

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち

第一号及び第三号

(3号廃棄物埋設施設)

2020年12月

日本原燃株式会社

目 次

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第十条第一号及び第三号並びにその解釈.....	1
2. 廃棄物埋設施設の安全機能について.....	3
3. 設計対象設備.....	3
4. 許可基準規則への適合のための設計方針.....	4
(1) 安全設計の方針.....	4
(2) 安全機能.....	5
(3) 廃棄物埋設地の設計に関して留意する事項.....	12
(4) その他の設計.....	12
5. 廃棄物埋設地の設計.....	20
(1) 構成及び設置位置.....	20
(2) 主要設備.....	20
[参考] 許可基準規則への適合性説明.....	47
(1) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第 10 条第 1 項及び第 3 項).....	47
(2) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第 10 条第 2 項).....	57
(3) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第 10 条第 4 項).....	58
(4) 許可基準規則第十条第三号(許可基準規則解釈第 10 条第 5 項).....	61
6. 参考文献.....	63

添付資料 1 廃棄物埋設地の設計の考え方

添付資料 2 技術要件における考え方

添付資料 3 許可基準規則解釈第 10 条第 1 項に関する補足説明

添付資料 4 許可基準規則解釈第 10 条第 2 項に関する補足説明

添付資料 5 1 号及び 2 号廃棄物埋設地の覆土について

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第十条第一号及び第三号並びにその解釈

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
(廃棄物埋設地) 第十条 廃棄物埋設地は、次の各号に掲げる要件を満たすものでなければならない。 一 廃棄物埋設地(ピット処分に係るものに限る。)は、外周仕切設備を設置する方法、その表面を土砂等で覆う方法その他の方法により、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から埋設の終了までの間にあつては廃棄物埋設地の限定された区域からの放射性物質の漏出を防止する機能、埋設の終了から廃止措置の開始までの間にあつては廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減する機能を有するものであること。 三 埋設した放射性廃棄物に含有される化学物質その他の化学物質により安全機能が損なわれないものであること。

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈
第10条(廃棄物埋設地) 1 第1号に規定する「外周仕切設備を設置する方法、その表面を土砂等で覆う方法その他の方法」及び第2号に規定する「その表面を土砂等で覆う方法その他の方法」とは、以下の設計をいう。 一 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること。 二 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること 三 劣化・損傷が生じた場合にも機能が維持できる(安全上支障のない期間内において速やかに修復できることが確実であることを含む。)構造・仕様であること。 2 第1号に規定する「廃棄物埋設地の限定された区域からの放射性物質の漏出を防止する」とは、雨水や地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈

止する構造が相まって、廃棄物埋設地の限定された区域から放射性物質が漏えいしない状況(工学的に有意な漏えいがない状況)を達成することをいう。

- 3 第1号に規定する「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減する機能」は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと。
- 4 第1号及び第2号の「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減」については、平常時における廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量が、第8条第1項に規定する「廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による事業所周辺の線量」及び第13条第1項に規定する「周辺監視区域の外の空气中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質」の放出により公衆の受ける線量を含め、法令に定める線量限度を超えないことはもとより、ALARAの考え方の下、実効線量で50マイクロシーベルト/年以下であること。
- 5 第3号に規定する「安全機能が損なわれないものであること」とは、埋設した放射性廃棄物、人工バリア(埋設する放射性廃棄物からの放射性物質の漏出の防止又は低減の機能を有する人工構築物をいう。以下同じ。)及び廃棄物埋設地に充填する土砂等が含有する可燃性の化学物質、可燃性ガスを発生する化学物質その他の化学物質の性質及び量に応じて、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地の安全機能に有意な影響を及ぼさないよう対策を講じたものであることをいう。

2. 廃棄物埋設施設の安全機能について

安全機能については、第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(以下「許可基準規則」という。)第二条第2項第一号に「安全機能」とは、廃棄物埋設施設の安全性を確保するために必要な機能であって、その機能の喪失により公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがあるものをいう。」とある。

したがって、安全機能に対する考え方としては、許可基準規則第二条第2項第一号を考慮し、安全機能を「放射性物質の漏出を防止する機能」(以下「漏出防止機能」という。)、**「移行抑制機能^{*1}」**、「遮蔽機能」とし、その機能の維持期間及び考え方を第1表にまとめる。

第1表 ピット処分における安全機能

安全機能	廃止措置の開始前		廃止措置の開始後
	放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了まで	覆土完了から廃止措置の開始まで	
漏出防止機能	○	-	-
移行抑制機能	-	○	△
遮蔽機能	○	○	△

○：安全機能を維持する
 △：必要な安全機能を期待できるように設計する
 -：考慮しない

*1：本資料では、放射性物質の漏出を低減する機能及び生活環境への移行を抑制する機能を「移行抑制機能」という。

ここで、廃棄物埋設施設のうち安全機能を有する設備は、埋設設備、排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層及び覆土である。

3. 設計対象設備

許可基準規則第十条第一号及び第三号の設計対象設備は、埋設設備、排水・監視設備及び覆土である。

4. 許可基準規則への適合のための設計方針

(1) 安全設計の方針

廃棄物埋設施設(以下「本施設」という。)は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(以下「原子炉等規制法」という。)等の関係法令の要求を満足するとともに、「許可基準規則」に適合する構造とする。

本施設で取り扱う放射性廃棄物で容器に固型化したもの(以下「廃棄体」という。)は、実用発電用原子炉の運転及び本施設の操業に伴って付随的に発生する固体状の放射性廃棄物をセメント系充填材で金属製の容器に固型化したもので、その容器が損傷しない限り、放射性物質は漏えいすることはない。また、取り扱う廃棄体の放射能濃度が低く、個々の廃棄体に含まれる放射性物質の量は十分少ないが、埋設する総本数が多い。そのため、漏出防止機能、移行抑制機能及び遮蔽機能が喪失した場合には、放射線障害を及ぼすおそれがあることから、これらを安全機能とする。

なお、飛散防止のための措置は、本施設の特徴を踏まえると公衆の受ける線量が十分小さいことから安全機能には該当しない。

本施設の安全設計の基本的方針は、常時機能維持を必要とする動的な設備・機器は不要であり、静的な設備・機器によりこれらの安全機能を有するよう設計することとし、これらの安全機能を適切に組み合わせることによって、安全性を確保することとする。

具体的には、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、平常時における廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量、本施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による濃縮・埋設事業所(以下「事業所」という。)周辺の線量並びに周辺監視区域の外の空气中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質の放出により事業所敷地(以下「敷地」という。)周辺の公衆の受ける線量が、「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」(平成30年6月8日原子力規制委員会告示第4号)(以下「線量告示」という。)で定められた線量限度を超えないことはもとより、公衆の受ける線量が As Low As Reasonably Achievable(ALARA)の考えの下、合理的に達成できる限り十分低くなるよう、実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下を達成できる設計とする。

放射線業務従事者は、その受ける線量が「線量告示」で定められた線量限度を超

えない設計とする。

廃止措置の開始後、廃棄物埋設地は、廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しのある設計とする。廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態とは、廃止措置の開始後の評価において、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も可能性が高いと考えられるパラメータを設定した自然事象シナリオ(以下「確からしい自然事象シナリオ」という。)で評価される公衆の受ける線量が $10\mu\text{Sv/y}$ を超えないこと、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も厳しいパラメータを設定した自然事象シナリオ(以下「厳しい自然事象シナリオ」という。)で評価される公衆の受ける線量が $300\mu\text{Sv/y}$ を超えないこと、人為事象シナリオの公衆の受ける線量が 1mSv/y を超えないこととする。

ここで、人工バリアとは、埋設する放射性廃棄物からの放射性物質の漏出の防止又は低減を行う人工構築物をいう。天然バリアとは、埋設する放射性廃棄物又は人工バリアの周囲に存在し、埋設する放射性廃棄物から漏出してきた放射性物質の生活環境への移行の抑制を行う地盤(岩盤及び第四紀層)をいう。

(2) 安全機能

以下に各安全機能の設計方針について記載する。

廃棄物埋設地の設計として、地下水面下への設置に応じた設計の考え方については添付資料1「1. 廃棄物埋設地の設計の考え方」に記載する。

(i) 漏出防止機能

a. 設計方針

安全機能を維持すべき期間のうち、放射性物質の漏出を防止する必要がある期間の終了時期である埋設の終了時期を覆土完了時点とする。

埋設設備のうち外周仕切設備、セメント系充填材、覆い及び内部防水並びに排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、以下に示す方針に基づき、廃棄物埋設地の限定された区域(埋設設備)からの漏出防止機能を有する設計とする。

漏出防止機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの

間において、水を媒体とした放射性物質の環境への漏出を防止するため、雨水及び地下水と廃棄物が接触しないよう浸入を防止する設計とし、万一、廃棄物と水が接触した場合にも放射性物質の漏出を防止する設計とする。

雨水及び地下水の浸入の防止は、外周仕切設備及び覆いの透水特性のうち低透水性及びひび割れ抑制並びに内部防水の防水性により埋設設備内への水の浸入を防止する設計とする。また、埋設設備内に浸入した水はポーラスコンクリート層により回収し、埋設設備外に排出するとともに、セメント系充填材及び内部防水により廃棄物と水の接触を防止する設計とする。

放射性物質の漏出の防止は、外周仕切設備及び覆いの透水特性のうち低透水性及びひび割れ抑制並びに内部防水の防水性により埋設設備外への水の漏出を防止する設計とする。また、放射性物質を含む水はポーラスコンクリート層により回収し、埋設設備外へ排出する設計とする。

b. 安全設計

廃棄物埋設地は、以下に示す設計を行うことにより、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、廃棄物埋設地の限定された区域(埋設設備)からの放射性物質の漏出を防止する。

漏出防止に関する構造は、雨水及び地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造を組み合わせるものとする。雨水及び地下水の浸入を防止する構造は、外周仕切設備、セメント系充填材、覆い、内部防水及びポーラスコンクリート層により構成し、放射性物質の漏出を防止する構造は、外周仕切設備、覆い、内部防水及びポーラスコンクリート層により構成する。

埋設する廃棄物は、「核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」(以下「事業規則」という。)に定められた廃棄体に係る技術上の基準を満足するものであり、容器の構造、定置までの取扱い、強度等から、変形・損傷や外部からの雨水及び地下水の浸入が生じ難い構造と考えられるため、容易に廃棄体内の放射性物質が容器の外へ漏えいすることはない。

しかし、埋設設備への定置後において、廃棄物周辺が水で満たされ液相に連続性がある状態となると、廃棄体内の放射性物質は水を媒体として溶出・移行し、廃棄物埋設地の外に漏えいすることが考えられる。このため、「埋設設備内

への雨水及び地下水の浸入を防止すること」及び「浸入した水を廃棄体と接触することなく適切に排水すること」により、雨水及び地下水の浸入を防止する設計とし、万一、廃棄体と水が接触した場合にも放射性物質の漏出を防止する設計とする。

(a) 雨水及び地下水の浸入を防止する設計

(一) 埋設設備内への雨水及び地下水の浸入を防止するため、埋設設備を構成する外周仕切設備及び覆いは、低透水性及びひび割れ抑制に優れた鉄筋コンクリート製の設計とする。外周仕切設備及び覆いは、低発熱に配慮した材料配合により温度応力を低減するとともに、鉄筋によりひび割れを抑制する設計とし、最大ひび割れ幅の設計目標値は0.1mmとする。また、埋設設備は、セメント系充填材の充填時の荷重、覆土の上載荷重、埋設設備及び廃棄体の自重等に対し、十分な構造上の安定性を有する設計とする。内部防水は、外周仕切設備の内側で、外周仕切設備底板部及び側壁の立ち上げ部に設置し、防水性を有する設計とする。

(二) 埋設設備内に浸入した水を廃棄体と接触することなく適切に排水するため、浸入した水を排水できるよう、ポーラスコンクリート層は、外周仕切設備及び覆いとセメント系充填材との間に設置し、廃棄体定置後から覆土完了までの間、排水性を有する設計とする。

(三) 埋設設備内に浸入した水を廃棄体と接触することなく適切に排水するため、浸入した水が廃棄体と接触しないよう、セメント系充填材は、廃棄体定置後、埋設設備内に充填し、有害な空隙が残らないよう充填性を有する設計とする。内部防水は、外周仕切設備及び覆いの内側で、セメント系充填材上部及び側部とポーラスコンクリート層の間に設置し、防水性を有する設計とする。

(四) その他、操業中における雨水の浸入を抑制するため、以下の設計を行う。

- ・ 廃棄体定置後から埋設設備の覆いが完成するまでの間は、埋設設備の区画上部にコンクリート仮蓋を設置し、開口部から埋設設備内部に雨水が浸入することを抑制する。

- ・ 定置作業中は、埋設クレーンの上部に屋根、側部に雨避け板を設置し、

雨水が廃棄体に接触することを抑制する。

(b) 放射性物質の漏出を防止する設計

(一) 廃棄体と水が接触した場合にも放射性物質の漏出を防止するため、埋設設備を構成する外周仕切設備及び覆いは、低透水性及びひび割れ抑制に優れた鉄筋コンクリート製の設計とする。外周仕切設備及び覆いは、低発熱に配慮した材料配合により温度応力を低減するとともに、鉄筋によりひび割れを抑制する設計とし、最大ひび割れ幅の設計目標値は0.1mmとする。また、埋設設備は、セメント系充填材の充填時の荷重、覆土の上載荷重、埋設設備及び廃棄体の自重等に対し、十分な構造上の安定性を有する設計とする。放射性物質を含む水はポーラスコンクリート層により回収し、埋設設備外へ排出する設計とする。内部防水は、外周仕切設備の内側で、外周仕切設備底版部及び側壁の立ち上げ部に設置し、防水性を有する設計とする。

(c) その他の設計

(一) 排水・監視設備のうち点検管は、ポーラスコンクリート層により排水された水を作業員が回収する作業空間が確保できる設計とする。

(二) 漏出防止機能を有するコンクリート構造物に対する設計、材料の選定、建設・施工及び検査は、「事業規則」、「許可基準規則」等のほか、利用可能な最善の技術として最新の知見を確認する。現時点の最新の知見としては、「コンクリート標準示方書(設計編及び施工編)」⁽¹⁾⁽²⁾に基づく。

(ii) 移行抑制機能

a. 設計方針

埋設設備及び覆土は、以下に示す方針に基づき、覆土完了から廃止措置の開始までの間において、移行抑制機能を維持する設計とし、廃止措置の開始後において、移行抑制機能を期待できる設計とする。

移行抑制機能は、放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量を低減するため、埋設設備内への水の浸入を抑制するとともに、放射性物質を収着する設計とする。

水の浸入の抑制に関して、覆土は、土質系材料の低透水性により埋設設備内への水の浸入を抑制する設計とする。

放射性物質の収着に関して、埋設設備及び覆土は、それぞれ収着性を有するセメント系材料及び土質系材料を用いる設計とする。

また、埋設設備及び覆土の移行抑制機能の設計に当たっては、天然バリアの移行抑制機能を考慮して行う。

b. 安全設計

廃棄物埋設地は、以下に示す設計を行うことにより、覆土完了後において、廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減し、生活環境への移行を抑制する。

移行抑制機能を有する構造は、覆土完了後において、低透水性及び収着性を期待する人工バリアと天然バリアとの組合せとする。人工バリアは、埋設設備、埋設設備の上部及び側部を覆う難透水性覆土、下部覆土並びに上部覆土により構成する。天然バリアは、埋設設備の底部及び周辺に位置する鷹架層及び第四紀層により構成する。

(a) 覆土

(一) 覆土は、放射性物質が地表近傍へ移行することによる汚染拡大を防止するため、低透水性を有する設計とする。また、収着性を有する土質系材料を用いる設計とする。

(二) 覆土は、劣化・損傷に対する抵抗性を考慮し、長期的な力学的影響及び化学的影響に対して、変形追従性及び化学的安定性に優れた自然材料である現地発生土、ベントナイト、砕砂及び砕石を採用する。

なお、覆土の材料は、実際の調達時期により詳細な材料特性が変わる可能性があるが、その場合にも要求性能を満足することを確認した上で用いることとする。

(三) 覆土は、劣化・損傷が生じた場合にも必要な移行抑制機能を有する構成・仕様とするため、難透水性覆土、下部覆土及び上部覆土を十分な厚さで多層化する。

(四) 難透水性覆土及び下部覆土は、周辺の岩盤(鷹架層)と同等以下の透水係数とし、埋設設備の底面を除く外周部に設置することで埋設設備に劣化・損傷が生じた場合にも、埋設設備内に浸入する地下水量を極力低減させる

設計とする。

また、難透水性覆土は、地下水流動によって地表面へ放射性物質が移行することを抑制するとともに、浸入した地下水が埋設設備の底部から透水性の小さい鷹架層に流出するように、透水係数を周辺の鷹架層よりも更に小さくなるように設計し、埋設設備の底面及び埋設設備間において幅 2.5m 以下となる狭隘部(以下「埋設設備間狭隘部」という。)を除く外周部に設置する。

埋設設備へ流入する地下水量及び埋設設備から流出する地下水量の抑制の観点として、埋設設備と第四紀層との隔離を安定的に確保する考え方については、添付資料 1「3. 第四紀層との隔離を安定的に確保する考え方」に詳細を示す。

(五) 移行抑制機能を有する覆土に対する設計、材料の選定、建設・施工及び検査は、「事業規則」、「許可基準規則」等に基づくほか、利用可能な最善の技術として最新の知見を確認し、現状入手できる材料を用いる。現時点での最新の知見としては、「道路土工要綱」⁽³⁾及び「河川土工マニュアル」⁽⁴⁾を参照する。

(b) 埋設設備

(一) 埋設設備は、長期的な侵食に対する抵抗性の確保と埋設設備へ流入する地下水の水量及び埋設設備から流出する地下水の水量を抑制するため、透水性の小さい岩盤(鷹架層)を掘り下げて設置する。

(二) 埋設設備は、浸入した地下水中に漏えいする放射性物質の濃度を低減するため、収着性を有するセメント系材料を用いる設計とし、評価において収着性による移行抑制機能を期待できるよう設計する。

(三) コンクリート製の埋設設備に対する設計、材料の選定、建設・施工及び検査は、「事業規則」、「許可基準規則」等のほか、利用可能な最善の技術として最新の知見を確認する。現時点の最新の知見としては、「コンクリート標準示方書(設計編及び施工編)」⁽¹⁾⁽²⁾に基づく。

(iii) 放射線の遮蔽機能

a. 設計方針

本施設は、敷地周辺の公衆の受ける線量及び放射線業務従事者の受ける線量

並びに管理区域以外の人が入る場所に滞在する者の線量が、「線量告示」で定められた線量限度を超えないことはもとより、合理的に達成できる限り低くするため、以下に示す方針に基づき遮蔽機能を有する設計とする。

遮蔽機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、廃棄体の線量当量率、位置等を考慮し、廃棄体を埋設設備に定置することにより、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の公衆の受ける線量を実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下に低減できる設計とする。また、放射線業務従事者の受ける線量が放射線業務従事者の線量限度を超えないようにするとともに管理区域以外の人が入る場所に滞在する者の線量を公衆の線量限度以下に低減できる設計とする。

覆土完了後においては、覆土により、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の公衆等の受ける線量を $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下に低減できる設計とする。また、管理区域以外の人が入る場所に滞在する者の線量を公衆の線量限度以下に低減できる設計とする。

なお、周辺監視区域の廃止後は公衆が敷地内に立ち入る可能性を考慮し、覆土により敷地内に立ち入る公衆の受ける線量を公衆の線量限度以下に低減できる設計とする。

b. 安全設計

廃棄物埋設地は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間においては、放射線の減衰効果のあるコンクリート製の外周仕切設備、内部仕切設備、廃棄体支持架台、覆い及びコンクリート仮蓋並びにセメント系充填材を配置することで、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による、敷地周辺の公衆の受ける線量及び放射線業務従事者の受ける線量並びに管理区域以外の人が入る場所に滞在する者の線量を低減できる設計とする。

覆土完了後においては、覆土のうち難透水性覆土及び下部覆土により、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の公衆の受ける線量及び管理区域以外の人が入る場所に滞在する者の線量を低減できる設計とする。

なお、周辺監視区域の廃止後は公衆が敷地内に立ち入る可能性を考慮し、覆土により、敷地内に立ち入る公衆の受ける線量を低減できる設計とする。

遮蔽の評価結果については、「第八条 遮蔽等」において別途説明する。

(3) 廃棄物埋設地の設計に関して留意する事項

廃棄物埋設地は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間は、放射性物質の漏出を防止し、覆土完了から廃止措置の開始までの間は、放射性物質の漏出を低減するため、以下に留意した設計とする。

- ・埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること
 - ・劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること
 - ・劣化・損傷が生じた場合にも当該機能が維持できる構造・仕様であること
 - ・放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと
- また、廃棄物埋設地は、埋設する放射性廃棄物に含有される化学物質その他の化学物質により安全機能を損なわない設計とする。

(4) その他の設計

(i) 廃棄物埋設地に関する設計の留意事項

廃棄物埋設地は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間は、放射性物質の漏出を防止し、覆土完了から廃止措置の開始までの間は、放射性物質の漏出を低減するため、以下に留意した設計とする。

- a. 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること

廃棄物埋設地の設計については、放射性物質の性質及び放射能濃度として、放射性物質の種類により主に半減期や放出される放射線の種類・エネルギーが異なることを考慮する。

- ・半減期の長い放射性物質に対しては、人工バリア及び天然バリアを組み合わせる移行抑制機能の設計により長期的に放射性物質の移行を抑制し、放射能の減衰を図ることで公衆の受ける線量を低減する。

・半減期が短く放射線のエネルギーが大きい放射性物質に対しては、遮蔽機能の設計により放射能が有意に減衰するまで遮蔽を確保することで、公衆の受ける外部被ばくを低減する。

・放射性廃棄物は容器に固型化したものであり、放射性物質が容易に漏えい・飛散するものではない。しかし、水を媒体として移動することが考えられることから、人工バリア及び天然バリアによる移行抑制機能を確保するまで、漏出防止機能の設計により、水を媒体として放射性物質が漏出することを防止する。

また、廃棄物埋設地は、保全に関する措置を必要としない状態に移行できるよう設計する。人間侵入リスクが高い地表面を避け、天然バリアである侵食抵抗性の高い岩盤の性能を有効に利用するために、地盤を掘り下げて埋設設備を設置する。その結果、埋設設備が地下水面下への設置となることから、その特徴を考慮し設計する。

埋設設備の設計については、既設埋設設備の設計・施工実績を考慮する。

以上より、廃棄物埋設地に要求される安全機能及びその安全機能を維持すべき期間を踏まえた上で、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術として、諸外国の類似施設の設計を参考とし、広く活用され、かつ、実績を多数有している建設・施工技術を用いる。

安全機能に対する期間ごとに、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術について以下に示す。

(a) 放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間は、安全機能(漏出防止機能及び遮蔽機能)を有する部位ごとの要求性能に加え、材料の選定、建設・施工及び検査を考慮した構造物として設計する。以下の内容を満足することで、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術とする。

(一) 合理的な建設・施工技術

当該期間は、数十年程度であることから、埋設設備及び排水・監視設備に対し、一般に数十年オーダーの耐用年数で知見が幅広く整備されているセメント系材料を用いたコンクリート構造物とすることが合理的である。

(二) 利用可能な最善の建設・施工技術

コンクリート構造物としての設計、材料の選定、建設・施工及び検査については、利用可能な最善の建設・施工技術として、最新の知見を確認し、施工の実現性及び品質を確保する。現時点の最新の知見としては、「コンクリート標準示方書(設計編及び施工編)」⁽¹⁾⁽²⁾に基づく。

また、安全機能ごとに対する設計としては以下のとおり。

- ・漏出防止機能は、雨水及び地下水の浸入の防止及び放射性物質の漏出の防止を行うため、埋設設備及び排水・監視設備において、透水特性を考慮した設計とする。低透水性としてコンクリートの材料配合、ひび割れ抑制としてコンクリートの材料配合及び鉄筋量、充填性として配合、防水性として内部防水の配置並びに排水性としてポーラスコンクリート層の設置を考慮した設計とする。

- ・遮蔽機能は、敷地周辺の公衆及び放射線業務従事者並びに管理区域以外の人が立ち入る場所に滞在する者への被ばくを低減するために、埋設設備の密度及び厚さを確保することで、放射線の遮蔽性能を有する設計とする。

(b) 覆土完了後

覆土完了後は、安全機能(移行抑制機能及び遮蔽機能)を有する部位ごとの要求性能に加え、材料の選定、建設・施工及び検査を考慮した構造物として設計する。以下の内容を満足することで、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術とする。

(一) 合理的な建設・施工技術

当該期間は、数百年以上であることから、長期的な透水特性及び遮蔽性能を期待するために、力学的・化学的作用により安全性が損なわれ難い天然材料である土質系材料を用いた土構造物とすることが合理的である。

また、長期的な核種収着性を期待するために、長期的に安全性が損なわれ難い土質系材料及びセメント系材料を用いることが合理的である。

(二) 利用可能な最善の建設・施工技術

土構造物としての設計、材料の選定、建設・施工及び検査については、利用可能な最善の建設・施工技術として、最新の知見を確認する。現時点での最新の知見としては、「道路土工要綱」⁽³⁾及び「河川土工マニュアル」

(4)を参照とする。また、一般土工で用いられる重機を使用し、適切な品質管理を行うことで、目標の透水係数を有する覆土を施工できることを確認している。

なお、施工時の品質管理方法は、覆土施工時に行う施工試験結果を用いて最終決定する。

安全機能ごとに対する設計としては以下のとおり。

- ・移行抑制機能は、低透水性として土質系材料により透水係数及び厚さを確保する設計とし、収着性を有するセメント系材料及び土質系材料を用いる設計とする。
- ・遮蔽機能は、敷地周辺の公衆及び管理区域以外の人が立ち入る場所に滞在する者への被ばくを低減するために、覆土の密度及び厚さを確保することで、放射線の遮蔽性能を有する設計とする。

b. 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

埋設設備及び排水・監視設備は、漏出防止機能を確保する期間に対して、劣化・損傷に対する抵抗性を有するよう鉄筋かぶり及び材料配合の設計を行う。また、劣化抵抗性を有していることを「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づく耐久性照査によって確認する。対象項目は、設計条件及び立地条件を考慮し、耐久性に影響があると考えられる中性化、塩害及び凍害とする。

- ・中性化に対する劣化抵抗性を有するために、中性化深さが鋼材腐食発生限界深さに達しない設計とする。
- ・塩害に対する劣化抵抗性を有するために、コンクリート表面塩化物イオン濃度の設計値が鋼材腐食発生限界濃度に達しない設計とする。
- ・凍害に対する内部損傷及び表面損傷に対する劣化抵抗性を有する設計とする。

(b) 覆土

難透水性覆土及び下部覆土は、化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性を考慮し、粒形分布に広がりを持った土質系材料を用いる。

難透水性覆土及び下部覆土は、容易な露呈を防止する観点から安定した地盤を掘り下げ、埋設設備の底面を除く外周部に設置する設計とする。

長期状態において想定される劣化・損傷事象を抽出し、覆土の透水特性に影響を及ぼす要因に対して、長期的に維持するための要求機能を満たす見通しのある設計とする。

これらにより、覆土は劣化・損傷に対する抵抗性を有する設計とする。

c. 劣化・損傷が生じた場合にも当該機能が維持できる構造・仕様であること

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

埋設設備及び排水・監視設備は、廃棄体と水が接触することを防止するために、外周仕切設備及び覆い、ポーラスコンクリート層、セメント系充填材並びに内部防水で多重化し、各部位の劣化・損傷が生じた場合においても、漏出防止機能を維持する構造・仕様とする。

(b) 覆土

覆土は、長期的に発生が予想される力学的影響及び化学的影響のいずれに対しても機能維持が受動的に期待できるよう、多層化した十分な厚さの覆土を設置する。

線量評価上用いる各性能は、線量評価の状態設定における劣化・損傷の程度及び期間の不確実性を包含する設定とすることにより、廃棄物埋設地全体として線量基準を満足できるようにする。

これらにより、劣化・損傷が生じた場合においても、移行抑制機能を維持する構造・仕様とする。

d. 放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと

放射性物質の漏出を低減する機能は、人工バリア及び天然バリアにより確保し、人工バリアは特性の異なる材料として、セメント系材料及び土質系材料を用いる設計とする。また、これらを用いた各部材に対して、第2表に示すように、地下水の浸入を抑制する機能(低透水性)及び放射性物質を収着する機能(収着性)の複数の異なる機能を期待することにより、一つの機能に過度に依存しないよう配慮した設計とする。

第2表 各部材に期待する移行抑制機能を構成する特性

	部材	収着性	低透水性
人工バリア	埋設設備	○	—
	覆土	難透水性覆土	○
		下部覆土	—*1
		上部覆土	○
天然バリア	岩盤	○	○

○：期待する

—：期待しない

*1：下部覆土は土質系材料であり収着性を期待できるが、難透水性覆土又は下部覆土の一方に収着性を期待することで十分であることから、下部覆土の収着性は考慮しない。

e. 放射性物質の漏出を低減する機能を有すること

(a) 設計方針

「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減する」について、覆土完了から廃止措置の開始までの間、公衆の受ける線量が法令に定める線量限度を超えないことはもとより、As Low As Reasonably Achievable (ALARA) の考えの下、合理的に達成できる限り十分低くなるよう、**実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下となる設計とする。**

(b) 評価方法

(一) 線量評価シナリオ

廃棄物埋設地からの移行に関する評価対象とする線量評価シナリオは、**地下水中の放射性物質が移行する尾駁沼の水産物摂取による内部被ばくとする。**

(二) 線量評価モデル

廃棄物埋設地からの移行に関する評価対象とする線量評価モデルは、**廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が、廃棄物埋設地を通過する地下水に混入し、沢を経て尾駁沼に流入するものとして設定する。この沼の水産物を摂取する場合の内部被ばくの評価は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)」の(1)式から(6)式及び(9)式を用いて計算する。**

(三) 線量評価パラメータ

廃棄物埋設地から漏出する放射性物質の量の算定に当たっては、覆土完了直後から放射性物質の漏出が開始するとして評価し、線量評価パラメータを設定する。

なお、覆土完了直後の放射エネルギーは、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料 9 線量評価パラメータ -パラメータ根拠集-」の第1表の値とし、覆土完了後の時間の経過による放射性物質の減衰を考慮する。その他の線量評価パラメータは同資料の第2表から第7表の値を用いる。

(c) 評価結果

埋設設備の覆土完了から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける被ばく線量について評価を行った結果、約 $3.8 \mu\text{Sv/y}$ となった。また、この線量に廃棄物埋設施設からの環境への放射性物質の放出による線量約 $1.7 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/y}$ を合計しても約 $3.8 \mu\text{Sv/y}$ であり、公衆が受ける実効線量が $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下となった。

なお、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による線量は覆土により覆土前よりも大幅に減少し、無視できるレベルとなっているため考慮しない。

埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの詳細な評価結果は「[参考] (3) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第十条第4項)」に示す。線量評価に関するパラメータについては、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。

f. 埋設する放射性廃棄物に含有される化学物質その他の化学物質により安全機能を損なわないものであること

埋設する廃棄体、埋設設備、排水・監視設備及び覆土には可燃性の化学物質、可燃性ガスを発生する化学物質は含まれない。一方、廃棄物埋設地の安全機能に影響を及ぼす可能性のあるその他の化学物質としては、廃棄体又は埋設設備内に含まれる有機物、更にはセメント系材料から溶出した高アルカリ成分を含む地下水との反応による影響を考慮する必要がある。

覆土完了前の安全機能については、埋設設備には漏出防止機能及び遮蔽機能

を期待しており、排水・監視設備には漏出防止機能を期待している。覆土完了までの数年間の期間においては、水との接触により埋設設備が容易に溶解・変質すること、更には水を媒体として埋設設備内の化学物質(有機物)が溶解して、化学反応により埋設設備が著しく損傷することはない。したがって、覆土完了前の漏出防止機能及び遮蔽機能については、これらの化学物質によって影響を受けない。

覆土完了後の安全機能については、埋設設備には移行抑制機能を期待しており、覆土には移行抑制機能及び遮蔽機能を期待している。遮蔽機能については、覆土が十分な厚さを有しており、化学物質との接触による覆土の厚さ減少及び密度低下は無視できると考えられる。移行抑制機能については、廃棄物埋設地内において地下水位が上昇し、地下水の浸入に伴う溶解及び漏出する化学物質(有機物)及びセメント系材料から溶出した高アルカリ成分が埋設設備の収着性並びに覆土の低透水性及び収着性に影響を及ぼす可能性がある。

上記のような化学物質の影響に対する対策として、埋設設備及び覆土に使用する材料については、化学物質による低透水性及び収着性への影響を考慮し、低透水性及び収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。また、覆土については化学的安定性の高い材料で構成する設計とする。

5. 廃棄物埋設地の設計

3号廃棄物埋設地の設計内容について説明する。

3号廃棄物埋設地が既設の1号及び2号廃棄物埋設地と異なる部分の考え方については、添付資料1「2. 3号廃棄物埋設地の基本的考え方」に示す。

(1) 構成及び設置位置

廃棄物埋設地は、管理建屋から運搬した廃棄体を埋設する場所であり、埋設設備、排水・監視設備及び覆土により構成する。

廃棄物埋設地は、1号廃棄物埋設地の東側に位置し、廃棄体最大42,240m³(200Lドラム缶211,200本相当)を埋設する。

埋設設備は、1基当たり廃棄体約5,280m³(200Lドラム缶26,400本相当)を埋設する埋設設備8基で構成し、東西方向に2基、南北方向に4基配置する。

埋設設備は、現造成面(標高約41m~46m)基準から約21m掘り下げて、標高約20m~25mとなるようにN値50以上の岩盤に設置する。

(2) 主要設備

(i) 埋設設備

a. 構成及び安全機能

埋設設備は、外周仕切設備、内部仕切設備、廃棄体支持架台、セメント系充填材、覆い、コンクリート仮蓋及び内部防水により構成する。

外周仕切設備及び覆いの低透水性及びひび割れ抑制、セメント系充填材の充填性並びに内部防水の防水性により放射性物質の漏出を防止する。

外周仕切設備、内部仕切設備、廃棄体支持架台、セメント系充填材、覆い及びコンクリート仮蓋は、遮蔽性により放射線の遮蔽を行う。

なお、評価において収着性による移行抑制機能を期待できる設計とする。

b. 要求性能

安全機能を確保するために必要な要求性能を整理する。

埋設設備の部位ごとに設定した要求性能及び設計要件を第3表に示す。

(a) 技術要件及び設計仕様項目

(一) 漏出防止機能

埋設設備の漏出防止機能は、雨水及び地下水の浸入を防止すること及び放射性物質の漏出を防止することである。水の浸入及び放射性物質の漏出は埋設設備の透水特性によって影響を受けることから、埋設設備に対する技術要件は透水特性(低透水性、ひび割れ抑制、充填性及び防水性)であり、その設計仕様項目は水結合材比、断熱温度上昇量、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ、鉄筋量、スランプフロー、ブリーディング、遮水性及びひび割れ追従性である。

また、埋設設備は、漏出防止機能を維持する上で、常時作用している荷重及び操業中に作用する荷重並びに静的地震力に対する健全性を要求することから、技術要件として力学特性(力学的安定性及び耐久性)を考慮する。漏出防止機能の要求期間が一般的なコンクリート構造物の設計耐用期間と同程度であることから、現状の土木建築分野における構造設計及び耐久設計の方法が適用可能である。したがって、その設計仕様項目は圧縮強度、鉄筋強度、鉄筋かぶり及び材料配合である。

(二) 移行抑制機能

埋設設備には、移行抑制機能に対する技術要件として、セメント系材料が有する収着性を考慮するが、その設計仕様項目は設定せず、収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。

(三) 遮蔽機能

埋設設備の遮蔽機能は、公衆の受ける線量及び放射線業務従事者の受ける線量並びに管理区域以外の人立ち入る場所に滞在する者の線量(以下「公衆等の受ける線量」という。)を低減することである。公衆等の受ける線量は埋設設備の遮蔽性能によって影響を受けることから、埋設設備に対する技術要件は遮蔽性能(遮蔽性)であり、その設計仕様項目は密度及び部材寸法(厚さ)である。

また、埋設設備は、遮蔽機能を維持する上で、常時作用している荷重及び操業中に作用する荷重並びに静的地震力に対する健全性を要求することから、技術要件として力学特性(力学的安定性及び耐久性)を考慮する。遮

蔽機能の要求期間が一般的なコンクリート構造物の設計耐用期間と同程度であることから、現状の土木建築分野における構造設計及び耐久設計の方法が適用可能である。したがって、その設計仕様項目は圧縮強度、鉄筋強度、鉄筋かぶり及び材料配合である。

(b) 設計要件

設計仕様項目である水結合材比、断熱温度上昇量、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ、鉄筋量、スランプフロー、ブリーディング、遮水性、ひび割れ追従性、圧縮強度、鉄筋強度、鉄筋かぶり、材料配合、密度及び部材寸法(厚さ)については、各部位が要求性能を満足するための設計要件を設定する。

埋設設備の技術要件のうち、低透水性、充填性、力学的安定性及び耐久性についての詳細は添付資料2「技術要件における考え方」に示す。

第3表 埋設設備の要求性能及び設計要件

安全機能	要求性能		仕切設備 外周	仕切設備 内部	支持架台 廃棄体	セメント系 充填材	覆い	コンクリート 仮蓋	内部防水	設計要件	
	技術要件 (必要な特性)	設計仕様項目									
漏出防止機能	透水特性	低透水性	水結合材比	○	—	—	—	○	—*1	—	緻密なコンクリートであること(基質部)。
		ひび割れ抑制	断熱温度上昇量	○	—	—	—*3	○	—*1	—	温度変化によるひび割れの抑制を考慮すること。
			自己収縮ひずみ	○	—	—	—*3	○	—*1	—	自己収縮によるひび割れの抑制を考慮すること。
			乾燥収縮ひずみ	○	—	—	—*3	○	—*1	—	乾燥収縮によるひび割れの抑制を考慮すること。
			鉄筋量	○	—	—	—	○	—*1	—	最大ひび割れ幅を低減すること。
		充填性	スランプフロー	—	—	—	○	—	—	—	必要な流動性を有すること。
			ブリーディング	—	—	—	○	—	—	—	材料分離抵抗性を有すること。
		防水性	遮水性	—	—	—	—	—	—	○	水の浸入及び漏出を防止すること。
	ひび割れ追従性		—	—	—	—	—	—	○	コンクリートのひび割れに追従すること。	
	漏出防止機能を確保するための要求機能	力学特性	力学的安定性	圧縮強度	○	○	○*2	○	○	—	—
鉄筋強度				○	○	○*2	—	○	—	—	必要な構造強度を有すること。
耐久性			鉄筋かぶり	○	○	—	—	○	—	—	中性化に対して必要なかぶりを有すること。
			材料配合	○	○	—	—	○	—	—	塩害及び凍害に対して劣化抵抗性を有すること。
移行抑制機能	核種収着性	収着性	—	—	—	—	—	—	—	設計仕様項目を設定しない(評価において、埋設設備自体が副次的にもつ性能として設定するものとする。)*4	
遮蔽機能	放射線の遮蔽性能	遮蔽性	密度	○	○	○	○	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。
			部材寸法(厚さ)	○	○	○	○	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。
	遮蔽機能を維持するための要求機能	力学特性	力学的安定性	圧縮強度	○	○	○	○	○	—	必要な構造強度を有すること。
				鉄筋強度	○	○	○	—	○	○	—
		耐久性	鉄筋かぶり	○	○	—	—	○	—	—	中性化に対して必要なかぶりを有すること。
			材料配合	○	○	—	—	○	—	—	塩害及び凍害に対して劣化抵抗性を有すること。

*1: 防水シート等の併用により区画内に水を浸入させないように考慮する。

*2: セメント系充填材を充填できるよう、ポーラスコンクリート層と廃棄体の間の厚さを確保するための力学的安定性を確保する。

*3: 充填性を確保した上でひび割れ抑制の観点についても考慮する。

*4: 分配係数は、材料仕様及び施工の際に取得する分配係数データ又は代替指標となるデータにより管理する。

c. 構造及び仕様

埋設設備の外形寸法は、約 64.1m(幅)×約 36.6m(奥行き)×約 6.7m(高さ)^{*1} であり、底部及び側部は外周仕切設備、上部は覆いにより構成する。埋設設備の内部は、内部仕切設備により 1 基当たり 6 行 11 列の 66 区画とする。

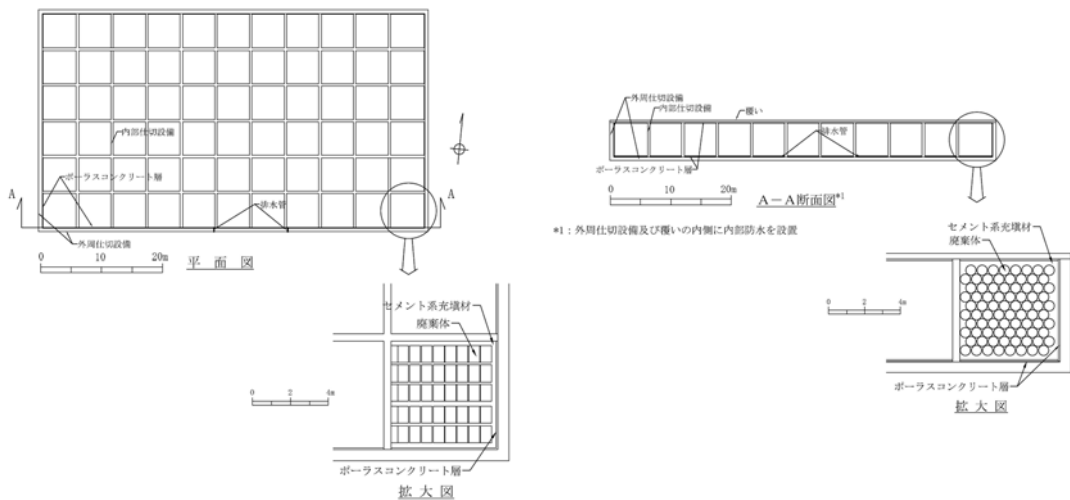
*1：小数点第一位までの記載とし、「約」と記載する。

区画した内部には、廃棄体を定置するための廃棄体支持架台を設置し、8 行、5 列、10 段積みで廃棄体を定置する。廃棄体の定置後は、有害な空隙が残らないようにセメント系充填材を充填する。

廃棄体の定置開始から覆い施工開始までの間は、作業時を除き、区画の開口部にコンクリート仮蓋を設置する。

埋設設備の平面図及び断面図を第 1 図に示す。

埋設設備の主要な部位と主な仕様を第 4 表に示す。



第 1 図 埋設設備平面図及び断面図

第4表 埋設設備の主要な部位と主な仕様

設備	主要な部位	主な仕様*1
埋設設備	外周仕切設備	材料：鉄筋コンクリート コンクリートの設計基準強度：24.6N/mm ² 以上 水結合材比：55%以下 最大ひび割れ幅設計目標値：0.1mm 厚さ：約60cm 密度：2,100kg/m ³ 以上
	内部仕切設備	材料：鉄筋コンクリート コンクリートの設計基準強度：24.6N/mm ² 以上 厚さ：約40cm 密度：2,100kg/m ³ 以上
	廃棄体支持架台	材料：鉄筋コンクリート ポーラスコンクリート層と廃棄体間の厚さ：約20cm 密度：1,600kg/m ³ 以上
	セメント系充填材	材料：モルタル モルタルの設計基準強度：10.0N/mm ² 以上 流動性：スランプフロー65cm以上 ポーラスコンクリート層と廃棄体間の厚さ：約20cm 密度：1,600kg/m ³ 以上
	覆い	材料：鉄筋コンクリート コンクリートの設計基準強度：24.6N/mm ² 以上 水結合材比：55%以下 最大ひび割れ幅設計目標値：0.1mm 厚さ：約30cm 密度：2,100kg/m ³ 以上
	コンクリート仮蓋	材料：鉄筋コンクリート コンクリートの設計基準強度：24.0N/mm ² 以上 厚さ：約50cm 密度：2,100kg/m ³ 以上
	内部防水	防水性を有する材料を設置

*1：各部位の厚さについては、寸法の許容誤差を含む記載として「約」としている。

以下に、各部位の仕様を記載する。

(a) 外周仕切設備

(一) 概要

外周仕切設備は、鉄筋コンクリート製の側壁及び底版であり、その厚さは約 60cm(許容誤差を含む)とする。

(二) 設計方針

外周仕切設備に求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間の漏出防止機能及び遮蔽機能である。漏出防止機能に対しては透水特性を、遮蔽機能に対しては遮蔽性能を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

コンクリートの低透水性及びひび割れの抑制に配慮した設計とする。

低透水性を確保するため、「コンクリート標準示方書(施工編)」⁽¹⁾に基づき、水結合材比を 55%以下とする。また、最大ひび割れ幅の設計目標値を 0.1mm とし、温度応力及び収縮による貫通ひび割れの発生を抑制するため、低発熱に配慮した材料配合により温度応力を低減するとともに、鉄筋によりひび割れを抑制する設計とする。

外周仕切設備の施工後、覆土完了まで、可能な範囲に対し定期的な点検を行う。ひび割れは 0.1mm 以上を管理する。0.1mm 以上のひび割れに対しては、排水・監視設備からの排水量及びひび割れの進展状況を防水性の観点で評価した上で、適切に補修する。

(イ) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は 2,100kg/m³ 以上とする。

(ウ) 力学特性

力学的安定性及び耐久性に配慮した設計とする。

力学的安定性を確保するため、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録 I に示される許容応力度法により構造強度の照査を行い、コンクリートの設計基準強度は 24.6N/mm² 以上とする。

耐久性を確保する観点から、中性化、塩害及び凍害に対して鉄筋かぶり及び材料配合の設計を行う。これらについて、「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づき照査を行う。

(b) 内部仕切設備

(一) 概要

内部仕切設備は、鉄筋コンクリート製であり、その厚さは約 40cm(許容誤差を含む)とする。

(二) 設計方針

内部仕切設備に求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間の遮蔽機能である。遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は 2,100kg/m³以上とする。

(イ) 力学特性

力学的安定性及び耐久性に配慮した設計とする。

力学的安定性を確保するため、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録 I に示される許容応力度法により構造強度の照査を行い、コンクリートの設計基準強度は 24.6N/mm²以上とする。

耐久性を確保する観点から、中性化、塩害及び凍害に対して鉄筋かぶり及び材料配合の設計を行う。これらについて、「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づき照査を行う。

(c) 廃棄体支持架台

(一) 概要

廃棄体支持架台は、鉄筋コンクリート製であり、埋設設備に設置するポーラスコンクリート層と廃棄体の離隔を確保するよう設置する。

(二) 設計方針

廃棄体支持架台は、セメント系充填材と一体となって漏出防止機能及び

遮蔽機能を達成する。ポーラスコンクリート層と廃棄体の間のセメント系充填材の厚さが約 20cm(許容誤差を含む)となるよう、廃棄体を固定及び支持するための力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $1,600\text{kg/m}^3$ 以上とする。

(イ) 力学特性

力学的安定性を確保するため、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録 I に示される許容応力度法により構造強度の照査を行う。

(d) セメント系充填材

(一) 概要

セメント系充填材は、区画内を充填するモルタルであり、廃棄体の間に有害な空隙が残らないようにする。

ポーラスコンクリート層と廃棄体の間のセメント系充填材の厚さは約 20cm(許容誤差を含む)とする。

(二) 設計方針

セメント系充填材に求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間の漏出防止機能及び遮蔽機能である。漏出防止機能に対しては透水特性を、遮蔽機能に対しては遮蔽性能を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

充填性に配慮した設計として、水が廃棄体に接触することを抑制するため、区画内の廃棄体周辺を充填する。有害な空隙が生じないよう充填するため、スランプフローは 65cm 以上とし、ブリーディングを極力生じないようにする。

(イ) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $1,600\text{kg/m}^3$ 以上とする。

(ウ) 力学特性

廃棄体の固定に対する力学的安定性に配慮した設計とし、モルタルの設計基準強度は 10.0N/mm^2 以上とする。

(e) 覆い及びコンクリート仮蓋

(一) 概要

覆いは、鉄筋コンクリート製であり、外周仕切設備及び内部仕切設備の上部に設置する。その厚さは約 30cm (許容誤差を含む) とする。

また、廃棄体の定置開始から覆い施工開始までの間は、作業時を除き、区画の開口部にコンクリート仮蓋を設置する。その厚さは約 50cm (許容誤差を含む) とする。

(二) 設計方針

覆いに求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間の漏出防止機能及び遮蔽機能である。漏出防止機能に対しては透水特性を、遮蔽機能に対しては遮蔽性能を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として力学特性を確保する。

コンクリート仮蓋に求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆い施工開始までの間の遮蔽機能である。遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

覆いは、コンクリートの低透水性及びひび割れの抑制に配慮した設計とする。

低透水性を確保するため、「コンクリート標準示方書(施工編)」⁽¹⁾に基づいて、水結合材比を 55% 以下とする。また、最大ひび割れ幅の設計目標値を 0.1mm とし、温度応力及び収縮による貫通ひび割れの発生を抑制するため、低発熱に配慮した材料配合により温度応力を低減するとともに、鉄筋によりひび割れを抑制する設計とする。

覆いの施工後、覆土完了まで、可能な範囲に対し定期的な点検を行う。ひび割れは 0.1mm 以上を管理する。 0.1mm 以上のひび割れに対しては、

排水・監視設備からの排水量及びひび割れの進展状況を防水性の観点で評価した上で、適切に補修する。

また、既設1号埋設設備において、覆いに生じたひび割れを浸入経路とした排水が認められており、ひび割れ制御鉄筋により対策していることから、3号埋設設備においてもこれを踏襲する(添付資料4「参考資料1 1号及び2号排水・監視設備からの排水実績と漏出防止機能の健全性について」参照)。

さらに、覆い目地部から浸入する雨水を低減するため、覆い上面に傾斜を設けることで水が滞留し難い設計とする(添付資料4「2.(4) その他の防水に対する設計」参照)。

コンクリート仮蓋は、区画内に雨水を浸入させない設計とする。

(イ) 遮蔽性能

覆いは、遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $2,100\text{kg}/\text{m}^3$ 以上とする。

また、コンクリート仮蓋も同様に密度及び厚さを確保するものとし、密度は $2,100\text{kg}/\text{m}^3$ 以上とする。

(ウ) 力学特性

覆いは力学的安定性及び耐久性に、コンクリート仮蓋は力学的安定性に配慮した設計とする。

力学的安定性を確保するため、覆いは、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録Iに示される許容応力度法により構造強度の照査を行い、コンクリートの設計基準強度は $24.6\text{N}/\text{mm}^2$ 以上とする。

耐久性を確保する観点から、中性化、塩害及び凍害に対して鉄筋かぶり及び材料配合の設計を行う。これらについて、「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づき照査を行う。

また、コンクリート仮蓋は、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録Iに示される許容応力度法により構造強度の照査を行い、コンクリートの設計基準強度は $24.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上とする。

(f) 内部防水

(一) 概要

外周仕切設備、セメント系充填材、覆い及びポーラスコンクリート層とともに、雨水及び地下水の浸入を防止し、埋設設備からの放射性物質の漏出を防止するために内部防水を行う。

内部防水については、以下の観点から設計する。

(ア) 外周仕切設備側壁部及び覆い部

ポーラスコンクリート層から廃棄体方向に浸入する水の流れを防止する。

(イ) 外周仕切設備底版部及び側壁部の立ち上げ部

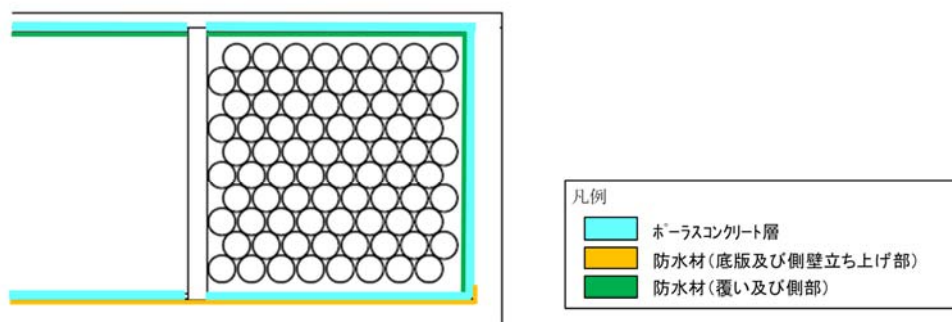
外周仕切設備底版からの地下水の浸入を防止するとともに、ポーラスコンクリート層からの放射性物質の漏出を防止する。

(二) 仕様

外周仕切設備側壁部及び覆い部における内部防水は、セメント系充填材上部及び側部とポーラスコンクリート層の間に行う。また、外周仕切設備の内側で外周仕切設備底版部及び側壁の立ち上げ部に内部防水を行う。

内部防水の設置位置概要図を第2図に示す。

内部防水は、遮水性を有し、ひび割れに対し追従性又はそれと同等の性能を有する設計とする。



*1: 内部仕切設備直下の内部防水は、選定された防水材・工法に応じて施工範囲を決定する。

第2図 内部防水設置位置概要図

(ii) 排水・監視設備

a. 構成及び安全機能

排水・監視設備は、ポーラスコンクリート層、排水管及び点検管により構成する。

ポーラスコンクリート層は、排水性を有し、埋設設備内に浸入した水を排水し、廃棄体と浸入した水の接触を抑制する。

点検管は、排水管からの排水状況を監視できる作業空間を確保する。排水管には、排水回収作業用の弁を設置する。

b. 要求性能

安全機能を確保するために必要な要求性能を整理する。

排水・監視設備の部位ごとに設定した要求性能及び設計要件を第5表に示す。

第5表 排水・監視設備の要求性能及び設計要件

安全機能	要求性能			コンクリート層 ポーラス	排水管 *1	点検管のうち 鋼管部	点検管のうち 点検室	設計要件	
	技術要件 (必要な特性)		設計仕様項目						
漏出防止機能	透水特性	排水性	排水能力	○	—	—	—	十分な排水能力を有する設備が配置されていること。	
漏出防止機能を 確保するための 要求機能	力学特性	力学的 安定性	コンクリート 圧縮強度	○	—	—	○	必要な構造強度を有すること。	
			鉄筋強度	—	—	—	○	必要な構造強度を有すること。	
			鋼管強度	—	—	○	—	必要な構造強度を有すること。	
		耐久性	鉄筋かぶり	—	—	—	—	○	中性化に対して必要なかぶりを有すること。
			材料配合	—	—	—	—	○	塩害及び凍害に対して劣化抵抗性を有すること。
			排水管の 腐食抵抗	—	○	—	—	—	供用期間中、腐食に対して劣化抵抗性を有すること。
	作業空間 の確保	作業性	内空寸法	—	—	○	○	作業員が水の回収作業を実施できること。	

*1：排水管には、排水管の回収作業用に弁を設けている。

(a) 技術要件及び設計仕様項目

(一) 漏出防止機能

排水・監視設備の漏出防止機能は、埋設設備内に浸入した水を排水し廃棄体への水の接触を抑制することである。浸入した水の排水は排水・監視設備の透水特性によって影響を受けることから、排水・監視設備に対する技術要件は透水特性(排水性)であり、その設計仕様項目は排水能力である。排水能力を期待する部位はポーラスコンクリート層であり、透水係数、透水断面積及び勾配により排水能力を算定する。

また、排水・監視設備は、漏出防止機能を確保する上で、常時作用している荷重及び操業中に作用する荷重並びに静的地震力に対する健全性を要求することから、技術要件として力学特性(力学的安定性、耐久性)を考慮する。漏出防止機能の要求期間が一般的なコンクリート構造物の設計耐用期間と同程度であることから、現状の土木建築分野における構造設計及び耐久設計の方法が適用可能である。したがって、その設計仕様項目はコンクリート圧縮強度、鉄筋強度、鋼管強度、鉄筋かぶり、材料配合及び排水管の腐食抵抗である。

さらに、排水・監視設備は、漏出防止機能が発揮されていることの確認のため、排水された水を作業員が適切に回収する必要があることから、技術要件として作業空間の確保(作業性)を考慮する。したがって、その設計仕様項目は内空寸法であり、それを期待する部位は点検管である。

(b) 設計要件

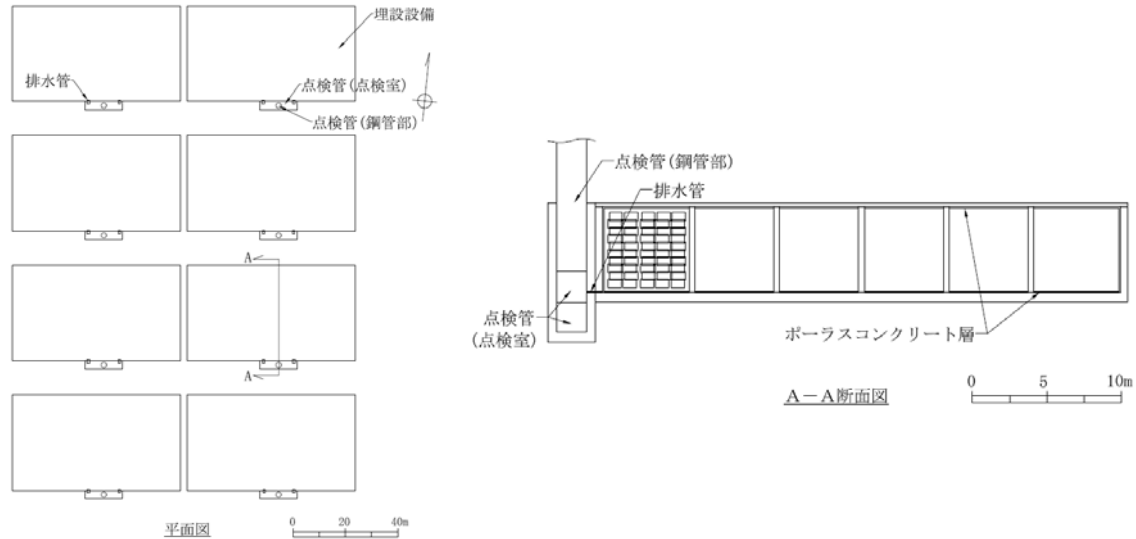
設計仕様項目である排水能力、コンクリート圧縮強度、鉄筋強度、鋼管強度、鉄筋かぶり、排水管の腐食抵抗及び内空寸法については、各部位が要求性能を満足するための設計要件を設定する。

c. 構造及び仕様

埋設設備の外周仕切設備及び覆いとセメント系充填材の間には、ポーラスコンクリート層を設置するとともに、集水した水を排水できるように排水管を設置する。排水管からの排水を覆土が施工された状態でも回収できるよう点検管を設置する。

排水・監視設備の平面図及び断面図を第3図に示す。

排水・監視設備の主要な部位と主な仕様を第6表に示す。



第3図 排水・監視設備平面図及び断面図

第6表 排水・監視設備の主要な部位と主な仕様

設備	主要な部位	主な仕様*1
排水・監視設備	ポーラスコンクリート層	材料：ポーラスコンクリート及びコンクリート ポーラスコンクリートの設計基準強度： 10.0N/mm ² 以上 厚さ：約10cm ポーラスコンクリートの透水係数：1.0×10 ⁻³ m/s以上 排水性：排水管に向かって勾配がついていること
	排水管	材料：ステンレス鋼 口径：50A 排水性：外側に向かって勾配がついていること 及び排水回収作業用に弁が設置されていること
	点検管	材料(鋼管部)：炭素鋼 材料(点検室)：鉄筋コンクリート コンクリートの設計基準強度：24.6N/mm ² 以上

*1：各部位の厚さについては、寸法の許容誤差を含む記載として「約」としている。

以下に各部位の仕様を示す。

(a) ポーラスコンクリート層

(一) 概要

ポーラスコンクリート層は、ポーラスコンクリート及びコンクリートからなり、外周仕切設備及び覆いの内側の面に設置する。

(二) 設計方針

ポーラスコンクリート層に求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間の漏出防止機能である。漏出防止機能に対しては、透水特性を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として、力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

排水性に配慮した設計とし、ポーラスコンクリートは、排水性の確保のため透水係数を $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 以上とし、厚さをポーラスコンクリート層の厚さ約 10cm(許容誤差を含む)の 1/2 以上とする。

また、排水管に向かって勾配をつける。

(イ) 力学特性

廃棄体の自重に対する力学的安定性に配慮した設計とし、ポーラスコンクリートの設計基準強度は 10.0N/mm^2 以上とする。

(b) 排水管

(一) 概要

ポーラスコンクリート層で集水した水を埋設設備の外に排水するために排水管を設置し、口径は 50A とする。外部に向かって勾配を設けるとともに、排水回収作業用の弁を設置する。

(二) 設計方針

排水管は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 力学特性

耐久性に配慮した設計とし、腐食に対して劣化抵抗性を有する材質(ステンレス鋼)とする。

(c) 点検管

(一) 概要

点検管は、炭素鋼製の鋼管部及び鉄筋コンクリート製の点検室からなり、覆土施工開始後から覆土完了まで排水状況の監視を行うため、地上部から埋設設備の排水管取付位置までの覆土内における作業空間の確保を目的としている。

(二) 設計方針

点検管は、力学特性及び作業空間を確保する。

なお、排水・監視設備による監視及び測定が終了した後に、有害な空隙が残らないよう点検室内の埋戻しを行う。また、鋼管部については埋設設備の上方向で難透水性覆土及び下部覆土内を貫通する箇所を解体し、有害な空隙が残らないよう埋戻しを行う。

(三) 仕様

(ア) 鋼管部

① 力学特性

力学的安定性に配慮した設計として、炭素鋼鋼管を使用し「道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説」⁽⁶⁾に示される許容応力度法により構造強度の照査を行う。

② 作業空間の確保

作業性に配慮した設計とし、排水・監視設備により排水された水を作業員が回収できる作業空間を確保する。

(イ) 点検室

① 力学特性

力学的安定性及び耐久性に配慮した設計とする。

力学的安定性を確保するため、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録 I に示される許容応力度法により構造強度の照査を行

い、コンクリートの設計基準強度は 24.6N/mm^2 以上とする。

耐久性を確保する観点から、中性化、塩害及び凍害に対して鉄筋かぶり及び材料配合の設計を行う。これらについて、「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づき照査を行う。

② 作業空間の確保

作業性に配慮した設計とし、排水・監視設備により排水された水を作業員が回収できる作業空間を確保する。

(iii) 覆土

a. 構成及び安全機能

覆土は、難透水性覆土、下部覆土及び上部覆土により構成する。

難透水性覆土及び下部覆土は、低透水性により放射性物質の移行を抑制し、遮蔽性により放射線の遮蔽を行う。

なお、評価において収着性による移行抑制機能を期待できる設計とする。

b. 要求性能

安全機能を確保するために必要な要求性能を整理する。

覆土の部位ごとに設定した要求性能及び設計要件を第7表に示す。

(a) 技術要件及び設計仕様項目

(一) 移行抑制機能

覆土の移行抑制機能は、埋設設備内を通過する地下水の流量を低減することである。埋設設備からの流出水量は覆土の透水特性によって影響を受けることから、覆土に対する技術要件は透水特性(低透水性)であり、その設計仕様項目は透水係数及び厚さである。

また、移行抑制機能については、長期にわたり機能を維持するため、透水係数及び厚さの変化に影響を及ぼす要因について抽出する。長期状態において覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構を第8表に示す。影響要因の抽出については、周辺岩盤などの外部環境も含めた施設の構成及び影響要因の相互作用を網羅的に考慮する。抽出した要因は、廃棄物埋設地の覆土完了後の再冠水による水との接触に伴う、ベントナイト特性の変化、有効粘土密度の変化及び短絡経路の形成である。長期における覆土の技術要件は、これらの要因に対する長期機能維持特性(化学的安

定性、変形追従性及び液状化抵抗性)であり、その設計仕様項目は透水係数、厚さ及び締固め度である。

なお、覆土には、移行抑制機能に対する技術要件として、土質系材料が有する収着性を考慮するが、その設計仕様項目は設定せず、収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。

(二) 遮蔽機能

覆土の遮蔽機能は、放射線を遮蔽する機能であるため、技術要件は遮蔽性であり、その設計仕様項目は密度及び厚さである。

(b) 設計要件

設計仕様項目である透水係数、厚さ、密度及び締固め度については、各部位が要求性能を満足するための設計要件を設定する。

覆土の技術要件のうち、低透水性及び液状化抵抗性についての詳細は添付資料2「技術要件における考え方」に示す。

第7表 覆土の要求性能及び設計要件

安全機能	要求性能		設計仕様項目	難透水性覆土	下部覆土	上部覆土	設計要件
	技術要件 (必要な特性)						
移行抑制機能	透水特性	低透水性	透水係数	○	○	—	必要な透水係数を有すること。 ^{*3}
			厚さ	○	○	—	必要な厚さを有すること。 ^{*4}
	核種 収着性	収着性	—	—	—	—	設計仕様項目を設定しない(評価において、覆土が副次的にもつ性能として設定するものとする)。 ^{*5}
移行抑制機能を長期的に維持するための要求機能	長期機能維持特性	化学的 ^{*1} 安定性	透水係数	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。 ^{*2}
		変形 ^{*1} 追従性	透水係数	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。 ^{*2}
			厚さ	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。 ^{*2}
		液状化 ^{*1} 抵抗性	締固め度	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。 ^{*2}
遮蔽機能	放射線の遮蔽性能	遮蔽性	密度	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。
			厚さ	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。 ^{*4}

*1：影響要因及び影響機構を第8表に整理している。

*2：長期状態変化に関連する設計については、第十条第四号の状態設定の評価と関連することから、第十条第四号の説明時に具体的な数値の説明を行う。

*3：難透水性覆土は巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 、下部覆土は巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ を施工時点で確保する。

*4：難透水性覆土は厚さ2m、下部覆土は難透水性覆土上面で厚さ2mを確保する。

*5：分配係数は、材料仕様及び施工の際に取得する分配係数データ又は代替指標となるデータにより管理する。

第8表 長期状態において覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構

設計仕様項目	長期状態における影響要因			影響機構	要求性能(技術要件)
透水係数	ベントナイト特性の変化	化学的影響	交換性陽イオンの変化	セメント系材料からの高カルシウム濃度の間隙水によるベントナイトのCa型化。	化学的安定性
			廃棄体中のほう酸塩、硫酸塩などの可溶性塩影響	可溶性塩影響により、空隙特性(空隙率、空隙構造)が変化するとともに、膨潤性能が低下。また、陥没による覆土の変形。	化学的安定性 変形追従性
	有効粘土密度*1の変化	力学的影響	金属の腐食	金属の腐食膨張により、覆土の隅角部等に、厚さの減少及び変位に伴う透水性が変化した領域の発生。	変形追従性
			地震影響	地震力により覆土の変形及び液状化の発生。	変形追従性 液状化抵抗性
	化学的影響	モンモリロナイトの溶解、随伴鉱物の溶解、二次鉱物の生成	セメント系材料からの高アルカリ性の間隙水によるベントナイト構成材料の溶解に伴う密度低下。溶解成分と地下水成分などが反応して二次鉱物が沈殿。	化学的安定性	
厚さ	短絡経路の形成	力学的影響	ガス発生	金属腐食等により発生するガスの破過が生じ、覆土に低密度部を形成。	変形追従性

*1：単位体積あたりに含まれるベントナイト分の乾燥重量をそれ自身の体積で割ることにより得られる密度であり、ベントナイト混合材料の特性を把握するときの指標のひとつ。

c. 構造及び仕様

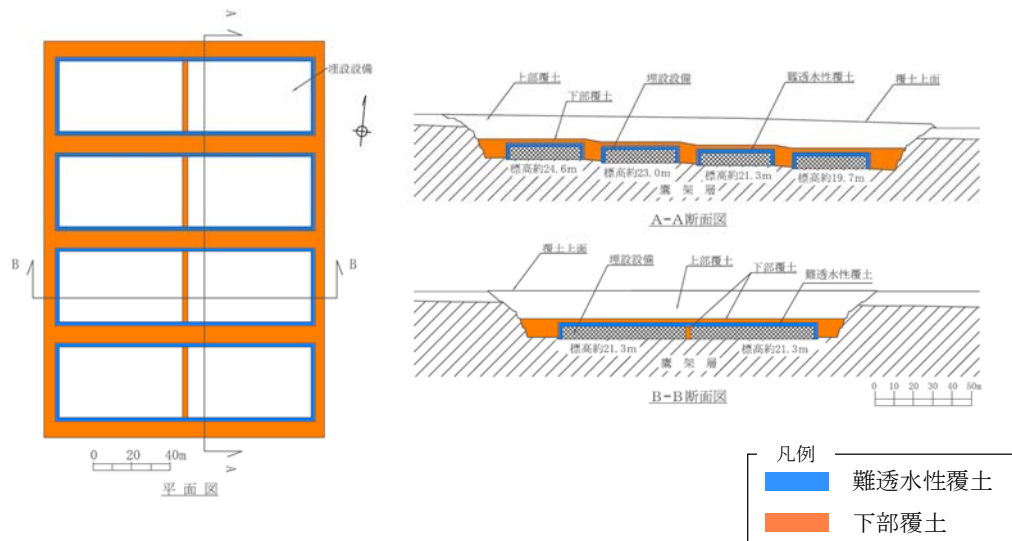
難透水性覆土は、埋設設備の底面及び埋設設備間狭隘部を除く外周部に設置する。下部覆土は、難透水性覆土の外周部及び埋設設備間狭隘部に設置する。上部覆土は、下部覆土上部に設置する。

埋設設備間狭隘部とは、具体的には埋設設備の東西方向の間を示す。

移行抑制機能を確保する観点から、覆土の低透水性は、力学的影響及び化学的影響による長期的な性能低下に配慮した設計とする。

覆土断面図を第4図に示す。

覆土の主要な部位と主な仕様を第9表に示す。



第4図 覆土断面図

第9表 覆土の主要な部位及び主な仕様

設備	主要な部位	主な仕様
覆土	難透水性覆土	材料：ベントナイト混合土 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数*1として $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下 厚さ：2m以上 密度：1,100kg/m ³ 以上
	下部覆土	材料：現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂及び砕石を混合 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数*1として $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下 厚さ：2m以上 密度：1,100kg/m ³ 以上
	上部覆土	材料：現地発生土に必要な応じて砕砂及び砕石を混合 透水係数(施工時点)：廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数と同程度 厚さ：難透水性覆土及び下部覆土とあわせて埋設設備上面から15m以上

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数をいう。

以下に各部位の仕様を示す。

(a) 難透水性覆土

(一) 概要

難透水性覆土は、砂を母材としたベントナイト混合土で構成し、埋設設備の底面及び埋設設備間狭隘部を除く外周部に設置する。

(二) 設計方針

難透水性覆土に求める安全機能は、覆土完了後の移行抑制機能及び遮蔽機能である。

移行抑制機能に対しては、透水特性を確保し、埋設設備からの流出水量を低減するために低透水性を考慮した設計とする。また、周辺岩盤に比して同程度以下の透水係数を長期的に維持できる設計とする。

遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。

また、移行抑制機能を長期的に維持するための化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性は、長期状態評価において考慮する性能を満たす見通

しがあるものとする。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

覆土の透水係数は、廃棄物埋設地の近傍に分布する鷹架層の透水係数が $5.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 程度であることを踏まえ、鷹架層の透水係数以下を長期的に維持することを目標として設計する。

難透水性覆土は、化学的影響の要因である物質の供給源となるセメント系材料と隣接している。難透水性覆土の透水係数は、長期的に性能低下が生じることを想定し、施工時点において巨視的透水係数^{*1}として $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下を確保する。また、埋設設備に内蔵される金属の腐食膨張に伴い鉛直方向に変形した場合でも低透水性を維持できるよう、難透水性覆土の厚さは、埋設設備の表面から 2m 以上とする。

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数を指す。

(イ) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $1,100 \text{kg/m}^3$ 以上とする。

(ウ) 長期機能維持特性

① 化学的安定性

化学的影響により覆土が変質した場合においても、長期的に低透水性を維持でき、化学的安定性の高いと考えられる天然の土質系材料を使用する。

② 変形追従性

力学的影響又は化学的影響により覆土が変形した場合においても、その変形に追従し、覆土全体として埋設設備からの流出水量の増加を抑制する設計とする。

③ 液状化抵抗性

力学的影響により覆土が変状することのないように、粒径分布に広がりを持った土質系材料で十分に締固めを行う。

なお、実際に使用する材料の粒形分布に基づいて、道路橋示方書⁽⁷⁾

に示される液状化判定法による確認を行う。

(b) 下部覆土

(一) 概要

下部覆土は、現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂及び砕石を混合したもので構成し、埋設設備間狭隘部並びに難透水性覆土の側部全体及び上部に設置する。

(二) 設計方針

下部覆土に求める安全機能は、覆土完了後の移行抑制機能及び遮蔽機能である。

移行抑制機能に対しては、透水特性を確保し、埋設設備からの流出水量を低減するために低透水性を考慮した設計とする。また、周辺岩盤に比して同程度以下の透水係数を長期的に維持できる設計とする。

遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。

また、移行抑制機能を長期的に維持するための化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性は、長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあるものとする。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

覆土の透水係数は、廃棄物埋設地の近傍に分布する鷹架層の透水係数が $5.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 程度であることを踏まえ、鷹架層の透水係数以下を長期的に維持することを目標として設計する。

下部覆土の透水係数は、難透水性覆土によってセメント系材料起源の成分による化学的変質の影響が遅延・緩衝されることから、施工時点において巨視的透水係数*1として $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下を確保する。また、難透水性覆土の上部に設置する下部覆土の厚さは2m以上とする。

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数を指す。

(イ) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $1,100 \text{kg/m}^3$ 以上とする。

(ウ) 長期機能維持特性

① 化学的安定性

化学的影響により覆土が変質した場合においても、長期的に低透水性を維持でき、化学的安定性の高いと考えられる天然の土質系材料を使用する。

② 変形追従性

力学的影響又は化学的影響により覆土が変形した場合においても、その変形に追従し、覆土全体として埋設設備からの流出水量の増加を抑制する設計とする。

③ 液状化抵抗性

力学的影響により覆土が変状することのないように、粒径分布に広がりを持った土質系材料で十分に締固めを行う。

なお、実際に使用する材料の粒形分布に基づいて、道路橋示方書⁽⁷⁾に示される液状化判定法による確認を行う。

(c) 上部覆土

(一) 概要

上部覆土は、現地発生土に必要な応じて砕砂及び砕石を混合したもので構成し、難透水性覆土及び下部覆土とあわせて埋設設備上面から 15m 以上に設置する。表面は地表水による侵食を抑制する観点から、適切な排水勾配を設け、植生を行う。

(二) 設計方針

上部覆土は、周辺の土壌・岩盤と水理的に連続性を持たせる観点から廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数 (10^{-6}m/s オーダー) を目安に施工し、上面は尾駁沼に向かって適切な排水勾配を設ける。

また、上部覆土は、液状化抵抗性を有するものとする。

(三) 仕様

上部覆土は、粒径分布に広がりを持った土質系材料で締固めを行い、難透水性覆土及び下部覆土とあわせて埋設設備上面から 15m 以上とする。

[参考] 許可基準規則への適合性説明

許可基準規則第十条第一号及び第三号への適合性について、上記「4. 許可基準規則への適合のための設計方針」及び「5. 廃棄物埋設地の設計」を基に項目ごとに整理した。

(1) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第10条第1項及び第3項)

廃棄物埋設地の放射性物質の漏出を防止及び低減する設計について以下のとおり確認する。

(i) 確認方法

以下の事項が留意された設計になっていることを確認する。

- a. 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること
- b. 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること
- c. 劣化・損傷が生じた場合にも機能が維持できる構造・仕様であること
- d. 放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと

(ii) 確認結果

以下に示すとおり、廃棄物埋設地の放射性物質を漏出及び低減する設計に関する事項が留意された設計となっている。

- a. 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること

(a) はじめに

廃棄物埋設地の設計が合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によることについて、本施設の地下水面下への設置と各設備の設計の観点から、以下に説明する。

(b) 充填固化体の特性

放射性廃棄物は、事業規則別表第一の放射能濃度を超えないものであって、同規則第八条第1項第二号及び第2項に定められた廃棄物に該当するもので

ある。また、充填固化体においては、それぞれ放射性廃棄物の特性を考慮し、固型化材料と混合することで、固化体の種別ごとに固型化される。廃棄物埋設地の設計においては、以下に示す充填固化体の固型化方法並びに放射性物質の性質及び放射能濃度を考慮した。

(一) 充填固化体の固型化方法

(ア) 固型化材料は、JIS R 5210(1992)若しくは JIS R 5211(1992)に定めるセメント又はこれらと同等以上の品質を有するセメントであること。

(イ) 容器は、JIS Z 1600(1993)に定める金属製容器又はこれと同等以上の強度及び密封性を有するものであること。

(ウ) 固型化に当たっては、あらかじめ均質に練り混ぜた固型化材料若しくは固型化材料及び混和材料を容器内の放射性廃棄物と一体となるように充填すること。この場合において、容器内に有害な空隙が残らないようにすること。

(二) 放射性物質の性質及び放射能濃度

放射性物質の性質及び放射能濃度として、放射性物質の種類により主に半減期や放出される放射線の種類・エネルギーが異なる。

- ・半減期の長い放射性物質に対しては、人工バリア及び天然バリアを組み合わせる移行抑制機能の設計により長期的に放射性物質の移行を抑制し、放射能の減衰を図ることで公衆の受ける線量を低減する。
- ・半減期が短く放射線のエネルギーが大きい放射性物質に対しては、遮蔽機能の設計により放射能が有意に減衰するまで遮蔽を確保することで、公衆の受ける外部被ばくを低減する。
- ・放射性廃棄物は容器に固型化したものであり、放射性物質が容易に漏えい・飛散するものではない。しかし、水を媒体として移動することが考えられることから、人工バリア及び天然バリアによる移行抑制機能を確保するまで、漏出防止機能の設計により、水を媒体として放射性物質が漏出することを防止する。

(c) 地下水面下への設置

廃棄物埋設地は廃止措置の開始後、保全の措置を必要としない状況に移行

できるように、以下の点について考慮した。

- ・第四紀層よりも侵食抵抗性の高い岩盤内に設置する。
- ・人間侵入リスクが高い地表面を避ける。
- ・施設周辺の天然バリアである岩盤が有する性能を有効利用するために、岩盤中に設置する。

したがって、埋設設備は、岩盤を掘り下げて設置することとし、その結果地下水面下への設置とした。

地下水面下への設置としたことに応じ、安全機能を達成できる設備の設計を行っている。具体的には、地下水面下に設置することで、覆土施工完了後は地下水に水没した状態を想定し、低透水性を有する覆土を設置することで、埋設設備からの流出水量を低減するとともに、セメント系材料及び土質系材料に収着性を期待することで、放射性物質の漏出を低減することとしている。

また、できるだけ保修に頼らず、移行抑制機能が達成できる設計としている。保修に頼らないとは、将来想定される劣化・損傷に対して裕度を持つ設計のことである。将来想定される劣化・損傷として、金属腐食による膨張等の力学的影響及び化学的影響を考慮した設計としている。

廃棄物埋設地を地下水面下に設置する考えについての詳細は、添付資料 1 「1. 廃棄物埋設地の設計の考え方」に示す。

(d) 放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間は、安全機能(漏出防止機能及び遮蔽機能)を有する部位ごとの要求性能に加え、材料の選定、建設・施工及び検査を考慮した構造物として設計する。以下の内容を満足することで、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術とする。

(一) 合理的な建設・施工技術

当該期間は、数十年程度であることから、埋設設備及び排水・監視設備に対し、一般に数十年オーダーの耐用年数で知見が幅広く整備されているセメント系材料を用いたコンクリート構造物とすることが合理的である。

(二) 利用可能な最善の建設・施工技術

コンクリート構造物としての設計、材料の選定、建設・施工及び検査については、利用可能な最善の建設・施工技術として、最新の知見を確認し、

施工の実現性及び品質を確保する。現時点での最新の知見としては、「コンクリート標準示方書(設計編及び施工編)」⁽¹⁾⁽²⁾に基づく。

また、安全機能ごとに対する設計としては以下のとおり。

- ・漏出防止機能は、雨水及び地下水の浸入の防止及び放射性物質の漏出の防止を行うため、埋設設備及び排水・監視設備において、透水特性を考慮した設計とする。埋設設備及び排水・監視設備は、低透水性としてコンクリートの材料配合、ひび割れ抑制としてコンクリートの材料配合及び鉄筋量、充填性としてモルタルの材料配合、防水性として内部防水の配置並びに排水性としてポーラスコンクリート層の設置を考慮した設計とする。
- ・遮蔽機能は、敷地周辺の公衆及び放射線業務従事者並びに管理区域以外の人立ち入る場所に滞在する者への被ばくを低減するように、埋設設備の密度及び厚さを確保することで、放射線の遮蔽性能を有する設計とする。

(e) 覆土完了後

覆土完了後は、安全機能(移行抑制機能及び遮蔽機能)を有する部位ごとの要求性能に加え、材料の選定、建設・施工及び検査を考慮した構造物として設計する。以下の内容を満足することで、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術とする。

(一) 合理的な建設・施工技術

当該期間は、数百年以上であることから、長期的な透水特性及び遮蔽性能を期待するために、力学的・化学的作用により安全性が損なわれ難い天然材料である土質系材料を用いた土構造物とすることが合理的である。

また、長期的な核種収着性を期待するために、長期的に安全性が損なわれ難い土質系材料及びセメント系材料を用いることが合理的である。

(二) 利用可能な最善の建設・施工技術

土構造物としての設計、材料の選定、建設・施工及び検査については、利用可能な最善の建設・施工技術として、最新の知見を確認する。現時点での最新の知見としては、「道路土工要綱」⁽³⁾及び「河川土工マニュアル」⁽⁴⁾を参照とする。また、一般土工で用いられる重機を使用し、適切な品質

管理を行うことで、目標の透水係数を有する覆土を施工できることを確認している。

なお、施工時の品質管理方法は、覆土施工時に行う施工試験結果を用いて最終決定する。

安全機能ごとに対する設計としては以下のとおり。

- ・移行抑制機能は、低透水性として土質系材料により透水係数及び厚さを確保する設計とし、収着性を有するセメント系材料及び土質系材料を用いる設計とする。
- ・遮蔽機能は、敷地周辺の公衆及び管理区域以外の人立ち入る場所に滞在する者への被ばくを低減するために、覆土の密度及び厚さを確保することで、放射線の遮蔽性能を有する設計とする。

覆土の施工実現性及び覆土の施工時における品質管理(案)について添付資料3「1. 覆土の施工実現性」及び「2. 覆土の施工時における品質管理(案)」に示す。

(f) 諸外国との比較

本施設の安全機能は、その機能を維持すべき期間が機能ごとに異なる。そのため、安全機能を維持すべき期間を考慮し、諸外国との比較を行う。

本施設と諸外国の比較に当たっては、文献⁽⁸⁾⁽⁹⁾を基に、本施設に対して、廃棄体処分量及び総放射エネルギーが同等か上回る4か国(フランス：オーブ処分場、イギリス：ドリッグ処分場、スペイン：エルカブルル処分場及びベルギー：デッセル処分場)を対象に行う。文献⁽⁹⁾によると、諸外国の事例では、設計方針及び技術的要件について以下のように整理されている。

[設計方針に係る項目]

- ・埋設設備は、埋設設備内へ雨水及び地下水の浸入を抑制するため、鉄筋コンクリート構造とすること。
- ・埋設設備の覆いが完成するまで廃棄体の定置に係る作業時に雨水を接触させないため、屋根を設けること。
- ・埋設設備内に浸入した雨水及び地下水により放射性物質が漏出することを想定し、雨水及び地下水の監視及び漏出制御を行える排水・監視構造を設けること。

[技術的要件に係る項目]

- ・放射性物質を含む廃棄物を固型化すること。
- ・放射性物質の漏えいを抑制する人工バリアとして、セメント材料を使用すること。

設計方針に係る項目に関しては、「(1)(ii)(d) 埋設設備及び排水・監視設備の設計」及び「(1)(ii)(e) 覆土の設計」にて参考としている。また、技術的要件に係る項目に関しては、「(1)(ii)(b) 充填固化体の特性」及び「(1)(ii)(d) 埋設設備及び排水・監視設備の設計」にて参考としている。

諸外国においては、廃棄物埋設地を地下水面より上に設置しているのに対して、本施設は、安全機能を維持すべき期間に応じて、廃棄物埋設地に対する地下水の位置が異なる。そのため、安全機能を維持すべき期間に応じて、人工バリアである埋設設備、排水・監視設備及び覆土に対する地下水面の位置を整理した。

本施設は、放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までにおいて、埋設設備、排水・監視設備及び覆土が、地下水面より上にある。覆土完了から廃止措置の開始までにおいて、埋設設備及び覆土は、地下水面より下にある。また、廃止措置の開始後では、埋設設備及び覆土は、地下水面より下にある。これらの人工バリアに対する地下水の位置関係を考慮した上で、安全機能に対する諸外国との比較を行う。

(一) 漏出防止機能について

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までについて、本施設と諸外国の人工バリアは、地下水面より上に位置している。

しかしながら、本施設と諸外国では、要求する機能に対する考え方が異なる。具体的には、諸外国において、雨水及び地下水が施設に浸入した場合には、施設から漏出を防止するのではなく、漏出制御を行う、又は、不飽和を維持する観点から速やかに排水する。一方、本施設では、漏出を防止することを要求していることから、諸外国より高い性能が必要である。また、放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までのうち、覆土施工期間中では、覆土の施工に伴い地下水面が徐々に上昇するため、人工バリアに対する地下水面の位置関係が経時的に変化する可能性がある。そのため、

本施設においては、漏出防止機能を確保する観点から、埋設設備の使用材料及び部材厚は諸外国と同等以上の設計を行っている。

(二) 移行抑制機能について

覆土完了から廃止措置の開始までについて、本施設と諸外国では人工バリアに対する地下水面の位置が異なる。諸外国では、地下水面より上に施設を設置して施設の周囲を不飽和にすることを前提とし、雨水の浸入を抑制する観点から低透水性を考慮している。一方、本施設では、地下水面下に施設を設置することから、地下水の浸入を抑制するとともに、浸入した地下水の(覆土側への)移行を抑制する観点として低透水性を考慮している。本施設では、地下水面下においても移行抑制機能を確保できるよう低透水性に優れた設計を行っている。

なお、廃止措置の開始後の本施設では、覆土により、移行抑制機能を期待できるように設計し、線量評価において移行抑制機能を考慮している。

(三) 遮蔽機能について

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までについて、本施設と諸外国では人工バリアに対する地下水面の位置及び要求される機能が同様である。埋設設備の使用材料及び部材厚に関しては諸外国と同程度の設計である。

覆土完了から廃止措置の開始までについて、本施設と諸外国では人工バリアに対する地下水面の位置が異なる。また、遮蔽機能に関する要求が明示されていない。本施設では、覆土により、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の公衆等の受ける線量を低減できる遮蔽性(密度及び厚さ)を有する設計としている。

なお、廃止措置の開始後について、諸外国では、遮蔽機能に関する要求が明示されていない。一方、本施設では、遮蔽機能を期待できるように設計し、線量評価において遮蔽機能を考慮している。

各部材の仕様等の詳細な比較は添付資料 3「3. 諸外国との比較」に示す。

(g) まとめ

本施設は、廃止措置の開始後、保全の措置を必要としない状況に移行できることを考慮して、設置位置を選定し、安全機能を達成できる設備の設計を

行っている。

また、「(1)(ii)(b) 充填固化体の特性」～「(1)(ii)(f) 諸外国との比較」に示すとおり、埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技术によるものである。

b. 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

漏出防止機能を確保する期間に対して、劣化・損傷に対する抵抗性を有するよう鉄筋かぶり及び材料配合の設計を行っている。また、劣化抵抗性を有していることを、「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づき耐久性照査によって確認している。対象項目は、設計条件及び立地条件を考慮し、耐久性に影響があると考えられる中性化、塩害及び凍害とした。

耐久性照査の詳細については、添付資料 2「4. 埋設設備の耐久性」を参照のこと。

(一) 中性化

中性化に対する劣化抵抗性を有するために、中性化深さが鋼材腐食発生限界深さに達しない設計としている。

(二) 塩害

塩害に対する劣化抵抗性を有するために、コンクリート表面塩化物イオン濃度の設計値が鋼材腐食発生限界濃度に達しない設計としている。

(三) 凍害

内部損傷及び表面損傷に対する劣化抵抗性を有する設計としている。

(b) 覆土

難透水性覆土及び下部覆土は、化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性を考慮し、粒形分布に広がりを持った土質系材料を用いる。

難透水性覆土及び下部覆土は、容易な露呈を防止する観点から安定した地盤を掘り下げ、埋設設備の底面を除く外周部に設置する設計としている。

覆土の設計においては、移行抑制機能を長期にわたり維持する必要があるため、長期状態において想定される劣化・損傷として、透水係数及び厚さの変化に影響を及ぼす要因を抽出している。

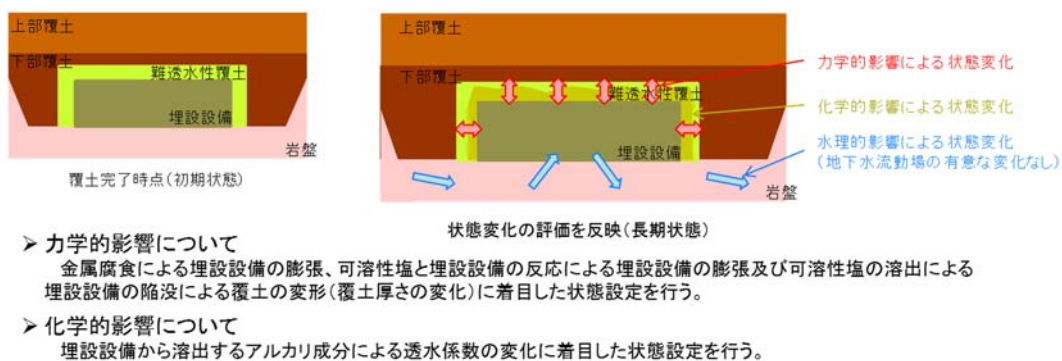
長期状態において覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構は、第 8 表に示すとおりである。

抽出した要因は、廃棄物埋設地の覆土完了後の再冠水による水の接触に伴う、ベントナイト特性の変化、有効粘土密度の変化及び短絡経路の形成である。これらの要因に対して、長期機能維持特性として、化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性を考慮しており、これらが長期状態において考慮する性能を満たす見通しがあるような設計としている。

具体的には、線量評価上の状態設定において、力学的影響及び化学的影響による覆土の性能(低透水性)の低下を考慮しており、設計上の設定値(初期状態)も性能の低下に配慮している。第 5 図に影響項目の概要を示す。

これらにより、覆土は劣化・損傷に対する抵抗性を有する設計とする。

線量評価上の状態設定についての詳細は、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。



第 5 図 影響項目の概要

c. 劣化・損傷が生じた場合にも機能が維持できる構造・仕様であること

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

埋設設備及び排水・監視設備は、廃棄体と水が接触することを防止するために、①外周仕切設備及び覆い、②ポーラスコンクリート層、③セメント系充填材、④内部防水で多重化し、各部位の劣化・損傷が生じた場合においても、漏出防止機能を維持する構造・仕様としている。

(b) 覆土

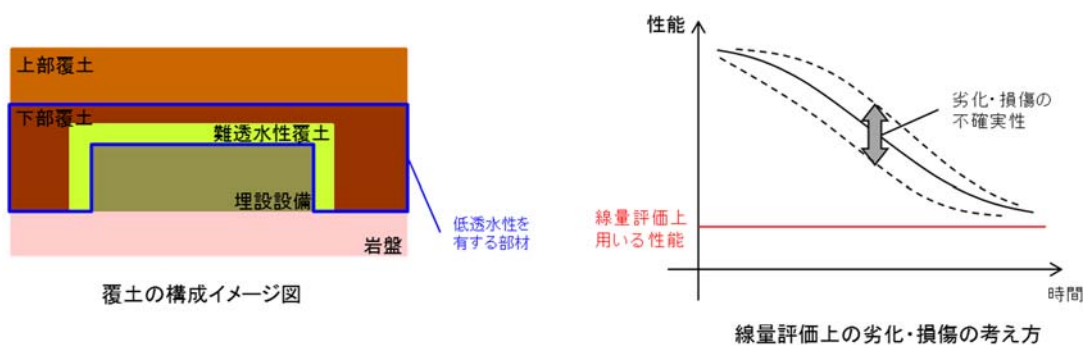
覆土は、長期的に発生が予想される力学的影響及び化学的影響のいずれに対しても機能維持が受動的に期待できるよう、多層化した十分な厚さの覆土を設置することで、劣化・損傷が生じた場合においても、移行抑制機能を維持する構造・仕様としている。

線量評価上用いる各性能は、線量評価の状態設定における劣化・損傷の程度及び期間の不確実性を包含する設定としていることから、廃棄物埋設地全体として線量基準を満足できるようにする。

力学的影響及び化学的影響に対しては、低透水性を有する難透水性覆土及び下部覆土の2層を設置し、各覆土の厚さを2m以上確保することで、全体として覆土に要求する低透水性が容易に損失しないものとしている。第6図に線量評価上の劣化・損傷の考え方を示す。

これらにより、劣化・損傷が生じた場合においても、移行抑制機能を維持する構造・仕様とする。

なお、線量評価上の状態設定についての詳細は、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。



第6図 線量評価上の劣化・損傷の考え方

- d. 放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと

放射性物質の漏出を低減する機能は、人工バリア及び天然バリアにより確保し、人工バリアは特性の異なる材料として、セメント系材料及び土質系材料を用いる設計とする。また、これらを用いた各部材に対して、第10表に示すよう

に、地下水の浸入を抑制する機能(低透水性)及び放射性物質を収着する機能(収着性)の複数の異なる機能を期待することにより、一つの機能に過度に依存しないよう配慮した設計としている。

第10表 各部材に期待する移行抑制機能を構成する特性

	部材		収着性	低透水性
人工バリア	埋設設備		○	—
	覆土	難透水性覆土	○	○
		下部覆土	—*1	○
		上部覆土	○	—
天然バリア	岩盤		○	○

○：期待する

—：期待しない

*1：下部覆土は土質系材料であり収着性を期待できるが、難透水性覆土又は下部覆土の一方に収着性を期待することで十分であることから、下部覆土の収着性は考慮しない。

参考として、確からしい自然事象シナリオの線量評価結果をベースとし、各バリア材の機能を構成する特性の一つを無視した線量評価を行い、特性の一つに過度に依存していないことを確認した。

線量結果は「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 4.(2)(v)d.その他」に示すとおりである。

(2) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第10条第2項)

放射性物質の漏出を防止する機能が、雨水や地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造が相まっていることを以下のとおり確認する。

(i) 確認方法

漏出防止機能を期待する埋設設備及び排水・監視設備が、雨水や地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造となっていることを確認する。

(ii) 確認結果

雨水及び地下水の浸入を防止する構造は、外周仕切設備及び覆い、ポーラスコ

ンクリート層、セメント系充填材並びに内部防水により構成する。放射性物質の漏出を防止する構造は、外周仕切設備、覆い、ポーラスコンクリート層及び内部防水により構成する。これらの組合せにより、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、放射性物質の漏出を防止することとしている。

以上のことから、埋設設備及び排水・監視設備は、放射性物質の漏出を防止する機能について、雨水や地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造が相まっているものである。

漏出防止設計に係る詳細な説明を添付資料 4「許可基準規則解釈第 10 条第 2 項に関する補足説明」に示す。

(3) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第 10 条第 4 項)

廃棄物埋設地が、覆土完了から廃止措置の開始までの間、廃棄物埋設地の外への放射線物質の漏出を低減する機能を有するものであることを以下のとおり確認する。

(i) 確認方法

「廃棄物埋設地の外への放射線物質の漏出を低減する」について、公衆の受ける線量が法令に定める線量限度を超えないことはもとより、As Low As Reasonably Achievable(ALARA)の考えの下、合理的に達成できる限り十分低くなるよう、実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下であることによって確認する。

(ii) 確認結果

埋設設備の覆土完了から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける被ばく線量について評価を行った結果、約 $3.8 \mu\text{Sv/y}$ となった。また、この線量に廃棄物埋設施設からの環境への放射性物質の放出による線量約 $1.7 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/y}$ を合計しても約 $3.8 \mu\text{Sv/y}$ であり、公衆が受ける実効線量が $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下となった。なお、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による線量は覆土により覆土前よりも大幅に減少し、無視できるレベルとなっているため考慮しない。

埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの評価の詳細を第 11 表に示す。線量評価に関するパラメータについては、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。

以上より、廃棄物埋設地は、覆土完了から廃止措置の開始までの間、実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下であることから、廃棄物埋設地の外への放射線物質の漏出を低減する機能を有する設計である。

第 11 表 埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの
期間において最大となる公衆の受ける被ばく線量の評価結果

線量評価 シナリオ*1	3号評価結果 ($\mu\text{Sv/y}$)		1号評価結果 ($\mu\text{Sv/y}$)		2号評価結果 ($\mu\text{Sv/y}$)		評価結果の重量 ($\mu\text{Sv/y}$)	
	覆土前	覆土 完了後	覆土前	覆土 完了後	覆土前	覆土 完了後	覆土前	覆土 完了後
気体廃棄物が大気への管理放出され、放射性物質が大気へ放出されることによる内部被ばく*2	約 3.5×10^{-6}						約 3.5×10^{-6}	
液体廃棄物が尾駁沼又は河川へ管理放出され、その水産物を摂取することによる内部被ばく*2	約 1.7×10^{-2}						約 1.7×10^{-2}	
廃棄物埋設地から放射性物質が地下水によって尾駁沼へ漏出し、その水産物を摂取することによる内部被ばく	—*4	約 0.59	—*4	約 1.9	—*4	約 1.3	—*4	約 3.8
管理建屋内の一時貯蔵の廃棄体および定置済み廃棄体からのスカイシャイン線による外部被ばく	約 6.5	—*5	約 27*6	—*5	約 25*6	—*5	約 23*7	—*5
						合計*3	約 23	約 3.8

*1: 「廃棄物埋設事業変更許可申請書」(平成10年10月8日付け、10安(廃規)第49号をもって事業変更許可)(以下「既許可」という。)において評価対象としている「沢への放射性物質の移行による外部被ばく及び内部被ばく」は、1号及び2号廃棄物埋設施設については、他の被ばく経路と比べて線量が無視できる程小さい。また、3号廃棄物埋設施設における線量も同じく低く(約 9.3×10^{-6} [$\mu\text{Sv/y}$])、廃棄物埋設地から放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量は、「廃棄物埋設地から放射性物質が地下水によって尾駁沼へ漏出し、その水産物を摂取することによる内部被ばく」にて代表できる。

*2: 覆土完了後に廃棄施設等を供用することを想定し、覆土完了後も考慮する。

*3: 線量合計値に関しては、最大線量時期を考慮せず、単純に合計したもの

*4: 埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間においては、放射性物質の漏出を防止することから公衆への影響は発生しない。

*5：覆土完了後は、十分な厚さの覆土があるため、周辺監視区域の廃止後に敷地内へ立ち入る人の外部被ばく線量影響は無視できるほど小さい。

*6：1号埋設設備7,8群の漏出防止対策の追加及び1号廃棄物埋設地に埋設する廃棄体の種類の追加及び数量の変更並びに2号廃棄物埋設地に埋設する廃棄体の数量の変更に伴う影響はなく、公衆の受ける外部被ばく線量は既許可での評価値を上回ることはない。

*7：各廃棄物埋設施設からの方位及び距離を考慮し、重畳させたもの。

(4) 許可基準規則第十条第三号(許可基準規則解釈第10条第5項)

廃棄物埋設地が、化学物質により安全機能が損なわれないものであることを以下のとおり確認する。

(i) 確認方法

埋設する廃棄体、埋設設備、排水・監視設備及び覆土には可燃性の化学物質、可燃性ガスを発生する化学物質は含まれない。一方、廃棄物埋設地の安全機能に影響を及ぼす可能性のあるその他の化学物質としては、廃棄体又は埋設設備内に含まれる有機物、さらにはセメント系材料から溶出した高アルカリ成分を含む地下水との反応による影響を考慮する必要がある。

覆土完了前の安全機能については、埋設設備には漏出防止機能及び遮蔽機能を期待しており、排水・監視設備には漏出防止機能を期待している。覆土完了までの数年間の期間においては、水との接触により埋設設備が容易に溶解・変質すること^{*1}、さらには水を媒体として埋設設備内の化学物質(有機物)が溶解して、化学反応により埋設設備が著しく損傷することはない。したがって、覆土完了前の漏出防止機能及び遮蔽機能については、これらの化学物質によって影響を受けない。

覆土完了後の安全機能については、埋設設備には移行抑制機能を期待しており、覆土には移行抑制機能及び遮蔽機能を期待している。遮蔽機能については、覆土が十分な厚さを有しており、化学物質との接触による覆土の厚さ減少及び密度低下は無視できると考えられる。移行抑制機能については、廃棄物埋設地内において地下水位が上昇し、地下水の浸入に伴う溶解及び漏出する化学物質(有機物)及びセメント系材料から溶出した高アルカリ成分が埋設設備の収着性並びに覆土の低透水性及び収着性に影響を及ぼす可能性がある。

したがって、化学物質(有機物)及びアルカリ成分による埋設設備の収着性並びに覆土の低透水性及び収着性への影響を考慮した設計であることを確認する。

*1：覆土完了までにセメント系材料である埋設設備に生じる劣化として中性化現象を考慮しても、鉄筋かぶり内に収まる結果であることから、埋設設備が著しく溶出することは考えられない。

(ii) 確認結果

(i)で整理した影響に対する対策として、埋設設備及び覆土に使用する材料については、化学物質による低透水性及び収着性への影響を考慮し、低透水性及び収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。また、覆土については化学的安定性の高い材料で構成する設計としている。

したがって、廃棄物埋設地が、化学物質により安全機能が損なわれないものである。

なお、廃止措置の開始後の評価においては、埋設設備に使用する有機物も含め、これら化学物質を考慮した状態設定に基づく線量評価を行い、各期間・シナリオの線量基準を満足するものであることを確認している。

6. 参考文献

- (1) (公社)土木学会(2018)：2017年制定コンクリート標準示方書(施工編)
- (2) (公社)土木学会(2018)：2017年制定コンクリート標準示方書(設計編)
- (3) (公社)日本道路協会(2009)：道路土工要綱
- (4) (財法)国土技術研究センター(2009)：河川土工マニュアル
- (5) (社)土木学会(2002)：2002年制定コンクリート標準示方書(構造性能照査編)
- (6) (社)日本道路協会(平成24年)：道路橋示方書(I 共通編・IV 下部構造編)・同解説
- (7) (社)日本道路協会(平成27年)：道路橋示方書(V 耐震設計編)・同解説
- (8) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：放射性廃棄物ハンドブック(2019年版)
- (9) ONDRAF/NIRAS(2012):Summary of the Safety Report for the surface repository of category A waste in Dessel

以上

廃棄物埋設地の設計の基本的考え方

目 次

1. 廃棄物埋設地の設計の考え方	1
(1) 地下水面下への設置	1
(2) 移行抑制機能の設計	1
(3) 漏出防止機能の設計	3
2. 3号廃棄物埋設地の基本的考え方	6
(1) 設置位置	6
(2) 設置深度	6
(3) 埋設設備の大型化	7
(4) 点検管及び点検路方式の選定	8
(5) 耐埋設荷重強度	9
(6) セメント系充填材の厚さ	13
3. 第四紀層との隔離を安定的に確保する考え方	14
(1) 地下水の流れの一般的な知見	14
(2) 覆土の構成	14
(3) 覆土の機能維持	14
(4) 覆土の不均質性に対する考え方	17

1. 廃棄物埋設地の設計の考え方

廃棄物埋設地の設計は、廃止措置の開始後、保全の措置を必要としない状況に移行できることが重要である。

廃棄物埋設地は、当初、地表面付近の地下水面より上に設置することも考えられたが、廃止措置の開始後、保全の措置を必要としない状況に移行できるようにすることを考慮して地下水面下に設置することとした。

その上でできるだけ保修に頼らない移行抑制機能が達成できるように設計するとともに、漏出防止機能を設計した。

(1) 地下水面下への設置

保全の措置を必要としない状況に移行できるようにする観点で、地下水面上への設置（地表近くの不飽和帯設置）と地下水面下への設置（岩中設置）とを比較した結果、地下水面下への設置が有利と判断した。

- ・地下水面上に設置すると、第四紀層に設置することになり、岩盤よりも柔らかい土壌内への設置となる。
- ・地下水面上に設置すると、凸型の覆土形状とする必要があるが、廃止措置後に跡地利用で盛土により平坦に造成され、不飽和帯が壊されることにより結果的に地下水面下への設置となる可能性がある。
- ・地下水面上への設置は、地表面に近く、人間侵入リスクが相対的に高い。

一方で、地下水面下への設置となると、完全な防水は不可能であり、漏出防止機能の設計においては、できるだけ不飽和状態を維持すること及び浸入した水の放射性物質濃度を管理することに対応した設計が必要となる。

(2) 移行抑制機能の設計

移行抑制機能は、覆土完了後、人工バリア及び天然バリアの組合せにより、廃棄物埋設地からの放射性物質の移行を抑制する機能を有する設計とする。

<前提条件>

- ・地下水面下への設置となったため、覆土施工後は最初から地下水に水没した状態を想定する。

- ・外周仕切設備等で使用するセメント系材料の物理的移行抑制機能（低透水性）は、ひび割れが入ると、設備の等価な透水係数が1オーダーから2オーダー大きくなることが予想される。設備をどのような防水材で覆っても、防水材の長期性能の評価は難しいことから、埋設設備には物理的移行抑制機能（低透水性）を期待しない設計とする。

<埋設設備>

- ・埋設設備は金属の腐食で比較的短期間（千年以内）に膨張や陥没で変形する可能性があるが、埋設設備は覆土直後から砂程度の透水性であっても安全性が確保できる設計とする。

<覆土>

- ・廃棄物埋設地は新第三紀の岩盤の上に厚さ数m～10m程度の第四紀層が載った台地上にあり、埋設設備設置地盤付近の間隙水圧測定結果から、地下水が下向き成分を含む横方向に流れている。埋設設備を岩盤に掘り込んで設置し、埋設設備の周囲を岩盤相当の透水性の低い覆土で覆い、埋設設備から漏出した放射性物質が地表面方向に流れ難くする。覆土は天然の材料を用い、埋設設備の膨張や陥没に対する変形に追随することを考慮する。
- ・覆土は、長期の化学的及び力学的影響による性能の低下を考慮して、覆土の初期の性能を高く設定し、漏出防止機能を期待する期間が終了した直後に埋設設備が砂程度の透水性となったと仮定しても、廃止措置の開始までの敷地境界付近における公衆の受ける線量が小さくなるよう、地下水中の放射性物質濃度を十分低減できる高い移行抑制機能を持つ設計とする。

<まとめ>

- ・防水材の長期性能の評価は難しいことから移行抑制機能は覆土によって確保し、セメント系材料の物理的移行抑制機能（低透水性）を最初から期待しない設計とする。
- ・移行抑制機能は、覆土完了後、覆土の低透水性及び収着性と、セメント系材料の化学的移行抑制機能（収着性）で達成する設計とする。

(3) 漏出防止機能の設計

漏出防止機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、廃棄物埋設地の限定された区域からの放射性物質の漏出を防止する。

<漏出防止の目的>

- ・漏出防止の目的は、全てのバリアが完成するまでに、放射性物質が廃棄体の外へ漏出することによる被ばくの防止と、移行抑制機能の評価の前提を確保することである。そのため、放射性物質がバリアの内側にある状態に管理することを基本方針とする。

<漏出防止設計の考え方>

- ・漏出防止の範囲は、外周仕切設備及び覆いの内側とし、その外側のバリア等における放射性物質の濃度が敷地境界付近における水中濃度限度に比較して十分小さくなるように管理する。
- ・埋設設備は漏出防止期間中においても、覆土施工期間中の後期は、地下水面下にある可能性がある。前述のとおり、コンクリートに貫通するわずかなひび割れでも水は浸入するため、覆土期間中に廃棄体に水が完全に接触しない確実な防水を保証することは容易でない。そこで、完全防水を目指す設計ではなく、できるだけ廃棄体周りを不飽和状態として、設備に浸入した水を管理することを漏出防止設計の基本とする。
- ・放射性物質はドラム缶の中に固型化されており、ドラム缶から移行するには、基本的にその移行媒体である水がドラム缶の周囲に存在する必要がある。したがって、漏出防止期間においては、できるだけ廃棄体の周囲が水で満たされた状態でない不飽和にすることを考える必要がある。また、覆土施工開始後は、埋設設備は地下水面下となる可能性があり、廃棄体周囲が飽和状態となることも否定できない。そのため、廃棄体周囲が仮に飽和状態となり、廃棄体から放射性物質の移行が認められた場合でも、放射性物質を含んだ水を管理された状態にすることを考える必要がある。

(補足説明)

- ・漏出防止の方針を達成するために、ポーラスコンクリート層からなる排水・監視設備を設け、排水・監視設備の水が、廃棄体の最下面より下に維持できるように排水することで、廃棄体の周囲を不飽和にさせ、万一、排水能力以上に水が入って来た場合は、その水を回収して確認することで、管理された状態に置くこととする。
- ・排水・監視設備から水を回収することで廃棄体をできるだけ不飽和に保ち、設備に入った排水を管理された状態に置くことが可能な設計となっていることから、漏出防止の目的は達成可能と考えられる。しかし、排水・監視設備（ポーラスコンクリート層）の部分の放射性物質濃度が高くなりすぎると、そこから埋設設備の外に放射性物質が移行し放射性物質濃度が水中濃度限度に比して十分小さくない事態となることも考えられる。
- ・廃棄体周りのセメント系充填材が、廃棄体内部への水の浸入や、放射性物質の移行を抑制できるように設計する必要がある。そこで、廃棄体周りのセメント系充填材の性能を仮定し、排水・監視設備の排水中の放射性物質濃度の予測を行った。予測に当たっては、保守的に廃棄体の周囲が水で飽和した状態を仮定し、最も移行しやすいトリチウム（埋設設備 1 基当たりの放射エネルギー： 3.1×10^{10} Bq（1号）、 7.5×10^{10} Bq（2号））を用いて予測計算を実施する（添付資料 4「参考資料 2 排水中のトリチウム濃度を用いた漏出防止評価について」参照）。廃棄体周りのセメント系充填材は、流動性を良くし充填性を上げ、廃棄体間の空隙を隙間なく充填するとともに、低発熱配合のセメント系充填材を選定し、温度応力によるひび割れを抑制する設計としている。
- ・解析では、全廃棄体の 1%の内部に浸入した水が接触し、放射性物質がポーラスコンクリート層に向けて移行するとする。廃棄体からポーラスコンクリート層までの移行は、拡散で移行するという現実的と思われるケースと、廃棄体から直接ポーラスコンクリート層に移行する保守的条件を模擬したケースの計算をする。その結果、いずれのケースでも、ポーラスコンクリート層の排水中の放射性物質濃度は $10 \mu\text{Sv/y}$ 相当濃度 ($6.0 \times 10^5 \text{Bq/m}^3$) を下回り、敷地境界付近の水中濃度限度と比較して十分低い濃度となった。現状のポーラスコンクリート層の放射性物質濃度の実測値は、約 $2.0 \times 10^3 \text{Bq/m}^3$ となり、解析結果の約 1/100

以下であったことから、この予測は十分保守的と考えられる。

- 1号及び2号廃棄物埋施設は、現状の放射性物質濃度の実測はこの解析結果の約1/100以下であるが、今後放射性物質濃度が上昇する可能性を検討する。現在の解析は、全廃棄体の1%の内部に水が接触したと仮定したが、仮に今後全ての廃棄体に水が接触したとしても、ポーラスコンクリート層の放射性物質濃度は $10\mu\text{Sv/y}$ 相当を下回る。
- 現状は不飽和だが、飽和になると仮定した場合は、廃棄体から直接ポーラスコンクリート層に移行する保守的条件を模擬したケースに包含される。ドラム缶の上部空隙に入った水の中に放射性物質が溶出して滞留しているものが、今後ひび割れが新たにできて一気に流出するケースを想定すると、例えば過去10年分の放射性物質が一気に出るとすると10倍程度になる可能性があるが、ポーラスコンクリート層の放射性物質濃度は $10\mu\text{Sv/y}$ 相当濃度を下回る。仮に上記の組合せが起こって、ポーラスコンクリート層の放射性物質濃度が $10\mu\text{Sv/y}$ 相当濃度を上回っても、外周仕切設備の外の流量はポーラスコンクリート層を流れる流量の10倍以上あるので、仮にそれが直接流出したとしても、そこでの濃度は、敷地境界付近の水中濃度限度と比較して十分低い濃度となる。
- 覆土までの期間は、できるだけ廃棄体に水を接触させないことが漏出防止性能をより確実にすることから、この間に廃棄体への水の浸入の可能性を低減させる取り組みを行うこととする。

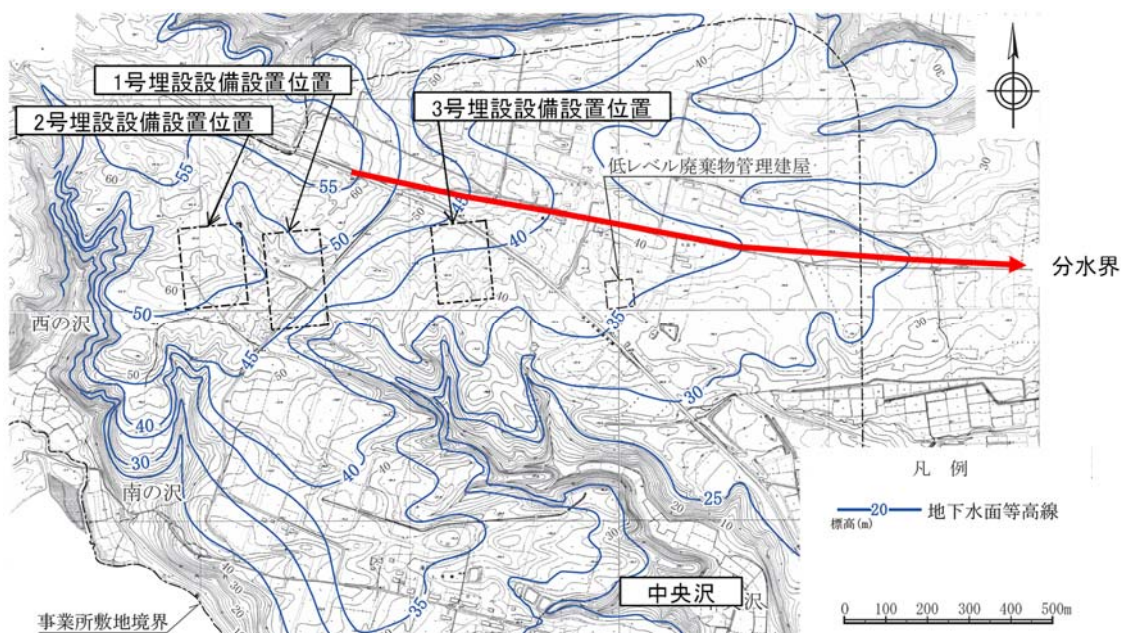
2. 3号廃棄物埋設地の基本的考え方

(1) 設置位置

3号廃棄物埋設地の設置位置の選定に当たっては、以下のことに配慮した。

- (i) 「許可基準規則」第三条を受け、変動地形が判読されない地盤、直下に活断層がない地盤、また地すべり地形が判読されない台地上に設置する。
- (ii) 「許可基準規則」第五条を受け、津波による遡上波が到達しない十分高い場所に設置する。
- (iii) 廃棄物埋設地を通過した地下水が、水理地質情報を把握している敷地内を通過し、尾駁沼側に流れるよう、地下水の分水界の南側に設置する（第1図参照）。
- (iv) 長期的に機能を維持する観点から、比較的岩盤出現深度が浅い場所で、かつ、侵食抵抗性の観点から中央沢から離して設置する。

これらを考慮した結果として、3号廃棄物埋設地は分水界の南側に位置している。



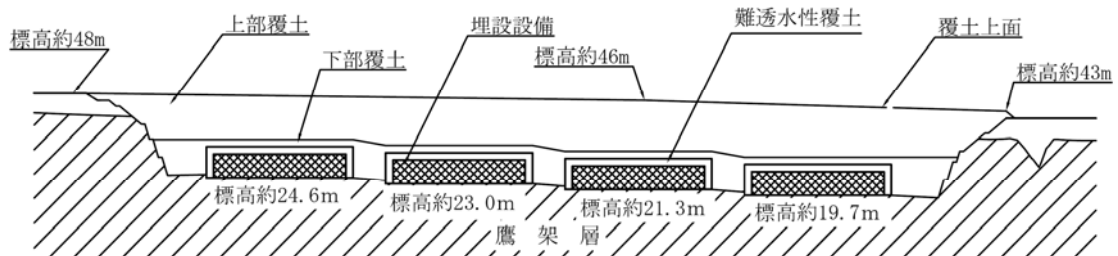
第1図 地下水面等高線図（1986年）

(2) 設置深度

埋設設備の設置深度は、以下の点を考慮し設定する。設置深度を第2図に示す。

- (i) N値50以上の岩盤上へ設置する。

(ii) 掘削前の第三紀層（鷹架層）推定レベル以下へ埋設設備全体を埋設する。



第2図 3号廃棄物埋設地の設置深度（南北断面図）

(3) 埋設設備の大型化

3号埋設設備の形状については、以下の事に配慮し、1基が2号埋設設備1群(2基)相当となる形状として大型化する。

(i) 覆土完了までの間の遮蔽機能の観点で、スカイシャインガンマ線及び直接ガンマ線に対するリスクを低減するため、廃棄物埋設地全体での埋設設備の表面積を小さくする。

(ii) 覆土完了後の移行抑制の観点では、第1表に示すとおり、廃棄体一本当たりの流出水量は1号～3号廃棄物埋設地で遜色なく、3号埋設設備における1基の大型化による大きな影響はない。

(iii) 敷地の効率利用の観点で、埋設設備を大型化し、廃棄物埋設地当たりの面積を小さくする。

各廃棄物埋設地の埋設設備表面積及び廃棄物埋設地面積を第2表に示す。

第1表 各埋設設備の廃棄体一本当たりの流出水量

廃棄物埋設地	廃棄体本数	流出水量(m ³ /y)		廃棄体一本当たりの流出水量(L/(y・本))	
		確からしい設定	厳しい設定	確からしい設定	厳しい設定
3号	211,200	1110	3790	5.3	17.9
1号	204,800	2660	3850	13.0	18.8
2号	207,360	1740	3930	8.4	19.0

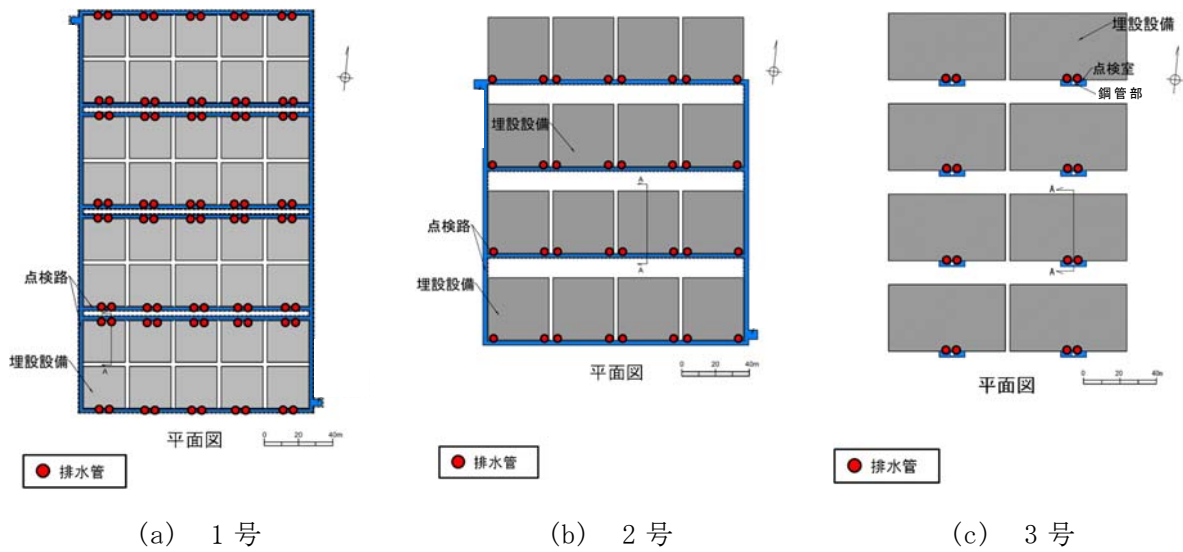
第2表 各廃棄物埋設地の埋設設備表面積及び廃棄物埋設地面積

	埋設設備表面積	廃棄物埋設地面積
3号	約 49,000m ²	約 34,000m ²
1号	約 70,000m ²	約 40,000m ²
2号	約 58,000m ²	約 41,000m ²

(4) 点検管及び点検路方式の選定

排水・監視設備に要求される排水管からの排水の回収作業に対して適切な方式を選定する。

3号廃棄物埋設地については、排水管位置が各埋設設備の中央に集約されることから、合理的に各埋設設備に独立した点検管方式を採用し、1号及び2号廃棄物埋設地については、排水管位置が多いことから、立坑を2箇所として、排水管位置をつなぐように点検路方式を採用する。各排水・監視設備の排水管位置図を第3図に示す。



第3図 排水・監視設備の排水管位置図

(5) 耐埋設荷重強度

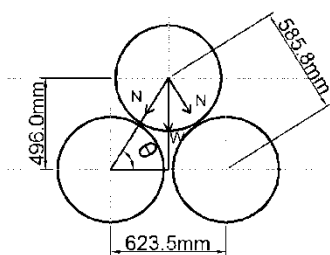
漏出防止機能に対する設計については、埋設設備内への定置及び充填が完了するまでに廃棄体から放射性廃棄物が漏出しないことが前提となっている。

廃棄体が埋設時に生じる荷重に耐える強度（以下「耐埋設荷重強度」という。）を有することを確認する。

ここでは、3号の10段積み为例に説明する。

(i) 俵積みによる荷重作用方向

廃棄体の自重は、俵積みで定置することにより、下部及び側部方向へ作用する。廃棄体間に作用する荷重の角度 θ を第4図に示す。



$$\theta = \tan^{-1}(496.0 / (623.5/2)) = 57.8^\circ$$

第4図 廃棄体間に作用する荷重の角度

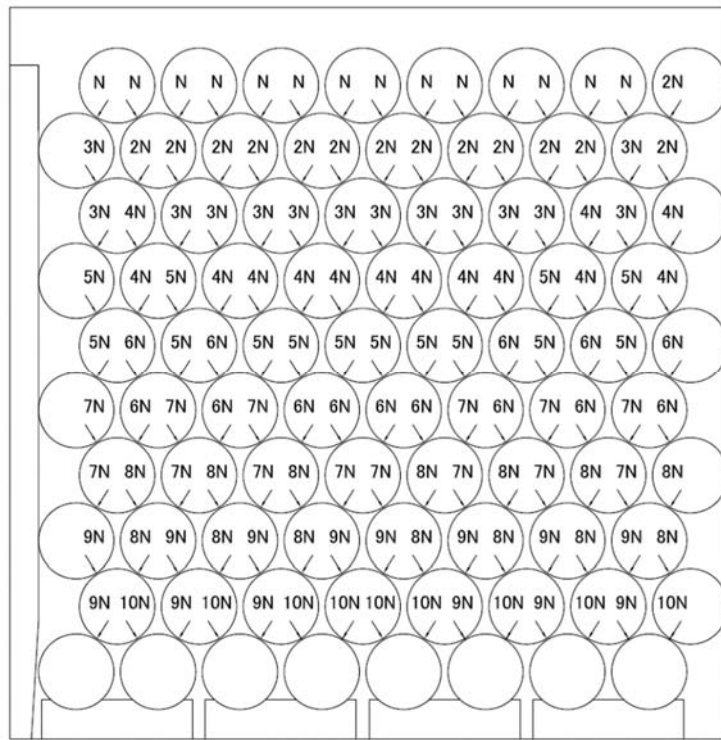
廃棄体重量 $W=1\text{t/本}$ のとき、角度 θ で作用する廃棄体荷重の分力 N を以下に示

す。

$$N = W / (2 \cdot \sin\theta)$$

$$= 0.591t$$

10 段積みした場合の廃棄体自重の分力分布を第 5 図に示す。



第 5 図 廃棄体自重分力分布図 (10 段積みの場合)

(ii) 廃棄体への最大荷重

廃棄体に作用する最大鉛直荷重を算出し、廃棄体が荷重に耐える強度を有することを確認する。

a. 廃棄体の自重による荷重

第 5 図より廃棄体の自重が最大となる箇所を選定し、その荷重 RF を以下に示す。

$$RF = 2 \times 10N \cdot \sin\theta + W$$

$$= 11t$$

b. 上載荷重 (1 号、2 号及び 3 号共通)

廃棄体へ作用する荷重として、最上段の廃棄体に対する上載荷重を 16t とす

る。

最上段の廃棄体 8 本に均等に作用するとし、2t/本とする。

以上の 2 つの荷重の合計 13t が、廃棄体に作用する最大の鉛直荷重となる。

同様に 1 号及び 2 号についても算出し、その結果を第 3 表に示す。

第 3 表 各埋設設備における廃棄体に作用する最大の鉛直荷重

対象埋設設備	廃棄体荷重 W (t/本)	定置段数	最大鉛直荷重 (t)
3 号	1.0	10	13.0
1 号	0.5	8	6.25
2 号	1.0	9	12.0

(iii) 耐埋設荷重強度

模擬廃棄体への載荷試験結果から、廃棄体の耐埋設荷重強度を設定する。載荷試験結果を第 4 表に示す。

第 4 表 模擬廃棄体への載荷試験結果

	均質・均一固化体* ¹	充填固化体* ²
対象埋設設備	1号	2号及び3号
模擬廃棄体条件	空ドラム缶 (JIS Z 1600 H級 (肉厚 1.6mm))	<ul style="list-style-type: none"> ・ 薄肉容器 (肉厚 0.8mm、形状は JIS Z 1600 1種のドラム缶と同じ) ・ 強度の低い廃棄物を内張り層なしで密収納 ・ 低強度モルタルと同様の材料及び配合の固型化材料を使用 ・ 上部空隙が 11%となるように充填 ・ 28日間養生
耐埋設荷重強度	8t	15t

*1：日本原燃株式会社（1992）：ドラム缶耐荷重試験概要

*2：北海道電力株式会社他（1999）：模擬充填固化体による載荷試験結果について

上記(i)～(iii)より、廃棄体に対して想定される最大荷重に対し、廃棄体の耐埋設荷重強度が高いことから、埋設する廃棄体は埋設荷重に耐える強度を持っていると評価する。

(6) セメント系充填材の厚さ

セメント系充填材は、漏出防止機能として充填性を、遮蔽機能として遮蔽性を有する廃棄体とポーラスコンクリート層の間の厚さを確保する。

3号埋設設備ではセメント系充填材の厚さを約20cmとしており、既設1号及び2号の約40cmと比べて薄くしている。

充填性について、廃棄体とポーラスコンクリート層の間の厚さが薄くなっても充填が可能な流動性(スランプフロー)を確保する。

遮蔽性について、本施設の作業手順として、最後に上面の覆いを設置することから、セメント系充填材の厚さを薄くした場合は、埋設設備上面の遮蔽条件への影響が大きい。したがって、最上段に定置する廃棄体の表面線量当量率は、1号及び2号埋設設備では2mSv/hを超えないものとしていたのに対し、3号埋設設備ではこれまでの埋設実績を踏まえ、0.3mSv/hを超えないものとしている。公衆の受ける線量はこれらを考慮して評価を行っており、基準を満足することを確認している。

また、移行抑制機能のうち収着性について、セメント系充填材の厚さの減少に伴い収着体積が減少するが、収着性を期待する全体積に対して大きな影響はないことを線量評価において確認している。

なお、漏出防止機能について、廃棄体とポーラスコンクリート層の間のセメント系充填材の箇所において仮に拡散又は移流によるトリチウムの移行を考慮しても、3号埋設設備に埋設する廃棄体に含まれるトリチウムの放射エネルギー(1.5×10¹³Bq)が既設1号(9.9×10¹³Bq)及び2号(1.2×10¹⁴Bq)に比べ少ないことから3号埋設設備でセメント系充填材の厚さが薄くなる場合の影響はない。

したがって、セメント系充填材の廃棄体とポーラスコンクリート層の間の厚さが約20cmとなっても、最上段に定置する廃棄体の表面線量当量率を0.3mSv/hに制限する対策を講じることにより、1号及び2号と同等の安全性を有すると評価した。

3. 第四紀層との隔離を安定的に確保する考え方

(1) 地下水の流れの一般的な知見

埋設設備設置地盤付近の間隙水圧測定結果及び広域的な地下水の流れの一般的な知見から、地下水が下向き成分を含む方向に流れている。これは広域的な地形的要因によるため、将来においても大まかな傾向は変わらないと考えられる。

(2) 覆土の構成

埋設設備から放射性物質が漏出した場合であっても、埋設設備底部から鷹架層中に移行させることで、地表近傍への放射性物質の移行を抑制できるよう、埋設設備の側面及び上部を難透水性覆土で覆う。また難透水性覆土の外側に下部覆土を設置し、下部覆土の上面に上部覆土を設置する。

これにより、埋設設備を通過した地下水は上方の第四紀層ではなく、下方の岩盤(鷹架層)へ向かって流れ、覆土による移行抑制機能について、流量が多い第四紀層との隔離を安定的に確保できる設計とする。

なお、覆土の透水係数は岩盤(鷹架層)相当以下にすることで、設備設置後も地下水が下方の岩盤(鷹架層)へ向かって流れる状況が保たれる。

(3) 覆土の機能維持

覆土に対する技術要件である透水特性(低透水性)を長期的に維持する上で考慮すべき技術要件には化学的安定性、変形追従性、液状化抵抗性がある。これらの要件に対して、覆土が部分的に性能劣化する不均質な状態も考慮して設計する。

設計方針を第5表に記載する。

第5表 技術要件と設計方針

技術要件	設計方針
化学的安定性	長期にわたり低透水性を維持する観点から、化学的安定性の高いと考えられる天然の土質材料を使用する。
変形追従性	覆土が力学的変形した場合においても、その変形に追従し、覆土全体として施設通過流量を増加させないよう多層構造とする。 また、長期な化学的影響及び力学的変形に対する難透水性覆土の性能については透水性能を低減させて評価している。
液状化抵抗性	難透水性覆土及び下部覆土については、材料にベントナイトを用いた覆土で、締め固めた土であるとともに、粒径分布に広がりを持った材料であることから、容易に液状化し難い設計とする。

また、上記の技術要件以外に、覆土の性能に影響する事項として、侵食、生物学的事象、地表からの化学影響及び熱影響、一般土地利用、覆土のすべり並びに廃棄物の重量による沈下についても考慮している。これらに対する設計方針を第6表に記載する。

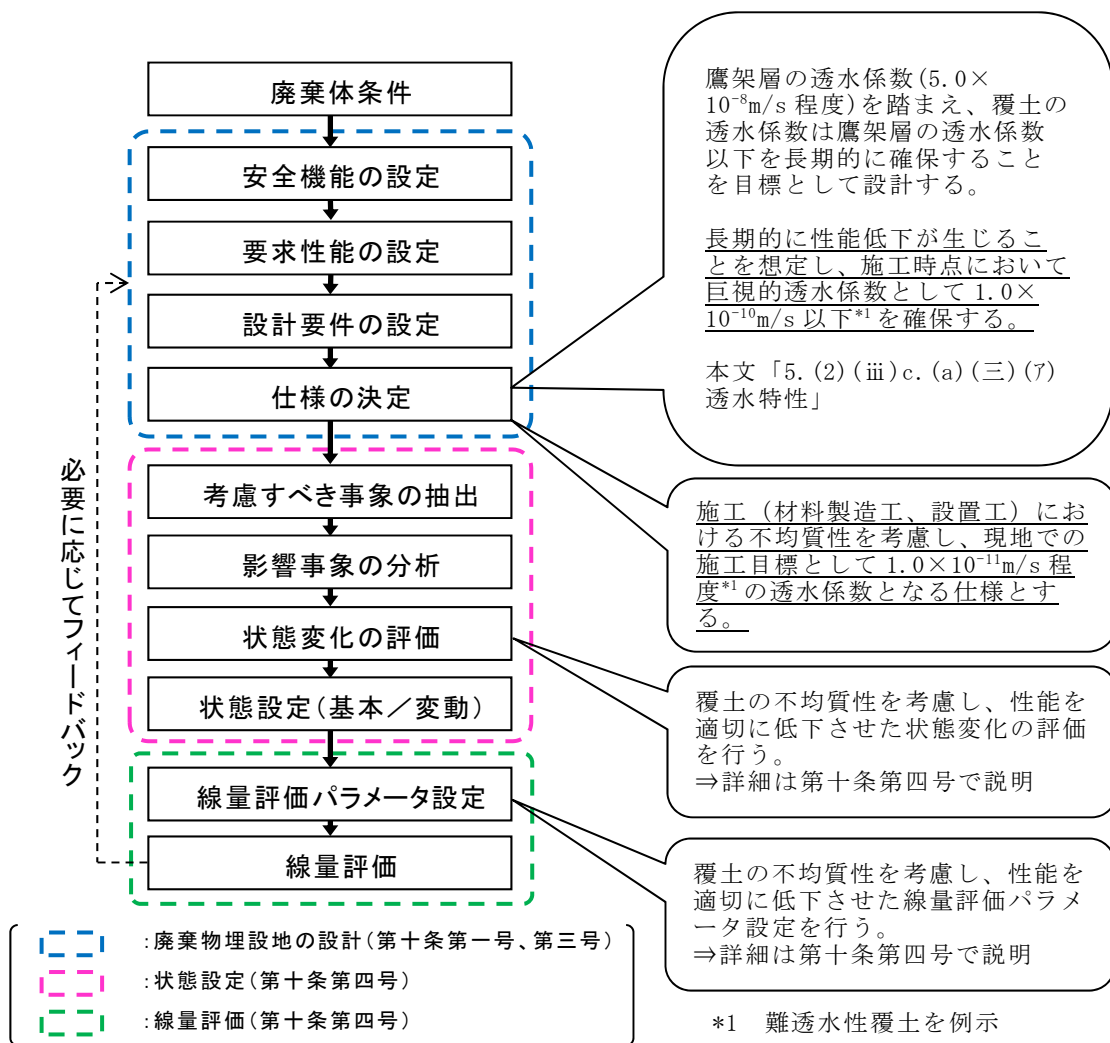
第6表 その他の考慮事項に対する設計方針

その他の 考慮事項	設計方針
侵食	敷地内の中央沢の枝沢からの侵食に対し、1万年後においても難透水性覆土が露呈しないよう設計する。
生物学的事象	樹木根及びモグラ類による影響に対し、十分な上部覆土の厚さを確保して設計する。
地表からの化学 影響（酸性雨）	地表からの化学影響として酸性雨に対するベントナイトの劣化影響を考慮し、十分な上部覆土の厚さを確保した設計とする。
地表からの熱影 響（火砕物密度 流）	地表からの熱影響として最も懸念される火砕物密度流に対する、ベントナイトの劣化影響を考慮し、十分な上部覆土の厚さを確保した設計とする。
一般土地利用	六ヶ所での一般的な土地利用による掘削を考慮し、十分な覆土の厚さを確保した設計とする。
覆土のすべり	廃棄物埋設地は、地すべり地形が判読されない安定した中位段丘面に設置する。また覆土は、埋設設備を設置するために掘削した領域を埋めて原形復旧した形状とし、覆土のすべりが生じない設計とする。
廃棄物の重量に よる沈下	埋設設備を、N値が50以上の十分な支持性能を有する岩盤に設置することにより、廃棄物の重量による埋設設備の沈下及びそれに伴う覆土の沈下が生じない設計とする。

(4) 覆土の不均質性に対する考え方

廃棄物埋設地の設計から線量評価に至るフロー及び覆土の不均質性に対する考慮事項について、第6図に示す。

廃棄物埋設地における覆土は、覆土材料自体のばらつき及び施工の不確実性に起因する不均質性を含んでいる。廃棄物埋設地の設計から線量評価に至るまでの間、覆土の不均質性については、設計における考慮及び評価における考慮を行っている。その評価結果によっては、必要に応じて設計にフィードバックを行うことで、覆土の不均質性を考慮した最適化された設計となっていると考える。



参考：土木学会、余裕深度処分安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方(2008)

第6図 廃棄物埋設地の設計から線量評価に至るフロー

技術要件における考え方

目 次

1. 埋設設備のコンクリートの低透水性	1
2. セメント系充填材の充填性	2
3. 埋設設備の力学的安定性	3
(1) 基本的考え方	3
(2) 設計基準強度設定経緯	3
4. 埋設設備及び排水・監視設備の耐久性	4
(1) 中性化	5
(2) 塩害	6
(3) 凍害	8
5. 埋設設備各部位の厚さ	11
6. 覆土の低透水性	11
7. 覆土の液状化抵抗性	12

参考資料 1 3号埋設設備の構造設計について

参考資料 2 想定される自然現象及び人為事象の選定について

参考資料 3 火山の影響について

1. 埋設設備のコンクリートの低透水性

緻密なコンクリートであることで外周仕切設備及び覆いの低透水性を達成する。

「コンクリート標準示方書(施工編)」⁽¹⁾によれば、水セメント比 55%以下であれば、一般のコンクリートとして求められる低透水性が確保できるとされている。

「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に示される水セメント比と透水係数の関係^{*1}を用いると、水セメント比 55%以下の場合、透水係数は $7.33 \times 10^{-11} \text{m/s}$ 以下と算出される。したがって、これと同等以下の透水係数であれば、低透水性を有すると判断できる。

本施設と同等のコンクリート配合では、第 1 表に示すとおり、その透水係数よりも小さい透水係数(「第十三条 廃棄施設」における放射性物質を含む排水量の算出において想定する $1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$)を達成できる見込みを得ている。

$$*1 : \log K = 4.3 \times W/C - 12.5$$

ここに、

K : コンクリートの透水係数 (m/s)

W/C : 水セメント(結合材)比

第 1 表 透水試験結果

対象イメージ	水結合材比	透水係数(m/s)
1号実績	55% ^{*1}	$2.75 \sim 4.74 \times 10^{-13}$
3号予定	47% ^{*2}	$2.84 \sim 3.28 \times 10^{-14}$

*1: 普通ポルトランドセメント 45%及び高炉スラグ微粉末 55%の混合セメント

*2: 中庸熟ポルトランドセメント 70%及びフライアッシュ 30%の混合セメント

したがって、「コンクリート標準示方書(施工編)」⁽¹⁾の記載に従い、水結合材比 55%以下とすることで外周仕切設備及び覆いの低透水性を確保する設計とする。

埋設設備のうち漏出防止機能を有するコンクリート構造物に対する設計、材料の選定、建設・施工及び検査は、「コンクリート標準示方書(設計編及び施工編)」⁽¹⁾⁽²⁾に基づくものとしている。「コンクリート標準示方書(施工編)」⁽¹⁾の施工標準 4 章配合設計においては、劣化抵抗性や物質透過性を考慮してコンクリートの単位水量の上限が

175kg/m³とされている。現在想定する配合(第2表参照)では単位水量はその上限を超えないものである。

第2表 外周仕切設備及び覆いの配合例

水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)				
	水	結合材*3	混和材*1	細骨材*2	粗骨材
47	155	333	60	729	1019

*1：石灰石微粉末

*2：陸砂と砕砂の混合品

*3：中庸熟ポルトランドセメント70%及びフライアッシュ30%の混合セメントとし、必要に応じて膨張材を置換する。また、施工時には所定のフレッシュ性状確保のため結合材料に比例して混和剤を添加する。

なお、埋設設備が漏出防止機能を達成するためには合わせてひび割れも考慮する必要がある。ひび割れ抑制については、添付資料4「2.(2) 最大ひび割れ幅の設計目標値の設定」に示す。

2. セメント系充填材の充填性

埋設設備内に有害な空隙を生じさせないことを達成するため、セメント系充填材の流動性を設定するものとする。第1図に示すとおり、高流動コンクリートの配合設計・施工指針を参考とし、高い自己充填性を要求するコンクリートとして自己充填性のランクを「1」とした際のスランプフローの目標値から、充填性を必要とする部材のスランプフローは65cm以上とする。

高流動コンクリートの自己充填性のランクと構造物の条件

自己充填性のランク	1	2	3
鋼材の最小あき (mm)	35~60 程度	60~200 程度	200 程度以上
主な対象構造物	高密度配筋部材、複雑・異形型枠を使用した構造物	通常の RC 構造物や複合構造物	配筋量の少ないマスコンクリート構造物や無筋構造物

自己充填性のランクと各評価試験の目標値の目安

自己充填性のランク		1	2	3
ボックス形またはU形充填高さ (mm)		300 以上 (障害 R 1)	300 以上 (障害 R 2)	300 以上 (障害なし)
目 標 値	スランプフロー*1 (mm)	700	650	600
	500 mm フロー到達時間の範囲** (秒)	5~20	3~15	3~15
	V ₅ 漏斗または O 漏斗の流下時間の範囲** (秒)	9~20	7~13	4~11

*1 過去の実績におけるスランプフロー目標値の一般的な範囲は、ランク 1：650~750 mm、ランク 2：600~700 mm、ランク 3：550~650 mm である。

*2 過去の実績における評価試験目標値の一般的な範囲を示す。

第 1 図 自己充填性のランクとスランプフロー目標値

3. 埋設設備の力学的安定性

(1) 基本的考え方

埋設設備の構造設計にあたっては、必要な構造強度を有することを達成するため、おおむね弾性範囲となる設計を行う。

設計にあたっては、構造物の各部材に生じる作用力や応力度を弾性理論により計算する許容応力度設計法にて構造計算を実施し、構造性能の照査を実施するものとする。構造計算結果より、力学的安定性を必要とする部材のコンクリート圧縮強度、鉄筋強度及び厚さを決定する。

なお、対象となる荷重は、建設・操業段階における作業に伴って発生するもの、地震を含む自然現象によるものとして適切に設定する。建設・操業段階における作業に伴うものは自重、廃棄体荷重、セメント系充填材打込み時の側圧、土圧、水圧、覆土荷重及び地表の上載荷重とする。地震を含む自然現象によるものは、地震(耐震重要分類 C クラス)、風、積雪及び降下火砕物とする。

構造計算については、参考資料 1「3号埋設設備の構造設計について」にて詳細説明する。

(2) 設計基準強度設定経緯

外周仕切設備、内部仕切設備、覆い及び点検管(点検路)の力学的安定性に係る設計については、検討開始当時における「埋設告示」を基に設計基準強度 24.6N/mm²を前提として検討を実施した。

コンクリート仮蓋については、一般のコンクリート構造物として扱い、計画供用

年数を標準として 24.0N/mm² を前提として検討を実施した。

どちらにおいても、力学的安定性を構造計算により評価し、必要な性能を有することを確認している。

4. 埋設設備及び排水・監視設備の耐久性

供用期間中、埋設設備及び排水・監視設備が劣化抵抗性を有することを確認するため、コンクリート標準示方書(設計編)⁽²⁾の標準2編3章の耐久性照査の項目を参考に照査を実施する。ここでは、部材のうち暴露期間の長い外周仕切設備及び覆いの照査を示す。コンクリート標準示方書(設計編)⁽²⁾に示される照査の項目は以下の観点から対象を選定する。

- ・鋼材腐食に対するひび割れ幅の評価については、外周仕切設備及び覆いにおいて最大ひび割れ幅の設計目標値を 0.1mm としていることから対象外とする。
- ・化学的侵食に対する照査については、立地条件及び使用状況から侵食性物質が周囲にないことから対象外とする。

したがって、耐久性照査の対象を中性化、塩害及び凍害とする。

コンクリートの配合は、各要求機能を満足する設計とし、以降の耐久性照査は、第3表に示す配合を使用する。

第3表 外周仕切設備及び覆いの配合例

照査用配合					
水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)				
	水	結合材*3	混和材*1	細骨材*2	粗骨材
47	155	333	60	729	1019

*1：石灰石微粉末

*2：陸砂と砕砂の混合品

*3：中庸熱ポルトランドセメント70%及びフライアッシュ30%の混合セメントとし、必要に応じて膨張材を置換する。また、施工時には所定のフレッシュ性状確保のため結合材料に比例して混和剤を添加する。

(1) 中性化

中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査は中性化深さをを用いて行う。中性化深さが設計耐用期間中に鋼材腐食発生限界深さに達しないことを確認することで、鋼材腐食に対する照査とする。ここでいう供用期間は、廃棄体の受入れの開始から覆土完了までの間とし第4表に示す。

中性化に伴う鋼材腐食に対する照査は、中性化深さの設計値 y_d の鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行う。

中性化深さの設計値 y_d を第5表に示す。中性化深さの設計値 y_d は安全係数を 1.15、コンクリートの材料係数を 1.0(側壁)及び 1.3(覆い)、中性化速度係数を配合に応じた設定として算出する。

鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} を第6表に示す。鋼材腐食発生限界深さ y_{lim} は設計かぶりを 75mm、施工誤差を 10mm、中性化残りを 10mm として算出する。

照査結果を第7表に示す。照査結果は、判定値 1.0 以下であり、中性化深さが供用期間中に鋼材腐食発生限界深さに達しないことから、中性化に対する劣化抵抗性を有する。

第4表 供用期間及び耐用年数

供用期間	27年
耐用年数 t	30年

第5表 中性化深さの設計値

部材	γ_i	γ_{cb}	α_k	β_e	γ_c	y_d
側壁	1.0	1.15	2.42	1.6	1.0	24.4
覆い	1.0	1.15	2.42	1.6	1.3	31.7

第 6 表 鋼材腐食発生限界深さ

(単位:mm)	設計かぶり	施工誤差	中性化残り	y_{lim}
側壁	75	10	10	55
覆い	75	10	10	55

第 7 表 中性化の照査

部材	y_d/y_{lim}	判定
側壁	0.44	≤ 1.0 OK
覆い	0.58	≤ 1.0 OK

γ_i : 構造物係数(1.0:健全性評価のため)

y_{lim} : 鋼材腐食発生限界深さ(mm)

(施工誤差などを考慮したかぶり:設計かぶり-施工誤差 10mm-中性化残り 10mm)

y_d : 中性化深さの設計値(mm)

$$y_d = \gamma_{cb} \cdot \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \cdot \sqrt{t}$$

α_k : 中性化速度係数の特性値 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \cdot W/B$$

W/B : 有効水結合材比

フライアッシュ使用の場合: 単位水量/ポルトランドセメント量

β_e : 環境作用の程度を表す係数(1.6:乾燥しやすい環境)

γ_c : コンクリートの材料係数(覆い上面 1.3、外壁 1.0)

γ_{cb} : 中性化深さの設計値のばらつきを考慮した安全係数(一般に 1.15)

t : 中性化に対する耐用年数(供用期間に対し保守的に設定)

(2) 塩害

埋設設備は、海岸から約 3km に位置している。コンクリート標準示方書(設計編)⁽²⁾には、一般に海岸から 1.0km 以上離れている場合は、構造物に塩分が飛来しない条件とあり、海岸からの距離とコンクリート表面塩化物イオン濃度の関係(第 8 表)では海岸から 1km の距離での値までしか示されていない。したがって、埋設設備は、

外部から塩害の影響を受けない環境であり、埋設設備に対して塩害の影響はない。

(参考)

埋設設備の重要性を考慮し、海岸 3km の位置における塩害による影響の可能性を念のため確認する。

本施設が海岸から約 3km に位置することを加味し、コンクリート表面塩化物イオン濃度の設計値 C_o の鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比が、1.0 以下であることを確認する。

塩化物イオン濃度の設計値 C_d は、埋設設備が海岸から約 3km に位置することから、コンクリート標準示方書(設計編)⁽²⁾で示される第 8 表のうち、最も海岸から距離の遠い 1.0km の値を採用し、飛来塩分濃度 1.5kg/m^3 とする。

鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} を第 9 表に、確認結果を第 10 表に示す。確認結果は、判定値 1.0 以下であり、コンクリート表面塩化物イオン濃度の設計値が鋼材腐食発生限界濃度に達しないことから、塩害の影響はない。

第 8 表 コンクリート表面塩化物イオン濃度 $C_o(\text{kg/m}^3)$

		飛沫帯	海岸からの距離				
			汀線付近	0.1km	0.25km	0.5km	1.0km
飛来塩分が多い地域	北海道、東北、北陸、沖縄	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域	関東、東海、近畿、中国、四国、九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

第 9 表 鋼材腐食発生限界濃度

W(水)	C(セメント)	C_{lim} (kg/m ³)
155	333	1.87

C_{lim} : 鋼材腐食発生限界濃度 (kg/m³)

以下の式を用いて定めてよい。(高炉セメント B 種相当、フライアッシュセメント B 種相当を使用する場合)*¹

$$C_{lim} = -2.6(W/C) + 3.1$$

*1 : 想定している配合はフライアッシュ置換率 30%であるが、フライアッシュ置換率が 15%と 30%の場合を比較しても鋼材腐食発生限界濃度に大きな差がないとの知見*²があることから本式を適用する。

*2 : 角型供試体に対して室内塩分浸漬試験を行い、コンクリートの配合が異なる場合の腐食発生限界塩化物イオン濃度を算出したものである。室内試験による算出結果であるため、フライアッシュ置換率による腐食発生限界濃度への影響の傾向を把握できるものと考えている。

(古村、杉山(2012) : フライアッシュコンクリート中の腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する実験的考察、コンクリート工学年次論文集、Vol. 34、No. 1)

第 10 表 塩害の照査

部材	C_o / C_{lim}	判定
側壁	0.80	≤ 1.0 OK
覆い	0.80	≤ 1.0 OK

(3) 凍害

凍害に対する照査は、内部損傷と表面損傷(スケーリング)に対する照査に分けて行う。

(i) 内部損傷

内部損傷に対する照査は、構造物内部のコンクリートが劣化を受けた場合に関して、凍結融解試験における相対動弾性係数の最小限界値 E_{min} とその設計値 E_d の比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることにより行

う。

凍結融解試験における相対動弾性係数の設計値 E_d を第 11 表に示す。凍結融解試験における相対動弾性係数の設計値 E_d は、凍結融解試験における相対動弾性係数の特性値をコンクリートの材料係数で除した値である。凍結融解試験における相対動弾性係数の特性値 E_k は、水結合材比率が 55% 以下であることから第 12 表より 85%、コンクリートの材料係数 γ_c は 1.0 (側壁) 及び 1.3 (覆い) として算出する。

凍結融解試験における相対動弾性係数の最小限界値 E_{min} は、部材の凍結融解がしばしば繰り返され、露出状況にあり、断面厚さが一般であることから、第 13 表より 60% とする。

照査結果を第 14 表に示す。照査結果は、判定値 1.0 以下であり、内部損傷が構造物の性能に影響を与えないことから、内部損傷に対する劣化抵抗性を有する。

第 11 表 凍結融解試験における相対動弾性係数の設計値 E_d

部材	E_k	γ_c	E_d
側壁	85	1.0	85
覆い	85	1.3	65.4

第 12 表 コンクリートの凍結融解試験における相対動弾性係数とそれを満足するための水結合材比 (%)

	水結合材比 (%)			
	65	60	55	45 以下
凍結融解試験における相対動弾性係数 (%)	60	70	85	90

第 13 表 凍害に関するコンクリート構造物の性能を満足するための
凍結融解試験結果における相対動弾性係数の最小限界値 E_{min} (%)

	凍結融解がしばしば繰り返される場合		氷点下の気温となることがまれな場合	
	薄い	一般	薄い	一般
(1)連続してあるいはしばしば水で飽和される場合	85	70	85	60
(2)普通の露出状況であり(1)に属さない場合	70	60	70	60

第 14 表 内部損傷の照査

部材	E_{min}/E_d	判定
側壁	0.71	≤ 1.0 OK
覆い	0.92	≤ 1.0 OK

(ii) 表面損傷(スケーリング)

一般に、表面損傷(スケーリング)に対する照査は、構造物表面のコンクリートが劣化を受けた場合に関して、コンクリートのスケーリング量の設計値とその限界値の比に構造物係数を乗じた値が、1.0 以下であることの確認が行われる。コンクリートのスケーリングは、我が国では海水の影響のある海岸構造物や凍結防止剤を散布する道路構造物で問題となっている。

埋設設備は、海水の影響のある海岸構造物や凍結防止剤を散布する道路構造物でないため、スケーリング量の設計値は僅かな値にとどまり、表面損傷が構造物の性能に影響を与えないことから、内部損傷に対する劣化抵抗性を有する設計とする。

なお、スケーリングやポップアウトといった表面に表れる損傷については、構造物の性能に有意な影響がでないよう、適切に保修を実施する。

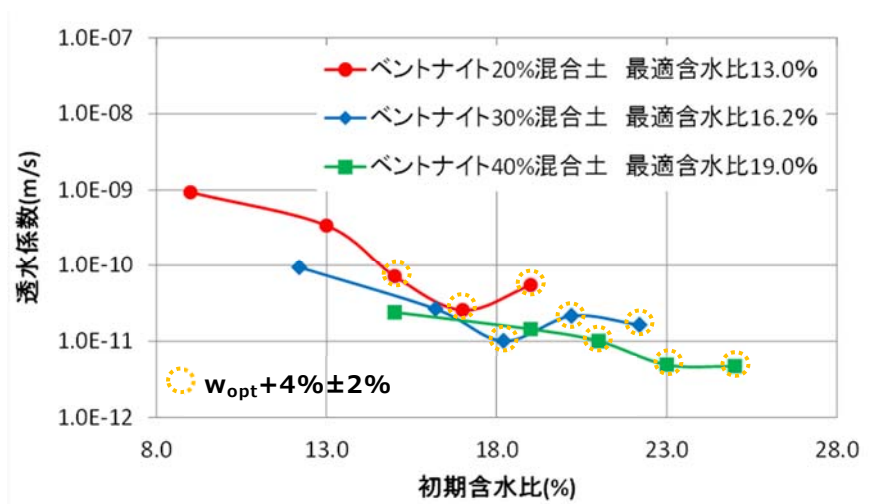
5. 埋設設備各部位の厚さ

埋設設備の各部位の厚さ(寸法)は、設計値として各評価等に用いている。施工時における寸法の許容誤差は、コンクリート標準示方書(施工編)⁽¹⁾においては構造物の種類や重要度によって異なるとされていることから、本施設の特徴を考慮し、JASS5N「原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事」を参照し設定する。

6. 覆土の低透水性

十分な低透水性を有することを達成するため、難透水性覆土及び下部覆土は、設計透水係数及び設計厚さを確保するものとする。

ベントナイト(クニボンド相当)を使用したベントナイト混合土で構成される難透水性覆土を対象に、ベントナイト混合率及び含水比をパラメータスタディした透水試験(地盤工学会基準 JGS 0312-2018 相当)の結果を第2図に示す。透水係数と含水比の関係において、その曲線の極小を生じる含水比は、一般に最適含水比よりわずかに高い含水比になることで知られており⁽³⁾、本試験結果においても同様の傾向を確認できる。最適含水比(w_{opt})+2%~6%において相対的に透水係数が低く、ベントナイト混合土を20%以上混合し、含水比を最適含水比(w_{opt})+4%±2%の範囲内とすれば、設計透水係数 $k=1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ を確保できる。よって、低透水性を必要とする難透水性覆土のベントナイト混合率は20%~30%程度とする。



第2図 ベントナイト混合率ごとの含水比と透水係数の関係

7. 覆土の液状化抵抗性

液状化抵抗性を確認するための液状化判定方法が各種提唱されており、それらは地盤の材料特性（粒度、密度及び液状化強度）をパラメータとして用いている。しかしながら、覆土材料は、材料調達状況を考慮した実際の覆土施工時に行う施工試験結果を踏まえて、材料及び施工のばらつきを考慮して最終決定する。そのため、過去の液状化対策事例を参照し、覆土の液状化抵抗性を評価する。

過去の液状化対策事例として、平成 19 年新潟県中越沖地震において、管理値（締固め度 90%以上）を設定し、埋戻し土（砂、砂質土）の締固めによる対策を実施した箇所では、震度 6 弱が発生しているものの、液状化被害は生じていないと報告されている⁽⁴⁾。

廃棄物埋設地においても、覆土施工における管理値を同等以上に設定する。

覆土は、現地発生土、購入砂、ベントナイト及び礫を仕様に応じて混合した混合土であり、一般に液状化しやすいと知られている「砂分を多く含む、粒度分布が偏った土砂」ではない。過去の液状化対策事例において液状化をしていない箇所で使用されている砂及び砂質土（第 3 図に粒径加積曲線を示す）と比較して、覆土は、液状化抵抗性に関連する締固め性能が良いとされている「粒径分布に広がりを持った材料」であるため、相対的に液状化し難い材料であると判断される。

廃棄物埋設地で発生すると考えられる地震は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号（廃止措置の開始後の評価）、補足説明資料 1 地質環境に係る長期変動事象

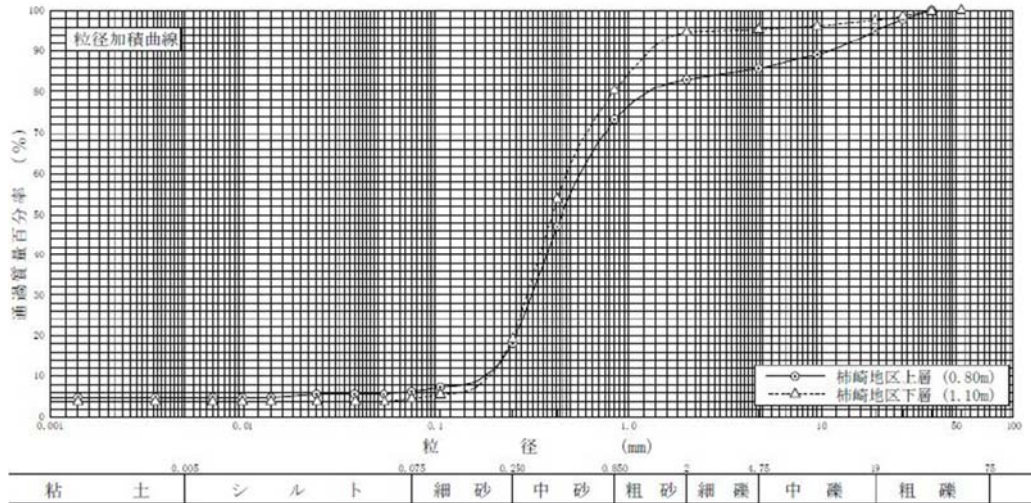
3. (1) (ii) a. 地震」より震度 5 強を超えないため、過去事例における締固めによる対策を実施した箇所で発生した地震より小さい。

以上のことから、廃棄物埋設地で発生する地震に対して、覆土は液状化抵抗性があり、液状化は生じないと考えられる。覆土材料を確定させる際には、道路土工⁽⁵⁾における液状化判定の引用元である道路橋示方書⁽⁶⁾に示されるような液状化判定法による確認を実施する。

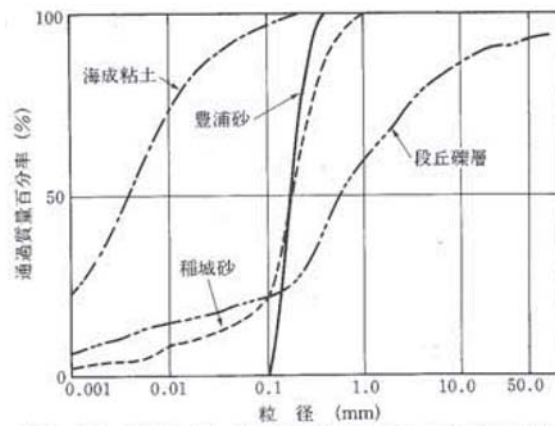
なお、「許可基準規則解釈第 10 条第 1 項に関する補足説明、添付資料 3、1. 覆土の施工実現性」で参照している河川土工マニュアル⁽⁷⁾は大雨に伴う洪水に対する土構造物の低透水性及び耐久性に着目しているため、地震に対する土構造物の液状化判定について詳述はないことから、力学特性として地震時安定性照査が示されている道路土工⁽⁵⁾及び道路橋示方書⁽⁶⁾を液状化判定の参考とした。

参考として、第 4 図に覆土材料として想定している購入砂、ベントナイト及び礫と

同等な材料として、豊浦砂、海成粘土、段丘礫層の粒形加積曲線の例⁽⁸⁾を示す。これらの材料を混合し覆土を製造することから、購入砂単体と比較し、粒度分布に広がりを持つ液状化し難い材料であると考えられる。



第3図 過去の液状化対策事例に用いている埋戻し土(砂、砂質土)の粒径加積曲線⁽⁴⁾



第4図 代表的な土の粒径加積曲線の例⁽⁸⁾

参考文献

- (1) (公社)土木学会(2018)：2017年制定コンクリート標準示方書(施工編)
- (2) (公社)土木学会(2018)：2017年制定コンクリート標準示方書(設計編)
- (3) (社法)土質工学会(1991)：土の締固めと管理
- (4) 下水道地震対策技術検討委員会(2008)：下水道地震対策技術検討委員会報告書
- (5) (公社)日本道路協会(2012)：道路土工-軟弱地盤対策工指針
- (6) (公社)日本道路協会(2017)：道路橋示方書・同解説(V耐震設計編)
- (7) (財法)国土技術研究センター(2009)：河川土工マニュアル
- (8) (社法)地盤工学会(2009)：地盤材料試験の方法と解説

3 号埋設設備の構造設計について

目 次

1. はじめに.....	1
2. 漏出防止設計の基本方針.....	1
(1) 基本方針.....	1
(2) 設備の概要.....	1
(3) 準拠する指針類.....	2
3. 埋設設備の設計.....	3
(1) 設計方針.....	3
(2) 計算モデル.....	3
(3) 照査ケース.....	6
(4) 荷重条件.....	8
(5) 作用荷重.....	10
(6) 荷重の組合せ.....	11
(7) 計算結果.....	16

1. はじめに

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第十条(廃棄物埋設地)のうち構造設計について説明する。具体的には、埋設設備の準拠する指針類、設計方針、計算モデル、照査ケース、荷重条件、作用荷重、荷重の組合せ、各設備の構造について説明する。

2. 漏出防止設計の基本方針

(1) 基本方針

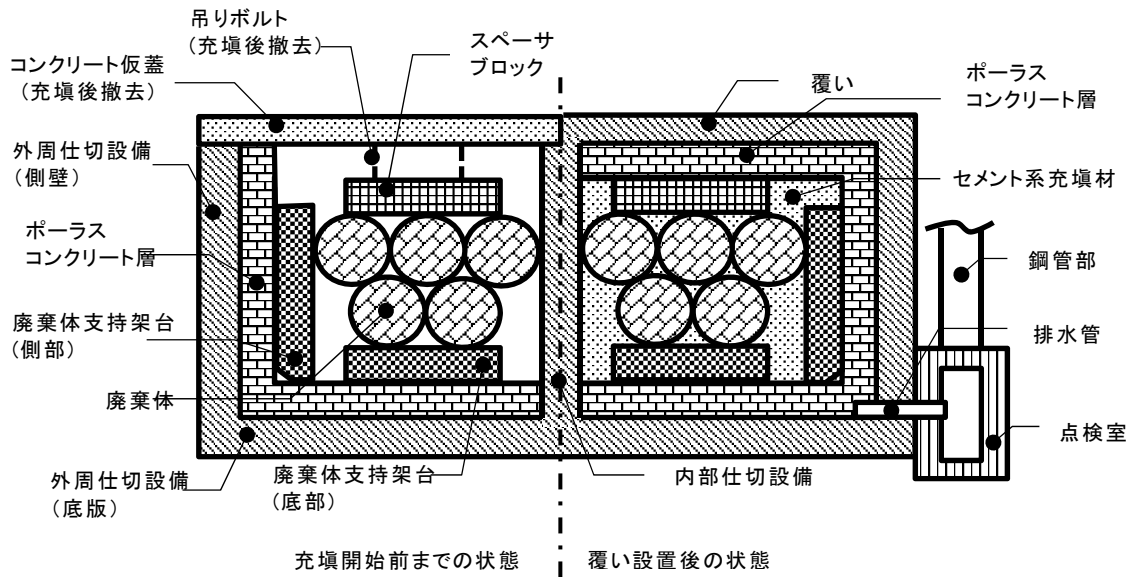
埋設設備のうち外周仕切設備、セメント系充填材、覆い及び内部防水並びに排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、廃棄物埋設地の限定された区域(埋設設備)からの放射性物質の漏出を防止する機能を有する設計とする。

(2) 設備の概要

埋設設備の概要図を第1図に示す。

埋設設備は、外周仕切設備、内部仕切設備、廃棄体支持架台、セメント系充填材、覆い及びコンクリート仮蓋からなるコンクリート構造物並びに内部防水により構成する。排水・監視設備はポーラスコンクリート層、排水管、点検管及び点検室で構成され、ポーラスコンクリート層は外周仕切設備及び覆いの内側の面に設置する。スペーサブロック及び吊りボルトは、セメント系充填材を充填したときの廃棄体の浮き上がりを防止するために設置するものであり、セメント系充填材を充填後に吊りボルトは撤去する。

ここでは、漏出防止及び遮蔽の機能を確保するために構造上の安定性を必要とする設備として、埋設設備の外周仕切設備、内部仕切設備、覆いの構造安定性について、設計方針、計算モデル、照査ケース、荷重条件、作用荷重、荷重の組合せ、各設備の構造を説明する。



第 1 図 埋設設備概要図

(3) 準拠する指針類

埋設設備は、以下に示す指針を基本に、必要に応じて選定した指針に基づき設計する。

- ・「コンクリート標準示方書（構造性能照査編）」（2002 年制定(社)土木学会）
（以下「コン示 2002」という。）
- ・「道路橋示方書・同解説 I 共通編」（平成 29 年 11 月(社)日本道路協会）
（以下「道示 I」という。）
- ・「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」（平成 29 年 11 月(社)日本道路協会）
（以下「道示 V」という。）
- ・「水道施設耐震工法指針・解説」（2009 年版(社)日本水道協会）
（以下「水道指針」という。）
- ・「コンクリート標準示方書（設計編）」（2017 年制定(公社)土木学会）
（以下「コン示 2017」という。）
- ・「青森県建築基準法施行細則」

なお、コンクリート標準示方書構造性能照査編 2002 年版については、限界状態設計がベースとなっていることから、許容応力度設計に関する箇所を用いることとし

ている。

3. 埋設設備の設計

(1) 設計方針

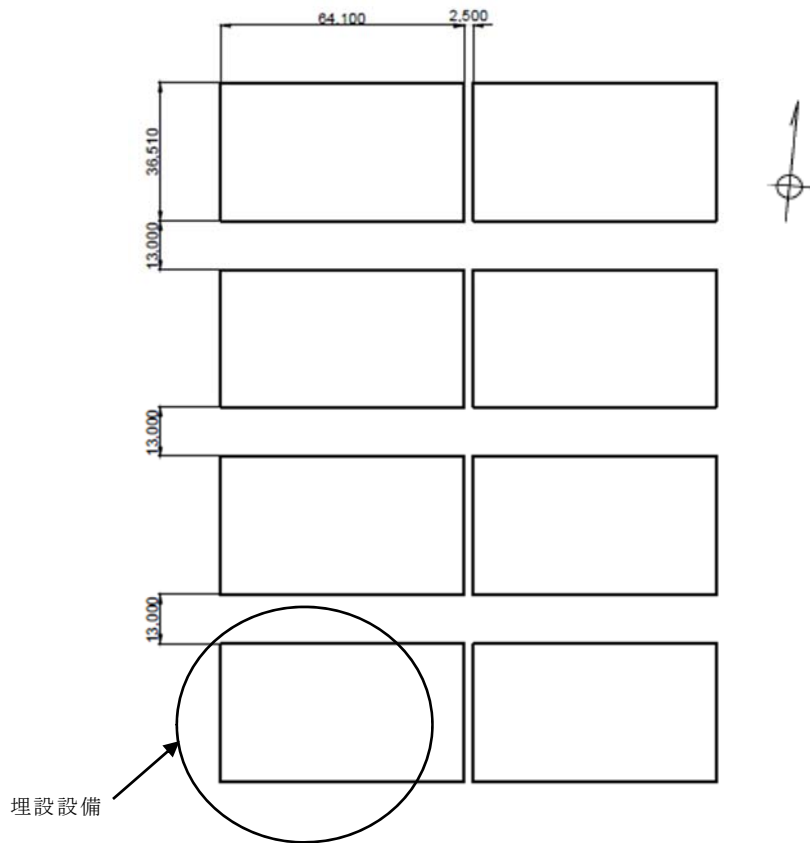
埋設設備の作業中の主な状態について、ピットの構造部位ごとに構造と荷重状態を想定し、許容応力度法による照査で構造安定性を確認する。

(2) 計算モデル

埋設設備は、鉄筋コンクリートによる外周仕切設備、内部仕切設備及び覆いにより構成され、内部は内部仕切設備により3号は66区画に区画される。各区画内には、廃棄体を定置した後、セメント系充填材として普通モルタルを充填し、有害な空隙が残らないようにするとともに、外周仕切設備及び覆いと廃棄体の間にはホワイトゾーンとして、普通モルタルの層を200mm設置する。

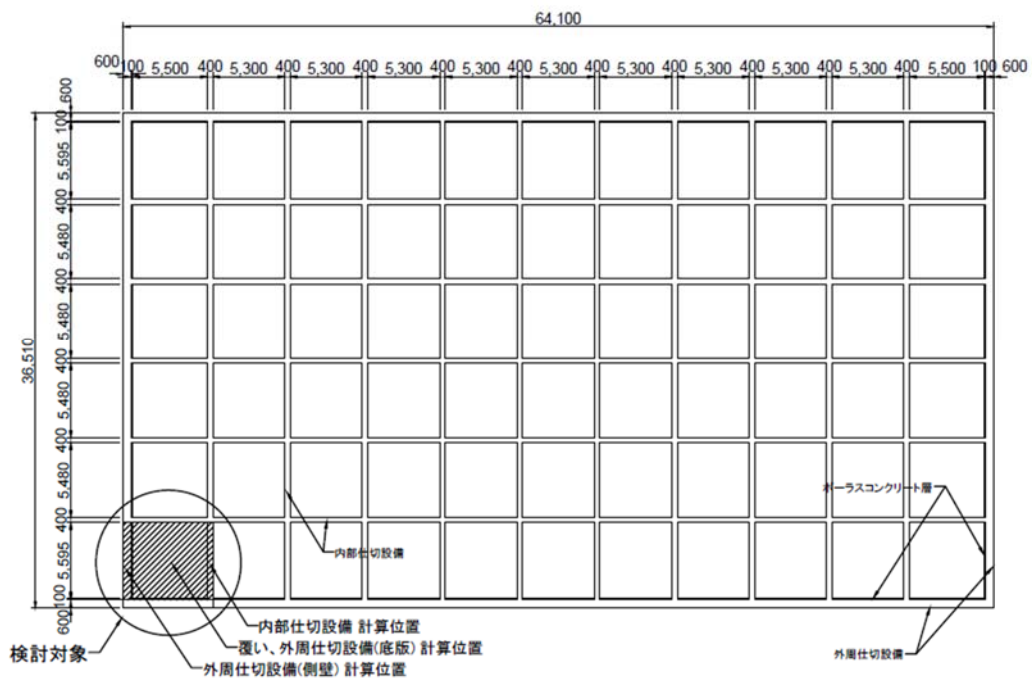
また、排水・監視設備として、外周仕切設備及び覆いとホワイトゾーンとの間に十分な集水機能を有する厚さ100mmのポーラスコンクリート層を設置する。

埋設設備の計算位置は、第2図に示すとおり、埋設設備の区画のうちスパンが最も大きい隅角部の区画を検討対象とする。埋設設備の検討対象区画の平面図及び断面図を第2図に示す。

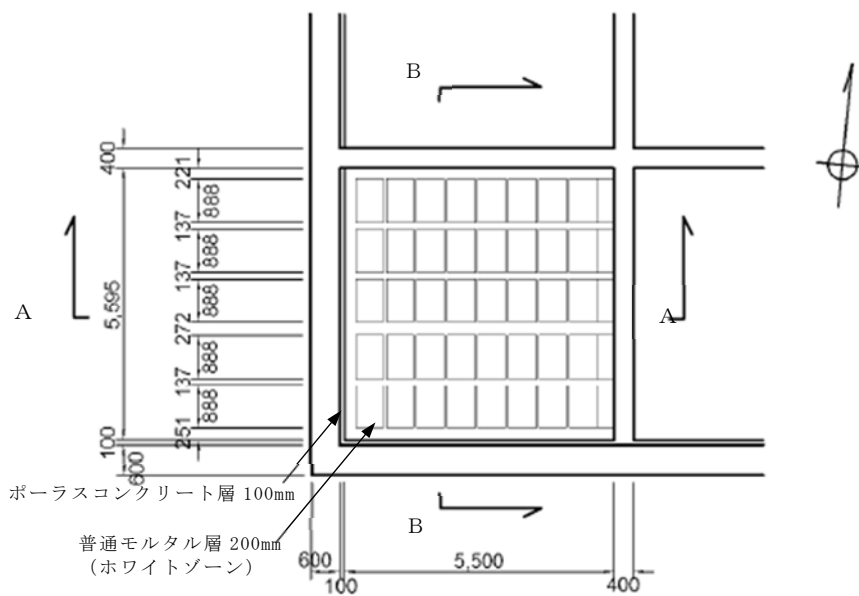


(a) 埋設設備平面図

第 2 図 検討対象区画の平面図・断面図(1/3)

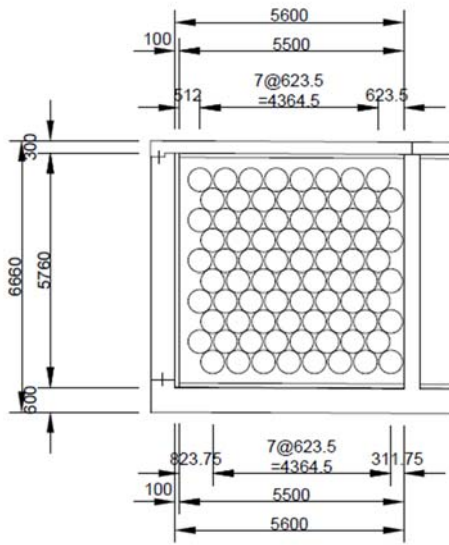


(b)埋設設備拡大平面図

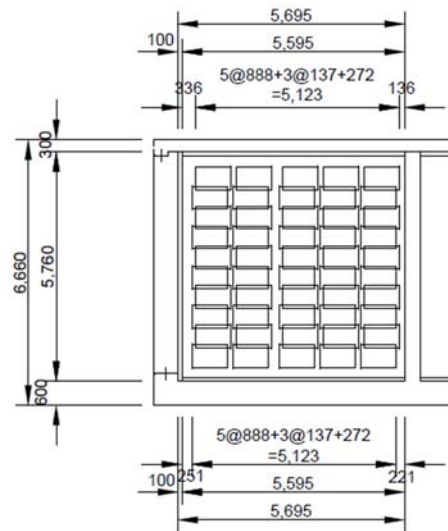


(c)検討対象平面図

第 2 図 検討対象区画の平面図・断面図 (2/3)



(d) A-A 断面図（東西方向）



(e) B-B 断面図（南北方向）

第 2 図 検討対象区画の平面図・断面図 (3/3)

(3) 照査ケース

照査ケースを第 1 表に示す。照査対照部位は、外周仕切設備側壁、外周仕切設備底版、内部仕切設備、覆い、埋設設備全体とする。ただし、覆いは埋設設備全体として照査するため省略する。

埋設設備の状態については、施設の操業中の主な状態について構造と荷重状態を想定し、廃棄体定置時、モルタル充填時、覆土前、覆土後に区分し、許容応力度法により部位ごとに照査する。

具体的には、廃棄体定置時、モルタル充填時については、作用荷重を想定し、外周仕切設備側壁、内部仕切設備、外周仕切設備底版のそれぞれについて面外荷重を受ける版としてモデル化し、断面力を算出、鉄筋コンクリート部材として許容応力度法による照査を行う。状態設定として、廃棄体定置時、モルタル充填時は施工期間が短期であるため常時のみ考慮する。

覆土前、覆土後については、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い、セメント系充填材の層、ポーラスコンクリート層及び廃棄体層からなる断面を 2 次元 FEM により、静的応力解析を行い、常時及び地震時を考慮する。地震力は、第四条（地震による損傷の防止）より、廃棄物埋設施設の耐震重要度分類を C クラスとし設計水平震度

$K_H=0.2$ とする。

第 1 表 照査ケース

	部位	ケース	廃棄体 定置時	モルタル 充填時	覆土前	覆土後	
埋設設備	外周仕切設備 側壁	常時	○	○			
		地震時					
	外周仕切設備 底版	常時	○	○			
		地震時					
	内部仕切設備	常時	○	○			
		地震時					
	覆い	常時					
		地震時					
	埋設設備全体	常時				○	○
		地震時				○	○

凡例：○は照査ケース、網かけは照査ケース外

(i) 廃棄体定置時

外周仕切設備底版、外周仕切設備側壁、内部仕切設備の構築完了後、各区画への廃棄体の定置が完了した状態とする。廃棄体定置後は短期間で充填され、その状態が存続する期間が短いため、常時は短期の許容応力度で照査し地震時を考慮しない。

(ii) モルタル充填時

廃棄体の定置が完了した区画にモルタルを充填し、ピット上部まで充填が完了した状態とする。充填は短期間であるため、常時は短期の許容応力度で照査し地震時を考慮しない。

(iii) 覆土前

全ての区画において廃棄体定置、モルタル充填、覆いの施工が完了し、覆土の施工のみが待たれる状態とする。この状態は長期間継続する可能性があるため、常時及び地震時の荷重状態を考慮する。常時は長期の許容応力度、地震時は短期の許容応力度で照査する。

(iv) 覆土後

全ての区画において廃棄体の定置、モルタル充填、覆い、覆土の施工が完了し、地下水が回復した状態とする。この状態は長期間継続するため、常時及び地震時の荷重状態を考慮する。常時は長期の許容応力度、地震時は短期の許容応力度で照査する。

(4) 荷重条件

(i) 重量

a. 廃棄体重量

設計に用いる廃棄体重量を第2表に示す。

第2表 廃棄体重量

材料	廃棄体重量 (kN/本)	備考
廃棄体 (最大)	9.81	
廃棄体 (最小)	2.26	浮力考慮

(ii) 許容応力度

a. 許容応力度

使用材料の許容応力度を第3表に示す。

第3表 許容応力度

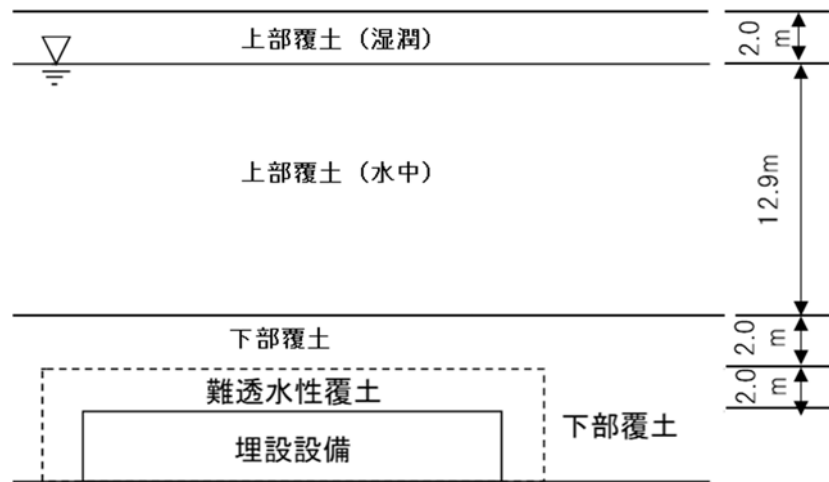
部材	応力度の種類		許容応力度 (N/mm ²)	備考
コンクリート 設計基準強度 24.6N/mm ²	曲げ	長期	9.20	*1
		短期	13.8	*1
	せん断	長期	0.455	*1
		短期	0.683	*1
鉄筋 SD345	引張	長期	196	
		短期	294	

*1 : 「コン示 2002」 P243

(iii) 土被り

a. 土被り

埋設設備は、難透水性覆土、上部覆土及び下部覆土で覆われ、難透水性覆土の厚さは、2.0mとする（側部も同様）。また、下部覆土の厚さも2.0mとし、地下水位はGL-2.0mとする。覆土の単位体積重量は地下水位より上は湿潤重量、地下水位より下は水中重量で設計する。土被りの状況を第3図に示す。



第3図 土被り及び地下水位

b. 地下水位

平均的な地下水位は、地下水流動解析より GL-4.0m と推定されるが、大雨や融雪時等の突発的な水位上昇を考慮し、埋設設備の設計上は、第3図に示すとおり GL-2.0m とする。

(5) 作用荷重

埋設設備の構造計算では、下記の荷重を考慮する。

- ・埋設設備自重
- ・廃棄体もたれ荷重
- ・充填モルタル側圧
- ・土圧
- ・水圧
- ・覆土荷重
- ・勾配コンクリート
- ・積雪荷重
- ・降灰荷重
- ・上載荷重
- ・地震時荷重
- ・風荷重

(6) 荷重の組合せ

(i) 外周仕切設備側壁

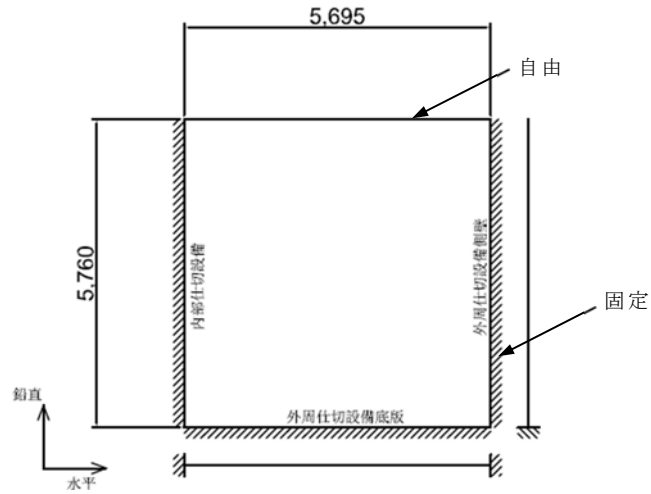
外周仕切設備側壁は、廃棄体及びモルタル充填時の側圧等を考慮し、3辺固定1辺自由スラブとして断面力を算出後、許容応力度法により照査する。

検討位置は、第2図に示す位置において、スパンが長くかつ廃棄体もたれ荷重が作用する南北方向の外周仕切設備の側壁を対象にする。設計計算を実施する検討ケースは、第4表の検討実施欄に○印で示した2ケースとする。解析モデルは第4図に示す。

なお、躯体の自重、覆い重量及び覆土重量等、面内方向の圧縮力として作用する荷重は、安全側を考慮して考えない。また、風荷重は廃棄体もたれ荷重及び充填モルタル側圧と作用方向が反対で、考慮すると断面力が小さくなるので、安全側を考慮して考えない。

第4表 外周仕切設備側壁の検討ケース

検討ケース		埋設設備自重	廃棄体もたれ荷重	充填モルタル側圧	土圧	水圧	覆土荷重	勾配コンクリート	積雪荷重	降灰荷重	上載荷重	地震の影響	風荷重	許容応力度	検討実施
廃棄体定置時	常時		○											短期	○
モルタル充填時	常時		○	○										短期	○



第 4 図 外周仕切設備側壁の解析モデル

(ii) 外周仕切設備底版

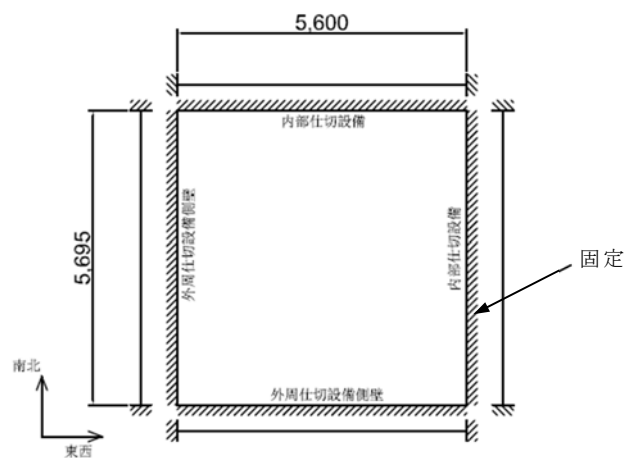
外周仕切設備底版は、埋設設備の自重、廃棄体及び充填モルタル等に対する地盤反力を考慮し、4 辺固定スラブとして断面力を算出後、許容応力度法により照査する。

検討位置は、第 2 図に示す。外周仕切設備の底版は、支持地盤上に設置されるため、主たる設計荷重を地盤反力とし、設計計算を実施する検討ケースは、第 5 表の検討実施欄に○印で示した 1 ケースとする。解析モデルは第 5 図に示す。

第 5 表 外周仕切設備底版の検討ケース

検討ケース		埋設設備自重	廃棄体もたれ荷重	充填モルタル側圧	土圧	水圧	覆土荷重	勾配コンクリート	積雪荷重	降灰荷重	上載荷重	地震の影響	風荷重	許容応力度	検討実施
廃棄体定置時	常時	○							○	○				短期	○
モルタル充填時	常時	○							○	○				短期	×

廃棄体定置時及びモルタル充填時は、地盤反力を構成する成分として、埋設設備自重（埋設設備自重、廃棄体自重、充填モルタル自重）、積雪荷重及び降灰荷重が考えられる。一方、地盤反力に抵抗する押さえ荷重として、埋設設備の底版の自重、廃棄体自重、充填モルタル自重が作用するが、廃棄体定置時のうち、廃棄体の定置直前が押さえ荷重が最も小さく、モルタル充填時より荷重状態が厳しいため、モルタル充填時の検討を省略する。また、風荷重は面内方向の圧縮力として作用するので、安全側を考慮して考えない。



第5図 外周仕切設備底版の解析モデル

(iii) 内部仕切設備

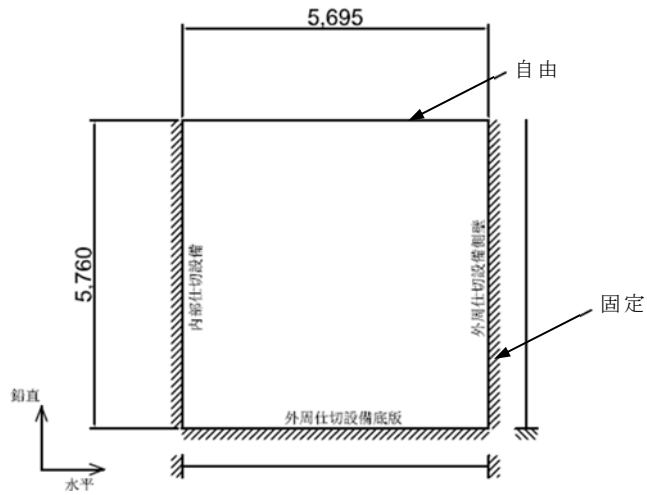
内部仕切設備は、廃棄体及びモルタル充填時の側圧等を考慮し、3辺固定1辺自由スラブとして断面力を算出後、許容応力度法により照査する。

検討位置は、第2図に示す位置において、スパンが長くかつ廃棄体もたれ荷重が作用する南北方向の内部仕切設備を対象にする。設計計算を実施する検討ケースは、第6表の検討実施欄に○印で示した2ケースとする。解析モデルは第6図に示す。

なお、躯体の自重、覆い重量及び覆土重量等、面内方向の圧縮力として作用する荷重は、安全側を考慮して考えない。また、風荷重は内周仕切設備には作用しないため、考慮しない。

第 6 表 内部仕切設備の検討ケース

検討ケース		埋設設備自重	廃棄体もたれ荷重	充填モルタル側圧	土圧	水圧	覆土荷重	勾配コンクリート	積雪荷重	降灰荷重	上載荷重	地震の影響	風荷重	許容応力度	検討実施
廃棄体定置時	常時		○											短期	○
モルタル充填時	常時		○	○										短期	○



第 6 図 内部仕切設備の解析モデル

(iv) 埋設設備全体

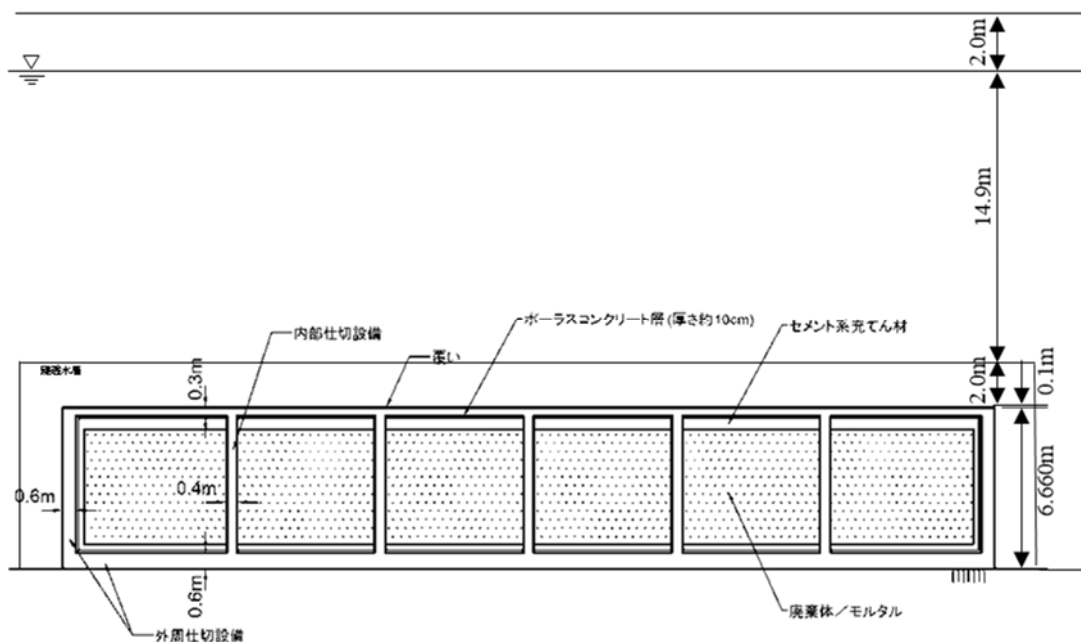
埋設設備全体は、外周仕切設備側壁、外周仕切設備底版、内部仕切設備、覆い、充填モルタルの層、ポーラスコンクリート層、廃棄体から成る埋設設備をモデル化し、モデル化する境界条件は設備の底面に地盤バネを配置し、常時と地震時に埋設設備に発生する応力を2次元FEM解析で評価する。なお、設計水平震度khは0.2とする。

検討位置は、第7図に示す断面において、埋設設備の底面幅の狭い南北方向断面を対象とする。設計計算を実施する検討ケースは、第7表の検討実施欄に○印で示した2ケースとする。

第7表 埋設設備全体の検討ケース

検討ケース		埋設設備自重	廃棄体もたれ荷重	充填モルタル側圧	土圧	水圧	覆土荷重	勾配コンクリート	積雪荷重	降灰荷重	上載荷重	地震の影響	風荷重	許容応力度	検討実施	備考
覆土前	常時	○							○	○			○	長期	×	覆土前<覆土後のため省略*1
	地震時	○									○	○	○	短期	×	
覆土後	常時	○			○	○	○	○	○	○				長期	○	
	地震時	○			○	○	○	○			○	○		短期	○	

*1：覆土後の荷重状態の方が覆土前より厳しいため、覆土前の検討を省略する。



第7図 解析対象断面図

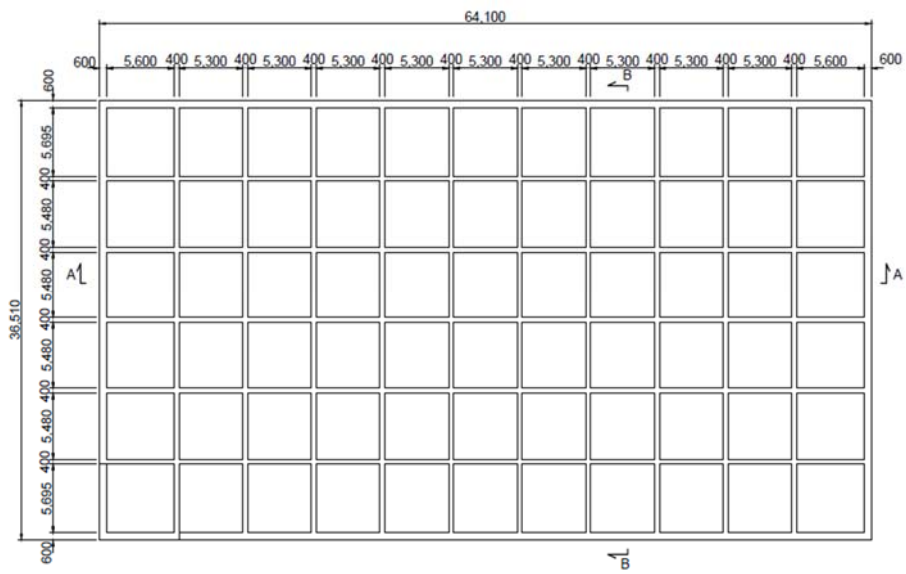
(7) 計算結果

(i) 計算結果

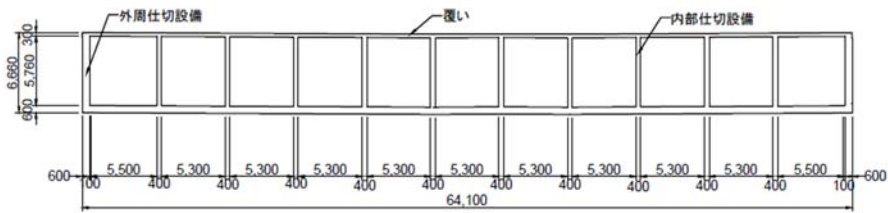
外周仕切設備、内部仕切設備、覆いの構造については、検討位置の鉛直方向及び水平方向に対して外側、内側に発生する応力度が、常時及び地震時において、曲げ圧縮、せん断、引張の各許容応力度以下であることを確認し、構造上の安定性を有する構造とする。

(ii) 埋設設備の構造

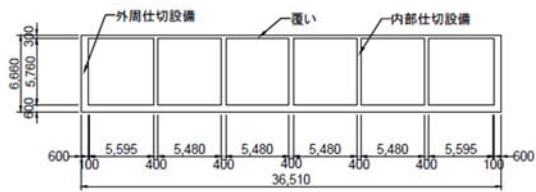
計算結果に基づき、埋設設備の構造図を第8図に示す。



(a) 埋設設備平面図



(b) 埋設設備 A-A 断面図



(c) 埋設設備 B-B 断面図

第 8 図 埋設設備構造図

想定される自然現象及び人為事象の
選定について

目 次

1. 選定の基本方針.....	1
2. 自然現象等の抽出.....	1
3. 自然現象の選定.....	3
4. 人為事象の選定.....	3
5. 安全機能に影響を及ぼし得る自然現象等.....	3
6. 安全機能に影響を及ぼし得る自然現象等に対する設計方針.....	3
(1) 自然現象について.....	3
(2) 人為事象について.....	5
(3) 自然現象の重畳.....	6

根拠資料 1 自然現象及び人為事象の選定

1. 選定の基本方針

敷地及び敷地周辺で想定される自然現象及び人為事象(以下自然現象及び人為事象をまとめて「自然現象等」という。)について、廃止措置の開始前の期間に対して、安全機能を有する施設の安全機能に影響を及ぼし得る自然現象等を選定する。

2. 自然現象等の抽出

(1) 自然現象等の選定の考え方及びフロー

自然現象等の選定の考え方としては、自然現象等を国内外の基準及び文献から網羅的に抽出し、立地特性、地質調査結果、埋設設備の状態及び自然現象の特徴等を考慮して、安全機能を有する施設の安全機能に影響を及ぼさない事象は除外し、詳細評価をすべき事象を選定する。

自然現象等の選定の流れとしては、国内外の基準及び文献調査により自然現象等を網羅的に抽出し、立地特性、地質調査結果、埋設設備の状態及び自然現象の特徴を考慮し、海外での評価手法を参考に、以下の基準のいずれかに該当するものを除外する。

なお、除外基準の詳細な考え方については根拠資料 1 に示す。

- ① 発生頻度が極低頻度と判断される事象
- ② 施設周辺では起こり得ない事象
- ③ 事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象
- ④ 施設に影響を及ぼさない事象
- ⑤ 他の事象に包含できる事象

除外基準に該当しない事象は、廃止措置の開始前の各期間において、安全機能を有する施設の安全機能に影響を及ぼし得る自然現象等として選定する。

なお、廃止措置の開始前における地震と津波については、第四条及び第五条で別途説明する。

(2) 自然現象等を抽出した国内外の文献

国内外の基準及び文献を参考にし、安全機能を有する施設の安全機能に影響を与えると考えられる自然現象等の抽出を行った。国内外の基準及び文献は自然災害、産業事故、原子力発電所の安全性に影響を与える可能性のある外部ハザード、放射性廃棄物処分施設の地質環境及び安全評価に係る情報が網羅的に示されているものを参考にした。自然現象等を抽出した国内外の文献の一覧を第 1 表に示す。

第1表 自然現象等を抽出した国内外の文献一覧

No.	文献名
1	日本原子力学会(2014):外的ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基準:2014(AESJ-SC-RK008)
2	国会資料編纂会(1998):日本の自然災害
3	日外アソシエーツ(2010):日本の災害史事典 1868-2009
4	日外アソシエーツ(2010):産業災害全史<シリーズ災害・事故史4>
5	IAEA(2003):Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Requirements Series No.NS-R-3(Rev.1)
6	IAEA(2010):Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide No.SSG-3
7	NRC(1983):PRA PROCEDURES GUIDE (Vol.1,Vol.2), NUREG/CR-2300
8	NRC(1991):Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events(IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities, NUREG-1407
9	NRC(1987):Evaluation of External Hazards to Nuclear Power Plants in the United States, NUREG/CR-5042
10	NEI(2012):DIVERSE AND FLEXIBLE COPING STRATEGIES (FLEX) IMPLEMENTATION GUIDE, NEI 12-06
11	IAEA(2015):Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations, Specific Safety Guide No.SSG-35
12	OECD/NEA(2000):Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste
13	OECD/NEA(2014):Updating the NEA International FEP List, An IGSC Technical Note
14	総合資源エネルギー調査会原子力保安・安全部会(2003):廃棄物安全小委員会報告書 -高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて-
15	IAEA(2004):Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities Vol.1
16	IAEA(2004):Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities Vol.2
17	土木学会(2006):精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方
18	原子力安全基盤機構(2006):地層処分に係る調査に関する報告書
19	産業技術総合研究所(2007):概要調査の調査・評価項目に関する技術資料
20	原子力安全基盤機構(2008):地層処分の立地選定段階の調査に係わるガイドラインの検討
21	土木学会(2008):余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行パラメータ設定の考え方
22	原子力安全委員会(2010):余裕深度処分の管理終了以後における安全評価に関する技術資料
23	IAEA(2011):Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No.SSG-14
24	IAEA(2014):Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No.SSG-29

No.1~11:自然災害及び産業事故に関する文献 No.12~24:放射性廃棄物処分施設の地質環境及び安全評価に係る文献

なお、上記論文に記載される内部事象については、第十条第四号の「影響事象分析」で説明する。

3. 自然現象の選定

自然現象の選定については、根拠資料 1 に示す。

なお、根拠資料 1 には、廃止措置の開始後の期間に対して、第十条第四号の観点で選定した事象についても示す。

4. 人為事象の選定

人為事象の選定については、根拠資料 1 に示す。

5. 安全機能に影響を及ぼし得る自然現象等

廃止措置の開始前の安全機能を有する施設の安全機能に影響を及ぼし得る自然現象として、①火山の影響、②風（台風）、③積雪、④竜巻、⑤降水、⑥低温・凍結、⑦塩害、⑧落雷、⑨森林火災、⑩生物学的事象、⑪液状化（覆土）の 11 事象を選定した。

廃止措置の開始前の安全機能を有する施設の安全機能に影響を及ぼし得る人為事象として、①航空機落下、②近隣工場等の火災、③近隣工場等の爆発、④電磁的障害、⑤有毒ガスの 5 事象を選定した。

6. 安全機能に影響を及ぼし得る自然現象等に対する設計方針

上記で選定した自然現象等のうち、火山の影響以外の自然現象(10 事象)及び人為事象(5 事象)については、大きな影響を及ぼすおそれはないが、個別に評価し、必要に応じて設計方針を示す。

なお、火山の影響については、参考資料 3「火山の影響」に詳細を記載する。

(1) 自然現象について

(i) 放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了まで

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までは、埋設設備により放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を確保する。

- 風（台風）及び積雪については、想定される風荷重及び積雪荷重に対して、放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を損なわない設計とする。具体的には、八戸特別地域気象観測所及びむつ特別地域気象観測所の観測値の極値並びに六ヶ所地域気象観測所の観測値の極値を比較し、そのうち最大の観測値(八戸特別地域気象観測所の日最大瞬間風速 41.7m/s、六ヶ所地域気象観測所の最深積雪 190cm)を踏まえて設計する。

- 竜巻については、想定される風荷重に対して、放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を損なわない設計とする。具体的には、敷地から最も近傍である東通村で発生した竜巻を考慮し、設計上考慮すべき竜巻風速の最大風速 49m/s を踏まえて設計する。
- 降水については、埋設設備の防水設計による浸入防止を図る設計とする。なお、排水・監視設備の排水管の弁を閉弁することもできる。
- 低温・凍結については、「2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】」に基づき、凍結融解により放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能へ影響を受けない配合仕様にした設計とする。
- 塩害については、「2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】」に基づき、塩害に起因する鋼材腐食により放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を損なわないようコンクリートの配合とかぶりを考慮した設計とする。
- 落雷については、「建築基準法」、「消防法」に基づく避雷設備の設置を要求される建物はなく、常時機能維持が必要な動的機器はないため、落雷により放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を損なうおそれがないため、落雷に対する設計は不要である。
- 森林火災については、鎮火後、保守を行うことが可能であるため、森林火災により放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を損なうおそれがないため、森林火災に対する設計は不要である。
- 生物学的事象については、埋設設備は生物によって破壊されないことから、生物学的事象に対する設計は不要である。

設計条件を設定して設計を行うとした自然現象による異種の自然現象について適切に重畳を考慮し、放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を損なわない設計とする。

(ii) 覆土完了から廃止措置の開始まで

覆土完了から廃止措置の開始までは、埋設設備により移行抑制機能を、覆土により遮蔽機能及び移行抑制機能を確保する。

- 風（台風）、積雪、竜巻、降水、低温・凍結、塩害、落雷、森林火災及び生物学的事象については、難透水性覆土及び下部覆土の遮蔽機能及び低透水性並びに埋設設備、難透水性覆土及び上部覆土の収着性に影響が生じないよう、上部覆土は 5m 以上の厚さを確保した設計とする。なお、上部覆土の収着

性に対して支障となるような状況に対しては、定期的に点検を行い必要に応じて
てて保修を行うことを基本とする。

- 液状化（覆土）については、液状化対策として、締固め性能が良いとされている「粒径分布に広がりを持った材料」を用いて、管理値(締固め度 90%以上)を設定して施工を行い、難透水性覆土及び下部覆土の遮蔽機能及び低透水性並びに難透水性覆土及び上部覆土の収着性を損なわない設計とする。

(2) 人為事象について

(i) 放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了まで

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までは、埋設設備により放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を確保する。

- 航空機落下については、埋設設備（標的面積 0.019km²）に対する、「直行経路を巡航中の計器飛行方式民間航空機の落下事故」及び「訓練空域内を訓練中及び訓練空域周辺を飛行中の自衛隊機又は米軍機の落下事故」を合算した航空機落下確率は、 4.3×10^{-8} （回/年）であり、「航空機落下確率評価基準」に示される判断基準である 10^{-7} 回/年未満であることから、航空機落下に対する設計は不要である。
- 近隣工場等の火災、爆発については、むつ小川原国家石油備蓄基地（距離：3,570m）及びウラン濃縮工場加工施設の屋外危険物貯蔵施設（距離：491m）の火災、濃縮機器製造工場の高圧ガス貯蔵／消費施設（距離：1,100m）の爆発が想定されるが、いずれも廃棄物埋設地まで十分な離隔があり、廃棄物埋設地に与える影響は十分小さいことから、近隣工場等の火災、爆発に対する設計は不要である。
- 有毒ガスについては、ウラン濃縮工場加工施設のフッ化ウラニル及びフッ化水素が想定されるが、埋設設備が鉄筋コンクリート造であるため、放射性物質の漏出を防止する機能、遮蔽機能を損なうおそれがないため、有毒ガスに対する設計は不要である。
- 電磁的障害については、埋設設備が静的な設備であるため、放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を損なうおそれはないため、電磁的障害に対する設計は不要である。

(ii) 覆土完了から廃止措置の開始まで

覆土完了から廃止措置の開始までは、埋設設備により移行抑制機能を、覆土に

より遮蔽機能及び移行抑制機能を確保する。

- 航空機落下、近隣工場等の火災、爆発、有毒ガス及び電磁的障害については、上部覆土を 5m 以上の厚さを確保した設計とすることから、いずれも、難透水性覆土及び下部覆土の遮蔽機能及び低透水性並びに難透水性覆土及び上部覆土の収着性を損なうおそれはないため、設計は不要である。
なお、上部覆土の収着性に対して支障となるような状況に対しては、定期的に点検を行い、必要に応じて保守を行うことを基本とする。

(3) 自然現象の重畳

(i) 重畳の組合せの検討

選定した自然現象（11 事象）について、組合せを網羅的に検討する。重畳を検討する自然現象の特徴を考慮して、詳細に検討が必要となる自然現象の組合せを抽出する。重畳の組合せの検討に当たっては、①重畳が考えられない組合せ、②いずれの事象も発生頻度が低く重畳を考慮する必要のない組合せ、③いずれかの事象に代表される組合せ、④廃棄物埋設施設に及ぼす影響が異なる組合せ、⑤それぞれの荷重が相殺する組合せ及び⑥一方の事象の条件として考慮する組合せを除外し、①から⑥のいずれにも該当しないものを設計において想定する組合せとし、組合せに対して安全性が損なわれない設計とする。重畳を考慮する自然現象の組合せについて第 2 表に示す。

第2表 重畳を考慮する自然現象の組合せ

	風 (台風)	竜巻	降水	落雷	森林 火災	低温 凍結	降下 火砕物	積雪	生物学 的事象	塩害	液状化
風(台風)											
竜巻	③										
降水	④	④									
落雷	④	④	④								
森林火災	⑥	④	⑤	④							
低温・凍結	④	④	①④	④	④⑤						
降下火砕物	○	②	⑥	④	④	④					
積雪	○	○	①⑤	④	④⑤	④	○				
生物学的事象	④	④	④	④	④	④	④	④			
塩害	④	④	④	④	④	④	④	④	④		
液状化	④	④	④	④	④	④	④	④	④	④	

- ：重畳を考慮する ①：重畳が考えられない組合せ
 ②：いずれの事象も発生頻度が低く重畳を考慮する必要のない組合せ
 ③：いずれかの事象に代表される組合せ
 ④：埋設施設に及ぼす影響が異なる組合せ
 ⑤：それぞれの荷重が相殺する組合せ
 ⑥：一方の事象の条件として考慮する組合せ

(ii) 荷重の組合せについて

a. 組合せの考え方

重畳を考慮する自然現象については第3表に示す。ここで、重畳を考慮する自然現象として地震を含む。さらに、地震荷重と竜巻荷重を比較すると、地震荷重の方が大きいため地震を考慮した場合での評価を行う。荷重の組合せについては、No. 1, 2 は No. 5 に包含でき、No. 3, 5 は No. 6 に包含できることから、荷重として評価する対象は、No. 4, 6 となる。

荷重の組合せ（応力評価）については、主現象（大きな荷重）を発生させる自然現象と、従現象（小さな荷重）を発生させる自然現象を想定する。Turkstra 則の考え方を踏まえ、主現象は、単独の自然現象で考慮する規模を想定（ 10^{-2} /年程度）し、従現象の規模は、「建築基準法」等を参考に設定する。重畳を考慮する事象を纏めると、第4表に示すとおりとなる。

なお、実際に荷重の組み合わせを考慮した計算を行う際には、各計算ケースの照査時点における埋設設備及び覆土の形状並びに計算の方法を考慮して、計算に用いる荷重の組み合わせと値を具体的に設定する。

第3表 重畳を考慮する自然現象

No	自然現象の組合せ	組合せの選定
1	風(台風)+降下火砕物	No.5に包含
2	風(台風)+積雪	No.5に包含
3	竜巻+積雪	No.6に包含
4	降下火砕物+積雪	重畳を考慮
5	風(台風)+降下火砕物+積雪	No.6に包含
6	地震+風(台風)+降下火砕物+積雪	重畳を考慮

第4表 重畳を考慮する自然現象の組合せ

No	主現象		従現象			備考
			風	積雪	降下火砕物	
1	風	41.7m/s	—	—	20cm (2.6kN/m ²)	鉛直： 2.6kN/m ²
2	風	41.7m/s	—	67cm (2.0kN/m ²)	—	鉛直： 2.0kN/m ²
3	竜巻	49m/s	—	67cm (2.0kN/m ²)	—	鉛直： 2.0kN/m ²
4	積雪	190cm (5.7kN/m ²)	—	—	20cm (2.6kN/m ²)	鉛直： 8.3kN/m ²
5	風	41.7m/s	—	67cm (2.0kN/m ²)	20cm (2.6kN/m ²)	鉛直： 4.6kN/m ²
6	地震	0.2G	41.7m/s	67cm (2.0kN/m ²)	20cm (2.6kN/m ²)	鉛直： 4.6kN/m ²

主・従現象(風) 41.7m/s：八戸特別地域気象観測所で観測された日最大瞬間風速を考慮
 構造計算等で用いる風荷重は、地上10mにおける10分間平均速度を基に
 構造物の高さ等による補正を行って設計風速を算定

主現象(竜巻) 49m/s：敷地から最も近傍である東通村で発生した竜巻を考慮

主現象(積雪) 190cm：六ヶ所村最深積雪量 30N/m²/cm：青森県建築基準法施行規則(抄)第11条
 190cm×30N/m²/cm=5.7kN/m²

主現象(地震) 0.2G：建築基準法施行令第八十八条

従現象(積雪) 67cm(190cm×0.35)：建築基準法施行令第八十二条
 67cm×30N/m²/cm=2.0kN/m²

従現象(降下火砕物) 20cm(55cm×0.35)：従現象(積雪)と同様の方法で評価
 20cm×1.3g/cm³=2.6kN/m²

(iii) 評価結果

埋設設備は、地震を含めた荷重に対し放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を損なわない設計としている。(耐震評価については参考資料1「3号埋設設備の構造設計について」にて別途説明する。)

以上から、重畳を考慮した場合においても、放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を損なうおそれはない。

自然現象及び人為事象の選定

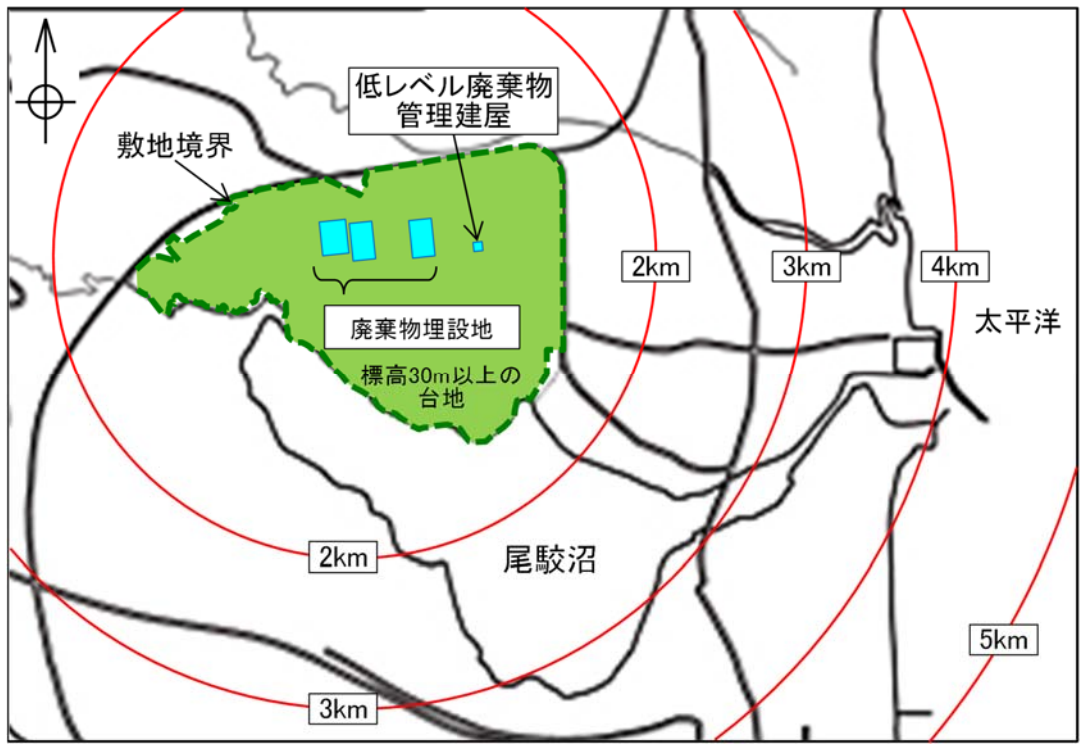
第1表 事象の除外基準及び考え方

自然現象等の除外基準	考え方	
	廃止措置の開始前*1	廃止措置の開始後*2
①発生頻度が極低頻度と判断される事象	隕石や人工衛星*3の落下のような、発生頻度が極低頻度と判断される事象は除外する。	隕石落下のような発生が極低頻度であり、事象の影響が放射性廃棄物による影響を上回るような事象は除外する。
②施設周辺では起こり得ない事象	安全機能を有する施設の立地条件、地質調査結果、埋設設備の状態及び選定された自然現象等の影響を考慮し、影響が及ばない事象は除外する。	安全機能を有する施設の立地条件、地質調査結果、埋設設備の状態及び選定された自然現象等の影響を考慮し、線量評価に影響が及ばない事象は除外する。
③事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができるものについては除外する。	—
④施設に影響を及ぼさない事象	事象に顕著な変化がなく安全機能を有する施設の安全機能に与える影響が小さい事象については除外する。	事象に顕著な変化がなく安全機能を有する施設の安全機能に与える影響が小さく、線量評価に影響しない事象については除外する。
⑤他の事象に包含できる事象	安全機能を有する施設への影響が他の事象の影響評価で包含できる場合は除外する。	安全機能を有する施設への影響が他の事象の影響評価で包含できる場合は除外する。

*1：許可基準規則解釈第9条第2項より「「廃止措置の開始前まで」とは、ピット処分にあつては埋設の終了後300～400年以内」とあることから、廃止措置の開始前までの期間として覆土完了後300年間～400年間を対象とする。

*2：主要な放射性物質のうち半減期の長い放射性物質の放射エネルギー及び放射能濃度が十分に小さいことを考慮して1万年程度までを目安とする。

*3：NRC（1991）によると、隕石及び人工衛星の落下の確率は 10^{-9} オーダー（回/y）と記載されている。
NRC（1991）：Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events(IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities, NUREG-1407



第1図 敷地の位置図

第2表 自然現象の選定 (1/8)

	国内外の文献から抽出した事象		除外の基準					評価		事象に対する考え方
			基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤	廃止措置開始前	廃止措置開始後	
			発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象			
1	火山・火成活動	火山の影響	-	-	-	-	-	要	要	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。 廃止措置の開始後は、第十条第四号にて「火山の影響」として考慮する。
2	プレート運動に起因する事象 地震・断層活動	地震	-	-	-	-	-	第四条	要	廃止措置の開始前は、第四条（地震による損傷の防止）にて別途説明する。 廃止措置の開始後は、第十条第四号にて「地震」として考慮する。
3		断層活動（地盤の変形）	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	-	不要	要	安全機能を有する施設はN値50以上の岩盤に設置していることから、地盤の変形は発生しない。第三条（安全機能を有する施設の地盤）にて別途詳細な説明をする。 廃止措置の開始後は、出戸西方断層の断層活動によって広域に地盤が傾斜する可能性があるため、第十条第四号にて「断層活動（地盤の変形）」として考慮する。
4		地盤の変位	-	○	-	-	-	不要	不要	敷地内に将来活動する可能性のある断層がないことから、地盤の変位は発生しないため、考慮しない。第三条（安全機能を有する施設の地盤）にて別途詳細な説明をする。
5		液状化	-	-	-	-	-	要	要	安全機能を有する施設はN値50以上の岩盤に設置しているため、地盤の液状化は発生しない。地盤の液状化は、第三条（安全機能を有する施設の地盤）にて別途詳細な説明をする。 廃止措置の開始前及び廃止措置の開始後の覆土については、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。
6		津波	-	-	-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	-	第五条	不要	廃止措置の開始前は、第五条（津波による損傷の防止）にて別途説明する。 廃止措置の開始後は、安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置すること及び既往津波並びに公表された津波シミュレーション結果から、津波は到達しない。また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。

事象は廃止措置の開始前及び廃止措置の開始後に区分し、評価した。

国内外の文献から抽出した事象をプレート運動、気候変動、プレート運動及び気候変動に起因する事象及びその他の事象に区分した。

第2表 自然現象の選定 (2/8)

国内外の文献から抽出した事象			除外の基準					評価		事象に対する考え方	
			基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤	廃止措置開始前	廃止措置開始後		
			発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象				
7	プレート運動	隆起・沈降運動	隆起・沈降	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	-	不要	要	廃止措置の開始前は、事象の変化により直接施設に影響を及ぼすことはないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、第十条第四号にて「隆起・沈降」として考慮する。
8	その他	変成作用		-	○	-	-	-	不要	不要	変成作用を被るような地質構造場（地温・圧力）ではないため、考慮しない。
9		塑性変形作用		-	○	-	-	-	不要	不要	塑性変形を被るような地質構造場（褶曲構造）ではないため、考慮しない。
10		続成作用		-	○	-	-	-	不要	不要	続成作用を被るような地質構造場（沈降場）ではないため、考慮しない。
11	気象変動に起因する事象	静振		-	-	-	○	-	不要	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
12		高潮		-	-	-	○	-	不要	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
13		波浪・高波		-	-	-	○	-	不要	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
14		高潮位		-	-	-	○	-	不要	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。

事象は廃止措置の開始前及び廃止措置の開始後に区分し、評価した。

国内外の文献から抽出した事象をプレート運動、気候変動、プレート運動及び気候変動に起因する事象及びその他の事象に区分した。

第2表 自然現象の選定 (3/8)

	国内外の文献等から抽出した事象	除外の基準					評価		事象に対する考え方
		基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤	廃止措置開始前	廃止措置開始後	
		発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象			
15	低潮位	-	-	-	○	-	不要	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
16	海流異変	-	-	-	○	-	不要	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れ、標高30m以上の台地に位置することから、影響はないため、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水する設備もないため、影響はない。
17	風（台風）	-	-	-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	-	要	不要	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。 廃止措置の開始後は、埋設設備は地下にあることから、影響はないため、考慮しない。
18	竜巻	-	-	-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	-	要	不要	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。 廃止措置の開始後は、埋設設備は地下にあることから、影響はないため、考慮しない。
19	砂嵐	-	○	-	-	-	不要	不要	敷地周辺に砂塵が舞い上がるような砂漠や大規模な砂丘は分布しないため、考慮しない。
20	極端な気圧	-	-	-	-	○	不要	不要	高気圧、低気圧による気圧の変化により、安全機能を有する施設の安全機能が損なわれるおそれはないため、考慮しない。なお、竜巻による急激な気圧変化が想定されるが、これは「竜巻」の影響評価に包含される。
21	降水（量）	-	-	-	-	-	要	要	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。 廃止措置の開始後は、地下水流動に影響するため第十条第四号にて「降水量」として考慮する。
22	洪水	-	○	-	-	-	不要	不要	周辺河川において洪水が発生したとしても、標高30m以上の台地に位置する安全機能を有する施設への影響はないため、考慮しない。（老部川は標高5m～20m、二又川は標高1m～5mを流れる。）

事象は廃止措置の開始前及び廃止措置の開始後に区分し、評価した。
国内外の文献等から抽出した事象をプレート運動、気候変動、プレート運動及び気候変動に起因する事象及びその他の事象に区分した。

第2表 自然現象の選定 (4/8)

	国内外の文献等から抽出した事象	除外の基準					評価		事象に対する考え方
		基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤	廃止措置開始前	廃止措置開始後	
		発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象			
23	降雹	—	—	—	—	○	不要	不要	「竜巻」の影響評価（飛来物）に包含される。
24	落雷（電流）	—	—	—	廃止措置開始前：— 廃止措置開始後：○	—	要	不要	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。 廃止措置の開始後は、埋設設備は地下に設置されていることから、影響はないため、考慮しない。
25	高温（気温）	—	—	—	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：—	—	不要	要 ^{*1}	廃止措置の開始前は、高温による安全機能を有する施設への影響はないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、降水量及び蒸発散量に影響するため第十条第四号にて「気温」として考慮する。
26	低温・凍結（気温）	—	—	—	—	—	要	要 ^{*1}	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。 廃止措置の開始後は、降水量及び蒸発散量に影響するため第十条第四号にて「気温」として考慮する。
27	氷結	—	—	—	—	○	不要	不要	「低温・凍結」の影響評価に包含される。
28	氷晶	—	—	—	—	○	不要	不要	氷晶による荷重の影響については、「降下火砕物」、「積雪」の荷重の影響評価に包含される。
29	氷壁	—	○	—	—	—	不要	不要	敷地周辺には氷壁が形成されるような環境がなく、取水及び冷却を行う設備はないことから、影響はないため、考慮しない。
30	高水温	—	—	—	—	○	不要	不要	海洋及び河川から取水する設備はなく、影響はないため、考慮しない。
31	低水温	—	—	—	—	○	不要	不要	海洋及び河川から取水する設備はなく、影響はないため、考慮しない。
32	干ばつ	—	—	—	—	○	不要	不要	顕著な変化がなく、安全機能を有する施設に与える影響が小さいことから、考慮しない。
33	霜	—	—	—	—	○	不要	不要	霜による安全機能を有する施設への影響はないため、考慮しない。

*1：高温及び低温・凍結は廃止措置の開始後の状態設定では降水量及び蒸発散量に影響するため、まとめて「気温」として考慮する。
 事象は廃止措置の開始前及び廃止措置の開始後に区分し、評価した。
 国内外の文献から抽出した事象をプレート運動、気候変動、プレート運動及び気候変動に起因する事象及びその他の事象に区分した。

第2表 自然現象の選定 (5/8)

	国内外の文献等から抽出した事象	除外の基準					評価		事象に対する考え方
		基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤	廃止措置開始前	廃止措置開始後	
		発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象			
34	霧	-	-	-	○	-	不要	不要	霧による安全機能を有する施設への影響はないため、考慮しない。
35	積雪	-	-	-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	-	要	不要	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。 廃止措置の開始後は、埋設設備は地下に設置されていることから、影響はないため、考慮しない。
36	雪崩	-	○	-	-	-	不要	不要	埋設設備周囲の斜面の形状を考慮すると、埋設設備を損傷させるような雪崩が発生しにくいと判断し、考慮しない。
37	土壌の収縮・膨張	-	-	-	○	-	不要	不要	安全機能を有する施設は岩盤に設置することから、影響はないため、考慮しない。
38	海水による川の閉塞	-	-	-	○	-	不要	不要	海洋及び河川から取水、冷却を行う設備はなく、安全機能を有する施設に影響はないため、考慮しない。
39	湖若しくは川の水位降下	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	不要	不要	安全機能を有する施設は、取水、冷却を行う設備はないことから、影響はないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、沼・河川の変化は、「隆起・侵食」及び「海水準変動」において考慮する。
40	海水準変動	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	-	不要	要	廃止措置の開始前は、事象の変化により直接施設に影響を及ぼすことはないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、地下水流動に影響するため、第十条第四号にて「海水準変動」として考慮する。
41	風化	-	-	-	○	-	不要	不要	事象の進展（岩盤の風化）が非常に緩慢なため、考慮しない。
42	蒸発散（量）	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	-	不要	要	廃止措置の開始前は、事象の変化により直接施設に影響を及ぼすことはないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、地下水流動に影響するため第十条第四号にて「蒸発散量」考慮する。

事象は廃止措置の開始前及び廃止措置の開始後に区分し、評価した。

国内外の文献から抽出した事象をプレート運動、気候変動、プレート運動及び気候変動に起因する事象及びその他の事象に区分した。

第2表 自然現象の選定 (6/8)

	国内外の文献から抽出した事象	除外の基準					評価		事象に対する考え方	
		基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤	廃止措置開始前	廃止措置開始後		
		発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象				
43	気象変動に起因する事象	かん養(量)	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	-	不要	要	廃止措置の開始前は、事象の変化により直接施設に影響を及ぼすことはないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、地下水流動に影響するため第十条第四号にて「かん養量」として考慮する。
44		永久凍土	-	○	-	-	-	不要	不要	将来の気温低下を考慮しても、永久凍土が問題となるような状況になるとは考えにくいため考慮しない。
45		河川流量	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	-	不要	要	廃止措置の開始前は、事象の変化により直接施設に影響を及ぼすことはないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、希釈水量に影響するため第十条第四号にて「河川流量」として考慮する。
46	プレート運動と気候変動の両者に起因する事象	地下水位(地下水流動)	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	-	不要	要	廃止措置の開始前は、事象の変化により直接施設に影響を及ぼすことはないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、地下水流動に影響するため第十条第四号にて「地下水位(地下水流動)」として考慮する。
47		土石流	-	○	-	-	-	不要	不要	周辺河川において土石流が発生したとしても、標高30m以上の台地に位置する安全機能を有する施設への影響はないため、考慮しない。(老部川は標高5m~20m、二又川は標高1m~5mを流れる。)
48		陥没	-	○	-	-	-	不要	不要	陥没が発生するような地質ではないため、考慮しない。
49		地形及び陸水の変化	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	不要	不要	廃止措置の開始前は、事象により直接施設に影響を及ぼすことはないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、「隆起・沈降」、「侵食」、「海水準変動」に包含される。
50		地盤(地表面)の侵食	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	-	不要	要	廃止措置の開始前は、事象により直接施設に影響を及ぼすことはないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、第十条第四号にて「侵食」として考慮する。

事象は廃止措置の開始前及び廃止措置の開始後に区分し、評価した。

国内外の文献から抽出した事象をプレート運動、気候変動、プレート運動及び気候変動に起因する事象及びその他の事象に区分した。

第2表 自然現象の選定 (7/8)

	国内外の文献から抽出した事象	除外の基準					評価		事象に対する考え方	
		基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤	廃止措置開始前	廃止措置開始後		
		発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象				
51	プレート運動と気候変動の両者に起因する事象	海岸侵食	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	不要	不要	廃止措置の開始前は、安全機能を有する施設が海岸から約3km離れていることから、考慮しない。 廃止措置の開始後は、「侵食」に包含される。
52		海面下の侵食	-	-	-	○	-	不要	不要	敷地は海岸から約3km離れていることから、考慮しない。 また、海洋及び河川から取水及び冷却を行う設備はないことから、影響はないため、考慮しない。
53		地下水による侵食	-	○	-	-	-	不要	不要	地下水による侵食を受けるような地質及び地下水質ではないため、考慮しない。
54		河川の流路変更	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	不要	不要	安全機能を有する施設は、取水及び冷却を行う設備はなく、影響はないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、沼・河川の変化は、「隆起・侵食」及び「海水準変動」において考慮する。
55		変質	-	○	-	-	-	不要	不要	変質（風化除く）を被るような地質環境にないため、考慮しない。
56		流出点の状態（河川・沼）	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	不要	不要	廃止措置の開始前は、事象の変化により直接施設に影響を及ぼすことはないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、侵食や海水準変動の評価に内包する。
57	その他	泥湧出（泥火山）	-	○	-	-	-	不要	不要	泥が湧出（泥火山が発生）する地質構造（泥岩破砕層、地中ガス貯存及び背斜構造）ではないため、考慮しない。
58		地すべり	-	○	-	-	-	不要	不要	埋設地及びその付近に地すべり地形はなく、すべり面となるような弱層も確認されていないため、考慮しない。 第三条（安全機能を有する施設の地盤）にて別途説明する。
59		透水性の変化	-	-	-	廃止措置開始前：○ 廃止措置開始後：-	-	不要	要	廃止措置の開始前は、事象により直接施設に影響を及ぼすことはないため、考慮しない。 廃止措置の開始後は、施設通過流量に影響するため第十条第四号にて「透水性の変化」として考慮する。
60		斜面の不安定	-	○	-	-	-	不要	不要	廃棄物埋設地及びその付近の自然斜面においては、崖崩れや山崩れが発生するような不安定な斜面は存在しないため、考慮しない。

事象は廃止措置の開始前及び廃止措置の開始後に区分し、評価した。

国内外の文献から抽出した事象をプレート運動、気候変動、プレート運動及び気候変動に起因する事象及びその他の事象に区分した。

第2表 自然現象の選定 (8/8)

	国内外の文献から抽出した事象	除外の基準					評価		事象に対する考え方
		基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤	廃止措置開始前	廃止措置開始後	
		発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象			
61	森林火災	-	-	-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	-	要	不要	廃止措置の開始前は、第六条（外部からの衝撃による損傷の防止）にて「森林火災」として考慮する。廃止措置の開始後は、埋設設備は地下に設置されていることから、影響はないため、考慮しない。
62	草原火災	-	-	-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	○	不要	不要	廃止措置の開始前は、「森林火災」の影響評価に包含される。廃止措置の開始後は、埋設設備は地下に設置されていることから、影響はないため、考慮しない。
63	生物学的事象	-	-	-	-	-	要	要	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。廃止措置の開始後は、第十条第四号にて「生物学的事象」として考慮する。
64	塩害	-	-	-	廃止措置開始前：- 廃止措置開始後：○	-	要	不要	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。廃止措置の開始後は、埋設設備は地下に設置されていることから、影響はないため、考慮しない。
65	その他 隕石	○	-	-	-	-	不要	不要	隕石の衝突は発生の可能性が著しく低い。また、非常に大きな隕石については、衝突による影響が放射性廃棄物による影響を有意に上回るため、考慮しない。
66	カルスト	-	○	-	-	-	不要	不要	敷地周辺はカルスト地形ではない（石灰岩分布地域ではない）ため、考慮しない。
67	岩塩ダイアビル	-	○	-	-	-	不要	不要	岩塩ダイアビルを生じるような岩塩層は分布しないため、考慮しない。
68	深部流体	-	○	-	-	-	不要	不要	敷地は火山フロントの海溝側にあること、水みちとなるような大規模な構造線が分布しないことから、施設に影響を与える深部流体はないため、考慮しない。
69	天水の水質	-	○	-	-	-	不要	不要	現状の天水は、安全機能を有する施設に影響を及ぼす水質ではないため、考慮しない。長期的にも、天水の水質が急激に変化することは想定しづらいので考慮しない。
70	表流水・地下水の水質	-	○	-	-	-	不要	不要	現状の地表水・地下水は安全機能を有する施設に影響を及ぼす水質ではないため、考慮しない。長期的にも、水質が急激に変化することは想定しづらいので、考慮しない。

事象は廃止措置の開始前及び廃止措置の開始後に区分し、評価した。

国内外の文献から抽出した事象をプレート運動、気候変動、プレート運動及び気候変動に起因する事象及びその他の事象に区分した。

第3表 人為事象の選定 (1/2)

	国内外の文献から抽出した事象	除外の基準					評価 廃止措置開始前	事象に対する考え方
		基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤		
		発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象		
1	船舶事故による油流出	-	-	-	○	-	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れた標高30m以上の台地に位置するため、影響はない。また、海洋から取水する設備もないため、影響はない。
2	船舶事故（爆発、化学物質の放出）	-	-	-	○	-	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れた標高30m以上の台地に位置するため、影響はない。
3	船舶の衝突	-	-	-	○	-	不要	安全機能を有する施設は海岸から約3km離れた標高30m以上の台地に位置するため、船舶が衝突することはない。
4	飛来物（航空機落下等）	-	-	-	-	-	要	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。
5	鉄道事故（爆発、化学物質の放出）	-	○	-	-	-	不要	敷地周辺には鉄道路線がないため、発生しない。
6	鉄道の衝突	-	○	-	-	-	不要	敷地周辺には鉄道路線がないため、発生しない。
7	交通事故（爆発、化学物質の放出）	-	-	-	-	○	不要	「近隣工場の爆発」に包含される。化学物質の放出は、「有毒ガス」に包含される。
8	自動車の衝突	-	○	-	-	-	不要	周辺監視区域の境界にフェンスを設置し、入構する自動車を管理しており発生しない。
9	近隣工場の爆発	-	-	-	-	-	要	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。
10	工場事故（化学物質の放出）	-	-	-	-	○	不要	化学物質の放出は、「有毒ガス」に包含される。
11	鉱山事故（爆発、化学物質の放出）	-	○	-	-	-	不要	敷地周辺に鉱山はないため、発生しない。
12	土木・建築現場の事故（爆発、化学物質の放出）	-	○	-	-	-	不要	敷地内での工事は十分に管理されていることから、発生しない。
13	軍事基地の事故（爆発、化学物質の放出）	-	○	-	-	-	不要	三沢基地は敷地から約28km離れており、影響はない。
14	軍事基地からの飛来物	-	○	-	-	-	不要	故意によるもの以外は、三沢基地は敷地から約28km離れていることから、影響はない。
15	軍事行動による破壊・損傷						不要	テロ行為等の人為的な破壊行為は外部事象に含めない。
16	パイプライン事故（爆発、化学物質の放出）	-	○	-	-	-	不要	むつ小川原国家石油備蓄基地の陸上輸送配管は、約2km以上離れた場所の1.2m以上の地下に埋設されており、影響はない。

第3表 人為事象の選定 (2/2)

	国内外の文献から抽出した事象	除外の基準					評価	事象に対する考え方
		基準①	基準②	基準③	基準④	基準⑤	廃止措置開始前	
		発生頻度が極低頻度と判断される事象	施設周辺では起こり得ない事象	事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	施設に影響を及ぼさない事象	他の事象に包含できる事象		
17	敷地内における化学物質の漏えい	—	○	—	—	—	不要	安全機能を有する施設付近における化学物質の貯蔵・運搬はないため、影響はない。
18	人工衛星の落下	○	—	—	—	—	不要	人工衛星の大部分が大気圏で燃え尽き、一部破片が落下する可能性があるが、その可能性は極めて低く、安全機能を有する施設に影響を及ぼすことはない。
19	ダムの崩壊	—	○	—	—	—	不要	安全機能を有する施設の周辺にダムはないため、ダムの崩壊は発生しない。
20	電磁的障害	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始前は、サージ・ノイズや電磁波の侵入の可能性があるため、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。
21	掘削工事	—	○	—	—	—	不要	敷地内での工事は規制されることから、発生しない。
22	重量物の落下	—	○	—	—	—	不要	重量物の運搬は十分に管理されているため、発生しない。
23	タービンミサイル	—	○	—	—	—	不要	敷地周辺にタービンミサイルを発生させるような回転装置はない。
24	有毒ガス	—	—	—	—	—	要	安全機能を有する施設では、有毒ガスを発生させる設備は存在しないが、他事業所や敷地外の施設（船舶、交通、工場）からの有毒ガスの発生が想定されるため、廃止措置の開始前は安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。
25	近隣工場の火災	—	—	—	—	—	要	廃止措置の開始前は、安全機能に影響を及ぼし得る事象として考慮する。（航空機落下火災、近隣工場の火災等）。
26	火災	—	—	—	—	○	不要	「近隣工場の火災」に包含される。

第4表 文献調査の結果抽出された自然現象 (1/4)

全事象	許可基準規則 解釈 ^{*1} 、 火山影響評価 ガイド ^{*2}	既往の国内外文献による自然現象・人為事象の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す										既往の国内外文献による地質環境の長期変動項目の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す										埋設施設へ影響を与える可能性の ある事象の整理と抽出	
		1	2,3,4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15,16	17	18	19	20	21	22	23		24
1 地震	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1 地震
2 地盤沈下	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2 地盤の変形
3 地盤隆起	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	3 地盤の変位
4 断層活動・地割れ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5 地滑り		○																					
6 豪雨による地滑り		○			○																		
7 融雪による地滑り	○	○	○	○						○													4 地滑り
8 地下水による地滑り					○																		
9 液状化現象		○	○	○	○										○	○							5 液状化現象
10 泥湧出															○	○	○	○					6 泥湧出
11 斜面の不安定			○		○																		
12 斜面の不安定 崖崩れor陥没			○		○																		7 斜面の不安定
13 地震による津波	○	○	○	○	○	○																	
14 火山による津波	○	○	○	○	○	○																	
15 静振		○		○	○	○																	9 静振
16 高潮		○	○	○	○	○																	10 高潮
17 波浪・高波		○	○	○	○	○																	11 波浪・高波
18 高潮位		○		○	○	○																	
19 異常潮位		○	○																				12 高潮位
20 高潮水位					○	○																	- 高潮位を含む
21 高河水位					○	○																	- 洪水を含む
22 低潮位		○																					13 低潮位
23 低水位					○																		- 低潮位含む
24 海流異変		○																					14 海流異変
25 風(台風)		○	○	○	○	○	○	○	○	○													
26 水嵐																							
27 雪嵐(吹雪)			○		○																		15 風(台風)
28 強い直線風																							
29 竜巻		○	○	○	○	○	○	○	○	○													16 竜巻
30 暴風による砂嵐		○		○	○	○	○	○	○	○													17 砂嵐
31 高圧		○																					
32 低圧		○			○	○																	
33 急激な気圧変化		○																					18 極端な気圧
34 豪雨			○	○	○	○																	
35 地震による洪水	○	○																					
36 豪雨による洪水		○	○		○																		
37 融雪による洪水		○			○																		
38 高水位による洪水																							
39 近隣河川、湖、貯水池 による洪水			○				○																20 洪水
40 地滑りによる洪水					○	○																	
41 豪雨による鉄砲水		○	○																				

*1：第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈(以下「許可基準規則解釈」という。)に例示されている事象を含む場合は○で示す。

*2：「火山影響評価ガイド」に記載される火山事象を含む場合は○で示す。

第4表 文献調査の結果抽出された自然現象 (2/4)

全事象	許可基準規則 解釈 ^{*1} 火山影響評価 ガイド ^{*2}	既往の国内外文献による自然現象・人為事象の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す										既往の国内外文献による地質環境の長期変動項目の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す										埋設施設へ影響を与える可能性のある事象の整理と抽出			
		1	2,3,4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15,16	17	18	19	20	21	22	23		24		
42	地震による土石流	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21	土石流
43	暴雨による土石流	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
44	降雹	—	○	○	○	—	○	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22	降雹
45	落雷(電流)	—	○	○	○	○	○	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23	落雷(電流)
46	森林火災	—	○	—	—	○	○	○	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24	森林火災
47	草原火災	—	○	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25	草原火災
48	高温	—	○	—	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—	○	○	○	○	—	—	—	—	26	高温
49	低温・凍結	—	○	○	—	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27	低温・凍結
50	氷結	—	○	—	—	○	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28	氷結
51	氷晶	—	○	○	—	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	29	氷晶
52	氷壁	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	氷壁
53	高水温	—	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	31	高水温
54	低水温	—	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32	低水温
55	干ばつ	—	○	○	○	○	○	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	33	干ばつ
56	霜	—	○	○	—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	34	霜
57	霧	—	○	○	—	○	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	35	霧
58	火山弾 (大きな噴石)	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	36	火山から発生する飛来物 (噴石)
59	火山礫 (小さな噴石)	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		火山性土石流、火山泥流及び 洪水
60	火砕流	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		降下火砕物 (24森林火災に含める)
61	溶岩流	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		火山ガス
62	火砕サージ	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		熱水系及び地下水の異常 岩層なだれ、地滑り及び斜面 崩壊
63	爆風	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		新しい火口の開口
64	洪水	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		津波及び静振
65	降灰	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		大気現象
66	火災(山林火災)	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		地殻変動
67	火山ガス滞留	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		火山性地震とこれに関連する 事象
68	熱湯	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		[火山:熱湯に含める]
69	山体崩壊	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		—
70	新しい火口の開口	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		—
71	津波及び静振	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		—
72	大気現象	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
73	地殻変動	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
74	火山性地震とこれに関 連する事象	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
75	熱湯	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
76	積雪	—	○	○	○	○	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	37	積雪
77	豪雪による雪崩	—	○	○	○	○	—	—	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
78	融雪による雪崩	—	○	○	○	○	—	—	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	38	雪崩

*1: 許可基準規則解釈に例示されている事象を含む場合は○で示す。

*2: 「火山影響評価ガイド」に記載される火山事象を含む場合は○で示す。

第4表 文献調査の結果抽出された自然現象 (3/4)

全事象	許可基準規則 解釈*1、 火山影響評価 ガイド*2	既往の国内外文献による自然現象・人為事象の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す										既往の国内外文献による地質環境の長期変動項目の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す										埋設施設へ影響を与える可能性 のある事象の整理と抽出						
		1	2,3,4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15,16	17	18	19	20	21	22	23		24					
79	生物学的事象	-	○	○	○	○	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39	生物学的事象			
80	動物	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
81	塩害・海塩粒子による 絶縁破壊	-	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	塩害			
82	塩害・腐食	-	○	-	-	○	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
83	隕石	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
84	隕石による衝撃波	-	○	-	-	○	○	○	○	-	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41	隕石		
85	陥没	-	-	○	○	○	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	42	陥没		
86	土壌の収縮・膨張	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43	土壌の収縮・膨張		
87	隆起・沈降運動	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	-	44	隆起・沈降		
88	地形及び陸水の変化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45	地形及び陸水の変化		
89	地盤の侵食	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46	地盤の侵食		
90	海岸浸食	-	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47	海岸浸食		
91	海面下の侵食	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48	海面下の侵食		
92	強い水流、地下水による 侵食	-	-	-	-	○	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	49	地下水による侵食		
93	カルスト	-	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	カルスト		
94	海水による川の閉塞	-	○	-	○	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51	海水による川の閉塞		
95	湖若しくは川の水位降下	-	○	-	-	-	○	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	湖若しくは川の水位降下		
96	河川の流路変更	-	○	-	-	-	○	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53	河川の流路変更		
97	有毒ガス	-	-	-	-	-	○	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	[人為の有毒ガスに含める]	
98	太陽フレアによる磁気嵐	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	[電磁的障害含める]	
99	気候変動・サイクル	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	気候変動による海水準変動や気象の変化として個別に考慮	
100	氷期-間氷期サイクル	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	-	○	○	○	○	○	○	-	-	-	気候変動による海水準変動や気象の変化として個別に考慮	
101	温暖化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
102	海水準変動	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	54	海水準変動		
103	構造運動	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	○	-	-	-	-	-	-	○	-	-	断層・火山・隆起等として考慮	
104	変成作用	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55	変成作用
105	塑性変形作用	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56	塑性変形作用
106	続成作用	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57	続成作用
107	岩塩ダイアピル	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58	岩塩ダイアピル
108	地殻変動	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	断層・火山・隆起等として考慮
109	海象	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	-	-	海象⇒高潮、潮位、津波で検討
110	地質・地質構造の性状・特性	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	地盤の特性(外部影響事象として抽出しない)
111	天然資源・鉱物資源	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	○	-	-	○	○	-	○	○	-	-	-	-	-	地盤の特性(外部影響事象として抽出しない)

*1：許可基準規則解釈に例示されている事象を含む場合は○で示す。

*2：「火山影響評価ガイド」に記載される火山事象を含む場合は○で示す。

第4表 文献調査の結果抽出された自然現象 (4/4)

全事象	許可基準規則 解釈 ^{*1} 、 火山影響評価 ガイド ^{*2}	既往の国内外文献による自然現象・人為事象の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す										既往の国内外文献による地質環境の長期変動項目の抽出 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す										埋設施設へ影響を与える可能性の ある事象の整理と抽出	
		1	2,3,4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15,16	17	18	19	20	21	22	23		24
112 風化	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	-	○	○	○	-	-	○	59 風化
113 変質	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	○	○	○	○	○	-	-	-	○	60 変質
114 力学・変形特性(掘削 影響範囲・力学的安定 性を含む)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	- 地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)
115 熱特性	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	○	-	○	○	-	○	-	- 地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)
116 蒸発散量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	○	○	-	-	○	○	-	-	○	61 蒸発散量
117 涵養量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	-	62 涵養量
118 季節的な水の量	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	- 季節的な水の量
119 風速・風向	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	-	○	-	-	○	-	-	○	-	-	-	- 風速・風向
120 極端な気象パターン	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	- 台風、異常低温、豪雪に包含
121 永久凍土	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	63 永久凍土
122 水収支	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	○	-	○	○	○	○	○	○	- 涵養量、河川流量等で考慮
123 河川流量	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	-	○	○	-	○	○	○	○	○	○	-	64 河川流量
124 流出地点の状態(河 川・沼)	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	-	○	○	-	○	○	○	○	○	-	○	65 流出地点の状態(河川・沼)
125 透水係数	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	66 透水係数
126 地下水位 (地下水流動)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	67 地下水位(地下水流動)
127 地下水の流動特性	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	- 地下水の流動特性
128 深部流体	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○	○	○	-	-	-	-	68 深部流体
129 天水の水質、化学組 成	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	69 天水の水質
130 表流水・地下水の水 質、化学組成	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	70 表流水・地下水の水質
131 岩盤の鉱物・化学組成	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	○	○	-	-	-	○	○	- 地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)
132 地下水の水質、化学 組成	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○	○	○	-	-	- 地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)
133 生物学・生化学的現 象・微生物	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	○	○	○	○	-	-	○	-	- 80 生物学的現象に包含
134 コロイド	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	○	○	○	○	-	-	○	○	- 地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)
135 有機物	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	-	-	-	○	○	- 地盤の特性(外部影響事象として 抽出しない)

*1：許可基準規則解釈に例示されている事象を含む場合は○で示す。

*2：「火山影響評価ガイド」に記載される火山事象を含む場合は○で示す。

第5表 文献調査の結果抽出された人為事象

全事象	既往の国内外文献による外部事象 番号は国内外の文献一覧における文献No.を示す										地質環境の長期変動事象 (地表自然環境)	許可基準規則及び許可 基準規則解釈 ^{*1} 、火山影 響評価ガイド ^{*2}	埋設施設へ影響を与える可能性のある事象 の抽出
	1	2,3,4	5	6	7	8	9	10	11	外部事象			
1 船舶事故による油流出	○		○	○						○	○	-	1 船舶事故による油流出
2 船舶による化学物質放出	○	○	○	○				○		○	○	-	2 船舶事故(爆発、化学物質放出)
3 船舶の爆発	○		○	○							○	-	3 船舶の衝突
4 船舶の衝突	○		○	○							○	-	4 飛来物(航空機落下等)
5 航空機落下	○	○	○	○				○		○	○	-	5 鉄道事故(爆発、化学物質放出)
6 鉄道事故による爆発	○		○	○	○	○					○	-	6 鉄道の衝突
7 鉄道事故による化学物質放出	○	○	○	○				○		○	○	-	7 交通事故(爆発、化学物質放出)
8 鉄道の衝突	○		-	○							○	-	8 交通事故による化学物質放出
9 交通事故による爆発	○		○	○							○	-	9 自動車の衝突
10 交通事故による化学物質放出	○	○	○	○				○		○	○	-	10 爆発
11 自動車の衝突	○		-	○							○	-	11 工場事故による爆発
12 爆発	-	-	○	○	-	-	-	-	-	○	○	-	12 工場事故による化学物質放出
13 工場事故による爆発	○	○	-	○				○		-	○	-	13 工場事故(化学物質放出)
14 工場事故による化学物質放出	○	○	○	○	○	○	○	○		-	○	-	14 鉱山事故による爆発
15 鉱山事故による爆発	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	○	-	15 鉱山事故による化学物質放出
16 鉱山事故による化学物質放出	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	○	-	16 土木・建築現場の事故による爆発
17 土木・建築現場の事故による爆発	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	○	-	17 土木・建築現場の事故による化学物質放出
18 土木・建築現場の事故による化学物質放出	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-	○	-	18 軍事基地の事故による爆発
19 軍事基地の事故による爆発	○	-	-	○	○	○	○	-	-	-	○	-	19 軍事基地からの飛来物
20 軍事基地からの飛来物	-	-	-	○						○	○	-	20 軍事行動による破壊・損傷
21 軍事行動による破壊・損傷	-	-	-	-	-	-	-	○			-	-	21 パイプライン事故・爆発
22 パイプライン事故・爆発	-	-	-	○							○	-	22 パイプライン事故後の化学物質
23 パイプライン事故後の化学物質	-	-	-	○	○			○			○	-	23 サイト貯蔵庫からの化学物質放出
24 サイト貯蔵庫からの化学物質放出	-	-	○	○	○	-	○	-	-	-	○	-	24 敷地内における化学物質の漏えい
25 敷地内における化学物質の漏えい	-	-	○	○	○	-	○	-	-	-	○	-	25 人工衛星の落下
26 人工衛星の落下	○	-	-	○	-	○	○	-	-	-	○	-	26 ダムの崩壊
27 ダムの崩壊	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	27 防壁・堤防の崩壊
28 防壁・堤防の崩壊	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	28 電磁的障害
29 電磁的障害	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	○	-	29 掘削工事(敷地内外)
30 掘削工事(敷地内外)	-	-	-	○	-	-	-	-	-	○	○	-	30 重量物落下、重量輸送物による衝撃
31 重量物落下、重量輸送物による衝撃	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	○	-	31 タービンミサイル
32 タービンミサイル	-	-	○	○	○	-	-	-	-	○	○	-	32 有毒ガス
33 有毒ガス	-	○	○	○	○	-	-	-	-	○	○	-	33 近隣工場の火災
34 近隣工場の火災	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	34 森林火災
35 森林火災	○	○	-	○	-	-	-	-	-	○	○	-	35 市街地の火災
36 市街地の火災	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	36 火災
37 火災	○	○	○	○	○	-	-	-	-	○	-	-	37 河川の流路変更
38 河川の流路変更	○	-	○	-	-	-	-	○	-	○	-	-	38 鉱坑、井戸、油井
39 鉱坑、井戸、油井	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	

*1：許可基準規則及び許可基準規則解釈に例示されている事象を含む場合は○で示す。

*2：「火山影響評価ガイド」に記載される火山事象を含む場合は○で示す。

火山の影響について

目 次

1. 火山の影響に係る設計の基本方針.....	1
2. 調査及び検討内容.....	1
(1) 文献調査.....	1
(2) 地形調査.....	2
(3) 地質調査.....	2
(4) 火山学的調査.....	2
(5) 地球物理学的調査.....	2
3. 廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山の抽出.....	3
(1) 完新世に活動を行った火山.....	3
(2) 完新世に活動を行っていない火山.....	3
(3) 廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山.....	4
4. 廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山の火山活動に関する個別評価.....	11
(1) 詳細調査対象火山の抽出.....	11
(2) 十和田.....	15
(3) 八甲田山.....	44
(4) まとめ.....	63
5. 火山活動のモニタリング.....	64
6. 廃棄物埋設地の安全性に影響を与える可能性のある火山事象の影響評価.....	65
(1) 降下火砕物.....	65
(2) その他の火山事象.....	79
7. 設計上考慮する降下火砕物に対する防護設計.....	80
(1) 放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了まで.....	80
(2) 覆土完了から廃止措置の開始まで.....	80
(3) 降灰に対する対応.....	81
8. 参考文献.....	82

1. 火山の影響に係る設計の基本方針

「原子力発電所の火山影響評価ガイド」(平成 25 年 6 月 19 日 原規技発第 13061910 号 原子力規制委員会決定)(以下「火山影響評価ガイド」という。)及び当社再処理施設が検討並びに確認している火山の影響評価(再処理事業所再処理事業変更許可申請書本文及び添付書類の一部補正について)(令和 2 年 4 月 28 日))を参考に、廃棄物埋設地に影響を与える可能性のある火山事象について評価を行う。

埋設設備には常時機能維持が必要とする動的な設備・機器はなく、想定される火山事象に対して、放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までは放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を、覆土完了から廃止措置の開始までは移行抑制機能及び遮蔽機能を損なわない設計とする。

評価は、立地評価と影響評価の 2 段階で行う。

立地評価では、廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山を抽出し、設計対応不可能な火山事象が施設の運用期間中に影響を及ぼす可能性について評価を行う。廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山のうち、設計対応不可能な火山事象の到達可能性範囲に敷地若しくは敷地近傍が含まれ、過去に巨大噴火が発生した火山については、「巨大噴火の可能性評価」を行った上で、「最後の巨大噴火以降の火山活動の評価」を行う。

影響評価では、施設の安全性に影響を与える可能性のある火山事象について評価を行う。

2. 調査及び検討内容

(1) 文献調査

第四紀に活動した火山(以下「第四紀火山」という。)のうち、廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山を抽出し、立地評価及び影響評価を行うことを目的として、第四紀火山について、敷地を中心とする半径 160 km の範囲(以下「地理的領域」という。)を対象に文献調査を実施した。

地理的領域内の第四紀火山の文献調査は、年代、活動様式等が網羅的に整理されているカタログを用いた。カタログは、「日本の火山(第 3 版)」(中野ほか編、2013)⁽¹⁾、「日本活火山総覧(第 4 版)」(気象庁編、2013)⁽²⁾、「第四紀火山岩体・貫入岩体データベース」(西来ほか編、2012)⁽³⁾、「第四紀噴火・貫入活動データベース」(西来ほか編、2014)⁽⁴⁾、「日本の第四紀火山カタログ」(第四紀火山カタログ委員会編、1999)⁽⁵⁾、「1 万年噴火イベントデータ集」(産業技術総合研究所地質調査総合センター編、2017)⁽⁶⁾及び各種

「地質図幅」である。また、カタログの引用文献等についても収集し、加えて、「海域火山データベース」(海上保安庁海洋情報部)⁽⁷⁾、「日本の主要第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図」(山元、2015)⁽⁸⁾及び「新編 火山灰アトラス」(町田・新井、2011)⁽⁹⁾についても文献調査を実施した。さらに、文献収集の更なる網羅性向上のため、補足的に国内外の主な科学技術系論文データベースを用いて、地理的領域内の第四紀火山に関する論文等についても文献調査を実施した。

なお、降下火砕物については、上記文献を用いて、地理的領域外の火山についても文献調査を実施した。

また、廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山のうち、設計対応不可能な火山事象の到達可能性範囲に敷地若しくは敷地近傍が含まれる火山については、地球物理学的調査の知見や近い将来の巨大噴火の発生可能性についても文献調査を実施した。

(2) 地形調査

主に国土地理院撮影の空中写真及び同院発行の地形図を使用して空中写真判読を行い、敷地を中心とする半径 30km の範囲及びその周辺地域において、第四紀火山の可能性のある地形の有無を把握した。

(3) 地質調査

地理的領域内の第四紀火山の噴出物を対象に地表踏査等を実施し、敷地を中心とする半径 30km の範囲及びその周辺地域において、噴出物の種類、分布、第四紀火山の活動時期等を把握した。

(4) 火山学的調査

地質調査において確認した降下火砕物及び火砕流堆積物を対象に、堆積物の厚さ、空間分布等を把握した。

(5) 地球物理学的調査

廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山のうち、設計対応不可能な火山事象の到達可能性範囲に敷地若しくは敷地近傍が含まれる火山を対象に、地震波速度構造、比抵抗構造、地震活動及び地殻変動に関する検討を実施し、現在のマグマ溜まりの状況について把握した。

3. 廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山の抽出

火山が廃棄物埋設地に与える影響を評価するため、文献調査並びに敷地及び敷地周辺における地質調査を実施し、地理的領域内(半径 160km)に分布する 48 の第四紀火山を抽出した。抽出結果を第 1 表及び第 1 図、地理的領域内の火山地質図を第 2 図に示す

なお、申請時点(2018年8月1日)では中野ほか編(2013)⁽¹⁾に基づき 43 の第四紀火山を抽出していたが、中野ほか編(2013)の WEB 版において 2019年3月19日の更新で三ツ森(碓ヶ関カルデラから分離)、阿闍羅山(碓ヶ関カルデラから分離)、先十和田(十和田から分離)、柴倉岳(新規)、網張火山群(岩手山から分離)の計 5 火山が新たに追加された。

廃棄物埋設地が位置する下北半島は、北側は津軽海峡に、東側は太平洋に、西側は陸奥湾にそれぞれ面し、敷地は、下北半島南部の太平洋側に位置し、この位置は火山フロントの前弧側(東側)にある。

地理的領域内の第四紀火山の形式、活動年代及び最後の活動からの経過期間を第 2 表に示す。これらの火山について、活動年代及び最後の活動からの経過期間から、廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山を評価した。

(1) 完新世に活動を行った火山

「日本の火山(第3版)」(中野ほか編, 2013)⁽¹⁾及び「日本活火山総覧(第4版)」(気象庁編, 2013)⁽²⁾を参照し、地理的領域内の第四紀火山のうち、完新世に活動を行った火山(以下「活火山」という。)を抽出した。

その結果、完新世に活動を行った北海道駒ヶ岳、恵山、恐山、岩木山、北八甲田火山群(気象庁編(2013)⁽²⁾による「八甲田山」に相当する。)、十和田、秋田焼山、八幡平火山群(気象庁編(2013)⁽²⁾による「八幡平」に相当する。)、岩手山及び秋田駒ヶ岳の 10 火山を廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山として抽出した。

(2) 完新世に活動を行っていない火山

完新世に活動を行っていない火山(38 火山)について、「日本の火山(第3版)」(中野ほか編, 2013)⁽¹⁾等の記載年代から、最後の活動からの経過期間が全活動期間よりも短い場合若しくは最後の活動からの経過期間が活動期間内の最大休止期間よりも短いとみなせる場合は、将来の活動性が否定できない火山と評価した。

その結果、横津岳、陸奥燧岳、田代岳、藤沢森、南八甲田火山群、八甲田カルデラ、

先十和田、玉川カルデラ、網張火山群、乳頭・高倉及び荷葉岳の 11 火山を抽出した。

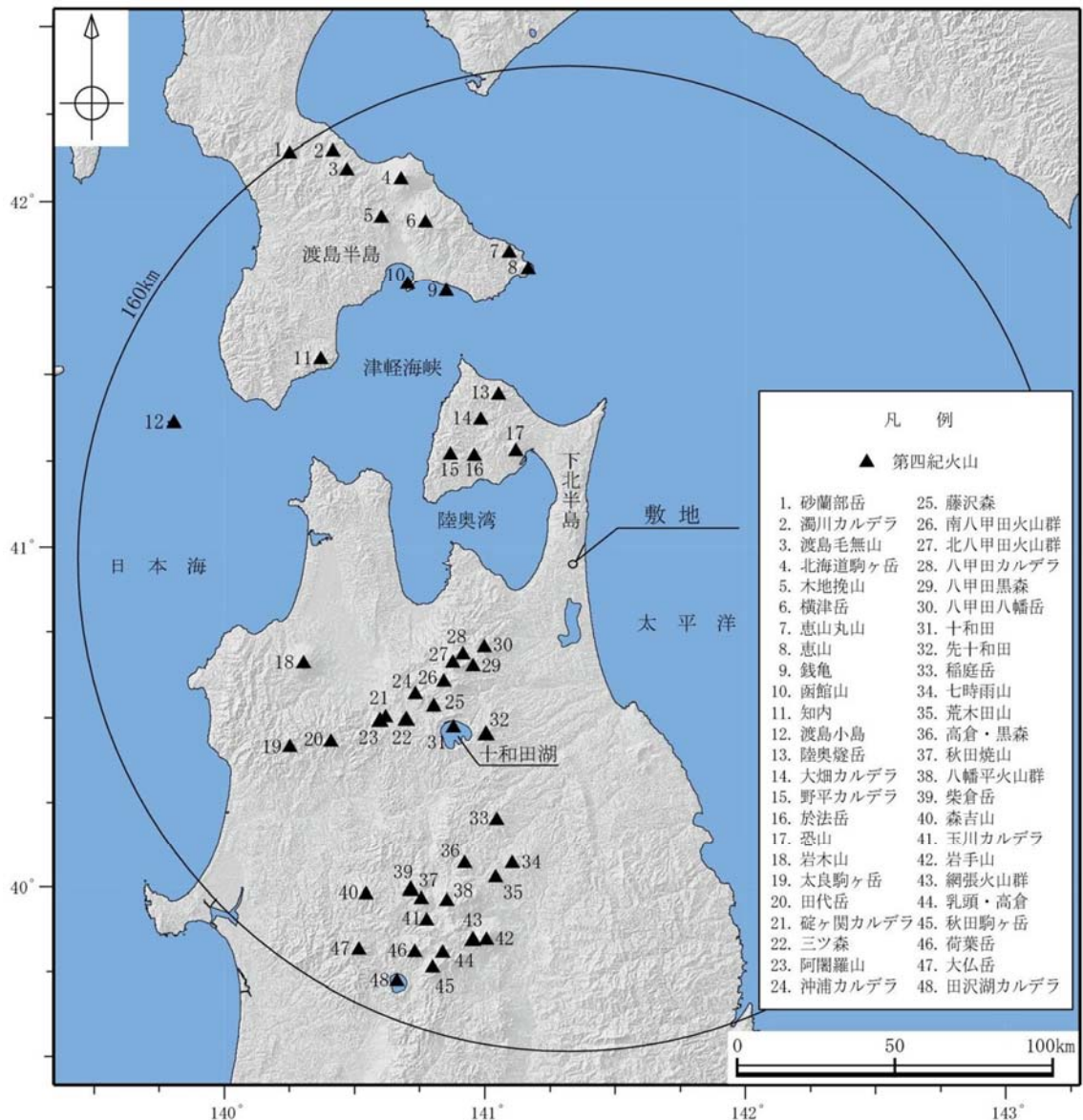
(3) 廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山

廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山として、「(1) 完新世に活動を行った火山」及び「(2) 完新世に活動を行っていない火山」より、北海道駒ヶ岳、横津岳、恵山、陸奥燧岳、恐山、岩木山、田代岳、藤沢森、南八甲田火山群、北八甲田火山群、八甲田カルデラ、十和田、先十和田、秋田焼山、八幡平火山群、玉川カルデラ、岩手山、網張火山群、乳頭・高倉、秋田駒ヶ岳及び荷葉岳の 21 の火山を抽出した。(第 3 図)

第1表 敷地周辺の第四紀火山一覧(敷地を中心とする半径160km範囲)

	火山名	位置		敷地からの離隔 (km)
		北緯	東経	
1	砂蘭部岳(さらんべだけ)	42° 08' 21"	140° 14' 05"	159
2	濁川カルデラ(にごりかわ)	42° 07' 11"	140° 26' 47"	148
3	渡島毛無山(おしまけなしやま)	42° 05' 15"	140° 28' 14"	144
4	北海道駒ヶ岳(ほっかいどうこまがたけ)	42° 03' 48"	140° 40' 38"	133
5	木地挽山(きじびきやま)	41° 57' 07"	140° 36' 09"	125
6	横津岳(よこつだけ)	41° 56' 16"	140° 46' 17"	118
7	恵山丸山(えさんまるやま)	41° 51' 07"	141° 05' 35"	100
8	恵山(えさん)	41° 48' 16"	141° 09' 58"	94
9	銭亀(ぜにかめ)	41° 44' 21"	140° 51' 05"	95
10	函館山(はこだてやま)	41° 45' 33"	140° 42' 14"	103
11	知内(しりうち)	41° 32' 33"	140° 22' 17"	103
12	渡島小島(おしまこじま)	41° 21' 27"	139° 48' 27"	136
13	陸奥燧岳(むつひうちだけ)	41° 26' 20"	141° 03' 10"	57
14	大畑カルデラ(おおはた)	41° 22' 00"	140° 59' 00"	53
15	野平カルデラ(のだい)	41° 16' 00"	140° 52' 00"	52
16	於法岳(おほうだけ)	41° 15' 47"	140° 57' 29"	46
17	恐山(おそれざん)	41° 16' 42"	141° 07' 11"	39
18	岩木山(いわきさん)	40° 39' 21"	140° 18' 11"	95
19	太良駒ヶ岳(だいらこまがたけ)	40° 24' 46"	140° 15' 04"	112
20	田代岳(たしろだけ)	40° 25' 42"	140° 24' 31"	100
21	碓ヶ関カルデラ(いかりがせき)	40° 30' 35"	140° 36' 35"	81
22	三ツ森(みつもり)	40° 29' 54"	140° 41' 49"	76
23	阿闍羅山(あじゃらやま)	40° 29' 37"	140° 35' 36"	83
24	沖浦カルデラ(おきうら)	40° 34'	140° 44'	69
25	藤沢森(ふじさわもり)	40° 31' 53"	140° 48' 14"	67
26	南八甲田火山群(みなみはっこうだ)	40° 36' 12"	140° 50' 33"	59
27	北八甲田火山群(きたはっこうだ)	40° 39' 32"	140° 52' 38"	53
28	八甲田カルデラ(はっこうだ)	40° 41' 00"	140° 55' 00"	49
29	八甲田黒森(はっこうだくろもり)	40° 38' 51"	140° 57' 18"	49
30	八甲田八幡岳(はっこうだはちまんだけ)	40° 42' 11"	140° 59' 54"	42
31	十和田(とわだ)	40° 28' 12"	140° 52' 45"	68
32	先十和田(せんとわだ)	40° 27' 10"	141° 00' 05"	65
33	稲庭岳(いなにわだけ)	40° 11' 54"	141° 02' 47"	90
34	七時雨山(ななしぐれやま)	40° 04' 09"	141° 06' 20"	102
35	荒木田山(あらかだやま)	40° 01' 35"	141° 02' 27"	108
36	高倉・黒森(たかくら・くろもり)	40° 04' 06"	140° 55' 23"	107
37	秋田焼山(あきたやけやま)	39° 57' 49"	140° 45' 25"	123
38	八幡平火山群(はちまんたい)	39° 57' 28"	140° 51' 14"	120
39	柴倉岳(しばくらだけ)	39° 59' 44"	140° 42' 49"	121
40	森吉山(もりよしざん)	39° 58' 36"	140° 32' 38"	130
41	玉川カルデラ(たまがわ)	39° 54' 00"	140° 46' 38"	129
42	岩手山(いわてさん)	39° 51' 09"	141° 00' 04"	128
43	網張火山群(あみはり)	39° 51' 03"	140° 57' 06"	129
44	乳頭・高倉(にゅうとう・たかくら)	39° 48' 17"	140° 50' 18"	137
45	秋田駒ヶ岳(あきたこまがたけ)	39° 45' 40"	140° 47' 57"	142
46	荷葉岳(かようだけ)	39° 48' 23"	140° 43' 50"	140
47	大仏岳(だいぶつだけ)	39° 48' 49"	140° 30' 56"	147
48	田沢湖カルデラ(たざわこ)	39° 43' 14"	140° 39' 43"	151

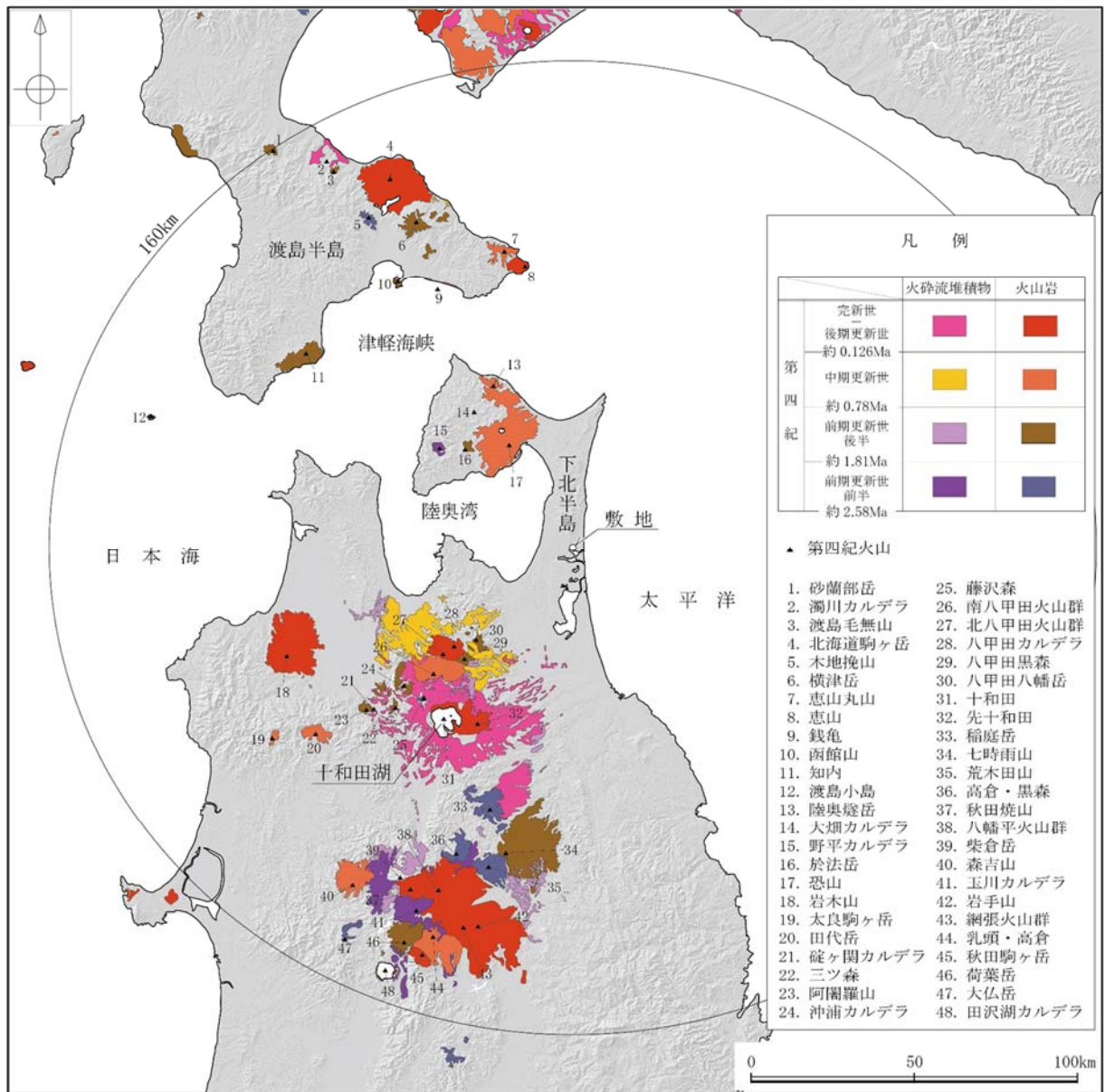
(中野ほか(2013)⁽¹⁾による。)



この地図の作成に当たっては、国土地理院長の承認を得て、同院発行の基盤地図情報を使用した。(承認番号 平成 30 情使、第 153 号)

(中野ほか編(2013)^①に基づき作成。)

第 1 図 敷地周辺の第四紀火山分布図(敷地を中心とする半径 160km 範囲)



第 2 図 地理的領域内の火山地質図

第2表 地理的領域内の第四紀火山における活動可能性(1/2)

火山名*1	形式*1	活動年代*1 (千年前)		最後の活動 からの 経過期間 (千年間)	廃棄物埋設地に 影響を及ぼし得る火山 (21火山)	
					完新世に活動を行 った火山 (10火山)	将来の活動可能性 が否定できない火 山 (11火山)*3
1 砂蘭部岳 (さらんべだけ)	複成火山	1,800		1,800		
2 濁川カルデラ (にごりかわ)	カルデラ-火砕流	15		15		
3 渡島毛無山 (おしまけなしやま)	溶岩流	前期更新世 前半	or 前期更新世	前期更新世 後半以降		
4 北海道駒ヶ岳 (ほっかいどうこまがた け)	複成火山	30 以前 110*4	~	A. D. 2,000	-	○
5 木地挽山 (きじびきやま)	複成火山	1,900	or 1,900 以降	約 1,900		
6 横津岳 (よこつだけ)	複成火山	1,100*5	or 1,100 以降 140*6	140		○
7 恵山丸山 (えさんまるやま)	複成火山	200		200		
8 恵山 (えさん)	複成火山 溶岩ドーム	50	~	A. D. 1,874	-	○
9 銭亀 (ぜにかめ)	カルデラ-火砕流	45		45		
10 函館山 (はこだてやま)	複成火山	1,200	~	900	900	
11 知内 (しりうち)	複成火山 溶岩ドーム	2,500	~	1,400	1,400	
12 渡島小島 (おしまこじま)	複成火山	160	~	110	110	
13 陸奥燧岳 (むつひうちだけ)	複成火山	1,200	~	500	500	○
14 大畑カルデラ (おおはた)	カルデラ	3,000	~	1,800	1,800	
15 野平カルデラ (のだい)	カルデラ	1,900		1,900		
16 於法岳 (おほうだけ)	複成火山	2,000		2,000		
17 恐山 (おそれざん)	火砕丘-カルデラ 溶岩ドーム	1,300	~	20	20	○*2
18 岩木山 (いわきさん)	複成火山 溶岩ドーム	650	~	A. D. 1,863	-	○
19 太良駒ヶ岳 (だいらこまがたけ)	複成火山	200		200		
20 田代岳 (たしろだけ)	複成火山 溶岩ドーム	600	~	600 以降 35~15.5*7	35~15.5*7	○
21 碓ヶ関カルデラ (いかりがせき)	カルデラ-火砕流台地	2,600	~	2,300	2,300	
22 三ツ森 (みつもり)	複成火山	1,900	~	1,300	1,300	
23 阿闍羅山 (あじゃらやま)	複成(複合)火山	1,000		1,000		
24 沖浦カルデラ (おきうら)	カルデラ-火砕流台 地、溶岩ドーム	1,700*8 900*8	~ ~	1,100*8 700*8	700*8	
25 藤沢森 (ふじさわもり)	溶岩流	3,500	~	1,700	1,700	○
26 南八甲田火山群 (みなみはっこうだ)	複成火山	1,100	~	300	300	○

第2表 地理的領域内の第四紀火山における活動可能性(2/2)

火山名 ^{*1}	形式 ^{*1}	活動年代 ^{*1} (千年前)		最後の活動からの経過期間 (千年間)	廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山 (21火山)	
					完新世に活動を行った火山 (10火山)	将来の活動可能性が否定できない火山 (11火山) ^{*3}
27 北八甲田火山群 (きたはっこうだ)	複成火山 溶岩ドーム	400	～ 0.6～0.4	0.6～0.4	○	
28 八甲田カルデラ (はっこうだ)	カルデラ-火砕流台地	900	～ 400	400		○ ^{*9}
29 八甲田黒森 (はっこうだくろもり)	複成火山	1,750	～ 1,600	1,600		
30 八甲田八幡岳 (はっこうだはちまんだけ)	複成火山	1,800	～ 1,600	1,600		
31 十和田 (とわだ)	カルデラ-火砕流台地 溶岩ドーム	200	～ A. D. 915	1	○	
32 先十和田 (せんとわだ)	複成(複合)火山	620 2,530 ^{*10}	～ 450	450		○
33 稲庭岳 (いなにわだけ)	複成火山	3,000	～ 2,600	2,600		
34 七時雨山 (ななしぐれやま)	複成火山、溶岩ドーム カルデラ-火砕流台地	1,100	～ 900	900		
35 荒木田山 (あらかだやま)	複成火山	2,100	～ 1,900	1,900		
36 高倉・黒森 (たかくら・くろもり)	複成火山	3,200	～ 2,500	2,500		
37 秋田焼山 (あきたやけやま)	複成火山 溶岩ドーム	500	～ A. D. 1,997	-	○	
38 八幡平火山群 (はちまんだい)	複成火山	1,200	～ 7.3	7.3	○	
39 柴倉岳 (しばくらだけ)	複成(複合)火山	2,600 1,200	～ 2,000 ^{*11}	1,200		
40 森吉山 (もりよしざん)	複成火山 溶岩ドーム	1,100	～ 700	700		
41 玉川カルデラ (たまがわ)	カルデラ-火砕流	2,000	and 1,000	1,000		○
42 岩手山 (いわてさん)	複成火山	700	～ A. D. 1,919	-	○	
43 網張火山群 (あみはり)	複成(複合)火山	1,620	～ 300	300		○
44 乳頭・高倉 (にゅうとう・たかくら)	複成火山 溶岩ドーム	600	～ 100	100		○
45 秋田駒ヶ岳 (あきたこまがたけ)	複成火山、溶岩流及 び小型楯状火山	100	～ A. D. 1,971	-	○	
46 荷葉岳 (かようだけ)	複成火山、溶岩流及 び小型楯状火山、溶 岩ドーム	2,200	～ 900	900		○
47 大仏岳 (だいぶつだけ)	複成火山	3,000	～ 2,100	2,100		
48 田沢湖カルデラ (たざわこ)	カルデラ 複成火山、溶岩ド ーム	1,800	～ 1,400	1,400		

*1: 中野ほか編(2013)⁽¹⁾、西来ほか編(2012)⁽³⁾及び西来ほか編(2014)⁽⁴⁾に基づき作成

*2: 気象庁編(2013)⁽²⁾による活火山に該当するため抽出

*3: 最後の活動からの経過期間が活動期間内の最大休止期間よりも短いとみなせる火山

*4: 雁澤ほか(2005)⁽⁴²⁾によれば、北海道駒ヶ岳起源の降下火砕物(E-x)が洞爺火山灰の下位に認められ、その年代を110kaと推定している

*5: 高田、中川(2016)⁽⁴³⁾によれば、横津岳のグループ1の活動は1.71Maから開始したとされるが、中野ほか編(2013)⁽¹⁾の年代を記載

*6: 新エネルギー・総合技術開発機構(1988)⁽⁴⁴⁾によれば、横津岳に含まれる熊泊山火山噴出物の年代として0.14±0.04Ma(FT年代)が得られている

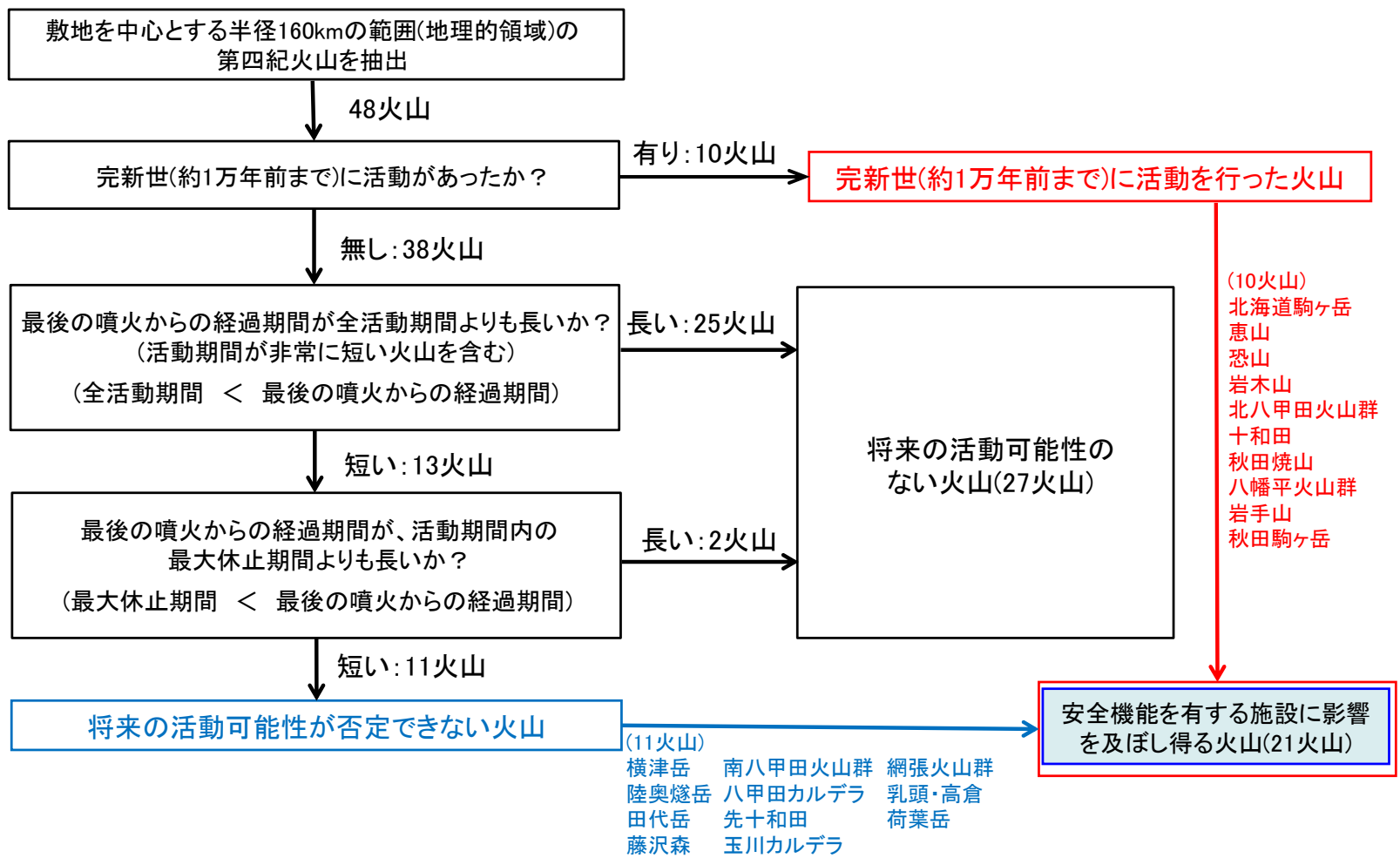
*7: 宝田(1991)⁽⁴⁵⁾によれば、層序的に十和田大不動火砕流(約3.5万年前)と十和田八戸火砕流(約1.55万年前)の噴出時期の間にあるとされる

*8: 宝田、村岡(2004)⁽²⁷⁾による

*9: 中野ほか編(2013)⁽¹⁾によれば、カルデラ形成時期は0.90Ma、0.76Ma及び0.40Maの各年代値が記載されているが、その活動時期を0.90Ma～0.40Maと保守的に評価した

*10: 工藤(2018)⁽⁴⁶⁾によれば、十和田湖周辺の高山溶岩・火山砕屑岩で、2.53±0.07Ma(K-Ar年代)が得られている

*11: 須藤(1992)⁽⁴⁷⁾によれば、柴倉岳火山噴出物と榑森火山噴出物は識別されており、前者で2.6±0.5Maと2.0±0.2Ma、後者で1.2±0.1Ma(K-Ar年代)が得られている



第3図 火山の抽出フロー

4. 廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山の火山活動に関する個別評価

(1) 詳細調査対象火山の抽出

廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山(21火山)について、活動履歴に関する文献調査により、立地評価の対象となる設計対応不可能な火山事象の発生実績、過去最大規模の噴火による火山噴出物の敷地への到達可能性等について第3表に整理した。

火砕物密度流については、敷地近傍では火砕流堆積物の分布は認められないものの、十和田及び八甲田カルデラの過去最大規模の噴火における火砕流の到達可能性範囲に敷地若しくは敷地近傍が含まれる(第4図及び第5図参照)。一方、十和田及び八甲田カルデラ以外の施設に影響を及ぼし得る火山については、発生実績や敷地からの離隔等より、火砕物密度流が敷地に到達する可能性は十分に小さいと評価した。

溶岩流、岩屑なだれ、地滑り及び斜面崩壊については、敷地から50km以内に分布する恐山及び八甲田カルデラが評価対象火山となる。恐山については、溶岩流、岩屑なだれ、地滑り及び斜面崩壊に伴う堆積物は敷地周辺には分布しない。一方、八甲田カルデラについては、溶岩流、岩屑なだれ、地滑り及び斜面崩壊の発生実績が認められない。その他の19火山については、敷地から50km以内に分布しないことから、評価対象外である。したがって、これらの火山事象が敷地に到達する可能性は十分に小さいと評価した。

新しい火口の開口及び地殻変動については、敷地が、廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山の過去の火口及びその近傍に位置しないこと、並びに火山フロントより前弧側(東方)に位置することから、これらの火山事象が敷地において発生する可能性は十分に小さいと評価した。

以上のことから、廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山(21火山)の火砕物密度流以外の設計対応不可能な火山事象は、過去最大規模の噴火を想定しても、施設に影響を及ぼす可能性は十分小さいと評価した。

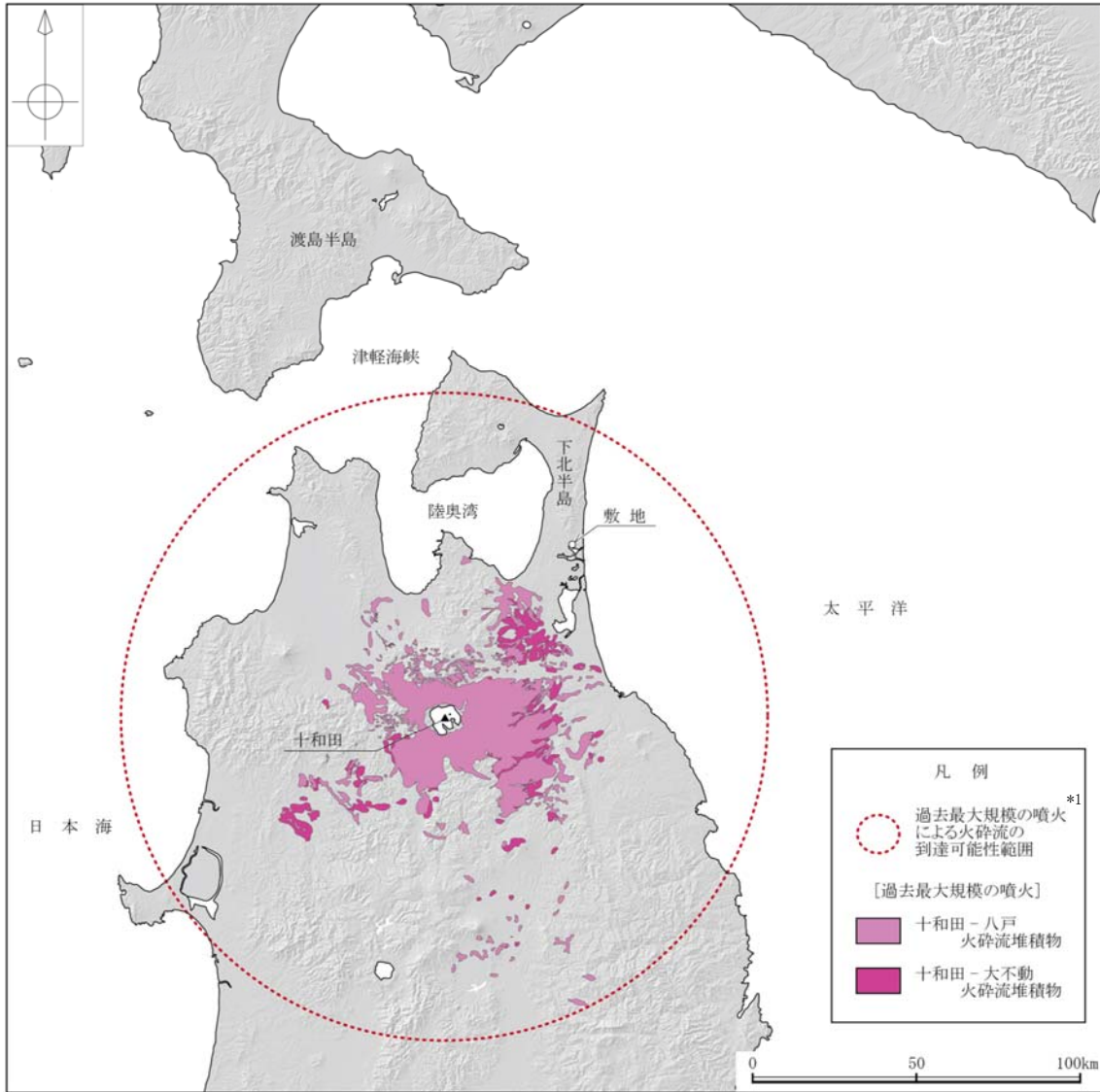
一方、火砕物密度流については、敷地及び敷地近傍が十和田及び八甲田カルデラの火砕流の到達可能性範囲に含まれることから、十和田及び八甲田カルデラについて、詳細な調査・検討を実施した。なお、八甲田カルデラについては、隣接する南八甲田火山群及び北八甲田火山群を含めて「八甲田山」として詳細な調査・検討を実施した。

第3表 設計対応不可能な火山事象とその噴出物の敷地への到達可能性評価

(地理的領域内の第四紀火山の文献調査結果に基づき作成)

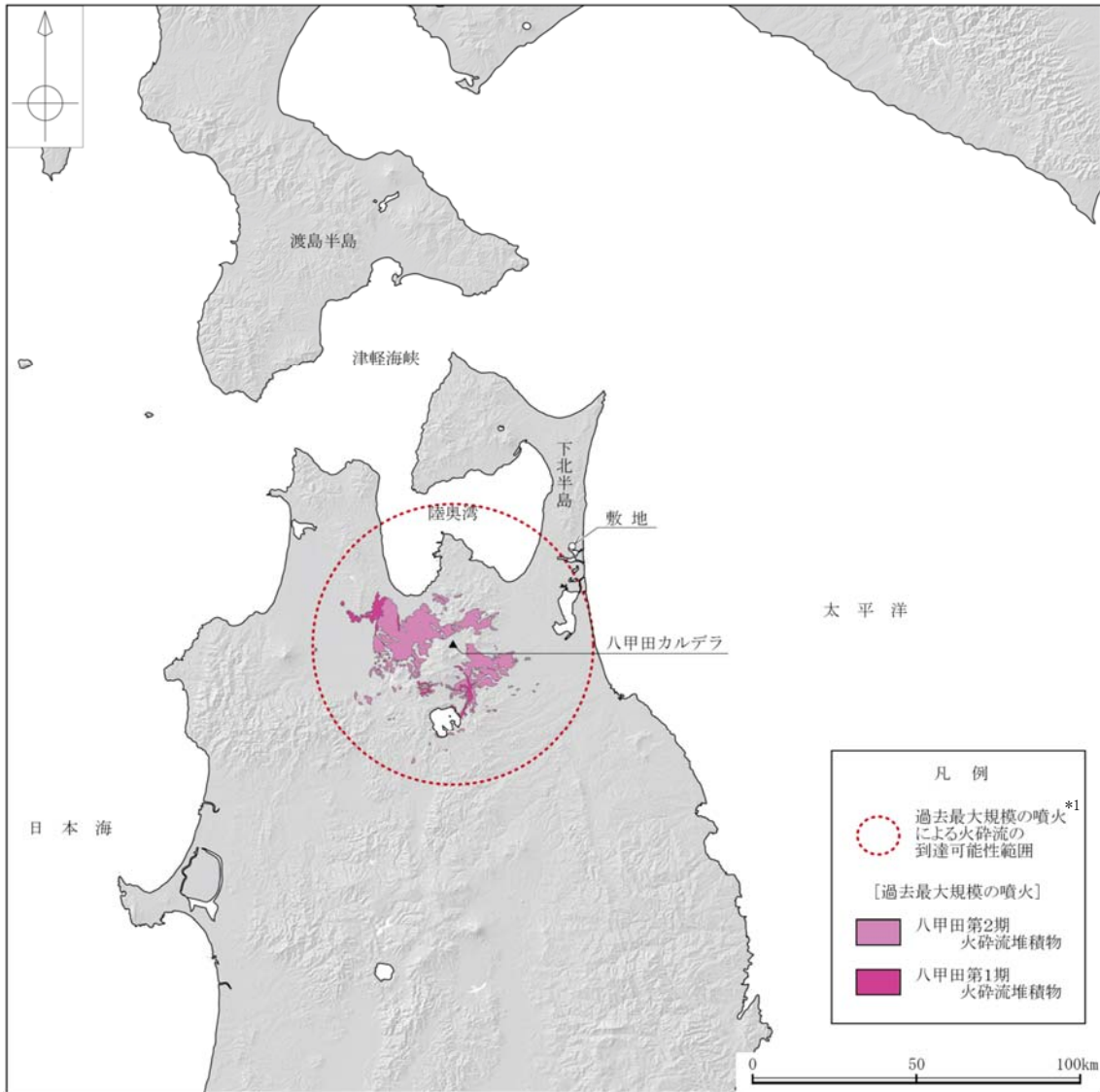
火山名	敷地からの距離 (km)	設計対応不可能な火山事象				
		火砕物 密度流	溶岩流	岩屑なだれ、 地滑り及び 斜面崩壊	新しい火口の 開口	地殻変動
		検討対象となる火山の敷地からの距離				
		160km以内	50km以内	50km以内	—	—
4 北海道駒ヶ岳 (ほっかいどうこまがたけ)	133	○ (7km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
6 横津岳 (よこつだけ)	118	○ (12km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
8 恵山 (えさん)	94	○ (4km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
13 陸奥燧岳 (むつひうちだけ)	57	○ (8km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
17 恐山 (おそれざん)	39	○ (15km)	○ (9km)	○ (15km)	○ ^{*1}	○ ^{*1}
18 岩木山 (いわきさん)	95	○ (6km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
20 田代岳 (たしろだけ)	100	○ (12km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
25 藤沢森 (ふじさわもり)	67	◎	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
26 南八甲田火山群 (みなみはっこうだ)	59	○ (13km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
27 北八甲田火山群 (きたはっこうだ)	53	○ (10km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
28 八甲田カルデラ (はっこうだ)	49	× (42km)	◎	◎	○ ^{*1}	○ ^{*1}
31 十和田 (とわだ)	68	× (100km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
32 先十和田 (せんとうだ)	65	○ (24km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
37 秋田焼山 (あきたやけやま)	123	○ (12km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
38 八幡平火山群 (はちまんたい)	120	◎	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
41 玉川カルデラ (たまがわ)	129	○ (41km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
42 岩手山 (いわてさん)	128	○ (20km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
43 網張火山群 (あみはり)	129	○ (8km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
44 乳頭・高倉 (にゅうとう・たかくら)	137	◎	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
45 秋田駒ヶ岳 (あきたこまがたけ)	142	○ (13km)	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}
46 荷葉岳 (かようだけ)	140	◎	検討不要		○ ^{*1}	○ ^{*1}

◎：当該火山の活動履歴上、発生実績が認められない火山事象
 ○：当該火山の活動履歴上、発生実績は認められるが、敷地近傍への到達可能性が十分に小さい火山事象
 ×：過去の最大規模の噴火による火山噴出物が、敷地及び敷地近傍に到達した可能性のある火山事象
 ()内の距離：過去の最大規模の噴火による火山噴出物の到達距離
 検討不要：敷地からの隔離による判断
 *1：敷地は過去の火口及びその近傍に位置しないことによる



*1: 到達可能性範囲は、火山を中心に過去の最大規模の噴火に伴う火砕流の最大到達距離を半径とし、円を描いた。

第4図 十和田における過去最大規模の噴火による火砕流堆積物の分布と到達可能性範囲
 (中川ほか(1972)⁽⁵³⁾、土井(1993)⁽⁵⁴⁾、村岡ほか(1991)⁽⁵⁵⁾、大沢ほか(1993)⁽⁵⁶⁾、大沢・須田
 (1978)⁽⁵⁷⁾、町田・新井(2011)⁽⁹⁾、長森ほか(2013)⁽⁵⁸⁾に基づき作成)



*1：到達可能性範囲は、火山を中心に過去の最大規模の噴火に伴う火砕流の最大到達距離を半径とし、円を描いた。

第5図 八甲田カルデラにおける過去最大規模の噴火による
火砕流堆積物の分布と到達可能性範囲

(村岡・高倉(1988)⁽²⁸⁾、村岡ほか(1991)⁽⁵⁵⁾、大沢ほか(1993)⁽⁵⁶⁾、青森県史編さん自然部会
(2001)⁽⁵⁹⁾、長森ほか(2013)⁽⁵⁸⁾、工藤ほか(2019)⁽⁴⁸⁾に基づき作成)

(2) 十和田

気象庁(2013)⁽²⁾によると、十和田は先カルデラ成層火山群、十和田カルデラ及び後カルデラ成層火山・溶岩ドームからなるとしている。その活動は、Hayakawa (1985)⁽¹⁰⁾によると、先カルデラ期、カルデラ形成期及び後カルデラ期に区分されるとしている。

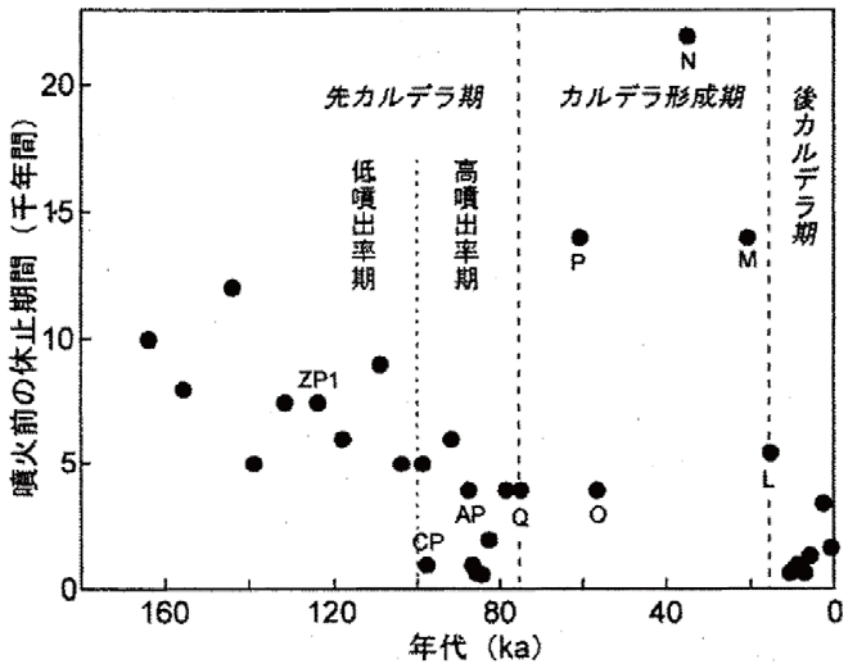
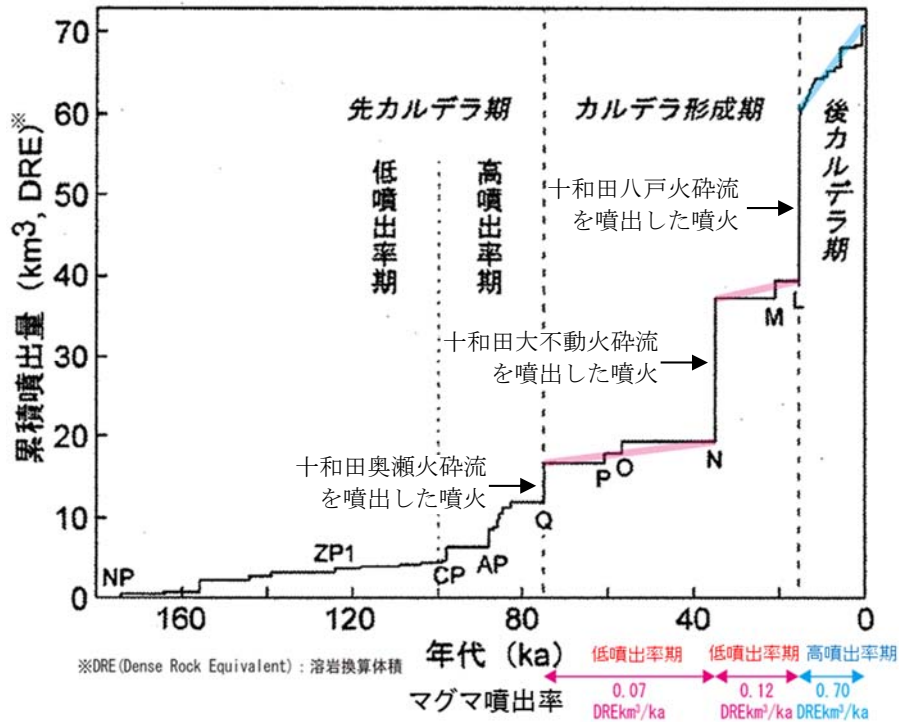
Hayakawa(1985)⁽¹⁰⁾及び工藤ほか(2011)⁽¹¹⁾によると、カルデラ形成期に火砕流を伴う規模の大きな噴火を3回(十和田奥瀬火砕流、十和田大不動火砕流及び十和田八戸火砕流)起こしている(第6図)。

一方、Yamamoto et al(2018)⁽¹²⁾は、地球科学的特徴から十和田奥瀬火砕流を噴出した噴火を先カルデラ期とみなすとしており、見解が分かれている(第7図)。

Hayakawa(1985)⁽¹⁰⁾によると、後カルデラ期に毛馬内火砕流(見かけの噴出量は約5km³)を噴出したとしている。

これらの噴火のうち巨大噴火に該当する噴火は、十和田大不動火砕流(見かけの噴出量は約40km³)及び十和田八戸火砕流(見かけの噴出量は約40km³)を噴出した噴火(以下それぞれを「噴火エピソードN」及び「噴火エピソードL」という。)である。したがって、この2回の巨大噴火と最後の巨大噴火(噴火エピソードL)以降の噴火を対象に評価を実施した。

なお、十和田奥瀬火砕流(見かけの噴出量は約10km³)を噴出した噴火は巨大噴火に該当しないが、噴火の様式と規模に基づきカルデラ形成期として整理した。

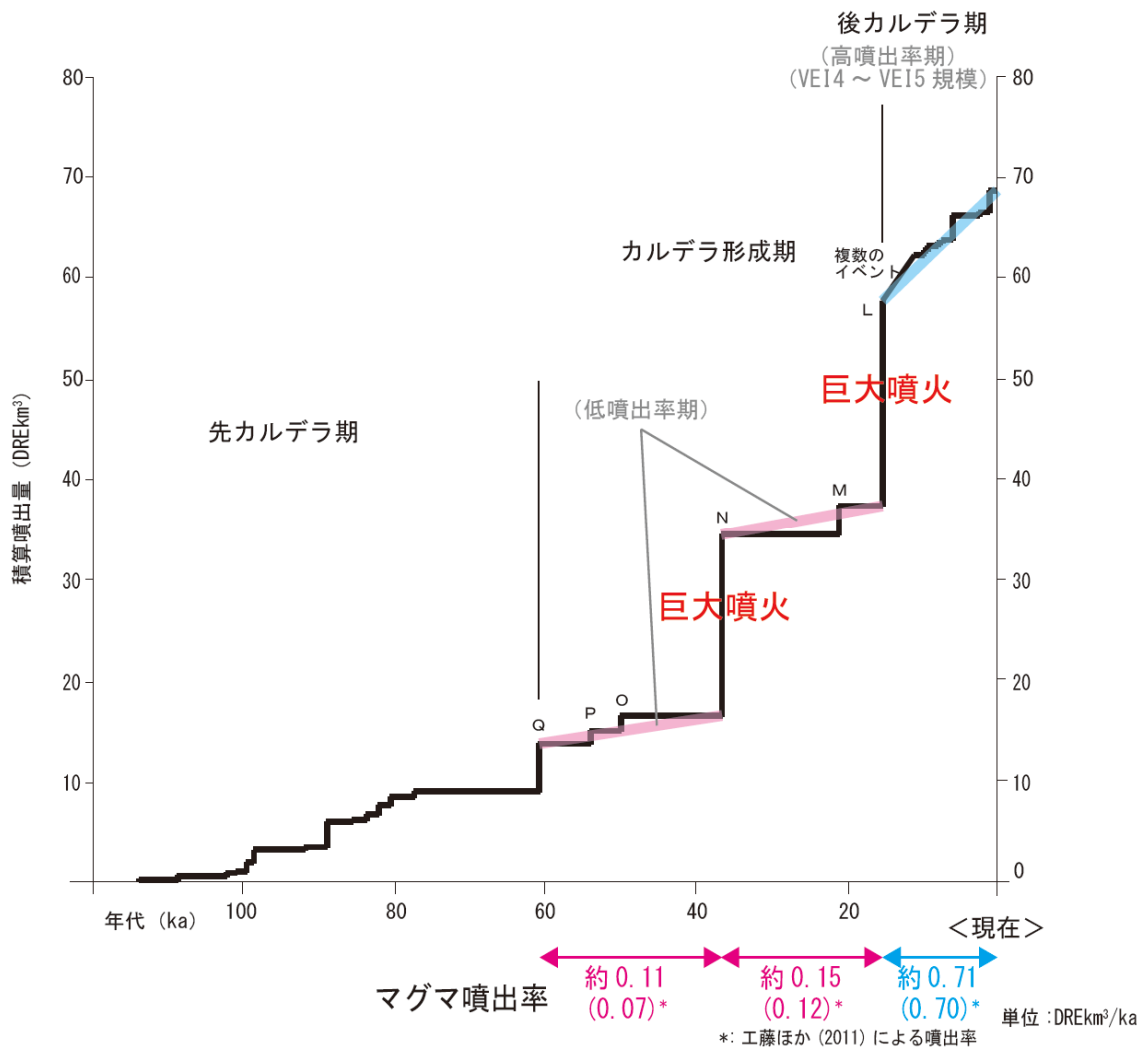


[カルデラ形成期]	[先カルデラ期]
L: 十和田八戸火砕流及び八戸テフラ	AP: 十和田アオスジテフラ
M: 十和田ビスケット2テフラ	CP: 十和田カステラテフラ
N: 十和田大不動火砕流及び切田テフラ	ZP1: 十和田ザラメ1テフラ
O: 十和田合同テフラ	NP: 十和田ヌカミソテフラ
P: 十和田キビダンゴテフラ	
Q: 十和田奥瀬火砕流及びレッドテフラ	

注) 八甲田白ベタテフラの年代を 190ka とした場合における各噴出物の年代

第 6 図 十和田の階段ダイアグラム及び噴火前休止期間の時間変化

(工藤ほか(2011)⁽¹¹⁾に基づき作成)



第7図 十和田の階段ダイアグラム(Yamamoto et al. (2018)⁽¹²⁾に基づき作成)

(i) 巨大噴火の可能性評価

a. 活動履歴

工藤ほか(2011)⁽¹¹⁾によると、現在の活動期である後カルデラ期は、高頻度(噴火間隔 3,400 年以下)かつ一回の噴出量が 2.5DREkm³以下であり、カルデラ形成期の低頻度(噴火間隔 22,000 年~4000 年)かつ一回の噴出量 1.2DREkm³~20.3DREkm³とは異なるとしている(第 6 図)。

一方、十和田の 10 万年前以降のマグマ供給率はほぼ一定であり、また、後カルデラ期は先カルデラ期後期と活動様式が類似していることから、今後マグマ供給率が減少しなければ、長期的(数万年スケール)には再びカルデラ形成期に移行する可能性が指摘されるとしている。しかし、過去の活動履歴から、大規模噴火の前には数万年にわたって局在的な低噴出率期(噴火エピソード N の前は 0.07DREkm³/千年、噴火エピソード L の前は 0.12DREkm³/千年)が先行するとしており、現在の活動は、約 15,000 年間にわたって高噴出率期(0.70DREkm³/千年)にあり、噴出量 1 DREkm³以下の小規模噴火も数多く発生していることから、現状ではカルデラ形成期のような状態に至っていないと考えられるとしている。したがって、今後も短期的(数百年~数千年スケール)には、過去 15,000 年間と同様な活動が継続すると推定され、仮に、今後カルデラ形成を伴う大規模噴火が発生するとしても数万年先になると予想されるとしている。

なお、工藤ほか(2011)⁽¹¹⁾の「カルデラ形成を伴う大規模噴火」は、「巨大噴火」に相当する。

一方、Yamamoto et al(2018)⁽¹²⁾において、階段ダイアグラム(第 7 図)が示されており、これに基づき噴出率の傾向を確認した結果、カルデラ形成期の巨大噴火前は低噴出率期(噴火エピソード L の前は約 0.15DREkm³/千年)であるが、現在の後カルデラ期は高噴出率期(約 0.71DREkm³/千年)となっている。これは、工藤ほか(2011)⁽¹¹⁾による噴出率の傾向と同様である。

また、十和田における近い将来の巨大噴火の発生可能性に言及した文献について調査した結果、高橋(2008)⁽¹³⁾及び工藤ほか(2011)⁽¹¹⁾には、現状、巨大噴火の可能性が低いとする主旨の知見は認められるが、巨大噴火が起こる可能性があるとする知見は認められない。また、十和田火山防災協議会(2018)⁽¹⁴⁾による十和田火山災害想定影響範囲図においても、巨大噴火を想定していない。

b. 地質調査及び火山学的調査

十和田における巨大噴火に伴う2回の大規模火砕流(十和田大不動火砕流及び十和田八戸火砕流)の噴出物を対象に調査を実施し、その分布を確認した。十和田近傍から敷地を中心とした地域にかけての地質柱状図を第8図に示す。なお、巨大噴火には該当しないものの、十和田奥瀬火砕流は敷地には到達していないことを確認した。

(a) 十和田大不動火砕流

十和田大不動火砕流を伴う巨大噴火では、火砕流の噴出に先立って爆発的噴火に伴う降下火砕物(十和田切田テフラ)が噴出しており、火砕流堆積物の直下に、この堆積物が認められる。十和田大不動火砕流堆積物及び十和田切田テフラの分布を第9図に示す。

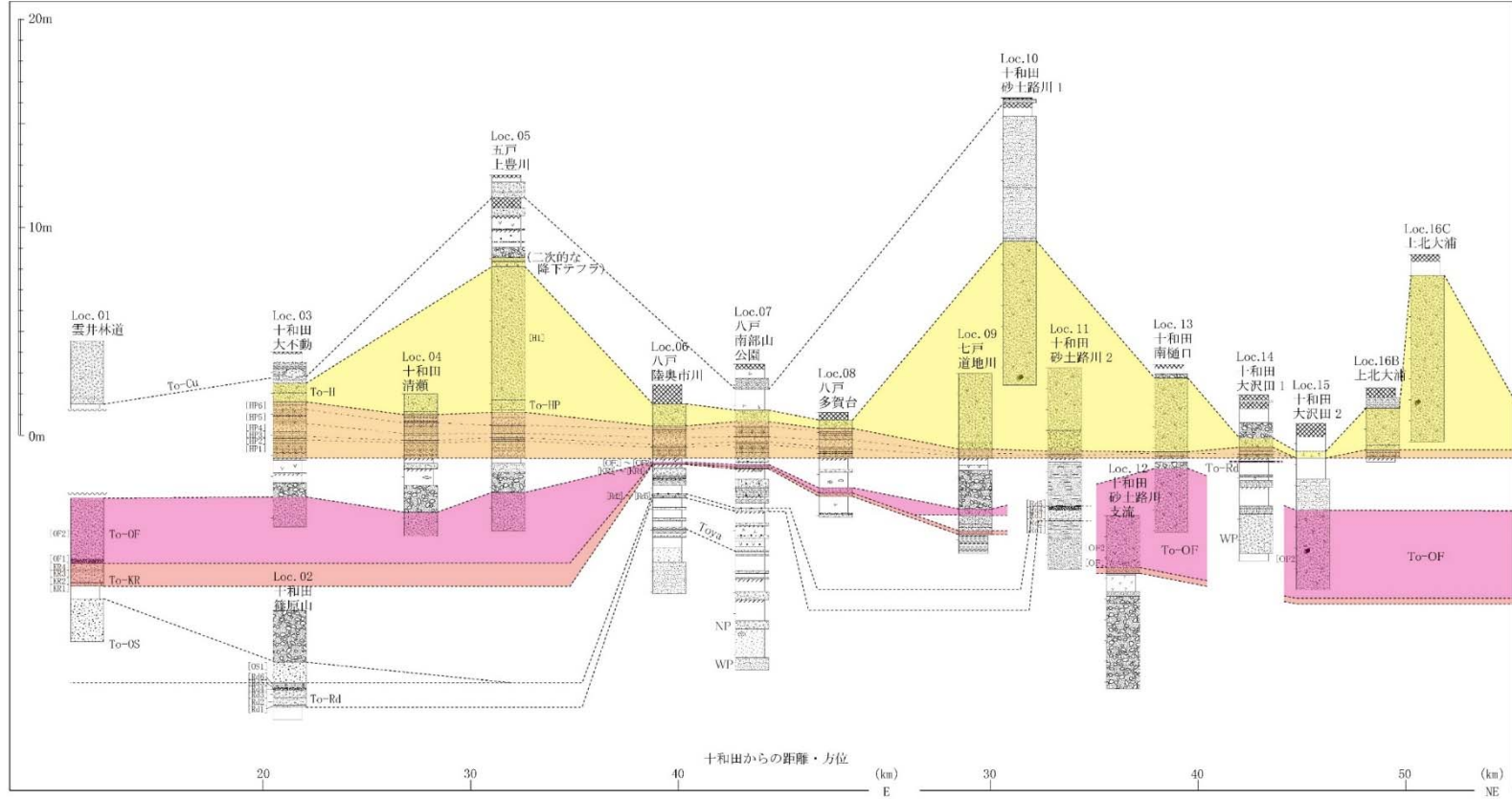
十和田大不動火砕流堆積物は、六ヶ所鷹架西(Loc. 33)及び野辺地目ノ越1(Loc. 50)において、ローム層中に軽石混じり火山灰層(火砕流堆積物)が層厚約16 cm及び約3 cmのパッチ状として認められる。また、敷地を含む更に北方の地域では、層相から火砕流堆積物と判断できないものの、ローム層中に十和田大不動火砕流起源に対比される径約1 cm以下の軽石が認められ、再処理敷地内(Loc. 26)においては、最大平均径約4mmの軽石が認められる(第10図)。したがって、火砕流堆積物の分布及びその層相の特徴より、敷地はその到達末端に位置すると評価した。一方、十和田切田テフラは、北方に向かって層厚を減じ、東北淋代2(Loc. 19)、六ヶ所平沼1(Loc. 23)等において、層厚約3 cm～約7 cmで確認した。

(b) 十和田八戸火砕流

十和田八戸火砕流を伴う巨大噴火では、火砕流の噴出に先立って爆発的噴火に伴う降下火砕物(十和田八戸テフラ)が噴出しており、火砕流堆積物の直下に、この堆積物が認められる。十和田八戸火砕流堆積物及び十和田八戸テフラの分布を第11図に示す。

十和田八戸火砕流堆積物は、塊状無層理で淘汰が悪く、軽石を主体として褐灰～灰白色火山灰の基質からなる。敷地近傍では、ローム層中に軽石混じり火山灰層(火砕流堆積物)が層厚約5 cm～約20 cmのパッチ状を呈する火砕流堆積物として確認した(第10図)。また、敷地より北方の地域では、層相から火砕流堆積物

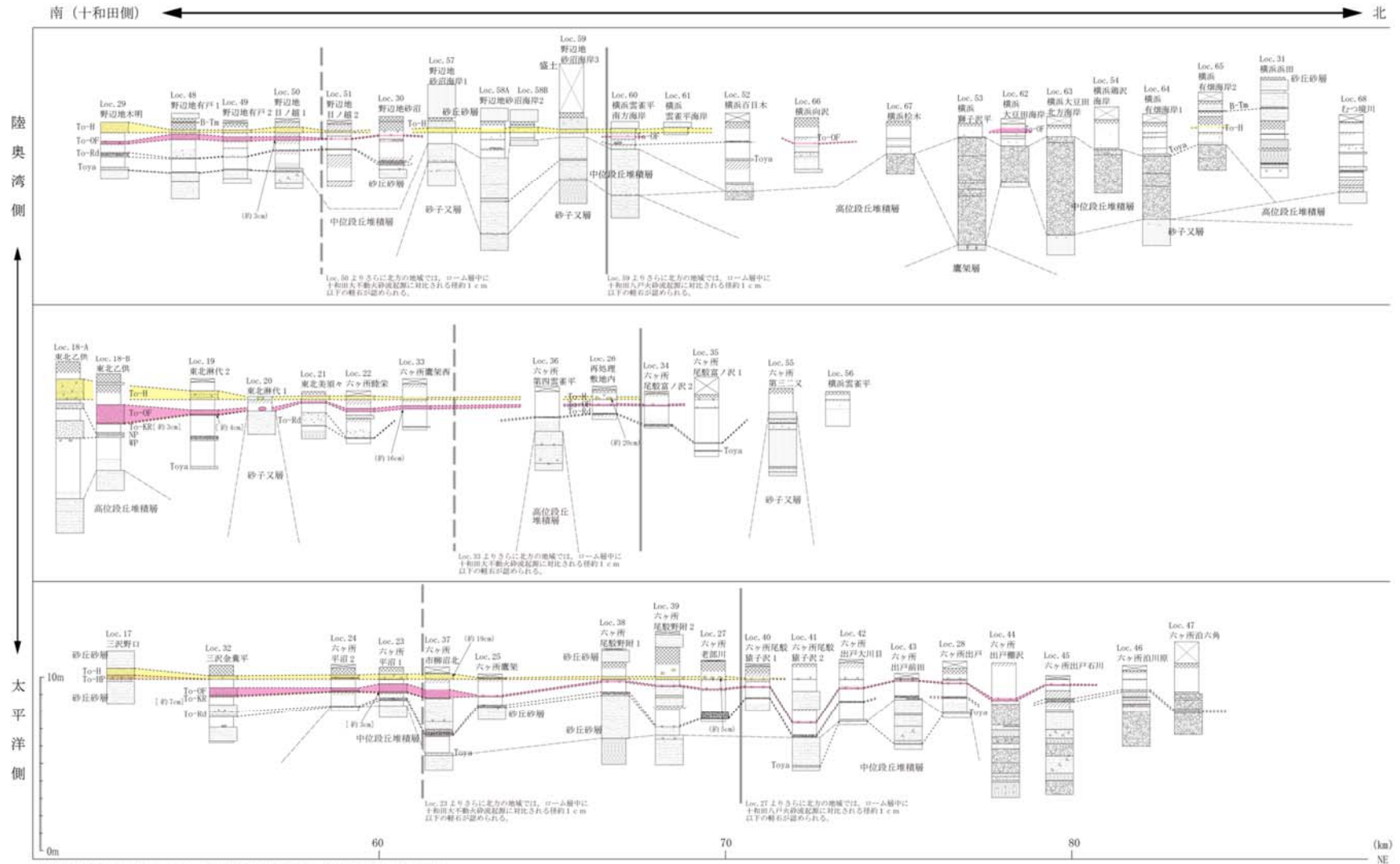
と判断できないものの、ローム層中に十和田八戸火砕流起源に対比される径約 1 cm以下の軽石が認められる。したがって、火砕流堆積物の分布及びその層相の特徴より、敷地はその到達末端に位置すると評価した。一方、十和田八戸テフラは、北方に向かい急激に層厚を減じ、三沢市野口 (Loc. 17) より北方では確認できない。



火山噴出物	巨大噴火による火砕堆積物	非火山性の堆積物など	カルデラ形成期の主な火山噴出物	その他の火山噴出物	火砕流堆積物の層相を示す堆積物が分布する範囲 (北限)
<ul style="list-style-type: none"> 細粒火山灰 粗粒火山灰 軽石 火山岩片・スコリア 火砕流堆積物(火山灰質) 火砕流堆積物(火山岩片質) 火砕流堆積物(パンチ状に分布) 軽石(散在する層相を示す) 火山豆石 	<ul style="list-style-type: none"> To-II To-HP To-OF To-KR 	<ul style="list-style-type: none"> 盛土、表土など 黒色土壌 暗褐色土壌 ローム 基盤岩類 礫層中部層 	<ul style="list-style-type: none"> 粘土・シルト 砂・シルト互層 砂 砂礫・礫 腐植 生成化石 炭化木 	<ul style="list-style-type: none"> 十和田起源 後カルデラ期 To-Cu: 十和田中殿テフラ 先カルデラ期 NP: ヌカミノ軽石 北八甲田火山群起源 WP: 甲地軽石 広城火山灰 B-Tn: 白頭山若小牧火山灰 Toya: 洞窟火山灰 	<ul style="list-style-type: none"> 十和田大不動 火砕流堆積物 十和田八戸 火砕流堆積物

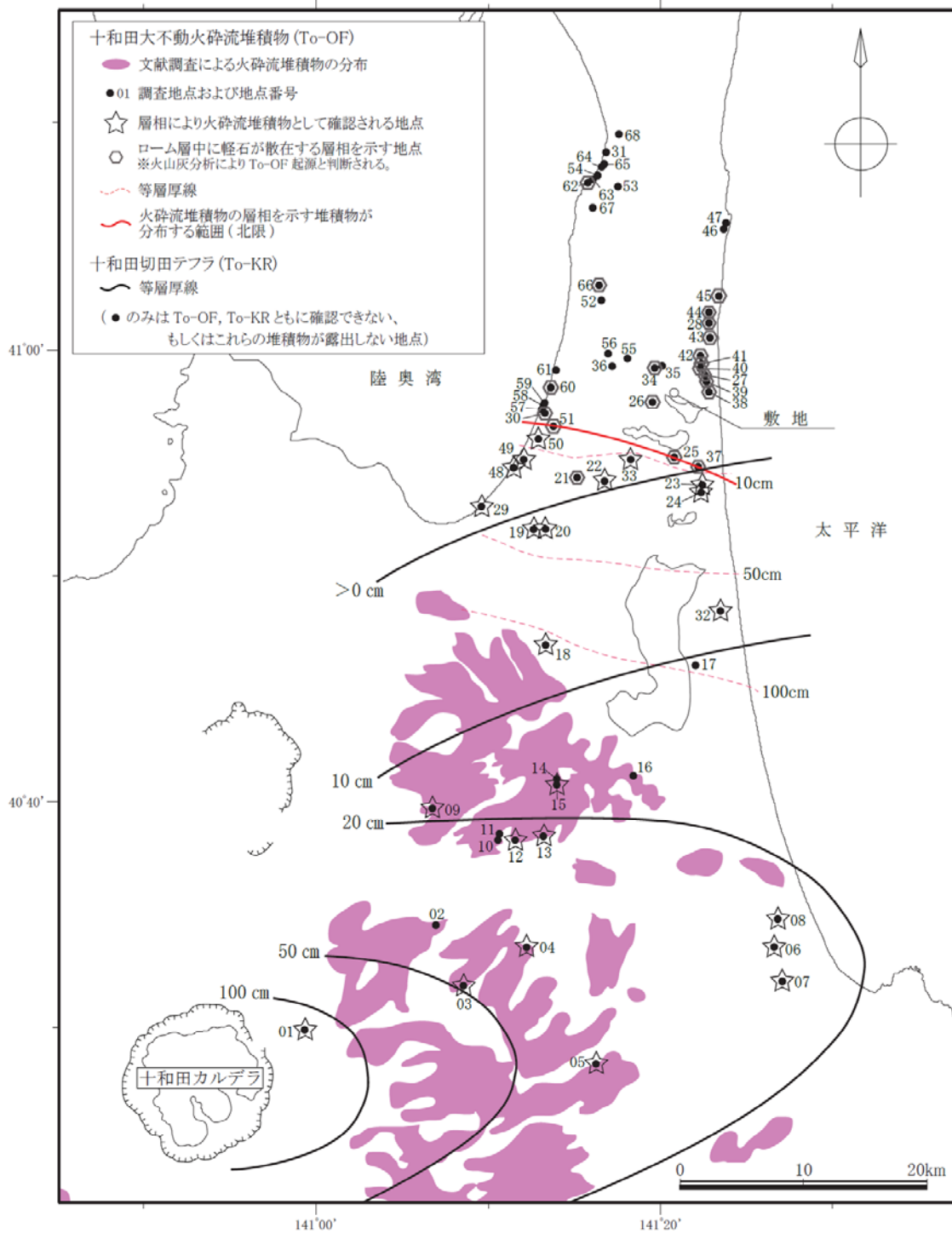
第8図 巨大噴火に伴う火砕流堆積物に着目した地質柱状図(1/2)

(各調査地点の位置は第9図及び第11図に示す)



十和田からの距離・方位

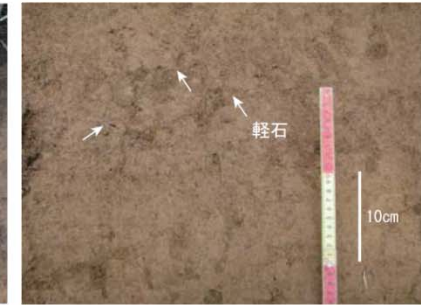
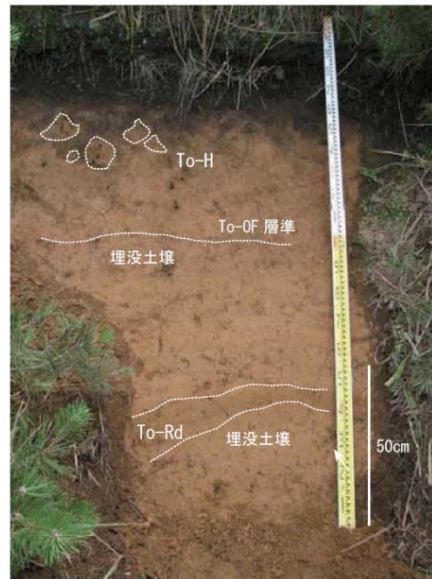
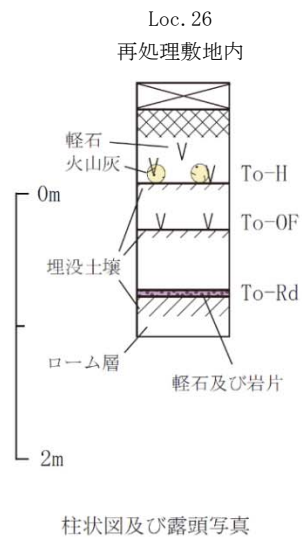
第8図 巨大噴火に伴う火砕流堆積物に着目した地質柱状図(2/2)
(各調査地点の位置は第9図及び第11図に示す)



(土井(1993)⁽⁵⁴⁾及び町田・新井(2011)⁽⁹⁾に基づき作成)

第9図 十和田大不動火砕流堆積物の分布及び十和田切田テフラの等層厚線図

(各調査地点の地質柱状図は第8図に示す)

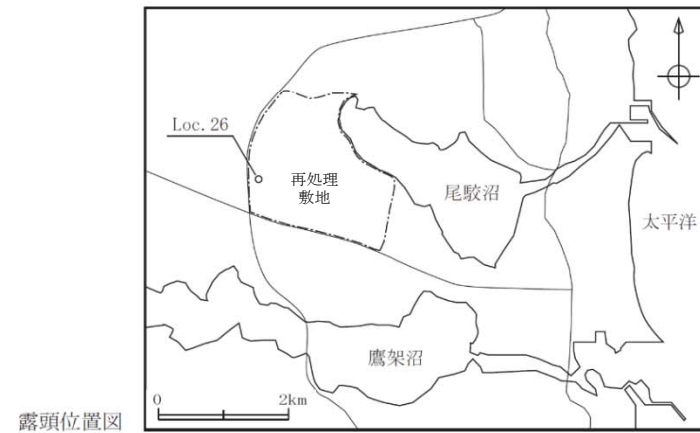


十和田大不動火砕流堆積物起源の軽石
ローム層中に、僅かに軽石が点在する。
最大平均粒径は約4mmである。

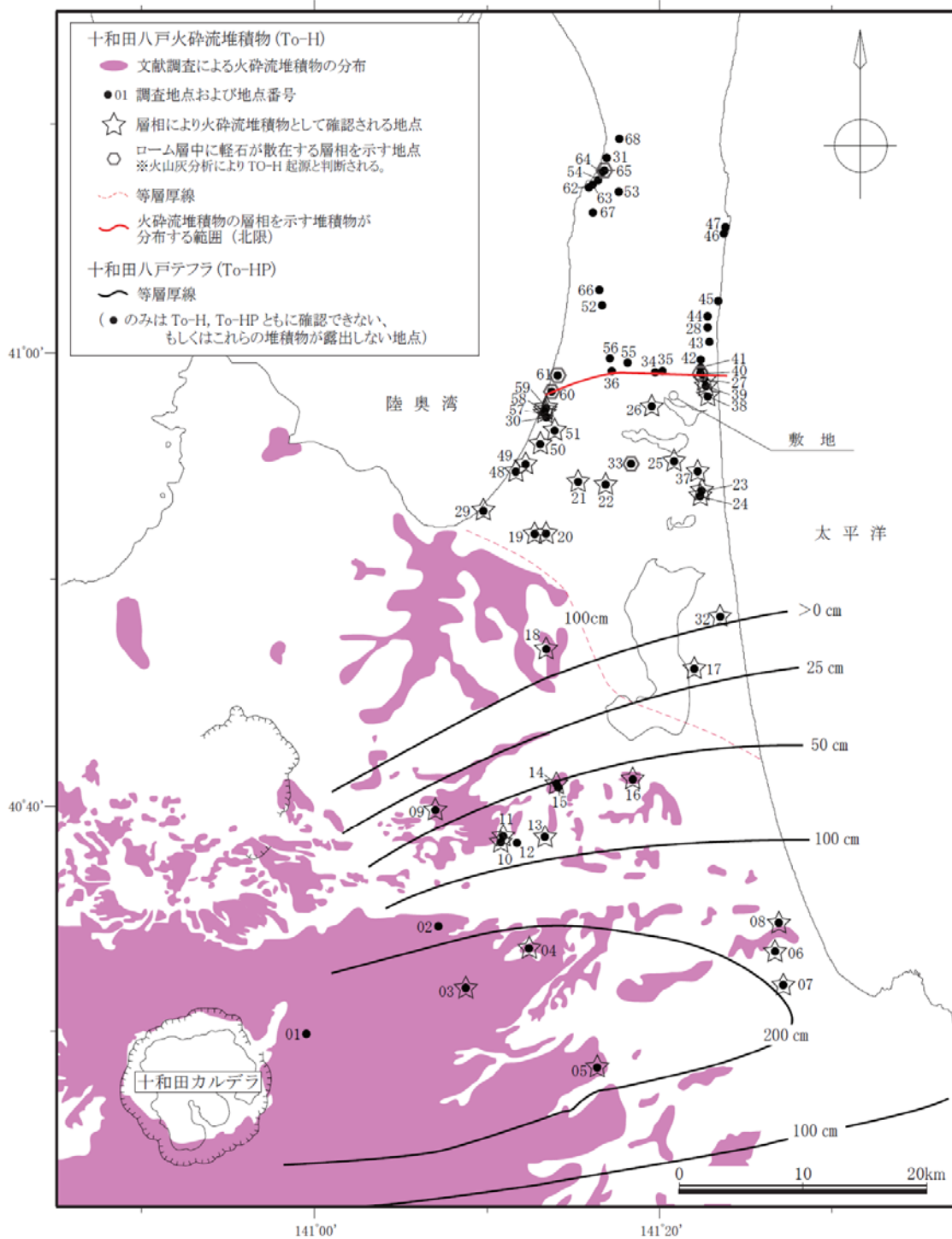


十和田八戸火砕流堆積物
軽石混じり火山灰がパッチ状に認められる。
層厚は約20cm、最大平均粒径は約2mmである。
土壌化や植生による擾乱が著しい。

上位より、
十和田八戸火砕流堆積物 (To-H)、十和田大不動
火砕流堆積物 (To-OF) 起源の軽石が散在する層準、
並びに軽石及び岩片が密集する十和田レッドテフラ
(To-Rd) が確認される。



第10図 Loc. 26における十和田八戸火砕流堆積物及び十和田大不動火砕流堆積物の状況



(土井(1993)⁽⁵⁴⁾、村岡ほか(1991)⁽⁵⁵⁾、大沢ほか(1993)⁽⁵⁶⁾、大沢・須田(1978)⁽⁵⁷⁾及び町田・新井(2011)⁽⁹⁾に基づき作成)

第 11 図 十和田八戸火砕流堆積物の分布及び十和田八戸テフラの等層厚線図

(各調査地点の地質柱状図は第 8 図に示す)

c. 地球物理学的調査

下司 (2016) ⁽¹⁵⁾によると、大規模噴火が発生するためには、その火山のシステムにあらかじめマグマを蓄積させておくことが必要であるとしており、この大規模噴火を引き起こすマグマシステムは、下部地殻物質の部分溶融等による珪長質メルトの生成、発生したメルトの分離・上昇、上部地殻への集積等が起こり、地殻全体に広がる巨大で複雑なシステムであると考えられるとしている。また、物理探査（地球物理学的調査）によってカルデラ火山の地下に検出されつつある低速度領域や低比抵抗領域は、このような部分溶融した貫入岩体の複合体を見ていると考えられるとしており、カルデラの陥没量とカルデラ形成噴火の噴出量がほぼ一致するとしている。なお、下司 (2016) ⁽¹⁵⁾の「大規模噴火」の噴火規模は、「巨大噴火」の噴火規模を包含する。

以上のことから、巨大噴火に直接寄与する上部地殻におけるマグマ溜まりは、カルデラを超える範囲まで部分溶融域が広がっていると考えられるため、巨大噴火が可能な量のマグマ溜まりが存在する可能性及び大規模なマグマの移動・上昇等の活動に着目して地球物理学的調査を実施し、現在のマグマ溜まりの状況について評価した。

地球物理学的調査として、地震波速度構造、比抵抗構造、地震活動及び地殻変動に関する検討を実施した。流体の存在に敏感な比抵抗構造と、流体のうちメルトか水か推定可能な地震波速度構造は相補的な関係であるため、これらより、巨大噴火が可能な量のマグマ溜まりが存在する可能性を把握した。また、地震活動及び地殻変動に関する調査を行い、大規模なマグマの移動・上昇等の活動を把握した。

(a) 地震波速度構造及び比抵抗構造

地震波速度構造について、Nakajima et al (2001) ⁽¹⁶⁾によると、火山フロントに沿った最上部マントルの低 V_p 、低 V_s 及び高 V_p/V_s は、大量のメルトの存在を示唆するとしている。また、火山フロントに沿った下部地殻のうち活火山の直下の低 V_p 、低 V_s 及び高 V_p/V_s は、メルトの存在を示唆するとしている。加えて、火山フロントに沿った上部地殻のうち活火山の直下の低 V_p 、低 V_s 及び低 V_p/V_s は、水の存在を示唆するとしている（第 12 図参照）。中島 (2017) ⁽¹⁷⁾によると、Nakajima et al (2001) ⁽¹⁶⁾の解析結果等から、東北地方の火山地

域の地殻にはいくつかの共通する特徴が存在するとしており、上部地殻内には大規模な (>10km) マグマ溜まりは存在しないとしている (第 13 図参照)。

防災科学技術研究所 HP 上の「日本列島下の三次元地震波速度構造 (海域拡大 2019 年版)」(Matsubara, 2019) ⁽¹⁸⁾ の地震波トモグラフィ解析結果 (第 14 図参照) 及び Hi-net や東北大学等の観測点の観測データを用いた地震波トモグラフィ解析結果 (第 15 図参照) に基づくと、いずれの結果でも十和田直下の上部地殻内 (約 20 km 以浅) に、メルトの存在を示唆する顕著な低 V_p かつ高 V_p/V_s 領域は認められない。

一方、比抵抗構造について、Kanda and Ogawa (2014) ⁽¹⁹⁾ によると、インダクションベクトルの実部は本質的に低比抵抗の方向を指す傾向があるとしている。Kanda and Ogawa (2014) ⁽¹⁹⁾ のインダクションベクトル (第 16 図参照) に基づくと、16 秒周期では、十和田に向くベクトルは認められず、顕著な低比抵抗異常は推定できない。また、磁場 3 成分を用いたインバージョン解析により、インダクションベクトルを再現できる北東北の三次元比抵抗構造が示されており、その解析結果 (第 17 図参照) に基づくと、十和田直下の上部地殻内にマグマ若しくは高塩濃度流体を示唆する顕著な低比抵抗領域は認められない。

地震波速度構造及び比抵抗構造を統合的に解釈すると、十和田直下の上部地殻内に大規模なマグマ溜まりの存在を示唆する顕著な低速度・高 V_p/V_s かつ低比抵抗領域は認められない。

(b) 地震活動

気象庁一元化震源カタログ (地震月報 (カタログ編) ⁽²⁰⁾ (期間: 1997 年 10 月 ~ 2017 年 12 月) 及び気象庁一元化処理震源要素 ⁽²¹⁾ (期間: 2018 年 1 月 ~ 2018 年 12 月)) より作成した十和田付近の震央分布及び地震活動の時間変化を第 18 図に示す。地震は、十和田の後カルデラ期の最新の噴火 (十和田 a) の火口である十和田湖中湖付近及びその周辺の震源深さ 5km~10km 付近に集中する一方で、低周波地震はそれらよりやや深い 25km~35km 付近で発生している。

また、「十和田の火山活動解説資料 (平成 26 年 1 月)」(気象庁、2014) ⁽²²⁾ によると、2014 年 1 月 27 日昼前から夜にかけて地震活動が活発な状況になったが、27 日の夜から地震回数は減少し、2 月に入ってからはおおむね静穏な状況であり、低周波地震、火山性微動は観測されていないとしている。また、火山

活動に特段の変化はなく、噴火の兆候は認められず、2007年12月1日の噴火予報（平常）の発表以降、予報警報事項に変更はないとしている。

(c) 地殻変動

国土地理院（2018）⁽²³⁾によると、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震後の余効変動が、東日本の広い範囲で見られるとしている。

国土地理院による電子基準点データから作成した十和田周辺の基準点間の基線長（斜距離成分）の時間変化（期間：2003年1月～2018年12月）を第19図に示す。十和田では、2011年東北地方太平洋沖地震以降の余効変動が継続しているが、地震発生前を含め、十和田を中心とした地域では、この余効変動を超える継続的な変位の累積は認められない。

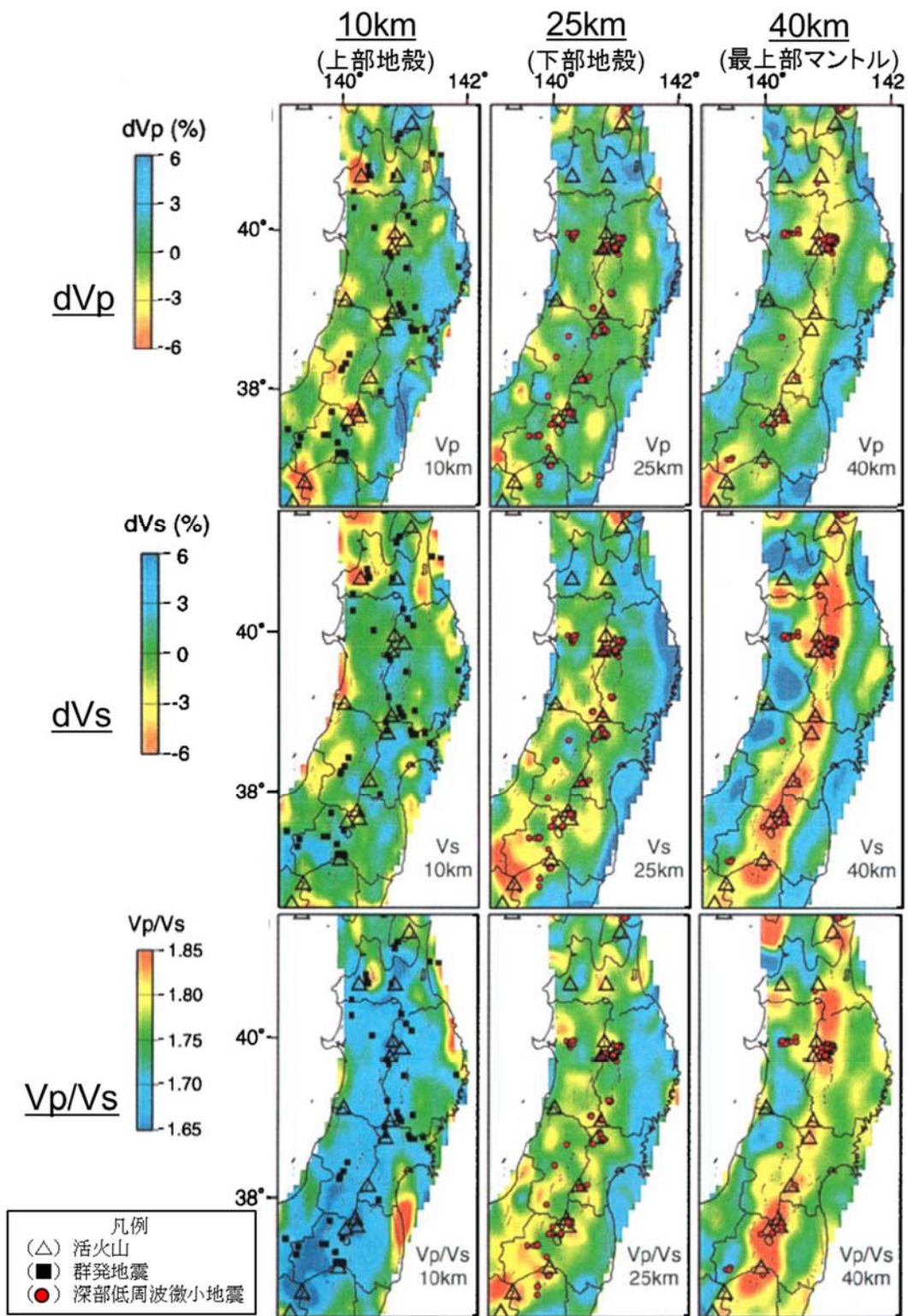
また、「十和田の火山活動解説資料（平成26年1月）」（気象庁、2014）⁽²²⁾において、2014年1月に地震活動が活発化した際の地殻変動観測結果によると、地震増加時及びその前後で十和田付近の地殻変動に変化は認められないとしている。

加えて、第131回火山噴火予知連絡会資料（気象庁、2015）⁽²⁴⁾によると、十和田周辺における干渉SARの解析結果（2014年9月4日と2014年10月16日）について、ノイズレベルを超える位相変化は認められないとしており、第143回火山噴火予知連絡会資料（気象庁、2019）⁽²⁵⁾においても、十和田周辺における干渉SARの解析結果（2015年10月8日と2018年10月18日）について、ノイズレベルを超えるような位相変化は認められないとしている。

さらに、国土地理院による基盤地図情報及び一等水準点検測成果収録を基に作成した、十和田付近の一等水準路線の上下変動（第20図参照）によると、大館付近において局所的な変動はあるが、十和田に最も近い碓ヶ関付近の一等水準点には継続的な変位の累積は認められず、十和田を中心とした継続的な変位の累積は認められない。

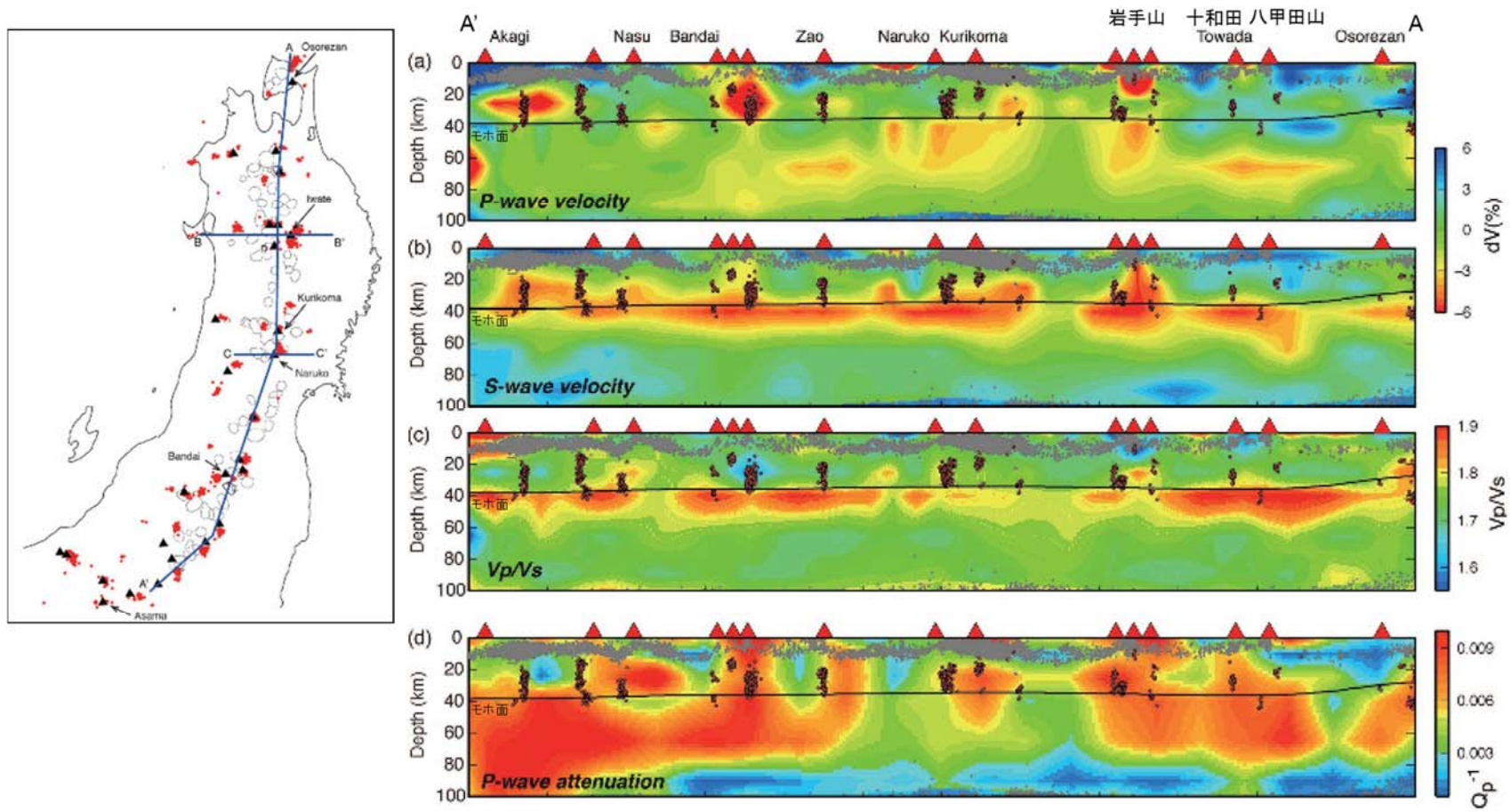
(d) 地球物理学的調査の評価

地震波速度構造、比抵抗構造並びに地震活動及び地殻変動から、現状、十和田直下の上部地殻（約20km以浅）には、巨大噴火が可能な量のマグマ溜まりが存在する可能性は十分小さく、大規模なマグマの移動・上昇等の活動を示す兆候は認められない。



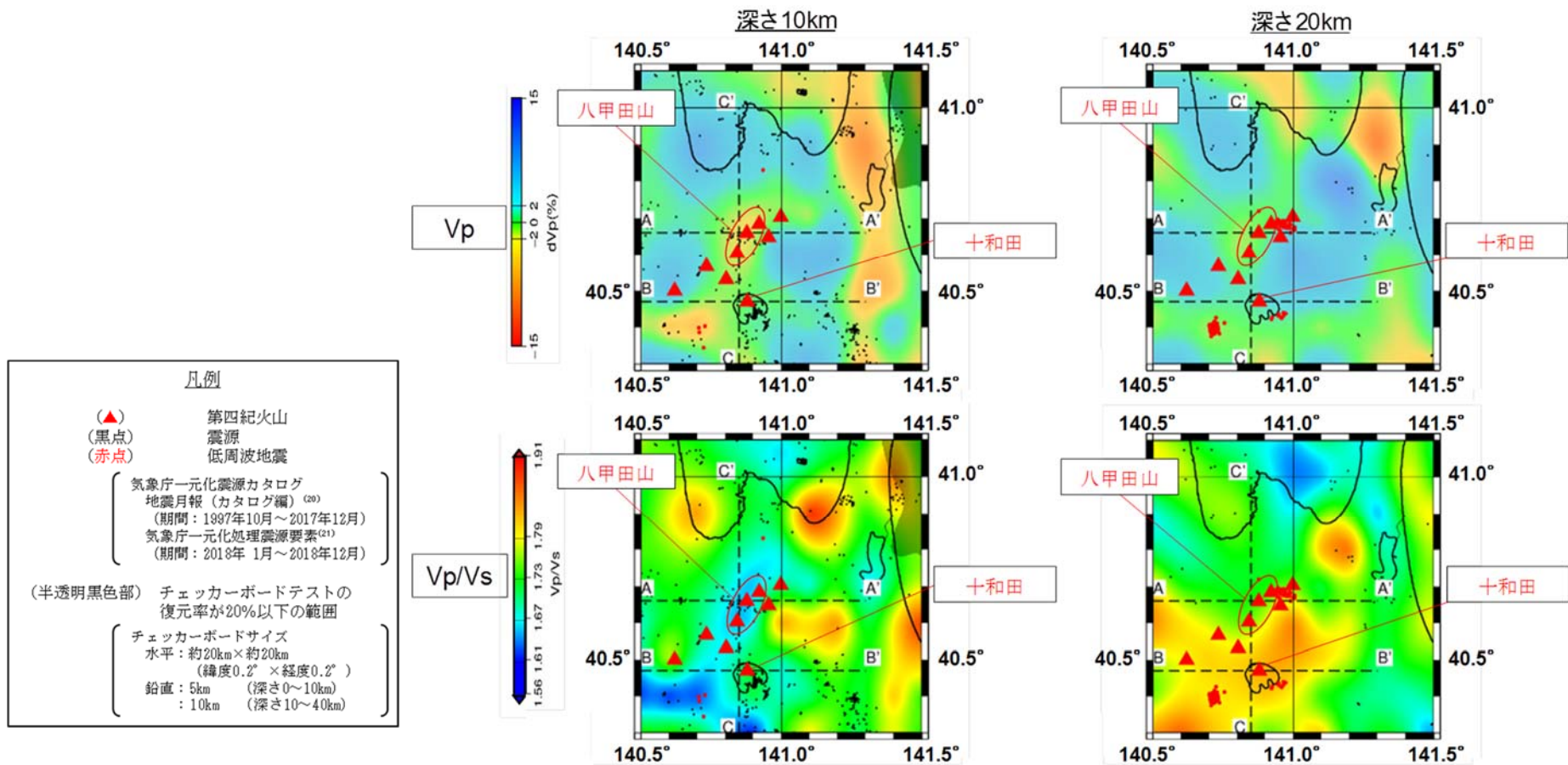
第12図 Nakajima et al. (2001)⁽¹⁶⁾の地震波トモグラフィ解析結果

(Nakajima et al. (2001)⁽¹⁶⁾に加筆)



*1 : (a)~(c)の解析結果は Nakajima et al. (2001)⁽¹⁶⁾と同じ

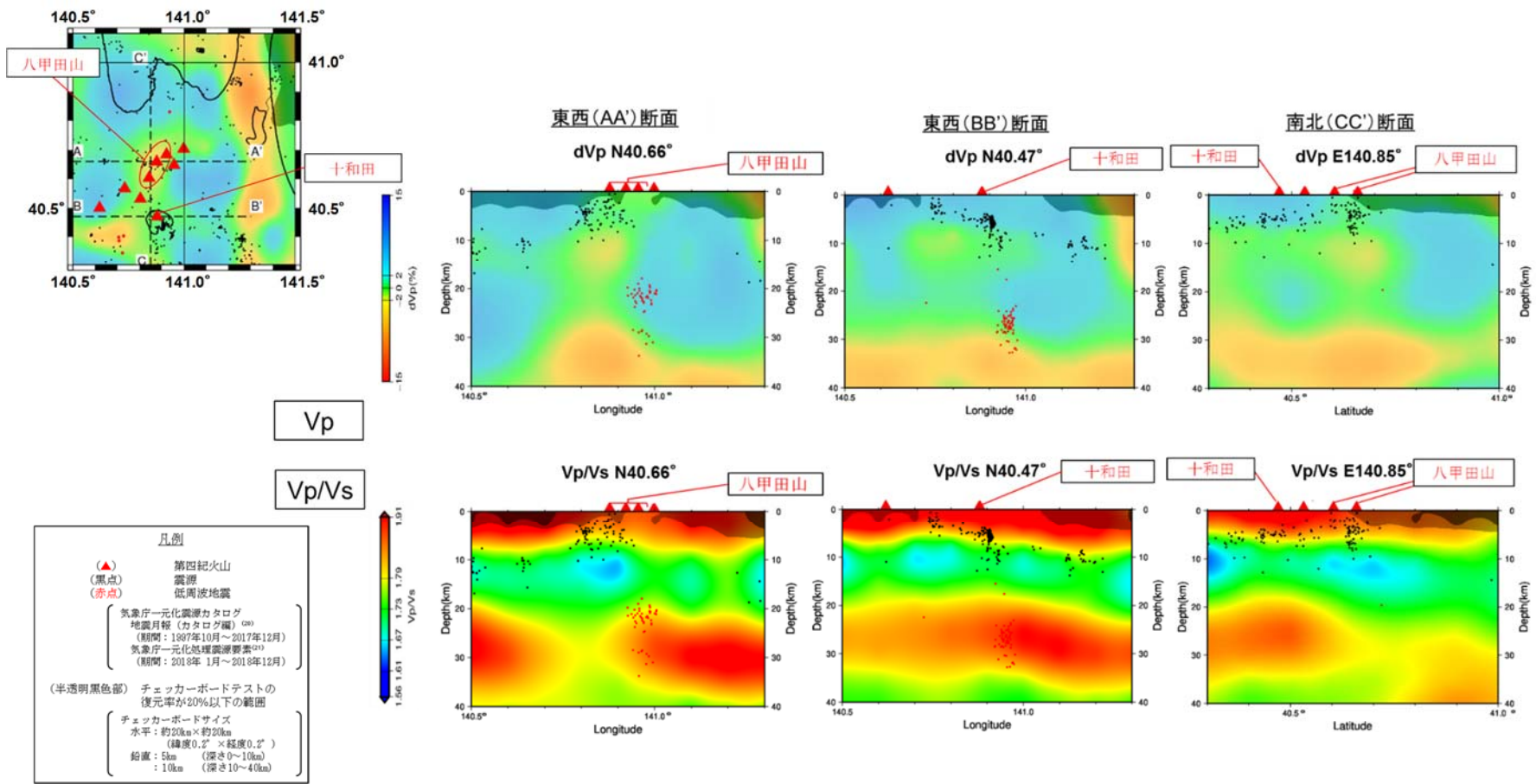
第 13 図 中島(2017)⁽¹⁷⁾の地震波トモグラフィ解析結果 (中島(2017)⁽¹⁷⁾に加筆) *1



第14図 防災科学技術研究所HP上の「日本列島下の三次元地震波速度構造(海域拡大2019年版)」の地震波トモグラフィ解析結果(1/2)

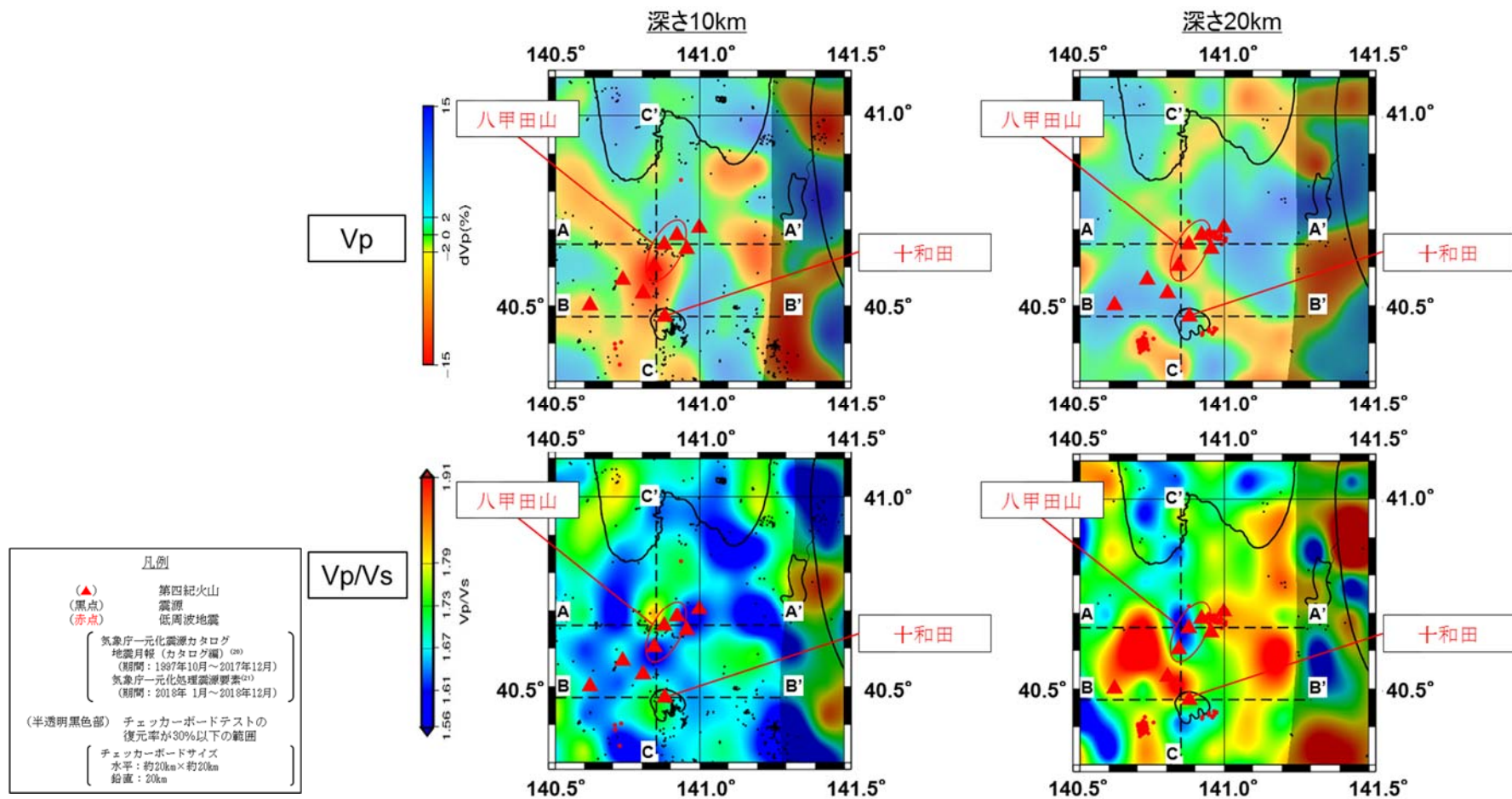
(防災科学技術研究所HP上の「日本列島下の三次元地震波速度構造(海域拡大2019年版)」地震波トモグラフィ解析結果の公開データに基づ

き作図(解析手法等はMatsubara et al. (2019)⁽¹⁸⁾に記載))

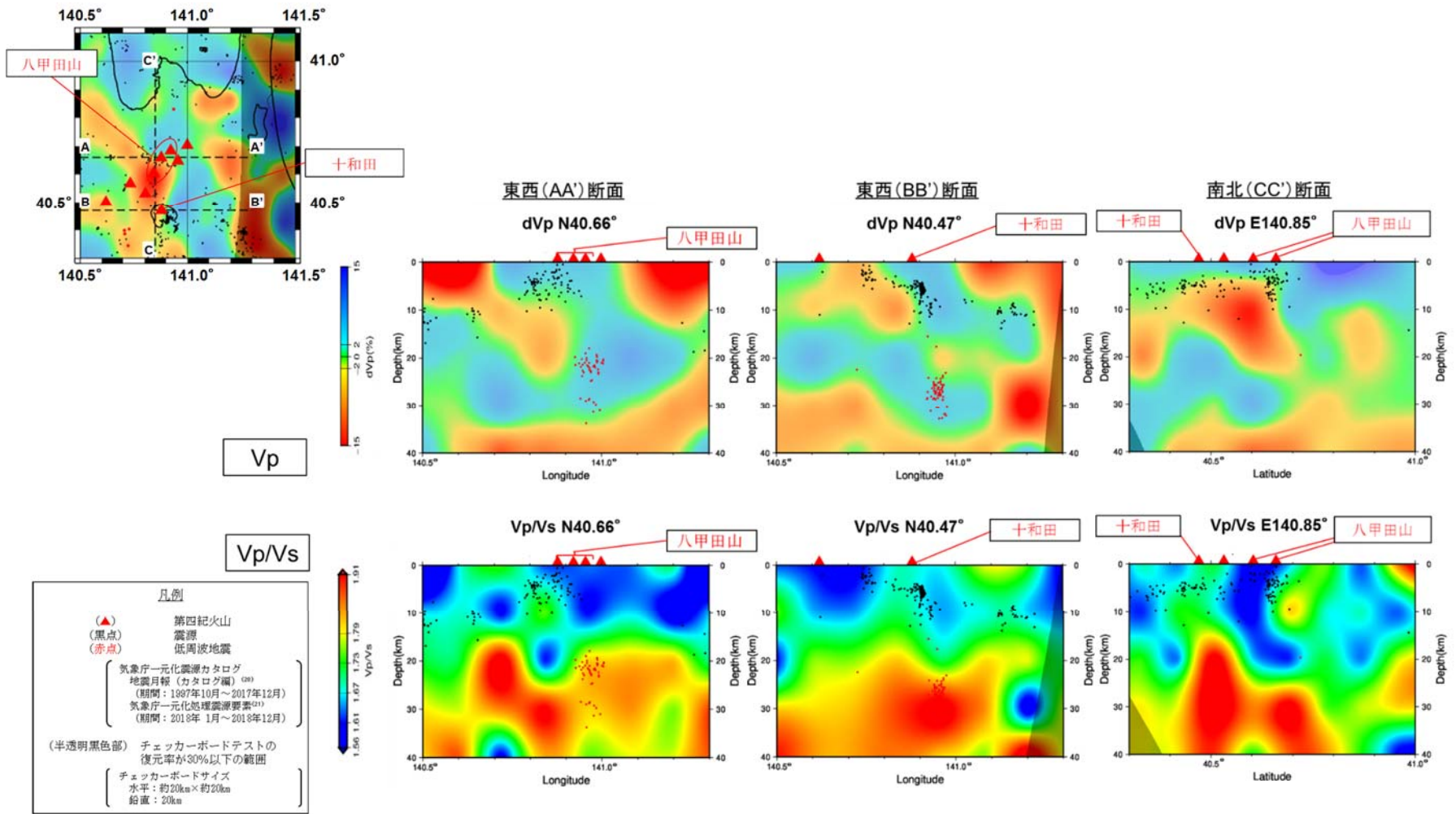


第 14 図 防災科学技術研究所 HP 上の「日本列島下の三次元地震波速度構造 (海域拡大 2019 年版)」の地震波トモグラフィ解析結果(2/2)

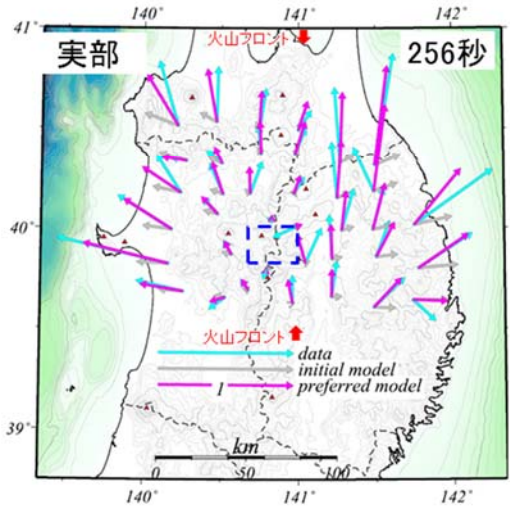
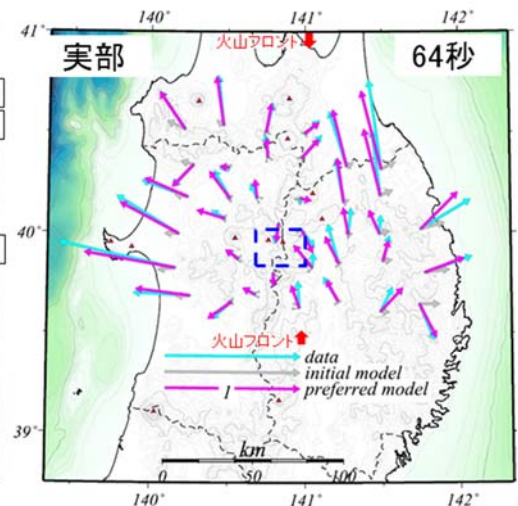
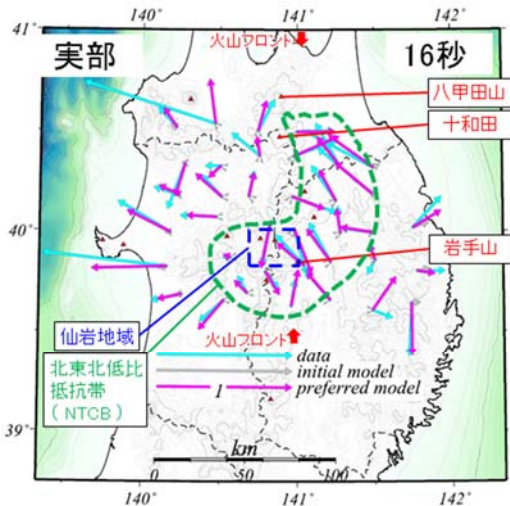
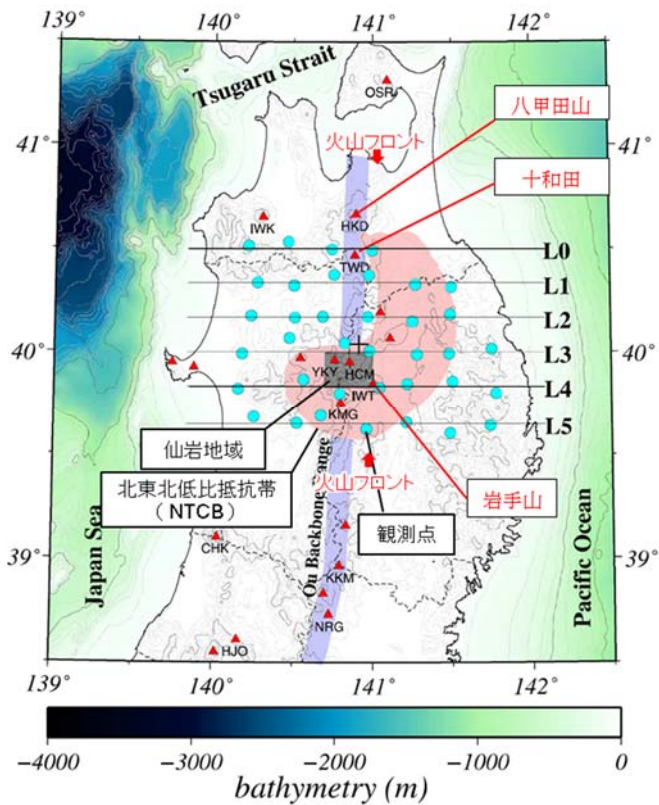
(防災科学技術研究所 HP 上の「日本列島下の三次元地震波速度構造 (海域拡大 2019 年版)」地震波トモグラフィ解析結果の公開データに基づき作図 (解析手法等は Matsubara et al. (2019)⁽¹⁸⁾に記載))



第15図 Hi-net や東北大学等の観測点の観測データを用いた地震波トモグラフィ解析結果(1/2)



第 15 図 Hi-net や東北大学等の観測点の観測データを用いた地震波トモグラフィ解析結果(2/2)

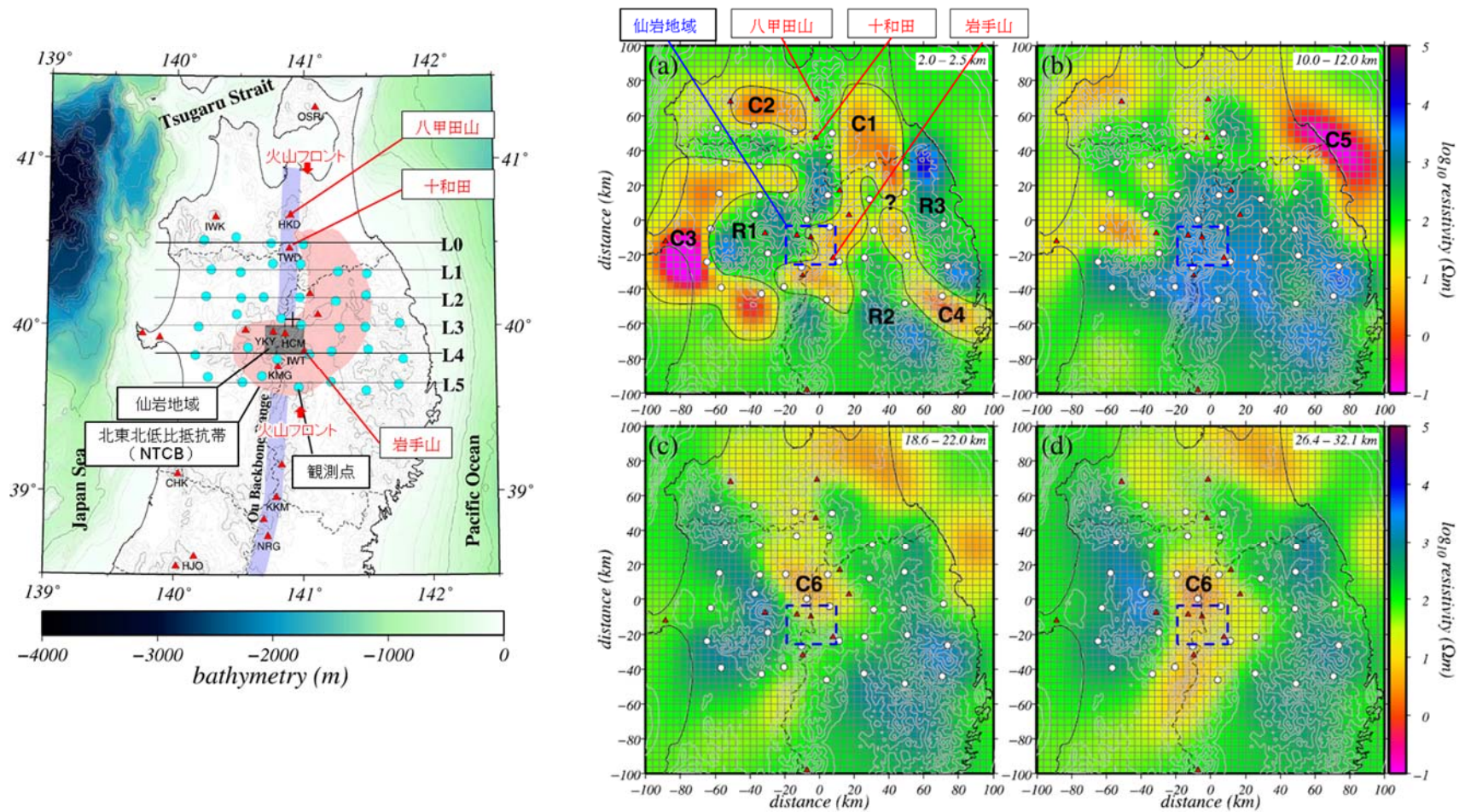


Kanda and Ogawa(2014)のインダクションベクトルのうち青矢印は、Ogawa(1987)で示された観測データに基づくインダクションベクトルと同じ。

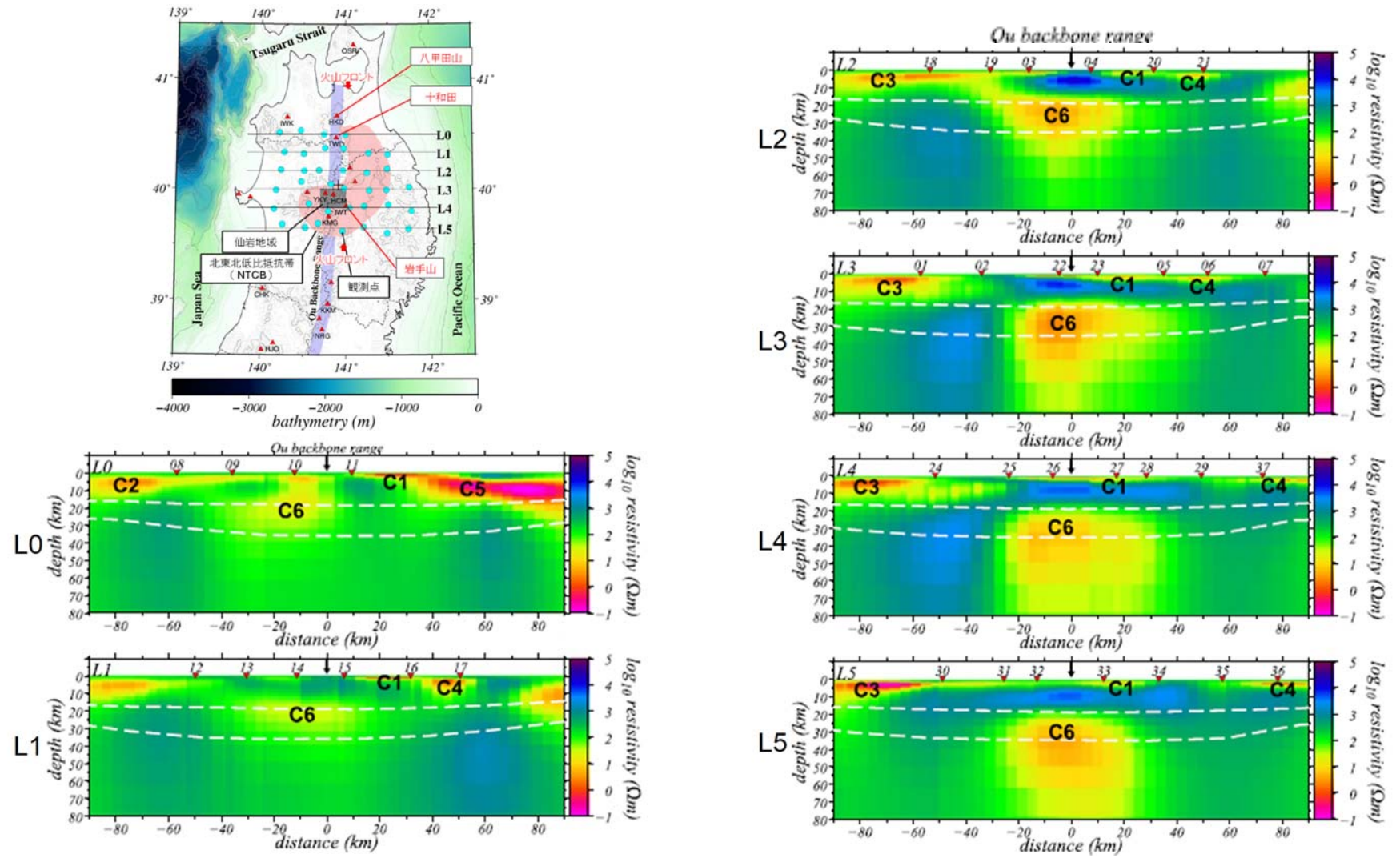
Skin depthは、観測する周波数帯域の電磁場がどれくらいの深さの情報を持っているかの指標となる。上嶋(2009)に基づけば、大地の比抵抗を100Ωmと仮定すると、

- ・16秒周期では深さ約20km以浅
- ・64秒周期では深さ約40km以浅
- ・256秒周期では深さ約80km以浅の比抵抗構造を反映する。

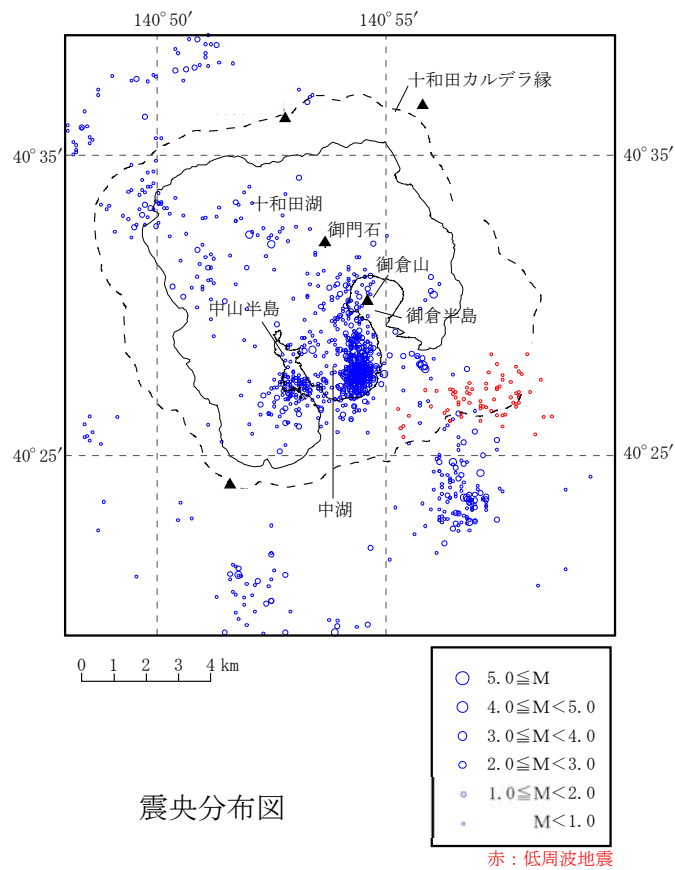
第 16 図 北東北における観測及びモデル化されたインダクションベクトル (kanda and ogawa (2014) ⁽¹⁹⁾ に加筆)



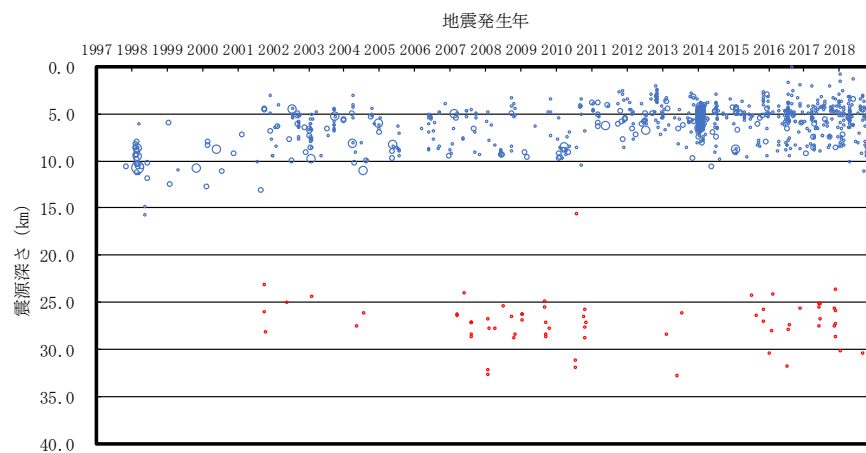
第 17 図 北東北の三次元比抵抗構造（水平断面）(1/2) (kanda and ogawa(2014)⁽¹⁹⁾に加筆)



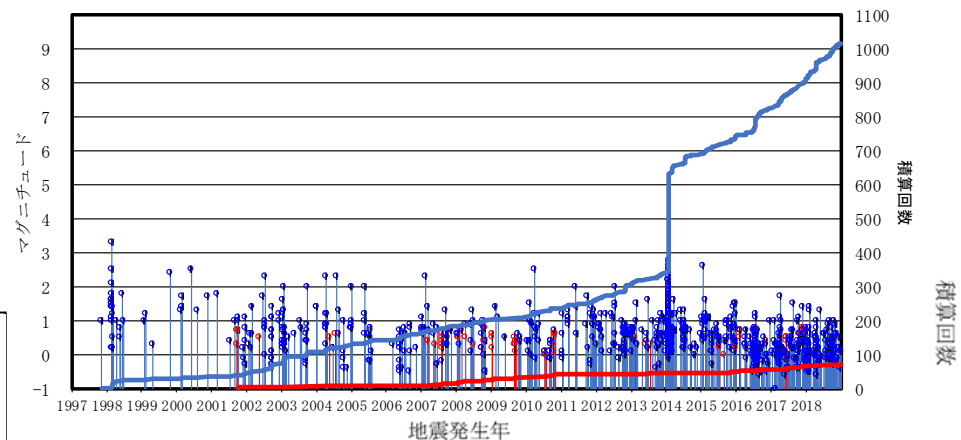
第 17 図 北東北の三次元比抵抗構造 (鉛直断面) (2/2) (kanda and ogawa(2014)⁽¹⁹⁾に加筆)



気象庁一元化震源カタログ
 地震月報 (カタログ編)⁽²⁰⁾ (期間: 1997年10月~2017年12月)
 気象庁一元化処理震源要素⁽²¹⁾ (期間: 2018年1月~2018年12月)
 に基づき作成

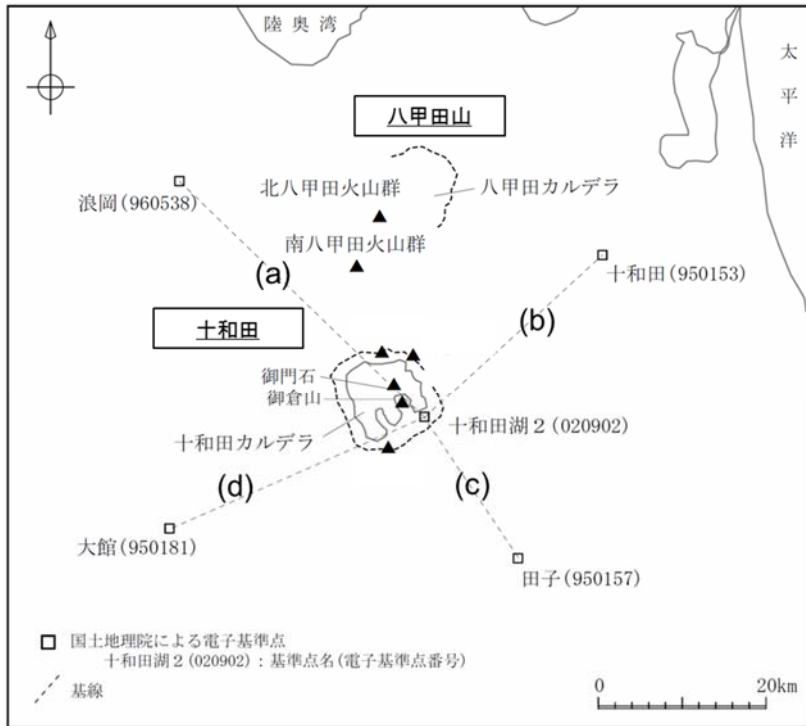


震源深さの時間変化図

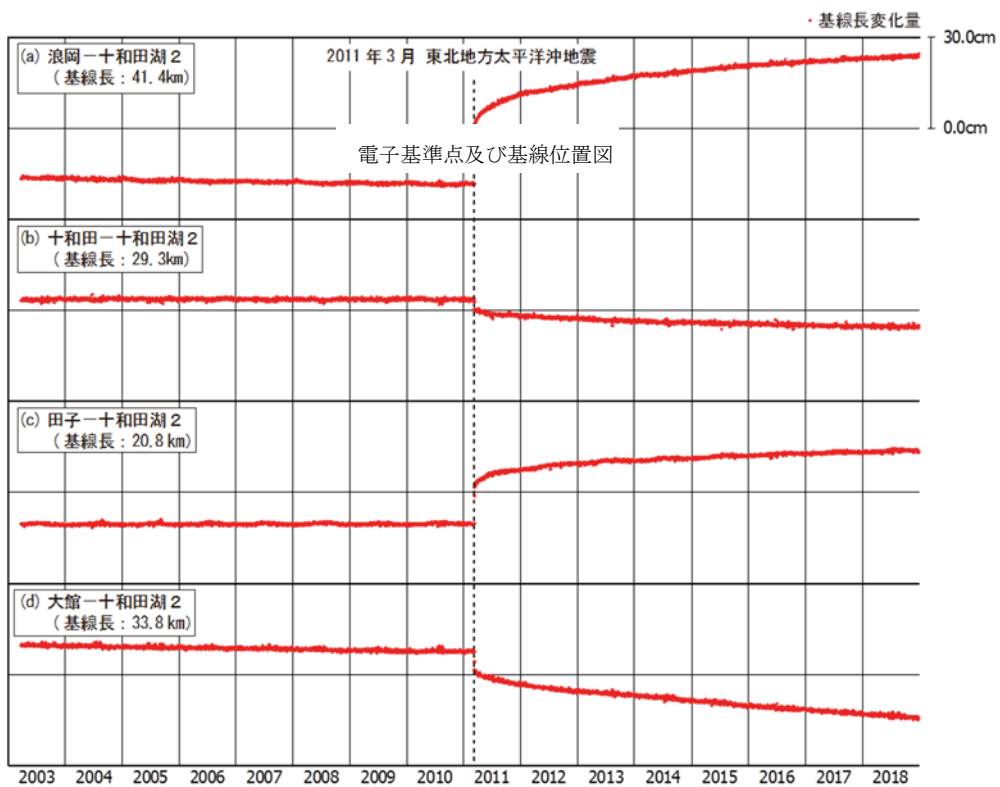


地震活動経過図及び回数積算曲線

第 18 図 十和田付近における地震活動



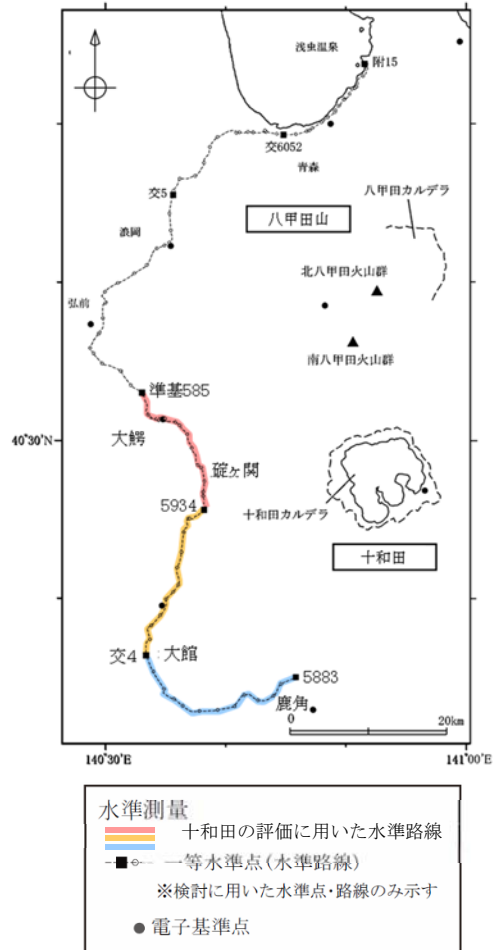
電子基準点及び基線位置図



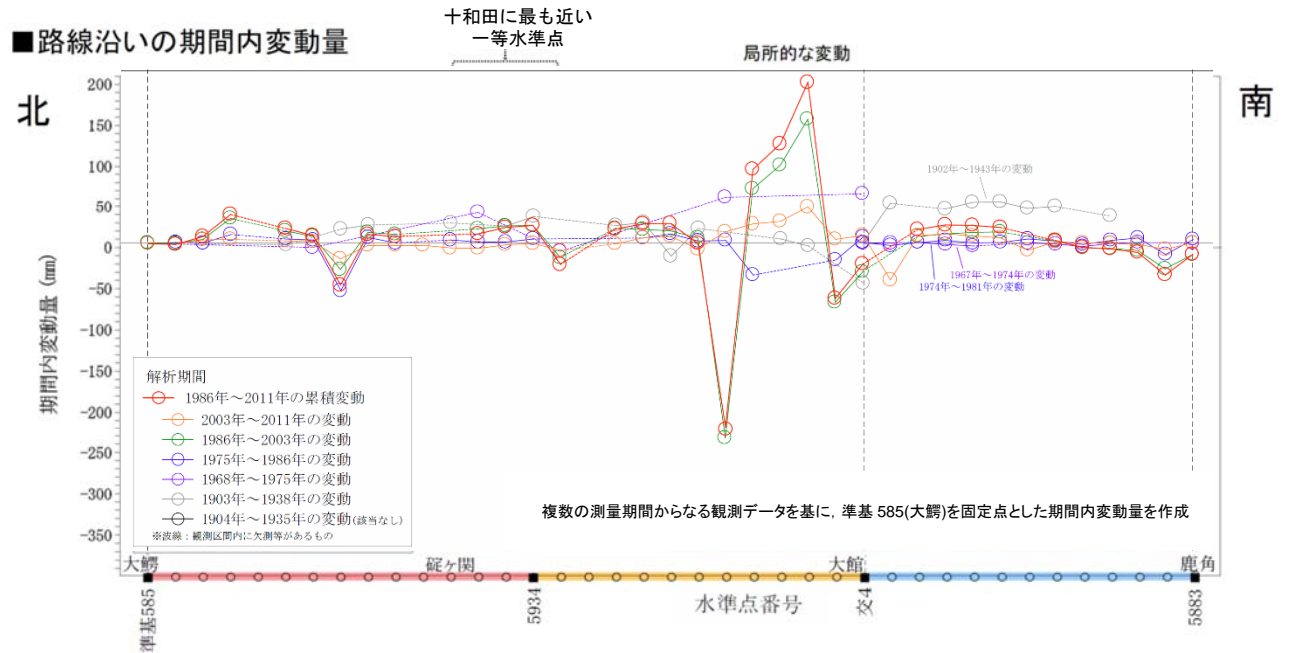
第 19 図 十和田を囲む電子基準点間の基線長の時間変化 (斜距離成分)

(国土地理院の電子基準点データより作成 (期間 : 2003 年 1 月 ~ 2018 年 12 月))

■水準路線



■路線沿いの期間内変動量



第20図 十和田付近の一等水準路線の上下変動の期間内変動量

(国土地理院による基盤地図情報及び一等水準点検測成果収録より作成)

d. 巨大噴火の可能性評価のまとめ

活動履歴から、巨大噴火が発生したカルデラ形成期と現在の活動期である後カルデラ期は、噴火の頻度・噴出量・噴出率が異なる(巨大噴火前には数万年間の低噴出率期が先行する傾向が見られるが、後カルデラ期は高噴出率期である)こと等から、現状ではカルデラ形成期のような状態には至っていないと考えられる(工藤ほか、2011)⁽¹¹⁾。

地質調査及び火山学的調査結果から、敷地は、巨大噴火に伴う2回の大規模火砕流であるカルデラ形成期の十和田八戸火砕流及び十和田大不動火砕流の到達末端に位置すると評価した。

地球物理学的調査の結果、現状、十和田直下の上部地殻内(約20km以浅)には、巨大噴火が可能な量のマグマ溜まりが存在する可能性は十分小さく、大規模なマグマの移動・上昇等の活動を示す兆候も認められない。

文献調査の結果、十和田について、高橋(2008)⁽¹³⁾及び工藤ほか(2011)⁽¹¹⁾には、現状、巨大噴火の可能性が低いとする主旨の知見は認められるが、巨大噴火が起こる可能性があるとする知見は認められない。また、十和田火山防災協議会(2018)⁽¹⁴⁾による十和田火山災害想定影響範囲図においても、巨大噴火を想定していない。

以上のことから、十和田の現在の活動状況は、巨大噴火が差し迫った状態ではなく、巨大噴火の可能性を示す科学的に合理性のある具体的な根拠が得られていないことから、巨大噴火の可能性は十分小さいと評価した。

(ii) 最後の巨大噴火以降の火山活動の評価

a. 活動履歴

最後の巨大噴火(噴火エピソード L)以降の活動期である後カルデラ期は、1,000年単位で頻繁に噴火を続けており、後カルデラ期と同規模の活動可能性は十分小さいと判断できない。したがって、最後の巨大噴火以降の最大規模の火砕流である毛馬内火砕流(見かけの噴出量は約 5km³)を対象として、敷地への到達の可能性を評価する。(第 21 図)

b. 地質調査及び火山学的調査

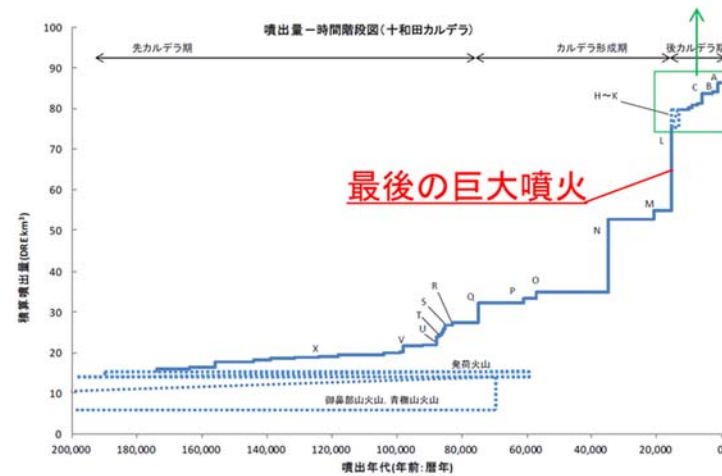
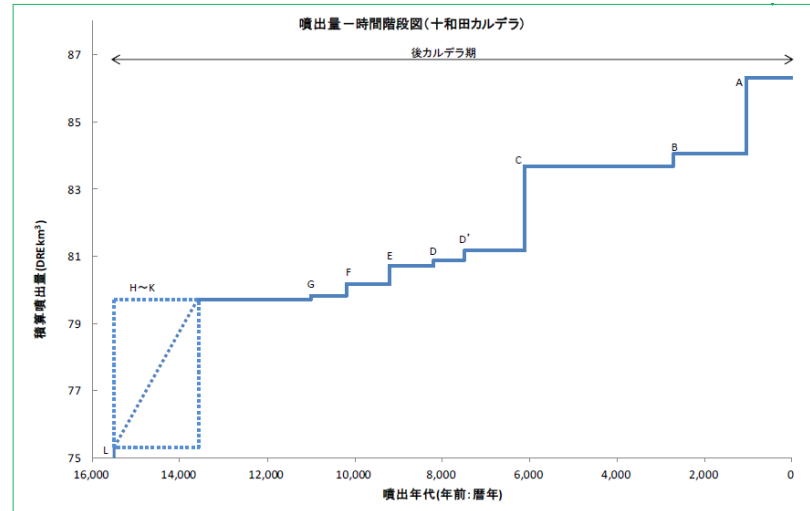
町田・新井(2011)⁽⁹⁾及び Hayakawa(1985)⁽¹⁰⁾は、毛馬内火砕流堆積物を十和田カルデラから主に河川沿いに図示している。また、十和田火山防災協議会(2018)⁽¹⁴⁾は、広井ほか(2015)⁽²⁶⁾等を考慮し、毛馬内火砕流堆積物及び OYU-2b の火砕サージ堆積物の確認地点を基に、十和田カルデラの周囲約 20km の範囲を火砕流・火砕サージの推定到達範囲として図示している。それらを合わせて第 22 図に示す。いずれの知見においても、毛馬内火砕流は、敷地に到達していない。

c. 最後の巨大噴火以降の火山活動の評価のまとめ

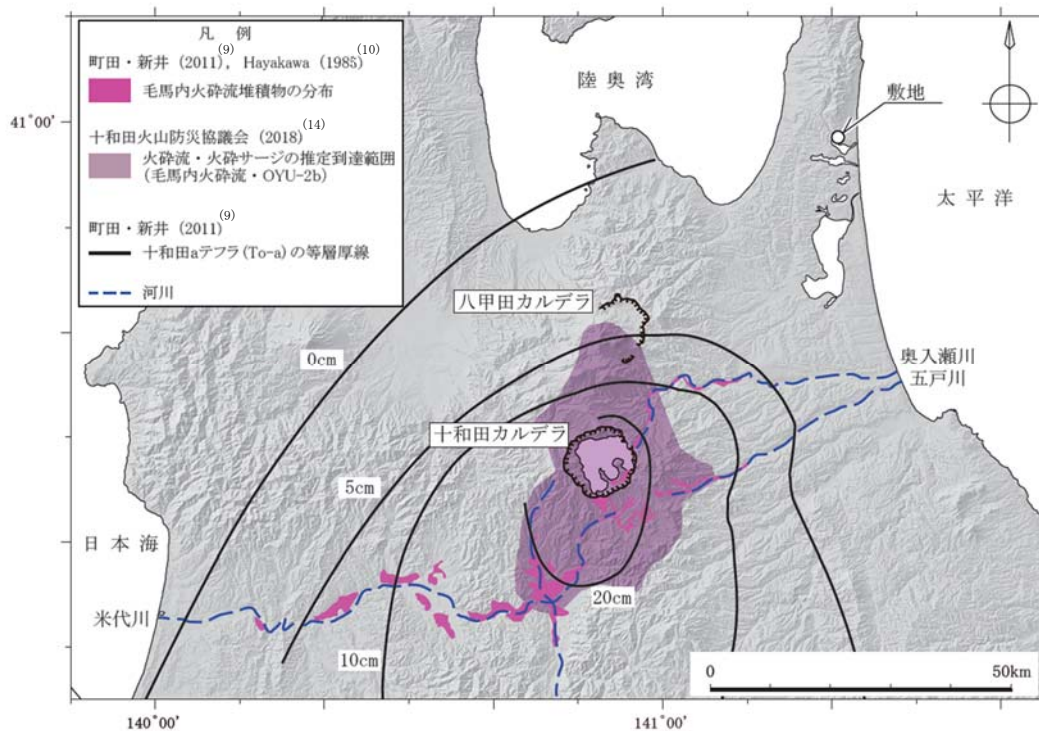
活動履歴及び地質調査・火山学的調査の結果より、最後の巨大噴火以降の最大規模の毛馬内火砕流が敷地に到達していないことから、火砕物密度流が廃棄物埋設地に影響を及ぼす可能性は十分小さいと評価した。また、火砕物密度流以外の設計対応不可能な火山事象は、「4. (1) 詳細調査対象火山の抽出」に記載するように、敷地と火山の離隔等から、廃棄物埋設地に影響を及ぼす可能性は十分小さいと評価した。

活動期	噴火エピソード (10) (Hayakawa, 1985)	噴出物	マグマ種類	噴火様式	体積・km ³ (斜体はDRE 下線は見かけの噴出量)
後カルデラ 成層火山・ 溶岩ドーム (後カルデラ 期)	A	十和田aテフラ			2.27 ^{※2} 6.51 ^{※3}
		毛馬内火砕流	流紋岩～ デイサイト	火砕流	
		大湯3軽石	—	降下軽石	
		大湯2火山灰(OYU-2)	—	降下火山灰, 火砕サージ	
	B	大湯1軽石	流紋岩	降下軽石	0.35 ^{※2} 0.84 ^{※3}
		惣部火山灰	—	降下火山灰	
	C	迷ヶ平軽石	流紋岩	降下軽石	2.52 ^{※2} 9.18 ^{※3}
		宇樽部火山灰	デイサイト	火砕サージ, 降下火山灰	
		金ヶ沢軽石	デイサイト	降下軽石	
	D'	中振軽石(CU)	安山岩～ デイサイト	プリニ-式噴火, 降下軽石	0.29 ^{※2} 0.325 ^{※3}
		御門石溶岩	デイサイト	溶岩ドーム	
		御倉山溶岩	デイサイト	溶岩ドーム	
	D	戸来火山灰	デイサイト	マグマ水蒸気噴火, 降下火山灰	0.16 ^{※2} 0.34 ^{※3}
		中ノ沢火山灰	—	降下火山灰	
	E	小国軽石	デイサイト	降下軽石, 降下火山灰	0.54 ^{※2} 2.51 ^{※3}
		貝守火山灰	—	降下火山灰	
	F	南部軽石	デイサイト	プリニ-式噴火, 降下軽石	0.36 ^{※2} 1.26 ^{※3}
		柵山火山灰	安山岩	降下火山灰, スコリア	
	G	夏坂スコリア	安山岩	降下スコリア	0.7 ^{※2} 0.45 ^{※3}
		新郷軽石	デイサイト	降下軽石	
H I J K	五色岩火山, 二の倉テフラ群 (二の倉期後, 中, 前期)	玄武岩質 安山岩	溶岩流, 降下スコリア, 降下火山灰	4.42 ^{※2} 10.4 ^{※3}	

※1: 第四紀火山カタログ委員会編(1999)⁽⁹⁾より引用 ※2: 文献中でDRE換算されている値を階段図等から読み取った体積 ※3: Hayakawa(1985)⁽¹⁰⁾より引用



第 21 図 十和田の後カルデラ期の階段ダイアグラム(山元(2015)⁽⁸⁾に基づき作成)



第 22 図 毛馬内火砕流堆積物の分布

(十和田火山防災協議会(2018)⁽¹⁴⁾、町田・新井(2011)⁽⁹⁾、Hayakawa(1985)⁽¹⁰⁾に基づき作成)

(3) 八甲田山

気象庁編(2013)⁽²⁾によると、八甲田山は、少なくとも 17 以上の成層火山や溶岩ドームからなり、南八甲田火山群及び北八甲田火山群に区分され、八甲田カルデラは、北八甲田火山群の直下～北東に存在するとしている。中野ほか編(2013)⁽¹⁾及び宝田・村岡(2004)⁽²⁷⁾によると、南八甲田火山群は、八甲田カルデラの先カルデラ火山であり、約 1.1Ma～0.3Ma に活動したとしている。

村岡・高倉(1988)⁽²⁸⁾によると、八甲田カルデラの噴出物として、八甲田第 1 期火砕流堆積物及び八甲田第 2 期火砕流堆積物が示されている。

中野ほか編(2013)⁽¹⁾及び工藤ほか(2011)⁽²⁹⁾によると、八甲田山の活動を南八甲田火山群、八甲田カルデラ及び北八甲田火山群の活動に区分し、このうち、八甲田カルデラにおいては、約 1Ma(八甲田中里川)、0.9Ma(八甲田黄瀬)、0.76Ma(八甲田第 1 期)及び 0.40Ma(八甲田第 2 期)に大規模火砕流を噴出したとしている。

工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾によると、北八甲田火山群は、八甲田カルデラの形成後の約 40 万

年前以降に活動を開始した後カルデラ火山群であるとしている。これらを踏まえた八甲田山の各火山の分布と階段ダイアグラムを第 23 図に示す。これらの噴火のうち、巨大噴火に該当する噴火は、八甲田カルデラの八甲田第 1 期火砕流(見かけの噴出量は 37km^3)及び八甲田第 2 期火砕流(見かけの噴出量は 36km^3)を噴出した噴火である。

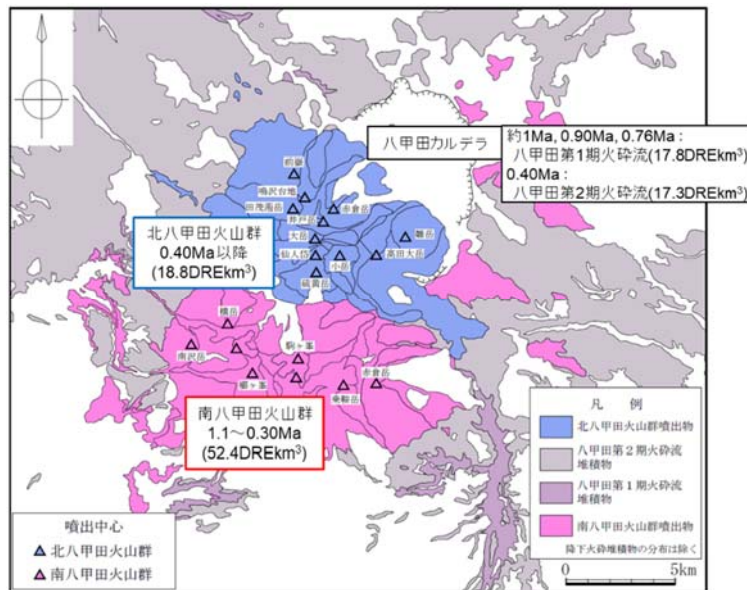
したがって、この 2 回の巨大噴火と最後の巨大噴火(八甲田第 2 期火砕流を噴出した噴火)以降の噴火を対象に評価を実施した。

(i) 巨大噴火の可能性評価

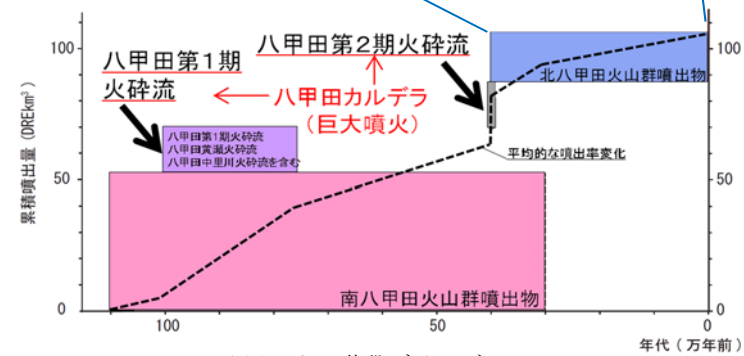
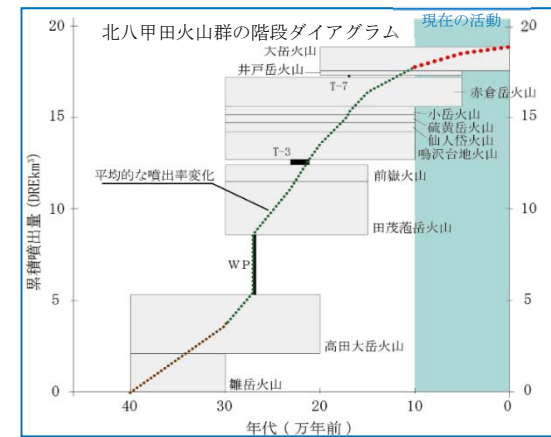
a. 活動履歴

八甲田山は、約 110 万年前から活動を開始し、南八甲田火山群及び八甲田カルデラの活動後、最近 30 万年間では北八甲田火山群のみ活動が継続している。工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾によると、北八甲田火山群は、八甲田カルデラの形成後の約 40 万年前以降に活動を開始した後カルデラ火山群である。また、北八甲田火山群の噴出率及び活動様式の時間変化から、その火山活動のピークは 40 万年前～10 万年前までの間にあったと考えられ、10 万年前以降の火山活動は比較的低調になっているとしている。加えて、噴出中心が火山群中央部に収束する傾向が認められることから、北八甲田火山群の活動は、長期的にみると終息へ向かいつつある状態と解釈できるとしている(第 24 図)。

また、文献調査の結果、八甲田山について、現状、巨大噴火が起こる可能性があるとする知見は認められず、八甲田山火山防災協議会(2014)⁽³¹⁾による火山災害予想区域図においても、巨大噴火を想定していない。



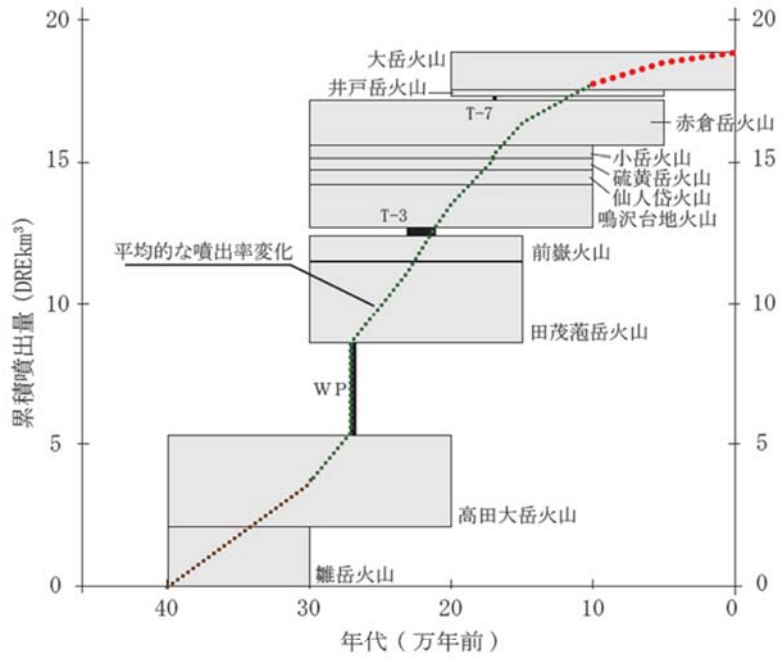
八甲田山の地質図



八甲田山の階段ダイアグラム

第 23 図 八甲田山の噴出物の分布と階段ダイアグラム

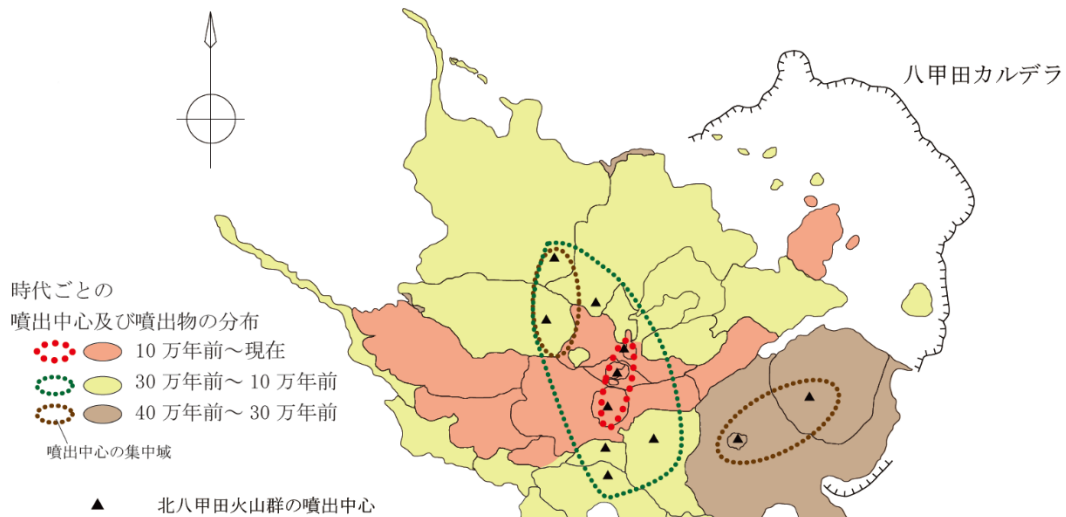
(村岡・高倉(1988)⁽²⁸⁾、宝田・村岡(2004)⁽²⁷⁾、中野ほか編(2013)⁽¹⁾、工藤ほか(2011)⁽²⁹⁾、Umeda et al.(2013)⁽⁶²⁾、工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾に基づき作成)



火山体	年代	噴出量	降下火砕物	年代 [※]	噴出量
大岳火山	0.2Ma ~ 現在	1.3DREkm ³	T-7	0.17Ma	0.1DREkm ³
井戸岳火山	0.2Ma ~ 0.1Ma 以降	0.25DREkm ³	T-3	0.23Ma ~ 0.21Ma	0.3DREkm ³
赤倉岳火山	0.3Ma ~ 0.1Ma 以降	1.6DREkm ³	甲地軽石 (WP)	0.27Ma	3.3DREkm ³
小岳火山	0.3Ma ~ 0.1Ma	0.45DREkm ³			
硫黄岳火山	0.3Ma ~ 0.1Ma	0.43DREkm ³			
仙人岱火山	0.3Ma ~ 0.1Ma	0.51DREkm ³			
鳴沢台地火山	0.3Ma ~ 0.1Ma	1.4DREkm ³			
前嶽火山	0.3Ma ~ 0.15Ma	0.91DREkm ³			
田茂菴岳火山	0.3Ma ~ 0.15Ma	2.9DREkm ³			
高田大岳火山	0.4Ma ~ 0.2Ma	3.2DREkm ³			
雛岳火山	0.4Ma ~ 0.3Ma	2.1DREkm ³			

※八甲田第2期火砕流堆積物と洞爺火山灰の年代及び堆積物間の土壌層厚からの推定値

※北八甲田火山群の噴出物の区分。年代及び噴出量は工藤ほか(2004)に基づく



第 24 図 北八甲田火山群の噴出率の時間変化及び噴出中心の時空間分布
(工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾に基づき作成)

b. 地質調査及び火山学的調査

八甲田山において、過去最大規模の火砕物密度流を噴出した八甲田カルデラの噴出物を対象に調査を実施した。

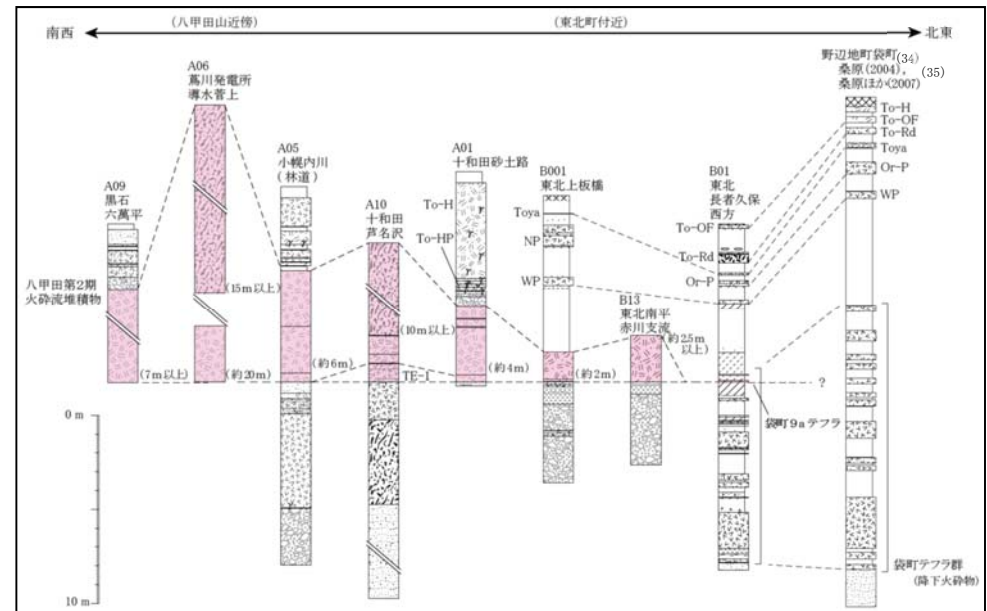
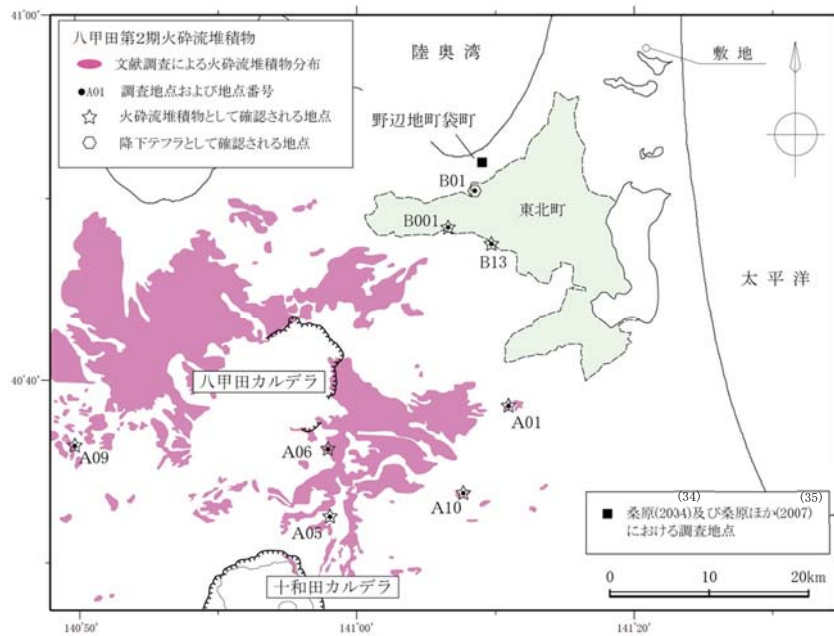
村岡・高倉(1988)⁽²⁸⁾、第四紀火山カタログ委員会編(1999)⁽⁵⁾によると、八甲田第1期火砕流の見かけの噴出量は37km³、八甲田第2期火砕流の見かけの噴出量は36km³とされているが、八甲田第1期火砕流堆積物は、工藤ほか(2006)⁽³²⁾、工藤ほか(2011)⁽²⁹⁾等によって示された年代測定、化学分析結果等によると、異なる時代の複数の火砕流堆積物で構成されている可能性があるとされている。これらのことから、2回の巨大噴火のうち八甲田第2期火砕流が、八甲田山の過去最大規模の火砕流であると評価した。

八甲田第2期火砕流堆積物は、第25図に示すように、八甲田山周辺に広く分布し、敷地方向では八甲田山から東北町西部にかけて分布し、八甲田山近傍の小幌内川林道(Loc. A05)及び十和田砂土路(Loc. A01)では層厚約6m及び約4m、東北南平赤川支流(Loc. B13)では層厚約2.5m以上の火砕流堆積物として確認した。

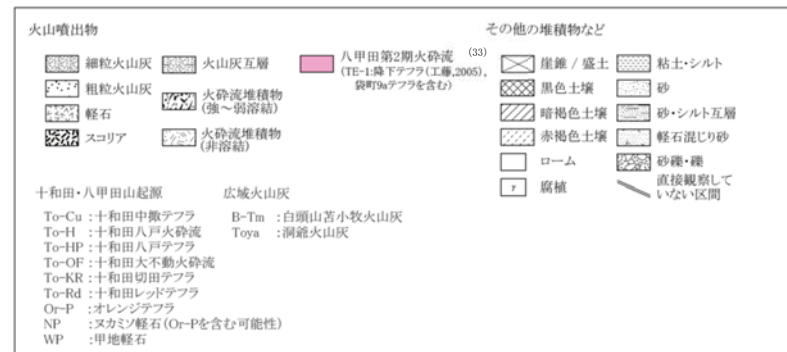
一方、東北長者久保西方(Loc. B01)においては、オレンジテフラ、甲地軽石(工藤(2005)⁽³³⁾による「八甲田白ベタテフラ」に相当する。)及び複数の降下火砕物(袋町テフラ群: 桑原(2004)⁽³⁴⁾の「袋町1~13テフラ」に相当する。)が確認され、これらの間に挟まる袋町9aテフラは、おおむね淘汰良好な軽石を主体とすることから、降下火砕物と評価した。また、その年代及び鉱物的特徴(石英を非常に多く含む等)は、八甲田第2期の噴出物と類似することから、八甲田第2期の噴火に伴って噴出した降下火砕物と考えられる。

しかし、本地点には、八甲田第2期の噴火に伴う火砕流堆積物は確認できない。このことは、本地点には、八甲田第2期の噴火に伴う火砕流は到達していないことを示唆している(第26図)。加えて、桑原(2004)⁽³⁴⁾及び桑原ほか(2007)⁽³⁵⁾によると、野辺地町袋町地点における露頭から、降下火砕物等の層序等に関する報告がされているが、八甲田第2期火砕流堆積物は認められていない。

以上のことから、これらの地点より北方に位置する敷地に火砕流は到達していないと評価した。

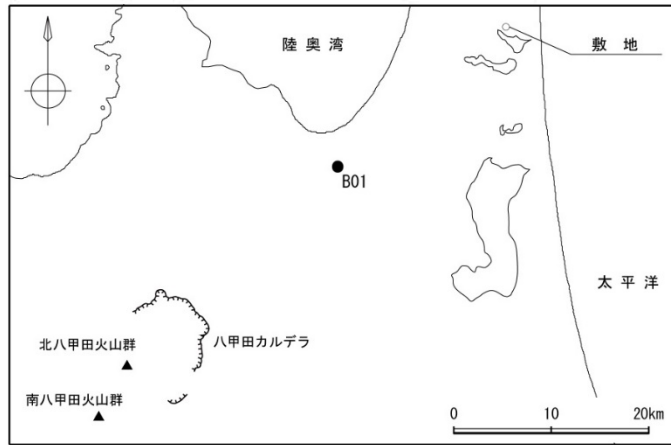


(村岡・高倉(1988)⁽²⁸⁾、村岡ほか(1991)⁽⁵⁵⁾、大沢ほか(1993)⁽⁵⁶⁾、青森県史編さん自然部会(2001)⁽⁵⁹⁾、桑原(2004)⁽³⁴⁾及び桑原ほか(2007)⁽³⁵⁾に基づき作成

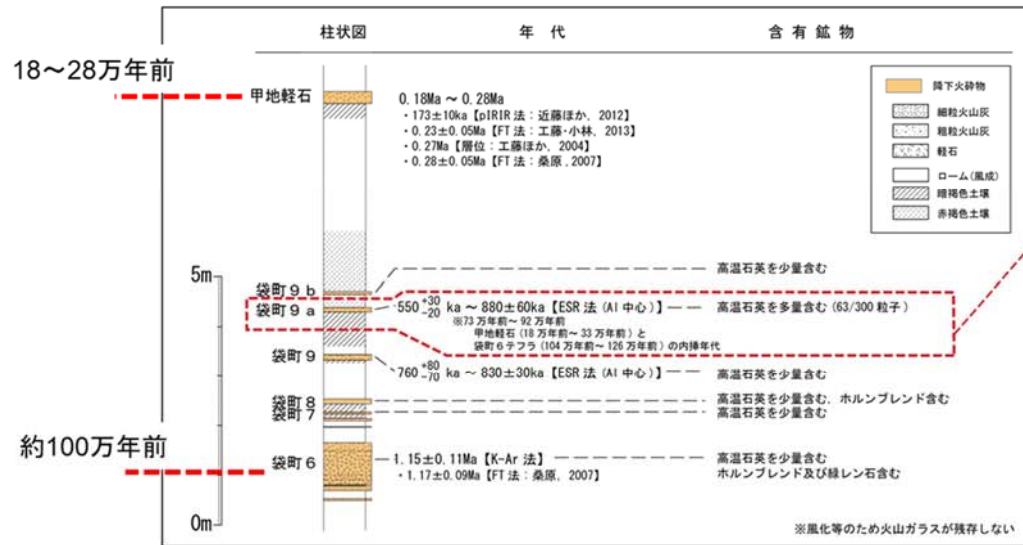


第 25 図 八甲田第 2 期火砕流堆積物に着目した地質柱状図

【東北町の露頭：B01 地点】



露頭写真



八甲田山周辺に分布する主な堆積物	年代	含有鉱物
八甲田第2期	約40万年前	高温石英を多量含む。 高温石英を多量含む。
八甲田第1期	約76万年前	高温石英、カミングトン閃石を少量含む 高温石英含む。
八甲田黄瀬	約90万年前	(高温石英含まない)
黄瀬川	78万年前~99万年前	高温石英を少量含む
八甲田中里川	約100万年前	高温石英含む

宝田・村岡 (2004)、工藤ほか (2006) 等に基づき作成

第26図 Loc. B01における八甲田カルデラの噴出物に着目した地質柱状図等

c. 地球物理学的調査

地球物理学的調査として、十和田と同様に、地震波速度構造、比抵抗構造、地震活動及び地殻変動に関する検討を実施した。流体の存在に敏感な比抵抗構造と、流体のうちメルトか水か推定可能な地震波速度構造は相補的な関係であるため、これらより、巨大噴火が可能な量のマグマ溜まりが存在する可能性を把握した。また、地震活動及び地殻変動に関する調査を行い、大規模なマグマの移動・上昇等の活動を把握した。

(a) 地震波速度構造及び比抵抗構造

地震波速度構造について、Nakajima et al. (2001)⁽¹⁶⁾によると、火山フロントに沿った最上部マントルの低 V_p 、低 V_s 及び高 V_p/V_s は、大量のメルトの存在を示唆するとしている。また、火山フロントに沿った下部地殻のうち活火山の直下の低 V_p 、低 V_s 及び高 V_p/V_s は、メルトの存在を示唆するとしている。加えて、火山フロントに沿った上部地殻のうち活火山の直下の低 V_p 、低 V_s 及び低 V_p/V_s は、水の存在を示唆するとしている（第 12 図参照）。中島 (2017)⁽¹⁷⁾によると、Nakajima et al. (2001)⁽¹⁶⁾の解析結果等から、東北地方の火山地域の地殻にはいくつかの共通する特徴が存在するとしており、上部地殻内には大規模な (>10km) マグマ溜まりは存在しないとしている（第 13 図参照）。

防災科学技術研究所 HP 上の「日本列島下の三次元地震波速度構造（海域拡大 2019 年版）」(Matsubara et al., 2019)⁽¹⁸⁾の地震波トモグラフィ解析結果（第 14 図参照）及び Hi-net や東北大学等の観測点の観測データを用いた地震波トモグラフィ解析結果（第 15 図参照）に基づくと、いずれの結果でも八甲田山直下の上部地殻内(約 20km 以浅)に、メルトの存在を示唆する顕著な低 V_p かつ高 V_p/V_s 領域は認められない。

一方、比抵抗構造について、Kanda and Ogawa (2014)⁽¹⁹⁾によると、インダクションベクトルの実部は本質的に低比抵抗の方向を指す傾向があるとしている。小川 (1991)⁽³⁶⁾によると、周期 64 秒のインダクションベクトル（第 27 図参照）では津軽海峡の誘導電流の影響で北向き成分が卓越するとしているが、調査域の東半分のインダクションベクトルの北向き成分が小さいことから深部に低比抵抗異常が存在することを示唆しているとしている。また、小川

(1991)⁽³⁶⁾の広域的な比抵抗構造の影響も考慮した二次元比抵抗構造（第28図参照）によると、八甲田地域の深度10km以深に低比抵抗帯が存在しているが、八甲田山直下の上部地殻内の10km以浅に顕著な低比抵抗領域は認められない。

地震波速度構造及び比抵抗構造を統合的に解釈すると、八甲田山直下の上部地殻内の10km以深は低比抵抗領域であるが、その領域は低 V_p かつ低 V_p/V_s であることから、上部地殻内に大規模なマグマ溜まりの存在を示唆する顕著な低速度・高 V_p/V_s かつ低比抵抗領域は認められない。

(b) 地震活動

気象庁一元化震源カタログ（地震月報（カタログ編⁽²⁰⁾）（期間：1997年10月～2017年12月）及び気象庁一元化処理震源要素⁽²¹⁾（期間：2018年1月～2018年12月）より作成した八甲田山付近の震央分布及び地震活動の時間変化を第29図に示す。八甲田山においては、通常地震が観測期間を通じて北八甲田火山群付近の深さ10km以浅に集中している。

また、「八甲田山の火山活動解説資料（令和元年10月7日）」（気象庁、2019）⁽³⁷⁾によると、2019年10月7日6時以降、大岳山頂の西約4km、深さ約1km付近を震源とする地震が増加し、14時まで61回発生したとしている。また、2018年4月10日に日回数22回を観測するなど、これまでも周辺で一時的な地震の増加がみられたが、低周波地震及び火山性微動は観測されておらず、地震活動以外に火山活動の活発化は認められないとし、噴火予報（噴火警戒レベル1、活火山であることに留意）の予報事項に変更はないとしている。

加えて、「火山の状況に関する解説情報（八甲田山第3号）令和元年10月8日16時00分」（気象庁、2019）⁽³⁸⁾によると、2019年10月7日6時頃から始まった八甲田山周辺での地震は、2019年10月8日10時以降観測されていないとしている。加えて、低周波地震や火山性微動は観測されておらず、地殻変動に火山活動に伴う変化はみられないとしている。また、監視カメラによる観測では、地獄沼付近及び大岳周辺に特段の変化はみられず、火山活動の活発化を示す変化は認められないとしている。

(c) 地殻変動

国土地理院(2018)⁽²³⁾によると、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震後

の余効変動が、東日本の広い範囲で見られるとしている。

国土地理院による電子基準点データから作成した八甲田山周辺の基準点間の基線長（斜距離成分）の時間変化（期間：1997年1月～2018年12月）を第30図に示す。八甲田山では、2011年東北地方太平洋沖地震前において、十和田―黒石及び青森A―十和田の基準点間で継続的な縮みが確認されていた。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震以降、全ての基線において余効変動が継続している。

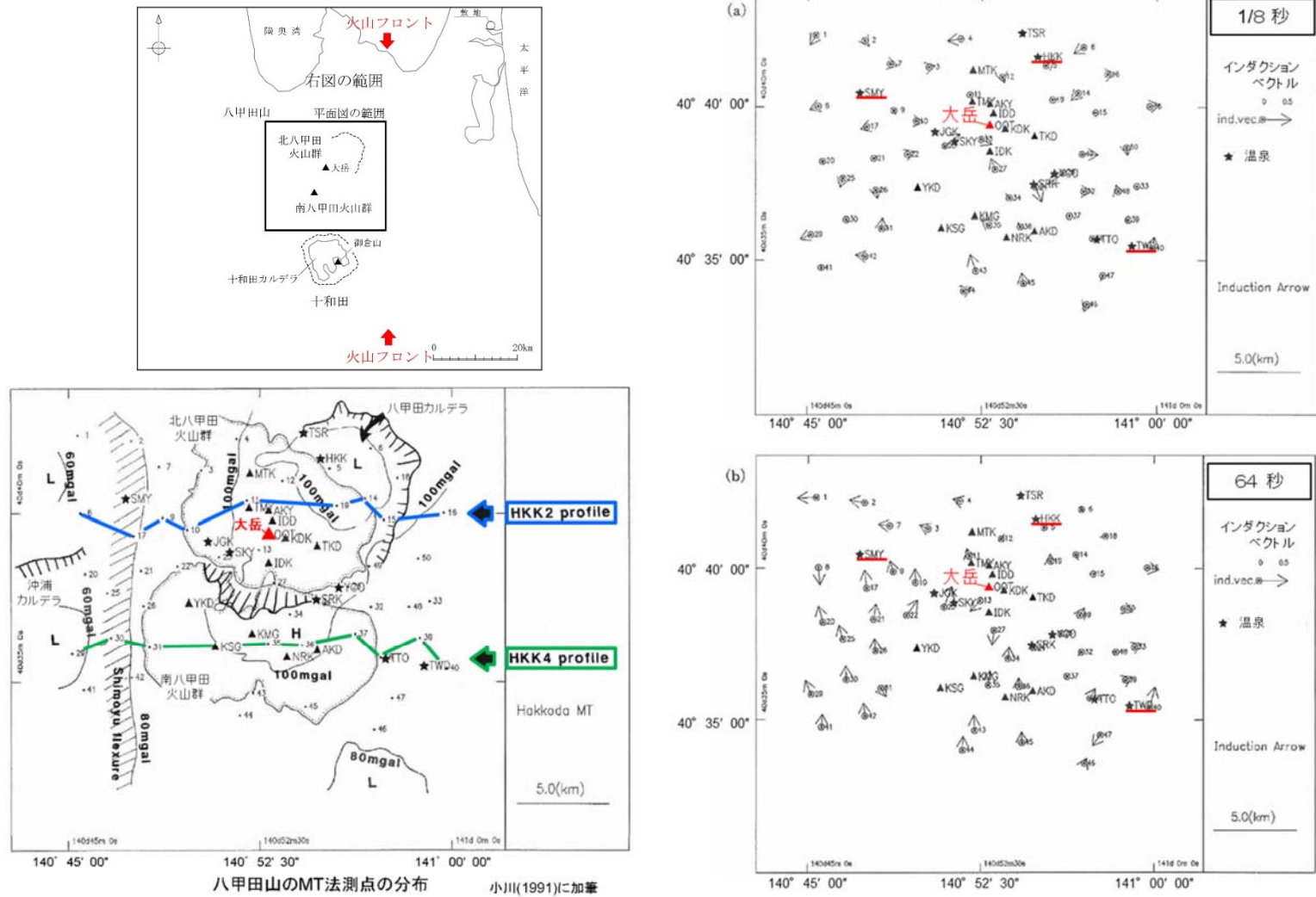
また、「八甲田山の火山活動解説資料（平成26年6月）」（気象庁、2014）⁽³⁹⁾によると、2013年2月頃以降わずかな膨張を示す地殻変動がみられていたが、8月頃から鈍化し、11月頃からは停滞しその状態が続いているとしている。

加えて、第131回火山噴火予知連絡会資料（気象庁、2015）⁽²⁴⁾によると、八甲田山周辺における干渉SARの解析結果（2014年9月4日と2014年10月16日）について、ノイズレベルを超える位相変化は認められないとしており、第143回火山噴火予知連絡会資料（気象庁、2019）⁽²⁵⁾において、八甲田山周辺における干渉SARの解析結果（2015年10月8日と2018年10月18日）について、山頂の西側周辺で衛星視線方向伸長の位相変化が認められるが、気象ノイズによる可能性があるとしている。

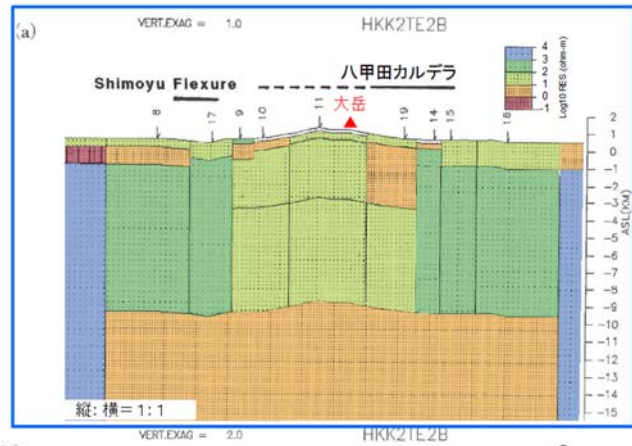
さらに、国土地理院による基盤地図情報及び一等水準点検測成果収録を基に作成した、八甲田山付近の一等水準路線の上下変動（第31図参照）によると、青森及び藤崎町付近において地盤沈下による局所的な変動はあるが、八甲田山に最も近い青森付近の一等水準点には継続的な変位の累積は認められず、八甲田山を中心とした継続的な変位の累積は認められない。

(d) 地球物理学的調査の評価

地震波速度構造、比抵抗構造並びに地震活動及び地殻変動から、現状、八甲田山直下の上部地殻内（約20km以浅）には、巨大噴火が可能な量のマグマ溜まりが存在する可能性は十分小さく、大規模なマグマの移動・上昇等の活動を示す兆候も認められない。



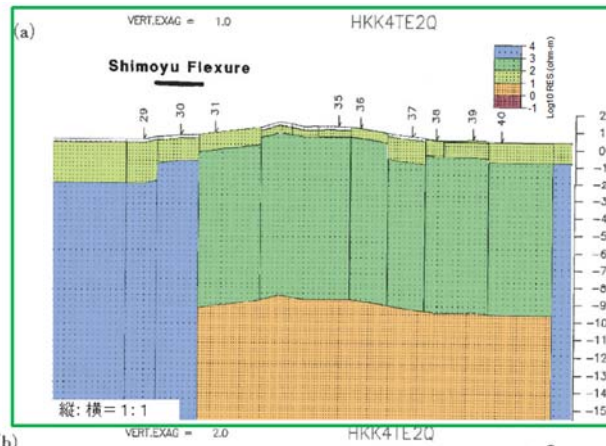
第 27 図 八甲田山におけるインダクションベクトルの実部の分布 (小川(1991)⁽³⁶⁾に加筆)



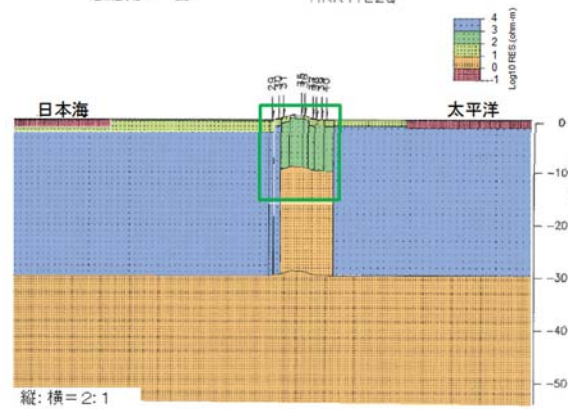
(b)



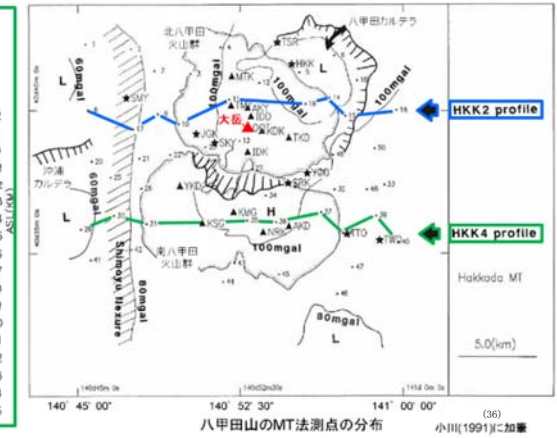
北八甲田火山群と八甲田カルデラを切る測線 (HKK 2)



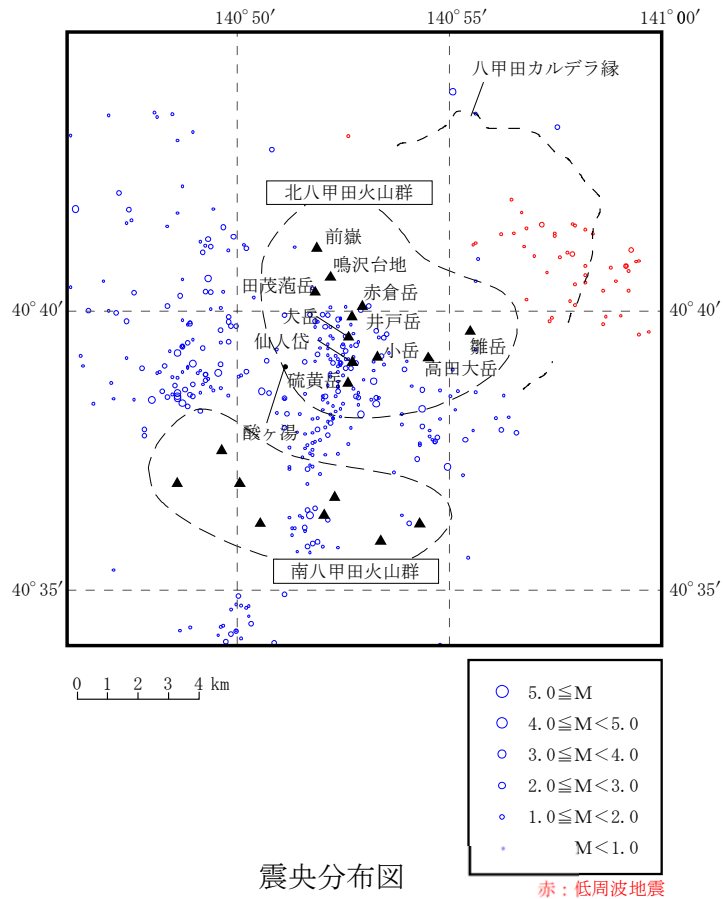
(b)



南八甲田火山群を切る測線 (HKK 4)



第 28 図 八甲田山の比抵抗構造 (小川(1991)⁽³⁶⁾に加筆及び塗色)



震央分布図

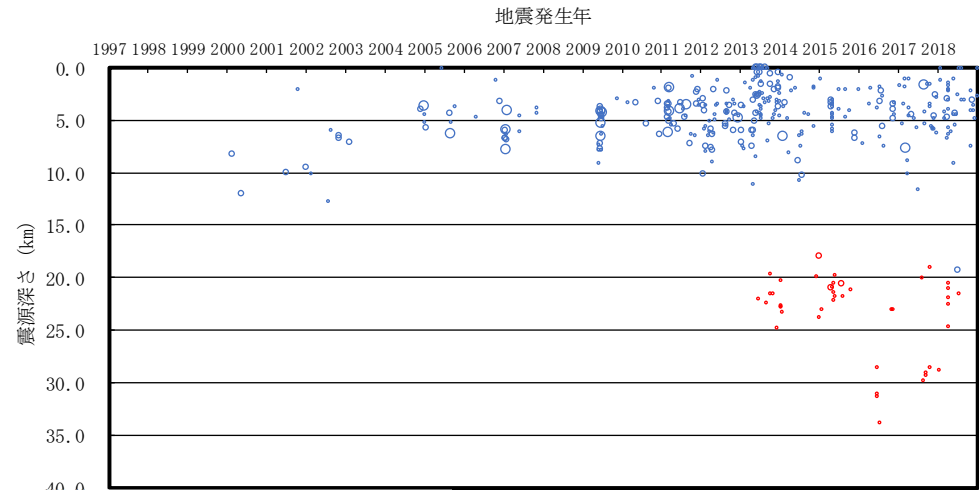
赤：低周波地震

気象庁一元化震源カタログ

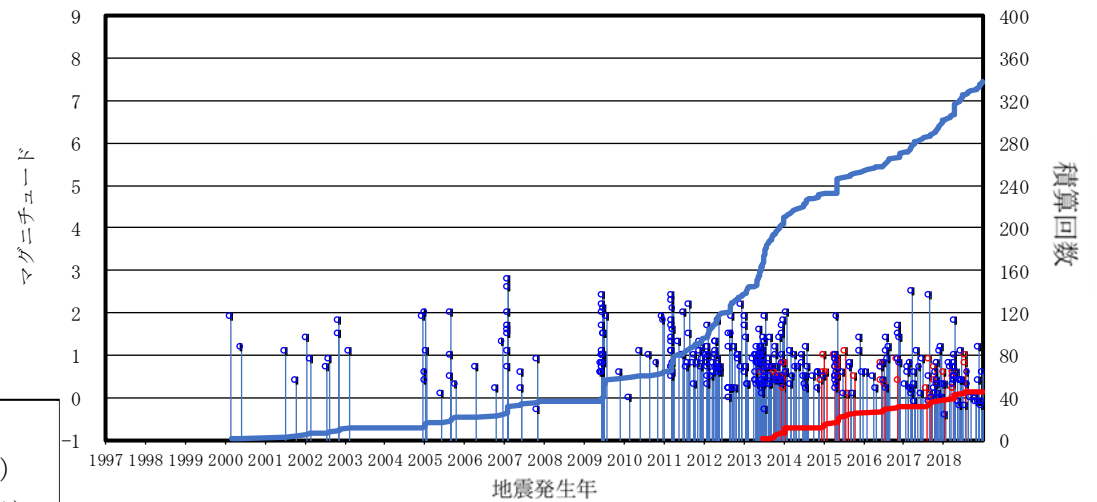
地震月報 (カタログ編)⁽²⁰⁾ (期間：1997年10月～2017年12月)

気象庁一元化処理震源要素⁽²¹⁾ (期間：2018年1月～2018年12月)

に基づき作成

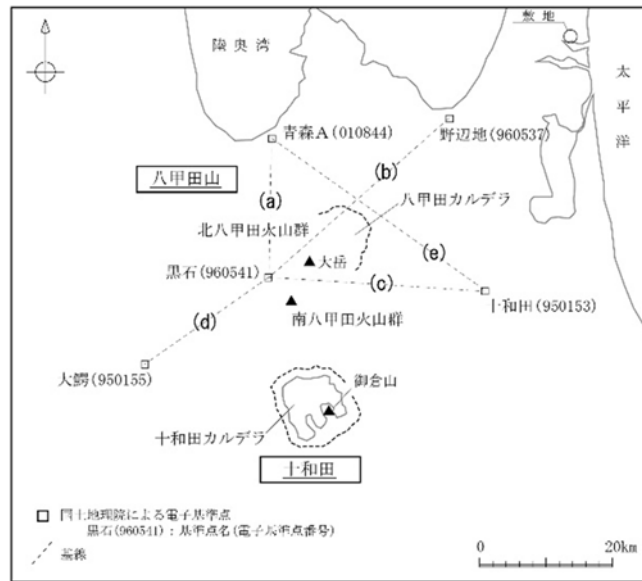


震源深さの時間変化図

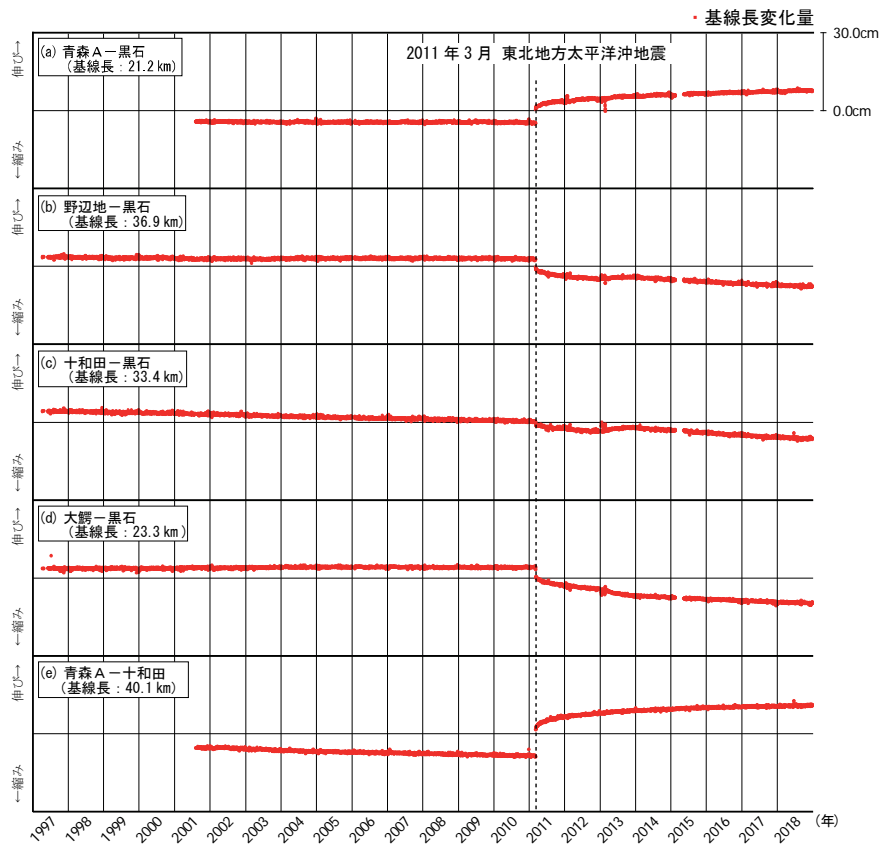


地震活動経過図及び回数積算曲線

第29図 八甲田山付近における地震活動



電子基準点及び基線位置

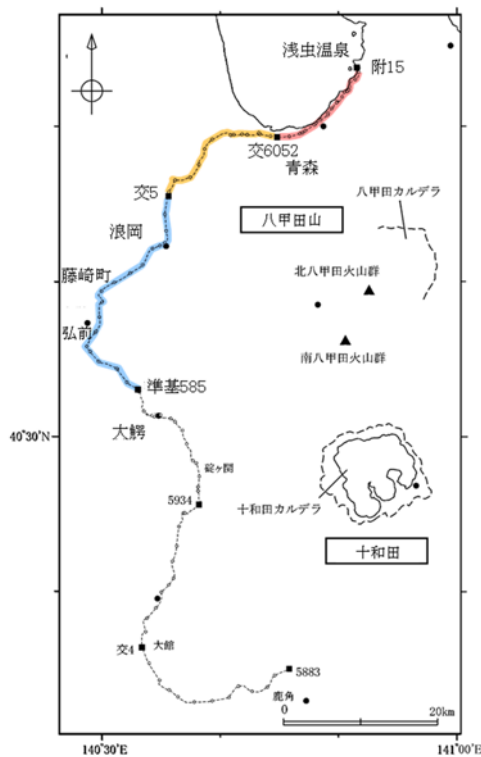


基線長の時間変化

第 30 図 八甲田山を囲む電子基準点間の基線長の時間変化 (斜距離成分)

(国土地理院の電子基準点データより作成 (期間: 1997 年 1 月 ~ 2018 年 12 月))

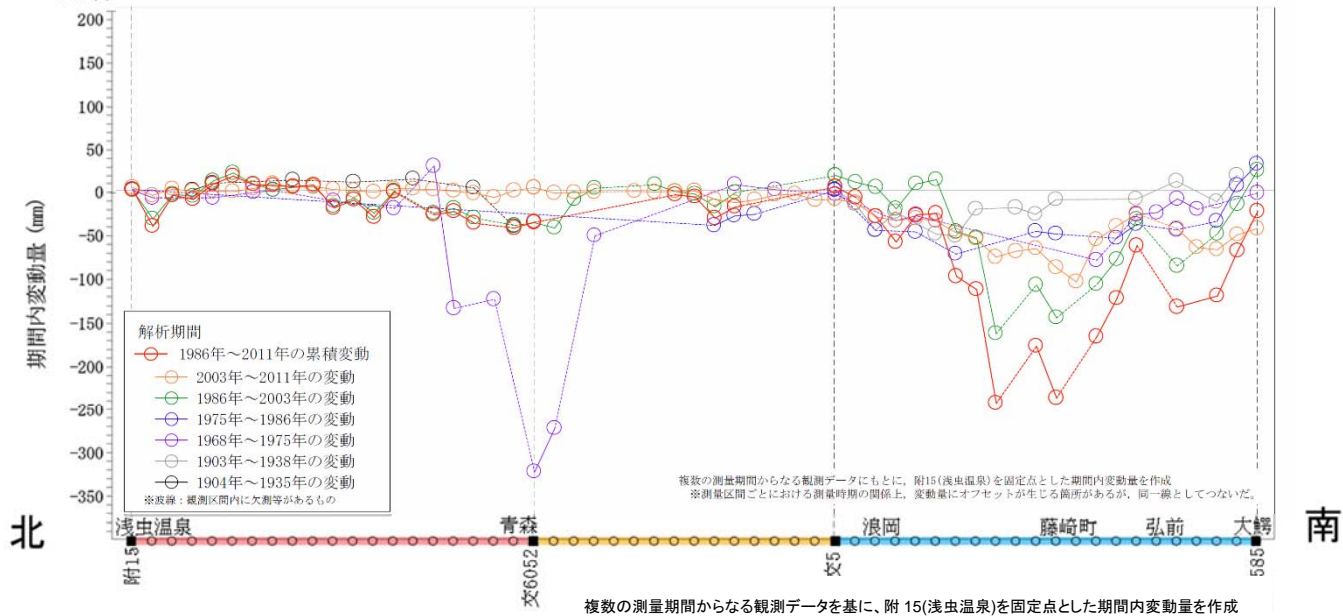
■水準路線



水準測量

 八甲田山の評価に用いた水準路線
 -■- 一等水準点(水準路線)
 ※検討に用いた水準点・路線のみ示す
 ● 電子基準点

■路線沿いの期間内変動量



複数の測量期間からなる観測データを基に、附 15(浅虫温泉)を固定点とした期間内変動量を作成

第 31 図 八甲田山付近の一等水準路線の上下変動の期間内変動量

(国土地理院による基盤地図情報及び一等水準点検測成果収録より作成)

d. 巨大噴火の可能性評価のまとめ

活動履歴について、工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾によると、八甲田カルデラの形成後の約 40 万年前以降に活動を開始した後カルデラ火山群である北八甲田火山群について、その活動のピークは 40 万年前～10 万年前までの間にあったと考えられ、10 万年前以降の火山活動は比較的低調になっており、長期的にみると終息へと向かっているとしている。

地質調査及び火山学的調査結果から、2 回の巨大噴火のうち過去最大規模の噴火である八甲田第 2 期火砕流は敷地に到達していないと評価した。

地球物理学的調査の結果、現状、八甲田山直下の上部地殻内(約 20km 以浅)には、巨大噴火が可能な量のマグマ溜まりが存在する可能性は十分小さく、大規模なマグマの移動・上昇等の活動を示す兆候も認められない。

文献調査の結果、八甲田山について、現状、巨大噴火が起こる可能性があるとする知見は認められず、八甲田山火山防災協議会(2014)⁽³¹⁾による火山災害予想区域図においても、巨大噴火を想定していない。

以上のことから、八甲田山の現在の活動状況は、巨大噴火が差し迫った状態ではなく、巨大噴火の可能性を示す科学的に合理性のある具体的な根拠が得られていないことから、巨大噴火の可能性は十分に小さいと評価した。

(ii) 最後の巨大噴火以降の火山活動の評価

a. 活動履歴

最後の巨大噴火(八甲田第 2 期火砕流を噴出した噴火)以降の活動について、北八甲田火山群は、工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾によると、八甲田カルデラの形成後の約 40 万年前以降に活動を開始した後カルデラ火山群であるとしていることから、北八甲田火山群における最大規模の火山活動を評価した。一方、八甲田カルデラの先カルデラ火山である南八甲田火山群については、宝田・村岡(2004)⁽²⁷⁾によると、約 1.1Ma 頃に活動を開始し八甲田カルデラ形成後の約 0.3Ma まで活動したとしていることから、最後の巨大噴火(約 40 万年前)以降、約 30 万年前までの活動における最大規模の火山活動を評価した。

b. 地質調査及び火山学的調査

工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾によると、最後の巨大噴火以降の火山活動である北八甲田火山群(40 万年前以降)の活動における最大規模の噴火に伴う噴出物は高田大岳溶岩

類(3.2DREkm³)であり、その分布は噴出中心付近に限られ、敷地が位置する北東方向では、八甲田カルデラを越えて分布していない。なお、北八甲田火山群の全噴出物や岩屑なだれを含め、八甲田カルデラを越えて分布していない(第32図)。

一方、宝田・村岡(2004)⁽²⁷⁾によると、八甲田カルデラの先カルデラ火山である南八甲田火山群について、最後の巨大噴火(約40万年前)以降、約30万年前まで活動したとされるが、それらの噴出物の分布は南八甲田火山群の山体周辺に限られ、敷地が位置する北東方向では、八甲田カルデラを越えて分布していない(第33図)。

c. 最後の巨大噴火以降の火山活動の評価のまとめ

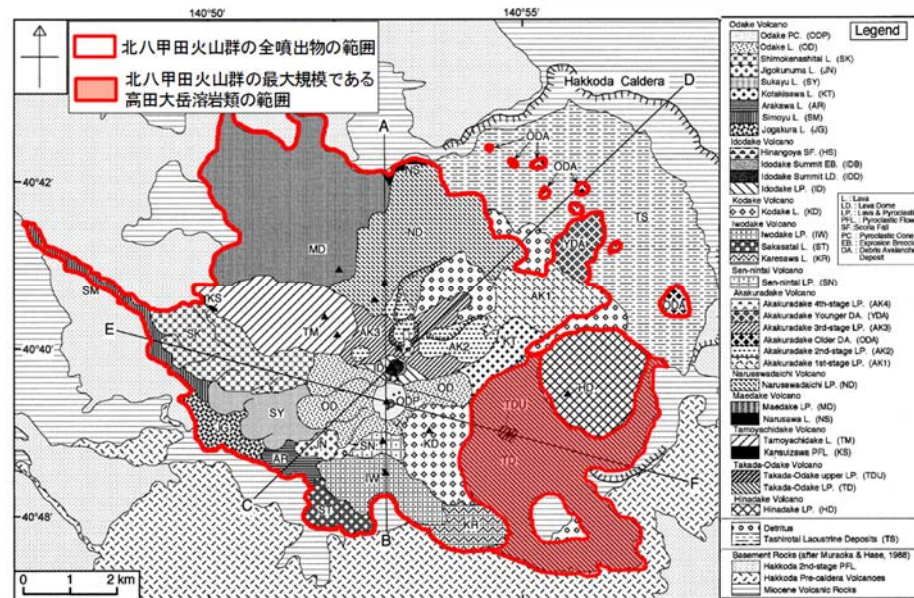
活動履歴調査、地質調査及び火山学的調査から、最後の巨大噴火以降の火山活動では、北八甲田火山群における最大規模の噴出物として高田大岳溶岩類があるが、噴出物の分布は噴出中心付近に限られ(第32図参照)、八甲田カルデラを越えた位置の分布は認められない。一方、南八甲田火山群は最後の巨大噴火以降、約30万年前まで活動したとされるが、それらの噴出物の分布は南八甲田火山群の山体周辺に限られ、敷地が位置する北東方向では、八甲田カルデラを越えて分布していない。

また、新しい火口の開口及び地殻変動については、「4.(1) 詳細調査対象火山の抽出」に記載するように、敷地において発生する可能性は十分小さいと評価した。

以上のことから、八甲田山の最後の巨大噴火以降の火山活動に伴う設計対応不可能な火山事象は、発生実績や敷地と火山離隔等から、廃棄物埋設地に影響を及ぼす可能性は十分小さいと評価した。

Volcano	Geological Unit* Abbreviation	Volume** (DRE, km ³)
Odake	ODP Odake PC.	0.01
	OD Odake L.	0.18
	SK Shimokenashitai L.	0.27
	JN Jigokunuma L.	0.02
	SY Sukayu L.	0.22
	KT Kotakisawa L.	0.09
	SM Shimoyu L.	0.17
	AR Arakawa L.	0.11
	JG Jougakura L.	0.19
	Total	1.3
Idodake	HS Hinangoya SF.	0.001
	IDE Idodake Summit EB.	0.001
	IDD Idodake Summit LD.	0.004
	ID Idodake LP.	0.25
	Total	0.25
Kodake	KD Kodake L.	0.45
Iwodake	IW Iwodake LP.	0.23
	ST Sakasatai L.	0.11
	KZ Kozawa L.	0.09
		Total
Sen-nintai	SN Sen-nintai LP.	0.51
Akakuradake	AK4 Akakuradake 4th-stage LP.	0.002
	AK3 Akakuradake 3rd-stage LP.	0.11 (0.02)
	AK2 Akakuradake 2nd-stage LP.	0.79 (0.23)
	AK1 Akakuradake 1st-stage LP.	0.39 (0.08)
	Total	1.6
Narusawadaichi	ND Narusawadaichi LP.	1.3 (0.09)
		Total
Maedake	MD Maedake LP.	0.88
	NS Narusawa L.	0.03
		Total
Tamoyachidake	TM Tamoyachidake L.	2.9
	KS Kansuzawa PFL.	0.02
		Total
Takada-Odake	TDU Takada-Odake upper LP.	0.003
	TD Takada-Odake LP.	3.2
		Total
Hinadake	HD Hinadake LP.	2.1
Debris	YDA Akakuradake Younger DA.	0.03
Avalanche	ODA Akakuradake Older DA.	0.40
	Total	15

北八甲田火山群起源の噴出物



北八甲田火山群起源の設計対応不可能な火山事象の分布 (赤線内)

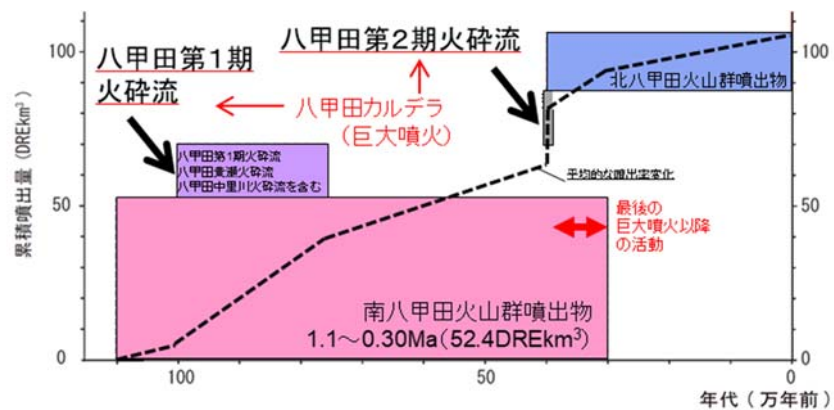
第 32 図 北八甲田火山群起源の設計対応不可能な火山事象の分布 (工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾に加筆)

南八甲田火山群起源の火山噴出物

噴出物	噴火様式	年代	体積
駒ヶ峯溶岩, 駒ヶ峯火砕岩	溶岩流, 溶岩ドーム, 火砕岩	0.3Ma	52.4 km ³ (DRE)
黄金平溶岩	溶岩流	0.3Ma	
南八甲田第3ステージ溶岩・火砕岩	成層火山体: 溶岩流, 火砕岩	0.5Ma~0.3Ma	
蔦川火砕堆積物	降下火砕物, 火砕流	0.65Ma~0.35Ma	
南八甲田第2ステージ溶岩・火砕岩	成層火山体: 溶岩流, 火砕岩	0.8Ma~0.6Ma	
黄瀬川火砕流	火砕流	1.0Ma~0.8Ma	
南八甲田第1ステージ溶岩・火砕岩	成層火山体: 溶岩流, 火砕岩	1.1Ma~0.8Ma	

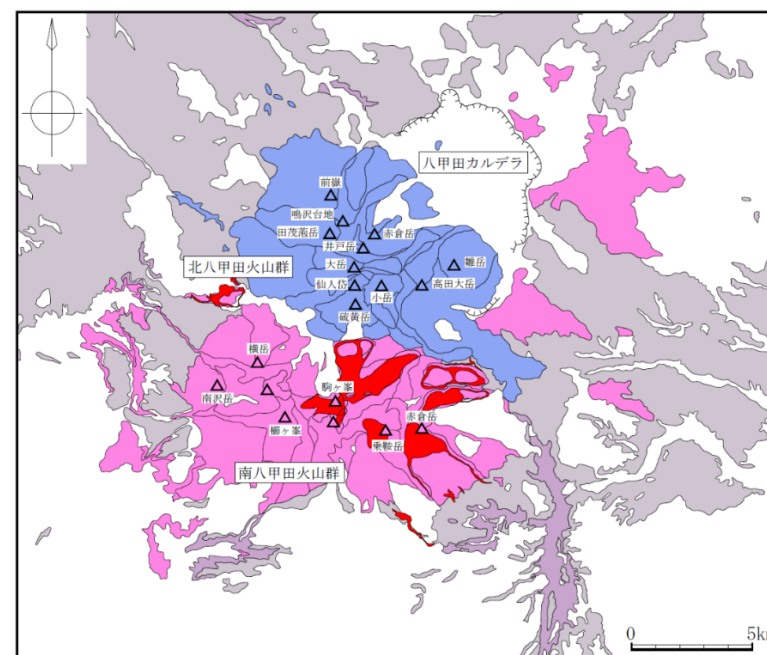
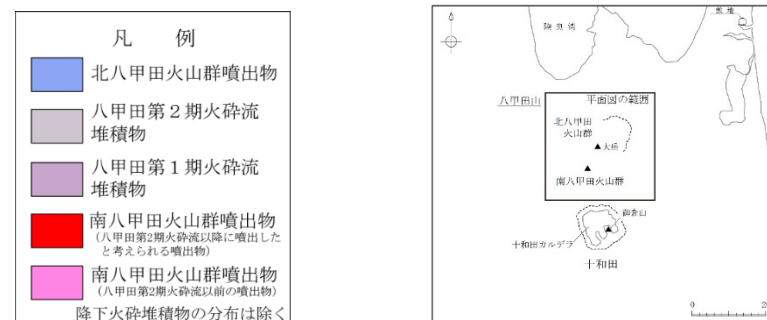
最後の
巨大噴火以降
の活動

宝田・村岡(2004)⁽²⁷⁾、Umeda et al. (2013)⁽⁶²⁾に基づき作成。
なお、蔦川火砕堆積物は八甲田第2期火砕流(0.4Ma)よりも下位層準である。



年代は中野ほか編(2013)⁽¹⁾、噴出量はUmeda et al. (2013)⁽⁶²⁾、工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾及び工藤ほか(2011)⁽²⁹⁾に基づく

八甲田山の階段ダイアグラム



八甲田山起源の火山噴出物の分布

第 33 図 南八甲田火山群起源の設計対応不可能な火山事象の分布

(4) まとめ

施設に影響を及ぼし得る火山（21火山）を対象に、設計対応不可能な火山事象について、発生実績、過去最大規模の噴火等の知見に基づき敷地への到達可能性を評価した。

火砕物密度流以外の設計対応不可能な火山事象については、発生実績や敷地と火山の離隔等から、過去最大規模の噴火を想定しても、廃棄物埋設地に影響を及ぼす可能性は十分小さい。

一方、火砕物密度流については、文献調査の結果、十和田及び八甲田カルデラの巨大噴火に伴う火砕流の到達可能性範囲に敷地若しくは敷地近傍が含まれることから、十和田及び八甲田山について、詳細な調査・検討を実施した。

十和田の巨大噴火の可能性評価については、地質調査及び火山学的調査の結果、敷地は巨大噴火による火砕流の末端に位置すると考えられるが、活動履歴、地震波速度構造、比抵抗構造、地震・地殻変動データ等から、巨大噴火が差し迫った状態ではなく、巨大噴火の可能性を示す科学的に合理性のある具体的な根拠が得られていないことから、巨大噴火の可能性は十分に小さいと評価した。

また、最後の巨大噴火以降の火山活動については、活動履歴及び地質調査・火山学的調査の結果より、最後の巨大噴火以降の最大規模の火砕流が敷地に到達していないことから、廃棄物埋設地に影響を及ぼす可能性は十分小さく、火砕物密度流以外の設計対応不可能な火山事象は、敷地と火山の離隔等から、廃棄物埋設地に影響を及ぼす可能性は十分小さいと評価した。

八甲田山の巨大噴火の可能性評価については、地質調査及び火山学的調査の結果、巨大噴火による火砕流は敷地に到達していないと考えられ、活動履歴、地震波速度構造、比抵抗構造、地震・地殻変動データ等から、巨大噴火が差し迫った状態ではなく、巨大噴火の可能性を示す科学的に合理性のある具体的な根拠が得られていないことから、施設の運用期間中における巨大噴火の可能性は十分に小さいと評価した。

また、最後の巨大噴火以降の火山活動については、活動履歴及び地質調査・火山学的調査の結果より、設計対応不可能な火山事象は、発生実績や敷地と火山の離隔等から、施設に影響を及ぼす可能性は十分小さいと評価した。

5. 火山活動のモニタリング

十和田及び八甲田山は巨大噴火の可能性が十分小さく、万が一火砕物密度流が到達した場合でも、以下の理由により火山活動のモニタリングは実施する必要はない。

- ・安全機能を有する施設に常時機能維持を必要とする動的な設備・機器はなく、直ちに対応が必要な設備はないこと
- ・過去の巨大噴火による火砕物密度流(十和田八戸火砕流堆積物)の到達実績(敷地近傍で約5cm～20cm)から、巨大噴火が発生し火砕物密度流が敷地に到達しても安全機能を有する施設が損壊する可能性は小さいこと
- ・安全を確保した上で、除灰等による対処が可能なこと

6. 廃棄物埋設地の安全性に影響を与える可能性のある火山事象の影響評価

3号廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山(21火山)に対して、現状における活動可能性及び規模を考慮し、3号廃棄物埋設地に影響を与える可能性のある火山事象について検討した。

なお、降下火砕物については、地理的領域外の火山を含めてその影響を評価した。

(1) 降下火砕物

(i) 給源を特定できる降下火砕物

「新編 火山灰アトラス」(町田・新井、2011)⁽⁹⁾等による、地理的領域内外における第四紀火山起源の主な降下火砕物の分布を第34図及び第35図に示す。

町田・新井(2011)⁽⁹⁾及び地質調査により、敷地及び敷地近傍に分布する主な降下火砕物として、下位より、甲地軽石、オレンジテフラ、洞爺火山灰、鬼界葛原テフラ、阿蘇4テフラ、十和田レッドテフラ、支笏第1テフラ、十和田切田テフラ、始良 Tn テフラ、十和田八戸テフラ、濁川テフラ、十和田中楸テフラ、十和田 a テフラ及び白頭山苦小牧テフラがあげられる(第4表)。

地理的領域内の火山を給源とする降下火砕物のうち十和田のオレンジテフラ、十和田レッドテフラ及び十和田切田テフラは最後の巨大噴火以前の、十和田八戸テフラは最後の巨大噴火の噴出物であり、現在は、最後の巨大噴火以降の活動である後カルデラ期の活動が継続していることから、これらの降下火砕物を評価対象外とした。加えて、濁川テフラの給源である濁川カルデラは「廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山の抽出」において、廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山ではないと評価したことから、評価対象外とした。

一方、地理的領域外の火山を給源とする降下火砕物のうち洞爺火山灰、鬼界葛原テフラ、阿蘇4テフラ、支笏第1テフラ及び始良 Tn テフラを噴出した各火山は現在、後カルデラ火山の活動を継続しており同規模噴火の可能性は十分小さいことから、これらの降下火砕物を評価対象外とした。このうち、敷地及び敷地近傍での層厚が最も大きい洞爺火山灰を噴出した洞爺カルデラの階段ダイアグラムを第36図に示す。

以上を踏まえると、評価対象となる十和田中楸テフラ、十和田 a テフラ、甲地軽石及び白頭山苦小牧テフラのうち敷地及び敷地近傍において最も層厚が大きい降下火砕物は、第4表に示すとおり、甲地軽石であり、再処理敷地内の複数地点で確認した(第37図)。再堆積を含む層厚が最大である KP-1 孔(第38図参照)において、軽石が比較的

密に集積する主部（層厚 21cm）と、その上位に堆積する甲地軽石を含む再堆積層（火山灰質シルト：層厚 22cm）を確認したことから、再堆積を含む甲地軽石の層厚を 43 cm と評価した。

（ii）給源不明な降下火砕物

地質調査により敷地内に給源不明な降下火砕物は確認されなかったが、敷地近傍の再処理敷地内において確認された主な給源不明な降下火砕物として A～D テフラがある（第 4 表）。これらの降下火砕物のうち、最も層厚が大きい降下火砕物は C テフラ（約 12 cm）である。

（iii）降下火砕物シミュレーション

降下火砕物シミュレーションの実施に当たって、解析可能な給源を特定できる降下火砕物について、同規模噴火の可能性、地質調査結果（最大層厚）、敷地と火山との離隔及び噴出量を検討し、敷地に最も影響を与える甲地軽石を対象に解析を実施した。降下火砕物は、一般的に給源から離れるほど層厚が減少する傾向を示すため、甲地軽石の給源に近い再処理事業所地点での計算結果を参照する。（再処理事業所再処理事業変更許可申請書 本文及び添付書類の一部補正について」（令和 2 年 4 月 28 日）

本解析は、移流拡散モデルを用いた解析プログラムであり、降下火砕物が全て降下するまで、一定方向に同じ風速の風が吹き続ける条件で実施した。

降下火砕物シミュレーションに用いる計算条件については、甲地軽石が 28 万年前～18 万年前の噴火と非常に古く、噴火に係る計算条件の情報が乏しいことから、工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾の等層厚線の分布主軸方向(WP)の風を抽出・平均した風を用いて、再現性解析を行い、最も再現性が良い解析結果(第 39 図)に基づき設定した。再現性解析結果を踏まえた降下火砕物シミュレーションの主な計算条件を第 5 表に示す。

月別平年値の風を基にした降下火砕物シミュレーション結果を第 40 図に示す。評価点における火山灰の厚さは 6.0cm～25cm となる。

一方、不確かさ（風向、風速及び噴煙柱高度）の検討については、敷地が八甲田山の北東方向に位置していることから、敷地方向の風を考慮した風向の不確かさの影響が最も大きくなると考えられる。したがって、八甲田山から敷地に向かう風を抽出・平均して作成した敷地方向の風を用いた風向の不確かさを考慮したシミュレーションのケースを実施した結果、層厚が 53cm となった(第 41 図)。

（iv）降下火砕物の密度

軽石の密度に関する文献調査の結果、新版地学辞典(2007)⁽⁴⁰⁾によると、軽石について、火山砕屑物の一種で、多孔質で見かけ密度が小さく淡色を呈するとしている。

また、小尾ほか(2019)⁽⁴¹⁾において、細粒火山灰との比較検討として有史以降の噴火の軽石を対象とした堆積密度を計測しており、乾燥状態では約 $0.4\text{g}/\text{cm}^3$ ～約 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 、自然状態では約 $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ ～約 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 、湿潤状態（試料を2日間浸水させて計測した密度）では約 $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ ～約 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ の結果を示している。

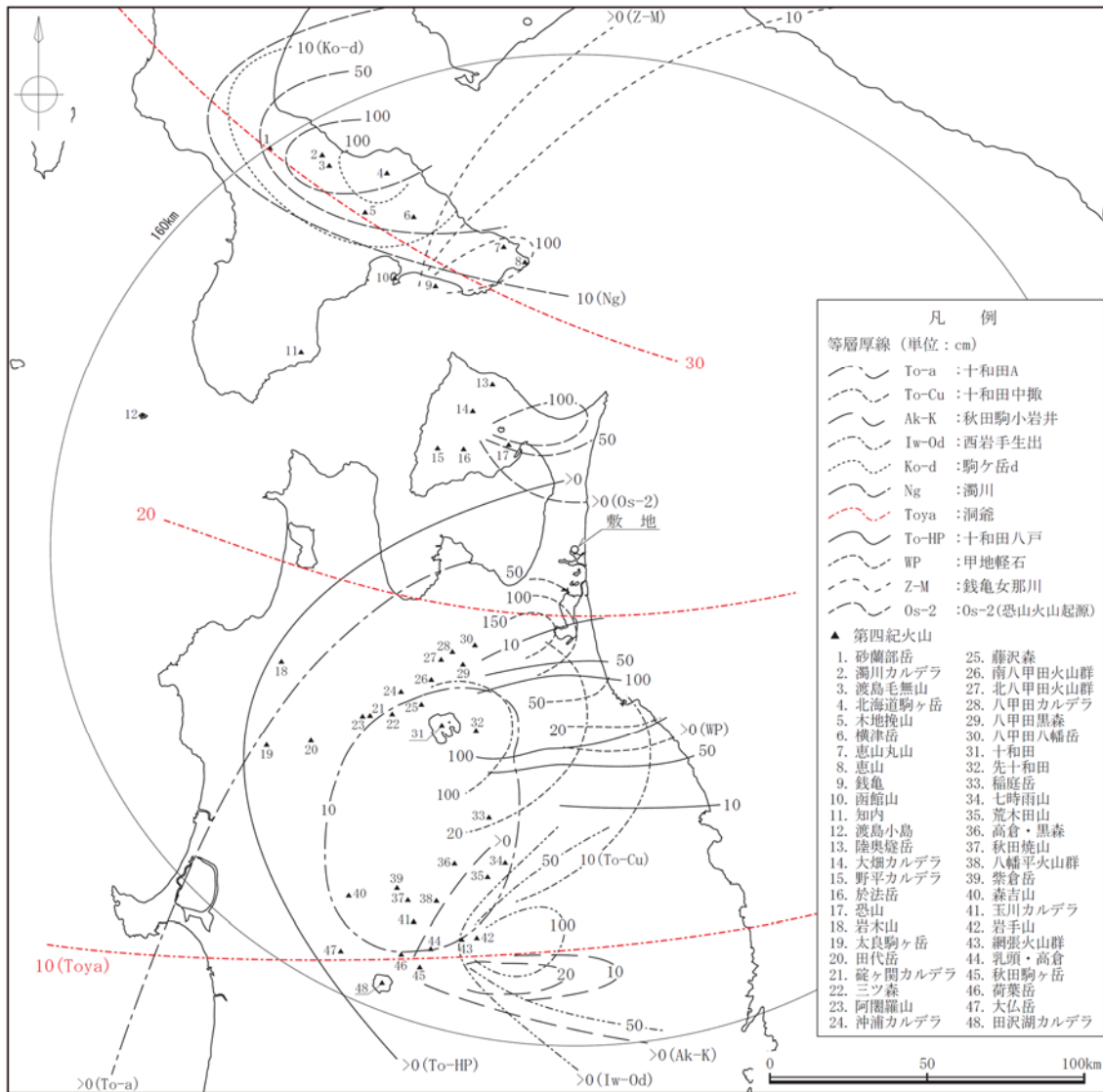
層厚が最大となる甲地軽石を対象に密度試験を実施した結果、乾燥密度は $0.43\text{g}/\text{cm}^3$ 、飽和密度 $1.25\text{g}/\text{cm}^3$ であり(第42図)、文献調査結果と整合的である。

(v) 設計に用いる降下火砕物の層厚及び密度

敷地及び敷地近傍で確認される主な降下火砕物のうち、給源を特定できる降下火砕物については、甲地軽石の層厚が最大で、地質調査によると再堆積を含み43cmであり、文献調査によると20cm～50cmである。また、給源不明な降下火砕物については、Cテフラの層厚が最大で、地質調査の結果、約12cmである。加えて、現状における同規模の噴火の可能性、地質調査結果及び噴出量等を踏まえ、甲地軽石を対象とした降下火砕物シミュレーションを実施した結果、風向の不確かさを考慮したケースにおいて、評価地点での層厚は53cmとなった。

甲地軽石の密度試験の結果、乾燥密度は $0.43\text{g}/\text{cm}^3$ 、飽和密度 $1.25\text{g}/\text{cm}^3$ である。

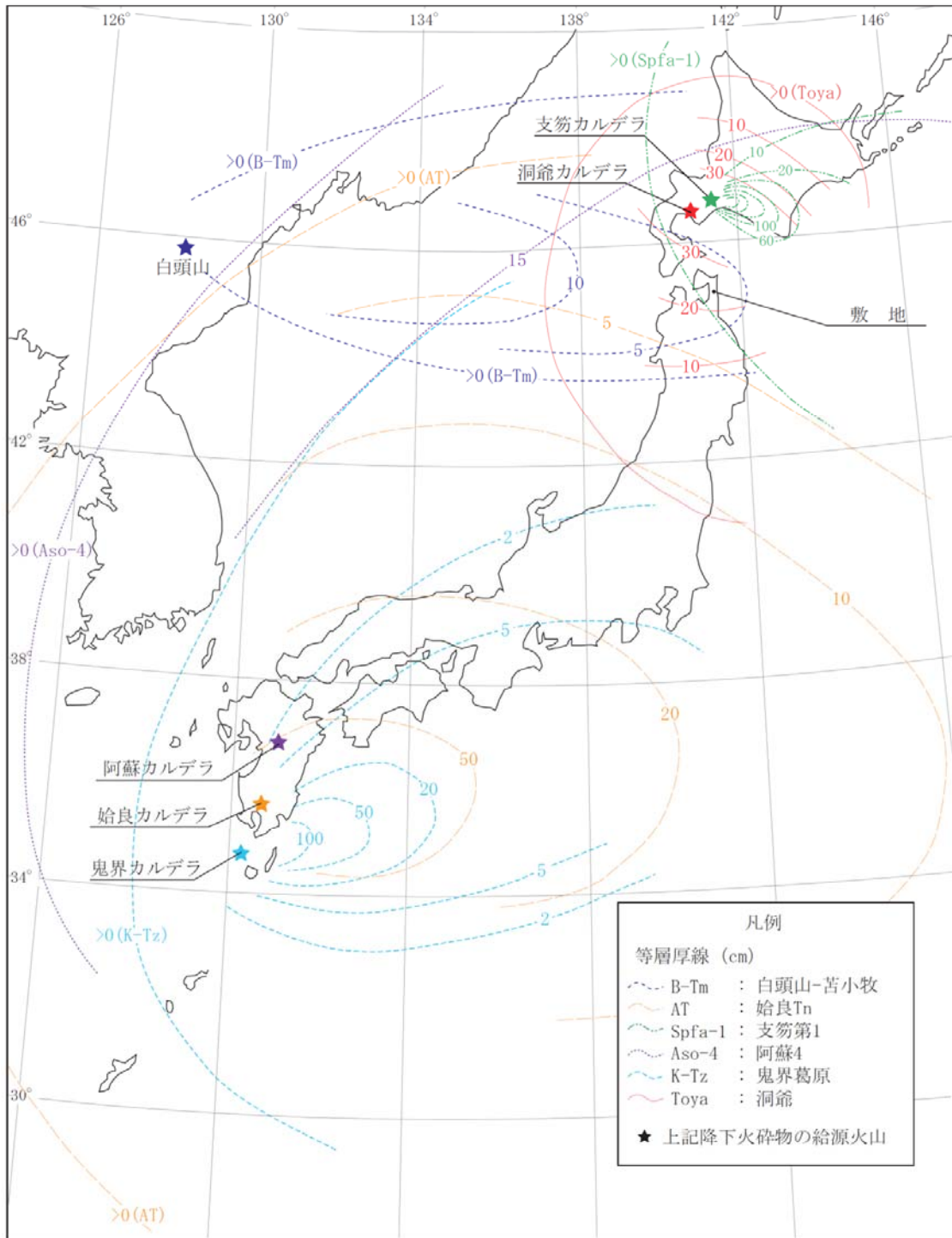
以上を踏まえ、設計に用いる降下火砕物の層厚を55cm、密度を湿潤状態で $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ とする。



(第四紀火山の位置及び名称は、中野ほか編(2013)⁽¹⁾に基づき作成。)
 (降下火砕物の名称及び等層厚線は、町田・新井(2011)⁽⁹⁾、工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾、リサイクル燃料貯蔵株式会社(2007)⁽⁶⁶⁾に基づき作成。)

第34図 地理的領域内の第四紀火山起源の主な降下火砕物の分布

(敷地及び敷地近傍に分布する主な降下火砕物については
 地理的領域外のものもあわせて示す)



(町田・新井(2011)⁹⁾に基づき作成。)

第 35 図 地理的領域外の第四紀火山起源の主な降下火砕物の分布

(敷地及び敷地近傍に分布する主な降下火砕物)

第4表 評価対象とする降下火砕物の選定及び諸元

(灰色セルは操業期間中に同規模の噴火が発生する可能性の低い降下火砕物)

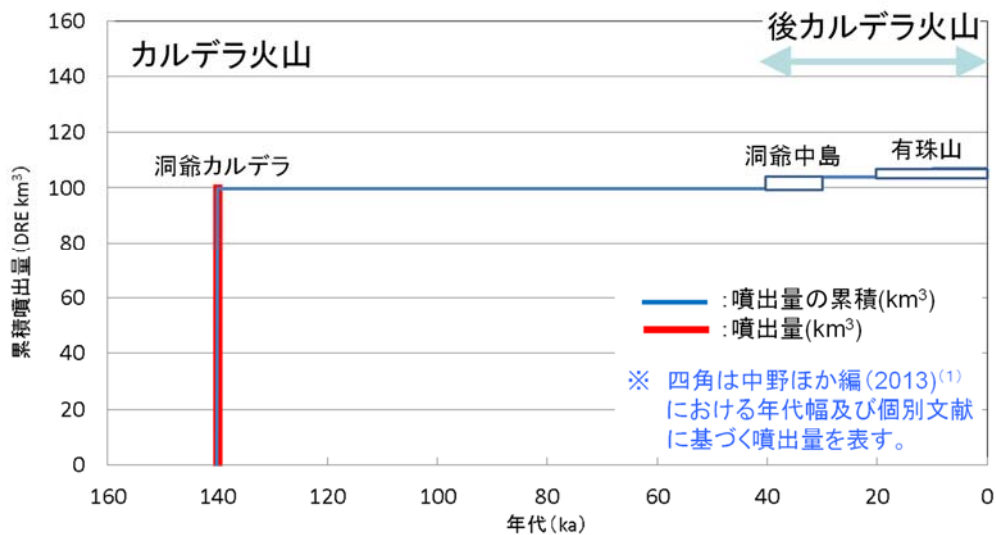
敷地と火山の 距離	噴出源	降下火砕物	年代	層厚(cm)	
				文献調査	地質調査
半径 160km 内	十和田	十和田 a テフラ (To-a)	約 1,100 年前 ⁽¹⁾	<5 ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾	—
	十和田	十和田中楸テフラ (To-Cu)	約 6,200 年前 ⁽⁴⁸⁾	<10 ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽⁴⁹⁾	—
	北八甲田 火山群	甲地軽石 (WP)	約 18 万年前～28 万年 前	20～50 ⁽³⁰⁾	43
	濁川 カルデラ	濁川テフラ (Ng)	約 1.5 万年前 ⁽⁹⁾	— ⁽⁹⁾	—
	十和田	十和田八戸テフラ (To-HP)	約 1.55 万年前 ⁽¹¹⁾	<10 ⁽⁹⁾⁽³³⁾	—
	十和田	十和田切田テフラ (To-KR)	約 3.6 万年前 ⁽⁴⁸⁾	<10 ⁽⁹⁾⁽³³⁾	—
	十和田	十和田レッドテフラ (To-Rd)	約 6.1 万年前 ⁽⁴⁸⁾	<10 ⁽⁹⁾⁽³³⁾	30
十和田	オレンジテフラ (Or-p)	約 17 万年前	<30 ⁽³⁰⁾	25	
半径 160km 外	白頭山	白頭山苫小牧テフラ (B-Tm)	約 1,000 年前 ⁽⁹⁾	5～10 ⁽⁹⁾	—
	始良 カルデラ	始良 Tn テフラ (AT)	約 2.8 万年前～3.0 万 年前 ⁽⁹⁾	<5 ⁽⁹⁾	—
	支笏 カルデラ	支笏第 1 テフラ (Spfa-1)	約 4.2 万年前～4.4 万 年前 ⁽⁹⁾	>0 ⁽⁹⁾	—
	阿蘇	阿蘇 4 テフラ (Aso-4)	約 8.5 万年前～9 万年 前 ⁽⁹⁾	>15 ⁽⁹⁾	—
	鬼界 カルデラ	鬼界葛原テフラ (K-Tz)	約 9.5 万年前 ⁽⁹⁾	<2 ⁽⁹⁾	—
	洞爺	洞爺火山灰 (Toya)	約 11.2 万年前～11.5 万年前 ⁽⁹⁾	20～30 ⁽⁹⁾	15
給源不明	—	A テフラ	—	—	約 7 ^{*1}
	—	B テフラ	—	—	約 11 ^{*1}
	—	C テフラ	—	—	約 12 ^{*1}
	—	D テフラ	—	—	約 10 ^{*1}

*1：敷地内には確認されないが、近隣の再処理敷地内で確認された層厚を示す。

洞爺カルデラ・洞爺中島・有珠山の活動履歴

年代 (ka)	活動期, 火山名	主要噴出物名	噴出量 (DRE km ³)	参考文献
AD.2000	後カルデラ火山	有珠山	2000年噴火 1663年噴火(Us-b) 有珠外輪山溶岩 等	中野ほか編(2013) ⁽¹⁾ 町田・新井(2011) ⁽⁹⁾ 曾屋ほか(2007) ⁽⁶⁷⁾ 中川ほか(2005) ⁽⁶⁸⁾ 第四紀火山カタログ委員会編(1999) ⁽⁵⁾
20ka 30ka 40ka		洞爺中島	中島火山噴出物	
140ka	カルデラ火山	洞爺カルデラ	洞爺火砕流 洞爺火山灰 [※]	

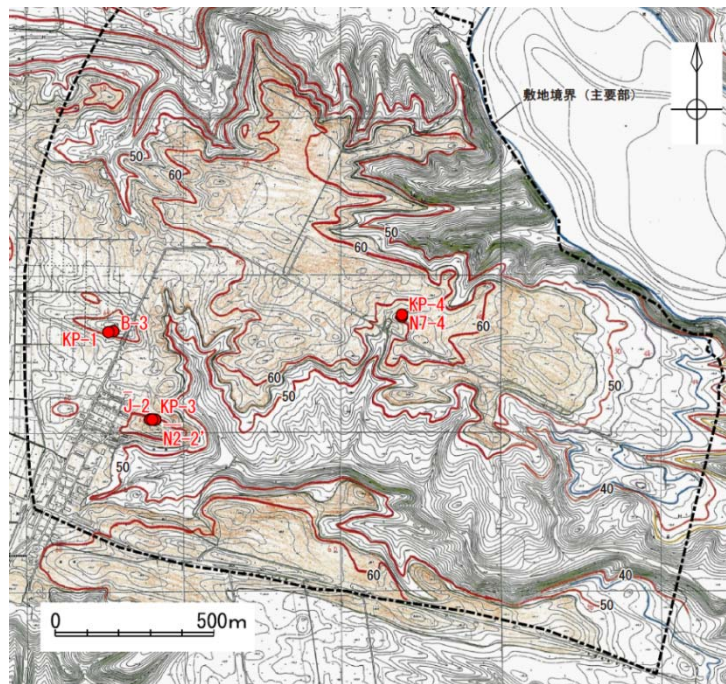
※町田・新井(2011)⁽⁹⁾によると、
11.2~11.5万年前に噴出したテフラとしている。



第 36 図 洞爺カルデラの階段ダイアグラム

再処理敷地内で確認した甲地軽石の層厚

ボーリング 孔名	層厚	確認深度 (確認標高)	備考
KP-1 孔	43cm	2.90m～3.33m (50.46m～50.89m)	・火山灰質シルト（甲地軽石の再堆積含む）22 c m ・甲地軽石（主部）21 c m
B-3 孔	37cm	8.57m～8.94m (50.98m～51.35m)	・火山灰質シルト（甲地軽石の再堆積含む）5 c m ・甲地軽石（主部）32 c m
KP-3 孔	—	—	シルト質砂層中に散在（深度：3.50m～3.72m、 標高：51.53m～51.75m）するため層厚評価不適
N2-2' 孔	—	—	砂層中に散在（深度：3.90m～3.92m、 標高：51.60m～51.62m）するため層厚評価不適
J-2 孔	10cm	3.60m～3.70m (51.48m～51.58m)	
KP-4 孔	17cm	2.21m～2.38m (53.06m～53.23m)	
N7-4 孔	16cm	7.50m～7.66m (53.37m～53.53m)	

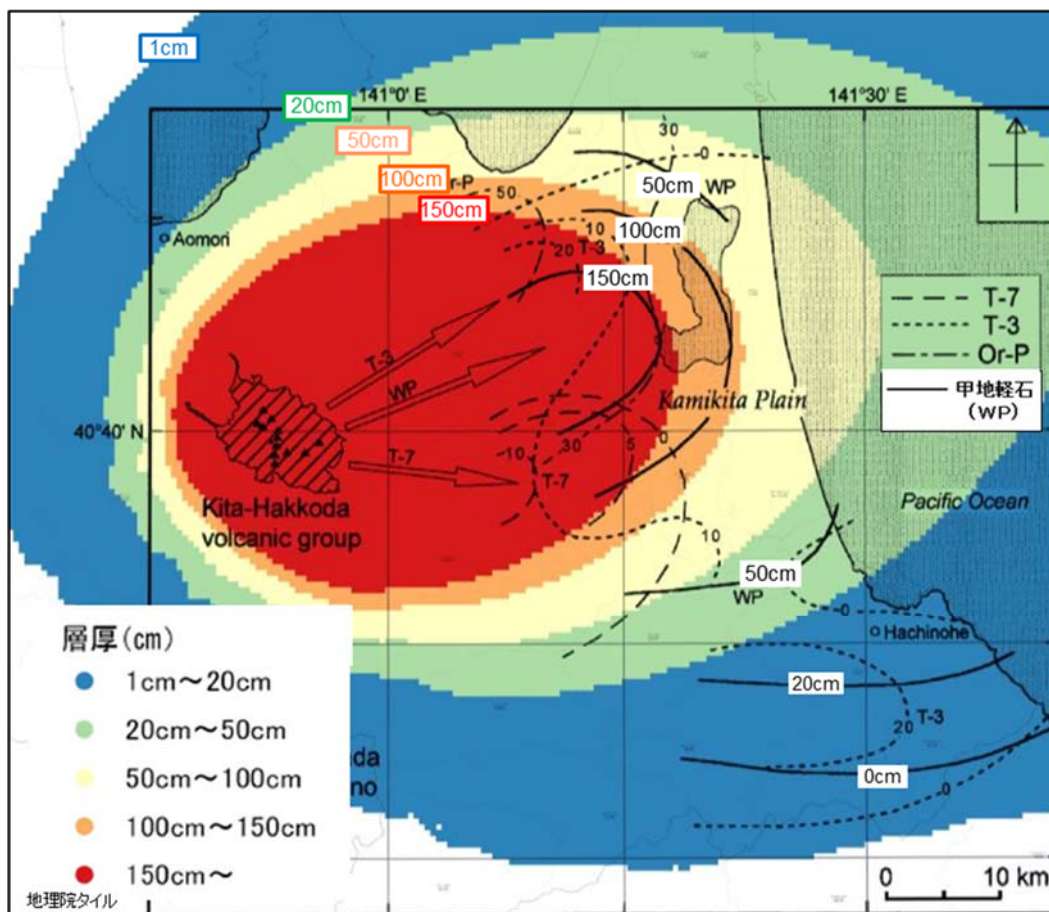


甲地軽石を確認した再処理敷地内ボーリング調査位置図

第 37 図 甲地軽石に着目した地質調査結果



第38図 再処理敷地で確認された甲地軽石の堆積状況



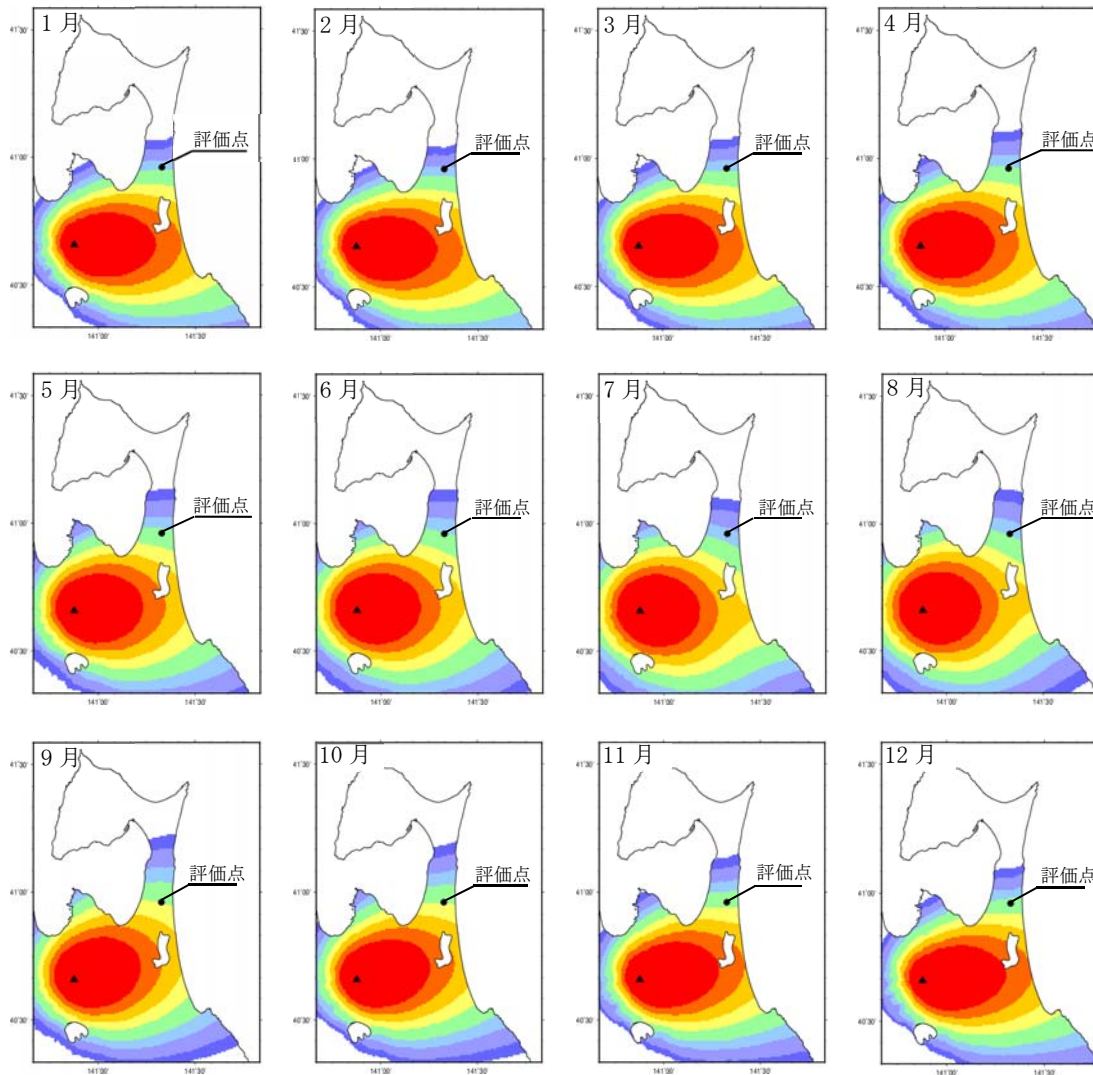
(工藤ほか(2004)⁽³⁰⁾に当社の解析結果を重ね合わせて作成)

第 39 図 甲地軽石 (WP) の再現性解析結果

第5表 降下火砕物シミュレーションの主な計算条件

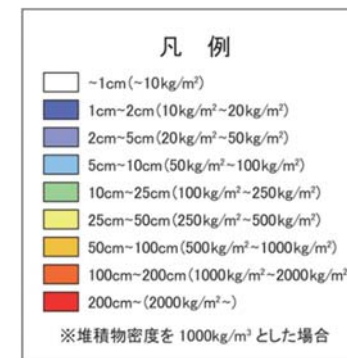
想定 噴火規模	パラメータ	単位	値	設定根拠等	
甲地軽石 (WP)	噴出物量	kg	8.25×10^{12}	工藤ほか(2004) ⁽³⁰⁾ に基づき設定(噴出量： 3.3km ³ (DRE)、マグマ密度2.5t/m ³)	
	噴煙柱高度	m	25,000	再現性解析結果に基づき設定	
	粒径	最大	mm	$1/2^{-10}$	Tephra2 推奨値
		最小	mm	$1/2^{10}$	Tephra2 推奨値
		中央	mm	$1/2^{-3}$	再現性解析結果に基づき設定
		標準 偏差	φ	2.5	再現性解析結果に基づき設定
	岩片密度	t/m ³	2.6	Tephra2 推奨値	
	軽石粒子密度	t/m ³	1.0	Tephra2 推奨値	
	渦拡散係数	m ² /s	0.04	萬年(2013) ⁽⁵⁰⁾ に基づき設定	
	拡散係数	m ² /s	75,000	再現性解析結果に基づき設定	
	Fall Time Threshold	s	3,600	萬年(2013) ⁽⁵⁰⁾ に基づき設定	
	給源	X座標 (UTM:54N)	m	489,622	大岳山頂のUTM座標
		Y座標 (UTM:54N)	m	4,500,900	
		標高	m	1,584	大岳山頂の標高
風	月別平年値の風 ^{*1}		気象庁が1981年～2010年の30年間の観測値の平均を 基に算出(秋田地方気象台)		
	風向の不確かさの風		ワイオミング大学のHP上の1973年～2018年のうち秋 田地方気象台の高層気象観測データを用いて、敷地方 向の風を抽出し作成		
標高 データ	500mメッシュ		国土地理院の数値地図50mを 解析用に500mメッシュに変換		

*1:「火山防災マップ作成指針」(内閣府ほか、2013)⁽⁶¹⁾によると、シミュレーションに用いる風向・風速は、気象庁ホームページの気象庁統計情報にある過去の気象データ検索(高層)で紹介されている月平均値を使うと良いとされており、この月平均値の風は、気象観測統計指針(気象庁、2018)⁽⁶²⁾において「その時々気象や天候を評価する基準」として示されている月別平年値の風に相当する。

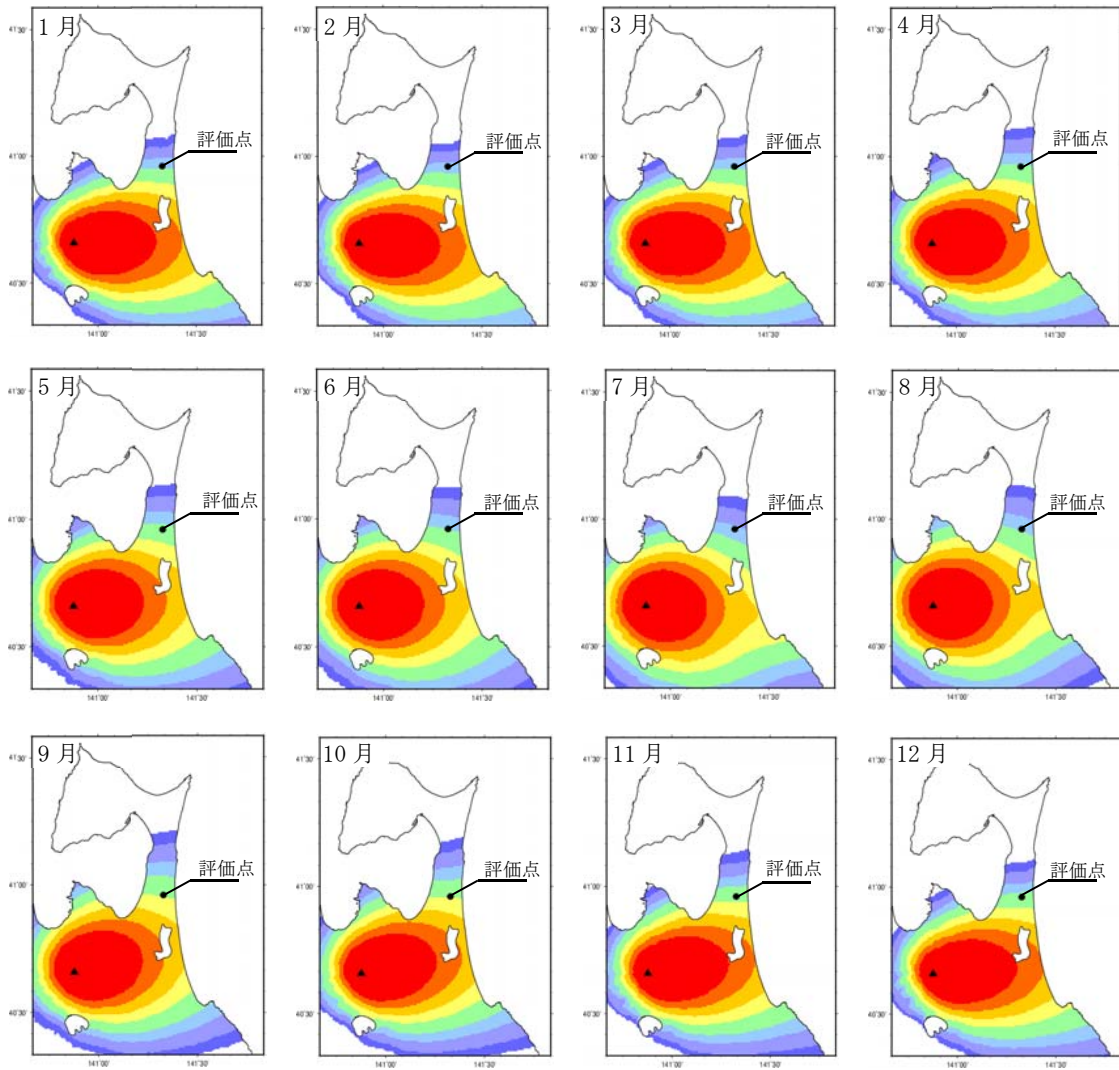


	質量 (kg/m ²)	層厚 (cm)
1月	8.4×10^1	8.4×10^0
2月	6.1×10^1	6.1×10^0
3月	8.8×10^1	8.8×10^0
4月	1.1×10^2	1.1×10^1
5月	1.3×10^2	1.3×10^1
6月	1.1×10^2	1.1×10^1
7月	6.7×10^1	6.7×10^0
8月	9.3×10^1	9.3×10^0
9月	2.5×10^2	2.5×10^1
10月	2.5×10^2	2.5×10^1
11月	1.9×10^2	1.9×10^1
12月	1.3×10^2	1.3×10^1

月別平年値(9時)の風の際の評価点での層厚(1981~2010年)

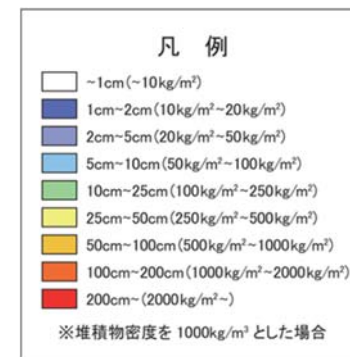


第40図 降下火砕物シミュレーションの解析結果(1/2) (月別平年値の風：9時)

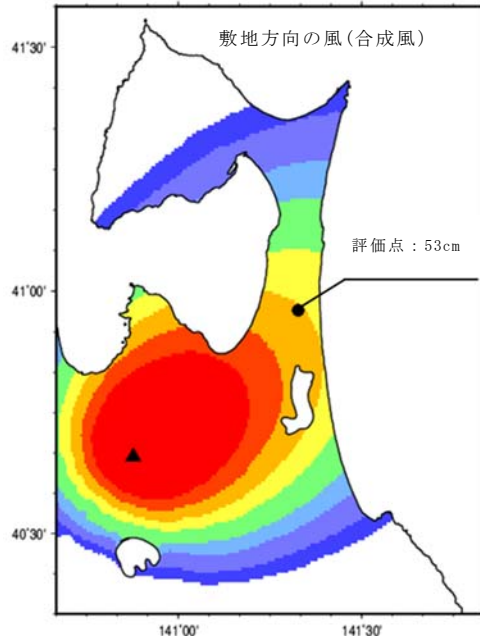


	質量 (kg/m ²)	層厚 (cm)
1月	8.9×10^1	8.9×10^0
2月	6.5×10^1	6.5×10^0
3月	8.6×10^1	8.6×10^0
4月	1.1×10^2	1.1×10^1
5月	1.3×10^2	1.3×10^1
6月	9.9×10^1	9.9×10^0
7月	6.0×10^1	6.0×10^0
8月	9.0×10^1	9.0×10^0
9月	2.3×10^2	2.3×10^1
10月	2.4×10^2	2.4×10^1
11月	1.8×10^2	1.8×10^1
12月	1.3×10^2	1.3×10^1

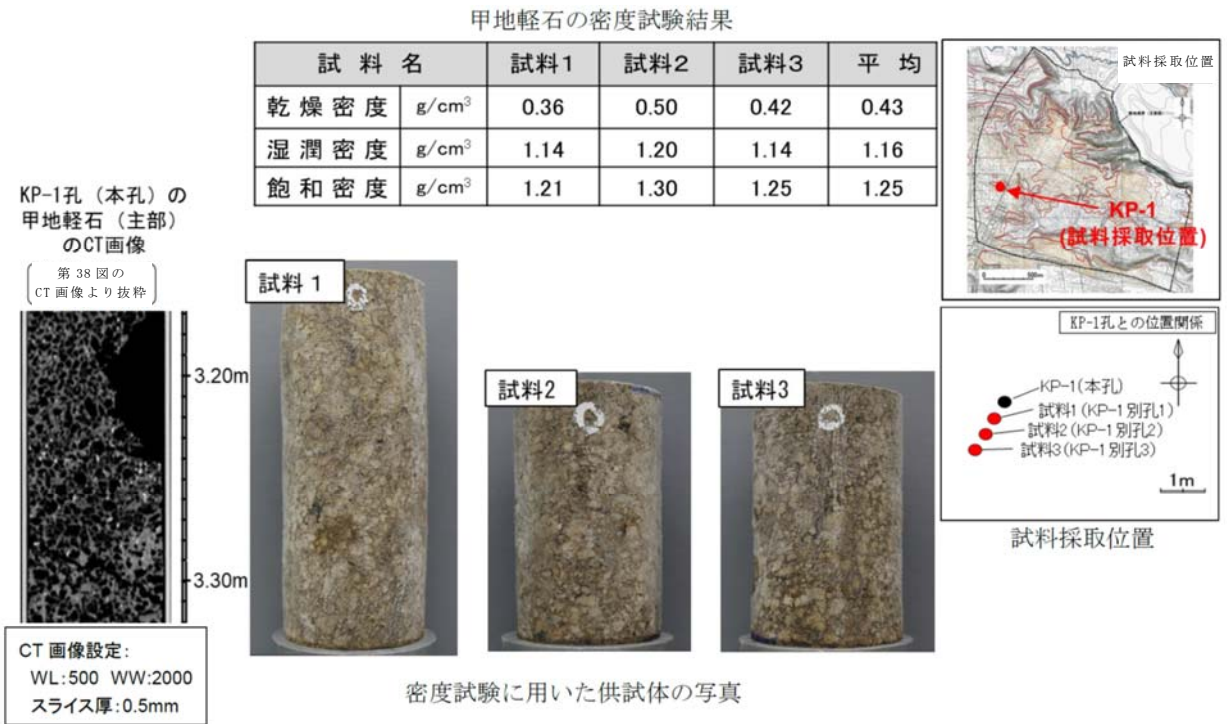
月別平年値(21時)の風の際の評価点での層厚(1981~2010年)



第40図 降下火砕物シミュレーションの解析結果(2/2) (月別平年値の風: 21時)



第 41 図 降下火砕物シミュレーションの解析結果(風向きの不確かさを考慮)



第 42 図 甲地軽石の密度試験結果

(2) その他の火山事象

その他の火山事象として、土石流、火山泥流及び洪水、火山から発生する飛来物(噴石)、火山ガス、津波、静振、大気現象、火山性地震とこれに関連する事象、熱水系及び地下水の異常について、文献調査、地質調査等の結果より検討した。

(i) 土石流、火山泥流及び洪水

土石流、火山泥流及び洪水については、敷地を中心とする半径 120km の範囲に存在する廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山(横津岳、恵山、陸奥燧岳、恐山、岩木山、田代岳、藤沢森、南八甲田火山群、北八甲田火山群、八甲田カルデラ、十和田、先十和田及び八幡平火山群の 13 火山)を対象に検討した。その結果、これらの火山を起源とする土石流、火山泥流及び洪水に伴う堆積物は確認されず、また、敷地は太平洋及び陸奥湾を境にする下北半島脊梁部の台地上に位置し、これらの火山を源流に有する河川流域に含まれないことから、廃棄物埋設地に土石流、火山泥流及び洪水が到達する可能性は十分小さいと評価した。

(ii) 火山から発生する飛来物(噴石)

火山から発生する飛来物(噴石)については、敷地を中心とする半径約 10km の範囲には、廃棄物埋設地に影響を及ぼし得る火山が分布しないことから、噴石が敷地に到達することはなく、3 号廃棄物埋設地に影響を及ぼす可能性は十分小さいと評価した。

(iii) 火山ガス

火山ガスについては、敷地は、太平洋及び陸奥湾を境にする下北半島脊梁部の台地上に位置し、火山ガスが敷地に滞留する地形ではないことから、敷地に到達することはなく、廃棄物埋設地に影響を及ぼす可能性は十分小さいと評価した。

(iv) その他の火山事象

火山による熱水系及び地下水の異常については、火山発生メカニズムや火山フロントの位置を考慮すると、敷地近傍において、新しい火口が開く可能性が十分に小さいことから、熱水等の影響の可能性は十分小さいと評価した。

火山性の津波及び静振については、敷地周辺の海域に海底火山は分布せず、敷地周辺に大きな影響を及ぼした火山事象による歴史津波の記録は知られていないことから、廃棄物埋設地に火山性の津波及び静振が到達する可能性は十分小さいと評価した。

火山に起因する大気現象については、第四紀火山と敷地とは十分な離隔があることから、廃棄物埋設地に到達する可能性は十分小さいと評価した。

火山性地震とこれに関連する事象については、第四紀火山と敷地とは十分な離隔があることから、影響は十分に小さいと評価した。

7. 設計上考慮する降下火砕物に対する防護設計

設計上考慮する火山の影響(降下火砕物)に対して廃棄物埋設地は、放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までは放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を、覆土完了から廃止措置の開始までは移行抑制機能及び遮蔽機能を損なわない設計とする。

(1) 放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了まで

(i) 防護設計の基本方針

埋設設備には、常時機能維持が必要な動的機器はないことから、降下火砕物に対しては荷重の影響を考慮する。降下火砕物の荷重としては、層厚及び単位荷重を考慮し、埋設設備は降下火砕物の荷重に対して放射性物質の漏出を防止する機能及び遮蔽機能を損なわない設計とする。

埋設設備の降下火砕物に対する設計については、静的設計法を基本とし、「2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】」及び「道路橋示方書・同解説(V耐震設計編) 平成29年版」に基づき防護設計を講ずる。

(ii) 自然現象の重畳

自然現象の重畳に関しては、重畳を検討する自然現象の特徴を考慮して、詳細に検討が必要となる自然現象の組合せを抽出する。重畳の組合せの検討の結果、降下火砕物は、風(台風)+降下火砕物及び降下火砕物+積雪を考慮する。

(2) 覆土完了から廃止措置の開始まで

降下火砕物の堆積により、上部覆土表面が化学的及び熱的影響を受ける懸念があるが、その影響範囲は地表面に限定される。難透水性覆土及び下部覆土の遮蔽機能及び低透水性並びに難透水性覆土及び上部覆土の収着性に影響は生じないよう、上部覆土は5m以上の厚さを確保した設計とする。

(3) 降灰に対する対応

降下火砕物の影響として、放射性廃棄物の受入れの開始から覆土開始までの間、埋設設備に降灰が確認された場合、必要に応じて、除灰を実施する。

また、覆土開始時点に、廃棄物埋設地上に降下火砕物が堆積していた場合、除灰を実施する。

なお、降下火砕物の荷重は、降下火砕物シミュレーション及び密度試験結果を考慮した結果、 7.0kN/m^2 ($55\text{ cm} \times 1.3\text{g/cm}^3 = 7.0\text{kN/m}^2$) である。埋設設備の設計上考慮している積雪荷重は 5.7kN/m^2 ($190\text{ cm} \times 30\text{N/m}^2/\text{cm}^3 = 5.7\text{kN/m}^2$) であり、降灰荷重及び積雪荷重は同程度となる。降灰荷重及び積雪荷重は、埋設設備の単位面積当たりの荷重 ($0.24\text{MN/m}^2 = 240\text{kN/m}^2$) に対して、3%程度と十分に小さいことから、埋設設備の安全機能に影響はない。設計荷重に関する考え方は、「十条 廃棄物埋設地のうち第一号及び第三号 添付資料 2」に示す。

8. 参考文献

- (1) 中野俊、西来邦章、宝田晋治、星住英夫、石塚吉浩、伊藤順一、川邊禎久、及川輝樹、古川竜太、下司信夫、石塚治、山元孝広、岸本清行編(2013)：日本の火山(第3版)、産業技術総合研究所地質調査総合センター、200万分の1地質編集図、No. 11
- (2) 気象庁編(2013)：日本活火山総覧(第4版)
- (3) 西来邦章、伊藤順一、上野龍之編(2012)：第四紀火山岩体、貫入岩体データベース、地質調査総合センター速報、no. 60、地質調査総合センター
- (4) 西来邦章、伊藤順一、上野龍之、内藤一樹、塚本 齊編(2014)：第四紀噴火・貫入活動データベース Ver. 1.00、独立行政法人産業技術総合研究所
- (5) 第四紀火山カタログ委員会編(1999)：日本の第四紀火山カタログ
- (6) 産業技術総合研究所地質調査総合センター編(2017)：1万年噴火イベントデータ集、Ver. 2.3、産業技術総合研究所 地質調査総合センター
- (7) 海上保安庁海洋情報部“海域火山データベース”
<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/kaiikiDB/list-2.htm> (参照 2016-09-06)
- (8) 山元孝広(2015)：日本の主要第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図、地質調査総合センター研究資料集、No. 613、産総研地質調査総合センター
- (9) 町田洋、新井房夫(2011)：新編 火山灰アトラス[日本列島とその周辺]、東京大学出版会、276p
- (10) Hayakawa, Y. (1985) : Pyroclastic Geology of TowA.D. a Volcano, Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo, Vol.60, pp.507-592
- (11) 工藤崇、小林淳、山元孝広、岡島靖司、水上啓治(2011)：十和田火山における噴火活動様式の時代変遷と長期予測、日本第四紀学会講演会要旨集、Vol.41、pp.82-83
- (12) Yamamoto, T., Kudo, T. and Isizuka, O. (2018) : Temporal variations in volumetric magma eruption rates of Quaternary volcanoes in Japan, Earth, Planets and Space, 70:65
- (13) 高橋正樹(2008)：破局噴火-秒読みに入った人類壊滅の日、祥伝社新書

- (14) 十和田火山防災協議会(2018) : 十和田火山災害想定影響範囲図、青森県防災危機管理課・秋田県総合防災課・鹿角市総務課・小坂町総務課発行、平成30年1月24日作成(修正済)、15p
- (15) 下司信夫(2016) : 大規模火砕噴火と陥没カルデラ : その噴火準備と噴火過程、火山、Vol. 61、No.1
- (16) Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A. and Zhao, D. (2001) : Three-dimensional structure of Vp, Vs, and Vp/Vs and beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids, Journal of Geophysical Research, Vol.106、No.B10, pp. 21,843-21,857
- (17) 中島淳一(2017) : 東北地方の火山周辺の地震波速度・減衰構造 : 地殻構造と低周波地震・S波反射面との関係、東京大学地震研究所彙報、Vol.92、pp.49-62
- (18) Matsubara, M., Sato H., Uehira, K., Mochizuki, M., Kanazawa, T., Takahashi, N., Suzuki, K., Kamiya, S(2019) : Seismic Velocity Structure in and around the Japanese Island Arc Derived from Seismic Tomography Including NIED MOWLAS Hi-net and S-net Data, Seismic Waves - Probing Earth System, IntechOpen, 1-19
- (19) Kanda, W. and Ogawa, Y. (2014) : Three-dimensional electromagnetic imaging of fluids and melts beneath the NE Japan arc revisited by using geomagnetic transfer function data, Earth, Planets and Space, 66, doi:10.1186-1880-5981-66-39
- (20) 気象庁(2019) : 地震月報(カタログ編). 気象庁ホームページ.
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo.html> (参照 2019-03-17)
- (21) 防災科学技術研究所(2019) : 気象庁一元化処理震源要素、防災科学技術研究所ホームページ. <https://hinetwww11.bosai.go.jp/auth/?LANG=ja> (参照 2019-03-17)
- (22) 気象庁(2014) : 十和田の火山活動解説資料(平成26年1月)
- (23) 国土地理院(2018) : 平成30年5月の地殻変動、国土地理院ホームページ.
<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2018-goudou0608.html> (参照 2018-06-08)

- (24) 気象庁(2015)：第131回火山噴火予知連絡会資料、2015-02-24.
- (25) 気象庁(2019)：第143回火山噴火予知連絡会資料、2019-02-27.
- (26) 広井良美、宮本毅、田中倫久(2015)：十和田火山平安噴火（噴火エピソードA）の噴出物層序及び噴火推移の再検討、火山、Vol. 60、No. 2.
- (27) 宝田晋治、村岡洋文(2004)：八甲田山地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、青森(5)、No. 30、地質調査総合センター、86p
- (28) 村岡洋文、高倉伸一(1988)：10万分の1八甲田地熱地域地質図説明書、特殊地質図(21-4)、通商産業省工業技術院地質調査所、27p
- (29) 工藤崇、檀原徹、山下透、植木岳雪、佐藤大介(2011)：“八甲田カルデラ起源火砕流堆積物の層序の再検討”、日本第四紀学会講演要旨集、徳島、日本第四紀学会
- (30) 工藤崇、宝田晋治、佐々木実(2004)：東北日本、北八甲田火山群の地質と火山発達史、地質学雑誌、Vol. 110、No. 5、pp. 271-289
- (31) 八甲田山火山防災協議会(2014)：“火山災害予想区域図（数値シミュレーション計算結果）”. 第5回八甲田山火山防災協議会、平成26年3月26日、14p. 青森県防災ホームページ.
<http://www.bousai.pref.aomori.jp/DisasterFireDivision/council/hakkodaAgreement/index.html>(参照 2018-3-27)
- (32) 工藤崇、植木岳雪、宝田晋治、佐々木寿、佐々木実(2006)：八甲田カルデラ南東地域に分布する鮮新世末期～中期更新世火砕流堆積物の層序と給源カルデラ、地学雑誌、Vol. 115、No. 1
- (33) 工藤崇(2005)：十和田地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、産総研地質調査総合センター、79p
- (34) 桑原 拓一郎(2004)：青森県東部上北平野における海成段丘構成物の層序と相対的海面変化、地質学雑誌、Vol. 110、No. 2、 pp. 93-102
- (35) 桑原 拓一郎、檀原 徹、山下 透(2007)：青森県、上北平野北部に分布する袋町1～9テフラの記載岩石学的特徴、第四紀研究、Vol. 46、No. 1、p. 63-66
- (36) 小川康雄(1991)：八甲田火山群の深部比抵抗構造に関する考察、地質調査所報告、No. 275、pp. 83-95
- (37) 気象庁(2019)：八甲田山の火山活動解説資料（令和元年10月7日）

- (38) 気象庁(2019)：“火山の状況に関する解説情報（八甲田山第3号）令和元年10月8日16時00分発表”。気象庁ホームページ。
http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/volinfo/VK20191008160000_203.html, (参照 2019-11-25)
- (39) 気象庁(2014)：八甲田山の火山活動解説資料（平成26年6月）
- (40) 地学団体研究会 新版地学事典編集委員会編(2007)：新版地学事典、平凡社
- (41) 小尾亮、藤沢康弘、厚井高志、池田暁彦、堤宏徳、山本陽子(2019)：降灰後の土石流発生に関わる火山灰特性（軽石の堆積密度）について、2019年度砂防学会研究発表会概要集、岩手、2019-5-21/23、砂防学会
- (42) 雁澤好博、紀藤典夫、柳井清治、貞方 昇(2005)：北海道駒ヶ岳の最初期テフラの発見と初期噴火活動史の検討、地質学雑誌、Vol.111、No.10、pp.581-589
- (43) 高田倫義、中川光弘(2016)：南西北海道、横津火山群の地質と岩石：150万年間の活動様式とマグマ化学組成の時間変遷、日本地質学会第123年学術大会講演要旨、R3-0-2
- (44) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)(1988)：No.13 南茅部地域、地熱開発促進調査報告書、1170p
- (45) 宝田晋治(1991)：岩屑流の流動・堆積機構－田代岳火山起源の岩瀬川岩屑流の研究－、火山、Vol.36、No.1、pp.11-23
- (46) 工藤 崇(2018)：十和田湖周辺地域における前期～中期更新世火山活動史、地質調査研究報告、No.69、pp.165-200
- (47) 須藤 茂(1992)：5万分の1仙岩地域中心部地熱地質図説明書、特殊地質図(21-5)、地質調査所、73p
- (48) 工藤崇、内野隆之、濱崎聡志(2019)：十和田湖地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、産総研地質調査総合センター、192p
- (49) 早川由紀夫(1983)：十和田火山中撤テフラ層の分布、粒度組成、年代、火山、第2集、Vol.28、No.3、pp.263-273
- (50) 萬年一剛(2013)：降下火山灰シミュレーションコードTephra2の理論と現状－第四紀学での利用を視野に、第四紀研究、Vol.52、No.4、pp.173-187
- (51) 内閣府（防災担当）、消防庁、国土交通省水管理・国土保全局砂防部、気象庁(2013)：火山防災マップ作成指針

- (52) 気象庁(2018) 気象観測統計指針
- (53) 中川久夫、中馬教允、石田琢二、松山力、七崎修、生出慶司、大池昭二、高橋一
(1972) : 十和田火山発達史概要、東北大學理學部地質學古生物學教室研究邦文報告、
No. 73
- (54) 土井宣夫(1993) : 盛岡市付近に分布する十和田一大不動、八戸火砕流堆積物の産
状、日本地質学会東北支部会報、No. 22、pp. 8-9
- (55) 村岡洋文、山口 靖、長谷紘和(1991) : 八甲田地熱地域で見出されたカルデラ
群、地質調査所報告、No. 275、pp. 97-111.
- (56) 大沢 穠、三村弘二、広島俊男、中島和敏(1993) : 20 万分の 1 地質図幅 青森、第
2 版、地質調査所
- (57) 大沢 穠、須田芳朗(1978) : 20 万分の 1 地質図幅 弘前および深浦、地質調査所
- (58) 長森英明、宝田晋治、吾妻崇(2013) : 青森西部地域の地質、地域地質研究報告 (5 万分の
1 地質図幅)、産業技術総合研究所 地質調査総合センター
- (59) 青森県史編さん自然部会(2001) 青森県史 自然編 地学、青森県史友の会
- (60) Ogawa, Y. (1987): Preliminary interpretation on detailed magnetovariational
profilings in the Northern Tohoku district, Journal of geomagnetism and
geoelectricity, Vol. 39.
- (61) 上嶋誠(2009) : MT 法による電気伝導度構造研究の現状、地震第 2 輯、vol. 61
- (62) Umeda, K., Ban, M., Hayashi, S., Kusano, T. (2013) : Tectonic shortening
and coeval volcanism during the Quaternary, Northeast Japan arc, J. Earth
System Science, Vol.122, No.1, pp.137-147
- (63) 近藤玲介、塚本すみ子、工藤崇、遠藤邦彦、小林淳、坂本竜彦(2012) : レス堆積物の
pIRIR 年代測定による十和田火山周辺におけるテフラ降下年代の推定、日本第四紀学会講
演要旨集、埼玉、2012-08-20/22, 日本第四紀学会
- (64) 工藤崇、小林淳(2013) : 十和田火山、先カルデラ期～カルデラ形成期テフラの放射年代
測定、地質調査研究報告、Vol. 64、No. 9/10
- (65) 桑原拓一郎(2007) : 青森県上北平野に分布する白ベタテフラ (WP) のジルコン・フィッ
ション・トラック年代、第四紀研究、Vol. 45、No. 5
- (66) リサイクル燃料貯蔵株式会社(2007) : リサイクル燃料備蓄センター 使用済燃料
貯蔵事業許可申請書 平成 19 年 3 月(平成 21 年 4 月一部補正、平成 21 年 6 月一部

補正、平成 21 年 8 月一部補正、平成 21 年 12 月一部補正、平成 22 年 4 月一部補正)

(67) 曾屋龍典、勝井義雄、新井田清信、堺幾久子、東宮昭彦(2007)：有珠火山地質図（第 2 版）、産業技術総合研究所 地質調査総合センター

(68) 中川光弘、松本亜希子、田近淳、広瀬亘、大津直(2005)：有珠火山の噴火史の再検討：寛文噴火（1663 年）と明和噴火（1769 年）に挟まれた 17 世紀末の先明和噴火の発見、火山、Vol. 50、No. 2

許可基準規則解釈第 10 条第 1 項
に関する補足説明

目 次

1. 覆土の施工実現性.....	1
(1) 現地施工試験の概要.....	1
(2) 混合土の製造について.....	3
(3) 現地施工試験の結果.....	6
(4) 特性の異なるベントナイト混合土を用いた現地施工試験結果について.....	7
2. 覆土の施工時における品質管理(案).....	8
(1) 完了確認時における品質管理項目.....	8
(2) 材料納入時、覆土材料製造時及び覆土施工時の品質管理項目.....	9
3. 諸外国との比較.....	12
(1) 日本の廃棄物埋設施設.....	12
(2) 諸外国の低レベル放射性廃棄物処分施設との比較.....	12

1. 覆土の施工実現性

現地施工においても室内試験による設計仕様とおりの覆土を製造及び施工でき、目標の透水係数を達成できる見込みがあることを確認する。

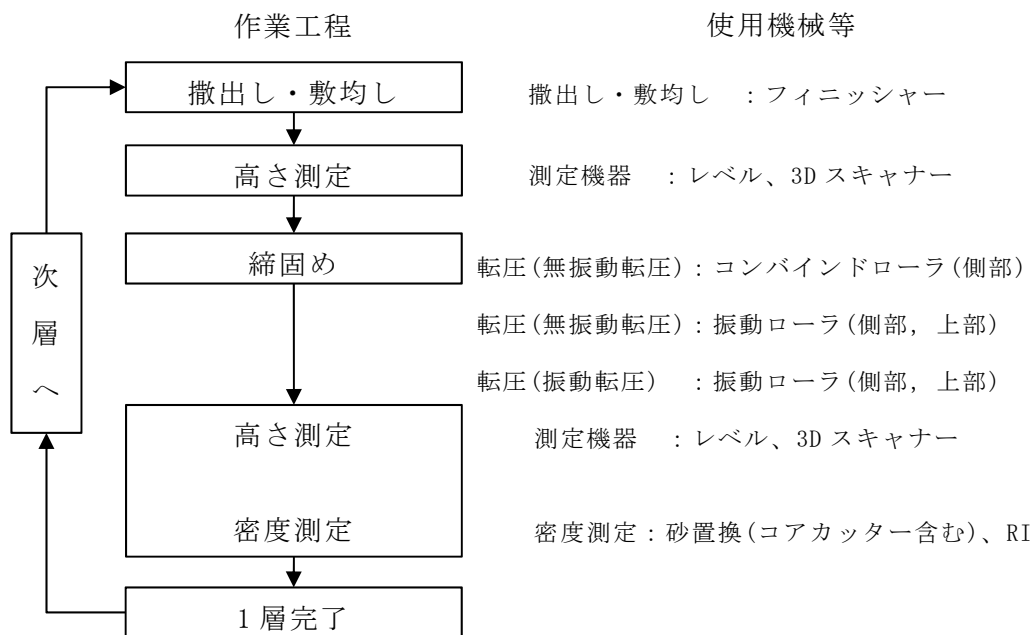
(1) 現地施工試験の概要

覆土の施工実現性を確認するための現地施工試験を実施した。試験結果を整理し、室内試験と同等の性能を確保できることを確認する。施工試験の実施に際しては、一般土工として広く適用されている道路土工要綱⁽¹⁾の他に、本施設と同様に透水性に留意している土構造物として河川堤防に着目した河川土工マニュアル⁽²⁾を参照し、覆土の設計要求性能である低透水性を満足するための締固め機械、締固め厚さ、締固め回数及び含水比を確認する。

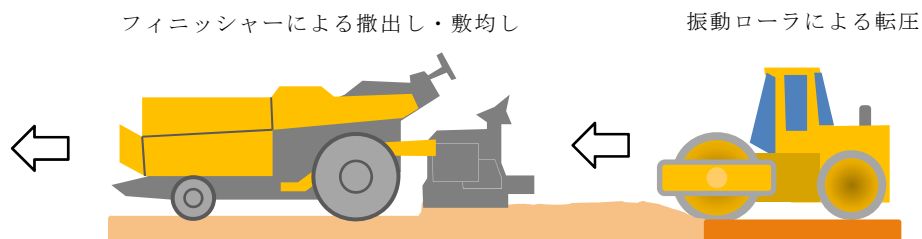
第1図に難透水性覆土の試験施工フローを、第2図に難透水性覆土の施工イメージ図を示す。また、第1表に現地施工試験と一般土工（河川土工マニュアル⁽²⁾）の施工方法比較を示す。

河川土工マニュアル⁽²⁾からの改良点として、覆土を平坦かつ均質に施工するため、フィニッシャーを用いて撒出し及び敷均しを行い、測定機器を用いて撒出し厚さ（10cm/層）を確認する。敷均し後、河川土工マニュアル⁽²⁾で一般的と示されている重機を用いて締固めを行い、1層目の覆土を設置する。品質確認のため、高さ及び密度をそれぞれ測定し、2層目以降を同様に実施する。

難透水性覆土（Ca型30%、初期含水比 $=w_{opt}+4\%$ 、撒出し厚さ10cm/層）を対象とした現地施工試験の概要を第2表に示す。第2表の小型振動ローラはピット側部を、大型振動ローラはピット上部を想定している。



第 1 図 難透水性覆土の試験施工フロー



第 2 図 難透水性覆土の施工イメージ図

第1表 現地施工試験と一般土工（河川土工マニュアル⁽²⁾）の施工方法比較

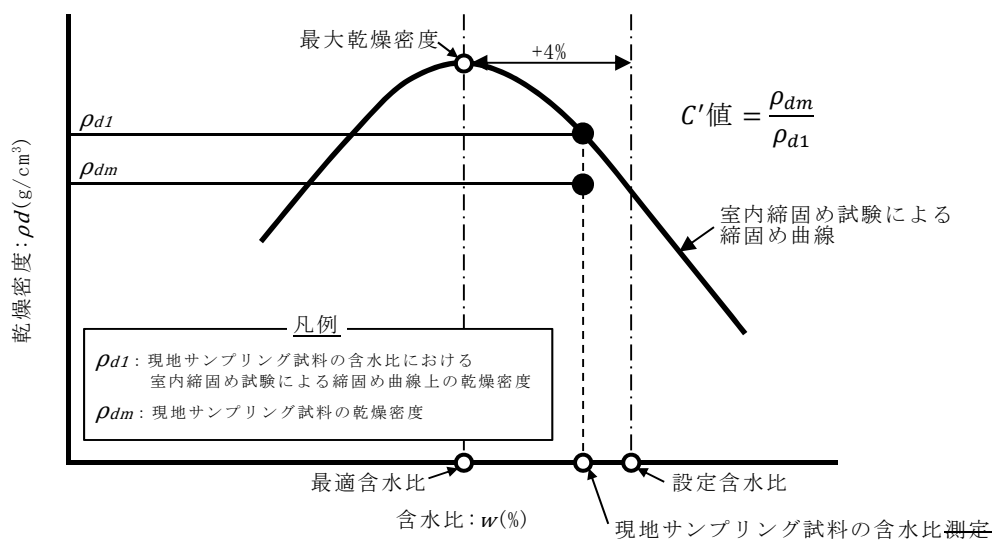
比較項目	現地施工試験	一般土工（河川土工マニュアル ⁽²⁾ ）
撒出し 敷均し	撒出し厚さ：10cm 施工機械：フィニッシャー	撒出し厚さ：35cm～45cm 施工機械：ブルドーザ 他
締固め	締固め回数：6回～8回 施工機械：振動ローラ	締固め回数：10回程度以下 施工機械：振動ローラ 他

第2表 現地施工試験一覧

No.	MBC* ¹ (mmol/100g)	透水係数(m/s)	締固め規定値 C' 値(%) * ²	施工機械等
1	123	6.4×10^{-12} ～ 7.0×10^{-11} 【n=40】	95～100 (平均 97) 【n=200】	小型振動ローラ 1.5t 幅 2.0m×長さ 9m×10層 無振動転圧 2回、振動転圧 6回
2	123	4.4×10^{-12} ～ 9.7×10^{-12} 【n=8】	99～104 (平均 102) 【n=20】	大型振動ローラ 8.8t 幅 3.0m×長さ 6m×2層 無振動転圧 2回、振動転圧 8回

*1：メチレンブルー吸着量であり、モンモリロナイトの量を表す指標である。

*2：現地サンプリング試料の含水比における締固め曲線上の乾燥密度 ρ_{d1} に対する現地サンプリング試料の乾燥密度 ρ_{dm} の比率で表される規定値である（第3図参照）。



第3図 締固め規定値の概要

(2) 混合土の製造について

混合土の製造はバッチ式ミキサー（容量 2,250L、混練時間 5 分程度）で行った。ベ

ントナイト混合土の仕様を第3表に、主要材料を第4表に示す。

ここで、室内成型供試体を用いて、ベントナイト(クニボンド相当)を使用したベントナイト混合土で構成される難透水性覆土を対象に、ベントナイト混合率及び含水比をパラメータスタディした透水試験(地盤工学会基準 JGS 0313-2018)の結果を第4図に示す。透水係数と含水比の関係において、その曲線の極小を生じる含水比は、一般に最適含水比よりわずかに高い含水比になることで知られており⁽³⁾、本試験結果においても同様の傾向を確認できる。よって、覆土において目的の透水係数を得るためには、ベントナイト混合率及び含水比を管理する必要がある。

締固め施工後のサンプリングにより、ベントナイト混合率(ここでは代替指標として細粒分含有率)及び含水比に対して、品質確認を行った。混合土の製造確認結果を第5図及び第6図に示す。ベントナイト混合率は30wt%±2%程度、含水比は $w_{opt}+4% \pm 2%$ の範囲であり、設計仕様の配合を確保した状態で混合できていることが分かる。

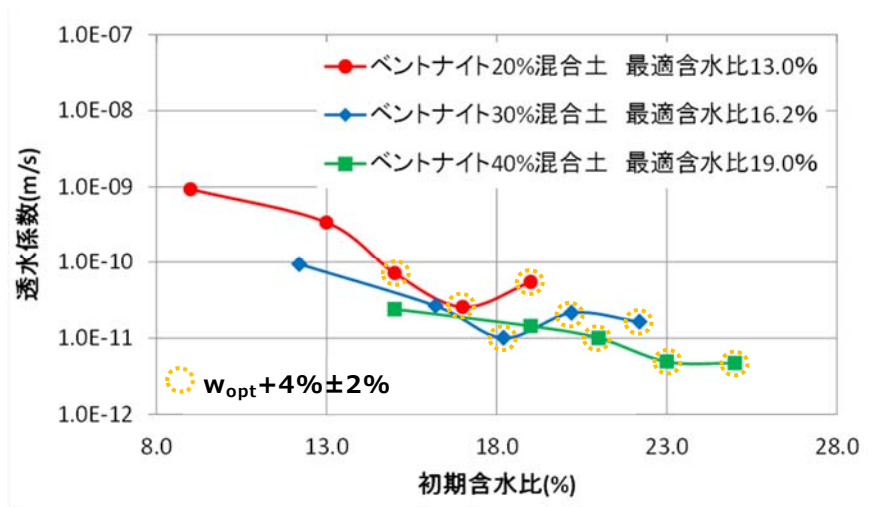
第3表 ベントナイト混合土の仕様

項目	仕様	備考
ベントナイト混合率	30%	—
含水比	$w_{opt}^{*1}+4% \pm 2%$	$w_{opt}+4%=19.6%$

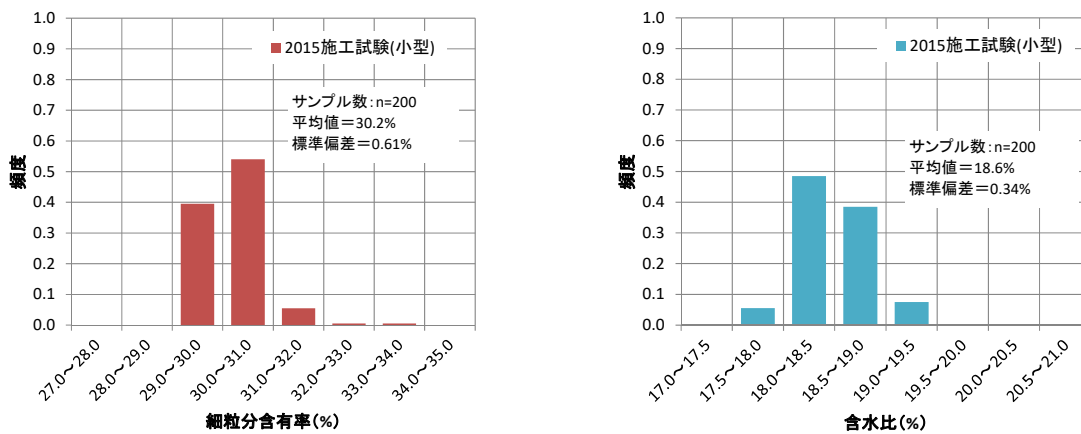
*1：最適含水比

第4表 主要材料

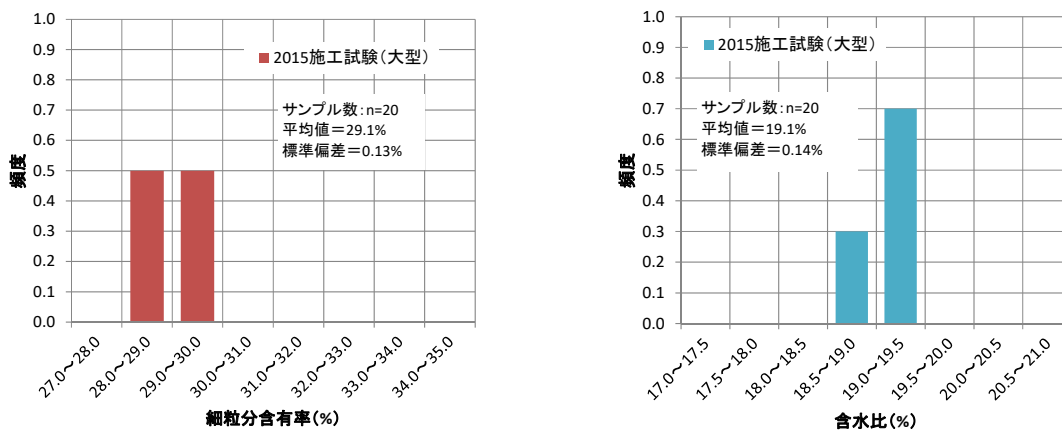
項目	仕様
Ca型ベントナイト(クニボンドRW)	MBC120以上
コンクリート用細骨材	青森県三沢市砂森産



第4図 ベントナイト混合率ごとの含水比と透水係数の関係



第5図 混合土の製造確認結果：小型施工機械分

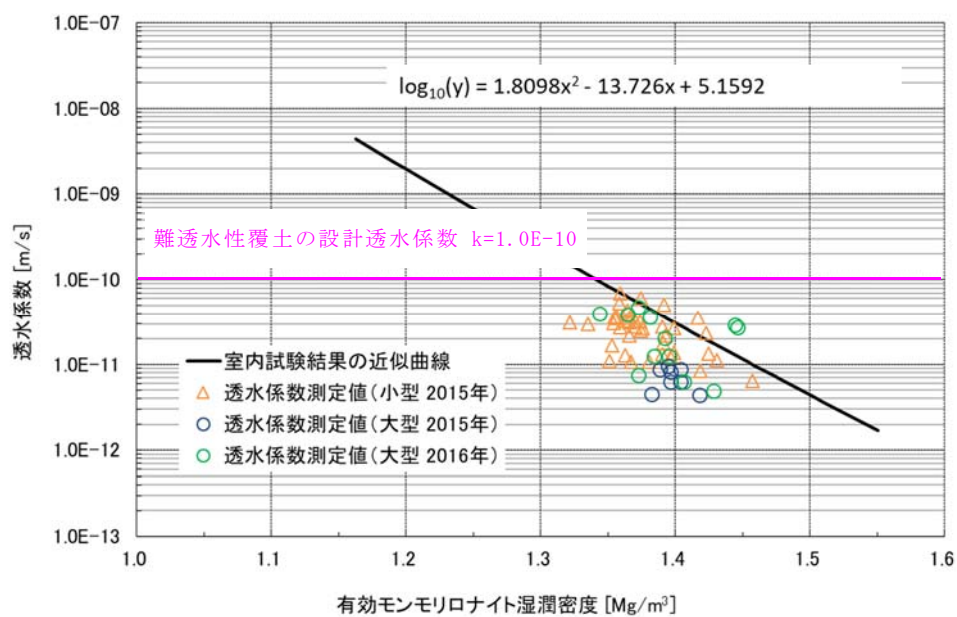


第6図 混合土の製造確認結果：大型施工機械分

(3) 現地施工試験の結果

有効モンモリロナイト湿潤密度と透水係数の関係（試験結果）を第7図に示す。
透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下を確保している。

以上のことから、現地施工においても室内試験による設計仕様とおりの覆土を製造及び施工でき、目標の透水係数を達成できる見込みがあると考えられる。

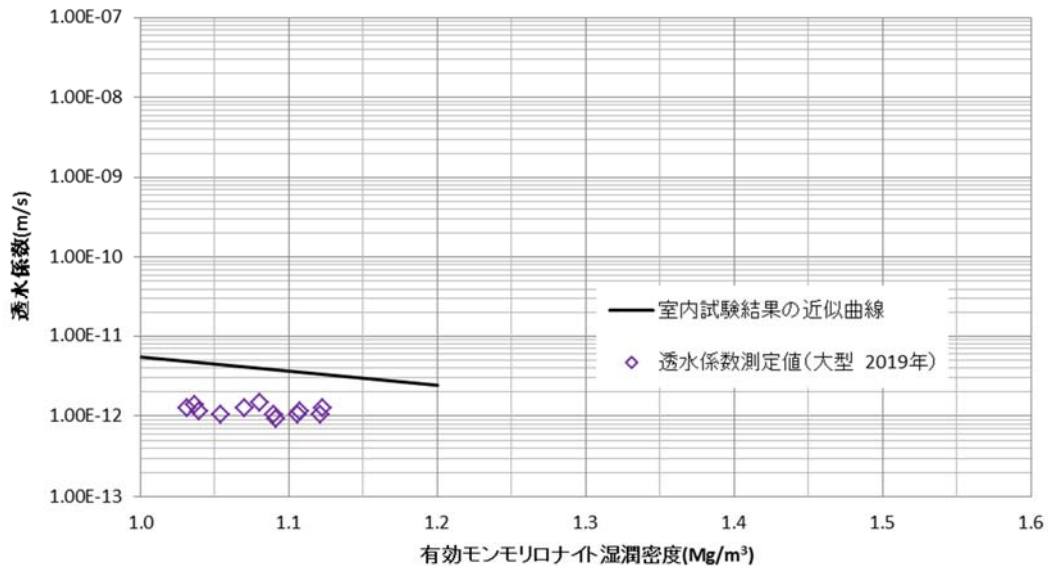


第7図 有効モンモリロナイト湿潤密度と透水係数の関係
(現地施工試験結果プロット、Ca型ベントナイト混合土)

(4) 特性の異なるベントナイト混合土を用いた現地施工試験結果について

覆土材料は、材料調達状況を考慮した実際の覆土施工時に行う施工試験結果を踏まえて、材料及び施工のばらつきを考慮して最終決定する。そのため、特性の異なるベントナイト混合土（Na型ベントナイト 20wt%と砂 80wt%の混合土、初期含水比は最適含水比 w_{opt} 、撒出し厚さ 10cm/層）による現地施工試験結果を整理する。

覆土施工試験は、前項までと同様の施工フローに基づき実施した。試験ヤードからサンプリングした供試体における有効モンモリロナイト湿潤密度と透水係数の関係を第 8 図に示す。透水係数は $1.0 \times 10^{-11} \text{m/s}$ を下回り、十分な低透水性があることを確認した。



第 8 図 有効モンモリロナイト湿潤密度と透水係数の関係
(現地施工試験結果プロット、Na型ベントナイト混合土)

2. 覆土の施工時における品質管理(案)

第5表に難透水性覆土の品質管理項目(案)を示す。品質管理は、「材料納入時」、「覆土材料製造時」、「覆土施工時」及び「完了確認時」の各段階において、所定の管理項目を実施する。

なお、ここで示す品質管理(案)は現在の覆土仕様から想定しているものであり、設計透水係数及び設計厚さを確保するための詳細な品質管理方法(管理項目、管理基準、管理方法及び管理頻度)については、実際の覆土施工時に行う施工試験結果を用いて、平均値及びばらつき(分散)による巨視的な性能を考慮して最終決定する。その際、本書で示す考え方を基本として品質管理方法を設定するものとする。

(1) 完了確認時における品質管理項目

(i) 有効モンモリロナイト湿潤密度の確認

難透水性覆土の主要機能である透水係数は、透水試験により確認するには時間が数ヶ月必要となることから、ベントナイト混合率及び含水比のばらつきを包含した形で評価可能な有効モンモリロナイト湿潤密度を確認することとする。

「1. (2) 混合土の製造について」に示すとおり、低配合ベントナイト混合土の透水係数は、ベントナイト混合率及び含水比の影響感度が高いことから、それらをパラメータとする有効モンモリロナイト湿潤密度を用いて透水係数を整理することで、製造時や締固め施工時のばらつきを包含した整理が可能であると考えられる。

なお、第7図及び第8図に示す室内試験結果より推定した透水係数の近似式と現地施工試験サンプリングによる透水係数試験結果を比較すると、現地施工試験による透水係数値は、おおよそ室内試験結果による近似式の透水係数値以下となっている。このことより、有効モンモリロナイト湿潤密度を透水係数の代替指標とすることで透水係数の品質管理をすることができると考えられる。

なお、室内試験結果と現地施工試験結果の比較については、限定的な条件(ベントナイト混合率20%~40%、含水比 $W_{opt}-4\% \sim W_{opt}+6\%$)における比較であることから、実際の覆土施工時に行う施工試験結果を用いて、品質管理方法の最終決定を行うものとする。

(ii) 原位置サンプリング試料による透水係数の確認

原位置サンプリング試料を用いた透水試験結果より、巨視的透水係数として設計透水係数が確保されていることを確認する。

(2) 材料納入時、覆土材料製造時及び覆土施工時の品質管理項目

完了確認時における品質管理項目である有効モンモリロナイト湿潤密度は、下式で表される。

$$\rho_{emt} = \rho_{em} + \frac{\frac{100}{100 - R_s} w \cdot \rho_b}{100 - (100 - C_m) \frac{\rho_b}{\rho_{nm}}}$$

ここに、

$$\rho_{em} = \frac{C_m \cdot \rho_b}{100 - (100 - C_m) \frac{\rho_b}{\rho_{nm}}}$$

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \frac{R_s \cdot \rho_d}{\rho_s}}$$

ρ_{emt} : 有効モンモリロナイト湿潤密度 (Mg/m³)

ρ_{em} : 有効モンモリロナイト乾燥密度 (Mg/m³)

ρ_b : 有効粘土乾燥密度 (Mg/m³)

w : 含水比 (%)

C_m : モンモリロナイト含有率 (%)

ρ_{nm} : 随伴鉱物の土粒子密度 (Mg/m³)

ρ_d : 乾燥密度 (Mg/m³)

ρ_s : 骨材の土粒子密度 (Mg/m³)

R_s : 骨材混合率 (%)

これより、有効モンモリロナイト湿潤密度を定義するための管理項目として、「含水比」「モンモリロナイト含有率（ベントナイト混合率、メチレンブルー吸着量）」、「乾燥密度（現場密度）」、及び「土粒子密度」があげられる。

よって、その他の品質管理では、「覆土完了時」に所定の品質を確保できるように「材料納入時」、「覆土材料製造時」及び「覆土施工時」の各段階において、第5表に示す所定の管理を実施することにより、有効モンモリロナイト湿潤密度の確認を間接的に行う。

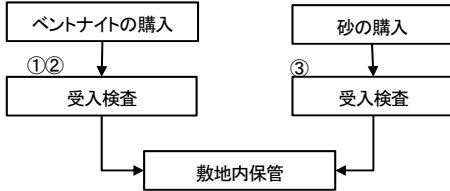
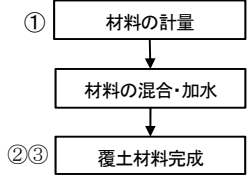
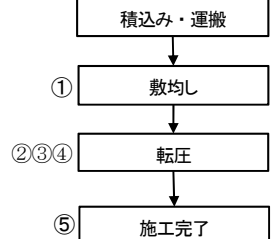
この管理基準は、「覆土完了時」の覆土全体の巨視的透水係数が所定の値（ 1.0×10^{-10} m/s）以下となるような目標値として設定する。透水係数と各種代替指標との関係

性は、実際の覆土施工時に行う施工試験で確認を行う。

また、第 5 図及び第 6 図に示す混合土の製造確認結果より混合土は均質に作製できていることから、第 54 表における覆土施工時のばらつきを確認することで、覆土内に連続的な弱部がないことを確認する。

なお、巨視的透水係数は平均透水係数よりも大きい値となるのが一般的であることから、巨視的透水係数及び平均透水係数のどちらも $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下となる。

第5表 難透水性覆土の品質管理項目(案)

施工フロー	対象	管理項目	管理基準	管理方法	
(1) 材料納入 	ベントナイト	(1)-① 基本物理特性 (粒度分布等)	製品における各種品質基準	ミルシート確認	
		(1)-② モンモリロナイト含有量	所定のメチレンブルー吸着量以上	メチレンブルー吸着試験	JIS Z 2451:2019
	購入砂	(1)-③ 基本物理特性 (粒度分布等)	製品における各種品質基準	ミルシート確認	
(2) 覆土材料製造 	混合土	(2)-① 材料構成比	所定の構成比	混合前の計量	—
		(2)-② 含水比	所定の含水比	含水比試験	JIS A 1203:1999
		(2)-③ ベントナイト混合率	所定のベントナイト混合率 ※サンプリング試料において一定のベントナイト混合率であることを確認し、均質に混合されていることを確認する	細粒分含有試験	JIS A 1223:2009
(3) 覆土施工 	混合土	(3)-① 1層当たり撒き出し厚	所定の厚さ かさ密度測定 ※フィニッシャーを用いて施工することにより覆土の均質性を確保	測量 密度, 含水比測定	レーザ測量等
		(3)-② 1層当たり仕上がり厚	所定の厚さ	測量	レーザ測量等
		(3)-③ 締固め回数	基準密度を満たす回数	目視	記録管理
		(3)-④ 施工範囲	所定の範囲・位置に施工されていること	測量	レーザ測量等
		(3)-⑤ 現場密度	所定の現場密度	砂置換法 RI 測定	JIS A 1214:2013 JGS 1614-2012
(4) 完了確認 ① 性能確認 サンプルングにより有意な水みちを形成することを避けるため、サンプルング位置が深さ方向で連続しないことに留意し、埋戻しには元の覆土と同等以上の低透水性の材料を用いる。	混合土	(4)-① 透水係数	所定の透水係数	一軸透水試験	JGS 0312-2018
			所定の有効モンモリロナイト湿潤密度	有効モンモリロナイト湿潤密度を算定	—

3. 諸外国との比較

(1) 日本の廃棄物埋設施設

本施設は、廃止措置の開始後において、廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しを得る必要がある。よって、地表面に対し離隔を図り、自然事象(隆起・侵食等)及び人為事象によるリスクを低減することが望ましい。このため、埋設設備は岩盤を掘り込んで設置することとした。その結果、本施設は諸外国の低レベル放射性廃棄物処分施設と異なり、地下水面より下に埋設設備を設置し、難透水性覆土で覆う構成としている。

(2) 諸外国の低レベル放射性廃棄物処分施設との比較

本施設の人工バリアが、合理的かつ利用可能な最善の技術(BAT: Best Available Technique)を使用して施工されていることを確認するため、諸外国の低レベル放射性廃棄物処分施設を調査した。

比較対象として、廃棄体処分量及び総放射エネルギーが同等か上回る4ヶ国を選定し、第6表に示す。

選定した各国の処分施設の人工バリアの仕様を第7表に示す。

コンクリートピットに関しては、各施設ともに鉄筋コンクリート製であり、部材厚は35cm～70cmである。本施設のうち、鉄筋コンクリート製である埋設設備の部材厚は約30cm～60cmであり、要求する力学的安定性及び遮蔽性としての十分な厚さを有していると考えられるため、各国に対し本施設は同等である。

充填材に関しては、各国では砂利若しくはセメント系材料を用いているのに対し、本施設では充填性に配慮した高流動モルタルを使用している。埋設設備内に有害な空隙を残さないようにし、雨水及び地下水が廃棄体に接触することを抑制する目的に配慮した材料を用いているため、各国に対し本施設は同等以上であるといえる。

覆土に関して、材料については、本施設及び各国ともに粘土系材料及び土砂を用いている。厚さについては、各国においては3m～6m程度である。透水係数については、本施設の難透水性覆土の値が各国の粘土層に対し1桁程度小さいものである。これらについては、本施設を地下水面下に設置することから、透水特性及び長期機能維持特性を考慮した設計の結果であり、諸外国と同等以上のものである。

止水対策に関しては、各国では防水対策を施しているのに対し、本施設では外周

仕切設備及び覆いにおいてひび割れ幅の設計目標値を 0.1mm とすること及び内部防水を実施することとしている。覆土完了までの期間において漏出防止機能として廃棄体と水の接触を抑制する目的に応じた方法を選定している。

排水・監視設備に関しては、本施設及び各国ともに排水・監視設備が存在し、廃棄物と接触して発生した汚染水を排水する機能を有する施設もあることから、各国に対し本施設は同等であるといえる。

以上のことから、本施設の人工バリアに関しては、各国に対して遜色ない技術が用いられているといえる。諸外国では地下水面より上に埋設施設を敷設しているのに対し、本施設は地下水面以深に埋設施設を敷設しているため、施設全体に関して単純な比較を行うことは難しいが、埋設設備については、使用材料及び部材厚は諸外国と同程度である。また、覆土については、地下水面下への設置に応じて、透水特性に優れた設計を行っている。

第6表 本施設及び諸外国の処分事業の結果の整理一覧表*1

対象施設 調査項目	日本	フランス	イギリス	スペイン	ベルギー	本施設と の比較
	六ヶ所村 日本原燃	オーブ処分場	ドリッグ処分場	エルカブリラ処分場	デッセル処分場	
概要	<p>操業中(1992～) 浅地中コンクリートピット 処分 ドラム缶廃棄体間をモルタル 充填、覆土 地下水面下に敷設</p>	<p>操業中(1992～) 半地下式コンクリートピット 処分 ドラム缶廃棄体 地下水面上の粘土層に敷設、 300年管理する</p>	<p>操業中(1959～) 第8トレンチ以降、浅地中コ ンクリートポルト処分 ドラム缶廃棄体を圧縮シコ ンテナへ格納、コンクリート 充填 地下水面上に敷設</p>	<p>操業中(1992～) 浅地中コンクリートピット 処分 ドラム缶廃棄体 地下水面上の結晶欠岩系の 岩盤に敷設</p>	<p>建設計画中 浅地中コンクリートモジュ ール処分 ドラム缶廃棄体をモルタル でブロック化 地下水面上に敷設</p>	
廃棄体形態	<p>廃棄物をドラム缶に収納、モ ルタル等で固型化</p>	<p>ドラム缶に廃棄物を収納、圧 縮後、400Lドラム缶に収納、 セメントグラウトで固型化 等</p>	<p>廃棄物を金属製の箱やドラ ム缶に収納、圧縮し、コンテ ナに圧縮体を収納・コンクリ ートで固型化</p>	<p>廃棄物を220Lドラム缶に収 納、一時貯蔵 コンクリート容器に収納、モ ルタルで固型化</p>	<p>コンクリートケーシングに 廃棄物ドラムを収納 空隙にセメントモルタルで 固型化</p>	同等
処分深度 (参考)	地下水面より下	地下水面より上	地下水面より上	地下水面より上	地下水面より上	本施設のみ地下水 面下

*1：公開されている取得可能な情報のみ掲載

第7表 本施設及び諸外国の人工バリア仕様の整理一覧表*1

対象施設 調査項目	日本	フランス	イギリス	スペイン	ベルギー	本施設と の比較
	六ヶ所村 日本原燃	オーブ処分場	ドリッグ処分場	エルカプリル処分場	デッセル処分場	
施設仕様	材料 鉄筋コンクリート製 代表部材厚 60cm (例として3号廃棄物埋設地を示す)	材料 鉄筋コンクリート製 代表部材厚 50cm	材料 鉄筋コンクリート製 代表部材厚 35cm	材料 コンクリート (鉄筋コンクリート製と推定) 代表部材厚 60cm	材料 鉄筋コンクリート 代表部材厚 70cm	同等
充填材材料 (充填性)	高流動モルタル	砂利あるいはコンクリート	free draining granular material (砂利等と推定)	砂利	モルタル	同等以上
覆土の仕様	材料：ベントナイト混合土、現場発生土 厚さ：難透水性覆土 2m 以上 下部覆土 2m 以上 透水係数：難透水性覆土 1.0×10^{-10} m/s 以下 下部覆土 1.0×10^{-8} m/s 以下	材料：土、砂、粘土 厚さ：表土層 4-6m 透水係数： 10^{-5} m/s	材料：ベントナイト、砂、砂利、岩、土 厚さ：工学キャップの厚さ 3m 透水係数：(具体的記載無し 材料が当施設と同等であるため、透水係数も同程度だと考えられる)	材料：表層土、粗礫、整粒砂、圧密施工粘土、砂、 厚さ：約 3m 透水係数：粘土層 10^{-9} m/s 覆土の第1層 10^{-4} m/s	材料：砂、砂利、ローム層、粘土 厚さ：約 4.5m を想定 透水係数： 粘土ライナー(GCL) 10^{-9} m/s	同等
止水対策	外周仕切設備及び覆いのひび割れ幅設計目標値 0.1mm 内部防水	コンクリートピットの上面及び側面にポリウレタンコーティング 覆土中にビチューメン又はアスファルト	覆土中にジオメンブレン(厚さ：2mm)	覆土中に最低厚さ 2mm の高密度ポリエチレン製ジオメンブレン	全てのモジュールを防水膜でカバーする	立地条件にあわせて設置していると推定
排水・監視設備	ポーラスコンクリート層、排水管、点検管、点検路	セルの底部防水、排水口、点検用通路 廃棄物と接触した可能性のある水を集水し、汚染されている場合、廃棄物に組み込むか、認可施設で処理	コンクリート内張り 床下廃水路 排水は、能動的管理の終了まで汚水槽に集められ、処理システムへと排水される	処分ポールの底部の点検通路に水の収集システムを設置 放射性核種を含む液体の放出をゼロとする原則のため、浸出水をモニタリング	排水システム、検査坑道 排水システムは、侵入する汚染水を管理し、検査坑道から排水できるような構造にする	同等

*1：公開されている取得可能な情報のみ掲載

参考文献

- (1) (公社)日本道路協会(2009)：道路土工要綱
- (2) (財法)国土技術研究センター(2009)：河川土工マニュアル
- (3) (社法)土質工学会(1991)：土の締固めと管理

許可基準規則解釈第 10 条第 2 項
に関する補足説明

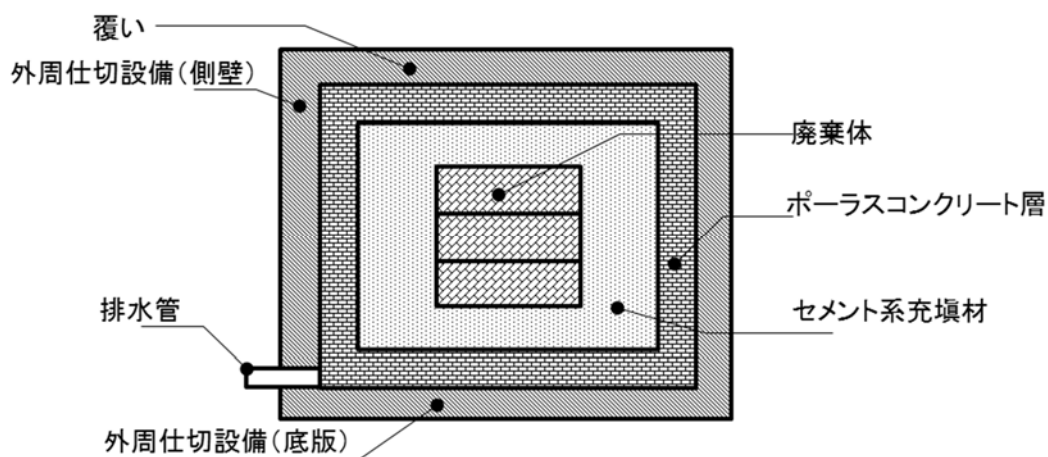
目 次

1. 漏出防止設計の基本方針	1
2. 外周仕切設備及び覆いの設計	2
(1) 全体概要	2
(2) 最大ひび割れ幅の設計目標値の設定	2
(3) 配合設計の整理	4
(4) その他の防水に対する設計	7
3. 操業中の雨水浸入防止対策	9
4. ポーラスコンクリート層の排水能力	9
5. 排水管の排水能力	10
6. 覆土の施工に応じた排水管理	10
(1) 浸入水量の算定	11
(2) 浸入水の対策について	12
7. セメント系充填材について	13
(1) 全体概要	13
(2) 配合設計の整理	13
8. 内部防水	16
(1) 内部防水の要求性能	16
(2) 内部防水の配置	16
(3) 内部防水の工法選定	17
9. 漏出防止機能に関する設計方針の変遷	20
参考資料 1	1号及び2号排水・監視設備からの排水実績と漏出防止機能の健全性について
参考資料 2	排水中のトリチウム濃度を用いた漏出防止評価について
参考資料 3	セメント系充填材の性能について
参考資料 4	セメント系充填材の配合選定経緯について

1. 漏出防止設計の基本方針

廃棄物埋設地(3号及び1号7,8群)は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間、埋設設備のうち外周仕切設備、セメント系充填材、覆い及び内部防水並びに排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層により限定された区域からの放射性物質の漏出を防止する機能を有する設計とする。

埋設設備の基本構造を第1図に示す。



第1図 埋設設備の基本構造

廃棄体は、埋設設備の中で4層構造で囲まれている。1層目は鉄筋コンクリートからなる外周仕切設備及び覆い、2層目はポーラスコンクリート層及び排水管からなる排水・監視設備、3層目は廃棄体周囲のセメント系充填材、4層目はセメント系充填材上部及び側部とポーラスコンクリート層の間並びに外周仕切設備底版とポーラスコンクリート層の間に設置する内部防水である。

廃棄体内部に水が浸入し難くするために、まず、1層目の外周仕切設備及び覆いにより、埋設設備内への雨水及び地下水の浸入を極力防止する。

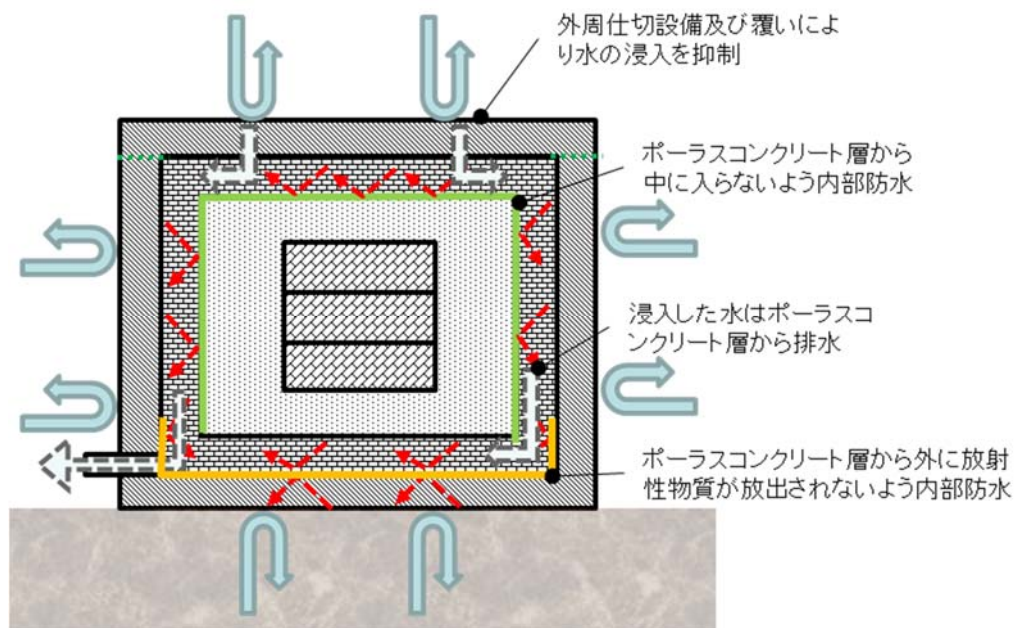
次に2層目のポーラスコンクリート層では、透水性と排水勾配により排水しやすくすることで、仮に外部から水が浸入した場合であっても、廃棄体に接触する前に埋設設備の外に排水する。

さらに、3層目のセメント系充填材は、ポーラスコンクリート層と廃棄体の間に有害な空隙が残らないよう充填することにより、大量の水が廃棄体に接触することを抑

制する。

また、4層目として、浸入水の移動経路等を考慮し、雨水及び地下水の浸入及び放射性物質の漏出を防止するため内部防水を行う。

雨水及び地下水の浸入防止を具体的にした漏出防止の概念図を第2図に示す。



第2図 漏出防止機能の概念図

2. 外周仕切設備及び覆いの設計

(1) 全体概要

外部からの水の浸入を極力防止するために、外周仕切設備及び覆いに対し、コンクリート標準示方書設計編 2017年版の本編 12章「初期ひび割れに対する照査」に基づき、ひび割れ抑制を行う。具体的には、「最大ひび割れ幅の低減」を目標とし、ひび割れ抑制を考慮した低発熱に配慮したコンクリート配合の材料を使用し、目標のひび割れ幅を達成できる鉄筋量を確保する。

(2) 最大ひび割れ幅の設計目標値の設定

埋設設備の外周仕切設備及び覆いのコンクリートに施工段階に発生するひび割れは、「温度ひび割れ」、「初期乾燥収縮によるひび割れ」及び「沈下ひび割れ」を

対象とする。

水の浸入に対し最も影響がある貫通ひび割れは、温度ひび割れであり、主に最高温度と温度降下量が影響する。よって、外周仕切設備及び覆いの設計においては、「最大ひび割れ幅の低減」を目標とし、発熱量の低下を指向したコンクリート配合を行うとともに、ひび割れ幅を低減できる鉄筋量を確保する（第3図）。

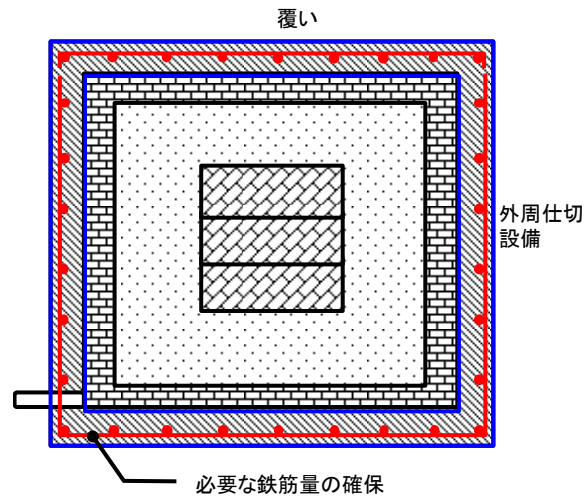
第1表に「コンクリート標準示方書 設計編：標準 2017年度制定」^{(1)*1}で示されている、コンクリートの水密性に対するひび割れ幅の設計限界値の目安⁽¹⁾を示す。

なお、ひび割れ幅の設計限界値の設定に用いた既往の研究は、全て貫通ひび割れを生じた結果によるものである。

第1表より、一般の水密性を確保する場合の水密性に対するひび割れ幅の限界値の目安は、温度応力による断面力が軸引張力のため0.1mmである。したがって、最大ひび割れ幅の設計目標値を0.1mmとし、これに対応した鉄筋量を考慮した設計をする。

外周仕切設備及び覆いは、施工から覆土完了まで、可能な範囲に対し定期的な点検を行う。ひび割れは0.1mm以上を管理する。0.1mm以上のひび割れに対しては、排水・監視設備からの排水量及びひび割れの進展状況を防水性の観点で評価した上で、適切に補修する。

*1：ひび割れに対する最新の知見である「コンクリート標準示方書 設計編：標準 2017年度制定」⁽¹⁾を参照する



*1：最大ひび割れ幅の目標値を 0.1mm とし、発熱量の低下を指向したコンクリート配合を用い、必要な鉄筋量を確保する。

第 3 図 外周仕切設備及び覆いの初期ひび割れに対する設計

第 1 表 水密性に対するひび割れ幅の設計限界値の目安(mm)⁽¹⁾

要求される水密性の程度		高い水密性を確保する場合	一般の水密性を確保する場合
卓越する断面力	軸引張力	—*1	0.1
	曲げモーメント*2	0.1	0.2

*1：断面力によるコンクリート応力は全断面において圧縮状態とし、最小圧縮応力度 0.5N/mm²

以上とする。なお、詳細解析による検討を行う場合には、別途定めるものとする。

*2：交番荷重を受ける場合には、軸引張力が卓越する場合に準じることとする。

(3) 配合設計の整理

安全機能を確保できるようコンクリートの配合検討を行う。力学的安定性、耐久性、遮蔽性及び低透水性を確実に満足するものとして配合設計を行う。ひび割れ抑制については、可能な限り向上を図る(第 2 表参照)。

配合設計として必要な各項目について以下に説明する。

①低透水性

外周仕切設備及び覆いからの水の浸入を極力防止する目的から、基質部を緻密なコンクリートとするため、水結合材比が 55%以下となる配合とする。

②ひび割れ抑制

外周仕切設備及び覆いからの水の浸入を抑制する目的から、ひび割れの発生に繋がる要因を可能な限り抑制する。具体的には、断熱温度上昇量、自己収縮ひずみ及び乾燥収縮ひずみの抑制である。水和熱、自己収縮及び乾燥収縮を可能な限り抑制する配合とする。

③力学的安定性

埋設設備内部に廃棄体を安定して定置できる強度を有するものとして力学的安定性を確保する。必要な圧縮強度である 24.6N/mm^2 を確保する配合とする。

④耐久性

漏出防止期間に埋設設備が環境に暴露されることによる埋設設備の劣化が生じないように、耐久性を確保する。供用期間内に機能を損失しない劣化抵抗性を有する配合とする。

⑤遮蔽性

公衆が受ける線量の低減のため、遮蔽性を確保する。遮蔽に必要な密度として 2.1t/m^3 を確保する配合とする。

第2表 外周仕切設備及び覆いの配合設計に係る項目

技術要件	設計仕様項目	目標性能	確認方法
①低透水性	水結合材比	55%以下	配合表により目標性能を満足すること
②ひび割れ抑制	断熱温度上昇量	低発熱の結合材を用い、温度上昇量が可能な限り小さいこと	①③④⑤の性能を満たし、温度上昇量が抑制されていること
	自己収縮ひずみ	収縮量が低減できる結合材を用い、収縮量を可能な限り抑制できること	①③④⑤の性能を満たし、収縮ひずみ量が抑制されていること
	乾燥収縮ひずみ		
③力学的安定性	圧縮強度	24.6N/mm ² 以上	圧縮強度試験により目標性能を満足すること
④耐久性	材料配合	供用年数で機能を損失しない劣化抵抗性を有すること	コンクリート標準示方書に基づく耐久性照査により目標性能を満足すること
⑤遮蔽性	密度	2.1t/m ³ 以上	密度試験により目標性能を満足すること

配合例を第3表に示す。目標性能を満足するよう、膨張材、混和材及び混和剤を含めた配合設計を行っている。目標性能に対応する試験を実施し、性能を満足することを確認している。したがって、外周仕切設備及び覆いの配合は安全機能上の要求性能を満足するものである。

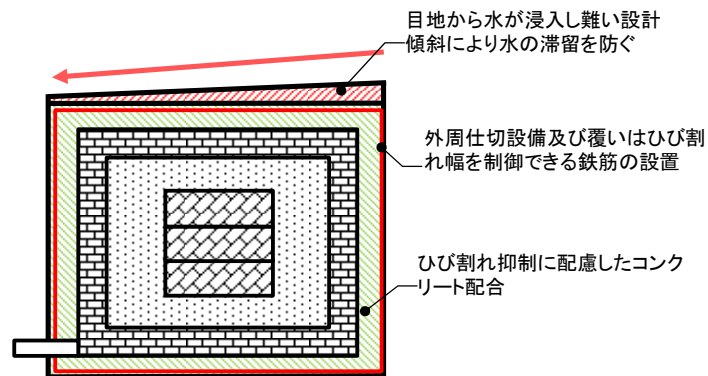
第3表 3号埋設設備の外周仕切設備・覆いの配合例

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)									
	水 W	結合材 B			混和材	細骨材 S*1		粗骨材	混和剤*1	
		中庸熱 ポルトランド セメント	フライ アッシュ	膨張 材	石灰石 微粉末	砕砂	陸砂	砕石	AE 減水剤	AE 剤
46.5	155	333			60	762		1,004	2.0	0.03
		223	95	15		232	530			

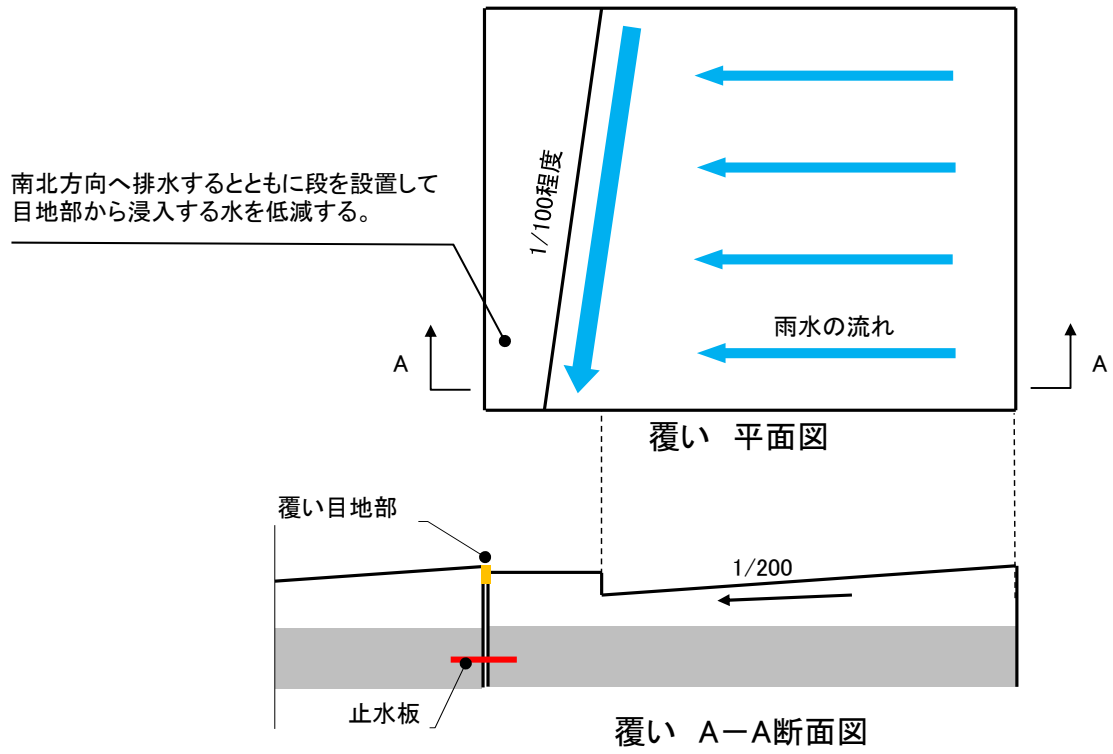
*1：混和剤及び細骨材の混合比は、所定のフレッシュ性状が確保できるよう施工時に微調整を行う。

(4) その他の防水に対する設計

覆いからの浸入水が経路として挙げられる。このため、覆いの上面に傾斜を設け、水が覆い上面に滞留し難くする設計とする(第4図及び第5図参照)。



第4図 排水を考慮した設計断面図



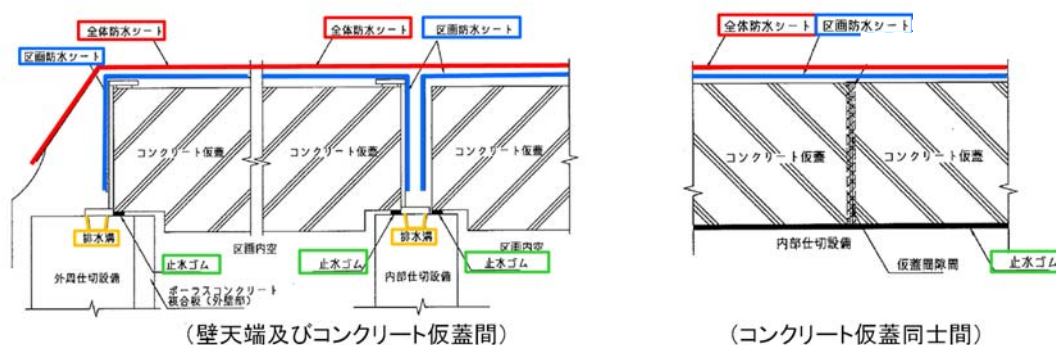
第 5 図 覆い上面の排水構造例

3. 作業中の雨水浸入防止対策

廃棄体定置後からセメント系充填材充填までの期間においては、区画上部へのコンクリート仮蓋の設置のほかに、下記の対策(第6図参照)を実施することで、区画内への水の浸入を極力防止する。

また、廃棄体定置作業時においては、埋設クレーンに屋根等を設置して、雨水の浸入を防ぐ。

- ・埋設設備上部を防水シートで覆う。区画防水シート及び全体防水シートを2重に設置する。
- ・シート内部へ浸入する水の排水を考慮し、内部仕切設備上部に勾配を設けた排水溝を設置し、外へ排水する。
- ・排水溝からのオーバーフローを考慮し、区画端部とコンクリート仮蓋との接点に止水ゴム等を設置する。



第6図 雨水浸入防止対策イメージ図

4. ポーラスコンクリート層の排水能力

最大ひび割れ幅の設計目標値を0.1mmとした外周仕切設備及び覆いからは水の浸入は極めて少ないと想定されるが、それでも浸入した水は、廃棄体に接触し難くするために透水性の高いポーラスコンクリート層を通過させ、排水・監視設備から埋設設備の外に排水させる設計とする。

ポーラスコンクリート層の透水係数は、 $3.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ (平均値：自社の受入基準値) であり、メーカー下限値 ($1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$) の3倍) 及び $1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ (メーカー上限値) とし、以下の式を用いて設定する。

ダルシー則より、 $Q=k \cdot i \cdot S$

ここに、

Q : 1ピット当たり浸入水量(m^3/y)

k : ポーラスコンクリートの透水係数($=3.0 \times 10^{-3} \text{m/s} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$)

i : 設置勾配($=0.005$)

S : 通水断面積($=3.331 \text{m}^2$)

上記計算結果より、ポーラスコンクリート層の排水能力は、 $1,576 \text{m}^3/\text{y} \sim 5,252 \text{m}^3/\text{y}$ となる。

5. 排水管の排水能力

排水管(内径: 50mm)1本当たりの排水能力は、流量算定式より以下に示す。

排水能力 $Q=A \cdot V$

A : 排水管(内径 50mm)の内空断面積($=0.00196 \text{m}^2$)

V : 流速(m/s)、マンニングの式より

$$V=1/n \cdot R^{(2/3)} \cdot I^{(1/2)}$$

n : 配管の粗度係数($=0.012$)

R : 配管 50mm の径深(周長に対する通水断面積の割合)($=0.013$)

I : 配管の設置勾配($=0.1\%$ と仮定)

上記計算結果より、排水管1本当たりの排水能力は、 $8,789 \text{m}^3/\text{y}$ となり、ポーラスコンクリート層から排水される全水量を滞留することなく排水することが可能である。

6. 覆土の施工に応じた排水管理

覆土施工に伴い地下水圧が上昇し、埋設設備内部と外部の水圧の差が大きくなると浸入水量が増える可能性がある。埋設設備への浸入経路は、覆土開始前に外周仕切設備側壁部及び覆いのひび割れについて点検し必要に応じて補修すること、また埋設設備側部及び上部には、難透水性覆土、下部覆土及び上部覆土が構築されることから、水の浸入経路は底版部からが主な経路と想定される。一方、底版部は、設計の段階か

ら、浸入経路となるひび割れ発生防止につとめ、ひび割れが発生しても、可能な限りの補修等を実施する計画であり、ひび割れ幅の制御及び防水材料による防水対策が施されていることから、顕著な水の浸入は少ないと考えている。

仮に覆土期間中に地下水の浸入があった場合には、底版上部のポーラスコンクリート層が機能して浸入水を排水すると考える。

(1) 浸入水量の算定

底版に発生する貫通ひび割れを想定した浸入水量は、次式*1より求める。

$$Q = \frac{\pi k(H - h_0)l}{2.3 \log_{10} \left\{ \frac{L}{b} + \sqrt{\left(\frac{L}{b}\right)^2 - 1} \right\}}$$



Q : 1ピット当たり浸入水量 (m^3/y)

k : 地盤透水係数 ($=5.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$)

H : 底版下面地下水圧 ($=0.6\text{m} \sim 24.7\text{m}$)

h_0 : 底版厚 ($=0.6\text{m}$)

L : 影響範囲 ($=9.7\text{m} \sim 18.3\text{m}$)

l : 底版ひび割れ長さ (ひび割れ本数 \times 底版長さ m)

b : 底版ひび割れ幅 ($=0.1\text{mm}$)

*1: 「集水暗きよの取水量公式」土木学会、昭和60年度版 水理公式集、p.383

1ピット当たりのひび割れ幅は、0.1mmと仮定した。また、1ピット当たりのひび割れ本数は、浸入水の流下方向(南北方向)に対して6本(南北方向の6区画に各1本の貫通ひび割れ)と仮定した。

検討期間は覆土開始から覆土完了までとする。覆土施工が進むにつれて浸入水量は増大し、覆土完了時には、1ピット当たりの浸入水量は、 $567\text{m}^3/\text{y} \sim 2,547\text{m}^3/\text{y}$ となる。

(2) 浸入水の対策について

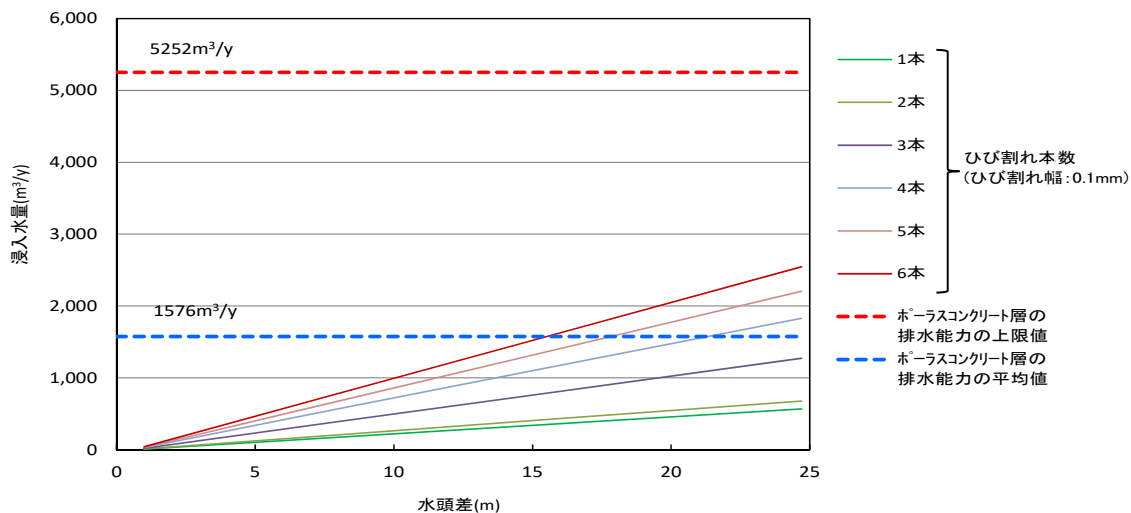
水頭差と浸入水量の関係を第7図に示す。破線は、ポーラスコンクリート層の排水能力を示す。

想定したひび割れ本数が1本～3本であれば、覆土完了までの期間において浸入水量はポーラスコンクリート層の排水能力の平均値を下回るため、不飽和を維持できる。

一方、想定したひび割れが4本～6本の場合、浸入水量は覆土施工中にポーラスコンクリート層の排水能力の平均値を上回るが、排水能力の上限値に対して浸入水量は十分に下回ることから不飽和を維持できる。

浸入水量は、埋設設備内部と外部の水圧の差に依存するため、覆土期間中の初期の段階で浸入水量と内外の水圧差を計測することで、覆土の進捗による将来の浸入水量をある程度推定することが可能である。

このため、覆土の進捗に伴いポーラスコンクリート層の排水能力を超えるような評価になった場合でも、覆土施工にあわせて、地下水位を一時的に低下させる等の対策を行うとともに、覆土期間中は、埋設設備内の排水量及び地下水位をモニタリングとあわせて排水監視する。



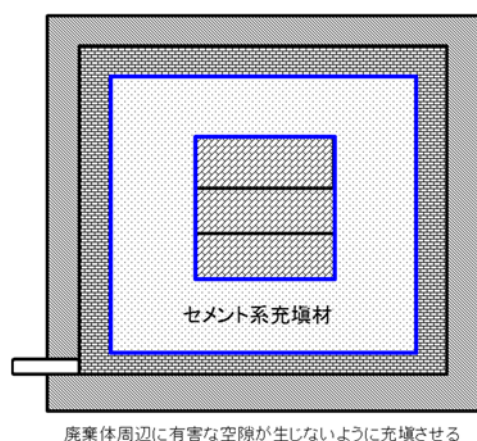
第7図 水頭差と浸入水量の関係

7. セメント系充填材について

(1) 全体概要

雨水及び地下水がポーラスコンクリート層で排水されずに区画内に浸入した場合でも、雨水及び地下水が廃棄体に接触することを抑制するため、有害な空隙が残らないように流動性を考慮したセメント系充填材により埋設設備内を充填する(第8図参照)。

したがって、廃棄体周りのセメント系充填材は、流動性を良くし充填性を上げ、廃棄体間の空隙を隙間なく充填するとともに、低発熱配合のセメント系充填材を選定し、温度応力によるひび割れを抑制する設計とする。



第8図 セメント系充填材の設計方針

(2) 配合設計の整理

安全機能を確保できるようモルタルの配合検討を行う。充填性、遮蔽性を確実に満足するものとして配合設計を行う。ひび割れ抑制、凝結遅延抑制及び力学的安定性については、可能な限り向上を図る(第4表及び第5表参照)。

配合設計として必要な各項目について以下に説明する。

① 充填性

埋設設備内に有害な空隙を残さない充填性を有するものとして、流動性と材料分離抵抗性を確保する。廃棄体間の狭隘な間隙部分にも十分に充填でき、材料分離による空隙を生じさせないために、スランプフローは65cm以上を確保し、ブリーディングについては極力生じない配合とする。

②遮蔽性

公衆が受ける線量の低減のため、遮蔽性を確保する。遮蔽に必要な密度として 1.6t/m^3 を確保する配合とする。

③ひび割れ抑制

セメント系充填材内を水が通過することを極力低減するため、ひび割れの発生につながる要因を可能な限り抑制する。具体的には、断熱温度上昇量、自己収縮ひずみ及び乾燥収縮ひずみの抑制である。水和熱、自己収縮及び乾燥収縮を可能な限り抑制する配合とする。

④力学的安定性

廃棄体と充填材の一体化の観点から必要な力学的安定性を確保する。必要な圧縮強度である 10N/mm^2 を確保する配合とする。

⑤凝結遅延抑制

作業上の工程の関係から凝結時間を抑制する。作業工程を考慮し、48時間以内に終結する配合とする。

第4表 セメント系充填材の配合設計に係る項目(安全機能)

技術要件	設計仕様項目	目標性能	確認方法
①充填性	スランプフロー	65cm以上	スランプフロー試験により目標性能を満足すること
	ブリーディング	極力生じないこと	試験結果でブリーディングが極力生じていないこと
②遮蔽性	密度	1.6t/m ³ 以上	密度試験により目標性能を満足すること
③ひび割れ抑制	断熱温度上昇量	低発熱の結合材を用い、温度上昇量を可能な限り抑えること	①②④⑤の性能を満たし、温度上昇量が抑制されていること
	自己収縮ひずみ	収縮量が低減できる結合材を用い、収縮量を可能な限り抑制できること	①②④⑤の性能を満たし、収縮ひずみ量が抑制されていること
	乾燥収縮ひずみ		
④力学的安定性	圧縮強度	10N/mm ² 以上	圧縮強度試験により目標性能を満足すること

第5表 セメント系充填材の配合設計に係る項目(その他)

技術要件	設計仕様項目	目標性能	確認方法
⑤凝結遅延抑制	凝結時間	終結が48時間以内	凝結試験により目標性能を満足すること

配合例を第6表及び第7表に示す。目標性能を満足するよう、膨張材、混和材及び混和剤を含めた配合設計を行っている。目標性能に対応する試験を実施し、性能が満足していることを確認している。したがって、セメント系充填材の配合は安全機能上の要求性能を満足するものである。

セメント系充填材の有する性能及びその配合の選定経緯については、参考資料3

「セメント系充填材の性能について」及び参考資料4「セメント系充填材の配合選定経緯について」に詳細を示す。

第6表 3号埋設設備のセメント系充填材の配合例①

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)							
	水 W	結合材 B		細骨材 S		水中 不分離性 混和剤	AE 減水剤	高性能 減水剤
		中庸熱 ポルトラン ドセメント	高炉 スラグ 微粉末	砕砂	陸砂			
67.1	283	422		1,466		1.5	0.844	6.33
		42	380	440	1026			

第7表 3号埋設設備のセメント系充填材の配合例②

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)							
	水 W	結合材 B			細骨材 S		水中 不分離性 混和剤	高性能 AE 減水剤
		中庸熱 ポルトラン ドセメント	高炉 スラグ 微粉末	膨張材	砕砂	陸砂		
55.0	252	458			1,454		1.1	4.58
		131	307	20	872	582		

8. 内部防水

(1) 内部防水の要求性能

外周仕切設備、セメント系充填材、覆い及びポーラスコンクリート層とともに、雨水及び地下水の浸入を防止し、埋設設備からの放射性物質の漏出を防止するために内部防水を行う。

内部防水としては、以下の2つの観点で設計する。

(i) 外周仕切設備側壁部及び覆い部

ポーラスコンクリート層から廃棄体方向に浸入する水の流れを防止する。

(ii) 外周仕切設備底版部及び側壁部の立ち上げ部

外周仕切設備底版からの地下水の浸入を防止するとともに、ポーラスコンクリート層からの放射性物質の漏出を防止する。

(2) 内部防水の配置

外周仕切設備側壁部及び覆い部における内部防水は、セメント系充填材上部及び

側部とポーラスコンクリート層の間に行う。また、外周仕切設備の内側で外周仕切設備底版部及び側壁の立ち上げ部に内部防水を行う。（第9図及び第10図）。

【内部防水の配置場所設定理由】

- ・外周仕切設備側壁部及び覆い部からの浸入水に対する内部防水は、上部ポーラスコンクリート層及び側部ポーラスコンクリート層の内側に配置する。その目的は、浸入水が廃棄体と接触し難くすること及び浸入水をポーラスコンクリート層を介して下部へ排水するためである。
- ・外周仕切設備底版部からの浸入水に対する内部防水は、下部ポーラスコンクリート層外側の底版側に行う。その目的は、外周仕切設備底版部において地下水を浸入し難くすること及びポーラスコンクリート層を介して排水される浸入水が外部に漏出し難くすることであり、外周仕切設備側壁の下部内側の一部の立ち上げた箇所にも内部防水を行う。

(3) 内部防水の工法選定

(i) 主な要求

内部防水の目的は、コンクリート材料の水の移動を抑制する性能を向上させることである。

水の移動を抑制する性能を向上するには、防水材そのものの遮水性と、遮水性を維持するために、防水材の施工面となる底版及び側壁(底部)、ポーラスコンクリート層(側部)並びにセメント系充填材(上部)について、防水材施工後のコンクリート材料のひび割れの発生及び進展を想定し、ひび割れ追従性が必要となる。

防水材に要求される遮水性及びひび割れ追従性の性能については、「表面保護工法 設計施工指針(案)」⁽²⁾に記載されている。

「表面保護工法 設計施工指針(案)」⁽²⁾は、コンクリート構造物の耐久性の向上及び劣化因子の侵入を防止・抑制することを目的とした設計及び施工に関する一般的な標準である。「表面保護工法 設計施工指針(案)」⁽²⁾では、表面保護工法を表面処理工法(表面被覆工法及び表面含浸工法)と断面修復工法に分類しているが、本施設の内部防水は新設の構造物に施工するものであるため、表面処理工

法に該当する(第 11 図参照)。

本施設における内部防水は、遮水性及びひび割れ追従性を要求性能としてい
ることから、「表面保護工法 設計施工指針(案)」⁽²⁾の遮水性及びひび割れ追従
性に関する記載を参照して表面処理工法の中から工法を選定し、設計を行う。

以上より、内部防水は、「表面保護工法 設計施工指針(案)」⁽²⁾を参照し、
JSCE-K523-1999(表面被覆材の透水量試験方法)で透水量 0.2g 以下又は同等の遮
水性及び JSCE-K532-1999(表面被覆材のひび割れ追従性試験方法)で 0.15mm 以上
又は同等のひび割れ追従性が確認できる材料を使用する。

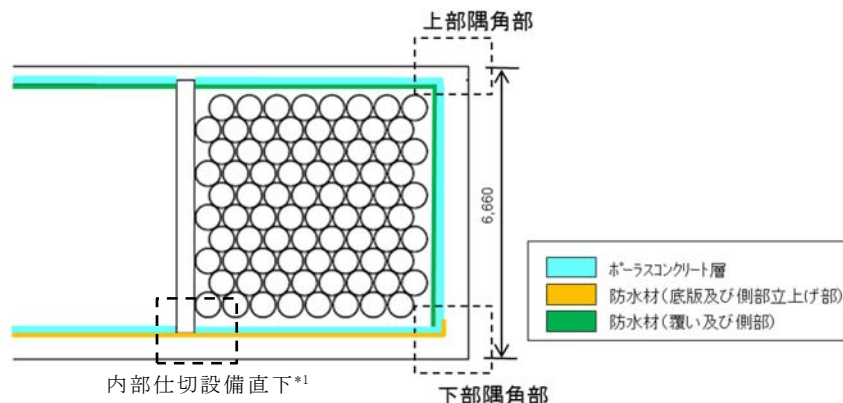
(ii) その他の考慮事項

内部防水の材料選定に当たっては、以下の事項を考慮する。

- ・施工基面に対して施工できるよう付着性を有すること
- ・廃棄体の自重やセメント系充填材の打設時の液圧等の圧力作用条件下にお
いても、遮水性を有する材料仕様であること
- ・埋設設備の構造安定性に影響を与えない材料仕様であること

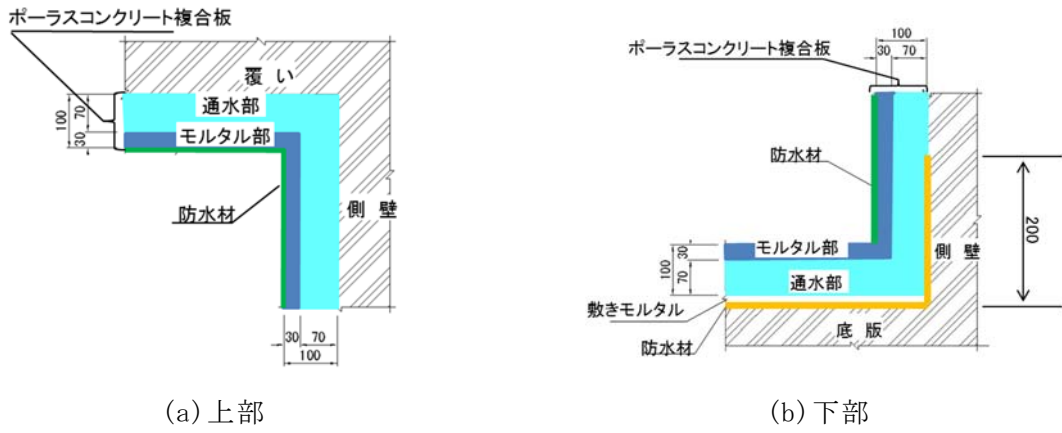
上記(i)(ii)を考慮して、内部防水は、遮水性及びひび割れ追従性の要求性能を
満足し、かつ、その他の考慮事項にも対応できる工法を選定し、現段階では、表面
処理工法のうち、表面被覆工法で有機系の塗装工法を候補とする。

なお、今後施工段階で、有機系の塗装工法以外の表面処理工法でも、上記と同様
の性能を発揮する良い工法があれば採用を検討する。

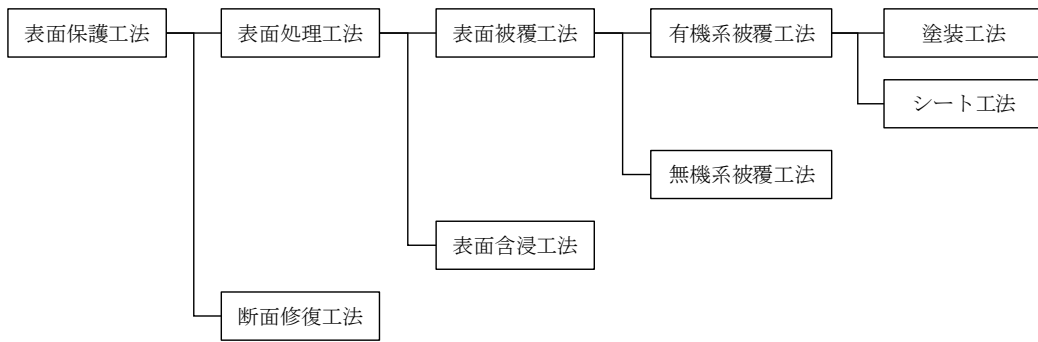


*1：内部仕切設備直下の内部防水は、選定された防水材・工法に応じて施工範囲を決定する。

第 9 図 3号埋設設備東西断面図(単位：mm)



第 10 図 隅角部図(単位 : mm)



第 11 図 表面保護工法の種類⁽³⁾

9. 漏出防止機能に関する設計方針の変遷

1号及び2号埋設設備の既許可時の漏出防止機能に関する安全設計方針は、「放射性物質が埋設設備の外へ漏出することを防止する。」としており、その具体的な設計方針は以下のとおりとしていた。

閉じ込めの機能に関する安全設計方針

(1号許可(平成2年11月15日)、2号許可(平成10年10月8日))

廃棄物埋設地

廃棄物埋設地においては、以下に示す設計を行うことにより、第1段階において放射性物質が埋設設備の外へ漏出することを防止するものとする。

埋設設備は、鉄筋コンクリート造とし、十分な地耐力を有する地盤に設置する。埋設設備を構成する外周仕切設備、内部仕切設備及び覆いは、地震力、自重、土圧等の荷重に対し、十分な構造上の安定性を有するよう、許容応力度法により設計する。

なお、使用するコンクリートは「土木学会 コンクリート標準示方書」に準拠して設計、施工を行う。

また、埋設設備は、廃棄体定置後、セメント系充てん材により区画内を充てんする。

廃棄物埋設地に設置する排水・監視設備により、仮に埋設設備の外周仕切設備及び覆いから地下水が浸入した場合でも、その水が廃棄体に達することなく排水ができるよう考慮した設計とする。

これに対し、本資料では漏出防止機能に関する設計方針について、以下のとおりとしている。

漏出防止機能に関する安全設計方針（3号）

(i) 漏出防止機能

b. 安全設計

廃棄物埋設地は、以下に示す設計を行うことにより、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、廃棄物埋設地の限定された区域(埋設設備)からの放射性物質の漏出を防止する。

漏出防止に関する構造は、雨水及び地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造を組み合わせるものとする。雨水及び地下水の浸入を防止する構造は、外周仕切設備、セメント系充填材、覆い、内部防水及びポーラスコンクリート層により構成し、放射性物質の漏出を防止する構造は、外周仕切設備、覆い、内部防水及びポーラスコンクリート層により構成する。

埋設する廃棄体は、「核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」(以下「事業規則」という。)に定められた廃棄体に係る技術上の基準を満足するものであり、容器の構造、定置までの取扱い、強度等から、変形・損傷や外部からの雨水及び地下水の浸入が生じ難い構造と考えられるため、容易に廃棄体内の放射性物質が容器の外へ漏えいすることはない。

しかし、埋設設備への定置後において、廃棄体周辺が水で満たされ液相に連続性がある状態となると、廃棄体内の放射性物質は水を媒体として溶出・移行し、廃棄物埋設地の外に漏えいすることが考えられる。このため、「埋設設備内への雨水及び地下水の浸入を防止すること」及び「浸入した水を廃棄体と接触することなく適切に排水すること」により、雨水及び地下水の浸入を防止する設計とし、万一、廃棄体と水が接触した場合にも放射性物質の漏出を防止する設計とする。

(a) 雨水及び地下水の浸入を防止する設計

(一) 埋設設備内への雨水及び地下水の浸入を防止することに対して、埋設設備を構成する外周仕切設備及び覆いは、低透水性及びひび割れ抑制に優れた鉄筋コンクリート製の設計とする。外周仕切設備及び覆いは、低発熱に配慮した材料配合により温度応力を低減するとともに、鉄

筋によりひび割れを制御する設計とする。最大ひび割れ幅の設計目標値は0.1mmとする。また、埋設設備は、セメント系充填材の充填時の荷重、覆土の上載荷重、埋設設備及び廃棄体の自重等に対し、十分な構造上の安定性を有する設計とする。内部防水は、外周仕切設備の内側で、外周仕切設備底版部及び側壁の立ち上げ部に設置し、防水性を有する設計とする。

(二) 埋設設備内に浸入した水を廃棄体と接触することなく適切に排水することに対して、浸入した水を排水できるよう、ポーラスコンクリート層は、外周仕切設備及び覆いとセメント系充填材との間に設置し、定置・充填後から覆土完了までの間、排水性を有する設計とする。

(三) 埋設設備内に浸入した水を廃棄体と接触することなく適切に排水することに対して、浸入した水が廃棄体と接触しないよう、セメント系充填材は、廃棄体定置後、埋設設備内に充填し、有害な空隙が残らないよう充填性を有する設計とする。内部防水は、外周仕切設備及び覆いの内側で、セメント系充填材上部及び側部とポーラスコンクリート層の間に設置し、防水性を有する設計とする。

(四) その他、操業中における雨水及び地下水の浸入を抑制するため、以下の設計を行う。

- ・ 廃棄体定置後から埋設設備の覆いが完成するまでの間は、埋設設備の区画上部にコンクリート仮蓋を設置し、開口部から埋設設備内部に雨水が浸入することを抑制する。
- ・ 定置作業中は、埋設クレーンの上部に屋根、側部に雨避け板を設置し、雨水が廃棄体に接触することを抑制する。

(b) 放射性物質の漏出を防止する設計

(一) 廃棄体と水が接触した場合にも放射性物質の漏出を防止することに対して、埋設設備を構成する外周仕切設備及び覆いは、低透水性及びひび割れ抑制に優れた鉄筋コンクリート製の設計とする。外周仕切設備及び覆いは、低発熱に配慮した材料配合により温度応力を低減するとともに、鉄筋によりひび割れを制御する設計とする。最大ひび割れ幅の設計目標値は0.1mmとする。また、埋設設備は、セメント系充填材の

充填時の荷重、覆土の上載荷重、埋設設備及び廃棄体の自重等に対し、十分な構造上の安定性を有する設計とする。放射性物質を含む水はポーラスコンクリート層により回収し、埋設設備外へ排出する設計とする。内部防水は、外周仕切設備の内側で、外周仕切設備底版部及び側壁の立ち上げ部に設置し、防水性を有する設計とする。

(c) その他の設計

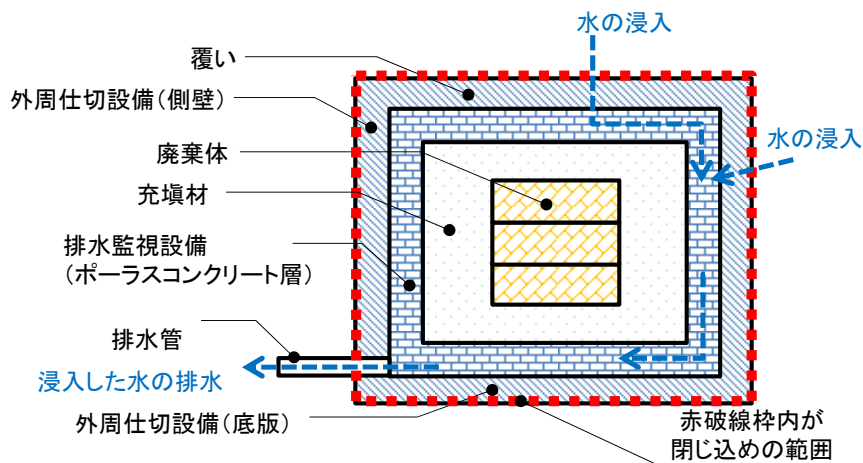
- (一) 排水・監視設備のうち点検管は、ポーラスコンクリート層により排水された水を作業員が回収する作業空間が確保できる設計とする。
- (二) 漏出防止機能を有するコンクリート構造物に対する設計、材料の選定、建設・施工及び検査は、「事業規則」、「許可基準規則」等のほか、利用可能な最善の技術として「コンクリート標準示方書(設計編及び施工編)」⁽¹⁾⁽²⁾に基づく。

(1) (公社)土木学会(2018)：2017年制定コンクリート標準示方書(施工編)

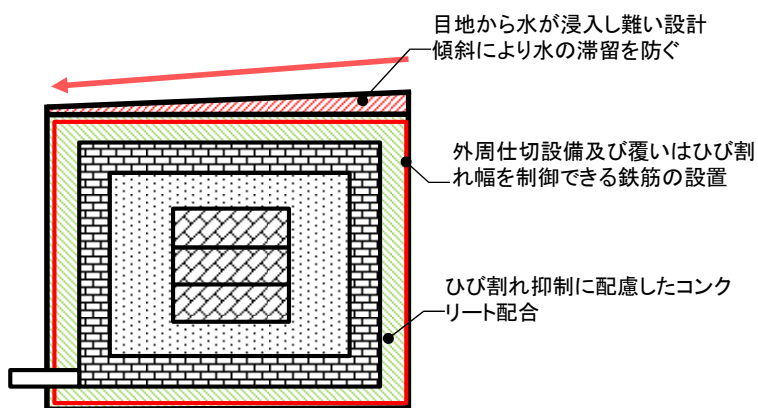
(2) (公社)土木学会(2018)：2017年制定コンクリート標準示方書(設計編)

本設計方針では、第12図に示すように、外周仕切設備及び覆いの内側から放射性物質を漏出させないことは、1号の当初から変わっていないが、各部位の機能や、廃棄体周囲が水で満たされた状態にならないようにする方針など、より具体的に記載している。

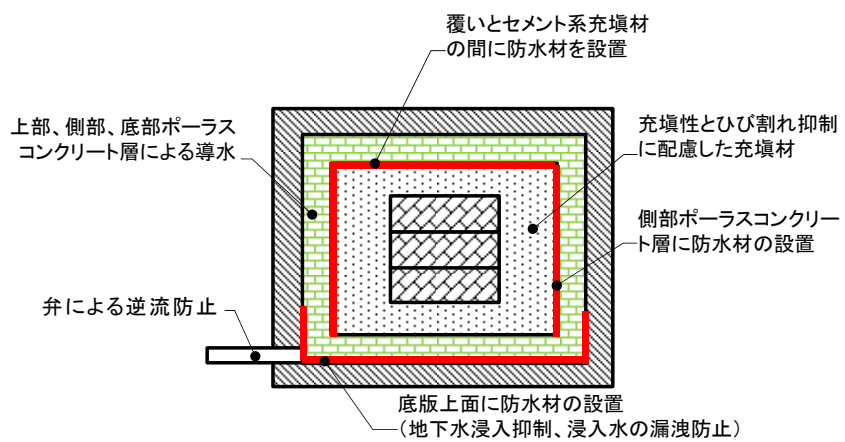
また、水の浸入を抑制するための防水対策を第13図及び第14図に示す。



第 12 図 漏出防止機能の概念図



第 13 図 外部からの水を浸入し難くさせるための防水対策のイメージ図



第 14 図 不飽和をできるだけ維持する対策のイメージ図

参考文献

- (1) (公社)土木学会：コンクリート標準示方書 設計編：標準 2017年度制定、4編
4.4 設計限界値の目安
- (2) (社法)土木学会(平成 17 年)：コンクリートライブラリー119 表面保護工法 設計施工指針(案)

1 号及び 2 号排水・監視設備からの排水実績
と漏出防止機能の健全性について

目 次

1. はじめに.....	1
2. 排水監視について.....	1
(1) 排水監視の方法について.....	1
(2) 排水監視開始時期等.....	2
3. 排水の状況について.....	4
(1) 1号排水・監視設備の排水実績.....	4
(2) 2号排水・監視設備の排水実績.....	6
4. 代表的な埋設設備の排水に伴う対策と浸入経路について.....	7
(1) 1号4-C埋設設備の対策について.....	7
(2) 1号4-C埋設設備のまとめ.....	19
5. 排水実績に基づく埋設設備の漏出防止性能について.....	19
(1) 漏出防止設計の考え方.....	19
(2) 漏出防止評価.....	20
(3) 埋設設備に浸入する水と漏出防止設計の関係.....	21
(4) 外周仕切設備及び覆いのひび割れに対する管理.....	21

別紙1 排水・監視設備の監視強化について

別紙2 年間想定排水量の考え方

別紙3 排水・監視設備構造

別紙4 排水実績一覧表(1993年度～2018年度)

別紙5 主な保修工法の概要

別紙6 既設備の損傷状況と改修履歴

別紙7 外周仕切設備底版からの地下水の浸入の可能性について

1. はじめに

排水・監視設備による排水の監視は 1993 年 5 月から開始しており、排水された水から放射性物質が検出されたことはなく、漏出防止機能は健全に維持されている。

本資料では以下のとおり、今までの排水状況及び漏出防止性能に与える影響について整理した。

- ・埋設設備は覆土完了までの間、外周仕切設備及び覆いの水密性により埋設設備内への水の浸入を抑制しており、埋設設備内に浸入した水は、廃棄体に接触する前に排水・監視設備により埋設設備外に排出して回収できる構造としており、回収した水の放射性物質濃度の測定を行っている。
- ・外周仕切設備及び覆いと廃棄体の間は、廃棄体及び廃棄体支持架台間の狭隙部を充填できるような流動性を持つセメント系充填材で充填する。このセメント系充填材は温度応力によるひび割れ抑制に配慮したモルタル(中庸熱ポルトランドセメント 10%、高炉スラグ 90%)を使用しており、排水・監視設備に浸入した水が廃棄体内部に浸入することは考え難い。
- ・これまで 1 号及び 2 号排水・監視設備からの排水を確認しているが、排水中に放射性物質は検出されておらず、埋設設備に浸入した水は廃棄体に接触する前に排水・監視設備を通して排水されていることから、漏出防止機能は有効に機能している。
- ・保安規定に基づき、排水・監視設備からの排水を監視し、必要に応じた保修を適切に行っている。

2. 排水監視について

(1) 排水監視の方法について

(i) 監視方法

排水・監視設備の排水管出口部に取り付けた 20L の容器により、埋設設備からの排水を回収する。

(ii) 監視頻度

週 1 回排水状況を確認する。

(iii) 記録事項

「確認年月日」、「埋設設備番号」、「排水の有無」、「排水量」等を記録す

る。

(iv) 監視強化

20L/(排水管・週)*¹を超える排水があった場合又は20L/(排水管・週)を超える排水が予想される場合は、監視・採取頻度の増加及び排水管バルブの開閉操作による監視強化を行う。

(別紙1「排水・監視設備の監視強化について」参照)

(v) 調査・補修

監視強化した埋設設備に対しては、調査を行い、原因を特定した場合は必要に応じて保修を行う。

*1：20L/(排水管・週)の根拠

1,2号事業変更許可申請時の排水・監視設備からの年間排水量想定(1号：30m³/年、2号：30m³/年)より設定している。(別紙2「年間想定排水量の考え方」参照)

1号：(30m³/年÷40基)÷52週/年≒14.4L/週 →7.2L/排水管・週

2号：(30m³/年÷16基)÷52週/年≒36.0L/週 →18L/排水管・週

(2) 排水監視開始時期等

これまでの各廃棄物埋設施設の排水監視開始時期、定置期間及び覆いコンクリート打設完了日を第1表及び第2表に整理した。

第1表 1号廃棄物埋設施設の排水監視開始時期等

埋設設備	排水監視 開始時期	定置期間		覆いコンクリート打 設、完了日	
		開始日	完了日		
1号	1-A	1993.5	1992.12.15	1993.3.23	1993.6.11
	1-B	1993.7	1993.3.24	1993.6.24	1993.8.26
	1-C	1993.10	1993.7.6	1993.10.19	1993.11.10
	1-D	1994.7	1993.10.20	1994.1.19	1994.7.26
	1-E	1994.8	1994.1.21	1994.4.4	1994.8.26
	2-A	1994.8	1994.4.8	1994.6.28	1994.9.2
	2-B	1994.11	1994.6.30	1994.10.19	1994.11.25
	2-C	1995.5	1994.10.21	1994.12.21	1995.5.19
	2-D	1995.8	1994.12.22	1995.3.16	1995.8.22
	2-E	1995.8	1995.3.22	1995.6.12	1995.8.29
	3-A	1995.11	1995.6.26	1995.10.15	1995.11.21
	3-B	1996.4	1995.10.12	1995.12.12	1996.4.23
	3-C	1996.8	1995.12.20	1996.3.12	1996.8.23
	3-D	1996.8	1996.3.14	1996.6.18	1996.8.30
	3-E	1996.11	1996.6.25	1996.8.9	1996.11.22
	4-A	1997.5	1996.10.22	1997.1.21	1997.5.23
	4-B	1997.9	1997.1.22	1997.4.8	1997.9.12
	4-C	1997.11	1997.4.10	1997.6.26	1997.11.18
	4-D	1998.6	1997.7.2	1998.3.20	1998.7.3
	4-E	1998.8	1998.5.12	1998.7.31	1998.8.28
	5-A	1998.4	1997.9.25	1998.1.21	1998.4.24
	5-B	1998.11	1998.1.23	1998.8.4	1998.11.10
	5-C	1999.6	1998.8.5	1999.3.18	1999.6.8
	5-D	2004.7	1999.3.19	2004.3.15	2004.7.29
	5-E	2007.9	2002.3.18	2013.2.26	2013.7.22
6-A	1999.6	1999.1.26	1999.4.20	1999.6.25	
6-B	1999.10	1999.6.16	1999.10.7	1999.11.1	
6-C	2007.4	1999.10.13	2009.3.9	2011.10.27	
6-D	2010.2	2010.2.24	定置中	—	
6-E	2018.11	2018.10.30	定置中	—	

(埋設設備の設置位置は別紙3「排水・監視設備構造」を参照)

第2表 2号廃棄物埋設施設の排水監視開始時期等

埋設設備	排水監視 開始時期	定置期間		覆いコンクリート打 設、完了日	
		開始日	完了日		
2号	1-A	2003.11	2000.10.25	2003.2.25	2003.11.27
	1-B	2004.9	2003.2.27	2004.3.22	2004.9.24
	2-A	2005.9	2004.4.20	2005.4.11	2005.9.23
	2-B	2006.11	2005.4.13	2006.10.2	2006.11.20
	3-A	2008.1	2006.12.5	2008.12.4	2010.5.24
	3-B	2009.2	2009.2.25	2010.6.25	2010.9.21
	4-A	2010.10	2010.9.27	2011.10.12	2012.5.23
	4-B	2011.10	2011.10.14	2013.2.22	2013.10.9
	5-A	2013.3	2013.3.13	2014.6.20	2014.10.9
	5-B	2014.6	2014.6.25	2015.9.16	2016.5.20
	6-A	2015.10	2015.10.9	2016.9.29	2018.7.9
	6-B	2016.11	2016.11.8	定置中	—

(埋設設備の設置位置は別紙3「排水・監視設備構造」を参照)

3. 排水の状況について

排水量について四半期ごとに整理した(別紙4「排水実績一覧表(1993年度～2018年度)」参照)。

いくつかの埋設設備において、覆いや側壁のひび割れが要因と考えられる排水が認められたことから、調査及びそれに基づく保守を行うことで排水の低減を行ってきた(別紙5「主な保守工法の概要」参照)。後に構築した埋設設備については、都度対策を行うことで改善を進めてきた(別紙6「既設備の損傷状況と改修履歴」参照)。現在までの排水中に放射性物質は検出されていない。

現在までの状況は以下に示すとおりである。(以下の○数字は、別紙4と対応)

(1) 1号排水・監視設備の排水実績

①1,2群では、定置完了直後に排水が発生している。これは、覆いコンクリート打設に伴う排水が主な要因であったことから、その後は排水量を削減できる施工方法に変更した。

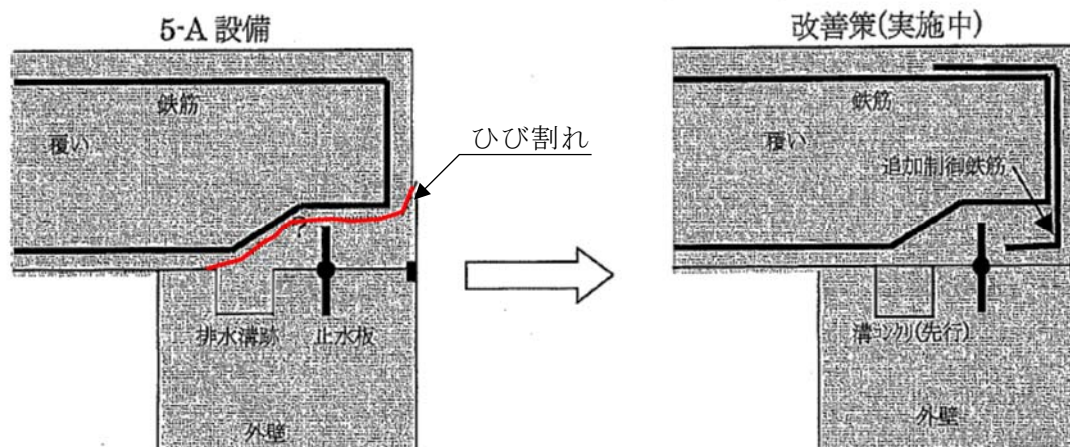
②1,2群では、側壁と覆いにひび割れがあり、それが要因と考えられる排水があった。1994年度～1995年度にかけて表面被覆及びひび割れ注入工法による保

修を実施した結果、保修直後に排水の発生が収束した。

- ③ひび割れ発生の抑制のため、3群以降に対しては、ひび割れ制御鉄筋を覆い及び側壁に設置した。その結果、3群以降の初期の排水量は低減された。
- ④表面被覆及びひび割れ注入工法による保修については、1996年度～1999年度にかけて3,4群についても実施した結果、これらの保修直後に排水の発生が収束した。
- ⑤2001年度の台風時に5-A埋設設備の覆い側部のひび割れを浸入経路として排水が認められた。保修を実施したところ効果が見られた。5-A埋設設備の覆い側部のひび割れ発生原因としては、覆いと側壁は突起部(噛み合わせ部)が設けられており、覆いが温度降下により収縮した際に突起部に応力集中が生じひび割れが発生したと推定された(写真1)。5-C以降の覆い施工には追加制御鉄筋を入れた(第1図)。1群から4群の表面被覆完了以後の2000年度以降にいくつかの埋設設備で同様の覆い側部からと考えられる継続的な排水が確認された。



写真1 覆い側部のひび割れ状況



第1図 追加制御鉄筋による止水対策

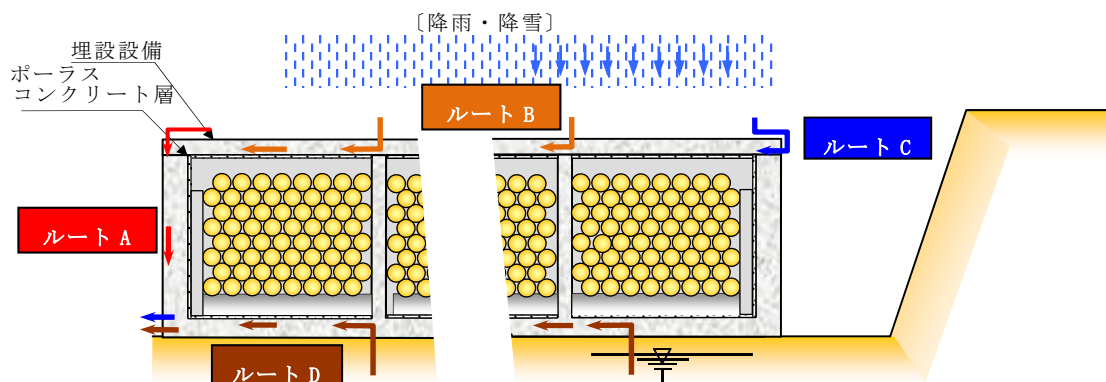
- ⑥2007年度～2008年度にかけて覆いに表面止水工法による保守を実施した結果、排水量は低減された。
- ⑦2010年度以降も排水量の増加が見られる箇所において、表面止水工法による保守を行った結果、排水量は低減された。
- ⑧至近の数年においても、若干量の排水が確認しており、一時的に監視強化を行った箇所はあるものの、2018年度末現在では監視強化対象の箇所はない。

(2) 2号排水・監視設備の排水実績

- ⑨1-Aで継続的な排水が確認されるが、監視強化を継続するほどの排水とはなっていない。
- ⑩1群から4群においては、大きな排水は継続していないが、排水増加の要因と考えられるひび割れが確認されたことから、2006年度～2007年度にかけて表面止水工法による保守を実施した。
- ⑪5群以降においては、ひび割れ発生抑制のさらなる向上として、配合をフライアッシュセメントに変更するとともに、底版側部にもひび割れ制御鉄筋を設置した。その他の埋設設備についても若干量の排水が確認されるが継続的なものではなく、2018年度末現在では監視強化対象の箇所はない。

4. 代表的な埋設設備の排水に伴う対策と浸入経路について

排水の浸入経路として考えられるルートを第2図に示す。



ルート A：覆い及び側壁からの浸入

ルート B：覆い天端の目地からの浸入

ルート C：覆い側部からの浸入

ルート D：底版からの浸入

(別紙7「外周仕切設備底版からの地下水の浸入の可能性について」参照)

第2図 排水の浸入経路

1号及び2号埋設設備においては、埋設設備の排水実績を踏まえて次埋設設備では、配合及びひび割れ制御対策の工夫をしてきている。

また点検結果に基づき、保守を行うことで、排水量が低減されている。しかし中には、保守を行っても排水が継続している埋設設備がいくつかある。

この代表的な例として、1号4-C埋設設備の状況を整理した。

(1) 1号4-C埋設設備の対策について

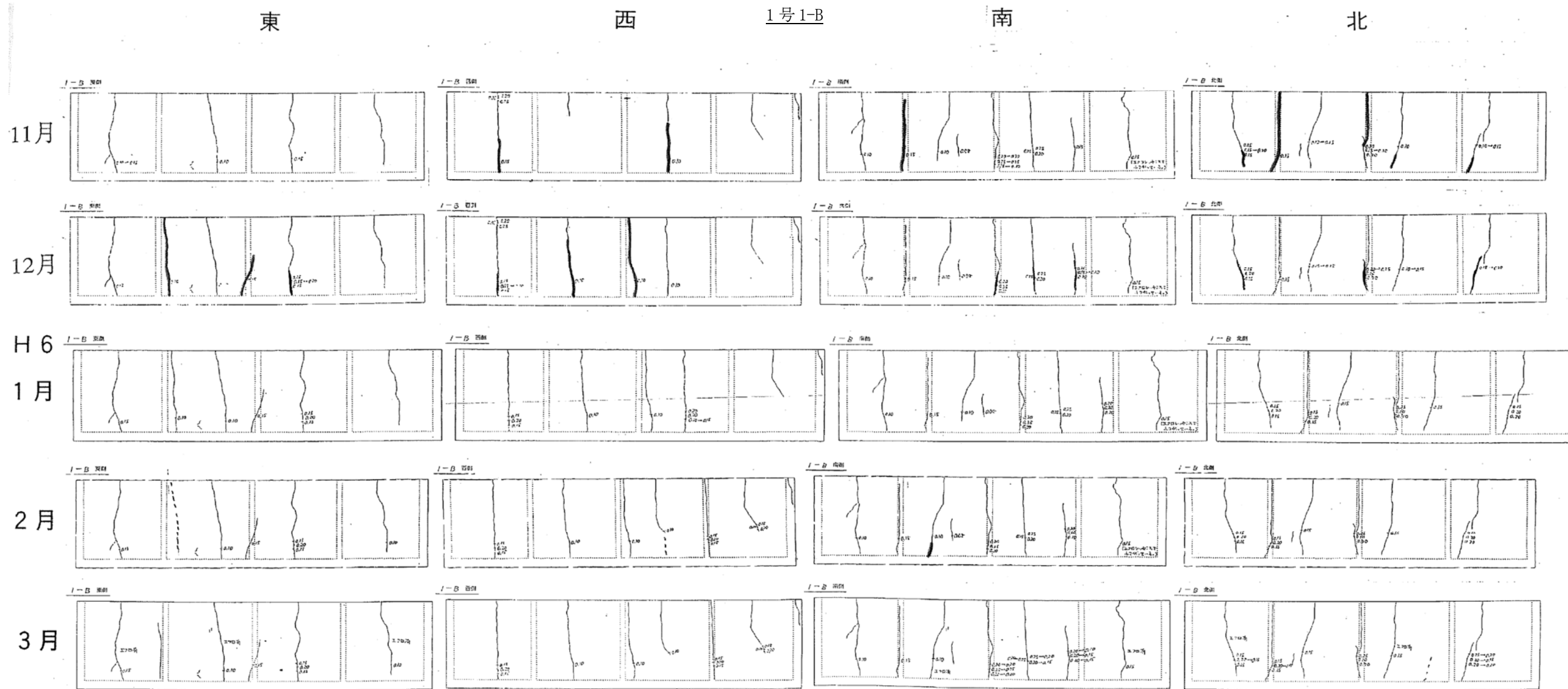
(i) 1号4-C構築前までの経緯(1995年以前)

1992年度頃の初期の1号埋設設備1,2群において側壁にひび割れが発生し、充填後にもひび割れ数が増加した。第3図にひび割れ調査結果の一例を示す。当時のひび割れ発生の原因推定結果は、「外部拘束による温度応力」、「乾燥収縮」であり、充填後には、これに、「モルタル充填に伴う温度応力」、「モルタル液

圧」、「モルタルの乾燥収縮」が加わると考察した⁽¹⁾⁽²⁾。

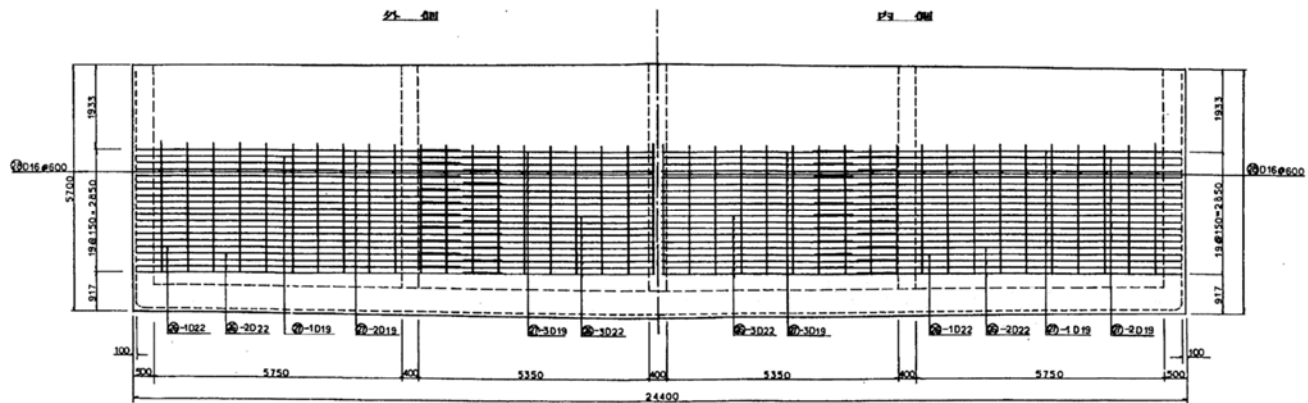
ひび割れ幅は0.2mm以下が大半で、外気温によりひび割れ幅は季節で増減していた。また、ひび割れ幅はセメント系充填材施工後に増加する傾向にあった。

1号3-A以降の埋設設備に関してはひび割れ対策として、覆い及び側壁に対してひび割れ制御鉄筋を配置した(第4図)。さらに、ひび割れ注入工法及び表面被覆工法による保修を実施した結果、排水量が低減された(写真2及び写真3)。

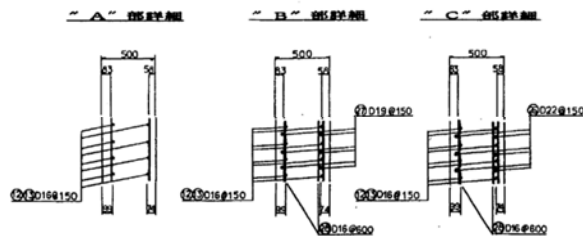
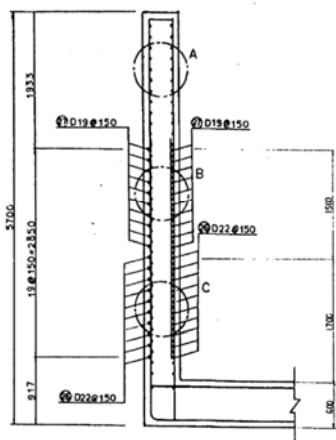


第3図 ひび割れ発生・進展状況図(1991年10月3日打設、1993年度観察状況)

ひびわれ制御鉄筋配置図 S=1/50



断面図
S=1:30



第4図 側壁ひび割れ制御鉄筋配置図



保修前



保修後

写真2 ひび割れ注入工(1号1-B 西面)



保修材張り



防水材吹付け



仕上げ材吹付け

写真3 表面被覆工(1号2-A)

(ii) 1号4-C埋設設備の対策

a. 覆いコンクリート打設直後の対策(1998年)

1号4-Cにおいては、1号3-A以降のひび割れ対策として実施した覆い及び側壁に対するひび割れ制御鉄筋を配置している(第4図)。また、覆いコンクリート打設後の1998年度に表面被覆を実施している(写真4)。この結果、初期の排水は止まった。



写真4 表面被覆状況(1号4-C)

b. 2001年度～2009年度の状況

2001年度から排水が再発しているが、原因は、1号5-A埋設設備で生じた覆い側部のひび割れからの浸入と同様と考えられる(第1図参照)。これまでに表面被覆工を実施しており、直接外観確認ができない場合もあったが、2007年度に覆い等を対象とした表面止水工法による保守を実施した。また、合わせて目地部の保守を実施した(写真5、写真6及び写真7)。この結果、排水量が大きく低減された。



保修前



保修後

写真5 表面止水工(1号4-C 覆い側部)



保修前



保修後

写真6 表面止水工(1号4-C 底版端部)



保修前



保修後

写真7 表面止水工(1号4-C 覆い目地部)

c. 2010 年度以降の状況 (2010 年度～現在)

2010 年度以降に再び排水が始まり、2013 年度に覆いの目地部及び側部の表面止水工法による保修(写真 8、写真 9 及び写真 10)も実施したが、現在も排水が続いている状態である。引き続き点検を継続しており、覆い側部のひび割れ箇所についても仮保修を実施している(写真 11 及び写真 12)。

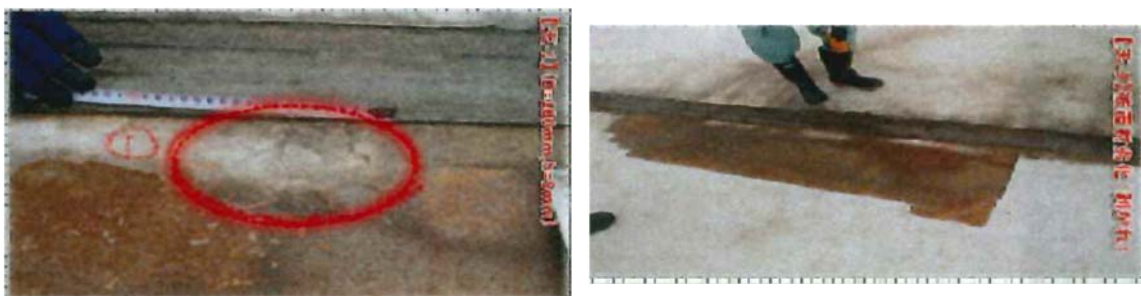


写真 8 表面止水工(1号 4-C 覆い目地部)

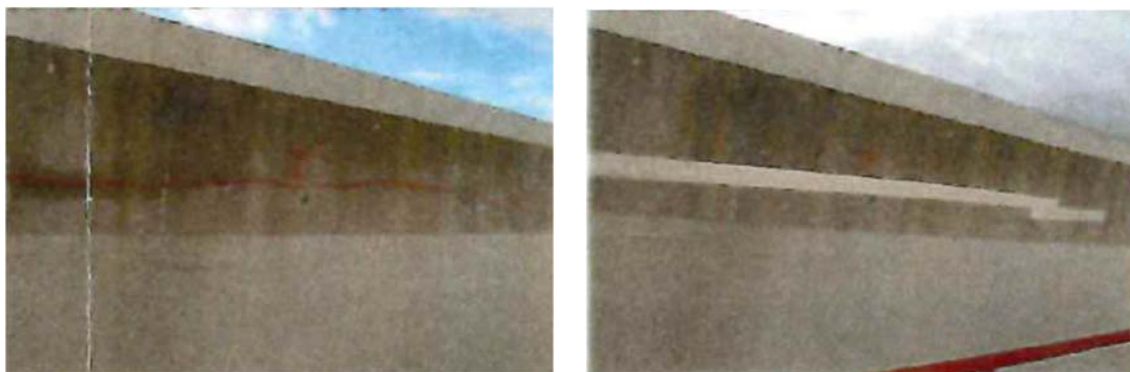


写真 9 表面止水工(1号 4-C 覆い側部)



写真 10 表面被覆の剥離(1号 4-C 覆い側部)



写真 11 調査対象箇所(1号 4-C)

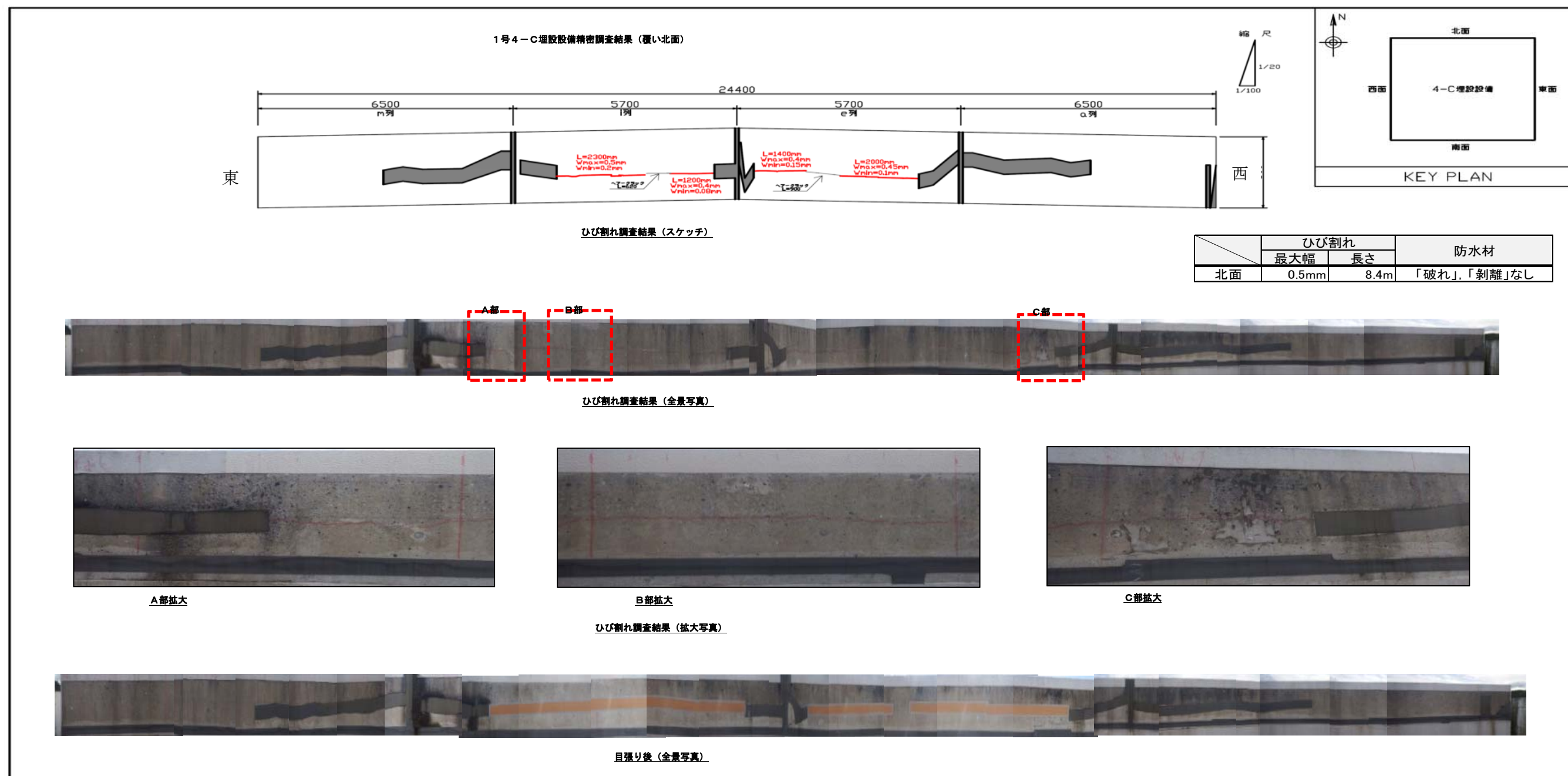


写真 12 調査結果(1号 4-C 覆い側部)

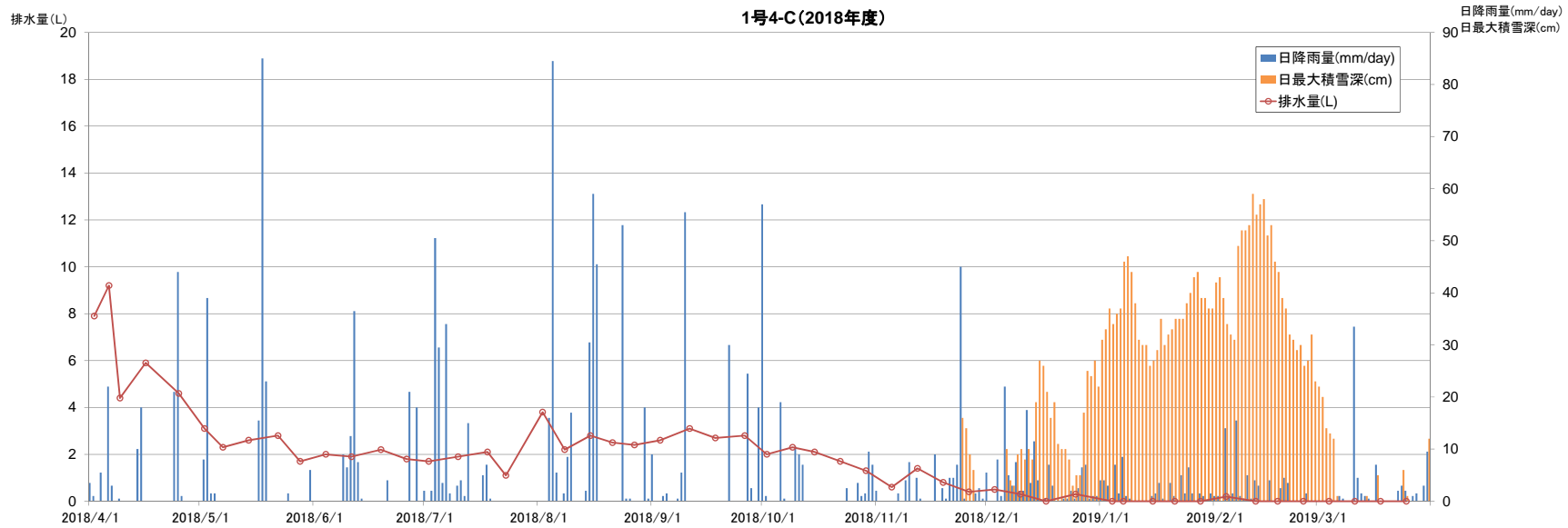
d. 1号4-Cの実績から推察される要因

排水の多くは、発生したひび割れを経由した降雨に起因するものと推定している。

2018年度の降雨量と排水量の関係(第5図)を見ると、全体として季節変動に伴う排水量の変化として以下の傾向が確認できる。

- ・4月は、雪解けによる排水量の増加が見られる。
- ・6月～9月を比較した場合、降雨量の多い時期(8月～9月：計約490mm)は、降雨量が少ない時期(6月～7月：計約275mm)に比べて排水量が増加する傾向にある。
- ・冬の時期は、積雪となることで、排水量が減少する。

なお、7月23日から8月2日にかけて、排水量の増加が見られるが、7月23日は5日間の排水量、8月2日は10日間の排水量となっていることが要因であり、水の浸入量については、目立った変化ではない。



第5図 排水量と降雨量及び積雪深さの関係(1号4-C 2018年度)

(2) 1号4-C埋設設備のまとめ

1号4-C埋設設備の排水状況について評価する。

ルートA：覆い及び側壁で発生したひび割れは、ひび割れ制御鉄筋を設置したことによりひび割れ発生を抑制し、排水を改善した。

ルートB：覆い天端の目地の劣化は、目地部を保修することで、排水を改善した。

ルートC：覆い側部で発生したひび割れは、ひび割れ部を表面止水工法による保修することで、排水を改善した。

ルートD：底版は状態を確認することはできず、ひび割れの発生やそれに伴う排水の可能性は否定できない。

5. 排水実績に基づく埋設設備の漏出防止性能について

(1) 漏出防止設計の考え方

(i) 漏出防止の期間は、覆土完了までとし、この期間、埋設設備は外周仕切設備及び覆いの水密性により埋設設備内への水の浸入を抑制し、埋設設備内に浸入した水は、廃棄体に接触する前に排水・監視設備により埋設設備外に排出して回収することで、漏出防止を達成する。

(ii) 漏出を防止する領域としては、外周仕切設備及び覆いの内側とする。

(iii) 放射性物質はドラム缶内に固型化されていることから、放射性物質が埋設設備の外に漏出するには、ドラム缶内に水が浸入する必要がある。放射性物質の漏出防止のため、ドラム缶内へ水が浸入し難くなるよう以下に配慮した設計とする。

a. 外周仕切設備及び覆いは水を透し難い設計とする。具体的には、地震力等外力を適切に考慮するとともに、水結合材比55%以下の水密性を確保し発熱量が小さいコンクリートを用いるなどの設計とする。

b. 外周仕切設備及び覆いから水が浸入した場合でも、その水が廃棄体に接触する前に外周仕切設備及び覆いの外に回収できるよう、外周仕切設備及び覆いの内側に透水性の高いポーラスコンクリート層からなる排水・監視設備を設け、ポーラスコンクリート層に接続した排水管により、外周仕切設備及び覆いの外に水を排出し、その放射性物質の濃度が確認できる構造とする。

c. ポーラスコンクリート層を流れる水が廃棄体の方へ浸入し難くさせるため、廃棄体の周りにはモルタル(セメント系充填材)を充填する。このモルタルは、廃

棄体間の狭隘部にも隙間なく充填されるような、ブリーディングの極めて少ない高流動のモルタルで、かつ温度応力ひび割れを起こし難くさせるため、低発熱となるようなモルタルとする(参考資料3「セメント系充填材の性能について」参照)。

(2) 漏出防止評価

- ・漏出防止期間中は、外周仕切設備及び覆いから浸入した水は排水・監視設備で排水し、ポーラスコンクリート中の水位が廃棄体の位置より低く保たれていれば、廃棄体周囲のモルタル層は不飽和状態となる。不飽和状態では、移流による核種の移行は起こらないが、トリチウムは不飽和中でも拡散で移行する可能性がある。
- ・現状の1号及び2号の排水量は1埋設設備当たり最大で $0.6\text{m}^3/\text{y}$ (過去最大で、 $11.8\text{m}^3/\text{y}$)であり、排水・監視設備の排水能力(保守的に少なめに想定した場合、1号： $105.0\text{m}^3/\text{y}$ 、2号： $159.5\text{m}^3/\text{y}$ *1参照)に比較して小さいことから廃棄体周囲のモルタル層は不飽和状態が維持されてきたと考えられる。
- ・仮に今後排水・監視設備の排水能力以上の水が浸入し、排水・監視設備が常時飽和し、廃棄体周囲のモルタル層も飽和状態となった場合を仮定したトリチウムの拡散評価を行った。廃棄体周囲のモルタル層は充填性が良く、亀裂も少ないこと、ドラム缶はアルカリ性のモルタルに囲まれ腐食は容易に進まないことから、排水・監視設備を流れる水がドラム缶内部に到達する割合は極めて少ないと考えられ、外周仕切設備及び覆いの外での放射性物質濃度は、「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」(平成30年6月8日原子力規制委員会告示第4号)で定められている周辺監視区域外の水中の濃度限度(以下「水中濃度限度」という。)と比べて十分に低い(参考資料2「排水中のトリチウム濃度を用いた漏出防止評価について」参照)。

*1：排水・監視設備の排水能力の算定方法

$$\text{排水能力 } Q = A \times k \times i$$

ここに、

A : ポーラスコンクリート層通水断面積

1号 : 高さ 0.05m、幅 22.2m、2号 : 高さ 0.05m、幅 33.71m

k : ポーラスコンクリート層の透水係数であり、品質管理基準の下限値である $3.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ に対し、接続部の影響を考慮し、排水能力が少なく見積もれるよう 1 オーダー保守的に $3.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$ とする。

i : 動水勾配であり、1/200 とする。

(3) 埋設設備に浸入する水と漏出防止設計の関係

- ・ 外周仕切設備及び覆いから排水・監視設備に浸入した水の量が、排水・監視設備の排水能力より小さければ、廃棄体周囲のモルタル層は不飽和状態となり、放射性物質は極めて移行し難くなり、外周仕切設備及び覆いの外での放射性物質濃度は、水中濃度限度より十分小さくなる。現在の排水量は、排水・監視設備の排水能力以下であり、問題ない。
- ・ 覆土施工中から、外周仕切設備及び覆いの周囲の地下水が上昇し、外周仕切設備及び覆いから排水・監視設備へ浸入する流量が増える可能性がある。この場合排水・監視設備の排水能力を超えると、廃棄体周囲のモルタル層は徐々に飽和状態となる。覆土施工開始から、漏出防止期間が終了するまでの期間は 10 年程度と短期であり、この間に廃棄体周囲のモルタル層は完全に飽和に至らない可能性がある。仮に飽和になれば、放射性物質は不飽和状態より移行しやすくなるが、排水・監視設備で排水している状態は、外周仕切設備及び覆いの外から、排水・監視設備の方向へ水が流れる状態であり、浸入した水は排水・監視設備から回収され、管理されることから、漏出防止としては問題ない状態である。

(4) 外周仕切設備及び覆いのひび割れに対する管理

- ・ 覆土施工前及び、覆土施工により埋設設備周囲の地下水面が上昇し外周仕切設備及び覆いの外から地下水が浸入する状態になるまでの間は、外周仕切設備（特に底版）にひび割れがあると、排水・監視設備から外周仕切設備の外の方へ向かう流れが生じる可能性があるため、廃棄体周囲のモルタル層が不飽和状態で放射性物質が移行し難くなる状態となるよう、排水・監視設備から排水され

る流量が排水・監視設備の排水能力を超えないよう、外周仕切設備及び覆いのひび割れの保修を行う。現状 20L/(排水管・週)を超える排水があった場合又は 20L/(排水管・週)を超える排水が予想される場合は、監視強化を行い、必要があれば保修を行うこととしている。

- ・排水・監視設備から実際に排水される水の量や放射性物質濃度を測定し、排水・監視設備の部分での計算上の放射性物質濃度の評価結果と比較することで、廃棄体周囲のモルタルの性能が想定通りになっているか推定することが可能である。現状排水・監視設備の排水は、移行しやすいトリチウムに対し水中濃度限度の 1/100 の精度で測定しているが、検出されたことはない。仮に今後、排水・監視設備で放射性物質が検出され、さらに、外周仕切設備及び覆いの外での放射性物質濃度が水中濃度限度より十分小さくならないと想定された場合は、埋設設備のひび割れ保修も含めた必要な対策をとることとしている。
- ・覆土施工後、設備周囲の地下水面の上昇で外周仕切設備及び覆いから排水・監視設備に浸入する流量が増加する可能性がある。流量が増加しても、外周仕切設備及び覆いの外から中に向かう流れなので漏出防止機能に問題はないが、廃棄体周囲のモルタルが飽和しない方が漏出防止性能が高いので、覆土施工前に表面のひび割れについて保修する。

参考文献

- (1) 戸栗ほか(2005)：放射性廃棄物埋設施設におけるひび割れ制御に関する設計と施工, 日本コンクリート工学協会論文集
- (2) 工藤ほか(2015)：浅地中処分施設における鉄筋コンクリート側壁のひび割れ制御の変遷, コンクリート工学, Vol. 53, No. 6

排水・監視設備の監視強化について

1. はじめに

本資料は、1号及び2号排水・監視設備における排水の監視における監視強化に関して説明するものである。

排水監視の実施に関して、「常時における監視頻度」、「監視強化を行う場合の条件」、「監視強化の解除の条件」、「排水管バルブの開閉運用」及び「排水中に有意とする濃度^{*1}以上の放射性物質が検出された場合の措置」について説明する。

2. 排水・監視設備における排水監視

当該埋設設備の廃棄体定置開始日から排水・監視設備における排水監視を開始する。

1基の埋設設備に対して、東西合計2つの排水管に各20Lの採取容器を設ける。排水を採取した場合は排水状況の記録を関係箇所に通知することとしている。

(1) 常時における監視頻度

排水監視開始後、毎週1回(原則として週の第一営業日)排水状況を確認する。ただし、目安値で排水量が0.1L未満の排水は採取しない。

(2) 監視強化

20L/(排水管・週)を超える排水があった場合又は20L/(排水管・週)を超える排水が予想される場合は、監視・採取頻度の増加(毎営業日)及び排水管バルブの開閉操作による監視強化に移行する。

20L/(排水管・週)を超える排水が予想される場合とは、排水状況が以下のいずれかに該当する場合である。

- ① 1基当たり東西合計20L/週を超える排水があった場合
- ② 1基当たり東西合計20L/週を超える排水が予想される場合
- ③ 1基の東西どちらかの採取容器に10L/週を超える排水があった場合
- ④ 1基の東西どちらかの採取容器に10L/週を超える排水が予想される場合

なお、監視強化中において、次回の排水監視までに排水量が1つの採取容器で20Lを超えないと判断した場合は排水を採取しない。

(3) 監視強化の解除

排水状況が以下であることが確認された場合に監視強化を解除する。

- ①排水が東西合計 20L/週を超えないこと
- ②排水が東西どちらかの採取容器で 10L/週を超えないこと

3. 排水管バルブの開閉について

排水管バルブは、排水管内に排水が滞留しないよう通常「開」状態としている。ただし、採取容器への排水量が次の排水監視までに1つの採取容器で20Lを超える排水が予想される場合は排水管バルブを「閉」状態とし、そのおそれが無くなった時点で排水管バルブを「開」状態に戻すこととしている。

また、大雨が予想される場合には、排水管から埋設設備内部への水の逆流を防止するため、排水管バルブを「閉」状態として操作をすることとしている。

4. 排水中に有意とする濃度*1以上の放射性物質が検出された場合の措置

排水中に有意とする濃度以上の放射性物質が検出された場合には、放射線防護上の措置を講じた上で排水の監視を実施する。

*1 有意とする濃度

(単位：Bq/cm³)

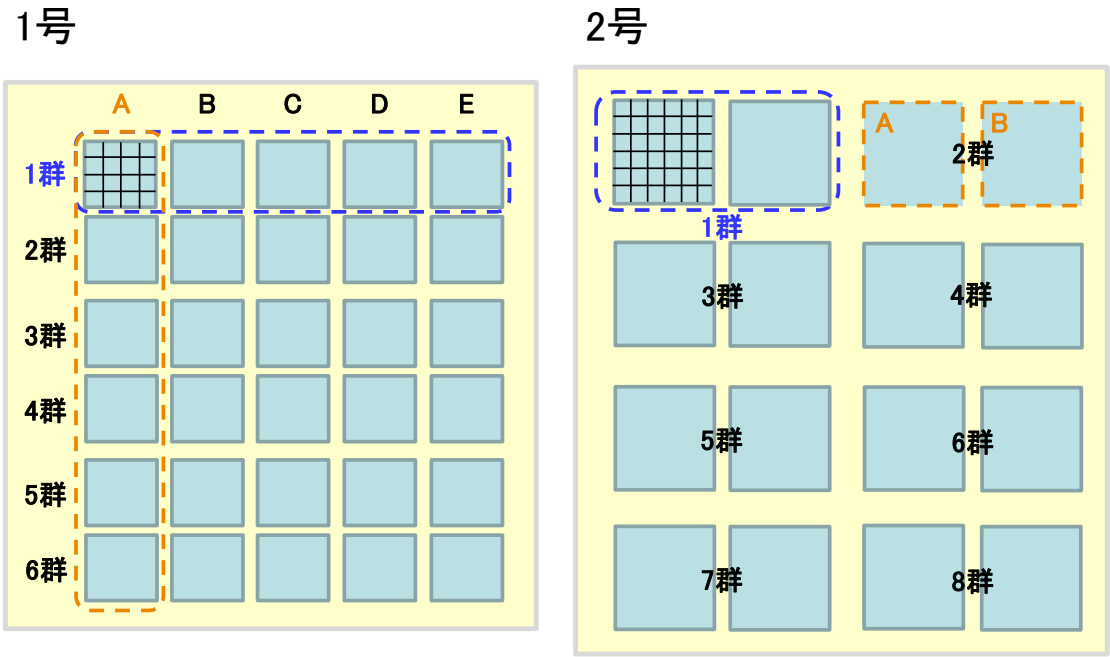
核種	排水・監視設備からの排水中の放射性物質濃度の評価
H-3	1×10 ⁰
Co-60	検出限界値(目標検出限界値 1×10 ⁻³)
Cs-137	検出限界値(目標検出限界値 7×10 ⁻⁴)

年間想定排水量の考え方

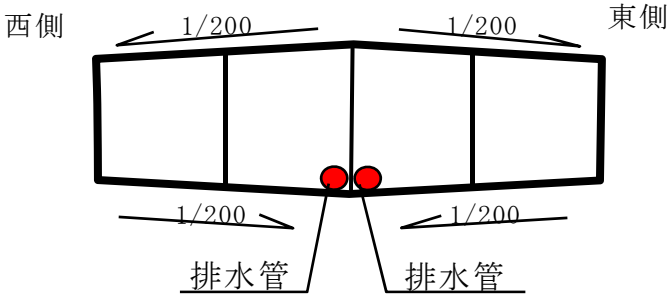
1,2号排出量20Lの考え方							3号現状の想定浸入水量の考え方					
<p>動水勾配が最大となる覆土完了後での健全なコンクリート(外周仕切設備及び覆い)からの浸入を想定する。</p> <p>動水勾配設定図 数字は1号での数字を示し、1,2号で異なる場合は()内に2号の数字を示す。</p> <p>$Q=K \cdot i \cdot S$</p> <ul style="list-style-type: none"> Q: 浸入水量 K: コンクリートの透水係数(=1.0×10⁻¹²m/s)と、ベントナイト混合土の透水係数(=1.0×10⁻¹¹m/s)より求まる等価透水係数 i: 動水勾配(=(外部の水頭-内部の水頭)/(浸入距離)) S: 面積 							<p>動水勾配が最大となる覆土完了後での健全なコンクリート(外周仕切設備及び覆い)からの浸入を想定する。</p> <p>動水勾配設定図</p> <p>$Q=K \cdot i \cdot S$</p> <ul style="list-style-type: none"> Q: 浸入水量 K: コンクリートの透水係数(=1.0×10⁻¹²m/s) i: 動水勾配(=(外部の水頭-内部の水頭)/(浸入距離)) S: 面積 					
浸入箇所	埋設設備	外部の水頭(m)	内部の水頭(m)	浸入距離(m)	面積(m ²)	浸入水量(m ³ /y)	浸入箇所	外部の水頭(m)	内部の水頭(m)	浸入距離(m)	面積(m ²)	浸入水量(m ³ /y)
覆い	1号	4.5	0.0	2.5	24.4×24.4	0.16	覆い	18.3	0.0	0.3	36.51×64.10	4.5
	2号	9.5	0.0	2.5	36×36.91	0.57	側壁	21.33	0.0	0.6	(36.51+64.10)×6.66×2	1.5
側壁	1号	7.05	0.0	2.5	24.4×6.2×4	0.26	底板	24.66	0.0	0.6	36.51×64.10	3.0
	2号	12.3	0.0	2.6	(36+36.91)×6.9×2	0.49	合計					9.0
底板	1号	10.2	0.0	0.6	24.4×24.4	0.32						
	2号	15.9	0.0	0.8	36×36.91	0.83						
合計	1号					0.74	上記計算結果より、想定される浸入水量を保守的に10m ³ /y・ピットと設定すると、埋設設備全体での浸入水量は以下の通り					
	2号					1.89	3号: 10.0m ³ /y×8ピット=80m ³ /y					
<p>上記計算結果より、想定される各埋設設備全体での浸入水量は以下の通り</p> <p>1号: 0.74m³/y×40ピット≒30m³/y</p> <p>2号: 1.89m³/y×16ピット≒30m³/y</p>												

なお、本資料は1号及び2号事業変更許可申請時と、今回の3号申請時のポーラスコンクリート想定浸入水量の考え方について比較したものである。

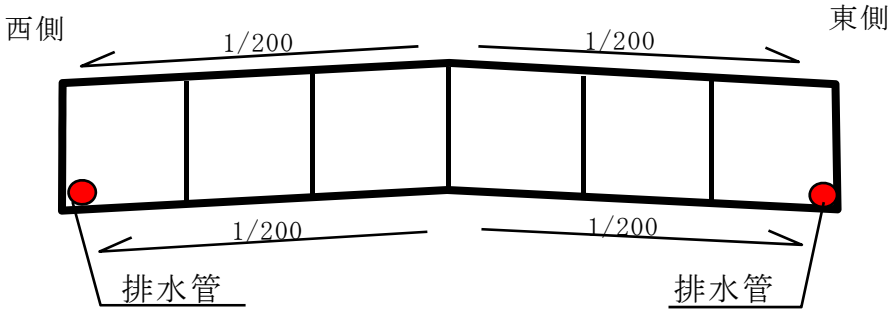
排水・監視設備構造



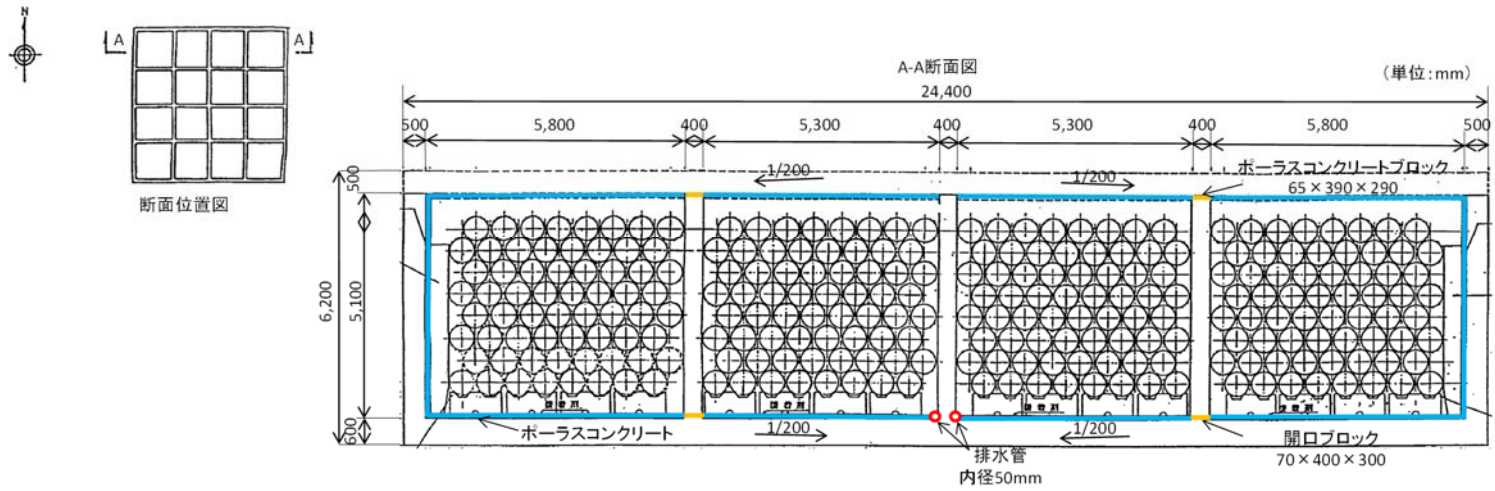
第 1 図 1 号及び 2 号埋設設備設置平面図



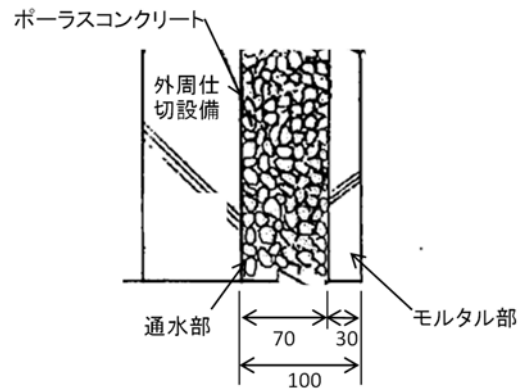
第 2 図 1 号集水構造断面図



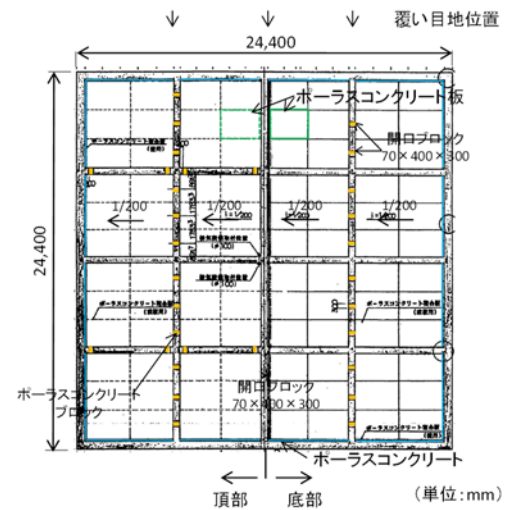
第 3 図 2 号集水構造断面図



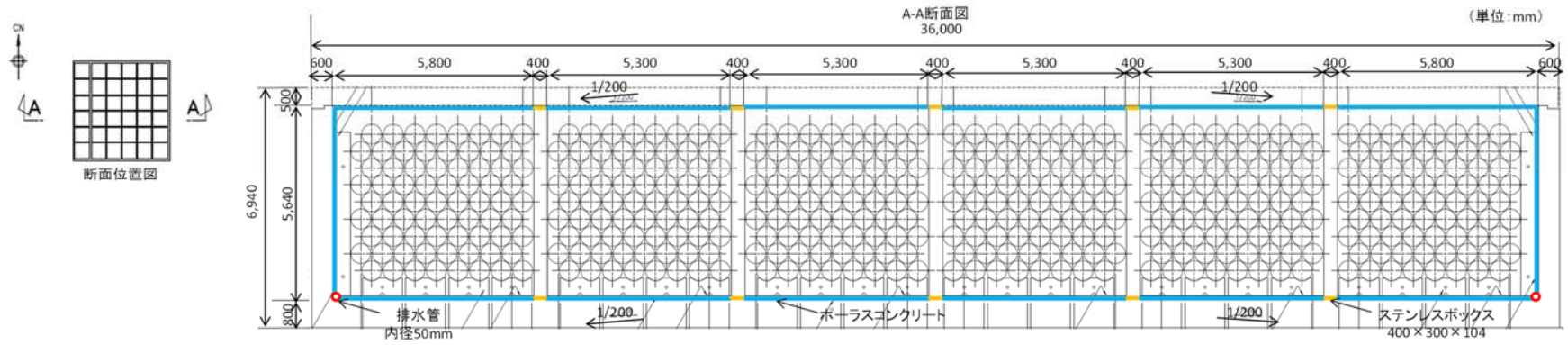
第4図 排水・監視設備配置断面図 (1号)



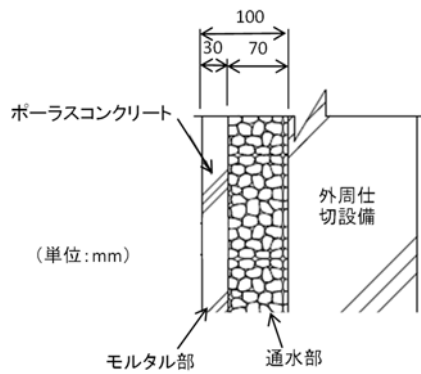
第5図 ポーラスコンクリート詳細図(1号)



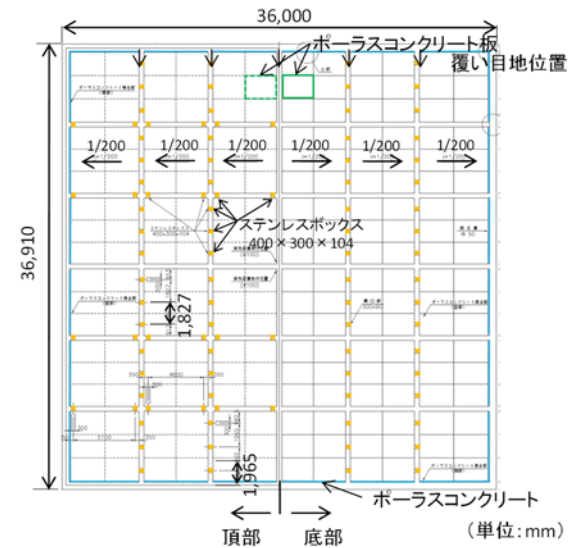
第6図 ポーラスコンクリート・開口ブロック、ポーラスコンクリートブロック平面配置図



第7図 排水・監視設備配置断面図 (2号)



第8図 ポラスコンクリート詳細図 (2号)



第9図 ポラスコンクリート・ステンレスボックス平面配置図

排水実績一覧表(1993年度～2018年度)(2/2)

別紙4

《凡例》
 四半期毎の排水量(赤色は240L以上)
 設置期間
 240L=20L/週×4週×3ヶ月



(単位:L) ※四捨五入した整数値を記載。「0」は0.5L未満を示す。
 各四半期に排水がないものは空欄とする。

【2号】		1992		1993		1994		1995		1996		1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018																																																							
年度	月	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3
1	A	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																								配合	ひび割れ抑制対策	鉄筋	側壁	覆い																															
	B	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																													BB ^{※1}	○	○																												
2	A	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																								BB	○	○																																	
	B	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																								BB	○	○																																	
3	A	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																								BB	○	○																																	
	B	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																								BB	○	○																																	
4	A	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																								BB	○	○																																	
	B	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																								BB	○	○																																	
5	A	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																								MF ^{※2}	○	○	○																																
	B	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																								MF	○	○	○																																
6	A	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																								MF	○	○	○																																
	B	[Red boxes]																								[Yellow boxes]																								▽表面止水保修(底版側面)																								MF	○	○	○																																

※1 BB: 高炉セメントB種(普通ポルトランドセメント45%、高炉スラグ微粉末55%)
 ※2 MF: フライアッシュセメントC種(中庸熱ポルトランドセメント70%、フライアッシュ30%)

11

主な保修工法の概要

	表面被覆工法	注入工法	ひび割れ表面止水工法
(1) 保修概要	埋設設備の表面に発生したひび割れ(平均的なひび割れ幅:0.1~0.2mm程度)に対して、表面被覆工法による保修を実施することで、水密性の確保及び耐久性を維持することとした。 なお、幅0.2mm以上のひび割れ部は、注入工法実施後に表面被覆を施した。	埋設設備の表面の確認したひび割れ(幅0.2mm以上)に対して、樹脂系の注入材を低圧注入した。	埋設設備の表面に確認したひび割れ(幅0.2mm以上)に対して、表面をシリコンシーリング材で閉塞した。 表面被覆を実施しているものについては表面被覆材を撤去後に実施した。
(2) 工法説明	工法:アロンウォール工法 コンクリートのひび割れ表面に塗膜を構成し、ひび割れ部からの水の浸入を遮断することによりコンクリート構造物の防水性を回復させ、耐久性の低下を防止することを目的とする工法である。 	工法:注入工法(低圧) コンクリートのひび割れ部に注入材を注入し、ひび割れ部からの水の浸入を遮断することによりコンクリート構造物の水密性を回復させ、耐久性の低下を防止することを目的とする工法である。 	工法:表面シール工法 コンクリートのひび割れ表面にシリコンシーリング材を貼付し、ひび割れ部からの水の浸入を遮断することによりコンクリート構造物の防水性を回復させ、耐久性の低下を防止することを目的とする工法である。 
(3) 保修材料の選定理由	表面被覆材:屋外環境における耐久性及び原子力関連施設での実績を踏まえ、アクリルゴム系の表面被覆材を使用した。	注入材:施工性及び乾燥収縮に対する抵抗性が高い樹脂系の注入材料を使用した。	シリコンシーリング材:施工性、耐寒性、コンクリート構造物での施工実績を踏まえ、シリコンシーリング材を使用した。
(4) 保修対象箇所	底部を除く全面	覆い、側壁、底版に確認されたひび割れ	覆い、側壁、底版に確認されたひび割れ

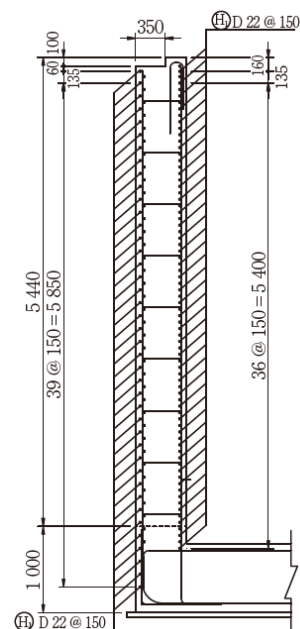
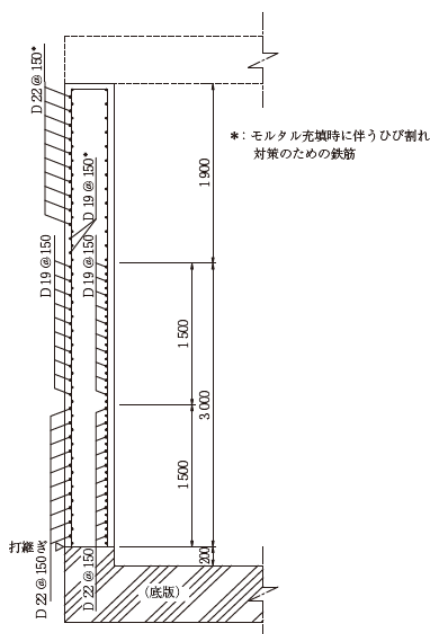
その他、覆い天端部及び側部の目地シールの交換並びに構築時に底版の断面修復を実施している。

既設備の損傷状況と改修履歴

1. ひび割れ制御鉄筋について

1号1,2群においては、コンクリートの打ち込み後、数ヶ月経過した時点から外周仕切設備側壁下部から鉛直方向にひび割れが発生した。このため、側壁のコンクリートに発生するひび割れ幅、本数を抑制する対策として、1号3群以降の埋設設備には従来の構造鉄筋（水平、鉛直ともに主鉄筋でD19@150mm）に加えD22@150mm、D19@150mmをひび割れ制御鉄筋として追加した（第1図）。また、覆い表面に対しても同様に、構造鉄筋（D16@150mm）に加えD13@150mmをひび割れ制御鉄筋として追加した。

2号埋設設備は1号埋設設備と比較し、側壁の延長が約1.5倍、高さが約1.1倍となるため、拘束条件、区画内に充填する流動性の高いモルタルの充填圧の影響が厳しくなることが想定された。このため1号で蓄積したひび割れ実測データや、最新の知見を踏まえて、平均ひび割れ幅0.04mm以下、最大ひび割れ幅0.2mm以下を目標とし、構造鉄筋D19@150mm（水平、鉛直方向）に加え、ひび割れ制御鉄筋D22@150mm（水平方向）を追加した（第2図）。



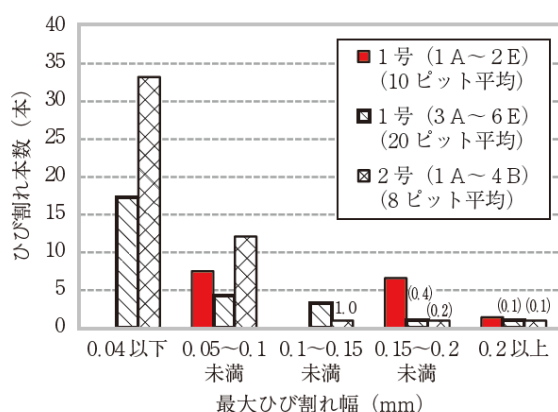
第1図 1号埋設設備3群から6群側壁の配筋図

第2図 2号埋設設備側壁の配筋図

2. ひび割れ制御鉄筋の効果

ひび割れ制御鉄筋が配置されていない1号(1A~2E)と、ひび割れ制御鉄筋を配置した1号(3A~6E)、2号(1A~4B)のひび割れ幅、本数について比較した。埋設設備に実際に発生した最大ひび割れ幅と1基当たりの平均ひび割れ本数を第3図に示す。側壁の打ち込み後、数ヶ月経過した頃から外周仕切設備側壁下部から鉛直方向にひび割れが発生した。これは温度降下に起因するものと考えられる。また、側壁施工から1年程度経過後において、充填材施工後、数日~4週間以内に、ひび割れが発生しており、それらはモルタル充填圧によるものと推測された。

1号(1A~2E)の最大ひび割れ幅は0.2mm以上、平均ひび割れ幅は0.13mmであった。これに対して、1号(3A~6E)の最大ひび割れ幅は0.2mm未満、平均ひび割れ幅は0.06mmとなった。また、1号より側壁長さが長い2号埋設設備の最大ひび割れ幅は、部分的に0.2mm以上が発生しているが、平均ひび割れ幅は0.05mmであった。設計したひび割れ制御鉄筋により、所要のひび割れ抑制効果が得られた。



第3図 最大ひび割れ幅と1基当たりの平均ひび割れ本数 (ひび割れ制御鉄筋効果比較)

3. コンクリート配合について

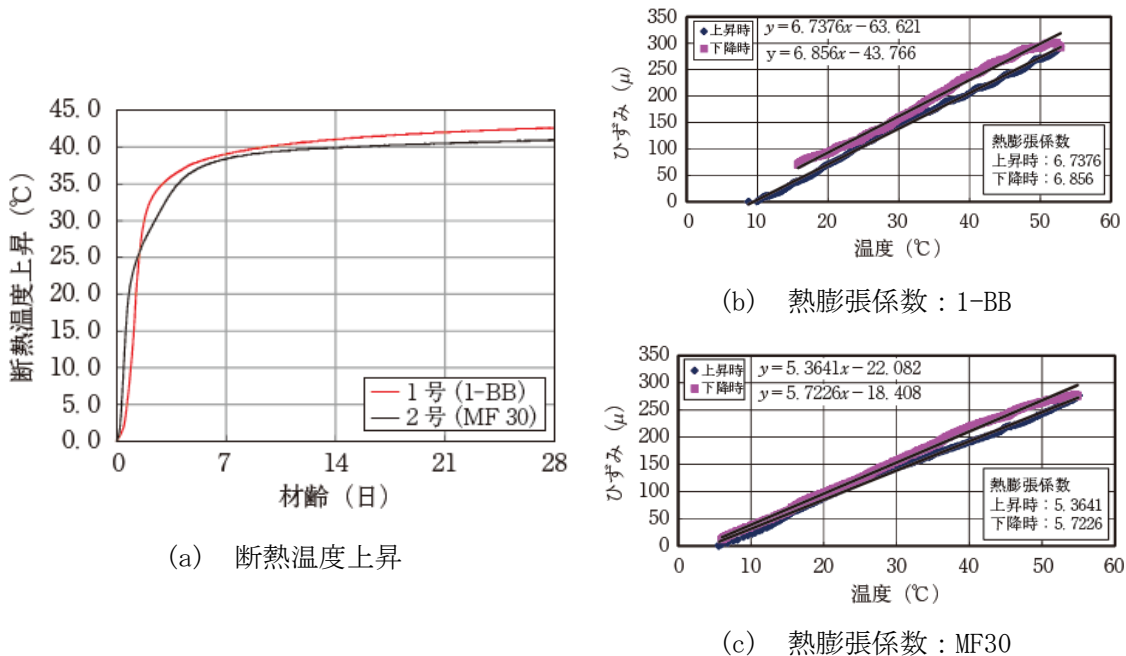
1号埋設設備では高炉スラグ配合(1-BBと称す)を、2号1A~4B埋設設備では、高炉スラグ配合(2-BBと称す)を使用していたが、ひび割れ抑制の向上のため、2号5A~8B埋設設備では、中庸熱セメント(フライアッシュ30%置換、MF30と称す)を使用した。変更前後の配合を第1表に、1-BB配合とMF30配合の熱種物性を第4図に示す。1-BB配合と比較して、断熱温度上昇特性はMF30配合と1-BB配合ともあまり変わらないが、

熱膨張係数はMF30配合の方が小さい結果であることから、温度変化によるひずみ量が小さくなり性能向上が期待できる。

第1表 埋設設備に用いたコンクリートの配合表

埋設施設	配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位数 (kg/m ³)								
				水 (W)	結合材 (B)			石灰石微粉末	細骨材 (S)		粗骨材 (G)	
					BB	MF 30	EX		LS	砕砂		陸砂
1号	1-BB	55.0	46.9	153	249	-	30	-	-	533	355	1 023
2号	1A~4B	53.7	45.8	145	240	-	30	-	-	530	354	1 048
	5A~8B	MF 30	46.5	44.1	155	-	318	15	60	313	470	999

BB：高炉セメントB種，MF 30：中層熱フライアッシュセメント，EX：膨張材



第4図 コンクリートの熱物性比較

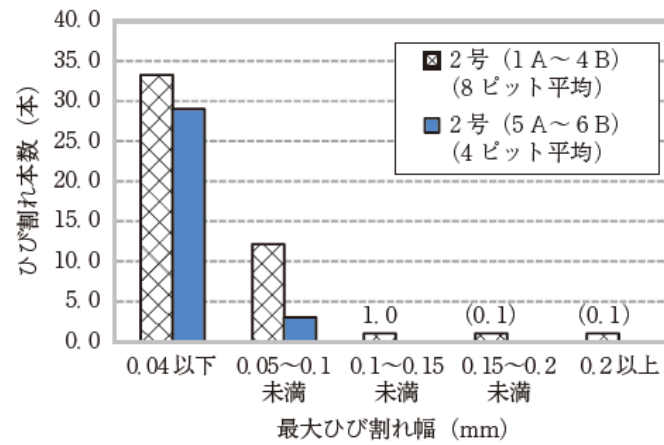
4. コンクリート配合の効果

配合変更によるひび割れ抑制効果について実測により評価した。最大ひび割れ幅と1基当たりの平均ひび割れ本数を第5図に示す。

2-BB配合では、最大で0.2mm幅程度のひび割れが発生しているのに対し、MF30配合では最大ひび割れ幅は0.08mm程度となっており、配合変更によるひび割れ抑制効果が確認された。

なお、2号埋設設備におけるひび割れ制御鉄筋は同一仕様であることから、ひび割

れ発生状況の相違は、主に配合変更の効果であるといえる。



第5図 最大ひび割れ幅と1基当たりの平均ひび割れ本数（配合変更効果比較）

外周仕切設備底版からの地下水の浸入の可能性について

1. 概要

本資料では、埋設設備への水の浸入経路のうち、底版からの浸入の可能性について検討する。

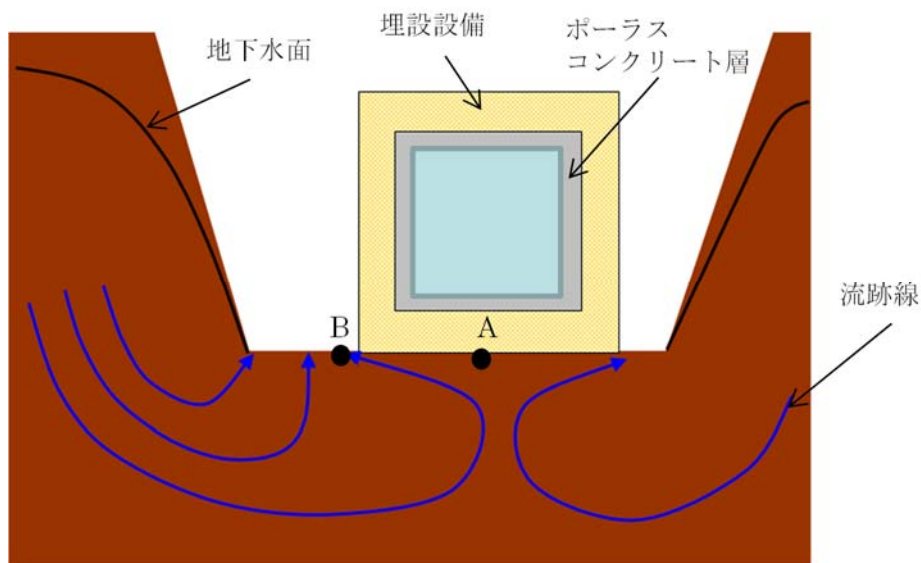
埋設設備は、廃棄物埋設地を掘削し、掘り下げた岩盤の上に設置している。外周仕切設備底版(以下「底版」という。)の上に設置する底部のポーラスコンクリート層は、掘削底面よりも高い位置(底版厚さとして1号で約60cm、2号で約80cm)にある。

地下水位の低い覆土前の期間は、地下水は、掘削底面よりも高い位置にある底版上のポーラスコンクリート層に容易に浸入しないと考えられる。しかし、埋設設備は岩盤を掘り込んで設置し、低透水の底版が広く広がっていることから、底版下部の水頭(地下水圧)が上昇し、底版にひび割れが存在した場合は、底部のポーラスコンクリート層に地下水が浸入する可能性が否定できない。

2. 底版から地下水が浸入するメカニズム

(1) 一般論

一般的に周辺の地下水位が高い領域を掘削し、地下水や雨水を排水することにより、地下水位は掘削底面付近まで低下する。掘削した廃棄物埋設地も同様に掘削底面まで地下水位が低下した状態である。掘削完了し、埋設設備の構築後の地下水流動場の概念図を第1図に示す。廃棄物埋設地の掘削底面は上方が開放されているため湧水箇所(B点)となるが、埋設設備底版が設置される範囲(1基当たり1号では約24m×約24m、2号では約36m×約37m)は低透水のコンクリートにより塞がれるため、地下水が湧水できない。埋設設備底版の下では地下水が湧水できないことから、埋設設備底版下から上方が開放されている湧水箇所(B点)まで岩盤内を横方向に地下水が流動する。このため、図のように、埋設設備底版中央部(A点)は、湧水可能な箇所から距離があることから、埋設設備の中央部に行くほど水頭(間隙水圧)が高くなる傾向にある。この場合、底版コンクリートに貫通ひび割れがあり、ポーラスコンクリート層の位置以上の高い水頭が作用すると、そこから底部のポーラスコンクリート層に水が浸入する可能性がある。



A点の水圧がB点より高くなる

第1図 地下水流動の概念図

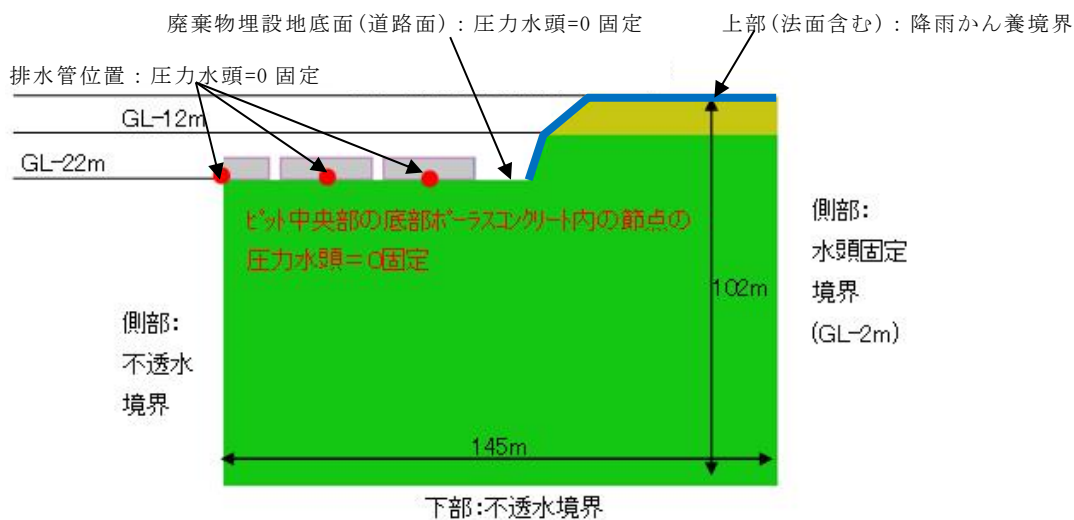
(2) 解析による地下水位の分布

1号埋設設備を対象として、埋戻前の全水頭(間隙水圧)の分布を求めるため、地下水流動解析を実施した。

(i) 解析条件及び解析モデル

1号埋設設備を対象として、東西方向断面で2Dモデル解析を実施した。解析モデルを第2図、各部位の透水係数を第1表に示す。

境界条件については、第2図に示すとおり、左側側部は対象モデルであることから不透水境界、右側側部は水頭固定境界、モデル下部は不透水境界、廃棄物埋設地法面を含む上部は降雨かん養境界、廃棄物埋設地底面(道路面)及び廃棄物埋設地底面の排水管位置(中央部1か所)には圧力水頭0に固定した水頭固定境界を設定した。埋設設備の表面については、降雨を考慮せず不透水境界とした。



第 2 図 解析モデル図

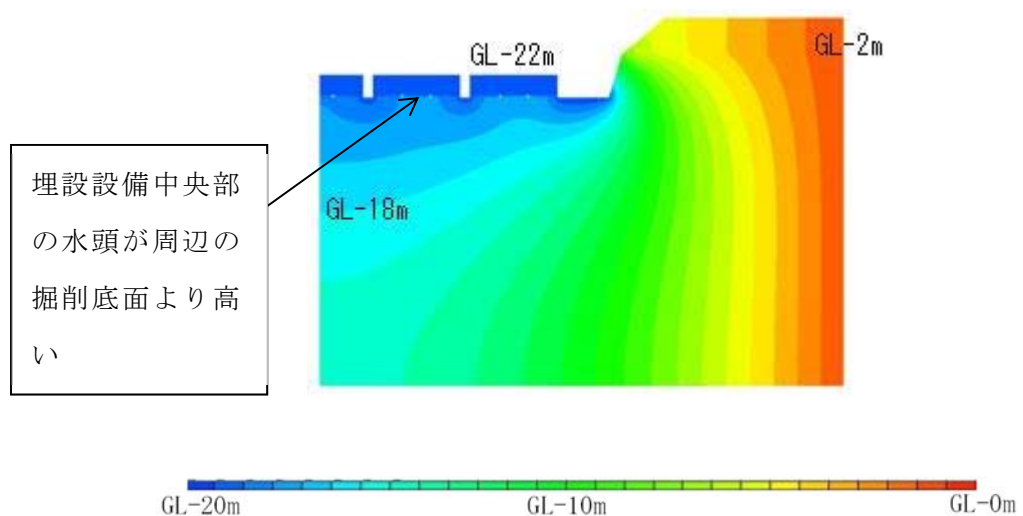
第 1 表 透水係数の設定値

部位	透水係数
鷹架層(岩盤)	1×10^{-7} (m/s)
埋設設備コンクリート 廃棄体+セメント系充填材	1×10^{-12} (m/s)
埋設設備底版内のひび割れ (想定)	8.7×10^{-7} (m/s) (幅 0.3mm、2 か所、貫通)
ポーラスコンクリート層	1.0×10^{-3} (m/s) (幅 0.1m)

(ii) 解析結果

地下水流動解析により、掘削した状態の廃棄物埋設地近傍の全水頭分布の解析結果を第 3 図に示す。本解析では、濃い青色の埋設設備の中央部は周辺の掘削底面よりも水頭が高くなる傾向が確認できる。廃棄物埋設地はすり鉢状の掘削地であり、周辺の地下水は掘削地に向かって流動し、掘削底面では下から上への地下水流動も発生している。埋設設備底面付近では、埋設設備底版が鉄筋コンクリー

ト製の低透水性材料であることから、それ以外の廃棄物埋設地底面(道路面)が湧水箇所となる。このため、埋設設備底面では湧水箇所に向かって流動する傾向になる。埋設設備底面中央部の水頭が高くなることから、底版コンクリートに貫通ひび割れを想定しポーラスコンクリート層内(排水管位置)に圧力水頭0の境界条件を設定すると、埋設設備内に地下水が浸入する現象がみられる。このような条件設定下の解析結果では、底版に貫通ひび割れがあった場合、ポーラスコンクリート層に地下水が浸入する可能性があることを示している。



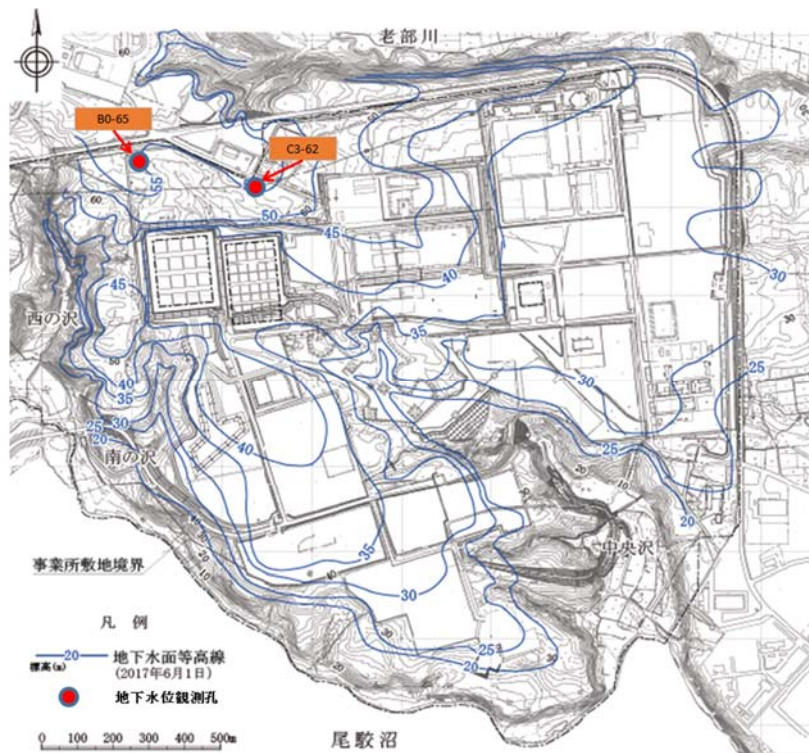
第3図 全水頭分布の解析結果(コンターピッチ: 1m)

3. 地下水の観測結果と排水量の関係

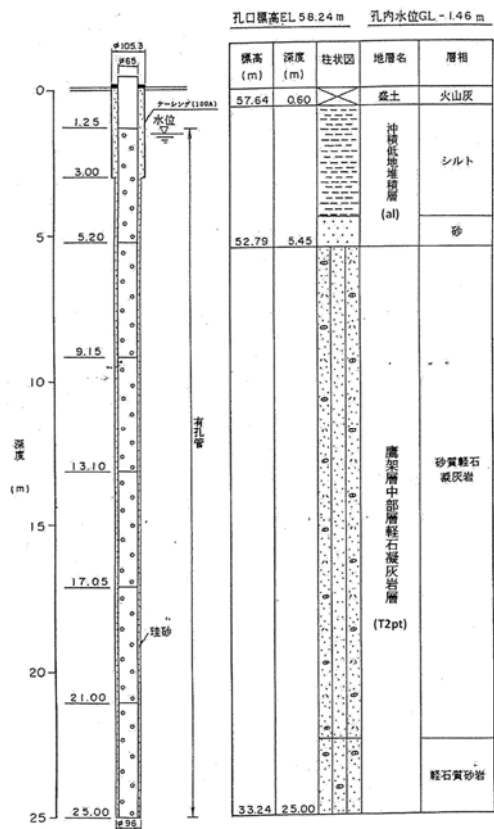
以下に、地下水位の観測結果と排水・監視設備からの排水量の関係を示す。

地下水位の観測位置を第4図に示す。次に井戸(観測孔)の構造図を第5図に示す。計測方法としては、孔内に圧力センサー方式の水位計を設置して自動計測した。

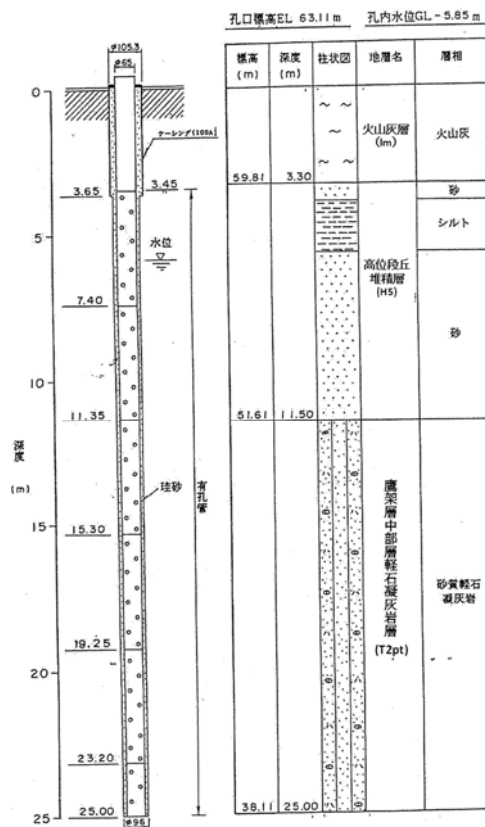
地下水位が高いときは降雨量も多いことが一般的であるが(第6図)、排水・監視設備からの排水量と降雨及び地下水との間に相関があるか明確にはわからなかった。なお、2号1-Aの12月26日から1月4日にかけて、排水量の増加が見られるが(第7図及び第8図)、12月26日は8日間の排水量、1月4日は10日間の排水量、1月7日は3日間の排水量となっていることが要因であり、水の浸入量については、目立った変化ではない。



第4図 地下水位の観測位置図

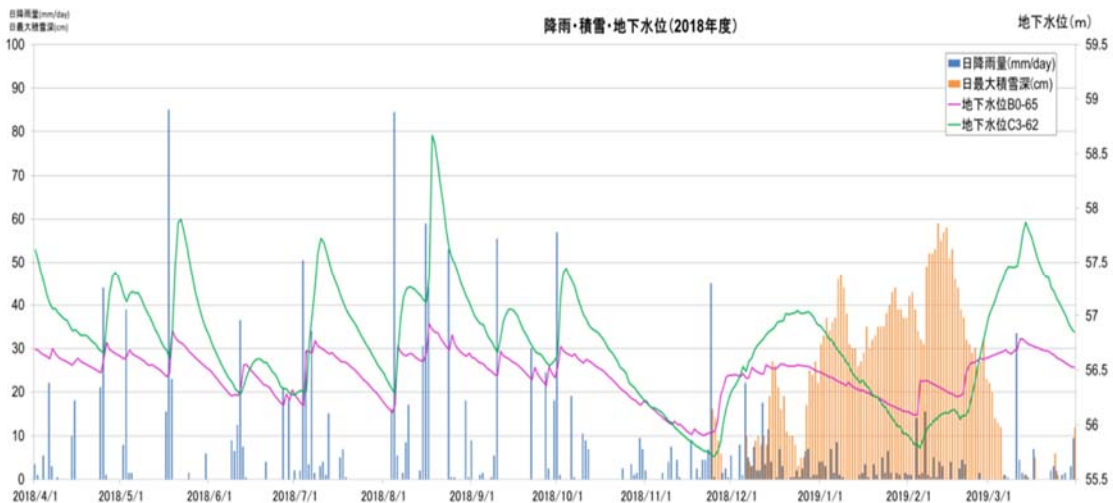


B0-65

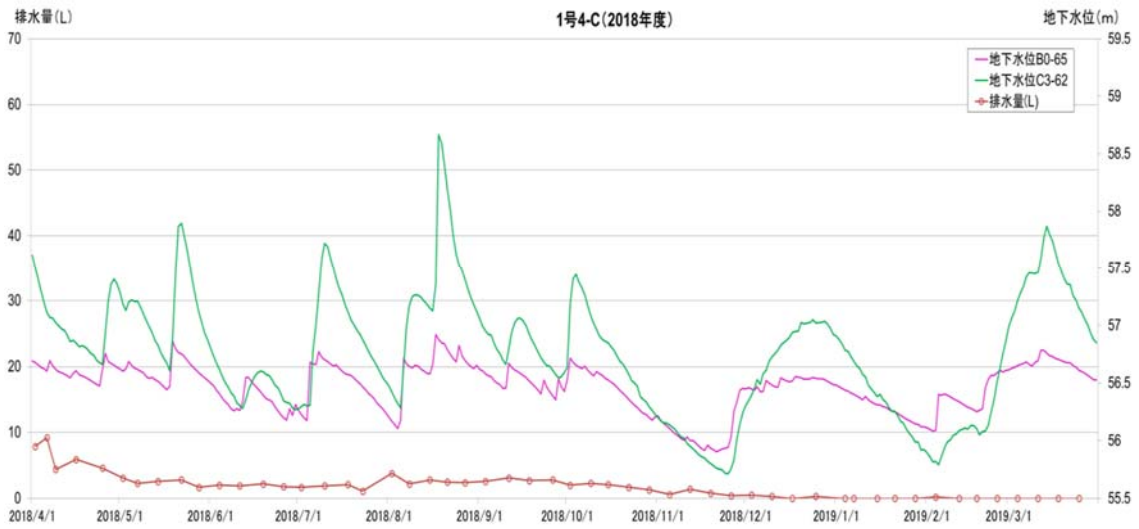


C3-62

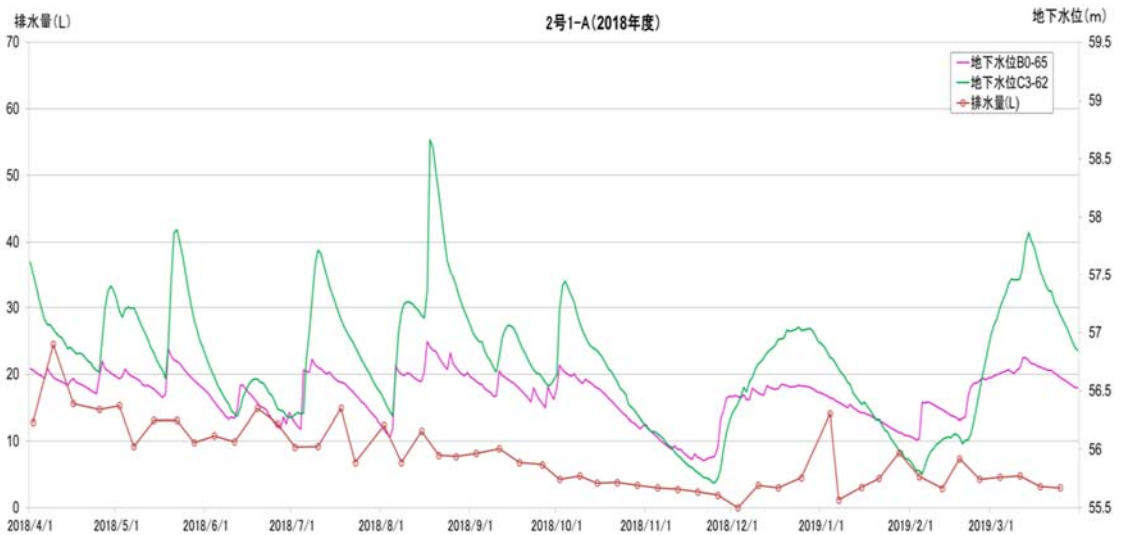
第5図 井戸(観測孔)の構造図



第6図 降雨・降雪・地下水の関係(2018年度)

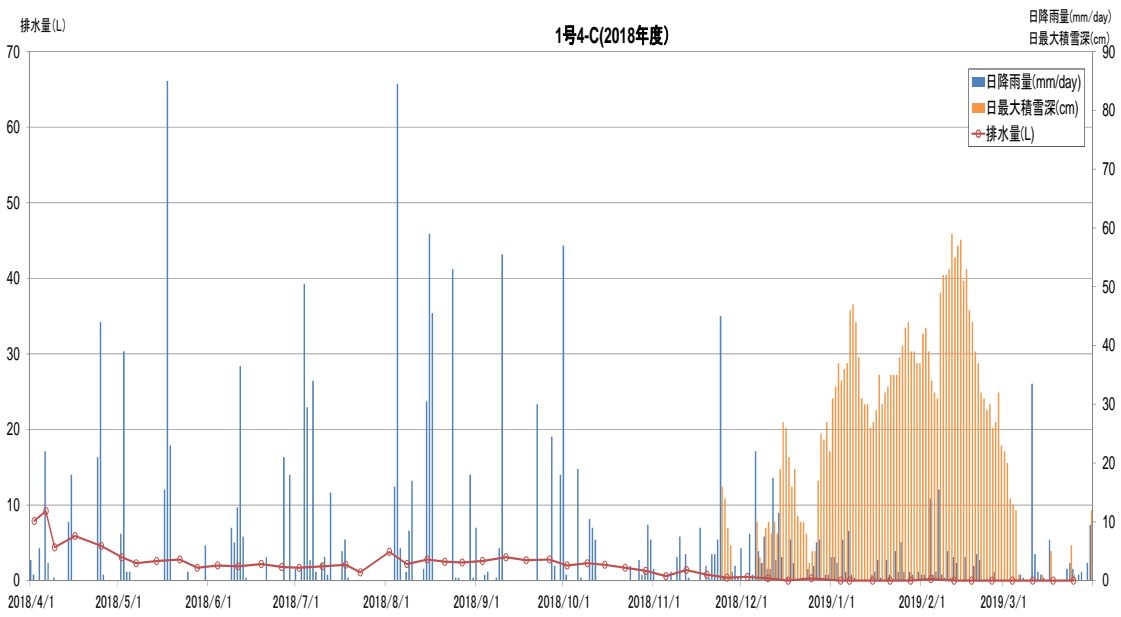


1号4-C

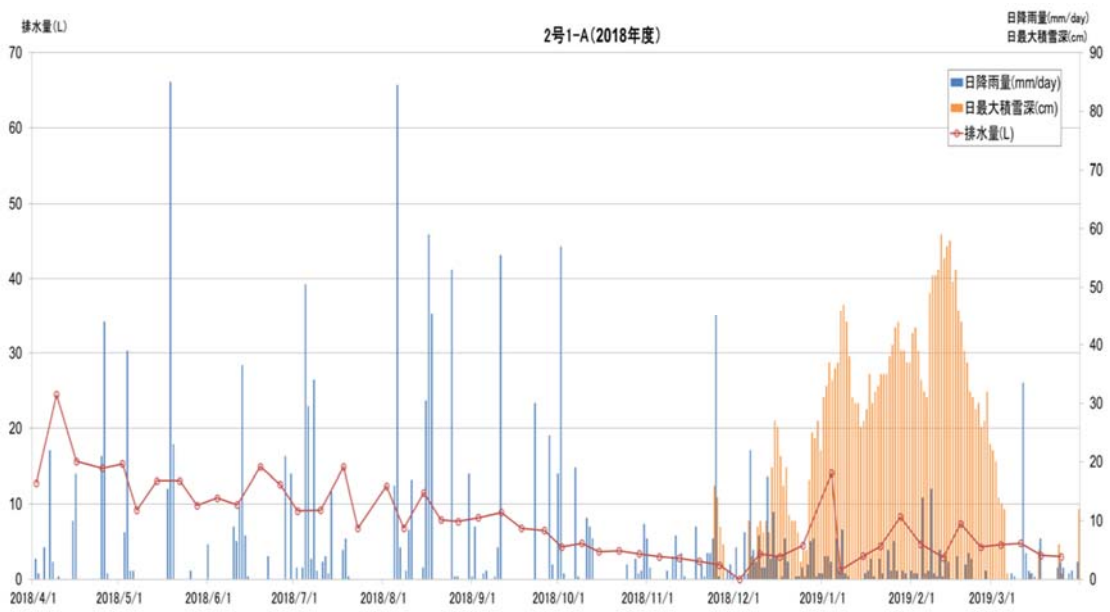


2号1-A

第7図 地下水位と排水量の関係(2018年度)



1号 4-C



2号 1-A

第8図 降雨量、積雪量と排水量の関係(2018年度)

4. 底版にひび割れが発生する可能性

(1) 底版のひび割れの観察結果

1号については、底版打設後に底版上面にひび割れは確認されていない。

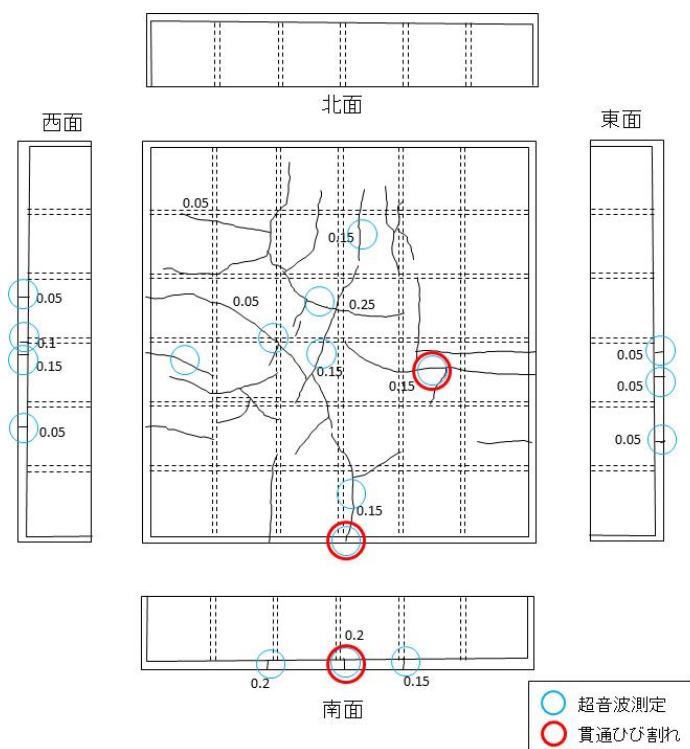
2号については、1-Aで底版にひび割れが確認されたことから、2号2-A及び2-Bで底版打設後に底版のひび割れ観察を実施した(第9図及び第10図)。

ひび割れ幅は最大で0.25mm、一部のひび割れでは超音波測定結果から貫通していると判断した。そのため、3群以降では温度収縮や自己収縮を小さくすることを目的に底版コンクリートに膨張材を添加することとした。

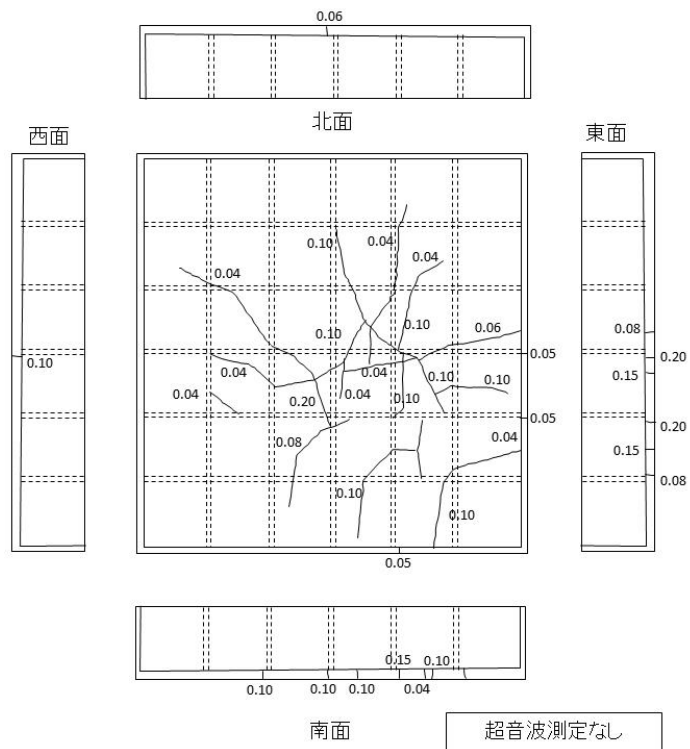
2号3-Aでも同様に底版打設後にひび割れ観察を実施した結果、膨張材添加効果として、ひび割れの抑制を確認した(第11図)。

なお、2号1-A、2-A及び2-Bに発生した底版上面のひび割れに対しては、保修を実施している。

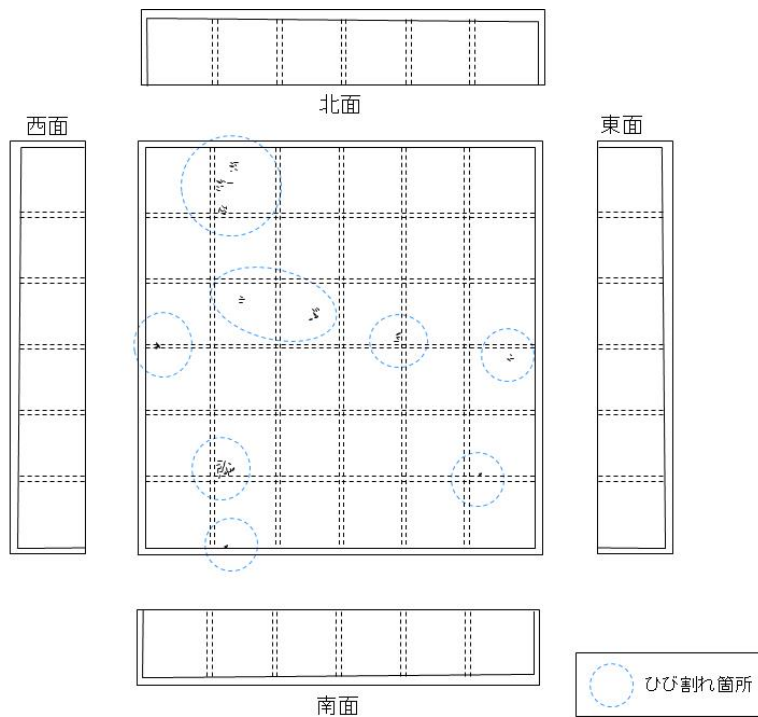
1号にひび割れが確認されなかった理由として、1号の寸法が2号の約2/3程度であることから、2号に比べて収縮変形量が相対的に小さいため、ひび割れの発生が抑制された可能性も考えられる。



第9図 2号2-A(底版コンクリート打設17日後)



第 10 図 2号 2-B(底版コンクリート打設 22 日後)



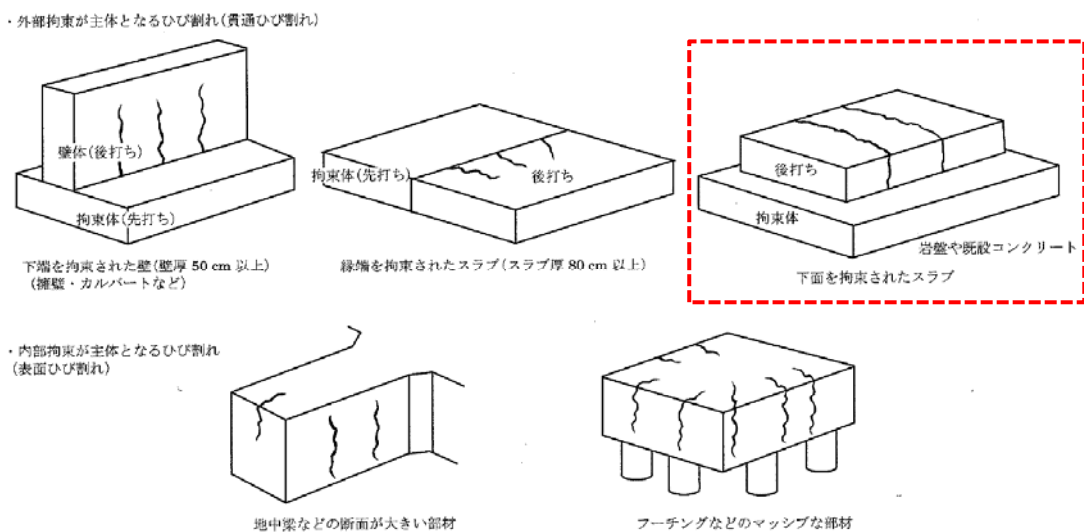
第 11 図 2号 3-A(底版コンクリート打設 35 日後)

(2) 底版に発生するひび割れ原因の推定

ひび割れ観察記録によれば、底版コンクリート打設後 8 日に側面中央部で確認し、その後底版上面でも確認している。ひび割れ発生時期は、おおむね打設後 2 週間以内に発生しているものが大半であり、ひび割れ発生タイミングがコンクリート内部の温度上昇から下降に転じ、外気温と同等になるまでの期間と一致する。

また、底版はコンクリート自身の収縮変形が下面の岩盤等に拘束される条件を有していることを考慮すれば、発生したひび割れの原因は「水和熱」及び「自己収縮」によるものと推察される。

なお、「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針」⁽¹⁾に示されるひび割れ原因推定方法に準拠した検討を実施した場合でも、同様の原因に該当、絞り込みできる。同指針に示される水和熱によるひび割れ発生パターンは第 12 図に示すとおりであり、今回 2 号 2 群に発生したひび割れは下面を拘束されたスラブに発生するとされているパターン(右上図)に合致する。



第 12 図 ひび割れ模式図⁽¹⁾

5. まとめ

掘削した廃棄物埋設地に埋設設備を設置していることから、埋設設備の底版下部の水頭が高くなる可能性がある。

2 号 1, 2 群について、底版に貫通ひび割れが確認され、その後 3 群以降については

ひび割れを低減させる対策を取ってきているが、底版にひび割れがあれば地下水が浸入する可能性は否定できない。

これまでの排水量の実績から、1基当たり、多くても2L/日～3L/日程度と埋設設備の規模の割には非常に少ないものであり、地下水位及び降雨量の観測結果と排水量との相関は明確ではない。

以 上

参考資料

- (1) 日本コンクリート工学会(2013):コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013-

排水中のトリチウム濃度を用いた
漏出防止評価について

目 次

1. 目的.....	1
(1) 評価モデル・条件.....	1
(2) 評価結果.....	8

1. 目的

漏出防止機能を確保する期間中は、排水・監視設備により排水し続けることにより、廃棄体周囲のモルタル層は不飽和状態となる。しかし、仮に設計で想定した状態とならず、ポーラスコンクリート層の排水能力以上の水が浸入した状態でポーラスコンクリート層が常時飽和して廃棄体周囲のモルタル層も飽和状態となった場合には、ドラム缶へ水が流入する可能性があることから、流入した場合のポーラスコンクリート層における放射能濃度を参考に評価した。

(1) 評価モデル・条件

埋設設備上部からポーラスコンクリート層に浸入した雨水が充填モルタルに発生した亀裂内を流れて、廃棄体の上部空隙内に滞留することを想定する。廃棄体へ到達した水は、ドラム缶蓋部から入り込み、放射性物質と接触し、廃棄体上部空隙内に滞留する水へ拡散により移行すると想定する。さらに、廃棄体の周囲の充填モルタル、廃棄体部分と排水・監視設備であるポーラスコンクリート層の間にある充填モルタル層(以下「ホワイトゾーン(WZ)」という。)(亀裂を含む)も拡散によって移行し、ポーラスコンクリート層へ到達することを想定し、以下のようにモデル化する。

廃棄体内部の固型化部分は拡散で移行し、廃棄体上部の空隙部分のたまり水部分は均一混合層とする。上部空隙に留まった水が移流によって移行することは想定しない。

放射性物質と接触した水は、ドラム缶蓋部の間隙を通過後に、廃棄体周囲の充填モルタル層に入るため、瞬時に廃棄体周囲の充填モルタルと平衡状態になると想定し、均一混合セルとする。

次に、放射性物質はホワイトゾーンに移行するため、ホワイトゾーンは、ひび割れ部分とひび割れのない健全部の2経路が並行して存在するとする。

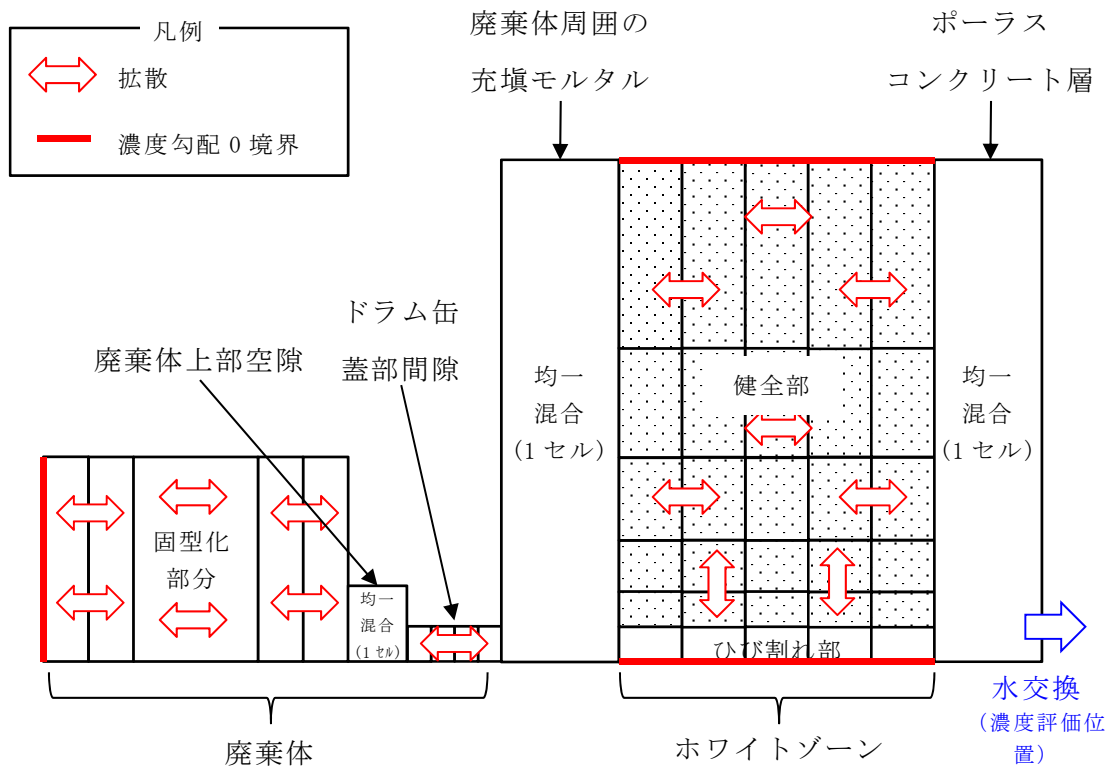
最後に、排水・監視設備のポーラスコンクリート層へ移行するため、ポーラスコンクリート層は均一混合層とする。

ホワイトゾーンのひび割れ部が移流場であるとしても、健全部を含めた全体系では、ひび割れ部は限られた部分的なものであり、水が流れ難いことには変わりはなく、放射性物質の移行は拡散が支配的であると考えられることを踏まえてモデル化して

いる。

なお、ホワイトゾーンのひび割れ部については、移流によってトリチウムが移行することを否定できないことから、参考として移流を模擬した評価も行う。

モルタル層は充填性が良く、亀裂も少ないことから、ポーラスコンクリート層を流れる水が廃棄体内部に到達する割合は極めて少ないと考えられる。仮に、埋設したドラム缶のうち1%のドラム缶に水が到達とした場合の評価を、拡散により移行しやすいトリチウムを対象に行う。拡散による移行のモデルを第1図に、評価に使用したパラメータを第1表及び第2表に示す。



第1図 拡散移行評価モデル概念図

(i) 廃棄体(固型化部分)

$$\varepsilon Rf(i) \frac{\partial C(x, t, i)}{\partial t} = De \frac{\partial^2 C(x, t, i)}{\partial x^2} - \lambda(i) \varepsilon Rf(i) C(x, t, i)$$

$$Rf(i) = 1 + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \rho K_d(i)$$

$$C(x, 0, i) = \frac{A_0(i)}{\varepsilon Rf(i) V_w}$$

$$\left. \frac{\partial C(x, t, i)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad C(L, t, i) = C_v(t, i)$$

(ii) 廃棄体上部空隙(均一混合)

$$V_v \frac{dC_v(t, i)}{dt} = -S_w De \left. \frac{\partial C(x, t, i)}{\partial x} \right|_{x=L} + S_a D_0 \left. \frac{\partial C_a(x_a, t, i)}{\partial x_a} \right|_{x_a=0} - V_v \lambda(i) C_v(t, i)$$

$$C_v(0, i) = 0, \quad C_a(0, t, i) = C_v(t, i)$$

(iii) ドラム缶蓋部間隙

$$\frac{\partial C_a(x_a, t, i)}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C_a(x_a, t, i)}{\partial x_a^2} - \lambda(i) C_a(x_a, t, i)$$

$$C_a(x_a, 0, i) = 0, \quad C_a(L_a, t, i) = C_m(t, i)$$

(iv) 廃棄体周囲の充填モルタル(均一混合)

$$\begin{aligned} V_m \varepsilon_m Rf_m(i) \frac{dC_m(t, i)}{dt} \\ = -S_a D_0 \left. \frac{\partial C_a(x_a, t, i)}{\partial x_a} \right|_{x_a=L_a} + \int_0^{L_c} S_m(y) De_w(y) \left. \frac{\partial C_w(x_w, y, t, i)}{\partial x_w} \right|_{x_w=0} dy \\ - V_m \varepsilon_m Rf_m(i) \lambda(i) C_m(t, i) \end{aligned}$$

$$C_m(0, i) = 0, \quad C_m(t, i) = C_w(0, y, t, i)$$

(v) ホワイトゾーン

$$\begin{aligned} & \varepsilon_w(y)Rf_w(y,i)\frac{\partial C_w(x_w,y,t,i)}{\partial t} \\ &= De_w(y)\frac{\partial^2 C_w(x_w,y,t,i)}{\partial x_w^2} + De_w(y)\frac{\partial^2 C_w(x_w,y,t,i)}{\partial y^2} \\ & \quad - \lambda(i)\varepsilon_w(y)Rf_w(y,i)C_w(x_w,y,t,i) \\ Rf_w(y,i) &= 1 + \frac{1-\varepsilon_w(y)}{\varepsilon}\rho_w(y)Kd_w(y,i) \end{aligned}$$

$$C_w(x_w,y,0,i) = 0, \quad C_w(L_w,y,t,i) = C_p(t,i)$$

$$\left. \frac{\partial C_w(x_w,y,t,i)}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial C_w(x_w,y,t,i)}{\partial y} \right|_{y=L_c} = 0$$

(vi) ポーラスコンクリート層

$$V_p \frac{dC_p(t,i)}{dt} = -Q C_p(t,i) - \int_0^{L_c} S_m(y)De_w(y)\left. \frac{\partial C_w(x_w,y,t,i)}{\partial x_w} \right|_{x_w=L_w} dy - V_p\lambda(i)C_p(t,i)$$

$$C_p(0,i) = 0$$

$C(x,t,i)$	固化体中の位置 x 、時間 t における核種 i の間隙水中濃度 (Bq/m ³)
$C_p(t,i)$	廃棄体上部空隙水たまりの時間 t における核種 i の濃度 (Bq/m ³)
$C_a(x_a,t,i)$	ドラム缶蓋隙間部の位置 x_a 、時間 t における核種 i の水中濃度 (Bq/m ³)
$C_m(t,i)$	廃棄体間モルタル中の時間 t における核種 i の間隙水中濃度 (Bq/m ³)

$C_w(x_w, y, t, i)$	ホワイトゾーン内の位置 (x_w, y) 、時間 t における核種 i の間隙水中濃度 (Bq/m ³)
$C_p(t, i)$	ポーラスコンクリート層水中の時間 t における核種 i の濃度 (Bq/m ³)
$\varepsilon, \varepsilon_m, \varepsilon_w(y)$	固化体、廃棄体間モルタル及びホワイトゾーンひび割れ面から鉛直方向位置 y の間隙率 (-)
$\rho, \rho_m, \rho_w(y)$	固化体、廃棄体間モルタル及びホワイトゾーンひび割れ面から鉛直方向位置 y の粒子密度 (kg/m ³)
$Rf(i), Rf_m(i), Rf_w(y, i)$	固化体、廃棄体間モルタル及びホワイトゾーンひび割れ面から鉛直方向位置 y の核種 i の遅延係数 (-)
$Kd(i), Kd_m(i), Kd_w(y, i)$	固化体、廃棄体間モルタル及びホワイトゾーンひび割れ面から鉛直方向位置 y の核種 i の分配係数 (m ³ /kg)
V_w, V_v, V_m, V_p	固化体、廃棄体上部空隙水たまり、廃棄体間モルタル及びポーラスコンクリート層滞留水の全体積 (m ³)
$S_w, S_a, S_w(y)$	固化体、ドラム缶蓋隙間部、ホワイトゾーンひび割れ面から鉛直方向位置 y の微小区間の全断面積 (m ²)
$De, D_0, De_w(y)$	固化体、ドラム缶蓋隙間部、ホワイトゾーンひび割れ面から鉛直方向位置 y の実効拡散係数 (m ² /s)
L, L_a, L_c, L_w	固化体、ドラム缶蓋隙間部、ホワイトゾーンの厚さ (m)
Q	ポーラスコンクリート層の交換水量 (m ³)
$\lambda(i)$	核種 i の崩壊定数 (1/s)

第1表 評価パラメータ(1号)

パラメータ		単位	値	備考
トリチウム放射エネルギー		Bq	3.10×10^{10}	1-6群の放射エネルギー/基数
ドラム缶の直径		m	0.567	JIS-Z1600(1993)
ドラム缶の高さ		m	0.8332	JIS-Z1600(1993)
ドラム缶の厚さ		m	1.6×10^{-3}	JIS-Z1600 (開口部拡散長さとしても利用)
ドラム缶の開口幅		m	1×10^{-3}	ドラム缶天蓋部と胴体部の寸法差
埋設設備数		基	1	
埋設設備内の区画数		区画/基	16	
1区画当たりの廃棄体本数		本/区画	320	
廃棄体1本当当たりの固型化材料の平均充填量		m ³ /本	0.14	
廃棄体上部空隙の長さ		m	0.1	上部空隙率30%以下であるが、保守的に濃度勾配が大きくなるよう充填固化体と同じ値を設定
埋設設備の寸法	長さ	m	24.40	
	幅	m	24.40	
	高さ	m	6.200	
	覆い(上部)厚さ	m	0.50	
	底版(下部)厚さ	m	0.60	
	側壁厚さ	m	0.50	
ポーラスコンクリート厚さ		m	0.10	
ホワイトゾーン(WZ)厚さ		m	0.40	
間隙率	廃棄体	—	0.35	
	モルタル(WZ)	—	0.20	
	ポーラスコンクリート	—	0.25	
粒子密度	廃棄体	kg/m ³	2,400	
	モルタル(WZ)	kg/m ³	2,500	
	ポーラスコンクリート	kg/m ³	2,500	モルタルと同等と仮定して設定
実効拡散係数	廃棄体	m ² /s	1×10^{-11}	
	モルタル(WZ)健全部	m ² /s	1×10^{-11}	
	WZひび割れ部	m ² /s	2×10^{-9}	自由水中のトリチウムの拡散係数を設定
ポーラスコンクリート浸入水量(排水量)		m ³ /y	0.75	年間排水量(施設全体:40基)を保守的に30m ³ /yと仮定し1基分の値を設定
WZひび割れ割合		—	1.89×10^{-4}	5,300mm当たりの乾燥収縮幅から1mmと設定($1/5,300 = 1.89 \times 10^{-4}$)

第2表 評価パラメータ(2号)

パラメータ		単位	値	備考
トリチウム放射エネルギー		Bq	7.50×10^{10}	放射エネルギー/基数
ドラム缶の直径		m	0.567	JIS-Z1600(1993)
ドラム缶の高さ		m	0.8332	JIS-Z1600(1993)
ドラム缶の厚さ		m	1.6×10^{-3}	JIS-Z1600 (開口部拡散長さとしても利用)
ドラム缶の開口幅		m	1×10^{-3}	ドラム缶天蓋部と胴体部の寸法差
埋設設備数		基	16	
埋設設備内の区画数		区画/基	36	
1区画当たりの廃棄体本数		本/区画	360	
廃棄体1本当たりの固型化材料の平均充填量		m ³ /本	0.1	
廃棄体上部空隙の長さ		m	0.1	上部空隙率30%以下であるが、保守的に濃度勾配が大きくなるよう充填固化体と同じ値を設定
埋設設備の寸法	長さ	m	36.00	
	幅	m	36.91	
	高さ	m	6.940	
	覆い(上部)厚さ	m	0.50	
	底版(下部)厚さ	m	0.80	
	側壁厚さ	m	0.60	
ポーラスコンクリート厚さ		m	0.10	
ホワイトゾーン(WZ)厚さ		m	0.40	
間隙率	廃棄体	—	0.35	
	モルタル(WZ)	—	0.20	
	ポーラスコンクリート	—	0.25	
粒子密度	廃棄体	kg/m ³	2,500	
	モルタル(WZ)	kg/m ³	2,500	
	ポーラスコンクリート	kg/m ³	2,500	モルタルと同等と仮定して設定
実効拡散係数	廃棄体	m ² /s	1×10^{-11}	
	モルタル(WZ)健全部	m ² /s	1×10^{-11}	
	WZひび割れ部	m ² /s	2×10^{-9}	自由水中のトリチウムの拡散係数を設定
ポーラスコンクリート浸入水量(排水量)		m ³ /y	1.875	年間排水量(施設全体:16基)を保守的に30m ³ /yと仮定し1基分の値を設定
WZひび割れ割合		—	1.89×10^{-4}	5,300mm当たりの乾燥収縮幅から1mmと設定($1/5,300 = 1.89 \times 10^{-4}$)

(2) 評価結果

(i) 線量評価

既設 1 号及び 2 号それぞれの結果を第 3 表及び第 2 図に示す。いずれの施設においても水中濃度限度を十分に下回る結果となった。この濃度の水が外周仕切設備の外に漏出した場合は、設備の外を流れる地下水で希釈され、更に濃度が下がるため、これによる環境への影響は十分に無視できると考えられる。

廃棄体内部に滞留した水が、充填モルタル、ホワイトゾーン内の亀裂内を移流によって移行し、ポーラスコンクリート層へ到達することも否定できないことから、参考としてホワイトゾーン内を拡散ではなく、移流により移行した場合の評価結果を第 4 表及び第 3 図に示す。本評価においては、廃棄体から漏出したトリチウムが速やかにポーラスコンクリート層の排水に到達するとし、ホワイトゾーンのひび割れ割合を 99.9%とし、ホワイトゾーンひび割れ部の実効拡散係数を $1.0 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$ とすることにより、簡易的に移流を模擬している。本評価においても、いずれの施設においても水中濃度限度を十分に下回る結果となった。必要に応じて、防水対策の詳細説明にあわせて、より現実的な評価を実施する。

(ii) 線量評価の妥当性確認

線量評価結果の妥当性を検証するため、ポーラスコンクリートの排水濃度を実測定にて確認した。実測結果を第 5 表に示す。その結果、環境中のトリチウム濃度と同等程度(約 $2 \times 10^3 \text{Bq}/\text{m}^3$ 若しくは測定限界の約 $4 \times 10^2 \text{Bq}/\text{m}^3$ 以下)であった。

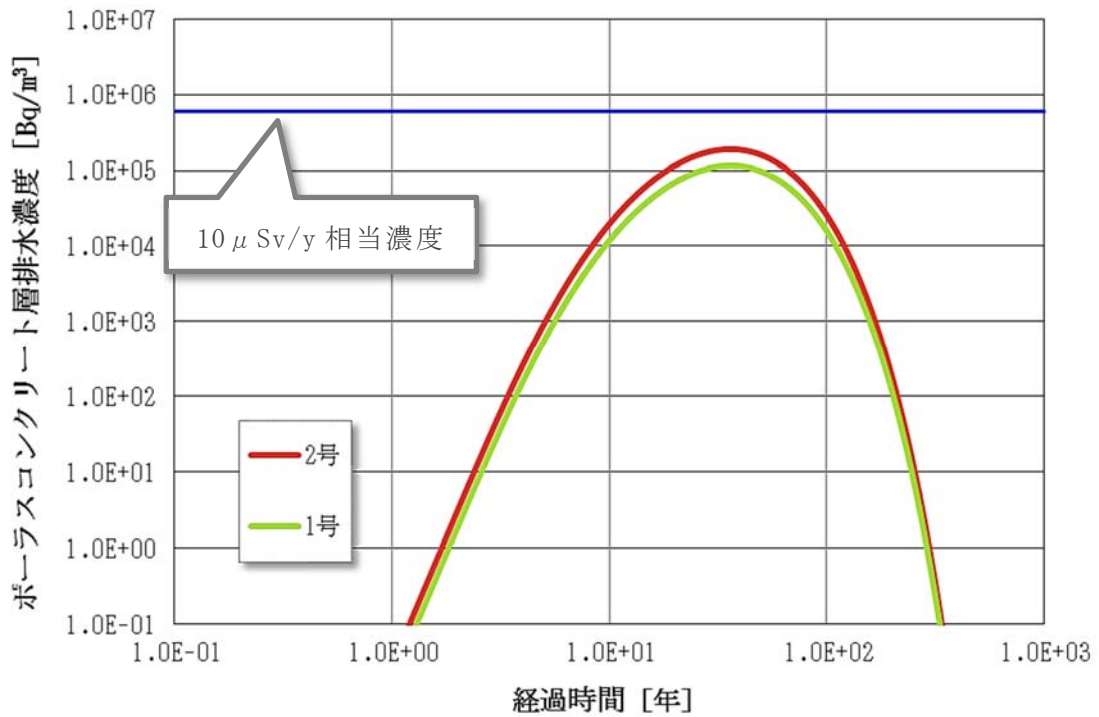
今回 $2 \times 10^3 \text{Bq}/\text{m}^3$ の濃度が測定された箇所の年間排水量は約 $0.08 \text{m}^3/\text{年}$ であったことから、解析結果が実態を表しているならば、今回の解析で用いた排水量を考慮すると実測される濃度は解析結果よりも高くなる(漏出放射エネルギーは同等)。一方で、埋設実績に基づくトリチウムの放射エネルギーは、この解析に用いた申請の放射エネルギーの 1/50 以下であること、埋設開始から 20 年以上経過し現時点が線量のピークだと仮定することもあわせて考えると、解析結果が実態を表しているとすれば、実測結果は解析結果の同程度～1 桁低い濃度となると想定している。しかし、実測結果は解析結果の約 1/100 であったことから、この評価モデルや計算に用いた廃棄体への水の到達割合、ひび割れ割合等のパラメータは十分に保守側となっていると考えられる。

第3表 排水中のトリチウム濃度の比較(拡散による移行)

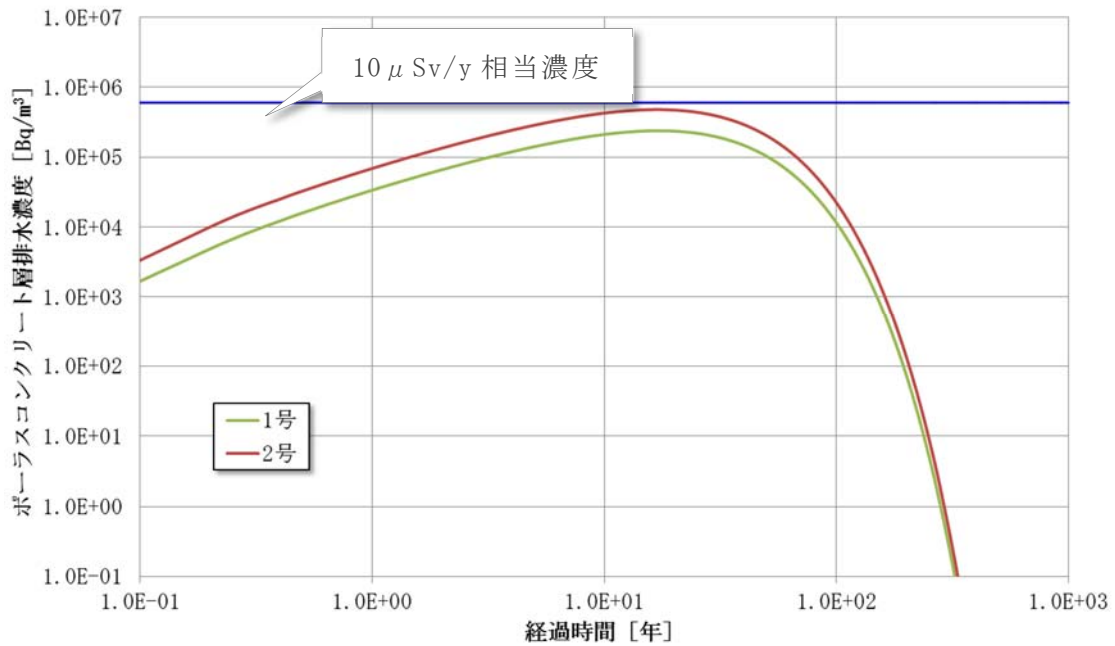
	トリチウム濃度最大値(Bq/m ³)	参考 告示濃度(Bq/m ³)
1号	1.20×10^5	6.00×10^7
2号	1.90×10^5	

第4表 排水中のトリチウム濃度の比較(移流による移行)

	トリチウム濃度最大値(Bq/m ³)	参考 告示濃度(Bq/m ³)
1号	2.38×10^5	6.00×10^7
2号	4.79×10^5	



第2図 ポーラスコンクリート排水中のトリチウム濃度(拡散による移行)



第 3 図 ポーラスコンクリート排水中のトリチウム濃度(移流による移行)

第 5 表 排水中のトリチウム濃度の実測結果*1

試料名	N 数	トリチウム放射能濃度 (Bq/L*2)	検出下限値 (Bq/L*2)
1 号 1-D 東	1	不検出	0.39
	2	不検出	0.38
	3	不検出	0.38
1 号 3-A 西	1	1.84±0.13	0.35
	2	1.80±0.14	0.38
	3	2.01±0.14	0.37
2 号 1-A 西	1	不検出	0.34
	2	不検出	0.35
	3	不検出	0.35

*1：測定値は試料の採取日時を考慮し減衰補正した。

*2：1,000Bq/m³=1Bq/L

(iii) 主なパラメータの結果への感度

今回の評価条件では結果への感度が高いパラメータは実効拡散係数及びポーラスコンクリート浸入水量であり、感度の小さいパラメータはひび割れ割合であった。ポーラスコンクリート浸入水量(排水量)の実績と計算の条件の関係は、結果に対し、実績の排水量が少ない場合は、負の相関(値が大きくなる)がある。今回の計算では $30\text{m}^3/\text{y}$ としたが、現状の排水実績は $1\text{m}^3/\text{y}$ 以下であることから、今回の計算どおりにドラム缶の蓋部からの放射性物質が漏出したとすると、実績の放射能濃度は 30 倍以上の感度で計測されると考える。

セメント系充填材の性能について

目 次

1. 概要.....	1
2. セメント系充填材の要求性能.....	1
3. 要求性能に基づく仕様(配合).....	1
4. セメント系充填材の充填性.....	3
(1) 充填性確認結果.....	3
5. セメント系充填材表面ひび割れの調査.....	5
(1) 1号3-A埋設設備における確認状況.....	6
(2) 2号6-B埋設設備における確認状況.....	7
6. セメント系充填材に発生するひび割れについて.....	9
(1) ひび割れ発生要因分析.....	9
(2) ひび割れ発生確率評価.....	12
7. 混和材選定について.....	14
(1) 膨張材について.....	14
(2) 結合材料について.....	14
8. 中規模模擬埋設設備による充填確認試験.....	15
(1) 実施概要.....	15
(2) セメント系充填材打設に伴う温度測定.....	16
(3) セメント系充填材におけるひび割れ調査.....	18
(4) セメント系充填材の物性試験結果.....	19
(5) 模擬埋設設備のひずみ測定結果.....	23
9. ドラム缶フロー試験.....	24
10. まとめ.....	25

1. 概要

セメント系充填材は、雨水及び地下水が廃棄体に接触することを抑制するために設置するものであり、有害な空隙が生じないように充填性に配慮する。また、セメント系充填材硬化後の温度応力によるひび割れの発生を抑制するため、低発熱型配合の仕様とする。

1号操業当初から、これらを配慮した充填材料として中庸熱ポルトランドセメント10%、高炉スラグ90%とした配合のモルタルを使用している。

上記のセメント系充填材は、廃棄体間の狭隙部にも充填され、廃棄体表面にも密着し、ひび割れが発生し難いことから、水が廃棄体に容易に接触することはない。

実際の埋設設備において打設表面にひび割れが確認されているが、発生しているひび割れは表面付近の限定的なものであり、内部は密実に充填されている。

2. セメント系充填材の要求性能

雨水及び地下水が廃棄体に接触することを抑制するため、有害な空隙を生じないように充填性に配慮した設計とする。

また、ひび割れにより充填部の透水性の増加が考えられることから、ひび割れを抑制するため、低発熱型の配合とした設計とする。

3. 要求性能に基づく仕様(配合)

現在使用しているセメント系充填材の配合を第1表に示す。

第1表 セメント系充填材の配合

水・ 結合 材比 W/C %	砂・ 結合 材比 S/C	単 位 量 (kg/m ³)							
		水 W	結 合 材 C		細 骨 材 S		混 和 剤		
			中庸熱 ポルトランド セメント	高炉 スラグ 微粉末	砕砂	陸砂	水中 不分 離性 混和 剤	AE 減水 剤	高性 能減 水剤
67.1	3.47	283	422		1466		1.5	0.844	6.33
			42	380	440	1026			

*1：混和剤及び細骨材の混合比は品質確認試験結果等により微調整を行う。

*2：充填性確保のため、スランプフローを75cm±10cmとする。

過去に以下のような配合変更があるが、中庸熱ポルトランドセメント10%、高炉スラグ90%という配合に変更はない。

- ①膨張材使用の取りやめ(1号3群以降)
- ②AE減水剤の添加量増加
- ③水中不分離性混和剤の変更

4. セメント系充填材の充填性

セメント系充填材の充填性については、流動性としてスランプフローで管理を行っている。スランプフローによる充填性の管理について、実規模の充填試験結果から確認した。

また、充填性の検討として、ドラム缶フロー試験も実施されている（「9. ドラム缶フロー試験」参照）。

(1) 充填性確認結果

原子力環境整備センターで実施した充填性確認試験結果⁽¹⁾を示す。この試験で用いたセメント系充填材の配合を第2表に示す。

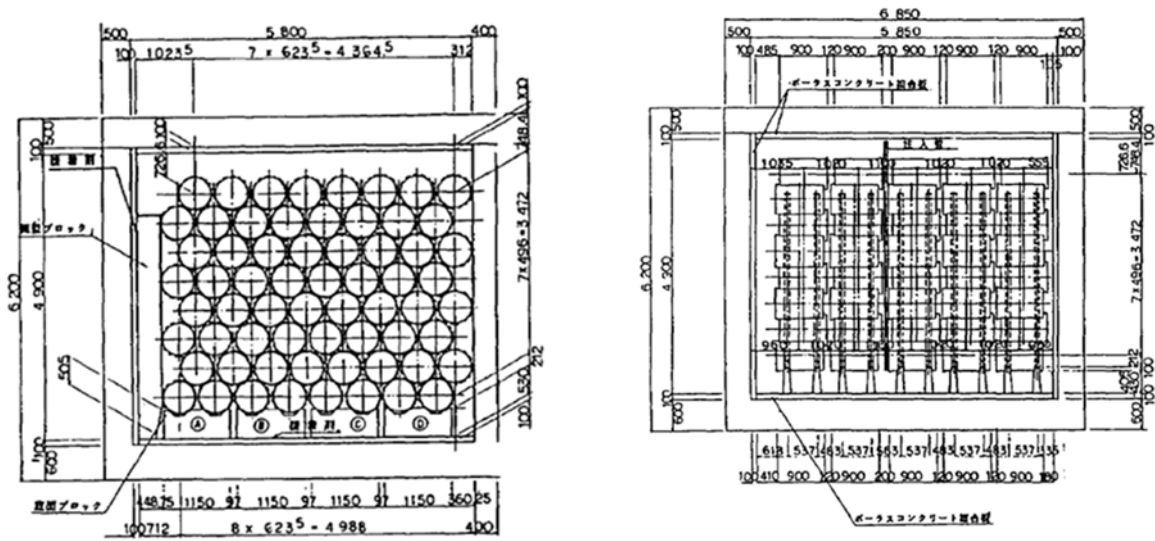
実際の埋設設備とほぼ同様の配合を用いている。

第2表 充填性確認試験におけるセメント系充填材の配合⁽²⁾

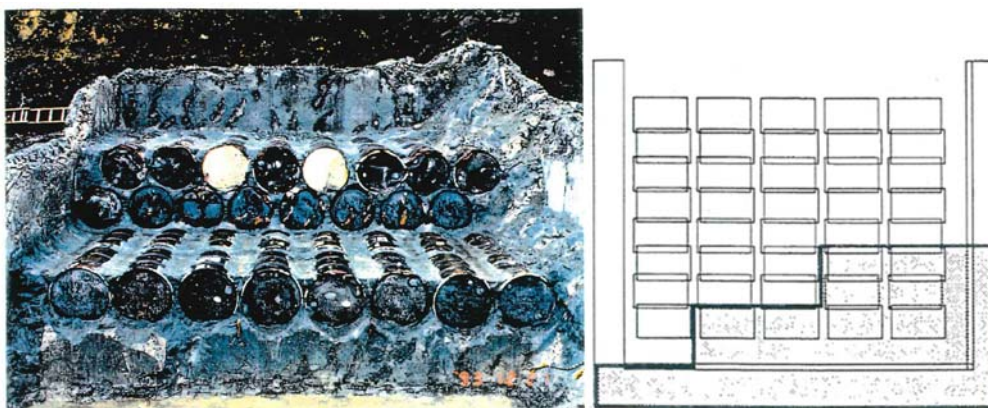
水 結合 材比 (%)	砂 結合 材比	スランプ フローの 範囲 (cm)	単位量 (kg/m ³)						
			水	砂	結合材		混和剤		
					セメント *1	膨張材	水中不 分離性 混和剤	AE 減水剤	高性能 減水剤
72.3	3.24	72.5±2.5	305	1367	397	25	1.5	結合材 重量の 0.1%	結合材 重量の 1.5%

*1：セメントは中庸熟ポルトランドセメント 10%、高炉スラグ 90%

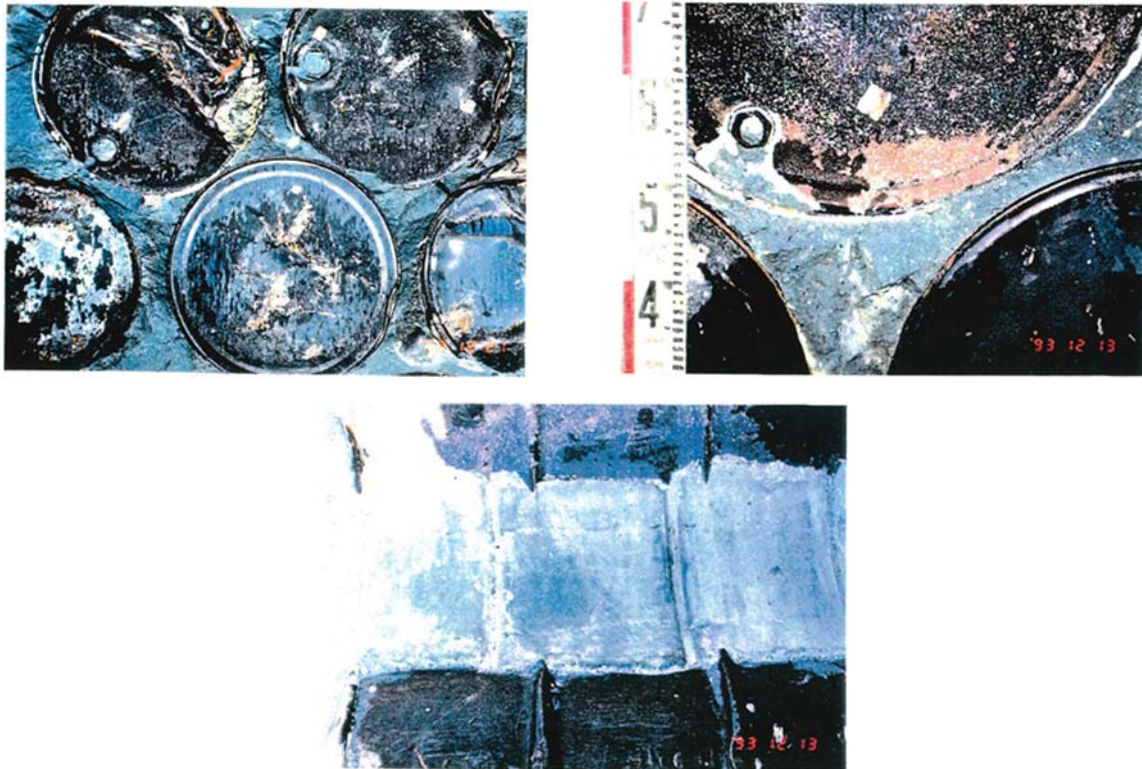
模擬埋設設備により、充填材硬化後に試験設備を解体調査し、充填状況確認を行った結果、廃棄体間の狭隘部であっても十分に充填できており、模擬廃棄体と十分に密着していることが確認されている（第1図、第2図及び第3図）。



第1図 模擬埋設設備断面図⁽²⁾ (単位:mm)



第2図 模擬埋設設備解体状況図⁽¹⁾



第3図 充填状況確認⁽¹⁾

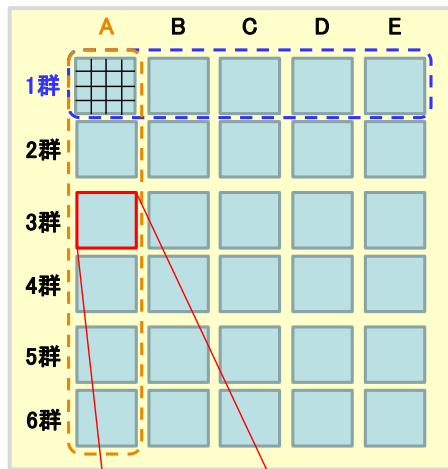
(模擬埋設設備の解体による充填性確認)

5. セメント系充填材表面ひび割れの調査

一部の埋設設備のセメント系充填材上部表面でひび割れの調査を行っている。調査対象を第4図に示す。

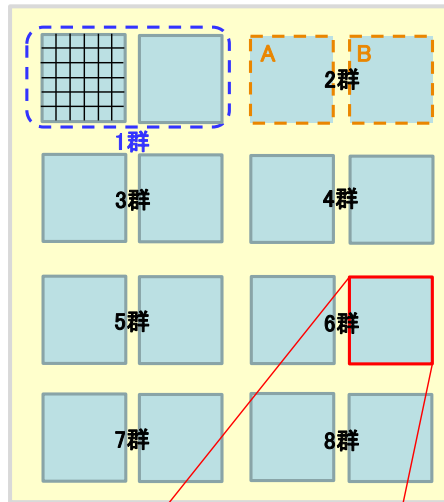
充填後のセメント系充填材の上部表面に生じるひび割れは少ないことを確認している。

1号



a	e	i	m
b	f	j	n
c	g	k	o
d	h	l	p

2号



1a	2a	3a	4a	5a	6a
1b	2b	3b	4b	5b	6b
1c	2c	3c	4c	5c	6c
1d	2d	3d	4d	5d	6d
1e	2e	3e	4e	5e	6e
1f	2f	3f	4f	5f	6f

第 4 図 セメント系充填材上部表面調査対象

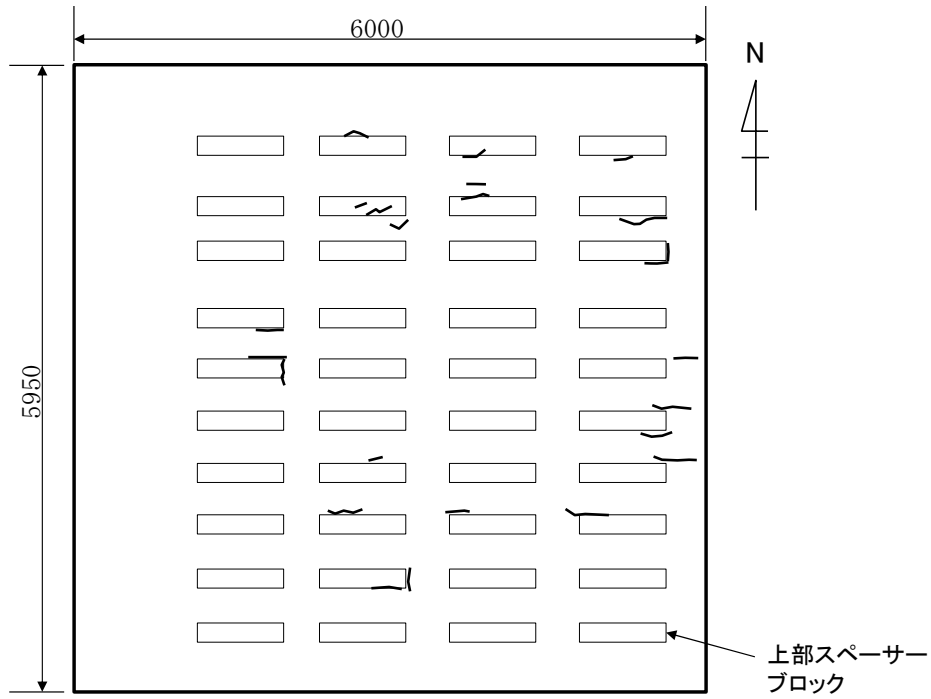
(1) 1号 3-A 埋設設備における確認状況

1号 3-A 埋設設備 a 区画におけるひび割れ調査結果を第 5 図に示す。

調査対象 : 1号 3-A 埋設設備 a 区画

セメント系充填材打設日 : 1995年 7月 18日

調査日 : 打設後 83日



(単位:mm)

第5図 1号3-A埋設設備a区画ひび割れスケッチ図

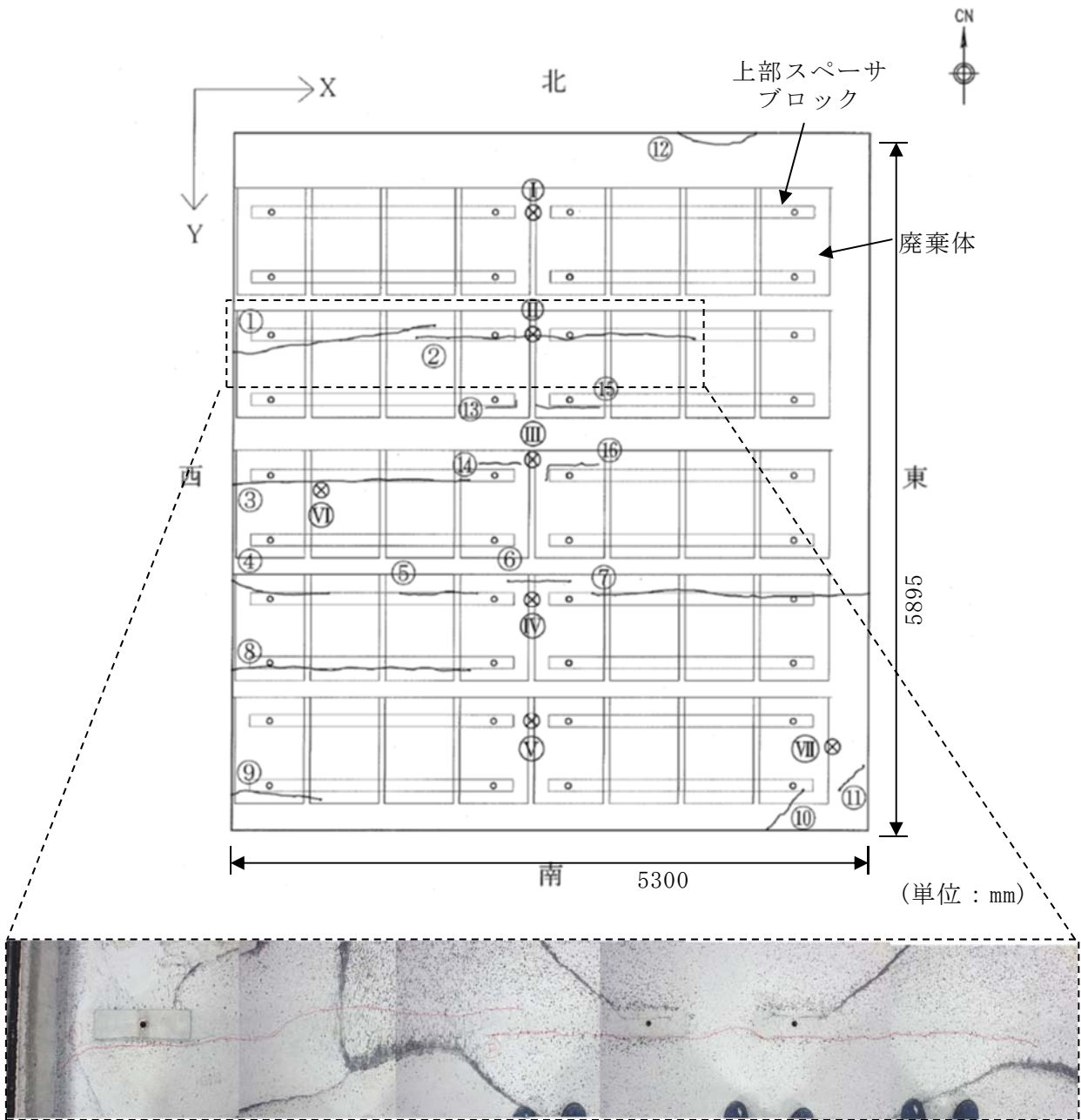
(2) 2号6-B埋設設備における確認状況

2号6-B埋設設備4a区画におけるひび割れ調査結果を第6図に示す。

調査対象 : 2号6-B埋設設備4a区画

セメント系充填材打設日 : 2018年6月20日

調査日 : 打設後310日



6. セメント系充填材に発生するひび割れについて

(1) ひび割れ発生要因分析

充填材に発生するひび割れの主な要因は以下のとおりと推定する。

- ①モルタルの沈下・ブリーディング
- ②硬化時の塑性流動変形
- ③セメントの水和熱
- ④モルタルの乾燥収縮(自己収縮)

以下、実際の埋設設備及び模擬埋設設備(「8. 中規模模擬埋設設備による充填確認試験」参照)の調査結果からひび割れの発生要因について考察する。

(i) モルタルの沈下・ブリーディング

コンクリート打設後に生じるブリーディングや沈下が、鉄筋や型枠、部材形状によって留められる部分から不均一になったとき、沈み込みの続く部分が引張力として作用し、その作用起点からひび割れが発生する。発生時期はブリーディングの経過によるものであるため、数時間～1日程度である。

一般に、単位水量が少なくブリーディングの少ないコンクリートを用いることでひび割れの発生を抑制できる。

模擬埋設設備の観察結果において、上記の形態のひび割れ(上部スペーサブロックに沿ったひび割れ)は確認されなかった。セメント系充填材の配合がノンブリーディングであり、十分な充填性を有しているため、模擬埋設設備の打ち込み高さでは、沈下・ブリーディングによる影響は少ないと考える。

実際の埋設設備においては、模擬埋設設備と比較し、打ち込み高さが約5倍となることからひび割れの発生確率が高くなる傾向にある。実際の埋設設備では、上部スペーサブロックに沿ったひび割れが生じているが、ノンブリーディング配合であることから、上部表面から最上段の廃棄体までに到達せず、表面に限定的なひび割れと推察される。

(ii) 硬化時の塑性流動変形

硬化時の塑性流動変形に伴うひび割れとは、コンクリートが硬化しつつある状態で、表面の不陸等の傾斜を流下する際に、塑性流動変形が拘束されることにより、ひび割れが発生するものである。発生時期は、コンクリートが凝結しつつある時間であるため、数時間～1日程度である。

模擬埋設設備では、上部スペーサブロック固定用鉄筋から放射状に伸びた形のひび割れが確認されている。樹脂注入によるひび割れ深さを測定した結果、材齢 28 日で 4cm、材齢 91 日で 6cm であった。この要因によるひび割れ深さは、不陸高さの数倍程度であり、表面近傍の深さのひび割れと考えられる。

実際の埋設設備においても、この要因と考えられる、上部スペーサブロック近傍のひび割れが確認されているが、上記の理由から表面のみに発生したひび割れと考える。

(iii) セメントの水和熱

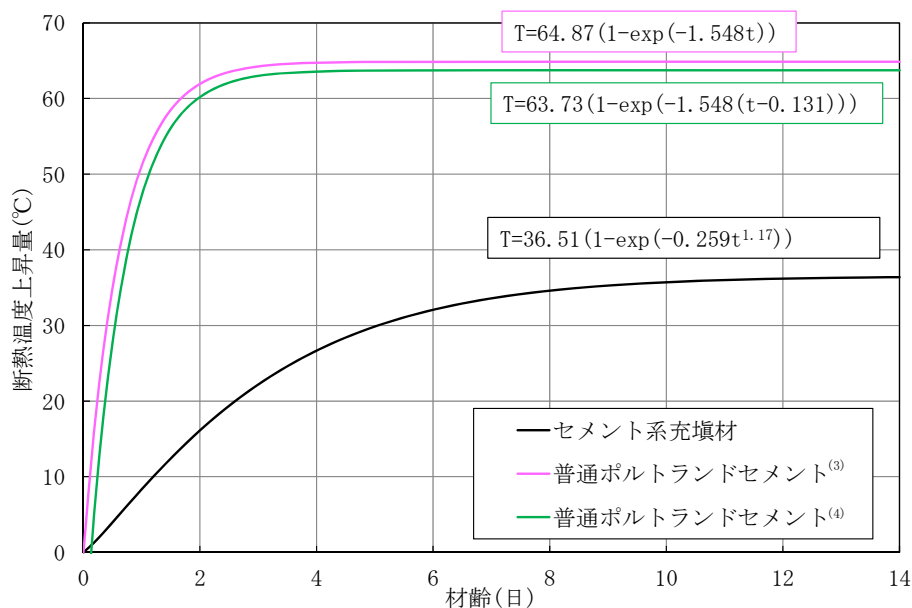
セメントの水和熱に伴うコンクリートの温度上昇又は温度低下による部材の自由変形が拘束されると、内部拘束応力及び外部拘束応力が生じ、これらの引張応力により温度ひび割れが発生する。ひび割れ発生には、セメント水和熱による温度上昇がピークに達した後の温度低下の速度と量が影響する。

発生時期は、セメントの水和に伴う温度上昇及び温度降下の期間に応じ、数日程度である。

一般に、低発熱配合を使用することや部材寸法によって温度の増減を小さくすることでひび割れの発生を抑制する。

模擬埋設設備及び実際の埋設設備においては、セメントの水和熱を起因とするひび割れは確認できなかった。

セメント系充填材は低発熱型の配合とすることにより、ひび割れ発生の抑制が図られている。第 7 図に示すように、同一単位セメント量の一般的な普通ポルトランドセメントと比較して極めて小さい発熱傾向を示す。



「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽³⁾及び

「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」⁽⁴⁾から算出

第 7 図 セメント系充填材の断熱温度上昇量比較

また、模擬埋設設備(第 9 図)において実施した模擬埋設設備内部での温度測定結果(第 4 表)では、平均温度降下量は 9.6°C である。

模擬埋設設備において、温度降下量が小さかった要因は、埋設設備内部に定置された廃棄体による熱の吸収が考えられる。このような現象は、原子力環境整備センターによる実証試験⁽²⁾においても確認されており、実際の埋設設備においてセメント系材料の水和熱を起因としたひび割れの発生可能性は小さい。

模擬埋設設備で計測した平均温度降下量(9.6°C)から、材齢 28 日での温度応力によるひび割れ発生確率について評価を行う。

一般的にコンクリートの熱膨張係数は $10 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ とされていることから、温度収縮ひずみは 96×10^{-6} と算出される。保守的に完全拘束されたとし、温度収縮ひずみ=拘束ひずみとする。

静弾性係数を $155,667 \text{ kgf/cm}^2 (15,266 \text{ N/mm}^2)$ (第 6 表) とすると、そのときの発生応力は $14.9 \text{ kgf/cm}^2 (1.47 \text{ N/mm}^2)$ となる。

材齢 28 日の引張強度が $18.0 \text{ kgf/cm}^2 (1.77 \text{ N/mm}^2)$ (第 6 表) のとき、 $18.0/14.9 \approx 1.2 (1.77/1.47 \approx 1.2)$ であることから、ひび割れ発生確率は低いと考えられる。

(iv) モルタルの乾燥収縮(自己収縮)

コンクリート表面からの水分蒸発による乾燥収縮やセメント成分の効果に伴う自己収縮が生じ、周囲により拘束されることで、引張応力が生じひび割れが発生する。

打設時期や部材寸法により異なるが、一般に数週間で発生する。

一般に乾燥収縮や自己収縮に配慮した配合とすることでひび割れ発生抑制を図る。

セメント系充填材の室内試験結果では、乾燥収縮(91日)760 μ 、自己収縮(58日)343 μ である(第13図及び第7表)。しかし、模擬埋設設備に埋め込んだひずみ計によるひずみ結果は200 μ m以下である。廃棄体や模擬埋設設備壁面による拘束により実際のひずみは抑制されるが、中心部に比べて、上部表面は拘束がなくひずみが発生しやすい。

このように表面では、乾燥収縮によりモルタルの引張強さを超えると、ひび割れの発生が考えられる。

乾燥収縮によるひび割れの進展・拡張についても、表面で生じる現象であることから、廃棄体までひび割れが進展することは考え難い。

(2) ひび割れ発生確率評価

模擬埋設設備におけるひずみ測定結果からひび割れ発生確率を評価する。

模擬廃棄体を3行7列2段配置する模擬埋設設備(第9図参照)にて充填試験を実施した。セメント系充填材は、第3表に示すものを用いた。

ひずみ計の設置位置を第10図に、基本物性試験結果を第6表に、ひずみ測定結果を第15図に示す。

ひび割れ指数は引張強度を測定したひずみから算出した応力で除することで算出する。

なお、算出に当たって、圧縮強度、引張強度、ヤング係数は第1式、第2式、第3式及び第4式を用いて回帰した。

ひび割れ指数の算出結果を第8図に示す。

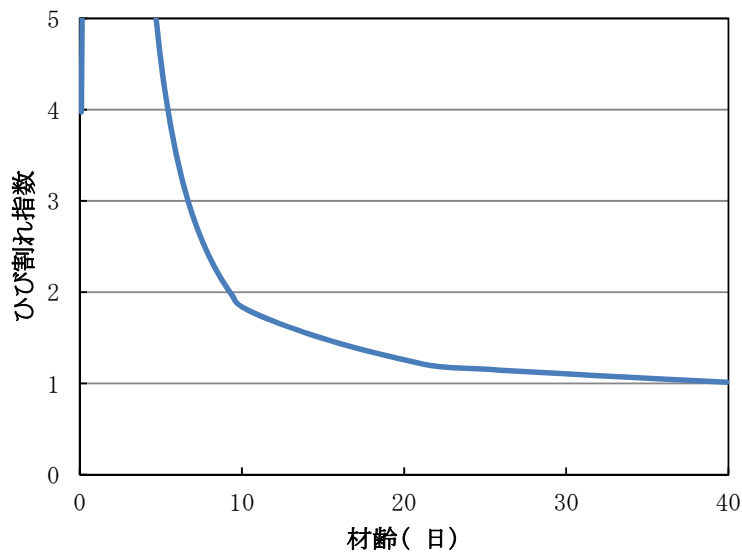
$$f_c'(t) = \frac{t}{a + bt} f_c'(n) \quad \text{第 1 式}$$

$$f_t(t) = C_1 \times f_c'(t)^{C_2} \quad \text{第 2 式}$$

$$E_c(t) = C_3 \times f_c'(t)^{C_4} \quad \text{第 3 式}$$

$$E_e(t) = \varphi \times E_c(t) \quad \text{第 4 式}$$

ここに、
 $f_c'(n)$: 時刻 n の圧縮強度 (N/mm²)
 $f_t(n)$: 時刻 n の引張強度 (N/mm²)
 $E_c(n)$: 時刻 n のヤング係数 (N/mm²)
 $E_e(n)$: 時刻 n の有効ヤング係数 (N/mm²)
 $\varphi(n)$: 時刻 n の補正係数
 (最高温度に達するまでの有効材齢=0.42)
 (最高温度に達した有効材齢+1日以降=0.65)
 a, b, C_1, C_2, C_3, C_4 : 係数
 t : 時刻 (日)



第 8 図 模擬埋設設備におけるひび割れ指数 (②中段 NS)

以上の結果から、セメント系充填材のひび割れ指数は最小で1であり発生確率としては50%となる箇所が存在することを確認した。

したがって、セメント系充填材にある程度のひび割れは生じるものの、全体に水の移動が容易となるひび割れが発生するとは考えられず、セメント系充填材に要求されるひび割れ抑制は達成されており、漏出防止機能を確保できると判断した。

7. 混和材選定について

(1) 膨張材について

セメント系充填材に要求する充填性の確保について、模擬埋設設備を用いて十分に充填できることを確認して配合を選定している。

1:9配合の膨張材を用いない場合のセメント系充填材のひび割れ発生状況については、「6. セメント系充填材に発生するひび割れについて」に示すように、模擬埋設設備による試験で多量のひび割れが発生しないことを確認している。

改善配合(3:7配合)では、膨張材の使用を予定しており、3:7配合においても模擬埋設設備を用いた試験で多量のひび割れが発生しないことを確認している(参考資料4「セメント系充填材の配合選定経緯について」参照)。

(2) 結合材料について

充填性の確保の観点では、充填性を担保する流動性及び材料分離抵抗性について、原子力環境整備センターの実証試験及び当社の配合選定試験によって、高炉スラグを用いた2成分系及びフライアッシュを用いた3成分系に大きな差はないことが確認されている。

ひび割れ抑制の観点では、高炉スラグを用いた場合には、フライアッシュを用いた場合に対して、収縮によるひび割れ発生可能性で不利な点がある。ひび割れへの影響については、模擬埋設設備を用いた確認試験を行っており、漏出防止機能が確保できなくなるような多くのひび割れは確認されていない(「6. セメント系充填材に発生するひび割れについて」及び参考資料4「5. 新配合充填材実証試験」参照)。

安全性の確保の観点では、セメント系充填材の充填以降は、その上部のポーラスコンクリート層及び覆いを早期に設置することで、漏出防止機能全体としてのシステムを形成し安全性を向上させることが望ましい。高炉スラグを用いた場合には、

フライアッシュを用いた場合に対して、強度発現が早いことで施工工程の進行に有利であり、安全性の確保に寄与する。

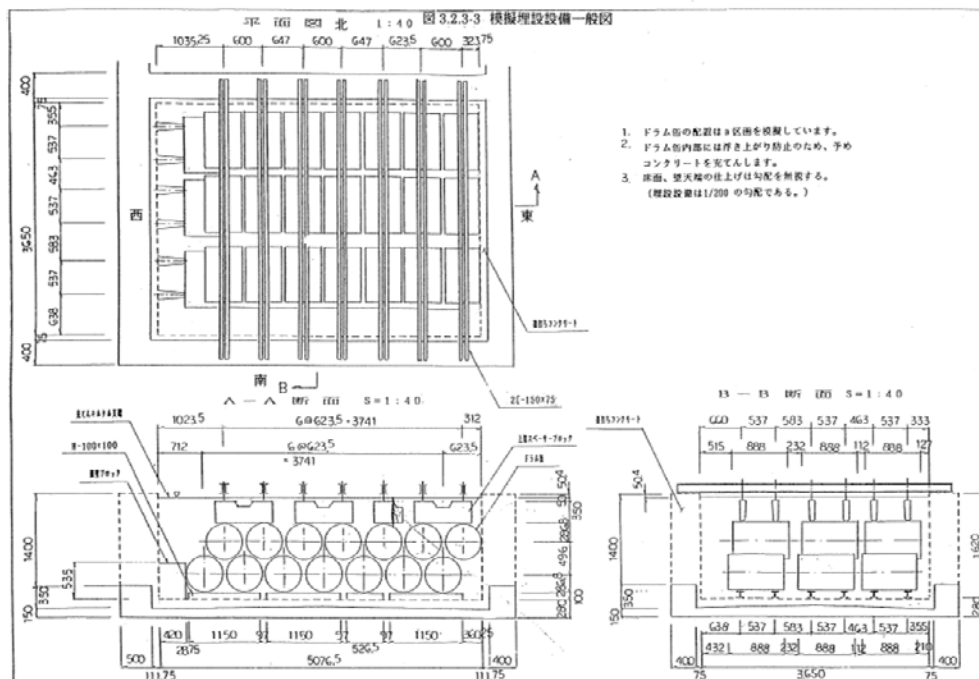
したがって、セメント系充填材に用いる結合材料の選定に当たっては、強度発現特性から安全性の確保に有利な高炉スラグを用いることとしている。

8. 中規模模擬埋設設備による充填確認試験

(1) 実施概要

模擬埋設設備内に模擬廃棄体を3行7列2段配置する中規模模擬試験を実施した(第9図参照)。区画の形状は1号埋設設備のうちa区画(セメント系充填材の層40cmを2面に設置)を模擬した。

セメント系充填材は、第3表に示すものを用いた。



第9図 模擬埋設設備平面図及び断面図

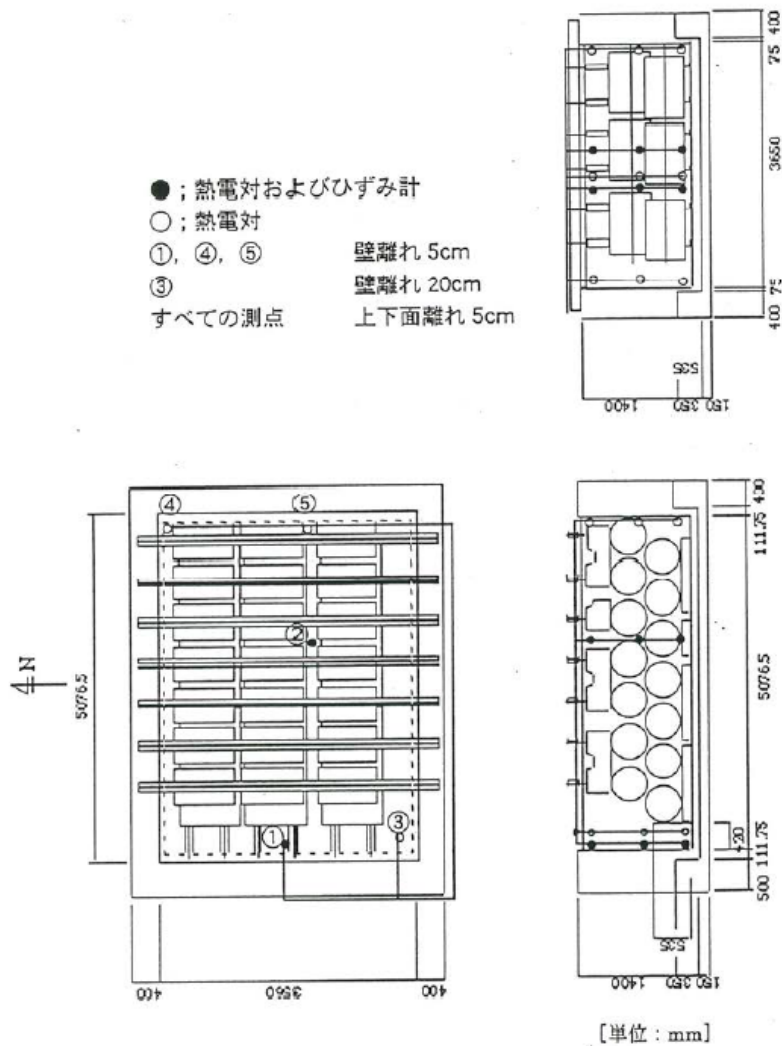
第3表 セメント系充填材の配合

水 結合 材比 (%)	砂 結合 材比	スランプ フローの 目標 (cm)	単位量 (kg/m ³)					
			水	砂	セメント *1	混和剤		
						水中不 分離性 混和剤	AE 減水剤	高性能 減水剤
67.1	3.46	75	283	1462	422	1.5	結合材 重量の 0.1%	結合材 重量の 1.25%

*1：セメントとは、中庸熟ポルトランドセメント 10%、高炉スラグ 90%

(2) セメント系充填材打設に伴う温度測定

熱電対を用いて、セメント系充填材の打設に伴う模擬埋設設備内部の温度変化を計測した。温度測定位置を第10図に、温度測定結果を第4表に示す。



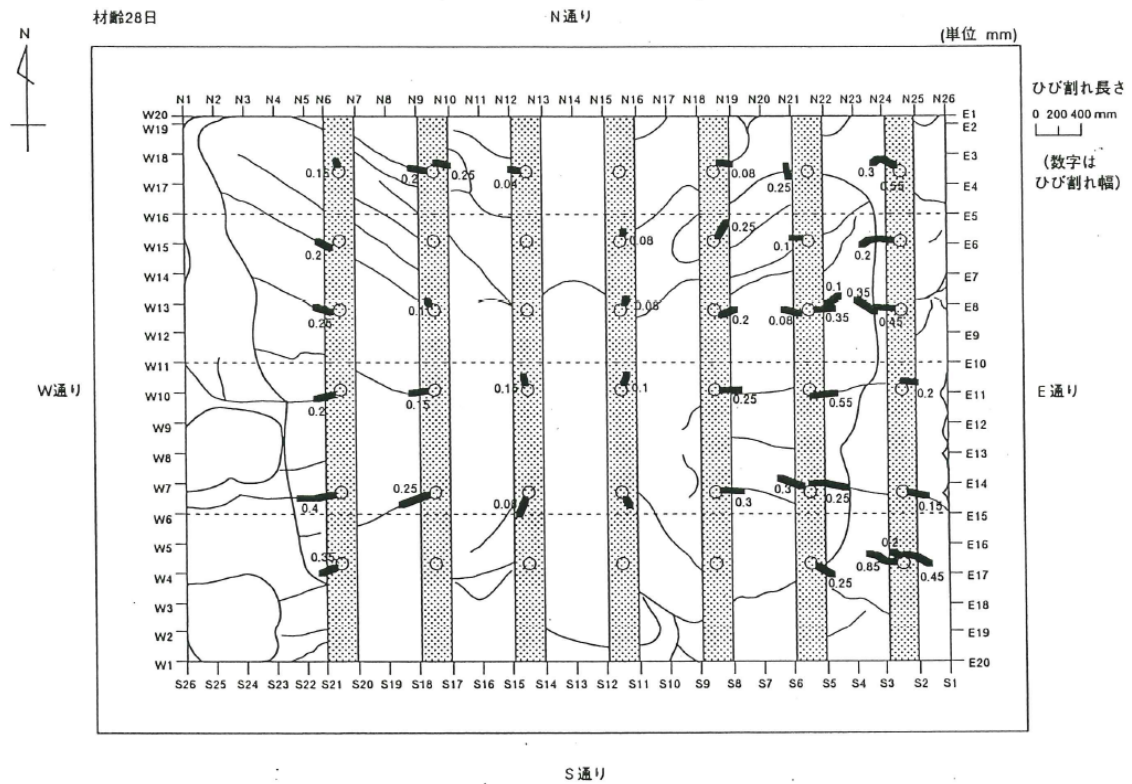
第 10 図 温度測定位置

第 4 表 平均温度降下量

測定位置	①	①	①	②	②	②	③	③	③	④	④	④	⑤	⑤	⑤
	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
最大値(℃)	30.9	35.5	29.1	33.1	37.4	32.0	32.1	37.8	30.2	29.8	30.6	26.8	30.9	33.6	29.7
最終温度データ(℃)	22.8	21.9	21.3	23.4	24.0	23.3	23.7	21.9	21.0	23.3	21.6	20.4	23.5	21.9	21.3
温度降下量(℃)	8.1	13.6	7.8	9.7	13.4	8.7	8.4	15.9	9.2	6.5	9.0	6.4	7.4	11.7	8.4
平均温度降下量(℃)	9.6														

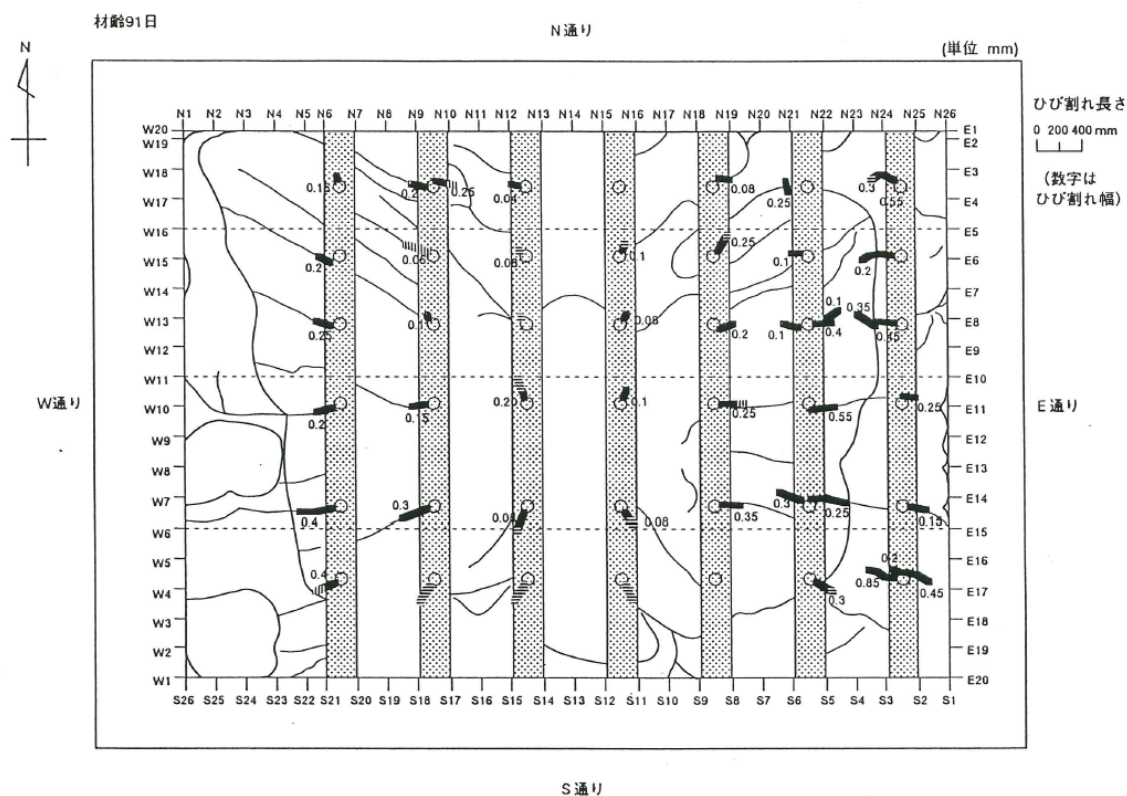
(3) セメント系充填材におけるひび割れ調査

模擬埋設設備におけるセメント系充填材上部のひび割れ調査結果を第 11 図及び第 12 図に示す。セメント系充填材上部表面におけるセメント系充填材と上部スペーサブロックの界面のひび割れは確認できず、セメント系充填材打設位置を中心に、上部スペーサブロックを固定する鉄筋位置から放射状に発生している。



*1：太線がひび割れを示す。細線は打設時に認められた表面のしわ等の模様を示す。

第 11 図 材齢 28 日での上部表面ひび割れ調査結果



*1 : 太線がひび割れを示す。細線は打設時に認められた表面のしわ等の模様を示す。

第 12 図 材齢 91 日での上部表面ひび割れ調査結果

(4) セメント系充填材の物性試験結果

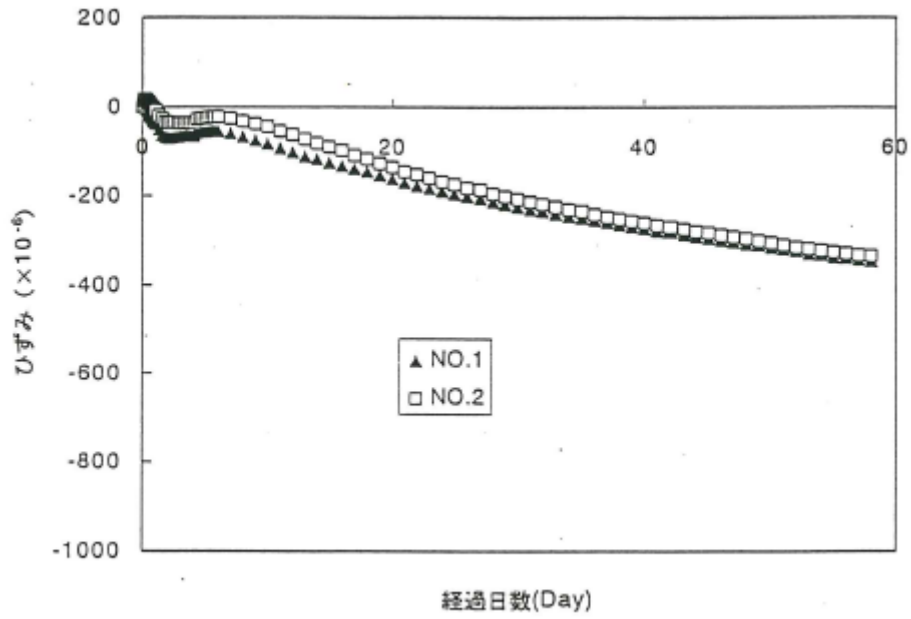
第 3 表に示す配合にて、第 5 表に示す各試験を実施した。基本物性として、圧縮強度、引張強度及び静弾性係数、充填性に係るフレッシュ性状としてスランプフロー、凝結硬化速度及びブリーディング、ひび割れに係る性状として、自己収縮、乾燥収縮及び断熱温度上昇量に係わる試験を実施した。各試験の結果を第 13 図、第 14 図、第 6 表、第 7 表、第 8 表に示す。なお、ブリーディングについては、発生しなかった。

第 5 表 試験項目

試験項目	摘要
圧縮強度	JIS A 1108 に準拠 材齢 3, 7, 14, 28, 91 日で実施
引張強度	JIS A 1113 に準拠 圧縮強度試験と同材齢で実施
静弾性係数	土木学会基準（案）に準拠 圧縮強度試験と同材齢で実施
自己収縮	JCI 高流動コンクリートの自己収縮試験方法（仮称） に準拠
乾燥収縮	JIS A 1129 に準拠
断熱温度上昇量	空気循環式測定器により測定
凝結硬化速度	JIS A 6204 に準拠
ブリーディング	JIS A 1123 に準拠

第 6 表 基本物性試験結果

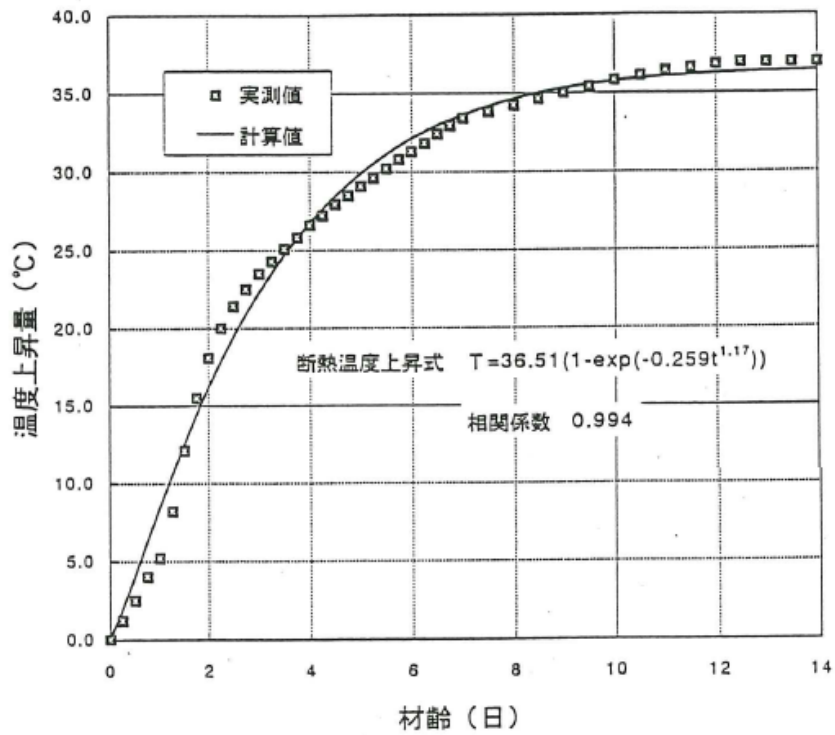
項目	材齢(日)				
	3	7	14	28	91
圧縮強度 kgf/cm ² (N/mm ²)	27.8 (2.73)	69.7 (6.84)	100.0 (9.81)	143.3 (14.05)	219.3 (21.5)
静弾性係数 kgf/cm ² (N/mm ²)	47,000 (4,609)	86,000 (8,434)	107,667 (10,559)	155,667 (15,266)	208,333 (20,430)
引張強度 kgf/cm ² (N/mm ²)	3.2 (0.31)	8.0 (0.78)	11.8 (1.16)	18.0 (1.77)	23.4 (2.29)



第 13 図 自己収縮試験結果

第 7 表 乾燥収縮試験結果

	1 週	4 週	8 週	3 ヶ月
乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	223	540	735	760



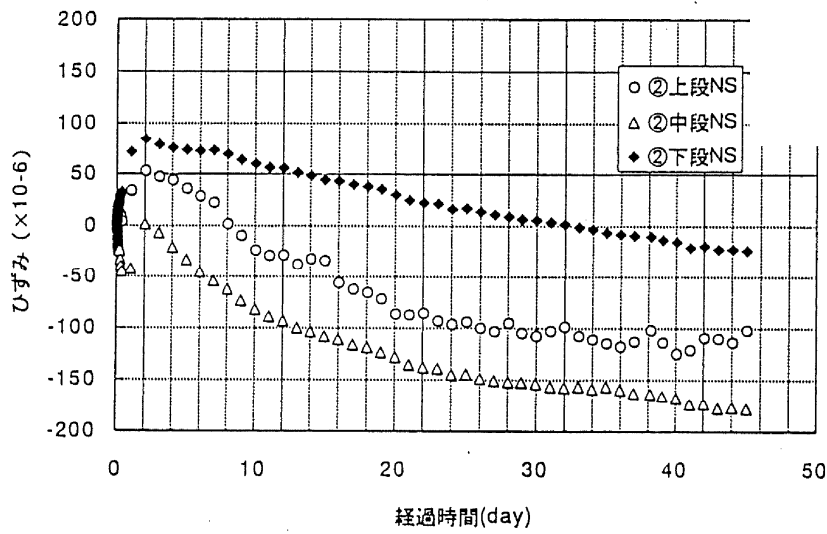
第 14 図 断熱温度上昇量試験結果

第 8 表 フレッシュ性状試験結果

スランブ フロー (cm)	モルタル 温度 (°C)	空気量 (%)	単位体積重量 (kg/m ³)	凝結時間	
				始発	終結
				時・分	時・分
76.5×76.0	20.1	2.6	2185.1	23・30	45・30
78.0×78.0	20.3	3.4	2152.5		

(5) 模擬埋設設備のひずみ測定結果

模擬埋設設備に対して、ひずみ測定を実施した。第1図に示すひずみ測定箇所のうち、最大箇所のひずみ測定結果を第15図に示す。



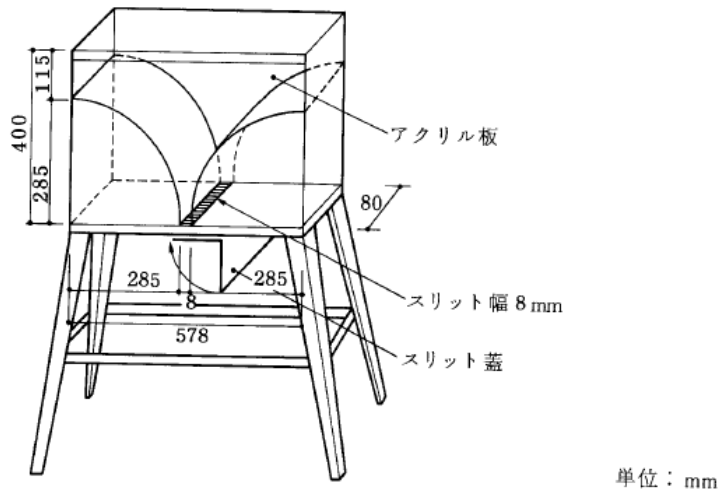
第15図 ひずみ測定結果 (最大箇所)

9. ドラム缶フロー試験

埋設設備への充填性の検討として、ドラム缶フロー試験により、ドラム缶同士の隙間を流動し、充填できることを確認する（第 16 図参照）。

原子力環境整備センターで実施したドラム缶フロー試験結果⁽⁵⁾を第 9 表、第 10 表及び第 11 表に示す。

実際の埋設設備で用いる配合と若干異なるものの、同様の傾向を示すものであり、スランプフローを管理することで、ドラム缶間等の狭隙部を通過できることを示すものである。



第 16 図 ドラム缶フロー試験装置

第 9 表 使用配合

W/C (%)	S/C (%)	単位量 (kg/m ³)							
		水	普通ポルトランドセメント	高炉スラグ	膨張材	細骨材	水中不分離性混和剤	AE減水剤 (L/m ³)	高性能減水剤 (L/m ³)
68.7	3.20	290	40	357	25	1350	1.50	1.69	4.22

第 10 表 試験結果⁽¹⁾

試験項目	練上り	1 時間	2 時間	3 時間	3 時間 低下量
スランプフロー (cm)	76×75	77×75	73×73	66×66	9.5
ドラム缶フロー (分, 秒)	46”	1’ 15”	1’ 18”	1’ 27”	41”

第 11 表 試験結果⁽²⁾

試験項目	試験結果	
空気量(%)	1.6	
練上り温度(℃)	22.6	
ブリーディング率(%)	0	
凝結(時間)	始発	終結
	20.5	29.5

10. まとめ

1号及び2号埋設設備の既に打設されたセメント系充填材を含め、セメント系充填材の要求性能は、充填性である。セメント系充填材は、配合の工夫、事前の試験及び打設後の確認から、有害な空隙を残さない十分な充填性を有していることを確認している。水みちとなるひび割れの発生についても、ある程度のひび割れは生じるものの、充填区画内部全体にわたって水の移動が容易となるひび割れが発生するとは考えられず、セメント系充填材に要求されるひび割れ抑制は達成されており、漏出防止機能を確保できると判断した。

以 上

参考文献

- (1) 財団法人 原子力環境整備センター(平成6年)：低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験報告書 平成5年度
- (2) 財団法人 原子力環境整備センター(平成5年)：低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験報告書 平成4年度
- (3) 土木学会(2018)：2017年制定コンクリート標準示方書(設計編)
- (4) 公益社団法人 日本コンクリート工学会(2016)：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016
- (5) 財団法人 原子力環境整備センター(平成3年)：低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験報告書 平成2年度

セメント系充填材の配合選定経緯について

目 次

1. はじめに.....	1
2. 1号操業開始時における既往の知見.....	1
(1) 原子力環境整備センターによる検討状況.....	1
(2) 日本コンクリート工学協会の検討状況 ⁽¹⁾	43
(3) 既往の知見のまとめ.....	46
3. 現在のセメント系充填材の配合選定.....	47
(1) 配合選定の経緯.....	47
(2) 配合選定試験.....	47
(3) 配合選定試験まとめ.....	50
4. 新增設におけるセメント系充填材の配合改良.....	53
(1) 目的.....	53
(2) セメント系充填材に要求される品質項目.....	53
(3) セメント系充填材の改善配合検討.....	55
(4) セメント系充填材量改善配合の検討内容.....	57
(5) セメント系充填材改善配合の検討結果.....	60
5. 新配合充填材実証試験.....	66
(1) 目的.....	66
(2) 検討内容.....	66
(3) 試験方法.....	67
(4) 試験結果及び考察.....	69
(5) まとめ.....	76

1. はじめに

漏出防止の目的は、全てのバリアが完成するまでに、放射性物質が廃棄体の外へ漏出することによる被ばくの防止である。そのため、放射性物質が埋設設備の内側にある状態に管理することを基本方針とする。

埋設設備は、外部からの水の浸入を極力防止し、埋設設備内を不飽和に維持することで内部からの漏えいを防止する。不飽和の状態を維持する対策として、排水・監視設備による導水に加え、セメント系充填材により、廃棄体内部への水の浸入や放射性物質の移行を抑制する。

したがって、廃棄体周りのセメント系充填材は、流動性を良くし充填性を上げ、廃棄体間の空隙を隙間なく充填するとともに、低発熱配合のセメント系充填材を選定し、温度応力によるひび割れを抑制する設計とする。

上記の要求を満足するセメント系充填材の配合の選定に当たり考慮した当時の知見及び新たに予定している配合の検討内容について説明する。

2. 1号操業開始時における既往の知見

(1) 原子力環境整備センターによる検討状況

低レベル放射性廃棄物の埋設設備に使用されるセメント系充填材に関する検討は、これまでに国中心としたプロジェクトで原子力環境整備センターによって、以下の研究が実施された。

昭和 58 年度～昭和 61 年度通産省受託研究	低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験
昭和 62 年度～平成元年度通産省受託研究	低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験
平成 2 年度～平成 5 年度通産省受託研究	低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験
昭和 63 年度～平成 3 年度科学技術庁受託研究	低レベル放射性廃棄物最終貯蔵システム安全性実証試験

上記の研究のうち、科学技術庁受託研究では、「低レベル放射性廃棄物の埋設に関して、廃棄物埋設施設への廃棄体の定置、充填、覆土等の埋設が安全かつ確実に実施できること、また、埋設後における地下水のサンプリングが確実に実施できることを実証すること。」を目的としている。

一方で、通産省受託研究では、低レベル放射性廃棄物の埋設設備の設計から施工までの試験が室内試験とあわせて実規模サイズの模型試験まで実施されており、当時の技術に基づいて、埋設設備の各部材(外周仕切設備、セメント系充填材、ベントナイト混合土)までの試験が幅広く実施されている。そのため、現在のセメント系充填材(1:9モルタル)の選定プロセスを室内試験から模型サイズの実証試験まで系統的に実施されている通産省受託研究に基づいて、本資料では、技術的観点で選定プロセス及び充填性等の機能評価までを取りまとめた。

上記通産省の昭和58年度から平成5年度まで実施された研究の主な検討工程は第1表に示すとおりである。このうち、セメント系充填材に関する検討は昭和62年度から実施されているため、ここでは、昭和62年度から平成5年度までのセメント系充填材に関する検討の概略を第1表にまとめた。

第 1 表 昭和 58 年度～平成 5 年度までの低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験全工程

試験内容	年度	昭和 58 年度	昭和 59 年度	昭和 60 年度	昭和 61 年度	昭和 62 年度	昭和 63 年度	平成 元年度	平成 2 年度	平成 3 年度	平成 4 年度	平成 5 年度
1. 最適システムの設定												
2. モデル施設要素の設定												
3. モデル施設の設計・建設												
4. 設備の設計および製作												
5. 機能確認試験												
6. 安全性実証試験												
7. 総合システム・マニュアル作成												
(1) 受入検査装置の実証試験												
① 受入検査システムの検討												
② 受入検査システムの概念設計												
③ モデル装置の製作												
④ 機能確認試験												
(2) 充填材安全性実証試験												
① 充填材自動充填装置の実証試験												
a. 充填材自動充填装置の検討												
b. 充填材自動充填装置の設計・製作												
c. 機能確認試験												
② セメント系充填材試験												
a. セメント系充填材の検討												
b. 配合試験												
c. 充填試験												
d. 実規模試験												
(3) 総合実証試験												
(1) セメント系充填材実証試験												
① 自動充填装置の実証試験												
② セメント系充填材性能試験												
③ 充填システム総合実証試験												
(2) ベントナイト混合土実証試験												
① ベントナイト混合土配合試験												
② 混合システム選定試験												
③ 転圧システム選定試験												
④ 埋戻しシステム実証試験												
⑤ 長期安定性実証試験												
(3) ポーラスコンクリート実証試験												
① 基礎物性試験												
② 水質変化確認試験												
③ 目詰まり状況確認試験												
④ 通水機能確認試験												
⑤ 長期通水性能確認試験												

(i) 昭和 62 年度～平成元年度の検討概要

a. 昭和 62 年度検討成果の概要

(a) セメント系充填材仕様検討における基本的考え方

セメント系充填材の仕様検討は、以下の事項を考慮することとして開始された。

- ・材料的に安定していること。
- ・水和反応が緩やかで、長期に反応が持続する。
- ・化学的耐久性が大きい。
- ・水和熱が低く、分離抵抗性が大きい。
- ・流動性、充填性が良い。
- ・ブリーディング沈下が少ない。
- ・充填後の体積変化が少ない。

以上の事項を考慮したモルタルの仕様として、当時は土木学会コンクリート標準示方書(61年度制定、施工編)22章「プレパックドコンクリート」に準拠することが望ましいとされ、注入モルタルの施工実績のもっとも多い「本四架橋における注入モルタルの示方配合」(第2表参照)に基づいて、使用セメントを長期耐久性の観点から、低発熱型高炉セメントB種(スラグ量55%)80%+フライアッシュ20%(第3表参照)を基本設定として検討が開始された。

第2表 本四架橋における注入モルタルの示方配合例

粗骨材の範囲 最大 ～最小 (mm)	空隙率 (%)	流下時間 の範囲 (sec)	水結合材比		砂結合 材比 $\frac{S}{C+F}$	単 位 量 (kg/m ³)					
			$\frac{W}{C+F}$	$\frac{F}{C+F}$		水	セメント	フライア ッシュ	砂	混和 剤	A l 粉
			(%)	(%)	W	C	F	S	(g/m ³)	(g/m ³)	
150 ～ 80	50	17±2	48	20	1	391	652	163	815	8150	81.5

第3表 プレパックド方式による場合のセメント系充填材配合(案)

セメントの種類	流下時間 (sec)	W C+F (%)	F C+F (%)	S C+F	単 位 量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	フライアッシュ F	砂 S	混和剤
低発熱型高炉セメント + フライアッシュ	19±2	50	20	1.1 ~ 1.4	370	592	148	814 ~ 1036	7.4

混和剤：プレパックドコンクリート用混和剤（ポゾリスGF630）

*1：セメントは低発熱型高炉セメントB種（スラグ量55%）

その後、予備試験の結果を踏まえ、配合選定条件としてフロー値、ブリーディング率及び膨張率を考慮し、第4表（配合A）、第5表（配合B）の2つの配合を設定することで、具体的なセメント系充填材の仕様検討が開始された。

第4表 セメント系充填材の示方配合(配合A)

水・結合材比 $\frac{W}{C+F}$	砂・結合材比 $\frac{S}{C+F}$	フロー (秒)	単 位 量 (kg/m ³)					
			水 W	セメント C	フライアッシュ F	砂 S	混和剤	A ₁ 粉
47%	1.1	22 ± 2	376	640	160	880	1.6ℓ	0.12

*1：結合材：低発熱型高炉セメントB種(80%)+フライアッシュ(20%)

*2：細骨材：市原産（比重=2.63、吸水率=2.15、粗粒率=1.34）

*3：混和剤：ポゾリス No.70、0.2L×(C+F)/100kg

*4：A₁粉末：山石金属社製 P300、(C+F)×0.015%

*5：配合A：配合選定条件

フロー値 22±2秒

ブリーディング率 3時間値で3%以下、最大値で4±1%以下

第 5 表 セメント系充填材の示方配合 (配合 B)

水・結合材比 W	砂・結合材比 S	単位量 (kg/m ³)						
		水 W	セメント C	フライアッシュ F	膨張材 CSA	砂 S	混和剤	Al 粉
C+F+CSA	C+F+CSA							
47 %	1.3	355	557	139	61	983	1.51ℓ	0.114

*1 : 混和剤 : ポゾリス No. 70、0.2L × (C+F) /100kg

*2 : Al 粉末 : 山石金属社製 P300、(C+F) ×0.015%

*3 : 膨張材 : 電気化学工業 CSA100R、C+F の 8%置換 (内割り)

*4 : 配合 B 配合選定条件

フロー値 30 秒以上

ブリーディング率 3 時間値で 3%以下

最大値で 4±1%程度

膨張率 300±100 μ

第 6 表及び第 7 表に示す試験を実施した。その結果、充填時のブリーディングにより、局部的にセメント分が少なくなり、砂分の多い部分が認められた。また、一部に微小なヘアークラックも認められた。一方、充填時の温度計測から充填モルタルの発熱性状を求めると、室内の断熱温度上昇試験結果と比較して、温度上昇量、上昇速度共に小さな値が得られた。これはモルタル周囲の廃棄体に熱が逃げるためと考察されている。

これらの結果から、配合 A 及び B に対し、水和熱の低減、ブリーディングの抑制に重点を置いたセメント系充填材の配合仕様の検討が実施されることとなった。

第6表 試験内容

試験内容	試験項目	測定項目	試験目的
モルタルの充填性	1. 材料試験	a) フロー b) 膨張率, プリージング率 c) 圧縮強度 (弾性係数を含む) d) 単位容積重量 e) 透水係数	・使用材料の品質確認
	2. 流動性	a) レベル測定 (流動勾配)	・流動性の検討
	3. 充填性	a) コブ採取・観察 b) 着色水張り試験 (上面に着色水を張り内部に浸透させて, ドラム缶, モルタルの境界面をはつり調査する)	・モルタルの充填性の確認 ・ドラム缶とモルタルの一体化の確認
モルタルの水和熱	1. 温度上昇	a) 温度測定 ・充填モルタル ・ドラム缶内部 ・外気温	充填モルタルの水和熱の影響を調査 ・シミュレーション解析データ ・解析方法の評価
	2. 体積変化	a) ひずみ測定 ・充填モルタル ・ドラム缶内部 ・外型枠 (土圧計) ・型枠拘束H鋼 ・丸鋼棒	・水和発熱によるモルタルの体積変化の測定 ・外型枠に及ぼす影響
		b) 変位測定 ・外型枠 (変位計)	・同上
外部環境の影響	1. 屋外暴露の影響評価	a) ひびわれ発生の有無 (乾燥収縮)	・ドラム缶の拘束の影響を調査

第7表 測定項目及び数量（試験体1体当たり）

項 目	数 量	備 考
充 填 性	2ヶ所 ($\phi 300\text{mm}$ コアポー リング)	ボーリングコアによるドラム缶・モルタル境 界面の状況観察 採取したコアの上面に着色水を張り内部に浸 透させてその状況をはつり調査
水 和 熱	31ヶ所 (内1ヶ所は外気温 測定用)	試験体内部に温度センサーを設置して、モル タルの硬化に伴う発熱状況を測定
モルタル内部ひずみ	10ヶ所 (内1ヶ所は無応力 ひずみ計)	試験体内部にひずみ計を設置して、硬化時に 発生するモルタルのひずみを測定
モルタル側圧	2ヶ所	モルタル注入時に型枠に作用する圧力を土圧 計により測定
型 枠 変 位	8ヶ所	型枠外面に変位計を設置して型枠の変位を測 定
型枠拘束H鋼ひずみ	4ヶ所	モルタルの水和発熱に起因する温度上昇・降 下による体積膨張、収縮をH鋼の曲げモーメ ントで測定
丸鋼棒ひずみ	1ヶ所	モルタルの体積膨張、収縮を丸鋼棒のひずみ で測定
透 水 係 数	8ヶ所	$\phi 100\text{mm}$ でコアを採取し、室内作製供試体2体 を含めて透水係数を測定

(b) 改良型モルタルの配合試験

上記(a)の配合A及びBの課題に対し、以下に示す混和剤、混和材を取り上
げて検討した。

- ・石粉(混和材としてセメントに置換)：水和発熱抑制
- ・水中コンクリート用混和剤：ブリーディング抑制
- ・膨張材(混和材としてセメントに置換)：硬化収縮の低減

使用材料は第 8 表に、検討要因は第 9 表に、試験項目及び試験方法は、第 10 表に示すとおりである。これらの試験結果から、以下の事項が明らかとなった。

結合材の一部を石粉で置換すると、流動性はやや悪くなるものの、水和熱を低減することができる(第 3 図及び第 4 図参照)。

増粘剤を添加すると粘稠性が増し、水・結合材比、砂・結合材比を大きくしても分離を防止し、ブリーディングを抑制できる。

第 8 表 使用材料

セメント	マスコン高炉 B 種 (第一セメント、高炉スラグ量 55%)
フライアッシュ	電発フライアッシュ (日本セメント)
石粉	日瓢珪砂 N-90 (日瓢礦業)
混和材	デンカ CSA100R (電気化学工業)
混和剤	増粘剤 USCA (信越化学工業、セルロースエーテル) AE 減水剤 No. 70 (ポゾリス) 高性能減水剤 NL4000 (ポゾリス、高縮合トリアジン系化合物)
アルミ粉	山石 P300 (山石金属)
細骨材	市原産 (比重 2.58、吸水率=2.33、粗粒率=1.45)

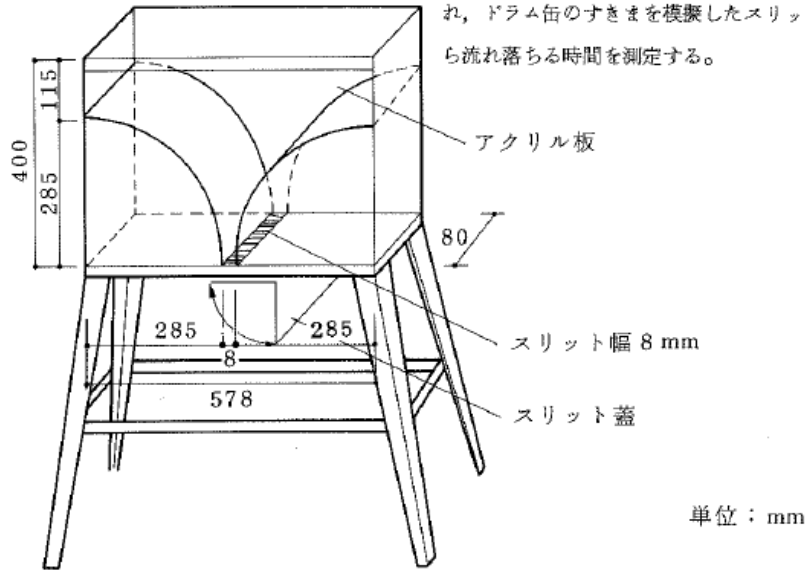
第9表 検討要因

試験 ケース	No.	検討要因					備 考
		砂・結合材比 S/(C+F)	石 粉 (%)	膨張材 CSA100R (%)	水中コンク リート用混 和剤 USCA (kg/m ³)	高性能減水剤 NL4000 (%)	
I	1	1.25	-	-	-	-	基本配合
	2	1.25	10	-	-	-	石粉, CSAは 結合材に内割 で添加
	3	1.25	20	-	-	-	
	4	1.25	30	-	-	-	
	5	1.25	20	8	-	-	
II	1	2.0	-	-	0.5	1.0	USCA1.0kg/ m ³ に対してス ランプフロー 80cmとなるよ うにNL4000を 決定
	2	2.0	-	-	1.0	1.0	
	3	2.0	-	-	1.5	1.0	
	4	2.0	-	8	1.5	1.0	CSA は内割
III	1	3.0	-	-	0.5 ~1.5	1.0 ~4.0	流動性の問題 からUSCA, NL 4000 を変化 させて実施
	2	2.5	-	-	1.0 ~1.5	1.0 ~3.0	

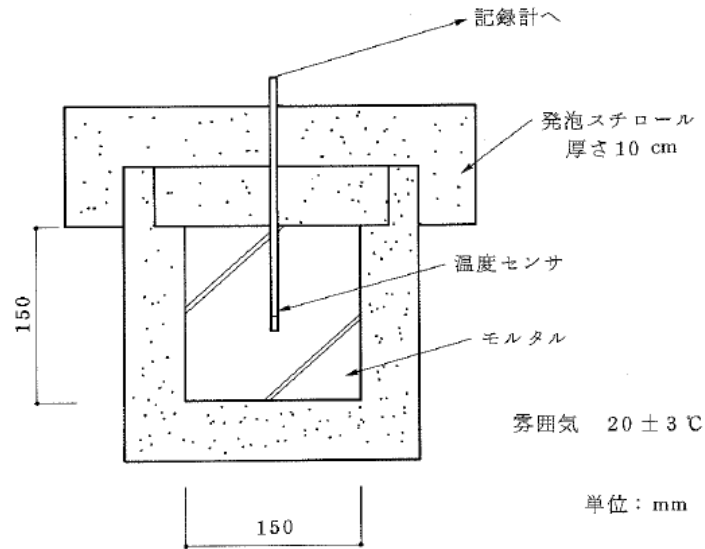
第 10 表 試験項目及び試験方法

試験項目	試験方法	備考
流動性試験	P ロートフロー (土木学会基準)	30 秒を目安とする。
	ドラム缶フロー	第 1 図参照。
	スランプフロー	スランプコーンを用いてのスプレッド値。
ブリーディング 率及び膨張率	土木学会基準に準拠	ブリーディング率 3 以下。 膨張率 2~4%。
単位容積重量	容重升 (フレッシュモルタル) 及び硬化共試体重量	フレッシュモルタルの場合は容重升による。 硬化後については曲げ共試体 (4×4×16cm) を測定。
凝結試験	プロクター貫入試験	JIS A 6204 附属書 1
水和熱の測定	簡易断熱温度上昇試験法	第 2 図参照, 最大温度に達するまで実施。
圧縮強度	JIS A 1108	材令 1, 4, 13 週 標準養生
曲げ強度	JIS A 1106	材令 1, 4, 13 週 標準養生
透水試験	アウトプット法	材令 4 週にて実施。
長さ変化試験	JIS A 1129	測定は長さ変化がほぼ一定になるまで、最大 6 ヶ月間行う。

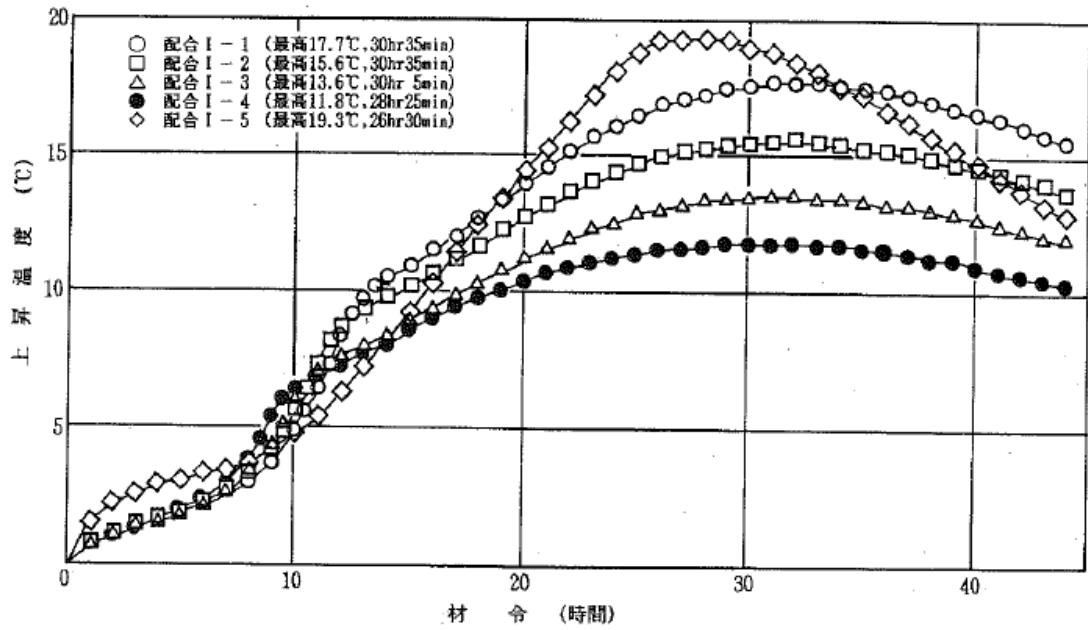
注 試験方法：Pロート法による試験に用いるモルタル量の
2倍（3450 cc）のモルタルを試験装置に入
れ、ドラム缶のすきまを模倣したスリットか
ら流れ落ちる時間を測定する。



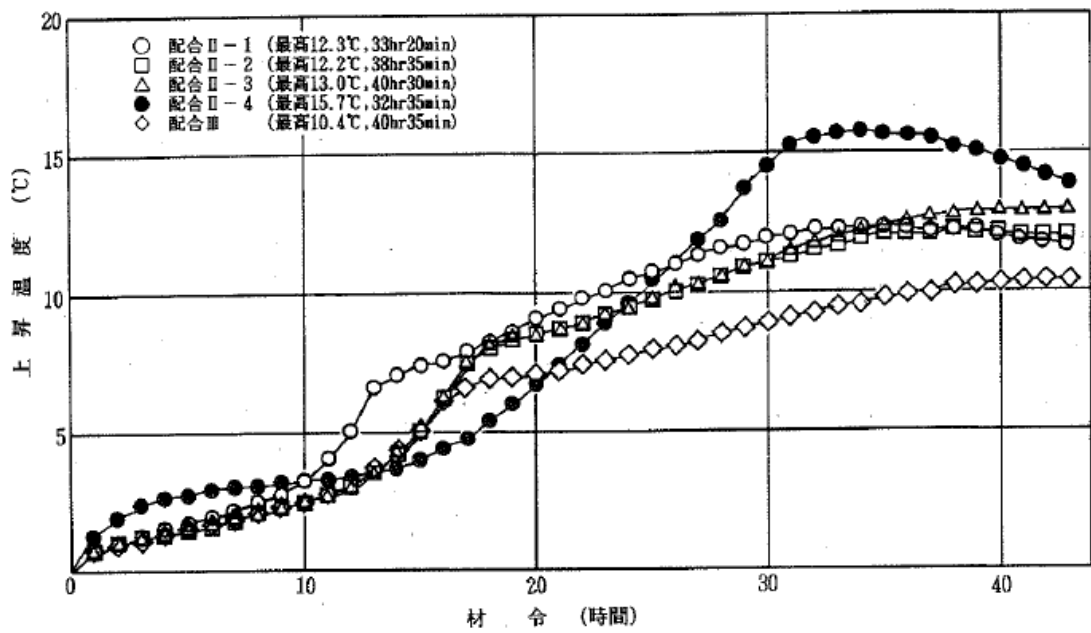
第1図 ドラム缶フロー試験装置



第2図 簡易断熱温度上昇試験装置



第3図 簡易断熱温度上昇試験測定結果(実験ケース I)



第4図 簡易断熱温度上昇試験測定結果(実験ケース II, III)

b. 昭和 63 年度検討概要

(a) 室内試験

当該年度は、ブリーディング抑制に対して有効性が確認された水中コンクリート用混和剤を用いるとともに、単位セメント量の低減、低発熱型セメントの使用等についての検討が、以下の目的で行われた。

- ・骨材が異なる場合の流動性を把握する。
- ・膨張材の適切な添加量を求める。
- ・セメントの種類が流動性、強度、温度上昇量及び透水係数に与える影響を把握する。

上記の検討では、第 11 表に示す配合条件及び使用材料で第 12 表に示す試験を実施した。

第 11 表 配合条件と使用材料

配合条件		使用材料	
水・結合材比(W/C)	70%	結合材	普通ポルトランドセメント (日本セメント)
砂・結合材比(S/C)	3.0~3.5		中庸熟ポルトランドセメント (日本セメント)
水中コンクリート 用混和材(USCA)	1.5kg/m ³	混和材	高炉スラグ (第一セメント セラメント)
高性能減水剤 (NL-4000)	C×1~2%		フライアッシュ (日本セメント アサノフライアッシュ)
スランプフロー	80cm 程度		膨張材(電気化学工業 CSA100R)
ドラム缶フロー	連続的な流 下	混和剤	水中コンクリート用混和剤(信越化学 アスカクリーン : USCA)
			AE 減水剤(ポゾリス物産 No. 70)
			高性能減水剤(ポゾリス物産 NL-4000)
		細骨材	鹿島産陸砂(F. M. 2. 27)
			相模・木更津混合砂(F. M. 2. 66)
			大井産川砂(F. M. 3. 04)

第 12 表 試験項目

検討項目	試験項目
骨材が流動性に与える影響	・流動性試験
膨張材の適切な添加量	・流動性試験 ・膨張率試験
セメントの種類が物性に与える影響	・流動性試験 ・断熱温度上昇量試験 ・強度試験 ・透水試験

試験の結果、粗粒率(F.M.)の違いによって所要の流動性を確保するためには、F.M.の増加とともに、S/Cも増加させる必要があること、膨張材の添加はC×6%の設定とすることが明らかとなった。

さらに、セメント6種類(普通ポルトランドセメント(以下「OPC」という。)5%+高炉スラグ95%、OPC10%+高炉スラグ90%、OPC20%+高炉スラグ80%、OPC30%+高炉スラグ40%+フライアッシュ30%、中庸熱20%+高炉スラグ80%、中庸熱30%+高炉スラグ40%+フライアッシュ30%)に水中コンクリート用混和剤を用いた場合の各種物性(流動性、圧縮強度、断熱温度上昇量、透水試験)について、以下のことが明らかとなった。

- ・流動性：セメントの違いによる差は見られない。
- ・圧縮強度：同上
- ・発熱量：高炉スラグ95%を含むものが最も小さく、OPCの割合が増えるに従い高い値を示す。
- ・スランプフロー：80cmを確保するためには、F.M.が2.27、2.66、3.04の場合、砂結合材比をそれぞれ3.00、3.25、3.50とすることが必要。
- ・透水係数：セメント種類に係らず、 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ cm/s程度の透水係数。

(b) 充填試験(模型試験)

当該年度は、ブリーディングの防止及び水和熱の低減等を目的として実施された配合試験の結果得られた配合(第13表参照)を用いて、昭和62年度と同様の充填試験(埋設設備の1区画の約1/4サイズ)を行い、各種計測(第14

表及び第 15 表)が実施され、以下の結果が得られた。

第 13 表 セメント系充填材の配合(充填試験)

単 位 量 (kg/m ³)								
水	普通ポルト ランドセメント	高炉スラグ	フライアッシュ	膨張材	砂	水中コンクリー ト用促和剤	AE減水剤	高性能減水剤
W	C	B	F	CSA100R	S	USCAクリーン	ボゾリス No. 70	ボゾリス NL-4000
274	117	156	117	25	1452	1.65	1.66	2.07

(配合条件)

スランプフロー : 72.5 ± 5.0 cm
 水結合材比 : $W / (C + B + F + CSA100R) = 66\%$
 砂結合材比 : $S / (C + B + F + CSA100R) = 3.5$

CSA100R : $(C + B + F + CSA100R) \times 6\%$
 ボゾリス No. 70 : $(C + B + F + CSA100R) \times 0.4\%$
 ボゾリス NL-4000 : $(C + B + F + CSA100R) \times 0.5\%$

砂 : 相模産(粗目) : 木更津産(細目) = 4 : 1

第 14 表 充填試験における試験及び計測項目

試験時期 試験項目	モルタル充填時	モルタル硬化後
モルタルの 品質管理	・スランプフロー ・空気量	—
モルタルの 物性値	—	圧縮強度 } 注入時採取供試体及び 透水試験 } φ100mm コアボーリン } グ供試体 膨張率測定試験 乾燥単位容積重量試験
充填性の確認	モルタル液面高さ及 び勾配の測定 透明アクリル板を通 した目視観察	φ300mm コアボーリング 着色水圧入試験及び試験体の解体
各種計測	埋設機器を使った計測	

第 15 表 充填試験における計測項目及び内容

計測項目	数量	内容
温度履歴	13ヶ所	試験体内部及び外部に温度計（CC 熱電対）を設置して、モルタルの硬化に伴う温度履歴を測定した。
モルタルの内部ひずみ	8ヶ所	試験体内部にモールドゲージを設置して、硬化時に発生するモルタルのひずみを測定した。
モルタルの側圧	2ヶ所	型枠に土圧計を設置して、モルタル入時に型枠に作用する圧力を測定した。
型枠変位	3ヶ所	型枠外面に変位計を設置して、型枠の変位を測定した。
充填モルタルとドラム缶の境界面における変位	1ヶ所	ドラム缶表面に継目計を設置し、ドラム缶とモルタルの境界面における変位を測定した。
熱膨張係数の測定	1ヶ所	無応力計を使って無拘束状態でのモルタルのひずみ変化を求めた。

当該年度では、モルタルの水和熱を低減させるために、高炉スラグ、フライアッシュを多量に混入するとともに砂の増量をはかることにより、単位セメント量を減少させ、また、水中コンクリート用混和剤を使用してブリーディングを完全に防止し、施工管理を容易にしたため、昭和 62 年度に比較して良好なものとなった。

特に、温度履歴は、9 月施工で外気温が 18.0℃と高かったにも係らず温度上昇量が 18.0℃であった。

(c) 実規模充填試験

コンクリートピットと同規模のピットを用いてセメント系充填材(配合は第 16 表参照)充填試験を行い、流動性、充填性、水和熱特性等の検討を行った(第 17 表及び第 18 表参照)。その結果、以下のことが明らかとなった。

(一) 流動性、充填性

水中コンクリート用混和剤によって、モルタルの流動性及びセルフレベルリング性が向上し、ドラム缶同士の狭小な間隙においても良好な充填性が確認されるとともに、流動による材料分離も認められなかった。

第 16 表 セメント系充填材の配合(実規模充填試験)

水結合材比 (%)	砂結合材比	スランブフロー の範囲 (cm)	単 位 量 (kg/m ³)								
			水 W	セメント C	砂 S	混 和 材			混 和 剤		
						高 炉 スラグ B	フ ラ イ ア ッ シ ュ F	膨 張 材 CSA 100R	水中コンクリ ート用混和剤 USCAクリーン	AE 減 水 剤 ポゾリス No. 70	高性能減水剤 ポゾリス NL-4000
70	3.25	72.5±5	300	121	1395	161	121	26	1.5	1.716	8.58

水結合材比 : $W / (C+B+F+CSA100R)$

砂結合材比 : $S / (C+B+F+CSA100R)$

CSA100R : $(C+B+F+CSA100R) \times 6\%$

ポゾリスNo. 70 : $(C+B+F+CSA100R) \times 0.4\%$

ポゾリスNL-4000 : $(C+B+F+CSA100R) \times 2\%$

第 17 表 実規模充填試験における試験項目

試験項目	モルタル充填時	モルタル硬化後
モルタルの 品質管理	<ul style="list-style-type: none"> ・スランプフロー ・空気量 ・ブリーディング ・単位容積重量 	—
モルタルの 物性値	—	<ul style="list-style-type: none"> ・膨張率 ・透水係数 ・圧縮強度 ・引張強度 ・弾性係数
充填性の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・モルタル液面高さ、勾配、上方からの目視観察 	<ul style="list-style-type: none"> ・φ 300mm コアボーリング*1 ・着色水圧入試験及び試験体の解体*1

*1：平成元年度実施

第 18 表 実規模充填試験における計測項目

計測対象	計測項目	仕様計測器	数量
モルタル	ひずみ及び温度	測温機能付き埋込み型ひずみ計 (KM-100B)	7
	温度	CC 電熱対 (T)	10
コンクリート ピット	壁面のひずみ及び温度	測温機能付き埋込み型ひずみ計 (KM-200B)	7
	壁内のひずみ及び温度	測温機能付き埋込み型ひずみ計 (KM-100B)	15
	壁内の温度	ひずみタイプ式温度計 (TK-F)	5
	壁内の応力	コンクリート有効応力計 (GK-60-202)	2
外気温	温度	CC 電熱対 (T)	1

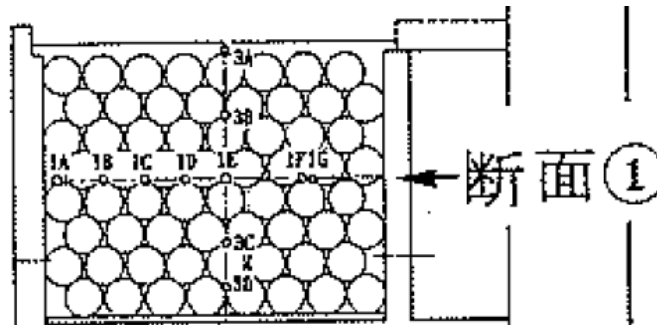
(二) 水和熱特性

高炉スラグ及びフライアッシュを多量に混入して単位セメント量を低減することによって、モルタルの温度上昇量は大幅に減少(第 19 表参照)し、温度応力によるひび割れの抑制に大きな効果があることがわかった。

第 19 表 モルタルの温度特性(断面①)

測点番号	充填温度 t_1 (°C)	最低温度時		最高温度時		材令28日 における 温度 t_4 (°C)	$t_1 - t_2$ (°C)	$t_3 - t_1$ (°C)	$t_3 - t_2$ (°C)	$t_3 - t_4$ (°C)
		材令 (日)	温度 t_2 (°C)	材令 (日)	温度 t_3 (°C)					
1 A	15.9	0.6	12.7	5.8	18.5	12.5	3.2	2.6	5.8	6.0
1 B	15.9	0.2	10.2	9.6	24.0	17.7	5.7	8.1	13.8	6.3
1 C	15.0	0.2	10.1	10.7	25.0	19.4	4.9	10.0	14.9	5.6
1 D	15.9	0.2	10.5	11.4	26.7	21.2	5.4	10.8	16.2	5.5
1 E	15.2	0.2	10.1	13.8	26.2	21.1	5.1	11.0	16.1	5.1
1 F	15.8	0.2	11.0	9.6	25.8	19.7	4.8	10.0	14.8	6.1

*1：測定番号位置は、下図参照。



c. 平成元年度検討概要

当該年度は昭和 63 年度に製作した実規模充填試験体を用いて、充填モルタルの品質試験及び実規模充填試験として、それぞれ以下の試験が実施された。

(a) 充填モルタル品質試験(配合は第 16 表参照)

- ・スランプフロー
- ・モルタル温度
- ・空気量

- ・ブリーディング量
- ・単位体積重量
- ・膨張率
- ・圧縮強度、引張強度及び静弾性係数
- ・透水係数

充填モルタルの品質管理試験結果を第20表に、膨張率測定結果を第5図に、物性試験結果を第21表に示す。

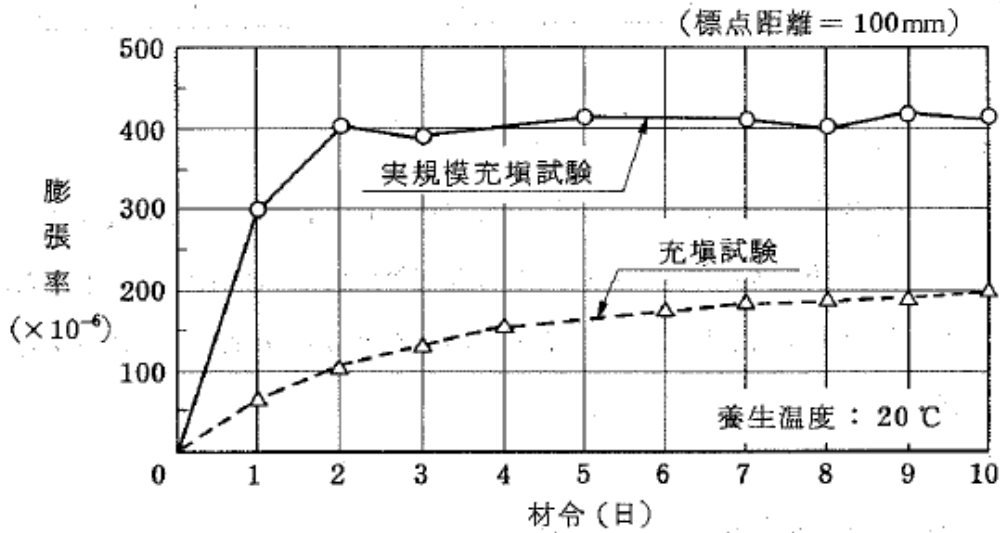
(b) 実規模充填試験(配合は第16表参照)

- ・モルタル充填試験
- ・充填性確認試験
- ・着色水圧入試験
- ・透水試験
- ・物理試験
- ・境界部付着試験
- ・温度応力解析

ピットの中央部と端部の2ヶ所でφ300mmのコアボーリング(第6図)を行い、充填状況の確認が行われた。その結果、充填状況は良好であり、ドラム缶下面のブリーディングによる空隙もなく、ドラム缶とモルタルは非常に密着しており、ドラム缶とドラム缶の間の狭い部分にもモルタルが密実に充填されていることが確認されている。

第 20 表 充填モルタルの品質管理試験結果

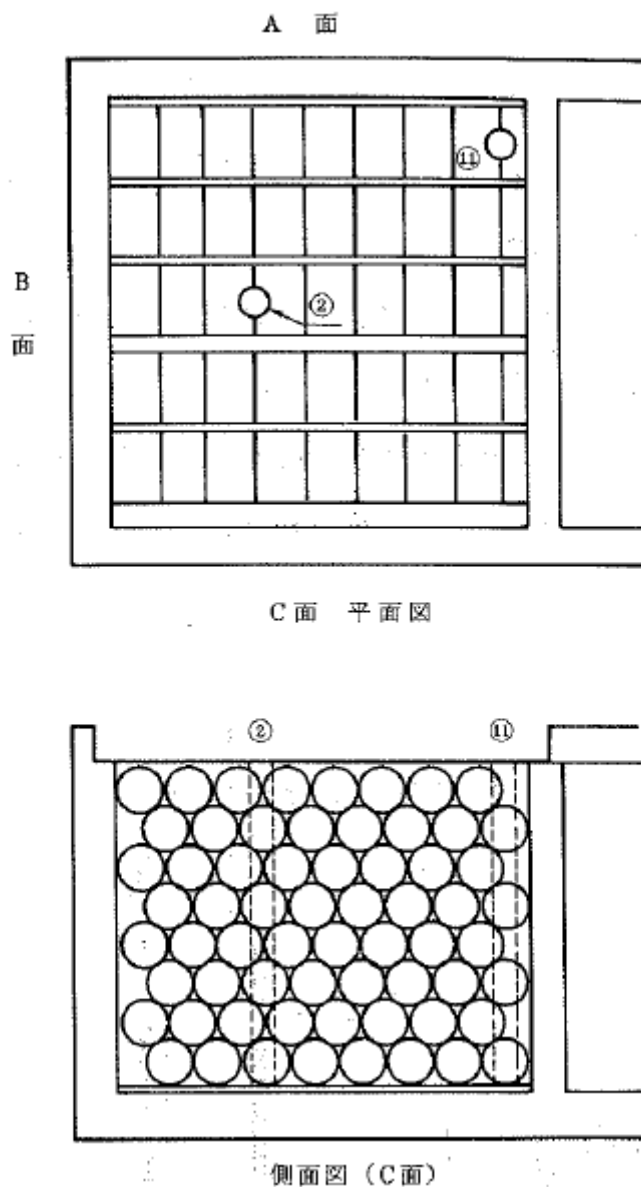
繰り上り時刻	アジダー No.	表面水率 (%)	計測場所	試料採取 時刻	スランブロー (cm×cm)	空気量 (%)	モルタル 温度(℃)	外気温 (℃)	単位体積重量 (t/m ³)	品質管理用 サンプリング	強度試験用 サンプリング
13:11	No. 1 (1号車)	5.0	バッチャープラント	13:15	72.0×73.5	2.2	14.5	12.0	2.022	—	—
			試験場	14:00	65.5×71.0	1.5	15.0	12.0	—	○	—
13:18	No. 2 (2号車)	5.0	バッチャープラント	13:25	75.5×77.5	1.9	15.0	12.0	2.018	—	—
			試験場	14:22	73.0×87.0	1.6	15.5	11.5	—	—	—
13:30	No. 3 (3号車)	5.0	バッチャープラント	13:33	77.5×77.5	2.1	15.0	12.0	2.022	—	—
			試験場	14:40	76.0×67.5	1.4	15.0	11.5	—	○	○
13:39	No. 4 (4号車)	5.0	バッチャープラント	13:42	76.5×77.5	2.4	14.5	12.0	2.012	—	—
			試験場	14:55	72.0×73.0	1.1	15.0	11.0	—	—	—
14:00	No. 5 (5号車)	5.5	バッチャープラント	14:00	74.0×72.0	3.3	14.0	13.0	2.012	—	—
			試験場	15:13	72.5×68.0	1.1	15.5	11.5	—	○	—
14:18	No. 6 (6号車)	5.5	バッチャープラント	14:20	76.0×75.0	2.5	14.0	12.0	2.031	—	—
			試験場	15:29	70.0×70.5	1.3	15.0	11.0	—	—	—
14:47	No. 7 (7号車)	5.5	バッチャープラント	14:48	76.5×76.5	2.1	14.5	12.0	2.041	—	—
			試験場	15:43	70.5×69.5	1.6	15.0	10.5	—	○	—
15:10	No. 8 (8号車)	6.0	バッチャープラント	15:10	72.0×72.5	2.0	14.0	12.0	2.060	—	—
			試験場	15:43	68.5×68.0	1.9	14.5	11.0	—	—	—
15:27	No. 9 (9号車)	6.0	バッチャープラント	15:30	75.5×74.5	3.3	14.0	12.0	2.038	—	—
			試験場	16:13	68.0×65.5	1.6	14.0	10.0	—	○	—



第 5 図 膨張率の測定結果

第 21 表 物性試験結果

材 令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
1	1.76	—	—
3	13.6	—	0.210
5	30.8	4.02	0.386
7	47.2	5.89	0.531
14	87.8	8.97	0.687
28	134	11.7	1.06
91	223	18.5	1.522

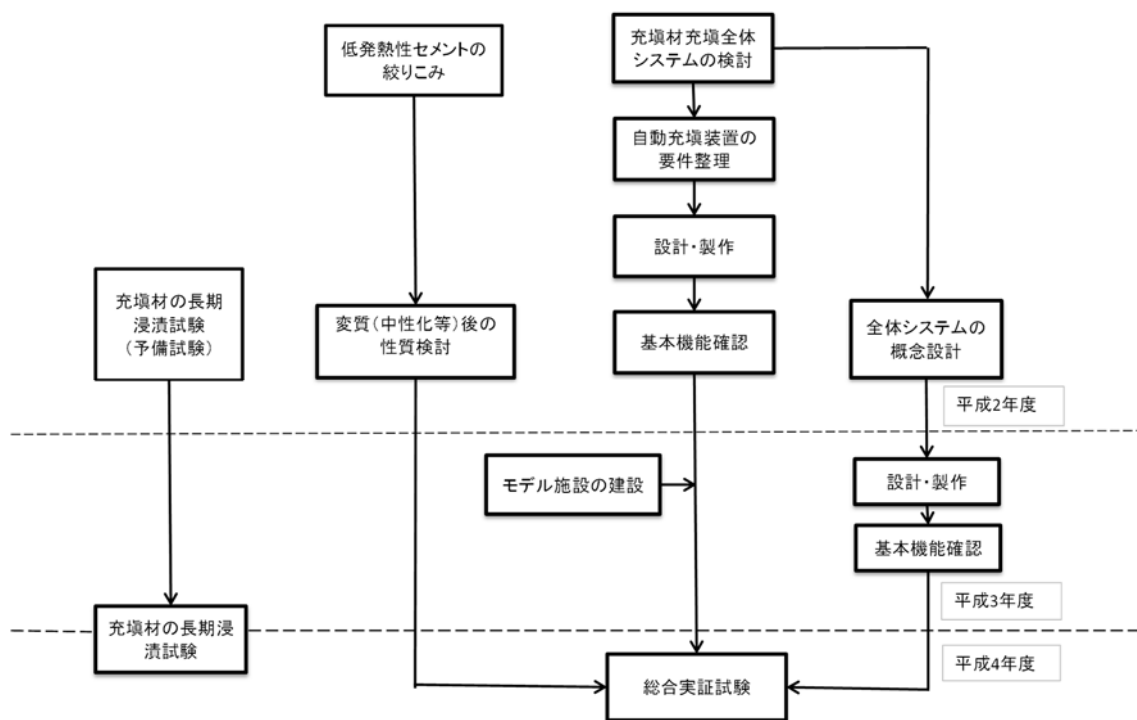


第 6 図 コアボーリング位置図(φ 300mm)

(ii) 平成 2 年度～平成 5 年度の検討概要

当該受託研究は、平成元年度までのセメント系充填材の検討結果を踏まえて、セメント系充填材により埋設設備の構造体に発生する温度応力を更に低減させることを主目的として実施された。

第 7 図にセメント系充填材実証試験検討フローを示す。



第7図 セメント系充填材実証試験検討フロー

a. 平成2年度検討概要

平成2年度は、以下の検討が実施された。

- ・ステップ1：低発熱セメントの絞りこみ(示方配合は第22表、使用材料は第23表参照)結合材のOPC、高炉スラグ及びフライアッシュの混合率を変化させた6種類に対して、簡易断熱温度上昇試験等^{*1}を行って選定。
- ・ステップ2：選定したセメントを用いた充填材の性状変化の確認。ステップ1で選定した結合材を用いて各種試験^{*2}を実施。

ステップ1の検討を踏まえ、流動性に関する試験、簡易断熱温度上昇試験等の結果、ポルトランドセメント量を低減しかつ中庸熱セメントを用いた、中庸熱、高炉スラグ、フライアッシュを2:5:3に混合したもの及びOPC、高炉スラグを1:9の割合で混合したものが結合材として選定された(第24表及び第8図参照)。

一方で、3成分系では凝結時間が始発、終結とも遅くなることから、これ以上フライアッシュを増加させ、OPC量を低減させることに問題があることが指摘された。そのため、3成分系の中では凝結時間に問題があるものの最も水と

熱が低い配合(中庸熱：高炉スラグ：フライアッシュ=2：5：3)が選定された。
 また、2成分系の結合材では、水和熱が最も低く、強度発現も十分な(OPC：高炉スラグ=1：9)が選定された。

また、ステップ2の検討の結果、ステップ1で絞り込んだ2種の結合材の断熱温度上昇試験(第9図参照)では、平成元年度まで提案していた充填材より、3成分系で14.6℃、2成分系で18.0℃温度上昇を低減することが可能となり、これら2種類の結合材は十分使えることが明らかにされた。

*1：フレッシュモルタルに関する諸物性(ブリーディング、スランプフロー、ドラム缶フロー、凝結硬化速度試験)、圧縮強度試験、簡易断熱温度上昇試験

*2：フレッシュモルタルに関する諸物性(ブリーディング率、スランプフロー、ドラム缶フロー)、断熱温度上昇試験、凍結融解抵抗性、中性化の影響

第22表 配合試験結果

配合 番号	W/C (%)	S/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)								
			水	セメント	高 炉 スラグ	フライ アッシュ	膨張材	細骨材	水中 不分離性 混和剤	AE 減水剤 (l/m ³)	高性能 減水剤 (l/m ³)
1	67.5	3.15	285	119	159	119	25	1329	1.50	1.69	4.22
2	67.5	3.14	285	(79)	199	119	25	1326	1.50	1.69	4.22
3	67.5	3.18	285	(79)	238	79	25	1341	1.50	1.69	4.22
4	68.7	3.20	290	40	357	—	25	1350	1.50	1.69	4.22
5	68.7	3.21	290	(79)	318	—	25	1353	1.50	1.69	5.06
6	68.7	3.21	290	(119)	278	—	25	1356	1.50	1.69	6.33

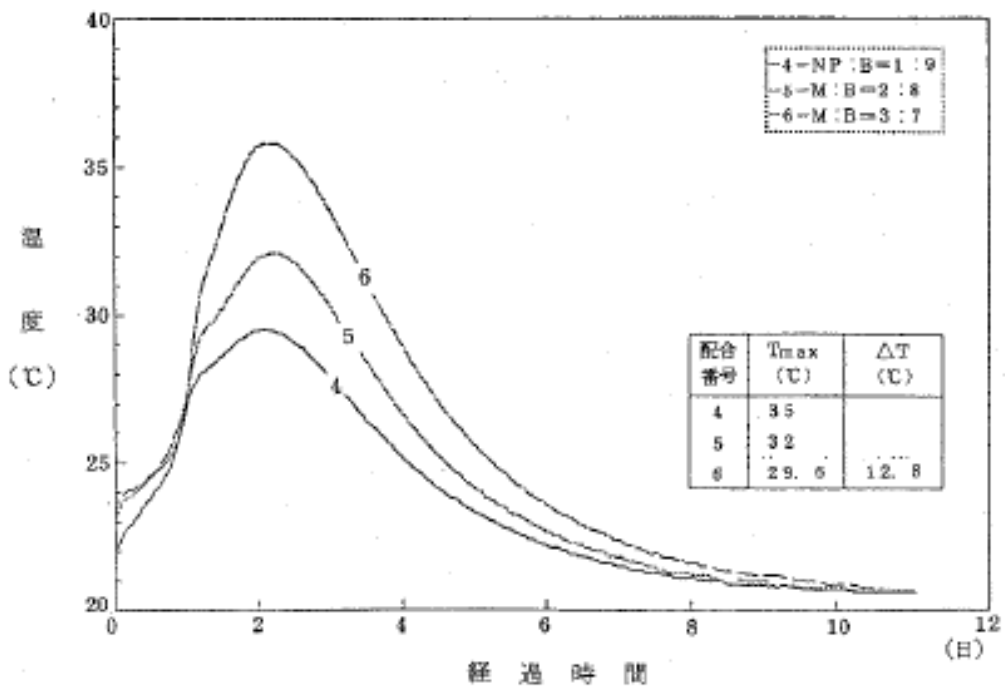
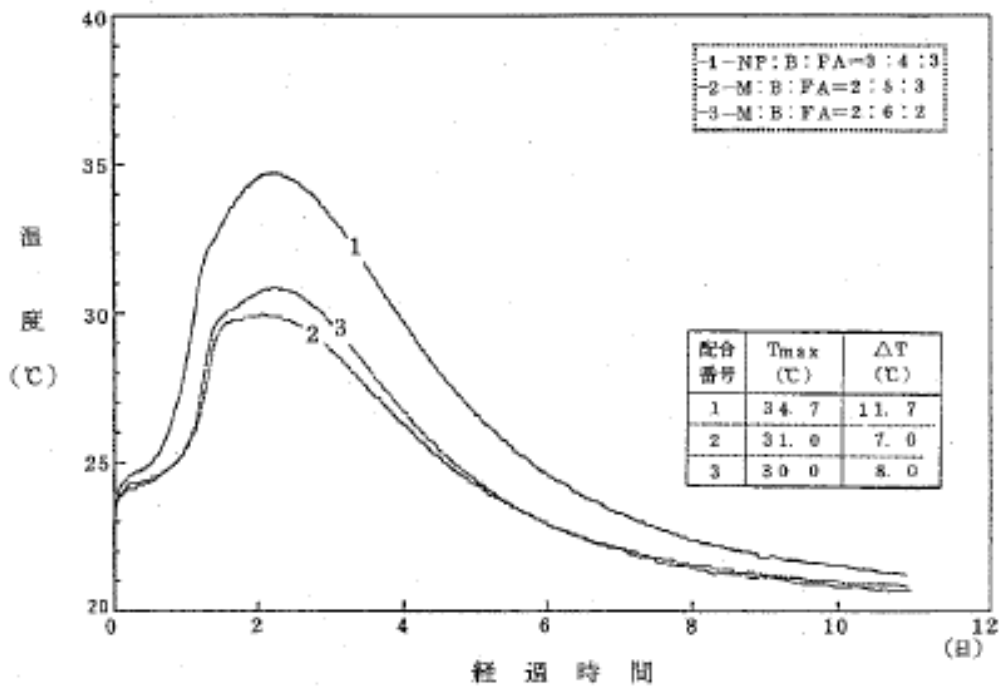
* ()は中庸熱ポルトランドセメント

第 23 表 使用材料一覧

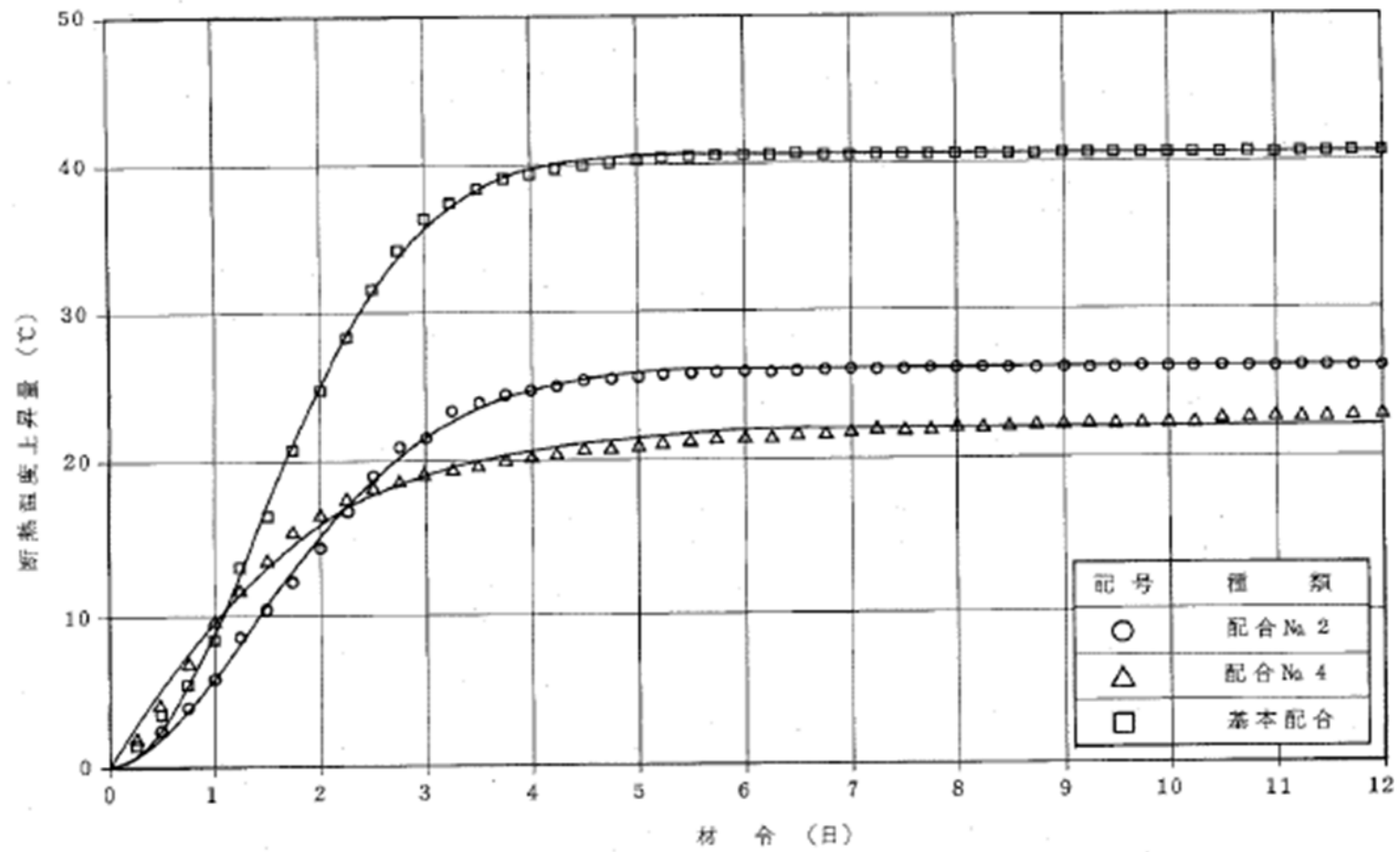
材 料		内 容
セメント		普通ポルトランドセメント（第一セメント製） 比重 3.16 中庸熱ポルトランドセメント（日本セメント製） 比重 3.20
混和材	高炉スラグ	セラメント（第一セメント製） 比重 2.90
	フライアッシュ	電発フライアッシュ（日本セメント製） 比重 2.19
	膨張材	デンカ CSA 100R（電気化学工業製） 比重 2.71
混和剤	水中不分離性 混和剤 （分離防止剤）	USCA クリーン（信越化学工業製） 水溶性セルロースエーテル系
	A E 減水剤 （標準型）	ポゾリス No.70（ポゾリス物産製） リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体 比重 1.25
	高性能 減水剤	ポゾリス NL-4000（ポゾリス物産製） 高縮合トリアジン系化合物 比重 1.13
細骨材		相模産（比重 2.59，吸水率 2.78%，F.M. 3.18）と 木更津産（比重 2.55，吸水率 2.84%，F.M. 1.28）を 8：2 で混合して使用

第24表 フレッシュモルタルに関する試験結果(ステップ1)

配合 番号	スランブフロー (cm)				3時間 低下量	ドラム缶フロー (分, 秒)				3時間 低下量 (秒)	空気量 (%)	練上り 温度 (℃)	ブリー ジング 率 (%)	凝 結 (時 間)	
	練上り	1時間	2時間	3時間		練上り	1時間	2時間	3時間					始 発	終 結
1	76 × 76	73 × 72	68 × 69	66 × 66	10	37 [〃]	49 [〃]	1' 12 [〃]	1' 01 [〃]	24 [〃]	2.0	22.9	0	24.5	33.0
2	78 × 78	76 × 75	73 × 73	72 × 71	6.5	34 [〃]	43 [〃]	1' 00 [〃]	1' 08 [〃]	34 [〃]	2.0	22.8	0	33.5	40.0
3	78 × 77	76 × 76	72 × 72	70 × 70	7.5	40 [〃]	55 [〃]	1' 00 [〃]	1' 07 [〃]	27 [〃]	2.0	22.7	0	30.0	39.0
4	76 × 75	77 × 75	73 × 73	66 × 66	9.5	46 [〃]	1' 15 [〃]	1' 18 [〃]	1' 27 [〃]	41 [〃]	1.6	22.6	0	20.5	29.5
5	75 × 73	72 × 72	70 × 69	68 × 67	6.5	44 [〃]	59 [〃]	1' 12 [〃]	1' 31 [〃]	47 [〃]	1.4	22.7	0	24.0	32.5
6	78 × 77	76 × 74	73 × 72	68 × 67	10	45 [〃]	1' 10 [〃]	1' 10 [〃]	1' 16 [〃]	31 [〃]	1.4	23.0	0	23.0	33.0



第8図 簡易断熱温度上昇試験結果(ステップ1)



第9図 断熱温度上昇量試験結果(20.0°C)

b. 平成 3 年度検討概要

平成 3 年度は、今後予定している充填システム実証試験のための埋設設備コンクリート壁の建設を実施し、特にセメント系充填材の選定に係る試験は特に実施されなかった。

c. 平成 4 年度検討概要

昭和 63 年度に実施した実規模充填試験では、3 成分系を用いて実施した。その結果、埋設設備のホワイトゾーン(モルタルの容積が大きい部分)の放熱速度が小さくなって充填材の温度が更に高くなることとなった。

当該年度は、充填材の水和発熱量を更に低減させる必要があることから、2 成分系結合材(使用材料は第 25 表、示方配合は第 26 表参照)を用いて実規模試験を実施し、充填材の水和発熱量と、流動性、充填性等^{*1}の確認を行った。

その結果、流動性、充填性については問題ないことが示された。また、昭和 63 年度に実施した 3 成分系の結合材を用いた場合、温度上昇量は 18.0℃であった。当該年度に用いた 2 成分系では、ホワイトゾーンという温度的には不利な条件があったにも係らず、温度上昇量を 14.5℃(第 27 表及び第 10 図参照)まで低減することができた。

第 25 表 使用材料

項 目		使 用 材 料
結 合 材	セ メ ン ト	中庸熟ポルトランドセメント10%, 高炉スラグ90%の混合セメント (三菱マテリアル製)
	膨 張 材	CSA系膨張材 (電気化学工業製デンカ CSA100R)
混 和 剤	分 離 防 止 剤	水溶性セルロースエーテル (信越化学工業製USCAクリーン)
	AE 減 水 剤 (標 準 形)	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体 (NMB製ポゾリスNo.70)
	高 性 能 減 水 剤	高縮合トリアジン系化合物 (NMB製ポゾリスNL-4000)
細 骨 材		いわき市大久町地内産山砂 F.M. = 2.79

*1: 品質管理試験 (出荷時、現場到着時)、充填材高さ及び流動勾配測定、強度試験、温度・ひずみの計測

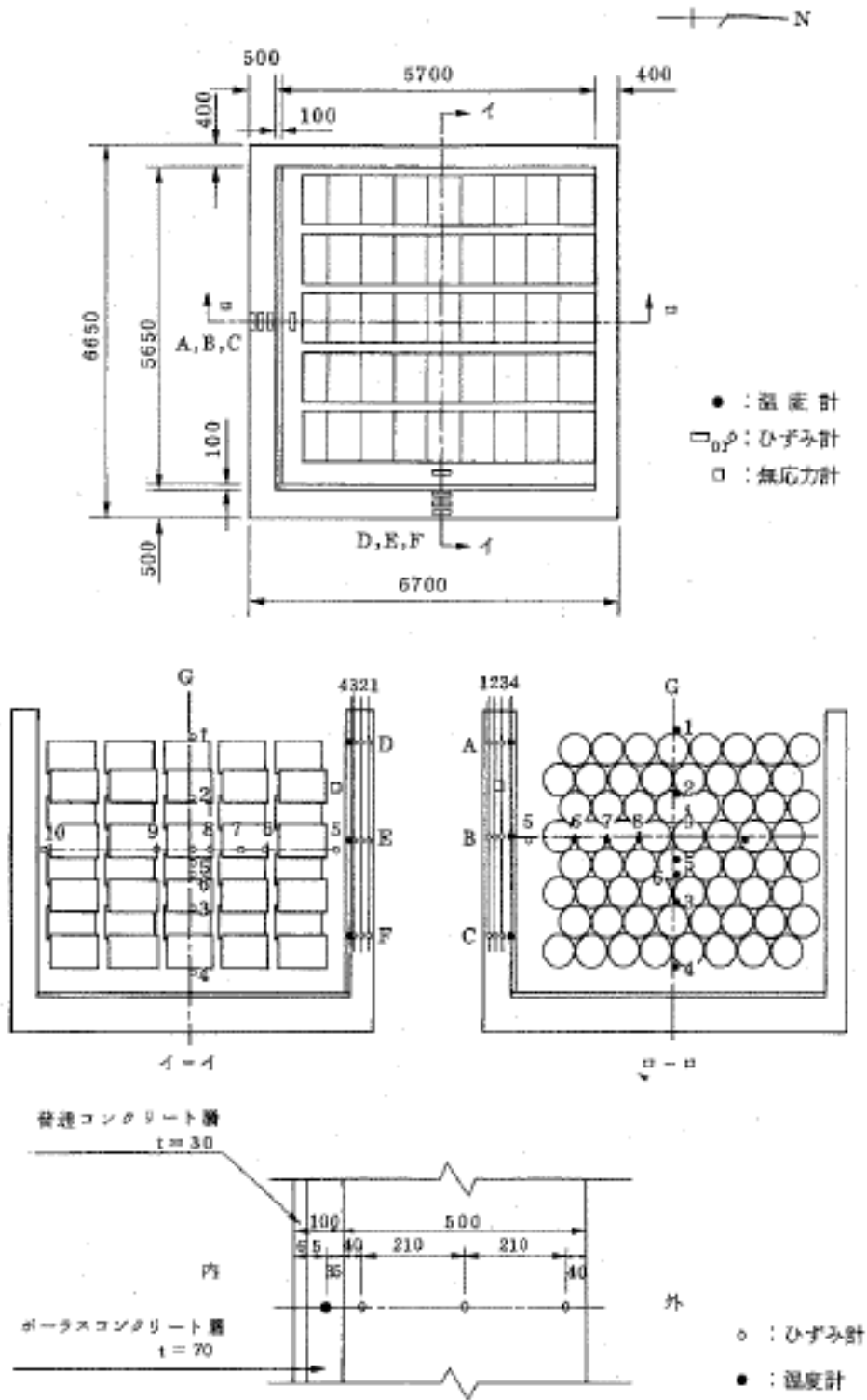
第 26 表 充填材の示方配合

水結合材比 (%)	砂結合材比 (%)	スランプフローの範囲 (cm)	単 位 量 (kg / m ³)						
			水	砂	結 合 材		混 和 剤		
					セメント	膨 張 材 CSA 100 R	分離防止剤 USCA クリーン	AE 減水剤 No.70	高 性 能 減 水 剤 NL-4000
72.3	3.24	72.5 ± 2.5	305	1367	397	25	1.5	結合材重量 の0.1%	結合材重量 の1.5%

第 27 表 充填材の温度特性

	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10	E-5	E-6	E-7	E-9	E-10	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6
充填直後 t_0 (°C)	25.2	25.1	24.8	25.4	26.2	25.1	24.9	25.5	25.6	24.7	23.0	23.5	25.0	26.3	24.8	19.1	19.1
充填終了時 t_1 (°C)* ¹	26.0	21.5	21.4	23.1	23.5	21.7	26.0	24.0	22.9	24.9	23.3	24.1	23.9	23.4	23.2	20.3	19.6
最高温度 t_2 (°C)	37.6	36.3	35.5	35.2	36.7	33.8	39.4	35.3	35.2	34.5	27.5	29.2	34.1	34.9	34.8	34.7	34.9
最高温度材令 (日)	2.00	4.58	8.67	8.58	8.00	6.63	1.92	7.58	8.75	8.75	2.00	1.52	4.25	8.58	2.54	8.67	8.67
$t_2 - t_0$ (°C)	12.4	11.2	10.7	9.8	10.5	8.7	14.5	9.8	9.6	9.8	4.5	5.7	9.1	8.6	10.0	15.6	15.8
温度上昇速度 (°C/日)	6.20	2.45	1.23	1.14	1.31	1.31	7.55	1.29	1.10	1.12	2.25	3.75	2.14	1.00	3.94	1.80	1.82
11/4 現在温度 t_3 (°C)	21.3	22.5	23.3	23.9	25.5	22.2	20.4	22.9	23.5	23.0	15.2	16.4	21.4	24.8	24.2	24.0	24.2
$t_2 - t_3$ (°C)	16.3	13.8	12.2	11.3	11.2	11.6	19.0	12.4	11.7	11.5	12.3	12.8	12.7	10.1	10.6	10.7	10.7
温度下降速度 (°C/日)	0.44	0.40	0.40	0.37	0.36	0.36	0.51	0.39	0.39	0.39	0.33	0.34	0.37	0.33	0.29	0.35	0.38

* 1 温度経時変化グラフ 初期値



第 10 図 計測器の設置位置

d. 平成 5 年度検討概要

当該年度は、平成 4 年度に実施した実規模充填試験体に対して以下の 3 点を確認した。

- ・ 充填材の充填状況の確認(模擬廃棄体間の狭隘な空隙部への充填状況の確認、特に、模擬廃棄体同士の接触部への充填状況の確認)
- ・ 材料分離傾向の有無の確認(模擬廃棄体下面におけるブリーディング等による骨材の分離状態の有無の確認)
- ・ 充填材の物性の確認

上記を確認するために以下の 3 項目の試験が実施された。

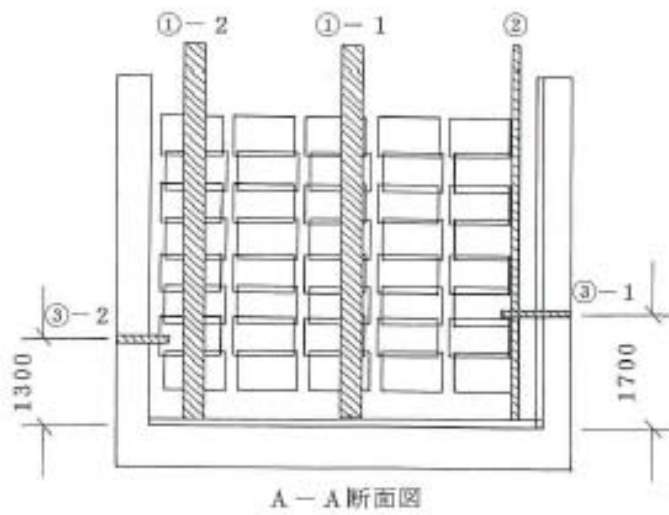
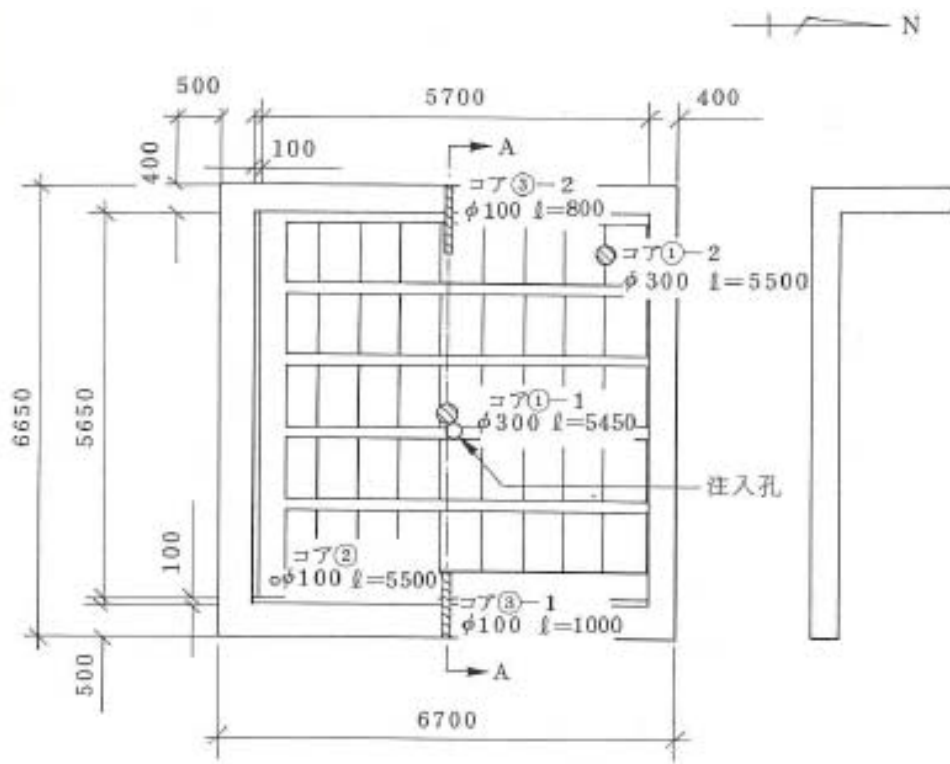
- ・ ボーリングコア(第 28 表及び第 11 図参照)による充填状況の目視による確認
- ・ 模擬埋設設備の解体調査による充填状況の確認
- ・ ボーリングコアから採取した供試体による透水試験及び圧縮強度試験

解体調査の結果、以下の点が確認された。

- ・ 模擬廃棄体同士の接触部等の狭隘部にも充填材は確実に充填されていた(第 12 図参照)。
- ・ 模擬廃棄体の下面等については、材料分離による細骨材の露出や充填不良による空隙は認められなかった。
- ・ 側壁コンクリートとの境界部分にも十分に密着していた(第 13 図参照)。

第 28 表 ボーリングコアの内容

記 号	直径 (mm)	長さ (mm)	目 的
① - 1	300	5,450	充填状況観察
① - 2	300	5,500	充填状況観察
②	100	5,500	透水試験, 圧縮強度試験
③ - 1	100	1,000	EPMA 分析 (通常土側)
③ - 2	100	800	EPMA 分析 (ベントナイト混合土側)



第 11 図 ボーリングコア採取位置



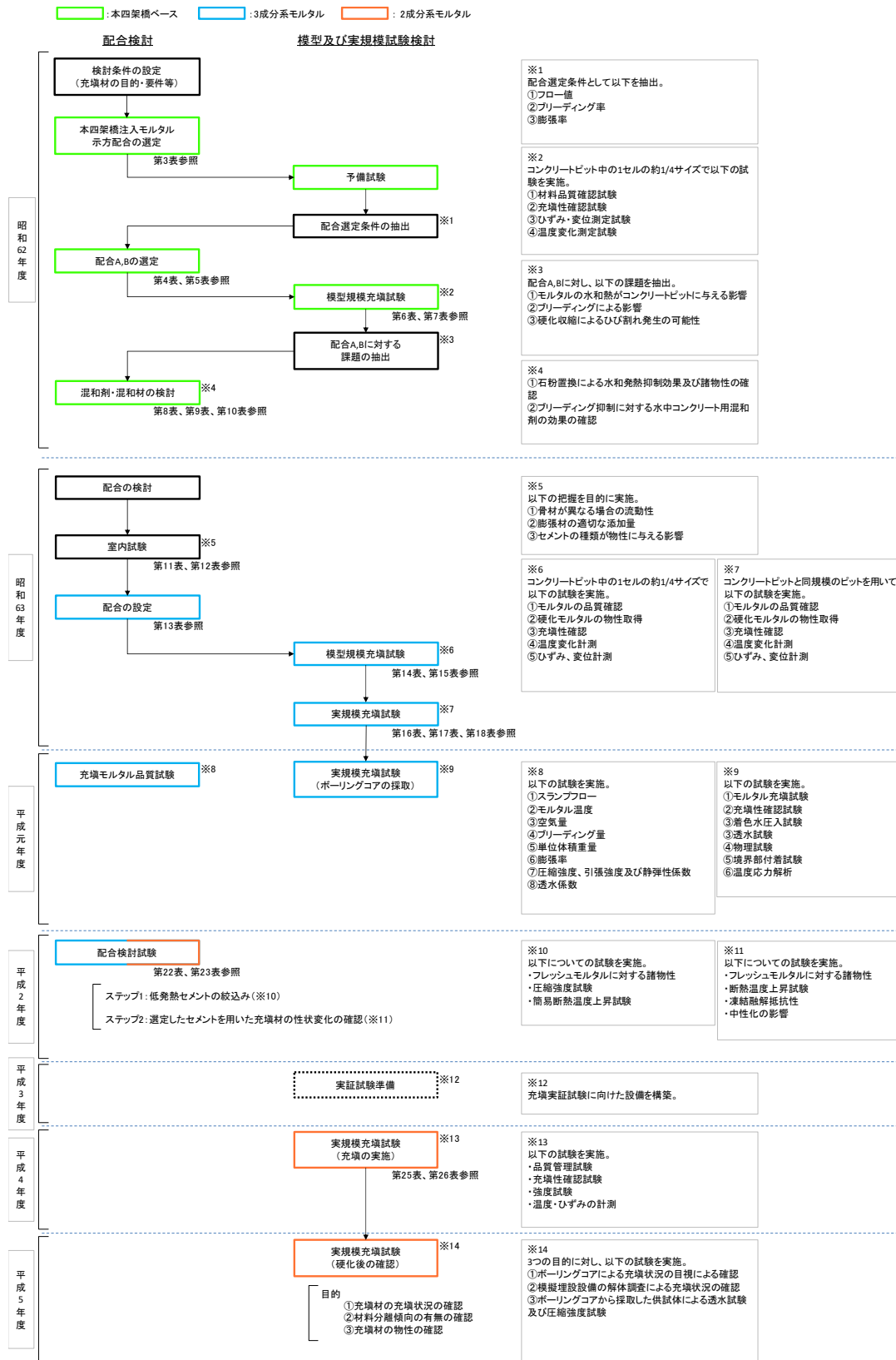
第 12 図 セメント系充填材部分の解体状況(模擬廃棄体間の間隙部の状況)



第 13 図 セメント系充填材部分の解体状況(側壁コンクリートとの境界部の状況)

(iii) 検討手順

(i)及び(ii)で示した昭和62年度～平成5年度までの検討概要の一連の経緯を第14図に検討フロー図として示す。



第 14 図 低レベル放射性廃棄物処分施設安全性確認試験の検討フロー

(iv) 検討結果

本四架橋の注入モルタルの示方配合に基づいて、埋設設備のセメント系充填材に求められる特性として、「低発熱型であること」、「ブリーディングを防止すること」、「流動性、充填性に優れること」の条件を考慮した。これより、混和材(高炉スラグ、フライアッシュ)の利用で単位セメント量を低減することで水和発熱を抑え、更に水中コンクリート用混和剤を用いて、ブリーディングを防止する等の改良を重ねた。

その結果、以下の3項目が当該受託研究で示された。

- ・当該受託研究で示されたセメント系充填材は、埋設設備の廃棄体間の狭隘な間隙部分にも十分に充填ができており、模擬廃棄体と十分密着している。
- ・材料分離による間隙や充填不良による空隙は見られず、下段や側部のコンクリートスペーサ、あるいは側壁コンクリートとも十分に密着している。
- ・セメント系充填材の透水係数は $10^{-10}\text{cm/s} \sim 10^{-11}\text{cm/s}$ のオーダーであり、十分に水密性を有している。

(v) 昭和62年度～平成5年度までの受託研究のまとめ

昭和62年度～平成5年度までに通産省受託研究で原子力環境整備センターが実施したセメント系充填材に関する試験結果をまとめると以下のとおりとなる。

セメント系充填材の仕様検討は、以下の手順で行われた。

本四架橋注入モルタルの仕様をベースとした。

セメント系充填材に求められる特性として、主に流動性、ブリーディングに着目した配合仕様の見直し(配合A及びB)による検討が実施された。

配合A及びBに基づいた試験により、更なる見直しとして、水和発熱の低減、ブリーディングの抑制、硬化収縮の抑制の観点からの配合見直しの検討が実施された。

上記の検討を経て、主に水和発熱の低減、ブリーディングの抑制、硬化収縮の抑制、流動性、充填性の確保という観点から、混和材の使用、水中コンクリート混和剤の使用を基本的な概念とし、昭和63年度から3成分系モルタル、平成2年度から2成分系モルタルを主体とした検討が開始された。

いずれの試験も、室内によるセメント系充填材品質確認試験、コンクリート

ピットの1セルの1/4サイズの模型試験による流動性、充填性及び水和発熱特性、ブリーディング等の確認試験、実規模充填試験が行われた。

その結果、いずれのモルタルも以下の3項目が当該受託研究で示された。

当該受託研究で示されたセメント系充填材により、埋設設備の廃棄体間の狭隘な間隙部分にも十分に充填ができており、模擬廃棄体と十分密着している。

材料分離による間隙や充填不良による空隙は見られず、下段や側部のコンクリートスペーサ、あるいは側壁コンクリートとも十分に密着している。

充填材の透水係数は $10^{-10}\text{cm/s}\sim 10^{-11}\text{cm/s}$ のオーダーであり、十分に水密性を有している。

(2) 日本コンクリート工学協会の検討状況⁽¹⁾

(i) 検討概要

当時建設の各分野では、各種の充填材が開発され、広範囲に実用されていた。しかし、それらの充填材はそれぞれ用途別に研究開発され、また有用されてきたため、これらの品質を共通の基準で相互に評価されたことは、ほとんどなかった。

そこで、平成3年度～平成4年度において、日本コンクリート工学協会(以下「JCI」という。)に充填材の品質評価研究委員会が設置され、平成4年12月のシンポジウムにおける中間報告⁽²⁾と論文発表⁽³⁾も踏まえ、充填材について要求性能やその品質評価試験方法の整理、要求される品質の分類化及び統一化が行われた。

(ii) 要求性能の分類

充填材に要求される性能を大別すると、「硬化前の充填材の性能として要求される項目」と「硬化後の充填材の性能として要求される項目」の二つに大別される。なかでも流動性と材料分離抵抗性は充填性に要求される性能のなかで、非常に重要な品質項目である。

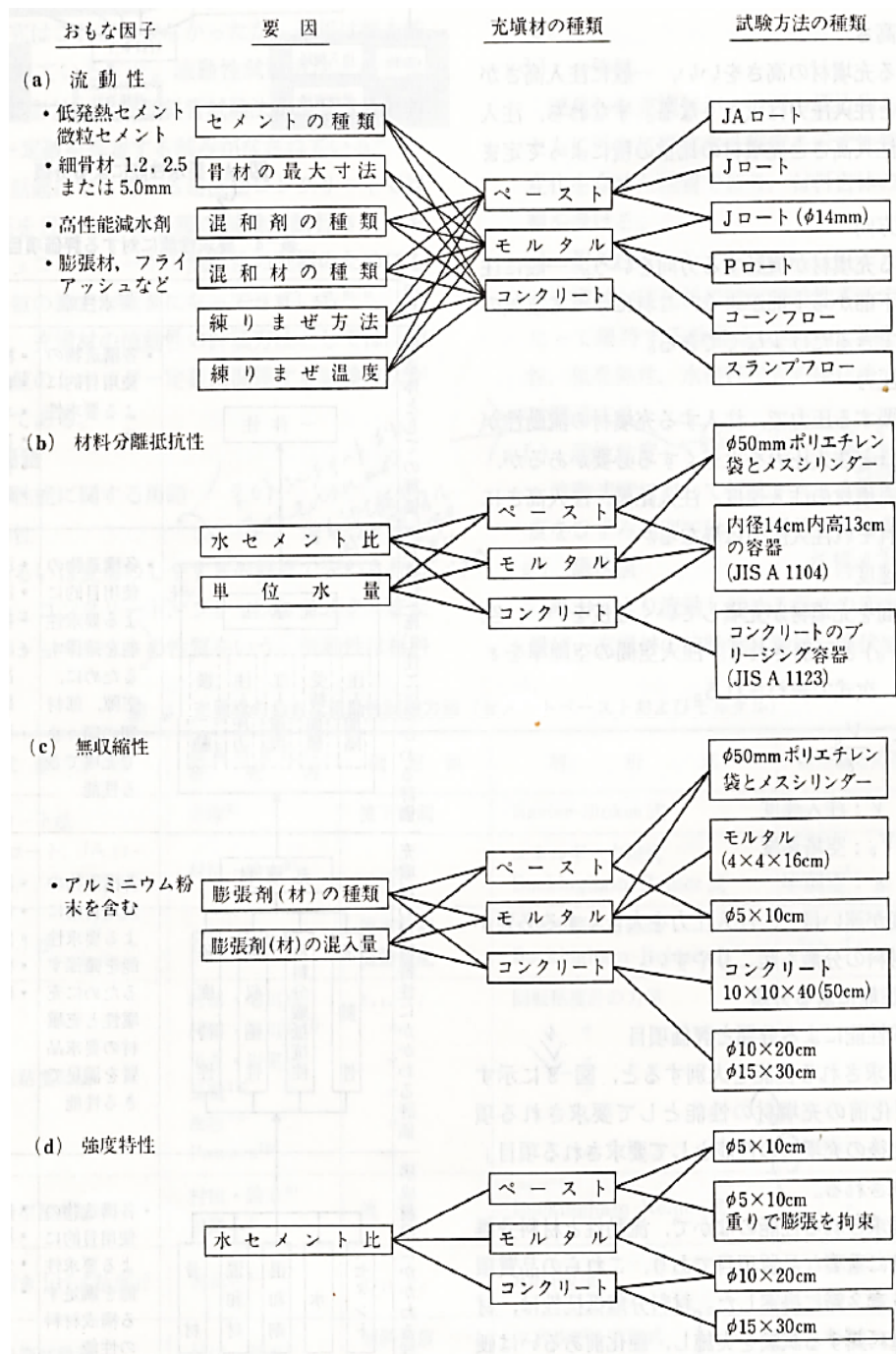
充填材の要求性能を分類するに際しては、硬化の前後の要求性能が異なるため、どのような評価方法で分類するかを明確に整理して、検討する必要がある。

充填材の要求性能については、構成材料、材料特性、施工性、構造体の性能の各段階について評価項目とともに第29表として整理されている。

第 29 表 要求性能に対する評価項目

項目	フ ロ ー	要求性能	評価項目
構造体としての評価		<ul style="list-style-type: none"> 各構造物の使用目的による要求性能 	<ul style="list-style-type: none"> 構造耐力 接着性, 付着性 水密性, 透気性 ひびわれ防止 強度 耐久性
充填性(施工性)にかかわる評価		<ul style="list-style-type: none"> 各構造物の使用目的による要求性能を確保するために, 空隙, 部材間の隅々まで充填できる性能 	<ul style="list-style-type: none"> 注入量 注入勾配, 高さ 接着性 流出口からの流出量と流動性の確認 強度
充填材の材料特性にかかわる評価		<ul style="list-style-type: none"> 各構造物の使用目的による要求性能を確保するために充填性と充填材の要求品質を満足できる性能 	<ul style="list-style-type: none"> 流動性 材料分離抵抗性 無収縮性 強度特性 硬化速度
構成材料にかかわる評価		<ul style="list-style-type: none"> 各構造物の使用目的による要求性能を満足する構成材料の性能 	<ul style="list-style-type: none"> 低発熱性 膨張性 分散性 骨材の最大寸法

充填材の材料特性である流動性、材料分離抵抗性、無収縮性及び強度特性などに影響を及ぼす各種の要因が第 15 図のように整理されている。



第 15 図 充填材の材料特性に及ぼす各種の要因

(iii) まとめ

本委員会では、原子力環境整備センターによるセメント系充填材に係る検討状況も踏まえ、充填材全般としての要求事項、品質規格や試験方法を整理しており、

セメント系充填材の設計に当たり参考となる情報が取りまとめられている。

(3) 既往の知見のまとめ

セメント系充填材の設計に当たり考慮すべき項目が、JCI の委員会により要求事項として整理された。

原子力環境整備センターにおいても実規模の充填試験を含めた検討がなされ、各要求事項を満足するものとして2つの配合(3成分系及び2成分系)が示されている。

配合の検討に当たっては、主に水和熱の低減、ブリーディングの抑制、硬化収縮の低減に考慮されている。

このように、当初からひび割れの制御を考慮してセメント系充填材の検討が進められてきた。水和熱に対しては混和材の使用により、硬化収縮に対しては膨張材の使用により収縮によるひび割れの発生に対して対応されてきた。

3. 現在のセメント系充填材の配合選定

(1) 配合選定の経緯

低レベル放射性廃棄物施設に用いるセメント系充填材は、原子力環境整備センターにおいて推奨されていた2成分系(普通ポルトランドセメント(以下「N」という。))及び高炉スラグ(以下「S」という。)を質量比で1:9で混合)及び3成分系(中庸熱ポルトランドセメント(以下「M」という。))、S及びフライアッシュ(以下「F」という。)を質量比で2:5:3で混合)の2種類の結合材に対する比較検討を1992年度に実施し、設定した。

当時、原子力環境整備センターの検討成果では2成分系と3成分系では3成分系の温度上昇が大きいものの、その影響は小さいと考え、流動性を重視して3成分系モルタルを推奨していた。

一方、2成分系モルタルは温度上昇量が小さいことに加え、材料コストの面などで有利な点があった。また、温度上昇量や流動性に関しては使用する材料で変化することが知られており、セメント系充填材の配合設定に当たっては、実際に使用される可能性の高い材料を用いて比較検討して決定することが妥当であるとし、1992年度に当社にて配合選定試験を実施した。

(2) 配合選定試験

本試験では、スランプフロー及びブリーディング量を満足した上で、ひび割れ抑制を考慮した配合を選定することを目的として、結合材の構成比率を変化させた場合の温度上昇特性、流動性の変化について検討した。

(i) 検討した混合比率

本試験では、第30表に示す結合材比率で試験を実施した。

第 30 表 配合選定試験で実施した結合材比率

No.	セメント	高炉スラグ	フライアッシュ	備 考
1	5(N)	95	—	スラグ混合率の影響検討
2	10(N)	90	—	同上
3	15(N)	85	—	同上
4	10(N)	60	30	フライアッシュ置換の効果
5	10(M)	90	—	M の効果
6	20(M)	50	30	既往検討の確認と M の効果

(ii) 試験項目

試験項目を第 31 表に示す。

なお、準拠規定等は 1992 年当時のまま示した。

第 31 表 試験項目一覧

試験項目	仕 様	準拠規定等
スランプフロー	0, 30, 60, 90, 120 分	土木学会基準コンクリートのスランプフロー試験方法(案)
ドラム缶フロー	同上	低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験報告書
空気量	同上	JIS A 1128 フレッシュコンクリートの空気量による試験方法
練り上がり温度	同上	アルコール棒状温度計による測定
断熱温度上昇	1 配合につき 1 回	空冷 2 槽式試験機により測定
凝結	同上	ASTM C 403 プロテクター貫入抵抗試験
ブリーディング率	同上	JSCE-F522 プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率及び膨張率試験方法(ポリエチレン袋方法)
単位容積質量	同上	JIS A 1116 フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法(質量方法)
圧縮強度	3, 5, 7, 14, 28 日	JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法

(iii) 試験結果

試験配合はあらかじめスランプフローが 70cm～75cm の範囲となるように配合を調整した後、比較試験を実施している。配合選定試験の結果を第 32 表及び第 33 表に示す。

a. 流動性

第 30 表に示した No. 1～No. 6 の結合材を用いた配合においても 120 分後のスランプフローが 65cm 程度であり、ドラム缶フローも閉塞することなく全て流下したことから、優れた流動性を確保できることを確認した。

b. 断熱温度上昇量

断熱温度上昇量は S の置換率が高くなるに伴い低減される結果となった。また、第 1 表に示す No. 2 と No. 5 の使用するセメントの種類の違い (N と M) としては、M を用いた方が 2℃ 程度小さい結果となった。

c. 凝結特性

2 成分系モルタルの凝結時間は、S の置換率が高くなるに伴い始発・終結時間ともに遅れるが終結の目標時間である 48 時間^{*1} 以内をクリアした。また、セメントの種類の違い (N と M) による凝結時間はほとんど変化しない結果となった。3 成分系モルタルの凝結時間は、2 成分系モルタルよりも遅く、No. 4 及び No. 6 配合ともに目標時間をクリアしない結果となった。

d. 一軸圧縮強度

2 成分系モルタルにおいては、断熱温度上昇量が大きいものが圧縮強度も大きくなる結果となった。これは、セメントの水和反応に応じた強度発現が得られていると判断できる。一方、3 成分系モルタルは、セメント量が多い No. 6 配合の圧縮強度が高い結果となったが、断熱温度上昇量が同等である 2 成分系の No. 3 配合と比較すると、約 8 割程度 (28 日強度時点) の強度発現に留まる結果となった。配合の構成材料が異なることから、2 成分系と 3 成分系のモルタルを断熱温度上昇量と強度の関係を同列に扱うことはできないが、3 成分系のモルタルに関しては F を使用しているため、S と F の水和生成物の違いが強度発現に影響を与えたと考えられる。

(3) 配合選定試験まとめ

セメント系充填材の流動性に関しては、いずれの配合も 120 分後のスランプフローの値が 65cm 程度であり性能に遜色はないと結論づけた。断熱温度上昇量は、S の置換率が高くなると温度上昇を低く抑えられることが明らかとなった。ただし、No. 1 配合の場合は、結合材の製造過程において生じる計量誤差により N の添加量が少なくなることも想定され、S の潜在水硬性の刺激量が少なくなることで生じる凝結遅延や強度発現不足を回避するため、選定外とした。また、3 成分系のモルタルは F を使用することで凝結が遅れる傾向であること、圧縮強度が 2 成分系に比べて小さいことが確認された。当時は、種々の現場 (本四連絡橋工事など) において F の品質

上の問題が懸念*2されていたこともあり、No.5の2成分系のモルタル(1:9モルタル)を選定*3した。

*1:凝結の終結時間は、モルタル充填の次工程である上部ポーラスコンクリート板設置作業までの最短スケジュールである2日程度を目安とした。工程を遅らせることも選択肢にあったが、凝結が遅すぎると材料分離の懸念もあったことから48時間を目標値とした。

*2:1958年に「JISA6201フライアッシュ」が、1960年には「JIR5213フライアッシュセメント」がそれぞれ制定された。その後、1970年代には使用量が年々増加するに従い、フライアッシュの一層の有効活用を図る目的で品質規定を主とする改正が行われたが、以降、品質規定は1999年「JISA6201コンクリート用フライアッシュ」にてフライアッシュの種類の設定と品質の改正が行われるまで見直しがされていない。さらに、1968年と1977年のフライアッシュの物理的性質を比較すると、1977年時の規定が緩和されていることが分かる。これは、火力発電所で用いる石炭が国内から海外炭に移行したことにより、石炭灰の品質も変化していたことが影響したものと思われ、セメント系充填材の配合検討当時に品質上の問題が懸念されたことは理解できる。

*3:Sは、1986年に土木学会規準「コンクリート用高炉スラグ微粉末規格(案)」が制定され、当時のコンクリート標準示方書にその使用についての規定が設けられた。コンクリート用高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、1995年に「JISA6206コンクリート用高炉スラグ微粉末」が制定されるまでの間、1988年に制定された「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案)」が標準として用いられていたことから、これを参考に検討を実施することで品質変動が抑制されると考えた。なお、昨今では高炉セメントは普通セメントと比較して自己収縮が大きくなることが知られているが、配合設定当時(1992年)は、乾燥収縮に比べてその影響は小さいことから、ひび割れ制御や設計において考慮されていなかった。ひび割れ発生原因として自己収縮を考慮するようになったのは、平成8年に制定されたコンクリート標準示方書(設計編)からである。

第 32 表 埋設設備充填モルタル配合試験結果一覧表(圧縮強度を除く)

No.	単体量 (kg/m ³)						混和剤量			試験結果													備考		
	水 (W)	セメント (C)	高炉スラグ (S)	フライアッシュ (F)	膨張材 (EX)	細骨材	増粘材 (kg/m ³)	No. 70 C×%	NL4000 C×%	スランプフロー (cm)			ドラム缶フロー (分' 秒")			空気量 (%)			単位容積質量 (t/m ³)	練上り温度 (°C)	凝結 (時間)			ブリーディング (率)	断熱温度上昇 (°C)
										0分	60分	120分	0分	60分	120分	0分	60分	120分			始発	終結			
1	280	20	377	—	25	1,470	1.5	0.10	1.0	71.0	70.8	67.0	2' 06"	2' 39"	3' 17"	2.9	1.9	2.3	2.183	19.7	39.1	47.6	0	20.7	N5:S95
2	281	40	357	—	25	1,468	1.5	0.10	1.0	72.5	69.8	67.0	2' 54"	3' 12"	4' 03"	2.8	2.2	2.2	2.187	18.8	33.7	43.6	0	25.8	N10:S90
3	285	60	337	—	25	1,460	1.5	0.10	1.0	71.0	69.5	65.8	1' 38"	2' 39"	2' 34"	3.1	1.9	2.1	2.173	18.7	29.5	42.0	0	28.9	N15:S85
4	283	40	238	119	25	1,428	1.5	0.10	1.0	70.8	68.3	67.0	1' 36"	2' 29"	2' 52"	3.4	1.6	1.9	2.135	18.9	43.7	53.2	0	26.2	N10:S60:F30
5	283	40	357	—	25	1,462	1.5	0.10	1.0	72.3	71.3	65.0	1' 53"	2' 28"	2' 25"	3.5	2.3	1.8	2.173	19.1	35.2	44.0	0	23.2	M10:S90
6	291	79	199	119	25	1,410	1.5	0.10	1.0	72.5	67.8	64.5	1' 25"	1' 31"	1' 43"	2.8	1.4	1.7	2.217	19.8	35.7	50.8	0	28.1	M20:S50:F30

第 33 表 埋設設備充填モルタル配合試験 圧縮強度試験結果一覧表

No.	圧縮強度 (kgf/cm ²)					備考
	材齢 3 日	材齢 5 日	材齢 7 日	材齢 14 日	材齢 28 日	
1	18.1	34.4	45.3	74.9	103	N5:S95
2	28.3	59.2	82.3	116	135	N10:S90
3	32.3	69.6	97.1	145	174	N15:S85
4	13.3	39.6	60.3	95.3	117	N10:S60:F30
5	27.2	58.2	78.9	110	136	M10:S90
6	15.4	41.3	60.2	103	137	M20:S50:F30

4. 新增設におけるセメント系充填材の配合改良

(1) 目的

1:9 モルタルは低温期には更に水和反応が遅れることから、確実な品質確保のため寒冷時(12月中旬から翌年3月中旬)には打ち込みを行わないこととしている⁽⁴⁾。

一方、寒冷時に施工制限が発生することに伴い、廃棄体定置後に未充填区画が多数生じることで災害時における被ばくリスクが高まるため、作業時におけるさらなる安全性確保が課題となっている。これらを踏まえ、年間を通じて安定したセメント充填材の品質を確保する必要があると考え、1:9 モルタルの配合設計の考え方を踏襲しつつ、低温下でも安定した品質を確保できる改善配合を検討した。

(2) セメント系充填材に要求される品質項目

セメント系充填材には、前項に記載したひび割れ抑制などに加え、モルタル施工時の作業者の被ばく低減のため、人力による補助作業(振動作業)を排除し、遮蔽用のコンクリート仮蓋を設置した状態で区画の中央部一箇所からモルタルを注入する工法を選択した。このような埋施設特有の施設形態を考慮し、配合設計及び施工はプレパックドコンクリート及び水中不分離性コンクリートに準じて、検討を実施してきた背景がある。また、充填後の次工程においても作業者の被ばくを低減するため、モルタル硬化後は遮蔽性能も要求される。

セメント系充填材に要求される性能を第34表に、性能設定の根拠を第35表に示す。

第 34 表 改善配合のセメント系充填材要求品質

技術的要件	具体的項目	目標性能
流動性(充填性)	スランプフロー	65cm 以上
材料分離抵抗性(密着性)	ブリーディング	0%
力学的安定性	圧縮強度	10N/mm ² 以上
耐凍害性	空気量	5±1.5%
凝結遅延抑制	凝結時間	終結時間が 48 時間以内
遮蔽性	乾燥単位容積質量	1.6t/m ³ 以上
ひび割れ抑制	断熱温度上昇量	可能な限り小さいこと
	自己収縮ひずみ	同上
	乾燥収縮ひずみ	同上
低透水性	透水係数(基質部)	同上

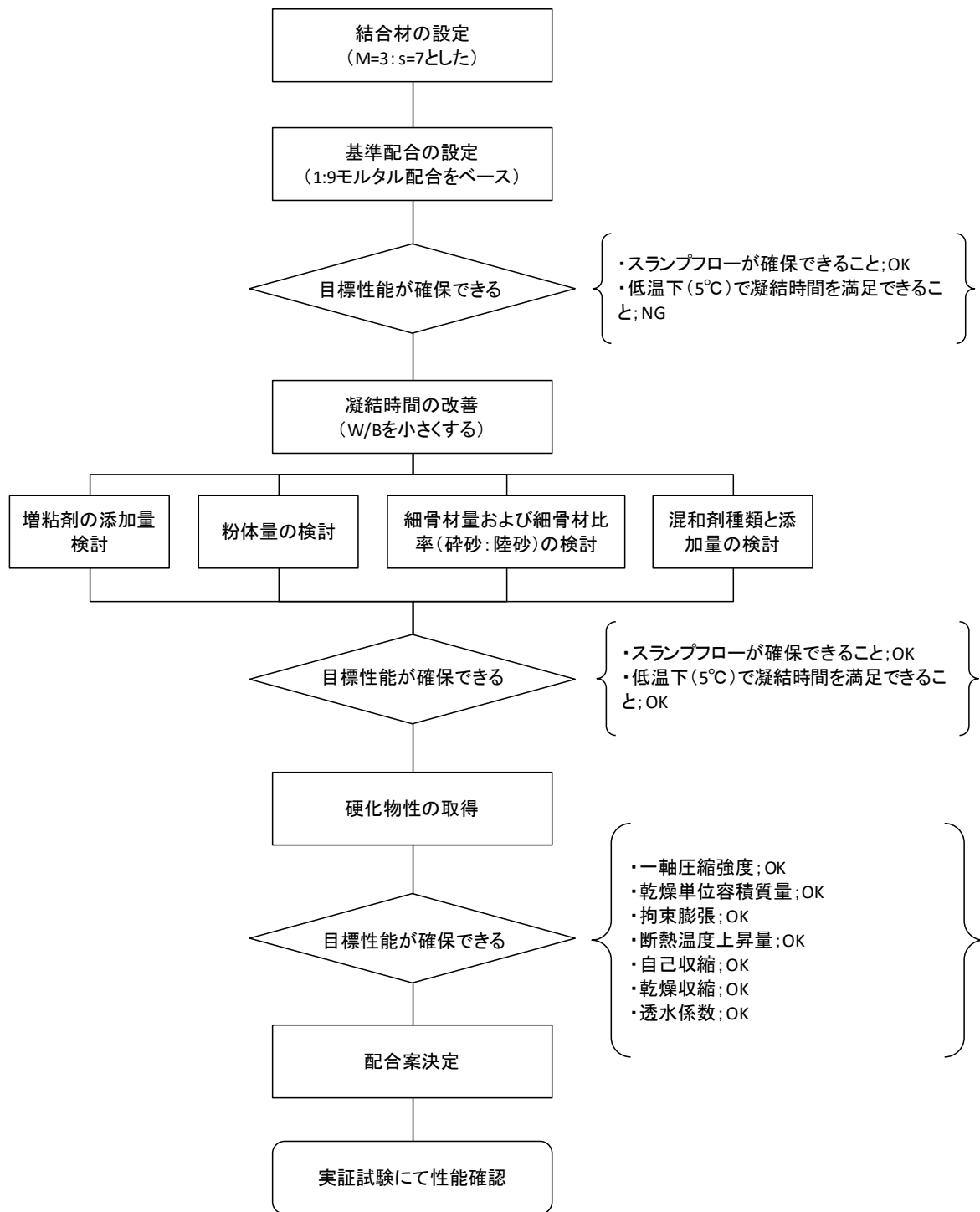
第 35 表 セメント系充填材目標性能設定根拠

具体的項目	根拠
スランプフロー	低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験 ⁽⁵⁾ 等
ブリーディング	同上
圧縮強度	当社社内基準 ⁽⁶⁾
空気量	「コンクリート標準示方書(施工編)」 ⁽⁷⁾ の最大値を超えないこと
凝結時間	当社社内基準 ⁽⁸⁾
乾燥単位容積質量	廃棄物埋設事業変更許可申請書 ⁽⁴⁾
断熱温度上昇量	施工性能を達成できる範囲で可能な限り小さくすること
自己収縮ひずみ	同上
乾燥収縮ひずみ	同上
透水係数(基質部)	同上

(3) セメント系充填材の改善配合検討

セメント系充填材の改善配合の検討において最も重要となるのは、必要な施工性能を確保しつつ、材料分離や硬化不良の不具合を防止するため、低温環境下においても凝結遅延がないようにすることである。このため、1:9 モルタルをベースとし、初期の水和反応を促進するため刺激剤となる M の比率を高め、S の置換率を減じた配合を検討することとした。

なお、M 及び S の比率は断熱温度上昇量を抑制するため、S の置換率は 60%以上⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾とするとともに初期に生成される水和生成物に着目⁽¹¹⁾し、設定した。検討の流れを第 16 図に示す。



第 16 図 充填モルタル改善配合の検討フロー

(4) セメント系充填材量改善配合の検討内容

(i) 基準配合の設定

a. 現状の把握

低温環境下(5℃を設定)における 1:9 モルタルの凝結時間(終結)は、平穩時の約 3 倍となる(130h)ことを試験で確認している。

b. 品質安定化に向けた配合検討の方針

- ・低温環境下での凝結時間を改善し、材料分離を抑制すること。
- ・低温環境下でも安定した水和反応が得られるようにすること。
- ・スランプフローなど、従来の性能要件を確保すること。
- ・最新知見を考慮し、材料仕様は最新に見直すこと。

c. 基準配合案の設定

1:9 モルタルの配合をベースに、M の使用量を 30%まで高めた配合で、低温環境下の凝結時間及び圧縮強度がどの程度改善されるかを確認した。配合を第 36 表に示す。

第 36 表 基本配合案の示方配合

W/B (%)	S/B	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)								
			水 W	結合材 B			細骨材		水中不分離性混和剤	超遅延性減水剤 No. 89	高性能 AE 減水剤 SP8LS
				中庸熱セメント	高炉スラグ微粉末	膨張材	砕砂	陸砂			
67.1	3.43	3.0	283	422			1,457		1.5	B× 0.15%	B× 1.0%
				127	295	—	873	582			

(参考添付 1:9 モルタル配合表)

W/B (%)	S/B	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)								
			水 W	結合材 B			細骨材		水中不分離性混和剤	AE 減水剤 No. 70	高性能減水剤 L4000
				中庸熱セメント	高炉スラグ微粉末	膨張材	砕砂	陸砂			
67.1	3.43	3.0	283	422			1,457		1.5	B× 0.2%	B× 1.5%
				42	380	—	873	582			

d. 基本配合案の凝結試験結果

低温環境下における基本配合案の凝結時間及び圧縮強度の結果を第 37 表に示す。凝結の始発は 35 時間 0 分、終結時間は 72 時間 20 分となり、1:9 モルタルに比べ大幅に改善が図られたものの、目標時間である 48 時間を満足するには更に 24 時間程度短縮する必要があった。圧縮強度では、91 日後で 22.2N/mm²まで増進し、要求性能を満足できる結果が得られた。

このため、M:S の比率は 3:7 とし凝結時間を短縮するための配合を設定するため、W/B を小さくするなどの配合変更を検討することとした。

第 37 表 基本配合案の凝結時間及び圧縮強度の結果

環境条件	凝結時間		圧縮強度 (N/mm ²)		
	始発	終結	7 日	28 日	91 日
平温時 (20℃)	14 時間 40 分	28 時間 00 分	11.4	22.5	28.5
低温時 (5℃)	35 時間 00 分	72 時間 20 分	1.82	11.5	22.2

(ii) 充填モルタルの配合改善の検討

基準配合の試験結果から、M と S の比率を 3:7 とすることで凝結時間の改善が図られたことから、結合材は 3:7 とし、以降の項目検討を実施することとした。従来の要求品質を確保し低温環境下での凝結改善を達成可能な配合を選定するため、室内試験練りを実施して第 38 表に示す配合を設定した。

a. 単位結合材料の設定

材料分離抵抗性、水和生成物量の観点から、従来の 422kg/m³ 以上を確保する。体積変化を抑制するため、膨張材を添加する。

b. 水・結合材比

55%以下とすることで、水密性の向上と凝結改善を図る。

c. 材料分離抵抗性

単位水量変動に対する抵抗性を確保するため、単位粉体量に加え、水中不分離性混和剤を使用することとした。

d. 細骨材比率

W/B=55%以下とすることで粉体又は細骨材量が増となり、粘性が増すことが想定されるため、砕砂と陸砂の比率は 6:4 とした。

S/B は、廃棄体間の間隙通過性を考慮し、配合に占める細骨材比(容積)を従来と同様とした(S/B は 3.46 程度以下となるよう設定)。

e. 混和剤

混和剤は、従来の 2 本使いから 1 本使いを目標とした。

種類は、高性能 AE 減水剤とした。

混和剤は汎用品から選定することとした。

第 38 表 品質改善したセメント系充填材の示方配合

W/B (%)	S/B	空気量 (%)	単体量 (kg/m ³)							
			水 W	結合材 B			細骨材 S		水中不 分離性 混和剤	高性能 AE 減水 剤 SP8HVM
				中庸熱 セメント	高炉ス ラグ 微粉 末	膨張 材	砕砂	陸砂		
55.0	3.17	5.0	252	458			1,454		1.1	4.58
				131	307	20	872	582		B× 1.0%

(5) セメント系充填材改善配合の検討結果

(i) 室内試験練り(フレッシュ性状確認試験)

- a. スランプフロー試験結果(75cm±10cm、5時間後も65cm以上を確保が理想)

第 39 表に示すように、平温時(20℃)及び低温時(5℃)においても、目標性能を満足する結果が得られた。

第 39 表 スランプフロー試験結果

環境条件	スランプフロー (cm)					
	5分	60分	120分	180分	240分	300分
平温時(20℃)	74.3	75.0	72.3	72.5	71.0	69.0
低温時(5℃)	69.8	71.0	70.0	69.8	68.0	66.5

- b. 空気量(1時間後に5%±1.5%)

空気量測定結果を第 40 表に示す。平温時(20℃)では目標性能を達成可能であったが、低温時(5℃)では、目標性能を僅かに外れた。低温下では水中不分離性混和剤の粘性が増すことが知られている。このため、練混ぜ時に巻き込ん

だ空気(エントラップドエア)が抜けきれずに所定の範囲に収まらなかったと考えられる。

ただし、これらは混和剤等の添加量を微調整することで対応可能であるため、最終的には実機試験練りにて修正することとし、問題ないと判断した。

第 40 表 空気量測定結果

環境条件	空気量(%)	
	5 分	60 分
平温時 (20℃)	4.6	3.8
低温時 (5℃)	9.0	7.0

c. ブリーディング率(ノンブリーディング)

平温時(20℃)及び低温時(5℃)いずれも 0%であり目標性能を満足する結果が得られた。

d. 凝結時間

凝結時間の試験結果を第 41 表に示す。基本配合案(第 37 表の凝結時間参照)に比べると、平温時及び低温時の終結時間はそれぞれ、6 時間 45 分と 15 時間 35 分短くなっており、W/B を見直したことによる効果であると考えられる。

なお、目標性能である 48 時間には 8 時間程度及ばない結果となったが、空気量の調整とあわせて混和剤等の添加量を修正(減じる)すれば、更に凝結時間の短縮が期待できると思われる。

第 41 表 凝結時間の試験結果

環境条件	凝結時間	
	始発	終結
平温時 (20℃)	15 時間 55 分	21 時間 15 分
低温時(5℃)	37 時間 05 分	56 時間 45 分

(ii) 硬化物性取得試験(平温時のみ取得)

a. 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を第 42 表に示す。低温時の圧縮強度は取得していないが、基本配合案(第 37 表の圧縮強度参照)の検討段階において M:S 比率が 3:7 であれば設計基準強度を満足できることを確認している。充填モルタル改善配合(以下「改善配合」という。)では W/B を小さくし、単位結合材も増量したことで平温時の強度が増進している。このため、改善配合は低温時においても安定した強度発現が得られると考えられる。

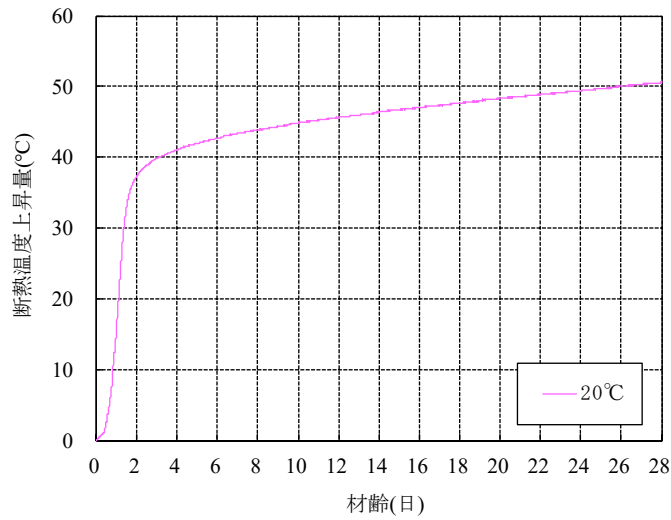
第 42 表 圧縮強度の試験結果

環境条件	圧縮強度 (N/mm ²)		
	7 日	28 日	91 日
平温時 (20℃)	22.6	32.3	43.0

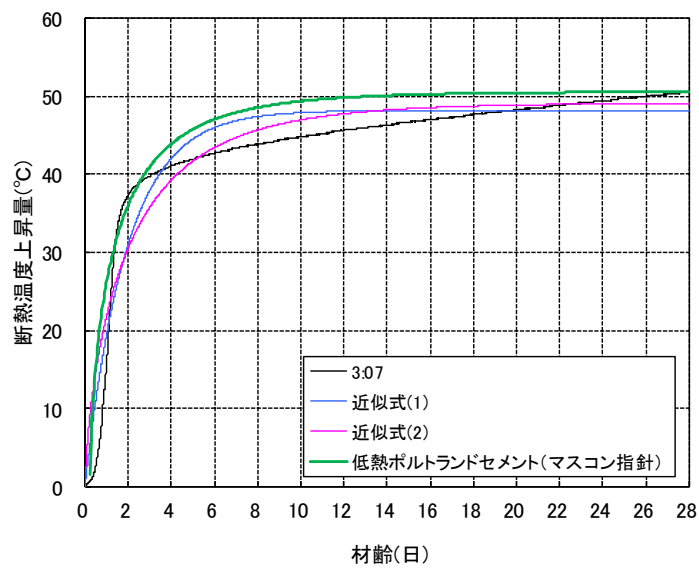
b. 断熱温度上昇量

断熱温度上昇量の試験結果を第 17 図に示す。断熱温度上昇量は一般に使用する結合材量が増えるに従い上昇する。改善配合結合材比率を M:S=3:7 としており、セメント比率が増えることによって、S の潜在水硬性も比例して促進されたことで、50℃程度まで上昇したと考えられる。

なお、参考までに同じ低発熱型のセメントである低熱ポルトランドセメントを改善配合の結合材と同量とした場合の断熱温度上昇量と比較したものを第 18 図に示す。両者はほぼ同等の断熱温度上昇量であることがわかる。このため、改善配合の断熱温度上昇量は、低発熱型セメントを使用した効果が発揮されていると考えられる。



第 17 図 改善配合の断熱温度上昇量試験結果

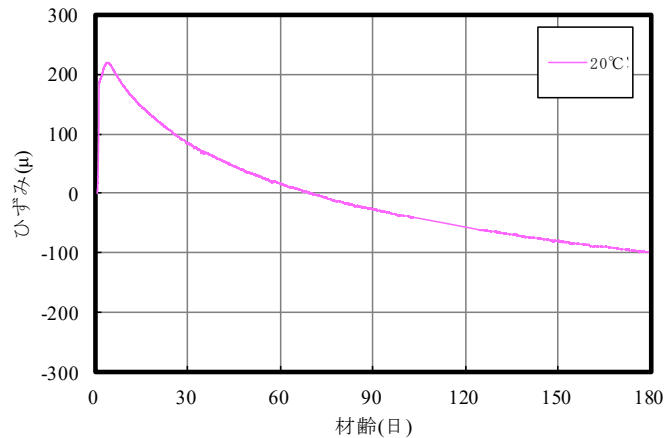


配合名	K	α	β	近似式
改善配合	48.2	0.515	-	$Q(t)=K(1-\exp(-\alpha t))$ ……式(1)
	49.2	0.586	0.725	$Q(t)=K(1-\exp(-\alpha t^\beta))$ ……式(2)
低熱ポルトランドセメント(マスコン指針)	50.6	0.867	0.639	$Q(t)=K(1-\exp(-\alpha t^\beta))$ ……式(2)

第 18 図 改善配合と低熱ポルトランドセメントの断熱温度上昇量比較

c. 自己収縮

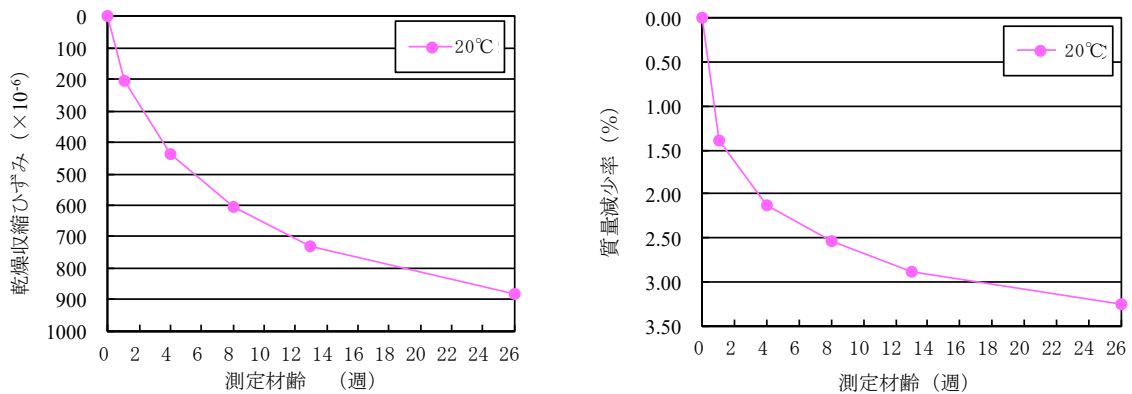
改善配合の自己収縮の測定結果を第 19 図に示す。改善配合では単位結合材料の増量と単位水量が減量されることによる収縮補償用として添加した膨張材の効果により、自己収縮ひずみは $100\mu\text{m}$ 程度まで抑えられたと考えられる。



第 19 図 改善配合の自己収縮試験結果

d. 乾燥収縮

改善配合の乾燥収縮測定結果を第 20 図に示す。単位水量を減じた効果により、乾燥収縮ひずみは一般のコンクリートと同程度の $800 \times 10^{-6} \sim 900 \times 10^{-6}$ となった。セメント系充填材は区画内に充填されるため、実際には乾燥の影響を受け難い環境であることを考慮すれば、改善配合は更に収縮量は低減されると考えられる。



第 20 図 改善配合の乾燥収縮試験結果

e. 乾燥単位容積質量

改善配合の乾燥単位容積質量の試験結果を第 43 表に示す。要求性能を満足できることを確認した。

第 43 表 乾燥単位容積質量の試験結果

環境条件	乾燥単位容積質量 (t/m ³)
平温時 (20℃)	2.00

(iii) 改善配合の検討結果まとめ

低温環境下における凝結改善を目的とした配合検討の結果、結合材比率(M:S比率)を 3:7 とすることで、低温時においても終結が 56 時間程度まで改善された。また、従来からの要求性能を満足できる見通しが得られたことで、

第 38 表に示す改善配合を新配合充填材の候補にすることとした。また、改善配合の検討を実施したことで収縮量の低減なども可能となり、更なるひび割れ抑制効果も期待できると考えられる。

なお、実際のセメント系充填材の性能については、模型実験等を経て性能を評価し、最終判断する必要があるとし、後述する新配合充填材実証試験を実施している。

5. 新配合充填材実証試験

(1) 目的

新配合充填材(以下「3:7 モルタル」という。)の実構造物における施工性(充填性)と硬化後の性状が目標性能を達成可能であることを確認する。

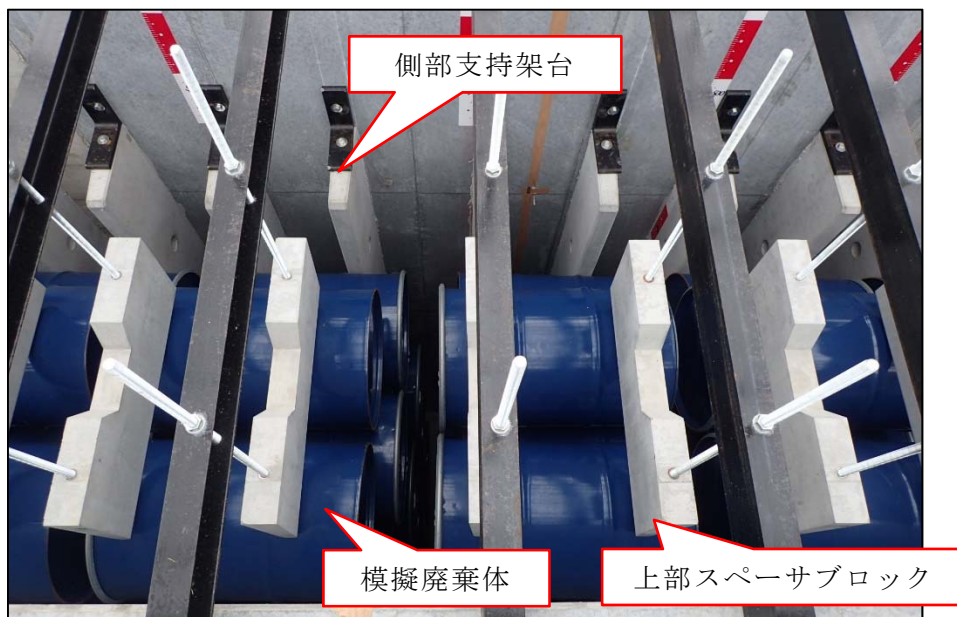
充填時において3:7 モルタルの充填性、側壁等に与える影響を分析・評価する。
ドラム缶周りの隙間への充填性などを確認する。

(2) 検討内容

新配合充填材実証試験(以下「実証試験」という。)に用いる設備は、2号埋設設備の高さを模擬するとともに、打込み速度も実施設と同様とした。モルタルを打設する試験体と検討項目を第21図、第22図及び第44表に示す。



第21図 実証試験供試体の外観



第 22 図 実証試験供試体の内側

第 44 表 実証試験における主な確認項目

検討項目	確認方法	確認内容
流動性の確認	目視・測量	セルフレベルリング性
間隙通過性の確認	目視・コア観察	廃棄体とモルタルの密着性
ひび割れ発生状況	目視・スケッチ	ひび割れ発生の有無

(3) 試験方法

モルタル打設は、2t 車級コンクリートポンプ車(11m、3 段屈折式ブーム、30m³/h)を使用した。ポンプ車の配置状況を第 23 図に示す。アジテータ車は全 11 台(4m³積み)とし、打込み量は、スペーサブロック上面の高さで終了することとした。



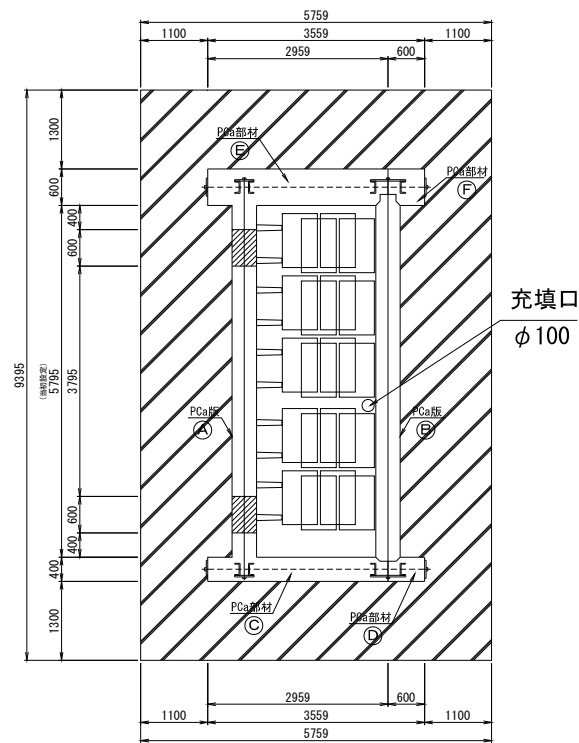
第 23 図 モルタル打設方法

打設方法は、実施工を模擬して、ブームを充填口に配置し、サニーホースに接続して、底面上 50cm 位置から打込みを開始した。サニーホースは打設高さ 50cm ごとに引き上げ、ホース下部を 50cm カットして充填口に戻し、これを 50cm 打ち上げるごとに繰り返した。

打込み速度は実施工を模擬して、同様の打ち上がり高さとなるよう以下の打込み速度とした。

$$40\text{m}^3/5\text{h}=8\text{m}^3/\text{h}\approx\text{約 }130\text{L}/\text{min}$$

供試体の平面図を第 24 図に、充填状況を第 25 図に示す。



第 24 図 実証試験供試体平面図



第 25 図 充填モルタル打込み状況

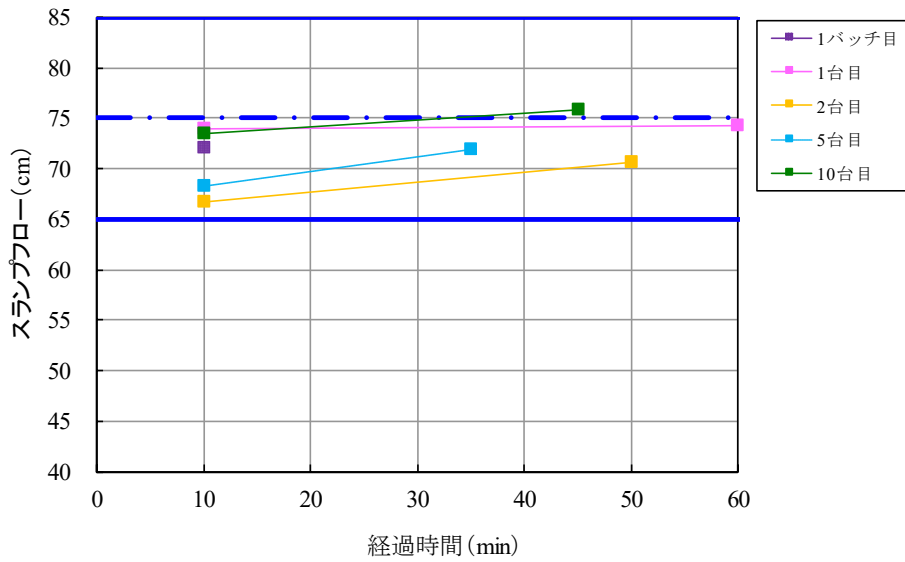
(4) 試験結果及び考察

(i) フレッシュ性状

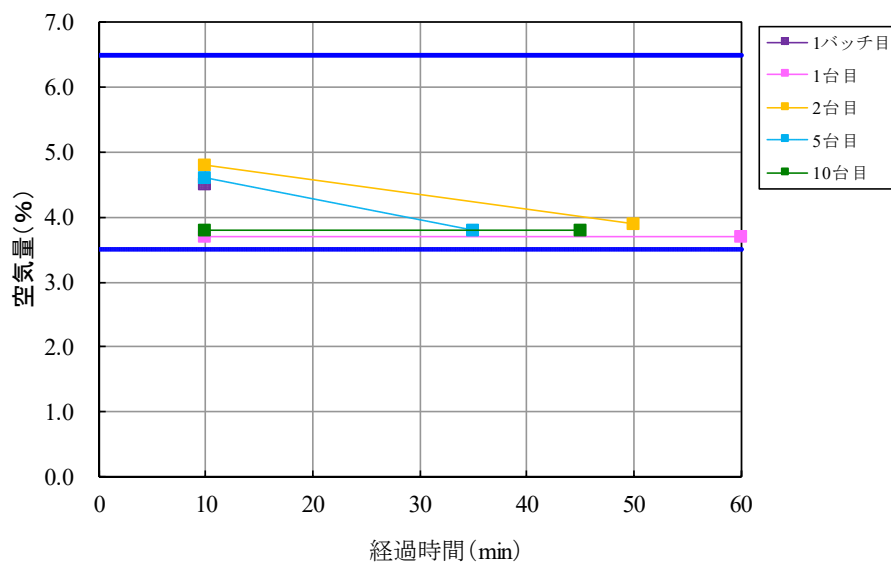
第 45 表、第 26 図及び第 27 図に示すように、要求品質を全て満足していることを確認した上で打設した。

第 45 表 フレッシュ性状確認結果

水準	経過時間 (min)	スランブフロー (cm)			平均	空気量 (%)	モルタル 温度 (℃)
			×				
1バッチ目	10	72.2	×	72.1	72.15	4.5	21
1台目	10	74.8	×	73.0	73.90	3.7	21
	60	74.5	×	74.0	74.25	3.7	23
2台目	10	67.1	×	66.4	66.75	4.8	21
	50	70.7	×	70.7	70.70	3.9	23
5台目	10	68.5	×	68.0	68.25	4.6	22
	35	72.0	×	72.0	72.00	3.8	23
10台目	10	73.7	×	73.2	73.45	3.8	22
	45	76.0	×	75.6	75.80	3.8	22



第 26 図 スランブフロー試験結果



第27図 空気量試験結果

(ii) ブリーディング

第28図に示すように、発生していないことを確認した。



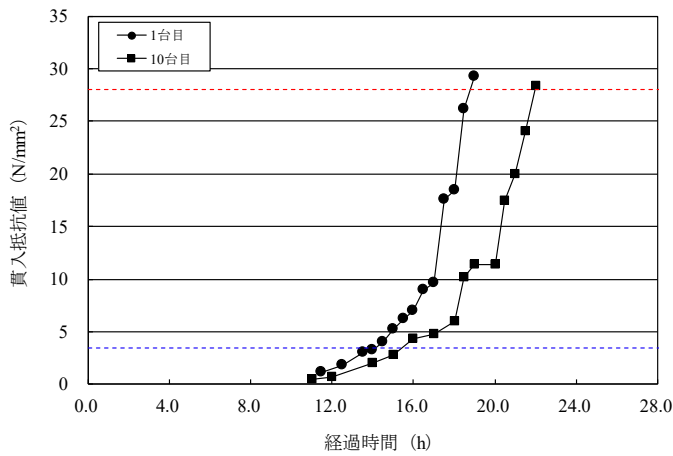
1台目

10台目

第28図 ブリーディング試験結果

(iii) 凝結

第29図に示すように、表面水の変動等の要因によりアジテータ車1台目と10台目で凝結時間が1時間程度相違したものの、目標の凝結終了時間を十分に満足している。

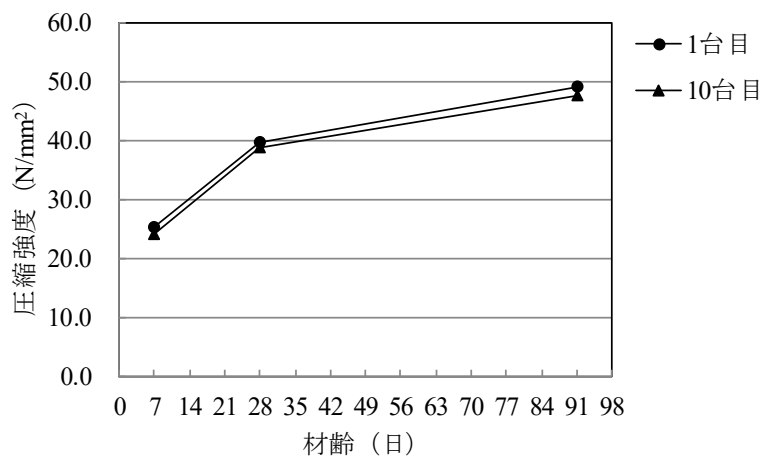


試料名	始発	終結
	h:m	
1台目	14:25	18:50
10台目	15:30	21:55

第 29 図 凝結時間結果

(iv) 圧縮強度

第 30 図に示すように、所定の圧縮強度発現を確認できた。



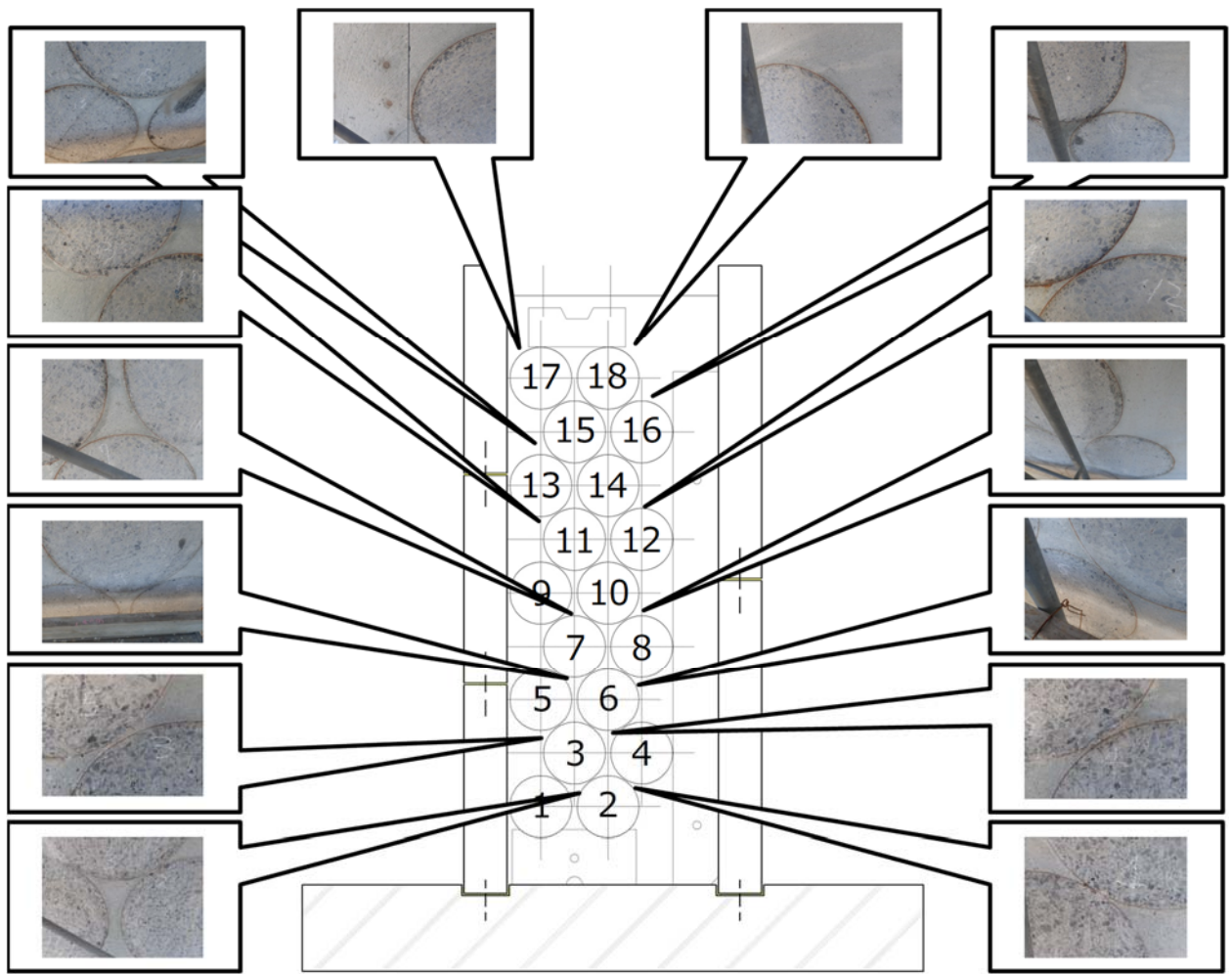
第 30 図 圧縮強度試験結果

(v) ドラム缶周りの充填性

3:7 モルタルを打設した後に試験体を切断し、ドラム缶の隙間やドラム缶の蓋周辺の充填状況を確認した（第 31 図、第 32 図及び第 33 図）。これより、輪体で重なるドラム缶の隙間や蓋の隙間などにも密実に充填されていることが確認できた。



第 31 図 充填状況（輪切り断面）（その 1）



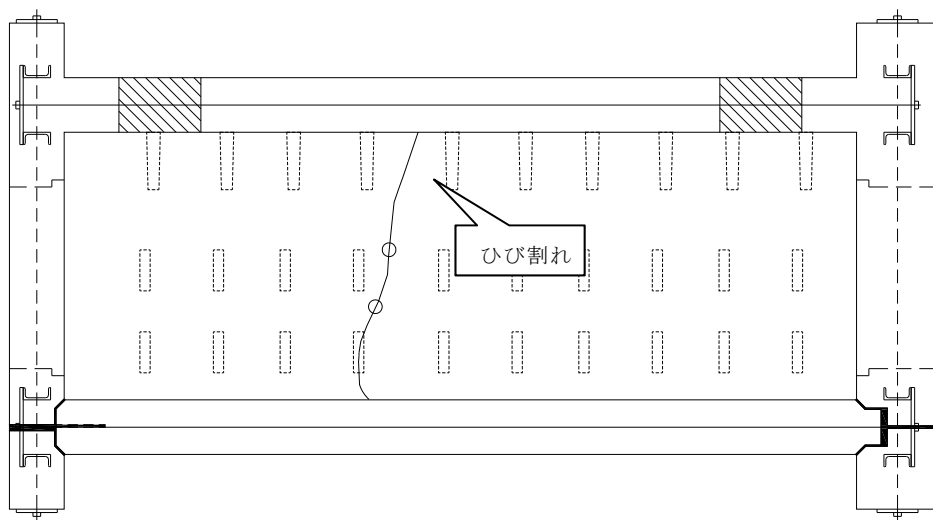
第 32 図 充填状況（輪切り断面）（その 2）



第 33 図 充填状況（側面）

(vi) ひび割れ発生状況

3:7モルタルを充填してから4日後に第34図に示すひび割れが発生した。ひび割れ深さは、長辺方向に切断した後断面を確認し、最上部のドラム缶位置までひび割れが達していることがわかった。しかし、今回の試験体は東西方向の長さを実際の区画の1/3程度としているため、実施設よりも拘束が厳しい。20℃程度の外気温の場合、実施設で温度ひび割れが発生したとしても、1本程度以下であることが確認できた。



第34図 ひび割れ発生状況

(5) まとめ

操業時におけるさらなる安全性確保の観点から、低温下でも安定した品質を確保できる改善配合を検討した。

従来からの要求事項を満足しつつ、低温下での凝結時間が管理できる配合を選定した。

充填性試験の結果、ドラム缶周りの隙間などにも密実に充填されていることが確認できた。

モルタルの収缩量にも配慮されており、ひび割れの発生可能性は小さいものとなっている。

参考文献

- (1) 充填材の品質評価研究委員会(1993)：充填材の品質評価研究委員会報告、コンクリート工学、Vol. 31、No. 8、1993. 8
- (2) 日本コンクリート工学協会(1992)：充填材の品質評価研究委員会中間報告書、1992年12月
- (3) 日本コンクリート工学協会(1992)：セメント系充填材に関するシンポジウム 論文集、1992年12月
- (4) 日本原燃株式会社(1997)：六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター 廃棄物埋設施設事業変更許可申請書、平成9年9月(一部補正)
- (5) (財)原子力環境整備センター(1988)：低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験報告書 昭和62年度
- (6) 日本原燃株：埋設設備充てん業務品質管理基準(25版)、2016. 7
- (7) (公財)土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書 施工編、2018. 3
- (8) 日本原燃株：土木操業管理細則(30版)、2017. 8
- (9) (社)土木学会(1988)：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案) 昭和63年1月、1988. 1
- (10) コンクリート工学会(1996)：技術フォーラム資源の有効活用とコンクリート(第5回)高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート、1996. 4
- (11) 矢ノ倉ほか(2015)：中庸熟セメントと高炉スラグ微粉末の混合比を変えたペーストの水和反応に関する研究 土木学会第70回年次学術講演会、V-483、pp. 965-966、2015. 9

1 号及び 2 号廃棄物埋設地の覆土について

目 次

1. 既許可の覆土時期.....	1
2. 覆土の範囲及び時期.....	1
(1) 1号廃棄物埋設地.....	1
(2) 2号廃棄物埋設地.....	1
3. 覆土の工程.....	2

1. 既許可の覆土時期

1号廃棄物埋設地の覆土の時期について、既許可において「埋設開始以降30年経過し35年以内の間」としている。埋設開始が1992年12月であることから、2027年12月までに覆土を行うこととしている。

2号廃棄物埋設地は、同様に「埋設開始以降25年経過し30年以内の間」としており、埋設開始が2000年10月であることから、2030年10月までに覆土を行うこととしている。

2. 覆土の範囲及び時期

1号及び2号廃棄物埋設地の覆土の範囲及び時期について以下に整理した。

(1) 1号廃棄物埋設地

(i) 目的

既設の埋設設備は、一部設備でひび割れ等から雨水の浸入が認められていることから、埋設設備への水の浸入をできるだけ抑制するため、難透水性覆土を含めた覆土で埋設設備を覆う。

(ii) 覆土範囲について

既許可の時期(2027年12月)までに行う廃棄物埋設地の覆土範囲について、以下に示す。

- a. 1群から6群は、埋設設備への水の浸入を抑制する観点から、既許可の時期までに順次、覆土を行う。
- b. 7,8群は、今後構築・操業していくことから、1群から6群の覆土の工事工程とは分離して操業を行い、操業終了後に覆土を行う。

(iii) 覆土時期について

1号廃棄物埋設地については、既許可の時期(2027年12月)までに1群から6群の覆土を行う。なお、6群を覆土するには、7群の操業が終了している必要があることから、6群は、7群の操業が終了次第、覆土を行う。

これらに基づく2027年12月での覆土の形状イメージを第1図に示す。

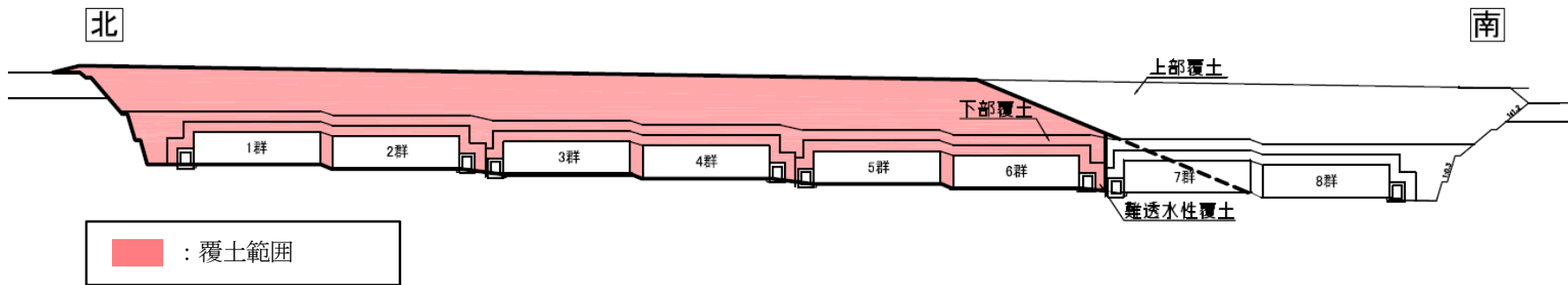
(2) 2号廃棄物埋設地

2号廃棄物埋設地については、既許可の時期(2030年10月)までに、1群から8

群の覆土を行う。

3. 覆土の工程

1号及び2号廃棄物埋設地の覆土に関して、覆土施工までに必要な準備工事を整理し、既許可の時期までの工程成立性について検討した。既許可の時期に対して、1号廃棄物埋設地1群から6群及び2号廃棄物埋設地1群から8群の覆土の工程が成立することを確認した(第1表)。



第1図 1号廃棄物埋設地の覆土の形状イメージ(2027年12月)

第1表 1号及び2号廃棄物埋設地の覆土までの工程
(既許可の時期までの工程成立性の確認)

項目 \ 年度		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	備考
1号	操業（廃棄体定置、覆い設置）			▽6群				▽7群				▽8群						・8群の操業は、1群～6群の覆土と調整しながら並行して行う。
	準備工事（ひび割れ保修・付属設備撤去）		1群～6群									7,8群						
	点検路構築					1群～4群▽		▽5群～6群	▽7群					▽8群				
	覆土							1群～4群▽	▽5群～6群								▽7,8群	・7,8群には、6群までの覆土法面の保修工程を考慮している。
2号	操業（廃棄体定置、覆い設置）					▽8群												
	準備工事（ひび割れ保修・付属設備撤去）			1群～8群														
	点検路構築							1群～4群▽	▽5群～8群									
	覆土									▽3群～4群	▽5群～8群							

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち

第一号及び第三号

(1号廃棄物埋設施設)

2020年12月

日本原燃株式会社

目 次

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第十条第一号及び第三号並びにその解釈.....	1
2. 廃棄物埋設施設の安全機能について.....	3
3. 設計対象設備.....	3
4. 許可基準規則への適合のための設計方針.....	4
(1) 安全設計の方針.....	4
(2) 安全機能.....	5
(3) 廃棄物埋設地の設計に関して留意する事項.....	12
(4) その他の設計.....	12
5. 廃棄物埋設地の設計.....	20
(1) 構成及び設置位置.....	20
(2) 主要設備.....	20
[参考] 許可基準規則への適合性説明.....	46
(1) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第 10 条第 1 項及び第 3 項).....	46
(2) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第 10 条第 2 項).....	57
(3) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第 10 条第 4 項).....	58
(4) 許可基準規則第十条第三号(許可基準規則解釈第 10 条第 5 項).....	61
6. 参考文献.....	63
添付資料 1 廃棄物埋設地の設計の考え方	
添付資料 2 技術要件における考え方	
添付資料 3 許可基準規則解釈第 10 条第 1 項に関する補足説明	
添付資料 4 許可基準規則解釈第 10 条第 2 項に関する補足説明	
添付資料 5 1 号及び 2 号廃棄物埋設地の覆土について	

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第十条第一号及び第三号並びにその解釈

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
(廃棄物埋設地) 第十条 廃棄物埋設地は、次の各号に掲げる要件を満たすものでなければならない。 一 廃棄物埋設地(ピット処分に係るものに限る。)は、外周仕切設備を設置する方法、その表面を土砂等で覆う方法その他の方法により、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から埋設の終了までの間にあつては廃棄物埋設地の限定された区域からの放射性物質の漏出を防止する機能、埋設の終了から廃止措置の開始までの間にあつては廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減する機能を有するものであること。 三 埋設した放射性廃棄物に含有される化学物質その他の化学物質により安全機能が損なわれないものであること。

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈
第10条(廃棄物埋設地) 1 第1号に規定する「外周仕切設備を設置する方法、その表面を土砂等で覆う方法その他の方法」及び第2号に規定する「その表面を土砂等で覆う方法その他の方法」とは、以下の設計をいう。 一 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること。 二 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること 三 劣化・損傷が生じた場合にも機能が維持できる(安全上支障のない期間内において速やかに修復できることが確実であることを含む。)構造・仕様であること。 2 第1号に規定する「廃棄物埋設地の限定された区域からの放射性物質の漏出を防止する」とは、雨水や地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈

止する構造が相まって、廃棄物埋設地の限定された区域から放射性物質が漏えいしない状況(工学的に有意な漏えいがない状況)を達成することをいう。

- 3 第1号に規定する「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減する機能」は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと。
- 4 第1号及び第2号の「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減」については、平常時における廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量が、第8条第1項に規定する「廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による事業所周辺の線量」及び第13条第1項に規定する「周辺監視区域の外の空气中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質」の放出により公衆の受ける線量を含め、法令に定める線量限度を超えないことはもとより、ALARAの考え方の下、実効線量で50マイクロシーベルト/年以下であること。
- 5 第3号に規定する「安全機能が損なわれないものであること」とは、埋設した放射性廃棄物、人工バリア(埋設する放射性廃棄物からの放射性物質の漏出の防止又は低減の機能を有する人工構築物をいう。以下同じ。)及び廃棄物埋設地に充填する土砂等が含有する可燃性の化学物質、可燃性ガスを発生する化学物質その他の化学物質の性質及び量に応じて、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地の安全機能に有意な影響を及ぼさないよう対策を講じたものであることをいう。

2. 廃棄物埋設施設の安全機能について

安全機能については、第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(以下「許可基準規則」という。)第二条第2項第一号に「安全機能」とは、廃棄物埋設施設の安全性を確保するために必要な機能であって、その機能の喪失により公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがあるものをいう。」とある。

したがって、安全機能に対する考え方としては、許可基準規則第二条第2項第一号を考慮し、安全機能を「放射性物質の漏出を防止する機能」(以下「漏出防止機能」という。)、**「移行抑制機能*1」**、「遮蔽機能」とし、その機能の維持期間及び考え方を第1表にまとめる。

第1表 ピット処分における安全機能

安全機能	廃止措置の開始前		廃止措置の開始後
	放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了まで	覆土完了から廃止措置の開始まで	
漏出防止機能	○	-	-
移行抑制機能	-	○	△
遮蔽機能	○	○	△

○：安全機能を維持する
 △：必要な安全機能を期待できるように設計する
 -：考慮しない

*1：本資料では、放射性物質の漏出を低減する機能及び生活環境への移行を抑制する機能を「移行抑制機能」という。

ここで、廃棄物埋設施設のうち安全機能を有する設備は、埋設設備、排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層及び覆土である。

3. 設計対象設備

許可基準規則第十条第一号及び第三号の設計対象設備は、埋設設備 7, 8 群、排水・監視設備のうち点検路及び覆土である。

なお、排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層及び排水管については、「廃棄物埋設事業変更許可申請書」(平成 10 年 10 月 8 日付け、10 安(廃規)第 49 号をもって事業変更許可)から変更はないが、埋設設備 7, 8 群と合わせて漏出防止機能に関連する設備として示す。

4. 許可基準規則への適合のための設計方針

(1) 安全設計の方針

廃棄物埋設施設(以下「本施設」という。)は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(以下「原子炉等規制法」という。)等の関係法令の要求を満足するとともに、「許可基準規則」に適合する構造とする。

本施設で取り扱う放射性廃棄物で容器に固型化したもの(以下「廃棄体」という。)は、実用発電用原子炉の運転及び本施設の操業に伴って付随的に発生する放射性廃棄物をセメント系充填材等で金属製の容器に固型化したもので、その容器が損傷しない限り、放射性物質は漏えいすることはない。また、取り扱う廃棄体の放射能濃度が低く、個々の廃棄体に含まれる放射性物質の量は十分少ないが、埋設する総本数が多い。そのため、漏出防止機能、移行抑制機能及び遮蔽機能が喪失した場合には、放射線障害を及ぼすおそれがあることから、これらを安全機能とする。

なお、飛散防止のための措置は、本施設の特徴を踏まえると公衆の受ける線量が十分小さいことから安全機能には該当しない。

本施設の安全設計の基本的方針は、常時機能維持を必要とする動的な設備・機器は不要であり、静的な設備・機器によりこれらの安全機能を有するよう設計することとし、これらの安全機能を適切に組み合わせることによって、安全性を確保することとする。

具体的には、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、平常時における廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量、本施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による濃縮・埋設事業所(以下「事業所」という。)周辺の線量並びに周辺監視区域の外の空气中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質の放出により事業所敷地(以下「敷地」という。)周辺の公衆の受ける線量が、「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」(平成30年6月8日原子力規制委員会告示第4号)(以下「線量告示」という。)で定められた線量限度を超えないことはもとより、公衆の受ける線量が As Low As Reasonably Achievable(ALARA)の考えの下、合理的に達成できる限り十分低くなるよう、実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下を達成できる設計とする。

放射線業務従事者は、その受ける線量が「線量告示」で定められた線量限度を超えない設計とする。

廃止措置の開始後、廃棄物埋設地は、廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しのある設計とする。廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態とは、廃止措置の開始後の評価において、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も可能性が高いと考えられるパラメータを設定した自然事象シナリオ(以下「確からしい自然事象シナリオ」という。)で評価される公衆の受ける線量が $10\mu\text{Sv/y}$ を超えないこと、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も厳しいパラメータを設定した自然事象シナリオ(以下「厳しい自然事象シナリオ」という。)で評価される公衆の受ける線量が $300\mu\text{Sv/y}$ を超えないこと、人為事象シナリオの公衆の受ける線量が 1mSv/y を超えないこととする。

ここで、人工バリアとは、埋設する放射性廃棄物からの放射性物質の漏出の防止又は低減を行う人工構築物をいう。天然バリアとは、埋設する放射性廃棄物又は人工バリアの周囲に存在し、埋設する放射性廃棄物から漏出してきた放射性物質の生活環境への移行の抑制を行う地盤(岩盤及び第四紀層)をいう。

(2) 安全機能

以下に各安全機能の設計方針について記載する。

廃棄物埋設地の設計として、地下水面下への設置に応じた設計の考え方については添付資料1「1. 廃棄物埋設地の設計の考え方」に記載する。

(i) 漏出防止機能

a. 設計方針

安全機能を維持すべき期間のうち、放射性物質の漏出を防止する必要のある期間の終了時期である埋設の終了時期を覆土完了時点とする。

埋設設備のうち外周仕切設備、セメント系充填材、覆い及び内部防水並びに排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、以下に示す方針に基づき、廃棄物埋設地の限定された区域(埋設設備)からの漏出防止機能を有する設計とする。

漏出防止機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、水を媒体とした放射性物質の環境への漏出を防止するため、雨水及び地下水と廃棄物が接触しないよう浸入を防止する設計とし、万一、廃棄物と水が接触した場合にも放射性物質の漏出を防止する設計とする。

雨水及び地下水の浸入の防止は、外周仕切設備及び覆いの透水特性のうち、低透水性及びひび割れ抑制並びに内部防水の防水性により埋設設備内への水の浸入を防止する設計とする。また、埋設設備内に浸入した水はポーラスコンクリート層により回収し、埋設設備外に排出するとともに、セメント系充填材により廃棄物と水の接触を防止する設計とする。

放射性物質の漏出の防止は、外周仕切設備及び覆いの透水特性のうち低透水性及びひび割れ抑制並びに内部防水の防水性により埋設設備外への水の漏出を防止する設計とする。また、放射性物質を含む水はポーラスコンクリート層により回収し、埋設設備外へ排出する設計とする。

b. 安全設計

廃棄物埋設地は、以下に示す設計を行うことにより、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、廃棄物埋設地の限定された区域(埋設設備)からの放射性物質の漏出を防止する。

漏出防止に関する構造は、雨水及び地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造を組み合わせるものとする。雨水及び地下水の浸入を防止する構造は、外周仕切設備、セメント系充填材、覆い、内部防水及びポーラスコンクリート層により構成し、放射性物質の漏出を防止する構造は、外周仕切設備、覆い、内部防水及びポーラスコンクリート層により構成する。

埋設する廃棄物は、「核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」(以下「事業規則」という。)に定められた廃棄体に係る技術上の基準を満足するものであり、容器の構造、定置までの取扱い、強度等から、変形・損傷や外部からの雨水及び地下水の浸入が生じ難い構造と考えられるため、容易に廃棄体内の放射性物質が容器の外へ漏えいすることはない。

しかし、埋設設備への定置後において、廃棄体周辺が水で満たされ液相に連続性がある状態となると、廃棄体内の放射性物質は水を媒体として溶出・移行

し、廃棄物埋設地の外に漏えいすることが考えられる。このため、「埋設設備内への雨水及び地下水の浸入を防止すること」及び「浸入した水を廃棄体と接触することなく適切に排水すること」により、雨水及び地下水の浸入を防止する設計とし、万一、廃棄体と水が接触した場合にも放射性物質の漏出を防止する設計とする。

(a) 雨水及び地下水の浸入を防止する設計

(一) 埋設設備内への雨水及び地下水の浸入を防止するため、埋設設備を構成する外周仕切設備及び覆いは、低透水性及びひび割れ抑制に優れた鉄筋コンクリート製の設計とする。外周仕切設備及び覆いは、低発熱に配慮した材料配合により温度応力を低減するとともに、鉄筋によりひび割れを抑制する設計とし、最大ひび割れ幅の設計目標値は0.1mmとする。埋設設備は、セメント系充填材の充填時の荷重、覆土の上載荷重、埋設設備及び廃棄体の自重等に対し、十分な構造上の安定性を有する設計とする。内部防水は、外周仕切設備の内側で、外周仕切設備底版部及び側壁の立ち上げ部に設置し、防水性を有する設計とする。

(二) 埋設設備内に浸入した水を廃棄体と接触することなく適切に排水するため、浸入した水を排水できるよう、ポーラスコンクリート層は、外周仕切設備及び覆いとセメント系充填材との間に設置し、廃棄体定置後から覆土完了までの間、排水性を有する設計とする。

(三) 埋設設備内に浸入した水を廃棄体と接触することなく適切に排水するため、浸入した水が廃棄体と接触しないよう、セメント系充填材は、廃棄体定置後、埋設設備内に充填し、有害な空隙が残らないよう充填性を有する設計とする。内部防水は、外周仕切設備及び覆いの内側で、セメント系充填材上部及び側部とポーラスコンクリート層の間に設置し、防水性を有する設計とする。

(四) その他、操業中における雨水の浸入を抑制するため、以下の設計を行う。

- ・ 廃棄体定置後から埋設設備の覆いが完成するまでの間は、埋設設備の区画上部にコンクリート仮蓋を設置し、開口部から埋設設備内部に雨水が浸入することを抑制する。

- ・定置作業中は、埋設クレーンの上部に屋根、側部に雨避け板を設置し、雨水が廃棄体に接触することを抑制する。

(b) 放射性物質の漏出を防止する設計

- (一) 廃棄体と水が接触した場合にも放射性物質の漏出を防止するため、埋設設備を構成する外周仕切設備及び覆いは、低透水性及びひび割れ抑制に優れた鉄筋コンクリート製の設計とする。外周仕切設備及び覆いは、低発熱に配慮した材料配合により温度応力を低減するとともに、鉄筋によりひび割れを抑制する設計とし、最大ひび割れ幅の設計目標値は0.1mmとする。また、埋設設備は、セメント系充填材の充填時の荷重、覆土の上載荷重、埋設設備及び廃棄体の自重等に対し、十分な構造上の安定性を有する設計とする。放射性物質を含む水はポーラスコンクリート層により回収し、埋設設備外へ排出する設計とする。内部防水は、外周仕切設備の内側で、外周仕切設備底版部及び側壁の立ち上げ部に設置し、防水性を有する設計とする。

(c) その他の設計

- (一) 排水・監視設備のうち点検路は、ポーラスコンクリート層により排水された水を作業者が回収する作業空間が確保できる設計とする。
- (二) 漏出防止機能を有するコンクリート構造物に対する設計、材料の選定、建設・施工及び検査は、「事業規則」、「許可基準規則」等のほか、利用可能な最善の技術として最新の知見を確認する。現時点の最新の知見としては、「コンクリート標準示方書(設計編及び施工編)」⁽¹⁾⁽²⁾に基づく。

(ii) 移行抑制機能

a. 設計方針

埋設設備及び覆土は、以下に示す方針に基づき、覆土完了から廃止措置の開始までの間において、移行抑制機能を維持する設計とし、廃止措置の開始後において、移行抑制機能を期待できる設計とする。

移行抑制機能は、放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量を低減するため、埋設設備内への水の浸入を抑制するとともに、放射性物質を収着する設計とする。

水の浸入の抑制に関して、覆土は、土質系材料の低透水性により埋設設備内

への水の浸入を抑制する設計とする。

放射性物質の収着に関して、埋設設備及び覆土は、それぞれ収着性を有するセメント系材料及び土質系材料を用いる設計とする。

また、埋設設備及び覆土の移行抑制機能の設計に当たっては、天然バリアの移行抑制機能を考慮して行う。

b. 安全設計

廃棄物埋設地は、以下に示す設計を行うことにより、覆土完了後において、廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減し、生活環境への移行を抑制する。

移行抑制機能を有する構造は、覆土完了後において、低透水性及び収着性を期待する人工バリアと天然バリアとの組合せとする。人工バリアは、埋設設備、埋設設備の上部及び側部を覆う難透水性覆土、下部覆土並びに上部覆土により構成する。天然バリアは、埋設設備の底部及び周辺に位置する鷹架層及び第四紀層により構成する。

(a) 覆土

(一) 覆土は、放射性物質が地表近傍へ移行することによる汚染拡大を防止するため、低透水性を有する設計とする。また、収着性を有する土質系材料を用いる設計とする。

(二) 覆土は、劣化・損傷に対する抵抗性を考慮し、長期的な力学的影響及び化学的影響に対して、変形追従性及び化学的安定性に優れた自然材料である現地発生土、ベントナイト、砕砂及び砕石を採用する。

なお、覆土の材料は、実際の調達時期により詳細な材料特性が変わる可能性があるが、その場合にも要求性能を満足することを確認した上で用いることとする。

(三) 覆土は、劣化・損傷が生じた場合にも必要な移行抑制機能を有する構成・仕様とするため、難透水性覆土、下部覆土及び上部覆土を十分な厚さで多層化する。

(四) 難透水性覆土及び下部覆土は、周辺の岩盤(鷹架層)と同等以下の透水係数とし、埋設設備の底面を除く外周部に設置することで埋設設備に劣化・損傷が生じた場合にも、埋設設備内に浸入する地下水量を極力低減させる

設計とする。

また、難透水性覆土は、地下水流動によって地表面へ放射性物質が移行することを抑制するとともに、浸入した地下水が埋設設備の底部から透水性の小さい鷹架層に流出するように、透水係数を周辺の鷹架層よりも更に小さくなるように設計し、埋設設備の底面及び埋設設備間において幅 2.5m 以下となる狭隘部(以下「埋設設備間狭隘部」という。)を除く外周部に設置する。

埋設設備へ流入する地下水量及び埋設設備から流出する地下水量の抑制の観点として、埋設設備と第四紀層との隔離を安定的に確保する考え方については、添付資料 1「3. 第四紀層との隔離を安定的に確保する考え方」に詳細を示す。

(五) 移行抑制機能を有する覆土に対する設計、材料の選定、建設・施工及び検査は、「事業規則」、「許可基準規則」等に基づくほか、利用可能な最善の技術として最新の知見を確認し、現状入手できる材料を用いる。現時点での最新の知見としては、「道路土工要綱」⁽³⁾及び「河川土工マニュアル」⁽⁴⁾を参照する。

(b) 埋設設備

(一) 埋設設備は、長期的な侵食に対する抵抗性の確保と埋設設備へ流入する地下水の水量及び埋設設備から流出する地下水の水量を抑制するため、透水性の小さい岩盤(鷹架層)を掘り下げて設置する。

(二) 埋設設備は、浸入した地下水中に漏えいする放射性物質の濃度を低減するため、収着性を有するセメント系材料を用いる設計とし、評価において収着性による移行抑制機能を期待できるよう設計する。

(三) コンクリート製の埋設設備に対する設計、材料の選定、建設・施工及び検査は、「事業規則」、「許可基準規則」等のほか、利用可能な最善の技術として最新の知見を確認する。現時点の最新の知見としては、「コンクリート標準示方書(設計編及び施工編)」⁽¹⁾⁽²⁾に基づく。

(iii) 放射線の遮蔽機能

a. 設計方針

本施設は、敷地周辺の公衆の受ける線量及び放射線業務従事者の受ける線量

並びに管理区域以外の人が入る場所に滞在する者の線量が、「線量告示」で定められた線量限度を超えないことはもとより、合理的に達成できる限り低くするため、以下に示す方針に基づき遮蔽機能を有する設計とする。

遮蔽機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、廃棄体の線量当量率、位置等を考慮し、廃棄体を埋設設備に定置することにより、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の公衆の受ける線量を実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下に低減できる設計とする。また、放射線業務従事者の受ける線量が放射線業務従事者の線量限度を超えないようにするとともに管理区域以外の人が入る場所に滞在する者の線量を公衆の線量限度以下に低減できる設計とする。

覆土完了後においては、覆土により、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の公衆等の受ける線量を $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下に低減できる設計とする。また、管理区域以外の人が入る場所に滞在する者の線量を公衆の線量限度以下に低減できる設計とする。

なお、周辺監視区域の廃止後は公衆が敷地内に立ち入る可能性を考慮し、覆土により敷地内に立ち入る公衆の受ける線量を公衆の線量限度以下に低減できる設計とする。

b. 安全設計

廃棄物埋設地は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間においては、放射線の減衰効果のあるコンクリート製の外周仕切設備、内部仕切設備、廃棄体支持架台、覆い及びコンクリート仮蓋並びにセメント系充填材を配置することで、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による、敷地周辺の公衆の受ける線量及び放射線業務従事者の受ける線量並びに管理区域以外の人が入る場所に滞在する者の線量を低減できる設計とする。

覆土完了後においては、覆土のうち難透水性覆土及び下部覆土により、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の公衆の受ける線量及び管理区域以外の人が入る場所に滞在する者の線量を低減できる設計とする。

なお、周辺監視区域の廃止後は公衆が敷地内に立ち入る可能性を考慮し、覆土により、敷地内に立ち入る公衆の受ける線量を低減できる設計とする。

遮蔽の評価結果については、「第八条 遮蔽等」において別途説明する。

(3) 廃棄物埋設地の設計に関して留意する事項

廃棄物埋設地は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間は、放射性物質の漏出を防止し、覆土完了から廃止措置の開始までの間は、放射性物質の漏出を低減するため、以下に留意した設計とする。

- ・埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること
 - ・劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること
 - ・劣化・損傷が生じた場合にも当該機能が維持できる構造・仕様であること
 - ・放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと
- また、廃棄物埋設地は、埋設する放射性廃棄物に含有される化学物質その他の化学物質により安全機能を損なわない設計とする。

(4) その他の設計

(i) 廃棄物埋設地に関する設計の留意事項

廃棄物埋設地は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間は、放射性物質の漏出を防止し、覆土完了から廃止措置の開始までの間は、放射性物質の漏出を低減するため、以下に留意した設計とする。

- a. 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること

廃棄物埋設地の設計については、放射性物質の性質及び放射能濃度として、放射性物質の種類により主に半減期や放出される放射線の種類・エネルギーが異なることを考慮する。

- ・半減期の長い放射性物質に対しては、人工バリア及び天然バリアを組み合わせる移行抑制機能の設計により長期的に放射性物質の移行を抑制し、放射能の減衰を図ることで公衆の受ける線量を低減する。

・半減期が短く放射線のエネルギーが大きい放射性物質に対しては、遮蔽機能の設計により放射能が有意に減衰するまで遮蔽を確保することで、公衆の受ける外部被ばくを低減する。

・放射性廃棄物は容器に固型化したものであり、放射性物質が容易に漏えい・飛散するものではない。しかし、水を媒体として移動することが考えられることから、人工バリア及び天然バリアによる移行抑制機能を確保するまで、漏出防止機能の設計により、水を媒体として放射性物質が漏出することを防止する。

また、廃棄物埋設地は、保全に関する措置を必要としない状態に移行できるよう設計する。人間侵入リスクが高い地表面を避け、天然バリアである侵食抵抗性の高い岩盤の性能を有効に利用するために、地盤を掘り下げて埋設設備を設置する。その結果、埋設設備が地下水面下への設置となることから、その特徴を考慮し設計する。

埋設設備の設計については、既設埋設設備の設計・施工実績を考慮する。

以上より、廃棄物埋設地に要求される安全機能及びその安全機能を維持すべき期間を踏まえた上で、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術として、諸外国の類似施設の設計を参考とし、広く活用され、かつ、実績を多数有している建設・施工技術を用いる。

安全機能に対する期間ごとに、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術について以下に示す。

(a) 放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間は、安全機能(漏出防止機能及び遮蔽機能)を有する部位ごとの要求性能に加え、材料の選定、建設・施工及び検査を考慮した構造物として設計する。以下の内容を満足することで、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術とする。

(一) 合理的な建設・施工技術

当該期間は、数十年程度であることから、埋設設備及び排水・監視設備に対し、一般に数十年オーダーの耐用年数で知見が幅広く整備されているセメント系材料を用いたコンクリート構造物とすることが合理的である。

(二) 利用可能な最善の建設・施工技術

コンクリート構造物としての設計、材料の選定、建設・施工及び検査については、利用可能な最善の建設・施工技術として、最新の知見を確認し、施工の実現性及び品質を確保する。現時点での最新の知見としては、「コンクリート標準示方書(設計編及び施工編)」⁽¹⁾⁽²⁾に基づく。

また、安全機能ごとに対する設計としては以下のとおり。

- ・漏出防止機能は、雨水及び地下水の浸入の防止及び放射性物質の漏出の防止を行うため、埋設設備及び排水・監視設備において、透水特性を考慮した設計とする。低透水性としてコンクリートの材料配合、ひび割れ抑制としてコンクリートの材料配合及び鉄筋量、充填性としてモルタルの材料配合、防水性として内部防水の配置並びに排水性としてポーラスコンクリート層の設置を考慮した設計とする。

- ・遮蔽機能は、敷地周辺の公衆及び放射線業務従事者並びに管理区域以外の人が立ち入る場所に滞在する者への被ばくを低減するために、埋設設備の密度及び厚さを確保することで、放射線の遮蔽性能を有する設計とする。

(b) 覆土完了後

覆土完了後は、安全機能(移行抑制機能及び遮蔽機能)を有する部位ごとの要求性能に加え、材料の選定、建設・施工及び検査を考慮した構造物として設計する。以下の内容を満足することで、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術とする。

(一) 合理的な建設・施工技術

当該期間は、数百年以上であることから、長期的な透水特性及び遮蔽性能を期待するために、力学的・化学的作用により安全性が損なわれ難い天然材料である土質系材料を用いた土構造物とすることが合理的である。

また、長期的な核種収着性を期待するために、長期的に安全性が損なわれ難い土質系材料及びセメント系材料を用いることが合理的である。

(二) 利用可能な最善の建設・施工技術

土構造物としての設計、材料の選定、建設・施工及び検査については、利用可能な最善の建設・施工技術として、最新の知見を確認する。現時点での最新の知見としては、「道路土工要綱」⁽³⁾及び「河川土工マニュアル」

(4)を参照とする。また、一般土工で用いられる重機を使用し、適切な品質管理を行うことで、目標の透水係数を有する覆土を施工できることを確認している。

なお、施工時の品質管理方法は、覆土施工時に行う施工試験結果を用いて最終決定する。

安全機能ごとに対する設計としては以下のとおり。

- ・移行抑制機能は、低透水性として土質系材料により透水係数及び厚さを確保する設計とし、収着性を有するセメント系材料及び土質系材料を用いる設計とする。
- ・遮蔽機能は、敷地周辺の公衆及び管理区域以外の人立ち入る場所に滞在する者への被ばくを低減するために、覆土の密度及び厚さを確保することで、放射線の遮蔽性能を有する設計とする。

b. 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

埋設設備及び排水・監視設備は、漏出防止機能を確保する期間に対して、劣化・損傷に対する抵抗性を有するよう鉄筋かぶり及び材料配合の設計を行う。また、劣化抵抗性を有していることを「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づく耐久性照査によって確認する。対象項目は、設計条件及び立地条件を考慮し、耐久性に影響があると考えられる中性化、塩害及び凍害とする。

- ・中性化に対する劣化抵抗性を有するために、中性化深さが鋼材腐食発生限界深さに達しない設計とする。
- ・塩害に対する劣化抵抗性を有するために、コンクリート表面塩化物イオン濃度の設計値が鋼材腐食発生限界濃度に達しない設計とする。
- ・凍害に対する内部損傷及び表面損傷に対する劣化抵抗性を有する設計とする。

(b) 覆土

難透水性覆土及び下部覆土は、化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性を考慮し、粒形分布に広がりを持った土質系材料を用いる。

難透水性覆土及び下部覆土は、容易な露呈を防止する観点から安定した地盤を掘り下げ、埋設設備の底面を除く外周部に設置する設計とする。

長期状態において想定される劣化・損傷事象を抽出し、覆土の透水特性に影響を及ぼす要因に対して、長期的に維持するための要求機能を満たす見通しのある設計とする。

これらにより、覆土は劣化・損傷に対する抵抗性を有する設計とする。

c. 劣化・損傷が生じた場合にも当該機能が維持できる構造・仕様であること

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

埋設設備及び排水・監視設備は、廃棄体と水が接触することを防止するために、外周仕切設備及び覆い、ポーラスコンクリート層、セメント系充填材並びに内部防水で多重化し、各部位の劣化・損傷が生じた場合においても、漏出防止機能を維持する構造・仕様とする。

(b) 覆土

覆土は、長期的に発生が予想される力学的影響及び化学的影響のいずれに対しても機能維持が受動的に期待できるよう、多層化した十分な厚さの覆土を設置する。

線量評価上用いる各性能は、線量評価の状態設定における劣化・損傷の程度及び期間の不確実性を包含する設定とすることにより、廃棄物埋設地全体として線量基準を満足できるようにする。

これらにより、劣化・損傷が生じた場合においても、移行抑制機能を維持する構造・仕様とする。

d. 放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと

放射性物質の漏出を低減する機能は、人工バリア及び天然バリアにより確保し、人工バリアは特性の異なる材料として、セメント系材料及び土質系材料を用いる設計とする。また、これらを用いた各部材に対して、第2表に示すように、地下水の浸入を抑制する機能(低透水性)及び放射性物質を収着する機能(収着性)の複数の異なる機能を期待することにより、一つの機能に過度に依存しないよう配慮した設計とする。

第2表 各部材に期待する移行抑制機能を構成する特性

	部材	収着性	低透水性
人工バリア	埋設設備	○	—
	覆土	難透水性覆土	○
		下部覆土	—*1
		上部覆土	○
天然バリア	岩盤	○	○

○：期待する

—：期待しない

*1：下部覆土は土質系材料であり収着性を期待できるが、難透水性覆土又は下部覆土の一方に収着性を期待することで十分であることから、下部覆土の収着性は考慮しない。

e. 放射性物質の漏出を低減する機能を有すること

(a) 設計方針

「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減する」について、覆土完了から廃止措置の開始までの間、公衆の受ける線量が法令に定める線量限度を超えないことはもとより、As Low As Reasonably Achievable (ALARA) の考えの下、合理的に達成できる限り十分低くなるよう、**実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下となる設計とする。**

(b) 評価方法

(一) 線量評価シナリオ

廃棄物埋設地からの移行に関する評価対象とする線量評価シナリオは、**地下水中の放射性物質が移行する尾駁沼の水産物摂取による内部被ばくとする。**

(二) 線量評価モデル

廃棄物埋設地からの移行に関する評価対象とする線量評価モデルは、**廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が、廃棄物埋設地を通過する地下水に混入し、沢を経て尾駁沼に流入するものとして設定する。この沼の水産物を摂取する場合の内部被ばくの評価は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)」の(1)式から(6)式及び(9)式を用いて計算する。**

(三) 線量評価パラメータ

廃棄物埋設地から漏出する放射性物質の量の算定に当たっては、覆土完了直後から放射性物質の漏出が開始するとして評価し、線量評価パラメータを設定する。

なお、覆土完了直後の放射エネルギーは、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料9 線量評価パラメータ -パラメータ根拠集-」の第1表の値とし、覆土完了後の時間の経過による放射性物質の減衰を考慮する。その他の線量評価パラメータは同資料の第2表から第7表の値を用いる。

(c) 評価結果

埋設設備の覆土完了から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける被ばく線量について評価を行った結果、約 $3.8 \mu\text{Sv/y}$ となった。また、この線量に廃棄物埋設施設からの環境への放射性物質の放出による線量約 $1.7 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/y}$ を合計しても約 $3.8 \mu\text{Sv/y}$ であり、公衆が受ける実効線量が $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下となった。

なお、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による線量は覆土により覆土前よりも大幅に減少し、無視できるレベルとなっているため考慮しない。

埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの詳細な評価結果は「[参考] (3) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第10条第4項)」に示す。線量評価に関するパラメータについては、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。

f. 埋設する放射性廃棄物に含有される化学物質その他の化学物質により安全機能を損なわないものであること

埋設する廃棄体、埋設設備、排水・監視設備及び覆土には可燃性の化学物質、可燃性ガスを発生する化学物質は含まれない。一方、廃棄物埋設地の安全機能に影響を及ぼす可能性のあるその他の化学物質としては、廃棄体又は埋設設備内に含まれる有機物及び塩、更にはセメント系材料から溶出した高アルカリ成分を含む地下水との反応による影響を考慮する必要がある。

覆土完了前の安全機能については、埋設設備には漏出防止機能及び遮蔽機能

を期待しており、排水・監視設備には漏出防止機能を期待している。覆土完了までの数年間の期間においては、水との接触により埋設設備が容易に溶解・変質すること、更には水を媒体として埋設設備内の化学物質(有機物及び塩)が溶解して、化学反応により埋設設備が著しく損傷することはない。したがって、覆土完了前の漏出防止機能及び遮蔽機能については、これらの化学物質によって影響を受けない。

覆土完了後の安全機能については、埋設設備には移行抑制機能を期待しており、覆土には移行抑制機能及び遮蔽機能を期待している。遮蔽機能については、覆土が十分な厚さを有しており、化学物質との接触による覆土の厚さ減少及び密度低下は無視できると考えられる。移行抑制機能については、廃棄物埋設地内において地下水位が上昇し、地下水の浸入に伴う溶解及び漏出する化学物質(有機物及び塩)及びセメント系材料から溶出した高アルカリ成分が埋設設備の収着性並びに覆土の低透水性及び収着性に影響を及ぼす可能性がある。

上記のような化学物質の影響に対する対策として、埋設設備及び覆土に使用する材料については、化学物質による低透水性及び収着性への影響を考慮し、低透水性及び収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。また、覆土については化学的安定性の高い材料で構成する設計とする。

5. 廃棄物埋設地の設計

1号廃棄物埋設地の設計内容について説明する。

(1) 構成及び設置位置

廃棄物埋設地は、管理建屋から運搬した廃棄体を埋設する場所であり、埋設設備、排水・監視設備及び覆土により構成する。

廃棄物埋設地は、敷地のほぼ中央北寄りに位置し、廃棄体最大 40,960m³ (200L ドラム缶 204,800 本相当) を埋設する。

埋設設備は、1基当たり廃棄体約 1,024m³ (200L ドラム缶 5,120 本相当) を埋設する埋設設備 5基を1埋設設備群とする埋設設備群 8群で構成し、東西方向に5基、南北方向に8基配置する。

埋設設備は、現造成面 (標高約 45m~46m) 基準から約 14m~19m 掘り下げて、標高約 26m~32m となるように N 値 50 以上の岩盤に設置する。

(2) 主要設備

(i) 埋設設備

a. 構成及び安全機能

埋設設備は、外周仕切設備、内部仕切設備、廃棄体支持架台、セメント系充填材、覆い、コンクリート仮蓋及び内部防水により構成する。

外周仕切設備及び覆いの低透水性及びひび割れ抑制、セメント系充填材の充填性並びに内部防水の防水性により放射性物質の漏出を防止する。

外周仕切設備、内部仕切設備、廃棄体支持架台、セメント系充填材、覆い及びコンクリート仮蓋は、遮蔽性により放射線の遮蔽を行う。

なお、評価において収着性による移行抑制機能を期待できる設計とする。

b. 要求性能

安全機能を確保するために必要な要求性能を整理する。

埋設設備の部位ごとに設定した要求性能及び設計要件を第3表に示す。

(a) 技術要件及び設計仕様項目

(一) 漏出防止機能

埋設設備の漏出防止機能は、雨水及び地下水の浸入を防止すること及び

放射性物質の漏出を防止することである。水の浸入及び放射性物質の漏出は埋設設備の透水特性によって影響を受けることから、埋設設備に対する技術要件は透水特性(低透水性、ひび割れ抑制、充填性及び防水性)であり、その設計仕様項目は水結合材比、断熱温度上昇量、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ、鉄筋量、スランプフロー、ブリーディング、遮水性及びひび割れ追従性である。

また、埋設設備は、漏出防止機能を維持する上で、常時作用している荷重及び操業中に作用する荷重並びに静的地震力に対する健全性を要求することから、技術要件として力学特性(力学的安定性及び耐久性)を考慮する。漏出防止機能の要求期間が一般的なコンクリート構造物の設計耐用期間と同程度であることから、現状の土木建築分野における構造設計及び耐久設計の方法が適用可能である。したがって、その設計仕様項目は圧縮強度、鉄筋強度、鉄筋かぶり及び材料配合である。

(二) 移行抑制機能

埋設設備には、移行抑制機能に対する技術要件として、セメント系材料が有する収着性を考慮するが、その設計仕様項目は設定せず、収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。

(三) 遮蔽機能

埋設設備の遮蔽機能は、公衆の受ける線量及び放射線業務従事者の受ける線量並びに管理区域以外の人が立ち入る場所に滞在する者の線量(以下「公衆等の受ける線量」という。)を低減することである。公衆等の受ける線量は埋設設備の遮蔽性能によって影響を受けることから、埋設設備に対する技術要件は遮蔽性能(遮蔽性)であり、その設計仕様項目は密度及び部材寸法(厚さ)である。

また、埋設設備は、遮蔽機能を維持する上で、常時作用している荷重及び操業中に作用する荷重並びに静的地震力に対する健全性を要求することから、技術要件として力学特性(力学的安定性及び耐久性)を考慮する。遮蔽機能の要求期間が一般的なコンクリート構造物の設計耐用期間と同程度であることから、現状の土木建築分野における構造設計及び耐久設計の方法が適用可能である。したがって、その設計仕様項目は圧縮強度、鉄筋強

度、鉄筋かぶり及び材料配合である。

(b) 設計要件

設計仕様項目である水結合材比、断熱温度上昇量、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ、鉄筋量、スランプフロー、ブリーディング、遮水性、ひび割れ追従性、圧縮強度、鉄筋強度、鉄筋かぶり、材料配合、密度及び部材寸法(厚さ)については、各部位が要求性能を満足するための設計要件を設定する。

埋設設備の技術要件のうち、低透水性、充填性、力学的安定性及び耐久性についての詳細は添付資料2「技術要件における考え方」に示す。

第3表 埋設設備の要求性能及び設計要件

安全機能	要求性能		仕切設備 外周	仕切設備 内部	支持架台 廃棄体	セメント系 充填材	覆い	コンクリート 仮蓋	内部防水	設計要件	
	技術要件 (必要な特性)	設計仕様項目									
漏出防止機能	透水特性	低透水性	水結合材比	○	—	—	—	○	—*1	—	緻密なコンクリートであること(基質部)。
		ひび割れ抑制	断熱温度上昇量	○	—	—	—*3	○	—*1	—	温度変化によるひび割れの抑制を考慮すること。
			自己収縮ひずみ	○	—	—	—*3	○	—*1	—	自己収縮によるひび割れの抑制を考慮すること。
			乾燥収縮ひずみ	○	—	—	—*3	○	—*1	—	乾燥収縮によるひび割れの抑制を考慮すること。
			鉄筋量	○	—	—	—	○	—*1	—	最大ひび割れ幅を低減すること。
		充填性	スランプフロー	—	—	—	○	—	—	—	必要な流動性を有すること。
			ブリーディング	—	—	—	○	—	—	—	材料分離抵抗性を有すること。
		防水性	遮水性	—	—	—	—	—	—	○	水の浸入及び漏出を防止すること。
	ひび割れ追従性		—	—	—	—	—	—	○	コンクリートのひび割れに追従すること。	
	漏出防止機能を確保するための要求機能	力学特性	力学的安定性	圧縮強度	○	○	○*2	○	○	—	—
鉄筋強度				○	○	○*2	—	○	—	—	必要な構造強度を有すること。
耐久性		鉄筋かぶり	○	○	—	—	○	—	—	中性化に対して必要なかぶりを有すること。	
		材料配合	○	○	—	—	○	—	—	塩害及び凍害に対して劣化抵抗性を有すること。	
移行抑制機能	核種収着性	収着性	—	—	—	—	—	—	—	設計仕様項目を設定しない(評価において、埋設設備自体が副次的にもつ性能として設定するものとする。)*4	
遮蔽機能	放射線の遮蔽性能	遮蔽性	密度	○	○	○	○	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。
			部材寸法(厚さ)	○	○	○	○	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。
	遮蔽機能を維持するための要求機能	力学特性	力学的安定性	圧縮強度	○	○	○	○	○	—	必要な構造強度を有すること。
				鉄筋強度	○	○	○	—	○	○	—
		耐久性	鉄筋かぶり	○	○	—	—	○	—	—	中性化に対して必要なかぶりを有すること。
			材料配合	○	○	—	—	○	—	—	塩害及び凍害に対して劣化抵抗性を有すること。

*1：防水シート等の併用により区画内に水を浸入させないよう考慮する。

*2：セメント系充填材を充填できるよう、ポーラスコンクリート層と廃棄体間の厚さを確保するための力学的安定性を確保する。

*3：充填性を確保した上でひび割れ抑制の観点についても考慮する。

*4：分配係数は、材料仕様及び施工の際に取得する分配係数データ又は代替指標となるデータにより管理する。

c. 構造及び仕様

埋設設備の外形寸法は、約 24.4m(幅)×約 24.4m(奥行き)×約 6.2m~6.4m(高さ)*1 であり、底部及び側部は外周仕切設備、上部は覆いにより構成する。埋設設備の内部は、内部仕切設備により 1 基当たり 4 行 4 列の 16 区画とする。

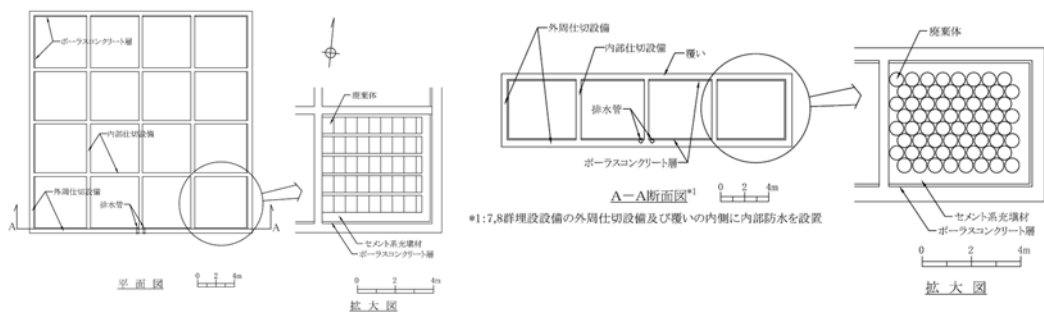
*1：小数点第一位までの記載とし、「約」と記載する。

区画した内部には、廃棄体を定置するための廃棄体支持架台を設置し、8 行、5 列、8 段積みで廃棄体を定置する。廃棄体の定置後は、有害な空隙が残らないようにセメント系充填材を充填する。

廃棄体の定置開始から覆い施工開始までの間は、作業時を除き、区画の開口部にコンクリート仮蓋を設置する。

埋設設備の平面図及び断面図を第 1 図に示す。

埋設設備の主要な部位と主な仕様を第 4 表に示す。



第 1 図 埋設設備平面図及び断面図

第4表 埋設設備の主要な部位と主な仕様

設備	主要な部位	主な仕様 ^{*1}
埋設設備	外周仕切設備	材料：鉄筋コンクリート コンクリートの設計基準強度：24.6N/mm ² 以上 水結合材比：55%以下 最大ひび割れ幅設計目標値：0.1mm 厚さ：約50cm(側壁)、約60cm(底版) 密度：2,100kg/m ³ 以上
	内部仕切設備	材料：鉄筋コンクリート コンクリートの設計基準強度：24.6N/mm ² 以上 厚さ：約40cm 密度：2,100kg/m ³ 以上
	廃棄体支持架台	材料：鉄筋コンクリート ポーラスコンクリート層と廃棄体間の厚さ：約40cm 密度：1,600kg/m ³ 以上
	セメント系充填材	材料：モルタル モルタルの設計基準強度：10.0N/mm ² 以上 流動性：スランプフロー65cm以上 ポーラスコンクリート層と廃棄体間の厚さ：約40cm 密度：1,600kg/m ³ 以上
	覆い	材料：鉄筋コンクリート コンクリートの設計基準強度：24.6N/mm ² 以上 水結合材比：55%以下 最大ひび割れ幅設計目標値：0.1mm 厚さ：約50cm 密度：2,100kg/m ³ 以上
	コンクリート仮蓋	材料：鉄筋コンクリート コンクリートの設計基準強度：24.0N/mm ² 以上 厚さ：60cm 密度：2,100kg/m ³ 以上
	内部防水	防水性を有する材料を設置

*1：各部位の厚さについては、寸法の許容誤差を含む記載として「約」としている。

以下に、各部位の仕様を記載する。

(a) 外周仕切設備

(一) 概要

外周仕切設備は、鉄筋コンクリート製の側壁及び底版であり、側壁の厚さは約 50 cm (許容誤差を含む)、底版の厚さは約 60 cm (許容誤差を含む) とする。

(二) 設計方針

外周仕切設備に求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間の漏出防止機能及び遮蔽機能である。漏出防止機能に対しては透水特性を、遮蔽機能に対しては遮蔽性能を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

コンクリートの低透水性及びひび割れの抑制に配慮した設計とする。低透水性を確保するため、「コンクリート標準示方書(施工編)」⁽¹⁾に基づき、水結合材比を 55%以下とする。また、最大ひび割れ幅の設計目標値を 0.1mm とし、温度応力及び収縮による貫通ひび割れの発生を抑制するため、低発熱に配慮した材料配合により温度応力を低減するとともに、鉄筋によりひび割れを抑制する設計とする。

外周仕切設備の施工後、覆土完了まで、可能な範囲に対し定期的な点検を行う。ひび割れは 0.1mm 以上を管理する。0.1mm 以上のひび割れに対しては、排水・監視設備からの排水量及びひび割れの進展状況を防水性の観点で評価した上で、適切に補修する。

(イ) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は 2,100kg/m³ 以上とする。

(ウ) 力学特性

力学的安定性及び耐久性に配慮した設計とする。

力学的安定性を確保するため、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録 I に示される許容応力度法により構造強度の照査を行

い、コンクリートの設計基準強度は 24.6N/mm^2 以上とする。

耐久性を確保する観点から、中性化、塩害及び凍害に対して鉄筋かぶり及び材料配合の設計を行う。これらについて、「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づき照査を行う。

(b) 内部仕切設備

(一) 概要

内部仕切設備は、鉄筋コンクリート製であり、その厚さは約 40cm (許容誤差を含む)とする。

(二) 設計方針

内部仕切設備に求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間の遮蔽機能である。遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $2,100\text{kg/m}^3$ 以上とする。

(イ) 力学特性

力学的安定性及び耐久性に配慮した設計とする。

力学的安定性を確保するため、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録 I に示される許容応力度法により構造強度の照査を行い、コンクリートの設計基準強度は 24.6N/mm^2 以上とする。

耐久性を確保する観点から、中性化、塩害及び凍害に対して鉄筋かぶり及び材料配合の設計を行う。これらについて、「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づき照査を行う。

(c) 廃棄体支持架台

(一) 概要

廃棄体支持架台は、鉄筋コンクリート製であり、埋設設備に設置するポラスコンクリート層と廃棄体の離隔を確保するよう設置する。

(二) 設計方針

廃棄体支持架台は、セメント系充填材と一体となって漏出防止機能及び遮蔽機能を達成する。ポーラスコンクリート層と廃棄体との間のセメント系充填材の厚さが約 40cm(許容誤差を含む)となるよう、廃棄体を固定及び支持するための力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $1,600\text{kg/m}^3$ 以上とする。

(イ) 力学特性

力学的安定性を確保するため、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録 I に示される許容応力度法により構造強度の照査を行う。

(d) セメント系充填材

(一) 概要

セメント系充填材は、区画内を充填するモルタルであり、廃棄体の間に有害な空隙が残らないようにする。

ポーラスコンクリート層と廃棄体との間のセメント系充填材の厚さは約 40cm(許容誤差を含む)とする。

(二) 設計方針

セメント系充填材に求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間の漏出防止機能及び遮蔽機能である。漏出防止機能に対しては透水特性を、遮蔽機能に対しては遮蔽性能を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

充填性に配慮した設計として、水が廃棄体に接触することを抑制するため、区画内の廃棄体周辺を充填する。有害な空隙が生じないように充填するため、スランプフローは 65cm 以上とし、ブリーディングを極力生じないようにする。

(イ) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $1,600\text{kg}/\text{m}^3$ 以上とする。

(ウ) 力学特性

廃棄体の固定に対する力学的安定性に配慮した設計とし、モルタルの設計基準強度は $10.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上とする。

(e) 覆い及びコンクリート仮蓋

(一) 概要

覆いは、鉄筋コンクリート製であり、外周仕切設備及び内部仕切設備の上部に設置する。その厚さは約 50cm (許容誤差を含む) とする。

また、廃棄体の定置開始から覆い施工開始までの間は、作業時を除き、区画の開口部にコンクリート仮蓋を設置する。その厚さは約 60cm (許容誤差を含む) とする。

(二) 設計方針

覆いに求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間の漏出防止機能及び遮蔽機能である。漏出防止機能に対しては透水特性を、遮蔽機能に対しては遮蔽性能を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として力学特性を確保する。

コンクリート仮蓋に求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆い施工開始までの間の遮蔽機能である。遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

覆いは、コンクリートの低透水性及びひび割れの抑制に配慮した設計とする。

低透水性を確保するため、「コンクリート標準示方書(施工編)」⁽¹⁾に基づいて、水結合材比を 55% 以下とする。また、最大ひび割れ幅の設計目標値を 0.1mm とし、温度応力及び収縮による貫通ひび割れの発生を抑制するため、低発熱に配慮した材料配合により温度応力を低減するとと

もに、鉄筋によりひび割れを抑制する設計とする。

覆いの施工後、覆土完了まで、可能な範囲に対し定期的な点検を行う。ひび割れは 0.1mm 以上を管理する。0.1mm 以上のひび割れに対しては、排水・監視設備からの排水量及びひび割れの進展状況を防水性の観点で評価した上で、適切に補修する。

コンクリート仮蓋は、区画内に雨水を浸入させない設計とする。

(イ) 遮蔽性能

覆いは、遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $2,100\text{kg/m}^3$ 以上とする。

また、コンクリート仮蓋も同様に密度及び厚さを確保するものとし、密度は $2,100\text{kg/m}^3$ 以上とする。

(ウ) 力学特性

覆いは力学的安定性及び耐久性に、コンクリート仮蓋は力学的安定性に配慮した設計とする。

力学的安定性を確保するため、覆いは、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録 I に示される許容応力度法により構造強度の照査を行い、コンクリートの設計基準強度は 24.6N/mm^2 以上とする。

耐久性を確保する観点から、中性化、塩害及び凍害に対して鉄筋かぶり及び材料配合の設計を行う。これらについて、「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づき照査を行う。

また、コンクリート仮蓋は、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録 I に示される許容応力度法により構造強度の照査を行い、コンクリートの設計基準強度は 24.0N/mm^2 以上とする。

(f) 内部防水

(一) 概要

外周仕切設備、セメント系充填材、覆い及びポーラスコンクリート層とともに、雨水及び地下水の浸入を防止し、埋設設備からの放射性物質の漏出を防止するために内部防水を行う。

内部防水については、以下の観点から設計する。

(ア) 外周仕切設備側壁部及び覆い部

ポーラスコンクリート層から廃棄体方向に浸入する水の流れを防止する。

(イ) 外周仕切設備底版部及び側壁部の立ち上げ部

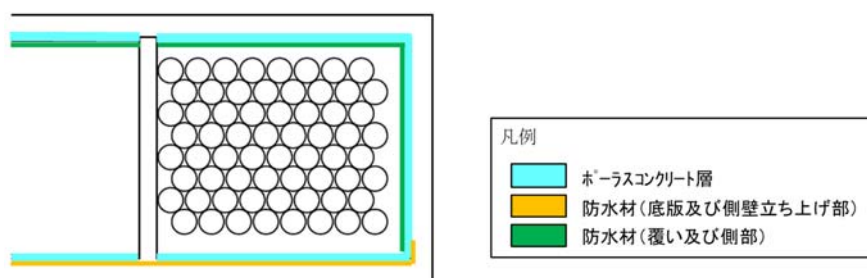
外周仕切設備底版からの地下水の浸入を防止するとともに、ポーラスコンクリート層からの放射性物質の漏出を防止する。

(二) 仕様

外周仕切設備側壁部及び覆い部における内部防水は、セメント系充填材上部及び側部とポーラスコンクリート層の間に行う。また、外周仕切設備の内側で外周仕切設備底版部及び側壁の立ち上げ部に内部防水を行う。

内部防水の設置位置概要図を第2図に示す。

内部防水は、遮水性を有し、ひび割れに対し追従性又はそれと同等の性能を有する設計とする。



*1：内部仕切設備直下の内部防水は、選定された防水材・工法に応じて施工範囲を決定する。

第2図 内部防水設置位置概要図

e. 既設設備の扱い

1号埋設設備1群から6群は、覆い設置から難透水性覆土施工までの間においては、水の浸入が有意に認められる埋設設備に対し、廃棄体への水の接触をより低減させるため、覆い上面から浸入した水が廃棄体に接触することを防止する対策を行う。

(ii) 排水・監視設備

a. 構成及び安全機能

排水・監視設備は、ポーラスコンクリート層、排水管及び点検路により構成する。

ポーラスコンクリート層は、排水性を有し、埋設設備内に浸入した水を排水し、廃棄体と浸入した水の接触を抑制する。

点検路は、排水管からの排水状況を監視できる作業空間を確保する。排水管には、排水回収作業用の弁を設置する。

b. 要求性能

安全機能を確保するために必要な要求性能を整理する。

排水・監視設備の部位ごとに設定した要求性能及び設計要件を第5表に示す。

第5表 排水・監視設備の要求性能及び設計要件

安全機能	要求性能			コンクリート層 ポラス	排水管 *1	点検路	設計要件
	技術要件 (必要な特性)		設計仕様項目				
漏出防止機能	透水特性	排水性	排水能力	○	—	—	十分な排水能力を有する設備が配置されていること。
漏出防止機能を 確保するための 要求機能	力学特性	力学的 安定性	コンクリート 圧縮強度	○	—	○	必要な構造強度を有すること。
			鉄筋強度	—	—	○	必要な構造強度を有すること。
		耐久性	鉄筋かぶり	—	—	○	中性化に対して必要なかぶりを有すること。
	材料配合		—	—	○	塩害及び凍害に対して劣化抵抗性を有すること。	
	排水管の 腐食抵抗		—	○	—	供用期間中、腐食に対して劣化抵抗性を有すること。	
	作業空間 の確保	作業性	内空寸法	—	—	○	作業員が水の回収作業を実施できること。

*1：排水管には、排水管の回収作業用に弁を設けている。

(a) 技術要件及び設計仕様項目

(一) 漏出防止機能

排水・監視設備の漏出防止機能は、埋設設備内に浸入した水を排水し廃棄体への水の接触を抑制することである。浸入した水の排水は排水・監視設備の透水特性によって影響を受けることから、排水・監視設備に対する技術要件は透水特性(排水性)であり、その設計仕様項目は排水能力である。排水能力を期待する部位はポーラスコンクリート層であり、透水係数、通水断面積及び勾配により排水能力を算定する。

また、排水・監視設備は、漏出防止機能を確保する上で、常時作用している荷重及び操業中に作用する荷重並びに静的地震力に対する健全性を要求することから、技術要件として力学特性(力学的安定性、耐久性)を考慮する。漏出防止機能の要求期間が一般的なコンクリート構造物の設計耐用期間と同程度であることから、現状の土木建築分野における構造設計及び耐久設計の方法が適用可能である。したがって、その設計仕様項目はコンクリート圧縮強度、鉄筋強度、鉄筋かぶり、材料配合及び排水管の腐食抵抗である。

さらに、排水・監視設備は、漏出防止機能が発揮されていることの確認のため、排水された水を作業員が適切に回収する必要があることから、技術要件として作業空間の確保(作業性)を考慮する。したがって、その設計仕様項目は内空寸法であり、それを期待する部位は点検路である。

(b) 設計要件

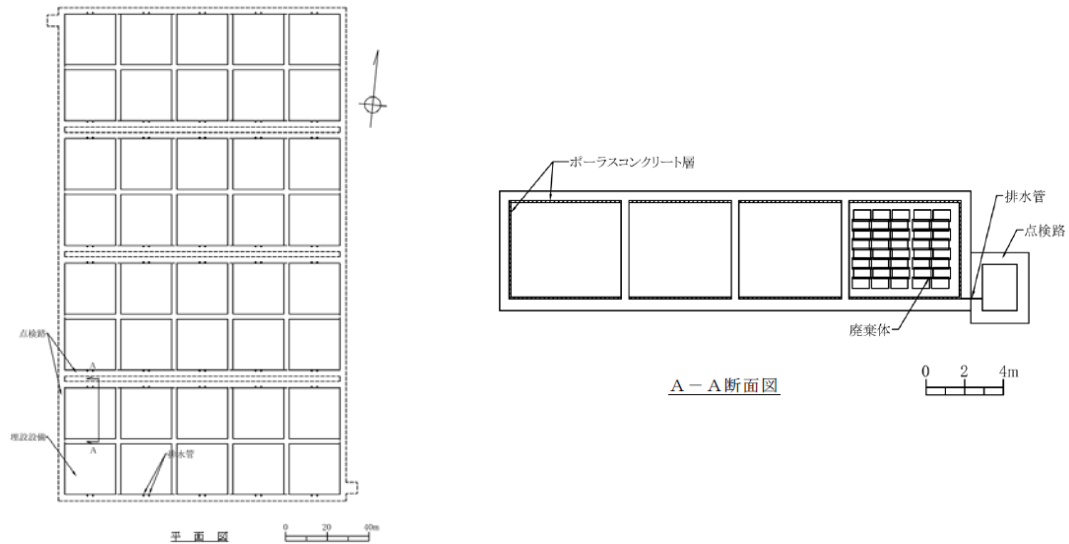
設計仕様項目である排水能力、コンクリート圧縮強度、鉄筋強度、鉄筋かぶり、排水管の腐食抵抗及び内空寸法については、各部位が要求性能を満足するための設計要件を設定する。

c. 構造及び仕様

埋設設備の外周仕切設備及び覆いとセメント系充填材の間には、ポーラスコンクリート層を設置するとともに、集水した水を排水できるように排水管を設置する。排水管からの排水を覆土が施工された状態でも回収できるよう点検路を設置する。

排水・監視設備の平面図及び断面図を第3図に示す。

排水・監視設備の主要な部位と主な仕様を第6表に示す。



第3図 排水・監視設備平面図及び断面図

第6表 排水・監視設備の主要な部位と主な仕様

設備	主要な部位	主な仕様*1
排水・監視設備	ポーラスコンクリート層	材料：ポーラスコンクリート及びコンクリート ポーラスコンクリートの設計基準強度：10.0N/mm ² 以上 厚さ：約10cm ポーラスコンクリートの透水係数：1.0×10 ⁻³ m/s以上 排水性：排水管に向かって勾配がついていること
	排水管	材料：ステンレス鋼 口径：50A 排水性：外側に向かって勾配がついていること及び排水回収作業用に弁が設置されていること
	点検路	材料：鉄筋コンクリート コンクリートの設計基準強度：24.6N/mm ² 以上

*1：各部位の厚さについては、寸法の許容誤差を含む記載として「約」としている。

以下に各部位の仕様を示す。

(a) ポーラスコンクリート層

(一) 概要

ポーラスコンクリート層は、ポーラスコンクリート及びコンクリートからなり、外周仕切設備及び覆いの内側の面に設置する。

(二) 設計方針

ポーラスコンクリート層に求める安全機能は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間の漏出防止機能である。漏出防止機能に対しては、透水特性を確保する設計とする。また、その他の必要な特性として、力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

排水性に配慮した設計とし、ポーラスコンクリートは、排水性の確保のため透水係数を $1.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 以上とし、厚さをポーラスコンクリート層の厚さ約 10cm(許容誤差を含む)の 1/2 以上とする。

また、排水管に向かって勾配をつける。

(イ) 力学特性

廃棄体の自重に対する力学的安定性に配慮した設計とし、ポーラスコンクリートの設計基準強度は 10.0N/mm^2 以上とする。

(b) 排水管

(一) 概要

ポーラスコンクリート層で集水した水を埋設設備の外に排水するために排水管を設置し、口径は 50A とする。外部に向かって勾配を設けるとともに、排水回収作業用の弁を設置する。

(二) 設計方針

排水管は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、力学特性を確保する。

(三) 仕様

(ア) 力学特性

耐久性に配慮した設計とし、腐食に対して劣化抵抗性を有する材質(ステンレス鋼)とする。

(c) 点検路

(一) 概要

点検路は、鉄筋コンクリート製であり、覆土施工開始後から覆土完了まで排水状況の監視を行うため、地上部から埋設設備の排水管取付位置までの覆土内における作業空間の確保を目的としている。

(二) 設計方針

点検路は、力学特性及び作業空間を確保する。

なお、排水・監視設備による監視及び測定が終了した後に、有害な空隙が残らないよう点検路の埋戻しを行う。また、点検路のうち埋設設備の上方向で難透水性覆土及び下部覆土内を貫通する箇所を解体し、有害な空隙が残らないよう埋戻しを行う。

(三) 仕様

(ア) 力学特性

力学的安定性及び耐久性に配慮した設計とする。

力学的安定性を確保するため、「コンクリート標準示方書(構造性能照査編)」⁽⁵⁾付録 I に示される許容応力度法により構造強度の照査を行い、コンクリートの設計基準強度は 24.6N/mm^2 以上とする。

耐久性を確保する観点から、中性化、塩害及び凍害に対して鉄筋被り及び材料配合の設計を行う。これらについて、「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づき照査を行う。

(イ) 作業空間の確保

作業性に配慮した設計とし、排水・監視設備により排水された水を作業員が回収できる作業空間を確保する。

(iii) 覆土

a. 構成及び安全機能

覆土は、難透水性覆土、下部覆土及び上部覆土により構成する。

難透水性覆土及び下部覆土は、低透水性により放射性物質の移行を抑制し、遮蔽性により放射線の遮蔽を行う。

なお、評価において収着性による移行抑制機能を期待できる設計とする。

b. 要求性能

安全機能を確保するために必要な要求性能を整理する。

覆土の部位ごとに設定した要求性能及び設計要件を第7表に示す。

(a) 技術要件及び設計仕様項目

(一) 移行抑制機能

覆土の移行抑制機能は、埋設設備内を通過する地下水の流量を低減することである。埋設設備からの流出水量は覆土の透水特性によって影響を受けることから、覆土に対する技術要件は透水特性(低透水性)であり、その設計仕様項目は透水係数及び厚さである。

また、移行抑制機能については、長期にわたり機能を維持する必要があるため、透水係数及び厚さの変化に影響を及ぼす要因について抽出する。長期状態において覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構を第8表に示す。影響要因の抽出については、周辺岩盤などの外部環境も含めた施設の構成及び影響要因の相互作用を網羅的に考慮する。抽出した要因は、廃棄物埋設地の覆土完了後の再冠水による水との接触に伴う、ベントナイト特性の変化、有効粘土密度の変化及び短絡経路の形成である。長期における覆土の技術要件は、これらの要因に対する長期機能維持特性(化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性)であり、その設計仕様項目は透水係数、厚さ及び締固め度である。

なお、覆土には、移行抑制機能に対する技術要件として、土質系材料が有する収着性を考慮するが、その設計仕様項目は設定せず、収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。

(二) 遮蔽機能

覆土の遮蔽機能は、放射線を遮蔽する機能であるため、技術要件は遮蔽性であり、その設計仕様項目は密度及び厚さである。

(b) 設計要件

設計仕様項目である透水係数、厚さ、密度及び締固め度については、各部位が要求性能を満足するための設計要件を設定する。

覆土の技術要件のうち、低透水性及び液状化抵抗性についての詳細は添付資料2「技術要件における考え方」に示す。

第7表 覆土の要求性能及び設計要件

安全機能	要求性能		設計仕様項目	難透水性覆土	下部覆土	上部覆土	設計要件
	技術要件 (必要な特性)						
移行抑制機能	透水特性	低透水性	透水係数	○	○	—	必要な透水係数を有すること。 ^{*3}
			厚さ	○	○	—	必要な厚さを有すること。 ^{*4}
	核種 収着性	収着性	—	—	—	—	設計仕様項目を設定しない(評価において、覆土が副次的にもつ性能として設定するものとする)。 ^{*5}
移行抑制機能を長期的に維持するための要求機能	長期機能維持特性	化学的 ^{*1} 安定性	透水係数	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。 ^{*2}
		変形 ^{*1} 追従性	透水係数	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。 ^{*2}
			厚さ	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。 ^{*2}
		液状化 ^{*1} 抵抗性	締固め度	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。 ^{*2}
遮蔽機能	放射線の遮蔽性能	遮蔽性	密度	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。
			厚さ	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。 ^{*4}

*1：影響要因及び影響機構を第8表に整理している。

*2：長期状態変化に関連する設計については、第十条第四号の状態設定の評価と関連することから、第十条第四号の説明時に具体的な数値の説明を行う。

*3：難透水性覆土は巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 、下部覆土は巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ を施工時点で確保する。

*4：難透水性覆土は厚さ2m、下部覆土は難透水性覆土上面で厚さ2mを確保する。

*5：分配係数は、材料仕様及び施工の際に取得する分配係数データ又は代替指標となるデータにより管理する。

第8表 長期状態において覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構

設計仕様項目	長期状態における影響要因			影響機構	要求性能(技術要件)
透水係数	ベントナイト特性の変化	化学的影響	交換性陽イオンの変化	セメント系材料からの高カルシウム濃度の間隙水によるベントナイトのCa型化。	化学的安定性
			廃棄体中のほう酸塩、硫酸塩などの可溶性塩影響	可溶性塩影響により、空隙特性(空隙率、空隙構造)が変化するとともに、膨潤性能が低下。また、陥没による覆土の変形。	化学的安定性 変形追従性
	有効粘土密度*1の変化	力学的影響	金属の腐食	金属の腐食膨張により、覆土の隅角部等に、厚さの減少及び変位に伴う透水性が変化した領域の発生。	変形追従性
			地震影響	地震力により覆土の変形及び液状化の発生。	変形追従性 液状化抵抗性
	化学的影響	モンモリロナイトの溶解、随伴鉱物の溶解、二次鉱物の生成	セメント系材料からの高アルカリ性の間隙水によるベントナイト構成材料の溶解に伴う密度低下。溶解成分と地下水成分などが反応して二次鉱物が沈殿。	化学的安定性	
厚さ	短絡経路の形成	力学的影響	ガス発生	金属腐食等により発生するガスの破過が生じ、覆土に低密度部を形成。	変形追従性

*1：単位体積あたりに含まれるベントナイト分の乾燥重量をそれ自身の体積で割ることにより得られる密度であり、ベントナイト混合材料の特性を把握するときの指標のひとつ。

c. 構造及び仕様

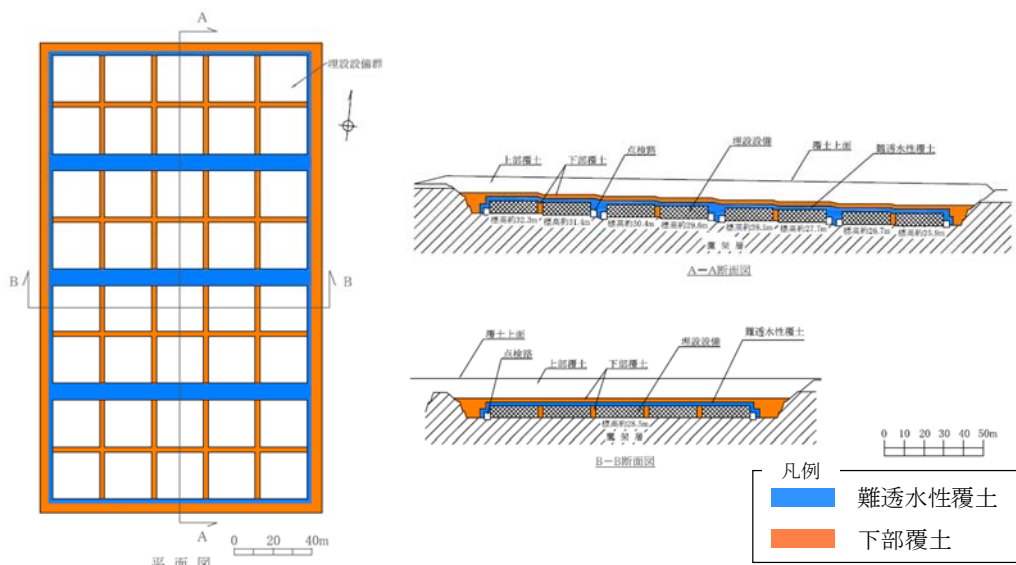
難透水性覆土は、埋設設備の底面及び埋設設備間狭隘部を除く外周部に設置する。下部覆土は、難透水性覆土の外周部及び埋設設備間狭隘部に設置する。上部覆土は、下部覆土上部に設置する。

埋設設備間狭隘部とは、具体的には埋設設備の東西方向の間及び埋設設備間の幅 2.5m 以下の南北方向の間を示す。

移行抑制機能を確保する観点から、覆土の低透水性は、力学的影響及び化学的影響による長期的な性能低下に配慮した設計とする。

覆土断面図を第 4 図に示す。

覆土の主要な部位と主な仕様を第 9 表に示す。



第 4 図 覆土断面図

第9表 覆土の主要な部位及び主な仕様

設備	主要な部位	主な仕様
覆土	難透水性覆土	材料：ベントナイト混合土 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数*1として 1.0×10^{-10} m/s以下 厚さ：2m以上 密度：1,100kg/m ³ 以上
	下部覆土	材料：現地発生土に必要なに応じてベントナイト、砕砂及び砕石を混合 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数*1として 1.0×10^{-8} m/s以下 厚さ：2m以上 密度：1,100kg/m ³ 以上
	上部覆土	材料：現地発生土に必要なに応じて砕砂及び砕石を混合 透水係数(施工時点)：廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数と同程度 厚さ：難透水性覆土及び下部覆土とあわせて埋設設備上面から6m以上

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数をいう。

以下に各部位の仕様を示す。

(a) 難透水性覆土

(一) 概要

難透水性覆土は、砂を母材としたベントナイト混合土で構成し、埋設設備の底面及び埋設設備間狭隘部を除く外周部に設置する。

(二) 設計方針

難透水性覆土に求める安全機能は、覆土完了後の移行抑制機能及び遮蔽機能である。

移行抑制機能に対しては、透水特性を確保し、埋設設備からの流出水量を低減するために低透水性を考慮した設計とする。また、周辺岩盤に比して同程度以下の透水係数を長期的に維持できる設計とする。

遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。

また、移行抑制機能を長期的に維持するための化学的安定性、変形追従

性及び液状化抵抗性は、長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあるものとする。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

覆土の透水係数は、廃棄物埋設地の近傍に分布する鷹架層の透水係数が $1.1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 程度であることを踏まえ、鷹架層の透水係数以下を長期的に維持することを目標として設計する。

難透水性覆土は、化学的影響の要因である物質の供給源となるセメント系材料と隣接している。難透水性覆土の透水係数は、長期的に性能低下が生じることを想定し、施工時点において巨視的透水係数^{*1}として $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下を確保する。また、埋設設備に内蔵される金属の腐食膨張に伴い鉛直方向に変形した場合でも低透水性を維持できるよう、難透水性覆土の厚さは、埋設設備の表面から 2m 以上とする。

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数を指す。

(イ) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $1,100 \text{kg/m}^3$ 以上とする。

(ウ) 長期機能維持特性

① 化学的安定性

化学的影響により覆土が変質した場合においても、長期的に低透水性を維持でき、化学的安定性の高いと考えられる天然の土質系材料を使用する。

② 変形追従性

力学的影響又は化学的影響により覆土が変形した場合においても、その変形に追従し、覆土全体として埋設設備からの流出水量の増加を抑制する設計とする。

③ 液状化抵抗性

力学的影響により覆土が変状することのないように、粒径分布に広がりを持った土質系材料で十分に締固めを行う。

なお、実際に使用する材料の粒径分布に基づいて、道路橋示方書⁽⁶⁾に示される液状化判定法による確認を行う。

(b) 下部覆土

(一) 概要

下部覆土は、現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂及び砕石を混合したもので構成し、埋設設備間狭隘部並びに難透水性覆土の側部全体及び上部に設置する。

(二) 設計方針

下部覆土に求める安全機能は、覆土完了後の移行抑制機能及び遮蔽機能である。

移行抑制機能に対しては、透水特性を確保し、埋設設備からの流出水量を低減するために低透水性を考慮した設計とする。また、周辺岩盤に比して同程度以下の透水係数を長期的に維持できる設計とする。

遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。

また、移行抑制機能を長期的に維持するための化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性は、長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあるものとする。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

覆土の透水係数は、廃棄物埋設地の近傍に分布する鷹架層の透水係数が $1.1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 程度であることを踏まえ、鷹架層の透水係数以下を長期的に維持することを目標として設計する。

下部覆土の透水係数は、難透水性覆土によってセメント系材料起源の成分による化学的変質の影響が遅延・緩衝されることから、施工時点において巨視的透水係数^{*1}として $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下を確保する。また、難透水性覆土の上部に設置する下部覆土の厚さは2m以上とする。

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数を指す。

(イ) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密

度及び厚さを確保するものとし、密度は $1,100\text{kg/m}^3$ 以上とする。

(ウ) 長期機能維持特性

① 化学的安定性

化学的影響により覆土が変質した場合においても、長期的に低透水性を維持でき、化学的安定性の高いと考えられる天然の土質系材料を使用する。

② 変形追従性

力学的影響又は化学的影響により覆土が変形した場合においても、その変形に追従し、覆土全体として埋設設備からの流出水量の増加を抑制する設計とする。

③ 液状化抵抗性

力学的影響により覆土が変状することのないように、粒径分布に広がりを持った土質系材料で十分に締固めを行う。

なお、実際に使用する材料の粒径分布に基づいて、道路橋示方書⁽⁶⁾に示される液状化判定法による確認を行う。

(c) 上部覆土

(一) 概要

上部覆土は、現地発生土に必要な応じて砕砂及び砕石を混合したもので構成し、難透水性覆土及び下部覆土とあわせて埋設設備上面から 6m 以上に設置する。表面は地表水による侵食を抑制する観点から、適切な排水勾配を設け、植生を行う。

(二) 設計方針

上部覆土は、周辺の土壌・岩盤と水理的に連続性を持たせる観点から廃物埋設地周辺の第四紀層の透水係数 (10^{-6}m/s オーダー) を目安に施工し、上面は尾駁沼に向かって適切な排水勾配を設ける。

また、上部覆土は、液状化抵抗性を有するものとする。

(三) 仕様

上部覆土は、粒径分布に広がりを持った土質系材料で締固めを行い、難透水性覆土及び下部覆土とあわせて埋設設備上面から 6m 以上とする。

d. 1号覆土の期間について

1号の覆土については、1群から6群の埋設設備に対して、順次覆土を行う。なお、6群の覆土は7群の操業が終了次第、行う。7,8群の覆土は、8群の操業が終了次第、行う。詳細については添付資料5「1号及び2号廃棄物埋設地の覆土について」に示す。

[参考] 許可基準規則への適合性説明

許可基準規則第十条第一号及び第三号への適合性について、上記「4. 許可基準規則への適合のための設計方針」及び「5. 廃棄物埋設地の設計」を基に項目ごとに整理した。

(1) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第10条第1項及び第3項)

廃棄物埋設地の放射性物質の漏出を防止及び低減する設計について以下のとおり確認する。

(i) 確認方法

以下の事項が留意された設計になっていることを確認する。

- a. 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること
- b. 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること
- c. 劣化・損傷が生じた場合にも機能が維持できる構造・仕様であること
- d. 放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと

(ii) 確認結果

以下に示すとおり、廃棄物埋設地の放射性物質を漏出及び低減する設計に関する事項が留意された設計となっている。

- a. 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること

(a) はじめに

廃棄物埋設地の設計が合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によ

ることについて、本施設の地下水面下への設置と各設備の設計の観点から、以下に説明する。

(b) 均質・均一固化体及び充填固化体の特性

放射性廃棄物は、事業規則別表第一の放射能濃度を超えないものであって、同規則第八条第1項第二号及び第2項に定められた廃棄物に該当するものである。また、均質・均一固化体及び充填固化体においては、それぞれ放射性廃棄物の特性を考慮し、固型化材料と混合することで、固化体の種別ごとに固型化される。廃棄物埋設地の設計においては、以下に示す均質・均一固化体及び充填固化体の固型化方法並びに放射性物質の性質及び放射能濃度を考慮した。

(一) 均質・均一固化体の固型化方法

(ア) 固型化材料は、以下のいずれかであること。

- ① JIS R 5210(1992)若しくは JIS R 5211(1992)に定めるセメント又はこれらと同等以上の品質を有するセメントであること。
- ② JIS K 2207(1990)に定める石油アスファルトで針入度が 100 以下のもの又はこれと同等以上の品質を有するアスファルトであること。
- ③ スチレンに溶解した不飽和ポリエステル(以下「不飽和ポリエステル樹脂」という。)であること。

(イ) 容器は、JIS Z 1600(1993)に定める金属製容器又はこれと同等以上の強度及び密封性を有するものであること。

(ウ) セメントを用いて放射性廃棄物を固型化する場合は、固型化された放射性廃棄物の一軸圧縮強度が 1,470kPa 以上であること。

(エ) アスファルト又は不飽和ポリエステル樹脂を用いて放射性廃棄物を固型化する場合は、廃棄体中の固型化材料の重量が廃棄体の重量から容器の重量を差し引いた重量のそれぞれ 50%以上又は 30%以上となるようにすること。

(オ) 不飽和ポリエステル樹脂を用いて放射性廃棄物を固型化する場合は、固型化された放射性廃棄物の JIS K 7215 に定める方法により測定した硬さ値が 25 以上であること。

(カ) 固型化に当たっては、固型化材料若しくは固型化材料及び混和材料と放射性廃棄物を均質に練り混ぜ、又はあらかじめ均質に練り混ぜた固型化材料若しくは固型化材料及び混和材料と放射性廃棄物を均一に混合させること。この場合において、容器内に有害な空隙が残らないようにすること。

(二) 充填固化体の固型化方法

(ア) 固型化材料は、JIS R 5210(1992)若しくは JIS R 5211(1992)に定めるセメント又はこれらと同等以上の品質を有するセメントであること。

(イ) 容器は、JIS Z 1600(1993)に定める金属製容器又はこれと同等以上の強度及び密封性を有するものであること。

(ウ) 固型化に当たっては、あらかじめ均質に練り混ぜた固型化材料若しくは固型化材料及び混和材料を容器内の放射性廃棄物と一体となるように充填すること。この場合において、容器内に有害な空隙が残らないようにすること。

(三) 放射性物質の性質及び放射能濃度

放射性物質の性質及び放射能濃度として、放射性物質の種類により主に半減期や放出される放射線の種類・エネルギーが異なる。

- ・半減期の長い放射性物質に対しては、人工バリア及び天然バリアを組み合わせる移行抑制機能の設計により長期的に放射性物質の移行を抑制し、放射能の減衰を図ることで公衆の受ける線量を低減する。
- ・半減期が短く放射線のエネルギーが大きい放射性物質に対しては、遮蔽機能の設計により放射能が有意に減衰するまで遮蔽を確保することで、公衆の受ける外部被ばくを低減する。
- ・放射性廃棄物は容器に固型化したものであり、放射性物質が容易に漏えい・飛散するものではない。しかし、水を媒体として移動することが考えられることから、人工バリア及び天然バリアによる移行抑制機能を確保するまで、漏出防止機能の設計により、水を媒体として放射性物質が漏出することを防止する。

(c) 地下水面下への設置

廃棄物埋設地は廃止措置の開始後、保全の措置を必要としない状況に移行できるように、以下の点について考慮した。

- ・第四紀層よりも侵食抵抗性の高い岩盤内に設置する。
- ・人間侵入リスクが高い地表面を避ける。
- ・施設周辺の天然バリアである岩盤が有する性能を有効利用するために、岩盤中に設置する。

したがって、埋設設備は、岩盤を掘り下げて設置することとし、その結果地下水面下への設置とした。

地下水面下への設置としたことに応じ、安全機能を達成できる設備の設計を行っている。具体的には、地下水面下に設置することで、覆土施工完了後は地下水に水没した状態を想定し、低透水性を有する覆土を設置することで、埋設設備からの流出水量を低減するとともに、セメント系材料及び土質系材料に収着性を期待することで、放射性物質の漏出を低減することとしている。

また、できるだけ保守に頼らず、移行抑制機能が達成できる設計としている。保守に頼らないとは、将来想定される劣化・損傷に対して裕度を持つ設計のことである。将来想定される劣化・損傷として、金属腐食による膨張等の力学的影響及び化学的影響を考慮した設計としている。

廃棄物埋設地を地下水面下に設置する考えについての詳細は、添付資料 1 「1. 廃棄物埋設地の設計の考え方」に示す。

(d) 放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間は、安全機能(漏出防止機能及び遮蔽機能)を有する部位ごとの要求性能に加え、材料の選定、建設・施工及び検査を考慮した構造物として設計する。以下の内容を満足することで、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術とする。

(一) 合理的な建設・施工技術

当該期間は、数十年程度であることから、埋設設備及び排水・監視設備に対し、一般に数十年オーダーの耐用年数で知見が幅広く整備されているセメント系材料を用いたコンクリート構造物とすることが合理的である。

(二) 利用可能な最善の建設・施工技術

コンクリート構造物としての設計、材料の選定、建設・施工及び検査については、利用可能な最善の建設・施工技術として、最新の知見を確認し、施工の実現性及び品質を確保する。現時点での最新の知見としては、「コンクリート標準示方書(設計編及び施工編)」⁽¹⁾⁽²⁾に基づく。

また、安全機能ごとに対する設計としては以下のとおり。

- ・漏出防止機能は、雨水及び地下水の浸入の防止及び放射性物質の漏出の防止を行うため、埋設設備及び排水・監視設備において、透水特性を考慮した設計とする。埋設設備及び排水・監視設備は、低透水性としてコンクリートの材料配合、ひび割れ抑制としてコンクリートの材料配合及び鉄筋量、充填性としてモルタルの材料配合、防水性として内部防水の配置並びに排水性としてポーラスコンクリート層の設置を考慮した設計とする。
- ・遮蔽機能は、敷地周辺の公衆及び放射線業務従事者並びに管理区域以外の人立ち入る場所に滞在する者への被ばくを低減するように、埋設設備の密度及び厚さを確保することで、放射線の遮蔽性能を有する設計とする。

(e) 覆土完了後

覆土完了後は、安全機能(移行抑制機能及び遮蔽機能)を有する部位ごとの要求性能に加え、材料の選定、建設・施工及び検査を考慮した構造物として設計する。以下の内容を満足することで、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術とする。

(一) 合理的な建設・施工技術

当該期間は、数百年以上であることから、長期的な透水特性及び遮蔽性能を期待するために、物理的・化学的作用により安全性が損なわれ難い天然材料である土質系材料を用いた土構造物とすることが合理的である。

また、長期的な核種収着性を期待するために、長期的に安全性が損なわれ難い土質系材料及びセメント系材料を用いることが合理的である。

(二) 利用可能な最善の建設・施工技術

土構造物としての設計、材料の選定、建設・施工及び検査については、

利用可能な最善の建設・施工技術として、最新の知見を確認する。現時点での最新の知見としては、「道路土工要綱」⁽³⁾及び「河川土工マニュアル」⁽⁴⁾を参照とする。また、一般土工で用いられる重機を使用し、適切な品質管理を行うことで、目標の透水係数を有する覆土を施工できることを確認している。

なお、施工時の品質管理方法は、覆土施工時に行う施工試験結果を用いて最終決定する。

安全機能ごとに対する設計としては以下のとおり。

- ・移行抑制機能は、低透水性として土質系材料により透水係数と厚さを確保する設計とし、収着性を有するセメント系材料及び土質系材料を用いる設計とする。
- ・遮蔽機能は、敷地周辺の公衆及び管理区域以外の人立ち入る場所に滞在する者への被ばくを低減するために、覆土の密度及び厚さを確保することで、放射線の遮蔽性能を有する設計とする。

覆土の施工実現性及び覆土の施工時における品質管理(案)について添付資料3「1. 覆土の施工実現性」及び「2. 覆土の施工時における品質管理(案)」に示す。

(f) 諸外国との比較

本施設の安全機能は、その機能を維持すべき期間が機能ごとに異なる。そのため、安全機能を維持すべき期間を考慮し、諸外国との比較を行う。

本施設と諸外国の比較に当たっては、文献⁽⁷⁾⁽⁸⁾を基に、本施設に対して、廃棄体処分量及び総放射エネルギーが同等か上回る4か国(フランス：オーブ処分場、イギリス：ドリッグ処分場、スペイン：エルカブルル処分場及びベルギー：デッセル処分場)を対象に行う。文献⁽⁸⁾によると、諸外国の事例では、設計方針及び技術的要件について以下のように整理されている。

[設計方針に係る項目]

- ・埋設設備は、埋設設備内へ雨水及び地下水の浸入を抑制するため、鉄筋コンクリート構造とすること。
- ・埋設設備の覆いが完成するまで廃棄体の定置に係る作業時に雨水を接触させないため、屋根を設けること。

- ・埋設設備内に浸入した雨水及び地下水により放射性物質が漏出することを想定し、雨水及び地下水の監視及び漏出制御を行える排水・監視構造を設けること。

[技術的要件に係る項目]

- ・放射性物質を含む廃棄物を固型化すること。
- ・放射性物質の漏えいを抑制する人工バリアとして、セメント材料を使用すること。

設計方針に係る項目に関しては、「(1)(ii)(d) 埋設設備及び排水・監視設備の設計」及び「(1)(ii)(e) 覆土の設計」にて参考としている。また、技術的要件に係る項目に関しては、「(1)(ii)(b) 均質・均一固化体及び充填固化体の特性」及び「(1)(ii)(d) 埋設設備及び排水・監視設備の設計」にて参考としている。

諸外国においては、廃棄物埋設地を地下水面より上に設置しているのに対して、本施設は、安全機能を維持すべき期間に応じて、廃棄物埋設地に対する地下水の位置が異なる。そのため、安全機能を維持すべき期間に応じて、人工バリアである埋設設備、排水・監視設備及び覆土に対する地下水面の位置を整理した。

本施設は、放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までにおいて、埋設設備、排水・監視設備及び覆土が、地下水面より上にある。覆土完了から廃止措置の開始までにおいて、埋設設備及び覆土は、地下水面より下にある。また、廃止措置の開始後では、埋設設備及び覆土は、地下水面より下にある。これらの人工バリアに対する地下水の位置関係を考慮した上で、安全機能に対する諸外国との比較を行う。

(一) 漏出防止機能について

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までについて、本施設と諸外国の人工バリアは、地下水面より上に位置している。

しかしながら、本施設と諸外国では、要求する機能に対する考え方が異なる。具体的には、諸外国において、雨水及び地下水が施設に浸入した場合には、施設から漏出を防止するのではなく、漏出制御を行う、又は、不飽和を維持する観点から速やかに排水する。一方、本施設では、漏出を防

止することを要求していることから、諸外国より高い性能が必要である。また、放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までのうち、覆土施工期間中では、覆土の施工に伴い地下水面が徐々に上昇するため、人工バリアに対する地下水面の位置関係が経時的に変化する可能性がある。そのため、本施設においては、漏出防止機能を確保する観点から、埋設設備の使用材料及び部材厚は諸外国と同等以上の設計を行っている。

(二) 移行抑制機能について

覆土完了から廃止措置の開始までについて、本施設と諸外国では人工バリアに対する地下水面の位置が異なる。諸外国では、地下水面より上に施設を設置して施設の周囲を不飽和にすることを前提とし、雨水の浸入を抑制する観点から低透水性を考慮している。一方、本施設では、地下水面下に施設を設置することから、地下水の浸入を抑制するとともに、浸入した地下水の(覆土側への)移行を抑制する観点として低透水性を考慮している。本施設では、地下水面下においても移行抑制機能を確保できるよう低透水性に優れた設計を行っている。

なお、廃止措置の開始後の本施設では、覆土により、移行抑制機能を期待できるように設計し、線量評価において移行抑制機能を考慮している。

(三) 遮蔽機能について

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までについて、本施設と諸外国では人工バリアに対する地下水面の位置及び要求される機能が同様である。埋設設備の使用材料及び部材厚に関しては諸外国と同程度の設計である。

覆土完了から廃止措置の開始までについて、本施設と諸外国では人工バリアに対する地下水面の位置が異なる。また、遮蔽機能に関する要求が明示されていない。本施設では、覆土により、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の公衆等の受ける線量を低減できる遮蔽性(密度及び厚さ)を有する設計としている。

なお、廃止措置の開始後について、諸外国では、遮蔽機能に関する要求が明示されていない。一方、本施設では、遮蔽機能を期待できるように設計し、線量評価において遮蔽機能を考慮している。

各部材の仕様等の詳細な比較は添付資料 3「3. 諸外国との比較」に示す。

(g) まとめ

本施設は、廃止措置の開始後、保全の措置を必要としない状況に移行できることを考慮して、設置位置を選定し、安全機能を達成できる設備の設計を行っている。

また、「(1)(ii)(b) 均質・均一固化体及び充填固化体の特性」～

「(1)(ii)(f) 諸外国との比較」に示すとおり、埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものである。

b. 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること。

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

漏出防止機能を確保する期間に対して、劣化・損傷に対する抵抗性を有するよう鉄筋かぶり及び材料配合の設計を行っている。また、劣化抵抗性を有していることを、「コンクリート標準示方書(設計編)」⁽²⁾に基づき耐久性照査によって確認している。対象項目は、設計条件及び立地条件を考慮し、耐久性に影響があると考えられる中性化、塩害及び凍害とした。

耐久性照査の詳細については、添付資料 2「4. 埋設設備の耐久性」を参照のこと。

(一) 中性化

中性化に対する劣化抵抗性を有するために、中性化深さが鋼材腐食発生限界深さに達しない設計としている。

(二) 塩害

塩害に対する劣化抵抗性を有するために、コンクリート表面塩化物イオン濃度の設計値が鋼材腐食発生限界濃度に達しない設計としている。

(三) 凍害

内部損傷及び表面損傷に対する劣化抵抗性を有する設計としている。

(b) 覆土

難透水性覆土及び下部覆土は、化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性を考慮し、粒形分布に広がりを持った土質系材料を用いる。

難透水性覆土及び下部覆土は、容易な露呈を防止する観点から安定した地盤を掘り下げ、埋設設備の底面を除く外周部に設置する設計としている。

覆土の設計においては、移行抑制機能を長期にわたり維持する必要があるため、長期状態において想定される劣化・損傷として、透水係数及び厚さの変化に影響を及ぼす要因を抽出している。

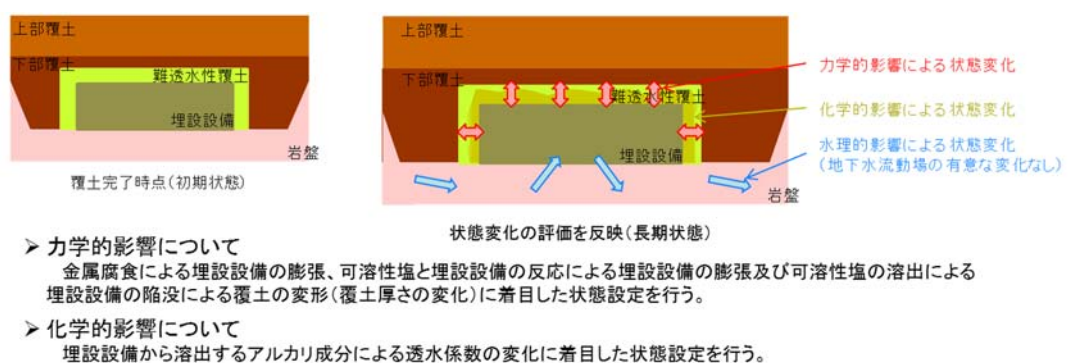
長期状態において覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構は、第8表に示すとおりである。

抽出した要因は、廃棄物埋設地の覆土完了後の再冠水による水の接触に伴う、ベントナイト特性の変化、有効粘土密度の変化及び短絡経路の形成である。これらの要因に対して、長期機能維持特性として、化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性を考慮しており、これらが長期状態において考慮する性能を満たす見通しがあるような設計としている。

具体的には、線量評価上の状態設定において、力学的影響及び化学的影響による覆土の性能(低透水性)の低下を考慮しており、設計上の設定値(初期状態)も性能の低下に配慮している。第5図に影響項目の概要を示す。

これらにより、覆土は劣化・損傷に対する抵抗性を有する設計とする。

線量評価上の状態設定についての詳細は、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。



第5図 影響項目の概要

c. 劣化・損傷が生じた場合にも機能が維持できる構造・仕様であること。

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

埋設設備及び排水・監視設備は、廃棄体と水が接触することを防止するために、①外周仕切設備及び覆い、②ポーラスコンクリート層、③セメント系充填材、④内部防水で多重化し、各部位の劣化・損傷が生じた場合においても、漏出防止機能を維持する構造・仕様としている。

(b) 覆土

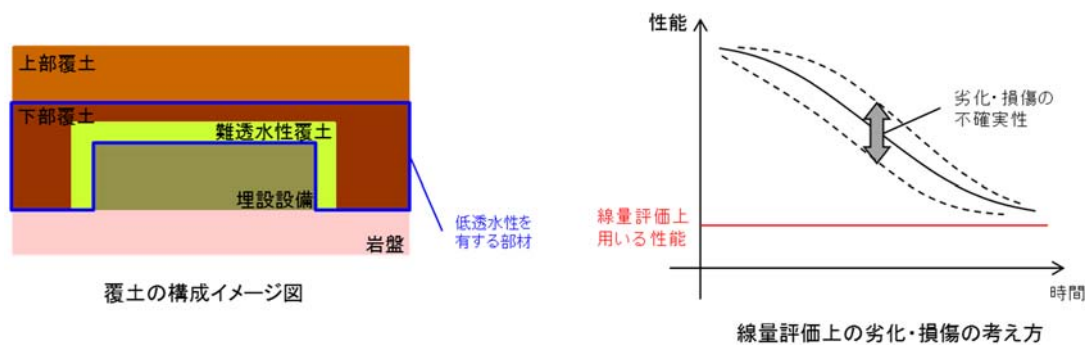
覆土は、長期的に発生が予想される力学的影響及び化学的影響のいずれに対しても機能維持が受動的に期待できるよう、多層化した十分な厚さの覆土を設置することで、劣化・損傷が生じた場合においても、移行抑制機能を維持する構造・仕様としている。

線量評価上用いる各性能は、線量評価の状態設定における劣化・損傷の程度及び期間の不確実性を包含する設定としていることから、廃棄物埋設地全体として線量基準を満足できるようにする。

力学的影響及び化学的影響に対しては、低透水性を有する難透水性覆土及び下部覆土の2層を設置し、各覆土の厚さを2m以上確保することで、全体として覆土に要求する低透水性が容易に損失しないものとしている。第6図に線量評価上の劣化・損傷の考え方を示す。

これらにより、劣化・損傷が生じた場合においても、移行抑制機能を維持する構造・仕様とする。

なお、線量評価上の状態設定についての詳細は、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。



第6図 線量評価上の劣化・損傷の考え方

d. 放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと

放射性物質の漏出を低減する機能は、人工バリア及び天然バリアにより確保し、人工バリアは特性の異なる材料として、セメント系材料及び土質系材料を用いる設計とする。また、これらを用いた各部材に対して、第10表に示すように、地下水の浸入を抑制する機能(低透水性)及び放射性物質を収着する機能(収着性)の複数の異なる機能を期待することにより、一つの機能に過度に依存しないよう配慮した設計としている。

第10表 各部材に期待する移行抑制機能を構成する特性

	部材	収着性	低透水性	
人工バリア	埋設設備	○	—	
	覆土	難透水性覆土	○	○
		下部覆土	—*1	○
		上部覆土	○	—
天然バリア	岩盤	○	○	

○：期待する

—：期待しない

*1：下部覆土は土質系材料であり収着性を期待できるが、難透水性覆土又は下部覆土の一方に収着性を期待することで十分であることから、下部覆土の収着性は考慮しない。

参考として、確からしい自然事象シナリオの線量評価結果をベースとし、各バリア材の機能を構成する特性の一つを無視した線量評価を行い、特性の一つに過度に依存していないことを確認した。

線量結果は「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)(3号廃棄物埋設施設) 4.(2)(v) d.その他」に示すとおりである。

(2) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第10条第2項)

放射性物質の漏出を防止する機能が、雨水や地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造が相まっていることを以下のとおり確認する。

(i) 確認方法

漏出防止機能を期待する埋設設備及び排水・監視設備が、雨水や地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造となっていることを確認する。

(ii) 確認結果

雨水及び地下水の浸入を防止する構造は、外周仕切設備及び覆い、ポーラスコンクリート層、セメント系充填材並びに内部防水により構成する。放射性物質の漏出を防止する構造は、外周仕切設備、覆い、ポーラスコンクリート層及び内部防水により構成する。これらの組合せにより、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間において、放射性物質の漏出を防止することとしている。

以上のことから、埋設設備及び排水・監視設備は、放射性物質の漏出を防止する機能について、雨水や地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造が相まっているものである。

漏出防止設計に係る詳細な説明を添付資料4「許可基準規則解釈第10条第2項に関する補足説明」に示す。

(3) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第10条第4項)

廃棄物埋設地が、覆土完了から廃止措置の開始までの間、廃棄物埋設地の外への放射線物質の漏出を低減する機能を有するものであることを以下のとおり確認する。

(i) 確認方法

「廃棄物埋設地の外への放射線物質の漏出を低減する」について、公衆の受ける線量が法令に定める線量限度を超えないことはもとより、As Low As Reasonably Achievable(ALARA)の考えの下、合理的に達成できる限り十分低くなるよう、実効線量で $50\mu\text{Sv/y}$ 以下であることによって確認する。

(ii) 確認結果

埋設設備の覆土完了から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける被ばく線量について評価を行った結果、約 $3.8\mu\text{Sv/y}$ となった。また、この線量に廃棄物埋設施設からの環境への放射性物質の放出による線量約 $1.7\times 10^{-2}\mu\text{Sv/y}$ を合計しても約 $3.8\mu\text{Sv/y}$ であり、公

衆が受ける実効線量が $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下となった。なお、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による線量は覆土により覆土前よりも大幅に減少し、無視できるレベルとなっているため考慮しない。

埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの評価の詳細を第 11 表に示す。線量評価に関するパラメータについては、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。

以上より、廃棄物埋設地は、覆土完了から廃止措置の開始までの間、実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下であることから、廃棄物埋設地の外への放射線物質の漏出を低減する機能を有する設計である。

第 11 表 埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの
期間において最大となる公衆の受ける被ばく線量の評価結果

線量評価 シナリオ*1	3号評価結果 ($\mu\text{Sv/y}$)		1号評価結果 ($\mu\text{Sv/y}$)		2号評価結果 ($\mu\text{Sv/y}$)		評価結果の重量 ($\mu\text{Sv/y}$)	
	覆土前	覆土 完了後	覆土前	覆土 完了後	覆土前	覆土 完了後	覆土前	覆土 完了後
気体廃棄物が大気への管理放出され、放射性物質が大気へ放出されることによる内部被ばく*2	約 3.5×10^{-6}						約 3.5×10^{-6}	
液体廃棄物が尾駁沼又は河川へ管理放出され、その水産物を摂取することによる内部被ばく*2	約 1.7×10^{-2}						約 1.7×10^{-2}	
廃棄物埋設地から放射性物質が地下水によって尾駁沼へ漏出し、その水産物を摂取することによる内部被ばく	—*4	約 0.59	—*4	約 1.9	—*4	約 1.3	—*4	約 3.8
管理建屋内の一時貯蔵の廃棄体および定置済み廃棄体からのスカイシャイン線による外部被ばく	約 6.5	—*5	約 27*6	—*5	約 25*6	—*5	約 23*7	—*5
	合計*3						約 23	約 3.8

*1: 既許可において評価対象としている「沢への放射性物質の移行による外部被ばく及び内部被ばく」は、1号及び2号廃棄物埋設施設については、他の被ばく経路と比べて線量が無視できる程小さい。また、3号廃棄物埋設施設における線量も同じく低く(約 $9.3 \times 10^{-6} [\mu\text{Sv/y}]$)、廃棄物埋設地から放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量は、「廃棄物埋設地から放射性物質が地下水によって尾駁沼へ漏出し、その水産物を摂取することによる内部被ばく」にて代表できる。

*2: 覆土完了後に廃棄施設等を供用することを想定し、覆土完了後も考慮する。

*3: 線量合計値に関しては、最大線量時期を考慮せず、単純に合計したもの

*4: 埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間においては、放射性物質の漏出を防止することから公衆への影響は発生しない。

*5: 覆土完了後は、十分な厚さの覆土があるため、周辺監視区域の廃止後に敷地内へ立ち入る人の外部被ばく線量影響は無視できるほど小さい。

*6：1号埋設設備7,8群の漏出防止対策の追加及び1号廃棄物埋設地に埋設する廃棄体の種類の追加及び数量の変更並びに2号廃棄物埋設地に埋設する廃棄体の数量の変更に伴う影響はなく、公衆の受ける外部被ばく線量は既許可での評価値を上回ることはない。

*7：各廃棄物埋設施設からの方位及び距離を考慮し、重畳させたもの。

(4) 許可基準規則第十条第三号(許可基準規則解釈第10条第5項)

廃棄物埋設地が、化学物質により安全機能が損なわれないものであることを以下のとおり確認する。

(i) 確認方法

埋設する廃棄体、埋設設備、排水・監視設備及び覆土には可燃性の化学物質、可燃性ガスを発生する化学物質は含まれない。一方、廃棄物埋設地の安全機能に影響を及ぼす可能性のあるその他の化学物質としては、廃棄体又は埋設設備内に含まれる有機物及び塩、更にはセメント系材料から溶出した高アルカリ成分を含む地下水との反応による影響を考慮する必要がある。

覆土完了前の安全機能については、埋設設備には漏出防止機能及び遮蔽機能を期待しており、排水・監視設備には漏出防止機能を期待している。覆土完了までの数年間の期間においては、水との接触により埋設設備が容易に溶解・変質すること*1、更には水を媒体として埋設設備内の化学物質(有機物及び塩)が溶解して、化学反応により埋設設備が著しく損傷することはない。したがって、覆土完了前の漏出防止機能及び遮蔽機能については、これらの化学物質によって影響を受けない。

覆土完了後の安全機能については、埋設設備には移行抑制機能を期待しており、覆土には移行抑制機能及び遮蔽機能を期待している。遮蔽機能については、覆土が十分な厚さを有しており、化学物質との接触による覆土の厚さ減少及び密度低下は無視できると考えられる。移行抑制機能については、廃棄物埋設地内において地下水位が上昇し、地下水の浸入に伴う溶解及び漏出する化学物質(有機物及び塩)及びセメント系材料から溶出した高アルカリ成分が埋設設備の収着性並びに覆土の低透水性及び収着性に影響を及ぼす可能性がある。

したがって、化学物質(有機物及び塩)及びアルカリ成分による埋設設備の収着性並びに覆土の低透水性及び収着性への影響を考慮した設計であることを確認

する。

*1：覆土完了までにセメント系材料である埋設設備に生じる劣化として中性化現象を考慮しても、鉄筋かぶり内に収まる結果であることから、埋設設備が著しく溶出することは考えられない。

(ii) 確認結果

(i)で整理した影響に対する対策として、埋設設備及び覆土に使用する材料については、化学物質による低透水性及び収着性への影響を考慮し、低透水性及び収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。また、覆土については化学的安定性の高い材料で構成する設計としている。

したがって、廃棄物埋設地が、化学物質により安全機能が損なわれないものである。

なお、廃止措置の開始後の評価においては、埋設設備に使用する有機物も含め、これら化学物質を考慮した状態設定に基づく線量評価を行い、各期間・シナリオの線量基準を満足するものであることを確認している。

6. 参考文献

- (1) (公社)土木学会(2018)：2017年制定コンクリート標準示方書(施工編)
- (2) (公社)土木学会(2018)：2017年制定コンクリート標準示方書(設計編)
- (3) (公社)日本道路協会(2009)：道路土工要綱
- (4) (財法)国土技術研究センター(2009)：河川土工マニュアル
- (5) (社)土木学会(2002)：2002年制定コンクリート標準示方書(構造性能照査編)
- (6) (社)日本道路協会(平成27年)：道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説
- (7) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：放射性廃棄物ハンドブック(2019年版)
- (8) ONDRAF/NIRAS(2012)：Summary of the Safety Report for the surface repository of category A waste in Dessel

以 上

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち

第一号及び第三号

(2号廃棄物埋設施設)

2020年12月

日本原燃株式会社

目 次

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第十条第一号及び第三号並びにその解釈.....	1
2. 廃棄物埋設施設の安全機能について.....	3
3. 設計対象設備.....	3
4. 許可基準規則への適合のための設計方針.....	4
(1) 安全設計の方針.....	4
(2) 安全機能.....	5
(3) 廃棄物埋設地の設計に関して留意する事項.....	8
(4) その他の設計.....	8
5. 廃棄物埋設地の設計.....	14
(1) 構成及び設置位置.....	14
(2) 主要設備.....	14
[参考] 許可基準規則への適合性説明.....	24
(1) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第 10 条第 1 項及び第 3 項).....	24
(2) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第 10 条第 2 項).....	33
(3) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第 10 条第 4 項).....	33
(4) 許可基準規則第十条第三号(許可基準規則解釈第 10 条第 5 項).....	35
6. 参考文献.....	36

添付資料 1 廃棄物埋設地の設計の考え方

添付資料 2 技術要件における考え方

添付資料 3 許可基準規則解釈第 10 条第 1 項に関する補足説明

添付資料 4 許可基準規則解釈第 10 条第 2 項に関する補足説明

添付資料 5 1 号及び 2 号廃棄物埋設地の覆土について

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第十条第一号及び第三号並びにその解釈

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
(廃棄物埋設地) 第十条 廃棄物埋設地は、次の各号に掲げる要件を満たすものでなければならない。 一 廃棄物埋設地(ピット処分に係るものに限る。)は、外周仕切設備を設置する方法、その表面を土砂等で覆う方法その他の方法により、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から埋設の終了までの間にあっては廃棄物埋設地の限定された区域からの放射性物質の漏出を防止する機能、埋設の終了から廃止措置の開始までの間にあっては廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減する機能を有するものであること。 三 埋設した放射性廃棄物に含有される化学物質その他の化学物質により安全機能が損なわれないものであること。

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈
第10条(廃棄物埋設地) 1 第1号に規定する「外周仕切設備を設置する方法、その表面を土砂等で覆う方法その他の方法」及び第2号に規定する「その表面を土砂等で覆う方法その他の方法」とは、以下の設計をいう。 一 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること。 二 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること 三 劣化・損傷が生じた場合にも機能が維持できる(安全上支障のない期間内において速やかに修復できることが確実であることを含む。)構造・仕様であること。 2 第1号に規定する「廃棄物埋設地の限定された区域からの放射性物質の漏出を防止する」とは、雨水や地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈

止する構造が相まって、廃棄物埋設地の限定された区域から放射性物質が漏えいしない状況(工学的に有意な漏えいがない状況)を達成することをいう。

- 3 第1号に規定する「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減する機能」は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと。
- 4 第1号及び第2号の「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減」については、平常時における廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量が、第8条第1項に規定する「廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイラインガンマ線による事業所周辺の線量」及び第13条第1項に規定する「周辺監視区域の外の空气中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質」の放出により公衆の受ける線量を含め、法令に定める線量限度を超えないことはもとより、ALARAの考え方の下、実効線量で50マイクロシーベルト/年以下であること。
- 5 第3号に規定する「安全機能が損なわれないものであること」とは、埋設した放射性廃棄物、人工バリア(埋設する放射性廃棄物からの放射性物質の漏出の防止又は低減の機能を有する人工構築物をいう。以下同じ。)及び廃棄物埋設地に充填する土砂等が含有する可燃性の化学物質、可燃性ガスを発生する化学物質その他の化学物質の性質及び量に応じて、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地の安全機能に有意な影響を及ぼさないよう対策を講じたものであることをいう。

2. 廃棄物埋設施設の安全機能について

安全機能については、第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(以下「許可基準規則」という。)第二条第2項第一号に「安全機能」とは、廃棄物埋設施設の安全性を確保するために必要な機能であって、その機能の喪失により公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすおそれがあるものをいう。」とある。

したがって、安全機能に対する考え方としては、許可基準規則第二条第2項第一号を考慮し、安全機能を「放射性物質の漏出を防止する機能」(以下「漏出防止機能」という。)、**「移行抑制機能^{*1}」**、「遮蔽機能」とし、その機能の維持期間及び考え方を第1表にまとめる。

第1表 ピット処分における安全機能

安全機能	廃止措置の開始前		廃止措置の開始後
	放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了まで	覆土完了から廃止措置の開始まで	
漏出防止機能	○	-	-
移行抑制機能	-	○	△
遮蔽機能	○	○	△

○：安全機能を維持する
 △：必要な安全機能を期待できるように設計する
 -：考慮しない

*1：本資料では、放射性物質の漏出を低減する機能及び生活環境への移行を抑制する機能を「移行抑制機能」という。

ここで、廃棄物埋設施設のうち安全機能を有する設備は、埋設設備、排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層及び覆土である。

3. 設計対象設備

許可基準規則第十条第一号及び第三号の設計対象設備は、覆土である。

4. 許可基準規則への適合のための設計方針

(1) 安全設計の方針

廃棄物埋設施設(以下「本施設」という。)は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(以下「原子炉等規制法」という。)等の関係法令の要求を満足するとともに、「許可基準規則」に適合する構造とする。

本施設で取り扱う放射性廃棄物で容器に固型化したもの(以下「廃棄体」という。)は、実用発電用原子炉の運転及び本施設の操業に伴って付随的に発生する固体状の放射性廃棄物をセメント系充填材で金属製の容器に固型化したもので、その容器が損傷しない限り、放射性物質は漏えいすることはない。また、取り扱う廃棄体の放射能濃度が低く、個々の廃棄体に含まれる放射性物質の量は十分少ないが、埋設する総本数が多い。そのため、漏出防止機能、移行抑制機能及び遮蔽機能が喪失した場合には、放射線障害を及ぼすおそれがあることから、これらを安全機能とする。

なお、飛散防止のための措置は、本施設の特徴を踏まえると公衆の受ける線量が十分小さいことから安全機能には該当しない。

本施設の安全設計の基本的方針は、常時機能維持を必要とする動的な設備・機器は不要であり、静的な設備・機器によりこれらの安全機能を有するよう設計することとし、これらの安全機能を適切に組み合わせることによって、安全性を確保することとする。

具体的には、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、平常時における廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量、本施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による濃縮・埋設事業所(以下「事業所」という。)周辺の線量並びに周辺監視区域の外の空气中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質の放出により事業所敷地(以下「敷地」という。)周辺の公衆の受ける線量が、「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」(平成30年6月8日 原子力規制委員会告示第4号)(以下「線量告示」という。)で定められた線量限度を超えないことはもとより、公衆の受ける線量が As Low As Reasonably Achievable(ALARA)の考えの下、合理的に達成できる限り十分低くなるよう、実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下を達成できる設計とする。

放射線業務従事者は、その受ける線量が「線量告示」で定められた線量限度を超

えない設計とする。

廃止措置の開始後、廃棄物埋設地は、廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しのある設計とする。廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態とは、廃止措置の開始後の評価において、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も可能性が高いと考えられるパラメータを設定した自然事象シナリオ(以下「確からしい自然事象シナリオ」という。)で評価される公衆の受ける線量が $10\mu\text{Sv/y}$ を超えないこと、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も厳しいパラメータを設定した自然事象シナリオ(以下「厳しい自然事象シナリオ」という。)で評価される公衆の受ける線量が $300\mu\text{Sv/y}$ を超えないこと、人為事象シナリオの公衆の受ける線量が 1mSv/y を超えないこととする。

ここで、人工バリアとは、埋設する放射性廃棄物からの放射性物質の漏出の防止又は低減を行う人工構築物をいう。天然バリアとは、埋設する放射性廃棄物又は人工バリアの周囲に存在し、埋設する放射性廃棄物から漏出してきた放射性物質の生活環境への移行の抑制を行う地盤(岩盤及び第四紀層)をいう。

(2) 安全機能

以下に各安全機能の設計方針について記載する。

廃棄物埋設地の設計として、地下水面下への設置に応じた設計の考え方については添付資料1「1. 廃棄物埋設地の設計の考え方」に記載する。

(i) 漏出防止機能

2号廃棄物埋設地は、覆土が設計対象設備であるため、漏出防止機能に係る変更はない。

(ii) 移行抑制機能

a. 設計方針

覆土は、以下に示す方針に基づき、覆土完了から廃止措置の開始までの間において、移行抑制機能を維持する設計とし、廃止措置の開始後において、移行抑制機能を期待できる設計とする。

移行抑制機能は、放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量を低減するため、

埋設設備内への水の浸入を抑制するとともに、放射性物質を収着する設計とする。

水の浸入の抑制に関して、覆土は、土質系材料の低透水性により埋設設備内への水の浸入を抑制する設計とする。

放射性物質の収着に関して、覆土は、収着性を有する土質系材料を用いる設計とする。

また、覆土の移行抑制機能の設計に当たっては、天然バリアの移行抑制機能を考慮して行う。

b. 安全設計

廃棄物埋設地は、以下に示す設計を行うことにより、覆土完了後において、廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減し、生活環境への移行を抑制する。

移行抑制機能を有する構造は、覆土完了後において、低透水性及び収着性を期待する人工バリアと天然バリアとの組合せとする。人工バリアは、埋設設備、埋設設備の上部及び側部を覆う難透水性覆土、下部覆土並びに上部覆土により構成する。天然バリアは、埋設設備の底部及び周辺に位置する鷹架層及び第四紀層により構成する。

(a) 覆土

(一) 覆土は、放射性物質が地表近傍へ移行することによる汚染拡大を防止するため、低透水性を有する設計とする。また、収着性を有する土質系材料を用いる設計とする。

(二) 覆土は、劣化・損傷に対する抵抗性を考慮し、長期的な力学的影響及び化学的影響に対して、変形追従性及び化学的安定性に優れた自然材料である現地発生土、ベントナイト、砕砂及び砕石を採用する。

なお、覆土の材料は、実際の調達時期により詳細な材料特性が変わる可能性があるが、その場合にも要求性能を満足することを確認した上で用いることとする。

(三) 覆土は、劣化・損傷が生じた場合にも必要な移行抑制機能を有する構成・仕様とするため、難透水性覆土、下部覆土及び上部覆土を十分な厚さで多層化する。

(四) 難透水性覆土及び下部覆土は、周辺の岩盤(鷹架層)と同等以下の透水係数とし、埋設設備の底面を除く外周部に設置することで埋設設備に劣化・損傷が生じた場合にも、埋設設備内に浸入する地下水量を極力低減させる設計とする。

また、難透水性覆土は、地下水流動によって地表面へ放射性物質が移行することを抑制するとともに、浸入した地下水が埋設設備の底部から透水性の小さい鷹架層に流出するように、透水係数を周辺の鷹架層よりも更に小さくなるように設計し、埋設設備の底面及び埋設設備間において幅 2.5m 以下となる狭隘部(以下「埋設設備間狭隘部」という。)を除く外周部に設置する。

埋設設備へ流入する地下水量及び埋設設備から流出する地下水量の抑制の観点として、埋設設備と第四紀層との隔離を安定的に確保する考え方については、添付資料 1「3. 第四紀層との隔離を安定的に確保する考え方」に詳細を示す。

(五) 移行抑制機能を有する覆土に対する設計、材料の選定、建設・施工及び検査は、「事業規則」、「許可基準規則」等に基づくほか、利用可能な最善の技術として最新の知見を確認し、現状入手できる材料を用いる。現時点での最新の知見としては、「道路土工要綱」⁽¹⁾及び「河川土工マニュアル」⁽²⁾を参照する。

(iii) 放射線の遮蔽機能

a. 設計方針

本施設は、敷地周辺の公衆の受ける線量及び放射線業務従事者の受ける線量並びに管理区域以外の人立ち入る場所に滞在する者の線量が、「線量告示」で定められた線量限度を超えないことはもとより、合理的に達成できる限り低くするため、以下に示す方針に基づき遮蔽機能を有する設計を行う。

遮蔽機能は、覆土完了後において、覆土により、直接ガンマ線及びスカイシヤインガンマ線による敷地周辺の公衆等の受ける線量を $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下に低減

できる設計とする。また、管理区域以外の人が立ち入る場所に滞在する者の線量を公衆の線量限度以下に低減できる設計とする。

なお、周辺監視区域の廃止後は公衆が敷地内に立ち入る可能性を考慮し、覆土により敷地内に立ち入る公衆の受ける線量を公衆の線量限度以下に低減できる設計とする。

b. 安全設計

廃棄物埋設地は、覆土完了後において、覆土のうち難透水性覆土及び下部覆土により、公衆の受ける線量及び管理区域以外の人が立ち入る場所に滞在する者の線量を低減できる設計とする。

なお、周辺監視区域の廃止後は公衆が敷地内に立ち入る可能性を考慮し、覆土により、敷地内に立ち入る公衆の受ける線量を低減できる設計とする。

遮蔽の評価結果については、「第八条 遮蔽等」において別途説明する。

(3) 廃棄物埋設地の設計に関して留意する事項

廃棄物埋設地は、覆土完了から廃止措置の開始までの間は、放射性物質の漏出を低減するため、以下に留意した設計とする。

- ・埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること
- ・劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること
- ・劣化・損傷が生じた場合にも当該機能が維持できる構造・仕様であること
- ・放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと

また、廃棄物埋設地は、埋設する放射性廃棄物に含有される化学物質その他の化学物質により安全機能を損なわない設計とする。

(4) その他の設計

(i) 廃棄物埋設地の設計

廃棄物埋設地は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間は、放射性物質の漏出を防止し、覆土完了から廃止措置の開始までの間は、放射性物質の漏出を低減するため、以下に留意した設計とする。

a. 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること

廃棄物埋設地の設計については、放射性物質の性質及び放射能濃度として、放射性物質の種類により主に半減期や放出される放射線の種類・エネルギーが異なることを考慮する。

- ・半減期の長い放射性物質に対しては、人工バリア及び天然バリアを組み合わせる移行抑制機能の設計により長期的に放射性物質の移行を抑制し、放射能の減衰を図ることで公衆の受ける線量を低減する。

- ・半減期が短く放射線のエネルギーが大きい放射性物質に対しては、遮蔽機能の設計により放射能が有意に減衰するまで遮蔽を確保することで、公衆の受ける外部被ばくを低減する。

また、廃棄物埋設地は、保全に関する措置を必要としない状態に移行できるよう設計する。人間侵入リスクが高い地表面を避け、天然バリアである侵食抵抗性の高い岩盤の性能を有効に利用するために、地盤を掘り下げて埋設設備を設置する。その結果、埋設設備が地下水面下への設置となることから、その特徴を考慮し設計する。

以上より、廃棄物埋設地に要求される安全機能及びその安全機能を維持すべき期間を踏まえた上で、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術として、諸外国の類似施設の設計を参考とし、広く活用され、かつ、実績を多数有している建設・施工技術を用いる。

安全機能に対する期間ごとに、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術について以下に示す。

(a) 放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間では、安全機能(漏出防止機能及び遮蔽機能)を有する設備は、埋設設備及び排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層であるが、「廃棄物埋設事業変更許可申請書」(平成10年10月8日付け、10安(廃規)第49号をもって事業変更許可)(以下「既許可」という。)から変更がないため、本資料では設計対象設備としていない。

(b) 覆土完了後

覆土完了後は、安全機能(移行抑制機能及び遮蔽機能)を有する部位ごとの要求性能に加え、材料の選定、建設・施工及び検査を考慮した構造物として設計する。以下の内容を満足することで、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術とする。

(一) 合理的な建設・施工技術

当該期間は、数百年以上であることから、長期的な透水特性及び遮蔽性能を期待するために、力学的・化学的作用により安全性が損なわれ難い天然材料である土質系材料を用いた土構造物とすることが合理的である。

また、長期的な核種収着性を期待するために、長期的に安全性が損なわれ難い土質系材料を用いることが合理的である。

(二) 利用可能な最善の建設・施工技術

土構造物としての設計、材料の選定、建設・施工及び検査については、利用可能な最善の建設・施工技術として、最新の知見を確認する。現時点での最新の知見としては、「道路土工要綱」⁽¹⁾及び「河川土工マニュアル」⁽²⁾を参照とする。また、一般土工で用いられる重機を使用し、適切な品質管理を行うことで、目標の透水係数を有する覆土を施工できることを確認している。

なお、施工時の品質管理方法は、覆土施工時に行う施工試験結果を用いて最終決定する。

安全機能ごとに対する設計としては以下のとおり。

- ・移行抑制機能は、低透水性として土質系材料により透水係数及び厚さを確保する設計とし、収着性を有する土質系材料を用いる設計とする。
- ・遮蔽機能は、敷地周辺の公衆及び管理区域以外の人立ち入る場所に滞在する者への被ばくを低減するために、覆土の密度及び厚さを確保することで、放射線の遮蔽性能を有する設計とする。

b. 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

埋設設備及び排水・監視設備は、既許可から変更がないため、本資料では設計対象設備としていない。

(b) 覆土

難透水性覆土及び下部覆土は、化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性を考慮し、粒形分布に広がりを持った土質系材料を用いる。

難透水性覆土及び下部覆土は、容易な露呈を防止する観点から安定した地盤を掘り下げ、埋設設備の底面を除く外周部に設置する設計とする。

長期状態において想定される劣化・損傷事象を抽出し、覆土の透水特性に影響を及ぼす要因に対して、長期的に維持するための要求機能を満たす見通しのある設計とする。

これらにより、覆土は劣化・損傷に対する抵抗性を有する設計とする。

c. 劣化・損傷が生じた場合にも当該機能が維持できる構造・仕様であること

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

埋設設備及び排水・監視設備は、既許可から変更がないため、本資料では設計対象設備としていない。

(b) 覆土

覆土は、長期的に発生が予想される力学的影響及び化学的影響のいずれに対しても機能維持が受動的に期待できるよう、多層化した十分な厚さの覆土を設置する。

線量評価上用いる各性能は、線量評価の状態設定における劣化・損傷の程度及び期間の不確実性を包含する設定とすることにより、廃棄物埋設地全体として線量基準を満足できるようにする。

これらにより、劣化・損傷が生じた場合においても、移行抑制機能を維持する構造・仕様とする。

d. 放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと

放射性物質の漏出を低減する機能は、人工バリア及び天然バリアにより確保し、人工バリアは特性の異なる土質系材料を用いる設計とする。また、これらを用いた各部材に対して、第2表に示すように、地下水の浸入を抑制する機能(低透水性)及び放射性物質を収着する機能(収着性)の複数の異なる機能を期待することにより、一つの機能に過度に依存しないよう配慮した設計とする。

第2表 各部材に期待する移行抑制機能を構成する特性

	部材	収着性	低透水性
人工バリア	難透水性覆土	○	○
	下部覆土	—*1	○
	上部覆土	○	—
天然バリア	岩盤	○	○

○：期待する

—：期待しない

*1：下部覆土は土質系材料であり収着性を期待できるが、難透水性覆土又は下部覆土の一方に収着性を期待することで十分であることから、下部覆土の収着性は考慮しない。

e. 放射性物質の漏出を低減する機能を有すること

(a) 設計方針

「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を低減する」について、覆土完了から廃止措置の開始までの間、公衆の受ける線量が法令に定める線量限度を超えないことはもとより、As Low As Reasonably Achievable (ALARA) の考えの下、合理的に達成できる限り十分低くなるよう、**実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下となる設計とする。**

(b) 評価方法

(一) 線量評価シナリオ

廃棄物埋設地からの移行に関する評価対象とする線量評価シナリオは、**地下水中の放射性物質が移行する尾駁沼の水産物摂取による内部被ばくとする。**

(二) 線量評価モデル

廃棄物埋設地からの移行に関する評価対象とする線量評価モデルは、**廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が、廃棄物埋設地を通過する地下水に混入し、沢を経て尾駁沼に流入するものとして設定する。この沼の水産物を摂取する場合の内部被ばくの評価は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四**

号(廃止措置の開始後の評価)」の(1)式から(6)式及び(9)式を用いて計算する。

(三) 線量評価パラメータ

廃棄物埋設地から漏出する放射性物質の量の算定に当たっては、覆土完了直後から放射性物質の漏出が開始するとして評価し、線量評価パラメータを設定する。

なお、覆土完了直後の放射エネルギーは、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料9 線量評価パラメータ-パラメータ根拠集-」の第1表の値とし、覆土完了後の時間の経過による放射性物質の減衰を考慮する。その他の線量評価パラメータは同資料の第2表から第7表の値を用いる。

(c) 評価結果

埋設設備の覆土完了から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける被ばく線量について評価を行った結果、約 $3.8\mu\text{Sv/y}$ となった。また、この線量に廃棄物埋設施設からの環境への放射性物質の放出による線量約 $1.7\times 10^{-2}\mu\text{Sv/y}$ を合計しても約 $3.8\mu\text{Sv/y}$ であり、公衆が受ける実効線量が $50\mu\text{Sv/y}$ 以下となった。

なお、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による線量は覆土により覆土前よりも大幅に減少し、無視できるレベルとなっているため考慮しない。

埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの詳細な評価結果は「[参考](3) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第10条第4項)」に示す。線量評価に関するパラメータについては、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。

f. 埋設する放射性廃棄物に含有される化学物質その他の化学物質により安全機能を損なわないものであること

埋設する廃棄物、埋設設備、排水・監視設備及び覆土には可燃性の化学物質、可燃性ガスを発生する化学物質は含まれない。一方、廃棄物埋設地の安全機能に影響を及ぼす可能性のあるその他の化学物質としては、廃棄物又は埋設設備内に含まれる有機物、更にはセメント系材料から溶出した高アルカリ成分を含む地下水との反応による影響を考慮する必要がある。

覆土完了後の安全機能については、覆土において移行抑制機能及び遮蔽機能を期待している。遮蔽機能については、覆土が十分な厚さを有しており、化学物質との接触による覆土の厚さ減少及び密度低下は無視できると考えられる。移行抑制機能については、廃棄物埋設地内において地下水位が上昇し、地下水の浸入に伴う溶解及び漏出する化学物質(有機物)及びセメント系材料から溶出した高アルカリ成分が覆土の低透水性及び収着性に影響を及ぼす可能性がある。

上記のような化学物質の影響に対する対策として、覆土に使用する材料については、化学物質による低透水性及び収着性への影響を考慮し、低透水性及び収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。また、覆土については化学的安定性の高い材料で構成する設計とする。

5. 廃棄物埋設地の設計

2号廃棄物埋設地の設計内容について説明する。

(1) 構成及び設置位置

廃棄物埋設地は、管理建屋から運搬した廃棄体を埋設する場所であり、埋設設備、排水・監視設備及び覆土により構成する。

廃棄物埋設地は、1号廃棄物埋設地の西側に位置し、廃棄体最大 41,472m³(200L ドラム缶 207,360 本相当)を埋設する。

埋設設備は、1基当たり廃棄体約 2,592m³(200L ドラム缶 12,960 本相当)を埋設する埋設設備 2基を 1埋設設備群とする埋設設備群 8群で構成し、東西方向に 4基、南北方向に 4基配置する。

埋設設備は、現造成面(標高約 52m)基準から約 16m~21m掘り下げて、標高約 31m~36mとなるように N値 50以上の岩盤に設置する。

(2) 主要設備

(i) 埋設設備

埋設設備は、既許可から変更がないため、本資料では設計対象設備としていない。

なお、既設の2号埋設設備は、覆い設置から難透水性覆土施工までの間においては、水の浸入が有意に認められる埋設設備に対し、廃棄体への水の接触をより低減させるため、覆い上面から浸入した水が廃棄体に接触することを防止する対策を行う。

(ii) 排水・監視設備

排水・監視設備は、既許可から変更がないため、本資料では設計対象設備としていない。

(iii) 覆土

a. 構成及び安全機能

覆土は、難透水性覆土、下部覆土及び上部覆土により構成する。

難透水性覆土及び下部覆土は、低透水性により放射性物質の移行を抑制し、遮蔽性により放射線の遮蔽を行う。

なお、評価において収着性による移行抑制機能を期待できる設計とする。

b. 要求性能

安全機能を確保するために必要な要求性能を整理する。

覆土の部位ごとに設定した要求性能及び設計要件を第3表に示す。

(a) 技術要件及び設計仕様項目

(一) 移行抑制機能

覆土の移行抑制機能は、埋設設備内を通過する地下水の流量を低減することである。埋設設備からの流出水量は覆土の透水特性によって影響を受けることから、覆土に対する技術要件は透水特性(低透水性)であり、その設計仕様項目は透水係数及び厚さである。

また、移行抑制機能については、長期にわたり機能を維持する必要があるため、透水係数及び厚さの変化に影響を及ぼす要因について抽出する。長期状態において覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構を第4表に示す。影響要因の抽出については、周辺岩盤などの外部環境も含めた施設の構成及び影響要因の相互作用を網羅的に考慮する。抽出した要因は、廃棄物埋設地の覆土完了後の再冠水による水との接触に伴う、ベントナイト特性の変化、有効粘土密度の変化及び短絡経路の形成である。長期における覆土の技術要件は、これらの要因に対する長期機能維持特性(化学的安

定性、変形追従性及び液状化抵抗性)であり、その設計仕様項目は透水係数、厚さ及び締固め度である。

なお、覆土には、移行抑制機能に対する技術要件として、土質系材料が有する収着性を考慮するが、その設計仕様項目は設定せず、収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。

(二) 遮蔽機能

覆土の遮蔽機能は、放射線を遮蔽する機能であるため、技術要件は遮蔽性であり、その設計仕様項目は密度及び厚さである。

(b) 設計要件

設計仕様項目である透水係数、厚さ、密度及び締固め度については、各部位が要求性能を満足するための設計要件を設定する。

覆土の技術要件のうち、低透水性及び液状化抵抗性についての詳細は添付資料2「技術要件における考え方」に示す。

第3表 覆土の要求性能及び設計要件

安全機能	要求性能		設計仕様項目	難透水性覆土	下部覆土	上部覆土	設計要件
	技術要件 (必要な特性)						
移行抑制機能	透水特性	低透水性	透水係数	○	○	—	必要な透水係数を有すること。 ^{*3}
			厚さ	○	○	—	必要な厚さを有すること。 ^{*4}
	核種 収着性	収着性	—	—	—	—	設計仕様項目を設定しない(評価において、覆土が副次的にもつ性能として設定するものとする)。 ^{*5}
移行抑制機能を長期的に維持するための 要求機能	長期機能 維持特性	化学的 ^{*1} 安定性	透水係数	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。 ^{*2}
			変形 ^{*1} 追従性	透水係数	○	○	—
		液状化 ^{*1} 抵抗性		厚さ	○	○	—
			縮固め度	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。 ^{*2}
遮蔽機能	放射線の 遮蔽性能	遮蔽性	密度	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。
			厚さ	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。 ^{*4}

*1：影響要因及び影響機構を第4表に整理している。

*2：長期状態変化に関連する設計については、第十条第四号の状態設定の評価と関連することから、第十条第四号の説明時に具体的な数値の説明を行う。

*3：難透水性覆土は巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 、下部覆土は巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ を施工時点で確保する。

*4：難透水性覆土は厚さ2m、下部覆土は難透水性覆土上面で厚さ2mを確保する。

*5：分配係数は、材料仕様及び施工の際に取得する分配係数データ又は代替指標となるデータにより管理する。

第4表 長期状態において覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構

設計仕様項目	長期状態における影響要因			影響機構	要求性能(技術要件)
透水係数	ベントナイト特性の変化	化学的影響	交換性陽イオンの変化	セメント系材料からの高カルシウム濃度の間隙水によるベントナイトのCa型化。	化学的安定性
			廃棄体中のほう酸塩、硫酸塩などの可溶性塩影響	可溶性塩影響により、空隙特性(空隙率、空隙構造)が変化するとともに、膨潤性能が低下。また、陥没による覆土の変形。	化学的安定性 変形追従性
	有効粘土密度*1の変化	力学的影響	金属の腐食	金属の腐食膨張により、覆土の隅角部等に、厚さの減少及び変位に伴う透水性が変化した領域の発生。	変形追従性
			地震影響	地震力により覆土の変形及び液状化の発生。	変形追従性 液状化抵抗性
		化学的影響	モンモリロナイトの溶解、随伴鉱物の溶解、二次鉱物の生成	セメント系材料からの高アルカリ性の間隙水によるベントナイト構成材料の溶解に伴う密度低下。溶解成分と地下水成分などが反応して二次鉱物が沈殿。	化学的安定性
厚さ	短絡経路の形成	力学的影響	ガス発生	金属腐食等により発生するガスの破過が生じ、覆土に低密度部を形成。	変形追従性

*1：単位体積あたりに含まれるベントナイト分の乾燥重量をそれ自身の体積で割ることにより得られる密度であり、ベントナイト混合材料の特性を把握するときの指標のひとつ。

c. 構造及び仕様

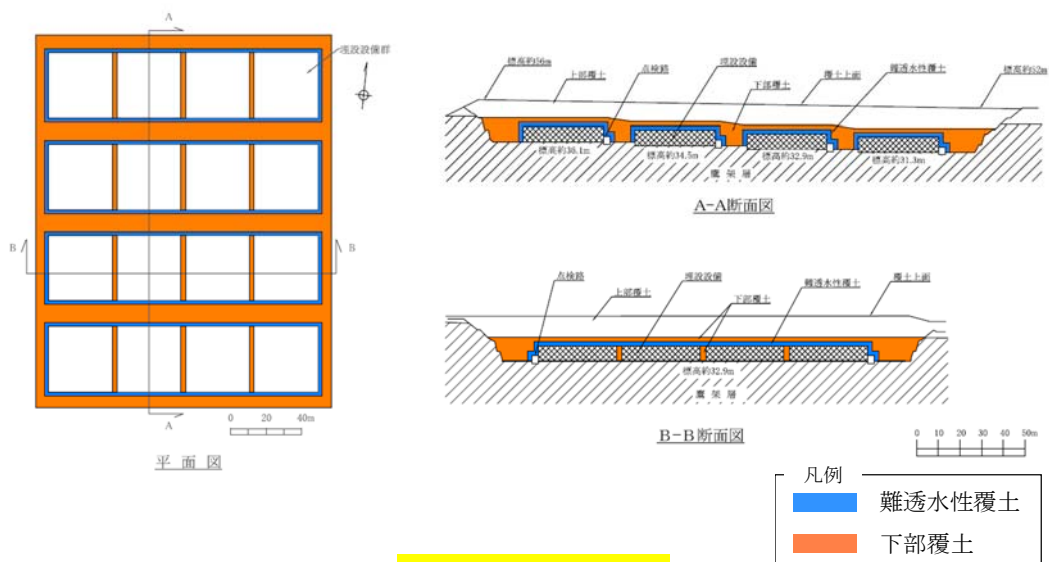
難透水性覆土は、埋設設備の底面及び埋設設備間狭隘部を除く外周部に設置する。下部覆土は、難透水性覆土の外周部及び埋設設備間狭隘部に設置する。上部覆土は、下部覆土上部に設置する。

埋設設備間狭隘部とは、具体的には埋設設備の東西方向の間を示す。

移行抑制機能を確保する観点から、覆土の低透水性は、力学的影響及び化学的影響による長期的な性能低下に配慮した設計とする。

覆土断面図を第1図に示す。

覆土の主要な部位と主な仕様を第5表に示す。



第1図 覆土断面図

第5表 覆土の主要な部位及び主な仕様

設備	主要な部位	主な仕様
覆土	難透水性覆土	材料：ベントナイト混合土 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数*1として $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下 厚さ：2m 以上 密度：1,100kg/m ³ 以上
	下部覆土	材料：現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂及び砕石を混合 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数*1として $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下 厚さ：2m 以上 密度：1,100kg/m ³ 以上
	上部覆土	材料：現地発生土に必要な応じて砕砂及び砕石を混合 透水係数(施工時点)：廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数と同程度 厚さ：難透水性覆土及び下部覆土とあわせて埋設設備上面から 11m 以上

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数をいう。

以下に各部位の仕様を示す。

(a) 難透水性覆土

(一) 概要

難透水性覆土は、砂を母材としたベントナイト混合土で構成し、埋設設備の底面及び埋設設備間狭隘部を除く外周部に設置する。

(二) 設計方針

難透水性覆土に求める安全機能は、覆土完了後の移行抑制機能及び遮蔽機能である。

移行抑制機能に対しては、透水特性を確保し、埋設設備からの流出水量を低減するために低透水性を考慮した設計とする。また、周辺岩盤に比して同程度以下の透水係数を長期的に維持できる設計とする。

遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。

また、移行抑制機能を長期的に維持するための化学的安定性、変形追従

性及び液状化抵抗性は、長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあるものとする。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

覆土の透水係数は、廃棄物埋設地の近傍に分布する鷹架層の透水係数が $7.8 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 程度であることを踏まえ、鷹架層の透水係数以下を長期的に維持することを目標として設計する。

難透水性覆土は、化学的影響の要因である物質の供給源となるセメント系材料と隣接している。難透水性覆土の透水係数は、長期的に性能低下が生じることを想定し、施工時点において巨視的透水係数^{*1}として $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下を確保する。また、埋設設備に内蔵される金属の腐食膨張に伴い鉛直方向に変形した場合でも低透水性を維持できるよう、難透水性覆土の厚さは、埋設設備の表面から 2m 以上とする。

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数を指す。

(イ) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆の受ける線量及び放射線業務従事者の受ける線量並びに管理区域以外の人立ち入る場所に滞在する者の線量(以下「公衆等の受ける線量」という。)を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $1,100 \text{kg/m}^3$ 以上とする。

(ウ) 長期機能維持特性

① 化学的安定性

化学的影響により覆土が変質した場合においても、長期的に低透水性を維持でき、化学的安定性の高いと考えられる天然の土質系材料を使用する。

② 変形追従性

力学的影響又は化学的影響により覆土が変形した場合においても、その変形に追従し、覆土全体として埋設設備からの流出水量の増加を抑制する設計とする。

③ 液状化抵抗性

力学的影響により覆土が変状することのないように、粒径分布に広がりを持った土質系材料で十分に締固めを行う。

なお、実際に使用する材料の粒径分布に基づいて、道路橋示方書⁽³⁾に示される液状化判定法による確認を行う。

(b) 下部覆土

(一) 概要

下部覆土は、現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂及び砕石を混合したもので構成し、埋設設備間狭隘部並びに難透水性覆土の側部全体及び上部に設置する。

(二) 設計方針

下部覆土に求める安全機能は、覆土完了後の移行抑制機能及び遮蔽機能である。

移行抑制機能に対しては、透水特性を確保し、埋設設備からの流出水量を低減するために低透水性を考慮した設計とする。また、周辺岩盤に比して同程度以下の透水係数を長期的に維持できる設計とする。

遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。

また、移行抑制機能を長期的に維持するための化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性は、長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあるものとする。

(三) 仕様

(ア) 透水特性

覆土の透水係数は、廃棄物埋設地の近傍に分布する鷹架層の透水係数が $7.8 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 程度であることを踏まえ、鷹架層の透水係数以下を長期的に維持することを目標として設計する。

下部覆土の透水係数は、難透水性覆土によってセメント系材料起源の成分による化学的変質の影響が遅延・緩衝されることから、施工時点において巨視的透水係数^{*1}として $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下を確保する。また、難透水性覆土の上部に設置する下部覆土の厚さは2m以上とする。

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数を

指す。

(イ) 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度及び厚さを確保するものとし、密度は $1,100\text{kg/m}^3$ 以上とする。

(ウ) 長期機能維持特性

① 化学的安定性

化学的影響により覆土が変質した場合においても、長期的に低透水性を維持でき、化学的安定性の高いと考えられる天然の土質系材料を使用する。

② 変形追従性

力学的影響又は化学的影響により覆土が変形した場合においても、その変形に追従し、覆土全体として埋設設備からの流出水量の増加を抑制する設計とする。

③ 液状化抵抗性

力学的影響により覆土が変状することのないように、粒径分布に広がりを持った土質系材料で十分に締固めを行う。

なお、実際に使用する材料の粒径分布に基づいて、道路橋示方書⁽³⁾に示される液状化判定法による確認を行う。

(c) 上部覆土

(一) 概要

上部覆土は、現地発生土に必要な応じて砕砂及び砕石を混合したもので構成し、難透水性覆土及び下部覆土とあわせて埋設設備上面から 11m 以上に設置する。表面は地表水による侵食を抑制する観点から、適切な排水勾配を設け、植生を行う。

(二) 設計方針

上部覆土は、周辺の土壌・岩盤と水理的に連続性を持たせる観点から廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数 (10^{-6}m/s オーダー) を目安に施工し、上面は尾駸沼に向かって適切な排水勾配を設ける。

また、上部覆土は、液状化抵抗性を有するものとする。

(三) 仕様

上部覆土は、粒径分布に広がりを持った土質系材料で締固めを行い、難透水性覆土及び下部覆土とあわせて埋設設備上面から 11m 以上とする。

[参考] 許可基準規則への適合性説明

許可基準規則第十条第一号及び第三号への適合性について、上記「4. 許可基準規則への適合のための設計方針」及び「5. 廃棄物埋設地の設計」を基に項目ごとに整理した。

(1) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第 10 条第 1 項及び第 3 項)

廃棄物埋設地の放射性物質の漏出を防止及び低減する設計について以下のとおり確認する。

(i) 確認方法

以下の事項が留意された設計になっていることを確認する。

- a. 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること
- b. 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること
- c. 劣化・損傷が生じた場合にも機能が維持できる構造・仕様であること
- d. 放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと

(ii) 確認結果

以下に示すとおり、廃棄物埋設地の放射性物質を漏出及び低減する設計に関する事項が留意された設計となっている。

- a. 埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によるものであること

(a) はじめに

廃棄物埋設地の設計が合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術によることについて、本施設の地下水面下への設置と各設備の設計の観点から、以下に説明する。

(b) 充填固化体の特性

放射性廃棄物は、事業規則別表第一の放射能濃度を超えないものであって、同規則第八条第1項第二号及び第2項に定められた廃棄物に該当するものである。また、充填固化体においては、それぞれ放射性廃棄物の特性を考慮し、固型化材料と混合することで、固化体の種別ごとに固型化される。廃棄物埋設施設の設計においては、以下に示す充填固化体の固型化方法並びに放射性物質の性質及び放射能濃度を考慮した。

(一) 充填固化体の固型化方法

(ア) 固型化材料は、JIS R 5210(1992)若しくはJIS R 5211(1992)に定めるセメント又はこれらと同等以上の品質を有するセメントであること。

(イ) 容器は、JIS Z 1600(1993)に定める金属製容器又はこれと同等以上の強度及び密封性を有するものであること。

(ウ) 固型化に当たっては、あらかじめ均質に練り混ぜた固型化材料若しくは固型化材料及び混和材料を容器内の放射性廃棄物と一体となるように充填すること。この場合において、容器内に有害な空隙が残らないようにすること。

(二) 放射性物質の性質及び放射能濃度

放射性物質の性質及び放射能濃度として、放射性物質の種類により主に半減期や放出される放射線の種類・エネルギーが異なる。

- ・半減期の長い放射性物質に対しては、人工バリア及び天然バリアを組み合わせる移行抑制機能の設計により長期的に放射性物質の移行を抑制し、放射能の減衰を図ることで公衆の受ける線量を低減する。
- ・半減期が短く放射線のエネルギーが大きい放射性物質に対しては、遮蔽機能の設計により放射能が有意に減衰するまで遮蔽を確保することで、公衆の受ける外部被ばくを低減する。

(c) 地下水面下への設置

廃棄物埋設地は廃止措置の開始後、保全の措置を必要としない状況に移行できるように、以下の点について考慮した。

- ・第四紀層よりも侵食抵抗性の高い岩盤内に設置する。

- ・人間侵入リスクが高い地表面を避ける。
- ・施設周辺の天然バリアである岩盤が有する性能を有効利用するために、岩盤中に設置する。

したがって、埋設設備は、岩盤を掘り下げて設置することとし、その結果地下水面下への設置とした。

地下水面下への設置としたことに応じ、安全機能を達成できる設備の設計を行っている。具体的には、地下水面下に設置することで、覆土施工完了後は地下水に水没した状態を想定し、低透水性を有する覆土を設置することで、埋設設備からの流出水量を低減するとともに、セメント系材料及び土質系材料に収着性を期待することで、放射性物質の漏出を低減することとしている。

また、できるだけ保修に頼らず、移行抑制機能が達成できる設計としている。保修に頼らないとは、将来想定される劣化・損傷に対して裕度を持つ設計のことである。将来想定される劣化・損傷として、金属腐食による膨張等の力学的影響及び化学的影響を考慮した設計としている。

廃棄物埋設地を地下水面下に設置する考えについての詳細は、添付資料1「1. 廃棄物埋設地の設計の考え方」に示す。

(d) 放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間では、安全機能(漏出防止機能及び遮蔽機能)を有する設備は、埋設設備及び排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層であるが、既許可から変更がないため、本資料では設計対象設備としていない。

(e) 覆土完了後

覆土完了後は、安全機能(移行抑制機能及び遮蔽機能)を有する部位ごとの要求性能に加え、材料の選定、建設・施工及び検査を考慮した構造物として設計する。以下の内容を満足することで、合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技術とする。

(一) 合理的な建設・施工技術

当該期間は、数百年以上であることから、長期的な透水特性及び遮蔽性能を期待するために、物理的・化学的作用により安全性が損なわれにくい天然材料である土質系材料を用いた土構造物とすることが合理的である。

また、長期的な核種収着性を期待するために、長期的に安全性が損なわれにくい土質系材料を用いることが合理的である。

(二) 利用可能な最善の建設・施工技術

土構造物としての設計、材料の選定、建設・施工及び検査については、利用可能な最善の建設・施工技術として、最新の知見を確認する。現時点の最新の知見としては、「道路土工要綱」⁽¹⁾及び「河川土工マニュアル」⁽²⁾を参照とする。また、一般土工で用いられる重機を使用し、適切な品質管理を行うことで、目標の透水係数を有する覆土を施工できることを確認している。

なお、施工時の品質管理方法は、覆土施工時に行う施工試験結果を用いて最終決定する。

安全機能ごとに対する設計としては以下のとおり。

- ・移行抑制機能は、低透水性として土質系材料により透水係数と厚さを確保する設計とし、収着性を有する土質系材料を用いる設計とする。
- ・遮蔽機能は、敷地周辺の公衆及び管理区域以外の人立ち入る場所に滞在する者への被ばくを低減するために、覆土の密度及び厚さを確保することで、放射線の遮蔽性能を有する設計とする。

覆土の施工実現性及び覆土の施工時における品質管理(案)について添付資料 3「1. 覆土の施工実現性」及び「2. 覆土の施工時における品質管理(案)」に示す。

(f) 諸外国との比較

本施設の安全機能は、その機能を維持すべき期間が機能ごとに異なる。そのため、安全機能を維持すべき期間を考慮し、諸外国との比較を行う。

本施設と諸外国の比較に当たっては、文献⁽⁴⁾⁽⁵⁾を基に、本施設に対して、廃棄体処分量及び総放射エネルギーが同等か上回る4か国(フランス:オーブ処分場、イギリス:ドリッグ処分場、スペイン:エルカブリアル処分場及びベルギー:デッセル処分場)を対象に行う。文献⁽⁵⁾によると、諸外国の事例では、設計方針及び技術的要件について以下のように整理されている。

[設計方針に係る項目]

- ・埋設設備は、埋設設備内へ雨水及び地下水の浸入を抑制するため、鉄筋コ

ンクリート構造とすること。

- ・埋設設備の覆いが完成するまで廃棄体の定置に係る作業時に雨水を接触させないため、屋根を設けること。
- ・埋設設備内に浸入した雨水及び地下水により放射性物質が漏出することを想定し、雨水及び地下水の監視及び漏出制御を行える排水・監視構造を設けること。

[技術的要件に係る項目]

- ・放射性物質を含む廃棄物を固型化すること。
- ・放射性物質の漏えいを抑制する人工バリアとして、セメント材料を使用すること。

設計方針に係る項目に関しては、「(1)(ii)(d) 覆土の設計」にて参考としている。また、技術的要件に係る項目に関しては、「(1)(ii)(b) 充填固化体の特性」にて参考としている。

諸外国においては、廃棄物埋設地を地下水面より上に設置しているのに対して、本施設は、安全機能を維持すべき期間に応じて、廃棄物埋設地に対する地下水の位置が異なる。そのため、安全機能を維持すべき期間に応じて、人工バリアである埋設設備、排水・監視設備及び覆土に対する地下水面の位置を整理した。

本施設は、放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までにおいて、埋設設備、排水・監視設備及び覆土が、地下水面より上にある。覆土完了から廃止措置の開始までにおいて、埋設設備及び覆土は、地下水面より下にある。また、廃止措置の開始後では、埋設設備及び覆土は、地下水面より下にある。これらの人工バリアに対する地下水の位置関係を考慮した上で、安全機能に対する諸外国との比較を行う。

(一) 漏出防止機能について

漏出防止機能を有する設備は、埋設設備及び排水・監視設備のうちポーラスコンクリート層であるが、これらは既許可から変更がないため、本資料では設計対象設備としていない。

(二) 移行抑制機能について

覆土完了から廃止措置の開始までについて、本施設と諸外国では人工バ

リアに対する地下水面の位置が異なる。諸外国では、地下水面より上に施設を設置して施設の周囲を不飽和にすることを前提とし、雨水の浸入を抑制する観点から低透水性を考慮している。一方、本施設では、地下水面下に施設を設置することから、地下水の浸入を抑制するとともに、浸入した地下水の(覆土側への)移行を抑制する観点として低透水性を考慮している。本施設では、地下水面下においても移行抑制機能を確保できるよう低透水性に優れた設計を行っている。

なお、廃止措置の開始後の本施設では、覆土により、移行抑制機能を期待できるように設計し、線量評価において移行抑制機能を考慮している。

(三) 遮蔽機能について

放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までについて、遮蔽機能を有する設備は、埋設設備であるが、これらは既許可から変更がないため、本資料では設計対象設備としていない

覆土完了から廃止措置の開始までについて、本施設と諸外国では人工バリアに対する地下水面の位置が異なる。また、遮蔽機能に関する要求が明示されていない。本施設では、覆土により、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の公衆等の受ける線量を低減できる遮蔽性(密度及び厚さ)を有する設計としている。

なお、廃止措置の開始後について、諸外国では、遮蔽機能に関する要求が明示されていない。一方、本施設では、遮蔽機能を期待できるように設計し、線量評価において遮蔽機能を考慮している。

各部材の仕様等の詳細な比較は添付資料3「3. 諸外国との比較」に示す。

(g) まとめ

本施設は、廃止措置の開始後、保全の措置を必要としない状況に移行できることを考慮して、設置位置を選定し、安全機能を達成できる設備の設計を行っている。

また、「(1)(ii)(b) 充填固化体の特性」～「(1)(ii)(g) 諸外国との比較」に示すとおり、埋設する放射性廃棄物に含まれる放射性物質の性質及び放射能濃度に応じて、設計時点において合理的かつ利用可能な最善の建設・施工技术によるものである。

b. 劣化・損傷に対する抵抗性を考慮すること

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

埋設設備及び排水・監視設備は、既許可から変更がないため、本資料では設計対象設備としていない。

(b) 覆土

難透水性覆土及び下部覆土は、化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性を考慮し、粒形分布に広がりを持った土質系材料を用いる。

難透水性覆土及び下部覆土は、容易な露呈を防止する観点から安定した地盤を掘り下げ、埋設設備の底面を除く外周部に設置する設計としている。

覆土の設計においては、移行抑制機能を長期にわたり維持する必要があるため、長期状態において想定される劣化・損傷として、透水係数及び厚さの変化に影響を及ぼす要因を抽出している。

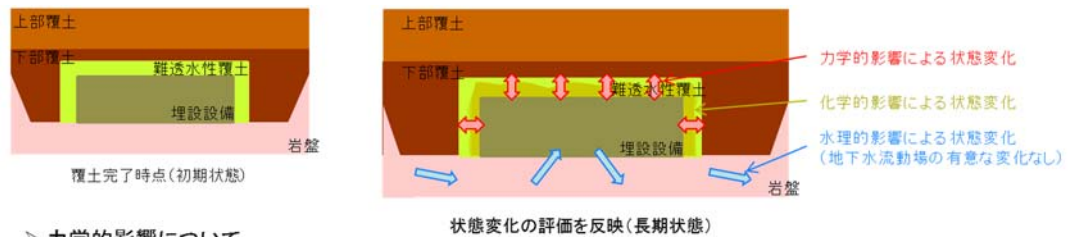
長期状態において覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構は、第4表に示すとおりである。

抽出した要因は、廃棄物埋設地の覆土完了後の再冠水による水の接触に伴う、ベントナイト特性の変化、有効粘土密度の変化及び短絡経路の形成である。これらの要因に対して、長期機能維持特性として、化学的安定性、変形追従性及び液状化抵抗性を考慮しており、これらが長期状態において考慮する性能を満たす見通しがあるような設計としている。

具体的には、線量評価上の状態設定において、力学的影響及び化学的影響による覆土の性能(低透水性)の低下を考慮しており、設計上の設定値(初期状態)も性能の低下に配慮している。第5図に影響項目の概要を示す。

これらにより、覆土は劣化・損傷に対する抵抗性を有する設計とする。

線量評価上の状態設定についての詳細は、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。



- 力学的影響について
 金属腐食による埋設設備の膨張、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張及び可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没による覆土の変形(覆土厚さの変化)に着目した状態設定を行う。
- 化学的影響について
 埋設設備から溶出するアルカリ成分による透水係数の変化に着目した状態設定を行う。

第2図 影響項目の概要

c. 劣化・損傷が生じた場合にも機能が維持できる構造・仕様であること

(a) 埋設設備及び排水・監視設備

埋設設備及び排水・監視設備は、既許可から変更がないため、本資料では設計対象設備としていない。

(b) 覆土

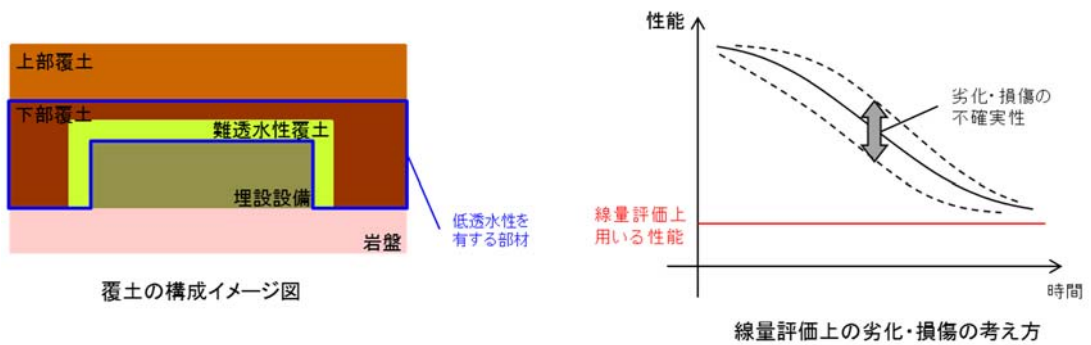
覆土は、長期的に発生が予想される力学的影響及び化学的影響のいずれに対しても機能維持が受動的に期待できるよう、多層化した十分な厚さの覆土を設置することで、劣化・損傷が生じた場合においても、移行抑制機能を維持する構造・仕様としている。

線量評価上用いる各性能は、線量評価の状態設定における劣化・損傷の程度及び期間の不確実性を包含する設定としていることから、廃棄物埋設地全体として線量基準を満足できるようにする。

力学的影響及び化学的影響に対しては、低透水性を有する難透水性覆土及び下部覆土の2層を設置し、各覆土の厚さを2m以上確保することで、全体として覆土に要求する低透水性が容易に損失しないものとしている。第3図に線量評価上の劣化・損傷の考え方を示す。

これらにより、劣化・損傷が生じた場合においても、移行抑制機能を維持する構造・仕様とする。

なお、線量評価上の状態設定についての詳細は、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。



第3図 線量評価上の劣化・損傷の考え方

d. 放射性物質の漏出を低減する機能は、地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能等の機能のうち、一つのものに過度に依存しないこと

放射性物質の漏出を低減する機能は、人工バリア及び天然バリアにより確保し、人工バリアは特性の異なる土質系材料を用いる設計とする。また、これらを用いた各部材に対して、第6表に示すように、地下水の浸入を抑制する機能（低透水性）及び放射性物質を収着する機能（収着性）の複数の異なる機能を期待することにより、一つの機能に過度に依存しないよう配慮した設計としている。

第6表 各部材に期待する移行抑制機能を構成する特性

		部材	収着性	低透水性
人工バリア	覆土	難透水性覆土	○	○
		下部覆土	—*1	○
		上部覆土	○	—
天然バリア		岩盤	○	○

○：期待する

—：期待しない

*1：下部覆土は土質系材料であり収着性を期待できるが、難透水性覆土又は下部覆土の一方に収着性を期待することで十分であることから、下部覆土の収着性は考慮しない。

参考として、確からしい自然事象シナリオの線量評価結果をベースとし、各バリア材の機能を構成する特性の一つを無視した線量評価を行い、特性の一つに過度に依存していないことを確認した。

線量結果は「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)
(3号廃棄物埋設施設)4.(2)(v)d.その他」に示すとおりである。

(2) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第10条第2項)

2号廃棄物埋設地は、覆土が設計対象設備であるため、放射性物質の漏出を防止する機能について、雨水や地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造の変更はない。

(3) 許可基準規則第十条第一号(許可基準規則解釈第10条第4項)

廃棄物埋設地が、覆土完了から廃止措置の開始までの間、廃棄物埋設地の外への放射線物質の漏出を低減する機能を有するものであることを以下のとおり確認する。

(i) 確認方法

「廃棄物埋設地の外への放射線物質の漏出を低減する」について、公衆の受ける線量が法令に定める線量限度を超えないことはもとより、As Low As Reasonably Achievable(ALARA)の考えの下、合理的に達成できる限り十分低くなるよう、実効線量で $50\mu\text{Sv/y}$ 以下であることによって確認する。

(ii) 確認結果

埋設設備の覆土完了から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地からの放射性物質の移行に伴う公衆の受ける被ばく線量について評価を行った結果、約 $3.8\mu\text{Sv/y}$ となった。また、この線量に廃棄物埋設施設からの環境への放射性物質の放出による線量約 $1.7\times 10^{-2}\mu\text{Sv/y}$ を合計しても約 $3.8\mu\text{Sv/y}$ であり、公衆が受ける実効線量が $50\mu\text{Sv/y}$ 以下となった。なお、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による線量は覆土により覆土前よりも大幅に減少し、無視できるレベルとなっているため考慮しない。

埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの評価の詳細を第7表に示す。線量評価に関するパラメータについては、「許可基準規則第十条第四号」にて説明する。

以上より、廃棄物埋設地は、覆土完了から廃止措置の開始までの間、実効線量で $50\mu\text{Sv/y}$ 以下であることから、廃棄物埋設地の外への放射線物質の漏出を低減する機能を有する設計である。

第7表 埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの
期間において最大となる公衆の受ける被ばく線量の評価結果

線量評価 シナリオ*1	3号評価結果 (μ Sv/y)		1号評価結果 (μ Sv/y)		2号評価結果 (μ Sv/y)		評価結果の重畳 (μ Sv/y)	
	覆土前	覆土 完了後	覆土前	覆土 完了後	覆土前	覆土 完了後	覆土前	覆土 完了後
気体廃棄物が大気 への管理放出さ れ、放射性物質が 大気へ放出され ることによる内部被 ばく*2	約 3.5×10^{-6}						約 3.5×10^{-6}	
液体廃棄物が尾駁 沼又は河川へ管理 放出され、その水 産物を摂取するこ とによる内部被ばく *2	約 1.7×10^{-2}						約 1.7×10^{-2}	
廃棄物埋設地から 放射性物質が地下 水によって尾駁沼 へ漏出し、その水 産物を摂取するこ とによる内部被ばく	—*4	約 0.59	—*4	約 1.9	—*4	約 1.3	—*4	約 3.8
管理建屋内の一時 貯蔵の廃棄体およ び定置済み廃棄体 からのスカイシャ イン線による外部 被ばく	約 6.5	—*5	約 27*6	—*5	約 25*6	—*5	約 23*7	—*5
						合計*3	約 23	約 3.8

*1: 既許可において評価対象としている「沢への放射性物質の移行による外部被ばく及び内部被ばく」は、1号及び2号廃棄物埋設施設については、他の被ばく経路と比べて線量が無視できる程小さい。また、3号廃棄物埋設施設における線量も同じく低く(約 9.3×10^{-6} [μ Sv/y])、廃棄物埋設地から放射性物質の移行に伴う公衆の受ける線量は、「廃棄物埋設地から放射性物質が地下水によって尾駁沼へ漏出し、その水産物を摂取することによる内部被ばく」にて代表できる。

*2: 覆土完了後に廃棄施設等を供用することを想定し、覆土完了後も考慮する。

*3: 線量合計値に関しては、最大線量時期を考慮せず、単純に合計したもの

*4: 埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了までの間においては、放射性物質の漏出を防止することから公衆への影響は発生しない。

*5: 覆土完了後は、十分な厚さの覆土があるため、周辺監視区域の廃止後に敷地内へ立ち入る人の外部被ばく線量影響は無視できるほど小さい。

*6: 1号埋設設備 7, 8群の漏出防止対策の追加及び1号廃棄物埋設地に埋設する廃棄体の種類の追加及び数量の変更並びに 2号廃棄物埋設地に埋設する廃棄体の数量の変更

に伴う影響はなく、公衆の受ける外部被ばく線量は既許可での評価値を上回ることはない。

*7：各廃棄物埋設施設からの方位及び距離を考慮し、重畳させたもの。

(4) 許可基準規則第十条第三号(許可基準規則解釈第10条第5項)

2号廃棄物埋設地は、覆土が設計対象設備であるため、覆土が、化学物質により安全機能が損なわれないものであることを以下のとおり確認する。

(i) 確認方法

埋設する廃棄体、埋設設備、排水・監視設備及び覆土には可燃性の化学物質、可燃性ガスを発生する化学物質は含まれない。一方、廃棄物埋設地の安全機能に影響を及ぼす可能性のあるその他の化学物質としては、廃棄体又は埋設設備内に含まれる有機物、更にはセメント系材料から溶出した高アルカリ成分を含む地下水との反応による影響を考慮する必要がある。

覆土完了後の安全機能については、覆土において移行抑制機能及び遮蔽機能を期待している。遮蔽機能については、覆土が十分な厚さを有しており、化学物質との接触による覆土の厚さ減少及び密度低下は無視できると考えられる。移行抑制機能については、廃棄物埋設地内において地下水位が上昇し、地下水の浸入に伴う溶解及び漏出する化学物質(有機物)及びセメント系材料から溶出した高アルカリ成分が覆土の低透水性及び収着性に影響を及ぼす可能性がある。

したがって、化学物質(有機物)及びアルカリ成分による覆土の低透水性及び収着性への影響を考慮した設計であることを確認する。

(ii) 確認結果

(i)で整理した影響に対する対策として、覆土に使用する材料については、化学物質による低透水性及び収着性への影響を考慮し、低透水性及び収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。また、覆土については化学的安定性の高い材料で構成する設計としている。

したがって、廃棄物埋設地が、化学物質により安全機能が損なわれないものである。

なお、廃止措置の開始後の評価においては、埋設設備に使用する有機物も含め、これら化学物質を考慮した状態設定に基づく線量評価を行い、各期間・シナリオの線量基準を満足するものであることを確認している。

6. 参考文献

- (1) (公社)日本道路協会(2009)：道路土工要綱
- (2) (財法)国土技術研究センター(2009)：河川土工マニュアル
- (3) (社)日本道路協会(平成 27 年度)：道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説
- (4) (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター:放射性廃棄物ハンドブック(2019年版)
- (5) ONDRAF/NIRAS(2012):Summary of the Safety Report for the surface repository of category A waste in Dessel

以 上

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

(3号廃棄物埋設施設)

2020年12月

日本原燃株式会社

目 次

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第十条第四号及びその解釈	1
2. 評価対象設備	2
3. 許可基準規則への適合のための評価方針	2
4. 許可基準規則への適合性説明	3
(1) 評価方法	3
(2) 廃止措置の開始後の評価	4
5. 参考文献	75

補足説明資料 1	地質環境に係る長期変動事象
補足説明資料 2	生活環境の状態設定
補足説明資料 3	廃棄物埋設地の状態設定 -影響事象分析-
補足説明資料 4	廃棄物埋設地の状態設定 -状態変化の評価(力学的影響)-
補足説明資料 5	廃棄物埋設地の状態設定 -状態変化の評価(化学的影響)-
補足説明資料 6	廃棄物埋設地の状態設定 -透水係数の設定-
補足説明資料 7	線量評価パラメータ -埋設設備からの流出水量-
補足説明資料 8	線量評価パラメータ -分配係数-
補足説明資料 9	線量評価パラメータ -パラメータ根拠集-
補足説明資料 10	線量評価結果 -経年変化グラフ-

1. 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 第十条第四号及びその解釈

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
(廃棄物埋設地) 第十条 廃棄物埋設地は、次の各号に掲げる要件を満たすものでなければならない。 四 廃止措置の開始までに廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるものであること。

第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈
第10条(廃棄物埋設地) 第6項 第4号に規定する「廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるもの」とは、設計時点における知見に基づき、廃棄物埋設施設の基本設計について、廃止措置の開始後における埋設した放射性廃棄物に起因して発生することが想定される放射性物質が公衆に及ぼす影響が、以下に掲げる各シナリオに基づく評価の結果、それぞれの基準を満たすよう設計されていることをいう。 これらの評価は、廃棄物埋設施設の敷地及びその周辺に係る過去の記録や、現地調査等の最新の科学的・技術的知見に基づき、人工バリア及び天然バリア(埋設された放射性廃棄物又は人工バリアの周囲に存在し、埋設された放射性廃棄物から漏出してきた放射性物質の生活環境への移行の抑制を行う岩盤又は地盤等をいう。以下同じ。)の状態の変化、被ばくに至る経路等に影響を与える自然現象及び土地利用による人間活動を考慮した上で行うこと。なお、廃止措置の開始後において評価の対象とする期間は、シナリオごとに公衆が受ける線量として評価した値の最大値が出現するまでの期間とする。 一 自然事象シナリオ 自然現象による放射性物質の廃棄物埋設地からの漏えい、天然バリア中の移行、河川等への移行及び一般的な土地利用(廃棄物埋設地の掘削を伴うものを除く。)を考慮したシナリオを対象として、以下のとおりであること。この際、同一の事業所内に複数の廃棄物埋設施設の設置が予定される場合は、これらの重畳を考慮すること。 イ 科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアと天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組み合わせのうち最も厳しいシナリオであっても、評価される公衆の受ける線量が、300 マイクロシーベルト/年を超えないこと。 ロ 科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組み合わせのうち、最も可能性が高いと考えられるパラメータを設定し、評価される公衆の受ける線量が、10 マイクロシーベルト/年を超えないこと。 二 人為事象シナリオ 廃棄物埋設地の掘削による放射性物質の廃棄物埋設地からの漏えい、天然バリア中の移行及び当該掘削後の土地利用を考慮したシナリオに基づき、評価される公衆の受ける線量が、ピット処分にあっては1 ミリシーベルト/年を超えないこと。

2. 評価対象設備

許可基準規則第十条第四号の対象設備は、廃棄物埋設地に設置する埋設設備及び覆土とし、第1表に示す安全機能のうち廃止措置の開始後の移行抑制機能^{*1}を対象に公衆の受ける線量を評価する。

*1:本資料では、放射性物質の漏出を低減する機能及び生活環境への移行を抑制する機能を「移行抑制機能」という。

第1表 ピット処分における安全機能

安全機能	廃止措置の開始前		廃止措置の開始後
	放射性廃棄物の受入れの開始から覆土完了まで	覆土完了から廃止措置の開始まで	
放射性物質の漏出の防止機能	○	—	—
移行抑制機能	—	○	△
遮蔽機能	○	○	△

○:安全機能を維持する

△:必要な安全機能を期待できるように設計する

—:考慮しない

3. 許可基準規則への適合のための評価方針

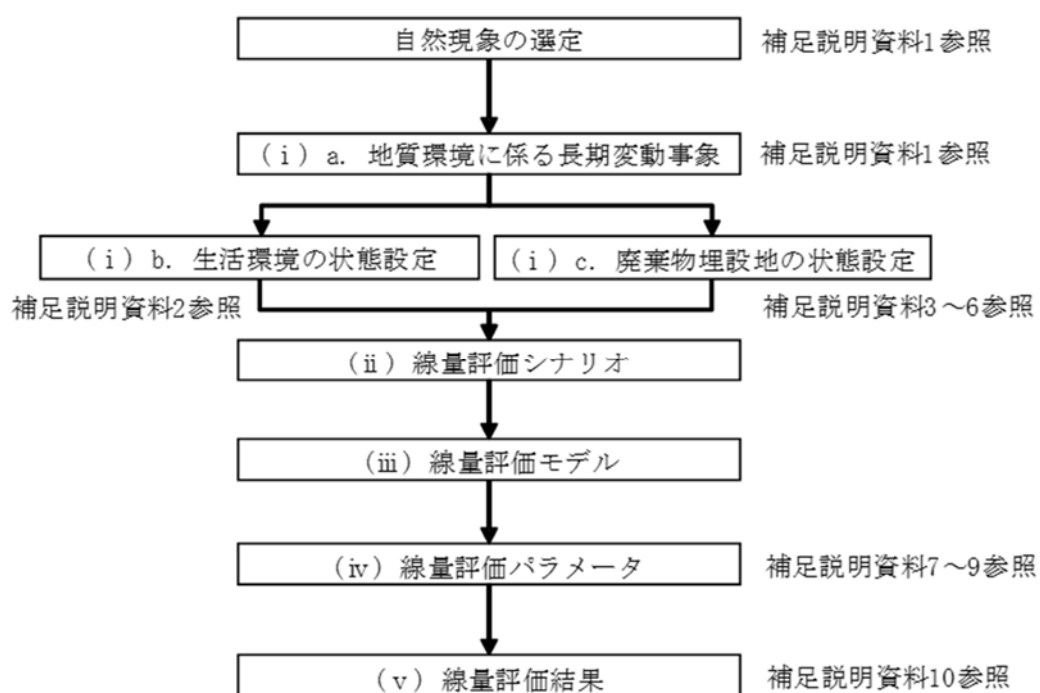
廃棄物埋設地が廃止措置の開始後、廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがある設計であることを公衆の受ける線量を評価することにより確認する。「廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがある」とは、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も可能性が高いと考えられるパラメータを設定した自然事象シナリオ(以下「確からしい自然事象シナリオ」という。)で評価される公衆の受ける線量が $10 \mu\text{Sv/y}$ を超えないこと、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も厳しいパラメータを設定した自然事象シナリオ(以下「厳しい自然事象シナリオ」という。)で評価される公衆の受ける線量が $300 \mu\text{Sv/y}$ を超えないこと並びに人為事象シナリオの公衆の受ける線量が 1mSv/y を超えないこととする。

4. 許可基準規則への適合性説明

許可基準規則第十条第四号 廃棄物埋設地(廃止措置の開始後の評価)に対する適合性について確認した結果を以下にまとめる。

(1) 評価方法

公衆の受ける線量の評価は、「許可基準規則」及び「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」(以下「許可基準規則解釈」という。)に基づいて行う。検討フローを第1図に示す。



第1図 検討フロー

(2) 廃止措置の開始後の評価

廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態へ移行できる見通しを得るため、廃止措置の開始後において、埋設する廃棄体に起因して発生すると想定される公衆の受ける線量が、確からしい自然事象シナリオにおいて $10\ \mu\text{Sv/y}$ を超えないこと、厳しい自然事象シナリオにおいて $300\ \mu\text{Sv/y}$ を超えないこと及び人為事象シナリオにおいて 1mSv/y を超えないことを評価する。

評価の対象とする期間は、評価する線量の最大値が出現する時期を含む期間とし、主要な放射性物質のうち半減期の長い放射性物質の放射エネルギー及び放射能濃度が十分に小さいことを考慮し、1万年程度までを目安とする。

評価に当たっては、廃棄物埋設地の敷地及びその周辺に係る過去の記録や現地調査結果等の最新の科学的・技術的知見に基づき、人工バリア及び天然バリアの状態変化、被ばく経路等に影響を与える自然現象及び土地利用による人間活動を考慮し、人工バリア及び天然バリアの機能の状態の変化に関する要素を体系的に収集・分析し、網羅的・包括的に評価すべきシナリオを設定する。

確からしい自然事象シナリオは、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も可能性が高いと考えられるパラメータを用いて評価する。また、本シナリオで考慮する生活様式は、ICRP Pub. 81⁽¹⁾及びICRP Pub. 101⁽²⁾の考え方を参考に合理性、持続可能性及び均一性のある一般的な人間活動を対象に設定する。ただし、最も可能性が高いと考えられる状態の設定が困難である場合又は様々な不確かさを考慮したとしても線量への影響が小さいと考えられる場合は、不確かさを考慮して保守的な状態を設定する。

厳しい自然事象シナリオは、科学的に合理的と考えられる範囲の人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち、最も厳しいパラメータを用いて評価する。厳しい自然事象シナリオで考慮する生活様式は、確からしい自然事象シナリオと同様に一般的な人間活動を対象に設定する。

人為事象シナリオは、廃棄物埋設地の掘削による放射性物質の廃棄物埋設地からの漏えい、天然バリア中の移行及び当該掘削後の土地利用を考慮して評価する。人為事象シナリオでは、廃棄物埋設地からの放射性物質の移行を考慮せず、廃棄物埋設地に放射性物質が残留することを想定しているため、確からしい設定及び厳しい設定に基づく線量評価パラメータは用いていない。人間活動である地下数階を有する建物の建設作業に関しては、わ

が国で想定される建物を考慮して、線量評価パラメータを設定する。本シナリオでは、敷地及びその周辺の社会環境を十分に勘案し、人為事象として一般的に生じるとは考えられない人間活動を対象に設定する。ただし、敷地周辺の自然環境及び社会環境を考慮した際に、発生の可能性が無視し得るほど小さい人間活動は対象としない。

確からしい自然事象シナリオ、厳しい自然事象シナリオ及び人為事象シナリオで考慮する様々な線量評価シナリオについて、計算するまでもなく明らかに線量が小さいもの、他の線量評価シナリオに比べて明らかに線量が小さいもの及び類似した他の線量評価シナリオで代表されるものを除外し、代表となる線量評価シナリオを設定する。

これらにより、各線量評価シナリオを表現する線量評価モデル及び状態設定に応じた線量評価パラメータを設定して線量を評価する。

(i) 状態設定

線量評価シナリオの設定に当たって、人工バリア及び天然バリアの機能並びに被ばく経路等に影響を与える自然現象及び土地利用による人間活動を考慮した上で、「地質環境に係る長期変動事象」、「生活環境」及び「廃棄物埋設地」のそれぞれについて、確からしい状態及び厳しい状態を設定(以下「状態設定」という。)する。状態設定を行う期間は、主要な放射性物質の半減期、放射エネルギー及び放射能濃度を踏まえ、1,000年程度までの期間とする。また、廃棄物埋設地及びその周辺の状態変化は緩慢であり、1,000年から10,000年の期間において、侵食等の自然現象によって廃棄物埋設地に著しい状態変化が生じることは想定されないことから、以降は1,000年後と同じ状態が継続するものと設定する。

- a. 地質環境に係る長期変動事象(詳細は補足説明資料1「2. 地質環境に係る長期変動事象の考え方」、「3. 状態設定」参照)

埋設設備を設置する地下の環境は、自然現象の影響を受け難いことから、地上に比べ比較的安定である。

しかし、長期的な観点で見ると、プレート運動及び気候変動によって、廃棄物埋設地を取り巻く地質環境は有意に変化することが予測される。

この地質環境に係る長期変動事象について、「プレート運動に起因する事象」、「気候変動に起因する事象」及び「プレート運動と気候変動の両者に起因する事象」に区分する⁽³⁾。区分した各事象については、プレート運動や気候変動が過去から現在までの変動傾向とその要因が今後も継続するとみなし、それらを外挿して状態設定を行う。

状態設定のうち、最も可能性が高いと考えられる状態を確からしい設定とする。

(a) プレート運動に起因する事象

日本周辺には、大陸プレートであるユーラシアプレート及び北米プレート並びに海洋プレートであるフィリピン海プレート及び太平洋プレートがあり、大陸プレートの下に海洋プレートが沈み込んでいる。敷地の位置する東北日本弧は北米プレートに位置し、東側から太平洋プレートが沈み込むことで、おおむね東西方向の圧縮の力が生じている。

将来の日本列島周辺のプレート運動についても、今後数十万年から数百万年程度継続すると考えられる⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。したがって、状態設定においては、現在のプレート運動が継続するものとして設定する。

プレート運動に起因する事象には、「火山・火成活動」、「地震・断層活動」及び「隆起・沈降運動」があげられる。

(一) 火山・火成活動

火山・火成活動によって、直接的に廃棄物埋設地が損傷すること、また、敷地周辺が高温になることによって地下水流動場が変化することが想定されることから、火山・火成活動による状態設定を行う。覆土完了までの間において、廃棄物埋設地に影響を及ぼす可能性がある火山・火成活動は降下火砕物だけであるが、長期変動事象としては、降下火砕物に加えて、火砕物密度流についても検討する。

(7) 降下火砕物

覆土完了後については、降下火砕物が堆積することにより、降下火砕物に含まれる成分によって地下水の水質変化が生じることが想定されるため、化学的影響について考慮する。

(イ) 火砕物密度流

数百年から数千年スケールには、敷地に到達する可能性は十分に小さいため⁽⁷⁾、火砕物密度流の熱的影響及び化学的影響は長期変動事象として考慮する必要はない。

(二) 地震・断層活動

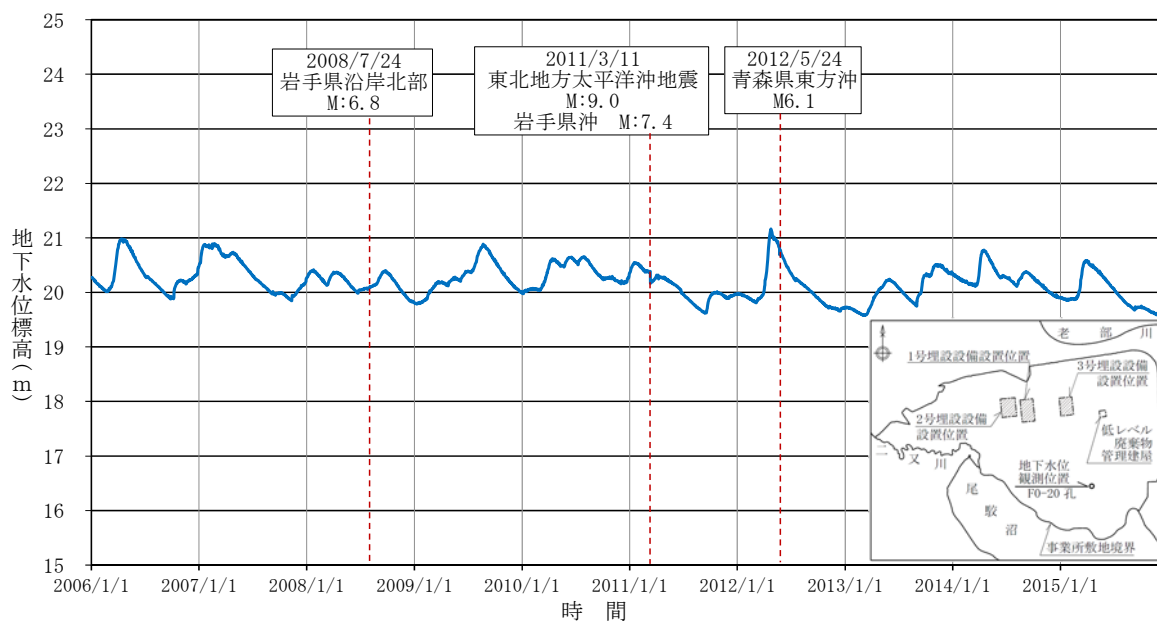
地震・断層活動については、現在のプレート運動が継続するとされていることから、将来も同様の場所で繰り返し発生すると想定する。

(7) 地震

補足説明資料1「3. (1) (ii) a. 地震」のうち「敷地周辺の被害地震の震央分布」及び「敷地周辺の被害地震のマグニチュード-震央距離」から、敷地付近は、M6を超える地震の発生はなく、震度5強を超える地震の発生もない地域である。

覆土(難透水性覆土及び下部覆土)に力学的な変形が生じることによって、低透水性に影響が生じるおそれがあるため、廃棄物埋設地の状態設定において影響を評価する。

敷地内における観測孔において、震度4程度の地震時における地下水位の変動が確認されている(第2図参照)。観測結果によると、震度4程度の地震において地下水位の変動は小さく、季節変動に内包される程度であった。したがって、地震活動による水理的影響は小さく、一時的なものであることから、長期変動事象として考慮しない。



第2図 地下水位観測結果(F0-20孔)

(イ) 断層活動(地盤の変形)

断層活動に伴う地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊されることが想定される。

空中写真判読結果及び地質調査から、活断層は廃棄物埋設地付近には分布しておらず、最も近い活断層は、敷地近傍の六ヶ所村出戸付近に分布する出戸西方断層である。出戸西方断層は、西傾斜の逆断層であり、その長さを約11kmと評価している。しかし、敷地には、出戸西方断層に起因する変動地形及びリニアメント並びに出戸西方断層に関連した地質構造は確認されていない。したがって、今後も地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊される可能性は十分低い。

出戸西方断層以外の活断層については、廃棄物埋設地から更に離れており、断層活動があったとしても、廃棄物埋設地には力学的影響は及ばない。

以上より、今後も地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊される可能性は十分低いと、断層活動による廃棄物埋設地への影響については、考慮する必要はない。

(ウ) 液状化(覆土)

覆土(難透水性覆土及び下部覆土)が液状化することによって、低透水性に影響が生じるおそれがあるため、廃棄物埋設地の状態設定において影響を評価する。

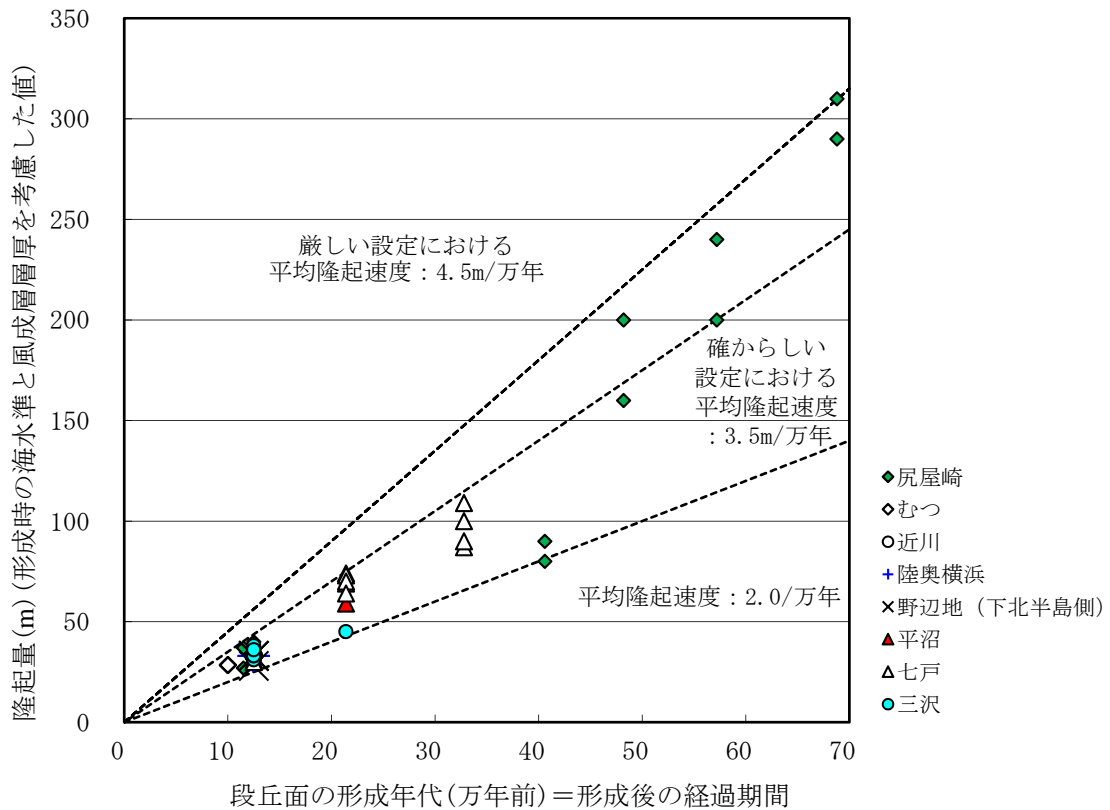
(三) 隆起・沈降運動

隆起・沈降運動は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、地形勾配の変化や侵食基準面から廃棄物埋設地までの比高の変化に伴い侵食・堆積環境が変化する。侵食・堆積環境の変化により、地下水流動に影響すること、また、埋設設備が地表に接近する可能性があることから、隆起・沈降運動を長期変動事象として考慮し、隆起・沈降運動の速度を設定する。

敷地の位置する下北半島付近には、過去約70万年間に形成された海成段丘が分布することから、敷地及びその周辺は、少なくとも同期間において大局的には隆起域と考えられる。小池・町田(2001)⁽⁸⁾から、下北半島周辺の海成段丘面の形成年代と旧汀線高度及び相対海水準等を考慮した隆起量について整理したものを第3図に示す。下北半島周辺の過去約70万年間の平均隆起速度は、2.0m/万年

～4.5m/万年である。

以上より、敷地周辺の海成段丘に基づき求めた平均隆起速度である3.5m/万年を確からしい設定とする。また、下北半島周辺の隆起速度のばらつきを考慮し、隆起速度が最も大きい4.5m/万年を厳しい設定とする。



注1：段丘面の形成年代及び隆起量は、小池・町田(2001)⁽⁶⁾に基づき作成。

第3図 下北半島の海成段丘面の形成年代と隆起量の関係

(b) 気候変動に起因する事象

気候変動は、数十万年前から現在まで約 8 万年周期から約 12 万年周期で氷期と間氷期を繰り返している⁽⁹⁾ことから、大局的には将来もこの周期の気候変動を繰り返すと考えられる。過去の気候変動の傾向から、今後氷期へ向かうと考えられることから⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、将来は寒冷化すると予測される。

一方で、人間活動に伴う温室効果ガス排出により、温暖化が進行する可能性があるとする報告⁽⁹⁾や、現在の温室効果ガス濃度を基準として、炭素循環のメカニズムを仮定した気候シミュレーションにより、将来 5 万年程度は温暖期が継続する可能性があるとする報告もある⁽¹²⁾。

以上のことから、気候変動に起因する事象に係る長期変動事象の状態設定については、過去の気候変動と同様に現在から寒冷化に向かう場合(以下「寒冷化ケース」という。)と、温暖期が数万年程度継続する場合(以下「温暖期継続ケース」という。)の 2 ケースに大別し、これらの 2 ケースについて、それぞれ「気温・降水量変化」及び「海水準変動」の長期変動事象として考慮する⁽³⁾。

(一) 気温・降水量変化

気温・降水量変化は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、気温・降水量の変化により表層での水収支の変化に伴って地下水流動及び表流水流動が変化することが想定される。これらのことから、気温変化及び降水量変化を長期変動事象として考慮し、将来の気温及び降水量を設定する。

(7) 気温変化

将来の気温変化については、花粉化石及び南極氷床コアの水素同位体比を用いた過去の気温の推定に関する知見⁽⁹⁾及び人間活動による温室効果ガス濃度を考慮した気温変動予測結果に基づいて設定する。

花粉化石は、Yamanaka et al. (1990)⁽¹³⁾で取得されている下北半島の北部の尻屋崎湿原における最終氷期最盛期頃の花粉化石群集データ及び敷地近傍の尾駁沼の沖積層堆積物における過去約 1 万年間の花粉化石群集データを用いた。

花粉化石を用いた過去の気温の推定方法は、松末ほか(2000)⁽¹⁴⁾の手法及び Nakagawa et al. (2002)⁽¹⁵⁾の手法を用いた。

① 寒冷化ケースにおける気温設定

寒冷化ケースにおいては、氷期最盛期の年平均気温から求めた気温変動割合を用いて将来の気温を設定する。

松末ほか(2000)⁽¹⁴⁾及びNakagawa et al. (2002)⁽¹⁵⁾の手法により下北半島付近の最終氷期最盛期の年平均気温を推定すると、それぞれ約 -2.2°C と約 3.7°C であった(第4図参照)。このことから、将来の寒冷化ケースの年平均気温の確からしい設定は、両手法の平均的な値から 0°C とする。

また、将来の氷期最盛期の年平均気温の厳しい設定は、松末ほか(2000)⁽¹⁴⁾における現在と過去の氷河期の気温差の最大値が 13°C であったことから、敷地周辺における1975年～2015年の年平均気温の最低値である 8°C から 13°C を低下させた -5°C となるが、降水量の不確かさを考慮した方が希釈水量は少なくなるため、気温の不確かさを考慮せず、確からしい設定の気温である 0°C と設定する。

氷期最盛期に至るまでの気温変化については、過去約45万年間の連続的なデータが取得されている南極氷床コアの水素同位体比⁽⁹⁾に基づいて整理された年平均気温の変化量の変動グラフを用いて設定する。

確からしい設定における将来の気温の変動曲線を第5図に、厳しい設定における将来の気温の変動曲線を第6図にそれぞれ示す。同図から、確からしい設定時は約8万年後に氷期最盛期になると想定し、厳しい設定時は約6万年後の氷期最盛期になると想定する。

② 温暖期継続ケースにおける気温設定

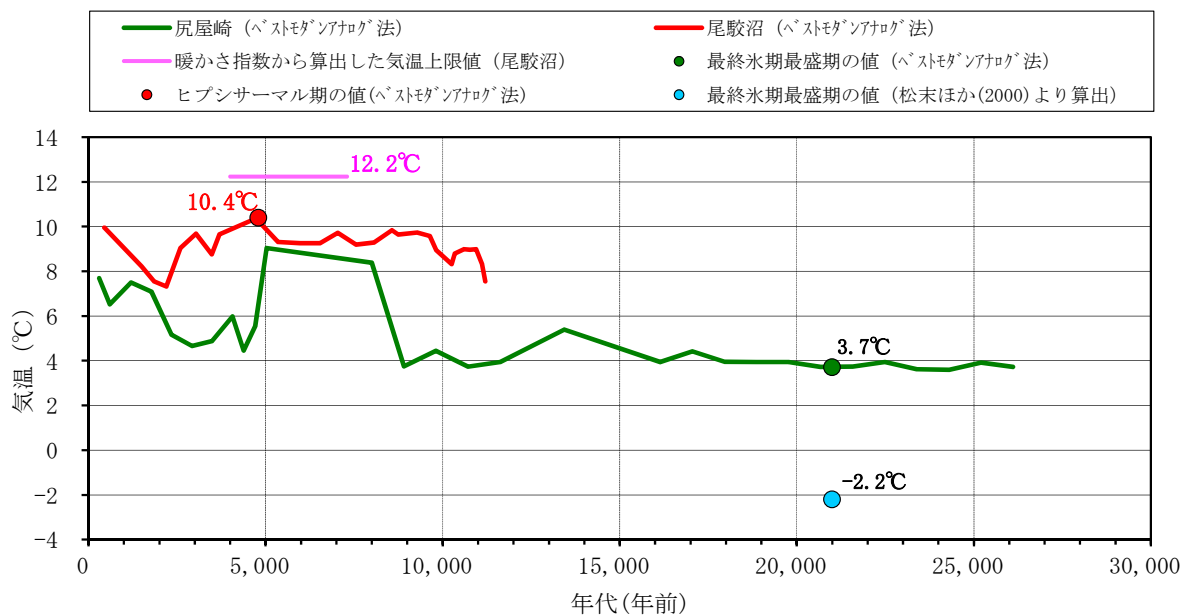
温暖期継続ケースにおいては、温暖期における最高気温のみ設定し、その気温が現在から継続すると想定する。

尾駁沼の沖積層堆積物から過去約1万年間の花粉化石群集データを取得し、そのデータを用いて松末ほか(2000)⁽¹⁴⁾の手法及びNakagawa et al. (2002)⁽¹⁵⁾の手法により敷地周辺のヒプシサーマル期の年平均気温を推定すると、それぞれ約 12.2°C と約 10.4°C であった(第4図参照)。

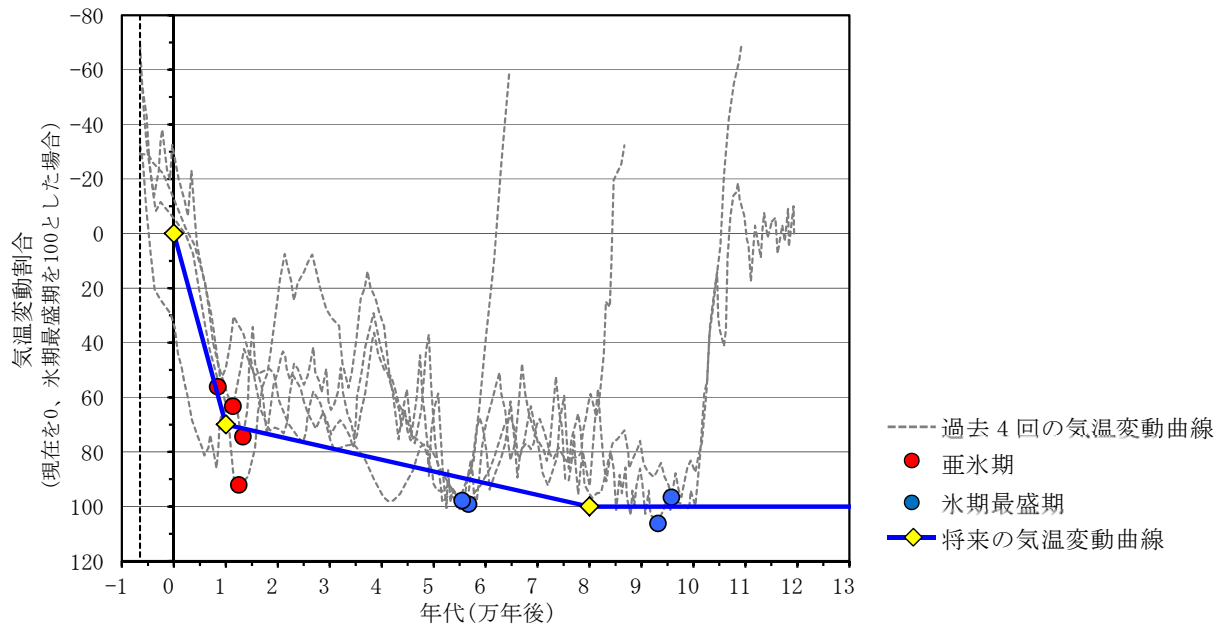
一方、人間活動による温室効果ガス濃度を考慮したシミュレーション結果によれば、2090年～2099年には世界平均で現在より 0.3°C ～ 6.4°C 上昇する可能性が指摘されている⁽¹⁵⁾。過去30年間の敷地周辺の年平均気温である

9°Cにシミュレーション結果の平均的な上昇値である3°Cを加えた12°Cを確からしい設定とする。この値は、花粉化石群集データより推定した12.2°Cと整合している。

また、厳しい設定においては、過去30年間の敷地周辺の年平均気温である9°Cにシミュレーション結果のほぼ最大上昇値である約6°Cを加えた15°Cとなるが、降水量の不確かさを考慮した方が希積水量は少なくなるため、気温の不確かさを考慮せず、厳しい設定には確からしい設定の気温である12°Cと設定する。

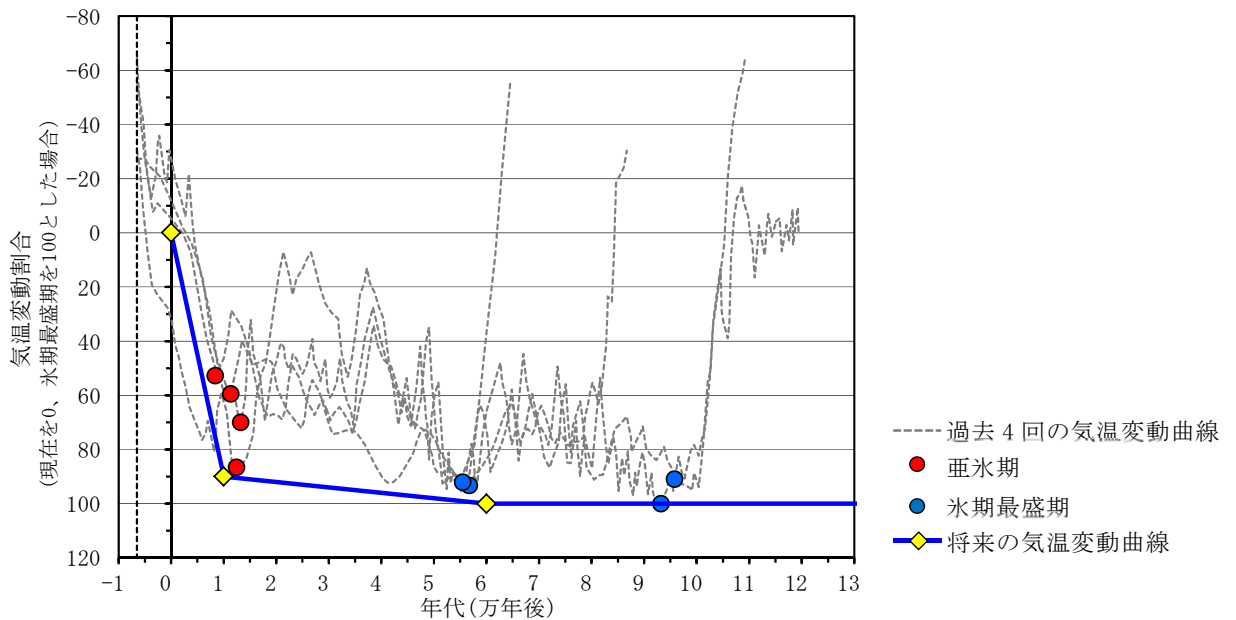


第4図 花粉分析による過去26,000年間の気温変動



注1：気温変動曲線はEPICA(2004)⁽⁹⁾に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。

第5図 将来の気温の変動曲線(寒冷化ケース・確からしい設定)



注1：気温変動曲線はEPICA(2004)⁽⁹⁾に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。

第6図 将来の気温の変動曲線(寒冷化ケース・厳しい設定)

(イ) 降水量変化

気温と降水量との関係には、正の相関がある⁽¹⁶⁾。また、地形や海流等の気候因子も降水量と相関がある。そこで、将来の降水量の設定に当たっては、敷地周辺と気候因子が類似する地点の気温と降水量の関係に基づき、将来の気温に対応する降水量を設定する。将来の気温は、「(ア) 気温変化」で設定した気温を用いる。

敷地周辺と気候因子が類似する地点の現在の気温と降水量の関係を求める。気候因子が類似する地点の判断に使用した項目は以下のとおりである。

- ① 北半球の太平洋側西部に位置すること。
- ② アリソフの気候区分が亜極帯～寒帯であること。
- ③ 沿岸海流が寒流であること。
- ④ 陸度(半径 50km 円内の陸域の占める割合)が 1/10～9/10 であること。
- ⑤ 開放度(半径 15km 円内で対象地点より標高が 200m 以上高い範囲を除く角度)が 240° ～360° であること。

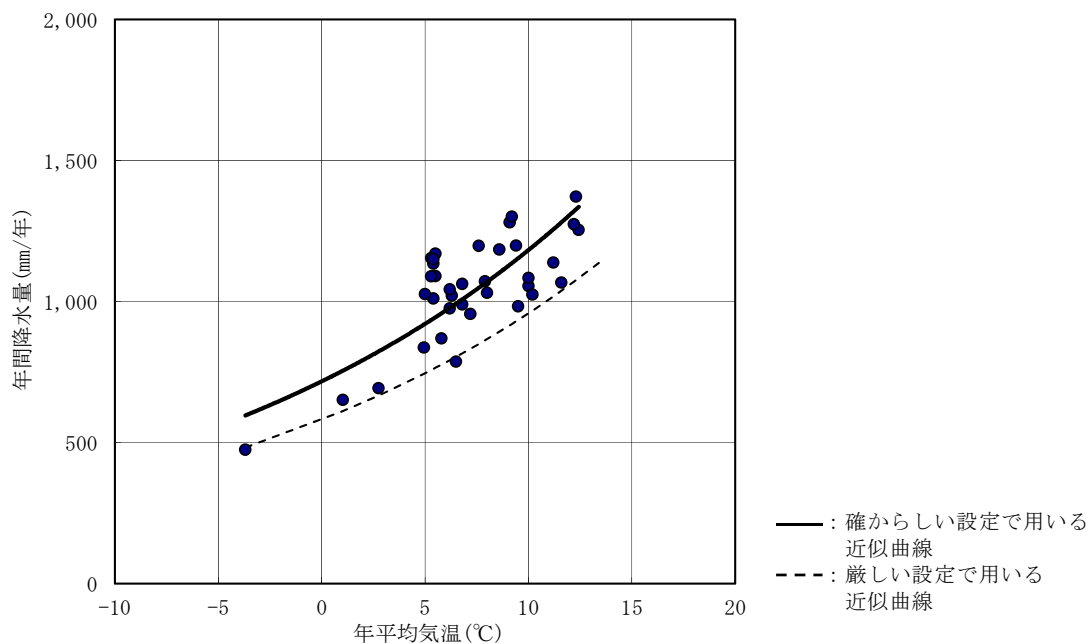
上記条件で抽出された地点のうち、過去 30 年以上の気象データの存在する 36 地点の年平均気温と年降水量を整理した(第 2 表参照)。

36 地点の気温と降水量の関係(第 7 図参照)を指数回帰式で表し、確からしい設定においてはこの指数回帰式を用いて降水量を設定する(第 3 表参照)。また、厳しい設定については気温と降水量の関係のばらつきを考慮して降水量を設定する(第 3 表参照)。

第2表 敷地周辺と類似する気候因子をもつ地点の気温と降水量

No.	地点名	国名	年平均気温(°C)	年降水量(mm/y)
1	OKHOTSK	RUSSIAN FED.	-3.7	475
2	VLADIVOSTOK	RUSSIAN FED.	5.0	837
3	ALEKSANDROVSK-SAKHALINSKII	RUSSIAN FED.	1.0	651
4	NIKOL' SKOJE (OSTROV BERINGA)	RUSSIAN FED.	2.8	693
5	稚内	JAPAN	6.8	1,063
6	網走	JAPAN	6.5	788
7	別海	JAPAN	5.4	1,135
8	根室	JAPAN	6.3	1,021
9	厚床	JAPAN	5.3	1,154
10	榑町	JAPAN	5.4	1,011
11	太田	JAPAN	5.5	1,170
12	白糠	JAPAN	5.5	1,090
13	釧路	JAPAN	6.2	1,043
14	池田	JAPAN	5.8	870
15	浦幌	JAPAN	6.2	976
16	糠内	JAPAN	5.0	1,026
17	大津	JAPAN	5.3	1,090
18	大樹	JAPAN	5.4	1,150
19	苫小牧	JAPAN	7.6	1,198
20	鶴川	JAPAN	6.8	989
21	室蘭	JAPAN	8.6	1,185
22	日高門別	JAPAN	7.2	956
23	静内	JAPAN	8.0	1,032
24	浦河	JAPAN	7.9	1,072
25	小田野沢	JAPAN	9.1	1,281
26	三沢	JAPAN	10.0	1,056
27	十和田	JAPAN	9.5	983
28	八戸	JAPAN	10.2	1,025
29	三戸	JAPAN	10.0	1,084
30	種市	JAPAN	9.4	1,198
31	鹿島台	JAPAN	11.2	1,138
32	石巻	JAPAN	11.6	1,067
33	仙台	JAPAN	12.4	1,254
34	亶理	JAPAN	12.2	1,274
35	相馬	JAPAN	12.3	1,373
36	六ヶ所	JAPAN	9.2	1,301

注1：気温及び年降水量は気象庁の発表⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾に基づき作成。



注1：36地点の年降水量及び年平均気温は、気象庁のデータ⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾を使用した。

第7図 敷地周辺と類似した気候因子を持つ36地点の年平均気温と年間降水量の関係

第3表 将来想定される気温、降水量、蒸発散量及び表流水流量

ケース	モデル化時期	気温(°C)	降水量 (mm/y)	蒸発散量 (mm/y)	表流水流量 (m ³)
確からしい設定	現在 ^{*1}	9	1,120	580	1.3×10 ⁷
	1,000年後	8	1,070	560	1.2×10 ⁷
厳しい設定	現在 ^{*1}	9	910	580	8.0×10 ⁶
	1,000年後	8	860	560	7.2×10 ⁶

*1：覆土完了時期までを表す(以降、第5表まで同様)。

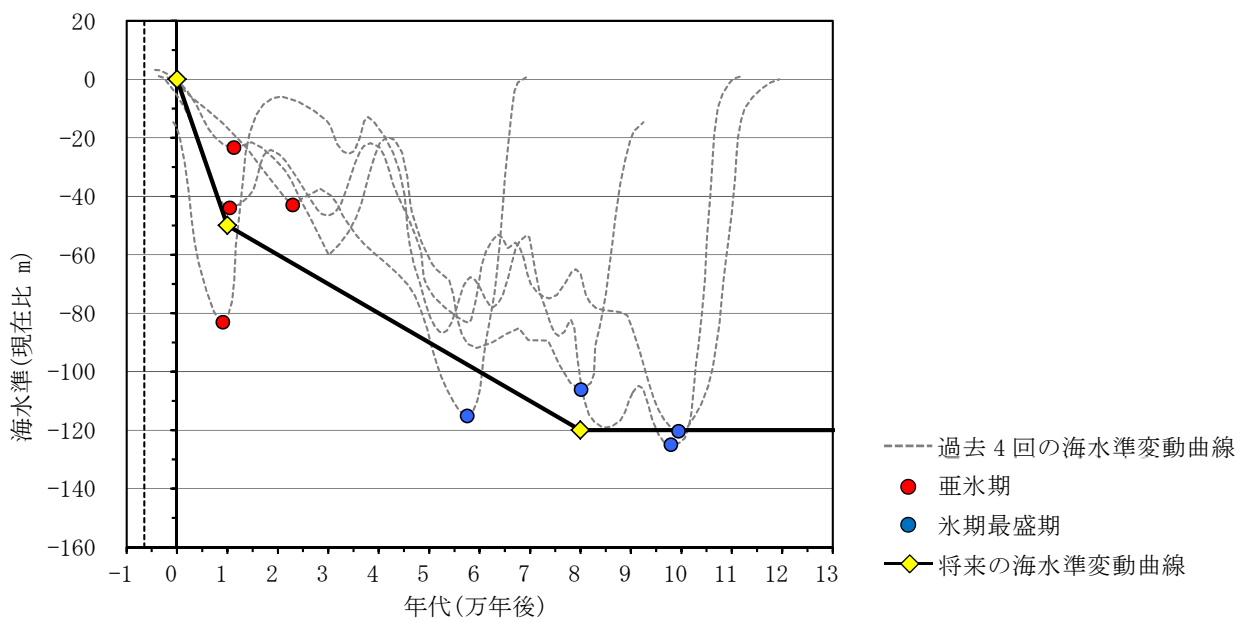
(二) 海水準変動

海水準変動は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、海水準変動が生じると、敷地及びその周辺における河川、湖沼及び海の分布域が変化し、将来の人の生活環境及び生活様式に影響を及ぼすことが想定される。また、海水準変動及びそれに伴う地形変化並びに地下水位及び地表水流動の変化が想定されるため、海水準変動を長期変動事象として考慮し、寒冷化ケース及び温暖期継続ケースにおける海水準の変動時期及び変動量を設定する。

(7) 寒冷化ケースにおける海水準の設定

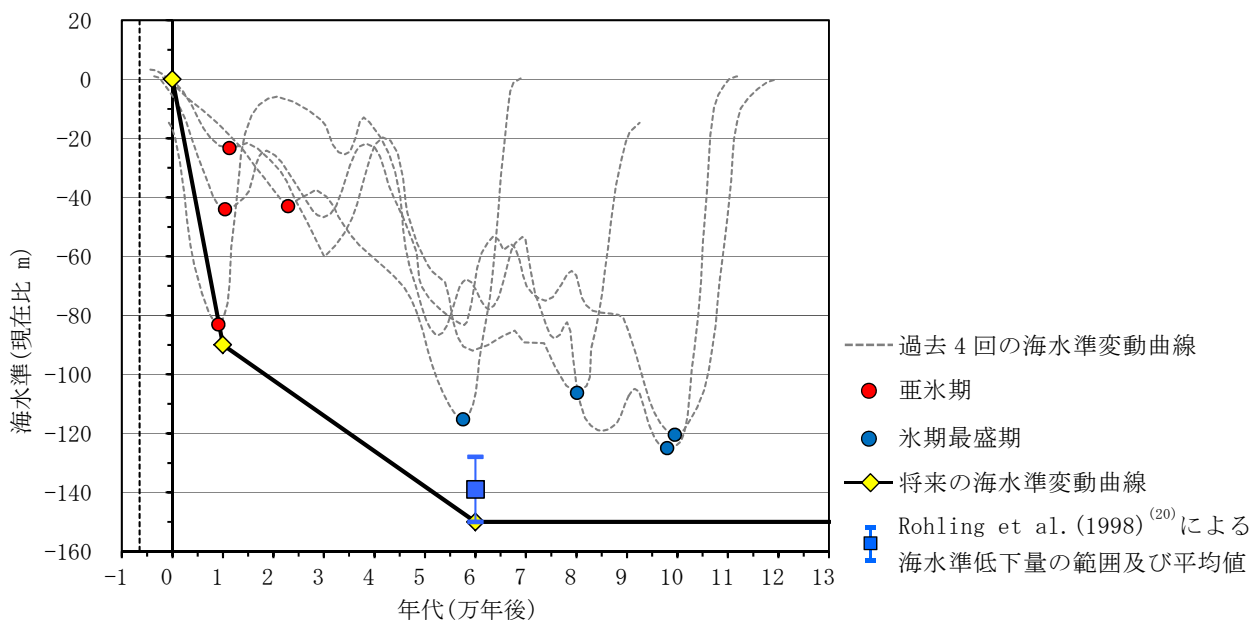
世界的な海水準変動は、気候変動に伴う大陸氷床の拡大・縮小に伴って生じる現象と考えられており、過去の海水準変動は気候変動と同様に、約8万年周期から約12万年周期で低海水準期と高海水準期を繰り返している⁽¹⁹⁾。

したがって、海水準変動の長期変動状態の設定のうち、寒冷化ケースにおける将来の氷期最盛期に至るまでの海水準変動は、気温変動と同様に、過去約45万年間の低海水準期と高海水準期の変動幅⁽¹⁹⁾を考慮して設定する。第8図に将来の海水準の変動曲線(確からしい設定)、第9図に将来の海水準の変動曲線(厳しい設定)を示す。



注1：海水準変動曲線はLabeyrie et al (2003)⁽¹⁹⁾に示される酸素同位体比による海水準の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。

第8図 将来の海水準の変動曲線(確からしい設定)



注1：海水準変動曲線はLabeyrie et al (2003)⁽¹⁹⁾に示される酸素同位体比による海水準の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。

第9図 将来の海水準の変動曲線(厳しい設定)

(イ) 温暖期継続ケースにおける海水準の設定

過去 300 万年間の温暖期における海面水位は、世界平均で現在より 5m 上回っており、最終間氷期(約 12.9 万年前～約 11.6 万年前)の数千年にわたっては、現在より海面水位が 5m より高く、10m 以上は高くなかったという報告がある⁽²¹⁾。この結果を参考に、温暖期継続ケースにおける海水準変動は、不確実性を考慮して現在の海水準より 10m 海水準が上昇し、継続すると設定する。

なお、温暖期継続ケースにおける海水準の設定に当たっては、確からしい設定において不確実性を考慮していることから、確からしい設定と厳しい設定は同様の設定値とする。海水準変動の状態設定結果を第 4 表に示す。

第 4 表 海水準変動の設定値

ケース	モデル化時期	海水準(現在比 : m)
確からしい設定	現在*1～1,000 年後	10
厳しい設定	現在*1～1,000 年後	10

*1:覆土完了時期までを表す(以降、同様)

(c) プレート運動と気候変動の両者に起因する事象

プレート運動と気候変動の両者に起因する事象は、「地形変化」、「地下水流動」及び「表流水流動」を対象とする⁽³⁾。気候変動に起因する事象に係る長期変動事象の状態設定と同様に、寒冷化ケースと温暖期継続ケースの 2 ケースについて、それぞれ「地形変化」、「地下水流動」及び「表流水流動」の長期変動事象として考慮する。

(一) 地形変化

「(a) プレート運動に起因する事象 (三) 隆起・沈降運動」及び「(b) 気候変動に起因する事象 (二) 海水準変動」に伴い、侵食作用が継続することによる廃棄物埋設地の侵食に伴う埋設設備の地表接近及び露呈並びに放射性物質を含んだ土砂の下流域への堆積が想定される。そのため、地形変化を長期変動事象として考慮し、侵食速度を設定する。

侵食は、沿岸部における沿岸流と波浪等による侵食(以下「海食」という。)と、

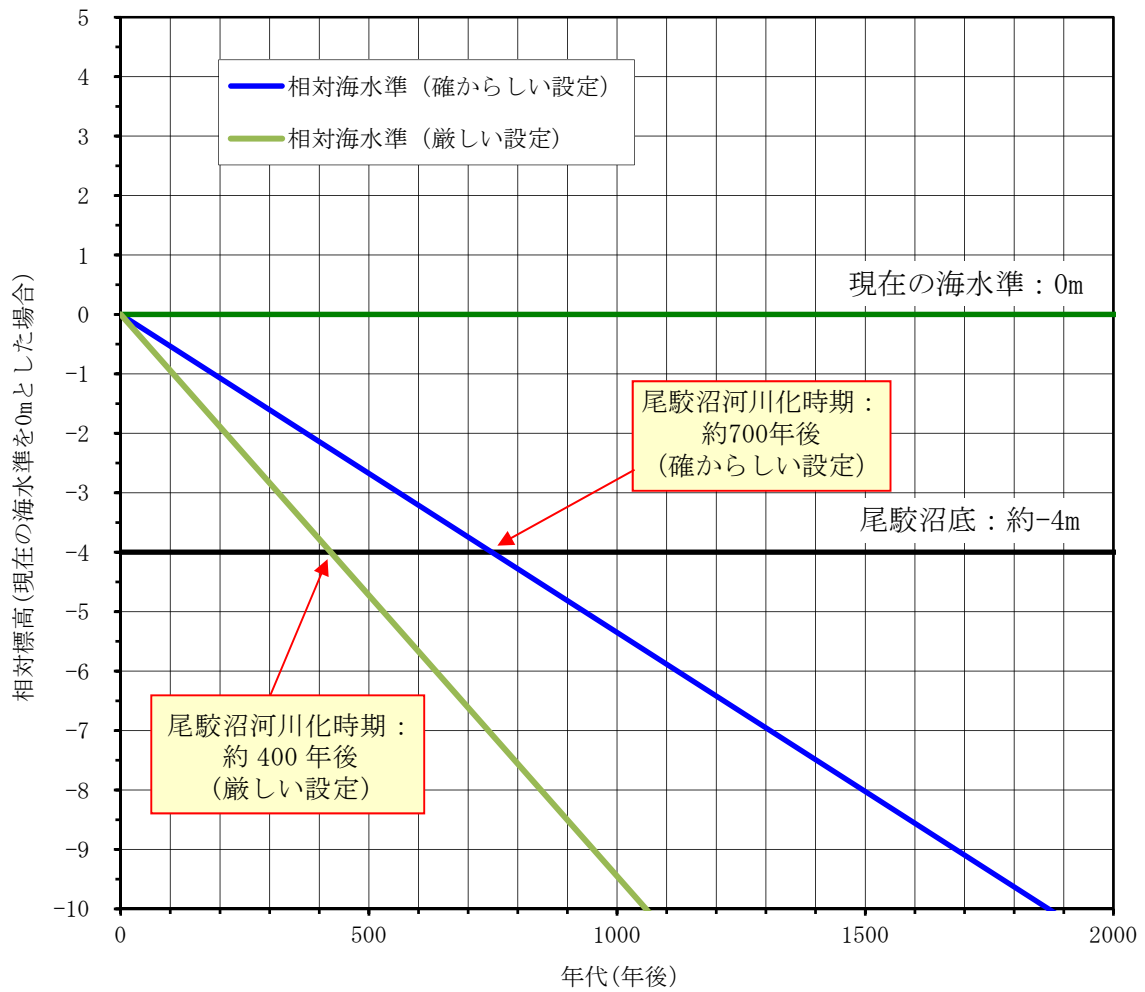
河川及び沢部における表流水による侵食(以下「河食」という。)が想定される。

敷地東方の沿岸部汀線付近では海食が生じているが、廃棄物埋設地は現在の汀線から内陸に約 3km 離れており、十分な離隔がある。仮に温暖期の海進により尾駮沼が内湾となっても、海食による影響は生じないものと考えられる。

敷地及び敷地近傍の沢部においては第四紀層及び基盤である鷹架層が削剥されており、河食が生じていると考えられる。廃棄物埋設地付近は二又川の流域であることから、二又川及び敷地から二又川に流れ込む沢による河食を考慮する。

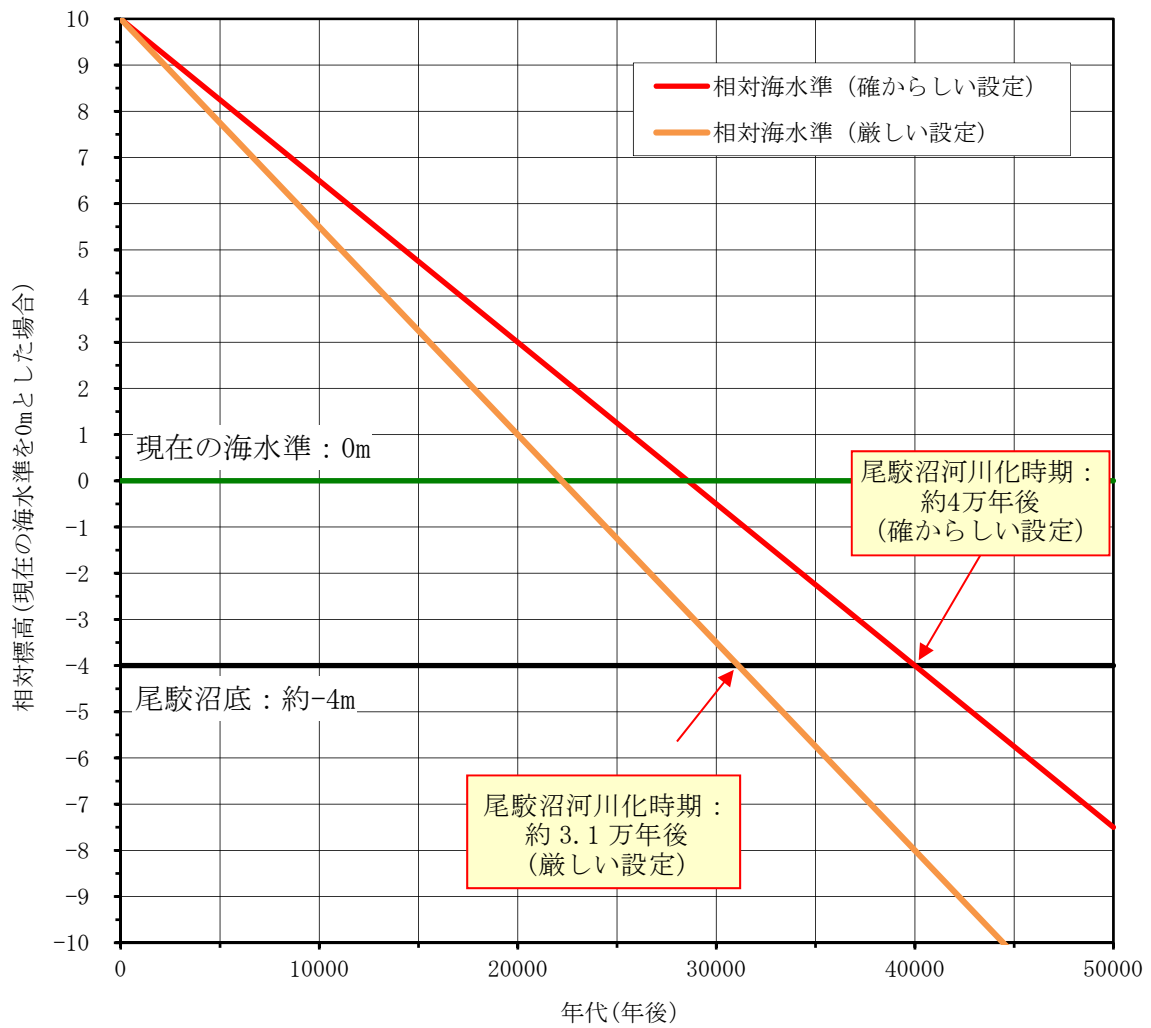
なお、敷地及び敷地近傍における台地と河川及び沢との位置関係等の大局的な地形状況は、数万年程度の将来において大きく変化することはなく、流域ごとの沢の縦断勾配及び横断形状を保って河食が進むと想定する。

隆起量を考慮した海水準(以下「相対海水準」という。)の低下に伴い、尾駮沼が河川化すると設定する(第 10 図及び第 11 図参照)。



注1：尾駮沼底の標高は、国土地理院発行2万5千分の1地形図「戸鎖」を参照。

第10図 寒冷化ケースにおける尾駮沼の河川化時期の予測
(確からしい設定・厳しい設定)



注 1：尾駁沼底の標高は、国土地理院発行 2 万 5 千分の 1 地形図「戸鎖」を参照。

第 11 図 温暖期継続ケースにおける尾駁沼の河川化時期の予測
(確からしい設定・厳しい設定)

(7) 侵食速度

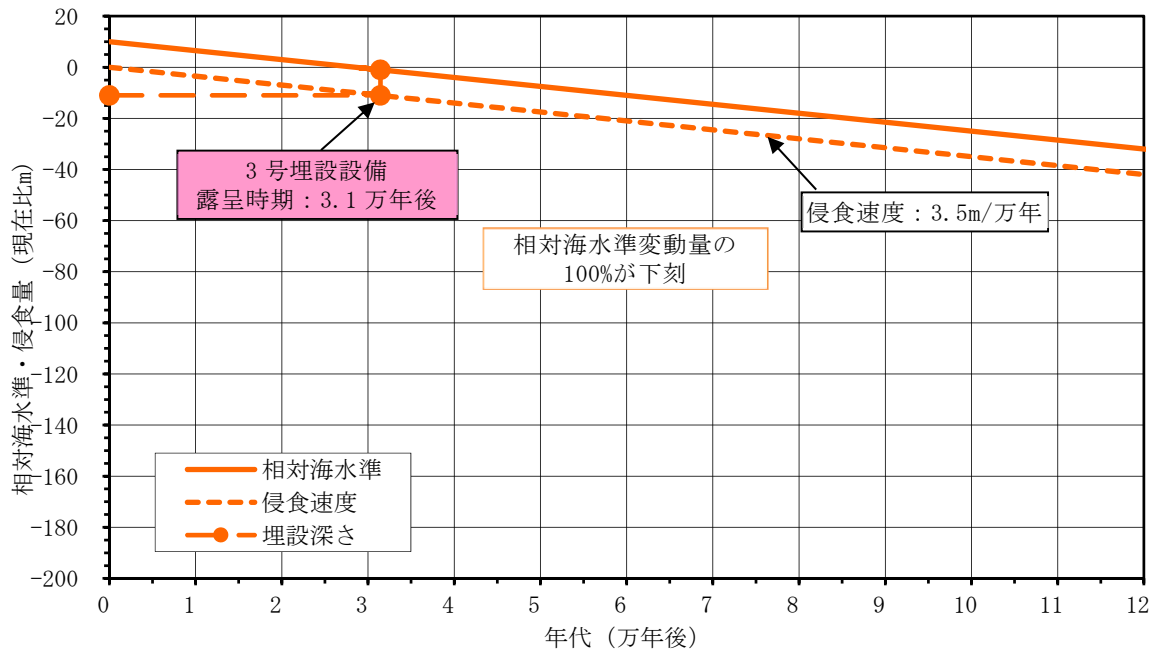
寒冷化ケースでは、沖積層の基底面の勾配を保ち、敷地の隆起に伴う相対海水準の低下による下方への侵食(以下「下刻」という。)が生じると想定する。したがって、寒冷化の当初は勾配の緩い下流部に堆積した沖積層の上限面から下刻することとなり、沖積層の下刻後は河床勾配と海退量との関係から下刻量が求められる。沖積層の下刻に数万年を要し、それまでの期間、鷹架層の下刻は発生しない。

温暖期継続ケースでは、現在の河床勾配を保ち、相対海水準低下に伴った下刻が生じると設定する。ここでいう温暖期継続ケースにおける相対海水準低下速度は、「(b) 気候変動に起因する事象 (二) 海水準変動」において、海水準変動を現在から将来にわたり、現在の海水準より一律で 10m 上昇すると設定したことから、「(a) プレート運動に起因する事象 (三) 隆起・沈降運動」で設定した隆起速度相当と設定する。

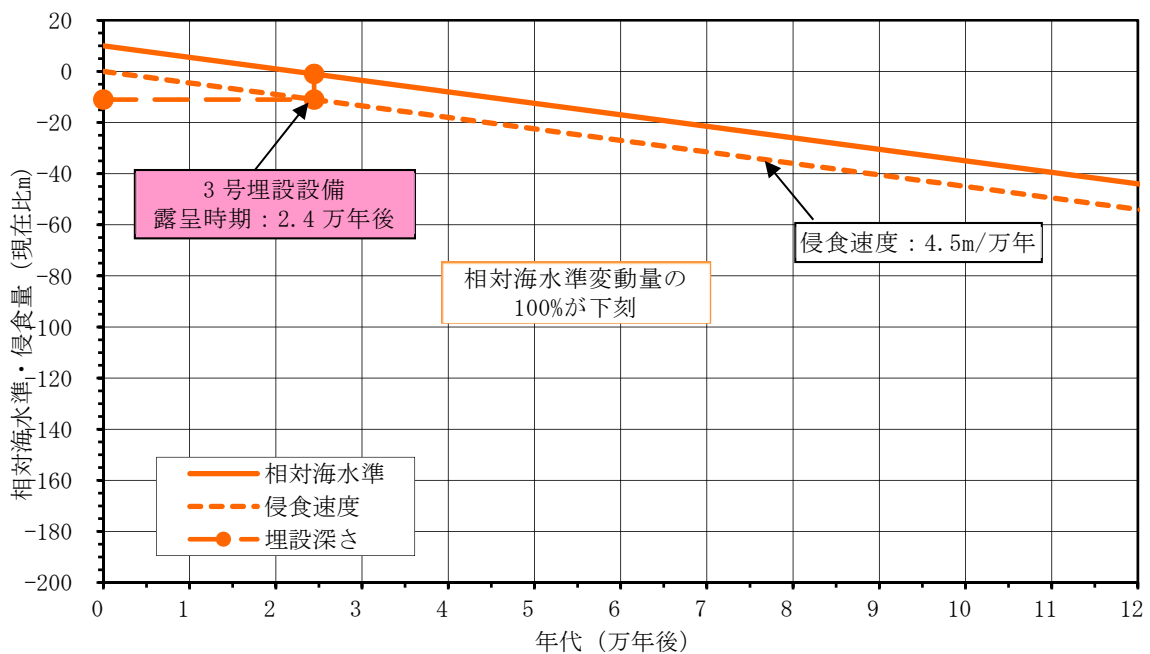
廃棄物埋設地周辺には、中央沢、南の沢、西の沢及びそれらの枝沢が分布する。枝沢は本流の沢に流れ込むことから、本流の沢との合流点が侵食基準面となる。枝沢の侵食基準面は本流が侵食されることで低下するため、本流の侵食速度と同等の速度で枝沢も侵食される。したがって、枝沢における侵食速度は、本流の沢の寒冷化ケース及び温暖期継続ケースの侵食速度と同じと設定する。

(イ) 露呈時期

埋設設備の露呈時期は、最も早くても数万年後(第 12 図及び第 13 図参照)となるため、評価期間を踏まえると、埋設設備の露呈時期の状態設定については、考慮しないものとする。



第12図 温暖期継続ケース確からしい設定における侵食量と埋設設備の露呈時期



第13図 温暖期継続ケース厳しい設定における侵食量と埋設設備の露呈時期

(二) 地下水流動

地下水流動は単独事象としては廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、地形変化や海水準変動による地下水流動の変化が、地下水の流動方向、地下水の流出点、地下水流速及び埋設設備から上部覆土や鷹架層への流出水量に影響する。

(ア) 地下水の流動方向及び地下水の流出点

補足説明資料7「2. (1) 事業所敷地周辺の地形と水系及びかん養」に示すとおり、敷地は北西から南東に緩く傾斜する台地からなり、地下水は主に降水によってかん養されている。また、台地の地下水面は降雨時及び融雪時に変動が認められるものの、主に表層に分布している第四紀層内にある。これは、鷹架層の透水係数が廃棄物埋設地周辺の第四紀層より約2桁小さく、地表面から浸透した雨水が容易に鷹架層に浸透できないためと考えられる。埋設設備は鷹架層を掘り下げて設置し、難透水性覆土及び下部覆土は鷹架層の透水係数以下となるように設置する。また、上部覆土は廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数程度となるように設置し、原地形及び原水理地質構造に近くなることから、覆土後の地下水面は、原地形と同様に廃棄物埋設地周辺の第四紀層内にあると考える。したがって、廃棄物埋設地付近を通過した地下水は、補足説明資料7「2. (2) (i) 地下水位」のうち「地下水面標高等高線図(1986年)」に示す原地形の地下水面等高線図から読み取れる地下水の流動方向と同様に、主に南に向かって流れ、中央沢を経て尾駮沼に流入すると考える。「(一) 地形変化」に示すとおり、1,000年後の将来の地形は現状とほぼ同様と考えられるため、将来においても廃棄物埋設地を通過した地下水は南に向かって流れ、中央沢を経て尾駮沼に流入すると考える。

(イ) 地下水流速

廃棄物埋設地付近の鷹架層及び上部覆土中の地下水流速は、その位置の動水勾配及び透水係数により設定する。

① 動水勾配

廃棄物埋設地付近の地下水流動は、「(ア) 地下水の流動方向及び地下水の流出点」に示すとおり、覆土後1,000年程度までの間は、原地形の地下水流動と同様になると想定し、間隙水圧測定実施位置を通る鉛直断面内の全水

頭等高線図から求めた埋設設備設置地盤付近の動水勾配に基づき設定する(第5表参照)。

② 透水係数

鷹架層及び上部覆土の透水係数は、プレート運動と気候変動の両者に起因する事象では影響を受けない。

(ウ) 埋設設備から上部覆土や鷹架層への流出流量

埋設設備から上部覆土や鷹架層への流出流量は、地下水浸透流解析により算定する。浸透流解析には、覆土や地盤の透水係数及び境界条件として動水勾配を用いる。動水勾配は、「① 動水勾配」に示す値とする。

第5表 将来の動水勾配

廃棄物埋設地	ケース	モデル化時期	動水勾配設定値(%)
3号廃棄物埋設地	確からしい設定	現在～	5
	厳しい設定	1,000年後	8

(三) 表流水流動

表流水流動は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、河川及び湖沼の表流水流量の変化によって放射性物質の希釈水量が変化することが想定される。これらのことから、地表水流動を長期変動事象として考慮し、河川及び湖沼の表流水流量を設定する。また、表流水流量を設定するために、蒸発散量についても設定する。

(7) 蒸発散量

蒸発散量は、年平均気温を用いて可能蒸発散量として推定するソーンスウェイト法⁽²²⁾により求める(第6表)。

一方、地下水は主に降水によってかん養され、第四紀層及び鷹架層表層部の風化部を流れ、中央沢を経て尾駁沼に流出していることから、敷地内の沢の流域面積に降った降水量から、その沢を流れる表流水流量を差し引いたものが、蒸発散量に相当する。降水量及び敷地内の表流水流量の観測結果(第14図参照)に基づく河川流出高を用いて求めた実蒸発散量を第6表に示す。実蒸発散

量の平均に対する可能蒸発散量の平均の比率は 0.95 である。

将来の蒸発散量は、「(b) 気候変動に起因する事象 (一) 気温・降水量変化」に示す敷地周辺と気候因子が類似した 36 地点の年平均気温から可能蒸発散量を算出し、実蒸発散量と可能蒸発散量の比 0.95 を用いて、36 地点の年平均気温と蒸発散量の関係を得た(第 15 図参照)。この関係から設定した将来の蒸発散量を第 3 表に示す。

(イ) 表流水流量

廃棄物埋設地を通過した地下水中の放射性物質濃度は、その地下水が地表に流出した地点で、そこを流れる河川や湖沼の表流水によって希釈される。廃棄物埋設地は二又川の流域にあり、後述する「b. 生活環境の状態設定 (b) (一) 水利用」に示すとおり、希釈水量となる表流水流量は二又川の河川流量に相当する。

河川流量は、降水量から蒸発散量を差し引いた河川流出高に流域面積を乗じて求める。表流水流量の確からしい設定及び厳しい設定の値を第 3 表に示す。

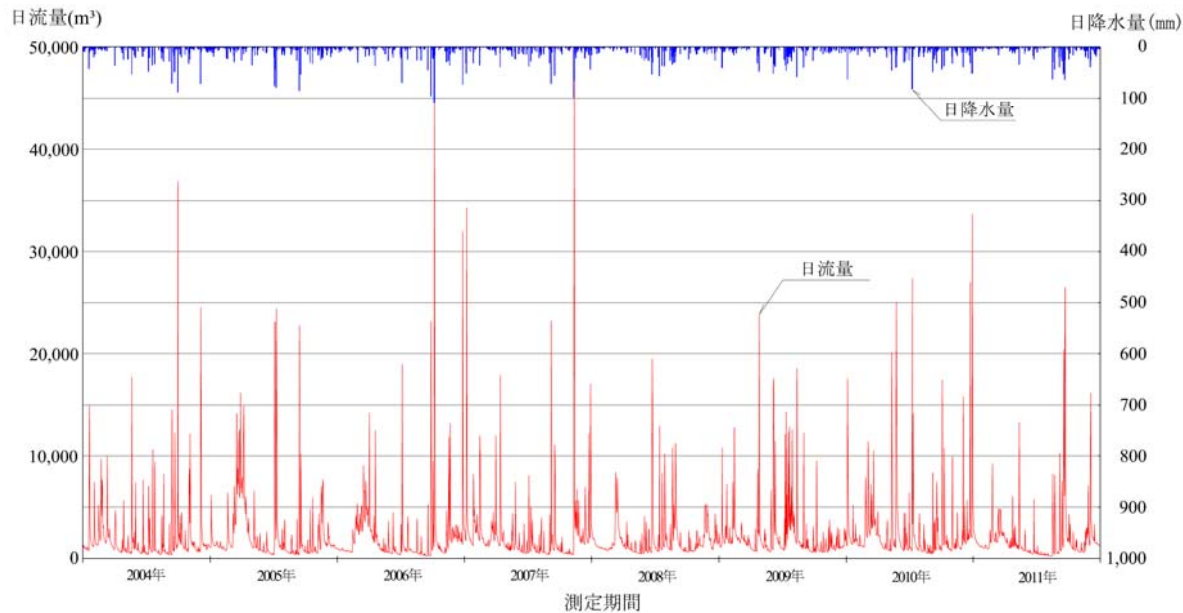
ここで設定した表流水流量は、後述の「(iv) 線量評価パラメータ」では「尾駁沼又は河川の交換水量」として扱う。

第6表 ソーンズウェイト法により求めた可能蒸発散量と観測から求められた

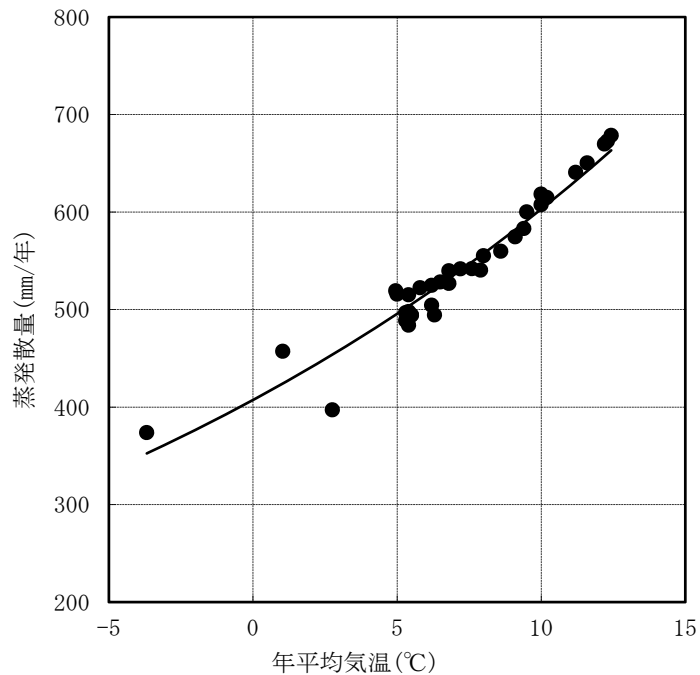
実蒸発散量(2004年～2011年)

観測年	気温 (°C)	年降水量 (mm/y)	①可能蒸発散量 [ソーンズウェイト法] (mm/y)	河川流出高 (mm/y)	②実蒸発散量 [水収支式] (mm/y)	補正係数 ②÷①
2004年	10.1	1,546	640	784	762	1.19
2005年	8.7	1,468	601	930	538	0.89
2006年	8.9	1,380	603	843	537	0.89
2007年	9.8	1,565	624	884	681	1.09
2008年	9.4	1,198	620	706	492	0.79
2009年	9.4	1,507	614	869	638	1.04
2010年	9.8	1,437	637	999	438	0.69
2011年	9.4	1,366	624	724	642	1.03
平均	9.4	1,433	620	842	591	0.95

注1：気温及び年降水量は気象庁の発表⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾に基づき作成。



第14図 敷地内の表流水流量の観測結果(2004年～2011年)



注1：36地点の年平均気温は、気象庁のデータ⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾を使用した。

第15図 敷地周辺と類似した気候因子を持つ36地点の年平均気温と蒸発散量の関係

(d) その他の事象

(一) 生物的事象

敷地内における樹木の根に関する調査結果から、樹木の根の深さは最大で2.3mである。

モグラ類による覆土の擾乱が想定されるが、地表から1m未満である場合が多く⁽²³⁾、樹木の根の影響範囲に包含される。

以上より、廃棄物埋設地には十分な厚さの覆土を設置することから、生物的事象による影響はなく、長期変動事象として考慮しない。

(二) 透水性の変化

岩盤の透水性は、「(a) プレート運動に起因する事象 (二) 地震・断層活動」に示すように大きく変化しないと判断し、長期変動事象として考慮しない。

b. 生活環境の状態設定(詳細は補足説明資料2参照)

廃止措置の開始後における将来の敷地周辺の生活環境の状態を設定する。

生活環境とは、人間を含む生物が生息する領域のうち、評価対象地点周辺で一般的な水の利用と土地の利用が想定される範囲及びその状況を意味する。

生活環境の状態と敷地周辺の社会環境から被ばくが生じると考えられる人間活動に基づいて被ばく経路を設定する。さらに、被ばく経路の重量を考慮して最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人(以下「評価対象個人」という。)を設定する。

廃止措置の開始後の将来における敷地周辺で活動する人間の生活環境は、自然環境の変化による影響を受けることが考えられるため、その前提として、「a. 地質環境に係る長期変動事象」に基づいた、気温・降水量及び地形の状態変化を考慮する。

生活環境の構成要素のうち廃止措置の開始後の将来の人間の生活様式については、これを長期的な不確かさを考慮して予測することは困難であるため、現世代の人間の生活様式に関する情報を基に、敷地及びその周辺の社会環境又はわが国で現在一般的とされる生活様式を前提とする。確からしい自然事象シナリオで考慮する人間活動は、ICRP Pub. 81⁽¹⁾及びICRP Pub. 101⁽²⁾を参考に合理性、持続可能性及び均一性を持つ一般的な人間活動を想定する。厳しい自然事象シナリオで考慮する人間活動は、確からしい自然事象シナリオで考慮する人間活動に加えて不確実性の高いものも考慮する。また、これらのシナリオで考慮すべき合理性、持続可能性及び均一性を持たず一般的に生じるとは考えられない人間活動については、人為事象シナリオで考慮する。

なお、全てのシナリオにおいて、放射性物質としての特性に着目した意図的な行為は含めない。

詳細は補足説明資料2「2. 生活環境の状態設定の考え方」及び「3. 検討方法」を参照。

(a) 生活環境に影響を及ぼす敷地及びその周辺における自然環境の変化(詳細は補足説明資料2「4. 生活環境に関する設定」参照)

「a. 地質環境に係る長期変動事象」に基づき、生活環境に影響を及ぼすと考えられる敷地及びその周辺における自然環境の変化を以下に整理する。

- ・現在から廃止措置の開始直後までの敷地周辺の地形は現状とほぼ同様であり、廃棄物埋設地に起因した放射性物質を含む地下水はほぼ全てが敷地内の沢を經由し汽水性である尾駸沼に流入する。
- ・気候変動によって、平均気温が変化することに伴い、敷地及びその周辺で生産される農産物の種類が変化することが考えられる。

- ・将来の敷地周辺のプレート運動及び気候変動に起因する事象(隆起・沈降、海水準変動及び侵食)に伴う地表の状態変化によって、尾駁沼が河川化し、資源量(漁獲量)が減少することが考えられる。
- ・地形変化が進行すると埋設設備が河食によって侵食され、放射性物質を含む土壌が下流域へ堆積することが考えられるが、数万年以降であり侵食による影響は無視できる。
- ・降水量、蒸発散量、かん養量、地下水位及び河川流量の変化によって、地下水の流出先及び希釈水量に影響するが、生活様式への影響はない。

(b) 事業所周辺における自然環境及び社会環境の状態を踏まえた生活様式の設定

「(a) 生活環境に影響を及ぼす敷地及びその周辺における自然環境の変化」に示す自然環境の変化及び事業所周辺の社会環境の状態を踏まえ、放射性物質が移行する範囲ごとに生活様式のうち被ばく経路を以下のとおり設定する。

(一) 水利用(詳細は補足説明資料2「6. (1) 水利用に伴う被ばく経路」参照)

廃棄物埋設地を通過する地下水は、敷地中央部の沢を経て尾駁沼に流出し太平洋に至るため、現在の二又川や老部川へ移行することは想定されない。また、地下水の流入する尾駁沼は汽水性の沼であるため、この水を生活用水、農業用水及び畜産用水に利用することも想定されない。

六ヶ所村の利水状況としては、豊富な地下水のある地点を水源とする水道の普及率が100%であり、専らこれを生活用水及び畜産用水として利用している。また、水田灌漑用水としては、河川水を利用している。1988年の調査結果に基づく浅井戸を生活用水として利用している世帯もあるが、その割合は約1%と極めて小さい。

沢水の利用については、現在は利用されていないこと、河川の水量を比較すると敷地中央部の沢の水量は小さいこと、現在の敷地周辺においては水道が十分普及していること及び農地が減少傾向にあることから、沢水の利用に伴い被ばくが生じる可能性は河川の利用の場合よりも小さい。しかしながら、評価に当たっては河川と沢の水量の違いによる利用の可能性(被ばくが生じる可能性)を定量的に示すことが困難であること、敷地造成前においては、広範囲では畑作が、また敷地中央部の沢の下流部では稲作が行われていたことを考慮する。

さらに、廃止措置の開始後の将来の地形変化を考慮すると、尾駁沼が河川化し、

汽水性の沼から淡水に変化することが考えられるため、河川水を生活用水等に利用する可能性があるが、現在の敷地周辺の生活様式を考慮し、評価には含めない。

以上より、水利用に関しては、現状の水理及び利水状況を前提にすると、廃棄物埋設地からの影響を受ける地下水や沢水を生活用水や畜産用水に利用することは考え難い。よって、生活用水等に利用することに伴う被ばく経路としては、尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取、沢水を利用して生産される農産物の摂取及び灌漑作業を想定する。ただし、水産物の摂取において、河川化に伴う資源量(漁獲量)の長期的な減少については評価に含めない。

水利用に伴う被ばく経路として考慮する人間活動は以下のとおりである。

(7) 自然事象シナリオ

- ・尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取
- ・沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取
- ・沢水を利用する灌漑作業

(二) 土地利用(詳細は補足説明資料2「6. (1) 土地利用に伴う被ばく経路」参照)

廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が廃棄物埋設地表面付近の土壌に移行し、被ばくを受ける可能性があるため、廃棄物埋設地及びその近傍における土地利用に伴う活動を考慮する。

地下の掘削を伴う土地利用の一つに構造物の建設がある。2019年の統計によれば、近年の六ヶ所村においては専用住宅、倉庫、店舗等の建築確認申請が行われている。加えて、廃棄物埋設地は市街化区域の用途地域のうち工業専用地域に位置し、工業地域、準工業地域、商業地域、中高層住居専用地域及び低層住居専用地域に隣接しているため、工場及び住宅の建設等に利用される可能性がある。ただし、現状の六ヶ所村では地下数階を有するような大規模な構造物はほとんどみられず、面積利用率では10m以深の掘削を行う頻度は1%未満である。さらに、可住地のうち構造物が建設される土地は一部であることを含めて敷地周辺の社会環境を考慮すると大規模な構造物の建設は代表的な事例ではない。そのため、代表的な事例として一般的な住宅の建設及びそれに伴って発生する掘削残土上での居住を想定する。

なお、面積利用率は、六ヶ所村で確認される建物区分について、それぞれに仮

定した平均深度ごとの利用面積が可住地面積に占める割合を求めたものである。

この他に地下を掘削する目的として、井戸の掘削や地下資源の開発があげられる。井戸については水利用の状況から、浅井戸の掘削が考えられるが、「(一) 水利用」に示すように、水道の普及率が 100%であり、また、浅井戸を生活用水として利用している世帯もあるものの、その割合は約 1%と極めて小さいことから考慮しない。地下資源の開発については、廃棄物埋設地及びその近傍において、採掘規模の石炭、鉱石等の天然資源は認められていないため、このような土地利用を考慮する必要はない。

また、地下の掘削を伴わない土地利用としては、農産物の生産があり、廃棄物埋設地表面付近の土壌又は地下水から農産物に放射性物質が移行し、その農産物を摂取することによって生じる被ばくが考えられる。

以上より、土地利用に関しては、廃棄物埋設地の利用による被ばくとして、住宅の建設作業、掘削残土上での居住及び廃棄物埋設地を利用して生産される農産物摂取による被ばくを考慮する。

なお、廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による大規模な掘削行為及び当該掘削後の土地利用に伴う被ばくは、一般的に生じるとは考えられないため、人為事象シナリオにおいて考慮する。

土地利用に伴う被ばく経路として考慮する人間活動は以下のとおりである。

(7) 自然事象シナリオ

- ・ 廃棄物埋設地における建設作業
- ・ 廃棄物埋設地における居住
- ・ 廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物の摂取

(イ) 人為事象シナリオ

- ・ 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業
- ・ 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住

(三) 水利用及び土地利用によって得られる各種生産物

「(一) 水利用」及び「(二) 土地利用」に示す水や土地の利用によって得られる生産物の種類を水産物及び農産物と設定する。

水産物については、廃止措置の開始後の将来の地形変化を考慮すると、尾駁沼

が河川化し、淡水性の水産物に変化することが想定される。しかし、淡水化に伴う資源量(漁獲量)の減少により、水産物種類の変化を考慮しても水産物の摂取による被ばく線量は小さくなる傾向となることから、線量評価においては、尾駁沼の河川化による水産物種類の変化は考慮せず、現在の汽水性である尾駁沼に生息する代表的な水産物とする。

農産物については、沢水を灌漑用水として利用して栽培される米及び廃棄物埋設地に栽培される野菜を考慮する。

- (c) 最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人の設定(詳細は補足説明資料 2「7. 最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人(評価対象個人)」参照)

「(b) 事業所周辺における自然環境及び社会環境の状態を踏まえた生活様式の設定」に示す生活様式に基づき、自然事象シナリオにおいては、被ばく経路に様々な個人の生活様式に係る場合には、それらの重ね合わせを考慮し、評価対象個人を設定する。

評価対象個人は、移行経路ごとの被ばく経路の特徴を表した個人で、年間を通して被ばくする可能性がある個人を代表として設定する。また、敷地及びその周辺又はわが国で現在認められる一般的な生活様式をもつ個人とし、比較的高い被ばくを受ける集団を代表する成人とする。

ただし、被ばく経路の重ね合わせにおいては、市場の流通の状況を適切に考慮する。生活様式として同時に存在することの合理性がないもの及び人為事象シナリオで考慮する一般的ではない人間活動による被ばく経路については、重ね合わせを考慮しない。

生活様式は、現在認められる就労形態ごとに異なる。就労形態によって、様々な生産活動が行われる可能性があるが、評価の観点からは放射性物質が移行する水又は土壤に接触する生産活動に従事する就労者を対象とすることが合理的である。そのため、生産活動及び生産物を摂取することによって起こると想定される被ばくを考慮する。また、放射性物質は、その移行特性や放射線影響が種類ごとに異なることから、評価対象個人を複数の集団から設定する。

現在の敷地及びその周辺の社会環境・産業構造において、被ばくの可能性がある就労形態は、第一次産業としては、漁業及び農業(畜産業を含む。)が代表的であり、第二次産業では建設業が代表的である。第三次産業やその他の業種については、労

働作業に伴う被ばくの可能性が小さいと考えられ、汚染された土地に居住する人を想定することで代表できると考えられる。

ただし、年間を通じて摂取する全ての食品が、廃棄物埋設地起源の放射性物質を含む生産品とすることは現在の市場の流通状況から考えて基本的に想定されない。このため、就労者が生産活動により得られる食品を自家消費すると想定し、その他については市場から購入すると想定する。

このような状況を考慮して、就労形態の分類に応じて評価対象個人を以下のとおり設定する⁽¹⁾。

(一) 確からしい自然事象シナリオ

最新の統計等に基づく、六ヶ所村の産業別就業者数のほぼ半数を第三次産業が占めており、また、第三次産業については廃棄物埋設地に居住する人を想定することで代表できると考えられることから、本シナリオにおいては評価対象個人を居住者とする。なお、評価対象者を居住者とすることから、「(b)(一)(ア) 自然事象シナリオ」で設定した「沢水を利用する灌漑作業」による被ばくは生じない。

(ア) 居住者

居住者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、市場に流通した食品を摂取すると想定する。

(二) 厳しい自然事象シナリオ

最新の統計等に基づく、第一次産業としては、漁業及び農業(畜産業を含む。)が、第二次産業では建設業が代表的であり、また、第三次産業やその他の業種については、廃棄物埋設地に居住する人を想定することで代表できると考えられることから、本シナリオにおいては、評価対象個人を漁業従事者、農業従事者、畜産業従事者、建設業従事者及び居住者とする。

(ア) 漁業従事者

漁業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、放射性物質が移行する水産物を自家消費すると想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。

(イ) 農業従事者

農業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、放射性物質が移行す

る農産物については自家消費すると想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。

なお、水利用の場合は放射性物質を含む沢水を灌漑に利用する稲作、土地利用の場合は放射性物質を含む土壌上における畑作を想定する。

(ウ) 畜産業従事者

畜産業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、放射性物質が移行する畜産物を自家消費すると想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。ただし、放射性物質が移行する畜産物を摂取することによる被ばくは想定されない。

(エ) 建設業従事者

建設業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、一般的な市場に流通した食品を摂取すると想定する。また、廃棄物埋設地において一般的な住宅の建設作業を行うことを想定する。

(オ) 居住者

居住者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、市場に流通した食品を摂取すると想定する。

c. 廃棄物埋設地の状態設定^{(24) (25) (26)}

放射性物質の生活環境への移行を考慮する際の廃棄物埋設地の状態は、放射性物質の減衰による線量低減効果を期待できる期間として 1,000 年程度を目安に設定する。着目する移行抑制機能は廃棄物埋設地及び周辺岩盤の低透水性と収着性とする(第 7 表参照)。

廃棄物埋設地は覆土完了時点を初期状態とし、長期の状態は、廃棄物埋設地の移行抑制機能に係る特性に影響を与える事象を抽出し、それら影響事象を考慮して状態設定を行う。

状態設定においては、移行抑制機能を期待する難透水性覆土、下部覆土及び岩盤(鷹架層)の低透水性並びにセメント系材料(廃棄体の固型化材及び埋設設備)、難透水性覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の収着性に着目する。

なお、覆土の遮蔽機能は、覆土が侵食されて遮蔽厚さが薄くなる時期は数万年後であり、その時点では遮蔽機能を必要としないことから、覆土の長期的な遮蔽機能の状態設定は行わない。

第7表 各構成部材に期待する機能

構成部材	移行抑制機能	移行抑制機能の内容
難透水性覆土、下部覆土*1	低透水性	ベントナイト混合土を用いた難透水性覆土及び下部覆土に対して低透水性を期待することにより、廃棄物埋設地の通過流量(埋設設備への浸入水量並びに埋設設備上部及び生活環境への地下水の流出)を低減させる。
岩盤(鷹架層)		岩盤(鷹架層)の低透水性によって、廃棄物埋設地への地下水浸入量の低減を期待するとともに、生活環境までの移行遅延を期待する。
セメント系材料(廃棄体固型化材、埋設設備)	収着性	セメント系材料、難透水性覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の収着性を期待することにより、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えい量を低減し、移行を遅延させる。 基本的に収着性が大きい方が移行抑制効果は大きいですが、土地(土壌)の利用が想定される場合は、上部覆土の収着性が小さい方が線量低減に寄与する。
難透水性覆土		
上部覆土		
岩盤(鷹架層)		

*1:下部覆土は土質系材料であり収着性を期待できるが、難透水性覆土又は下部覆土の一方に収着性を期待することで十分であることから、下部覆土の収着性は考慮しない。

(a) 着目する移行抑制機能に関連する物理的・化学的性質

廃棄物埋設地の低透水性は、主に廃棄体の固型化材、埋設設備、難透水性覆土、下部覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)のそれぞれの間隙率、密度並びにひび割れの有無に対する物理的性質及び力学条件に依存する。

また、廃棄物埋設地の収着性は、主に廃棄体、埋設設備、難透水性覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の鉱物組成並びにそれぞれの間隙水の水質に対する化学的性質及び化学条件に依存する。

(b) 影響事象の抽出・分析(熱-水理-力学-化学)(詳細は補足説明資料3「3. 検討結果」参照)

低透水性及び収着性に影響する事象を把握するため、各部材相互の影響事象を体系的に抽出・分析する。抽出・分析に当たっては、各部材相互の影響事象を熱、水理、力学及び化学の観点で整理する。影響事象については、廃棄物安全小委員会報告書⁽²⁷⁾及びIAEA-ISAM⁽²⁸⁾のFEP(Feature, Event, process)を参考に、廃棄物埋設

地の特徴及び「a. 地質環境に係る長期変動事象」で設定した長期変動事象を考慮する。

影響事象分析の結果は、以下に示すとおりである。

(一) 熱

低透水性及び収着性に与える熱的影響事象としては、放射性物質の崩壊熱、セメント系材料の水和熱及び気温変化による地表環境の温度変化があげられる⁽²⁴⁾。これらの事象によって、難透水性覆土及び埋設設備を構成するセメント系材料の熱変質が生じ、それぞれの鉱物組成及び密度が変化することにより、難透水性覆土の低透水性及びセメント系材料の収着性に影響を及ぼすことが考えられる。

(ア) 崩壊熱

廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊によって発生する崩壊熱は、埋設する廃棄体に含まれる放射性物質の量が少ないことから、各部材の熱変質が生じる温度⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾⁽³¹⁾より十分に小さい。そのため、崩壊熱は影響事象として考慮しない。

(イ) 水和熱

セメント系材料で構成される埋設設備は、外周仕切設備構築時と充填材充填時に水和反応に伴う熱により、部材自体の膨張変化による温度応力が発生する⁽³²⁾。しかし、廃棄物埋設地からの放射性物質の移行は水和熱が低下した後の覆土完了後に生じること及びセメント系材料の収着性は水和後の特性に期待していることから、水和熱を影響事象として考慮しない。

(ウ) 気温変化

覆土及び岩盤(鷹架層)は、それ自体が発熱することはないが、地表環境の温度変化によって生じる影響があげられる。覆土前の埋設設備は年間の気温の変化の影響を直接受けるが、それによって熱変質が生じるほど温度が上昇しないと考えられる。また、覆土完了後の埋設設備は、地表から 20m 程度の深度に設置されることから、埋設設備の設置位置近傍で想定される温度変化は十分小さい。そのため、年間の気温の変化以上に廃棄物埋設地の温度が変化しないと考えることから、気温変化は影響事象として考慮しない。

(二) 水理

低透水性及び収着性に与える水理的影響事象としては、地下水流動があげられる⁽²⁴⁾。この事象によって、難透水性覆土及び下部覆土の流出に伴い密度が変化

し、これら部材の低透水性に影響が生じることが考えられる。

(7) 地下水流動

一般にベントナイトは膨潤力が大きく、難透水性覆土及び下部覆土の砂粒子の間から膨出したベントナイトが周辺の地下水流動によって流出することが考えられる。しかし、廃棄物埋設地周辺の地下水流速が十分に小さいため、地下水流動による直接的な影響は生じないことから、地下水流動によるベントナイトの流出は影響事象として考慮しない。

(三) 力学

低透水性及び収着性に与える力学的影響事象としては、金属腐食による体積膨張、ガス発生、ベントナイトの膨潤圧及び地震があげられる⁽²⁴⁾。これらの事象によって、埋設設備、難透水性覆土及び下部覆土に変形・損傷又はひび割れが発生することにより、透水性に影響が生じることが考えられる。

(7) 金属腐食による体積膨張

埋設設備内に含まれる金属腐食による体積膨張に伴い、各部材が変形・損傷し、低透水性に影響することが考えられる。そのため、金属腐食による体積膨張を影響事象として考慮する。

(イ) ガス発生(詳細は補足説明資料3 添付資料1 参照)

埋設設備内に含まれる金属の腐食及び有機物の分解に伴い発生するガスによるガス圧・間隙水圧の上昇又はガスの移行により難透水性覆土及び下部覆土が変形・損傷し低透水性に影響することが考えられる。

埋設設備内におけるガスの発生源は、廃棄体中に含まれる金属又は有機物、廃棄体の容器及び埋設設備内の鉄筋であり、ガス発生量の大半を占めるガス発生物質は、埋設設備内に存在する金属である。

単位時間当たりのガス発生量が最も大きくなるのは、金属類廃棄体⁽³³⁾であり、既往知見⁽³⁴⁾によると、埋設設備1基から1年間に発生する標準状態(0℃、1atm)のガス発生量は、pH12.5～pH13.0及び水温15℃～45℃の条件での腐食速度試験の結果に基づくと最大で1,000m³(埋設設備1m³当たり0.064m³/y)と推定され、時間の経過とともに減少すると考えられる。

ベントナイト系材料中のガス移行メカニズムに関する藤山ら⁽³⁵⁾の調査結果によれば、難透水性覆土の内側に蓄積したガスは、気液2相流、卓越流路の形

成を伴う hidroリックフラクチャリングのいずれか、又はこれらの両方が共存するガス移行メカニズムに従い、飽和した難透水性覆土中を移行し、破過に至ると考えられ、廃棄物埋設地においてもこれらのガス移行メカニズムが共存する状態であると考えられる。

田中ら⁽³⁶⁾が実施したベントナイト混合土のガス透気試験では、廃棄物埋設地で想定される上記のガス移行メカニズムによりガス破過が生じていると考えられ、ガス破過前後の透水係数に変化は見られなかったことから、難透水性覆土の透水係数の変化は生じないと考えられる。

また、下部覆土については、難透水性覆土の外側にあり、施工時点において確保する透水係数が難透水性覆土よりも 2 桁程度大きいため、難透水性覆土に比べて容易に水及びガスが移行すると考えられる。このため、下部覆土の低透水性に対するガス破過の影響は、難透水性覆土に対するその影響に包含されるものとする。

以上より、ガス発生による難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に有意な影響は生じないことから、ガス発生は影響事象として考慮しない。

(ウ) ベントナイトの膨潤圧

ベントナイトを混合する難透水性覆土及び下部覆土は、地下水により飽和し膨潤することによる圧力(膨潤圧)が発生することに伴い、各部材が変形・損傷し、低透水性に影響することが考えられる。しかし、膨潤圧は周辺の地圧と比較して小さいため⁽³⁷⁾、ベントナイトの膨潤圧は影響事象として考慮しない。

(エ) 地震

過去及び現在の状況から、繰り返し地震が発生することが想定される。地震によって各部材が変形・損傷し、低透水性に影響すると考えられるため、地震による影響評価として、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に対する力学的影響について評価する。地震力の作用により覆土で発生が想定される事象として、力学的な変形及び液状化があげられる。

力学的な変形については、地震力の作用により発生する覆土の変形量が「(d) 各物理的・化学的性質の長期的な状態変化の評価 (一) 金属腐食による体積膨張」に示す金属腐食に伴う埋設設備の変形量と比較して非常に小さいことから、金属腐食の評価に包含される。

液状化については、過去の液状化対策事例として、平成19年新潟県中越沖地震において、管理値(締固め度90%以上)を設定し、埋戻し土(砂及び砂質土)の締固めによる対策を実施した箇所では、震度6弱が発生しているものの、液状化は生じていないと報告されている⁽³⁸⁾。

廃棄物埋設地においても、覆土施工における管理値を同等以上に設定する。覆土は、現地発生土、購入砂、ベントナイト及び礫を仕様に応じて混合した混合土である。よって覆土は、一般に液状化しやすいと知られている「砂分を多く含む、粒度分布が偏った土砂」ではない。上記の液状化対策事例において液状化をしていない箇所で使用されている砂及び砂質土⁽³⁸⁾と比較して、覆土は、液状化抵抗性に関連する締固め性能が良いとされている「粒径分布に広がりを持った材料」であるため、相対的に液状化し難い材料であると判断される。

廃棄物埋設地で発生すると考えられる地震は、「補足説明資料1 地質環境に係る長期変動事象 3.(1)(ii)a.地震」より震度5強を超えないため、過去事例における締固めによる対策を実施した箇所で発生した地震より小さい。

なお、文献⁽³⁹⁾に例示されるような購入砂と異なる粒径分布を持つ材料を混合し覆土を製造することから、購入砂単体と比較し、覆土は粒度分布に広がりを持つ液状化し難い材料であると考えられる。

以上より、地震によって難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に有意な影響は生じないことから、地震は影響事象として考慮しない。

(四) 化学

低透水性及び収着性に与える化学的影響事象としては、地下水との反応、化学的変質、金属腐食、セメント系材料の溶脱、有機物影響、塩影響、コロイド影響、微生物影響及び降下火砕物があげられる⁽²⁴⁾。これらの事象によって、各部材の鉱物組成及び間隙水の水質が変化し、低透水性及び収着性に影響することが考えられる。

(7) 地下水との反応(化学的変質、セメント系材料の溶脱を含む)

地下水が埋設設備を通過することにより、セメント系材料の溶脱が発生し、鉱物組成及び間隙水の水質の変化が生じる。また、セメント成分が溶解した間隙水と難透水性覆土、下部覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)が反応⁽³¹⁾⁽⁴⁰⁾し、難透水性覆土、下部覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の鉱物の溶解並びに二次

鉍物が生成することにより、低透水性及び収着性に影響することが考えられる。そのため、地下水との反応を影響事象として考慮する。

(イ) 金属腐食

埋設設備内に含まれる金属が腐食することによって、地下水に含まれる溶存酸素が消費され、酸化還元環境が変化し⁽⁴¹⁾、収着性に影響することが考えられる。そのため、金属腐食を影響事象として考慮する。

金属腐食は、廃棄物埋設地周辺は酸化雰囲気であること、還元雰囲気下の分配係数は酸化雰囲気下と比較して大きな値となる傾向⁽⁴²⁾があることから、核種の還元が生じるような金属腐食の収着影響は考慮しないものとする。

(ロ) 有機物影響

埋設設備内に含まれる有機物のアルカリ分解反応により放射性物質を捕捉する分解生成物が生成することが考えられる。有機物及び分解生成物が間隙水中に存在する場合には、放射性物質と錯体を形成し、収着性に影響することが考えられる。そのため、有機物の分解生成物を影響事象として考慮する。

(ハ) 塩影響

均質・均一固化体に含まれる可溶性塩が地下水中に溶解することによって、間隙水の水質の変化が生じる。さらに、塩が溶解した間隙水とセメント、難透水性覆土、下部覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)が反応⁽⁴³⁾し、難透水性覆土、下部覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の鉍物の溶解並びに二次鉍物の生成等により、これらの固相に変質が生じ、低透水性及び収着性に影響することが考えられる。

しかし、廃棄物埋設地に埋設する廃棄体は可溶性塩を含まない充填固化体であるため、塩影響は影響事象として考慮しない。

(ニ) コロイド影響

各部材の間隙水中にコロイドが存在する場合には、コロイドに放射性物質が収着し、放射性物質の移行が促進される(収着性が阻害される)ことが考えられる。

収着性に影響を与える可能性のあるコロイド影響については、埋設設備の間隙水はセメント平衡水でありコロイドが安定に分散できる環境ではなく、収着性に影響は生じないと考えられることから、コロイド影響は影響事象として考

慮しない。

(カ) 微生物影響

廃棄物埋設地近傍に存在する微生物の活動によって、岩盤(鷹架層)中では有機物が無機化し、収着性が低下することが考えられる。そのため、収着性の評価に際して微生物影響のうち有機物の無機化を影響事象として考慮する。

なお、有機物が分解してガスが発生すること及び金属の腐食反応が促進されることが考えられる。しかし、微生物は高 pH 環境となる埋設設備内や難透水性覆土中においてその活性は低く⁽⁴³⁾、このような活動で生じる化学環境の変化はその他の影響事象に含まれると考えられるため、これらの微生物影響は影響事象として考慮しない。

(キ) 降下火砕物

降下火砕物が堆積すると、地下水の水質変化が生じ、鉱物の溶解及び二次鉱物の生成により低透水性及び収着性に影響すること並びに上部覆土については化学的変質の影響を直接受けることが考えられる。

しかし、降下火砕物による化学的な影響については、十分な厚さの上部覆土を設置するため、上部覆土による pH 変化などの化学的変化を和らげる緩衝作用により、溶解・変質などの化学的影響は十分低減され、埋設設備、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性及び収着性への影響は無視できる。また、上部覆土に関しては、化学的影響を受ける範囲(緩衝作用の範囲)が表層に限定されることに加え、上部覆土の収着性に影響が生じても線量への感度が小さいことから、降下火砕物は影響事象として考慮しない。

(c) 廃棄物埋設地の初期状態の設定

線量評価においては覆土完了時点を初期状態とし、各部材の初期状態は第 8 表から第 16 表に示す廃棄体及び廃棄物埋設地の寸法、材料等の仕様、性状に基づき、各状態設定の評価においてそれぞれ設定する。状態設定の評価に用いる埋設設備及び覆土の材料仕様は、設計において期待する性能を満たすことができる候補材料から設定する。施工時点において材料仕様が変更になることも予想されるが、期待性能を満たす材料を適切に設定する。

第8表 埋設する廃棄体の仕様

廃棄物埋設地	3号
種類	充填固化体*1
重量	1本当たり 1,000kg を超えないもの
内容物	金属類、プラスチック類、保温材・フィルタ類
固型化材	セメント*2
状態変化で考慮する内容物	有機物、金属類

*1: 充填固化体の標準的な製作方法⁽³³⁾により製作。

*2: 「JIS R 5210(1992)」若しくは「JIS R 5211(1992)」に定めるセメント又はこれと同等以上の品質を有するセメント。

第9表 バリア機能への影響を評価する上で考慮する廃棄体の内容物

充填固化体		
内容物	平均重量(kg/本) ^{*1}	備考
天然有機物	0.152 ^{*2}	分別除去後の調査結果。廃棄物重量当たりの含有率は 1.7g/kg。
アルミニウム	0.109 ^{*2}	分別除去後の調査結果。廃棄物重量当たりの含有率は 1.2g/kg。
金属類	301~305	対象廃棄物の種類のうち、金属を多く含むもので、鉄が大半を占める。

*1: 充填固化体の標準的な製作方法⁽³³⁾に基づいて設定。

*2: 代表的な固体状廃棄物(ドラム缶 154 本相当)の調査結果であるが、全体的にも同程度の量の内容物が含まれているものとして、平均値として設定した。

第 10 表 埋設設備の寸法*1

埋設設備		3号
埋設設備構成		8基
1基当たり の大きさ	奥行き(南北)	36.51m
	幅(東西)	64.1m
	高さ	6.66m*1
区画/基		66区画/基
部材厚さ	外周仕切設備(側壁)	60cm
	外周仕切設備(底版)	60cm
	内部仕切設備	40cm
	ポーラスコンクリート層と 廃棄体間の厚さ(セメント系 充填材)	20cm
	覆い	30cm

*1:勾配調整コン、ひび割れ対策に伴う覆い厚さ変更予定を含まないもの

第 11 表 コンクリートの配合

3号廃棄物埋設地					
水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)				
	水	結合材*1	混和材*2	細骨材*3	粗骨材
47	155	333	60	729	1019

*1:中庸熱ポルトランドセメント 70%及びフライアッシュ 30%の混合セメントとし、必要に応じて膨張材を置換する。また、施工時には所定のフレッシュ性状確保のため結合材料に比例して混和剤を添加する。

*2:石灰石微粉末

*3:陸砂と砕砂の混合品

第 12 表 難透水性覆土に用いるベントナイト混合土の仕様

項目	仕様	備考
ベントナイト混合率	30%*1	Ca 型ベントナイト
含水比	最適含水比+4%±2%	最適含水比+4%=19.6%

*1：Na 型ベントナイトの場合は 20%

第 13 表 難透水性覆土に用いるベントナイト混合土の主要材料

項目	仕様
Ca 型ベントナイト*1	MBC*2120 以上
コンクリート用細骨材	青森県三沢市砂森産

*1：参考として Na 型ベントナイトも評価した

*2：メチレンブルー吸着量

第 14 表 廃棄物埋設地付近の土質特性(盛土及び第四紀層)

廃棄物埋設地	地 層	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	土粒子の密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)
3 号	盛 土	1.79	26.2	2.72	47.9
	火山灰層	1.54	58.1	2.68	62.7
	段丘堆積層	1.79	29.4	2.66	48.1

第 15 表 廃棄物埋設地付近の鷹架層の特性

廃棄物埋設地	区分		湿潤密度 (g/cm ³)		含水比 (%)		土粒子の密度 (g/cm ³)		間隙率 (%)		試料数 (個)
			平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
3号	鷹架層	軽石	1.59	0.03	52.1	4.4	2.39	0.01	56.1	2.1	39 (18) ^{*1}
	中部層	凝灰岩									
	軽石凝灰岩層	砂質軽石凝灰岩	1.70	0.03	38.8	2.9	2.48	0.03	50.3	1.9	159 (76) ^{*1}

*1 : ()内の数字は土粒子の密度を測定した試料数を示す。

第 16 表 廃棄物埋設地付近の地下水の水質

項目	単位	測定結果
マグネシウムイオン	Mg ²⁺ mg/L	0.1~3.8
カルシウムイオン	Ca ²⁺ mg/L	0.1未満~7.2
ナトリウムイオン	Na ⁺ mg/L	7.2~31.5
カリウムイオン	K ⁺ mg/L	0.5~5.6
硫酸イオン	SO ₄ ²⁻ mg/L	1.0~21.7
炭酸水素イオン	HCO ₃ ⁻ mg/L	5.6~51.9
塩化物イオン	Cl ⁻ mg/L	12.9~20.3
溶存鉄	Fe mg/L	0.05未満~21.0
pH	—	5.3~8.3
電気伝導度	mS/m	7.2~18.9

(d) 各物理的・化学的性質の長期的な状態変化の評価

「(b) 影響事象の抽出・分析(熱-水理-力学-化学)」に基づき、移行抑制機能を期待する難透水性覆土、下部覆土及び岩盤(鷹架層)の低透水性並びにセメント系材料(廃棄体の固型化材及び埋設設備)、難透水性覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の収着性に係る各物理的・化学的性質の長期的な変化を評価する。評価に際しては、FEPにより抽出した影響事象ごとに適切に不確かさを考慮する。

(一) 金属腐食による体積膨張（詳細は補足説明資料4「4. 状態変化(膨張)に必要となる条件設定」及び「5. 1,000年後の状態変化(膨張)の影響評価」参照)

低透水性を有する難透水性覆土及び下部覆土は金属腐食による体積膨張に伴う鉛直方向の変形に対して破断しないように配慮した厚さで設計しており、当該部位に破断が生じる可能性が低いものと考えられる。しかし、難透水性覆土の隅角部には、厚さの減少及び変形に伴う透水性が変化した領域の発生が予想される。そのため、長期状態においては、廃棄物埋設地に生じる現象の不確実性及び金属廃棄物の多様性を考慮した埋設設備の変形量を設定し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性への力学的影響を評価する。

金属腐食による体積膨張に係るパラメータを第17表～第18表に示す。

金属の腐食は、金属と廃棄物埋設地の周辺環境(溶存酸素、酸化還元電位、pH及び水温)との相互作用(電気化学的腐食)により生じる。そのため、埋設設備中の環境条件、金属種類、腐食生成物、腐食膨張倍率及び腐食速度を設定し、状態設定を行う期間(1,000年)において埋設設備の膨張変形を想定する。

金属の腐食による体積膨張に起因する力学的影響評価においては、粒状体個別要素法(Distinct Element Method)解析を用いる。この結果に基づき、難透水性覆土及び下部覆土の透水係数及び厚さは、力学的変形に対し、透水係数に変化は生じないものの厚さが変化する又は開口が生じると設定する(第19表参照)。

第 17 表 埋設設備中の環境条件、金属種類並びに腐食生成物の設定及び設定の考え方

条件		設定	設定の考え方
ORP*1		【確からしい設定】 嫌気的条件	【確からしい設定】 埋設設備の設置深度近傍にて取得された溶存酸素濃度(0.2ppm 未満)及び ORP*1 (-100mV 以下)を参考に設定する。
		【厳しい設定】 嫌気的条件～好気的条件	【厳しい設定】 埋設設備中の溶存酸素の移行経路によっては、廃棄体容器及び金属廃棄物に供給されることが考えられる。また、廃棄物埋設地周辺の地下水に含まれる溶存酸素の供給量の変動した場合を考慮し、嫌気的条件～好気的条件を考慮する。
pH		【確からしい設定】 セメント系材料に生じる一般的な現象を考慮し、高い pH を設定	【確からしい設定】 状態変化の評価期間において、セメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することにより高い pH の状態(pH11 以上)となることが考えられるため、これを考慮する。
		【厳しい設定】 上記に加え、セメント系材料から Na 及び K 成分が溶出した場合を考慮し、更に高い pH を設定	【厳しい設定】 セメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することに加え、Na 及び K 成分が溶出した場合、pH が更に高い状態に推移する。金属腐食では、pH が変化した場合、腐食膨張倍率の異なる腐食生成物が生成され、金属の膨張量が増加する可能性があることから、これを考慮する。
水温		【共通】 廃棄物埋設地周辺の水温を参考に設定	【共通】 埋設設備の設置深度近傍にて取得された水温(10℃～15℃程度)を参考に設定する。
代表とする 金属種類	鉄	【確からしい設定】 Fe ₃ O ₄	【確からしい設定】 安定な結晶性の腐食生成物であることから Fe ₃ O ₄ を設定する。
		【厳しい設定】 Fe(OH) ₂	【厳しい設定】 金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する Fe(OH) ₂ を設定する。
その他 考慮する 金属種類	アルミニウム ニッケル 銅 亜鉛	【確からしい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu ・ Zn(OH) ₂	【確からしい設定】 金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を設定する。 ただし、銅に関しては、確からしい設定の環境条件下では腐食しないことから銅のままとして設定する。
		【厳しい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu(OH) ₂ ・ Zn(OH) ₂	【厳しい設定】 金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を一律設定する。

*1：酸化還元環境のうち、酸化還元電位を指す。

第 18 表 腐食膨張倍率並びに腐食速度の設定値及び設定の考え方

条件	設定値	設定の考え方
腐食膨張 倍率	【確からしい設定】 3 倍	【確からしい設定】 代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物を Fe_3O_4 とし、その他考慮する金属種類の混入率を 0wt%-50wt%の幅で設定し、金属が混合された状態での腐食膨張倍率を評価した結果、いずれも腐食膨張倍率は 3 倍以下であることから、3 倍と設定する。
	【厳しい設定】 4 倍	【厳しい設定】 環境条件の変動を考慮し、設定した代表とする金属種類並びに非晶質の水酸化物を設定したその他考慮する金属種類の混入率を 0wt%~50wt%の幅で評価した結果、いずれも腐食膨張倍率は 4 倍以下であることから、4 倍と設定する。
腐食速度	【確からしい設定】 0.1 μ m/y	【確からしい設定】 腐食速度の測定手法に内在する測定誤差を考慮し、値を設定する。
	【厳しい設定】 腐食速度を設定せず金属の全量が瞬時に腐食すると設定	【厳しい設定】 腐食膨張量は、金属腐食を評価する上で必要となる環境条件による腐食速度に依存するが、局部腐食(孔食)や異種金属接触腐食、環境条件の変動に係る不確実性を考慮する。よって、廃止措置の開始後の状態変化の評価期間(1,000 年後)においては、腐食形態に係らず全量が瞬時に腐食すると設定する。

第 19 表 金属腐食による体積膨張に係る覆土への力学的影響評価

対象設備 (対象廃棄物)	変形 形態	力学的変形	
		確からしい設定	厳しい設定
3号 廃棄物埋設地 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが 1m 以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部に約 2m の開口が生じる状態 ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態

(二) 地下水との反応による影響(詳細は補足説明資料 5「3. 解析結果」参照)

廃棄物埋設地における地下水との反応による影響は、各部材と地下水との反応とそれに伴う難透水性覆土及び下部覆土の透水性並びに埋設設備等のセメント系材料の収着性の変化を考慮する。各部材と地下水との反応は、主に埋設設備内に浸入する地下水量及び水質、各部材を構成する鉱物の溶解度に依存する。

セメント系材料で構成される埋設設備に接する難透水性覆土の透水性は、モンモリロナイトの溶解及び二次鉱物の生成による変質の影響を受けると考えられる。

埋設設備のセメント系材料の収着性は、主要鉱物であるケイ酸カルシウム水和物の溶脱や二次鉱物の生成、またそのような固相変化に応じた間隙水の pH の変化の影響を受けると考えられる⁽⁴³⁾。

このような長期的な変化は、化学反応モデルと物質移行モデルを連成させた地化学解析コード PHREEQC-TRANS⁽⁴⁰⁾を用いて求める。

(7) 難透水性覆土及び下部覆土

地化学解析によって、鉱物組成、密度、空隙率、間隙水の液性及び覆土の低透水性の変化を評価する。難透水性覆土中の物質移行は、確からしい設定は、ベントナイト中の拡散挙動を空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式で設定し、厳しい設定は、モンモリロナイトの割合を 0 とし、空隙率に比例するとして設定する。

この解析の結果を基に、難透水性覆土の透水係数は、確からしい設定及び厳

しい設定とともにモンモリロナイトの密度及び空隙率の変化に応じて変化するものとして設定する。

難透水性覆土の透水係数の化学的影響の評価結果を第 20 表に示す。化学的影響を受けた場合においても難透水性覆土中のモンモリロナイトが残存することから、下部覆土への化学的な影響による透水係数の変化は生じないものとする。

第 20 表 化学的影響による難透水性覆土の透水係数の評価結果

評価期間	透水係数 (m/s)	
	3 号廃棄物埋設地	
	確からしい設定	厳しい設定
0 年	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}
1,000 年後	1.01×10^{-10}	1.02×10^{-10}

(イ) 埋設設備等のセメント系材料

埋設設備を構成するセメント系材料の主要な水和鉱物であるケイ酸カルシウム水和物(C-S-H ゲル)は、地下水との反応により緩やかに溶脱し Ca/Si 比は徐々に低下する。しかしながら、廃棄物埋設地内への地下水浸入量はセメント量に対して十分少ないため、状態設定を行う評価期間内において収着性に影響を与えるような著しい Ca/Si 比の低下は生じず、埋設設備内は高 pH 環境 (pH11 以上) となると考えられる。そのため、固相の変化は収着性に影響は生じないものとし、埋設設備内の間隙水は高 pH が維持されるものとして、このような環境条件を想定した試験に基づき収着性を設定する。

(三) 有機物影響(詳細は補足説明資料 8「5. (7) 有機物による収着影響」参照)

埋設設備に存在する可能性のある有機物は、主にセルロースである⁽³³⁾。セルロースはアルカリ性の環境下において分解し、生成したイソサッカリン酸 (ISA) が放射性物質と錯体を形成することで、収着性に影響することが考えられる。その影響は、間隙水中の分解生成物の濃度に依存する⁽⁴⁰⁾。

アルカリ環境での分解試験結果⁽⁴⁴⁾に基づいて、確からしい設定はセルロースの 5%、厳しい設定は 30%が分解することとし、セメント系材料への収着⁽⁴⁰⁾を考

慮して、間隙水中の分解生成物の濃度を設定する。

(四) 微生物影響

微生物影響については、岩盤(鷹架層)中では微生物活動によって有機物が無機化することが考えられるため、収着性の設定に際して炭素(C-14)の化学形態が無機形態となることを考慮する。

(e) 着目した移行抑制機能の状態変化の設定

「(b) 影響事象の抽出・分析(熱-水理-力学-化学)」、 「(c) 廃棄物埋設地の初期状態の設定」及び「(d) 各物理的・化学的性質の長期的な状態変化の評価」の結果に基づき、廃棄物埋設地及び周辺岩盤(鷹架層)の低透水性及び収着性の長期的な状態変化を設定する。

(一) 低透水性(詳細は補足説明資料 6「3. 廃棄物埋設地の状態設定」参照)

難透水性覆土及び下部覆土の低透水性は、力学的影響(金属腐食による体積膨張、ガス発生、地震)及び化学的影響(地下水との反応)によって変化が生じる。これらの変化は、覆土完了時点である初期状態から、埋設設備への地下水の浸入によって徐々に進行する。

力学的影響及び化学的影響は相互干渉せずに、独立して覆土に影響を与えると判断するが、状態設定においては、透水係数の増加を局所的に見込むものとする。力学的影響により開口を生じないケースは、化学的影響による変質のみによる状態を設定する。開口が生じるケースは、開口部付近において化学変質が促進されるものとして、透水係数を変質後から更に2桁以上引き上げた状態を設定する。

確からしい設定及び厳しい設定における難透水性覆土及び下部覆土の等価透水係数を第21表に示す。等価透水係数は、上記の状態設定に基づき、難透水性覆土及び下部覆土の厚さと透水係数から算出する。

なお、周辺岩盤についても、覆土と同様の化学的影響により低透水性に変化が生じると考えられるが、その範囲は極めて限定的であり、化学的影響は無視できる。

以上の状態設定に基づき、埋設設備から上部覆土への流出水量($Q_{co}(t)$)及び埋設設備から鷹架層への流出水量($Q_{go}(t)$)を有限要素法による鉛直断面2次元地下水浸透流解析により算定し設定する。地下水浸透流解析に用いる動水勾配の設定値を第5表、透水係数の設定値を第22表、線量の評価に用いる埋設設備か

ら上部覆土への流出水量及び埋設設備から鷹架層への流出水量の設定値を第 23 表に示す。

第 21 表 難透水性覆土及び下部覆土の等価透水係数

廃棄物埋設地	透水係数 (m/s) (評価期間 : 1,000 年後)	
	確からしい設定	厳しい設定
3 号廃棄物埋設地	2.0×10^{-10}	1.5×10^{-8}

第 22 表 地下水浸透流解析に用いる透水係数

地盤 又は覆土		計算 ケース	透水係数 (m/s)	設定の考え方
			3 号廃棄物埋設地	
廃棄物埋設地 周辺地盤	鷹架層	確からしい設定	5.0×10^{-8}	廃棄物埋設地付近で取得した N 値 50 以上の鷹架層中部層の透水係数の対数平均値*1 とする。
		厳しい設定	5.0×10^{-8}	
	第四紀層	確からしい設定	3.0×10^{-6}	廃棄物埋設地付近で取得した盛土、第四紀層及び N 値 50 未満の風化した鷹架層中部層の透水係数の対数平均値とする。
		厳しい設定	3.0×10^{-6}	
廃棄物埋設地	上部覆土	確からしい設定	3.0×10^{-6}	周辺土壌と同程度とする(第四紀層の透水係数と同じ値とする)。
		厳しい設定	3.0×10^{-6}	
	下部覆土	確からしい設定	1.0×10^{-8}	周辺岩盤*2 よりも若干小さい透水係数とする。
		厳しい設定	1.0×10^{-8}	
	難透水性覆土	確からしい設定	2.0×10^{-10}	将来千年後の力学及び化学影響を考慮した等価透水係数とする。
		厳しい設定	1.5×10^{-8}	
埋設設備	確からしい設定	1.0×10^{-5}	砂程度に劣化した状態の透水係数とする。	
	厳しい設定	1.0×10^{-5}		

*1: 原位置試験の対数平均値と巨視的透水係数(割目と基質部における原位置透水試験の透水係数とボーリングや掘削面の地質観察で得た割目のデータから算出)が同程度であることから、簡単に求められる原位置試験の対数平均値を採用した。なお、これらの透水係数を用いて敷地の調査坑道の空洞からの湧水量を 3 次元地下水浸透流解析で計算し、実測値とほぼ一致していることを確認している。

*2: 想定した周辺岩盤は N 値 50 以上の鷹架層とした(透水係数 : $5.0 \times 10^{-8} \sim 1.1 \times 10^{-7}$ (m/s))

第 23 表 線量の評価に用いる埋設設備から上部覆土及び埋設設備から鷹架層への流出水量

廃棄物埋設地	設定	埋設設備から上部覆土への流出水量 (m ³ /y)	埋設設備から鷹架層への流出水量 (m ³ /y)
3号廃棄物埋設地	確からしい設定	10	1,100
	厳しい設定	990	2,800

(二) 収着性(詳細は補足説明資料 8「5. 影響事象による各バリア材料への放射性物質の収着影響」参照)

埋設設備及び廃棄体に含まれる有機物の分解生成物が、放射性物質と錯体を形成することで収着性が低下する

収着性に対する影響のうち、確からしい設定及び厳しい設定で異なるものは、有機物影響ではセルロースの分解率とし、分解生成物である ISA の濃度に応じて収着性を設定する。

また、微生物影響については、確からしい設定及び厳しい設定ともに有機炭素が微生物活動によって無機化することを考慮し、炭素(C-14)は無機形態として岩盤(鷹架層)の収着性を設定する。

各部材の収着性は、後述の「(iv) 線量評価パラメータ」において分配係数として扱う。分配係数は、上述の影響事象の状態変化の評価及び状態設定を踏まえ、想定される廃棄物埋設地の環境条件で取得した試験データ又は文献値により設定する。具体的には、実際に廃棄物埋設地を構成する埋設設備及び覆土の各バリア材料並びに廃棄物埋設地周辺から採取した岩盤(鷹架層)を使用し、想定される環境条件(温度、pH、地下水組成)及び放射性物質の化学形態を考慮した試験系で実測された分配係数を適用することを基本とする。

(ii) 線量評価シナリオ

線量評価シナリオは、確からしい自然事象シナリオ、厳しい自然事象シナリオ及び人為事象シナリオの3区分に分類して評価を行う。

各線量評価シナリオにおける放射性物質の移行挙動及び生活環境は、「(i) 状態設定」に基づき設定する。

a. 確からしい自然事象シナリオ

覆土完了後に地下水が再冠水することによって埋設設備の間隙は地下水によって満たされていくこととなる。地下水を介して放射性物質が移行することを評価する場合は、この過渡的な現象は比較的速やかに進行するものとし、線量評価上は覆土完了直後に地下水で飽和するものとして設定する。廃棄体は、放射性物質によって汚染された廃棄物を容器に固型化したものであるため、放射性物質が容易に漏出することはない。また、覆土完了後において長期的に腐食速度が小さい環境となる可能性が高いため、鋼製である容器は腐食し難い状況にあるが、長期的な評価を行う上では、容器による移行抑制機能は考慮しないものとする。

廃棄体内への地下水の浸入に伴い放射性物質が埋設設備内の間隙水中に漏出し、廃棄体から漏えいした放射性物質は、速やかに埋設設備内に均一に分布し、埋設設備内の廃棄体の固型化材、充填材、埋設設備等の収着性に応じて間隙水中に溶解するものとする。

埋設設備内の間隙水に漏えいした放射性物質は、覆土と鷹架層へそれぞれ移行する。漏えいした放射性物質は覆土又は鷹架層とそれぞれの間隙水中を移行し、沢及び尾駁沼又は尾駁沼が淡水化した河川に流入する（「(i) 状態設定 a. 地質環境に係る長期変動事象」参照）。地下水の流入した水域で得られる水産物及び水を利用して生産された農産物には、それぞれ水産物への濃縮係数及び農産物への移行係数に応じて放射性物質が移行する。よって、沢水及び沼水又は河川水を利用することによって公衆の被ばくが生じるものとする。

なお、仮に廃棄物埋設地から北側(老部川)へ流出した場合と南側(尾駁沼)へ流出した場合では、老部川までの放射性核種の移行距離が尾駁沼への移行距離よりも長いこと及び老部川の交換水量が事業所敷地中央部の沢を含む評価対象地点の交換水量よりも多いことにより、北側(老部川)へ流出した場合の方が線量は低くなる。したがって、地下水の流動方向が変化したとしても影響はない。

また、廃棄物埋設地の近傍土壌及び周辺岩盤への放射性物質の移行は基本的に地下水を介して生じる。漏えいした放射性物質は覆土又は鷹架層とそれぞれの間隙水中を移行するため、分配係数に応じて放射性物質が収着し、土壌や鷹架層中に放射性物質が残存するものとし、廃棄物埋設地における土地の利用によって公衆の被ばくが生じるものとする。

以上の放射性物質の移行挙動を踏まえ、「(i) 状態設定」で設定した確からしい設定のもとで、沢水の利用、沼水又は河川水の利用及び廃棄物埋設地の利用を対象として、明らかに線量が小さいもの及び他の被ばく経路で代表されるものを除外した以下の被ばく経路を設定し、評価対象個人の線量を評価する。

- (a) 尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取による内部被ばく
- (b) 沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による内部被ばく
- (c) 沢水を利用する灌漑作業による外部被ばく及び内部被ばく
- (d) 廃棄物埋設地における屋外労働作業による外部被ばく及び内部被ばく
- (e) 廃棄物埋設地における居住による外部被ばく及び内部被ばく
- (f) 廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物の摂取による内部被ばく

b. 厳しい自然事象シナリオ

廃棄物埋設地から生活環境までの放射性物質の移行過程は、確からしい自然事象シナリオと同じとする。厳しい自然事象シナリオでは、様々な不確かさと変動要因を考慮し、人工バリアや天然バリアの状態及び被ばくに至る経路の組合せのうち最も厳しい条件で評価する。

廃棄物埋設地から生活環境までの放射性物質の移行は、「(i) 状態設定」で設定した厳しい設定に基づく。

対象とする被ばく経路は以下のとおりとし、評価対象個人の線量を評価する。

- (a) 尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取による内部被ばく
- (b) 沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による内部被ばく
- (c) 沢水を利用する灌漑作業による外部被ばく及び内部被ばく
- (d) 廃棄物埋設地における屋外労働作業による外部被ばく及び内部被ばく
- (e) 廃棄物埋設地における居住による外部被ばく及び内部被ばく
- (f) 廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物の摂取による内部被ばく

c. 人為事象シナリオ

人為事象シナリオは、廃棄物埋設地の掘削による放射性物質の廃棄物埋設地からの漏出、天然バリア中の移行及び当該掘削後の土地利用を考慮したシナリオを対象とする。

人為事象シナリオの線量の評価対象とする被ばく経路を以下のとおり設定する。これらの被ばく経路は、廃棄物埋設地の掘削による放射性物質の廃棄物埋設地からの漏

出(地表への移行)と当該掘削後の土地利用を考慮した経路であり、掘削が生じるまでに放射性物質の漏えいが生じない条件で、バリア機能によらず掘削によって放射性物質が地表に移行した状態を想定することから、掘削後に天然バリア中の移行によって受ける線量は、掘削等による人為的な被ばく経路の線量に比べ十分に小さくなるため、評価の対象としない。

(a) 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による外部被ばく及び内部被ばく

(b) 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住による外部被ばく及び内部被ばく

(iii) 線量評価モデル

線量評価モデルは、廃棄物埋設地の状態や現象の特徴を適切に、かつ簡潔に表現でき、線量が保守側になるよう考慮する。

線量評価モデルの不確かさについては線量評価パラメータを保守的に設定することで考慮する。

a. 自然事象シナリオにおける線量評価モデル

線量評価モデルについて、まず評価の対象となる領域における放射性物質の移行に関する評価モデルを示し、次に被ばく経路に対応した線量を算出するための生活環境における被ばくに関する評価モデルを示す。

(a) 核種の移行に関する評価モデル

(一) 埋設設備及び難透水性覆土内の地下水中の移行

廃棄体に含まれる放射性物質は、埋設設備内に浸入した地下水に漏出し、埋設設備内の固相である固型化材、充填モルタル及び埋設設備のセメント系材料と分配平衡の状態にあるものとして評価する。埋設設備内の放射性物質は、材料の透水性と拡散性に依存するため、放射能濃度の分布が均一とはならないが、放射性物質の漏出を評価する上では単純化して均一であるものとして評価する。

埋設設備及び難透水性覆土内の地下水中の核種*i*の濃度は(1)式～(3)式を用いて計算する。なお、核種*i+1*は核種*i*の親核種を示す。

$$\frac{\partial C_{ww}(t, i)}{\partial t} = S_b \cdot De_b \cdot \left. \frac{\partial C_{bw}(z, t, i)}{\partial z} \right|_{z=0} - \{Q_{co}(t) + Q_{go}(t)\} \cdot C_{ww}(t, i)$$

$$\begin{aligned}
& -\lambda(i) \cdot \overline{\varepsilon \cdot Rf(i)} \cdot V_{meq} \cdot C_{ww}(t, i) \\
& + \lambda(i) \cdot \overline{\varepsilon \cdot Rf(i+1)} \cdot V_{meq} \cdot C_{ww}(t, i+1) \quad \dots (1)
\end{aligned}$$

(初期条件)

$$C_{ww}(0, i) = \frac{A_0(i)}{\varepsilon \cdot Rf(i) \cdot V_{meq}}$$

$$\overline{\varepsilon \cdot Rf(i)} = \sum_j [P(j) \cdot \varepsilon(j) \cdot Rf(i, j)] \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned}
& \varepsilon_b \cdot Rf_b(i) \cdot \frac{\partial C_{bw}(z, t, i)}{\partial t} \\
& = De_b \cdot \frac{\partial^2 C_{bw}(z, t, i)}{\partial z^2} - U_b(t) \frac{\partial C_{bw}(z, t, i)}{\partial z} \\
& \quad - \lambda(i) \cdot \varepsilon_b \cdot Rf_b(i) \cdot C_{bw}(z, t, i) \\
& \quad + \lambda(i) \cdot \varepsilon_b \cdot Rf_b(i+1) \cdot C_{bw}(z, t, i+1) \quad \dots (3)
\end{aligned}$$

(初期条件) $C_{bw}(z, 0, i) = 0$; $0 < z \leq L_b$

(境界条件) $C_{bw}(L_b, t, i) = 0$

$C_{bw}(0, t, i) = C_{ww}(t, i)$

$C_{ww}(t, i)$: 埋設設備内の時刻 t における核種 i の間隙水中濃度 (Bq/m³)

t : 覆土完了後の経過時間 (y)

$A_0(i)$: 核種 i の総放射エネルギー (Bq)

$P(j)$: 埋設設備内の媒体 j の体積分率 (-)

$\varepsilon(j)$: 埋設設備内の媒体 j の間隙率 (-)

$Rf(i, j)$: 埋設設備内の媒体 j の核種 i の遅延係数 (-) ;

$$= 1 + \frac{1 - \varepsilon(j)}{\varepsilon(j)} \cdot \rho(j) \cdot Kd(i, j)$$

$\rho(j)$: 埋設設備内の媒体 j の粒子密度 (kg/m³)

$Kd(i, j)$: 埋設設備内の媒体 j の核種 i の分配係数 (m³/kg)

V_{meq} : 分配平衡となる埋設設備の体積 (m³)

S_b : 難透水性覆土の拡散寄与面積 (m²)

De_b : 難透水性覆土の実効拡散係数 (m²/y)

$C_{bw}(z, t, i)$: 難透水性覆土の位置 z 、時刻 t における核種 i の間隙水中濃度 (Bq/m³)

z : 難透水性覆土における埋設設備からの距離 (m)

$Q_{co}(t)$: 埋設設備から上部覆土への流出水量 (m ³ /y)
$Q_{go}(t)$: 埋設設備から鷹架層への流出水量 (m ³ /y)
$\lambda(i)$: 核種 <i>i</i> の崩壊定数 (1/y) ; = $\ln 2/T_{1/2}(i)$
$T_{1/2}(i)$: 核種 <i>i</i> の半減期 (y)
ε_b	: 難透水性覆土の間隙率 (-)
$Rf_b(i)$: 難透水性覆土の核種 <i>i</i> の遅延係数 (-) ; $= 1 + \frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \cdot \rho_b \cdot Kd_b(i)$
ρ_b	: 難透水性覆土の粒子密度 (kg/m ³)
$Kd_b(i)$: 難透水性覆土の核種 <i>i</i> の分配係数 (m ³ /kg)
L_b	: 難透水性覆土の厚さ (m)
$U_b(t)$: 難透水性覆土の地下水流速 (m/y) ; = $Q_{co}(t)/S_b$

(二) 上部覆土内地下水中の移行

上部覆土内地下水中の核種*i*の濃度は、(4)式を用いて計算する。

$$\begin{aligned} & \varepsilon_c \cdot Rf_c(i) \cdot \frac{\partial C_{cw}(x, t, i)}{\partial t} \\ & = De_c \frac{\partial^2 C_{cw}(x, t, i)}{\partial x^2} - U_c \frac{\partial C_{cw}(x, t, i)}{\partial x} \\ & \quad - \lambda(i) \cdot \varepsilon_c \cdot Rf_c(i) \cdot C_{cw}(x, t, i) \\ & \quad + \lambda(i) \cdot \varepsilon_c \cdot Rf_c(i+1) \cdot C_{cw}(x, t, i+1) + f_c(t, i) \quad \dots (4) \end{aligned}$$

(初期条件) $C_{cw}(x, 0, i) = 0$; $-\infty < x < +\infty$

(境界条件) $C_{cw}(\infty, t, i) = 0$

$$U_c \cdot C_{cw}(-L_c, t, i) = De_c \cdot \left. \frac{\partial C_{cw}(x, t, i)}{\partial x} \right|_{x=-L_c}$$

$C_{cw}(x, t, i)$: 距離*x*、時刻*t*における上部覆土内地下水中の核種*i*の濃度 (Bq/m³)

x : 核種が流入する上部覆土下流端からの距離 (m)

L_c : 核種が流入する上部覆土の地下水流向方向長さ (m)

ε_c : 上部覆土の間隙率 (-)

$Rf_c(i)$: 上部覆土の核種 <i>i</i> の遅延係数(-) ; $= 1 + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \cdot \rho_c \cdot Kd_c(i)$
ρ_c	: 上部覆土の粒子密度 (kg/m ³)
$Kd_c(i)$: 上部覆土の核種 <i>i</i> の分配係数 (m ³ /kg)
De_c	: 上部覆土の実効分散係数 ; $= \varepsilon_c \cdot D_0 + \alpha_c \cdot U_c$ (m ² /y)
D_0	: 自由水中の拡散係数 (m ² /y)
α_c	: 上部覆土の分散長 (m)
U_c	: 上部覆土の地下水流速 (m/y)
$f_c(t, i)$: 核種 <i>i</i> の上部覆土への単位体積当たりの漏出量 (Bq/(m ³ · y)) ; $= \begin{cases} S_c(t, i)/V_{fc}(t) & (-L_c \leq x \leq 0) \\ 0 & (x < -L_c, 0 < x) \end{cases}$
$S_c(t, i)$: 核種 <i>i</i> の漏出量 (Bq/y) ; $= -S_b \cdot De_b \cdot \left. \frac{\partial C_{bw}(z, t, i)}{\partial z} \right _{z=L_b} + Q_{co}(t) \cdot C_{bw}(L_b, t, i)$
$V_{fc}(t)$: 漏出核種が流入する上部覆土の体積 (m ³) ; $= Q_c(t) \cdot L_c / U_c$
$Q_c(t)$: 上部覆土内地下水流量 (m ³ /y)

(三) 鷹架層内地下水中の移行

鷹架層内地下水中の核種*i*の濃度は、(5)式を用いて計算する。

$$\begin{aligned}
& \varepsilon_g \cdot Rf_g(i) \cdot \frac{\partial C_{gw}(x, t, i)}{\partial t} \\
& = De_g \cdot \frac{\partial^2 C_{gw}(x, t, i)}{\partial x^2} - U_g \cdot \frac{\partial C_{gw}(x, t, i)}{\partial x} \\
& \quad - \lambda(i) \cdot \varepsilon_g \cdot Rf_g(i) \cdot C_{gw}(x, t, i) \\
& \quad + \lambda(i) \cdot \varepsilon_g \cdot Rf_g(i+1) \cdot C_{gw}(x, t, i+1) \\
& \quad + f_g(t, i) \quad \dots (5)
\end{aligned}$$

(初期条件) $C_{gw}(x, 0, i) = 0$; $-\infty < x < +\infty$

(境界条件) $C_w(\infty, t, i) = 0$

$$U_g \cdot C_{gw}(-L_g, t, i) = De_g \cdot \left. \frac{\partial C_{gw}(x, t, i)}{\partial x} \right|_{x=-L_g}$$

$C_{gw}(x, t, i)$: 距離 x 、時刻 t における鷹架層内地下水中の核種 i の濃度
(Bq/m³)

x : 核種が流入する鷹架層下流端からの距離(m)

L_g : 核種が流入する鷹架層の地下水流向方向長さ(m)

ε_g : 鷹架層の間隙率(-)

$Rf_g(i)$: 鷹架層の核種 i の遅延係数(-) ;

$$= 1 + \frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} \cdot \rho_g \cdot Kd_g(i)$$

ρ_g : 鷹架層の粒子密度(kg/m³)

$Kd_g(i)$: 鷹架層の核種 i の分配係数(m³/kg)

De_g : 鷹架層の実効分散係数 ; $= \varepsilon_g \cdot D_0 + \alpha_g \cdot U_g$ (m²/y)

α_g : 鷹架層の分散長(m)

U_g : 鷹架層の地下水流速(m/y)

$f_g(t, i)$: 核種 i の鷹架層への単位体積当たりの漏出量(Bq/(m³・y)) ;

$$= \begin{cases} S_g(t, i)/V_{fg}(t) & (-L_g \leq x \leq 0) \\ 0 & (x < -L_g, 0 < x) \end{cases}$$

$S_g(t, i)$: 核種 i の漏出量(Bq/y) ; $= Q_{go}(t) \cdot C_{ww}(t, i)$

$V_{fg}(t)$: 漏出核種が流入する鷹架層の体積(m³) ;

$$= Q_g(t) \cdot L_g/U_g$$

$Q_g(t)$: 鷹架層内地下水流量 (m^3/y)

(四) 尾駁沼、河川水中又は沢水中の放射性物質の濃度

尾駁沼、河川水中又は沢水中の核種*i*の濃度は、(6)式を用いて計算する。

$$C_{sw}(t, i) = \frac{C_{cw}(X_{cs}, t, i) \cdot Q_{cs}(t) + C_{gw}(X_{gs}, t, i) \cdot Q_{gs}(t)}{Q_s(t)} \dots (6)$$

$C_{sw}(t, i)$: 尾駁沼、河川水中又は沢水中の核種*i*の濃度 (Bq/m^3)

X_{cs} : 核種が流入する上部覆土下流端から尾駁沼、河川又は沢までの評価上の距離 (m)

X_{gs} : 核種が流入する鷹架層下流端から尾駁沼、河川又は沢までの評価上の距離 (m)

$Q_{cs}(t)$: 核種が流入する上部覆土から尾駁沼、河川又は沢への地下水流入量 (m^3/y)

$Q_{gs}(t)$: 核種が流入する鷹架層から尾駁沼、河川又は沢への地下水流量 (m^3/y)

$Q_s(t)$: 尾駁沼、河川又は沢の交換水量 (m^3/y)

(五) 沢水を利用する灌漑土壌中の放射性物質の濃度

沢水を利用する灌漑土壌中の核種*i*の濃度は、(7)式を用いて計算する。

$$\frac{dC_{soil}^{ir}(t, i)}{dt} = \frac{C_{ir}(t, i) \cdot F_{ir} \cdot Q_{ir}}{V_{ir} \cdot (1 - \varepsilon_{ir}) \cdot \rho_{ir}} - \frac{Qp_{ir} \cdot C_{soil}^{ir}(t, i)}{V_{ir} \cdot \{\varepsilon_{ir} + (1 - \varepsilon_{ir}) \cdot \rho_{ir} \cdot Kd_{ir}(i)\}} - \lambda(i) \cdot C_{soil}^{ir}(t, i) + \lambda(i) \cdot C_{soil}^{ir}(t, i + 1) \dots (7)$$

$C_{soil}^{ir}(t, i)$: 灌漑土壌中の核種*i*の濃度 (Bq/kg)

$C_{ir}(t, i)$: 灌漑用水中の核種*i*の濃度 (Bq/m^3) ; $= fu_{ir} \cdot C_{sw}(t, i)$

fu_{ir} : 灌漑における放射性物質を含む沢水の利用率 (-)

F_{ir} : 灌漑土壌への放射性物質の残留割合 (-)

Q_{ir} : 単位面積当たりの灌漑水量 ($m^3/(m^2 \cdot y)$)

V_{ir} : 灌漑土壌の有効体積 (m^3/m^2)

ε_{ir} : 灌漑土壌の間隙率 (-)

ρ_{ir} : 灌漑土壌の粒子密度 (kg/m^3)

Qp_{ir} : 灌漑土壌浸透水量 ($m^3/(m^2 \cdot y)$)

$Kd_{ir}(i)$: 灌漑土壌の核種*i*の分配係数(m³/kg)

(六) 廃棄物埋設地の土壌中の放射性物質の濃度

上部覆土内地下水に含まれる放射性物質が、廃棄物埋設地の土壌に残留したときの土壌中の核種*i*の濃度は、(8)式を用いて計算する。

$$C_{soil}^d(t, i) = C_{cw}(X_d, t, i) \cdot \left(\frac{\varepsilon_d}{(1 - \varepsilon_d) \cdot \rho_d} + Kd_d(i) \right) \cdot G_d \quad \dots (8)$$

$C_{soil}^d(t, i)$: 廃棄物埋設地の土壌中の核種*i*の濃度(Bq/kg)

$C_{cw}(X_d, t, i)$: 距離 X_d 、時刻*t*における上部覆土内地下水中の核種*i*の濃度(Bq/m³)

X_d : 核種が流入する上部覆土下流端から濃度算出地点までの評価上の距離(m)

ε_d : 廃棄物埋設地の土壌の間隙率(-)

ρ_d : 廃棄物埋設地の土壌の粒子密度(kg/m³)

$Kd_d(i)$: 廃棄物埋設地の土壌の核種*i*の分配係数(m³/kg)

G_d : 廃棄物埋設地の土壌の希釈係数(-)

(b) 生活環境における被ばくに関する評価モデル

(一) 尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取による内部被ばく

尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取により内部被ばくする場合の線量は、(9)式を用いて計算する。

$$D_{aq}(p, t) = \sum_i \left(\sum_m \{C_{sw}(t, i) \cdot CF_{aq}(i, m) \cdot M_{aq}(m) \cdot f_{aq}(p, m) \cdot DCF_{ing}(i)\} \right) \quad \dots (9)$$

$D_{aq}(p, t)$: 公衆 p の尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取による線量 (Sv/y)

$CF_{aq}(i, m)$: 水産物 m における核種 i の濃縮係数 (m³/kg)

$M_{aq}(m)$: 水産物 m の摂取量 (kg/y)

$f_{aq}(p, m)$: 公衆 p の水産物 m の市場希釈係数 (-)

$DCF_{ing}(i)$: 核種 i の経口摂取による線量換算係数 (Sv/Bq)

(二) 沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による内部被ばく

沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取により内部被ばくする場合の線量は、(10)式及び(11)式を用いて計算する。

(ア) 灌漑農産物中の放射性物質の濃度

$$C_{ag}^{ir}(t, i) = C_{soil}^{ir}(t, i) \cdot B_{ag}^{ir}(i) \quad \dots (10)$$

$C_{ag}^{ir}(t, i)$: 灌漑農産物中の核種 i の濃度 (Bq/kg)

$B_{ag}^{ir}(i)$: 灌漑農産物への核種 i の移行係数 ((Bq/kg-wet 農産物)/(Bq/kg-dry 土壌))

(イ) 灌漑農産物摂取による線量

$$D_{ag}^{ir}(p, t) = \sum_i \{C_{ag}^{ir}(t, i) \cdot M_{ag}^{ir} \cdot f_{ag}(p) \cdot DCF_{ing}(i)\} \quad \dots (11)$$

$D_{ag}^{ir}(p, t)$: 公衆 p の沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による線量 (Sv/y)

M_{ag}^{ir} : 灌漑農産物の摂取量 (kg/y)

$f_{ag}(p)$: 公衆 p の農産物の市場希釈係数 (-)

(三) 沢水を利用する灌漑作業による外部被ばく及び内部被ばく

沢水を利用する灌漑作業による地表面からの外部被ばく及び地表面の放射性物質を含むダストの吸入摂取による内部被ばくについては、沢水中の放射性物質の濃度、土壌への残留割合から求めた土壌中の放射性物質の濃度に基づき、(12)式及び(13)式を用いて計算する。

(ア) 外部被ばく

$$D_{farm_ext}^{ir}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}^{ir}(t, i) \cdot Sh_{work}(p, i) \cdot T_{farm}^{ir}(p) \cdot DCF_{ext}(i)\} \quad \dots (12)$$

$D_{farm_ext}^{ir}(p, t)$: 公衆 p の沢水を利用する灌漑作業時における外部放射線に係る線量(Sv/y)

$Sh_{work}(p, i)$: 公衆 p の屋外労働作業時の核種 i の遮蔽係数(-)

$T_{farm}^{ir}(p)$: 公衆 p の灌漑作業時間(h/y)

$DCF_{ext}(i)$: 核種 i の外部放射線に係る線量換算係数
(Sv/h)/(Bq/kg)

(イ) 内部被ばく

$$D_{farm_inh}^{ir}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}^{ir}(t, i) \cdot fd_{farm}^{ir} \cdot I_{work} \cdot T_{farm}^{ir}(p) \cdot DCF_{inh}(i)\} \quad \dots (13)$$

$D_{farm_inh}^{ir}(p, t)$: 公衆 p の沢水を利用する灌漑作業時における吸入摂取による線量(Sv/y)

fd_{farm}^{ir} : 灌漑作業時の空气中ダスト濃度(kg/m³)

I_{work} : 屋外労働作業時の呼吸率(m³/h)

$DCF_{inh}(i)$: 核種 i の吸入摂取による線量換算係数
(Sv/Bq)

(四) 廃棄物埋設地における屋外労働作業による外部被ばく及び内部被ばく

廃棄物埋設地における屋外労働作業により外部被ばく及び内部被ばくする場合の線量は、土壌中の放射性物質の濃度に基づき、(14)式及び(15)式を用いて計算する。

(ア) 屋外労働作業による外部被ばく

$$D_{work_ext}(p, t) \quad \dots (14)$$

$$= \sum_i \{C_{soil}(t, i) \cdot Sh_{work}(p, i) \cdot T_{work}(p) \cdot DCF_{ext}(i)\}$$

$D_{work_ext}(p, t)$: 公衆 p の屋外労働作業時の外部放射線に係る線量 (Sv/y)

$C_{soil}(t, i)$: 土壌中の核種 i の濃度 (Bq/kg)

$T_{work}(p)$: 公衆 p の屋外労働作業時間 (h/y)

(イ) 屋外労働作業による内部被ばく

$$D_{work_inh}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}(t, i) \cdot fd_{work} \cdot I_{work} \cdot T_{work}(p) \cdot DCF_{inh}(i)\} \quad \dots (15)$$

$D_{work_inh}(p, t)$: 公衆 p の屋外労働作業時の吸入摂取による線量 (Sv/y)

fd_{work} : 屋外労働作業時の空气中ダスト濃度 (kg/m³)

(五) 廃棄物埋設地における居住による外部被ばく及び内部被ばく

廃棄物埋設地での居住により屋外において外部被ばく及び内部被ばくする場合の線量並びに居住により屋内において内部被ばくする場合の線量は、それぞれの土壌中の放射性物質の濃度に基づき、(16)式～(18)式を用いて計算する。

(ア) 居住時の屋外における被ばく

① 外部被ばく

$$D_{haboh_ext}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}(t, i) \cdot Sh_{haboh}(i) \cdot T_{haboh}(p) \cdot DCF_{ext}(i)\} \quad \dots (16)$$

$D_{haboh_ext}(p, t)$: 公衆 p の居住時の屋外活動による外部放射線に係る線量 (Sv/y)

$Sh_{haboh}(i)$: 居住者の屋外における核種 i の遮蔽係数 (-)

$T_{haboh}(p)$: 公衆 p の居住時の屋外における滞在時間 (h/y)

② 内部被ばく

$$D_{haboh_inh}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}(t, i) \cdot fd_{haboh} \cdot I_{inh} \cdot T_{haboh}(p) \cdot DCF_{inh}(i)\} \quad \dots (17)$$

$D_{haboh_inh}(p, t)$: 公衆 p の居住時の屋外活動による吸入摂取による線量 (Sv/y)

fd_{haboh} : 屋外における空气中ダスト濃度 (kg/m³)

I_{inh} : 居住時の呼吸率 (m³/h)

(イ) 居住時の屋内における内部被ばく

$$D_{habih_inh}(p, t) = \sum_i \{C_{soil}(t, i) \cdot fd_{habih} \cdot I_{inh} \cdot T_{habih}(p) \cdot DCF_{inh}(i)\} \quad \dots (18)$$

$D_{habih_inh}(p, t)$: 公衆 p の屋内における吸入摂取による線量 (Sv/y)

fd_{habih} : 屋内における空气中ダスト濃度 (kg/m³)

$T_{habih}(p)$: 公衆 p の居住時の屋内における滞在時間 (h/y)

(六) 廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物の摂取による被ばく

廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物を摂取することにより内部被ばくする場合の線量は、(19)式及び(20)式を用いて計算する。

$$C_{ag}^v(t, i) = C_{soil}(t, i) \cdot B_{ag}^v(i) \quad \dots (19)$$

$$D_{ag}^v(p, t) = \sum_i \{C_{ag}^v(t, i) \cdot M_{ag}^v \cdot f_{ag}(p) \cdot DCF_{ing}(i)\} \quad \dots (20)$$

$C_{ag}^v(t, i)$: 生産される農耕農産物中の核種 i の濃度 (Bq/kg)

$B_{ag}^v(i)$: 農耕農産物への核種 i の移行係数
((Bq/kg-wet 農産物) / (Bq/kg-dry 土壌))

$D_{ag}^v(p, t)$: 公衆 p の生産される農耕農産物の摂取による線量 (Sv/y)

M_{ag}^v : 農耕農産物の摂取量 (kg/y)

b. 人為事象シナリオにおける評価モデル

本シナリオにおける評価モデルについて、まず評価の対象となる領域における核種の移行に関する評価モデルを示し、次に被ばく経路に対応した線量を算出するための生活環境における被ばくに関する評価モデルを示す。

(a) 核種の移行に関する評価モデル

(一) 建設作業における土壌中の放射性物質濃度

地下数階を有する建物の建設作業において、放射線源となる掘削される埋設設備を含む土壌中の核種 i の濃度は(21)式を用いて計算する。

$$C_d(t, i) = \frac{A_0(i)}{V_w \cdot (1 - \varepsilon_s) \cdot \rho_s} \cdot G_p \cdot \exp(-\lambda(i) \cdot t) \quad \dots (21)$$

$C_d(t, i)$: 土壌中の核種*i*の濃度 (Bq/kg)

V_w : 廃棄体の総体積 (m³)

ε_s : 土壌の間隙率 (-)

ρ_s : 土壌の粒子密度 (kg/m³)

G_p : 土壌の希釈係数 (-)

(b) 生活環境における被ばくに関する評価モデル

(一) 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による外部被ばく及び内部被ばく

廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業により外部被ばく及び内部被ばくする場合の線量は、それぞれ(14)式及び(15)式を用いて計算する。ただし、土壌中の核種*i*の濃度 $C_{soil}(t, i)$ を $C_d(t, i)$ に置き換える。

(二) 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住による被ばく

廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住により外部被ばく及び内部被ばくする線量は、それぞれ(16)式～(18)式を用いて計算する。ただし、土壌中の核種*i*の濃度 $C_{soil}(t, i)$ を $C_d(t, i)$ に置き換える。

(iv) 線量評価パラメータ

放射性物質の生活環境への移行挙動に関しては、確からしい自然事象シナリオでは、「(i) 状態設定 a. 地質環境に係る長期変動事象」及び「(i) 状態設定 c. 廃棄物埋設地の状態設定」で設定した確からしい設定、不確かさを考慮する厳しい自然事象シナリオでは厳しい設定に基づいて線量評価パラメータを設定する。また、生活環境における公衆の被ばくに係る線量評価パラメータに関しては、最新の統計、調査及び文献に基づいて、確からしい自然事象シナリオでは現実的と考えられる値、厳しい自然事象シナリオでは線量が最も厳しくなる保守的な値を設定する。

確からしい自然事象シナリオと厳しい自然事象シナリオとで異なる設定とする線量評価パラメータは、「埋設設備から上部覆土への流出水量」、「埋設設備から鷹架層への流出水量」、「各核種の分配係数」、「尾駁沼又は河川の交換水量」及び「廃棄物埋

設地の土壌の希釈係数」とする。

また、これら以外の各線量評価パラメータにも、様々な不確かさがあると考えられるが、最も可能性が高いと考えられるパラメータの設定が困難なもの、不確かさを踏まえても線量影響が小さいと考えられるものは、各線量評価シナリオで共通の値とし、適切な保守性を考慮した設定とする。

各パラメータの詳細は補足説明資料 9 を参照。

(v) 線量評価結果

以下に示すとおり、廃棄物埋設地は廃止措置の開始後(覆土完了から 300 年後)における埋設した廃棄体に起因して発生すると想定される放射性物質の環境への影響が基準を満たす設計となっており、覆土完了後 300 年で、廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行できる見通しである。

線量評価結果の経年変化グラフは補足説明資料 10 を参照。

a. 確からしい自然事象シナリオ

廃止措置の開始後の評価における確からしい自然事象シナリオの線量の計算結果を第 24 表に示す。評価対象個人の最大線量は約 $8.7 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/y}$ (3 号廃棄物埋設地) である。

また、事業所内の各廃棄物埋設地の重畳を考慮しても最大線量は約 $4.7 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/y}$ であり、「許可基準規則解釈」に示されている線量の $10 \mu\text{Sv/y}$ を超えない。

b. 厳しい自然事象シナリオ

廃止措置の開始後の評価における厳しい自然事象シナリオの線量の計算結果を第 25 表に示す。評価対象個人の最大線量は約 $3.7 \times 10^0 \mu\text{Sv/y}$ (3 号廃棄物埋設地) である。

また、事業所内の各廃棄物埋設地の重畳を考慮しても最大線量は約 $1.2 \times 10^1 \mu\text{Sv/y}$ であり、「許可基準規則解釈」に示されている線量の $300 \mu\text{Sv/y}$ を超えない。

c. 人為事象シナリオ

廃止措置の開始後の評価における人為事象シナリオの線量の計算結果を第 26 表に示す。廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による被ばくの線量は約 $2.5 \times 10^{-3} \text{mSv/y}$ (3 号廃棄物埋設地)、廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住による被ばくの線量は約 1.9×10^{-3}

mSv/y(3号廃棄物埋設地)であり、「許可基準規則解釈」に示されている線量の1mSv/yを超えない。

d. その他

バリア機能の一部が喪失した場合を仮定した評価における線量は、確からしい自然事象シナリオと比較して、最も厳しい結果となる人工バリアの収着性が喪失した場合でも線量上昇は約20倍である。各バリア材の機能喪失を仮定した3号廃棄物埋設地の線量評価結果を第27表に示す。線量は線量拘束値である $300\mu\text{Sv/y}$ に比べ十分に小さく、各バリアが有する機能については、その機能を構成する特性の一つに過度に依存していない。

第 24 表 廃止措置の開始後における評価の結果

(確からしい自然事象シナリオ)

評価対象者	線量 ($\mu\text{Sv/y}$)	
	3号廃棄物埋設地	各廃棄物埋設地の寄与を考慮した線量*1
(a) 居住者	約 8.7×10^{-2}	約 4.7×10^{-1}

*1：廃棄物埋設地の利用による被ばくは重畳しないため、各廃棄物埋設地の寄与を考慮した最大線量は、覆土完了後の最も線量の大きい廃棄物埋設地の利用による線量に、全廃棄物埋設地の重畳の可能性のある水利用による被ばく経路の線量を足し合わせている。

第 25 表 廃止措置の開始後における評価の結果

(厳しい自然事象シナリオ)

評価対象者	線量 ($\mu\text{Sv/y}$)	
	3号廃棄物埋設地	各廃棄物埋設地の寄与を考慮した線量*1,2
(a) 漁業従事者	約 3.7×10^0	約 1.2×10^1
(b) 農業従事者(米)	約 1.8×10^0	
(c) 農業従事者(米以外)	約 1.9×10^0	
(d) 畜産業従事者	約 6.2×10^{-1}	
(e) 建設業従事者	約 7.9×10^{-1}	
(f) 居住者	約 8.5×10^{-1}	

*1：廃棄物埋設地の利用による被ばくは重畳しないため、各廃棄物埋設地の寄与を考慮した最大線量は、覆土完了後の最も線量の大きい廃棄物埋設地の利用による線量に、全廃棄物埋設地の重畳の可能性のある水利用による被ばく経路の線量を足し合わせている。

*2：評価対象個人のうち、被ばく線量が最大となる漁業従事者の線量を記載している。

第 26 表 廃止措置の開始後における評価の結果

(人為事象シナリオ)

評価対象者 (被ばく経路)	線量 (mSv/y)
	3号廃棄物 埋設地
(a) 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業による外部被ばく及び内部被ばく	約 2.5×10^{-3}
(b) 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住による外部被ばく及び内部被ばく	約 1.9×10^{-3}

第 27 表 各バリア材の機能喪失を仮定した 3 号廃棄物埋設地の線量評価結果

考慮した 状態設定	状態設定に基づく 線量評価パラメータ設定値		設定の考え方	線量(μ Sv/y) (居住者*1)	
人工バリアの 収着性を喪失 したケース	分配 係数	廃棄体(m^3/kg)	全核種 0	人工バリアの収着性を 無視したケースとし て、覆土完了時点から 分配平衡領域の分配係 数を全核種 0 (m^3/kg)と 設定する。	約 1.9×10^0 支配核種 : C-14
		充填モルタル(m^3/kg)	全核種 0		
		コンクリート(m^3/kg)	全核種 0		
天然バリアの 収着性を喪失 したケース	分配 係数	岩盤(鷹架層)(m^3/kg)	全核種 0	天然バリアの化学的遅 延機能は無視したケー スとして、覆土完了時 点から鷹架層の分配係 数を全核種 0(m^3/kg)と 設定する。	約 7.6×10^{-1} 支配核種 : Am- 241*2
人工バリアの 低透水性を喪 失したケース *3*4		埋設設備から 覆土への 流出水量(m^3/y)	5,200	人工バリアの低透水性 を無視したケースとし て、覆土完了時点から 各バリアの透水係数を 厳しい自然事象シナリ オの設定(1.5×10^{-8} (m/s))よりも更に厳し い設定(1.0×10^{-7} (m/s))とする。*3	約 7.0×10^{-1} 支配核種 : C-14
		埋設設備から 鷹架層への 流出水量(m^3/y)	6,200		
確からしい自 然事象シナリ オ		-	-	-	約 8.7×10^{-2} 支配核種 : C-14
厳しい自然事 象シナリオ		-	-	-	約 8.5×10^{-1} 支配核種 : C-14

*1 : 被ばく経路に関しては許可基準規則第十条第四号に記載した確からしい自然事象シナリオにおける全ての被ばく経路を対象とした。

*2 : 確からしい自然事象シナリオの支配核種である C-14 は天然バリアの収着性(分配係数)が小さいことから、支配核種は天然バリアの収着性(分配係数)の大きい Am-241 に変わっている。

*3 : 人工バリアの低透水性の喪失したケースとして、難透水性覆土及び下部覆土の膨潤性が損なわれ、細粒子が残留する状態を想定し、透水係数を 1.0×10^{-7} (m/s)と設定する。

*4 : 本ケースの埋設設備から覆土への流出水量及び埋設設備から鷹架層への流出水量は、設定した透水係数を基に 2 次元地下水浸透流解析(第十条 廃棄物埋設地のうち第四号 (廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料 7「線量評価パラメータ-埋設設備からの流出水量-」を参照)により算出を行った。確からしい自然事象シナリオの設定値はそれぞれ $10(m^3/y)$ 、 $1,100(m^3/y)$ 、厳しい自然事象シナリオの設定値はそれぞれ $990(m^3/y)$ 、 $2,800(m^3/y)$ である。

5. 参考文献

- (1) International Commission on Radiological Protection(1998): Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste, ICRP Publication 81
- (2) International Commission on Radiological Protection(2006): Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public and The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process, ICRP Publication 101
- (3) 土木学会(2008): 余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方、社団法人土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会、2008.6
- (4) 高橋雅紀(2004): 日本列島の E-W 短縮テクトニクスの原因とその開始時期、日本地震学会 2004 年秋季大会講演予稿集、B048
- (5) 吉田武義、中島淳一、長谷川昭、佐藤比呂志、長橋良隆、木村純一、田中明子、Prima, O. D. A.、大口健志(2005): 後期新生代、東北本州弧における火成活動史と地殻・マントル構造、第四紀研究
- (6) 産業技術総合研究所(2012): 地質・気候関連事象の時間スケールに対する不確実性の検討、独立行政法人産業技術総合研究所 深部地質環境研究コア
- (7) 工藤崇、小林淳、山元孝広、岡島靖司、水上啓治(2011): 十和田火山における噴火活動様式の時代変遷と長期予測、日本第四紀学会講演会要旨集、Vol. 41、pp. 82-83
- (8) 小池一之、町田洋編(2001): 日本の海成段丘アトラス、東京大学出版会
- (9) EPICA community members(2004): Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, NATURE, 429
- (10) IPCC(2007): Climate Change 2007: SYNTHESIS REPORT, A Report of the Intergovernmental Panel Climate Change
- (11) Ayako Abe-Ouchi, Fuyuki Saito, Kenji Kawamura, Maureen E. Raymo, Jun'ichi Okuno, Kunio Takahashi, Heinz Blatter. (2016): Isolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume, Nature, vol.500, p.190-194
- (12) ANDRA(2005): Phenomenological evolution of a geological repository

- (13) Yamanaka, M., Ishikawa, S. and Sugawara, K. (1990): PALYNOLOGICAL STUDIES OF QUATERNARY SEDIMENTS, IN NORTHEAST JAPAN, VII. SHIRIYA-ZAKI MOOR IN SHIMOKITA PENINSULA, ECOLOGICAL REVIEW, 22, 1
- (14) 松末和之、藤原治、末吉哲雄(2000) : 日本列島における最終氷期最寒冷期の気候、サイクル機構技報、vol.6
- (15) Nakagawa, T., Tarasova, P.E., Nishida, K., Gotanda, K. and Yasuda, Y. (2002): Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: application to surface and Late Quaternary spectra
- (16) 登坂博行(2006) : 地圏の水環境科学, 東京大学出版会
- (17) 気象庁(1981~2010) : 過去の気象データ検索、
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- (18) 気象庁(1981~2010) : 世界の地点別年平均値、
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climatview/frame.php>
- (19) L.Labeyrie, J.Cole, K.Alverson and T.Stocker(2003): The History of Climate Dynamics in the Late Quaternary, Paleoclimate, Global Change and the Future, p. 33-71.
- (20) Rohling et al. : Magnitudes of sea-level lowstands of the past 500,000 years, NATURE, (394), pp.162-165, (1998)
- (21) IPCC(2013) : Climate Change 2013:The Physical Science Basis, AR5, WG I, 第5次評価報告書第1作業部会報告書-技術要約-、気象庁翻訳(2013)
- (22) C.W.Thornthwaite(1948): An Approach toward a Rational Classification of Climate , Geographical Review Vol. 38, No. 1 (Jan., 1948), pp. 55-94
- (23) 亀井翼(2013) : モグラによる遺物の埋没と埋没後擾乱-茨城県稲敷郡美浦村陸平貝塚を対象として-、第四紀研究、Vol.52、No.1、pp.1-12
- (24) 一般社団法人 日本原子力学会(2018) : 日本原子力学会標準 浅地中ピット処分の安全評価手法 : 2016
- (25) 社団法人 土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会(2009) : 余裕深度処分における地下施設の設計, 品質管理および検査の考え方

- (26) 社団法人 土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会(2008)：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方
- (27) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会(平成 15 年)：廃棄物安全小委員会報告書－高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて－
- (28) International Atomic Energy Agency(2004)：Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Results of a co-ordinated research project
- (29) 一般社団法人 日本機械学会(2014)：発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格
- (30) 日本建築学会(2013)：原子力施設鉄筋コンクリート構造 計算規準・同解説、pp. 76～77
- (31) 横山信吾、佐藤努、大谷祐介、高山英樹、中村邦彦、田中幸久、廣永道彦(平成 19 年)：低レベル放射性廃棄物処分施設における人工バリアの耐久性評価、-アルカリ環境下でのベントナイト系材料中のモンモリロナイト溶解に関する研究-、電力中央研究所研究報告、N07006
- (32) 土木学会(2012)：コンクリート標準示方書[設計編]、pp. 91-98
- (33) 北海道電力株式会社、東北電力株式会社、東京電力ホールディングス株式会社、中部電力株式会社、北陸電力株式会社、関西電力株式会社、中国電力株式会社、四国電力株式会社、九州電力株式会社、日本原子力発電株式会社(2016)：充填固化体の標準的な製作方法
- (34) 三菱マテリアル株式会社・日揮株式会社・大成建設株式会社・清水建設株式会社、鹿島建設株式会社(平成 9 年)：六ヶ所 2 号廃棄物埋設施設に関するガスの透気評価
- (35) 藤山哲雄ら(平成 20 年)：ベントナイト・セメント系材料のガス移行評価に関する文献調査、電力中央研究所 調査報告、N07021
- (36) 田中幸久、廣永道彦(平成 26 年)：飽和した Ca 型ベントナイト混合土のガス移行特性評価、電力中央研究所報告、N13011

- (37) 前田宗宏、棚井憲治、伊藤勝、三原守弘、田中益弘(1998)：カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性－膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度及び弾性係数－、PNC TN8410 98-021
- (38) 下水道地震対策技術検討委員会(平成 20 年)：下水道地震対策技術検討委員会報告書 能登半島地震・新潟県中越沖地震の総括と耐震対策の評価および下水道の担うべき機能を継続的に確保する方法の考え方
- (39) (社法)地盤工学会(2009)：地盤材料試験の方法と解説
- (40) 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(平成 17 年)：TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－
- (41) 金子昌章、三浦律彦、藤原愛、山本正史(平成 16 年)：還元性環境での金属腐食に起因するガス発生量評価、原環センター技術報告書、RWMC-TRJ-03001
- (42) Erich Wieland, Luc R. Van Loon(2003):Cementitious Near-Field Sorption Data Base for Performance Assessment of an ILW Repository in Opalinus Clay, PSI Bericht Nr. 03-06
- (43) 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(2005)：TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－根拠資料集 分冊 3 FEP
- (44) MARTIN A. GLAUS AND LUC R. VAN LOON(2008): Degradation of Cellulose under Alkaline Conditions: New Insights from a 12 Years Degradation Study, Environ. Sci. Technol. 42, 2906-2911

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

地質環境に係る長期変動事象

2020年12月

日本原燃株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 地質環境に係る長期変動事象の考え方.....	2
3. 状態設定.....	3
(1) プレート運動に起因する事象.....	3
(2) 気候変動に起因する事象.....	13
(3) プレート運動と気候変動の両者に起因する事象.....	58
(4) その他の事象.....	71
4. まとめ.....	73

添付資料1 想定される自然現象の選定について

添付資料2 事業所敷地周辺の地震の発生状況について

1. はじめに

本資料は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)」のうち、地質環境に係る長期変動事象について補足説明するものである。

長期状態設定において考慮すべき自然現象を第1表に示す。

第1表 長期状態設定において考慮すべき自然現象^{*1}

起回事象	長期事象	項目
プレート運動に 起因する事象	火山・火成活動	①火山の影響（火砕物密度流、降下火砕物）
	地震・断層活動	②地震、③液状化(覆土)、 ④断層活動(地盤の変形)
	隆起・沈降運動	⑤隆起・沈降
気候変動に起因する事象		⑥海水準変動、⑦気温、⑧降水量、 ⑨蒸発散量、⑩かん養量、 ⑪地下水位(地下水流動)、⑫河川流量
プレート運動と気候変動の両者に 起因する事象		⑬侵食
その他の事象		⑭生物学的事象、⑮透水性の変化

*1：長期状態設定において考慮すべき自然現象の選定については、添付資料1に詳細を示す。

2. 地質環境に係る長期変動事象の考え方

埋設設備を設置する地下の環境は、自然現象等の影響を受け難いことから、地上に比べ比較的安定である。しかし、長期的な観点で見ると、プレート運動及び気候変動によって、廃棄物埋設地を取り巻く地質環境は有意に変化することが予測される。

この地質環境に係る長期変動事象について、「プレート運動に起因する事象」、「気候変動に起因する事象」及び「プレート運動と気候変動の両者に起因する事象」に区分する⁽¹⁾。区分した各事象については、プレート運動や気候変動が過去から現在までの変動傾向とその要因が今後も継続するとみなし、それらを外挿して状態設定を行う。状態設定は、確からしい設定及び厳しい設定を設定する。

- ・ 確からしい設定：将来起こり得るなかで最も可能性が高いと考えられる状態とする。
- ・ 厳しい設定：過去の変化傾向とその要因の不確かさを網羅的に考慮し、科学的に合理的と考えられる範囲で最も厳しい状態とする。

状態設定を行う期間は、主要な放射性物質の半減期、放射エネルギー及び放射能濃度を踏まえ、1,000年程度までの期間とする。

なお、確からしい設定において最も可能性が高いと考えられる状態の設定が困難である場合は、不確かさを考慮して保守側に設定し、確からしい設定と厳しい設定で同様の値を用いるものとする。また、事象同士が密接に関係しており、両者で不確かさを考慮するのが適切でないと考えられる場合は、評価において保守的となる事象で不確かさを考慮して設定する。

3. 状態設定

(1) プレート運動に起因する事象

日本周辺には、大陸プレートであるユーラシアプレート及び北米プレート並びに海洋プレートであるフィリピン海プレート及び太平洋プレートがあり、大陸プレートの下に海洋プレートが沈み込んでいる。敷地の位置する東北日本弧は北米プレートに位置し、東側から太平洋プレートが沈み込むことで、おおむね東西方向の圧縮の力が生じている。

将来の日本列島周辺のプレート運動についても、今後数 10 万年から数 100 万年程度継続すると考えられる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。したがって、状態設定においては、現在のプレート運動が継続するものとして設定する。

プレート運動に起因する事象には、「火山・火成活動」、「地震・断層活動」及び「隆起・沈降運動」があげられる。

(i) 火山・火成活動

火山・火成活動によって、直接的に設備が破壊されること、また、敷地周辺が高温になることによって地下水流動場が変化することが想定されることから、火山・火成活動による状態設定について検討する。長期変動事象としては、降下火砕物に加えて、廃棄物埋設地に与える影響を考慮し、火砕物密度流についても検討する。

a. 火砕物密度流

短期的(数百年～数千年スケール)には、敷地に到達する可能性は十分に小さいため⁽⁵⁾、評価期間においては、火砕物密度流の熱的影響及び化学的影響については、考慮しない。

b. 降下火砕物

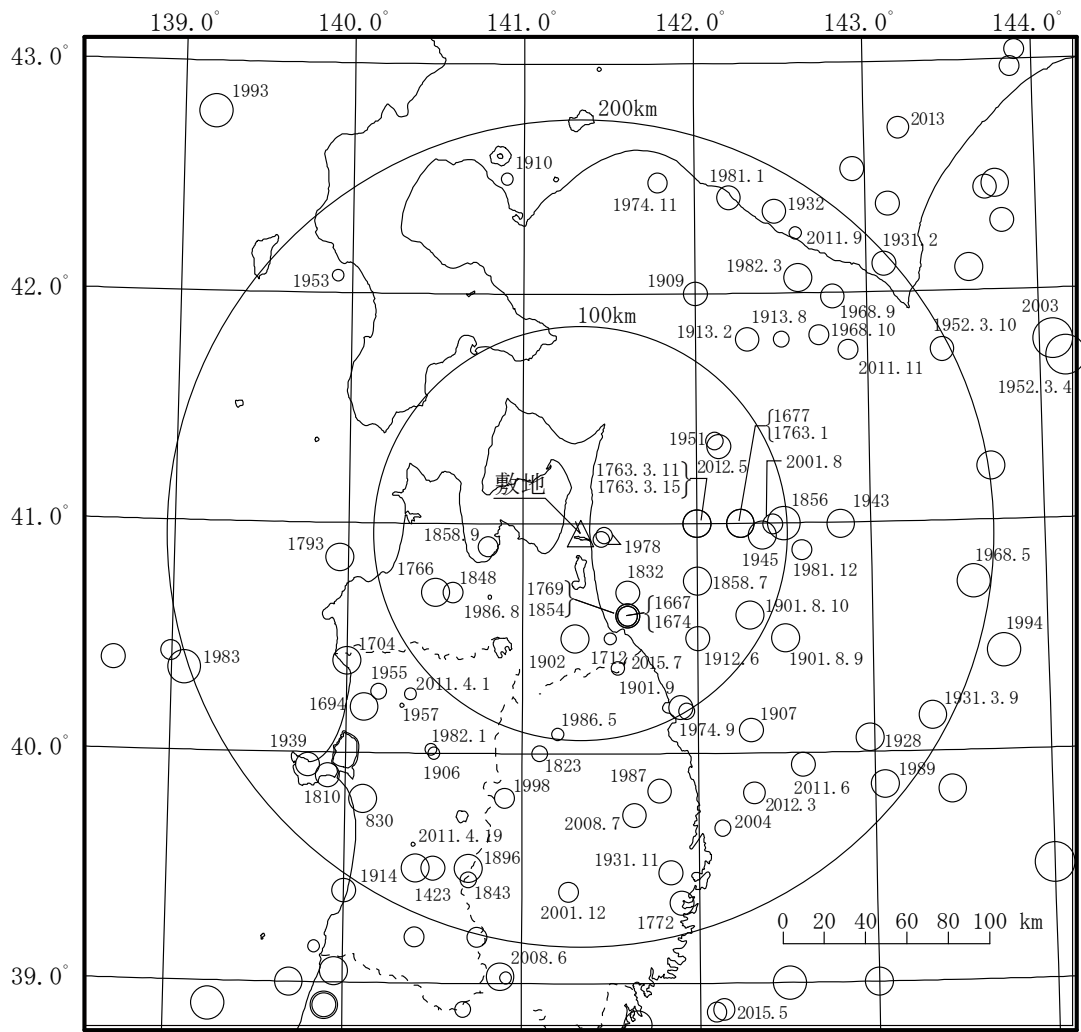
降下火砕物に含まれる成分によって地下水の水質変化(低 pH の水)が生じることが想定されるため、化学的影響について考慮する。

(ii) 地震・断層活動

地震・断層活動については、現在のプレート運動が継続することから、将来も同様の場所で繰返し発生すると想定し、状態設定を行う。

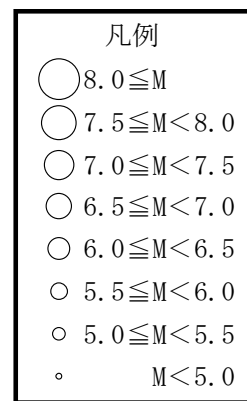
a. 地震

敷地周辺の被害地震の震央分布(敷地からの震央距離 200km 程度以内)を第 1 図に、敷地周辺の被害地震のマグニチュードと震央距離の関係を第 2 図に示す。敷地付近は、過去の被害地震から、M6 を超える地震の発生はなく、震度 5 強を超える地震の発生もない地域である(添付資料 2)。また、地震による力学的な変形は金属腐食に伴う埋設設備の変形量と比較して非常に小さいことから、地震による力学的影響を考慮しない。



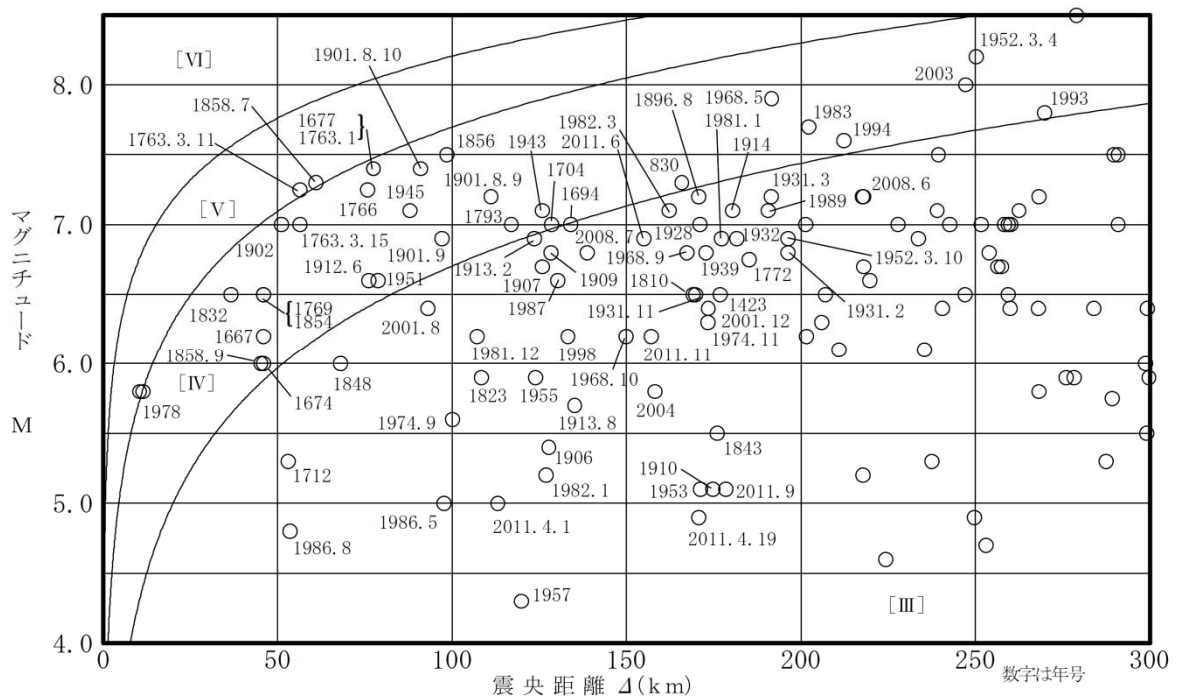
*1: 図中の数字は地震発生年(同年(同年月)の地震が複数存在する場合には年月(年月日))。

*2: 地震緒元は、1884年以前の地震については「日本被害地震総覧」⁽⁶⁾による値を、1885年以降1922年以前の地震については「宇津カタログ(1982)」⁽⁷⁾による値を、さらに1923年以降の地震については「気象庁地震カタログ」⁽⁸⁾による値をそれぞれ用いている。



第1図 敷地周辺の被害地震の震央分布*1*2

(敷地からの震央距離 200km 程度以内)



第2図 敷地周辺の被害地震のマグニチュード-震央距離*1*2

*1：図中の数字は地震発生年(同年(同年月)の地震が複数存在する場合には年月(年月日))。

*2：[Ⅲ]～[Ⅵ]は気象庁震度階級で、村松(1969)⁽⁹⁾、勝又・徳永(1971)⁽¹⁰⁾による。

1997年以降の気象庁震度10階級においては、[Ⅲ]が3に、[Ⅳ]が4に、[Ⅴ]が5弱及び5強に、[Ⅵ]が6弱及び6強に対応する。

b. 液状化(覆土)

覆土(難透水性覆土、下部覆土)が液状化することによって、低透水性に影響が生じるおそれがあるため、廃棄物埋設地の状態設定において影響を評価する。

液状化(覆土)の詳細な評価については、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 廃棄物埋設地の状態設定-影響事象分析-」に示す。

c. 断層活動(地盤の変形)

断層活動に伴う地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊されることが想定される。

第3図に敷地周辺の空中写真判読結果を示す。空中写真判読結果及び地質調査から、活断層は廃棄物埋設地付近には分布しておらず、最も近い活断層は、敷地近傍の六ヶ所村出戸付近に分布する出戸西方断層である。出戸西方断層は、西傾斜の逆断層であり、その長さを約11kmと評価している。しかし、敷地には、出戸西方断層に起因する変動地形及びリニアメント並びに出戸西方断層に関連した地質構造は確認されていない。したがって、今後も地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊されることは想定できない。

出戸西方断層以外の活断層については、廃棄物埋設地から更に離れており、断層活動があったとしても、廃棄物埋設地には力学的影響は及ばないと想定される。

以上より、今後も地盤の変位及び変形により廃棄物埋設地が直接破壊されることは想定できないため、断層活動による廃棄物埋設地への影響については、考慮しない。

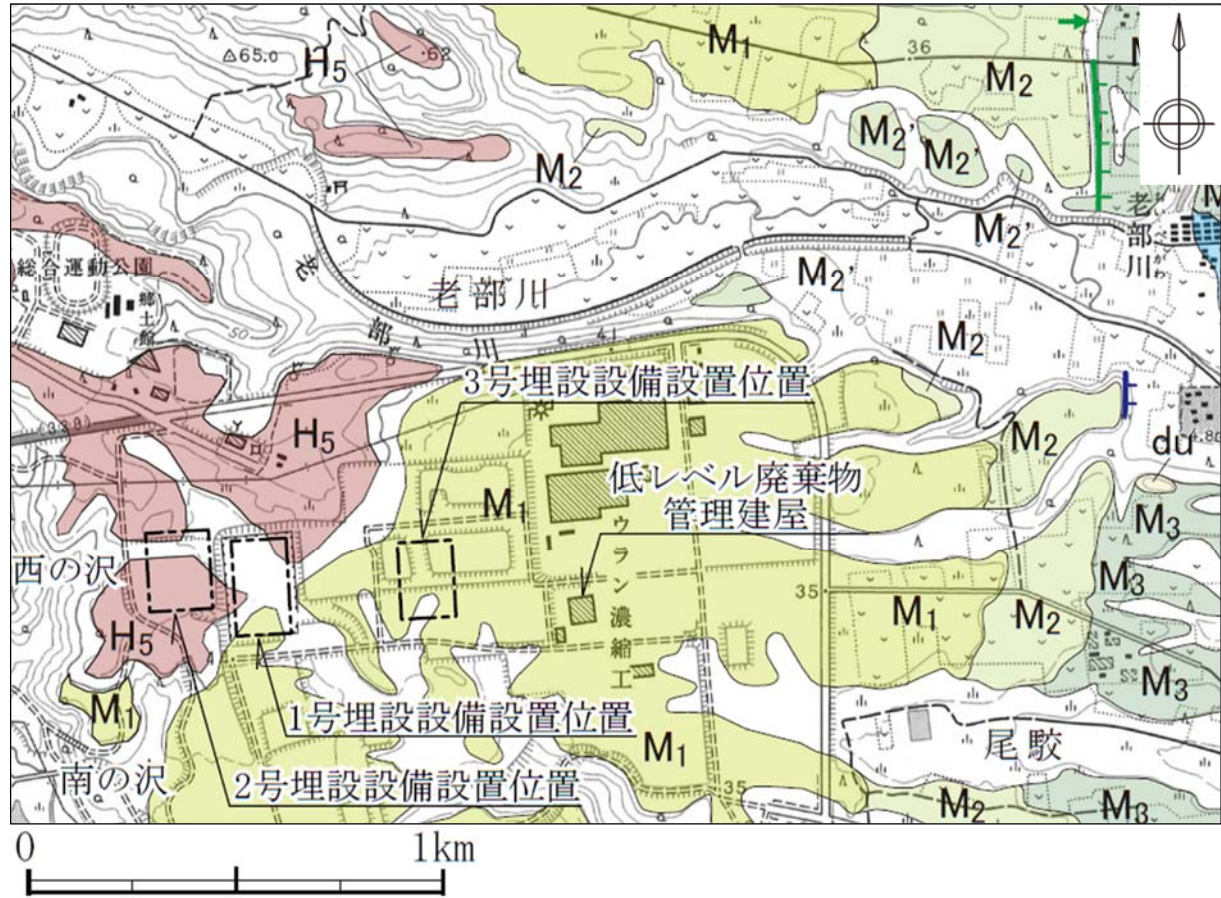
変動地形に基づいた
リニアメントの判読結果の凡例

L_A 変動地形である可能性が高い
L_B 変動地形である可能性がある
L_C 変動地形である可能性が低い
L_D 変動地形である可能性は非常に低い

○ 短線の方向は、低い地形の方向を示す。
○ 短線の無いリニアメントは、その両側で高度の不連続が認められないもの。
↓ ↓ 段丘面上の急傾斜部矢印の方向は傾斜方向を示す。

地形面区分凡例

du	砂丘	
L ₁	L ₁ 面	低位面
M _{3'}	M _{3'} 面	中位面
M ₃	M ₃ 面	
M _{2'}	M _{2'} 面	
M ₂	M ₂ 面	
M ₁	M ₁ 面	
H ₅	H ₅ 面	高位面



第3図 敷地周辺の空中写真判読結果

(iii) 隆起・沈降運動

a. 隆起・沈降

隆起・沈降運動は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、地形勾配の変化や、侵食基準面から廃棄物埋設地までの比高の変化に伴う侵食・堆積環境の変化が想定される。侵食・堆積環境の変化により、地下水流動への影響や、埋設設備が地表に接近する可能性があることから、隆起・沈降運動を長期変動事象として考慮し、隆起・沈降運動の速度を設定する。

なお、敷地の位置する下北半島付近には、過去約 70 万年間に形成された海成段丘が分布することから、敷地及びその周辺は、少なくとも同期間において大局的には隆起域と考えられる。したがって、敷地周辺では将来も隆起運動が継続すると想定し、状態設定として隆起速度を設定する。

(a) 隆起速度の設定に関する考え方

小池・町田(2001)⁽¹¹⁾から、下北半島周辺(むつ-野辺地以東の尻屋崎～三沢間)の海成段丘面の形成年代と旧汀線標高等を考慮した隆起量について整理した結果を第 4 図に示す。

隆起速度は、廃棄物埋設地付近に分布する海成段丘面の形成年代と旧汀線標高及び海水準変動等を考慮して、下記の式から算出する。

隆起速度 = (旧汀線標高 - 段丘面形成時の海水準 - 火山灰層層厚) / 段丘面形成年代

なお、下北半島周辺における海成段丘面の過去約 70 万年間の平均隆起速度は、2.0m/万年～4.5m/万年の範囲となる。

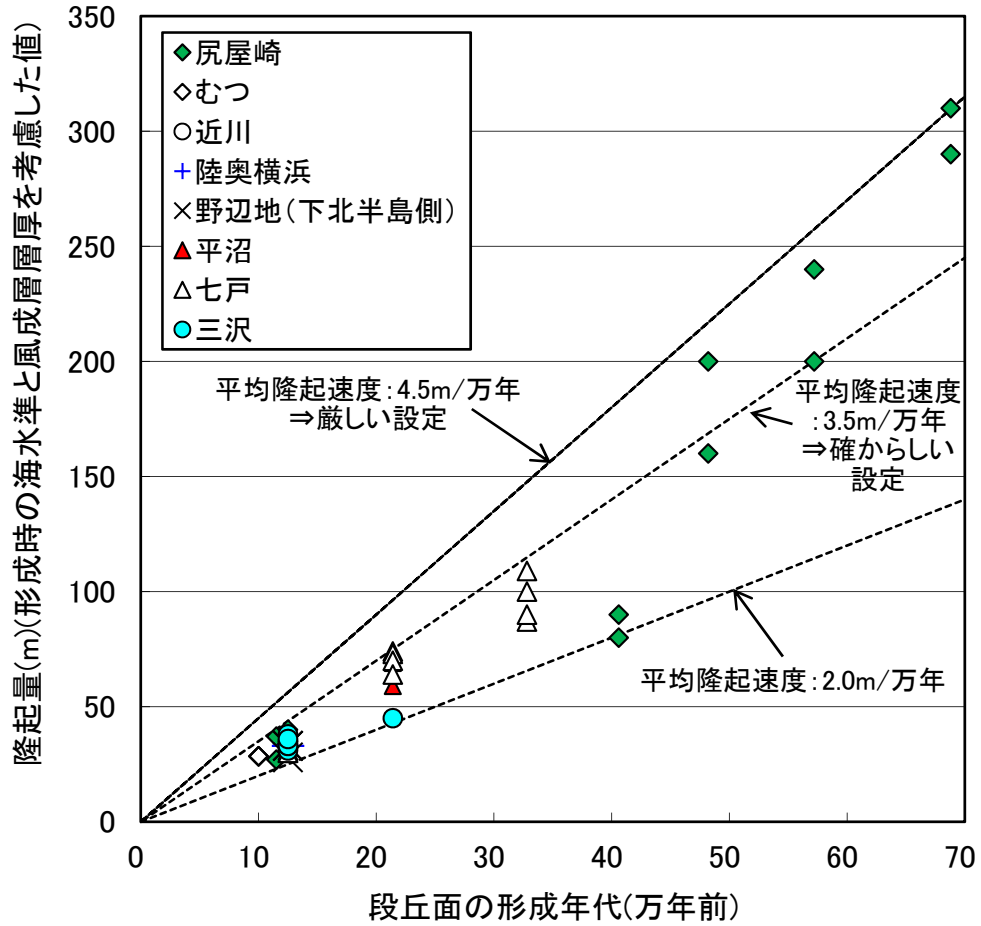
(一) 確からしい設定

敷地内の海成段丘面(M1 面、12.5 万年前)の旧汀線分布を第 5 図に、敷地における M1 面の状況を第 2 表に示す。確からしい設定における隆起速度は、廃棄物埋設地付近に分布する M1 面の形成年代と旧汀線標高及び海水準変動等を考慮して算出する。

(二) 厳しい設定

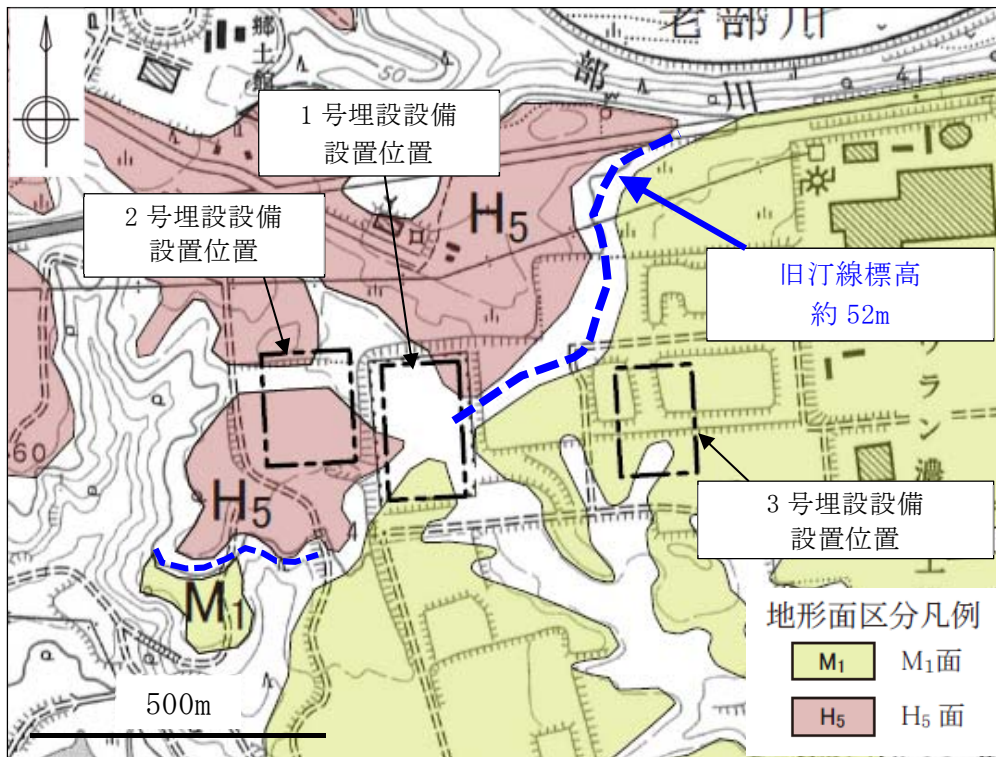
厳しい設定においては、隆起速度が速い方が相対的な海水準が低下し、河川の侵食が進むため、埋設設備の露呈時期が早くなることを考慮する。したがって、厳しい設定における隆起速度は、最も隆起速度が速い地点を包含す

る速度を設定する。



第4図 尻屋崎～三沢の海成段丘面の形成年代と平均隆起量との関係^{*1}

*1: 段丘面の形成年代及び隆起量は、小池・町田(2001)⁽¹¹⁾に基づき作成。



第5図 敷地内のM1面の旧汀線分布と標高

第2表 敷地におけるM1面の状況

旧汀線標高(分布境界)	EL52m
火山灰層層厚(敷地平均値)	3m
段丘面形成年代	12.5万年前
段丘面形成時の海水準(現在比+)	+5m

(b) 隆起速度の状態設定

隆起速度の状態設定結果を第3表に示す。

(一) 確からしい設定

廃棄物埋設地付近に分布する M1 面の形成年代等から、隆起速度は 3.5m/万年とする。

隆起速度 = (旧汀線標高 - 段丘面形成時の海水準 - 火山灰層層厚) / 段丘面形成年代

$$\text{隆起速度} = (52\text{m} - 5\text{m} - 3\text{m}) / 12.5 \text{ 万年} \approx 3.5\text{m/万年}$$

(二) 厳しい設定

下北半島周辺の平均隆起速度は、2.0m/万年～4.5m/万年の範囲となるため、最も隆起速度が速い地点を考慮し、4.5m/万年とする。

第3表 隆起速度の設定値

ケース	隆起速度 (m/万年)
確からしい設定	3.5
厳しい設定	4.5

(2) 気候変動に起因する事象

気候変動は、数 10 万年前から現在まで約 8 万年周期から約 12 万年周期で氷期と間氷期を繰り返している⁽¹²⁾ことから、大局的には将来もこの周期の気候変動を繰り返すと考えられる。また、過去の気候変動の傾向から、今後氷期へ向かうと考えられることから⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、将来は寒冷化すると予測される。

一方、人間活動に伴う温室効果ガス排出により、温暖化が進行する可能性があるとする報告⁽¹⁴⁾や、現在の温室効果ガス濃度を基準として、炭素循環のメカニズムを仮定した気候シミュレーションにより、将来 5 万年程度は温暖期が継続する可能性があるとする報告もある⁽¹⁵⁾。

以上のことから、気候変動に起因する事象に係る長期変動事象の状態設定については、過去の気候変動と同様に現在から寒冷化に向かう場合(以下「寒冷化ケース」という。)と、温暖期が数万年程度継続した後、寒冷化に向かう場合(以下「温暖期継続ケース」という。)の 2 ケースに大別し、これらの 2 ケースについて、それぞれ「海水準変動」、「気温」、「降水量」、「蒸発散量」、「かん養量」、「地下水位」及び「河川流量」を長期変動事象として考慮する。

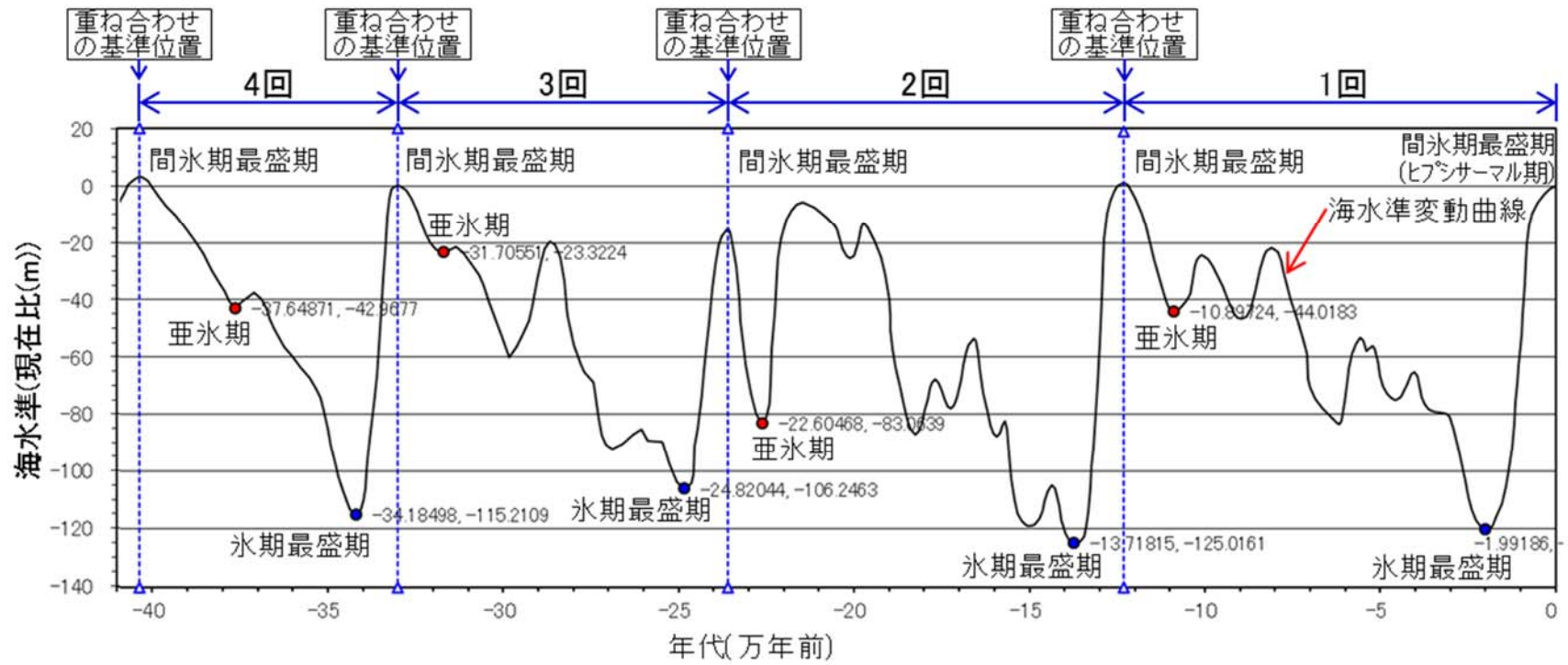
(i) 海水準変動

海水準変動は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、海水準変動が生じると、敷地及びその周辺における河川、湖沼及び海の分布域が変化し、将来の人の生活環境及び生活様式に影響を及ぼすことが想定される。また、海水準変動及びそれに伴う地形変化並びに地下水位及び地表水流動の変化が想定されるため、海水準変動を長期変動事象として考慮し、寒冷化ケース及び温暖期継続ケースにおける海水準の変動時期及び変動量を設定する。

a. 海水準変動の設定に関する考え方

過去 45 万年間の海水準変動曲線を第 6 図に示す。将来の海水準の設定に当たっては、過去 45 万年間の汎世界的な海水準変動を酸素同位体比から推定している Labeyrie et al. (2003)⁽¹⁶⁾を用いる。

なお、日本の海成段丘面等の形成年代と汎世界的な海水準変動は調和的⁽¹⁷⁾であることから、汎世界的な海水準変動は敷地においても同様とする。



第6図 過去の海水準変動曲線*1

*1: Labeyrie et al. (2003)⁽¹⁶⁾に一部加筆

(a) 確からしい設定

(一) 寒冷化ケース

過去の海水準変動曲線と将来の海水準変動曲線の設定について第 7 図に示す。Labeyrie et al. (2003)⁽¹⁶⁾を基に、過去 4 回の海水準変動曲線の間氷期最盛期のピークを基準として重ね合わせ、亜氷期までの時間及び海水準を設定する。設定した時間及び海水準を結んだ直線を将来の海水準とする。

将来の亜氷期までの時間については、過去 4 回の間氷期最盛期から亜氷期までの時間の平均値を用いる。

将来の亜氷期の海水準については、過去 4 回の亜氷期における海水準の平均値を用いる。

また、1,000 年後の海水準は、現在から亜氷期までの時間及び海水準の平均値を結んだ直線を用いて求める。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける海水準変動については、過去の海水準変動の傾向から現在は間氷期最盛期になると考えられるため、将来の海水準変動の設定には不確かさが大きく状態設定が困難である。そのため、温暖期継続ケースの海水準は、IPCC(2013)⁽¹⁸⁾より、最終間氷期(約 129,000 年前～116,000 年前)の数千年は、海面水位が現在より 5m 高く、10m 以上は高くなかったとされていることを考慮して、過去の海水準の最大値を用いることとし、確からしい設定と厳しい設定は同様の値を用いるものとする。海水準が上昇する期間は、ANDRA(2005)⁽¹⁵⁾より、将来 5 万年程度は温暖期が継続するとされることから、評価期間中継続すると設定する。

(b) 厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

過去の海水準変動曲線と将来の海水準変動曲線の設定について第 8 図に示す。確からしい設定と同様に、過去 4 回の海水準変動曲線の間氷期最盛期のピークを基準として重ね合わせ、亜氷期までの時間及び海水準から設定する。

海水準は低下量が大きく、低下時期が早いほど、埋設設備の露呈時期及び希積水量の観点から保守的な設定となるため、厳しい設定における将来の亜氷期までの時間については、過去 4 回の間氷期最盛期から亜氷期までの時間

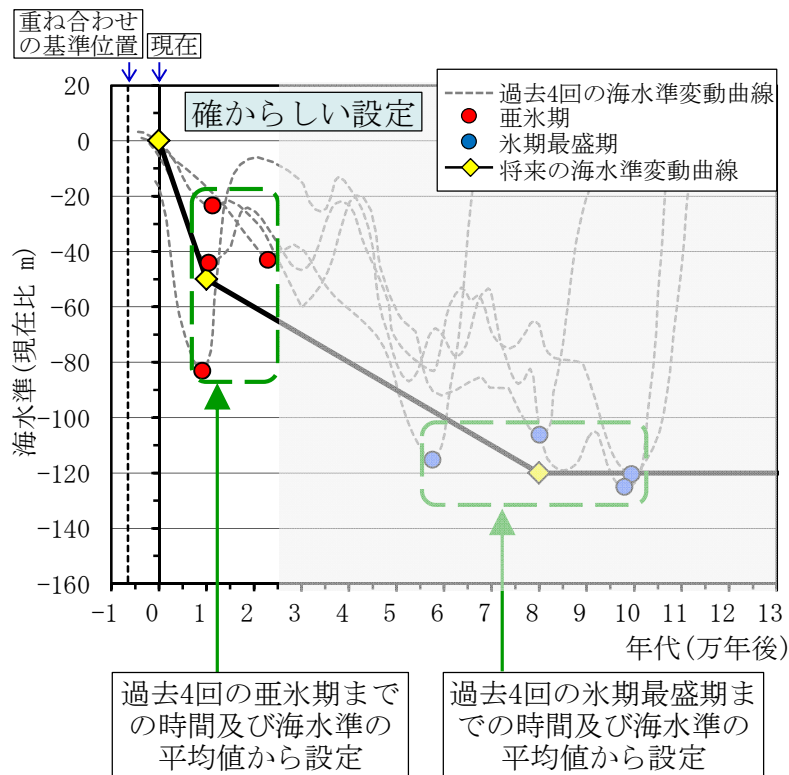
の最短値を用いる。

将来の亜氷期までの海水準については、亜氷期は海水準低下量の最大値から設定する。

また、1,000年後の海水準は、現在から亜氷期までの時間の最短値及び海水準低下量の最大値を結んだ直線を用いて求める。

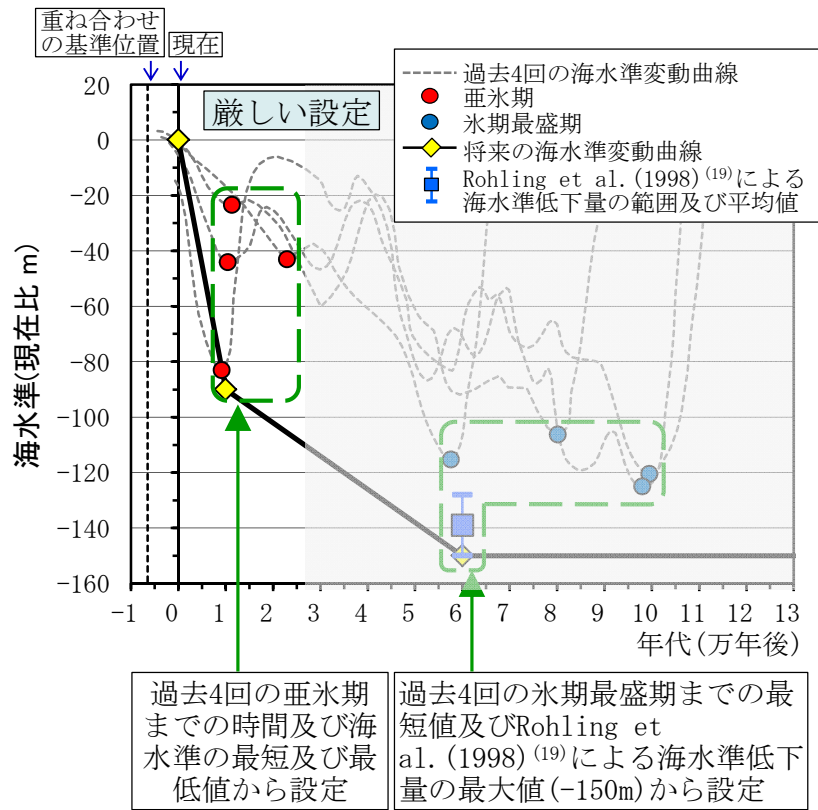
(二) 温暖期継続ケース

確からしい設定において不確かさを考慮していることから、厳しい設定も同様の値とする。



第7図 過去の海水準変動曲線と将来の海水準変動曲線の設定(確からしい設定)*1

*1: 海水準変動曲線は Labeyrie et al (2003)⁽¹⁶⁾ に示される酸素同位体比による海水準の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を6,500年前として重ね合わせた。



第 8 図 過去の海水準変動曲線と将来の海水準変動曲線の設定(厳しい設定)*1

*1: 海水準変動曲線は Labeyrie et al (2003) (16) に示される酸素同位体比による海水準の知見から、過去 4 回の変動周期の間氷期最盛期を 6,500 年前として重ね合わせた。

b. 海水準変動

(a) 確からしい設定

(一) 寒冷化ケース

過去 4 回の亜氷期までの時間及び海水準の平均値から、亜氷期の海水準は 10,000 年後に-50m とし、1,000 年後の海水準は、現在から亜氷期までの直線を将来の海水準とすることから、-5m とする。

(二) 温暖期継続ケース

最終間氷期の数千年は、海面水位が現在より 5m 高く、10m 以上は高くなかったとされていることから、不確かさを考慮して現在の海水準より 10m 上昇すると設定する。

(b) 厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

過去 4 回の亜氷期までの時間及び海水準の最大値から、亜氷期の海水準は 10,000 年後に-90m とし、1,000 年後の海水準は、現在から亜氷期までの直線を将来の海水準とすることから、-9m とする。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける海水準変動の設定値の推定には不確かさが大きく状態設定が困難であり、確からしい設定において不確かさを考慮していることから、厳しい設定は確からしい設定と同様に現在の海水準より 10m 上昇すると設定する。

c. 海水準変動の状態設定

海水準変動の状態設定結果を第 4 表に示す。海水準は後述する「3. (3) (i) c. 埋設設備の露呈時期」に影響する。埋設設備の露呈時期は、温暖期継続ケースの方が保守的となるため、温暖期継続ケースを状態設定の対象とする。

第4表 海水準変動の設定値

ケース		モデル化時期	海水準(現在比:m)
確からしい 設定	温暖期継続ケース	現在*1~1,000年後	10
厳しい設定	温暖期継続ケース	現在*1~1,000年後	10

*1: 覆土完了時期までを表す(以降、同様)

(ii) 気温

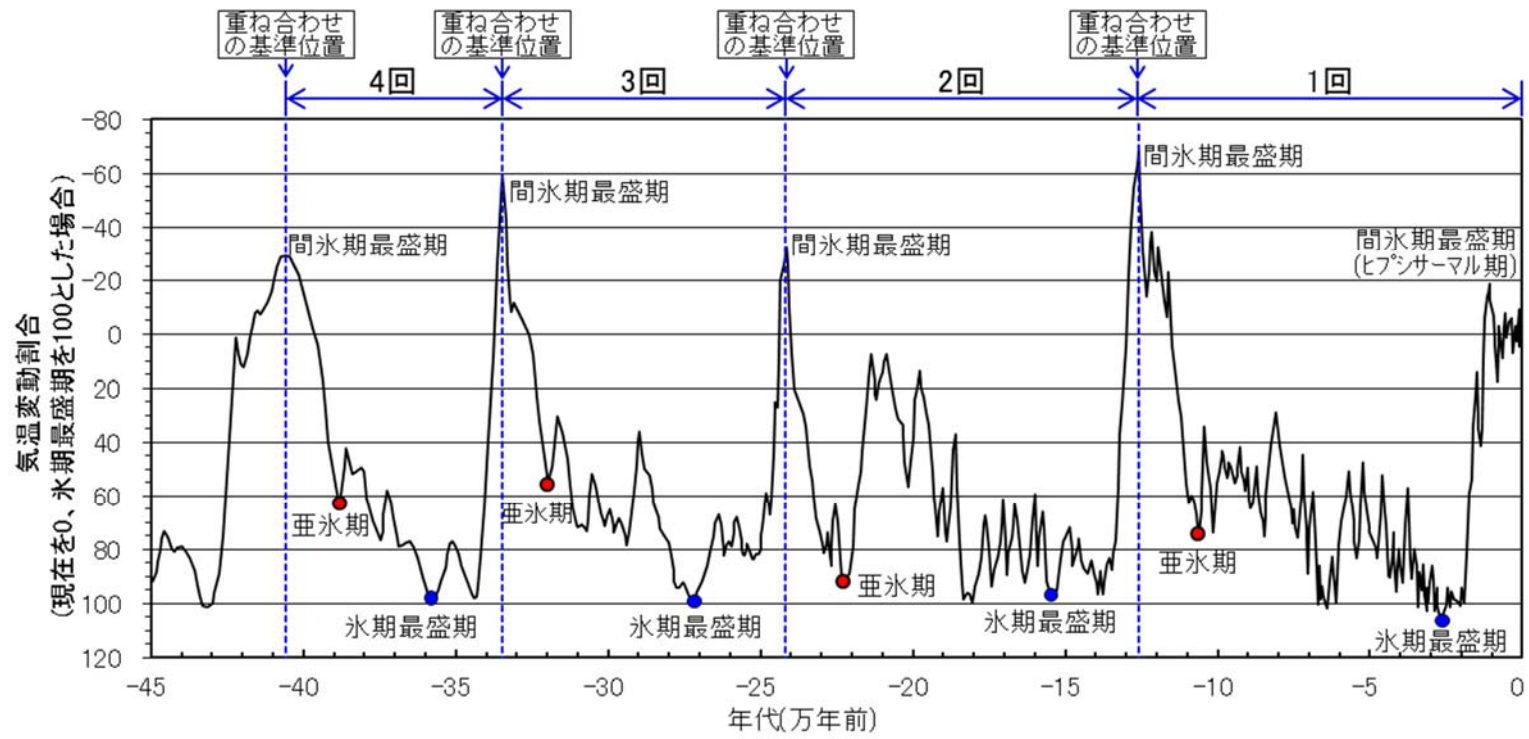
気温変化は、廃棄物埋設施設を直接損傷させることはないが、気温の変化により表層での水収支の変化に伴って、地下水流動及び表流水流動が変化することが想定されるため、気温変化を長期変動事象として考慮し、将来の気温を設定する。

a. 気温の設定に関する考え方

EPICA (2004)⁽¹²⁾に示される過去 45 万年間の氷床コアの同位体比に基づく気温変動曲線を第 9 図に示す。氷床コアの同位体比の変動を気温変動の指標とし、過去 4 回の気温変動(氷期及び間氷期の繰返し)の間氷期最盛期のピークを基準として重ね合わせ、亜氷期までの時間及び気温変動割合を設定する。気温変動割合は、第 9 図に示した変動曲線において、現在を 0 とし、氷期最盛期を 100 としたときの気温の変動割合を示す。

将来の気温は、気温変動割合及び氷期最盛期の気温から設定することとし、氷期最盛期の気温は、花粉化石を用いて推定された最終氷期最盛期の気温から設定する。

気温設定の前提として、気温は降水量と正の相関関係があり⁽²⁰⁾、降水量は希釈水量に関連する。降水量が低下するほど希釈水量が少なくなるため、気温が低いほど保守的な設定となる。



第9図 過去の気温変動曲線*1

*1：気温変動曲線はEPICA(2004)⁽¹²⁾に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去4回の変動周期の間氷期最盛期を重ね合わせの基準位置とした。

(a) 確からしい設定

(一) 寒冷化ケース

過去の気温変動曲線と将来の気温の設定について第 10 図に示す。

将来の亜氷期までの時間は、過去 4 回の間氷期最盛期から亜氷期及び氷期最盛期までの時間の平均値から設定する。

現在の年平均気温は、六ヶ所地域気象観測所の観測値(1975 年～2015 年)の平均値とする。

将来の氷期最盛期の気温は、Yamanaka et al. (1990)⁽²¹⁾で取得されている下北半島北部の尻屋崎湿原における最終氷期最盛期頃の花粉化石群集データを用いて推定した気温の平均値から設定する。また、将来の亜氷期の気温は、過去 4 回の亜氷期における気温変動割合の平均値から設定する。

1,000 年後の気温は、現在から亜氷期までの時間及び気温変動割合の平均値を結んだ直線を用いて求める。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースの気温は、人間活動による影響を考慮した IPCC(2007)⁽¹⁴⁾による温暖化の知見及び過去 30 年間の敷地周辺の年平均気温を考慮し、その気温が現在から評価期間中継続すると想定して設定する。

(b) 厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

過去の気温変動曲線と将来の気温の設定について第 11 図に示す。

気温は低下量が大きく、低下時期が早いほど保守的な設定となるため、厳しい設定における将来の亜氷期までの時間は、過去 4 回の間氷期最盛期から亜氷期までの時間の最短値から設定する。

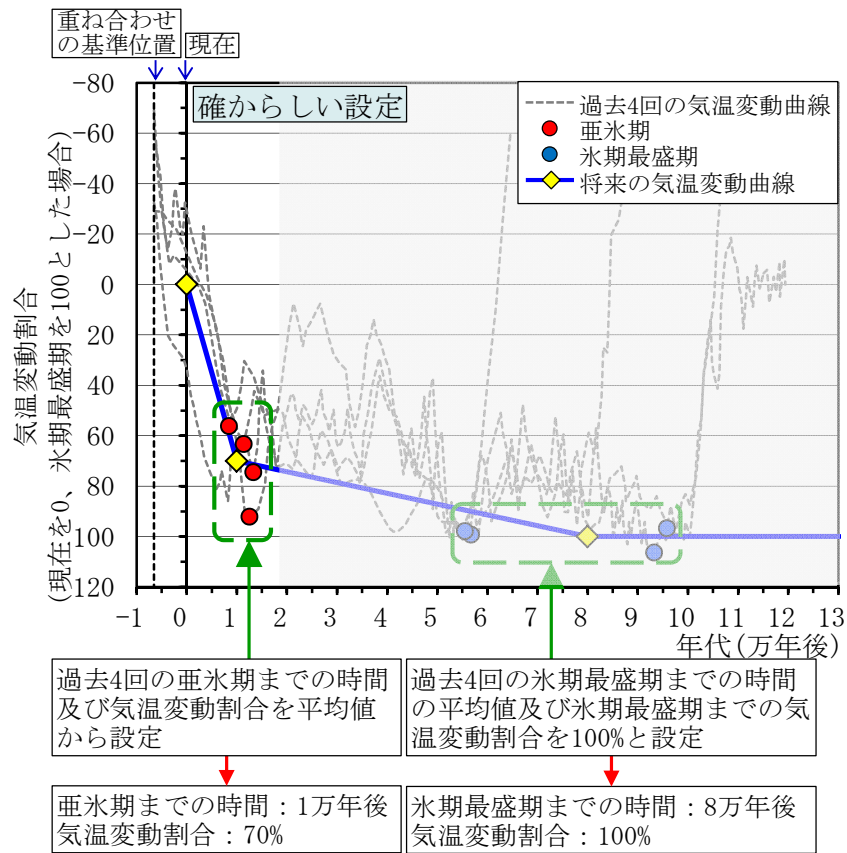
厳しい設定における現在の年平均気温及び将来の氷期最盛期の気温は、後述する降水量の不確かさを考慮した方が希釈水量は少なくなるため、厳しい設定には確からしい設定の気温を用いる。また、将来の亜氷期の気温は、気温の低下量が大きいほど保守的となるため、過去 4 回の亜氷期における気温変動割合の最大値から設定する。

1,000 年後の気温は、現在から亜氷期までの時間の最短値及び気温変動割合

の最大値を結んだ直線を用いて求める。

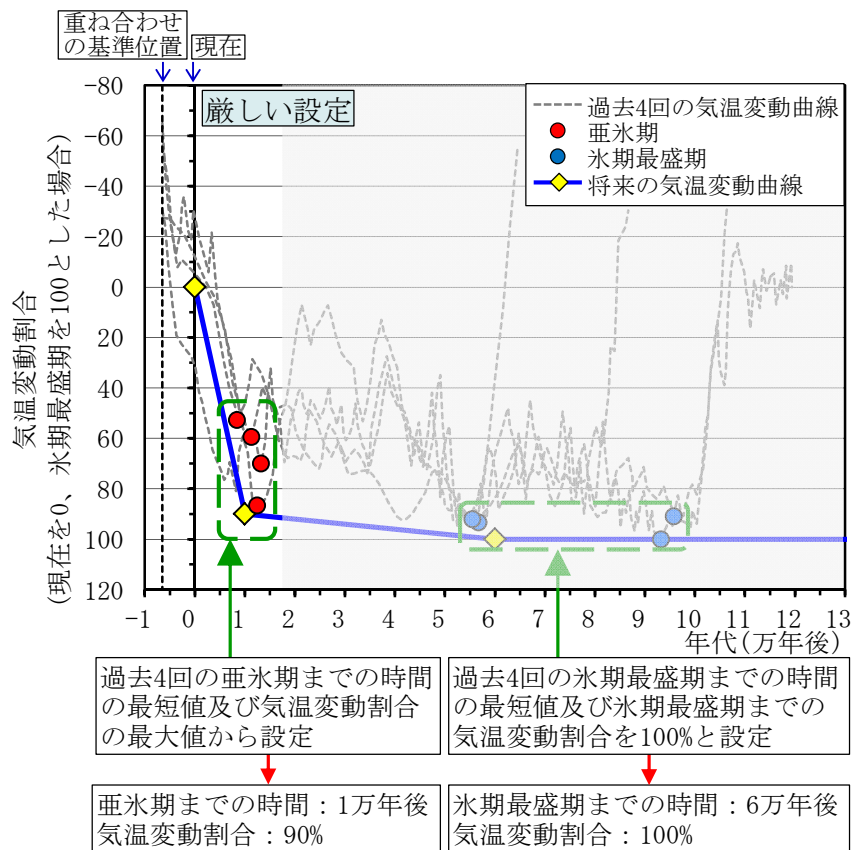
(二) 温暖期継続ケース

気温の不確かさを考慮した厳しい設定は、気温と降水量の関係から、希釈水量への影響を考慮して設定する。



第 10 図 過去の気温変動曲線と将来の気温の設定(確からしい設定)*1

*1：気温変動曲線は EPICA(2004)⁽¹²⁾ に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去 4 回の変動周期の間氷期最盛期を 6,500 年前として重ね合わせた。



第 11 図 過去の気温変動曲線と将来の気温の設定(厳しい設定)*1

*1：気温変動曲線は EPICA (2004)⁽¹²⁾ に示される氷床コアの酸素・水素同位体比の知見から、過去 4 回の変動周期の間氷期最盛期を 6,500 年前として重ね合わせた。

b. 気温変化

(a) 確からしい設定

(一) 寒冷化ケース

確からしい設定における現在の年平均気温は、六ヶ所地域気象観測所の観測値(1975年～2015年)の平均値である9℃とする。

花粉化石群集データを用いて松末ほか(2000)⁽²²⁾の手法及び Nakagawa et al. (2002)⁽²³⁾の手法により敷地周辺の最終氷期最盛期の年平均気温を推定すると、それぞれ約-2.2℃と約3.7℃であった(第12図)。

このことから、将来の氷期最盛期の年平均気温は両手法の値から、平均的な値として0℃とする。

10,000年後の亜氷期の気温は、現在の気温(9℃)及び氷期最盛期(0℃)から気温変動割合(70%)を考慮し、3℃と設定する。

1,000年後の気温は、現在の気温(9℃)から10,000年後の亜氷期における気温(3℃)の変化率を考慮して、8.4℃となることから保守側に切り下げて、8℃と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

人間活動による温室効果ガス濃度を考慮したシミュレーション結果から、2090年から2099年には世界平均で現在より0.3℃～6.4℃上昇する可能性が指摘されている⁽¹⁴⁾。過去30年間の敷地周辺の年平均気温である9℃よりシミュレーションの平均的な上昇値である3℃を加えた12℃を確からしい設定とする。

一方、尾駁沼の沖積層堆積物から過去約10,000年間の花粉化石群集データを取得し、そのデータを用いて松末ほか(2000)⁽²²⁾の手法及び Nakagawa et al. (2002)⁽²³⁾の手法により敷地周辺の間氷期最盛期の年平均気温を推定すると、それぞれ約12.2℃と約10.4℃であったと考えられる。この値は、花粉化石群集データより推定した12.2℃と整合している。

(b) 厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

厳しい設定における現在の年平均気温は、六ヶ所地域気象観測所の観測値(1975年～2015年)における年平均気温の最低値である8℃となるが、降水量

の不確かさを考慮した方が希積水量は少なくなるため、確からしい設定の9℃と設定する。

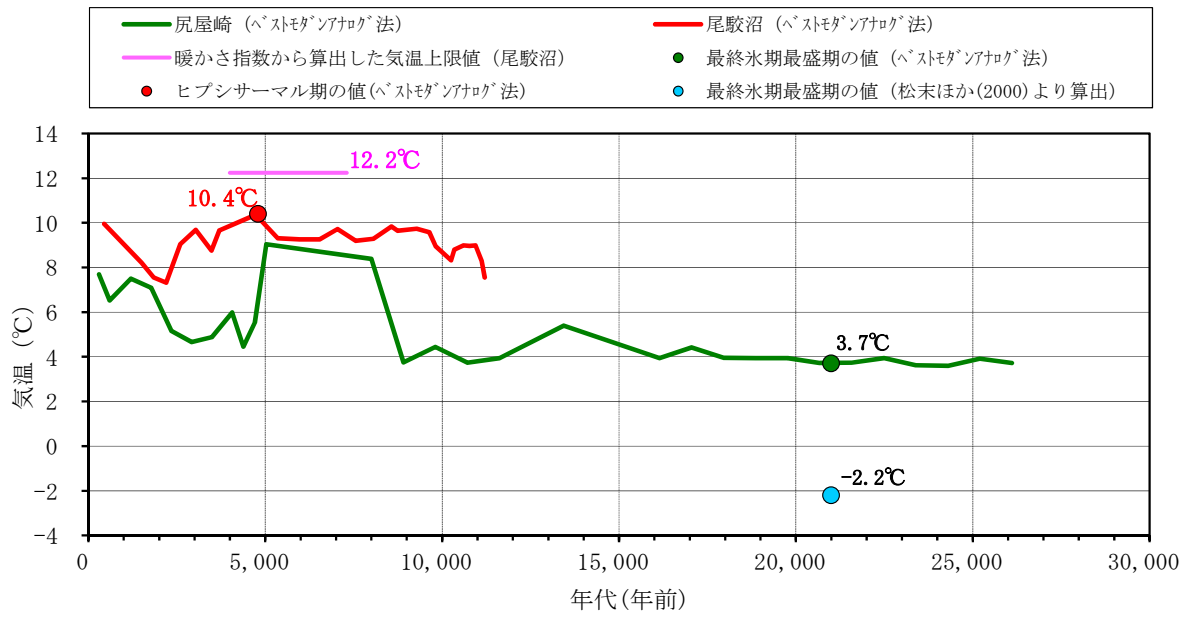
将来の氷期最盛期の年平均気温は、松末ほか(2000)⁽²²⁾における現在と最終氷期最盛期の気温差の最大値から-13℃を想定し、前述した年平均最低値である8℃から13℃を低下させた-5℃となるが、降水量の不確かさを考慮した方が希積水量は少なくなるため、確からしい設定の気温である0℃と設定する。

10,000年後の亜氷期の気温は、現在の気温(9℃)及び氷期最盛期(0℃)からの気温変動割合(90%)を考慮し、0℃と設定する。

1,000年後の気温は、現在の気温(9℃)から10,000年後の亜氷期における気温(0℃)の変化率を考慮して、8.1℃となることから保守側に切り下げて、8℃と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける気温は、過去約30年間(1975年～2015年)の敷地周辺の年平均気温である9℃よりシミュレーションのほぼ最大上昇値である約6℃を加えた15℃となるが、降水量の不確かさを考慮した方が希積水量は少なくなるため、厳しい設定には確からしい設定の気温である12℃と設定する。



第 12 図 花粉分析による過去 26,000 年間の気温変動

c. 気温の状態設定

気温の状態設定結果を第 5 表に示す。気温と降水量は正の相関関係があり、降水量が低下するほど希釈水量が少なくなるため、気温が低いほど保守的な設定となる。したがって、寒冷化ケースを状態設定の対象とする。

第 5 表 気温の設定値

ケース		モデル化時期	気温(°C)
確からしい 設定	寒冷化ケース	現在	9
		1,000 年後	8
厳しい設定	寒冷化ケース	現在	9
		1,000 年後	8

(iii) 降水量

降水量変化は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、降水量の変化により表層での水収支の変化に伴って地下水流動及び表流水流動が変化することが想定される。これらのことから、降水量の変化を長期変動事象として考慮し、将来の降水量を設定する。

a. 降水量の設定に関する考え方

降水量変化については、現在の気温と降水量との関係に、大局的な正の相関がある⁽²⁰⁾ことから、現在の気温と降水量との関係を基に、「(ii)c. 気温の状態設定」で求めた現在、1,000年後の気温の状態設定値から、将来の降水量を設定する。

降水量を変動させる気温以外の主な要因には、地形や海流等の気候因子が考えられる。したがって、敷地周辺と地形や海流等が類似した地点のデータを用いることで、その影響を除けば、気温と降水量との相関関係が求められる。

以上のことから、降水量の長期変動状態の設定については、敷地周辺と気候因子が類似する地点の気温・降水量データより、将来の降水量を想定する。気候因子が類似する地点の判断に使用した項目は以下のとおりである。

- ① 北半球の太平洋側西部に位置すること。
- ② アリソフの気候区分が亜極帯～寒帯であること。
- ③ 沿岸海流が寒流であること。
- ④ 陸度(半径 50km 円内の陸域の占める割合)が 1/10～9/10 であること。
- ⑤ 開放度(半径 15km 円内で対象地点より標高が 200m 以上高い範囲を除く角度)が 240° ～360° であること。

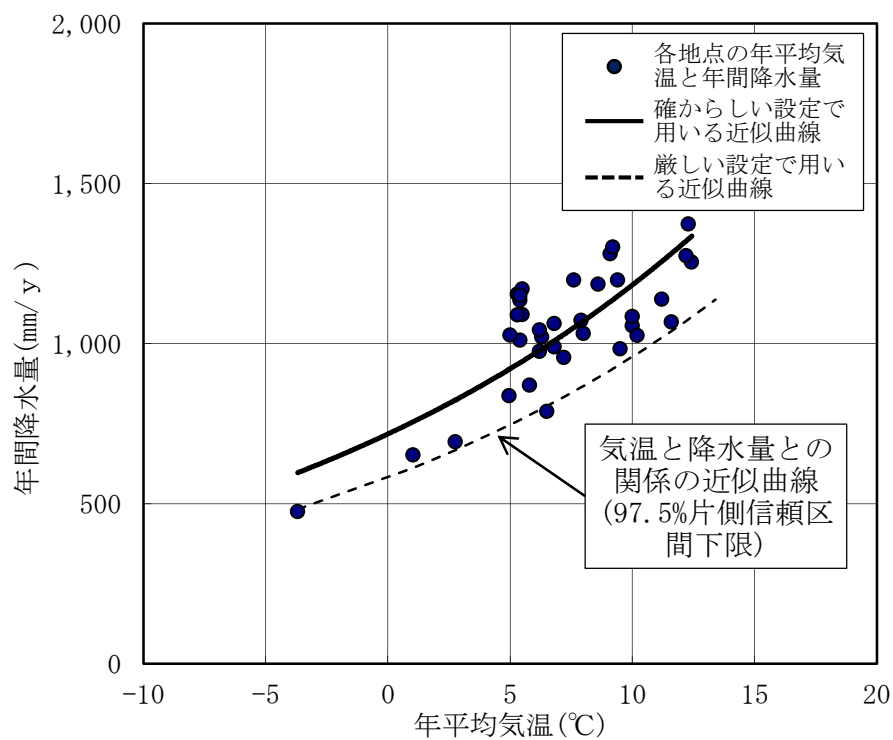
上記条件で抽出された地点のうち、過去 30 年以上の気象データの存在する 36 地点の年平均気温と年降水量との関係から、将来の気温変化に伴う降水量変化を予測する。気象データは、1981 年～2010 年の 30 年間の平年値データを使用する。平年値を用いた理由は、平年値がその時々々の気象や天候を評価する基準として利用され、その地点の気候を表す値として用いられること、局地的な短期変動が除去できるなど平均値としての安定性・均質性が考慮されているためである。36 地点の気温と降水量を第 6 表に、年平均気温と年降水量の関係を第 13 図に示す。

なお、将来の降水量は、年平均気温と年降水量との関係から求めるため、寒冷化ケース及び温暖期継続ケースは同様の関係式で設定する。

第6表 敷地周辺と類似する気候因子を持つ地点の気温と降水量*1

No.	地点名	国名	年平均気温 (°C)	年降水量 (mm/y)
1	OKHOTSK	RUSSIAN FED.	-3.7	475
2	VLADIVOSTOK	RUSSIAN FED.	5.0	837
3	ALEKSANDROVSK-SAKHALINSKII	RUSSIAN FED.	1.0	651
4	NIKOL'SKOJE (OSTROV BERINGA)	RUSSIAN FED.	2.8	693
5	稚内	JAPAN	6.8	1,063
6	網走	JAPAN	6.5	788
7	別海	JAPAN	5.4	1,135
8	根室	JAPAN	6.3	1,021
9	厚床	JAPAN	5.3	1,154
10	榺町	JAPAN	5.4	1,011
11	太田	JAPAN	5.5	1,170
12	白糠	JAPAN	5.5	1,090
13	釧路	JAPAN	6.2	1,043
14	池田	JAPAN	5.8	870
15	浦幌	JAPAN	6.2	976
16	糠内	JAPAN	5.0	1,026
17	大津	JAPAN	5.3	1,090
18	大樹	JAPAN	5.4	1,150
19	苫小牧	JAPAN	7.6	1,198
20	鷓川	JAPAN	6.8	989
21	室蘭	JAPAN	8.6	1,185
22	日高門別	JAPAN	7.2	956
23	静内	JAPAN	8.0	1,032
24	浦河	JAPAN	7.9	1,072
25	小田野沢	JAPAN	9.1	1,281
26	三沢	JAPAN	10.0	1,056
27	十和田	JAPAN	9.5	983
28	八戸	JAPAN	10.2	1,025
29	三戸	JAPAN	10.0	1,084
30	種市	JAPAN	9.4	1,198
31	鹿島台	JAPAN	11.2	1,138
32	石巻	JAPAN	11.6	1,067
33	仙台	JAPAN	12.4	1,254
34	亘理	JAPAN	12.2	1,274
35	相馬	JAPAN	12.3	1,373
36	六ヶ所	JAPAN	9.2	1,301

*1 : 36 地点の年平均気温及び年間降水量は、気象庁のデータ⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾を使用した。



第13図 敷地周辺と類似した気候因子を持つ36地点の年平均気温と年降水量の関係*1

*1: 36地点の年降水量及び年平均気温は、気象庁のデータ⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾を使用した。

(a) 確からしい設定

36 地点の気温と降水量の関係は指数回帰式(第 13 図の実線近似曲線)で表されることから、確からしい設定においてはこの指数回帰式を用いて設定する。

(b) 厳しい設定

気温と降水量の関係のばらつきを考慮し、線量評価上、希釈水量が少なくなるように、気温と降水量の下限値の関係式(第 13 図の破線近似曲線)を用いて設定する。

b. 降水量の変化

(a) 確からしい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースの将来の降水量は、第 13 図に示す指数回帰式(実線)及び確からしい設定における気温の状態設定値から、1,000 年後に 1,070mm/y と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースの将来の降水量は、第 13 図に示す指数回帰式(実線)及び確からしい設定における気温の状態設定値から、1,300mm/y と設定する。

(b) 厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースの将来の降水量は、第 13 図に示す指数回帰式(破線)及び厳しい設定における気温の状態設定値から、1,000 年後に 860mm/y と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースの将来の降水量は、第 13 図に示す指数回帰式(破線)及び厳しい設定における気温の状態設定値から、1,050mm/y と設定する。

c. 降水量の状態設定

降水量の状態設定結果を第 7 表に示す。降水量が低下するほど希釈水量が少なくなるため、保守的な設定となる。したがって、寒冷化ケースを状態設定の対象とする。

第7表 降水量の設定値

ケース		モデル化時期	気温(°C)	降水量(mm/y)
確からしい 設定	寒冷化ケース	現在	9	1,120
		1,000年後	8	1,070
厳しい設定	寒冷化ケース	現在	9	910
		1,000年後	8	860

(iv) 蒸発散量

蒸発散量は、後述する河川流量の設定に必要となるため設定する。

a. 蒸発散量の設定に関する考え方

蒸発散量については、ソーンズウェイト法⁽²⁶⁾により、年平均気温を用いて可能蒸発散量として推定する手法がある。

一方、地下水は主に降水によってかん養され、第四紀層及び鷹架層表層部の風化部を流れ、中央沢を経て尾駁沼に流出していると考えられていることから、下記式で示すように敷地内の沢の流域面積に降った降水量から、その沢を流れる表流水流量を差し引いたものが、蒸発散量に相当すると考えられる。

$$\text{降水量} = \text{実蒸発散量} + \text{表流水流量} + \text{貯留変化量}$$

ここで、貯留変化量=0 と仮定する。

降水量と敷地内の表流水流量の観測結果(第 14 図) から求めた蒸発散量を、実蒸発散量とする。実蒸発散量の平均は可能蒸発散量の平均より少なく、その比率は 0.95 となった。

可能蒸発散量と実蒸発散量の関係を第 8 表に示す。

将来の蒸発散量は、「(iii) 降水量」に示す敷地周辺と気候因子が類似した 36 地点の年平均気温と蒸発散量の関係式と、「(ii)c. 気温の状態設定」で求めた現在、1,000 年後の気温の状態設定値から設定する。

ここで用いる 36 地点の年平均気温は、「(iii) 降水量」の状態設定と同様に、1981 年～2010 年の気象データの年平均気温である。

36 地点の年平均気温と蒸発散量の関係式は、ソーンズウェイト法を用いて可能蒸発散量を算出し、上記で求めた実蒸発散量と可能蒸発散量の比 0.95 を考慮した蒸発散量を用いて作成する (第 9 表及び第 15 図)。

なお、将来の蒸発散量は、蒸発散量と年平均気温との関係から求めるため、寒冷化ケース及び温暖期継続ケースは同様の関係式から設定する。

(a) 確からしい設定

敷地周辺と類似した気候因子を持つ 36 地点の蒸発散量と年平均気温の関係式から、確からしい設定における将来の気温の状態設定値を用いて設定する。

(b) 厳しい設定

敷地周辺と類似した気候因子を持つ 36 地点の蒸発散量と年平均気温の関係式

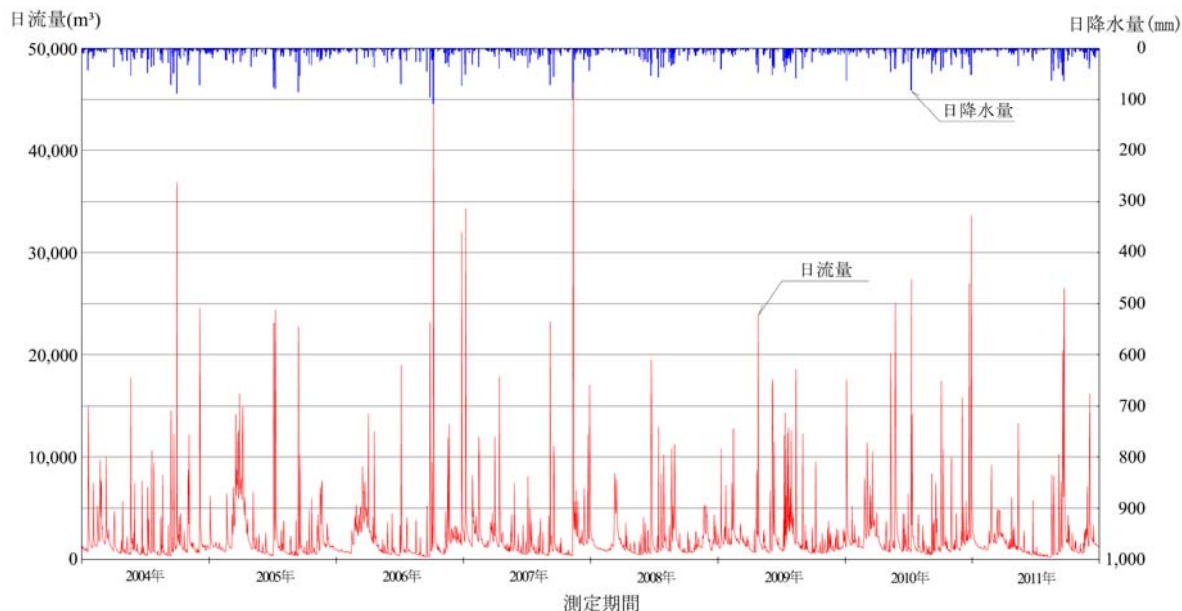
から、厳しい設定における将来の気温の状態設定値を用いて設定する。

第 8 表 可能蒸発散量、実蒸発散量及び補正係数

観測年	年平均気温 (°C)	年間降水量 (mm/y)	可能蒸発散量*1 (mm/y)	実蒸発散量*2 (mm/y)	蒸発散量 補正係数
2004 年	10.1	1,546	640	762	1.19
2005 年	8.7	1,468	601	538	0.89
2006 年	8.9	1,380	603	537	0.89
2007 年	9.8	1,565	624	681	1.09
2008 年	9.4	1,198	620	492	0.79
2009 年	9.4	1,507	614	638	1.04
2010 年	9.8	1,437	637	438	0.69
2011 年	9.4	1,366	624	642	1.03
平均	9.4	1,433	620	591	0.95

*1：可能蒸発散量はソーンズウェイト法により、年平均気温から算出した。

*2：降水量と敷地内の表流水流量の観測結果から求めた河川流出高を用いて求めた蒸発散量を、実蒸発散量とした。



第 14 図 敷地内の表流水流量の観測結果(2004 年～2011 年)

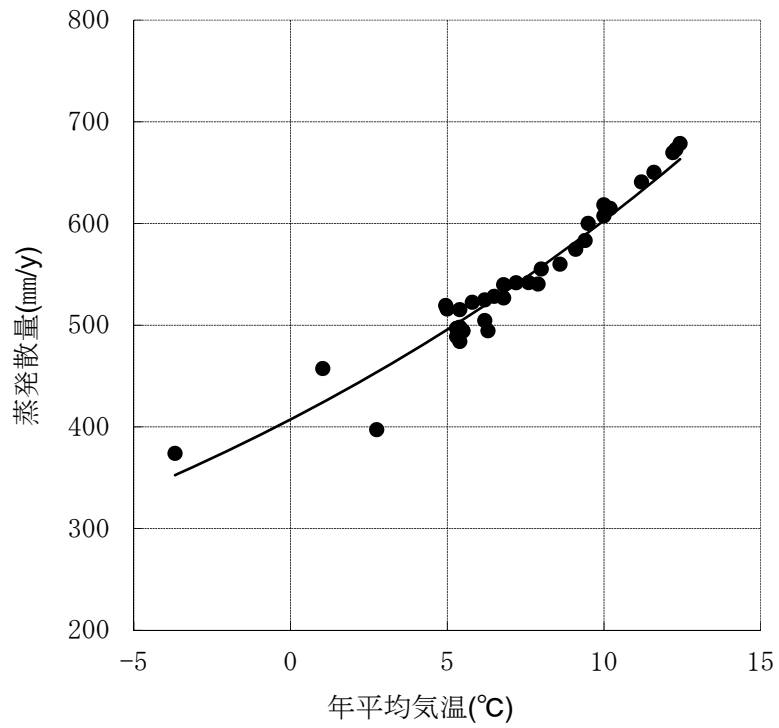
第9表 敷地周辺と類似した気候因子を持つ36地点の年平均気温と蒸発散量*1

No.	地点名	国／地域名	年平均気温 (°C)	可能 蒸発散量*2 (mm/y)	蒸発散量*3 (mm/y)
1	OKHOTSK	RUSSIAN FED.	-3.7	393	374
2	VLADIVOSTOK	RUSSIAN FED.	5.0	547	519
3	ALEKSANDROVSK-SAKHALINSKII	RUSSIAN FED.	1.0	481	457
4	NIKOL' SKOJE (OSTROV BERINGA)	RUSSIAN FED.	2.8	418	397
5	稚内	JAPAN	6.8	554	527
6	網走	JAPAN	6.5	556	528
7	別海	JAPAN	5.4	524	498
8	根室	JAPAN	6.3	520	494
9	厚床	JAPAN	5.3	514	489
10	榺町	JAPAN	5.4	509	484
11	太田	JAPAN	5.5	520	494
12	白糠	JAPAN	5.5	520	494
13	釧路	JAPAN	6.2	531	504
14	池田	JAPAN	5.8	550	522
15	浦幌	JAPAN	6.2	552	525
16	糠内	JAPAN	5.0	543	516
17	大津	JAPAN	5.3	523	497
18	大樹	JAPAN	5.4	542	515
19	苫小牧	JAPAN	7.6	570	542
20	鶴川	JAPAN	6.8	568	540
21	室蘭	JAPAN	8.6	589	560
22	日高門別	JAPAN	7.2	570	542
23	静内	JAPAN	8.0	584	555
24	浦河	JAPAN	7.9	569	540
25	小田野沢	JAPAN	9.1	605	575
26	三沢	JAPAN	10.0	639	607
27	十和田	JAPAN	9.5	632	600
28	八戸	JAPAN	10.2	647	615
29	三戸	JAPAN	10.0	651	618
30	種市	JAPAN	9.4	614	583
31	鹿島台	JAPAN	11.2	674	641
32	石巻	JAPAN	11.6	684	650
33	仙台	JAPAN	12.4	714	678
34	亘理	JAPAN	12.2	705	670
35	相馬	JAPAN	12.3	708	673
36	六ヶ所	JAPAN	9.2	614	583

*1：36地点年平均気温は、気象庁のデータ⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾を使用した。

*2：可能蒸発散量はソーンスウェイト法により、年平均気温から算出した。

*3：蒸発散量は、可能蒸発散量に補正係数(0.95)を乗じて算出した。



第 15 図 敷地周辺と類似した気候因子を持つ 36 地点の年平均気温と蒸発散量の関係*1

*1 : 36 地点の年平均気温は、気象庁のデータ⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾を使用した。

b. 蒸発散量の変化

(a) 確からしい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースの将来の蒸発散量は、第 15 図に示す関係式及び確からしい設定における寒冷化ケースの気温の状態設定値から、1,000 年後に 560mm/y と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースの将来の蒸発散量は、第 15 図に示す関係式及び確からしい設定における寒冷化ケースの気温の状態設定値から、660mm/y と設定する。

(b) 厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースの将来の蒸発散量は、第 15 図に示す関係式及び厳しい設定における寒冷化ケースの気温の状態設定値から、1,000 年後に 560mm/y と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

厳しい設定における温暖期継続ケースの気温は、降水量の不確かさを考慮した方が希積水量は少なくなるため、確からしい設定の気温を用いていることから、蒸発散量も確からしい設定と同様の値とする。

c. 蒸発散量の設定値

蒸発散量の状態設定結果を第 10 表に示す。蒸発散量は河川流量の設定に関連しており、河川流量は降水量の影響を考慮した方が保守的な設定となる。したがって、河川流量が保守的となる寒冷化ケースを状態設定の対象とする。

第 10 表 蒸発散量の状態設定値

ケース		モデル化時期	気温(°C)	蒸発散量 (mm/y)
確からしい 設定	寒冷化 ケース	現在	9	580
		1,000 年後	8	560
厳しい設定	寒冷化 ケース	現在	9	580
		1,000 年後	8	560

(v) かん養量

かん養量の変化は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、かん養量が増加すると廃棄物埋設地周辺において表流水流量に係る地下水の流出量(基底流出量)及び地表面を流れる直接流出量に影響を及ぼすと考えられる。これらのことから、かん養量の変化を長期変動事象として考慮し、将来のかん養量を設定する。

a. かん養量の設定に関する考え方

基底流出量は、おおむねかん養量に相当する(山本、高橋(1987)⁽²⁷⁾)とされていることから、以下の3つの方法から、現在の降水量に対する基底流出量(=かん養量)の割合を設定し、この割合が将来も同様と考え、将来のかん養量を設定する。

山本、高橋(1987)⁽²⁷⁾によると、日本の平均的な降水量、蒸発散量、直接流出量及び基底流出量は以下のように記載される。

- ・年平均降水量・・・1,800mm/y
- ・蒸発散量・・・・・・・・650mm/y
- ・直接流出量・・・・・・・・750mm/y
- ・基底流出量・・・・・・・・400mm/y

$$\text{基底流出量/年平均降水量} = 400/1,800 = 0.22$$

上記より、基底流出量と年平均降水量との関係は、降水量の約22%となる。

敷地周辺の降水量及び敷地における表流水流量観測の結果(ハイドログラフ)から、基底流出量を求めることができる。表流水流量における基底流出量の概念図を第16図に示す。本手法は、表面流出水量観測堰の流量経時変化曲線の変動振幅の下端を結んだ曲線を引くことにより、分割される面積比率(直接流出量/基底流出量の割合)から求める方法である。

年間降水量 1,310mm/y に対して、流量観測堰の表面流出量から求めた基底流出流量は 138mm/y～289mm/y となる。したがって、基底流出量は降水量の 11%～22%となる。

敷地周辺の降水量及び敷地に適用したタンクモデル(菅原(1972)⁽²⁸⁾)から想定される表流水流量から求めた基底流出量は、年間降水量 1,310mm/y に対して、231mm/y～242mm/y となる。したがって、基底流出量は降水量の約18%となる。

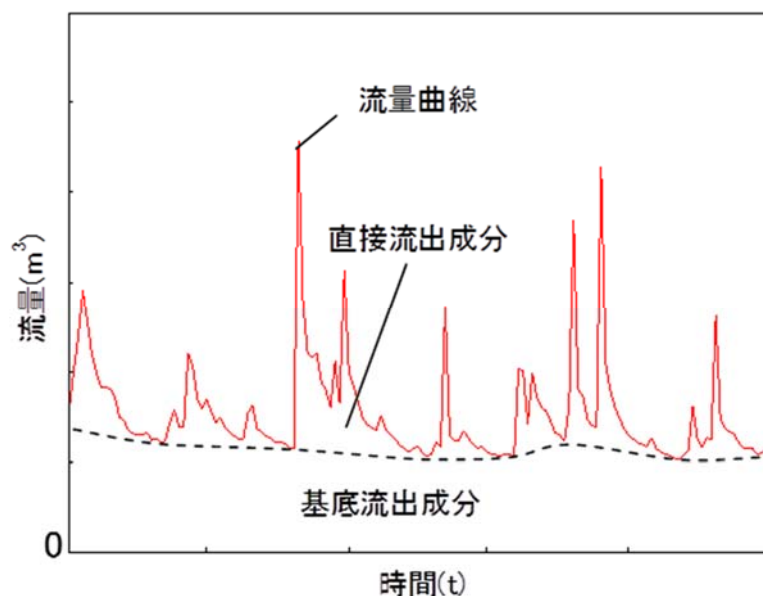
以上の3つの手法における基底流出量と降水量の関係から、かん養量は降水量の

20%と設定する。

したがって、将来のかん養量は、「(iii) c. 降水量の状態設定」で求めた現在、1,000年後の降水量の状態設定値の20%と設定する。

降水量は希釈水量に関連しており、降水量が少ない方が表流水流量も少なくなるため希釈水量は保守的となる。したがって、かん養量の設定値は、降水量が少なくなる値を用いて求める。

なお、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号（廃止措置の開始後の評価）線量評価パラメータ 埋設設備からの流出水量」で使用する降雨浸透量(かん養量)は、埋設設備からの流出水量と関連があり、埋設設備からの流出水量が多くなると、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出量が増加するため、降水量が多くなることを考慮した値を用いることとする。



第16図 表流水流量における基底流出量の概念図(ハイドログラフ)

b. かん養量の変化

(a) 確からしい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける将来のかん養量は、確からしい設定における寒冷化ケースの降水量の状態設定値から、1,000年後に214mm/yと設定する。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける将来のかん養量は、確からしい設定における温暖期継続ケースの降水量の状態設定値から、260mm/yと設定する。

(b) 厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける将来のかん養量は、厳しい設定における寒冷化ケースの降水量の状態設定値から、1,000年後に172mm/yと設定する。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける将来のかん養量は、厳しい設定における温暖期継続ケースの降水量の状態設定値から、210mm/yと設定する。

c. かん養量の状態設定

かん養量の状態設定結果を第11表に示す。かん養量は、地表面を流れる直接流出量に影響を及ぼすと考えられるため、降水量と同様に寒冷化ケースを状態設定の対象とする。

また、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号（廃止措置の開始後の評価）線量評価パラメータ 埋設設備からの流出水量」において求める埋設設備からの流出水量は、降雨浸透量（かん養量）が増えると大きくなる傾向があることから、降雨浸透量を求めるための年平均降水量は、保守的に大きい値となるように設定する。年平均降水量は温暖期継続ケースの確からしい設定の値1,300mm/y及び厳しい設定の値1,050mm/y（ばらつきの小さい側）を用いて、年平均降水量のばらつきの大きい側の値 $1,550\text{mm/y} (=1,300 + (1,300 - 1,050))$ とする。したがって、流出水量の算出に用いる降雨浸透量は310mm/y（年平均降水量1,550mm/yの20%）と設定する。

第 11 表 かん養量の設定値

ケース		モデル化時期	気温 (°C)	降水量 (mm/y)	かん養量 (mm/y)	考え方
確からしい 設定	寒冷化ケース	現在	9	1,120	224	かん養量は降水量の 20%と設定 希釈水量の観点から、降水量が 少なくなる値を使用して設定
		1,000 年後	8	1,070	214	
厳しい設定	寒冷化ケース	現在	9	910	182	
		1,000 年後	8	860	172	
解析用パラメータ (温暖期継続ケース)		現在～1,000 年後	12	1,550 ^{*1}	310	かん養量は降水量の 20%と設定 流出水量の観点から、降水量が 多くなる値を使用して設定

*1 : 年平均降水量が大きい温暖期継続ケースの確からしい設定の値 1,300 に厳しい設定の値 1,050 との差分を加算 (1,550mm/y=1,300 + (1,300-1,050))

(vi) 地下水位(地下水流動)

地下水位(地下水流動)は単独事象としては廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、地形変化や海水準変動による地下水流動の変化が、地下水の流動方向、地下水の流出点、地下水流速及び埋設設備から上部覆土や鷹架層への流出水量に影響する。

a. 地下水の流動方向及び地下水の流出点

敷地は北西から南東に緩く傾斜する台地からなり、地下水は主に降水によってかん養されている。また、台地の地下水面は降雨時及び融雪時に変動が認められるものの、主に表層に分布している第四紀層内にある。これは、鷹架層の透水係数が廃棄物埋設地周辺の第四紀層より約 2 桁小さく、地表面から浸透した雨水が容易に鷹架層に浸透できないためと考えられる。埋設設備は鷹架層を掘り下げて設置し、難透水性覆土及び下部覆土は鷹架層の透水係数以下となるように設置する。また、上部覆土は廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数程度となるように設置し、原地形及び原水理地質構造に近くなることから、覆土後の地下水面は、原地形と同様に第四紀層内にあると考える。したがって、廃棄物埋設地付近を通過した地下水は、原地形の地下水面等高線図から読み取れる地下水の流動方向と同様に、主に南に向かって流れ中央沢を経て尾駮沼に流入すると考える。1,000 年後の将来の地形は現状と大局的には変わらないため、将来においても廃棄物埋設地を通過した地下水は南に向かって流れ、中央沢を経て尾駮沼に流入すると考える。

b. 地下水流速

廃棄物埋設地付近の鷹架層及び上部覆土中の地下水流速*1 は、その位置の動水勾配及び透水係数により設定する。

(a) 動水勾配

廃棄物埋設地付近の地下水流動は、「a. 地下水の流動方向及び流出点」に示すとおり、覆土後 1,000 年程度までの間は原地形の地下水流動と同様になると想定し、間隙水圧測定実施位置を通る鉛直断面内の全水頭等高線図から求めた埋設設備設置地盤付近の動水勾配に基づき設定する。

なお、覆土後 1,000 年程度までの間における地形の侵食を考慮した動水勾配を算出しても、それらの動水勾配は、現在の動水勾配と大きく変わらない

*1: ここで地下水流速は、みかけの流速(実流速×間隙率)を示す。

ことを確認した。将来の地形の侵食を考慮した動水勾配の算出位置及び算出例を第 17 図及び第 18 図に示す。

(一) 鉛直断面内の全水頭等高線に基づく動水勾配の設定に関する考え方

鉛直断面内の全水頭等高線に基づく動水勾配は、廃棄物埋設地付近で実施した間隙水圧測定値(標高換算全水頭)を基に作成した全水頭等高線図を用いて設定した。

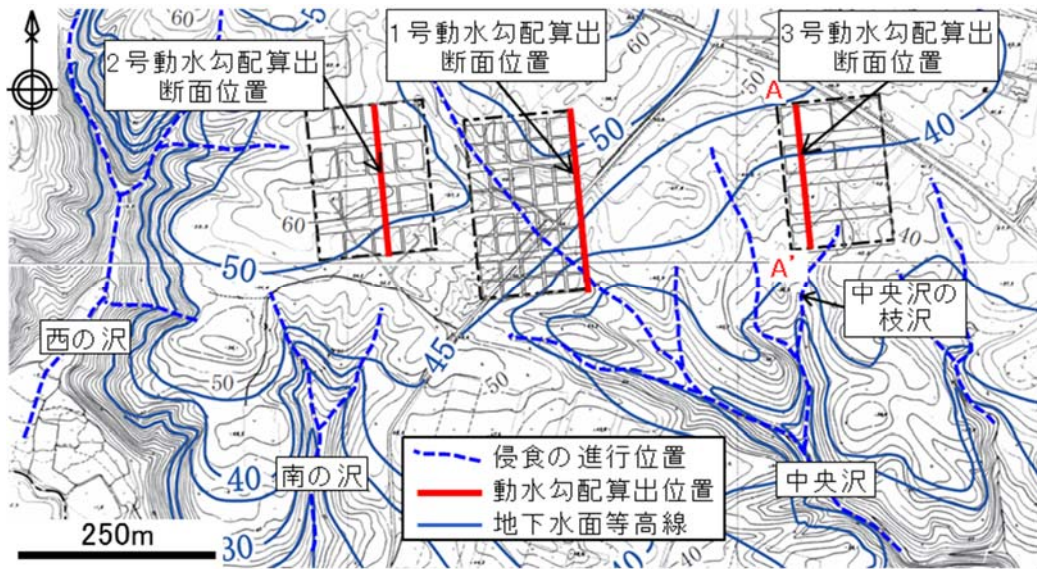
確からしい設定の動水勾配では実測に基づいて求めた動水勾配の平均を、厳しい設定の動水勾配では実測に基づいて求めた動水勾配の最大値を基に、それぞれ埋設設備からの流出水量が大きくなる側に 0.5%単位で丸めた値とした。

鉛直断面内の全水頭等高線に基づく動水勾配の設定方法の詳細については、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号 (廃止措置の開始後の評価) 線量評価パラメータ 埋設設備からの流出水量 2. (3)埋設設備設置地盤付近の地下水の流動状況」に示す。

(二) 鉛直断面内の全水頭等高線に基づく動水勾配の状態設定

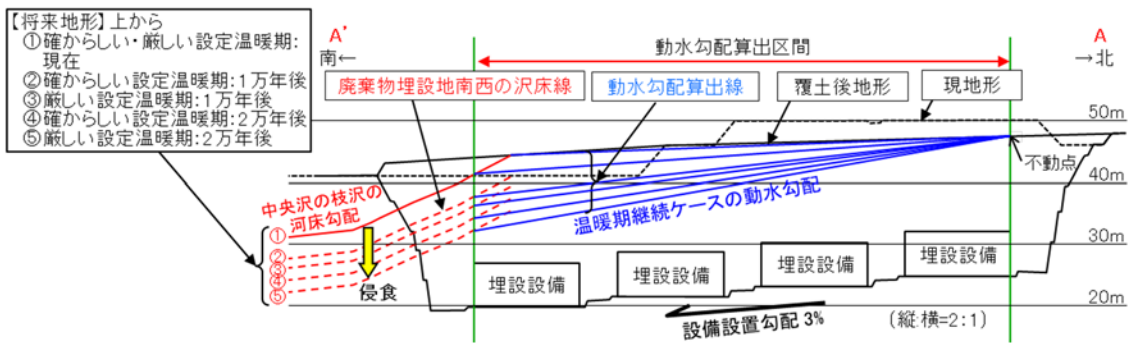
第 19 図に間隙水圧測定結果から作成した全水頭等高線を示す。

また、第 19 図から求めた埋設設備設置地盤付近の地下水の動水勾配及び現在から 1,000 年後までの動水勾配の状態設定値を第 12 表に示す。



第 17 図 動水勾配の算出位置*1

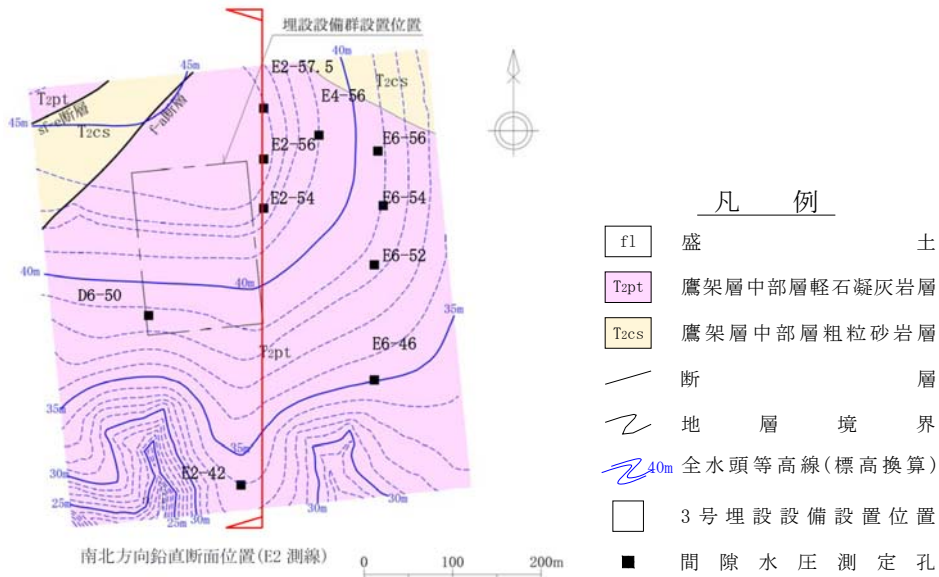
*1：将来の地形変化に基づく動水勾配の算出断面は、地下水面の勾配と地形勾配が調和的であることを考慮し、廃棄物埋設地における地下水面等高線の上流側から下流側にかけて地形勾配が最も急となる位置とした。



第 18 図 3号廃棄物埋設地南北断面における将来の地形変化と動水勾配の算出*1

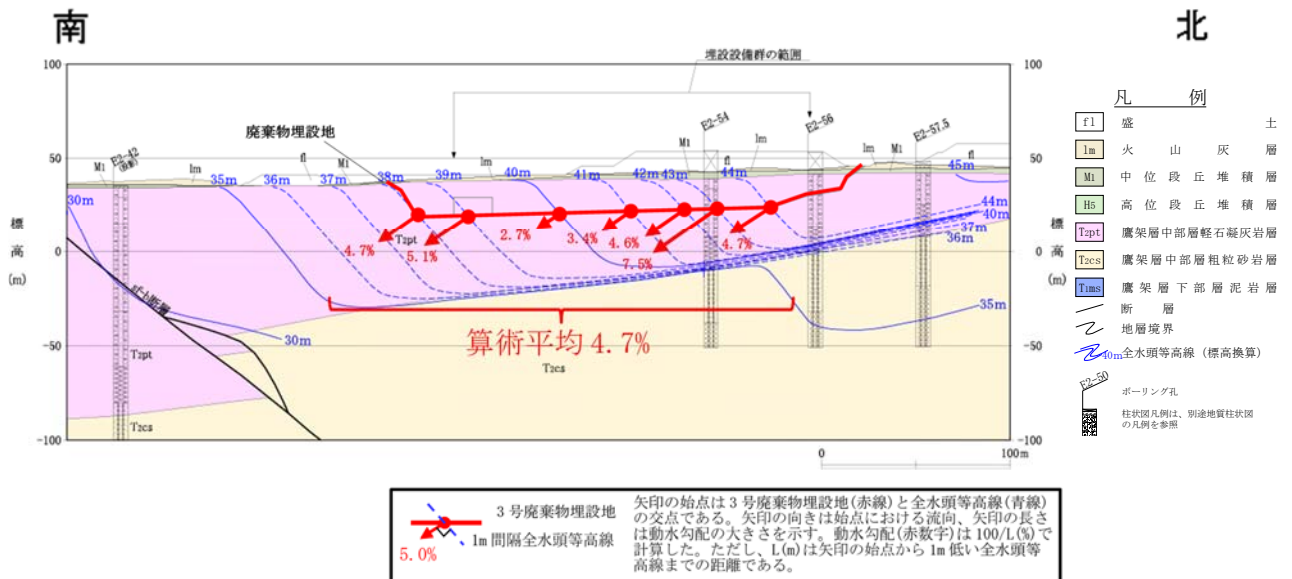
*1：将来の動水勾配は、埋設設備設置位置の範囲(緑縦線)において設定することとし、上流部(北側)の不動点と下流部(南側)の侵食を考慮した中央沢の枝沢等の交点から算出する。

(沢底の地下水位は地形と調和的であることから将来も同様とし、将来の動水勾配は沢地形から設定する。)



標高+22m 水平断面*1

*1：埋設設備群設置標高の水平断面における埋設設備群設置範囲では、地下水の流向はおおむね南北方向であり、動水勾配も同様の傾向となる。3号廃棄物埋設地付近ではE2側線が南北方向に間隙水圧測定孔を多く配置していることから、この測線を3号廃棄物埋設地付近の南北方向の代表鉛直断面作成位置とした。

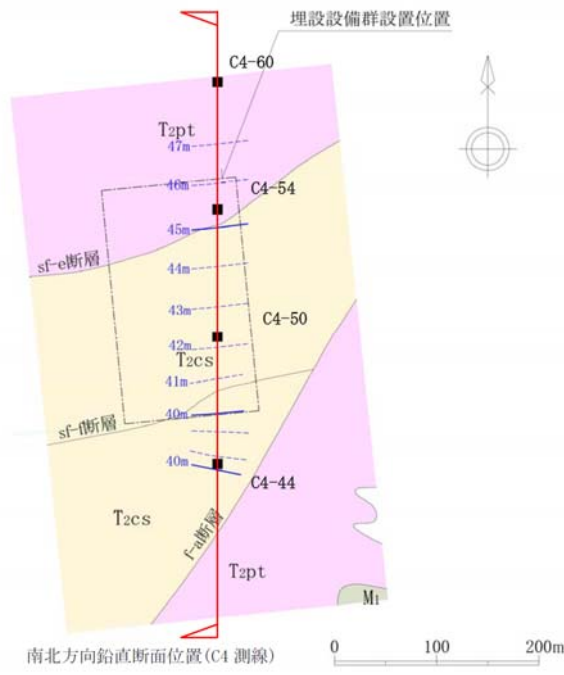


注1：矢印で示す動水勾配は、全水頭等高線から求めた局所的な値である。

南北方向 E2 測線鉛直断面

第 19 図 廃棄物埋設地付近の全水頭分布図 (1/3)

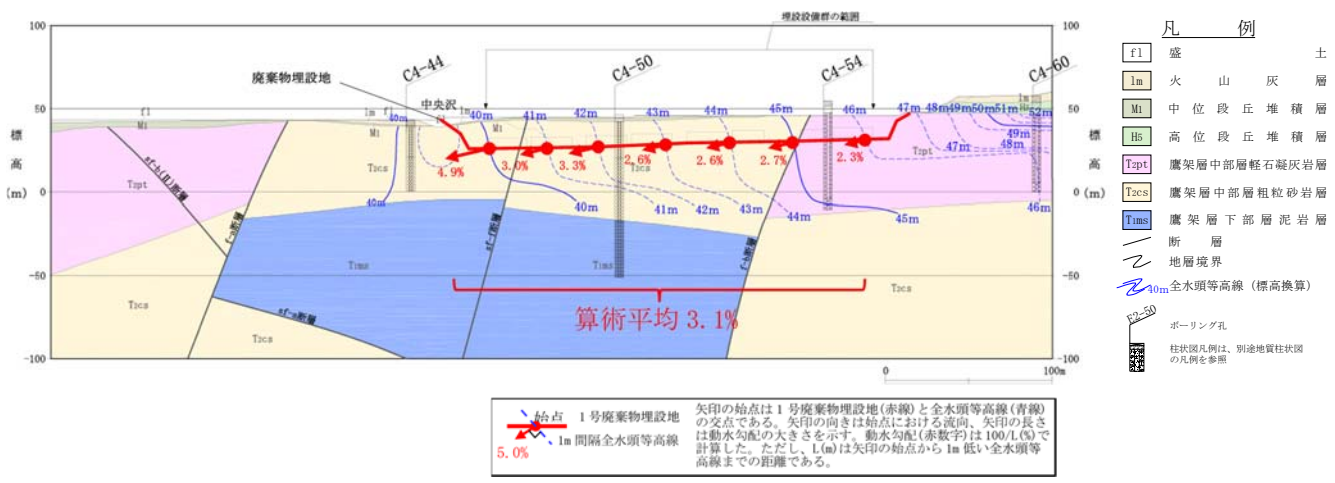
(3号廃棄物埋設地付近、2017年6月)



*1：埋設設備設置標高の水平断面における埋設設備群設置範囲では、地下水の流向がおおむね南北方向であり、動水勾配も同様の傾向となる。1号廃棄物埋設地では、C4側線が南北方向に間隙水圧測定孔を多く配置していることから、この測線を1号廃棄物埋設地付近の南北方向の代表鉛直断面作成位置とした。

- 凡例
- M1 中位段丘堆積層
 - T2pt 鷹架層中部層軽石凝灰岩層
 - T2cs 鷹架層中部層粗粒砂岩層
 - 断層
 - 〰 地層境界
 - 〰 40m全水頭等高線(標高換算)
 - 1号埋設設備設置位置
 - 間隙水圧測定孔

標高+30m 水平断面*1

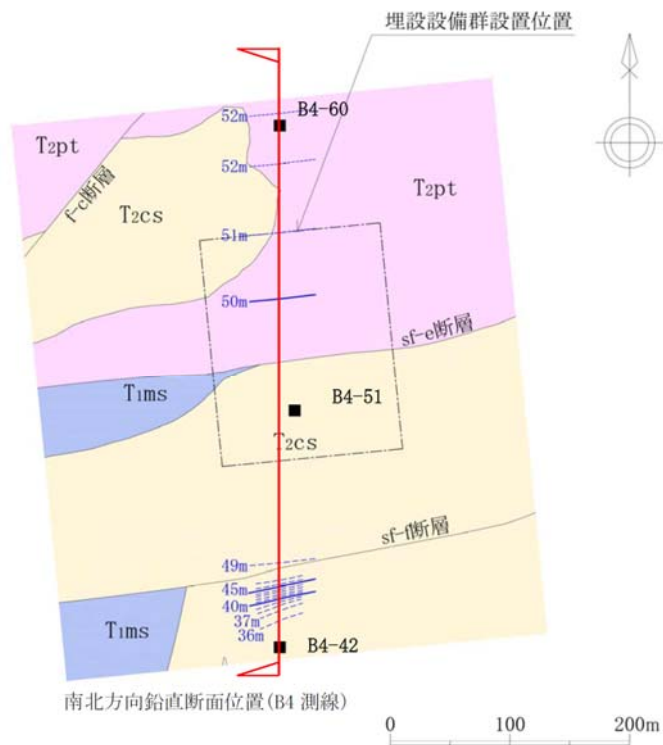


注1：矢印で示す動水勾配は、全水頭等高線から求めた局所的な値である。

南北方向 C4 測線鉛直断面

第 19 図 廃棄物埋設地付近の全水頭分布図 (2/3)

(1号廃棄物埋設地付近、1990年6月)

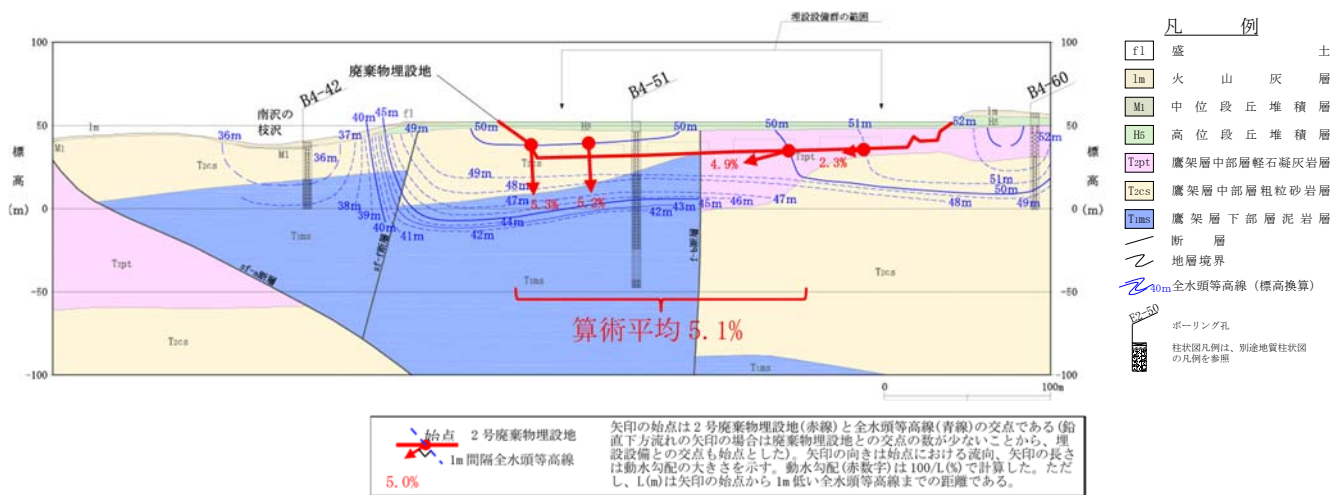


*1: 埋設設備設置標高の水平断面における埋設設備群設置範囲では、地下水の流向がおおむね南北方向であり、動水勾配も同様の傾向となる。2号廃棄物埋設地では、B4 側線が南北方向に間隙水圧測定孔を多く配置していることから、この測線を2号廃棄物埋設地付近の南北方向の代表鉛直断面作成位置とした。

凡 例

- T_{2pt} 鷹架層中部層軽石凝灰岩層
- T_{2cs} 鷹架層中部層粗粒砂岩層
- T_{1ms} 鷹架層下部層泥岩層
- 断 層
- 〰 地 層 境 界
- ~ 40m 全水頭等高線 (標高換算)
- 2号埋設設備設置位置
- 間 隙 水 圧 測 定 孔

標高+34m 水平断面*1



注1: 矢印で示す動水勾配は、全水頭等高線から求めた局所的な値である。

南北方向 B4 測線鉛直断面

第 19 図 廃棄物埋設地付近の全水頭分布図 (3/3)

(2号廃棄物埋設地付近、1995年6月)

第 12 表 埋設設備設置地盤付近の地下水の動水勾配及び動水勾配の状態設定値

廃棄物埋設地	断面位置	埋設設備設置地盤付近の地下水の動水勾配(%) ^{*1}		動水勾配の状態設定値(%)	
		平均 ^{*2}	範囲	確からしい設定	厳しい設定
3号廃棄物埋設地	E2 測線	4.7	2.7～7.5	5.0	8.0
1号廃棄物埋設地	C4 測線	3.1	2.3～4.9	3.5	5.0
2号廃棄物埋設地	B4 測線	5.1	2.3～5.3	5.5	5.5

*1：間隙水圧測定結果の実測値から作成した全水頭等高線を基に求めた(第 19 図参照)。

*2：個々の値の算術平均とした。

(b) 透水係数の設定に関する考え方

地盤の透水係数は、廃棄物埋設施設を設置する地盤の N 値が 50 以上の岩盤であること、天然バリアを著しく損傷する事象は想定されないことから、将来においても大きく変化する要因がない。したがって、透水係数は確からしい設定と厳しい設定では同じ値とし、鷹架層中部層の平均的な透水係数とする。

c. 埋設設備から上部覆土や鷹架層への流出水量

埋設設備から上部覆土や鷹架層への流出流量は、地下水浸透流解析により算定する。浸透流解析には、覆土や地盤の透水係数及び境界条件として動水勾配を用いる。

動水勾配は、「(二) 鉛直断面内の全水頭等高線に基づく動水勾配の状態設定」に示す値とする。

(vii) 河川流量

河川流量の変化は廃棄物埋設地を直接損傷させることはないが、廃棄物埋設施設を通過した地下水中の放射性物質の濃度は、その地下水が地表に流出した地点で、そこを流れる河川や湖沼などの表流水によって希釈される。これらのことから河川流量の変化を長期変動事象として考慮し、将来の河川流量を設定する。

a. 河川流量の設定に関する考え方

廃棄物埋設地は二又川の流域にあるため、希釈水量となる流量は二又川の河川流量に相当する。

河川流量は、下式で表される。

河川流量 = (降水量 - 蒸発散量)

= [河川流出高] × 流域面積 - 河川の水利用量(飲料水、農業用水、工業用水等)

・ 将来の降水量及び蒸発散量として、現在、1,000年後の「降水量」及び「蒸発散量」の設定値を用いて、河川流量を算出する。

・ 将来の水利用率は、現在と同じと設定する。

現在の二又川の水利用量は、青森県(2007)⁽²⁹⁾に示される工業用水(9,500m³/d)と農業用水(0.03m³/s)の合計である4.41×10⁶m³/yとする。

現在の表流水流量は、現在の二又川(尾駁沼への流入地点より上流域)の流域面積26.9km²、現在の年降水量1,310mm/y及び蒸発散量590mm/y(水収支から算出)から、1.94×10⁷m³/yとする。

河川の水利用が二又川(尾駁沼への流入地点より上流域)に限られることを考慮し、現在の二又川水利用率を、4.41×10⁶m³/y ÷ 1.94×10⁷m³/y = 0.227 ≒ 0.3とし、将来もこの利用率が変わらないと設定する。

したがって、将来の二又川の河川流量は、下式により算出する。

(将来の降水量 - 将来の蒸発散量) × 将来の二又川の流域面積 × (1 - 0.3)

二又川流域の設定図を第20図に示す。

(a) 確からしい設定

(一) 寒冷化ケース

確からしい設定における寒冷化ケースの将来の「(2)(iii) 降水量」及び

「(2)(iv) 蒸発散量」を用いる。流域面積は、相対海水準の低下により尾駁沼が河川化するため、二又川と中央沢の合流点より上流側の流域と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

確からしい設定における温暖期継続ケースの将来の「(2)(iii) 降水量」及び「(2)(iv) 蒸発散量」を用いる。流域面積は、現在の尾駁沼の流域⁽²⁹⁾と設定する。

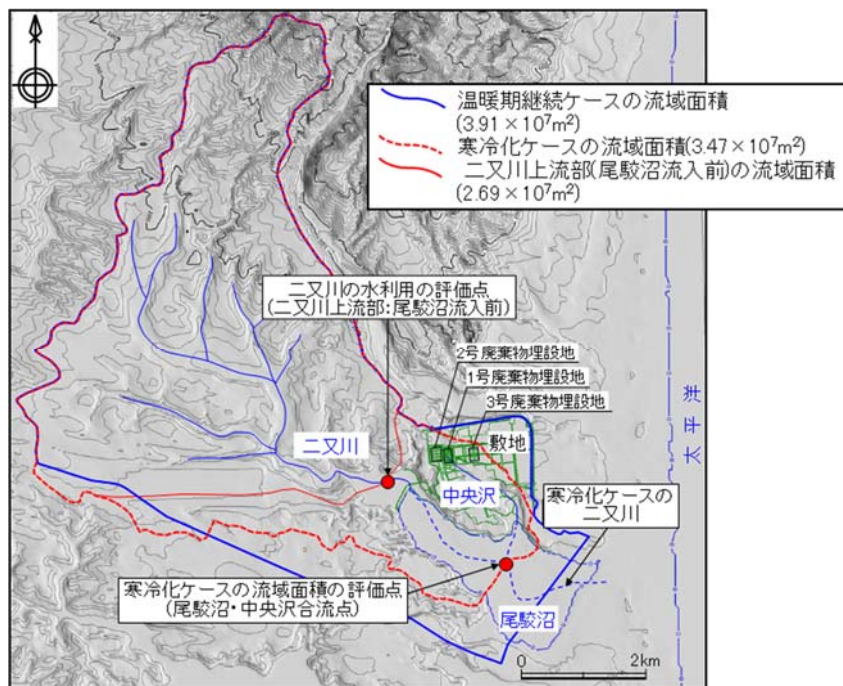
(b) 厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

厳しい設定における寒冷化ケースの将来の「(2)(iii) 降水量」及び「(2)(iv) 蒸発散量」を用いる。流域面積は、確からしい設定と同様に、二又川と中央沢の合流点より上流側の流域と設定する。

(二) 温暖期継続ケース

厳しい設定における温暖期継続ケースの将来の「(2)(iii) 降水量」及び「(2)(iv) 蒸発散量」を用いる。流域面積は、確からしい設定と同様に、現在の尾駁沼の流域⁽²⁹⁾と設定する。



第 20 図 二又川流域の設定図

b. 河川流量の変化

(a) 確からしい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける河川流量は、確からしい設定における寒冷化ケースの降水量、蒸発散量及び流域面積から、1,000年後に $1.2 \times 10^7 \text{m}^3/\text{y}$ とする。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける河川流量は、確からしい設定における温暖期継続ケースの降水量、蒸発散量及び流域面積から、 $1.7 \times 10^7 \text{m}^3/\text{y}$ とする。

(b) 厳しい設定

(一) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける河川流量は、厳しい設定における寒冷化ケースの降水量、蒸発散量及び流域面積から、1,000年後に $7.2 \times 10^6 \text{m}^3/\text{y}$ とする。

(二) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける河川流量は、厳しい設定における温暖期継続ケースの降水量、蒸発散量及び流域面積から、 $1.0 \times 10^7 \text{m}^3/\text{y}$ とする。

c. 河川流量の状態設定

河川流量の設定値を第13表に示す。河川流量は少ないほど希釈水量が少なくなるため、保守的となる。したがって、寒冷化ケースを状態設定の対象とする。

第 13 表 河川流量の設定値

ケース		モデル化時期	気温 (°C)	降水量 (mm/y)	蒸発散量 (mm/y)	流域面積 (m ²)	河川流量 (m ³ /y)
確からしい 設定	寒冷化 ケース	現在	9	1,120	580	3.47 × 10 ⁷	1.3 × 10 ⁷
		1,000 年後	8	1,070	560		1.2 × 10 ⁷
厳しい設定	寒冷化 ケース	現在	9	910	580	3.47 × 10 ⁷	8.0 × 10 ⁶
		1,000 年後	8	860	560		7.2 × 10 ⁶

(3) プレート運動と気候変動の両者に起因する事象

(i) 侵食

侵食作用が継続することによって、埋設設備の地表近接及び露呈並びに廃棄物埋設地周辺の地形が変化することによる地下水位(地下水流動)の変化が想定される。これらのことから、侵食を長期変動事象として考慮し、将来の侵食速度を設定し、侵食速度を用いて埋設設備の位置及び沢の位置から露呈時期を設定する。また、隆起量を考慮した相対的な海水準を「相対海水準」とし、この相対海水準の低下によって生じる尾駁沼の河川化時期についても設定する。

敷地及び敷地近傍の沢部においては第四紀層及び基盤である鷹架層が削剥されており、河食が生じていると考えられる。廃棄物埋設地付近は二又川の流域であることから、二又川及び敷地から二又川に流れ込む沢による下刻を考慮する。

敷地及び敷地近傍における台地と河川及び沢との位置関係等の大局的な地形状況は、数万年程度の将来において大きく変化することはないと想定するため、流域ごとの沢の縦断勾配及び横断形状を保持して下刻が進むと想定するため、第四紀層及び鷹架層における侵食速度の差異は十分小さいと考えられる。

なお、台地上及び沢の上流部では沖積層は厚く堆積していないため、沖積層による侵食速度への影響は十分小さいと考えられる。

隆起域における河川侵食の概念図を第 21 図に示す。下刻は、相対海水準と降水量の影響を受けるため、寒冷化ケースと温暖期継続ケースでは、大局的には以下のような下刻過程となる(貝塚、1977⁽³⁰⁾)。

寒冷化ケースでは、降水量が減少し、河川流量が少なくなる。そのため、上流域では土砂が発生しない、若しくは凍結融解作用などにより土砂が発生してもほとんど下流域に運搬されず、現在の下流域に相当する地域では、海水準低下に伴い侵食基準面が低下し、下刻が進む。相対海水準の低下に伴い、最初に下流域に堆積している沖積層(間氷期堆積物)が侵食される。沖積層は比較的軟質なため、相対海水準に対して勾配を持たずに侵食される。沖積層削剥後、相対海水準の低下に伴い、氷期の平衡河床勾配を保持して下流域～上流域まで侵食が進む。

温暖期(温暖期継続ケース)では、降水量が増加し、河川流量が多くなるため、上流域では下刻が進み、下流域ではその土砂が堆積する。相対海水準の低下に伴い、間氷期の平衡河床勾配を保持したまま、相対海水準変化量(隆起量相当)の下刻が進む。

なお、以下の理由から河食以外の侵食は考慮しない。

海食：廃棄物埋設地は現在の汀線から内陸に約 3km 離れており、十分な離隔があることから、考慮しない。

溶食：石灰岩等の分布域でないことから、考慮しない。

風食：乾燥地帯ではなく、影響は河食に包含されることから、考慮しない。

なお、ガリー侵食は、河床より下刻することはないため河食に包含される。

a. 侵食速度

(a) 侵食速度の設定に関する考え方

寒冷化ケースと温暖期継続ケースの侵食量の関係を第 22 図に示す。寒冷化ケースの侵食では、沖積層の基底面の勾配を保ち、敷地の隆起を考慮した相対海水準の低下による下方への下刻が生じると設定する。したがって、寒冷化の当初は勾配の緩い下流部に堆積した沖積層の上限面から下刻することとなり、沖積層の下刻後は河床勾配と海退量との関係から下刻量が求められる。沖積層の下刻に数万年を要し、それまでの期間、鷹架層の下刻の影響は十分小さいと想定される。

温暖期継続ケースでは、現在の河床勾配を保ち、相対海水準低下に伴った下刻が生じると設定する。

廃棄物埋設地周辺には、中央沢、南の沢、西の沢及びそれらの枝沢が分布する。枝沢は本流の沢に流れ込むことから、本流の沢との合流点が侵食基準面となる。枝沢の侵食基準面は本流が侵食されることで低下するため、本流の侵食速度と同等の速度で枝沢も侵食されていくと考えられる。したがって、枝沢における侵食速度は、本流の沢の寒冷化ケース及び温暖期継続ケースの侵食速度と同じと設定する。

寒冷化ケース及び温暖期継続ケースにおける侵食量を比較すると、寒冷化ケースは下流域の沖積層の侵食等により上流部の侵食が進行しないと設定していることから、3.2 万年後までは、温暖期継続ケースの方が侵食が早く進行する。

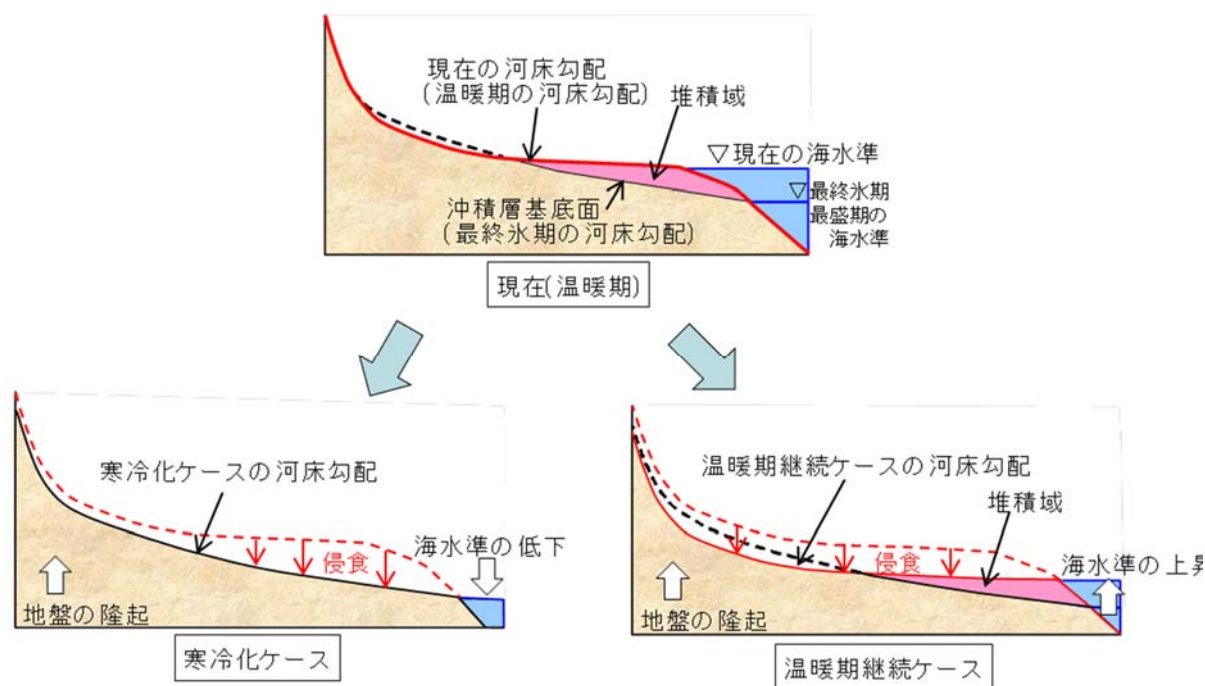
このことから、侵食速度の確からしい設定においては、温暖期継続ケースにおける相対海水準低下速度を侵食速度として設定する。温暖期継続ケースにおける相対海水準低下速度は、「(2)(i) 海水準変動」において海水準変動を現在から将来にわたり、現在の海水準より一律で 10m 上昇するとしたことから、「(1)(iii) 隆起・沈降運動」の隆起速度相当と設定できる。

(一) 確からしい設定

相対海水準の低下分が侵食されるため、侵食速度は確からしい設定における隆起速度と同等とする。

(二) 厳しい設定

相対海水準の低下分が侵食されるため、侵食速度は厳しい設定における隆起速度と同等とする。



【寒冷化ケース】

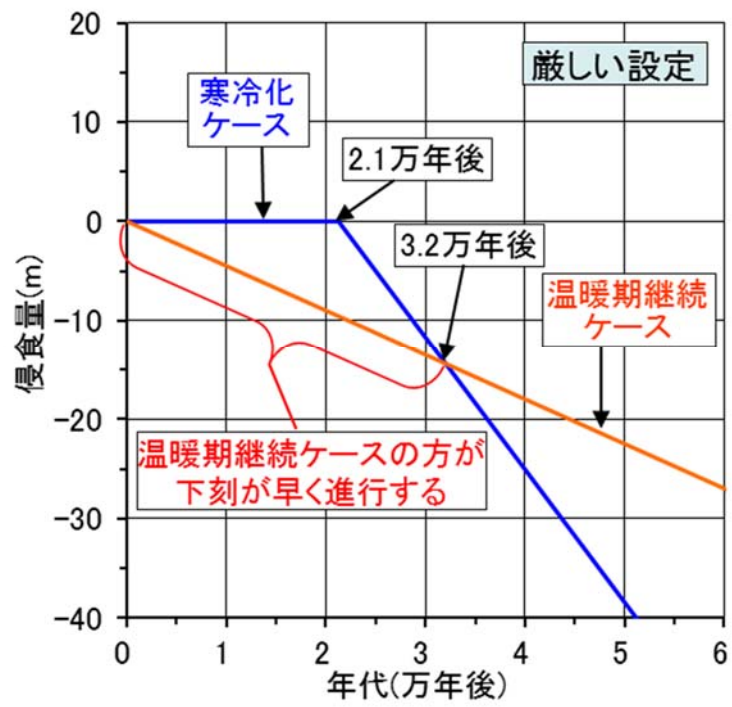
- ・降水量、河川流量の減少及び海水準が低下する。
- ・隆起するため、相対的な海水準は最終氷期最盛期よりも低下する。

⇒主に下流域で沖積層の侵食が始まり、平衡河床勾配に達した後上流側にも侵食が及ぶ。

【温暖期継続ケース】

- ・降水量、河川流量の増加及び海水準が上昇する。
- ・河床勾配は現在(温暖期)と変わらないが、隆起するため、全体に侵食が進む。

第 21 図 隆起域における河川侵食の概念図



第 22 図 侵食量の関係(厳しい設定の例)

b. 侵食速度の状態設定

侵食速度の状態設定値を第 14 表に示す。

(a) 確からしい設定

確からしい設定における隆起速度は 3.5m/万年であるため、侵食速度は 3.5m/万年とする。

(b) 厳しい設定

厳しい設定における隆起速度は 4.5m/万年であるため、侵食速度は 4.5m/万年とする。

第 14 表 侵食速度の状態設定値

ケース	期間	侵食速度 (m/万年)
確からしい設定	現在～1,000 年後	3.5
厳しい設定		4.5

c. 埋設設備の露呈時期

(a) 埋設設備の露呈時期の設定に関する考え方

埋設設備の露呈については、寒冷化ケースと温暖期継続ケースを比較すると、廃棄物埋設地付近は、温暖期継続ケースの方が早く侵食が生じるため、埋設設備には温暖期継続ケースの侵食の方が早く到達することとなる。したがって、侵食に係る長期変動事象の状態設定は、保守的に廃棄物埋設地付近の侵食が早く生じる温暖期継続ケースの値を採用することとする。

温暖期継続ケースにおける侵食の概念図を第 23 図に、温暖期継続ケースにおける侵食速度と埋設設備の露呈時期の例を第 24 図に示す。

温暖期継続ケースの侵食は、現河床勾配を保ったまま主要な河川及び沢からの侵食が進行する。埋設設備の露呈時期の算出に当たっては、廃棄物埋設地の周辺に埋土があるが、安全評価上の移行距離としても考慮していないことから、廃棄物埋設地の周辺における旧地形面より上位の埋土及び覆土は考慮せず、旧地形面から埋設設備上端までを仮想的土被りとする。仮想的土被りの層厚を隆起速度で除した値を露呈開始までの時間とする。

なお、廃棄物埋設地において上部覆土は、締固め度 90%以上に管理された状態で施工する。上部覆土については、周辺の土壌・岩盤と水理的に連続性を持たせる観点からおおむね廃棄物埋設施設周辺の第四紀層と同等の透水係数を目安に施工するため、覆土上部だけが大きく削られることは考え難く、廃棄物埋設地における侵食速度は周辺岩盤と同等程度と考えられる。

(一) 確からしい設定

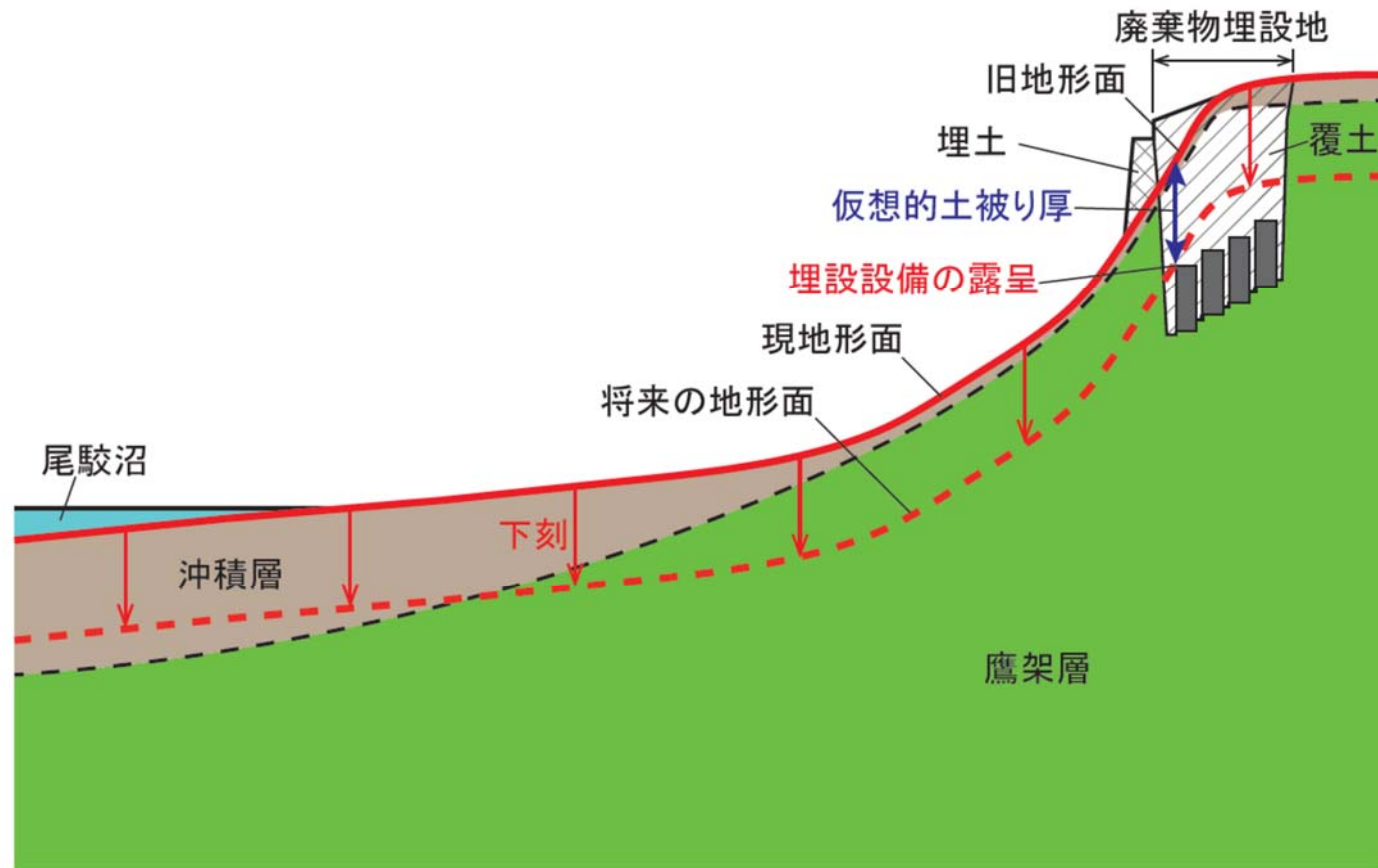
確からしい設定における隆起速度及び各廃棄物埋設地の仮想的土被り厚さから、埋設設備の露呈時期を求める。

(二) 厳しい設定

厳しい設定における隆起速度及び各廃棄物埋設地の仮想的土被り厚さから、埋設設備の露呈時期を求める。

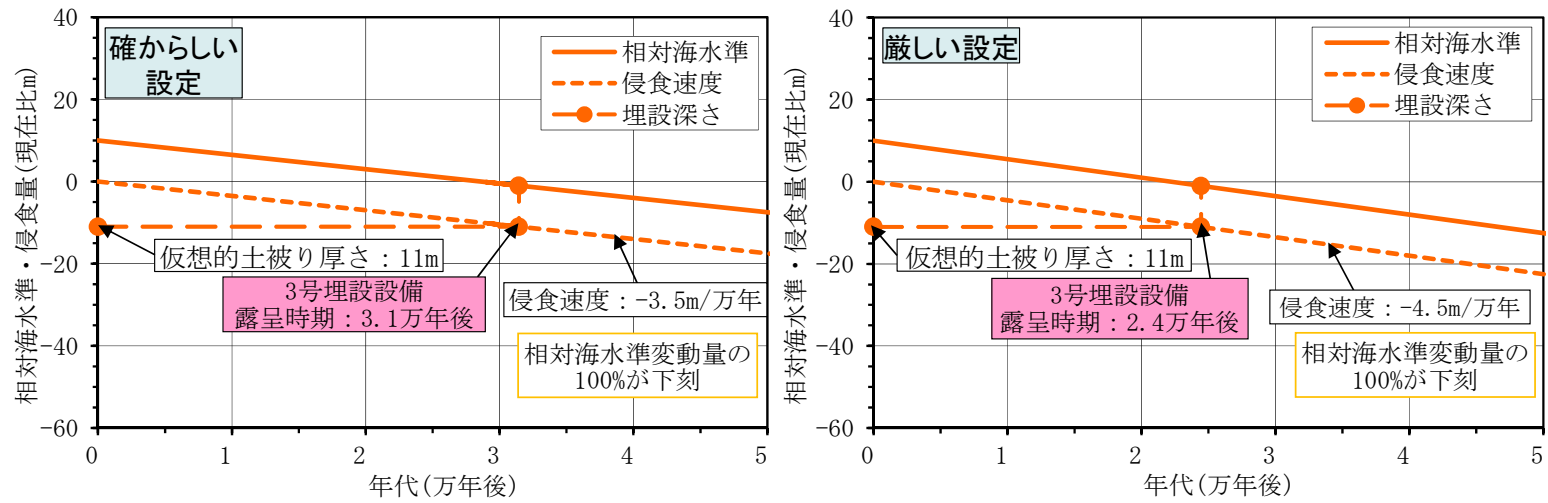
(b) 埋設設備の露呈時期の状態設定

埋設設備の露呈時期を第 15 表に示す。埋設設備の露呈時期は、最も早くても数万年後となるため、評価期間を踏まえると、埋設設備の露呈時期の状態設定については、考慮しないものとする。



第 23 図 侵食の概念図(温暖期継続ケースの場合*1)

*1：温暖期継続ケースの侵食は、主要な河川及び沢の現河床勾配(図中の赤実線：現地形面及び埋土覆土部分は旧地形面を示す)を保ったまま侵食が進行する。また、仮想的土被り厚は、旧地形面よりも上位にある埋土及び覆土を除いた厚さを考慮する。



第 24 図 温暖期継続ケースにおける侵食速度と埋設設備の露呈時期 (3号廃棄物埋設地の例)

第 15 表 埋設設備の露呈時期

項目	温暖期継続ケース					
	確からしい設定			厳しい設定		
	3号廃棄物 埋設地	1号廃棄物 埋設地	2号廃棄物 埋設地	3号廃棄物 埋設地	1号廃棄物 埋設地	2号廃棄物 埋設地
隆起速度(m/万年)	3.5			4.5		
海水準変動量(現在比:m)	10			10		
露呈開始位置の 仮想的土被り厚さ(m)	11	7	18	11	7	18
埋設設備 露呈開始時期(万年後)	3.1	2.0	5.1	2.4	1.6	4.0

d. 尾駁沼の河川化時期

(a) 尾駁沼の河川化時期の設定に関する考え方

将来の尾駁沼の河川化時期は、隆起量と海水準変動を組み合わせた相対海水準が尾駁沼の最深値(-4m)になる時期を河川化時期とする。

隆起量及び海水準変動は、前述の「(1)(iii) 隆起・沈降運動」及び「(2)(i) 海水準変動」の設定値を用いる。

(一) 確からしい設定

確からしい設定における隆起速度及び海水準変動から、尾駁沼の河川化時期を求める。

(二) 厳しい設定

厳しい設定における隆起速度及び海水準変動から、尾駁沼の河川化時期を求める。

(b) 尾駁沼の河川化時期の状態設定

相対海水準の低下による尾駁沼の河川化時期の関係を第 25 図に、尾駁沼の河川化時期の状態設定値を第 16 表に示す。

(一) 確からしい設定

(ア) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける尾駁沼の河川化時期は、確からしい設定における寒冷化ケースの海水準(現在比 0m からの低下量)及び隆起速度 3.5m/万年から、約 700 年後とする。

(イ) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける尾駁沼の河川化時期は、確からしい設定における温暖期継続ケースの海水準(現在比+10m)及び隆起速度 4.5m/万年から、約 4.0 万年後となるため、評価期間を踏まえ、考慮しないものとする。

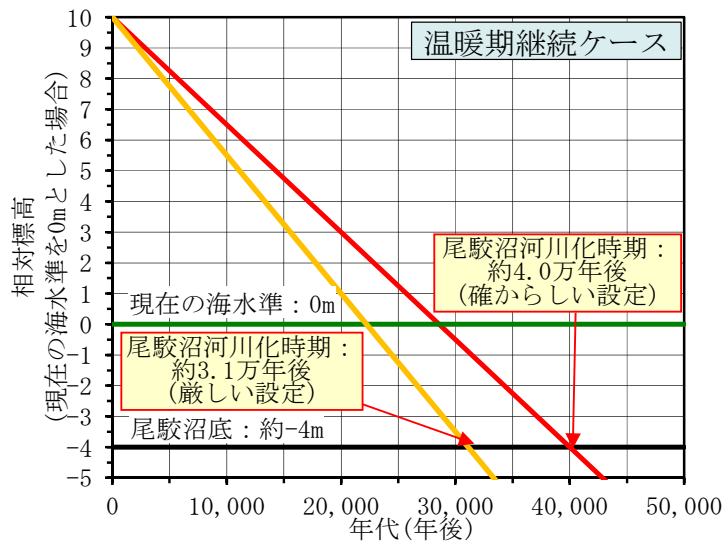
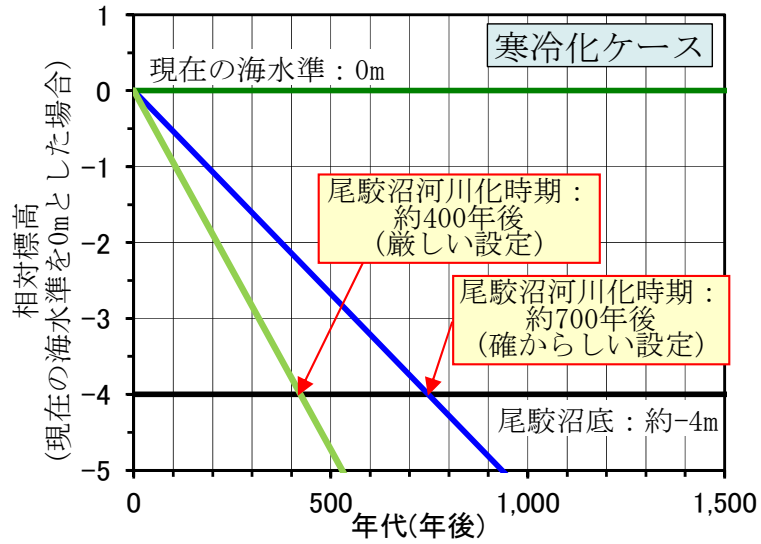
(二) 厳しい設定

(ア) 寒冷化ケース

寒冷化ケースにおける尾駁沼の河川化時期は、厳しい設定における寒冷化ケースの海水準(現在比 0m からの低下量)及び隆起速度 3.5m/万年から、約 400 年後とする。

(イ) 温暖期継続ケース

温暖期継続ケースにおける尾駁沼の河川化時期は、確からしい設定における温暖期継続ケースの海水準(現在比+10m)及び隆起速度 4.5m/万年から、約 3.1 万年後となるため、評価期間を踏まえ、考慮しないものとする。



第 25 図 相対海水準の低下による尾駁沼の河川化時期^{*1}

*1: 尾駁沼底の標高は、国土地理院発行 2 万 5 千分の 1 地形図「戸鎖」を参照。

第 16 表 尾駁沼の河川化時期の設定値

ケース		尾駁沼の 河川化時期	考え方
寒冷化 ケース	確からしい 設定	約 700 年後	寒冷化ケースの現在の海水準から将来の海水準 と隆起量を考慮した相対海水準が尾駁沼の基底 (標高-4m)に達するまでの時間とする。
	厳しい設定	約 400 年後	

(4) その他の事象

(i) 生物学的事象

敷地内における樹木の根に関する調査結果から、樹木の根の深さは最大で 2.3m である。

モグラ類による覆土の擾乱が想定されるが、地表から 1m 未満である場合が多く⁽³¹⁾、樹木の根の影響範囲に包含される。

以上のことから、埋設設備は十分な覆土に覆われることから、生物学的事象による影響はなく、長期変動事象として考慮しない。

(ii) 透水性の変化

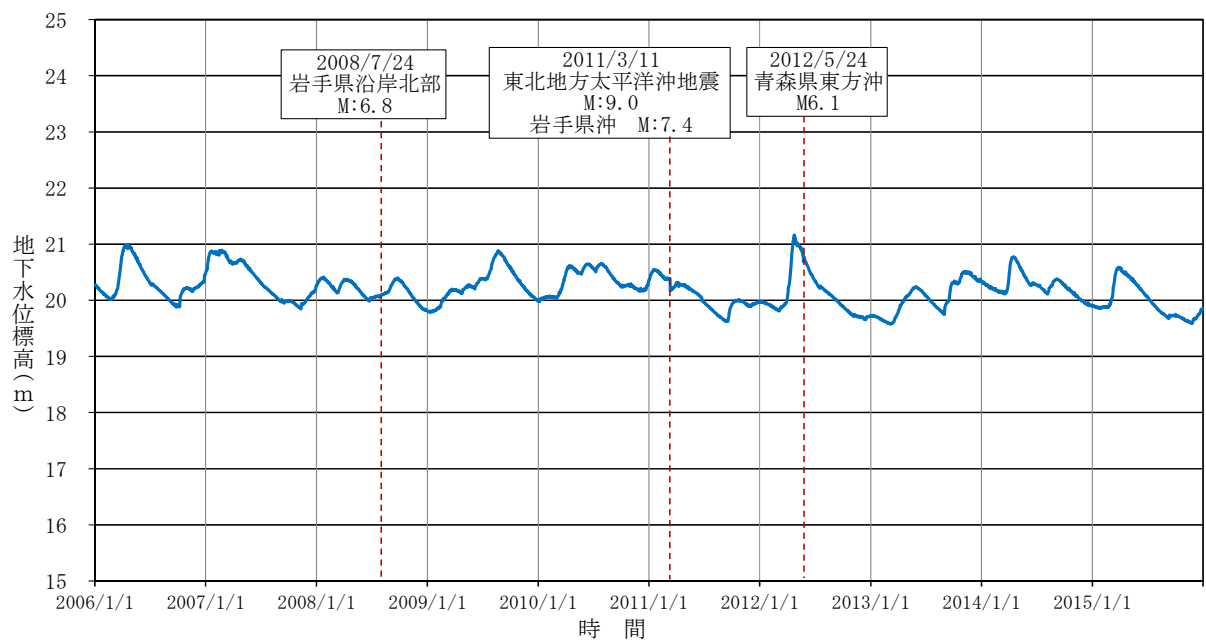
岩盤の透水性は、以下の点から大きく変化しないと判断し、長期変動事象として考慮しない。

a. 断層

敷地内に将来活動する断層が認められないことから、断層運動による岩盤への破碎は発生しない。

b. 地震

敷地内における地下水観測結果を第 26 図に示す。地下水位観測結果から、地震による地下水位の変動が認められるものの、その変動量は季節変動に内包され、一定期間後には元の地下水位に戻っている。このことから、地震による透水性の変化は考慮しない。



第 26 図 地下水位観測結果(F0-20 孔)

4. まとめ

廃止措置の開始後の評価における線量評価シナリオの設定に当たって、人工バリア及び天然バリアの機能並びに被ばく経路等に影響を与える自然現象を考慮した地質環境に係る長期変動事象の状態設定結果を第 17 表に示す。

第 17 表 長期変動事象の状態設定結果 (1/2)

起因	長期事象	長期変動項目	確からしい設定	厳しい設定	根拠記載箇所
プレート運動	火山・火成活動	火砕物密度流	短期的(数百年～数千年スケール)には、敷地に到達する可能性は十分に小さいため、火砕物密度流の影響は考慮しない。		3. (1) (i) 火山・火成活動 a. 火砕物密度流
		降下火砕物	化学成分溶出による低 pH の水が発生すると想定する。		3. (1) (i) 火山・火成活動 b. 降下火砕物
	地震・断層活動	地震	金属腐食に伴う埋設設備の変形量と比較して非常に小さいことから、地震による力学的影響を考慮しない。		3. (1) (ii) 地震・断層活動 a. 地震
		液状化(覆土)	覆土は容易に液状化し難く、低透水性への影響は生じないと考えられるため、考慮しない。		3. (1) (ii) 地震・断層活動 b. 液状化(覆土)
		断層活動(地盤の変形)	敷地内に活断層が分布しないことから、断層活動による影響について考慮しない。		3. (1) (ii) 地震・断層活動 c. 断層活動(地盤の変形)
隆起・沈降	隆起・沈降	隆起速度：3.5m/万年	隆起速度：4.5m/万年	3. (1) (iii) 隆起・沈降運動	
気候変動	海水準変動	海水準(現在比 m)			3. (2) 気候変動に起因する事象 (i) 海水準変動
		温暖期継続ケース 現在～1,000年後：+10m	温暖期継続ケース 現在～1,000年後：+10m		
	気温	寒冷化ケース 現在：9℃、1,000年後：8℃	寒冷化ケース 現在：9℃、1,000年後：8℃	3. (2) 気候変動に起因する事象 (ii) 気温	
	降水量	寒冷化ケース 現在：1,120mm/y 1,000年後：1,070mm/y	寒冷化ケース 現在：910mm/y 1,000年後：860mm/y	3. (2) 気候変動に起因する事象 (iii) 降水量	
	蒸発散量	寒冷化ケース 現在：580mm/y 1,000年後：560mm/y	寒冷化ケース 現在：580mm/y 1,000年後：560mm/y	3. (2) 気候変動に起因する事象 (iv) 蒸発散量	
	かん養量	寒冷化ケース 現在：224mm/y 1,000年後：214mm/y	寒冷化ケース 現在：182mm/y 1,000年後：172mm/y	3. (2) 気候変動に起因する事象 (v) かん養量	
温暖期継続ケース 現在～1,000年後：310mm/y					

第 17 表 長期変動事象の状態設定結果 (2/2)

起因	長期事象	長期変動項目	確からしい設定	厳しい設定	根拠記載箇所
気候変動	地下水	動水勾配			3. (2) 気候変動に起因する事象 (vi) 地下水位
		3号 現在～1,000年後：5% 1号 現在～1,000年後：3.5% 2号 現在～1,000年後：5.5%	3号 現在～1,000年後：8% 1号 現在～1,000年後：5.0% 2号 現在～1,000年後：5.5%		
	河川流量	寒冷化ケース 現在： $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{y}$ 1,000年後： $1.2 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{y}$	寒冷化ケース 現在： $8.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ 1,000年後： $7.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$	3. (2) 気候変動に起因する事象 (vii) 河川流量	
プレート運動と気候変動	侵食	侵食速度(温暖期継続ケース)			3. (3) プレート運動と気候変動に起因する事象 (i) 侵食
		3.5m/万年		4.5m/万年	
		尾駁沼の河川化時期			
		寒冷化ケース：約700年後		寒冷化ケース：約400年後	
		埋設設備の露呈時期			
		埋設設備の露呈時期は、最も早くても数万年後となるため、評価期間を踏まえると、埋設設備の露呈時期の状態設定については、考慮しないものとする。			
その他	生物学的事象	埋設設備は十分な厚さの覆土に覆われることから、生物学的事象による影響はなく、長期変動事象として考慮しない。			3. (4) その他の事象 (i) 生物学的事象
	透水性の変化	岩盤の透水性は大きく変化しないと判断し、長期変動事象として考慮しない。			3. (4) その他の事象 (ii) 透水性の変化

参考文献：

- (1) 土木学会(2008)：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方、社団法人土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会、2008.6、372p
- (2) 高橋雅紀(2004)：日本列島のE-W短縮テクトニクスの原因とその開始時期、日本地震学会 2004年秋季大会講演予稿集、B048
- (3) 吉田武義、中島淳一、長谷川昭、佐藤比呂志、長橋良隆、木村純一、田中明子、Prima, O.D.A.、大口健志(2005)：後期新生代、東北本州弧における火成活動史と地殻・マントル構造、第四紀研究、Vol.44、No.4、pp.195-216
- (4) 産業技術総合研究所(2012)：地質・気候関連事象の時間スケールに対する不確実性の検討、独立行政法人産業技術総合研究所 深部地質環境研究コア、116p
- (5) 工藤崇、小林淳、山元孝広、岡島靖司、水上啓治(2011)：十和田火山における噴火活動様式の時代変遷と長期予測、日本第四紀学会講演会要旨集、Vol.41、pp.82-83
- (6) 宇佐美龍夫、石井寿、今村隆正、武村雅之、松浦律子(2013)：日本被害地震総覧 [599-2012]、東京大学出版会
- (7) 宇津徳治(1982)：日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表：1885年～1980年、東京大学地震研究所彙報 Vol.57
- (8) 気象庁(1951～2011)：「地震年報」等・・・「気象庁地震カタログ」
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
- (9) 村松郁栄(1969)：震度分布と地震のマグニチュードとの関係、岐阜大学教育学部研究報告、自然科学、第4号
- (10) 勝又護、徳永規一(1971)：震度IVの範囲と地震の規模および震度と加速度の対応、驗震時報、vol.36
- (11) 小池一之、町田洋編(2001)：日本の海成段丘アトラス、東京大学出版会、CD-ROM 日本 I [北海道・東北]
- (12) EPICA community members(2004)Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, NATURE, Vol.429, pp.623-628
- (13) Ayako Abe-Ouchi, Fuyuki Saito, Kenji Kawamura, Maureen E. Raymo, Jun'ichi Okuno, Kunio Takahashi, Heinz Blatter(2016)：Isolation-driven 100,000-year

- glacial cycles and hysteresis of ice-sheet Volume, Nature, Vol.500, pp.190-194
- (14) IPCC(2007): Climate Change 2007: SYNTHESIS REPORT, A Report of the Intergovernmental Panel Climate Change
- (15) ANDRA(2005) Phenomenological evolution of a geological repository, 525p
- (16) L.Labeyrie, J.Cole, K.Alverson and T.Stocker(2003) : The History of Climate Dynamics in the Late Quaternary, Paleoclimate, Global Change and the Future, p. 33-71
- (17) 日本第四紀学会(1987) : 百年千年万年後の日本の自然と人類—第四紀研究にもとづく将来予測、pp. 38-59、231p
- (18) IPCC(2013) : Climate Change 2013:The Physical Science Basis, AR5, WG I, 第5次評価報告書第1作業部会報告書—技術要約—、気象庁翻訳(2013)
- (19) Rohling E. J., Fenton M., Jorissen F. J., Bertrand P., Ganssen G., Caulet J.P. (1998) : Magnitudes of sea-level lowstands of the past 500,000 years, Nature, Vol.394, No.6689, pp.162-165
- (20) 登坂博行(2006)地圏の水環境科学、東京大学出版会、pp.12-13、364p
- (21) Yamanaka, M., Ishikawa, S. and Sugawara, K. (1990): PALYNOLOGICAL STUDIES OF QUATERNARY SEDIMENTS, IN NORTHEAST JAPAN, VII. SHIRIYA-ZAKI MOOR IN SHIMOKITA PENINSULA, ECOLOGICAL REVIEW, 22, 1
- (22) 松末和之、藤原治・末吉哲雄(2000) : 日本列島における最終氷期最寒冷期の気候、サイクル機構技報、vol.6、 pp. 93-103
- (23) Nakagawa, T., Tarasova, P.E., Nishida, K., Gotanda, K. and Yasuda, Y. (2002):Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Lapan: application to surface and Late Quaternary spectra
- (24) 気象庁(1981~2010) : 過去の気象データ検索、<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- (25) 気象庁(1981~2010) : 世界の地点別年平均値、<http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/climatview/frame.php>
- (26) C.W.Thornthwaite(1948):An Approach toward a Rational Classification of Climate , Geographical Review Vol. 38, No. 1 (Jan., 1948), pp. 55-94

- (27) 山本莊毅、高橋裕(1987)：図説水文学(水文学講座)、共立出版、pp. 62、221p
- (28) 菅原正巳(1972)：流出解析法(水文学講座 7)、共立出版、257p
- (29) 青森県(2007)：新むつ小川原開発基本計画素案に係る環境影響評価書、516p
- (30) 貝塚爽平(1977)：日本の地形 ー特質と由来ー、岩波書店、234p
- (31) 亀井翼(2013)：モグラによる遺物の埋没と埋没後擾乱-茨城県稲敷郡美浦村陸平貝塚を対象として-、第四紀研究、Vol. 52、No. 1、pp. 1-12

想定される自然現象の選定について

目 次

1. 自然現象の選定の位置づけ.....	1
2. 選定の基本方針.....	1
3. 自然現象の抽出.....	1
(1) 自然現象の選定の考え方及びフロー.....	1
(2) 自然現象を抽出した国内外の文献.....	1
4. 自然現象の選定.....	3
5. 安全機能に影響を及ぼし得る自然現象.....	3

1. 自然現象の選定の位置づけ

本資料は、許可基準規則第十条第四号に関する適合性を示す上で考慮する自然現象について、その基本的考え方及び選定結果までを説明する。

2. 選定の基本方針

第十条第四号を考慮した自然現象の選定の基本方針としては、「廃止措置の開始後」の期間に対して、安全機能を有する施設の安全機能に影響を及ぼし得る自然現象を選定する。

3. 自然現象の抽出

(1) 自然現象の選定の考え方及びフロー

自然現象の選定の考え方としては、自然現象等を国内外の基準及び文献から網羅的に抽出し、立地特性、地質調査結果、埋設設備の状態及び自然現象の特徴等を考慮して、安全機能を有する施設の安全機能に影響を及ぼさない事象は除外し、詳細評価をすべき事象を選定する。

自然現象等の選定の流れとしては、国内外の基準及び文献調査により自然現象を網羅的に抽出し、立地特性、地質調査結果、埋設設備の状態及び自然現象の特徴を考慮し、海外での評価手法を参考に、以下の基準のいずれかに該当するものを除外する。

なお、除外基準の詳細な考え方については根拠資料 1 に示す。

- ① 発生頻度が極低頻度と判断される事象
- ② 施設周辺では起こり得ない事象
- ③ 事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象
- ④ 施設に影響を及ぼさない事象
- ⑤ 他の事象に包含できる事象

除外基準に該当しない事象は、廃止措置の開始後の各期間において、安全機能を有する施設の安全機能に影響を及ぼし得る自然現象として選定する。

(2) 自然現象を抽出した国内外の文献

国内外の基準及び文献を参考にし、安全機能を有する施設の安全機能に影響を与えると考えられる自然現象等の抽出を行った。国内外の基準及び文献は自然災害、

産業事故、原子力発電所の安全性に影響を与える可能性のある外部ハザード、放射性廃棄物処分施設の地質環境及び安全評価に係る情報が網羅的に示されているものを参考にした。自然現象等を抽出した国内外の文献の一覧を第1表に示す。

第1表 自然現象を抽出した国内外の文献一覧

No.	文献名
1	日本原子力学会(2014):外的ハザードに対するリスク評価方法の選定に関する実施基準:2014(AESJ-SC-RK008)
2	国会資料編纂会(1998):日本の自然災害
3	日外アソシエーツ(2010):日本の災害史事典 1868-2009
4	日外アソシエーツ(2010):産業災害全史<シリーズ災害・事故史4>
5	IAEA(2003):Site Evaluation for Nuclear Installations, Safety Requirements Series No.NS-R-3(Rev.1)
6	IAEA(2010):Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide No.SSG-3
7	NRC(1983):PRA PROCEDURES GUIDE (Vol.1,Vol.2), NUREG/CR-2300
8	NRC(1991):Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events(IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities, NUREG-1407
9	NRC(1987):Evaluation of External Hazards to Nuclear Power Plants in the United States, NUREG/CR-5042
10	NEI(2012):DIVERSE AND FLEXIBLE COPING STRATEGIES (FLEX) IMPLEMENTATION GUIDE, NEI 12-06
11	IAEA(2015):Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations, Specific Safety Guide No.SSG-35
12	OECD/NEA(2000):Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste
13	OECD/NEA(2014):Updating the NEA International FEP List, An IGSC Technical Note
14	総合資源エネルギー調査会原子力保安・安全部会(2003):廃棄物安全小委員会報告書 -高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて-
15	IAEA(2004):Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities Vol.1
16	IAEA(2004):Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities Vol.2
17	土木学会(2006):精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方
18	原子力安全基盤機構(2006):地層処分に係る調査に関する報告書
19	産業技術総合研究所(2007):概要調査の調査・評価項目に関する技術資料
20	原子力安全基盤機構(2008):地層処分の立地選定段階の調査に係わるガイドラインの検討
21	土木学会(2008):余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行パラメータ設定の考え方
22	原子力安全委員会(2010):余裕深度処分の管理終了以後における安全評価に関する技術資料
23	IAEA(2011):Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No. SSG-14
24	IAEA(2014):Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No. SSG-29

No.1~11:自然災害及び産業事故に関する文献 No.12~24:放射性廃棄物処分施設の地質環境及び安全評価に係る文献

なお、上記論文に記載される内部事象については、第十条第四号の「影響事象分析」で説明する。

4. 自然現象の選定

自然現象の選定については、「第十条 廃棄物埋設地のうち第一号及び第三号 添付資料2 参考資料2 根拠資料1 自然現象及び人為事象の選定」に示す。

なお、上記根拠資料1には、廃止措置の開始前の期間に対して選定した事象についても示す。

5. 安全機能に影響を及ぼし得る自然現象

第十条第四号を考慮した廃止措置の開始後の廃棄物埋設地の安全機能に影響を及ぼし得る自然現象として、①火山の影響、②地震、③断層活動（地盤の変形）、④液状化（覆土）、⑤隆起・沈降、⑥気温（高温、低温・凍結）、⑦降水量、⑧海水準変動、⑨蒸発散量、⑩かん養量、⑪河川流量、⑫侵食、⑬地下水位（地下水流動）、⑭透水性の変化、⑮生物学的事象の15事象を選定した。

事業所敷地周辺の地震の発生状況について

目 次

1. 事業所敷地周辺の地震発生状況.....	1
2. 被害地震.....	1
3. 被害地震の調査.....	8
4. 参考文献.....	10

1. 事業所敷地周辺の地震発生状況

事業所が位置する東北地方及び北海道地方では、海洋プレートである太平洋プレートが陸域に向かって近づき、日本海溝から陸のプレートの下方へ沈み込んでいることが知られている。また、東北地方における活断層の多くは南北方向の走向を示す逆断層であり、この地域が東西方向に圧縮されていることを示唆している⁽¹⁾。

東北地方から北海道地方では上記に対応するように地震が発生しており、その発生様式等から「プレート間地震」、「海洋プレート内地震」、「内陸地殻内地震」及び「日本海東縁部の地震」の4種類に大別される。これらの地震のうち、敷地周辺ではプレート間地震の発生数が最も多く、また、マグニチュード(以下「M」という。)7～8程度の大地震も発生している。

2. 被害地震

日本国内の地震被害に関する記録は古くからみられ、これらを収集、編集したものと、「増訂 大日本地震史料」⁽²⁾、「日本地震史料」⁽³⁾、「新収 日本地震史料」⁽⁴⁾、「日本の歴史地震史料」⁽⁵⁾等の地震史料がある。

また、地震史料及び明治以降の地震観測記録を基に、主な地震の震央位置、地震規模等を取りまとめた地震カタログとして、「理科年表」⁽⁶⁾、「日本被害地震総覧」⁽⁷⁾、「宇佐美カタログ(1979)」⁽⁸⁾、「宇津カタログ(1982)」⁽⁹⁾、「気象庁地震カタログ」⁽¹⁰⁾、「地震活動総説」⁽¹¹⁾等がある。

「日本被害地震総覧」⁽⁷⁾及び「気象庁地震カタログ」⁽¹⁰⁾に記載されている被害地震のうち、敷地からの震央距離が200km程度以内の被害地震の震央分布を第1図に示す。また、同図に示した被害地震の諸元を第1表に示す。ここで、地震の規模及び震央位置は、1884年以前の地震については「日本被害地震総覧」⁽⁷⁾による値を、1885年以降1922年以前の地震については「宇津カタログ(1982)」⁽⁹⁾による値を、更に1923年以降の地震については「気象庁地震カタログ」⁽¹⁰⁾による値をそれぞれ用いている。

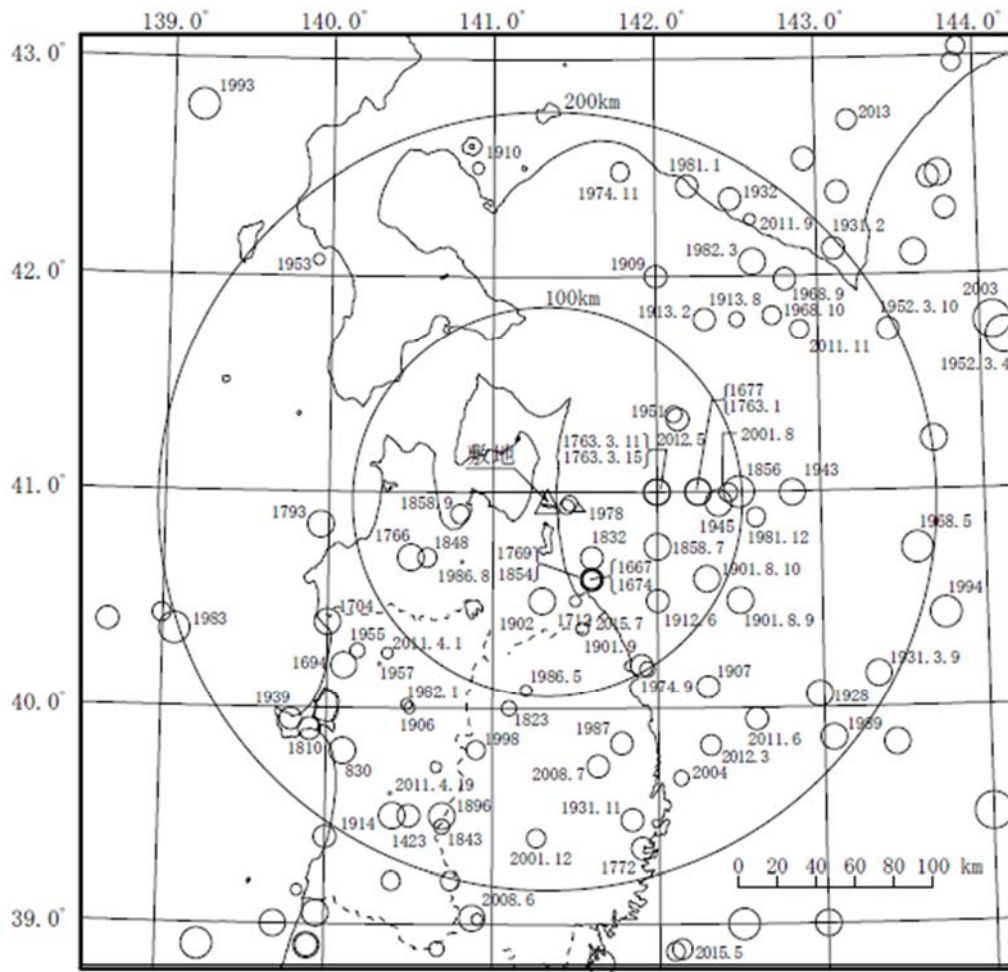
プレート間地震に関しては、第1図によると、太平洋側の海域では、東経144°付近における1952年十勝沖地震(M8.2)及び2003年十勝沖地震(M8.0)のようにM8クラスの地震が発生している。また、青森県東方沖から日本海溝付近にかけての海域においてはM7クラスの地震が数多く発生しており、それらの中には、1968年十勝沖地震(M7.9)や1994年三陸はるか沖地震(M7.6)のように近年青森県に大きな被害をもたらした地震も

存在する⁽¹²⁾⁽¹³⁾。また、敷地から 300km 以上離れているが、国内の既往最大のプレート間地震として、2011 年東北地方太平洋沖地震(モーメントマグニチュード 9.0)が発生している。

海洋プレート内地震に関しては、第 1 図によると、2008 年岩手県沿岸北部の地震(M6.8)のように被害をもたらした地震が発生している。また、敷地から 300km 以上離れているが、1933 年昭和三陸地震(M8.1)、1993 年釧路沖地震(M7.5)、1994 年北海道東方沖地震(M8.2)及び 2011 年宮城県沖の地震(M7.2)が発生している。上記の敷地から 300km 以上離れた位置で発生した 4 地震の発生位置を第 2 図に示す。

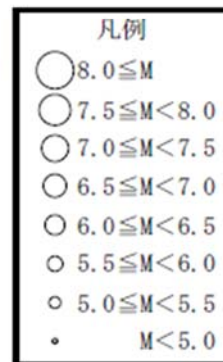
内陸地殻内地震に関しては、陸域では、東経 141° 付近よりも西側において、1766 年津軽の地震(M7 1/4)のように M7 クラスの地震が発生しており、また、敷地から 200km 以上離れているが、2008 年岩手・宮城内陸地震(M7.2)が発生している。一方、海域では、敷地周辺において、敷地の東側で発生した 1978 年青森県東岸の 2 地震(M5.8)以外に被害地震は発生していない。

日本海東縁部の地震に関しては、1983 年日本海中部地震(M7.7)及び 1993 年北海道南西沖地震(M7.8)のように M7 を上回る地震が発生している。



注1：図中の数字は地震発生年(同年(同年月)の地震が複数存在する場合には年月(年月日))。

注2：地震緒元は、1884年以前の地震については「日本被害地震総覧」⁽⁷⁾による値を、1885年以降1922年以前の地震については「宇津カタログ(1982)」⁽⁹⁾による値を、さらに1923年以降の地震については「気象庁地震カタログ」⁽¹⁰⁾による値をそれぞれ用いている。



第1図 事業所敷地周辺の被害地震の震央分布

(事業所敷地からの震央距離 200km 程度以内)

添3ニ-第1表 事業所敷地周辺の被害地震(1/3)

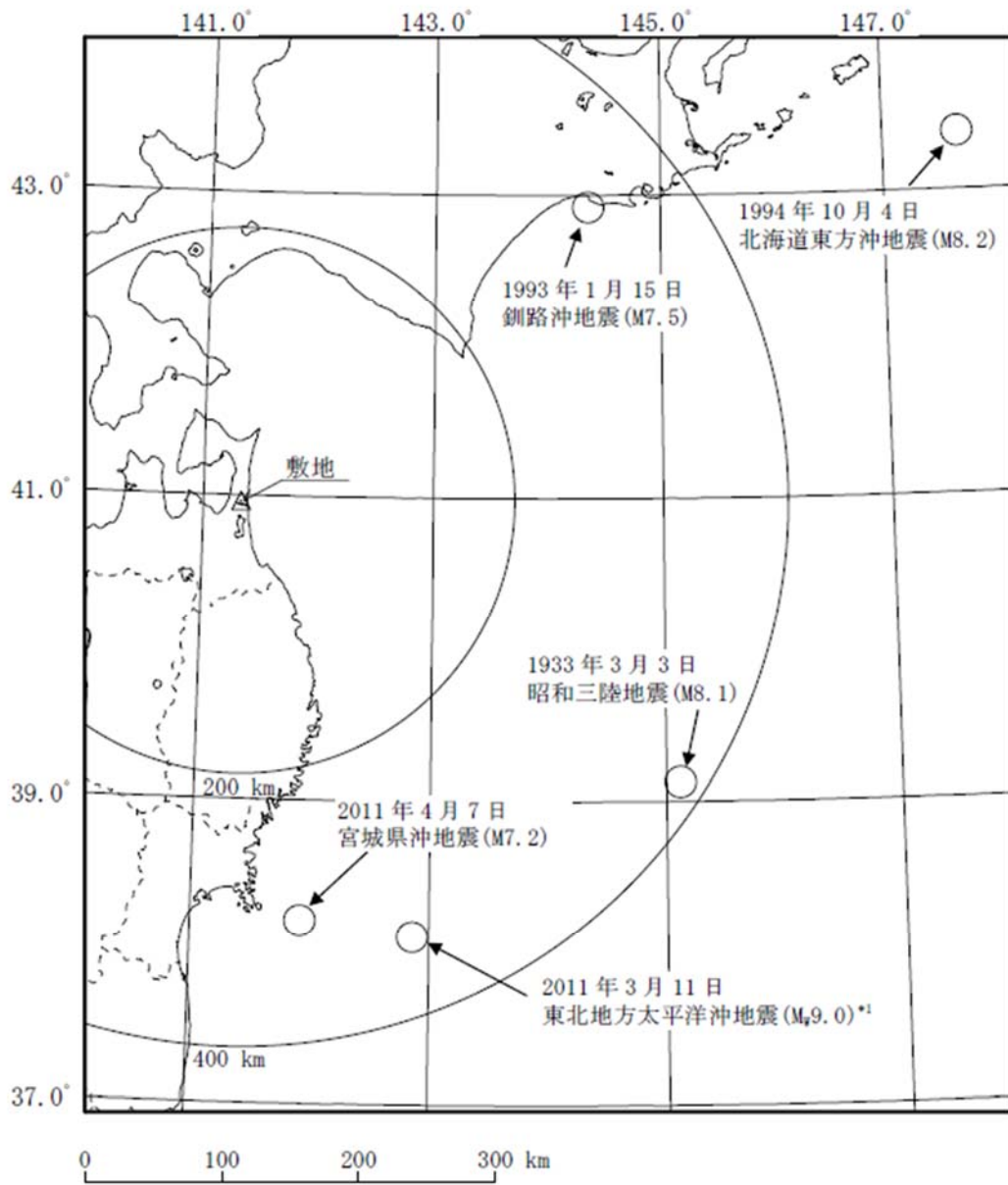
No.	年.月.日	北緯	東経	マグニ チュード (M)	震央距離 △ (km)	地名
1	830. 2. 3	39.8°	140.1°	7.3	168	出羽
2	1423. 11. 23	39.5°	140.5°	6.5	179	羽後
3	1667. 8. 22	40.6°	141.6°	6.2	46	八戸
4	1674. 4. 15	40.6°	141.6°	6.0	46	八戸
5	1677. 4. 13	41.0°	142.25°	7.4	76	陸中
6	1694. 6. 19	40.2°	140.1°	7.0	136	能代地方
7	1704. 5. 27	40.4°	140.0°	7.0	131	羽後・津軽
8	1712. 5. 28	40.5°	141.5°	5.3	54	八戸
9	1763. 1. 29	41.0°	142.25°	7.4	76	陸奥八戸
10	1763. 3. 11	41.0°	142.0°	7 1/4	55	陸奥八戸
11	1763. 3. 15	41.0°	142.0°	7.0	55	陸奥八戸
12	1766. 3. 8	40.7°	140.5°	7 1/4	78	津軽
13	1769. 7. 12	40.6°	141.6°	6.5	46	八戸
14	1772. 6. 3	39.35°	141.9°	6 3/4	186	陸前・陸中
15	1793. 2. 8	40.85°	139.95°	7.0	119	西津軽
16	1810. 9. 25	39.9°	139.9°	6.5	171	羽後
17	1823. 9. 29	40.0°	141.1°	5.9	110	陸中岩手山
18	1832. 3. 15	40.7°	141.6°	6.5	37	八戸
19	1843. 6. 29	39.45°	140.7°	5.5	178	陸中沢内
20	1848. 1. 14	40.7°	140.6°	6.0	70	津軽
21	1854. 8. 28	40.6°	141.6°	6.5	46	陸奥
22	1856. 8. 23	41.0°	142.5°	7.5	97	日高・胆振・渡島・津軽・南部
23	1858. 7. 8	40.75°	142.0°	7.3	60	八戸・三戸
24	1858. 9. 29	40.9°	140.8°	6.0	47	青森
25	1896. 8. 31	39.5°	140.7°	7.2	173	秋田・岩手県境(陸羽地震)
26	1901. 8. 9	40.5°	142.5°	7.2	111	青森県東方沖
27	1901. 8. 10	40.6°	142.3°	7.4	90	青森県東方沖
28	1901. 9. 30	40.2°	141.9°	6.9	98	岩手県久慈沖
29	1902. 1. 30	40.5°	141.3°	7.0	53	三戸地方
30	1906. 10. 12	40.0°	140.5°	5.4	130	秋田県北部

添3ニ-第1表 事業所敷地周辺の被害地震(2/3)

No.	年.月.日	北緯	東経	マグニ チュード (M)	震央距離 △ (km)	地名
31	1907.12.2	40.1°	142.3°	6.7	126	青森県東方沖
32	1909.9.17	42.0°	142.0°	6.8	126	襟裳岬沖
33	1910.7.24	42.5°	140.9°	5.1	174	有珠山
34	1912.6.8	40.5°	142.0°	6.6	76	青森県東方沖
35	1913.2.20	41.8°	142.3°	6.9	122	日高沖
36	1913.8.1	41.8°	142.5°	5.7	133	浦河沖
37	1914.3.15	39.5°	140.4°	7.1	182	秋田県仙北郡(秋田仙北地震)
38	1928.5.27	40° 3.7′	142° 58.4′	7.0	171	三陸沖
39	1931.2.17	42° 7.3′	143° 6.2′	6.8	194	浦河付近
40	1931.3.9	40° 9.3′	143° 19.9′	7.2	191	青森県南東沖
41	1931.11.4	39° 28.9′	141° 50.4′	6.5	171	岩手県小国付近
42	1932.11.26	42° 21.4′	142° 28.0′	6.9	180	新冠川流域
43	1939.5.1	39° 56.8′	139° 47.2′	6.8	175	男鹿半島(男鹿地震)
44	1943.6.13	40° 59.7′	142° 49.6′	7.1	124	八戸東方沖
45	1945.2.10	40° 56.8′	142° 22.5′	7.1	86	八戸北東沖
46	1951.10.18	41° 20.1′	142° 7.7′	6.6	77	青森県北東沖
47	1952.3.4	41° 42.3′	144° 9.1′	8.2	248	十勝沖(十勝沖地震)
48	1952.3.10	41° 44.7′	143° 26.0′	6.9	194	十勝沖
49	1953.7.14	42° 4.5′	139° 54.9′	5.1	171	檜山沖
50	1955.10.19	40° 17.3′	140° 13.7′	5.9	121	米代川下流(二ツ井地震)
51	1957.3.1	40° 12.4′	140° 19.0′	4.3	122	秋田県北部
52	1968.5.16	40° 42.0′	143° 35.7′	7.9	192	青森県東方沖 (1968年十勝沖地震)
53	1968.9.21	41° 59.1′	142° 45.7′	6.8	163	浦河沖
54	1968.10.8	41° 51.7′	142° 39.2′	6.2	147	浦河沖
55	1974.9.4	40° 12.1′	141° 54.7′	5.6	98	岩手県北岸
56	1974.11.9	42° 32.5′	141° 45.5′	6.3	178	苫小牧付近
57	1978.5.16	40° 57′	141° 28′	5.8	10	青森県東岸
58	1978.5.16	40° 56′	141° 27′	5.8	10	青森県東岸
59	1981.1.23	42° 25′	142° 12′	6.9	161	日高支庁西部
60	1981.12.2	40° 53′	142° 36′	6.2	106	青森県東方沖
61	1982.1.8	40° 1′	140° 29′	5.2	129	秋田県中部
62	1982.3.21	42° 4′	142° 36′	7.1	160	浦河沖

添 3 ニ-第 1 表 事業所敷地周辺の被害地震(3/3)

No.	年.月.日	北 緯	東 経	マグニ チュード (M)	震央距離 △ (km)	地 名
63	1983. 5. 26	40° 21.6′	139° 4.4′	7.7	204	秋田県沖(1983年(昭和58年)日本海中部地震)
64	1986. 5. 26	40° 5.1′	141° 12.1′	5.0	99	岩手県北部
65	1986. 8. 10	40° 40.9′	140° 48.7′	4.8	56	青森県南部
66	1987. 1. 9	39° 50.2′	141° 46.6′	6.6	131	岩手県北部
67	1989. 11. 2	39° 51.5′	143° 3.2′	7.1	190	三陸はるか沖
68	1993. 7. 12	42° 46.9′	139° 10.8′	7.8	270	北海道南西沖(1993年(平成5年)北海道南西沖地震)
69	1994. 12. 28	40° 25.8′	143° 44.7′	7.6	211	三陸はるか沖(1994年(平成6年)三陸はるか沖地震)
70	1998. 9. 3	39° 48.4′	140° 54.1′	6.2	135	雫石付近
71	2001. 8. 14	40° 59.7′	142° 26.2′	6.4	92	青森県東方沖
72	2001. 12. 2	39° 23.9′	141° 15.8′	6.4	175	岩手県内陸南部
73	2003. 9. 26	41° 46.7′	144° 4.7′	8.0	245	釧路沖(2003年(平成15年)十勝沖地震)
74	2004. 8. 10	39° 40.4′	142° 7.9′	5.8	159	岩手県沖
75	2008. 6. 14	39° 1.8′	140° 52.8′	7.2	219	岩手県内陸南部(2008年(平成20年)岩手・宮城内陸地震)
76	2008. 7. 24	39° 43.9′	141° 38.1′	6.8	140	岩手県沿岸北部
77	2011. 4. 1	40° 15.4′	140° 21.8′	5.0	115	秋田県内陸北部
78	2011. 4. 19	39° 36.2′	140° 23.2′	4.9	173	秋田県内陸南部
79	2011. 6. 23	39° 56.9′	142° 35.5′	6.9	155	岩手県沖
80	2011. 9. 7	42° 15.6′	142° 35.4′	5.1	177	日高地方中部
81	2011. 11. 24	41° 45.0′	142° 53.2′	6.2	155	浦河沖
82	2012. 3. 27	39° 48.4′	142° 20.0′	6.6	154	岩手県沖
83	2012. 5. 24	41° 20.6′	142° 7.4′	6.1	77	青森県東方沖
84	2012. 8. 30	38° 24.5′	141° 54.9′	5.6	289	宮城県沖
85	2013. 2. 2	42° 42.1′	143° 13.7′	6.5	248	十勝地方南部
86	2015. 5. 13	38° 51.8′	142° 9.0′	6.8	244	宮城県沖
87	2015. 7. 10	40° 21.2′	141° 33.6′	5.7	71	岩手県内陸北部



*1: Mw=モーメントマグニチュード。

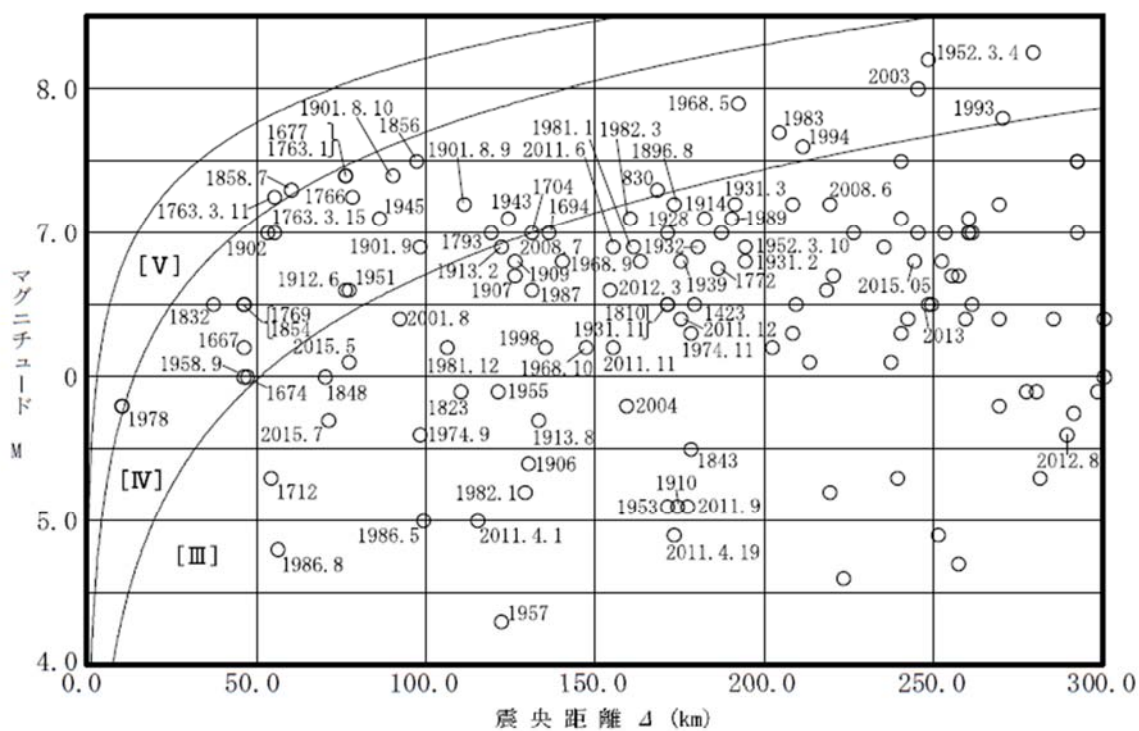
第2図 事業所敷地周辺の被害地震の震央分布
 (事業所敷地からの震央距離 200km 程度以遠)

3. 被害地震の調査

地震によって建物等に被害が発生するのは震度 5 弱 (1996 年以前は震度 V) 程度以上であるとされている⁽¹⁴⁾。

「日本被害地震総覧」⁽⁷⁾に記載されている震度分布図及び気象庁で公表されている震度分布図によると、敷地の震度が V 程度であったと推定される地震は 1763 年 1 月陸奥八戸の地震、1856 年日高・胆振・渡島・津軽・南部の地震、1968 年十勝沖地震、1978 年青森県東岸の 2 地震及び 1994 年三陸はるか沖地震の 6 地震がある。

また、第 1 表に示した被害地震について、震央距離と地震規模及び敷地で想定される震度との関係を第 3 図に示す。この図から、敷地での震度が不明な地震について敷地に与えた影響度をみると、震度分布図による上記 6 地震のほかに敷地で震度 V と推定される地震は、1763 年 3 月 11 日陸奥八戸の地震及び 1858 年八戸・三戸の地震の 2 地震がある。敷地付近では M6 を超える地震の発生はなく、震度 5 強を超える地震の発生もない。



注1：図中の数字は地震発生前年(同年(同年月)の地震が複数存在する場合には年月(年月日))。
 注2：[III]～[VI]は気象庁震度階級で、村松(1969)⁽¹⁰⁾、勝又・徳永(1971)⁽¹⁶⁾による。

第3図 事業所敷地周辺の被害地震のマグニチュード-震央距離

4. 参考文献

- (1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会編(平成 21 年)：日本の地震活動－被害地震から見た地域別の特徴－
- (2) 文部省震災予防評議会編(昭和 16 年～昭和 18 年)：増訂 大日本地震史料、第一巻～第三巻
- (3) 武者金吉(昭和 26 年)：日本地震史料、毎日新聞社
- (4) 東京大学地震研究所編(昭和 56 年～平成 5 年)：新収 日本地震史料、第一巻～第五巻、補遺、続補遺
- (5) 宇佐美龍夫編(平成 10 年～平成 17 年)：日本の歴史地震史料、拾遺、拾遺別巻、拾遺二、拾遺三
- (6) 国立天文台編(平成 26 年)：理科年表 平成 27 年版、丸善
- (7) 宇佐美龍夫、石井寿、今村隆正、武村雅之、松浦律子(2013)：日本被害地震総覧 [599－2012]、東京大学出版会
- (8) Tatsuo USAMI(1979)：Study of Historical Earthquakes in Japan, BULLETIN OF THE EARTHQUAKE RESEARCH INSTITUTE Vol.54・・・「宇佐美カタログ(1979)」
- (9) 宇津徳治(1982)：日本付近の M6.0 以上の地震および被害地震の表：1885 年～1980 年、東京大学地震研究所彙報 Vol.57・・・「宇津カタログ(1982)」
- (10) 気象庁(1951～2011)：「地震年報」等・・・「気象庁地震カタログ」
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
- (11) 宇津徳治(1999)：地震活動総説、東京大学出版会
- (12) 青森県(昭和 44 年)：青森県大震災の記録－昭和 43 年の十勝沖地震－
- (13) 気象庁(平成 7 年)：災害時地震・津波速報、平成 6 年(1994 年)三陸はるか沖地震
- (14) 気象庁・消防庁(平成 21 年)：震度に関する検討会報告書
- (15) 村松郁栄(昭和 44 年)：震度分布と地震のマグニチュードとの関係、岐阜大学教育学部研究報告、自然科学、第 4 号
- (16) 勝又護、徳永規一(1971)：震度Ⅳの範囲と地震の規模および震度と加速度の対応、験震時報、vol.36

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

生活環境の状態設定

2020年12月

日本原燃株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 生活環境の状態設定の考え方.....	1
3. 検討方法.....	1
4. 生活環境に関する設定.....	2
(1) 自然環境の状態に関する設定.....	2
5. 放射性物質が移行する範囲.....	4
6. 被ばく経路.....	4
(1) 水利用に伴う被ばく経路.....	4
(2) 土地利用に伴う被ばく経路.....	6
7. 最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人(評価対象個人).....	13
(1) 確からしい自然事象シナリオ.....	14
(2) 厳しい自然事象シナリオ.....	14
8. まとめ.....	17
9. 参考文献.....	19

添付資料1 被ばく経路ごとの線量評価パラメータ

1. はじめに

本資料は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)」のうち、生活環境の状態設定について補足説明するものである。

2. 生活環境の状態設定の考え方

「生活環境の状態設定」では、様々な人間活動によって生じる被ばく経路(被ばくをもたらす人間活動)を設定するに当たって、廃止措置の開始後の将来の敷地及びその周辺の自然環境の状態を設定し、その状態と現在の敷地及びその周辺の社会環境から被ばくが生じると考えられる人間活動及び最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人(以下「評価対象個人」という。)を設定する。

なお、生活環境とは、人間を含む生物が生息する領域(生物圏)のうち、評価対象地点周辺で一般的な水の利用と土地の利用が想定される範囲及びその状況を意味する。

3. 検討方法

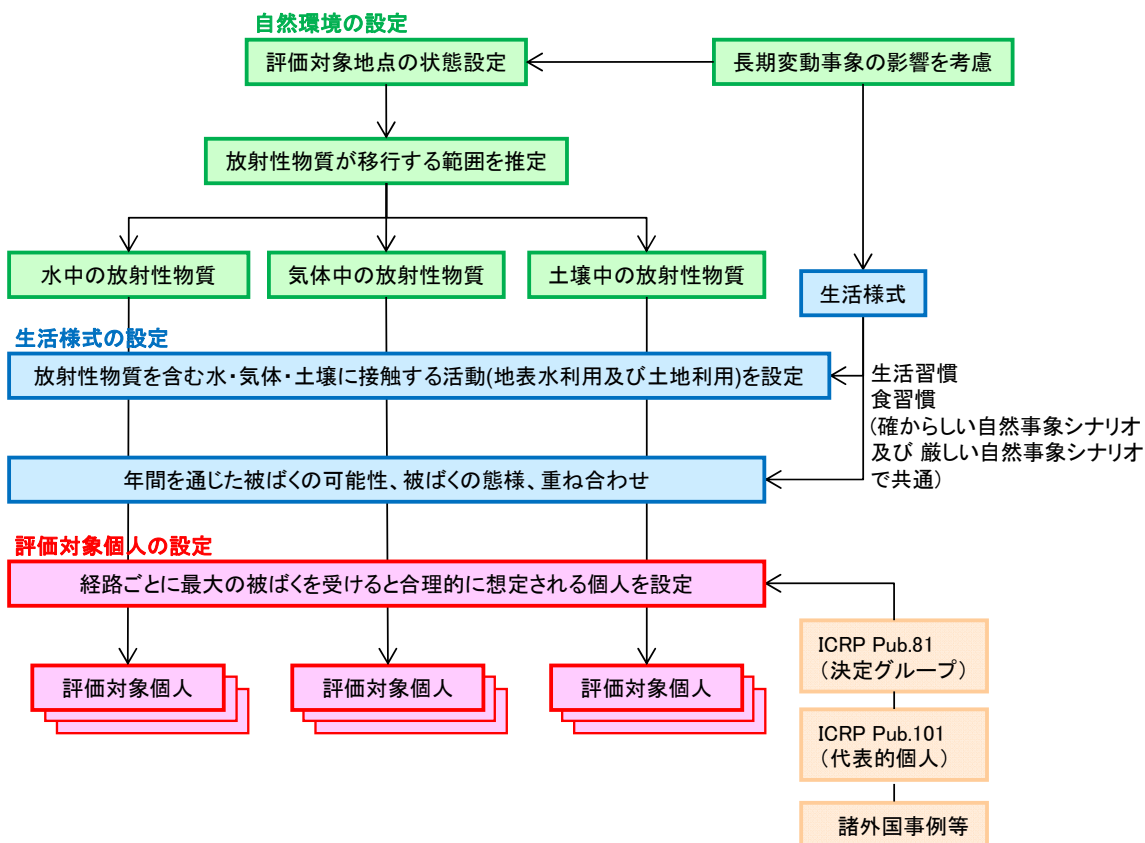
廃止措置の開始後の将来の敷地及びその周辺で活動する人間の生活環境は、自然環境の変化による影響を受けることが考えられるため、その前提として気温・降水量及び地形の状態変化を考慮する(気温・降水量及び地形の状態変化の詳細については、補足説明資料1「地質環境に係る長期変動事象」を参照。)

生活環境の構成要素のうち廃止措置の開始後の将来の人間の生活様式(ある集団が共有する生活習慣、食習慣及び人間活動)については、これを長期的な不確かさを考慮して予測することは困難であるため、現世代の人間の生活様式に関する情報(利用可能な最新の統計等であり、ある時点から更新のない統計等については、調査時点の統計等)を基に、敷地及びその周辺の社会環境又はわが国で現在一般的とされる生活様式を前提とする。具体的には、生活様式の設定に当たっては現世代の人間の生活習慣及び食習慣を考慮する。確からしい自然事象シナリオ及び厳しい自然事象シナリオで考慮する人間活動は、ICRP Pub. 81⁽¹⁾、ICRP Pub. 101⁽²⁾及び諸外国事例等の考え方を参考に合理性、持続可能性及び均一性を持つ一般的な人間活動を想定する。さらに、厳しい自然事象シナリオで考慮する人間活動は、確からしい自然事象シナリオで考慮する人間活動に加えて不確実性の高いものも考慮する。これらのシナリオで考慮すべき合理性、持続可能性及び均一性を持たず、一般的に生じるとは考えられない人間活動については、人為事象シナリオで考慮する。また、放射性物質としての特性

に着目した意図的な行為は含めない。ただし、生活習慣及び食習慣については、確からしい自然事象シナリオ及び厳しい自然事象シナリオと共通とする。

上記のとおり設定した自然環境及び生活様式に基づき、評価対象個人を設定する。

第1図に生活環境の状態設定の検討フローを示す。



第1図 生活環境の状態設定の検討フロー⁽³⁾

4. 生活環境に関する設定

(1) 自然環境の状態に関する設定

補足説明資料1「地質環境に係る長期変動事象」の検討結果に基づき、生活環境に影響を及ぼすと考えられる敷地及びその周辺における自然環境の変化を設定したものを第1表に示す。設定したものの中から、放射性物質の移行する範囲及び資源量の持続可能性への影響が考えられるものを以下のとおり選定する。

現在から廃止措置の開始までの敷地及びその周辺の地形は、数百年という期間の短さか

ら現状とほぼ同様であると考えられる。廃棄物埋設地に起因した放射性物質を含む地下水のほぼ全てが敷地内の沢を經由し汽水性である尾駱沼に流入する。しかし、廃止措置の開始後の将来の敷地周辺のプレート運動及び気候変動に起因する事象(隆起・沈降、海水準変動及び侵食)に伴う地表の状態変化を考慮すると、尾駱沼が河川化し、漁獲される水産物の種類が変化するとともに、漁獲量が減少することが考えられる。

また、気候変動によって、平均気温が変化することに伴い、敷地及びその周辺で生産される農産物の種類が変化することが考えられる。

なお、降水量、蒸発散量、かん養量、地下水位及び河川流量の変化によって、地下水の流出先及び希釈水量に影響するが、生活様式への影響はない。

第1表 生活環境に影響を及ぼすと考えられる敷地及びその周辺における自然環境の変化

起回事象	長期事象	長期変動項目	長期変動事象により予測される影響	生活環境への影響 ^{*1}
プレート運動に起因する事象	火山・火成活動	①火砕物密度流	・地下水質、熱的影響	—
		②降下火砕物	・地下水質への影響	—
	地震・断層活動	③地震	・地下水流動への影響	—
		④液状化(覆土)	・覆土の透水性変化・力学的な影響(拘束圧の減少等)	—
		⑤断層活動(地盤の変形)	・出戸西方断層の断層活動による力学的影響	—
	隆起・沈降運動	⑥隆起・沈降	・隆起に伴う地下水流動への影響(動水勾配等)	○
気候変動に起因する事象		⑦海水準変動	・侵食による地形変化に伴う地下水流動への影響	○
		⑧気温	・地下水位分布、動水勾配、施設通過流量への影響	○
		⑨降水量		○
		⑩蒸発散量		○
		⑪かん養量		○
		⑫地下水位		○
		⑬河川流量	・希釈水量への影響	○
プレート運動と気候変動の両者に起因する事象		⑭侵食	・地形変化に伴う地下水流動への影響	○
			・廃棄物埋設地の削剥	
その他の事象		⑮生物学的事象	・水理・化学的影響	—
		⑯透水性の変化	・岩盤の透水性の変化	—

*1：○：影響が考えられる、—：評価対象外

なお、上記の生活環境への影響が考えられる自然環境の変化を表中に赤枠で示す。

(2) 人間の生活様式の状態に関する設定

「4. (1) 自然環境の状態に関する設定」に示す自然環境の変化及び過去から現在の事業所周辺の社会環境の状態を踏まえ、廃止措置の開始後の評価に用いる生活様式のうち被ばく経路を「6. 被ばく経路」に示すとおりを設定する。

5. 放射性物質が移行する範囲

現在から廃止措置の開始後の将来にかけての評価対象地点の自然環境や状態の時間的な変化を考慮して、放射性物質が移行する範囲を推定する。放射性物質は、廃棄物埋設地から基本的に地下水を介して徐々に生活環境へ広がっていく。その際に、土壤に収着したものは、やがて侵食作用によって土壤ごと下方へ移動する。

また、自然環境以外によるものとして、地表における人間の活動によって放射性物質が移行する場合がある。例えば、汚染された土壤を掘り返す行為などがこれに該当する。

6. 被ばく経路

(1) 水利用に伴う被ばく経路

廃棄物埋設地(近傍を含む。)における水利用に伴う被ばく経路の設定に当たっては、廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が覆土及び岩盤を地下水を通じて移行し、その周辺における人間活動に伴って被ばくを受ける可能性があるため、その利用に伴う活動を考慮する。

廃棄物埋設地を通過する地下水は、敷地中央部の沢を経て尾駮沼に流出し太平洋に至るため、現在の二又川や老部川へ移行することは想定されない。また、地下水の流入する尾駮沼は汽水性の沼であるため、この水を生活用水、農業用水及び畜産用水に利用することも想定されない。

六ヶ所村の利水状況⁽⁴⁾としては、豊富な地下水のある地点(敷地周辺外の深井戸及び浅井戸(伏流水))を水源とする水道の普及率が100%⁽⁵⁾であり、1998年に当社が実施した調査によれば、専らこれを生活用水及び畜産用水として利用している。また、水田灌漑用水としては、河川水を利用している⁽⁶⁾。1988年の調査結果⁽⁴⁾に基づくと浅井戸を生活用水として利用している世帯もあるが、その割合は約1%と極めて小さい。

なお、六ヶ所村における家畜用水の水源としては、上水道の非給水区域においては、深井戸より取水した小規模水道又は深井戸より取水した地下水が利用されているものの、河

川水及び沢水の利用はない。

沢水の利用については、現在は利用されていないこと、河川の水量を比較すると敷地中央部の沢の水量は小さいこと、現在の敷地周辺においては水道が十分普及していること及び農地等が減少傾向にある⁽⁷⁾こと等から、沢水の利用に伴い被ばくが生じる可能性は河川の利用の場合よりも小さい。しかしながら、評価に当たっては河川と沢の水量の違いによる利用の可能性(被ばくが生じる可能性)を定量的に示すことが困難であること、敷地造成前においては、広範囲で畑作が、また敷地中央部の沢の下流部では稲作が行われていたことを考慮する。

一方、廃止措置の開始後の将来の地形変化を考慮すると、尾駁沼が河川化し、汽水性の沼から淡水に変化することが考えられる。この場合、尾駁沼が現在の廃棄物埋設地からの影響を受けた地表水は淡水であり、豊富な水量となるため、これを生活用水等に利用する可能性がある。

以上より、水利用に関しては、現状の水理及び利水状況を前提にすると、廃棄物埋設地からの影響を受ける地下水や沢水を生活用水や畜産用水に利用することは考えられない。よって、生活用水等に利用することに伴う被ばく経路としては、尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取、沢水を利用して生産される農産物の摂取及び灌漑作業を想定する。ただし、水産物の摂取において、河川化に伴う資源量(漁獲量)の長期的な減少により、水産物の摂取量のうち放射性物質で汚染された水産物の割合が減少すること及び淡水化に伴って水産物種類が変化することについては、被ばく線量は小さくなる傾向となることから、評価に含めない。線量評価においては、尾駁沼の河川化による水産物種類の変化を考慮せず、水産物の摂取において考慮する水産物は、現在の汽水性である尾駁沼に生息する代表的な水産物とする。

また、仮に廃棄物埋設地から北側(老部川)へ流出した場合と南側(尾駁沼)へ流出した場合を比較すると、老部川までの放射性核種の移行距離が尾駁沼への移行距離よりも長いこと及び事業所敷地中央部の沢を含む評価対象地点の交換水量が老部川の交換水量よりも多いことにより、北側(老部川)へ流出した場合の方が線量は低くなる。したがって、地下水の流動方向が変化したとしても影響はない。

水利用に伴う被ばく経路として考慮する人間活動は以下のとおりである。

(i) 確からしい自然事象シナリオ

a. 尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取

b. 沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取

c. 沢水を利用する灌漑作業

(ii) 厳しい自然事象シナリオ

a. 尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取

b. 沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取

c. 沢水を利用する灌漑作業

(2) 土地利用に伴う被ばく経路

廃棄物埋設地(近傍を含む。)における土地利用に伴う被ばく経路の設定に当たっては、廃棄物埋設地から漏出する放射性物質が廃棄物埋設地表面付近の土壌に移行し、その周辺における人間活動に伴って被ばくを受ける可能性があるため、その利用に伴う活動を考慮する。

地下の掘削を伴う土地利用の一つに構造物の建設がある。2019年の統計⁽⁷⁾によれば、近年の六ヶ所村においては専用住宅、総所、店舗等の建築確認申請が行われている。加えて、廃棄物埋設地は市街化区域の用途地域のうち工業専用地域に位置し、工業地域、準工業地域、商業地域、中高層住居専用地域及び低層住居専用地域に隣接しているため、工場及び住宅の建設等に利用される可能性がある。しかしながら、第2図に示す六ヶ所村における到達深さに対する到達確率(面積利用率)より、現状の六ヶ所村では地下数階を有するような大規模な構造物はほとんどみられず、面積利用率では10m以深の掘削を行う頻度は1%未満である。ここでいう到達確率(面積利用率)とは、六ヶ所村で確認される建物区分について、それぞれに仮定した平均深度ごとの施設面積が可住地面積に占める割合を求めたものである。六ヶ所村における利用用途ごとの平均深度の設定値を第2表に示す。

なお、第2図における数値中のEは、指数表記における基数の10を示す(例えば、1E+02は 1×10^2 を示す。以下、同様。)

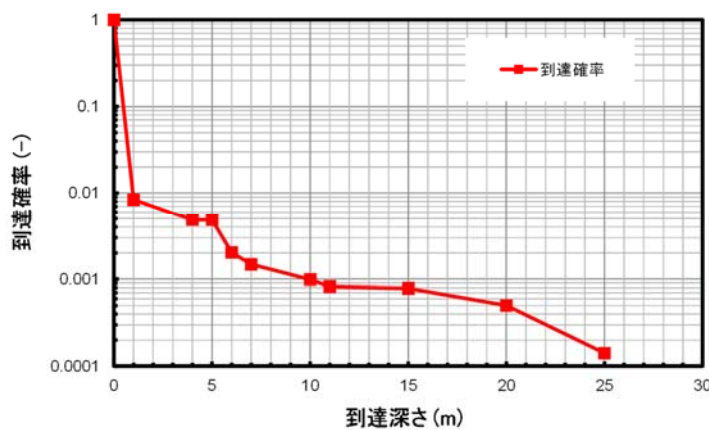
また、第3図に未使用の可住地面積及び当社施設の施設面積を除いた場合の到達確率(面積利用率)を示す。第3図に示すように、原子力施設である当社施設を除外し、六ヶ所村における住宅や工場等の一般的な施設に着目した場合には、10m以深の掘削を行う施設は存在しない。

以上のことから、敷地及びその周辺の社会環境を考慮しても、大規模な構造物の建設は土地利用の代表的な事例ではない。そのため、自然事象シナリオでは代表的な事例として一般的な住宅の建設及びそれに伴って発生する掘削残土上での居住を想定する。

なお、大規模な構造物の建設に当たっては、法令等(例：都市計画法、工場立地法)により事前に記録の確認が行われるため、廃棄物埋設地の存在が認知されることを踏まえても、大規模な構造物が建設されることは一般的とは考えられない。

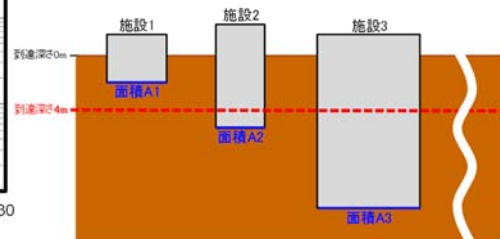
六ヶ所村における到達深さに対する到達確率⁽⁸⁾⁽⁹⁾

到達深さ(m)	施設面積(m ²) ^{*1}	番号	到達確率 ^{*2}	計算式
0	112,159,411	①	1.00E+00	$\Sigma ((1 \sim (11)) / (12))$
1	403,213	②	8.40E-03	$\Sigma ((2 \sim (11)) / (12))$
4	1,011	③	4.84E-03	$\Sigma ((3 \sim (11)) / (12))$
5	317,525	④	4.83E-03	$\Sigma ((4 \sim (11)) / (12))$
6	61,885	⑤	2.02E-03	$\Sigma ((5 \sim (11)) / (12))$
7	55,186	⑥	1.48E-03	$\Sigma ((6 \sim (11)) / (12))$
10	18,936	⑦	9.88E-04	$\Sigma ((7 \sim (11)) / (12))$
11	3,733	⑧	8.21E-04	$\Sigma ((8 \sim (11)) / (12))$
15	32,400	⑨	7.88E-04	$\Sigma ((9 \sim (11)) / (12))$
20	40,700	⑩	5.01E-04	$\Sigma ((10 \sim (11)) / (12))$
25 ^{*3}	16,000	⑪	1.41E-04	$\Sigma ((11 \sim (11)) / (12))$
合計 ^{*4}	113,110,001	⑫		



- *1 到達深さ0mの施設面積は未使用の可住地面積を含む。
- *2 その深さより深が利用される確率(面積利用率)。
- *3 当社で行った現地調査の結果、到達深さが25mより深い施設はない。
- *4 小数点以下四捨五入。

【到達確率の計算例(到達深さ4mの場合)】



$$\text{到達確率} = \frac{A2 + A3 + \dots}{(\text{施設面積の合計})}$$

六ヶ所村における到達深さと到達確率

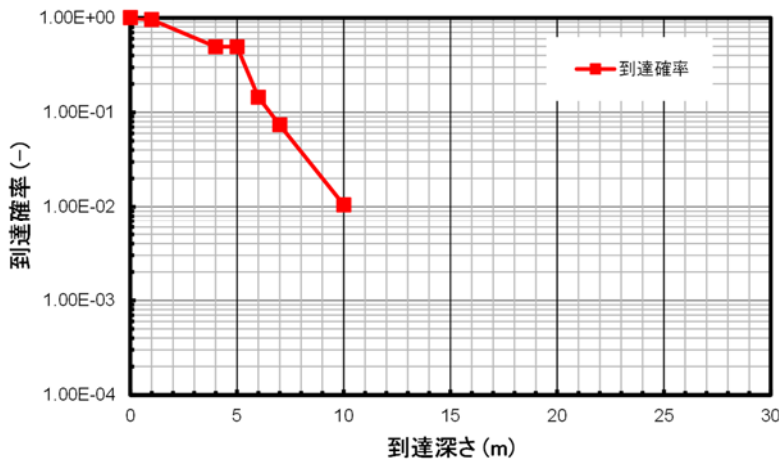
第2図 六ヶ所村における到達深さに対する到達確率(面積利用率)

第2表 六ヶ所村における利用用途ごとの平均深度の設定値

利用用途	内訳	平均深度 (m)
戸建住宅	個人宅	1
集合住宅	—	4
飲食店	レストラン、居酒屋等	5
商店	食料品店、たばこ屋、クリーニング、美容室、郵便局等	5
量販店	スーパー、コンビニ等	5
事業所・事務所	銀行、法律事務所、警備等	5
インフラ	変電所、GS、浄水場等	5
スポーツ興業施設	体育館、公園等	5
宿泊遊興施設	温泉、ホテル旅館等	5
医療・福祉	診療所、歯科医院、老人福祉センター等	6
公共施設	役場、消防署、交番、図書館等	7
学校	幼稚園、保育所、小学校、中学校、高等学校、塾等	6
宗教関連	寺院、神社等	5
オフィスビル	オフィス系の事業所	6
倉庫	倉庫、貯蔵庫、冷蔵庫	5
工場	—	5
エネルギー関連施設	石油備蓄、風力発電所等	10
廃棄物処分場	—	10
作業場・資材置場	—	5
駐車場	—	0
牧場	—	0
その他(戸建住宅、集合住宅以外の家屋)	—	0

六ヶ所村における到達深さに対する到達確率⁽⁸⁾⁽⁹⁾

到達深さ(m)	施設面積(m ²) ^{*1}	番号	到達確率 ^{*2}	計算式
0	38,982	①	1.00E+00	$\Sigma ((1 \sim 11) / 12)$
1	403,213	②	9.55E-01	$\Sigma ((2 \sim 11) / 12)$
4	1,011	③	4.94E-01	$\Sigma ((3 \sim 11) / 12)$
5	304,628	④	4.93E-01	$\Sigma ((4 \sim 11) / 12)$
6	61,885	⑤	1.44E-01	$\Sigma ((5 \sim 11) / 12)$
7	55,186	⑥	7.36E-02	$\Sigma ((6 \sim 11) / 12)$
10	9,186	⑦	1.05E-02	$\Sigma ((7 \sim 11) / 12)$
11	0	⑧	0.00E+00	$\Sigma ((8 \sim 11) / 12)$
15	0	⑨	0.00E+00	$\Sigma ((9 \sim 11) / 12)$
20	0	⑩	0.00E+00	$\Sigma ((10 \sim 11) / 12)$
25 ^{*3}	0	⑪	0.00E+00	$\Sigma ((11 \sim 11) / 12)$
合計 ^{*4}	874,091	⑫		



- *1 施設面積は未使用の可住地面積及び当社施設の施設面積を含まない。
- *2 その深さで深さが利用される確率(面積利用率)。
- *3 当社で行った現地調査の結果、到達深さが25mより深い施設はない。
- *4 小数点以下四捨五入。

六ヶ所村における到達深さと到達確率

第3図 六ヶ所村における到達深さに対する到達確率

(未使用の可住地面積及び当社施設の施設面積を除く)

この他に地下を掘削する目的として、井戸の掘削や地下資源の開発(ボーリングを含む。)があげられる。井戸については水利用の状況から浅井戸の掘削が考えられるが、「6. (1) 水利用に伴う被ばく経路」に示すように、水道の普及率が100%であり、また、浅井戸を生活用水として利用している世帯もあるものの、その割合は約1%と極めて小さいことから考慮しない。地下資源の開発については、廃棄物埋設地及びその近傍において採掘規模の石炭、鉱石等の天然資源は認められていないため、このような土地利用を考慮する必要はない。

また、地下の掘削を伴わない土地利用としては農産物(飼料作物を含む。)の生産があり、ここでは廃棄物埋設地表面付近の土壌又は地下水から農産物に放射性物質が移行し、その農産物を摂取することに伴う被ばく経路が考えられる。ただし、飼料作物については、根の深さと地下水位との関係から、放射性物質の移行は生じないため、評価対象外とする。

廃止措置の開始後から数千年、数万年以上の将来の地形変化に伴い敷地中央部の沢による河食が進行することによって廃棄物埋設地が露呈する場合には、地下水によって移行せずに残存する放射性物質を含む埋設設備が削剥され、周辺土壌と混合して廃棄物埋設地周辺の水域の下流域に比較的広く堆積するため、この堆積地(以下「下流堆積地」という。)を利用した様々な人間活動(屋外労働作業、住宅の建設及び居住並びに農畜産物の生産)に伴う被ばく経路が考えられる。しかし、廃棄物埋設地の露呈が起こるのは廃止措置の開始後から数万年後のことであるため、十分な減衰が見込めることから評価対象外とする。

以上より、土地利用に関しては、廃棄物埋設地の利用に伴う被ばく経路として、住宅の建設作業等の屋外労働作業、掘削残土上での居住及び廃棄物埋設地を利用して生産される農産物摂取を考慮する。

また、廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業等の大規模な掘削行為によって生じる被ばく及び当該掘削後の土地利用に伴う被ばくは、一般的に生じるとは考えられないため、人為事象シナリオにおいて考慮する。

なお、上記の人為事象シナリオにおける被ばく経路は、廃棄物埋設地の掘削による放射性物質の廃棄物埋設地からの漏出(地表への移行)と当該掘削後の土地利用を考慮した経路であり、掘削が生じるまでに放射性物質の漏出が生じない条件で、バリア機能によらず掘削によって放射性物質が地表に移行した状態を想定することから、掘削後に天然バリア中の移行によって受ける線量は、掘削等による人為的な被ばく経路の線量に比べ十分に小さくなるため、評価の対象としない。

土地利用に伴う被ばく経路として考慮する人間活動は以下のとおりである。

(i) 自然事象シナリオ

- a. 廃棄物埋設地における屋外労働作業(建設作業等)
- b. 廃棄物埋設地における居住
- c. 廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物の摂取

(ii) 人為事象シナリオ

- a. 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業
- b. 廃棄物埋設地における地下数階を有する建物の建設作業によって発生する土壌上での居住

これまでの検討結果に基づき、被ばく経路の選定結果を第3表に示す。

第3表 被ばく経路の選定結果(1/2)

放射性物質の放出	放射性物質の移行経路		被汚染物	利用形態	被ばく形態	被ばく経路の選定結果*1		
地下水への漏出	地下水移行	地下水	-	浅層地下水	飲用水利用	飲用水摂取	-	地下水の利用が想定されないため対象外
					灌漑利用	農作物(米)摂取		
						土壌吸入		
				土壌外部被ばく				
				飼育水利用	畜産物摂取			
				深層地下水	飲用水利用	飲用水摂取		
		灌漑利用	農作物(米)摂取					
			土壌吸入					
		土壌外部被ばく						
		飼育水利用	畜産物摂取					
		植物による吸上げ	-	浅層地下水	地表土壌利用(農畜産業)	農作物(米以外)摂取	○ 評価対象	
					畜産物摂取	-	牧草の根の深さと地下水位の関係から対象外	
	地表土壌利用(農畜産業)				農作物(米以外)摂取	-	掘削深さから放射性物質を含む土壌が掘削されることはないため評価対象外	
					土壌吸入	-		
					土壌外部被ばく	-		
					畜産物摂取	-		
	地表利用(居住)	土壌吸入	○ 評価対象					
		土壌外部被ばく	○ 評価対象					
		建設作業	土壌吸入	○ 評価対象				
		土壌外部被ばく	○ 評価対象					
	地表への漏出	地表への漏出	-	河川水、湖沼水、海水又は沢水	飲用水利用	飲用水摂取	○ 現在の生活様式を考慮して評価対象外	
					灌漑利用	農作物(米)摂取	○ 評価対象(沢水)	
						土壌吸入	○ 評価対象(沢水)	
						土壌外部被ばく	○ 評価対象(沢水)	
飼育水利用					畜産物摂取	○ 現在の生活様式を考慮して評価対象外		
水産物消費					水産物摂取	○ 評価対象(河川・湖沼)		
水面活動		直接外部被ばく	-	廃棄物埋設地又は周辺土壌の利用に包含されるため対象外				
地表への漏出		-	河川岸、湖沼岸、海岸又は沢岸(海水準変動によって利用可能な土地も含む)	(海水)	送風塩吸入	送風塩吸入	-	
				(海水)	海水利用(製塩)	塩摂取	-	社会環境を踏まえ対象外
				岸利用(農畜産業)	農作物(米以外)摂取	-	灌漑利用及び飼育水利用に包含されるため対象外	
					土壌吸入	-		
					土壌外部被ばく	-		
	岸利用(住居)			畜産物摂取	-	廃棄物埋設地又は周辺土壌の利用に包含されるため対象外		
土壌吸入		-						
土壌外部被ばく		-						
建設作業	土壌吸入	-						
土壌外部被ばく	-							

*1: 被ばく経路の選定結果における「○」は「評価対象」を、「-」は「評価対象外」を意味する。

なお、上記の被ばくの選定結果として「評価対象」としたものを表中に赤枠で示す。

第3表 被ばく経路の選定結果(2/2)

放射性物質の放出	放射性物質の移行経路			被汚染物	利用形態	被ばく形態	被ばく経路の選定結果*1		
廃棄物の露呈	-	-	-	廃棄物埋設地又は周辺土壌の侵食面	地表土壌利用(農畜産業)	農作物(米以外)摂取	-		
						土壌吸入	-		
						土壌外部被ばく	-		
						畜産物摂取	-		
						地表利用(居住)	土壌吸入	-	
						土壌外部被ばく	-		
	侵食に伴う移行	-	-	-	堆積土壌	地表土壌利用(農畜産業)	農作物(米以外)摂取	-	
							土壌吸入	-	
							土壌外部被ばく	-	
							畜産物摂取	-	
						地表利用(居住)	土壌吸入	-	
							土壌外部被ばく	-	
							建設作業	土壌吸入	-
							土壌外部被ばく	-	
		降雨のかん養水	-	-	水域への流入	河川水、湖沼水、海水又は沢水	飲用水利用	飲用水摂取	-
							灌漑利用	農作物(米)摂取	-
							飼育水利用	土壌吸入	-
								土壌外部被ばく	-
							畜産物摂取	-	
							水産物消費	水産物摂取	-
水面活動	直接外部被ばく	-							
(海水)	送風塩吸入	送風塩吸入	-						
(海水)	海水利用(製塩)	塩摂取	-						
廃棄物埋設地又は近傍へのボーリング	地下水移行	地下水	-	地下水	飲用水利用	飲用水飲用	-	現在の生活様式を考慮して評価対象外	
		地表への流出	-	-	水域への流入	河川水、湖沼水、海水又は沢水	飲用水利用	飲用水摂取	-
							灌漑利用	農作物(米)摂取	-
							飼育水利用	土壌吸入	-
								土壌外部被ばく	-
							畜産物摂取	-	
							水産物消費	水産物摂取	-
		水面活動	直接外部被ばく	-					
		(海水)	送風塩吸入	送風塩吸入	-	社会環境を踏まえ対象外			
		(海水)	海水利用(製塩)	塩摂取	-				

*1: 被ばく経路の選定結果における「○」は「評価対象」を、「-」は「評価対象外」を意味する。

なお、上記の被ばくの選定結果として「評価対象」としたものを表中に赤枠で示す。

7. 最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人(評価対象個人)

「4. (2) 人間の生活様式の状態に関する設定」及び「6. 被ばく経路」に示す生活様式に基づき、自然事象シナリオにおいては、被ばく経路に様々な個人の生活様式に係る場合には、それらの重ね合わせを考慮し、評価対象個人を設定する。評価対象個人の設定に当たってはICRP Pub. 81⁽¹⁾の決定グループ(最高の年線量を受けると予想される集団における個人を代表する人々のグループであり、年齢、飲食物及び受ける年線量に影響する行動という観点からみて比較的均質であるように十分小さいグループのこと)、ICRP Pub. 101⁽²⁾の代表的個人(公衆の防護の目的のために、線量拘束値の遵守の判断に用いられる人。被ばく経路、空間分布、持続可能性、年齢カテゴリー等を考慮する必要がある。)及び諸外国事例等を参考にする。

評価対象個人は、移行経路ごとの被ばく経路の特徴を表した個人で、年間を通して被ばくする可能性がある個人を代表として設定する。また、敷地及びその周辺又はわが国で現在認められる一般的な生活様式を持つ個人とし、比較的高い被ばくを受けると想定される集団を代表する成人とする。

被ばく経路の重ね合わせにおいては、市場の流通の状況等を適切に考慮する。また、個人の持つ生活様式として同時に存在することの合理性がないもの及び人為事象シナリオで考慮する一般的ではない人間活動による被ばく経路については、重ね合わせを考慮しない。

生活様式については、現在認められる就労形態ごとに異なると想定される。就労形態によって、様々な生産活動が行われる可能性があるが、評価の観点からは放射性物質が移行する水又は土壤に接触する生産活動に従事する就労者を対象とすることが合理的である。そのため、生産活動を通じて起こると想定される被ばく及び生産物を摂取することによって起こると想定される被ばくを考慮する。また、放射性物質は、その移行特性や放射線学的影響が種類ごとに異なることから、評価対象個人を複数の集団から設定する(例えば、漁業を営む集団だけではなく、農業や畜産を営む集団からもそれぞれ評価対象個人を設定する。)

第4表に六ヶ所村の就業者数を示す。現在の敷地及びその周辺の社会環境・産業構造において、被ばくの可能性がある就労形態は、第一次産業としては、漁業及び農業(畜産を含む。)が代表的であり、第二次産業では建設業が代表的である。第三次産業やその他の業種については、労働作業に伴う被ばくの可能性が小さいと考えられ、廃棄物埋設地に居住する人を想定することで代表できると考えられる。

ただし、年間を通じて摂取する全ての食品が、廃棄物埋設地起源の放射性物質を含む生産品とすることは現在の市場の流通状況から考えて基本的に想定されない。このため、就労者

が生産活動の結果、得られる食品については自家消費されることを想定するが、その他については市場から購入することを想定する。

このような状況を考慮して、生活様式の異なる就労形態の分類に応じて、評価対象個人を以下のとおり設定する⁽³⁾。

(1) 確からしい自然事象シナリオ

最新の統計等に基づく、六ヶ所村の産業別就業者数のほぼ半数を第三次産業が占めており、また、第三次産業については廃棄物埋設地に居住する人を想定することで代表できると考えられることから、本シナリオにおいては評価対象個人を居住者とする。なお、評価対象者を居住者とすることから、「6. (1) 人間の水利用に伴う被ばく経路」で設定した「沢水を利用する灌漑作業」による被ばくは生じない。

(i) 居住者

居住者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、市場に流通した食品を摂取すると想定する。

(2) 厳しい自然事象シナリオ

最新の統計等に基づく、第一次産業としては、漁業及び農業(畜産業を含む。)が、第二次産業では建設業が代表的であり、また、第三次産業やその他の業種については、廃棄物埋設地に居住する人を想定することで代表できると考えられることから、本シナリオにおいては、評価対象個人を漁業従事者、農業従事者、畜産業従事者、建設業従事者及び居住者とする。

(i) 漁業従事者

漁業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、放射性物質が移行する水産物については漁獲した水産物(汚染された水産物)のみを摂取することを想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取することを想定する。

(ii) 農業従事者

農業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、放射性物質が移行する農産物については栽培した農産物(汚染された農産物)のみを摂取することを想定し、その他は一般的な市場に流通した食品を摂取することを想定する。

なお、地表水利用の場合は放射性物質を含む沢水を灌漑に利用する稲作とし、土地利用の場合は放射性物質を含む土壌上における畑作を想定する。

(iii) 畜産業従事者

畜産業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、放射性物質が移行する畜産物については養畜した畜産物(汚染された畜産物)のみを摂取する。その他は一般的な市場に流通した食品を摂取することを想定する。ただし、放射性物質が移行する畜産物を摂取することによる被ばくは想定されない。

(iv) 建設業従事者

建設業従事者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、一般的な市場に流通した食品を摂取することを想定する。また、廃棄物埋設地において一般的な住宅等の建設作業を行うことを想定する。

(v) 居住者

居住者は、廃棄物埋設地に居住する人を対象とし、市場に流通した食品を摂取することを想定する。

第4表 六ヶ所村の就業者数⁽¹⁰⁾

業種別			産業別		
区分	人数(人)	割合(%)	区分	人数(人)	割合(%)
農業・林業	574	9.4	第一次産業	787	12.9
(うち農業)	(566)	(9.3)			
漁業	213	3.5			
鉱業、採石業、砂利採取業	23	0.4	第二次産業	2,346	38.5
建設業	921	15.1			
製造業	1,402	23.0			
電気・ガス・熱供給・水道業	33	0.5	第三次産業	2,931	48.1
情報通信業	34	0.6			
運輸業、郵便業	182	3.0			
卸売業、小売業	376	6.2			
金融業、保険業	24	0.4			
不動産業、物品賃貸業	66	1.1			
学術研究、専門・技術サービス業	429	7.0			
宿泊業、飲食サービス業	237	3.9			
生活関連サービス業、娯楽業	105	1.7			
教育、学習支援業	140	2.3			
医療・福祉	350	5.7			
複合サービス業	99	1.6			
サービス業 (他に分類されないもの)	633	10.4			
公務 (他に分類されないもの)	223	3.7			
分類不能な産業	31	0.5			
計	6,095	100.0	計	6,095	100.0

8. まとめ

「6. 被ばく経路」及び「7. 最大の被ばくを受けると合理的に想定される個人(評価対象個人)」で設定した、評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路を第5表及び第6表に示す。これを基に線量評価を行い、許可基準規則第十条第四号で要求されている基準値を下回ることを確認する。

なお、被ばく経路ごとの線量評価パラメータの設定値については添付資料1「被ばく経路ごとの線量評価パラメータ」を参照。

第5表 評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路(確からしい自然事象シナリオ)*1

被ばく経路		居住者
水利用	尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取	○
	沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取	○
	沢水を利用する灌漑作業	—
土地利用 (廃棄物埋設地)	屋外労働作業 (建設作業等)	—
	居住	○
	農耕農産物の摂取	○

*1：○：考慮する被ばく経路、—：考慮しない被ばく経路

第6表 評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路(厳しい自然事象シナリオ)*1

被ばく経路		漁業 従事者	農業 従事者 (米)	農業 従事者 (米以 外)	畜産業 従事者	建設業 従事者	居住者
水利用	尾駁沼又は河川水中 の水産物の摂取	○	○	○	○	○	○
	沢水を利用して生産 される灌漑農産物の 摂取	○	○	○	○	○	○
	沢水を利用する灌漑 作業	—	○	—	—	—	—
土地利用 (廃棄物埋設地)	屋外労働作業 (建設作業等)	—	—	—	—	○	—
	居住	○	○	○	○	○	○
	農耕農産物の摂取	○	○	○	○	○	○

*1：○：考慮する被ばく経路、—：考慮しない被ばく経路

9. 参考文献

- (1) International Commission on Radiological Protection(1998): Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste, ICRP Publication 81
- (2) International Commission on Radiological Protection(2006): Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public and The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process, ICRP Publication 101
- (3) 一般社団法人 日本原子力学会(2018): 日本原子力学会標準 浅地中ピット処分の安全評価手法: 2016
- (4) 日本エヌ・ユー・エス株式会社(1988): 六ヶ所村周辺の社会環境実態調査結果報告書
- (5) 青森県健康福祉部保健衛生課(2020): 平成 30 年度版 青森県の水道
- (6) 青森県(平成 19 年): 新むつ小川原開発基本計画素案に係る環境影響評価書
- (7) 六ヶ所村(平成 31 年): 平成 30 年度版 六ヶ所村統計書
- (8) ゼンリン(2013): 建物ポイントデータ 2013
- (9) 総務省統計局(2013): 統計でみる市区町村のすがた 2013
- (10) 総務省統計局(2016): 平成 27 年 国勢調査

以 上

被ばく経路ごとの線量評価パラメータ

1. はじめに

本資料は、安全評価に用いる線量評価パラメータのうち生活様式に関連する評価パラメータを、被ばく経路ごとに取りまとめたものである。被ばく経路ごとの線量評価パラメータ一覧を第1表に示す。また、評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路を第3表及び第4表に示す。

なお、線量パラメータの設定の詳細については「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料9 線量評価パラメータ-パラメータ根拠集-」を参照。

第1表 被ばく経路ごとの線量評価パラメータ一覧表(生活様式に関連する評価パラメータのみ)(1/3)

被ばく経路	生活様式に関連する評価パラメータ	単位	設定値*1	
			確からしい自然事象シナリオ	厳しい自然事象シナリオ
沢水又は井戸水の飲用による内部被ばく	水の摂取量	[m ³ /y]	-	-
	飲用における放射性物質を含む沢水又は井戸水の利用率	[-]	-	-
	公衆 <i>p</i> の飲用水の市場希釈係数	[-]	-	-
尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取による内部被ばく	水産物 <i>m</i> の摂取量	[kg/y]	魚類 : 5.7 無脊椎動物 : 1.4	魚類 : 5.7 無脊椎動物 : 1.4
	公衆 <i>p</i> の水産物 <i>m</i> の市場希釈係数	[-]	居住者 : 0.1	漁業従事者 : 1 上記以外 : 0.1

*1 : 表中の「-」は、2020年10月7日の第31回原子力規制委員会において了承された議題3「日本原燃(株)廃棄物埋設事業変更許可申請における廃止措置の開始後の公衆の被ばく線量評価に係る審査方針について(第3回)～将来の人間活動に関する設定～」で示された審査方針(以下「審査方針」という。)を踏まえた生活環境の状態設定及び評価対象個人の設定の見直しに伴い、安全評価において使用しない線量評価パラメータを示す。

第1表 被ばく経路ごとの線量評価パラメータ一覧表(生活様式に関連する評価パラメータのみ) (2/3)

被ばく経路	生活様式に関連する評価パラメータ	単位	設定値*1	
			確からしい自然事象シナリオ	厳しい自然事象シナリオ
沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取による内部被ばく	灌漑農産物の摂取量	[kg/y]	100	100
	公衆 <i>p</i> の灌漑農産物の市場希釈係数	[-]	居住者 : 0.1	農業従事者(米) : 1 上記以外 : 0.1
	灌漑農耕における放射性物質を含む沢水の利用率	[-]	1	1
沢水を利用して生産される畜産物の摂取による内部被ばく	畜産における放射性物質を含む沢水の利用率	[-]	-	-
	家畜 <i>n</i> の家畜用水摂取量	[m ³ /d]	-	-
	畜産物 <i>n</i> の摂取量	[kg/y]	-	-
	公衆 <i>p</i> の畜産物 <i>n</i> の市場希釈係数	[-]	-	-
沢水を利用する灌漑作業による外部被ばく及び内部被ばく	公衆 <i>p</i> の屋外労働作業中の核種 <i>i</i> の遮蔽係数	[-]	-	第2表参照
	公衆 <i>p</i> の灌漑農耕作業時間	[h/y]	-	500
	屋外労働作業中の空气中ダスト濃度	[kg/m ³]	-	3.0×10 ⁻⁸
	屋外労働作業中の呼吸率	[-]	-	1.2

*1 : 表中の「-」は、審査方針を踏まえた評価対象個人の設定の見直しに伴い当該被ばく経路の線量評価を行わないため、使用しなくなった線量評価パラメータを示す。

第1表 被ばく経路ごとの線量評価パラメータ一覧表(生活様式に関連する評価パラメータのみ)(3/3)

被ばく経路	生活様式に関連する評価パラメータ	単位	設定値*1	
			確からしい自然事象シナリオ	厳しい自然事象シナリオ
廃棄物埋設地における屋外労働作業による外部被ばく及び内部被ばく	公衆 <i>p</i> の屋外労働作業中の核種 <i>i</i> の遮蔽係数	[-]	-	第2表参照
	廃棄物埋設地における公衆 <i>p</i> の屋外労働作業時間	[h/y]	-	500
	屋外労働作業中の空气中ダスト濃度	[kg/m ³]	-	1.0×10 ⁻⁷
	屋外労働作業中の呼吸率	[-]	-	1.2
廃棄物埋設地における居住による外部被ばく及び内部被ばく	居住者の屋外における核種 <i>i</i> の遮蔽係数	[-]	全核種：1	全核種：1
	公衆 <i>p</i> の居住中の屋外における居住時間	[h/y]	居住者：1,000	居住者：1,000 居住者以外：700
	居住中の空气中ダスト濃度(屋外)	[kg/m ³]	2.0×10 ⁻⁸	2.0×10 ⁻⁸
	公衆 <i>p</i> の居住中の屋内における居住時間	[h/y]	居住者：7,760	居住者：7,760 居住者以外：6,060
	居住中の空气中ダスト濃度(屋内)	[kg/m ³]	5.0×10 ⁻⁹	5.0×10 ⁻⁹
	居住時の呼吸率	[m ³ /h]	0.93	0.93
廃棄物埋設地を利用して生産される農耕農産物の摂取による内部被ばく	農耕農産物の摂取量	[kg/y]	100	100
	公衆 <i>p</i> の農耕農産物の市場希釈係数	[-]	居住者：0.1	農業従事者(米以外)：1 上記以外：0.1

*1：表中の「-」は、審査方針を踏まえた評価対象個人の設定の見直しに伴い当該被ばく経路の線量評価を行わないため、使用しなくなった線量評価パラメータを示す。

第2表 公衆 p の屋外労働作業中の核種 i の遮蔽係数

評価対象個人	核種	設定値	核種	設定値
建設業従事者	H-3	0.02	Ra-226	0.4
	C-14	0.02	Ac-227	0.3
	Cl-36	0.02	Th-229	0.4
	Co-60	0.4	Th-230	0.02
	Ni-59	0.02	Pa-231	0.2
	Ni-63	0.02	U-233	0.02
	Sr-90	0.02	U-234	0.02
	Nb-94	0.4	U-235	0.2
	Tc-99	0.02	Np-237	0.2
	I-129	0.02	Pu-238	0.02
	Cs-137	0.3	Pu-239	0.02
	Pb-210	0.2	Pu-240	0.02
	Po-210	0.02	Am-241	0.02
上記以外	全核種 1			

第3表 評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路(確からしい自然事象シナリオ)*1

被ばく経路		居住者
水利用	尾駁沼又は河川水中の水産物の摂取	○
	沢水を利用して生産される灌漑農産物の摂取	○
	沢水を利用する灌漑作業	—
土地利用 (廃棄物埋設地)	屋外労働作業(建設作業等)	—
	居住	○
	農耕農産物の摂取	○

*1 : ○ : 考慮する被ばく経路、— : 考慮しない被ばく経路

第4表 評価対象個人ごとに考慮する被ばく経路(厳しい自然事象シナリオ)*1

被ばく経路		漁業 従事者	農業 従事者 (米)	農業 従事者 (米以 外)	畜産業 従事者	建設業 従事者	居住者
水利用	尾駁沼又は河川水中 の水産物の摂取	○	○	○	○	○	○
	沢水を利用して生産 される灌漑農産物の 摂取	○	○	○	○	○	○
	沢水を利用する灌漑 作業	—	○	—	—	—	—
土地利用 (廃棄物埋設地)	屋外労働作業 (建設作業等)	—	—	—	—	○	—
	居住	○	○	○	○	○	○
	農耕農産物の摂取	○	○	○	○	○	○

*1：○：考慮する被ばく経路、—：考慮しない被ばく経路

以 上

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

-影響事象分析-

2020年12月

日本原燃株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 検討内容.....	1
(1) 各バリアに期待する性能.....	1
(2) FEP の整理.....	2
(3) 影響事象分析.....	3
3. 検討結果.....	3
4. 参考文献.....	15

添付資料 1 影響評価により影響なしと判断した根拠

参考資料 1 IAEA ISAM 及び廃棄物安全小委員会報告書の人工バリアに関する FEP リスト

1. はじめに

廃止措置の開始後の評価に際しては、廃棄物埋設地の人工バリア及び天然バリアの機能の状態の変化を十分に把握し、その変化を適切に評価に反映する。

人工バリア及び天然バリアの機能に係る物理的・化学的状態の長期的な変化を予測し、長期的な廃棄物埋設地等の状態を設定する(状態設定)に当たって、廃棄物埋設地の設計において、安全機能のうち長期的な機能を期待する移行抑制機能に影響する可能性のある事象を体系的に分析した結果を説明する。

分析に当たっては、各部材相互の影響事象を熱、水理、力学及び化学の観点で整理する。影響事象については、OECD/NEA⁽¹⁾⁽²⁾、廃棄物安全小委員会⁽³⁾及びIAEA⁽⁴⁾で整理されたFEPを参考に、網羅的・包括的に検討し、抽出・整理を行う。

2. 検討内容

(1) 各バリアに期待する性能

覆土完了後に期待する移行抑制機能は、放射性物質の移行する量を低減又は遅延させる機能であり、この機能を期待できる性能としては、低溶出性、低拡散性、低透水性及び収着性がある。

これらのうち1号、2号及び3号廃棄物埋設地の各バリアに期待する性能は低透水性と収着性とし、影響事象分析における前提条件とする。各バリアに期待する性能を第1表に示す。

第1表 各バリアに期待する性能

バリア(部材)	性能	安全機能の内容
難透水性覆土、 下部覆土*1	低透水性	ベントナイト混合土を用いた難透水性覆土及び下部覆土に対して低透水性を期待することにより、廃棄物埋設地の通過流量(埋設設備への浸入水量及び埋設設備上部並びに生活環境への地下水の流出)をできるだけ低下させる。また、比較的透水性の大きい覆土側への施設浸入地下水の流出割合を低減する。
岩盤(鷹架層)		岩盤(鷹架層)の低透水性によって、廃棄物埋設地への地下水浸入量の低減を期待するとともに、生活環境までの放射性物質の移行遅延を期待する。
セメント系材料 (廃棄体の固型化材、 埋設設備)	収着性	セメント系材料、難透水性覆土、上部覆土及び岩盤(鷹架層)の収着性を期待することにより、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出量を低減し、移行を遅延させる。 基本的に収着性が大きい方が移行抑制効果は大きい が、土地(土壌)の利用が想定される場合は、収着性が小さい方が線量低減に寄与する場合もある。
難透水性覆土		
上部覆土		
岩盤(鷹架層)		

*1：下部覆土は土質系材料であり収着性を期待できるが、難透水性覆土又は下部覆土の一方に収着性を期待することで十分であることから、保守側に下部覆土の収着性は考慮しない。

(2) FEP の整理

廃止措置の開始後の評価における評価シナリオ選定においては、廃棄体、廃棄物埋設地及び周囲の地質環境条件について網羅された FEP (Features, Events, Processes) からスクリーニング作業によって安全評価において考慮すべき影響事象を抽出する。

ピット処分である 1 号、2 号及び 3 号廃棄物埋設地の FEP リストは、廃棄物埋設地の対象廃棄体、設備形状、浅地中処分地独自の特徴を考慮しつつ、以下の FEP を参考にピット処分の FEP リストを作成した。

- ① OECD/NEA の国際 FEP リスト⁽¹⁾⁽²⁾
- ② 廃棄物安全小委員会報告書の FEP リスト⁽³⁾
- ③ IAEA-ISAM の FEP リスト⁽⁴⁾

作成したピット処分における FEP リストを第 2 表に示した。本 FEP リストは、廃棄物安全小委員会報告書の FEP のうち、セメント系材料及びベントナイト系材料が用いられる人工バリア(緩衝材/埋め戻し材、プラグ・グラウト・支保工)の FEP(参考資料 1「IAEA ISAM

及び廃棄物安全小委員会報告書の人工バリアに関する FEP リスト」を参照。)を網羅した
ものとなっている。

なお、第 2 表に示す FEP のうち、核種移行現象・特性(放射線分解を除く。)はバリア機
能に直接影響するものではないため評価モデルの検討に際して考慮すること、施工不良に
ついては適切な品質管理が行われることから、影響事象より除外する。また、人間活動に
ついては生活環境の状態設定において考慮する。

(3) 影響事象分析

実際の処分システムでは、外部事象及び内部事象に関連する様々な事象が相互に関連
しあっているが、設計・評価に当たって、全ての事象を考慮する必要は必ずしもなく、
移行抑制機能に係る重要なものを適切に考慮すれば良い。重要な事象を選定する方法と
して、「2. (1) 各バリアに期待する性能」に示した各バリアに期待する性能に着目して考
慮すべき事象の絞り込みを行った。

具体的には、熱(T)、水理(H)、力学(M)及び化学(C)の観点からマトリクス形式の表を
整理し、影響元となる部材(外部事象を含む。)の特性、そこで生じる事象やプロセスに
よって、対象とする各バリアに期待する性能に影響するか否かを分析した。分析の際に
は第 2 次 TRU レポートの FEP 辞書⁽⁶⁾等を参考とした。

3. 検討結果

影響事象分析表を第 3 表～第 6 表に示した。この分析の結果から、状態設定において考
慮すべき影響事象として、以下を抽出した。これらの事象については、廃棄物埋設地の状
態設定において適切に考慮することとする。

a) 熱

- ・第 3 表に示すとおり考慮すべき影響事象はない

b) 水理

- ・各部材の水理特性
- ・各部材の地下水流動(→地下水との反応)
- ・各部材の飽和(不飽和)(→地下水流動)
- ・液状化(覆土)
- ・隆起

- ・海水準変動
- ・気温、降水量、蒸発散量、かん養量、地下水位
- ・侵食

c) 力学

- ・各部材の力学特性
- ・各部材の応力
- ・廃棄体中の金属廃棄物及び容器の腐食(→応力、破壊とひび割れ、変形)
- ・埋設設備中の鉄筋の腐食(→応力、破壊とひび割れ、変形)
- ・上記の腐食に伴うガス発生(→応力、破壊とひび割れ、変形)
- ・各部材の破壊とひび割れ
- ・廃棄体、充填材、埋設設備、難透水性覆土及び下部覆土の変形
- ・地震
- ・液状化(覆土)
- ・侵食

d) 化学

- ・各部材の化学特性
- ・各部材中の地下水化学
- ・各部材の地下水との反応
- ・各部材の化学的変質
- ・廃棄体中の金属廃棄物及び容器の腐食(→地下水化学)
- ・埋設設備中の鉄筋の腐食(→地下水化学)
- ・廃棄体の固型化材、充填材、埋設設備の溶脱
- ・各部材中の有機物影響
- ・各部材中の微生物影響
- ・各部材中でのコロイド形成
- ・降下火砕物
- ・表流水・地下水の水質

なお、抽出した影響事象のうち、ガス発生の影響、地震による影響、液状化(覆土)の影響、コロイド影響、微生物影響のうちガス発生、微生物影響のうち金属腐食の促進及び降下火砕物(化学)の影響については、設計を踏まえた影響評価を行った結果、影響を無視できる

と判断した(添付資料1「影響評価により影響なしと判断した根拠」を参照。)

第2表 ピット処分におけるFEPリスト(1/2)

環境 分類	廃棄体層(充填材・ポーラスコンクリート層含む)		埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)		ベントナイト混合土層(難透水性覆土、下部覆土*)		覆土(上部覆土)		母岩(岩盤)	
	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP
熱的現象・特性	WT01	廃棄体層の熱特性	CT01	埋設設備の熱特性	BT01	ベントナイト混合土層の熱特性	XT01	覆土の熱特性	RT01	母岩の熱特性
	WT02	廃棄体の崩壊熱	CT03	セメント系材料の水和熱	BT04	ベントナイト混合土層の温度	XT04	覆土の温度	RT04	母岩の温度
	WT03	セメント系材料の水和熱								
	WT04	廃棄体層の温度	CT04	埋設設備の温度	BT05	ベントナイト混合土層の熱膨張	XT05	覆土の熱膨張	RT05	母岩の熱膨張
	WT05	廃棄体層の熱膨張	CT05	埋設設備の熱膨張						
現象・水理的・特性	WH01	廃棄体層の水理特性	CH01	埋設設備の水理特性	BH01	ベントナイト混合土層の水理特性	XH01	覆土の水理特性	RH01	母岩の水理特性
	WH02	廃棄体層の地下水流動	CH02	埋設設備の地下水流動	BH02	ベントナイト混合土層の地下水流動	XH02	覆土の地下水流動	RH02	母岩の地下水流動
	WH03	廃棄体層の飽和	CH03	埋設設備の飽和	BH03	ベントナイト混合土層の飽和	XH03	覆土の飽和	RH03	母岩の飽和
力学的現象・特性	WM01	廃棄体層の力学特性	CM01	埋設設備の力学特性	BM01	ベントナイト混合土層の力学特性	XM01	覆土の力学特性	RM01	母岩の力学特性
	WM02	廃棄体層の応力	CM02	埋設設備の応力	BM02	ベントナイト混合土層の応力	XM02	覆土の応力	RM02	母岩の応力
	WM03	廃棄体層の破壊とひび割れ	CM03	埋設設備の破壊とひび割れ	BM03	ベントナイト混合土層の破壊とひび割れ	XM03	覆土の破壊とひび割れ	RM03	母岩のクリープ
	WM04	廃棄体層の変形	CM04	埋設設備の変形	BM04	ベントナイト混合土層の変形	XM04	覆土の変形	RM04	EDZの進展
化学的現象・特性	WC01	廃棄体層の化学特性	CC01	埋設設備の化学特性	BC01	ベントナイト混合土層の化学特性	XC01	覆土の化学特性	RC01	母岩の化学特性
	WC02	廃棄体層の地下水化学	CC02	埋設設備の地下水化学	BC02	ベントナイト混合土層の地下水化学	XC02	覆土の地下水化学	RC02	母岩の地下水化学
	WC03	廃棄体層の地下水との反応	CC03	埋設設備の地下水との反応	BC03	ベントナイト混合土層の地下水との反応	XC03	覆土の地下水との反応	RC03	母岩の地下水との反応
	WC04	廃棄体層の化学的変質	CC04	埋設設備の化学的変質	BC04	ベントナイト混合土層の化学的変質	XC04	覆土の化学的変質	RC04	母岩の化学的変質
	WC05	金属廃棄物、容器の腐食 充填材とコンクリートの溶脱	CC05	鉄筋の腐食	BC07	ベントナイト混合土層の侵食性イオン影響	XC07	覆土の侵食性イオン影響	RC07	母岩の侵食性イオン影響
	WC06		埋設設備の溶脱							
	WC07	廃棄体層の侵食性イオン影響	CC07	埋設設備の侵食性イオン影響	BC08	ベントナイト混合土層の微生物影響	XC08	覆土の微生物影響	RC08	母岩の微生物影響
	WC08	廃棄体層の微生物影響	CC08	埋設設備の微生物影響	BC09	ベントナイト混合土層の有機物影響	XC09	覆土の有機物影響	RC09	母岩の有機物影響
	WC09	廃棄体層の有機物影響	CC09	埋設設備の有機物影響	BC10	ベントナイト混合土層のコロイド形成	XC10	覆土のコロイド形成	RC10	母岩のコロイド形成
	WC10	廃棄体層のコロイド形成	CC10	埋設設備のコロイド形成	BC11	ベントナイト混合土層のガス発生影響	XC11	覆土のガス発生影響	RC11	母岩のガス発生影響
	WC11	廃棄体層のガス発生影響	CC11	埋設設備のガス発生影響						

第2表 ピット処分におけるFEPリスト(2/2)

環境 分類	廃棄体層(充填材・ポーラスコンクリート層含む)		埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)		ベントナイト混合土層 (難透水性覆土、下部覆土*1)		覆土 (上部覆土)		母岩 (岩盤)	
	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP
現象・放射線学的 ・特性	WR01	廃棄体層での核種の放射線崩壊	CR01	埋設設備での核種の放射線崩壊	BR01	ベントナイト混合土層での核種の放射線崩壊	XR01	覆土での核種の放射線崩壊	RR01	母岩での核種の放射線崩壊
	WR02	廃棄体層の地下水の放射線分解	CR02	埋設設備の地下水の放射線分解	BR02	ベントナイト混合土層の地下水の放射線分解	XR02	覆土の地下水の放射線分解	RR02	母岩の地下水の放射線分解
現象・核種移行 ・特性	WN01	廃棄体層の物質移動特性	CN01	埋設設備の物質移動特性	BN01	ベントナイト混合土層の物質移動特性	XN01	覆土の物質移動特性	RN01	母岩の物質移動特性
	WN02	廃棄体層の幾何形状・間隙構造	CN02	埋設設備の幾何形状・間隙構造	BN02	ベントナイト混合土層の幾何形状・間隙構造	XN02	覆土の幾何形状・間隙構造	RN02	母岩の幾何形状・間隙構造
	WN03	廃棄体層の核種移行	CN03	埋設設備の核種移行	BN03	ベントナイト混合土層の核種移行	XN03	覆土の核種移行	RN03	母岩の核種移行
	WN04	移流／分散	CN04	移流／分散	BN04	移流／分散	XN04	移流／分散	RN04	移流／分散
	WN05	拡散	CN05	拡散	BN05	拡散	XN05	拡散	RN05	拡散
	WN06	収着	CN06	収着	BN06	収着	XN06	収着	RN06	収着
	WN07	沈殿溶解	CN07	沈殿溶解	BN07	沈殿溶解	XN07	沈殿溶解	RN07	沈殿溶解
	WN08	コロイド移行	CN08	コロイド移行	BN08	コロイド移行	XN08	コロイド移行	RN08	コロイド移行
	WN09	ガスによる移行	CN09	ガスによる移行	BN09	ガスによる移行	XN09	ガスによる移行	RN09	ガスによる移行
						XN10	臨界	RN10	臨界	
施工不良	WQ01	廃棄体層の製作・施工不良	CQ01	コンクリートの製作・施工不良	BQ01	ベントナイト混合土層の製作・施工不良	XQ01	覆土の製作・施工不良	RQ01	調査用ボーリング孔のシール不良

*1：下部覆土にベントナイト混合土を用いない場合は覆土として取り扱う

第3表 影響事象分析表(熱(T))

影響元		影響先		固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)	
熱	廃棄体	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、セメント系材料の熱による化学的変質(WC04, CC04)が生じる温度(約60℃)よりも十分小さいため、影響は生じない。 廃棄体は発電所で製作されるため固型化時の水和熱(WT03)の影響は生じない。 									
	充填材	<ul style="list-style-type: none"> 充填材の充填時に水和熱(WT03)が発生するが、放射性物質の移行は水和熱(WT03)が低下した後に生じること、安全機能は水和後のセメント系材料の特性に期待しているため、影響は生じない。 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に難透水性覆土及び下部覆土を施工するため、影響は生じない。 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は生じない。 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は生じない。 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は無視できる。 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)の影響は、コンクリートの極近傍に限定されるため、影響は無視できる。 									
	埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート構築時に水和熱(CT03)が発生するが、放射性物質の移行は水和熱(CT03)が低下した後に生じること、安全機能は水和後のセメント系材料の特性に期待しているため、影響は生じない。 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に難透水性覆土及び下部覆土を施工するため、影響は生じない。 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は生じない。 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は無視できる。 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)の影響は、コンクリートの極近傍に限定されるため、影響は無視できる。 									
	難透水性覆土、下部覆土	<ul style="list-style-type: none"> 熱による影響は生じないため、熱特性(CT01)、温度(CT04)、熱膨張(CT05)を考慮する必要はない。 									
	上部覆土	<ul style="list-style-type: none"> 発熱しないので、熱特性(XT01)、温度(XT04)、熱膨張(XT05)を考慮する必要はない。 									
	岩盤・地下水	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、セメント系材料の熱による化学的変質(WC04, CC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、セメント系材料の熱による化学的変質(BC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、セメント系材料の熱による化学的変質(XC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、上部覆土の熱による化学的変質(XC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、岩盤の熱による化学的変質(RC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、岩盤の熱による化学的変質(RC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 									
	自然事象	火砕物密度流(NP02)	<ul style="list-style-type: none"> 火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。 								

第4表 影響事象分析表(水理(H)) (1/2)*1

影響元 先	影響	固化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)	
水理	廃棄体	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、埋設設備内の水理特性及び化学特性に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、難透水性覆土及び下部覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、難透水性覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、岩盤内の水理、化学特性に関係し、岩盤の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体及び充填材の水理特性(WH01)、地下水流動(WH02)、飽和/不飽和(WH03)は、岩盤内の水理、化学特性に関係し、岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	
	充填材								
	埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はコンクリートの番号に対応) 	
	難透水性覆土、下部覆土	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)はベントナイト混合土層の番号に対応)
	上部覆土	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・同上 (ただし、部位名称(ID)は覆土の番号に対応)
			<ul style="list-style-type: none"> ・上部覆土の地下水流動(XH02)に伴う難透水性覆土及び下部覆土の流出(BM05)に関しては、上部覆土内の地下水流速が十分に小さいことから、影響は生じない。 						
	岩盤・地下水 (地下水流、水理特性)	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、埋設設備内の水理特性及び化学特性に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、難透水性覆土及び下部覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、難透水性覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、上部覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、上部覆土内の水理特性及び化学特性に関係し、収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、自身の水理特性及び化学特性に関係し、低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理特性(RH01)、地下水流動(RH02)、飽和/不飽和(RH03)は、自身の水理特性及び化学特性に関係し、収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	
			<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の地下水流動(RH02)に伴う難透水性覆土及び下部覆土の流出(BM05)に関しては、岩盤の地下水流速が十分に小さいことから、影響は生じない。 						
	自然事象	火砕物密度流 (NP02)	<ul style="list-style-type: none"> ・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。 						
		断層活動(変形) (NP01)	<ul style="list-style-type: none"> ・断層活動による変形は、出戸西方断層の活動による地盤の傾斜を想定しているが、同断層の規模や平均変位速度を考慮した地表変位を仮定した場合でも、廃棄物埋設地における地盤傾斜は0.1%未満と推定されるため、水理的な影響は生じない。 						
地震(NP01)		<ul style="list-style-type: none"> ・地震動による地下水流動(WH02, CH02, BH02, XH02, RH02)の変化は一時的であり、水理的な影響は生じない。 							
液状化(覆土) (NP01)		<ul style="list-style-type: none"> ・液状化(覆土)の発生により、埋設設備内の地下水流動(WH02, CH02)に変化が生じ、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・液状化(覆土)の発生により、難透水性覆土及び下部覆土内の間隙水圧が一時的に変化するなど、難透水性覆土及び下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・液状化(覆土)の発生により、地下水流動(BH02)に変化が生じ、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・液状化(覆土)の発生により、上部覆土内の間隙水圧が一時的に変化するなど、下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・液状化(覆土)の発生により、地下水流動(XH02)に変化が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> ・N値50以上の岩盤であるため、影響は生じない。 		

*1：各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

第4表 影響事象分析表(水理(H)) (2/2)*1

影響元	影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)
自然事象	隆起 (NP04)	<ul style="list-style-type: none"> 隆起及び海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、埋設設備内の地下水流動 (WH02, CH02) が変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、難透水性覆土及び下部覆土内の地下水流動 (BH02) が変化することで、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、上部覆土の地下水流動 (XH02) が変化することで、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化しても、岩盤の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、岩盤の地下水流動 (RH02) が変化することで、岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)
	海水準変動 (NP04)							
	気温、降水量・蒸発散量、かん養量、地下水位 (NP04)	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量及びかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場及び地下水位が変化し、埋設設備内の地下水流動 (WH02, CH02) も変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量及びかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場及び地下水位が変化し、難透水性覆土及び下部覆土内の地下水流動 (BH02) も変化することで、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量及びかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場及び地下水位が変化し、上部覆土の地下水流動 (XH02) も変化することで、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 気候変動により地盤へのかん養量の変化しても、岩盤の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量及びかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場及び地下水位が変化し、廃棄物埋設地近傍の岩盤の地下水流動 (RH02) も変化することで、岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)
	侵食 (NP03)	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により、廃棄物埋設地周辺の地形が変化、さらには埋設設備が削剥されることにより、廃棄物埋設地の地下水流動が大きく変化し、埋設設備内の地下水流動 (WH02, CH02) も変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により、廃棄物埋設地周辺の地形が変化、さらには難透水性覆土及び下部覆土が削剥されることにより、廃棄物埋設地の地下水流動が大きく変化し、難透水性覆土及び下部覆土の地下水流動 (BH02) も変化することで、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により、廃棄物埋設地周辺の地形が変化、さらには上部覆土が削剥されることにより、廃棄物埋設地の地下水流動が大きく変化し、上部覆土の地下水流動 (XH02) も変化することで、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により廃棄物埋設地周辺の地形が変化した場合においても、廃棄物埋設地近傍の岩盤の低透水性に影響は生じない。ただし、岩盤が侵食されることにより、移行距離が短くなることは考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により廃棄物埋設地周辺の地形が変化し、廃棄物埋設地の地下水流動が大きく変化し、岩盤の地下水流動 (RH02) も変化することで、岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)
	風化 (NP04)	<ul style="list-style-type: none"> 風化の伸展は緩慢であり、埋設設備が風化の影響をうけるのは、将来数万年後の地表に近接時であるため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 風化の伸展は緩慢であり、難透水性覆土及び下部覆土が風化の影響をうけるのは、将来数万年後の地表に近接時であるため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 上部覆土の浅い部分が物理的・化学的風化により、地化学環境が変化し、水理特性 (XH01)、地下水流動 (XH02) が変化する可能性があるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の水理的影響に包含されるため、影響は無視できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 風化の伸展は緩慢であり、埋設設備が風化の影響をけるのは、将来数万年後の地表に近接時で、設置岩盤は更に深い位置にあるため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左
	生物化学的現象 (SE03)	<ul style="list-style-type: none"> 埋設設備まで樹木の根 (SE03) は到達しないため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土及び下部覆土まで樹木の根 (SE03) は到達しないため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 上部覆土表面は、樹木に覆われて樹木の根 (SE03) が上部覆土内に伸長することが推定されるが、その長さは3m程度で浅く、地下水位との関係から、地下水位以深における上部覆土の透水性への影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤まで樹木の根 (SE03) は到達しないため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左
	津波 (隕石落下)	<ul style="list-style-type: none"> 巨大津波に伴う地下水流動への影響は一時的なものであり、水理的な影響は無視できる。 						
透水性の変化	<ul style="list-style-type: none"> 各項目参照 							

*1：各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

第5表 影響事象分析表(力学(M)) (1/2)*1

影響元	影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)	
力学	廃棄体	・金属廃棄物及び容器の腐食(WC05)膨張及びガス発生(WC11)によって生じる応力(WM02)によって、廃棄体領域の力学特性(WM01)を考慮すると、破壊とひび割れ(WM03)、変形(WM04)が生じる可能性があり、埋設設備内の水理特性、化学特性が変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・金属廃棄物及び容器の腐食(WC05)膨張及びガス発生(WC11)によって生じる応力(WM02)によって、難透水性覆土及び下部覆土に応力(BM02)が発生し、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)が生じることで、密度低下が生じ、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・金属廃棄物及び容器の腐食(WC05)膨張及びガス発生(WC11)によって生じる応力(WM02)によって、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)が生じる可能性があり、難透水性覆土の水理特性、化学特性が変化することで、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・埋設設備の上部に設置され、十分な厚さがあることから、廃棄体層の力学特性(WM01)、応力(WM02)、破壊とひび割れ(WM03)、変形(WM04)による影響は無視できる。		・安定な岩盤に設置されることから、廃棄体層の力学特性(WM01)、応力(WM02)、破壊とひび割れ(WM03)、変形(WM04)による影響は無視できる。		
	充填材								
	埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)	・鉄筋の腐食(CC05)膨張及びガス発生(CC11)によって生じる応力(CM02)によって、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)が生じる可能性があり、埋設設備内の水理特性、化学特性が変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・鉄筋の腐食(CC05)膨張及びガス発生(CC11)によって生じる応力(CM02)によって、難透水性覆土及び下部覆土に応力(BM02)が発生し、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)が生じることで、密度低下が生じ、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・鉄筋の腐食(CC05)膨張及びガス発生(CC11)によって生じる応力(CM02)によって、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)が生じる可能性があり、難透水性覆土の水理特性、化学特性が変化することで、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・埋設設備の上部に設置され、十分な厚さがあることから、コンクリートの力学特性(CM01)、応力(CM02)、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)による影響は無視できる。			・安定な岩盤に設置されることから、コンクリートの力学特性(CM01)、応力(CM02)、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)による影響は無視できる。	
	難透水性覆土、下部覆土	・難透水性覆土及び下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)は、埋設設備内の水理特性、化学特性が変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・難透水性覆土及び下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)は、自身の低透水性に影響するものである。	・難透水性覆土及び下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)は、自身の水理特性、化学特性が変化することで、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	・難透水性覆土及び下部覆土の上部に設置され、十分な厚さがあることから、難透水性覆土及び下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)による影響は無視できる。			・安定な岩盤に設置されることから、難透水性覆土及び下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)による影響は無視できる。	
		・難透水性覆土及び下部覆土は、地下水により飽和し膨潤することによる応力(BM02)が発生するが、周辺の地圧等と比較してその膨潤圧は小さいため、影響は生じない。							
	上部覆土	・上部覆土の力学特性(XM01)及び応力(XM02)の状態から、セメント系材料の収着性に影響は生じない。	・上部覆土の上載圧(応力(XM02))による難透水性覆土及び下部覆土の圧密沈下による変形(BM04)が生じる可能性があるが、透水係数が小さくなる方向であり、影響は生じない。	・上部覆土の力学特性(XM01)及び応力(XM02)の状態から、難透水性覆土の収着性への影響は生じない。	・上部覆土の力学特性(XM01)、応力(XM02)、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)は、自身の低透水性に影響するものである。	・上部覆土の力学特性(XM01)、応力(XM02)、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)は、自身の水理特性、化学特性が変化することで、収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)		・安定な岩盤に設置されることから、上部覆土の力学特性(XM01)、応力(XM02)、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)による影響は無視できる。	
	岩盤・地下水(地圧・水圧)	・岩盤の力学特性(RM01)及び応力(RM02)の状態から、セメント系材料の収着性に影響は生じない。	・岩盤の力学特性(RM01)及び応力(RM02)の状態から、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響は生じない。	・岩盤の力学特性(RM01)及び応力(RM02)の状態から、難透水性覆土の収着性に影響は生じない。	・岩盤の力学特性(RM01)及び応力(RM02)の状態から、上部覆土の低透水性に影響は生じない。	・岩盤の力学特性(RM01)及び応力(RM02)の状態から、上部覆土の収着性に影響は生じない。	・岩盤の力学特性(RM01)、応力(RM02)、破壊とひび割れ(RM03)、変形(RM04)は、自身の低透水性に影響するものである。	・岩盤の力学特性(RM01)、応力(RM02)、破壊とひび割れ(RM03)、変形(RM04)は、自身の水理特性、化学特性に関係し、収着性に影響する可能性がある。 (→水理:地下水流動、→化学:地下水との反応)	
			・掘削時の岩盤の応力(RM02)開放によって岩盤のEDZが進展し、流出(BM05)が生じる可能性があるが、応力開放は小さくEDZの進展は生じないため、影響は生じない。						

*1: 各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

第5表 影響事象分析表(力学(M)) (2/2)*1

影響元		影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)
力学	自然事象	降下火砕物 (NP02)	・覆土上に降下火砕物が堆積する可能性があるが、その層厚は2m以下と推定されるため、影響は生じない。						
		火砕物密度流 (NP02)	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。						
		断層活動(変形) (NP01)	・断層活動による変形は、出戸西方断層の活動による地盤の傾斜を想定しているが、同断層の規模や平均変位速度を考慮した地表変位を仮定した場合でも、廃棄物埋設地における地盤傾斜は0.1%未満と推定され、傾斜にともなう応力(WM02)発生による影響は生じない。						
		地震(NP01)	・地震によって埋設設備内が変形(CM04)・損傷しても、埋設設備の収着性への影響は生じない。	・地震によって、難透水性覆土及び下部覆土に応力(BM02)が発生し、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)することによって、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・地震によって難透水性覆土及び下部覆土が変形(BM04)しても、難透水性覆土の収着性への影響は生じない。	・地震によって、上部覆土に応力(XM02)が発生し、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)することによって、上部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・地震によって上部覆土が変形(BM04)・損傷しても、上部覆土の収着性への影響は生じない。	・地震によって、岩盤に応力(XM02)が発生し、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)することによって、岩盤の低透水性に影響する可能性がある。	・地震によって岩盤が変形(BM04)・損傷しても、上部覆土の収着性への影響は生じない。
		液状化(覆土) (NP01)	・液状化(覆土)の発生により、埋設設備内の地下水流動(WH02, CH02)に変化が生じ、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。(→化学：地下水との反応)	・液状化(覆土)の発生により、難透水性覆土及び下部覆土の密度、間隙率等に変化が生じ、難透水性覆土及び下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。	・液状化(覆土)の発生により、難透水性覆土及び覆土内の地下水流動(BH02)に変化が生じ、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。(→化学：地下水との反応)	・液状化(覆土)の発生により、下部覆土の密度、間隙率等に変化が生じ、下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。	・液状化(覆土)の発生により、下部覆土内の地下水流動(XH02)に変化が生じ、下部覆土の収着性に影響する可能性がある。(→化学：地下水との反応)	・N値50以上の岩盤であるため、液状化(覆土)の発生は考え難く、影響は生じない。	・N値50以上の岩盤であるため、液状化(覆土)の発生は考え難く、影響は生じない。
		侵食(NP03)	・コンクリートが侵食され、喪失した場合は、セメント系材料の全ての機能に影響する可能性がある。	・難透水性覆土及び下部覆土が侵食され、喪失した場合は、難透水性覆土及び下部覆土の全ての機能に影響する可能性がある。	・上部覆土が侵食され、喪失した場合は、覆土の全ての機能に影響する可能性がある。	・岩盤が侵食され、喪失した場合は、岩盤の全ての機能に影響する可能性がある。			
風化(NP04)	・風化によって上部覆土及び岩盤の空隙構造等が変化することが考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の力学的影響に包含されるため、影響は無視できる。								

*1：各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

第6表 影響事象分析表(化学(C)) (1/2)*1

影響元	影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)
廃棄体、充填材		・廃棄体及び充填材の化学特性(WC01)及び間隙水の液性(地下水化学(WC02))が自身の化学的な反応(地下水との反応(WC03)、化学的変質(WC04)、溶脱(WC06))に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。	・廃棄体及び充填材の化学特性(WC01)及び間隙水の液性(地下水化学(WC02))が難透水性覆土及び下部覆土の化学的な反応(地下水との反応(BC03)、化学的変質(BC04))に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・廃棄体及び充填材の化学特性(WC01)及び間隙水の液性(地下水化学(WC02))が上部覆土の化学的な反応(地下水との反応(XC03)、化学的変質(XC04))に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・廃棄体及び充填材の化学特性(WC01)及び間隙水の液性(地下水化学(WC02))が岩盤の化学的な反応(地下水との反応(RC03)、化学的変質(RC04))に関係し、低透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)
		・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。	・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響は生じない。	・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。	・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、上部覆土の透水性に影響は生じない。	・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。	・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、収着性に影響する可能性がある。	・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、収着性に影響する可能性がある。
		・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、これらの物質が錯体を形成し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある(有機物影響(WC09))。	・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、これらの物質が錯体を形成する可能性がある(有機物影響(BC09))が、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響は生じない。	・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある(有機物影響(BC09))。	・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、難透水性覆土の透水性に影響は生じない。	・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、上部覆土の収着性に影響する可能性がある(有機物影響(XC09))。	・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、低透水性に影響は生じない。	・廃棄体に含まれる可能性のある一部の有機物のアルカリ分解反応によって、放射性物質を捕捉するキレート物質が生成し、収着性に影響する可能性がある(有機物影響(RC09))。
化学	埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)	・コンクリートの化学特性(CC01)及び間隙水の液性(地下水化学(CC02))がセメント系材料の化学的な反応(地下水との反応(WC03)、化学的変質(WC04)、溶脱(WC06))に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。	・コンクリートの化学特性(CC01)及び間隙水の液性(地下水化学(CC02))が難透水性覆土及び下部覆土の化学的な反応(地下水との反応(BC03)、化学的変質(BC04))に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・コンクリートの化学特性(CC01)及び間隙水の液性(地下水化学(CC02))が覆土の化学的な反応(地下水との反応(XC03)、化学的変質(XC04))に関係し、上部覆土の水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・コンクリートの化学特性(CC01)及び間隙水の液性(地下水化学(CC02))が岩盤の化学的な反応(地下水との反応(RC03)、化学的変質(RC04))に関係し、低透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)
		・鉄筋の腐食(CC05)によって、酸化還元環境が変化し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。	・鉄筋の腐食(CC05)によって、酸化還元環境が変化し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響は生じない。	・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。	・鉄筋の腐食(CC05)によって、酸化還元環境が変化し、上部覆土の透水性に影響は生じない。	・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。	・鉄筋の腐食(CC05)によって、酸化還元環境が変化し、収着性に影響する可能性がある。	・廃棄体に含まれる金属及び容器の腐食(WC05)によって、酸化還元環境が変化し、収着性に影響する可能性がある。
	難透水性覆土、下部覆土	・難透水性覆土及び下部覆土の化学特性(BC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が各部材の化学的な反応(地下水との反応(WC03)、化学的変質(WC04)、溶脱(WC06))に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。	・難透水性覆土及び下部覆土の化学特性(BC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が自身の化学的な反応(地下水との反応(BC03)、化学的変質(BC04))に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・難透水性覆土及び下部覆土の化学特性(BC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が覆土の化学的な反応(地下水との反応(XC03)、化学的変質(XC04))に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・難透水性覆土及び下部覆土の化学特性(BC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が岩盤の化学的な反応(地下水との反応(RC03)、化学的変質(RC04))に関係し、低透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)
	上部覆土	・上部覆土の化学特性(XC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が各部材の化学的な反応(地下水との反応(WC03)、化学的変質(WC04)、溶脱(WC06))に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。	・上部覆土の化学特性(XC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が難透水性覆土及び下部覆土の化学的な反応(地下水との反応(BC03)、化学的変質(BC04))に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・上部覆土の化学特性(XC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が自身の化学的な反応(地下水との反応(XC03)、化学的変質(XC04))に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・上部覆土の化学特性(XC01)及び間隙水の液性(地下水化学(BC02))が岩盤の化学的な反応(地下水との反応(RC03)、化学的変質(RC04))に関係し、低透水性に影響する可能性がある。	・同左(ただし、低透水性を収着性に置き換える)

*1: 各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

第6表 影響事象分析表(化学(C)) (2/2)*1

影響元	影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)		
化学	岩盤・地下水	・岩盤の化学特性(RC01)及び地下水の液性(地下水化学(RC02))がセメント系材料の化学的な反応(地下水との反応(WC03)、化学的変質(WC04)、溶脱(WC06))に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。	・岩盤の化学特性(RC01)及び地下水の液性(地下水化学(RC02))が難透水性覆土及び下部覆土の化学的な反応(地下水との反応(BC03)、化学的変質(BC04))に関係し、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・岩盤の化学特性(RC01)及び地下水の液性(地下水化学(RC02))が上部覆土の化学的な反応(地下水との反応(XC03)、化学的変質(XC04))に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・岩盤の化学特性(RC01)及び地下水の液性(地下水化学(RC02))が自身の化学的な反応(地下水との反応(RC03)、化学的変質(RC04))に関係し、低透水性に影響する可能性がある。	・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える)		
	各部材共通	・微生物の活動に(微生物影響(WC08, CC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進、放射性物質の化学特性の変化が生じ、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。	・微生物の活動(微生物影響(BC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進の可能性があるが、その他の化学的影響に包含されるため、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性への影響は無視できる。	・微生物の活動(微生物影響(BC08))によって、有機物の分解、放射性物質の化学特性の変化が生じ、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。	・微生物の活動(微生物影響(XC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進の可能性があるが、その他の化学的影響に包含されるため、上部覆土の低透水性への影響は無視できる。	・微生物の活動(微生物影響(XC08))によって、有機物の分解、放射性物質の化学特性の変化が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。	・微生物の活動(微生物影響(RC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進の可能性があるが、その他の化学的影響に包含されるため、上部覆土の低透水性への影響は無視できる。	・微生物の活動(微生物影響(RC08))によって、有機物の分解、放射性物質の化学特性の変化が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。		
		・間隙水中でコロイド形成(WC10, CC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着すること等により、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。	・間隙水中でのコロイド形成(BC10)は、難透水性覆土及び下部覆土の低透水性に影響は生じない。	・間隙水中でコロイド形成(BC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着すること等により、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。	・間隙水中でのコロイド形成(XC10)は、上部覆土の透水性に影響は生じない。	・間隙水中でコロイド形成(XC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着すること等により、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。	・間隙水中でのコロイド形成(RC10)は、低透水性に影響は生じない。	・間隙水中でコロイド形成(RC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着すること等により、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。		
		・地下水(間隙水)の放射線分解(WR02, CR02, BR02, XR02, RR02)によって、ガスが発生する可能性はあるが、廃棄体の放射線量は小さく、影響は無視できる。								
	自然事象	降下火砕物(NP02)	・降下火砕物による地下水の水質の変化が考えられるが、影響期間は短期であり、範囲が限定されるため、影響は無視できる。			・上部覆土は、降下火砕物の溶出成分により化学的変質(XC04)が生じ、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・上部覆土は、降下火砕物からの溶出成分により化学的変質(XC04)が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。	・降下火砕物による地下水の水質の変化が考えられるが、影響期間は短期であり、範囲が限定されるため、影響は無視できる。		
		火砕物密度流(NP02)	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。							
		表流水・地下水の水質(NP02)	・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。			・上部覆土は、酸性雨により化学的変質(XC04)が生じ、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・上部覆土は、酸性雨により化学的変質(XC04)が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。	・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。		
			・地下水の水質は「岩盤・地下水」参照							
		風化(NP02)	・風化によって上部覆土及び岩盤の鉱物の変質が考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。							
		生物学的現象	・「微生物影響」参照。							
津波(隕石落下)	・巨大津波によって、海水が廃棄物埋設地に流入することで、間隙水の液性(地下水化学(MC02, CC02, BC02, XC02, RC02))に変化が生じるが、一時的なものであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。									

*1: 各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

4. 参考文献

- (1) Nuclear Energy Agency(2000): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste: An International Database
- (2) Nuclear Energy Agency(2006): The NEA International FEP Database: Version2.1
- (3) 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会(平成15年): 廃棄物安全小委員会報告書－高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて－
- (4) International Atomic Energy Agency(2004): Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities: Results of a coordinated research project
- (5) 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構(2005): TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－

影響評価により影響なしと判断した根拠

目 次

1. ガス発生の影響.....	1
(1) ガス発生速度、ガス発生量及びガス移行メカニズムに関する既往知見の整理.....	2
(2) ベントナイト混合土を用いた室内試験（透気・透水試験）によるガス発生の影響評価.....	8
(3) 廃棄物埋設地におけるガス発生影響について	13
(4) まとめ.....	15
2. 地震の影響.....	16
3. 液状化(覆土)の影響.....	17
4. コロイド影響.....	19
5. 微生物影響.....	19
6. 降下火砕物(化学)の影響.....	19
7. 参考文献.....	21

1. ガス発生の影響

埋設設備内に含まれる金属の腐食及び有機物の分解に伴いガスが発生する。ガスの発生により埋設設備内のガス圧が上昇し、ガスが移行することで、覆土の変形・損傷に伴い透水係数が増加するおそれがある。

廃棄物埋設地において発生し得るガスの大部分は、廃棄体層に存在する金属が水と接触して腐食することにより発生する水素ガスである。基本的には、発生したガスが埋設設備内に充満することにより、地下水の浸入が抑制され、金属腐食の進展が滞ることから、大きなガス圧が覆土に作用することは考え難い。また、難透水性覆土はベントナイトの膨張に起因する自己修復性を持つ土質系材料であり、上載圧による拘束も作用していることから、仮にガスによって変形・損傷を受けた場合においても、元の状態が復元されると想定できる。そのため、覆土に対するガス発生の影響はその他の力学的影響に比べ軽微であると考えられる。

しかしながら、上記の考えには廃棄物埋設地の持つ不均質性などによる不確実性を含むことから、ガス発生の影響に対して定量的な判断を実施するため、以下の手順により検討を行う。

- ・ガス発生速度、ガス発生量及びガス移行メカニズムに関する既往知見の整理
- ・ベントナイト混合土を用いた室内試験（透気・透水試験）によるガス発生の影響評価
- ・実際の廃棄物埋設地におけるガス発生影響の検討

(1) ガス発生速度、ガス発生量及びガス移行メカニズムに関する既往知見の整理

(i) ガスの発生速度

a. 覆土完了までの期間

外周仕切設備・覆いコンクリートに対する材料・施工に係る品質管理により防水対策を施すこと、ポーラスコンクリート層に接続した排水管を通じて排水を行うことから、周辺から廃棄体層に浸入する水の量は極めて少ない。このため、この期間における廃棄体層からのガス発生は無視できる。

b. 覆土完了後（排水・監視設備による排水の終了後）

排水・監視設備による排水の終了後は、周辺の地下水が埋設設備の内部に浸入し、廃棄体層に到達すると考えられる。このため、ガスの発生を想定し検討する必要がある。

埋設設備はセメント系材料によって構成されている。その間隙水には、セメントの主成分である水酸化カルシウムが飽和するまで溶解し、微量成分のナトリウムやカリウムが溶解することから、pH12.5～pH13、水温 15℃程度となる。廃棄体内に分別除去後に少量残存し得るアルミニウムと、高い pH であるセメント系材料中の間隙水が反応することにより、水素ガスが発生する。埋設設備内の環境に近い条件におけるアルミニウムの腐食速度は、藤原らの報告⁽¹⁾によれば、pH11.5～pH12.5、水温 15℃の条件においては 10 μm/y 以下の値で推移し、1 μm/y 以下まで低下することが知られている。

また、廣永らの報告⁽²⁾によると、pH12.5～pH13 と想定されるモルタル粉砕粒子共存中での水温 15℃におけるアルミニウムの腐食速度は、100 μm/y 以下まで 3 週間程度で低下し、最終的に 10 μm/y に達するとされている。埋設設備に浸入した地下水は、外周仕切設備の鉄筋に接触して、金属の腐食（酸素消費型）が生じることで溶存酸素が消費され、嫌气的条件となるが、この地下水が廃棄体容器の内部に浸入して、廃棄体層内が嫌气的条件になると、鉄の嫌気性腐食に伴う水素ガスも発生する。鉄の嫌気性腐食速度については、廣永らの報告⁽²⁾によると、pH12.4、水温 15℃においては 0.002 μm/y 程度と考えられる。

覆土完了後における埋設設備全体から発生するガスの量としては、廃棄体層から発生する水素ガスの量に加え、鉄筋コンクリート中の鉄筋の嫌気性腐食に伴い発生する水素ガスの量を加味する必要がある。

よって、ガス発生量はアルミニウムのアルカリ腐食と鉄の嫌気性腐食を考慮する。

1号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体に含まれる可溶性塩によるガスの発生速度への影響があると考えられる。廃棄物埋設地におけるガスの発生量の評価においては、可溶性塩の存在により腐食速度が変化することを考慮する。

(ii) ガスの発生量

既往知見⁽²⁾⁽³⁾により整理された pH12.5～pH13.0 及び水温 15℃～45℃の条件での腐食速度試験の結果に基づいて、アルミニウムの腐食速度を $30\mu\text{m}/\text{y}$ (極薄物については、1年以内に全量腐食すると設定)、鉄の腐食速度を $0.01\mu\text{m}/\text{y}$ と設定して2号廃棄物埋設地を対象に評価したガス発生量を第1表及び第1図に示す。埋設設備1基当たり1年間に発生するガスの量は、標準状態において最大 $500\text{Nm}^3/\text{y}$ であると評価されている。

3号廃棄物埋設地においては、埋設設備1基当たり埋設可能な廃棄体本数が2号廃棄物埋設地の約2倍 (26,400本/12,960本=2.04) であることから、同様な考え方に基づくくと、埋設設備1基当たり最大で $1,000\text{Nm}^3/\text{y}$ (埋設設備 1m^3 当たり $0.064\text{m}^3/\text{y}$) と算定できる。ここで、3号廃棄物埋設地においては、埋設する廃棄体種類が2号廃棄物埋設地と同じであり、3号廃棄物埋設地における埋設設備の単位体積当たりのガス発生量 ($0.064\text{m}^3/\text{y}$) は、2号廃棄物埋設地における埋設設備の単位体積当たりのガス発生量 ($0.054\text{m}^3/\text{y}$) とほぼ同等である。

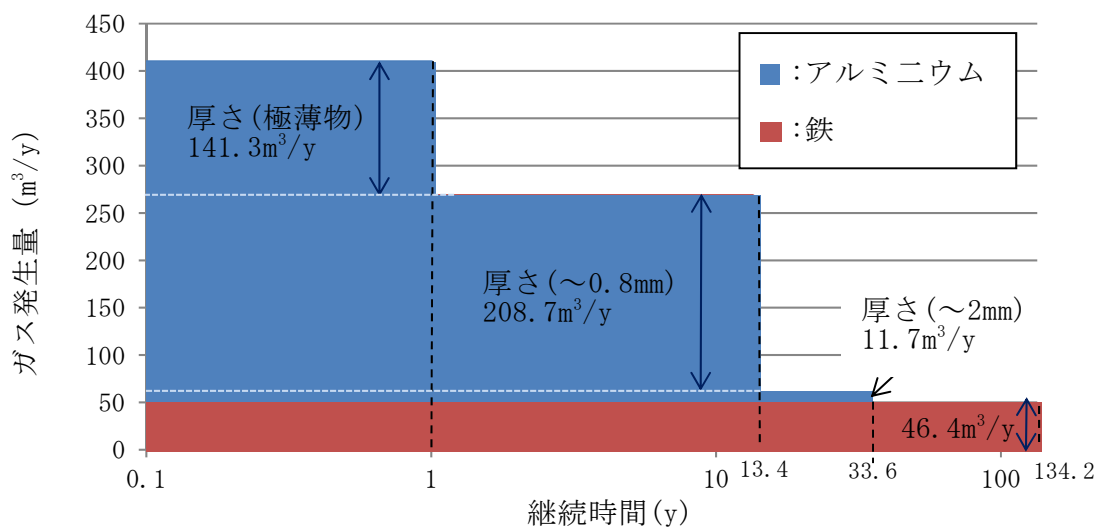
1号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体に含まれる可溶性塩によるガスの発生量への影響が生じる。廃棄物埋設地におけるガスの総発生量は、埋設される廃棄体に含まれる金属の量と正の相関を持つ。均質・均一固化体に含まれる金属量は、充填固化体に含まれる金属量に比べ非常に少ないため、1号埋設設備のうち充填固化体を埋設する埋設設備を対象に、可溶性塩による影響を考慮したガス発生量を評価する。1号廃棄物埋設地に埋設される充填固化体の重量は、3号廃棄物埋設地に埋設される充填固化体の重量の半分程度であることを考慮して、第1図を参考にガス発生量を評価した。その結果、可溶性塩の存在により鉄の腐食速度が仮に10倍程度⁽⁴⁾⁽⁵⁾になっても、ガス発生について支配的であるアルミニウムの腐食速度は大きく変化しない⁽⁶⁾ことから、2号及び3号廃棄物埋設地における埋設設備の単位体積当たりのガス発生量 (2号: $0.054\text{m}^3/\text{y}$ 、3号: $0.064\text{m}^3/\text{y}$) は、1号廃棄物埋設地における埋設設備の単位体積当たりのガス発生量 ($0.053\text{m}^3/\text{y}$) とほぼ同等である。

以上のことから、1号廃棄物埋設地における可溶性塩の影響を考慮しても、3号廃棄物埋設地におけるガス発生による影響評価で代表できるといえる。

第1表 2号廃棄物埋設地の埋設設備1基当たりガス発生量の内訳⁽³⁾

	鉄	アルミニウム				合計
		極薄物	~0.8mm	~2mm	~8mm	
ガス発生量	46.4m ³ /y	141.3m ³ /y ^{*1}	208.7m ³ /y	11.7m ³ /y	0m ³ /y	408.1m ³ /y
継続時間	考慮せず	1y ^{*1}	13.4y	33.6y	134.2y	-

*1: 厚さ数10 μ mの極薄物については、1年以内に全量腐食するものとした。

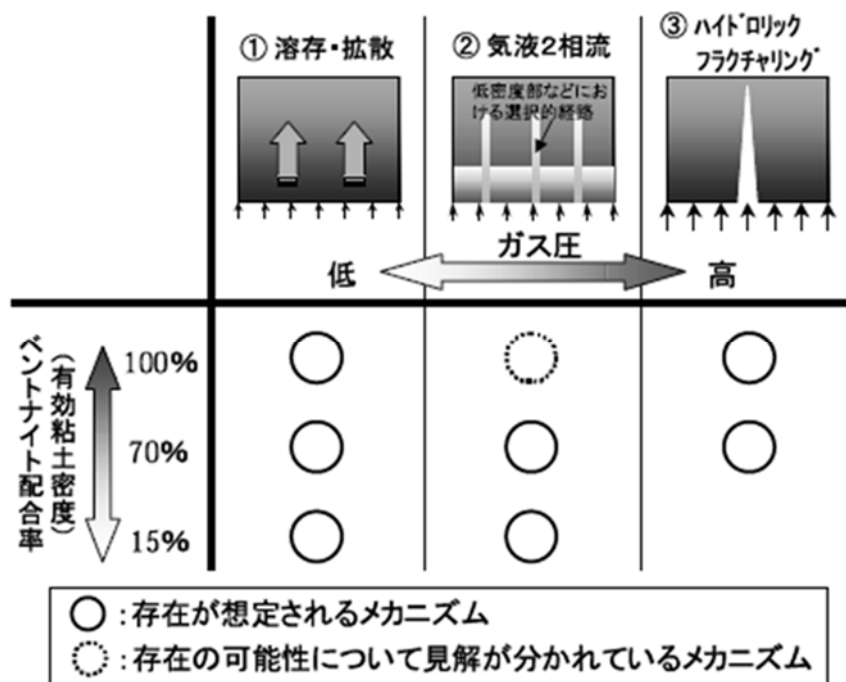


第1図 2号廃棄物埋設地の埋設設備1基当たりガス発生量の経時変化

(iii) ベントナイト系材料中のガス移行メカニズム

藤山ら⁽⁷⁾は、例えば Graham ら⁽⁸⁾及び Hoch ら⁽⁹⁾による文献及び各種データを調査・整理し、飽和ベントナイト系材料中のガス移行メカニズムに対して第2図に示す概念図を提示し、以下のようにとりまとめた。

- ① 間隙水中のガスの溶存・拡散による移行。
- ② 気液2相流によるガス移行。密度が相対的に低い部分等において、選択的な経路を形成する可能性が高いと想定される。
- ③ ハイドロリックフラクチャリングによる卓越流路の形成を伴うガス移行。
- ④ ①～③の共存。ベントナイト配合率が高く（有効粘土密度が大きい）、かつガス圧力が高いほど、③の挙動が支配的であり、低いと①②の挙動が支配的である。



第2図 飽和ベントナイト系材料のガス移行メカニズム（概念図）⁽⁷⁾

ガス移行メカニズムのうち②気液2相流と③ハイドロリックフラクチャリングについて、田中ら⁽¹⁰⁾による室内試験の試験体内部の応力状態に着目した考察は以下のとおりである。また、ガス移行メカニズムを説明するための概念図を第3図に示す。

a. 気液 2 相流によるガス移行

ガス発生と埋設設備内のガス移行に伴い、ベントナイト混合土にガス圧がかかる。ガス圧がベントナイト混合土中の間隙水圧を超えた際、ガスは間隙水を押し出す様にベントナイト混合土内に侵入する。同時に、押された間隙水は一時的に圧縮されることから、間隙水圧が上昇し、ガス圧とつり合うことでガスの侵入を抑制させる。その後、一時的に上昇した間隙水圧は徐々に消散し、ガス圧よりも小さくなると、再度、ガスが侵入する。この侵入と抑制を繰り返すことによってベントナイト混合土内をガスが移行する。ここでは、このメカニズムによってガスが移行する現象を「破過」と定義する。

破過が生じる場合は、ベントナイト混合土内で過剰間隙水圧が発生することから、ガス圧は常に軸方向全応力より小さい値となる。

b. ハイドロリックフラクチャリングによるガス移行

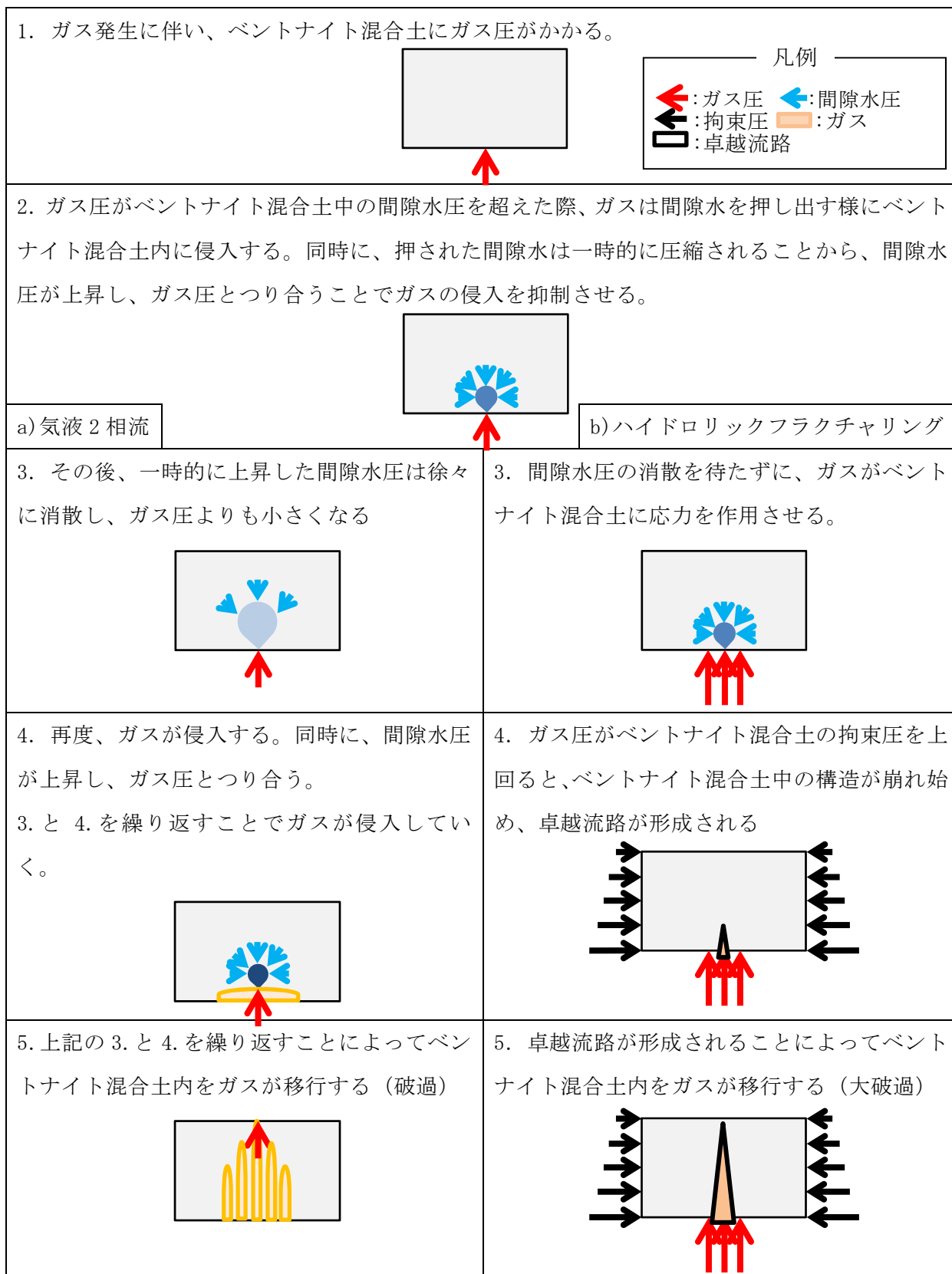
ガス発生と埋設設備内のガス移行に伴い、ベントナイト混合土にガス圧がかかる。ガスの昇圧速度（発生速度）が早い場合、気液 2 相流のガス移行で説明される間隙水圧の消散を待たずに、ガスがベントナイト混合土に応力を作用させることとなる。そのガス圧がベントナイト混合土の拘束圧を上回ると、ベントナイト混合土中の構造が崩れ始め、卓越流路が形成されることで、そこをガスが大量に通過する。ここでは、このメカニズムによってガスが移行する現象を「大破過」と定義する。

大破過が生じる場合は、ガス圧が直接的にベントナイト混合土内を伝達されることから、ガスの昇圧に伴いガス圧は軸方向全応力と等しい値となる。

c. その他の補足知見

周辺材料の剛性が相対的に高く、水平方向の応力分散を妨げるような状況である場合には、水平方向の圧力が蓄積されることで拘束圧が擬似的に増加することとなり、ガス移行に際してはより高い圧力が生じる。

以上のことから、①溶存・拡散を除くガス移行メカニズムは、ベントナイト混合土内における間隙水圧の消散速度とガスの昇圧速度（発生速度）の大小関係により、②気液 2 相流（破過）あるいは③ハイドロリックフラクチャリング（大破過）に分類される。ガス破過は破過と大破過の双方を指す。



第 3 図 時系列によるガス移行メカニズムの概念図

(2) ベントナイト混合土を用いた室内試験（透気・透水試験）によるガス発生の影響評価
埋設設備内のガス圧が上昇することを考慮して、難透水性覆土の透水係数への影響について検討を行う。

ベントナイト配合率 20wt%～30wt%の Ca 型ベントナイト混合土を用いて透気・透水試験を行った。

なお、難透水性覆土として Na 型ベントナイト混合土を用いることも考えられるため、ベントナイト配合率 15wt%～20wt%の Na 型ベントナイト混合土における同様の試験を実施した結果を以下に示す。

(i) Ca 型ベントナイト混合土のガス移行特性（田中ら⁽¹⁰⁾、大石ら⁽¹¹⁾）

Ca 型ベントナイト混合土（難透水性覆土相当、ベントナイト配合率 20wt%～30wt%）の透水・透気試験の試験条件及び試験結果を第 2 表に、ガス移行試験装置を第 4 図に、透気試験における圧力、応力及び排気量を第 5 図に、ガス破過前後の Ca 型ベントナイト混合土（難透水性覆土相当）に対する透水係数の比較を第 6 図に示す。なお、第 6 図における数値中の E は、指数表記における基数の 10 を示す（例えば、1E+02 は 1×10^2 を示す。以下、同様。）。

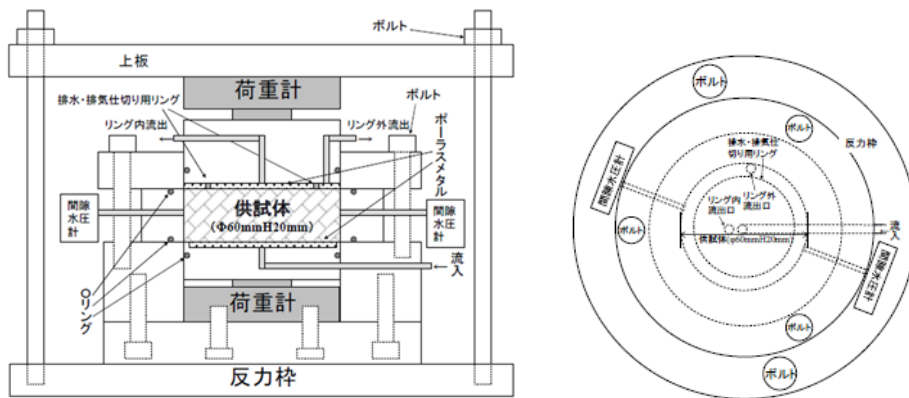
供試体の拘束圧は、廃棄物埋設地の難透水性覆土に対する有効土被り圧相当である約 0.15MPa とした。昇圧速度は、廃棄物埋設地で発生するガスの発生量を用いて、覆土への影響が大きくなるよう、埋設設備内の空隙における圧力の増加量を保守的に大きく設定し、0.04MPa/30min とした。

これらの図表からわかるように、Ca 型ベントナイト混合土（難透水性覆土相当）の透気後の透水試験において、配合率 30wt% の場合はガス破過前後で透水係数が $2.3 \times 10^{-11} \text{m/s} \sim 5.7 \times 10^{-11} \text{m/s}$ から $1.9 \times 10^{-11} \text{m/s} \sim 3.9 \times 10^{-11} \text{m/s}$ に、配合率 20wt% の場合は $3.2 \times 10^{-10} \text{m/s} \sim 4.2 \times 10^{-10} \text{m/s}$ から $2.2 \times 10^{-10} \text{m/s} \sim 3.6 \times 10^{-10} \text{m/s}$ に変化するが、ベントナイトの配合率や拘束条件によらず、ガス破過前後の透水係数に大きな変化は見られなかった。

第2表 ベントナイト混合土の透水・透気試験の試験条件及び試験結果

		No. 1 ⁽¹⁰⁾	No. 2 ⁽¹⁰⁾	No. 3 ⁽¹¹⁾	No. 4 ⁽¹¹⁾	No. 5 ⁽¹⁰⁾	No. 6 ⁽¹⁰⁾
Ca型ベントナイト配合率(wt%)		30	30	20	20	20	20
購入砂配合率(wt%)		70	70	80	80	80	80
吸水膨潤時拘束条件 ^{*1}		変位拘束	0.16MPa	0.14MPa	0.14MPa	変位拘束	0.15MPa
昇圧条件		急速载荷：0.04MPa/30min					
有効破過圧(MPa)	外側	-	-	0.087	0.044	0.09	-
	内側	0.76	0.25	0.123	0.120	-	0.09
有効大破過圧(MPa)	両側	1.25	0.85	0.166	0.138	0.22	0.21
ガス破過前の透水係数(m/s)		2.3×10^{-11}	5.7×10^{-11}	3.9×10^{-10}	4.2×10^{-10}	3.2×10^{-10}	3.2×10^{-10}
ガス破過後の透水係数(m/s)		1.9×10^{-11}	3.9×10^{-11}	3.0×10^{-10}	3.6×10^{-10}	2.2×10^{-10}	3.2×10^{-10}

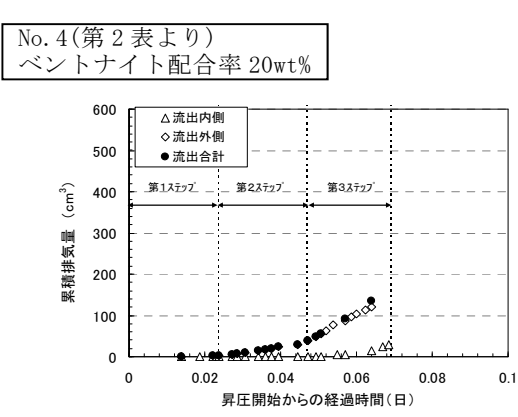
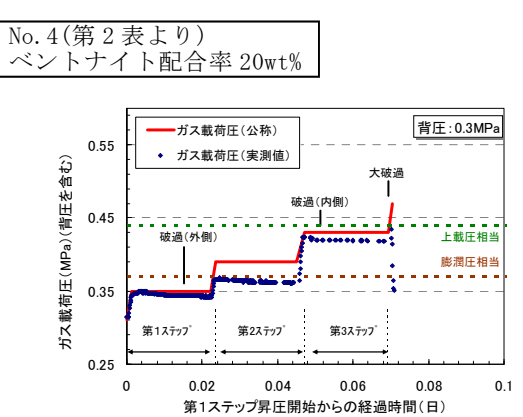
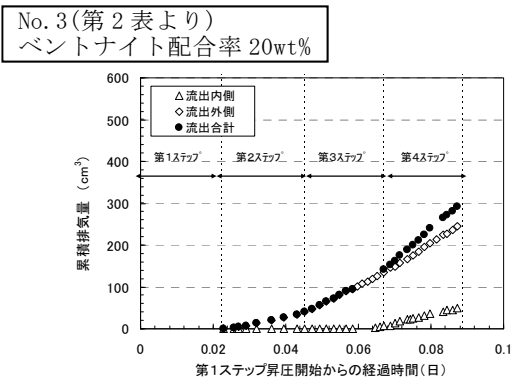
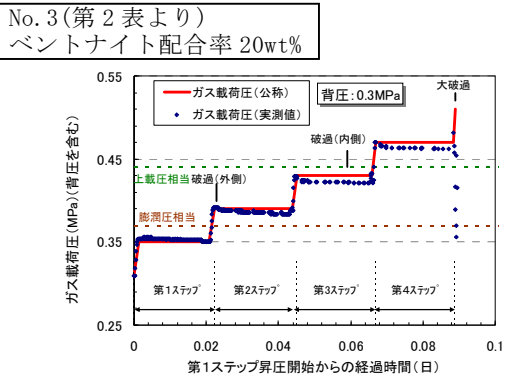
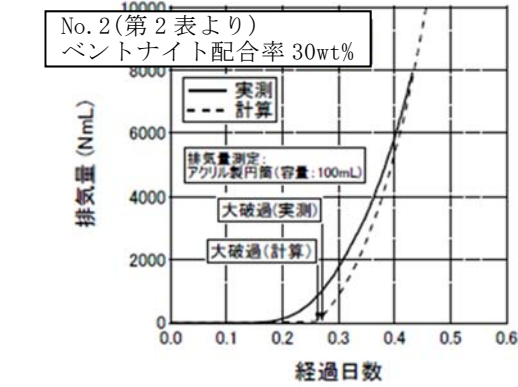
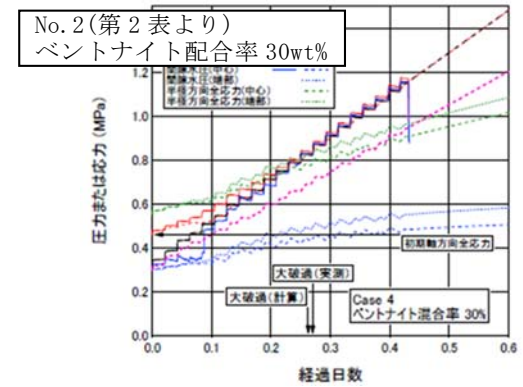
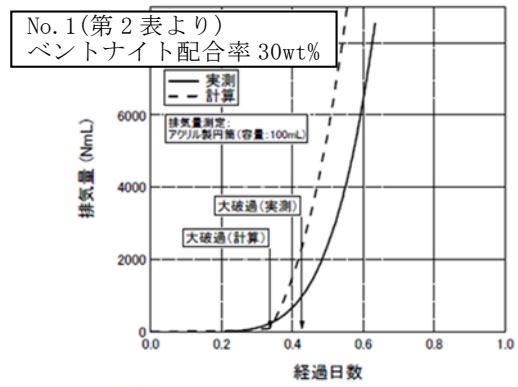
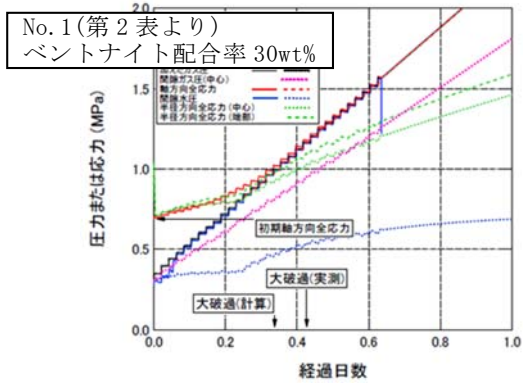
*1:「変位拘束」は軸方向変位を固定した状態で試料を膨潤させたことを、それ以外は軸方向有効圧力一定(有効土被り圧相当である約0.15MPa)で試料を膨潤させたことを示す。



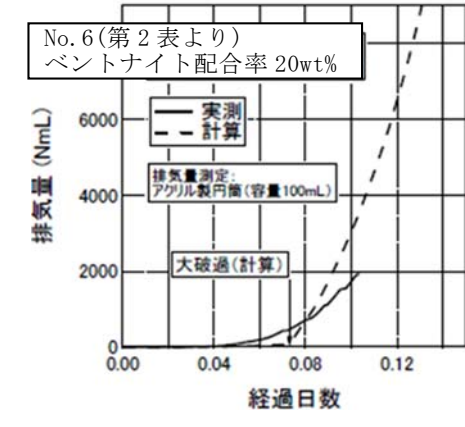
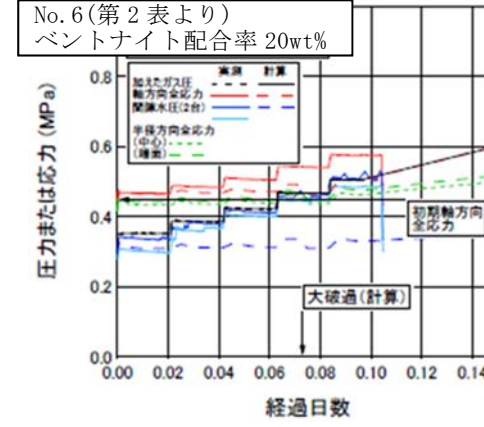
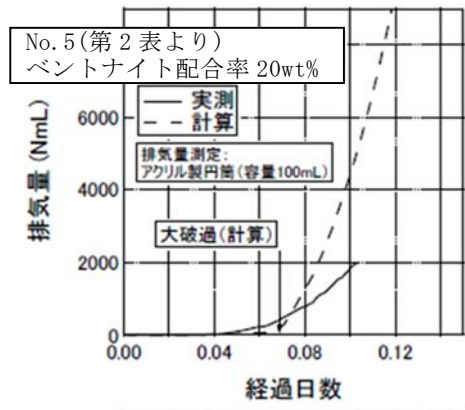
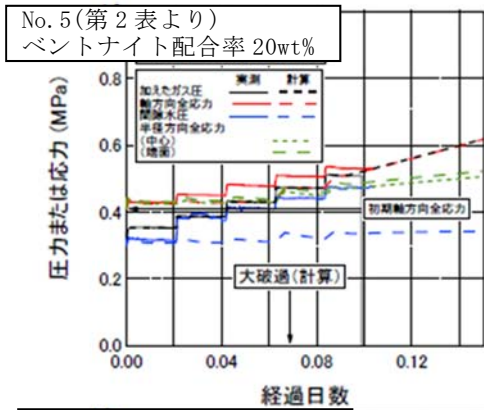
軸方向断面図

半径方向断面図

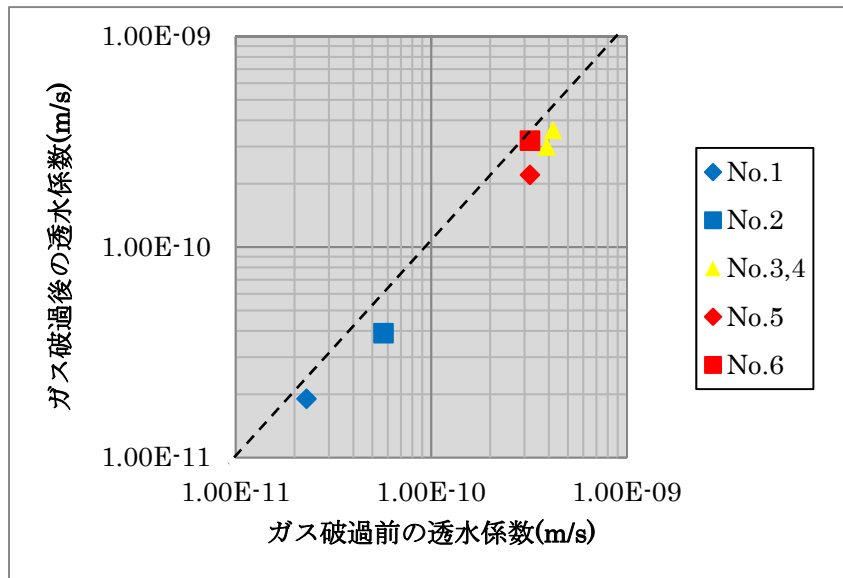
第4図 ガス移行試験装置⁽¹⁰⁾



第5図 透気試験における圧力、応力及び排気量⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ (1/2)



第5図 透気試験における圧力、応力及び排気量⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ (2/2)

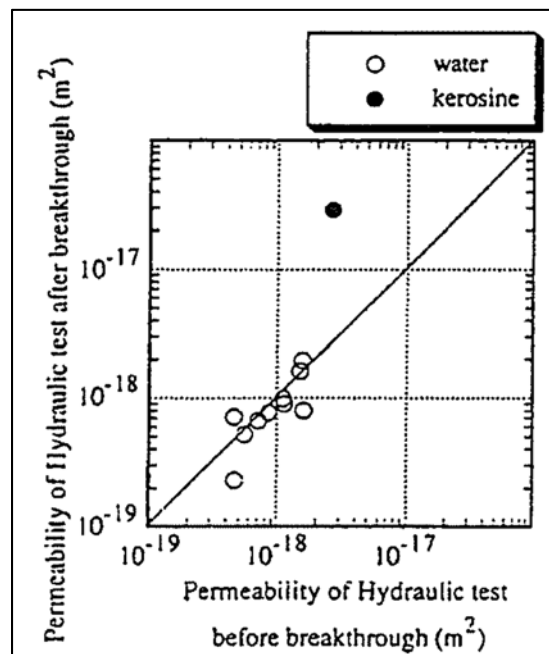


第6図 ガス破過前後のCa型ベントナイト混合土(難透水性覆土相当)の透水係数の比較⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

(ii) Na 型ベントナイト混合土のガス移行特性(穂刈ら⁽¹²⁾)

Na 型ベントナイト混合土(代替可能性のある難透水性覆土相当、ベントナイト配合率 15wt%~20wt%)のガス破過前後のベントナイト混合土に対する浸透率の比較を第 7 図に示す。

この図からわかるように、Na 型ベントナイト混合土(代替可能性のある難透水性覆土相当、ベントナイト配合率 15wt%~20wt%)の透気後の透水試験において、ベントナイトの配合率によらず、ガス破過前後の浸透率(透水係数)に大きな変化は見られなかった。



第 7 図 ガス破過前後の透水試験における Na 型ベントナイト混合土の浸透率の比較⁽¹²⁾

(3) 廃棄物埋設地におけるガス発生影響について

廃棄物埋設地におけるガス発生影響について検討するため、田中ら⁽¹⁰⁾、大石ら⁽¹¹⁾が実施した室内試験結果の適用性に関して以下のとおり考察する。

(i) 室内試験結果の考察

a. ベントナイト配合率 30wt%のケース (No. 1 及び No. 2)

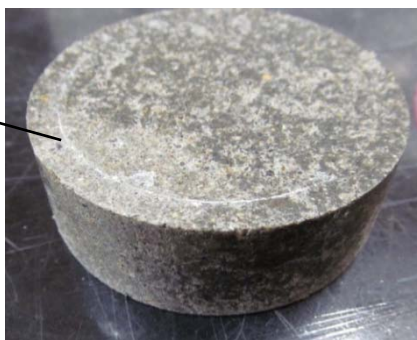
ベントナイト配合率 30wt%のケース (No. 1 及び No. 2) では、ガスの昇圧に伴いガス圧が軸方向全応力と等しい値となり、排気量が急激に増大する現象を確認できていることから、ガス圧の昇圧に伴い供試体にガスの透気方向に亀裂の発生などの損傷が生じている可能性が高い(③ハイドロリックフラクチャリング)。

この際、排気量の急増により 7Nm³ の容量のガスボンベ中のガスが全て透気し、加圧側ガス圧が背圧程度まで低下したことを確認している。廃棄物埋設地ではガス圧が上載荷重による拘束圧をやや超えたところで大破過が発生し、ガス圧の低下に伴い比較的速やかに大破過が収まるとすると、多量のガスを透気している本試験では卓越流路を通過するガスによるベントナイト流失といった損傷影響を保守的に大きく再現できていると考えられる。

なお、Ca 型ベントナイト混合土の室内試験結果 No. 1 及び No. 2 において、有効上載圧に対して大破過圧が倍以上に大きくなっている結果を示しているが、供試体周辺が剛性の高い鋼製材料に囲まれ、半径方向の応力分散を妨げるような状況であるため、半径方向の圧力が蓄積されることで拘束圧が擬似的に増加し、有効上載圧付近においても大破過に至らずガス圧が上昇したことによる。

参考として、同様の透気試験後にガス流路の拡張を目的として通気し続けた別試験⁽¹³⁾の試験後供試体を第 8 図に示す。透気試験においてはリング内外で大破過が認められているにも関わらず、供試体には目視できる損傷は確認できていない。

白く見える円形は
内外仕切り板の跡



第 8 図 気みち拡張後供試体の側部表面状態

b. ベントナイト配合率 20wt%のケース (No. 3～No. 6)

ベントナイト配合率 20wt%のケース (No. 5 及び No. 6) では、ガス圧は常に軸方向全応力より小さい値であり、排気量の急激な増大を確認し難いことから、明確な亀裂の発生などの損傷が生じていない可能性が高い(②気液 2 相流)。また、ベントナイト配合率 20%のケース (No. 3 及び No. 4) でも大破過に至る場合もあるが、試験結果より、透水係数に有意な影響がないことを確認している。

(ii) 試験結果から推定される廃棄物埋設地におけるガス移行メカニズムの考察

室内試験におけるガス移行メカニズムは、「(1) ガス発生速度、ガス発生量及びガス移行メカニズムに関する既往知見」で整理したメカニズムのうち、②気液 2 相流又は③ハイドロリックフラクチャリングであると推定される。前述のとおり、室内試験においてハイドロリックフラクチャリングが発生する際には、廃棄物埋設地に設置される難透水性覆土に比べ小さい供試体に対し、短時間で想定以上の量のガスが透気する。このため、「(1) ガス発生速度、ガス発生量及びガス移行メカニズムに関する既往知見の整理」で整理したガス発生量(最大 1,000Nm³/y)を考慮すると、難透水性覆土へのガスの影響評価において、室内試験は廃棄物埋設地より厳しい条件での結果であると判断される。

(iii) 廃棄物埋設地におけるガス発生影響

室内試験においては、ガス破過前後の透水係数が変化しない結果を確認した。

廃棄物埋設地においては、室内試験に比べて大破過時に通過するガス量が少なく、昇圧速度が遅いことから、室内試験よりも影響が小さいと考えられる。

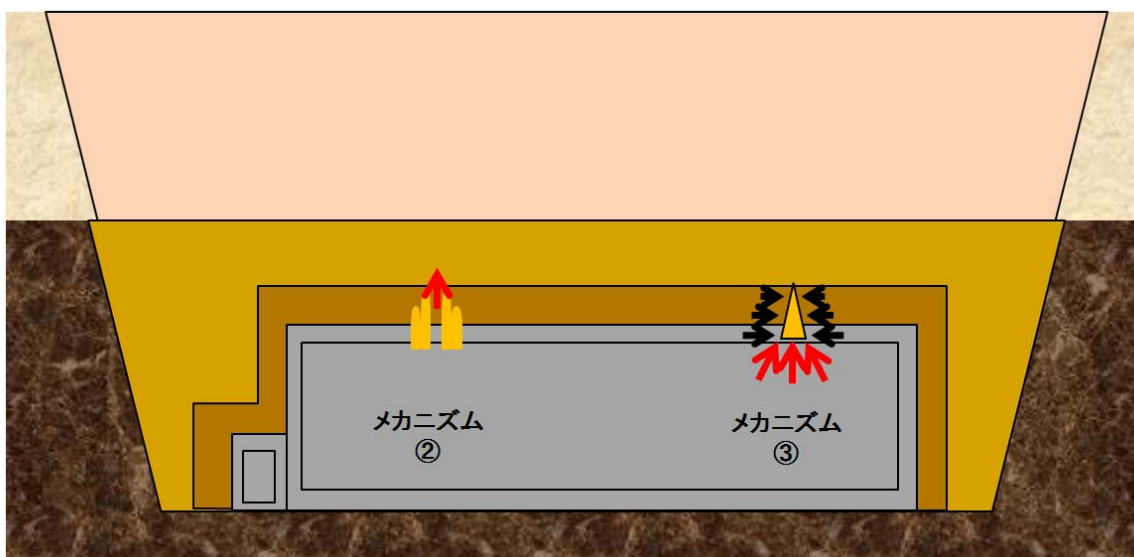
なお、下部覆土については、難透水性覆土の外側にあり、施工時点において確保する透水係数が難透水性覆土よりも 2 オーダー程度大きいため、難透水性覆土に比べて容易に水・ガスが移行すると考えられる。このため、下部覆土の低透水性に対するガス破過の影響は、難透水性覆土に対するその影響に包含されるものとする。

(4) まとめ

前項までで整理したように、想定されるガス移行メカニズムは、第2図に記載した3つのメカニズム(①溶存・拡散、②気液2相流、③ハイドロリックフラクチャリング)及びそれらの共存状態が考えられる。

第9図に示すように、廃棄物埋設地では上記のメカニズムが共存すると考えられるが、②の移行が生じる場合は、有効土被り圧よりも小さい圧力でガスの移行が生じ、③の移行が生じる場合でも、有効土被り圧と同等の圧力でガスの移行が生じる。また、②又は③の移行メカニズムでガス移行が生じているベントナイト混合土のガス破過後の透水試験において、ベントナイトの配合率や拘束条件によらず、ガス破過前後の透水係数に大きな変化は見られなかった。加えて、廃棄物埋設地においては、室内試験に比べて大破過時に通過するガス量が少なく、昇圧速度が遅い。よって、廃棄物埋設地においてガス破過によって透水係数の変化は生じないと考えられる。

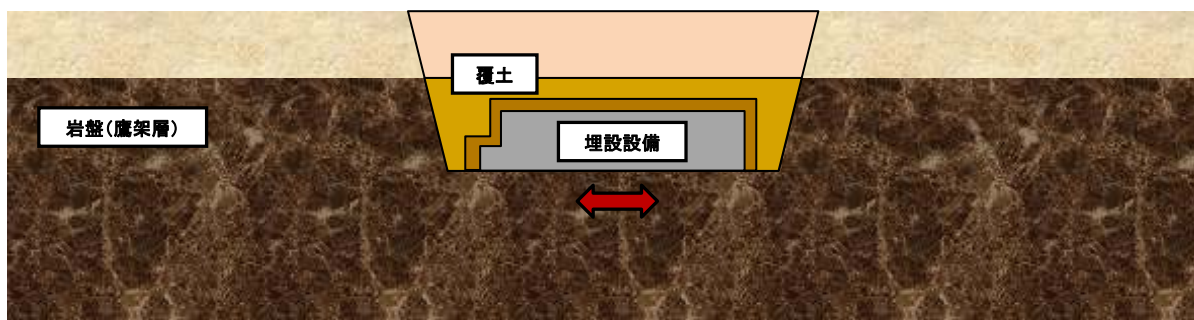
以上のことから、ガス発生による覆土の低透水性への影響は生じないと判断する。



第9図 廃棄物埋設地におけるガス移行挙動の概念図

2. 地震の影響

地震力の作用により、覆土(難透水性覆土及び下部覆土)に変形が生じ、低透水性に影響が生じるおそれがある。地震動による埋設設備への影響図を第 10 図に示す。



第 10 図 地震動による埋設設備への影響図

埋設設備は岩盤に直接支持されており、内部空洞のない充填されたコンクリート構造物であることから、地震動による構造物の変形は限定的であり、周辺覆土へ与える変形量は小さい。また、覆土自体においても、水平地盤であり、周囲を岩盤に囲まれていることから、地震における変形量は小さい。

以上から、廃棄物埋設地が地震を受けた際に難透水性覆土が受ける影響について、変位量は小さいと考えられる。地震の影響による覆土の変形量は金属腐食による埋設設備の変形量(補足説明資料 4「廃棄物埋設地の状態設定-状態変化の評価(力学的影響)-」を参照。)と比較して非常に小さく、金属腐食の評価に包含されるため、低透水性への影響を無視できる。

3. 液状化(覆土)の影響

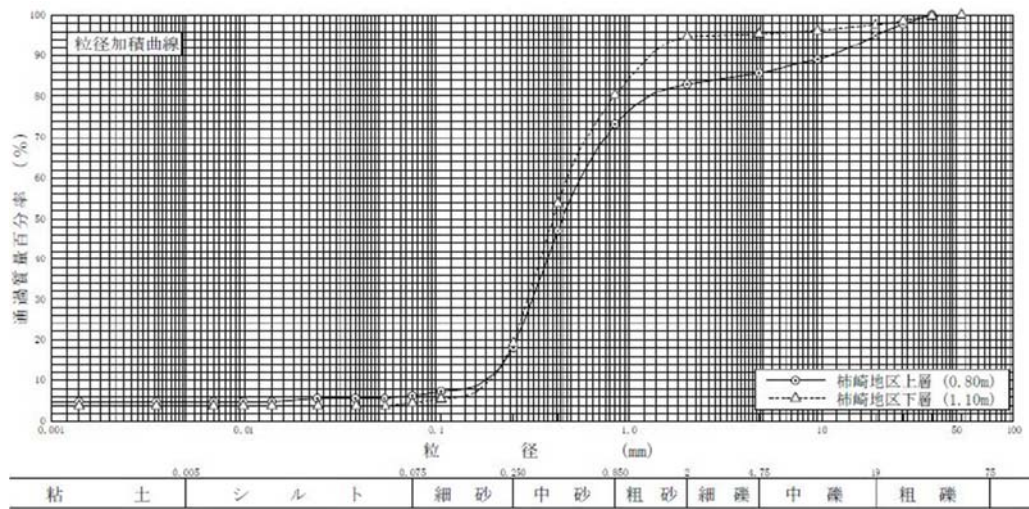
過去の液状化対策事例として、平成 19 年新潟県中越沖地震において、管理値(締固め度 90%以上)を設定し、埋戻し土(砂及び砂質土)の締固めによる対策を実施した箇所では、震度 6 弱が発生しているものの、液状化は生じていないと報告されている⁽¹⁴⁾。

廃棄物埋設地においても、覆土施工における管理値を同等以上に設定する。覆土は、現地発生土、購入砂、ベントナイト及び礫を仕様に応じて混合した混合土である。よって覆土は、一般に液状化しやすいと知られている「砂分を多く含む、粒度分布が偏った土砂」ではない。上記の液状化対策事例において液状化をしていない箇所で使用されている砂及び砂質土⁽¹⁴⁾(第 11 図に粒径加積曲線を示す)と比較して、覆土は、液状化抵抗性に関連する締固め性能が良いとされている「粒径分布に広がりを持った材料」であるため、相対的に液状化し難い材料であると判断される。

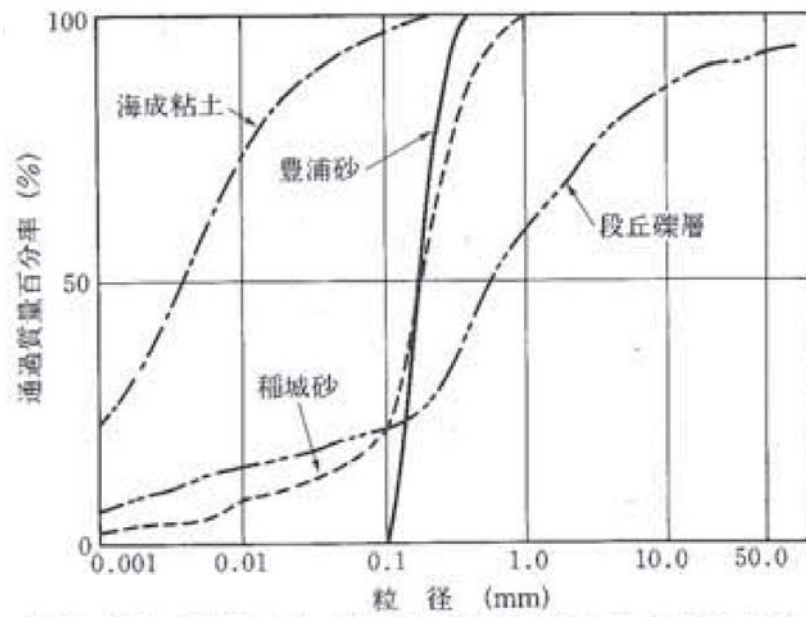
廃棄物埋設地で発生すると考えられる地震は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)、補足説明資料 1 地質環境に係る長期変動事象 3. (1) (ii) a. 地震」より震度 5 強を超えないため、過去事例における締固めによる対策を実施した箇所で発生した地震より小さい。

以上のことから、覆土は容易に液状化し難く、低透水性への影響は生じないと考えられる。

なお、参考として、第 12 図に覆土材料として想定している購入砂、ベントナイト及び礫と同等な材料として、豊浦砂、海成粘土及び段丘礫層の粒形加積曲線の例⁽¹⁵⁾を示す。文献⁽¹⁵⁾に例示されるような購入砂と異なる粒径分布を持つ材料を混合し覆土を製造することから、購入砂単体と比較し、覆土は粒度分布に広がりを持つ液状化し難い材料であると考えられる。



第 11 図 液状化対策事例における
埋戻し土(砂、砂質土)の粒径加積曲線⁽¹⁴⁾



第 12 図 代表的な土の粒形加積曲線の例⁽¹⁵⁾

4. コロイド影響

各部材の間隙水中にコロイドが存在する場合には、コロイドに放射性物質が収着し、放射性物質の移行が促進される(収着性が阻害される)ことが考えられる。

収着性に影響を与える可能性のあるコロイド影響については、埋設設備の間隙水はセメント平衡水でありコロイドが安定に分散できる環境ではなく、収着性に影響は生じないと考えられる。

5. 微生物影響

廃棄物埋設地近傍に存在する微生物の活動によって、岩盤(鷹架層)中では有機物が無機化し、収着性が低下することが考えられる。そのため、収着性の評価に際して微生物影響のうち有機物の無機化を影響事象として考慮する。

なお、有機物が分解してガスが発生すること及び金属の腐食反応が促進されることが考えられる。しかし、微生物は高 pH 環境となる埋設設備内や難透水性覆土中においてその活性は低く⁽¹⁶⁾、このような活動で生じる化学環境の変化はその他の影響事象に含まれると考えられる。

6. 降下火砕物(化学)の影響

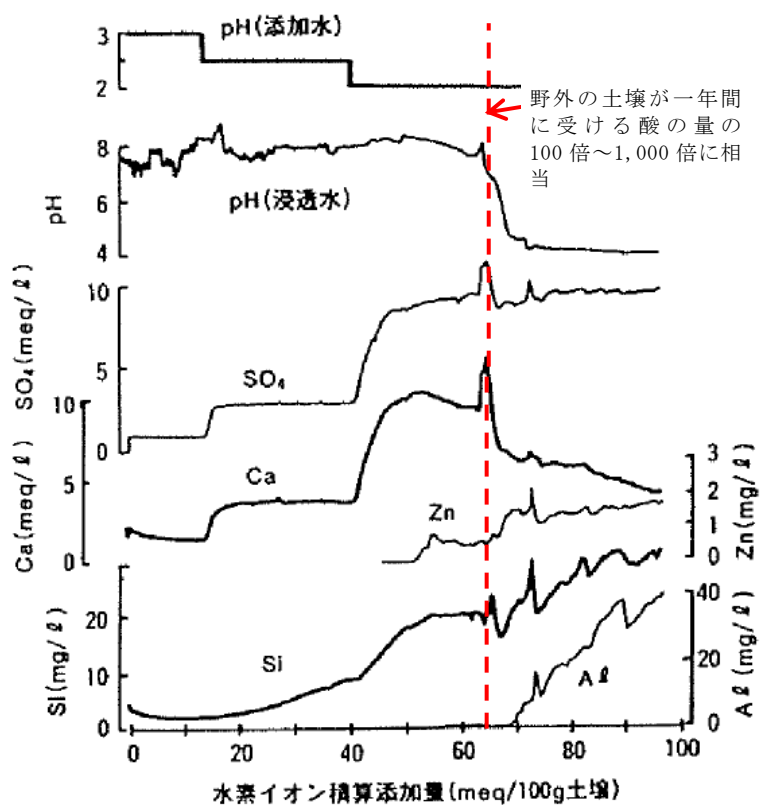
降下火砕物が堆積すると、これらに含まれる成分によって地下水の水質変化、低透水性及び収着性に影響が生じるおそれがある。

pH の変化などの化学的变化に対し、土壌は影響を和らげる緩衝作用⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾を持っている。例として、水素イオンが土壌中の粘土や有機物に吸着している陽イオンと置き換えられる陽イオン交換反応、アルミニウム水酸化物の溶解などがある。pH2~3 の希硫酸を火山灰土壌カラムに浸透させた際の水質変化から⁽¹⁹⁾、継続的な酸の流入に対しても、数百年単位で土壌の pH が保たれる。降下火砕物から溶出した成分による pH は、この条件と同等かそれよりも高く、また、一時的なものであるため影響は小さい。

上部覆土は十分な厚さを有するため、上部覆土の緩衝作用により、各バリアの変質などの化学的影響は十分低減され、透水係数及び収着性への影響は無視できる。また、上部覆土の化学的な影響を受ける範囲は限定的であり、十分な厚さを有することから収着性への影響は無視できる。土壌の緩衝作用を第 3 表に、希硫酸添加に伴う土壌カラム浸透水の水質変化を第 13 図に示す。

第3表 土壌の緩衝作用

陽イオン交換反応	土壌中の粘土や有機物は通常マイナスに帯電しており、 Ca^{2+} などの陽イオンを吸着している。 H^+ は土壌の負荷電と親和性が高いため、吸着イオンは置き換えられ、 CaSO_4 などとして溶出する。
アルミニウム水酸化物の溶解	H^+ 及び OH^- が過剰となる時、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 及び $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ の加水分解反応の平衡が崩れて pH の変化を抑制する。
変異荷電の発生・消滅	土壌の水酸基 ($-\text{OH}$) やカルボキシル基 ($-\text{COOH}$) は H^+ を吸着して正電荷を生じ pH の低下を抑制する。また OH^- と官能基末端の H^+ が結合して H_2O を形成し、pH の上昇を抑制する。
炭酸カルシウムの溶解	炭酸-重炭酸平衡反応により、 H^+ が消費される。



第13図 希硫酸添加に伴う土壌カラム浸透水の水質変化⁽¹⁹⁾

7. 参考文献

- (1) 藤原和俊、谷純一、田中幸久(平成 28 年)：処分環境条件を考慮したアルミニウムの腐食挙動の検討(その 1)－腐食挙動に及ぼす乾燥保管の影響－、電力中央研究所研究報告、Q15010
- (2) 廣永道彦、馬原保典(平成 10 年)：セメント中でのアルミニウムおよび鉄の腐食による水素ガス発生挙動、電力中央研究所研究報告、U97109
- (3) 三菱マテリアル株式会社・日揮株式会社・大成建設株式会社・清水建設株式会社、鹿島建設株式会社(平成 9 年)：六ヶ所 2 号廃棄物埋設施設に関するガスの透気評価
- (4) 三原守弘、西村務、和田隆太郎、本田明(2002)：低酸素かつアルカリ条件における炭素鋼、ステンレス鋼及びジルカロイからのガス発生率及び腐食速度の評価、サイクル機構技報、No. 15
- (5) 金子昌章、三浦律彦、藤原愛、山本正史(平成 16 年)：還元性環境での金属腐食に起因するガス発生量評価、原環センター技術報告書、RWMC-TRJ-03001
- (6) 伊藤伍郎(1981)：アルミニウムの腐食、軽金属、Vol. 31, No. 10
- (7) 藤山哲雄ら(平成 20 年)：ベントナイト・セメント系材料のガス移行評価に関する文献調査、電力中央研究所 調査報告、N07021
- (8) Graham, J., Halayko, K. G., Hume, H., Kirkham, T., Malcom, G. and Oscarson, D.: A capillarity-advective model for gas break-through in clays, Engineering Geology 64, pp.273-286, 2002.
- (9) Hoch, A.R., Cliffe, K.A., Swift, B.T. and Rodwell, W.R. : Modeling gas migration in compacted bentonite, GAMBIT Club Phase 3 Final Report, Posiva Report
- (10) 田中幸久、廣永道彦(平成 26 年)：飽和した Ca 型ベントナイト混合土のガス移行特性評価、電力中央研究所報告、N13011
- (11) 大石英希、熊谷守、森敦史、田中幸久、廣永道彦、山本修一(2012)：Ca 型ベントナイト混合土のガス移行特性に関する検討 (1)室内ガス移行試験とガス移行前後の透水性、日本原子力学会 2012 年春の年会
- (12) 穂刈利之、沖原光信、石井卓、小島圭二(1996)：ベントナイト混合土の自己修復性に関する考察、放射性廃棄物研究、Vol. 3、No. 1、pp. 15-23
- (13) 株式会社大林組・株式会社セレス(平成25年)：3号埋設施設の基本設計(その2)のう

ち安全評価に係るガス影響の検討

- (14) 下水道地震対策技術検討委員会(平成 20 年)：下水道地震対策技術検討委員会報告書 能登半島地震・新潟県中越沖地震の総括と耐震対策の評価および下水道の担うべき機能を継続的に確保する方法の考え方
- (15) (社法)地盤工学会(2009)：地盤材料試験の方法と解説
- (16) 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(2005)：TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－根拠資料集 分冊 3 FEP
- (17) 松中照夫(2003)：土壌学の基礎、農文協、pp. 142-146
- (18) 石塚和裕(1992)：酸性降下物に対する土壌緩衝能の実態と評価、森林立地 34(1)、pp. 26-35
- (19) 久保井徹(1989)：地下水が酸性になる前に－土壌の緩衝能とその限界－、国立環境研究所ニュース 8 巻 3 号、pp. 6-7

参考資料 1

参 考 資 料

IAEA ISAM 及び廃棄物安全小委員会報告書の人工バリアに関する FEP リスト

特性	IAEA ISAM の FEP リスト	廃棄物安全小委員会報告書の FEP*1	
	廃棄体及び人工バリア (浅地中処分)	人工バリアの構成材料(高レベル放射性廃棄物処分)	
		緩衝材/埋め戻し材	プラグ・グラウト ・支保工
温度	2.1.11 熱的プロセスと状態	B1.1 熱特性 B1.2 温度	D1.1 熱特性 D1.2 温度
水理	2.1.05 人工バリアシステムの 特性と変質過程 2.1.08 水理学/水文地質学的 プロセスと状態 2.1.12 ガス発生源と影響	B2.1 水理特性 B2.2 地下水流動 B2.3 飽和	D2.1 水理特性 D2.2 地下水流動 D2.3 飽和
力学	2.1.02 廃棄体の材料、特性、変 質過程 2.1.03 容器の材料、特性、変質 過程 2.1.04 緩衝材/埋め戻し材の 材料、特性、変質過程 2.1.05 人工バリアシステムの 特性と変質過程 2.1.06 他の人工バリアの材料、 特性、変質過程 2.1.07 力学的プロセスと状態 2.1.12 ガス発生源と影響	B3.1 力学特性 B3.2 応力 B3.3 膨潤 B3.4 変形 B3.5 流出	D3.1 力学特性 D3.2 応力 D3.3 膨潤 D3.4 変形 D3.5 流出
化学	2.1.02 廃棄体の材料、特性、変 質過程 2.1.03 容器の材料、特性、変質 過程 2.1.04 緩衝材/埋め戻し材の 材料、特性、変質過程 2.1.05 人工バリアシステムの 特性と変質過程 2.1.06 他の人工バリアの材料、 特性、変質過程 2.1.09 化学/地球化学的プロ セスと状態 2.1.10 生物学/生化学的プロ セスと状態 2.1.12 ガス発生源と影響	B4.1 化学特性 B4.2 地下水化学 B4.3 地下水との反応 B4.4 化学的変質 B4.5 微生物影響 B4.6 有機物影響 B4.7 コロイドの形成 B4.8 ガスの発生/影響 B4.9 塩の蓄積	D4.1 化学特性 D4.2 地下水化学 D4.3 地下水との反応 D4.4 化学的変質 D4.5 微生物影響 D4.6 有機物影響 D4.7 コロイドの形成 D4.8 ガスの発生/影響 D4.9 塩の蓄積

*1: ガラス固化体及びオーバーパックに関する記載を除外した。

特性	IAEA ISAM の FEP リスト	廃棄物安全小委員会報告書の FEP*1	
	廃棄体及び人工バリア (浅地中処分)	人工バリアの構成材料(高レベル放射性廃棄物処分)	
		緩衝材／埋め戻し材	プラグ・グラウト ・支保工
放射線	2.1.13 放射線影響 2.1.14 臨界	B5.1 核種の放射性崩壊 B5.2 地下水の放射線分解	B5.1 核種の放射性崩壊 B5.2 地下水の放射線分解
核種移行	2.1.01 インベントリ、核種と他の材料 3.2.01 汚染物質の溶解、沈殿、結晶化 3.2.02 汚染物質の化学種、溶解度 3.2.03 汚染物質の収着・脱着プロセス 3.2.04 コロイドと汚染物質の相互作用と移行 3.2.05 錯体生成による汚染物質の化学種／移行への影響 3.2.06 汚染物質の微生物／生物／植物を介したプロセス 3.2.07 水を媒介とした汚染物質の移行 3.2.08 固体を媒介とした汚染物質の移行 3.2.09 ガスを媒介とした汚染物質の移行	B6.1 物質移動特性 B6.2 幾何形状・間隙構造 B6.3 核種移行 B6.3.1 移流／分散 B6.3.2 拡散 B6.3.3 収着 B6.3.4 沈殿溶解 B6.3.5 コロイド移行 B6.3.6 ガスによる移行 B6.4 物質移動	D6.1 物質移動特性 D6.2 幾何形状・間隙構造 D6.3 核種移行 D6.3.1 移流／分散 D6.3.2 拡散 D6.3.3 収着 D6.3.4 沈殿溶解 D6.3.5 コロイド移行 D6.3.6 ガスによる移行 D6.4 物質移動
他	2.1.15 外来物質	—	—

*1: ガラス固化体及びオーバーパックに関する記載を除外した。

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

-状態変化の評価(力学的影響)-

2020年12月

日本原燃株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 現象の整理と検討手順.....	1
(1) 膨張現象.....	1
(2) 陥没現象.....	1
(3) 検討手順.....	2
3. 状態変化の評価に用いる初期条件.....	3
(1) 廃棄物(充填固化体).....	3
(2) 廃棄体容器.....	7
(3) 埋設設備中の鉄筋.....	8
(4) 廃棄物(均質・均一固化体).....	8
(5) 埋設設備.....	9
4. 状態変化(膨張)に必要となる条件設定.....	10
(1) 金属の膨張量の設定に係る諸条件の設定.....	10
(2) 金属腐食による金属の膨張量の設定.....	34
(3) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定に係る諸条件の設定.....	38
(4) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定.....	54
(5) 金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定.....	56
5. 1,000年後の状態変化(膨張)の影響評価.....	57
(1) 力学的影響評価の考え方.....	57
(2) 力学的影響評価手法.....	60
(3) 覆土の主な仕様.....	61
(4) 解析に用いる諸条件の設定.....	62
(5) 解析結果.....	75
(6) 1,000年後の力学的影響評価.....	79
6. 状態変化(陥没)に必要となる条件設定.....	80
(1) 可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没量の設定に係る諸条件の設定.....	80
(2) 可溶性塩の溶出量の設定.....	80
(3) 埋設設備の陥没量の設定.....	81
7. 1,000年後の状態変化(陥没)の影響評価.....	84
(1) 力学的影響評価の考え方.....	84
(2) 力学的影響評価手法.....	85
(3) 覆土の主な仕様.....	85
(4) 解析に用いる諸条件の設定.....	86
(5) 解析結果.....	95
(6) 1,000年後の力学的影響評価.....	99
8. 1,000年後の状態変化の評価(力学的影響)のまとめ.....	100
9. 参考文献.....	101

- 参考資料 1 設定値を超える金属廃棄物が埋設された場合の評価について
- 参考資料 2 金属腐食による腐食生成物並びに可溶性塩による二次鉱物に対し真密度を用いた力学的影響の評価を行う妥当性について
- 参考資料 3 埋設設備中の環境条件の設定に対する腐食生成物の設定の考え方と妥当性について
- 参考資料 4 力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた場合の等価透水係数の試算について

1. はじめに

本資料は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)」のうち、廃棄物埋設地の状態設定(力学的影響の評価)を補足説明するものである。補足説明に当たっては、廃棄物埋設地ごとの状態変化の評価(力学的影響)としてそれぞれに生じる現象を予測し情報を整理した上で、覆土の低透水性への力学的影響の評価を実施する。

2. 現象の整理と検討手順

廃棄物埋設地の状態設定のうち、状態変化の評価(力学的影響)に係る現象を整理する。

現象の整理に当たっては、覆土の設計要件である低透水性(透水係数及び厚さ)に影響を与える現象を対象に行う。覆土の透水係数及び厚さへの力学的影響は、覆土自身の変形やそれに伴う密度変化により生じる。覆土の変形は、隣接する埋設設備の変形に支配されることから、埋設設備に生じる現象を対象とする。

埋設設備に生じる現象は、埋設設備の膨張変形及び陥没変形を想定する。そのため、埋設設備の膨張及び陥没に分類して現象の整理を行う。

(1) 膨張現象

埋設設備及び充填固化体には、金属が含まれており、金属周辺の環境条件に依存した電気化学的腐食により金属が腐食し腐食生成物が生成されることで、金属の膨張が生じると想定する。

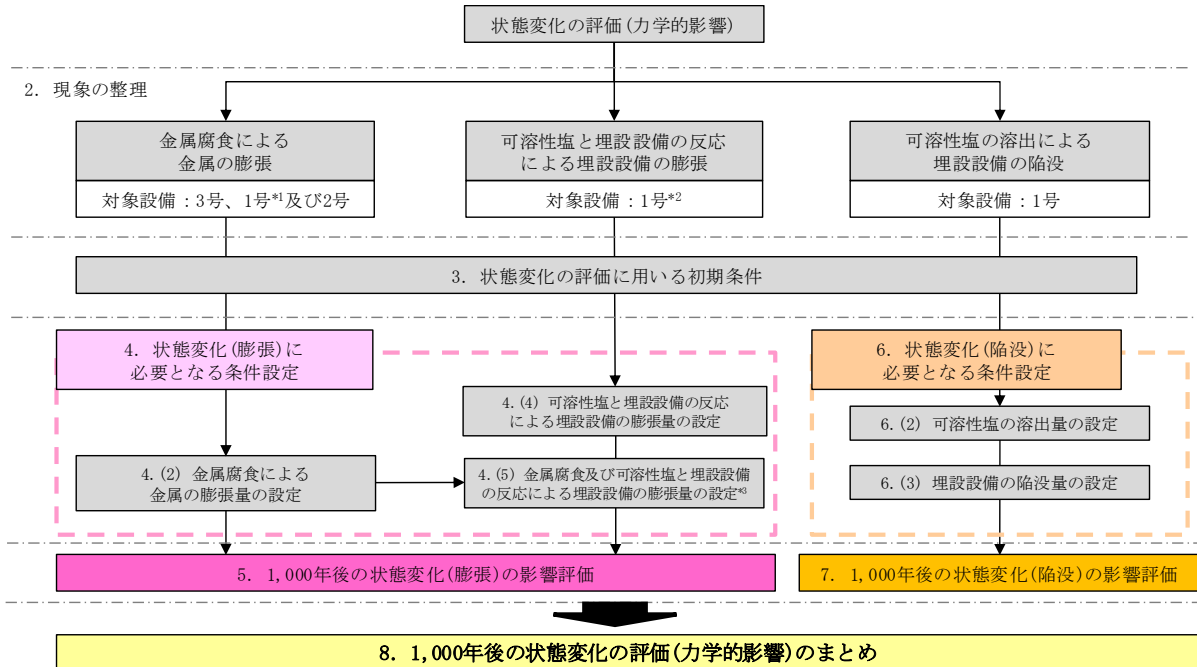
また、均質・均一固化体には、可溶性塩が含まれており、可溶性塩と埋設設備中のセメント系材料の反応に伴い膨張性鉱物が生成するため、埋設設備が膨張することを想定する。

(2) 陥没現象

均質・均一固化体には、可溶性塩が含まれており、埋設設備に浸入した地下水との反応により溶出し、空隙が生じること及び廃棄体に上部空隙が存在することから、埋設設備に空洞が発生し、陥没現象⁽¹⁾が生じると想定する。

(3) 検討手順

状態変化の評価(力学的影響)は、廃棄物埋設地ごとで生じる現象が複数存在するため、前項における現象の整理結果を踏まえて、覆土への力学的影響の評価に係る検討手順を体系的に整理する。状態変化の評価(力学的影響)の検討手順を第1図に示す。



*1 : 1号7群の埋設設備4基及び8群の埋設設備5基が対象となる。

*2 : 1号1群から6群までの埋設設備30基及び7群の埋設設備1基が対象となる。

*3 : 金属の膨張量を加味し評価する。

第1図 状態変化の評価(力学的影響)の検討手順

3. 状態変化の評価に用いる初期条件

状態変化の評価(力学的影響)は、埋設される廃棄体及び埋設設備の構成部材に起因した物理的・化学的相互作用を踏まえて、覆土の低透水性への力学的影響評価を行う必要がある。そのため、埋設される廃棄体及び埋設設備の構成部材に係る初期条件を整理する。

(1) 廃棄物(充填固化体)

「充填固化体の標準的な製作方法」⁽²⁾では、固体状廃棄物は以下のように分類されている。

- ・ 高圧圧縮処理及び溶融処理を行わない場合
- ・ 高圧圧縮処理を行う場合
- ・ 溶融処理を行う場合(高周波誘導溶融方式、プラズマ溶融方式)

上記分類に関し、固化体ごとの特徴は以下のとおりである。

(i) 高圧圧縮処理及び溶融処理を行わない場合

固体状廃棄物の仕分け分類を第1表に、固体状廃棄物の分別(例)を第2表に示す。

第1表 固体状廃棄物の仕分け分類⁽²⁾

分類	仕分けする固体状廃棄物の性状	
強度分類	A	固体状廃棄物の強度が高いもの
	B	固体状廃棄物の強度が低いもの
形状分類	1	固型化材料等が内部に充填しやすい形状のもの
	2 ^{*1}	固型化材料等が内部に充填し難い形状のもの

*1: 切断又は圧縮処理を行うことにより、固体状廃棄物の充填効率の向上等のための減容を目的に「形状分類2」とするものもある。

第2表 固体状廃棄物の分別(例)⁽²⁾

仕分けする固体状廃棄物の種類				強度分類	形状分類	備考
金属類	・金属	金属片・板類	金属板、鋼材、金属棒等	A	1	
		金属配管類	金属配管等	A	1	
		塊状金属類	弁等	A	1	
		小物金属類等	ボルト・ナット類等	A	1	
		番線類	番線、針金等	A	1	
	缶類	一斗缶、ペール缶、スプレー缶等	A	2		
	・コンクリート類 ・ガラス類	コンクリート類	コンクリート片、石膏ボード、土砂等	A	1	
	ガラス類	ガラス瓶等	A	2	*2	
プラスチック類	・塩化ビニル類	管類	塩化ビニル配管等	A	1	
			塩化ビニルホース等	A	2	*1
	・プラスチック類	線類	ケーブル、コード等	A	1	
			片類	プラスチック片等	A	1
	・ゴム類	箱状類	ゴム片(ガスケット、ゴム板)等	B	1	
			塩化ビニル片等	B	2	
			プラスチック容器等	A	2	
シート類	防災シート、ビニルシート等、ゴムシート等	B	2			
保温材・フィルタ類	・保温材類 ・フィルタ類	保温材類	ガラスクロス、ケイ酸カルシウム、ロックウール、グラスウール等	B	2	*3
		フィルタ類	バグフィルタ、ロールフィルタ、プレフィルタ等	B	2	*3
その他	・多量の粉粒物			A	2	*4
	・所内ボイラの耐火煉瓦 ・焼却炉・溶融炉の耐火煉瓦及びセラミックフィルタ			A	1	*5

*1： 処理対象は、内径1cm以上、長さ50cm以上のもの

ただし、発生量が少ないと想定される内径1cm未満のものは「形状分類1」とする。

*2： ただし、片・板状のガラス類は「形状分類1」とする。

*3： 減容の観点から圧縮処理対象とするために「形状分類2」とした。

*4： 固型化材料等と一体化が困難となる多量の粉粒物について、小型混練固化の対象とする場合は、仕分けする。

*5： 「強度分類A」であるが、参考文献⁽²⁾Appendix-B(廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質について)に示す理由から、内籠収納又は内張り容器収納とするため仕分けする。

(ii) 高圧圧縮処理を行う場合

固体状廃棄物の仕分け分類を第3表に、固体状廃棄物の種類を第4表に示す。

第3表 固体状廃棄物の仕分け分類⁽²⁾

仕分けする固体廃棄物の種類	備考
金属類	—
非金属類	塩化ビニル類、プラスチック類、ゴム類、保温材類、フィルタ類
その他	・所内ボイラの耐火煉瓦 ^{*1} ・焼却炉・溶融炉の耐火煉瓦及びセラミックフィルタ ^{*1}

*1：参考文献⁽²⁾Appendix-B(廃棄体の健全性を損なうおそれのある物質について)に示す理由から、内籠収納又は内張り容器収納とするため仕分けする。

第4表 固体状廃棄物の種類⁽²⁾

仕分けする固体状廃棄物の種類				
金属類	金属類	・金属	金属片・板類	金属板、鋼材、金属棒等
			金属配管類	金属配管等
			塊状金属類	弁等
			小物金属類等	ボルト・ナット類等
			番線類	番線、針金等
			缶類	一斗缶、ペール缶、スプレー缶等
非金属類	プラスチック類	・塩化ビニル類	管類	塩化ビニル配管等 塩化ビニルホース等
			線類	ケーブル、コード等
			片類	プラスチック片等
				ゴム片(ガスケット、ゴム板)等
				塩化ビニル片等
			箱状類	プラスチック容器等
	シート類	防災シート、ビニルシート等、ゴムシート等		
	保温材・フィルタ類	・保温材類 ・フィルタ類	保温材類	ガラスクロス、ケイ酸カルシウム、ロックウール、グラスウール等
			フィルタ類	バグフィルタ、ロールフィルタ、プレフィルタ等

(iii) 溶融処理を行う場合(高周波誘導溶融方式、プラズマ溶融方式)

固体状廃棄物の仕分け分類(高周波誘導溶融方式、プラズマ溶融方式)を第5表及び第6表に示す。

高周波誘導溶融方式では、塊状アルミニウムを40wt%以下として鉄系金属廃棄物と混合溶融しており、塊状アルミニウム40wt%以下とすることで、鉄と同様のガス発生挙動となると考えられている⁽²⁾。

また、プラズマ溶融方式では、塊状アルミニウムと無機廃棄物を混合しているが、酸化アルミニウムと無機廃棄物とで均質な溶融体が形成される範囲としていることから、酸化アルミニウムとして安定した状態にあると考えられる⁽²⁾。

第5表 固体状廃棄物の仕分け分類(高周波誘導溶融方式)⁽²⁾

仕分けする固体廃棄物の種類	備考
塊状アルミニウム	混合処理するために仕分けする。
難溶融物 (土砂、セラミックフィルタ)	必要に応じて、投入量管理、溶融助剤の添加を行うため、仕分けする。
上記以外の固体状廃棄物	—

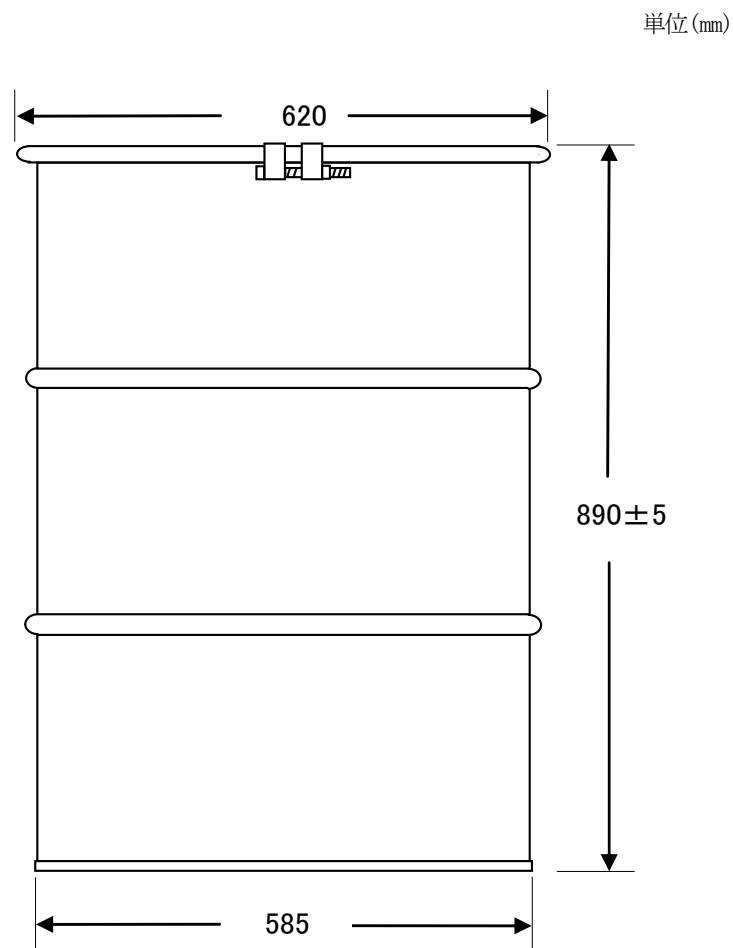
第6表 固体状廃棄物の仕分け分類(プラズマ溶融方式)⁽²⁾

仕分けする固体廃棄物の種類	備考
塊状アルミニウム	混合処理するために仕分けする。
難溶融物 (土砂、セラミックフィルタ)	必要に応じて、投入量管理を行うため、仕分けする。
上記以外の固体状廃棄物	—

(2) 廃棄体容器

廃棄物埋設地に使用される廃棄体容器(ドラム缶)の仕様は、鋼製オープンドラム：JIS Z 1600 H級(厚さ 1.6mm)又はこれと同等以上の強度及び密封性を有するものである。

また、ドラム缶のタイプは、固体危険物及び固体非危険物並びに液体危険物及び液体非危険物の輸送及び貯蔵容器として主に用いられているDタイプである⁽³⁾。ドラム缶の概念図を第2図に示す。



第2図 ドラム缶の概念図⁽³⁾

(3) 埋設設備中の鉄筋

鉄筋の仕様は、鉄筋コンクリート用棒鋼：JIS G 3112 SD345 異形鉄筋である⁽⁴⁾。

(4) 廃棄物(均質・均一固化体)

均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法⁽⁵⁾より均質・均一固化体の廃棄体の特徴を第7表に示す。

また、均質・均一固化体では、濃縮廃液等に由来する可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)が含まれていることから、これまでの埋設実績を第8表に示す。

第7表 均質・均一固化体の廃棄体の特徴⁽⁵⁾

固化材	種類	セメント	アスファルト	プラスチック
	適合材料	<ul style="list-style-type: none"> ・ JIS R 5201 (1992) に定めるポルトランド(5種) ・ JIS R 5211 (1992) に定める高炉(A, B, C種) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ JIS K 2207 (1990) に定める石油アスファルトで針入度が100以下のストレート、ブローン及び防水工事用アスファルト 	<ul style="list-style-type: none"> 不飽和ポリエステル樹脂 ・ エスター-SNO-100G ・ ポリマール 301NA ・ ポリマール 301NB ・ ポリマール 303SB
容器		JIS Z 1600 (1993) に定める1種H級ドラム缶(俵積み時に5tの荷重に耐える)		
固型化	配合	—	固化材/固化体 $\geq 50\%$	固化材/固化体 $\geq 30\%$
	物性	一軸圧縮強度 1,470kPa 以上	—	デュロメータ硬さ 25 以上
	練混ぜ	一様に混練		
	有害な空隙	少なくとも「上部空隙が30%を超えない」ものは有害ではない		
健全性を損なうおそれのある物質	<ul style="list-style-type: none"> 1. 爆発性の物質，接水時に爆発的に反応する物質 →危険物第五類，第三類で該当するもの 2. 揮発性の物質 →危険物第四類で該当するもの 3. 自然発火性の物質 →危険物第二類，第三類で該当するもの 4. 廃棄体を著しく腐食させる物質 →危険物第一類，第三類，第六類で該当するもの 5. 多量にガスを発生させる物質 →危険物第二類，第三類で該当するもの 			
耐埋設荷重	容器と同じ(埋設時の圧壊を防止する)			
その他の確認項目	著しい破損、放射能濃度、表面密度限度、表面線量等量率、放射性廃棄物を示す標識の表示、整理番号の表示及び固型化後の経過期間			

第8表 均質・均一固化体に含まれる可溶性塩の量

	平均重量(kg/本) ^{*1}	備考
硫酸塩	約 21	硫酸塩は、主に BWR 廃棄体に含まれている (BWR 廃棄体 1 本当たり、約 15kg～約 120kg 含まれている)。
ほう素 (ほう酸塩)	約 3.0	ほう素(ほう酸塩)は、主に PWR 廃棄体に含まれている (PWR 廃棄体 1 本当たり、約 3.0kg～約 18kg 含まれている)。

*1：これまでの埋設実績から、炉型別の区別をせずに廃棄体 1 本あたりに含まれる平均重量を算定。

(5) 埋設設備

1 号埋設設備では、可溶性塩と埋設設備の反応による膨張を評価する必要があるため、埋設設備に用いられているセメント系材料を整理する。

1 号埋設設備は、外周仕切設備、内部仕切設備、セメント系充填材及び覆いから構成されているコンクリート構造物であるため、それぞれに使用されたセメント系材料の仕様を第9表に示す。

第9表 1号埋設設備のセメント系材料仕様

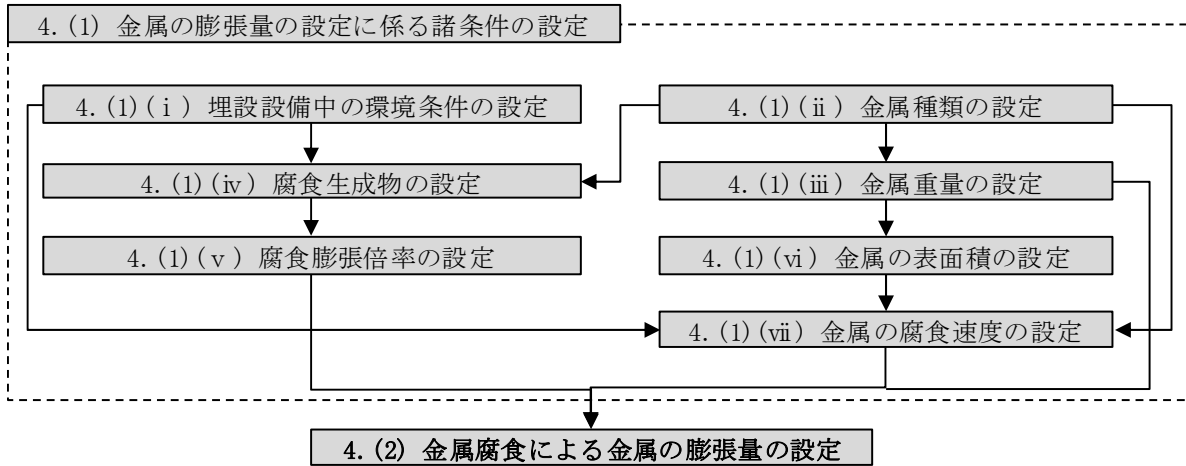
使用設備		セメント種類 (セメントと混和材の混合比)
充填モルタル		中庸熟ポルトランドセメント +高炉スラグ(1:9)
	1群から6群	
コンク リート	外周仕切	普通ポルトランドセメント +高炉スラグ(45:55)
	内部仕切	
	覆い	

4. 状態変化(膨張)に必要な条件設定

(1) 金属の膨張量の設定に係る諸条件の設定

金属の膨張量の設定は、埋設設備中の対象となる金属種類(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)に対し、環境条件として酸化還元環境のうち酸化還元電位(以下「ORP」という。)及びpHによる腐食生成物及び腐食生成物の生成による体積の膨張倍率を用いて行う。

金属の膨張量の設定手順を以下の第3図に示す。



第3図 金属腐食による金属の膨張量の設定手順

(i) 埋設設備中の環境条件の設定

金属は、周辺の環境(水や酸素)との相互作用(電気化学的腐食)を生じることが知られている。金属の電気化学的腐食に関連する環境条件としては、主に周辺環境の水質(ORP、pH 及び水温)並びに酸素(地下水中に含まれる溶存酸素)である。

そのため、埋設設備中の環境条件の設定は、状態変化の評価期間において埋設設備中の環境条件が変化することから、以下の想定される状態を考慮する。

【確からしい設定】

(溶存酸素について)

埋設設備周辺の地下水中の溶存酸素は、埋設設備の設置深度(標高約 20m～約 36m)近傍の深さを対象とした水文観測調査の結果より、検出限界以下(0.2ppm 未満)であることが確認されている。また、覆土前の埋設設備に存在する溶存酸素濃度は、状態変化の評価期間において、外周仕切設備の鉄筋の腐食(酸素消費型)により消費されることが想定される。

(ORP について)

埋設設備周辺の ORP は、埋設設備の設置深度(標高約 20m～約 36m)近傍の深さを対象とした水文観測調査の結果より、-100mV 以下であることが確認されているため、嫌気的条件であることが想定される。

(pH について)

埋設設備中の pH は、埋設設備中の間隙水に、セメントの主成分である水酸化カルシウム、微量成分のナトリウム並びにカリウムが溶解することから、高いアルカリ性を示すことが想定される。

(水温について)

廃棄物埋設地周辺の水温は、埋設設備の設置深度(標高約 20m～約 36m)近傍の深さを対象とした水文観測調査の結果より、10℃～15℃程度であることからこれを参考に設定する。

なお、確からしい評価期間(1,000 年後)においては、気候変動に大きな変化が生じないことから、確からしい設定/厳しい設定で共通の設定とする。

【厳しい設定】

確からしい設定にて想定される埋設設備中の環境条件に対し、以下の変動要因を考慮して設定する。

(溶存酸素について)

- ・ 廃棄物埋設地周辺の地下水からの溶存酸素の供給量
- ・ 外周仕切設備に生じるひび割れ等による廃棄体容器及び金属廃棄物への溶存酸素の供給

(ORP について)

- ・ 金属類による溶存酸素の消費量

(pH について)

- ・ セメント系材料からのナトリウムやカリウムの溶解量

以上のことから、埋設設備中の環境条件の設定の考え方を踏まえ設定する。埋設設備中の環境条件の設定の考え方と設定を第 10 表に示す。

第 10 表 埋設設備中の環境条件の設定の考え方と設定

条件	設定	設定の考え方
ORP	【確からしい設定】 嫌気的条件	【確からしい設定】 埋設設備の設置深度近傍にて取得された溶存酸素濃度(0.2ppm 未満)及び ORP(-100mV 以下)を参考に設定する。
	【厳しい設定】 嫌気的条件～好気的条件	【厳しい設定】 埋設設備中の溶存酸素の移行経路によっては、廃棄体容器及び金属廃棄物に供給されることが考えられる。また、廃棄物埋設地周辺の地下水に含まれる溶存酸素の供給量の変動した場合を考慮し、嫌気的条件～好気的条件を考慮する。
pH	【確からしい設定】 セメント系材料に生じる一般的な現象を考慮し、高い pH を設定	【確からしい設定】 状態変化の評価期間において、セメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することにより高い pH の状態(pH11 以上)となることが考えられるため、これを考慮する。
	【厳しい設定】 上記に加え、セメント系材料から Na 及び K 成分が溶出した場合を考慮し、更に高い pH を設定	【厳しい設定】 セメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することに加え、Na 及び K 成分が溶出した場合、pH が更に高い状態に推移する。金属腐食では、pH が変化した場合、腐食膨張倍率の異なる腐食生成物が生成され、金属の膨張量が増加する可能性があることから、これを考慮する。
水温	【共通】 廃棄物埋設地周辺の水温を参考に設定	【共通】 埋設設備の設置深度近傍にて取得された水温(10℃～15℃程度)を参考に設定する。

(ii) 金属種類の設定

金属種類は、「3. 状態変化の評価に用いる初期条件」で整理している。充填固化体では、金属廃棄物として炭素鋼、ステンレス鋼及び鋳鉄が大部分を占め、その他に小物金属、番線、計器類、缶類及びメッキ加工された金属板などが収納されている。

一方で、金属廃棄物は、金属の種類ごとの収納量に係る情報並びにその制限(ただし、アルミニウム等の除外物質を除く)がない⁽²⁾。そのため、評価の主軸となる金属種類を設定し、その他考慮する金属種類の混合率を設定し、金属が混合された状態での影響評価を行う必要がある。

よって、ここでは、充填固化体に含まれる金属種類を整理することで、代表とする金属種類とその他考慮する金属種類を設定する。

充填固化体中の金属種類を整理した結果、充填固化体中の主要な金属は鉄であることから、代表とする金属はこれを設定する。設定した金属種類を以下の第 11 表に示す。

第 11 表 金属種類の設定の考え方と設定

評価対象物	設定		設定の考え方
	代表とする金属種類	その他考慮する金属種類	
金属廃棄物	鉄	アルミニウム ニッケル 銅 亜鉛	代表とする金属種類は、以下の「a. 固体状廃棄物の保管状況」～「c. 充填固化体の開缶調査(分別)結果」より、鉄とする。また、その他含まれている金属種類をあわせて考慮し、設定する。
廃棄体容器	鉄	亜鉛(メッキ)	廃棄体容器の金属種類は、JIS 規格 ⁽³⁾ に定められている金属種類を参考とし、設定する。
埋設設備中の鉄筋	鉄	-	鉄筋コンクリートに用いられる金属種類は、鉄として設定する ⁽⁴⁾ 。

a. 固体状廃棄物の保管状況

代表とする金属種類に関しては、平成5年度～7年度に実施した第一次、第二次開缶調査結果を参考とし、全国の原子力発電所に保管されている固体状廃棄物(ドラム缶への充填固化前)の保管量(当時)を基に算出した結果⁽⁶⁾より設定を行う。

開缶調査を実施するドラム缶の選定を行うため、原子力発電所に保管された固体状廃棄物の調査データが整理されている。全国の原子力発電所の固体状廃棄物の保管量を第12表に示す。

第12表 全国の原子力発電所の固体状廃棄物保管量(200Lドラム缶換算)⁽⁶⁾

ドラム缶分類	累積保管量(本)	構成比率(%)
金属類	138,035	47
塩ビ・ゴム類	36,492	12
保温材	36,194	12
フィルタ	30,474	10
コンクリート/ガラス類	13,050	4
その他	43,875	15
合計	298,120	100

b. 固体状廃棄物の重量構成

「a. 固体状廃棄物の保管状況」にて整理された構成比率の調査結果を基に、BWR 及び PWR より開缶調査対象とするサンプリング選定を行っている。開缶調査は、BWR が 104 本、PWR が 50 本のサンプリング本数であり、金属類のドラム缶の選定に関しては、全国の原子力発電所に保管されている重量分布に類似するように選定されている⁽⁶⁾。充填固化体の重量に関する調査をした結果を第 13 表に示す。

第 13 表より、充填固化体の力学的影響(膨張)の評価においては、構成比率が約 80%と大半を占める金属類を選定した。

第 13 表 ドラム缶分類別廃棄物総重量⁽⁶⁾

ドラム缶分類	ドラム缶数量(本)	総重量(kg)	構成比率(%)
金属類	90	12,225	79
塩ビ・ゴム類	24	1,100	7
保温材	24	863	6
廃フィルタ	10	257	2
コンクリート/ガラス類	6	867	6
合計	154	15,312	100

c. 充填固化体の開缶調査(分別)結果

第一次開缶調査により判明している廃棄物の分別結果を第 14 表に示す。

開缶調査結果⁽⁶⁾より、代表とする金属種類は、充填固化体に含まれる内容物に基づき、鉄が主要な金属種類であるとし、これを設定する。

第14表 第一次開缶調査結果の廃棄物の分別結果⁽⁶⁾

A1	廃棄物分類			具体的廃棄物品名				代表模擬 廃棄物品目	
	廃棄物 分類名	重量割合 (%)	累積重量 (%)	具体的 廃棄物名	重量割合 (%)	累積重量割合 (%)	型式重量割合 (%)		判定
A1	金属片 ・板類	40.6	40.6	金属板	34.7	34.7	14.1	◎	金属板
				鋼材	24.4	59.1	9.9	◎	アングル
				ドラム缶	15.3	74.4	6.2	◎	金属板
				足場クランプ	8.4	82.8	3.4	◎	足場クランプ
				金属片	8.0	90.8	3.2	◎	金属板
				工具類	1.6	92.4	0.7	-	-
				アンカー	1.1	93.5	0.4	-	-
				ベアリング	1.1	94.5	0.4	-	-
				金網	1.0	95.6	0.4	-	-
				配管	77.8	77.8	22.9	◎	配管
	金属配管類	29.4	70.0	フランジ	13.9	91.7	4.1	◎	配管
				電線管	3.3	95.0	1.0	-	-
				カップリング	2.0	97.0	0.6	-	-
				足場パイプ	1.6	98.7	0.5	-	-
	塊状金属類	19.8	89.8	弁	65.9	65.9	13.1	◎	弁
				スチームトラップ	18.3	84.2	3.6	◎	弁
				ストレーナ	7.3	91.5	1.4	◎	弁
				マスク用フィルタ	2.1	93.6	0.4	-	-
				ドアノブ	1.4	95.1	0.3	-	-
				スイッチボックス	1.3	96.4	0.3	-	-
コンクリート				55.6	55.6	2.2	◎	コンクリート	
コンクリート片 ・ガラス類	4.0	93.9	石膏ボード	34.1	89.7	1.4	◎	石膏ボード	
			サンダー刃	4.7	94.4	0.2	-	-	
			ガラス瓶	4.4	98.8	0.2	-	-	
			ガラス類	1.1	99.9	0.0	-	-	
			ホルト・ナット類	91.6	91.6	2.4	◎	ボルト・ナット	
小物金属	2.6	96.4	金属端子	7.8	99.4	0.2	-	-	
			番線	76.6	76.6	1.7	◎	番線	
			針金	10.8	87.4	0.2	◎	番線	
			溶接棒	4.6	92.0	0.1	◎	番線	
			ワイヤ	4.4	96.4	0.1	-	-	
			ケーブル線	1.8	98.1	0.0	-	-	
			計器類	55.6	55.6	0.5	-	-	
計器類	1.0	99.7	センサー	44.1	99.7	0.4	-	-	
			ゴミ屑	77.0	77.0	0.3	-	-	
			砂	23.0	100.0	0.1	-	-	
缶類	100.0	100.0	缶	48.9	48.9	48.9	◎	一斗缶 ペール缶 スプレー缶	
			PT缶	15.4	64.3	15.4	◎		
			一斗缶	14.4	78.7	14.4	◎		
			ペール缶	11.9	90.6	12.9	◎		
			スプレー缶	9.0	99.6	9.0	◎		
			-	-	-	-	-		

A2	廃棄物 分類名	重量割合 (%)	累積重量 (%)	選定した模擬廃棄物の寸法			模擬廃棄物 組成(%)
				品名	寸法	決定理由・根拠	
A 非圧縮	金属片 ・板類	-	-	金属板	W500×L500×t3 W500×L600×t3 W500×L200×t3	平板状の金属廃棄物を重量割合の多い金属板で代表 寸法は開缶調査結果より得られた寸法分布の最頻値	26
				アングル	W50×L700×t6 W50×L500×t6 W50×L200×t6	L型アングル、H鋼などの鋼材を重量割合の多いアングルで代表 寸法は開缶調査結果より得られた寸法分布の最頻値	11
				足場クランプ	H30×W70×L270	標準的な寸法	4
	金属配管類	-	-	配管(直管)	20A×L300、600	フランジ等を注入性の劣る配管で代表 寸法は開缶調査結果より得られた寸法分布の最頻値 かつ空隙評価結果より注入性を確保すべき最小径	27
				配管(曲管)	“(単片L100)	寸法は開缶調査結果より得られた寸法分布の最頻値 かつ空隙評価結果より注入性を確保すべき最小径	3
	塊状金属類	-	-	弁	20A、50A	形状が比較的複雑で内部空隙の残りやすい弁で代表 寸法は、配管と同一口径とし、開缶調査より得られた寸法分布の最頻値の弁も加えた	21
	コンクリート片 ・ガラス類	-	-	コンクリート	H70×W70×L70	開缶調査結果より推定した標準的な寸法	2
				石膏ボード	H200×W200×t10	開缶調査結果より推定した標準的な寸法	2
	小物金属	-	-	ボルト・ナット	M10×L100	重量割合の多いボルト・ナットで代表 寸法は開缶調査結果より得られた寸法分布の最頻値	3
	番線類	-	-	番線	外形φ3×L250	重量割合の多い番線で代表 寸法は通常使用される10番線(約3mm)を使用	2
計器類	-	-	-	-	-	-	
屑	-	-	-	-	-	-	
A 圧縮	缶類	-	-	一斗缶	240□×H350	標準的な寸法	52
				ペール缶	290φ×H350	-	
				スプレー缶	70φ×H200	標準的な寸法	

(iii) 金属重量の設定

金属重量は、埋設設備ごとの仕様(設備形状、廃棄体の重量制限)により異なることから個別に算出し、設定する。

a. 金属廃棄物重量の設定

2号及び3号埋設設備の金属廃棄物の重量は、文献⁽⁶⁾の密収納時(非圧縮体)における最大重量が305kg(第15表参照)である。また、2号埋設設備の埋設実績より、2号埋設設備に対する平均値の最大重量279.8kg(第16表参照)であることから、これらを参考とする。

以上のことから、1本当たりの廃棄体重量を310kgとして設定し、埋設設備ごとの埋設本数を乗算することで設定する。

金属廃棄物重量の設定に当たっては、以下の観点から妥当である。

- ・金属腐食による金属の膨張は、埋設設備1基単位での変形挙動による評価であること
- ・2号埋設設備の埋設実績において、1本当たりの金属廃棄物の重量が大きな廃棄体(高圧圧縮体及び溶融体)の割合は、約6%であり非常に少ないこと
- ・廃棄体重量(310kg/本)は、廃棄体容器に密充填した際の金属重量(305kg/本)を包含していること

1号埋設設備は、2号及び3号埋設設備とは異なり重量制限(500kg/本)であることから、埋設実績を踏まえた金属廃棄物重量の設定を行うことが出来ない。

そのため、廃棄体製作技術⁽⁶⁾より廃棄体に含まれる上部空隙(約10%以下)及び理論上収納できる金属量を考慮し、設定する。

廃棄体製作技術⁽⁶⁾にて整理されている廃棄体の収納状態、重量及び試験実施状況を参考とし第15表に収納重量に関するデータを示す。

また、2号埋設設備の廃棄物の受入実績を第16表に示す。

第 15 表 固体状廃棄物の収納重量、固型化材料等の充填体積等⁽⁶⁾

固型化対象物の種類		収納容器	固体状廃棄物の 収納重量(kg)	固型化後重量 (kg)	固型化材料等の 充填体積 ^{*6} (L)
金属類		ドラム缶	301～305	662～694	163～165
プラスチック類		内籠容器	36～40	462～484	175～179
		内張容器	36	446	135
圧縮体 ^{*1}		ドラム缶	94 ^{*3}	350	102
圧縮体 ^{*2}		ドラム缶	178 ^{*4}	401	86
溶融体		ドラム缶	735～742 ^{*5}	867～878	50～53
高圧圧縮体 (非金属 類) ^{*7}	圧縮力約 1,000t 縦絞り縮径あり	ドラム缶	280 ^{*9}	436	58
	圧縮力約 1,500t 縦絞り縮径なし	ドラム缶	245 ^{*10}	392	59
高圧圧縮体 (金属類) ^{*8}	圧縮力約 1,000t 縦絞り縮径あり	ドラム缶	597 ^{*11}	808	82
	圧縮力約 1,500t 縦絞り縮径なし	ドラム缶	737 ^{*12}	894	71

*1： 保温材・フィルタ類及び圧縮対象のプラスチック類の圧縮体

*2： 圧縮対象の金属類の圧縮体

*3： 圧縮用容器(120L)の重量(約 45kg, 約 11kg×4 個)を含む

*4： 圧縮用容器(120L)の重量(約 90kg, 約 11kg×4 個)を含む

*5： キャニスタの重量(約 140kg)を含む

*6： 固型化材料等のドラム底部からの注入高さの目標値を非圧縮物及び圧縮体は 780mm、溶融体は 820mm とした。

*7： 高圧圧縮対象の非金属類の高圧圧縮体

*8： 高圧圧縮対象の金属類の高圧圧縮体

*9： 高圧圧縮処理用容器(200L)の重量(約 120kg, 約 30kg×4 個)を含む

*10： 高圧圧縮処理用容器(155L)の重量(約 63kg, 約 13kg×5 個)を含む

*11： 高圧圧縮処理用容器(200L)の重量(約 90kg, 約 30kg×3 個)を含む

*12： 高圧圧縮処理用容器(155L)の重量(約 63kg, 約 13kg×5 個)を含む

第 16 表 2 号埋設設備における廃棄物の受入実績

	1 群		2 群		3 群		4 群		5 群		6 群	平均 値
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	
平均廃棄物収 納重量(kg/本)	205.4	201.1	230.5	226.3	199.4	217.0	213.4	190.5	208.7	176.2	192.1	205.5
平均廃棄体重 量(kg/本)	598.9	581.8	589.8	574.6	565.0	567.2	556.9	539.2	544.9	530.9	531.0	561.8
金属類廃棄物 の割合(%)	88.9	83.2	81.0	72.1	74.5	75.5	71.0	62.5	66.6	64.6	58.8	72.6
溶融体、高圧圧 縮体の割合(%)	0.0	0.4	6.9	9.1	4.3	6.4	6.9	4.0	5.3	1.6	2.1	4.3
その他の割合 (%)	11.1	16.8	19.0	27.9	25.5	24.5	29.0	37.5	33.4	35.4	41.2	27.4
平均金属類廃 棄物収納重量 (kg/本)	220.2	225.2	263.2	279.8	237.6	256.3	263.9	252.0	261.5	221.6	255.0	248.8

ここで、金属廃棄物の重量の算出について、3号廃棄物埋設地を例に以下に示す。

$$\begin{aligned}
 \text{金属重量(kg/基)} &= \text{金属廃棄物重量(kg/本)} \times \text{廃棄体本数(本/基)} \\
 &= 310(\text{kg/本}) \times 26,400(\text{本/基}) \\
 &= 8,184,000(\text{kg/基})
 \end{aligned}$$

上記の算出方法に従い、埋設設備ごとに算出した結果を第 17 表に示す。

第 17 表 金属廃棄物重量の設定値

条件	金属重量(kg/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号*1	対象設備：2号
金属廃棄物	8,184,000	282,624	4,017,600

*1：金属廃棄物重量(kg/基)は、1号埋設設備の重量制限(500kg/本)、鉄の密度(7,874kg/m³)及びモルタルの比重(2,100kg/m³)を用いて算定した55.2kg/本より、設定した。

b. 廃棄体容器重量の設定

1号、2号及び3号廃棄物埋設地に使用される廃棄体容器(ドラム缶)の仕様は、JIS Z 1600⁽³⁾のH級ドラム缶として共通であることから、同一の考え方に基づいて設定を行う。

H級ドラム缶は最小質量として27.0kgと規定されていることから、1本当たり30kgとして設定する。

ここで、廃棄体容器の重量の算出について、3号廃棄物埋設地を例に以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{金属重量(kg/基)} &= \text{廃棄体容器重量(kg/本)} \times \text{廃棄体本数(本/基)} \\ &= 30(\text{kg/本}) \times 26,400(\text{本/基}) \\ &= 792,000(\text{kg/基}) \end{aligned}$$

上記の算出方法に従い、埋設設備ごとに算出した結果を第18表に示す。

第18表 廃棄体容器重量の設定値

条件	金属重量(kg/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号	対象設備：2号
廃棄体容器	792,000	153,600	388,800

c. 埋設設備中の鉄筋重量の設定

埋設設備中の鉄筋の重量は、設計図書から鉄筋径、配置本数及び延長を算出し、設定する。

埋設設備ごとに算出した結果を第19表に示す。

第19表 埋設設備中の鉄筋重量の設定値

条件	金属重量(kg/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号	対象設備：2号
埋設設備中の鉄筋	1,357,000	127,000	415,000

(iv) 腐食生成物の設定

腐食生成物の設定は、埋設設備中の環境条件により生成が予想される腐食生成物の形態が異なるため、確からしい設定／厳しい設定に区分けし、腐食生成物に関連するパラメータを考慮した上で設定する。

腐食生成物の設定では、「4. (1) (i) 埋設設備中の環境条件の設定」において設定した環境下に対し、生成される腐食生成物を定量的に同定した知見がないことから、以下の考え方にに基づき設定する。

確からしい設定は、「4. (1) (i) 埋設設備中の環境条件の設定」において設定した環境条件及び文献^{(7)~(9)}を参考に最も安定に存在し得る腐食生成物を抽出し、設定する。環境条件に適合した腐食生成物が複数存在する場合又は、最も安定に存在し得る腐食生成物の設定が困難である場合は、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を選定する。

厳しい設定は、環境条件及び文献^{(9)~(13)}を参考に、覆土の低透水性への影響評価の観点から、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を設定する。

上記の設定方針に従い、代表とする金属種類及びその他考慮する金属種類ごとに確からしい設定／厳しい設定の考え方及び設定する腐食生成物を第 20 表に示す。

ここで、充填固化体では、金属廃棄物として炭素鋼、ステンレス鋼及び鋳鉄が大部分を占めていることから、代表とする金属種類である鉄に対する腐食生成物(マグネタイト)の設定の考え方について、参考資料 3「2. (3) 解析による推定」に詳細を示す。

腐食生成物は、金属腐食の進行とともに変化する環境条件及び生成される腐食生成物の影響により時間変遷とともに変化する。一方で、時間変遷を考慮した生成される腐食生成物の定量的な推定を行うことは、困難である。

そのため、腐食生成物の設定においては、金属腐食に伴う膨張量を評価するため、代表とする金属種類及びその他考慮する金属種類が第 20 表により設定した腐食生成物に全て変化することとした。

なお、1 号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体に含まれる可溶性塩による腐食生成物への影響を考慮する。可溶性塩による腐食生成物への影響を評価した文献⁽⁹⁾に基づき、可溶性塩を考慮した環境条件下において、腐食膨張倍率が大きな腐食生成物である水酸化物を設定する。ここで、アルミニウムにおいては、文献⁽⁹⁾より腐食膨張倍率の大きな腐食生成物(7.1 倍)を生成する可能性が示唆されている。しか

しながら、アルミニウムは、文献⁽²⁾より除去する廃棄物として区分されており、分別除去後の調査結果としては、廃棄体1本当たりの平均重量が0.109kg(鉄の約1,000分の1以下)であることから、腐食膨張倍率の大きなアルミニウムの腐食生成物による影響は無視できる。

第20表 腐食生成物の設定及び設定の考え方

条件		設定	設定の考え方
代表とする 金属種類*1	鉄	【確からしい設定】 Fe ₃ O ₄	【確からしい設定】 複数の文献において生成すること及び安定な結晶性の腐食生成物であることから Fe ₃ O ₄ (マグネタイト)を設定する。
		【厳しい設定】 Fe(OH) ₂	【厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する Fe(OH) ₂ (水酸化鉄(II))を設定する。
その他考慮 する 金属種類	アルミニウム ニッケル 銅 亜鉛	【確からしい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu ・ Zn(OH) ₂	【確からしい設定】 それぞれの金属種類に対して複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を設定する。 ただし、銅に関しては、確からしい設定の環境条件下では腐食しないことから銅のままとして設定する。
		【厳しい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu(OH) ₂ ・ Zn(OH) ₂	【厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を一律設定する。

*1：1号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体中に含まれる可溶性塩による影響を考慮している。

(v) 腐食膨張倍率の設定

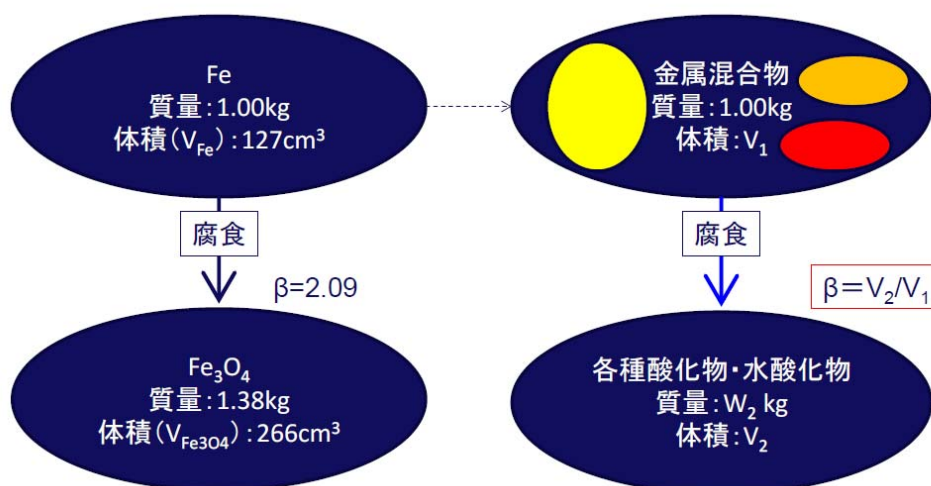
腐食膨張倍率は、第 20 表より設定した腐食生成物を用いて設定する。

埋設設備中の金属割合が文献⁽⁶⁾より定量的に設定することが困難であることから、「代表とする金属種類(鉄)」の腐食膨張倍率を基準とし、「その他考慮する金属種類」の金属単体ごとの腐食膨張倍率の混入率(wt%)をパラメータとし、金属が混合された状態での腐食膨張倍率の評価を行う。

a. 腐食生成物の腐食膨張倍率の算定

金属の腐食に伴う腐食生成物は、腐食に伴い酸素を取り込み形成される。そのため、拘束などがない環境において生成する腐食生成物は、かさ密度*1 と呼ばれるもので評価されることが実態である。一方で、廃棄物埋設地においては、埋設設備の周囲が覆土により拘束された状態である。いずれの場合においても、かさ密度を考慮した定量的な腐食生成物の膨張倍率に関する知見がない。そのため、ICSD の無機結晶構造データベース(化学情報協会)⁽⁹⁾に示される理論密度を用いて、重量 1.0kg の金属の体積 V_1 が腐食し、酸化物あるいは水酸化物となった場合の体積 V_2 の比より、理論的な膨張率(β)を求める。鉄を例とした際の算出方法を第 4 図に示す。

*1: かさ密度とは、質量からかさ容積を除いた密度を指す。また、かさ容積は、開気孔(外部に通じている気孔)閉気孔(固体内に閉じ込められている気孔)両方の体積を含んだ容積である⁽¹⁴⁾。



第 4 図 鉄の膨張倍率の算定方法

金属の膨張率の算定方法としては、第 21 表に示す金属のモル質量などから算出を行う。

ここで、金属元素 (A, B 及び C) としたとき、これらが含まれる化合物 (A_a, B_b, C_c, O_d 及び H_e) を考える。化合物 1mol 中には a, b 及び c mol の A, B 及び C が存在する。

よって、1mol の化合物 (体積 $L_{X,Comp} = L_{A_a B_b C_c O_d H_e}$ の中) に含まれる金属元素が金属として存在するときの総モル質量 ($\sum W_{X,Metal}$) 及び総モル体積 ($\sum L_{X,Metal}$) は以下の式で表される。

$$\sum W_{X,Metal} = aM_A + bM_B + cM_C$$

$$\sum L_{X,Metal} = aL_A + bL_B + cL_C$$

このとき、体積膨張率 (β) は、以下の式で表すことができる。

$$\beta_{A_a B_b C_c O_d H_e} = L_{A_a B_b C_c O_d H_e} / \sum L_{X,Metal}$$

すなわち、一般式は以下となる。

$$\beta_X = L_{X,Comp} / \sum L_{X,Metal}$$

第 21 表 金属化合物の体積膨張率 (β) 一覧

	モル質量 (g/mol)	真密度 (g/cm ³)	L_{metal} (cm ³ /mol)	金属 原子数	L_{Comp} (cm ³ /mol)	β
Fe	55.845	7.860	7.105	1	7.105	1.00
Fe ₃ O ₄ (Magnetite)	231.533	5.170	7.105	3	14.928	2.10
Fe(OH) ₂	89.860	3.400	7.105	1	26.429	3.72
Ni	58.693	8.900	6.595	1	6.595	1.00
Ni(OH) ₂	92.708	4.100	6.595	1	22.612	3.43
Al	26.982	2.700	9.993	1	9.993	1.00
Al(OH) ₃ (Amorphous aluminum hydroxide)	78.004	2.420	9.993	1	32.233	3.23
Cu	63.546	8.960	7.092	1	7.092	1.00
Cu(OH) ₂	97.561	3.368	7.092	1	28.967	4.08
Zn	65.380	7.140	9.157	1	9.157	1.00
Zn(OH) ₂ (beta-Zn(OH) ₂)	99.395	3.053	9.157	1	32.557	3.56

第 20 表の腐食生成物の設定及び第 21 表の金属化合物の体積膨張率より、腐食膨張倍率の設定を行う。

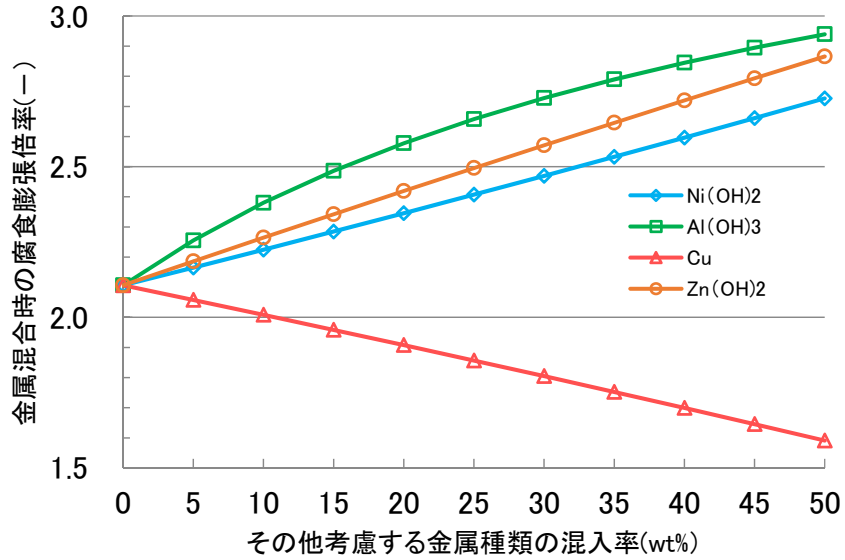
確からしい設定は、代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物であるマグネタイト(β : 2.1)を基準とし、その他考慮する金属種類の腐食生成物である水酸化物(例えば、 Ni(OH)_2 の β : 3.43)の金属単体ごとの混入率(wt%)をパラメータとし、金属が混合された状態での腐食膨張倍率を評価したものを第 5 図に示す。

厳しい設定は、確からしい設定と同様の考え方にに基づき、代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物である水酸化鉄(II)(β : 3.72)に対して評価したものを第 6 図に示す。

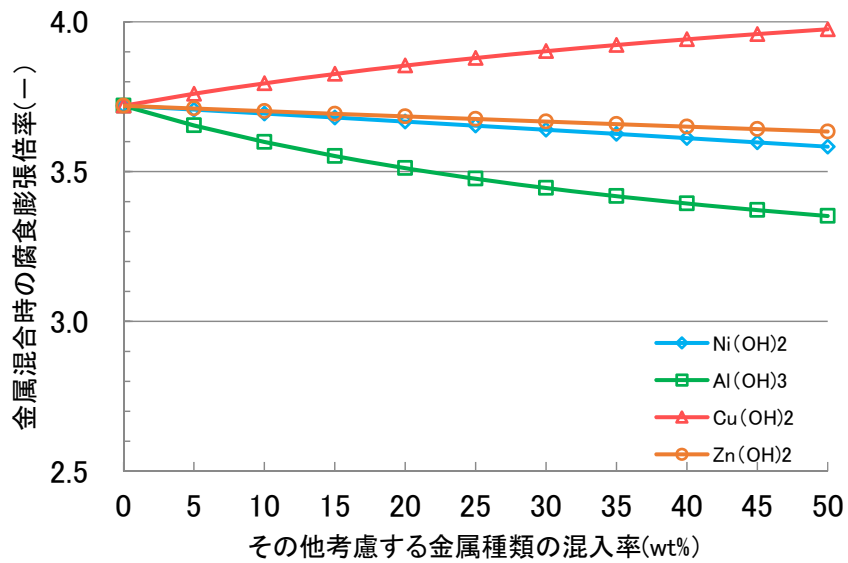
以上の設定・評価を踏まえ、腐食膨張倍率を第 22 表のとおり設定する。

第 22 表 腐食膨張倍率の設定値

条件	設定値	設定の考え方
腐食膨張倍率	【確からしい設定】 3 倍	【確からしい設定】 代表とする金属種類(鉄)の腐食生成物を Fe_3O_4 (マグネタイト)とし、その他考慮する金属種類の混入率を 0wt%-50wt%の幅で設定し、金属が混合された状態での腐食膨張倍率を評価した結果、いずれも腐食膨張倍率は 3 倍以下であることから、3 倍と設定する。
	【厳しい設定】 4 倍	【厳しい設定】 環境条件の変動を考慮し、設定した代表とする金属種類並びに非晶質の水酸化物を設定したその他考慮する金属種類の混入率を 0wt%~50wt%の幅で評価した結果、いずれも腐食膨張倍率は 4 倍以下であることから、4 倍と設定する。



第 5 図 確からしい設定 (Fe₃O₄(腐食膨張倍率：2.10)を基準)における
金属が混合された場合の腐食膨張倍率



第 6 図 厳しい設定 (Fe(OH)₂(腐食膨張倍率：3.72)を基準)における
金属が混合された場合の腐食膨張倍率

(vi) 金属の表面積の設定

金属の腐食膨張量を算出する際に必要となる表面積について、構成部材ごとの設定値を第 23 表に示す。

第 23 表 金属の表面積/比表面積の設定値

構成部材	対象設備	表面積/比表面積	備考
金属廃棄物	共通	$8.8 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{kg})$	溶融体を除く
	共通	$2.18 (\text{m}^2/\text{本})$	溶融体のみ
廃棄体容器	共通	$4.36 (\text{m}^2/\text{本})$	
埋設設備中の鉄筋	3号	$19,000 (\text{m}^2)$	
	1号	$3,000 (\text{m}^2)$	
	2号	$11,000 (\text{m}^2)$	

a. 金属廃棄物

(a) 充填固化体のうち溶融処理を行わない場合

充填固化体には、金属板、番線、配管など様々な寸法・形状の廃棄物が含まれている。これら個々に対する表面積を設定することは、収納物の取扱上、困難であるため、文献⁽⁶⁾に記載されている調査・算出された廃棄物の単位重量当たりに含まれる金属廃棄物の表面積(第 24 表参照)のうち値の大きなものを設定する。

文献⁽⁶⁾では、金属廃棄物からのガス発生量の観点から、廃棄体に含まれる鉄系金属の表面積を固体状廃棄物の開缶調査より算定している。

算定に当たっては、廃棄体に収納する廃棄物量が 1 本ごとに異なると考えられることから、廃棄物の単位重量当たりに含まれる金属廃棄物の表面積(m^2/kg)を調査し、廃棄物の収納重量から金属の表面積($\text{m}^2/\text{本}$)を算出できるようにしている⁽⁶⁾。

具体的な鉄系金属の表面積は、金属片、配管、管、番線類等の代表的な廃棄物ごとに分類し、代表的な廃棄物の重量値及び表面積測定値から比表面積(鉄系金属の重量当たりの表面積)を算出した後、これに全鉄系金属の代表的な廃棄物ごとの総重量を乗じることで算出している⁽⁶⁾。算出された鉄系金属の表面積は、第 24 表のとおりである。第 24 表より、充填固化体のうち溶融処理を行わない場合の比表面積を $8.8 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{kg})$ として設定する。

第 24 表 鉄系金属の表面積⁽⁶⁾

発電所炉形式	分類	鉄系金属総表面積(m ²)	廃棄物総重量(kg)	表面積(m ² /kg) ^{*1}
BWR	A	497.73	6,310	7.9×10 ⁻²
PWR	A	730.30	4,870	8.8×10 ⁻²

*1：廃棄物単位重量当たりの金属表面積(m²/kg) = 金属総表面積(m²) / 廃棄物総重量(kg)

(b) 充填固化体のうち溶融処理を行う場合

充填固化体のうち溶融処理を行う廃棄体は、ドラム缶に収納できる形状にて製作される。

そのため、溶融処理以外の廃棄体とは異なり表面積は、溶融処理後の形状に依存することから、ドラム缶の表面積と同様とする。表面積を以下のとおり設定する。

$$\begin{aligned} \text{表面積} A &= (2 \times \pi \times R^2) + (2 \times \pi \times R \times h) \\ &= 2.182361(\text{m}^2/\text{本}) \cong 2.18(\text{m}^2/\text{本}) \end{aligned}$$

ドラム缶直径 φ	: 5.85×10 ⁻¹ (m)
ドラム缶半径 R	: $\varphi/2$ (m)
ドラム缶高さ h	: 8.95×10 ⁻¹ (m)

b. 廃棄体容器

充填固化体に用いられるドラム缶は標準的な製作方法に基づき、JIS Z 1600⁽³⁾のうちH級ドラム缶であることから、H級ドラム缶の寸法を参考に以下のとおり算出し設定を行う。

なお、表面積の算出においては、ドラム缶の内・外側両方の面積を合計した値とする。

$$\begin{aligned} \text{表面積} A &= 2 \times (2 \times \pi \times R^2) + 2 \times (2 \times \pi \times R \times h) \\ &= 4.364722(\text{m}^2/\text{本}) \cong 4.36(\text{m}^2/\text{本}) \end{aligned}$$

ドラム缶直径 φ	: 5.85×10 ⁻¹ (m)
ドラム缶半径 R	: $\varphi/2$ (m)
ドラム缶高さ h	: 8.95×10 ⁻¹ (m)

c. 埋設設備中の鉄筋

埋設設備中の鉄筋に関しては、設計図書を参考に構成部材ごと(覆い、底版、側壁及び内部仕切)に含まれる鉄筋の重量、本数及び総延長から鉄筋径ごとに算出・集計した値を参考に設定を行う。

なお、鉄筋に係る単位質量、公称直径、断面積及び周長は JIS G 3112⁽⁴⁾に基づく。

(a) 3号埋設設備

$$\begin{aligned} \text{総表面積 (m}^2\text{)} &= \text{覆いの鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{底版の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{側壁の鉄筋表面積 (東西方向 2 枚+南北方向 2 枚) (m}^2\text{)} + \text{内部仕切壁の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} \text{ (東西方向 10 枚+南北方向 5 枚)} \\ &= 3,416.4 + 4,948.6 + 3,517.5 + 6,243.2 \\ &= 18,125.7(\text{m}^2) \cong 19,000(\text{m}^2) \end{aligned}$$

(b) 1号埋設設備

$$\begin{aligned} \text{総表面積 (m}^2\text{)} &= \text{覆いの鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{底版の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{側壁の鉄筋表面積 (東西方向 2 枚+南北方向 2 枚) (m}^2\text{)} + \text{内部仕切壁の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} \text{ (東西方向 3 枚+南北方向 3 枚)} \\ &= 871.2 + 966.8 + 743.3 + 375.0 \\ &= 2,956.3(\text{m}^2) \cong 3,000.0(\text{m}^2) \end{aligned}$$

(c) 2号埋設設備

$$\begin{aligned} \text{総表面積 (m}^2\text{)} &= \text{覆いの鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{底版の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} + \text{側壁の鉄筋表面積 (東西方向 2 枚+南北方向 2 枚) (m}^2\text{)} + \text{内部仕切壁の鉄筋表面積 (m}^2\text{)} \text{ (東西方向 5 枚+南北方向 5 枚)} \\ &= 1,942.7 + 2,586.0 + 2,362.2 + 3,711.4 \\ &= 10,602.3(\text{m}^2) \cong 11,000.0(\text{m}^2) \end{aligned}$$

(vii) 金属の腐食速度の設定

金属の腐食に伴う膨張量は、環境に応じた金属の腐食速度に状態変化の評価期間を掛け合わせた際の腐食生成物として失われた金属質量より求めることができる。

膨張量の算出に必要な金属の腐食速度を求める手法は、一般的に重量法⁽¹⁵⁾、ガス発生法⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾及び電気化学法⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾が知られている。

廃止措置の開始後の確からしい評価期間(1,000年後)の金属の腐食速度は、「4.(1)(i)埋設設備中の環境条件の設定」を考慮し、適切な分析手法により求められる値を参考に設定する。

a. 腐食速度の測定手法の選定

腐食速度の測定は、前述のとおり3つの手法により試験が実施されている。

なお、日本産業規格や学会基準などにより広く定義された測定手法はなく、実務者が測定手法に対して、精度良く分析すべく様々な手法が考案されているものである。

確からしい評価期間(1,000年後)においては、想定する環境条件に適した測定手法により取得された値を参考に、腐食速度を設定する必要がある。

そのため、腐食速度の測定手法に関して、手法ごとの特徴、測定誤差の要因及び対応する環境を整理することで適した測定手法の選定を行う。腐食速度の測定手法の特徴を第25表に示す。

第 25 表 腐食速度の測定手法の特徴

測定手法		特徴	測定誤差の要因	対応する環境条件
重量法		試験前後の重量差から直接的に腐食速度を求める。 表面に皮膜が形成する場合には、化学的あるいは電解により除去し、母材の腐食減量を測定する。	<ul style="list-style-type: none"> 腐食生成物の除去率のばらつき(脱スケールの処理) 天秤の測定誤差 試験前後の試験片の乾燥処理 	好氣的／嫌氣的条件
ガス発生法		腐食反応に伴う水素ガスの発生量を計測し、ファラデーの法則により間接的に腐食速度を求める。	<ul style="list-style-type: none"> 溶存酸素の試験系内への混入 水素発生を伴わないカソード反応(酸化還元反応) 	嫌氣的条件
電気化学法 (20)	ターフェル外挿法	定常分極曲線の半対数プロットで逆反応が無視できる分極範囲(>70mV)から外挿により電流密度を求める。	<ul style="list-style-type: none"> 皮膜成長の影響 	好氣的／嫌氣的条件
	直接分極抵抗法	腐食電位近傍の分極曲線の直線部分の勾配から腐食速度を求める。	<ul style="list-style-type: none"> 比例定数の正確さ 	

【確からしい設定】

第 10 表の環境条件の設定に基づき、第 25 表から環境条件に適用した測定手法を選定する。測定手法は、環境条件が嫌氣的条件であり、金属類が水素発生型の腐食挙動を示すと想定されることから、ガス発生法により取得された腐食速度が適切であると判断し、これを選定する。

【厳しい設定】

第 10 表の環境条件の設定では、ORP 及び pH が幅を持って変動すると整理されている。刻々と変化する環境条件下では、局部腐食(孔食)の発生や異種金属接触腐食が生じることが予想され、試験的に求める腐食速度を均一腐食として評価することが困難である。そのため、腐食速度の選定を行わない。

b. ガス発生法により取得された腐食速度の整理

第 10 表の確からしい設定の環境条件と試験条件が類似し、かつガス発生法により腐食速度を取得・評価した文献の一例を第 26 表に示す。

第 26 表のうち、温度環境が比較的高い状態で取得された腐食速度は、第 10 表の環境条件に適したものではないため、No. 1, 3, 9 及び 12(No. 12 は 25.5℃のデータのみ)により取得された値が適切であると判断する。

第 26 表 ガス発生法による腐食速度に関する知見*1,*2

No.	著者	腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{y}$)	材料	環境条件
1	Kreis ら	0.005~0.01	炭素鋼	温度：20℃、水質：水酸化カルシウム系、pH：12.8、試験期間：240日
2		0.065~0.02		温度：20℃、水質：NaOH, KOH、pH：12.8、試験期間：80、240日
3	藤沢ら	0.002	炭素鋼	温度：15℃、水質：セメントモルタル共存、pH：-、試験期間：365日
4		0.001		温度：30℃、水質：セメントモルタル共存、pH：-、試験期間：365日
5		0.01		温度：45℃、水質：セメントモルタル共存、pH：-、試験期間：2ヶ月
6	三原ら	0.4	炭素鋼	温度：50℃、水質：人工海水+NaOH、pH：10、試験期間：6ヶ月
7		0.02		温度：50℃、水質：人工海水+NaOH、pH：12、試験期間：6ヶ月
8		0.02		温度：50℃、水質：人工海水+NaOH、pH：13.5、試験期間：6ヶ月
9	廣永ら	0.003	炭素鋼	温度：15℃、水質：OPC モルタル浸漬水、pH：12.4、試験期間：6ヶ月
10		0.01		温度：30℃、水質：OPC モルタル浸漬水、pH：12.4、試験期間：6ヶ月
11		0.08		温度：45℃、水質：OPC モルタル浸漬水、pH：12.4、試験期間：6ヶ月
12	(財)原子力環境整備促進・資金管理センター	0.03(25.5℃)~0.1(45.5℃)	炭素鋼	温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン5ppm、pH：12.5、試験期間：190日
13		0.02(25.5℃)~0.06(45.5℃)		温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン500ppm、pH：12.5、試験期間：190日
14		0.02(25.5℃)~0.07(45.5℃)		温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン1,500ppm、pH：12.5、試験期間：190日
15		0.06(25.5℃)~0.2(45.5℃)		温度：25.5~45.5℃、水質：水酸化カルシウム平衡水+塩化物イオン5,000ppm、pH：12.5、試験期間：190日

*1：No. 1~No. 8 は参考文献⁽¹⁶⁾より引用

*2：No. 9~No. 15 は参考文献⁽¹⁷⁾より引用

c. 腐食速度の設定

【確からしい設定】

腐食速度の設定は、第 25 表に整理したとおり、測定手法に内在する測定誤差があることが判明している。そのため、第 26 表から適切であると判断した腐食速度 ($0.002 \mu\text{m}/\text{y} \sim 0.01 \mu\text{m}/\text{y}$) に対して、最大の腐食速度である $0.01 \mu\text{m}/\text{y}$ の小数第 2 位を切り上げた値である $0.1 \mu\text{m}/\text{y}$ を設定する。

【厳しい設定】

「4. (1) (vii) a. 腐食速度の測定手法の選定」のとおり、試験的に求める腐食速度を均一腐食として評価することが困難であることから、腐食速度を設定せず金属の全量が瞬時に腐食すると設定する。

以上の腐食速度の設定値及びその考え方を第 27 表に示す。

なお、1 号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体に含まれる可溶性塩による腐食速度への影響を考慮する。可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)による腐食速度への影響は、文献⁽²¹⁾⁽²²⁾より埋設設備中の環境条件下において、腐食速度の低下、又は鉄が不動態化することから影響はない。そのため、文献⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾に示された様々な環境条件下(可溶性塩影響*1より金属の腐食環境として厳しい人工海水(NaCl)影響*2を含む)にて取得された腐食速度に対し、最大の腐食速度を選定している。

*1:均質・均一固化体を埋設する埋設設備内の間隙水における可溶性塩の濃度は、塩による収着影響との設定(硫酸塩 3%、ほう酸塩 0.1%)と同じ値である。

*2: 文献⁽¹⁶⁾に示される人工海水(NaCl)の濃度は、約 3%である。

第 27 表 腐食速度の設定値

条件	設定値	設定の考え方
腐食速度*1	【確からしい設定】 $0.1 \mu\text{m}/\text{y}$	【確からしい設定】 腐食速度の測定手法に内在する測定誤差を考慮し、値を設定する。
	【厳しい設定】 腐食速度を設定せず金属の全量が瞬時に腐食すると設定	【厳しい設定】 腐食膨張量は、金属腐食を評価する上で必要となる環境条件による腐食速度に依存するが、局部腐食(孔食)や異種金属接触腐食、環境条件の変動に係る不確実性を考慮する。よって、廃止措置の開始後の状態変化の評価期間(1,000年後)においては、腐食形態に係らず全量が瞬時に腐食すると設定する。

*1: 1 号廃棄物埋設地では、均質・均一固化体中に含まれる可溶性塩による影響を考慮している。

(2) 金属腐食による金属の膨張量の設定

金属腐食による金属の膨張量は、「4. (1) 金属の膨張量の設定に係る諸条件の設定」までの設定値を踏まえ、廃棄物埋設地ごとに算出し、設定する。金属の膨張量の算出に必要となるパラメータを第 28 表に示す。

評価対象物(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)である金属のうち、金属廃棄物の重量割合は、第 28 表より埋設設備中の鉄筋及び廃棄体容器に対し、約 8 割と大半を占めている。

そのため、金属腐食による膨張方向は、金属廃棄物の膨張挙動に支配されることが想定されることから、金属廃棄物の収納状況を考慮し設定する。

金属廃棄物は、収納される金属の形状が様々であるが、廃棄体容器への収納は、容器が効率的に使用できるように極力密に入れて収納している。また、金属の腐食は、その材料の形状により腐食環境に接触する面積が多い箇所ほど促進する傾向を有する。

以上のことから、金属腐食による膨張方向の設定は、廃棄体容器へ収納される金属の形状及び収納状況により、腐食が進展する方向を正確に推測することが困難であるが、現実的な設定として、埋設設備の構造寸法に基づくアスペクト比が維持されたまま鉛直・水平方向へ変形するものとする。

また、膨張方向の設定においては、鉛直・水平方向への変形に対する評価のみではなく、埋設設備の側部に必要に応じて碎石を混合した剛性の高い下部覆土が設置されていること、埋設設備の上部は覆土の上載圧による拘束のみであることから、鉛直方向に卓越した変形における膨張量の算出をあわせて実施する。

なお、厳しい設定における金属の膨張量に関しては、腐食に伴う挙動を定量的に評価することが困難であるため、内在する不確実性に対して腐食速度を設定せず金属の全量が腐食すると設定するなど、膨張量が大きくなるような設定を行っている。

第 28 表 金属の膨張量算出に必要なパラメータ一覧

項目			対象設備		
			3号	1号	2号
共通項目	埋設設備	寸法	東西方向：64.10(m) 南北方向：36.51(m) 鉛直方向：6.66(m)	東西方向：24.40(m) 南北方向：24.40(m) 鉛直方向：6.20(m)	東西方向：36.00(m) 南北方向：36.91(m) 鉛直方向：6.94(m)
		体積	約 15,587(m ³)	約 3,692(m ³)	約 9,222(m ³)
	金属重量	金属廃棄物	8,184,000(kg)	282,624(kg)	4,017,600(kg)
		廃棄体容器	792,000(kg)	153,600(kg)	388,800(kg)
		埋設設備中の鉄筋	1,357,000(kg)	127,000(kg)	415,000(kg)
		合計	10,333,000(kg)	563,224(kg)	4,821,400(kg)
	金属の表面積 /比表面積	金属廃棄物	8.8×10 ⁻² (m ² /kg)(溶融体を除く) 2.18(m ² /本)(溶融体のみ)		
		廃棄体容器	4.8(m ² /本)		
		埋設設備中の鉄筋	19,000(m ²)	3,000(m ²)	11,000(m ²)
	確からしい 設定	腐食膨張倍率	3倍		
腐食速度		0.1(μm/y)			
評価年数		1,000(y)			
厳しい設定	腐食膨張倍率	4倍			
	腐食速度	腐食速度を設定せず金属の全量が腐食すると設定			
	評価年数	腐食速度を設定しないことから、評価年数を設定しない			

(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定

鉛直方向への変形による膨張量は、第3図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備中の金属量(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)、腐食膨張倍率、腐食速度、鉄の密度、評価対象物となる金属の比表面積及び埋設設備の形状を用いて算出し、設定する。

ここで、膨張量の算出について、算出項目が複数存在することから、その算出過程がわかるものを抽出し示す。算出に至っては、埋設設備中の金属量が最も多く、膨張量としても大きくなることが予想される3号廃棄物埋設地を対象とし、確からしい設定のうち鉛直方向へ卓越した変形の算出過程を例に以下に示す。

金属の膨張による埋設設備の膨張量(鉛直方向)(m)

=埋設設備の体積膨張量(金属腐食の膨張のみ)^{*1}(m³)/埋設設備の水平面積^{*2}(m²)

*1:埋設設備の体積膨張量(m³)(金属腐食の膨張のみ)

= (単位年数当たりの腐食体積(m³/y)^{*3} × 評価年数(y) × 金属の腐食膨張倍率) - (健全時の金属重量(kg) / 鉄の密度^{*5}(kg/m³))

*2:埋設設備の水平面積(m²)

=埋設設備(東西方向)長さ(m) × 埋設設備(南北方向)長さ(m)

*3:単位年数当たりの腐食体積(m³/y)

=金属の総表面積(m²)^{*4} × 腐食速度(m/y)

*4:金属の総表面積(m²/y)

= (廃棄体容器の表面積(m²) + 埋設設備中の鉄筋の表面積(m²) + 金属廃棄物の表面積(m²))

= (1本当たりの表面積(m²/本) × 本数(本)) + 埋設設備中の鉄筋の表面積(m²) + (金属廃棄物の重量(kg) × 充填固化体のうち熔融処理を行わない場合の比表面積(m²/kg))

*5:鉄の密度は、7,874(kg/m³)⁽²³⁾

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第29表に示す。

第29表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備:3号	対象設備:1号	対象設備:2号
	鉛直方向		
確からしい設定	1.10 × 10 ⁻¹	2.53 × 10 ⁻²	9.51 × 10 ⁻²
厳しい設定	1.69 × 10 ⁰	3.61 × 10 ⁻¹	1.39 × 10 ⁰

(ii) 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定

鉛直・水平方向への変形による膨張量は、第3図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備中の金属量(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)、腐食膨張倍率、腐食速度、鉄の密度、評価対象物となる金属の比表面積及び埋設設備の形状を用いて算出し設定する。

ここで、膨張量の算出について、算出項目が複数存在することから、その算出過程がわかるものを抽出し示す。算出に至っては、埋設設備中の金属量が最も多く、膨張量としても大きくなることが予想される3号廃棄物埋設地を対象とし、確からしい設定のうち鉛直・水平方向への変形の中から東西方向の算出過程を例に以下に示す。

金属の膨張による埋設設備の膨張量(東西方向) (m)

$$= (\text{埋設設備(東西寸法)}(m) \times 1 \text{ 方向当たりの埋設設備の膨張比}(-)^{*1}) - \text{埋設設備(東西寸法)}(m)$$

*1: 1方向当たりの埋設設備の膨張比(-)

$$= (\text{埋設設備の体積膨張比}(-)^{*2}) \text{の三乗根}$$

*2: 埋設設備の体積膨張比(-)

$$= (\text{埋設設備の体積(健全時)}(m^3) + \text{埋設設備の体積膨張量(金属腐食の膨張のみ)}(m^3)^{*3}) / \text{埋設設備の体積(健全時)}(m^3)$$

*3: 埋設設備の体積膨張量(金属腐食の膨張のみ) (m³)

$$= (\text{単位年数当たりの腐食体積}(m^3/y)^{*4} \times \text{評価年数}(y) \times \text{金属の腐食膨張倍率}) - (\text{健全時の金属重量}(kg) / \text{鉄の密度}^{\ast 5}(kg/m^3))$$

*4: 「4.(2)(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定」のうち単位年数当たりの腐食体積(m³/y)の算出結果を引用

*5: 鉄の密度は、7,874(kg/m³)⁽²³⁾

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第30表に示す。

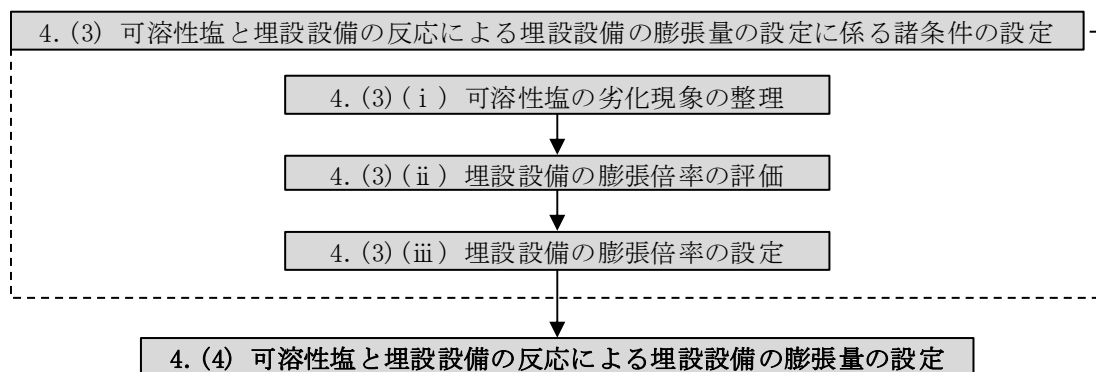
第30表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)								
	対象設備: 3号			対象設備: 1号			対象設備: 2号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向
確からしい設定	3.50×10 ⁻¹	2.00×10 ⁻¹	3.64×10 ⁻²	3.32×10 ⁻²	3.32×10 ⁻²	8.42×10 ⁻³	1.64×10 ⁻¹	1.68×10 ⁻¹	3.16×10 ⁻²
厳しい設定	5.00×10 ⁰	2.85×10 ⁰	5.20×10 ⁻¹	4.64×10 ⁻¹	4.64×10 ⁻¹	1.18×10 ⁻¹	2.25×10 ⁰	2.31×10 ⁰	4.34×10 ⁻¹

(3) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定に係る諸条件の設定

可溶性塩と埋設設備の反応による膨張量の設定は、廃棄体の内容物(可溶性塩：硫酸塩及びほう酸塩)に対し、想定している劣化現象の整理を行い、可溶性塩と埋設設備中のセメント系材料(充填材及びコンクリート)の反応による埋設設備の体積の膨張倍率を用いて行う。

可溶性塩と埋設設備の反応による膨張量の設定手順を第7図に示す。



第7図 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定手順

(i) 可溶性塩の劣化現象の整理

a. 可溶性塩の劣化現象の整理(硫酸塩)

可溶性塩のうち、硫酸塩(Na₂SO₄)は、セメント系材料と接触することで、コンクリート構造体に劣化現象を発生させることが知られており⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾、硫酸塩劣化と総称されている。

硫酸塩劣化のメカニズムは、硫酸塩とセメント水和物が化学反応を起こし、コンクリート中で反応生成物が結晶成長することで、反応生成物の物理的圧力が要因となり劣化するものである。

均質・均一固化体のうち、セメント固化体に硫酸塩が含まれているため、埋設設備の膨張影響は、化学的劣化により生じる膨張現象に着目し、評価する。

硫酸塩劣化のうち、化学的劣化のメカニズムを整理したものを第31表に示す。

第31表 硫酸塩(化学的劣化)のメカニズムの分類

メカニズムの分類		
化学的劣化	エトリンガイト生成	<ul style="list-style-type: none"> エトリンガイトの生成による結晶成長圧などがコンクリートを劣化させる。 $\text{monosulfate } CaSO_4 \cdot 2H_2O, H_2O \xrightarrow{C-A-H} \text{ettringite}$
	二水石こう生成	<ul style="list-style-type: none"> 二水石こうの生成による結晶成長圧でコンクリートが劣化する。 $Ca(OH)_2, SO_4^{2-}, H_2O \xrightarrow{C-S-H} CaSO_4 \cdot 2H_2O$
	ソーマサイト生成	<ul style="list-style-type: none"> 主に低温環境において、SO₄²⁻・CO₃²⁻の存在によりソーマサイトが生成し、コンクリートを劣化させる。 $Ca(OH)_2, SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, H_2O \xrightarrow{C-S-H} \text{thaumasite}$
	Mg ²⁺ による劣化	<ul style="list-style-type: none"> 硫酸塩がMgSO₄の場合、以下の反応によりMg²⁺がセメント水和物を分解する。 $Ca(OH)_2, MgSO_4, H_2O \xrightarrow{C-S-H} CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2 + SiO_2 \cdot xH_2O \rightarrow M-S-H$

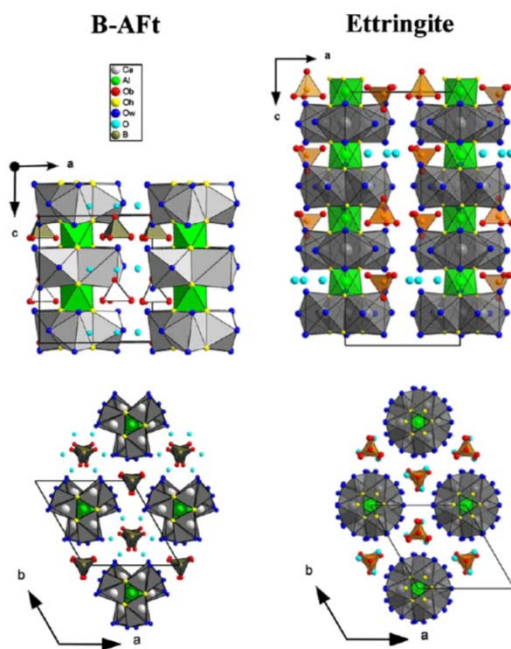
b. 可溶性塩の劣化現象の整理(ほう酸塩)

ほう酸塩は、コンクリート中の金属イオン(Na イオンや Ca イオン)と反応を示すが、ほう酸塩による反応生成物が硫酸塩劣化と同様の膨張影響を生じると直接的に示している文献は確認されていない⁽²⁶⁾。

一方で、エトリングタイトの SO_4 に対して BO_4 が置換すること^{(26)~(28)}が報告されていることから、埋設設備の膨張影響に関しては、覆土の低透水性への影響評価の観点を考慮し、膨張量を大きく算出するため、硫酸塩と同様の膨張影響として評価する。

ほう素を含む AFt*1 とエトリングタイトの結晶構造の比較を第 8 図に示す。

*1: ほう素を含む AFt は、カルシウム・アルミノフェライト・モノサルフェート水和物型化合物の総称を指す(エトリングタイトを主に指す)。



- ・ ほう酸は、エトリングタイト ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) に対して、3つの SO_4^{2-} イオンが4つの $B(OH)^{-}$ と2つの OH^- とに置き換わった構造をとる(エトリングタイトと結晶構造が類似)。

- ・ エトリングタイトの生成と同様に、膨張現象が生じる可能性が考えられるため、膨張影響では、覆土の低透水性への影響評価の観点を考慮し、膨張量を大きく算出するため、硫酸塩と埋設設備の反応と同様の挙動を示すと評価する。

第 8 図 ほう素を含む AFt とエトリングタイトの結晶構造の比較

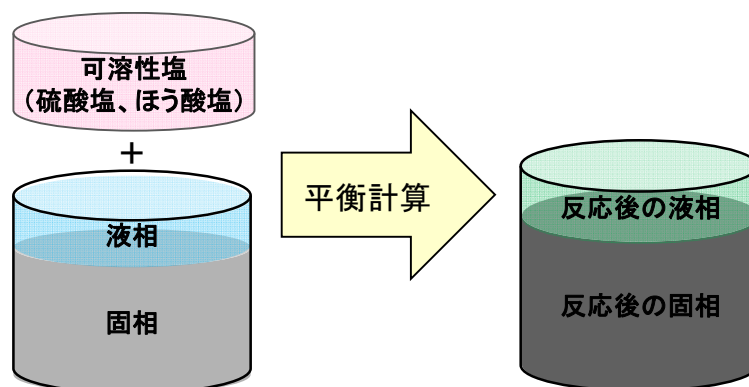
(ii) 埋設設備の膨張倍率の評価

可溶性塩による埋設設備の膨張倍率は、埋設設備に含まれる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)がセメント系材料と反応した後の固相の変化を考慮して設定する。

しかしながら、可溶性塩と埋設設備の反応による二次鉱物の膨張倍率を対象とした定量的な評価や知見がない。

そのため、地球化学計算コード PHREEQC^{(29)~(31)}を用いた評価期間に依存しない平衡計算を行うことで、鉱物の生成・溶解に伴う鉱物相の体積変化を求めることで、1号埋設設備の膨張倍率を評価する。PHREEQCを用いた評価の概念図を第9図に示す。

PHREEQCによる平衡計算は、可溶性塩により生成される膨張の特性を有する二次鉱物の生成量を確認するため、第8表にて整理している均質・均一固化体に含まれる可溶性塩の量を考慮し、実施する。



第9図 平衡計算の概念図

a. 解析プログラム

平衡計算においては、PHREEQC を使用する。解析では、高濃度の可溶性塩による反応に伴い、想定される二次鉱物の生成を考慮した検討が必要であることから、熱力学データベース (PHREEQC に同梱されている sit.dat より抽出、Thaumasite については、文献⁽³²⁾)を用いる。

b. 解析用物性値

PHREEQC の平衡計算に必要な入力物性値について、以下のとおり設定をする。

(a) 地下水組成

地下水組成は、事業所敷地内の鷹架層下部層、中部層及び第四紀層の地下水を対象に 1986 年 1 月～1987 年 10 月、1995 年 10 月及び 2011 年 10 月～11 月に取得された水質試験の結果を参考とし、濃度の平均値を用いて設定する。地下水組成を第 32 表に示す。

第 32 表 地下水組成(事業所敷地全体)

		測定結果	単位	設定値	単位
pH		5.3-8.3	-	PHREEQC にてチャージバランスを保つように計算して設定	-
ナトリウムイオン	Na ⁺	7.2-31.5	mg/L	8.4×10 ⁻⁴	mol/L
カリウムイオン	K ⁺	0.5-5.6	mg/L	7.8×10 ⁻⁵	mol/L
カルシウムイオン	Ca ²⁺	0.1未満-7.2	mg/L	9.1×10 ⁻⁵	mol/L
マグネシウムイオン	Mg ²⁺	0.1-3.8	mg/L	8.0×10 ⁻⁵	mol/L
炭酸水素イオン	HCO ₃ ⁻	5.6-51.9	mg/L	4.7×10 ⁻⁴	mol/L
硫酸イオン	SO ₄ ²⁻	1.0-21.7	mg/L	1.2×10 ⁻⁴	mol/L
塩化物イオン	Cl ⁻	12.9-20.3	mg/L	4.7×10 ⁻⁴	mol/L

(b) 初期鉱物組成

1号埋設設備に用いられたセメント系材料仕様・化学組成から、セメント系材料の初期鉱物組成を設定する。

セメント系材料の仕様を第33表に、また、セメント系材料及び混和材の化学組成を第34表及び第35表に示す。

第34表及び第35表のセメント系材料の仕様及び化学組成から、セメント系材料の初期鉱物組成を文献⁽³³⁾の算定方法に従い設定する。セメント系材料の初期鉱物組成を第36表に示す。

これは、地層処分の検討に用いられたセメント条件設定に使用しているモデルであるが、第9図の平衡計算の概念図のようなセメント系材料のバッチ式浸漬実験との比較において普通ポルトランドセメント及びフライアッシュ高含有シリカフェームセメントの液相成分の再現性が高いことから、適用をした。

第 33 表 セメント系材料仕様

	間隙率*1	W/C(%)	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量(kg/m ³)			細・粗骨材料(kg/m ³)		
				中庸熟 ポルトランドセメント	高炉スラグ 微粉末	膨張材	砕砂	陸砂	
充填材	0.16	67.1	283	422			1,462		
				42	380	-	877	585	
コンクリート	0.16	55	153	279			1,911		
				126	153	-	1,023	533	355

*1：全容積に対する空間の容積の割合を指す。

第 34 表 セメント系材料の化学組成

(単位：wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	ig. loss
普通 ポルトランドセメント	21.8	4.49	2.9	63.9	1.84	2.26	0.2	0.38	0.64
中庸熟 ポルトランドセメント	23.3	3.8	3.9	63.3	0.9	2.4	0.3	0.35	0.8

第 35 表 高炉スラグの化学組成

(単位：wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
高炉スラグ	34.19	14.87	0.84	41.97	6.09	0.02	0	0

第 36 表 セメント系材料の初期鉱物組成

鉱物	充填材		コンクリート		
	間隙率(-)*1	0.16	間隙率(-)*1	0.16	
	鉱物濃度				
	(mol/m ³)	(mol/L _{water})	(mol/m ³)	(mol/L _{water})	
エトリンガイト Ettringite	4.51	0.028	12.0	0.075	
ハイドロタルサイト Hydrotalcite	145.9	0.91	72.2	0.45	
CSH	CSH1.6	1,024.2	6.40	1,327.9	8.30
	CSH1.2	1,301.3	8.13	0.0	0.0
ギブサイト Gibbsite	427.1	2.67	0.0	0.0	
ハイドロガーネット C ₃ AH ₆	0.0	0.0	87.2	0.54	
ポルトランドイト Portlandite	0.0	0.0	29.9	0.17	
	Na ₂ O	2.03	0.013	4.07	0.025
	K ₂ O	1.56	0.01	5.08	0.032
骨材としてのカルサイト Calcite	8,762	55	10,220	64	

*1：全容積に対する空間の容積の割合を指す。

(c) 二次鉱物組成

PHREEQC では、設定する二次鉱物で平衡計算により算出される結果が異なることから、反応に寄与する条件(可溶性塩)を考慮し、以下の2種類の二次鉱物の設定による影響を確認する。

「埋設設備の環境におけるセメント二次鉱物設定(1)」は、セメント-ベントナイト環境における設定値である。

また、「ソーマサイトを含むセメントの検討における二次鉱物設定(2)」は、可溶性塩(硫酸塩)を起源として生成する可能性がある鉱物(ソーマサイト)による影響を把握するための設定値である。セメント系材料の二次鉱物の設定を第37表に示す。

第37表 セメント系材料の二次鉱物の設定

埋設設備の環境におけるセメント二次鉱物設定(1)		ソーマサイトを含むセメントの検討における二次鉱物設定(2)	
固相名	データベース内の名称	固相名	データベース内の名称
CSH ゲル	CSH0.8 ~ CSH1.6	CSH ゲル	CSH0.8 ~ CSH1.6
C_3ASH_4	Katoite	-	-
C_4AH_{13}	C_4AH_{13}	C_4AH_{13}	C_4AH_{13}
ゲーレンナイトハイドレート(C_2ASH_8)	Stratlingite	ゲーレンナイトハイドレート(C_2ASH_8)	Stratlingite
モノサルフェート	Monosulfoaluminate	モノサルフェート	Monosulfoaluminate
-	-	モノカルボアルミネート	Monocarboaluminate
-	-	ヘミカルボアルミネート	Hemicarboaluminate
カルサイト	Calcite	カルサイト	Calcite
ブルーサイト	Brucite	ブルーサイト	Brucite
ハイドロタルサイト	Hydrotalcite	ハイドロタルサイト	Hydrotalcite
-	-	アモルファスシリカ	SiO ₂ (am)
アナルサイム	Analcime	-	-
ローモンタイト	Laumontite	-	-
カオリナイト	Kaolinite	-	-
パイロフィライト	Pyrophyllite	-	-
フリーデル氏塩	Friedel-salt	-	-
2水石膏	Gypsum	2水石膏	Gypsum
硬石膏	Anhydrite	硬石膏	Anhydrite
ほう酸塩	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O (s)	ほう酸塩	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O (s)
	Ca ₃ B ₂ O ₆ (s)		Ca ₃ B ₂ O ₆ (s)
	CaB ₄ O ₇ (s)		CaB ₄ O ₇ (s)
	CaB ₂ O ₄ (s)		CaB ₂ O ₄ (s)
	NaBO ₂ (s)		NaBO ₂ (s)
硫酸塩 (Na ₂ SO ₄)	Thernardite	硫酸塩 (Na ₂ SO ₄)	Thernardite
ソーマサイト	Thaumasite	ソーマサイト	Thaumasite

(d) 可溶性塩濃度

可溶性塩濃度の設定は、可溶性塩による膨張性鉱物の生成に伴う膨張量に関して、定量的な知見がないことから、膨張性鉱物の体積膨張量が最大になると考えられる濃度を設定する。

そのため、可溶性塩濃度の設定値は、第 8 表に示された値を参考に、1 号埋設設備(1 群から 6 群)全体の体積における平均濃度が、1 号 7, 8 群の埋設設備へ作用するとして設定する。設定に当たっては、1 号埋設設備(1 群から 6 群)に含まれる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)の重量をモル量に換算した後、1 号埋設設備(7, 8 群)中の間隙水量により除算することで算出した。設定した可溶性塩の濃度を第 38 表に示す。

第 38 表 可溶性塩の濃度

ほう酸塩 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	硫酸塩 (Na_2SO_4)
0.84mol/L _{water} ^{*1}	4.5mol/L _{water} ^{*1}

*1：間隙水 1L に対する塩のモル量

(e) 解析ケース

「4. (3) (ii) b. (a) 地下水組成」から「4. (3) (ii) b. (d) 可溶性塩濃度」により設定したパラメータを踏まえて設定した解析ケースを第 39 表及び第 40 表に示す。

第 39 表 解析ケース-1

ケースNo.	セメント	間隙率 ^{*1}	塩 (1~6群の塩量全てが 7,8群へ反応する)	二次鉱物として ソーマサイト (沈殿あり/なし)	Stratlingite (C ₂ ASH ₈) 等の 二次鉱物 (あり/なし)	骨材を カルサイトと想定	二次鉱物設定
100	充填材	0.16	×	×	○	×	1
101			○	×	○	×	1
102			○	○	○	×	1
103			○	○	×	×	1
104			○	×	×	×	1
105			×	×	○	○	1
106			○	×	○	○	1
107			○	○	○	○	1
108			○	○	×	○	1
109			○	×	×	×	1
200	コンクリート	0.16	×	×	○	×	1
201			○	×	○	×	1
202			○	○	○	×	1
203			○	○	×	×	1
204			○	×	×	×	1
205			×	×	○	○	1
206			○	×	○	○	1
207			○	○	○	○	1
208			○	○	×	○	1
209			○	×	×	×	1

*1: 全容積に対する空間の容積の割合を指す。

第 40 表 解析ケース-2

ケースNo.	セメント	間隙率 ^{*1}	塩 (1~6群の塩量全てが 7,8群へ反応する)	二次鉱物として ソーマサイト (沈殿あり/なし)	Stratlingite (C ₂ ASH ₈) 等の 二次鉱物 (あり/なし)	骨材を カルサイトと想定	二次鉱物設定
100-2	充填材	0.16	×	×	○	×	2
101-2			○	×	○	×	2
102-2			○	○	○	×	2
103-2			○	○	×	×	2
104-2			○	×	×	×	2
105-2			×	×	○	○	2
106-2			○	×	○	○	2
108-2			○	○	×	○	2
109-2			○	×	×	○	2
200-2			コンクリート	0.16	×	×	○
201-2	○	×			○	×	2
202-2	○	○			○	×	2
203-2	○	○			×	×	2
204-2	○	×			×	×	2
205-2	×	×			○	○	2
206-2	○	×			○	○	2
207-2	○	○			○	○	2
208-2	○	○			×	○	2
209-2	○	×			×	×	2

*1: 全容積に対する空間の容積の割合を指す。

(f) 計算結果

PHREEQC を用いた平衡計算の計算結果を第 10 図～第 13 図に示す。

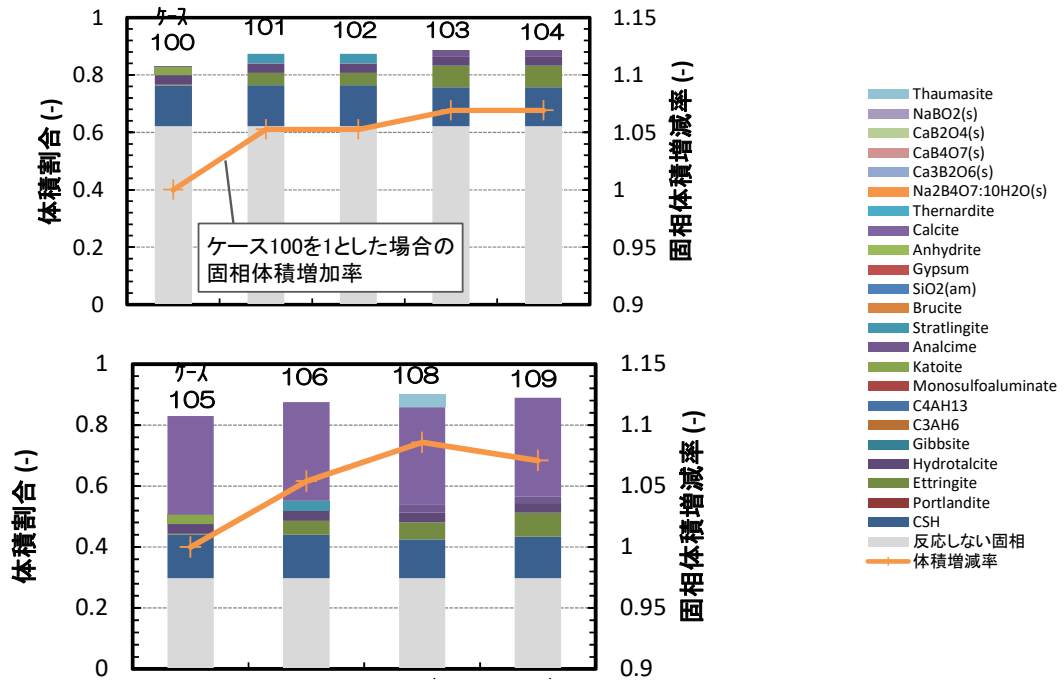
第 10 図より、充填材を対象とした解析ケース 100～109 の計算結果では、塩影響による固相体積の増加が最も大きかったのは、解析ケース 108 であり、約 9%の体積増加であった。第 11 図より、解析ケース 100-2～109-2 の計算結果では、解析ケース 103-2 及び 104-2 にて解析ケース 100～109 シリーズと同様の約 9%の体積増加であった。

また、第 12 図より、コンクリートを対象とした解析ケース 200～209 の計算結果では、塩影響による固相体積の増加が最も大きかったのは、解析ケース 208 及び 209 であり、約 5%の体積増加であった。第 13 図より、解析ケース 200-2～209-2 の計算結果では、解析ケース 203-2、204-2、207-2 及び 208-2 にて約 4%の体積増加であった。

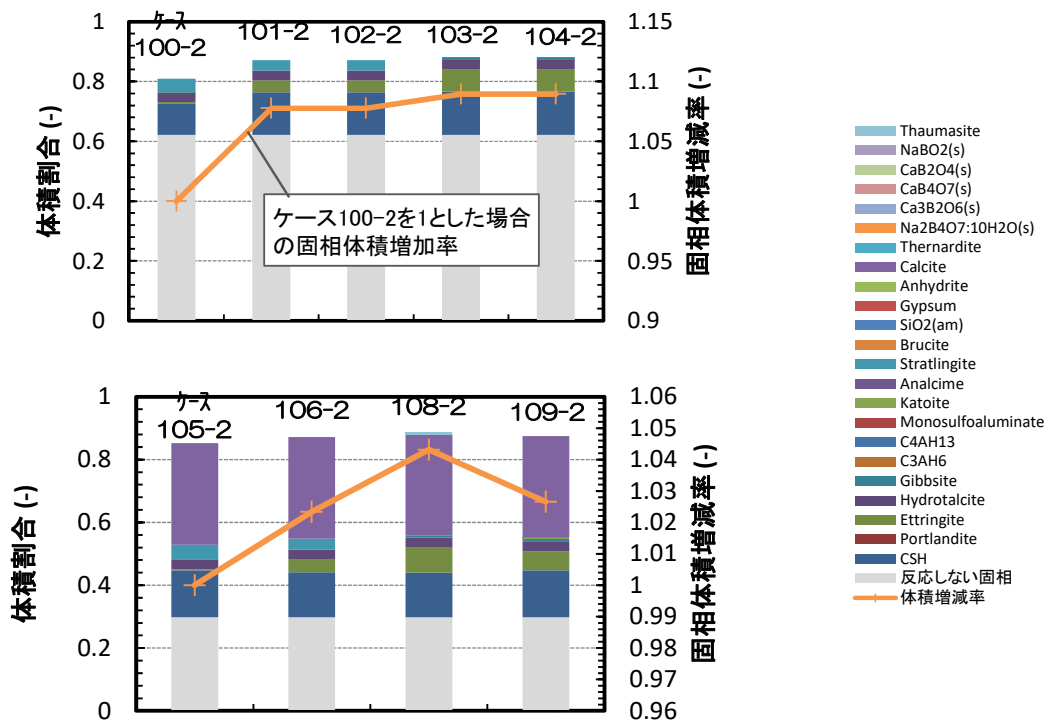
充填材及びコンクリートを対象とした解析結果より、それぞれの部材に生じ得る体積増加分は、「4. (3) (i) 可溶性塩の劣化現象の整理」のとおり、設定する物性値の評価に不確かさがあることから、以下のとおり最大の体積膨張倍率を設定する。

- ・ 充填材の体積膨張倍率は、1.09 倍とする。
- ・ コンクリートの体積膨張倍率は、1.05 倍とする。

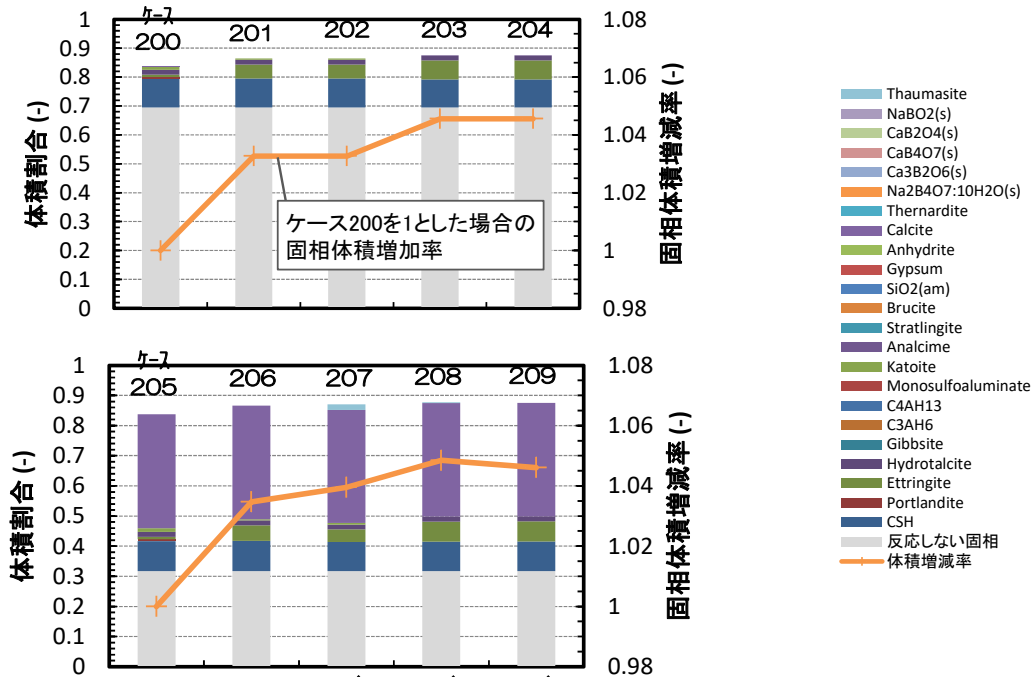
上記の設定に加えて、埋設設備の充填材、コンクリートの体積分率(第 41 表参照)を踏まえた埋設設備の体積膨張倍率を設定する。埋設設備の膨張倍率の設定値及びその考え方に関しては、次章の「4. (3) (iii) 埋設設備の膨張倍率の設定」にて詳述する。



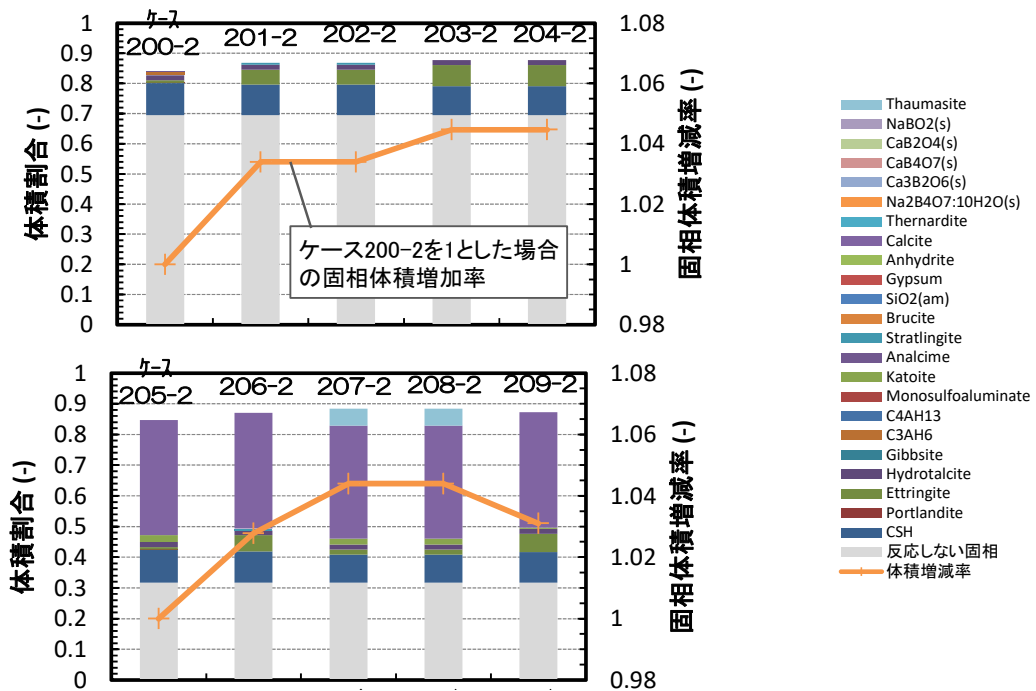
第 10 図 充填材を対象とした解析ケース 100～109 の計算結果



第 11 図 充填材を対象とした解析ケース 100-2～109-2 の計算結果



第 12 図 コンクリートを対象とした解析ケース 200～209 の計算結果



第 13 図 コンクリートを対象とした解析ケース 200-2～209-2 の計算結果

第 41 表 埋設設備の構成部材ごとの体積分率

部位	体積分率(-)
廃棄体中の充填材	0.194
廃棄体上部空隙	0.083
セメント系充填材	0.311
ポーラスコンクリート	0.042
コンクリート (覆い、外周及び内部仕切設備)	0.315

埋設設備の膨張倍率(-)^{*1}

$$= (\text{廃棄体中の充填材の体積分率(-)} + \text{セメント系充填材の体積分率(-)}) \times \text{充填材の体積膨張倍率(-)} + (\text{ポーラスコンクリートの体積分率(-)} + \text{コンクリート体積分率(-)}) \times \text{コンクリートの体積膨張倍率(-)} + \text{廃棄体上部空隙(-)}$$

*1：埋設設備の膨張倍率の算出に必要な体積分率は、第 41 表の埋設設備の構成部材ごとの値を用いる。

(iii) 埋設設備の膨張倍率の設定

「4. (3) (ii) 埋設設備の膨張倍率の評価」の結果を踏まえ、確からしい設定／厳しい設定を以下のとおりとする。埋設設備の膨張倍率の設定値を第 42 表に示す。

a. 確からしい設定

埋設設備の膨張倍率は、可溶性塩の溶出及び鉱物の生成に必要となる原料の消費による空隙の増加並びにセメント系材料及び廃棄体の初期空隙が存在することから、これを考慮し設定する。

b. 厳しい設定

埋設設備の膨張倍率は、セメント系材料(充填材及びコンクリート)の固相変化による膨張倍率の算出結果(充填材：1.09 倍、コンクリート：1.05 倍)を踏まえて設定する。

第 42 表 埋設設備の膨張倍率の設定値

条件	設定値	設定の考え方
膨張倍率	【確からしい設定】 1.0 倍 (変化なし)	【確からしい設定】 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張は、二次鉱物の生成に必要となる原料(他の鉱物)の消費に伴う空隙の増加又は他の鉱物の溶出による影響を考慮し、埋設設備の体積に変化が生じないものとして設定する。
	【厳しい設定】 1.1 倍	【厳しい設定】 セメント系材料の固相変化による膨張倍率の算出結果を踏まえて設定する。

(4) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定

可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量は、「4. (3) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定に係る諸条件の設定」の設定・評価を踏まえ、埋設設備の膨張倍率より算出し設定する。

可溶性塩は、廃棄体ごとに様々な濃度で分布しており、固型化時に形成される鉱物も多種多様である。また、可溶性塩は、廃棄体から溶出した際にセメント系材料と反応することで膨張性鉱物を生成するが、その膨張方向の規則性に係る定量的な知見はなく、特定することが出来ない。

そのため、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量は、「4. (2) 金属腐食による金属の膨張量の設定」と同様の2種類の変形方向に対して算出する。

(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定

鉛直方向への変形による膨張量は、第7図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備の膨張倍率の設定を用いて算出し設定する。

膨張量の算出については、その算出過程がわかるものとして1号廃棄物埋設地のうち、厳しい設定の鉛直方向へ卓越した変形の算出過程を例に以下に示す。

可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量(鉛直方向) (m)

$$= \text{埋設設備の体積膨張量}^{*1} (\text{m}^3) / \text{埋設設備の水平面積}^{*2} (\text{m}^2)$$

*1: 埋設設備の体積膨張量(m³)

$$= (\text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3} (\text{m}^3) \times \text{埋設設備の体積膨張倍率} (-) - \text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3} (\text{m}^3))$$

*2: 埋設設備の水平面積(m²)

$$= \text{埋設設備(東西方向)長さ} (\text{m}) \times \text{埋設設備(南北方向)長さ} (\text{m})$$

*3: 埋設設備のセメント系材料の体積(m³)

$$= \text{埋設設備の体積} (\text{m}^3) (\text{東西方向長さ} (\text{m}) \times \text{南北方向長さ} (\text{m}) \times \text{鉛直方向高さ} (\text{m})) - (\text{埋設設備中の健全時の金属重量} (\text{kg}) / \text{鉄の密度} (\text{kg}/\text{m}^3))$$

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第43表に示す。

第43表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)
	対象設備: 1号
	鉛直方向
確からしい設定	—
厳しい設定	6.08×10 ⁻¹

(ii) 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定

鉛直・水平方向への変形による膨張量は、第7図の膨張量の設定手順に従い、埋設設備の膨張倍率の設定を用いて算出し、設定する。

ここで、膨張量の算出について、算出項目が複数存在することから、その算出過程がわかるものを抽出し示す。算出に至っては、1号埋設設備の厳しい設定のうち鉛直・水平方向への変形の中から東西方向の算出過程を例に以下に示す。

可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量(東西方向)(m)

$$= (\text{埋設設備(東西寸法)}(m) \times 1 \text{ 方向当たりの埋設設備の膨張比}(-)^{*1}) - \text{埋設設備(東西寸法)}(m)$$

*1: 1方向当たりの埋設設備の膨張比(-)

$$= (\text{埋設設備の体積膨張比}(-)^{*2}) \text{の三乗根}$$

*2: 埋設設備の体積膨張比(-)

$$= (\text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3}(m^3) + \text{埋設設備の体積膨張量}^{*4}(m^3)) / \text{埋設設備のセメント系材料の体積}^{*3}(m^3)$$

*3: 「4.(4)(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定」のうち埋設設備のセメント系材料の体積の算出結果を引用

*4: 「4.(4)(i) 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定」のうち埋設設備の体積膨張量の算出結果を引用

上記の算出過程に従い、埋設設備ごとに膨張量を算出した結果を第44表に示す。

第44表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備: 1号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向
確からしい設定	-	-	-
厳しい設定	7.88×10^{-1}	7.88×10^{-1}	2.01×10^{-1}

(5) 金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定

(i) 膨張量の設定の考え方

「2. 現象の整理と検討手順」のとおり、1号廃棄物埋設地では、一部の群において混合埋設となることから、異なる条件により生じる現象(膨張)を加算することで膨張量の設定を行う。

1号廃棄物埋設地の膨張量の設定に当たっては、充填固化体由来の金属腐食に伴う現象(膨張)を、充填固化体が埋設される埋設設備に対してのみ考慮する。

また、均質・均一固化体由来の可溶性塩と埋設設備の反応に伴う現象(膨張)に関しては、廃棄物埋設地が地下水面下に敷設されることから、周辺の地下水により可溶性塩が充填固化体を含む埋設設備へ移行することを考慮する。

以上のことから、1号廃棄物埋設地のうち、7群の埋設設備1基及び8群の埋設設備5基に対してのみ2種類の現象(膨張)を重畳されることとする。

なお、重畳時の相互作用を定量的に推定・評価することが困難であることから膨張量を加算することで評価する。

(ii) 膨張量の設定値

「4. (2) 金属腐食による金属の膨張量の設定」及び「4. (4) 可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定」により設定した膨張量を「4. (5) (i) 膨張量の設定の考え方」に基づき算出した結果を第45表及び第46表に示す。

第45表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号*1	対象設備：2号
	鉛直方向		
確からしい設定	1.10×10^{-1}	2.53×10^{-2}	9.51×10^{-2}
厳しい設定	1.69×10^0	9.69×10^{-1}	1.39×10^0

*1：1号廃棄物埋設地のうち厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している。

第46表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)								
	対象設備：3号			対象設備：1号*1			対象設備：2号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向
確からしい設定	3.50×10^{-1}	2.00×10^{-1}	3.64×10^{-2}	3.32×10^{-2}	3.32×10^{-2}	8.42×10^{-3}	1.64×10^{-1}	1.68×10^{-1}	3.16×10^{-2}
厳しい設定	5.00×10^0	2.85×10^0	5.20×10^{-1}	1.26×10^0	1.26×10^0	3.19×10^{-1}	2.25×10^0	2.31×10^0	4.34×10^{-1}

*1：1号廃棄物埋設地のうち厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している。

5. 1,000年後の状態変化(膨張)の影響評価

(1) 力学的影響評価の考え方

金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による膨張量は、3号廃棄物埋設地で最大となり、確からしい設定で水平方向:0.35m(東西)、鉛直方向:0.0364m、厳しい設定で水平方向:5.0m(東西)、鉛直方向:0.52mである(第45表及び第46表参照)。確からしい設定及び厳しい設定の膨張量が直接的に覆土の変位量になると仮定した場合、覆土の形状変化は第14図c.及び第14図d.に示すとおりとなる。

覆土完了後の廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数m以上あることから、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である(第14図a.参照)。金属腐食による膨張は、この拘束圧が作用した場において、メートルオーダーの大変形として生じることとなる。埋設設備間の狭隘部に設置された下部覆土は、埋設設備の膨張に伴い、埋設設備に挟まれ圧縮された状態となり圧密(密度増加)することから、覆土の低透水性への影響はないと想定される。また、狭隘部は隣接する埋設設備により変形が拘束されることから、側部岩盤側の覆土方向へ変形が卓越すると想定される(第14図b.参照)。そのため、大きな剛性を持つ金属が変形することにより、金属と比較して小さな剛性を持つ側部岩盤側の覆土が、強制変位のような状態でせん断変形する状態である。

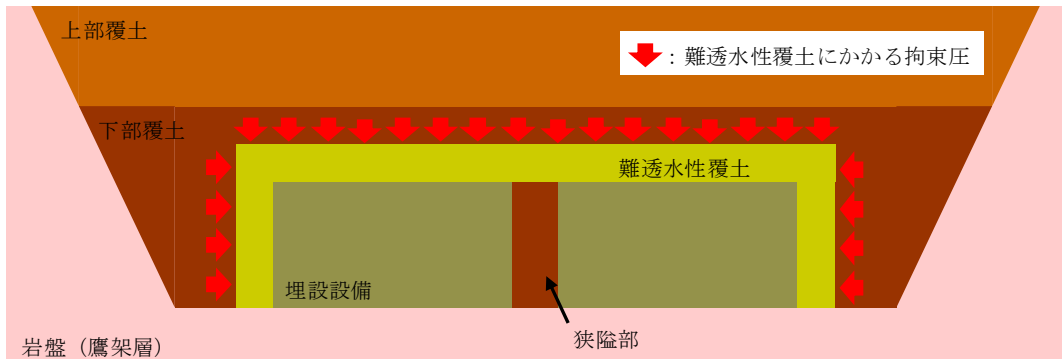
以上のことから、膨張による変形が卓越する隅角部(側部岩盤方向)の難透水性覆土に着目し、力学的影響を評価する。

確からしい設定における水平方向の変形量0.35mが難透水性覆土の厚さ2.0m以下であることから、難透水性覆土に20%程度のひずみが生じるものの開口は生じない(第14図c.参照)。しかしながら、せん断面付近のひずみの発生に伴い、透水性能の低下が生じる可能性がある。難透水性覆土(購入砂を母材としたCa型ベントナイト混合土)のせん断変形を対象とした三軸圧縮試験結果及びせん断透水試験結果を第15図に示す。第15図a.より、せん断ひずみ5%以降から30%までせん断破壊後の残留状態^{*1}であることを確認できる。残留状態に達した覆土はひずみ量の増加によらず継続的に同じ性質を示すため、20%程度のひずみが生じる難透水性覆土の隅角部においても、同じ性質を示すと考えられる。また、第15図b.より、残留状態であるせん断ひずみ15%までの変形において透水係数に大きな変化が生じていない。これらのことから、難透水性覆土には20%程度のひずみが生じるが、せん断面付近の透水性能の低下が生じないと考えられる。

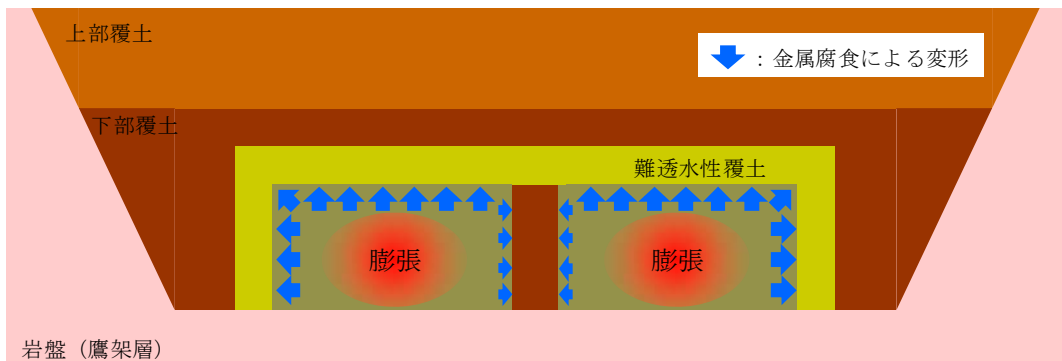
厳しい設定における水平方向の変形量5.0mが難透水性覆土の厚さ2.0m以上であることから、難透水性覆土に開口が生じる可能性がある(第14図d.参照)。地盤内の複雑な応力状態及び変形挙動を考慮し、開口の可能性について詳細に検討する必要がある。

以上のことから、厳しい設定に対し、廃棄物埋設地の規模を考慮した覆土の低透水性(透水係数及び厚さ)への力学的影響評価を実施する。また、確からしい設定においては難透水性覆土に開口は生じないものの、覆土の低透水性(厚さの変化)を確認するため、力学的影響評価を同様に実施する。

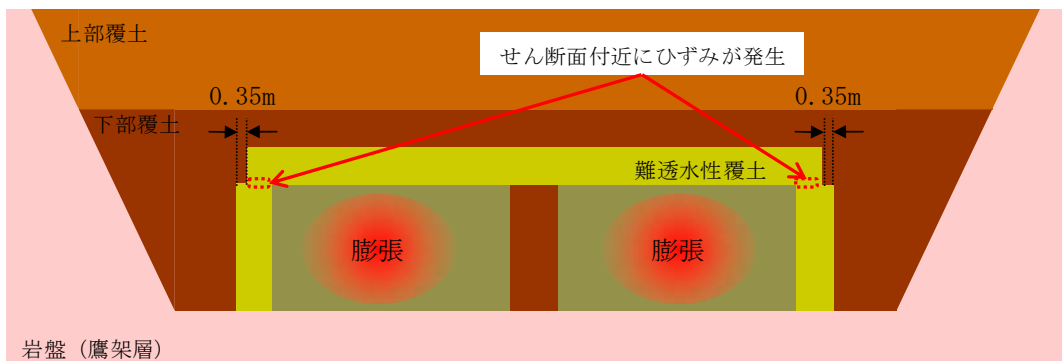
*1: 残留状態とは、せん断抵抗がピーク値(せん断強さ)を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達した状態である。



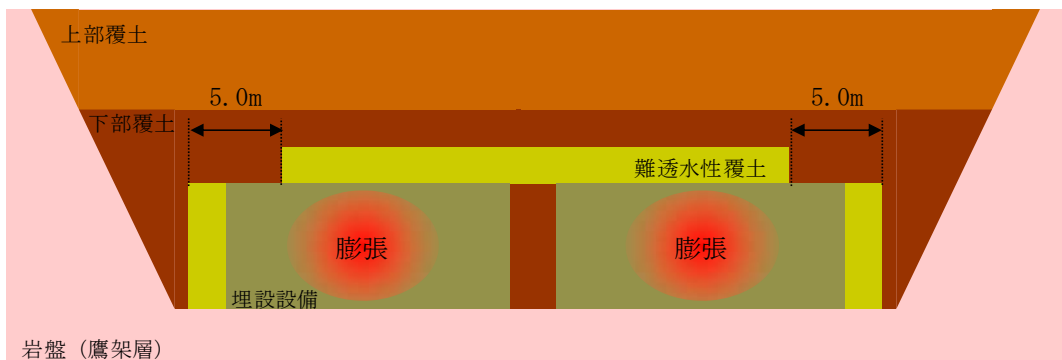
a. 初期状態(覆土完了後)



b. 金属腐食による変形

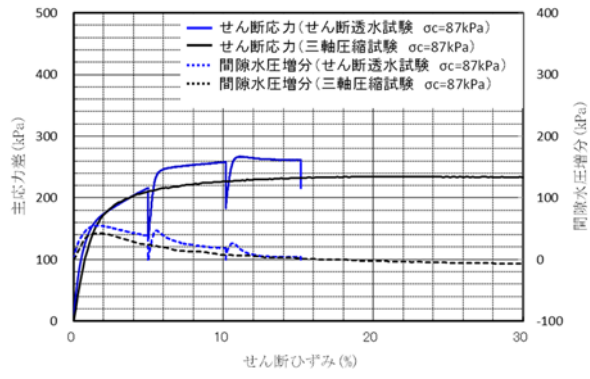


c. 確からしい設定における覆土の形状変化

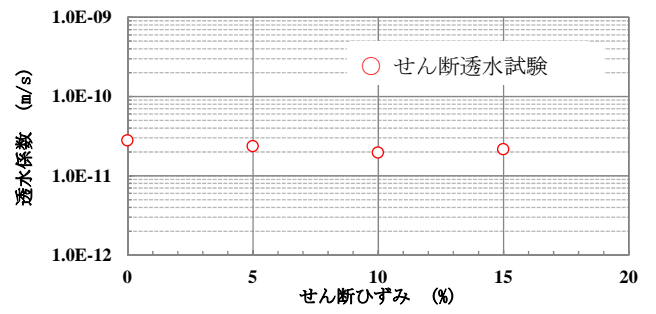


d. 厳しい設定における覆土の形状変化

第 14 図 埋設設備の膨張に伴う覆土の形状変化の概念図



a. 主応力差-せん断ひずみ



b. 透水係数-せん断ひずみ

第 15 図 三軸圧縮試験及びせん断透水試験による試験結果

(2) 力学的影響評価手法

力学的影響評価手法は、廃棄物埋設地の規模を考慮し、数値解析を用いた評価を実施する。

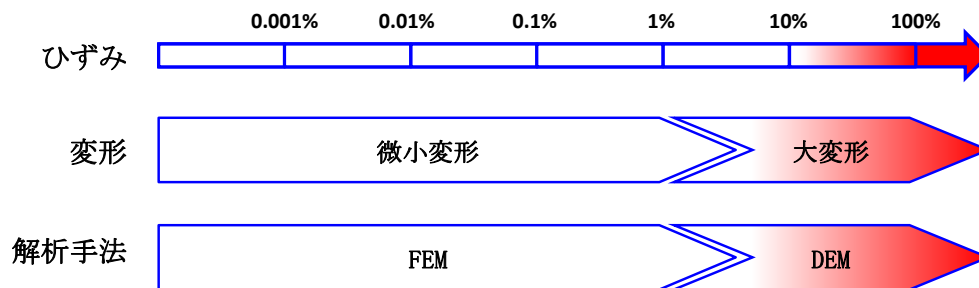
地盤工学の数値解析分野では、有限要素法(Finite Element Method) (以下「FEM」という。)が広く用いられている。文献⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾によると、FEMは計算格子を用いた計算手法であることから、地震時における地盤の安定性評価などの微小変形である数%程度までのひずみを対象として用いられている。数%のひずみを超える大変形においては、変形するにつれ要素に大きなひずみが生じ、計算精度を低下させる可能性がある。

大変形を扱うことができる解析手法の1つとして、個別要素法(Distinct Element Method) (以下「DEM」という。)がある。文献⁽³⁴⁾~⁽³⁶⁾によると、DEMは対象物を粒子の集合体(剛体)とし、粒子に運動方程式を適用することで、不連続体の挙動を再現する解析手法である。

上記の文献⁽³⁴⁾~⁽³⁶⁾より、解析手法とひずみレベルは第16図に示す関係があると整理される。

廃棄物埋設地の覆土に生じるひずみは、金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応による膨張により、数十~数百%に及ぶことが予想される。大変形の領域においては、分離、すべり及び剥離のような不連続体としての挙動が顕著になることから、不連続体を対象とした解析としてDEMにより評価することが好ましい。

以上のことから、埋設設備の膨張によるメートルオーダーの大変形においては、不連続体を対象としたDEM解析手法を採用する。



第16図 解析手法とひずみレベルの関係

(3) 覆土の主な仕様

廃棄物埋設地における覆土の主な仕様を第 47 表に示す。難透水性覆土の材料はベントナイト混合土、下部覆土の材料は現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂及び砕石、上部覆土の材料は現地発生土に必要な応じて砕砂及び砕石を混合する。

第 47 表 覆土の主な仕様

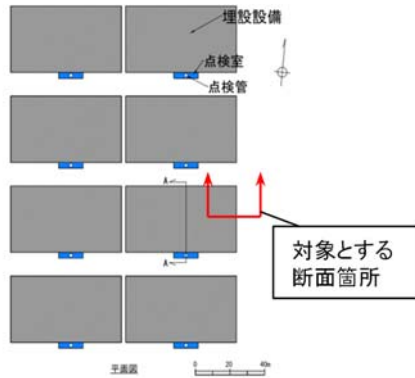
設備	主要な部位	仕様	
		材料	性能
覆土	難透水性覆土	・ ベントナイト混合土	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数^{*1}として1.0×10^{-10}m/s 以下 ・ 厚さ：2m 以上
	下部覆土	・ 現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂及び砕石を混合	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数^{*1}として1.0×10^{-8}m/s 以下 ・ 厚さ：難透水性覆土側部及び難透水性覆土上面から層厚 2m 以上
	上部覆土	・ 現地発生土に必要な応じて砕砂及び砕石を混合	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点)：廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数と同程度 ・ 厚さ：下部覆土上面から現造成面又はそれ以上

*1：空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数を指す。

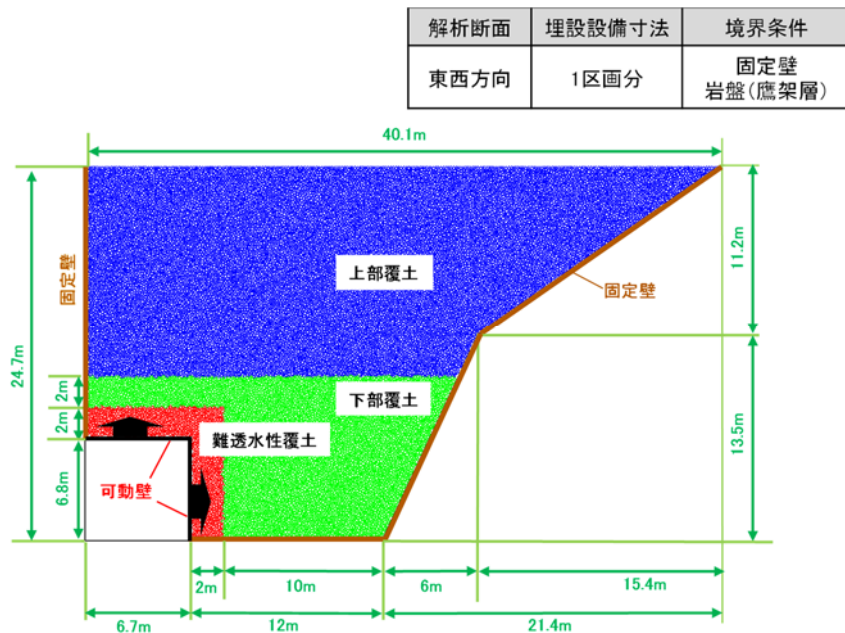
(4) 解析に用いる諸条件の設定

(i) 解析モデル

解析モデルの設定においては、膨張量の最も大きい廃棄物埋設地の断面を対象とする。金属廃棄体の配列数が多い水平方向に変形が卓越することから、隅角部付近の覆土に大きなひずみが発生する。そのため、解析対象断面は、3号廃棄物埋設地の東西方向の断面とし、埋設設備端部の1区画を対象とする。解析対象断面の位置図を第17図に、解析モデルを第18図にそれぞれ示す。



第17図 3号廃棄物埋設地における解析対象断面の位置図



第18図 3号廃棄物埋設地の解析モデル

(ii) 埋設設備の膨張影響の方向

覆土の力学的影響(膨張影響)は、埋設設備中の金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応に起因し生じるが、その変形方向に関しては、これらの現象に起因する覆土への応力分布を定量的に把握することが困難であるため、変形方向の状態を設定する。埋設設備の膨張影響の方向の設定を第 48 表に示す。

第 48 表 埋設設備の膨張影響の方向の設定

設定	設定の考え方	変形概念図
<p>【確からしい設定/厳しい設定共通】</p> <p>鉛直方向へ卓越した変形</p>	<p>埋設設備の変形は、埋設設備の側部に必要に応じて碎石を混合した剛性の高い下部覆土を設置することから、鉛直方向に卓越して生じる可能性が高いと考えられる。</p> <p>そのため、埋設設備の膨張に伴う変位は、全て鉛直方向へ作用するとして設定する。</p>	
<p>【確からしい設定/厳しい設定共通】</p> <p>鉛直・水平方向への変形</p>	<p>埋設設備の変形は、構造上躯体が水平方向に大きいことから、水平方向に変位が生じる可能性がある。</p> <p>そのため、埋設設備の膨張に伴う変位は、埋設設備の構造寸法に基づくアスペクト比が維持されたまま鉛直・水平方向へ作用するとして設定する。</p>	

(iii) 解析に用いる変形量

埋設設備中の金属廃棄物は、廃棄体 1 本ごとの金属重量が異なる。そのため、金属腐食に伴う膨張現象が埋設設備の区画ごとで不均質に生じることが予想される。

覆土の力学的影響は、膨張現象に起因した変形挙動による不均質性に対し、以下の観点を踏まえた最大の値となる変形量を設定することで、不確実性を包含した評価を行う。

a. 鉛直方向へ卓越した変形

埋設される金属廃棄物の量が埋設設備の区画ごとに異なることから、鉛直方向への膨張は、埋設設備の区画ごとに異なる挙動を示す。一方で、埋設設備の鉛直方向の変形量は、区画ごとにそれぞれが膨張した場合に比較して、1 つの区画のみが膨張した場合において、最大となる。そのため、埋設設備に生じる膨張に伴う変形は、埋設設備端部の 1 区画に対して、全て鉛直方向へ作用するとして、最大の値を設定する。

b. 鉛直・水平方向への変形

埋設される金属廃棄物の量が埋設設備の区画ごとに異なることから、鉛直・水平方向の膨張は、埋設設備の区画ごとに異なる挙動を示す。一方で、埋設設備の鉛直・水平方向に対する変形量は、埋設設備の区画ごとに生じる膨張量の合計であるため、鉛直方向に比較して水平方向への膨張が卓越し、最大となる。そのため、埋設設備に生じる膨張に伴う変形は、埋設設備端部の 1 区画に対して、埋設設備の構造寸法に基づくアスペクト比が維持されたまま鉛直・水平方向へ作用するとして、最大の値を設定する。

以上のことから、解析に用いる変形量は、覆土の低透水性への影響評価の観点から、隅角部付近の覆土に大きなひずみが生じるよう「4. (5) (ii) 膨張量の設定値」を参考とした最大の値を設定する。また、解析の変形挙動は、「5. (4) (ii) 埋設設備の膨張影響の方向」に従い埋設設備の変形比率を保ったまま一定として変形するものとする。解析に用いる変形量を以下の第 49 表に示す。

第 49 表 DEM 解析に用いる変形量

変形方向	変形量(m/基)	
	東西方向	鉛直方向
鉛直方向へ卓越した変形	0.0	2.0
鉛直・水平方向への変形	5.0	1.0

(iv) 解析用物性値

廃棄物埋設地における力学的影響評価に必要な解析用物性値を設定する。土質系材料である覆土の変形挙動を再現するため、覆土の材料を用いた供試体による三軸圧縮試験結果に対して、シミュレーション解析により各覆土の物性値のフィッティングを行う。フィッティングが完了した時点の各種物性値を、廃棄物埋設地における力学的影響評価の解析用物性値とする。三軸圧縮試験、三軸圧縮試験の供試体、シミュレーション解析及びフィッティングの具体的な内容を以下に示す。また、シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値に対し、廃棄物埋設地の解析モデルへの適用性を示す。

a. 三軸圧縮試験

(a) 試験の選定理由

廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係を第 19 図に示す。

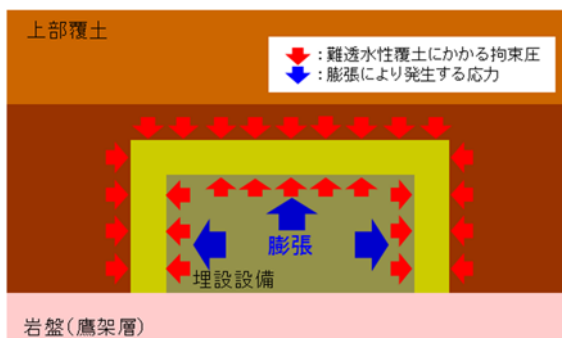
廃棄物埋設地は、覆土による拘束圧が作用することで、覆土内部の応力状態が等方応力状態にある。その後、長期的な埋設設備の膨張に伴い、覆土には内側から押し広げられる方向に応力が加えられる。そのため、埋設設備の膨張時において、覆土内部では圧縮応力及びせん断応力が支配的に作用している状態となると考えられる。

文献⁽³⁸⁾によると、三軸圧縮試験は、等方応力状態で圧密された土に対して、軸圧縮されるとき強度・変形特性及び主応力差最大時の有効応力を求めることができる。そのため、廃棄物埋設地における長期的な埋設設備の膨張時の圧縮応力及びせん断応力が作用している状態と同様であると考えられる。

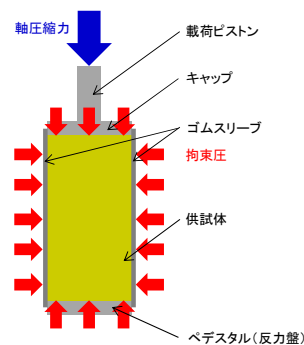
以上のことから、埋設設備の膨張時における覆土の変形挙動を三軸圧縮試験により再現できると判断し、三軸圧縮試験を選定した。

(b) 試験方法

三軸圧縮試験は、地盤工学会基準「土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験」(JGS 0523-2009)に準拠し実施する。三軸圧縮試験における拘束圧は、各覆土にかかる上載圧相当を包含している。軸圧縮は、ひずみ速度が一定になるように連続的に供試体を圧縮する。また、圧縮中は、軸圧縮力及び軸変位量を測定することで主応力差-軸ひずみ曲線を取得する。



a. 廃棄物埋設地の応力状態



b. 三軸圧縮試験の応力状態

第 19 図 廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係

b. 三軸圧縮試験の供試体

(a) 難透水性覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた難透水性覆土の供試体は、購入砂を母材とした Ca 型ベントナイト混合土である。

難透水性覆土の材料である購入砂は、JIS A 5005⁽³⁷⁾に準拠した製品を用いるため、品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきがない。また、難透水性覆土の材料であるベントナイトは細粒分である粘土に分類され、文献⁽³⁸⁾によると粒径 0.075mm 以下である。材料の大半を占める砂の粒径は 5.0mm 以下であり、難透水性覆土の骨格を主形成していることから、ベントナイトは力学的な作用に寄与しない。フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、同様に品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきのない砂及び有意な力学的影響を与えないベントナイトで作製し、廃棄物埋設地においても三軸圧縮試験の供試体と同様の品質で施工すると考えられる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(b) 下部覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた下部覆土の供試体は、ベントナイト、砕砂及び砕石を混合しない現地発生土単体である。

下部覆土の材料は、現地発生土を用いるため、品質(密度及び粒度分布)にばらつきがあることから、必要に応じてベントナイト、砕砂及び砕石により調整を行うこととしている。一方で、フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、現地発生土単体を対象としている。現地発生土単体は、平均粒径が大きい砕砂及び砕石を混合した場合よりも剛性が小さくなる。そのため、現地発生土単体により設定された解析用物性値は、下部覆土に砕砂及び砕石を混合した場合よりも、変形を大きく表現できる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(c) 上部覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた上部覆土の供試体は、砕砂及び砕石を混合しない現地発生土単体である。

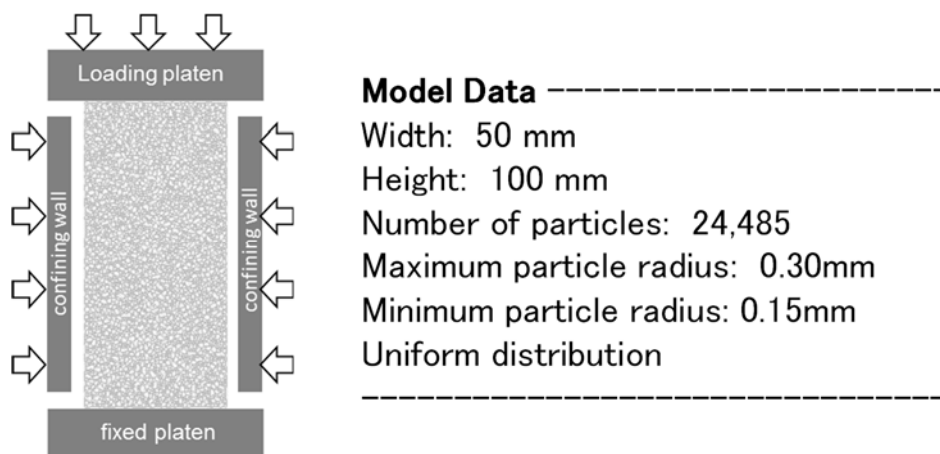
上部覆土の材料は、現地発生土を用いるため、品質(密度及び粒度分布)にばらつきがあることから、必要に応じて砕砂及び砕石により調整を行うこととしている。一方で、フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、現地発生土単体を対象としている。現地発生土単体は、平均粒径が大きい砕砂及び砕石を混合した場合よりも剛性が小さくなる。そのため、現地発生土単体により設定された解析用物性値は、上部覆土に砕砂及び砕石を混合した場合よりも、変形を大きく表現できる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

c. シミュレーション解析

(a) 三軸圧縮試験の解析モデル

三軸圧縮試験のシミュレーションモデルを第 20 図に示す。供試体モデルは、実際の三軸圧縮試験と同様に幅 50mm、高さ 100mm として作成した。粒子数は 24,485 個である。



第 20 図 三軸圧縮試験のシミュレーションモデル

粒子間結合モデルの概念図を第 21 図に示す。

粒子間結合モデルは、廃棄物埋設地に生じる膨張現象を考慮して設定する。廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数 m 以上あるため、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である。また、金属腐食による膨張は、この拘束圧が作用した場において生じることとなる。

金属腐食の膨張に伴い、覆土には内側から押し広げられる方向に応力が加えられることから、覆土内部では圧縮応力及びせん断応力が支配的に作用している状態となると考えられる。そのため、本 DEM 解析においては、粒子が接触しているときの圧縮挙動及びせん断挙動の再現性が重要であり、法線方向及び接線方向にバネ及びスライダーを直列で設定した。

一方で、上記の応力状態を考慮すると、粒子が離れようとするときのせん断挙動は限定的であり、覆土全体の挙動における再現性への影響が小さいことから、バネのみを設定した。粒子間結合モデルに付与するそれぞれの機能を以下に示す。

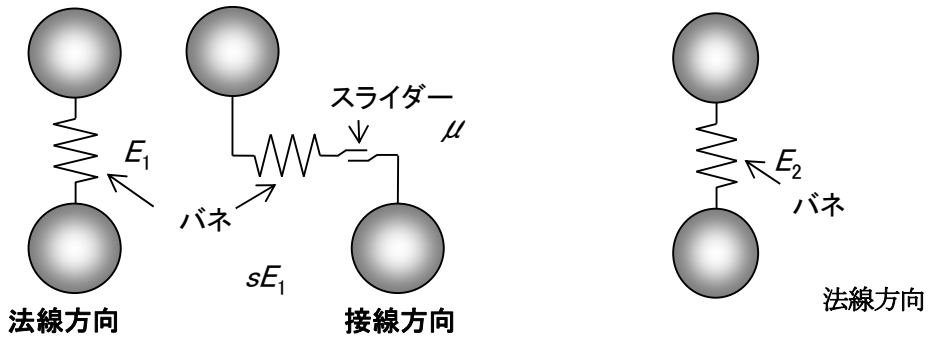
また、参考として、粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係を第 50 表に示す。

[粒子が接しているとき]

- ・ 法線方向のバネ (E_l) : 圧縮方向において覆土の剛性を表現する
- ・ 接線方向のバネ (sE_l) : せん断方向において覆土の剛性を表現する
- ・ 接線方向のスライダー (μ) : せん断方向において摩擦抵抗力を表現する

[粒子が離れようとするとき]

- ・ 法線方向のバネ (E_2) : 引張方向において覆土の剛性を表現する



粒子が接触しているとき

粒子が離れようとするとき

- 粒子同士が接触しているときは、バネによる反発力及びスライダーによる摩擦力が作用する。
- 粒子同士が離れようとするときは、バネによる引張力が作用する。
- 引張力がバネの結合強度を超えるとバネが破断し粒子同士が離れ、再び粒子同士が接触することによって結合力が再生する。
- 粒子の要素は剛体とし、要素自体が変形するなどの挙動は示さないものとする。

第 21 図 粒子間結合モデルの概念図

第 50 表 粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係

	粒子が接触しているとき	粒子が離れようとするとき
法線方向	<p>応力</p> <p>ひずみ</p>	<p>応力</p> <p>ひずみ</p>
接線方向	<p>応力</p> <p>ひずみ</p>	<p>—</p>

(b) 解析方法

シミュレーション解析は、実際の三軸圧縮試験と同様に供試体モデル下部の載荷盤を固定しておき、側部及び上部の載荷盤から一定の拘束圧を作用させた状態で上部の載荷盤を動かすことにより実施した。

軸方向応力は、供試体モデル上端の粒子から上部の載荷盤に作用する反発力の総和を供試体モデルの幅で除すことにより算出した。

ひずみについては、供試体モデルの上下左右各辺付近の粒子を10個ずつ選出し、それらの粒子の相対的な変位を計測し、それぞれ平均をとることにより算出した。

d. フィッティング

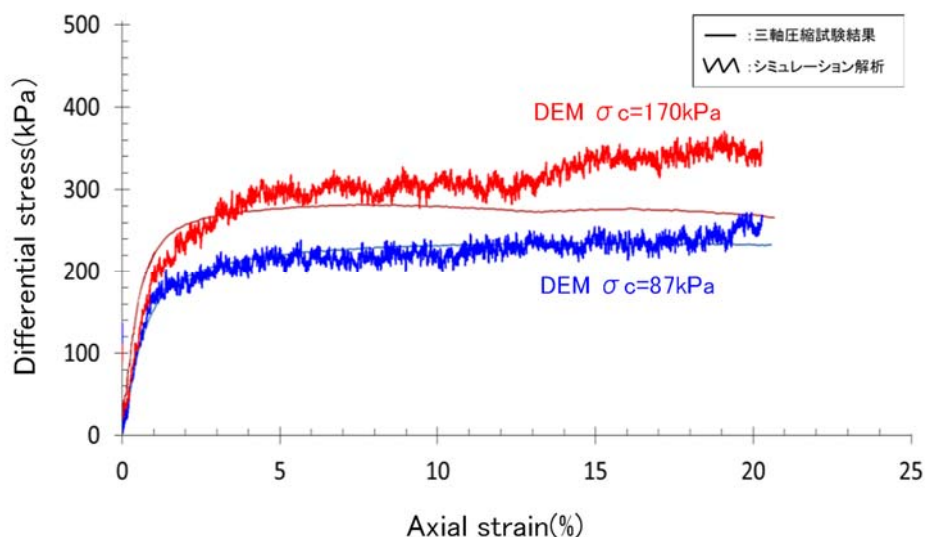
三軸圧縮試験により得られた各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線に対して、シミュレーション解析により得られる各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線が適合するまで、パラメータを繰り返し補正することをフィッティングという。フィッティングが完了した時点のパラメータが解析用物性値となる。

(a) 難透水性覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第22図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できているため、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

なお、拘束圧 170kPa のシミュレーション解析のうちひずみ 10%以降において、三軸圧縮試験結果に対して主応力差がわずかに上昇している箇所がある。これは、シミュレーションモデルにおいては、側部に設置している剛体壁を介して拘束圧を与えており、ひずみが大きくなると供試体の変形を押し戻す作用が働くために起きていると考えられる。三軸圧縮試験においては供試体の側部のゴムスリーブを介して拘束圧を与えており、変形を許容していることから、変形を押し戻す作用が生じていない。廃棄物埋設地モデルは、モデルサイズが大きく上部が解放されていることから、上記のような変形を押し戻す作用が生じないと考えられる。

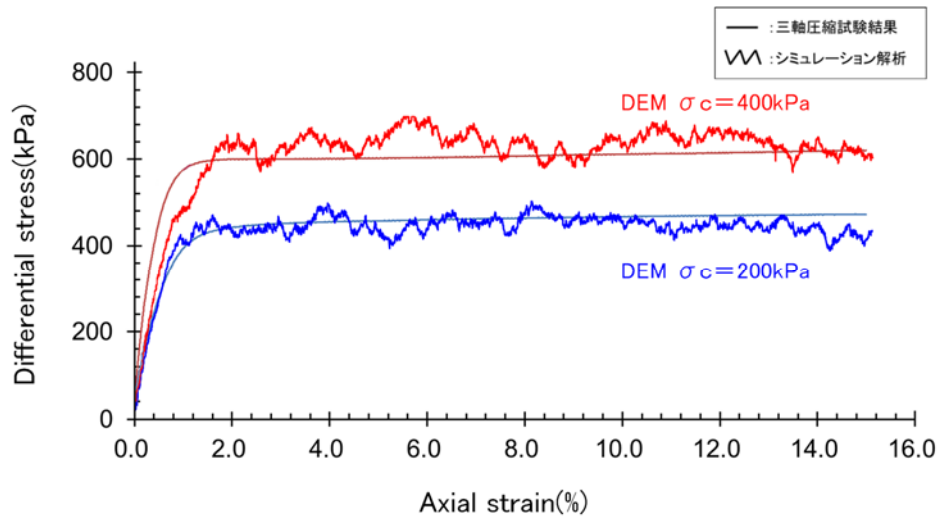


第 22 図 難透水性覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

(b) 下部覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第23図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できていることから、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。



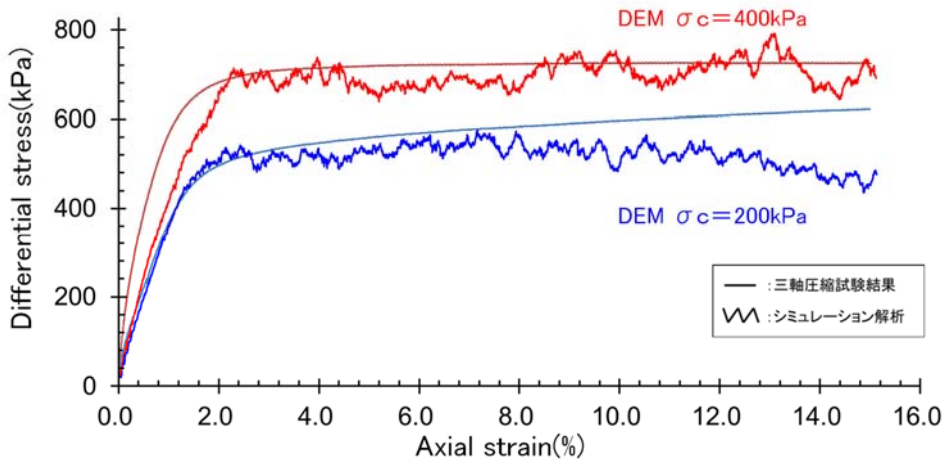
第23図 下部覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

(c) 上部覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第24図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できていることから、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

なお、上部覆土は、力学的影響評価の対象としている低透水性機能を有する難透水性覆土及び下部覆土への上載荷重が作用していれば良い。



第24図 上部覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

e. 解析用物性値のまとめ

(a) シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値

解析用物性値のフィッティングにより設定した難透水性覆土、下部覆土及び上部覆土の解析用物性値を第 51 表に示す。

第 51 表 解析用物性値一覧

設定	設定値			単位	設定方法
	難透水性覆土	下部覆土	上部覆土		
密度	1,649	1,940	1,500	kg/m ³	対象部材の土粒子密度試験より算出し、設定する。
最大粒子半径	100	100	100	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
最小粒子半径	50	50	50	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
粒度分布	-	-	-	-	解析モデルにあわせて設定する。
法線方向弾性バネ 1 弾性係数(E_1)	55	200	140	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
法線方向弾性バネ 2 弾性係数(E_2)	600	200	140	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
弾性バネ定数比(s)	1.0	1.0	1.0	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
粒子間摩擦係数(μ)	0.4	0.5	0.4	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
結合強度(σ_{max})	330	1,000	1,200	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。

(b) 廃棄物埋設地の解析モデルへの適用性

大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに対して、三軸圧縮試験のシミュレーションモデルでフィッティングした解析用物性値を適用させることについて、以下のとおり考察する。

三軸圧縮試験結果では、5%以降のひずみ領域において応力の変動は見られず、覆土がせん断破壊後の残留状態となり、残留強度を発現していると考えられる。

文献⁽³⁶⁾によると残留強度はせん断抵抗がピーク値（せん断強さ）を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達したときの値と定義される。また、原位置において移動距離の大きい地すべり面でのせん断強さに相当すると考えられており⁽³⁹⁾、廃棄物埋設地の覆土においても大変形時に発現する強度であるといえる。さらに、室内試験によるせん断破壊後、せん断面において最終的にペッド(複数の土粒子が集まって集合体を形成したもの)の再配列が完了し、完全配向状態となった段階で、残留強度状態に収束するとされている⁽⁴⁰⁾。そのため、15%以降のひずみ領域においても、残留状態に達した覆土はひずみ量の増加によらず継続的に同じ性質を示す。

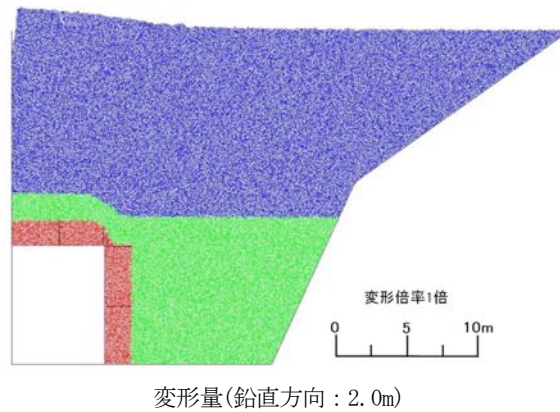
以上のことから、15%までのひずみを対象としたシミュレーション解析でフィッティングさせた解析用物性値は、残留状態に至るまでの状況を再現できているため、大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(5) 解析結果

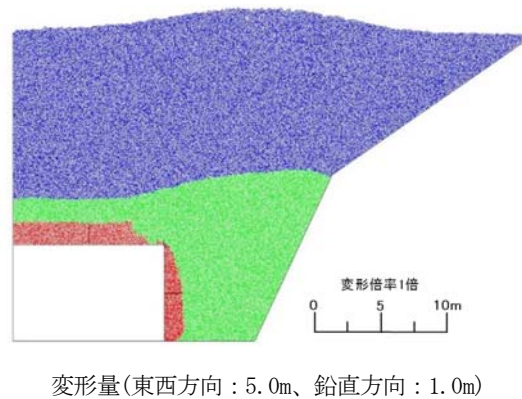
(i) 覆土の変形方向による力学的影響の確認

前項までに設定したパラメータを用いてDEM解析を実施した。解析では、覆土の形状変化に大きな影響を与える状態を確認するため、第48表で設定した変形方向の2種類の設定を併記することで形状変化を確認する。解析結果を第25図及び第26図に示す。第25図及び第26図より、第49表の変位を与えた際の覆土の形状変化は、鉛直・水平方向への変形による影響が大きいことが確認された。

そのため、覆土の透水係数及び厚さへの影響については、鉛直・水平方向への変形を対象に評価する。



第25図 鉛直方向へ卓越した変形ケースにおける解析結果



第26図 鉛直・水平方向への変形ケースにおける解析結果

(ii) 覆土の厚さの評価

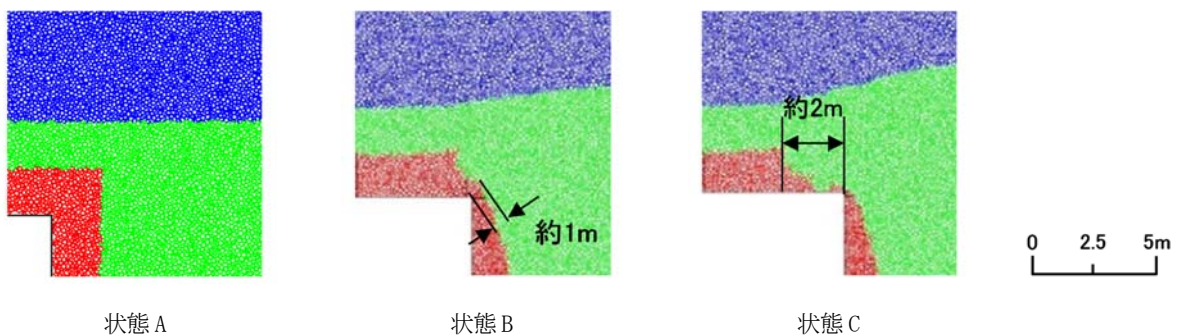
覆土の厚さは、弱部と考えられる隅角部に残存している難透水性覆土の厚さを確認することで評価する。

第 46 表の確からしい設定の膨張量(東西方向： $3.50 \times 10^{-1}m$ 、鉛直方向： $3.64 \times 10^{-2}m$)及び厳しい設定の膨張量(東西方向： 5.00×10^0m 、鉛直方向： $5.20 \times 10^{-1}m$)を考慮して鉛直・水平方向の変形ケースのうち、以下の 3 種類の変形状態に対する隅角部の拡大図を第 27 図に示す。

- ・ 状態 A 解析の初期状態
- ・ 状態 B 確からしい設定以上に変形した状態(変形量 東西方向： $3.0m$ 、鉛直方向： $0.6m$)
- ・ 状態 C 厳しい設定以上に変形した状態(変形量 東西方向： $5.0m$ 、鉛直方向： $1.0m$)

解析結果から、確からしい設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口は生じず、厚さが約 1m 残る状態が確認されたが、金属腐食の膨張量が解析の変形量に比して十分小さいことから、厚さが 1m 以上残る状態を確からしい設定の設定値とする。また、厳しい設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口(約 2m)が生じる可能性が確認されたため、隅角部に約 2m の開口が生じる状態を厳しい設定の設定値とする。

なお、解析結果より、難透水性覆土の厚さが減少した隅角部は、覆土材料が存在しない空洞のような状態ではなく、下部覆土に置き換わっていることを確認している。また、下部覆土は、難透水性覆土の解析結果から、覆土厚さへ有意な影響が生じないと設定する。



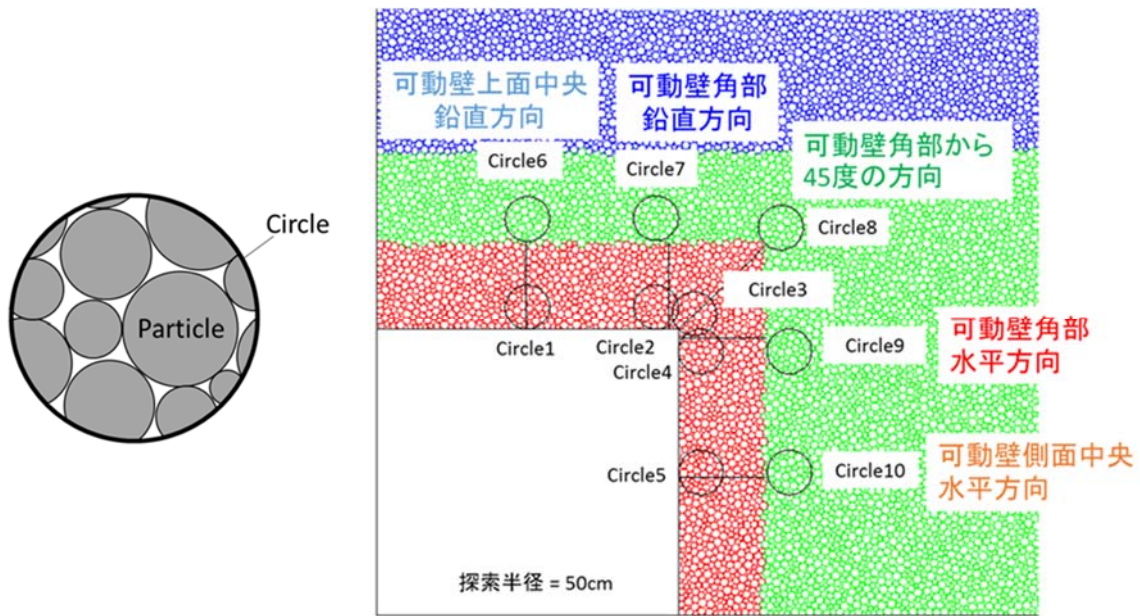
第 27 図 鉛直・水平方向の変形ケースにおける弱部(隅角部)の拡大図

(iii) 覆土の透水係数の評価

覆土の透水係数への影響は、密度と相関があることから、変形前後の密度を確認することで評価する。DEM 解析に用いられている粒子の大きさ、空隙構造や空隙量が実態の土粒子と異なるため、定量的な評価を行うことは困難であるが、定性的な変化を把握するため、密度の増加率を確認することで評価する。

密度は第 28 図 b. に示すとおり、解析に半径 50cm の Circle を設定し、Circle 内に含まれる粒子の面積に粒子密度をかけたものを足し合わせ、Circle 面積により割り込むことで算出する。算出箇所に関しては、第 28 図に示したとおり難透水性覆土及び下部覆土を対象とした 10 箇所とする。密度の増加率を算出した結果を第 52 表に示す。

第 52 表より、覆土の密度減少は軽微であることから、密度変化により覆土の透水係数が増加する有意な影響は生じない。



a. 密度の算出概念

b. 密度の算出位置^{*1, *2}

*1 : Circle1~Circle5 : 難透水性覆土層と可動壁の接触位置

*2 : Circle6~Circle10 : 難透水性覆土層の外周

第 28 図 密度の算出方法の概念図

第 52 表 鉛直・水平方向への変形時における密度の増加率

測定位置	鉛直・水平方向への変形	
	第 27 図のうち状態 B	第 27 図のうち状態 C
	密度の増加率 (%) ^{*1}	密度の増加率 (%) ^{*1}
Circle1	-0.8	0.3
Circle2	-2.0	1.7
Circle3	12.3	12.3
Circle4	7.3	16.3
Circle5	21.8	30.9
Circle6	-0.9	-1.9
Circle7	-4.0	-7.1
Circle8	0.9	0.0
Circle9	-4.2	5.1
Circle10	7.8	11.5

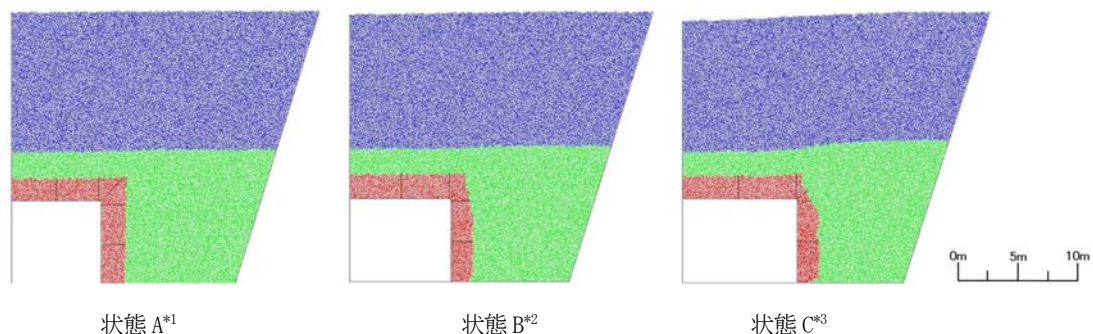
*1：負の値は、密度低下を示す。

1 号廃棄物埋設地に関しては、可溶性塩と埋設設備による反応を起因とする埋設設備の膨張影響をあわせて考慮しているため、第 27 図と同様に DEM 解析にて覆土への力学的影響を評価した。

覆土の形状変化に関して、解析を用いて確認した結果を第 29 図に示す。

解析結果から、確からしい設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口は生じず、厚さが約 1m 残る状態が確認されたが、金属腐食の膨張量が解析の変形量に比して十分小さいことから、厚さが 1m 以上残る状態を確からしい設定の設定値とする。また、厳しい設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口は生じないものの、厚さがほぼ残らない状態を設定値とする。

なお、解析結果より、難透水性覆土の厚さが減少した隅角部は、覆土材料が存在しない空洞のような状態ではなく、下部覆土に置き換わっていることを確認している。また、下部覆土は、難透水性覆土の解析結果から、透水係数及び覆土厚さへ有意な影響が生じないと設定する。



- *1：状態 A 解析の初期状態
- *2：状態 B 確からしい設定以上に変形した状態(変形量 東西方向：1.0m、鉛直方向：0.2m)
- *3：状態 C 厳しい設定以上に変形した状態(変形量 東西方向：2.0m、鉛直方向：0.4m)

第 29 図 鉛直・水平方向の変形ケースにおける解析結果

(6) 1,000年後の力学的影響評価

金属及び埋設設備の膨張影響に起因する影響において、DEM解析により覆土の低透水性への影響評価を行った結果から、透水係数に変化は生じないものの覆土厚さに力学的変形が生じると設定する。金属及び埋設設備の膨張による覆土への力学的影響評価を第53表に示す。

なお、力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた際の等価透水係数を試算した場合(参考資料4参照)においても、DEM解析と等価透水係数が同等であったため、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響は生じないとする。

第53表 金属及び埋設設備の膨張による1,000年後の覆土への力学的影響評価

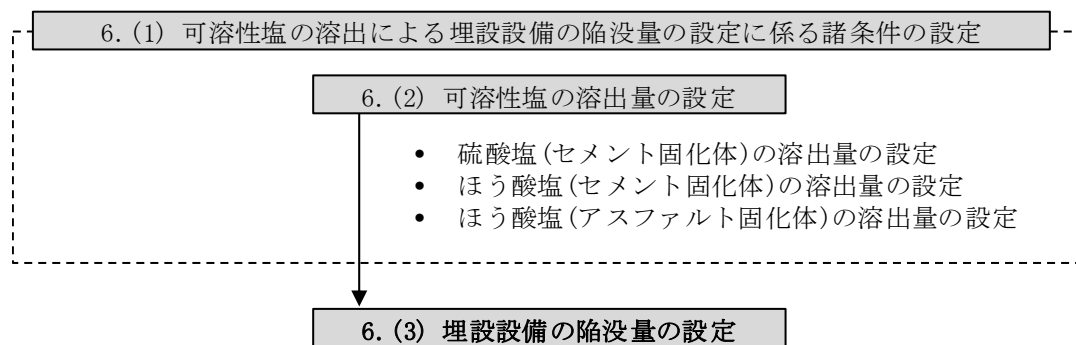
対象設備 (対象廃棄物)	変形 形態	力学的変形	
		確からしい設定	厳しい設定
2号及び3号 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部に約2mの開口が生じる状態 ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態
1号 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部の厚さがほぼ残らない状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態

6. 状態変化(陥没)に必要な条件設定

(1) 可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没量の設定に係る諸条件の設定

陥没量の設定は、埋設設備中の対象となる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)が地下水との反応により溶出すること及び廃棄体に上部空隙が存在することから、埋設設備に空洞が発生するとし、空洞の発生に伴う陥没を考慮して行う。埋設設備の陥没量の設定手順^{*1}を第30図に示す。

*1：廃棄体の上部空隙を考慮し陥没量の設定を行う。



第30図 可溶性塩の溶出による埋設設備の陥没量の設定手順

(2) 可溶性塩の溶出量の設定

(i) 硫酸塩(セメント固化体)の溶出量の設定

廃止措置の開始後の状態変化の評価においては、文献⁽⁴¹⁾を参考に硫酸塩の溶出に伴う空隙の生成に着目し、**全量溶出した状態を設定する。**

(ii) ほう酸塩(セメント固化体)の溶出量の設定

廃止措置の開始後の状態変化の評価においては、文献⁽⁴¹⁾を参考にほう酸塩の溶出に伴う空隙の生成に着目し、**全量溶出した状態を設定する。**

(iii) ほう酸塩(アスファルト固化体)の溶出量の設定

廃止措置の開始後の状態変化の評価においては、文献⁽⁴²⁾を参考に**アスファルトの実態的な漏出防止性能を考慮し、設定する。**

(3) 埋設設備の陥没量の設定

埋設設備の陥没量は、埋設設備中の対象となる可溶性塩(硫酸塩及びほう酸塩)が地下水との反応により溶出すること及び均質・均一固化体の固型化条件である有害な空隙(少なくとも「上部空隙が30%を超えない」ものは有害ではない)に起因し、陥没することから、「6. (2) 可溶性塩の溶出量の設定」を考慮し、設定する。

廃棄体中の可溶性塩が溶出することによる空隙の体積増加分及び廃棄体の初期条件である上部空隙の体積分を考慮し、埋設設備の区画ごとの最大沈下量を算出する。

廃棄体の初期条件である上部空隙については、覆土の低透水性への影響評価の観点から、均質・均一固化体の固型化条件の最大値である上部空隙30%の体積分を用いる。

沈下量の設定は、埋設設備の区画ごとに含まれる可溶性塩の量に応じて変化することから、1区画当たりの沈下量(沈下する底面積は、区画底面積とする。)とする。

なお、可溶性塩のうち、アスファルト固化体中のほう酸塩については、文献⁽⁴²⁾を参考に考慮する。

沈下量の算出式を以下に示す。

はじめに、廃棄体中の空隙量に従った初期空隙高さ L_i より、埋設設備中の区画の初期空隙体積 V_i を求める。

$$V_i = L_i \times S_{pit}$$

S_{pit} : 区画の投影面積(m²)

V_i よりドラム缶 1 本当たりの初期空隙体積 V_d を求める。ただし、区画には n 本あるとする(1号埋設設備のうち、1区画には320本(8段5列8行)のドラム缶が配置される。)

$$V_d = V_i/n$$

V_d よりドラム缶中の初期空隙高さ h を求める。

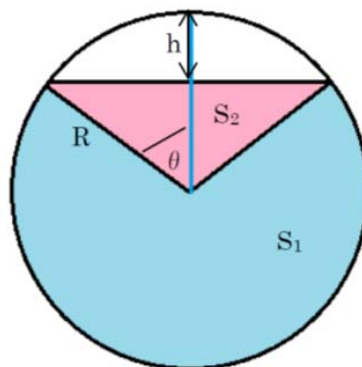
次に、ドラム缶断面の廃棄体投影面積 S を求める。投影面積に関する概念図を第31図に示す。

$$S = S_1 + S_2$$

$$S_1 = \pi R^2(1 - \theta/\pi)$$

$$S_2 = \frac{R^2}{2}(2\sin\theta\cos\theta)$$

ただし、ドラム缶の半径 R 、ドラム缶中の初期空隙高さ h であるため、 $\cos\theta = \frac{R-h}{R}$ となる。



第31図 ドラム缶断面の廃棄体投影面積

よって、ドラム缶中の廃棄体の体積 V_w は、ドラム缶全長 H を用いて
 $V_w = S \times H$

S の式より、表面溶出する場合、一部の可溶性塩が残存する廃棄体のドラム缶断面の投影面積 S' を求める。

溶出については、表面から r だけ溶出するとし、 S_1 の部分は半径 $R \rightarrow (R-r)$ 、 S_2 の部分は空隙 $h \rightarrow (h-r)$ に存在する可溶性塩が溶出すると仮定する。

$$S' = S'_1 + S'_2$$

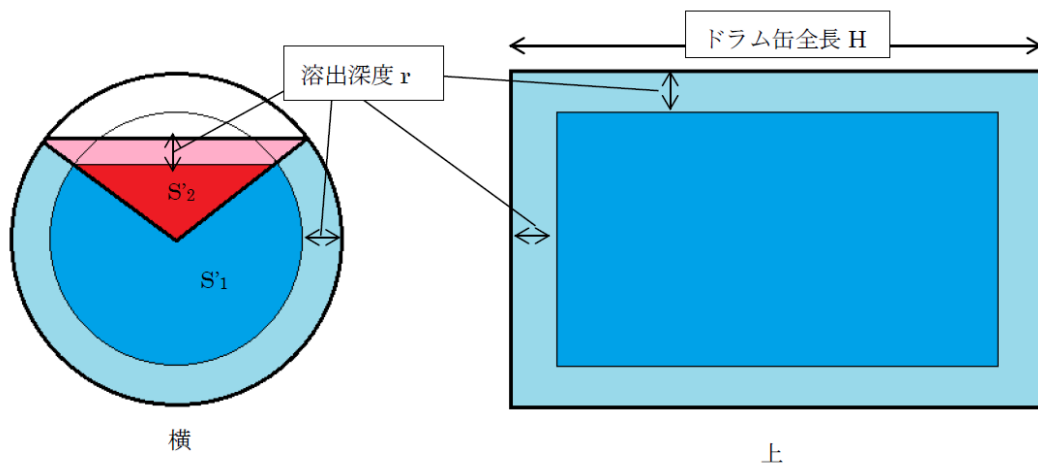
$$S'_1 = \pi(R-r)^2(1-\theta/\pi)$$

$$S'_2 = \frac{R^2}{2}(2\sin\theta\cos\theta)\left(\frac{R-h-r}{R-h}\right)^2$$

よって、可溶性塩の溶出が起こらないドラム缶中の廃棄体の体積 V'_w は
 $V'_w = S' \times (H - 2r)$

可溶性塩の溶出による区画の沈下量 L は以下の式より求められる。区画ごとの可溶性塩の含有量を V_{salt} とする。ドラム缶断面の廃棄体投影面積(可溶性塩残存時)を第 32 図に示す。

$$L = V_{salt} \times \frac{V_w - V'_w}{V_w} / S_{pit}$$



第 32 図 ドラム缶断面の廃棄体投影面積(可溶性塩残存時)

以上のことから、最大の沈下量を算出した結果、約 743mm である。

可溶性塩の溶出挙動に関しては、セメント系材料との反応による挙動の不確かさや溶出速度の知見など、定量的な沈下量を設定する根拠が乏しい。そのため、陥没量は最大の沈下量に対し、覆土の低透水性への影響評価の観点から大きく設定する。設定した値を第 54 表に示す。

第 54 表 鉛直方向へ卓越した変形による陥没量の設定

設定	陥没量(m)
	対象設備：1号
	鉛直方向
確からしい設定／厳 しい設定共通	1.0

7. 1,000年後の状態変化(陥没)の影響評価

(1) 力学的影響評価の考え方

可溶性塩の溶出による陥没量は、第 54 表より、確からしい設定及び厳しい設定で鉛直方向：1.0m である。確からしい設定及び厳しい設定の陥没量が直接的に覆土の変形量になると仮定した場合、覆土の形状変化は第 33 図に示すとおりとなる。

覆土完了後の廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数 m 以上あることから、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である(第 33 図 a. 参照)。また、拘束圧が作用した場において、可溶性塩が地下水との反応により溶出することで、埋設設備に空洞が発生する。埋設設備の空洞の発生に伴い、覆土が追従することでせん断変形する状態となる。

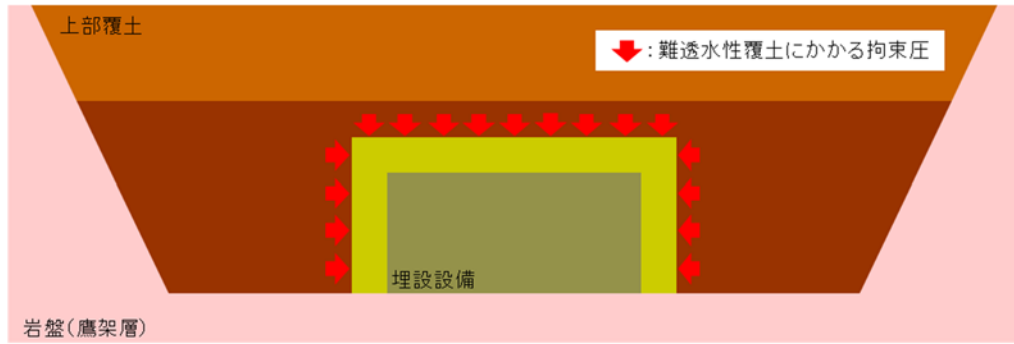
確からしい設定及び厳しい設定における鉛直方向の変形量 1.0m は難透水性覆土の厚さ 2.0m 以下であることから、難透水性覆土に 50%程度のひずみが生じるものの開口は生じない(第 33 図 b. 参照)。しかしながら、せん断面付近のひずみの発生に伴い、透水性能の低下が生じる可能性がある。難透水性覆土(購入砂を母材とした Ca 型ベントナイト混合土)のせん断変形を対象とした三軸圧縮試験結果及びせん断透水試験結果を第 15 図に示す。

第 15 図 a. より、せん断ひずみ 5%以降でせん断破壊後の残留状態^{*1}であることを確認できる。残留状態に達した覆土はひずみ量の増加によらず継続的に同じ性質を示すため、50%程度のひずみが生じる難透水性覆土の隅角部においても、同じ性質を示すと考えられる。また、第 15 図 b. より、残留状態であるせん断ひずみ 15%までの変形において透水係数に大きな変化が生じていない。これらのことから、難透水性覆土には 50%程度のひずみが生じるが、せん断面付近の透水性能は低下しないと考えられる。

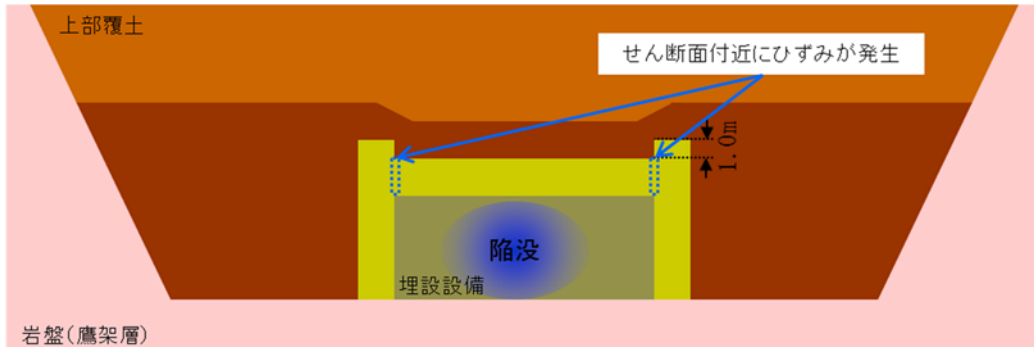
しかしながら、陥没現象では覆土が下方に緩むことにより、膨張現象に比べて複雑な応力場となることが考えられるため、上記について不確かさを否定できない。

以上のことから、確からしい設定及び厳しい設定に対し、廃棄物埋設地の規模を考慮した覆土の低透水性(透水係数及び厚さ)への力学的影響評価を実施する。

*1：残留状態とは、せん断抵抗がピーク値(せん断強さ)を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達した状態である。



a. 初期状態(覆土完了後)



b. 確からしい設定/厳しい設定における覆土の形状変化

第 33 図 埋設設備の陥没に伴う覆土の形状変化の概念図

(2) 力学的影響評価手法

覆土の力学的影響の評価手法は、埋設設備の陥没による覆土の大変形に応じた挙動を評価するため、膨張影響と同様の手法である DEM 解析を用いる。

なお、粒子間結合の設定では、粒子が沈下する際の滑り及び沈下後の圧密現象をより良く再現するため、変更している。

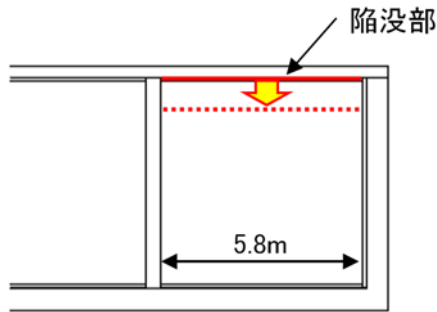
(3) 覆土の主な仕様

廃棄物埋設地における覆土の主な仕様は第 47 表に示すとおり難透水性覆土の材料はベントナイト混合土である。

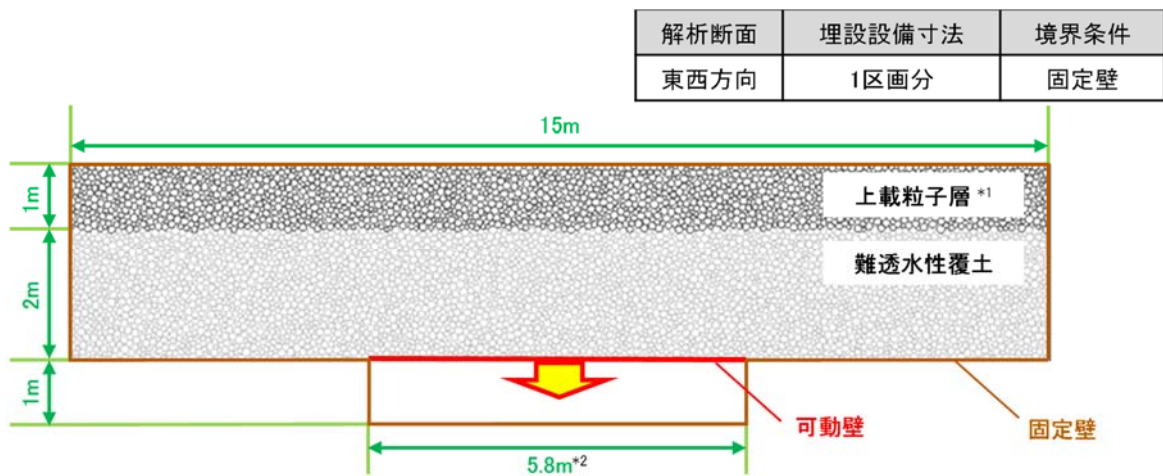
(4) 解析に用いる諸条件の設定

(i) 解析モデル

解析モデルの設定においては、陥没現象が生じる廃棄物埋設地の断面を対象とする。可溶性塩が含まれる埋設設備では、可溶性塩が徐々に溶出するに伴い分散した形で空隙が形成されることで陥没が生じ、覆土にひずみが発生する。そのため、解析対象断面は、1号廃棄物埋設地の鉛直方向の断面とし、埋設設備の1区画を対象とする。解析対象の鉛直断面図を第34図に、解析モデルを第35図にそれぞれ示す。



第34図 1号埋設設備の鉛直断面図



*1：上載粒子層は、難透水性覆土へかかる有効拘束圧を与えるものである。

*2：陥没する幅は、1号埋設設備のうち、1区画当たりの内側寸法として設定する。

第35図 1号廃棄物埋設地の解析モデル

(ii) 埋設設備の陥没影響の方向

覆土への力学的影響(陥没影響)は、埋設設備中の可溶性塩の溶出及び廃棄体に含まれる上部空隙に起因し土圧に抵抗出来なくなることにより、鉛直方向へ卓越した変形が生じることが考えられるため、この変形方向の状態を設定する。埋設設備の陥没影響の方向の設定を第 55 表に示す。

第 55 表 埋設設備の陥没影響の方向の設定

設定	設定の考え方	変形概念図
【確からしい設定/厳しい設定共通】 鉛直方向へ卓越した変形	埋設設備の変形は、廃棄体に内蔵される可溶性塩の溶出に伴い、埋設設備が土圧に抵抗出来なくなることから、鉛直方向に卓越して生じる可能性が高いと考えられる。 そのため、可溶性塩の溶出に伴う変位が全て鉛直方向へ作用するとして設定する。	

(iii) 解析に用いる変形量

埋設設備中の可溶性塩は、廃棄体 1 本ごとに異なる。そのため、可溶性塩の溶出に伴う陥没現象が埋設設備の区画ごとで不均質に生じることが予想される。

覆土の力学的影響は、陥没現象に起因した変形挙動による不均質性に対し、以下の観点を踏まえた最大の値となる変形量を設定することで、不確実性を包含した評価を行う。

a. 鉛直方向へ卓越した変形

埋設設備中の可溶性塩の量が埋設設備の区画ごとに異なることから、鉛直方向への陥没は、埋設設備の区画ごとに異なる挙動を示す。一方で、埋設設備の鉛直方向の変形量は、区画ごとにそれぞれが陥没した場合に比較して、1 つの区画のみが陥没した場合において、最大となる。そのため、埋設設備に生じる陥没に伴う変形は、埋設設備端部の 1 区画に対して、全て鉛直方向へ作用するとして、最大の値を設定する。

以上のことから、解析に用いる変形量は、覆土の低透水性への影響評価の観点から、隅角部付近の覆土に大きなひずみが生じるよう「6. (3) 埋設設備の陥没量の設定」を参考とした最大の値を設定する。また、解析の変形挙動は、「7. (4) (ii) 埋設設備の陥没影響の方向」に従い変形するものとする。解析に用いる変形量を以下の第 56 表に示す。

第 56 表 DEM 解析に用いる変形量

設定	陥没量(m)
	対象設備: 1号
	鉛直方向
確からしい設定/厳しい設定共通	1.0

(iv) 解析用物性値

廃棄物埋設地における力学的影響評価に必要となる解析用物性値を設定する。土質系材料である覆土の変形挙動を再現するため、覆土の材料を用いた供試体による三軸圧縮試験結果に対して、シミュレーション解析により各覆土の物性値のフィッティングを行う。フィッティングが完了した時点の各種物性値を、廃棄物埋設地における力学的影響評価の解析用物性値とする。三軸圧縮試験、三軸圧縮試験の供試体、シミュレーション解析及びフィッティングの具体的な内容を以下に示す。また、シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値に対し、廃棄物埋設地の解析モデルへの適用性を示す。

a. 三軸圧縮試験

(a) 試験の選定理由

廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係を第 36 図に示す。

廃棄物埋設地は、覆土による拘束圧が作用することで、覆土内部の応力状態が等方応力状態にある。その後、長期的な埋設設備の陥没に伴い覆土が下方に緩むことによるせん断応力が支配的であり、圧縮応力が共に作用している状態となると考えられる。

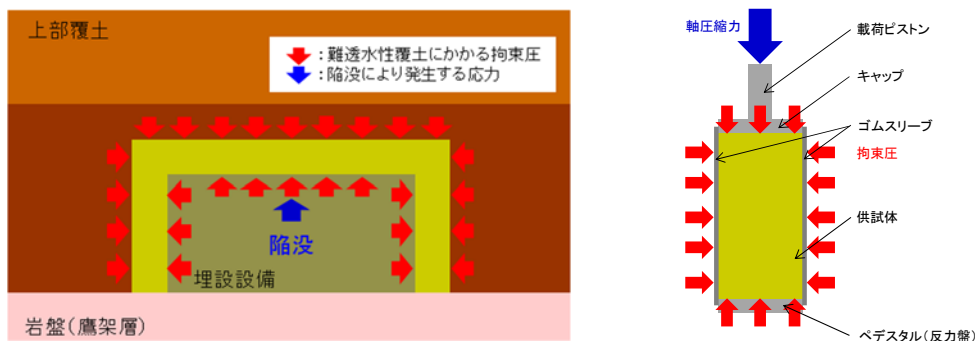
文献⁽³⁸⁾によると、三軸圧縮試験では、等方応力状態で圧密された土に対して、軸圧縮されるとき強度・変形特性及び主応力差最大時の有効応力を求めることができる。そのため、廃棄物埋設地における長期的な埋設設備の陥没時の圧縮応力及びせん断応力が作用している状態と同様であると考えられる。

以上のことから、埋設設備の膨張時における覆土の変形挙動を三軸圧縮試験により再現できると判断し、三軸圧縮試験を選定した。

(b) 試験方法

三軸圧縮試験は、地盤工学会基準「土の圧密非排水(C_U)三軸圧縮試験」(JGS 0523-2009)に準拠し実施する。

三軸圧縮試験における拘束圧は、各覆土にかかる上載圧相当を包含している。軸圧縮は、ひずみ速度が一定になるように連続的に供試体を圧縮する。また、圧縮中は、軸圧縮力及び軸変位量を測定することで主応力差-軸ひずみ曲線を取得する。



a. 廃棄物埋設地の応力状態

b. 三軸圧縮試験の応力状態

第 36 図 廃棄物埋設地及び三軸圧縮試験の応力状態の関係

b. 三軸圧縮試験の供試体

(a) 難透水性覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いる難透水性覆土の供試体は、購入砂を母材とした Ca 型ベントナイト混合土である。

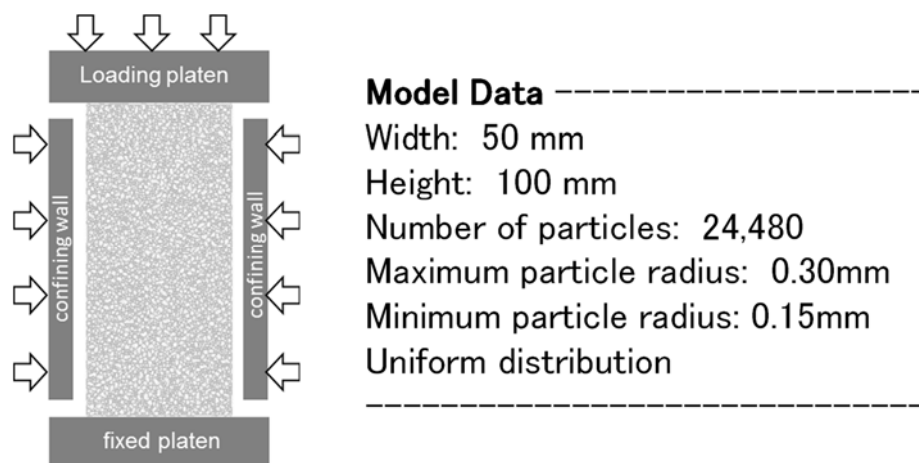
難透水性覆土の材料である購入砂は、JIS A 5005⁽³⁷⁾に準拠した製品を用いるため、品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきがない。また、難透水性覆土の材料であるベントナイトは細粒分である粘土に分類され、文献⁽³⁸⁾によると粒径 0.075mm 以下である。材料の大半を占める砂の粒径は 5.0mm 以下であり、難透水性覆土の骨格を主形成していることから、ベントナイトは力学的な作用に寄与しない。フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、同様に品質(密度及び粒度分布)に有意なばらつきのない砂及び有意な力学的影響を与えないベントナイトで作製し、廃棄物埋設地においても三軸圧縮試験の供試体と同様の品質で施工すると考えられる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

c. シミュレーション解析

(a) 三軸圧縮試験の解析モデル

三軸圧縮試験のシミュレーションモデルを第 37 図に示す。供試体モデルは、幅 50mm、高さ 100mm(最大粒子半径 0.3mm、最小粒子半径 0.15mm)として作成した。粒子数は 24,480 個である。



第 37 図 三軸圧縮試験のシミュレーションモデル

粒子間結合モデルの概念図を第 38 図に示す。

粒子間結合モデルは、廃棄物埋設地に生じる陥没現象を考慮して設定する。

廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数 m 以上あるため、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である。また、可溶性塩の溶出に伴う陥没は、この拘束圧が作用した場において生じることとなる。

金属腐食による膨張のような強制変位とは異なり、覆土が下方に緩むことによるせん断変形となる。よって、覆土の緩みに伴い粒子が離れようとするときの挙動の重要性が増すと考えられる。そのため、本 DEM 解析においては、粒子が離れようとするときの接線方向にバネとスライダを直列で設定した。

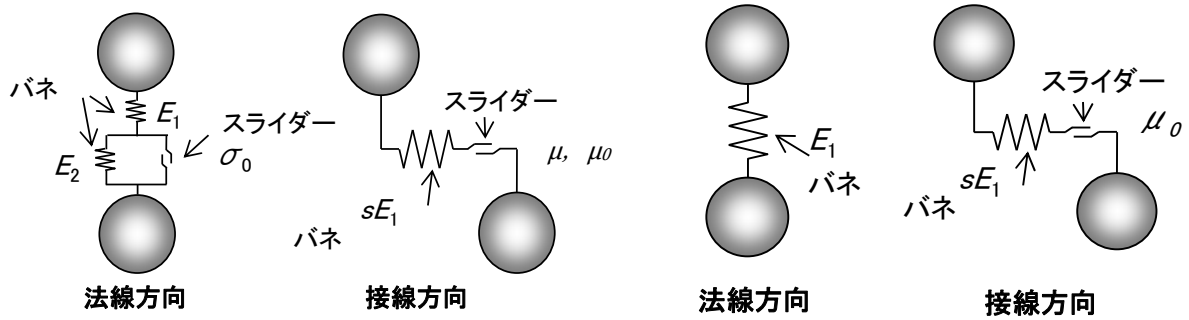
また、緩み後に上載覆土が再び積み重なることを想定し、覆土の圧縮方向の反発力を使い分ける必要があると考えられる。そのため、本 DEM 解析においては、粒子が接触しているときの法線方向にバネ単独及びスライダと並列したバネを設定した。粒子間結合モデルに付与するそれぞれの機能を以下に示す。また、参考として、粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係を第 57 表に示す。

[粒子が接しているとき]

- ・ 法線方向のバネ (E_1) : 圧縮方向において覆土の剛性を表現する
- ・ 法線方向のバネ (E_2) : 圧縮方向において E_1 と共に降伏後の覆土の剛性を表現する
- ・ 法線方向のスライダ (σ_0) : 圧縮方向において摩擦抵抗力を表現する
- ・ 接線方向のバネ (sE_1) : せん断方向において覆土の剛性を表現する
- ・ 接線方向のスライダ (μ, μ_0) : せん断方向において摩擦抵抗力を表現する

[粒子が離れようとするとき]

- 法線方向のバネ (E_1) : 引張方向において覆土の剛性を表現する
- 接線方向のバネ (sE_1) : せん断方向において覆土の剛性を表現する
- 接線方向のスライダー (μ_0) : せん断方向において覆土の摩擦抵抗力を表現する



粒子が接触しているとき

粒子が離れようとするとき

- 粒子同士が接触しているときは、バネによる反発力及びスライダーによる摩擦力が作用する。
- 粒子同士が離れようとするときは、バネにより引張力が作用する。
- 引張力がバネの結合強度を超えるとバネが破断し粒子同士が離れる、再び粒子同士が接触することによって結合力が再生する。
- 粒子の要素は剛体とし、要素自体が変形するなどの挙動は示さないものとする。

第 38 図 粒子間結合モデルの概念図

第 57 表 粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係

	粒子が接触しているとき	粒子が離れようとするとき
法線方向		
接線方向		

(b) 解析方法

シミュレーション解析は、実際の三軸圧縮試験と同様に供試体モデル下部の载荷盤を固定しておき、側部及び上部の载荷盤から一定の拘束圧を作用させた状態で上部の载荷盤を動かすことにより実施した。

軸方向応力は、供試体モデル上端の粒子から上部の载荷盤に作用する反発力の総和を供試体モデルの幅で除すことにより算出した。

ひずみについては、供試体モデルの上下左右各辺付近の粒子を 10 個ずつ選出し、それらの粒子の相対的な変位を計測し、それぞれ平均をとることにより算出した。

d. フィッティング

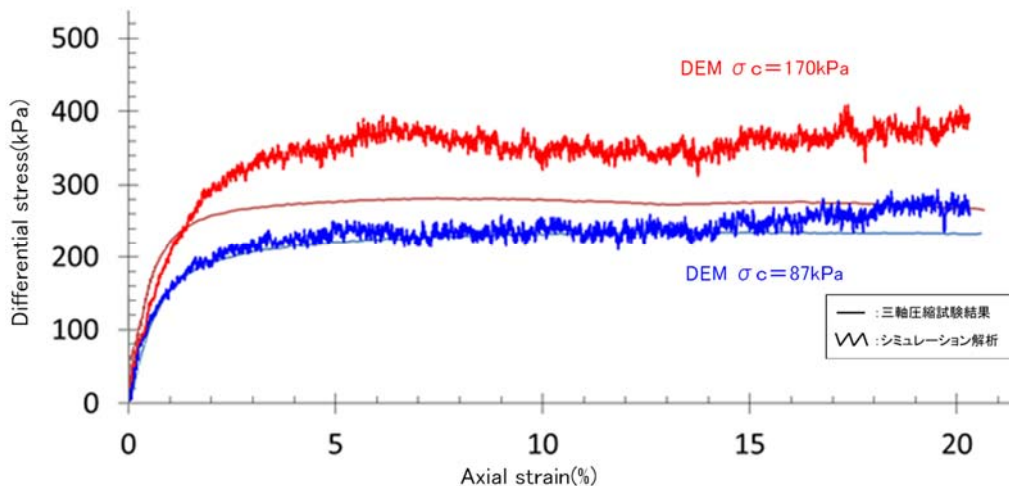
三軸圧縮試験により得られた各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線に対して、シミュレーション解析により得られる各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線が適合するまで、パラメータを繰り返し補正することをフィッティングという。フィッティングが完了した時点のパラメータが解析用物性値となる。

(a) 難透水性覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を第 39 図に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、第 39 図より、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できているため、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

なお、拘束圧 170kPa のシミュレーション解析のうちひずみ 10%以降において、三軸圧縮試験結果に対して主応力差がわずかに上昇している箇所がある。これは、シミュレーションモデルにおいては、側部に設置している剛体を介して拘束圧を与えており、ひずみが大きくなると供試体の変形を押し戻す作用が働いているために起きていると考えられる。三軸圧縮試験においては供試体の側部のゴムスリーブを介して拘束圧を与えており、変形を許容していることから、同様の現象が生じていない。廃棄物埋設地モデルはモデルサイズが大きいことから、上記のような変形を押し戻す作用が生じないと考えられる。



第 39 図 難透水性覆土に対する三軸圧縮試験結果及びシミュレーション解析の比較

e. 解析用物性値のまとめ

(a) シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値

解析用物性値のフィッティングにより設定した難透水性覆土の解析用物性値を第 58 表に示す。

第 58 表 解析用物性値一覧

設定	設定値	単位	設定方法
密度	1,649	kg/m ³	対象部材の土粒子密度試験より算出し、設定する。
最大粒子半径	60	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
最小粒子半径	30	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
粒度分布	-	-	解析モデルにあわせて設定する。
法線方向弾性バネ 1 弾性係数 (E_1)	200	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
法線方向弾性バネ 2 弾性係数 (E_2)	50	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
法線方向スライダ降伏値 (σ_0)	10	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
弾性バネ定数比 (s)	1.0	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
粒子間摩擦係数 (μ)	1.0	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
基準摩擦抵抗値 (μ_0)	1.5	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
結合強度 (σ_{max})	10	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。

(b) 廃棄物埋設地モデルへの適用性

大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに対して、三軸圧縮試験のシミュレーションモデルでフィッティングした解析用物性値を適用させることについて、以下のとおり考察する。

三軸圧縮試験結果では、5%以降のひずみ領域において応力の変動は見られず、覆土がせん断破壊後の残留状態となり、残留強度を発現していると考えられる。

文献⁽³⁶⁾によると残留強度はせん断抵抗がピーク値(せん断強さ)を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達したときの値と定義される。また、原位置において移動距離の大きい地すべり面でのせん断強さに相当すると考えられており⁽³⁹⁾、廃棄物埋設地の覆土においても大変形時に発現する強度であるといえる。さらに、室内試験によるせん断破壊後、せん断面において最終的にペッド(複数の土粒子が集まって集合体を形成したもの)の再配列が完了し、完全配向状態となった段階で、残留強度状態に収束するとされている⁽⁴⁰⁾。そのため、15%以降のひずみ領域においても、残留状態に達した覆土はひずみ量の増加に因らず継続的に同じ性質を示す。

以上のことから、15%までのひずみを対象としたシミュレーション解析でフィッティングさせた解析用物性値は、残留状態に至るまでの状況を再現できているため、大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

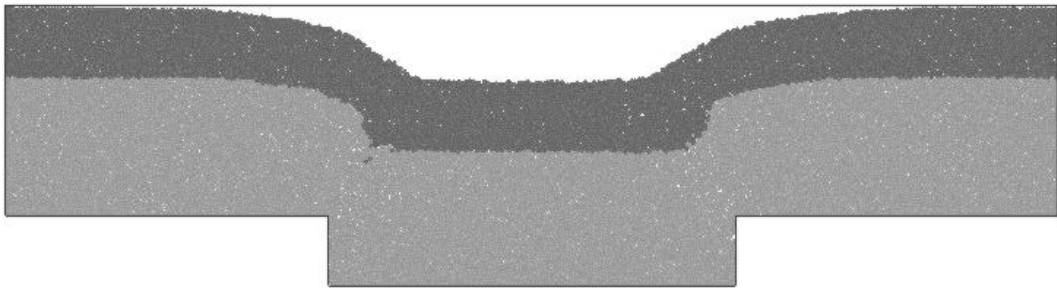
(5) 解析結果

(i) 覆土の厚さの評価

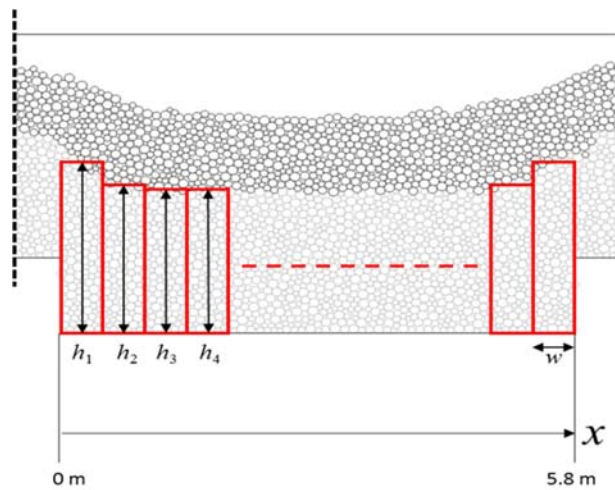
前項までに設定したパラメータを用いて DEM 解析を実施した。解析結果を第 40 図に示す。陥没現象では、第 55 表のとおり鉛直方向への変形に対する影響評価である。そのため、覆土の厚さは、第 40 図に示す解析結果*1 を対象に、第 41 図に示す算出方法のとおり算出し確認することで評価する。算出した難透水性覆土の厚さ分布を第 42 図に示す。

第 42 図より、難透水性覆土の厚さに大きな減少が確認されなかったことから、厚さに変化は生じないと設定する。

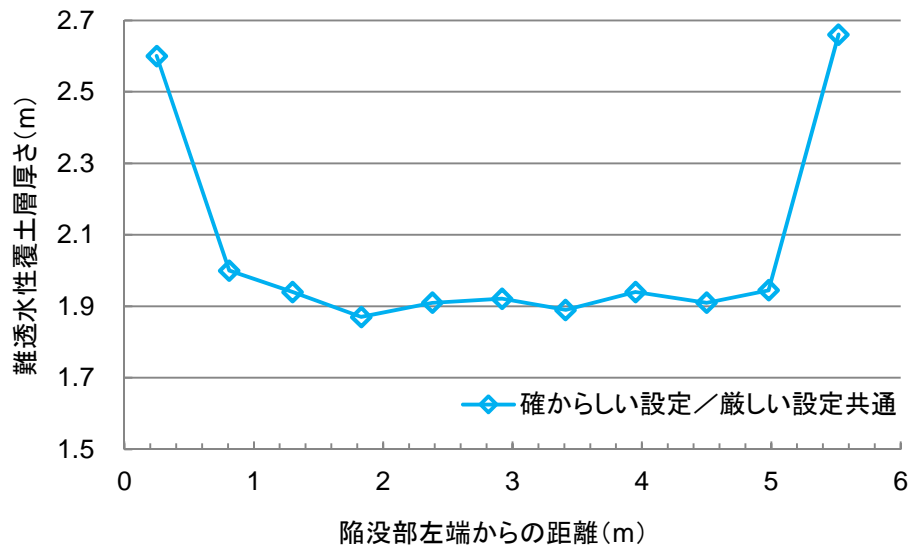
*1：解析結果は、確からしい設定／厳しい設定共通である。



第 40 図 鉛直方向へ卓越した変形ケースにおける解析結果



第 41 図 難透水性覆土の厚さ算出方法



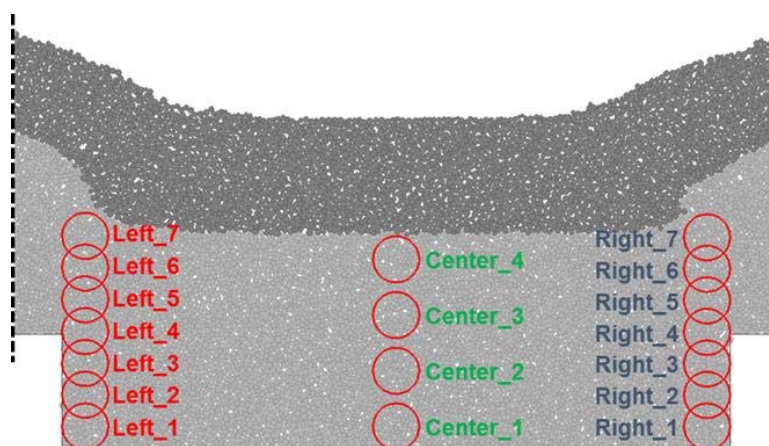
第 42 図 難透水性覆土の厚さ分布

(ii) 覆土の透水係数の評価

覆土の透水係数への影響は、密度と相関があることから、陥没前後の密度を確認し評価する。DEM 解析に用いられている粒子の大きさ、空隙構造や空隙量が実態の土粒子と異なるため、定量的な評価を行うことは困難であるが、定性的な変化を把握するため、密度の増加率を確認することで評価する。

密度は第 43 図に示すとおり、陥没前後の陥没隅角部近傍(Left 及び Right 系列)並びに陥没中央部(Center 系列)における増加率を確認する。また、密度の増加率を算出した結果を第 59 表に示す。

第 59 表より、陥没隅角部近傍(Left 及び Right 系列)では、密度の減少が確認されたが、覆土の厚さに大きな変化が生じていないこと及び陥没中央部(Center 系列)の密度増加を考慮し、覆土の透水係数が増加する有意な影響は生じないことが確認された。



第 43 図 難透水性覆土の密度測定位置

第 59 表 鉛直方向への変形時における密度の増加率

測定位置	密度の増加率(%)*1
Left_1	2.4
Left_2	-2.1
Left_3	-7.7
Left_4	-8.2
Left_5	-4.0
Left_6	-5.1
Left_7	-5.2
Center_1	8.6
Center_2	1.5
Center_3	2.6
Center_4	2.2
Right_1	6.7
Right_2	-4.4
Right_3	-2.6
Right_4	-5.0
Right_5	-5.5
Right_6	-1.5
Right_7	0.4

*1：負の値は、密度低下を示す。

(6) 1,000 年後の力学的影響評価

可溶性塩の溶出による陥没影響に起因する影響において、DEM 解析により覆土の低透水性への影響評価をした結果から、透水係数及び覆土厚さに力学的変形が生じないと設定する。可溶性塩の溶出による覆土への力学的影響評価を第 60 表に示す。

第 60 表 可溶性塩の溶出による 1,000 年後の覆土への力学的影響評価

対象設備 (対象廃棄物)	変形 形態	力学的変形	
		確からしい設定	厳しい設定
1 号 (均質・均一固化体)	陥没	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態

8. 1,000年後の状態変化の評価(力学的影響)のまとめ

金属及び埋設設備の膨張並びに埋設設備の陥没に起因する影響において、DEM解析により覆土の低透水性(透水係数及び覆土厚さ)への影響評価をした結果から、透水係数に変化は生じないものの覆土厚さに力学的変形が生じると設定する。状態変化の評価(力学的影響)のまとめを第61表に示す。

なお、2号及び3号廃棄物埋設地における厳しい設定の膨張影響では、難透水性覆土に隅角部に約2mの開口*1が生じるが、埋設設備外周部に設置された難透水性覆土(3号の場合、東西方向の覆土施工範囲：約64m)に対し、限定的な範囲の影響である。

*1：難透水性覆土に対し開口すると設定した箇所は、覆土材料が存在しない空洞のような状態ではなく、下部覆土である。また、下部覆土の密度減少は解析結果から軽微であることから、密度変化による透水係数が増加する有意な影響は生じない。

第61表 1,000年後の状態変化の評価(力学的影響)のまとめ

対象設備 (対象廃棄物)	変形 形態	力学的変形	
		確からしい設定	厳しい設定
2号及び3号 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部に約2mの開口が生じる状態 ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態
1号 (充填固化体)		○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部の厚さがほぼ残らない状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態
1号 (均質・均一固化体)	陥没	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土／下部覆土共通 破断や厚さの変化が生じない状態

9. 参考文献

- (1) 牧野 隆吾(2010) : 石炭採掘後の陥没現象の解明およびその調査・対策に関する研究、応用地質 第51巻 第2号 p73-84
- (2) 北海道電力(株)ほか(2016) : 充填固化体の標準的な製作方法(改訂8版)
- (3) JIS Z 1600(2017) : 鋼製オープンヘッドドラム
- (4) JIS G 3112(2010) : 鉄筋コンクリート用棒鋼
- (5) 原子力安全基盤機構(2008) : 均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法について(一部改正)、JNESS-SS-0801
- (6) 財団法人 原子力環境整備センター(平成10年3月) : 低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について(各種固体状廃棄物)(改訂1)
- (7) 三沢 俊平(1985) : 鉄鋼の湿食形態と腐食生成物、日本金属学会会報
- (8) K. Tuutti(1982) : Corrosion of Steel in Concrete, CBI forskningsresearch
- (9) 藤原 和俊(2018) : 浅地中ピット処分環境における金属腐食による体積膨張挙動の調査、電力中央研究所報告、Q18001
- (10) Juraj Majzlan et al. (2006) : Thermodynamic properties and crystal structure refinement of ferricopiapite, coquimbite, rhomboclase, and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3(\text{H}_2\text{O})_5$
- (11) 高橋 良ほか(2009) : 幌別硫黄鉱山地域における砒素や重金属を溶出させる熱水変質岩の地質学的特徴
- (12) Wenqian Xu et al. (2010) : $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ formed by dehydrating rhomboclase and its potential existence on Mars
- (13) Wenqian Xu et al. (2012) : Temperature and humidity effects on ferric sulfate stability and phase transformation
- (14) 一般社団法人 日本溶射学会(2017) : 溶射工学便覧、第10章 皮膜の性質と試験方法
- (15) 腐食防食協会(2005) : 第VI編 腐食試験法 第2章 腐食試験法、腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版
- (16) 三原 守弘ほか(2002) : 低酸素かつアルカリ条件における炭素鋼、ステンレス鋼及びジルカロイからのガス発生及び腐食速度の評価
- (17) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター(平成16年) : 還元性環境での金属腐食に起因するガス発生量評価、原環センター技術報告書、RWMC-TRJ-03001
- (18) 水流 徹(2011) : 水溶液系の腐食現象の計測技術、まてりあ 第50巻 第7号、p283-286
- (19) 小林 孝一ほか(2001) : 分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究、土木学会論文集 No.669/V-50、p173-186
- (20) 朝倉 祝治ほか(1981) : 電気化学的方法による腐食状態の実時間計測技術、金属表面技術 32巻 6号、p280-290
- (21) 大塚 俊明ほか(1982) : 液抵抗補正短形波電流分極法による鉄腐食速度の測定、防食技術 31巻 5号、p336-342
- (22) 小澤 正義ほか(2018) : 炭素鋼の自己不働態化に及ぼす淡水中へのホウ酸塩添加の影響、材料と環境 67巻 10号、p426-434
- (23) 国立天文台(2005) : 理科年表 平成18年(机上版)、p367
- (24) 土木学会(2014) : コンクリート技術シリーズ No103 セメント系構造物と周辺地盤の化補 4-101

学的相互作用研究小委員会(345 委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集

- (25) Jan Skalny et al. (2002): Sulfate Attack on Concrete
- (26) J.B.Champenois et al. (2013): Conditioning Highly Concentrated Borate Solutions with Calcium Sulfoaluminate Cement, Cement-Based Materials for Nuclear Waste Storage
- (27) Laszlo J et al. (1992): Borate Substituted Ettringites, MRS Online Proceedings Library
- (28) Jean-Baptiste Champenois al. (2012): Crystal structures of Boro-AFm and sBoro-AFt phase, Cement and concrete Research
- (29) Parkhurst, D. L. et al. (1999): User's guide to PHREEQC (ver.2)-a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey, Water-resources investigations report 99-4259
- (30) Parkhurst, D. L. et al. (2013): Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, US Geological Survey, Denver, USA.
- (31) Diederik JACQUES, et. al. (2012): Benchmarking the cemdata07 database to model chemical degradation of concrete using GEMS and PHREEQC, NEN/RWM/R(2012)3
- (32) Thomas Schmidt, Barbara Lothenbach, Michael Romer, Karen Scrivener, Daniel Rentsch, Renato Figi (2008): A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation, Cement and Concrete Research, 38, p337-349
- (33) 日本原子力研究開発機構(2015):平成 26 年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度化開発-4 カ年研究成果の取りまとめ 報告書
- (34) 桐山 貴俊(2018): 粒子方に基づく地盤大変形解析技術の開発と応用
- (35) 若井 明彦ほか(2013): 地すべりを再現するための数値解析手法の現状、日本地すべり学会誌 50 巻 1 号、p7-17
- (36) 公益社団法人 地盤工学会(2014): 地盤工学用語辞典、p10
- (37) JIS A 5005(2009): コンクリート用砕石及び砕砂
- (38) 社団法人 地盤工学会(2010): 地盤材料試験の方法と解説
- (39) 大河原 正文ほか(2001): 粘土の残留強度発現機構に関する基礎的研究 - 固体表面間の潤滑状態と摩擦の要因-, 土木学会 第 56 回年次学術講演会、p102-103
- (40) 村尾 英彦ほか(2015): リングせん断試験のせん断面と地すべり面における微視的構造の比較、Journal of the Japan Landside Society Vol. 52 No. 3、p123-131
- (41) 日本原子力研究所(1989): 低レベル放射性廃棄物固化体の長期浸出試験
- (42) 宮脇 健太郎ほか(2018): アスファルト固化体からの環境影響物質の長期浸出挙動と浸出機構、廃棄物資源循環学会論文誌

以 上

設定値を超える金属廃棄物が
埋設された場合の評価について

目 次

1. はじめに	1
2. 金属廃棄物重量の設定の妥当性について	1
3. 想定を超える金属重量の廃棄体が埋設された場合の検討	1
4. 参考文献	3

1. はじめに

本資料は、設定値を超える金属廃棄物が埋設された場合を考慮した上で、金属廃棄物に対する金属重量の設定(310kg/本)を行うことの妥当性を示すものである。

2. 金属廃棄物重量の設定の妥当性について

3号埋設設備では、事業変更許可後に充填固化体が埋設されることから、2号埋設設備とは異なり埋設実績はない。

一方で、2号埋設設備では、金属廃棄物の収納効率を向上させる観点から、高圧圧縮処理又は熔融処理を行い、可能な限り多くの金属廃棄物を埋設しているため、3号埋設設備でも同様の金属廃棄物の重量にて埋設されると考えられる。

よって、2号埋設設備の埋設実績を用いた金属廃棄物重量の設定は妥当である。

なお、金属腐食による金属の膨張量の設定においては、高圧圧縮体又は熔融体に対し、「腐食速度の設定」として腐食速度を適用せず全量が腐食すると設定し、金属腐食による金属の膨張量を算出する際に、十分な保守性を与えている。

3. 想定を超える金属重量の廃棄物が埋設された場合の検討

金属重量の大きな廃棄物が将来埋設される不確実性の影響を検討するため、仮に3号埋設設備に最大収納重量となる金属廃棄物(高圧圧縮体又は熔融体)が埋設された場合を想定した際の厳しい設定において、金属腐食による金属の膨張量を算出した。

なお、高圧圧縮体及び熔融体は、処理方法の特性上、一つの金属の塊であると捉えられる。そのため、高圧圧縮体及び熔融体の表面積は、金属廃棄物が密収納された廃棄体に比して小さいことから、腐食の進行が遅いと考えられる。

よって、高圧圧縮体及び熔融体に対しては、金属廃棄物の全量が腐食するとはせず、腐食速度及び表面積を設定する。

金属腐食による金属の膨張量の算出に必要なパラメータを第1表に示す。

鉛直方向へ卓越した変形による膨張量及び鉛直・水平方向への変形による膨張量の算出結果を第2表及び第3表に示す。

第1表 厳しい設定における金属の膨張量算出に必要なパラメータ一覧

項目		対象設備
		3号
金属重量	金属廃棄物 ^{*1}	19,800,000 (kg)
	廃棄体容器	792,000 (kg)
	埋設設備中の鉄筋	1,357,000 (kg)
	合計	21,949,000 (kg)
腐食膨張倍率		4倍
金属の表面積 /比表面積	金属廃棄物 ^{*2}	$8.8 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{kg})$
	廃棄体容器	4.8 ($\text{m}^2/\text{本}$)
	埋設設備中の鉄筋	19,000 (m^2)
埋設設備	寸法	東西方向：64.10 (m) 南北方向：36.51 (m) 鉛直方向：6.66 (m)
	体積	約 15,587 (m^3)
腐食速度 ^{*3}		0.1 ($\mu\text{m}/\text{y}$)
評価年数		1,000 (y)

*1：金属廃棄物重量は、廃棄体製作技術の溶融体重量(742kg)を参考に750kg/本として算定した。

*2：金属廃棄物の表面積は、廃棄体製作技術の鉄系金属の表面積(PWR)を参考に設定した。

*3：腐食速度は、腐食速度の測定手法に内在する測定誤差を考慮した値である0.1($\mu\text{m}/\text{y}$)を設定した。

第2表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定

設定	膨張量(m/基)	
	対象設備：3号	
	鉛直方向	
厳しい設定	3.21×10^{-1}	
参考値 ^{*1}	1.69×10^0	

*1：金属重量(310kg/本)での厳しい設定の膨張量

第3表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定

設定	膨張量(m/基)		
	対象施設：3号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向
厳しい設定	1.02×10^0	5.77×10^{-1}	1.06×10^{-1}
参考値 ^{*1}	5.00×10^0	2.85×10^0	5.20×10^{-1}

*1：金属重量(310kg/本)での厳しい設定の膨張量

第2表及び第3表より、1,000年後の金属腐食による膨張量を算出した結果は、金属重量(310kg/本)の厳しい設定にて算出した膨張量に比して約1/5倍である。

以上のことから、将来想定を超える金属重量の廃棄体が埋設された場合の不確実性は、金属重量(310kg/本)の厳しい設定に対し、「腐食速度の設定」を全量腐食と設定した際の膨張量の設定値以下であることから、金属重量を310kg/本として評価することは妥当である。

4. 参考文献

- (1) 財団法人 原子力環境整備センター(平成10年3月): 低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について(各種固体状廃棄物)(改訂1)

以 上

金属腐食による腐食生成物並びに
可溶性塩による二次鉍物に対し真密度を
用いた力学的影響の評価を行う
妥当性について

目 次

1. はじめに	1
2. 金属腐食による腐食生成物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について	1
(1) 「腐食生成物の設定」に係る考え方	1
(2) 「腐食膨張倍率の設定」に係る考え方	2
(3) 「金属腐食による金属の膨張量の設定」に係る考え方	5
3. 可溶性塩による二次鉱物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について	5
(1) 「埋設設備の膨張倍率の評価」に係る考え方	5
(2) 「埋設設備の膨張倍率の設定」に係る考え方	6
4. 参考文献	6

1. はじめに

本資料は、金属の腐食に伴う腐食生成物並びに可溶性塩と埋設設備の反応による二次鉱物によって生じる力学的影響(膨張)について、真密度を用いた力学的影響の評価を行うことの妥当性を示すものである。

2. 金属腐食による腐食生成物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について

金属腐食によって生じる腐食生成物の膨張量は、拘束がない環境において、かさ密度により評価されることが一般的である。

覆土完了後の廃棄物埋設地は、覆土の厚さが十数m以上あることから、土圧における圧縮場での拘束圧が作用した状態である。金属腐食による膨張では、周辺の拘束がある環境において、かさ密度から求めた体積の変化量を用いた定量的な腐食膨張倍率を評価した知見がないことから、かさ密度を考慮した定量的な評価を実施することが困難である。また、拘束圧が作用した状態においては、腐食生成物中のかさ容積^{*1}に含まれる気孔全てが膨張に寄与することは考え難い。そのため、金属腐食に伴う力学的影響(膨張)の評価では、腐食生成物に対し真密度から求めた体積の変化量を用いた評価を行うこととしている。

真密度を用いた評価では、かさ密度を用いた評価に比して力学的影響(膨張)が過小評価となるおそれがあることから、以下に示す「腐食生成物の設定」、「腐食膨張倍率の設定」及び「金属腐食による金属の膨張量の設定」の考え方を踏まえた上で、適切な保守性を与えた評価により実施している。

*1:かさ容積とは、開気孔(外部に通じている気孔)及び閉気孔(固体内に閉じ込められている気孔)両方の体積を含んだ容積である⁽¹⁾。

(1) 「腐食生成物の設定」に係る考え方

腐食生成物は、以下の考え方に基づき設定している。

文献⁽²⁾より、充填固化体に収納される金属廃棄物は、炭素鋼、ステンレス鋼及び鋳鉄が大部分を占め、その他に小物金属、番線、計器類、缶類及びメッキ加工された金属板などである。充填固化体中に収納される金属廃棄物に対し、金属種類を整理した結果より、主要な金属種類は鉄であり、その他考慮する金属種類はアルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛である。腐食生成物の設定は、金属種類を整理した結果を踏まえて、金属種類(鉄、アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)ごとに個別で設定する。

金属種類ごとの腐食生成物に対する確からしい設定は、最も安定に存在し得る腐食生成物を設定する。環境条件に適合した腐食生成物が複数存在する場合又は、最も安定に存在し得る腐食生成物の設定が困難である場合は、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を選定することとする。

金属種類ごとの腐食生成物に対する厳しい設定は、覆土の低透水性への影響評価の観点から、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与すると考えられる腐食生成物(非晶質を含む)を設定する。

以上の考え方に基づき設定した腐食生成物を第1表に示す。

第1表 腐食生成物の設定及び設定の考え方

金属種類	設定	設定の考え方
鉄	【確からしい設定】 Fe ₃ O ₄	【確からしい設定】 複数の文献において生成すること及び安定な結晶性の腐食生成物であることから Fe ₃ O ₄ (マグネタイト)を設定する。
	【厳しい設定】 Fe(OH) ₂	【厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する Fe(OH) ₂ (水酸化鉄(II))を設定する。
アルミニウム ニッケル 銅 亜鉛	【確からしい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu ・ Zn(OH) ₂	【確からしい設定】 それぞれの金属種類に対して複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を設定する。 ただし、銅に関しては、確からしい設定の環境条件下では腐食しないことから銅のままとして設定する。
	【厳しい設定】 ・ Al(OH) ₃ ・ Ni(OH) ₂ ・ Cu(OH) ₂ ・ Zn(OH) ₂	【厳しい設定】 複数の腐食生成物が確認されているが、金属腐食に伴う膨張に大きく寄与する水酸化物を一律設定する。

(2) 「腐食膨張倍率の設定」に係る考え方

金属種類ごとの腐食生成物に対する腐食膨張倍率は、第1表に示した腐食生成物に対し、ICSDの無機結晶構造データベース(化学情報協会)⁽³⁾に示される理論密度を用いて算出している。算出した腐食生成物の腐食膨張倍率を第2表に示す。

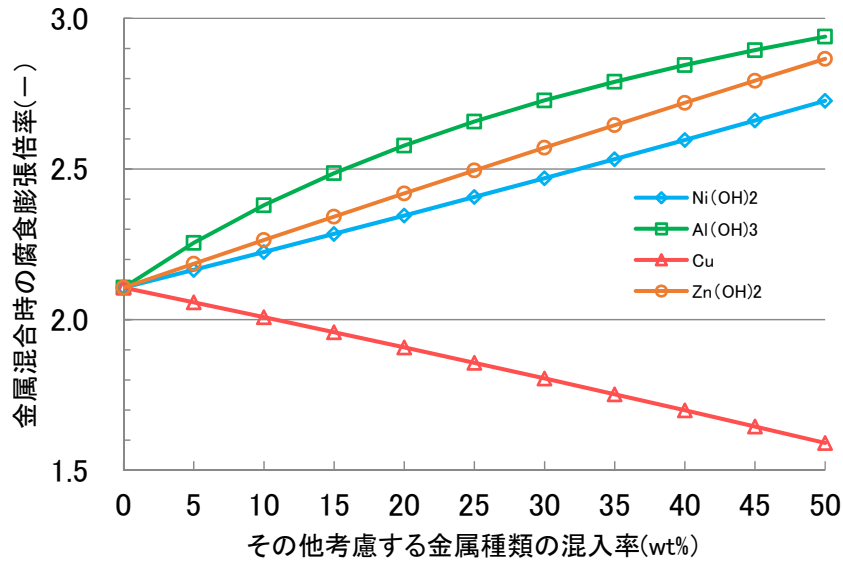
埋設設備中の金属の腐食膨張倍率の設定は、廃棄体中の金属の割合を考慮し設定する必要があるが、文献⁽²⁾より定量的な割合を整理出来ないため、金属の割合を設定することが困難である。そのため、主要な金属種類である鉄に対して、その他考慮する金属種類(アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)の混入率を0wt%~50wt%の幅で設定し、金属が混合された状態での腐食膨張倍率を算出する。

確からしい設定及び厳しい設定に対し、金属が混合された場合の腐食膨張倍率の算出結果を第1図及び第2図にそれぞれ示す。埋設設備中の金属の腐食膨張倍率の設定に当たっては、金属が混合された状態での腐食膨張倍率の最大値を包含する値を設定する。

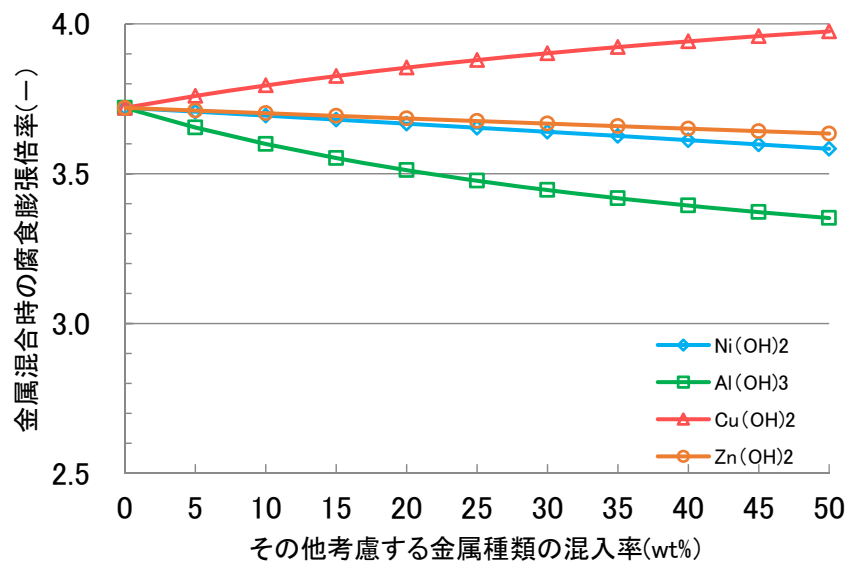
なお、文献⁽²⁾より、その他考慮する金属種類(アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)は、金属廃棄物のうち小物金属、番線、計器類、缶類及びメッキ加工された金属板などである。そのため、その他考慮する金属種類(アルミニウム、ニッケル、銅及び亜鉛)の混入率は、埋設設備全体の金属量に対し、占める割合が小さいと考えられる。

第2表 腐食生成物の設定及び腐食膨張率

条件	腐食生成物の設定及び腐食膨張倍率	
鉄	【確からしい設定】	
	Fe_3O_4	2.10
	【厳しい設定】	
	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	3.72
アルミニウム	【確からしい設定／厳しい設定】	
	$\text{Al}(\text{OH})_3$	3.23
ニッケル	【確からしい設定／厳しい設定】	
	$\text{Ni}(\text{OH})_2$	3.43
銅	【確からしい設定】	
	Cu	1.00
	【厳しい設定】	
	$\text{Cu}(\text{OH})_2$	4.08
亜鉛	【確からしい設定／厳しい設定】	
	$\text{Zn}(\text{OH})_2$	3.56



第1図 確からしい設定(Fe_3O_4 (腐食膨張倍率: 2.10)を基準)における金属が混合された場合の腐食膨張倍率



第2図 厳しい設定($Fe(OH)_2$ (腐食膨張倍率: 3.72)を基準)における金属が混合された場合の腐食膨張倍率

(3) 「金属腐食による金属の膨張量の設定」に係る考え方

金属腐食による金属の膨張量は、埋設設備中の金属量(廃棄体容器、埋設設備中の鉄筋及び金属廃棄物)、腐食生成物の腐食膨張倍率、腐食速度、鉄の密度、評価対象物となる金属の比表面積及び埋設設備の形状を用いて算出し設定している。

金属腐食による金属の膨張量の設定に必要な腐食生成物の腐食膨張倍率は、第1表に示すとおり、主要な金属種類である鉄の確からしい設定を除き、安定な腐食生成物の設定が困難であるため、膨張に大きく寄与する水酸化物を設定している。水溶液中の水酸化物の特性として溶解度に従い溶出することが想定されるが、溶出する現象を考慮せず、金属腐食による金属の膨張量では、腐食生成物(水酸化物を含む)の腐食膨張倍率に従い、全てが埋設設備の膨張に寄与するとして設定している。

以上のことから、力学的影響(膨張)の評価においては、金属腐食による腐食生成物に対して、真密度を用いた評価を実施しているが、金属腐食による金属の膨張量の算出・設定に至るまでの考え方として、適切な保守性を与えた上で評価していることから、妥当であると判断している。

3. 可溶性塩による二次鉱物に真密度を用いた力学的影響の評価の妥当性について

可溶性塩による二次鉱物は、セメント系材料と反応した際のメカニズムは解明されているものの、二次鉱物の生成に伴う膨張量に関して、定量的な知見がない。

「埋設設備の膨張倍率の評価」では、二次鉱物の生成に伴う膨張量の定量的な知見がないため、地球化学計算コードを用いた真密度による評価を実施している。

そのため、可溶性塩による二次鉱物を真密度として評価するに当たっては、以下に示す「埋設設備の膨張倍率の評価」、「埋設設備の膨張倍率の設定」及び「可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定」の考え方を踏まえた上で、適切な保守性を与えた評価により実施している。

(1) 「埋設設備の膨張倍率の評価」に係る考え方

埋設設備の膨張倍率の評価は、可溶性塩による鉱物の生成・溶解に係る反応に対し、評価期間に依存しない平衡計算を行っている。また、解析用物性値である可溶性塩濃度においては、二次鉱物の体積膨張量が最大となるように、1号埋設設備(1群から6群)全体の体積における平均濃度が、1号7,8群の埋設設備へ作用させる設定としている。

(2) 「埋設設備の膨張倍率の設定」に係る考え方

埋設設備の膨張倍率の設定は、セメント系材料の固相変化による膨張倍率(充填材：1.09倍、コンクリート：1.05倍)と埋設設備の構成部材ごとの体積分率を乗算することで設定を行っている。

埋設設備の膨張倍率(-)

$$= (\text{廃棄体中の充填材の体積分率}(-) + \text{セメント系充填材の体積分率}(-)) \times \text{充填材の体積膨張倍率}(-) + (\text{ポーラスコンクリートの体積分率}(-) + \text{コンクリート体積分率}(-)) \times \text{コンクリートの体積膨張倍率}(-) + \text{廃棄体上部空隙}(-)$$

$$= (0.194 + 0.311) \times 1.09 + (0.042 + 0.315) \times 1.05 + 0.083$$

$$= 1.0083$$

一方で、埋設設備の膨張倍率の設定値は、二次鋳物の膨張倍率に係る定量的な知見がないことによる不確実性を考慮し、算出された埋設設備の膨張倍率に対し、切り上げた値(埋設設備の膨張倍率：1.1倍)を設定している。

また、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の設定においては、埋設設備の膨張倍率に従い、全てが埋設設備の膨張に寄与するとして評価している。

以上のことから、力学的影響(膨張)の評価においては、可溶性塩による二次鋳物に対して、真密度を用いた評価を実施しているが、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量の算出・設定にいたるまでの考え方として、適切な保守性を与えた評価により実施していることから、妥当であると判断している。

4. 参考文献

- (1) 一般社団法人 日本溶射学会(2017)：溶射工学便覧、第10章 皮膜の性質と試験方法
- (2) 財団法人 原子力環境整備センター(平成10年3月)：低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について(各種固体状廃棄物)(改訂1)
- (3) 藤原 和俊(2018)：浅地中ピット処分環境における金属腐食による体積膨張挙動の調査、電力中央研究所報告、Q18001

以 上

埋設設備中の環境条件の設定に対する
腐食生成物の設定の
考え方と妥当性について

目 次

1. はじめに	1
2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理	1
(1) 現象による推定	1
(2) 文献による推定	4
(3) 解析による推定	5
3. 腐食生成物の設定	8
(1) 確からしい設定	8
(2) 厳しい設定	8
4. まとめ	8
5. 参考文献	9

1. はじめに

本資料は、埋設設備中の環境条件の設定に対する腐食生成物の設定に係る詳細な考え方と設定の妥当性について示すものである。

2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理

埋設設備中の環境条件下で生成される腐食生成物について、現象、文献及び解析による推定により整理する。

(1) 現象による推定

状態変化の評価期間(1,000年後)において生じる現象から、腐食メカニズムを推定する。

覆土完了後、埋設設備内に周辺の地下水が比較的速やかに浸入することで、埋設設備は、廃止措置の開始後の状態変化の評価期間(1,000年後)において、周辺の地下水により満たされた湿潤状態にある。

そのため、金属は、周辺の環境(水や酸素)と相互作用(電気化学的腐食)することで腐食生成物が生成される。

腐食生成物の生成過程に係る現象を推定するに当たっては、評価対象物となる金属(金属廃棄物、廃棄体容器及び埋設設備中の鉄筋)が複数あること、また、その配置や曝される環境が厳密には異なることから、腐食に伴う環境条件の変化を整理する必要がある。

よって、ここでは評価対象物ごとの代表的な環境条件を選定するため、代表とする金属種類である鉄に対し、埋設設備中の環境変化を以下のとおり整理する。

- ・埋設設備中の評価対象となる金属の配置は、埋設設備の内部から金属廃棄物、廃棄体容器、埋設設備中の鉄筋の順に配置されている。
- ・金属廃棄物及び廃棄体容器は隣接している一方、埋設設備中の鉄筋は充填材の層を介して離れた場所に配置されている。
- ・埋設設備中の鉄筋は、主に周辺岩盤と接する底版及び周辺岩盤と距離が近い外周仕切設備のコンクリート中に存在することから、周辺地下水の組成などの埋設設備外の環境に大きく影響される。
- ・金属廃棄物及び廃棄体容器は、埋設設備中の鉄筋の腐食に伴う環境条件の変化を受けた地下水に曝されることから、埋設設備中の鉄筋とは異なった腐食挙動となることが予想される。

以上の環境条件の変化を踏まえ、評価対象物である金属が曝される代表的な環境は、大きく分けて2つの条件に分類することができる。代表的な環境条件を以下の第1表に示す。

第1表に整理される溶存酸素、pH及び酸化還元電位(以下「ORP」という。)に関しては、相互関係がある。

文献⁽¹⁾では、一般的にORPに対するpHの影響が大きく、次に溶存酸素の影響があるとされ、酸化剤の存在する環境下ではORPを上昇させる効果があるとしている。また、文献⁽²⁾では、中性の地下水を対象としたORPとpHに関する試験及び解析を用いた評価を行っており、文献⁽¹⁾と同様の相互関係があることを示している。

以上のことから、第1表の環境条件は、溶存酸素、pH及びORPの相互関係が正しく設定されている。

- ・①の環境においては、pHが高いアルカリ性であり、溶存酸素が存在する状態を設定していること。

- ・②の環境においては、pHが高いアルカリ性であり、溶存酸素が検出限界以下と限りなく少ない状態を設定していること。

第1表 評価対象物ごとの代表的な環境条件

項目	①	②
環境の状態 ^{*1}	廃棄物埋設地周辺の地下水環境(好氣的条件)	埋設設備中の鉄筋の腐食による影響を受けた地下水環境(嫌氣的条件)
評価対象物	埋設設備中の鉄筋	金属廃棄物及び廃棄体容器
溶存酸素	数 ppm 程度	検出限界以下(0.2ppm 未満)
ORP ^{*2}	約+50mV 以上 ^{*3}	約-100mV 以下 ^{*3}
pH	12.5 程度	
水温	10~15℃程度	

*1：環境の状態(好氣的条件及び嫌氣的条件)は、溶存酸素、ORP、pH及び水温を考慮して設定している。

*2：ORPは、対象とする溶液の溶存酸素、pH及び水温により変動するものである。

*3：ORP値は、文献⁽³⁾を参考に、廃棄物埋設地に流入する地下水(溶存酸素、pH及び水温を考慮)の値を想定したものである。

第1表より、2種類の環境条件における現象を以下のとおり整理する。

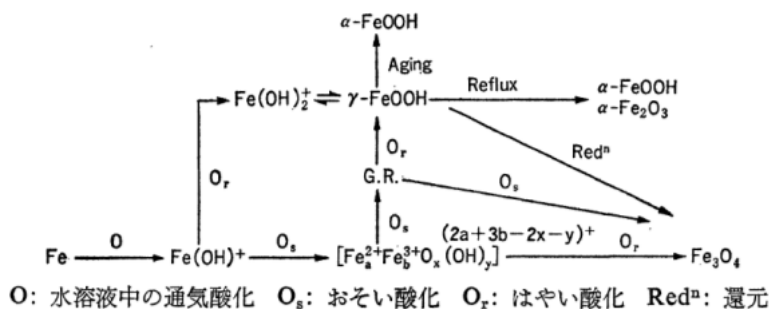
(①の環境下での腐食メカニズム)

埋設設備中の鉄筋は、周辺の地下水と反応することで生じる金属腐食によって、電子を放出する。放出された電子は、周辺の地下水又は、覆土前の埋設設備に存在する溶存酸素^{*1}に消費されることで、 α -FeOOH(以下「ゲーサイト」という。)が生成されると想定する。

そのため、「①の環境」では、酸素消費型の腐食^{(4)~(6)}が生じることが予想される。

酸素消費型の腐食に関しては、文献⁽⁴⁾により常温の水溶液中における鉄の腐食生成物に関する腐食メカニズムが整理されている。鉄さびの生成経路図を第1図に示す。

*1：溶存酸素は、周辺地下水中の溶存酸素(濃度：0.2ppm 未満)及び埋設設備に内在する溶存酸素(大気圧環境下の飽和濃度(想定)：約8ppm)を指す。なお、この溶存酸素は、供給量に対し、埋設設備中の鉄筋(3号の鉄筋重量：1,357,000kg)による金属腐食での消費により、状態変化の評価期間(1,000年後)において、十分に消費できる溶存酸素濃度である。

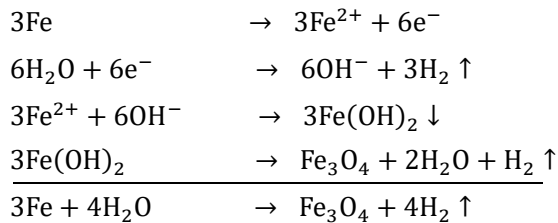


第1図 常温の水溶液中における鉄さび生成経路図⁽⁴⁾

(②の環境下での腐食メカニズム)

金属廃棄物及び廃棄体容器は、埋設設備中の鉄筋により溶存酸素が消費された後、充填材の層を介した地下水環境(酸素が非常に少ない状態)に曝される。よって、金属腐食により放出された電子は、水を分解して水素ガスを発生し、溶解した鉄は2価の水酸化物として沈殿した後、水酸化物が酸化されることで、 Fe_3O_4 (以下「マグネタイト」という。)が生成されると想定する。

そのため、「②の環境」では、水素発生型の腐食^{(4)~(6)}が生じることが予想される。マグネタイトの生成に至る反応式は、以下のとおりになる。



ここで、腐食生成物を設定するに当たり、更に代表的な環境条件を選定する。評価対象物である金属ごとの重量割合は、金属廃棄物：廃棄体容器：埋設設備中の鉄筋=8：1：1 の関係であるため、金属廃棄物及び廃棄体容器が埋設設備中の全金属重量の約9割と大半を占めている。

以上のことから、代表的な環境条件を「②の環境」として設定する。

そのため、確からしい設定の代表的な環境条件である「②の環境」下において、生成される代表的な腐食生成物は、マグネタイトであると整理する。

また、厳しい設定においては、マグネタイト、ゲーサイト及びマグネタイトの生成過程で生成する $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (以下「水酸化鉄(II)」という。)のうち、いずれかの腐食生成物が生成されると整理する。

したがって、現象から推定される腐食生成物は、確からしい設定としてマグネタイト、厳しい設定としてマグネタイト、ゲーサイト及び水酸化鉄(II)のいずれかであると推定する。

(2) 文献による推定

鉄は、状態変化の評価期間(1,000年後)において、「2. (1) 現象による推定」に基づき、溶存酸素の少ない嫌氣的条件及びセメント系材料のカルシウムシリケート水和物が溶解することによる高 pH の環境下に曝される。そのため、これらの環境に類似した条件下にて調査された知見を以下に整理する。

- ・森川ほか⁽⁷⁾は、電食試験(コンクリート中に埋め込んだ鉄筋材を NaCl 水溶液などの溶液中でアノード電解する促進腐食試験)によるコンクリート中の腐食生成物を X 線回折で同定することにより、さびの主成分は、マグネタイトであり、ゲーサイトも確認している。
- ・高谷ほか⁽⁸⁾は、実構造物(鉄道橋(40年経過)、道路橋(30年経過))、暴露試験材(防潮堤26年自然暴露)等を X 線回折で同定することにより、マグネタイトとゲーサイトを検出している。
- ・杉橋ほか⁽⁹⁾は、嫌氣的条件下の試験結果のほとんどでマグネタイトの生成を確認している。
- ・柴田⁽¹⁰⁾は、酸化還元反応式による理論、簡易な計算及び腐食試験などの多角的視点を踏まえた上で、高アルカリ性環境下においては、マグネタイトが生成することを確認している。
- ・三原ほか⁽¹¹⁾は、処分施設のコンクリート中鉄筋、地層処分環境下等を想定したガス発生法による試験から、マグネタイトが生成することを確認している。

以上のことから、確からしい設定の埋設設備中の環境条件に類似する試験条件下において、最も生成される可能性が高いものとしては、マグネタイトであると推定する。

また、厳しい設定においては、マグネタイト、ゲーサイトのうち、いずれかの腐食生成物が生成されると推定する。

(3) 解析による推定

埋設設備中の想定される環境条件下において、金属腐食に伴い生成される腐食生成物を評価するためには、Pourbaix による電位-pH 図を用いた評価がなされることがある⁽¹²⁾。Pourbaix の電位-pH 図は、評価対象とする元素に対し、電位-pH の座標軸を用いてイオン種や化学種の安定領域を示したものであり、水溶液中の酸化還元反応や酸-塩基反応を総括的に理解することができる。

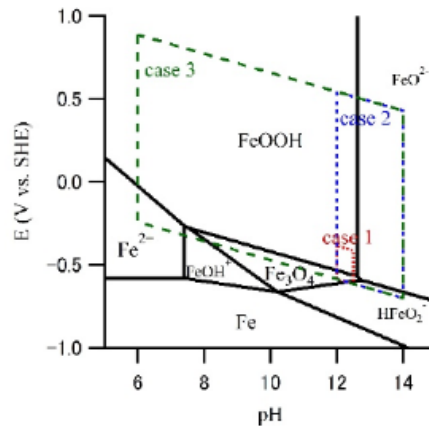
文献⁽¹²⁾では、上記の Pourbaix による電位-pH 図が 25°C の評価が中心であるとともに、特定の酸化物のみを対象にしており、一部の酸化物が考慮されていない。

そのため、文献⁽¹³⁾では、共存するアニオンの影響については情報が不足していることから、化学平衡計算ソフト HSC Chemistry for Windows Ver. 9.3.0 (以下「HSC Chemistry」という。)の Eh-pH Diagram モジュールを用いて電位-pH 図を作成し、環境に応じた腐食生成物の生成可否に関して解析的検討を行っている。

解析に用いられた環境条件を第 2 表に、Case1 の条件下で作図された電位-pH 図を第 2 図に示す。また、文献⁽¹³⁾においては、1 号廃棄物埋設地の廃棄体の特性である可溶性塩を考慮した条件 (Case2) についても解析を実施しているため、Case2 の条件下で作図された電位-pH 図を第 3 図に示す。

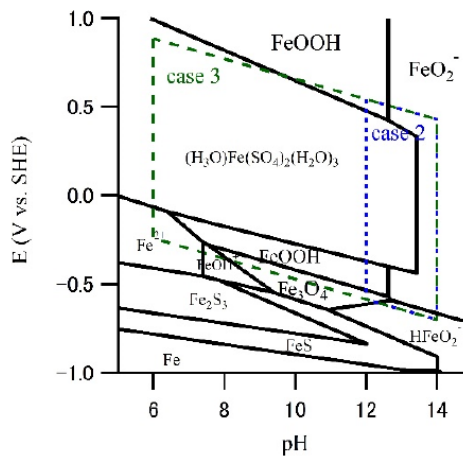
第 2 表 環境条件の設定

項目	Case1	Case2	Case3
温度	5, 15, 25°C	5, 15, 25°C	5, 15, 25°C
pH	12.0~12.5	12.0~14.0	6.0~14.0
溶存酸素	脱気	脱気~空気飽和	脱気~空気飽和
硫酸イオン	なし	あり	あり
ほう酸イオン	なし	あり	あり
塩化物イオン	なし	あり	あり
炭酸イオン	なし	なし	あり



注1：②の環境と類似するのはCase1（赤破線）の範囲である。

第2図 HSC Chemistryによる15°CにおけるFe-H₂O系での電位-pH図



第3図 HSC Chemistryによる15°CにおけるFe-S-H₂O系での電位-pH図

第2図より、確からしい設定の埋設設備中の環境条件に類似する解析条件下において、生成される代表的な腐食生成物はマグネタイトであると整理する。

また、厳しい設定においては、第2図及び第3図より、主要な鉄の腐食生成物としては、マグネタイト、ヘマタイト、ゲーサイト及び $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_3$ (以下「ロンボクレース」という。)のいずれかの腐食生成物が生成される可能性がある。

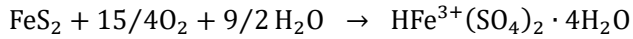
しかしながら、解析により作図される電位-pH図は、熱力学データベースに基づいた計算により熱力学的に安定な腐食生成物が選定されることから、腐食生成物の生成条件を考慮されていない。

そのため、「2. (1) 現象による推定」及び「2. (2) 文献による推定」にて整理した腐食生成物以外の腐食生成物(ロンボクレース)に対し、生成条件を精査する。

文献^{(14)~(15)}では、ロンボクレースが生成する環境が限定的であるとしている。よって、埋設設備中の環境条件(②の環境)下においては、生成しない腐食生成物であると判断する。文献^{(14)~(15)}に記載されている具体的な生成条件は、以下のとおりである。また、ロンボクレースが生成する

環境条件を第4図に示す。

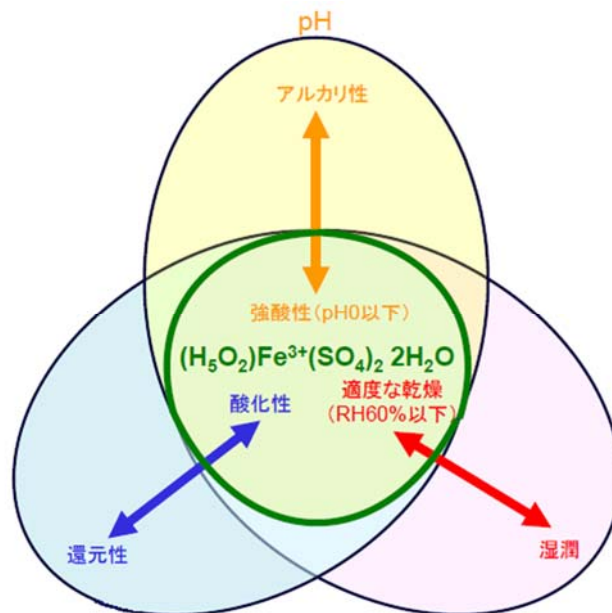
- ・高橋ほか⁽¹⁴⁾は、ロンボクレーズは pH が負の値を示すような著しい酸性の環境下において、黄鉄鉱や白鉄鉱の分解によって生じる鉄硫酸塩鉱物とし、以下の反応式によって生成するとしている。



- ・WENQIAN ほか⁽¹⁵⁾は、低温環境でフェリコピアタイトとロンボクレーズの混合物に関する試験を行い、相対湿度(以下「RH」という。)が35%~55%の環境での反応性を示していることから、湿潤環境下では溶解するとしている。

以上のことから、厳しい設定では、ロンボクレーズを除いたマグネタイト、ヘマタイト及びゲーサイトのうち、いずれかの腐食生成物が生成されると整理する。

したがって、解析から推定される腐食生成物は、確からしい設定としてマグネタイト、厳しい設定としてマグネタイト、ヘマタイト及びゲーサイトのいずれかであると推定する。



第4図 ロンボクレーズが生成する環境条件

3. 腐食生成物の設定

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」の3つの推定を踏まえて、埋設設備中の環境条件における腐食生成物を設定する。

(1) 確からしい設定

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」より整理された結果を踏まえ、代表とする環境条件下において、安定に生成かつ結晶性を有する腐食生成物であるマグネタイト(β :2.1)を設定する。

(2) 厳しい設定

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」の3つの推定では、厳しい設定に対して複数の腐食生成物(ヘマタイト、マグネタイト、ゲーサイト及び水酸化鉄(II))が生成するとして整理している。金属腐食による腐食生成物の設定においては、金属腐食に伴う膨張に対し、覆土の低透水性への影響評価の観点から、膨張に大きく寄与すると考えられる腐食膨張倍率の最も大きな腐食生成物を設定することが必要である。

設定に当たっては、「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」にて生成するとして整理した腐食生成物に対し、ICSDの無機結晶構造データベース(化学情報協会)⁽¹³⁾に示される理論密度を用いて、重量1.0kgの金属の体積 V_1 が腐食し、酸化物あるいは水酸化物となった場合の体積 V_2 の比より、理論的な膨張率(β)を求めることで算出し、整理する。各腐食生成物の体積膨張倍率(β)の算出した結果を第3表に示す。

第3表より、腐食膨張倍率の最も大きな水酸化鉄(II)(β :3.72)を設定する。

第3表 各腐食生成物の体積膨張倍率

	モル質量(g/mol)	真密度(g/cm ³)	β
Fe	55.845	7.860	1.00
ヘマタイト	159.688	5.240	2.10
マグネタイト	231.533	5.170	2.14
ゲーサイト	88.852	4.260	2.94
水酸化鉄(II)	89.860	3.400	3.72

4. まとめ

「2. 腐食生成物の設定に係る知見の整理」及び「3. 腐食生成物の設定」より、埋設設備中の金属に対する腐食生成物は、埋設設備中の環境条件の設定に対し、3つの推定を踏まえても確からしい設定としてマグネタイト、厳しい設定として水酸化鉄(II)を設定することが妥当である。

5. 参考文献

- (1) 伊藤 伍郎(2010)：腐食化学と防食技術、第 25 版、p52-53
- (2) 岩月 輝希ほか(2009)：深部地下水の物理化学パラメータ (pH、酸化還元電位)の測定とその留意点、地下水学会誌、第 51 巻第 3 号、p205-214
- (3) 武藤 暢夫ほか(1986)：酸化還元電位値に影響を及ぼす要因に関する実験的検討、水質汚濁研究 第 9 巻 第 10 号、p661-667
- (4) 三沢 俊平(1983)：鉄さび生成の現状と未解明点、防食技術、32、p657-667
- (5) 三沢 俊平(1985)：鉄鋼の湿食形態と腐食生成物、日本金属学会会報、第 24 巻、第 3 号、p201-210
- (6) 三沢 俊平ほか(1974)：鉄さびの生成機構と耐候性さび層、防食技術、23、p17-275
- (7) 森川 雄行ほか(1987)：鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究、土木学会論文集 第 378 号/V-6、p97-105
- (8) 高谷 哲ほか(2015)：コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性、土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)、Vol. 71、No. 3、p235-247
- (9) 杉橋 直行ほか(2008)：余裕深度処分施設におけるセメント系人工バリア内の鋼材腐食に関する一考察、土木学会第 63 回年次学術講演会、CS05-43、p253-254
- (10) 柴田 俊夫(2014)：材料と環境、63、p109-115
- (11) 三原 守弘ほか(2002)：低酸素かつアルカリ条件における炭素鋼, ステンレス鋼及びジルカロイからのガス発生率及び腐食速度の評価、サイクル機構技報、JNC TN1340 2002-001、No. 15、p91-101
- (12) M. Pourbaix et al. (1974): Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solution 2nd English edition. NACE international cebelcor. ISBN-10 : 0915567989
- (13) 藤原 和俊(2018)：浅地中ピット処分環境における金属腐食による体積膨張挙動の調査、電力中央研究所報告、Q18001
- (14) 高橋 良ほか(2009)：幌別硫黄鉱山遅滞における砒素や重金属を溶出させる熱水変質岩の地質学的特徴、応用地質、Vol. 50、No. 4、p228-237
- (15) WENQIAN XU et al. (2010): $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ formed by dehydrating rhomboclase and its potential existence on Mars、American Mineralogist、Vol. 95、No. 10、p1408-1412

以上

力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ
与えた場合の等価透水係数の試算について

目 次

1. はじめに	1
2. 覆土形状の設定	1
(1) 埋設設備膨張量の算出	1
(2) 覆土形状	2
3. 覆土の状態設定	3
(1) 部位ごとの透水係数の設定	3
(2) 等価透水係数の設定	4
4. 線量評価への影響について	5
5. 覆土材料による影響について	5
6. その他	6
7. 参考文献	7

1. はじめに

本資料は、力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた場合の等価透水係数の試算について示すものである。

2. 覆土形状の設定

埋設設備の膨張量が直接的に覆土の変形量になると仮定することで、覆土の変形量が最大となるように状態設定を行う。

(1) 埋設設備膨張量の算出

金属腐食及び可溶性塩と埋設設備の反応を考慮して算出した埋設設備の膨張量を第1表及び第2表に示す。最も膨張量の大きい厳しい設定における3号廃棄物埋設地の東西方向を代表とし、東西断面に生じる膨張の概念図を第1図に示す。

第1表 鉛直方向へ卓越した変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)		
	対象設備：3号	対象設備：1号*1	対象設備：2号
	鉛直方向		
確からしい設定	1.10×10^{-1}	2.53×10^{-2}	9.51×10^{-2}
厳しい設定	1.69×10^0	9.69×10^{-1}	1.39×10^0

*1：1号廃棄物埋設地のうち厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している。

第2表 鉛直・水平方向への変形による膨張量の設定値

設定	膨張量(m/基)								
	対象設備：3号			対象設備：1号*1			対象設備：2号		
	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向	東西方向	南北方向	鉛直方向
確からしい設定	3.50×10^{-1}	2.00×10^{-1}	3.64×10^{-2}	3.32×10^{-2}	3.32×10^{-2}	8.42×10^{-3}	1.64×10^{-1}	1.68×10^{-1}	3.16×10^{-2}
厳しい設定	5.00×10^0	2.85×10^0	5.20×10^{-1}	1.26×10^0	1.26×10^0	3.19×10^{-1}	2.25×10^0	2.31×10^0	4.34×10^{-1}

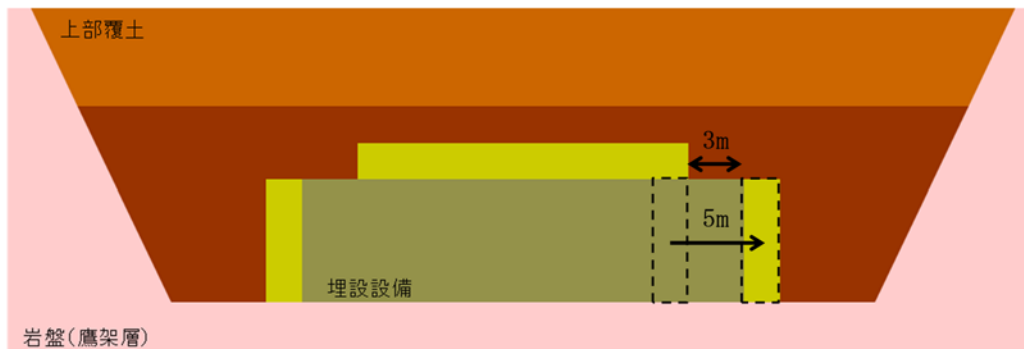
*1：1号廃棄物埋設地のうち厳しい設定は、可溶性塩と埋設設備の反応による埋設設備の膨張量を加味している。



第1図 3号廃棄物埋設地膨張概念図(厳しい設定)

(2) 覆土形状

膨張により設定した覆土形状を第2図に示す。東西方向を代表断面とし、モデルの片側に5mの変位を与えた(本来は2.5m)。埋設設備側部の難透水性覆土が5m水平移動することにより、埋設設備両端の上面3mが、それぞれ下部覆土に置き換わるとする。



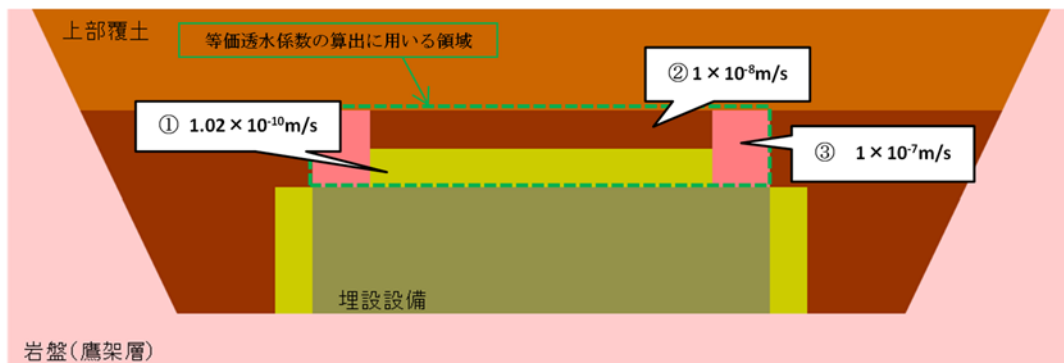
第2図 覆土形状の設定(3号廃棄物埋設地)

3. 覆土の状態設定

(1) 部位ごとの透水係数の設定

第2図の覆土形状に対し、化学的影響を考慮した透水係数の設定を第3図に示す。

透水係数の設定においては、「廃棄物埋設施設における許可基準規則への適合性について 第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料5 廃棄物埋設地の状態設定-状態変化の評価(化学的影響)」(以下「化学的影響」という。)及び「廃棄物埋設施設における許可基準規則への適合性について 第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価) 補足説明資料6 廃棄物埋設地の状態設定-透水係数の設定-」(以下「透水係数の設定」という。)と同様の考え方に基づく。①及び②の透水係数は、「化学的影響」の地球化学解析による評価結果に基づいて設定した。③の透水係数は、「透水係数の設定」の考え方に基づいて設定した。



第3図 覆土の状態設定

(2) 等価透水係数の設定

等価透水係数の算出に用いる領域における覆土の透水係数を第3表に示す。また、算出した覆土の等価透水係数を第4表に示す。等価透水係数の計算方法については、「透水係数の設定」と同様の考え方に基づく。

DEM 解析を使用しない場合の覆土の等価透水係数は、DEM 解析を使用した覆土の透水係数とほぼ同等であることを確認した。

第3表 覆土の透水係数設定(3号廃棄物埋設地)

時期	厳しい設定
1,000年後	<p> $L_3=3.0, K_3=1.0 \times 10^{-7}$ $L_4=3.0, K_4=1.0 \times 10^{-7}$ $L_1=2.0, K_1=1.0 \times 10^{-8}$ $L_2=2.0, K_2=1.02 \times 10^{-10}$ $L_5=30.0, K_5=2.02 \times 10^{-10}$ </p>

L : 長さ (m)、K : 透水係数 (m/s)

第4表 覆土の等価透水係数(3号廃棄物埋設地)

1,000年後 厳しい設定	今回の覆土形状
等価透水係数 [m/s]	1.69×10^{-8}

4. 線量評価への影響について

DEMによる覆土形状と今回の覆土形状から算出された等価透水係数の比較を第5表に示す。力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた際の等価透水係数を試算した場合においても、DEM解析と等価透水係数が同等であったため、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響は生じないと考えられる。

第5表 覆土の等価透水係数の比較(3号廃棄物埋設地)

1,000年後 厳しい設定	DEMによる覆土形状	今回の覆土形状
等価透水係数[m/s]	1.13×10^{-8}	1.69×10^{-8}

5. 覆土材料による影響について

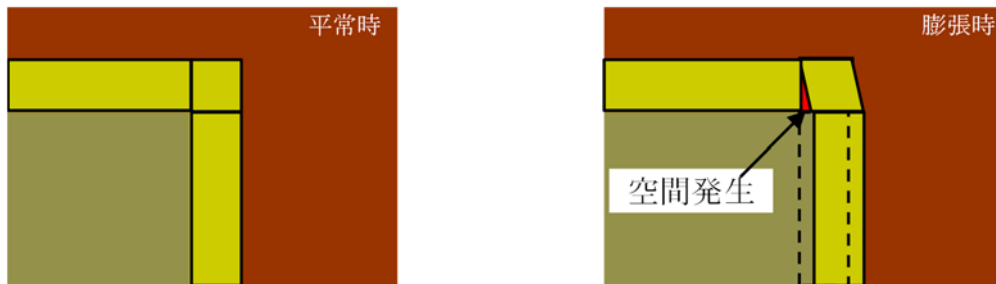
覆土材料は、材料調達状況を考慮した覆土施工時の施工試験結果により、材料及び施工のばらつきを考慮して最終決定する。そのため、最終決定された覆土材料に対しては、覆土の低透水性への力学的影響の評価を必要に応じて実施し、線量評価への影響の有無を確認する必要がある。

覆土完了後の廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数m以上あることから、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である。また、金属腐食による膨張は、この拘束圧が作用した場において、メートルオーダーの大変形が生じることとなる。これは、大きな剛性を持つ金属が変形することにより、金属と比較して小さな剛性を持つ覆土が、強制変位のような状態でせん断変形する状態である。そのため、ベントナイト混合土(Ca型ベントナイト30wt%と砂70wt%の混合土)に対し、剛性が大きく変わらない覆土材料(Na型ベントナイト20wt%と砂80wt%の混合土)を用いた場合においても、金属腐食による膨張に伴い強制変位のような状態でせん断変形することが想定される。また、第5表に示すとおり、最も厳しい評価となる埋設設備の膨張量が直接的に覆土へ与えた場合の等価透水係数の試算においても、覆土の等価透水係数は、DEM解析と同等であったことから、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響が生じない考えを示している。

以上のことから、覆土材料による影響については、覆土の変形に寄与する剛性が大きく変わらないため、等価透水係数に与える影響が軽微であり、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響は生じないと考えられる。

6. その他

埋設設備の膨張に伴い水平方向へ難透水性覆土が移動することで、難透水性覆土の上部が引き込まれ、卓越経路になり得る空間が生じると示唆される。そのため、空間が発生する可能性が示唆される現象(以下「示唆される現象」という。)について考察する。示唆される現象の概念図を第4図に示す。



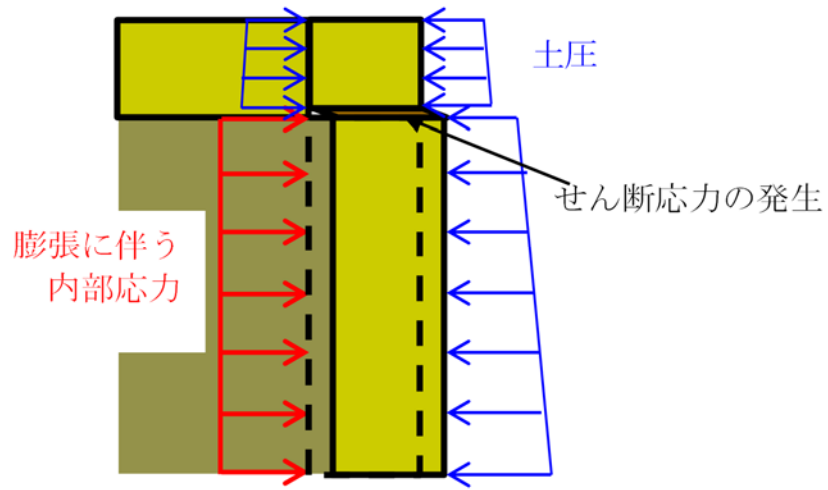
第4図 示唆される現象の概念図

文献⁽¹⁾によると、土や岩は、圧縮には強いがゆがみには比較的脆弱であり、外部や自重の作用によって地盤の内部にせん断応力が発生すると、地盤要素にゆがみによるせん断変形が生じるとされている。また、土の場合においては、せん断によってのみせん断破壊が生じるとされている。さらに、地盤材料がせん断変形を受けることでせん断面を形成している状況において、せん断面のひずみが集中している薄い層をせん断帯といい、粘土においては数十 μm オーダー、砂においては数 mm オーダーとされている。

ここで、示唆される現象が生じた場合の難透水性覆土周辺の応力場を第5図に示す。

難透水性覆土内部においては、周辺からの土圧の作用による押さえ込みにより等方圧縮応力場となっている。地盤の内部に廃棄物埋設地の膨張に伴い内部応力が発生し、内部応力は徐々に周辺土圧相当まで高まる。内部応力が周辺土圧と同等となると、埋設設備に接している覆土を押し込む状況が発生する。これは、内部応力が作用する面でのみ発生する現象であり、内部応力の発生しない部分との境界面においては、内部応力と土圧によるせん断応力が発生する。

以上のことから、せん断応力の発生する境界面において、極めて薄い層でのせん断破壊が発生することから、示唆される現象が発生する可能性はない。



第5図 示唆される現象が生じた場合の難透水性覆土周辺の応力場

7. 参考文献

- (1) 社団法人 地盤工学会 (2010) : 地盤材料試験の方法と解説

以 上

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

-状態変化の評価(化学的影響)-

2020年12月

日本原燃株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 解析条件.....	1
(1) 解析コード.....	1
(2) 解析モデル.....	2
(3) 地下水組成.....	4
(4) 難透水性覆土の設定.....	4
(5) セメント系材料の設定.....	8
(6) 生成を想定した二次鉱物.....	10
(7) 熱力学データベース.....	12
3. 解析結果.....	12
(1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)	12
(2) 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合(ケース②)	21
4. 参考文献.....	30

添付資料1 パラメータ設定根拠集

添付資料2 地下水組成のチャージバランス計算

添付資料3 覆土が長期間にわたり低透水性を維持することができる要因

参考資料1 ペクレ数分布

参考資料2 難透水性覆土の材料仕様をNa型ベントナイトとした場合

1. はじめに

本資料は、「第十条 廃棄物埋設地のうち第四号（廃止措置の開始後の評価）」を補足説明するものである。

難透水性覆土に対する安全機能として低透水性が期待されている。難透水性覆土の透水性は、ベントナイト系材料に含まれる膨潤性鉱物であるモンモリロナイトにより支配されていることが知られている⁽¹⁾。一方、廃棄体固型化材や埋設設備には多量のセメント系材料が用いられている。セメント系材料と接触した地下水は、セメント系材料から溶出するセメント成分や1号廃棄物埋設地に埋設された廃棄体に含まれる可溶性塩により組成が変化し、高アルカリ性となる。高アルカリ性の地下水は、ベントナイト系材料中のモンモリロナイトを溶解あるいは変質させ、難透水性覆土の低透水性機能が次第に低下することが懸念される。ここでは、これらの化学的影響を考慮しても難透水性覆土の低透水性が、期待する期間において維持されることを確認するため、難透水性覆土とセメント系材料を接触させた反応系における地球化学解析により、難透水性覆土中の等価透水係数の変遷を評価した。評価期間は、廃止措置の開始後の確からしい評価期間として1,000年後とした。(また、参考として地下水シナリオにおいて移行抑制機能を期待する数万年(20,000年後)についても評価した。)

なお、1号及び3号廃棄物埋設地の評価結果は併記する。

2. 解析条件

(1) 解析コード

本解析では、難透水性覆土へのアルカリ成分の移行挙動とモンモリロナイトの化学的な溶解を連成させて評価する必要があるため、これらを連成して解析できる PHREEQC-TRANS(化学反応物質移行連成解析コード)により、セメント系材料が用いられる埋設設備から難透水性覆土へのアルカリ成分の移行及び化学反応を評価した。

本解析で用いた PHREEQC-TRANS で中心となる地球化学解析は、アメリカ地質調査所(USGS)が開発・公開している PHREEQC⁽²⁾⁽³⁾をベースとしている。PHREEQCはソースプログラムが公開されており、広く検証されている⁽⁴⁾。また、PHREEQC-TRANSは地球化学解析と物質移行解析を連成させることで、地球化学反応の進展に伴う物質移行パラメータ(空隙率、拡散係数)の変化も同時に反映しながら、長期の変質挙動を解析することができる解析コードである。

(2) 解析モデル

本解析では、地下水は廃棄物埋設地の下部より流入し、廃棄物埋設地内を通過して再び廃棄物埋設地下部より流出することから、セメント系材料から難透水性覆土への移流成分は少ないと想定される。そのため地球化学解析における物質移行は拡散によつてのみ起こるものとした。

なお、埋設設備周辺の難透水性覆土及び下部覆土において、ペクレ数分布より、評価期間内で拡散場が継続することを確認している。(参考資料 1「ペクレ数分布」、補足説明資料 6「透水係数の設定」参考資料 1「3. 確認結果」及び補足説明資料 7「埋設設備からの流出水量」添付資料 5「放射性物質を含む地下水が分水界の北側へ移行した場合の線量評価について」を参照。)

解析モデルについては、廃棄物埋設地で用いられるセメント系材料が難透水性覆土に与える影響を検討するため、セメント系材料と難透水性覆土が接する領域を解析対象とした 1 次元モデルを設定した。難透水性覆土の厚さは 2m を設定した。

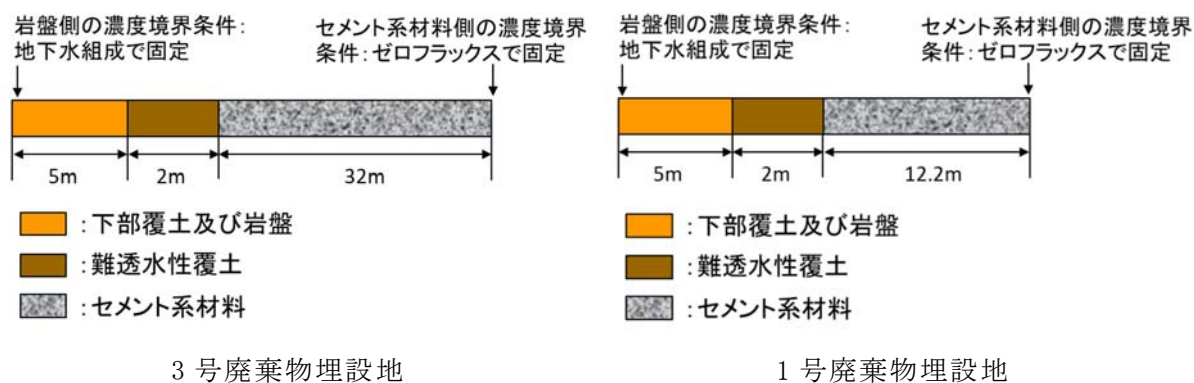
ここで、難透水性覆土中のモンモリロナイトの溶解量は、セメント系材料から溶出し難透水性覆土へ移行して化学反応に寄与するアルカリ量で決定される。セメント系材料のアルカリ量は、セメント系材料の種類や配合に加え、体積により決定される。1 次元体系では、体積は各材料のモデル長さに反映される。そこで、セメント系材料のモデル長さは、難透水性覆土に対して十分な長さとして、埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分(3号廃棄物埋設地では 64m の半分の 32m、1号廃棄物埋設地では 24.4m の半分の 12.2m)の長さを設定した。(難透水性覆土とセメント系材料の体積比を考慮すると、難透水性覆土 2m に対するセメント系材料の長さは、埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さより短い。)

なお、2号廃棄物埋設地は、3号廃棄物埋設地と同種の廃棄体(充填固化体)及び類似施設であり、解析結果はいずれかの廃棄物埋設地で代表することができる。埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さをセメント系材料のモデル長さに設定する場合、2号廃棄物埋設地と比べ3号廃棄物埋設地の方が長く、その分アルカリ量は多くなることから、3号廃棄物埋設地の解析結果で代表することとした。一方、1号廃棄物埋設地については、廃棄体(均質・均一固化体)に塩類(硫酸塩、ほう酸塩)が含まれているため、セメント系材料から浸出してくるアルカリ成分に加え、廃棄体から溶出する塩が難透水性覆土に含まれるモンモリロナイトの変質に影響を及ぼす可能性

がある。そのため、3号廃棄物埋設地とは別に解析を行うこととした。

以上より、解析では3号及び1号廃棄物埋設地を評価対象とした。

また、本解析では、難透水性覆土とセメント系材料の相互作用に着目するため、難透水性覆土とセメント系材料のみが反応し、下部覆土及び岩盤は反応しないものとした。境界条件に関して、難透水性覆土端から離れた点では、セメント影響を受けずに地下水組成と同じ液相組成になると考えられるため、地下水組成固定条件を設定した。一方、セメント系材料端は、セメント系材料の成分がセメント系材料の端から解析体系外へ移行しないように濃度勾配ゼロの境界条件(反射条件)とした。3号及び1号廃棄物埋設地の解析体系の概念図を第1図に示す。



第1図 解析体系概念図

(3) 地下水組成

廃棄物埋設地周辺の地下水組成は、淡水で地表付近の地下水であるという特性をふまえて地表付近の淡水と大気圧との平衡を考慮したモデル地下水 FOHP (Fresh-Oxidizing-High-pH)⁽⁵⁾を参照することとした。解析で設定した地下水組成を第1表に示す。

第1表 設定した地下水組成

pH	8.46
Na	$3.22 \times 10^{-3} \text{mol/L}$
K	$5.79 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
Ca	$1.01 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
Mg	$6.50 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
C	$3.54 \times 10^{-3} \text{mol/L}$
S	$1.00 \times 10^{-6} \text{mol/L}$
Cl	$4.40 \times 10^{-6} \text{mol/L}$
Al	$3.61 \times 10^{-7} \text{mol/L}$
Si	$3.40 \times 10^{-4} \text{mol/L}$

(4) 難透水性覆土の設定

(i) 難透水性覆土の鉱物組成

ここではCa型ベントナイト(クニボンド)を3割配合した材料仕様とした。難透水性覆土の乾燥密度は 1.61Mg/m^3 と設定した。難透水性覆土の初期鉱物組成を第2表に示す。

第2表 難透水性覆土の初期鉱物組成

	Ca型ベントナイト(クニボンド) 30wt%				
	モンモリロナイト				随伴鉱物
	Na-Mont	Ca-Mont	K-Mont	Mg-Mont	カルセドニ
mol/L _{water} ^{*1}	0.33	1.94	0.06	0.23	2.94

*1: 空隙水 1L に対する鉱物の物質質量

(ii) モンモリロナイトの溶解速度

モンモリロナイトの溶解速度は TRU2 次レポート⁽⁶⁾で使用されている式を使用した。セメント由来の高 pH 溶液の影響を考慮するため、Sato et al. (2004)⁽⁷⁾がモンモリロナイト試料を用いて種々の pH 条件(8~13)におけるフロースルー試験で測定された溶解速度の結果より、pH の関数として求めた溶解速度式と平衡に接近した場合のモンモリロナイトの溶解速度に対する飽和依存性の式について、Cama et al. (2000)⁽⁸⁾がモンモリロナイトの溶解速度実験データに基づきフィッティングによって求めた経験式を合わせた数式 1 を用いた。文献⁽⁹⁾では、強アルカリ性条件では、Cama et al. (2000)が弱アルカリ条件で求めた溶解速度の ΔGr 依存性よりも、より小さい ΔGr (より不飽和な環境)で溶解速度が小さくなることが確認されていること(第 2 図)から、Cama 式を適用した。

なお、第 2 図における数値中の E は、指数表記における基数の 10 を示す(例えば、1E+2 は 1×10^2 を示す。以下、同様。)

また、鉱物の反応表面積は、モンモリロナイトの比表面積として Yokoyama, S. et al. (2005)⁽¹⁰⁾にて N_2 -BET 法で算出された $7m^2/g$ を用いてモンモリロナイト 1mol 当たりの反応表面積に換算して使用した。

$$Rate = \left(4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.57/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{69.67/RT} \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}} \right) \cdot A_{min} \cdot \{1 - \exp(6 \cdot 10^{-10} \cdot (2 \cdot \Delta Gr/RT)^6)\}$$

(数式 1)

Rate : モンモリロナイトの溶解速度 [mol/s]

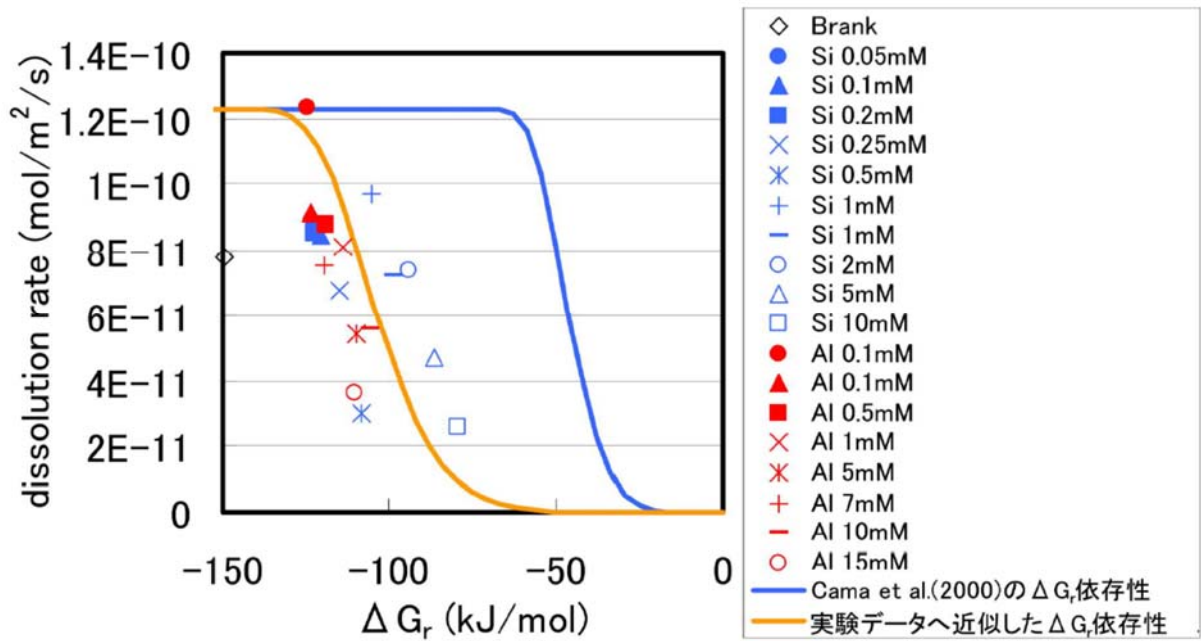
R : 気体定数 [kJ/(K·mol)]

T : 絶対温度 [K]

a_{OH^-} : OH^- イオンの活量

A_{min} : 鉱物の反応表面積 [m^2]

ΔGr : 反応のギブス自由エネルギー変化(化学親和力) [kJ/mol]



第2図 モンモリロナイトの溶解速度と化学親和力 ΔG_r の関係(文献⁽⁹⁾)

(iii) 難透水性覆土の透水係数の変遷評価式

難透水性覆土の透水係数は、TRU2次レポート⁽⁶⁾で使用されている、ベントナイトに対し様々な条件下で求めた透水係数の実測値に基づき、伊藤ら(2005)⁽¹⁾が求めたベントナイトと透水係数の関係式(数式2)を使用した。

$$K = 10^{1.30 \cdot C_i} \cdot e_{sme}^{3.48 \cdot C_i} \cdot K_0 \quad (\text{数式 2})$$

ただし、 $C_i > 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ のとき、 $C_i = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$

$K > 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$ のとき、 $K = 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$

$K > 1.0 \cdot 10^{-5}$ のとき、 $K = 1.0 \cdot 10^{-5}$

$$K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} & e_{sme} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \left(\frac{e_{sme}}{7.0}\right)^{11.4} & 7.0 < e_{sme} \end{cases}$$

ただし、 $K_0 < K_0|_{ESP=1}$ のとき、 $K_0 = K_0|_{ESP=1}$

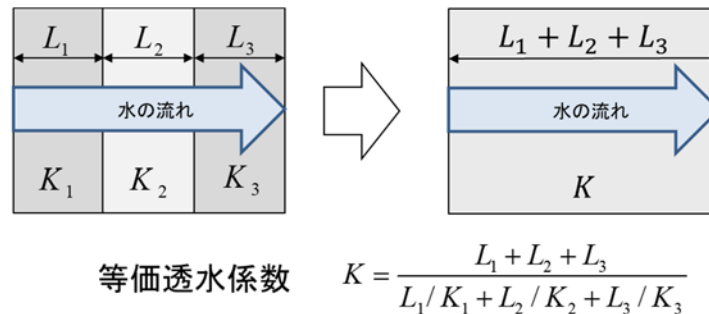
C_i : 空隙水の当量イオン濃度 [eq/L]

ESP : ベントナイトの交換性ナトリウム割合 [-]

e_{sme} : スメクタイト間隙比 [-]

K : 透水係数 [m/s]

難透水性覆土全体の透水係数に関しては、文献⁽¹¹⁾を参考に、第3図に示すように異なる透水係数を持つ材料に対して直列となる方向の透水性を考えた場合の系全体の透水係数(等価透水係数)で表現した。



第3図 等価透水係数の設定(直列)

(iv) 難透水性覆土の拡散係数

難透水性覆土中の拡散係数は、TRU2次レポート⁽⁶⁾で使用されている、空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式⁽¹²⁾(数式3)を設定した現実的な拡散モデルとした(以下「ケース①」という。確からしい設定に相当する。)

$$D_e = 2.27 \times 10^{-9} \times \varepsilon^n \quad (\text{数式 3})$$

$$n = 2.22 f_s^{0.13} + 1$$

$$f_s = a \times f_b$$

D_e : 実効拡散係数 [m²/s]

ε : 空隙率 [-]

a : ベントナイト中のモンモリロナイト割合 [-]

f_b : ベントナイトの配合割合 [-]

また、上記で設定した経験式(数式 3)において、ベントナイト中のモンモリロナイトの割合 a (若しくはベントナイトの配合割合 f_b)を 0 とした場合、 ε の指数 n は 1 となり、実効拡散係数は単純に空隙率に比例するという拡散モデル(拡散係数が大きい方が、アルカリ成分が難透水性覆土中を移動する速度を大きく見積もることになり、モンモリロナイトの溶解が広範囲に広がる可能性がある)となる(数式 4)。そのため数式 4 を用いた解析も行った(以下「ケース②」という。厳しい設定に相当する。)

$$D_e = 2.27 \times 10^{-9} \times \varepsilon \quad (\text{数式 4})$$

(5) セメント系材料の設定

(i) セメント系材料の鉱物組成

廃棄物埋設地で使用されているセメント系材料のうち、充填モルタルの配合を参照した。

なお、3 号廃棄物埋設地の充填モルタルの配合は候補配合とした。初期鉱物組成の算定方法は、文献⁽¹³⁾に記載されている算定方法を参考した。参照した算定方法では、初期鉱物として C-S-H ゲル、ハイドロタルサイト、エトリンガイト、(余剰 Al_2O_3 をギブサイト)、NaOH、KOH を想定しており、セメント系材料のバッチ式浸漬実験との比較において、液相成分の再現性が高く、適用可能なモデルであることが示されたもの⁽¹³⁾である。

なお、どちらの条件においても、骨材については反応しないものとした。

a. 3 号廃棄物埋設地

ここでは 3 号廃棄物埋設地の充填モルタルの候補配合とした。3 号廃棄物埋設地の解析で設定したセメント系材料の初期鉱物組成を第 3 表に示す。

第 3 表 セメント系材料の初期鉱物組成 (3 号廃棄物埋設地)

	結合材 (C)					
	C-S-H ゲル	ハイドロ タルサイト	エトリン ガイト	ギブサイト	NaOH	KOH
mol/L _{water} *1	9.51	0.33	0.04	0.94	0.03	0.03

*1：空隙水 1L に対する鉱物の物質質量

b. 1 号廃棄物埋設地

1 号廃棄物埋設地で使用されている配合を参照した。1 号廃棄物埋設地の解析で設定したセメント系材料の初期鉱物組成を第 4 表に示す。

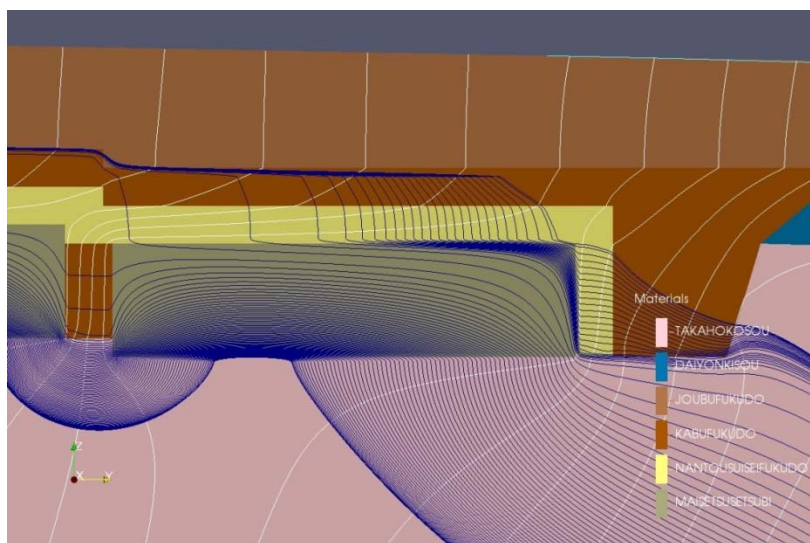
第 4 表 セメント系材料の初期鉱物組成 (1 号廃棄物埋設地)

	結合材 (C)					
	C-S-H ゲル	ハイドロ タルサイト	エトリン ガイト	ギブサイト	NaOH	KOH
mol/L _{water} *1	6.46	0.41	0.01	1.19	0.01	0.01

*1：空隙水 1L に対する鉱物の物質質量

(ii) 廃棄体に含まれる塩量 (1 号廃棄物埋設地で設定)

1 号廃棄物埋設地の廃棄体 (均質・均一固化体) に含まれる塩類 (ほう酸塩及び硫酸塩) の量について、1 号廃棄物埋設地の埋設実績から集計を用いて設定した。また、セメント系材料の幾何学的な劣化 (ひび割れ) に伴い 1 号廃棄物埋設地内には、地下水は難透水性覆土が設置されていない下部から入り込み、主に下部から岩盤中へと移行していく。したがって、廃棄物埋設地内に存在する塩の大半は、それらの流れに乗って岩盤中へ移動していくと考えられる (第 4 図)。廃棄物埋設地から流出する全体の流量のうち、難透水性覆土へ移動する流量を踏まえ、本解析では、難透水性覆土へ移動する塩量を全体の 10% と設定した (地下水流動解析の詳細は、補足説明資料 7 「埋設設備からの流出水量」 添付資料 5 「放射性物質を含む地下水が分水界の北側へ移行した場合の線量評価について」 を参照)。1 号廃棄物埋設地の解析で設定した塩濃度を第 5 表に示す。



第 4 図 廃棄物埋設地の地下水流動概念図

第 5 表 解析で設定した塩濃度

ほう酸塩 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	硫酸塩 (Na_2SO_4)
0.01mol/L_water*1	0.07mol/L_water*1

*1：空隙水 1L に対する鉱物の物質質量

(iii) セメント系材料の拡散係数

セメント系材料中の拡散係数については、セメント系材料は長期的に化学劣化以外の幾何学的劣化(ひび割れ)が想定されるため、物質移動が速い状態となることを想定し、拡散係数として自由水中のトリチウム水の拡散係数 ($2.27 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}^{(14)}$) を設定した(拡散係数が大きい方がアルカリ供給速度は大きく見積もられる。)

(6) 生成を想定した二次鉱物

セメント系材料と地下水が反応した溶液が難透水性覆土へ移行する際に難透水性覆土中のモンモリロナイトの溶解が生じると、空隙水中の Si や Al あるいは Mg といった反応生成物である溶存化学種の濃度が徐々に上昇し、条件に応じて過飽和となり、種々の二次鉱物が沈殿すると考えられる。生成する二次鉱物の種類によって、溶液組成や pH、空隙率が変化し、難透水性覆土の透水性に影響を及ぼす可能性がある。

文献⁽¹⁵⁾では、セメント系材料と反応した溶液と接する緩衝材(ベントナイト系材料)の鉱物学的変化の可能性について、室内試験結果、関連する天然事例から得られる情報に基づき考察を行い、多様な系の特徴に応じて生成頻度が高いと判断された鉱物をまとめている。

一方、二次鉱物の変遷は熱力学的平衡だけで決まるものではなく反応速度の影響を受ける。しかしながら、反応速度に関する知見は乏しく反応速度の影響を定量的に表現するのは困難である。文献⁽¹⁵⁾では、熱力学的に安定な鉱物(安定相)、安定相と比べ相対的に準安定な鉱物(準安定相)に分類し、複数の鉱物変遷シナリオを作成している。本解析では、生成する可能性がある二次鉱物を幅広く網羅するために、準安定相や安定相を含め多くの二次鉱物を設定した(第6表)。

第6表 生成を想定した二次鉱物

フィリップサイト	ブルーサイト	C_3ASH_4
クリノプチロライト	カルサイト	C_4AH_{13}
ヒューランダイト	ドロマイト	C_4AH_{19}
C-S-H ゲル	カルセドニ	ゲーレンナイト水和物
エトリングイト	カリ長石	カオリナイト
モノサルフェート	アナルサイム	パイロフィライト
ハイドロタルサイト	ローモンタイト	フリーデル氏塩
セピオライト	イライト	2水石膏
ポルトランダイト		

また、1号廃棄物埋設地では、廃棄体に含まれる塩とセメント成分及びベントナイトが反応して二次鉱物が生成する可能性も考えられる。そこで、塩影響に係る二次鉱物としてNa及びCaを含むほう酸塩及び硫酸塩を設定した(第7表)。1号廃棄物埋設地を対象とした解析では、第6表に加え第7表を設定した。

第7表 塩影響を考慮した際に生成を想定した二次鉱物(1号廃棄物埋設地で設定)

ほう酸塩	硫酸塩
Ca ₃ B ₂ O ₆	Na ₂ SO ₄ ・10H ₂ O
CaB ₄ O ₇	Thaumasite
CaB ₂ O ₄	エトリンガイト
NaBO ₂	2水石膏
Colemanite	

(7) 熱力学データベース

熱力学データベースは、TRU2次レポート⁽⁶⁾で使用されていた JNC-TDB. TRU⁽¹⁶⁾をベースに、C-S-Hゲルの熱力学データとして A. Atkinson⁽¹⁷⁾のデータを追加して使用した。1号廃棄物埋設地ではセメント・ベントナイト相互作用だけでなく廃棄体に含まれる塩類による影響も評価するため、液相中のイオン濃度が高濃度になることが予想される。そのため、イオン強度が高い領域でも適用可能な活量補正モデルを用いる必要がある。ここでは、PHREEQCに同梱されている SIT モデルに対応した熱力学データベース (sit.dat) を用いた。

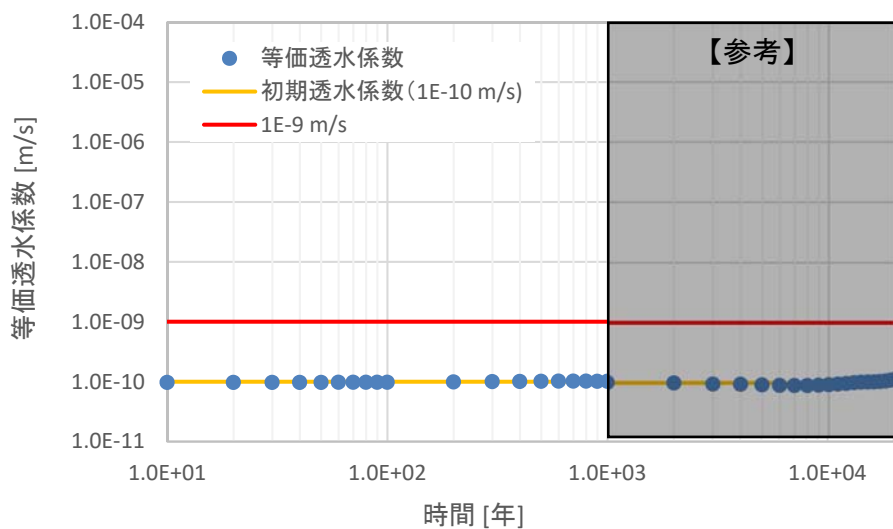
3. 解析結果

(1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)

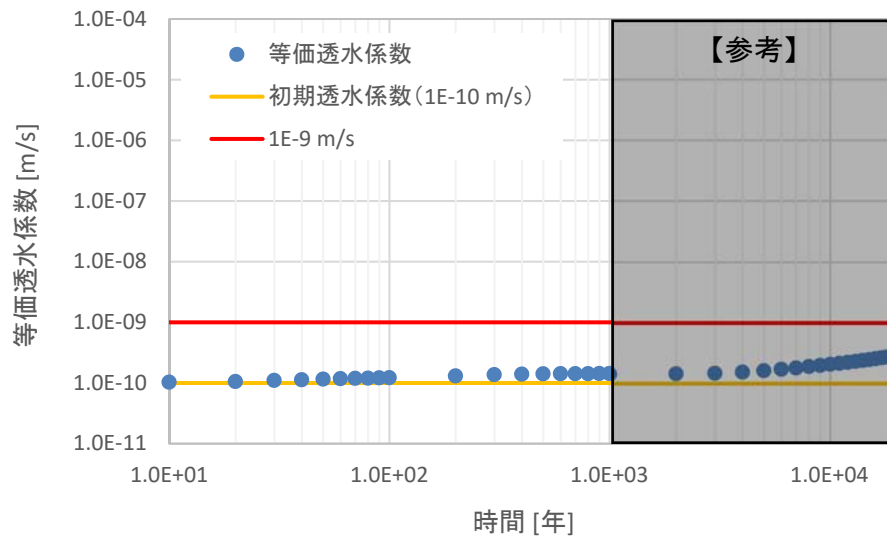
難透水性覆土中の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式とした現実的なモデル(数式 3)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第5図に、1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第6図に示す。また、3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を第7図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第8図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第9図に示す。1号廃棄物埋設地においても同様に、難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を第10図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第11図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第12図に示す。

3号廃棄物埋設地の難透水性覆土の等価透水係数は、1,000年後には、セメント系材

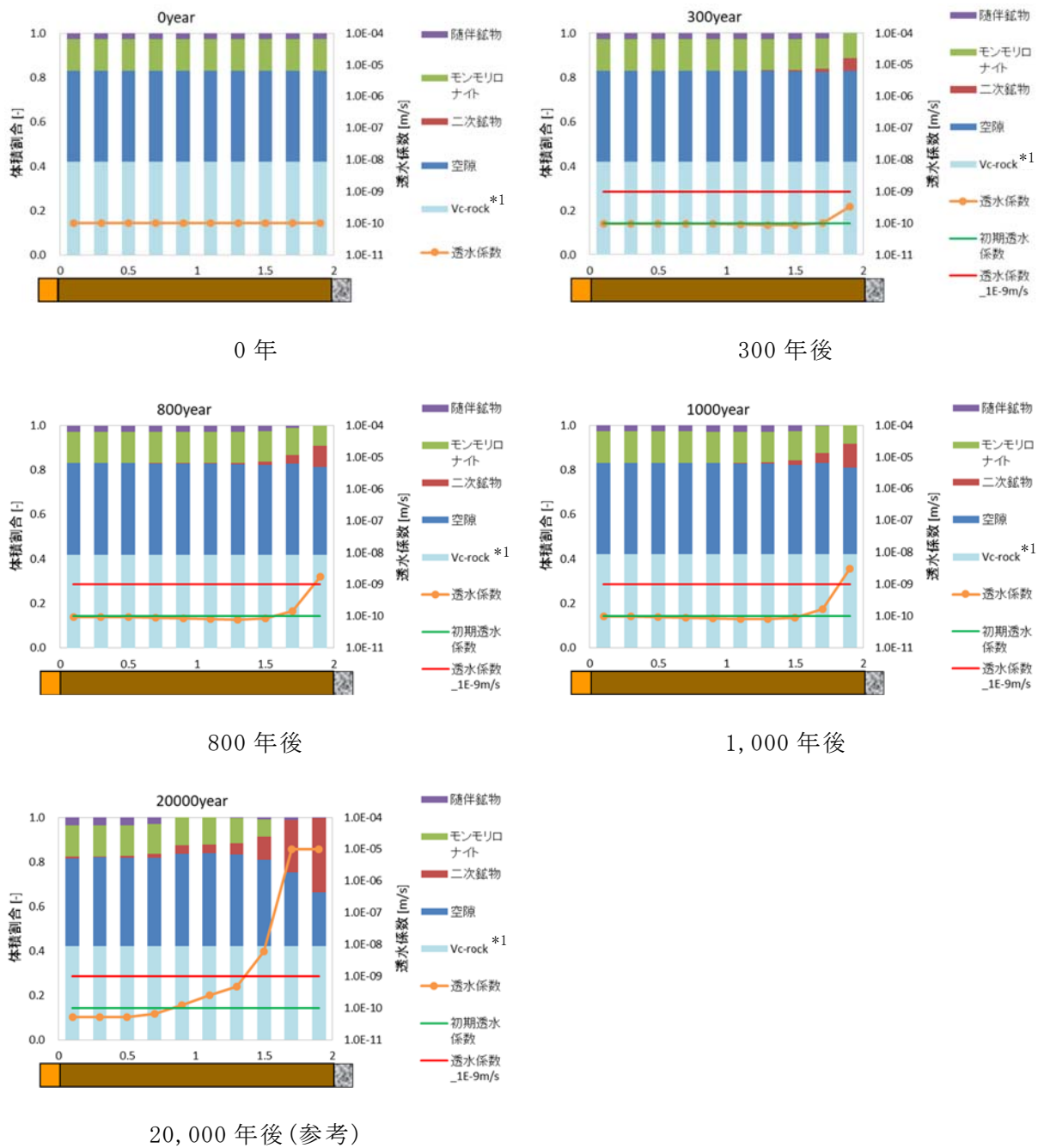
料と接する面ではベントナイトが若干溶解することにより透水係数がわずかに上昇するものの、それより内側の領域ではベントナイトの変質は見られず透水係数も初期値を維持していた。一方で、岩盤側ではベントナイトの変質はごくわずかであり透水係数の上昇も見られなかった。1号廃棄物埋設地のベントナイトの変質については、1,000年後の段階で、セメント系材料境界近傍のベントナイトが全溶解している層があった。セメント系材料由来のアルカリ成分の他に廃棄体に含まれる塩の影響を受け、3号廃棄物埋設地の結果よりも早い段階からベントナイトの変質が見られた。



第5図 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

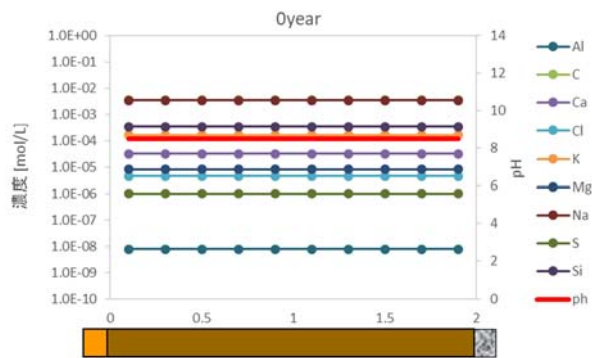


第 6 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水性係数の時間変化の結果
 (ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

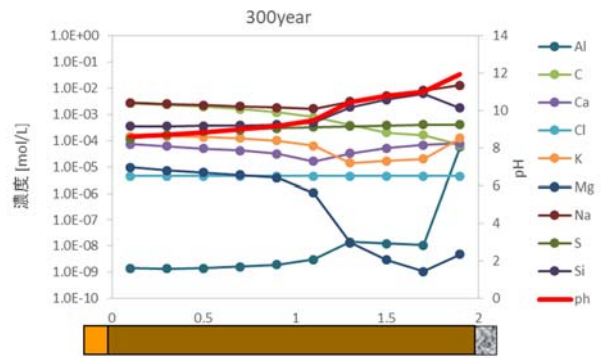


*1 : Vc-rock : 化学反応に寄与しない固相

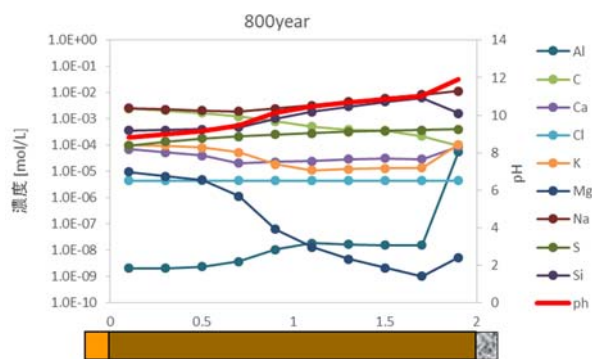
第 7 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース① : 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



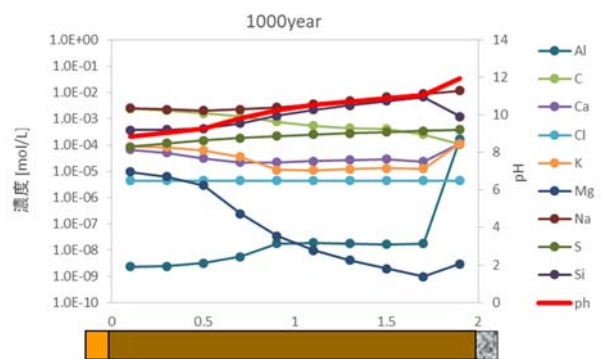
0 年



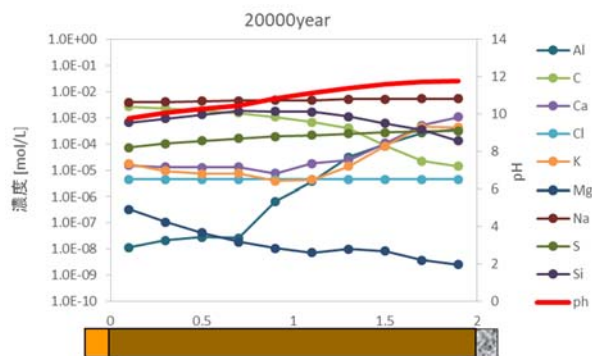
300 年後



800 年後

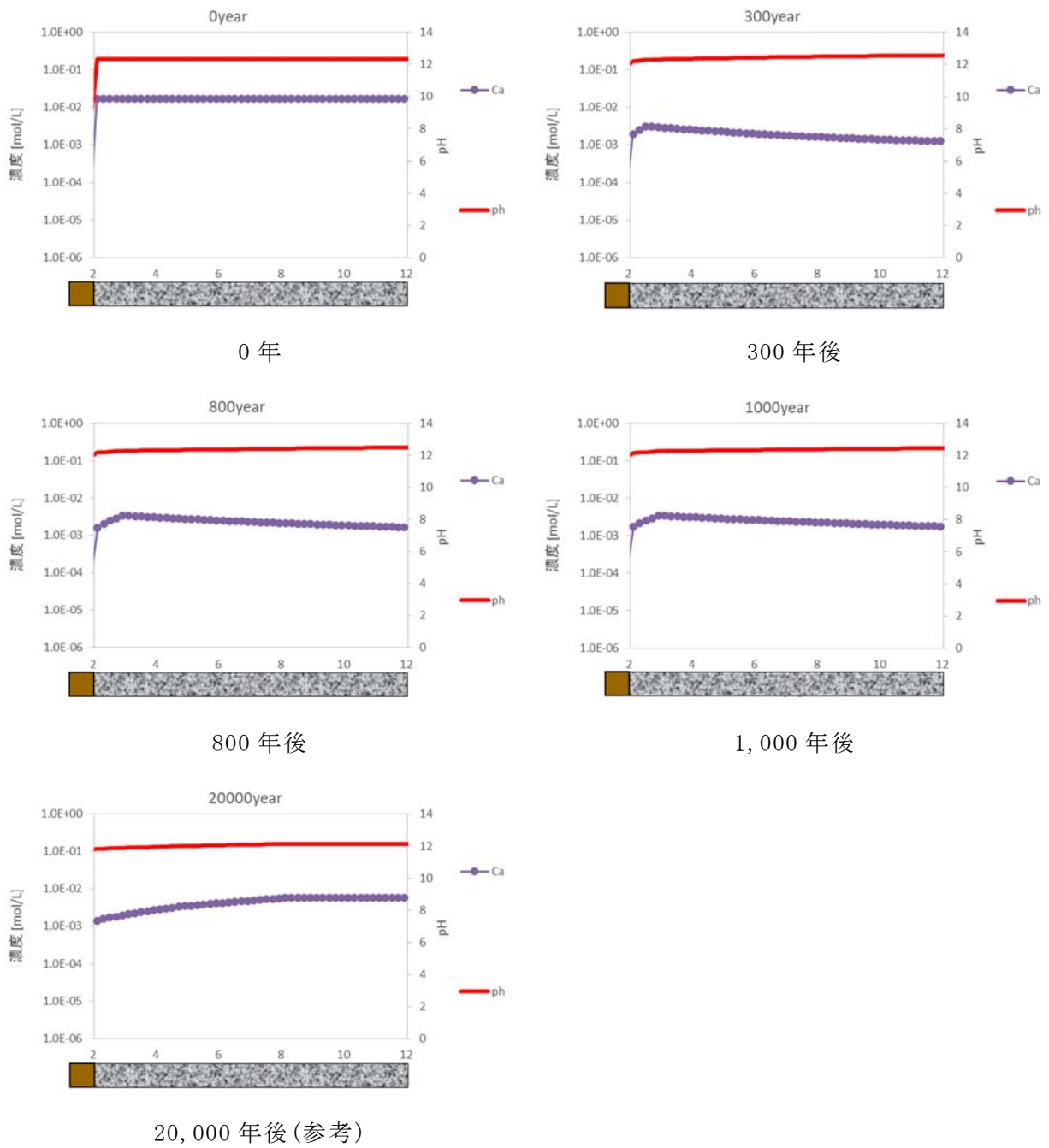


1,000 年後

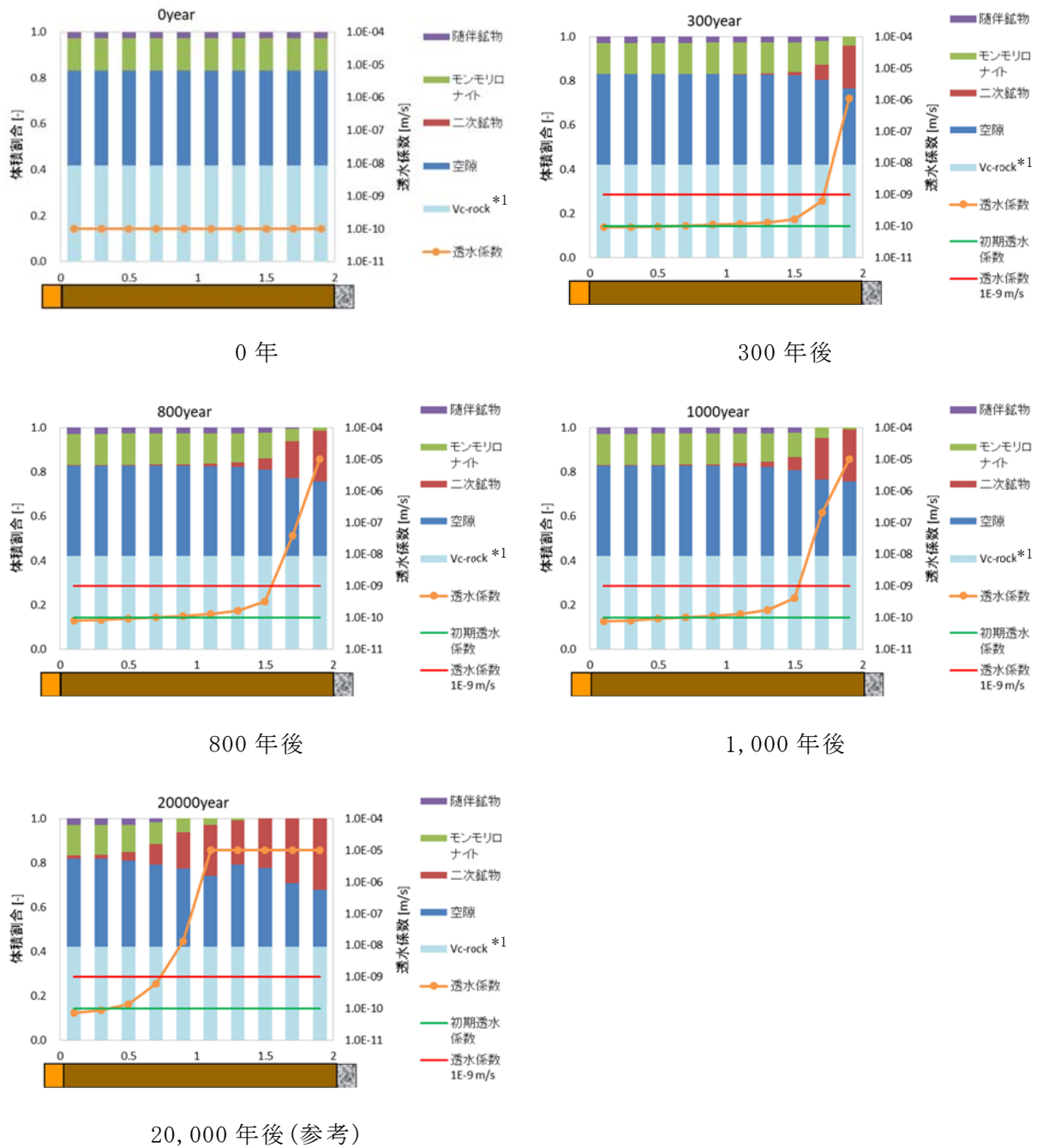


20,000 年後 (参考)

第 8 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土内の液相組成の分布図
(ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

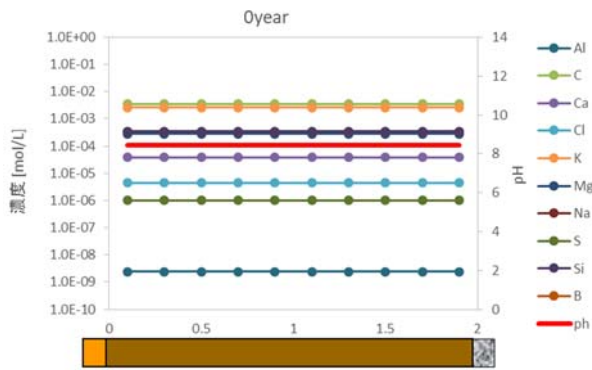


第 9 図 3 号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

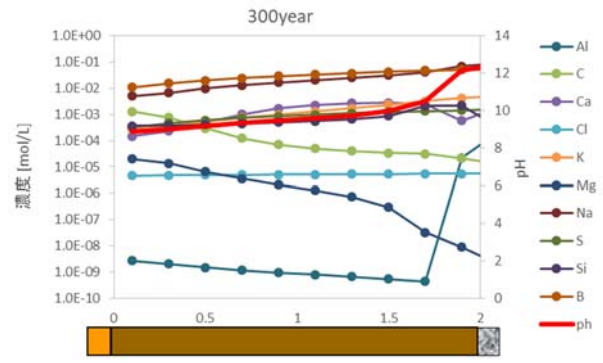


*1: Vc-rock: 化学反応に寄与しない固相

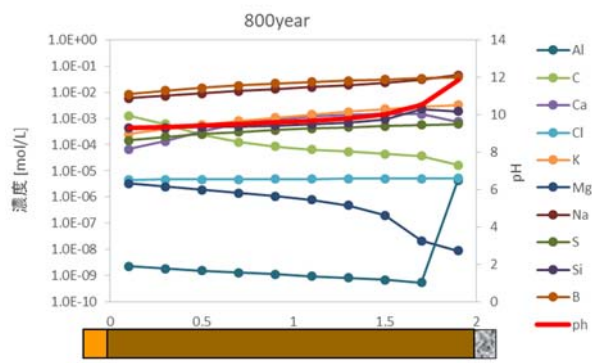
第 10 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



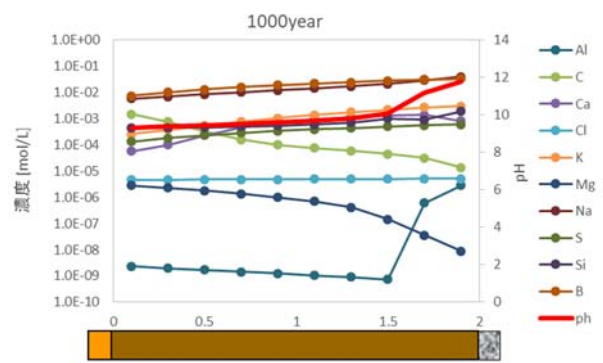
0年



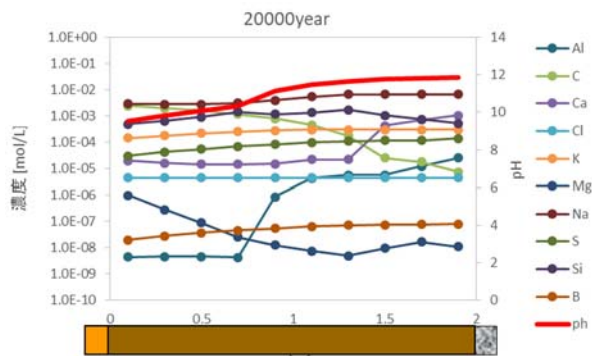
300年後



800年後

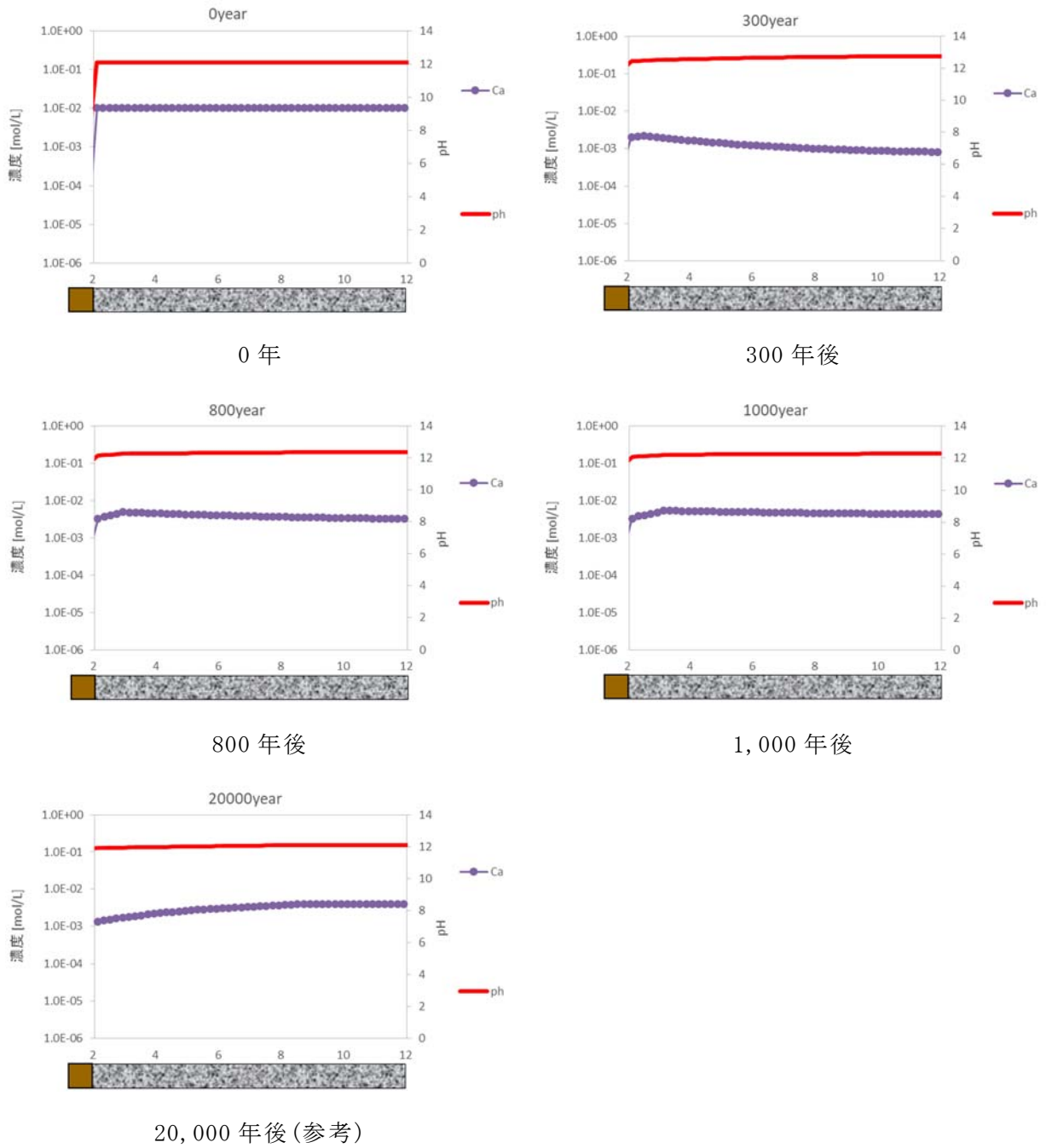


1,000年後



20,000年後(参考)

第 11 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土内の液相組成の分布図
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



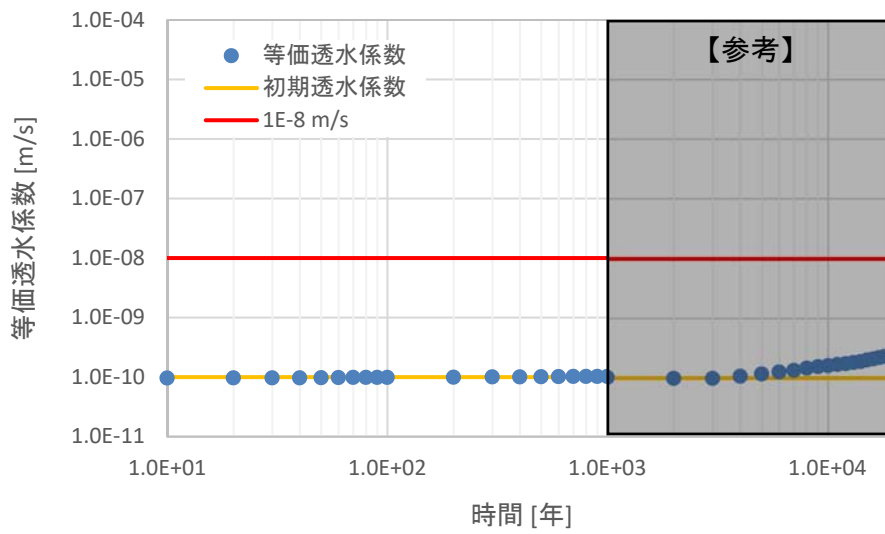
第 12 図 1 号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

(2) 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合(ケース②)

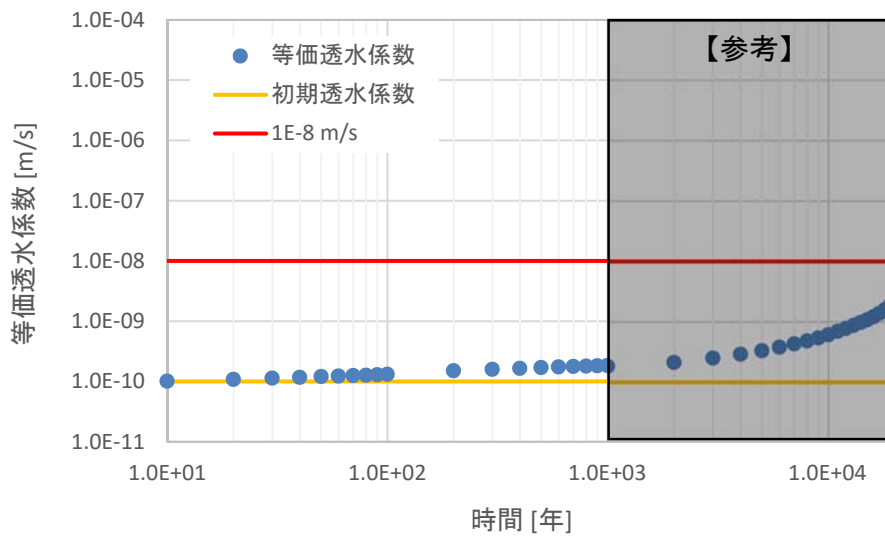
難透水性覆土中の拡散係数モデルについて、モンモリロナイトの割合を0とし、単純に空隙率に比例するとしたモデル(数式 4)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第13図に、1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第14図に示す。また、3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を第15図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第16図に、参考として覆土にアルカリ成分を共有する埋設設備内のpH、Ca濃度分布図を第17図に示す。1号廃棄物埋設地においても同様に、難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を第18図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第19図に、参考として覆土にアルカリ成分を共有する埋設設備内のpH、Ca濃度分布図を第20図に示す。

3号廃棄物埋設地のベントナイトの変質については、1,000年後の段階では、「(1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)」と同様、セメント境界近傍ではわずかに変質が見られる程度であった。

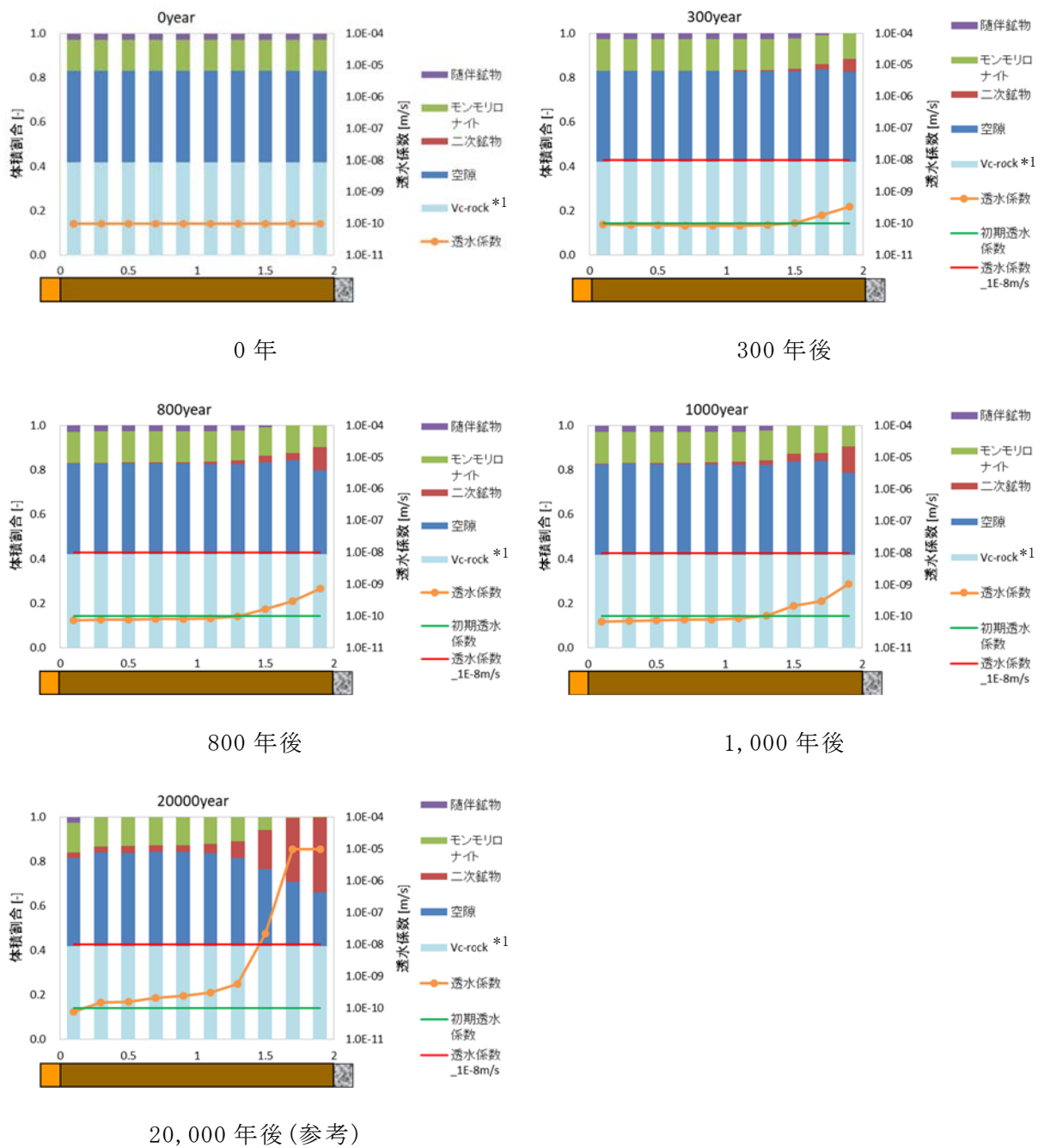
1号廃棄物埋設地の難透水性覆土の等価透水係数は、1,000年後の段階で初期の透水係数値よりもわずかに高い値となった。



第 13 図 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

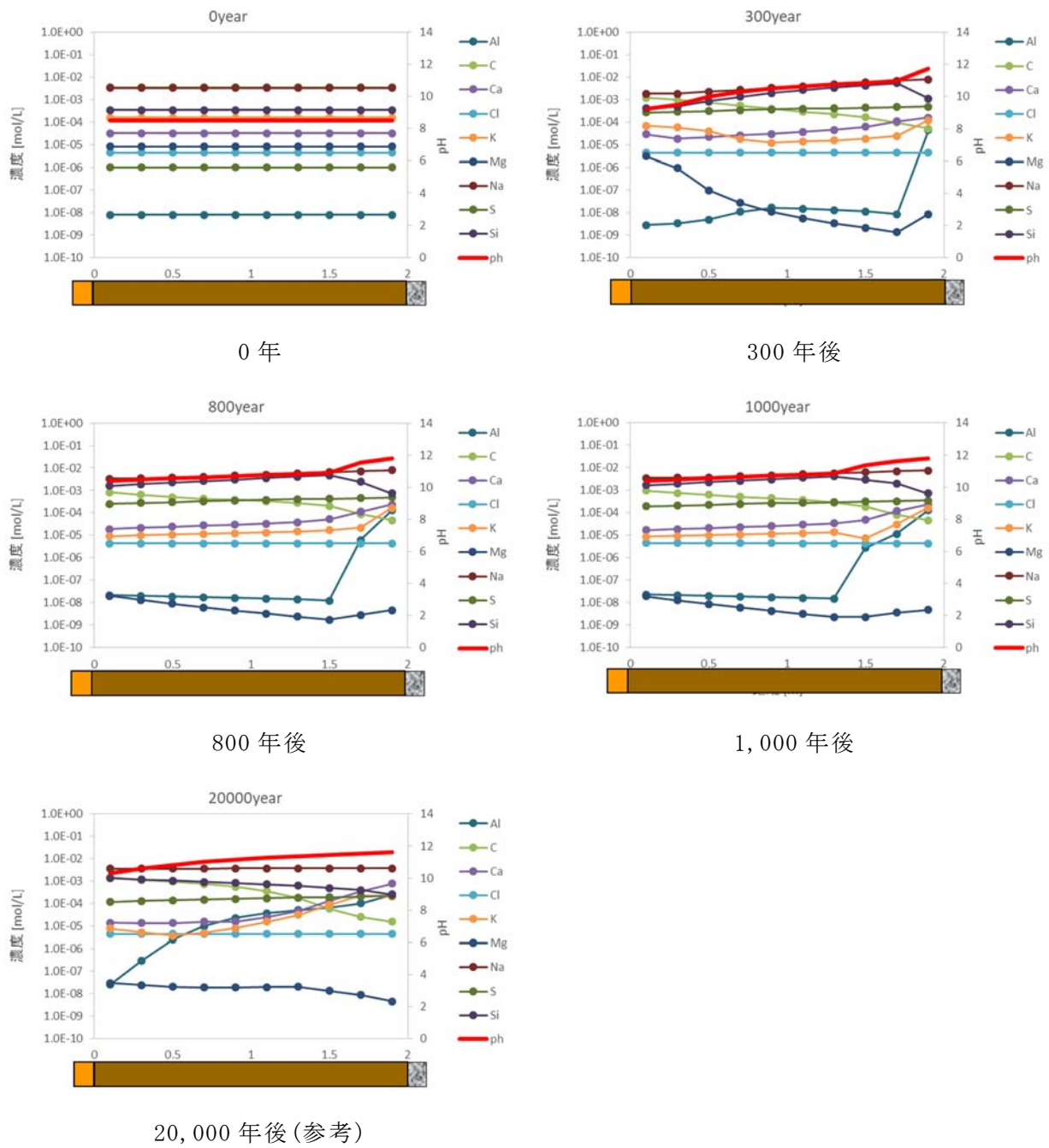


第 14 図 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

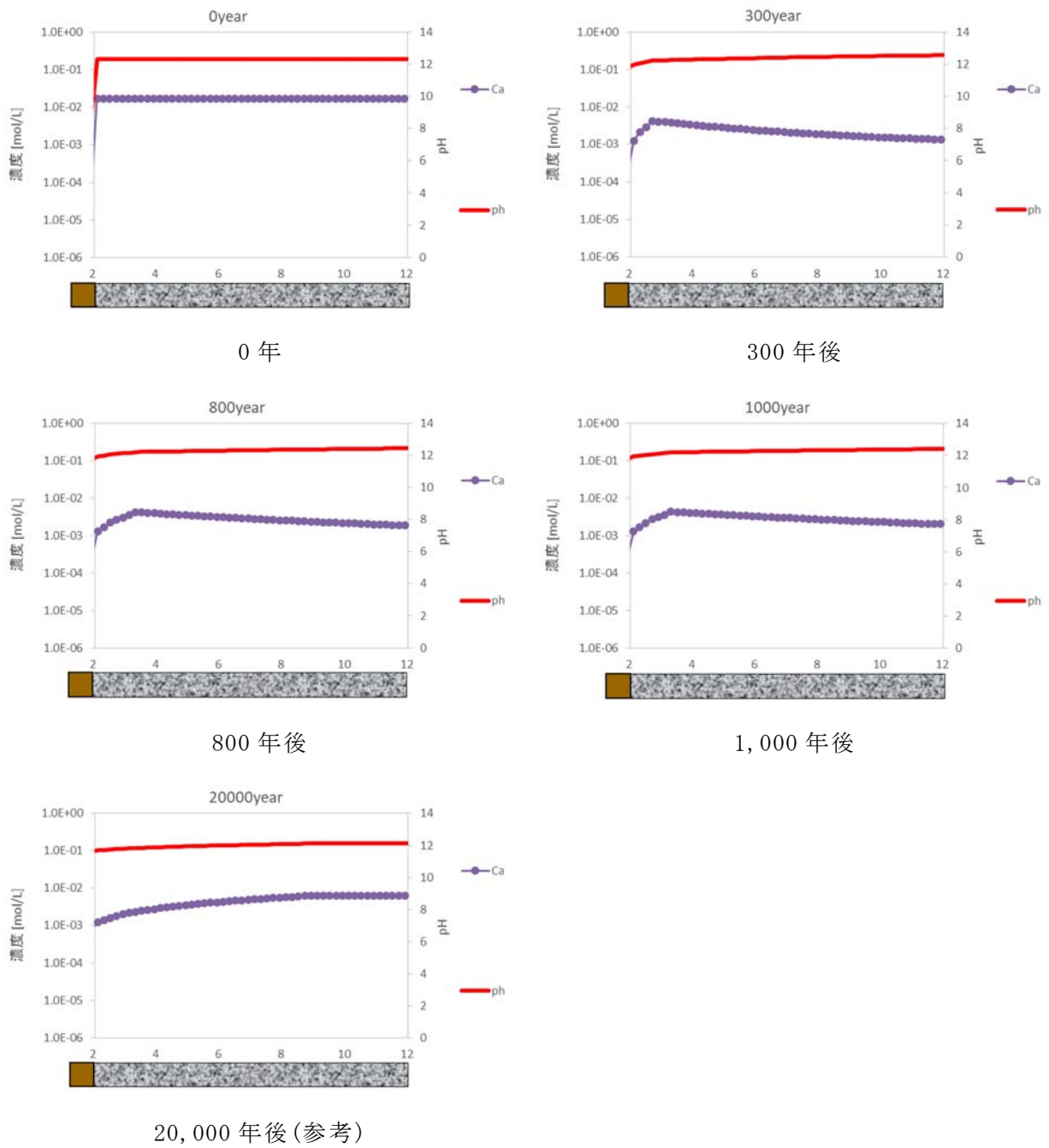


*1: Vc-rock: 化学反応に寄与しない固相

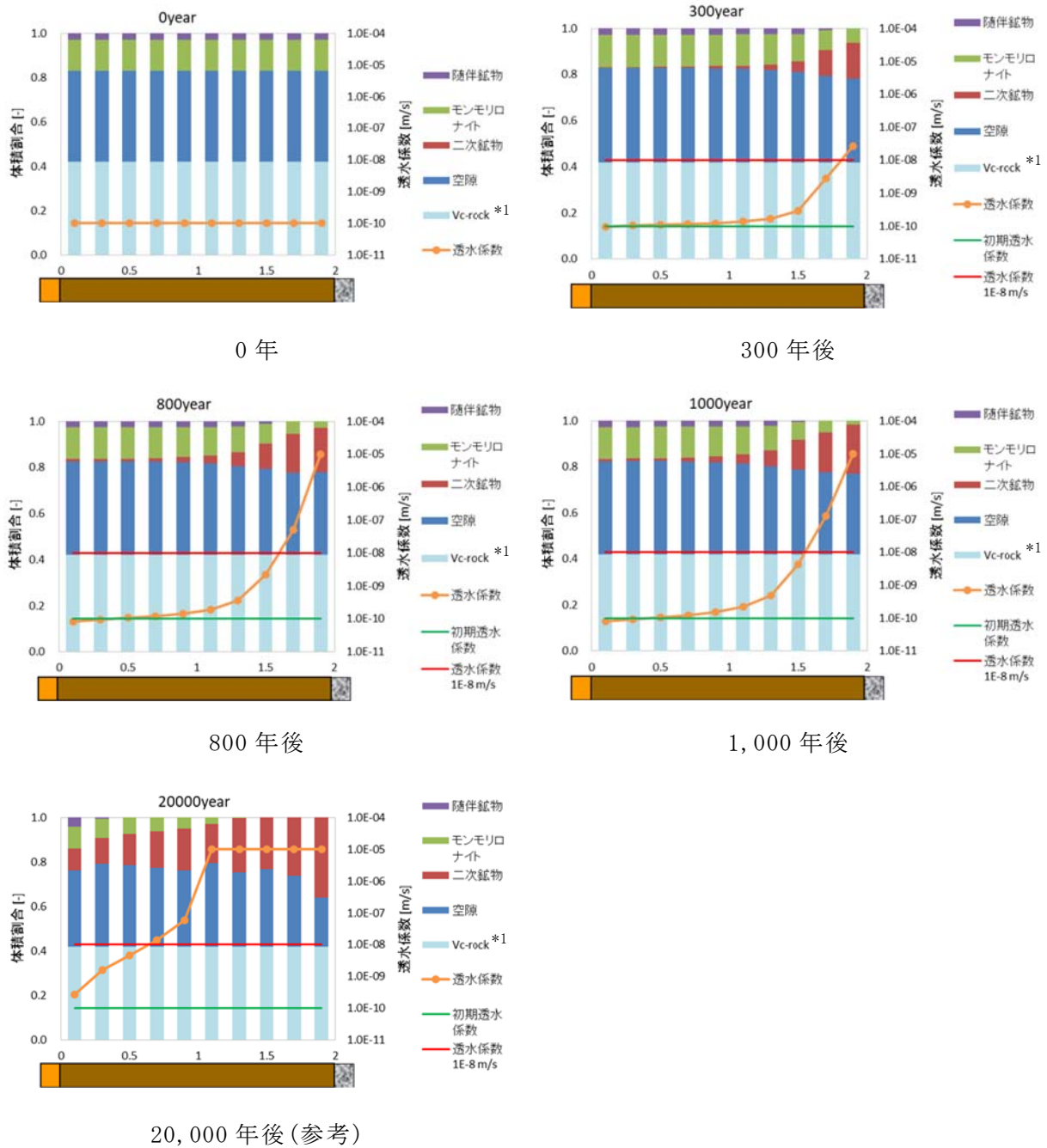
第 15 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース②: 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



第 16 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における液相組成の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

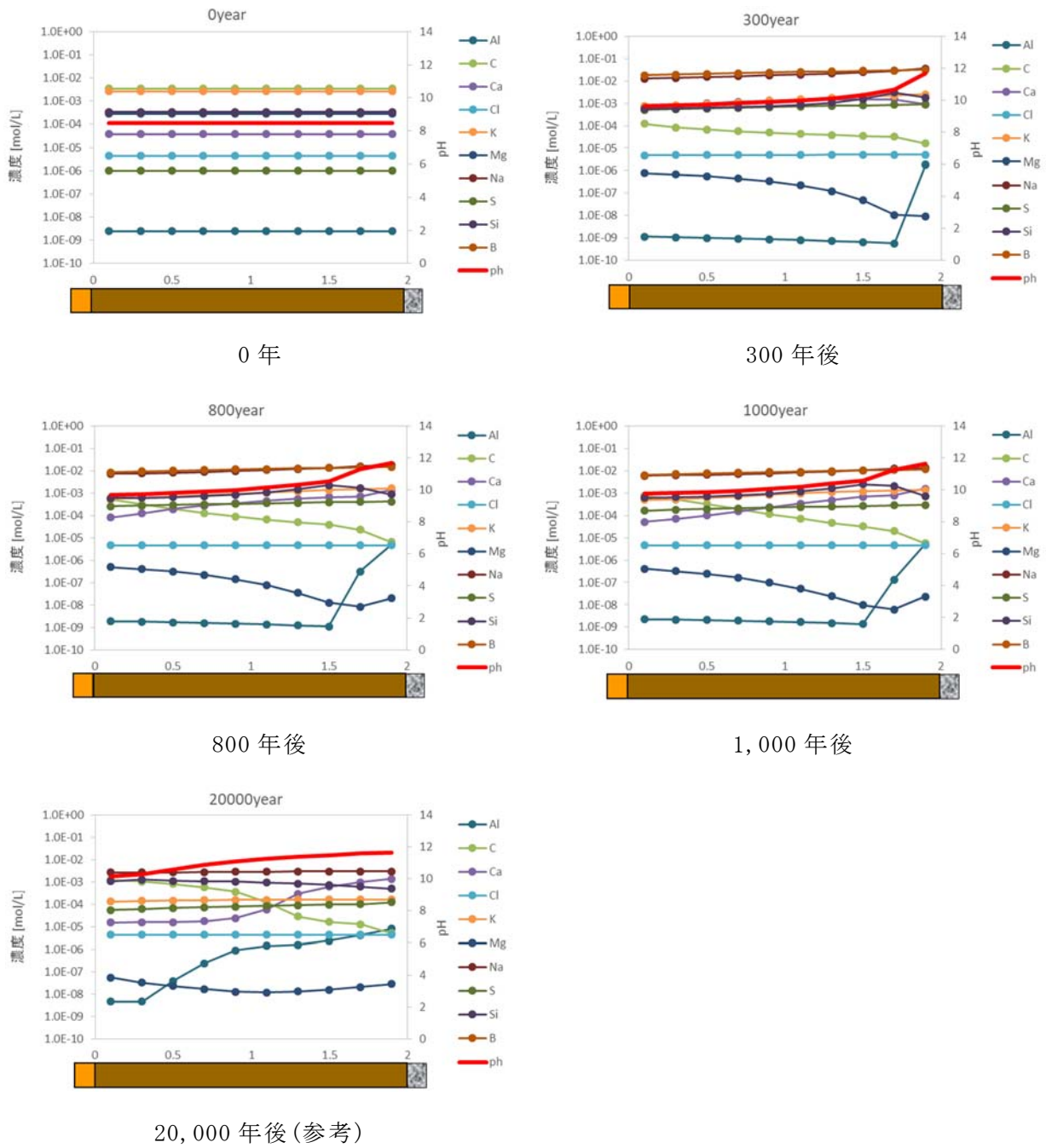


第 17 図 3 号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

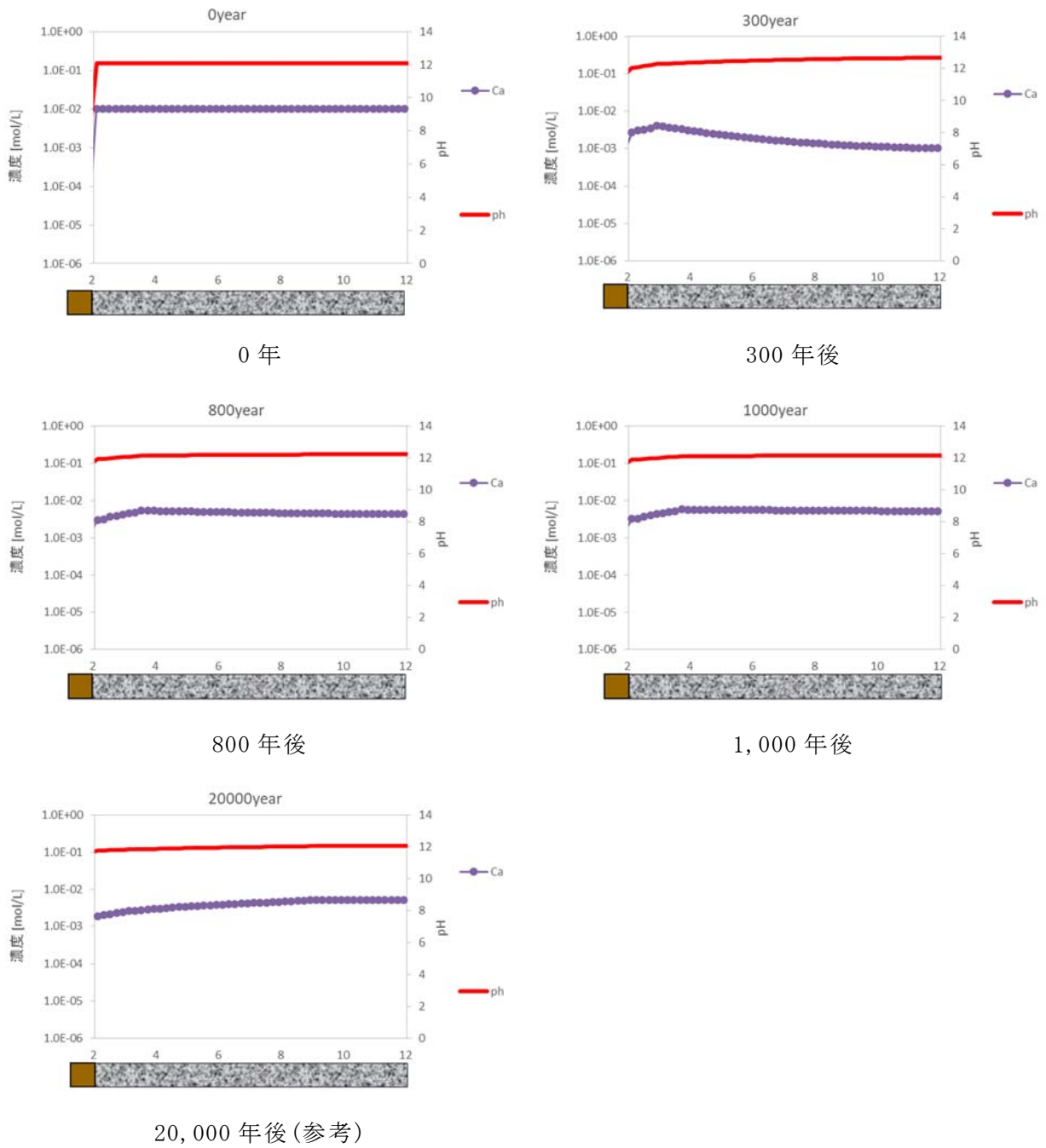


*1 : Vc-rock : 化学反応に寄与しない固相

第 18 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース② : 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



第 19 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における液相組成の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



第 20 図 1 号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

以上より、長期的な化学的影響を考慮した難透水性覆土の線量評価上の透水係数は1,000年後において下記の値に基づき設定する(第8表)。

また、化学的影響を受けた場合においても難透水性覆土中のモンモリロナイトが残存することから、難透水性覆土の周囲に設置する下部覆土は、化学的な影響による透水係数の変化は生じないものとする。

なお、下部覆土相当の材料で施工する1号廃棄物埋設地の南北方向の埋設設備間の狭隘部については、両側から化学的変質が生じることに加え、移流による化学物質の移行が生じることから、第10図及び第18図に示す難透水性覆土の透水係数の分布図に基づくと、ケース①及びケース②ともに1,000年後において砂程度の透水係数($1 \times 10^{-5} \text{m/s}$)になることが想定されるが、補足説明資料7「埋設設備からの流出水量」添付資料9「1号埋設設備狭隘部の充填材が劣化した場合の埋設設備からの流出水量について」に示すように、埋設設備からの流出水量は、狭隘部の透水係数による影響を受けない。

第8表 化学的影響の評価結果

	3号廃棄物埋設地[m/s]		1号廃棄物埋設地[m/s]	
	ケース①*1	ケース②*2	ケース①*1	ケース②*2
0年	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}
1,000年後	1.01×10^{-10}	1.02×10^{-10}	1.42×10^{-10}	1.84×10^{-10}

*1：難透水性覆土中の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式(数式3)とする現実的な設定とした場合

*2：難透水性覆土中の拡散係数モデルを、モンモリロナイトの割合を0とし単純に空隙率に比例するという単純な設定(数式4)とした場合

4. 参考文献

- (1) 伊藤弘之、三原守弘(2005)：ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式、JNC TN8400 2005-029
- (2) Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J.(1999): User's guide to PHREEQC (ver.2)-a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. Geological Survey, Water-resources investigations report 99-4259
- (3) Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J.(2013): Description of input and examples for PHREEQC version 3 - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, US Geological Survey, Denver, USA
- (4) Diederik JACQUES, Lian WANG, Evelien MARTENS and Dirk MALLANTS(2012):Benchmarking the cemdata07 database to model chemical degradation of concrete using GEMS and PHREEQC, NEN/RWM/R
- (5) Mikazu Yui, Hiroshi Sasamoto, Randolph C Arthur(1999):Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress Performance Assessment(PA) Report, JNC TN8400 99-030
- (6) 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構(2005)、TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02
- (7) Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsui, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S. (2004): Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions, NUMO-TR-04-05
- (8) Cama, J., Ganor, J., Ayora, C. and Lasaga, C.A. (2000): Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.64, No.15, pp.2701-2717
- (9) (独)日本原子力研究開発機構(2009)：TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発 平成20年度報告－JAEA-Research 2009-046
- (10) Yokoyama, S. et al. (2005): Atomic force microscopy study of


- montmorillonite dissolution under highly alkaline conditions. Clays and Clay Minerals 53(2), 147-154
- (11) 原子力発電環境整備機構(2007)：処分システムに求められる閉鎖性能の考え方－処分場パネル規模の水理に関する試解析－、NUMO-TR-06-01
- (12) Morihiro MIHARA, Ryouichi SASAKI(2005):Radio-nuclides Migration DATasets(RAMDA) on cement, bentonite and rock for the performance assessment of TRU waste repository in Japan, JNC TN8400 2005-027
- (13) (独)日本原子力研究開発機構(2015)：平成26年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度化開発報告書
- (14) 日本化学会(2004)：化学便覧 基礎編 改定5版、丸善、東京、p-II.64
- (15) 小田治恵、佐々木良一、David Savage、Randolph C. Arthur、本田明(2005)：緩衝材の鉱物学的長期変遷シナリオ、JNC TN8400 2005-020
- (16) Randolph C. Arthur et al. (2005): Development of Thermodynamic Databases for Hyperalkaline, Argillaceous Systems. JNC, TN8400 2005-010
- (17) A. Atkinson et al. (1991): Aqueous chemistry and thermodynamic modelling of CaO-SiO₂-H₂O gels at 80 °C, DoE, DoE-HMIP-RR-91-045

パラメータ設定根拠集

目 次

1. 解析のモデル形状(3号及び2号廃棄物埋設地)	1
2. 解析のモデル形状(1号廃棄物埋設地)	2
3. 地下水組成	3
4. 難透水性覆土の初期鉱物組成	5
5. 難透水性覆土の初期空隙率	6
6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)	7
7. セメント系材料の初期鉱物組成(1号廃棄物埋設地)	9
8. 廃棄体の塩量	10
9. セメント系材料の初期空隙率	11
10. 難透水性覆土の透水係数	12
11. 難透水性覆土の拡散係数	13
12. セメント系材料の拡散係数	14
13. モンモリロナイトの溶解速度	15
14. 二次鉱物	16
15. 塩影響を考慮した二次鉱物(1号廃棄物埋設地)	17

パラメータ	1. 解析のモデル形状 (3号及び2号廃棄物埋設地)
設定値	難透水性覆土のモデル長さ 2m セメント系材料のモデル長さ 32m
設定根拠	<p>難透水性覆土のモデル長さは難透水性覆土の設計に基づき設定した。</p> <p>セメント系材料のモデル長さについて、3号廃棄物埋設地の形状を想定し、埋設設備の一基当たりの外形寸法の幅(64m)の半分の長さを設定した。なお、2号廃棄物埋設地は、3号廃棄物埋設地と同種の廃棄体及び類似施設であり埋設設備の一基当たりの外形寸法の長さの観点*1で3号廃棄物埋設地の解析結果で代表する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 3号廃棄物埋設地 埋設設備の一基当たりの外形寸法 64m×37m×7m (2号廃棄物埋設地 埋設設備の一基当たりの外形寸法 37m×36m×7m) <p>*1：セメント系材料のモデル長さを埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さ設定したことについて補足する。3号及び2号廃棄物埋設地の鉛直断面概念図を下図に示す。中心のセメント系材料のアルカリ成分が、周囲の難透水性覆土(A、C、D)及び岩盤(B)へ移動していく現象に対して、難透水性覆土へのアルカリ成分の影響を大きく見積もるため、上面Aと側面Cのみにアルカリ成分が全て移動し側面(D)及び岩盤(B)への移行はないとしたケースについて考える。難透水性覆土の体積を1としたときのセメント系材料の体積比は、2号廃棄物埋設地で2.7、3号廃棄物埋設地では3.0である。これより、難透水性覆土2mに対するセメント系材料の長さは、2号廃棄物埋設地で5.4m、3号廃棄物埋設地では6.0mとなる。</p> <p>本解析では、32mを設定しており、覆土に対して十分な長さといえる。</p> <div data-bbox="485 1317 1315 1783" data-label="Diagram"> <p>鉛直断面図 (紙面方向に単位長さ 1m とする)</p> <p>図は、埋設設備の鉛直断面を示しています。中心には「セメント系材料」があり、その周囲には「難透水性覆土」(A, C, D)と「岩盤」(B)が存在します。セメント系材料の体積は、2号: 259m³、3号: 448m³です。難透水性覆土の体積は、A: 2号: 82m³、3号: 136m³、C: 14m³、D: 14m³です。岩盤(B)の体積は、2号: 36m³、3号: 37m³です。セメント系材料のモデル長さは、2号: 5.4m、3号: 6.0mです。難透水性覆土のモデル長さは、2mです。埋設設備の外形寸法は、2号: 37m×36m×7m、3号: 64m×37m×7mです。</p> </div> <p>3号及び2号廃棄物埋設地の鉛直断面図(紙面方向に単位長さ 1m とする)</p>
参考文献	

パラメータ	2. 解析のモデル形状(1号廃棄物埋設地)
設定値	難透水性覆土のモデル長さ 2m セメント系材料のモデル長さ 12.2m
設定根拠	<p>難透水性覆土のモデル長さは難透水性覆土の設計に基づき設定した。 セメント系材料のモデル長さについて、1号廃棄物埋設地の形状を想定し、埋設設備の一基当たりの外形寸法の幅(24.4m)の半分の長さを設定した。</p> <p>・1号廃棄物埋設地 埋設設備の一基当たりの外形寸法 24.4m×24.4m×6.2m</p> <p>セメント系材料のモデル長さを埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さに設定したことについて補足する。 1号廃棄物埋設地の鉛直断面概念図を下図に示す。「1. 解析のモデル形状(3号及び2号廃棄物埋設地)」と同様にして、難透水性覆土へのアルカリ成分の影響を大きく見積もるケースについて考える。 難透水性覆土の体積を1としたときのセメント系材料の体積比は、2.1である。これより、難透水性覆土2mに対するセメント系材料の長さは、4.2mとなる。本解析では、12.2mを設定しており、覆土に対して十分な長さといえる。</p>  <p>1号廃棄物埋設地の鉛直断面図(紙面方向に単位長さ1mとする)</p>
参考文献	

パラメータ	3. 地下水組成
設定値	<p>pH 8.46</p> <p>Na $3.22 \times 10^{-3} \text{mol/L}^{*1}$</p> <p>K $5.79 \times 10^{-5} \text{mol/L}$</p> <p>Ca $1.01 \times 10^{-4} \text{mol/L}$</p> <p>Mg $6.50 \times 10^{-5} \text{mol/L}$</p> <p>C $3.54 \times 10^{-3} \text{mol/L}$</p> <p>S $1.00 \times 10^{-6} \text{mol/L}$</p> <p>Cl $4.40 \times 10^{-6} \text{mol/L}$</p> <p>Al $3.61 \times 10^{-7} \text{mol/L}$</p> <p>Si $3.40 \times 10^{-4} \text{mol/L}$</p> <p> *1 : PHREEQCにてチャージバランスを保つように計算して設定</p>
設定根拠	<p>文献⁽¹⁾で検討されているモデル地下水のうち、酸化性淡水の地下水(FOHP)を設定した。</p> <p>セメント系材料と難透水性覆土の化学反応に関する重要な成分(pH、Na、K、Ca、Mg、C、S、Cl、Al、Si)に着目し、それ以外の元素については考慮しないこととした。上記の成分を抽出し、Naでチャージバランスをとった値を用いることとした。</p> <p>地下水組成が解析に与える影響</p> <p>廃棄物埋設地周辺の淡水地下水は、廃棄物埋設地で用いられるセメント系材料と反応すると、セメント系材料中の成分が溶脱し、イオン強度が高く、高アルカリ性の組成になると考えられる。4種類の地下水組成を対象にセメント系材料との平衡計算を行い、各地下水組成の変化を比較した。セメント系材料の組成は「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)」を参照した。</p>

検討した地下水の組成

	六ヶ所水質結果_最小	六ヶ所水質結果_中間の値	六ヶ所水質結果_最大	FOHP
pH	5.30	6.80	8.30	8.46
Na	3.60×10^{-4} *1	6.40×10^{-4} *1	1.10×10^{-3} *1	3.22×10^{-3} *1
K	1.30×10^{-5}	7.80×10^{-5}	1.40×10^{-4}	5.79×10^{-5}
Ca	2.50×10^{-6}	9.10×10^{-5}	1.80×10^{-4}	1.01×10^{-4}
Mg	4.10×10^{-6}	8.00×10^{-5}	1.60×10^{-4}	6.50×10^{-5}
C	9.20×10^{-5}	4.70×10^{-4}	8.50×10^{-4}	3.54×10^{-3}
S	1.00×10^{-5}	1.20×10^{-4}	2.30×10^{-4}	1.00×10^{-6}
Cl	3.60×10^{-4}	4.70×10^{-4}	5.70×10^{-4}	4.40×10^{-6}
Al	—	—	—	3.61×10^{-7}
Si	—	—	—	3.40×10^{-4}

(濃度の単位は mol/L)

*1 : Na 濃度をチャージバランスにて設定

結果を以下に示す。地下水の組成が変化しても、セメント系材料と反応した地下水の組成に大きな違いは見られなかった。したがって、淡水系の地下水組成の変化は、本解析の結果に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

セメント系材料と反応した地下水の組成

	六ヶ所水質結果_最小	六ヶ所水質結果_中間の値	六ヶ所水質結果_最大	FOHP
pH	12.70	12.69	12.69	12.69
Na	3.46×10^{-2}	3.49×10^{-2}	3.53×10^{-2}	3.74×10^{-2}
K	2.62×10^{-2}	2.63×10^{-2}	2.64×10^{-2}	2.63×10^{-2}
Ca	3.78×10^{-3}	3.95×10^{-3}	4.10×10^{-3}	5.22×10^{-3}
Mg	1.83×10^{-10}	1.86×10^{-10}	1.87×10^{-10}	1.99×10^{-10}
C	9.21×10^{-5}	4.70×10^{-4}	8.50×10^{-4}	3.34×10^{-3}
S	2.28×10^{-5}	2.27×10^{-5}	2.27×10^{-5}	2.25×10^{-5}
Cl	3.60×10^{-4}	4.70×10^{-4}	5.70×10^{-4}	4.40×10^{-6}
Al	3.52×10^{-3}	3.51×10^{-3}	3.51×10^{-3}	3.47×10^{-3}
Si	3.51×10^{-6}	3.50×10^{-6}	3.50×10^{-6}	3.46×10^{-6}

(濃度の単位は mol/L)

参考文献

- (1) Mikazu Yui, Hiroshi Sasamoto, Randolph C Arthur(1999):Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress Performance Assessment(PA) Report, JNC TN8400 99-030

パラメータ	4. 難透水性覆土の初期鉱物組成
設定値	<ul style="list-style-type: none"> ・ ベントナイト(クニボンド) Na 型モンモリロナイト 0.33mol/L_{water} Ca 型モンモリロナイト 1.94mol/L_{water} K 型モンモリロナイト 0.06mol/L_{water} Mg 型モンモリロナイト 0.23mol/L_{water} カルセドニ 2.94mol/L_{water}
設定根拠	<ul style="list-style-type: none"> ・ ベントナイト(クニボンド)の配合率:30wt% ・ ベントナイト(クニボンド)の鉱物組成⁽¹⁾ <ul style="list-style-type: none"> モンモリロナイト 80% 石英 5% クリストバライト 15% <p>(解析の都合上、クリストバライトと比べ石英は安定な鉱物のため、解析では反応しない鉱物として設定した。また、クリストバライトは熱力学データベースに存在しないため、カルセドニとして設定した。)</p> ・ 乾燥密度: 1.61Mg/m³(室内試験結果) ・ 初期空隙率: 「5. 難透水性覆土の初期空隙率」を参照 ・ 混合砂は反応しないものとした。(シリカ成分は、高アルカリ側の溶存化学種の加水分解により pH 緩衝性を有する。混合砂には多くのシリカ成分が含まれるが、本解析では緩衝性を無視するため反応しないものとした。) ・ クニボンドの陽イオン組成⁽²⁾ <ul style="list-style-type: none"> NaZ 10.3meq/100g^{*1} CaZ₂ 60.1meq/100g^{*1} KZ 1.9meq/100g MgZ₂ 7.2meq/100g <p>*1: 初期透水係数が 1.0×10^{-10} m/s となるように調整した。</p>
参考文献	<p>(1) 前田宗宏、棚井憲治、伊藤勝、三原守弘、田中益弘(1998): カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性—膨潤圧、透水係数、—軸圧縮強度及び弾性係数—, PNC TN8410 98-021</p> <p>(2) 直井優、小峰秀雄、安原一哉、村上哲、百瀬和夫、坂上武晴(2005): 各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響、土木学会論文集 No. 785/III-70, 39-49</p>

パラメータ	5. 難透水性覆土の初期空隙率
設定値	0.41
設定根拠	空隙率の設定値 40.6%(乾燥密度 1.61Mg/m ³ より算出される値)を丸めて 0.41 と設定した。
参考文献	

パラメータ	6. セメント系材料の初期鉱物組成 (3号廃棄物埋設地)																																																			
設定値	C-S-H ゲル	9.51mol/L_water																																																		
	ハイドロタルサイト	0.33mol/L_water																																																		
	エトリンサイト	0.04mol/L_water																																																		
	ギブサイト	0.94mol/L_water																																																		
	NaOH	0.03mol/L_water																																																		
	KOH	0.03mol/L_water																																																		
設定根拠	<p>3号廃棄物埋設地の充填モルタルの候補配合を参照した。参照したセメントの配合では、高炉スラグ微粉末が多く配合されていることから普通ポルトランドセメントと比べSi成分が多い。そこで、初期鉱物組成の算定方法は、文献⁽¹⁾に記載されているフライアッシュ高含有シリカフェュームセメント (HFSC) の初期鉱物組成の算定方法を参照した。</p> <p>なお、骨材 (砕砂、陸砂) は反応しないものとした。</p> <p style="text-align: center;">3号廃棄物埋設地の充填モルタルの候補配合</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="4">単位量 [kg/m³]</th> </tr> <tr> <th colspan="2">結合材 (C)</th> <th colspan="2">細骨材 (S)</th> </tr> <tr> <th>中庸熱ポルトランドセメント</th> <th>高炉スラグ微粉末</th> <th>砕砂</th> <th>陸砂</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>127</td> <td>295</td> <td>440</td> <td>1026</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">中庸熱ポルトランドセメントの化学組成⁽¹⁾</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>SiO₂</th> <th>Al₂O₃</th> <th>Fe₂O₃</th> <th>CaO</th> <th>MgO</th> <th>SO₃</th> <th>Na₂O</th> <th>K₂O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23.3</td> <td>3.80</td> <td>3.90</td> <td>63.3</td> <td>0.90</td> <td>2.40</td> <td>0.30</td> <td>0.35</td> </tr> </tbody> </table> <p>(単位は wt%)</p> <p style="text-align: center;">高炉スラグ微粉末の化学組成</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>SiO₂</th> <th>Al₂O₃</th> <th>Fe₂O₃</th> <th>CaO</th> <th>MgO</th> <th>SO₃</th> <th>Na₂O</th> <th>K₂O</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>34.2</td> <td>14.9</td> <td>0.84</td> <td>42.0</td> <td>6.09</td> <td>0.02</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> </tr> </tbody> </table> <p>(単位は wt%)</p>				単位量 [kg/m ³]				結合材 (C)		細骨材 (S)		中庸熱ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	砕砂	陸砂	127	295	440	1026	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	23.3	3.80	3.90	63.3	0.90	2.40	0.30	0.35	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	34.2	14.9	0.84	42.0	6.09	0.02	0.00	0.00
単位量 [kg/m ³]																																																				
結合材 (C)		細骨材 (S)																																																		
中庸熱ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	砕砂	陸砂																																																	
127	295	440	1026																																																	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O																																													
23.3	3.80	3.90	63.3	0.90	2.40	0.30	0.35																																													
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O																																													
34.2	14.9	0.84	42.0	6.09	0.02	0.00	0.00																																													

	<p>・水和鉱物量の算定方法⁽²⁾</p> <p>(1) SO₃の全量をエトリンサイトとして配分する。</p> <p>(2) Fe₂O₃の全量を C₃FH₆として配分する。(ただし、C₃FH₆は反応しないものとした。)</p> <p>(3) MgOの全量をハイドロタルサイトとして配分する。</p> <p>(4) SiO₂量及び残りの CaO 量に対し、これらの両成分が完全に消費されるような 2 種類の連続した Ca/Si 比を持つ C-S-H ゲルを設定する。</p> <p>残りの Al₂O₃量から C-S-H ゲルに取り込まれる Al₂O₃量を下式に従って差し引く。その後、Al₂O₃が更に余剰するようであれば残りの Al₂O₃をギブサイトとして配分する。</p> <p>C-S-H ゲルに取り込まれる Al 量の算定式</p> $[Al/Ca \text{ モル比}] = 0.2723 \times [Si/Ca \text{ モル比}] - 0.0692$ <p>(5) Na₂O、K₂O はそれぞれ NaOH、KOH として配分する。</p> <p>・初期空隙率：「9. セメント系材料の初期空隙率」参照</p>
参考文献	<p>(1) 五十嵐豪、寺本篤史、丸山一平(2012)：各種ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたセメント硬化体の結合水量と水蒸気 BET 比表面積の関係、日本建築学会構造系論文集、Vol. 77、No. 682、pp. 1819-1828</p> <p>(2) (独)日本原子力研究開発機構(2015)：平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発 報告書</p>

パラメータ	7. セメント系材料の初期鉱物組成(1号廃棄物埋設地)																			
設定値	C-S-H ゲル	6.46mol/L _{water}																		
	ハイドロタルサイト	0.41mol/L _{water}																		
	エトリンサイト	0.01mol/L _{water}																		
	ギブサイト	1.19mol/L _{water}																		
	NaOH	0.01mol/L _{water}																		
	KOH	0.01mol/L _{water}																		
設定根拠	<p>1号廃棄物埋設地で実際に使用されている配合を参照した。各水和鉱物量の算定方法は、「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)」と同様、文献⁽¹⁾のHFSCの算定方法を参照した。 なお、骨材(砕砂、陸砂)は反応しないものとした。</p> <p style="text-align: center;">1号廃棄物埋設地の充填モルタルの配合</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">単位量 [kg/m³]</th> </tr> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">結合材(C)</th> <th colspan="2" style="text-align: center;">細骨材(S)</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">中庸熱ポルトランドセメント</th> <th style="text-align: center;">高炉スラグ微粉末</th> <th style="text-align: center;">砕砂</th> <th style="text-align: center;">陸砂</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">42</td> <td style="text-align: center;">380</td> <td style="text-align: center;">877</td> <td style="text-align: center;">585</td> </tr> </tbody> </table> <p>・中庸熱ポルトランドセメントの化学組成：「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)」参照 ・高炉スラグ微粉末の化学組成：「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)」参照 ・水和鉱物量の算定方法：「6. セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)」参照 ・初期空隙率：「9. セメント系材料の初期空隙率」参照</p>				単位量 [kg/m ³]				結合材(C)		細骨材(S)		中庸熱ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	砕砂	陸砂	42	380	877	585
単位量 [kg/m ³]																				
結合材(C)		細骨材(S)																		
中庸熱ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	砕砂	陸砂																	
42	380	877	585																	
参考文献	(1) (独)日本原子力研究開発機構(2015)：平成26年度 地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発 報告書																			

パラメータ	8. 廃棄体の塩量
設定値	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.01mol/L_water Na_2SO_4 0.07mol/L_water
設定根拠	<p>廃棄体 1 本あたりに含まれる塩量の平均値から 1 号廃棄物埋設地の埋設設備の一基当たりの外形寸法の間隙に均一に分布していると仮定して設定した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 廃棄体(ドラム缶 1 本あたり)に含まれる塩量の平均値 ほう酸塩 13kg/ドラム缶 1 本、 硫酸塩 25.6kg/ドラム缶 1 本 ・ 塩濃度の算出 <ol style="list-style-type: none"> (1) 一基に埋設されるドラム缶の本数(5, 120 本)より、一基に埋設された塩量を算出 ほう酸塩 68t/基 硫酸塩 131t/基 (2) 廃棄体に含まれる塩量のうち、1/10 が岩盤側に流出したと仮定*1し、塩量を算出 ほう酸塩 6.80t/基 硫酸塩 13.10t/基 (3) 廃棄体中の塩が埋設設備の一基当たりの外形寸法全体に均質に分布していると仮定し、1 号廃棄物埋設地の埋設設備の一基当たりの外形寸法(24m×24m×6m)で上記の塩量を割って、1m³当たりの塩量を算出 ほう酸塩 1.98kg/m³ 硫酸塩 3.79kg/m³ (4) 単位換算(kg/m³→mol/L) ほう酸塩 0.01mol/L 硫酸塩 0.03mol/L (5) 空隙水 1L に対する塩濃度を算出(空隙率で割る) ほう酸塩 0.01mol/L_water 硫酸塩 0.07mol/L_water ・ 初期空隙率：「9. セメント系材料の初期空隙率」参照 <p>*1: 廃棄体に含まれる塩量のうち岩盤側へ流出する割合については、地下水流動解析の結果より設定した。</p>
参考文献	

パラメータ	9. セメント系材料の初期空隙率
設定値	0.36
設定根拠	<p>空隙率の設定値 35.7%(空隙率と透水係数の推定式より換算した値)を丸めて 0.36 と設定した。</p> <p>3号廃棄物埋設地の解析で設定している 3:7モルタルの空隙率は 26.2%であるが、水セメント比を考慮して 1:9モルタルの値(空隙率 35.7%を丸めて 0.36)を参照した。</p>
参考文献	

パラメータ	10. 難透水性覆土の透水係数
設定値	$K = 10^{1.30 \cdot C_i} \cdot e_{sme}^{3.48 \cdot C_i} \cdot K_0$ <p>ただし、$C_i > 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ のとき、$C_i = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$</p> $K > 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$ のとき、 $K = 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$ $K > 1.0 \cdot 10^{-5}$ のとき、 $K = 1.0 \cdot 10^{-5}$ $K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} & e_{sme} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \left(\frac{e_{sme}}{7.0}\right)^{11.4} & 7.0 < e_{sme} \end{cases}$ <p>ただし、$K_0 < K_0 _{ESP=1}$ のとき、$K_0 = K_0 _{ESP=1}$</p> <p>C_i: 空隙水の当量イオン濃度 [eq/L] ESP: ベントナイトの交換性ナトリウム割合 [-] e_{sme}: スメクタイト間隙比 [-] K: 透水係数 [m/s]</p>
設定根拠	透水試験結果を参照して取りまとめられている文献(1)の式を使用する。
参考文献	(1) 伊藤弘之、三原守弘(2005): ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式、JNC TN8400 2005-029

パラメータ	11. 難透水性覆土の拡散係数
設定値	$D_e = 2.27 \times 10^{-9} \varepsilon^n$ $n = 2.22 f_s^{0.13} + 1$ $f_s = a \times f_b$ D_e : 実効拡散係数[m ² /s] ε : 空隙率[-] a : ベントナイト中のモンモリロナイト割合[-] f_b : ベントナイトの配合割合[-]
設定根拠	<p>空隙率と実効拡散係数の実測値にフィッティングした式⁽¹⁾を用いて、実効拡散係数を設定した。Na型ベントナイトをCa型化して取得した実効拡散係数を既存のNa型ベントナイトの値と比較し、ほぼ同程度の値であると推定されている⁽²⁾。</p> <div data-bbox="635 1041 1136 1411" style="text-align: center;"> <p>Figure 4 Relationship between porosity and effective diffusion coefficients of HTO in Kunigel V1</p> </div> <p>(1) より引用</p>
参考文献	<p>(1) Mihara, M. and Sasaki, R. (2005): RAMDA; Radio-nuclides Migration Datasets (RAMDA) on cement, bentonite and rock for TRU waste repository in Japan, JNC TN8400 2005-027.</p> <p>(2) 三原守弘、伊藤勝、加藤博康、上田真三(1999) : カルシウム型ベントナイトのトリチウム、セシウム、ヨウ素及び炭素の実効拡散係数の取得(試験報告)、JNC TN8430 99-011.</p>

パラメータ	12. セメント系材料の拡散係数
設定値	$2.27 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$
設定根拠	セメント系材料は長期的に化学劣化以外の幾何学的劣化(ひび割れ)が想定されるため、物質移動が速い状態となることを想定し、拡散係数として自由水中のトリチウム水の拡散係数 ⁽¹⁾ を設定する。
参考文献	(1) 日本化学会(2004): 化学便覧 基礎編 改定5版、丸善、東京、p-II.64

パラメータ	13. モンモリロナイトの溶解速度
設定値	$Rate = \left(4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.57/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{69.67/RT} \right. \\ \left. \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}} \right) \cdot A_{min} \\ \cdot \{1 - \exp(6 \cdot 10^{-10} \cdot (2 \cdot \Delta Gr/RT)^6)\}$ <p> <i>Rate</i> : モンモリロナイト溶解速度 [mol/s] <i>R</i> : 気体定数 [kJ/(K・mol)] <i>T</i> : 絶対温度 [K] <i>a_{OH⁻}</i> : OH⁻イオンの活量 <i>A_{min}</i> : 鉱物の反応表面積 [m²] <i>ΔGr</i> : 反応のギブス自由エネルギー変化 [kJ/mol] </p>
設定根拠	<p>TRU2 次レポート⁽¹⁾の地化学解析で使用されている式を使用する。 モンモリロナイトが液相と平衡に近い状態になったときの溶解速度を表現可能な飽和濃度依存性⁽²⁾と、高 pH の液相中の溶解速度へ適用するための pH 依存性⁽³⁾を含んでいる。</p>
参考文献	<p>(1) 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(2005) : TRU 廃棄物分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－ JNC TY1400 2005-013 FEPC TR2-2005-02</p> <p>(2) Cama, J., Ganor, J., Ayora, C. and Lasaga, C.A. (2000): Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8, <i>Geochimica et Cosmochimica Acta</i>, Vol.64, No.15, pp.2701-2717.</p> <p>(3) Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsui, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S. (2004): Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions, NUMO-TR-04-05.</p>

パラメータ	14. 二次鉱物		
設定値	フィリップサイト クリノプチロライト ヒューランダイト C-S-H ゲル エトリングアイト モノサルフェート ハイドロタルサイト セピオライト ポルトランダイト	ブルーサイト カルサイト ドロマイト カルセドニ カリ長石 アナルサイム ローモンタイト イライト	C_3ASH_4 C_4AH_{13} C_4AH_{19} ゲーレンナイト水和物 カオリナイト パイロフィライト フリーデル氏塩 モノサルフェート 2 水石膏
設定根拠	TRU2 次レポート ⁽¹⁾ の地化学解析で考慮されている鉱物を設定した。また文献 ⁽²⁾ では、TRU2 次レポート ⁽¹⁾ でセメント系材料の二次鉱物として考慮されているものに加え 2 水石膏を追加していたことから、本解析でも 2 水石膏を考慮することとした。		
参考文献	(1) 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構(2005)：TRU 廃棄物分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－ JNC TY1400 2005-013 FEPC TR2-2005-02 (2) (独)日本原子力研究開発機構(2013)：平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発 報告書		

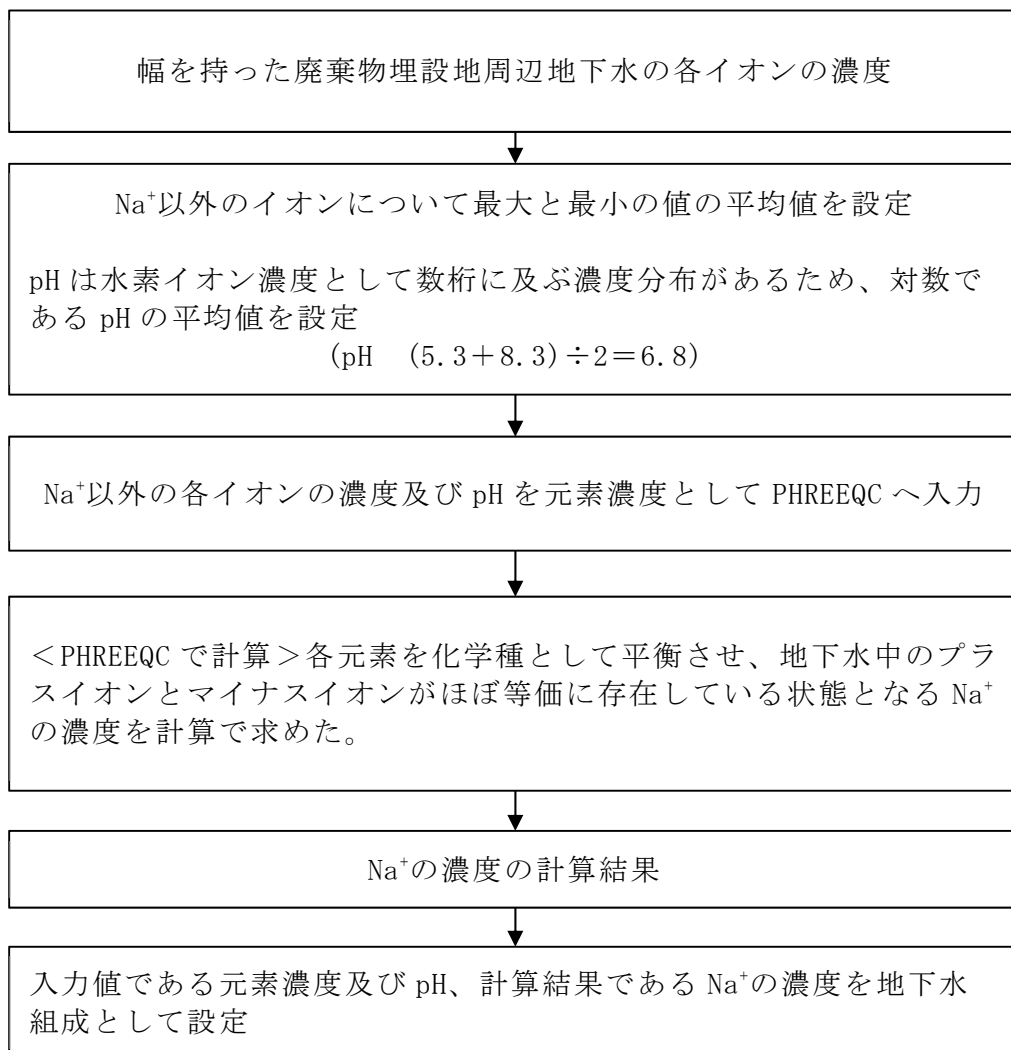
地下水組成のチャージバランス計算

地球化学解析において地下水組成を設定する場合、チャージのバランスがとれた状態(陽イオン、陰イオン、pHの電荷の合計が±0になっている状態)となるようにイオンあるいはpHで、電荷の合計を±0に調整して地球化学解析に与える。チャージバランスの計算はPHREEQCを用いた平衡計算となる。

六ヶ所水質試験結果(第1表)に基づいた地下水組成を設定する場合の流れを第1図に示す。ここでのチャージバランスは、元素濃度が他の元素モル濃度と比較して高く、チャージバランスの調整のため濃度が変動しても元の値から大きく外れないと考えて、Na⁺でチャージバランスをとることとした。例えば、FOHP(Fresh-Oxidizing-High-pH)地下水においても、Na⁺にてチャージバランスを計算している⁽⁵⁾。Na以外のイオンについては、最大と最小の値の平均値を設定した。

Na⁺の平均値の $8.4 \times 10^{-4} \text{mol/L}$ (第2表参照)に対して、チャージバランス計算後のNa⁺濃度は $6.4 \times 10^{-4} \text{mol/L}$ (第3表参照)であり、1/4程度の低下率となるが、桁が変わるほどの変化ではないことが確認された。

参考として、Na⁺ではなくpHでチャージバランスをとったケースを第4表に示す。pHは9.8となった。



第1図 地下水組成設定計算フロー

第1表 六ヶ所サイトの水質試験結果(3号廃棄物埋設地の水質試験結果)

Na ⁺	7.2~31.5mg/L
K ⁺	0.5~5.6mg/L
Ca ²⁺	0.1~7.2mg/L
Mg ²⁺	0.1~3.8mg/L
HCO ₃ ⁻	5.6~51.9mg/L
SO ₄ ²⁻	1.0~21.7mg/L
Cl ⁻	12.9~20.3mg/L
pH	5.3~8.3

第2表 六ヶ所サイトの水質試験結果の平均値

Na ⁺	19.35mg/L	8.4×10^{-4} mol/L
K ⁺	3.05mg/L	7.8×10^{-5} mol/L
Ca ²⁺	3.65mg/L	9.1×10^{-5} mol/L
Mg ²⁺	1.95mg/L	8.0×10^{-5} mol/L
HCO ₃ ⁻	28.75mg/L	4.7×10^{-4} mol/L
SO ₄ ²⁻	11.35mg/L	1.2×10^{-4} mol/L
Cl ⁻	16.6mg/L	4.7×10^{-4} mol/L
pH	6.8	6.8

第3表 Na でチャージバランスを計算した後の地下水組成

Na ⁺	$6.4 \times 10^{-4} \text{mol/L}^{*1}$
K ⁺	$7.8 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
Ca ²⁺	$9.1 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
Mg ²⁺	$8.0 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
HCO ₃ ⁻	$4.7 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
SO ₄ ²⁻	$1.2 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
Cl ⁻	$4.7 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
pH	6.8
*1 : PHREEQC にてチャージバランスを保つように計算して設定	

(参考) 第4表 pH でチャージバランスを調整した場合

Na ⁺	$8.4 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
K ⁺	$7.8 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
Ca ²⁺	$9.1 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
Mg ²⁺	$8.0 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
HCO ₃ ⁻	$4.7 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
SO ₄ ²⁻	$1.2 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
Cl ⁻	$4.7 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
pH	9.8 ^{*1}
*1 : PHREEQC にてチャージバランスを保つように計算して設定	

覆土が長期間にわたり低透水性を
維持することができる要因

目 次

1. はじめに	1
2. 難透水性覆土の透水係数に影響を与える因子分析	1
3. 難透水性覆土の低透水性が維持されることの妥当性評価	4
(1) モンモリロナイトの溶解速度の影響	5
(2) 難透水性覆土の拡散係数(物質の移動速度)の影響	7
(3) ベントナイト中の随伴鉱物の反応の影響	9
(4) セメント系材料の配合(アルカリ成分の供給量)の影響	11
4. まとめ	14

1. はじめに

本資料は、補足説明資料 5(以下「補足 5 本文」という。)のうち「3. 解析結果」に示す地球化学解析結果(以下「解析結果」という。)について追加説明するものである。

解析結果では、1,000 年までの範囲において難透水性覆土の低透水性の全体的な性能は維持されていた。そこで、1,000 年間という長期間にわたり難透水性覆土が低透水性を維持したことに寄与した要因について分析し、補足 5 本文に示す解析条件や解析結果の妥当性・保守性・安定性について検討する。

2. 難透水性覆土の透水係数に影響を与える因子分析

難透水性覆土の透水係数の変化は、モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合 (ESP)、モンモリロナイトと空隙の体積比 (e_{sme}) 及び空隙水の当量イオン濃度 (C_i) の関数として表現される(補足 5 本文「2. (4). (iii) 難透水性覆土の透水係数の変遷評価式」の数式 2)。透水係数に大きな影響を与えている因子を把握するため、各因子を変化させた場合に透水係数がどのような応答をするのか感度解析を行った。各因子の変化が透水係数に与える影響を第 1 図に示す。

$$K = 10^{1.30 \cdot C_i} \cdot e_{sme}^{3.48 \cdot C_i} \cdot K_0 \quad (\text{数式 2})$$

ただし、 $C_i > 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ のとき、 $C_i = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$

$$K > 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0 \text{ のとき、} K = 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$$

$$K > 1.0 \cdot 10^{-5} \text{ のとき、} K = 1.0 \cdot 10^{-5}$$

K_0

$$= \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} & e_{sme} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \left(\frac{e_{sme}}{7.0}\right)^{11.4} & 7.0 < e_{sme} \end{cases}$$

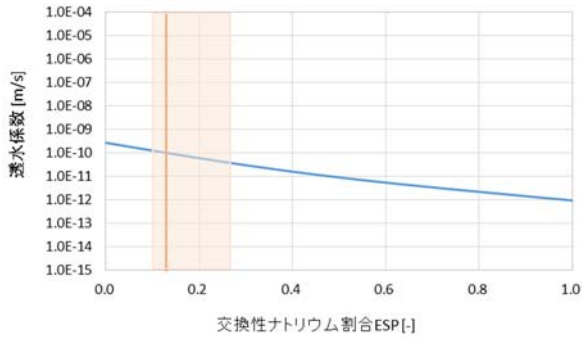
ただし、 $K_0 < K_0|_{ESP=1}$ のとき、 $K_0 = K_0|_{ESP=1}$

C_i : 空隙水の当量イオン濃度 [eq/L]

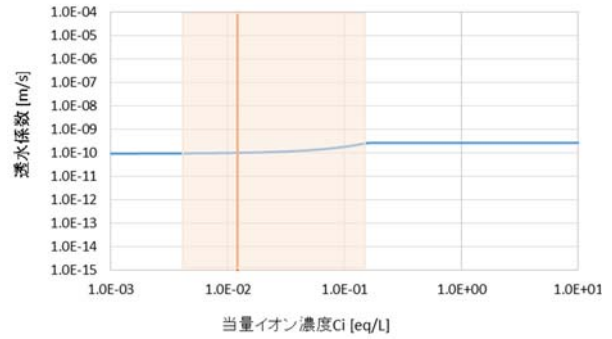
ESP : ベントナイトの交換性ナトリウム割合 [-]

e_{sme} : スメクタイト間隙比 [-]

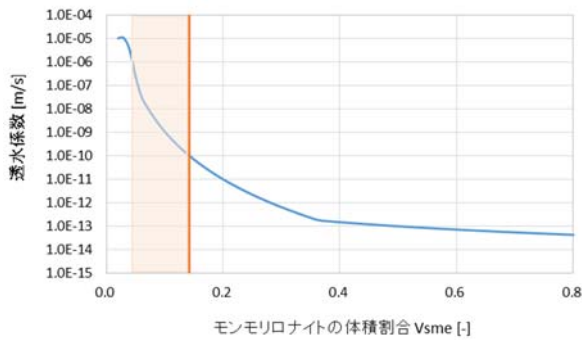
K : 透水係数 [m/s]



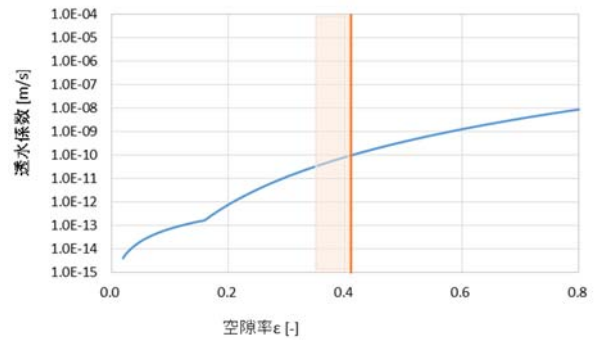
交換性ナトリウム割合ESP[-]
モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合 (ESP)



当量イオン濃度Ci [eq/L]
空隙水の当量イオン濃度 (C_i)



モンモリロナイトの体積割合 V_{sme} [-]
モンモリロナイト体積割合 (V_{sme})



空隙率ε [-]
空隙率 (ϵ)

注 1 : 橙色の線は初期値を、枠で囲まれている部分は補足 5 本文での解析における 1,000 年間の変化幅を示す。

注 2 : 変化させた因子以外のパラメータは、初期値で固定した。

第 1 図 各因子の透水係数への影響

○交換性ナトリウム割合 (ESP)

第1図を見ると、 ESP が増加するに従い透水係数は緩やかに低下する傾向を示している。解析では、モンモリロナイトのイオン交換反応により ESP が変化することで、透水係数に影響を及ぼすことが考えられる。難透水性覆土はCa型ベントナイトを配合した材料仕様となっていることから、交換性陽イオンは主にCaである(初期 ESP は0.13程度)。また、セメント系材料の主要な化学成分はCaであり、NaやKに比べCaの供給量が多いことから、イオン交換反応は起こり難いと考えられる。そのため、本解析では ESP の影響はほとんどないものと思われる。

○当量イオン濃度 (C_i) (溶液濃度)

当量イオン濃度が透水係数に与える影響は、 ESP の増加とともに顕著になること、透水係数が濃度によらず一定となり始める濃度は ESP の増加とともに大きくなる傾向がある。難透水性覆土の材料仕様はCa型ベントナイトであり初期 ESP が小さいことから、当量イオン濃度が透水係数に及ぼす影響は小さいことが考えられ、第1図からも感度が小さいことがわかった。

○モンモリロナイトと空隙の体積比 (e_{sme}) (モンモリロナイト体積割合、空隙率)

モンモリロナイトと空隙の体積比 (e_{sme}) は、モンモリロナイトの体積割合 (V_{sme}) と空隙率 (ε) の比である。

モンモリロナイトの体積割合について、第1図を見ると、空隙率を初期値で固定した場合、体積割合が減少するに従い透水係数が大きくなる傾向があり、特に体積割合が小さい領域では透水係数に与える影響が顕著に表れている。難透水性覆土のベントナイト配合率は30wt%、初期のモンモリロナイトの体積割合は0.14程度であり、モンモリロナイトが溶解し体積割合が減少すると、透水係数は大きく上昇することがわかる。

また、空隙率についても、第1図を見ると、モンモリロナイトの体積割合を初期値で固定した場合、空隙率が大きくなるほど透水係数も上昇しており、空隙率が透水係数に与える影響は大きいことがわかる。解析では、モンモリロナイトが溶解することで空隙率が大きくなる一方、二次鉱物が生成されることにより空隙率が小さくなることが考えられる。

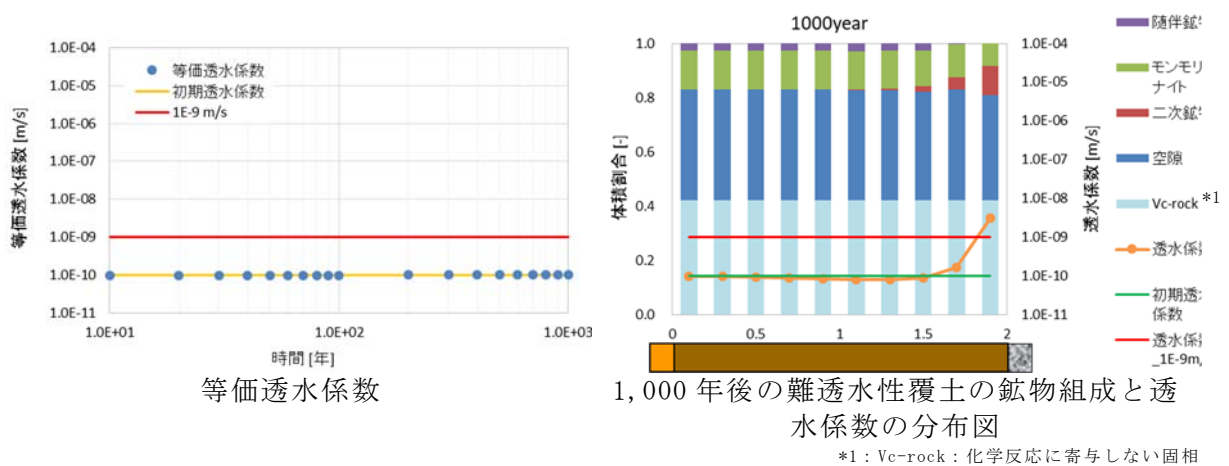
補足 5 本文「3. 解析結果」は、セメント境界面では、二次鉱物の生成により空隙率がわずかに減少している結果となっている一方で、透水係数は上昇している結果であった。これは、モンモリロナイトが溶解しモンモリロナイトの体積割合が減少する効果の方が大きいためであると考えられる。したがって、本解析では、透水係数に与える空隙率の影響はモンモリロナイトの体積割合に比べ小さいものと考えられる。

以上より、難透水性覆土の透水性に大きな影響を与える因子は「モンモリロナイトの体積割合」であると考えられる。すなわち、難透水性覆土が低透水性を維持するためにはセメント由来のアルカリ成分によるモンモリロナイトの溶解という化学劣化影響を加味しても十分なモンモリロナイトの体積が残存していることが重要な要因である。

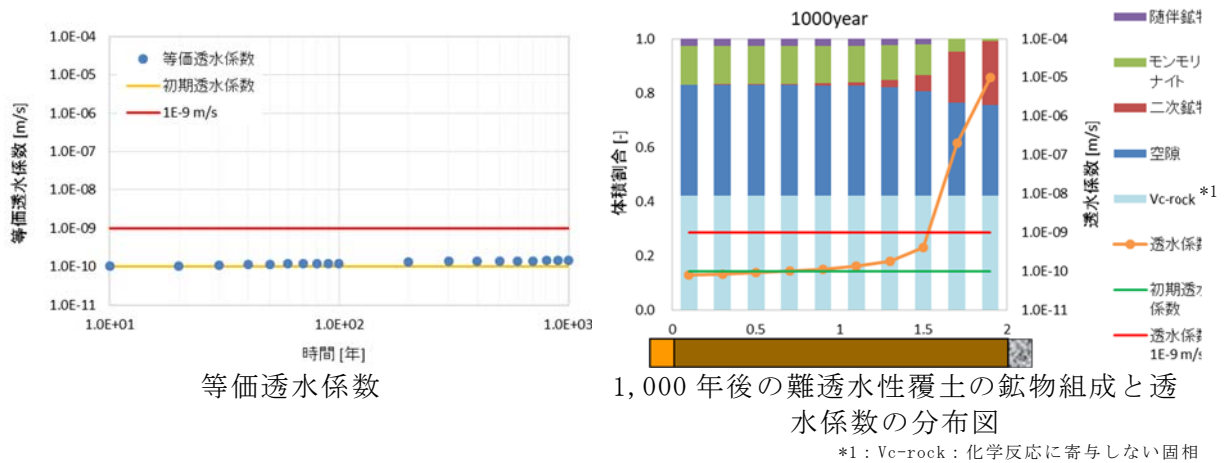
3. 難透水性覆土の低透水性が維持されることの妥当性評価

「2. 難透水性覆土の透水係数に影響を与える因子分析」では、難透水性覆土の透水性に大きな影響を与える因子はモンモリロナイトの体積割合であることを確認し、難透水性覆土の低透水性が維持される要因は、セメント由来のアルカリ成分による化学劣化影響を加味しても十分にモンモリロナイトが残存していることだと考えた。そこで難透水性覆土の化学変質解析において、モンモリロナイトの体積割合に影響を与え得る要因に着目した極端なケーススタディを実施し、モンモリロナイトの体積割合への影響を考慮したとしても、難透水性覆土の低透水性が維持されることの妥当性を評価した。

比較用のベースケースとして、補足 5 本文「3. (1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び 1,000 年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を、3号廃棄物埋設地については第 2 図に、1号廃棄物埋設地については第 3 図に再掲して示す。



第2図 補足5本文の第5図及び第7図における3号廃棄物埋設地の解析結果



第3図 補足5本文の第6図及び第10図における1号廃棄物埋設地の解析結果

(1) モンモリロナイトの溶解速度の影響

難透水性覆土の化学変質解析においてモンモリロナイトの体積割合に影響を与える要因のうち、モンモリロナイトの溶解速度を変化させて影響を評価した。

補足5本文の地球化学解析に用いたモンモリロナイトの溶解速度条件は、試験より得られた経験式を組み合わせさせた式(補足5本文「2.(4).(ii) モンモリロナイトの溶解速度」の数式1)とした。この式は、平衡に接近した場合の溶解速度の減少について考慮したものである。それに対してここでは、モンモリロナイトの溶解量を大きく見積もるため、モンモリロナイトの溶解が瞬時に平衡に達する(瞬時平衡)と仮定した解

析を実施し、モンモリロナイトの溶解速度がモンモリロナイトの溶解に与える影響について検討した。

なお、モンモリロナイトの溶解速度以外の解析条件は補足 5 本文「3. (1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)と同様とした。

3 号廃棄物埋設地の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び 1,000 年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を第 4 図に、1 号廃棄物埋設地の解析結果を第 5 図に示す。モンモリロナイトの溶解速度を経験式(補足 5 本文「2. (4). (ii) モンモリロナイトの溶解速度」の数式 1)とした場合の解析結果と比べ、セメント系材料の境界面において、モンモリロナイトの溶解量は多くなり透水係数も上昇する結果となった。ただし、変質は部分的であり、等価透水係数もわずかに上昇するだけで、全体的には大きな影響はなかった。

モンモリロナイトの溶解速度はモンモリロナイトの体積割合に大きな影響を与えることがわかった。しかし、平衡に接近した場合の溶解速度の減少を考慮せず瞬時平衡とした場合でも、1,000 年程度は低透水性を維持できるモンモリロナイト量は残存することを確認した。

$$Rate = \left(4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.57/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{69.67/RT} \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}} \right) \cdot A_{min} \cdot \{1 - \exp(6 \cdot 10^{-10} \cdot (2 \cdot \Delta Gr/RT)^6)\}$$

(数式 1)

Rate : モンモリロナイトの溶解速度 [mol/s]

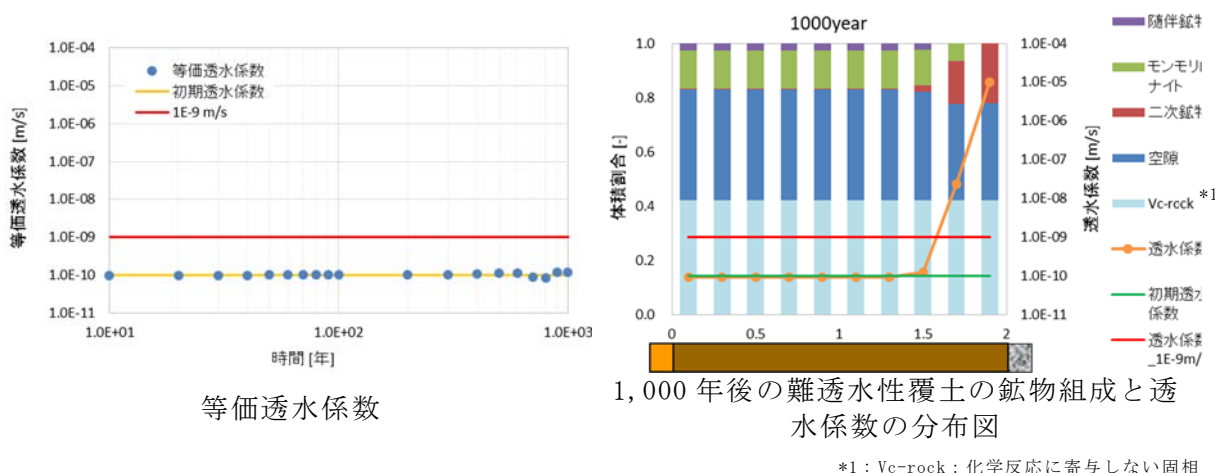
R : 気体定数 [kJ/(K·mol)]

T : 絶対温度 [K]

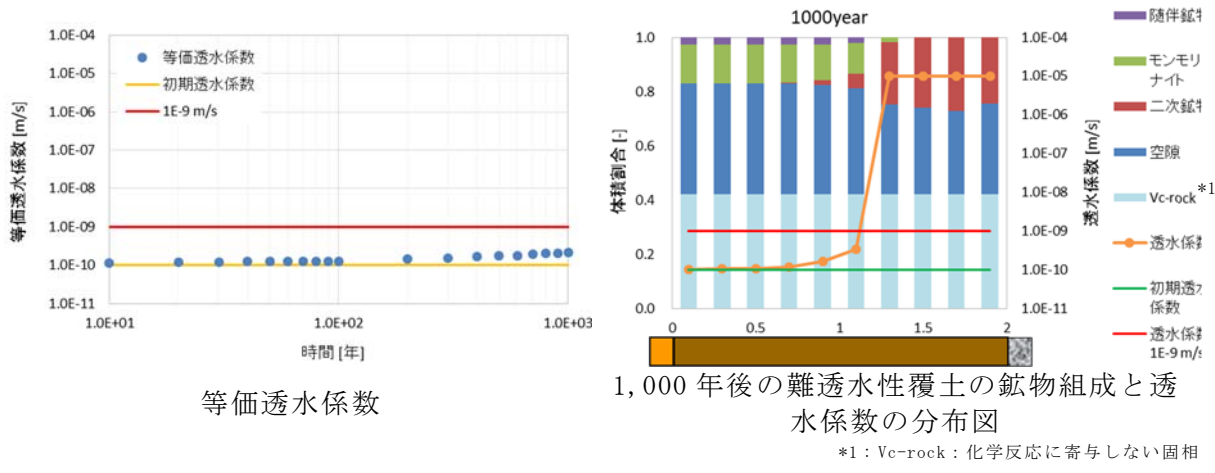
a_{OH⁻} : OH⁻イオンの活量

A_{min} : 鉱物の反応表面積 [m²]

ΔGr : 反応のギブス自由エネルギー変化(化学親和力) [kJ/mol]



第4図 3号廃棄物埋設地の解析結果(モンモリロナイトの溶解速度: 瞬時平衡)



第5図 1号廃棄物埋設地の解析結果(モンモリロナイトの溶解速度: 瞬時平衡)

(2) 難透水性覆土の拡散係数(物質の移動速度)の影響

難透水性覆土の変質解析においてモンモリロナイトの体積割合に影響を与える要因のうち、難透水性覆土の拡散係数(物質の移動速度)を変化させて影響を評価した。補足5本文の地球化学解析に用いた難透水性覆土の拡散係数条件は、ベントナイト系材料中のトリチウムの実効拡散係数測定結果より得られた経験式(補足5本文「2.(4).(iv) 難透水性覆土の拡散係数」の数式3)とした。それに対してここでは、モンモリロナイトの溶解量を大きく見積もるため、物質移動が速い状態の拡散係数として自由

水中のトリチウム水の拡散係数 ($2.27 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$) を設定し解析を実施し、物質の移動速度がモンモリロナイトの溶解に与える影響について検討した。

なお、難透水性覆土中の拡散係数以外の解析条件は、補足 5 本文に記載されている条件と同様とした。

3号廃棄物埋設地の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び1,000年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を第6図に、1号廃棄物埋設地の解析結果を第7図に示す。経験式(補足5本文「2.(4).(iv) 難透水性覆土の拡散係数」の数式3)ではモンモリロナイトが溶解した範囲はセメント系材料の境界面近傍のみであったが、拡散係数が大きい設定では溶解する範囲は広がる結果となった。しかし、3号廃棄物埋設地の解析結果については、全体的なモンモリロナイトの体積割合に大きな差は見られなかったため、等価透水係数にもほとんど影響は見られなかった。一方、1号廃棄物埋設地の解析結果については、全体的なモンモリロナイトの体積割合が減少しており、等価透水係数もわずかに上昇する結果となった。

難透水性覆土の拡散係数について、モンモリロナイトが溶解する領域に多少影響を与えることがわかった。しかしながら、十分な量のモンモリロナイトが残存するため、1,000年程度の期間は難透水性覆土の低透水性は維持されることを確認した。

$$D_e = 2.27 \times 10^{-9} \times \varepsilon^n \quad (\text{数式 3})$$

$$n = 2.22 f_s^{0.13} + 1$$

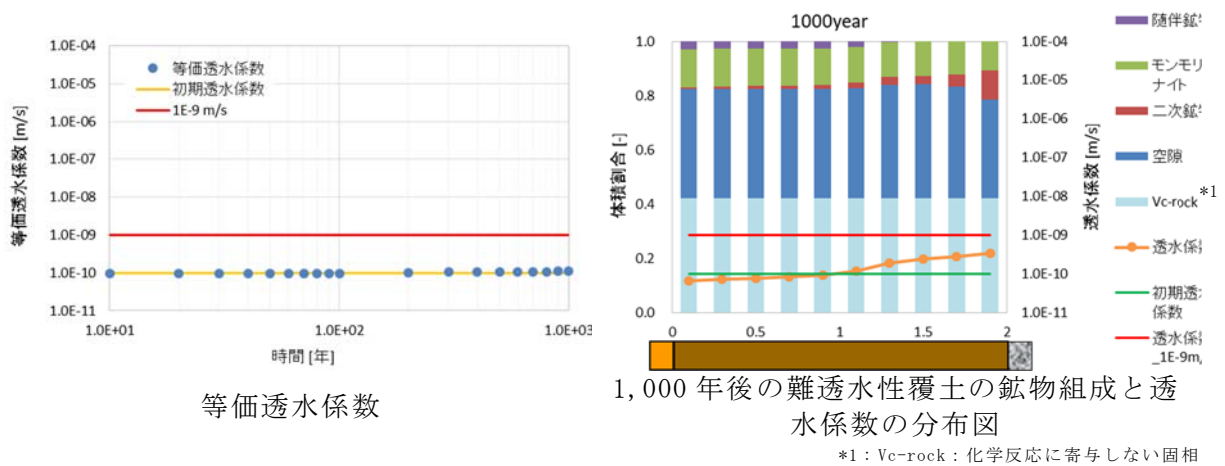
$$f_s = a \times f_b$$

D_e : 実効拡散係数 [m^2/s]

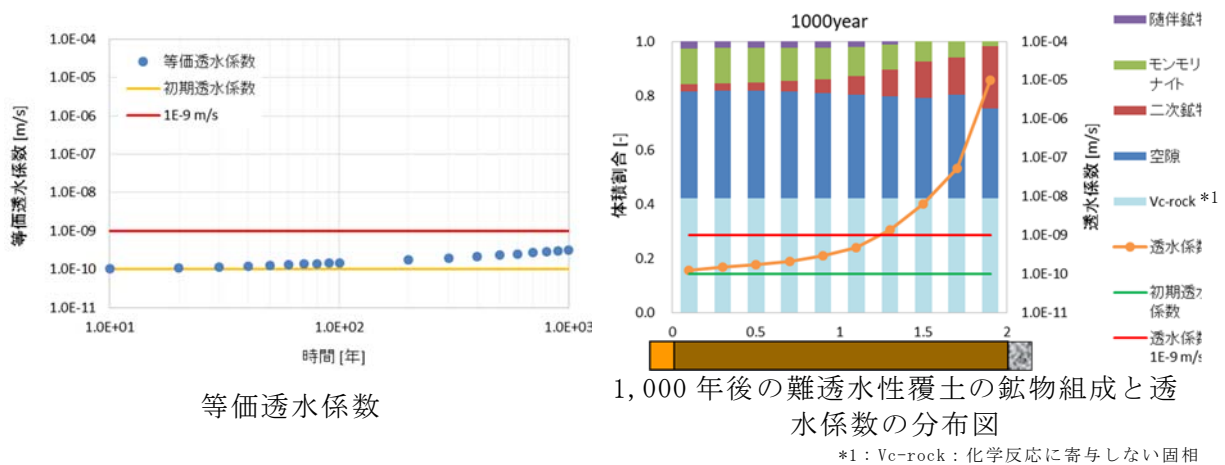
ε : 空隙率 [-]

a : ベントナイト中のモンモリロナイト割合 [-]

f_b : ベントナイトの配合割合 [-]



第 6 図 3号廃棄物埋設地の解析結果
(覆土の拡散係数：自由水中のトリチウム水の拡散係数)



第 7 図 1号廃棄物埋設地の解析結果
(覆土の拡散係数：自由水中のトリチウム水の拡散係数)

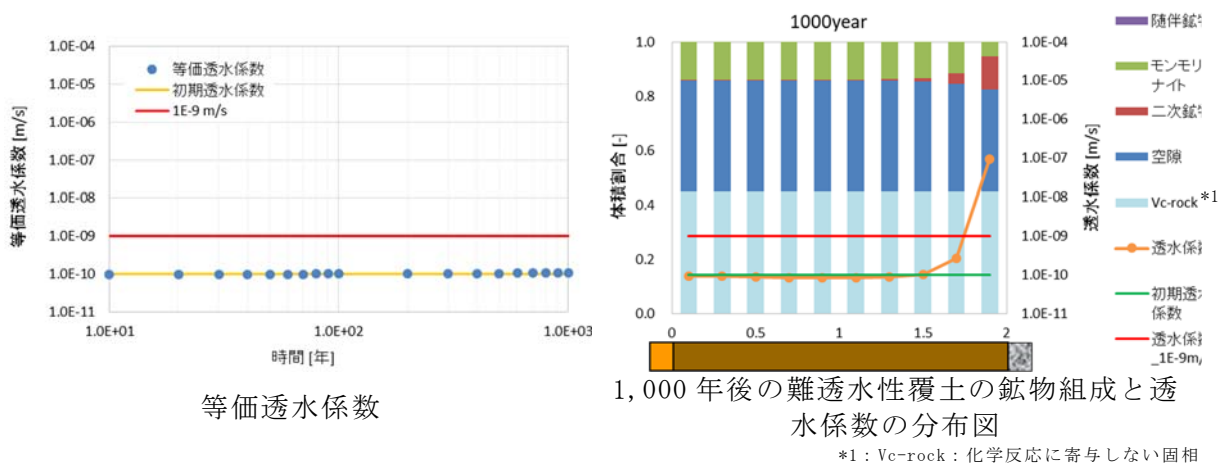
(3) ベントナイト中の随伴鉱物の反応の影響

難透水性覆土の変質解析においてモンモリロナイトの体積割合に影響を与える要因のうち、ベントナイト中の随伴鉱物の反応の有無を変化させて影響を評価した。

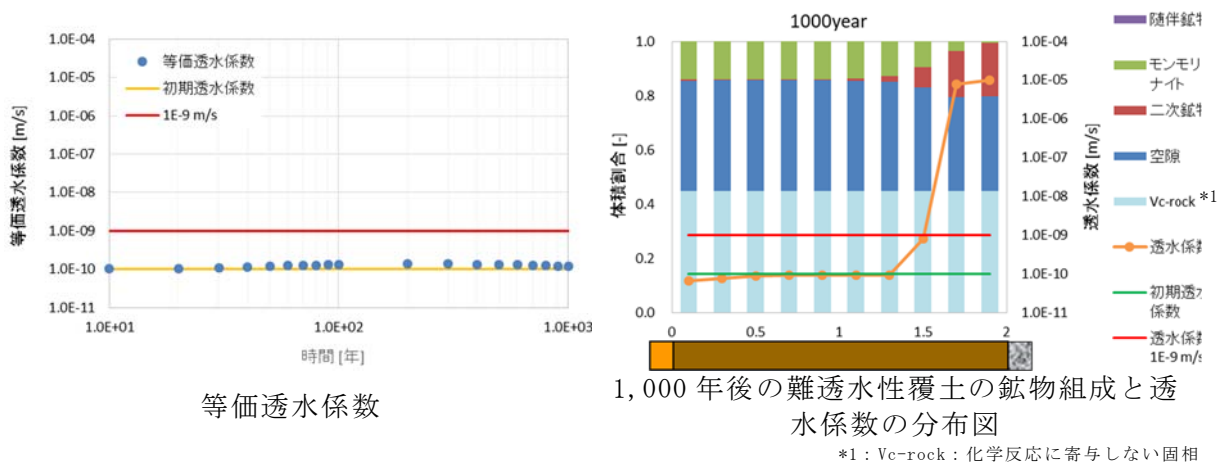
難透水性覆土中の初期鉱物組成として、ベントナイト中に含まれるモンモリロナイトの他、ベントナイト中の随伴鉱物を設定し、補足 5 本文における解析では随伴鉱物の反応(緩衝作用)を考慮している。これらの随伴鉱物の溶解反応によって放出される Si がモンモリロナイトの溶解反応や二次鉱物の沈殿反応に寄与する溶存 Si

濃度に直接影響することから、これらの反応の有無は解析結果に影響を与える可能性がある。そこで、ここでは随伴鉱物の反応を考慮しない解析を行い、随伴鉱物の反応によるアルカリ緩衝性の有無がモンモリロナイトの溶解に与える影響について検討した。なお、その他の解析条件は補足5本文「3. (1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)と同様とした。

3号廃棄物埋設地の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び1,000年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を第8図に、1号廃棄物埋設地の解析結果を第9図に示す。解析結果から、ベントナイトに含まれる随伴鉱物を地球化学反応において考慮しなかった場合でも解析結果に与える影響が小さいことが確認された。



第8図 3号廃棄物埋設地の解析結果(随伴鉱物の反応：反応を考慮しない)



第 9 図 1 号廃棄物埋設地の解析結果(随伴鉱物の反応：反応を考慮しない)

(4) セメント系材料の配合(アルカリ成分の供給量)の影響

難透水性覆土の変質解析においてモンモリロナイトの体積割合に影響を与える要因のうち、セメント系材料の配合(アルカリ成分の供給量)を変化させて影響を評価した。

モンモリロナイトの溶解量はセメント系材料由来のアルカリ成分量にも影響される。セメント系材料のアルカリ量は、セメント系材料の種類や配合、体積により決定される。補足 5 本文における解析に用いたセメント系材料の種類・配合は、実際の埋設設備に用いられる条件に基づき設定している。それに対してここでは、モンモリロナイトの溶解量を大きく見積もるため、セメント系材料の種類・配合として多量のアルカリ成分を含む普通ポルトランドセメントが主に配合された仕様を設定した。設定したセメント系材料の配合及び化学組成を第 1 表と第 2 表に、設定したセメント系材料の初期鉱物組成を第 3 表及び第 4 表に示す。なお、その他の解析条件は補足 5 本文「3. (1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)と同様とした。

3 号廃棄物埋設地の解析結果(難透水性覆土の等価透水係数の時間変化及び 1,000 年後の鉱物分布と透水係数の分布図)を第 10 図に、1 号廃棄物埋設地の解析結果を第 11 図に示す。セメント系材料の仕様を OPC に変更するとモンモリロナイトの溶解量が多くなる結果となった。しかし、セメント境界面ではモンモリロナイトの溶解が促進されるものの局所的であり、難透水性覆土全体としてはほとんど変化しな

かった。

第 1 表 コンクリート (OPC) の配合

単位量 [kg/m ³]			
結合材 (C)	粗骨材 (G)	細骨材 (S)	
普通ポルトランドセメント		砕砂	陸砂
296	1,023	218	654

第 2 表 普通ポルトランドセメント (OPC) の化学組成

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
21.8	4.49	2.9	63.9	1.84	2.26	0.2	0.38

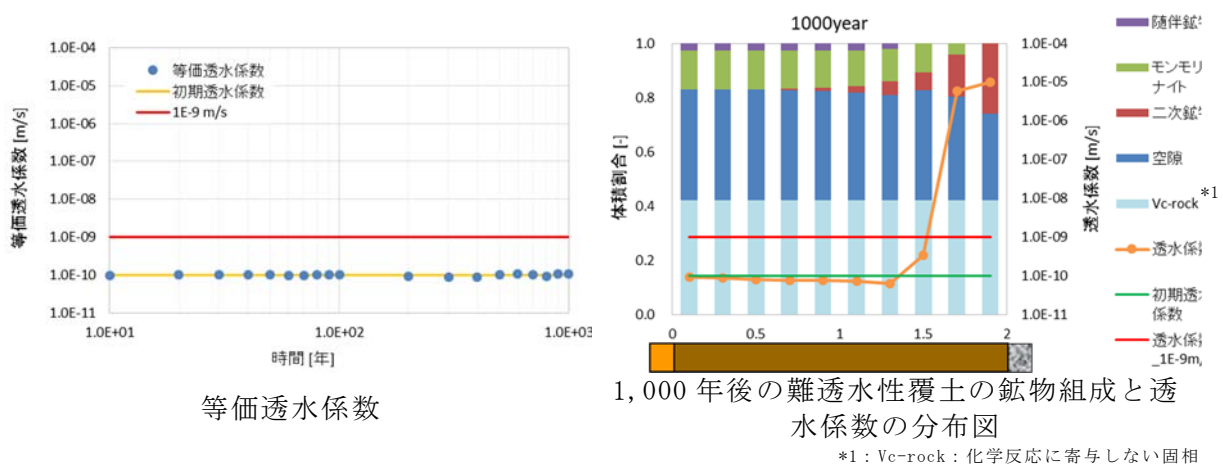
(単位は wt%)

第 3 表 セメント系材料の初期鉱物組成 (アルカリ成分の供給が多い条件)
(3 号廃棄物埋設地)

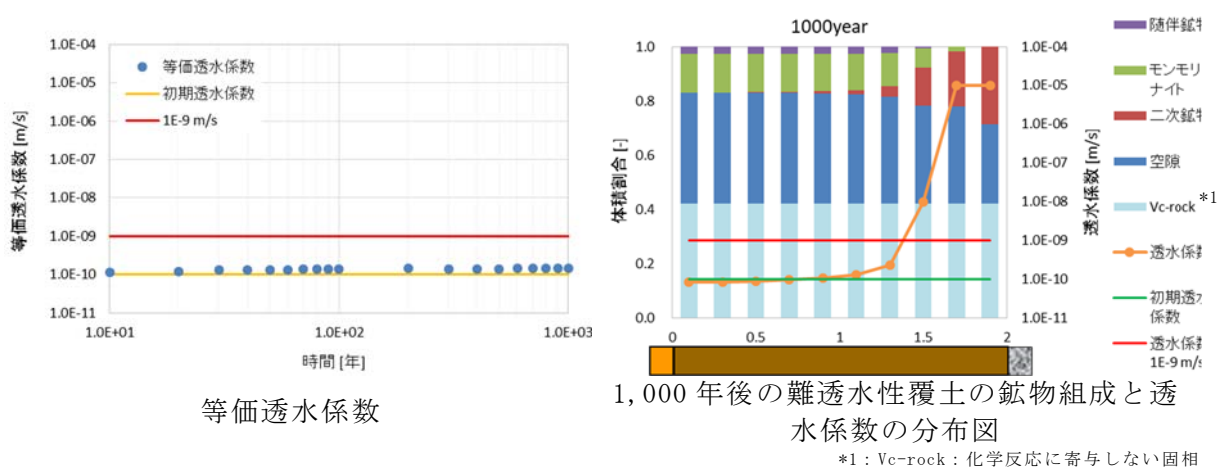
	結合材 (c)					
	C-S-H ゲル	ハイドロタルサイト	エトリンガイト	ポルトランドダイト	NaOH	KOH
mol/L _{water} *1	12.1	0.21	0.17	6.95	0.12	0.15
*1: 空隙水 1L に対する鉱物の物質量						

第 4 表 セメント系材料の初期鉱物組成 (アルカリ成分の供給が多い条件)
(1 号廃棄物埋設地)

	結合材 (c)					
	C-S-H ゲル	ハイドロタルサイト	エトリンガイト	ポルトランドダイト	NaOH	KOH
mol/L _{water} *1	6.71	0.21	0.17	8.29	0.12	0.15
*1: 空隙水 1L に対する鉱物の物質量						



第 10 図 3 号廃棄物埋設地の解析結果(セメント系材料の仕様: OPC)



第 11 図 1 号廃棄物埋設地の解析結果(セメント系材料の仕様: OPC)

4. まとめ

1,000年間にわたり難透水性覆土の低透水性が維持できる要因は、透水係数に影響を与える因子(当量イオン濃度、ベントナイトの交換性ナトリウム割合、空隙率、モンモリロナイトの体積割合)のうち、モンモリロナイトの体積割合の影響が大きく、セメント系材料から供給されるアルカリ成分によるモンモリロナイトの溶解が進んでも十分な量のモンモリロナイトが残存していることが必要である。

そのためモンモリロナイトの溶解量に影響を与え得る複数の項目(モンモリロナイトの溶解速度、難透水性覆土の拡散係数、ベントナイト中の随伴鉱物の反応、セメント系材料の配合)について、解析上極端な条件設定で感度解析を行ったが、難透水性覆土には十分な量のモンモリロナイトが残存した。これにより、補足5本文における地球化学解析結果より得られた「化学影響を踏まえても難透水性覆土が1,000年間にわたり低透水性を維持する」との結論が妥当であることを確認した。

【参考】要因分析に資する参考データについて

添付資料 3 の要因分析の参考とするため、モンモリロナイトのイオン型の時間変化及び二次鉱物の生成種類について参考データとして記載する。

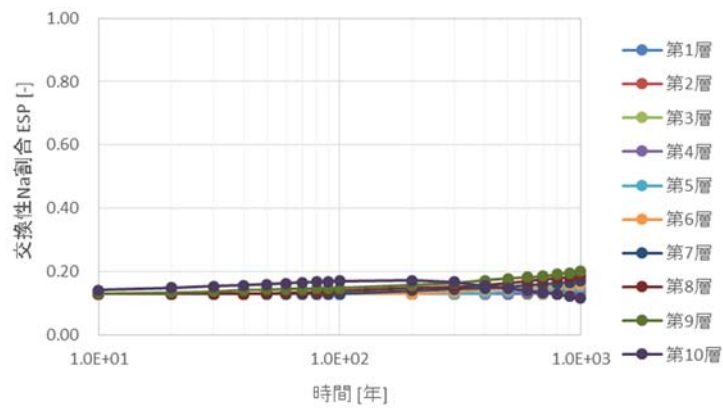
1. モンモリロナイトのイオン型が透水係数に与える影響について

難透水性覆土は Ca 型ベントナイトを配合した材料仕様となっている。そこへ、セメント系材料から供給される Na により、モンモリロナイトの一部が Ca 型から Na 型化され交換性ナトリウム割合 (*ESP*) が上昇することにより、難透水性覆土の止水性能が上昇する可能性が考えられる。上昇の程度は、添付資料 3 「第 1 図 各因子の透水係数への影響」に示したとおり小さいものと考えられるが、モンモリロナイトのイオン型の時間変化図と合わせて、難透水性覆土中のモンモリロナイトのイオン型が透水係数に与える影響について詳細を改めて再確認する。

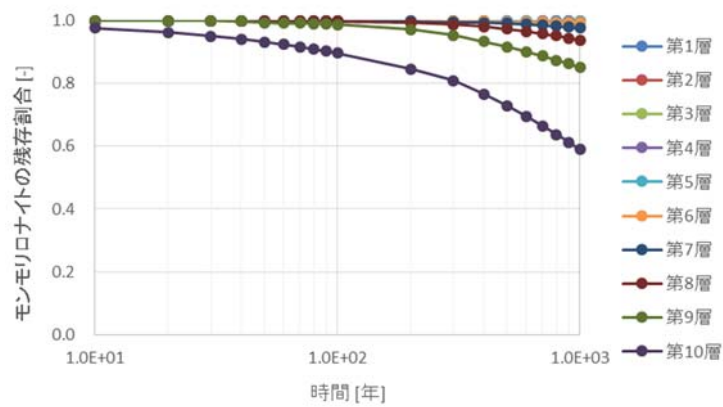
補足 5 本文「3. (1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)の解析結果(モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合、モンモリロナイトの残存割合、難透水性覆土の透水係数)について、3号廃棄物埋設地は第 12 図に、1号廃棄物埋設地は第 13 図に示す。難透水性覆土について等間隔に十層に分割し、岩盤・下部覆土側の難透水性覆土から第 1 層とし、セメント系材料に接する難透水性覆土を第 10 層とした(第 14 図)。

セメント系材料に接する第 9 層及び第 10 層では、交換性ナトリウム割合がごくわずかに上昇しており、特に 1号廃棄物埋設地では、固化体に含まれる Na 塩の影響によりモンモリロナイトの Na 型割合がわずかに多い結果であった。それでも、難透水性覆土の止水性を大きく向上させるほどの Na 型化は見られなかった。また、Na 型化が見られた第 9 層～第 10 層では、モンモリロナイトが溶解し体積割合が大きく減少しており、そのため透水係数は初期値よりもわずかに上昇している結果であった。

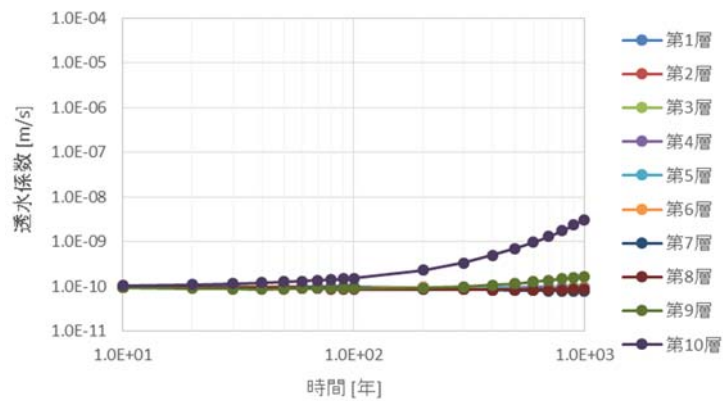
したがって、モンモリロナイトのイオン型が透水係数に与える影響について、セメント系材料から Na の供給による難透水性覆土中のモンモリロナイトの Na 型化はごくわずかであり、Na 型化による止水性能の上昇よりも、モンモリロナイトの溶解に伴う止水性能の低下の影響の方が大きいことが確認された。



モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合

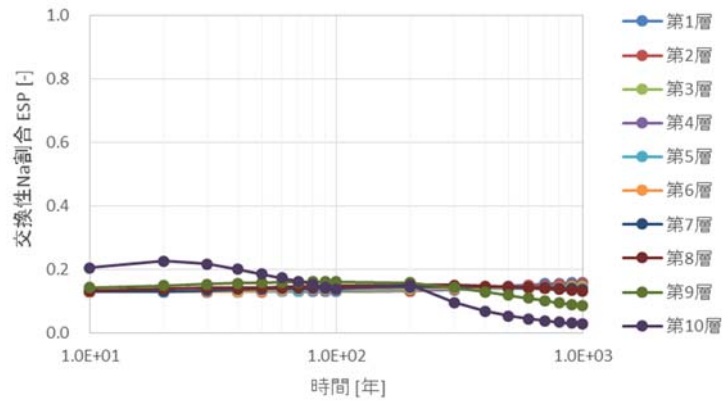


モンモリロナイトの残存割合

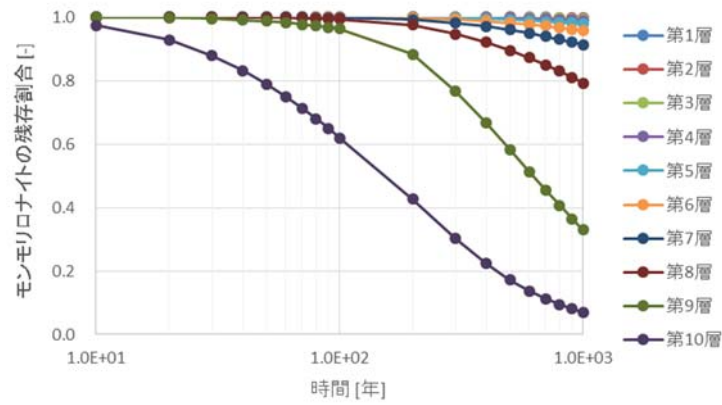


難透水性覆土の透水係数

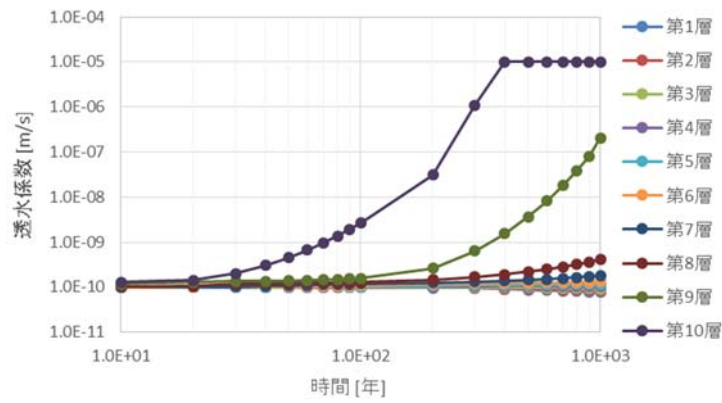
第 12 図 3 号廃棄物埋設地の解析結果
(交換性ナトリウム割合、モンモリロナイトの残存割合、透水係数)



モンモリロナイトの交換性ナトリウム割合



モンモリロナイトの残存割合



難透水性覆土の透水係数

第13図 1号廃棄物埋設地の解析結果
(交換性ナトリウム割合、モンモリロナイトの残存割合、透水係数)



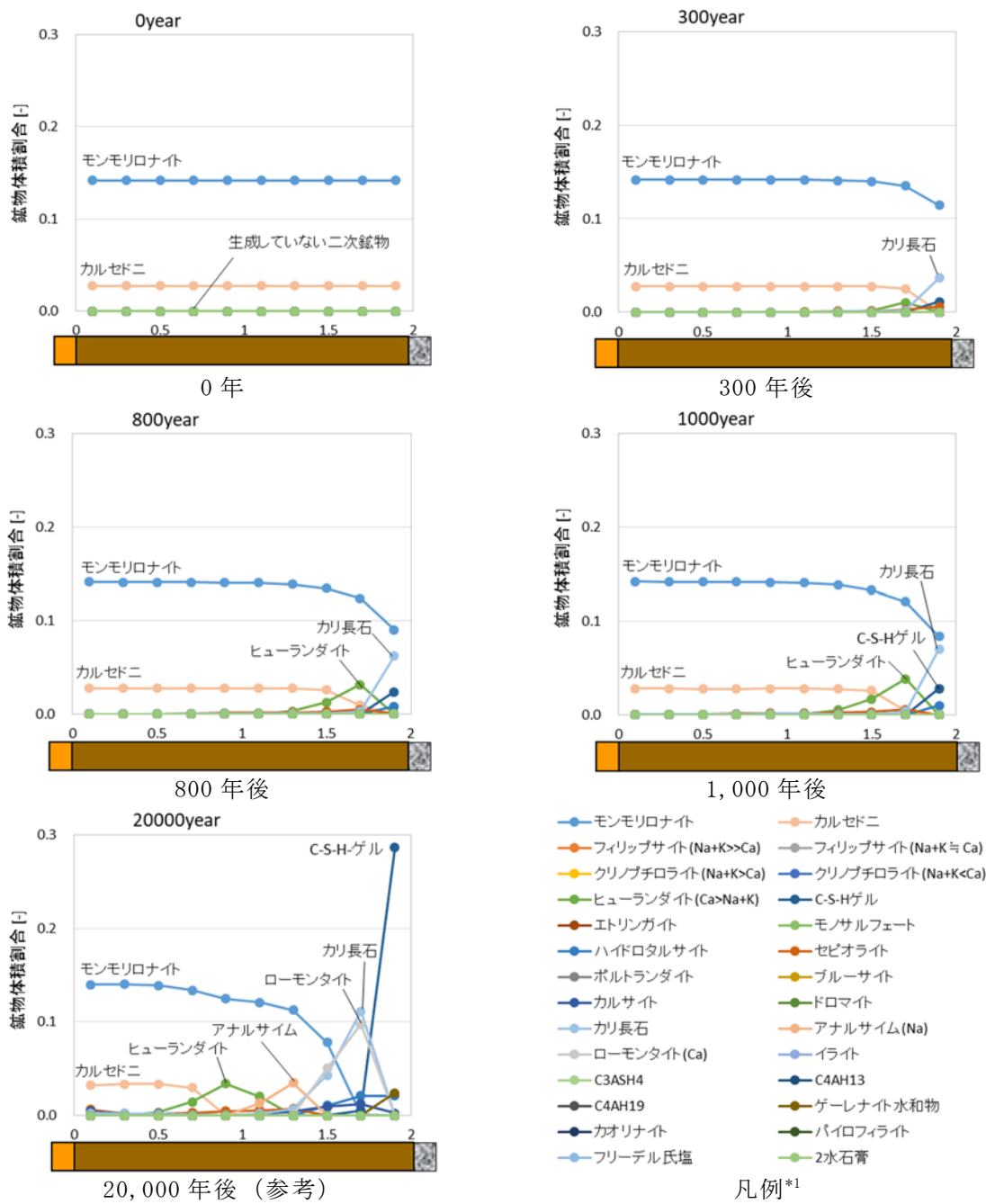
第 14 図 難透水性覆土の層の定義

2. 難透水性覆土中に生成した二次鉱物の種類について

セメント系材料から供給されたアルカリ成分 (Na、K、Ca) によりモンモリロナイトの溶解が生じると、モンモリロナイトを構成する主要元素である Al、Mg、Si の液相濃度が上昇するため、過飽和となり二次鉱物が生成する可能性がある。本解析においても、補足 5 本文「難透水性覆土の鉱物組成と透水係数の分布図」(第 7 図及び第 10 図) に示すとおり、難透水性覆土中のモンモリロナイトが溶解すると同時に、二次鉱物が生成することが確認された。

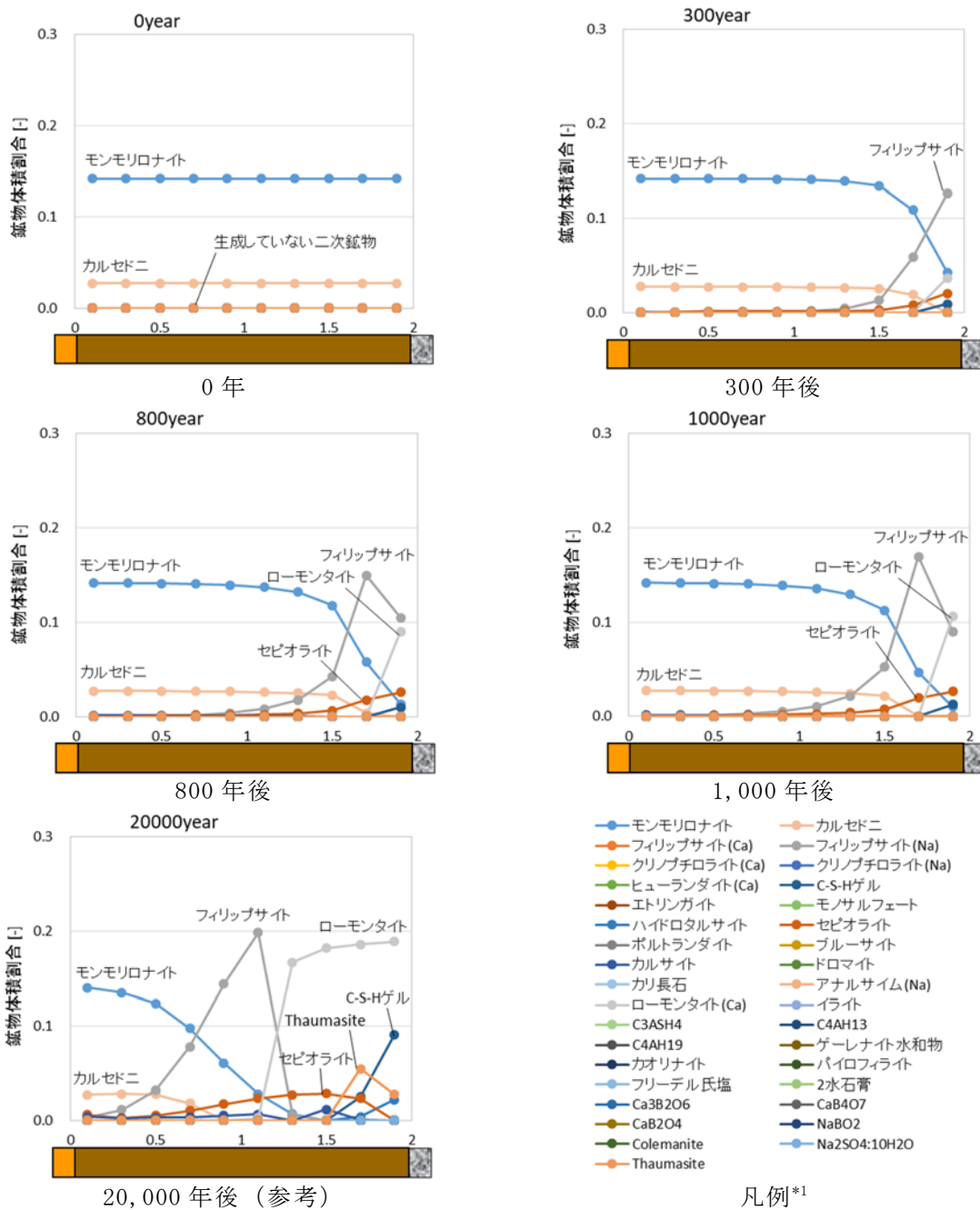
そこで、難透水性覆土中に生成した二次鉱物の種類(鉱物体積割合)について、モンモリロナイトを構成する代表的な成分 (Al、Mg、Si) 及びセメント系材料から供給されたアルカリ成分 (Na、K、Ca) に着目しながら確認することで、覆土が長期間にわたり低透水性を維持することができる要因分析の参考とした。

補足 5 本文「3. (1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)」に記載されている条件(ケース①)の解析結果(難透水性覆土中の鉱物体積割合)について、3号廃棄物埋設地は第 15 図に、1号廃棄物埋設地は第 16 図に示す。二次鉱物として、カリ長石、ゼオライト(ヒューランダイト、フィリップサイト、ローモンタイト)が支配的であり、その他セピオライトや C-S-H ゲルも生成していることを確認した。セメント系材料から供給されるアルカリ成分について、Na はフィリップサイト ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)、K はカリ長石 (KAlSi_3O_8)、Ca は主に C-S-H ゲル、ローモンタイト ($\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 及びヒューランダイト ($\text{Na}_{0.167}\text{K}_{0.066}\text{Ca}_{0.55}\text{Al}_{1.333}\text{Si}_{4.667}\text{H}_{8.67}\text{O}_{16.335}$) により消費されているものと考えられる。一方、モンモリロナイトの溶解で生じた Al、Mg 及び Si について、Al は主にカリ長石とゼオライトに、Mg は主にセピオライト ($\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2(\text{OH}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) に、Si は生成した二次鉱物全般により消費されているものと考えられる。



*1：鉱物名に記した()内は、ゼオライトのアルカリ、アルカリ土類元素の組成を表す。

第 15 図 3 号廃棄物埋設地の解析結果(難透水性覆土中の鉱物体積割合)



*1：鉱物名に記した()内は、ゼオライトのアルカリ、アルカリ土類元素の組成を表す。

第 16 図 1 号廃棄物埋設地の解析結果(難透水性覆土中の鉱物体積割合)

以上

ペクレ数分布

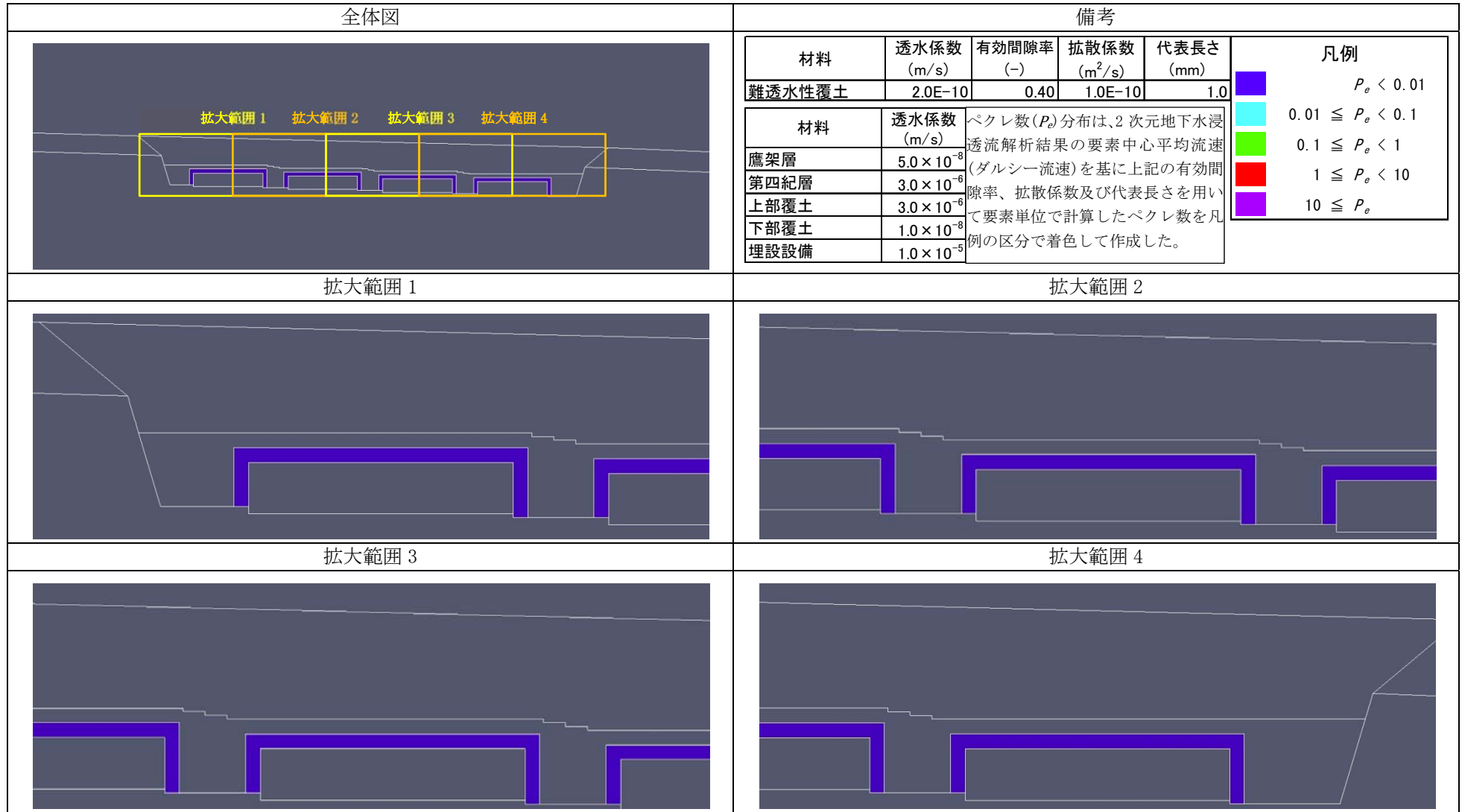


図 難透水性覆土内のペクレ数(P_e)分布(1/6)【3号廃棄物埋設地】(確からしい設定 1,000年後)

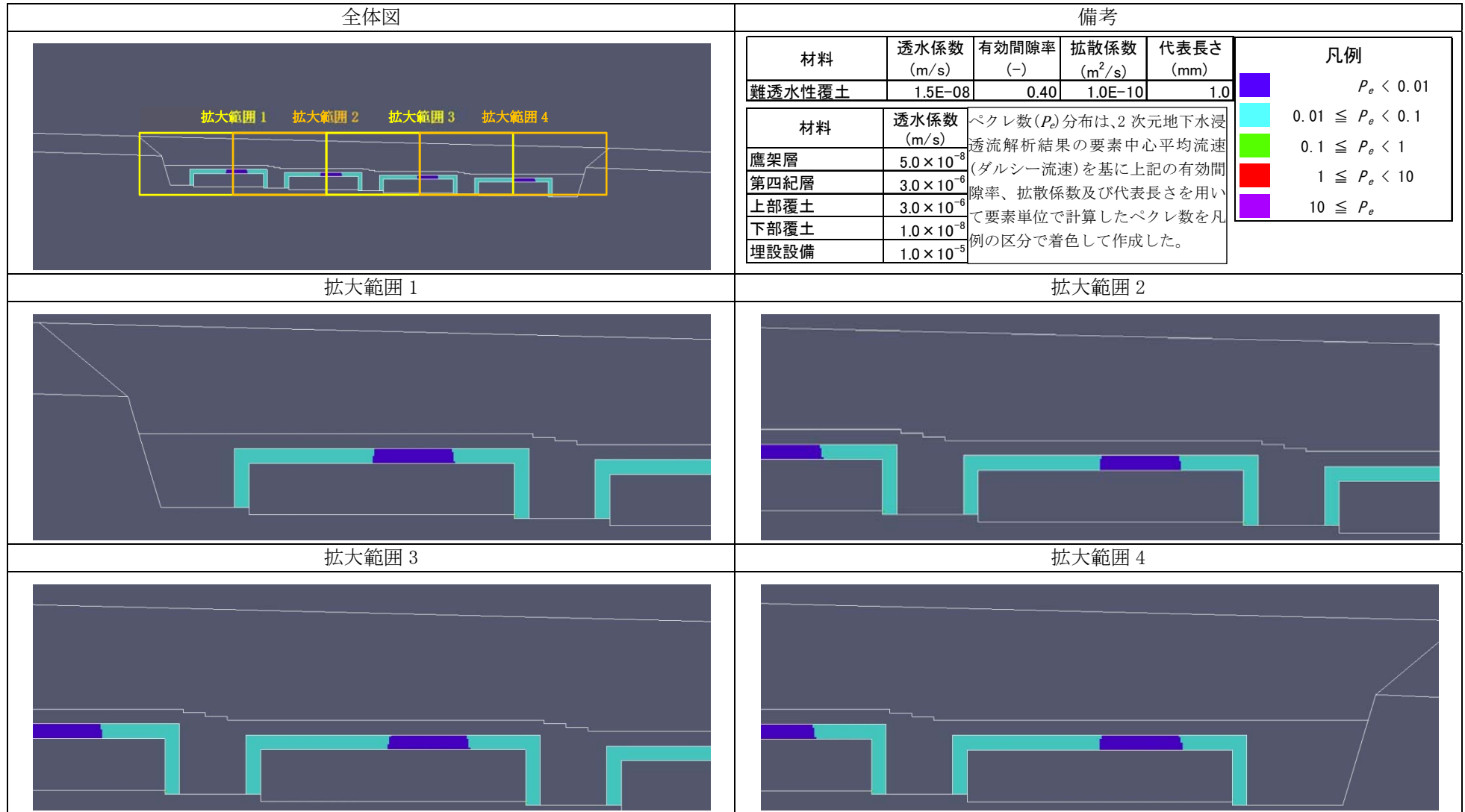


図 難透水性覆土内のペクレ数(P_e)分布(2/6)【3号廃棄物埋設地】(厳しい設定 1,000年後)

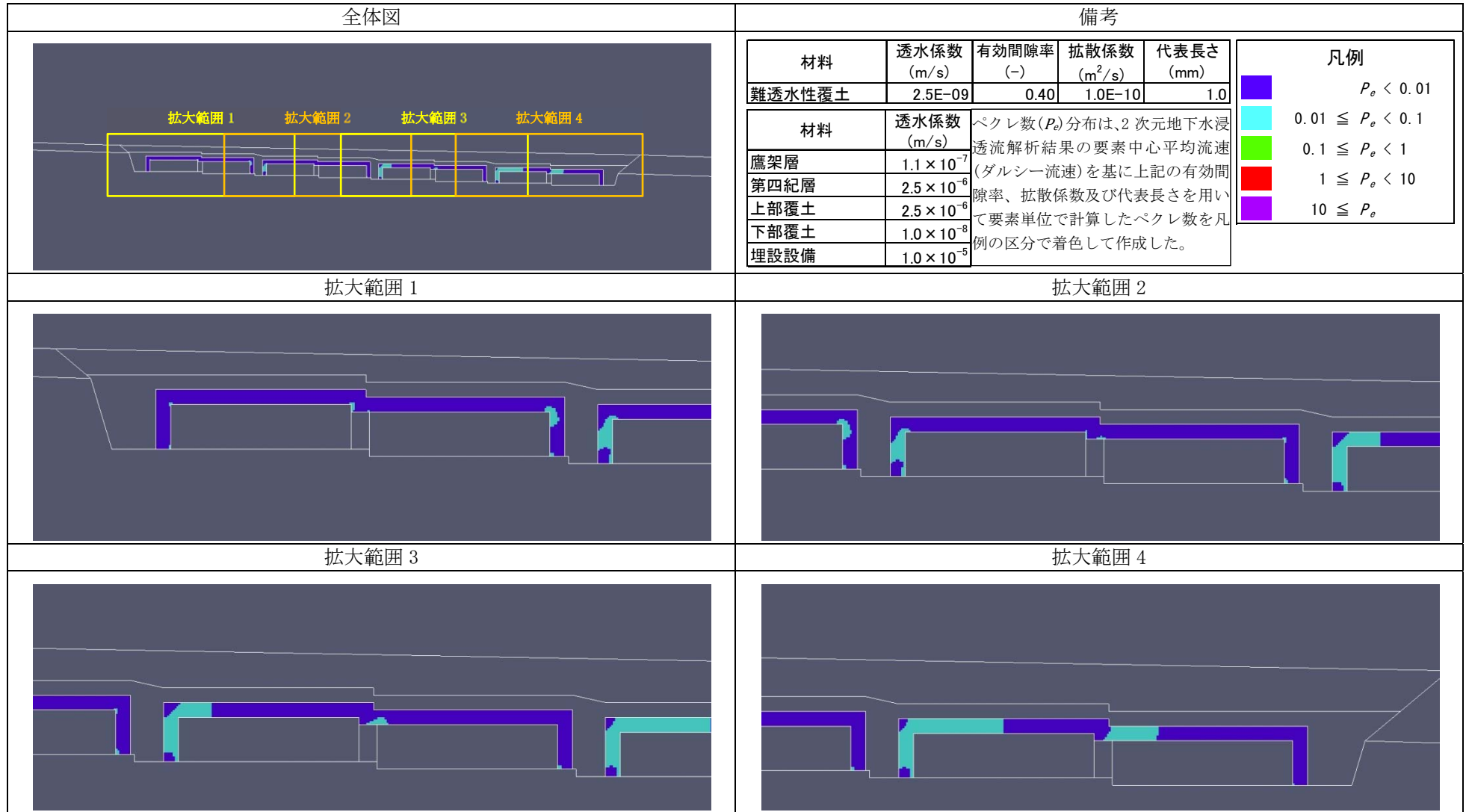


図 難透水性覆土内のペクレ数(P_e)分布(3/6) 【1号廃棄物埋設地】(確からしい設定 1,000年後)

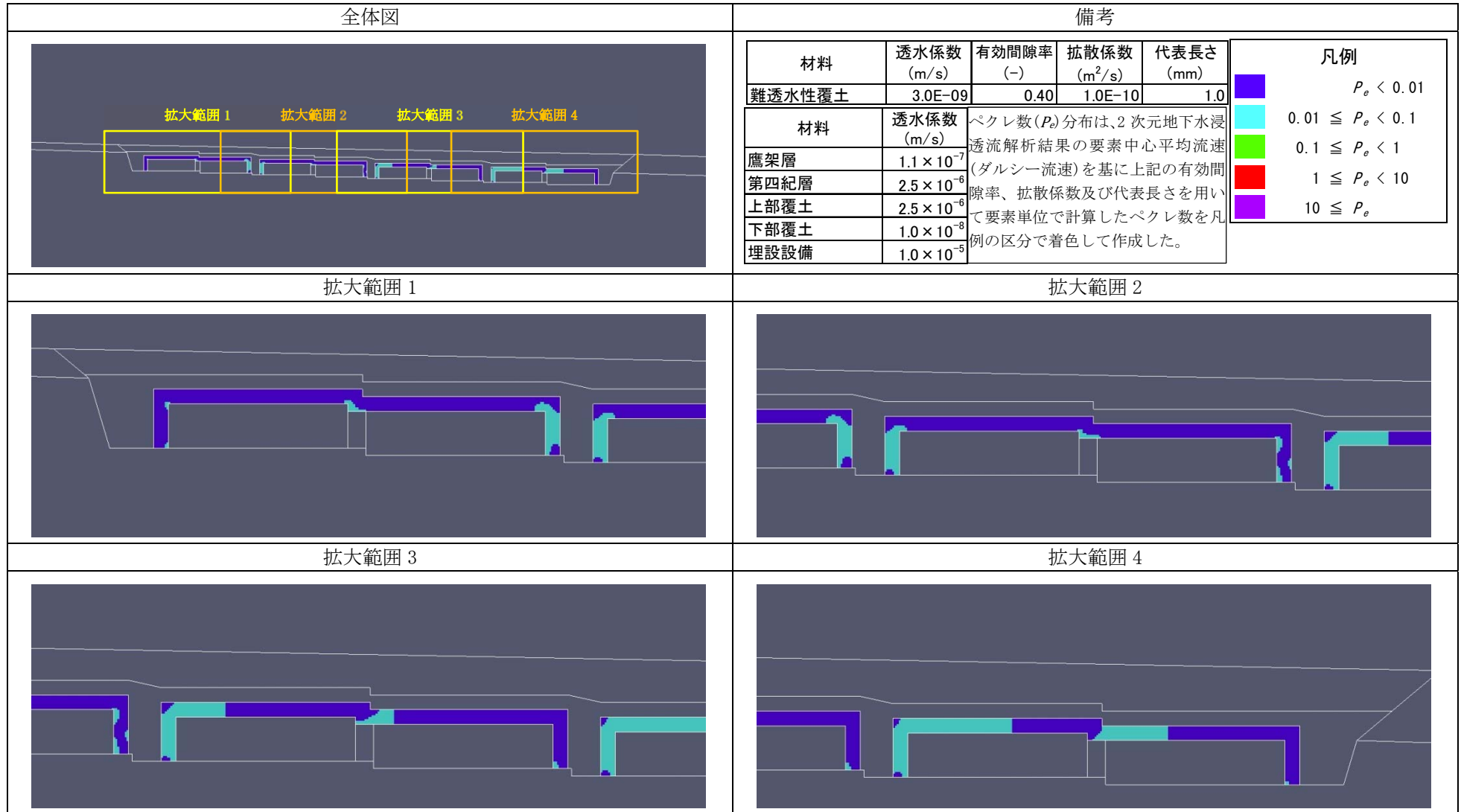


図 難透水性覆土内のペクレ数(P_e)分布(4/6)【1号廃棄物埋設地】(厳しい設定 1,000年後)

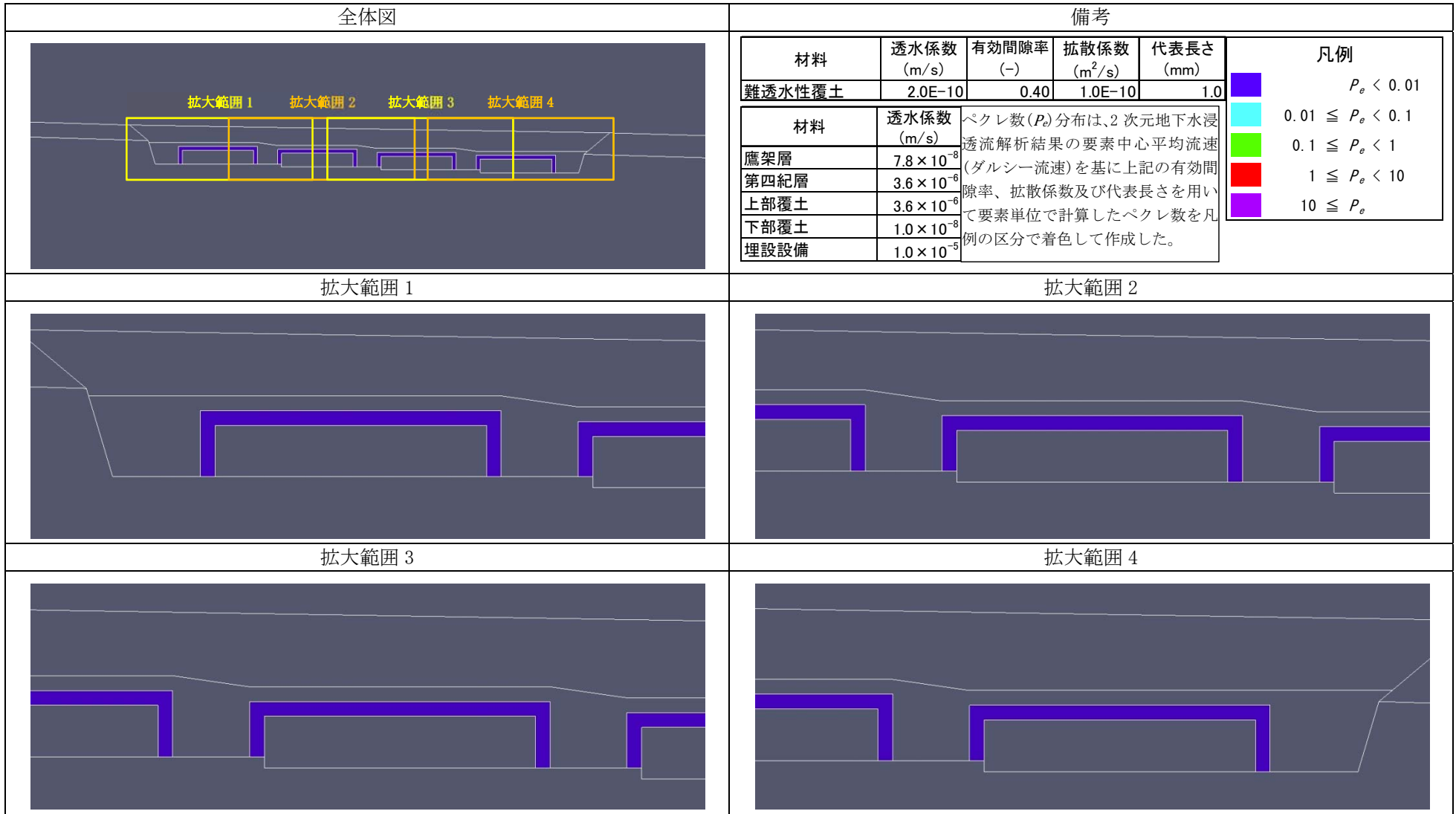


図 難透水性覆土内のペクレ数 (P_e) 分布 (5/6) 【2号廃棄物埋設地】 (確からしい設定 1,000年後)

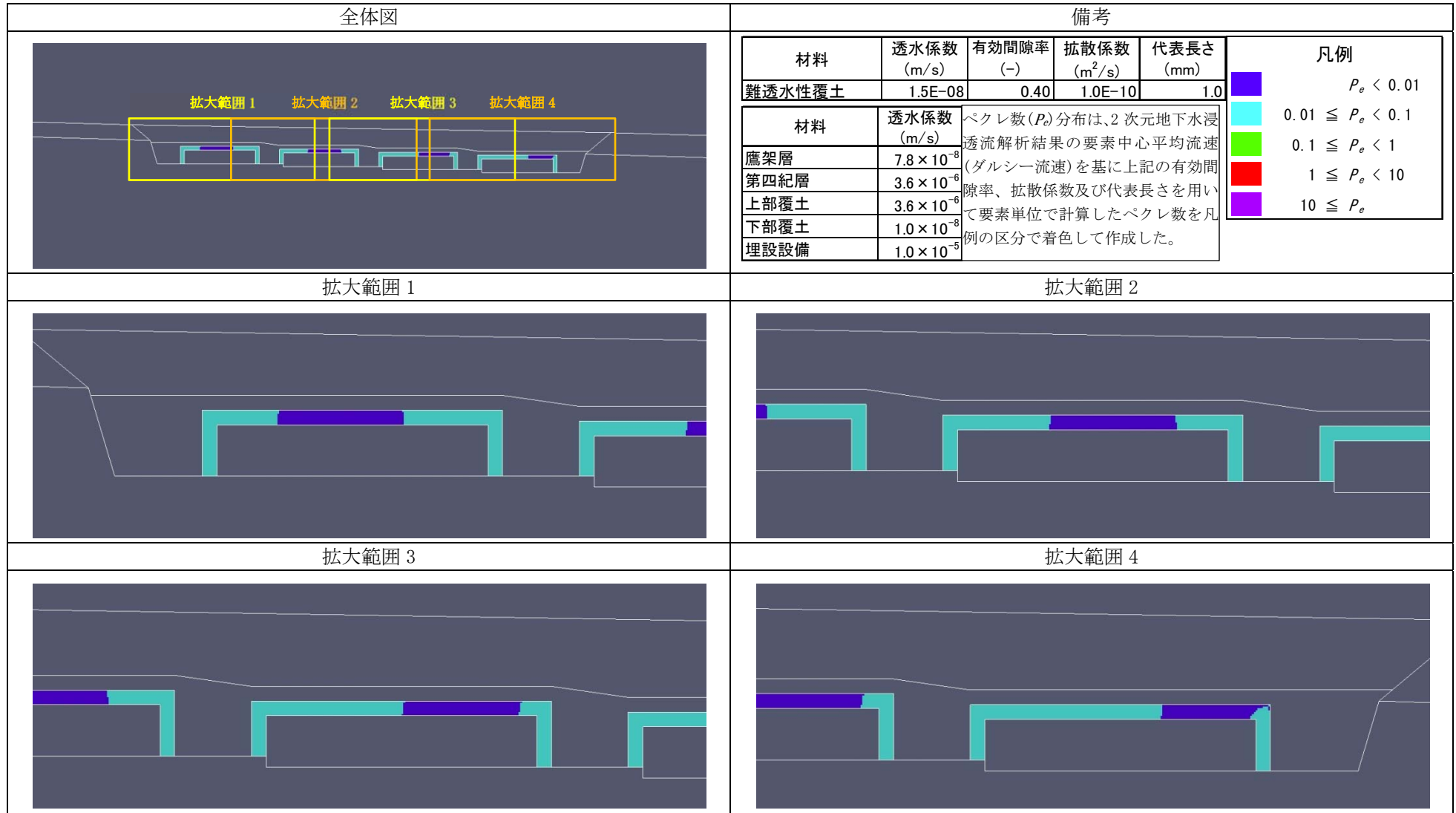


図 難透水性覆土内のペクレ数(P_e)分布(6/6)【2号廃棄物埋設地】(厳しい設定 1,000年後)

難透水性覆土の材料仕様を Na 型ベントナイトとした場合

1. はじめに

本資料は、補足説明資料 5(以下「補足 5」という。)のうち、難透水性覆土の材料仕様を変更した場合について追加説明するものである。

難透水性覆土の材料仕様について、補足 5 では Ca 型ベントナイト(クニボンド)を 3 割配合した材料仕様(以下、「Ca 型難透水性覆土」とする)とした。しかし、難透水性覆土として Na 型ベントナイトを用いることも考えられる。Na 型ベントナイトは、Ca 型ベントナイトと比べ、優れた膨潤性により高い止水性が期待される。一方、セメント系材料から供給される Ca により、ベントナイトの主成分のモンモリロナイトの交換性陽イオンが Na から Ca に置き換わった場合、モンモリロナイトの膨潤特性を低下させ、難透水性覆土の止水性に悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、難透水性覆土の材料仕様を Na 型ベントナイトに変更した場合における、難透水性覆土中の等価透水係数の変遷を評価した。

2. 解析条件

(1) 難透水性覆土の鉱物組成

ここでは、Na 型ベントナイト(クニゲル V1)を 2 割配合した材料仕様(以下、「難透水性覆土(Na 型)」とする)とした。難透水性覆土の乾燥密度は 1.95Mg/m^3 と設定した。難透水性覆土の初期鉱物組成を第 1 表に示す。

第 1 表 難透水性覆土の初期鉱物組成

	Na 型ベントナイト(クニゲル V1)					
	モンモリロナイト				随伴鉱物	
	Na-Mont	Ca-Mont	K-Mont	Mg-Mont	カルセドニ	カルサイト
mol/L _{water} *1	1.25	0.31	0.02	0.02	8.22	0.31
*1: 空隙水 1L に対する鉱物の物質質量						

なお、その他の条件は補足 5 と同様とした。

3. 解析結果

(1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)

難透水性覆土中の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式とした現実的なモデル(補足 5 数式 3)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第 1 図に、1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第 2 図に示す。また、3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を第 3 図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第 4 図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第 5 図に示す。1 号廃棄物埋設地においても同様に、難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を第 6 図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第 7 図に、参

考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第 8 図に示す。

難透水性覆土の材料仕様を、Ca 型ベントナイト(クニボンド)を 3 割配合した材料仕様から Na 型ベントナイト(クニゲル V1)を 2 割配合した材料仕様に変更した場合、Na 型ベントナイトの主成分である Na 型モンモリロナイトの膨潤性により、初期の透水係数値は難透水性覆土(Ca 型)よりも低い値であった。

3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)の等価透水係数は、難透水性覆土(Ca 型)と同様、1,000 年後においても初期の透水係数値を維持していた。

一方、1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)の等価透水係数は、1,000 年後の段階で初期の透水係数値よりもわずかに高い値となった。難透水性覆土(Na 型)は、ベントナイトの配合率の減少及びベントナイト中のモンモリロナイトの割合の減少により、難透水性覆土中のモンモリロナイトの体積割合が大きく減少している。そのため、モンモリロナイトが溶解すると透水係数は大きく上昇する結果となった。それでも、高い止水性は維持されていることが確認された。

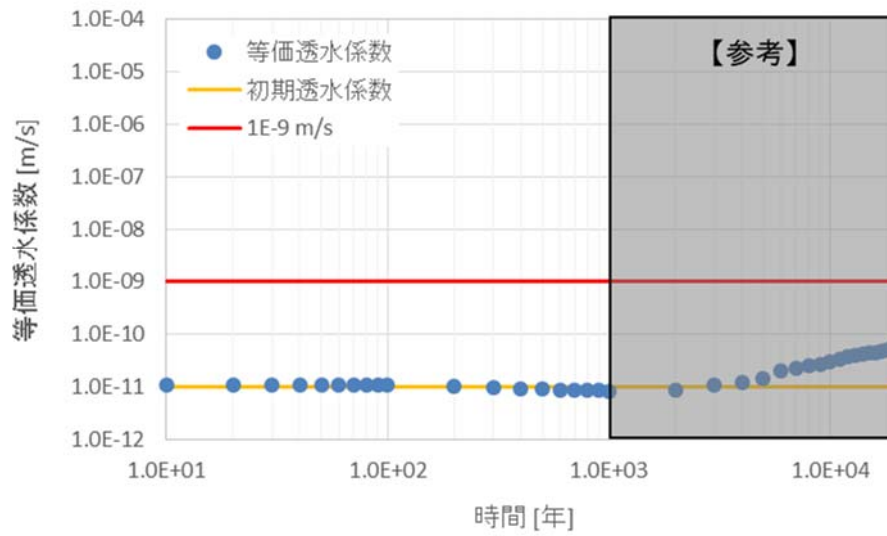
(2) 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合(ケース②)

難透水性覆土中の拡散係数モデルを、モンモリロナイトの割合を 0 とし、単純に空隙率に比例するとしたモデル(補足 5 数式 4)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。

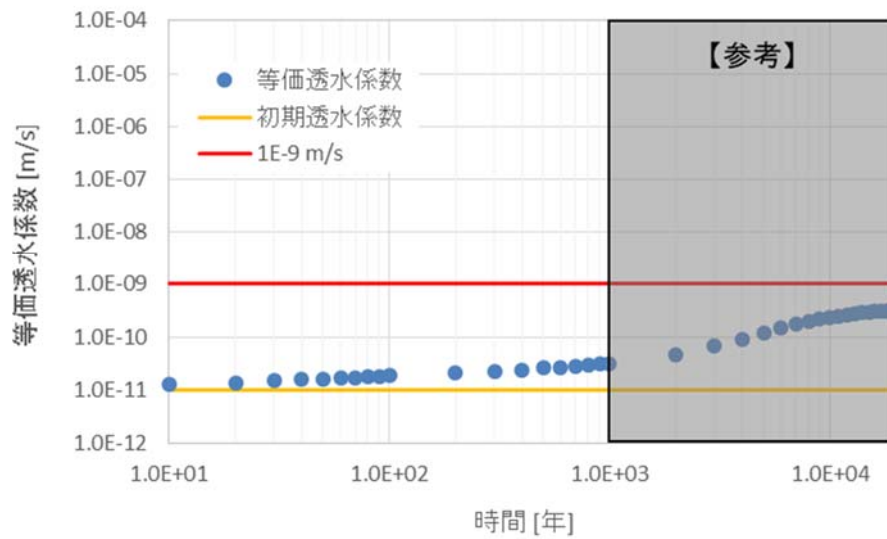
3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第 9 図に、1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を第 10 図に示す。また、3 号廃棄物埋設地の鉱物組成と透水係数の分布図を第 11 図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第 12 図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第 13 図に示す。1 号廃棄物埋設地においても同様に、鉱物組成と透水係数の分布図を第 14 図に、難透水性覆土内の液相組成分布図を第 15 図に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を第 16 図に示す。

3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)の等価透水係数は、(a)と同様、1,000 年後においても初期値を維持していた。

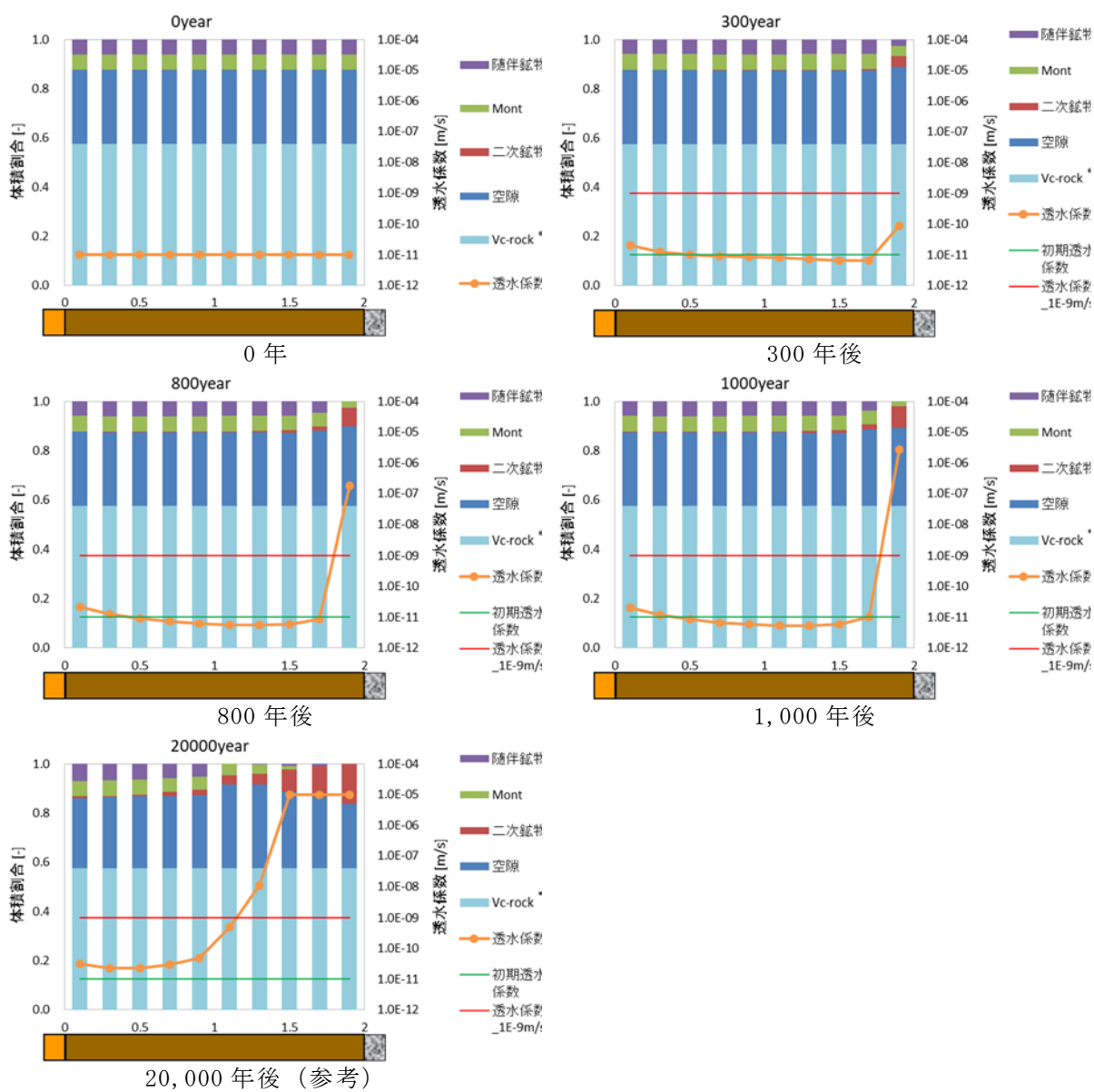
1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)の等価透水係数は、(a)と同様、1,000 年後の段階で初期の透水係数値よりも上昇した。それでも、低透水性が維持できる結果となった。



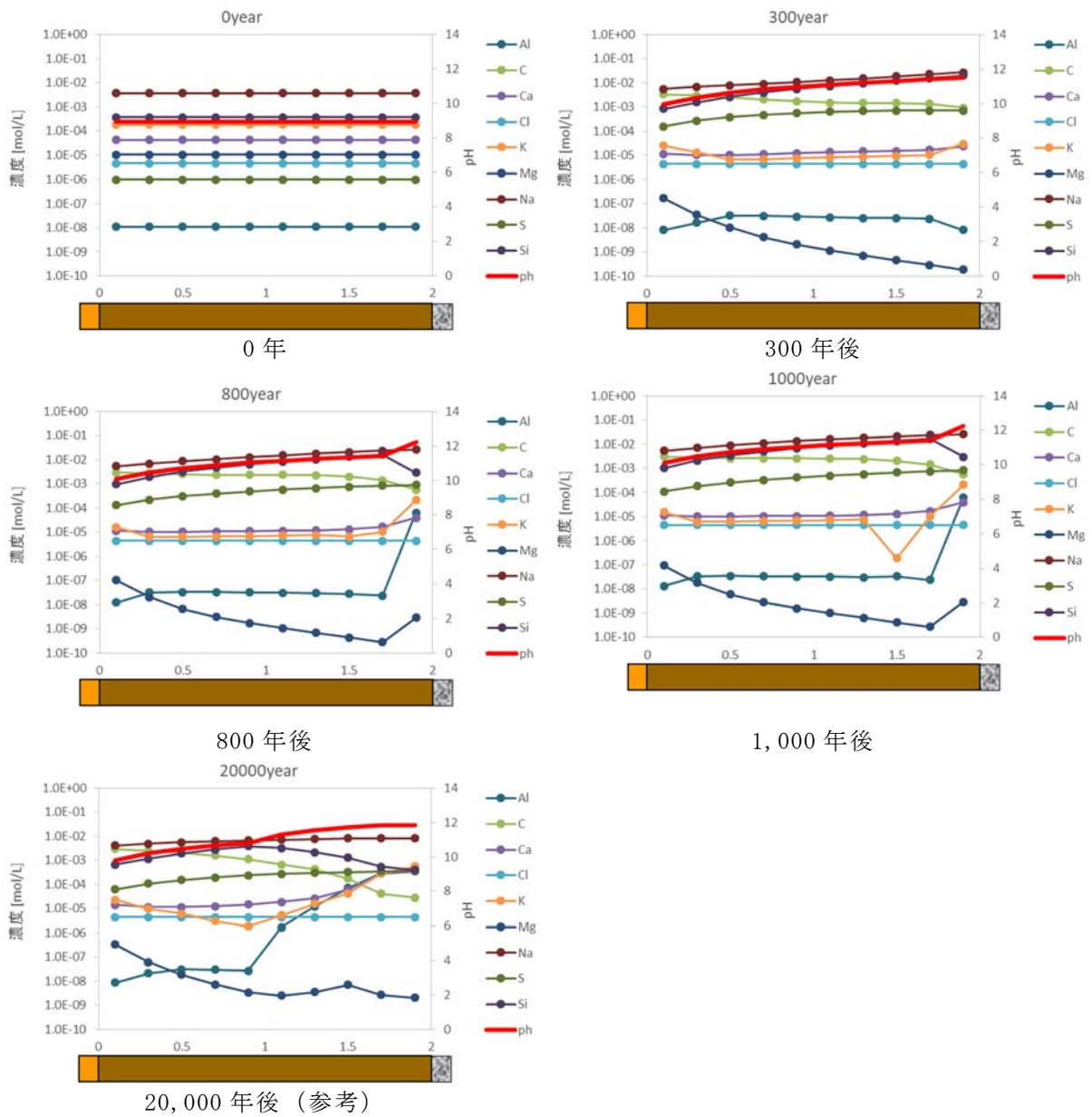
第 1 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土 (Na 型) における等価透水係数の時間変化の結果
 (ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



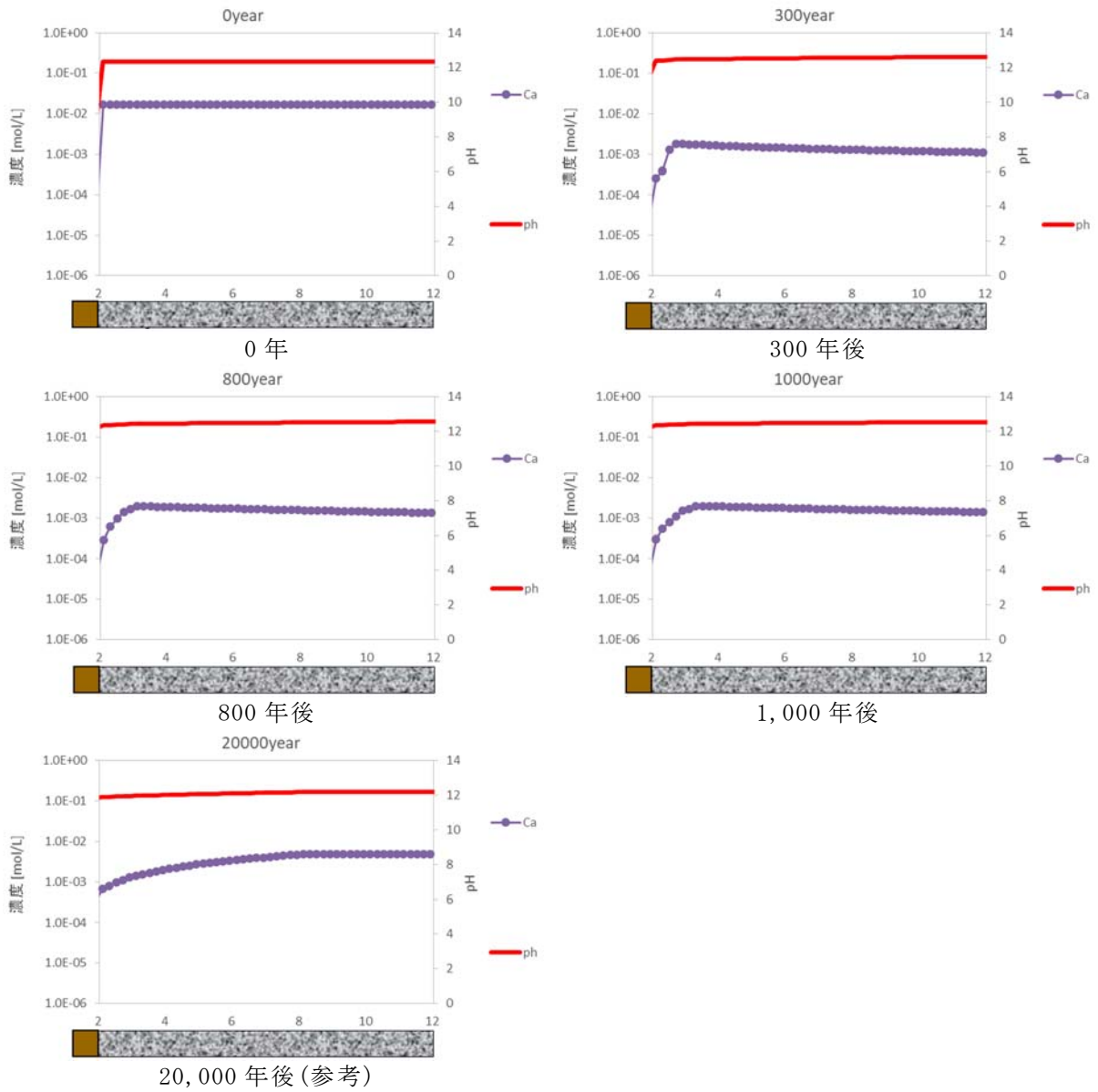
第 2 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土 (Na 型) における等価透水係数の時間変化の結果
 (ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



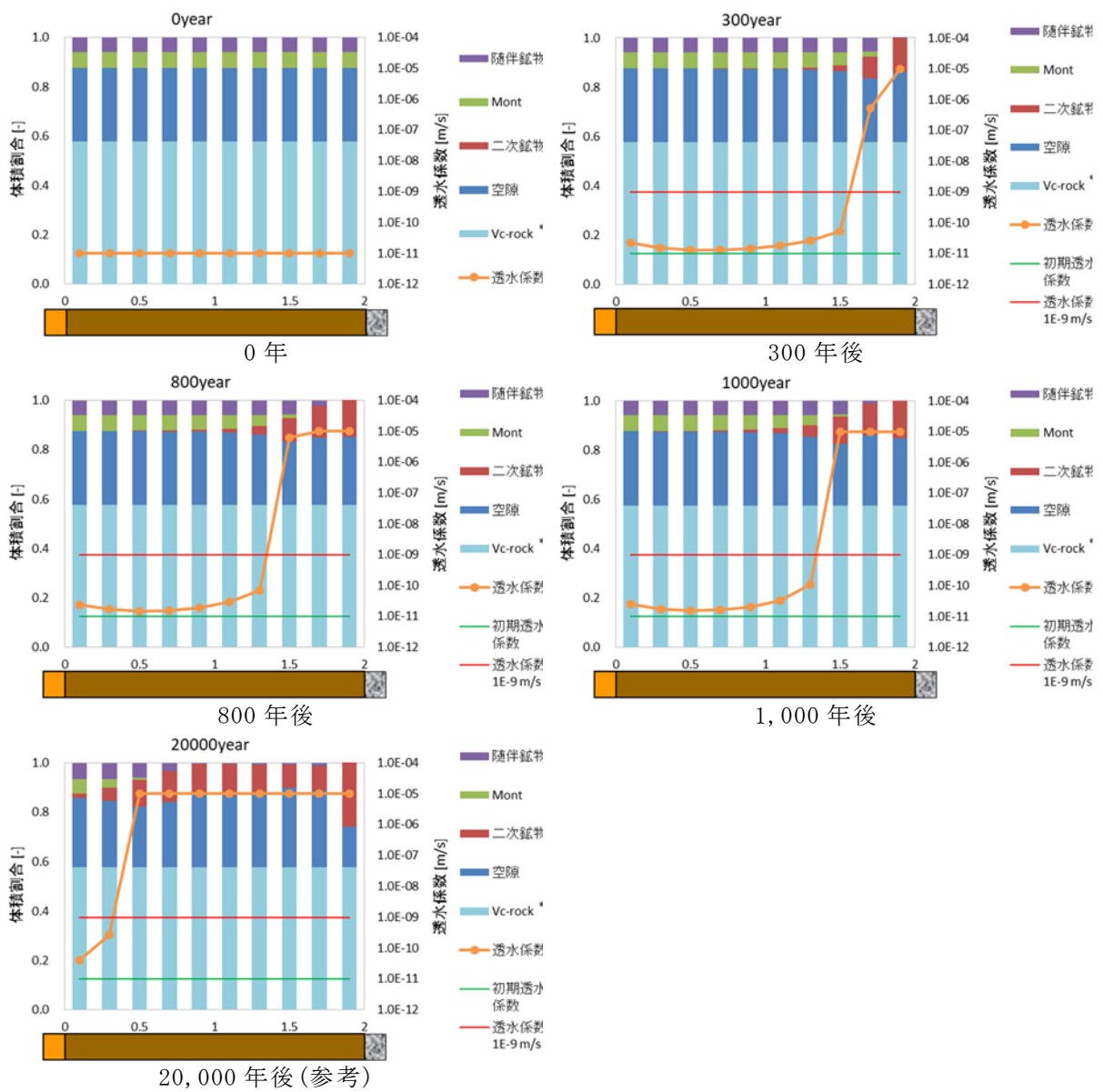
第 3 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土 (Na 型) における鉱物組成と透水係数の分布図
 (ケース① : 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



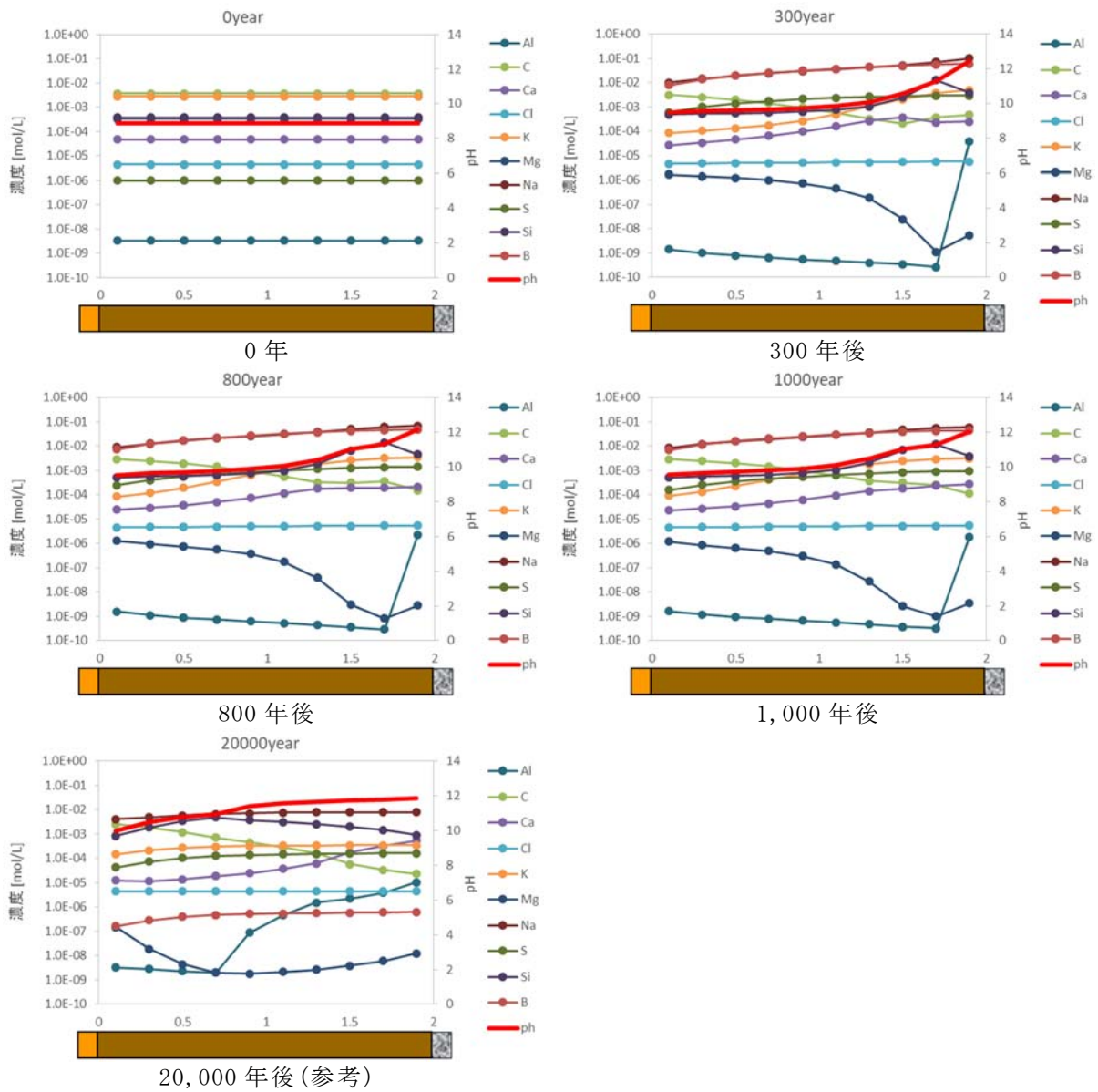
第4図 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na型)内の液相組成の分布図
 (ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



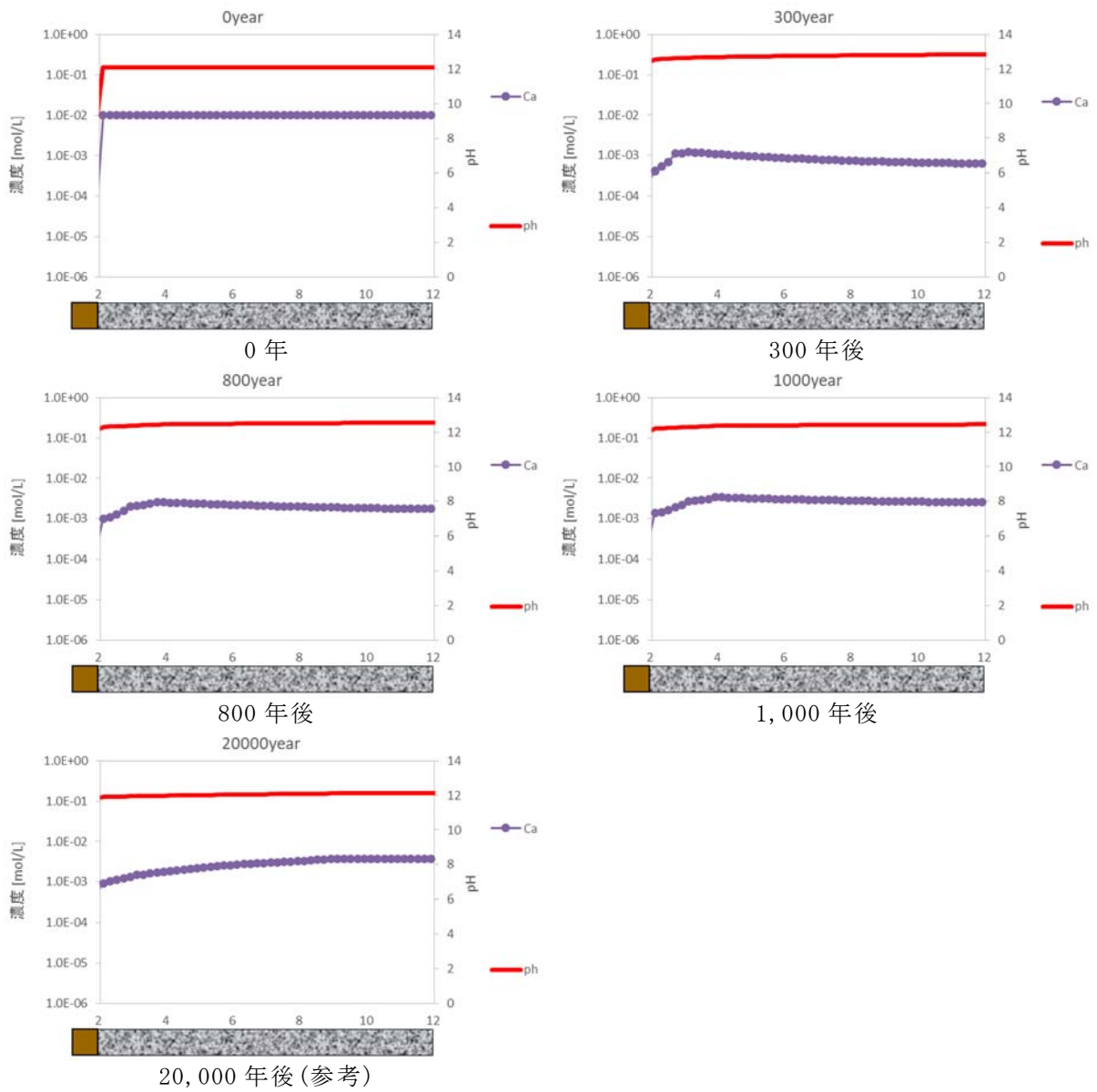
第5図 3号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成(pH、Ca濃度)の分布図
 (ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



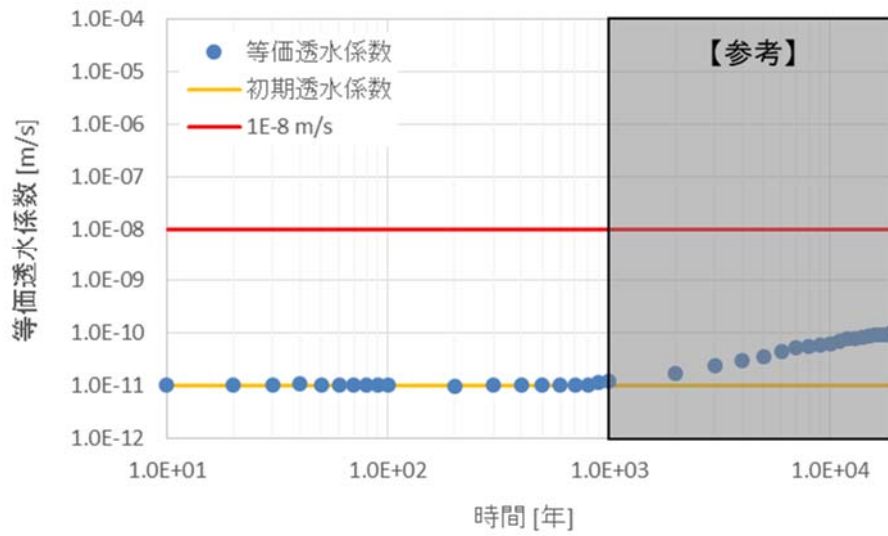
第 6 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土 (Na 型) における鉱物組成と透水係数の分布図
 (ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



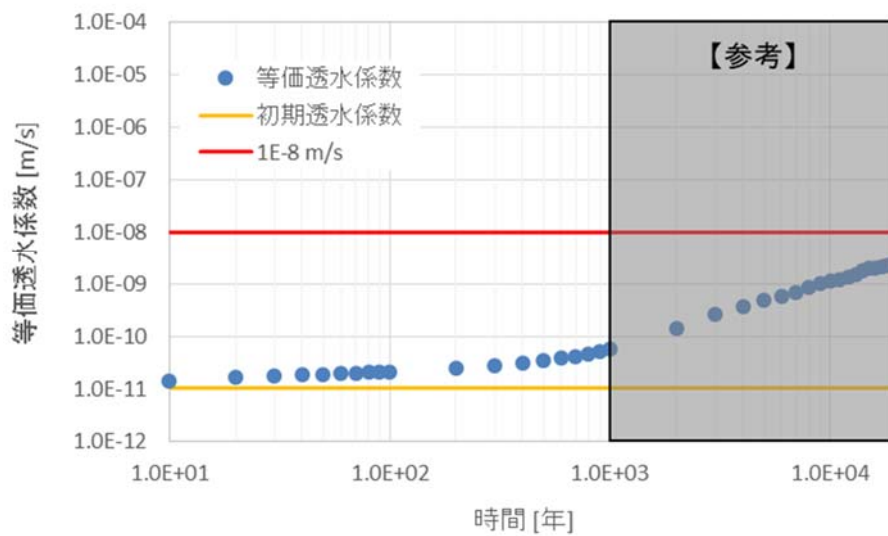
第7図 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na型)内の液相組成の分布図
(ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



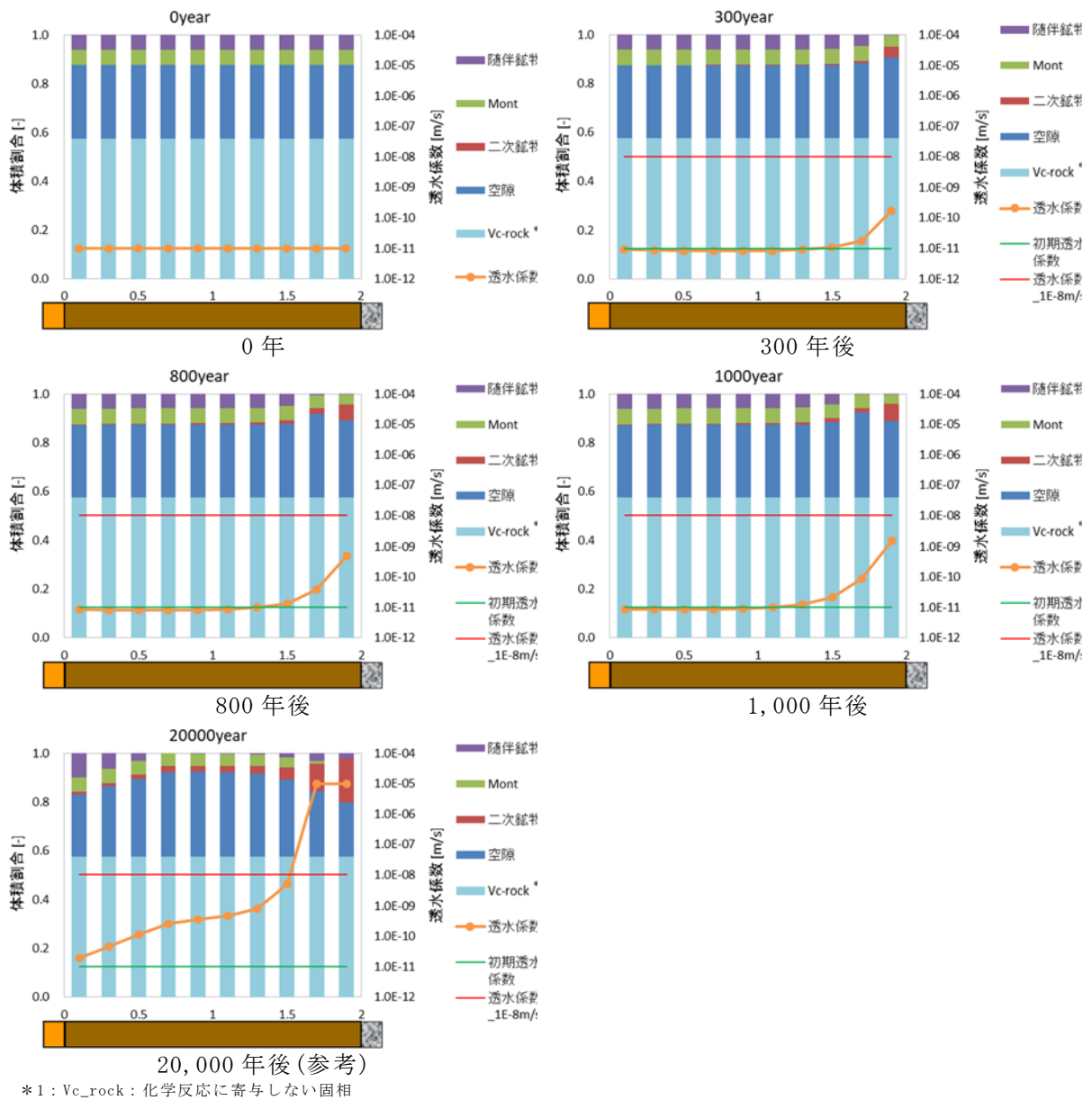
第8図 1号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成(pH、Ca濃度)の分布図
 (ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



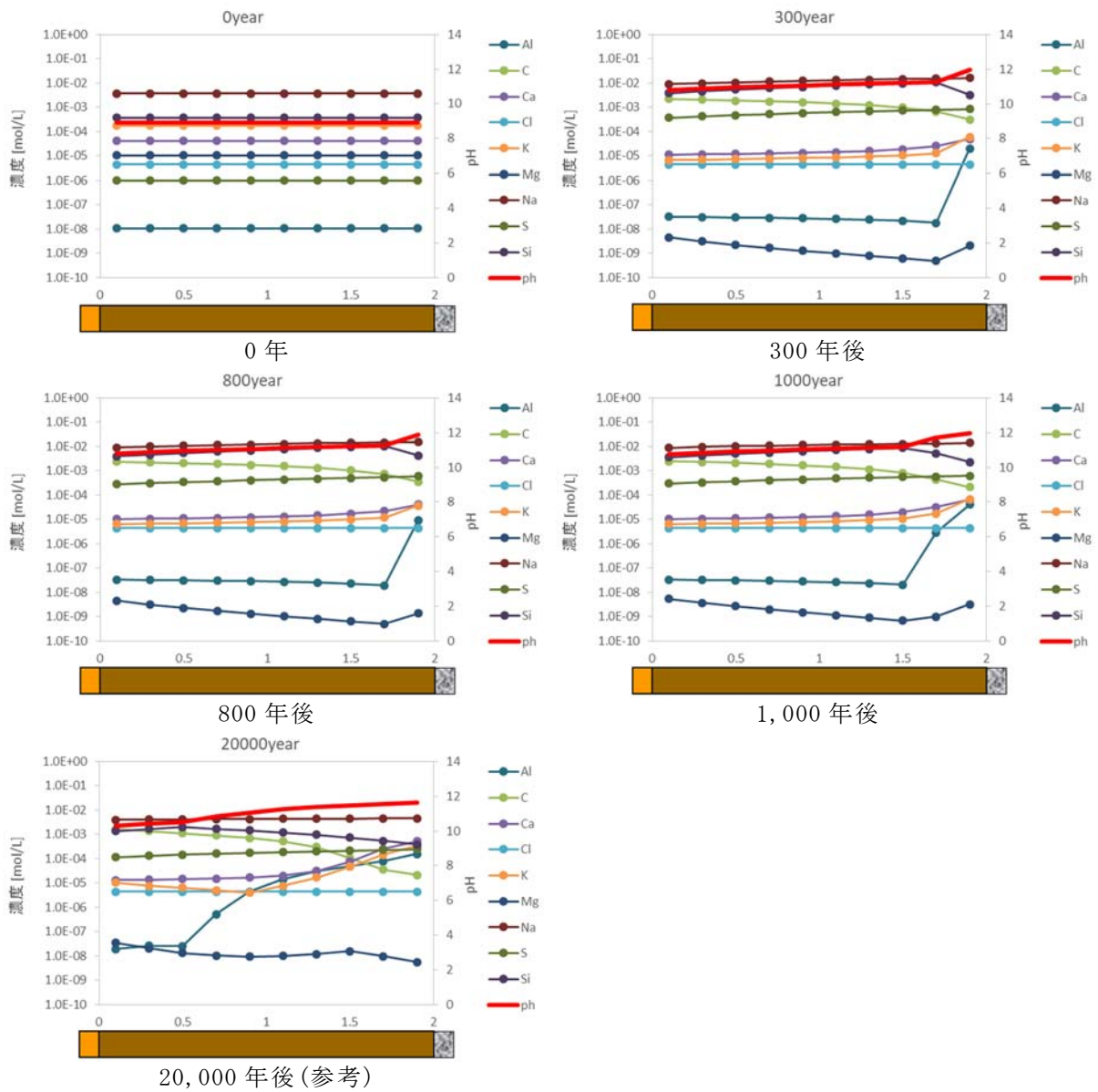
第 9 図 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na型)における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



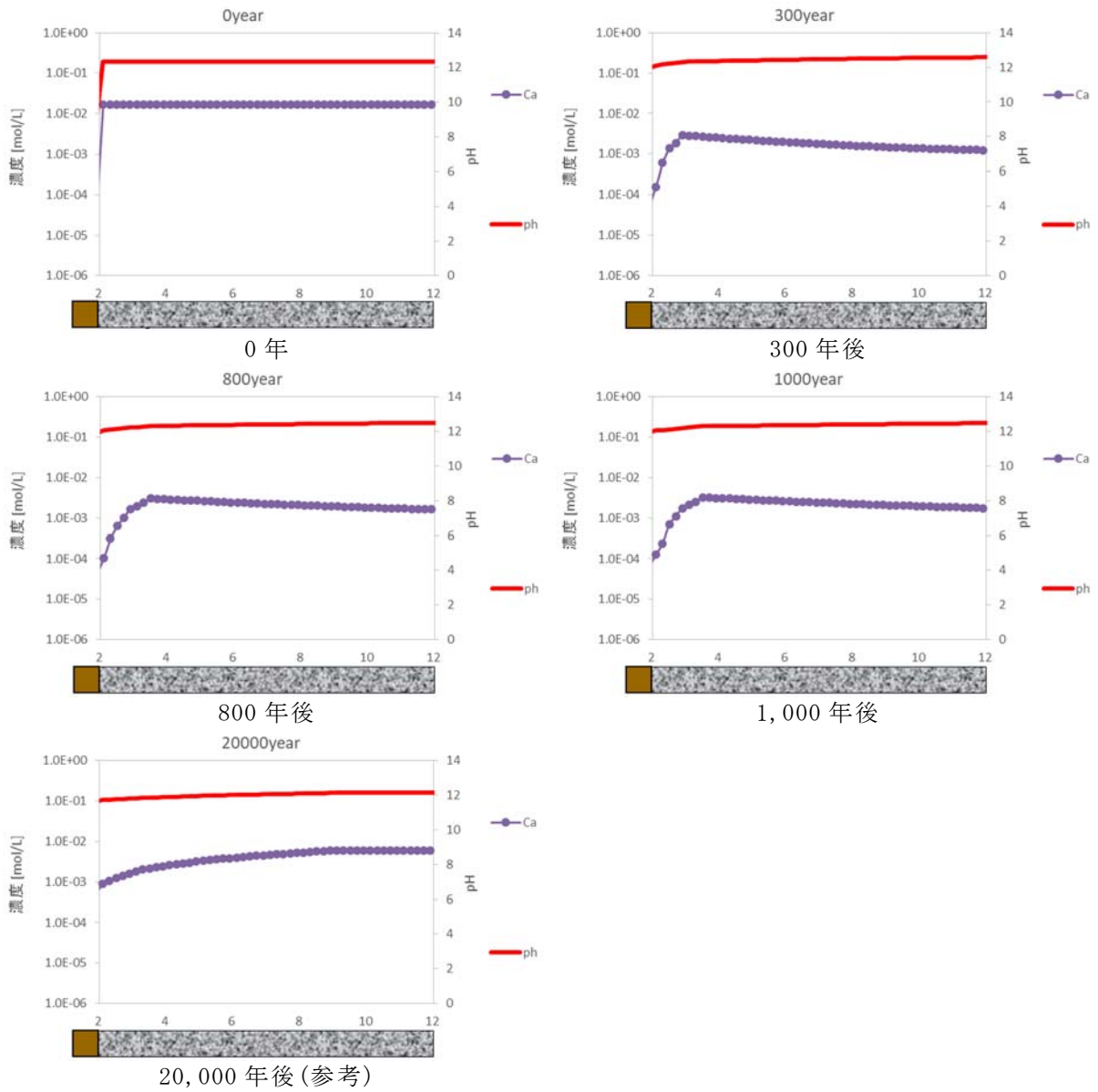
第 10 図 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na型)における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



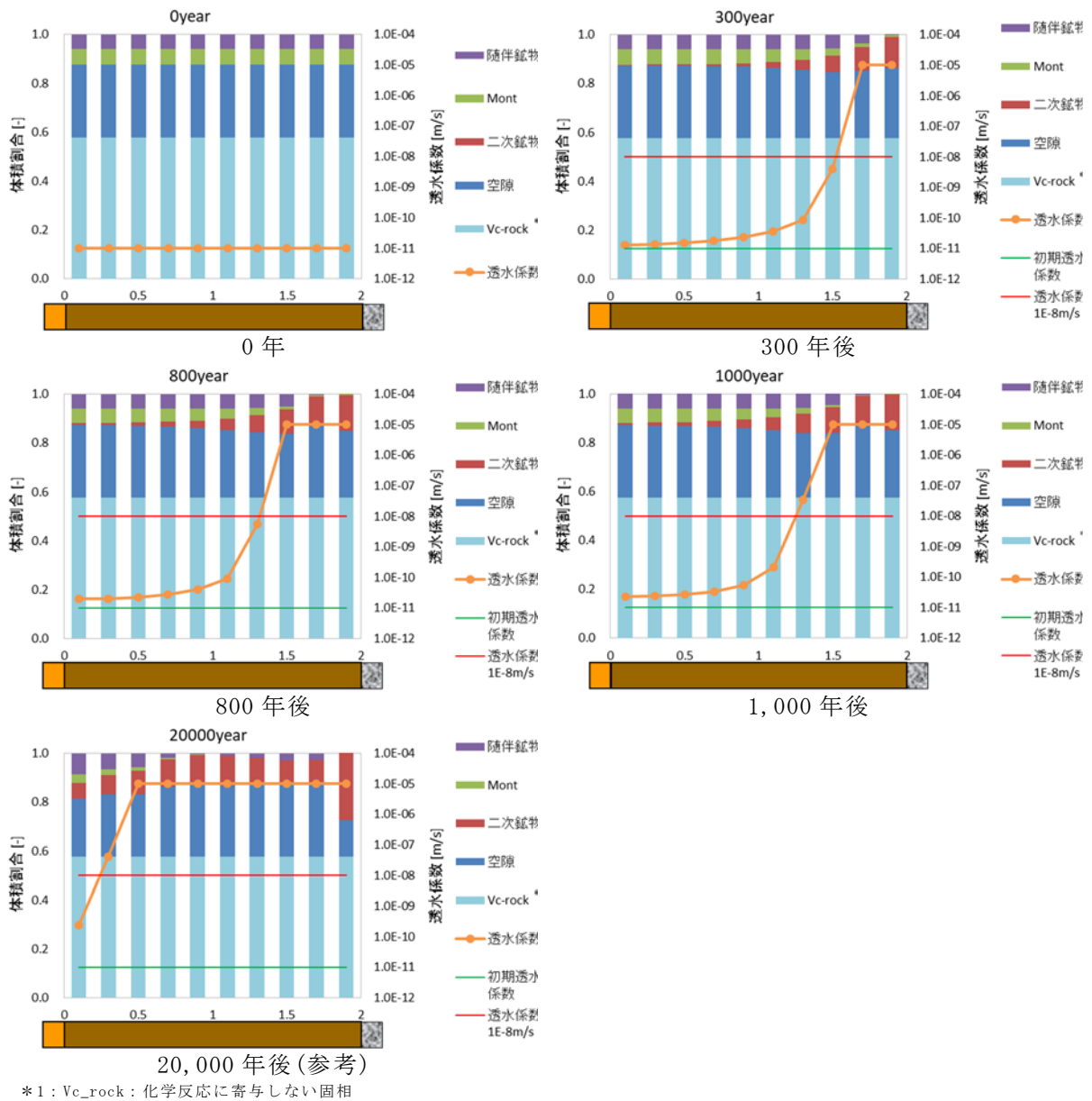
第 11 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース②: 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



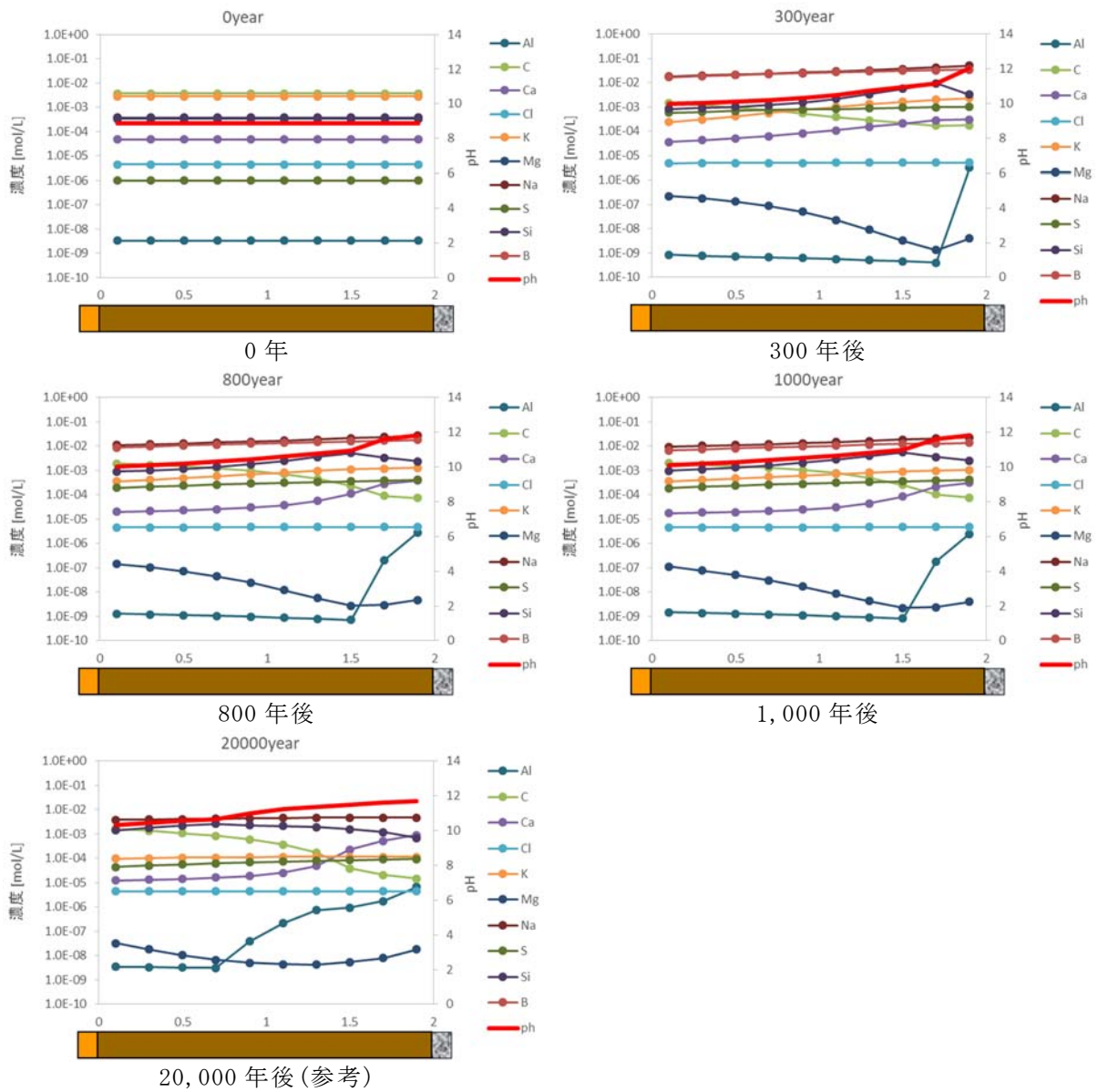
第 12 図 3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)における液相組成の分布図
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



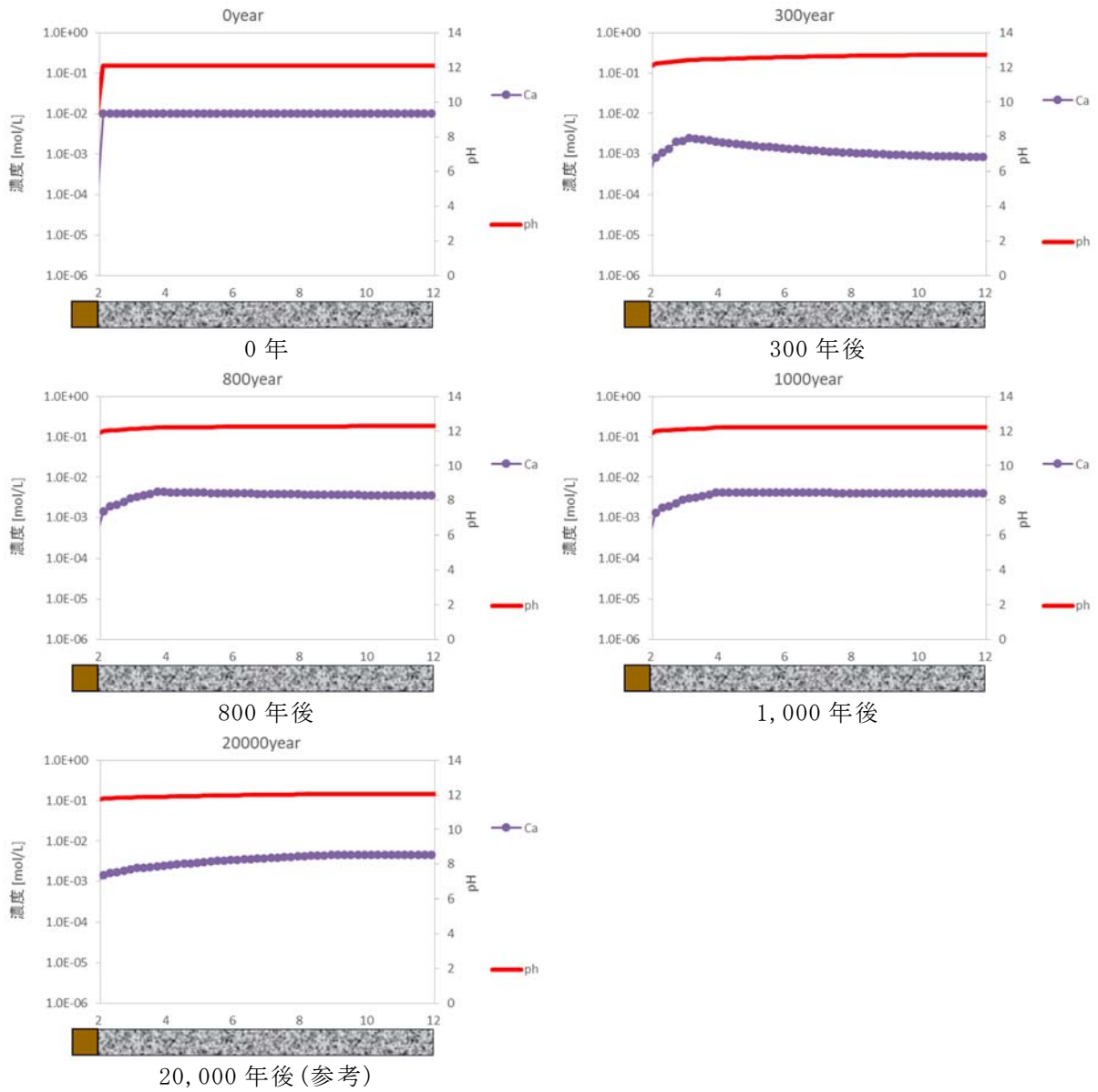
第 13 図 3 号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース②: 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



第 14 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース②: 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



第 15 図 1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土(Na 型)における液相組成の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



第 16 図 1 号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成 (pH、Ca 濃度) の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

4. まとめ

難透水性覆土の材料仕様を、Ca 型ベントナイト(クニボンド)を 3 割配合した材料仕様から、Na 型ベントナイト(クニゲル V1)を 2 割配合した材料仕様に変更した場合、Na 型ベントナイトの主成分である Na 型モンモリロナイトの優れた膨潤性より高い止水性を示していた。1,000 年後においても、3 号廃棄物埋設地では、その高い止水性が維持される結果となった。一方、難透水性覆土中のモンモリロナイトの体積割合が難透水性覆土(Ca 型)と比べて低いため、1 号廃棄物埋設地では、モンモリロナイトが溶解し透水係数は大きく上昇する結果となった。それでも、1,000 年後において、高い止水性が維持されていることが確認された。

以上より、長期的な化学的影響を考慮した難透水性覆土(Na 型)の線量評価上の透水係数は 1,000 年後において下記の値を基に設定する(第 2 表)。

第 2 表 化学的影響の評価結果(難透水性覆土のベントナイトを Na 型にした場合)

	3 号廃棄物埋設地 [m/s]		1 号廃棄物埋設地 [m/s]	
	ケース①*1	ケース②*2	ケース①*1	ケース②*2
0 年	1.00×10^{-11}	1.00×10^{-11}	1.00×10^{-11}	1.00×10^{-11}
1,000 年	1.07×10^{-11}	1.23×10^{-11}	3.20×10^{-11}	5.73×10^{-11}

*1：難透水性覆土中の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式(補足 5 数式 3)とする現実的な設定をした場合

*2：難透水性覆土中の拡散係数モデルを、モンモリロナイトの割合を 0 とし単純に空隙率に比例するという単純な設定(補足 5 数式 4)とした場合

以上

廃棄物埋設施設における
許可基準規則への適合性について

第十条 廃棄物埋設地のうち第四号

(廃止措置の開始後の評価)

廃棄物埋設地の状態設定

－透水係数の設定－

2020年12月

日本原燃株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 状態変化の評価.....	2
(1) 力学的影響.....	2
(2) 化学的影響.....	4
(3) 状態変化の重畳.....	6
3. 廃棄物埋設地の状態設定.....	8
(1) 覆土の状態設定.....	9
(2) 難透水性覆土及び下部覆土の等価透水係数.....	12
(3) その他の廃棄物埋設地の状態設定.....	16

参考資料 1 低透水性を有する覆土に対して等価透水係数を設定することの妥当性

参考資料 2 特性の異なるベントナイト混合土を用いた場合の等価透水係数の確認

1. はじめに

本資料は「第十条廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)」のうち廃棄物埋設地の状態設定(透水係数の設定)を補足説明するものである。

覆土の透水係数及び厚さに対する状態変化の評価に基づき、廃棄物埋設地の長期状態を設定する。「補足説明資料 4_力学的影響」及び「補足説明資料 5_化学的影響」の評価結果を基に、力学的影響及び化学的影響を考慮した廃棄物埋設地の状態を設定し、線量評価に用いる覆土の等価透水係数を算出する。

なお、水理的影響により大きな状態変化は発生しないことから、状態設定においては直接的な影響として考慮しないものとする。

状態設定においては、埋設設備内に含まれる廃棄体の種類によって評価が異なることから、1号、2号及び3号廃棄物埋設地で個別に設定を行う。

また、廃棄物埋設地における埋設設備及び地盤についても状態設定を行い、透水係数を設定する。

2. 状態変化の評価

(1) 力学的影響

金属及び埋設設備の膨張並びに埋設設備の陥没に起因する影響において、DEM 解析により覆土の低透水性（透水係数及び覆土厚さ）への影響評価をした結果から、透水係数に変化は生じないものの覆土厚さに力学的変形が生じると評価する。（詳細は「補足説明資料 4_力学的影響」を参照）

(i) 難透水性覆土の変形

a. 埋設設備の膨張による覆土の変形

難透水性覆土の状況を第 1 表に示す。確からしい設定においては開口が生じず、膨張量の大きい 2 号及び 3 号埋設設備の厳しい設定において 2m の開口が生じると評価する。

第 1 表 埋設設備膨張量及び覆土状況

		1,000 年後	
		確からしい設定	厳しい設定
3 号	埋設設備膨張量[m]	0.35	5.0
	難透水性覆土の状況	厚さが 1m 以上残る (開口無し)	隅角部が 2m 開口
1 号	埋設設備膨張量[m]	0.0332	1.26
	難透水性覆土の状況	厚さが 1m 以上残る (開口無し)	埋設設備隅角部に 厚さがほぼ残らない (開口無し)
2 号	埋設設備膨張量[m]	0.164	2.25
	難透水性覆土の状況	厚さが 1m 以上残る (開口無し)	隅角部が 2m 開口

b. 埋設設備の陥没による覆土の変形

難透水性覆土の状況を第2表に示す。確からしい設定及び厳しい設定において、ともに破断や厚さの変化が生じないと評価する。

第2表 埋設設備陥没量及び覆土状況

		1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
1号	埋設設備陥没量 [m]	1.0	1.0
	難透水性覆土 の状況	厚さの変化 無し	厚さの変化 無し

(ii) 下部覆土の変形

破断や厚さの変化が生じないと評価する。

(2) 化学的影響

地球化学解析を用いて等価透水係数の変遷を評価した結果から、透水係数に化学的変質が生じると評価する。(詳細は「補足説明資料 5_化学的影響」を参照)

(i) 難透水性覆土の変質

難透水性覆土の変質後における透水係数及び変質フロント(透水係数が初期値を下回る領域の到達点)に対する覆土の残り長さ(以下「健全部残長」という。)を第3表に示す。化学的影響は難透水性覆土内に留まると評価する。

第3表 変質後の難透水性覆土の透水係数及び健全部残長

		1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
3号	透水係数[m/s]	1.01×10^{-10}	1.02×10^{-10}
	健全部残長[m]	1.6	1.2
1号	透水係数[m/s]	1.42×10^{-10}	1.84×10^{-10}
	健全部残長[m]	0.8	0.2
2号*1	透水係数[m/s]	1.01×10^{-10}	1.02×10^{-10}
	健全部残長[m]	1.6	1.2

*1:3号の結果を流用

(ii) 下部覆土の変質

下部覆土の変質後における透水係数及び健全部残長を第4表に示す。下部覆土は化学的影響により変質を受けないと評価する。変質を受ける場合においても、直近の難透水性覆土の影響度合いが小さく、下部覆土に対する影響範囲は限定的であり、健全部残長は1.5m以上であると評価する。

なお、変質後の透水係数に関しても $1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 以下であると評価する。

第4表 変質後の下部覆土の透水係数

		1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
3号	透水係数[m/s]	—	—
	健全部残長[m]	2.0	2.0
1号	透水係数[m/s]	—	—
	健全部残長[m]	2.0	2.0
2号	透水係数[m/s]	—	—
	健全部残長[m]	2.0	2.0

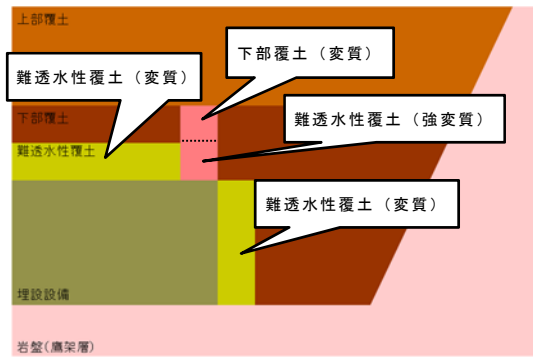
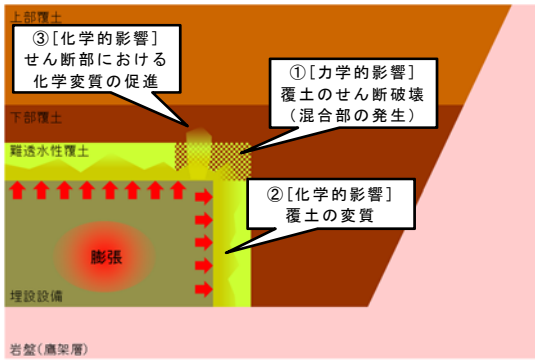
(3) 状態変化の重畳

力学的影響により覆土は変形するが、透水係数は変化しないと評価している。ここで、化学的影響による透水係数上昇の主要因であるモンモリロナイトの溶解については、微粒分の変質現象であり、変形特性に対する影響は軽微であると考えられる。

化学的影響により覆土の透水係数が増加すると評価している。ここで、力学的影響では透水係数が増加しないため、覆土の変質要因である化学物質の供給量に対する影響は軽微であると考えられる。

以上のことから、力学的影響及び化学的影響は相互干渉せずに、独立して覆土に影響を与えると判断するが、状態設定においては、透水係数の増加を局所的に見込むものとする。

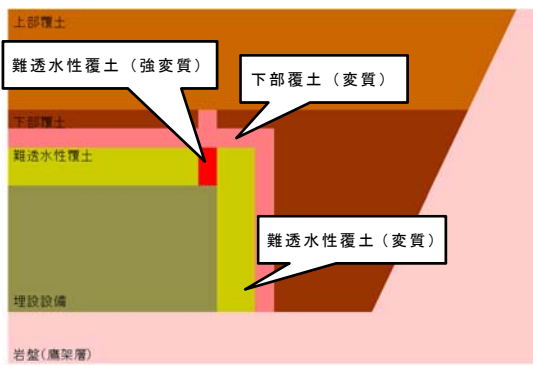
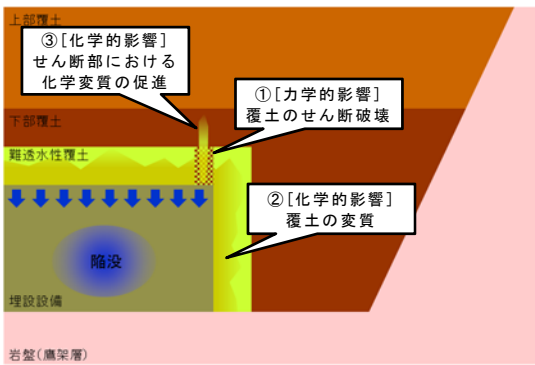
力学的影響及び化学的影響を重ね合わせた概念図について、力学的影響における変形形態の整理に倣い、埋設設備膨張時の状態変化及び状態設定の概念図を第1図に、埋設設備陥没時の状態変化及び状態設定の概念図を第2図に示す。



a. 状態設定で想定する状態変化の重畳

b. 覆土の状態設定

第 1 図 埋設設備膨張時の状態変化及び状態設定の概念図



a. 状態設定で想定する状態変化の重畳

b. 覆土の状態設定

第 2 図 埋設設備陥没時の状態変化及び状態設定の概念図

3. 廃棄物埋設地の状態設定

評価結果を基に、力学的影響及び化学的影響を考慮した廃棄物埋設地の状態を設定する。

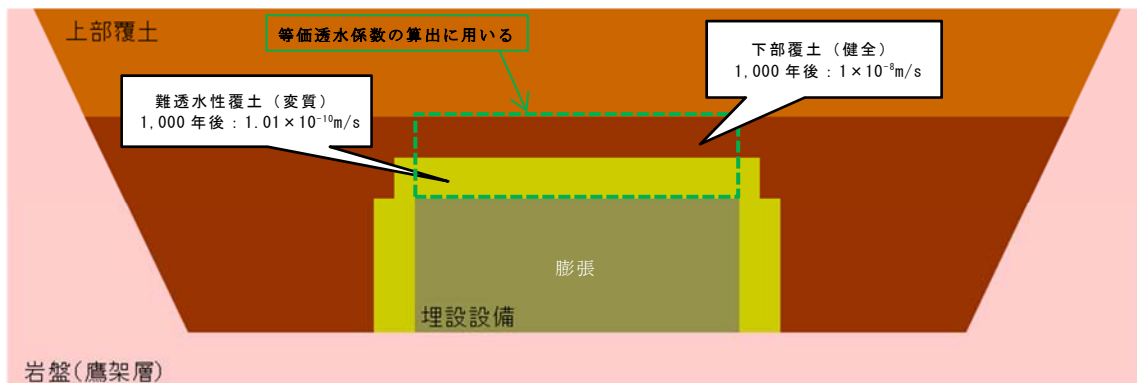
なお、側方の覆土状態に比べ、上方の覆土状態の変質度合いが大きいことから、埋設設備を取り囲む覆土の等価透水係数を算出する際には、上方の覆土状態を対象とした等価透水係数にて代表させる。

(1) 覆土の状態設定

(i) 3号廃棄物埋設地

a. 確からしい設定（開口が生じないケース）

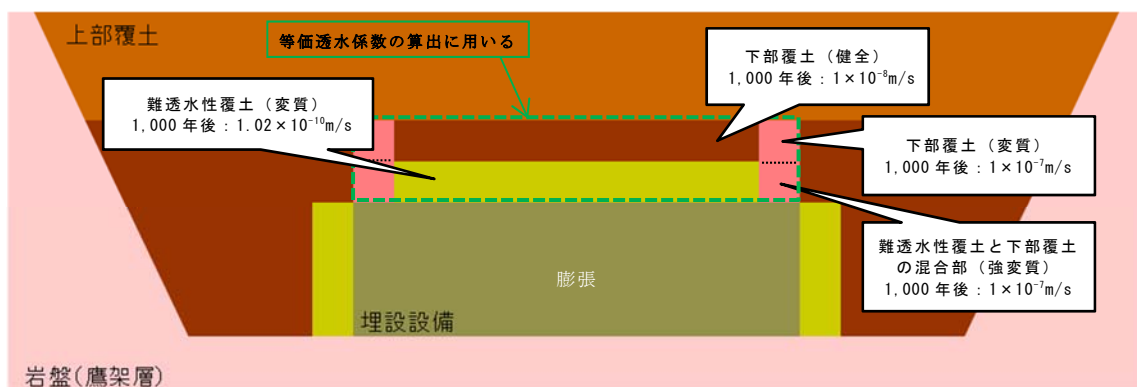
力学的影響により開口を生じないことから、化学的影響による変質のみによる状態を設定する。設定した状態を第3図に示す。



第3図 3号廃棄物埋設地の状態設定（確からしい設定）

b. 厳しい設定（2mの開口が生じるケース）

開口部付近の「難透水性覆土と下部覆土の混合部（強変質）」においては化学変質が促進されるものとして、透水係数を変質後から更に2オーダー以上引き上げた状態を設定する。それ以外の箇所においては、化学的影響による変質のみとする。設定した状態を第4図に示す。

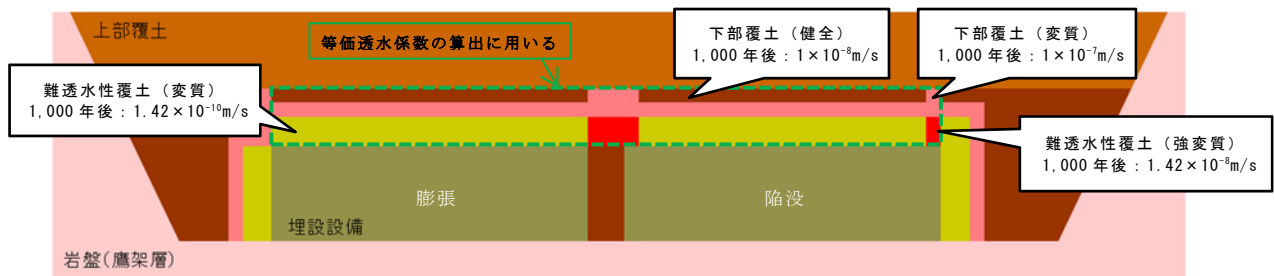


第4図 3号廃棄物埋設地の状態設定（厳しい設定）

(ii) 1号廃棄物埋設地

a. 確からしい設定（開口が生じないケース）

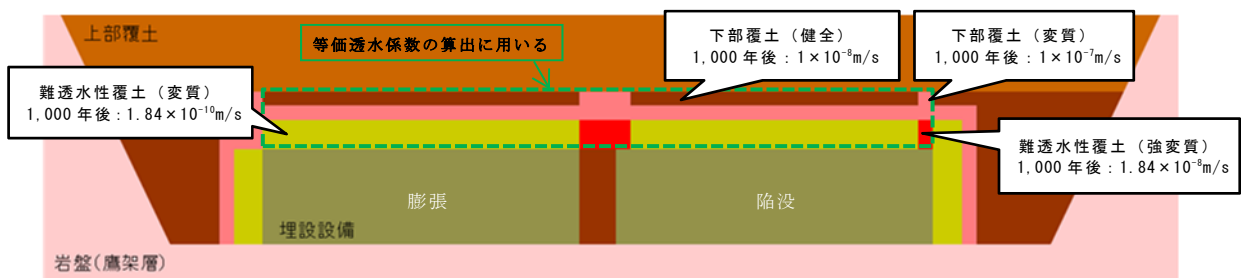
力学的影響により開口を生じないが、陥没によるせん断部付近の「難透水性覆土（強変質）」においては化学変質が促進されるものとして透水係数を変質後から更に2オーダー引き上げた状態を設定する。それ以外の箇所においては、化学的影響による変質のみとする。設定した状態を第5図に示す。



第5図 1号廃棄物埋設地の状態設定（確からしい設定）

b. 厳しい設定（開口が生じないケース）

力学的影響により開口を生じないが、陥没によるせん断部付近の「難透水性覆土（強変質）」においては化学変質が促進されるものとして透水係数を変質後から更に2オーダー引き上げた状態を設定する。それ以外の箇所においては、化学的影響による変質のみとする。設定した状態を第6図に示す。

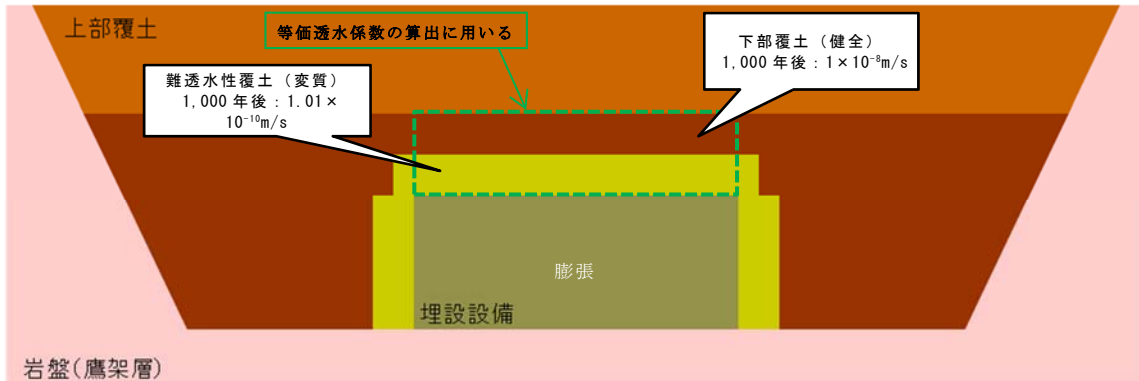


第6図 1号廃棄物埋設地の状態設定（厳しい設定）

(iii) 2号廃棄物埋設地

a. 確からしい設定（開口が生じないケース）

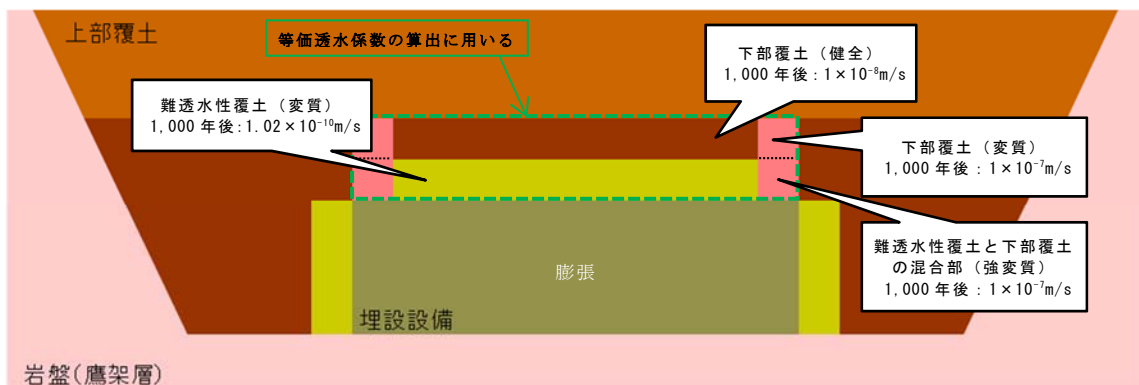
力学的影響により開口を生じないことから、化学的影響による変質のみによる状態を設定する。設定した状態を第7図に示す。



第7図 2号廃棄物埋設地の状態設定（確からしい設定）

b. 厳しい設定（2mの開口が生じるケース）

開口部付近の「難透水性覆土と下部覆土の混合部」においては化学変質が促進されるものとして、透水係数を変質後から更に2オーダー以上引き上げた状態を設定する。それ以外の箇所においては、化学的影響による変質のみとする。設定した状態を第8図に示す。



第8図 2号廃棄物埋設地の状態設定（厳しい設定）

(2) 難透水性覆土及び下部覆土の等価透水係数

覆土の状態設定を用いて、難透水性覆土及び下部覆土の等価透水係数を算出する。側方の覆土状態に比べ、上方の覆土状態の変質度合いが大きいため、埋設設備の上方の覆土を対象に等価透水係数を算出し、流出水量の計算において上方及び側方の透水係数として用いる。したがって、覆土内の地下水の流動方向によらず、埋設設備から外部への核種移行を検討する際に用いる最も保守的な等価透水係数となる。

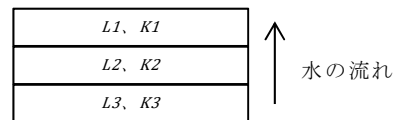
なお、透水係数の異なる複数の土質材料が存在していることから、以下に示す直列方向の合成と並列方向の合成を組み合わせることで、覆土の等価透水係数を算出する。

<鉛直直列方向の合成式>

$$K = \frac{\sum L_i}{\sum (L_i / K_i)}$$

L_i : i 番目の層の覆土厚さ [m]

K_i : i 番目の層の透水係数 [m/s]

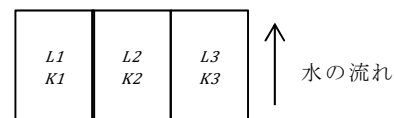


<鉛直並列方向の合成式>

$$K = \frac{\sum (K_i \times L_i)}{\sum L_i}$$

L_i : i 列目の覆土幅 [m]

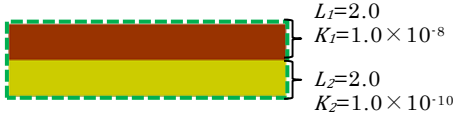
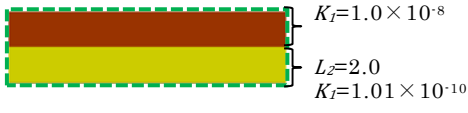
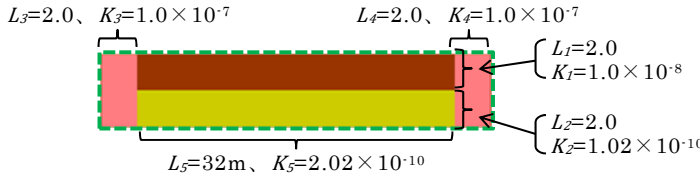
K_i : i 列目の透水係数 [m/s]



(i) 3号廃棄物埋設地における覆土の等価透水係数

覆土の透水係数設定及び等価透水係数を第5表及び第6表に示す。

第5表 覆土の透水係数設定 (3号廃棄物埋設地)

時期	—
0年 (初期)	
時期	確からしい設定
1,000年後	
時期	厳しい設定
1,000年後	

L : 長さ (m)、 K : 透水係数 (m/s)

第6表 覆土の等価透水係数 (3号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
計算値[m/s]	1.98×10^{-10}	2.00×10^{-10}	1.13×10^{-8}
設定値[m/s]	—	2.00×10^{-10}	1.50×10^{-8}

(ii) 1号廃棄物埋設地における覆土の等価透水係数

覆土の透水係数設定及び等価透水係数を第7表及び第8表に示す。

第7表 覆土の透水係数設定 (1号廃棄物埋設地)

時期	—	
0年 (初期)		
時期	確からしい設定	
1,000年後		
時期	厳しい設定	
1,000年後		

L : 長さ (m)、 K : 透水係数 (m/s)

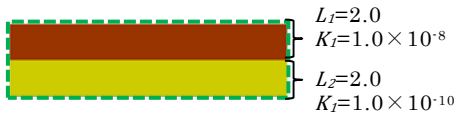
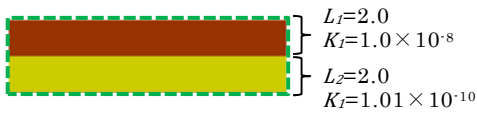
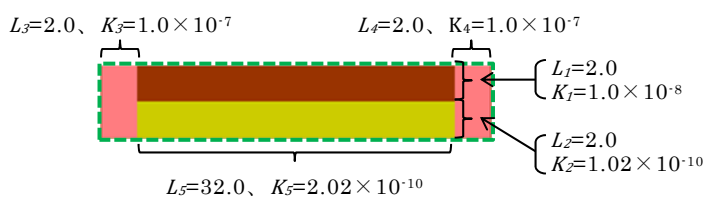
第8表 覆土の等価透水係数 (1号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
計算値[m/s]	1.98×10^{-10}	2.39×10^{-9}	3.00×10^{-9}
設定値[m/s]	—	2.50×10^{-9}	3.00×10^{-9}

(iii) 2号廃棄物埋設地における覆土の等価透水係数

覆土の透水係数設定及び等価透水係数を第9表及び第10表に示す。

第9表 覆土の透水係数設定 (2号廃棄物埋設地)

時期	—
0年 (初期)	
時期	確からしい設定
1,000年後	
時期	厳しい設定
1,000年後	

L : 長さ (m)、 K : 透水係数 (m/s)

第10表 覆土の等価透水係数 (2号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
計算値 [m/s]	1.98×10^{-10}	2.00×10^{-10}	1.13×10^{-8}
設定値 [m/s]	—	2.00×10^{-10}	1.50×10^{-8}

(3) その他の廃棄物埋設地の状態設定

廃棄物埋設地における埋設設備及び地盤について、以下のとおり状態設定を行い、1,000年後の透水係数を設定する。

(i) 埋設設備

コンクリート構造物である埋設設備は、エトリングガイトの生成による内部破壊やセメントの溶脱による固結性低下により、長期状態においてほぼ砂程度の状態となることが想定される。そのため、確からしい設定及び厳しい設定における透水係数を $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ と設定する。

(ii) 岩盤（「補足説明資料 1_地質環境に係る長期変動事象」を参照）

断層運動及び地震の影響により岩盤の透水性は大きく変化しないと想定される。そのため、長期状態における透水係数は初期値のまま継続すると設定する。地盤の透水係数を第 11 表に示す。

第 11 表 地盤の透水係数

ケース	材料区分	3号廃棄物埋設地 [m/s]	1号廃棄物埋設地 [m/s]	2号廃棄物埋設地 [m/s]
確からしい 設定	第四紀層	3.0×10^{-6}	2.5×10^{-6}	3.6×10^{-6}
	鷹架層	5.0×10^{-8}	1.1×10^{-7}	7.8×10^{-8}
厳しい 設定	第四紀層	3.0×10^{-6}	2.5×10^{-6}	3.6×10^{-6}
	鷹架層	5.0×10^{-8}	1.1×10^{-7}	7.8×10^{-8}

低透水性を有する覆土に対して
等価透水係数を設定することの妥当性

目次

1. はじめに.....	1
2. 妥当性の確認方法.....	1
3. 確認結果.....	3

1. はじめに

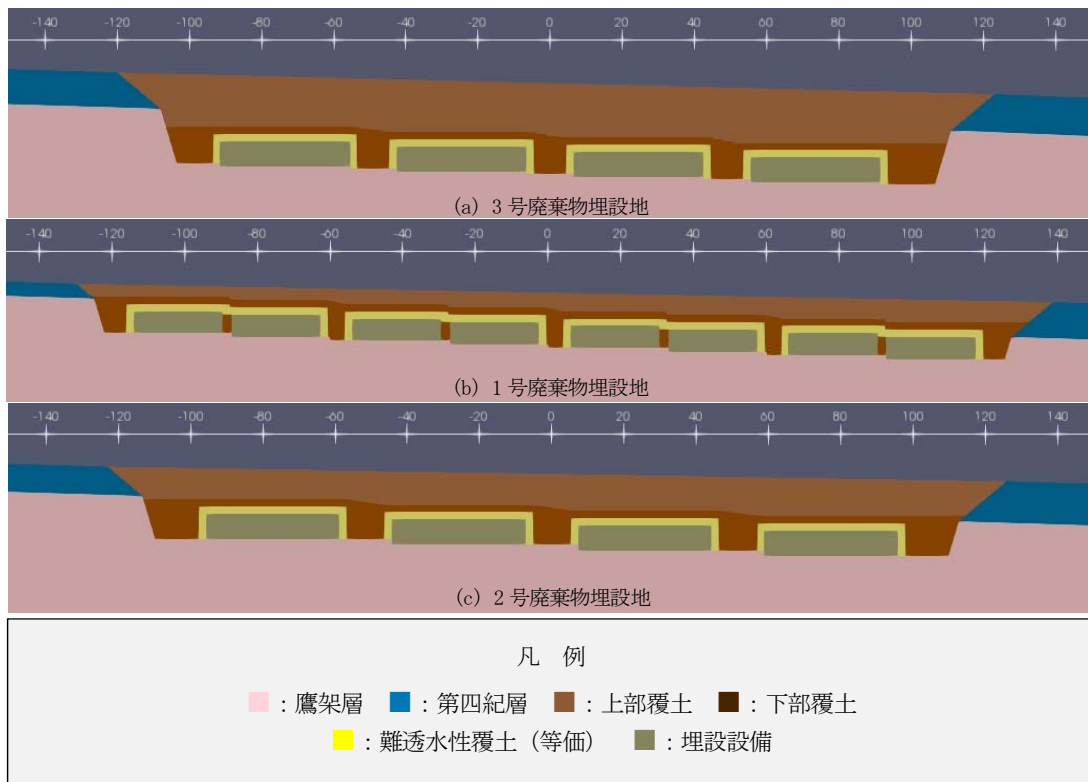
本資料は、2次元地下水浸透流解析で等価透水係数を設定することの妥当性を示すものである。

なお、2次元地下水浸透流解析は、線量評価パラメータである「埋設設備から覆土及び鷹架層への流出水量」を求めるために利用している。一方で、線量評価は1次元モデルにより解析を実施していることから、前段の2次元地下水浸透流解析においては、埋設設備から周辺への移行経路をモデリングしやすいように、低透水性を有する覆土の劣化後の透水係数を等価透水係数として設定している。

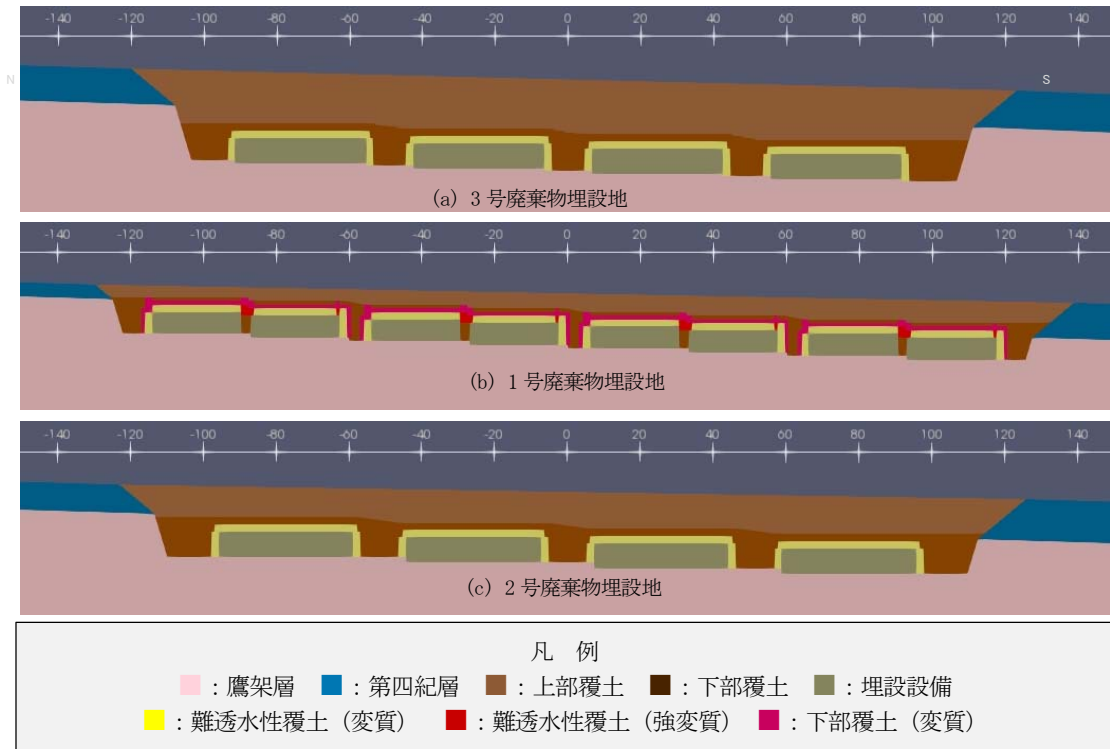
2. 妥当性の確認方法

力学的影響及び化学的影響を考慮した状態設定に従い、変質部の透水係数を部分的に配置したモデル（劣化箇所反映モデル）を第1図から第3図に示す。本モデルを用いて流出水量を算出後、等価透水係数を用いたモデル（等価透水係数モデル）による流出水量と比較し、必要に応じて線量評価により影響を確認する。

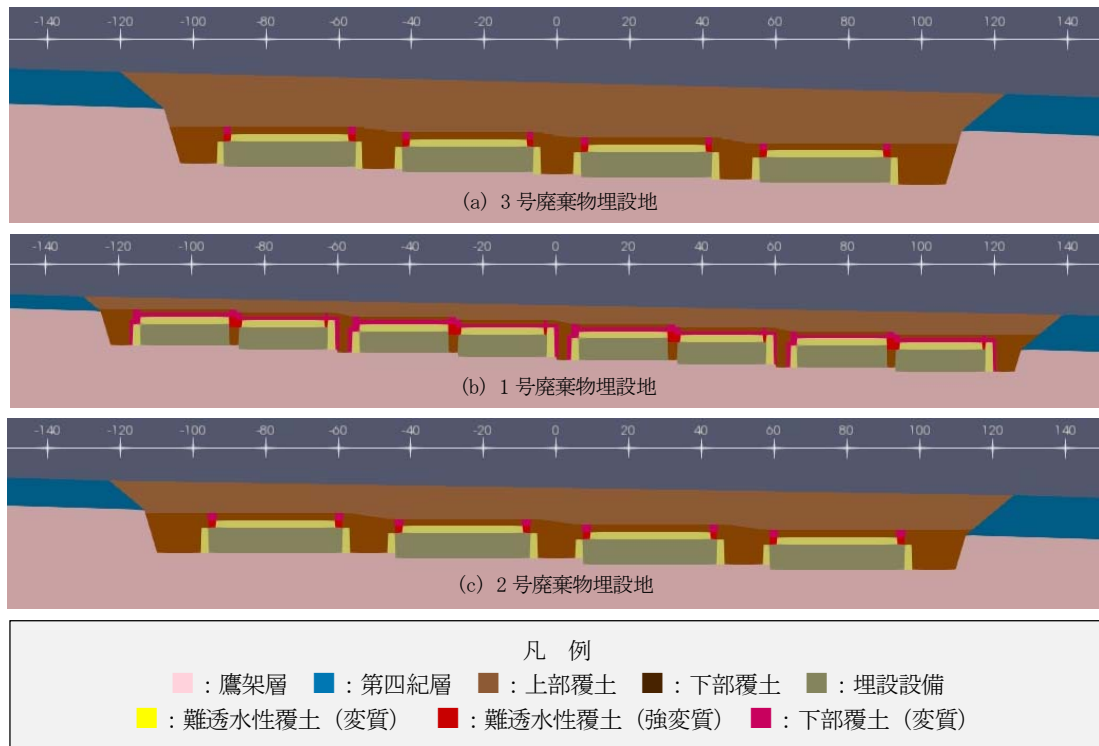
なお、モデル以外の解析条件は「補足説明資料7_埋設設備からの流出水量」のうち「4. 埋設設備から覆土及び鷹架層への流出水量の計算に必要な条件設定及び計算結果」と同様とする。



第1図 廃棄物埋設地付近の材料分布(等価透水係数モデル)



第2図 廃棄物埋設地付近の材料分布(劣化箇所反映モデル 確からしい設定)



第3図 廃棄物埋設地付近の材料分布(劣化箇所反映モデル 厳しい設定)

3. 確認結果

等価透水係数モデル及び劣化箇所反映モデルの埋設設備からの流出水量を第1表に示す。等価透水係数モデル及び劣化箇所反映モデルにおいて大きな差はなく、劣化箇所反映モデルの線量評価に影響を与えない見込みがあることを確認した。

第1表 等価透水係数モデル及び劣化箇所反映モデルの埋設設備からの流出水量

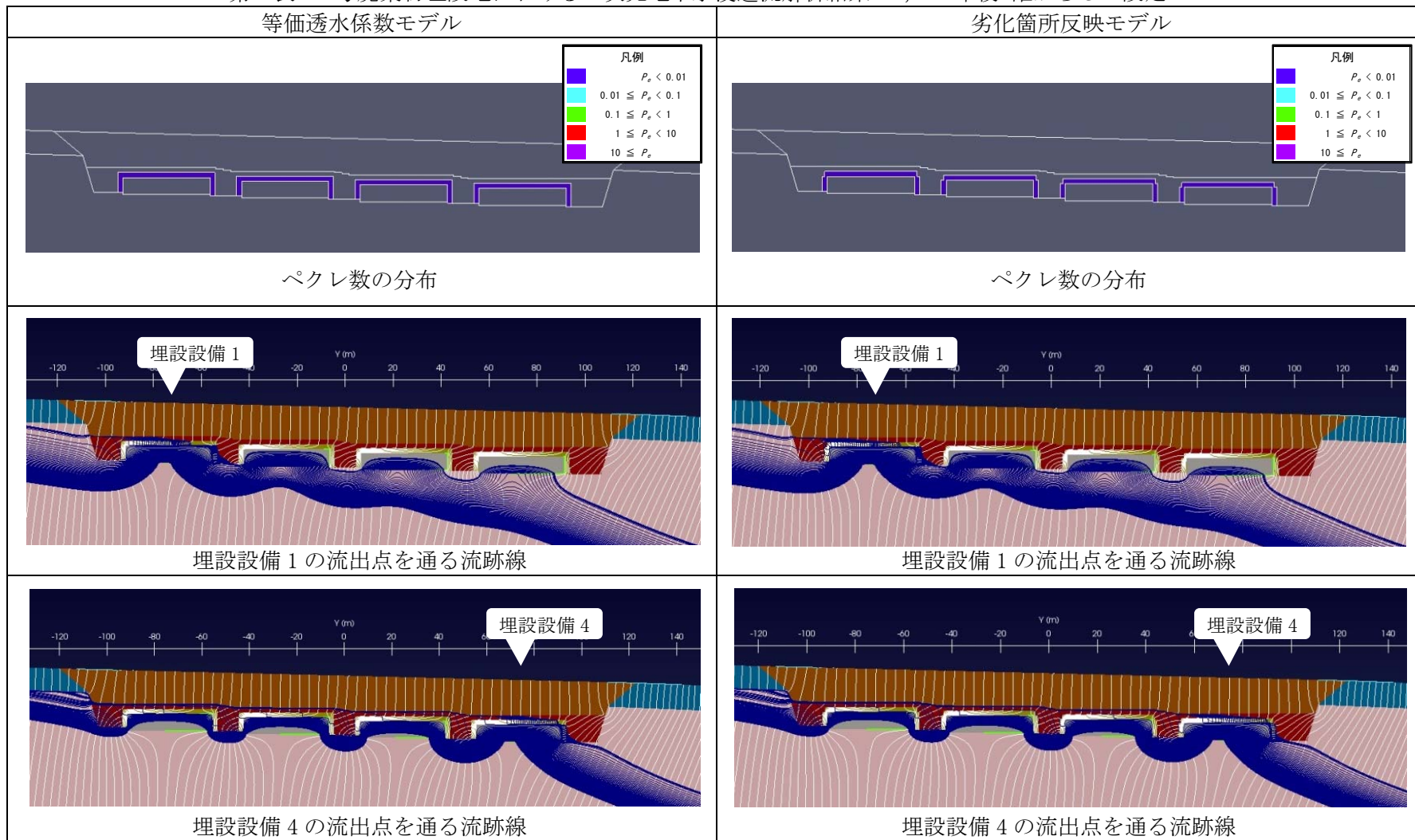
計算ケース	モデル	3号廃棄物埋設地		1号廃棄物埋設地		2号廃棄物埋設地		
		$Q_{co}(t)$ [m ³ /y]	$Q_{go}(t)$ [m ³ /y]	$Q_{co}(t)$ [m ³ /y]	$Q_{go}(t)$ [m ³ /y]	$Q_{co}(t)$ [m ³ /y]	$Q_{go}(t)$ [m ³ /y]	
確からしい設定	寒冷化ケース	①等価透水係数モデル	10	630	130	2,200	20	920
		②劣化箇所反映モデル	10	630	110	2,200	20	910
		差(②-①)	0	0	-20	0	0	-10
	温暖期継続ケース	①等価透水係数モデル	10	630	130	2,200	20	920
		②劣化箇所反映モデル	10	630	110	2,200	20	910
		差(②-①)	0	0	-20	0	0	-10
厳しい設定	寒冷化ケース	①等価透水係数モデル	510	1,500	150	2,200	350	1,300
		②劣化箇所反映モデル	460	1,500	130	2,200	280	1,300
		差(②-①)	-50	0	-20	0	-70	0
	温暖期継続ケース	①等価透水係数モデル	510	1,500	150	2,200	350	1,300
		②劣化箇所反映モデル	460	1,500	130	2,200	280	1,300
		差(②-①)	-50	0	-20	0	-70	0

*1: $Q_{co}(t)$: 埋設設備から覆土への流出水量[m³/y]
 $Q_{go}(t)$: 埋設設備から鷹架層への流出水量[m³/y]

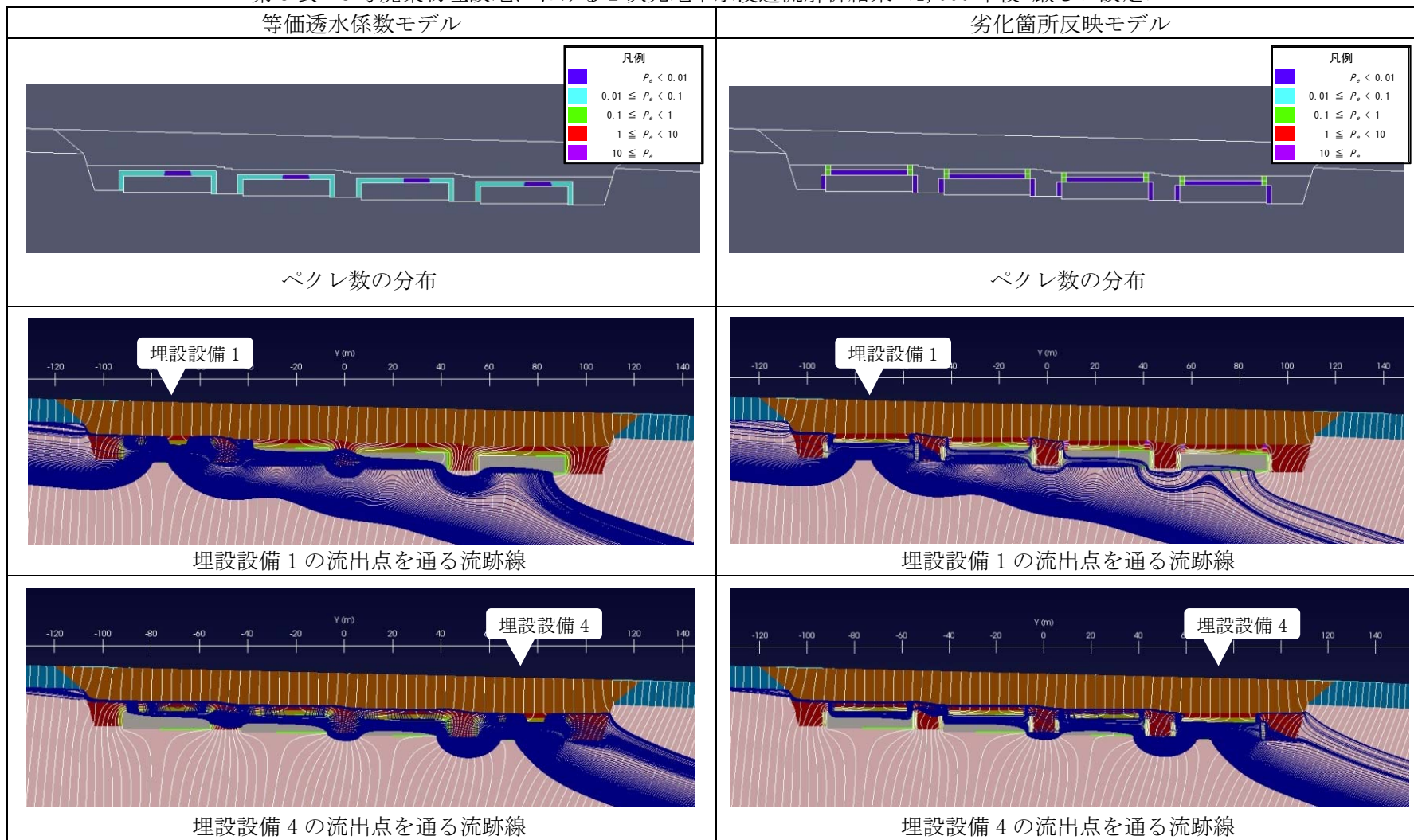
また、等価透水係数モデル及び劣化箇所反映モデルのペクレ数分布及び流跡線を第2表から第7表に示す。低透水性を期待する難透水性覆土及び下部覆土において、両モデルともにペクレ数が1未満であることから、拡散場となっていることを確認した。流跡線についても、両モデルで傾向に大きな差異はなく、同等であることを確認した。

以上のことから、2次元地下水浸透流解析を行う際に、覆土における変質部の透水係数を部分的に配置せず、等価透水係数を設定することは妥当であると判断する。

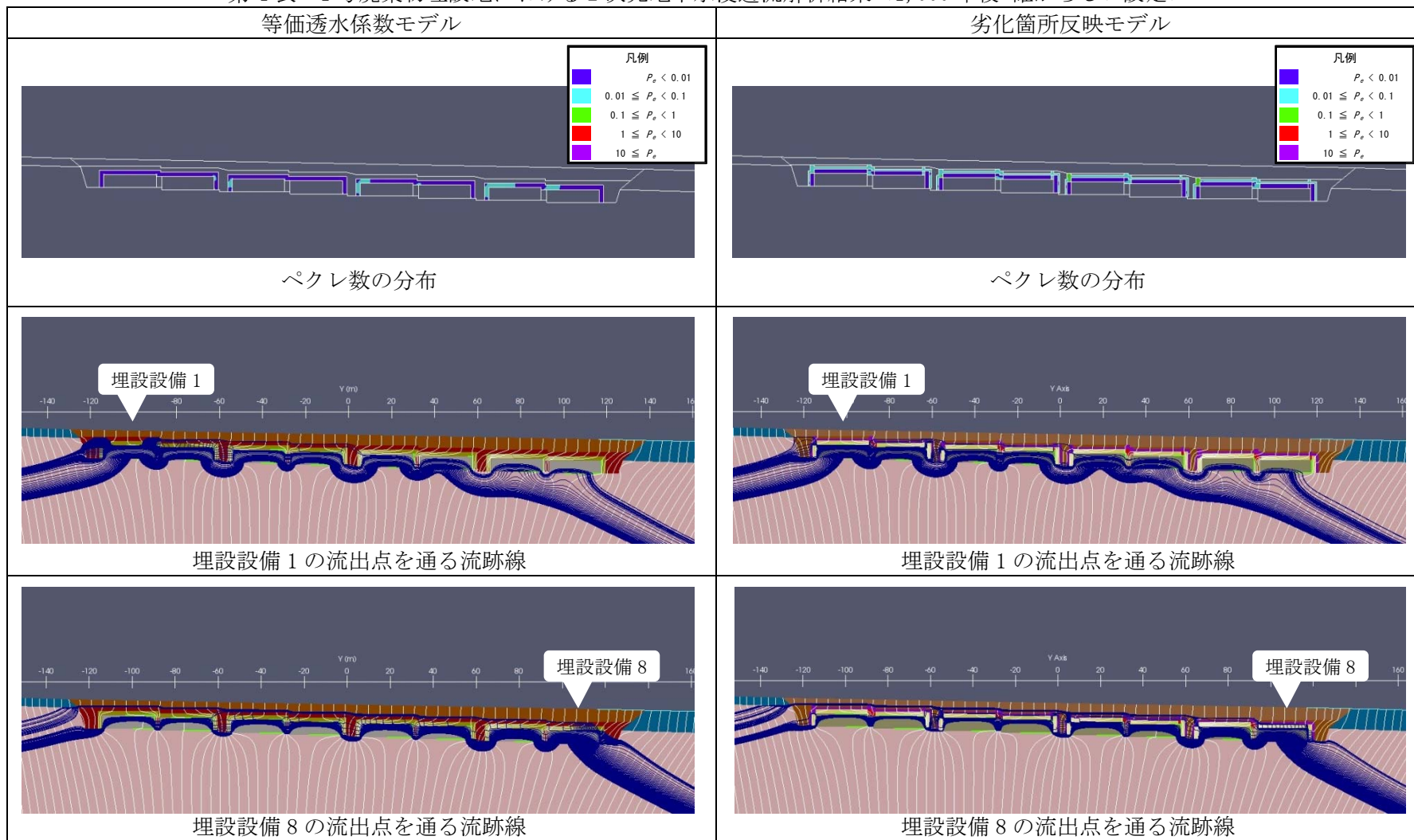
第2表 3号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 確からしい設定>



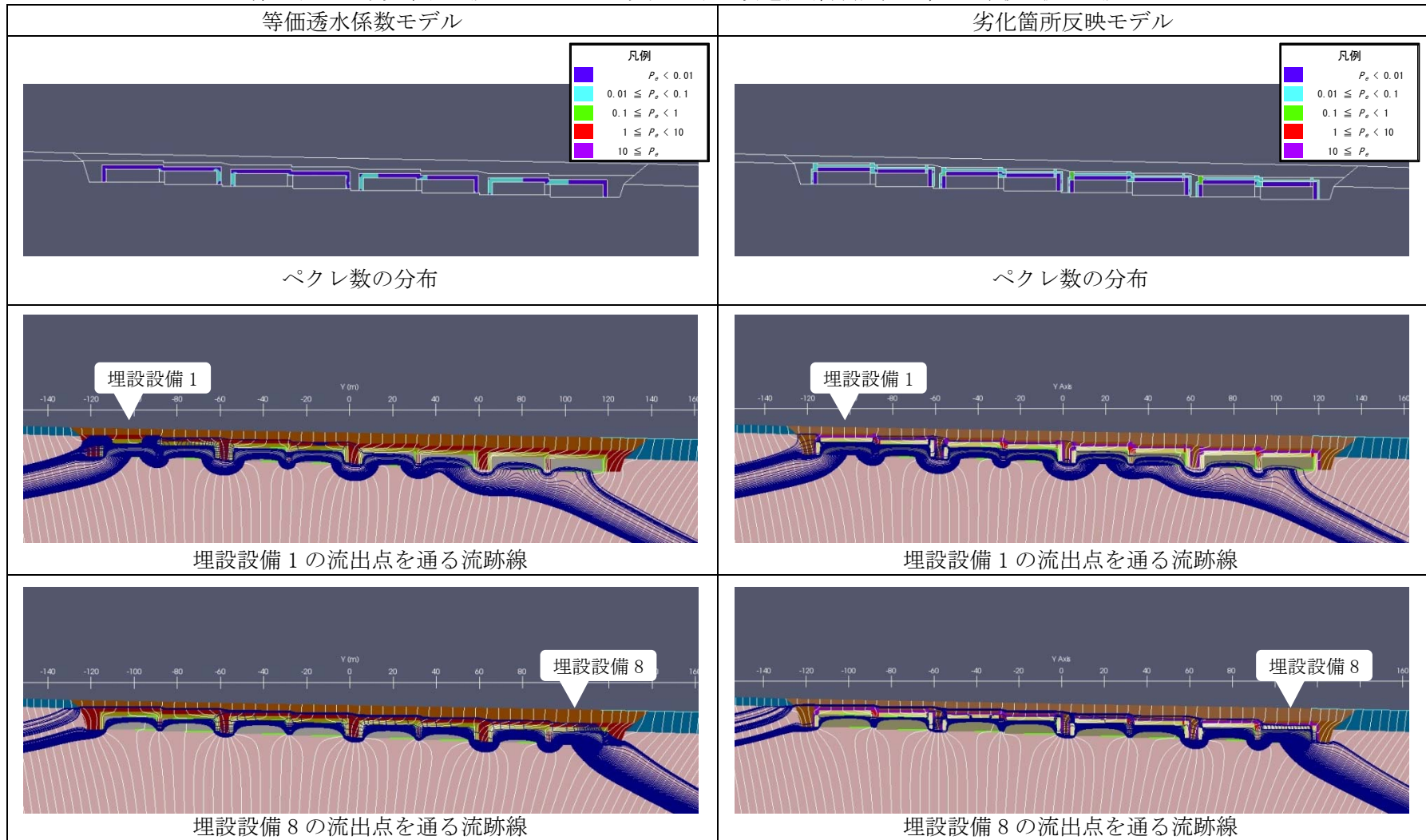
第3表 3号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 厳しい設定>



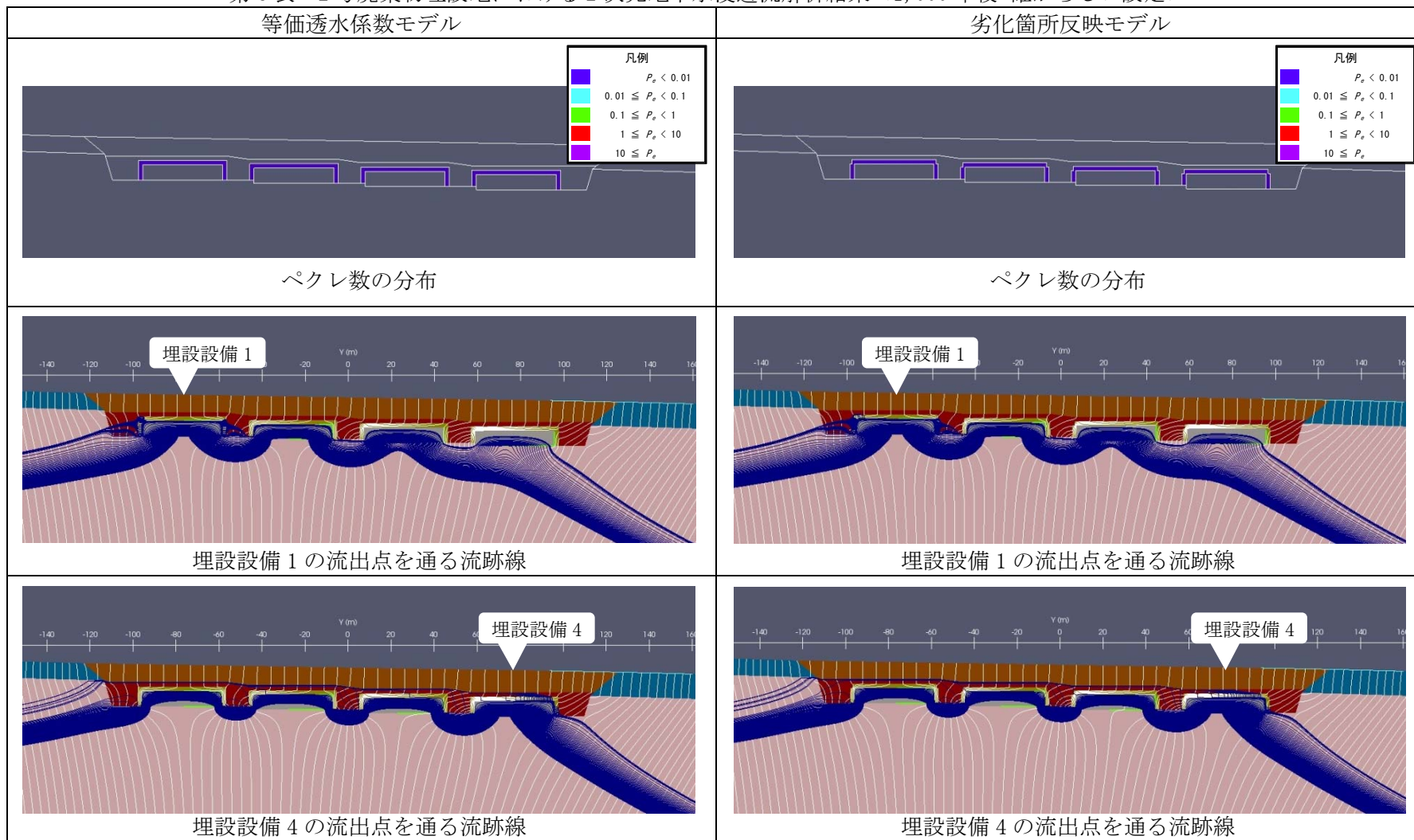
第4表 1号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 確からしい設定>



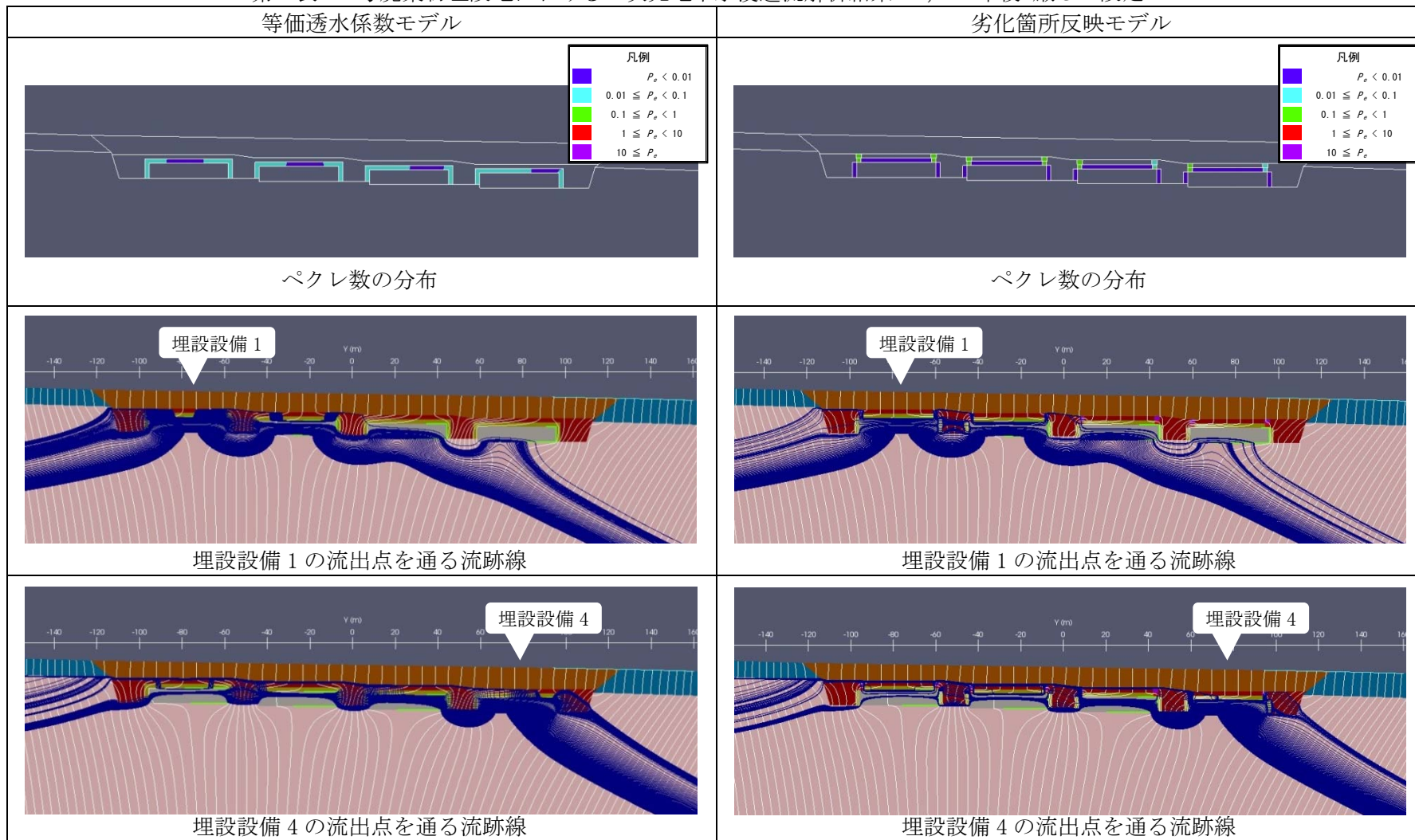
第5表 1号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 厳しい設定>



第6表 2号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 確からしい設定>



第7表 2号廃棄物埋設地における2次元地下水浸透流解析結果<1,000年後 厳しい設定>



特性の異なるベントナイト混合土を用いた
場合の等価透水係数の確認

目 次

1. はじめに.....	1
2. 状態変化の評価.....	1
(1) 力学的影響.....	1
(2) 化学的影響.....	1
3. 廃棄物埋設地の状態設定.....	2
4. まとめ.....	2

1. はじめに

覆土材料は、材料調達状況を考慮した覆土施工時の施工試験結果により、材料及び施工のばらつきを考慮して最終決定する。そのため、難透水性覆土に特性の異なるベントナイト混合土（Na型ベントナイト 20wt%と砂 80wt%の混合土）を用いた場合を想定し、線量評価に用いる覆土の等価透水係数を確認する。

なお、以下に説明のない条件については、既往の検討と同様である。

2. 状態変化の評価

(1) 力学的影響

変形に寄与する力学的な特性（剛性）の異なる覆土材料を用いた場合においても同様に、力学的影響（膨張量）による線量評価への有意な影響は生じないと考えられる。（詳細は「補足説明資料4_力学的影響」のうち「参考資料4」を参照）

以上のことから、特性の異なるベントナイト混合土を用いた場合においても、力学的影響は既往の検討と同様であるとする。

(2) 化学的影響

地球化学解析を用いて等価透水係数の変遷を評価した結果から、透水係数に化学的変質が生じると評価する。（詳細は「補足説明資料5_化学的影響」のうち「参考資料2」を参照）

(i) 難透水性覆土の変質

難透水性覆土の変質後における透水係数を第1表に示す。特性の異なるベントナイト混合土において、変質後の難透水性覆土の透水係数が既往の検討よりも小さい。

第1表 変質後の難透水性覆土の透水係数

		1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
3号	透水係数[m/s]	1.07×10^{-11}	1.23×10^{-11}
1号	透水係数[m/s]	3.20×10^{-11}	5.73×10^{-11}
2号*1	透水係数[m/s]	1.07×10^{-11}	1.23×10^{-11}

*1:3号の結果を流用

(ii) 下部覆土の変質

特性の異なるベントナイト混合土において、変質後の難透水性覆土の透水係数が既往の検討よりも小さいため、下部覆土の変質は相対的に小さいと考えられるが、下部覆土の劣化は既往の検討と同様の評価とする。

3. 廃棄物埋設地の状態設定

特性の異なるベントナイト混合土に対する評価結果を基に、力学的影響及び化学的影響を考慮した廃棄物埋設地の状態を設定する。力学的影響は既往の検討と同様であることから覆土の形状は同様とし、化学的影響による変質後の透水係数を特性の異なるベントナイト混合土の値とする。

算出した等価透水係数を第2表から第4表に示す。

第2表 覆土の等価透水係数 (3号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
今回[m/s]	2.00×10^{-11}	2.14×10^{-11}	1.12×10^{-8}
既往検討[m/s]	1.98×10^{-10}	2.00×10^{-10}	1.13×10^{-8}

第3表 覆土の等価透水係数 (1号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
今回[m/s]	2.00×10^{-11}	5.91×10^{-10}	1.04×10^{-9}
既往検討[m/s]	1.98×10^{-10}	2.39×10^{-9}	3.00×10^{-9}

第4表 覆土の等価透水係数 (2号廃棄物埋設地)

	0年 (初期)	1,000年後	
		確からしい設定	厳しい設定
今回[m/s]	2.00×10^{-11}	2.14×10^{-11}	1.12×10^{-8}
既往検討[m/s]	1.98×10^{-10}	2.00×10^{-10}	1.13×10^{-8}

4. まとめ

難透水性覆土に特性の異なるベントナイト混合土 (Na型ベントナイト 20wt%と砂 80wt%の混合土) を用いた場合の等価透水係数は、既往のベントナイト混合土 (Ca型ベントナイト 30wt%と砂 70wt%の混合土) を用いた等価透水係数よりも小さく、十分な低透水性があることを確認した。