

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

2022年10月27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。

質問のうち「黒字の部分」は、資料 2-2-2<sup>(注1)</sup> を、その回答は資料 3-1-1<sup>(注2)</sup> を参照ください。赤字の「更問」は、参考資料 4-1-1 を参照ください。「更問」の回答のうち黒字部分は、資料 3-1-1 と同じ部分、赤字部分は新たに加筆修正した部分です。

注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（令和3年9月21日） 資料2-2-2 「第3回会合における日本原子力学会への説明依頼事項（案）」

注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（令和3年11月5日） 資料3-1-1 「中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法にかか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」

**〇はじめに**

**放射能濃度決定標準の規定内容を具体的に理解するために、同じ評価対象物（例えば、チャンネルボックス）に対して、①点推定法、②濃度比法、③換算係数法及び④濃度分布評価法を用いて、最大放射能濃度を算出した例を、下表の内容が分かるよう示して下さい。**

規定	説明して欲しい内容
6.1.2.2 元素成分条件	—
6.1.2.2.1 起源元素の選定方法	どのように起源元素を選定したか その結果、どの起源元素を選定したか スクリーニングをした場合、その理由とスクリーニングの内容
6.1.2.2.2 起源元素の元素成分データの収集方法	3つの方法のうちどの方法で収集したか その方法を選んだ理由
6.1.2.2.3 起源元素の成分条件の設定方法	3つの方法のうちどの方法で設定したか その方法を選んだ理由
6.1.2.3 中性子条件	—
a) 中性子フルエンス率・中性子スペクトル	使用した中性子輸送コードの種類 そのコードを選んだ理由 中性子フルエンス率、中性子スペクトルの設定に至るまでの考え方、設定の判断方法、根拠
b) 放射化断面積	2つの方法のうちいずれの方法で放射化断面先を作成したのか その方法を選んだ理由
6.1.2.4 照射条件	a)とb)のいずれを選定したか その方法を選んだ理由

	各方法において、照射条件を設定する場合の適切性を判断する理由（判断方法）は、同様に保守性を判断できる理由
6.1.3 放射化計算	—
6.1.3.1 放射化計算方法	なぜ、その放射化計算方法を選んだのか
6.1.3.2 計算用入力条件の設定	放射化計算の入力パラメータ及び条件 区間推定法の場合、入力パラメータ及び条件をランダムに抽出するか又は適切な代表条件を設定するかどちらか その方法を選んだ理由
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 その数で妥当とした理由
6.1.3.3.2 区間推定法	実施した計算数 その数で十分と判断した理由
6.1.4 表面汚染の取扱い	表面汚染を除染したか 除染した場合、除染が十分と判断した根拠 除染しない場合、表面に付着した放射性物質の放射能濃度の評価結果 理論計算法で決定した放射能濃度に加えなかった場合、その理由
6.3.1 理論的方法の妥当性確認	—
6.3.1.1 妥当性確認の方法	放射化計算方法及び計算手順が期待される結果を与えたか そのように判断した根拠 計算が、恒常的に、正確に実施できるか そのように判断した根拠
6.3.1.2 不確かさの扱い	不確かさの評価方法と結果
6.5 放射能濃度の評価における裕度	最大放射能濃度との比較に用いる推定放射能濃度の算出方法と結果 提示する評価精度値とその根拠

## 回答（はじめに）

別紙1「最大放射能濃度の計算の手順の比較（チャンネルボックス（CB）の評価手順と評価結果の例）」を参照下さい。

### ○ 「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。炉核的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。

更問 1 ① (資料 3-1-1 の回答 1(1) の第 1～第 3 パラグラフ) については、本標準の記載内容に関する説明であり、質問に対する回答がありません。

② (資料 3-1-1 の回答 1(1) の第 4 パラグラフ) については、熱中性子フルエンス率と高速中性子フルエンス率或いは熱外中性子フルエンス率との比が 2 倍以内であるため炉心平均の中性子条件を適用することは問題ない、という説明ですが、「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」という質問に対する回答がありません。

以上を踏まえ、次に掲げる事項について、評価例等により説明して下さい。

① 中性子スペクトルの変動幅とそれに応じた放射化放射能の変動幅との定量的な関係

② 最大放射能濃度評価 (及び埋設総放射能濃度評価) の観点から、許容される放射化放射能の変動幅、或いは変動幅の設定の方法。

③ 熱中性子フルエンス率と高速中性子フルエンス率或いは熱外中性子フルエンス率との比が 2 倍以内とした根拠) 2 倍が保守側に濃度を高く評価することを説明する際には、評価対象となりうるすべての生成核種の親元素の放射化断面積に関して、熱中性子のほうが熱外・高速中性子よりも大きいことを示してください。

④ 上記②及び③を踏まえて、一定とみなすことのできる中性子スペクトルの範囲。

⑤ 「表 J. 6—BWR チャンネルボックスの評価条件 (45GWd/t)」の熱群 (FT) 中性子スペクトルインデックス値は軸方向位置 1～2 4 において 0.64 で一定とする根拠。

⑥ 「表 J. 6—BWR チャンネルボックスの評価条件 (45GWd/t)」と「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」を示しているが、その相互関係について。

1) 「表 J. 6—BWR チャンネルボックスの評価条件 (45GWd/t)」の熱中性子フルエンス率と似たものが「図 G. 5—BWR チャンネルボックスでの熱中性子フルエンス率軸方向分布の例」(28GWd/t のもの) に示されています。しかし、燃焼度が 1.6 倍異なることを考慮して表 J. 6 の熱中性子フルエンス率の値を 1.6 で除しても  $10^{13}$  を下回るものはありませんが、図 G. 5 の軸方向位置 24 では最外周及び炉心中央部平均でも  $10^{13}$  を下回っています。その理由について。

2) 図 G. 6 の縦軸 (高速中性子フルエンス率/熱中性子フルエンス率) の値は、表 J. 6 の熱中性子フルエンス率に中性子スペクトルインデックスの「高速群 (FF)/熱群 (FT)」比を乗じたものと相関があるように見えません (図 G. 6 は右肩上がり、表 J. 6 だと軸方向位置 23、24 で下がる)。表 J. 6 と図 G. 6 の関係について。

### 回答 1+更問 1 への回答

ご指摘の①～⑥の事項につきまして、以下に回答します。

① 中性子スペクトルの変動幅とそれに応じた放射化放射能の変動幅との定量的な関係

BWR における径方向の炉心配置位置の違いによる中性子スペクトルの変動幅は炉心中央平均の軸方向中性子スペクトルに対して、0.9 倍～1.4 倍（-10 %～+40 %）の範囲となります。この変動幅による放射化放射エネルギーの変動幅は-9 %～+36 %程度となります。評価結果の詳細については別紙 2「換算係数法計算例（BWR チャンネルボックス）の中性子条件設定について」に示します。

### ②最大放射能濃度評価（及び埋設総放射エネルギー評価）の観点から、許容される放射化放射エネルギーの変動幅、或いは変動幅の設定の方法。

最大放射能濃度評価の観点からは、換算係数法を用いて計算を実施した事例はありませんが、中性子条件の設定手順としては、附属書 J の表 J.1 に示しますように、評価対象廃棄物自身の全領域に一つの保守的（放射能濃度評価結果が大きくなるような）代表値を設定します。

総放射エネルギー評価の観点からは、区画別放射エネルギーの確認を受ける評価単位の設定によって許容される変動幅が異なってきます。具体的には区画ごとに放射性物質の種類ごとの埋設放射エネルギーが不確かさ（元素条件、中性子条件、照射条件、計算）を加味しても申請書の放射エネルギーを超えないことの定量的な評価は、申請核種の特定や、埋設施設設計や埋設施設の区画毎の埋設運用方法を踏まえたうえで実施する必要があります。このため、現時点では許容できる変動幅を提示することはできません。

なお、総放射エネルギー評価においては附属書 M の M.3.2 に示しますように廃棄体個々の放射能濃度のばらつきは、平均放射能濃度を中心とした対称的な分布を示すことから、全埋設廃棄体の総放射エネルギーとしては、放射能濃度のばらつきは最終的に相殺されるため、埋設放射エネルギー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考えています。

BWR チャンネルボックスの平均放射能濃度の評価に炉心平均の中性子条件を適用することの妥当性については、別紙 2 のとおり炉心配置位置の違いによる放射化放射エネルギーの変動幅が十分小さいことを確認した上で適用しています。

### ③熱中性子フルエンス率と高速中性子フルエンス率或いは熱外中性子フルエンス率との比が 2 倍以内とした根拠）2 倍が保守側に濃度を高く評価することを説明する際には、評価対象となりうるすべての生成核種の親元素の放射化断面積に関して、熱中性子のほうが熱外・高速中性子よりも大きいことを示してください。

前回のご説明では、炉心配置位置の違いによるスペクトルの違い（中性子フルエンス率の比）までにとどまっていたため、不十分な説明となっていました。現在想定している申請核種の起源元素に対し、炉心配置位置の違いによるスペクトルの変動範囲に応じた放射化放射エネルギーの変動幅の評価結果は炉心平均の中性子条件で評価した結果に対して-9 %～+36 %となります。詳細結果を別紙 2 に示します。なお、想定している申請核種に変更がある場合には、同様な感度解析を実施し影響評価を実施したうえで、中性子条件を設定することになります。

④上記②及び③を踏まえて、一定とみなすことのできる中性子スペクトルの範囲。

最大放射能濃度の評価では、評価対象廃棄物自身の全領域に一つの保守的（放射能濃度評価結果が大きくなるような）代表値を設定します。

総放射能評価では、別紙 2 に示しました手順で平均的な中性子条件の適用性を確認しますが、回答②にありますとおり、申請核種の特定や埋設施設の区画毎の埋設運用方法を踏まえたうえで評価する必要があるため、現時点では一定とみなすことのできる中性子スペクトルの範囲を提示することはできません。

⑤「表 J.6—BWR チャンネルボックスの評価条件 (45GWd/t)」の熱群 (FT) 中性子スペクトルインデックス値は軸方向位置 1～24 において 0.64 で一定とする根拠。

熱群 (FT) 中性子スペクトルインデックスは熱中性子フルエンス率に対する比率ではなく、熱群スペクトル形状の温度補正に関するファクタであり、当該領域の温度差は 10 K 程度であり表 J.6 の注 b) の FT の式に従うと 1% 以下の変動であるため、軸方向位置において一定としています。

参考 表 J.6 注 b) (標準からの抜粋)

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

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)

⑥「表 J.6—BWR チャンネルボックスの評価条件 (45GWd/t)」と「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」を示しているが、その相互関係について。

1) 「表 J.6—BWR チャンネルボックスの評価条件 (45GWd/t)」の熱中性子フルエンス率と似たものが「図 G.5—BWR チャンネルボックスでの熱中性子フルエンス率軸方向分布の例」(28GWd/tのもの) に示されています。しかし、燃焼度が 1.6 倍異なることを考慮して表 J.6 の熱中性子フルエンス率の値を 1.6 で除しても 10<sup>13</sup> を下回るものはありませんが、図 G.5 の軸方向位置 24 では最外周及び炉心中央部平均でも 10<sup>13</sup> を下回っています。その理由について。

2) 図 G.6 の縦軸（高速中性子フルエンス率／熱中性子フルエンス率）の値は、表 J.6 の熱中性子フルエンス率に中性子スペクトルインデックスの「高速群 (FF)／熱群 (FT)」比を乗じたものと相関があるように見えません（図 G.6 は右肩上がり、表 J.6 だと軸方向位置 23、24 で下がる）。表 J.6 と図 G.6 の関係について。

表 J.6 は換算係数法を用いる場合の計算例であり、管理指標として集合体平均燃焼度であるため、燃焼度変化に応じたノードごとに計算した中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定しています。一方、図 G.5 及び図 G.6 は特定の評価方法に限定しないときの計算例であり、代表燃料断面における中性子フルエンス率・中性子スペクトルを補正して設定しています。

- 1) 上記のとおり異なる計算例であるため、表 J.6 と図 G.5 は整合していません。
- 2) ノードごとの計算結果と代表燃料断面における計算結果の違いにより、表 J.6 と図 G.5 では軸方向出力及びボイド率で補正しているが天然ウランとなる 23、24 ノードで違いが生じています。

前回のご説明では、表 J.6 の熱中性子フルエンス率と図 G.6 及び図 G.7 の熱中性子フルエンス率に対する比が同一の評価条件ではないことの説明が十分ではありませんでした。なお、前回のご説明内容は上の回答にもあるとおり回答が十分でなかったことから、換算係数法における中性子条件の設定については、あらためて**別紙 2**で回答させていただきます。

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。

更問 2. 「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。」とありますが、最終的な放射能濃度に対する影響がどの程度であるかを評価例等により示して下さい。

#### 回答 2+更問 2 への回答

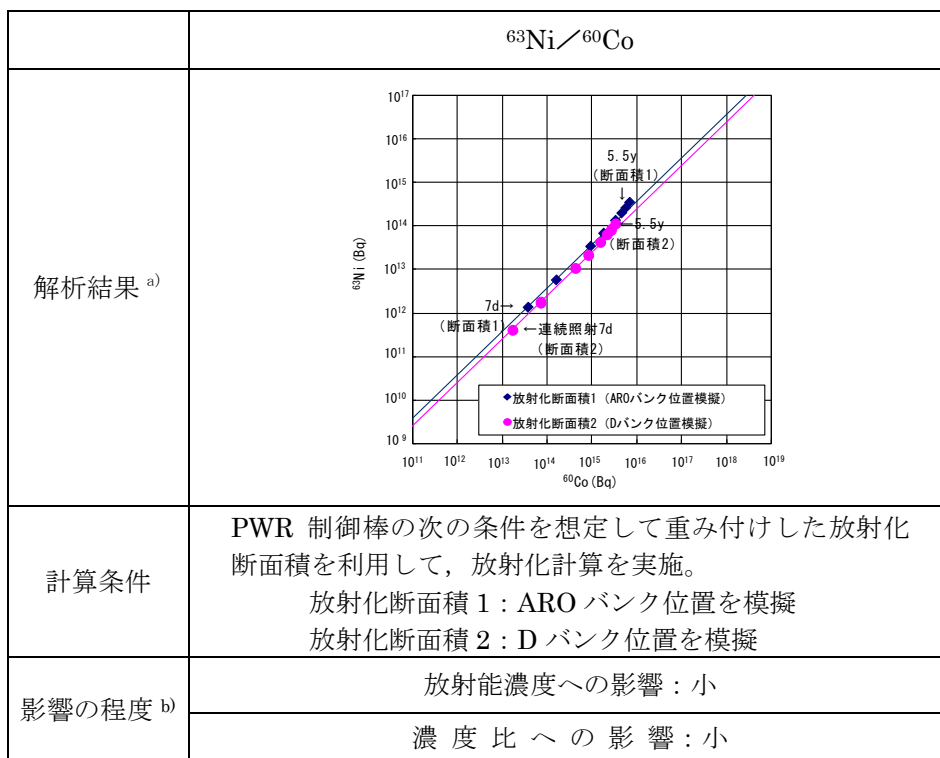
本標準では、附属書 B の図 B.4「放射化計算結果への主な計算条件の影響評価結果（放射化断面積の影響）」の脚注 b)に示すように、放射能濃度の評価結果への影響が 2～3 倍程度以内の場合は、放射能濃度への影響が小さく、濃度比を一定とする場合の中性子スペクトルを同等とみなせるとしています。

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は、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）」において、評価上、保守

側に ARO バンクの放射化断面積を設定して評価した例が挙げられます。上記の事例における中性子フルエンス率を同一とした場合の中性子スペクトルの変化による放射化断面積の放射能濃度への影響を下表に示します。D バンクに対する ARO バンクの放射能濃度は、Co-60 で 2.1~2.2 倍、Ni-63 で 3.2 倍を示しています。

項目	-	各照射時間における放射能濃度 (廃棄物 1 tあたり) (Bq)							
		照射時間	7.0D	30.0D	180.0D	1.0YR	2.0YR	3.0YR	4.0YR
AROバンク位置	Co-60	4.0E+13	1.7E+14	9.8E+14	1.9E+15	3.5E+15	4.8E+15	5.9E+15	7.2E+15
	Ni-63	1.3E+12	5.6E+12	3.4E+13	6.8E+13	1.3E+14	2.0E+14	2.6E+14	3.5E+14
Dバンク位置	Co-60	1.8E+13	7.7E+13	4.5E+14	8.8E+14	1.6E+15	2.3E+15	2.8E+15	3.5E+15
	Ni-63	4.1E+11	1.8E+12	1.1E+13	2.1E+13	4.2E+13	6.2E+13	8.3E+13	1.1E+14
放射能濃度の比 (AROバンク/Dバンク)	Co-60	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1
	Ni-63	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2

なお、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。



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

<sup>b)</sup> 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。

**更問 3 照射位置の設定した事例を元に、中性子フルエンス率と中性子スペクトルの変動の影響をどのように考慮したのか説明してください。表 D. 2 の注 b) のようなケースが考えられるため、具体的な照射位置の設定において、どのような検討がなされた上で、どのような理由（根拠）から判断されるのかを説明してください。**

（質問の背景）照射位置の設定の方法が、放射能濃度決定標準において具体的に示されていないことから、照射位置の設定の方法において、中性子フルエンス率と中性子スペクトルの変動の影響をどのように考慮するのか質問したものです。

**回答 3+更問 3 への回答**

中性子条件の変動に関しては、原子炉内の中性子フルエンス率と中性子スペクトルの評



価及び評価位置の選択の2つのステップによって、以下のように考慮されます。

① 原子炉内の中性子フルエンス率と中性子スペクトルの評価

原子炉内の軸方向及び径方向の位置ごと（軸方向 24 区分、径方向（炉心中央、最外周及び中性子の変動を与える制御棒近傍におけるコントロールセルを含む 3 区分）における中性子フルエンス率と中性子スペクトルを、検証された中性子輸送計算コードを使用した中性子輸送計算を用いて、炉内の構造条件なども踏まえて個々に評価し、原子炉内の中性子の分布をマッピングします。これによって、原子炉内における中性子フルエンス率と中性子スペクトルの変動を考慮した中性子の分布が評価できます。（附属書 D の D.2 f) 参照）

② 放射化計算用の評価位置の選択（①で評価した中性子の分布から選択するための位置の決定）

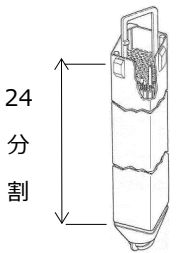
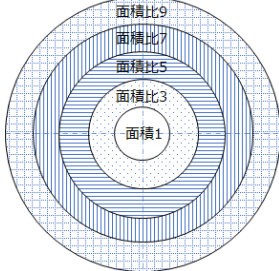
原子炉内に設置されている放射化金属等の放射能濃度を評価するため、上記①でマッピングされた中性子の分布から、評価対象放射化金属等原子炉内の位置（軸方向及び径方向）を、放射化金属等の設置状態を踏まえて評価する照射位置を選択します。これによって、選択した放射能濃度を評価する位置における中性子フルエンス率と中性子スペクトルを決定することが出来ます。（附属書 D の D.2 b) 参照）

②における区間推定法の評価対象とする放射化金属等の原子炉内の軸方向及び径方向の照射位置の選択は、下記（附属書 D の D.2 b)）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することで、その影響を含めた放射能濃度分布を評価します。

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、表 3-1 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。

表 3-1 評価対象とする位置に関する存在確率分布のイメージ

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 data-bbox="459 1736 486 1859">24 分 割</p> <p data-bbox="331 1921 790 1980">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 data-bbox="949 1921 1324 1980">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。
------------------	--

**附属書 D (標準からの抜粋、下線部が該当箇所)**

**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)。
- f) 中性子フルエンス率の設定** 原子炉内の中性子フルエンス率の分布を検証、妥当性確認された計算コードを使用して評価する。続いて、ステップ **b)** で選択した評価対象物の照射位置、及びステップ **d)** で選択した原子炉内の設置位置のローテーションパターンを踏まえ、評価した照射期間中の中性子フルエンス率の分布から入力条件とする中性子フルエンス率を選択する (D.5 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。

**回答 3 に対する追加質問 (検討チーム会合中のご質問)**

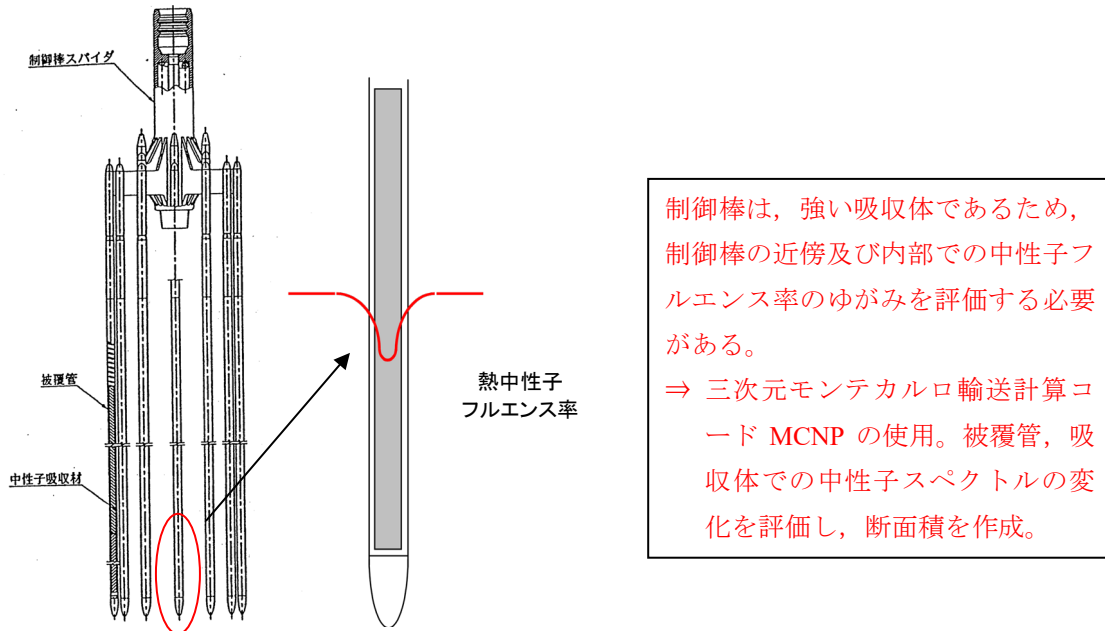
**表 D.2 の注 b) の特段の考慮が必要な場合とは具体的にどのような場合か。**

中性子フルエンス率、中性子スペクトルが変化する特段の考慮が必要な場合とは、次のような場合を意味します。

- 強い中性子吸収体 (例 制御棒) によって中性子分布の歪みが生じる位置 (BWR のコントロールセル)

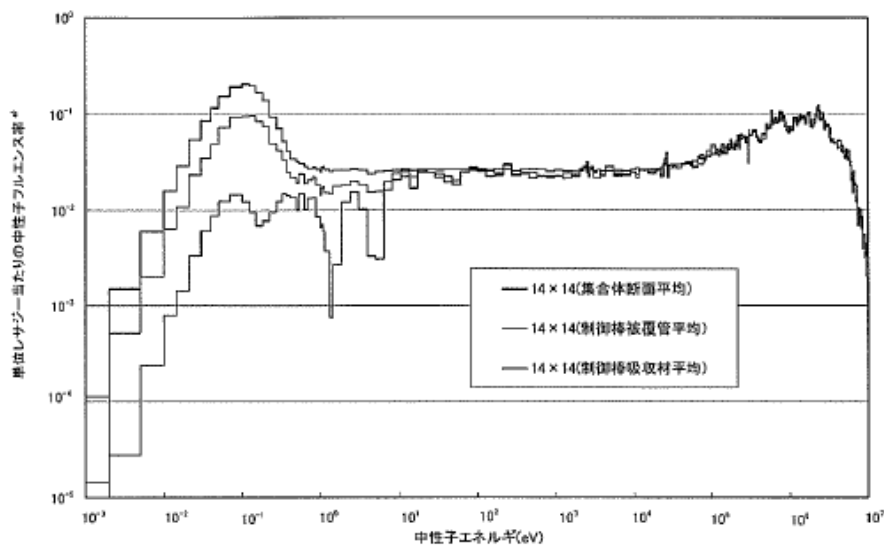
**補足：中性子の歪みの例**

PWR 制御棒における中性子の歪みの例を下記に示します。

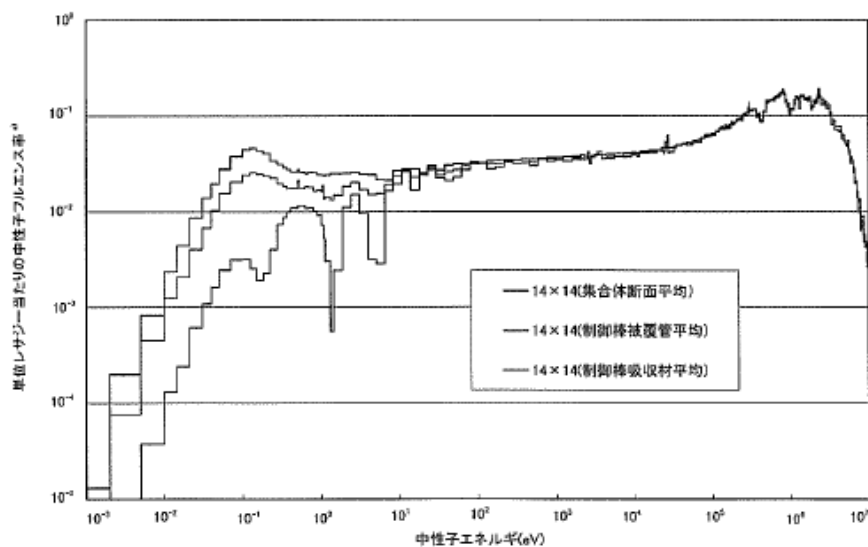


**図 G.8—PWR 制御棒における熱中性子フルエンス率のディプレッション効果（概念図）**

制御棒は、強い中性子吸収体であるため、中性子分布の歪みが生じる範囲として、制御棒の近傍（被覆管）及び内部（吸収体）での中性子スペクトルが変化します。それらの影響の度合いとして、中性子スペクトルの変化を評価して、放射化断面積を作成する必要があります。下図に制御棒の近傍（被覆管）及び内部（吸収体）での中性子スペクトルの変化を評価した例を示します。（附属書 G 図 G.12）



a) AROバンク



b) Dバンク

注<sup>\*)</sup> 集合体断面平均 $\phi$ で規格化

図 G12—PWR 制御棒先端部の中性子スペクトル (2 ループプラント、14×14 型燃料の例)

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ります。」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（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。<sup>1)</sup>
- 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。

**注 1** 解体廃棄物は中性子照射が一斉に終了するため、供用期間中に取替工事が行われることが無ければ、炉内構造物に対する照射時間は同じとなります。

**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	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</li> </ul>	全評価対象廃棄物

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
用期間中)		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。 ー 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。	
	個別設定	ー 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。	
<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。			

(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、表 4-1 のように設定します。

**表 4-1 濃度比法における照射期間の設定の考え方**

区分	評価対象物の例	照射期間の設定
運転廃棄物	チャンネルボックス、制御棒など	数年から十数年程度の照射期間に幅があるため、全照射時間の長さ（例 10 年間ごとに区切るなど）に応じてグルーピングを行い、グループごとに照射期間を設定して濃度比を決定する。
解体廃棄物	上部格子板、バッフル、シュラウド、炉心槽など	照射期間は、供用期間中の取替工事（例 シュラウド交換）などが無ければ、炉ごとに 40 年間や 60 年間などのように、一定の実績照射期間で設定して濃度比を決定する。

	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 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。	

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。

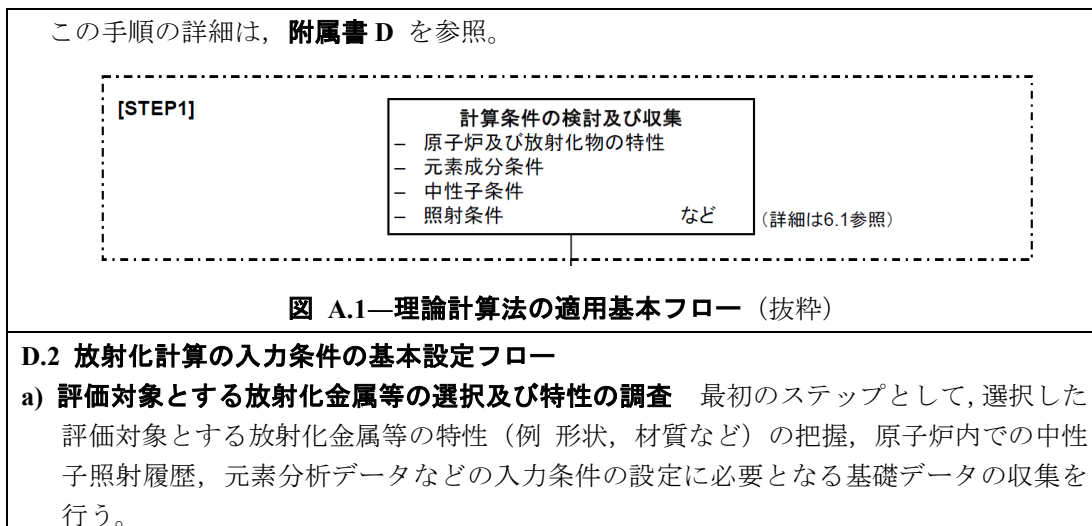
回答5

「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、放射化計算に必要な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。

**A.1.2 STEP1：計算のための基本の設定（標準からの抜粋）**  
 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。



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、何をもち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。

**更問 6** どのように計算コードの適切性を確認したのか分かるよう、計算コードの適切性を判断する際の、確認項目、確認方法、適切と判断する基準等について、具体的に記載して下さい。他の規格、第三者機関等による場合には、その内容について説明してください。また、「検証と妥当性確認 (V&V)」を説明する際には、定義や引用元を明確にした上で記載してください。

(質問の背景) 適切な計算コードを選定しなければ、適切な計算はできません。このため、計算コードの適切性を判断する際の、確認項目、確認方法、適切と判断する基準等について質問したものです。

**回答 6+更問 6 への回答**

計算コードの適切性の確認については、「原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン」(JANSI-GQA-01-第 3 版) [1] 4.2.2 計算機プログラムの検証に示される表 6-1 に示します確認方法を適用して、可能な方法 (複数) にて確認します。

**表 6-1 計算コードの適切性の確認**

確認項目・確認方法	適切と判断する基準等
・汎用ソフトウェアの導入評価 (解析条件に応じた使用実績確認等) の確認	使用実績における計算値と分析値の比較評価 (傾向分析) が妥当であること
・トピカルレポート (許認可申請において原子力施設共通事項として取りまとめた技術文書) 審査等の規制機関による確認	許認可審査等により規制機関に確認を受けている実績があること



・実機運転データとの比較	計算値と分析値の比較評価（傾向分析）が妥当であること
・大型実験又はベンチマーク試験結果との比較	計算値と分析値の比較評価（傾向分析）が妥当であること
・規制機関によるクロスチェック	規制機関によるクロスチェックされている場合はその実績があること
・他の計算機プログラム（他機関、社内）による計算結果との比較	他の計算コードの計算値と比較評価（傾向分析）が妥当であること
・簡易モデル（サンプル計算例）、標準計算事例を用いた解析結果との比較	サンプル計算例との計算値が一致すること
・手計算又は理論解との比較	手計算結果との比較評価（傾向分析）が妥当であること

また、放射化計算コードの適切性の確認においては、放射化範囲の中性子条件（中性子フルエンス率、スペクトル）を反映した放射化計算ができるコードを選択することが必要であることから、ORIGEN 又は ORIGEN2 コードシリーズを選択します。

次にどのように放射化計算方法を検証するのかについてですが、上記の確認の中で計算値（予測値）と分析値（実験値）との比較（実機運転データとの比較又は大型実験又はベンチマーク試験結果との比較）を通じた放射化計算方法全体の妥当性を確認することを意味しております。

その妥当性評価の事例として、実機運転データとの比較について以下に示します。

例えば、ORIGEN2 用の JENDL-4.0 の放射化断面積が発行された際の文献[1]において、PWR 使用済み燃料の照射後解析の結果（下図）から、実験値（E 値）と ORIGEN2 による計算値（C 値）との比較結果（C/E-1）を図に示しています。JENDL-4.0 による計算結果（PWR41J40 の結果：下図の赤い■）は、Cm-246, Cm-247 では 20～30%程度のずれがありますが、その他の核種については 10%以内で実験値を再現していることが傾向分析されており、計算値と実験値はよく一致していることが評価されています。

#### <参考>文献[2]の P36 抜粋

- ORLIBJ40 による計算結果は、Cm-246 と Cm-247 を除けば、ほぼ 10%以内で実験値を再現しており、ORLIBJ33 で見られた一部核種に対する過小評価も改善されている。

[1] <http://www.genanshin.jp/archive/qualityimprovement/data/jansi-gqa-01.pdf>

[2] 奥村啓介他「JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット」JAEA-Data/Code2012-032

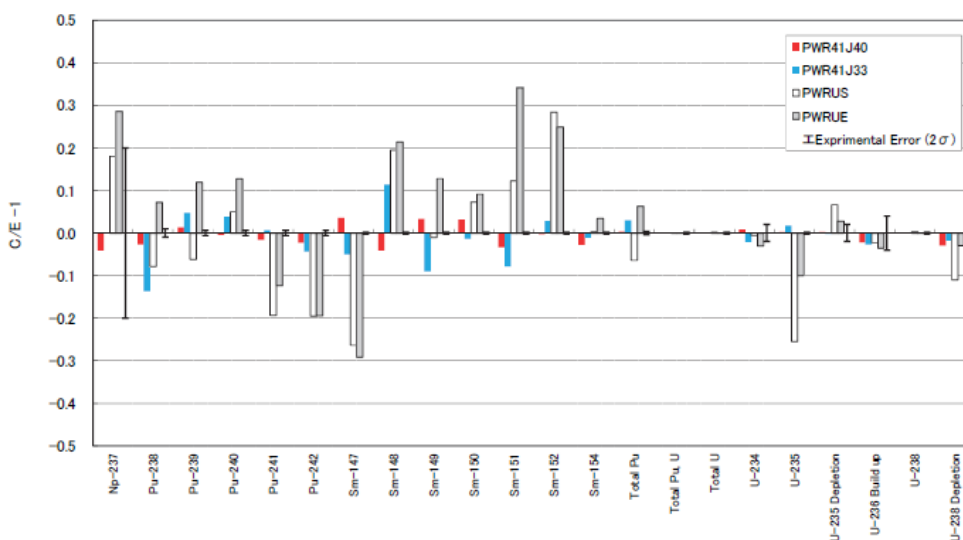


図 3.4-7 高浜 3 号炉使用済み燃料組成の計算値(C)と実験値(E)との比較(その 1)

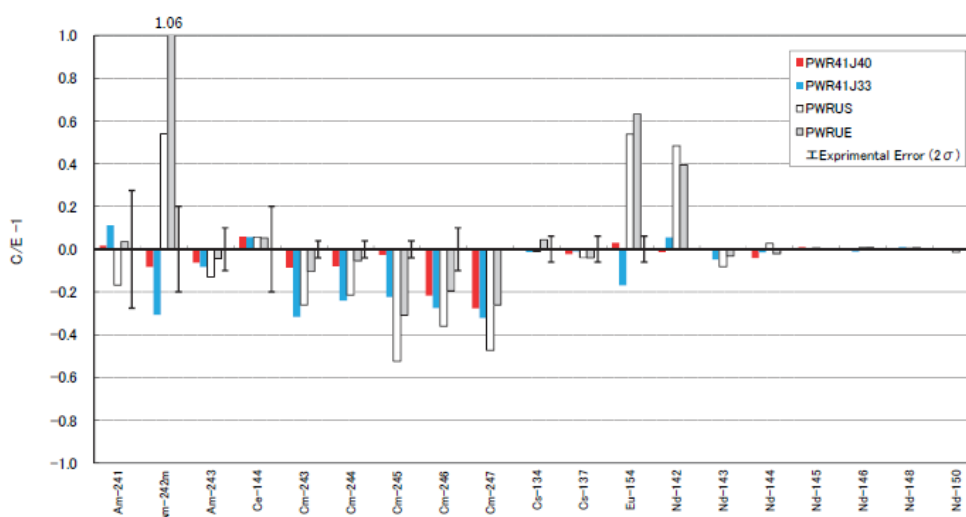


図 3.4-8 高浜 3 号炉使用済み燃料組成の計算値(C)と実験値(E)との比較(その 2)

### 補足：計算コードの適切性確認の組み合わせについて

計算コードの適切性の確認には、「A : Verification (検証)」と「B : Validation (妥当性確認)」の組み合わせが必要と考えます。「C : その他」はもしあればという位置づけです。項目分けを表 6-2 に示します。

Verification (検証) は計算コードの基礎となる計算モデル (計算式) が正しいかを確認する過程であり、表中の項目のうち、「他のプログラム (他機関、社内) による計算結果との比較」、「簡易モデル (サンプル計算例)、標準計算事例を用いた解析結果との比較」、「手計算又は理論解との比較」が該当します。

Validation (妥当性確認) は、計算コードが現実の物理現象を正しく表現しているかを確認

する過程であることから、表中の項目のうち、「実機運転データとの比較」、「大型実験又はベンチマーク試験結果との比較」が該当します。

なお、トピカルレポート（許認可申請において原子力施設共通事項として取りまとめた技術文書）審査等の規制機関による確認では上述の Verification（検証）と Validation（妥当性確認）の両方が確認されていると考えられます。

表 6-2 計算コードの適切性の確認の項目分け

確認項目・確認方法	項目分け
・汎用ソフトウェアの導入評価（解析条件に応じた使用実績確認等）の確認	C
・トピカルレポート（許認可申請において原子力施設共通事項として取りまとめた技術文書）審査等の規制機関による確認	A+B
・実機運転データとの比較	B
・大型実験又はベンチマーク試験結果との比較	B
・規制機関によるクロスチェック	C
・他の計算機プログラム（他機関、社内）による計算結果との比較	A
・簡易モデル（サンプル計算例）、標準計算事例を用いた解析結果との比較	A
・手計算又は理論解との比較	A

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lement 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lement 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Element 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、表 7 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。

表 7 放射能評価の各段階の確認内容

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<sup>1)</sup></li> </ul>

注 1) 放射能濃度の評価結果に含まれる入力データの妥当性、不確かさなどを踏まえた評価は、この中で行います。

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。

更問 8 質問に対して、「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。」と回答いただいておりますが、より具体的に説明いただかなければ回答の方法で妥当性が確認出来るかどうか判断できません。

①結果を記録したことで何の妥当性を確認するのでしょうか。放射化計算結果の妥当性でしょうか。放射化計算手順の妥当性でしょうか。

②放射化計算結果を何と比較することで「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」を判断するのでしょうか。

③客観的、文書化された根拠とは具体的にどのようなものを想定しているか示してください。

（質問の背景）放射化計算の妥当性確認は、本標準の根幹をなす重要な項目であり、妥当性を確認出来ない場合は放射化計算により中深度処分対象廃棄物の放射能濃度を導くことはできないと考えます。

放射化計算のプロセスのひとつとして「A.4.4 計算結果の記録段階」が挙げられていま

す。「放射化計算の結果を記録し、妥当性を確認する。」という記載だけを読むと、記録から妥当性確認の間にあるべき具体的方法の記載が抜けているように思われるため質問したものです。

#### 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。

#### 更問 8 への回答

##### ①結果を記録したことで何の妥当性を確認するのでしょうか。放射化計算結果の妥当性でしょうか。放射化計算手順の妥当性でしょうか。

「A.4.4 計算結果の記録段階」では、必要な計算条件を設計図面等の入力根拠と共に文書化し、理論計算法の放射化計算方法と計算手順の文書化によりプロセスが妥当であることを示し、得られた放射化計算の結果の妥当性を確認します。

放射化計算の結果の妥当性確認方法は、原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン（JANSI-CQA-01－第3版）における「4.3 解析結果の審査、検証」が該当します。

##### ②放射化計算結果を何と比較することで「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」を判断するのでしょうか。

放射化計算の結果の妥当性確認においては、計算条件を明確化した類似解析結果との比較、または、既知の理論値や経験値との比較（物理的又は工学的整合性の確認）により傾向分析（条件ごとに結果に与える影響度を評価し、すべての条件による影響が結果に反映されていることの確認など）を行い妥当であることを確認します。

条件ごとに結果に与える影響度を評価し、すべての条件による影響が結果に反映されていることの確認事例を別紙 3 に示します。

##### ③客観的、文書化された根拠とは具体的にどのようなものを想定しているか示してください。

上記②で示すような第三者が評価を再現できるような図書及び結果の妥当性を示す図書を想定しています。

○ 「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。

**更問1 点推定法及び区間推定法によって使い分け（組合せを含む。）があるのか説明してください。**

また、「6.1.3.2 計算用入力条件の設定」においては、元素成分条件にランダムサンプリングと適切な代表値の両方を規定していますが、換算係数法の場合は「J.1.2 放射化計算の条件の設定」の「a) 元素成分条件」において「各元素の代表値を1点設定する」として規定しています。換算係数法で各元素濃度をランダムサンプリングした場合の換算係数及び放射能濃度の決定方法を説明してください。

(質問の背景)「代表値を設定する方法」は各元素の濃度の代表値、「濃度分布から設定する方法」は各元素の複数の代表的濃度、「濃度範囲を設定する方法」は各元素の最大濃度、最小濃度を設定するとあり、いずれでも可とする理由が分からないため質問したものです。いずれでも可とするなら、結果の同等性が重要です。

**更問1. (1) 計算コードから求めた放射化断面積と中性子フルエンス率の評価結果から求めたものの例を示して下さい。**

(質問の背景) 「使用する放射化計算コードの放射化断面積ライブラリ」は計算コード内から選択で求まるが、「中性子フルエンス率の評価結果から…放射化断面積を設定」は計算コード内で行うものではないと思われます。計算式の説明がないため、同等なのかを質問したものです。

**更問1. (2) 利用する計算コード及び放射化断面積ライブラリが最新のものであることの確認方法と放射化断面積ライブラリが変更されたときの妥当性評価方法について、例を示して説明してください。**

(質問の背景) 利用する計算コード及び放射化断面積ライブラリが最新のものであることの確認方法と放射化断面積ライブラリが変更されたときの妥当性評価方法について具体的説明を求めたものです。

**回答1 (6.1.2.2.3 に対する質問の回答) + 更問1 への回答**

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)  
 $\geq$  「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)

その元素成分条件の設定方法に関する適用の評価方法及び評価対象による区分は、表 1-1 に示す適用を想定しています。

表 1-1 元素成分条件の設定方法

評価方法及 び対象	点推定法		区間推定法	
	最大放射能濃度	平均放射能濃度	最大放射能濃度	平均放射能濃度
適用する元 素の成分条 件の設定方 法	代表値を設定す る方法(最大値)	<ul style="list-style-type: none"> <li>濃度分布から設 定する方法(平 均)</li> <li>代表値を設定す る方法(平均)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>濃度範囲を設定 する方法(最大 値)</li> <li>代表値を設定す る方法(最大値)</li> <li>濃度分布から設 定する方法(信頼 上限)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>濃度分布から設 定する方法(平 均)</li> <li>代表値を設定す る方法(平均)</li> </ul>
適用区分	<ul style="list-style-type: none"> <li>収集した元素分 析結果の最大 値が利用できる 場合</li> <li>JIS などの規格 値の上限値を 適用する場合</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①収集した元素分 析結果が利用で きる場合(平均)</li> <li>②JIS などの規格 値の平均値を適 用する場合</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①JIS などの規格値 の上限値を適用 する場合</li> <li>②収集した元素分 析結果の最大値 が利用できる場 合</li> <li>③ランダムサンプ リング用の入力 用設定分布から 設定する場合(評 価結果の信頼上 限)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ランダムサンプ リング用の入力 用設定分布から 設定する場合(評 価結果の平均)</li> <li>②収集した元素分 析結果が利用で きる場合</li> </ul>

換算係数法で評価対象物の条件を網羅する評価(ランダムサンプリングによって)した場合の換算係数及び放射能濃度の決定方法を附属書 J に示しました代表値(平均など)による評価と比較する形で表 1-2 に示しました。

なお、標準附属書 J には換算係数法における「J.1.2 放射化計算の条件の設定」の例として、「a) 元素成分条件」を「各元素の代表値を 1 点設定する」としていますが、これは平均放射能濃度を評価する例を示しているため代表値で設定していますが、標準では代表値、ランダムサンプリングどちらでも設定可能としており、最大放射能濃度の評価では入力条件をランダムサンプリングとすることを考えています。

表 1-2 ランダムサンプリング及び代表値による換算係数及び放射能濃度の決定方法

	評価対象物の条件を網羅する評価	代表値（平均など）による評価
元素成分条件	濃度分布から設定する方法でランダムサンプリングによって濃度を設定（必要数を繰り返し設定）	濃度分布から設定する方法によって代表値（平均値）を設定
中性子条件	事前に燃焼度ごとに、個々に評価した炉内の中性子フルエンス率（中性子スペクトル含む）の分布から、ランダムサンプリングによって選択し、その位置の中性子フルエンス率で設定（必要数を繰り返し設定）	事前に燃焼度ごとに、軸方向は 24 分割ごとに計算した平均値、径方向は燃焼度の違いを補正した炉内平均中性子フルエンス率で設定
燃焼度	管理指標とする燃焼度（例 0～55GWd/t の管理範囲から、数点の代表燃焼度：例（10、20、30、40、45、50、55 GWd/ t））を設定する。	同左
換算係数	上記の入力条件での各燃焼度に対する放射能濃度の分布を評価し、分布より換算係数（放射能濃度／燃焼度）を平均又は信頼上限値として算出する。	上記の入力条件での各燃焼度に対する放射能濃度を評価し、換算係数（放射能濃度／燃焼度）を算出する。
放射能濃度	管理記録から評価対象物の燃焼度を設定し、換算係数を乗じて、放射能濃度（平均値、最大値）を決定する。	管理記録から評価対象物の燃焼度を設定し、換算係数を乗じて、放射能濃度（平均値）を決定する。

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、表 1-3 の考え方を基本としています。

表 1-3 信頼上限の適用区分

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。

### 更問 1. (1) への回答

計算コードから求めた放射化断面面積(ORIGEN2 コードに付属する放射化断面面積)と、中性子フルエンス率の評価結果から放射化断面面積を設定した値を比較したデータを事業者で保有していないため、両者の計算式が同等であることを示します。

ORIGEN2 コードにおける中性子スペクトルの評価結果から放射化断面面積を作成する処理は、以下のとおり行います。(4)式は、ORIGEN2 コード付属の放射化断面面積ライブラリである ORLIBJ40[1]での 1 群断面面積の作成の式 ([1]文献の 2-5 式) と同じであるため、計算式は同等です。

#### (中性子スペクトルの評価結果から放射化断面面積 (1 群断面面積) の作成処理)

放射化反応率  $I$  は連続的な分布を持つ中性子フルエンス率  $\Phi(E)$  と放射化断面面積  $\sigma(E)$  に対して、エネルギーで積分することで(1)式により求めることが出来る。

$$I = \int \Phi(E) \cdot \sigma(E) dE \quad (1)$$

しかし、本検討における中性子フルエンス率は、輸送計算コードを利用して得られる中性子フルエンス率は、多群のエネルギー群構造のものとなる。

そのため、放射化反応率  $I$  は、(2)式で与えられることとなり、輸送計算コードのエネルギー群構造に応じた放射化断面面積  $\sigma_g$  を(3)式により求める必要がある。

$$I = \sum_{g=1}^{g_{max}} \Phi_g \cdot \sigma_g \quad (2)$$

$$\sigma_g = \int_{E_i}^{E_{i+1}} \sigma(E) dE \quad (3)$$

また、ORIGEN2 コードで用いる 1 群縮約された放射化反応率  $I$  は、(4)式により求められる。

$$I = \Phi \cdot \langle \sigma \rangle \quad (4)$$

ここで、 $\Phi$  は全中性子フルエンス率であり、 $\langle \sigma \rangle$  は 1 群縮約された放射化断面面積である。全中性子フルエンス率  $\Phi$  は、(5)式のとおり定義される。

$$\Phi = \int \Phi(E) dE \approx \sum_{g=1}^{g_{max}} \Phi_g \quad (5)$$

よって、1群縮約された放射化断面積( $\sigma$ )は、(1)、(2)、(4)、(5)式を用いて、(6)式により求めることが出来る。

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\int \Phi(E) \cdot \sigma(E) dE}{\int \Phi(E) dE} \approx \frac{\sum_{g=1}^{g_{max}} \Phi_g \cdot \sigma_g}{\sum_{g=1}^{g_{max}} \Phi_g} \quad (6)$$

一方、ORIGEN2 コード付属の放射化断面積ライブラリである ORLIBJ40<sup>[1]</sup>での 1 群断面積の作成の式 ([1]文献の 2-5 式) は以下のとおりであり、(6)式と同じです。(  $\sigma_x^i$  は放射化断面積、 $\psi$  は中性子フルエンス率を表します。)

$$\langle \sigma_x^i \rangle = \frac{\int \sigma_x^i(E) \psi(E) dE}{\int \psi(E) dE} \approx \frac{\sum_{g=1}^{NG} \sigma_{x,g}^i \psi_g}{\sum_{g=1}^{NG} \psi_g} \quad (2-5)$$

なお、(6)式、(2-5)式共に左辺の積分に対して右辺では  $\Sigma$  となっているが、近年の輸送計算では 100~200 群程度で取り扱っており、結果への影響は小さいものと考えられる。

[1]奥村啓介他「JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット」JAEA-Data/Code2012-032

#### 更問 1 (2) への回答 (6.1.2.3 に対する質問と想定した回答)

利用する計算コード及び核データ(放射化断面積ライブラリ)が最新であることの確認は、以下のウェブサイト参照して確認します。最新版が発行された際には、初期不具合等の報告が収束するのを確認してから使用します。

計算コード：高度情報科学技術研究機構 (RIST)

放射化断面積ライブラリ (核データ)：

日本原子力研究開発機構 核データ研究グループ

米国ブルックヘブン国立研究所 国際核データセンター

放射化断面積ライブラリの変更された場合の妥当性評価については、発行元の文献にて妥当性評価を参照して確認します。

例えば、JENDL-4.0 の放射化断面積が発行された際の文献[1]を参照し、PWR 使用済み燃料の照射後解析の結果(「回答 6+更問 6 への回答」の図 3.4-7 及び図 3.4-8 を参照)から、計算値 (C) と実験値 (E) について、JENDL-4.0 による計算結果は、ほぼ 10 %以内で実験値を再現しており、JENDL-3.3 に比べて JENDL-4.0 の予測精度が改善されていると評価されています。

[1] 奥村啓介他「JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット」JAEA-Data/Code2012-032

## 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。

更問2. (1) 質問に対して、「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。」と回答いただいておりますが、回答の意図が分かりません。質問は、「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。」の、「必要に応じる」のはどのような場合か、というものです。

「必要に応じる」場合の判断基準が示されていないので定量的に説明してください。なお、先日の検討チーム会合では、定量的な判断基準がないという回答でしたが、それが正式な回答である場合、技術評価結果は表面汚染を理論計算法で決定した放射能濃度に加えることとせざるを得ません。

(質問の背景) 中深度処分対象廃棄物の埋設に当たっては、廃棄体中に存在する放射能濃度を全て評価する必要がありますので、放射化計算による母材中の放射能濃度の評価に加え、表面汚染による放射能を加えなければなりません。

表面汚染による影響が無視できるほど小さい場合には、表面汚染による放射能を加える必要がないと判断することができますが、表面汚染の影響を考慮する必要がない条件について定量的に示されていないため質問したものです。

更問2. (2) 質問に対して、「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になると考えます。」と回答いただいておりますが、「一例」を「参考」にしても「十分に低減できている」ことの判断基準の説明にはなっていません。

「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」場合に、「十分に低減できる」ことの判断基準を定量的に説明してください。

なお、先日の検討チーム会合では、定量的な判断基準がないという回答でしたが、それが正式な回答である場合、技術評価結果は表面汚染を理論計算法で決定した放射能濃度に加えることとせざるを得ません。

(質問の背景) 中深度処分対象廃棄物の埋設に当たっては、廃棄体中に存在する放射能濃度を全て評価する必要がありますので、放射化計算による母材中の放射能濃度の評価に加え、表面汚染による放射能を加えなければなりません。

表面汚染による影響が無視できるほど小さい場合には、表面汚染による放射能を加える必要がないと判断することができますが、表面汚染の影響を考慮する必要がない条件について定量的に示されていないため質問したものです。

#### 回答 2(1) + 更問 2(1) への回答

クラッドの影響がないと判断できる基準については、金属母材とクラッドの物性値の違い（溶出率や分配係数など）による埋設施設の移行シナリオへの影響等を踏まえて定める必要があるため、現時点では提示できません。今後、事業者が中深度処分施設の設計及び評価を進める中で、表面汚染による放射性物質の影響を把握した上で、具体的な条件（判断基準）が定められるものと考えます。

なお、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ので、技術評価では表面汚染を理論計算法で決定した放射能濃度に加えることとすることについて問題はありません。

表面汚染による影響を加えて評価する方法としては、主に以下の方法が考えられますが、具体的な方法については現時点では回答できません。

- ① 放射化と表面汚染の放射能の比率を予め設定し、理論計算で決定した放射化放射能に、この比率を掛けて求めた表面汚染放射能を加える方法
- ② 事前の表面汚染分析、または、理論計算により表面汚染の放射能濃度を評価し、理論計算で決定した放射化放射能に加える方法

#### 回答 2(2) + 更問 2(2) への回答

上述のとおり、今後、事業者が中深度処分施設の設計及び評価を進める中で、具体的な条件（判断基準）が定められ、その後の事業者による個別審査もしくは標準改定後に受ける技術評価の中で確認を受けるものと考えます。

標準の「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」について、今回の技術評価では「除染後に残存する放射能に応じて放射能濃度に加える」と読み替えることに異存ありません。

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。

更問 4-1 質問に対して、各スクリーニング項目の設定意図を回答いただいておりますが、質問は設定「根拠」です。根拠が示されなければ、スクリーニング手順として妥当であるかどうか判断できません。

- ①スクリーニング手順の設定に当たって参考にした事例（過去の許認可事例、海外事例等）の有無を示してください。
- ②参考事例が有る場合はその方法が中深度処分対象廃棄物の起源元素の選定に適用できる根拠を示してください。
- ③参考事例がない場合は、この設定項目で抜け漏れがないこと、スクリーニングの順番が前後することで評価結果が変わる可能性がないこと、その他起源元素の選定に関わる影響がないことをどのように判断したのか説明してください。

更問 4-2 また、スクリーニングの考え方として「対象とならない元素を除外する」旨の回答がされていますが、除外するための判断基準が記載されていません。

- ①一次スクリーニングから四次スクリーニングにおける選定基準等を設定した根拠を示して下さい。また、当該スクリーニング方法を作成するに当たって参考にした文献等があれば提示して下さい。
- ②一次スクリーニングにおいて放射性同位元素を除外して問題ない根拠を示して下さい。
- ③二次スクリーニングにおける放射化計算条件を示して下さい。
- ④三次スクリーニングの 1) から 6) について、「表 G.5-三次スクリーニングで除外対象とできる元素例」に記載された以下の内容を説明してください。
  - 「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」と記載されているが、「大半」が除去されたことを定量的に示して下さい。また、元素を除去対象とできる根拠を説明してください。
  - 「高炉の温度が 2000℃近くとなることを考慮すると、飢渴する可能性が高い」と記載されているが、「飢渴する可能性」がどの程度であるか定量的に示して下さい。また、元素を除去対象とできる根拠を説明してください。
  - 「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」と記載されているが、「希ガスが不純物として金属に混入する可能性」がどの程度であるか定量的に示して下さい。また、元素を除去対象とできる根拠を説明してください。
  - 「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」と記載されているが、「不純物として金属に混入する可能性」がどの程度であるか定量的に示して下さい。また、元素を除去対象とできる根拠を説明してください。
  - 「高炉における還元性雰囲気によって、精錬過程で除去」と記載されているが、「精錬

**過程で除去」される割合を定量的に示した上で、元素を除去対象とできる根拠を説明すること。**

**○ZrTN804D 及び SUS304 について記載されているが、その他の金属も同じ観点でスクリーニングが可能である理由とその根拠を説明してください。**

**⑤ (そもそも) 2 次スクリーニングで化学的性質等で除外する前に放射化計算する理由を説明してください。また、三次スクリーニングの前に二次スクリーニングする理由を説明してください。**

**⑥ 四次スクリーニングにおいて生成比 0.01%未満の元素を除外して問題ない根拠を示してください**

#### 回答 4+更問 4 への回答

##### ①スクリーニング手順の設定に関する類似の事例：

起源元素のスクリーニングの手順の参考事例としては、浅地中処分御安全評価に適用されています下記の事例（出典は表の注 1 参照）があります。

- ・ 放射性物質の選定の考え方で「埋設処分の観点から考慮すべきである半減期 30 日以上の放射性物質とし、希ガス及び生成量の極めて小さいものを除く 170 核種とする。」
- ・ 原子炉構成材料の元素組成については、以下の方法で設定を行った。  
「評価に使用する分析データについては、電気事業者が取得した分析データに加え、新型転換炉「ふげん」の構成材の元素分析データ及び国内外の文献における分析データを使用した。評価に使用した材料別の元素組成設定値を第 3 表に示す。ただし、希ガス元素及び安定同位体が天然に存在しない元素は除外した。」

##### ②中深度処分対象廃棄物の起源元素の選定に適用できる根拠：

ここでは、標準理解のために、具体的な起源元素の選定例として、L2 許可の核種による評価例を示しているものです。実際には、将来の L1 埋設の事業許可で対象とされる核種に基づいて、廃棄確認申請のために、起源元素の選定を行いますので、L1 特有の核種が存在した場合でも対象から漏れることはありません。なお、L2 廃棄体の規制核種の生成源は、炉内の腐食生成物、燃料であり、その核種の生成源は、L1 廃棄物と同様と考えております。

##### ③この設定項目で抜け漏れがないこと、スクリーニングの順番が前後することで評価結果が変わる可能性がないことなど：

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、表 4-1 に理由を示しますように、まず、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（放射化による核種生成後の崩壊、照射による核種は計算の中に含まれる）」、「評価対象核種を生成しない元素」及び「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」は除外し、加えて、「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」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。

なお、最初に、材料共通の条件として、評価対象物（中性子による放射化前のコールド材料が放射化計算の出発点である対象元素となります）に含まれない「放射性同位体」、及びそもそも放射化によっても評価対象核種を生成することのない元素は、その後の三次以降のスクリーニングを行う必要もないことから、初期の段階でスクリーニングを行うものです。

次に、三次以降のスクリーニングは、生成量の評価を材料中に存在し評価対象核種を生成する可能性のある元素に対して行うために、材料の製造工程、化学的性質を考慮したスクリーニングを行い、生成した量の全体に占める割合を踏まえて、放射化計算の入力条件とすべき起源元素として選定する手順としています。

表 4-1 スクリーニングの理由など

スクリーニング	理由・根拠	適用除外
一次:初期の起源元素でない放射性同位体	照射されていない炉内構造物の材料が放射化計算の出発点であるため、この材料に含まれない放射性同位体は起源元素から除外できる。 <sup>1)</sup>	天然に広く存在する U, Th は除外しない
二次:評価対象核種を生成しない元素	全元素に対して、中性子照射によって生成する核種を計算評価 <sup>2)</sup> し、放射化によっても評価対象核種を生成しない元素は除外できる。	—
三次:材料の精錬時などに揮散する可能性が高いと判断できる元素	構造物の材料の製造過程の熱処理（精錬など）、化学処理（スラグ化、還元処理）によって受ける温度以下の沸点の元素は揮散、又は化学反応でスラグ等に移行させて除去されるため、除外できる。また、希ガス元素も除外できる <sup>3)</sup> 。	添加される元素
四次:評価対象核種の総生成放射能に対する寄与が小さい元素	評価対象核種を生成する元素でも、その生成量が非常に少なく、総生成放射能に対する寄与が小さい元素は、除外できる。	生成比 0.01 % <sup>3)</sup> 以上の元素は除外しない。

注 1 放射化計算の対象元素から放射性同位体を起源元素から除外している例としては、  
「補足説明資料 9 廃棄物埋設施設における許可基準規則への適合性について第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)線量評価パラメータ・パラメータ根拠集-2021 年 6 月 日本原燃株式会社の添付資料 2 総放射能の設定について」において、  
「評価に使用した材料別の元素組成設定値を第 3 表に示す。

ただし、希ガス元素及び安定同位体が天然に存在しない元素は除外した。」と同様な適用を行っている。

また、この原子炉構成材料の元素組成は、中深度処分対象廃棄物である。

注 2 放射化計算条件は、計算コード：ORIGEN2.2，断面積ライブラリ：PWR41J33，照射時間：30y，中性子フルエンス率： $4.72 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}/\text{s}$ ，元素量：各元素とも等量（0.001kg）として、評価対象核種（ここでは、仮に  $^{14}\text{C}$ ， $^{36}\text{Cl}$ ， $^{60}\text{Co}$ ， $^{63}\text{Ni}$ ， $^{90}\text{Sr}$ ， $^{94}\text{Nb}$ ， $^{99}\text{Tc}$ ， $^{129}\text{I}$ ， $^{137}\text{Cs}$ ，全  $\alpha$  を評価対象核種とした例で示している）

注 3 生成比のスクリーニングの判断指標は、放射化計算結果の放射能濃度又は濃度比の最終

的な値の有効数字が 2 桁であると想定し、これに推定存在濃度レベル評価の不確定性を考慮（1 桁を想定）し、生成比 0.01 %未満（有効数字 5 桁以下に影響）とした。

また、標準には示しておりませんが、第 3 次スクリーニングにおける除外理由とその根拠に関して、表 4-2 に示します。

表 4-2 第 3 次スクリーニングの根拠

第 3 次スクリーニング項目	元素を除去対象とできる根拠
スラグとして除去 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	<p>化学反応による除去（反応式 <math>(S+3(CaO) = (CaS)+O)</math>、及び <math>(2P+3(CaO)+5O=3(CaO \cdot P_2O_5))</math> で示されるようにスラグ-メタル間の化学反応）のため反応が続きます。</p> <p>なお、炭素鋼の例となりますが、副原料である石灰石（5~10%の配合<sup>1)</sup>）の Ca（アルカリ金属類）に着目して、製鋼過程でスラグに移行せず鉄鋼中に残存する Ca は 0.0001%以下<sup>1)</sup>、SUS304 で 0.0004%<sup>2)</sup>であることを踏まえると、スラグに移行せず金属中に残る元素の残存率（製鋼中の Ca/原料中の Ca）は、9E-5~2.6E-4 程度と考えられることから、十分低減できると考えます。</p>
低沸点による揮発 高炉の温度が 2000℃近くとなることを考慮すると、飢渴する可能性が高い	<p>材料によって、製造工程で受ける温度条件は異なるが、材料が製造中に受ける温度に対して元素の沸点（Rb：688℃~Sb：1,635℃）<sup>3)</sup>を比較することで、微量成分である沸点の低い元素の揮散の有無が確認できます。</p> <p>また、鉄鋼の場合、高温での処理時間も高炉で約 1,500~2,000℃、約 6~8 時間に加え、転炉で約 1,200~1,600℃、30 分程度、SUS の精錬に適用されている VOD（Vacuum Oxygen Decarburization）で約 1,650℃、50~100 分程度<sup>4)</sup>、と脱気に対しての十分な時間が掛けられています。</p> <p>さらに、転炉に当たる SUS 及びジルカロイの溶解・精錬工程では、真空脱気又は Ar 吹込みによる脱気操作も加えられ、より脱気を容易にしています。</p>
希ガス 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 <sup>5)</sup>	<p>化学的に不活性なガス物質であり、溶鋼に溶解しないとして、溶存ガスや介在物の分離浮上を促進するためのバブリングガスとして多量に使用されていることから金属に混入する可能性は低い。</p> <p>また、希ガスである Ar の炭素鋼への溶解度を評価した結果（<math>1.569E-8cm^3-Ar/cm^3-Fe(1580^\circ C)</math>）<sup>6)</sup>を踏まえると、鉄鋼中の存在量は、3.6E-10 %程度であり、存在量としては無視できるレベルと考えられます。</p>
希少元素 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	<p>希少元素（ルテニウム Ru）の白金族鉱物（Ru の主な産出源となる鉱物）及び地殻中の存在濃度の例を下表に示しますが、主に白金族鉱石に含まれて、採掘される Ru は、その鉱石中の濃度も低く、微量元素として存在する地殻中の濃度は、さらに低いことから、SUS などの原料に含まれる不純物（制限値は最も低い U で 3.5 ppm）として混入する濃度も同様に低いと考えら</p>



	れます。						
	<table border="1"> <tr> <td>白金族鉱石<sup>7)</sup></td> <td>SUS304 分析<sup>2)</sup></td> <td>地殻<sup>8)</sup></td> </tr> <tr> <td>0.18~57.75 ppm</td> <td>&lt;1 ppm</td> <td>0.01 ppm</td> </tr> </table>	白金族鉱石 <sup>7)</sup>	SUS304 分析 <sup>2)</sup>	地殻 <sup>8)</sup>	0.18~57.75 ppm	<1 ppm	0.01 ppm
白金族鉱石 <sup>7)</sup>	SUS304 分析 <sup>2)</sup>	地殻 <sup>8)</sup>					
0.18~57.75 ppm	<1 ppm	0.01 ppm					
還元性雰囲気による除去 高炉における還元性雰囲気 によって、精錬過程で除去	<p>化学反応による除去（炭素による熱還元 Fe：</p> $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{高炉(過剰還元)} \rightarrow \text{転炉(部分酸化)} \rightarrow \text{粗鋼}$ <p>フェロアロイ(Fe-M 合金, M : Ni, Cr, Si, Mn)：</p> $(\text{Fe},\text{M})\text{O}_x \rightarrow \text{電気炉} \rightarrow \text{粗 Fe-M 合金}$ <p>脱硫：<math>(\text{CaO}) + [\text{S}] = (\text{CaS}) + [\text{O}]</math> 又は <math>(\text{CaO}) + [\text{S}] + [\text{C}] = (\text{CaS}) + \text{CO}</math> のため、反応物質が十分であれば反応が続きます。</p> <p>また、鋼質の向上を図るためには、精錬過程における溶鋼の脱酸、脱硫管理が重要で管理されており、溶鋼中の酸素濃度は脱酸、脱硫後で 1E-3~4E-3 % 程度との文献<sup>9)</sup>もあり、十分に除去されると考えられます。</p>						

注 1 鉄鋼の原料：社団法人日本鉄鋼連盟, <https://www.jisf.or.jp/kids/shiraberu/03.html>

及び JSS 日本鉄鋼認証標準物質一覧, 日本鉄鋼連盟 標準化センター

注 2 「ふげん」発電所の主要構造材元素組成分析, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.9, No.4, p.405~418 (2010)

注 3 化学便覧 第六版 日本化学会編

注 4 ステンレス鋼便覧-第 3 版- ステンレス協会編

注 5 希ガス元素を起源元素から除外している例としては、

「補足説明資料 9 廃棄物埋設施設における許可基準規則への適合性について第十条 廃棄物埋設地のうち第四号(廃止措置の開始後の評価)線量評価パラメータ-パラメータ根拠集-2021年6月 日本原燃株式会社の添付資料 2 総放射エネルギーの設定について」において、「評価に使用した材料別の元素組成設定値を第 3 表に示す。ただし、希ガス元素及び安定同位体が天然に存在しない元素は除外した。」と同様な適用を行っている。

注 6 北大 石井ら, 溶融鉄中のアルゴン溶解度と添加元素効果, 科学研究費助成事業 1994 年度

注 7 世界の PGM 資源の探査・開発・技術動向の調査・情報提供事業, 国際鉱物資源開発協力協会、平成 16 年 3 月

岸本, 資料 ソ連の白金鉱床, 地質調査所月報 (第 26 巻第 3 号)

Platinum-Group Elements in Sulphide Minerals, Platinum-Group Minerals, and Whole-Rocks of the Merensky Reef (Bushveld Complex, South Africa): Implications for the Formation of the Reef, JOURNAL OF PETROLOGY, Vol.48, No.8, 2007

注 8 中川, レアメタルテキスト：(2) 白金族元素, 資源地質, 60(2), 2010

注 9 材料設計技術研究所, 鋼中の酸素濃度と酸素分圧について, 平成 25 年, 及び LD-AOD 法によるステンレス鋼製造法, 鉄と鋼, 67(1981)

#### G.1.1.2 起源元素の選定の前提条件 (略) (標準からの抜粋)

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。)
  - 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。)

**補足 1 : 二次スクリーニングにおける放射化計算条件の設定根拠**

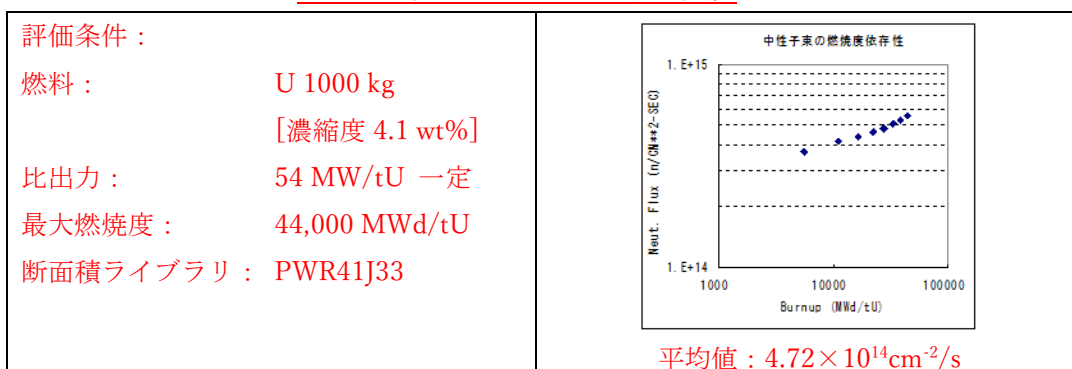
**表 G.3—放射化計算による核種生成の有無の評価例（二次スクリーニング評価）（標準抜粋）**

注記 2 放射化計算条件は、計算コード：ORIGEN2.2, 断面積ライブラリ：PWR41J33, 照射時間：30y, 中性子フルエンス率： $4.72 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}/\text{s}$ , 元素量：各元素とも等量 (0.001kg)

注記 2 に示します計算条件は、下記のような考え方で、中性子フルエンス率が比較的高い PWR プラントの条件で、起源元素のスクリーニング用の放射化計算条件を設定しています。

- ① 断面積ライブラリ：PWR41J33  
ORLIBJ33 のライブラリで JENDL-3.3 に基づいた ORIGEN2 用断面積ライブラリです。  
<https://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j33/j33appli/orlibj33.html>
- ② 照射時間：30y  
40 年間稼働（設備利用率を約 80%）を想定した正味照射時間は、約 30 年間に相当するものです。
- ③ 中性子フルエンス率： $4.72 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}/\text{s}$ ,  
表 4-3 の燃料の燃焼条件での燃焼時に発生する中性子フルエンス率の変化を踏まえ、平均値で設定したものです。

**表 4-3 中性子フルエンス率の変化**



- ④ 元素量は、放射化計算による核種生成の有無を評価する目的としていることと、4 次スクリーニングで材料別の各元素の推定存在濃度レベルを基に生成比を評価するため、一律 1 g での評価としています。

**補足 2 : 有効数字 2 桁と 3 桁での違い**

「有効数字は2桁で、かつ切り上げて評価値を決める」ことで規定していますので、このレベルに影響を与えない「生成比 0.01 %未満」でスクリーニングすることで問題はないと考えております。

なお、有効数字3桁とした場合でも、3桁目を切り上げて有効数字2桁とした結果で保守的にカバーされると考えます。

また、親元素は全103元素から始めており、かつ、規制される申請核種を生成しない元素は、1次スクリーニングを行わず、対象に加えて放射化計算を行っても起源元素の対象から落ちることになりますので、結果としては同じになると考えております。

**補足3：どの程度揮散するのか**

沸点以上の温度を長時間加えることで、揮散すると考えておりますが、揮散量までを示すことは難しいため、表4-4に示す元素に関しての鉄鋼中の存在量から、低沸点の元素は、ほとんど揮散すると考えられます。

表 4-4 鉄鋼中の存在量

	Rb	Sr	Sb	Te	Cs	Ba
SUS304 <sup>1)</sup>	0.00003 %	0.00042 %	0.0012 %	<0.00001 %	<0.000005 %	0.00002 %
高純度鉄 3種 <sup>2)</sup>	—	—	<0.0002 %	<0.0001 %	—	—

出典1：「ふげん」発電所の主要構造材元素組成分析，日本原子力学会和文論文誌，Vol.9, No. 4, p.405～418 (2010)

出典2：JSS 日本鉄鋼認証標準物質一覧，日本鉄鋼連盟 標準化センター

**補足4：金属も同じ観点でスクリーニングが可能である理由**

下記の回答に示しましたスクリーニングの基本的な考え方は、汎用的な考え方を示しており、特定の材料（ジルカロイ、SUS）に限ったものではないと考えております。ただし、影響の程度は、個別審査で確認することになると考えます。

前述の回答部分の再掲

そのスクリーニングの考え方は、下記に理由を示しますように、まず、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（放射化による核種生成後の崩壊、照射による核種は計算の中に含まれる）」、「評価対象核種を生成しない元素」及び「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」は除外し、加えて、「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」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。

なお、最初に、材料共通の条件として、評価対象物（中性子による放射化前のコールド材料が放射化計算の出発点である対象元素となります）に含まれない「放射性同位体」、及びそもそも放射化によっても評価対象核種を生成することのない元素は、その後の三次以降のスクリーニングを行う必要もないことから、初期の段階でスクリーニングを行うものです。

次に、三次以降のスクリーニングは、生成量の評価を材料中に存在し評価対象核種を生成する可能性のある元素に対して行うために、材料の製造工程、化学的性質を考慮したスクリーニングを行い、生成した量の全体に占める割合を踏まえて、放射化計算の入力条件とすべき起源元素として選定する手順としています。

**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、次のように理論計算法の種類によって、使い分けを行うことになります。

－ 点推定法の場合

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（代表値）で設定する次の方式：

- ・ 代表分析値： 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（対象物を個別に評価する場合は想定される）
- ・ 分析データ群： 元素成分の分析データ群の平均値、最大値を適用する方法（対象廃棄物グループを評価する場合は想定される）

－ 区間推定法の場合

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次の方式：

- ・ 分析データ群の代表分析値： 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、この分布から平均値、最大値を適用する方法
- ・ 分析データ群： 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、この分布からランダムサンプリングを適用

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。

ただし、それぞれの評価する放射能（最大放射能濃度及び総放射能量）に対して、表 5 に示します元素データを使用します。

**表 5 適用する元素データ**

	最大放射能濃度	総放射能量
点推定法	・ 元素分析データ群の最大値	・ 元素の代表分析値 ・ 元素分析データ群の平均値
区間推定法	・ 元素分析データ群の最大値 ・ 元素分析データ群の分布からランダムサンプリングによる設定（信頼上限値）	・ 元素分析データ群の分布からランダムサンプリングによる設定（平均値） ・ 元素分析データ群の分布から平均値

**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。
<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。 <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。 <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。			

### 補足：換算係数法の元素成分条件の設定方式と設定例について

換算係数法を用いる場合の元素成分条件の設定方式については、附属書表 G.9 の組み合わせの例に示すように、分析データ群と濃度分布による設定の組み合わせとなります。表 G.9 注 c) 「換算係数法を用いる場合は、設定した濃度分布によって各元素の代表値（起源元素ごと）を設定する。」の具体例としては、平均放射能濃度（総放射能濃量）を求める計算例として附属書 J.2.2.1 b) に分析データの平均値を設定する例があります。

なお、換算係数法の元素成分条件の設定方式について、附属書 J は平均放射能濃度を評価する例を示しているため代表値で設定していますが、標準では代表値、ランダムサンプリングどちらでも設定可能としており、最大放射能濃度の評価では入力条件をランダムサンプリングとすることを考えています。

### 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。

**更問7.(1) 質問に対して、検出困難元素の特性として「化学的性質」と「放射化金属等の原鉱物及び製錬工程における熱及び化学的影響」を踏まえる旨回答いただいておりますが、具体的例示は「放射化金属等の原鉱物及び製錬工程における化学的影響」のみに留まっています。このうち、「化学的性質」「放射化金属等の原鉱物及び製錬工程における熱的影響」として踏まえるべき内容を具体的に示してください。**

(質問の背景) 検出困難元素の濃度分布を評価するに当たり、実機構成材の元素分析データ以外の、鉱物、岩石などからの試料の標準偏差を適用する場合に、その標準偏差が実機構成材のものと同等であることは、分布の妥当性を示すために重要です。鉱物、岩石などからの試料については、「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。」とありますが、「検出困難元素の特性などを考慮した種類」の判断基準が示されておらず、妥当性を判断出来ないための質問です。

**更問7.(2) 説明で3点以下の測定点しかないものや平均値しかないものは外されていたと思いますが、色々な機関で測定された値をあつめて評価してはいけない理由はありません。測定点数が少ないことが、除外の理由として妥当と考える根拠について説明してください。**

**回答7(1) + 更問7.(1) への回答**

まず、どのような特性を考慮に入れるかに関しては、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<sup>1)</sup>」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  $(S+3(CaO)=(CaS)+O)$ 、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))

次に、上記の「化学的性質」の考慮すべき内容としては、起源元素の属する周期上の同じ

族としての性質、や製造時に受ける化学反応（酸化・還元、スラグ化）に対する性質があげられます。ただし、検出困難元素の濃度分布評価は、『「同一の元素」又は「化学的性質が類似した元素」』への適用を想定していますが、今回の適用事例及び将来的な適用計画においては、「同一元素」のみでの適用を考えております。

さらに、「放射化金属等の原鉱物及び精錬工程における熱影響」の考慮すべき内容は、放射化金属等の母材となるまでの製造工程で受ける表 7(1)-1 のような温度履歴の影響（図 H.18 及び図 H.19 などから作成）があります。

表 7(1)-1 材料製造工程中に受ける温度履歴

	SUS の場合	ZrTN804D の場合
原材料・銑鉄工程	溶融還元：約 1,500～約 2,000℃	—
溶解・精錬工程	溶銑：約 1,200～約 1,650℃	一次塩化：約 1,000～1,300℃ 真空蒸留分解：約 900～950℃ 真空溶解：約 1,700℃以上
加工工程	熱間圧延：約 1,100～約 1,250℃	鍛造：約 850～950℃ 熱間押出：約 650～880℃

また、標準には示しておりませんが、「炉内構造物として使用されている材料」の分析できた元素濃度分布が示す標準偏差と「鉱物、岩石などからの試料」の元素濃度データが示す標準偏差について、炉内構造物として使用されている材料（SUS）で分析可能であった Mo 及び Nb に関して、下図 7(1)-1 (Mo の例) のように比較しており、標準偏差では、「鉱物、岩石などからの試料」の方が小さく、検出下限値以下の元素濃度分布に適用する設定する標準偏差としては、分布をより狭く評価することとなるため、過小評価になる分布とはならないと考えられます。

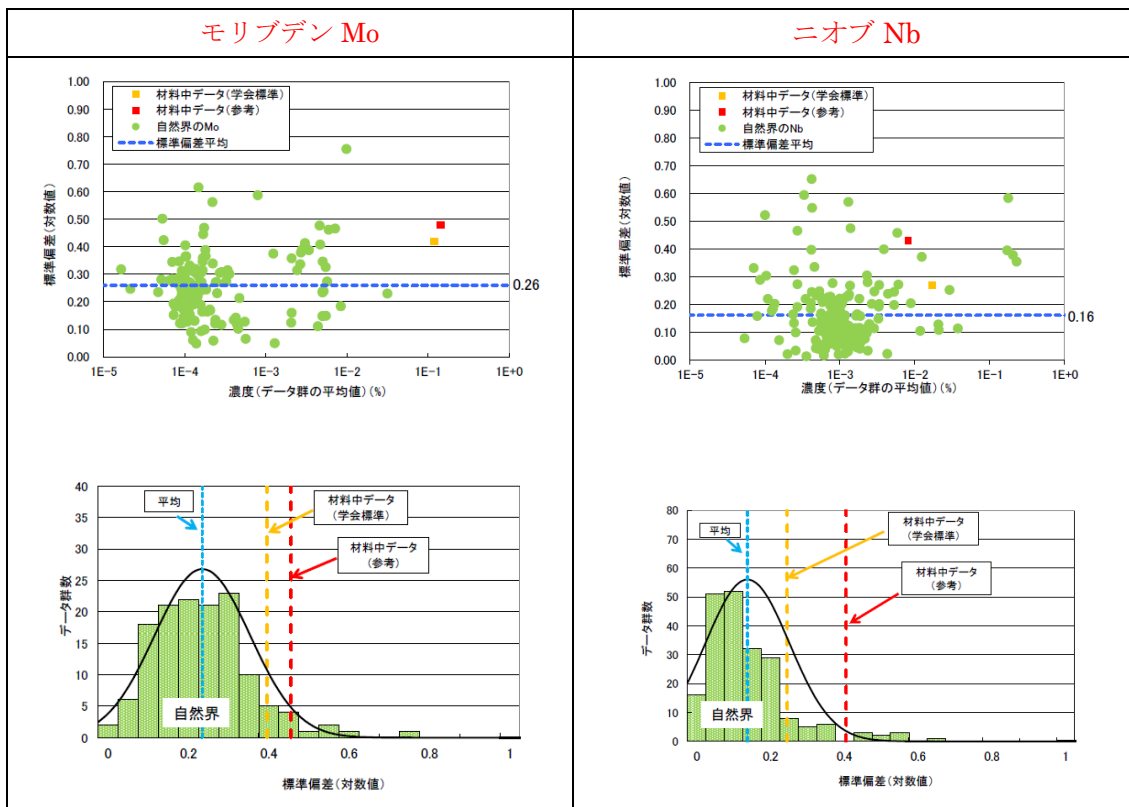


図 7(1)-1 自然界の物質と材料との分布の標準偏差の比較

注記 「材料中データ (参考)」は 8 件の一般文献で収集した SUS304 の元素データ

出典 北海道電力株式会社ほか, “平成 25 年度 検出困難元素の濃度分布評価について”, 平成 26 年 7 月

**補足：同一元素に対する適用に関して**

- ① 「化学的性質が類似した元素」への適用は、現状、具体的にはありません。全て、同一元素に対しての適用を想定しています。
- ② 他の金属などに関する熱的影響に関しては、個別審査で確認するものと考えております。
- ③ 材料製造工程中に受ける温度履歴の出典は、以下に示す通りです。

表 7(1)-2 温度履歴の出典

	SUS の場合	出典
原材料・銑鉄工程	溶融還元：約 1,200 ～ 約 2,000°C	焼成工程：約 1,200°C～岩佐ロータリーキルンパンフレット
		フェロニッケル製造工程：約 1500°C：大太平洋金属株式会社 フェロニッケル製造工程パンフレット
		溶解工程：～約 2000°C：鉄を作るプロセス，化学工学会夢化学委員会
溶解・精錬工程	溶銑：約 1,500～約 1,650°C	溶銑：約 1500°C：ステンレス鋼製造技術の進歩 -新日鉄技法第 351 号 (1994)
		精錬：～約 1,650°C：ステンレス鋼便覧第 3 版(1994)
加工工程	熱間圧延：約 1,100～1,250°C	ステンレス鋼圧延技術の進歩 鉄と鋼 第 59 年(1973) 第 13 号



**回答 7(2) + 更問 7. (2) への回答**

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。

なお、各データ群間の比較（同等性、正規性）を行うため、この統計処理を行う上で、3 点未満のデータ群は評価が出来ませんので除外しているもので、データ群の全体統合が可能と評価された段階では、ご指摘のように、収集した評価は可能であると考えます。

ただし、次の回答 8 に示しましたように、データ群のデータ数が 20 点を未満の場合は、データの少なさによるばらつきも大きい状態のため、標準偏差の決定に使用するデータ群としての適用は避けています。

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。

**更問 8. 質問に対して、「標準偏差の同等性確認：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」と回答いただいておりますが、同等性は…同等性を確認するという文章になっており、質問の回答になっていません。標準偏差が同程度であることを判断するための具体的な判断基準を示してください。**

また、必要なデータ数に対する質問に対して、「必要なデータ数は標準には示していませんが、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。」と回答いただいておりますが、これも質問の回答になっていません。必要なデータ数の妥当性を確認する方法と判断基準を提示してください。

#### 回答 8 + 更問 8 への回答

まず、「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**差異が小さいこと**を確認する。（下図及び下表参照）

対数正規性の確認： **正規性の検討と、平均値・標準偏差が近似的に推定出来る正規確率紙<sup>1)</sup>上のプロットが、おおむね直線関係にあること。**

注 1) 正規確率紙による方法，獣医科学と統計利用，No.2，3-6(1978)

分布型のはなし—正規分布型—，獣医科学と統計利用，No.11，33-37(1978)

確率分布の適合度の図式判定法について，土木学会論文集，No.357，243-246(1985)

この「標準偏差が同程度であること」を判断するための具体的な判断基準は、次に示します図 H.4 の標準偏差の産地、種類ごとの比較及び表 8-1 の標準偏差の平均値の比較によって、総合的に判断します。

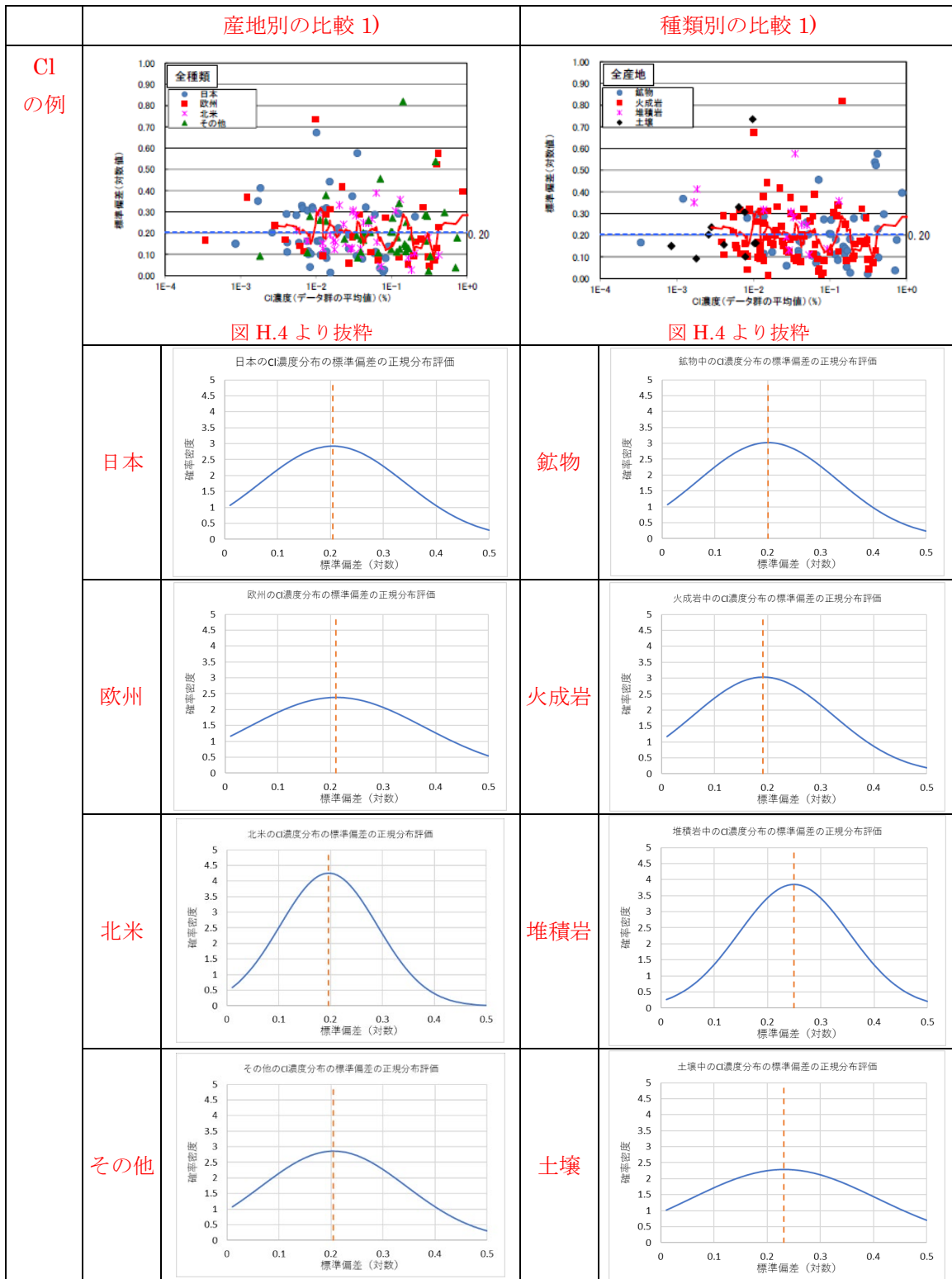


図 H.4—Cl の全データ群の元素濃度分布及び標準偏差の濃度依存性（産地・種類別の全体図）  
 (分類区分ごとの標準偏差の分布図は、事業者から提示された平均値と標準偏差のデータを使用して作図)  
 出典 北海道電力株式会社ほか，“平成 25 年度 検出困難元素の濃度分布評価について”，平成 26 年 7 月

注 1 分散分析の結果では、各グループ間での有意差なしと評価されている。

表 8-1 塩素、トリウム及びウランのデータ群の標準偏差及び標準偏差の平均値

元素	塩素 (Cl)	トリウム (Th)	ウラン (U)
データ群の標準偏差 (データ数が 5 点以下のデータ群を 除いた場合)	0.01~0.82 (0.01~0.46)	0.01~0.51 (0.03~0.44)	0.02~0.63 (0.03~0.63)
標準偏差の平均値	0.22	0.22	0.19
区分 (産地/種類) ごとの 標準偏差の平均値	0.19~0.25	0.15~0.24	0.19~0.24

出典 北海道電力株式会社ほか, “平成 25 年度 検出困難元素の濃度分布評価について”, 平成 26 年 7 月

次に、「必要データ数」に関してですが、標準には示していませんが、図 H.4 及び表 8-1 の評価には、統計値 (標準偏差) が算出できるデータ数として 3 点以上のデータ群によって評価を行っています。

また、最終的には、上記確認を行った上で、検出困難元素の濃度分布の設定に必要なとなります標準偏差を決定するための基礎データとする各データ群の必要なデータ数としては、下図 (図 H.21) に示しますデータ数の増加による統計値の安定性を評価した結果から、標準には規定していませんが、データ数が 20 点以上のデータ群だけを、検出困難元素の濃度分布の評価用の標準偏差の設定に適用しています。

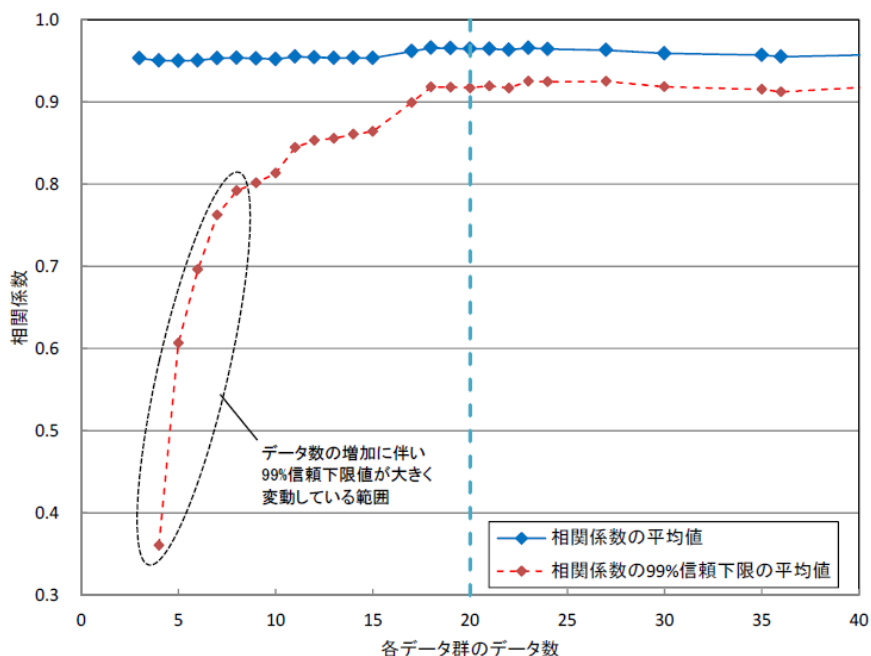


図 H.21—Cl の各データ群の相関係数の平均と相関係数の 99%信頼下限値の平均との関係

**H.3.2 元素濃度データの適用性の確認 (標準からの抜粋)**

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、H.3.1 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 (対数值) 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)。
- － Cl 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)。
- － 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、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)。

**補足：直線関係にあることの判定基準**

正規確率紙による正規性の判断は、例 (参考文献) に示していますように、定性的な評価によるものです。

そのため、「直線関係にあることの判定基準」についての文献はないのではと考えます。もし、定量的判断を必要とするならば、正規性の検定などによる方法もあります。

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、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。」とありますが、「鉱物、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。

更問9. 回答いただいた表 H.3 は、例であって、根拠ではありません。元素濃度の代表性を「鉱物、岩石などからの試料を適切に代表している」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」とするにあたって、根拠となったデータや評価事例を提示してください。

(質問の背景) 元素濃度の代表性を「鉱物、岩石などからの試料を適切に代表してい

る」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」としたことの根拠について質問したものです。

**回答 9+更問 9 への回答**

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。

この評価指標の区分としました「産地」及び「種類」ですが、下記の観点で分類した指標となっています。

産地： 可能な限り広範な産地から元素分析データを収集して影響を把握するため、日本及び大陸別で分類した収集対象とした。

種類： 可能な限り広範な環境条件から元素分析データを収集して影響を把握するため、各種材料の原材料である鉱物に加え、岩石（火成岩、堆積岩）及び河川などの堆積物、土壌を収集対象とした。

具体的には、標準には示しておりませんが、鉱物、岩石などからの試料を適切に代表している点に関しまして、産地に関しては、表 9-1[1]に示しました広範囲の分類区分のデータを収集することで、種類に関しても、表 9-2[1]に示しました広範囲の分類区分のデータを収集することで、代表性を確保しています。

なお、この考え方を踏まえて、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。

出典[1] 北海道電力株式会社ほか，“平成 25 年度 検出困難元素の濃度分布評価について”，平成 26 年 7 月

表 9-1 産地の分類区分表

分類1	分類2	分類3	分類4*	分類5			
日本	日本	日本	(都道府県)				
			岩手県	北上山地			
			熊本県	雲仙			
			群馬県	南牧川流域			
			高知県	足摺岬エリア			
			秋田県	秋田鉱山			
			大分県	大崩山(土岩)			
			大分県	大崩山(環状岩)			
			長野県	高遠町北部地域			
			兵庫県	神戸市			
			北海道	虻田鉱山			
			北米	カナダ	Abitibi緑色岩地帯	(北領外部火山地域、並びにOuéville, Val-d'Or, Normétal, Joutel, Selbaie, Matagami, Hunter, Noranda, Bousquet, Gemini-Turgeon及びChibougamauの各地域)	
					オンタリオ州	(Clergue Township, Midlothian Township, McCool Township, German Township, Bartlett-Geike Township, サトウワリー)	
ケベック州	Pontiac 郡						
サスカチュワン州	Cantuar						
ニューファンドランド州	Lewis Hills						
ニューブランズウィック州	南西部						
ブラスエースト準州							
ブリテンシュコロンビア州	Telegraph Creek area						
ユーコン準州	(南西部、西部)						
米国	アイオワ州	Sioux					
	アイダホ州	American Falls					
	アラバマ州						
	イリノイ州	hardin					
	ワイコンシン州	(Calumet, Iron)					
	ウェストバージニア州	(Brooke, Ohio, Wayne)					
	オクラホマ州	Birch Lake area					
	カリフォルニア州	(サンフランシスコ郡, Eureka Valley, Clear Lake地域)					
	カンザス州	(Friederich, Finn, OZ, Poersch)					
	ケンタッキー州	Fulton					
	コロラド州	(El Paso郡, Jefferson郡)					
	ジョージア州	ヒエモント					
	テキサス州	(Llano郡、西部)					
	テネシー州						
	ニューメキシコ州	(Santa Fe, サンファン郡)					
	ニューヨーク州	(Rockland, Genesee)					
	ノースカロライナ州	Surry					
	バージニア州						
	バーモント州	(Grand Isle, Chittenden, Grand Isle)					
	フロリダ州	Hillsborough					
	ペンシルバニア州						
	ミシガン州	(Alger, Dickinson, Keweenaw, Greenstone Flow)					
	ミネソタ州	(Merritt hole, Arko hole, Duluth)					
	メイン州	Sagadahoc					
	ユタ州	(Bingham District, 南西部, Uintah郡, トウール郡)					
ワイオミング州	(ラミー, Iron Mountain, Leucite Hills)						
ワシントン州	Mount St. Helens						
北太平洋(沿岸)	ファン・デ・フカ						
欧州	アイスランド	アイスランド		アイスランド	アイスランド		
	イタリア	モンテネーポル・アディジェ州		Valsugana			
		トリエンテ州		Cima d'Asta-Caoria			
		アブルッツ州		グラン・サツ			
		カンパニア州		カンパニア			
		イタリヤ		(ストロンポリ, Vulcano島, Lipari島)			
	ギリシャ	ギリシャ		(サントリーニ島, シロス島)			
	グリーンランド	グリーンランド		南グリーンランド			
	スイス	スイス		Mont Russelin			
	スウェーデン	スウェーデン		ストックホルム県			
	スペイン	アンダルシア州	アルメリア県				
		ウエルバ	Neron				
		カナリア諸島州	グラン・カナリア島				
	ロシア	イルクーツク州	スリュジャンカ				
		ザハ共和国	ヤクーチヤ				
	フィンランド	フィンランド南部	フィンランド南部				
	ポルトガル	ポルトガル中央部	ポルトガル中央部				
	大西洋	大西洋	Iberian Abyssal Plain				
	テレニア海	テレニア海	テレニア海				
	その他	イラン	イラン	イラン北西部			
		インド	マドラス州	バーブク郡			
			マドラス州	セーラム県			
		アンドラプラデーシュ州	クリシュナ県				
インドネシア		インドネシア	Barito				
インド洋		インド洋	南西インド洋海嶺				
オーストラリア		ニューサウスウェールズ州	(ローズヒル, ストラトフォード)				
ケニア		ケニア	ナクル=ナイバシヤ地域				
ジャマイカ		ジャマイカ	ジャマイカ				
スリナム		スリナム	スリナム				
チリ		Los Lagos Region	Fresia				
		Mantos de Oro	Chimberos				
バプアニューギニア		Manus海盆東部					
ハワイ諸島		ハワイ諸島	(オアフ島, カウアイ島, ハワイ島, マウイ島)				
ブラジル		ブラジル	ブラジル				
ベネズエラ		ベネズエラ	ベネズエラ				
ペルー		ペルー	イカ県				
ロシア(極東)		クリル諸島	クリル諸島				
		カムチャツカ	(Gredmy Ridge, 東カムチャツカ火山帯)				
西インド諸島		西インド諸島	西インド諸島				
太平洋		太平洋	(less deep rift valley, Guatemala Slope)				
大西洋		大西洋	(MAR-Kane, MAR-FAMOUS)				
中国		湖南省	南岳衡山				
		江蘇省	清浦区				
		浙江省	麗水市				
		遼寧省	北票市				
		甘肅省	(Yindongzi-Daxigou, Tongmugou)				
		江西省	銀山(Yinshan)鉱床				
南アフリカ共和国		Koffiefontein	Koffiefontein				
南極		セルロンターネ山地	セルロンターネ山地				

\*1 分類5の情報が無く、かつ、分類4のみが異なる産地については分類4内に括弧書きで示した。  
出典；北海道電力株式会社ほか，“平成25年度 検出困難元素の濃度分布評価について”，平成26年7月

表 9-2 種類の分類区分表

分類1	分類2	分類3	分類4*1	分類5
鉱物	イノケイ酸塩鉱物	角閃石グループ	(普通角閃石、パロウ閃石、バーガス閃石)	
		輝石グループ	エジリン輝石	
	テクトケイ酸塩鉱物	柱石		
		長石	(長石、アルカリ長石、斜長石、玻璃長石)	
	ネソケイ酸塩鉱物	かんらん石		
	フィロケイ酸塩鉱物	雲母	(雲母、金雲母、黒雲母)	
		緑泥石グループ		
	リン鉱物	ミネット鉱		
	リン酸塩鉱物	燐灰石グループ	燐灰石	
	酸化鉱物	スピネルグループ		
		ルチルグループ	バデレアイト	
		SiO <sub>2</sub> 鉱物	石英	
	炭酸塩鉱物	苦灰石グループ	苦灰石	
	硫化鉱物	輝安鉱グループ	輝安鉱	
		濃紅銀鉱		
	アルミニウム鉱石	ボーキサイト		
	鉄鉱石	褐鉄鉱		
		鉄鉱石		
	火山ガラス			
	鉱床試料			
火成岩	深成岩	gladesville斑れい岩		
		metatonalite		
		アブライト		
		かんらん岩	(かんらん岩、ダンかんらん岩、蛇紋岩化かんらん岩)	
		キンバーライト		
		花崗岩	(花崗岩、黒雲母花崗岩、モンソ花崗岩)	
		花崗閃緑岩	花崗閃緑岩	
			高遠花崗閃緑岩	黒雲母花崗閃緑岩
			角閃石黒雲母花崗閃緑岩	
			黒雲母花崗閃緑岩	
			蛇紋岩	
			深成岩類風化土壌	
			閃長岩	
			閃緑岩	
			斑れい岩	
			斑岩	(斑岩、角閃石黒雲母花崗岩斑岩)
			優白花崗岩	
		火山岩	シヨジョナイト	
	デイサイト			
	テフライト			
	ラタイト			
	ランプロアイト			
	安山岩			
	輝緑岩			
	珪長岩			
	玄武岩			
	玄武岩質安山岩			
	粗面ドレライト			
	粗面岩			
	粗粒玄武岩			
	流紋岩			
	凝灰岩		(凝灰岩、溶結凝灰岩)	
	火山砕屑岩			
	変成岩(交代変成岩)			
	変成岩(広域変成岩)	エクロジヤイト		
		結晶片岩	(結晶片岩、葉状片岩)	
		砂泥質片麻岩		
		千枚岩	変質千枚岩	
		片麻岩		
		緑色岩		
	変成岩(接触変成岩)	珪岩		
		閃緑岩		
		変斑れい岩		
	変成岩	変成安山岩		
		変成玄武岩		
堆積岩	碎屑岩	角礫岩		
		砂岩		
		泥岩	(泥岩、シルト岩、泥灰岩、粘土岩)	
		粘板岩		
	頁岩			
	粘土岩	ペントナイト		
	頁岩			
変成岩(広域変成岩)	角閃岩			
	結晶片岩	(結晶片岩、泥質片岩)		
	片麻岩			
堆積物(河 土壌)	河川堆積物			
	Aiken土壌統			
	Altamont土壌統			
	Holland土壌統			
	Imperial土壌統			
	Kettlemen土壌統			
	Maymen土壌統			
	Merced土壌統			
	Watsonville土壌統			
	チェルノーゼム			
	ラトソル			
	暗栗色土			
	黄色土			
	褐色森林土			
	黒ぼく土			
	砂丘レゴソル			
	砂土			

\*1 分類5の情報が無く、かつ、分類4のみが異なる種類については分類4内に括弧書きで示した。北海道電力株式会社ほか、「平成25年度 検出困難元素の濃度分布評価について」、平成26年7月



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（標準からの抜粋）

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。

更問 10. 質問に対して、「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」と回答いただいておりますが、標準 H.2.2 に示された方法では判断できなかったため質問したものです。

「化学的性質が類似」していることを求めています。どのような化学的性質が類似している必要があるのかを具体的に示してください。また、類似していることは何をもちて判断するのも併せて示してください。

### 回答 10+更問 10 への回答

まず、化学的性質が類似した元素濃度データの利用に関する選定方法ですが、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。

なお、上記に示します「化学的性質が類似」とは、起源元素の属する周期上の同じ族としての性質、や製造時に受ける化学反応（酸化・還元、スラグ化）に対する性質があげられません。

ただし、標準では検出困難元素の濃度分布評価は、『「同一の元素」又は「化学的性質が類似した元素」』を適用範囲としていますが、実際の適用事例及び将来的な検出困難元素の濃度分布評価への適用計画においては、「同一元素」に対する適用のみを考えております。

このため、「類似していること」に対する判断基準は示しておりません。

<p><b>H.2.5 化学的性質が類似した元素濃度データの利用（標準からの抜粋）</b></p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>－ 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。</li> <li>－ 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。</li> <li>－ 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。</li> </ul> <p>（略）</p>
<p><b>H.2.2 元素濃度データの収集方法（標準からの抜粋）</b></p> <p>鉱物、岩石などからの試料の元素濃度データは、文献などから収集することができる。ただし、元素濃度データを収集する場合には、次の考慮が必要である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) <b>データ収集方針</b> 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。</li> <li>b) <b>適用除外データ</b> 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。</li> <li>c) <b>データ群の作成</b> 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。</li> </ul>
<p><b>H.2.3 元素濃度データの適用条件（標準からの抜粋）</b></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> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) <b>標準偏差の同等性の確認</b> 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。</li> <li>b) <b>対数正規性の確認</b> 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</li> </ul>

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）

1 1. 「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。

**更問 1 1. Cl, Th, U 以外の、①鉱物中或いは部材中の含有量の少ない元素、及び②製造管理により部材中の含有範囲の狭い元素についてもこの手法が適用出来ることを実測例をもって示してください。**

**回答 11+更問 11 への回答**

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。

なお、この「検出困難元素の濃度分布の評価」は、検出困難な元素が対象 (特に、検出限界値しか得られなかった元素) に対して適用するものです。このため、「製造管理により部材中の含有範囲の狭い元素」に関しましては、主成分元素と考えられますので、適用は想定しておりません。

また、部材中の含有量の少ない元素として、標準で例示しました下記の評価対象核種 (附属書 G 参照) の条件では、起源元素のうち、「Cl, Th 及び U」が検出困難元素としての適用対象元素であり、その他の元素は、検出できる可能性のある元素のため、「Cl, Th 及び U」が対象となります。

評価対象核種 :  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , 全  $\alpha$

将来的に、申請核種が決まった段階で、新たな起源元素が検出困難元素となった場合は、「Cl, Th 及び U」と同じ手順で文献データを収集した上で、適用性を判断することとなります。

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。

**更問 12.** 回答には、「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。」とありますが、表 I.6 に示されたジルカロイ-4 中の不純物成分元素としての Cu について、正規分布を採用した理由は、対数正規分布では不整合が生じたためという消極的なものに読み取れます。Cu の分布が実際に正規分布している根拠がない限り、正規分布の採用が妥当かどうか判断できませんので、正規確率紙へのプロット結果など、具体的な根拠を示してください。

(質問の背景) 対数正規分布が基本的考え方であるならば、それを正として、規格の制限値を超えるもの(ただし、材料メーカーが規格値を超える原料を使用するとは考えづらい)があれば、それを除外(対数正規分布の裾部分の切り落とし)した分布にする等の対応をすればよいのではないかと考えから質問したものです。

また、実際の分析データに基づいて分布型を変更することについては理解できますが、分布型変更の場合には根拠が必要であると考えますので質問しています。

#### 回答 12+更問 12 への回答

「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いため、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：
 

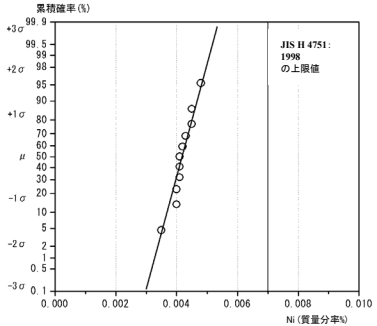
分析データを収集し、附属書 D の表 D.4 の基本的考え方に示す元素の濃度分布の基本形状(正規分布又は対数正規分布)を適用して分布形状の評価(平均、標準偏差、正規性)を進める。
- ② 入力データ設定用分布の設定段階：
 

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、附属書 I の表 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)
	実際の元素分析データの分布	 <p>濃度範囲が非常に狭く (<math>\pm 3\sigma</math>でも 2.5 以内)、上図の正規確率紙上でも、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 (標準からの抜粋)**

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。

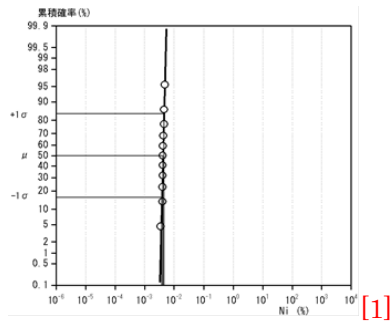
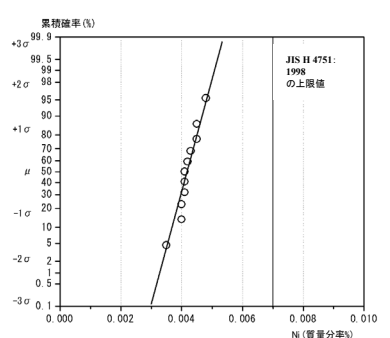
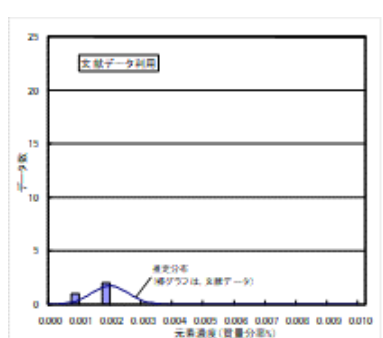
**注記** 検出が困難な元素に関する濃度分布の評価方法は、附属書 H を参照。

**回答 12 に対する追加質問 (検討チーム会合中のご質問)**

対数正規分布を採用しない理由が記載されていない。対数正規分布では不都合があることをグラフ等で示すようにすること。

基本的考え方とは異なる分布形状を適用した Ni 及び Cu に関して、基本的考え方に沿って評価した結果と、分析データの実態を踏まえて決定した分布形状の評価結果に関して、表 12-1 に示します。

表 12-1 Ni 及び Cu の対数正規性と元素分析データに基づく分布の決定

		Ni	Cu
基本的な考え方に基づく、分布形状の評価	対数正規分布による評価	 <p>[1]</p>	<p>—</p> <p>(3 点のデータ (0.001%, 0.002%, 0.002%) で、かつ 2 点と同じ濃度のため、対数正規確率図が作成できない)</p>
	分析結果の範囲	<p>収集データ数：11 点 (分析値)</p> <p>平均濃度：<math>4.2 \times 10^{-3} \%</math></p> <p>濃度範囲：<math>3.5 \times 10^{-3} \%</math> ~ <math>4.8 \times 10^{-3} \%</math></p> <p>(約 1.4 倍)</p>	<p>収集データ数：3 点 (文献値)</p> <p>平均濃度：<math>1.6 \times 10^{-3} \%</math></p> <p>濃度範囲：<math>1.0 \times 10^{-3} \%</math> ~ <math>2.0 \times 10^{-3} \%</math></p> <p>(約 2 倍)</p>
	判断	<p>分析結果の濃度範囲が非常に狭く (最大/最小で 1.4)、数桁での範囲の分布評価に適用性を示す対数正規分布ではなく、実数軸範囲での正規分布の評価の方が適切と考えられた。</p>	<p>濃度範囲も狭く、ジルカロイ 4 の JIS 規格 (JIS H 4751) の Cu 制限値である 0.005% 以下に対して、対数正規分布を当てはめると「平均+3σ」の濃度で 0.0053% と材料規格の制限値を超えてしまう分布となり、対数正規分布ではない方が適切と考えられた。</p>
分析実績を踏まえた入力用成分条件 (濃度分布) の設定	正規分布による評価 (標準から抜粋)	 <p>(表 I.6 より抜粋)</p>	 <p>(図 I.5 より抜粋)</p>
	判断	<p>濃度範囲が非常に狭く、正規確率紙上でも、正規性を示す。</p>	<p>濃度範囲が狭く、正規分布の方がより適切。</p>
	適用分布	正規分布	正規分布

出典 1 事業者より提示を受けた対数正規確率紙プロット図

## 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。

更問13.(1) 回答は、最大放射能濃度を評価する場合の濃度比の設定に算術平均を適用するとありますが、附属書K(濃度分布評価法によって決定する場合の計算例)のK.1.4b)においては、「1)廃棄物の総放射能を評価する場合」は「廃棄物の総放射能を評

価する場合には、放射能濃度の算術平均値と廃棄物の総質量とを用いる。」、**「2) 最大放射能濃度を評価する場合」は「最大放射能濃度を評価する場合には、計算値における正のばらつきを考慮し、放射能濃度の幾何平均値及び標準偏差を用いる」と規定しています。矛盾しているように読めるため、これらの関係を説明してください。**

また、回答で示された  $CI$  及び  $Nb$  は決定係数（相関係数の2乗）が0.5以上ですが、図 I.8 の  $Sr$ 、 $I$ 、 $Cs$  及び  $Np$  は決定係数が0.5未満です。データの充足性を確認する観点から、図 I.8 の残りの元素（ $C$ 、 $Ni$ 、 $Sr$ 、 $Tc$ 、 $I$ 、 $Cs$ 、 $Np$ ）についても分析値との比較図を示してください。

**更問 13. (2)**

①図 I.8 (濃度比法) では、分析値が  $Co-60 : 3.3E+12Bq/t$ 、 $CI-36 : 1.4E+7Bq/t$ 、 $Nb-94 : 4.4E+7Bq/t$  に対して、計算値がそれぞれ2オーダー程度高くなり、保守的となっておりますが、資料 1-1 の39ページ(点推定法)には、分析結果  $Co-60 : 3.3E+12Bq/t$  に対して計算結果が  $Co-60 : 3.4E+12Bq/t$ 、分析結果  $Ag-108m : 2.5E+14Bq/t$  に対して計算結果が  $Ag-108m : 2.6E+14Bq/t$  とほとんど保守性がありません。これらの違いはどこにあるのか説明してください。

②図 I.8 では分析データが1点しか示されていませんが、サンプリングの不確かさや分析の不確かさを踏まえても計算によって求めた核種比が実測によって求めた核種比と同等あるいは保守的であることを説明してください。

**更問 13. (3) 回答で示されている文献は、難測定核種と測定核種という2つのパラメータが二変量対数分布に従っている という前提条件で、難測定核種の放射能を評価しているものです。**

2つのパラメータが二変量対数分布に従っていると判断できる条件(必要条件)が示されている文献等を提示してください。

**更問 13. (4) 幾何平均値による濃度比の適用条件を明確にして欲しい(例えば、濃度比算出に用いたサンプル値全体の放射能量(あるいは放射能濃度)に限る。):**

(補足: 幾何平均濃度比を適用した埋設施設での廃棄体の管理に関する条件の問い)

**回答 13(1) +更問 13(1) への回答**

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能量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)

なお、濃度比法と濃度分布評価における最大放射能濃度の評価方法に関しましては、表 13(1)に示しますように、評価用の係数の設定と濃度分布からの濃度の設定によって適用す



る平均値に差異があります。

表 13(1)-1 最大放射能濃度を超えていないことを確認するための放射能濃度の決定方法

		濃度比法の場合	濃度分布評価法
評価方法の概要		放射化計算によって評価対象核種と Key 核種の濃度比を設定し、Key 核種の放射能濃度に濃度比を乗じて評価対象核種の放射能濃度を決定する。	放射化計算によって評価対象核種の放射能濃度分布を評価し、この放射能濃度分布を使用して、評価対象核種の放射能濃度を決定する。
利用 する 対象	評価係数	濃度比には「算術平均」を適用する	—
	放射能濃度分布	—	分布の平均と標準偏差を適用する
放射能濃度の決定		Key 核種濃度（非破壊外部測定又は、放射化計算結果を適用）に算術平均濃度比を乗じて評価する	放射能濃度分布を評価した計算結果の最大値を用いて放射能濃度を評価する

#### 回答 13(2) + 更問 13(2) への回答

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 13(2)-1(1)～(3)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。

ただし、Tc-99、I-129、Np-237 は分析結果が検出下限値となっています。

さらに、比較に適用した元素濃度の分析値は、図 13(2)-1(1)～(3)（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。

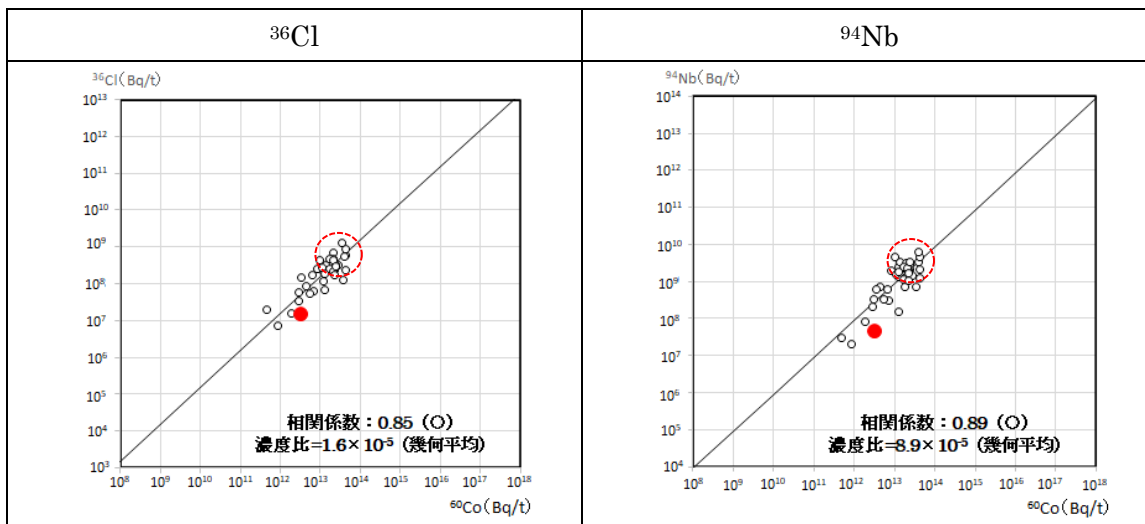


図 13(2)-1(1)–ZrTN804D (BWR チャンネルボックスの本体) の評価対象核種及び Key 核種 ( $^{60}\text{Co}$ ) の散布図 (放射化計算結果) から抜粋

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

注記 1  $^{36}\text{Cl}$  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)

注記 4 相関係数の右の( )内は相関関係の t 検定を行った結果で、○ : 相関関係が認められる。× : 相関関係が認められない。

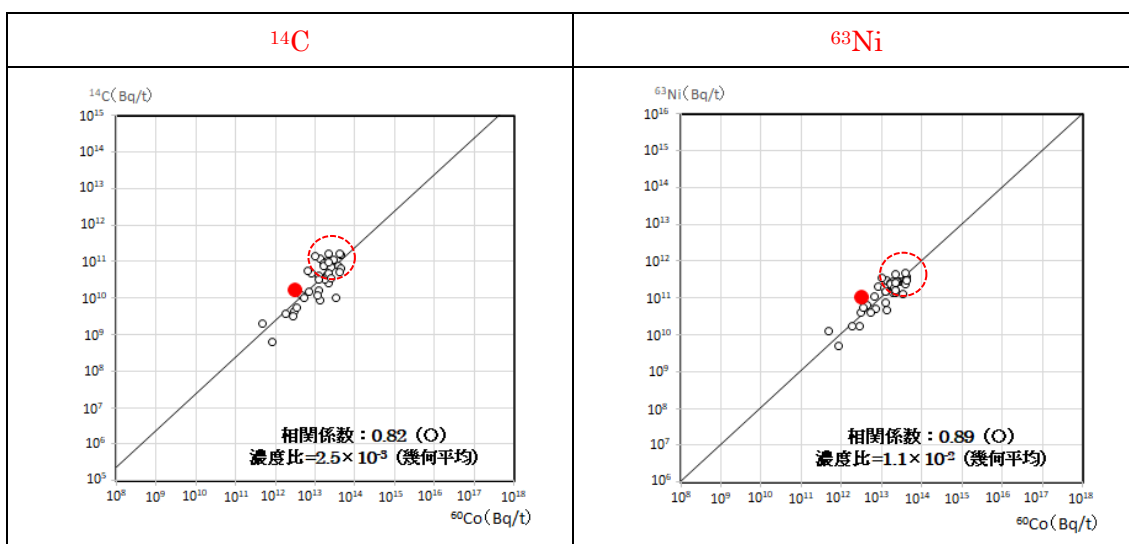


図 13(2)-1(2)–ZrTN804D (BWR チャンネルボックスの本体) の評価対象核種及び Key 核種 ( $^{60}\text{Co}$ ) の散布図 (放射化計算結果) から抜粋

(●は分析値を示す。Co-60 :  $3.3\text{E}+12\text{Bq/t}$ , C-14 :  $1.6\text{E}+10\text{Bq/t}$ , Ni-63 :  $9.9\text{E}+10\text{Bq/t}$ )

注記 1  $^{14}\text{C}$  及び  $^{63}\text{Ni}$  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 C-14 及び Ni-63 の起源元素である N 及び Ni は元素の分析結果が得られている。

注記 4 相関係数の右の ( ) 内は相関関係の t 検定を行った結果で、○ : 相関関係が認められる。× : 相関関係が認められない。

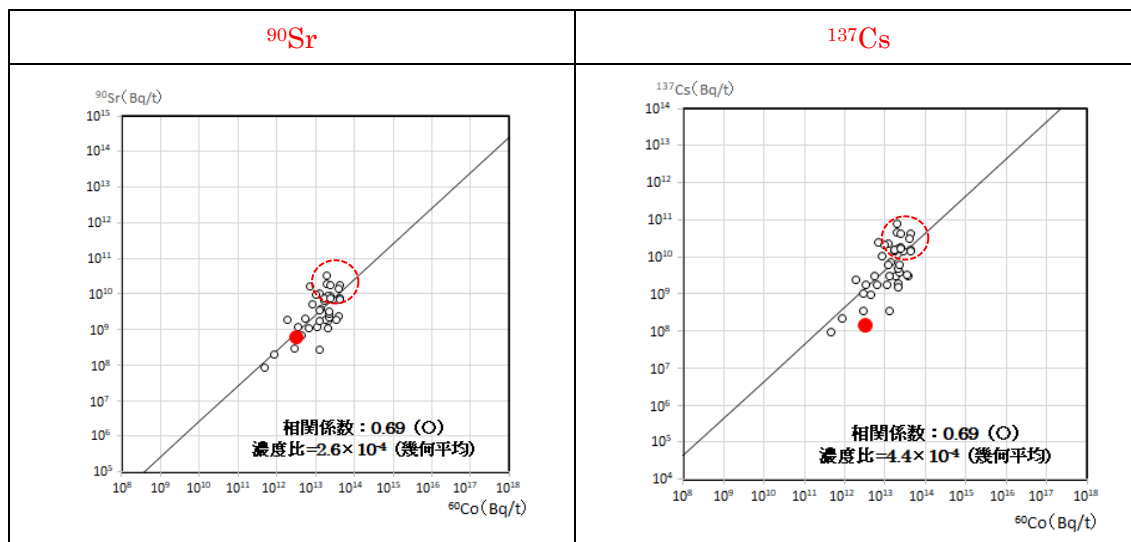


図 13 (2) -1(3)-ZrTN804D (BWR チャンネルボックスの本体) の評価対象核種及び Key 核種 ( $^{60}\text{Co}$ ) の散布図 (放射化計算結果) から抜粋

(●は分析値を示す。Co-60 :  $3.3\text{E}+12\text{Bq/t}$ , Sr-90 :  $6.0\text{E}+8\text{Bq/t}$ , Cs-137 :  $1.4\text{E}+8\text{Bq/t}$ )

注記 1  $^{90}\text{Sr}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  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 相関係数の右の ( ) 内は相関関係の t 検定を行った結果で、○ : 相関関係が認められる。× : 相関関係が認められない。

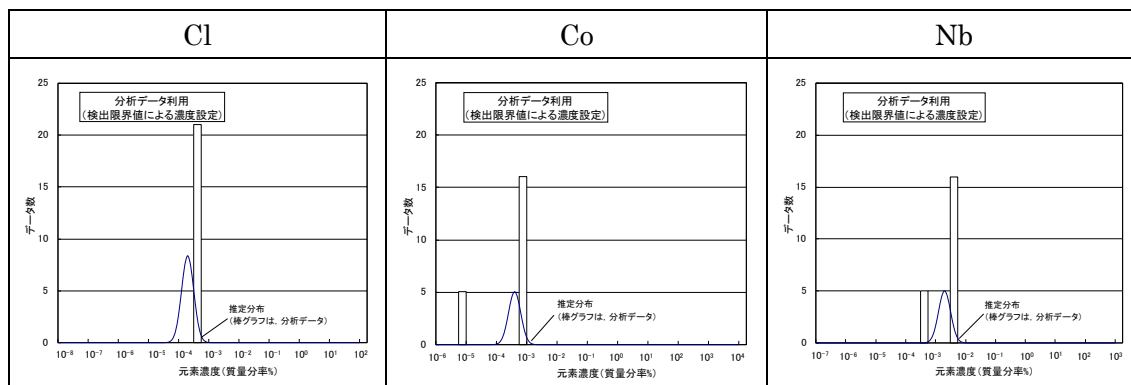


図 I.5-ZrTN804D の元素分析データ及び濃度分布条件設定結果から抜粋

なお、附属書 F で示しております点推定法による計算結果と分析結果の比較と、上記の附属書 I に示しました区間推定法による計算結果と事業者から提供を受けました分析結果

の比較は、下記のように比較対象としている評価の内容が異なりますので、差異が出ているものです。

- ① 計算方法の妥当性確認（附属書 F の点推定法による計算結果と分析結果の比較）
- ② 放射能評価における保守性／不確かさ（附属書 I の区間推定法による計算結果と分析結果の比較）

この両者の違いに関して、表 13(2)-1 に示します。

表 13(2)-1 計算方法の妥当性確認の評価結果と放射能評価上の保守性／不確かさの違い

		計算方法の妥当性確認	放射能評価における保守性／不確かさ
評価方法		評価対象物の同一位置における計算結果と採取サンプルの分析結果の比較（保守性は入っていない）	区間推定法による放射能濃度の評価結果の不確かさの評価（実際の適用例で保守性が入っている）
計算コードの検証		ORIGEN、MCNPなどの計算コードの開発段階でのベンチマーク試験結果などによって確認	同左
適用手法		点推定法	区間推定法
入力データ	元素条件	評価対象物の品質管理材で、かつこの元素分析で分析結果が得られた元素から生成する核種のみでの比較を行う	評価対象物と同一材質の全起源元素の分析データの分布（検出下限値がある場合は、これを考慮して設定するため、バイアスが加わる）からのランダムサンプリング
	中性子条件	評価対象物の評価位置（ローテーションがあれば、その移動条件の詳細を含める）における中性子フルエンス率、中性子スペクトル及びこれらから設定した放射化断面積	①評価対象物を分割した区間（軸方向、径方向）ごとに評価した中性子フルエンス率、中性子スペクトル（放射化断面積）を評価 ②放射化物の評価位置をランダムサンプリング（移動があれば、パターン化して設定）し、①でマッピングされた分布から中性子条件を選択して設定
	照射条件	評価対象物が実際に受けた照射時間（ローテーションがあればその移動条件、照射停止時間も含める）	評価対象物の照射時間の実績分布及び代表的な照射パターンを適用した照射条件からのランダムサンプリング
評価結果の妥当性又は保守性などの評価		チャンネルボックスの Co-60 の例： 分析値： $3.3 \times 10^{12}$ Bq/t 計算値： $3.4 \times 10^{12}$ Bq/t	濃度比法適用した場合： 元素データの ND 値によるバイアスに加え、評価した平均放射能濃度としては、99%信頼上限値まで約 1.7 倍のばらつきを有する。

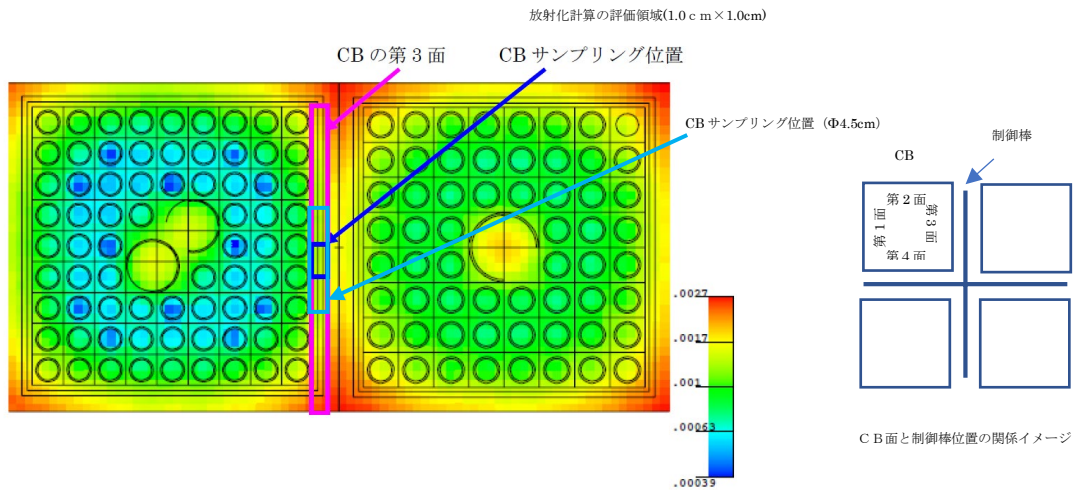
### 更問 13. (2) ②への回答

(1) サンプリングの不確かさ

チャンネルボックスからのサンプリングにおいては、任意の位置から採取できる専用の

サンプリング装置を設計、製作し、CBのシリアル番号（炉内位置、使用履歴）を確認した上で、所定の面と高さから円盤状のサンプル（Φ4.5 cm）を採取しており、採取位置のズレは mm 単位です。また、放射化計算で放射能濃度を評価した領域はサンプリング位置の中心 1.0 cm×1.0 cm で実施しています。図 13(2)-2 にサンプリング位置と MNCP にて解析した熱中性子束分布の計算例を示します。

図に示すようにサンプリング位置における熱中性子束分布は平坦であり、サンプルの大きさ（Φ4.5 cm）と計算の評価領域（1.0 cm×1.0 cm）の違いによる影響は無視できます。



(数値は1粒子あたりに規格化された値)

図 13(2)-2 MNCP にて解析した熱中性子束分布の計算例：9×9 燃料  
(事業者から提供されたデータ)

(2) 分析の不確かさ

核種分析においては、試料調整時の秤量、定容(希釈)、核種計測において不確かさが含まれます。チャンネルボックスの Co-60 分析において、拡張相対不確かさ (相対不確かさ×包含係数 2) は 15 %以下の実績があります。

したがって、表 13(2)-1 に示しました計算値/分析値の誤差 3 %には、約±15 %程度の不確かさが含まれますので、計算値/分析値は-10 %~+21 %程度の範囲内での 3 %誤差と言えます。

**回答 13(3) + 更問 13(3) への回答**

**(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。

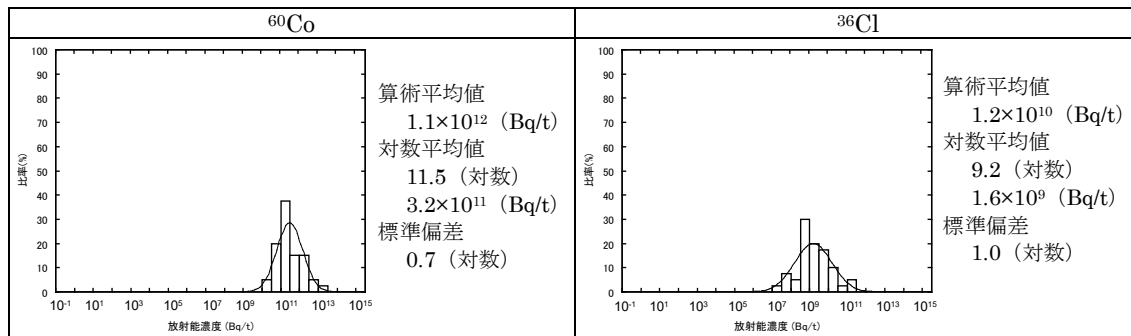
(例 チャンネルボックスであれば、1 体だけでなく全チャンネルボックス、シュラウドであれば、切断片でなくシュラウド全体)

**(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：図 13(3)-1 参照）において放射能濃度の分布を示してあり、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。)

図 13(3)-1 射能濃度分布評価法の例



**(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」<sup>1)</sup>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、かつ双方の核種間の相関関係を利用した分布モデルであり、次式で示されますように、2つの正規分布を示す変数の間で相関関係がある場合の分布で扱うモデルです。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left(\frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(x-\mu_1)(y-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right)\right)$$

ここで、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$  は変数  $x$ 、 $y$  の平均値、 $\sigma$  は変数  $x$ 、 $y$  の分散、 $\rho$  は変数  $x$ 、 $y$  の相関係数である。

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>2)</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)-2 に示します。

注 1 二変量正規分布及びその解析手法を利用して、評価している例としては、下記があります。

- 海底地殻変動観測の統計的な精度評価手法,海洋情報部研究報告 第 53 号 平成 28 年 3 月 1 日
- L20002, 放射性廃棄物処分におけるベントナイト層の透水係数の合理的な品質管理手法の提案－地球統計学手法の適用性に関する検討－, 電力中央研究所, 2021/03

- 稲田, CTA 大口径望遠鏡初号機の光学性能最適化に向けた分割鏡測定とその配置の検討, 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻, 平成 29 年 1 月
- 八巻, 巻き込み 2 変量正規分布に従う位相スペクトルをもつ 2 信号間の位相限定相関関数の統計的性質, 計測自動制御学会 東北支部 第 294 回 研究集会, 2015
- 森地, 情報提供システム評価のための交通行動分析手法に関する研究, 交通工学 Vol30, No3, 1995

注 2 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)

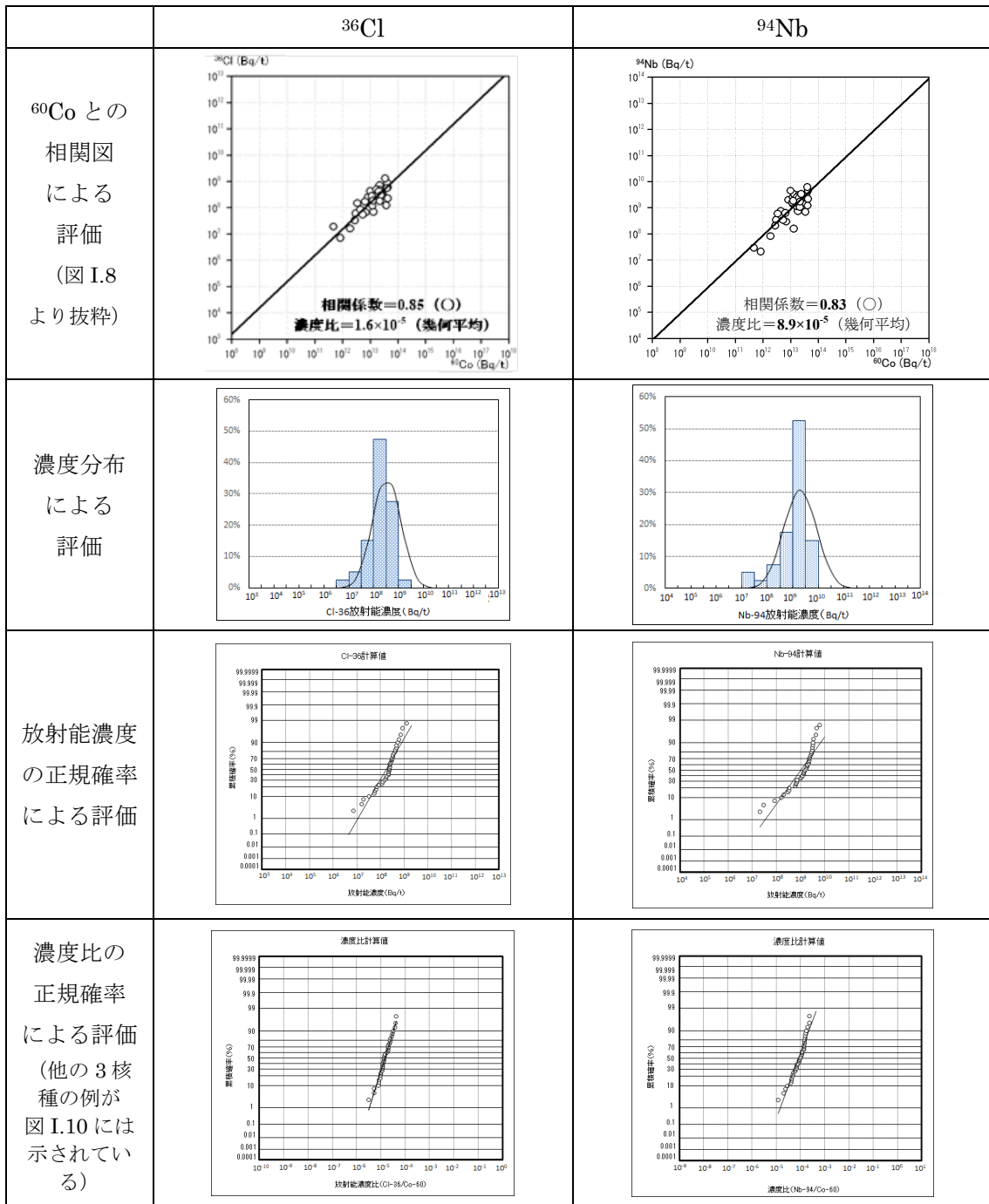


図 13(3)-2 相関性及び対数正規性を示す図の例

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  $^{60}\text{Co}$  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

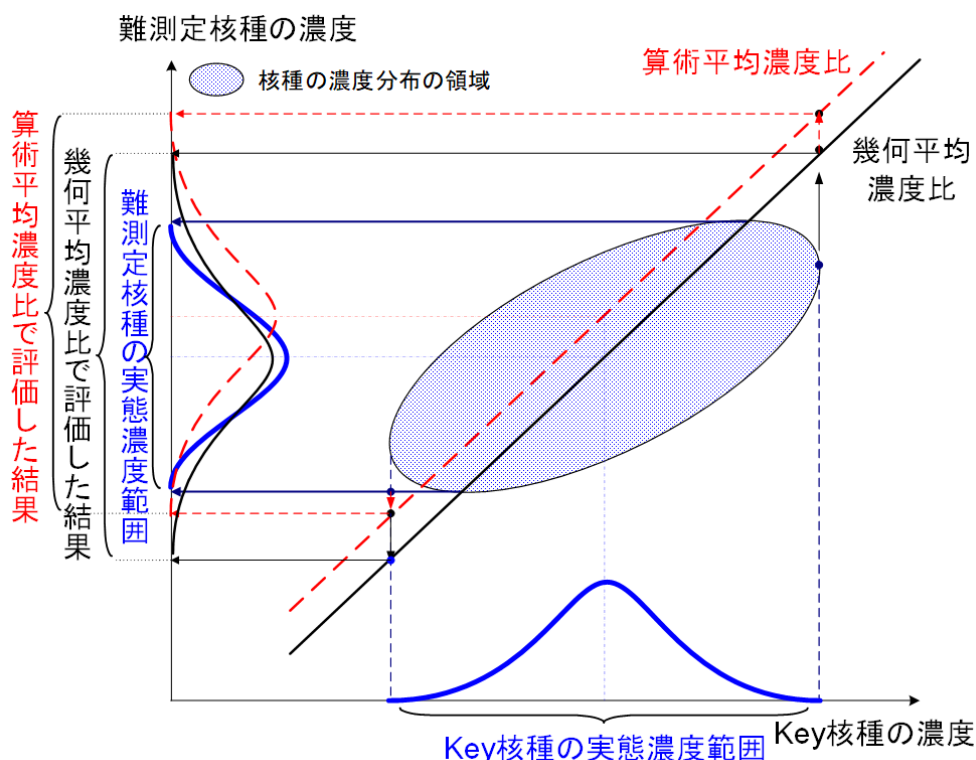


図 13(4)-1 難測定核種の放射能濃度の評価に適用する算出式による差異のイメージ

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。

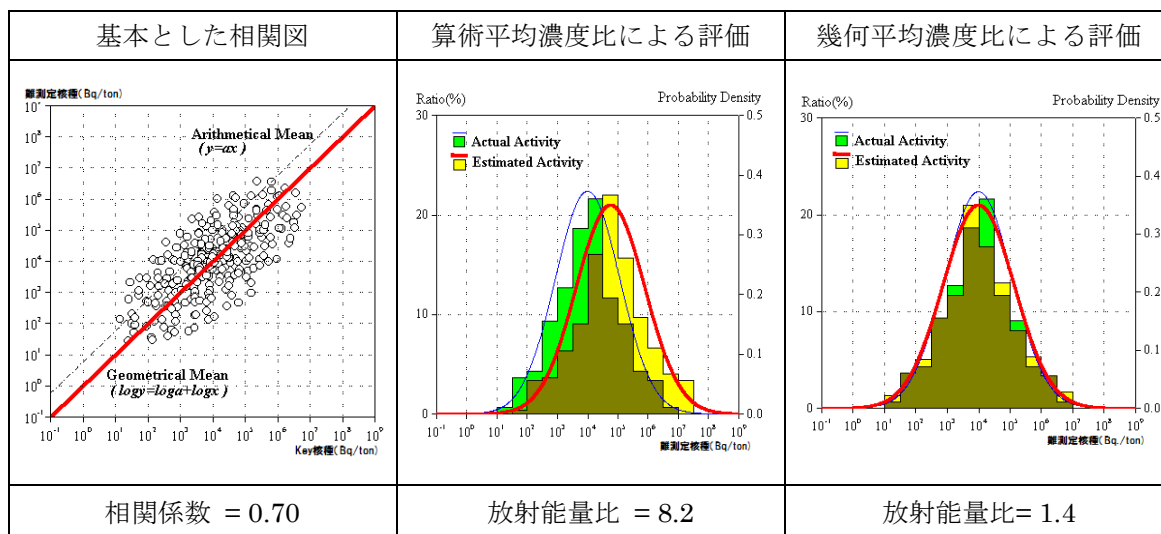
表 13(4)-1 算術平均濃度比と幾何平均濃度比による評価の比較

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：放射エネルギー比=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エネルギー（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エネルギー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)

**回答 13(4)に対する追加ご質問（検討チーム会合中のご質問）**

濃度比法を使用した場合の不確かさとして、ばらつきはどこまで許容できるか。

回答

「ばらつき」は、最大放射能濃度の評価に対して必要になります考慮事項です。

この点に関して、回答 13(3)の図 13(3)-1 に示しています評価対象核種と Key 核種の濃度比ばらつきを最大値・最小値の範囲で示しますと、Cl-36 で 14 倍、Nb-94 で 38 倍と平均の ±1 桁以内（すなわち、100 倍以内）に入っており、かつ算術平均値に対する最大値のばらつき範囲は Cl-36 で 2.5 倍、Nb-94 で 4.1 倍と算術平均値の +1 桁を超えるものではありません。<sup>1)</sup>

このため、最大放射能濃度の評価に適します濃度比に対する「算術平均値」の適用に加え、スクリーニングレベル（例 1 桁）を適用することで、「ばらつき」を考慮した最大放射能濃度の確認が行えるものと考えます。

注 1) 計算例で最もばらつきが大きい Np-237 でも算術平均値に対する最大値のばらつき範囲は 4.9 倍であった。

**回答 13(4)に対する追加ご質問** (検討チーム会合中のご質問)

放射化計算の充足数として、40 点で良いのか。

回答

放射化計算数の充足度は、40 点といった規定値でなく、計算回数を増やしていった場合の計算結果が示す統計値の安定性 (図 13(4)-3 のように、統計値安定後の濃度比はほとんど変化しない) で評価します。

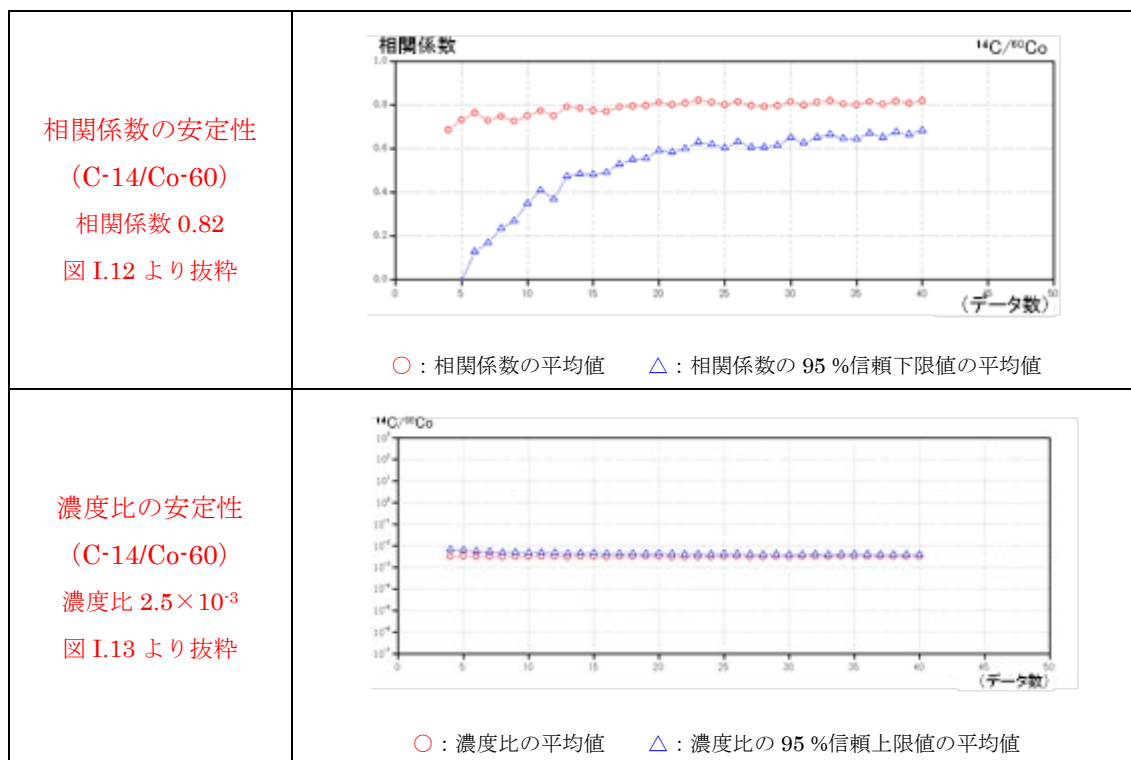


図 13(4)-3 放射化計算数の充足度の統計値による評価

この判断方法は、第 1 回検討チーム回答での「資料 1-1 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」の 37 ページから 38 ページに示しておりますように、相関係数の統計値の安定性によって判断するものです。

これを踏まえ、標準では、附属書 I の図 I.12 に示しています「相関係数の安定性の評価 (放射化計算結果の数 (評価データ数) 及び相関係数の統計値の推移による評価)」で評価していますが、前述の計算例に示しています Cl-36、Nb-94 に関する Co-60 との相関係数の統計値の推移を図 13(4)-4 に示します。

この計算例の図のように、計算数が 30 点を超えた段階で統計値は安定していることから、これ以上計算回数を増やしても、計算結果に変化は見られないことを示しており、計算例では 40 点の計算による評価で確認できることを示しています。

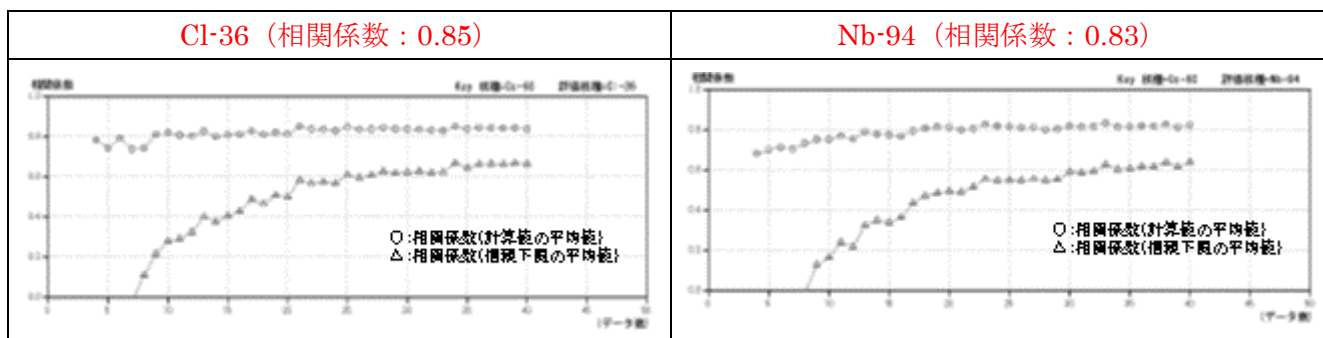


図 13(4)-4 濃度比法における Cl-36 と Nb-94 の計算回数の充足度の評価  
 出典 事業者から提供された推移図を示す。

標準に記載されている内容ではありませんが、必要計算数の考え方としましては、次の考え方が適用できると考えます。

必要計算数の考え方の例として、IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.18 に示されるスケーリングファクタの評価に必要な分析データの充足数に関する引用文献[1]があり、図 13(4)-4 の評価結果（相関係数 0.8 の場合の 100 点のデータまでの統計値の推移を評価した例）などを踏まえ、理論計算の計算数を増し続けても、計算結果の信頼性の指標となる統計値（相関係数などの 95%信頼下限値）の向上率が、図 13(4)-4 のように徐々に低下し、計算数を向上したとしてもその効果が得られなくなっていきます。

このように計算数を増やした場合に得られる計算結果の信頼性の向上率が小さくなり、安定した段階が、計算数が充足したと判断できる数量と考えます。この計算数としての充足性を満たす数量（引用文献ではスケーリングファクタ法における必要データ数）に関して、0.6 以上の相関係数ごとに表 13(4)-2 に示されており、このデータ数の充足性を満たす数量の考え方が、同じ統計値（相関関係を踏まえた濃度比）を利用して評価する理論的方法にも適用することが可能です。

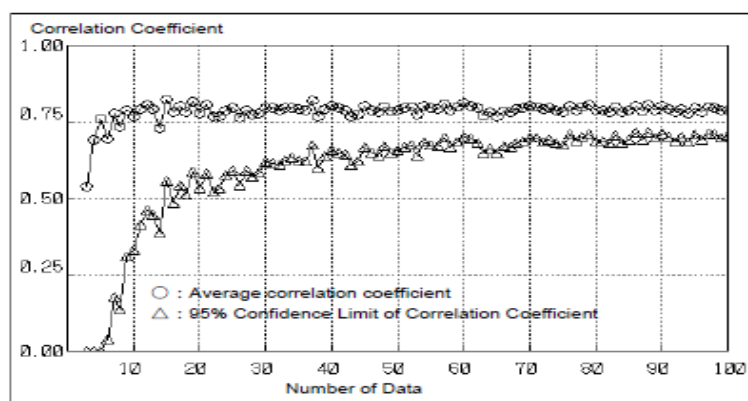


図 13(4)-4 The changes in correlation coefficient with the number of samples (相関係数 0.8 の例[1])

表 13(4)-2 *Required number of data according to the correlation coefficient and based on a 95% confidence limit [1]*

	Correlation Coefficient				
	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
Required number of data	40	35	30	25	20

出典 1 KASHIWAGI M., MÜLLER W., LANTÈS B., “Considerations on the activity concentration determination method for low-level waste packages and nuclide data comparison between different countries”, Safety of Radioactive Waste Management (Proc. Int. Conf. Cordoba, 2000), IAEA, Vienna (2000) 175–179.

**(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。

また、廃棄体の埋設総放射エネルギー及び埋設区画ごとの放射エネルギーも、この管理によって把握され、必要な制限値（区間ごとの総放射エネルギーには許容範囲が設定される）を満足していることを確認することとなります。

この際に、現行埋設施設で言う埋設設備 1 基ごと、又は埋設設備の群単位内に、同一の幾何平均濃度比を適用して平均放射能濃度を評価した同一廃棄物グループが埋設されることを確認することとなります。

○ 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。

**更問 1. 標準 p89 表 G.6 「起源元素の推定濃度レベル例（オーダー）」の推定存在濃度レベルの丸め方は、JIS Z 8401:1999 に示されたどの数値の丸め方とも方法が異なります。分析データや文献値よりも低い値が推定存在濃度レベルになっているものもあります。**

**①推定濃度レベルの数値の丸め方の考え方を、具体例を交えて示してください。また、その丸め方を採用して良い根拠（過去の許認可での実績や、海外事例など）を示してください。**

**②この数値の丸め方が、後のスクリーニング手順に影響を与える可能性があります。この方法を採用して良い理由を示してください。（表 G.6 に示された SUS304 中の Mn については、JIS Z 8401:1999 の B の方法で数値を丸めると、第四次スクリーニングにおいてスクリーニングされずに評価対象元素に残ります。）**

**回答 1+更問 1 への回答**

「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 2 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 8401:2019 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、JIS の例：12.223→12.3）となります。

	放射能濃度	濃度比などの係数
申請値の例	1.0×10 <sup>10</sup> Bq/t	1.0×10 <sup>10</sup>
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

なお、放射性廃棄物に関する過去の申請などに使用されています数値の表示例（丸め方の参考）を表 1 に示します。

表 1 数値の表示例（丸め方の参考）

申請書など	項目	値の表記
廃棄物埋設事業変更許可申請書	最大放射能濃度	1.0×10 <sup>10</sup> Bq/t
廃棄物確認に関する運用要領	スケールリングファクタ	1.0×10 <sup>-10</sup>

また、この数字の丸め方は、最終段階での放射能濃度、評価係数の決定時に適用するもので、評価途中の計算結果、設定値などに関しては、適用せずに使用しております。

なお、表 G.6 に示しております推定存在濃度レベルに関しましては、主成分以外の元素は、ここではオーダーとして 1 及び 5 に区分して元素濃度を設定したものです。

この数字の丸め方の考え方は、JIS Z 8401 の規則 B 中でも、「丸めの幅を 5×10<sup>k</sup>（k は整

数)とした二捨三入・七捨八入も特定の分野で用いられている」との例示があります。(ただし、標準では指数表示のため0ではなく1としています)

注記 ニュージーランドでは現金での支払いの際、スウェディッシュ・ラウンディングと呼ばれる方法で端数処理が行われている。「スウェディッシュ・ラウンディング」とは、十進法で二捨三入や七捨八入と呼ばれる方法である。

具体的な「二捨三入・七捨八入」は、分析データ及び文献データにおいて、まず、平均濃度が得られている値に対して行い、次に検出下限値だけの場合は、その検出下限値に対して行っているものです。

なお、表 G.6 に示しています「成分管理目標値」は、JIS 規格値を参考までに示しているもので、「二捨三入・七捨八入」の対象ではありません。

#### **補足：数字の丸め方の適用内容**

- ・ 推定濃度レベルの設定においては、1桁レベルに区切るのは、設定間隔が大きいので、「二捨三入・七捨八入」として、各桁（1～10）の中央でも区切る方法を適用し、 $1 \times 10^x$ 、 $5 \times 10^x$ の間隔で設定したものです。

なお、標準に示しています数字の丸め方は、

- ・ JIS Z 8401 の B の方法は、放射化計算によって得られた最終評価値（放射能濃度、濃度比など）の数字の丸め方に関して、JIS Z 8401 に準拠して数字を丸める方法を示したもので、評価の途中の段階（スクリーニング段階の設定値など）の数値の設定方法を規定しているものではありません。

#### **6.4 数値の丸め方（標準からの抜粋）**

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。



表 G.6—起源元素の推定存在濃度レベル例（オーダー）

<ZrTN804D>						
元素	分析データ <sup>a)</sup>		文献データ <sup>b)</sup>		成分管理目標値 (質量分率%) (JIS H 4751 <sup>[3]</sup> )	推定存在濃度 レベル (質量分率%)
	データ数	平均値 (質量分率%)	データ数	平均値 (質量分率%)		
C	16 (0)	$1.6 \times 10^{-2}$	4 (2)	$1.0 \times 10^{-2}$	$\leq 0.027$	$1.0 \times 10^{-2}$
N	21 (0)	$3.2 \times 10^{-3}$	10 (1)	$3.2 \times 10^{-3}$	$\leq 0.008$	$5.0 \times 10^{-3}$
O	5 (0)	$1.3 \times 10^{-1}$	5 (0)	$1.1 \times 10^{-1}$	—	$1.0 \times 10^{-1}$
Na	0 (0)	—	0 (0)	—	—	$1.0 \times 10^0$
S	0 (0)	—	1 (0)	$3.5 \times 10^{-3}$	—	$5.0 \times 10^{-3}$
Cl	0 (21)	( $5.0 \times 10^{-4}$ )	0 (0)	—	—	$5.0 \times 10^{-4}$
K	0 (4)	( $1.0 \times 10^{-4}$ )	0 (0)	—	—	$1.0 \times 10^{-4}$
V	0 (0)	—	2 (0)	$2.4 \times 10^{-3}$	—	$1.0 \times 10^{-3}$
Cr	0 (0)	—	18 (0)	$1.1 \times 10^{-1}$	0.07 ~ 0.13	$1.0 \times 10^{-1}$
Mn	0 (0)	—	5 (1)	$1.0 \times 10^{-3}$	$\leq 0.005$	$1.0 \times 10^{-3}$
Fe	5 (0)	$2.1 \times 10^{-1}$	18 (0)	$2.1 \times 10^{-1}$	0.18 ~ 0.24	$1.0 \times 10^{-1}$
Co	0 (21)	( $7.6 \times 10^{-4}$ )	5 (0)	$4.7 \times 10^{-4}$	$\leq 0.002$	$5.0 \times 10^{-4}$
Ni	11 (10)	$4.2 \times 10^{-3}$	3 (1)	$3.5 \times 10^{-3}$	$\leq 0.007$	$5.0 \times 10^{-3}$
Cu	0 (0)	—	3 (0)	$1.7 \times 10^{-3}$	$\leq 0.005$	$1.0 \times 10^{-3}$
Zn	0 (0)	—	0 (0)	—	—	$1.0 \times 10^{-2}$
Zr	16 (0)	$9.8 \times 10^1$	1 (0)	$9.8 \times 10^1$	残部	$9.8 \times 10^1$
Nb	0 (21)	( $3.9 \times 10^{-3}$ )	1 (0)	$1.2 \times 10^{-2}$	$\leq 0.010$	$5.0 \times 10^{-3}$
Mo	0 (21)	$7.6 \times 10^{-4}$	1 (1)	$2.0 \times 10^{-3}$	$\leq 0.005$	$1.0 \times 10^{-3}$
Th	0 (16)	( $1.0 \times 10^{-5}$ )	0 (0)	—	—	$1.0 \times 10^{-5}$
U	1 (20)	( $8.1 \times 10^{-5}$ )	2 (0)	$3.5 \times 10^{-5}$	$\leq 3.5E-04$	$5.0 \times 10^{-5}$

以上