

資料 3 - 2 - 1

日本原子力学会「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
(AESJ-SC-F015:2019)」に関する技術評価書（案）

目次

1. はじめに	4
2. 放射能濃度決定標準の技術評価に当たって	4
2. 1 技術評価における視点	4
2. 2 技術評価の範囲と手順	4
2. 3 二種埋設事業規則との対応	4
3. 放射能濃度決定標準の技術的妥当性の確認方法	4
3. 1 技術評価の対象となる規定の選定	4
4. 技術評価の内容	5
4. 1 適用範囲	5
4. 2 評価対象核種	6
4. 3 放射能濃度決定方法の種類	12
4. 3. 1 理論計算法の種類	16
4. 3. 2 点推定法	21
4. 3. 3 区間推定法	25
4. 3. 4 換算係数法	30
4. 3. 5 濃度比法	38
4. 3. 6 濃度分布評価法	45
4. 4 放射化計算の基本手順	53
4. 4. 1 評価対象放射化金属等の評価位置の選択	63
4. 4. 2 元素成分条件の設定	70
4. 4. 3 中性子条件の設定	83
4. 4. 4 照射条件の設定	92
4. 5 放射化計算の条件設定方法	99
4. 5. 1 元素成分条件の設定方法	100
4. 5. 2 中性子条件の設定方法	118
4. 5. 3 照射条件の設定方法	124
4. 6 放射化計算方法	126
幾何平均濃度比による評価	142
4. 6. 1 放射化計算の計算数の設定	147
4. 6. 2 表面汚染の取扱い	149
4. 6. 3 理論的方法の妥当性確認	151
4. 6. 4 数値の丸め方	154
4. 6. 5 放射能濃度評価の裕度	155
4. 7 原廃棄物の実証的方法による放射能濃度決定方法	158

4. 7. 1	原廃棄物分析法	158
4. 7. 2	原廃棄物分析法の手順	160
4. 7. 3	原廃棄物分析法の妥当性確認	163
4. 8	記録	164
5.	放射能濃度決定標準の適用に当たっての条件	167
6.	日本原子力学会規格の策定に関する要望事項	167
	添付資料	167

1. はじめに

追而

2. 放射能濃度決定標準の技術評価に当たって

追而

2. 1 技術評価における視点

追而

2. 2 技術評価の範囲と手順

追而

2. 3 二種埋設事業規則との対応

追而

3. 放射能濃度決定標準の技術的妥当性の確認方法

追而

3. 1 技術評価の対象となる規定の選定

追而

4. 技術評価の内容

4. 1 適用範囲

本標準の適用範囲については「序文」及び「1 適用範囲」に規定している。

(1) 規定の内容

序文

この標準は、原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物のうち、中深度処分対象廃棄物の放射能濃度を決定する方法を示すことを目的としている。

1 適用範囲

この標準は、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。

(2) 検討の結果

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 年版（以下「放射能濃度決定標準」という。）の「序文」及び「1 適用範囲」において、原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物のうち中深度処分対象廃棄物の放射能濃度を決定する方法を対象とする旨記載されている。

原子力発電所には種々の炉型があるが、本標準が対象とする炉型について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹。

標準の作成に当たっては、原子力発電所の炉型として、次の原子炉を対象としています。

- ・ 沸騰水型軽水炉 (BWR)
- ・ 加圧水型軽水炉 (PWR)
- ・ ガス冷却炉 (GCR)

原子力発電所のうち、実用炉が対象であることから、「原子力発電所」は「実用発電用原子炉及びその附属施設」と読み替える。

(3) 適用に当たっての条件

追而

¹ 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資料 2-1-1 回答 2

4. 2 評価対象核種

中深度処分対象廃棄物の評価対象と核種については「4 評価対象とする廃棄物及び評価対象核種」に規定している。

(1) 規定の内容

4 評価対象とする廃棄物及び評価対象核種

- a) 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。
- b) 評価対象核種は、申請核種とする。

(2) 検討の結果

- ① 放射能濃度決定標準の解説「3 適用範囲」において、「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、“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に作成されたものである。」と記載している。また、説明資料「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」²では、適用する評価対象として、「廃棄体の放射能濃度」及び「埋設施設の総埋設放射能」とある。

一方、第二種廃棄物埋設事業規則³は、以下の確認・評価を求めている。

- ・第二種廃棄物埋設を行う放射性廃棄物に含まれる放射性物質の種類ごとの最大放射能濃度、総放射エネルギー及び区画別放射エネルギー⁴の確認
- ・廃棄体の放射能濃度が第二種廃棄物埋設に係る許可を受けたところによる最大放射能濃度を超えないこと⁵の確認
- ・政令⁶第 31 条で定める放射性物質⁷（以下「政令記載核種」という。）の放射能濃度の確認
- ・廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線の評価⁸
- ・廃止措置の開始までに廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に

² 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 資料 1-1、5 頁

³ 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（昭和 63 年総理府令第 1 号）

⁴ 第二種廃棄物埋設に係る事業規則第 2 条第 1 項第 1 号

⁵ 第二種廃棄物埋設に係る事業規則の改正案第 8 条第 2 項第 3 号

⁶ 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令（昭和 32 年政令第 324 号）

⁷ C-14、Cl-36、Tc-99、I-129、アルファ線を放出する放射性物質

⁸ 第二種廃棄物埋設に係る許可基準規則の改正案第 8 条第 1 項

移行する見通しがあるものであることの評価⁹

上記確認・評価のうち、放射能濃度決定標準が適用できるものについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁰。

標準の目的は、解説「3 適用範囲」に示すとおり、「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、“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 1) に定める廃棄物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に作成されたものである。」としており、上に示した技術基準を確認するための方法を規定しています。

注 1：標準改定後、2019 年 12 月 5 日に規則改正が行われ第八条第 2 項第三号に改正された。

日本原子力学会は、「第二種廃棄物埋設を行う放射性廃棄物に含まれる放射性物質の種類ごとの最大放射能濃度、総放射エネルギー及び区画別放射エネルギーの確認」及び「廃棄物の放射能濃度が第二種廃棄物埋設に係る許可を受けたところによる最大放射能濃度を超えないことの確認」のための方法であるとしている。

中深度処分対象廃棄物の評価対象核種の検討において、汚染の影響を含めているか、特に、除染を行わない場合に、汚染が評価対象核種の選定に影響を及ぼす可能性と、その影響の程度について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹¹。

(回答待ち)

② 中深度処分については、埋設しようとする放射性廃棄物に含まれる放射性物質が、第二種廃棄物埋設事業規則別表第一に規定されているピット処分に係る放射性物質の放射能濃度を超え、政令記載核種の放射能濃度を超えないものとされている。一方で、放射能濃度決定標準では、中深度処分対象廃棄物であることを前提にその放射能濃度の決定方法を規定している。

a) 「3 用語及び定義」に記載されている「3.5 使用済樹脂等」及び「3.14 放射化金属等」には放射能濃度によってピット処分対象物と中深度処分対象物に分かれる可能性がある。

対象物の全体の放射能濃度の評価結果から中深度処分対象物を選定する方法及びその際に政令濃度上限値を超えるものとピット処分対象とを区分する方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹²。

<標準が想定している中深度処分対象廃棄物の考え方>

⁹ 第二種廃棄物埋設に係る許可基準規則の解釈の改正案第 12 条 8 (例えば、自然事象シナリオにおける「放射性廃棄物に含まれる主要な放射性物質」の放射エネルギー)

¹⁰ 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資料 2-1-1 回答 3

¹¹ 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参考資料 ●-● 「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 1

¹² 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資料 2-1-1 回答 4(1)

放射化金属等の中には放射能濃度によって「ピット処分対象物」と「中深度処分対象物」に分かれますが、本標準の策定にあたっては、廃棄物の全体の放射能濃度評価結果を基に、中深度処分対象物を選定したものではありません。

旧原子力安全委員会が示した中深度処分対象廃棄物（使用済制御棒、チャンネルボックス、炉内構造物など）¹⁾を主な対象に、本標準を整備したものです。

注 1) 出典：低レベル放射性廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第3次中間報告）平成12年9月14日

<事業者が想定している区分の考え方>

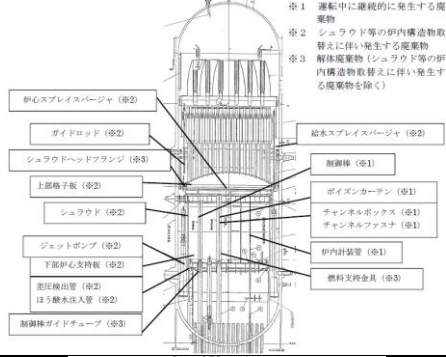
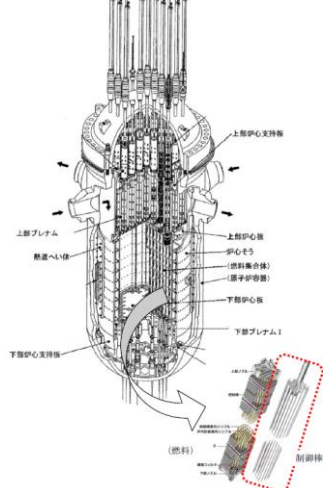
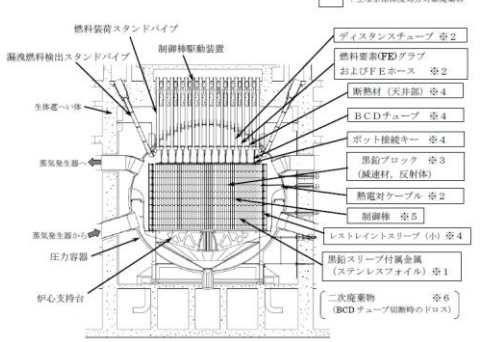
対象物の放射能濃度の評価結果と浅地中ピット処分場の廃棄体受入れ条件（最大放射能濃度、総放射エネルギーなど）を比較し、浅地中ピット処分場の受入れ条件を超え、かつ、中深度処分場の廃棄体受入れ条件（最大放射能濃度など）を超えない廃棄物を中深度処分対象として選定すると聞いています。

b) 上記「3.5 使用済樹脂等」における「その他の粉状若しくは粒状の放射性廃棄物」及び「3.14 放射化金属等」における「黒鉛など」の「など」について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹³⁾。

「使用済樹脂等」の定義である「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」の表現は、第二種埋設事業規則の第八条第2項第一号の表現を踏襲したものです。現時点では、「その他の粉状若しくは粒状の放射性廃棄物」に該当する廃棄物は想定しておりません。

「放射化金属等」の定義に示しております「例」（代表的な放射化金属を示しています）にある放射化金属に関しましては、現時点では、原子炉内やその周辺で中性子照射によって放射化された機器等を想定しており具体的には以下のとおりです。

¹³⁾ 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資料2-1-1 回答4(2)
第3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参考資料3-2 回答4(2)

炉型	対象物	対象物の発生部位 ^{注)}
BWR	上部格子板、燃料支持金具、シュラウド、炉心支持板、炉心スプレーパージャ、CRDガイドチューブ、シュラウドヘッドフランジ、ジェットポンプ、制御棒、チャンネルボックス、炉内計装管	
PWR	バップル、バップルフォーマ板、炉心槽、上部炉心板、制御棒クラスタ案内管、熱遮へい体、下部炉心板、下部プレナム、下部炉心支持板、コンクリート、制御棒、バーナブルポイズン、プラッキングデバイス	
GCR	炉内挿入物 (黒鉛スリーブ付属金属、制御棒、ディスタンスチューブ1)、燃料要素(FE)グラブ1)及びFEホース1)、熱電対ケーブル1))、炉内構造物 (断熱材 (天井部)、BCD チューブ、ポット接続キー、レストレイントスリーブ (小))、BCD チューブ切断ドロス、黒鉛ブロック	

注1) 事業者が提示した「余裕深度処分対象廃棄物に関する基本データ集 (一部改訂) (平成28年8月23日) より抜粋

注2) 上表に示した対象物以外に、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対象物として、圧力容器などがある。

「放射化金属等」は、原子炉内やその周辺で中性子照射によって放射化された機器等を想定し、「使用済樹脂等」には「その他の粉状若しくは粒状の放射性廃棄物」に該当する廃棄物は想定されていないとしている。

したがって、「3.5 使用済樹脂等」の定義の「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。」は「液体状の放射性廃棄物又はイオン交換樹脂、フィルタスラッジの放射性廃棄物。」に読み替える。

c)解体作業においては炉内構造物のほとんどが切断されて廃棄物容器に収納されると想定される。大型の対象物（例えばシュラウド）は、放射能濃度に分布があると想定されるが、大型の対象物の放射能濃度の計算結果から、個々の切断片の放射能濃度を算出する方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁴。

大型の対象物については、炉内での物理的配置によって、中性子フルエンス率に分布が生じるため、廃棄物中に放射化による放射能濃度の分布が生じます。したがって、個々の切断片の放射能濃度は異なります。

しかしながら、廃棄物確認などの際に実施する放射能濃度評価は、切断片ごとの放射能濃度を考慮するのではなく、評価対象機器の部位（必ずしも切断区分と一緒にではない）ごとに放射能濃度を評価し、評価対象機器全体としての放射能濃度を把握します。

この結果を使用して、当該評価対象物（例 シュラウドの切断片、大型機器の切断片）を収納した廃棄体としての放射能濃度を評価します。具体的には、次のような基本的考え方で評価します。

- ・ 当該対象物の最大値を示す代表位置の放射能濃度を、切断した放射化金属等を収納した廃棄体の放射能濃度として保守的に決定します。
- ・ 代表位置での評価を行わない場合、区間推定法の濃度分布評価法、濃度比法などを適用して、中性子フルエンス率分布を考慮した放射化計算によって、対象廃棄物の放射能濃度分布、Key 核種の濃度に対する濃度比を評価して、これを用いて放射化金属等を収納した個々の廃棄体の Key 核種の放射能濃度を非破壊外部測定した結果に乗じることで、平均濃度、最大濃度などを決定します。

これらの詳細については、事業者が行う廃棄確認段階で実際に適用した条件が示されることとなります。

放射能濃度決定標準は、実用発電用原子炉施設等の解体により発生する廃棄物の放射能濃度を評価することにより廃棄体製作の準備を行い、廃止措置を計画的に進めるために必要となるものである。最大値を示す代表部位での評価を行わない場合は、廃棄体の設計条件が定まらなると個々の廃棄体の Key 核種の放射能濃度を非破壊外部測定する方法は適用できない。

したがって、本技術評価においては、代表部位での評価を対象とすることとし、個々の廃棄体の Key 核種の放射能濃度を非破壊外部測定した結果に乗じることで、平均濃度、最大濃度などを決定する方法は技術評価の対象外とする。

- ③ 本文には、「b) 評価対象核種は、申請核種とする。」と規定されているが、具体的な決定方法は規定されていない。申請核種の決定方法について、放射能濃度決定標準と旧原子力安全・保安院の内規¹⁵の以下の記載との関係について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁶。

¹⁴ 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資料 2-1-1 回答 4(3)

¹⁵ 放射性廃棄物に含まれる放射性物質の種類について（内規）平成 24・03・22 原院第 1 号

¹⁶ 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資料 2-1-1 回答 5

申請核種については、旧保安院の内規等を参考に、事業者が選定することになると想定されます。

標準では、どのような申請核種が選ばれたとしても、放射能評価上の申請核種に対応する元素の選定は、本標準に示している方法で対応できるものとなっております。

なお、標準の附属書Gでは、放射化計算の例を示す上で、法令で規制される核種、浅地中埋設の事業申請で申請核種となった次の核種を評価対象核種として設定して、起源元素を評価選定し理論的方法の計算例を示すと共に、計算結果の評価を行っています。

C-14, Cl -36, Co -60, Ni -63, Sr-90, Nb -94, Tc -99, I -129, Cs -137, 全 α 1)

注1) α 線を放出する全ての放射性物質

また、標準 AESJ-SC-F012:2008 余裕深度処分の安全評価手法：2008 において、中深度処分の基本シナリオの被ばく経路ごとの決定核種（支配的な核種又は重要な核種）の例として提示されている核種には、上記以外に Ni-59 及び Cs-135 があります。

【放射性廃棄物に含まれる放射性物質の種類について（内規）（抜粋）】

③ ②で選定された各被ばく経路について、管理期間中及び管理期間終了以後の公衆の年間被ばく線量を評価する。その結果、選定された被ばく経路ごとに、当該放射性廃棄物中に含まれる全ての放射性物質の種類の中から、最大の線量値を持つ放射性物質の線量の最大値と比較して、当該放射性物質の線量の最大値が1パーセント以上である放射性物質を、影響をもたらすことが予想される放射性物質として選定する。このとき、放射性物質の線量値は、管理期間中及び管理期間終了以後にわたる当該放射性物質の線量値の最大値を用いて比較すること。

中性子照射によって評価対象核種を生成する起源元素の適切な選定がなされ、放射化計算が行われれば、その出力である評価対象核種の一覧は適切なものと判断することができる。これに関する技術評価は、「附属書G(参考)放射化計算の入力条件の設定例」に係る部分であり、同附属書の技術評価と併せて評価することとする。

(3) 適用に当たっての条件

追而

4. 3 放射能濃度決定方法の種類

放射能濃度決定方法の種類については、「5.1 放射能濃度決定方法の適用」に規定している。

(1) 規定の内容

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。		
b) 使用済樹脂等 実証的方法を適用する。		
表1ー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	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。
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。		

(2) 検討の結果

- ① 「5.1 放射能濃度決定方法」には、「放射能濃度決定方法は、(中略)表1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。」と規定しており、スケーリングファクタ法等の実証的方法も適用可能としている。「表1ー放射能濃度決定方法の種類及び内容」に示された方法は、汚染物が主体であるピット処分対象廃棄体の放射能濃度決定方法として旧原子力安全

委員会が示した手法¹⁷である

放射化物が主体である中深度処分対象廃棄物に、当該手法が適用できる根拠について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁸。

旧原子力安全委員会が示した手法¹⁷は、浅地中処分を対象とした二次的汚染物が対象の放射能評価方法ですが、評価対象としている核種の生成過程は、原子炉内での中性子の照射による構造材などの放射化、核分裂生成、中性子多重捕獲です。このため、放射化物の内部に放射化によって生成した核種がそのまま残る放射化物か、放射化された機器の腐食生成物などの移行によって廃棄物表面に付く二次的汚染かの差異であり、放射性物質の生成過程は同じであることから、放射化金属等を対象とします中深度処分対象廃棄物にも適用できる方法と考えます。

注1) 出典：廃棄体中の放射能濃度の決定手順について 科学技術庁原子力安全局 平成3年12月

この放射能評価方法の中で、スケーリングファクタ法、非破壊検査外部測定法、平均放射能濃度法、廃棄体破壊分析法は、既に手法が確立している方法であり、この方法を主な対象とします浅地中処分対象の放射能評価方法を規定する標準^{注2)}に示しております。

注記 AESJ-SC-F022 ピット処分及びトレンチ処分対象廃棄物の放射能濃度決定に関する基本手順:2019

「AESJ-SC-F022 ピット処分及びトレンチ処分対象廃棄物の放射能濃度決定に関する基本手順:2019」は技術評価していないが、ピット処分対象廃棄物及び中深度処分対象廃棄物は「放射性物質の生成過程は同じである」ことを根拠としており問題ないと判断する。

また、「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」の選定において考慮すべき具体的内容及び最も適した方法であると判断する上での判断基準について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁹。

標準が対象としている廃棄物に対しては、比較的放射能濃度が高く、サンプリングや分析の際の被ばく低減の観点から、旧原子力安全委員会が示した6つの手法の中から「理論計算法」と「原廃棄物分析法」とを本標準で規定することにしました。

標準が対象とする「理論計算法」及び「原廃棄物分析法」に対する「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」の選択は、対象物の下表に示す考慮内容、判断内容によって行います。

¹⁷ 日本原燃産業株式会社六ヶ所事業所における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）に対する報告について（平成4年4月2日 原子力安全委員会）

¹⁸ 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資料 2-1-1 回答6

¹⁹ 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資料 2-1-1 回答6

適用方法	考慮すべき具体的内容	最も適した方法であるとの判断
理論計算法	<ul style="list-style-type: none"> ・評価対象の放射性核種の特徴（放射化／汚染といった）。 ・評価対象とする放射性廃棄物の特徴。 	<ul style="list-style-type: none"> ・評価対象の放射性核種は、炉内での中性子照射によって生成する核種であること。 ・評価対象とする放射性廃棄物の原子炉内設置位置、形状、材質、中性子照射履歴が把握できること。
原廃棄物分析法	<ul style="list-style-type: none"> ・評価対象の放射性核種の特徴（放射化／汚染といった）。 ・評価対象とする放射性廃棄物の保管状態、特徴。 	<ul style="list-style-type: none"> ・評価対象の放射性核種は、系統水からの汚染によって評価対象廃棄物に付着、又は吸着されていること。 ・液体状又は粉・粒状の廃棄物で、代表サンプルの採取が可能なこと。 ・評価対象廃棄物が、未固化で貯槽などに保管管理されていること。

対象は、「理論計算法」及び「原廃棄物分析法」であるとしていることから、スケーリングファクタ法、非破壊外部測定法、平均放射能濃度法及び廃棄体破壊分析法は技術評価対象外とする。これに関連して「5.3.2 その他の方法」も技術評価対象外とする。

- ② 理論計算法の内容として、「表 1ー放射能濃度決定方法の種類及び内容」の内容欄の「ほかの手法で求めた放射能濃度を用いる方法」について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁰。

「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²¹及びほかの手法で求めた放射能濃度を用いる方法」とは、平成 4 年当時に原子力安全委員会（当時）が了承した廃棄体中の放射性物質濃度の決定方法の内容を示したものです。

注 1) 原子力安全委員会が了承した手法では「濃度比」ではなく、「組成比」と表記されていますが、標準内では、放射化計算での濃度の比率は、「濃度比」で統一しています。（「組成比」と表記すると、浅地中処分対象廃棄体向けのスケーリングファクタ法の組成比と誤解を生む恐れがあるため）

この中の「ほかの手法」とは、理論的な方法以外の手法を意味し、標準では、理論的方法とそれ以外の方法と組み合わせて評価することによって放射能濃度を決定する方法も理論的方法に分類しています。

具体的には、下記のように 3 つの方法を組合せて評価している実績があります。

$Ni-59$ 放射能濃度 = 濃度比 ($Ni-59/Ni-63$)² × SF ($Ni-63/Co-60$)³ × Co-60 放射能濃度⁴)

注 2) 理論計算法（原子炉燃焼計算）で理論的に求めた濃度比

注 3) 放射化学分析データによってスケーリングファクタ法で求めた SF

²⁰ 第 3 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参考資料 3-1 回答 1(1)

²¹ 原子力安全委員会が了承した手法では「濃度比」ではなく、「組成比」と表記されていますが、標準内での統一を図り、放射化計算での濃度の比率は、「濃度比」（「組成比」は浅地中処分対象廃棄体向けのスケーリングファクタ法の組成比と誤解を生む恐れがあるため）と示しています。

注4) 非破壊外部測定法で測定した廃棄体の放射能濃度

なお、「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」とは、学会標準で示す点推定法及び区間推定法を示しております。

原子力安全委員会は理論計算法における「ほかの手法」の具体を示していない。日本原子力学会は、「ほかの手法」とは「理論的な方法以外の手法を意味し」としているが、「理論的な方法以外の手法」の具体が示されていない。したがって、「表1-放射能濃度決定方法の種類及び内容」の「理論計算法」の「内容」の「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。」は、「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で求めた放射能濃度を用いる方法。」に読み替える。

- ③ 原廃棄物分析法については、固型化処理前の廃棄物の放射能濃度を用いているが、固型化材料の放射化計算の要否について、日本原子力学会は、以下のように説明している²²。

原廃棄物分析法の評価対象となります使用済樹脂などの固型化に使用します「固型化材料」（セメントが想定されています）は、中性子の照射環境には置かれず、かつ固型化後も使用済樹脂の放射能によって放射化される環境条件にもありませんので、「固型化材料」に対する放射化計算は不要です。

なお、 α 線によって (α, n) 反応を起こす主たる元素としてBe、B、Fなどがありますが、使用済樹脂などが放出する α 線エネルギーは、さほど強くなく生成する中性子量も少ないと推定され、これによる放射化の影響は小さい。

固型化材料は放射化される環境に置かれないことから、固型化材料は技術評価の対象外とする。

(3) 適用に当たっての条件

追而

²² 第3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参考資料3-1 回答1(2)

4. 3. 1 理論計算法の種類

理論計算法の種類については大別して「5. 2. 1 理論計算法の種類」、注記として「附属書 A (参考) 理論計算法の適用方法及び手順」及び「附属書 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」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>5. 2. 1 理論計算法の種類</p> <p>次の 2 種類の方法が、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。</p> <ul style="list-style-type: none">— 点推定法 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。— 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。 <p>注記 詳細は、附属書 A 及び附属書 B 参照。</p>
<p>A. 1. 3 STEP2：評価方法の選択</p> <p>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、“区間推定法”の選択が適切である。</p>
<p>B. 1 概要</p> <p>6. 1. 2 に示した各種の放射化計算の条件の変動は、条件によっては、放射能濃度及び難測定核種と Key 核種との濃度比の各々に対する影響が異なる場合があることから、適用する放射能濃度決定方法の種類に応じて、適切、又は放射能濃度評価結果が保守的となるよう条件の設定を考慮する必要がある。この附属書では、放射化計算の条件設定のための補足として、起源元素の元素成分条件、中性子条件、中性子照射条件について、想定条件における解析を行い、各条件が放射化計算結果に与える影響の程度を整理した。</p> <p>B. 2 元素成分条件(略)</p> <p>B. 3 中性子条件</p> <p>中性子条件は、中性子発生源の特徴、中性子照射される評価対象廃棄物の材質、中性子照射位置などの条件に応じ決定される。また、放射化断面積は、中性子スペクトルがその一つの決定因子であり、中性子条件に依存するため、ここで併せて取り扱う。ここでは、各因子の影響を整理するため、ORIGEN2 コードシリーズ²³で中性子エネルギー1 群²⁴での放射化計算を行った。</p> <p>B. 4 照射条件(略)</p> <p>B. 5 放射化計算の条件の影響評価結果 (解析結果のまとめ)</p> <p>B. 2～B. 4 の解析結果に基づき、各放射化計算の条件が放射化計算結果に及ぼす影響の程度 (ただし、この解析条件における影響) を整理した結果を、表 B. 9 に示す。</p> <p>元素成分条件については、評価対象核種の起源元素の濃度は、放射能濃度に直接的</p>

²³ <回答記入>第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」
回答 12

²⁴ <回答記入>第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」
回答 12

な影響を与えるため、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のように、評価対象廃棄物の放射能濃度を直接的に決定する場合は、評価対象廃棄物の放射能濃度を代表できる適切な放射化計算の条件、又は放射能濃度の評価結果が大きくなるような放射化計算の条件の設定が必要となる。

一方、難測定核種及び Key 核種の濃度比は、各々の起源元素の濃度比のばらつきの影響を受けるため、濃度比を用いる場合には、各元素の濃度及び濃度比のばらつきを適切に考慮した放射化計算の条件（適切な元素成分条件の範囲）の設定が必要となる。

中性子条件のうち、中性子フルエンス率が放射能濃度に与える影響は、比較的大きいため、換算係数法、濃度分布評価法のように直接的に評価対象廃棄物の放射能濃度を決定する場合は、評価対象廃棄物の放射能濃度を代表できる放射化計算の条件の設定、又は放射能濃度評価結果が大きくなるような放射化計算の条件の設定が必要となる。一方、中性子フルエンス率が濃度比に与える影響は、比較的小さいため、濃度比を用いる場合には、放射化計算の条件として適切な代表値（又は範囲）を設定すればよい。また、換算係数を用いる場合は、利用する管理指標の特徴を踏まえ、適切な放射化計算の条件を設定すればよい。

なお、中性子条件のうち、放射化断面積については、放射能濃度、濃度比のいずれに対する影響も比較的小さいため、いずれの方法を適用する場合でも、放射化計算の条件として適切な代表値（又は範囲）を設定すればよい。

照射条件のうち、中性子の照射時間については、放射能濃度に直接的な影響を与える。核種の減衰については、 ^{60}Co のような比較的短半減期の核種は、中性子の照射停止後の減衰の影響を受ける。また、原子炉供用期間中の減衰については、減衰（すなわち、中性子照射停止）時間の合計が同一であれば、各減衰（中性子照射停止）時間の長短は、放射能濃度、濃度比のいずれに対する影響も基本的に小さい。このため、照射条件については、放射能濃度決定方法の種類に応じ、適切な放射化計算の条件設定、放射化計算結果の適切な減衰補正などの評価が必要となる。

表 B.9－放射化計算の条件の放射化計算結果に対する影響の程度

放射化計算の条件		放射化計算結果への影響の程度 ^{a)}		
		放射能濃度	濃度比	
元素成分条件		b)	c)	
中性子条件		中性子フルエンス率	中	小
		放射化断面積	小	小
照射条件	照射時間	～10年程度 ^{d)}	大	小
		長期照射 ^{e)}	大(小 ^{f)} ～)	小(～中 ^{g)})
	照射停止 (減衰)	照射停止後	小(～大 ^{f)})	小(～大 ^{g)})
		原子炉供用期間中	小	小
注^{a)} 影響の程度は、解析結果において“大：1桁程度以上の差異を生む”，“中：1桁程度の差異を生む”，“小：2～3倍程度以内の差異を生む”を意味する。 b) 評価対象核種の起源元素の濃度のばらつきによる。 c) 難測定核種及び Key 核種の起源元素の濃度比のばらつきによる。 d) 連続照射。基本的に原子炉供用期間中に発生する主な廃棄物の中性子照射条件に相当。 e) 解体時などに発生する廃棄物の中性子照射条件に相当。 f) 比較的短半減期の核種の場合。 g) 比較的短半減期の核種と比較的長半減期の核種との組合せの場合。				

(2) 検討の結果

「5.2.1 理論計算法の種類」には、「点推定法」と「区間推定法」が規定されている。

- ①「点推定法」と「区間推定法」の使い分けについて、「附属書 A (参考) 理論計算法の適用方法及び手順」の「A.1.3 STEP2:評価方法の選択」に「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、区間推定法の選択が適切である」と規定されている。

それぞれの手法を選択する場合の判断基準について、日本原子力学会は、以下のよう

に説明している²⁵。

標準が示します「点推定法」と「区間推定法」、いずれの評価方法も全ての放射化金属等への適用が可能ですが、その評価方法の特徴から、「判断基準」と言うより、より合理的に放射能濃度を評価することを考えて、下表のように方法ごとに適用する評価対象候補を選定します。

全ての放射化金属等の放射能の評価を点推定法で行うことも可能ですが、複数の条件の設定に際し、評価対象を適切に網羅し、かつ、恣意的な設定にならないように設定することは、難しいと考えられます。

このため、大型の機器、同じような条件で大量に発生する機材は、評価対象範囲全体を恣意的にならず、網羅できるランダムサンプリングによって、複数の入力条件を設定できる「区間推定法」の適用が望ましいと考えております。

なお、放射化金属等の詳細情報が特定されない場合、すなわち、切断した廃棄物のように、廃棄体に収納した個々の切断片の詳細情報を把握することが難しい場合には、切断前の機器の状態での評価を行うことが出来る区間推定法の適用が望ましいと考えます。

	点推定法	区間推定法
評価方法の概要	選定した評価対象廃棄物の特定位置の特定照射条件での放射化計算によって放射能濃度を決定する。 このため、代表位置（例 最大値を示す位置）が選定できない放射化金属等の場合、多数の放射化計算（特定位置の特定照射条件での）を実施する必要性が生じる。	評価対象廃棄物の条件範囲を網羅した放射化計算によって放射能濃度を決定する。 このため、同種の放射化金属が多数発生し、かつ、条件範囲が明確な放射化金属等に向く ^注 。
適する放射化金属等	代表位置（例 最大値を示す位置、小型機器）が選定できる放射化金属等（挿入先端位置の濃度が高い制御棒、チャンネルボックスのファスナ部）	<ul style="list-style-type: none"> 同種の放射化金属が多数発生するもの（例 CB、BP、制御棒、黒鉛ブロック） 大型の放射化金属（例 シュラウド、炉心そう）
向かない放射化金属等	<ul style="list-style-type: none"> 代表位置が明確に特定できない放射化金属等 （多数の計算が必要となる）大量に発生する放射化金属等 （多数の計算が必要となる）大型の放射化金属等 	発生量の少ない、小型の放射化金属

²⁵ 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資料 2-1-1 回答 7(1)

また、「判断基準」と言うより、より合理的に放射能濃度を評価することを考えて」について、合理的な放射能濃度の評価を日本原子力学会は、以下のように説明している²⁶。

(回答待ち)

放射化金属等の詳細情報が特定されない場合(例えば、照射履歴が追えない場合)の評価方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁷。

(回答待ち)

切断する前の機器の状態での評価が可能な区間推定法によって得られた平均放射能濃度などの評価結果を廃棄体の放射能濃度決定に反映する方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁸。

(回答待ち)

- ②「表 B. 2-元素成分条件(変化率は、SUS304 を想定したもの)」において、Co 及び Cu は JIS SUS304 の化学成分には規定されていない。材料の種類から元素成分条件をどのように想定するかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁹。

(回答待ち)

また、元素成分 B/元素成分 A 比が Co は 10 倍、Ni は 5 倍、Cu は 0.2 倍とされているが、比の妥当性について、日本原子力学会は、以下のように説明している³⁰。

(回答待ち)

- ③ 解析結果の図 B. 1 ほかにおいて、放射化計算の核データライブラリに JENDL3.3 シリーズ(図 B. 4 は 3.2 シリーズ)が使用されている。これらのライブラリは 2010 年 5 月に 4.0 シリーズが公開されているが、4.0 シリーズを使用した場合の影響について、日本原子力学会は、以下のように説明している³¹。

(回答待ち)

- ④「B. 3.1 中性子フルエンス率」の「b)解析結果」において、「中性子フルエンス率の大小は、(中略)核種の濃度比への影響はない」(B. 5 においても、「中性子フルエンス率が濃度比に与える影響は、比較的小さいため、(後略)」とある。)としているが、

²⁶ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 2(1)

²⁷ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 2(2)

²⁸ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 2(3)

²⁹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 11(1)

³⁰ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 11(2)

³¹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 11(3)

「表 B. 3－中性子フルエンス率の影響評価の計算条件」に示す元素成分条件は 1 点のみで濃度の大小については計算条件に入っていない。図 B. 2 に示す解析結果から、濃度比への影響はないとする根拠、及びここでの濃度比は何と何の比であるのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している³²。

(回答待ち)

- ⑤「B. 3. 2 放射化断面積」の「b) 解析結果」において、「中性子スペクトルの変化による放射化断面積の変化は、それほど大きくなく、放射能濃度及び濃度比のいずれに対しても影響は小さい」(B. 5 においても、「放射化断面積については、放射能濃度、濃度比のいずれに対する影響も比較的小さいため、(後略)」とある。)としているが、「表 B. 4－放射化断面積の影響評価の計算条件」に示す元素成分条件は 1 点のみで放射能濃度の大小については計算条件に入っていない。図 B. 4 に示す解析結果から、放射能濃度及び濃度比への影響は小さいとする根拠、及びここでの濃度比は何を比較するのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している³³。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

追而

³² 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 13

³³ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 14

4. 3. 2 点推定法

理論計算のうち点推定法については、「5. 2. 2 点推定法」及び注記として「附属書 C (参考) 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」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>5. 2. 2 点推定法</p> <p>この方法は、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（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> <p>注記 詳細は、附属書 C 参照。</p>
<p>C. 2 放射化計算の実施順序</p> <p>C. 2. 1 全般</p> <p>ISO16966:2013 の Annex B は、点推定法の放射化計算手順（図 C. 1 参照）と、そのステップごとの方法及び設定必要項目とを示している。</p> <p>C. 2. 2 STEP 1: 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</p> <p>C. 2. 2. 1 炉心内又は炉心近くの構造物</p> <p>ISO16966:2013 の Annex B には、炉内などでの中性子条件を設定するための考え方及び手順が示されている。</p> <p>C. 2. 2. 2 炉内構造物、圧力容器及びその他の構造物</p> <p>ISO16966:2013 の Annex B には、炉外を含めた中性子条件を設定するための考え方及び手順が示されている。</p> <p>C. 2. 3 STEP 2: 中性子輸送計算の実施</p> <p>ISO16966:2013 の Annex B には、中性子輸送計算を実施するための必要項目、手順（輸送計算モデルの設定、中性子輸送計算コードの選択及び中性子反応断面積ライブラリの確認）が示されている。</p> <p>C. 2. 4 STEP 3: 放射化計算の実施</p> <p>ISO16966:2013 の Annex B には、上記で設定した中性子条件に加え、放射化計算コード、放射化計算に必要な元素条件、照射条件の設定などの考え方及び手順が示されている。</p>

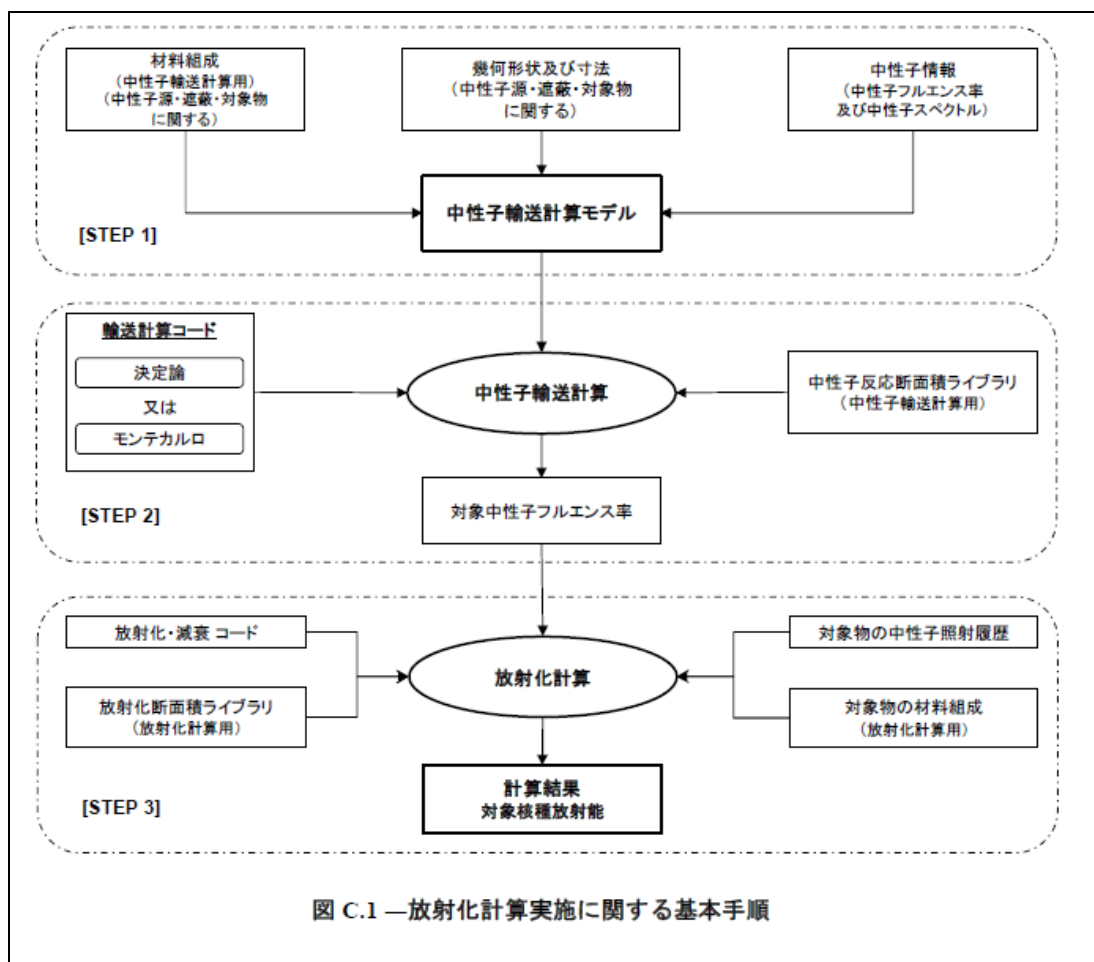


図 C.1 —放射化計算実施に関する基本手順

C.3 線量率測定による検証，調整

ISO16966:2013 の Annex B には，必要に応じた，線量率測定による放射化計算結果の補正などの考え方が示されている。

(2) 検討の結果

①点推定法は、「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。」と規定している。

ここでの「適切なパラメータ」及び「保守的なパラメータ」について，日本原子力学会は，以下のように説明している³⁶。

放射化計算に適用する適切なパラメータ及び保守的なパラメータは，標準 6.1.2.2.3 及び 6.1.2.4 に記載しておりますように，それぞれ次のようになります。

³⁶ 第3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参考資料 3-1 回答 2

区分	評価条件	平均放射能濃度の評価	最大放射能濃度の評価
適切なパラメータ ¹⁾	代表位置での設定による評価	—	評価対象とする放射化金属等の代表とできる位置 ²⁾ が選択できる場合に、その位置でのパラメータで設定する。
	平均的条件での設定による評価	各パラメータの平均値を適用する。	—
保守的なパラメータ ¹⁾	保守的条件での設定による評価	—	評価対象とする放射化金属等の中性子条件、照射条件、元素条件の最大値、又は信頼上限値を適用する。

注 1) パラメータとは、放射化計算に入力する材料仕様、中性子条件及び照射条件

注 2) 代表とできる位置の例：チャンネルボックスの中央位置、制御棒の先端位置

日本原子力学会は、「適切なパラメータ」として、「評価対象とする放射化金属等の代表とできる位置におけるパラメータ」又は「平均的な条件とできる各パラメータの平均値を適用したパラメータ」の2種類を指すとしているが、それぞれをどのように使い分けるのかを示していない。一方、「保守的なパラメータ」としては、「評価対象とする放射化金属等の中性子条件、照射条件、元素条件の最大値、又は信頼上限値を適用する」としている。

放射能濃度決定標準は、最大放射能濃度と総放射能量の評価方法を規定しているとのことであるが、それぞれの規定がどちらを指しているのかは判別できない。「適切な」の用語は、「適切な代表的条件」、「適切な放射化計算」、「適切な代表値（又は範囲）」、「適切な中性子条件」等、多数用いられている。このため、最大放射能濃度と総放射能量の評価方法それぞれについて技術評価することは困難である。

被規制者より、「技術評価を希望する学協会規格について」³⁷⁾において「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」の審査³⁸⁾に用いるとの説明があったことから、技術評価は、最大放射能濃度の評価方法について対象とすることとし、総放射能量の評価方法については、今後の改定において、最大放射能濃度の評価方法と整理し規定されてから技術評価することとする。

また、「適切な代表的条件」、「適切な放射化計算」、「適切な代表値（又は範囲）」、「適切な中性子条件」等は、「保守的な代表的条件」、「保守的な放射化計算」、「適保守的な代表値（又は範囲）」、「保守的な中性子条件」等と読み替える。

- ②ISO16966:2013の「Annex B(informative) Suggested procedure for the point method for activation calculation」(仮訳：(参考) 点推定法による放射化計算の推奨手順)には、放射化計算に必要な諸条件の設定の考え方及び手順並びに計算コードが示され

³⁷⁾ 第16回新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合資料16-1

³⁸⁾ 埋設事業者が定める保安規定のうち保安規定のうち廃棄物受け入れ基準(回答待ち)WAC及び廃棄物埋設申請書(廃棄体)の審査

ているが推奨事項であり、それ以外の手順を制限するものではない。「附属書 C」には、複数箇所 ISO16966:2013 の Annex B が参照されているが、当該文献の何を参照しているかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している³⁹。

ISO 標準の Annex B 全体が適用対象であり、特定の部分を念頭に参照するとしたわけではありません。また、ISO 標準の詳細内容については、転載許諾の制限で、現段階では学会として内容の詳細を示すことが出来ないため、原子力規制庁殿にて当該標準を参照願います。

具体的な手法を規定しているものではないことから、ISO16966:2013 Annex B は技術評価対象外とする。

- ③点推定法は理論計算法の一つとされているが、「C.3 線量率測定による検証，調整」に「ISO16966:2013 の Annex B には，必要に応じた，線量率測定による放射化計算結果の補正などの考え方が示されている。」とある。線量率測定による放射化計算結果の補正について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁴⁰。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件 追而

³⁹ 第3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資料 3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 3

⁴⁰ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 17

4. 3. 3 区間推定法

区間推定法の種類については「5. 2. 3. 1 区間推定法の種類」及び注記として「附属書 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」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>5. 2. 3 区間推定法</p> <p>5. 2. 3. 1 区間推定法の種類</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。この方法は、代表的又は平均的な値及び分布を提供する。</p> <p>幾つかの種類の放射化金属等の放射能濃度は、燃料の燃焼度などと密接な関係をもつ。</p> <p>一旦、平衡状態に達すると、同じ放射化金属等の同じ部位の元素組成、中性子条件及び照射条件は同じであることから、生成された各々の放射性核種は一定の濃度比率をもつ。</p> <p>原子炉中の固定された放射化金属等（例 原子炉圧力容器）は、起源元素の成分条件（以下、元素成分条件という。）及び照射条件が同じで、原子炉での水平位置・垂直位置の設置部位に依存する中性子フルエンス率だけが異なる。</p> <p>このため、次の 3 種類の理論計算法が区間推定法として、適用できる。</p> <ul style="list-style-type: none">— 換算係数法— 濃度比法— 濃度分布評価法 <p>注記 詳細は、附属書 D 参照。</p>
<p>D. 1 区間推定法</p> <p>D. 1. 1 区間推定法の種類</p> <p>放射化金属等の内部の放射能濃度は、燃料の燃焼度と密接な関係をもつ点、放射化金属等の同一部位で生成した放射性核種の濃度の比は、元素成分条件及び照射条件が同じことから一定条件にある点、並びに炉内で固定され設置された放射化金属等は元素成分条件及び照射条件が同じで、部位による中性子条件だけが異なる点から、これらを考慮した表 D. 1 に示す下記の代表的な区間推定法が放射能濃度分布の評価方法として適用できる。</p> <ul style="list-style-type: none">— 換算係数法— 濃度比法— 濃度分布評価法

注：表 D. 1 は添付資料参照

(2) 検討の結果

①「5. 2. 3. 1 区間推定法の種類」には、換算係数法、濃度比法、濃度分布評価法の 3 種類が記載されている。

換算係数法は、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核種の生成因子である燃料の燃焼度などの管理指標の値から評価する方法、濃度比法は、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、計算により求めた濃度比に、測定又は計算により求めた Key 核種 (Co-60 等) の放射能濃度を乗じて対象核種の放射能濃度を評価する方法、濃度分布評価法は、同一の照射時間及び材料組成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を評価する方法としている。

ここで、「表 D.1 各区分推定法の基本的な特徴及び適用対象放射化金属等」には、三つの手法について、代表的な評価対象とする放射化金属等の種類がそれぞれ記載されている。三つの手法は原理的には放射化金属等であれば評価対象とする放射化金属等の種類によらず適用できるものと想定される。

対象となる放射化金属等が異なることについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁴¹。

いずれの手法でも、実際の運用段階における入力条件の設定において、不確定性があるものは、十分な保守性をもって設定するため、保守的な結果によって評価できる方法となっています。

また、同一の放射化金属等を三つの手法で計算した場合の評価結果の同等性について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁴²。

濃度比法、換算係数法及び濃度分布評価法の 3 つの区分推定法は、下表に示しますように、それぞれの特徴である下記の点を踏まえた最も適性を示す放射化金属への適用が望ましいと考えます。

- ・ 濃度比法：同時に中性子照射され、生成した核種間の濃度比は一定性を示す放射化物放射化物への適性を示す。
- ・ 換算係数法：燃料の燃焼度などと密接な関係性を示す放射化物への適性を示す。
- ・ 濃度分布評価法：同一の照射時間、材料組成で、中性子分布だけが異なる放射化物への適性を示す。

なお、各手法の個々の放射化計算自体は、点推定法と同じ（ただし、恣意的な入力条件でないように各条件をランダムサンプリングで設定）であり、個々の計算結果は、同じ結果を使用します。

区分推定法は、その多数の放射化計算の結果を使用して評価する方法（比で評価する、管理指標との係数で評価する、濃度分布で評価する）が異なるだけです。

したがって、各手法を選択する場合においては、「判断基準」と言うより、より合理的に放射能濃度を評価する観点で選択するため、次表に示します評価方法ごとの特徴、適する対象及び適用条件を踏まえた評価対象の具体例が考えられます。さらに、いずれの手法でも、入力条件の設定において、不確定性があるものは、十分な保守性をもって設定するため、保守的な結果をもって評価できる方法となっています。

⁴¹ 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資料 2-1-1 回答 8

⁴² 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資料 2-1-1 回答 10

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)
基礎データ模式図			
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) 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
適用条件 ³⁾	①評価対象とする切断等が行われた機器/機材を廃棄体に収納した状態での放射能濃度の評価に適用する。 ②廃棄体と対象放射化金属等との連関管理が出来ること。	①燃料の燃焼度、原子炉内での中性子照射量の管理記録が示せる燃料及び燃焼制御に使用している機器/機材の放射能濃度の評価に適用する。 ②燃料の燃焼度又は照射量と対象放射化金属等との連関記録が示せること。	①解体する大型の機器、機材全体の放射能濃度の評価に適用する。 ②機器/機材が、部分的に交換されていないこと及び炉内での移動が無いこと。
適する評価対象の具体例 ³⁾	BWR：多数発生する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 (CRD ガイドチューブなど)、大型の放射化物 (シュラウド、圧力容器 ²⁾ 、上部格子板、炉心支持板) PWR：多数発生する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 (制御棒クラスタ案内管など)、大型の解体廃棄物 (圧力容器、炉心槽、熱遮へい体、バップル、下部炉心支持板)	BWR：燃焼度との関係が強いチャンネルボックス、中性子照射量との関係が強い制御棒 PWR：燃焼度との関係が強いバーナブルポイズン、中性子照射量との関係が強い制御棒	BWR：大型の固定されたシュラウド、圧力容器、格子板、支持板 PWR：大型の固定された圧力容器、炉心槽、熱遮へい体、炉心バップル、支持板

- 注1 換算係数法の模式図では、燃焼度ごとの個々の計算結果を評価した場合で例示している。
- 注2 圧力容器などは、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である。
- 注3 適用条件及び具体例は、標準中に具体的には示していないが、標準はこれらを踏まえている。

しかしながら、それぞれの方法の適用条件については、放射能濃度決定標準には規定されていない。また、評価結果の同等性やそれぞれの評価結果の保守性についても示されていない。例えば、「表 D. 1—各区間推定法の基本的な特徴及び適用対象放射化金属等」には、「代表的な廃棄物の種類」として、例えばチャンネルボックスについては「換算係数法」及び「濃度比法」が適用可能とされている。「濃度比法」と「換算係数法」の放射化計算の結果の同等性について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁴³。

(回答待ち)

また、「放射能濃度の計算結果を使用した評価の方法」は同じではないことから、同じ計算結果(核種の放射能濃度)を用いて「換算係数法」及び「濃度比法」で評価した場合、どの程度の差が出るのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁴⁴。

(回答待ち)

- ②同一の対象物に対してそれぞれの手法を適用した際の評価結果の同等性について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁴⁵。

「換算係数法」、「濃度比法」も、適用する個々の放射化計算は、入力用設定分布(「入力用基礎データベースに基づき保守的に設定した分布」)から、ランダムサンプリングで選定した入力条件を用いて「点推定法」と同じ理論計算で求めるものです。

このため、区間推定法は、この点推定法(ただし、入力条件はランダムに選定した条件)による計算を多数行った結果ですので、「換算係数法」、「濃度比法」とも同じ計算結果(核種の放射能濃度)がベースとなります。

この計算結果を用いて、評価対象核種と燃焼度との換算係数、又は評価対象核種とKey核種(例 Co-60、Cs-137)との濃度比で評価する方法が区間推定法で、それぞれの評価方法の特徴(例 運転管理データを利用、非破壊測定結果を利用)を踏まえて選択するものです。

すなわち、下表に示すように、両者は同じ計算結果を使用して放射能濃度を評価しているものです。

⁴³ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答3(2)

⁴⁴ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答3(1)

⁴⁵ 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資料2-1-1 回答8

理論的計算法の入力条件設定から廃棄体の放射能濃度の決定までの流れと保守性

理論的方法	点推定法	区間推定法	
		換算係数法	濃度比法
入力条件の設定	代表位置 (例 最大を示す位置) の、中性子、照射条件及び元素 (例 最大値) で設定する。	入力用設定分布から「ランダムに選択した位置での中性子、照射条件」に加え、入力用設定分布から「ランダム抽出した元素条件」を繰り返し設定する (必要数量に達するまで)。	
放射化金属等の各位置における放射能濃度の計算結果	1回の放射化計算の結果である放射能濃度が得られる。	各入力条件での放射化計算の結果 (上記の必要数量の放射能濃度の結果) が得られる。なお、計算方法は、点推定法と同じ。	
放射能濃度の計算結果を使用した評価	—	上記の複数の放射能濃度の計算結果を使用して、放射能濃度と管理指標 (例 燃焼度) との「換算係数」を評価、設定する。	上記の複数の放射能濃度の計算結果を使用して、評価核種と Key 核種の「濃度比」を評価、設定する。
廃棄体の放射能濃度の決定	1回の放射化計算の結果を廃棄体の放射能濃度として、そのまま適用する。	廃棄体に収納した放射化金属等の管理指標 (例 燃焼度) に上記「換算係数」を乗じて、放射能濃度を決定する。	放射化金属等を収納した廃棄体の Key 核種を非破壊測定、又は放射化計算結果の集積結果に、上記「濃度比」を乗じて、放射能濃度を決定する。
保守性	・入力データごとの最大値などの適用	・入力データごとの保守性の適用 ・換算係数の評価・決定における保守性の適用 ・燃焼度に関する保守性	・入力データごとの保守性の適用 ・濃度比に評価・決定における保守性の適用 ・Key 核種濃度非破壊測定結果

(3) 適用に当たっての条件

追而

4. 3. 4 換算係数法

区間推定法のうちの換算係数法については「5. 2. 3. 2 換算係数法」及び注記として「附属書 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」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>5. 2. 3. 2 換算係数法</p> <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。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> <p>注記 詳細は、附属書 D 参照。</p>
<p>D. 1. 2 換算係数法</p> <p>換算係数法のご概念は、放射性核種の生成量が中性子の累積照射量に比例することに基づく方法である。</p> <p>中性子の累積照射量（中性子の照射量又は燃焼度、運転日数など）などを管理指標として使用し、管理指標に比例する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決定できる。</p> <p>具体的には対象物における代表的、又は保守的な放射化計算条件を用いた計算によって、管理指標の値と放射能濃度との関係を換算係数として評価し、換算係数と対象とする放射化金属等の管理指標の値との積から放射能濃度を決定する方法である。</p> <p>したがって、この方法は、評価対象とする放射化金属等に対する照射量と比例する因子とが原子力発電所などで管理され管理指標として利用できること、又は対象物の代表的な、若しくは保守的な中性子フルエンス率が設定できることが適用の条件となる。</p> <p>管理指標の例として、次のものが挙げられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> － 制御棒、原子炉容器又は他の炉内構造物の累積照射時間。 － BWR のチャンネルボックスの累積照射時間、又は燃料集合体の燃焼度。 <p>放射化によって生成する核種の放射能は、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、次の式(1)のように近似的（中性子エネルギー群に単純化）に表わされる。</p> $A = \sigma \times N \times \Phi \times t \times \lambda \dots\dots\dots (1)$ <p>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)</p> <p>ここで、評価対象とする放射化金属等の部位を考えると、放射化断面積 (σ)、親核種の原子数密度 (N) は一定とみなすことができ、崩壊定数 (λ) も定数であることから、放射能濃度は中性子の照射量 ($\Phi \times t$) と比例関係にある。</p> <p>さらに、評価対象物の中性子の照射量 ($\Phi \times t$) 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比例係数を換算係</p>

数 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。

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

ここに、 R : 換算係数
 B : 管理指標 (例えば、燃焼度)

上記のように、放射能濃度は、換算係数 R と管理指標の値 B との積として表わすことができる。したがって、換算係数 R をあらかじめ評価しておけば、管理指標の値から評価対象とする放射化金属等の放射能濃度を求めることができる。

(2) 検討の結果

換算係数法は、燃焼度など放射能濃度と相関の高い管理指標を用いることで、対象物の放射能濃度を管理指標と換算係数との積として求める方法である。

- ① 「D. 1.2 換算係数法」において、「したがって、この方法は、評価対象とする放射化金属等に対する照射量と比例する因子とが原子力発電所などで管理され管理指標として利用できること、又は対象物の代表的な、若しくは保守的な中性子フルエンス率が設定できることが適用の条件となる。」と規定している。

上記下線部の「又は」とする理由について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁴⁶。

換算係数法による評価では、下記のいずれかの管理指標を適用して評価することが想定されます。管理指標は評価対象物に応じて選択するため、「又は」で表現したものです。

- ① 「対象物」に対して「照射量」と「比例する因子」が管理され「管理指標として利用できます」

⇒ 例えば、発電所ではチャンネルボックス1体毎に、照射量と比例する「燃焼度」を管理しています。この場合、管理指標 B は「燃焼度」になります。(主な適用対象：チャンネルボックス、制御棒)

もう一方は、

- ② (個々の対象物に対して「照射量」と「比例する因子」とが管理されていない状態であったとしても)「対象物」の代表的な、若しくは保守的なフルエンス率 (Φ) を設定できれば、照射時間 (t) から「照射量」を決定できます。

⇒ 中性子照射期間中配置の変更がなく、中性子照射期間中の代表的、若しくは保守的な中性子フルエンス率が設定しやすいものに適用します。この場合、管理指標 B は「運転期間」になります (主な適用対象：シュラウド、核計装管)

換算係数法の評価式： $A=R \times B$

換算係数 R : 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比例係数

管理指標 B : 評価対象物の中性子の照射量 ($\Phi \times t$) に比例する因子

- ② 管理指標として、中性子の照射量 (中性子フルエンス率と中性子の照射時間の積) に比例する因子を用いることが示されており、例として燃焼度が挙げられている。

⁴⁶ 第3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参考資料3-1 回答4(1)

想定されるその他の管理指標の例示について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁴⁷。

放射能濃度を求めるための管理指標には、燃焼度の他に、累積照射時間、照射量があります。集合体平均燃焼度と、中性子の照射量との換算係数に関して、それぞれを管理指標として評価した一例を附属書Jの図J.4及び図J.5に示しています。

また、これらの管理指標は、原子力発電所のプロセス計算機によって管理されており、信頼できる管理指標です。

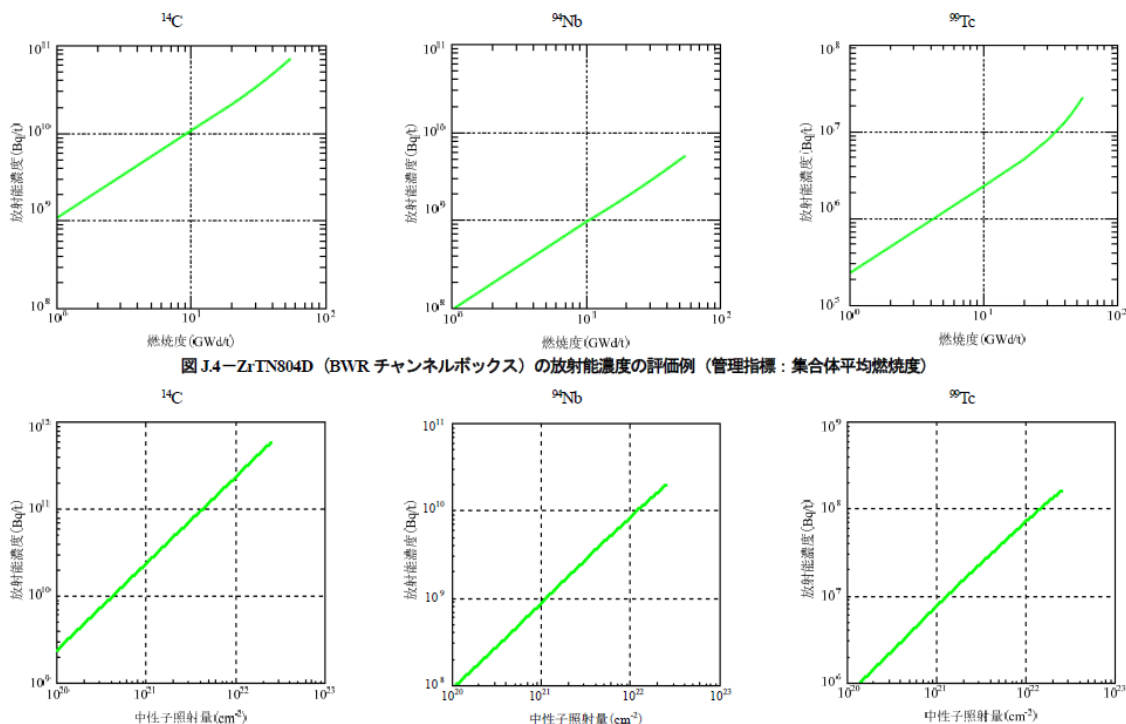


図 J.5—SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) の放射能濃度の評価例 (管理指標: 中性子の照射量)

放射化金属等の放射能濃度を、放射能濃度と相関のある管理指標と換算係数との積で評価することは妥当と判断する。

- ③ 「D.1.2 換算係数法」の(2)式は、換算係数に管理指標を乗じることで放射能濃度を算出するとしているが、管理指標としては、累積照射時間、燃焼度が例として示されている。

対象物の放射能濃度に影響を与える管理指標が複数ある場合の換算係数R及び変数Bの設定方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁴⁸。

管理指標として、対象の放射能濃度に影響を与える複数の因子がある場合、つまり、燃焼度と累積照射時間、照射量と累積照射時間がある場合は、情報量

⁴⁷ 第3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参考資料3-1 回答4(2)

⁴⁸ 第3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参考資料3-1 回答4(4)

が多い燃焼度、照射量を利用します。

例えば、制御棒の評価事例においては、管理指標として照射量を利用します。換算係数法の評価式は、以下のとおりとなります。

$$A = R \times B \text{ (換算係数} \times \text{管理指標)}$$

$$R = N \times \sigma \times \lambda$$

$$B = \phi \times t$$

N : 親核種の照射前の原子数密度 (cm^{-3})

σ : 親核種の放射化断面積 (cm^2)

λ : 生成核種の崩壊定数 (s^{-1})

$\phi \times t$: 中性子照射量 (n/cm^2)

ここで、照射量 ($\phi \times t$) については、管理指標として、制御棒の寿命の観点から、各サイクルでの制御棒の配置位置、制御棒の挿入位置(挿入・引抜き)に基づく制御棒先端部の中性子照射量が、中性子輸送計算/拡散計算によって算出され管理されています。また、放射化断面積 σ については、制御棒の挿入・引き抜きにより断面積が変動しますが、Dバンク位置(定格出力時の挿入位置)又はAROバンク位置(定格出力時の全引抜き位置)のいずれかのうち、生成核種に対する反応断面積が大きくなる方にて代表設定します。

- 燃焼度は累積照射時間に比例すると想定されますが、例えば Co-60 放射能濃度を、累積照射時間を管理指標として求めた場合と、燃焼度を管理指標として求めた場合との評価の同等性について、評価結果等を用いて説明してください。

日本原子力学会は、②において、管理指標として「集合体平均燃焼度」及び「中性子の照射量」ととしているが、③では、管理手法として「累積照射時間」としている。管理指標として適用可能なものを整理し、規定することを要望する。

- ④換算係数法は、炉心内での配置が変動するものも対象にしているが、燃焼度(燃料集合体あたりの核分裂反応(熱出力)の積分値をウラン燃料重量で除した値)が同じでも中性子スペクトルが異なれば、放射化によって生成される核種量も異なる。炉心核的性能計算において、どのような場合に中性子スペクトルを同じものとみなすことできるかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁴⁹。

炉心内での配置が変動する対象物に換算係数法を適用する場合の中性子条件は、附属書Jの表J.1に示すように、「移動及び中性子照射期間中による中性子フルエンス率・中性子スペクトルの変化に対し、評価対象廃棄物自身における平均的な中性子フルエンス率・中性子スペクトル分布を設定」するか、又は「評価対象廃棄物自身の全領域に一つの保守的な(放射能濃度評価結果が大きくなるような)代表値を設定」することになります。

前者の設定の例として、附属書Jの表J.6に炉心内の配置の移動やフルエンス率・スペクトルの変動を考慮して設定したBWRチャンネルボックスの中性子条件を示しています。

この中性子条件の設定は、附属書JのJ.2.2.2.1に示しており、炉心内の配置位置の移動を考慮して炉心平均の軸方向出力及びボイド率分布を算出し、そ

⁴⁹ 第3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資料 3-1-1「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 1(1)

れらを用いてチャンネルボックスの軸方向位置ごとに単位燃料集合体核特性計算コードによってチャンネルボックス位置の中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定します。

炉心内の中性子スペクトルは、炉心最外周では熱中性子に対する高速中性子、熱外中性子の比率が下がるため、同じ燃焼度でも最外周に配置したチャンネルボックスの放射化放射エネルギーは炉心中央部と比較して小さくなります。ただし炉心内の配置位置による中性子スペクトルの影響は附属書 G の図 G.6～図 G.7 に示すとおり炉心中央部と最外周部で 2 倍以内であることから放射化放射エネルギーへの影響は小さく、炉心平均の中性子条件を適用することは問題ありません。

なお、附属書 J に示した中性子条件は計算例であり、燃料タイプや燃料格子が異なる場合には、炉心配置位置によるスペクトルへの影響を確認し、平均的な中性子条件を適用可能か確認する必要があります。

表 J.1—換算係数を用いる場合における中性子条件設定の考え方

評価対象廃棄物の配置位置		評価対象廃棄物の例	中性子条件の設定の考え方
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の移動のあるもの	(BWR) チャンネルボックス (PWR) バーナブルポイズン, プラギングデバイス など	移動及び中性子照射期間中による中性子フルエンス率・中性子スペクトルの変化に対し、評価対象廃棄物自身における平均的な中性子フルエンス率・中性子スペクトル分布を設定するか、又は評価対象廃棄物自身の全領域に一つの保守的 ^{b)} な(放射能濃度評価結果が大きくなるような)代表値を設定する。
	燃焼制御のための挿入位置などの配置位置が変化するもの	(BWR) 制御棒 (PWR) 制御棒 ^{a)} など	同上
固定	中性子照射期間中は、配置位置の変化がないもの	(BWR) シュラウド, 核計装管, 上部格子板 (PWR) 炉心槽, 上部炉心板 など	中性子照射期間中の中性子フルエンス率・中性子スペクトルの変化に対し、評価対象廃棄物における平均的な中性子フルエンス率・中性子スペクトル分布を設定するか、又は評価対象廃棄物自身の全領域に一つの保守的 ^{b)} な代表値を設定する。
注^{a)} 通常、PWR では、運転中に挿入位置の移動は、行われませんが、運転サイクルごとに挿入位置の変更がある。 注^{b)} 中性子スペクトルの保守性は、中深度処分対象核種の評価に対しての保守性。			

表 J. 6—BWR チャンネルボックスの評価条件(45GWd/t)

軸方向位置 ^{a)}	熱中性子フルエンス率 (n/cm ² /s)	中性子スペクトルインデックス ^{b)}		
		熱群 (F_T)	熱外群 (F_R)	高速群 (F_F)
1	3.0×10^{13}	0.64	1.0	0.25
2	4.2×10^{13}	0.64	2.0	0.51
3	5.6×10^{13}	0.64	2.0	0.50
4	6.0×10^{13}	0.64	2.0	0.51
5	6.2×10^{13}	0.64	2.1	0.53
6	6.2×10^{13}	0.64	2.2	0.56
7	6.1×10^{13}	0.64	2.4	0.59
8	6.1×10^{13}	0.64	2.5	0.62
9	6.1×10^{13}	0.64	2.7	0.66
10	6.0×10^{13}	0.64	2.8	0.70
11	5.9×10^{13}	0.64	3.0	0.74
12	6.0×10^{13}	0.64	3.1	0.76
13	5.9×10^{13}	0.64	3.2	0.78
14	5.6×10^{13}	0.64	3.5	0.85
15	5.7×10^{13}	0.64	3.5	0.84
16	5.6×10^{13}	0.64	3.3	0.81
17	5.3×10^{13}	0.64	3.6	0.87
18	5.4×10^{13}	0.64	3.5	0.84
19	5.2×10^{13}	0.64	3.5	0.85
20	4.8×10^{13}	0.64	3.6	0.88
21	4.3×10^{13}	0.64	3.6	0.88
22	3.5×10^{13}	0.64	3.7	0.88
23	3.7×10^{13}	0.64	1.9	0.45
24	2.3×10^{13}	0.64	1.9	0.43

注^{a)} BWR チャンネルボックスの軸方向位置を 1 (炉心下部) から 24 に分割。
^{b)}

$$F_T = \sqrt{\frac{\pi T_0}{4 T}}, \quad F_R = \sum_{E_g \geq 0.625eV}^{E_g \leq 1.0MeV} \phi_g / \phi_{th}, \quad F_F = \sum_{E_g \geq 1.0MeV} \phi_g / \phi_{th}$$

ここに、

- F_T : 熱中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス (THERM)
- F_R : 熱外中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス (RES)
- F_F : 高速中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス (FAST)
- E_g : g 群のエネルギー (eV)
- T : 媒質の温度 (K)
- T_0 : 293.16 (K)
- ϕ_g : g 群の中性子フルエンス率 (n/cm²/s)
- ϕ_{th} : 熱群の中性子フルエンス率 (n/cm²/s)

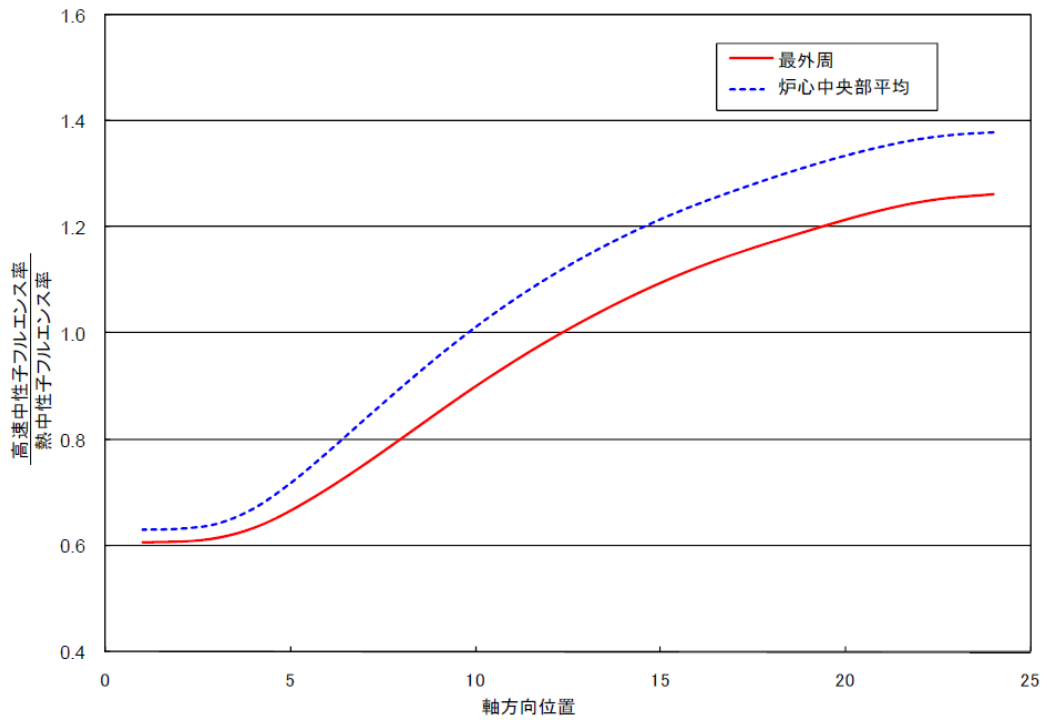


図 G.6—BWR チャンネルボックスでの高速中性子フルエンス率の熱中性子フルエンス率に対する比の例

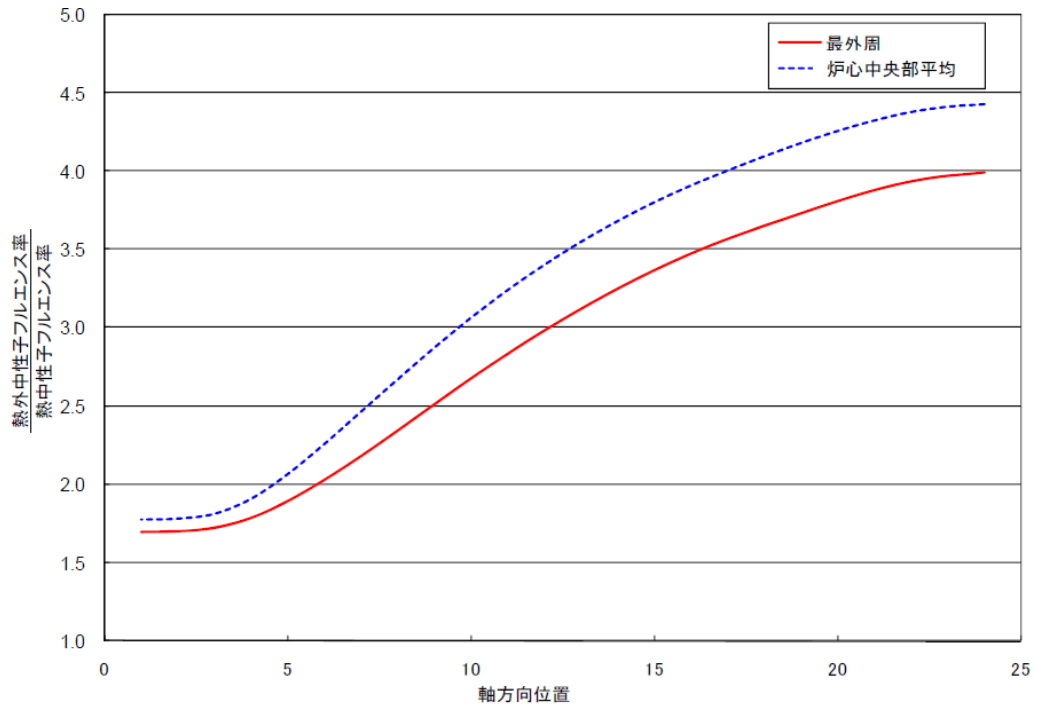


図 G.7—BWR チャンネルボックスでの熱外中性子フルエンス率の熱中性子フルエンス率に対する比の例

「附属書 J (参考) 換算係数を用いる場合の計算例」において、軸方向の中性子スペクトルの違いが反映されているが、径方向の違いがどのように反映されているかは示されていない。燃焼度が同じで中性子スペクトルが異なる場合、放射化放射能濃度が同一とみなせる中性子スペクトルの範囲について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁵⁰。

炉心内の中性子スペクトルは、炉心最外周では熱中性子に対する高速中性子、熱外中性子の比率が下がるため、同じ燃焼度でも最外周に配置したチャンネルボックスの放射化放射能量は炉心中央部と比較して小さくなります。ただし炉心内の配置位置による中性子スペクトルの影響は附属書 G の図 G. 6～図 G. 7 に示すとおり炉心中央部と最外周部で 2 倍以内であることから放射化放射能への影響は小さく、炉心平均の中性子条件を適用することは問題ありません。

- ⑤ 「表 I. 11-ZrTN804D(BWR チャンネルボックスの本体)の配置位置の設定」に示されたローテーションの種類は、1980 年代後半以降に採用されたもの⁵¹であり、それ以前は外周部に新燃料を配置していた可能性がある。1980 年代後半以前に発生したチャンネルボックスの評価方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁵²。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

追而

⁵⁰ 第 3 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資料 3-1-1 「適用範囲と理論的方法の特徴」 回答 1(2)

⁵¹ BWR 新型炉心燃料の適用と開発, 日立評論 Vol. 70, No. 4, (1988-4)

⁵² 第●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参考資料●-● 「適用範囲と理論的方法の特徴」 回答 4

4. 3. 5 濃度比法

区間推定法のうちの濃度比法については「5.2.3.3 濃度比法」及び注記として「附属書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」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>5.2.3.3 濃度比法</p> <p>放射化金属等の特定部位では、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。</p> <p>同じ種類の複数の放射化金属等の複数の部位の元素成分条件、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。</p> <p>注記 詳細は、附属書 D 参照。</p>
<p>D.1.3 濃度比法</p> <p>濃度比法の概念は、汚染した放射性廃棄物に適用されているスケーリングファクタ法と類似のものである。ただし、スケーリングファクタ法は、実際の汚染した放射性廃棄物の放射化学分析結果を用いた実証的方法であるのに対し、濃度比法は、対象とする放射化金属等の放射化に係る条件範囲（元素成分、中性子フルエンス率及び照射履歴）を網羅する放射化計算を行い、その計算結果を用いて難測定核種と Key 核種との濃度比を設定する理論的方法である。</p> <p>この考えは、評価対象とする放射化金属等の照射開始から照射終了までの期間において、放射化金属等の放射能濃度は経時的に変化しても、対象とする放射化金属等の各部位においては、同一元素組成、同一中性子フルエンス率及び同一照射履歴であることから、核種の濃度比は、基本的に一定であるとの考え方に基づくものである。このため、放射化計算によって対象とする放射化金属等の平均的な核種の濃度比を決定するには、廃棄物の照射条件（照射位置及び原子炉の運転条件）を考慮した範囲を放射化計算条件として設定する。</p> <p>したがって、対象とする放射化金属等の照射履歴（照射終了後の減衰含む）を考慮した平均的な難測定核種と Key 核種との濃度比を評価していることから、評価対象とする放射化金属等が特定されれば、中性子の照射履歴の詳細情報が明確でない場合でも、Key 核種濃度を測定すれば、適用できる方法である。</p>

(2) 検討の結果

濃度比法は、対象とする放射化金属等の放射化に係る条件範囲（元素成分、中性子フルエンス率及び照射履歴）の変動範囲を網羅する放射化計算を行い、その計算結果を用いて難測定核種と Key 核種の濃度比を設定する方法である。

- ① 「D.1.3 濃度比法」において、濃度比法は難測定核種と Key 核種の比を放射化計算により求める方法と規定されている。

濃度比を用いて廃棄物の放射能濃度をどのように求めるのかについて、日本原子力

学会は、以下のように説明している⁵³。

対象廃棄物の条件（元素、中性子、照射時間）範囲を網羅した放射化計算結果（スケーリングファクタ法のサンプリング・分析データに相当します）によって、評価対象核種と Key 核種（例えば、Co-60）の「濃度比」を評価し、廃棄体ごとの Key 核種の放射能濃度に、この評価した「濃度比」を乗じることによって、廃棄体の他の評価対象核種の放射能濃度を決定します。

また、Key 核種の放射能濃度を実測により求める場合は、「表 D. 1—各区分推定法の基本的な特徴及び適用対象放射化金属等」に記載する大型の評価対象物（シュラウド、圧力容器）の測定をどのように行うのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁵⁴。

廃棄体ごとの Key 核種の放射能濃度を決定する方法としては、次の 2 つの方法が考えられます。

- ① 切断した大型廃棄物を容器に収納した廃棄物（切断片ごと）の Key 核種の放射能濃度を理論計算によって決定する。（廃棄体に収納した廃棄物の履歴トレースが必要となります）
- ② 切断した大型廃棄物を収納した廃棄体の Key 核種の放射能濃度を廃棄体の非破壊外部測定によって決定する。

上記①の大型廃棄物を収納した容器とは廃棄体の容器のことであり、放射能濃度評価のために必要な廃棄体の設計情報は切断前の大型廃棄物の難測定核種と Key 核種の放射能濃度分布である。その放射能濃度分布から切断位置と収納容器への配分方法を検討することが重要であるが、適切な廃棄体ごとの評価を行うために必要な記録の種類及びその内容が示されていない。また、②の非破壊外部測定による Key 核種の放射能濃度評価は、廃棄体容器の材質、厚さ、遮へい材の有無、内部の線源分布等に依存するが、現時点において廃棄体の詳細な要件が示されていない。

したがって、切断した大型廃棄物を収納した廃棄体の Key 核種の放射能濃度を廃棄体の非破壊外部測定によって決定する方法については、技術評価の対象外とすることとし、複数の収納容器に分割配置する廃棄物に濃度比法を用いる場合は、切断前に廃棄物の難測定核種と Key 核種の放射能濃度分布を評価し、その放射能濃度分布から切断位置と収納容器への配分方法を検討することを適用に当たっての条件に付すこととする。

- ② 「D. 1. 3 濃度比法」において、「対象とする放射化金属等の各部位においては、同一元素組成、同一中性子フルエンス率及び同一照射履歴であることから、核種の濃度比は基本的に一定であるとの考え方に基づく」とされているが、中性子フルエンス率及び照射履歴は炉内での位置により異なると想定される。

中性子フルエンス率及び照射履歴を同一として扱ってよい範囲及びその理由について

⁵³ 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 資料 2-1-1 回答 9(1)

⁵⁴ 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 資料 2-1-1 回答 9(1)

て、日本原子力学会は、以下のように説明している⁵⁵。

ここでの「対象とする放射化金属等の各部位においては、同一元素組成、同一中性子フルエンス率、同一照射履歴」とは、放射化計算を行う選定位置における入力条件のことを示しており、1回の計算における同じ選定位置での放射化計算の入力条件は、対象物がローテーション（燃料と一緒に移動するチェンネルボックスは、燃料サイクルごとに炉内で移動すること）によって対象物の炉内の位置が変わっても、各炉内設置位置での照射履歴を集積した同じ中性子フルエンス率及び照射時間になります。

したがって、選定位置位での元素組成、中性子フルエンス率、照射時間は、同一となります。また、区間推定法では、都度、対象とする放射化金属等の評価位置を選択して、この計算手順を繰り返します。

なお、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。

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

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)

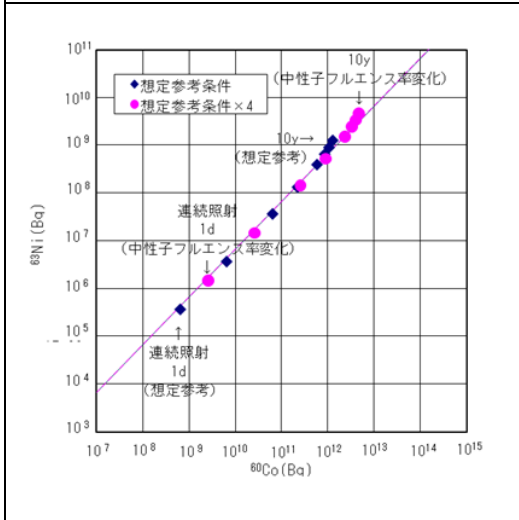
t : 中性子の照射時間 (s)

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 Key 核種との濃度比は、一定の定数で示すことができることとなります。

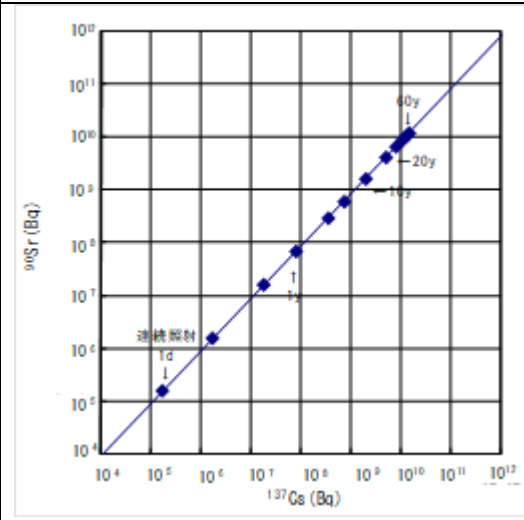
これらの結果によって評価する核種間の「濃度比」は、附属書B（下表に抜粋）に示すように、中性子フルエンス率及び照射時間の差異の影響のパラメータスタディの結果を踏まえると、放射能濃度への影響は大きいものの、濃度比への影響は小さいことがわかっており、中性子フルエンス率及び照射時間の差異の影響を受けず「濃度比」は一定となります。

⁵⁵ 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 資料 2-1-1 回答 9(2)

中性子フルエンス率の濃度比への影響
 図B.2より抜粋 (4倍の変化の影響)



照射時間の濃度比への影響
 図B.5より抜粋 (1日から60年間の影響)



- ③「評価する核種間の「濃度比」は、(中略) 中性子フルエンス率及び照射時間の差異の影響を受けず「濃度比」は一定となる。」について、「附属書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」に例示されている核種以外のマイナーな核種についても同様である根拠について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁵⁶。
 (回答待ち)

中性子フルエンス率が同一であっても、中性子スペクトルが異なると放射化断面積が変化すると想定される。中性子スペクトルが同一とみなせる範囲をどのように設定するのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁵⁷。

中性子スペクトルが同等は、平均的な炉心条件における中性子輸送計算結果から、炉心の径方向及び軸方向の放射化金属等の内部の中性子スペクトルに関して横並びに比較して評価します。中性子スペクトルのうち、特に放射化反応が起こることが多い熱群に着目し、また評価対象核種に高速群で生成する核種がある場合には高速群にも着目して、スペクトルの割合を確認し、スペクトルが同等とみなせる放射化金属等の範囲を設定します。

なお、同等とみなせる範囲については、中性子スペクトルの変化が大きくなる代表的な例として、附属書Bの図B.4「放射化計算結果への主な計算条件の影響評価結果 (放射化断面積の影響)」の脚注b)に示す、影響の程度が“小：2～3倍程度以内の差異を生む”を参考とします。中性子スペクトルの変化が大きくなる上記の例の範囲内において、評価上は保守側にAROバンクの放射化断面積を設定します。

⁵⁶ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答5

⁵⁷ 第3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資料3-1-1「適用範囲と理論的方法の特徴」回答2

$^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$	
解析結果 ^{a)}	
計算条件	<p>PWR 制御棒の次の条件を想定して重み付けした放射化断面積を利用して、放射化計算を実施。</p> <p>放射化断面積 1：ARO バンク位置を模擬 放射化断面積 2：D バンク位置を模擬</p>
影響の程度 ^{b)}	<p>放射能濃度への影響：小</p> <p>濃度比への影響：小</p>

注^{a)} 放射化計算コード：ORIGEN2, ライブラリ：JENDL Activation File [^{59}Co (n, γ) ^{60}Co], JENDL3.2 [^{62}Ni (n, γ) ^{63}Ni] シリーズ

注^{b)} 影響の程度は、“小：2～3 倍程度以内の差異を生む”を意味する。

**図 B. 4—放射化計算結果への主な計算条件の影響評価結果
(放射化断面積の影響)**

④難測定核種と Key 核種の比は、半減期の違いにより設定時から時間とともに変化していくと想定される。

放射化計算で求める濃度比から廃棄体の放射能濃度に換算する際に、上記の濃度比の変化をどのように考慮するのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁵⁸。

「濃度比」は、比較する核種間の半減期の差異によって、照射終了後の経過時間と共に変化します。このため、「濃度比」は、この照射後の減衰の影響を受けないよう放射化金属等の照射完了時点での放射化計算に統一することによって評価します。

なお、廃棄確認時の申請する各核種の放射能濃度は、まず Key 核種に関して半減期を考慮して減衰補正した値（例えば、非破壊測定して得られる Key 核種濃度を照射完了時点まで減衰補正した値に濃度比を乗じることによって評価対象核種の放射能濃度を評価）で評価し、この評価対象核種の放射能濃度を申請時点まで、再度減衰させた値で申請することになると想定されます。

「濃度比」は、この照射後の減衰の影響を受けないよう放射化金属等の照射完了時点での放射化計算に統一することによって評価」とあり、「表 D. 8—プラント寿命

⁵⁸ 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資料 2-1-1 回答 9(3)

中における中性子の照射時間及び照射停止時間の基本的考え方」の照射停止時間（原子炉供用期間中）の注記 a) には、「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。」とされている。

したがって、これを明確にするために、「5.2.3.3 濃度比法」において、「同じ種類の複数の放射化金属等の複数の部位の元素成分条件、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 核種の放射能濃度との相関関係を評価し、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。」に「この場合において、この照射後の減衰の影響を受けないよう放射化金属等の照射完了時点での放射化計算に統一すること。」を加える。

- ⑤ 「評価対象とする放射化金属等が特定されれば、中性子の照射履歴の詳細情報が明確でない場合でも、Key 核種濃度を測定すれば、適用できる」とあり、この条件が当てはまるのは照射履歴が濃度比を計算した際の照射履歴の範囲に収まる場合と想定される。

照射履歴の詳細情報が明らかでない場合に、濃度比法が適用できることについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁵⁹。

「評価対象とする放射化金属等が特定されれば、中性子の照射履歴の詳細情報が明らかでない場合でも、Key 核種濃度を測定すれば適用できる」とは、標準のこの文章の前段において、「対象とする放射化金属等の照射履歴（照射終了後の減衰含む）を考慮した平均的な難測定核種と Key 核種との濃度比を評価していることから」と示していますように、事前に区間推定法による評価を行った上で、適用しているものです。

このため、例えば、切断した容器に収納した「個々の放射化金属の切断片ごと」の詳細情報（切断片ごとの放射化金属等の種類、材質、部位（形状寸法含む）、中性子条件、照射条件、減衰条件）のいずれかが特定できなくとも、廃棄体に収納する「切断する前の放射化金属等」としての条件範囲の情報（種類、材質、中性子条件、照射条件、減衰条件の範囲）は把握できますので、区間推定法の計算に必要となる入力条件は設定できます。

したがって、この条件範囲を網羅した放射化計算によって得られた「濃度比」を使用して、かつ、廃棄体の Key 核種の放射能濃度を非破壊外部測定することによって、評価対象核種の放射能濃度を評価できることを意味しています。

- ⑤ 「附属書 I（参考）濃度比を用いる場合の計算例」における疑似乱数を使用した放射化計算用データの差校正方法については、「解説 6.2.3.2 疑似乱数を使用した放射化計算用データの作成方法」において、正規分布、対数正規分布、一様分布及び指数分布のいずれにおいてもデータ数は 40 点としている。データ数の妥当性について、日本原子力

⁵⁹ 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資料 2-1-1 回答 9(4)

学会は、以下のように説明している⁶⁰。

(回答待ち)

また、「解説 6.2.5 濃度比の決定方法」の「b)相関係数の安定性による充足数の評価方法」には、「相関係数が 0.6 以上の相関関係をもつデータ群であれば、40 点程度のデータを集積することで統計量は、十分安定するといえる。」とあるが、相関係数 0.6 以上で妥当とする理由について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁶¹。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

追而

⁶⁰ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 51

⁶¹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 53

4. 3. 6 濃度分布評価法

区間推定法のうちの濃度分布評価法については「5. 2. 3. 4 濃度分布評価法」及び注記として「附属書 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」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>5. 2. 3. 4 濃度分布評価法</p> <p>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による中性子フルエンス率だけが異なる。</p> <p>放射化金属等の各照射部位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> <p>注記 詳細は、附属書 D 参照。</p>
<p>D. 1. 4 濃度分布評価法</p> <p>濃度分布評価法は、放射化金属等ごとの放射能濃度を決定するのではなく、同一種類の複数の放射化金属等を一つのグループ（例えば、黒鉛ブロック全体を一つのグループとする）とし、そのグループに対して放射能濃度を決定する方法である。</p> <p>この方法における放射化計算方法は、基本的に個別の廃棄物の放射能濃度を計算する場合と同等であるが、評価の対象とする放射化金属等グループを代表する放射能濃度（例えば、平均放射能濃度）を保証できることが適用の前提となる。このため、そのグループ内の廃棄物について、計算条件（例えば、中性子フルエンス率）の変動範囲がある一定の範囲内となることが必要となる。</p> <p>この場合、計算条件の変動範囲が計算結果に与える影響が小さいことが明らかな条件については、複数の計算条件を設定せずに一つの値（代表的な値又は保守的な値）を設定できる。</p> <p>この考え方にに基づき、放射化金属等のグループの計算条件の変動範囲を考慮した複数の放射化計算を行い、計算結果の放射能濃度分布から放射能濃度の平均値などを求める。また、この法によって求める廃棄物グループの放射能濃度の平均値などの決定に当たっては、複数の放射化計算結果が一定の範囲内に安定して分布していることを評価し判断することが適切である。</p>

(2) 検討の結果

濃度分布評価法は、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対して、同一種類の複数の放射化金属等を一つのグループとして、計算条件（例えば、中性子フルエンス率）の変動範囲がある一定の範囲内となる場合に、放射化金属等グループを代表する放射能濃度を適用する方法としている。

- ① 「5. 2. 3. 4 濃度分布評価法」に、「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の中性子フルエンス率だけが異なる」とあるが、対象部位によっては中性子スペクトルの変動のケースも考えられ、その変動性を踏まえた放射化断面積の条件に影響する可能性が考えられる。中性子フ

ルエンス率だけとしている理由について日本原子力学会は次のように説明している⁶²。

中性子スペクトルの変動は、標準 6.1.2.3 b) 及び附属書 D の D.5.1 に示しますように放射化断面積に中性子スペクトルの特性を考慮して反映します。

したがって、標準 6.1.2.1 に示します放射化計算の入力条件としては、「元素条件」及び「照射条件」及び「中性子条件 (中性子フルエンス率・中性子スペクトル)」ですが、標準 5.2.3.4 では、放射化計算の入力条件の内、「元素条件」及び「照射条件」は一定で、かつ、中性子スペクトルは放射化断面積のパラメータに反映されますので、「中性子フルエンス率だけ」との表現としています。

例えば、BWR のチャンネルボックス及び PWR の制御棒では、放射化断面積への反映方法が使用する放射化計算コードによって、次のように異なります。

ORIGEN-S: 中性子スペクトルを表すインデックスによって、計算コードの内部にて放射化断面積を計算 (附属書 F の図 F.1 参照: BWR のチャンネルボックスの例)

ORIGEN2: 中性子スペクトルを考慮した放射化断面積を作成 (附属書 F の図 F.4 参照: PWR 制御棒の例)

このように、いずれの計算コードでも中性子スペクトルは、最終的に放射化断面積として考慮します。

⁶² 第 3 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参考資料 3-1 回答 3

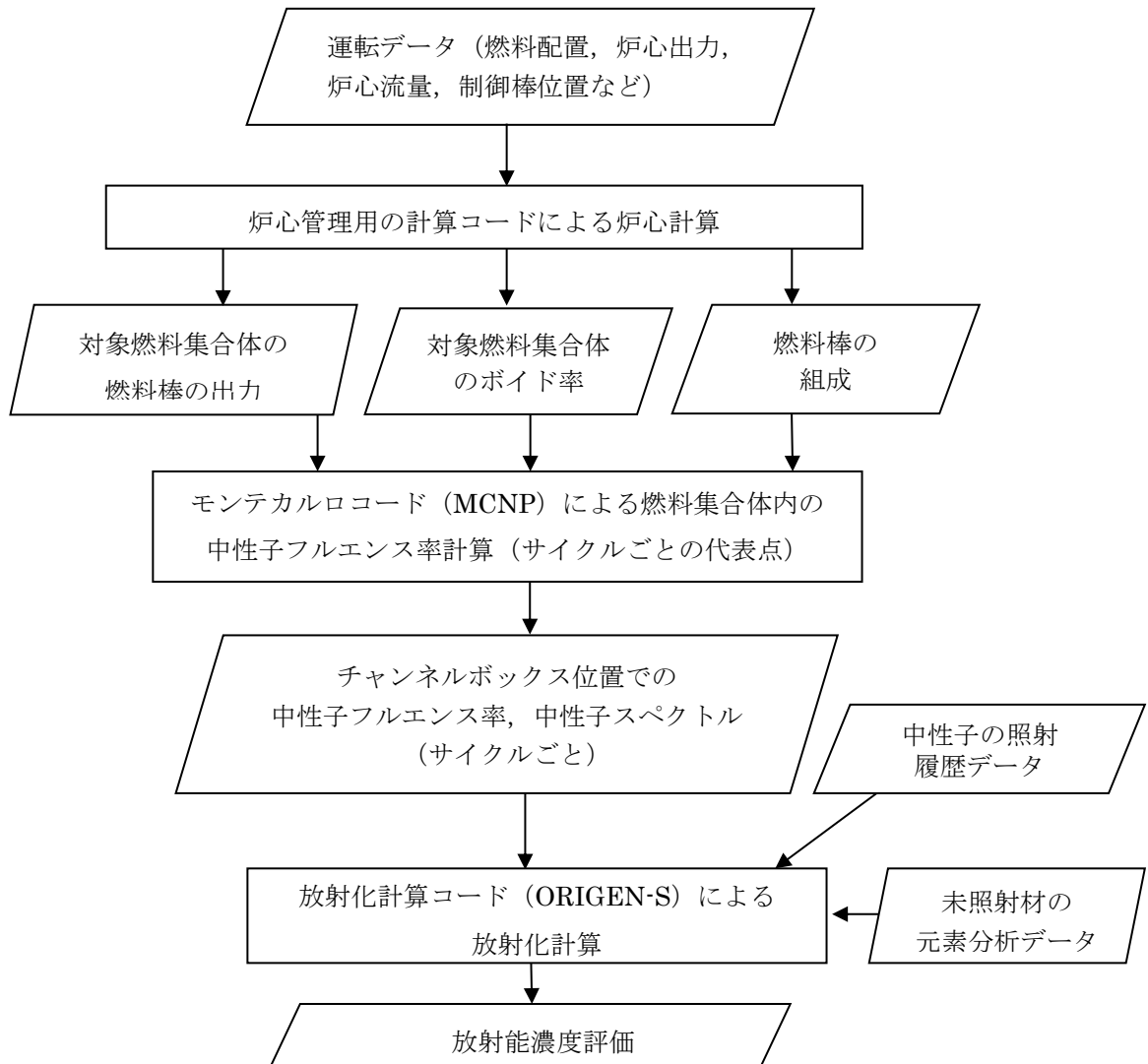


図 F.1-BWR チャンネルボックスの放射化計算フロー図

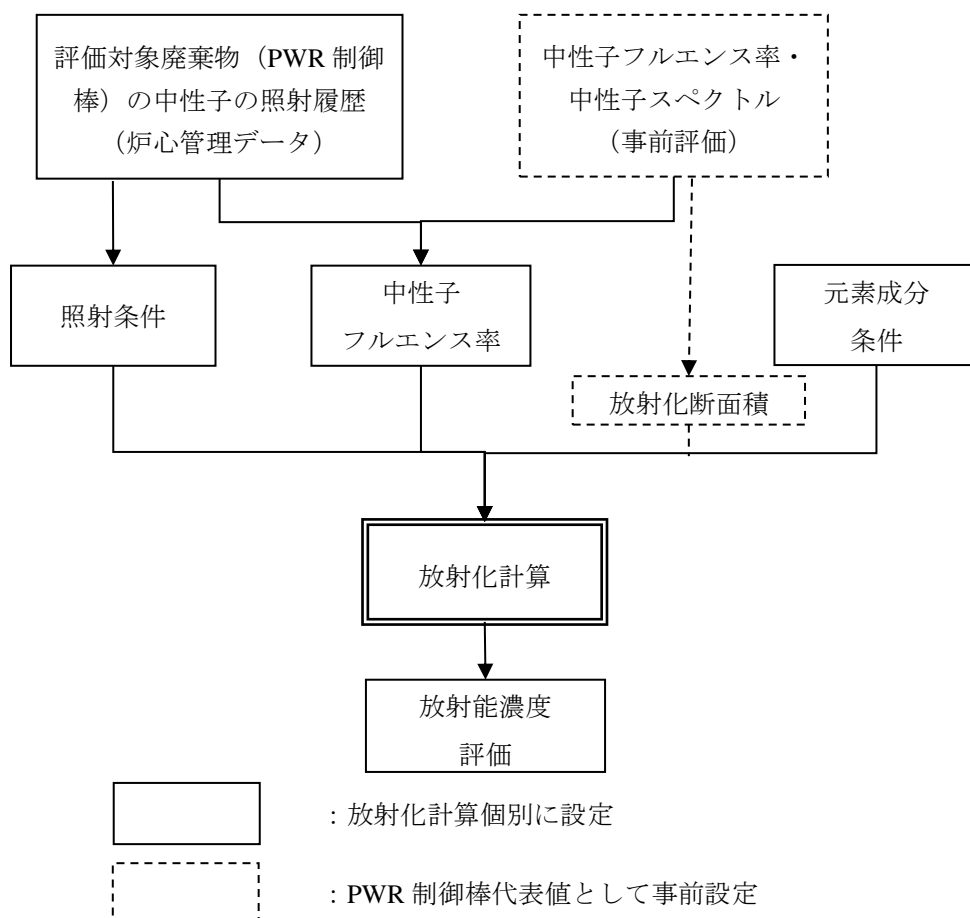


図 F. 4-PWR 制御棒の放射化計算フロー図

日本原子力学会は、ORIGEN-S コードでは中性子スペクトルを表すインデックスによりコード内部にて放射化断面積を作成していること、また、ORIGEN2 コードではユーザーが中性子スペクトルに基づいてあらかじめ 1 群放射化断面積をライブラリから選択あるいは作成するものであるから「中性子フルエンス率だけ」としている。したがって、濃度分布法においては、中性子スペクトルの特性が反映された放射化断面積が使用されることを条件に「中性子フルエンス率だけ」という表現を許容することとする。また、放射能濃度決定標準に規定する放射化計算は、ORIGEN コードの使用を前提としていることから、「放射化計算コード」は「ORIGEN コード」に読み替える。

廃棄体に適用する場合は、廃棄体に収納される廃棄物の放射能濃度が必要である。例示する黒鉛ブロック全体が一つの廃棄体として収納可能な場合は、一つのグループとして放射能濃度を決定することができるが、複数の廃棄体に分割して収納する場合は、分割された黒鉛ブロック集合体としての放射能濃度を評価する必要がある。また、複数

の廃棄体に分割収納するが黒鉛ブロックごとの放射能濃度の最大値を黒鉛ブロック全体の放射能濃度とする場合は、一つのグループとして放射能濃度を決定することができるが、低放射化の部位の放射能濃度を過剰に評価することになり、合理的ではない。

したがって、「5.2.3.4 濃度分布評価法」の「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。」は、「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、それぞれの廃棄体ごとに収納する放射化金属等の放射能濃度を評価する。」と読み替える。

- ②「D.1.4 濃度分布評価法」には、「この方法における放射化計算方法は、基本的に個別の廃棄物の放射能濃度を計算する場合と同等であるが、評価の対象とする放射化金属等のグループを代表する放射能濃度（例えば、平均放射能濃度）を保証できることが適用の前提となる。」と規定されている。

「放射能濃度を保証する」具体的な方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁶³。

そのグループの個々の廃棄物について、下記の条件にあることです。

- ・材料が同一規格仕様のものであること
- ・中性子フルエンス率がある一定の範囲内にあること
- ・中性子照射条件が同一であること

放射化計算方法において、評価の対象とする放射化金属等のグループを代表する放射能濃度（例えば、平均放射能濃度）が「材料が同一規格仕様のものであること」、「中性子フルエンス率がある一定の範囲内にあること」、「中性子照射条件が同一であること」が確認できていることを適用の前提条件とするとされているが、放射能濃度決定標準には、これらが規定されていない。

なお、「5.2.3.4 濃度分布評価法」では「炉内の固定された放射化金属等は、元素成分条件が同じ」ことを前提条件としているが、上記回答は「材料が同一規格仕様のものであること」としており、供用中や廃止措置期間中に付着する元素成分の影響が無視できない場合が考慮されていない。

したがって、「評価の対象とする放射化金属等のグループを代表する放射能濃度（例えば、平均放射能濃度）を保証できることが適用の前提となる。」に「この場合において、「評価の対象とする放射化金属等のグループを代表する放射能濃度（例えば、平均放射能濃度）が保証できること」とは、元素成分条件が同じであること、中性子フルエンス率がある一定の範囲内にあること及び中性子照射条件が同一であることをいう。」を加える。

「計算条件（例えば、中性子フルエンス率）の変動範囲がある一定の範囲内となるこ

⁶³ 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資料 2-1-1 回答 11(1)

とが必要となる。」と規定されており、「ある一定の範囲内」の意味について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁶⁴。

「ある一定の範囲内」とは、例えば中性子フルエンス率については、炉心を構成している機器、機材を評価対象とする場合には、その機器、機材の位置に応じた中性子フルエンス率が炉心計算等により評価されているという意味です。

この中性子フルエンス率は、炉心計算等によって評価され、最大値、最小値間の分布が確認できていることから、この状態を「ある一定の範囲内」にあるという表記にしています。

炉心計算等によって評価され、最大値、最小値間の分布が確認できている中性子フルエンス率の範囲を「ある一定の範囲内」とするとしているが、廃棄体に収納した廃棄物の放射能濃度を保証するには、「ある一定の範囲内」が当該廃棄物の計算条件の変動範囲と一致していることが重要である。

したがって、「このため、そのグループ内の廃棄物について、計算条件（例えば、中性子フルエンス率）の変動範囲がある一定の範囲内となることが必要となる。」は、「このため、計算条件（例えば、中性子フルエンス率）の変動範囲が個々の廃棄体内の当該廃棄物の計算条件の変動範囲と一致していることが必要となる。」と読み替える。

中性子フルエンス率は中性子スペクトルの影響を受けると想定される。例示された中性子フルエンス率以外の変動要因となりうる計算条件について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁶⁵。

対象とする固定された大型の炉内構造物に対して、変動要因となりうる計算条件としては、中性子フルエンス率だけであると考えております。

「計算条件の変動範囲が計算結果に与える影響が小さいことが明らかな条件については、複数の計算条件を設定せずに一つの値（代表的な値又は保守的な値）を設定できる。」と規定されているが、「計算結果に与える影響が小さいことが明らかな条件」について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁶⁶。

「計算結果に与える影響が小さいことが明らかな条件」としては、評価対象の機器又は部材を移動、交換していないことと考えます。

これによって、中性子照射条件（照射時間、停止時間）は、原子炉内に運転開始（試運転）から運転終了まで存在している種々の構造物に対して相違はなく、ひとつの値（同一の条件）を設定できます。

「計算条件（例えば、中性子フルエンス率）の変動範囲がある一定の範囲内となることが必要となる」とあるが、変動要因になりうるものは中性子フルエンス率だけであることから、「計算条件（例えば、中性子フルエンス率）の変動範囲」は「中性子フルエンス率の変動範囲が」と読み替える。

⁶⁴ 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資料 2-1-1 回答 11(2)

⁶⁵ 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資料 2-1-1 回答 11(3)

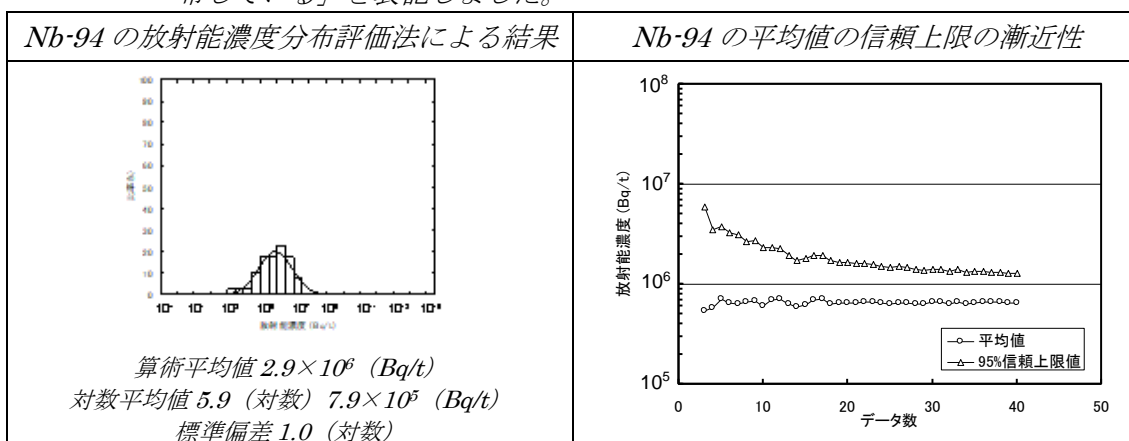
⁶⁶ 第2回中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法に係る日本原子力学会標準の技術評価に関する検討チーム資料 2-1-1 回答 11(3)

また、「計算結果に与える影響が小さいことが明らかな条件」は、評価対象の機器又は部材を移動、交換していないこととしていることから、「計算条件の変動範囲が計算結果に与える影響が小さいことが明らかな条件については、」は「計算条件の変動範囲が計算結果に与える影響が小さいことが明らかな条件（評価対象の機器又は部材を移動、交換していない場合）については、」と読み替える。

「複数の放射化計算結果が一定の範囲内に安定して分布していることを評価し判断することが適切である。」と規定しており、「安定して分布している」ことの評価方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁶⁷。

評価の対象とする放射化金属等の放射能濃度を評価した結果である放射能濃度分布を代表する放射能濃度（例えば、平均放射能濃度）の信頼性が、計算の回数（総数）を増加させても向上しないという意味です。

具体的には、放射化計算によって評価した放射化金属等の放射能濃度分布の平均放射能濃度の95%信頼上限値は、実施した放射化計算の数量に応じて変化し、計算の回数が少ないとより大きな値を示します。しかし、計算の回数を多くすることで「平均放射能濃度」と「平均放射能濃度の95%信頼上限値」の差は、下図（附属書Kの図K.5及びK.6から抜粋）に示しますように、差異が小さくなって漸近して一定の差の状態になります。この状態を「安定して分布している」と表記しました。



「安定して分布している」とは、「平均放射能濃度」と「平均放射能濃度の95%信頼上限値」の差が小さくなって漸近して一定の差の状態になることを指すとしている。

- 「平均放射能濃度」と「平均放射能濃度の95%信頼上限値」の差が小さくなって漸近して一定の差の状態になる」について、「一定の差の状態」とは計算回数を増加させた場合、両者の差の変動幅が何パーセント以内に収まることをいうのか説明してください。

⁶⁷ 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資料2-1-1 回答11(4)

(3) 適用に当たっての条件
追而

4. 4 放射化計算の基本手順

放射化計算の手順は「6. 1. 1 放射化計算の基本手順」、注記として「附属書 A (参考) 理論計算法の適用方法及び手順」及び「附属書 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」に規定している。

(1) 規定の内容

<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。</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>A. 1 理論計算法の基本的な適用方法</p> <p>A. 1. 1 全般</p> <p>放射化金属等の放射能濃度は非常に高いため、サンプリング、分析して放射能濃度を決定する方法は、作業者が高い被ばくを受けるおそれから、放射化計算を利用した理論計算法を適用して放射化金属等中の放射能濃度を決定する方法は、被ばく低減の一つの合理的な方法である。</p> <p>図 A. 1 は、理論計算法による廃棄体中の放射能濃度決定のため手順の基本フローを示す。</p> <p>A. 1. 2 STEP1：計算のための基本の設定</p> <p>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。</p> <p>この手順の詳細は、附属書 D を参照。</p> <p>A. 1. 3 STEP2：評価方法の選択</p> <p>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、“区間推定法”の選択が適切である。</p> <p>A. 1. 4 STEP3：計算の入力条件</p> <p>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、収集したデータベースを踏まえ、設定する。</p> <p>A. 1. 5 STEP4：結果の提示</p> <p>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。</p>

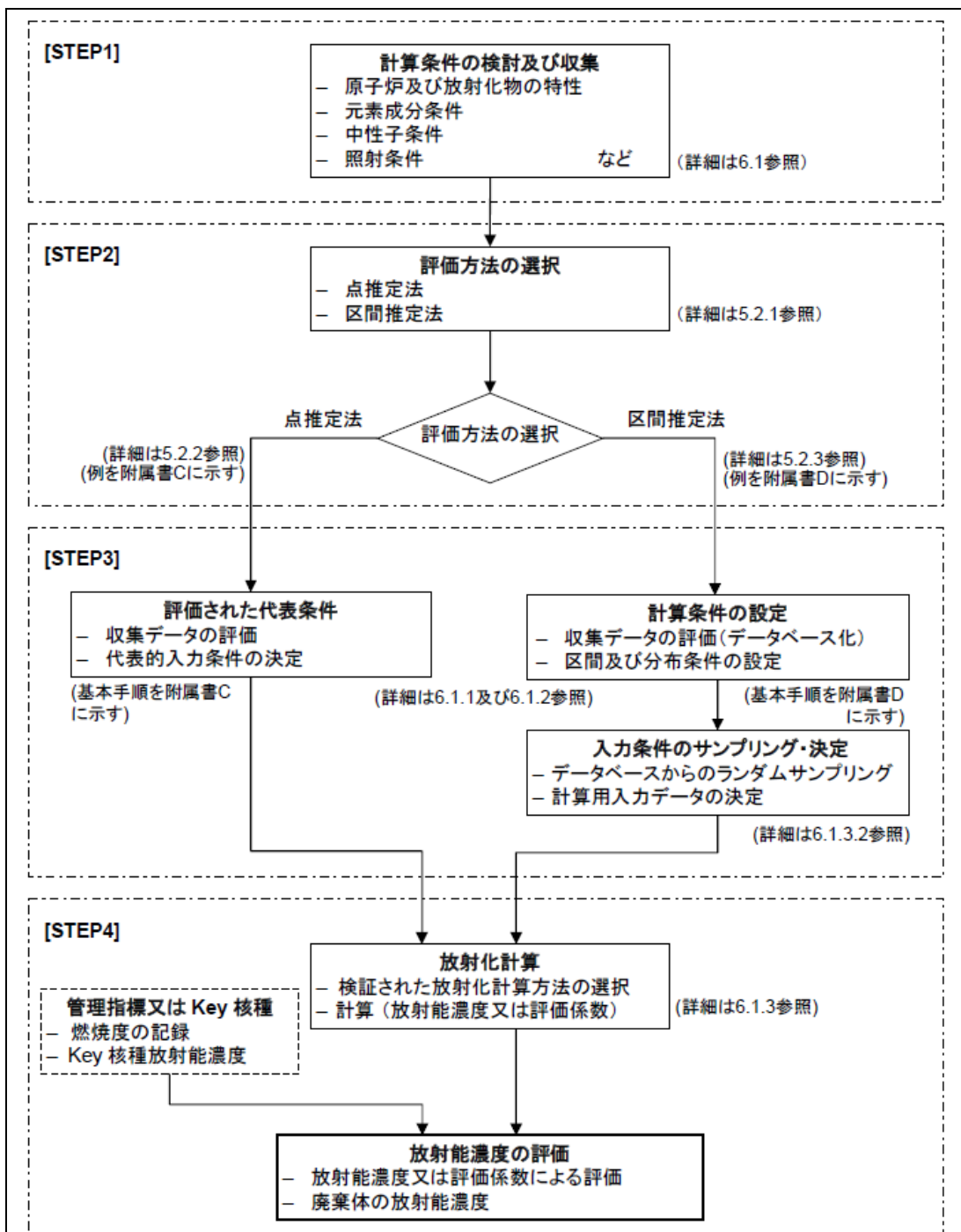


図 A. 1—理論計算法の適用基本フロー

D. 2 放射化計算の入力条件の基本設定フロー

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。

- 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。

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。

- a) 評価対象とする放射化金属等の選択及び特性の調査（略）
- b) 評価対象とする放射化金属等の内部における評価位置の選択（評価位置）（略）（D. 3 参照）
- c) 元素成分の濃度の設定（略）（D. 4 参照）
- d) 原子炉運転サイクルにおける設置位置の選択（略）（D. 5 参照）
- e) 中性子の照射時間の選択（略）（D. 6 参照）
- f) 中性子フルエンス率の設定（略）（D. 5 参照）
- g) 放射化断面積の設定（略）（D. 5 参照）
- h) 放射化計算用の入力データの設定（略）

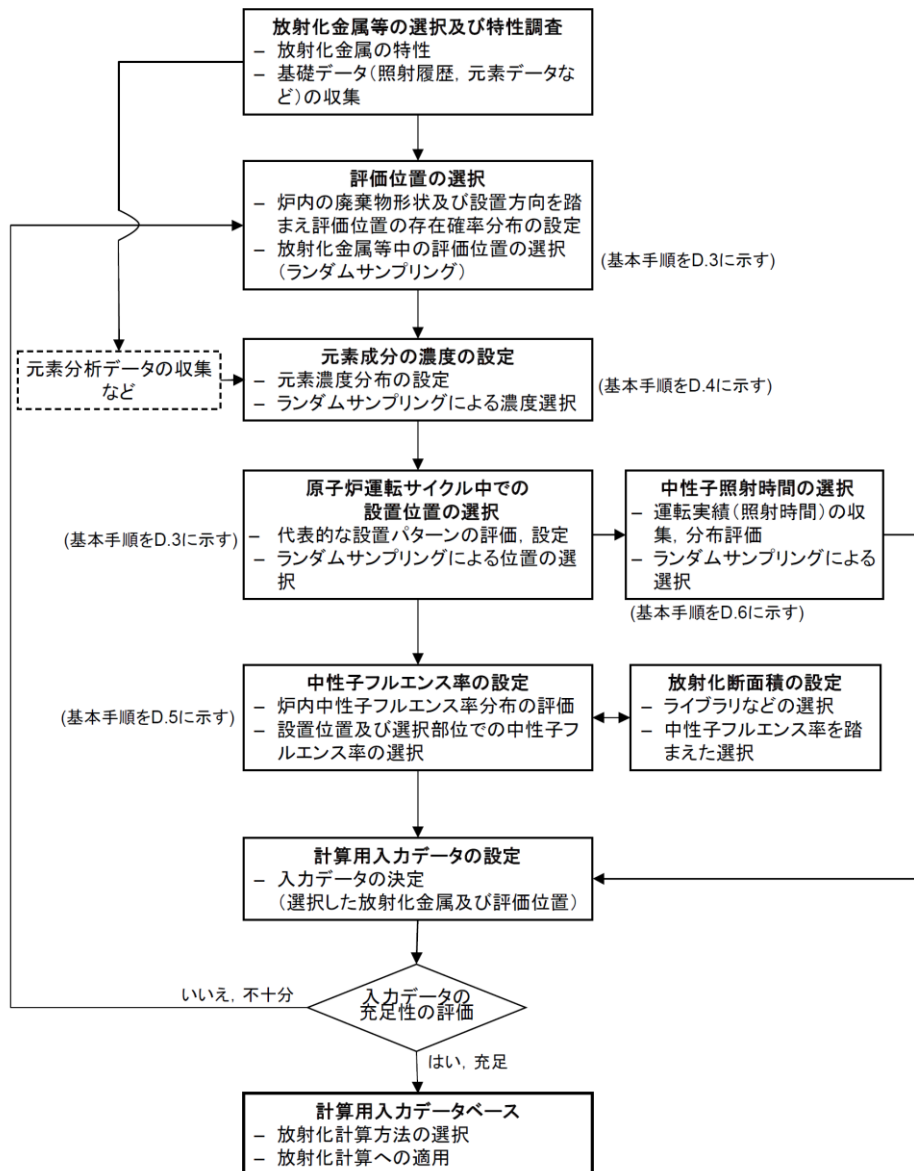


図 D. 1—区間推定法による放射化計算の入力データの基本設定フロー

(2) 検討の結果

① 「D.2 放射化計算の入力条件の基本設定フロー」には、点推定法について、「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」とあり、解説の「3 適用範囲」には、「最大放射能濃度を超えないこと」を満足していることを確認することを目的としている。代表的な値を「平均値」としている理由について、日本原子力学会は次のように説明している⁶⁹。

標準の「3 適用範囲」の詳細を示しています「解説の3 適用範囲」に、「第二種埋設事業規則の第八条第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」と示しております。

また、附属書Mの表M.1に示しますように、標準においては、先に示しました廃棄体の「最大放射能濃度」（保守的な値を代表値とする）だけでなく、埋設する廃棄体の「埋設総放射エネルギー」（すなわち、平均放射能濃度（平均値を代表値とする）×総廃棄体重量）を評価するための入力条件として、「平均値」に関しても、もう一つの代表的な値としております。

表 M.1—第二種廃棄物埋設規則上の廃棄体中の放射能濃度に係る基準

基準項目	最大放射能濃度	埋設総放射能
埋設規則条項	第八条第2項第二号 ^{注記}	第六条第1項第一号
確認対象	廃棄体	廃棄物埋設施設
対象範囲	廃棄体ごと	埋設された放射性廃棄物全体
確認内容	放射能濃度が申請書等に記載した最大放射能濃度を超えないこと。	埋設を行うことによって、廃棄物埋設施設を設置した事業所に埋設された放射性廃棄物に含まれる放射性物質の種類ごとの放射能の総量が申請書等に記載した放射性物質の種類ごとの総放射能を超えないこと。
要求される条件	廃棄体ごとのばらつき ^{a)} の考慮 (又は保守性 ^{a)})	廃棄体全体（平均値）としての妥当性 (又は保守性 ^{a)})
注^{a)} 放射能濃度評価結果が大きな値をとるような安全裕度の考慮。		

注記 現在、第二種埋設事業規則が改正され、第八条第2項第三号となっている。

日本原子力学会は、最大放射能濃度を求める場合と埋設総放射エネルギーを求める場合とで「代表的な値」の意味が異なるとしている。技術評価は最大放射能濃度の評価を対象として実施することとしたことから、「D.2 放射化計算の入力条件の基本設定フロー」の「点推定法向け」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

⁶⁹ 第3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参考資料3-1 回答5

する」は「保守的な値を入力条件として設定する」に読み替える。

「代表的」の用語は、「代表的な部位」、「代表的な放射能濃度の分布」「代表的又は平均的な値及び分布」等多数用いられている。これらについても、「保守的な部位」、「保守的な放射能濃度の分布」「保守的な値及び分布」等に読み替える。

- ②「図 D. 1—区間推定法による放射化計算の入力データの基本設定フロー」は、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示したものである。

各入力条件の設定は「代表的な条件」又は「ランダムサンプリング」とされている。「最大放射能濃度を超えないこと」とした場合に「保守的な条件」としなくてよい理由について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁷⁰。

標準は、最大放射能濃度及び総放射能量の評価を対象としており、「代表的な条件」（保守的な条件での最大放射能濃度の評価）、または「ランダムサンプリング」（放射能濃度分布などの評価）を適用することによって、これら进行评估します。

この「ランダムサンプリング」は、評価対象の全体を網羅する条件範囲からランダムに入力データの抽出を行って入力条件を設定しますので、その計算結果が示す放射能濃度の分布（分布から平均値、最大値が評価可能）、又は濃度比の分布（分布から平均値、最大値が評価可能で、スクリーニングレベルのような制限の考え方も適用可能）を使用することによって、廃棄体の最大放射能濃度を評価することが可能です。

評価対象となる放射化金属等を網羅する条件範囲からランダムサンプリングを行うことで、廃棄物全体の放射能濃度の分布を求めることができ、当該分布から最大放射能濃度を評価することが可能とするものである。

- 求めた放射能濃度分布からどのように最大放射能濃度を求めるのか、事例を示して説明してください。

- ③「代表的な条件」と「ランダムサンプリング」を使い分ける際の条件及び同一の放射化金属等について、「代表的な条件」と「ランダムサンプリング」それぞれの手法で計算した際の計算結果の同等性について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁷¹。

標準は、示しています各手法間の同等性を求めているものではありません。また、保守性を確保した評価方法とする基本的な考え方としては同等ですが、適用する保守性の取り方によっては、各手法で評価した結果は必ずしも一致するものではありません。

なお、入力条件の設定方法は、評価方法と密接に関係しますので、適用する評価方法（点推定法か区間推定法か）によって、次のような選択になります。

点推定法：代表的な条件（保守的な条件での最大放射能濃度の評価に適用）

⁷⁰ 第3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参考資料3-1 回答6(1)

⁷¹ 第3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参考資料3-1 回答6(2)

区間推定法： ランダムサンプリング（放射能濃度分布などの評価に適用）
日本原子力学会は、区間推定法については、「ランダムサンプリング（放射能濃度分布などの評価に適用）」であるとしている。

「評価位置の選択」のボックスに「評価位置の存在確率分布の設定」があるが、「D.3 評価対象放射化金属等の評価位置の選択」記載がない。存在確率分布の設定方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁷²。

評価位置の存在確率分布の設定は、附属書Dの表D.2に示しています。原子炉内での機器などの設置方向に応じて、基本的に設置方向が軸方向の場合は「一様分布」、径方向の場合は「該当部の面積比に応じた分布」で設定します。

表D.2—評価対象放射化金属等の内部における照射位置の設定に関わる基本的な考え方

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。

なお、原子炉内の中性子フルエンス率は、原子炉内を円筒状に見た場合、同一円周上はほぼ一定と考えることが出来ますので、軸方向に沿って、挿入されている円筒状や長尺状の機器／機材は、代表的に軸方向の分布を考慮します。（チャンネルボックスのように、原子炉内径方向のローテーションがある機器／機材は、これも考慮します）

一方、原子炉の径方向に設置した機器／機材は、径方向の半径に応じた同心円状の面積は、軸方向の長さのように一様ではなく、外側に行くほど大きくなりますので、径方向の外側に向かって行くに従って面積が増える条件を加味して、評価する照射位置の選択・設定を行う際に面積比（径に比例）を乗じることによって重み付け考慮しています。

手法の同等性については、代表的な条件による評価、ランダムサンプリングによる評価共に、対象となる放射化金属等の放射能濃度分布を求める手法であるため、「保守性を確保した評価方法とする基本的な考え方としては同等ですが、適用する保守性の取り方によっては、各手法で評価した結果は必ずしも一致するものではありません」とす

⁷² 第3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参考資料3-1 回答6(3)

る説明は妥当と判断する。

ランダムサンプリングを行う場合の計算の繰り返し回数の考え方について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁷³。

ランダムサンプリングを行う場合の計算の繰り返し回数は、標準 6.1.3.3.2 に示します次の考え方で、データ数の充足度の評価によって安定と判断されるまでの計算回数になります。

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。

なお、この考え方は、附属書 A で引用しております「ISO 16966:2013 Theoretical activation calculation method to evaluate the radioactivity of activated waste generated at nuclear reactors」に示されています次の考え方と同じです。

4.3.1 Determining the number of calculations

The number of calculations can be determined by one of two methods:
(略)

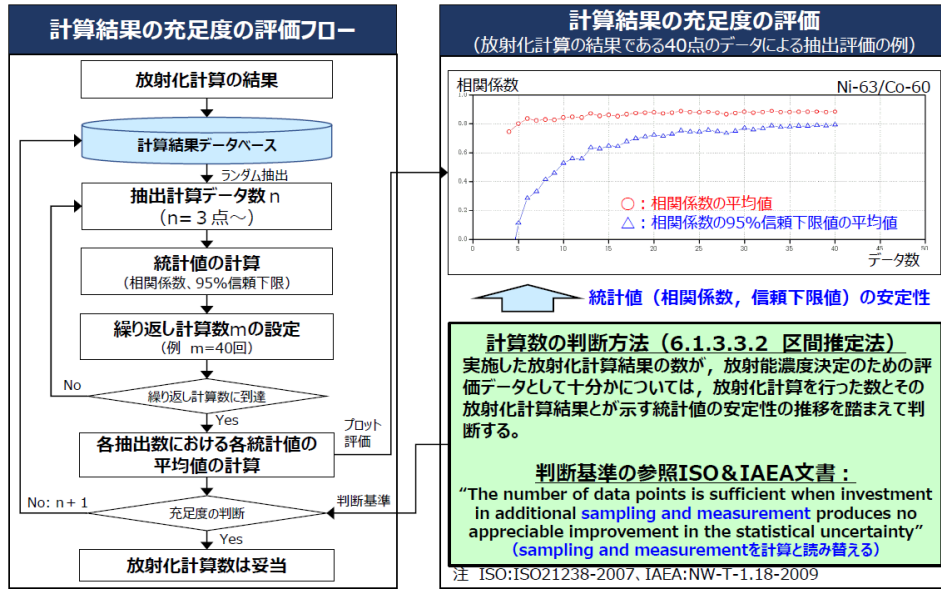
b) Range method

“When the range method is applied, the number of activation calculation results obtained should be adequate for their use as evaluation data for determining the radioactivity concentrations. Whether their number is adequate or not can be judged in consideration of the number of the activation calculations made and the changes in the stability of the statistical values obtained from these activation calculation results.”

また、具体的には、附属書 A の「A.4.3 計算の実施段階」に示しますように、統計値（下図は相関係数の例）の安定性（図 A.2 では平均値と 95%信頼下限の差異の漸近性：これ以上計算回数を増やしてもそれによって得られる統計値はほとんど変わらない）を評価する方法で行います。

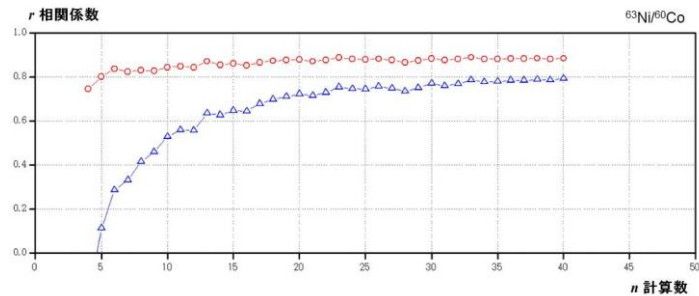
⁷³ 第3回中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法に係る日本原子力学会標準の技術評価に関する検討チーム参考資料3-1 回答6(4)

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



A.4.3 計算の実施段階（略）

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。



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

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]

評価を追加

- ④ 「中性子フルエンス率の設定」のステップと「放射化断面積の設定」のステップの間が両矢印になっている。

その意味について日本原子力学会は、以下のように説明している⁷⁴。

⁷⁴ 第3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参考資料3-1 回答6(5)

「中性子フルエンス率の設定」のボックスと「放射化断面積の設定」のボックスの間が両矢印になっていますのは、放射化計算結果である放射能濃度は中性子フルエンス率と放射化断面積（中性子スペクトル）とによって影響を受けますので、標準6.1.2.3 b)に示しますように、相互の関係を把握した上で設定が必要なため、矢印を両方向にしているものです。

6.1.2.3 中性子条件（中略）

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。

注記 詳細は、附属書F 及び附属書G 参照。

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。

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。
— 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。

評価を追加

- ⑤ 「入力データの充足性の評価」のステップについては、「A.4 妥当性確認の例」において、「なお、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。」と規定され、「図 A.2 放射化計算数の増加に伴う相関係数（平均、95%信頼下限値）の安定性のイメージ」が示されている。

具体的にどのように充足性を判断するのかについて、日本原子力学会は、以下のよう

に説明している⁷⁵。
入力データ数（すなわち、計算回数に相当します）の充足性を判断する方法とし

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。

評価を追加

- ⑥ 「A.1.2 STEP1：計算のための基本の設定」のSTEP1では「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」と記載されているが、図 A.1 の該当箇所には、「放射化金属等の幾何形状」に代わり「原子炉及び放射化物の特性」が記載されている。「原子炉及び放射化物の特性」に関してどのようなデータを収集するの

⁷⁵ 第3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参考資料3-1 回答6(6)

かについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁷⁶。

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）を事前に収集します。

放射化物の放射能濃度の評価のためには、まず、基礎となる評価対象である「原子炉の特性（炉型、燃料）及び放射化物の特性（材質、幾何形状）」を踏まえて、放射化計算に必要なります標準 6.1.2.1 に示しますように次の 3 種類の入力データの収集が必要となる事を示したものです。

— 元素成分条件：評価対象とする放射化物の特性（種類（材質）、申請核種の起源元素の選定及び起源元素の分析データ

— 中性子条件：評価対象とする原子炉の特性（炉型、燃料）、放射化物の特性（構造物の幾何形状、設置条件）及びこれに基づく中性子輸送計算の結果

— 照射条件：評価対象とする原子炉の特性（運転条件：中性子照射時間、照射停止時間）、放射化物の特性（移動又は交換実績）

したがって、「原子炉及び放射化物の特性」とは、評価の対象となります原子炉の特性（炉型、燃料）及び放射化物の特性（材質、幾何形状）を把握することを意味しています。

- ⑦ 「A.1.5 STEP4：結果の提示」に「適切な計算コードを選択し、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。」との記載があるが、何をもって計算コードの適切性を確認するのか、また、図 A.1 には、「検証された放射化計算方法の選択」とあるが、どのように放射化計算方法を検証するのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁷⁷。

計算コードの適切性の確認については、事業者が許認可で規制側に提出している「計算機プログラム（解析コード）の概要」に基づき、検証（Verification）されたコードを選択します。

この検証（Verification）については、コード配布時に同梱されたサンプル問題の再現により計算機能が適正であることを確認します。

妥当性確認（Validation）については、評価対象の実物又は類似の体系についての計算値と分析値を比較することにより妥当性を確認します。

（3）適用に当たっての条件

追而

⁷⁶ 第 3 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資料 3-1-1 「適用範囲と理論的方法の特徴」 回答 5

⁷⁷ 第 3 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資料 3-1-1 「適用範囲と理論的方法の特徴」 回答 6

4. 4. 1 評価対象放射化金属等の評価位置の選択

評価対象放射化金属等の形状及び設置方向による照射位置の設定は「附属書 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」の「D. 3. 1 評価対象放射化金属等の形状及び設置方向による照射位置の設定」に、設置位置の移動を踏まえた照射位置の設定は同「D. 3. 2 評価対象放射化金属等の原子炉内での設置位置の移動を踏まえた照射位置の設定」に規定している。

(1) 規定の内容

D. 3 評価対象放射化金属等の評価位置の選択			
D. 3. 1 評価対象放射化金属等の形状及び設置方向による照射位置の設定			
<p>中性子フルエンス率（フラックス及びスペクトル）を設定するためには、評価対象とする放射化金属等の評価する照射位置を選択し、その位置での炉内の中性子フルエンス率を特定する必要がある。このためには、まず、評価対象とする放射化金属等の形状及び原子炉内での設置方向、配置位置を考慮した照射位置を選定した上で、評価対象とする放射化金属等の選定した照射位置ごとに適切な中性子条件を設定する。</p> <p>評価対象とする放射化金属等の形状及び設置方向を考慮した放射化計算の評価対象とする照射位置を設定する場合の基本的な考え方を、表 D. 2 に示す。</p>			
表 D. 2—評価対象放射化金属等の内部における照射位置の設定に関わる基本的な考え方			
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
<p>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）。</p> <p>^{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。</p> <p>^{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。</p>			
D. 3. 2 評価対象放射化金属等の原子炉内での設置位置の移動を踏まえた照射位置の設定			
<p>評価対象とする放射化金属等の原子炉内での運転サイクルごとの設置位置の移動の有無による照射位置の設定に関する基本的な考え方を、表 D. 3 に示す。これは、どの評価対象とする放射化金属等の部位が中性子の照射を受けるか、そして放射能の一樣性にも影響を与える。</p>			
表 D. 3—評価対象放射化金属等の炉内外での配置位置の設定に関わる基本的な考え方			
評価対象とする放射化金属等の形状	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

及び設置方向 ^{a)}			
配置の移動	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など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
<p>注 a) 評価対象とする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。</p> <p>b) 原子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（中央部, 最外周など）ごとの考慮が必要である。</p> <p>c) PWR 制御棒では, 定格出力運転時の原子炉の軸方向の配置位置（定格出力運転時の制御位置, 及び定格出力運転時の制御棒全引抜き位置）ごとの考慮が必要である。</p> <p>d) BWR 制御棒では, 原子炉内での配置位置, 及び定格出力運転時の炉心内挿入位置に対応する挿入時間の考慮が必要である。</p> <p>e) 全照射期間において, 原子炉内外で固定された状態で照射される。</p> <p>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（例えば, 放射能濃度評価結果が大きくなるような）配置位置のパターンにて設定する場合もある。</p>			

(2) 検討の結果

評価対象とする放射化金属等の形状及び設置方向を考慮した放射化計算の照射位置を設定する場合の基本的な考え方を示したものであり、評価対象放射化金属等の内部における照射位置の設定に関わる基本的な考え方を「表 D. 2—評価対象放射化金属等の内部における照射位置の設定に関わる基本的な考え方」のとおりとしている。また、評価対象放射化金属等の炉内外での配置位置の設定に関わる基本的な考え方を「表 D. 3—評価対象放射化金属等の炉内外での配置位置の設定に関わる基本的な考え方」のとおりとしている。

① 「照射位置の出現確率」について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁷⁸。

評価対象とする照射位置は、附属書 D の表 D. 2 に示しますように、原子炉内に設置される放射化金属等の原子炉軸方向（径方向の一定位置に、軸方向の長さをもった機器/機材の場合）や径方向（原子炉の水平断面に横置き平板形状の機器/機材の場合）の位置で設定できます。

標準では、これらの機器/機材において、機器/機材中の評価する位置をランダムに選択する際に、放射化金属等全体から機器/機材中の評価位置を選択する確率を「照射位置の出現確率」と呼んでいます。

「照射位置の出現確率」は、基本的には円筒状の機器、軸方向に設置する長

⁷⁸ 第 3 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参考資料 3-1 回答 7(1)

尺の機器に関しては、軸方向の評価位置を選択する確率は一様分布です。

一方、径方向に設置する円盤状の機器／機材に関しては、径方向の同心円状に面積の広がりを示しますので、評価位置を選択する確率は軸方向のように一様でなく、径（選択した円周の位置）に依存（径に比例）しますので、確率に関してこの面積比による重み付けを考慮して選択・設定できるようにするために、面積比を反映します。

評価を追加

- ②「考慮する照射位置の出現確率の分布」について、原子炉軸方向に設置した放射化金属等については一様分布、原子炉の径方向に設置した放射化金属等については該当部の面積比に応じた分布としているが、この設定の根拠について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁷⁹。

（回答 6(3)と同じです）原子炉内の中性子フルエンス率は、円筒状に見た場合、同一円周上はほぼ一定と考えることが出来ますので、軸方向に沿って、挿入されている機器／機材（チャンネルボックス、制御棒、シュラウド）は、軸方向の分布を考慮します。（チャンネルボックスのように、原子炉内径方向のローテーションがある機器／機材は、これも考慮します）

一方、原子炉の径方向に設置した機器／機材（上部格子板）は、回答 7(1)に示しましたように、径方向で考えた場合の面積は一様ではなく、外側に行くほど大きくなりますので、半径方向の位置によって面積が増える条件を加味して、評価する照射位置の選択・設定を行う際に面積比（径に比例）を乗じることで重み付けを考慮しています。

評価を追加

- ③「評価対象とする放射化金属等の形状及び設置方向」の項には放射化金属等の設置方向についての記述しかないが、放射化金属等の形状についてはどのように設定するのか説明を求めたところ、日本原子力学会は、以下のように説明している⁸⁰。

原子炉における中性子の分布を評価する中性子輸送計算においては、標準「6.1.2.3 中性子条件」に示しておりますように、原子炉及び燃料の配置、すなわち、炉内構造物の配置条件（機器／機材の形状、材質（減速））に関して、放射化金属等の形状を考慮しモデル化して設定します。

なお、放射化計算の対象とする評価位置（座標）は、放射化金属等の形状を踏まえた原子炉内の軸方向と径方向の位置で決定します。したがって、評価対象とする機器の評価位置は、軸方向の位置と径方向の位置を考慮することで、入力条件とする中性子フルエンス率を選択する位置が決定できます。

6.1.2.3 中性子条件

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。

注記 詳細は、**附属書F** 及び**附属書G** 参照。

- 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、

⁷⁹ 第3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参考資料 3-1 回答 7(2)

⁸⁰ 第3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参考資料 3-1 回答 7(3)

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。

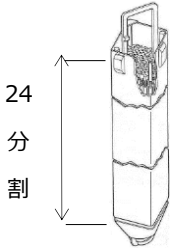
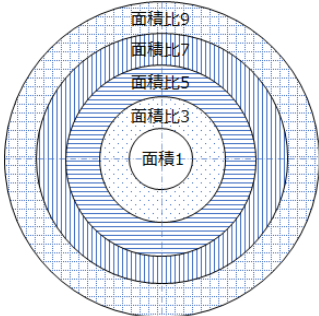
例 中性子輸送計算のモンテカルロ法などは、原子炉の中性子の詳細条件及び評価対象範囲に設置されている構造物などの条件への適合が要求される場合にも、構造物などの条件に合わせる事が可能である。

④照射位置の選定の妥当性を確認するための考え方及び手順について、「評価対象とする放射化金属等の形状及び原子炉内での設置方向、配置位置を考慮した照射位置を選定した上で」とされている。照射位置は、中性子フルエンス率と中性子スペクトルの変動との関係にも依存するため、照射位置の設定の方法において、その影響をどのように考慮するのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁸¹。

区間推定法における評価対象とする放射化金属等の照射位置の選択は、下記（附属書DのD.2）に示しますように、「評価対象とする位置に関する存在確率分布」から、ランダムサンプリングによって選定します。

なお、「評価対象とする位置に関する存在確率分布」は、附属書Dの表D.2に示しますように、評価対象物の原子炉内での軸方向、径方向の設置方向を踏まえて、設定します。

ランダムサンプリングを行うための軸方向と径方向の評価対象とする位置に関する存在確率分布は、対象とする放射化金属等の放射能濃度分布（同一体積単位で評価した放射能濃度分布）を評価するために、下表に示す分布を考慮し、この分布からランダムサンプリングを行い、評価位置を設定します。

軸方向に設置される放射化金属等	径方向に水平に設置される放射化金属等
チャンネルボックスなど	上部格子板など
 <p>24 分 割</p> <p>有効燃料部を24分割し、炉外の1分割を加えた25分割で評価する。</p>	 <p>面積比9 面積比7 面積比5 面積比3 面積1</p> <p>面積比のイメージ図（平面図） （分割数はイメージのため簡易的に示したもの）</p>
軸方向の一様分布からランダム選択	同心円状の部分の面積比 ^リ による存在確率の重み付けを考慮した径方向の位置をランダム選択 注1 各面積比の数値が中心部と各部位の面積比の重み付けの値を示す。

D.2 放射化計算の入力条件の基本設定フロー

b) 評価対象とする放射化金属等の内部における評価位置の選択（評

⁸¹ 第3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資料3-1-1「適用範囲と理論的方法の特徴」回答3

価位置) 評価対象とする放射化金属等の形状及び原子炉内での設置方向を踏まえて、評価対象とする放射化金属等の内部における評価対象とする位置に関する存在確率分布を設定する。入力条件を設定するため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し、選択・設定される (D.3 参照)。

また、「評価位置」と「照射位置」のの違いについて、日本原子力学会は、以下のよう
に説明している⁸²。

(回答待ち)

運転サイクル等による設置位置の移動の有無を踏まえて、評価対象とする放射化金属等の照射位置(放射化計算をする位置と理解)を設定する方法を示したものであり、評価対象放射化金属等の炉内外での配置位置の設定に関わる基本的な考え方を「表 D.3—評価対象放射化金属等の炉内外での配置位置の設定に関わる基本的な考え方」のとおりとし、「考慮する照射位置の出現確率の分布」において、配置が固定された放射化金属等(シュラウド、上部格子板)については固定値としている。

- ⑤「考慮する照射位置の出現確率の分布」について、配置位置が移動する場合には実際の分布又は代表的なパターンを用いるとしているが、代表的なパターンとはどのように代表性が担保されているのか(例えば、炉型の違い、運転サイクルの違い)について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁸³。

これまでの BWR プラントの運転実績から、BWR チャンネルボックスの代表的な配置位置のパターンとして、附属書 I の表 I.11 に示すような配置位置のローテーションの種類があります。これを踏まえて、放射能濃度の評価結果が大きくなるように、配置位置のローテーションから中性子フルエンス率分布を考慮して、運転サイクル数ごとにローテーションを代表的な配置位置のパターンとして設定します。

また、PWR 及び GCR の制御棒についても、BWR チャンネルボックスの場合と同様に配置位置のローテーションを行いますが、代表性の担保の考え方は BWR チャンネルボックスの場合と同様に実績を踏まえます。

表 I.11—ZrTN804D (BWR チャンネルボックスの本体) の配置位置の設定

運転サイクル数 ^{a)}		出現頻度分布	配置位置の設定条件 (ローテーションの種類 ^{d)})
サイクル数	中性子照射時間		
1	2 年未満	固定 ^{b)}	A : 中央
2	2 年以上, 3 年未満	配置ローテーションの 種類の一様分布 ^{c)}	B : 中央→中央 C : 中央→近傍
3	3 年以上, 4 年未満	配置ローテーションの 種類の一様分布 ^{c)}	D : 中央→中央→中央 E : 中央→近傍→中央
4	4 年以上, 5 年未満	配置ローテーションの 種類の一様分布 ^{c)}	F : 中央→中央→中央→中央 G : 中央→中央→近傍→中央

⁸² 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 6

⁸³ 第 3 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参考資料 3-1 回答 8(1)

			<i>H</i> : 中央→中央→中央→最外 <i>I</i> : 中央→中央→最外→最外 <i>J</i> : 中央→近傍→最外→最外
5	5年以上	配置ローテーションの種類の一様分布 ^{c)}	<i>K</i> : 中央→中央→中央→中央→最外 <i>L</i> : 中央→中央→中央→最外→最外 <i>M</i> : 中央→中央→近傍→最外→最外
注 ^{a)} 中性子照射時間に応じて運転サイクル数を設定。 ^{b)} 中性子照射時間2年未満の場合は、配置位置のローテーションは、行わず、原子炉の中央部で継続的に照射される。 ^{c)} 範囲を評価することが重要であり、代表的な配置位置のローテーションの種類ごとに同じように選択するとした。 ^{d)} 原子炉内での運転サイクルごとの代表的な配置位置のローテーションの種類（代表的な装荷位置の組合せ）。 中央：原子炉内の中央部、最外：原子炉内の最外周部、近傍：制御棒近傍位置、を意味する。			

評価を追加

- ⑥「代表的なパターン」とは脚注 f によると「例えば、放射能濃度評価結果が大きくなるような」とあるが、「D.4.1 元素成分条件の設定方法の選定」には「代表的な元素分析データ（元素分析データの平均値など）」と規定されている。放射能濃度決定標準全体を通じて「代表的」の意味について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁸⁴。

附属書Dの表D.3において使用しております「代表的なパターン」の「代表的」とは、次の考え方です。

最大放射能濃度の評価： 保守的に設定（放射能濃度が大きくなるように設定）

総放射能量の評価： 平均的な設定

評価を追加

- ⑦各項目の「など」の内訳について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁸⁵。

「ローテーションなど」には、照射期間中に使用済燃料プールにて一旦保管したのち、再度配置位置を変更して照射されることがあるもの（例えば、バーナブルポイズン）を含んでいます。

「挿入位置など」には、制御位置、全引き抜き位置を含んでいます。

「チャンネルボックスなど」には、バーナブルポイズン、プラグングデバイスが含まれます。

「PWR 制御棒、BWR 制御棒など」には、GCR 制御棒が含まれます。

「シュラウド、上部格子板など」には、核計装管、炉心槽、黒鉛ブロックが含まれます。

評価を追加

(3) 適用に当たっての条件

⁸⁴ 第3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参考資料3-1 回答8(2)

⁸⁵ 第3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参考資料3-1 回答8(3)

追而

4. 4. 2 元素成分条件の設定

元素成分条件の設定方式の選定は「附属書 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」の「D. 4. 1 元素成分条件の設定方式の選定」に、各元素の濃度分布基本形状の設定は同「D. 4. 2 各元素の濃度分布基本形状の設定」に、元素分析データ数量に応じた濃度分布条件設定は同「D. 4. 3 元素分析データ数量に応じた濃度分布条件設定」に規定している。

(1) 規定の内容

D. 4 元素成分条件の設定			
D. 4. 1 元素成分条件の設定方式の選定			
<p>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、収集した元素分析データ及び放射能濃度決定方法の種類に応じて、次のいずれかが選択できる。</p> <ul style="list-style-type: none"> － 評価対象とする放射化金属等の代表的な元素分析データ（元素分析データの平均値など）で設定する方式。 － 評価対象とする放射化金属等の元素分析データの濃度分布又は濃度範囲を設定する方式。 			
D. 4. 2 各元素の濃度分布基本形状の設定			
<p>各材料中に含まれる各元素の濃度分布の基本形状は、材料製造時の各成分の管理条件を考慮して設定できると考えられ、その基本的な考え方を、表 D. 4 に示す。</p> <p>材料中の各元素は、一般に、材料製造時に成分管理目標値などを定めて調整を行う“主成分元素”及び“不純物成分元素”と、成分管理目標値などが定まっていない“微量成分元素”とに大別できる。したがって、各元素の濃度分布の基本形状には、材料製造時の主成分元素としての成分の管理目標値などの有無によって、正規分布又は対数正規分布のいずれかが選択できる。</p> <p>なお、主成分元素については、分布の上限値に近い濃度のデータが正規分布よりも多く出現する一様分布を保守的に適用することもある。また、収集した元素分析データの濃度分布を考慮して、最終的に各元素の濃度分布の基本形状を設定できる。</p>			
表 D. 4—対象とする放射化金属等の元素成分濃度の分布タイプの設定に関わる基本的な考え方			
成分管理条件	主成分元素	不純物成分元素	微量成分元素
	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。
各元素の濃度分布	正規分布	対数正規分布	対数正規分布
D. 4. 3 元素分析データ数量に応じた濃度分布条件設定			

元素濃度分布条件の設定には、評価対象とする放射化金属等の材料のロット及び収集した元素分析データの数量に応じて、代表性又は保守性を考慮した上で、次の a)～d) の濃度分布条件設定方法の適用が望ましい。

なお、標準偏差は、保守性を考慮した上で適切な値を設定すればよいが、不純物成分元素及び微量成分元素であれば、同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を参考にして標準偏差を設定する方法も適用できる。

ただし、同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を参考にする場合は、参考とする元素分析データを収集した上で、参考とした同一の元素の標準偏差に濃度依存性がないこと、及び参考とした化学的性質が類似した元素との間で標準偏差に差異がないことを評価する必要がある。

- a) 元素分析データ数が十分にある場合 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に十分あり、元素分析データとしての代表性をもっている場合は、保守性を見込む必要性はなく、元素分析データの平均値、標準偏差、最小値、最大値などを用いて評価対象とする元素成分濃度分布を設定できる。
- b) 元素分析データ数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に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、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できる。
- c) 元素分析データ数が非常に少ない場合の設定方法 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に 1～2 点（残りは、検出下限値の場合）と非常に少なく、標準偏差などを計算できない場合は、次のいずれかの方法による平均値、標準偏差を設定する方法がある。
 - － 元素分析データの検出値の平均値を推定分布の平均値と仮定し、保守的な標準偏差を適用して、濃度分布を仮定する。
 - － 元素分析データの検出最大値以下の濃度の低い濃度領域で、濃度分布を仮定する。

なお、これら元素分析データ数が非常に少ない場合の、具体的な元素成分の濃度分布を設定するために必要となる平均値及び標準偏差の決定方法の考え方を、表 D.5 に示す。

表 D.5—元素分析データが非常に少ない元素の濃度分布条件設定方法

方法	方法の概要	保守性の考慮
検出値を平均値として使用する方法	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	例 1 に示すとおり、 <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。 <u>濃度分布の標準偏差</u> ： 保守的な標準偏差を適用して、保守性を見込む（例えば、各元素のデータ群の標準偏差の分布の 90 % までを包含する値など）

例1 検出データの平均値を使用した元素濃度分布設定のイメージ		
検出値以下で元素の濃度分布を仮定する方法	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	例2に示すとおり、 <u>平均濃度</u> ： 分析した数が比較的多い場合は、保守的に検出最大値を濃度分布の+2σ（標準偏差）の位置とし、逆算して設定する。 分析した数自体が少ない場合は、分析した数を考慮して、保守性を考慮する。 <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（例えば、不純物成分元素及び微量成分元素であれば、同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を参考にした標準偏差を設定など）。
	<p>例2 検出最大値から分布を評価する場合のイメージ</p>	

- d) 元素分析データに検出下限値しかない場合 評価対象とする放射化金属等（材料）の元素分析データが全て検出下限値以下の場合、次のいずれかの方法で平均値、標準偏差を設定できる。
- 元素分析データの検出下限値を平均値としてそのまま使用する。
 - 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、既知の類似試料の標準偏差を利用して設定する。
 - 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。
- なお、検出下限値しかない場合の具体的な元素成分の、濃度分布を設定するために必要となる平均値及び標準偏差の決定方法の考え方を、表D.6に示す。

表 D.6—元素分析データに検出下限値しかない元素の濃度分布条件設定方法

方法	方法の概要	保守性の考慮
検出下限値をそのまま使用する方法	元素分析データ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。
検出下限値以下で、元素の濃度分布を仮定する方法	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。	例3に示すとおり、 <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、逆算して設定する。 分析した数自体が少ない場合は、分析した数を考慮して、保守性を考慮する。 <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（例えば、不純物成分元素及び微量成分元素であれば、同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を参考にした標準偏差を設定など）。
	<p>確率密度</p> <p>検出下限値</p> <p>σ: 平均的な標準偏差 (同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を評価して適用)</p> <p>平均濃度 (設定値)</p> <p>2σ</p> <p>元素濃度 (%)</p> <p>例3 検出下限値以下で分布を設定する場合のイメージ</p>	
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方法。	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。

(2) 検討の結果

- ①元素成分条件の設定方式として、放射化金属等（厳密には、放射化する前の放射化金属等と推察）の代表的な元素成分データで設定する方法と、元素分析データの濃度分布又は濃度範囲を設定する方式を示したものである。

日本原子力学会は、収集した元素分析データおよび放射能濃度決定方法の種類に応じて次のいずれかが選択できるとしているが、「附属書 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」は区間推定法のデータ設定方法を規定しており、適切な評価結果を得るには元素分析データに基づく元素成分条件もいずれか片方のみではなく両方を選択する必要がある。

- ・評価対象とする放射化金属等の代表的な元素分析データ（元素分析データの平均値など）で設定する方式。
- ・評価対象とする放射化金属等の元素分析データの濃度分布又は濃度範囲を設定する方式。

したがって、「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、収集した元素分析データ及び放射能濃度決定方法の種類に応じて、次のいずれかが選択できる。」とあるのは、「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、収集した元素分析データに基づき、次の両者を選択する。」と読み替える。

各材料（放射化前の放射化金属等を指すものと推察）中に含まれる各元素について、濃度分布の基本形状の設定の考え方を示したものであり、材料中の各元素は、主成分元素、不純物元素、微量成分元素の3つに大別され、主成分元素は正規分布、不純物成分元素と微量成分元素については対数正規分布に従うとしている。

- ②「表 D. 4—対象とする放射化金属等の元素成分濃度の分布タイプの設定に関わる基本的

な考え方」において、不純物成分元素及び微量成分元素については、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として対数正規分布に従うとしている根拠について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁸⁶。

標準では元素成分条件の入力データ設定用の濃度分布の評価及び設定を行うために、次のステップで評価を行います。

- ① 分析データの収集、正規性の評価段階：分析データを収集し、附属書 D の表 D. 4 の基本的考え方に示す元素の濃度分布の基本形状（正規分布又は対数正規分布）を適用して分布形状の評価（平均、標準偏差、正規性）を進める。
- ② 入力データ設定用分布の設定段階：放射化計算用の入力データを選定するために設定する濃度分布は、収集した分析データが示す最も適切となる分布形状を確認して設定する。

したがって、微量成分元素に関しましては、製造工程中で調整などが行われていませんので、原材料中の分布形状が維持されていると考えられるものです。このため、表 G. 13（元素の濃度分布を対数正規分布として扱う例）に示しますように、基本的な考え方として「対数正規分布」として扱うことが適切です。

また、不純物元素について、その濃度上限が管理されるものであるにも関わらず、その上限値ではなく対数正規分布に従うと設定していることについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁸⁷。

次に、不純物元素に関しましては管理上限値があり、酸化物としてスラグに取り込むことなどで低減させるなどの精錬を行い分布が歪む可能性があります。分布形状そのものは上限値のような点でなく、①に示しましたように、まず「対数正規分布」として、評価を進めます。

ただし、附属書 G の G. 1. 2. 3. 2 に示しますように、実際に入力データとして適用する元素の濃度分布は、②に示しましたように、最終的には実際のデータによって評価し、いずれの分布形状に属しているかを判断した上で設定することを求めており、「不純物元素」に関しては、元素分析によって得られた実際の分析データの範囲が狭く「正規分布」で評価することの方が適切と判断した場合は、「正規分布」を入力データ設定用分布の設定に適用します。

G. 1. 2. 3. 2 各元素の濃度分布基本形状の設定例

各材料中に含まれる各元素の濃度分布の基本形状は、表 D. 4 に示したように、製造時の各成分の管理条件を考慮して設定できる。

まず、各元素の濃度分布の基本形状には、材料製造時の主成分元素としての成分の管理目標値などの有無によって、正規分布又は対数正規分布のいずれかが選択できる。

なお、主成分元素については、分布の上限値のデータが正規分布よりも、多く出現する一様分布を保守的に適用することもある。

次に、収集した元素成分データの濃度分布を考慮して、最終的に各元素の濃度分布の基本形状を設定する。（略）

なお、各元素の濃度分布基本形状を設定する場合は、上記の基本的な考え

⁸⁶ 第 3 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参考資料 3-1 回答 9

⁸⁷ 第 3 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参考資料 3-1 回答 9

方に加え、実際の元素成分データの濃度分布を踏まえて、最終的に各元素の濃度分布の基本形状を設定する必要がある。

なお、説明資料「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」⁸⁸では正規分布に従うとして設定している。同説明資料には、「主成分元素については、分布の上限値に近い濃度のデータが正規分布よりも多く出現する一様分布を保守的に適用することもある。」とあり、管理範囲がある主成分元素に対して、一様分布ではなく正規分布となる場合はどのような場合かについて、日本原子力学会は、以下のように説明している⁸⁹。

(回答待ち)

③元素分析データ数に応じた元素濃度分布条件の設定方法について、元素成分は収集できるデータ数に限りが生じるとして、分析によって収集できた、検出数が比較的少ない場合と非常に少ない場合に対して、その保守性を設定する方法を示している。

・データ数が比較的少ない場合

平均濃度：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。

濃度分布の標準偏差：保守的な標準偏差を適用する。

・データ数が非常に少ない場合（その1）

平均濃度：検出値の平均値とする。

濃度分布の標準偏差：保守的な標準偏差を適用する。

・データ数が非常に少ない場合（その2）

平均濃度：保守的に検出最大値を濃度分布の $+2\sigma$ （標準偏差）の値で設定する。

濃度分布の標準偏差：保守的な標準偏差を適用することによって濃度分布条件を設定する。

「D.4.3 元素分析データ数量に応じた濃度分布条件設定」には、元素分析データ数が「十分にある場合」、「比較的少ない場合」、「非常に少ない場合」に分けて規定されている。「非常に少ない場合」は元素分析データ数が1～2点とあるが、「十分にある場合」及び「比較的少ない場合」の具体的なデータ数について、日本原子力学会は、以下のよう⁹⁰に説明している。

基本的な考え方は、「第2回会合における日本原子力学会への説明依頼事項に対する回答」の回答14(2)を参照ください。

なお、標準では定量的な数値は示していませんが、「十分にある場合」のデータ数は、元素によっても異なると考えられますが、分布が安定するデータ数として概ね数十点程度と考えます。

⁸⁸ 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資料1-1、23頁

⁸⁹ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答7

⁹⁰ 第3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参考資料3-1 回答11

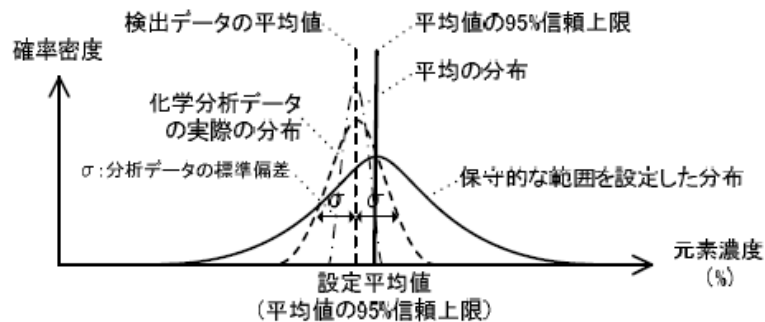
(参考) 第2回会合における日本原子力学会への説明依頼事項に対する回答」の回答 14(2)

取得検出データ数	検出下限値のみ	非常に少ない (1, 2点の検出数)	比較的少ない (3点以上十分未満)	十分にある場合
平均値	①検出下限値で設定 ②検出下限値以下の領域で設定 (下限値から 2σ の位置)	①検出値で設定 ②検出値以下の領域で設定 (検出値から 2σ の位置)	平均値の信頼上限で設定	得られた検出データの平均値で設定
標準偏差の適用の考え方	①— ②同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を踏まえて設定 (信頼下限)	①同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を参考にして設定 (信頼上限) ②同左	得られた検出データの標準偏差の信頼上限で設定	得られた検出データの標準偏差で設定

注記 ①②は、各々の場合の平均値と標準偏差の適用の考え方において、それぞれ対比している。

評価を追加

- ④「b)元素分析データ数が比較的少ない場合」について、「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できる」としている。例示の図(下図参照)では、検出データの平均値の95%信頼上限を設定平均値とした「保守的な範囲を設定した分布」が示されているが、この元素成分濃度分布に基づく放射化計算の範囲について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁹¹。



例 元素分析データ数が比較的少ない場合の濃度分布の設定のイメージ

検出データの平均値の95%信頼上限を設定平均値とするなどによって設定した「入力用設定分布」の分布範囲全体 (平均値と標準偏差による分布の設定を行ったもの) を使用して、その中から、「入力用基礎データベース」の分布形状に応じた確率分布の全体からランダムサンプリングによって、1つずつの入力データを選定し、この選定操作を入力データ数として充足するまで続け、

⁹¹ 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資料 2-1-1 回答 13

入力条件を上げます。

これによって、「入力用設定分布」の部分的な範囲でなく、保守的に設定した濃度分布の全体範囲を網羅した入力条件とすることが出来ます。

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)
点推定法 (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、 <u>保守性(信頼上限値の適用など)</u> を勘案して設定する。	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、 <u>保守性(最大条件の適用など)</u> 勘案して設定する。	入力用基礎データベースの照射時間分布を踏まえ、 <u>保守性(最大時間の適用など)</u> を勘案して設定する。
区間推定法 (放射化物 の範囲を網 羅する複数 の入力デー タの設定)	<u>入力用設定分布からのランダムサンプリング</u> ・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から設定した入力用設定分布(保守性考慮した分布)からのランダム抽出によって設定する。 ・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。 ・ランダム抽出方法は、JIS Z 9031 に示される方法。(右記にも適用)	<u>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</u> ・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。 ・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。 ・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及びスペクトル(放射化断面積)を設定する。	<u>入力用設定分布からのランダムサンプリング</u> ・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から設定した入力用設定分布からのランダム抽出によって照射時間を設定する。 ・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。 ・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

評価を追加

- ⑤ 「c) 元素分析データ数が非常に少ない場合の設定方法」は、二つの仮定方法のいずれかで平均値、標準偏差を設定する方法があるとしている。それぞれの設定方法に基づく評価結果の同等性について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁹²。

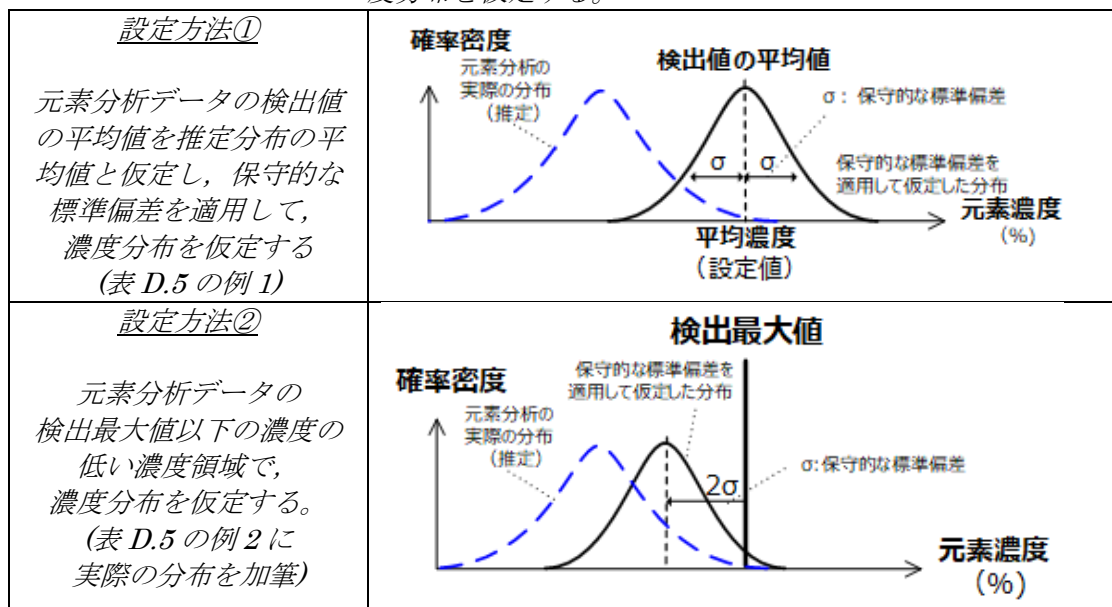
標準は、元素成分の濃度分布を設定する各手法間に同等性を求めているものではありません。また、附属書 D の D. 4. 3 に示します 2 つの設定方法は、いずれも真値に対して、保守的な評価結果を得るための方法です。このため、適用する濃度分布の設定方法によって保守性が変わります。

したがって、適用する入力条件の設定方法によって保守性の考え方が異なりますので、評価結果は、設定方法①>設定方法②となります

⁹² 第 3 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参考資料 3-1 回答 10

設定方法① 元素分析データの検出値の平均値を推定分布の平均値と仮定し、保守的な標準偏差を適用して、濃度分布を仮定する

設定方法② 元素分析データの検出最大値以下の濃度の低い濃度領域で、濃度分布を仮定する。



評価を追加

⑥「表 D. 5—元素分析データが非常に少ない元素の濃度分布条件設定方法」の「例 2 検出最大値から分布を評価する場合のイメージ」について、1～2 点の検出データから得られた濃度を「検出最大値 (保守的)」として、推定分布の平均濃度 (設定値) を検出最大値 (保守的) の -2σ に設定している。

a) この方法が適用できるのは、検出下限値 (以下「N. D. 値」という。) のデータ数が十分ににある場合と想定されるが、そのデータ数について、日本原子力学会は、以下のよう

に説明している⁹³。

検出下限値のデータ必要数を定量的に評価することは、難しいと考えます。ただし、元素分析において「検出下限値のみ」又は「1, 2 点の検出データ」となるおそれのある元素は、附属書 D の表 D. 4 に示しますように、検出することが比較的難しい「微量成分元素」であり、その濃度分布は、附属書 G の表 G. 13 に示します多くの文書にありますように「対数正規分布」を示すと考えられます。

その分布の信頼性を左右する検出下限値の妥当性は、種々の文献での材料種類、分析方法の情報によって評価することは可能であることから、標準ではこの入力データの設定の考え方を示しております。

このため、検出下限値以下又は 1, 2 点の検出値以下の濃度領域での対数正規分布を設定して評価することは、適切であると考えています。

なお、元素濃度の分析による検出下限値は、測定機器、測定時間、測定試料量、バックグラウンドなどによって決まるものですので、分析データ数に依存することは低いと考えられます。

⁹³ 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資料 2-1-1 回答 14(1)

また、理論計算による放射能濃度の評価結果に検出下限値が直結しますの
で、事業者はできる限り検出下限を下げる努力を払うことが想定されますし、
実際に、元素分析に適用している測定機器も次のような高性能な機器を適用
して測定しており、その測定結果として得られた検出下限も、海外での分析事
例よりも低濃度での検出下限となっています。

これらのことを勘案すると、検出下限の妥当性の確認は実際に検出下限を
決定する運用段階で、実際に適用した「測定機器、測定時間、測定試料量及び
バックグラウンド」を確認し、データ数を含めた妥当性を評価することが適切で
あると考えます。

ICP-AES：誘導結合プラズマ発光分光分析

ICP-MS：誘導結合プラズマ質量分析

GD-MS：グロー放電質量分析

SUS304 に関する化学分析において全て検出下限値となっている主な元素の情報

元素	生成核種	分析法	分析数	検出下限値 (平均)	NUREG /CR3474 (SUS)
Cl	Cl-36	蛍光 X 線分析法 GD-MS	9	7.3×10^{-4} wt%	7.0×10^{-3} wt%
Th	Sr-90	ICP-AES	9	5.0×10^{-7} wt%	1.0×10^{-4} wt%
U	Tc-99 I-129 Cs-137 α 核種	ICP-AES	9	5.0×10^{-7} wt%	2.0×10^{-4} wt%
Co ¹⁾	Co-60 Ni-63	ICP-AES	21	7.6×10^{-4} wt%	—
Nb ¹⁾	Nb-94	ICP-MS ICP-AES	21	3.9×10^{-3} wt%	—
Mo ¹⁾	Tc-99	ICP-AES	21	7.6×10^{-4} wt%	—

出典 放射化金属の放射能濃度評価における照射材料中の微量元素デ
ータに関する検討について、日本原子力発電、2010年8月（附属書G
参考文献）

注記 GD-MS：グロー放電質量分析、ICP-AES：誘導結合プラズマ発光分
光分析、

ICP-MS：誘導結合プラズマ質量分析

注1 参考までに、ジルカロイ4のND値を示す。

元素の検出下限値は、分析に用いた試料量や測定器の性能・測定方法等、化学分析
の方法に依存する。対象となる放射化生成物の放射能、放射化断面積及び照射条件か
ら逆算し、起源元素をどの程度の濃度レベルで評価するべきかを明らかにした上で、
その値に対してどの程度の検出下限値を目標とするかによっても扱いが変わると考
えられる。化学分析法の妥当性の評価のほか、目標とする検出下限値について、日本

原子力学会は、以下のように説明している⁹⁴。

(回答待ち)

b) 検出データが 1 点の場合に、元素濃度分布の標準偏差 σ の決定方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁹⁵。

起源元素の濃度を分析によって 1、2 点程度しか検出できなかった場合は、実施したサンプリング分析の結果からでは、標準偏差を設定することができません。このため、「同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を参考にした標準偏差」で設定する方法を適用します。

(分布の設定方法について)

濃度分布の設定方法は、附属書 H に示しますように、「同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布」の収集方法、適用条件及び評価方法を踏まえて設定しました「標準偏差」を適用します。

これを用いた濃度分布の設定は、図 H.1 に示すとおり、保守的に 1~2 点の検出最大値を、濃度分布の上側限界値 (例 上側限界値 = 平均 + 2σ (標準偏差) の濃度) とし、同一の元素又は化学的性質が類似した元素の既知の濃度分布 (別途、文献値などによって収集した濃度分布) から“平均的な標準偏差”などの濃度分布条件を設定した上で、平均濃度を設定する方法を示しています。

なお、通常、推定される濃度の分布は、検出最大値以下の領域で検出最大値から約 3σ の位置を平均値とした分布で存在すると考えられます。これを検出最大値から 2σ の位置を平均値とした分布で上側にスライドすることで、保守性を加味します。(標準偏差 σ の設定方法について)

標準では、附属書 D に示しますように、濃度分布の設定に必要となる“平均値”、“標準偏差 σ ”を元素分析によって得られたデータ数量に応じて保守性を加味して設定する考え方を、下表のように示しています。

取得検出データ数	検出下限値のみ	非常に少ない (1, 2 点の検出数)	比較的少ない (3 点以上十分未満)	十分にある場合
平均値	① 検出下限値で設定 ② 検出下限値以下の領域で設定 (下限値から 2σ の位置)	① 検出値で設定 ② 検出値以下の領域で設定 (検出値から 2σ の位置)	平均値の信頼上限で設定	得られた検出データの平均値で設定
標準偏差の適用の考え方	① - ② 同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を踏まえて設定 (信頼下限)	① 同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を参考にして設定 (信頼上限) ② 同左	得られた検出データの標準偏差の信頼上限で設定	得られた検出データの標準偏差で設定

注記 ①②は、各々の場合の平均値と標準偏差の適用の考え方において、それぞれ対比している。

⁹⁴ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 8(2)

⁹⁵ 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資料 2-1-1 回答 14(2)

注記 「3点」は、統計値として標準偏差が計算できる最低数量。

上記の“標準偏差”を同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を参考にして設定する考え方は、収集、選定した元素濃度データを利用し、検出困難元素の標準偏差を評価上の保守性を踏まえた上で、信頼下限区間を考慮した標準偏差で設定します。この標準偏差の設定方法の例を、附属書 H の図 H.3 及び表 H.1 で示します。

基本的には、図 H.3 に示すように、標準偏差をより小さく設定することで保守性を考慮することが出来ますが、表 H.1 に示すように、標準偏差のデータが示す正規性を評価することで 99%信頼下限の標準偏差を適用できると考えます。

基本的には、図 H.3 に示すように、標準偏差をより小さく設定することで保守性を考慮することが出来ますが、標準偏差の最小値の適用は、保守的すぎると考えられますので、表 H.1 に示すように、データが示す正規性を評価することで 99%信頼下限値の標準偏差を適用できると考えます。

○通常、推定される濃度の分布は、検出最大値以下の領域で検出最大値から約 3σ の位置を平均値とした分布で存在すると考えられる。」の根拠について説明してください。

- ⑦ 「d) 元素分析データに検出下限値しかない場合」は、三つの方法のいずれかで平均値、標準偏差を設定できるとしている。それぞれの設定方法に基づく評価結果の同等性について、日本原子力学会は、以下のように説明している⁹⁷。

標準は、各手法間に同等性を求めているものではありません。

附属書 D の D.4.3 の「d) 元素分析データに検出下限値しかない場合」に示します 3 つの設定方法は、いずれも真値に対して、保守的な評価結果を得るための方法です。このため、適用する方法によって保守性の考え方が変わります。

したがって、入力条件の設定方法としての採用する保守性の考え方が異なりますので、評価結果は、基本的に設定方法①>設定方法②>設定方法③となります。

設定方法① 元素分析データの検出下限値を平均値としてそのまま使用する

設定方法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類似試料の標準偏差を利用して設定する

設定方法③ 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

評価を追加

- ⑧ 「表 D.6—元素分析データに検出下限値しかない元素の濃度分布条件設定方法」において、推定分布の平均濃度（設定値）を N.D. 値の -2σ に設定している。
- a) この方法が適用できるのは、N.D. 値のデータ数が十分にある場合と想定されるが、そ

⁹⁷ 第3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参考資料 3-1 回答 12

のデータ数について、日本原子力学会は、上記④a)と同じ理由であると説明している⁹⁸。

(追而)

b) N. D. 値を平均濃度として用いるのではなく、それよりも 2σ 低い値を平均濃度として用いることができる理由について、日本原子力学会は、上記④a)と同じ理由であると説明している⁹⁹。

(追而)

c) 濃度分布の標準偏差 σ として、「同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を評価して適用」とあるが、具体的な求め方について日本原子力学会は、上記④a)と同じ理由であると説明している¹⁰⁰。

(追而)

保守性として、データ群の標準偏差の分布の何%を見込むことを妥当とするのか、及びその根拠について、日本原子力学会は、以下のとおり説明している¹⁰¹。

(回答待ち)

⑨「解説 6.2.1 元素成分条件の設定」には、「(略) 同一の濃度分布 (対数正規分布) を設定する元素の濃度分布データの標準偏差の分布を評価した結果を、解説図 1 に示すが、標準偏差の分布に大きな差異は、見受けられない (収集した元素分析データの標準偏差の最大は、SUS304 中の Co である。これは、試料サンプルに一般材料及び原子力仕様材料の両者を加えたことによって元素濃度分布範囲が大きくなったもので、一般材料を除いた場合の標準偏差の分布の範囲は、ほぼ同等である)。」とされている。「一般材料を除いた場合の標準偏差の分布の範囲は、ほぼ同等である」について、日本原子力学会は、以下のとおり説明している¹⁰²。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

追而

⁹⁸ 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資料 2-1-1 回答 15(1)

⁹⁹ 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資料 2-1-1 回答 15(2)

¹⁰⁰ 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資料 2-1-1 回答 15(3)

¹⁰¹ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 8(1)

¹⁰² 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 49

4. 4. 3 中性子条件の設定

中性子条件の設定における基本事項は「附属書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」の「D. 5. 1 中性条件の設定における基本事項」に、中性子フルエンス率等の設定方法は同「D. 5. 2 中性子フルエンス率などの設定方法」に規定している。

(1) 規定の内容

D. 5 中性子条件の設定					
D. 5. 1 中性子条件の設定における基本事項					
<p>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。</p> <p>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、表 D. 7 に示す。</p>					
表 D. 7—中性子フルエンス率の設定における基本的な考慮事項					
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	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">軸方向</td> <td> <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)} </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">径方向</td> <td> <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)} </td> </tr> </table>	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)}
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)} 				
<p>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。</p> <p>^{b)} 燃料の種類とは、例えば、UO₂、MOX。</p> <p>^{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。</p> <p>^{d)} 評価対象とする放射化金属等自身の部位で中性子フルエンス率が増加する場合。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。</p> <p>^{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。</p> <p>^{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。)</p> <p>^{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。</p>					

一方、放射化断面積は、基本的に、放射化計算コードに内蔵されている既存の断面積ライブラリを使用すればよいが、中性子スペクトル評価の結果などによって放射化範囲の中性子スペクトルの特性を考慮して固有の断面積を作成することもある。

ただし、既存の断面積ライブラリを使用する場合には、原子炉型式及び燃料組成が類似していればライブラリ間の差異が放射化計算に与える基本的に影響は、小さいと考えられるものの、1群実効断面積の作成に影響を与える中性子スペクトルの特性については、あらかじめ把握しておく必要がある。

D.5.2 中性子フルエンス率などの設定方法

中性子フルエンス率は、適用する放射能濃度決定方法に応じ、次のいずれかの方法による設定がある。

a) 個別に条件設定する方法 中性子の照射履歴に基づき、評価対象とする放射化金属等ごとに、中性子条件を詳細に設定する方法。

なお、放射化断面積については、中性子スペクトルの代表性を確認した上で、値を設定することもある。

b) 代表条件を設定する方法 中性子の照射履歴に基づき、複数の評価対象とする放射化金属等を適切又は放射能濃度評価結果が大きくなるように代表する中性子条件を設定する方法。

なお、濃度比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。

さらに、放射化計算の条件の設定を目的とした中性子フルエンス率の評価を行う場合には、中性子フルエンス率の計算に利用するコード及び群定数について、利用の目的を十分考慮した上で、適切な手法（信頼性のある放射化計算コード）を適用することがある。中性子計算は、炉心核的性能計算（単位燃料集合体核特性計算コード、3次元核熱水力解析）、ボルツマンの中性子輸送方程式を解く手法が主流であり、Sn法（微分型中性子輸送方程式）、モンテカルロ法、直接積分法などが該当する。これらの計算手法に加えて、外挿計算法、アルベド輸送計算法などを、それぞれの特徴に合わせて使用する。

例 1 断面積ライブラリ（核データ）としては、日本原子力研究開発機構の JENDL、米国ブルックヘブン国立研究所の ENDF/B などがある。

例 2 計算コードとしては、Sn法を用いた輸送計算コードには、米国オークリッジ国立研究所の ANISN、DOT、TORT が、モンテカルロ法を用いた輸送計算コードには、米国ロスアラモス国立研究所の MCNP がある。

(2) 検討の結果

放射化計算に必要な中性子条件を、中性フルエンス率、中性子スペクトル、放射化断面積に大別し、それぞれの設定における考慮事項を示している。中性子フルエンス率については、燃料の条件、評価対象物の炉内の設置位置、ボイド率等のその他の条件を考慮することとしている。放射化断面積については、既存の断面積ライブラリを使用すればよいが、中性子スペクトル評価の結果などによって放射化範囲の中性子スペクトルの特性を考慮して固有の断面積を作成することもあるとしている。

①「D.5.1 中性子条件の設定における基本事項」には、中性子条件を「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」に大別しており、中性子フルエンス率

と放射化断面積の設定における基本的な考慮事項が記載されている。中性子スペクトルの設定における基本的な考慮事項について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁰³。

中性子スペクトルの設定における基本的な考慮事項としては、附属書 G の G2.1 に示しますように、附属書 D の表 D.7 に示す中性子フルエンス率の設定における基本的な考慮事項となります。

G.2 中性子条件の設定例

G.2.1 概要

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。中性子フルエンス率・中性子スペクトルは、原子炉型式・燃料条件、照射される評価対象とする放射化金属等の位置条件、部位などによって変化する。このため、中性子フルエンス率・中性子スペクトルを計算で求めるには、実際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。

例 中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定する場合に考慮が必要となる基本的な事項は、表 D.7 に示した次による。

表 D.7—中性子フルエンス率の設定における基本的な考慮事項

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)}
<p>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。</p>		

¹⁰³ 第3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参考資料 3-1 回答 13(4)

評価を追加

「一方、放射化断面積は、基本的に、放射化計算コードに内蔵されている既存の断面積ライブラリを使用すればよいが、中性子スペクトル評価の結果などによって放射化範囲の中性子スペクトルの特性を考慮して固有の断面積を作成することもある。」の意味について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁰⁵。

(回答待ち)

放射化断面積の設定において、ORIGEN、MCNP (PHITS も用いるのであれば、それを含む) を使用する際に、使用する核データライブラリによって計算結果に差異が生じると想定される。使用を想定している核データライブラリとともに、核データライブラリによって計算結果に差異があるのか、差異があるならば、放射能濃度決定においてどのように考慮するのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁰⁶。

基本的には核データライブラリは日本原子力研究開発機構などの各国の研究機関において、実験値をベースとして核物理の理論計算値や統計学による推定値を加えることによってもっとも真値に近づくよう核データを評価された評価済核データライブラリであり、また、各種実験データに基づくベンチマーク解析によって臨界や遮蔽 (中性子、ガンマ線) の観点でバージョン間の比較を含めて検証²⁾された信頼性の高いものであることから、どれも使用することは可能と考えます。

注 1) https://wwwndc.jaea.go.jp/Labo/index_J.html

注 2) K. Shibata et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3", J. Nucl. Sci. Technol. vol 39, No. 11, p. 1125 (2002).

核データライブラリの選定においては、その時点での新しい核データライブラリとの比較を行い、差異を確認した上で使用することとなります。もし、核データライブラリ間での大きな差異があれば、新知見の反映の有無や実測値との比較によって妥当性を確認することとなります。

なお、中性子フルエンス率評価、放射化評価において、使用を想定されている核データライブラリの例は、以下のとおりです。

JENDL-4, JENDL-3.3, JENDL-3.2, JENDL-3, JENDL/AD-2017³⁾

ENDF/B-IV, ENDF/B-V, ENDF/B-VI, ENDF/B-VII

注 3) <https://wwwndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-ad-2017/jendl-ad-2017.html>

(原子炉施設などの廃止措置に資するため、放射性核種の生成量評価のために日本原子力研究開発機構にて整備された放射化断面積。

「核原料物質又は核燃料物質の精錬の事業に関する規則に基づく線量限度等を定めた告示」(原子力規制委員会告示第八号) に記載された放射性核種のうち原子炉施設に係わる核種に起因する放射能の評価に必要な 311 核種 (親核種数) を網羅する放射化断面積データベース)

¹⁰⁵ 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参考資料 ●-● 「適用範囲と理論的方法の特徴」 回答 9 (1)

¹⁰⁶ 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資料 2-1-1 回答 12

「中性子スペクトル評価の結果などによって放射化範囲の中性子スペクトルの特性を考慮して固有の断面積を作成することもある。」とり、具体的な方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁰⁷。

「中性子スペクトル評価の結果などによって放射化範囲の中性子スペクトルの特性を考慮して固有の断面積を作成することもある。」については、ORIGEN2 コードシリーズの手順です。ORIGEN2 コードシリーズについては、原子炉内で照射される放射化金属等（制御棒、バーナブルポイズン棒などの運転中廃棄物）に対しては、原子炉内の燃料領域のスペクトルで縮約された既存の1群実効断面積ライブラリ（ORLIB-J40 など）が使用できますが、燃料領域以外など中性子スペクトルが異なる位置の放射化金属等（バッフルなどの解体廃棄物）に対しては、当該位置の中性子スペクトルを反映した1群縮約断面積を準備する必要があります。断面積の作成フローを下図に示します。

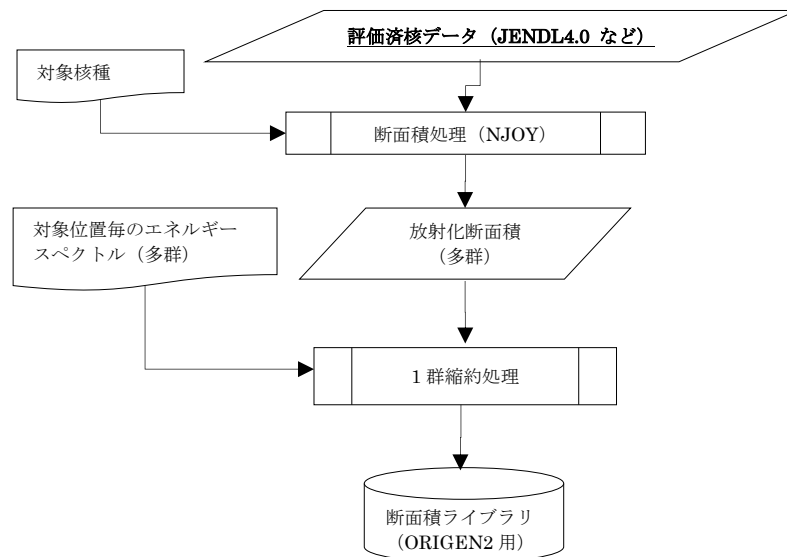


図 1 群実効核反応断面積ライブラリの作成フロー

「中性子スペクトル評価の結果」及び「中性子スペクトルの特性」について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁰⁸。

(回答待ち)

「1群実効断面積の作成に影響を与える中性子スペクトルの特性については、あらかじめ把握しておく必要がある。」に関し、具体的な実施内容と、1群実効断面積のみでよい理由について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁰⁹。

「既存の断面積ライブラリを使用する場合には、原子炉型式や燃料組成が

¹⁰⁷ 第3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参考資料 3-1 回答 13(2)

¹⁰⁸ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 9(2)

¹⁰⁹ 第3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参考資料 3-1 回答 13(3)

類似してれば・・・」の部分については、既存の1群実効断面積が用意されている ORIGEN2 コードシリーズについて記載しているため、1群実効断面積のみの記載としています。

ORIGEN2 コードシリーズにおいては、既存の1群実効断面積ライブラリの使用の際には、原子炉型式や燃料組成が類似していれば、原子炉内で照射される放射化金属等(制御棒、バーナブルポイズン棒などの運転中廃棄物)に対して使用可能です。

ただし、既存のライブラリと燃料の燃料組成や燃焼度などの条件が異なる場合については、あらかじめ中性子輸送計算をした結果からそのスペクトルの差異を把握し適用性を確認することが必要となります。

評価を追加

- ② 「D.5.2 中性子フルエンス率などの設定方法」では、中性子フルエンス率は、適用する放射能濃度決定方法に応じ、中性子フルエンス率の設定方法として、中性子の照射履歴に基づき、評価対象とする放射化金属等毎に個別に条件設定する方法と、中性子の照射履歴に基づき、複数の評価対象となる放射化金属等適切又は放射能濃度評価結果が大きくなるように代表する中性子条件を設定する方法を示している。「a) 個別に条件設定する方法」と「b) 代表条件を設定する方法」のいずれかの方法によるかの選定の判断基準について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹¹⁰。

中性子フルエンス率及びスペクトルは、個別に条件設定する方法又は代表条件を設定する方法の2つの方法があります。その設定方法については、照射履歴に基づき、以下のとおり判断し設定します。

個別設定：照射履歴が特定できるすべての評価対象について、評価対象ごとに個別の中性子フルエンス率及びスペクトルを設定する。

代表設定：複数の照射履歴をもつ同種の評価対象(例 CB、BP、制御棒、黒鉛ブロック)について、説明性のある範囲で複数の評価対象を適切に(平均的に)又は放射能濃度が大きくなるよう代表する中性子フルエンス率及びスペクトルを設定する。

評価を追加

「b) 代表条件を設定する方法」において、「中性子の照射履歴に基づき、複数の評価対象とする放射化金属等を適切又は放射能濃度評価結果が大きくなるように代表する中性子条件を設定する」の「適切に代表する中性子条件」について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹¹¹。

「適切に代表する中性子条件」を設定する方法とは、回答8(1)に示しましたように、放射能濃度評価結果が大きくなるように代表設定する中性子条件、配置位置のローテーションから中性子フルエンス率分布を考慮して、運転サイクル数ごとにローテーションを代表的な配置位置のパターンとして設定して代表的な複数の中性子条件を設定する方法です。

評価を追加

「さらに、放射化計算の条件の設定を目的とした中性子フルエンス率の評価を行う

¹¹⁰ 第3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参考資料3-1 回答14(2)及び回答15

¹¹¹ 第3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参考資料3-1 回答14(1)

場合には、中性子フルエンス率の計算に利用するコード及び群定数について、利用の目的を十分考慮した上で、適切な手法（信頼性のある放射化計算コード）を適用することができる。」について、中性子フルエンス率を評価するのに放射化計算コードを適用できる理由について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹¹²。

炉心内の中性子フルエンス率に関しては、放射化計算コードでは燃料組成、出力及び燃焼期間をインプットとした燃焼計算を行うことも可能であり、その燃焼計算時に中性子フルエンス率が付随的に評価されるため、放射化計算コードを炉心内の中性子フルエンス率の評価にも適用できます。

「群定数」及び「1群実効断面積」については「3用語及び定義」において記載がないが、日本原子力学会は、以下のように説明している¹¹⁶。

群定数は、評価済核データ（JENDL など）を基に、連続エネルギーの核反応断面積をエネルギー区間ごとに平均化群数分け（離散化）して整備された断面積で、中性子・光子の輸送計算をする際に利用します。例えば、JENDL-4.0の群定数に中性子199群、光子42群にて整備されたMATXS-LIB-J40があります。

1群実効断面積は、ORIGEN2コードシリーズにて用いられている核反応断面積の形式で、エネルギー毎の核反応断面積を対象位置の中性子スペクトルにて1群に縮約したものです。1群縮約においては、各エネルギー群の中性子フルエンス率（中性子スペクトル）と核反応断面積の掛け合わせの積分値である反応量が保存されるように、下式のとおり、1群の核反応断面積を作成します。

例えば、各種炉型や燃料仕様に対する原子炉燃料中の中性子スペクトルに基づき整備されたJENDL-4.0の1群実効断面積にORLIB-J40があります。

$$\sigma_1 = \frac{\sum g \sigma \cdot \Phi}{\sum g \Phi}$$

σ_1 : 1群実効核反応断面積

σ : 核反応断面積

Φ : 中性子フルエンス率

$\sum g \Phi$: 1群の中性子フルエンス率（ g は全群に対して積分することを示す）

評価を追加

炉心核的性能計算の具体的な方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹¹⁹。

（回答待ち）

炉心核的性能計算とボルツマンの中性子輸送方程式との違いについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹²⁰。

（回答待ち）

¹¹² 第3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参考資料3-1 回答14(4)

¹¹⁶ 第3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参考資料3-1 回答13(1)

¹¹⁹ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答11(2)

¹²⁰ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答11(3)

本標準が対象とする3つの炉型について、どの炉型に対してどのライブラリを適用するのか、炉型に応じたライブラリをどのような観点で選択したのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹²²。

(回答待ち)

JAEA 核データセンターでは放射化断面積データベース JENDL/AD-2017 を公開しており、JENDL/AD-2017 には、JENDL-4.0 には未収録であった基底状態及び準安定状態に対する評価済生成断面積、及び、JENDL-4.0 の公開以降に評価された核種の放射化断面積も収録されている。放射化評価において JENDL/AD-2017 をどのように取り扱うのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹²³。

(回答待ち)

以下に示す各種中性子計算方法に関し、同等な結果を得るための条件について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹²⁶。

- ・ Sn 法 (微分型中性子輸送方程式)
 - ・ モンテカルロ法
 - ・ 直接積分法
- 上記に加えて使用するもの
- ・ 外挿計算法
 - ・ アルベド輸送計算法

標準では、適用する中性子計算方法に関して、同等性を求めているものではありません。ただし、それぞれ計算方法において、保守性を考慮した評価条件によって計算することで、保守的な計算結果が得られます。その観点において同等性があります。

主に使用することを想定しています中性子輸送計算方法は、以下のとおりです。なお、外挿計算法及びアルベド輸送計算法は他の計算結果から補正する方法であるため、「加えて」と表現しています。

- ・ Sn 法 (微分型中性子輸送方程式)

計算体系を表示する座標と放射線粒子の進行方向を表す角度座標を離散化して、偏微分型のボルツマン輸送方程式を解く方法のうち、最も一般的な計算手法です。

- ・ モンテカルロ法

積分型ボルツマン輸送方程式を解く方法であり、発生させた乱数列を用いて、確率分布にしたがって線源から粒子を放出し、輸送カーネル及び衝突カーネルの計算を行うことで放射線束を求める方法です。

- ・ 直接積分法

ボルツマン方程式を放射線の進行方向に沿って直接積分してメッシュごとに粒子束を評価するものです。

¹²² 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 10(1)

¹²³ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 10(2)

¹²⁶ 第3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参考資料 31- 回答 14(3)

- ・ 外挿計算法
他の計算結果から外挿して補正する計算方法です。
- ・ アルベド輸送計算法
他の計算結果からアルベドデータで補正する計算方法です。

評価を追加

中性子輸送計算コードの例として MCNP が挙げられており、他のモンテカルロシミュレーションコード、例えば、国産の PHITS を用いる場合にどのような手順になるのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹²⁸。

PHITS 使用する場合についても、*MCNP* と同じ手順になるものと考えます。

PHITS と MCNP の違いを踏まえた中性子輸送計算の設定上考慮すべき事項について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹²⁹。

(回答待ち)

原子炉の運転時は、原子炉内外の中性子が測定されており、測定結果との比較などにより中性子フルエンス率計算結果の妥当性を確認あるいは補正することが考えられる。中性子フルエンス率計算結果と中性子測定結果との比較について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹³³。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件 追而

¹²⁸ 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資料 2-1-1 回答 16

¹²⁹ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 11(5)

¹³³ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 11(4)

4. 4. 4 照射条件の設定

中性子の照射条件設定の基本的考え方は「附属書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」の「D. 6. 1 中性子の照射条件設定の基本的考え方」に、中性子の照射における考慮事項は同「D. 6. 2 中性子の照射条件設定における考慮事項」に規定している。

(1) 規定の内容

D. 6 照射条件の設定			
D. 6. 1 中性子の照射条件設定の基本的考え方			
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。			
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。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を、表 D. 8 に示す。			
表 D. 8—プラント寿命中における中性子の照射時間及び照射停止時間の基本的考え方			
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
照射時間 (合計)	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時間 (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。			
D. 6. 2 中性子の照射条件設定における考慮事項			
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、表 D.9 に示す。

表 D.9—照射条件の設定において考慮が必要な基本事項

項目		考慮する必要のある主な事項
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)} ⁶⁰Co 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。

なお、表 D.9 では、照射条件を設定する場合に考慮する基本的な事項を示したが、基本的な事項については、次の考え方で整理を行うことができる。

D. 6. 2. 2 中性子の照射時間

中性子の照射時間は、放射能濃度に大きな影響を与えるため、評価対象とする放射化金属等の放射能濃度を決定する場合は、評価対象とする放射化金属等の放射能濃度を代表できるような照射時間、又は放射能濃度評価結果が大きくなるような照射時間の条件を設定する必要がある。

一方、中性子の照射時間の長さが放射能濃度比に与える影響については、原子力発電所の供用期間中に発生する廃棄物の照射時間（～10 年連続照射）程度であれば、影響は比較的小さい。しかしながら、解体時などに発生する廃棄物の中性子の照射時間（例えば、数十年にわたる長期照射が相当）になると、⁶⁰Co などの比較的短半減期核種に関しては、放射能濃度に対する影響が生じるため、これら比較的短半減期核種との濃度比を用いる場合には、評価対象とする放射化金属等の中性子の全照射時間の長さに応じて放射化計算の条件設定を変えるなど、適切に考慮する必要がある。

D. 6. 2. 3 照射終了後の時間（全ての照射が終了した後の）

⁶⁰Co のような比較的短半減期の核種は、中性子の照射が完全に終了した後の減衰の影響を受けるため、減衰期間を適切に考慮した結果の補正を行う必要がある（ただし、減衰補正の効果が小さい場合は、中性子の照射停止時の放射化計算結果をそのまま適用してもよい）。

なお、放射能濃度比を用いる場合において、Key 核種及び難測定核種の組合せに、比較的短半減期核種及び比較的長半減期核種の組合せを利用する場合は、Key 核種の非破壊外部測定結果などに適切な減衰補正を考慮する必要がある。

例 Key 核種に ^{60}Co を適用する場合は、非破壊による外部から測定した ^{60}Co の放射能濃度を廃棄物発生日に減衰補正し、これに放射化計算結果で算定した“濃度比”を乗じて廃棄物発生日での難測定核種濃度を算定した上で、難測定核種の放射能濃度を評価したい日の放射能濃度に減衰補正するなどの考慮が必要である。

D. 6. 2. 4 照射停止時間（供用期間中における）

中性子の照射停止時間の合計が同一であれば、原子炉の供用期間中の照射が停止している各々の時間の大小は、 ^{60}Co のような比較的短半減期の核種であっても、放射能濃度、濃度比のいずれに対する影響も基本的に小さい。このため、放射化計算の条件を設定する場合は、実態に合わせた中性子の照射停止時間（合計）を設定した上で、これを中性子の照射期間中に均等に配分するなどの方法を適用することも適切である。

ただし、中性子の照射停止時間の合計が同一であっても、長期間の中性子の照射停止時間が含まれる場合（B. 4. 2 参照）は、長期照射停止を終了し、再起動したしばらくの期間は、減衰による放射能濃度低下の影響が大きい場合もあるため、長期間の中性子の照射停止を行った場合には、この点を配慮する必要がある。

（2）検討の結果

「D. 6 照射条件の設定」には、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方法を示している。照射時間は頻度分布による設定又は個別値による設定、原子炉供用期間中の照射停止時間は均等設定又は個別設定としていること、比較的短半減期（数年以下）の核種に対しては、核種の減衰の影響の考慮をすることとしている。

濃度比法、換算係数法、濃度分布評価法によって決定する場合は、個別条件の代わりに、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として、照射条件を設定する場合に必要な基本的な事項を示している。

「D. 6. 2. 1 中性子の照射における考慮事項」は、主に中性子の照射停止時間のうち、照射終了後の減衰補正について規定している。「D. 6. 2. 2 中性子の照射時間」は、「D. 6. 2. 3 照射終了後の時間（全ての照射が終了した後の）」は、比較的短半減期の核種について、減衰器間を適切に考慮した結果の補正を行う必要があると示している。「D. 6. 2. 4 照射停止時間（供用期間中における）」は、中性子の照射停止時間の影響について言及したものであるが、長期間の中性子の照射停止時間が含まれる場合は、減衰による放射能濃度低下の影響が大きい場合もあることを示している。

①「表 D. 8—プラント寿命中における中性子の照射時間及び照射停止時間の基本的考え方」の照射時間（合計）は照射条件の設定方法を、頻度分布による設定の場合について、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）を設定すると規定している。実際の運転実績から考えられる照射実績は何らかの分布に従うものなのか、また分布の選定はどのような判断基準で行うのかについて、日本原子力学会

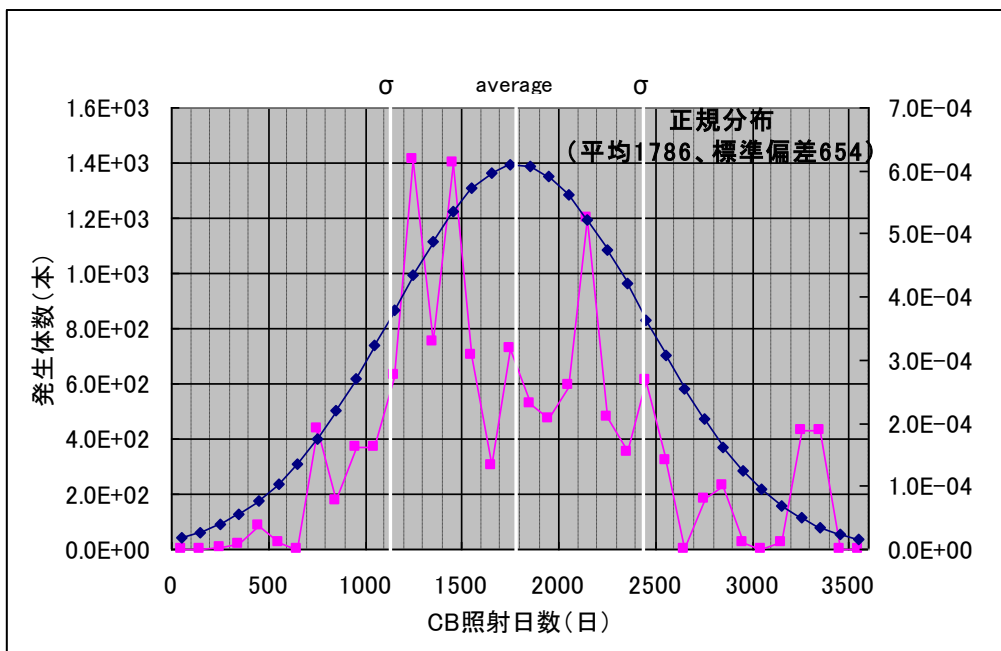
は、以下のように説明している¹³⁴。

BWR チャンネルボックスの場合、附属書Iの表I. 14に示すように、約13,000体の燃料集合体の燃焼度の実態調査結果より、燃焼度が正規分布となっていることを把握しています。

燃焼度が正規分布であれば、燃焼度に比例する照射時間の頻度分布も正規分布となります。

表 I. 14—ZrTN804D(BWR チャンネルボックスの本体)の照射時間の出現頻度分布の設定

	燃焼度の実態調査	設定頻度分布	中性子照射時間の設定条件 ^{a)}
中性子照射時間の条件	約13,000体の燃料集合体(すなわち、付随するチャンネルボックス)の燃焼度の実態調査結果を踏まえ、次の実態分布が評価された。 燃焼度 : 正規分布	正規分布	平均値=1,786日 標準偏差=654日
注 ^{a)} 中性子照射時間の設定条件は、燃料集合体の燃焼度(実績)に基づき比出力を踏まえて算出した。 なお、比出力にはプラントの設置許可申請書記載値の最小値を利用した。			



注：事業者より提供されたデータ

- ② 「D. 6. 2. 2 中性子の照射時間」において、「D. 6. 2. 2 中性子の照射時間」で中性子の照射時間については評価対象とする放射化金属等の放射能濃度を代表できるような照射時間、又は放射能濃度評価結果が大きくなるような照射時間の条件を設定するとされ

¹³⁴ 第3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参考資料 3-1 回答 16

ているが、放射能濃度を代表できるような照射時間の条件設定方法、評価結果が大きくなるような照射時間の条件設定方法が記載されていない。「比較的短半減期核種との濃度比を用いる場合には、評価対象とする放射化金属等の中性子の全照射時間の長さに応じて放射化計算の条件設定を変えるなど、適切に考慮する必要がある」と規定されている。その方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹³⁵。

区間推定法の濃度比法を用いる場合には、附属書DのD.6.2.2に示しますように、中性子の照射時間が長期にわたる場合（解体廃棄物が相当します）には、評価対象核種とKey核種との濃度比で評価しますので、Key核種にCo-60（半減期5.27年）などの比較的短い半減期の核種を選択する場合には、減衰の影響を考慮する必要があります。

この減衰の影響の具体的な例は、附属書Bの「B.4.1 中性子の照射時間」に下図の例で示しております。このKey核種であるCo-60の減衰の影響を緩和させるために、次の方法があります。

- ・ 濃度比法の適用範囲（放射化計算条件の範囲）を制限する。照射時間10年以下を対象範囲とする、又は評価期間を10年程度ごとに区切って設定することで、Key核種であるCo-60の減衰の影響を緩和する。
- ・ 核種の組合せを比較的半減期が長い核種同士にする。Key核種に半減期の比較的長いCs-137（半減期30.1年）を選択して、減衰の影響を緩和する。

（放射能濃度を代表できるような照射時間の条件設定方法、評価結果が大きくなるような照射時間の条件設定方法）

評価対象物中に生成する放射性核種の放射能濃度は、中性子照射時間に比例して高くなります。このため、評価する対象の放射能が最大放射能濃度（評価結果が大きくなるような照射時間を適用）なのか総放射能量（放射能濃度を代表できるような照射時間を適用）なのかによって設定方法が異なります。このため、条件設定方法を規定することはせず附属書に場合分けした例を示しています。また、評価対象物が、チャンネルボックスのような運転廃棄物か、解体廃棄物かによっても異なります。

① 運転廃棄物の場合の照射時間の設定例（附属書Dの表D.8参照）

- ①a 代表できるような照射時間：中性子の照射時間（合計）の実績の頻度分布（例えば、正規分布）を設定し、この頻度分布からランダムサンプリングによって選定します。
- ①b 放射能濃度評価結果が大きくなるような照射時間：①aで設定しました頻度分布の信頼上限値を平均、標準偏差によって適用します。

② 解体廃棄物の場合の照射時間の設定例（附属書Dの表D.8参照）

- ②a 代表できるような照射時間：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、実績を踏まえ個別値の照射時間を一律に設定します。
- ②b 放射能濃度評価結果が大きくなるような照射時間：②aと同じです。

（比較的短半減期核種との濃度比を用いる場合の設定方法）

「D.6.2.2 中性子の照射時間」の比較的短半減期核種との濃度比の場合の影響の例は、附属書BのB.4.1に示しておりますが、半減期の2倍程度の期間を過ぎると比較的短半減期の短いCo-60の減衰に起因した影響が顕著に表

¹³⁵ 第3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参考資料3-1 回答17及び第3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資料3-1-1「適用範囲と理論的方法の特徴」回答4

れてきますので、照射期間の長い解体廃棄物に関しては、濃度比法を適用する場合は、10年間ごとに区切るなどの計算条件範囲で、各期間の濃度比を評価する必要があります。

	比較的半減期が長い核種同士の組合せ ($^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$) (図 B.6 抜粋)	半減期が短い核種との組合せ ($^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$) (図 B.6 抜粋)
解析結果 ^{a)}		
計算条件	長期照射（～60年連続）条件で放射化計算を実施。	
影響の程度 ^{b)}	濃度比への影響：小	濃度比への影響：小（～10年程度） 中（長期照射の場合）
注 ^{a)}	放射化計算コード：ORIGEN2.2, ライブラリ：JENDL3.3 シリーズ	
注 ^{b)}	影響の程度は、“大：1桁程度以上の差異を生む”，“中：1桁程度の差異を生む”，“小：2～3倍程度以内の差異を生む”を意味する。	

放射能濃度を代表できるような照射時間の条件設定方法及び評価結果が大きくなるような照射時間の条件設定方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹³⁶。

(回答待ち)

中性子の照射時間の長さが放射能濃度比に与える影響が比較的小さい範囲として10年連続照射以下としているが、その理由と「比較的小さい放射能濃度比に与える影響」について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹³⁷。

(回答待ち)

「長期間中性子の照射停止時間が含まれる場合は、長期照射停止を終了し、再起動したしばらくの期間は、減衰による放射能濃度低下の影響が大きい場合」の「長期間の具体的期間」と「再起動したしばらくの期間」は具体的にどの程度を指すのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹³⁸。

(回答待ち)

¹³⁶ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 12(1)

¹³⁷ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 12(2)

¹³⁸ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 13

(3) 適用に当たっての条件
追而

4. 5 放射化計算の条件設定方法

放射化計算の条件設定方法については「6. 1. 2 放射化計算の条件の設定」並びに注記として「附属書 C(参考)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」及び「附属書 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」に規定している。

(1) 規定の内容

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。 — 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) 注記 詳細は, 附属書 C 及び附属書 D 参照
C. 2. 2 STEP 1: 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 (4. 3. 2項で評価)
D. 4 元素成分条件の設定 (4. 4. 2項で評価)
D. 5 中性子条件の設定 (4. 4. 3項で評価)
D. 6 照射条件の設定 (4. 4. 4項で評価)

(2) 検討の結果

(3) 適用に当たっての条件

追而

4. 5. 1 元素成分条件の設定方法

元素成分条件の設定方法については「6. 1. 2. 2 元素成分条件」並びに注記として「附属書 F(参考)放射化計算を行う場合の計算例」、「附属書 G(参考)放射化計算の入力条件の設定例」及び「附属書 H(参考)検出困難元素の濃度分布評価方法」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>6. 1. 2. 2 元素成分条件</p> <p>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。</p> <p>注記 詳細は、附属書 F 及び附属書 G 参照。</p>
<p>6. 1. 2. 2. 1 起源元素の選定方法</p> <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> <ul style="list-style-type: none">— 原子炉内で放射化によって生成する放射性同位体は、起源元素から除外できる。ただし、天然に広く存在する放射性同位体は除外しない。 <p>例 Pu などのように材料の放射化によって生成する放射性同位体。</p> <ul style="list-style-type: none">— 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。— 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。— 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は、起源元素から除外できる。
<p>6. 1. 2. 2. 2 起源元素の元素成分データの収集方法</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none">— 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。
<p>6. 1. 2. 2. 3 起源元素の成分条件の設定方法</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none">— 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。			
F. 1. 3 放射化計算 a) 元素成分条件(略)			
F. 2. 3 放射化計算 a) 元素成分条件(略)			
F. 3. 3 放射化計算 a) 元素成分条件(略)			
G. 1. 1 起源元素の選定例			
G. 1. 1. 1 概要(略)			
G. 1. 1. 2 起源元素の選定の前提条件			
a) 評価対象とする放射化金属等の想定(略)			
b) 評価対象核種の想定 評価対象核種は、本来は、中深度処分対象廃棄物の埋設処分施設の埋設事業許可申請書等に記載された放射性核種に従って評価する。ここでは、表 G. 2 に示す“政令記載核種”及び浅地中ピット処分対象廃棄物の“申請核種”を参考に、腐食生成核種、核分裂生成核種などの代表例として、次の放射性核種を評価対象核種として想定した。			
^{14}C , ^{36}Cl , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{94}Nb , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{137}Cs , 全 α ¹⁾			
注 1) α 線を放出する全ての放射性物質			
表 G. 2—中深度処分及び浅地中ピット処分の評価対象核種の例			
中深度処分		浅地中ピット処分	
政令記載核種 ^{a)}		規則記載核種 ^{b)}	申請核種例 ^{c)}
^{14}C ^{36}Cl ^{99}Tc ^{129}I		^{14}C ^{60}Co ^{63}Ni ^{90}Sr ^{99}Tc	^3H ^{14}C ^{60}Co ^{59}Ni ^{63}Ni
α 核種 ^{d)}		^{137}Cs α 核種 ^{e)}	^{90}Sr ^{94}Nb ^{99}Tc ^{129}I
			^{137}Cs 全 α ^{f)}
注 ^{a)} 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令第三十一条の表に放射能濃度が記載されている核種。			
注 ^{b)} 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一条の二第 2 項第四号(別表第一)に放射能濃度が記載されている核種。			
注 ^{c)} 六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター廃棄物埋設事業変更許可申請書に放射性廃棄物の種類ごとの最大放射能濃度が記載されている核種。			
注 ^{d)} α 線を放出する放射性物質。“低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について”(原子力安全委員会, 2007 年 5 月 21 日)では, ^{238}Pu が代表核種として記載されている。			
注 ^{e)} α 線を放出する放射性物質。“低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について”(原子力安全委員会, 2007 年 5 月 21 日)では, ^{241}Am が代表核種として記載されている。			
注 ^{f)} α 線を放出する放射性物質。六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター廃棄物埋設事業変更許可申請書の廃棄体中の放射性物質の濃度(添付書類六)では, 全 α として記載されている。			
c) 起源元素の選定の考え方(略)			
G. 1. 1. 3 起源元素の選定手順 (注:「表 G. 3—放射化計算による核種生成の有無の評価例(二次スクリーニング評価)」は添付資料○、「表 G. 5—三次スクリーニングで除外対象とできる元素例(ZrTN804D, SUS304 の場合の例)」は添付資料○、「表 G. 6—起源元素の推定存在濃度レベル例(オーダー)」は添付資料○参照)			
a) 一次スクリーニング(材料共通)(略)			
b) 二次スクリーニング(材料共通)(略)			
c) 三次スクリーニング(材料別)(略)			
d) 四次スクリーニング(材料別)(略)			
G. 1. 1. 4 起源元素の選定結果(略)			
G. 1. 2 元素成分条件の設定における考慮事項及び例(注:「図 G. 3—元素成分条件(濃度分布)の設定方法の概念フロー」は添付資料○)			

G. 1. 2. 1 概要(略)

G. 1. 2. 2 元素成分データの収集例

元素成分データは、評価対象とする放射化金属等の種類、原材料の品質を考慮した上で、評価対象とする放射化金属等を適切又は保守的に代表できる方法で収集することがある。この場合の評価対象とする放射化金属等の代表性の考慮事項としては、評価対象とする放射化金属等の種類、品質、製造工程などがある。

G. 1. 2. 3 元素成分条件の設定例(略)

G. 1. 2. 3. 1 元素成分条件の設定方式の選定例

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、次のいずれかが選択できる。

- － 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（元素成分データの平均値など）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

評価対象とする放射化金属等の元素成分条件は、表 G. 9 に示すとおり、収集する元素成分データの種類（代表分析値又は分析データ群）、元素成分条件の設定方式（代表値又は濃度分布）、及び適用する放射能濃度決定方法の種類に応じて、適切な適用が必要となる。

表 G. 9—元素成分条件の設定方式及び元素成分データの種類の放射能濃度決定方法に対する組合せの例

		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	元素成分条件の設定方式	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。

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。

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。

G. 1. 2. 3. 2 各元素の濃度分布基本形状の設定例(略)

G. 2 中性子条件の設定例

G. 2. 1 概要

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。中性子フルエンス率・中性子スペクトルは、原子炉型式・燃料条件、照射される評価対象とする放射化金属等の位置条件、部位などによって変化する。このため、

中性子フルエンス率・中性子スペクトルを計算で求めるには、実際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。

例 中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定する場合に考慮が必要となる基本的な事項は、表 D.7 に示した次による。(注：表 D.7 は 4. 4. 3 項参照)

一方、放射化断面積は、基本的に、放射化計算コードに内蔵されている既存の断面積ライブラリを使用すればよいが、中性子フルエンス率・中性子スペクトル評価の結果などによって放射化範囲の中性子スペクトルの特性を考慮して固有の断面積を作成することもある。ただし、既存の断面積ライブラリを使用する場合には、原子炉型式及び燃料組成が類似していればライブラリ間の差異が放射化計算に与える影響は、基本的に小さいものの、1 群実効断面積の作成に影響を与える中性子スペクトルの特性については、あらかじめ把握しておく必要がある。断面積ライブラリ(核データ)としては、例えば、日本原子力研究開発機構の JENDL、米国ブルックヘブン国立研究所の ENDF/B、文献[40]がある。

なお、中性子条件は、放射能濃度決定方法に応じ、次のいずれかの設定方法がある。

a) 個別に条件設定する方法 照射履歴に基づき、評価対象とする放射化金属等ごとに、中性子条件を詳細に設定する方法。

なお、放射化断面積については、中性子スペクトルの代表性を確認した上で、値を設定することもある。

b) 代表条件を設定する方法 照射履歴に基づき、複数の評価対象とする放射化金属等を適切又は放射能濃度評価結果が大きくなるように代表する中性子条件を設定する方法。

なお、濃度比法の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。

G. 2.2 BWR チャンネルボックスの中性子条件の設定例(略)

a) 設定手順

1) 単位燃料集合体核特性計算コードによって、代表燃料断面について、燃焼度及び出力密度の条件を、それぞれサイクル中期の炉心平均燃焼度、及び定格出力密度として、チャンネルボックス位置の中性子フルエンス率・中性子スペクトルを算出。

2) 代表炉心の 3 次元核熱水力解析によって、炉内径方向位置に応じた軸方向出力分布、ボイド率分布を算出。

3) 2) で求めた軸方向出力分布、ボイド率分布を利用し、1) の値をボイド率で内挿、出力密度補正を行い、炉心中央部及び最外周部におけるチャンネルボックス位置の中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定。

b) 評価結果 図 G.5 に、チャンネルボックスの軸方向位置を 1 (炉心下部) から 24 (有効燃料部上端) に分割し、各位置での炉心中央部及び最外周部の熱中性子フルエンス率の軸方向分布を図 G.6、及び高速中性子フルエンス率及び熱外中性子フルエンス率に対する熱中性子フルエンス率の比を図 G.7 に示す。放射化断面積は、放射化計算コードに内蔵されている値の適用を前提とした。また、その他の中性子条件は、 ^{235}U 濃縮度約 4%、比出力約 24 MW/MtU 及び炉心平均燃焼度約 28 GWd/MtU を計算条件としており、評価結果は、単位燃料集合体核特性計算コードの計算結果を集約したものである。中性子条件については、必要に応じて変動を考慮した。

なお、チャンネルボックスの軸方向の放射能濃度分布が、図 G.5 に示すチャンネルボックスの軸方向の中性子フルエンス率分布と同様で、炉心外の中性子フルエンス率が図 G.5 の有効燃料部上端部と同一の値であると仮定すると、有効燃料部上端

から上方の放射能濃度は、チャンネルボックス全体の数%程度であるため、放射能評価におけるこの部分の重要性は低い。

- c) 中性子条件設定の考え方 b)で評価したチャンネルボックスの径方向位置（最外周，中央など）ごとの中性子フルエンス率の軸方向分布を利用して，適用する放射能濃度決定方法の種類に応じて，個別条件又は代表条件の設定が必要となる。

G. 2. 3 PWR 制御棒の中性子条件の設定例（略）

- a) 設定手順（略）

- b) 評価結果 制御棒に対する中性子フルエンス率の評価結果を，図 G. 11 に示す。ただし，評価結果は，2 ループプラントの代表的な条件における炉心平均軸方向中性子フルエンス率分布を整理したものである。また，ORIGEN2 シリーズでの評価を前提に，放射化計算を実施する場合，放射化断面積については，例えば JENDL3. 3 などの核データを基に，MCNP で評価した ARO バンク及び D バンクにおける制御棒先端部の被覆管並びに吸収体の中性子スペクトルで，1 群の実効断面積に縮約することがある。制御棒先端部の中性子スペクトルを，図 G. 12 に示す。

なお，制御棒の放射能評価においては，原子炉起動時及び停止時の制御棒挿入状態での照射量は，定格出力時の ARO バンク，D バンクの制御棒が受ける照射量と比べて無視できるほど小さく，考慮する必要はない。また，制御棒の軸方向の放射能濃度分布が，図 G. 13 に示す制御棒の軸方向の中性子フルエンス率分布と同様の分布であると仮定すると，制御棒の先端から 0. 75m の位置から上方の放射能は，制御棒全体の 1%未満であるため，放射能評価におけるこの部分の重要性は低い。

- c) 中性子条件設定の考え方（略）

H. 1 概要

6. 1. 2. 2. 3 に示す起原元素の元素成分条件の具体的な設定方法及び設定例は，附属書 D 及び附属書 G に示している。このうち，元素分析データが非常に少ない場合，又は元素分析データに検出下限値しかない検出困難元素の元素成分条件を元素濃度分布から設定する方法は，表 D. 5 及び表 D. 6 に示すとおりである。具体的には，図 H. 1 に示すとおり，保守的に検出下限値を濃度分布の上側限界値 [例 上側限界値 = 平均 + 2 σ (標準偏差) の濃度] とし，同一の元素又は化学的性質が類似した元素の既知の濃度分布から“平均的な標準偏差”などの濃度分布条件を設定した上で，平均濃度を設定する方法を示している。また，“平均的な標準偏差”は，同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を参考にして設定する考え方で，その設定例も，あわせて示している。

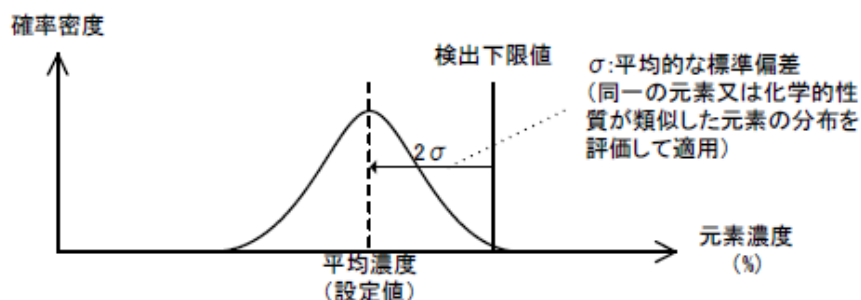


図 H.1—検出困難元素の濃度分布評価の基本的な考え方

H. 2. 1 考え方

H. 1 に示した検出困難元素の濃度分布評価に利用する標準偏差は，鉱物，岩石，土壌，堆積物など（以下，鉱物，岩石などからの試料という。）の元素濃度データを利用して設定することができる。ただし，鉱物，岩石などからの試料の元素濃度データを検出困難元素の標準偏差の設定に利用するためには，次の確認が必要である。

- 鉱物，岩石などからの試料の元素濃度データ（濃度分布）は，産地及び種類によ

らず標準偏差が同程度の対数正規分布を示す。

- 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。

H. 2.2 元素濃度データの収集方法

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。

- 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。
- 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。
- 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。

H. 2.3 元素濃度データの適用条件

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。

- 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。
- 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。
- 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。

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[1]。（注：図 H. 2 は略）

H. 2.4 検出困難元素の濃度分布評価方法

H. 2.3 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。

- 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。
 - 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。
 - 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。
- 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。

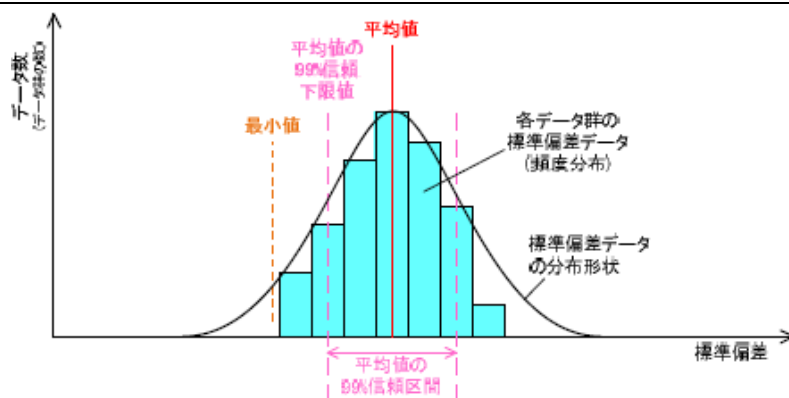


図 H.3—平均的な標準偏差の設定方法のイメージ図 (例)

(注：表 H.1 は略)

- 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。

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。

H.2.5 化学的性質が類似した元素濃度データの利用

評価対象とする検出困難元素が、不純物成分元素又は微量成分元素であれば、検出困難元素の元素濃度データの一部に、評価対象とする検出困難元素と化学的性質が類似した元素の濃度データを加えることも可能である。ただし、化学的性質が類似した元素の濃度データを参考とする場合は、あらかじめ次の確認が必要である。

- － 評価対象とする検出困難元素と同様の方法（H.2.2 の方法）で化学的性質が類似した元素の濃度データを収集している。
- － 収集した化学的性質が類似した元素の濃度データに対して、検出困難元素の濃度分布評価（すなわち、標準偏差の設定）のための適用条件の確認（H.2.3 の確認）が行われている。
- － 上記で収集した元素濃度データを利用し、評価対象とする検出困難元素と化学的性質が類似した元素の濃度分布の標準偏差とが同程度であることの評価が行われている。

上記の確認を行った化学的性質が類似した元素の濃度データは、検出困難元素の元素濃度データの一部として、H.2.4 に示す検出困難元素の濃度分布評価に利用できる。

H.3 検出困難元素の濃度分布の評価例

検出困難元素の濃度分布の評価例として、ステンレス鋼（SUS304）及びジルコニウム合金（ZrTN804D）の Cl, Th 及び U の標準偏差の設定が行われた報告[1]もある。この報告（以下、有識者検討会の報告書という。）の概要を、次に示す。

(略)

(2) 検討の結果

起源元素の選定およびその後の元素成分条件の設定は、その後の放射化計算を経て、中

深度処分対象廃棄物の放射能濃度に直接的に影響する因子である。中深度処分対象廃棄物の放射能濃度の決定のためには、放射能濃度の評価を行う核種を確実に把握する必要がある。

- ① 「G. 1. 1. 2 起源元素の選定の前提条件」の評価対象核種の選定においては、放射化後に評価対象核種となりうる元素を起源元素として抜けもれなく選定する必要がある。日本原子力学会は、中深度処分対象廃棄物の政令記載核種及び浅地中ピット処分対象廃棄物の申請核種を参考に評価対象核種を選定したとしているが、選定された評価対象核種は政令記載核種及び規則記載核種から一部の核種が追加及び除外されたものとなっている。評価対象核種として、Nb-94を加えた理由及び申請核種例のH-3及びNi-59を除外した理由について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹³⁹。

(回答待ち)

- ② 「G. 1. 1. 3 起源元素の選定手順」には、一次スクリーニングから四次スクリーニングまでの各スクリーニング項目が規定されている。それらの設定根拠について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁴⁰。

申請核種を生成する起源元素の選定に関しては、全103元素から出発しますが、「附属書GのG. 1. 1. 2のc) 起源元素の選定の考え方」に示しますように、起源元素の選定においてスクリーニングを行います。

そのスクリーニングの考え方は、対象元素とならない「初期の起源元素でない放射性同位体」、「評価対象核種を生成しない元素」及び「鋼材などの精錬過程において除かれる元素」は除外し、加えて、「評価対象核種を生成するが評価対象核種の総放射能量に影響するレベルとはならない元素」までを放射化計算の入力条件に含める必要はないことから除外するものです。

G. 1. 1. 2 起源元素の選定の前提条件 (略)

c) 起源元素の選定の考え方 評価対象とする放射化金属等の種類(材料)ごとに、6. 1. 2. 2. 1に示した次の考え方を踏まえ、選定する。

－ 最初の起源元素は、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(評価対象核種と関連させるKey核種を含む)を生成する元素は、起源元素として抽出する。

なお、抽出した起源元素は、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。

－ 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。(以下、一次スクリーニングという。)

－ 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。(以下、二次スクリーニングという。)

－ 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良い元素もある。(以下、三次スクリーニングという。)

¹³⁹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答19

¹⁴⁰ 第3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資料3-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答4

ーニングという。)

ー 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は、起源元素から除外できる。(以下、四次スクリーニングという。)

- ③ 「6.1.2.2.1 起源元素の選定方法」において、起源元素の選定方法の一つに「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。」と規定されている。材料の特性改善のための添加元素及び溶接性の改善のために添加された合金元素等、JIS 等の材料規格に規定する試験成績書（ミルシート）に記載されない添加元素の確認方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁴¹。

(回答待ち)

- ④ 「表 G.3—放射化計算による核種生成の有無の評価例（二次スクリーニング評価）」の注記3には、「ORIGEN 上の閾値 (CutOff) は、3.7Bq (=1.0×10⁻¹⁰ Ci)とした(ただし、照射時間 60y での生成量で核種生成の有無を判断)。」と規定されている。しかし、同表によると起源元素 V による評価対象核種 ⁶⁰Co が 1.13Bq、Kr による ⁹⁰Sr が 2.51Bq 及び Sb による ¹³⁷Cs が 0.325Bq として集計されている。ORIGEN 上で閾値を設けることの適否について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁴³。

(回答待ち)

- ⑤ 「表 G.5—三次スクリーニングで除外対象とできる元素例 (ZrTN804D, SUS304 の場合の例)」には、「原料である鉍石に含まれるが、高炉などで原料を溶解分離したときのスラグとして大半は除去」と規定されており、例えば Sr は当該項目及び「低沸点による揮発」に該当しており、他方、Y は「スラグとして除去」のみが該当しているが、両者とも第三次スクリーニングで除外対象となっている。第三次スクリーニングで除外できる元素の判断基準について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁴⁴。

(回答待ち)

同表には、各評価項目の該当/不該当の基準が定性的に規定化されている。基準について定量的に選定することについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁴⁵。

(回答待ち)

同表は、金属材料を想定しているが、「G.1.1.3 c) 三次スクリーニング」ではコンクリートの場合は、三次スクリーニングに低沸点による揮発、希少元素、用途が限定され

¹⁴¹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 5(3)

¹⁴³ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 20(1)

¹⁴⁴ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 20(6)

¹⁴⁵ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 20(7)

ている元素の適用が想定されるとしている。コンクリートの場合は高温による精錬プロセスがないと考えられるが、考慮すべき低沸点元素（化合物として存在する場合も含む）としてどのような元素が考えられるのかとそのスクリーニング基準について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁴⁷。

（回答待ち）

- ⑥「表 G. 6—起源元素の推定存在濃度レベル例（オーダー）」の推定存在濃度レベルの導出方法について、分析データ及び文献値よりも低い値が推定存在濃度レベルとなっているものがある。例えば、表下段の SUS304 において、JIS の規定値は $Mn \leq 2.00\%$ であるが、分析データ平均値が 1.5%、文献データ平均値が 1.3% であるのかかわらず、推定存在濃度レベルが 1.0%（有効数字 2 桁の指数表示）と評価されている。推定存在濃度レベルの評価方法の妥当性について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁴⁸。

（回答待ち）

（「6.4 数値の丸め方」に従って、JIS Z 8401:1999¹⁴⁹によるとしていることによるとの回答が得られた場合）例えば SUS304 において Mn 推定量を 2.0% と評価すると、「表 G. 8—四次スクリーニング評価結果例（生成比の評価による除外）（SUS304 の例）」における Mn による ⁶⁰Co の生成比 0.00548% が約 2 倍となり 0.01% を超え、四次スクリーニングで除外できなくなる。数値を小さく丸めることで、非保守側の評価となることについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁵⁰。

（回答待ち）

- ⑦「6.1.2.2.3 起源元素の成分条件の設定方法」において、起源元素の成分条件は「代表値を設定する方法」、「濃度分布から設定する方法」、「濃度範囲を設定する方法」のいずれかの方法で設定すると規定している。これらの同等性について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁵³。

（回答待ち）

- ⑧「図 G. 3—元素成分条件（濃度分布）の設定方法の概念フロー」は、図中央部の「各元素の濃度分布基本形状選択における基本的な考え方」において、元素の種類は主成分、不純物成分及び微量成分に区分されている。材料特性改善のための添加元素は何に区分されるのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁵⁴。

¹⁴⁷ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 20(4)

¹⁴⁸ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 20(2)
149

¹⁵⁰ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 20(5)

¹⁵³ 第 3 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資料 3-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 1

¹⁵⁴ 第●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

(回答待ち)

- ⑨「G. 1. 2. 3. 1 元素成分条件の設定方式の選定例」において「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、次のいずれかが選択できる。」として、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（元素成分データの平均値など）で設定する方式と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が規定されている。これらの使い分け又は評価手法の同等性について、日本原子力学会は、以下のよう

に説明している¹⁵⁶。

元素成分条件の選定する設定する方式（附属書Gの表G.9参照）には、次の2種類を標準では規定していますが、次のように使い分けを行うこととなります。

－ 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（元素成分データの平均値など）で設定する方式：点推定法に適用する元素成分濃度を設定する場合において、同一ロットの品質サンプルなどの元素分析値を適用する方法と、元素成分データの平均値、最大値を適用する方法です。

－ 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：区間推定法における元素成分濃度を設定する場合に適用し、複数の同一種類及び品質の元素成分データの濃度分布を使用します。

また、双方の元素成分条件の設定方式は、評価対象の放射能（最大放射能濃度又は放射エネルギー）に応じて設定するものであり、同等性を求めたものではありません。

- ⑩「表G.10—ZrTN804Dの化学成分の製造管理目標値（主成分）」にはジルカロイ4の起源元素に0（酸素）が含まれており、「JIS H 4751:2016 ジルコニウム合金管」の「表2—化学成分」には「酸素含有量は、受渡当事者間の協定による」とされ、許容変動値が0.020%と規定されている。また、「表G.5—三次スクリーニングで除外対象とできる元素例（ZrTN804D、SUS304の場合の例）」の注a)において、「ZrTN804Dの元素のうち、0は、機械的強度向上を目的とした添加が行われているため、評価対象（三次スクリーニングの対象外）とした」とされている。「表G.10—ZrTN804Dの化学成分の製造管理目標値（主成分）」に酸素の記載がないことについて、日本原子力学会は、以下のよう

に説明している¹⁵⁸。

(回答待ち)

また、「附属書G(参考)放射化計算の入力条件の設定例」の参考文献として「JIS H 4751:1998 ジルコニウム合金管」が記載されている。解説の「1.2 今回（2017年）の改定の経緯」にあるように、放射能濃度決定標準の改定作業は2017年以降に行われているが、上記JIS規格は2016年に改正されている。JIS等の適用年版の考え方について、

討チーム参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答20(3)

¹⁵⁶ 第3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資料3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答5

¹⁵⁸ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答23(1)

日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁵⁹。

(回答待ち)

- ⑪「表 G. 11—ZrTN804D の化学成分の製造管理目標値(不純物成分)」及び「表 G. 12—SUS304 の化学成分の製造管理目標値」には、不純物成分元素の製造管理目標値が示されているが、「表 D. 4—対象とする放射化金属等の元素成分濃度の分布タイプの設定に関わる基本的な考え方」には、不純物成分元素の濃度分布として対数正規分布を選択できると規定されている。製造管理目標値と対数正規分布の関係について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁶⁰。

(回答待ち)

- ⑫「表 G. 12—SUS304 の化学成分の製造管理目標値」の参考文献である「JIS G 4305:2021 冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯」の「表 2—化学成分」には、SUS304 系鋼板として Cu、N 又は Nb が添加された種類の記号が規定されている。「表 G. 12—SUS304 の化学成分の製造管理目標値」に示す化学成分は、SUS304 そのものの元素管理目標値であるが、上記添加元素ありの鋼板が規格化される前は、添加元素ありの材料であって表示記号が SUS304 という場合も考えられる。上記添加元素を微量元素とすることの適切性について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁶¹。

(回答待ち)

「表 G. 12—SUS304 の化学成分の製造管理目標値」には Fe が残部である旨記載することを要望する。

- ⑬「H. 1 概要」の「図 H. 1—検出困難元素の濃度分布評価の基本的な考え方」では、附属書 D の理解のために検出困難元素の濃度分布を仮定して設定する方法の例を示しているが、「表 D. 4—対象とする放射化金属等の元素成分濃度の分布タイプの設定に関わる基本的な考え方」では、検出困難元素の濃度分布が対数正規分布を示すという考え方を採っている。同図の横軸が元素濃度(log%)ではなく元素濃度(%)であることについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁶²。

(回答待ち)

- ⑭「H. 2 考え方」では、「ただし、鉱物、岩石などからの試料の元素濃度データを検出困難元素の標準偏差の設定に利用するためには、次の確認が必要である。」として産地及び種類によらず標準偏差が同程度の対数正規分布を示すこと及び標準偏差が材料の製

¹⁵⁹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 23(1)

¹⁶⁰ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 22(2)

¹⁶¹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 23(2)

¹⁶² 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 27

造工程の影響を受けないことを挙げている。これらの条件を満たすことのできない検出困難元素が存在する場合にどのように評価するのか、「種類」とは何を指しているのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁶³。

(回答待ち)

- ⑮ 「H. 2. 2 元素濃度データの収集方法」の「a) データ収集方法」には、「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。」とされている。どのような特性を考慮に入れることを想定しているのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁶⁴。

元素濃度データの収集対象とする「鉱物、岩石などからの試料の元素濃度データ」は、検出困難元素の特性として、「化学的性質」、「放射化金属等の原鉱物及び精錬工程における熱及び化学的影響注1」を踏まえて、天然の鉱物、岩石、精錬後の金属から広く収集することを基本としています。

注1 化学的影響の一例として、精錬工程での脱硫、脱りんは、反応式 $S+3(CaO)=(CaS)+0$ 、及び $(2P+3(CaO)+5O=3(CaO\cdot P2O5))$ で示されるようにスラグ-メタル間の化学反応でS及びPが除去されることが挙げられる。

(出典：鉄の高純度化精錬，まてりあ，Vol. 33, No. 1 (1994))

- ⑯ 「H. 2. 2 元素濃度データの収集方法」の「b) 適用除外データ」には、「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。」とされている。「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」とはどのようなデータかを想定しているのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁶⁵。

検出困難元素の標準偏差の評価に適さないと判断するデータは、附属書 H の「H. 3. 1 b) 適用除外データ」に示しますように、次のデータがその対象となります。

- － 分析結果の集計値（平均値など）だけが示されている文献は、対数正規分布に関する評価が行えないため、除外する。ただし、対数正規分布による平均値及び標準偏差が示されている場合は除外しない。
- － 元素濃度データが3点未満の文献は、標準偏差を算出できないため、除外する。
- － 生物、液体（海水、地下水など）の元素濃度データに関する文献は、除外する（生物では代謝活動による影響、液体では元素の溶解度などによる影響があり、微量成分元素の元素濃度データとして適切でない可能性があるため）。
- － Th 及び U の元素濃度データに関する文献では、ウラン鉱山及びジルコンに関する文献は、除外する（ウラン鉱山及びジルコンでは、Th 及び U が部分濃集しており、微量成分元素の元素濃度データとして適切でない可能性があるため）。
- － 元素濃度データのデータ群に、検出下限値が含まれていた場合は、該当す

¹⁶³ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 28

¹⁶⁴ 第3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資料 3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 7(1)

¹⁶⁵ 第3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資料 3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 7(2)

るデータ群を除外する。

- ⑩ 「H. 2.3 元素濃度データの適用条件」には、「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。」とある。同程度であることはどのように評価するのか、当該評価に必要なデータ数について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁶⁶。

各データ群の標準偏差に濃度依存性がないことの確認ですが、附属書Hの「H. 3.2 元素濃度データの適用性の確認」に示しておりますように、「標準偏差の同等性の確認」及び「対数正規性の確認」によって行います。

標準偏差の同等性の確認： 標準偏差の平均、元素濃度に対する移動平均の濃度依存性のないこと、及び産地、種類ごとの標準偏差を比較して同等性を確認する。

対数正規性の確認： 対数正規確率図上のプロットがおおむね直線関係にあること。

なお、必要なデータ数は標準には示しておりませんが、標準偏差の同等性及び対数正規性の確認が行えるだけの数量が必要となります。

H. 3.2 元素濃度データの適用性の確認

a) 標準偏差の同等性の確認 有識者検討会の報告書では、C1, Th 及びUに対し、H3.1で収集した元素濃度データ（データ群）を利用し、次の評価を行っている。

－ C1, Th 及びUの全データ群の標準偏差の平均は0.18～0.20（対数値）であり、元素濃度に対する移動平均からも明らかな濃度依存性は認められなかった（図H.4から図H.6参照）。

－ C1は鉱物、火山岩、深成岩、Th及びUは鉱物、火成岩、堆積岩のそれぞれのデータ群において、産地ごとの標準偏差の比較を行った結果、明らかな濃度依存性は認められなかった（図H.7から図H.9参照）。

－ C1は日本、欧州、北米、Th及びUは日本、北米のそれぞれのデータ群において、種類ごとの標準偏差の比較を行った結果、明らかな濃度依存性は認められなかった（図H.10から図H.12参照）。

上記評価結果から、有識者検討会の報告書では、C1, Th 及びUの鉱物、岩石などからの試料の元素濃度分布（標準偏差）は、産地、種類及び濃度に依存せず、同程度の値を示すと評価している。

b) 対数正規性の確認 有識者検討会の報告書では、C1, Th 及びUに対し、H. 3.1で収集した元素濃度データ（データ群）を利用して代表的なデータ群の元素濃度分布を整理し、対数正規確率図上のプロットがおおむね直線関係にあることを確認しており、この結果から、いずれの元素も鉱物、岩石などからの試料の元素濃度分布は、対数正規分布を示していると評価している（図H.13から図H.15参照）。

- ⑪ 「図H.2—製造工程を考慮した検出困難元素の標準偏差の基本的な設定方法」には、スクラップ材が混入している場合の材料のフローが記載されていない。「図H.17—SUS304の製造工程及び製造工程中のC1, Th 及びUの挙動調査結果（一例）」には、原材料・鉄

¹⁶⁶ 第3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資料3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答8

鉄工程にスクラップ（購入スクラップ、リターンスクラップ）材が含まれている。スクラップ材には意図しない循環性元素（トランプエレメント）の存在が否定できず、濃縮されて検出可能レベルの濃度に達している可能性もある。循環性元素の濃度分布評価方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁶⁷。

（回答待ち）

- ①「H2.4 検出困難元素の濃度分布評価方法」には、「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。」とある。「鉱物、岩石などからの試料を適切に代表している」と、「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」の適切な範囲について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁶⁸。

附属書Hの表H.3に示しますように、全て検出下限値を含まないデータで、種類及び産地を広く収集できていることによって評価します。

なお、この考え方は、附属書Hの「H.2.1 考え方」に示します検出困難元素の特性（放射化金属等の原鉱物及び精錬工程における熱及び化学的影響、化学的性質）を踏まえて、天然の鉱物、岩石、精錬後の金属から収集することを踏まえたものとなっています。

表 H.3—収集した Th の元素濃度データの産地及び種類別のデータ群数[1]

種類	産地				合計
	日本	欧州	北米	その他	
鉱物	15	0	6	7 ^{a)}	28
火成岩	37	6	28	10 ^{b)}	81
堆積岩	8	3	13	7 ^{c)}	31
堆積物（河川，湖沼）	47	0	9	0	56
土壌	3	0	9	0	12
合計	110	9	65	24	208

注^{a)} 産地内訳：大西洋，アフリカ，豪州，チリ，イラン，パプアニューギニア，スリナム，ジャマイカ
^{b)} 産地内訳：イラン，中国
^{c)} 産地内訳：オーストラリア，インドネシア，ベネズエラ

「b) 平均的な標準偏差の設定方法」において、平均的な標準偏差の設定方法のイメージ図（例）が「図 H.3—平均的な標準偏差の設定方法のイメージ図（例）」に示されている。横軸が対数でない標準偏差データの分布形状に、各データ群の標準偏差データ（対数正規分布）が分布するとしていることについて、日本原子力学会は、以下のように説

¹⁶⁷ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 29(1)

¹⁶⁸ 第3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資料 3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 9

明している¹⁶⁹。

(回答待ち)

「c) 検出困難元素の濃度分布評価」には、「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。」とされている。その具体的方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁷⁰。

(回答待ち)

- ② 「H. 2. 5 化学的性質が類似した元素濃度データの利用」には、「評価対象とする検出困難元素が、不純物成分元素又は微量成分元素であれば、検出困難元素濃度データの一部に、評価対象とする検出困難元素と化学的性質が類似した元素の濃度データを参考とする」とされている。具体的にどのように選定するかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁷¹。

化学的性質が類似した元素濃度データの利用に関しては、附属書 H の H. 2. 5 に示しておりますように、次の確認を行った上で適用します。

- － 評価対象とする検出困難元素と同様の方法（H. 2. 2 の方法）で化学的性質が類似した元素の濃度データを収集している。
- － 収集した化学的性質が類似した元素の濃度データに対して、検出困難元素の濃度分布評価（すなわち、標準偏差の設定）のための適用条件の確認（H. 2. 3 の確認）が行われている。
- － 上記で収集した元素濃度データを利用し、評価対象とする検出困難元素と化学的性質が類似した元素の濃度分布の標準偏差とが同程度であることの評価が行われている。

H. 2. 5 化学的性質が類似した元素濃度データの利用

評価対象とする検出困難元素が、不純物成分元素又は微量成分元素であれば、検出困難元素の元素濃度データの一部に、評価対象とする検出困難元素と化学的性質が類似した元素の濃度データを加えることも可能である。ただし、化学的性質が類似した元素の濃度データを参考とする場合は、あらかじめ次の確認が必要である。

- － 評価対象とする検出困難元素と同様の方法（H. 2. 2 の方法）で化学的性質が類似した元素の濃度データを収集している。
- － 収集した化学的性質が類似した元素の濃度データに対して、検出困難元素の濃度分布評価（すなわち、標準偏差の設定）のための適用条件

¹⁶⁹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 29(2)

¹⁷⁰ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 29(3)

¹⁷¹ 第 3 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資料 3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 10

<p>の確認 (H. 2. 3 の確認) が行われている。</p> <p>— 上記で収集した元素濃度データを利用し、評価対象とする検出困難元素と化学的性質が類似した元素の濃度分布の標準偏差とが同程度であることの評価が行われている。(略)</p>
<p>H. 2. 2 元素濃度データの収集方法</p> <p>鉍物、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>
<p>H. 2. 3 元素濃度データの適用条件</p> <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 鉍物、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 鉍物、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鉍物、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。(略)</p>

⑳ 「H. 3 検出困難元素の濃度分布の評価例」には、「平成 25 年度 検出困難元素の濃度分布評価について」にて行われた Cl, Th, U の評価方法及びその結果が示されているが、これらは鉍物中及び部材中に含有量が比較的多い元素になる。この方法のその他の元素への適用性について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁷²。

鉍物、岩石などからの試料の分析データを利用して、検出困難元素の元素濃度分布を評価する方法は、適用対象元素を Cl, Th (微量成分元素)、U (ZrTN804D では不純物成分元素、SUS304 では微量成分元素) の検出が難しい元素に限ったものでなく、対象元素の特性 (化学的性質、放射化金属等の原鉍物及び精錬工程における熱及び化学的影響) を考慮した分析データ収集結果 (検出下限値を含まないデータ) に基づいて評価する方法です。

このため、回答 8 の元素濃度データの適用条件に示しました「標準偏差の同等性の確認」「対数正規性の確認」及び「材料の製造工程の影響の確認」を行うことで、その他の元素にも適用できます。

¹⁷² 第 3 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資料 3-1-1 「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 11

②「解説 6.7.4 材料の製造工程の影響の確認」の「b) “鉍物，岩石などからの試料” と材料中との標準偏差の比較」には、「なお，SUS304 の原材料使用されるスクラップに Mo が含まれている可能性があるように，ほかの元素に対しても同様の事象が生じる可能性も否定はできないが，一般には当該元素が添加されたスクラップと，添加されていないスクラップとを混合して利用した場合，材料中の標準偏差は“鉍物，岩石などからの試料”の標準偏差より大きくなる（元素濃度データのばらつきは大きくなる）と考えられる。このため，有識者検討会の報告書では，検出困難元素の濃度分布評価（元素成分条件の設定）において，“鉍物，岩石などからの試料”の標準偏差を用いることによって，放射能濃度の評価結果が過小評価にはならないと考察されている。」とされている。材料中の標準偏差が大きくなっても放射能濃度の評価結果が過小評価にはならない理由について，日本原子力学会は，以下のように説明している¹⁷³。

（回答待ち）

（3）適用に当たっての条件 追而

¹⁷³ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 55

4. 5. 2 中性子条件の設定方法

中性子条件の設定方法については「6. 1. 2. 3 中性子条件」並びに注記として「附属書 F(参考)放射化計算を行う場合の計算例」及び「附属書 G(参考)放射化計算の入力条件の設定例」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>6. 1. 2. 3 中性子条件</p> <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> <p>— 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。</p> <p>— 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。</p>
<p>F. 1. 3 放射化計算 b) 中性子条件</p> <p>1) 中性子フルエンス率(略)</p> <p>2) 放射化断面積 放射化断面積は、1)で評価したチャンネルボックスの試料採取位置における中性子スペクトルを反映したものをを用いた。</p> <p>放射化計算コード ORIGEN-S では、放射化断面積に中性子スペクトルを反映させる方法として熱中性子、熱外中性子及び高速中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス（以下、それぞれ THERM, RES 及び FAST という。）を用いて、内蔵されている 3 群の放射化断面積を補正した。その THERM, RES, FAST の評価式を、次に示す。</p> $F_T = \sqrt{\frac{\pi T_0}{4 T}} \dots\dots\dots (1)$ $F_R = \sum_{\substack{E_g \leq 1.0 \text{ MeV} \\ E_g \geq 0.625 \text{ eV}}} \phi_g / \phi_{th} \dots\dots\dots (2)$ $F_F = \sum_{E_g \geq 1.0 \text{ MeV}} \phi_g / \phi_{th} \dots\dots\dots (3)$ <p>ここに、</p> <p>F_T : 熱中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス (THERM)</p> <p>F_R : 熱外中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス (RES)</p> <p>F_F : 高速中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス (FAST)</p>

E_g : g 群のエネルギー (eV) T : 媒質の温度 (K) T_0 : 293.16 K ϕ_g : g 群の中性子フルエンス率 (n/cm ² /s) ϕ_{th} : 熱中性子フルエンス率 (n/cm ² /s) 今回の解析で用いたチャンネルボックスの試料採取位置でのスペクトルインデックスは、MCNP による燃料集合体内の計算で得られた中性子スペクトルから求めた。 F. 2.3 放射化計算 b) 中性子条件(略) F. 3.3 放射化計算 b) 中性子条件(略) G. 2 中性子条件の設定例(略)

(2) 検討の結果

① 「6.1.2.3 中性子条件」の「a) 中性子フルエンス率・中性子スペクトル」には、「中性子フルエンス率・中性子スペクトルは(中略)中性子輸送計算コードなどによって適切に評価し設定する。」とされている。「中性子輸送計算コードなど」の具体的内容について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁷⁶。

(回答待ち)

② 「b) 放射化断面積」には、使用する放射化計算コードの放射化断面積ライブラリ又は中性子フルエンス率の評価結果のいずれかの方法で設定すると規定している。その同等性について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁷⁷。

評価対象とする放射化金属の放射能(最大放射能濃度又は総放射エネルギー)によって、適用する元素成分条件の設定方法、及びそれぞれの保守性などの設定条件が異なるため、同等性が得られるものではありません。

なお、概ね、下記の大小関係にあると考えられます。

「濃度範囲を設定する方法」(最大値) ≥ 「代表値を設定する方法」(最大値) ≥ 「濃度分布から設定する方法」(信頼上限) ≥ 「濃度分布から設定する方法」(平均) ≧ 「代表値を設定する方法」(平均) ≥ 「濃度範囲を設定する方法」(最小値)

ここで示します「信頼上限」の評価に適用する有意水準に関しては、下記の考え方を基本としています。

有意水準	95 %	99 %
適用理由	平均値と平均値の信頼下限値の差(すなわち不確定性の大きさ)の推移評価を行う「相対比較」に関しては、一般的な有意水準としての適用が多い95%を適用する。	評価する分布の標準偏差の「値」として適用する場合に関しては、より信頼を高くするために、99%を適用する。

ORIGEN2 コードシリーズについては、コードに付属する放射化断面積ライブラリの使用又は中性子フルエンス率の評価結果である中性子スペクトルに

¹⁷⁶ 第3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資料3-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答7

¹⁷⁷ 第3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資料3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答1(1)

基づき放射化断面積を作成して使用することとなります。

ORIGEN コードシリーズについては、中性子フルエンス率の評価結果より、3群の中性子フルエンス率の比(スペクトルインデックス)に基づく放射化断面積がコード内で作成されることとなります。

以上のいずれの方法においても、評価対象位置の中性子スペクトルを考慮した放射化断面積を使用して放射化計算を実施するという観点においては同等と考えます。

また、「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」と規定している。最新の計算コード及び放射化断面積ライブラリの妥当性の確認方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁷⁸。

放射化断面積ライブラリの妥当性については、妥当性が確認(Validation)されていることを確認するか又は計算者自らが妥当性を確認し、適用性を確認します。

- ③「F.1.3 放射化計算」の「2)放射化断面積」には、放射化計算コード ORIGEN-S に内蔵されている3群の放射化断面積を THERM, RES, FAST の評価式を用いて補正したとされている。3群の放射化断面積及び THERM, RES, FAST の評価式とは何かについて、また、その放射化断面積の補正方法の適切性について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁷⁹。

(回答待ち)

- ④中性子条件の設定例の「G.2.1 概要」の中性子条件の設定方法について、「a)個別に条件設定する方法」と「b)代表条件を設定する方法」が規定されている。これらの評価結果の同等性について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁸⁰。

中性子条件の設定について、個別の評価対象ごとに詳細設定する場合と複数の評価対象を代表する適切(平均的)又は放射能濃度を大きくするよう保守側に条件設定する場合とでは、以下に示す CB、制御棒などの例のとおり、中性子条件の設定の考え方が異なりますが、いずれにおいても適用する保守性のとりかたによって保守的な評価結果となり、その観点において同等となります。

個別設定：複数の照射履歴をもつ同種の放射化金属(CB、制御棒など)について、照射履歴が特定される個別の評価対象ごとに、個別の中性子フルエンス率、スペクトルを設定する。

代表設定：複数の照射履歴をもつ同種の放射化金属(CB、制御棒など)について、複数の評価対象を代表する適切(平均的)又は放射能濃度を大きくするよう保守側に条件設定する。

「断面積ライブラリ(核データ)としては、例えば、日本原子力研究開発機構の JENDL、米国ブルックヘブン国立研究所の ENDF/B、文献[40]がある。」としているが、文献[40]をもって妥当と判断できる理由について、日本原子力学会は、以下のように説明してい

¹⁷⁸ 第3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資料 3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 1(2)

¹⁷⁹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 18

¹⁸⁰ 第3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資料 3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 6

る¹⁸³。

[40] S. F. Mughabghab, “BNL-325 5th edition”, National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory (2006).

(回答待ち)

「b) 代表条件を設定する方法」には、「照射履歴に基づき、複数の評価対象とする放射化金属等を適切又は放射能濃度評価結果が大きくなるように代表する中性子条件を設定する方法。」とある。放射能濃度評価結果が大きくなるように設定する方法のほかに、適切な方法であることをどのように判断するのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁸⁴。

(回答待ち)

「この評価においては、BWR チャンネルボックス及びPWR 制御棒の照射位置ごとの中性子フルエンス率・中性子スペクトルを評価しているが、実際の放射化計算の条件の設定を目的とした中性子フルエンス率・中性子スペクトルの評価を行う場合には、中性子フルエンス率・中性子スペクトルの計算に利用するコード及び群定数について、利用の目的を十分考慮した上で、適切な手法（信頼性のある計算コード）を適用することがある。」とあり、「適用することがある」のはどのような場合か、また、「信頼性のある計算コード」について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁸⁵。

(回答待ち)

「中性子フルエンス率・中性子スペクトルを計算で求めるには、実際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。」とあり、全ての評価対象核種について計算を求めているのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁸⁶。

(回答待ち)

「1 群実効断面積の作成に影響を与える中性子スペクトルの特性については、あらかじめ把握しておく必要がある。」とあり、具体的にどのような確認が必要かについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁸⁷。

(回答待ち)

¹⁸³ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 24(3)

¹⁸⁴ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 24(7)

¹⁸⁵ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 24(4)

¹⁸⁶ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 24(5)

¹⁸⁷ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 24(6)

- ⑤ 「G. 2. 2 BWR チャンネルボックスの中性子条件の設定例」の「a) 設定手順」に示す計算手法は、3次元解析を回転体の2次元解析で代替したもののよう記載されている。完全な3次元解析の場合と比較した場合の計算手法の適切性について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁸⁸。

(回答待ち)

「b) 評価結果」に「放射化断面積は、放射化計算コードに内蔵されている値の適用を前提とした。」とあるが、「6. 3. 1. 1 妥当性確認の方法」には注記1において「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」とされていることとの整合性(適切性)について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁸⁹。

(回答待ち)

また、「中性子条件については、必要に応じて変動を考慮した。」とあり、考慮した変動の内容について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁹⁰。

(回答待ち)

「G. 2. 2 BWR チャンネルボックスの中性子条件の設定例」の例示としては不明確であり、記載の検討を要望する。

「c) 中性子条件設定の考え方」の規定について、何を参照して条件設定をするのか記載されていない。これについて、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁹¹。

(回答待ち)

- ⑥ 「G. 2. 3 PWR 制御棒の中性子条件の設定例」の「b) 評価結果」には、「なお、制御棒の放射能評価においては、原子炉起動時及び停止時の制御棒挿入状態での照射量は、定格出力時のAROバンク、Dバンクの制御棒が受ける照射量と比べて無視できるほど小さく、考慮する必要はない。」とされている。廃棄体の放射能濃度の観点から、制御棒の放射能濃度を軸方向の部位ごとに評価しないことの適切性について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁹²。

(回答待ち)

「b) 評価結果」には、「また、制御棒の軸方向の放射能濃度分布が、図G. 13に示す

¹⁸⁸ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答25(1)

¹⁸⁹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答25(2)

¹⁹⁰ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答25(2)

¹⁹¹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答25(3)

¹⁹² 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答25(5)

制御棒の軸方向の中性子フルエンス率分布と同様の分布であると仮定すると、制御棒の先端から 0.75m の位置から上方の放射能は、制御棒全体の 1%未満であるため、放射能評価におけるこの部分の重要性は低い。」とされている。「図 G.13—PWR 制御棒の燃料有効部上端近傍から上方に関する全中性子フルエンス率分布 (2 ループプラントの例)」は横軸が「燃料有効部上端からの距離」とされており、制御棒の先端から 0.75m の位置がどこであるか明確ではない。この位置について、日本原子力学会は、以下のよう
に説明している¹⁹³。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

追而

¹⁹³ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 25(4)

4. 5. 3 照射条件の設定方法

照射条件の設定方法については「6. 1. 2. 4 照射条件」並びに注記として「附属書 F(参考)放射化計算を行う場合の計算例」及び「附属書 G(参考)放射化計算の入力条件の設定例」に規定している。

(1) 規定の内容

6. 1. 2. 4 照射条件 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。 注記 詳細は、附属書 F 及び附属書 G 参照。 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。 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。 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。
F. 1. 3 放射化計算 c)照射条件(略) F. 2. 3 放射化計算 c)照射条件(略) F. 3. 3 放射化計算 c)照射条件(略)
G. 3 照射条件設定における考慮事項 照射条件である照射時間及び照射停止時間については、表 D. 8 に示した照射履歴に基づき、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詳細な条件、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めにする保守的な条件）の設定が必要となる。また、濃度比法の場合、換算係数法の場合及び濃度分布評価法の場合は、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。 例 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は表 D. 9 に示した次による。（注：次によるとする表は表 D. 9 と同じにつき 4. 4. 4 項参照）

(2) 検討の結果

- ①「G. 3 照射条件設定における考慮事項」で参照する「附属書 G(参考)放射化計算の入力条件の設定例」には、放射化計算の入力条件の設定例が記載されている。「G. 3 照射条件設定における考慮事項」には、「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は表 D. 9 に示した次による。」とされ、具体例が記載されていない。「G. 3 照射条件設定における考慮事項」の必要性について、日本原子力学会は、以下のように説明している¹⁹⁸。

（回答待ち）

¹⁹⁸ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 26

(3) 適用に当たっての条件
追而

4. 6 放射化計算方法

放射化計算方法については「6. 1. 3. 1 放射化計算方法」及び「6. 1. 3. 2 計算用入力条件の設定」並びに注記として「附属書 A(参考)理論計算法の適用方法及び手順」、「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」及び「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」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>6. 1. 3 放射化計算</p> <p>6. 1. 3. 1 放射化計算方法</p> <p>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。</p> <p>注記 詳細は、附属書 A 参照。</p>
<p>6. 1. 3. 2 計算用入力条件の設定</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none">— 元素成分条件— 中性子条件— 照射条件 <p>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、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。</p> <p>注記 詳細は、附属書 I, 附属書 J 及び附属書 K 参照。</p>
<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, DCHAIN2¹⁹⁹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> <ul style="list-style-type: none">a) ORIGEN コードの概要(略)b) ORIGEN コードの計算(略)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。<ul style="list-style-type: none">— ORIGEN79— ORIGEN-S— ORIGEN2— ORIGEN2. 1— ORIGEN2. 2 <p>これらのうち、ORIGEN コードシリーズ（ORIGEN79, ORIGEN-S）は、複数群の中性子断面積を内蔵しており、熱中性子、共鳴領域中性子及び高速中性子の中性子フルエン</p>

¹⁹⁹ <回答記入> 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 14(1)

ス率の比を入力することによって、中性子スペクトルを反映できる放射化計算となっている。ORIGEN2 コードシリーズ (ORIGEN2, ORIGEN2.1, ORIGEN2.2) は、原子炉型式、燃料の組み合わせに対する 1 群実効核反応断面積²⁰⁰ライブラリが、あらかじめ、計算コードとともに準備されている。

なお、計算では、これらライブラリの中の適切な断面積を選択するか、評価対象とする放射化金属等を照射する中性子スペクトルを反映した断面積をユーザーが準備して使用する。ここで、あらかじめ準備された断面積ライブラリを選択する場合は、原子炉型式及び燃料組成が類似していれば、ライブラリ間の差異が放射化計算に与える影響は、基本的に小さいが、評価対象とする放射化金属等の照射位置の中性子スペクトルの特徴については、事前に把握しておく必要がある。ただし、ORIGEN-S では、1 群実効核反応断面積ライブラリを選択できる。

I. 1. 2 放射化計算の条件の設定

放射化計算の条件の設定方法は、次による。

- a) 元素成分条件 評価対象廃棄物ごとに、評価対象核種の起源元素を選定し、元素成分条件を設定。
- b) 中性子条件 評価対象廃棄物の中性子照射位置ごと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した上で、評価対象廃棄物の形状及び設置方向、配置位置を考慮した中性子照射位置を設定し、設定した評価対象廃棄物の中性子照射位置ごとに中性子条件を選定。

例 1 評価対象廃棄物の形状及び設置方向による中性子照射位置設定の基本的な考え方は、次による。(略)

例 2 評価対象廃棄物の配置位置による中性子照射位置設定の基本的な考え方は、次による。(略)

- c) 中性子照射条件 評価対象廃棄物の中性子照射時間及び原子炉供用期間中の中性子照射停止時間を設定。

なお、⁶⁰Co などの比較的短半減期の核種に対しては、長期間にわたる中性子照射を受ける場合は、中性子照射期間中の核種の減衰の影響を考慮する必要がある。

例 3 中性子照射時間及び原子炉供用期間中の中性子照射停止時間の設定の基本的な考え方は、次による。(略)

I. 1. 4 適用方法

濃度比を用いる場合 (I. 1. 3 の放射化計算結果を利用) の基本的な適用方法は、次による。

- a) Key 核種の選定 次のいずれかに適合する Key 核種を選定
 - 1) 外部から検出が比較的容易な γ 線放出核種である。
 - 2) 評価対象廃棄物ごとの放射能濃度を放射化計算によって算出できる核種である。
- b) 放射能濃度の決定方法 式(1)を適用して、評価対象廃棄物の放射能濃度を決定する。

なお、放射能濃度を決定する場合は、次を考慮する。

- 1) Key 核種濃度を放射化計算で設定した日に減衰補正する。
- 2) ⁶⁰Co などの比較的短半減期の核種に対して適用する場合、中性子照射時間が適切な適用範囲にあること、又は適切な補正を行う。

$$A=R \times B \dots\dots\dots (1)$$

ここに、A : 難測定核種の放射能濃度 (Bq/t)
R : 濃度比

²⁰⁰ <回答記入>第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」14(2)

B : Key 核種の放射能濃度 (Bq/t)

c) 濃度比の決定方法 式(1)に示す濃度比 R の決定手順は、次による。

1) 濃度比の算出方法 式(2)を使用して、式(1)の濃度比 R を算出する。

なお、代表条件による放射化計算を行う場合は、放射化計算結果の濃度比をそのまま適用する。

$$R = \sqrt[n]{(y_1/x_1 \times y_2/x_2 \times \dots \times y_n/x_n)} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 x_i : Key 核種の放射能濃度 ($i=1\dots n$)
 y_i : 難測定核種の放射能濃度 ($i=1\dots n$)
 n : 放射化計算結果の数

2) 濃度比決定のための放射化計算結果 (評価データ) の充足性 評価対象廃棄物中の難測定核種及び Key 核種の濃度比の値を決定するための放射化計算結果の数が、十分であるかどうかの判断は、ISO21238:2007[1]に示されている適切なデータ数の取得の考え方を踏まえた次の判断を適用できる。

— 得られた放射化計算結果の数に応じた放射化計算結果群 (データベース) が示す統計値の安定性に関して、放射化計算の追加によって統計値の安定性に明確な向上が見込めなければ、十分と判断してよい。

I. 2. 2 放射化計算の条件の設定

I. 2. 2. 1 元素成分条件

I. 2. 2. 1. 1 評価対象核種の起源元素の選定 (略)

I. 2. 2. 1. 2 元素成分条件の設定

a) 元素成分データの収集 (略)

b) 元素成分条件の設定方式の選択 (略)

c) 各元素の濃度分布基本形状の設定 評価対象廃棄物である ZrTN804D (チャンネルボックスの本体) 及び SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) の各元素について、主成分元素及び不純物元素の成分管理目標値の有無を踏まえ、濃度分布の基本形状を設定した結果を表 I. 5 に示す。ただし、表 I. 6 に示す元素については、元素分析データを踏まえ、濃度分布基本形状を設定した。

表 I.5—基本的な考え方によって選択した各元素の濃度分布基本形状

成分管理条件	成分管理目標値あり		成分管理されていない微量成分元素
	主成分元素として濃度範囲管理	不純物成分元素として上限管理	
ZrTN804D (JIS H 4751:1998)	Fe, Zr	N, Co, Ni, Cu, Nb, Mo, U	O, S, Cl, K, Th
SUS304 (JIS G 4305:2005)	Fe, Ni	S	N, Cl, K, Co, Cu, Zr, Nb, Mo, Th, U
基本的な濃度分布 (形状)	正規分布	対数正規分布	対数正規分布

表 I.6—実際の元素分析データを踏まえ設定した濃度分布基本形状

材 料		ZrTN804D	
元 素		Ni	Cu
元素成分の区分		不純物成分元素	不純物成分元素
基本的な考え方 による設定		対数正規分布	対数正規分布
実際の元素分析データ を踏まえた設定		正規分布	正規分布
理 由	濃度分布の 推定範囲 ($\pm 3\sigma$)	質量分率 $2.9 \times 10^{-3} \%$ ～質量分率 $7.1 \times 10^{-3} \%$ (約 2.5 倍)	質量分率 $2.7 \times 10^{-4} \%$ ～質量分率 $3.7 \times 10^{-3} \%$ (約 14 倍)
	実際の 元素分析 データ の分布	<p>濃度範囲が非常に狭く、正規確率紙上でも、正規性を示したため。</p>	基本的考え方から選択した“対数正規分布”を仮定すると、JIS規格で規定されている上限値（不純物成分元素としての許容範囲）を大幅に超えてしまうため、正規分布を適用した。

d) 各元素の濃度分布条件の設定（略）

I. 2. 4. 3 濃度比の決定方法

a) 濃度比の算出 評価対象廃棄物全体の放射能濃度は、様々な放射化条件下であり、数桁にわたる広範囲の放射能濃度で分布するものもあり、一般に、難測定核種及びKey核種の放射能濃度は、対数正規分布で評価される。また、難測定核種及びKey核種の濃度比も基本的に相関関係をもつ二変量対数正規分布に従うため、複数回の放射化計算結果を使用して濃度比を算出する場合には、幾何平均⁹⁾の適用が適切である。図 I. 8 及び図 I. 9 に示した BWR のチャンネルボックスの本体及び PWR 制御棒の被覆管の難測定核種、並びに Key 核種の濃度比は、図 I. 10 及び図 I. 11 に示すとおり、難測定核種及び Key 核種の濃度比が対数正規分布を示すため、式(2)に示した埋設総放射能の評価に適用する放射能濃度の決定に適用する濃度比は、幾何平均を適用して算出している（濃度比は、値が大きくなるように、有効数字3桁目を切り上げて表示している）。（注：図 I. 8～図 I. 11 は略）

なお、濃度比の分布形状が対数正規分布に明らかに従わず、最大放射能濃度の評価の観点では、ばらつきを踏まえた保守性の考慮が必要な場合には、算術平均などによって濃度比を算出する。

注9) AESJ-SC-F10:2007 では、浅地中ピット処分廃棄物の放射能濃度決定方法に適用するスケールリングファクタの算出方法として、式(2)に示した幾何平均が記載されている。

b) 放射化計算結果（評価データ）の充足性 放射化計算結果（評価データ）の数が、濃度比決定のための評価データとして十分であるかどうかについては、計算して得られた放射化計算結果の数に応じて、放射化計算結果群（データベース）が示す統計値の安定性を踏まえて判断すればよい。

ここで、ISO21238:2007 に示されている適切なデータ数の取得の考え方（I. 1. 4 参照）を踏まえて、今回の放射化計算結果である 40 点のデータベースに関して、

代表的な統計値である相関係数の安定性（すなわち、各データ数における相関係数の平均値及び相関係数の95%信頼下限値の差が示す不確定性の減少の割合）について評価した結果を、図 I. 12 に示す。

この結果に基づけば、放射化計算によって集積したデータ数の推移に応じて、相関係数の95%信頼下限値が上昇し、次第に安定領域に入り、40点の計算用入力データ群では、追加計算によっても、統計値の明確な改善は、生じないことが十分予測されるため、濃度比を決定するためのデータ数としては、充足している。

なお、参考として、同様の方法で濃度比の安定性（各データ数における濃度比の平均値及び濃度比の95%信頼上限値の差が示す不確定性の減少の割合）を評価した結果を、図 I. 13 に示すが、濃度比の安定性の観点でも、上記と同様である。

J. 1. 1 考え方

換算係数を用いる方法は、核種生成量が中性子照射量に対し基本的に正の比例関係となることから、評価対象廃棄物の中性子照射量に比例する因子（中性子照射量、燃焼度、運転日数など）を管理指標として利用し、放射能濃度を求めるものである。次に換算係数を用いる場合の原理、管理指標の選定の方法、評価手順について説明する。

放射化によって生成する放射能は、中性子照射時間が生成する放射性核種の半減期に比べて短いなどの条件¹⁰⁾では、式(1)のように近似的に表わされる。

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

- ここに、 A : 評価対象廃棄物の放射能濃度 (Bq/cm³)
- σ : 親核種の放射化断面積 (cm²)
- N : 親核種の中性子照射前の原子数密度 (cm⁻³)
- Φ : 中性子フルエンス率 (n/cm²/s)
- t : 中性子照射時間 (s)
- λ : 生成核種の崩壊定数 (s⁻¹)

ここで、評価対象廃棄物の部位を考えると、放射化断面積 (σ)、親核種の原子数密度 (N) は、一定とみなすことができ、崩壊定数 (λ) も定数であることから、放射能濃度 (A) は、中性子照射量 (Φ×t) と比例関係がある。

さらに、評価対象廃棄物の中性子照射量 (Φ×t) に比例するよう管理指標 (B) を定義すると、放射能濃度は、管理指標 (B) に比例する。放射能濃度と管理指標との比例係数を換算係数 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。

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

- ここに、 R : 換算係数
- B : 管理指標

上記のように放射能濃度は、換算係数 R と管理指標の値 B との積として原理的に表わすことができる。したがって、換算係数 R をあらかじめ決定しておけば、管理指標の値から評価対象廃棄物の放射能濃度を求めることができる。

換算係数 R は、管理指標の値 B に対応する形で放射化計算によって決定することができ、管理指標の値によって換算係数 R が変化する場合には、換算係数は、R (B) のように B の関数で決めることができる。

注¹⁰⁾ 次の条件での放射能濃度。“中性子照射時間が生成する放射性核種の半減期に比べて短い”，“変換される起源元素の割合（起源元素の減少分）が無視できる”，“生成した放射性核種が中性子照射によって変換される割合は、崩壊によって失われる割合より十分小さい”。

この方法で使用する管理指標は、評価対象廃棄物の中性子照射量に比例する因子を選定する。具体的な管理指標の例として、制御棒に対して原子力発電所で管理されている中性子照射量が、BWR 燃料集合体のチャンネルボックスなどに対して燃料の燃焼

度が、また、炉心近傍に固定された機器に対して炉心の運転期間などがあげられる。

この方法による換算係数及び放射能濃度の評価は、次の手順で行う。

まず、上記に示したように評価対象廃棄物に対し適切な管理指標を決定する。次に、評価対象廃棄物のもつ管理指標の値の範囲を考慮して代表的な中性子照射量を設定し、平均的又は放射能濃度評価結果が大きくなるような中性子条件で放射化計算を実施する。

この結果から管理指標の値と放射能濃度との関係を換算係数として決定し、換算係数及び評価対象廃棄物のもつ管理指標の値の積から放射能濃度を決定する。この方法による評価手順の概略を、図 J.1 に示す。(注：図 J.1 は略)

J.1.2 放射化計算の条件の設定

a) 元素成分条件 附属書 G に示す方法で、評価対象廃棄物ごとに起源元素を選定し、各元素の濃度の代表値を 1 点設定する。

b) 中性子条件 中性子フルエンス率・中性子スペクトルは、評価対象廃棄物の設置位置、移動の有無などの中性子照射条件などを踏まえ、中性子照射期間中における評価対象廃棄物自身の平均的又は保守的な（放射能濃度評価結果が大きくなるような）中性子フルエンス率・中性子スペクトル¹¹⁾を設定する。

具体的には、評価対象廃棄物の炉心内外での配置位置の移動の有無を考慮し、表 J.1 に示す方法で設定する。

なお、評価対象廃棄物の中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定する場合は、附属書 G に示す事項を考慮する。また、放射化断面積は、上記の条件を考慮した上で、附属書 G を踏まえ、設定する。

注¹¹⁾ 中性子スペクトルの保守性は、中深度処分対象核種の評価に対する保守性。

表 J.1－換算係数を用いる場合における中性子条件設定の考え方

(略)

c) 中性子照射条件 中性子照射時間の範囲は、個々の評価対象廃棄物の管理指標の値から中性子照射時間の実績を包含するように設定する。範囲の設定には管理されている管理指標の実績値、評価対象廃棄物に認可されている最大照射量などから計算される中性子照射時間が利用できる。

放射化計算を行うための中性子照射時間の代表計算点は、評価対象廃棄物の中性子照射時間の範囲内で適切に設定する。また、停止期間は、実績を踏まえて平均値又は放射能濃度評価結果が大きくなるよう設定するか、若しくは基礎的な検討（附属書 B 参照）などによって中性子照射停止時間の放射能濃度への影響が小さいことが明らかな場合は、設定しない。

J.1.4.2 換算係数の決定方法

a) 換算係数の算出 J.1.3 で実施した放射化計算によって放射能濃度と管理指標の値との比として換算係数を算出し決定する。また、換算係数は、中性子照射時間の代表計算点ごとに算出されるが、代表計算点間の換算係数は、内挿によって設定することができる。

b) 換算係数の妥当性の評価 換算係数の妥当性は、詳細計算とサンプリングによる測定結果との比較などによって、その妥当性を、適用前にあらかじめ検証しておくことが必要である。

K.1.1 考え方

濃度分布評価法によって決定する場合とは、評価対象とする廃棄物グループの放射化計算の条件が明確であり、その計算条件において求められる放射能濃度が一定範囲にある場合、廃棄物グループの放射能濃度を、複数の理論計算によって求めた放射能濃度の平均値などによって決定する方法である。このため、廃棄物グループの計算条件の変動幅を考慮した複数の放射化計算を行い、計算結果の分布から廃棄物グループの放射能濃度を決定する。基本的な流れは、図 K.1 のとおりとなる。(注：図 K.1 は

略)

例えば、原子炉の運転開始から恒久停止まで原子炉内の一定の位置に設置された一種類の材料で構成される構造物を適用対象の廃棄物グループと考え、廃棄物グループの元素分析データから元素成分条件の変動範囲が把握できることから、その変動範囲を考慮して複数の元素成分条件を適切に設定できる。

一方、中性子条件、中性子の照射条件は、一定であることから、放射化量が大きい値となるような中性子条件及び中性子の照射条件をそれぞれ一つ設定できる。それらの条件を用い、元素成分条件の変動に基づく放射化計算を複数実施し、計算結果のばらつきがある一定の範囲内に安定し、かつ、平均値が一定値に収束していることを確認し、複数の放射能濃度の計算結果からの平均値などを決定する。

この評価方法の具体的な対象廃棄物の例として、東海発電所（GCR）の黒鉛減速材を示す。

K. 1. 2 放射化計算の条件の設定

附属書 G を踏まえ、次の放射化計算の条件を設定する。

- a) 元素成分条件 附属書 G に示す方法で、評価対象となる廃棄物グループに対して、評価対象核種の起源元素を選定し、元素成分条件を設定する。
- b) 中性子条件 附属書 G に示す方法で、廃棄物グループに対して、中性子の照射位置ごとの中性子フルエンス・中性子スペクトル及び放射化断面積を設定する。次に、廃棄物グループの形状及び設置方向、並びに配置位置を考慮した中性子の照射位置を設定し、設定した廃棄物グループの放射化量が大きい値となるような中性子条件を選定する。
- c) 中性子の照射条件 附属書 G を踏まえ、評価対象廃棄物の放射化量が大きい値となるような中性子の照射時間及び原子炉供用期間中の中性子の照射停止時間を設定する。

(2) 検討の結果

- ① 「6. 1. 3. 1 放射化計算方法」には、「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」とされている。何に対して「適切な」のかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁰¹。

(回答待ち)

- ② 「6. 1. 3. 2 計算用入力条件の設定」には、区間推定法を適用する場合の入力パラメータ及び条件はランダムに抽出するか、又は、適切な代表的条件を設定すると規定されている。何に対して「適切」なのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁰²。

(回答待ち)

- ③ 「A. 3 放射化計算コードの例」に 5 種類の ORIGEN コードが記載されている。それぞれの特徴と使い分けについて、また、各コードに内蔵される断面積ライブラリの基となる

²⁰¹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 9

²⁰² 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 10(1)

核データとその処理方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁰⁴。

いずれの *ORIGEN* コードも放射化計算の対象としている放射化金属等の特徴によらず、放射化金属等の計算位置の中性子スペクトルを反映した放射化計算を実施することが可能です。

ただし、いずれの *ORIGEN* コードにおいても、検証され、分析値との比較により妥当性確認された計算コード、断面積ライブラリを使用することが必要となります。

ORIGEN コードシリーズ (*ORIGEN79*, *ORIGEN-S*) は、複数群の中性子断面積を内蔵しており、熱中性子、共鳴領域中性子及び高速中性子の中性子フルエンス率の比を入力することによって、中性子スペクトルを反映できる放射化計算コードです。

ORIGEN2 コードシリーズ (*ORIGEN2*, *ORIGEN2.1*, *ORIGEN2.2*) は、燃焼計算用に原子炉型式、燃料の組み合わせに対する燃料領域における 1 群実効核反応断面積ライブラリがあらかじめ計算コードと共に準備されています。ただし、燃料領域以外については、*JENDL* 等の核データ及び、放射化計算位置における中性子スペクトルを用いて 1 群に縮約した断面積をユーザーが作成し、計算を実施します。

各コードに内蔵又は付属する断面積ライブラリの基となる核データ及び断面積ライブラリの取扱いについて、以下に整理します。

コード		内蔵又は付属の断面積ライブラリの基となる核データ	断面積ライブラリの取扱い
<i>ORIGEN</i> コードシリーズ	<i>ORIGEN79</i>	<i>ENDF/B-IV</i>	<ul style="list-style-type: none"> 左記の核データに基づく複数群の中性子断面積を内蔵しており、熱中性子、共鳴領域中性子及び高速中性子の中性子フルエンス率の比を入力することによって、中性子スペクトルを反映した放射化断面積を使用できる。
	<i>ORIGEN-S</i>	<i>ENDF/B-VI</i>	
<i>ORIGEN2</i> コードシリーズ	<i>ORIGEN2</i>	<i>ENDF/B-IV</i>	<ul style="list-style-type: none"> 左記の核データに基づく原子炉型式、燃料の組合せに対する燃料領域における 1 群実効核反応断面積ライブラリがあらかじめ準備されている。 上記以外については、核データ及び放射化金属等の計算位置の中性子のスペクトルを用いて 1 群に縮約した放射化断面積をユーザーが作成する。
	<i>ORIGEN2.1</i>	<i>ENDF/B-V</i> <i>JENDL-3.2</i> ^{*1} <i>JENDL-3.3</i> ^{*1}	
	<i>ORIGEN2.2</i>	<i>ENDF/B-V</i> <i>JENDL-3.2</i> ^{*1} <i>JENDL-3.3</i> ^{*1} <i>JENDL-4.0</i> ^{*1}	

*1 *ORIGEN2.1* 及び *ORIGEN2.2* では、日本原子力研究開発機構から公開されている *JENDL* シリーズの *ORIGEN2* 用 1 群実効核反応断面積ライブラリ (*ORLIBJ32*, *ORLIBJ33*, *ORLIBJ40*) の使用が可能。

²⁰⁴ 第 3 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資料 3-1-2 回答 7(2)

- ④ 「A.3 放射化計算コードの例」に「評価対象とする放射化金属等を照射する中性子スペクトルを反映した断面積をユーザーが準備する」と規定されている。具体的な断面積の設定方法について日本原子力学会は、以下のように説明している²⁰⁵。

「評価対象とする放射化金属等を照射する中性子スペクトルを反映した断面積をユーザーが準備する」については、ORIGEN2 コードシリーズの手順です。ORIGEN2 コードシリーズについては、炉内で照射される放射化金属等（制御棒、バーナブルポイズン棒などの運転中廃棄物）に対しては、前述の炉内の燃料領域のスペクトルで縮約された1群実効核反応断面積ライブラリが使用できますが、燃料領域以外など中性子スペクトルが異なる位置の放射化金属等（バッフルなどの解体廃棄物）に対しては、当該位置の中性子スペクトルを反映した1群縮約断面積を準備する必要があります。断面積の作成フローを下図に示します。

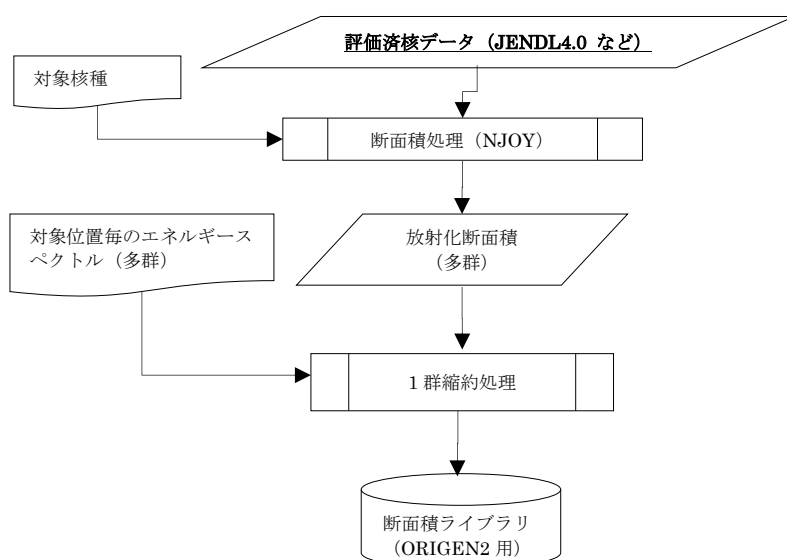


図 1 群実効核反応断面積ライブラリの作成フロー

- ⑤ 「A.3 放射化計算コードの例」に「基本的に一般的に使用されている放射化計算コード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。」とありますが、評価対象核種となりうる全ての核種に対して当該計算コードが適用できるのか、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁰⁶。

(回答待ち)

- ⑥ 「I.1.4 適用方法」の「a) Key 核種の選定」において、次の1)又は2)のいずれかに適

²⁰⁵ 第3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資料 3-1-2 回答 7(3)

²⁰⁶ 第3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資料 3-1-1 「適用範囲と理論的方法の特徴」 回答 14(3)

合する Key 核種を選定するとしている。理論計算法ではすべての核種の放射能濃度を放射化計算により求めるところ 2) で Key 核種を選定する理由、及び 2) について放射能濃度を放射化計算によって算出できない核種の詳細について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁰⁷。

- 1) 外部から検出が比較的容易な γ 線放出核種である。
- 2) 評価対象廃棄物ごとの放射能濃度を放射化計算によって算出できる核種である。
(回答待ち)

「c)濃度比の決定方法 2)濃度比決定のための放射化計算結果(評価データ)の充足性」の「評価対象廃棄物中の難測定核種及びKey 核種の濃度比の値を決定するための放射化計算結果の数が、十分であるかどうかの判断」において参考としている「適切なデータ数の取得の考え方」について、ISO21238:2007 に示されている内容、及び「放射化計算の追加によって統計値の安定性に明確な向上が見込めなければ、十分と判断してよい」とする数値の判断基準について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁰⁸。

(回答待ち)

- ⑦ 「I. 2. 1 事前準備」の「c)放射化計算コードの選定」において、放射化計算コードとして ZrTN804D (BWR チャンネルボックス本体) には ORIGEN-S、SUS304 (PWR 制御棒被覆管) には ORIGEN2 が選定されていることについて、日本原子力学会は、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁰⁹。

(回答待ち)

- ⑧ 「I. 2. 2. 1. 2 元素成分条件の設定」の「表 I. 6-実際の元素分析データを踏まえ設定した濃度分布基本形状」において、Ni、Cu とともに「基本的考え方による設定」は対数正規分布だが、「実際の元素分析データを踏まえた設定」は正規分布となっている。「基本的考え方による設定」の位置付け及び Ni、Cu の元素分析データを踏まえた分布形として対数正規分布を採用した理由と考え方について、日本原子力学会は、以下のように説明している²¹⁰。

「主要成分元素」は、組成調整が行われますが、その他の「不純物成分元素」及び「微量成分元素」は、組成調整は行われなため、基本的には、本来の元素濃度の分布である対数正規分布が維持されます。

この元素濃度の分布の基本的考え方は、「第2回会合における日本原子力学会への説明依頼事項に対する回答」の回答 14(1)に示しましたように附属書 G の G. 1. 2. 3. 2 の考え方 (表 G. 13 を参照ください) です。

²⁰⁷ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 31(1)

²⁰⁸ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 31(2)

²⁰⁹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 32

²¹⁰ 第3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資料 3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 12

しかしながら、「不純物成分元素」に関しては制限値があり、精錬過程において制限値を満足させるための管理（除去）が行われ、分布が歪むことも考えられますので、分布形状の評価に当たっては、標準では 6.1.2.2.3 に示すように分析データによる元素成分の入力用のデータには、分布形状を踏まえた設定を求めています。

このため、元素成分条件の入力データ設定用の濃度分布の評価及び設定を行うために、次のステップで評価を行います。

- ① 分析データの収集、正規性の評価段階：分析データを収集し、附属書 D の表 D.4 の基本的考え方に示す元素の濃度分布の基本形状（正規分布又は対数正規分布）を適用して分布形状の評価（平均、標準偏差、正規性）を進める。
- ② 入力データ設定用分布の設定段階：放射化計算用の入力データを選定するために設定する濃度分布は、収集した分析データが示す最も適切となる分布形状を確認して設定する。

この結果、ジルカロイの Ni、Cu に関しては分析結果の分布の実態を踏まえて、表 I.6 に示すように、分布形状を「正規分布」としたものです。

表 I.6—実際の元素分析データを踏まえ設定した濃度分布基本形状

材 料		ZrTN804D	
元 素		Ni	Cu
元素成分の区分		不純物成分元素	不純物成分元素
基本的な考え方による設定		対数正規分布	対数正規分布
実際の元素分析データを踏まえた設定		正規分布	正規分布
理 由	濃度分布の推定範囲 ($\pm 3\sigma$)	質量分率 $2.9 \times 10^{-3} \%$ ～質量分率 $7.1 \times 10^{-3} \%$ (約 2.5 倍)	質量分率 $2.7 \times 10^{-4} \%$ ～質量分率 $3.7 \times 10^{-3} \%$ (約 14 倍)
	実際の元素分析データの分布	<p>濃度範囲が非常に狭く、正規確率紙上でも、正規性を示したため。</p>	基本的考え方から選択した“対数正規分布”を仮定すると、JIS 規格で規定されている上限値（不純物成分元素としての許容範囲）を大幅に超えてしまうため、正規分布を適用した。

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。

「d)各元素の濃度分布条件の設定」「2)元素分析データ数が非常に少ない元素」において、「なお、標準偏差には、全ての元素の標準偏差の分布の小さいほうから 90%の範囲を包含する条件（ここでは、対数正規分布として、標準偏差=0.5（対数））を設定することで、保守性を見込む。」とあるが、標準偏差の累積度数分布の 90%に相当する標準偏差値（対数）を設定し、95%としない根拠について、日本原子力学会は、以下のよう

（回答待ち）

「d)各元素の濃度分布条件の設定」「3)元素分析データに検出下限値しかない元素」において、「実際の元素濃度分布は、検出下限値より低い濃度領域にあるが、ここでは、元素濃度分布がより高い濃度で分布するように、検出下限値が元素濃度分布の+2 σ （分布の 95.4 %を包含する範囲の上限値）の位置と仮定し、濃度分布の標準偏差を利用した平均値を設定」とあり、「図 I.3-元素分析データに検出下限値しかない元素の濃度分布条件の設定方法及び結果」において、不純物 Co、Nb、Mo は濃度分布基本形状として対数正規分布を選択している。不純物 Co、Nb、Mo について、検出下限値しかない元素に分類したこと及び濃度分布基本形状を対数正規分布と選択したことについて、日本原子力学会は、以下のよう

<参考>

- ・「D.4.2 各元素の濃度分布基本形状の設定」において、不純物成分元素は材料製造時に成分管理目標値などを定めて調整を行うもの、微量成分元素は成分管理目標値などが定まっていないものと区別されている。
- ・ZrTN804D を規定する JIS H 4751:2016 においては、化学成分及び不純物の分析試験方法について、O、H 及び N 以外は受渡当事者間の協定によると規定しており、検出下限値は明確でない。
- ・JIS 規格等において不純物の許容値及び許容変動値を規定していることは、不純物が許容値を上回る原材料が含まれることもあるが、製錬工程において混合させることで希釈又は脱処理し全体として許容値以下を達成していると考えられる。

（回答待ち）

⑨「表 I.3-各元素の元素分析データ収集結果（ZrTN804D）」の注記1において、「対数正

²¹¹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 33(1)

²¹² 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 33(2)

規分布の標準偏差は、「平均値+1σ」で表示」とあるが、平均値を加算する意味について、日本原子力学会は、以下のように説明している²¹³。

(回答待ち)

- ⑩ 「表 I. 14—ZrTN804D (BWR チャンネルボックスの本体) の照射時間の出現頻度分布の設定」の中性子照射時間の設定条件は、平均値=1,786 日、標準偏差=654 日としている。また、「表 I. 15—SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) の中性子照射時間の出現頻度分布の設定」の中性子照射時間の設定条件は、D バンクが指数分布で $y=534.12e^{-0.8254x}$ (x: 中性子照射時間 (年), y: 発生頻度)、ARO バンクが正規分布で平均値=7.68 年、標準偏差=2.92 年としている。これらの数値の設定理由について、日本原子力学会は、以下のように説明している²¹⁴。

(回答待ち)

- ⑪ 「I. 2. 4. 3 濃度比の決定方法」の「a) 濃度比の算出」において、濃度比は幾何平均又は算術平均で算出するとしている。廃棄体の放射能濃度が第二種廃棄物埋設に係る許可を受けたところによる最大放射能濃度を超えないことを確実にするための算出値の処理方法について、及び「平均」と記載しているもの²¹⁵は「幾何平均」又は「算術平均」のいずれであるかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している²¹⁶。

濃度比法における濃度比の設定に適用する「平均」の考え方は、適用する評価対象の放射能に合わせて、以下のとおりに使い分けます。

算術平均： 最大放射能濃度を評価する場合の濃度比の設定に適用 算術平均は保守性をもった平均値である。(回答 13(4) も参照ください)

幾何平均： 平均放射能濃度及び総放射エネルギーを評価する場合の濃度比の設定に適用 幾何平均は全体の放射能濃度の平均を適切に評価する平均値である。

「評価対象廃棄物全体の放射能濃度は、様々な放射化条件下にあり、数桁にわたる広範囲の放射能濃度で分布するものもあり、一般に、難測定核種及び Key 核種の放射能濃度は、対数正規分布で評価される。また、難測定核種及び Key 核種の濃度比も基本的に相関関係をもつ二変量対数正規分布に従うため、」と記載されている。「評価対象廃棄物全体」とは、どのような範囲か、「一般に、難測定核種及び Key 核種の放射能濃度は、対数正規分布で評価される。」の根拠、及び「難測定核種及び Key 核種の濃度比も基本的に相関関係をもつ二変量対数正規分布に従う」の意味とその根拠について、日本原子力学会は、以下のように説明している²¹⁷。

(評価対象廃棄物全体)

²¹³ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 33(3)

²¹⁴ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 34

²¹⁵ 用語「幾何平均」は標準中に 11 箇所 (図 B. 6、表 G. 13、I. 2. 4. 3、図 I. 8、図 I. 9、K. 1. 4) 記載されていますが、その他は「平均」と記載されている。

²¹⁶ 第 3 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資料 3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 13(1)

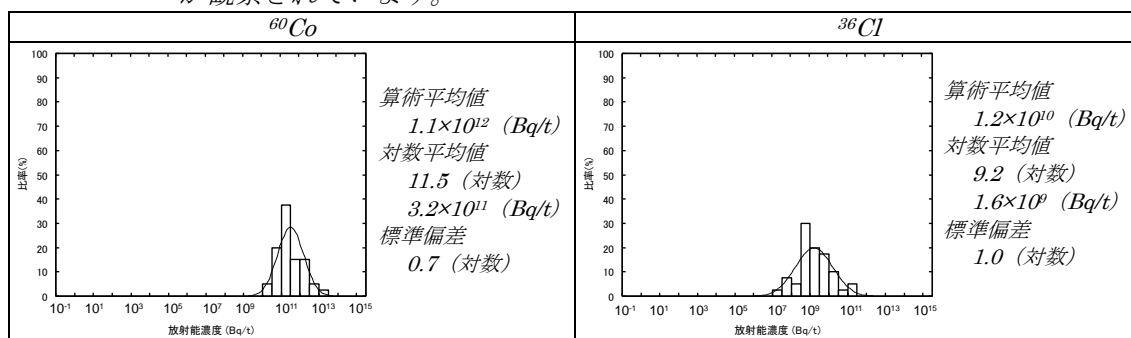
²¹⁷ 第 3 回中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法に係る日本原子力学会標準の技術評価に関する検討チーム資料 3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 13(3)

附属書 I の I. 2. 4. 3 濃度比の決定方法に示しています「評価対象廃棄物全体」は、放射能濃度を求める対象とする放射化金属の一つ又は一部ではなく、放射化金属の全体を意味しています。

(例 チャンネルボックスであれば、1 体だけでなく全チャンネルボックス、シュラウドであれば、切断片でなくシュラウド全体)

(難測定核種及び Key 核種の放射能濃度は、対数正規分布で評価される)

標準の例では、濃度比法における個々の核種の放射能濃度分布は示しておりませんが、同じ区間推定法の放射能濃度分布評価法の例(附属書 K の図 K. 6: 下図参照)において放射能濃度の分布を示しており、対数正規分布であることが観察されています。



(難測定核種と Key 核種の濃度が二変量対数正規分布に従う)

「二変量対数正規分布」は、難測定核種と Key 核種の双方の核種の放射能濃度分布がそれぞれ正規性を示し、かつ双方の核種間に相関関係が示される分布です。

一般的に放射能濃度の分布は数桁に及ぶため、対数正規分布を示す 1) ことから、評価対象核種と Key 核種間との相関性を評価することによって、この「二変量対数正規分布」の考え方が適用できます。このため、その適用性の判断は、各核種の濃度分布の正規性と核種間の相関性で評価します。

なお、参考までに、標準に示しました計算結果を整理した結果の一例を図 13(3)-1 に示します。

注 1 濃度等の分布が対数正規性を示していると報告された文書 (一例)

[1] 福島第一原子力発電所事故 事務局長報告書 (引用 UNITED NATIONS, FAO/IAEA Food Database, UNSCEAR 2013 Report, Attachment C-8 of Annex A; Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident After the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2014).)

[2] JAEA-Technology 2015-009 JPDR 保管廃棄物に対する放射能濃度評価方法の検討 (2)

[3] 日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ Vol. 7 No. 2, 射線安全の新しいパラダイム検討専門研究会報告書 (引用 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 1993 Report (1993))

[4] 平成 30 年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費助金 (固体廃棄物の処理処分に関する研究開発)」2019 年度成果 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

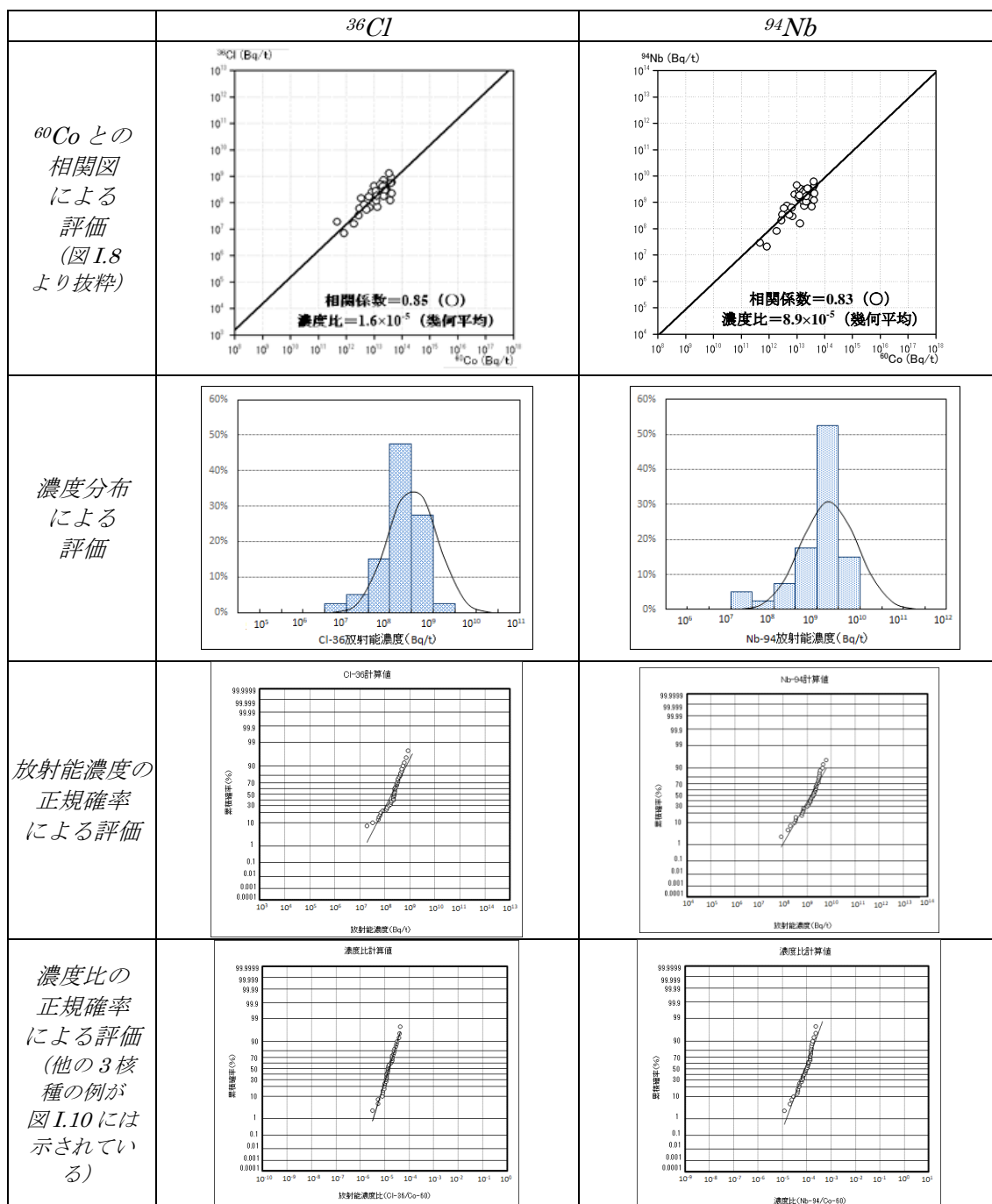


図 13(3)-1 相関性及び対数正規性を示す図の例

注記 1 濃度分布及び正規確率の図は、現行の標準での記載はない。附属書 I の表 I.17 及び表 I.21 に示す放射化計算結果を用いて今回あらたに作図したもの。

注記 2 ^{60}Co との相関図による評価において、相関係数の () 内の「○記号」は t 検定によって相関関係が認められたことを意味する。

「難測定核種及び Key 核種の濃度比も基本的に相関関係をもつ二変量対数正規分布に従うため、複数回の放射化計算結果を使用して濃度比を算出する場合には、幾何平均の適用が適切である。」と記載されている。濃度比が対数正規分布に従っているとした

場合、濃度比として幾何平均を用いると難測定核種の放射能濃度が必ず保守的になるか、及び難測定核種と Key 核種が二変量対数正規分布であるとして濃度比を幾何平均で求めた場合、二変量対数正規分布と判断した濃度範囲の廃棄物全体が同一の処分場あるいは処分場の同じ区画に埋設されることを担保する方法、又は当該廃棄物全体が一つの廃棄体に入っていることが担保される方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している²¹⁸。

(幾何平均による保守性)

濃度比に幾何平均を使用する考え方は、過剰な保守性を排除するために、適用するものです。

ここで、Key 核種の濃度分布から難測定核種との相関関係を踏まえ、難測定核種の放射能濃度分布を推定評価するには、主に線形の関係の基本とした図 13(4)-1 に示す下記の 2 種類の算出式による評価方法があります。

- ① 算術平均濃度比による難測定核種の評価
- ② 幾何平均濃度比による難測定核種の評価

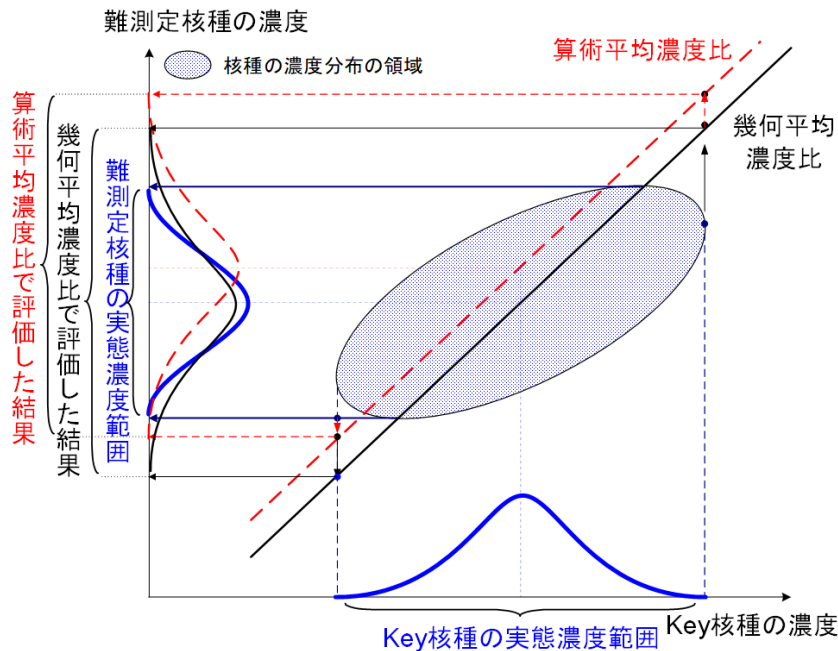


図 13(4)-1 難測定核種の放射能濃度の評価に適用する算出式による差異のイメージ

注 Key 核種は分析が容易な核種であるが、難測定核種は分析が難しく検出限界の影響を受けて濃度分布範囲が若干狭まることを踏まえ、傾きを 1 より小さくした。

上図に示した 2 種類の評価方法について、その特徴を表 13(4)-1 に整理しました。まず、「算術平均」は、濃度分布のばらつきを加味できるため、スクリーニングレベルと組み合わせることで、「最大放射能濃度」の評価に適します。

一方、「幾何平均」は、濃度分布を適切に評価できるため、「放射能量の総量」を算出するための放射能濃度の評価に適します。

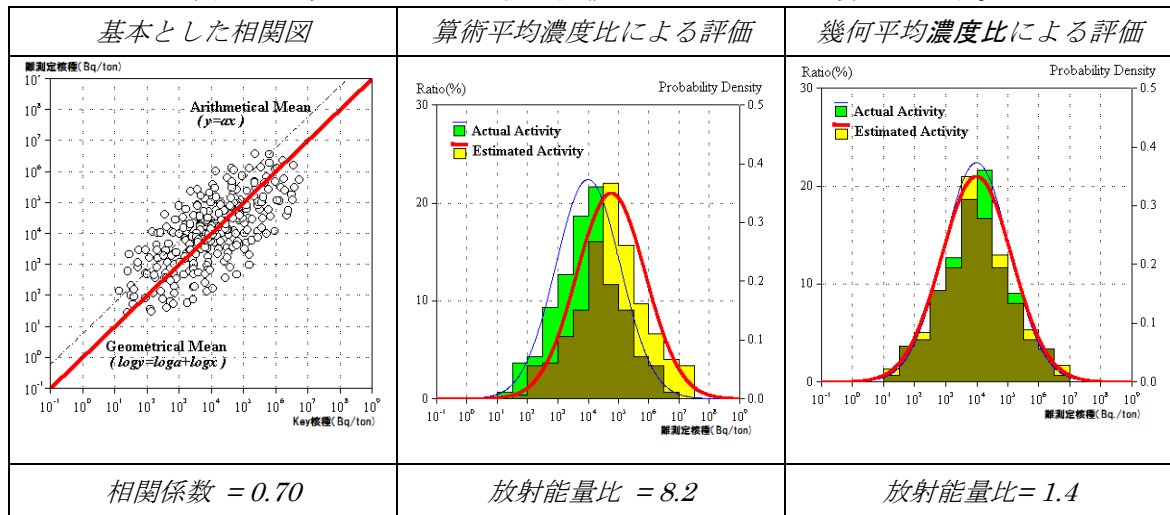
表 13(4)-1 算術平均濃度比と幾何平均濃度比による評価の比較

²¹⁸ 第 3 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資料 3-1-1 「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」 回答 13(4)

	算術平均濃度比による評価	幾何平均濃度比による評価
基本的な適用範囲	算術平均は、「正規分布」に従う変数に対して望ましい平均値である。	幾何平均は、「対数正規分布」に従う変数に対して望ましい平均値である。
濃度比を適用して評価した分布の結果	ばらつきの影響が加味され、分布の形状はあまり変えないものの、濃度の大きい方向にスライドさせる形での評価分布となる。	分布の中心は変わらず、濃度の大小の方向に若干拡張させる形での評価分布となるが、ばらつきに大きく影響されない。
適した評価対象	分布のばらつきを加味するため、これに保守性を加えることにより、『最大放射能濃度』の評価に適する。	分布の中心を正しく評価し、かつ、分布の線形の傾きが1未満の場合、保守性も加わり、『放射能算出のための放射能濃度』の評価に適する。

濃度比として、「算術平均」を適用した場合、算出式が示す推定放射能濃度分布への影響の特徴 (図 13(4)-1 参照：スケーリングファクター法の例示ですが、濃度比法にも適用できます) で示しますように、放射能濃度分布を大きい方向にスライドさせた評価となり、設定した放射能の 8.4 倍の放射能の評価結果を示し、ばらつきを過度に加味した大きな保守性を含むことになります。

一方、「幾何平均」を適用した場合、濃度分布の平均濃度は変わりませんが、放射能濃度の高い領域を大き目に評価する特徴 (図 13(4)-1 参照) から、実際の放射能の 1.4 倍程度の放射能評価結果となり、保守性を確保しつつ、より実態 (難測定核種の放射能濃度分布と放射能の真値) に近い評価結果を得ることができており、「幾何平均」を適用した方が、放射能の総量の評価に関しては、実態をより適切に評価できていることが分かります。



注：放射能比=スケーリングファクタを適用し算出した難測定核種の放射能 (Estimated Activity) / 規格化データの難測定核種の真値 (Actual Activity)
 図 13(4)-2 スケーリングファクタ算出方法の違いが放射能評価結果に与える影響 (規格化したデータを使用した評価)

(出典) H. Masui, M. Kashiwagi and H. Ozaki, Rationalization of radioactivity concentration determination method for Low-

level radioactive waste generated at Japanese nuclear power plants, (International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management: ICM' 01, Bruges, Belgium, 2001)

IAEA Nuclear Energy Series, No. NW-T-1.18, Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in Nuclear Power Plants (2009)

(判断した濃度範囲の廃棄物全体が同一の処分場あるいは処分場の同じ区画に埋設されることを担保する方法など)

埋設段階の廃棄体の管理、運用に関しましては、申請を行う各事業者が計画し、管理を行うこととなります。

その管理に関しては、埋設する各廃棄体は整理番号によって管理され、さらに、各廃棄体に収納した放射化金属等の種類、廃棄物量、放射能濃度も廃棄体の整理番号によって管理されますので、評価対象とした廃棄体に関する埋設管理が可能となります。

したがって、「濃度比法」を適用した廃棄体に関しては、放射能評価方法を適用するためにも、廃棄体と情報との1対1の連関管理(整理番号と記録との管理)を行うことで、廃棄体の埋設管理及び実際の廃棄確認によって、担保されることとなります。

「b)放射化計算結果(評価データ)の充足性」において、40点のデータで濃度比を決定するデータ数としては充足していると評価されているが、当該計算で求めた核種比が実際のものと同等あるいは保守的になっているかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している²¹⁹。

標準では、区間推定法による放射化計算の結果と分析値の比較は行っておりません。

しかしながら、分析を行ったサンプル採取位置と区間推定法でランダムサンプリングした評価位置は、一致するものではありませんが、濃度比法による計算結果に分析値をプロットしたものを参考までに、次図(図 I.8 に分析データをプロットしたもの)に示します。

なお、図中の「●」は、チャンネルボックスの中央部から採取した試料を放射化学分析した結果ですので、これと比較する計算結果は、比較的高い放射能濃度領域(赤破線の○で囲った部分)の計算値プロットである「○」との比較となります。

さらに、比較に適用した元素濃度の分析値は、次図(図 I.5 から抜粋)に示しますように、検出下限値しか得られていませんので、区間推定法の元素濃度の設定は、検出下限値から設定した濃度分布からランダムサンプリングした元素濃度であることにも留意が必要です。

²¹⁹ 第3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資料 3-1-1「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 13(2)

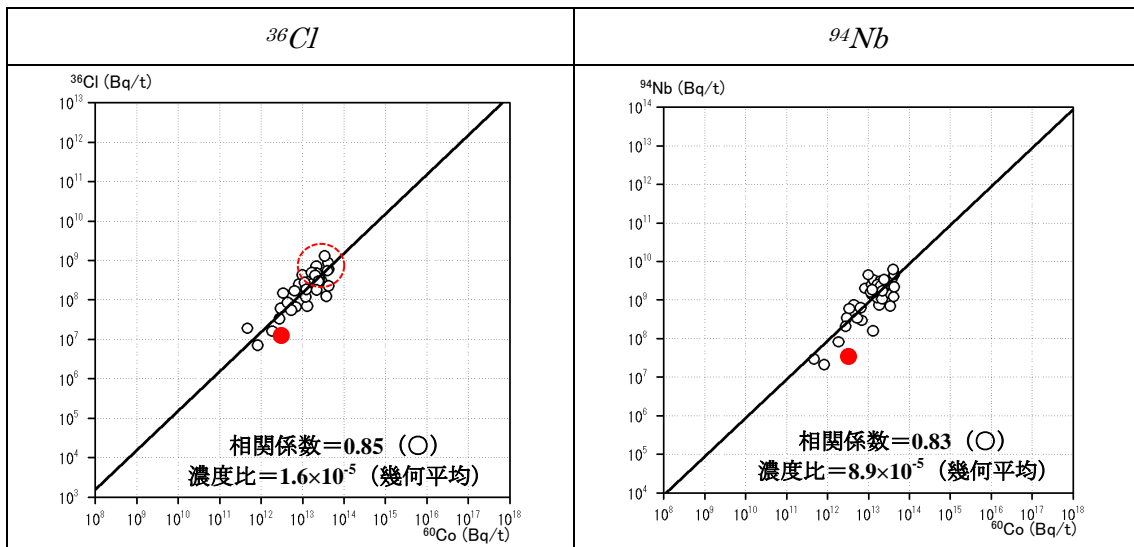


図 I. 8—ZrTN804D (BWR チャンネルボックスの本体) の難測定核種及び Key 核種 (^{60}Co) の散布図 (放射化計算結果) から抜粋

(●は分析値を示す。Co-60 : $3.3\text{E}+12\text{Bq/t}$, Cl-36 : $1.4\text{E}+7\text{Bq/t}$, Nb-94 : $4.4\text{E}+7\text{Bq/t}$)

注記 1 ^{36}Cl 及び ^{94}Nb の放射能濃度は、標準には示していない事業者から提供された分析データを使用している。

注記 2 分析したサンプルは CB の中央部からの採取であり、最も高い濃度を示す部位からの採取と考えられる (したがって、計算結果の最大領域の結果 (赤破線の○で囲った部分) との比較となる)。

注記 3 濃度比法の計算に適用した元素 Cl、Co 及び Nb の濃度分布は、元素分析の検出下限からの対数正規分布で設定したもの (下図 (図 I. 5) 参照)

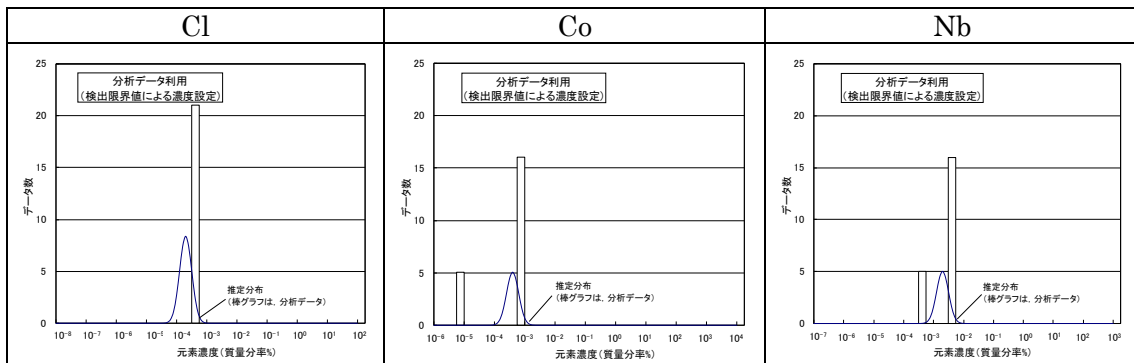


図 I. 5—ZrTN804D の元素分析データ及び濃度分布条件設定結果から抜粋

⑫「J. 1. 1 考え方」には、「評価対象廃棄物のもつ管理指標の値の範囲を考慮して代表的な中性子照射量を設定し、平均的又は放射能濃度評価結果が大きくなるような中性子条件で放射化計算を実施する。」とされている。「平均的な中性子条件」と「放射能濃度評価結果が大きくなるような中性子条件」での換算係数を用いた結果が同等となるのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している²²²。

²²² 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 35

(回答待ち)

- ⑬ 「J. 1. 4. 2 換算係数の決定方法」の「b)換算係数の妥当性の評価」について、「換算係数の妥当性は、詳細計算とサンプリングによる測定結果との比較などによって、その妥当性を、適用前にあらかじめ検証しておくことが必要」とあり、「詳細計算」の方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している²²³。

(回答待ち)

- ⑭ 「J. 2. 4. 2 換算係数の決定方法」では、「図 J. 2-ZrTN804D (BWR チャンネルボックス)の換算係数の例 (管理指標：集合体平均燃焼度)」及び「図 J. 3-SUS304 (PWR 制御棒の被覆管)の換算係数の例 (管理指標：中性子の照射量)」を例示するだけで換算係数の決定方法についての記述がない。換算係数の決定方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している²²⁴。

(回答待ち)

- ⑮ 「J. 2. 4. 3 放射能濃度の決定方法」では、「図 J. 4-ZrTN804D (BWR チャンネルボックス)の放射能濃度の評価例 (管理指標：集合体平均燃焼度)」及び「図 J. 5-SUS304 (PWR 制御棒の被覆管)の放射能濃度の評価例 (管理指標：中性子の照射量)」を例示するだけで放射能濃度の決定方法についての記述がない。放射能濃度の決定方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している²²⁵。

(回答待ち)

- ⑯ 「K. 1. 1 考え方」の「廃棄物グループの元素分析データから元素成分条件の変動範囲が把握できることから、その変動範囲を考慮して複数の元素成分条件を適切に設定できる。」とは具体的にどのようなことかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している²²⁷。

(回答待ち)

- ⑰ 「K. 2. 2. 2 中性子条件」の「b)放射化断面積の設定」において、「黒鉛減速材用黒鉛の評価では、ORIGEN2 を適用する」としている。その適切性について、日本原子力学会は、以下のように説明している²²⁹。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

²²³ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 36

²²⁴ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 37

²²⁵ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 38

²²⁷ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 40

²²⁹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 42

追而

4. 6. 1 放射化計算の計算数の設定

放射化計算の計算数については「6. 1. 3. 3 放射化計算の計算数の設定」、注記として「附属書 A(参考)理論計算法の適用方法及び手順」に規定している。

(1) 規定の内容

6. 1. 3. 3 放射化計算の計算数の設定

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の特徴（例 2 参照）などを考慮して決定する。

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。

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が明確な場合は、その部位 1 点で計算した代表値で評価する。

6. 1. 3. 3. 2 区間推定法

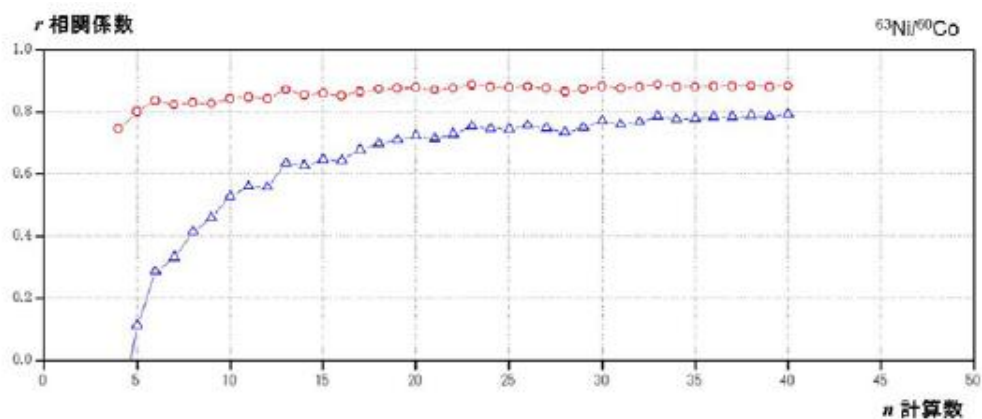
実施した放射化計算結果の数が、放射能濃度決定のための評価データとして十分かについては、放射化計算を行った数とその放射化計算結果とが示す統計値の安定性の推移を踏まえて判断する。

注記 詳細は、A. 4. 3 参照。

A. 4. 3 計算の実施段階

準備段階で文書化された放射化計算方法などに従って、必要な計算条件を明確化し、計算条件の入力データを、第三者によるトレーサビリティが得られるように、明確に記録する。

なお、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。



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

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

(2) 検討の結果

- ①「A. 4. 3 計算の実施段階」において、「計算条件の入力データを、第三者のトレーサビリティが得られるように、明確に記録する」とあるが、記録すべき項目について、日本原子力学会は、以下のように説明している²³⁵。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

追而

²³⁵ 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参考資料2-1「適用範囲と理論的方法の特徴」に関するもの17

4. 6. 2 表面汚染の取扱い

理論計算法における表面汚染の取扱いについては「6. 1. 4 表面汚染の取扱い」に規定している。

(1) 規定の内容

6. 1. 4 表面汚染の取扱い

理論計算法の適用において、放射化金属等の表面に付着した放射性物質を十分に低減できるよう除染する場合は、表面の汚染を考慮する必要はない。また、除染しない場合は、放射化金属等の表面に付着した放射性物質の放射能濃度を評価し、必要に応じて理論計算法で決定した放射能濃度に加える。

(2) 検討の結果

- ① 「6. 1. 4 表面汚染の取扱い」には、「除染しない場合は、放射化金属等の表面に付着した放射性物質の放射能濃度を評価し、必要に応じて理論計算法で決定した放射能濃度に加える。」とされている。除染しない場合に、放射化金属等の表面に付着した放射性物質の放射能濃度の評価結果を加える必要がない条件について、日本原子力学会は、以下のように説明している²³⁶。

標準では、「必要に応じて理論計算法で決定した放射能濃度に加える。」とのみ規定しています。

なお、標準の解説表 3 に、「除染しない場合で、表面汚染を加える必要がない場合」の一例として、福島第二発電所のチャンネルボックスの母材とクラッドの放射能比の評価結果を示しており、クラッドの放射能は母材の放射能に対して非常に小さく (1%)、クラッドの放射能の影響がないとして評価できる事例を示しています。

解説表 3—チャンネルボックス^{a)}の母材に対するクラッドの放射能比^{b)}

3H	^{14}C	^{60}Co	^{63}Ni	^{137}Cs
0.18 %	0.0041 %	0.95 %	0.21 %	0.27 %

注 ^{a)} 福島第二発電所 1 号機から発生したチャンネルボックス。
^{b)} 放射化学分析等によって得られた単位面積当たりの放射能の比 (クラッドの母材に対する比)。

- ② 「放射化金属等の表面に付着した放射性物質を十分に低減できるよう除染する」と記載されているが、「十分に低減できる」ことの判断基準について、日本原子力学会は、以下のように説明している²³⁷。

「十分に低減できている」ことの一例としても、回答 2(1)の表面汚染分と放射化分の放射能比が参考となると考えます。

(3) 適用に当たっての条件

²³⁶ 第 3 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資料 3-1-1 「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 2(1)

²³⁷ 第 3 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資料 3-1-1 「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 2(2)

追而

4. 6. 3 理論的方法の妥当性確認

放射化計算の妥当性確認については「6.3.1.1 妥当性確認の方法」及び「6.3.1.2 不確かさの扱い」、注記として「附属書 A(参考)理論計算法の適用方法及び手順」及び「附属書 L(参考)不確かさなどによる計算結果の評価」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>6.3.1 理論的方法の妥当性確認</p> <p>6.3.1.1 妥当性確認の方法</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> <p>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。</p> <p>注記2 詳細は、附属書 A 参照。</p> <p>6.3.1.2 不確かさの扱い</p> <p>理論計算法の結果の代表性を定量化するために、計算の正確さ及び不確かさを評価する。</p> <p>注記1 “正確さ”は、理論計算結果が真値にどれだけ近いかを示す。偏り及び保守性の程度は、放射能濃度の許容限度（廃棄体の受入基準、放射線防護、輸送などの限度）から決まる。また、“正確さ”は決定した放射能濃度の偏りを示し、“代表性”は正確さ及び精度を反映したパラメータで考慮することができる。</p> <p>注記2 詳細は、附属書 L 参照。</p>
<p>A.4.1 妥当性確認</p> <p>妥当性確認は、放射化計算などによって得られた結果に関する正確さ及び適用性を確認する。その放射化計算のプロセスは、“計算の準備”、“計算の実施”及び“計算結果の記録”の段階に分けて、妥当性確認を行う。</p> <p>なお、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。</p> <p>A.4.2 計算の準備段階</p> <p>妥当性確認された放射化計算方法又は放射化計算コードを使用するために必要な手順書の準備を行う。</p> <p>A.4.3 計算の実施段階（4.6.1項に掲載済につき略）</p> <p>A.4.4 計算結果の記録段階</p> <p>放射化計算方法、明確な入力条件に従い実施した放射化計算の結果を記録し、妥当性を確認する。</p>
<p>附属書 L (参考) 不確かさなどによる計算結果の評価</p> <p>L.1 代表性及び保守性</p> <p>ISO16966:2013 の Annex D の不確かさなどによる計算結果の評価方法の概要を、次に示す。</p> <p>理論計算法は、計算結果を測定値と比較することによって、開発したモデルを検証し、その代表性及び／又は保守性を評価する。このために、計算結果の代表性は、正確さ（偏り）及び精度（不確かさ）の両方によって定量化する。</p> <p>決定される放射能濃度の値は、計算の条件及び適用範囲によって設定された正確</p>

さ、又は保守性を保証する必要があるため、不確かさは、その目的のために正しく評価することが望ましい。

L.2 点推定法

化学組成、中性子フルエンス率及び中性子の照射条件に対する設定値の不確かさを、事前に評価することが望ましく、この不確かさについては、評価された値に関連させて、信頼区間を設定することが望ましい。

L.3 区間推定法

主なパラメータ（材料の元素成分、中性子フルエンス率及び中性子の照射条件）に分布関数が適用されている。この入力データがもつ分布によって、計算結果も分布に従うことから、計算結果の信頼区間を分布から評価する。

(2) 検討の結果

- ① 「A.4.1 妥当性確認」には、「なお、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。」とある。「参照」の意味、及び「計算の準備」「計算の実施」「計算結果の記録」それぞれのステップについて、放射能濃度決定標準の参照範囲とその内容、適用できる根拠について、日本原子力学会は、以下のように説明している²³⁸。

「AESJ SC-A008:2015 シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン」の「3.4 エレメント4: シミュレーションモデルの予測性能の判断」に示される考え方（評価指標、不確かさ、予測性能と実験値の比較）を踏まえ、「計算の準備段階」で、放射化計算方法・計算コードが検証・妥当性確認された際の結果を確認、若しくは計算者自らが放射化計算方法全体を通じた計算値（予測値）と分析値（実験値）との比較を通じて、放射化計算方法・計算コードの妥当性を確認します。

したがって、上記ガイドラインの考え方（3.4 エレメント4: シミュレーションモデルの予測性能の判断）を踏まえ、これを適用する箇所は「A.4.2 計算の準備」の段階だけとなります。

また、AESJ SC-A008:2015 は原子力学会にて審議・制定されたガイドラインであり、対象がシミュレーションモデルと本標準の放射化計算との相違はあるものの、計算の妥当性に関しては、その考え方を適用できるものと考えます。ただし、この確認対象の差異を考慮し、限定的な適用として、ガイドラインの参照部分（3.4 章エレメント4だけ）と標準への適用範囲をA.4.2 章の計算の準備段階としているものです。

さらに、放射化計算などによって得られた結果を確認しますが、そのプロセスは、下表に示しますように「計算の準備」、「計算の実施」及び「計算結果の記録」の段階に分けて、実施します。

放射能評価の各段階	妥当性確認などの内容
計算の準備段階	<ul style="list-style-type: none"> 放射化計算方法又は放射化計算コードの妥当性の確認 必要な手順書、計算書の準備（文書化）
計算の実施段階	<ul style="list-style-type: none"> 文書化された放射化計算方法に従っての実施の確認 必要な放射化計算の条件を記録（入力データの明確化及びトレーサビリティの確保）

²³⁸ 第3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資料 3-1-1 「適用範囲と理論的方法の特徴」 回答7

②「A. 4. 1 妥当性確認」には、「放射化計算などによって得られた結果に関する正確さ及び適用性を確認する。」とある。放射化計算のほかに想定している方法及び放射化計算などによって得られた結果の「正確さ」と「適用性」はどのように確認するのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している²³⁹。

(回答待ち)

③「A. 4. 2 計算の準備段階」には、「妥当性確認された放射化計算方法又は放射化計算コードを使用するために必要な手順書の準備を行う」とある。手順書に記載すべき内容について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁴⁰。

(回答待ち)

④「A. 4. 4 計算結果の記録段階」には、「放射化計算の結果を記録し、妥当性を確認する」とある。妥当性の確認方法について、また、AESJ-SC-A008:2015「シミュレーションの妥当性確認に従うのであれば、AESJ-SC-A008:2015 のどの部分を用いて妥当性を確認するのかについて、日本原子力学会は以下のように説明している²⁴¹。

「計算結果の記録」の段階における妥当性の確認方法とは、必要な計算条件を明確化し、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)明示することです。

なお、「計算結果の記録」の段階における妥当性確認には、AESJ-SC-A008:2015 を適用しません。

⑤「L. 2 点推定法」には、「化学組成、中性子フルエンス率及び中性子の照射条件に対する設定値の不確かさを、事前に評価することが望ましく、この不確かさについては、評価された値に関連させて、信頼区間を設定することが望ましい。」とある。「評価された値に関連させる」とは、具体的に何をするのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁴²。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

追而

²³⁹ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 15

²⁴⁰ 第●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参考資料●-●「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 16

²⁴¹ 第 3 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資料 3-1-1「適用範囲と理論的方法の特徴」回答 8

²⁴² 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 43

4. 6. 4 数値の丸め方

理論計算法における数値の丸め方については「6.4 数値の丸め方」に規定している。

(1) 規定の内容

6.4 数値の丸め方

計算結果の整理, 数値の丸め方は, JIS Z 8401:1999 に従う。ただし, 放射能濃度評価結果の有効数字を丸めるときは, 大きめにとってもよい。

(2) 検討の結果

「6.4 数値の丸め方」には、数値の丸め方は JIS Z 8401:1999 に従うと規定している。JIS には数値の丸め方が複数規定されている。放射能濃度決定標準で採用する数値の丸め方について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁴⁴。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

追而

²⁴⁴ 第3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資料3-1「その他」回答1

4. 6. 5 放射能濃度評価の裕度

理論計算法における放射能濃度評価の裕度については「6.5 放射能濃度の評価における裕度」、注記として「附属書 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」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>6.5 放射能濃度の評価における裕度</p> <p>理論的方法又は実証的方法による放射能濃度決定方法によって放射能濃度を評価する場合、最大放射能濃度を超えないことを確認するため、適切な裕度を考慮する。</p> <p>注記 詳細は、附属書 M 参照。</p>
<p>M.3 評価精度に対する要求に対する対応</p> <p>放射能濃度の評価値のばらつきは、保守的に評価値に大きな値を適用する場合を除けば、必ずしも、一方向だけに生じるものではなく、平均値を中心とした加減双方向の分布をもつ。このことを考慮し、放射能濃度の評価精度を踏まえた裕度に求められる基本的な考え方は、次による。</p> <p>M.3.1 埋設放射能の確認における要求評価精度の考え方</p> <p>埋設放射能（すなわち、平均放射能濃度）の確認においては、廃棄体個々の放射能濃度のばらつきは、推定した平均放射能濃度を中心とした対称的な分布を示す。このため、全埋設廃棄体の総放射能としては、放射能濃度のばらつきは、最終的に相殺されるため、埋設放射能の確認においては、評価結果である個々の廃棄物の放射能濃度及び平均放射能濃度の妥当性が確認されれば、得られた評価は、そのまま適用できる。</p> <p>M.3.2 最大放射能濃度を超えないことの確認における評価精度への対応の考え方</p> <p>a) 評価精度の考え方</p> <p>廃棄体の放射能濃度が最大放射能濃度を超えないことに関する確認においては、M.2 に示した個々の廃棄体に関する放射能濃度評価値のばらつきへの考慮が必要となる。この最大放射能濃度を超えないことの確認において要求される評価精度に関する基本的な考え方を、次に示す。</p> <p>1) 点推定法によって個々の廃棄物に対して放射能濃度を決定する方法</p> <p>点推定法では、評価対象廃棄物個々の放射能濃度を詳細に決定するため、最大放射能濃度の確認においても放射能濃度決定値をそのまま適用することができる。</p> <p>2) 区間推定法によって廃棄物グループを代表する平均的な放射能濃度を決定する方法</p> <p>区間推定法では、放射化計算結果を利用して個々の廃棄体に関するばらつきを勘案し、最大放射能濃度を超えないことを確認する必要がある。</p> <p>b) 評価精度の提示方法</p> <p>廃棄物グループを代表する平均的な放射能濃度を決定する方法における廃棄体個々の放射能濃度のばらつきの程度を意味する評価精度は、次のいずれかの方法などによって提示することが可能である。</p> <p>1) 推定放射能濃度のばらつきの分布の偏差によって評価精度を提示する。</p> <p>例 区間推定法によって評価した廃棄物グループの濃度分布などのばらつきの標準偏差から、得られる平均値の信頼区間による提示など。</p> <p>2) 推定放射能濃度のばらつきの統計的な信頼区間などによって評価精度を提示する。</p> <p>c) 最大放射能濃度を超えないことの確認</p> <p>b)の廃棄体個々の推定放射能濃度のばらつきを踏まえて、次のいずれかの方法によ</p>

って、廃棄体の放射能濃度が最大放射能濃度を超えないことを、妥当性の評価又は裕度の確保によって確認する必要がある。

- 1) 平均放射能濃度を適用しても、最大放射能濃度を超えるおそれが高い範囲を設定する（例えば、平均放射能濃度の評価が適用できる範囲を示すスクリーニングレベルなどを設定する）。
- 2) 放射化計算の条件に適切な裕度を考慮し、到達する可能性のある最大放射能濃度を評価して確認する。
- 3) 放射能濃度を“平均放射能濃度＋偏差”の形式で推定範囲を示し、これによって最大放射能濃度を超えないこと確認する。

(2) 検討の結果

- ①「M. 3. 1 埋設放射能の確認における要求評価精度の考え方」には、「全埋設廃棄体の総放射能としては、放射能濃度のばらつきは、最終的に相殺されるため、埋設放射能の確認においては、評価結果である個々の廃棄物の放射能濃度及び平均放射能濃度の妥当性が確認されれば、得られた評価は、そのまま適用できる。」とされている。評価結果をそのまま適用すると、埋設廃棄体の総数の程度によっては確率的に偏りが生ずることも懸念される。個々の廃棄体についての裕度の必要性について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁴⁵。

(回答待ち)

- ②「M. 3. 2 最大放射能濃度を超えないことの確認における評価精度への対応の考え方」の「b) 評価精度の提示方法」には、「廃棄物グループを代表する平均的な放射能濃度を決定する方法における廃棄体個々の放射能濃度のばらつきの程度を意味する評価精度は、次のいずれかの方法などによって提示することが可能である。」として、その一つの「1) 推定放射能濃度のばらつきの分布の偏差によって評価精度を提示する。」の例に「区間推定法によって評価した廃棄物グループの濃度分布などのばらつきの標準偏差から、得られる平均値の信頼区間による提示など。」とされている。平均値の信頼区間により個々の廃棄体の評価精度が提示できるかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁴⁶。

(回答待ち)

- ③「表 D. 1—各区間推定法の基本的な特徴及び適用対象放射化金属等」に示す換算係数法、濃度比法及び濃度分布評価法に関し、「M. 3. 2 最大放射能濃度を超えないことの確認における評価精度への対応の考え方」の「c) 最大放射能濃度を超えないことの確認」に基づく裕度の確保方法について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁴⁷。

(回答待ち)

²⁴⁵ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 44

²⁴⁶ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 45

²⁴⁷ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 46

(3) 適用に当たっての条件
追而

4. 7 原廃棄物の実証的方法による放射能濃度決定方法

4. 7. 1 原廃棄物分析法

原廃棄物分析法については「5. 3. 1 原廃棄物分析法」、注記として「附属書 E(参考)原廃棄物分析法の基本的な適用方法」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>5. 3. 1 原廃棄物分析法</p> <p>固型化処理前の評価対象とする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評価対象核種ごとの放射能濃度を用いて、その放射能濃度及び固型化条件によって廃棄体の放射能濃度を決定する、又は評価対象核種と Key 核種との組成比及び Key 核種の放射能濃度を適用して廃棄体の放射能濃度を決定する。</p> <p>なお、原廃棄物分析法によって放射能濃度を決定する放射性廃棄物の適用範囲は、代表試料がカバーできる範囲とする。</p> <p>注記 詳細は、附属書 E 参照。</p> <p>5. 3. 2 その他の方法</p> <p>AESJ-SC-F022:2011 に示される 5. 1. 2～5. 1. 4 の方法。</p>
<p>E. 2 原廃棄物分析法の試料採取方法</p> <p>E. 2. 1 基本的な考え方</p> <p>原廃棄物分析法は、適用対象とする貯蔵タンクに保管廃棄されている使用済樹脂、使用済樹脂の処理後に発生する廃液などの廃棄物全体の代表試料を採取して、これを放射化学分析等を行うことで、廃棄物全体の放射能濃度を直接的に決定する方法である。このため、原廃棄物分析法を適用する場合には、廃棄物の代表試料を採取することが重要となる。</p> <p>ここで、原廃棄物分析法の適用も想定される使用済樹脂等の代表試料の採取の考え方は、貯蔵タンクでの廃棄物の均一性の確保の状況などによって異なる。原廃棄物分析法における代表試料採取の基本的な考え方は、次による。</p> <p>a) 廃棄物の均一性が確認できる場合 かくはん（攪拌）機器による混合などによって、あらかじめ貯蔵タンク内での廃棄物が均一混合できると見なすことが可能な場合は、均一混合後に、代表試料を 1 点採取し、代表試料の放射化学分析等を行うことによって、原廃棄物分析法の適切な適用が可能となる。</p> <p>b) 廃棄物の均一性が確認できない場合 貯蔵タンクに混合処理のためのかくはん（攪拌）機器などがなく、かつ、あらかじめ貯蔵タンク内で廃棄物が均一混合できると見なすことが難しい場合は、貯蔵タンクから複数の試料（一次試料）を採取し、各々の一次試料に対して放射化学分析等を実施するか、複数の一次試料から調整した二次試料を代表試料として放射化学分析等を実施することで、原廃棄物分析法の適切な適用が可能となる。</p>

(2) 検討の結果

- ① 「E. 2. 1 基本的な考え方」の原廃棄物分析法の試料採取において、b)の「廃棄物の均一性が確認できない場合」に該当する貯蔵容器の具体例について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁴⁸。

²⁴⁸ 第●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参考資料●-●「実証的方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 5

(回答待ち)

- ② 「E. 2.1 基本的な考え方」の均一混合処理に関連して、「解説図 9—貯蔵タンクの配管（循環ライン）の表面線量当量率と循環時間との関係」の図の注記において、「図は、タンク内のかくはん（攪拌）のために行った廃液の循環の初期から終期まで、配管の表面線量当量率の最大値と最小値との差異が小さいこと[すなわち、タンク内が均一にかくはん（攪拌）されている状態であること]を示している。」とされている。横軸の循環時間が 190 分、205 分、225 分の時点で線量当量率が $2.0E-03\text{mSv/h}$ を超えており、線量当量率は変動している。各時間における最大値と最小値との差異が小さいこと（図ではプロットが重なって太線のように見える。）でかくはん状態を判断することの適切性について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁴⁹。

(回答待ち)

- (3) 適用に当たっての条件
追而

²⁴⁹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 54

4. 7. 2 原廃棄物分析法の手順

原廃棄物分析法の手順については「6. 2. 1 原廃棄物分析法の試料採取方法」及び「6. 2. 2 原廃棄物分析法による評価方法」、注記として「附属書 E(参考)原廃棄物分析法の基本的な適用方法」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>6. 2 実証的方法の手順</p> <p>6. 2. 1 原廃棄物分析法の試料採取方法</p> <p>a) AESJ-SC-F022:2011 に適用方法が示されている原廃棄物分析法の代表試料の採取方法を示す。</p> <p>b) 原廃棄物分析法は、固型化処理前の評価対象とする廃棄物から試料を採取し、試料の放射化学分析等の分析結果によって廃棄体の放射能濃度を決定するため、適用する廃棄体の放射能濃度に関して、次のいずれかの方法で代表試料を採取する。</p> <p>1) 廃棄物の均一性が確認できる場合 あらかじめ、タンク内で廃棄物が均一混合できると見なすことが可能な場合は、均一混合後に採取する。</p> <p>2) 廃棄物の均一性が確認できない場合 あらかじめ、タンク内で廃棄物が均一混合できると見なすことが不可能な場合は、タンクから適切な複数の試料を採取する。</p> <p>注記 詳細は、附属書 E 参照。</p> <p>6. 2. 2 原廃棄物分析法による評価方法</p> <p>6. 2. 1 に示した方法で採取した評価対象とする廃棄物の代表試料を放射化学分析し、次のいずれかの方法で、廃棄体の放射能濃度を決定する。</p> <p>a) 廃棄体の放射能濃度として決定する方法 分析によって得られた代表試料中の評価対象核種の放射能濃度と、固型化方法を踏まえた配合条件（例 廃棄物重量／固化体重量の比率など）とによって、廃棄体の放射能濃度を決定する。</p> <p>b) 廃棄体中の放射性核種の組成比を適用して決定する方法 分析によって得られた代表試料中の評価対象核種と Key 核種との組成比と、廃棄体の非破壊外部測定などによって得られた Key 核種の放射能濃度とによって、廃棄体の放射能濃度を決定する。</p>
<p>E. 2. 2 代表試料の採取・調整方法</p> <p>E. 2. 2. 1 廃棄物の均一性が確認できる場合(略)</p> <p>E. 2. 2. 2 廃棄物の均一混合性が確認できない場合(略)</p> <p>E. 3 原廃棄物分析法による評価方法</p> <p>E. 2 に示した方法で採取した代表試料の放射化学分析等を実施し、次の方法で、廃棄体中の核種別の放射能濃度を決定する。</p> <p>なお、固型化廃棄物に対して、加熱処理などの核種の放射能濃度に影響を与える可能性のある廃棄物処理を適用する場合は、処理方法による影響の適切な補正が必要となる。</p> <p>a) 廃棄体の放射能濃度として決定する方法 放射化学分析等によって得られた原廃棄物中の評価対象核種の放射能濃度と、固型化方法を踏まえた配合条件（例 廃棄物重量／固化体重量の比率など）を利用し、次のいずれかの方法で、廃棄体中の核種別の放射能濃度を決定する。</p> <p>1) 代表試料の放射化学分析等で得られた核種別の放射能濃度、及び廃棄体への廃棄物投入量によって、廃棄体ごとの放射能濃度を決定する方法。</p> <p>2) 複数の一次試料の放射化学分析等で得られた核種別の放射能濃度の平均値、及び廃棄体への廃棄物投入量によって、廃棄体ごとの放射能濃度を決定する方法。</p>

b) 廃棄体中の放射性核種の組成比を適用して決定する方法 放射化学分析等によって得られた原廃棄物中の評価対象核種と Key 核種 (^{60}Co など) との組成比と、廃棄体の非破壊外部測定法などによって得られた Key 核種の放射能濃度とによって、廃棄体中 (1 体ごと) の核種別の放射能濃度を決定する。

E. 4 原廃棄物分析方法の適用のステップ

原廃棄物分析法の基本的な適用のステップは、図 E. 2 及び次による。(注：図 E. 2 は添付○参照)

a) 原廃棄物分析法の適用性の評価 原廃棄物分析法の適用の可否を判断する場合、適用対象廃棄物の特性 (沈積物の有無など)、貯蔵タンクの混合処理などの特性について把握する必要がある。

この場合に、貯蔵タンクの混合処理用機器による均一混合の可能性を、次のいずれかによって、把握しておく必要がある。

- 1) かくはん (攪拌) 用機器の性能による均一混合性の把握。
- 2) 貯蔵タンク内の混合状態の模擬試験などによる均一混合性の把握。
- 3) 貯蔵タンク内の混合状態の計算評価による均一混合性の把握。

b) 代表試料の採取 E. 2. 2 に示した均一混合による試料の採取、又は適切な複数の一次試料の採取及び均一混合による二次試料の調整が必要である。

c) 代表試料の放射化学分析 次のいずれかの試料を放射化学分析することで、原廃棄物分析法として適用できる適切な放射化学分析結果が得られる。

- 1) 採取又は調整した代表試料
- 2) 採取した複数の一次試料

d) 原廃棄物分析法としての放射能濃度の決定方法 対象とした固型化処理前の廃棄物の範囲を適切に管理した上で、c) の放射化学分析結果から、E. 3 に示す方法で、核種別の放射能濃度を決定する。

(2) 検討の結果

① 「6. 2. 1 原廃棄物分析法の試料採取方法」には、a) として、「AESJ-SC-F022:2011 に適用方法が示されている原廃棄物分析法の代表試料の採取方法を示す。」とされ、b) として「次のいずれかの方法で代表試料を採取する。」と規定されている。a) と b) の関係について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁵⁰。

(回答待ち)

② 「表 E. 4—JIS K 2251:2003 に記載された試料採取方法の主な特徴」の「貯蔵タンク内の試料採取方法」の「試料調整方法 (二次試料)」には、「平均試料 など」と記載されている。「など」について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁵³。

表 E. 4—JIS K 2251:2003 に記載された試料採取方法の主な特徴

	貯蔵タンク内の試料採取方法	タンク循環ラインの試料採取方法	排出・抜出しラインの試料採取方法
概要	採取器を利用して使用済樹脂等の貯蔵タ	貯蔵タンクの循環ラインから試料を採取	排出又は抜出しラインから試料を採取

²⁵⁰ 第●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参考資料●-●「実証的方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 1(1)

²⁵³ 第●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参考資料●-●「実証的方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 6

	ンクから試料を採取		
試料採取場所 (使用済樹脂 等の場合)	貯蔵タンク	タンク循環ラインの サンプリングライン	排出・拔出しラインの サンプリングライン
適用の 前提条件 (試料性状)	－液体	－液体及び半流動体 －試料採取前のタン ク内かくはん（攪 拌）又は一定の循 環	－液体及び半流動体 －サンプリングライ ン及び排出・拔出 しラインの試料流 速が同等
試料採取方法 (一次試料)	定点（位置） 試料採取方法 (上部，中部，下部)	一点	定点（時間） 試料採取方法 (初期，中期，後期)
試料調整方法 (二次試料)	平均試料 など	－	混合試料

(回答待ち)

- ③ 「E.3 原廃棄物分析法による評価方法」の「a) 廃棄体の放射能濃度として決定する方法」の2)に規定する方法は、複数の一次試料の平均値と廃棄物投入量から放射能濃度を決定している。二次試料の結果を用いない理由について、日本原子力学会は、以下のよう説明している²⁵⁴。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

追而

²⁵⁴ 第●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参考資料●-●「実証的方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答7

4. 7. 3 原廃棄物分析法の妥当性確認

原廃棄物分析法の妥当性確認については「6.3.2.1 妥当性確認の方法」及び「6.3.2.2 不確かさの扱い」に規定している。

(1) 規定の内容

6.3.2.1 妥当性確認の方法

妥当性確認は、分析方法及び分析結果が期待される結果を与えることを明示（客観的、文書化された証拠によって）し、分析が恒常的に、正確に実施できることを確認する。

妥当性確認は、適用する分析方法及び分析結果に関する正確さと適用性とを把握することであり、分析方法の信頼性、分析の誤差、目的核種の回収率などで評価できる。

注記 妥当性確認は、標準試料を用いた分析試験、同一試料の複数機関による分析試験、妥当性確認された分析方法などと比較することなどで行うことができる。

6.3.2.2 不確かさの扱い

適用する分析方法による結果の正確さを定量化するために、分析結果の不確かさを評価する。

例 “不確かさ” は、分析値の偏りを示す真度、分析値におけるばらつきを示す精度などから評価する。

(2) 検討の結果

実証的方法の評価結果における「不確かさの扱い」についての具体的事例について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁵⁷。

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

追而

²⁵⁷ 第●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参考資料●-●「実証的方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答4(2)

4. 8 記録

記録については、「7.1 理論的方法の記録」、「附属書 N (参考) 理論計算法の記録の例」、「附属書 0 (参考) 原廃棄物分析法の記録の例」に規定している。

(1) 規定の内容

<p>7.1 理論的方法の記録</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。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> <p>注記 理論計算法の記録の詳細は、附属書 N 参照。</p> <p>7.2 実証的方法の記録</p> <p>記録は、評価対象とした廃棄物及び代表試料の採取方法、評価対象核種の分析方法並びに分析値（誤差含む）が明確にされた記録、分析に使用した測定器の校正記録、及び評価値を設定した方法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。</p> <p>記録は、簡単で、容易に把握できるようにする。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> <p>注記 原廃棄物分析法の記録の詳細は、附属書 0 参照。</p>
<p>附属書 N (参考) 理論計算法の記録の例</p> <p>この附属書は、理論計算法の記録の例を示すものであるが、内容の詳細は、“ISO16966:2013 Theoretical activation calculation method to evaluate the radioactivity of activated waste generated at nuclear reactors” の Annex E を参照すること。</p> <p>N.1 結果の記録内容</p> <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c) 放射線（線量率）測定方法の説明（放射線測定を適用した場合）d) 理論計算方法の説明e) 理論計算の結果の要約f) 結果の妥当性確認、及び／又は不確定性の検討g) 参考文献（含むことが望ましい）h) 評価、検証などの結果 <p>N.2 その他</p> <p>ISO16966:2013 の Annex E には、その他に、次の内容が示されている。</p> <ul style="list-style-type: none">a) 再利用可能な結果（計算部分、報告部分）b) 情報の取り扱いc) 報告範囲d) 評価結果の報告（数値の精度） <p>なお、数値の丸め方としての値の切り上げは望ましい（6.4 を参照）。</p>
<p>附属書 0 (参考) 原廃棄物分析法の記録の例</p> <p>この附属書は、標準本体の理解のために、原廃棄物分析法の評価に利用した記録</p>

(ただし、放射化学分析等自体に関する記録は除く)に関する例を示すものである。

0.1 結果の記録内容

原廃棄物分析法の評価に利用した主要な記録は、知識をもつ評価者が評価の背景及び評価をトレースできるようにするために、詳細に記載するのがよい。また、できる限り、次の情報を含むことが望ましい。

a) 原廃棄物分析法の内容及び範囲

- － 評価の目的
- － 基本的な前提条件
- － 適用性及び制限

b) 評価対象とした試料の説明 評価対象とした試料(廃棄物)に対し、目的に応じて、次の中から適切な項目を選定し、管理する。

- － 試料番号(試料管理番号)
- － 発生日(対象が廃棄物として発生した年月日)
- － 採取日(試料を採取した年月日)
- － 発生履歴(原子炉型式、発電所名、号機名、発生場所、廃棄物の種類・性状など)

c) 放射化学分析等の説明

- － 放射化学分析等の方法及び結果の要旨。
(放射化学分析等の結果の原本の複写は、記録の一部として保管する。)

d) 原廃棄物分析法の説明

- － 適用した原廃棄物分析法の説明。
(原廃棄物分析法における放射化学分析等の結果の利用方法などを記載する。)

e) 原廃棄物分析法を利用した評価結果の要約

- － 評価対象とした試料に関する情報。
- － 放射化学分析等の結果の使用及び適用に関する検討書。
- － 評価に利用した放射性核種の放射能濃度。
- － 要求されるその他のデータの要約及び評価結果。

f) 結果の妥当性確認、及び/又は不確定性の検討 原廃棄物分析法で決定した放射性核種の放射能濃度に対し、その結果が妥当であること、及び/又は不確定性を踏まえていても問題ないことを、放射能評価上の裕度等の観点から、確認する必要がある(附属書 M 参照)。

なお、評価結果及び/又は放射化学分析等の結果に外れ値が見られた場合は、原因を確認した上で、その外れ値は訂正又は棄却すべきである。外れ値の原因が特定できない場合は、JIS Z 8402-2:1999[1]に記載されているグラブズ(Grubbs)の検定などを外れ値の取扱い方法として適用してもよい。

g) 参考文献

h) 評価、検証などの結果

- － 報告書の作成者、評価者、検証者、承認者の署名。

0.2 情報の取り扱い

原廃棄物分析法に利用した主な基礎情報は、別途、文書及び参考文献として示す。

0.3 評価結果の報告

数値の精度は、放射能濃度の確認において要求される評価精度を踏まえ、有効桁数などを決定する(附属書 M 参照)。

なお、数値の丸め方としての値の切り上げは望ましい(6.4を参照)。

(2) 検討の結果

- ① 「N.1 結果の記録内容」において、内容の詳細は、ISO16966:2013 の Annex E を参照す

るとしている。ISO16966:2013 の Annex E を適用する範囲とその内容、適用できる根拠について、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁵⁸。

(回答待ち)

- ② 「N.1 結果の記録内容」には、記録することが望ましい項目として a~h が示されている。理論計算法の計算条件は a~h のどこに含まれるのかについて、日本原子力学会は、以下のように説明している²⁵⁹。

(回答待ち)

- ③ 「附属書 0 (参考) 原廃棄物分析法の記録の例」の「0.1 f) 結果の妥当性確認、及び/又は不確定性の検討」には、JIS Z 8402-2:1999 「測定精度及び測定結果の精確さ (真度及び精度) - 第 2 部: 標準測定方法の併行精度及び再現精度を求めるための基本的方法」に記載されているグラブスの検定などを (中略) 適用してもよいとされているが、「2 引用規格」には当該 JIS 規格は記載されていない。また、JIS K 2251:2003 についても同様である。引用規格に記載する範囲について、日本原子力学会は、以下のように説明している。²⁶¹

(回答待ち)

(3) 適用に当たっての条件

技術評価対象外とする。(←対象外とする理由を (2) に記載する)

(4) 要望事項

附属書 N 及び附属書 0 の内容は本文の規定内容と整合を図ることを要望する。

²⁵⁸ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 47(1)

²⁵⁹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 47(2)

²⁶¹ 第●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参考資料●-●「理論的方法の入力条件の設定方法の具体及び評価結果の不確かさ」回答 1

5. 放射能濃度決定標準の適用に当たっての条件
追而

6. 日本原子力学会規格の策定に関する要望事項
追而

添付資料
追而

表 D.1—各区間推定法の基本的な特徴及び適用対象放射化金属等

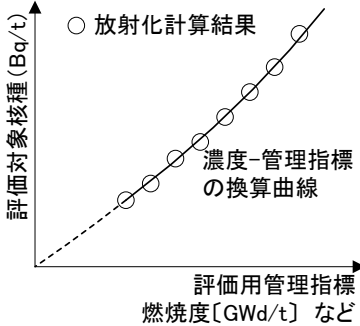
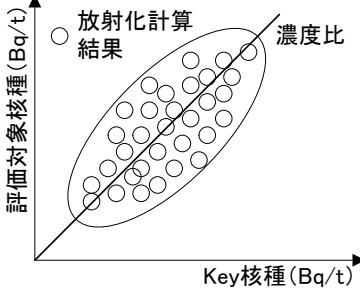
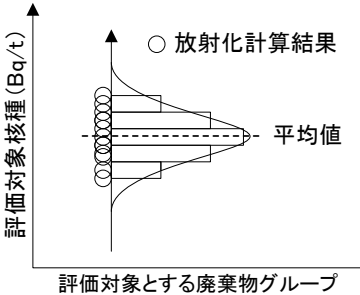
方法	換算係数法	濃度比法	濃度分布評価法
<p>評価のイメージ</p>			
<p>基本的な特徴</p>	<p>管理指標 [燃焼度 (通常、燃料は燃焼度で管理される)] と放射化金属等中に生成する核種の放射能濃度とには、密接な関係がある。 放射化金属等の内部に含まれる難測定核種の放射能濃度は、実際の原子炉の条件範囲 (例えば、元素組成、中性子フルエンス率、照射条件) を考慮した放射化計算によって得られる換算係数と管理指標 (燃焼度など) とを乗じることで、計算できる。</p>	<p>原子炉構成材の同じ部位が放射化した際に生成する核種間には、全ての放射化条件が同じため、特別な関係がある。 難測定核種と Key 核種間との濃度の比は、実際の原子炉の条件範囲を考慮した放射化計算によって評価できる。</p>	<p>元素成分条件、中性子の照射履歴は、固定された原子炉及び構成材では、ほとんど同じで、唯一、個々の部位での中性子フルエンス率だけが異なっている。核種の放射能濃度の違いは、中性子フルエンス率の違いによって生まれる。 構成材中の放射能濃度は、実態の原子炉の条件及び機材の位置の範囲を考慮した放射化計算によって評価できる。</p>
<p>代表的な評価対象とする放射化金属等</p>	<p>チャンネルボックス, 制御棒, パーナブルポイズンなど。</p>	<p>チャンネルボックス, 制御棒, パーナブルポイズン, 黒鉛, シュラウド, 圧力容器など。</p>	<p>黒鉛, シュラウド, 圧力容器など。</p>
<p>注記 “難測定核種” とは、廃棄体などの外部からの非破壊測定が困難な放射性核種。</p>			

表 G.3—放射化計算による核種生成の有無の評価例（二次スクリーニング評価）

母体元素 (1次SL ¹⁾ 後)	評価対象核種											単位: Bq
	¹⁴ C	³⁶ Cl	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Nb	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	¹³⁷ Cs	²³⁷ Np	全α	
H	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
He	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Li	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Be	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C	1.00 ×10 ³	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N	1.04 ×10 ¹⁰	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
O	5.51 ×10 ³	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F	3.61 ×10 ³	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ne	1.36 ×10 ⁶	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Na	4.91 ×10 ¹	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Al	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Si	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
P	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S	—	1.90 ×10 ³	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cl	—	5.99 ×10 ⁸	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ar	—	2.64 ×10 ⁴	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K	—	4.88 ×10 ⁶	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ca	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sc	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V	—	—	1.13 ×10 ⁶	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr	—	—	4.57 ×10 ¹	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mn	—	—	5.97 ×10 ⁷	9.45 ×10 ¹	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe	—	—	2.14 ×10 ²	2.34 ×10 ⁴	—	—	—	—	—	—	—	—
Co	—	—	4.87 ×10 ¹⁰	5.29 ×10 ⁸	—	—	—	—	—	—	—	—
Ni	—	—	4.53 ×10 ¹⁰	1.84 ×10 ¹⁰	—	—	—	—	—	—	—	—
Cu	—	—	4.84 ×10 ¹	3.04 ×10 ⁹	—	—	—	—	—	—	—	—
Zn	—	—	2.01 ×10 ¹	3.07 ×10 ³	—	—	—	—	—	—	—	—
Ga	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ge	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
As	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Se	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Br	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Kr	—	—	—	—	2.51 ×10 ⁰	—	—	—	—	—	—	—
Rb	—	—	—	—	5.14 ×10 ³	—	—	—	—	—	—	—
Sr	—	—	—	—	5.98 ×10 ³	—	—	—	—	—	—	—
Y	—	—	—	—	1.34 ×10 ⁴	—	—	—	—	—	—	—
Zr	—	—	—	—	2.41 ×10 ⁴	8.64 ×10 ⁰	4.57 ×10 ²	—	—	—	—	—
Nb	—	—	—	—	2.61 ×10 ²	3.94 ×10 ⁸	1.65 ×10 ²	—	—	—	—	—
Mo	—	—	—	—	1.88 ×10 ¹	1.60 ×10 ⁴	5.33 ×10 ³	—	—	—	—	—
Ru	—	—	—	—	—	4.47 ×10 ¹	—	—	—	—	—	—
Rh	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ag	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
In	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sn	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Te	—	—	—	—	—	—	—	3.49 ×10 ⁴	3.84 ×10 ⁴	—	—	—
I	—	—	—	—	—	—	—	4.80 ×10 ³	6.60 ×10 ⁴	—	—	—
Xe	—	—	—	—	—	—	—	—	1.94 ×10 ⁹	—	—	—
Cs	—	—	—	—	—	—	—	—	6.16 ×10 ⁸	—	—	—
Ba	—	—	—	—	—	—	—	—	1.71 ×10 ³	—	—	—
La	—	—	—	—	—	—	—	—	9.66 ×10 ²	—	—	—
Ce	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Nd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Eu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dy	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ho	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Er	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Yb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Lu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Hf	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ta	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Re	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Os	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ir	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pt	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Au	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Hg	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tl	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Th	—	—	—	—	5.77 ×10 ¹⁰	—	1.88 ×10 ⁶	2.04 ×10 ⁴	5.77 ×10 ¹⁰	1.92 ×10 ⁴	1.10 ×10 ⁹	—
U	—	—	—	—	9.35 ×10 ⁹	—	1.27 ×10 ⁶	8.29 ×10 ³	2.85 ×10 ¹⁰	2.41 ×10 ³	1.22 ×10 ¹⁰	—
合計	1.04 ×10 ¹⁰	6.04 ×10 ⁸	4.92 ×10 ¹⁰	2.30 ×10 ¹⁰	6.70 ×10 ¹⁰	3.94 ×10 ⁸	3.68 ×10 ⁶	6.84 ×10 ⁴	8.87 ×10 ¹⁰	2.16 ×10 ⁴	1.33 ×10 ¹⁰	—

注1 上記は、一次スクリーニング実施後の元素（安定同位体核種が存在する元素）に対して放射化計算を実施した結果である。

注2 放射化計算条件は、計算コード：ORIGEN2.2、断面種ライブラリ：PWR4133、照射時間：30y、中性子フルエンス率：4.72×10⁴cm⁻²/s、元素量：各元素とも等量（0.001kg）

注3 ORIGEN上の閾値（CutOff）は、3.7Bq（=1.0×10⁻¹³ Ci）とした（ただし、照射時間60yでの生成量で核種生成の有無を判断）。

注⁴ 1次SLは、“一次スクリーニング”を意味する。

表 G.5—三次スクリーニングで除外対象とできる元素例（ZrTN804D, SUS304 の場合の例）

三次スクリーニング対象元素	スラグとして除去	低沸点による揮発	希ガス	希少元素	還元性雰囲気による除去	用途が限定される
	原料である鉱石に含まれるが、高炉などで原料を溶解分離したときのスラグとして大半は除去。	高炉の温度が 2 000℃ 近くとなることを考慮すると、飢渴する可能性が高い（括弧内は沸点）。	岩石・鉱物に微量含まれるが、希ガスが不純物として金属に混入する可能性は、低い。	希少性が高く、不純物として金属に混入する可能性は、低い。	高炉における還元性雰囲気によって、精錬過程で除去。ただし、酸素を吹付けて脱炭する場合もある。	特定の用途に利用する場合だけに含まれる（括弧内は、利用される場合の主な用途）。
O ^{a)}	—	—	—	—	○	—
F	—	—	—	—	—	○ (フッ素コーティング)
Ne	—	—	○	—	—	—
Ar	—	—	○	—	—	—
Kr	—	—	○	—	—	—
Rb	—	○ (696℃)	—	—	—	○ (ルビジウム原子時計)
Sr	○	○ (1 639℃)	—	—	—	—
Y	○	—	—	—	—	—
Ru	—	—	—	○	—	○ (水素化触媒)
Sb	○	○ (1 640℃)	—	—	—	—
Te	○	○ (1 390℃)	—	—	—	—
I	—	—	—	—	—	○ (抗菌処理)
Xe	—	—	○	—	—	—
Cs	○	○ (760℃)	—	—	—	—
Ba	○	○ (1 537℃)	—	—	—	—
La	○	—	—	—	—	—

注記 “○” は、金属に対する三次スクリーニングが可能と考えられる対象元素を示す。
注^{a)} ZrTN804D の元素のうち、○ は、機械的強度向上を目的とした添加が行われているため、評価対象（三次スクリーニングの対象外）とした。

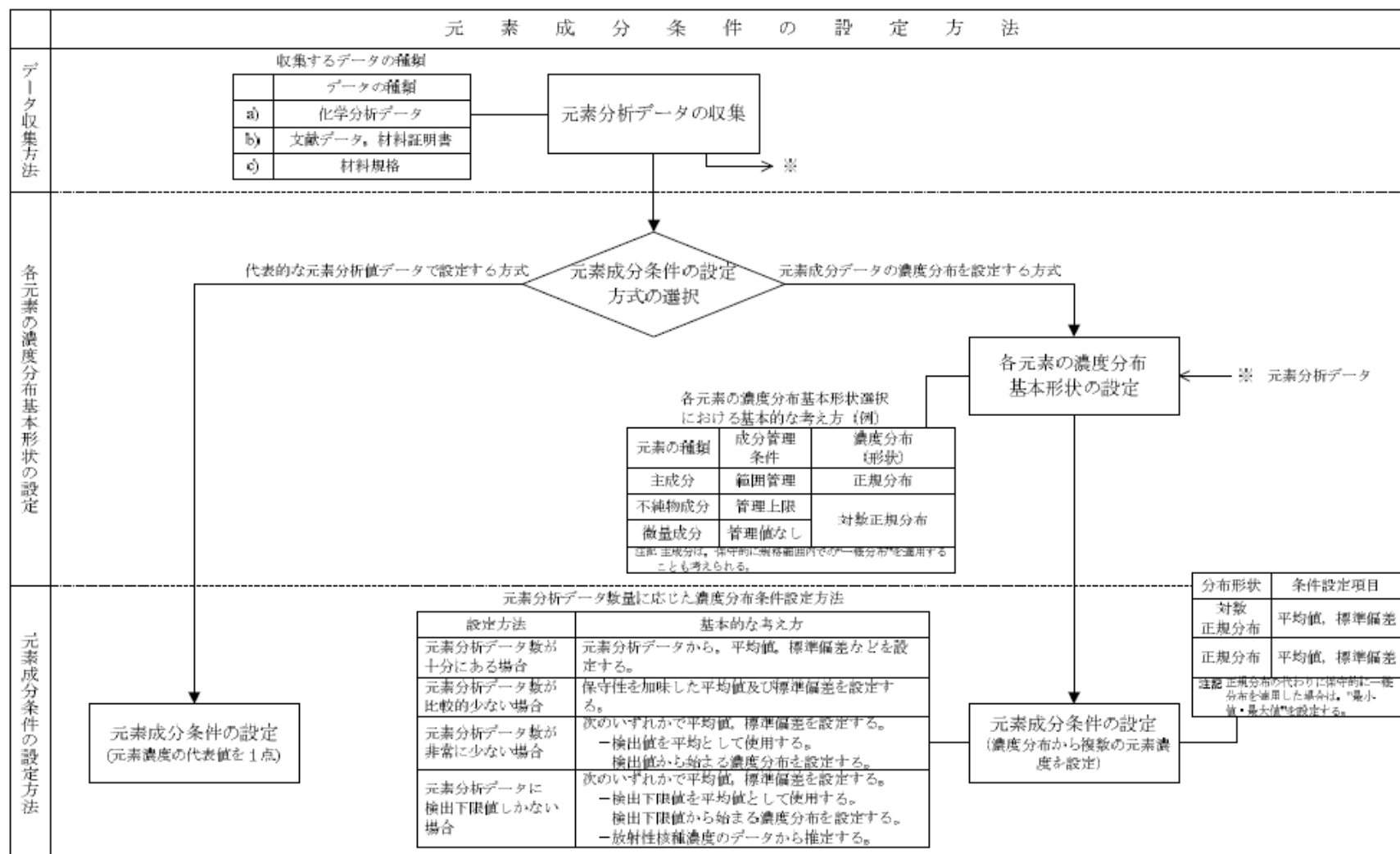


図 G.3—元素成分条件（濃度分布）の設定方法の概念フロー

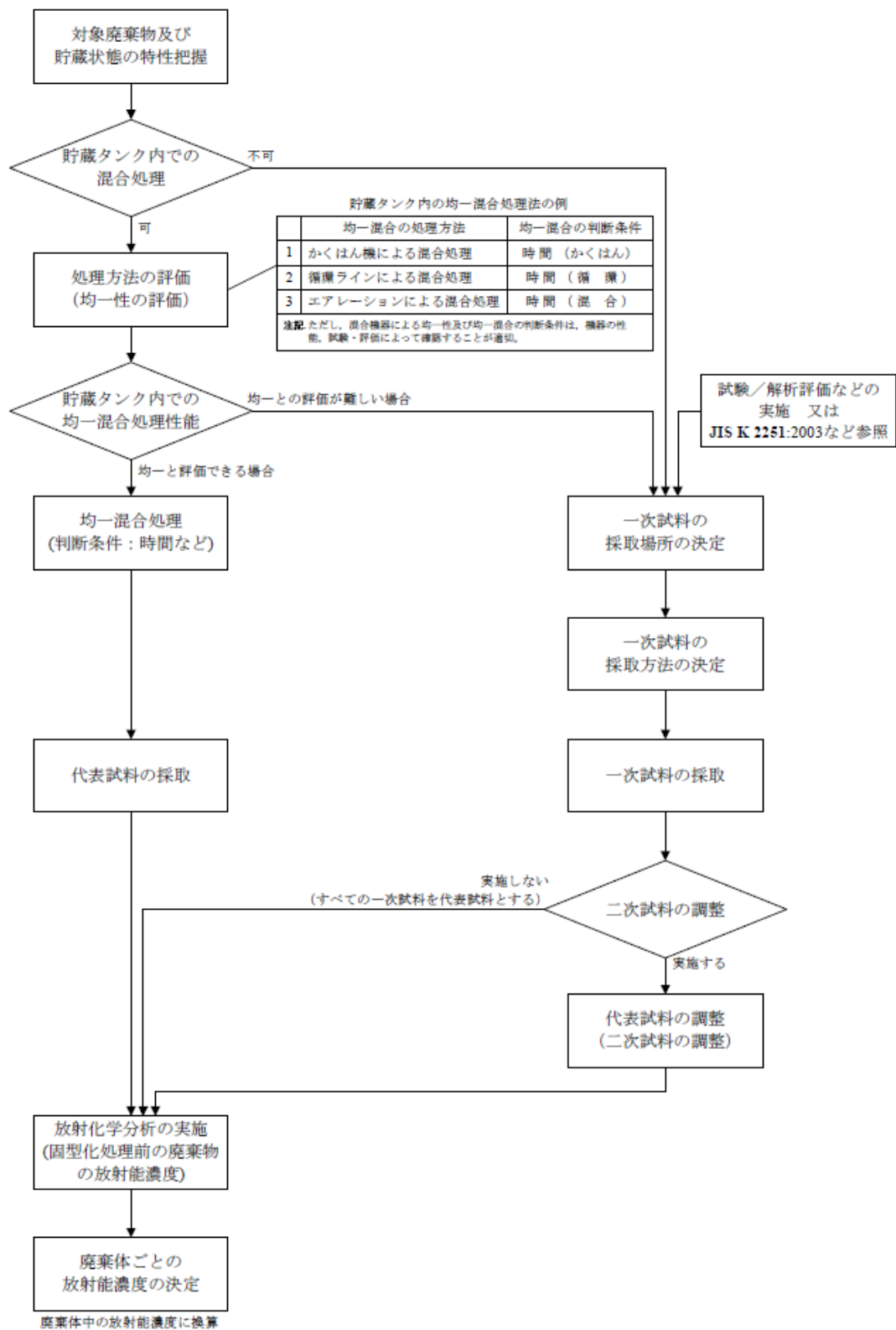


図 E.2—原廃棄物分析法の基本的な適用フロー