

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  
第 3 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

2021 年 11 月 5 日  
(一社) 日本原子力学会  
標準委員会

標記につきましては、以下の通り回答いたします。

○ 「適用範囲と理論的方法の特徴」に関するもの

1. 「D.1.2 換算係数法」

- (1) 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ますが、**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ります。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ができるか説明してください。
- (2) 附属書 J 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ますが、径方向の違いがどのように反映されているかが示されていません。**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を説明してください。**

回答 1(1)

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りな(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 <sup>a)</sup> 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りな代表値を設定する。
<p><b>注</b> <sup>a)</sup> 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。</p> <p><sup>b)</sup> 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。</p>			

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

注 <sup>a)</sup> 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。

<sup>b)</sup>

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

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)

$\phi_g$  : g 群の中性子フルエンス率 (n/cm<sup>2</sup>/s)

$\phi_{th}$  : 熱群の中性子フルエンス率 (n/cm<sup>2</sup>/s)

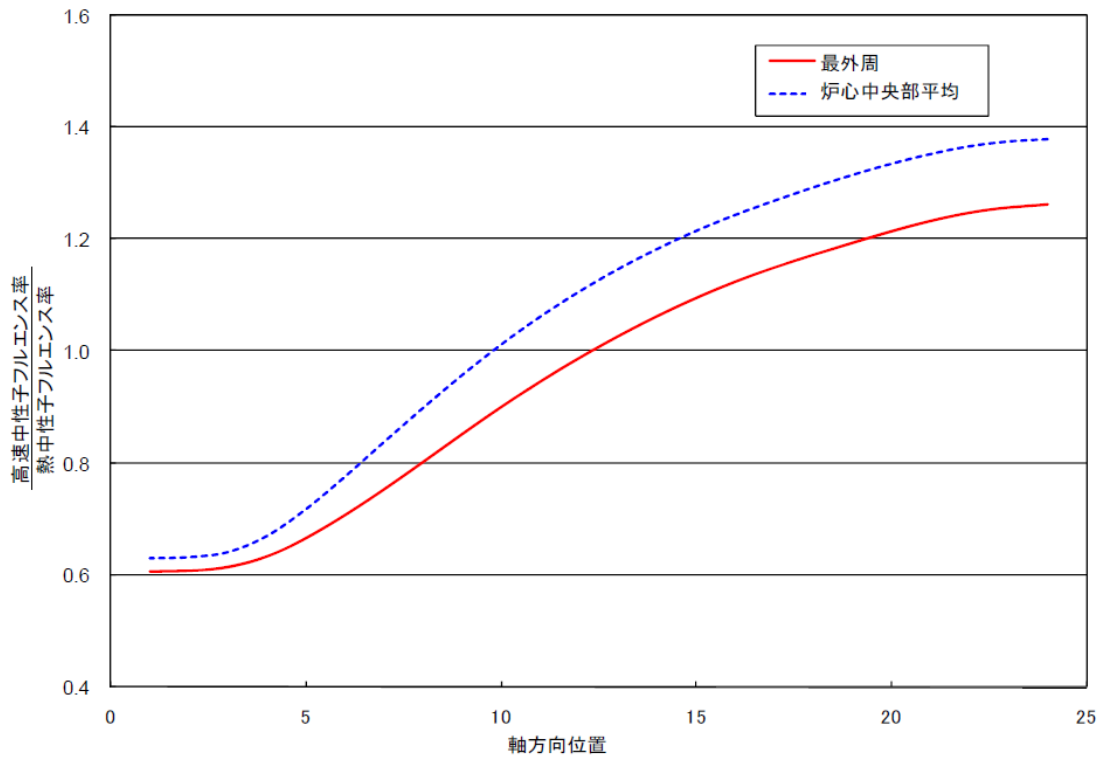


図 G.6—BWR チャンネルボックスでの高速中性子フルエンス率の熱中性子フルエンス率に対する比の例

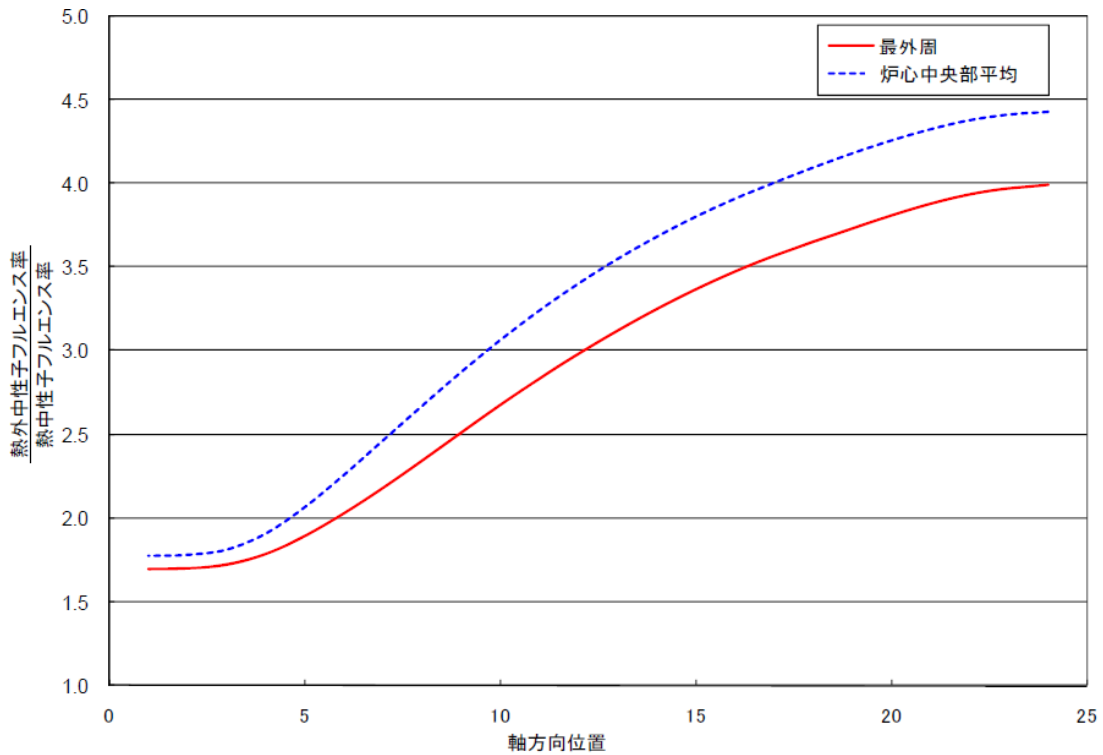


図 G.7—BWR チャンネルボックスでの熱外中性子フルエンス率の熱中性子フルエンス率に対する比の例

**回答 1(2)**

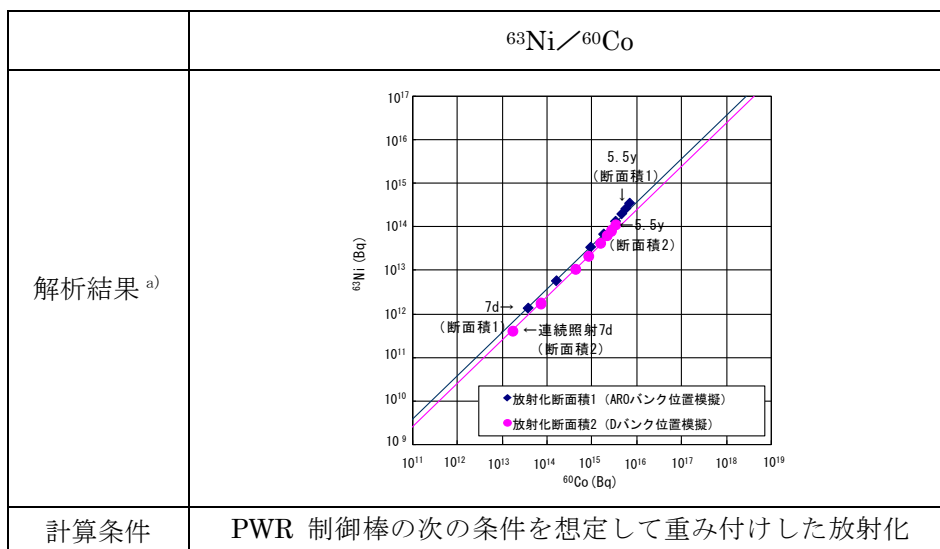
回答 1 (1) に示しましたように、炉心内の中性子スペクトルは、炉心最外周では熱中性子に対する高速中性子、熱外中性子の比率が下がるため、同じ燃焼度でも最外周に配置したチャンネルボックスの放射化放射エネルギーは炉心中央部と比較して小さくなります。ただし炉心内の配置位置による中性子スペクトルの影響は附属書 G の図 G.6～図 G.7 に示すとおり炉心中央部と最外周部で 2 倍以内であることから放射化放射エネルギーへの影響は小さく、炉心平均の中性子条件を適用することは問題ありません。

**2. 「D.1.3 濃度比法」の濃度比が一定となる条件について、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ます。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説明してください。**

**回答 2**

中性子スペクトルが同等とみなせる範囲は、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。



	断面積を利用して，放射化計算を実施。 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
影響の程度 <sup>b)</sup>	放射能濃度への影響：小
	濃度比への影響：小

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

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）

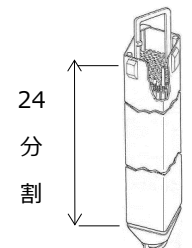
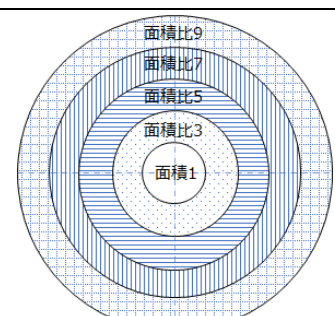
3. 「D.3.1 評価対象放射化金属等の形状及び設置方向による照射位置の設定」の照射位置の選定の妥当性を確認するための考え方及び手順について「評価対象とする放射化金属等の形状および原子炉内での設置方向、配置位置を考慮した照射位置を選定した上で」とありますが、照射位置の設定の方法が具体的に示されていません。照射位置は、中性子フルエンス率と中性子スペクトルの変動との関係にも依存するため、照射位置の設定の方法において、その影響をどのように考慮するのか説明してください。

回答 3

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 チャンネルボックスなど	径方向に水平に設置される放射化金属等 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 <sup>リ</sup> 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）。

**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 <sup>a)</sup>	考慮する条件 <sup>b)</sup>	評価対象とする放射化金属等の一例 <sup>c)</sup>	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。

**4. 「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ていますが、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ません。「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。」について、その方法を具体的に示してください。**

**回答 4**

（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)

- ④ 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。
- ⑤ 放射能濃度評価結果が大きくなるような照射時間： ④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)

- ④ 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。
- ⑤ 放射能濃度評価結果が大きくなるような照射時間： ④と同じです。

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"> <li>— 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。</li> <li>— 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。</li> </ul>	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"> <li>— 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。</li> </ul>	シュラウド、上部格子板など
照射停止 時間 <sup>a)</sup> (原子炉供 用期間中)	均等設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 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。</li> <li>— 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。</li> </ul>	全評価対象 廃棄物
	個別設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 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。</li> </ul>	
<p><b>注</b> <sup>a)</sup> 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。</p>			

(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 ( <sup>90</sup> Sr/ <sup>137</sup> Cs) (図 B.6 抜粋)	半減期が短い核種との組合せ ( <sup>63</sup> Ni/ <sup>60</sup> Co) (図 B.6 抜粋)
解析結果 <sup>a)</sup>		
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 <sup>b)</sup>	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 <sup>a)</sup>	放射化計算コード：ORIGEN2.2，ライブラリ：JENDL3.3 シリーズ	
注 <sup>b)</sup>	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。	

5. 「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」と記載されていますが、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」が記載されています。「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か具体例をもって説明してください。

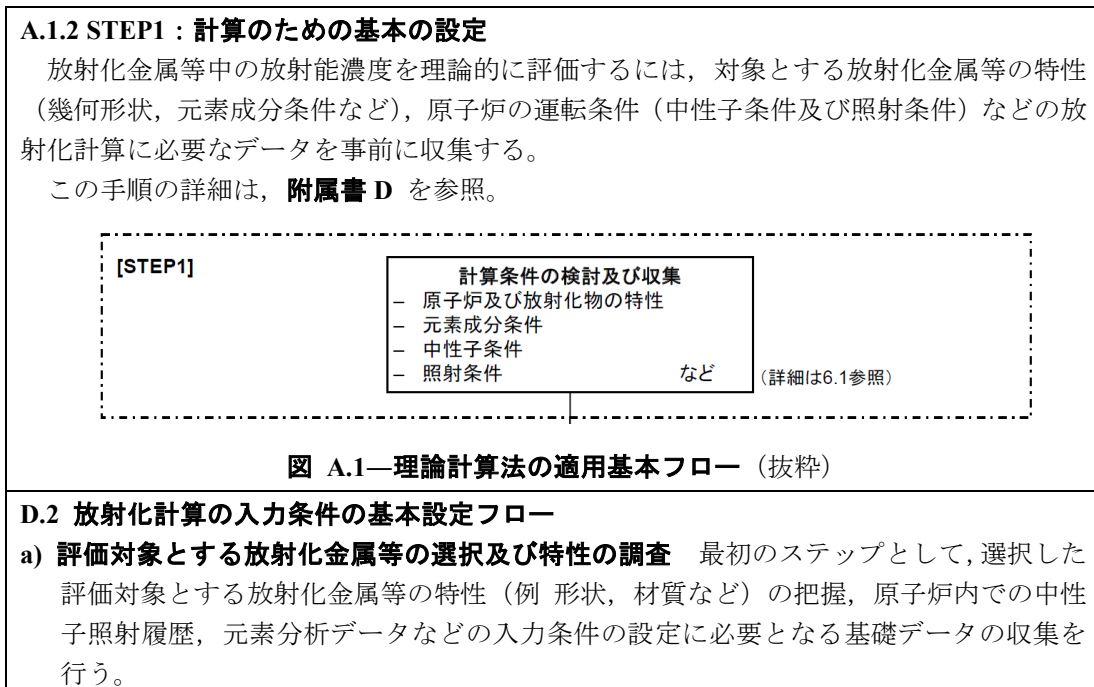
**回答 5**

「A.1.2 STEP1：計算のための基本の設定」では、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、放射化計算に必要となります入力データの収集が必要となることを示したものです。

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。



6. 「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。」との記載がありますが、何を以て計算コードの適切性を確認するのか説明してください。また、図 A. 1 には、「検証された放射化計算方法の選択」とありますが、どのように放射化計算方法を検証するのか説明してください。

**回答 6**

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。

放射化計算方法の妥当性確認(Validation)に関しては、回答 7 を参照ください。

7. 「A. 4. 1 妥当性確認」に「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。」とありますが、「参照」の意味するところを説明してください。また、「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、当該標準の参照範囲とその内容、適用できる根拠を説明してください。

**回答 7**

「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"> <li>放射化計算方法又は放射化計算コードの妥当性の確認</li> <li>必要な手順書、計算書の準備（文書化）</li> </ul>
計算の実施段階	<ul style="list-style-type: none"> <li>文書化された放射化計算方法に従っての実施の確認</li> <li>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)</li> <li>計算結果の充足性の評価</li> </ul>
計算結果の記録段階	<ul style="list-style-type: none"> <li>実施した放射化計算の結果の記録及び確認</li> <li>放射化計算の結果を踏まえた放射能濃度の評価の確認</li> </ul>

**8. 「A.4.4 計算結果の記録段階」「放射化計算の結果を記録し、妥当性を確認する」とあるが、妥当性の確認方法について説明してください。AESJ-SCA008:2015「シミュレーションの妥当性確認に従うのであれば、AESJ-SCA008:2015 のどの部分を用いて妥当性を確認するのか具体的に説明してください。**

**回答 8**

「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。

○ 「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」に関するもの

1. 「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ますが、同等性について説明してください。

(1) b)の放射化断面積は、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ますが、同等性について説明してください。

(2) 最新の計算コード及び放射化断面積ライブラリについて確認すると規定していますが、妥当性の確認方法を説明してください。

回答1 (6.1.2.2.3 に対する質問の回答)

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能量）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)  $\geq$  「代表値を設定する方法」(最大値)  
 $\geq$  「濃度分布から設定する方法」(信頼上限)  $\geq$  「濃度分布から設定する方法」(平均)  
 $\asymp$  「代表値を設定する方法」(平均)  $\geq$  「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。

回答1(1) (6.1.2.3 に対する質問と想定した回答)

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。

**回答 1(2)** (6.1.2.3 に対する質問と想定した回答)

計算コードの妥当性については、回答 6 を参照ください。

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。(回答 7 も参照ください)

**2. 「6.1.4 表面汚染の取扱い」**

(1) 「6.1.4 表面汚染の取扱い」のまた書きにおいて、「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。」と規定しています。

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説明してください。

(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」ことの判断基準を説明してください。

**回答 2(1)**

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<sup>a)</sup>の母材に対するクラッドの放射能比<sup>b)</sup>**

<sup>3</sup> H	<sup>14</sup> C	<sup>60</sup> Co	<sup>63</sup> Ni	<sup>137</sup> Cs
0.18 %	0.0041 %	0.95 %	0.21 %	0.27 %
注 <sup>a)</sup> 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。 <sup>b)</sup> 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)。				

**回答 2(2)**

「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. 「附属書 C」の随所に ISO16966:2013 の Annex B を参照していますが、「考え方及び手順が示されている」などの抽象的な記載では当該文献の何を参照しているか不明確なので、参照している範囲を説明してください。**

**回答 3**

ISO 標準の Annex B 全体が適用対象です。

なお、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。

**4. 「G.1.1.3 起源元素の選定手順」の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の設定根拠を説明してください。**

**回答 4**

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よい元素もある。(以下、三次スクリーニングという。)
- 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。)

**5. 「G.1.2.3.1 元素成分条件の設定方式の選定例」で「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挙げられていますが、その使い分けあるいは評価手法の同等性について説明してください。

**回答 5**

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になります。

- － 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能量）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。

**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	代表値 <sup>a)</sup> による設定	評価対象とする放射化金属等ごとの点推定法 <sup>a)</sup> 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 <sup>a)</sup> 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 <sup>b)</sup> による設定	—	濃度比法、換算係数法を用いる場合 <sup>c)</sup> 、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。
<p><b>注</b> <sup>a)</sup> 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。</p> <p><sup>b)</sup> 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。</p> <p><sup>c)</sup> 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。</p>			

**6. 「G.2.1 概要」の中性子条件の設定方法について、「個別に条件設定する方法」と「代表条件を設定する方法」の評価結果の同等性を説明してください。**



## 回答 6

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。

### 7. 「H. 2. 2 元素濃度データの収集方法」

(1) 「a) データ収集方法」に、「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。」とありますが、どのような特性を考慮に入れることを想定しているか説明してください。

(2) 「b) 適用除外データ」に、「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。」とありますが、「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か説明してください。

#### 回答 7(1)

元素濃度データの収集対象とする「鉍物、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」、「放射化金属等の原鉍物及び精錬工程における熱及び化学的影響<sup>1)</sup>」を踏まえて、天然の鉍物、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  $(S+3(CaO)=(CaS)+O)$ 、及び  $(2P+3(CaO)+5O=3(CaO\cdot P_2O_5))$  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))

#### 回答 7(2)

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、該当するデータ群を除外する。

**8. 「H.2.3 元素濃度データの適用条件」に「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。」とありますが、同程度であることはどのように評価するのか説明してください。また、当該評価に必要なデータ数についても説明してください。**

**回答 8**

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、Cl, 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。

- － Cl, 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（ H.4 から ）

H.6 参照)。

- － Cl は鈾物，火山岩，深成岩，Th 及び U は鈾物，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)。
- － Cl 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，Cl，Th 及び U の鈾物，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，Cl，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，いずれの元素も鈾物，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)。

9. 「H2.4 検出困難元素の濃度分布評価方法」に「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，鈾物，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。」とありますが、「鈾物、岩石などからの試料を適切に代表している」「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」の適切な範囲の根拠について説明してください。

**回答 9**

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 (放射化金属等の原鈾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，天然の鈾物、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<sup>[1]</sup>

種類	産地				合計
	日本	欧州	北米	その他	
鉱物	15	0	6	7 <sup>a)</sup>	28
火成岩	37	6	28	10 <sup>b)</sup>	81
堆積岩	8	3	13	7 <sup>c)</sup>	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<sup>a)</sup> 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  
<sup>b)</sup> 産地内訳：イラン，中国  
<sup>c)</sup> 産地内訳：オーストラリア，インドネシア，ベネズエラ

### 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。

**10. 「H.2.5 化学的性質が類似した元素濃度データの利用」に「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」とありますが、具体的にどのように選定するか説明してください。**

#### 回答 10

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。  
(略)

**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。(略)

11. 「H.3 検出困難元素の濃度分布の評価例」で Cl, Th, U についての評価例が示されていますが、これらの元素は鉱物中及び部材中に含有量が比較的多い元素であると推察します。この方法がその他の元素にも適用できる根拠を説明してください。

**回答 11**

鉱物、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、放射化金属等の原鉱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。

**12. 「I.2.2.1.2 元素成分条件の設定」の表 I.6 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ですが、実測値を踏まえて正規分布で設定しています。これは「基本的考え方」が実態と乖離していることを示唆していると想定されますが、「基本的考え方」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を説明してください。**

**回答 12**

「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。

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 に示しますように分析データによる元素成分の入力のデータには、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 に示しますように、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)
	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。

**回答 14(1)**

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。

**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

**表 G.13—元素の濃度分布を対数正規分布として扱う例**

濃度分布を対数正規分布とした例	
1 [31]	<p>作業場内における有害物質の濃度の分布は、時間的にも空間的にも正規型の分布より左側（低濃度側）にかたよった型になることが多く、次のような理由から正規型ではなく対数正規型の分布に近いことが予測される。</p> <p>a) 環境中有害物質の濃度は広い範囲にわたって分布し、最低値と最高値の比はしばしば 100 倍から 1 000 倍にもなることがある。</p> <p>b) 濃度は物理的に負の値にはなり得ない。</p> <p>c) 測定値の変動の大きさは測定された濃度の程度の広がりをもっている。</p> <p>d) 飛び離れた非常に大きな値の得られる確率は、あまり大きなものではない。</p>
2 [32]	<p>食品の消費の方も、カドミウムの濃度分布の方も、モデル化というものをしております。実際にある数字を使うのではなくて、それこそとんでもなく高い濃度というのはどこで出るかわからないということを考えまして、分布の尻尾に当たる方を非常に長くとるような、例えばもしも計算で間違うのであったら、消費者の保護がより確保できるような方に間違う方がいいということで、対数正規分布というモデル化をしております。・・・(中略)・・・もちろん、ほかのいろいろな違う分布をやることもありますが、今、世界では、対数正規分布というのが主に使われております。</p>
3 [33]	<p>一般に環境中の化学物質の分布は対数正規分布で表すことができるため、・・・(以下、省略)。</p>



4 [34]	兵庫県下の陸水試料や環境調査としての毛髪試料を精力的に分析した。特に、毛髪試料では分析法の確立を図りながら非汚染地域の多数の試料を分析し、約 20 元素を定量し、元素ごとの特徴を明らかにした。すなわち、必須元素は正規分布に、非必須元素は対数正規分布になり、これらの中央値又は幾何平均値が環境試料中の元素濃度の取扱いに有効であることを示した。
5 [35]	河川水中の微量元素の濃度分析 全国 55 の河川から集めた 77 試料について希土類元素、トリウム及びウラニウム (16 元素) の濃度の平均値と範囲が明らかにされた。対象としたすべての元素濃度は非常に低く、高くても 100 ppt レベル、低い場合には、1 ppt 以下となった。各元素の濃度幅は非常に広く 3 桁程度の広がりを示した (津村, 1991)。 わが国の陸水試料約 80 点について超微量元素 38 種類を分析した結果、各元素とも濃度範囲は非常に広く頻度分布は対数正規分布をすることが分かった。
6 [36]	一般に金属鉱床では、地球化学的な元素の含量の分布の型は対数正規分布ないしは、二項分布に近い分布をするといわれているが、中津河鉱床の探鉱坑道におけるように、比較的狭い範囲から相当多数の新鮮な試料が得られた場合に限って統計すると、ウランは二項分布型、トリウムは対数正規分布型を示す。
7 [37]	元素の地殻中の品位 (濃度) 分布は、L.H.Ahrens によれば対数正規分布で、その最多量値は平均地殻存在度の付近にあって、鉱石品位領域では Lasky 法則に従うと論じた。
8 [38]	Geology and mining. In the Earth's crust, the concentration of elements and their radioactivity usually follow a log-normal distribution. Environment. The distribution of particles, chemicals, and organisms in the environment is often log-normal.
9 [39]	Frequency distribution plots of K, Rb, Sc, V, Co, Ga, Cr, and Zr in Ontario diabase, Sc, V, Ga, Cr, La, and Zr in Canadian granite, K, Rb, and Cs in New England granite and F and Mo in granite from various localities are regular, but assume decided positive skewness when dispersion is large, hence, distribution of concentration is not normal. All distributions become normal, or nearly so, provided the variate (concentration of an element) is transformed to log concentration: this leads to a statement of a fundamental (lognormal) law concerning the nature of the distribution of the concentration of an element in specific igneous rocks.

### 1.3. 「I.2.4.3 濃度比の決定方法」

- (1) 「a) 濃度比の算出」濃度比は幾何平均又は算術平均で算出するとしていますが、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、算出値の処理方法について説明してください。また、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」と記載されています。「平均」と記載しているものは「幾何平均」又は「算術平均」のいずれが適切か個別に、根拠と共に説明してください。
- (2) 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の評価であるが、当該計算で求めた核種比が実際のもと同等あるいは保守的になっていることを分析データに基づいて説明してください。
- (3) 「a) 濃度比の算出」で「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、との記載されている。「評価対象廃棄物全体」とは、どのような範囲に限定されているかを説明してください。また、「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。」は、根拠となるデータに基づいて説明してください（付図では、核種比で示されているだけです）。さらに、「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」とは、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、という意味でしょうか？そうである場合、根拠となるデータ（二変量対数正規分布と判断する方法も含めて）に基づいて説明してください（付図では、核種比で示されているだけです。二変量対数正規分布に従うことと、濃度比が対数正規分布に従うことが同値であることを示してください）。

- (4) 「a)濃度比の算出」で「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。」とあります。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ことを示してください。また、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、また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を説明してください。

#### 回答 13(1)

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。  
（回答 13(4)も参照ください）

#### 回答 13(2)

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「○」との比較になります。

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。

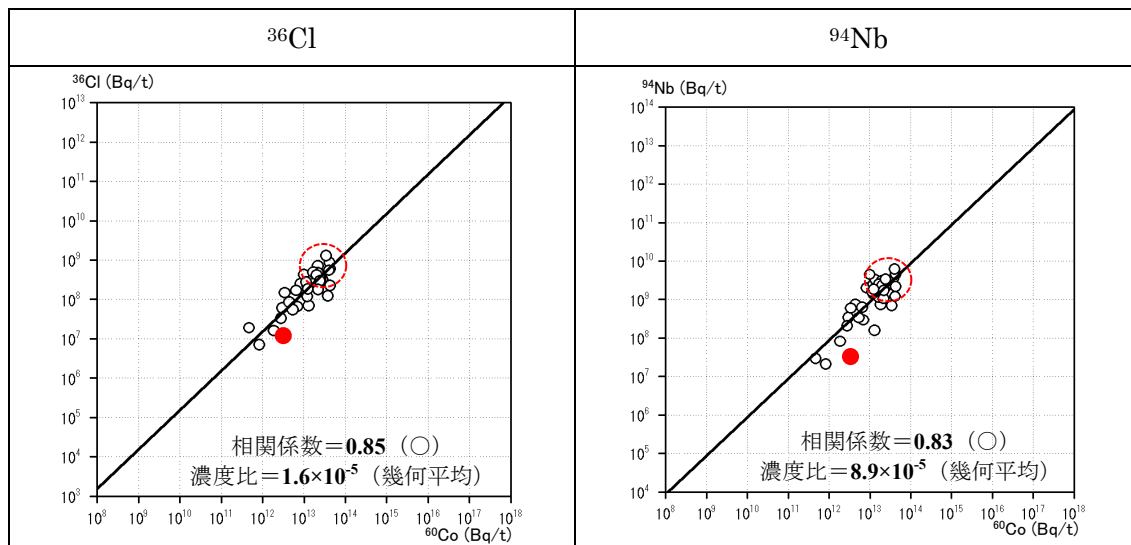


図 I.8—ZrTN804D (BWR チャンネルボックスの本体) の難測定核種及び Key 核種 ( $^{60}\text{Co}$ ) の散布図 (放射化計算結果) から抜粋

(●は分析値を示す。Co-60 : 3.3E+12Bq/t, Cl-36 : 1.4E+7Bq/t, Nb-94 : 4.4E+7Bq/t)

注記 1  $^{36}\text{Cl}$  及び  $^{94}\text{Nb}$  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)

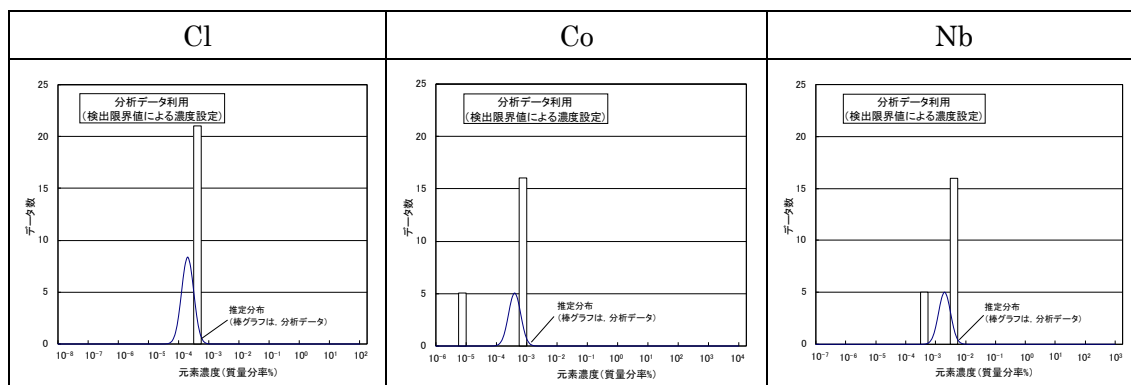


図 I.5—ZrTN804D の元素分析データ及び濃度分布条件設定結果から抜粋

### 回答 13(3)

(評価対象廃棄物全体)

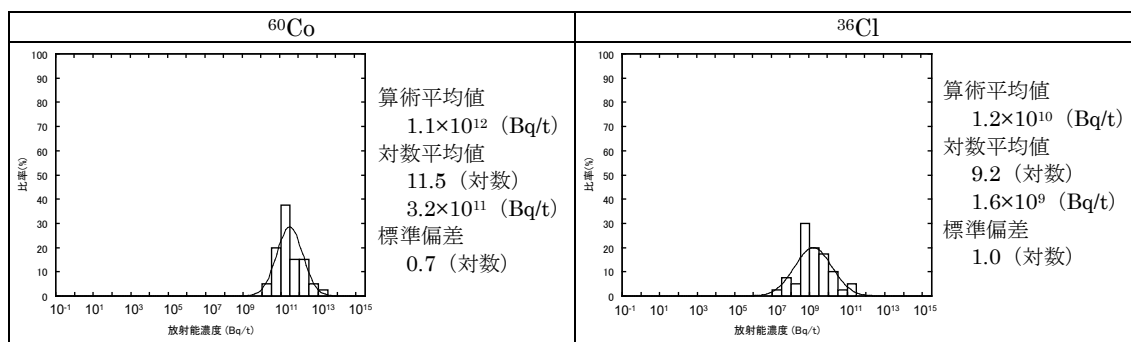
附属書 I の I.2.4.3 濃度比の決定方法に示しています「評価対象廃棄物全体」は、放射能濃度を求める対象とする放射化金属の一つ又は一部ではなく、放射化金属の全体を意味しています。

(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。

(回答 12 及び次の回答での引用文献も参照ください。)



(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<sup>1)</sup>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）

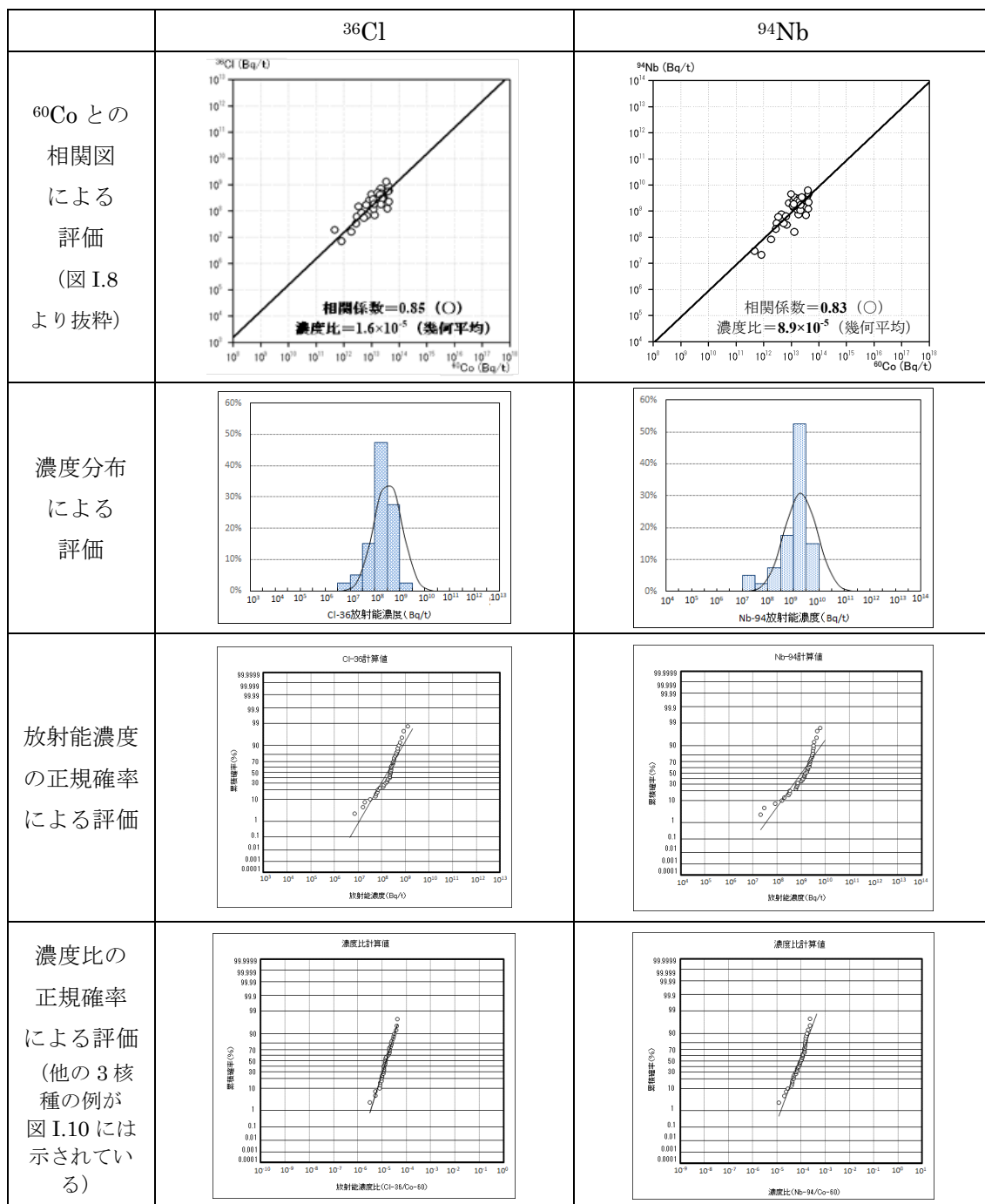


図 13(3)-1 相関性及び対数正規性を示す図の例

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 <sup>60</sup>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。

回答 13(4)

(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、主に線形な関係を基本とした図 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

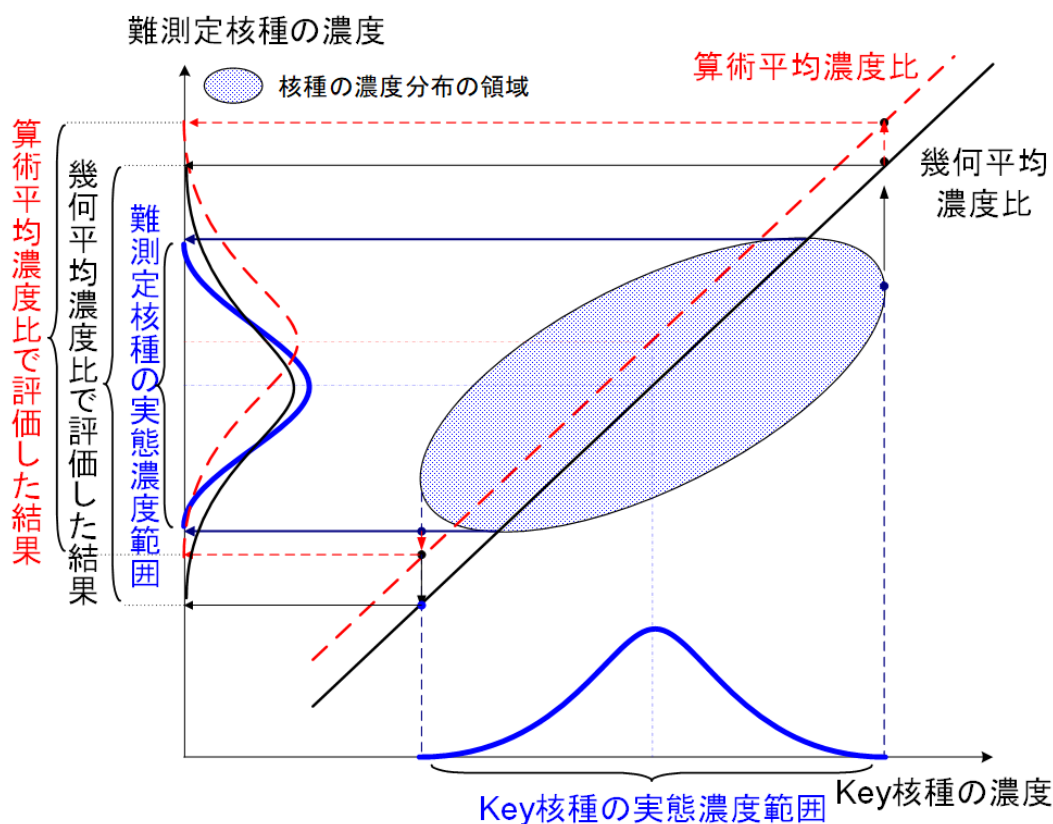


図 13(4)-1 難測定核種の放射能濃度の評価に適用する算出式による差異のイメージ

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、「放射エネルギーの総量」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

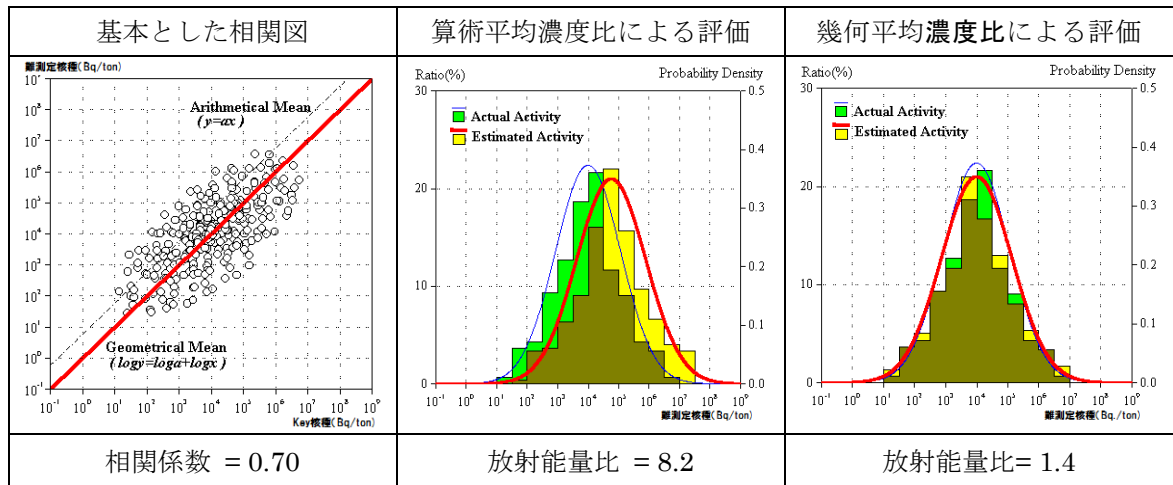
算出方法	算術平均濃度比による評価	幾何平均濃度比による評価
基本的な適用範囲	算術平均は、「正規分布」に従う変数に対して望ましい平均値である。	幾何平均は、「対数正規分布」に従う変数に対して望ましい平均値である。
濃度比を適用して評価した分布の結果	ばらつきの影響が加味され、分布の形状はあまり変えないものの、濃度の大きい方向にスライドさせる形での評価分布となる。	分布の中心は変わらず、濃度の大小の方向に若干拡張させる形での評価分布となるが、ばらつきに大きく影響されない。
適した評価対象	分布のばらつきを加味するため、これに保守性を加えることにより、『最大放射能濃度』の評価に適する。	分布の中心を正しく評価し、かつ、分布の線形の傾きが1未満の場合、保守性も加わり、『放射能量算出のための放射能濃度』の評価に適する。

相関係数=0.7 を示す難測定核種と Key 核種の放射能濃度データを 300 点生成し、この各データが、個々の廃棄体の放射能濃度のデータであると想定して、「各々の難測定核種濃度のデータの値」と、各々の「Key 核種濃度に濃度比を乗じて算出した難測定核種の放射能濃度の値」とを比較評価した結果を図 13(4)-2 に示します。

その結果、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、設定した放射能量の 8.4 倍の放射能量の評価結果を示し、ばらつきを過度に加味した大きな保守性を含むこととなります。

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、実際の放射能量の 1.4 倍程度の放射能量評価結果となり、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量の真値）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、放射能量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：放射能量比=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量 (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量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: ICEM'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になります。

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。

○ その他

1. 「6.4 数値の丸め方」において、数値の丸め方は JIS Z 8401:1999 に従うと規定していますが、JIS は種々の丸め方を規定しているので、本標準で採用する丸め方を具体的に説明してください。

回答 1

「放射能濃度」及び「濃度比などの係数」は、これまでの廃棄体確認申請などを踏まえると、有効数字として小数点 1 桁としているため、標準 6.4 に示している丸め方に従いますと、次のような具体例（JIS Z 8401:1999 の「2.数値の丸め方」に例示されている丸めの幅：0.1 の適用）となります。

	放射能濃度	濃度比などの係数
申請値の例	$1.0 \times 10^{10}$ Bq/t	$1.0 \times 10^{10}$
丸め方	小数点 2 桁目を切り上げ	小数点 2 桁目を切り上げ

**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。

以上