

第1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評価方法の概要  
及び理論的方法の技術的ポイント**

2021年7月30日

日本原子力学会 標準委員会

# 本資料の内容構成

ページ	内容
2～10	L1放射能評価標準のニーズ／目的、標準化の経緯 及び標準策定のための技術要素、並びにISO標準との関係
11～20	L1放射能評価標準の対象とする放射能評価方法
21～39	中深度処分対象廃棄物の放射能濃度の評価方法 －理論的方法の主な手順とその主なポイント－
40～41	L1放射能評価標準に示される妥当性確認、記録及びQMS
42～43	参考 ISO標準の各国の国家規格への取り込み状況

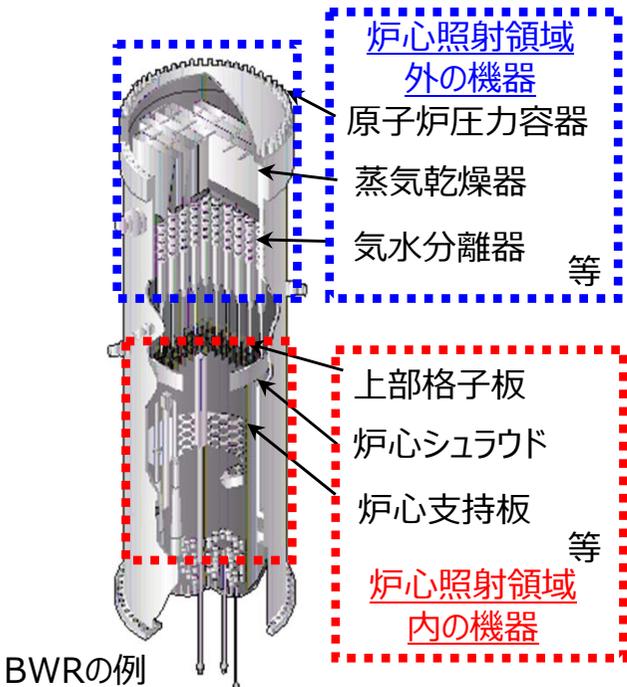
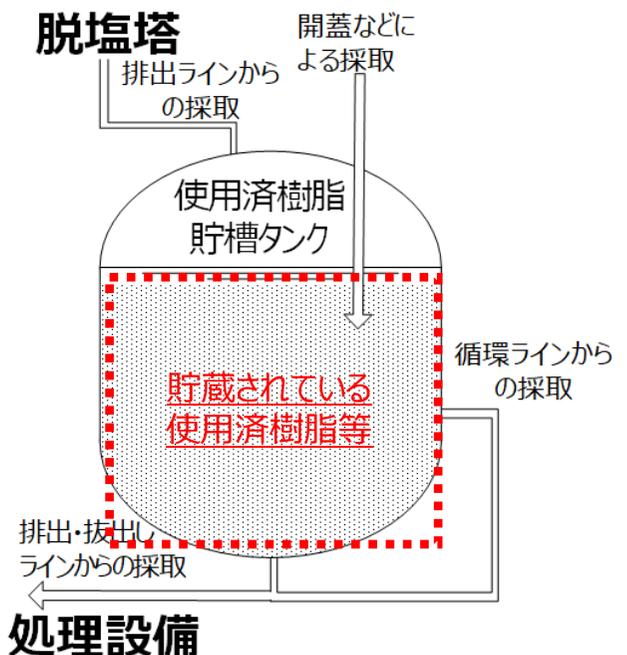
**L1放射能評価標準のニーズ／目的、標準化の経緯  
及び標準策定のための技術要素、  
並びにISO標準との関係**

# 中深度処分対象廃棄物の放射能評価方法に関する標準 の制定に対するニーズ及び標準化の目的

- **日本原子力学会 標準委員会は、下記の標準化のニーズを勘案して、中深度処分対象廃棄物の放射能評価方法に関する標準**（余裕深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順 AESJ-SC-F015:2010（以下、**2010年版**））を標準委員会などに参加している産学の専門家によって、約2年半の公平、公正な公開審議を経て、「**技術基準などで要求される中深度処分対象廃棄物の放射能濃度を放射化計算など評価できる標準的な方法・手順**」を定める標準として**2011年2月に制定した**。
- **廃止措置計画の具体化**：原子炉の廃止措置計画が申請され、解体工事などの準備が進められており、原子炉領域の解体に伴い**比較的放射能濃度が高い中深度処分対象廃棄物が今後発生する**。
  - **炉内構造物などの放射能の評価**：浅地中ピット処分対象物の放射能濃度評価方法を適用すると、廃棄物のサンプリング・分析が必要となることから、**作業員の被ばくを抑制できる放射能濃度評価方法が求められる**。  
さらに、**廃棄物の特性（廃棄物の材料、照射条件）**が明確であり、その**評価対象核種は、放射化による生成が主体**であることから、放射化計算が容易なため、適切な領域区分を行うことによって、**放射化計算を用いて廃棄物の放射能評価が可能な方法の標準化**が望まれた。
  - **使用済樹脂などの放射能の評価**：廃止措置完了までに貯槽タンクに保管されている**放射能濃度が高い使用済樹脂等の「放射能濃度」**の評価方法に関して、攪拌などの設備構成を考慮した**サンプリング・分析などにより、作業員の被ばくをできる限り抑制できる「原廃棄物分析法」**の標準化が望まれた。

# 本標準を適用する評価対象廃棄物と適用する放射能評価方法

本標準は、原子力発電所の低レベル放射性廃棄物のうち、標準化のニーズの高い下記の比較的高い放射能濃度の放射化金属等及び使用済樹脂等の放射能濃度を決定するための、より合理的（被ばく低減などが達成可能）な放射能評価方法に関する手順を標準化したものである。

対象廃棄物	放射化金属等	使用済樹脂等
<p>適用する 評価対象 廃棄物などの例</p>	 <p>BWRの例</p>	
<p>適用する 放射能評価方法</p>	<p>理論的方法</p> <p>放射化金属等の材料、照射履歴が明確な特性を利用した理論的な計算評価</p>	<p>実証的方法 (原廃棄物分析法)</p> <p>貯蔵管理している機器、系統の設備を利用した代表サンプルの採取による評価</p>

注記1 赤破線内が中深度処分対象廃棄物を示し、青破線内は浅地中ピット処分の最大濃度を下回ると推定されるが、中深度処分の可能性がある廃棄物を示す。  
 注記2 本適用対象は、標準本文の1及び4に規定している。

# 放射能評価方法に求められる要求と標準を適用する評価対象

本標準では、主として原子炉の解体工事から発生する炉内構造物などの「放射化金属等」、貯槽タンクに保管されている「使用済樹脂等」を廃棄体として埋設処分するに際して、技術基準などで要求される廃棄体の放射能濃度の評価方法に関して標準化している。

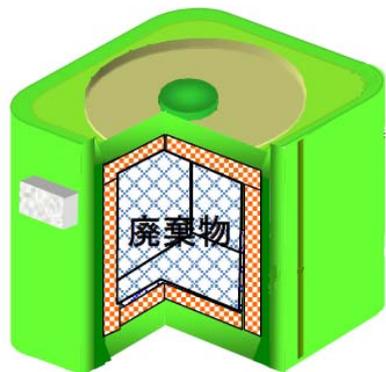
## 技術基準などから求められる要求

廃棄体は規制される最大放射能濃度、総放射エネルギーを超えないことが求められる。

## 本標準に示す放射能評価方法

### 【適用する評価対象】

廃棄体の放射能濃度

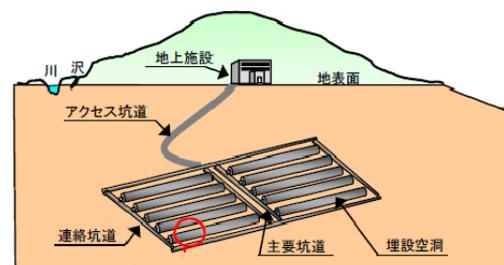


溶接容器内への放射化金属等の収納

**廃棄体製作及び検査**  
(分別・収納) (放射能評価)

### 【適用する評価対象】

埋設施設の総埋設放射能



深度70m以深での  
中深度埋設施設への処分

**埋設処分**  
(中深度処分)

# 放射能評価方法の標準に必要となる技術要素を踏まえた標準化

本標準の策定に当たっては、技術基準から求められる満たすべき性能を下表のように捉え、電力安全小委員会報告<sup>出典</sup>の基本的考え方（基準を満たすために必要な技術要素：評価条件、評価手法及びマージン(裕度)）を踏まえ、「満たすべき性能」に対して、標準の策定に必要となる「技術要素」の項目を抽出、検討した上で、標準に示すべき具体的内容（次頁参照）を検討して標準化を進めてきた。

対象	L1放射能評価標準 (放射能濃度及び総放射エネルギーの評価)
技術基準などからの要求	廃棄体は規制される最大放射能濃度、総放射エネルギーを超えないことが求められる。
標準に求められる満たすべき性能	中深度処分対象廃棄体中の放射能濃度及び放射エネルギーが適切に評価できる方法であること。
技術要素	放射能濃度及び放射エネルギーの評価方法として妥当性が確保するための技術要素
3つの技術要素項目への展開  詳細は次頁参照	<b>【放射能評価方法に関する技術要素項目への展開を検討した】</b> ① 放射能濃度を評価すべき対象条件 (適用範囲、対象とする放射性廃棄物の条件の明確化) ② 放射能濃度の評価方法及び手順 (理論的方法、計算の入力データの設定方法の明確化) ③ 評価した放射能濃度の裕度 (評価対象に応じた保守性などの考慮、理論計算のトレーサビリティの要求)

# 標準が満たすべき技術要素の具体的な内容

本標準は、前頁に示した中深度処分対象廃棄物の放射能評価方法が満たすべき3つの技術要素に関して、下表に示すように具体的な内容を検討して策定したものである。

満たすべき技術要素	放射能濃度の評価に対する技術要素の検討結果	理論的方法の標準に示すべき技術要素の具体的な内容
<b>技術要素1</b> 放射能濃度を評価すべき対象条件	① <b>適用範囲</b> ：放射能濃度の評価対象とする放射性廃棄物及び評価すべき放射性物質（核種）を示すこと。 ② <b>対象とする放射性廃棄物の条件</b> ：対象とする放射性廃棄物の放射能濃度を評価するために必要な特性の把握を行うこと。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中深度処分対象廃棄物の埋設事業の審査における安全評価の前提とする放射性廃棄物及び核種に対する適用範囲を示すこと。</li> <li>● 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性廃棄物の条件（母材、照射条件など）を整理すること。</li> </ul>
<b>技術要素2</b> 放射能濃度の評価方法及び手順	① <b>理論的方法</b> ：「対象とする放射性廃棄物の条件」を考慮した放射性物質（核種）の放射能濃度が評価できる方法及び手順が、適切で妥当性があること。 ② <b>計算の入力データの設定方法</b> ：放射能濃度の計算方法ごとに、必要となる入力データの設定方法及び手順が、適切で妥当性があること。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 対象とする中深度処分対象放射性廃棄物の特徴（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。</li> <li>● 理論的方法の計算手順を示すこと。</li> <li>● 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。</li> <li>● 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。</li> <li>● 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代表、又は網羅した条件で設定できる方法であること。</li> </ul>
<b>技術要素3</b> 評価した放射能濃度の裕度	① <b>評価対象に応じた保守性などの考慮</b> ：放射能濃度の評価のばらつきなどを考慮した評価とすること。 ② <b>理論計算のトレーサビリティ</b> ：放射能濃度の評価のトレーサビリティが確保されていること、その記録（入力データ、計算結果など）が残されていること。	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 最大放射能濃度を評価する上でのばらつきを考慮する。</li> <li>● 平均放射能濃度を評価する上での方法の適正を考慮する。</li> <li>● 放射化計算自体のトレーサビリティを確保すること。</li> <li>● 入力データ及び計算結果の記録確認が可能であること。</li> </ul>

# 参考 AESJ-SC-F015:2019 技術基準規則解釈等の引用箇所について

## 放射性廃棄物の受入れの基準

1. 廃棄物埋設施設に受け入れる放射性廃棄物が、技術上の基準に適合していることについて確認するための廃棄物受入基準に関する事項が定められていること。

2. 廃棄体に係る廃棄物受入基準は、少なくとも以下の事項を含むこと。

### (6) 放射能濃度

#### (引用案)

上記2、に放射能濃度に係る記載を追記して頂き、中深度処分対象廃棄物の放射能濃度の決定には2019年版の該当箇所による旨を追記して頂く等が考えられる。

### 第二種埋設施設 保安規定審査基準

#### 引用箇所 (案)

電気事業者

廃棄物製作・検査

輸送

埋設事業者

廃棄物受入

埋設

第二種埋設事業規則 第八条第2項第三号(廃棄体：最大放射能濃度)

技術基準

事業許可申請書に記載した  
最大放射能濃度を超えないこと

炉規法第五十一条の18第一項

保安規定

炉規法第五十一条の6第二項

廃棄体確認

第二種埋設事業規則第二十条第1項保安規定  
(第十二号 廃棄物受入基準：WAC)

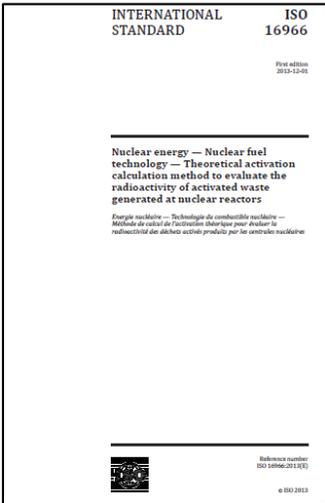
第二種埋設事業規則第七条第1項第1号廃棄体確認  
(第2項第四号放射能濃度を決定した方法の説明書)

なお、第二種廃棄物埋設に係る規則等の改正案及び審査ガイド案の作成が2021年4月頃<sup>1)</sup>に予定されていることから、具体的な技術評価の内容、引用先については改めて相談させていただきたい。

第二種埋設事業規則：核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則

# 本標準と海外規格（ISO標準）との関係及び相互の検討経緯

ISOは、各国での解体廃棄物などの放射化金属等の理論計算法の標準化のニーズを踏まえ、下表のように2010年版の理論計算法に関する内容をベースに、ISO 16966:2013 “Theoretical activation calculation method to evaluate the radioactivity of activated waste generated at nuclear reactors”を2013年に制定した。その後、各国でもISO標準を国家規格として採用している。また、ISO標準に追加された内容を審議の上、2019年版に下表のように反映した。

標準	本標準：AESJ-SC-F015:2010及び2019	ISO標準：ISO 16966:2013
検討体制	標準委員会／専門部会／分科会での多段階による検討・審議	TC85／SC5／WG5／専門PJチームでの多段階による検討・審議
承認手続き	標準委員会／専門部会での書面投票による審議・決議及び公衆審査	TC85／SC5参加国での国際投票による決議（21ヶ国:当時）
検討経緯	<ul style="list-style-type: none"> <li>2010年版（AESJ-SC-F015:2010）は、標準委員会などで標準内容を約2年半の審議・書面投票、公衆審査を経て2010年に制定した。</li> <li>2019年版（AESJ-SC-F015:2019）は、ISO標準に追加された内容「妥当性確認」などを含め、約1年半の審議・書面投票、公衆審査を経て、2019年に改定した。</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>ISOは、専門PJチーム（12ヶ国の専門家が参加）を形成し、先行していた学会の2010年版の理論的方法をベースに、約2年間の検討、3回の国際投票を経て、2013年に制定した。</li> <li>ISO標準は、審議段階で必要とされた「妥当性確認及び不確かさの扱い」及び「記録」が加えられた。</li> </ul> 

# 本標準の制定、改定の経緯

- **日本原子力学会 標準委員会は、中深度処分対象廃棄物の放射能評価方法に関する標準**（余裕深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順 AESJ-SC-F015:2010：2010年版）を、**廃棄物の放射能濃度を評価する方法（理論的方法及び実証的方法）として2011年2月に制定した。**
- **標準委員会は、2010年版の制定以降に得られた次の点に関し、標準委員会などに参加している産学の専門家によって妥当性、保守性などを確認の上、公平、公正な公開審議（2016年6月～2018年1月）を経て改定し、2019年8月に2019年版として発刊した。**
  - ISO 16966:2013に加えられた**“妥当性確認”に係る規定、“記録”に係る規定。**
  - 理論的方法に関して、**“元素分析データに検出下限値しかない場合の元素分析データの検出下限値から始まる濃度の低い領域で濃度分布を設定する方法”**（“鉱物、岩石などの試料”のデータを利用した検出下限値以下の分布の設定方法に関する学識経験者などによる報告書の内容）。
  - 実証的方法に関して、浅地中ピット処分対象廃棄物の液体状の放射性廃棄物に関する**“原廃棄物分析法”に関する適用事例**に関する原子力安全基盤機構（当時）の報告書の内容。
  - 炉内等廃棄物の埋設処分に係る最新の規制動向を反映し、比較的放射能濃度の高い廃棄物の**処分形態の名称を、“余裕深度処分”から“中深度処分”に変更。**

# **L1放射能評価標準の対象とする放射能評価方法**

# L1放射能評価標準の対象とする放射能評価方法

## － 2019年版(AESJ-SC-F015:2019)の全体構成 －

2019年版は、理論的方法及び実証的方法（原廃棄物分析法）による放射能濃度の評価方法及び手順だけでなく、記録、品質マネジメントシステムなどにも規定している。

【本 体】	【附 属 書】	
1 適用範囲	A (参考) <u>理論計算法の適用方法及び手順</u>	H (参考) <u>検出困難元素の濃度分布評価方法</u>
2 引用規格	B (参考) 放射化計算の条件が放射能濃度に与える影響の評価例	I (参考) 濃度比を用いる場合の計算例
3 用語及び定義	C (参考) <u>点推定法のための放射化計算の入力データ設定の推奨方法</u>	J (参考) 換算係数を用いる場合の計算例
4 評価対象とする廃棄物及び評価対象核種	D (参考) 区間推定法のための放射化計算の入力データ設定の推奨方法	K (参考) 濃度分布評価法によって決定する場合の計算例
5 放射能濃度決定方法	E (参考) 原廃棄物分析法の基本的な適用方法	L (参考) <u>不確かさなどによる計算結果の評価</u>
5.1 放射能濃度決定方法の適用	F (参考) 放射化計算を行う場合の計算例	M (参考) 廃棄体中の放射能濃度の確認に対する基本的な考え方
5.2 理論的方法	G (参考) 放射化計算の入力条件の設定例	N (参考) <u>理論計算法の記録の例</u>
5.3 実証的方法（原廃棄物分析法）		O (参考) <u>原廃棄物分析法の記録の例</u>
6 放射能濃度決定方法の手順		
6.1 理論的方法の手順		
6.2 実証的方法の手順		
6.3 <u>妥当性確認</u>		
6.4 数値の丸め方		
6.5 放射能濃度の評価における裕度		
7 記録		
7.1 <u>理論的方法の記録</u>		
7.2 <u>実証的方法の記録</u>		
8 <u>品質マネジメントシステム</u>		
【解 説】		

注記1 附属書（参考）は、今後の実運用における技術的成果を、改定の際に取り込み、規定化を進める。

注記2 下線部分は、2019年度版への改定の際に、2010年版に追加された部分を示す。

# L1放射能評価標準の対象とする放射能評価方法

## － 本標準の適用範囲及び評価対象廃棄物並びに対象核種 －

本標準は、「適用範囲（評価対象とする廃棄物及び評価対象核種）」を、下表のように中深度処分対象廃棄物（放射化金属等及び使用済樹脂等）に限定している。特に、理論的方法（理論計算に適用するORIGEN などの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、照射条件範囲が明確な（炉内構造物などの放射化物）条件下で成立する手法である。

### 標準の記載内容

標準の記載内容	
適用範囲	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>
評価対象とする廃棄物及び評価対象核種	4. 評価対象とする廃棄物及び評価対象核種 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> b) <u>評価対象核種は、申請核種とする。</u>  (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 「使用済樹脂等」は、3. 用語及び定義（3.5）で、「使用済樹脂等液体状の放射性廃棄物又はイオン交換樹脂、フィルタスラッジその他の粉状若しくは粒状の放射性廃棄物」と定義している。 注3 「申請核種」は、3. 用語及び定義（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。)

注記1 評価対象は「申請核種」であるが、どのような申請核種が安全審査で規定されても、2019年版は放射化計算の入力条件とする「起原元素」が選定できる方法を示している。

注記2 放射性廃棄物の埋設事業許可申請書とは、第二種埋設事業規則第六条及び第八条に示される「法第五十一条の二第一項又は第五十一条の五第一項の許可を受けた申請書」

# L1放射能評価標準の対象とする放射能評価方法

## － 中深度処分対象廃棄物の例及び適用する放射能評価方法 －

本標準に規定している放射能濃度決定方法は、下表に適用対象とする放射性廃棄物とその評価方法である「理論的方法」及び「実証的方法（原廃棄物分析法）」を示している。なお、貯槽タンク保管分を一括で評価可能な「原廃棄物分析法」は、浅地中処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法として実運用に適用している。

また、中深度処分対象廃棄物（特に、放射化金属等）の放射能評価に適用を計画している「理論的方法」は、従来のサンプリング・分析による実証的方法と比較し、被ばく低減が可能な新しい方法である。

対象	発生場所等	主な廃棄物	放射能的特徴	放射能濃度の評価	評価方法の適用実績
<b>放射化金属等</b>	原子炉内（使用される機器、装置等）及び原子炉周辺（遮蔽）から発生し、使用済燃料プールなどに保管	<ul style="list-style-type: none"> <li>制御棒（種々）</li> <li>チャンネルボックス（BWR）</li> <li>バーナブルポイズン（PWR）</li> <li>黒鉛（GCR）</li> <li>解体廃棄物（炉内構造物）</li> </ul>	<p><b>放射化が主体</b> （高濃度）</p> <p>核種の生成過程が明確</p>	<p><b>理論的方法による評価</b></p> <p>計算による評価（サンプリングなどでの被ばく低減が可能）</p>	<b>未適用</b>
<b>使用済樹脂等</b>	系統水を浄化するための原子炉冷却材浄化設備等から発生し、貯槽内に保管	<ul style="list-style-type: none"> <li>イオン交換樹脂</li> <li>フィルタースラッジ（BWR）</li> <li>溶離廃液（樹脂から核種を溶離させた廃液）（PWR）</li> </ul>	<p><b>汚染が主体</b> （未固化）</p>	<p><b>実証的方法による評価</b> （原廃棄物分析法） （貯槽単位の一括評価が可能）</p>	<b>浅地中処分対象の廃棄体に適用済</b>

注記 本文5.1及び解説4に示している内容。

# L1放射能評価標準の対象とする放射能評価方法

## － 本標準の対象とする放射能濃度決定方法 －

本標準は、平成4年に、原子力安全委員会（当時）が了承した“日本原燃（株）廃棄物埋設の事業に係る重要事項（廃棄体中の放射性物質濃度の具体的決定手順について）について”に示される下記の6種類の方法の内、**新しく適用を検討している「理論計算法」、及び具体的な知見が得られた「原廃棄物分析法」の2種類**を規定している。

方法	放射能濃度決定方法の概要	本標準の主な対象
理論計算法	原子炉燃焼計算などによって理論的に当該廃棄体中の放射能濃度を決定する方法。	○
スケーリングファクタ法	代表試料の放射化学分析等の測定によって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、当該廃棄体中の放射能濃度を決定する方法。	—
非破壊外部測定法	廃棄体の外部から非破壊測定し、当該廃棄体中の放射能濃度を決定する方法。	—
平均放射能濃度法	代表試料の放射化学分析等の測定によって得られる平均的な放射能濃度によって当該廃棄体中の放射能濃度を決定する方法。	—
廃棄体破壊分析法	廃棄体から代表試料を採取して、これを放射化学分析し、当該廃棄体中の放射能濃度を決定する方法。	—
原廃棄物分析法	固型化処理間近のプロセス廃棄物から代表試料を採取して、これを放射化学分析し、廃棄体中の放射能濃度を決定する方法。	○

注記 本文5.1及び解説1.1に示している内容。

# 参考 本標準の対象とする放射能濃度を評価する理論的方法

原子力安全委員会（当時）が了承した「理論計算法」（理論的方法）は、浅地中処分対象廃棄体に適用した組成比（Ni-59とNi-63との比に適用；主に放射化断面積比に依存）を求める方法である。

これに対して、本標準で示す理論的方法は、下表に示すように理論的に放射能濃度を評価する「点推定法」と「区間推定法」を標準化している。

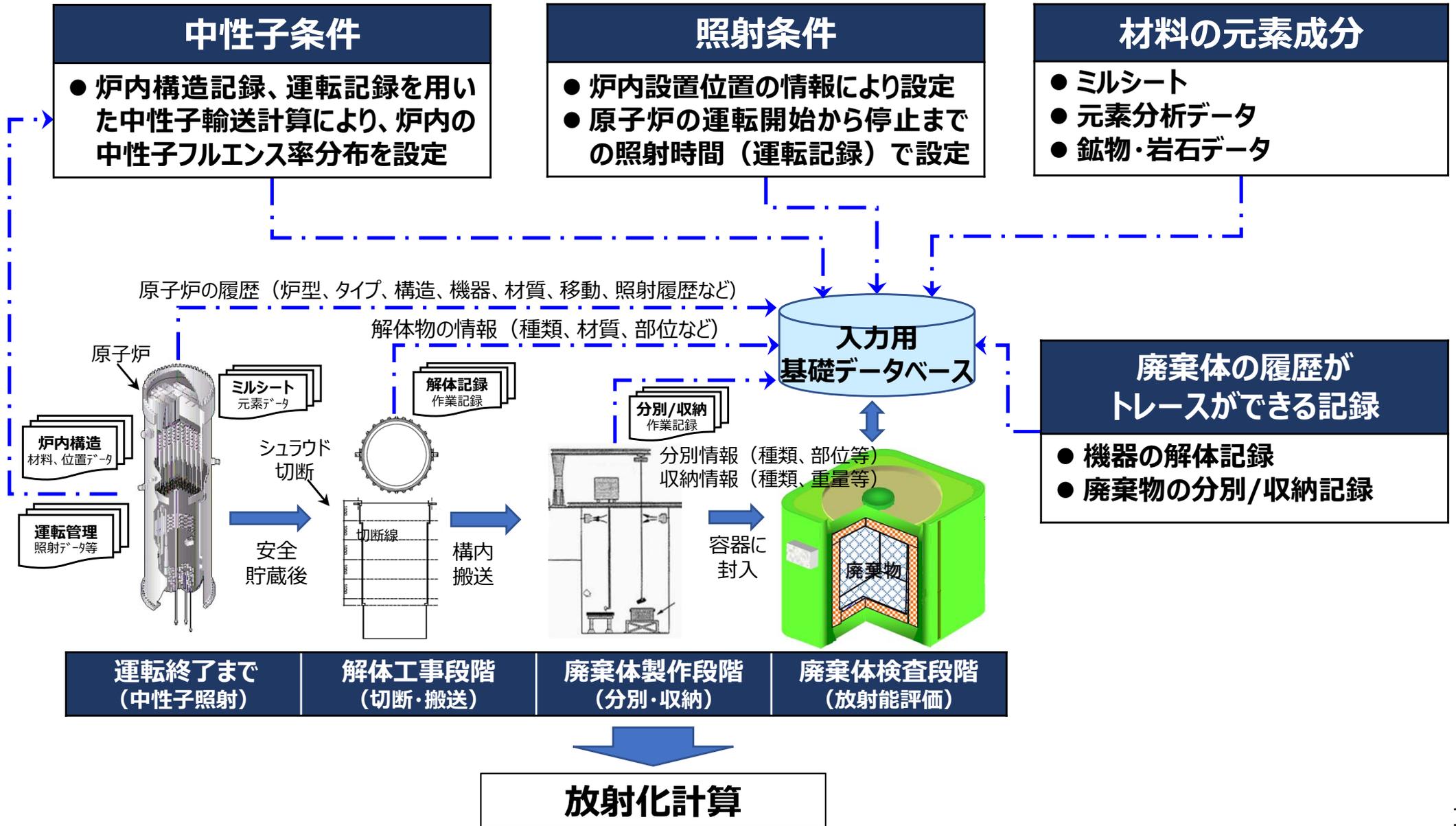
原子力安全委員会 が了承した方法	理論的方法の主な評価方法の種類	本標準の 主な対象
<b>理論計算法：</b> 原子炉燃焼計算などによって理論的に当該廃棄体中の放射能濃度を決定する方法	<b>組成比を求める方法（H4年当時の適用方法）：</b> 原子炉燃焼計算等により理論的に得られる放射性物質の組成比と他の手法（スケーリングファクタ法など）で求めた放射性物質濃度を用いる方法。 適用例：Ni-59/Ni-63の組成比	— （L2廃棄体に適用済）
	<b>点推定法：</b> 放射化計算の基本となる方法である。通常、放射化金属等の内部に含まれる特定対象（部位）ごとに材料仕様、中性子条件及び照射条件を含む適切又は保守的なパラメータを用いて放射能濃度を計算する。	○
	<b>区間推定法：</b> 中性子条件及び照射条件は、評価対象とする放射化金属等の炉内の物理的配置によって定まる中性子フルエンス率に依存するため、放射化金属等全体の放射能濃度は、“特定の放射化金属等の全体に対する中性子照射”を網羅する中性子条件によって、特定の放射化金属等に関する放射化計算を繰り返すことで放射能濃度又は係数を計算する。	○

注記 組成比を求める方法は原子力安全委員会資料、点推定法と区間推定法は、本文5.2.1に示している内容で放射能濃度を評価する方法。

# L1放射能評価標準の対象とする放射能評価方法

## － 理論的方法を適用する上での必要な情報の全体概要 －

本標準に示す理論的方法による放射化金属等の放射能濃度の決定のために必要となる入力用基礎データベースの収集・作成の概略イメージを下図に示す。



# L1放射能評価標準の対象とする放射能評価方法

## － 本標準に示す理論的方法の種類－

本標準では、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次の理論的方法を標準化している。

まず、「点推定法」は、廃棄物の代表ポイント（最大値を示す部位など）で評価することができる廃棄物への適用を想定し、次に、「区間推定法」は、主に物量が多い同一廃棄物グループへの適用を想定している。

種類	評価方法
点推定法	<p>放射化金属等の特定の部位、又は代表的な部位の放射能濃度を計算するために適用する方法。</p> <p><u>放射化計算の基本となる方法</u>である。通常、放射化金属等の内部に含まれる特定対象（部位）ごとに材料仕様、中性子条件及び照射条件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>
区間推定法	<p>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。<u>代表的な放射能濃度の分布又は対象となる条件範囲を網羅した評価によって、対象物の平均放射能濃度などを計算する方法</u>である。</p> <p>中性子条件及び照射条件は、評価対象とする放射化金属等の炉内の物理的配置によって定まる中性子フルエンス率に依存するため、放射化金属等全体の放射能濃度は、“特定の放射化金属等の全体に対する中性子照射”を網羅する中性子条件によって、特定の放射化金属等に関する放射化計算を繰り返すことで評価できる。</p>

# L1放射能評価標準の対象とする放射能評価方法

## － 理論的方法である区間推定法の概要 －

本標準に示す点推定法は、特定放射化物の特定部位の放射能濃度を計算評価する方法であるが、同じく標準に示す下表の区間推定法は、廃棄物グループ全体を対象とし、廃棄物グループの条件範囲（元素、中性子及び照射の範囲）を網羅した放射化計算を行い、係数などを算出して放射能濃度を評価する方法である。

方法	濃度比法	換算係数法	濃度分布評価法
基礎データ			
評価方法の特徴	同種の放射化物の中で <u>同時に中性子照射され生成した核種間の濃度比が一定</u> 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 <u>燃料の燃焼度などの管理指標と密接な関係性</u> 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）の値から対象核種の放射能濃度を評価する方法。	<u>同一の照射時間、材料組成（中性子だけが異なる）</u> の放射化物中に生成する核種の放射能濃度を部位ごとに計算し、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。
適する評価対象の特徴	材料、中性子、照射時間の変動範囲を考慮した評価方法であり、これらの変動があり、多数の発生が想定される放射化物に向く。	燃焼度など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放射化物に向く。
計算した結果	評価対象廃棄物グループの条件範囲を網羅した放射化計算の結果から、濃度比法は一定の難測定核種及びKey核種の濃度比、Key核種の濃度を算定する。換算係数法は原子炉の運転の管理指標（燃焼度など）に対する換算係数を算定し、放射能濃度を評価する。濃度分布評価法は放射能濃度分布及び代表的な放射能濃度（例えば平均値）を算定する。		
保守性などの考慮	<ul style="list-style-type: none"> <li>入力データを作成するための基礎データベースに関する保守性などの考慮。</li> <li>評価対象廃棄物及び照射条件の範囲を網羅した計算の実施。 (このために、収集した基礎データベースからランダムに入力データを抽出)</li> </ul>		

注記 区間推定法は、本文5.2.3及び附属書にDに詳細を示している。

# L1放射能評価標準の対象とする放射能評価方法

## － 実証的方法（原廃棄物分析法）の概要 －

本標準では、貯槽タンク内に保管されている中深度処分対象廃棄物である使用済樹脂等の放射能濃度を評価するために「原廃棄物分析法」（固型化処理間近のプロセス廃棄物から代表試料を採取して、これを放射化学分析し、廃棄体中の放射能濃度を決定する方法）についても標準化しており、その概要を下表に示す。

方法	サンプリング方法		評価方法	
	均一混合サンプリング	層別サンプリング	濃度評価	組成比評価
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>貯槽タンク内の攪拌（攪拌機、エジェクタなどによる）後にサンプリングを行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>貯槽タンク内の層別（高さ毎）サンプリングを行う。</li> <li>循環、移送ラインからの層別（一定間隔での採取）サンプリングを行う。</li> </ul>	<p>原廃棄物を分析した放射能濃度データから直接的に廃棄体の放射能濃度を決定する。</p>	<p>原廃棄物を分析した放射能濃度データから、核種の組成比を評価し、廃棄体のKey核種濃度に乘じて決定する。</p>
具体的方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>均一混合の判断は事前試験による均一混合に必要な所要時間の管理による。</li> <li>管理方法はJNESレポートの柏崎刈羽発電所及び浜岡発電所の実例を示した。（解説に紹介）</li> </ul>	<p>JIS K 2251(原油及び石油製品－試料採取方法)に示される試料採取方法に準拠する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>採取試料の分析を実施する。</li> <li>原廃棄物の分析結果（放射能濃度）</li> <li>廃棄体の製作条件（廃棄物と固型化材料との配合条件）を考慮して、放射能濃度を算出する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>採取試料の分析を実施する。</li> <li>原廃棄物の分析結果（放射能濃度）から組成比を算出する。</li> <li>廃棄体のKey核種の外部測定など。</li> <li>Key核種濃度と核種組成比とから放射能濃度を算出する。</li> </ul>

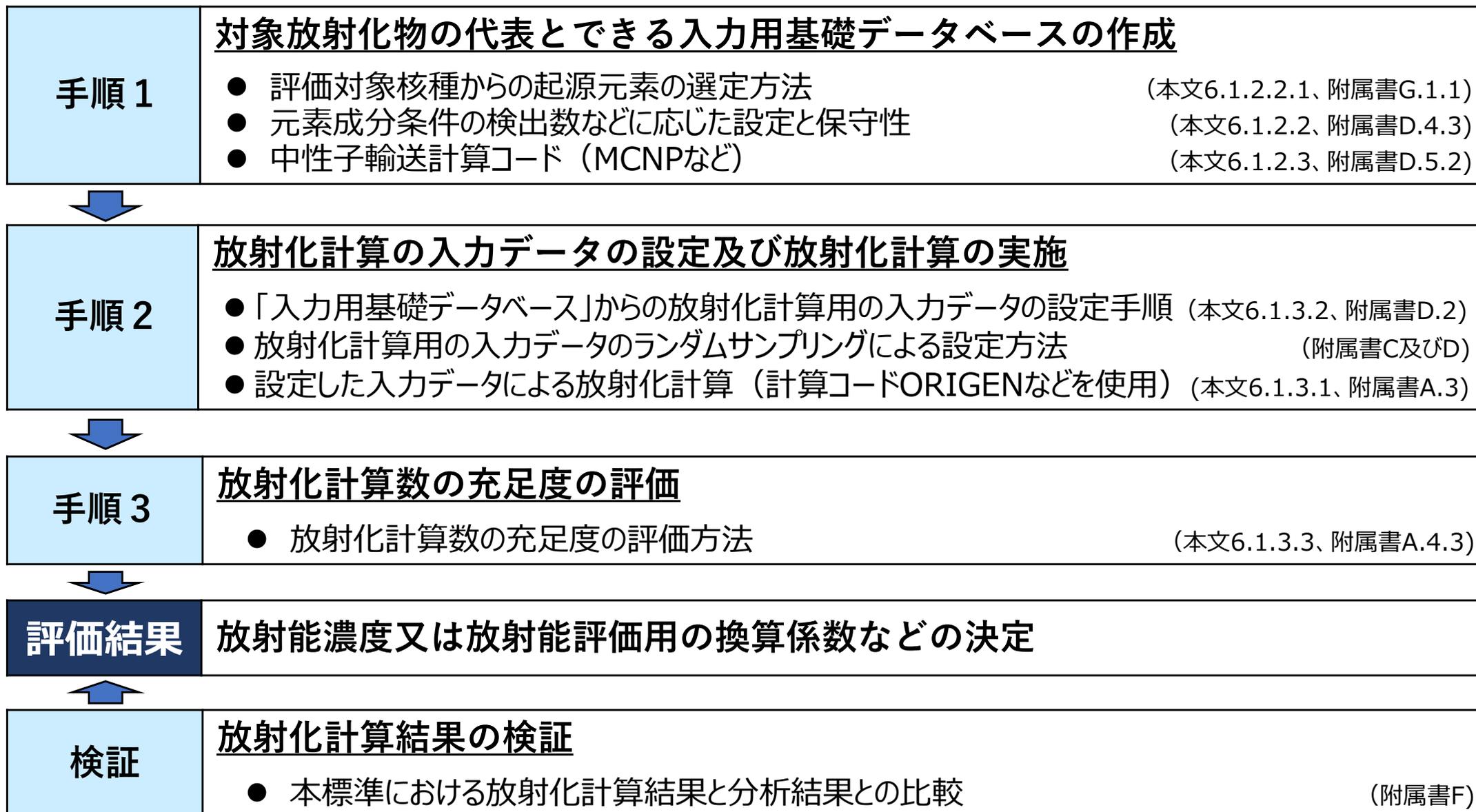
# **中深度処分対象廃棄物の放射能濃度の評価方法**

## **－理論的方法の主な手順とその主なポイント－**

# 中深度処分対象廃棄物の放射能濃度の評価方法

## － 理論的方法の主な手順とその主なポイント－

本標準に示している中深度処分対象の放射化金属等の放射能濃度を放射化計算によって評価するための「理論的方法」に関する主な3つのステップの手順、及びその手順の中で留意が必要な主なポイントについて次に示す。



注記 括弧内は、標準に記載されている本文の章番号などを示している。

# 手順1 対象放射化物の代表とできる入力用基礎データベースの作成

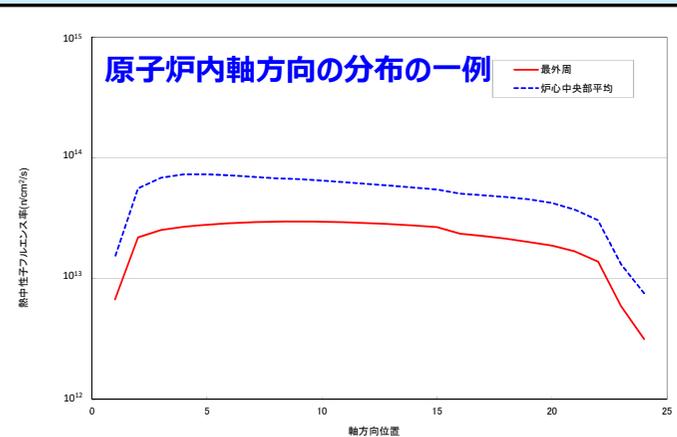
手順1として、放射化計算に適用する下図に示ように入力用の基礎データを収集し、データベース化する。このデータベースを使用して、手順2において入力条件を保守的、又は廃棄物を網羅できるようにランダムに抽出して、放射化計算を必要数実施することによって、評価対象廃棄物の放射能濃度を決定できる。

## 評価対象とする放射化金属の選択、特性把握、起源元素の選定

基礎  
データ  
の収集

炉内構造／配置位置等を踏まえた  
中性子輸送計算

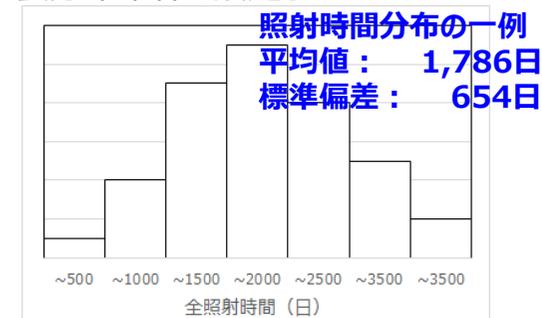
中性子条件  
(データベース化)



原子炉の運転履歴情報  
(照射、停止期間) 収集

照射条件  
(データベース化)

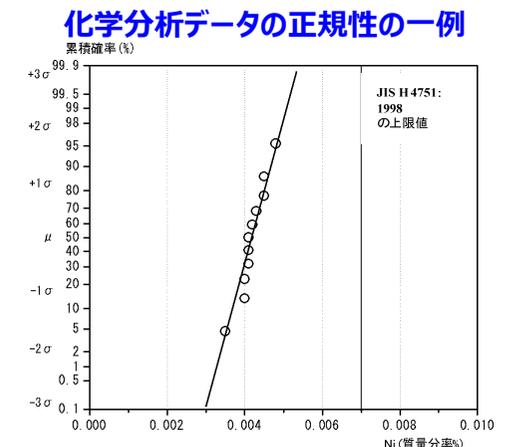
13,000体のCBの総中性子照射時間の運転履歴に基づき照射時間の代表分布条件を設定した。



構造材料中の  
起源元素の化学分析等

(検出率の考慮)

元素成分条件  
(データベース化)



手順  
1

注記 放射化計算の入力条件は、本文6.1.2.1、附属書D及び附属書G参照。

# 手順1の評価対象核種からの起源元素の選定方法

## － 起源元素選定の既往例 －

中深度処分対象廃棄物の放射能濃度は、放射性核種の生成機構に関わるパラメータ（元素条件、中性子条件及び照射条件）によって理論的に決まる。この入力条件の内、元素条件は、材料及び評価対象核種によって、放射性核種の生成起源となる元素が異なるため、その起源元素の選定を行う必要がある。

本標準では、この起源元素の選定方法として、評価対象核種を生成し、かつ、放射能濃度に影響を与えるレベルの元素を選定する必要があるため、下表に示すこれまでの評価事例などを踏まえて標準化した選定方法を次頁に示す。

放射能濃度の 評価対象核種	評価対象核種の例	理論計算に よる放射能 濃度評価の 既往例	左記の放射能濃度の評価 における評価対象核種の 起源元素の選定方法
放射線管理用の 評価核種	強ガンマ線放出する十数の評価核種である。	有り	
埋設施設の 線量評価用の インベントリ評価 核種	線量告示（1,042核種）ICRP（1,252核種）から短半減期核種などを除外し絞り込んだ百数十のインベントリ設定用の評価核種である。	有り	左記の評価対象核種に対して、既往例として本標準で示す起源元素の選定方法を適用して、起源元素を選定した上で、放射能濃度を評価している。

# 手順1の評価対象核種からの起源元素の選定方法

評価対象核種は前頁に示したように、埋設施設の線量評価用のインベントリ評価、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）である。このため、本標準では、評価対象核種が決まれば、放射化計算の入力条件の設定に必要な「起源元素」の選定手順を、前頁に示した、実績のある選定方法と同じ方法で選定できることについて、本標準で次のように示した。

## 評価対象核種からの起源元素の選定手順

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。

### 基本的考え方

- 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。
- なお、起源元素は、次のステップ（全て又はいずれか）によって、対象からスクリーニングすることができる。

### スクリーニング

1次

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。

2次

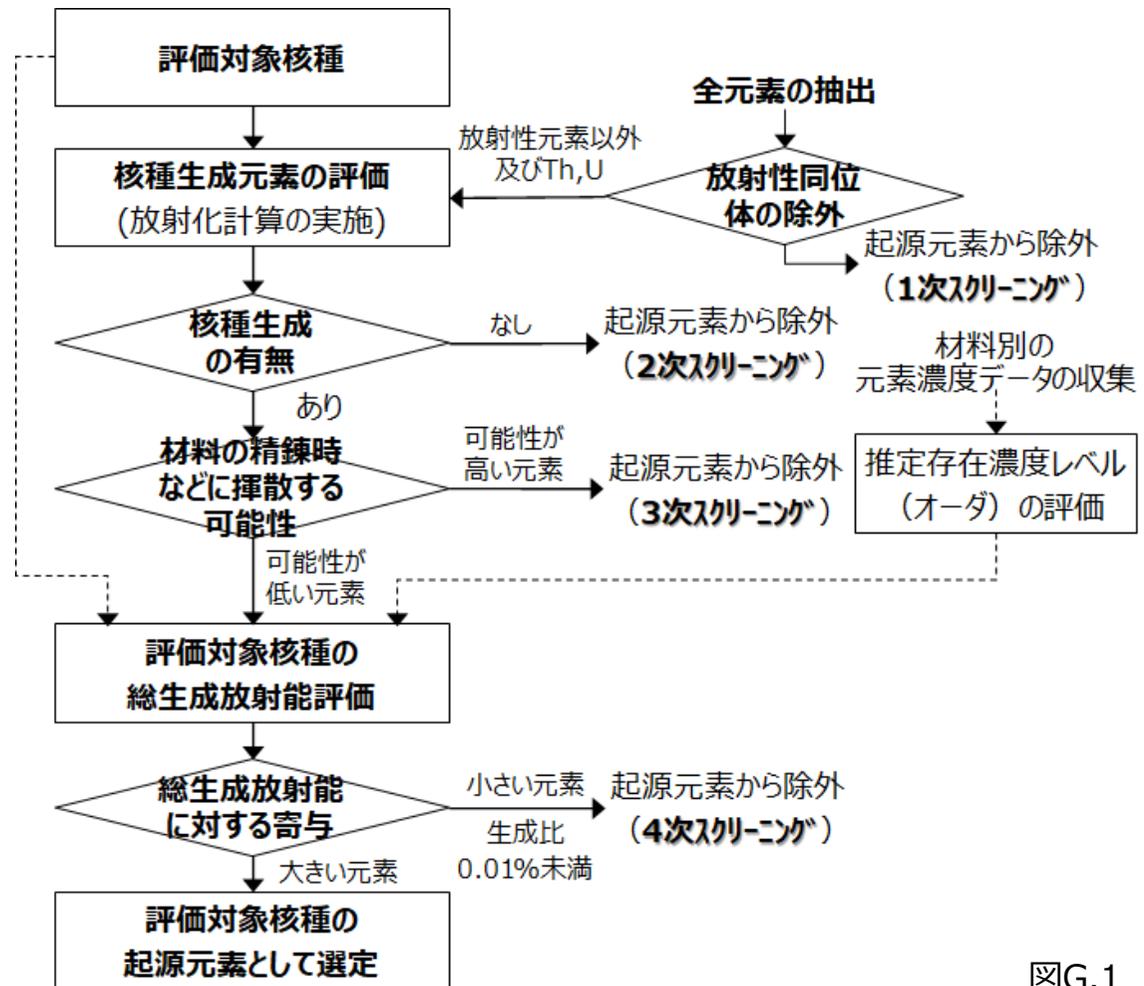
評価対象核種を生成しない元素は、起源元素から除外できる。

3次

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。

4次

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。



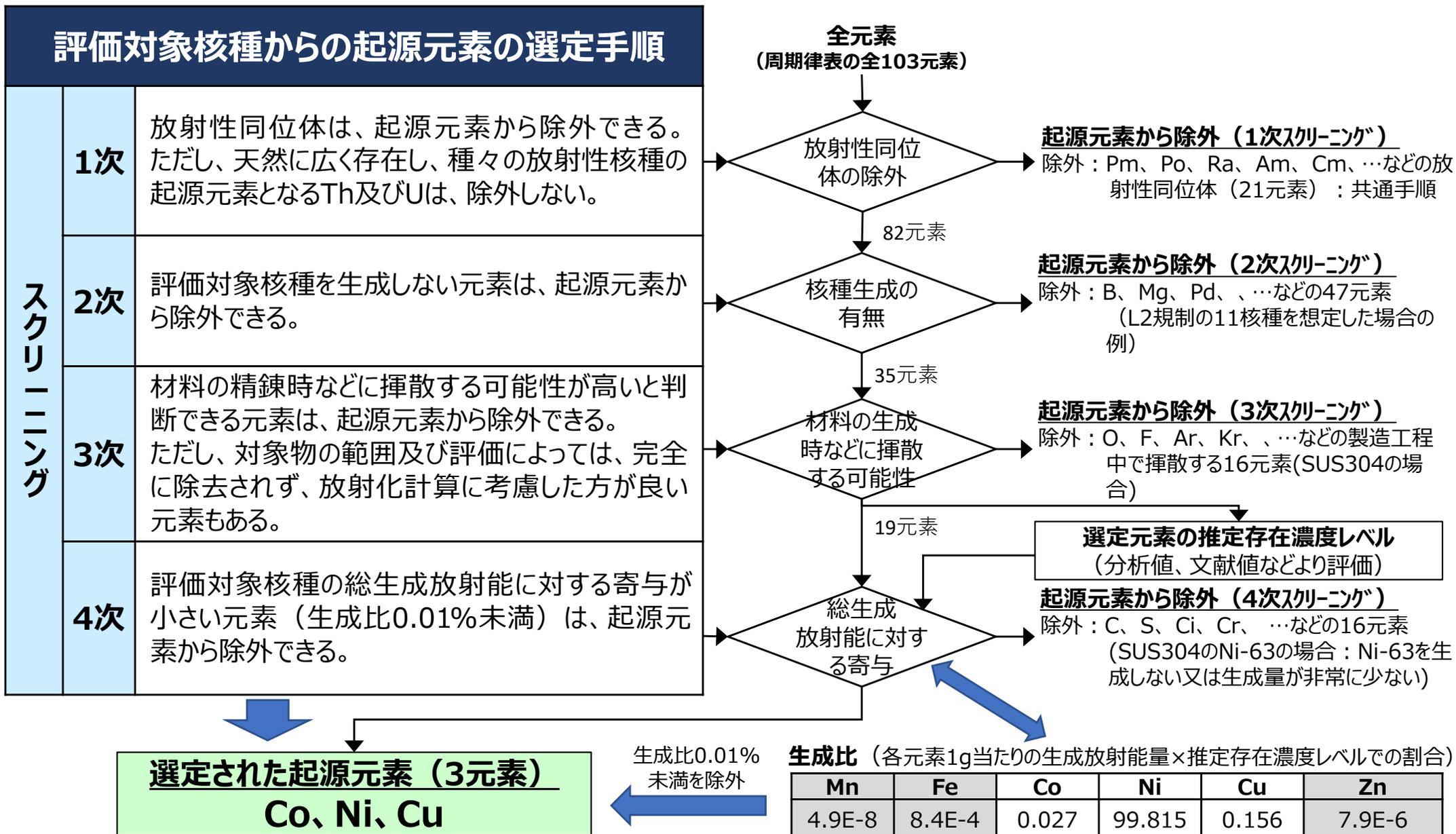
図G.1

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 本文6.1.2.2.1に考え方、及び附属書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。

# 補足 手順1の評価対象核種からの起源元素の選定方法の例 (材質SUS304、評価対象核種Ni-63の場合の選定例)

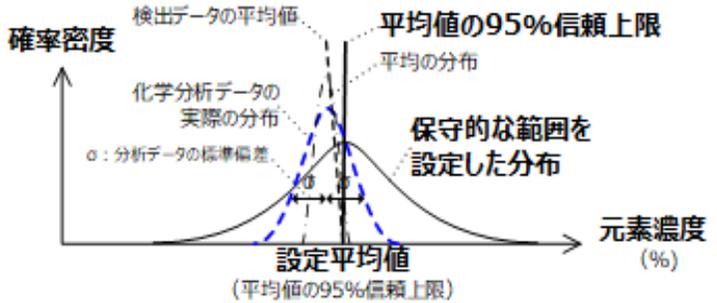
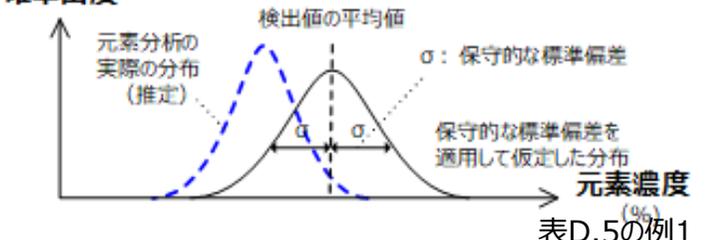
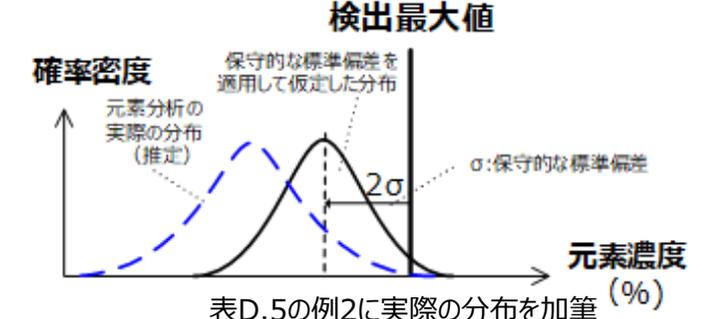
本標準で示す評価対象核種の放射化計算の際に必要な「起源元素」の選定手順の具体例を、SUS304の評価対象核種Ni-63を例にした場合の選定手順とその過程における起源元素の選定結果例を以下に示す。



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。

# 手順1の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いため、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、本標準では、**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	
<p><b>比較的少ない場合</b></p>	<p>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などの方法によって、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>	<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>
<p><b>非常に少ない場合</b> (標準偏差が計算できない)</p>	<p>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> <p>【過大な保守性を低減する】</p> <p>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>	<p><u>平均濃度:</u> 検出値<sup>1)</sup>の平均値とする。</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> <p><b>検出最大値</b></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。

注1) 検出値は実際の推定分布のうち、高い濃度領域のデータのみとなる。

(青破線の分布を保守的に黒実線の分布で設定)

# 補足 手順1の元素成分条件の検出数などに応じた設定と保守性の例

ーデータ数が比較的少ない場合：ZrTN804Dの元素成分条件の設定例（Niの一例）ー

## 分析データを踏まえた分布形状設定の考え方

<b>材 料</b>		ZrTN804D (ジル加イ)
<b>元 素</b>		N i
<b>元素成分の区分</b>		不純物成分元素
<b>基本的な考え方による設定</b>		対数正規分布
<b>実際の元素分析データを踏まえた設定</b>		<b>正規分布</b> (データ数が比較的少ない： 11点)
<b>理由</b>	<b>濃度分布の推定範囲 (±3σ)</b>	質量分率 $2.9 \times 10^{-3} \%$ ～質量分率 $7.1 \times 10^{-3} \%$ (約2.5倍)
	<b>実際の元素分析データの分布の観察</b>	<p>濃度範囲が非常に狭く、正規確率紙上でも、正規性を示した。</p>



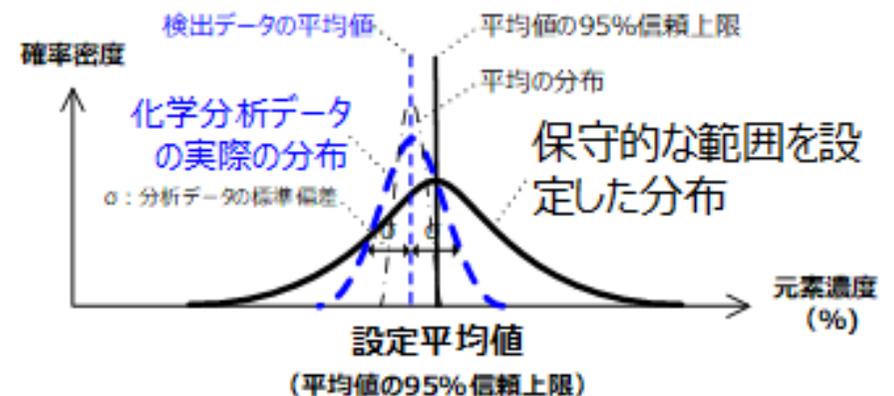
## 元素濃度条件（分布）設定の方法の例

### 元素分析データが比較的少ない場合

評価対象とする放射化金属等（材料）の元素分析データの数が十分でない場合もある。この場合、分析データ数の少なさを考慮し、実際の化学分析データの分布に対して信頼上限を適用するなどの方法によって、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の入力データに関して、「保守的な範囲を設定した分布」を適用して設定する。

**設定平均濃度：95%信頼上限値**

**設定標準偏差：分析値の95%信頼上限値**

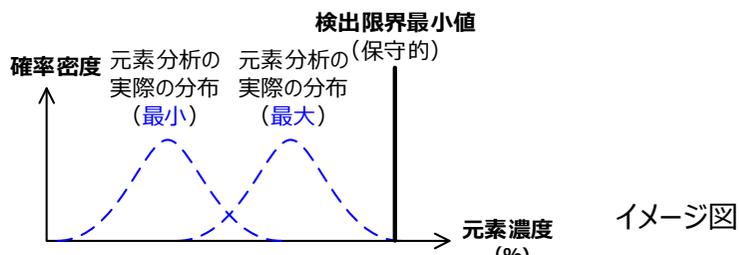
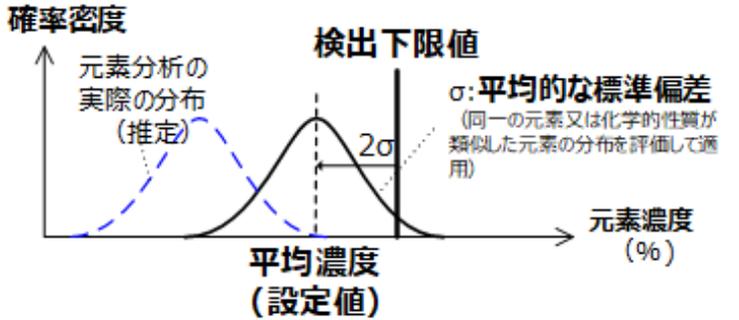


**データ数の少なさを考慮した濃度分布の設定（例）**

# 手順 1 の元素成分条件の検出数などに応じた設定と保守性 2

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、次頁に示す。

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	
<b>検出下限しか得られなかった場合</b>	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。	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。 
	<b>【過大な保守性を低減する】</b> 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	<b>平均濃度:</b> 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。 <sup>1)</sup> <b>濃度分布の標準偏差:</b> 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：次頁参照)	 <p>表D.6の例 3 に実際の分布を加筆</p>
	<b>【過大な保守性を低減する】</b> 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 (逆算) 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。

(青破線の分布を保守的に黒実線の分布で設定)

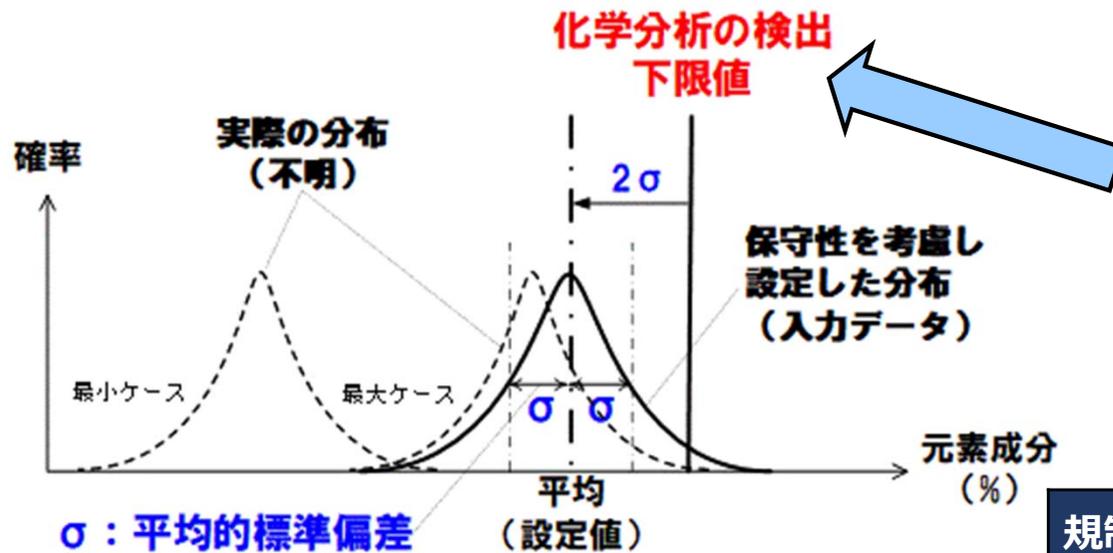
注1) 分布の範囲は、通常3σで考慮するが、より高い濃度領域にシフトさせて評価するために2σを適用している。

# 手順1の元素成分条件の検出数などに応じた設定と保守性3

## －同一元素などの分布を参考にした標準偏差の設定方法－

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。

# 手順1の中性子輸送計算コード（例 MCNP）

本標準では、適切な輸送計算コードを適用することを求め、その例として、MCNPなどの計算コードなどを示している。（本文6.1.2.3、附属書D.5.2）

## 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」<sup>1)</sup>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。

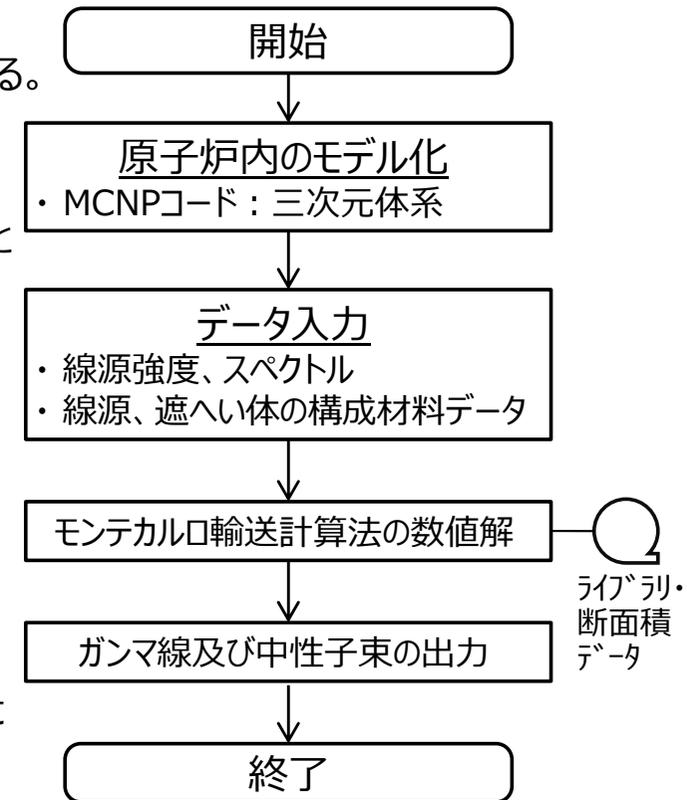
米国では使用済燃料貯蔵施設の審査指針である「Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities」（NUREG-1567）においては遮蔽解析ツールとしてMCNPコードが記載されており、遮蔽設計、線量評価等で使用されている。

## 5. 検証

汎用コードの導入評価<sup>2)</sup>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<sup>3) 4)</sup>が実施されていることを確認。実機においても検証例<sup>5) 6)</sup>が報告されている。

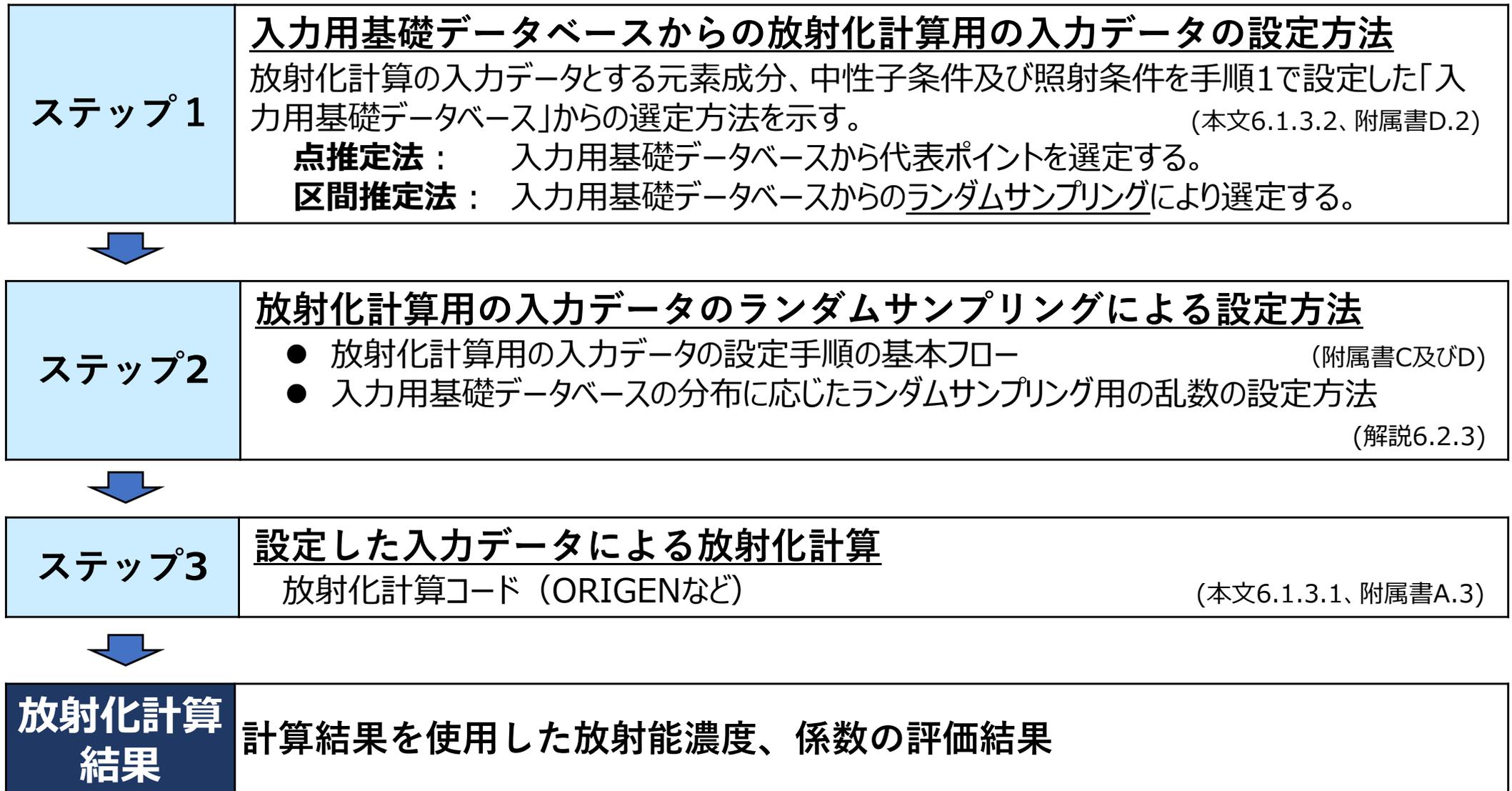
- 1) 一般社団法人 日本電気協会 原子力規格委員会、「原子力発電所放射線遮蔽設計規程」、JEAC 4615-2020、(2020)。
- 2) J.F. Briesmeister(Ed.)、「MCNP - a general Monte Carlo n-particle transport code, version 4A」、Los Alamos National Laboratory Report, LA-12625-M, 1993。
- 3) 平沼巨樹ほか、「MCNP-ラインビームレスポンス接続によるBWRタービンスカイシャイン線量評価手法の適用」、日本原子力学会誌和文論文誌、Vol.4、No.2(2005)
- 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

## 手順2 放射化計算の入力データの設定方法及び放射化計算の実施

本標準に示している中深度処分対象の放射化金属等の放射能濃度を対象範囲を網羅した放射化計算によって評価するための「理論的方法」に適用する手順1で設定した「入力用基礎データベース」からの放射化計算の入力データの設定手順及び放射化計算の方法を、次のようなステップで行うように標準化している。



# 手順2-ステップ1の「入力用基礎データベース」からの放射化計算用の入力データの設定手順

本標準では、手順1に示した入力用基礎データの収集結果（入力用基礎データベース）を踏まえて、適用する理論的方法の種類に応じて、基礎データベースから、下表に示す3つの放射化計算用の入力データを手順（次頁にフロー図を示す）に従って決定する。

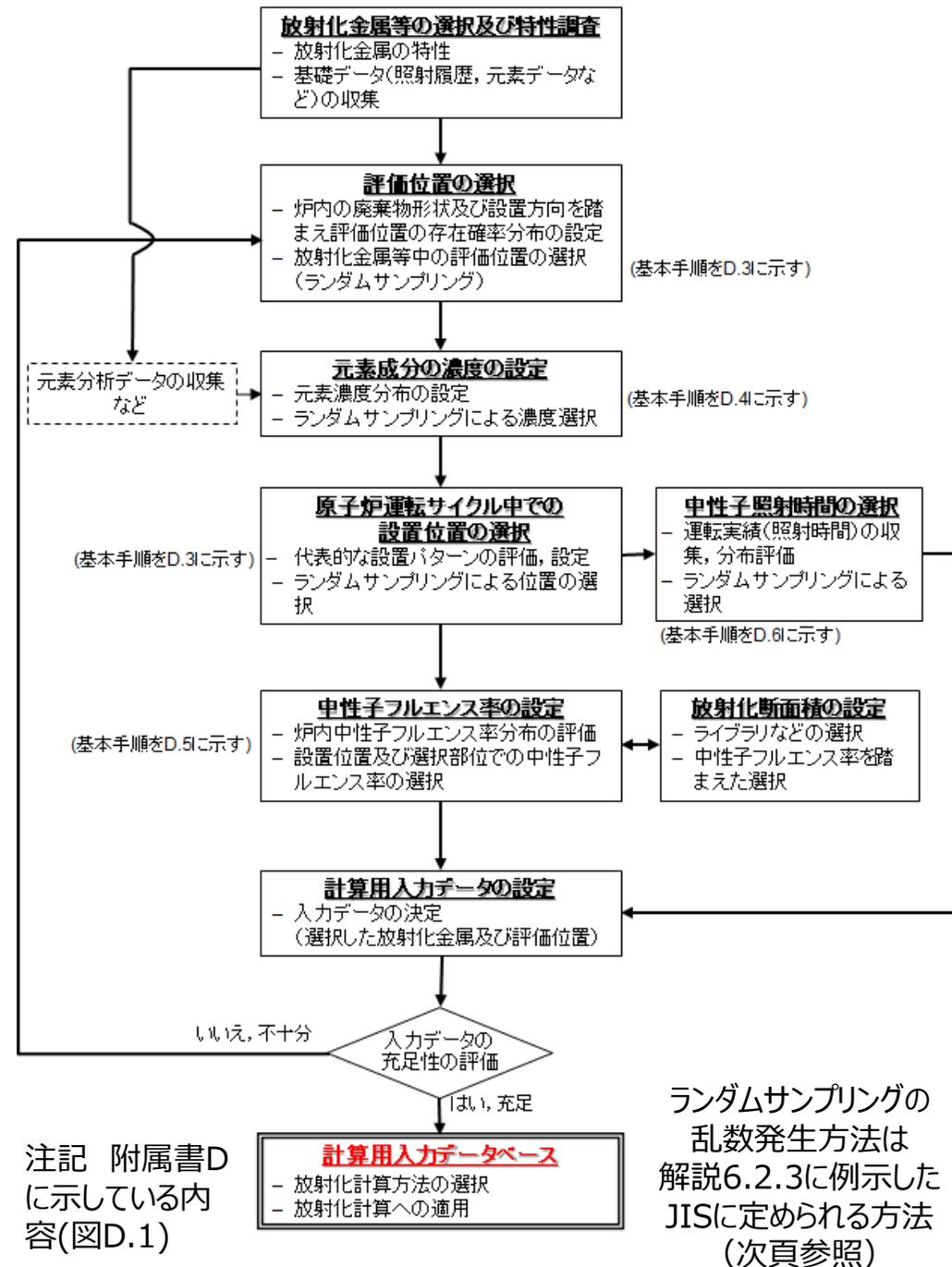
理論的方法	元素成分条件 (本文6.1.2.2)	中性子条件 (本文6.1.2.3)	照射条件 (本文6.1.2.4)
<b>点推定法</b> (特定放射化物の代表データによる設定)	入力用基礎データベースの起源元素濃度分布を踏まえ、 <b>保守性（信頼上限値の適用など）を勘案して設定</b> する。	入力用基礎データベースの中性子フルエンス率分布を踏まえ、 <b>保守性（最大条件の適用など）勘案して設定</b> する。	入力用基礎データベースの照射時間分布を踏まえ、 <b>保守性（最大時間の適用など）を勘案して設定</b> する。
<b>区間推定法</b> (放射化物の範囲を網羅する複数の入力データの設定)	<p><b>入力用基礎データベースの分布からのランダムサンプリング</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>分析などにより収集された起源元素の入力用基礎データベースの分布（保守性考慮した分布（28頁に示した内容））からのランダム抽出によって設定する。</li> <li>必要な放射化計算用の数を満たすまで繰り返して設定する。（次頁参照）</li> <li>ランダム抽出方法は、JISに示される方法。（右記にも適用）</li> </ul>	<p><b>入力用基礎データベースの分布からのランダムサンプリング</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>評価対象廃棄物の「評価位置（部位）」をランダム抽出によって設定する。</li> <li>ローテーションのある場合、運転サイクルごとの炉内挿入位置の実績（例 炉内の中央部→中央部→最外周部などといった挿入パターン）からランダムに「炉内挿入位置」を設定する。</li> <li>輸送計算による分布から、選定した対象廃棄物の「評価位置」及び「炉内挿入位置」における中性子フルエンス率を設定する。（以上を、繰り返して設定：次頁参照）</li> </ul>	<p><b>入力用基礎データベースの分布からのランダムサンプリング</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>収集された運転管理データ（運転サイクル、照射時間）による入力用基礎データベースの分布からのランダム抽出によって照射時間を設定する。</li> <li>ローテーションのある場合、評価対象廃棄物の運転サイクルごとの「炉内挿入位置」のパターンをランダムに設定する。（繰り返して設定：次頁参照）</li> </ul> <p>このサイクルごとの炉内挿入位置のパターンは、中性子条件の設定と同じ</p>

注記 入力データの設定方法の詳細は、点推定法は附属書C、区間推定法は附属書Dに示している。

また、附属書I～Kに理論計算の入力データの設定の適用例の詳細を示している。

# 手順 2-ステップ 1 の放射化計算用の入力データの設定手順の基本フロー

本標準では、区間推定法による放射化計算が恣意的な条件で行わないように、「入力用基礎データベース」からの入力データの設定手順を次のフローで規定している。



**a) 放射化金属等の選択及び特性調査** 評価対象とする放射化金属等の特性の把握、中性子照射履歴、元素分析データなどの入力条件となる基礎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、放射化金属等の評価対象位置に関する確率分布を設定し、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、これを用いて元素成分濃度分布を設定し、入力条件は分布から**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** 炉内で移動がある場合、代表的なローテーションパターンを評価設定する。設定した代表的なローテーションの割合を踏まえて、ローテーション位置を**ランダムサンプリング**。

**e) 中性子照射時間の選択** 炉内照射時間は、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、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** 炉内の中性子フルエンス率分布を輸送計算コードを使用して評価する。**b)** 及び**d)** の評価位置を踏まえ、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決定** **b) ~ g)** で選択し、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、選択を繰り返し継続。

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。

# 手順 2 - ステップ 2 の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

## － 入力用基礎データベースの分布に応じたランダムサンプリング用の乱数の設定方法 －

本標準では、収集した「入力用基礎データベース」によって設定する分布から、擬似乱数を使用した放射化計算用の入力データをランダムに作成する方法として、「入力用基礎データベース」が示す分布形（正規分布など）に応じて、下表のランダムサンプリングの乱数作成方法を示している。

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<sup>1)</sup>で擬似乱数（範囲0～1の擬似一様乱数）を必要数生成。</p> <p>b) JIS Z 9031<sup>2)</sup>の標準正規分布に使用できる逆関数法<sup>3)</sup>を適用し、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に示されている対数正規分布に使用できる擬似乱数を必要数生成。</p> <p>b) 対数上において、a)の方法で標準正規乱数Zを算定し、これを対数値（<math>\log Y</math>）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）を必要数生成。</p> <p>b) 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 本文6.1.3.2及び解説6.2.3.2示している内容。

# 手順 2 - ステップ 3 の設定した入力データによる放射化計算

## －放射化計算コード（例 ORIGEN2）－

本標準では、適切な放射化計算コードを適用することを求め、その例として、ORIGENなどの計算コードなどを示している。(本文6.1.3.1、附属書A.3)

### 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

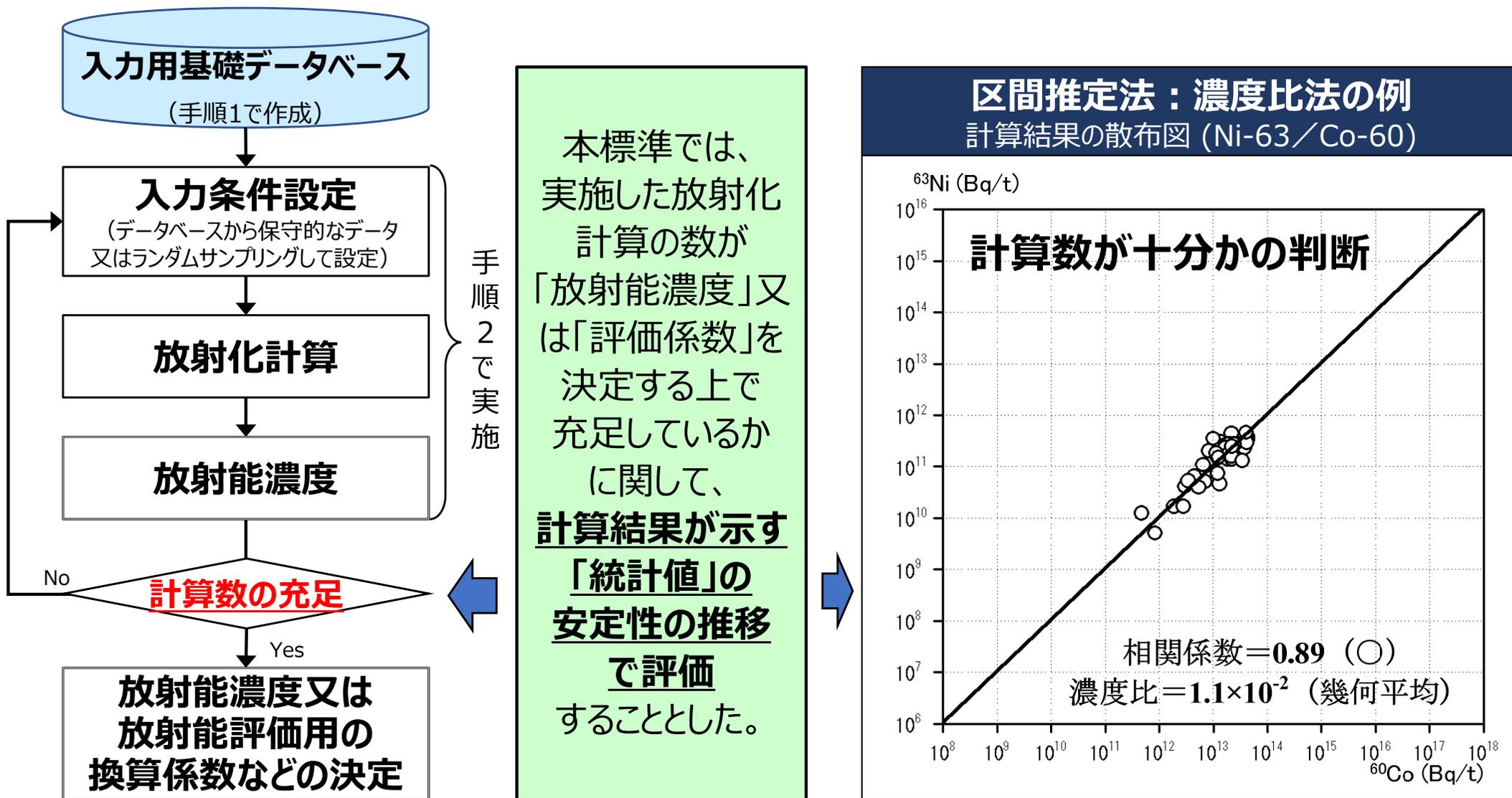
汎用コードの導入評価<sup>1)</sup>が実施されていることが確認されている。

大型実験／ベンチマーク試験による検証<sup>2) 3)</sup>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 MATRIX 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)

# 手順3 放射化計算数の充足度の評価

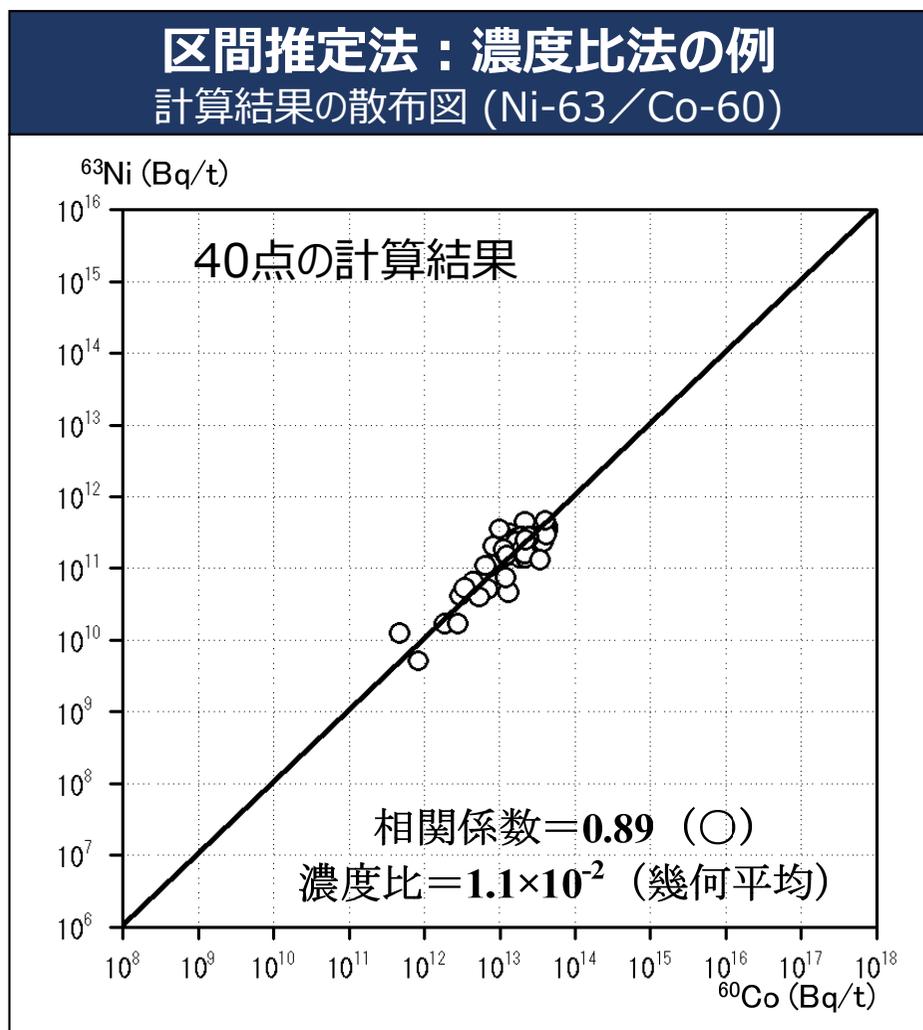
本標準で示す「区間推定法」の場合、対象とする廃棄物グループなどの全体の条件範囲を網羅する入力条件をランダムに設定して、放射化計算を実施する。 このため、手順2で実施した放射化計算の結果として、廃棄物グループを代表できる放射能濃度又は評価係数と判断できる数量で決定することが重要となる。



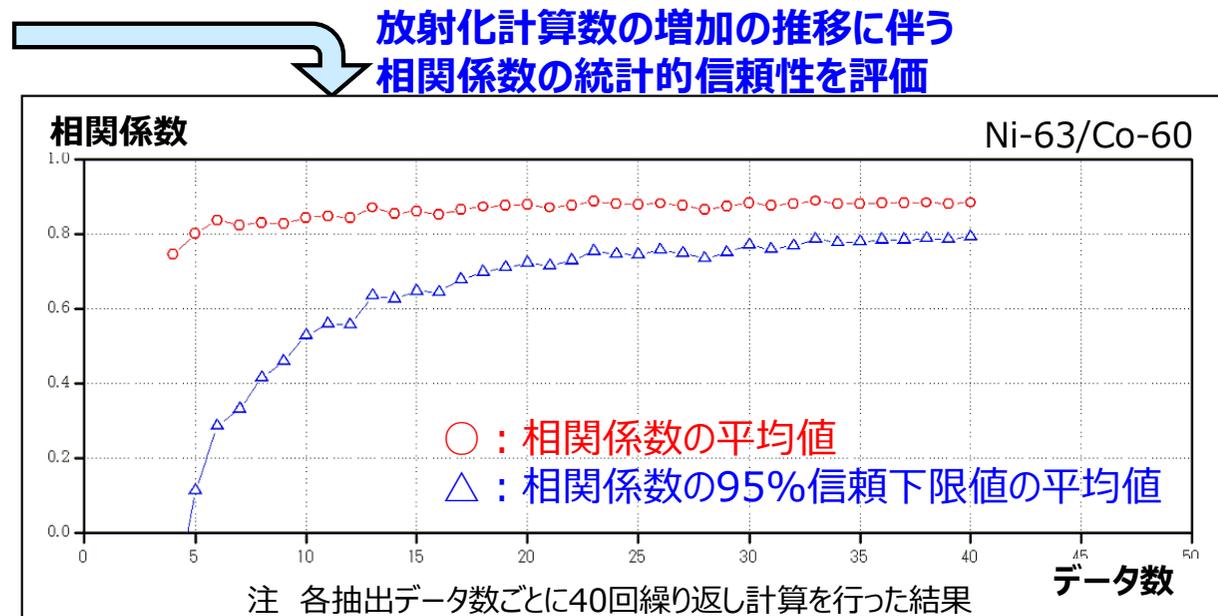
注記 本文6.1.3.3に規定し、附属書A4.3、附属書Iに評価例を示している。

# 手順3の放射化計算数の充足度の評価方法（区間推定法）

放射化計算結果（計算数）が充足しているかの判断は、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、下記の判断手法で、放射化計算数の充足度を評価し、判断する。



入力用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計算数で判断

**放射化計算数の判断方法（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。

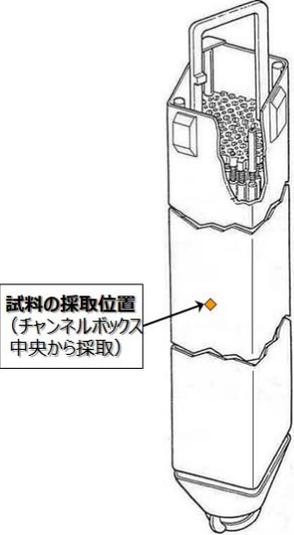
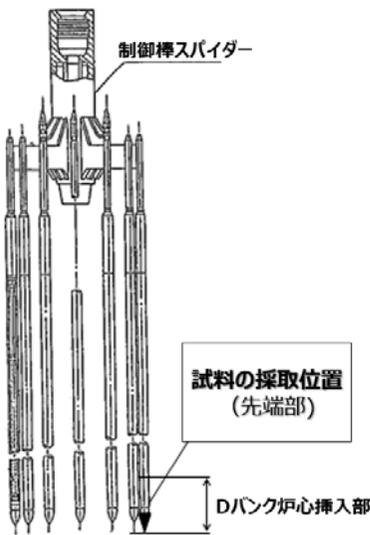
**判断基準として参照したISO&IAEA図書：**  
“The number of data points is sufficient when investment in additional **sampling and measurement** produces no appreciable improvement in the statistical uncertainty”  
(sampling and measurementを計算と読み替える)

注記 本文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。

# 検証 放射化計算結果の検証

## － 本標準における放射化計算結果と分析結果との比較 －

本標準では、分析試料を採取した部位の放射能濃度に関する点推定法（区間推定法の個々の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、計算方法の妥当性を評価している。

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

注記 理論的方法の検証は、附属書Fに詳細を示す。

# **L1放射能評価標準に示される 妥当性確認、記録及びQMS**

# 妥当性確認、記録及び品質マネジメントシステム

2019年版では、放射能濃度の評価方法に関する内容の他、下記に示す「妥当性確認」、「記録」及び「品質マネジメントシステム」に関する規定も示している。

項目	標準の記載内容
<b>妥当性確認</b>	<p><b>6.3.1 理論的方法の妥当性確認</b> <b>6.3.1.1 妥当性確認の方法</b></p> <p>妥当性確認は、理論計算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。</p> <p>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。</p>
<b>記録</b>	<p><b>7 記録</b> <b>7.1 理論的方法の記録</b></p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>
<b>品質マネジメントシステム</b>	<p><b>8 品質マネジメントシステム</b></p> <p>この標準に規定する放射能濃度決定手順を適用するに当たって、利用者がこの標準を引用する要領などにおいて、利用者が規定している“品質マネジメントシステム”の適用を明確にする。</p>

## **参考**

# **ISO標準の各国の国家規格への取り込み状況**

# 参考 ISO16966:2013の各国の国家規格への取り込み状況

国際標準であるISO16966:2013 “Theoretical activation calculation method to evaluate the radioactivity of activated waste generated at nuclear reactors”は、下表の国で、国家規格<sup>注</sup>として、採用されている。

対象	ISOの調査に対して国家規格に、そのまま取り込んだと回答した国	調査で該当する規格が存在した国
採用国	英国： BS ISO 16966:2013 フランス： NF ISO 16966 Février 2014 スウェーデン： SS ISO 16966:2014	ロシア： St ISO 16966:2013
国際規格をISO番号で採用	中国： 国際標準化組織、关于放射性废物的标准（国際標準：放射性廃棄物に関する） ISO 16966-2013 核能.核燃料技术.评估核反应堆产生的活性废物放射性的理论激活计算方法	--

日本では、このISO標準の利用の分野が、原子力の廃棄物分野に限定されることから、日本原子力学会標準（AESJ-SC-F015:2010）をベースに標準化された国際標準であるISO16966:2013との整合性を図るために、学会標準AESJ-SC-F015を改定し、2019年版として発行した。

注 国際規格のJIS化：1995年に発足したWTO（世界貿易機関）のTBT協定（貿易の技術的障害に関する協定）により、加盟国はその国の国家規格の類似する箇所について、ISOやIECなどの国際規格に合わせていくことが義務づけられた。