



処分場設計の考え方 (包括的技術報告書より)

2023年 9月 27日

原子力発電環境整備機構 (NUMO) 技術部

■ 包括的技術報告書における「処分場設計」の考え方

本編第4章の構成

- 4.1 処分場の設計の考え方
- 4.2 処分場の設計手順と設計の前提となる条件の設定
- 4.3 地下施設設置深度の設定
- 4.4 人工バリアの設計
- 4.5 地下施設の設計
- 4.6 地上施設の設計
- 4.7 回収可能性の確保に関する取り組み
- 4.8 まとめと今後の取り組み

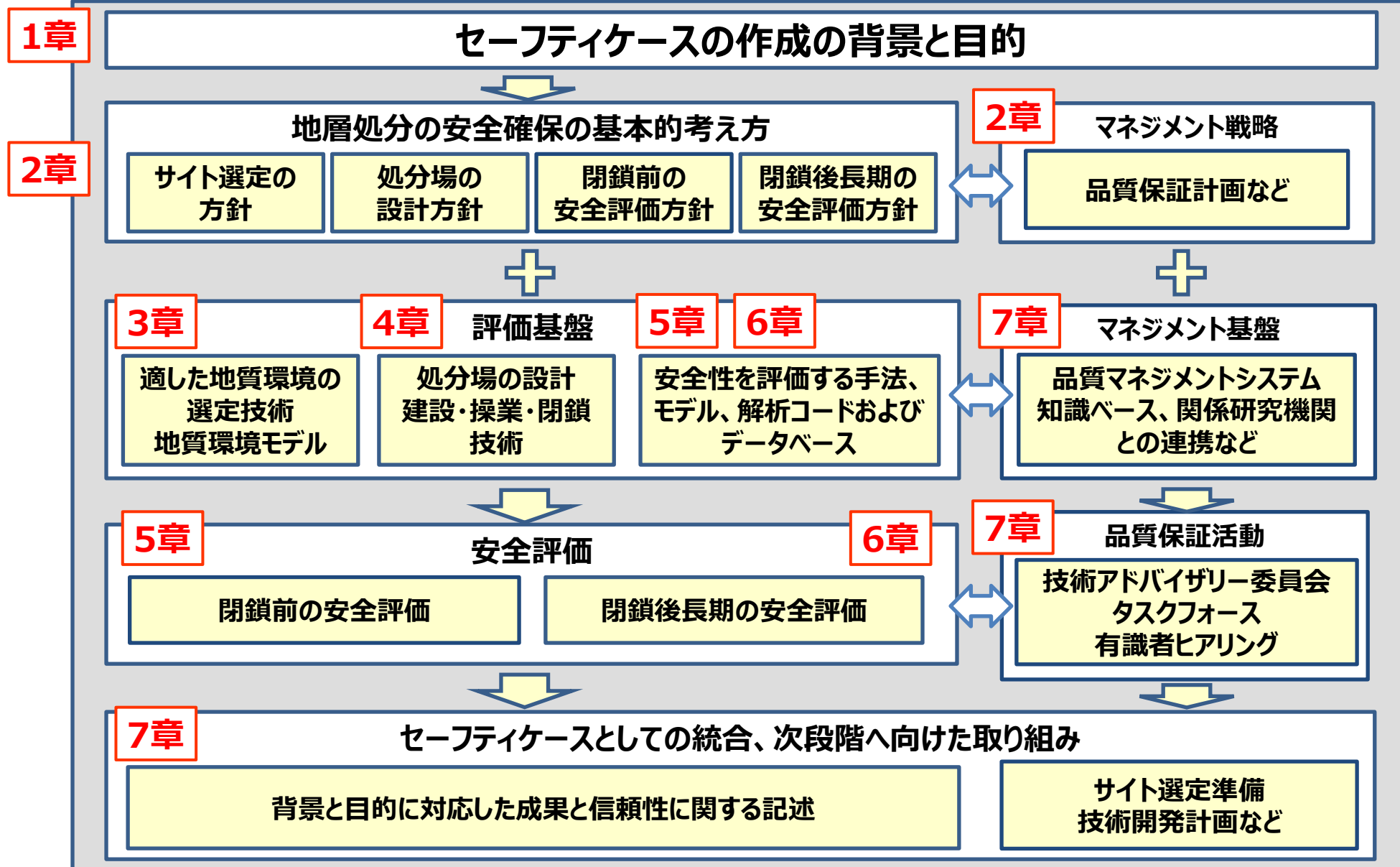
■ 日本原子力学会およびOECD/NEALレビュー結果の要点

包括的技術報告書 : https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html

注) 本資料は、2021年5月13日から6月30日にかけて計8回実施した「地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）」でご説明した資料を使用しています。

地層処分技術オンライン説明会 : <https://www.numo.or.jp/technology/techpublicity/lecture/210513.html>

セーフティケースの構造と報告書の構成との関係



処分場の設計において対象とする放射性廃棄物の種類と量

【ガラス固化体】

処分する廃棄物の量：**4万本以上※**（年あたり約**1,000本※**を処分）

※「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」（2008年3月14日、閣議決定）

製造者	日本原燃	JAEA	Orano (旧 AREVA NC)	Sellafield Ltd
放射エネルギー* (製造時)	β, γ : 2.17×10^{16} Bq 以下 α : 1.29×10^{14} Bq 以下	β, γ : 1.5×10^{16} Bq 以下 α : 2.6×10^{14} Bq 以下	(代表値) β, γ : 2.8×10^{16} Bq α : 1.4×10^{14} Bq	(代表値) β, γ : 4.5×10^{16} Bq α : 3.5×10^{14} Bq
発熱量	2.3 kW 以下 (製造時)	1.4 kW 以下 (製造時)	<2.0 kW (輸送時)	<2.5 kW (輸送時)
ガラス固化体寸法	高さ：約 1,340 mm 外径：約 430 mm キャニスター肉厚：約 6 mm	高さ：約 1,040 mm 外径：約 430 mm キャニスター肉厚：約 6 mm	高さ：約 1,340 mm 外径：約 430 mm キャニスター肉厚：約 5 mm	高さ：約 1,340 mm 外径：約 430 mm キャニスター肉厚：約 5 mm
ガラス固化体重量	約 500 kg	約 380 kg	約 492 kg	約 550 kg
貯蔵本数 (2020年12月現在)	346本	316本	1,310本	520本

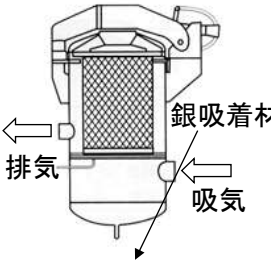
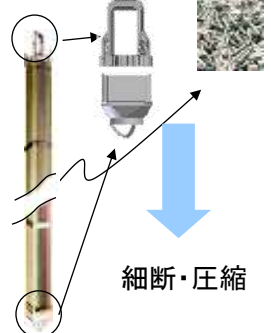
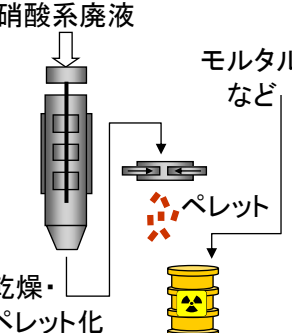


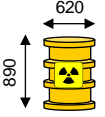
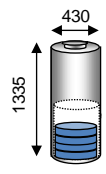
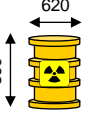
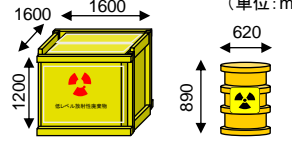
注) 設計においては、第2次取りまとめと同様に日本原燃の再処理事業指定申請書などを参考に仕様を設定
(日本原燃の再処理工場が稼働し、現存の使用済燃料あるいは今後の原子力発電によって発生する使用済燃料が再処理されると、発生するガラス固化体は日本原燃で製造されるものが大部分を占めることから)

処分場の設計において対象とする放射性廃棄物の種類と量

【TRU等廃棄物】

処分する廃棄物の量： **19,000m³以上**※

※「特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画」（2008年3月14日、閣議決定）

廃棄体グループ	1	2	3	4	
				低発熱性L	発熱性H
概要	<p>廃銀吸着材</p>  <p>放射性的ヨウ素を除去する吸着材料</p>	<p>エンドピース ハル</p>  <p>細断・圧縮</p>	<p>濃縮廃液など 硝酸系廃液</p>  <p>乾燥・ペレット化</p> <p>モルタルなど ペレット</p>	<p>難燃性廃棄物</p>  <p>ゴム手袋 (焼却・圧縮)</p> <p>不燃性廃棄物</p>  <p>工具 金属配管</p>	
主な廃棄体の形態	<p>(単位: mm)</p>  <p>200Lドラム缶</p>	<p>(単位: mm)</p>  <p>キャニスタ</p>	<p>(単位: mm)</p>  <p>200Lドラム缶</p>	<p>(単位: mm)</p>  <p>角型容器 200Lドラム缶 その他(ハル缶, インナーバレル)</p>	
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 放射性的ヨウ素 (I-129)を含む セメント固化体 	<ul style="list-style-type: none"> 発熱量が比較的大 放射性的炭素 (C-14)を含む 	<ul style="list-style-type: none"> 硝酸塩を含む モルタル, アスファルトによる固化体など 	<ul style="list-style-type: none"> 焼却灰, 不燃物 セメント固化体など 	
見込み発生量	319 [m ³]	5,792 [m ³]	5,228 [m ³]	5,436 [m ³]	1,309 [m ³]
最大発熱量 (発生時点)	1 [W/本]未満	90 [W/本]未満	1 [W/本]	16 [W/本]	210 [W/本]

■ 包括的技術報告書における「処分場設計」の考え方

本編第4章の構成

- 4.1 処分場の設計の考え方
- 4.2 処分場の設計手順と設計の前提となる条件の設定
- 4.3 地下施設設置深度の設定
- 4.4 人工バリアの設計
- 4.5 地下施設の設計
- 4.6 地上施設の設計
- 4.7 回収可能性の確保に関する取り組み
- 4.8 まとめと今後の取り組み

■ 日本原子力学会およびOECD/NEALレビュー結果の要点

注) 本資料は、2021年5月13日から6月30日にかけて計8回実施した「地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）」でご説明した資料を使用しています。

第4章の目的とアプローチ

○目的

多様な地質環境条件に対して、所要の安全機能を有する処分場の構築するための技術基盤が整っていることを提示

○アプローチ

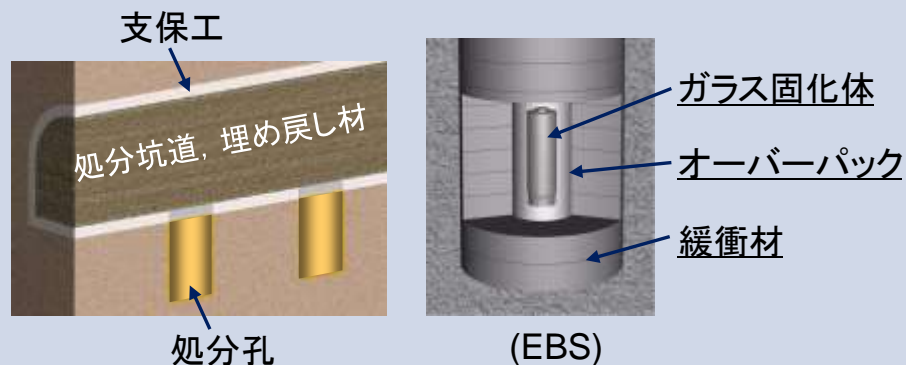
- 最新の科学的知見や技術開発成果に基づき、多様なサイト条件や社会的な環境変化などに対して柔軟に対応し、安全な処分場を成立させるための**設計技術（設計因子を基軸とした体系的な設計の方法論や、設計オプションの考慮など）**を提示
 - この際、断層の存在など、サイト調査において現実的に遭遇する可能性がある地質環境への設計上の対応や処分概念の違いによる得失などを考慮できる、実用性のある設計の方法論を適用
- **検討対象母岩の地質環境モデルに基づいて**、閉鎖前と閉鎖後長期の安全性、および建設・操業・閉鎖の工学的実現性を考慮した**処分場の仕様を具体的に提示**
 - 現時点あるいは近い将来に到達可能な技術を適用
 - 回収可能性が確保できることを確認

報告書で検討した処分概念

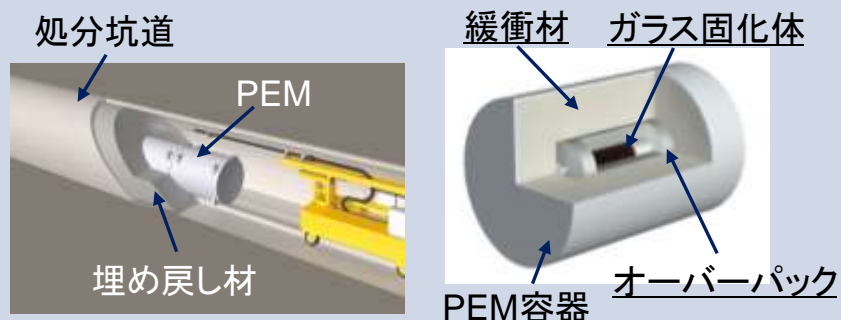
高レベル放射性廃棄物処分場の 処分概念

分散定置型

縦置き・ブロック方式

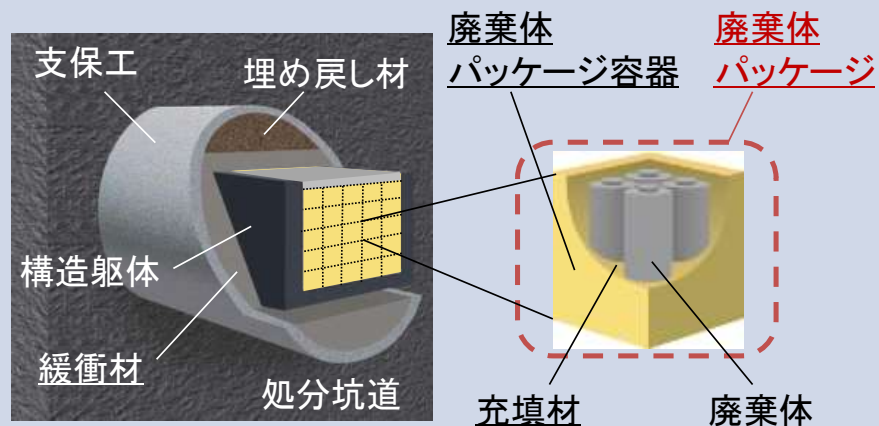


横置き・PEM方式※



TRU等廃棄物処分場の 処分概念

集積定置型



- 緩衝材：収着性が低い放射性物質を多く含む廃棄体や高発熱性の廃棄体に対する安全機能を確保することを目的として、**グループ1,2および4H**の場合に設置
- 廃棄体パッケージ：
 - 廃棄体パッケージA：厚さ5mm,上蓋なし
 - 廃棄体パッケージB：厚さ50mm,上蓋あり

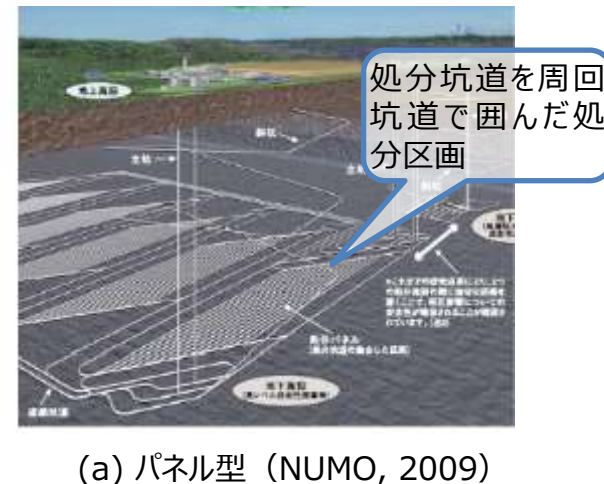
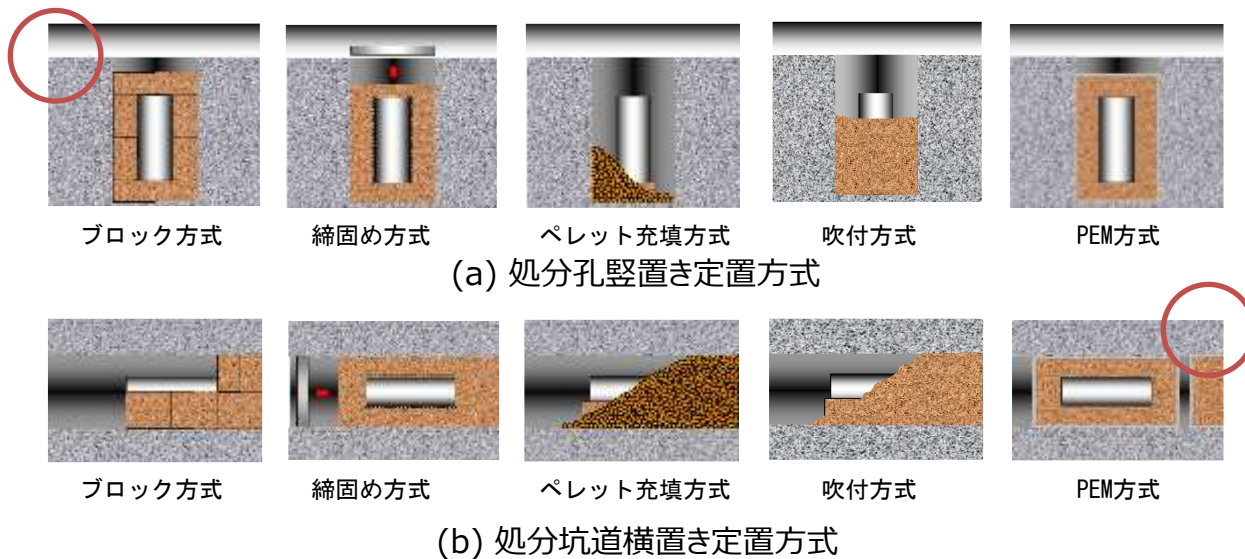
注) アンダーラインの構成要素が人工バリア

※ PEM (Prefabricated Engineered Barrier System Moduleの略)：地上施設で廃棄体を人工バリアと一体化したモジュールを地下施設に搬送し、定置する技術

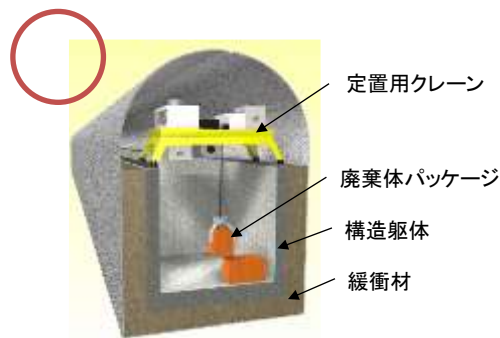
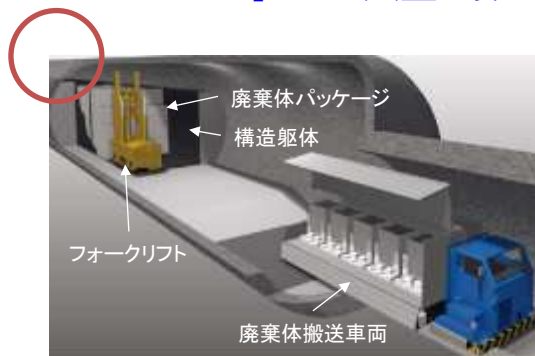
設計オプションの整備

～地質環境や社会条件への柔軟な対応～

処分場概念，地下施設レイアウト，処分区画の配置，廃棄体の定置方法（縦置き，横置きなど），オーバパックや緩衝材などの人工バリア構成要素の材料などに関する設計上の多様な選択肢を検討



【HLW人工バリアの定置・施工方法の例】



【TRU等廃棄体パッケージの定置方法の例】



【地下施設のレイアウトの例】

処分施設の仕様は、文献調査、概要調査、精密調査の各段階で取得される地質環境情報や、その時点の最新の技術開発成果などに基づき、**段階的に詳細化と最適化**

○ 設計因子を基軸とした体系的な設計の方法論の適用

異なるサイトや事業段階においても、処分場に求められるさまざまな要件を統合的に考慮できるよう、**首尾一貫した設計の考え方（設計因子を基軸とした体系的な設計）**を適用

※**設計因子**：

設計によって処分場に持たせようとする性能と能力を取りまとめたもの

閉鎖後長期の安全性、閉鎖前の安全性、工学的成立性、モニタリング、回収可能性、環境影響、社会経済的側面など

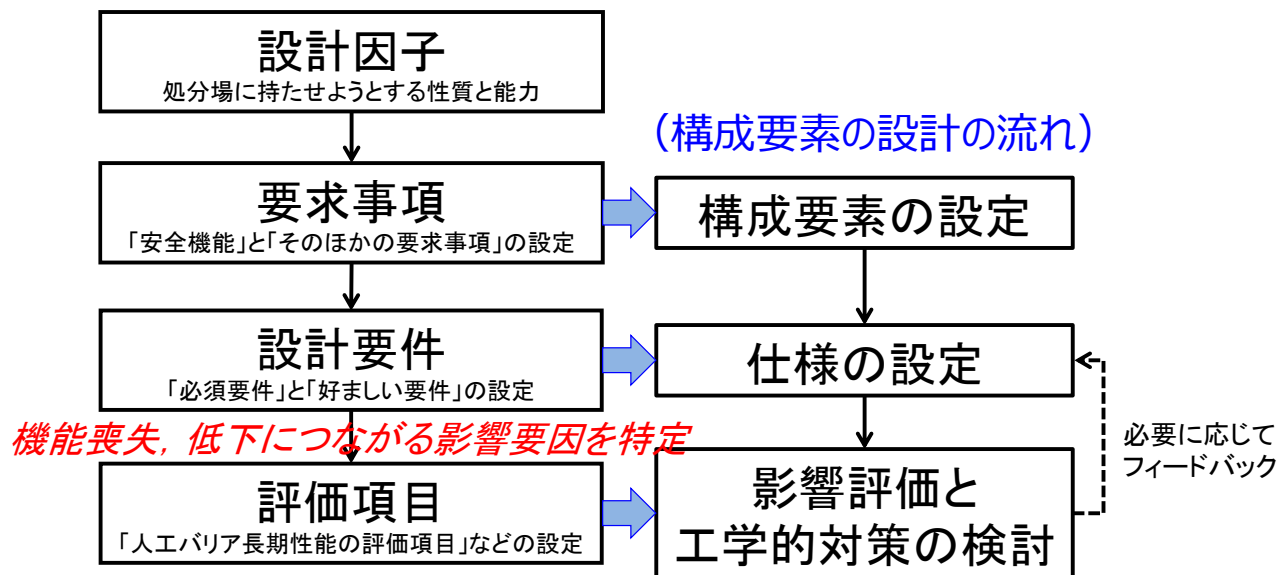
○ 設計オプションの整備

多様な地質環境や、長い事業期間中における科学技術の進歩などに柔軟に対応して、処分場の設計を進められるよう、**複数の設計オプション（多様な選択肢）**を整備

設計因子を基軸とした体系的な設計方法

- 設計因子に対して、**処分場に必要**な**要求事項**を設定
- 適切な**処分概念**と**処分場の構成要素**を設定し、要求事項である処分場が有すべき安全機能を期待する構成要素に割り当て
- **構成要素**ごとに**要求事項**を充足させるために必要な性能が確保されるように**設計要件**を設定し、設計要件に対する設計での確認方法と指標および基準を設定
- 設計要件を充足するように**基本となる仕様**を設定
- この仕様を対象として、操業期間中や閉鎖後に構成要素の**機能喪失**や**低下**につながる**可能性**がある**影響要因**を特定し、**影響評価**により仕様の妥当性を判断

(設計要件および評価項目の設定の流れ)



設計因子、要求事項および設計要件に基づく設計の流れ

レビュー対応のポイント💡
影響評価と安全評価の関係

- 処分場設計の基本的考え方については、設計対象となる処分場に求められる要求事項を設計因子や安全機能として示したうえで、それらを満足する複数の設計例（包括的技術報告書では仕様）を求めるためのプロセスが示されている。ここでは、設計対象に要求される項目を要求性能として整理し、その要求性能を満足するように工学的設計プロセスを示すとともに、設計の結果が要求性能を満たしているかどうかの確認が行われることになる。これは、世界貿易機関（WTO）の「貿易の技術的障害に関する協定」（TBT 協定）において定義されているような**性能設計型**のアプローチと整合するものであり、国際水準に合致する設計の枠組みが提示されているものと評価できる。
- 処分場の設計は仕様を提示するために行うとし、第4章においては「設計要件に基づいて設計を実施し、基本となる仕様（材料、形状、寸法など）を設定する」とより具体的に説明をしているが、包括的技術報告書における「仕様」や「仕様成立範囲」は一般的な構造物の設計における用例とは異なる場合がある。それぞれの用語の定義を明確にし、処分場の設計が仕様規定型ではなく**性能設計型**となっていることや設計因子を満足する設計の一例を示していることをより明確にすることを推奨する。

※「NUMO包括的技術報告書」レビュー報告書、2019年2月、日本原子力学会
2.3安全確保の基本的考え方（p.11）より抜粋

設計因子と要求事項の設定

- ◆ 国際機関や関連する原子力施設の規制等で示されている処分場の安全確保の要件
- ◆ 最終処分基本方針など政策上の要件
- ◆ 処分場設計の実用性および合理性に係る要件

設計因子	処分場に必要な要求事項
閉鎖前の安全性	<ul style="list-style-type: none">・ 廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止・ 施設外への放射性物質の放出の防止・ 放射線の遮蔽・ 作業環境の維持・ 災害の発生・拡大の防止・ 災害時の避難経路の確保
閉鎖後の安全性	<ul style="list-style-type: none">・ 自然現象の著しい影響からの防護・ 人の接近の抑制・ 放射性物質の溶出抑制・ 放射性物質の移行抑制
回収可能性	<ul style="list-style-type: none">・ 回収可能性の維持・ 回収可能性の維持による安全性への影響の防止・低減
工学的成立性	<ul style="list-style-type: none">・ 実現可能な建設・操業・閉鎖の作業工程・方法・ 実証された技術の適用
経済的合理性	<ul style="list-style-type: none">・ 処分場の建設・操業・閉鎖の合理性・ 調達性

※ 環境保全とモニタリングに関する設計因子については、実際のサイトの地表や地質環境条件や社会条件に大きく依存し、サイトに応じた地上・地下施設の設計や建設・操業・閉鎖の具体的な方法を明確にする過程で検討することが合理的であることから、今後サイトの地質環境条件やそれに基づいて実施する設計の詳細が具体化する段階で設定

閉鎖前に対する安全機能と構成要素の関係

<放射線防護>

基本概念	安全機能	構成要素
作業時閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止	ガラス固化体, オーバーパック 廃棄体パッケージ
	施設外への放射性物質の放出の防止	廃棄体受入・検査・封入施設 換気設備（排気フィルタも含む）
放射線遮蔽	放射線の遮蔽	廃棄体パッケージ間充填材, 廃棄体受入・検査・封入施設 建屋の遮蔽壁, 廃棄体搬送車両, 定置装置などの設備・機器

<一般労働安全>

基本概念	安全機能	構成要素
作業環境の維持	換気能力	坑道の換気経路, 換気設備（冷房設備含む）
	排水能力	坑道の排水経路, 排水設備
	照明能力	坑道の照明設備
労働災害の発生・拡大の防止	防火対策	防火設備, 消火設備
	坑道の力学的安定性	支保工
	そのほかの労働災害防止対策	落下・転倒防止装置, 非常用貯水槽
緊急時の避難経路の確保	避難経路の確保	アクセス坑道（入気用立坑を避難経路とする） 連絡坑道, 緊急待避所, 風門, 通信・連絡設備

※ 赤字：人工バリアの構成要素

閉鎖後長期に対する安全機能と構成要素の関係

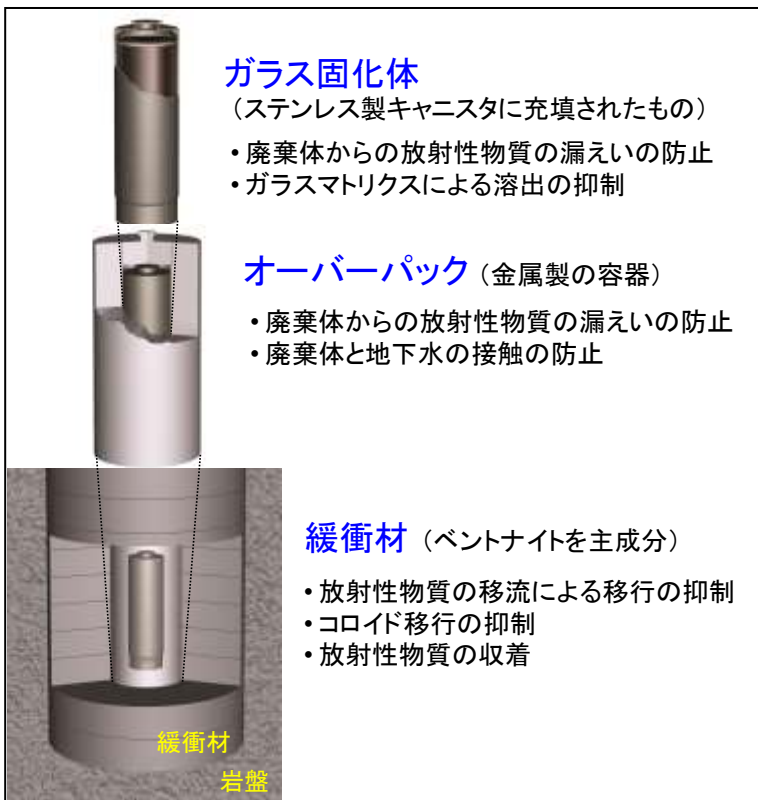
基本概念	安全機能	構成要素		
		HLW	TRU	
隔離	自然現象の著しい影響からの防護	地質環境	地質環境	
	人の接近の抑制	地質環境	地質環境	
閉じ込め	放射性物質の溶出の抑制	ガラス固化体 オーバーパック	廃棄体 廃棄体パッケージ	
	放射性物質の 移行の抑制	放射性物質の溶解の抑制	地質環境	地質環境
		遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制	地質環境	地質環境
		放射性物質の移流による移行の抑制	緩衝材	緩衝材
		コロイド移行の抑制	緩衝材	緩衝材
		放射性物質の収着	緩衝材 地質環境	緩衝材 廃棄体パッケージ間 充填材 地質環境
		放射性物質の分散	地質環境	地質環境
坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制	止水プラグ 埋め戻し材	止水プラグ 埋め戻し材		

※1 地質環境：適切に選定された地質環境

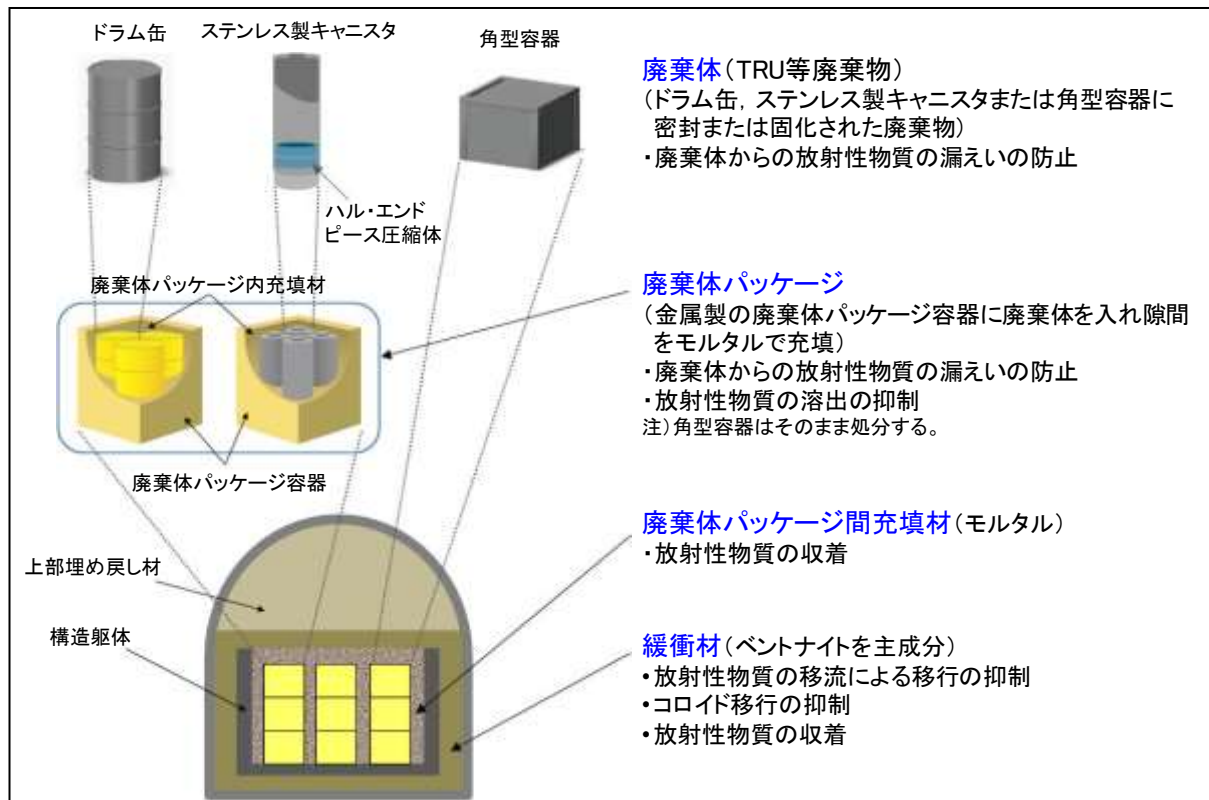
※2 赤字：人工バリアの構成要素，青字：地下施設の構成要素

人工バリアの構成要素

○高レベル放射性廃棄物処分場



○TRU等廃棄物処分場



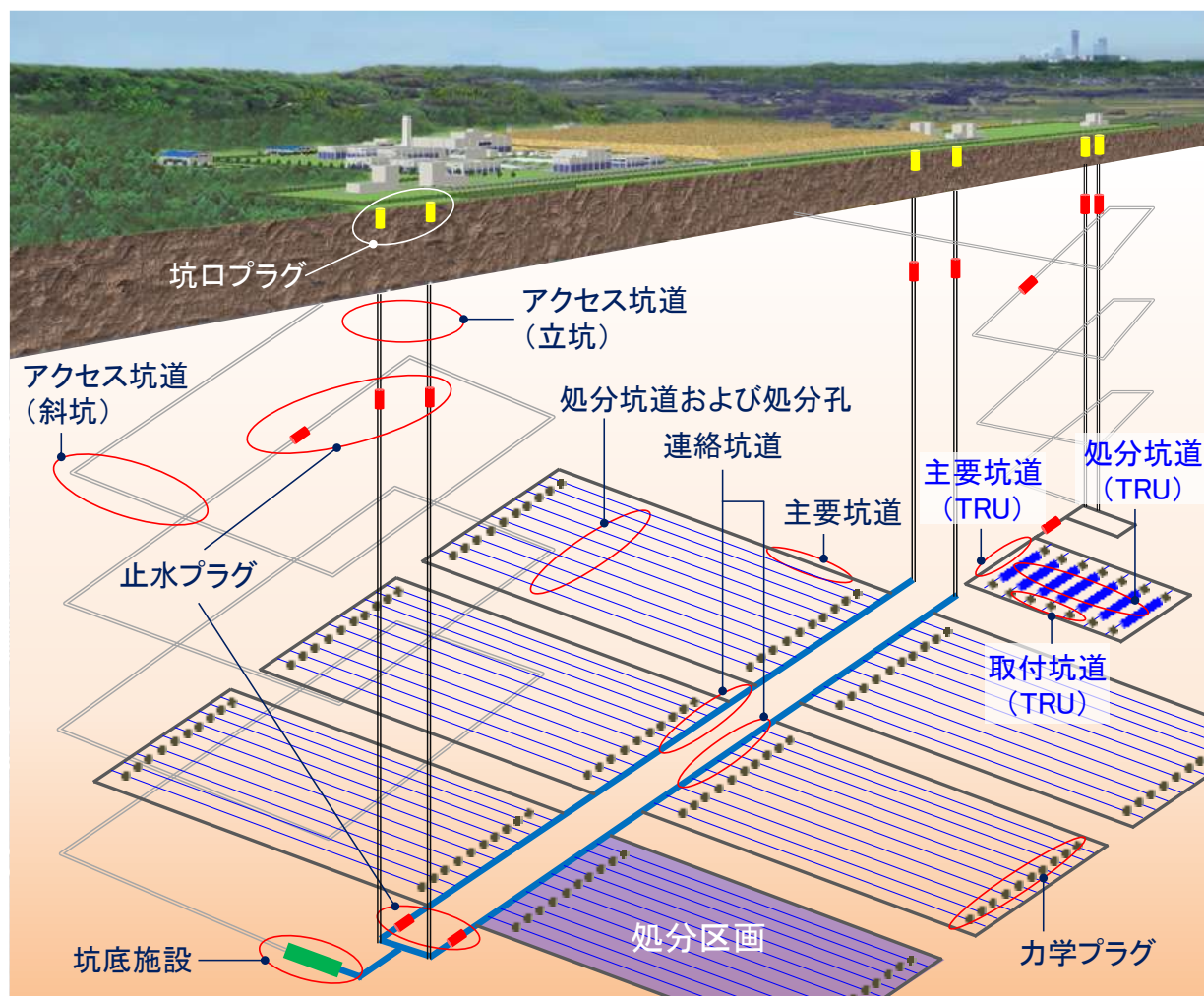
【凡例】

青文字：人工バリアの構成要素

黒文字：安全機能

地下施設の構成要素

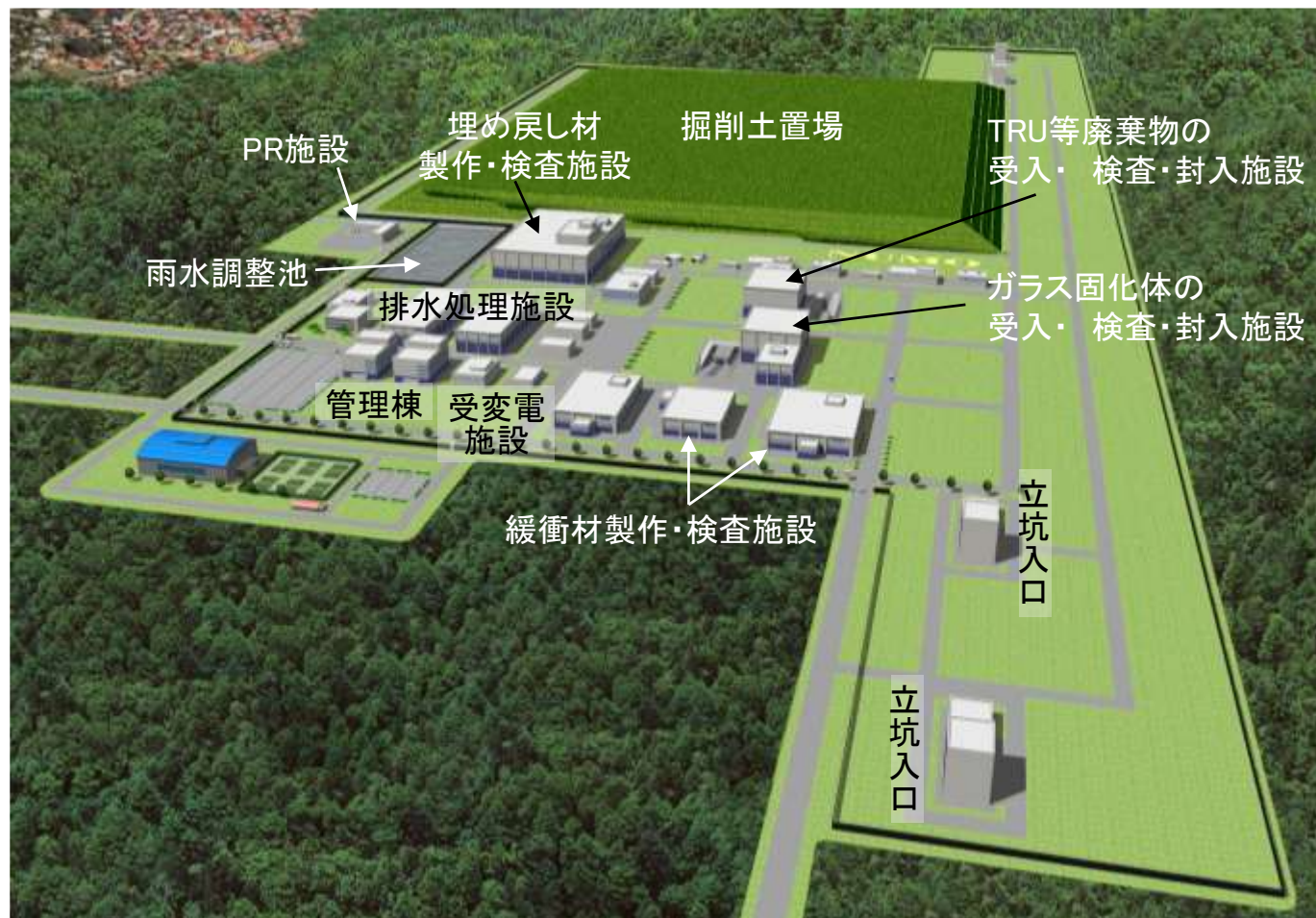
さまざまな用途の坑道群（アクセス坑道，処分坑道，連絡坑道など），プラグ（止水プラグ，力学プラグ，坑口プラグ），坑内環境を維持するための設備などから構成



- 支保工
- 埋め戻し材
- 構造躯体 (TRU)
- + • 換気, 排水, 照明, 防火・消火設備
- 非常用設備 (通信・連絡設備, 緊急待避所, 非常用貯水槽など)
- 搬送容器, 搬送車両, 定置装置など

地上施設の構成要素

廃棄体を受け入れ、地下に搬送して定置するための準備と事業管理に必要な施設、
地下施設で行われる作業を支援するための一群の施設

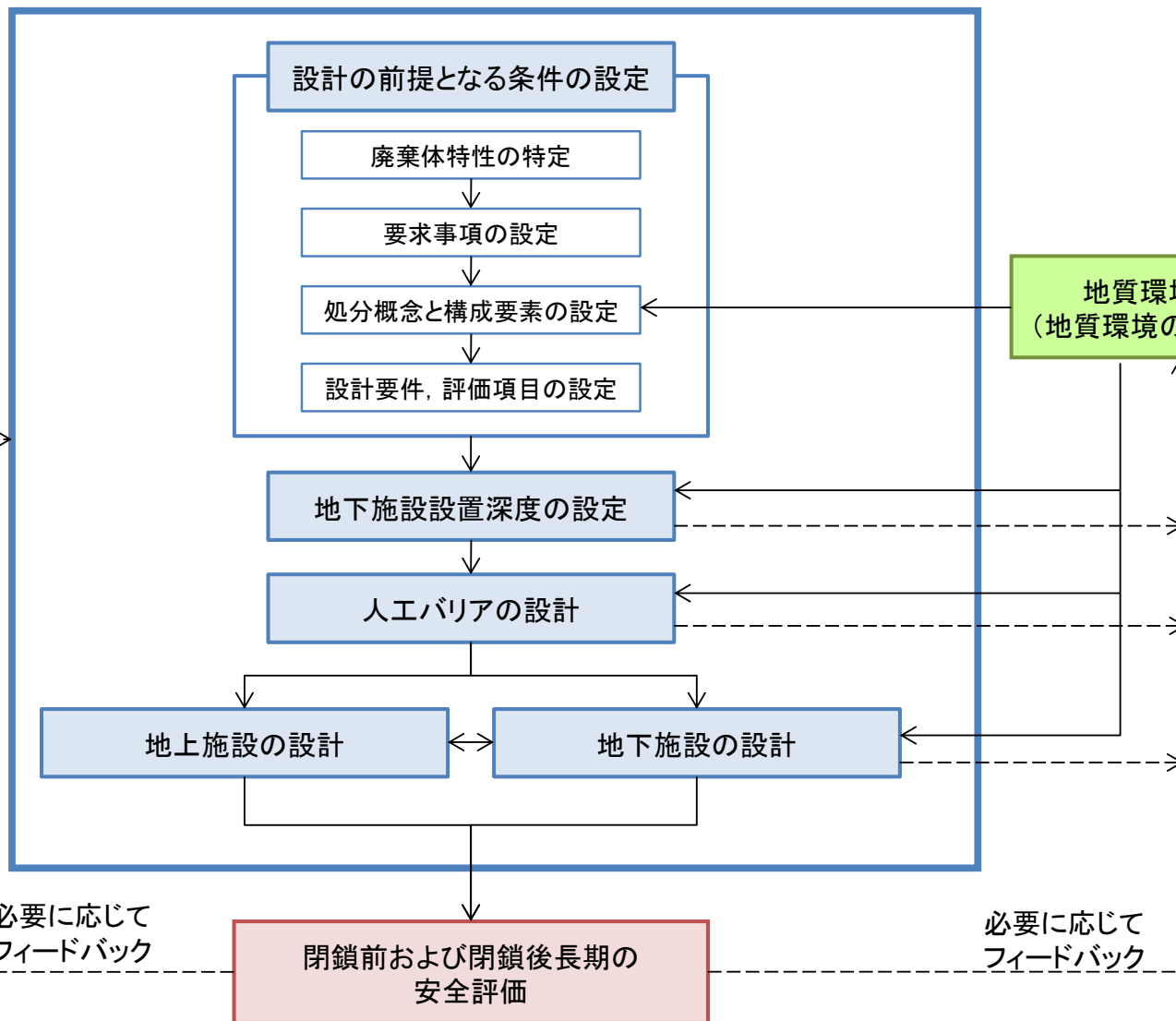


+

- 港湾施設 (Harbor Facility)
- 専用道路 (Dedicated Road)

処分場の設計手順（修正前）

処分場の設計



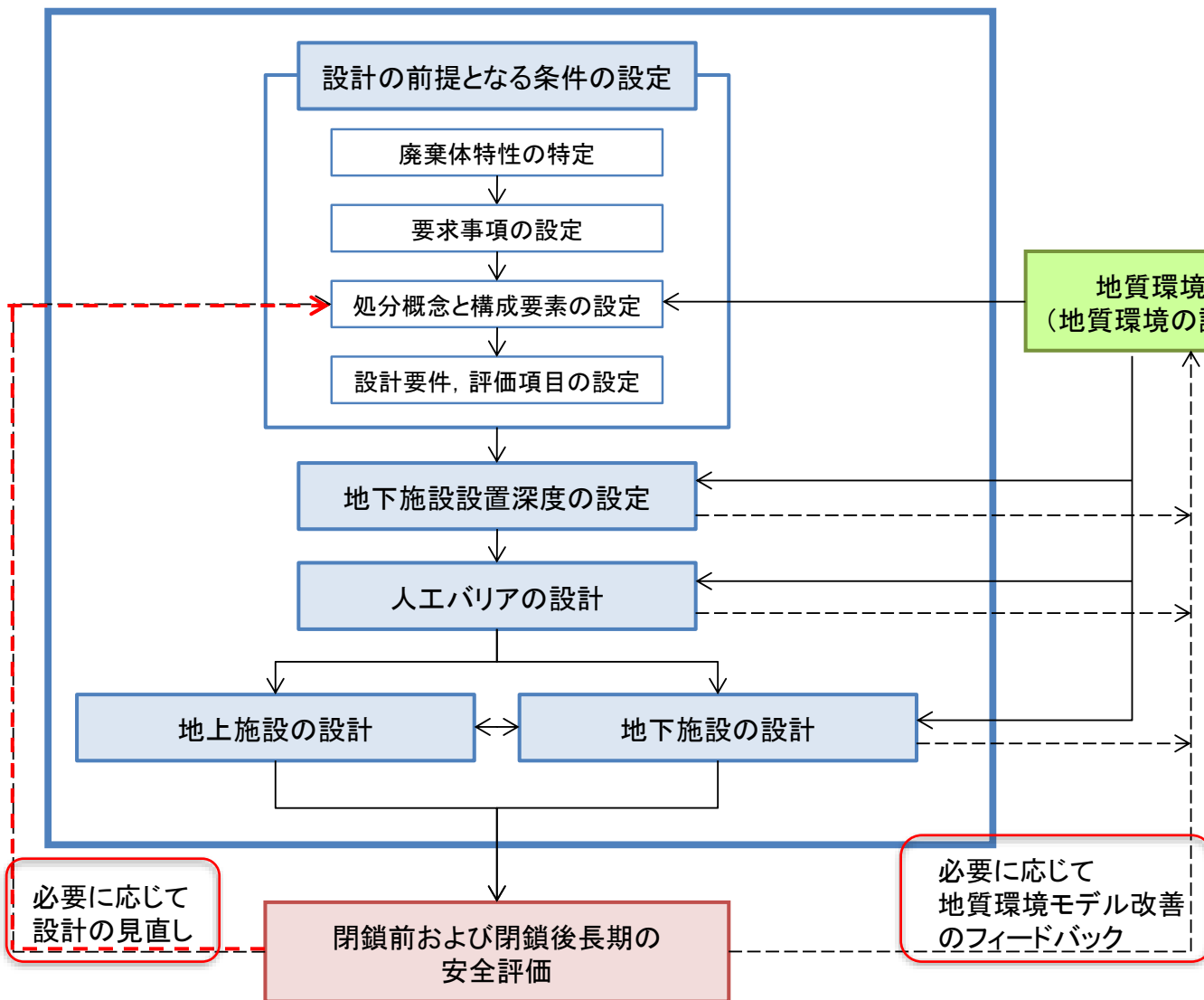
レビュー対応のポイント💡
影響評価と安全評価の関係
設計における不確実性の対応

【原子力学会レビューコメント（抜粋）】
 包括的技術報告書の第4章における「影響評価」と同報告書の第5章や第6章における「安全性の評価」の関係もわかりにくい。設計の妥当性の検証とフィードバックには、処分場の工学的設計の設計要件に対する照査と地層処分システム全体の安全評価の2つのプロセスがあるように書かれているが、その当該の図の説明を文章で記述するべきである。

修正前：レビュー版（2018年11月公表）

処分場の設計手順（修正後）

処分場の設計



レビュー対応のポイント💡
影響評価と安全評価の関係
設計における不確実性の対応

【安全評価と設計の関係】

- 設計した処分場に対し、処分場の閉鎖前および閉鎖後長期の安全評価を実施
- 所要の安全性の確保が困難と判断した場合、設計の見直し
- 設計の見直しは人工バリア、地上施設、地下施設の仕様および地下施設設置深度、さらに見直しが必要となる場合は、処分概念と構成要素の設定の見直し
- 設計の過程で特定された地質環境特性にかかわる不確実性が、次段階で作成する地質環境モデルの更新において低減されるよう、地質環境調査・評価の計画にフィードバック

修正後：2021年2月公表

地下施設設置深度の設定

○ 上限深度

- 最終処分法（地表から300 m より深い位置の岩盤）
- 隆起・侵食（評価期間における安全評価結果が目安値を満足すること）

○ 下限深度

- 深くなることによる地圧や地温の上昇による影響に対して設置可能な深度

地下施設設置深度の設計要件

設計要件	内容	深度を深くすることによる影響	
		構成要素	要求事項への影響
坑道の力学的安定性	現実的な支保工で坑道の力学的安定性を確保すること	坑道	地圧の増大に伴う空洞安定性の低下
緩衝材の制限温度	合理的な廃棄体占有面積で緩衝材の温度を制限温度（100℃）を超えないように抑えること	緩衝材	地温の増大に伴う廃棄体占有面積の増加
坑内の制限温度	現実的な換気設備により、坑内環境を労働安全衛生規則で定める制限温度（37℃）を超えないように抑えること	換気設備	地温の増大に伴う換気（冷房）容量の増加

○ 本報告書 下限深度に対して設定

深成岩類，先新第三紀堆積岩類 ⇒ 1,000 m（坑内の制限温度の設計要件から）

新第三紀堆積岩類 ⇒ 500 m（坑道の力学的安定性の設計要件から）

オーバーパックの設計要件（HLW）

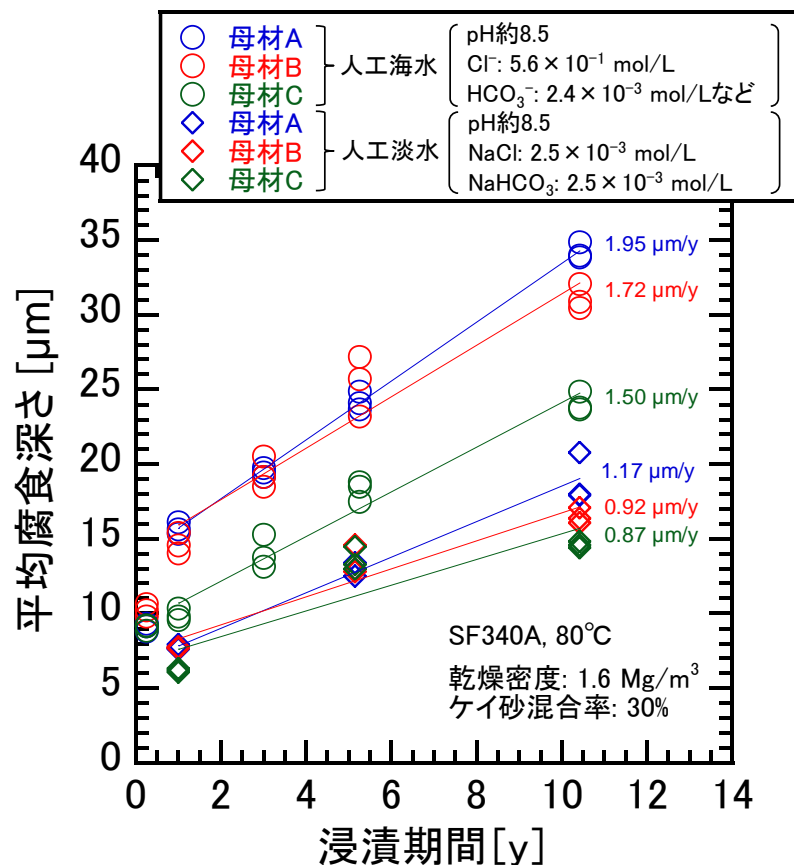
○期待する安全機能

ガラス固化体の放射能が大きく減衰する少なくとも**1,000年間はガラス固化体と地下水の接触を防止**する。

要求事項	設計要件	方法	指標	基準
廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止（閉鎖前） 放射性物質の溶出の抑制（閉鎖後長期）	耐食性	全面腐食であることを確認した上で、少なくとも1,000年間の最大腐食深さを見積り、その値以上の腐食代を設定する。	腐食代	> 1,000年間の最大腐食深さ
	構造健全性	オーバーパックに常時作用する荷重に対して、オーバーパックが許容状態以下となるように材料、形状、厚さを設定する。	オーバーパックの応力状態や変形状態	許容状態以下であること
	耐食性に対する放射線影響の抑制	オーバーパック表面の吸収線量率が、腐食速度が加速される吸収線量率のしきい値以下となるように、遮蔽代を設定する。	吸収線量率	≤ 3 Gy/h
実証された技術の適用	製作性	現在の技術で十分製作可能である材料および形状とする。	—	—
実現可能な作業工程・方法	遠隔封入性	遠隔操作によるガラス固化体の挿入が可能のように、クリアランスを設ける。また、遠隔操作による溶接が可能である溶接部構造とする。	—	—
	遠隔定置性	遠隔操作による定置が可能なオーバーパック形状および把持構造を設定する。	—	—

オーバーパックの必要厚さ

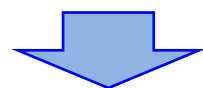
10年間の炭素鋼浸漬腐食試験や放射線分解生成物による腐食促進の評価など、耐食性に関する知見が拡充されたことを受け、オーバーパックに必要な厚さを見直した。



還元性環境における平均腐食速度の経時変化 (RWMC, 2017)

	深成岩 (縦置き方式)	
	平板部	円筒部
①必要腐食代 (埋設後初期の酸化性環境における腐食)	≥11	≥11
②必要腐食代 (埋設後長期の還元性環境における腐食)	≥6	≥6
③必要耐圧代 (静水圧等への耐圧性)	≥104	≥44
④必要遮蔽代 (放射線による腐食促進の防止)	≥80	≥80
オーバーパックの必要厚さ (①+Max(②+③,④))	≥121	≥91

※ 必要厚さ≥ 約160mm (第2次取りまとめ)



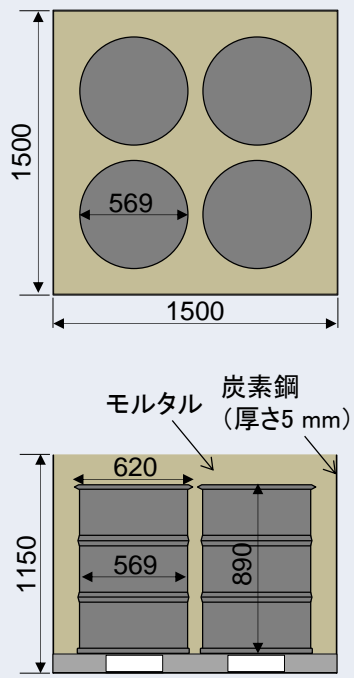
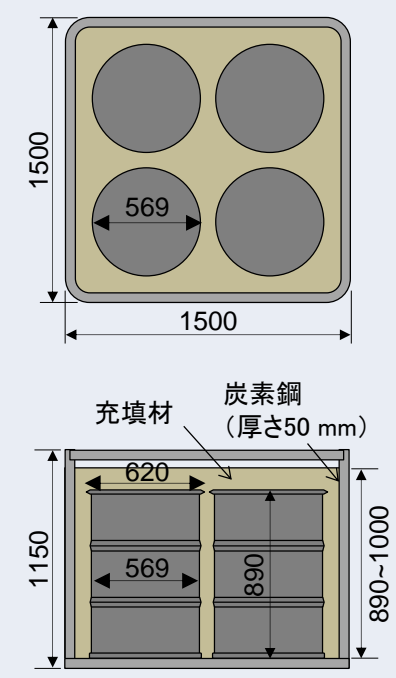
現状の設定値190mm

必要な安全機能の確保に対して設定値の余裕が高まった。

廃棄体パッケージの設計要件（TRU）

要求事項	設計要件	方法	指標	基準
廃棄体からの放射性物質の漏えいの防止（閉鎖前）	耐食性	操業中の大気腐食による腐食深さが、板厚と比較して顕著ではないことを確認する。	腐食深さ	板厚と比較して顕著でないこと
	構造健全性	操業中に作用する荷重に対して、廃棄体パッケージの許容状態以下となるように材料、形状、厚さを設定する。	オーバーパックの応力状態や変形状態	許容状態以下であること
実証された技術の適用	製作性	現在の技術で十分製作可能である材料および形状とする。	—	—
実現可能な作業工程・方法	遠隔封入性	遠隔操作による廃棄体の収容が可能ないように、クリアランスを設ける。また、遠隔操作による容器内の充填、溶接が可能構造とする。	—	—
	遠隔定置性	遠隔操作による定置が可能廃棄体パッケージ形状および把持構造を設定する。	—	—

廃棄体パッケージの仕様

種類	廃棄体パッケージ(A)	廃棄体パッケージ(B)
定置方法	フォークリフト	クレーン
参考仕様	第2次TRULレポート	低レベル放射性廃棄物の処分容器
材質/厚さ	炭素鋼 / 5 mm	炭素鋼 / 50 mm
寸法 (ドラム缶の例) 単位 : mm	 <p>Top view: 1500 mm x 1500 mm, 4 circles, 569 mm diameter.</p> <p>Side view: 1150 mm height, 620 mm width, 569 mm diameter, 890 mm drum height, mortar (炭素鋼 厚さ5mm).</p>	 <p>Top view: 1500 mm x 1500 mm, 4 circles, 569 mm diameter.</p> <p>Side view: 1150 mm height, 620 mm width, 569 mm diameter, 890 mm drum height, filling material (炭素鋼 厚さ50mm).</p>

緩衝材の設計要件

○期待する安全機能

- 地下水の流れを抑制するとともに、放射性物質を収着することによって、放射性物質の周辺岩盤への移行を抑制
- 力学的・化学的緩衝作用によってガラス固化体を封入したオーバーパックを保護

要求事項	設計要件	方法	指標	基準	対象	
					HLW	TRU
放射性物質の移流による移行の抑制	低透水性	緩衝材中の放射性物質の移行が拡散によって支配されるように、緩衝材の密度を設定する。	ペクレ数	0.1以下	●	●
	自己シール性	施工時の隙間を充填可能な膨潤性を有していることを確認する。	膨潤率／隙間体積比	2以上	●	
	コロイドろ過能	コロイドが緩衝材中を透過しないように、緩衝材の密度を設定する。	コロイド透過率	0	●	●
	自己修復性	ガス発生により亀裂が生じたとしても、閉塞することのできる密度を確認する。	破過前後の透水係数の増加割合	1以下	●	●
放射性物質の溶出の抑制 (オーバーパックの成立性に必要な事項)	微生物影響の防止	緩衝材内で微生物活動が生じないことを確認する。	菌体数	増殖しないこと	●	
	物理的緩衝性	オーバーパックの腐食膨張による緩衝材の圧密応力と地下水静水圧の和がオーバーパックの耐圧強度を下回ることを確認する。	緩衝材圧密反力と地下水静水圧の合計	オーバーパックの耐圧強度を下回り、急増しないこと	●	
実証された技術の適用	製作施工性	緩衝材の製作が可能であることを確認する。	有効粘土密度 (Mg/m ³)	HLW:1.8以下 TRU:1.6以下	●	●

<参考> 緩衝材設計の検討条件

○ 材料

- ・ ベントナイトを主成分（Na型のクニゲルV1）
- ・ ケイ砂の混合を考慮（熱伝導性，締固め性の向上）

○ 製作・施工方法と隙間の状態

対象	製作方法	隙間の状態
HLW（縦置き）	圧縮成型（ブロック）	2 cm（オーバーパック～緩衝材） 4 cm（緩衝材～処分孔）
HLW（横置き）	PEM容器内での締固め	2 cm（オーバーパック～緩衝材）
TRU等廃棄物※	現場締固め，吹付け工法	なし

※ TRU等廃棄物において緩衝材は廃棄体グループ1,2,4Hに対して設置（非収着性，高発熱の廃棄体）

○ 地下水の水質

- ・ 淡水，海水相当の塩水（降水起源～沿岸部の海水起源の地下水への対応）

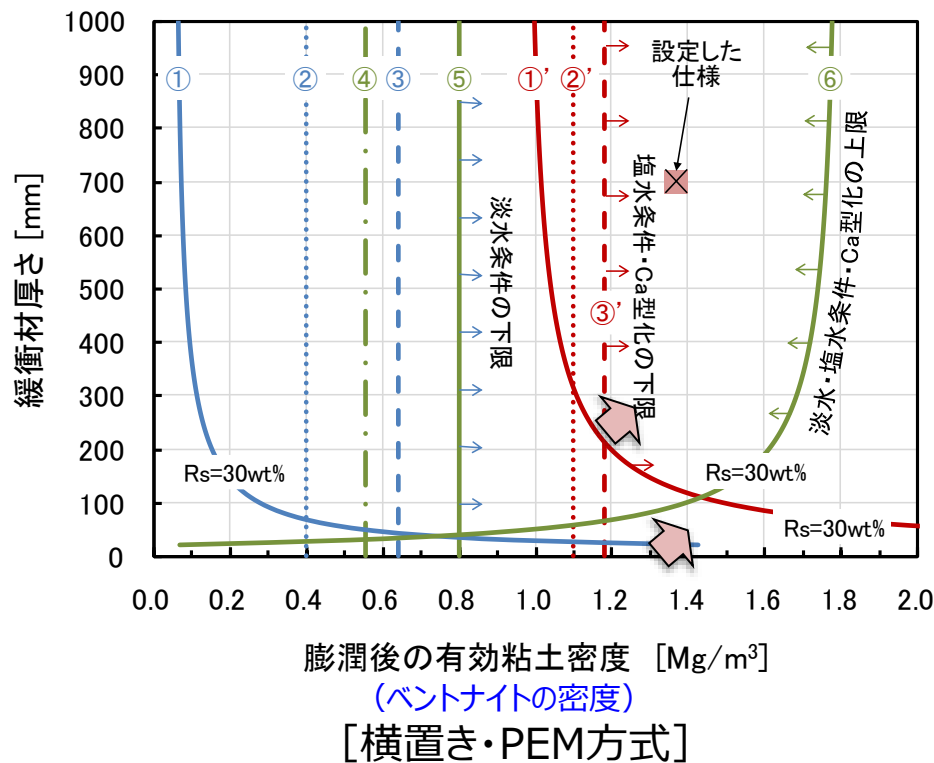
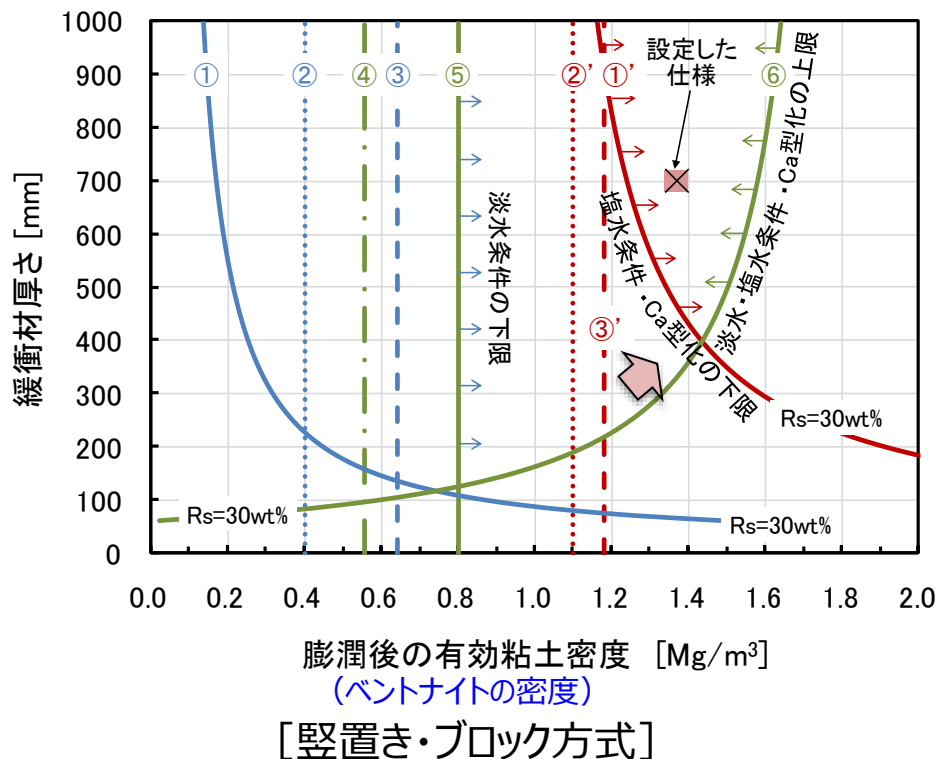
○ ベントナイトのCa型化

- ・ 坑道内のコンクリート製残置物からのCaの拡散による交換性陽イオンの置換（特に，TRU等廃棄物）

設計要件を満足する緩衝材の有効粘土密度と厚さの関係 (HLW)

- ① 自己シール性を有する下限(淡水)
- ② 低透水性を有する下限(淡水)
- ③ 自己修復性を有する下限(淡水)
- ④ 微生物影響を防止する下限(共通)
- ⑤ コロイドろ過能を有する下限(共通)
- ⑥ 製作施工性の上限(共通)
- ①' 自己シール性を有する下限(塩水, Ca型化)
- ②' 低透水性を有する下限(塩水, Ca型化)
- ③' 自己修復性を有する下限(塩水, Ca型化)
- ⑤ コロイドろ過能を有する下限(共通)

- ① 自己シール性を有する下限(淡水)
- ② 低透水性を有する下限(淡水)
- ③ 自己修復性を有する下限(淡水)
- ④ 微生物影響を防止する下限(共通)
- ⑤ コロイドろ過能を有する下限(共通)
- ⑥ 製作施工性の上限(共通)
- ①' 自己シール性を有する下限(塩水, Ca型化)
- ②' 低透水性を有する下限(塩水, Ca型化)
- ③' 自己修復性を有する下限(塩水, Ca型化)

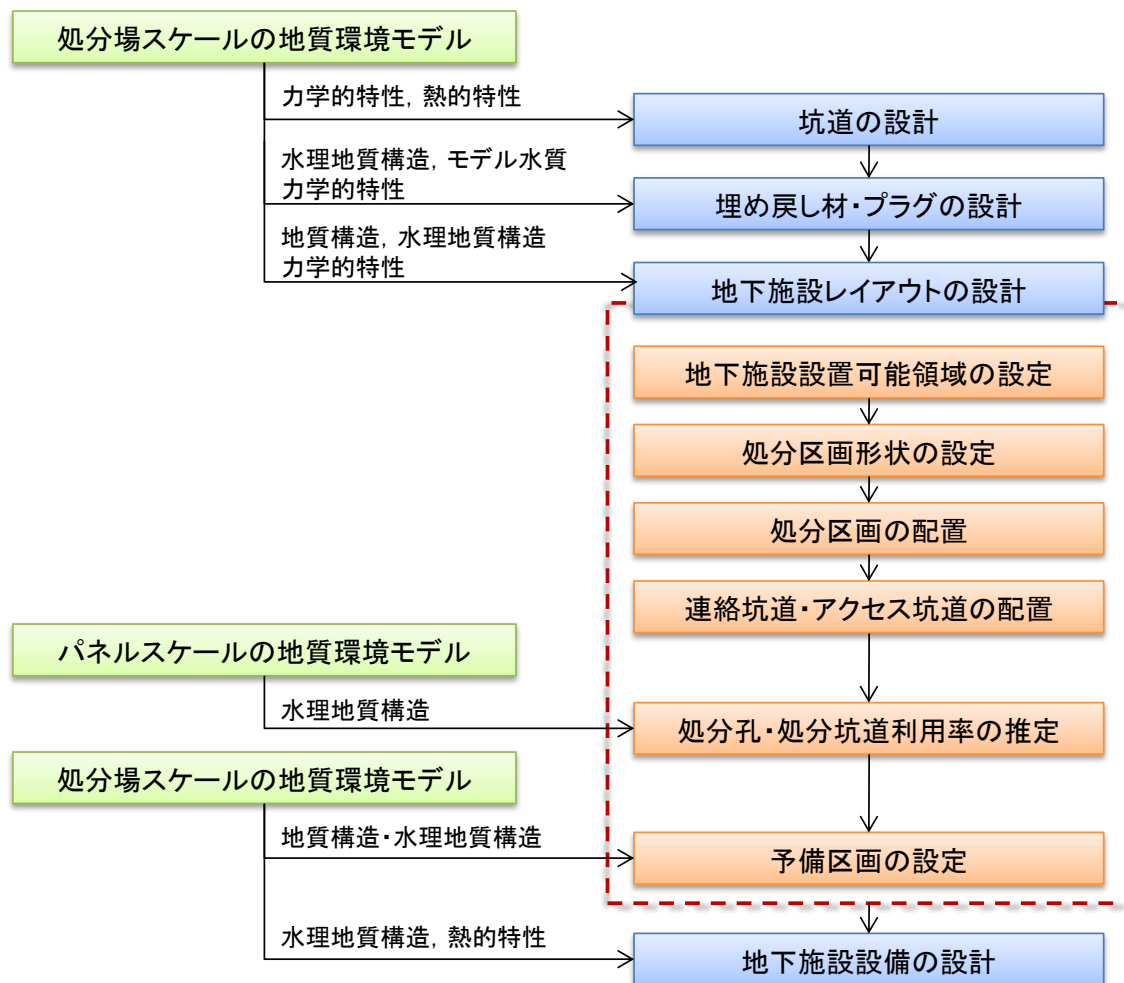


- ・ 上記の設計要件を満足する十分な安全性の余裕を考慮した必要厚さ、密度を設定⇒ 合理化の方向性
- ・ PEM方式の場合は緩衝材の膨潤により充填する隙間が少なくできるため、自己シール性の仕様成立範囲はより広範囲

レビュー対応のポイント💡
不確実性への対応
沿岸海底下処分場の設計

地下施設の設計手順

- ① **坑道の設計**：それぞれの坑道に必要な断面形状・寸法，および，設定した設置深度における空洞安定性の評価に基づいて支保を設計
- ② **埋め戻し材・プラグの設計**：坑道周囲の掘削損傷領域（EDZ）の地下水流動特性に対する影響を考慮したうえで，埋め戻し材の仕様，プラグの仕様とその設置位置を設計
- ③ **地下施設レイアウトの設計**：坑道断面と埋め戻し材・プラグの仕様を考慮し，処分区画の規模や形状，配置，連絡坑道の配置やアクセス坑道の本数，配置などを検討し，地下施設全体のレイアウトを設計
- ④ **地下施設設備の設計**：換気・冷房設備，排水設備など，設計した地下施設レイアウトを対象として設計



坑道の設計要件

○期待する安全機能

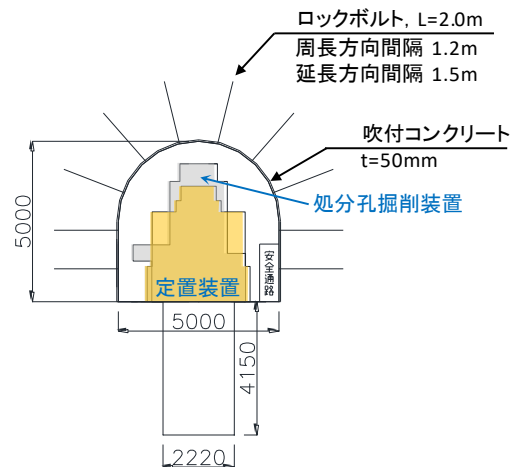
- 設計因子である「閉鎖前の安全性」に関する要求事項（安全機能）として、**一般労働安全**にかかわる「**労働災害の発生・拡大の防止**」,**緊急時の避難経路の確保**」,**作業環境の維持**」を設定
- 放射性物質の移行の抑制に必要な**緩衝材の成立性**（温度環境）の確保

要求事項	設計要件	内容	設計項目
労働災害の発生・拡大の防止	空洞安定性	建設・操業が安全かつ円滑に行われるよう坑道の力学的安定性が確保できること	坑道形状, 内空径 支保工, 廃棄体定置間隔, 処分坑道中心間距離
	坑壁剥落防止	坑壁の剥落を防止すること	支保工
緊急時の避難経路の確保	安全通路の確保	作業従事者が立ち入る区画については, 安全通路が確保されること	坑道形状, 内空径
作業環境の維持	収容性	人工バリアの設置, 建設・操業に必要な設備・機器, 換気・排水設備などのユーティリティ設備に必要な空間を確保すること	坑道形状, 内空径
放射性物質の移行の抑制 (緩衝材の成立性に必要な事項)	廃棄体の発熱影響の低減	廃棄体からの熱影響により人工バリアの性能が著しく低下しないこと	処分坑道中心間距離, 廃棄体定置間隔

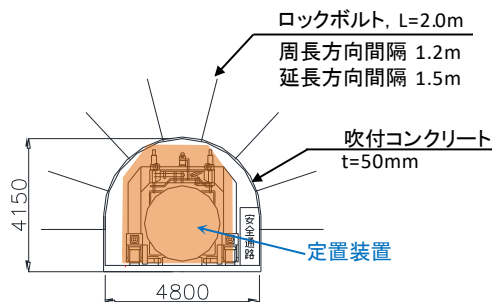
坑道の設計例

～HLWの処分坑道断面と支保仕様の検討例～

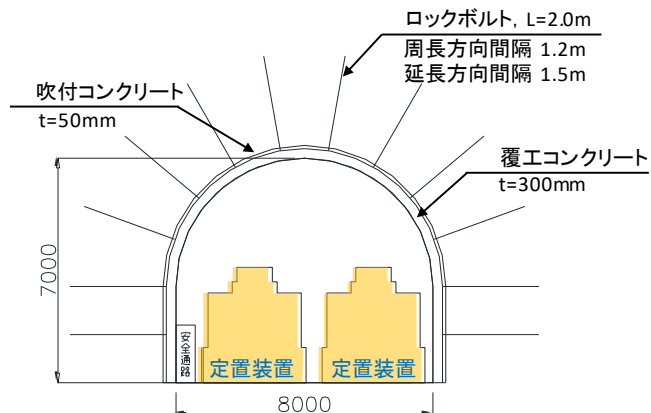
深成岩／先新第三紀堆積岩モデル



縦置きの処分坑道

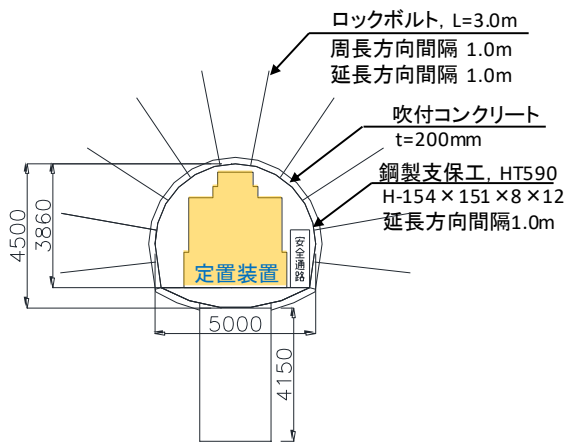


横置き・PEM方式の処分坑道

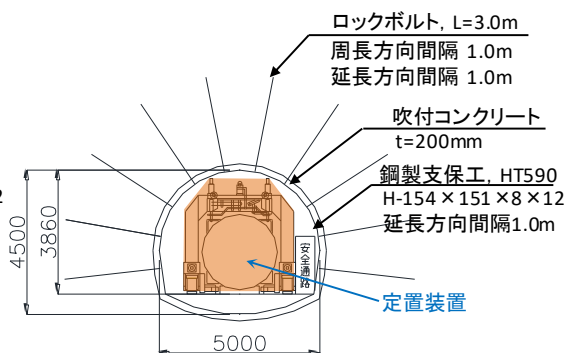


連絡坑道

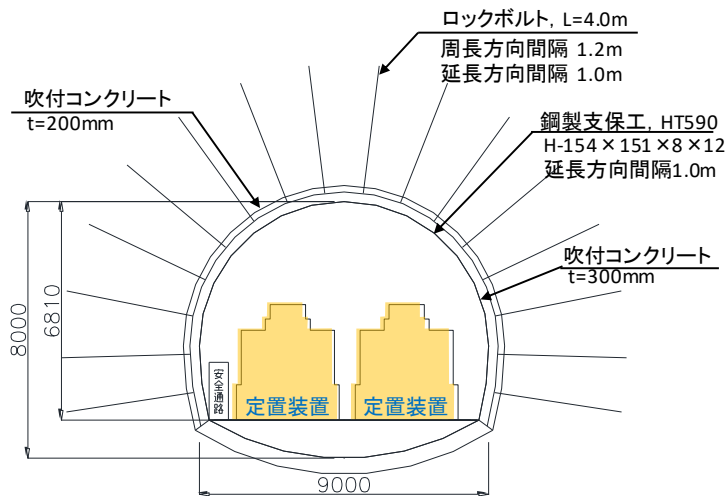
新第三紀堆積岩モデル



縦置きの処分坑道

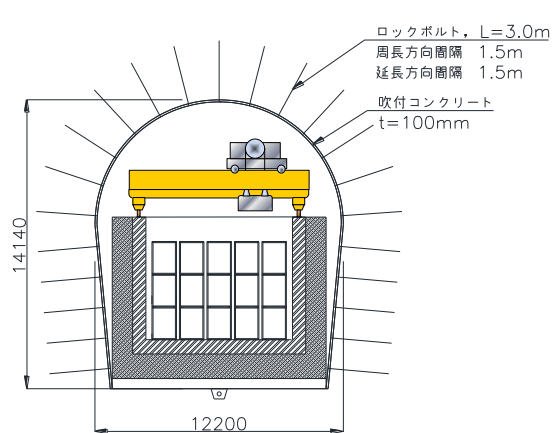


横置き・PEM方式の処分坑道

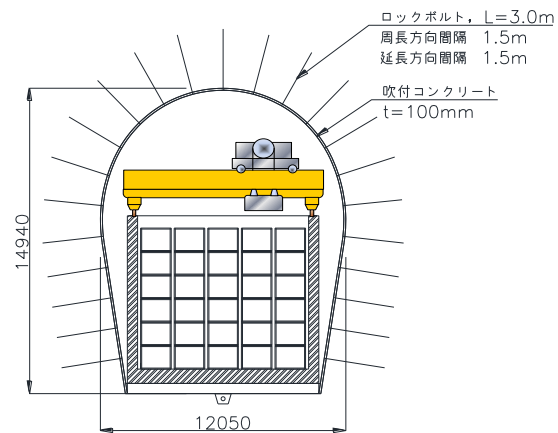


連絡坑道

深成岩／先新第三紀堆積岩モデル

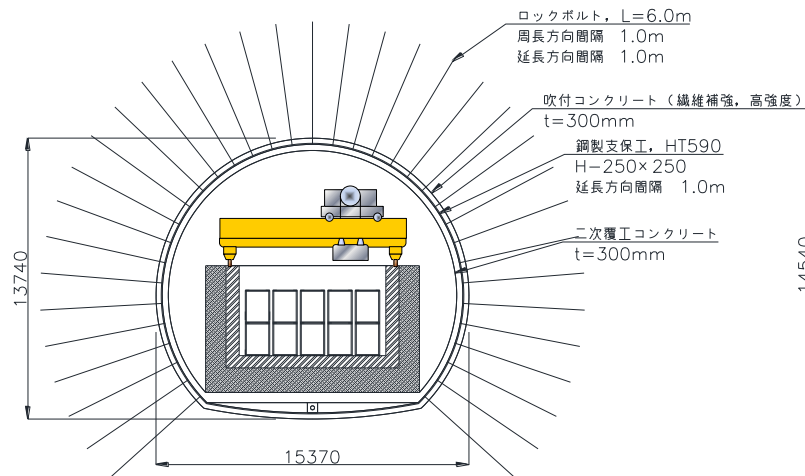


(a) グループ2

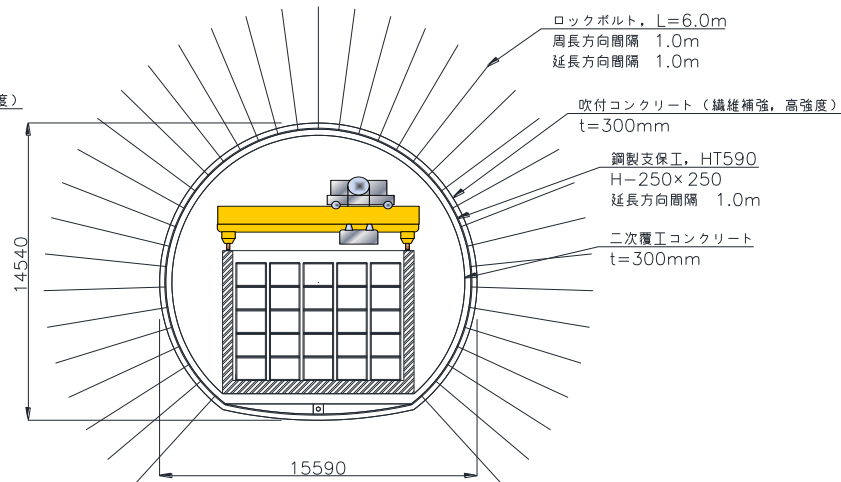


(b) グループ3

新第三紀堆積岩モデル



(c) グループ2



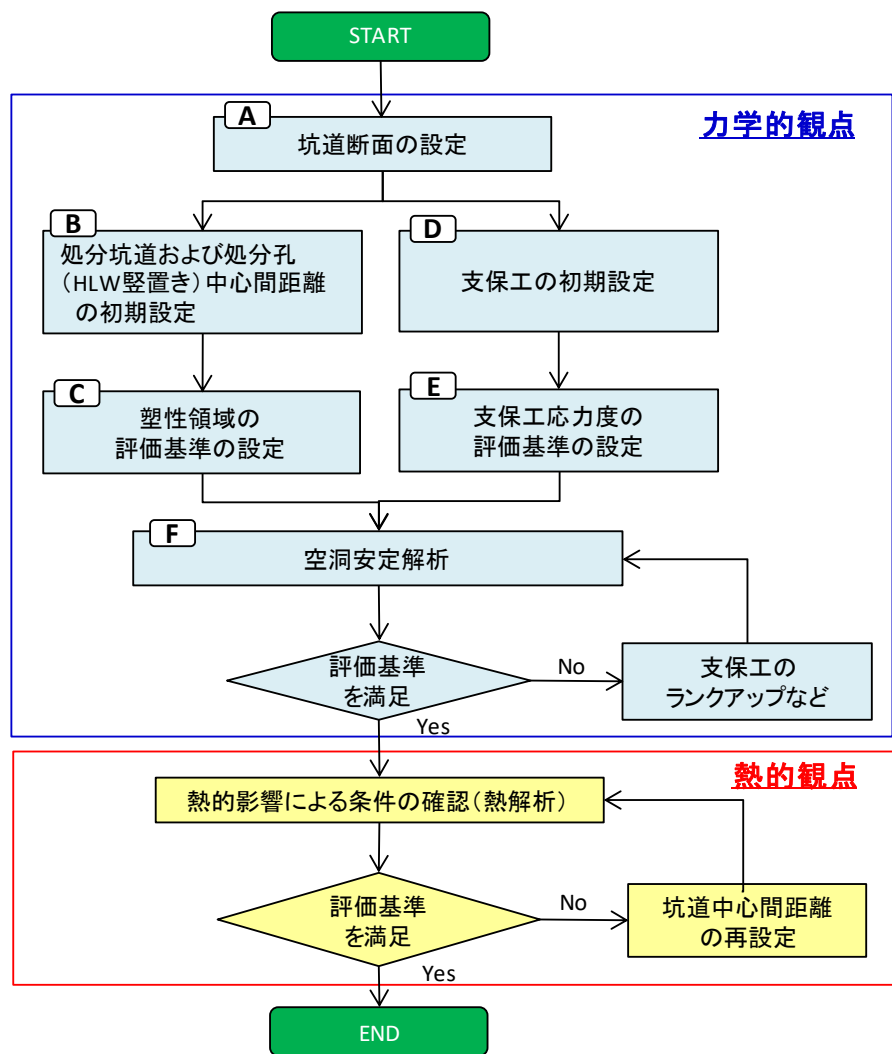
(d) グループ3

処分場の坑道の役割

役割	アクセス坑道 (斜坑)	アクセス坑道 (立坑※)	連絡坑道 主要坑道 取付坑道	処分坑道
廃棄体および操業関連機 械などの搬送通路	●	—	●	●
作業従事者の移動通路	—	●	●	—
建設機械の移動通路	—	●	●	—
掘削土の搬出路	—	●	●	—
換気経路	●	●	●	—
排水経路・給水経路	—	●	●	—
給電・通信路	—	●	●	—
緊急時避難経路	●	●	●	—

※ 立坑は複数配置し、各立坑の役割は配置に応じて割り当てる。

処分坑道中心間距離の設定

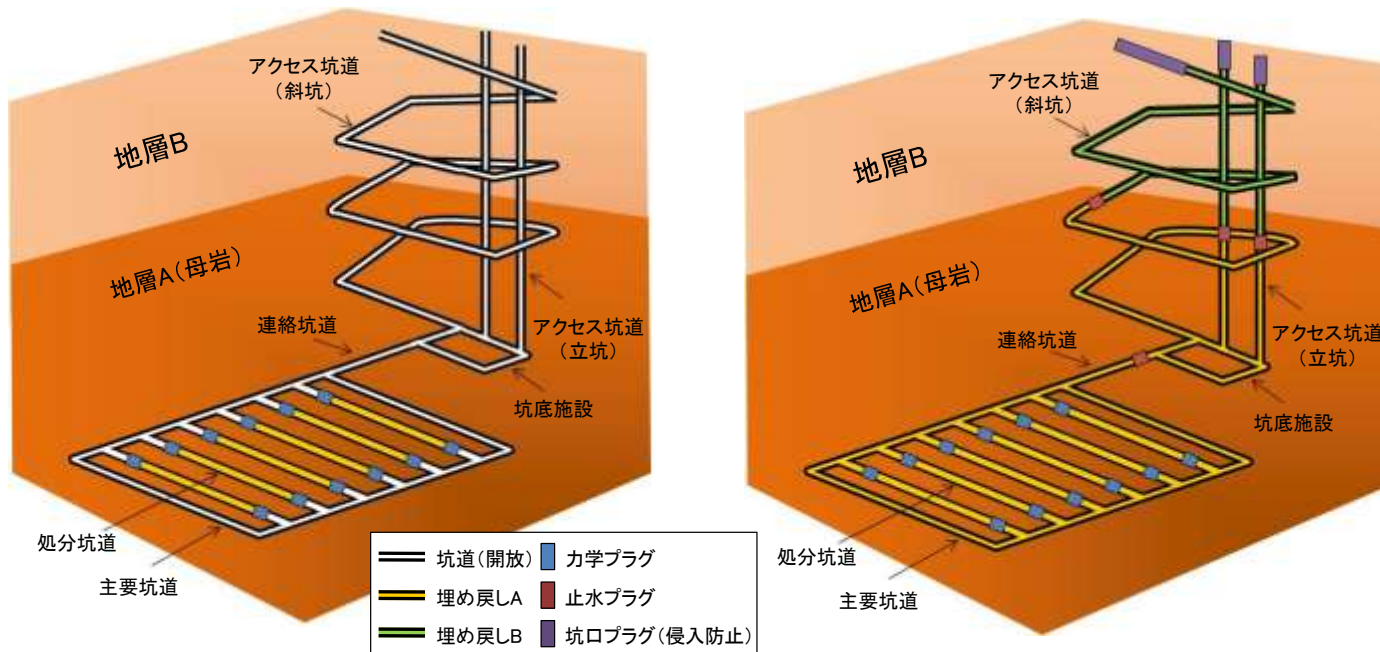


処分坑道中心間距離の設定フロー

処分坑道中心間距離の設定結果 (HLW)

条件		縦置き・ブロック方式		横置き・PEM方式			
		パネル型		デッドエンド型			
		深成岩類	新第三紀堆積岩類	先新第三紀堆積岩類	深成岩類	新第三紀堆積岩類	先新第三紀堆積岩類
空洞安定性	処分坑道のみ	10.0 m	12.0 m	10.0 m	9.6 m	12.0 m	9.6 m
	取付部考慮	—	—	16.0 m	16.0 m	21.6 m	16.0 m
廃棄体熱影響	貯蔵期間 50年	10.0 m	12.0 m	10.0 m	11.0 m	12.0 m	11.0 m
設定値 (最大値)		10.0 m	12.0 m	16.0 m	16.0 m	21.6 m	16.0 m

埋め戻し材・プラグの設置



(a) 操業期間（処分坑道の埋め戻しと力学プラグの設置）

(b) 処分場の閉鎖（全坑道の埋め戻しと止水プラグの設置）

坑道の埋め戻しとプラグの設置イメージ

坑道シーリングの構成要素に期待する機能と役割

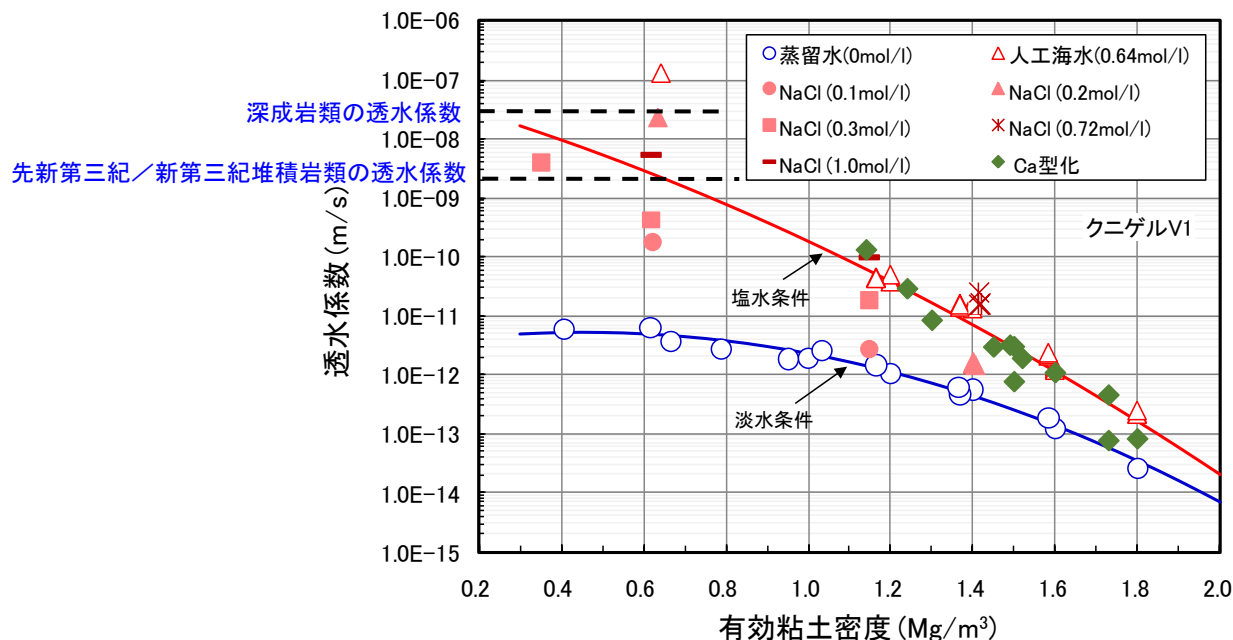
構成要素	要求事項	機能/役割の説明
止水プラグ	放射性物質の移行の抑制	• 埋め戻し材との組み合わせで閉鎖後のアクセス坑道およびその周辺が放射性物質の移行経路になることを防止
埋め戻し材		• 放射性物質の移行経路となるような地下水の流れを抑制
力学プラグ	緩衝材／止水プラグの成立性に必要な事項	• 再冠水後の緩衝材や止水プラグ（粘土プラグ）の坑道への膨出を抑制
		• 処分坑道において埋め戻しの完了していない空間側への埋め戻し材の膨出を抑制

- 廃棄体を定置した後の処分坑道は、操業期間中に埋め戻すことを想定
- 閉鎖措置の段階では処分場を地上から隔離することを目的として、連絡坑道、アクセス坑道などの埋め戻しを実施
- 埋め戻し材の施工と処分場の隔離を確実にするため、力学プラグと止水プラグを設置

埋め戻し材の設計

設計要件	確認方法	指標	基準
低透水性	坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないように、埋め戻し材の密度を設定する。	透水係数	母岩の平均的な透水係数の10倍以下
製作施工性	坑道内での埋め戻し施工が可能な密度であることを確認する。	乾燥密度	1.8 Mg/m ³ 以下

評価項目	確認方法	指標	基準
緩衝材および止水プラグの膨出抑制	再冠水後の緩衝材および止水プラグの膨出を抑制し、これらの有効粘土密度が仕様成立範囲に収まることを、埋め戻し材仕様に対して確認する。	有効粘土密度 (緩衝材, 止水プラグ)	1.2 Mg/m ³ 以上



ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係

(松本ほか, 1997 ; 棚井ほか, 1998 ; 菊池ほか, 2003 ; 日本原子力研究所, 2003 ; 笹倉ほか, 2003 ; 菊池ほか, 2005 ; に基づき作成)

埋め戻し材の仕様例

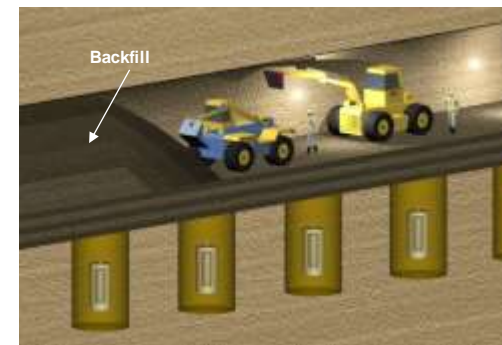
No.	仕様	対象坑道	施工方法
1	配合：ベントナイト／掘削土 = 15% / 85% 乾燥密度：1.8 Mg/m ³ 有効粘土密度：0.6 Mg/m ³	処分坑道（HLW縦置き方式），処分坑道（TRU），連絡坑道，取付坑道，主要坑道，アクセス斜坑，アクセス立坑	撒き出し・締固め工法
2	配合：ベントナイト／掘削土 = 50% / 50% 乾燥密度：1.6 Mg/m ³ 有効粘土密度：1.2 Mg/m ³	処分坑道（HLW横置き・PEM方式）	吹付け工法 （遠隔操作による）

■ 仕様 No.1

- 対象とする坑道で作業空間の放射線遮蔽が確保されていることから，施工機械の運転など埋め戻し作業を直接人間が行うことが可能であり，幅広い実績と効率性から「撒き出し・締固め工法」を採用。
- 「膨出抑制」の観点から最も低圧縮になる（乾燥密度が高くなる）配合条件を設定。

■ 仕様 No.2

- 緩衝材による放射線遮蔽効果が期待できるが，安全性の高い放射線防護の観点から，埋め戻し作業は遠隔操作による無人化施工で行うことを想定。PEM容器と坑道間の隙間が比較的大きいこと，砂分を多く含む場合の配合や密度に対して適用範囲の広い「吹付け工法」を採用。
- 遠隔操作による施工を想定することから，施工時の隙間充填性に対する品質の余裕を見込んで，直接施工による仕様No.1の場合よりも「膨潤性」と「低透水性」の高い仕様を設定。



撒き出し・締固め工法による坑道の埋め戻し作業のイメージ（縦置き方式）



吹付け工法による坑道の埋め戻し作業のイメージ（横置き方式）

止水プラグの設計

要求事項

- 閉鎖後の**アクセス坑道およびその周辺**が放射性物質の移行経路になることを防ぐ。

設計概念の特徴

- アクセス坑道に接続する連絡坑道に設置
- 止水プラグにより掘削前の母岩相当となる低透水性の領域を設けることで、連絡坑道とアクセス坑道間に天然バリアと同等の水理的な状態を創出
- EDZを含む坑道を通じた地上への移行経路を分断**

設計要件

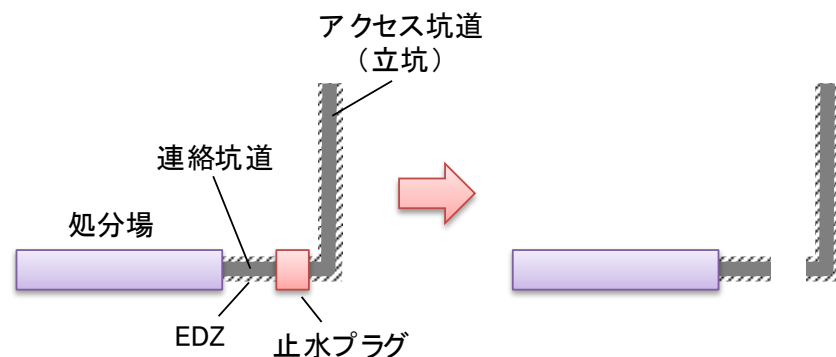
設計要件	内容	対応
低透水性	坑道埋め戻し材との組み合わせで、坑道およびその周辺に沿った地下水の流動を抑制すること	<ul style="list-style-type: none"> ベントナイトの使用(材料) EDZ幅を上回る切欠き(構造)
施工の実現性	既存の技術または実現性のある技術で見通しのある技術で施工可能であること	<ul style="list-style-type: none"> 締固めたベントナイトブロックの積み上げ

設計手順

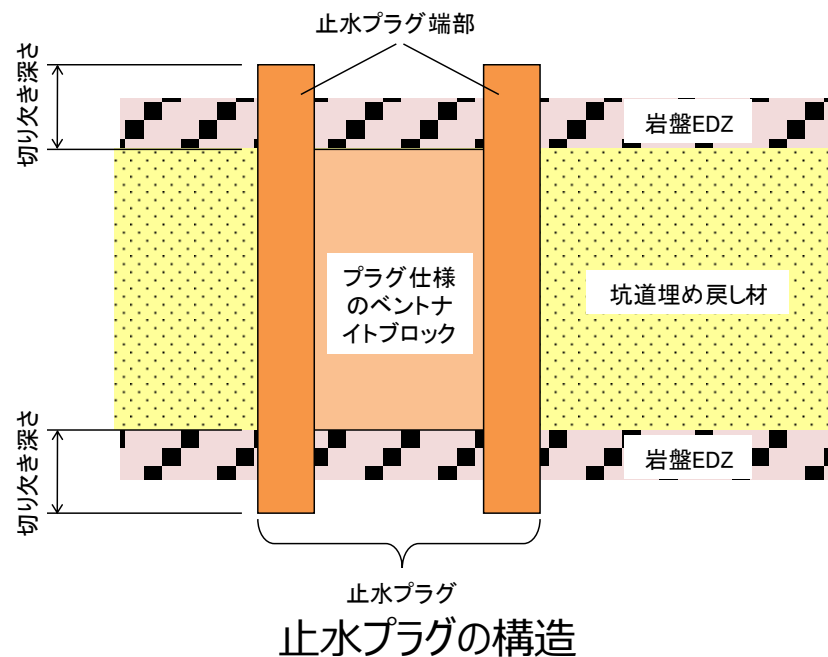
材料選定

材料仕様の設定

構造仕様の設定



止水プラグによる坑道シーリングの概念



止水プラグの構造

止水プラグの設計要件と仕様例

○ 材料に対する設計要件

設計要件	内容	指標	基準
低透水性	止水プラグ中の放射性物質の移行が拡散によって支配されるように、密度を設定する。	ペクレ数	0.1以下
製作施工性	ベントナイトブロックが製作可能な密度であることを確認する。	有効粘土密度	1.8Mg/m ³ 以下

○ 構造に対する設計要件

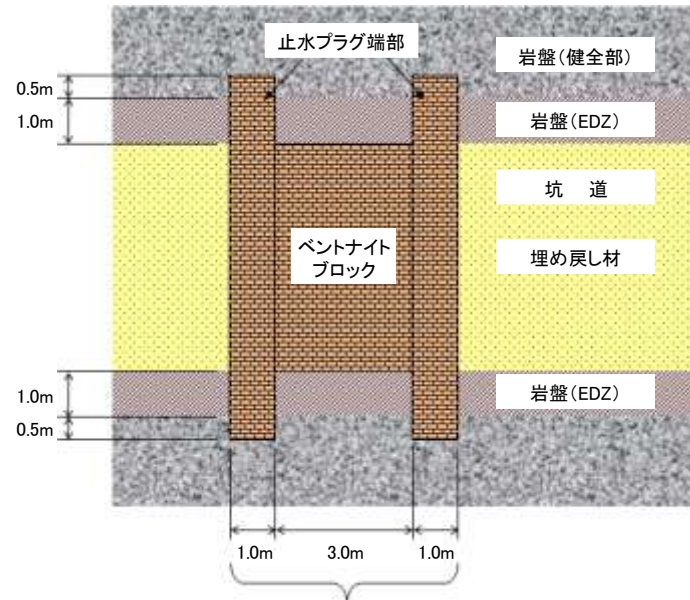
設計要件	内容	指標	基準
低透水性	坑道およびその周辺に沿った地下水の流動を分断するように、掘削前の母岩に相当する低透水性の領域が設定されていることを、止水プラグの仕様に対して確認する。	地下水通過流量	掘削前の母岩以下

材料の仕様成立範囲

設計要件	有効粘土密度 [Mg/m ³]			適用
	淡水条件	塩水条件	Ca型化	
低透水性	0.4	1.1	1.1	下限
製作施工性	1.8 (ブロック)			上限
共通仕様	1.1 ~ 1.8			

止水プラグの材料仕様

配合 (乾燥重量比)	乾燥密度 [Mg/m ³]	有効粘土密度 [Mg/m ³]	備考
ベントナイト 70 % ケイ砂 30 %	1.6	1.4	ベントナイトブロック 製作の目標密度

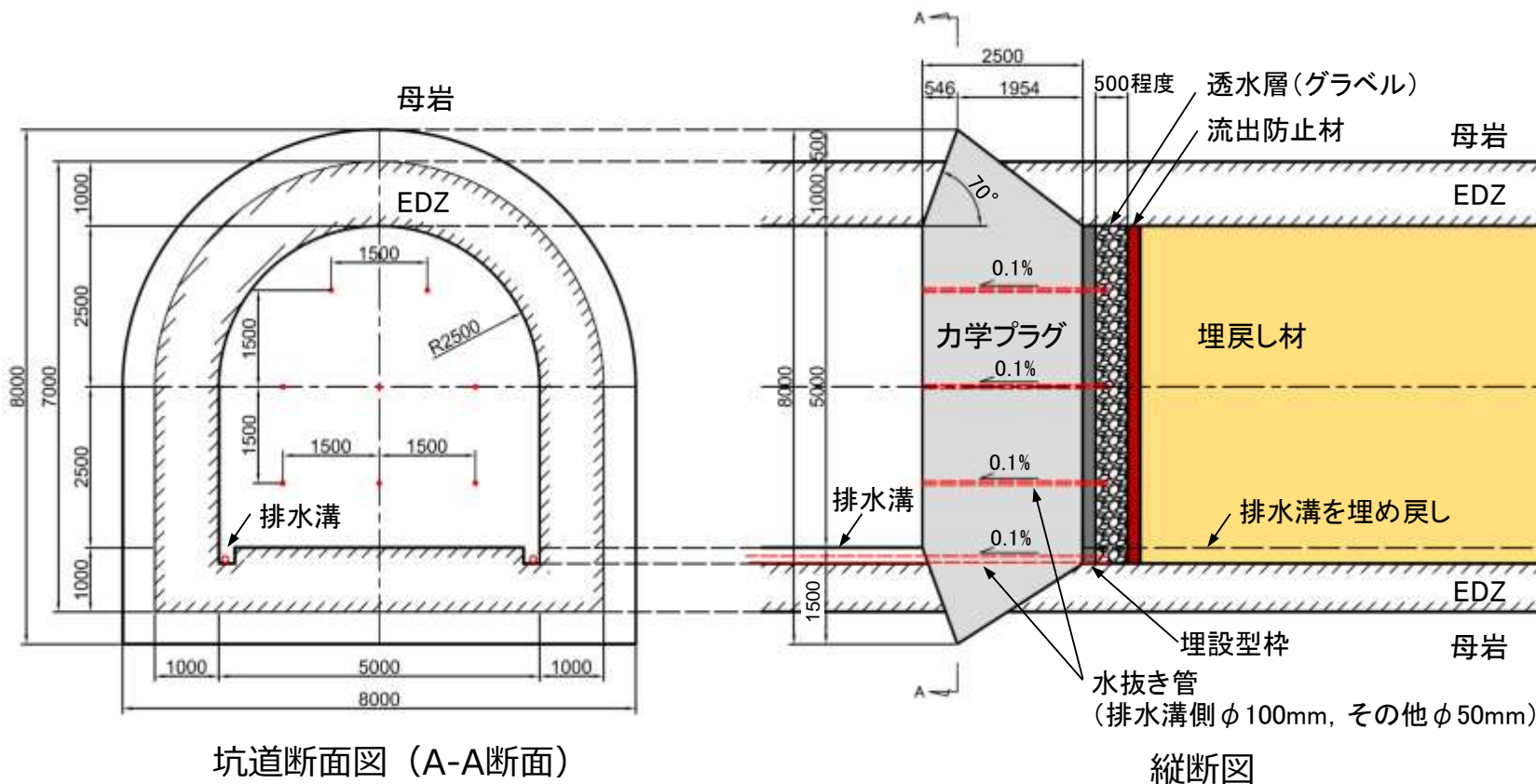


止水プラグ
設計した止水プラグの構造

カ学プラグの設計要件と仕様例

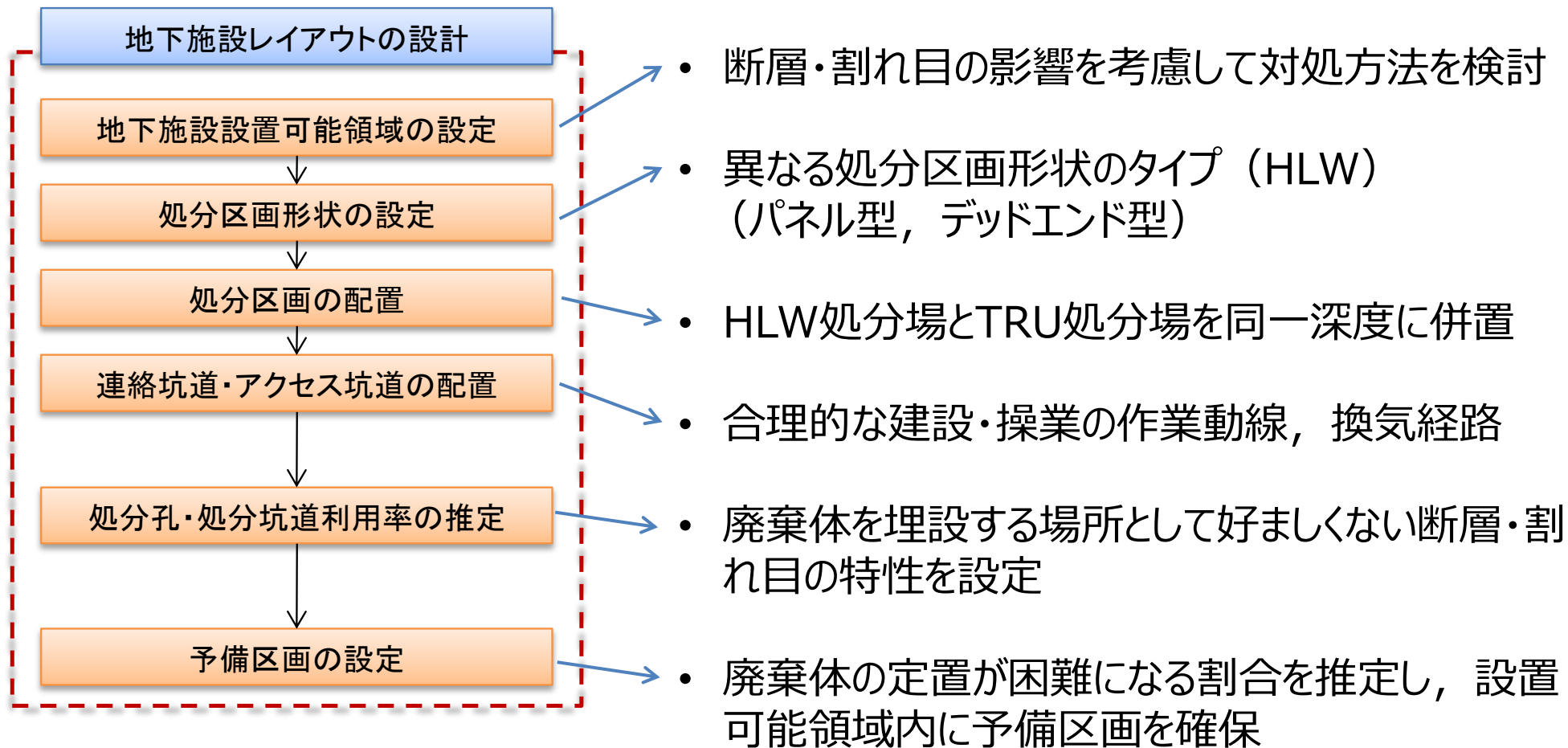
○ 設計要件

設計要件	内容	指標	基準
構造健全性	カ学プラグに作用する荷重と発生断面力に対して構造健全性を維持し、埋め戻し材の膨出を防止できることを、カ学プラグの仕様に対して確認する。	曲げ応力度 せん断応力度	許容応力度 以下
製作施工性	カ学プラグが施工可能であること、設計条件を満たすコンクリートの配合が可能であることを確認する。	28日材齢の強度	設計基準強度 以上



設計したカ学プラグの構造

レイアウトの設計における特徴的な検討内容/条件



地下施設レイアウトの設計 ～断層，割れ目に対する対処～

断層，割れ目の分類	地質環境モデルの構築における考え方	地下施設の設計での取り扱い
長さ 10 km以上の断層	<ul style="list-style-type: none"> 活断層の可能性のある断層と想定 文献調査から精密調査の前半の段階において除外する断層 広域スケールの地質構造モデルで記載するが，処分場スケールのモデル領域からは除外 	左記の対応により， 地下施設レイアウトの検討では対象から除外
長さ 1～10 kmの断層	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査から精密調査の前半の段階においてその位置や特性を概ね把握できる断層 広域スケールおよび処分場スケールの地質環境モデルにその分布が記載される断層 	異常出水などにより掘削に支障を生じる可能性があるため， 処分坑道の配置において断層が分布する領域を除外 ⇒ レイアウト決定特性（LDF）に設定
長さ 1 km未満の断層	<ul style="list-style-type: none"> 母岩中に普遍的に分布 概要調査および精密調査の段階においてすべてを検出することは現実的ではなく，その性状の把握や統計量の算出を目的とした調査・評価にて確認 パネルスケールの地質環境モデルで記載される断層 	<ul style="list-style-type: none"> 処分区画の設置領域に分布することを許容 湧水対策の観点から処分坑道または処分孔の掘削，緩衝材の施工に支障が生じる可能性がある場合には，分布箇所を廃棄体定置箇所から除外 ⇒定置位置決定特性（EDF）に設定

レイアウト決定特性（LDF）：Layout Determining Featuresの略

定置位置決定特性（EDF）：Emplacement Determining Featuresの略

地下施設レイアウトの設計要件(1/2)

地下施設設置可能領域の設定に関する設計要件

設計要件	分類※	内容	設計項目
坑道掘削の容易性	—	坑道の掘削の支障となるような現象が少ないこと	地下施設設置可能領域の設定
湧水量の低減	—	建設・操業中の湧水量ができる限り少ないこと	地下施設設置可能領域の設定
閉鎖後長期の放射性物質の移行の抑制	—	相対的に地下水移行時間の長い所に優先的に配置できる領域であること	地下施設設置可能領域の設定

【レイアウト決定特性（LDF）】

設計要件に対して考慮が必要な地質学的特性を整理

- ・長さ1～10kmの断層に着目
- ・断層長さの1/100の幅を保守的に断層破碎帯を有する断層の影響範囲とみなす
- ・長さ1km以上の断層は、坑道径10m程度の幅の破碎帯を伴う可能性があり、掘削に支障が生じる可能性があると考え

設計要件	考慮すべきリスク	考慮すべき地質学的特性（LDF）
坑道掘削の容易性	処分坑道の切羽の崩落	断層
	異常出水	断層
湧水量の低減	操業中の湧水の処理量（排水量）の増大	断層
閉鎖後長期の放射性物質の移行の抑制	速い地下水流動による放射性物質の移行	断層 岩盤の透水性、地下水移行時間

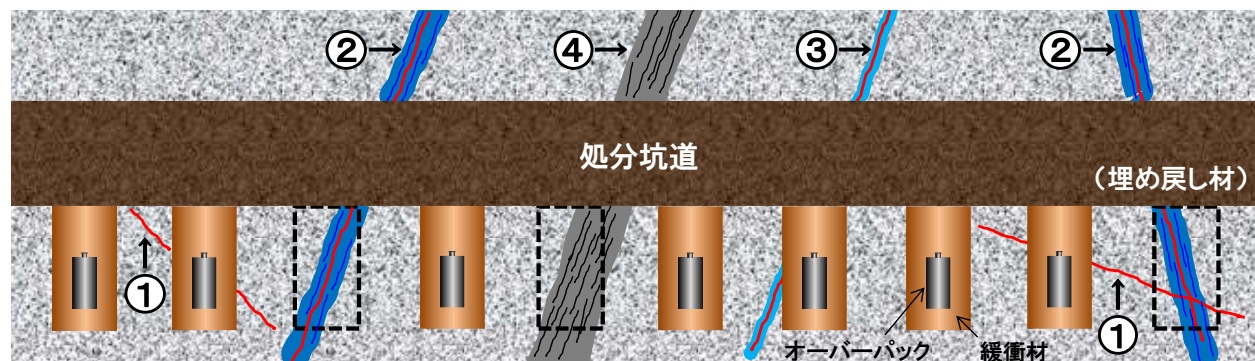
<参考> 定置位置決定特性 (EDF)

● 長さ1km未満の断層・割れ目への対処

処分孔の掘削，緩衝材や埋め戻し材の施工の観点から好ましくないケースを想定し，以下の分類に応じて対処

- ① 湧水を伴わない断層・割れ目：処分孔に接していたとしても支障なし
- ② 透水性の断層・割れ目：湧水量が大きく支障があり，グラウチングによる湧水量低減や処分孔を利用しない対策を設定
- ③ 透水性の断層・割れ目：湧水量が小さく支障なし
- ④ 断層・割れ目が密集し力学的な強度が低下している領域：

力学的強度が低下している範囲の支保工の補強などによる安定化，廃棄体定置箇所から除外



廃棄体を埋設する場所として好ましくない特性の模式図
(高レベル放射性廃棄物処分場の縦置き・ブロック方式の例)

- 処分孔の掘削および緩衝材ブロックの処分孔への**定置の可否**について，断層・割れ目からの湧水量を指標として決定（長さ1km未満の断層・割れ目地質学的特性を**EDF**と設定）
- **EDFの基準値**
 - 処分孔内の**単位時間湧水量**が判断指標
 - 緩衝材の施工後から埋め戻しが完了するまでの間に，湧水とともに緩衝材が流出する**パイピング現象**により，緩衝材の閉鎖後の安全機能が損なわれることを防止

地下施設レイアウトの設計要件(2/2)

処分区画の配置の設計要件

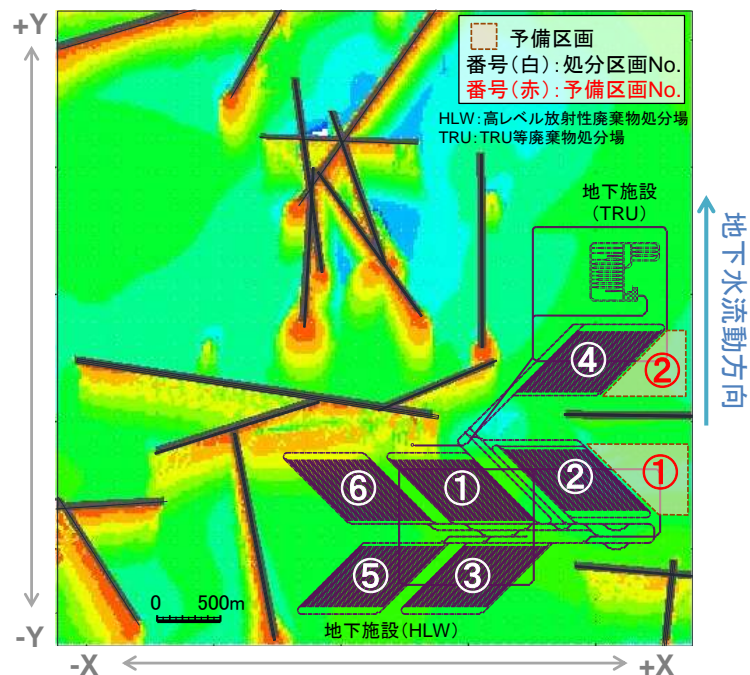
設計要件	分類※	内容	設計項目
処分坑道に沿った地下水流動の抑制	—	地下水流動方向に対して処分坑道の方向が直交であること	処分坑道の配置方向
処分坑道の空洞安定性確保	—	最大主応力と処分坑道の方向が一致していること	処分坑道の配置方向 坑道仕様
排水経路の確保	—	放射線管理区域を通過した湧水がほかの処分区画へ移動しないよう、処分坑道の勾配および処分区画全体の傾斜が設定されていること 出来るだけ自然流下による排水が可能なこと	処分坑道の勾配
併置処分に伴う相互影響の低減	○	HLWおよびTRUの処分区画が相互に熱的あるいは化学的影響を与えることのないように、処分区画を配置すること	HLWおよびTRUの処分区画の配置

連絡坑道・アクセス坑道の配置の設計要件

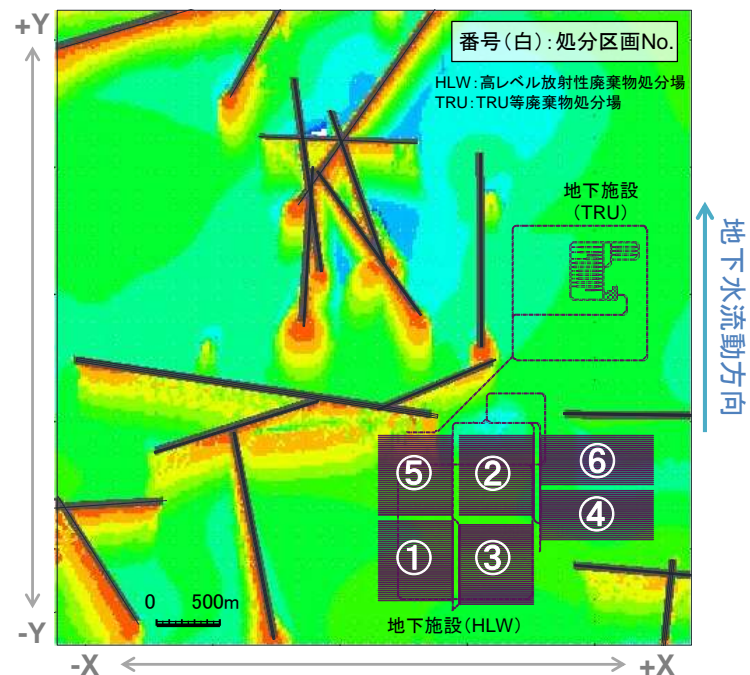
設計要件	分類※	内容	設計項目
坑道の力学安定性の確保	○	接続した坑道において空洞安定性が確保できること	坑道離間距離
作業動線の独立性の確保	○	建設資機材搬入、掘削土の搬出、廃棄体定置、埋め戻しの各作業動線が独立していること（建設と定置・埋め戻しの動線が交差しない）	坑道の配置 立坑の本数と本数
換気経路の独立性の確保	○	作業動線に応じた換気経路が確保されていること、放射線管理区域と非管理区域で排気の経路が独立していること	坑道の配置 立坑の本数と本数
排水経路の独立性の確保	○	作業動線に応じた排水経路が確保されていること、かつ、放射線管理区域と非管理区域で排水経路が独立していること	連絡坑道の配置および勾配
避難経路の確保	○	建設・操業に伴う災害に備えて、避難経路が確保されていること、避難経路が確保できない場合に備えて、緊急退避所が備えられていること	避難経路 緊急待避所
アクセス斜坑の限界勾配	○	運搬方式に応じた限界勾配以下とすること	アクセス斜坑の勾配

※ ○：地下施設レイアウトの設計に必須の要件，－：好ましい要件

地下施設レイアウトの設計例（深成岩類）



縦置き・ブロック方式の
パネル型



横置きPEM方式の
デッドエンド型

- 複雑な地質構造に対しても、地下水移行時間が短い位置、および断層破碎帯の分布位置を避けて処分区画を配置
- TRU等廃棄物処分場との併置（HLW処分場の下流側に設置）
- 処分坑道内の湧水による定置率が低い場合にも、予備区画を準備することで所定数量の廃棄体を埋設

<設計要件>

設計要件	内容	設計項目
作業エリアの酸素濃度の維持	作業エリアの酸素濃度を維持するため、必要量の空気を送気できること	換気ファン, 風門
可燃性ガスの希釈	地質環境条件によって坑道内に発生する可燃性ガス（メタンガス等）を希釈し、地上に排出できること	換気ファン, 風門
有害ガスや粉塵の希釈	建設工事に伴って坑道内に発生する有害ガス（発破の後ガスや機械の排出ガス）や粉塵などを希釈し、地上に排出できること	換気ファン, 風門, 集じん機
作業エリアの温度の維持	作業エリアの温度が適温となるように、岩盤や建設機械によって熱せられた空気を冷却できること	冷却設備能力
坑道内の通気速度制限	坑道内の通気速度が定められた通気速度基準を超えないこと	換気ファン, 風門
事故時の放射性物質の漏えいの防止	地下施設内で放射性物質の漏えいを伴う事故が発生した場合にも、施設外への放出を防止すること	換気ファン, 風門, 緊急換気設備

<関係する規則/指針>

準拠基準類	指標	基準値	摘要
労働安全衛生規則 第611条	温度	37 °C 以下	法令
ずい道等建設工事における換気技術指針	温度	湿球温度28 °C 以下	指針による目標値
	風速	0.3 m/s 以上 0.5 m/s 以上（可燃性ガス）	
	作業従事者の呼気	0.05 m ³ /s 人	
鉱山保安法施行規則	風速	7.5 m/s 以下	鉱山保安法は適用外のため参考値として設定

換気・冷房施設の仕様例（HLW）

換気設備の仕様例（深成岩類の場合）

名称	仕様	数 量	
		縦置き・ブロック方式	横置き・PEM方式
坑口ファン	定格風量 2,000 m ³ /min 定格全圧 4.9 kPa	4 台 (排気用立坑2本×2台)	1 台 (排気用立坑1本×1台)
局部ファン	定格風量 1,000 m ³ /min 定格全圧 2.9 kPa	6 台	6 台
集じん機	定格風量1,200 m ³ /min	6 台	6 台
風 門	W=5,000 mm	42 台 (処分坑道)	-
風 門	W=8,000 mm	26 台 (連絡坑道)	37 台 (処分坑道)
風管 (軟管)	φ900 mm	4,000 m	3,300 m

冷房設備の仕様例

処分概念	縦置き・ブロック方式			横置き・PEM方式		
	深成岩類	新第三紀 堆積岩類	先新第三紀 堆積岩類	深成岩類	新第三紀 堆積岩類	先新第三紀 堆積岩類
岩種	深成岩類	新第三紀 堆積岩類	先新第三紀 堆積岩類	深成岩類	新第三紀 堆積岩類	先新第三紀 堆積岩類
処分区画形状	パネル型	パネル型	デッド エンド型	デッド エンド型	デッド エンド型	デッド エンド型
冷房能力の合計 [kW]	1,200	設置不要	3,200	800	設置不要	1,600

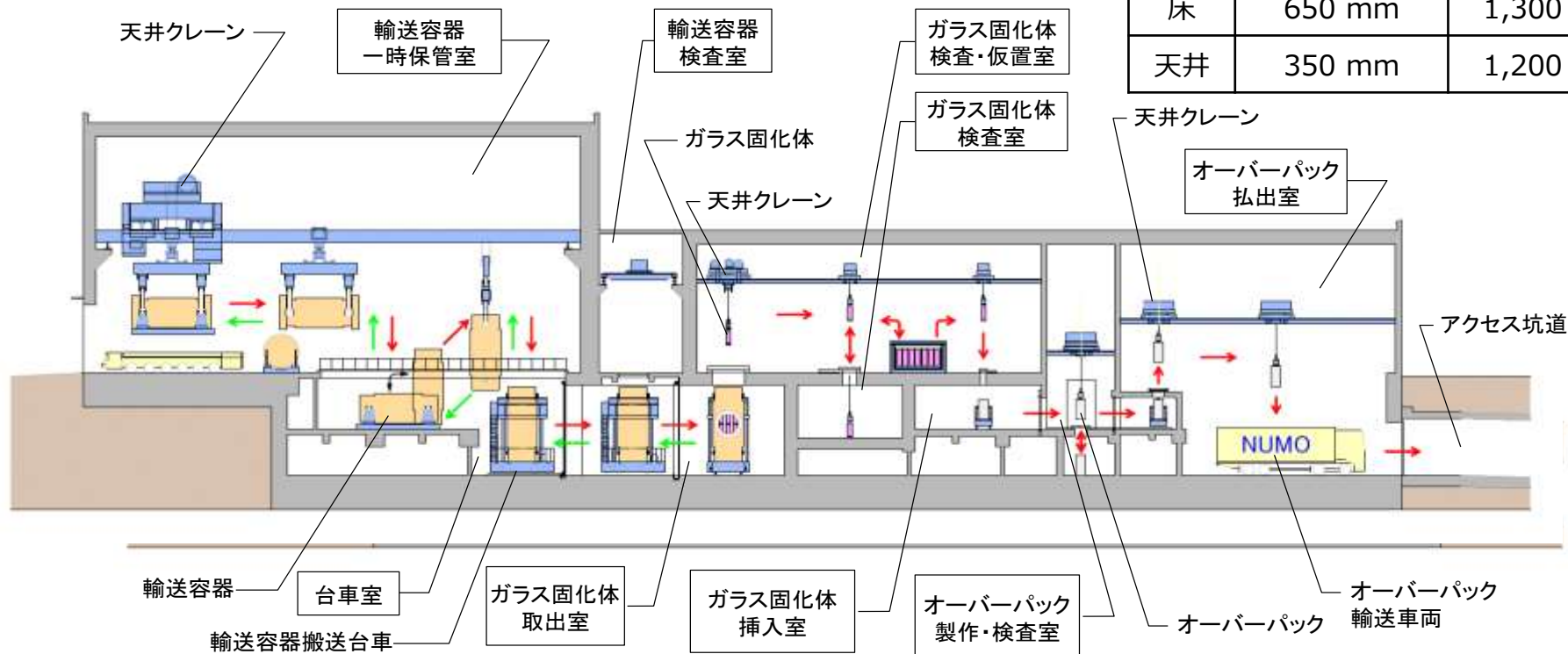
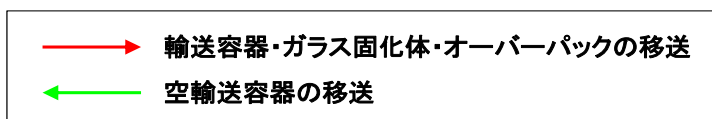
地上施設（廃棄体の受入・検査・封入施設）の設計要件

	設計要件	内容	設計項目
閉鎖前の安全性	周辺公衆の放射線からの防護	事業所周辺の線量を十分に低減できるよう、遮蔽そのほかの適切な措置を講じていること	施設設置位置，遮蔽壁 換気設備，輸送容器
	作業従事者の放射線からの防護	管理区域そのほか事業所内の人間が立ち入る場所における線量を低減できるよう、遮蔽そのほかの適切な措置を講じていること	遮蔽壁，輸送容器 放射線管理区域設定
	閉じ込め機能の確保	放射性物質による汚染が発生するおそれのある作業区画は，その内部を負圧状態に維持することが可能であること	放射線管理区域設定 換気設備（含，排気フィルタ） 廃棄体，オーバーパックまたは廃棄体パッケージ，輸送容器
	異常状態における機能喪失の防止	「落下」，「火災」，「爆発」，「外部電源喪失」，および「そのほかの装置の故障」などの異常状態においても，閉じ込めの機能を喪失しないように，異常の発生防止策，拡大防止策を考慮した設計であること	廃棄体，オーバーパックまたは廃棄体パッケージ 定置用クレーンなどの廃棄体などを取り扱う設備，装置
	放射線の監視測定	閉じ込め機能が確保されていることを監視できること，漏えいを検知し，速やかに警報できること	監視測定設備
工学的成立性	廃棄体の収容性	1回の輸送で受け入れる輸送容器を一時的に保管できること	建屋内区域の配置設計
	廃棄体パッケージ製造能力	1日に所定の数量の廃棄体パッケージを製造できること	廃棄体取扱設備
	遠隔操作性	遠隔操作により廃棄体を検査できること 遠隔操作により廃棄体をオーバーパックまたは廃棄体パッケージ容器に封入できること	廃棄体取扱設備

廃棄体受入・検査・封入施設の設計例（HLW）

必要遮蔽厚さ（HLW）

分類	輸送容器 一時保管室	ガラス固化体 検査・仮置室
壁	600 mm	1,300 mm
床	650 mm	1,300 mm
天井	350 mm	1,200 mm



- 輸送船 1 回の最大積載数を受け入れ可能な施設
 - 作業従事者に対する線量限度（50 mSv/年かつ5年間につき100mSv）を超えないように、部屋ごとの立ち入り頻度、滞在時間に応じて線量率区分を設定して遮蔽壁の必要厚さを設計
- ※線量率区分と設計基準線量率は、日本原燃（2001）による廃棄物管理施設の遮蔽設計区分を参考に設定

自然現象	安全対策（著しい影響は設置領域から除外されていることを前提）
地震	耐震設計を行い、地震力に対して十分耐えうることができる構造とすること
津波	サイトの周辺の地形を考慮して、津波によって影響が及ぼされることがないように施設を高台に設置することや、防潮堤の設置、浸水防止扉の設置などの対策を施すこと
洪水	サイトの周辺の地形を考慮して、高台に設置することや、浸水防止扉の設置などの対策を施すこと
風（台風）	サイトの周辺で観測された最大風速を考慮して、施設設計において、台風などの風により損傷を受けることがないように設計
竜巻	施設は、竜巻などの風圧、飛来物の衝撃荷重に対して、損傷を受けることがない設計
凍結	サイトの周辺で観測された最低気温を条件として設計
降水	サイトの周辺で観測された最大降水量を条件として設計 構内排水計画の策定および建物内への浸水を防止すること
積雪	サイトの周辺で観測された最大積雪量を考慮して、積雪により損傷を受けることがないように設計
落雷	落雷により施設の安全性を損なわないよう避雷設備を設計
地滑り	サイトの周辺での観測記録および敷地付近の地形や地質の状況を考慮して、必要に応じて地滑り対策工法を施すこと
火山の影響	降下火砕物（火山灰）が施設に影響を与える可能性がある場合には、降下火砕物の飛来、衝突、堆積などにより施設の機能が損なわれない設計
生物学的事象	考慮すべき生物学的事象として、鳥類の侵入などを想定し、施設や立坑の出入口の開口部には網目構造のバードスクリーンを設置し、侵入を防止する設計
森林火災	延焼被害を防止するために、施設と周辺の森林との間に可燃物を排除した領域（防火帯）を設けるなどの対策を施すこと

人為事象に対する安全対策の考え方

人為事象	安全対策
飛来物 (航空機落下など)	地上施設の設置位置の周辺状況を考慮して、必要な場合には、航空機などの飛来物が施設に衝突することを想定しても安全が確保できる設計
ダムの崩壊	地上施設の設置位置の周辺状況を考慮して、必要な場合には、高台に設置することや、浸水防止扉の設置などの対策を施すこと
爆発	地上施設の設置位置の周辺状況を考慮して、近隣の施設の爆発事故の影響が想定される場合には、安全上重要な施設を離間距離をとって配置するなどの対策を施すこと
近隣工場の火災	地上施設の設置位置の周辺状況を考慮して、近隣工場の火災の影響が想定される場合には、安全上重要な施設を離間距離をとって配置するなどの対策を施すこと
有毒ガス	地上施設の設置位置の周辺状況を考慮して、近隣の施設からの有毒ガスの影響が想定される場合には、安全上重要な施設を離間距離をとって配置するなどの対策を施すこと
船舶の衝突	地上施設の設置位置の周辺状況を考慮して、船舶が施設に衝突する可能性が想定される場合には、安全上重要な施設を海岸から離間距離をとって配置するなどの対策を施すこと
電磁的障害	電磁的な干渉や妨害を受ける可能性のある施設や廃棄体を扱う設備については、フェイルセーフ機能を設け、障害が起こった場合にも安全性が確保されるように対策を施すこと
不法な侵入などの防止	不法な侵入により、地上施設の安全性が損なわれることを防ぐために、廃棄物の防護のための区域の設定、サイバーテロに対する情報セキュリティ対策、防護対象物への接近を困難にする対策、区域の出入り管理、見張り人による区域内外の巡視などの検知の対策、治安当局への連絡体制の整備などの妨害破壊行為の防止対策を施すこと

可逆性 (Reversibility)

原則として、処分システムを実現していく間に行われる**決定を元に戻す、あるいは検討し直す能力**を意味する。後戻り (Reversal) とは、決定を覆し、以前の状態に戻す行為。

回収可能性 (Retrievability)

原則として、**処分場に定置された廃棄物あるいは廃棄物パッケージ全体を取り出す能力**を意味する。回収 (Retrieval) とは、廃棄物を取り出す行為。

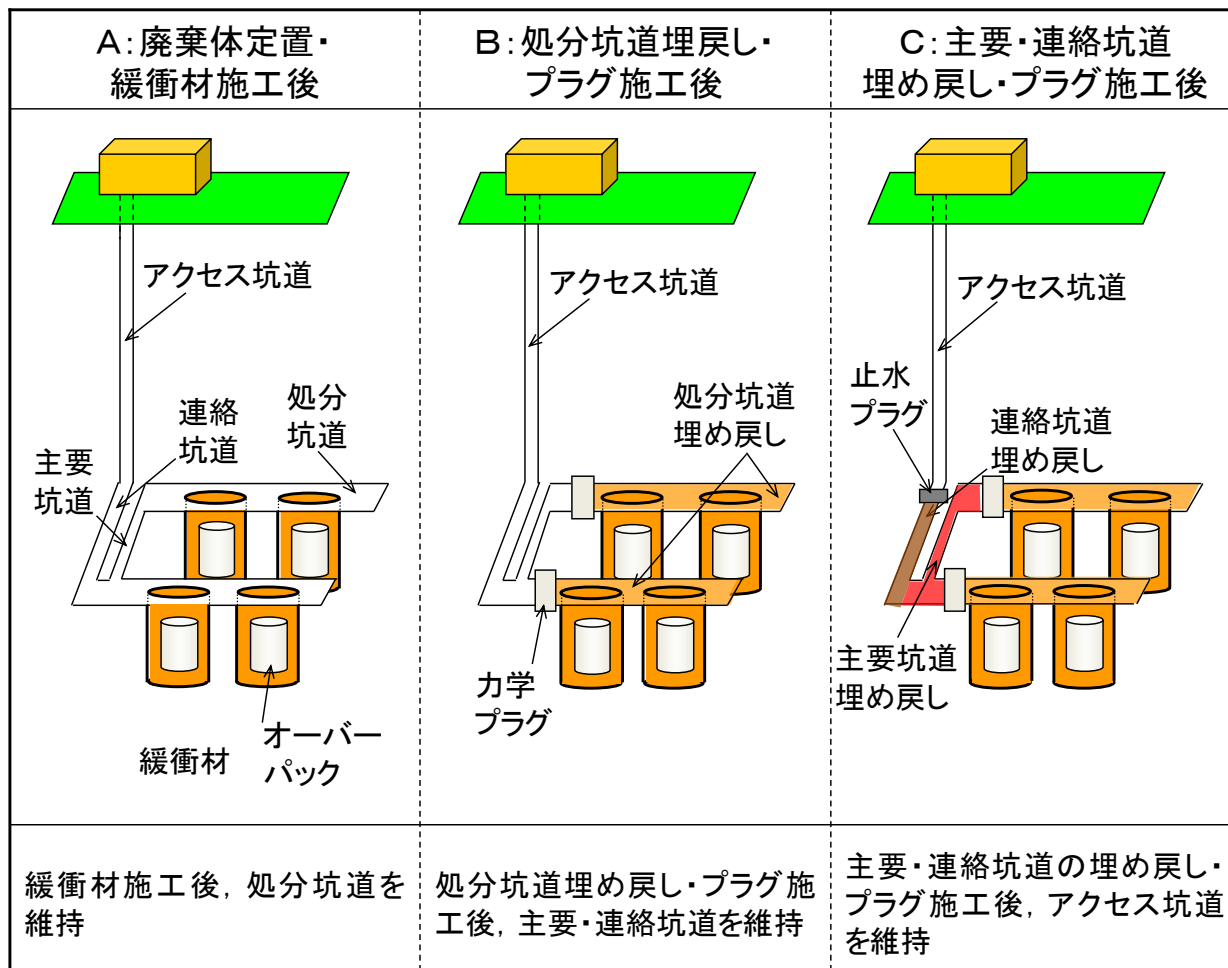
(出典：OECD/NEA,2011)

○ 実施内容

- 回収可能性の維持することによる影響，維持するのに好ましい状態について整理
- 現状の設計に対して回収可能性を維持するための技術の工学的成立性

回収を維持する状態

回収可能性を維持する状態として3つの状態を想定し、回収可能性を維持することに伴う地層処分に対する影響（坑道の維持管理，人工バリアの温度，緩衝材の流出，オーバーパックの腐食等の観点）について比較評価



① 処分坑道端部プラグの除去



(縦置き・ブロック方式の場合)

② 処分坑道埋め戻し材の除去 (自由断面掘削機)



③ 緩衝材の除去 (右図の塩水噴射除去装置)



④ オーバーパックの回収 (右図の装置に機能を備える)



縦置きを対象とした回収方法のイメージ (RWMC, 2015)

(横置き・PEM方式の場合)

② 隙間埋戻し材の機械除去 (外周部)



③ 隙間埋戻し材の塩水ジェット除去 (PEM周辺)



④ PEMの回収 (専用装置の開発による)



PEMの回収方法のイメージ

- 処分概念に対応した回収方法を検討し、現状の設計と技術で回収可能性が確保できることを確認
- 遠隔操作による実証的な検討が国内外で実施中

処分場の設計と工学技術に関する今後の取り組み

- 今後の取り組み：処分場の安全性および経済的合理性を高めるとともに、実証試験などを通じた技術の実用化や品質管理手順・方法の確立を図ることを目標
- 地下施設を沿岸海底下とすることで、アクセス坑道の長大化や換気・排水設備の能力の増強などへの留意が必要となることから、上記の設計の検討においては、沿岸海底下を対象とした検討条件を詳細に考慮

レビュー対応のポイント💡
不確実性への対応
沿岸海底下処分場の設計

分類	主な実施項目
人工バリア	<ul style="list-style-type: none">➤ 人工バリア代替材料と設計オプションの整備➤ TRU等廃棄物処分に対する人工バリアの閉じ込め機能の向上➤ 人工バリア長期挙動の評価技術の整備と実証➤ 人工バリアの設計手法，材料特性試験の標準化➤ 人工バリアの製作技術および定置技術の開発と実証
地上・地下施設	<ul style="list-style-type: none">➤ 処分施設の設計技術の向上➤ 処分場建設の安全性を確保する技術の高度化➤ 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備
回収可能性	<ul style="list-style-type: none">➤ 廃棄体回収技術の開発と実証➤ 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備

■ 包括的技術報告書における「処分場設計」の考え方

本編第4章の構成

- 4.1 処分場の設計の考え方
- 4.2 処分場の設計手順と設計の前提となる条件の設定
- 4.3 地下施設設置深度の設定
- 4.4 人工バリアの設計
- 4.5 地下施設の設計
- 4.6 地上施設の設計
- 4.7 回収可能性の確保に関する取り組み
- 4.8 まとめと今後の取り組み

■ 日本原子力学会およびOECD/NEALレビュー結果の要点

注) 本資料は、2021年5月13日から6月30日にかけて計8回実施した「地層処分技術オンライン説明会（改訂した包括的技術報告書）」でご説明した資料を使用しています。

日本原子力学会レビュー結果の要点

■ レビューの結果（レビュー報告書からの抜粋）

● 設計における不確実性への対応

工学的設計においては**不確実性**が残ることは避けられないが、**不確実性の幅を極力狭める努力が肝要である**。地質環境モデルにおいて提示される地質環境特性や人工バリアに用いる材料特性に関する情報・データに関わる**不確実性**を考慮することに加え、**設計の前提条件や仕様成立範囲の決定方法等が内包する不確実性にも配慮することを推奨する**。

● 影響評価と安全評価

包括的技術報告書の第4章における「**影響評価**」と同報告書の第5章や第6章における「**安全性の評価**」の関係もわかりにくい。設計の妥当性の検証とフィードバックには、処分場の工学的設計の設計要件に対する照査と地層処分システム全体の安全評価の2つのプロセスがあるように書かれているが、その**当該の図の説明を文章で記述するべきである**。

● 自然現象（地震、津波）への対応

地震力や津波などに対する具体的な検討がサイトの地質環境の条件が特定されていないことを理由に行われていないが、**例えば東日本大震災における地震や津波を想定したシナリオを検討し、評価結果の考察を追記することが望ましい**。

● 沿岸海底下における処分場の設計

施設を「**沿岸海底下**」とすることで生じる特有の問題があると考えられることから、**処分場の設計と工学技術の観点からも「沿岸海底下における処分施設の工学設計」を追加することを推奨する**。

OECD/NEAレビュー結果の要点（推奨事項）

- Design options: **to be kept open as long as possible** in order to keep the **flexibility of design evolution** as **additional knowledge** is acquired;
- Flexibility of design options requires **monitoring of changes in requirements and boundary conditions**, which can be ensured using a configuration management system;
- Reversibility of disposal decisions: to make proposals to cover this, in particular in terms of decision-making processes that characterise the lifetime of the geological disposal project and keeping options open for future generations;
- Additional phenomena: to explore the phenomena considered at this stage as **non-dominant** or **non-determining**, in order to **assess how they should or should not be taken into account** in subsequent phases;
- Design developments: to be continued, particularly with a view to **adapting to the characteristics of the sites** that will be considered for future studies;
- Design and construction procedures to be **adapted to the particular characteristics of the host geological formations** envisaged for following siting stages in a way that allows contrasts between formations to be reflected in the design;
- Handling and emplacement of waste packages in disposal tunnels / vaults: to be studied, **with tests in a relevant underground environment**;

OECD/NEAのレビュー報告書：

https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_77138/the-nuclear-waste-management-organization-of-japan-s-pre-siting-safety-case-based-on-the-site-descriptive-model-an-international-peer-review-of-the-numo-safety-case

ご清聴ありがとうございました