

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



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 2：放射能濃度の評価方法及び手順－

2021年9月21日

日本原子力学会 標準委員会

「理論的方法」及び「入力データの設定方法」について －技術要素2-放射能濃度の評価方法及び手順－

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の評価方法には、次の「理論的方法」の妥当性及び「計算の入力データの設定方法」の妥当性が必要となると考えている。

技術要素2-1：理論的方法の妥当性

- 放射能濃度の評価方法として、適用する理論的方法は、下記を満足させる必要がある。
 - ① 放射性廃棄物の特性（照射条件，交換／解体条件など）を考慮した評価方法であること。
 - ② 理論的方法の手順が示されていること。
 - ③ 放射化計算に適用する計算方法（放射化計算コードなど）は実績があり、妥当であること。

技術要素2-2：計算の入力データの設定方法の妥当性

- 理論的方法の入力データの設定方法として、下記を満足させる必要がある。
 - ① 放射化計算に適用する入力項目（母材の元素濃度，中性子フルエンス率，照射時間）の基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること。
 - ② 放射化計算に適用する入力条件（元素濃度，中性子フルエンス率，照射時間）が、対象とする放射性廃棄物を取り得る範囲を網羅、又は代表した条件で設定できる方法であること。

技術要素2-1 理論的方法の妥当性

－放射性廃棄物の特性を考慮した評価方法であること－

次の2種類の 방법이、放射性廃棄物の特性を考慮して、放射化金属等の放射能濃度の評価に適用することができる。

- **点推定法** 放射化金属等の特定部位（位置）、又は代表的部位（位置）の放射能濃度を計算するために適用する方法。
- **区間推定法** 点推定法を発展させた方法で、同様の廃棄物特性、照射状態にあった放射化金属等に適用できる。代表的な放射能濃度の分布又は範囲の評価によって、対象物の平均放射能濃度などを計算する方法である。（補足参照）

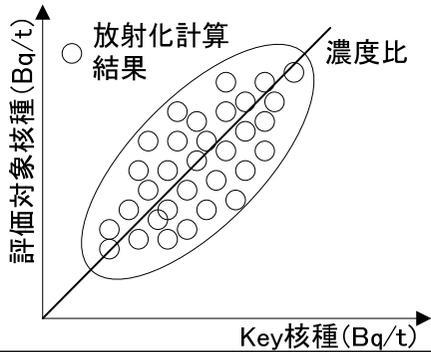
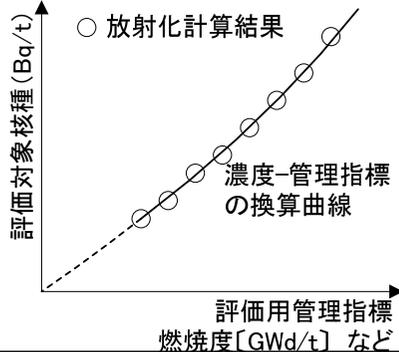
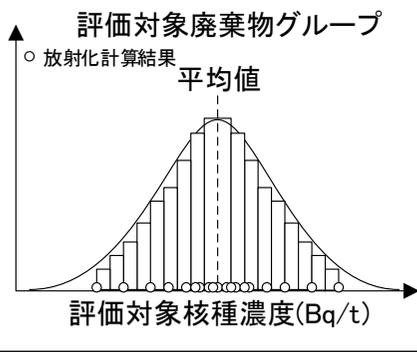
評価方法	記載箇所	標準の記載内容
点推定法	5.2.2 点推定法	<p><u>この方法は、放射化計算の基本となる方法である。</u>通常、放射化金属等の内部に含まれる特定対象（部位（位置））ごとに材料仕様、中性子条件（6.1.2.3参照）及び照射条件（6.1.2.4参照）を含む適切又は保守的なパラメータを用いて計算する。</p> <p>この方法は、全てのタイプの放射化金属等の評価に適用できる。一般的に、特定の放射化金属等が最大放射能濃度に近い場合に適用する。</p>
区間推定法	5.2.3 区間推定法	<p>燃料と組まれる放射化金属等（チャンネルボックス、バーナブルポイズンなど）の中に<u>中性子照射によって生成する放射性核種の放射能濃度は、燃料の燃焼度と密接な関係がある。</u>これは、評価対象とする放射化金属等が同じ設計、材料仕様で、かつ、同じ照射条件及び中性子フルエンス率で照射されて原子炉に存在しているからである。</p> <p>管理指標（例 燃料の燃焼度など）と放射化金属等の内部の放射能濃度との関係を、管理指標が取り得る範囲を網羅する放射化計算によって評価することで、管理指標に対する放射能濃度への換算係数を求め、管理指標に換算係数を乗じることによって放射化金属等の内部の放射能濃度を評価する。</p>
	5.2.3.2 換算係数法	
	5.2.3.3 濃度比法	<p>放射化金属等の特定部位（位置）では、<u>中性子照射によって同時に生成する放射性核種の濃度の比は、特定部位（位置）における元素成分条件、中性子条件及び照射条件がほとんど同じことから一定条件にある。</u></p> <p>同じ種類の複数の放射化金属等の複数の部位（位置）の元素成分条件、中性子条件及び照射条件を網羅する放射化計算によって、評価対象とする放射化金属等全体の難測定核種の放射能濃度と同時に生成するKey核種1)の放射能濃度との相関関係の評価し、難測定核種とKey核種との濃度比を算定しておき、濃度比にKey核種の放射能濃度を乗じることによって、放射化金属等の内部に含まれる各評価対象核種の放射能濃度を評価する。</p> <p>なお、半減期が大きく異なる難測定核種とKey核種との比率に、照射終了後の減衰時間が影響を与える場合は、減衰時間を考慮する（考慮する必要がない場合を、例に示す）。</p>
5.2.3.4 濃度分布評価法	<p><u>原子炉内の固定された放射化金属等は、元素成分条件及び照射条件（時間）が同じで、原子炉内での設置部位（位置）による中性子フルエンス率だけが異なる。</u></p> <p>放射化金属等の各照射部位（位置）の中性子フルエンス率を網羅する放射化計算によって、放射化金属等全体における放射性核種の放射能濃度の分布を評価し、この分布に基づき、放射化金属等の内部に含まれる平均放射能濃度などを評価する。</p>	

注記 点推定法の詳細を附属書C、区間推定法の詳細を附属書Dに示す。

技術要素2-1の補足1 放射性廃棄物の特性を考慮した評価方法であること

－ 区間推定法の特徴とその適用例 －

区間推定法は、廃棄物グループ全体を対象とした放射能濃度範囲を評価し、係数などを計算評価して放射能濃度を決定する。

評価法	濃度比法(5.2.3.3)	換算係数法(5.2.3.2)	濃度分布評価法(5.2.3.4)
基礎データ			
評価方法の特徴	同種の放射化物の中で同時に中性子照射され生成した核種間の濃度比が一定であることを利用し、Key核種（Co-60）の放射能濃度に計算で得られた濃度比を乗じて対象核種の放射能濃度を評価する方法	核種の生成因子である燃料の燃焼度などの管理指標と密接な関係性をもつ放射化物の放射能濃度を、原子炉の運転で管理されている管理指標（燃焼度など）の値から対象核種の放射能濃度を評価する方法	同一の照射時間、材料組成（中性子分布だけが異なる）の放射化物中に生成する核種の放射能濃度を部位（位置）ごとに計算し、対象とした放射化物全体の対象核種の放射能濃度分布として評価する方法
適する評価対象	材料、中性子条件、照射時間の変動範囲を考慮した評価方法であるため、これらの変動があり、多数の発生が想定される放射化物、多数の位置に配置される放射化物又は大型の放射化物に向く	燃焼度、中性子照射量との強い関係性を考慮した評価方法であり、これを管理指標として適用するため、燃料との関係が強い放射化物に向く	放射能濃度分布が比較的狭い範囲となる解体廃棄物、特に、原子炉軸方向又は径方向の中性子分布だけが異なる大型の固定された放射化物に向く
適する評価対象の具体例	BWR ：チャンネルボックス、制御棒、多数の位置に配置された解体廃棄物（ガト管など） PWR ：バーナブルポイズン、制御棒、多数の位置に配置された解体廃棄物（支持柱など）	BWR ：チャンネルボックス、制御棒 PWR ：バーナブルポイズン、制御棒	BWR ：シュラウド、圧力容器、格子板、支持板 PWR ：圧力容器、炉心槽、熱遮へい体、炉心バッフル、支持板

注 区間推定法は、5.2.3及び附属書Dに詳細を示している。

技術要素2-1の補足2 放射性廃棄物の特性を考慮した評価方法であること － 区間推定法の特徴とその適用例 －

附属書Dの式(1)に示すように、放射化によって生成する核種の放射能濃度は、中性子の照射時間が生成する核種の半減期に比べて短いなどの条件では、式(1)のように近似的（中性子エネルギー群に単純化）に表わされます。

$$A = \sigma \times N \times \Phi \times t \times \lambda \quad (1)$$

ここに、
A : 評価対象とする放射化金属等の放射能濃度 (Bq/cm³)
Σ : 親核種の放射化断面積 (cm²)
N : 親核種の照射前の原子数密度 (cm⁻³)
Φ : 中性子フルエンス率 (n/cm²/sec)
Λ : 生成核種の崩壊定数 (s⁻¹)
t : 中性子の照射時間 (s)

この式を用いると、評価対象部位（位置）の放射能濃度は経時的に変化しても、選択した評価対象部位（位置）では、同一の中性子フルエンス率、同一の中性子の照射時間であることから、評価対象核種とK e y核種核種との濃度比は、下式のように一定の定数で示すことができることとなります。

$$\text{濃度比} = \frac{A_e}{A_k} = \frac{\sigma_e \times N_e \times \Phi \times t \times \lambda_e}{\sigma_k \times N_k \times \Phi \times t \times \lambda_k} = \frac{\sigma_e \times N_e \times \lambda_e}{\sigma_k \times N_k \times \lambda_k}$$

上式の添え字e：評価対象核種、k：K e y核種を意味する。

また、中性子の照射量 (Φ×t) に比例する因子を管理指標Bとすれば、放射能濃度は管理指標に比例し、放射能濃度と管理指標との換算係数をRとして表せば、放射能濃度は、式(2)のように単純に表される。

$$A = R \times B \quad (2)$$

ここに、R：換算係数、B：管理指標（例えば、燃焼度）

技術要素2-1 理論的方法の妥当性

－ 理論的方法の手順が示されていること－

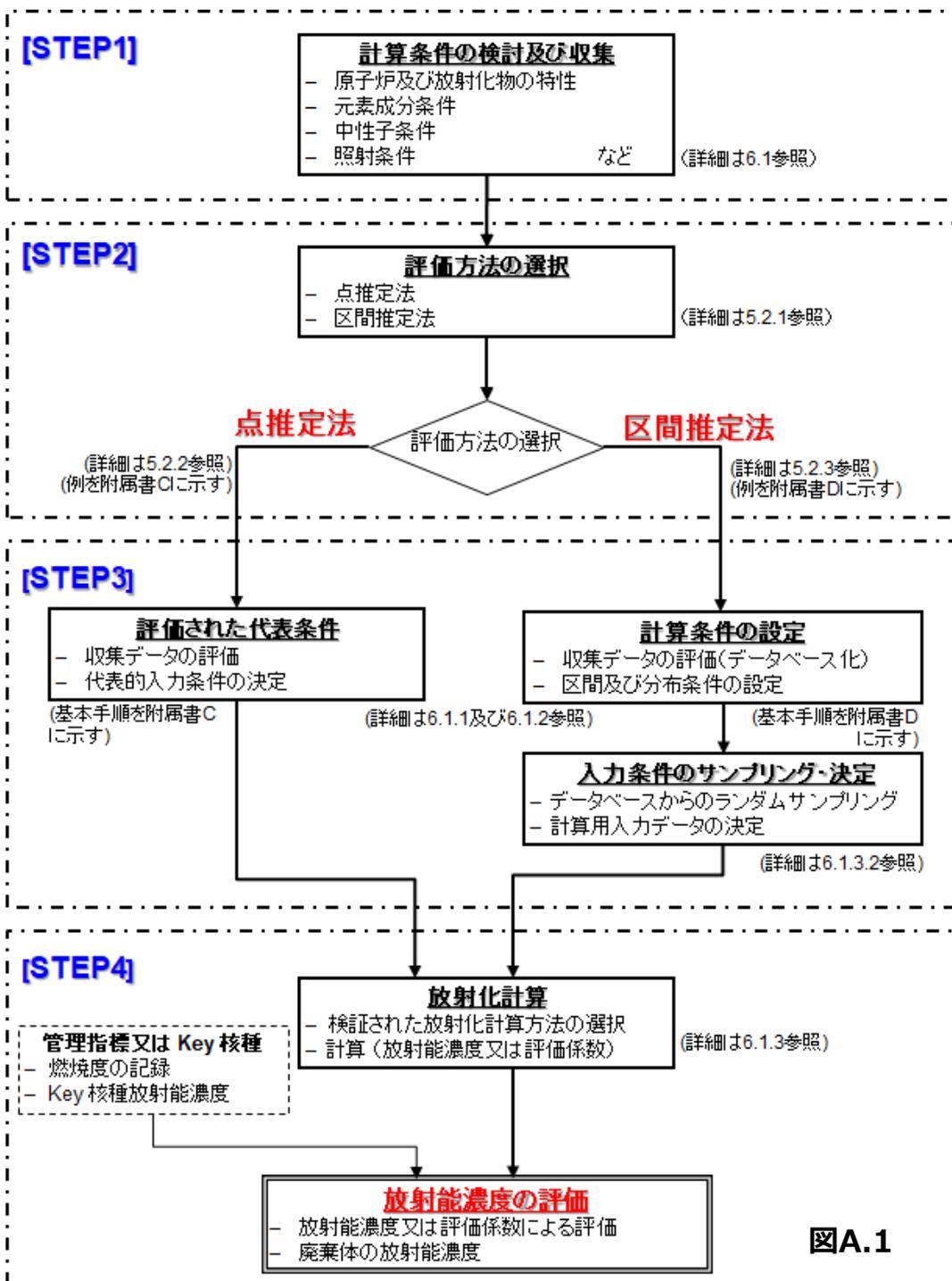
理論的方法の手順は、下表に示したように、L1放射能評価標準2019の本文の「6.1 理論的方法の手順」に、「放射化計算の基本手順」が規定されており、この計算の準備から計算結果を得るまでの流れが、附属書Aに「A.1理論的方法の基本的な適用方法」として、評価手順のステップ（参考図1参照）として明確に示されている。

さらに、附属書Cに「点推定法を適用する場合の基本手順」（参考図2参照）、附属書Dに「区間推定法を適用する場合の入力データの基本設定フロー」（参考図3参照）、及び附属書Gに「放射化計算の入力条件の設定例」と評価手順の詳細が明確に示されている。加えて、各区間推定法の計算手順の実例の例を具体的に示す次の附属書を標準に付けている。

- 附属書I（参考） 濃度比を用いる場合の計算例
- 附属書J（参考） 換算係数を用いる場合の計算例
- 附属書K（参考） 濃度分布評価法によって決定する場合の計算例

記載箇所	標準の記載内容
<p>本文</p> <p>6. 放射能濃度決定方法の手順</p> <p>6.1 理論的方法の手順</p> <p>6.1.1 放射化計算の基本手順</p>	<p>6 放射能濃度決定方法の手順</p> <p>6.1 理論的方法の手順</p> <p>6.1.1 放射化計算の基本手順</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>b) 計算方法の選択 (例 点推定法又は区間推定法の選択)</p> <p>c) 入力パラメータの選択・決定 入力パラメータ及び境界条件は、選択した計算方法に依存する。</p> <p>d) 計算の実施 選定した方法及び入力パラメータを使用した放射化計算の実施。</p> <p>e) 計算結果の処理 選択した方法に依存する相関、換算係数などを決定するための放射化計算した結果の処理。</p> <p>注記 詳細は、附属書A参照。</p>
<p>本文</p> <p>6.1.2 放射化計算の条件の設定</p> <p>6.1.2.1 放射化計算の入力条件</p>	<p>6.1.2 放射化計算の条件の設定</p> <p>6.1.2.1 放射化計算の入力条件</p> <p>入力パラメータ及び条件を設定する一般的な手順は、点推定法による計算方法及び区間推定法による計算方法として文書化する。また、放射化計算には、次に示した基本的な入力パラメータ及び条件が必要となる。</p> <ul style="list-style-type: none"> － 元素成分条件 － 中性子条件 － 照射条件 (例 中性子照射時間, 照射停止時間) <p>注記 詳細は、附属書C及び附属書D参照。</p>

技術要素2-1の参考図1 L1放射能評価標準に示す理論的方法の適用基本フロー



図A.1

理論的方法は、母材料及び中性子の照射条件が明確な炉内構造物などの中深度処分対象廃棄物の埋設事業変更許可で申請する放射性核種の放射能濃度を評価するための方法で、次のステップで評価を進める。

STEP1 : 対象・目的などの設定 (計算条件の検討及び収集)

放射化金属等中の放射能濃度を理論的に評価するには、対象とする放射化金属等の特性（幾何形状，元素成分条件など），原子炉の運転条件（中性子条件及び照射条件）などの放射化計算に必要なデータを事前に収集する。

STEP2 : 計算方法（評価方法）の選択

理論計算法は、STEP1を踏まえて、放射化金属等の条件に応じ、“点推定法”及び“区間推定法”から、評価方法を選択する。例えば、評価対象とする放射化金属等の詳細情報が特定されない場合、全体を網羅した評価を行う“区間推定法”の選択が適切である。

STEP3 : 入力パラメータの選択・決定 (計算の入力条件の設定)

放射化計算を行うための入力条件は、STEP2で選択した方法に応じて、収集した基礎データベースを踏まえ、(区間推定法の場合)ランダムサンプリングで設定する。

STEP4 : 放射化計算及び放射能濃度の評価

適切な計算コードを選択し、STEP3で設定した入力条件を用いて、放射化計算を実施し、直接的に放射能濃度を算出するか、又は濃度比などの評価係数を計算する。

注記 附属書A.1に示している内容。

技術要素2-1の参考図2 点推定法の適用基本フロー

点推定法は、評価対象位置（理論上は代表点）において、放射化計算コードで照射条件と中性子フルエンス率とを使用して、評価対象部材の放射化を決定する方法で、次のステップで評価を進める。

STEP1：中性子フルエンス率を決定するための中性子輸送計算モデルの設定

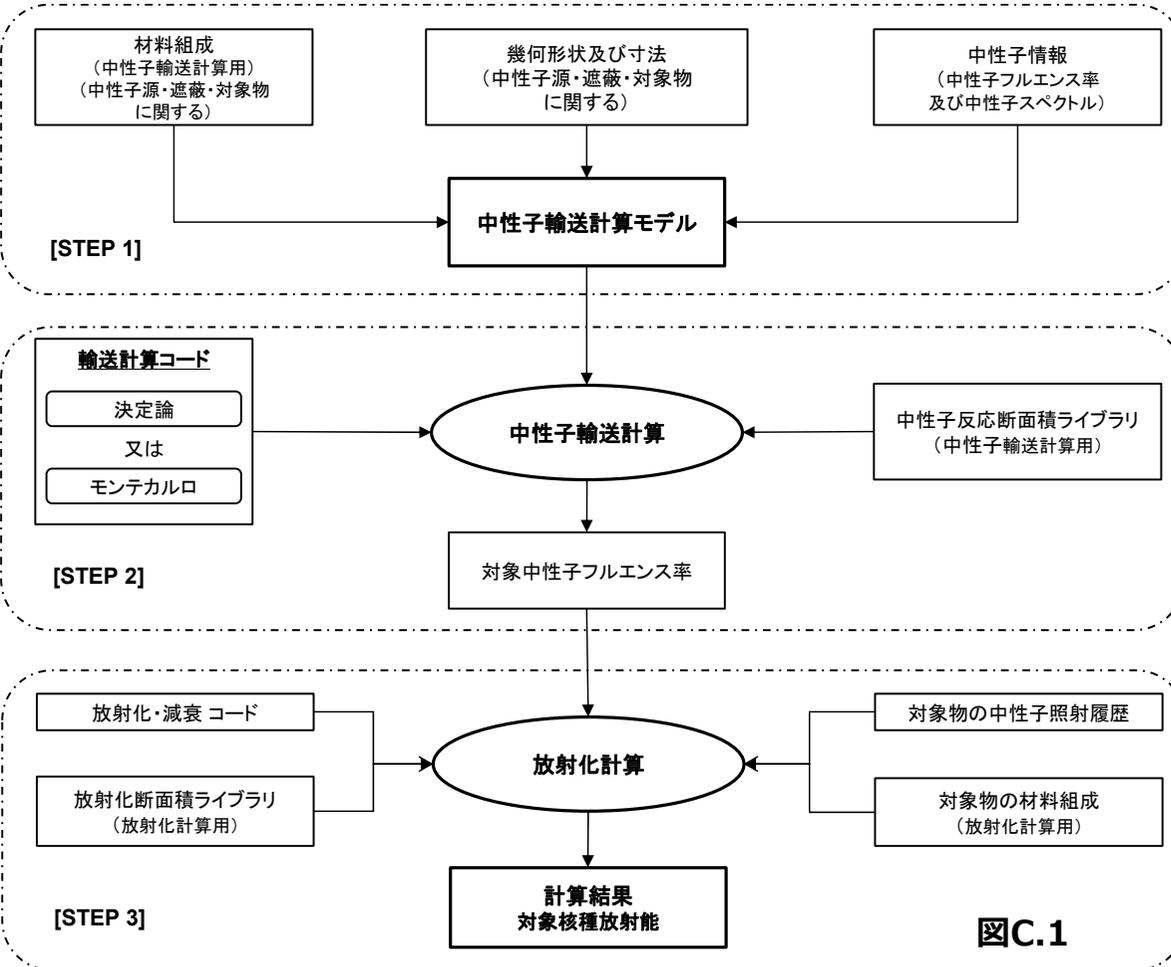
- 炉心内又は炉心近くで消耗される集合体
 - 機器の使用期間に記録されている中性子フルエンス率を使用する。運転履歴及び中性子束から、中性子フルエンス率を評価し直す。
 - 放射能の全体分布は、機器の照射を最も多く受けた部分によってきわめて大きく影響される。
- 炉内構造物、格納容器及び構造物
 - 線源の定義：
 - 中性子フルエンス率の分布、又は、
 - 核分裂生成核種の分布を含む炉心構成材の組成。
 - 冷却材を含む、輸送問題に関連した部材及び形状の設定など：
 - 構成材の組成及び密度、
 - 輸送問題に関連した形状の記述。

STEP2：中性子輸送計算の実施

中性子輸送計算によって、評価対象位置の中性子フルエンス率（中性子束及びスペクトル）を決定できる評価対象の位置は、評価対象内の代表「点」などである。

STEP3：放射化計算の実施

放射化計算では、評価対象の基準点の核種組成を、評価対象内の代表点の値として、又は評価対象の平均値として決定する。

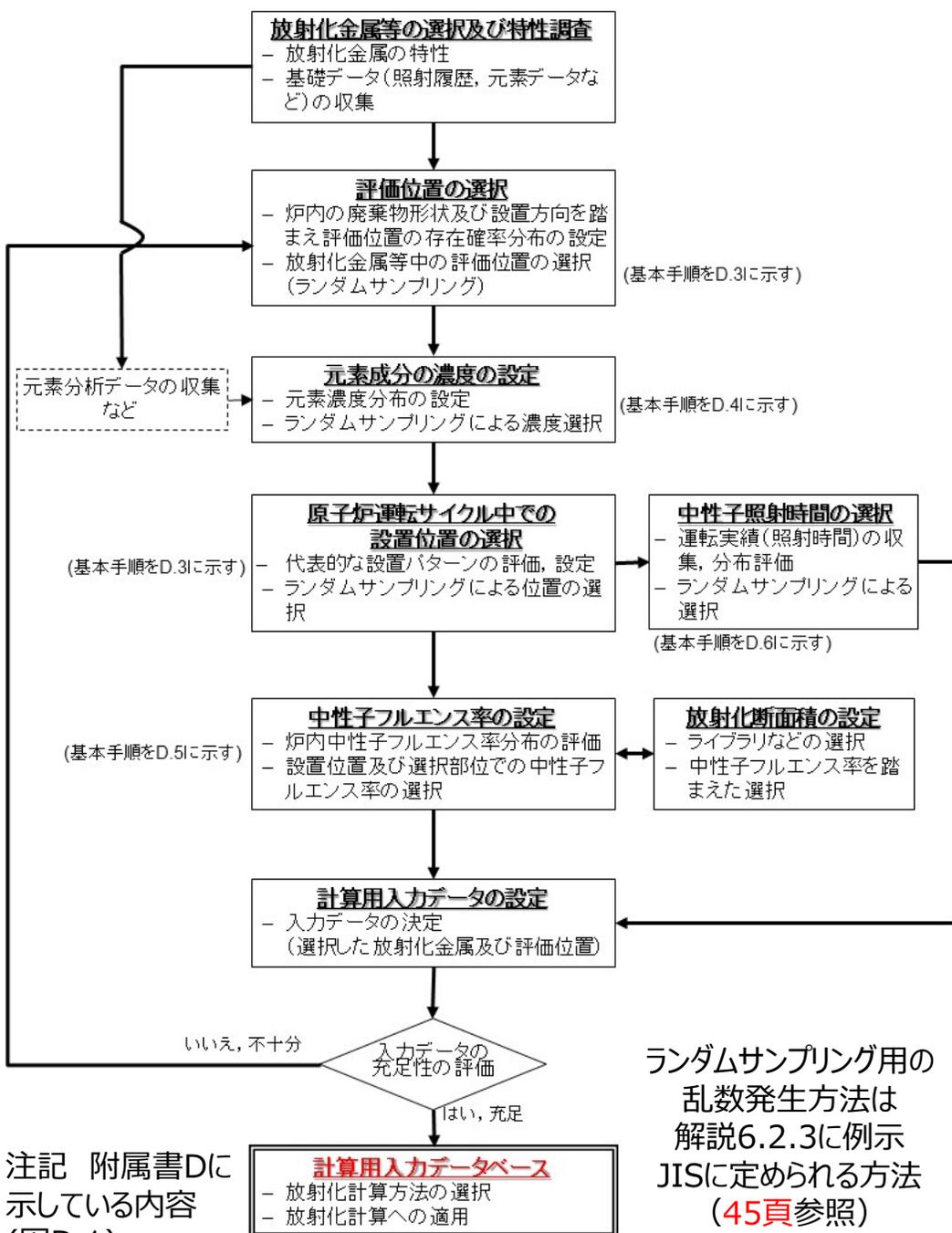


図C.1

放射化計算実施に関する基本手順

注記 附属書Cに示している内容。

技術要素2-1の参考図3 放射化計算用の入力データの設定方法の手順



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, この基礎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での設置位置の選択 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。

技術要素2-1 理論的方法の妥当性

－放射化計算に適用する計算方法（放射化計算コードなど）は実績があり、妥当であること－

放射化計算に適用する放射化計算方法は、**下表**に示したように、L1放射能評価標準2019の本文の「6.1.3.1 放射化計算方法」に、「適切な放射化計算方法を選定」と規定されている。

さらに、本文の「6.3.1 理論的方法の妥当性確認」に、「妥当性確認は、理論的方法の放射化計算方法及び計算手順が期待される結果を与えることを（客観的、文書化された証拠によって）明示し、計算が恒常的に、正確に実施できることを確認する」と規定されている。

具体的には、**参考1**に示した附属書A「A.3 放射化計算コードの例」として、「ORIGEN」などの概要を示し、この計算コードの推奨を明確にしている。

なお、ORIGEN 2に関する妥当性確認は、**参考2**に示すように、国内外の公的機関によって、確認されている計算コードである。

また、附属書Fに、実際に照射された放射化金属等（BWRのチャンネルボックス、PWRの制御棒、GCRの黒鉛ブロック）のサンプルの放射化学分析結果と同じ元素条件及び照射条件での理論的方法（点推定法）による計算値に関して、比較した結果が示されており、これらを**参考3**に示すが、計算結果の正確さ示されており、理論的方法の妥当性がこれらによって確認されている。

記載箇所		標準の記載内容
本文	6.1.3 放射化計算	6.1.3 放射化計算 6.1.3.1 放射化計算方法 放射化計算を行うに当たっては、 適切な放射化計算方法を選定 し、計算範囲の中性子条件の特徴を考慮し、使用する。 注記 詳細は、 附属書A 参照。
本文	6.3.1 理論的方法の妥当性確認	6.3 妥当性確認 6.3.1 理論的方法の妥当性確認 6.3.1.1 妥当性確認の方法 妥当性確認は、 理論的方法の放射化計算方法 及び計算手順が期待される結果を与えることを（客観的、文書化された証拠によって）明示し、計算が恒常的に、正確に実施できることを確認する。 妥当性確認は、適用する計算方法の結果に関する正確さ及び適用性を確認することであり、近似性の正確さ及び適正さ、相関性の適用性などで評価できる。 注記1 妥当性確認は、放射化計算方法を周知のテストケース、既に妥当性確認された計算方法などと比較することなどで行うことができる。また、放射化計算方法に関する妥当性確認は、 AESJ-SC-A008:2015 を参照する。 注記2 詳細は、 附属書A 参照。

技術要素2-1の参考1 理論的方法の妥当性

－放射化計算に適用する適切な計算方法（放射化計算コードなど）の例－

標準では、放射化計算に適用する適切な放射化計算コードとして、下表に示す例を示している。

記載箇所	標準の記載内容
附属書A A.3 放射化計算コードの例	<p>A.3 放射化計算コードの例</p> <p>理論計算法に使用する放射化計算コードについては、基本的に一般的に使用されている放射化計算コード（ORIGEN[2], DCHAIN2[3]などがある）を、放射化範囲の中性子条件の特徴を勘案し、適切に使用する必要がある。ただし、放射化計算は、超ウラン元素のような核種間の崩壊系列が複雑なものを除き、放射性核種を限定すれば上記の放射化計算コードを用いることなく実施可能であり、使用する基本データ（例 放射化断面積、崩壊データ）を整備し、放射化計算を実施する場合もある。</p> <p>ここでは、代表的な放射化計算コードの一つであるORIGENコードの概要を、次に示す。</p> <p>a) ORIGENコードの概要 ORIGENコードとは、米国オークリッジ国立研究所にて開発されたもので、数百種を超える核種に対する核反応による生成核種を評価できる。この放射化計算コードのシリーズは、使用済燃料、再処理工程の線源強度評価、放射性廃棄物の放射能評価などに広く使われている。</p> <p>b) ORIGENコードの計算 ORIGENコードは、与えられた燃料組成及び比出力に対する燃焼中の核分裂生成物、中性子吸収、核反応による生成核種の蓄積量の計算、及び与えられた元素成分条件並びに中性子条件に対する放射化生成核種の蓄積量の計算を実施することができる。ORIGENコードを使用して計算できる内容は、次のとおりである。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 燃焼計算 核分裂物質の量、比出力及び燃焼時間を入力することによって、燃料の燃焼に伴う核分裂生成物、放射化生成物の生成量、放射能及び発熱量の計算を行う。 2) 放射化計算 評価対象とする放射化金属等の元素成分条件、中性子条件及び照射時間を入力することによって、評価対象とする放射化金属等内の放射化生成物、Uなどの核分裂性物質が含まれる場合は、核分裂生成物の生成量、放射能及び発熱量の計算を行う。 3) 崩壊計算 対象とする放射性物質の量及び減衰時間を入力することによって、放射性物質の放射性崩壊及び放射性崩壊の連鎖を考慮した放射性物質質量、放射能及び発熱量の計算を行う。 <p>c) ORIGENコードの種類 ORIGENコードの種類としては、次のものがある。</p> <ul style="list-style-type: none"> － ORIGEN79 － ORIGEN-S － ORIGEN2 － ORIGEN2.1 － ORIGEN2.2

注記 放射化計算コードに関しては、11～13頁に示している。

技術要素2-1の参考2(1) 放射化計算コード (例 ORIGEN2) の妥当性

1. 概要

ORIGEN2 コードとは、米国オークリッジ国立研究所にて開発されたもので、数百種を超える核種に対する核反応による生成核種を評価できる。

ORIGEN2 コードを使用して計算できる内容は、次のとおりである。

- 1) 燃焼計算 核分裂物質の量、比出力及び燃焼時間を入力することによって、燃料の燃焼に伴う核分裂生成物、放射化生成物の生成量、放射能及び発熱量の計算を行う。
- 2) 放射化計算 評価対象とする放射化金属等の元素成分条件、中性子条件及び照射時間を入力することによって、評価対象とする放射化金属等内の放射化生成物、Uなどの核分裂性物質が含まれる場合は、核分裂生成物の生成量、放射能及び発熱量の計算を行う。
- 3) 崩壊計算 対象とする放射性物質の量及び減衰時間を入力することによって、放射性物質の放射性崩壊及び放射性崩壊の連鎖を考慮した放射性物質質量、放射能及び発熱量の計算を行う。

2. 使用実績

ORIGEN2コードは、使用済燃料、再処理工程の線源強度評価、放射性廃棄物の放射能評価、輸送キャスク、核燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている。

3. 検証方法

汎用コードの導入評価¹⁾が実施されていることが確認されている。

大型実験／ベンチマーク試験による検証^{2) 3)}が実施されていることが確認されている。

- 1) A.G. Croff, "ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code ATRIX EXPONENTIAL METHOD", CCC-371, (1987)
- 2) (社)日本原子力学会 "原子炉崩壊熱とその推奨値", 1989年8月
- 3) A. G. Croff, "ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Nuclear Technology, Vol.62, (1983)

技術要素2-1の参考2(2) 放射化計算コード (例 ORIGEN79) の妥当性

1. 概要

ORIGEN-79コードとは、米国オークリッジ国立研究所にて開発されたORIGENシリーズの一つである。高速中性子,熱外中性子,熱中性子の3群断面積ライブラリーを使用する。

一連のORIGENコードを使用して計算できる内容は、次のとおりである。

- 1) 燃焼計算 燃料の核種組成 (重量) ,照射期間 (運転パターン) ,炉内中性子束あるいは炉の比出力を入力することによって、各核種の放射エネルギー,中性子やガンマ線発生数,核分裂生成物やアクチノイド核種の生成量を計算する。
- 2) 放射化計算 評価対象である構造材の材料組成,中性子束,照射履歴を入力することによって、構造材の放射化放射エネルギーを計算する。
- 3) 崩壊計算 評価対象である材料組成,中性子束,照射履歴を入力することによって、生成,消滅計算から得られる放射性核種の発熱量を計算する。

2. 使用実績

ORIGEN-79は、炉内構造物の放射化計算,原子炉施設の廃止措置に使用されている。

3. 検証方法

汎用コードの導入評価¹⁾が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証²⁾が実施されていることが確認されている。

1) "ORIGEN-79 : Isotope Generation and Depletion Code – Matrix Exponential Method", Radiation Safety Information Computational Center, (1979)

2) Mikio Uematsu, Masahiko Kurosawa, Yoshiko Haruguchi, "Evaluation of induced radioactivity in structural material of Toshiba Training Reactor 'TTR1' " Radiat Prot Dosimetry 2005, 116(1-4 Pt2):276-9

技術要素2-1の参考2(2) 放射化計算コード (例 ORIGEN-S) の妥当性

1. 概要

ORIGEN-Sコードとは、米国オークリッジ国立研究所にて開発されたORIGENシリーズの一つである。SCALEシステムの一部であり、ORIGEN-79同様3群のスペクトルを使用可能である。

一連のORIGENコードを使用して計算できる内容は、次のとおりである。

- 1) 燃焼計算 燃料の核種組成 (重量), 照射期間 (運転パターン), 炉内中性子束あるいは炉の比出力を入力することによって, 各核種の放射エネルギー, 中性子やガンマ線発生数, 核分裂生成物やアクチノイド核種の生成量を計算する。
- 2) 放射化計算 評価対象である構造材の材料組成, 中性子束, 照射履歴を入力することによって, 構造材の放射化放射エネルギーを計算する。
- 3) 崩壊計算 評価対象である材料組成, 中性子束, 照射履歴を入力することによって, 生成, 消滅計算から得られる放射性核種の発熱量を計算する。

2. 使用実績

ORIGEN-Sは、炉内構造物の放射化計算, 原子炉施設の廃止措置に使用されている。

3. 検証方法

汎用コードの導入評価¹⁾が実施されていることが確認されている。

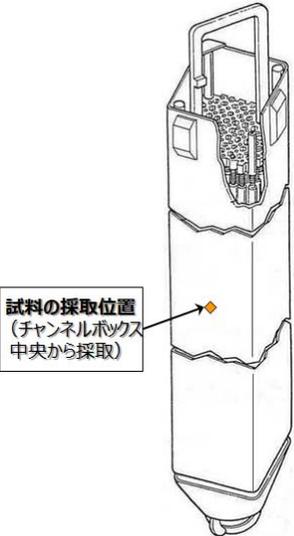
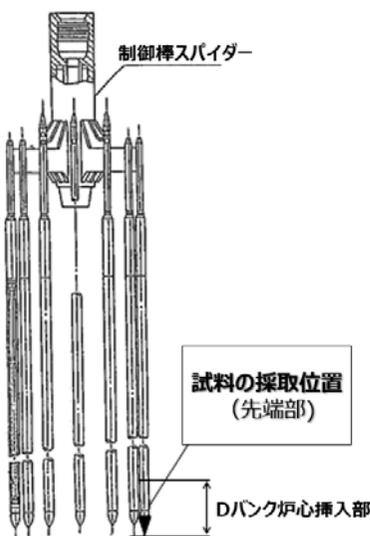
大型実験/ベンチマーク試験による検証²⁾が実施されていることが確認されている。

1) SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, ORNL/TM-2005/39, Version 5.1, Vols.I-III, November (2006)

2) K.Tanaka et al., "Radioactivity evaluation for Main Steam Line and Suppression Chamber of small type BWR", Progress in Nuclear Science and Technology Volume 4 (2014) pp.836-839

技術要素2-1の参考3-1 放射化計算結果の検証(標準における分析結果との比較)

理論計算方法の正確さは、分析試料を採取した部位（位置）の放射能濃度に関する点推定法（区間推定法の個々の理論計算は点推定法と同じである）による計算結果と分析結果との比較によって、計算評価方法の適用性を評価している。

種類	BWR チャンネルボックス	PWR制御棒
試料採取部位 (評価位置)	 <p>試料の採取位置 (チャンネルボックス 中央から採取)</p>	 <p>制御棒スライダー 試料の採取位置 (先端部) Dバンク炉心挿入部</p>
分析結果	Co-60 : 3.3×10^{12} Bq/t	Ag-108m : 2.5×10^{14} Bq/t
計算結果	Co-60 : 3.4×10^{12} Bq/t	Ag-108m : 2.6×10^{14} Bq/t
入力条件	<p><u>元素成分</u> : 同一ロットの未照射試料の元素分析結果</p> <p><u>中性子条件</u> : CB中央部の中性子フルエンス率、</p> <p><u>照射条件(中性子照射及び照射停止日数)</u> : サイクルごとに与える。</p>	<p><u>元素成分</u> : Ag-In-Cd合金のミルシートの平均値</p> <p><u>中性子条件</u> : 制御棒先端の中性子フルエンス率、</p> <p><u>照射条件(中性子照射及び照射停止日数)</u> : サイクルごとに与える。</p>

注記 理論的方法の検証は、附属書Fに詳細を示す。

技術要素2-1の参考3-2 放射化計算結果の検証 (標準における分析結果との比較)

理論計算方法の計算結果と分析値の比較検証に適用した理論計算方法の入力条件の詳細を下表に示す。

種類	BWR チャンネルボックス	PWR制御棒		
入力条件の詳細 附属書F 表F.1及び F.2	理論計算法の点推定法を用いて放射化計算を実施した。放射化計算の条件は、次のとおり設定した。			
	条件	計算条件	備考	
	元素成分条件	Co濃度(イオン交換-誘導結合プラズマ質量分析による測定)：質量分率 $5.3 \times 10^{-5} \%$	同一ロットから作られたチャンネルボックス未照射保管試料の元素分析データを用いた。	
	中性子フルエンス率及び照射条件	チャンネルボックス試料片の中性子フルエンス率、中性子照射日数及び中性子照射停止日数をサイクルごとに与える。	照射条件は、実際の照射履歴から詳細に設定している。中性子フルエンス率分布は集合体内を詳細に模擬した三次元のモンテカルロ法に基づくMCNPを用いている。	
放射化断面積	ORIGEN-Sに内蔵の3群断面積を熱中性子、熱外中性子、高速中性子に対するスペクトルインデックスを用いて補正して使用した。	評価位置におけるスペクトルインデックスは、MCNPによって得られた中性子スペクトルから求めた。		
		条件	計算条件	備考
		元素成分条件	Ag-In-Cd合金のミルシートの平均値 Ag濃度：質量分率 80 %	Agは、Ag-In-Cd合金の主要な構成材であるため、元素分析値のばらつきは、ほとんどない。
		中性子フルエンス率及び照射条件	制御棒先端の中性子フルエンス率、中性子照射日数及び中性子照射停止日数をサイクルごとに与える。	照射条件は、照射履歴から詳細に設定している。中性子の計算には制御棒を詳細に模擬した三次元のモンテカルロ法に基づくMCNPを用い、事前にJMTR照射試験を行い、MCNPによる計算値と測定結果との比較を行い、よく一致していることを確認している。
		放射化断面積	11サイクル中9サイクルがDバンクで照射されており、Dバンクの吸収体先端0.2 m 平均の放射化断面積で代表した。	制御棒吸収体でのディプレッション効果によるエネルギースペクトルを反映した実効断面積を作成している。 核データ (RNAL) は、ORIGEN 2 用1群断面積で設定している。
計算コード	ORIGEN-Sコード (米国オークリッジ国立研究所が開発した公開コードであり、米国を中心に広く利用されている。)	ORIGEN2コード (公開コードであり、許認可ではキャスク及び高燃焼度化における使用済燃料の線源強度計算で実績がある。)		

注記 理論的方法の検証は、附属書Fに詳細を示す。RNAL は、IAEA で作成された評価済み核データライブラリである。

「理論的方法」及び「入力データの設定方法」の妥当性 －技術要素2：放射能濃度の評価方法の評価－

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の評価方法には、次の「理論的方法」の妥当性及び「計算の入力データの設定方法」の妥当性が必要となると考えている。

技術要素2-1：理論的方法の妥当性

- 放射能濃度の評価方法として、適用する理論的方法は、下記を満足させる必要がある。
 - ① 放射性廃棄物の特性（照射条件，交換／解体条件など）を考慮した評価方法であること。
 - ② 理論的方法の手順が示されていること。
 - ③ 放射化計算に適用する計算方法（放射化計算コードなど）は実績があり、妥当であること。

技術要素2-2：計算の入力データの設定方法の妥当性

- 理論的方法の入力データの設定方法として、下記を満足させる必要がある。
 - ① 放射化計算に適用する入力項目（母材の元素濃度，中性子フルエンス率，照射時間）の基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること。
 - ② 放射化計算に適用する入力条件（元素濃度，中性子フルエンス率，照射時間）が、対象とする放射性廃棄物を取り得る範囲を網羅、又は代表した条件で設定できる方法であること。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－放射化計算の基本手順－

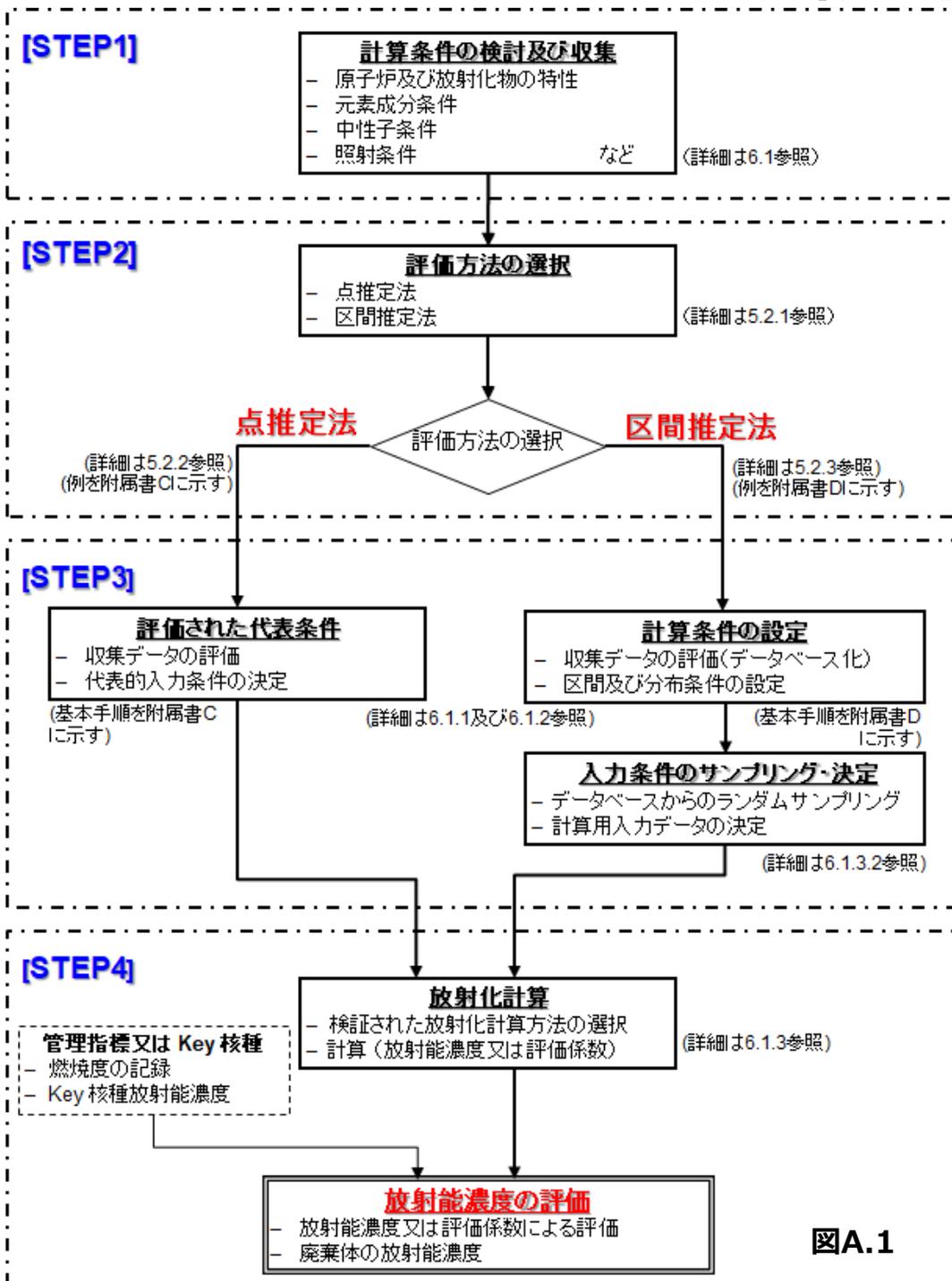
理論的方法の手順は、6.1.1に示した基本手順（手順を基本フローで示した図を次頁及び7、8頁に示す）に従って、放射化計算など実施して、放射化金属等の放射能濃度を評価する。

このために必要となる入力条件の設定は、19頁以降に示す。

評価方法	記載箇所	標準の規定内容
本文	6.1.1 放射化計算の基本手順	<p>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計算法に適用する放射化計算の基本手順は、次の過程に従う。</p> <p>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。</p> <p>b) 計算方法の選択 （例 点推定法又は区間推定法の選択）</p> <p>c) 入力パラメータの選択・決定 入力パラメータ及び境界条件は，選択した計算方法に依存する。</p> <p>d) 計算の実施 選定した方法及び入力パラメータを使用した放射化計算の実施。</p> <p>e) 計算結果の処理 選択した方法に依存する相関，換算係数などを決定するための放射化計算した結果の処理。</p>

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－放射化計算の基本手順のフロー－



図A.1

理論的方法は、母材料及び中性子の照射条件が明確な炉内構造物などの中深度処分対象廃棄物の埋設事業変更許可で申請する放射性核種の放射能濃度を評価するための方法で、次のステップで評価を進める。

STEP1 : 対象・目的などの設定 (計算条件の検討及び収集)

放射化金属等中の放射能濃度を理論的に評価するには、対象とする放射化金属等の特性（幾何形状，元素成分条件など），原子炉の運転条件（中性子条件及び照射条件）などの放射化計算に必要なデータを事前に収集する。

STEP2 : 計算方法（評価方法）の選択

理論計算法は、STEP1を踏まえて、放射化金属等の条件に応じ、“点推定法”及び“区間推定法”から、評価方法を選択する。例えば、評価対象とする放射化金属等の詳細情報が特定されない場合、全体を網羅した評価を行う“区間推定法”の選択が適切である。

STEP3 : 入力パラメータの選択・決定 (計算の入力条件の設定)

放射化計算を行うための入力条件は、STEP2で選択した方法に応じて、収集した基礎データベースを踏まえ、(区間推定法の場合)ランダムサンプリングで設定する。

STEP4 : 放射化計算及び放射能濃度の評価

適切な計算コードを選択し、STEP3で設定した入力条件を用いて、放射化計算を実施し、直接的に放射能濃度を算出するか、又は濃度比などの評価係数を計算する。

注記 附属書A.1に示している内容。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－ 評価位置の選択（評価対象物内の位置） －

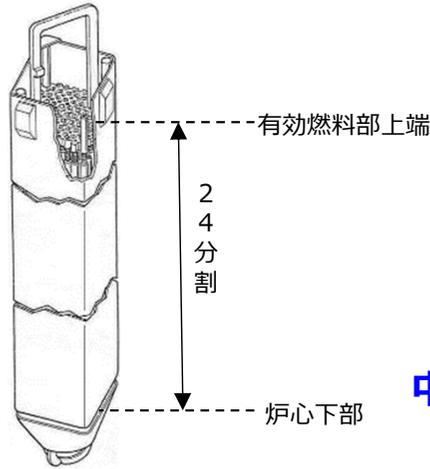
評価対象の特性の内、STEP1で行う幾何形状を踏まえた、評価位置の設定は、点推定法の場合は、評価位置は代表できる位置を選択するが、区間推定法の場合、対象廃棄物を網羅するように評価位置をランダムに選定する必要がある。

D.3.1 評価位置（廃棄物内の位置）の設定

D.3.2 評価位置（原子炉内の位置）の設定

チャンネルボックスの軸方向の評価位置

（軸方向の位置は一様分布）

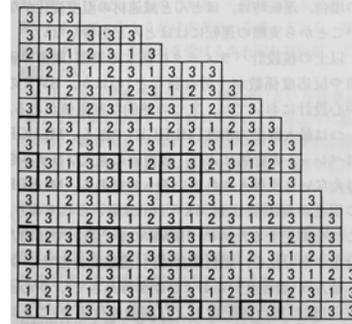


原子炉内の軸方向のCBの部位（位置）は、一様分布として、ランダムに廃棄物自体の評価位置を抽出する。

中性子条件の設定に適用

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）



CBの原子炉内の径方向の挿入位置は、照射時間に応じたローテーションパターンを踏まえ設定する。

中性子条件の設定に適用

炉内での燃料の装荷状態の一例

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

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) 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。

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。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－ 基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること－

理論的方法の入力データの設定方法として、下記を満足させる必要がある。

- － 放射化計算に適用する入力項目（母材の元素濃度，中性子フルエンス率，照射時間）の[基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること](#)。

理論的方法の入力データの項目（母材の元素濃度，中性子フルエンス率，照射時間）に関する標準の規定内容を次表に示した。

評価方法	記載箇所	標準の規定内容		
本文	6.1.2 放射化計算の条件の設定 6.1.2.1 放射化計算の入力条件	入力パラメータ及び条件を設定する一般的な手順は，点推定法による計算方法及び区間推定法による計算方法として文書化する。また，放射化計算には，次に示した基本的な入力パラメータ及び条件が必要となる。 ー 元素成分条件 ー 中性子条件 ー 照射条件（例 中性子照射時間，照射停止時間） 注記 詳細は， 附属書C 及び 附属書D 参照。		
入力条件	元素濃度条件(6.1.2.2.2)	中性子条件(6.1.2.3)	照射条件(6.1.2.4)	
基礎データ	放射化金属等の種類，材料を考慮した上で，次のいずれかの方法 <ul style="list-style-type: none"> ・ 試料などの化学分析を行う。 ・ 試料などの化学分析結果の文献データ，材料証明書を収集。 ・ 材料規格の元素成分データを収集。 	中性子フルエンス率・中性子スペクトルは， 原子炉及び燃料の配置を考慮した中性子輸送計算コード （ANISN，DOT，MCNPなど：計算コードの妥当性は 31～38頁 参照） などによって適切に評価して設定 する。	照射時間及び照射停止時間（例原子炉運転時間及び照射終了後の減衰時間）は， 次のいずれかの方法で設定 する。運転サイクルも考慮する。（ 39～42頁 参照） <ul style="list-style-type: none"> ・ 個別に照射履歴を設定する方法 ・ 代表照射履歴を設定する方法 	
収集の可能性	各元素の検出性によって収集できるデータ数が異なる (21～30頁 参照)	十分なデータ数の確保が可能	十分なデータ数の確保が可能	

注記 元素データの設定方法の詳細を附属書G、具体例を附属書I～Kに示す。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－ 基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること：元素成分 1 －

理論的方法の入力データの設定方法として、下記を満足させる必要がある。

- 放射化計算に適用する入力項目（母材の元素濃度，中性子フルエンス率，照射時間）の[基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること](#)。

起源元素の元素成分データの収集、設定方法に関する標準の規定内容を次表に示した。

記載箇所		標準の規定内容
本文	6.1.2.2 元素成分条件	評価の条件，評価対象とする放射化金属等の構成材料を考慮して，起源元素を選定し，元素成分データを収集する。種々のソースから収集した起源元素の元素成分データを放射化計算に用いることができる。 注記 詳細は， 附属書F 及び 附属書G 参照。
	6.1.2.2.2 起源元素の元素成分データの収集方法	評価対象とする放射化金属等の種類，材料を考慮した上で，次のいずれかの方法で起源元素の元素成分データを収集する。 － 放射化金属等の試料（品質管理用保存試料など）又は同じ材料の種類の 試料の化学分析を行う方法 。 － 放射化金属等と同じ材料種類の試料，又は同種の材料種類の 試料の化学分析結果の文献データ，材料証明書を収集する方法 。 － 放射化金属等と同じ材料種類に関する 材料規格の元素成分データを収集する方法 。
	6.1.2.2.3 起源元素の成分条件の設定方法	起源元素の元素成分条件は，次のいずれかの方法で設定する。 － 代表値を設定する方法 収集した起源元素の元素成分データによって，濃度の代表値を設定する。 － 濃度分布から設定する方法 収集した起源元素の元素成分データの濃度分布を踏まえ，複数の代表的濃度（例 平均濃度，信頼上限値など）を設定する。 － 濃度範囲を設定する方法 収集した起源元素の元素成分データの濃度範囲を踏まえ，最大濃度，最小濃度を設定する。 注記 検出が困難な元素に関する濃度分布の評価方法は， 附属書H を参照。

注記 元素データの設定方法の詳細を附属書G、具体例を附属書I～Kに示す。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること：元素成分2－

評価対象とする放射化金属等の元素成分条件の設定方式は、収集した元素成分データ及び放射能濃度決定方法の種類に応じて、下表（表G.9）に示す次のいずれかの方法が選択できる。

- － 評価対象とする放射化金属等の代表的な元素成分データ（元素成分データの最大値など）で設定する方式
- － 評価対象とする放射化金属等の元素成分データ群によって濃度分布を設定する方式

設定法		元素成分データの種類	
		代表分析値	分析データ群
元素成分条件 の設定方式	代表値 ^{a)} による設定	評価対象とする放射化金属等ごとの点推定法 ^{a)} の場合： 同一ロットの品質サンプル 又は実物の元素分析値。	評価対象とする放射化金属等ごとの点推定法 ^{a)} の場合： 複数の同一種類、品質の元素成分データの平均値など。
	濃度分布 ^{b)} による設定	—	濃度比法、換算係数法を用いる場合 ^{c)} 、濃度分布評価法を用いる場合： 複数の同一種類及び品質の元素成分データの濃度分布。
注 ^{a)} 点推定法による評価対象とする放射化金属等（廃棄物単一及び単一廃棄物グループ）の放射化計算に使用する元素ごとの濃度の代表値を一つ設定することを意味する。 注 ^{b)} 放射化計算を複数実施し、評価対象とする放射化金属等の放射能濃度、又は濃度比の分布を把握するために、評価対象とする放射化金属等の元素濃度分布を実態の範囲を考慮して、元素ごとに複数の濃度（放射化計算の条件）を設定することを意味する。 注 ^{c)} 換算係数法を用いる場合は、設定した濃度分布によって各元素の代表値（起源元素ごと）を設定する。			

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること－

(元素成分条件の検出数などに応じた設定と保守性 1)

中性子条件及び照射条件のように、計算や運転データで、多くの基礎データを収集できる条件と異なり、元素成分は、材料の化学分析に負うところが大きいと、元素の検出率に応じ、収集できるデータ数に限りが生じる。このため、標準では、分析によって収集できた検出数が少ない場合に対して、その保守性を次のように設定することとしている。

データ数	保守性の設定の考え方	元素濃度分布の設定のイメージ例	
比較的少ない場合	分析データ数の少なさを考慮し、元素分析データの分散の信頼上限を適用する方法によって、保守性を加味した平均値、標準偏差を適用することで、評価対象とする元素成分濃度分布を設定する方法	<p><u>平均濃度:</u> 検出値の平均値の信頼上限とすることで、保守性を見込む。</p> <p><u>濃度分布の標準偏差:</u> 保守的な標準偏差を適用する。</p>	<p>D4.3b)の例図</p>
非常に少ない場合 (標準偏差が計算できない)	① 元素分析データの検出値の平均値を推定する分布の平均値として適用し、加えて、保守性をもつ標準偏差を適用して、濃度分布を設定する方法	<p><u>平均濃度:</u> 検出値の平均値とすることで、保守性を見込む。</p> <p><u>濃度分布の標準偏差:</u> 保守的な標準偏差を適用する。</p>	<p>表D.5の例1</p>
	【過大な保守性を低減する】 ② 元素分析データの検出最大値以下の濃度の低い領域で濃度分布を設定する方法	<p><u>平均濃度:</u> 保守的に検出最大値を濃度分布の+2σ (標準偏差) の値で設定する。</p> <p><u>濃度分布の標準偏差:</u> 保守的な標準偏差適用することによって濃度分布条件を設定する。</p>	<p>表D.5の例2に実際の分布を加筆</p>

注記 附属書D (データ数量に応じた濃度分布条件の設定方法 : D.4.3) に詳細を示している。(青破線の分布を保守的に黒実線の分布で設定)

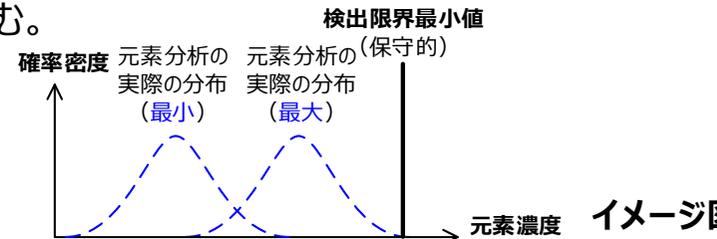
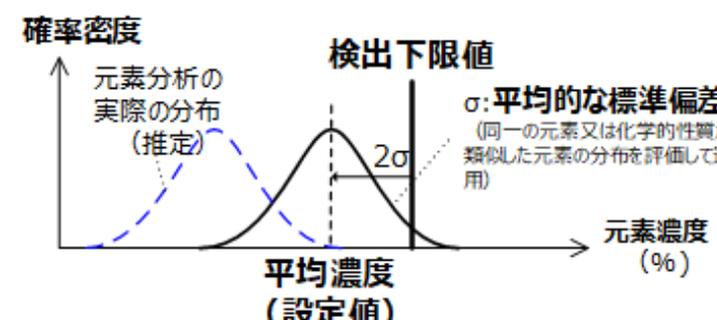
技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

– 基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること –

(元素成分条件の検出数などに応じた設定と保守性 2)

この標準では、分析の結果、検出下限値しか得られなかった場合の保守性を考慮した元素濃度の設定方法を次のように規定している。

なお、この中で示す「同一元素などの分布を参考にした標準偏差」の設定方法は、25~27頁に示す。

データ数	保守性の設定の考え方	元素濃度分布の設定方法及びイメージ例	
検出下限しか得られなかった場合	① 検出下限値をそのまま使用する方法	元素分析結果の検出下限値を平均値として使用する。	<p>確認された最小の検出下限値などで元素濃度を設定すること自体で、多大な保守性を見込む。</p>  <p>イメージ図</p>
	【過大な保守性を低減する】 ② 元素分析データの検出下限値を最大値とする濃度分布を、既知の試料の標準偏差を利用して設定する方法	<p><u>平均濃度:</u> 分析した数が比較的多い場合は、保守的に検出下限値を濃度分布の +2σ の位置として設定する。</p> <p><u>濃度分布の標準偏差:</u> 平均的な標準偏差などの濃度分布条件を設定する (例 鉱物、岩石などの同一元素などの分布を参考にした標準偏差: 25~27頁参照)</p>	 <p>表D.6の例3に実際の分布を加筆</p>
	【過大な保守性を低減する】 ③ 放射化学分析結果から推定する方法	照射履歴が明確な評価対象とする放射化金属等の核種の放射能濃度データから、起源元素の濃度を推定する。	放射化学分析結果などを鑑み、必要に応じて、適切な保守性を考慮する。

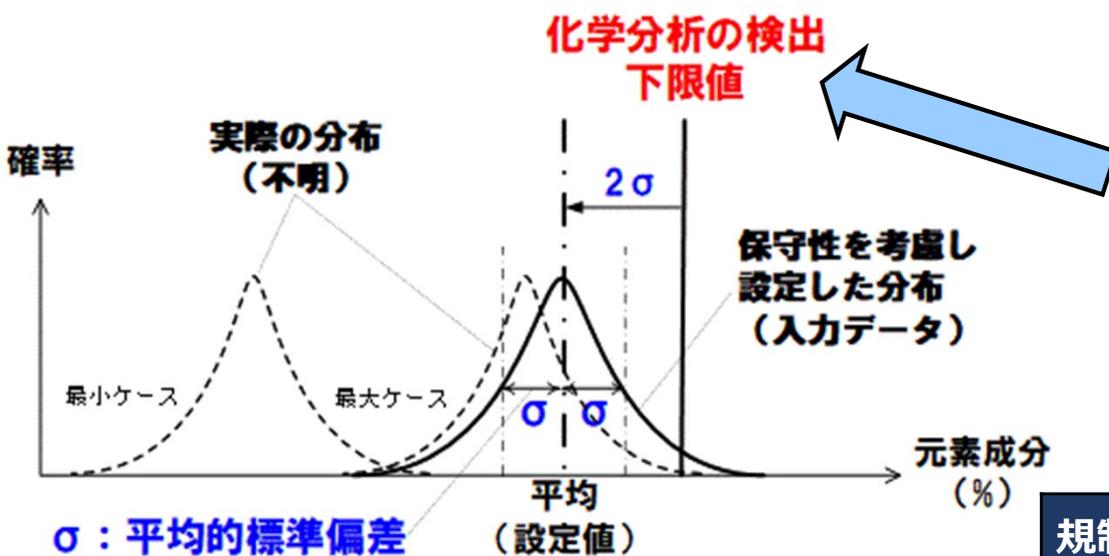
注記 附属書D (データ数量に応じた濃度分布条件の設定方法: D.4.3) に詳細を示している。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－同一元素などの分布を参考にした標準偏差の設定方法1－

本標準では、化学分析の結果、検出下限値しか得られなかった元素濃度分布の設定方法を次のように規定している。

成分区分	主成分	不純物成分	微量成分
成分濃度の概要	材料規格などで濃度範囲が規定される主要成分	材料規格では上限値などが規定される制限成分	材料規格、製造工程上管理されない極微量の成分
SUS304例	Fe、Ni、Cr	C、S	N、Co、Nb、Mo、Cl、Th、U
検出性	検出容易	検出比較的容易	検出困難な元素が多い



化学分析では、中性子照射される材料の微量成分の一部の元素（例 Cl、Th、U）は、検出下限値だけしか得られていない

規制核種(例)	C-14	Cl-36	Nb-94	Tc-99	α
主な起源元素	N、C	Cl	Nb、Mo	Mo、Nb	Th、U

既知の元素濃度分布の平均的な標準偏差：

濃度分布の標準偏差を、既知の類似試料である「**鉱物、岩石などの分析データ**」から保守的に推定し設定する。

（例えば、「**鉱物、岩石などのCl、Th、Uの分析データ**」の分布から算出した「**平均的な標準偏差**」の適用）

注記 附属書Hに詳細を示している。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

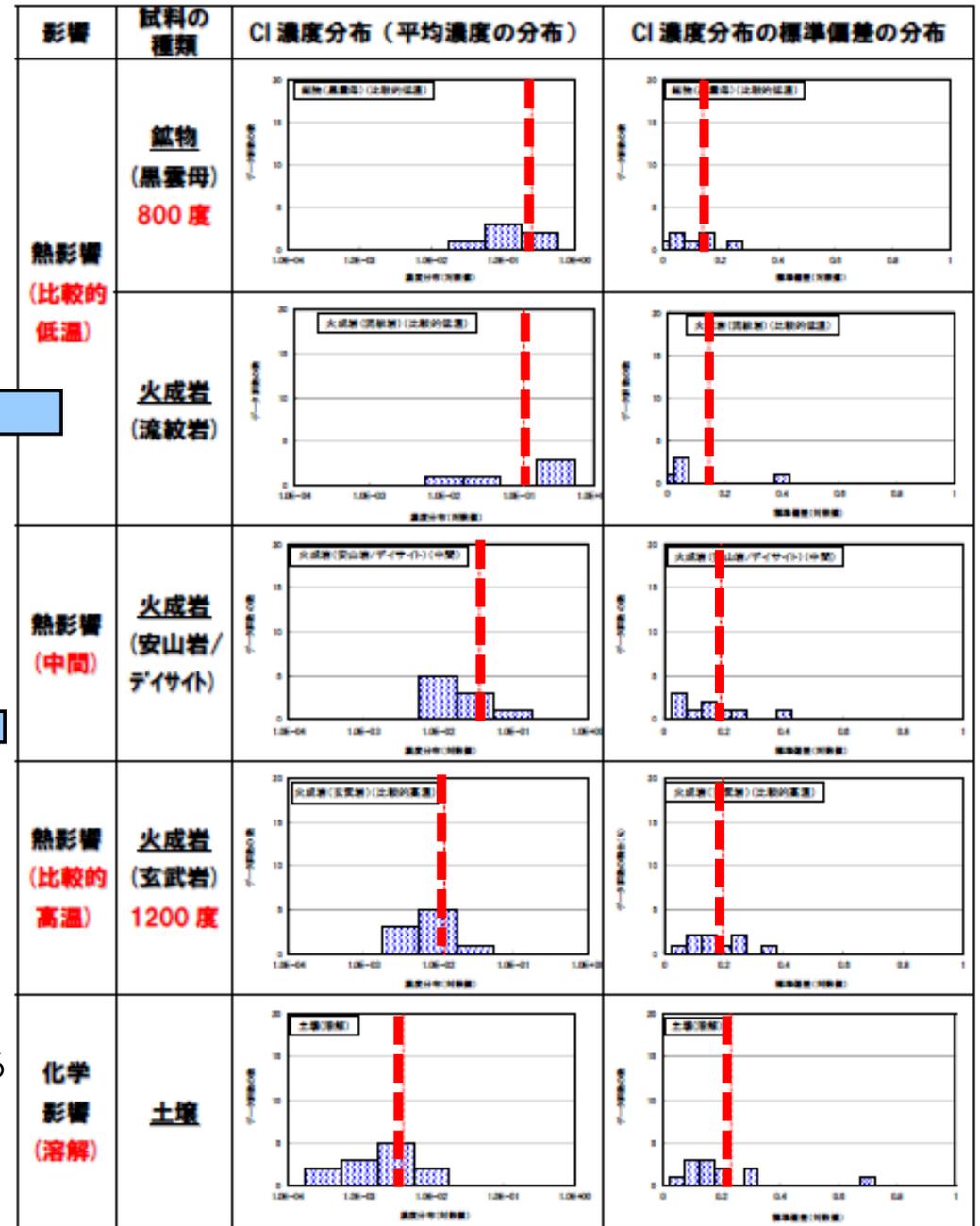
同一元素などの分布を参考にした標準偏差の設定方法 2

「鉱物、岩石などの分析データ」における元素濃度とその標準偏差に与える影響をデータに基づき次のように示している。
 温度及び化学影響で濃度は桁での影響があるが標準偏差はほとんど影響を受けていない

公開された報告書の要旨

- SUS及びジルカロイの製造工程（熱及び化学変化）を踏まえた微量元素（Clなど）の移行挙動を評価 → **影響小**
- 微量元素の濃度分布形状（標準偏差）は鉱物、岩石などの分析データで、温度／化学的变化の影響を評価 → **影響小**
- Cl分析データの分布（産地／種類ごと）などの具体的な適用性を評価（27頁） → **影響小**

熱、化学影響が元素濃度分布の形状に及ぼす影響は小さく、鉱物、岩石などのCl元素の分布¹⁾の標準偏差を利用した評価の可能性が示された



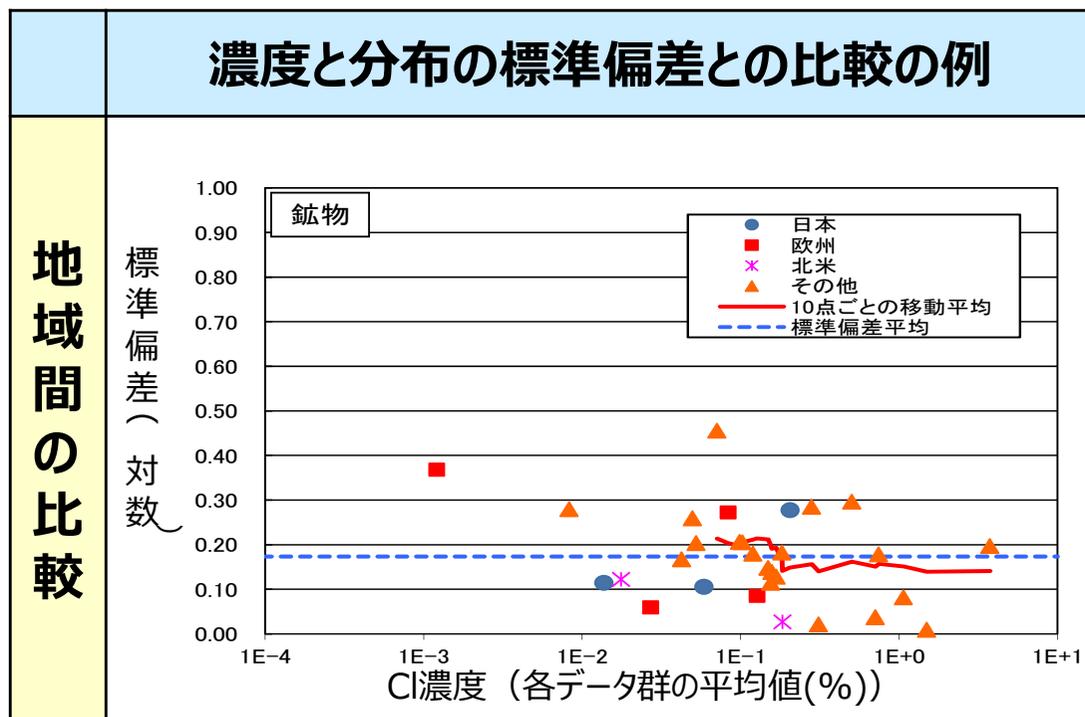
1) Clに関しては、168のデータ群（それぞれ個別データがある）で評価を行っている

出典は、附属書Hに引用している“平成25年度 検出困難元素の濃度分布評価について”，平成26年7月

注記 解説6.7に詳細を示している。（右図は解説図16）

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－同一元素などの分布を参考にした標準偏差の設定方法3－



- 報告書では、文献調査で**168データ群**（生データ3点以上の文献を1データ群）の元素分析データベースを構築（各データ群の対数正規性も確認）。
- 元素分析データを試料の**種類**（鉍物、火山岩、深成岩）及び**地域**（日本、欧州、北米）ごとの分類区分の評価の結果、**濃度分布の形状（標準偏差）に明らかな濃度依存性は見られず**。
- 分類区分（地域／種類）ごとの**標準偏差の平均**は、概ね0.17～0.22の範囲で、**大きな差異は見られず**。



実際の鉍物、岩石などのCl元素の濃度分布の標準偏差の利用可

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること－ (検出が困難な元素に関する濃度分布の評価方法の手順 1)

理論的方法の入力データ（元素データ）の設定方法として、検出が困難な元素に関する濃度分布の評価方法の手順を次に示す。

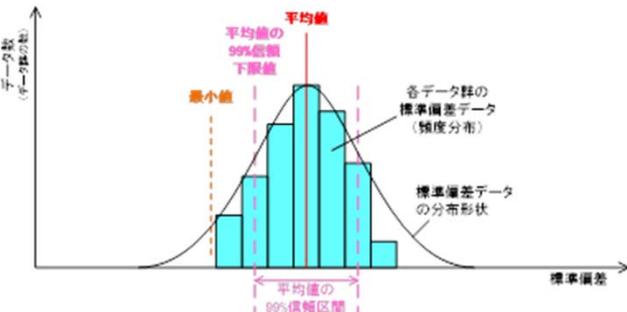
記載箇所		標準の規定内容
附属書H	H.2.2 元素濃度データの収集方法	<p>鉱物，岩石などからの試料の元素濃度データは，文献などから収集することができる。ただし，元素濃度データを収集する場合には，次の考慮が必要である。</p> <p>a) データ収集方針 元素濃度データは，検出困難元素の特性などを考慮した種類を，可能な限り広範な産地から，収集する。</p> <p>b) 適用除外データ a) の方針で収集した元素濃度データであっても，検出困難元素の標準偏差の評価に適さないと判断したデータは，除外する。</p> <p>c) データ群の作成 収集した元素濃度データは，産地及び種類ごとに元素濃度データをデータ群（産地及び種類ごとの元素濃度データのグループ）として分類し，各々のデータ群で標準偏差を作成する。</p>
	H.2.3 元素濃度データの適用条件	<p>H.2.2で収集した元素濃度データを，検出困難元素の濃度分布評価（標準偏差の設定）に適用するために，次の確認を行う。</p> <p>a) 標準偏差の同等性の確認 鉱物，岩石などからの試料の元素濃度データ（濃度分布）が産地及び種類によらず同程度の標準偏差を示すことを確認する。また，各データ群の標準偏差に濃度依存性がないことも確認する。</p> <p>b) 対数正規性の確認 鉱物，岩石などからの試料の元素濃度データ（濃度分布）が，産地及び種類によらず，対数正規性を示すことを確認する。</p> <p>c) 材料の製造工程の影響の確認 検出困難元素の標準偏差は，材料の製造工程（例 添加，熱処理，化学処理など）の影響を受けない，又は影響を受けても最終的には鉱物，岩石などからの試料の元素濃度データと同等になることを，材料の製造工程及び製造工程中の元素挙動の調査結果などから確認する。</p> <p>なお，材料の製造工程中の管理内容（例 添加物の有無，熱・化学処理の有無），及び検出困難元素並びに添加物の製造工程中での熱・化学処理による挙動を踏まえた検出困難元素の標準偏差の基本的な設定方法を，図H.2に示す。</p>

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

– 基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること –

(検出が困難な元素に関する濃度分布の評価方法の手順 2)

理論的方法の入力データ（元素データ）の設定方法として、検出が困難な元素に関する濃度分布の評価方法の手順（データの選定及び標準偏差の設定）を次に示す。

記載箇所		標準の規定内容							
附属書H	H.2.4 検出困難元素の濃度分布評価方法	<p>H2.3において、検出困難元素の濃度分布評価（標準偏差の作成）に、鉱物、岩石などからの試料の元素濃度データを適用できることが確認できた場合は、次の手順で、検出困難元素の標準偏差を作成し、濃度分布を評価する。</p> <p>a) 利用する元素濃度データの選定 H.2.2で収集した元素濃度データに対し、次の点を考慮し、検出困難元素の標準偏差の設定に利用する範囲（実際に利用する元素濃度データ）を選定する。</p> <p>1) 元素濃度データの代表性 検出困難元素の標準偏差の設定に利用する元素濃度データは、鉱物、岩石などからの試料を適切に代表している（標準偏差に産地・種類・濃度の依存性がないなど）、又は設定する標準偏差の特性などを鑑みた適切な範囲から収集されていることを、あらかじめ確認しておく必要がある。</p> <p>2) 元素濃度データの信頼性 区分ごと（産地、種類など）に収集したデータ群がもつ信頼性などの評価を行い、元素濃度データの適切な利用範囲（実際に利用する元素濃度データ）を設定する必要がある。</p> <p>b) 平均的な標準偏差の設定方法 検出困難元素の標準偏差は、a) で選定した元素濃度データを利用し、評価上の保守性などを踏まえた上で、統計的な手法などの適切な方法で設定する。平均的な標準偏差の設定方法の例を、図H.3及び表H.1に示す。</p>							
	<p>図H.3 平均的な標準偏差の設定方法のイメージ図</p> <p>表H.1 設定方法</p>	 <p>表H.1 検出困難元素の平均的な標準偏差の設定方法</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>設定方法</th> <th>概要</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>平均値</td> <td>各データ群の標準偏差の平均値を適用する方法。</td> </tr> <tr> <td>99%信頼下限値</td> <td>各データ群の標準偏差の分布形状から、標準偏差の平均値の信頼区間（99%信頼区間の下限値）を算出し、これを設定値として適用する方法。</td> </tr> <tr> <td>最小値</td> <td>各データ群の標準偏差の最小値を適用する方法。</td> </tr> </tbody> </table>	設定方法	概要	平均値	各データ群の標準偏差の平均値を適用する方法。	99%信頼下限値	各データ群の標準偏差の分布形状から、標準偏差の平均値の信頼区間（99%信頼区間の下限値）を算出し、これを設定値として適用する方法。	最小値
設定方法	概要								
平均値	各データ群の標準偏差の平均値を適用する方法。								
99%信頼下限値	各データ群の標準偏差の分布形状から、標準偏差の平均値の信頼区間（99%信頼区間の下限値）を算出し、これを設定値として適用する方法。								
最小値	各データ群の標準偏差の最小値を適用する方法。								

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

– 基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること –

(検出が困難な元素に関する濃度分布の評価方法の手順3)

理論的方法の入力データ（元素データ）の設定方法として、検出が困難な元素に関する濃度分布の評価方法の手順を次に示す。

記載箇所	標準の規定内容
<p>附属書H</p> <p>H.2.4 検出困難元素の濃度分布評価方法</p>	<p>c) 検出困難元素の濃度分布評価 検出困難元素の濃度分布として、平均値及び標準偏差を設定する。平均値は、図H.1に示したように、評価対象廃棄物（材料）の元素分析データの検出値又は検出下限値を推定する元素の濃度分布の上限値として、b)で選択・設定した検出困難元素の平均的な標準偏差（鉱物、岩石などからの試料の元素濃度データで設定）を利用して設定する。濃度分布の上限値の位置（例 濃度分布の上限値 = 平均値 + 2σの濃度）は、放射化計算で得られる廃棄物濃度の保守性などを踏まえ、適切に設定する。</p> <p>なお、上記で設定した平均値と、b)で選択・設定した検出困難元素の平均的な標準偏差とが、6.1.2.2.3に示す起源元素の元素成分条件（濃度分布から設定）となる。</p>
<p>図H.1 検出困難元素の濃度分布評価の基本的な考え方</p>	<div data-bbox="645 970 1742 1380" data-label="Figure"> </div> <p>図H.1 – 検出困難元素の濃度分布評価の基本的な考え方 (青破線の分布を理解のために追記している)</p> <p>注記 保守的に検出下限値を濃度分布の+2σの位置とし、逆算して設定する。 σが小さいほど、保守的な設定となる。</p>

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－ 基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること：中性子条件1－

理論的方法の入力データの設定方法として、下記を満足させる必要がある。

- － 放射化計算に適用する入力項目（母材の元素濃度，中性子フルエンス率，照射時間）の[基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること](#)。

中性子条件設定方法に関する標準の規定内容を次表に示した。また、この中性子条件を設定するための中性子輸送計算方法を33～37頁に、基礎データベースのからの代表分布の設定例を38頁示した。

記載箇所		標準の規定内容
本文	6.1.2.3 中性子条件	<p>評価対象とする放射化金属等に対する次の中性子フルエンス率・中性子スペクトル，及び放射化断面積を設定する。</p> <p>注記 詳細は，附属書F及び附属書G参照。</p> <p>a) 中性子フルエンス率・中性子スペクトル 中性子フルエンス率・中性子スペクトルは，原子炉及び燃料の配置を考慮した中性子輸送計算コードなどによって適切に評価して設定する。中性子輸送計算コードは，詳細モデルの要求レベル及び精度の要求レベルと合わせて適用することが適切である。</p> <p>例 中性子輸送計算のモンテカルロ法などは，原子炉の中性子の詳細条件及び評価対象範囲に設置されている構造物などの条件への適合が要求される場合にも，構造物などの条件に合わせる事が可能である。</p> <p>b) 放射化断面積 a) の条件を考慮して，次のいずれかの方法で設定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> － 使用する放射化計算コードに内蔵又は附属されている放射化断面積ライブラリから選択する。このとき，最新の計算コード及び放射化断面積ライブラリを確認する。 － 中性子フルエンス率の評価結果から，放射化範囲の中性子スペクトルの特性を考慮して放射化断面積を設定する。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること：中性子条件2－

D.5.1 中性子条件の設定における基本事項

中性子条件は，“中性子フルエンス率”，“中性子スペクトル”及び“放射化断面積”に大別される。まず，中性子フルエンス率は，原子炉型式，燃料条件，評価対象とする放射化金属等の種類及び部位（位置）などによって変化する。このため，中性子フルエンス率を計算で求めるには，実際の原子炉の状況に基づいた計算モデルを作成し，必要な精度，中性子場の形成状況などを考慮した上で，目的に合った計算コード及び群定数を用いて計算する必要がある。

中性子フルエンス率を設定する場合に考慮が必要となる基本的な事項を，下表（表D.7）に示す。

項目		考慮する必要のある主な事項
燃料の条件		<ul style="list-style-type: none"> － 濃縮度 a) － 燃焼度 a) － 燃料の種類 b)
炉内位置 ^{c)}	軸方向	<ul style="list-style-type: none"> － 評価対象とする放射化金属等自身の軸方向位置 d) － 評価対象とする放射化金属等自身の軸方向（上下）の移動 e)
	径方向	<ul style="list-style-type: none"> － 評価対象とする放射化金属等自身の径方向位置 d) － 評価対象とする放射化金属等自身の径方向の移動 e)
その他		<ul style="list-style-type: none"> － ボイド率（BWR） f) － ホウ素濃度（PWR） － 温度分布 － ディプレッション効果^{g)}

- 注 a) 評価対象とする放射化金属等の照射期間中に使用した燃料の濃縮度及び燃焼度。
 b) 燃料の種類とは，例えば， UO_2 ，MOX。
 c) 中性子発生源，評価対象とする放射化金属等，その他の減速，反射，吸収，漏れなどの中性子のふるまいに影響する物質の位置関係。
 d) 評価対象とする放射化金属等自身の部位（位置）で中性子フルエンス率が変化する場合。評価対象とする放射化金属等が原子炉内及び原子炉外にわたる場合も該当する。
 e) 評価対象とする放射化金属等が中性子フルエンス率の変化する範囲で移動する場合。
 f) BWRの場合（BWRでは，炉心部で発生した蒸気（ボイド）量が増加するに従って核反応が抑制され出力が低下する。PWRの通常の運転条件では，ボイドは発生しない。）
 g) 評価対象とする放射化金属等が強い中性子吸収体である場合（例 制御棒など）は，ディプレッション効果（中性子フルエンス率分布の歪み（ゆがみ））が生じるため，中性子フルエンス率への吸収効果に留意する。

注記 入力条件の設定方法詳細を附属書D、中性子フルエンス率の設定方法の具体例を附属書I～Kに示す。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性 - 中性子輸送計算コード (例 MCNP) の妥当性 -

1. 概要

MCNPコードは三次元輸送計算コードであり、米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) で開発された、中性子、光子及び電子輸送問題を解くための汎用解析モンテカルロコードである。

2. 機能

MCNPコードは、遮蔽解析に際して以下の機能を有する。

- 1) MCNPコードは二次曲面の論理演算によって表現された任意の三次元領域を取扱うことができ、形状モデルや断面積データを正確に取り扱うことができる。
- 2) 断面積の取扱いに連続エネルギーを採用している。

3. 解析フロー

MCNPコードの解析フローを図に示す。

4. 使用実績

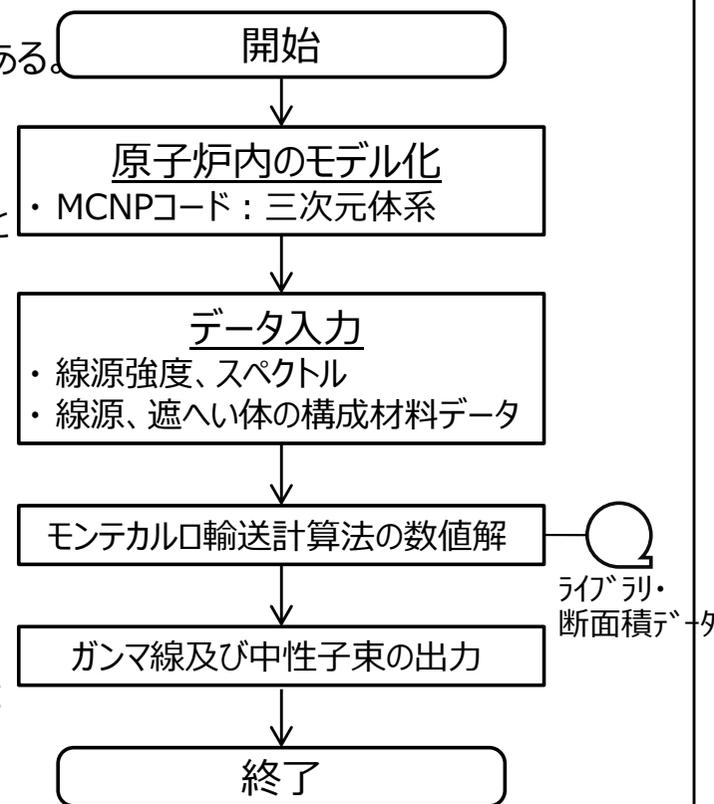
国内では、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」¹⁾において、原子力施設の遮蔽のための輸送計算コードとしてモンテカルロ法を用いた計算手法の適用が可能とされており、MCNPコードは放射性物質輸送・貯蔵容器の遮蔽解析などで用いられている。米国では使用済燃料貯蔵施設の審査指針である「Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities」(NUREG-1567) においては遮蔽解析ツールとしてMCNPコードが記載されており、遮蔽設計、線量評価等で使用されている。

5. 検証

汎用コードの導入評価²⁾が実施されていることを確認。

大型実験／ベンチマーク試験による検証^{3) 4)} が実施されていることを確認。実機においても検証例^{5) 6)}が報告されている。

- 1) 一般社団法人 日本電気協会 原子力規格委員会,「原子力発電所放射線遮蔽設計規程」,JEAC 4615-2020, (2020).
- 2) J.F. Briesmeister (Ed.), "MCNP - a general Monte Carlo n-particle transport code, version 4A", Los Alamos National Laboratory Report, LA-12625-M, 1993.
- 3) 平沼巨樹ほか, "MCNP-ラインビームレスポンス接続によるBWRタービンスカイシャイン線量評価手法の適用", 日本原子力学会誌和文論文誌, Vol.4, No.2(2005)
- 4) 小佐古敏荘ほか, "MCNPコードの金属キャスク貯蔵方式中間貯蔵施設線量評価への適用", 日本原子力学会和文論文誌, Vol.6, No.3 (2007)
- 5) 石川真澄ほか, "余裕深度処分対象低レベル放射性廃棄物であるチャンネルボックス片の放射能濃度測定値と解析値との比較", 平成21年度日本原子力学会 2009年秋の大会, 2009年9月
- 6) T.Waki, et al., "Study on the improved evaluation of radioactivity of activated control rods in PWR", International congress on advances in nuclear power plants 2009 (ICAPP 2009), Vol.3, (2009)



MCNP コードの解析フロー図

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－中性子輸送計算コード（例 単位燃料集合体核特性コード）の妥当性－

1. 概要

単位燃料集合体核特性コードは燃料集合体の反応度や出力分布等の核的性質を解析するコードであり、GEや東芝などメーカーが独自に開発してきた解析コードである。

単位燃料集合体核特性コードを用いる場合は、必要に応じて出力密度及びボイド率による補正を行う。

2. 機能

単位燃料集合体核特性コードは、遮蔽解析に際して以下の機能を有する。

- 1) 1体の燃料集合体を対象に、中性子の空間的・エネルギー的振舞いを評価する。
- 2) 単位燃料集合体核特性コードは、二次元の体系を扱うことができる。

3. 解析フロー

単位燃料集合体核特性コードの解析フローを図に示す。

4. 使用実績

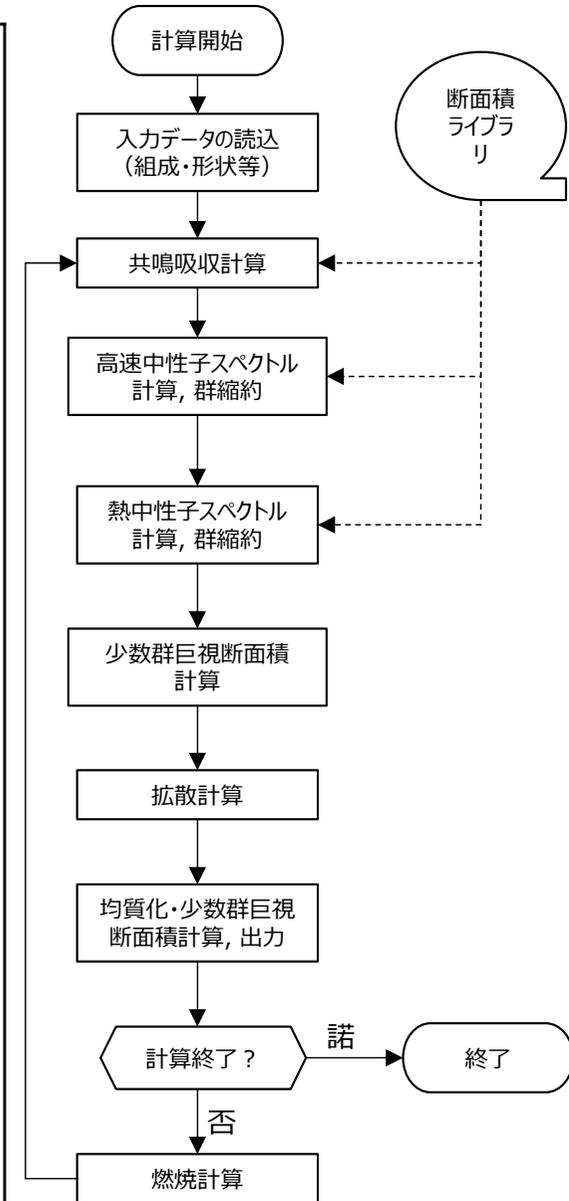
単位燃料集合体核特性コードは、原子力施設の炉心設計及び中性子束分布評価に広く用いられており、豊富な実績がある。

5. 検証

コードの導入評価¹⁾が実施されていることを確認。

臨界試験／実機運転実績等による検証¹⁾が実施されていることを確認。

- 1) (株)東芝, “沸騰水型原子力発電所燃料集合体核特性計算手法”, TLR-006Rev.1, 平成20年



単位燃料集合体核特性コードの解析フロー図

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性 - 中性子輸送計算コード（例 ANISN）の妥当性 -

1. 概要

ANISNコードは一次元輸送コードであり，米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された汎用解析コードである。

2. 機能

ANISNコードは，遮蔽解析に際して以下の機能を有する。

- 1) ガンマ線や中性子線に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解析法であり，放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- 2) ANISNコードは，一次元の体系を扱うことができる。

3. 解析フロー

ANISNコードの解析フローを図に示す。

4. 使用実績

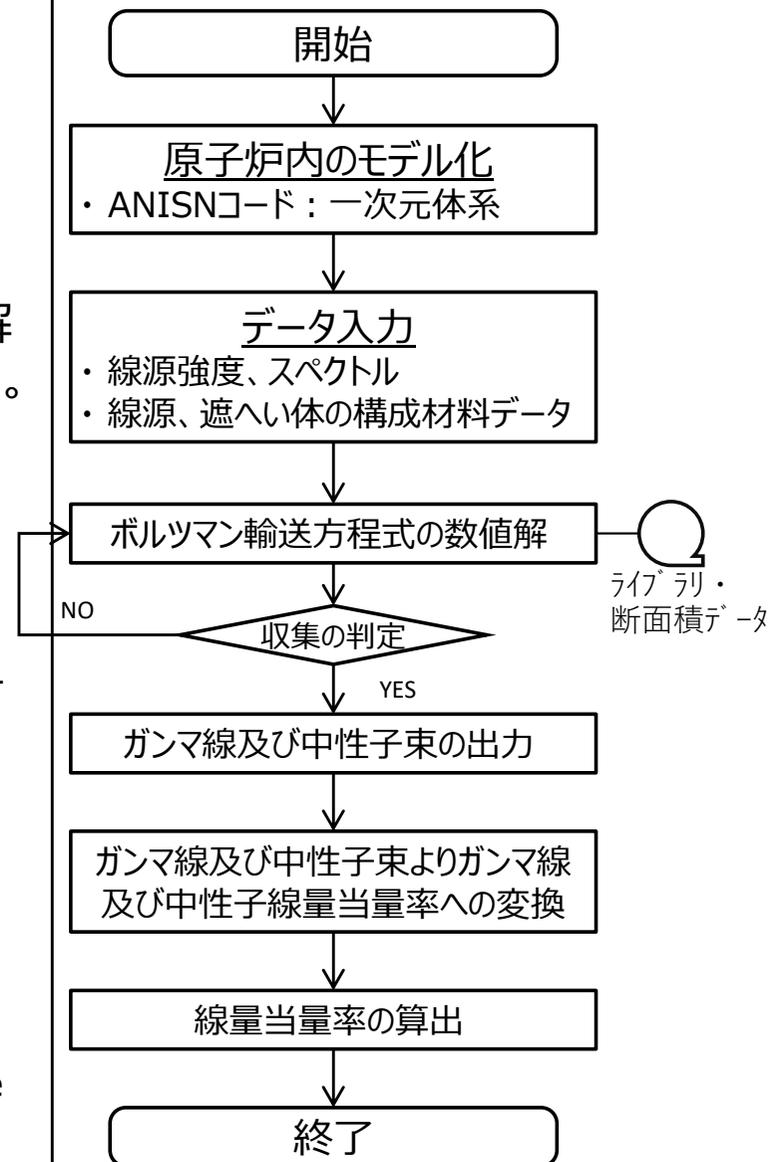
ANISNコードは，原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており，RPV鋼材監視試験、再処理施設の設計、居住性評価等に豊富な実績がある。

5. 検証

汎用コードの導入評価¹⁾が実施されていることを確認。

大型実験／ベンチマーク試験による検証²⁾が実施されていることを確認。

- 1) Ward W. Engle, Jr., "A Users Manual for ANISN, A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering," K-1693, Union Carbide Corporation (1967).
- 2) Yamano N. et al., "Integral Test of JENDL-3.3 with Shielding Benchmarks", J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 2, p.841-846, 2002



ANISN コードの解析フロー図

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－ 中性子輸送計算コード（例 DOT/DORT）の妥当性－

1. 概要

DOT3.5コード（以下、「DOTコード」という。）及びDORTコードは二次元輸送コードであり、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された汎用解析コードである。

2. 機能

DOT/DORTコードは、遮蔽解析に際して以下の機能を有する。

- 1) ガンマ線や中性子線に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解析法であり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方向性が表現できる。
- 2) DOT/DORTコードは、二次元の体系を扱うことができる。

3. 解析フロー

DOT/DORTコードの解析フローを図に示す。

4. 使用実績

DOT/DORTコードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、輸送キャスクの遮蔽解析やRPV鋼材監視試験に豊富な実績がある。

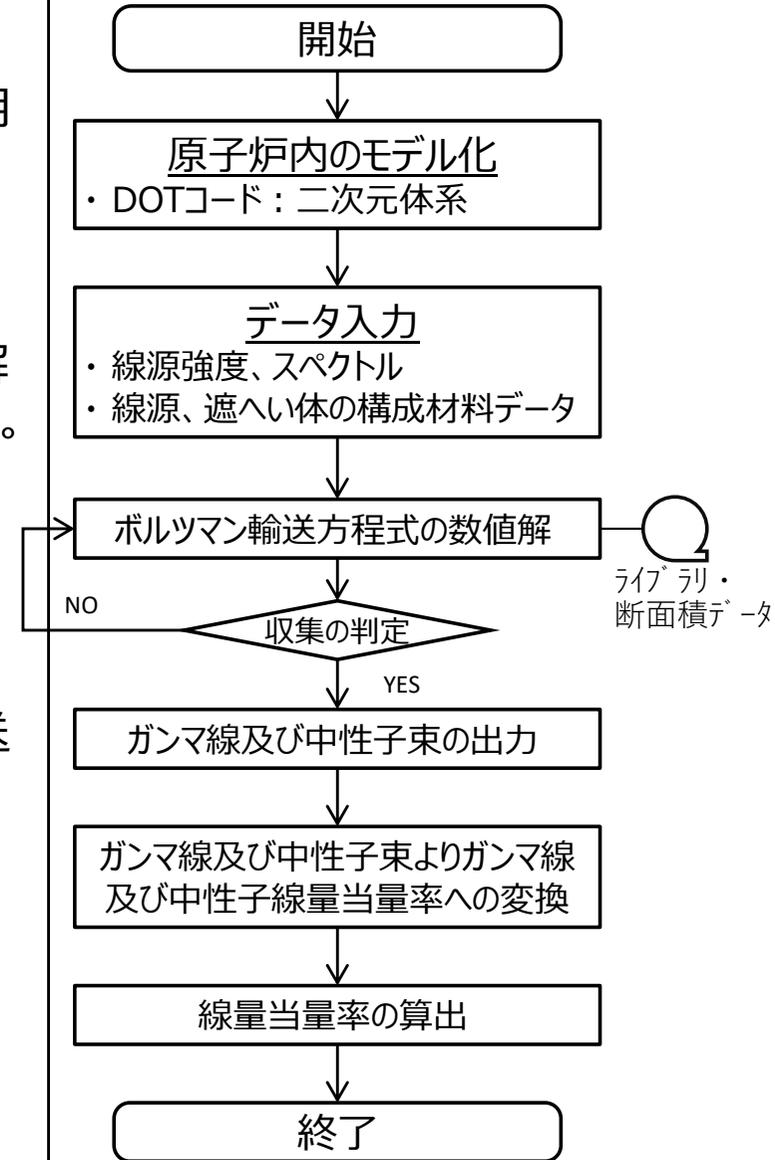
5. 検証

汎用コードの導入評価¹⁾が実施されていることを確認。

大型実験／ベンチマーク試験による検証²⁾が実施されていることを確認。

1) W. A. Rhoades, "DOT3.5 TWO DIMENSIONAL DISCRETE ORDINATES RADIATION TRANSPORT CODE", CCC-276, 1978年10月

2) Yamano N. et al., "Integral Test of JENDL-3.3 with Shielding Benchmarks", J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 2, p.841-846, 2002



DOT/DORT コードの解析フロー図

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性 - 中性子輸送計算コード（例 TORT）の妥当性 -

1. 概要

TORTコードは三次元輸送コードであり、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された汎用解析コードである。

2. 機能

TORTコードは、遮蔽解析に際して以下の機能を有する。

- 1) ガンマ線や中性子線に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解析法であり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- 2) TORTコードは、三次元の体系を扱うことができる。

3. 解析フロー

TORTコードの解析フローを図に示す。

4. 使用実績

TORTコードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、構造材の放射化評価等に豊富な実績がある。

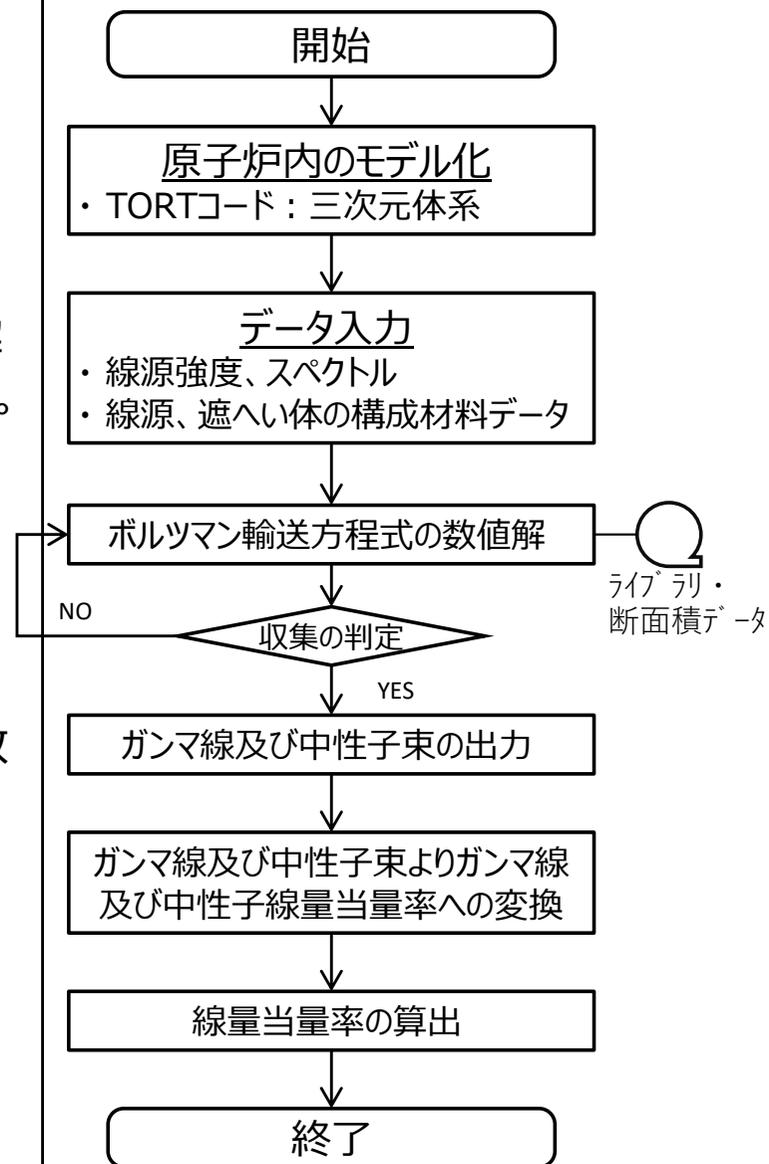
5. 検証

汎用コードの導入評価¹⁾が実施されていることを確認。

大型実験／ベンチマーク試験による検証²⁾が実施されていることを確認。

1) A. F. Rice, R. W. Roussin (Editors), "Deterministic Methods in Radiation Transport," ORNL/RSIC-54, 1992

2) 日本原子力研究開発機構, "Integral Test of JENDL-3.3 Based on Shielding Benchmarks", 2019



TORT コードの解析フロー図

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－ 中性子条件の基礎データベースからの代表分布の作成例 －

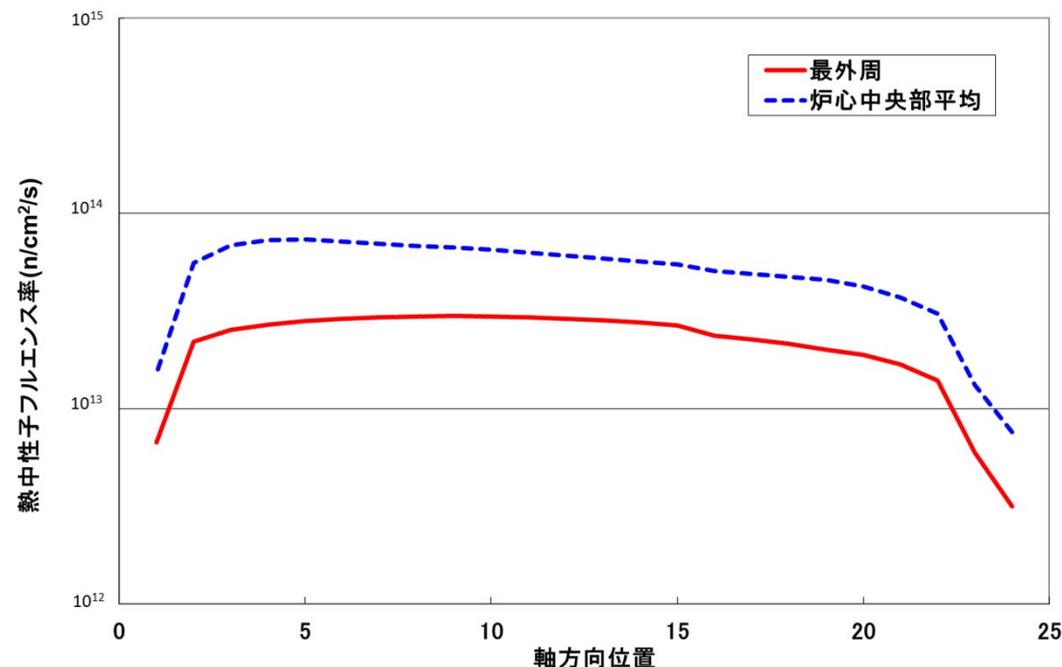
基礎データベース：BWRチャンネルボックス（CB）の熱中性子フルエンス率の計算

計算コード：単位燃料集合体核特性計算コードを利用（+核熱水力解析：ボットなど）

BWRのCBの軸方向位置ごとに、炉心の「中央部及び最外周部」の熱中性子／高速中性子／熱外中性子フルエンス率を計算

代表分布：熱中性子フルエンス率の軸方向分布の計算結果の例

CBの軸方向位置（24分割）ごと、径方向（炉心中央部平均及び最外周部）ごとの中性子フルエンス率の分布を設定（上記計算結果）



技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－ 基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること： 照射条件1－

理論的方法の入力データの設定方法として、下記を満足させる必要がある。

- 放射化計算に適用する入力項目（母材の元素濃度，中性子フルエンス率，照射時間）の[基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること](#)。

照射条件データの収集、設定方法に関する標準の規定内容を次表に示した。また、その基礎データベースの設定例を41頁に示した。

記載箇所		標準の記載内容
本文	6.1.2.4 照射条件	<p>評価対象とする放射化金属等に関する照射条件に用いる照射時間及び照射停止時間（例 原子炉運転時間及び照射終了後の減衰時間）は、次のいずれかの方法で設定する。また、全体の計算対象時間には、運転サイクル（例 中性子照射及び照射停止時間並びに回数）も考慮する。</p> <p>注記 詳細は、附属書F及び附属書G参照。</p> <p>a) 個別に照射履歴を設定する方法 放射化金属等ごとに、中性子の照射履歴に基づき、適切又は保守的に代表する照射条件を設定する。</p> <p>b) 代表照射履歴を設定する方法 中性子の照射履歴に基づき、放射化金属等のグループを適切又は保守的に代表する照射条件を設定する。</p> <p>なお、換算係数法、濃度比法及び濃度分布評価法によって決定する場合は、複数の放射化金属等を適切に代表する照射条件の範囲又は分布を設定してもよい。</p>

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること：照射条件2－

記載箇所	標準の記載内容
附属書D D.6.1 中性子の照射条件設定の基本的考え方	<p>評価対象とする放射化金属等の中性子の照射時間及び原子炉の供用期間中の中性子の照射停止時間を設定する。</p> <p>なお、^{60}Co（半減期5.27年）などの比較的短半減期（数年以下）の核種に対しては、長期間にわたる中性子の照射を受ける場合は、照射期間中の核種の減衰の影響を考慮する必要がある。<u>照射時間及び原子炉の供用期間中の照射停止時間の設定の基本的な考え方</u>を、表D.8（下表）に示す。</p>

設定項目	照射条件の設定方法		
	設定方法	設定の基本的考え方	設定対象
照射時間（合計）	頻度分布による設定	<ul style="list-style-type: none"> 評価対象とする放射化金属等の中性子の照射時間が必ずしも一律でない場合、中性子の照射時間（合計）の実績などで適切な分布形状（例えば、正規分布）を設定する。 設定する頻度分布は、中性子の照射時間の分布形状に応じ平均、標準偏差などによって設定する。 	チャンネルボックス、制御棒など
	個別値による設定	<ul style="list-style-type: none"> 対象原子炉ごと及び評価対象とする放射化金属等ごとに中性子の照射実績が同じ場合は、実績を踏まえ照射時間を一律に設定する。 	シュラウド、上部格子板など
照射停止時間 ^{a)} （原子炉供用期間中）	均等設定	<ul style="list-style-type: none"> 評価対象とする放射化金属等の照射停止回数（合計）及び照射停止回数の実績によって、平均的な照射停止回数及び1回当たりの平均的な照射停止時間の割合（すなわち稼働率）を一律に設定する。 平均的な照射停止時間の割合で、運転サイクルごとに均等に設定する。 	全評価対象廃棄物
	個別設定	<ul style="list-style-type: none"> 評価対象とする放射化金属等の照射実績にあわせて、個別の照射停止時期及び照射停止時間を設定する。 	

注 a) 全ての中性子の照射が終了した後の保管している経過時間は、基本的に照射条件として設定せず、評価結果に減衰補正を加えて評価することが望ましい。

注記 照射条件の設定方法の具体例を附属書I～Kに示す。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること：照射条件3－

記載箇所		標準の記載内容
附属書D	D.6.2.1 中性子の照射における考慮事項	照射条件である中性子の照射時間及び中性子の照射停止時間については、中性子の照射履歴に基づき、放射能濃度決定方法の種類に応じて、評価対象とする放射化金属等ごとに照射条件を詳細に、又は複数の評価対象とする放射化金属等を適切に代表する条件（又は放射能濃度評価結果を大きくする保守的な条件）の設定が必要となる。また、濃度比を用いる場合、換算係数を用いる場合及び濃度分布評価法によって決定する場合は、個別の条件の代わりに、複数の評価対象とする放射化金属等を適切に代表する条件範囲を設定することもある。照射条件を設定する場合に考慮する必要がある基本的な事項を、下表（表D.9）に示す。

項目		考慮する必要がある主な事項
中性子の照射時間		－ 中性子の照射時間の合計 a)
中性子の照射停止（減衰）時間	照射終了後	－ 放射化計算結果の中性子の照射終了後の停止時間での減衰補正 b) 又は － 評価対象核種濃度の発生日への適切な補正 b), c)
	原子炉供用期間中	－ 中性子の照射停止時間及び停止時期 d)

注 a) 評価対象核種のうち、プラント運転時間より半減期が短い核種は、プラント運転初期の中性子の照射履歴の影響は小さく、評価時点直前の中性子フルエンス率が大きく影響する。また、プラント運転時間に対して半減期が長い核種は、総中性子照射量が影響する。

b) 比較的短半減期核種の場合。

c) 濃度比法を用いる場合において、Key核種を非破壊によって外部からの測定した場合。

d) ^{60}Co などの半減期が中性子の照射時間と同じ程度の期間の核種については、中性子の照射終了後の経過時間の減衰について考慮が必要である。

注記 照射条件の設定方法の具体例を附属書I～Kに示す。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

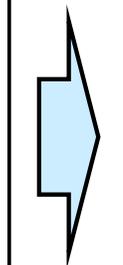
－基礎データベースから代表分布などを適切に作成する方法であること：照射条件4－

照射時間は、原子炉の運転実績データ（放射化物毎の総照射時間、運転サイクル数など）を収集して、基礎データベースを作成する。なお、BWRチャンネルボックスの中性子照射時間及び実績に基づく、ローテーションパターンの設定例を以下に示す。

BWRチャンネルボックス（CB）の照射時間の分布調査の例

13,000体のCBの総中性子照射時間の結果（燃焼度の実態調査と比出力を踏まえ算出）に基づき、総中性子照射時間の「正規分布」を適用し、下記の照射時間の代表分布条件を設定した。

平均値： 1,786日
標準偏差： 654日



照射時間の選択

運転サイクル数とローテーションパターン（一様分布）

運転サイクル数		出現頻度分布	配置位置の設定条件 (ローテーションパターン)
サイクル数	中性子照射時間		
1	2年未満	固定	A：中央
2	2年以上 3年未満	配置ローテーションの 一様分布	B：中央→中央 C：中央→近傍
3	3年以上 4年未満		D：中央→中央→中央 E：中央→近傍→中央
4	4年以上 5年未満		F：中央→中央→中央→中央 G：中央→中央→近傍→中央 H：中央→中央→中央→最外 I：中央→中央→最外→最外 J：中央→近傍→最外→最外
			K：中央→中央→中央→中央→最外 L：中央→中央→中央→最外→最外 M：中央→中央→近傍→最外→最外
5	5年以上		

注記 詳細は附属書 G 及び附属書 I 示す。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－対象とする放射性廃棄物を取り得る範囲を網羅した条件で設定できること－

理論的方法の入力データの設定方法として、下記を満足させる必要がある。

- 放射化計算に適用する入力条件（元素濃度，中性子フルエンス率，照射時間）が、対象とする放射性廃棄物を取り得る範囲を網羅、又は代表した条件で設定できる方法であること。

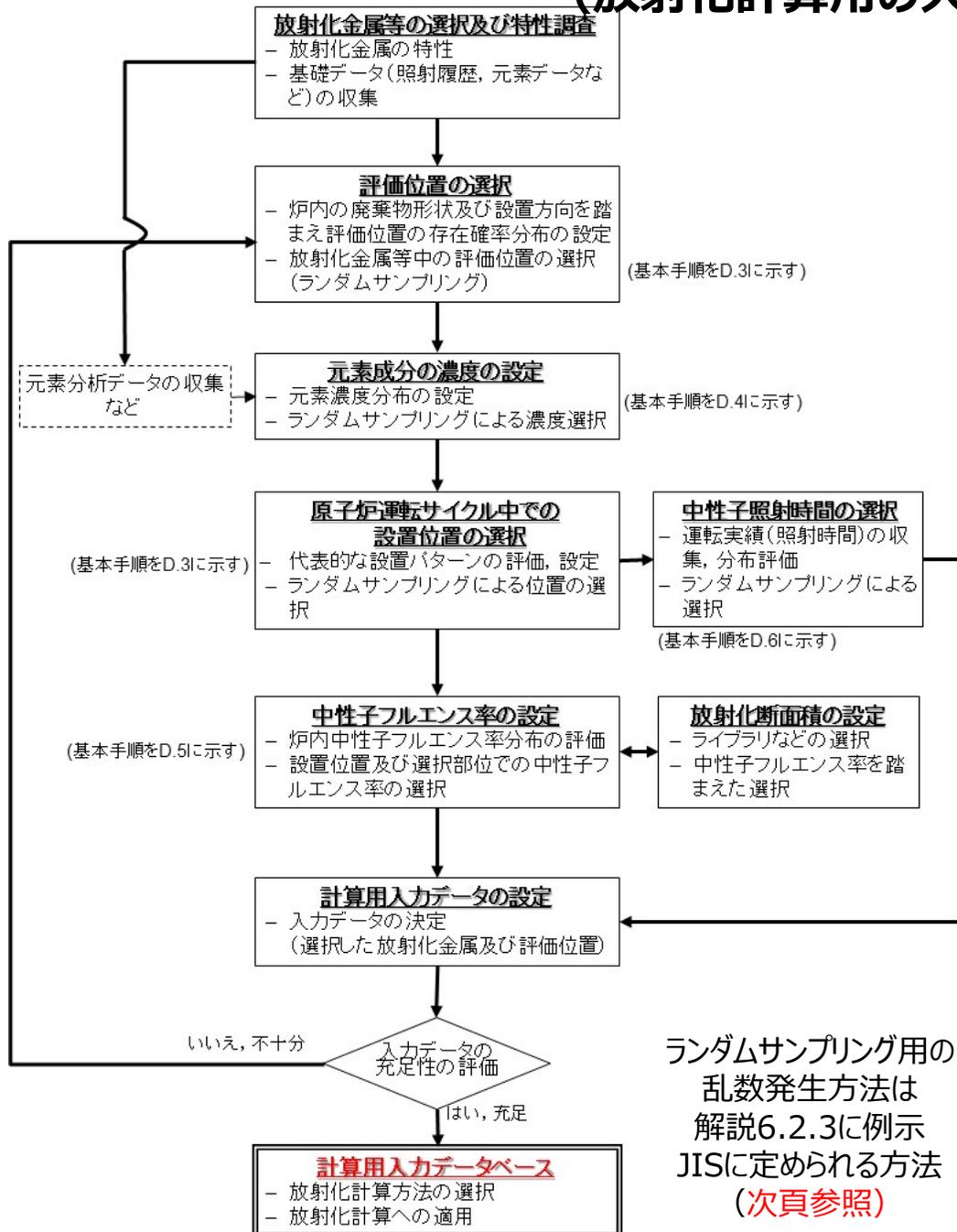
計算用入力条件の設定方法に関する標準の規定内容を次表に示した。また、その設定手順を次頁に示した。

記載箇所		標準の記載内容
本文	6.1.3.2 計算用入力条件の設定	6.1.2を踏まえ、適用する理論計算法（点推定法又は区間推定法）ごとに必要となる、次の放射化計算の入力パラメータ及び条件を、評価対象とする放射化金属等ごとに設定する。 <ul style="list-style-type: none">— 元素成分条件— 中性子条件— 照射条件 なお、区間推定法を適用する場合は、各入力パラメータ及び条件について、 <u>6.1.2で評価した入力条件の分布又は範囲から、ランダムに抽出して放射化計算の入力データとして設定するか、又は、適切な代表的条件を放射化計算の入力条件として設定する。</u> 注記 詳細は、 附属書I 、 附属書J 及び 附属書K 参照。
本文	6.1.3.3 放射化計算の計算数の設定 6.1.3.3.2 区間推定法	実施した放射化計算結果の数が、放射能濃度決定のための評価データとして十分かについては、放射化計算を行った数とその放射化計算結果とが示す統計値の安定性の推移を踏まえて判断する。 注記 詳細は、A.4.3 参照。

注記 入力条件の設定方法の詳細を附属書G、具体例を附属書F及び附属書I～Kに示す。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

— 対象とする放射性廃棄物を取り得る範囲を網羅した条件で設定できること —
 (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, この基礎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での設置位置の選択 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。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－対象とする放射性廃棄物を取り得る範囲を網羅した条件で設定できること－ (放射化計算用の入力データのランダムサンプリングによる設定方法)

「6.1.3.2 計算用入力条件の設定」では、「区間推定法を適用する場合は、各入力パラメータ及び条件について、6.1.2 で評価した入力条件の分布又は範囲から、[ランダムに抽出して放射化計算の入力データとして設定するか](#)、又は、適切な代表的条件を放射化計算の入力条件として設定する。」ことを求めている。

基礎データベースから、擬似乱数を使用した放射化計算用の入力データの作成方法は、基礎データベースが示す分布形に応じて、取り得る範囲を網羅するように、下表のようにランダムサンプリングを適用する。

分布形	正規分布の場合	対数正規分布の場合	一様分布の場合
放射化計算用データの作成方法の例	<p>a) メルセンヌツイスター法¹⁾で擬似乱数（範囲0～1の擬似一様乱数）を40点生成。</p> <p>b) 放射化計算の条件として設定した平均値と標準偏差とを利用し、各種分布に従う乱数を発生させる方法として、JIS Z 9031：2012²⁾に示されている標準正規分布に使用できる逆関数法³⁾を適用（具体的には、正規累積分布の逆関数³⁾を返す関数を使用）し、40点の擬似一様乱数を正規分布の擬似乱数に変換。</p>	<p>a) JIS Z 9031：2012に示されている対数正規分布に使用できる擬似乱数の生成方法に基づき、標準正規乱数Zを利用した方法（$Y = 10^Z$）で擬似乱数を生成。</p> <p>b) 具体的には、正規分布を想定する対数上において、a)の方法で標準正規乱数Zを算定し（対数値に変換した平均値及び標準偏差を利用し、逆関数法を適用して、メルセンヌツイスター法で生成した40点の擬似一様乱数を正規分布の擬似乱数に変換）、これを対数値（log Y）から実数値（Y）に変換。</p>	<p>a) メルセンヌツイスター法で擬似乱数（範囲0～1の擬似一様乱数）を40点生成。</p> <p>b) 40点の擬似一様乱数を、放射化計算の条件として設定した最小値から最大値の範囲に変換。</p>
備考	<p>1) 擬似乱数列生成器 (PRNG) の1つであり、松本眞と西村拓士によって1996年に国際会議で発表されたもの（1998年1月に論文掲載）である。利点は、長周期性と均等性、及び既に広範に使われテストされていることである。</p> <p>2) JIS Z 9031：2012 乱数生成及びランダム化の手順</p> <p>3) 累積分布関数の逆関数を用いて、標準一様分布に従う確率変数から、所望の分布に従う確率変数を生成させる方法</p>		

注記 6.1.3.2及び解説6.2.3.2示している内容。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－対象とする放射性廃棄物を取り得る範囲を網羅した条件で設定できること－ (放射化計算用の入力条件の設定の一例)

記載箇所	標準の記載内容
附属書I I.2.3 放射化計算 I.2.3.1 放射化計算 用データの設 定	<p>濃度比を用いる場合の基本的な考え方は、評価対象となる放射化金属等を実際にサンプリング及び放射化学分析した多数の代表試料の放射能濃度データによって難測定核種及びKey核種の濃度比（すなわち、スケーリングファクタ）を評価、設定する代わりに、適切に代表した放射化計算の条件での多数の放射化計算結果（評価データ）によって難測定核種及びKey核種の濃度比を評価、設定する。</p> <p>したがって、対象となる放射化金属等の元素成分条件、中性子条件及び照射条件の範囲、並びにその分布を適切に設定し、これを網羅した代表的な放射化計算用の入力データ群を作成して、放射化計算による評価を進めることが必要となる。</p> <p>このため、放射化計算の条件としての放射化計算コードへの入力条件として設定するデータ（すなわち、放射化計算用データ）については、<u>評価対象廃棄物の中性子照射条件などの実績などを十分考慮した放射化計算範囲を適切に設定した上で、それぞれの計算条件をランダムにサンプリングすることで、次の設定必要項目ごとに放射化計算用入力データを作成する。</u></p> <ul style="list-style-type: none">－ 元素成分条件：分析結果などに基づき元素濃度の分布を設定－ 中性子条件：評価対象廃棄物の形状、原子炉内外での設置状態、及び運転サイクルごとにローテーションした配置位置、原子炉供用期間中の運転モードによる配置位置（以下、配置位置という。）の実績を考慮し、中性子照射位置の出現頻度分布を適切に設定し、この中性子照射位置での中性子条件を設定－ 照射条件：原子炉での実際の中性子照射実績を踏まえて設定 <p>元素成分条件は、I.2.2.1.2 で設定した化学分析データなどに基づく分布を踏まえ、元素ごとに適切な濃度分布を設定した。</p> <p>中性子条件は、評価対象であるZrTN804D（BWR チャンネルボックスの本体）及びSUS304（PWR 制御棒の被覆管）に対する中性子条件を設定する上での評価対象廃棄物の配置位置の移動条件及び形状、設置方向の原子炉軸方向の一様分布を考慮してI.2.2.2 で設定した中性子条件とした。</p> <p>中性子照射条件は、附属書B に示したように、中性子照射条件は、全体的な設定値が同一であれば、各運転サイクルの間の差異の影響は、非常に小さいため、I.2.2.3 で設定した実態の分布を踏まえた中性子照射時間及び均等設定した中性子照射停止期間とした。</p>

注記 上記は附属書Iの濃度比法の例を示している。なお、附属書Jには、換算係数法の例、附属書Kには濃度分布評価法の例を示す。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－放射能濃度を評価するために必要な計算数（放射化計算結果）の充足度の評価－

計算によって対象放射化物の放射能濃度を評価する場合、理論計算数の充足度を評価しておく必要がある。

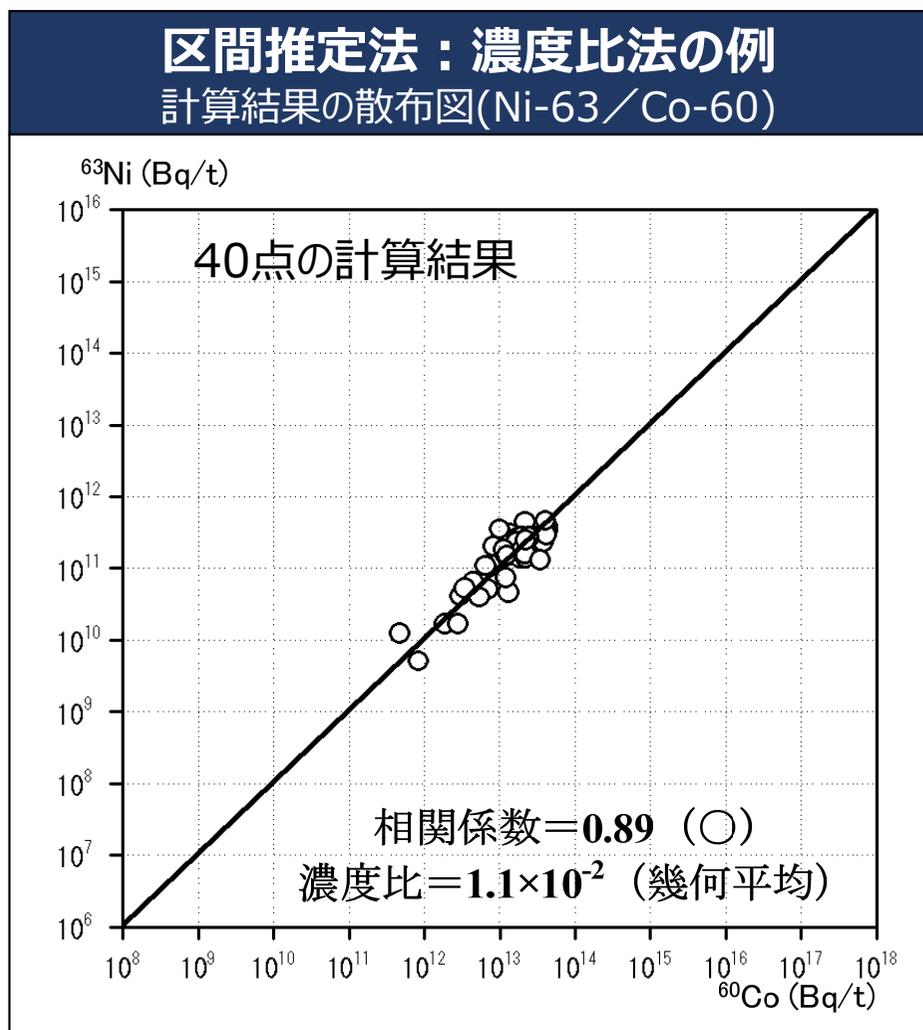
記載箇所		標準の記載内容
本文	6.1.3.3 放射化計算の計算数の設定	<p>6.1.3.3 放射化計算の計算数の設定</p> <p>6.1.3.3.1 点推定法 必要計算数は、評価対象とする放射化金属等の大きさ及び中性子フルエンス率の差異（例1参照）、評価対象とする放射化金属等の部位（位置）の特徴（例2参照）などを考慮して決定する。</p> <p>例1 大型又は複雑な対象物の場合で、中性子フルエンス率が対象物の異なる部位（位置）で変化する場合は、中性子フルエンス率を考慮した幾つかの区分に分割して計算した平均値又は代表値を使用する。</p> <p>例2 評価対象とする放射化金属等の放射能濃度の最大値を示す部位（位置）が明確な場合は、その部位（位置）1点で計算した代表値で評価する。</p> <p>6.1.3.3.2 区間推定法 実施した放射化計算結果の数が、放射能濃度決定のための評価データとして十分かについては、放射化計算を行った数とその放射化計算結果とが示す統計値の安定性の推移を踏まえて判断する。</p> <p>注記 詳細は、A.4.3参照。</p>
附属書A	A.4.3 計算の実施段階	<p>区間推定方法に必要な放射化計算結果の数は、図 A.2 に示す放射化計算の数によるKey 核種濃度と難測定核種濃度間との相関係数の安定性の評価などによって、把握できる。</p> <div style="text-align: right;"> </div> <p>凡例 -○- 相関係数の平均値 -△- 相関係数の95%信頼下限値 r 相関係数 n 計算数</p> <p>図 A.2—放射化計算数の増加に伴う相関係数（平均、95%信頼下限）の安定性のイメージ^[1]</p>

注記 附属書I及びKに、適用した場合の計算数充足性の評価例を示している。

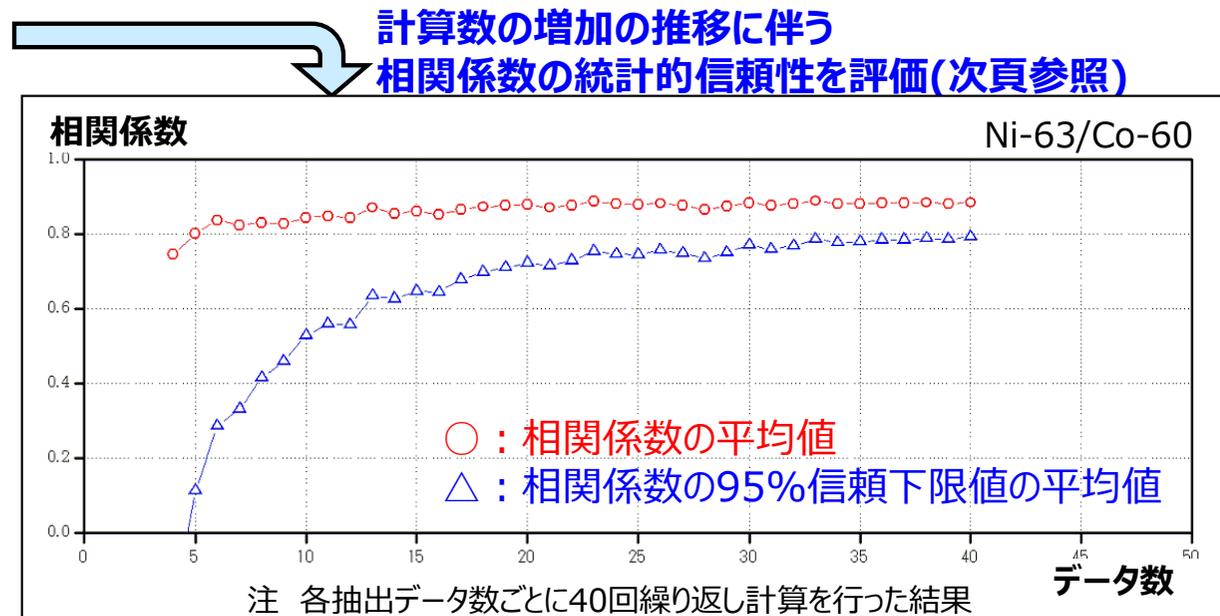
技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

－放射化計算結果の充足数の評価方法（区間推定法の場合）1－

放射化計算結果（計算数）が充足しているかは、計算結果の蓄積によって得られる評価値（濃度比など）の統計値（例えば相関係数）の信頼性の向上が小さくなる計算数まで実施すれば良いとする考え方（ISO21238-2007及びIAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.18）を踏まえ、下記の評価手法で、放射化計算数の充足度を評価する。



基礎データベースを踏まえ、ランダムサンプリングによって設定した入力データを使用し、放射化計算を実施した結果（難測定核種及びKey核種の放射能濃度）の散布図にプロット及び算出した濃度比



相関係数の信頼下限値が安定した放射化計算数

計算数の判断方法（6.1.3.3.2 区間推定法）
実施した放射化計算結果の数が、放射能濃度決定のための評価データとして十分かについては、放射化計算を行った数とその放射化計算結果とが示す統計値の安定性の推移を踏まえて判断する。

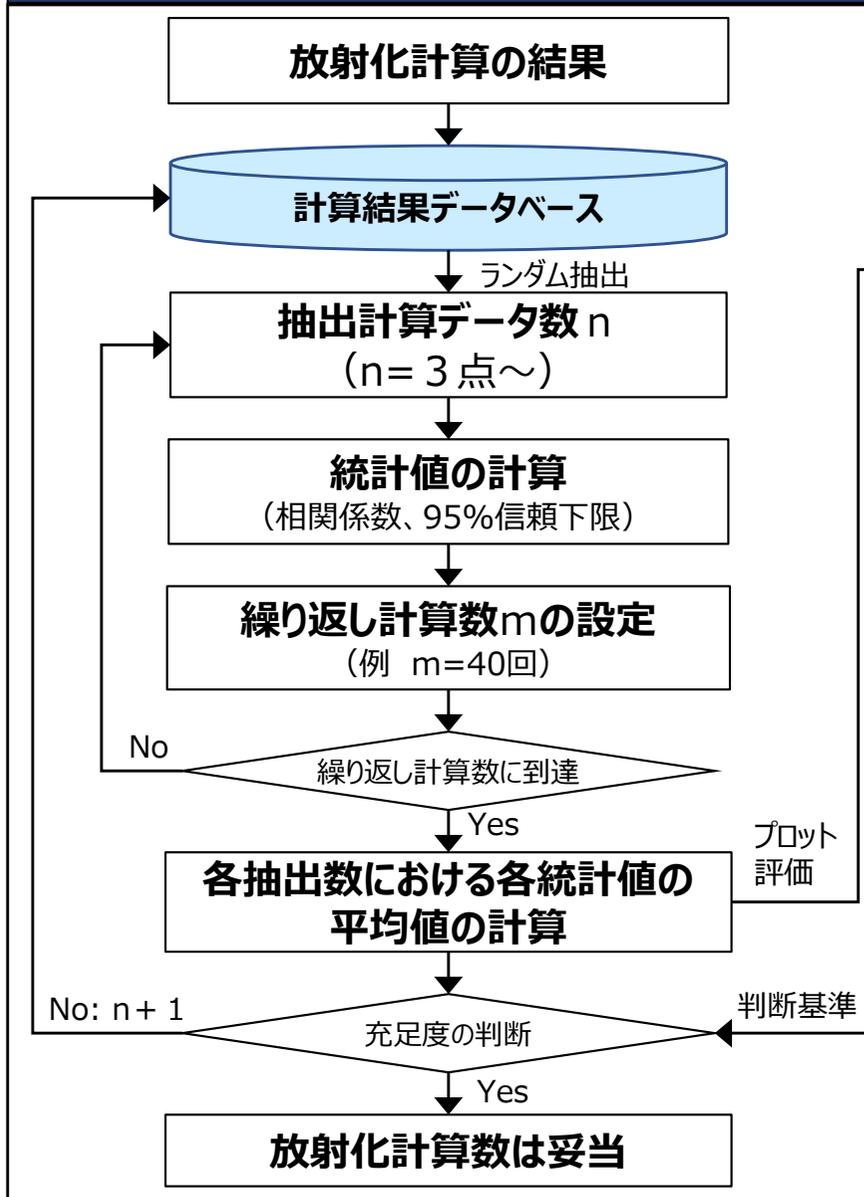
判断基準として参照したISO&IAEA図書：
“The number of data points is sufficient when investment in additional **sampling and measurement** produces no appreciable improvement in the statistical uncertainty”
(sampling and measurementを計算と読み替える)

注記 本体6.1.3.3に規定し、附属書A4.3、附属書Iに評価例を示している。

技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性

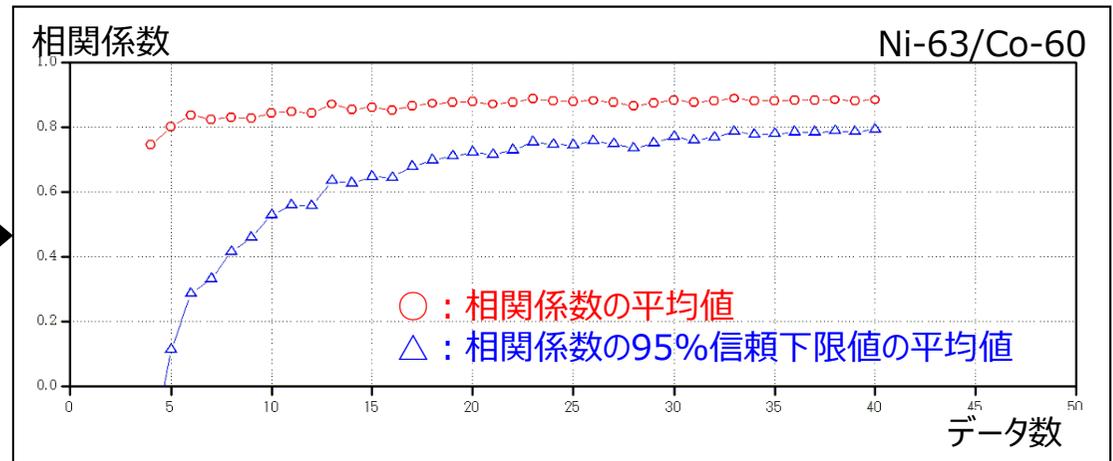
– 放射化計算結果の充足度の評価の例（区間推定法の場合）2 – BWRチャンネルボックス本体（ZrTN804D）の必要計算数の判断方法

計算結果の充足度の評価フロー



計算結果の充足度の評価

(放射化計算の結果である40点のデータによる抽出評価の例)



↑ 統計値（相関係数、信頼下限値）の安定性

計算数の判断方法（6.1.3.3.2 区間推定法）

実施した放射化計算結果の数が、放射能濃度決定のための評価データとして十分かについては、放射化計算を行った数とその放射化計算結果とが示す統計値の安定性の推移を踏まえて判断する。

判断基準の参照ISO&IAEA文書：

“The number of data points is sufficient when investment in additional **sampling and measurement** produces no appreciable improvement in the statistical uncertainty”
(sampling and measurementを計算と読み替える)

注 ISO:ISO21238-2007、IAEA:NW-T-1.18-2009