

第2回 中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法に係る
日本原子力学会標準の技術評価に関する検討チーム



(案)

**中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順：
2019, AESJ-SC-F015:2019 (L1放射能評価標準)**

**L1放射能評価標準に規定されている理論的方法
－技術要素 1：評価対象とする放射性廃棄物の条件－**

2021年9月21日

日本原子力学会 標準委員会

対象とする放射性廃棄物の条件の明確化

－ 技術要素 1 : 評価対象とする放射性廃棄物の条件 －

中深度処分対象の放射化金属等の廃棄体の放射能濃度の評価方法は、次のように、要求性能を満足させる評価方法として適用するために、適用範囲、対象とする放射性廃棄物の条件が明確化されていることが必要となると考えている。

技術要素 1-1 : 適用範囲の明確化

- 理論的方法（特に、ORIGEN2などの理論計算に適用する計算コードを使用した計算）が適用できる範囲は無制限ではなく、放射化された放射性廃棄物などに対して、一定の条件下で成立する手法であることから、[理論的方法を適用して放射能濃度を評価する中深度処分対象である放射性廃棄物の適用範囲](#)（放射性廃棄物の種類及び評価対象とする放射化によって生成する核種（この核種の放射能濃度を理論的方法で求める際に必要となる「起源元素」の選定方法））[が明示されている必要がある。](#)

技術要素 1-2 : 対象とする放射性廃棄物の特性

- 理論的方法で最大放射能濃度、総放射エネルギーを評価する対象である中深度処分対象の放射能濃度を評価するためには、計算のための入力条件を設定する必要があることから、放射性廃棄物の特性（材質、照射条件など）を把握しておく必要がある。

技術要素1-1 適用範囲の明確化

理論的方法（特に、ORIGEN 2などの理論計算に適用する計算コードを使用した計算）が適用できる範囲は無制限ではなく、放射化された放射性廃棄物などに対して、一定の条件下で成立する手法であることから、理論的方法を適用して放射能濃度を評価する中深度処分対象である放射性廃棄物の「適用範囲（放射性廃棄物の種類及び評価核種の種類）」が、下表のように明示されている。

また、本標準では、申請核種を決めるものではなく、国の事業許可において、どのような核種で規制されても対応できるように、申請核種が決まった後、申請核種から起源元素を選定する方法を規定している。

| 記載箇所 | | 標準の記載内容 |
|------|-----------------------|--|
| 本文 | 1. 適用範囲 | この標準は、 <u>原子力発電所の運転中及び解体時に発生する低レベル放射性廃棄物のうち、中深度処分を行う廃棄物中の放射能濃度を決定する理論的方法及び実証的方法の使用条件・手順を規定する。</u> （3頁参照） |
| 本文 | 4. 評価対象とする廃棄物及び評価対象核種 | <p>a) <u>評価対象とする廃棄物は、放射化金属等及び使用済樹脂等とする。</u>（4頁参照）</p> <p>b) <u>評価対象核種は、申請核種とする。</u></p> <p>（注1「放射化金属等」は、3. 用語及び定義（3.14）で、「原子炉内及び周辺で中性子照射によって放射化された部材、機器。例 制御棒、チャンネルボックス、バーナブルポイズン、炉心支持構造物、生体遮蔽コンクリート、黒鉛など」と定義している。 注2「申請核種」は、3. 用語の定義（3.6）で、「放射性廃棄物の埋設事業許可申請書に記載する放射性核種。」と定義している。）</p> |
| 本文 | 6.1.2.2.1 起源元素の選定方法 | <u>起源元素は、評価対象とする放射化金属等の種類（材料）ごとに、次の考え方を踏まえ、選定する。</u> （5頁参照） |

注記 評価対象は「申請核種」であるが、将来、どのような申請核種が国の安全審査で規定されても、標準では放射化計算の入力条件とする「起源元素の」が選定できる方法を示している。（注記 6.1.2.2.1及び附属書Gに詳細を示している）

技術要素1-1 適用範囲の明確化：対象とする廃棄物及び核種

本標準では、箇条1に規定した適用範囲について、下記のように具体的に示している。

| 記載箇所 | 3 適用範囲 | 標準の記載内容 |
|------|--------|--|
| 解説 | 3 適用範囲 | <p>この標準は、中深度処分対象である放射化金属等及び使用済樹脂等について、<u>“核燃料物質又は核燃料物質によっ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”第八条第2項第二号^{注)}に定める廃棄体の放射能濃度に係る技術基準を満足していることを確認するとともに、同規則第六条第1項第一号に定める事業所に埋設された放射性物質の放射能の総量を超えていないことを確認するための標準的な放射能濃度決定方法を規定することを目的</u>に作成されたものである。ただし、放射性廃棄物の代表試料に関する放射化学分析方法は、この標準に含んでいない。</p> <p>放射能濃度決定方法は、中深度処分の対象となる放射性廃棄物の特性を踏まえた方法についての記載を行うことが適切であるため、<u>原子炉内での中性子照射によって放射性核種が生成する放射化金属等</u>を対象とする理論的方法に当たる“放射化計算を用いる放射能濃度決定方法”，及び<u>原子炉冷却材浄化系などで、放射性物質をろ過・吸着した使用済樹脂等</u>に適用する実証的方法に当たる“原廃棄物分析法”を示したものである。また、使用済燃料とともに原子力発電所から搬出され、再処理工場において廃棄物となるチャンネルボックス、バーナブルポイズンなどの放射能評価上の特徴は、原子力発電所から発生する廃棄物と同じであり、この標準が適用できる。</p> <p>なお、原子力規制委員会などにおいて、この標準に関連する内容などの検討を行った結果によって、この標準の記載内容に影響がある場合には、最新の法令などを確認した上で、この標準を使用する必要がある。</p> |

注記 本標準制定（2019年6月）後、2019年12月に第二種埋設事業規則が改正され、第八条第2項第三号が該当条項に当たる。

技術要素1-1 適用範囲の明確化：対象とする廃棄物及び核種

本標準では、箇条4に規定した対象とする放射性廃棄物及び核種を下記のように具体的に示している。

| 記載箇所 | | 標準の記載内容 |
|------|----------------|--|
| 解説 | 4 対象とする廃棄物及び核種 | <p>この標準が対象とする原子力発電所から発生する中深度処分対象廃棄物を、<u>“放射化金属等”及び“使用済樹脂等”に大別した放射性廃棄物の主な例を、解説表2(下表)に示す。</u></p> <p>なお、<u>評価対象核種は、廃棄体の輸送又は処分のために、放射能濃度及び／又は放射能を評価しなければならない核種</u>であり、輸送規則、<u>中深度処分施設の自然条件、埋設の具体的方法、埋設量、管理期間などを考慮した安全評価を踏まえて決定されることとなる。</u></p> |

解説表2 – 中深度処分対象廃棄物の例及び適用する放射能濃度決定方法

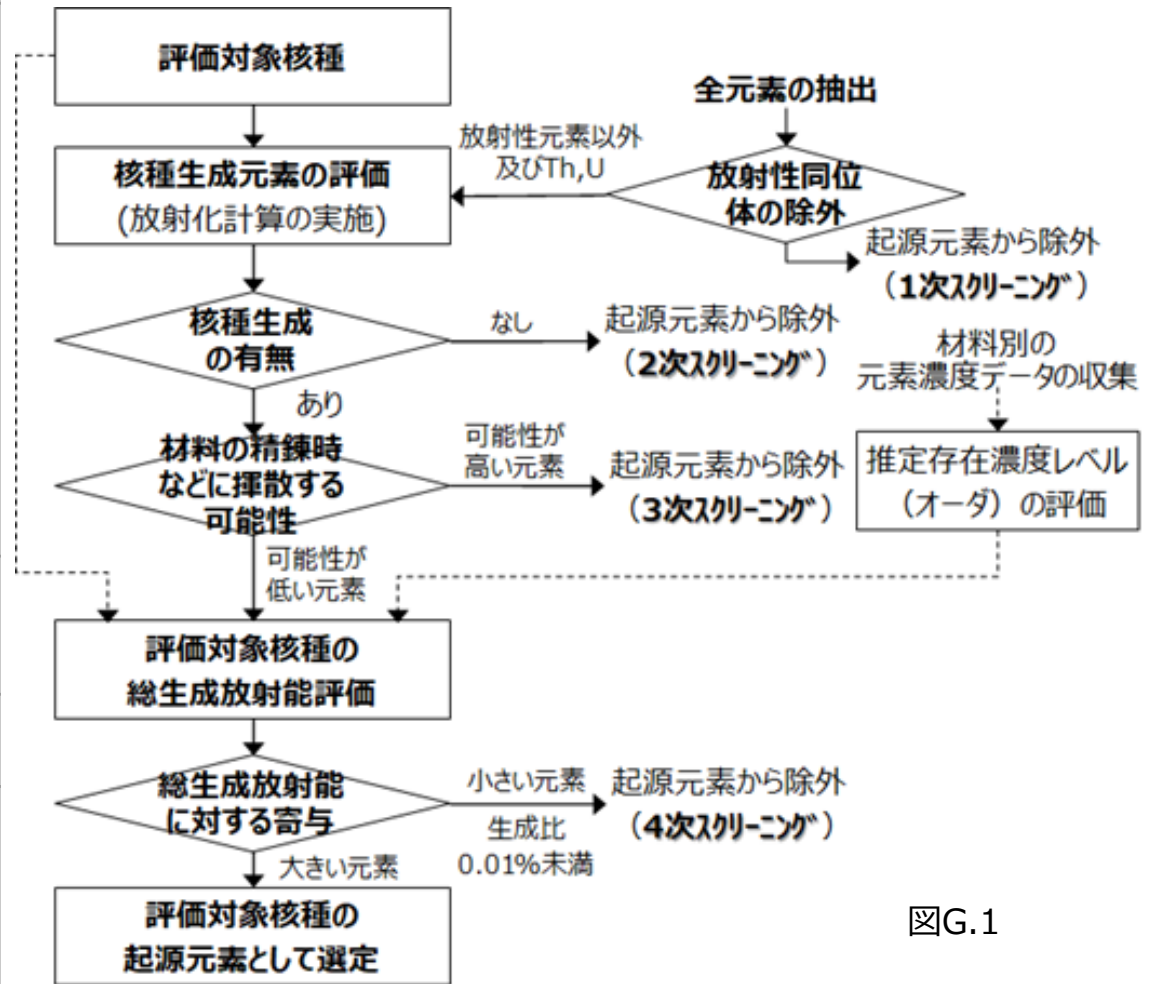
| 種類 | 発生場所など | 主な放射性廃棄物の例 | 主な放射能濃度決定手法 |
|--------|--------------------------------------|--|----------------------------------|
| 放射化金属等 | 原子炉内及び周辺 補足：対象炉型はBWR、PWR、GCR | <ul style="list-style-type: none"> - 制御棒（種々の炉型） - チャンネルボックス（BWR） - バーナブルポイズン（PWR） - 炉内構造物（種々の炉型） - 生体遮蔽コンクリート（PWR） - 黒鉛（GCR） | 理論的方法 (理論計算法) |
| 使用済樹脂等 | 原子炉冷却材浄化設備，化学体積制御系，使用済燃料プール水冷却浄化設備など | <ul style="list-style-type: none"> - 使用済のイオン交換樹脂（種々の炉型） - 使用済のフィルタスラッジ（BWR） - 溶離廃液（PWR） | 実証的方法 (原廃棄物分析法，スケーリングファクタ法など) |

技術要素1-1 適用範囲の明確化：評価対象核種からの起源元素の選定方法

評価対象核種は、埋設事業許可申請に向けたインベントリ評価、埋設処分施設の安全評価などを踏まえた放射性核種（評価核種又は申請核種）であり、現状、特定できるものではない。このため、本標準では、放射性核種を想定した扱いではなく、将来、どのような核種が評価対象核種となっても対応できるように、評価対象核種の放射化計算の際に必要な「起源元素」の選定手順を次のように示している。

評価対象核種からの起源元素の選定手順

| | |
|-----------------------|--|
| 基本的考え方 (6.1.2.2.1) | <p>起源元素は、評価対象とする放射化金属等の種類（材料）ごとに、次の考え方を踏まえ、選定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> — 起源元素は、不純物、又は微量元素として存在していると考えられる元素とともに、評価する材料の化学組成から選定する。 — 評価対象核種（評価対象核種と相関関係をもつKey核種を含む）を生成する元素は、起源元素として抽出しなければならない。 <p>なお、起源元素は、次のステップ（全て又ははいずれか）によって、対象からスクリーニングすることができる。</p> |
| | <p>放射性同位体は、起源元素から除外できる。ただし、天然に広く存在し、種々の放射性核種の起源元素となるTh及びUは、除外しない。</p> |
| スクリーニング 1次 | <p>放射性同位体は、起源元素から除外できる。ただし、天然に広く存在し、種々の放射性核種の起源元素となるTh及びUは、除外しない。</p> |
| スクリーニング 2次 | <p>評価対象核種を生成しない元素は、起源元素から除外できる。</p> |
| スクリーニング 3次 | <p>材料の精錬時などに揮散する可能性が高いと判断できる元素は、起源元素から除外できる。ただし、対象物の範囲及び評価によっては、完全に除去されず、放射化計算に考慮した方がよい元素もある。</p> |
| スクリーニング 4次 | <p>評価対象核種の総生成放射能に対する寄与が小さい元素（生成比0.01%未満）は、起源元素から除外できる。</p> |



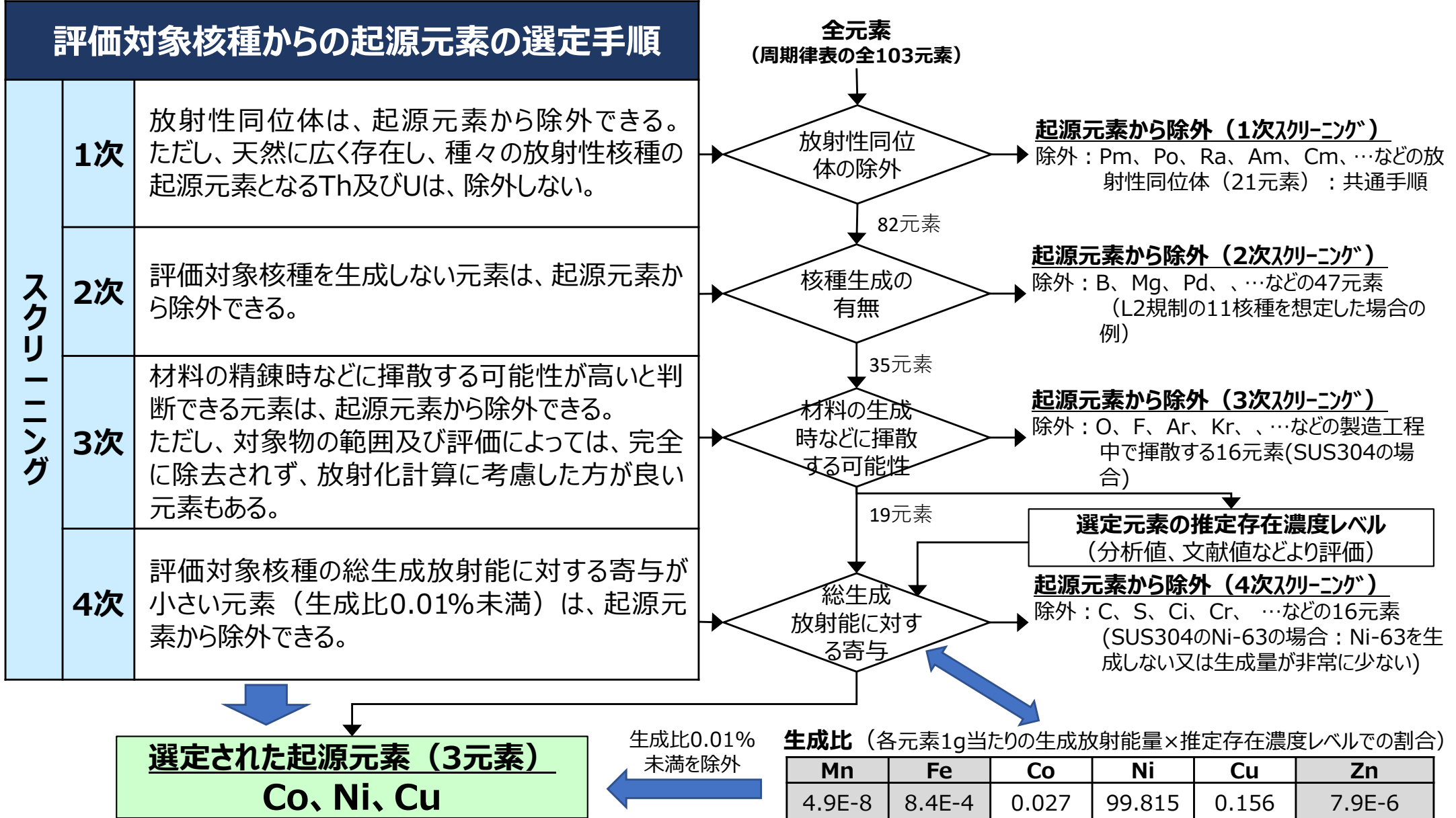
図G.1

注記1 起源元素：中性子照射によって評価対象核種を生成する元素。

注記2 標準本文細箇条6.1.2.2.1に考え方、及び附属書G（選定の前条件：G.1.1.2、選定手順G.1.1.3）に具体的な選定例を示している。

技術要素1-1 補足 適用範囲の明確化：評価対象核種からの起源元素の選定方法（材質SUS304、評価対象核種Ni-63の場合の選定例）

本標準で示す評価対象核種の放射化計算の際に必要な「起源元素」の選定手順の具体例を、SUS304の評価対象核種Ni-63を例にした場合の選定手順とその過程における起源元素の選定結果例を以下に示す。



注記 附属書G（選定の前提条件：G.1.1.2、選定手順：G.1.1.3）に具体的な選定例を示している。

対象とする放射性廃棄物の条件の明確化

－ 技術要素 1 : 評価対象とする放射性廃棄物の条件 －

中深度処分対象の放射化金属等の廃棄体の放射能濃度を評価するにあたっては、次のように、要求性能を満足させる評価方法として適用するために、適用範囲、対象とする放射性廃棄物の条件が明確化されていることが必要となると考えている。

技術要素1-1 : 適用範囲の明確化

- 理論的方法（特に、ORIGEN2などの理論計算に適用する計算コードを使用した計算）が適用できる範囲は無制限ではなく、放射化された放射性廃棄物などに対して、一定の条件下で成立する手法であることから、理論的方法を適用して放射能濃度を評価する中深度処分対象である放射性廃棄物の適用範囲（放射性廃棄物の種類及び評価対象とする放射化によって生成する核種（この核種の放射能濃度を理論的方法で求める際に必要となる「起源元素」の選定方法）が明示されている必要がある。

技術要素1-2 : 対象とする放射性廃棄物の特性

- 理論的方法で最大放射能濃度、総放射エネルギーを評価する対象である中深度処分対象の放射能濃度を評価するためには、計算のための入力条件を設定する必要があることから、放射性廃棄物の特性（材質、照射条件など）を把握しておく必要がある。

技術要素1-2 対象とする放射性廃棄物の特性

理論的方法で放射能濃度、総放射エネルギーを評価する対象である中深度処分対象の放射性廃棄物の放射能濃度を評価するためには、計算のための入力条件を設定する必要があることから、放射性廃棄物の特性（材質、照射条件など）を把握しておく必要があり、この規定を下表のように示している。

| 記載箇所 | | 標準の記載内容 |
|------|-----------------------------------|---|
| 本文 | 5.1 放射能濃度決定方法の適用 | 放射能濃度決定方法は、次のとおり、表1（ 参考1参照 ）に示す方法の中から 評価対象とする廃棄物の性状及び評価対象核種に最も適した方法を選定 する。 a) 放射化金属等 基本的に理論的方法（理論計算法）を適用する。ただし、非破壊外部測定法、スケーリングファクタ法などの実証的方法、又は、理論的方法と実証的方法とを組み合わせることもできる。 |
| 本文 | 6.1.1 放射化計算の基本手順 a) 対象・目的などの設定 | 6.1.1 放射化計算の基本手順 放射化金属等の内部に含まれる評価対象核種の放射能濃度の決定のために実施する理論的方法に適用する放射化計算の基本手順は、次の過程に従う。 a) 対象・目的などの設定 計算の目的の明確化。 評価対象とする放射化金属等及び核種 、正確性・精度の要求、 幾何形状並びに必要な計算の全体スコープ の設定。 例 放射化に影響を与える、 放射化金属等の構成材料 、 評価対象とする放射化金属等の量 、 類似性 、 形状 、 サンプリングの可能性 などを整理する。 |
| 本文 | 7.1 理論的方法の記録 | 7 記録 7.1 理論的方法の記録 記録は、 評価対象とした放射化金属等 、計算に使用した放射化計算方法、トレース可能な 計算用入力条件及び計算の設定条件 が明確にされた計算書が示されなければならない。また、確認のために、第三者が容易に把握できるようにする。 記録は、 簡単で 、容易に把握でき、追加操作を行わずに理解できるようにする。報告の単位は、記録中に明示し、かつ、特段の指示がなければ、国際単位系で記録する。 注記 理論的方法の記録の詳細は、 附属書N参照 。 |

技術要素1-2の参考1 本標準の表1 放射能濃度決定方法の種類及び内容

| 放射能濃度決定方法の種類 | | 内 容 |
|---|---------------------------|---|
| 理論的方法 | 理論計算法 | 廃棄物ごとに放射化計算の条件を設定して放射化計算を行い、廃棄物又は廃棄物グループごとの放射能濃度を決定する方法、原子炉燃焼計算などによって理論的に得られる放射性核種の濃度比及びほかの手法で求めた放射能濃度を用いる方法。 |
| 実証的方法 | スケーリングファクタ法 ^{a)} | 代表試料の放射化学分析等の測定結果から得られる難測定核種とKey核種との相関関係と、個々の廃棄体外部による非破壊測定結果とを組み合わせ評価する方法。 |
| | 非破壊外部測定法 ^{a)} | 廃棄体の外部から非破壊測定する方法。 |
| | 平均放射能濃度法 ^{a)} | 代表試料の放射化学分析等の測定結果から得られる平均的な放射能濃度を用いる方法。 |
| | 廃棄体破壊分析法 ^{a)} | 廃棄体から代表試料を採取し、放射化学分析等を行い得られる放射能濃度などを用いる方法。 |
| | 原廃棄物分析法 | 固型化処理前の廃棄物から代表試料を採取し、放射化学分析等を行い得られる放射能濃度などを用いる方法。 |
| 注 ^{a)} AESJ-SC-F022:2011の5.1.2～5.1.4及び5.1.6の方法を参照。 | | |

注記 標準の5.1で示している表1。

技術要素1-2 対象とする放射性廃棄物の特性

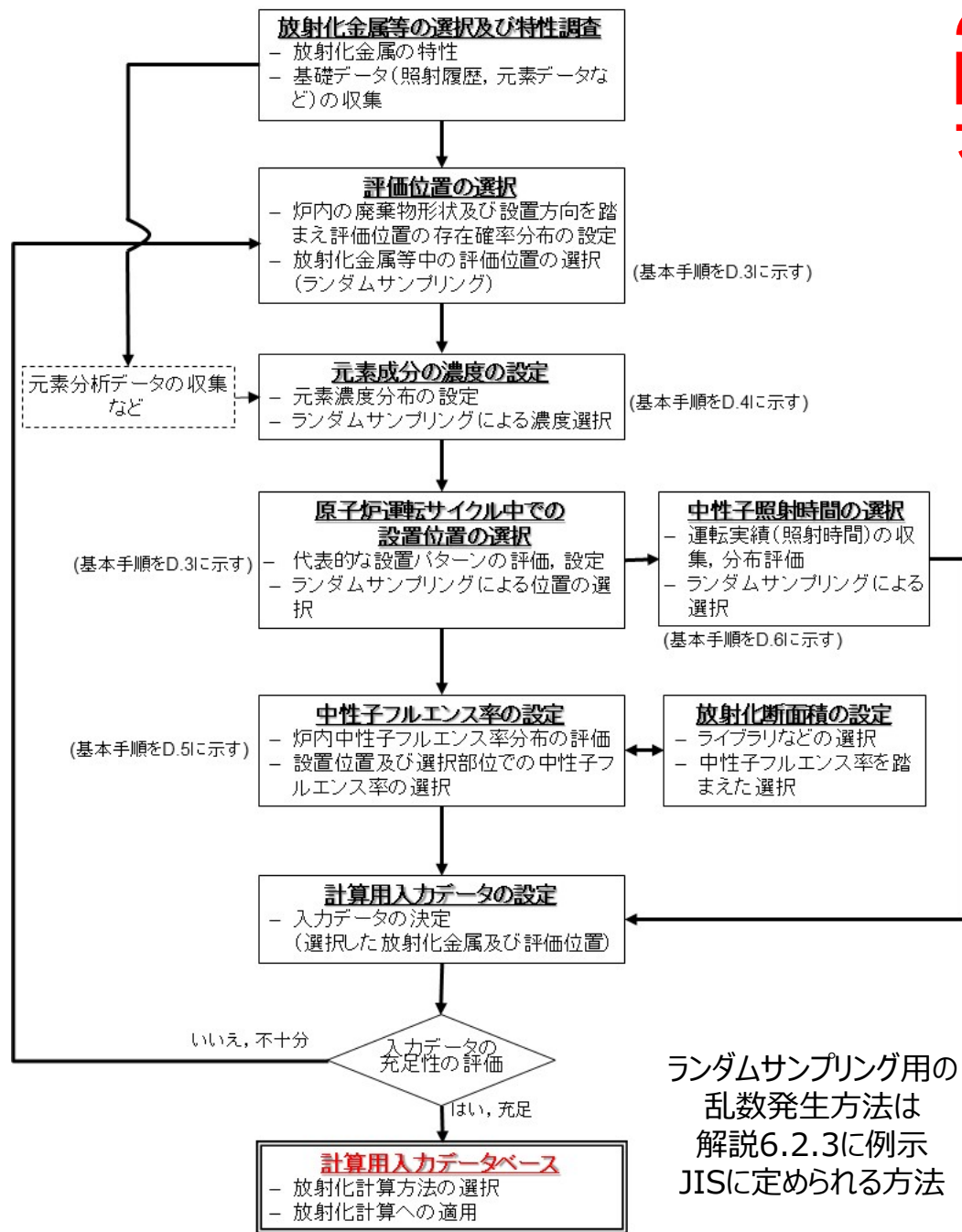
－放射性廃棄物の特性の調査内容及び記録－

理論的方法で放射能濃度、総放射エネルギーを評価する対象である中深度処分対象の放射性廃棄物の放射能濃度を評価するためには、計算対象である放射性廃棄物の特性（材質、照射条件など）を把握しておく必要があり、この内容を下表のように示している。

| 記載箇所 | | 標準の記載内容 |
|------|------------------------|---|
| 附属書D | D.2 放射化計算の入力条件の基本設定フロー | <p>評価対象とする放射化金属等の放射能濃度を決定するための放射化計算を行う上で必要となる入力条件の設定方法には、次の2種類がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> － 点推定法向け：評価対象とする放射化金属等の元素濃度分布，中性子フルエンス率及び照射条件の代表的な値（平均値，保守的な値など）を入力条件として設定する。 － 区間推定法向け：評価対象とする放射化金属等の元素濃度分布，中性子フルエンス率及び照射履歴を網羅する必要な複数の入力条件を準備する。 <p>評価対象とする放射化金属等の元素濃度分布，中性子フルエンス率及び照射履歴を網羅する十分な複数の入力条件を準備する区間推定法のための基本設定フローを，図D.1に示す。各入力条件は，次のステップで選択することで，評価対象とする放射化金属等の放射化条件を適切に網羅できる複数の入力条件の設定が可能となる。</p> <p>a) 評価対象とする放射化金属等の選択及び特性の調査 最初のステップとして，選択した評価対象とする放射化金属等の特性（例 形状，材質など）の把握（例1参照），原子炉内での中性子照射履歴，元素分析データなどの入力条件の設定に必要な基礎データの収集（例2参照）を行う。</p> |
| 附属書N | N.1 結果の記録内容 | <p>放射化計算の結果の主要な記録は，評価者が計算の背景及び計算をトレースできるようにするために，次の情報を含むことが望ましい。</p> <ul style="list-style-type: none"> a) 理論計算の内容及び範囲 b) 評価対象とした放射化金属等の説明 |

注記 具体的な放射化金属の特性（材質、炉内位置など）の詳細条件は、入力条件の設定に関わる附属書Dに示している。

技術要素1-2の参考(図D.1) 放射化計算用の入力データの設定手順の例



a) 放射化金属等の選択及び特性調査 選択した評価対象とする放射化金属等の特性の把握, 炉内での中性子照射履歴, 元素分析データなどの入力条件となるデータの収集を行う。

b) 評価位置の選択 放射化金属等の形状及び炉内での設置方向を踏まえ, 放射化金属等の内部における評価対象位置に関する存在確率分布を設定する。放射化金属等の内部における評価位置は, この確率分布から**ランダムサンプリング**。

c) 元素成分の濃度の設定 放射化金属等の化学分析データ(元素成分)を準備し, このデータベースを用い元素成分濃度分布を設定する。入力条件は元素成分濃度分布から**ランダムサンプリング**。

d) 原子炉運転サイクル中の設置位置の選択 放射化金属等が原子炉内で移動する場合, 原子炉内での代表的なローテーションパターンを評価し設定する。入力条件設置位置のローテーションを, 設定した代表的なローテーションの割合を踏まえて, **ランダムサンプリング**。

e) 中性子照射時間の選択 放射化金属等の原子炉内での照射時間は, 実際の原子炉の運転実績データを踏まえて, 照射時間の分布を評価する。入力条件とする照射時間を設定した分布から**ランダムサンプリング**。

f) 中性子フルエンス率の設定 原子炉内の中性子フルエンス率の分布を検証, 妥当性確認された計算コードを使用して評価する。b)及びd)を踏まえ, 照射期間中の分布から入力条件を選択。

g) 放射化断面積の設定 元素の放射化断面積を, f)を踏まえて, 入力条件として選択する。

h) 計算用入力データの設定 b) ~ g)で選択したものを入力条件とする。入力データ数が不足の場合, b)に戻り, 放射化計算の入力条件の評価, 選択を継続。

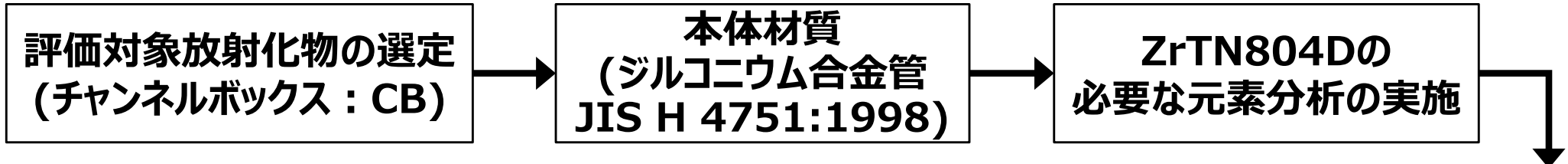
注 ランダムサンプリングは区間推定法の場合に適用する。

注記 詳細は附属書Dに示す。(上図は図D.1)

技術要素1-2 対象とする放射性廃棄物の特性

例 1：対象とする放射性廃棄物の特性（材質）

中深度処分対象の放射性廃棄物の放射能濃度を評価するためには、評価の対象である放射化物の特性（材質：例としてチャンネルボックス（CB）であればジルコニウム合金）を把握し、その評価対象となる起源元素とその特徴（主成分、不純物、微量成分）を把握しておく必要があり、この考え方を下表（附属書D 表D.4に加筆）のように示している。



| 分類 | 主成分元素 | 不純物成分元素 | 微量成分元素 |
|-------------------|---|--|--|
| 元素成分 管理条件 | 管理範囲がある | 管理上限がある | 管理値なし |
| 基本的 考え方 | 特定の工場，材料のロット管理が行われて製造される材料の主成分であり，材料の規格範囲内の目標値での成分の調整が行われる元素で，存在濃度範囲（濃度分布）が比較的狭い。 | 製造される材料中の不純物として一定の製造過程で低減又は管理される成分で，元素の濃度が比較的低い管理値以下である元素で，自然での濃度分布が材料中の各元素の濃度分布にも反映される。 | 管理されていない元素であり，自然での存在濃度分布が，材料中の各元素の濃度分布にも反映される。 |
| 各元素の 基本濃度分布 | 正規分布 | 対数正規分布 | 対数正規分布 |
| 対象元素例 (ジルコニウム) | Fe, Zr | N, Co, Ni, Cu, Nb, Mo, U | O, S, Cl, K, Th |
| 根拠とできる データ | ミルシートデータなど | ミルシートデータなど JIS規格値 | 元素分析データなど |

注記 理論計算に必要な具体的な放射化金属の特性（材質（元素成分）など）の詳細条件は、附属書D及び附属書Gに示している。
各元素の濃度分布基本形状の設定例に関して、G.1.2.3.2 に詳細を示している。

技術要素1-2 対象とする放射性廃棄物の特性

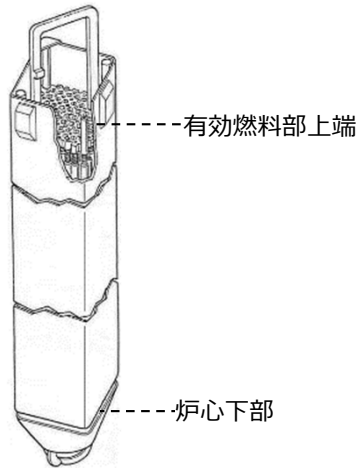
例2：評価対象とする放射性廃棄物の特性（形状、位置）

チャンネルボックス（CB）を例とした、形状・方向及び炉内の設置条件の調査、把握

附属書D 表D.2 – 形状、方向などの把握

附属書D 表D.3 – 原子炉内の設置位置の把握

チャンネルボックスの軸方向の形状など (原子炉内の軸方向に挿入される)



【廃棄物の種類、形状、方向】
CB（材質：ジルコニウム合金）は、左図のように、原子炉内の軸方向に挿入されている。

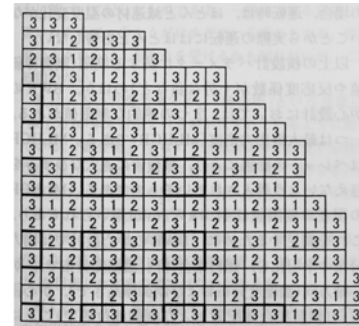


評価位置の中性子条件
の設定に適用

| 評価対象とする放射化金属等の形状及び設置方向 a) | 考慮する条件 b) | 評価対象とする放射化金属等の一例 c) | 考慮する照射位置の出現確率の分布 |
|---------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------|
| 原子炉の軸方向 | 評価対象とする放射化金属等自身の炉心軸方向の設置状態 | チャンネルボックス, 制御棒, シュラウドなど | 一様分布 |
| 原子炉の径方向 | 評価対象とする放射化金属等自身の炉心径方向の設置状態 | 上部格子板など | 該当部の面積比に応じた分布 |

注 a) 評価対象とする放射化金属等自身の形状及び原子炉内外での設置方向（原子炉の軸方向に沿って設置，原子炉の径方向に沿って設置など）。
b) 中性子フルエンス率，中性子スペクトルとして特段の考慮が必要な評価対象とする放射化金属等の形状及び設置方向があれば，必要に応じて考慮。
c) 原子炉内の軸方向，及び径方向に広がる形状で設置されている代表的な廃棄物の例。

チャンネルボックスの炉内径方向の設置位置 (運転サイクルごとに燃料に付随しローテーションする)



炉内での燃料の装荷状態の一例

【廃棄物の炉内の設置位置】
CBの原子炉内の径方向の挿入位置は、照射時間に応じて運転サイクルごとに、径方向のローテーション（移動）が行われている。



評価位置の中性子条件
の設定に適用

| 評価対象とする放射化金属等の配置位置 a) | 考慮する条件 | 評価対象とする放射化金属等の一例 | 考慮する照射位置の出現確率の分布 |
|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 配置が移動 | 運転サイクルごとのローテーションなどによる配置位置変化 | チャンネルボックス b), など | 配置位置のローテーション等の実際の分布又は代表的なパターン f) |
| | 燃焼制御のための挿入位置などの配置位置変化 | PWR制御棒 c), BWR制御棒 d) など | 挿入位置などの実際の分布、又は代表的なパターン f) |
| 配置が固定 | 照射期間中は、配置位置の変化がないこと | シュラウド, 上部格子板 など e) | 固定値 |

注 a) 放射化金属等の原子炉内外でのローテーションによる配置位置の移動の有無の条件。
b) 炉内での運転サイクルごとにローテーションした配置位置ごとの考慮。
f) ローテーションした配置位置，挿入位置などの実際の頻度分布にて設定，又は代表的な配置位置のパターンにて設定する場合もある。