

資料4-1の別紙1、別紙2及び別紙3を以下にまとめた。

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

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)

説明依頼事項	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示して下さい。
--------	--

2022年10月27日

(一社) 日本原子力学会
標準委員会

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）

規定	説明して欲しい内容	点推定法	区間推定法		
			濃度比法	換算係数法	濃度分布評価法
6.1.2.2 元素成分条件 6.1.2.2.1 起源元素の選定方法	<p>① どのように起源元素を選定したか ② その結果、どの起源元素を選定したか ③ 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</p> <p>標準の規定内容</p> <p>6.1.2.2.1 起源元素の選定方法 起源元素は、評価対象とする放射化金属等の種類（材料）ごとに、次の考え方を踏まえ、選定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> — 起源元素は、不純物、又は微量元素として存在していると考えられる元素とともに、評価する材料の化学組成から選定する。 — 評価対象核種（評価対象核種と相関関係をもつKey核種を含む）を生成する元素は、起源元素として抽出しなければならない。 <p>なお、起源元素は、次のステップ（全て又はいずれか）によって、対象からスクリーニングすることができる。</p> <ul style="list-style-type: none"> — 原子炉内で放射化によって生成する放射性同位体は、起源元素から除外できる。ただし、天然に広く存在する放射性同位体は除外しない。 例 Pu などのように材料の放射化によって生成する放射性同位体。 — 評価対象核種を生成しない元素は、起源元素から除外できる。 — 材料の精錬時などに揮散する可能性が高いと判断できる元素は、起源元素から除外できる。ただし、対象物の範囲及び評価によっては、完全に除去されず、放射化計算に考慮した方がよい元素もある。 — 評価対象核種の総生成放射能に対する寄与が小さい元素は、起源元素から除外できる。 	<p>①選定した方法：右記（濃度比法）と同じです。</p> <p>②起源元素の選定結果：右記（濃度比法）と同じです。</p>	<p>①選定した方法：全103元素から下記の4段階のスクリーニング（添付1参照）を実施して申請核種の起源元素を選定します。 附属書Gでは、仮に、「現行L2埋設などの申請核種（¹⁴C, ³⁶Cl, ⁶⁰Co, ⁶³Ni, ⁹⁰Sr, ⁹⁴Nb, ⁹⁹Tc, ¹²⁹I, ¹³⁷Cs, 全α）」を想定して起源元素を選定した例を示しています。 ③スクリーニングの理由と内容：スクリーニングは、申請核種の放射能を評価するための放射化計算に必要なとらない元素を除外し、全103元素から申請核種の起源元素に適切に絞り込むためです。 このために適用します4段階のスクリーニングは、次のとおりです。 一次：U, Th以外の放射性同位体を除いた元素に絞ります。（初期材料は放射化されていないため） （除外元素：Tc, Pm, Bi, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac, Pa, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr：21元素） 二次：評価対象核種を生成する元素に絞ります。（表G.3参照）（評価対象核種を生成しない元素は、起源元素から除外） （除外元素：H, He, Li, Be, B, Mg, Al, Si, P, Ca, Sc, Ti, Ga, Ge, As, Se, Br, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb：47元素） 三次：附属書Hの図H.19に示す製造工程（熱処理：溶解等、化学処理：還元等）を踏まえ鋼材中に残存する元素に絞ります。（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） （表G.5参照、詳細な理由及び根拠は第3回の回答4参照） （除外元素：F, Ne, Ar, Kr, Rb, Sr, Y, Ru, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, La：15元素） 四次：放射能生成比0.01%以上の元素に絞ります。（表G.6, 7参照） （除外元素：C, Na, V, Cr, Mn, Zn：6元素）</p> <p>②起源元素の選定結果：①の結果から、評価対象核種を生成する「N, O, S, Cl, K, Fe, Co, Ni, Cu, Zr, Nb, Mo, Th, U（14元素）」を起源元素として選定しています。</p>	<p>①選定した方法：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>②起源元素の選定結果：左記（濃度比法）と同じです。</p>	<p>①選定した方法：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>②起源元素の選定結果：左記（濃度比法）と同じです。</p>

規定	説明して欲しい内容	点推定法	区間推定法		
			濃度比法	換算係数法	濃度分布評価法
6.1.2.2.2 起源元素の元素成分データの収集方法	<p>① 3つの方法のうちどの方法で収集したか</p> <p>② その方法を選んだ理由</p> <p>標準の規定内容</p> <p>6.1.2.2.2 起源元素の元素成分データの収集方法 評価対象とする放射化金属等の種類、材料を考慮した上で、次のいずれかの方法で起源元素の元素成分データを収集する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 放射化金属等の試料（品質管理用保存試料など）又は同じ材料の種類<small>の試料の化学分析を行う方法。</small> 放射化金属等と同じ材料種類の試料、又は同種の材料種類の試料の化学分析結果の文献データ、材料証明書を収集する方法。 放射化金属等と同じ材料種類に関する材料規格の元素成分データを収集する方法。 	<p>①収集方法：右記（濃度比法）と同じです。</p> <p>②選択理由：右記（濃度比法）と同じです。</p>	<p>①収集方法：3種類の収集方法（化学分析を行う方法、文献データ・材料証明書を収集する方法、材料規格の元素データを収集する方法）を全て適用しています。 その適用方法は、附属書 I の表 I.3 に示しています。</p> <p>②選択理由：幅広く元素分析データを収集するために、全ての手法を適用するものです。 なお、この収集した分析データの中から入力用の元素データを設定するために、次の考え方でデータを選択します。</p> <p>⑤分析データが得られている場合：分析データを選択する。</p> <p>⑥分析データが得られなかった場合：文献データを選択する。</p> <p>⑦主成分元素の場合：分析データに替えて、材料規格値（保守的な評価とするため）を適用してもよいと考えます。</p> <p>なお、上記を踏まえ、CB の例として入力用の元素分布の設定データとして選択した結果を表 I.9 に示しています。</p>	<p>①収集方法：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>②選択理由：左記（濃度比法）と同じです。</p>	<p>①収集方法：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>②選択理由：左記（濃度比法）と同じです。</p>
6.1.2.2.3 起源元素の成分条件の設定方法	<p>① 3つの方法のうちどの方法で設定したか</p> <p>② その方法を選んだ理由</p> <p>標準の規定内容</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> 代表値を設定する方法 収集した起源元素の元素成分データによって、濃度の代表値を設定する。 濃度分布から設定する方法 収集した起源元素の元素成分データの濃度分布を踏まえ、複数の代表的濃度（例平均濃度、信頼上限値など）を設定する。 濃度範囲を設定する方法 収集した起源元素の元素成分データの濃度範囲を踏まえ、最大濃度、最小濃度を設定する。 <p>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。</p>	<p>①選択した設定方法：「代表値を設定する方法」を適用しています。</p> <p>②方法の選択理由：設定した濃度分布、濃度範囲から、保守的となる最大値、又は信頼上限値などを代表値として設定することができるが理由です。</p>	<p>①選択した設定方法：上記で選択しました分析データを使用した「濃度分布から設定する方法」を適用しています。（表 I.9 に示します元素データを使用） なお、主成分である Fe 及び Zr は、CB の例では「濃度範囲を設定する方法」を適用しています。</p> <p>②方法の選択理由：主成分元素について「濃度範囲を設定する方法」を適用したのは、材料規格として濃度の許容範囲が決まっているため、この許容範囲を利用して保守的な設定が可能であることが理由になります。 一方、主成分元素以外について「濃度分布から設定する方法」を適用したのは、上記のような材料成分の許容範囲がないため、選択した分析データや文献値（平均値及び標準偏差）を利用して濃度分布から保守的に設定する必要があることが理由になります。</p>	<p>①選択した設定方法：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>②方法の選択理由：左記（濃度比法）と同じです。</p>	<p>①選択した設定方法：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>②方法の選択理由：左記（濃度比法）と同じです。</p>

規定	説明して欲しい内容	点推定法	区間推定法		
			濃度比法	換算係数法	濃度分布評価法
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	<p>① 使用した中性子輸送コードの種類</p> <p>② そのコードを選んだ理由</p> <p>③ 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</p> <p>標準の規定内容</p> <p>6.1.2.3 中性子条件 評価対象とする放射化金属等に対する次の中性子フルエンス率・中性子スペクトル、及び放射化断面積を設定する。 注記詳細は、附属書F及び附属書G参照。 a) 中性子フルエンス率・中性子スペクトル 中性子フルエンス率・中性子スペクトルは、原子炉及び燃料の配置を考慮した中性子輸送計算コードなどによって適切に評価して設定する。中性子輸送計算コードは、詳細モデルの要求レベル及び精度の要求レベルと合わせて適用することが適切である。 例 中性子輸送計算のモンテカルロ法などは、原子炉の中性子の詳細条件及び評価対象範囲に設置されている構造物などの条件への適合が要求される場合にも、構造物などの条件に合わせる事が可能である。</p> <p>なお、具体的な中性子条件の設定方法は、点推定法は附属書FのF.1.3を参照、区間推定法は附属書GのG.2を参照。</p>	<p>① 中性子輸送コード：MCNP</p> <p>② 選定理由：評価対象位置の中性子条件を正確に評価するためには、燃料集合体をモデル化した中性子フルエンス率・中性子スペクトルの計算を行うことが必要になります。 この計算に際して、計算コードとして「MCNP」を選定したのは、添付2（標準には示されていません）のMCNPは原子炉内をモデル化して中性子フルエンス率・中性子スペクトルを求めることができる計算コードとして使用実績があり、大型実験やベンチマーク試験による検証も行われていることが理由になります。</p> <p>③ 設定方法：（附属書FのF.1.3b参照） 中性子フルエンス率・中性子スペクトルの設定においては、燃料集合体をモデル化し、中性子の3次元分布の計算を行った上で、評価位置を保守的に選んで設定する考え方としました。 設定方法としては、3次元核熱水力解析による燃料棒の出力分布及びボイド率分布を計算し、これをもとにMCNPによる中性子分布の計算を実施し、サイクルごとの保守的位置における中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定しました。 設定の判断方法は、燃料集合体をモデル化したMCNPの計算結果において、中性子フルエンス率が最大となる位置で設定することであり、その根拠は、中性子スペクトルが大きく変化しなければ、中性子フルエンス率が最大な位置において最大の放射能が生成されると考えられるためです。</p>	<p>① 中性子輸送コード：単位燃料集合体核特性計算コード</p> <p>② 選定理由：炉内の中性子条件を設定するには、3次元核熱水力コードで求めた軸方向出力分布、ボイド率分布を計算し、中性子フルエンス率・中性子スペクトルを算出することが必要となります。 この計算に際して、計算コードとして「単位燃料集合体核特性計算コード」を選定したのは、添付3（標準には示されていません）に示すように、原子炉の炉心設計及び中性子フルエンス率・中性子スペクトルの分布評価に広く用いられ、豊富な実績があり、臨界試験や実機運転による検証が行われていることが理由になります。</p> <p>③ 設定方法：（附属書GのG.2.2参照） ①中性子フルエンス率・中性子スペクトルの炉内分布の評価計算 1) 代表燃料断面について、燃焼度及び出力密度の条件を、それぞれサイクル中期の炉心平均燃焼度、及び定格出力密度として、チャンネルボックス設置位置の中性子フルエンス率・中性子スペクトルを算出します。 2) 代表炉心の3次元核熱水力解析によって、炉内径方向位置に応じた軸方向出力分布、ボイド率分布を算出します。 3) 2)で求めた軸方向出力分布、ボイド率分布を利用し、1)の値をボイド率で内挿、出力密度補正を行い、炉心中央部及び最外周部におけるチャンネルボックス評価位置の中性子フルエンス率・中性子スペクトルを計算します。 また、附属書IのI.2.2.2.1a)に示すように、中性子スペクトルが大きく変化する制御棒挿入位置、炉心外についても中性子フルエンス率・中性子スペクトルを計算します。</p> <p>上記の手順によって、原子炉内のCBが設置される全評価位置における中性子フルエンス率・中性子スペクトルが決まります。</p>	<p>① 中性子輸送コード：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>② 選定理由：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>③ 設定方法：（将来の計算に適用する計画） ①中性子フルエンス率・中性子スペクトルの炉内分布の評価計算 左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>ただし、下記の点が異なります。 1) 管理指標である燃料集合体の「平均燃焼度」の選定した代表7点（10、20、30、40、45、50、55GWd/t）ごとに、炉内のチャンネルボックス評価位置に応じた軸方向出力分布、ボイド率分布を踏まえて、軸方向位置における中性子フルエンス率・中性子スペクトルを計算して設定します。 2) 径方向は、中性子フルエンス率が最大となる炉心中央部及び中性子スペクトルが最も硬くなる炉心部（コントロールセル位置：運転中の制御棒挿入位置）をそれぞれ保守的に適用します。</p>	<p>① 中性子輸送コード：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>② 選定理由：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>③ 設定方法：左記（濃度比法）と同じです。</p>

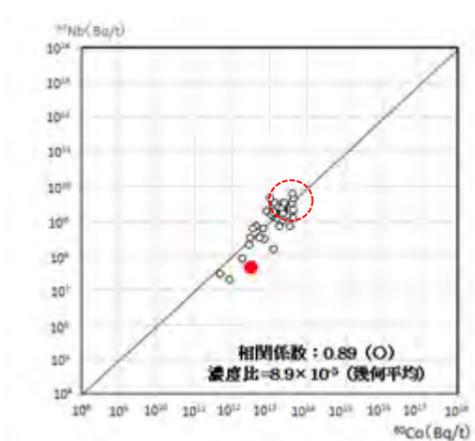
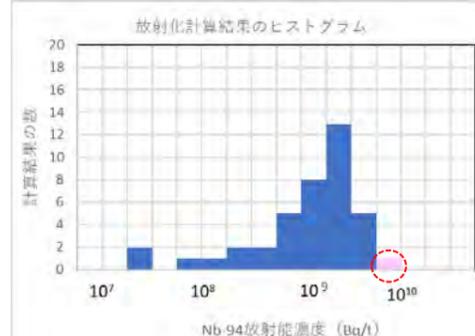
規定	説明して欲しい内容	点推定法	区間推定法		
			濃度比法	換算係数法	濃度分布評価法
			⑥中性子フルエンス率・中性子スペクトルの選定		
		<p>①6.1.2.4 照射条件の手順によって選択した「照射時間」を踏まえ、CB の炉内のローテーションパターン（表）をランダムサンプリングによって選択し、軸方向、径方向の評価位置をランダムサンプリングによって決定することで、CB が設置される位置条件を網羅した評価位置の選定が出来ることとなります。（必要計算回数分を実施）</p> <p>2)⑥の炉内分布の評価計算で評価した中性子フルエンス率・中性子スペクトルの分布より、1)で選択した評価位置のローテーションごとの中性子フルエンス率・中性子スペクトルを選択・決定します。（必要計算回数分を実施）</p>	<p>左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>ただし、下記の点が異なります。</p> <p>1) 選定した管理指標である燃料集合体の「平均燃焼度」の代表7点（10、20、30、40、45、50、55 GWd/t）ごとに、④で評価した中性子フルエンス率・中性子スペクトルの分布より、選択・決定します。（必要計算回数分を実施）</p>		
b) 放射化断面積	<p>① 2つの方法のうちいずれの方法で放射化断面積を作成したのか</p> <p>② その方法を選んだ理由</p> <p>標準の規定内容 (6.1.2.3 b))</p> <p>次のいずれかの方法で設定する。 ー使用する放射化計算コードに内蔵又は附属されている放射化断面積ライブラリから選択する。このとき、最新の計算コード及び放射化断面積ライブラリを確認する。 ー中性子フルエンス率の評価結果から、放射化範囲の中性子スペクトルの特性を考慮して放射化断面積を設定する。</p>	<p>①<u>選択した方法</u>：右記（濃度比法）と同じ。</p> <p>②<u>選択理由</u>：右記（濃度比法）と同じ。</p>	<p>①<u>選択した方法</u>：放射化計算コードに「内蔵されている放射化断面積ライブラリ」を使用します。 なお、ORIGEN-S のスペクトルインデックスを用いて内蔵放射化断面積ライブラリを補正します。</p> <p>②<u>選択理由</u>：ORIGEN-S に「内蔵されている放射化断面積ライブラリ」を用いた放射化計算については、既に炉内構造物の放射化計算、原子炉の廃止措置に使用された実績があることが、内蔵放射化断面積ライブラリを選択した理由です。</p>	<p>①<u>選択した方法</u>：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>②<u>選択理由</u>：左記（濃度比法）と同じです。</p>	<p>①<u>選択した方法</u>：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>②<u>選択理由</u>：左記（濃度比法）と同じです。</p>
6.1.2.4 照射条件	<p>a)と b)のいずれを選定したか</p> <p>① その方法を選んだ理由</p> <p>② 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</p> <p>標準の規定内容 (6.1.2.4)</p> <p>a) <u>個別に照射履歴を設定する方法</u> 放射化金属等ごとに、中性子の照射履歴に基づき、適切又は保守的に代表する照射条件を設定する。</p>	<p>①-a <u>選定した方法</u>：「個別に照射履歴を設定する方法」を選定します。（図 F.3 参照）</p> <p>①-b <u>選定理由</u>：評価対象とした CB（保守的に最大値を示すと考えられる CB^註）自体の中性子照射日数及び中性子照射停止日数を運転サイクルごとに与えられることが理由です。</p>	<p>①-a <u>選定した方法</u>：「代表照射履歴（照射時間）を設定する方法」を選定します。 具体的には、収集した CB の照射時間データ（平均及び標準偏差）から、附属書 I に示す入力条件用の照射時間分布を設定し、設定した照射時間の分布からランダムサンプリングします。</p> <p>①-b <u>選定理由</u>：評価対象とする CB 全体の照射条件を網羅した設定とするために、実際の CB の照射時間の分布（平均及び標準偏差）から評価することで、代表照射履歴による放射化計算用の入力条件とできることが理由です。</p>	<p>①-a <u>選定した方法</u>：「代表照射履歴（燃焼度）」を選択し、燃焼度は、J.1 に基づき、評価対象とした CB が装荷される 9×9 燃料の燃焼集合体の許認可上の最高燃焼度 55GWd/t から、範囲を 0～55GWd/t と設定します。また、燃焼度に対する代表ポイントは 10、20、30、40、45、50、55GWd/t の 7 点を設定します。</p> <p>①-b <u>選定理由</u>：換算係数法の管理指標として燃料集合体平均燃焼度（中性子フルエンス率と照射期間の積に比例する）を用いることで、径方向位置による中性子フルエンス率の変動、照射期間を考慮できることが理由です。</p>	<p>①-a <u>選定した方法</u>：左記（濃度比法）と同じです。</p> <p>①-b <u>選定理由</u>：左記（濃度比法）と同じです。</p>

規定	説明して欲しい内容	点推定法	区間推定法		
			濃度比法	換算係数法	濃度分布評価法
	<p>b) 代表照射履歴を設定する方法 中性子の照射履歴に基づき、放射化金属等のグループを適切又は保守的に代表する照射条件を設定する。 なお、換算係数法、濃度比法及び濃度分布評価法によって決定する場合は、複数の放射化金属等を適切に代表する照射条件の範囲又は分布を設定してもよい。</p>	<p>②-a 設定の妥当性：評価対象とした CB (保守的に最大値を示すと考えられる CB^註) の個別の詳細な照射記録を適用することで、適切性、妥当性を確保できることが理由です。 注：照射時間が長く、中性子フルエンス率も高い CB</p>	<p>②-a 設定の妥当性：代表照射分布 (平均 1,786 日、標準偏差=654 日) は、約 13,000 体の CB の照射時間の実態調査結果を踏まえることで、照射分布の適切性、妥当性を確保できることが理由です。(表 I.14 参照) ②-b 放射化計算の入力用の設定方法：上記の CB の照射時間の実態調査結果から設定した代表照射分布から、ランダムサンプリングすることによって、照射時間を必要回数設定します。</p>	<p>②-a 設定の妥当性：燃焼度の評価範囲を 0 GWd/t から 9×9 燃料の最大燃焼度の 55 GWd/t に設定しています。その間の燃焼度の換算係数は内挿で求めます。 さらに、大半の 9×9 燃料の取出し燃焼度は、40~55 GWd/t の範囲であるため、この区間は 5 GWd/t 刻みと内挿評価の補間性を高めることで、燃焼度設定値の適切性、妥当性を確保できることが理由です。</p>	<p>②-a 設定の妥当性：左記 (濃度比法) と同じです。 ②-b 放射化計算の入力用の設定方法：左記 (濃度比法) と同じです。</p>
<p>6.1.3 放射化計算 6.1.3.1 放射化計算方法</p>	<p>① なぜ、その放射化計算方法を選んだのか 標準の規定内容 6.1.3.1 放射化計算方法 放射化計算を行うに当たっては、適切な放射化計算方法を選定し、計算範囲の中性子条件の特徴を考慮し、使用する。</p>	<p>選択した方法：右記 (濃度比法) と同じです。 ① 選択理由：右記 (濃度比法) と同じです。</p>	<p>選択した方法：ORIGEN-S ① 選択理由：添付 4 (標準には示されていません) に示す計算方法の妥当性、及び中性子フルエンス率・中性子スペクトルの違いを放射化計算に反映するためです。 ORIGEN-S は、スペクトルインデックスを設定することによって、中性子スペクトルの違いを放射化計算に反映可能です。</p>	<p>選択した方法：左記 (濃度比法) と同じです。 ① 選択理由：左記 (濃度比法) と同じです。</p>	<p>選択した方法：左記 (濃度比法) と同じです。 ① 選択理由：左記 (濃度比法) と同じです。</p>
<p>6.1.3.2 計算用入力条件の設定</p>	<p>放射化計算の入力パラメータ及び条件 ① 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 ② その方法を選んだ理由 標準の規定内容 6.1.3.2 計算用入力条件の設定 6.1.2 を踏まえ、適用する理論計算法 (点推定法又は区間推定法) ごとに必要となる、次の放射化計算の入力パラメータ及び条件を、評価対象とする放射化金属等ごとに設定する。 ー 元素成分条件 ー 中性子条件 ー 照射条件 なお、区間推定法を適用する場合は、各入力パラメータ及び条件について、6.1.2 で評価した入力条件の分布又は範囲から、ランダムに抽出して放射化計算の入力データとして設定するか、又は、適切な代表的条件を放射化計算の入力条件として設定する。</p>	<p>① 選択した方法：「適切な代表条件[※]」で設定する方法 ※ここでは、評価対象 CB (保守的に最大値を示すと考えられる CB^註) の評価対象位置の条件です。 ② 選択理由：特定の評価対象 CB (保守的に最大値を示すと考えられる CB^註) 及び評価対象位置を設定するためです。 注：照射時間が長く、照射条件である中性子フルエンス率も高い CB</p>	<p>① 選択した方法：「ランダムに抽出する[※]」方法 (附属書 I 参照) ※放射化計算の入力パラメータ及び条件をランダムに抽出します。 ② 選択理由：評価対象物の条件範囲を網羅した無作為な評価を行うために、入力条件を設定した分布などからランダムサンプリングで行う必要があるためです。 補足：放射化計算の実施と濃度比の評価：設定した計算用入力条件を使用した必要数の放射化計算を行った結果 (Key 核種と評価対象核種の放射能濃度) を使用して、適用する評価対象核種に対する濃度比 (最大放射能濃度を評価する場合は算術平均値を適用) を決定します。</p>	<p>① 選択した方法：左記 (濃度比法) と同じです。 ② 選択理由：左記 (濃度比法) と同じです。 ただし、燃焼度ごとに行います。 補足：放射化計算の実施と換算係数の評価：管理指標である燃料集合体燃焼度ごとに、設定した計算用入力条件を使用した必要数の放射化計算を行った結果 (燃焼度と放射能濃度との比である換算係数の分布) を使用して、適用する換算係数を決定します。</p>	<p>① 選択した方法：左記 (濃度比法) と同じです。 ② 選択理由：左記 (濃度比法) と同じです。 補足：放射化計算の実施(濃度分布の評価)：設定した計算用入力条件を使用して行った必要数の放射化計算の結果を使用して、適用する評価対象核種に関する放射能濃度の分布を決定します。</p>

規定	説明して欲しい内容	点推定法	区間推定法		
			濃度比法	換算係数法	濃度分布評価法
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	① 必要計算数 ② その数で妥当とした理由 標準の規定内容 6.1.3.3 放射化計算の計算数の設定 6.1.3.3.1 点推定法 必要計算数は、評価対象とする放射化金属等の大きさ及び中性子フルエンス率の差異（例1参照）、 評価対象とする放射化金属等の部位の特徴（例2参照）などを考慮して決定する。	① 計算数： 1点です。 ②その数で十分と判断した理由： 点推定法で、最大放射能濃度を評価する場合は、CBの最大濃度の位置での保守性（元素濃度、照射時間に最大値、又は信頼上限値を適用する）を含む計算でCB全体を評価するためです。	—	—	—
6.1.3.3.2 区間推定法	① 実施した計算数 ② その数で十分と判断した理由 標準の規定内容 6.1.3.3 放射化計算の計算数の設定 6.1.3.3.2 区間推定法 実施した放射化計算結果の数が、放射能濃度決定のための評価データとして十分かについては、 放射化計算を行った数とその放射化計算結果とが示す統計値の安定性の推移を踏まえて判断する。	—	①計算数： 附属書 I に示します計算例では 40 点です。 ②その数で十分と判断した理由： 必要計算数は核種間の相関関係に依存するため、核種ごとに必要計算回数は異なります。 例として附属書 I に例示しました Nb-94 の場合は Co-60 との相関係数 0.83 であり、計算数としては、30 点で充分と考えますが、他の核種も含めた統一した評価例を示すため 40 点としています。 （注：計算数の充足性の判断に関しては、添付 5（標準に示しておりません）に示しました第 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の回答 13(4)を参照ください。）	①計算数： 今後実施します。 前述しました各集合体平均燃焼度 7 点 (10, 20, 30, 40, 45, 50, 55 GWd/t) に対して、左記（濃度比法）と同じ、各々 40 点を計算した合計 280 点を想定しています。 ②その数で十分と判断した理由： 今後実施します。 各燃焼度において濃度比法と同様に、評価した放射能濃度と燃焼度との比で求められる換算係数の分布（または放射能濃度の分布）が対数正規分布と見なせることに関して、統計検定を用いて分布の安定性（平均値、信頼上限値など）を評価し、充足性を評価します。	①計算数： 左記（濃度比法）と同じです。 ②その数で十分と判断した理由： 左記（濃度比法）と同じです。
6.1.4 表面汚染の取扱い	① 表面汚染を除染したか ② 除染した場合、除染が十分と判断した根拠 ③ 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 ④ 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 標準の規定内容 6.1.4 表面汚染の取扱い 理論計算法の適用において、放射化金属等の表面に付着した放射性物質を十分に低減できるよう除染する場合は、表面の汚染を考慮する必要はない。また、除染しない場合は、放射化金属等の表面に	右記（濃度比法）と同じです。	標準には示されておりませんが、下記の考え方です。 （一般的な炉内構造物に関する説明です） ①表面汚染の除染： 系統除染程度は実施しますが、機械的除染の実施は未定です。 ②除染が十分と判断した根拠： 除染の判断は、放射化分と汚染分の濃度の比（除染の効果）だけでなく、線量評価からの表面汚染分の判断も必要ですので、現状、標準では汚染分に関する具体例までを示しておりませんが、下記のように考えます。現状、③を基本と考えます。 ③表面汚染分の考慮が必要な場合： 表面汚染分の放射能濃度を評価して、放射化分の放射能濃度に加えることが基本です。	左記（濃度比法）と同じです。	左記（濃度比法）と同じです。

規定	説明して欲しい内容	点推定法	区間推定法		
			濃度比法	換算係数法	濃度分布評価法
	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。		表面汚染を評価した結果は、標準にはありませんが、母材とクラッド分の比を評価した結果を解説表3に示しています。 ④表面汚染分の考慮が不要な場合： 除染などによって、表面汚染分の放射能濃度への影響が低いと考えられる場合は、表面汚染分を考慮する必要はないと考えます。 ・埋設処分における汚染分の線量評価への影響が放射化分に比べ小さいと考えられる濃度以下の場合（ただ、現段階において定量的な判断基準を示すことはできません）		
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	① 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 ② そのように判断した根拠 ③ 計算が、恒常的に、正確に実施できるか ④ そのように判断した根拠 標準の規定内容 6.3.1.1 妥当性確認の方法 妥当性確認は、理論計算法の放射化計算方法及び計算手順が期待される結果を与えることを（客観的、文書化された証拠によって）明示し、計算が恒常的に、正確に実施できることを確認する。	①及び②計算方法・結果： 分析結果－理論計算結果の比較及び保守性の評価を踏まえ、適用する方法・手順に従うことによって、廃棄体の放射能濃度を精度よく又は保守的に決定することができます。（6.3の説明参照） ③恒常的に、正確に実施： 妥当性が確認された計算コードを使用し、計算手順書を定め、入力条件書を作成した上で手順に従って実施し、計算の記録を残すことで、再現性が得られる評価結果となります。 ④判断した根拠： 第三者によって上記の方法（検証結果含む）、手順及び入力データが確認でき、かつ、再評価もできるようになっているためです。	左記（点推定法）と同じです。（左記の分析－計算結果の比較検証及び計算コード及び入力条件の設定方法の妥当性を確認する）	点推定法と同じです。	点推定法と同じです。
6.3.1.2 不確かさの扱い	① 不確かさの評価方法と結果 標準の規定内容 6.3.1.2 不確かさの扱い 理論計算法の結果の代表性を定量化するために、計算の正確さ及び不確かさを評価する。	－ (理論計算法の計算結果と分析結果の評価精度の比較は、添付8を参照ください)	①-a 不確かさの評価方法： 計算結果である濃度比（平均値）に関しては信頼限界を評価し、組合せるKey核種濃度（非破壊測定の場合）に関しては、変動係数を評価し、双方を乗じることで、評価した放射能濃度の不確かさの範囲を評価します。 ①-b 結果の不確かさの試算結果： Nb-94の場合（算術平均を適用）で、約1.6倍の不確かさを含みます。（添付6参照：標準にはこの結果は示されていません）	①-a 不確かさの評価方法： 現状、標準では計算結果である換算係数の不確かさを評価していません。今後、換算係数に関しては信頼限界を評価し、組合せる管理指標ごとの変動係数等を評価し、評価した放射能濃度の不確かさの範囲を評価します。 ①-b 結果の不確かさの試算結果： 現状、標準では計算結果である換算係数の不確かさを評価していません。今後、上記の最大放射能濃度を算出手順で計算した結果によって不確かさ*を評価します。*各燃焼度における放射能濃度と燃焼度との比で計算される換算係数の分布（または、放射能濃度の分布）の計算結果のもつ不確かさに関して、分布の平均値、標準偏差を考慮した信頼区間を踏まえて評価します。	①-a 不確かさの評価方法： 計算結果である放射能濃度分布の平均値及び標準偏差を踏まえ、信頼限界を評価し、評価した放射能濃度の分布のもつ不確かさの範囲を評価します。 ①-b 結果の不確かさの試算結果： Nb-94の場合で放射能濃度分布は、約1.8倍の不確かさ（上側へのスライドする不確かさ）を有していると考えられます。（添付7参照：標準には、この結果は示されていません）

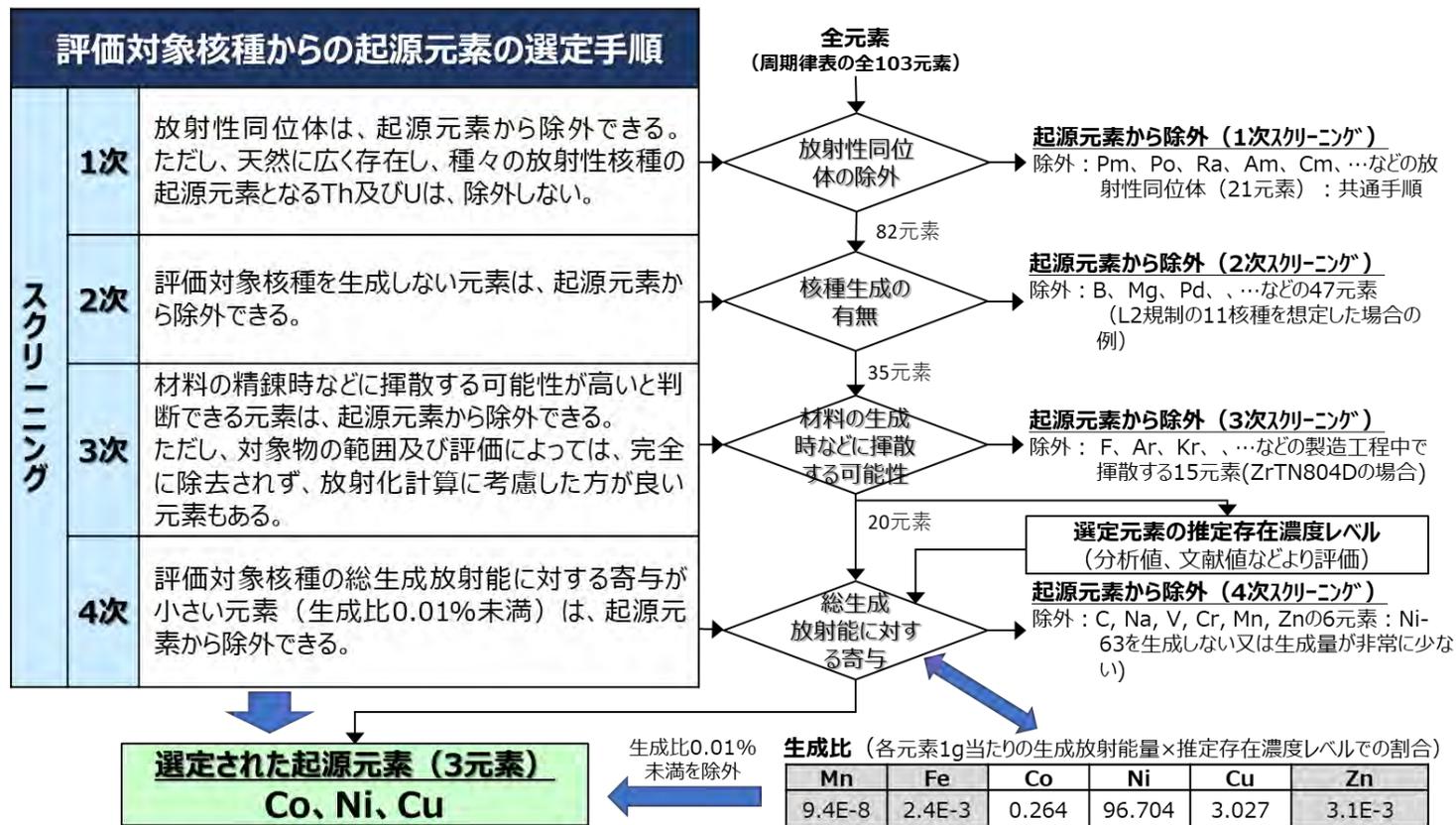
規定	説明して欲しい内容	点推定法	区間推定法		
			濃度比法	換算係数法	濃度分布評価法
6.5 放射能濃度の評価における裕度	<p>① 最大放射能濃度との比較に用いる推定放射能濃度の算出方法と結果</p> <p>② 提示する評価精度値とその根拠</p> <p>標準の規定内容</p> <p>6.5 放射能濃度の評価における裕度 理論的方法又は実証的方法による放射能濃度決定方法によって放射能濃度を評価する場合、最大放射能濃度を超えないことを確認するため、適切な裕度を考慮する。</p> <p>標準に示す裕度の設定例 解説 6.5.2 最大放射能濃度を超えないことを確認する方法（スクリーニングレベルの適用）</p> <p>解説図 11—スケールングファクタ法の適用可能範囲（浅地中ピット処分対象廃棄物の場合）</p>	<p>①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</p> <p>最大の放射能濃度の評価に適用する場合は、計算条件に保守的条件（入力条件に最大値、又は信頼上限値の適用）を設定します。保守的条件を設定することで、裕度を確保できます。</p> <p>その最大の「放射能濃度」の評価結果を表1に示します。</p>	<p>①-a 最大放射能濃度の評価に適用する係数：「算術平均濃度比」を適用します。</p> <p>①-b 推定放射能濃度の算出方法と結果：「算術平均濃度比」に Key 核種（Co-60）の放射能濃度（非破壊外部測定によって評価した結果、または理論計算によって評価した結果）を乗じることで、評価対象核種の最大の「放射能濃度」を決定します。これが事業許可申請書等の「最大放射能濃度」を超えていないことで確認します。</p> <p>放射化計算の結果の範囲[※]は、10 倍以内に収まっており、濃度比法を適用できる範囲を制限する「スクリーニングレベル」（例えば 1/10）を設定することによって、最大放射能濃度を超えないことの確認が可能です。</p> <p>※附属書 I の表 I.21 の計算結果では、最も濃度比の範囲が小さい Cl-36 の場合で最大の濃度比／算術平均濃度比＝2.4、最も濃度比の範囲が大きい Sr-90 の場合で最大の濃度比／算術平均濃度比＝5.9</p> <p>その最大の「放射能濃度」の評価結果を表 2 に示します。</p>	<p>①-a 最大放射能濃度との比較に用いる係数：現状、最大の放射能濃度の比較に用いる「換算係数」の算出結果はありません。今後、上記の最大放射能濃度の算出手順によって計算した結果にて「換算係数」[*]を評価します。</p> <p>※各燃焼度における放射能濃度と燃焼度の比で計算される換算係数の分布（または、放射能濃度の分布）を計算した結果を踏まえて、「換算係数」の裕度を評価します。</p> <p>①-b 推定放射能濃度の算出方法と結果：現状、比較に用いる推定放射能濃度の算出結果はありません。今後、上述の最大の放射能濃度の算出手順によって計算した結果にて評価します。</p>	<p>— (係数評価は濃度分布評価法では行いません)</p> <p>①-b 推定放射能濃度の算出方法と結果：計算した放射能濃度の結果の最大の「放射能濃度」（図 2 参照）を保守的に適用し、この最大の「放射能濃度」を決定します。これが事業許可変更申請書の「最大放射能濃度」を超えていないことで確認します。</p> <p>その「最大放射能濃度」の評価結果を表 3 に示します。</p>
	(最大の放射能濃度の評価結果の比較)	下記に最大の放射能濃度の評価結果を示します。	下記に「標準に示す計算結果」と「分析結果（これは標準には示されていません）」との比較、及び最大の放射能濃度の評価結果（区間推定法の比較用）を示します。		

規定	説明して欲しい内容	点推定法	区間推定法															
			濃度比法	換算係数法														
	<p>最大の放射能濃度の比較の補足説明</p> <p>標準では評価方法間の評価結果の比較は行っておりませんが、標準に示していません濃度比法で行った放射化計算の結果（附属書 I の表 I.21）を使用すると、右記のように、各手法間の Nb-94 の最大の放射能濃度の評価結果は、1.27 倍の範囲で評価されています。</p> <p>ただし、各評価結果には、それぞれに入力条件の保守性が加えられている評価結果での比較となっています。</p> <p>なお、最大の放射能濃度の決定は、標準の附属書 M に示します「基本的な考え方」を踏まえて、「保守的な最大値」、「ばらつきを考慮した濃度比の算術平均値とスクリーニングレベルの組合せ」などによって確認できます。（上記の解説図 11）</p> <p>標準の附属書の内容</p> <p>M.3.2 最大放射能濃度を超えないことの確認における評価精度への対応の考え方</p> <p>a) 評価精度の考え方 廃棄体の放射能濃度が最大放射能濃度を超えないことに関する確認においては、M.2 に示した個々の廃棄体に関する放射能濃度評価値のばらつきへの考慮が必要となる。この最大放射能濃度を超えないことの確認において要求される評価精度に関する基本的な考え方を、次に示す。</p> <p>1) 点推定法によって個々の廃棄物に対して放射能濃度を決定する方法 点推定法では、評価対象廃棄物個々の放射能濃度を詳細に決定するため、最大放射能濃度の確認においても放射能濃度決定値をそのまま適用することができる。</p> <p>2) 区間推定法によって廃棄物グループを代表する平均的な放射能濃度を決定する方法 区間推定法では、放射化計算結果を利用して個々の廃棄体に関するばらつきを勘案し、最大放射能濃度を超えないことを確認する必要がある。</p> <p>b) 評価精度の提示方法 廃棄物グループを代表する平均的な放射能濃度を決定する方法における廃棄体個々の放射能濃度のばらつきの程度を意味する評価精度は、次のいずれかの方</p>	<p>表 1 最大の放射能濃度の評価条件と評価結果</p> <table border="1"> <tr> <td>Nb-94 の最大の放射能濃度の求め方</td> <td>計算した Nb-94 の放射能濃度の結果 ¹⁾ の最大値を使用して、Nb-94 の最大の放射能濃度として評価</td> </tr> <tr> <td>評価した Nb-94 最大の放射能濃度</td> <td>6.2 E+9 Bq/t</td> </tr> </table> <p>注 1 附属書 I の表 I.21 に示す放射化計算の結果から決定</p> <p>標準には記載していませんが、濃度比法で放射能濃度を評価した結果（濃度比法も 1 点ごとの計算は点推定法と同じ）の最大値を保守的に適用すると上記の値となります。</p> <p>②結果の不確かさの試算結果：点推定法での直接的な比較結果は標準には示していませんが、保守的な計算結果と真値（分析結果）との裕度は、濃度比法の結果（分析結果と計算結果の比較した図 1）から、1 桁～2 桁程度の保守的評価となっています。</p>	Nb-94 の最大の放射能濃度の求め方	計算した Nb-94 の放射能濃度の結果 ¹⁾ の最大値を使用して、Nb-94 の最大の放射能濃度として評価	評価した Nb-94 最大の放射能濃度	6.2 E+9 Bq/t	<p>表 2 最大の放射能濃度の評価条件と評価結果</p> <table border="1"> <tr> <td>Co-60 の最大の放射能濃度の設定方法</td> <td>計算した結果 ¹⁾ の Co-60 の放射能濃度の最大値を Co-60 の最大の放射能濃度と適用</td> </tr> <tr> <td>Nb-94 の最大の放射能濃度の求め方</td> <td>①Co-60 放射能濃度と一緒に計算された Nb-94 放射能濃度を使用して、Nb-94/Co-60 濃度比（算術平均）を評価 ②上欄の Co-60 放射能濃度（最大値）に、①で求めた Nb-94/Co-60 濃度比を乗じて Nb-94 の最大の放射能濃度を評価</td> </tr> <tr> <td>評価した Nb-94 最大の放射能濃度</td> <td>4.9 E+9 Bq/t</td> </tr> </table> <p>注 1 附属書 I の表 I.21 に示す放射化計算の結果</p> <p>②結果の不確かさの試算結果：Nb-94 の場合、約 1.6 倍（算術平均適用の場合）のばらつきを含む（添付 6 参照：標準には示されていません）。また、図 1（Nb-94 と Co-60 の放射能濃度の計算結果の散布図）のように理論計算による計算結果と CB の代表試料の分析結果の比較によって保守性も把握しています。</p> <p>注記 Co-60 の最大放射能濃度に濃度比を乗じて Nb-94 の最大放射能濃度を評価します。</p>	Co-60 の最大の放射能濃度の設定方法	計算した結果 ¹⁾ の Co-60 の放射能濃度の最大値を Co-60 の最大の放射能濃度と適用	Nb-94 の最大の放射能濃度の求め方	①Co-60 放射能濃度と一緒に計算された Nb-94 放射能濃度を使用して、Nb-94/Co-60 濃度比（算術平均）を評価 ②上欄の Co-60 放射能濃度（最大値）に、①で求めた Nb-94/Co-60 濃度比を乗じて Nb-94 の最大の放射能濃度を評価	評価した Nb-94 最大の放射能濃度	4.9 E+9 Bq/t	<p>濃度分布評価法</p> <p>表 3 最大の放射能濃度の評価条件と評価結果</p> <table border="1"> <tr> <td>Nb-94 の最大の放射能濃度の求め方</td> <td>計算した Nb-94 の放射能濃度の結果 ¹⁾ の最大値を使用して、Nb-94 の最大の放射能濃度として評価</td> </tr> <tr> <td>評価した Nb-94 最大の放射能濃度</td> <td>6.2 E+9 Bq/t</td> </tr> </table> <p>注 1 附属書 I の表 I.21 に示す放射化計算の結果から決定</p> <p>②結果の不確かさの試算結果：Nb-94 の場合、約 1.8 倍（平均値の不確かさ：濃度の高い側に分布がスライドする可能性）のばらつきを含む（添付 7 参照：標準には示されていません）。</p> <p>※今後、前述した最大放射能濃度を算出する手順に従って計算した結果によって不確かさを評価します。</p>	Nb-94 の最大の放射能濃度の求め方	計算した Nb-94 の放射能濃度の結果 ¹⁾ の最大値を使用して、Nb-94 の最大の放射能濃度として評価	評価した Nb-94 最大の放射能濃度	6.2 E+9 Bq/t
Nb-94 の最大の放射能濃度の求め方	計算した Nb-94 の放射能濃度の結果 ¹⁾ の最大値を使用して、Nb-94 の最大の放射能濃度として評価																	
評価した Nb-94 最大の放射能濃度	6.2 E+9 Bq/t																	
Co-60 の最大の放射能濃度の設定方法	計算した結果 ¹⁾ の Co-60 の放射能濃度の最大値を Co-60 の最大の放射能濃度と適用																	
Nb-94 の最大の放射能濃度の求め方	①Co-60 放射能濃度と一緒に計算された Nb-94 放射能濃度を使用して、Nb-94/Co-60 濃度比（算術平均）を評価 ②上欄の Co-60 放射能濃度（最大値）に、①で求めた Nb-94/Co-60 濃度比を乗じて Nb-94 の最大の放射能濃度を評価																	
評価した Nb-94 最大の放射能濃度	4.9 E+9 Bq/t																	
Nb-94 の最大の放射能濃度の求め方	計算した Nb-94 の放射能濃度の結果 ¹⁾ の最大値を使用して、Nb-94 の最大の放射能濃度として評価																	
評価した Nb-94 最大の放射能濃度	6.2 E+9 Bq/t																	
			 <p>図 1 濃度比を評価した散布図での保守性</p> <p>注記 CB 中央部の分析結果を●（標準には示されていません）で示す。比較は計算結果（○）の最大領域の結果（赤破線の○で囲った部分）（標準には示されていません）との比較となる。</p>	 <p>図 2 濃度分布を評価したヒストグラムでの保守性</p> <p>注記 CB の Nb-94 の計算結果をヒストグラム（標準には示されていません）で示した。この放射能濃度分布の最大値で評価した。</p>														

規定	説明して欲しい内容	点推定法	区間推定法		
			濃度比法	換算係数法	濃度分布評価法
	<p>法などによって提示することが可能である。</p> <p>1) 推定放射能濃度のばらつきの分布の偏差によって評価精度を提示する。</p> <p>例 区間推定法によって評価した廃棄物グループの濃度分布などのばらつきの標準偏差から、得られる平均値の信頼区間による提示など。</p> <p>2) 推定放射能濃度のばらつきの統計的な信頼区間などによって評価精度を提示する。</p>				

評価対象核種からの起源元素の選定方法の例 (材質ZrTN804D、評価対象核種Ni-63の場合の選定例)

本標準で示す評価対象核種の放射化計算の際に必要な「起源元素」の選定手順の具体例を、ZrTN804Dの評価対象核種Ni-63を例にした場合の選定手順とその過程における起源元素の選定結果例を以下に示す。



添付2 第2回検討チーム会合 資料 2-1-3 P33 -中性子輸送計算コード(例 MCNP)の妥当性-

1. 概要

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

2. 機能

MCNPコードは、遮蔽解析に際して以下の機能を有する。

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

3. 解析フロー

MCNPコードの解析フローを図に示す。

4. 使用実績

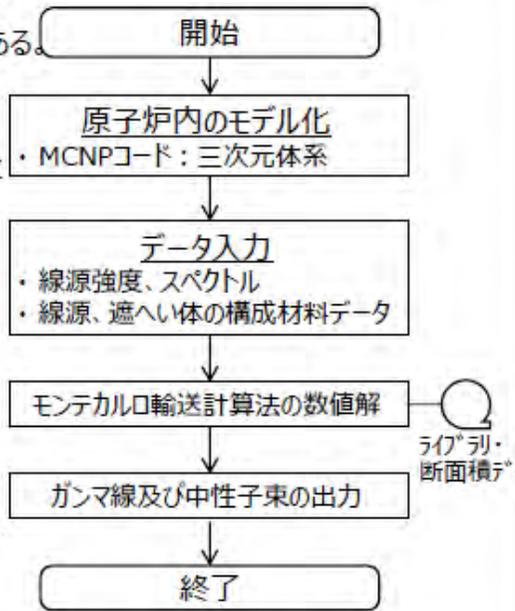
国内では、「原子力発電所放射線遮へい設計規程¹⁾」において、原子力施設の遮蔽のための輸送計算コードとしてモンテカルロ法を用いた計算手法の適用が可能とされており、MCNPコードは放射性物質輸送・貯蔵容器の遮蔽解析などで用いられている。米国では使用済燃料貯蔵施設の審査指針である「Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities」(NUREG-1567)においては遮蔽解析ツールとしてMCNPコードが記載されており、遮蔽設計、線量評価等で使用されている。

5. 検証

汎用コードの導入評価²⁾が実施されていることを確認。

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

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



MCNPコードの解析フロー図

添付3 第2回検討チーム会合 資料2-1-3 P34
－中性子輸送計算コード（例 単位燃料集合体核特性コード）の妥当性－

1. 概要

単位燃料集合体核特性コードは燃料集合体の反応度や出力分布等の核的性質を解析するコードであり、GEや東芝などメーカーが独自に開発してきた解析コードである。単位燃料集合体核特性コードを用いる場合は、必要に応じて出力密度及びボイド率による補正を行う。

2. 機能

単位燃料集合体核特性コードは、遮蔽解析に際して以下の機能を有する。

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

3. 解析フロー

単位燃料集合体核特性コードの解析フローを図に示す。

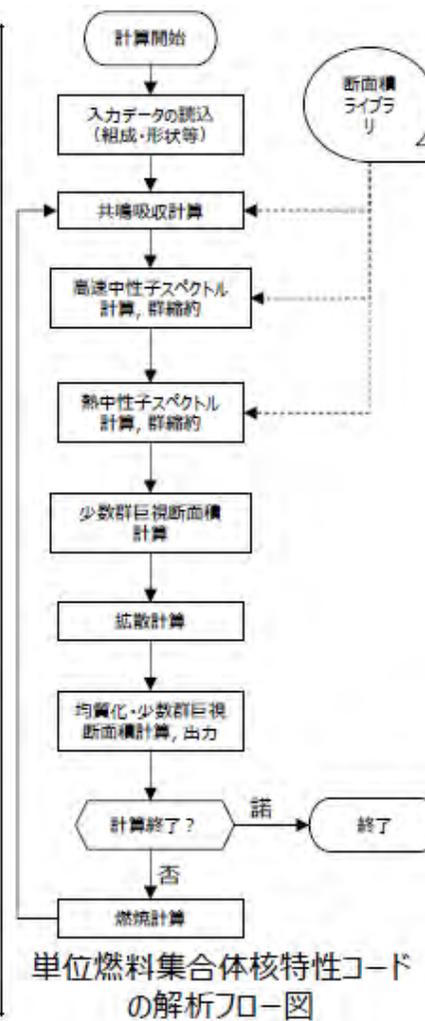
4. 使用実績

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

5. 検証

コードの導入評価¹⁾が実施されていることを確認。
 臨界試験／実機運転実績等による検証¹⁾が実施されていることを確認。

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



添付4 第2回検討チーム会合 資料2-1-3 P13

放射化計算コード（例 ORIGEN-S）の妥当性

1. 概要

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

一連のORIGENコードを使用して計算できる内容は、次のとおりである。

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

2. 使用実績

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

3. 検証方法

汎用コードの導入評価¹⁾が実施されていることが確認されている。

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

- 1) SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, ORNL/TM-2005/39, Version 5.1, Vols.I-III,November (2006)
- 2) K.Tanaka et al., "Radioactivity evaluation for Main Steam Line and Suppression Chamber of small type BWR", Progress in Nuclear Science and Technology Volume 4 (2014) pp.836-839

添付5 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の回答 13(4)

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くます。

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、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。

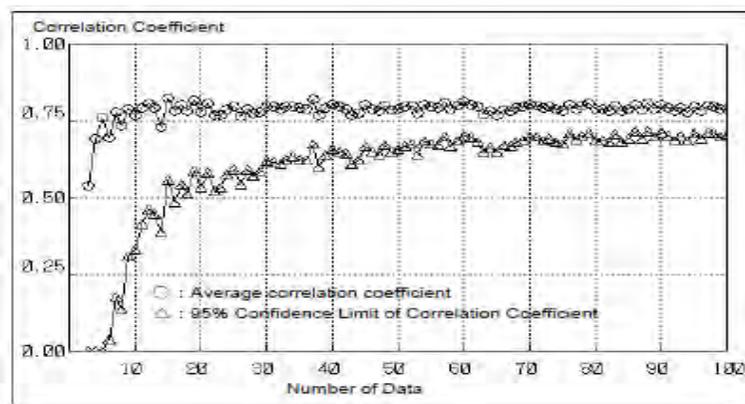


図 13(4)-4 *The changes in correlation coefficient with the number of samples* (相関係数 0.8 の例[1])

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.

添付6 区間推定法（濃度比法）における不確かさの評価

評価方法	評価方法内における不確かさの程度	放射化計算結果以降の評価で生じるばらつきの評価									
濃度比法 (附属書Iの表I.21の結果を使用し新たに計算した結果)	<ul style="list-style-type: none"> CB グループ内でのばらつきを考慮した入力条件での濃度比の計算結果の不確かさ： Nb-94 での試算例： 各濃度比及び99%信頼上限との比： <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>算術平均</th> <th>幾何平均</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>濃度比</td> <td>1.2E-4</td> <td>8.9E-5</td> </tr> <tr> <td>99%信頼上限との比</td> <td>1.3 倍</td> <td>1.4 倍</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> 非破壊測定結果 (Co-60) の不確かさ： 測定精度：±20% [1] (L1 廃棄体に収納している廃棄物は体積線源と想定でき、より均一廃棄体に近いと仮定されるが、保守性を加え充填固化体の測定評価結果を適用した) 		算術平均	幾何平均	濃度比	1.2E-4	8.9E-5	99%信頼上限との比	1.3 倍	1.4 倍	評価した放射能濃度は、濃度比（算術平均）の評価値と非破壊測定値の不確かさを加味すると、評価値は約1.6倍となる可能性がある。
	算術平均	幾何平均									
濃度比	1.2E-4	8.9E-5									
99%信頼上限との比	1.3 倍	1.4 倍									

参考資料

[1] 酒井ら, 充填固化体の放射能評価について, 原子力バックエンド研究, Vol15, No1(1998)

添付7 区間推定法（濃度分布評価法）における不確かさの評価

評価方法	評価方法内における不確かさの程度	放射化計算結果以降の評価で生じるばらつきの評価									
濃度分布評価法 (附属書Iの表I.21の結果を使用し新たに計算した結果)	<ul style="list-style-type: none"> CB グループ内でのばらつきを考慮した入力条件での放射能濃度の計算結果の不確かさ： Nb-94 での試算例： 各平均濃度及び99%信頼上限との比： <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>算術平均</th> <th>幾何平均</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>平均濃度</td> <td>1.9E+9</td> <td>1.1E+9</td> </tr> <tr> <td>99%信頼上限との比</td> <td>1.4 倍</td> <td>1.8 倍</td> </tr> </tbody> </table>		算術平均	幾何平均	平均濃度	1.9E+9	1.1E+9	99%信頼上限との比	1.4 倍	1.8 倍	評価した放射能濃度は、放射能濃度分布のばらつきを加味すると、評価値は分布の平均値の不確かさから濃度分布自体が約1.8倍高い濃度側にスライドする可能性がある。
	算術平均	幾何平均									
平均濃度	1.9E+9	1.1E+9									
99%信頼上限との比	1.4 倍	1.8 倍									

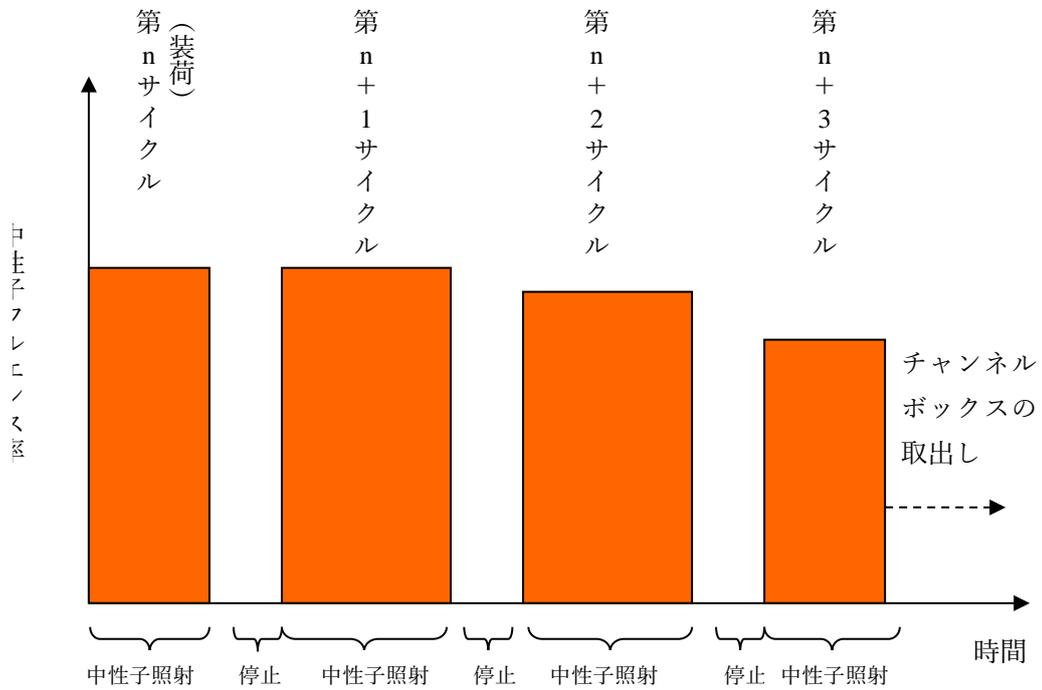
検証 放射化計算結果の検証

－ 本標準における放射化計算結果と分析結果との比較 －

本標準では、分析試料を採取した部位の放射能濃度に関する点推定法（区間推定法の個々の計算は点推定法と同じである）による計算結果と分析結果との比較によって、計算方法の妥当性を評価している。

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

【濃度比法に関する評価例の参考】



附属書 F 図 F.3—チャンネルボックスの中性子の照射履歴（概念図）

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）

単位: Bq

起源元素 (1次SL ¹⁾ 後)	評価対象核種										
	¹⁴ C	³⁶ Cl	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Nb	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	¹³⁷ Cs	²³⁷ Np	全α
H	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
He	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Li	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Be	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C	1.00 ×10 ⁵	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N	1.04 ×10 ¹⁰	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
O	5.51 ×10 ⁵	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F	3.61 ×10 ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ne	1.36 ×10 ⁶	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Na	4.91 ×10 ¹	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Al	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Si	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
P	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S	—	1.90 ×10 ⁵	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cl	—	5.99 ×10 ⁸	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ar	—	2.64 ×10 ⁴	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K	—	4.88 ×10 ⁶	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ca	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sc	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V	—	—	1.13 ×10 ⁰	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr	—	—	4.57 ×10 ³	—	—	—	—	—	—	—	—
Mn	—	—	5.97 ×10 ⁷	9.45 ×10 ¹	—	—	—	—	—	—	—
Fe	—	—	2.14 ×10 ⁹	2.34 ×10 ⁴	—	—	—	—	—	—	—
Co	—	—	4.87 ×10 ¹²	5.29 ×10 ⁸	—	—	—	—	—	—	—
Ni	—	—	4.53 ×10 ¹⁰	1.94 ×10 ¹⁰	—	—	—	—	—	—	—
Cu	—	—	4.84 ×10 ⁸	3.04 ×10 ⁹	—	—	—	—	—	—	—
Zn	—	—	2.01 ×10 ¹	3.07 ×10 ⁵	—	—	—	—	—	—	—
Ga	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ge	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
As	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Se	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Br	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Kr	—	—	—	—	2.51 ×10 ⁰	—	—	—	—	—	—
Rb	—	—	—	—	5.14 ×10 ³	—	—	—	—	—	—
Sr	—	—	—	—	5.98 ×10 ⁵	—	—	—	—	—	—
Y	—	—	—	—	1.34 ×10 ⁴	—	—	—	—	—	—
Zr	—	—	—	—	2.41 ×10 ⁴	8.64 ×10 ⁰	4.57 ×10 ²	—	—	—	—
Nb	—	—	—	—	2.61 ×10 ²	3.94 ×10 ⁸	1.65 ×10 ²	—	—	—	—
Mo	—	—	—	—	1.88 ×10 ¹	1.60 ×10 ⁴	5.33 ×10 ⁵	—	—	—	—
Ru	—	—	—	—	—	4.47 ×10 ¹	—	—	—	—	—
Rh	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ag	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
In	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sn	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Te	—	—	—	—	—	—	—	3.49 ×10 ⁴	3.84 ×10 ⁴	—	—
I	—	—	—	—	—	—	—	4.80 ×10 ³	6.60 ×10 ⁴	—	—
Xe	—	—	—	—	—	—	—	—	1.94 ×10 ⁹	—	—
Cs	—	—	—	—	—	—	—	—	6.16 ×10 ⁸	—	—
Ba	—	—	—	—	—	—	—	—	1.71 ×10 ⁵	—	—
La	—	—	—	—	—	—	—	—	9.66 ×10 ²	—	—
Ce	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Nd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Eu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dy	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ho	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Er	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Yb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Lu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Hf	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ta	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Re	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Os	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ir	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pt	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Au	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Hg	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tl	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Th	—	—	—	—	5.77 ×10 ¹⁰	—	1.88 ×10 ⁶	2.04 ×10 ⁴	5.77 ×10 ¹⁰	1.92 ×10 ⁴	1.10 ×10 ⁹
U	—	—	—	—	9.35 ×10 ⁹	—	1.27 ×10 ⁶	8.29 ×10 ³	2.85 ×10 ¹⁰	2.41 ×10 ³	1.22 ×10 ¹⁰
合計	1.04 ×10 ¹⁰	6.04 ×10 ⁸	4.92 ×10 ¹²	2.30 ×10 ¹⁰	6.70 ×10 ¹⁰	3.94 ×10 ⁸	3.68 ×10 ⁶	6.84 ×10 ⁴	8.87 ×10 ¹⁰	2.16 ×10 ⁴	1.33 ×10 ¹⁰

注1 上記は、一次スクリーニング実施後の元素（安定同位体核種が存在する元素）に対して放射化計算を実施した結果である。
 注2 放射化計算条件は、計算コード：ORIGEN2.2、断面積ライブラリ：PWR41J33、照射時間：30y、中性子フルエンス率：4.72×10¹⁴cm⁻²/s、元素量：各元素とも等量（0.001kg）
 注3 ORIGEN上の閾値(CutOff)は、3.7Bq (=1.0×10⁻¹⁰ Ci)とした(ただし、照射時間60yでの生成量で核種生成の有無を判断)。
 注⁴ 1次SLは、“一次スクリーニング”を意味する。

表 G.5—三次スクリーニングで除外対象とできる元素例 (ZrTN804D, SUS304 の場合の例)

三次スクリーニング対象元素	スラグとして除去	低沸点による揮発	希ガス	希少元素	還元性雰囲気による除去	用途が限定される
	原料である鉱石に含まれるが、高炉などで原料を溶解分離したときのスラグとして大半は除去。	高炉の温度が2000°C近くとなることを考慮すると、飢渴する可能性が高い(括弧内は沸点)。	岩石・鉱物に微量含まれるが、希ガスが不純物として金属に混入する可能性は、低い。	希少性が高く、不純物として金属に混入する可能性は、低い。	高炉における還元性雰囲気によって、精錬過程で除去。ただし、酸素を吹付けて脱炭する場合もある。	特定の用途に利用する場合だけに含まれる(括弧内は、利用される場合の主な用途)。
O ^{a)}	—	—	—	—	○	—
F	—	—	—	—	—	○ (フッ素コーティング)
Ne	—	—	○	—	—	—
Ar	—	—	○	—	—	—
Kr	—	—	○	—	—	—
Rb	—	○ (696°C)	—	—	—	○ (ルビジウム原子時計)
Sr	○	○ (1639°C)	—	—	—	—
Y	○	—	—	—	—	—
Ru	—	—	—	○	—	○ (水素化触媒)
Sb	○	○ (1640°C)	—	—	—	—
Te	○	○ (1390°C)	—	—	—	—
I	—	—	—	—	—	○ (抗菌処理)
Xe	—	—	○	—	—	—
Cs	○	○ (760°C)	—	—	—	—
Ba	○	○ (1537°C)	—	—	—	—
La	○	—	—	—	—	—

注記 “○”は、金属に対する三次スクリーニングが可能と考えられる対象元素を示す。
注^{a)} ZrTN804D の元素のうち、○は、機械的強度向上を目的とした添加が行われているため、評価対象（三次スクリーニングの対象外）とした。

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 ^{a)}		文献データ ^{b)}		成分管理目標値 (質量分率%) (JIS H 4751 ^[3])	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)	1.6×10^{-2}	4 (2)	1.0×10^{-2}	≦ 0.027	1.0×10^{-2}
N	21 (0)	3.2×10^{-3}	10 (1)	3.2×10^{-3}	≦ 0.008	5.0×10^{-3}
O	5 (0)	1.3×10^{-1}	5 (0)	1.1×10^{-1}	—	1.0×10^{-1}
Na	0 (0)	—	0 (0)	—	—	1.0×10^0
S	0 (0)	—	1 (0)	3.5×10^{-3}	—	5.0×10^{-3}
Cl	0 (21)	(5.0×10^{-4})	0 (0)	—	—	5.0×10^{-4}
K	0 (4)	(1.0×10^{-4})	0 (0)	—	—	1.0×10^{-4}
V	0 (0)	—	2 (0)	2.4×10^{-3}	—	1.0×10^{-3}
Cr	0 (0)	—	18 (0)	1.1×10^{-1}	0.07 ~ 0.13	1.0×10^{-1}
Mn	0 (0)	—	5 (1)	1.0×10^{-3}	≦ 0.005	1.0×10^{-3}
Fe	5 (0)	2.1×10^{-1}	18 (0)	2.1×10^{-1}	0.18 ~ 0.24	1.0×10^{-1}
Co	0 (21)	(7.6×10^{-4})	5 (0)	4.7×10^{-4}	≦ 0.002	5.0×10^{-4}
Ni	11 (10)	4.2×10^{-3}	3 (1)	3.5×10^{-3}	≦ 0.007	5.0×10^{-3}
Cu	0 (0)	—	3 (0)	1.7×10^{-3}	≦ 0.005	1.0×10^{-3}
Zn	0 (0)	—	0 (0)	—	—	1.0×10^{-2}
Zr	16 (0)	9.8×10^1	1 (0)	9.8×10^1	残部	9.8×10^1
Nb	0 (21)	(3.9×10^{-3})	1 (0)	1.2×10^{-2}	≦ 0.010	5.0×10^{-3}
Mo	0 (21)	7.6×10^{-4}	1 (1)	2.0×10^{-3}	≦ 0.005	1.0×10^{-3}
Th	0 (16)	(1.0×10^{-5})	0 (0)	—	—	1.0×10^{-5}
U	1 (20)	(8.1×10^{-5})	2 (0)	3.5×10^{-5}	≦ 3.5E-04	5.0×10^{-5}
SUS304						
元素	分析データ ^{a)}		文献データ ^{b)}		成分管理目標値 (質量分率%) (JIS G 4305 ^[4])	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	21 (0)	4.9×10^{-2}	13 (3)	5.9×10^{-2}	≦ 0.08	5.0×10^{-2}
N	21 (0)	4.6×10^{-2}	5 (0)	6.9×10^{-2}	—	5.0×10^{-2}
Na	0 (0)	—	1 (0)	9.7×10^{-4}	—	1.0×10^{-3}
S	9 (0)	3.9×10^{-3}	11 (3)	1.6×10^{-2}	≦ 0.03	1.0×10^{-2}
Cl	0 (9)	(7.3×10^{-4})	1 (0)	7.0×10^{-3}	—	1.0×10^{-3}
K	0 (4)	(1.0×10^{-4})	0 (1)	(3.0×10^{-4})	—	1.0×10^{-4}
V	0 (0)	—	1 (0)	4.6×10^{-2}	—	5.0×10^{-2}
Cr	9 (0)	1.8×10^1	18 (0)	1.9×10^1	18.00 ~ 20.00	2.0×10^1
Mn	9 (0)	1.5×10^0	11 (5)	1.3×10^0	≦ 2.00	1.0×10^0
Fe	9 (0)	7.2×10^1	4 (0)	7.0×10^1	—	7.0×10^1
Co	21 (0)	1.2×10^{-1}	3 (0)	7.7×10^{-2}	—	1.0×10^{-1}
Ni	21 (0)	8.7×10^0	18 (0)	9.4×10^0	8.00 ~ 10.50	1.0×10^1
Cu	0 (0)	—	5 (0)	1.8×10^{-1}	—	1.0×10^{-1}
Zn	0 (0)	—	1 (0)	4.6×10^{-2}	—	5.0×10^{-2}
Zr	5 (7)	2.8×10^{-4}	1 (0)	1.0×10^{-3}	—	5.0×10^{-4}
Nb	15 (0)	2.0×10^{-2}	2 (0)	9.5×10^{-3}	—	1.0×10^{-2}
Mo	15 (6)	1.6×10^{-1}	5 (0)	1.8×10^{-1}	—	1.0×10^{-1}
Th	0 (9)	(5.0×10^{-7})	0 (1)	(1.0×10^{-4})	—	1.0×10^{-7}
U	0 (9)	(5.0×10^{-7})	0 (1)	(2.0×10^{-4})	—	1.0×10^{-7}

注記1 上記は、分析データ及び文献データの平均値から、各元素の推定存在濃度（オーダー）を評価した結果である。
注記2 データ数は、検出値のデータ数と、その横に括弧書きで検出限界以下のデータ数も合わせて記載した。
注記3 平均値は、検出データの平均値を記載した。ただし、検出限界データしか存在しない元素は、括弧書きで検出限界データの平均値を記載した（ZrTN804DのUは検出データ+検出限界データの平均値を括弧書きで記載した）。
注記4 存在濃度レベルの推定が困難な元素（ZrTN804DのNa, Zn）は、地殻存在割合^[29]を利用して推定存在濃度レベルを評価した。
注^{a)} 分析データ：放射化計算条件を設定するために事業者が評価対象廃棄物（材料）中の元素分析を実施した結果^[2]
注^{b)} 文献データ：一般公開文献情報^{[5]~[28]}

表 I.3-各元素の元素分析データ収集結果 (ZrTN804D)

元素	データ数	元素分析データ ¹⁾						データ数	分析データ ²⁾						成分管理目標値 (JIS H 4751 ³⁾) (質量分率%)
		対数正規分布		正規分布(両側)		一般分布			対数正規分布		正規分布(両側)		一般分布		
		平均値 (質量分率%)	標準偏差 (質量分率%)	平均値 (質量分率%)	標準偏差 (質量分率%)	最小値 (質量分率%)	最大値 (質量分率%)		平均値 (質量分率%)	標準偏差 (質量分率%)	平均値 (質量分率%)	標準偏差 (質量分率%)	最小値 (質量分率%)	最大値 (質量分率%)	
N	21 (0)	3.1 × 10 ⁻² (-2.5)	3.7 × 10 ⁻² (0.08)	3.2 × 10 ⁻²	5.2 × 10 ⁻²	2.2 × 10 ⁻²	4.1 × 10 ⁻²	10 (1)	2.8 × 10 ⁻² (-2.6)	4.6 × 10 ⁻² (0.22)	3.2 × 10 ⁻²	2.0 × 10 ⁻²	1.4 × 10 ⁻²	8.0 × 10 ⁻²	≧ 0.008 (不純物)
O	5 (0)	1.3 × 10 ⁻¹ (-0.9)	1.4 × 10 ⁻¹ (0.01)	1.8 × 10 ⁻¹	3.7 × 10 ⁻¹	1.3 × 10 ⁻¹	1.4 × 10 ⁻¹	5 (0)	1.1 × 10 ⁻¹ (-0.9)	1.3 × 10 ⁻¹ (0.05)	1.1 × 10 ⁻¹	1.3 × 10 ⁻¹	9.5 × 10 ⁻²	1.3 × 10 ⁻¹	—
S	0 (0)	—	—	—	—	—	—	1 (0)	3.5 × 10 ⁻⁴ (-2.5)	—	3.5 × 10 ⁻⁴	—	—	—	—
Cl	0 (21)	5.0 × 10 ⁻⁴ (-3.3)	—	5.0 × 10 ⁻⁴	—	5.0 × 10 ⁻⁴	5.0 × 10 ⁻⁴	0 (0)	—	—	—	—	—	—	—
K	0 (4)	1.0 × 10 ⁻⁴ (-4.0)	—	1.0 × 10 ⁻⁴	—	1.0 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻⁴	0 (0)	—	—	—	—	—	—	—
Fe	5 (0)	2.1 × 10 ⁻³ (-0.7)	2.2 × 10 ⁻³ (0.01)	2.1 × 10 ⁻³	5.5 × 10 ⁻³	2.1 × 10 ⁻³	2.2 × 10 ⁻³	18 (0)	2.1 × 10 ⁻³ (-0.7)	2.2 × 10 ⁻³ (0.03)	2.1 × 10 ⁻³	1.3 × 10 ⁻³	1.8 × 10 ⁻³	2.4 × 10 ⁻³	0.18 ~ 0.24
Co	0 (21)	3.3 × 10 ⁻⁴ (-3.5)	—	7.6 × 10 ⁻⁴	—	1.0 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻⁴	5 (0)	2.8 × 10 ⁻⁴ (-3.5)	9.0 × 10 ⁻⁴ (0.30)	4.7 × 10 ⁻⁴	4.8 × 10 ⁻⁴	1.1 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻⁴	≧ 0.002 (不純物)
Ni	11 (10)	4.2 × 10 ⁻⁴ (-2.4)	4.5 × 10 ⁻⁴ (0.04)	4.2 × 10 ⁻⁴	3.4 × 10 ⁻⁴	3.5 × 10 ⁻⁴	4.8 × 10 ⁻⁴	3 (1)	3.2 × 10 ⁻⁴ (-2.5)	5.1 × 10 ⁻⁴ (0.20)	3.5 × 10 ⁻⁴	1.5 × 10 ⁻⁴	2.0 × 10 ⁻⁴	5.0 × 10 ⁻⁴	≧ 0.007 (不純物)
Cu	0 (0)	—	—	—	—	—	—	3 (0)	1.6 × 10 ⁻³ (-2.8)	2.4 × 10 ⁻³ (0.17)	1.7 × 10 ⁻³	5.8 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻³	2.0 × 10 ⁻³	≧ 0.005 (不純物)
Zr	16 (0)	9.8 × 10 ⁻¹ (2.0)	—	9.8 × 10 ⁻¹	—	9.8 × 10 ⁻¹	9.8 × 10 ⁻¹	1 (0)	9.8 × 10 ⁻¹ (2.0)	—	9.8 × 10 ⁻¹	—	—	—	規格
Nb	0 (21)	2.9 × 10 ⁻⁴ (-2.5)	—	3.9 × 10 ⁻⁴	—	5.0 × 10 ⁻⁴	5.0 × 10 ⁻⁴	1 (0)	1.2 × 10 ⁻² (-1.9)	—	1.2 × 10 ⁻²	—	—	—	≧ 0.010 (不純物)
Mo	0 (21)	3.3 × 10 ⁻⁴ (-3.5)	—	7.6 × 10 ⁻⁴	—	1.0 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻⁴	1 (1)	2.0 × 10 ⁻⁴ (-2.7)	—	2.0 × 10 ⁻⁴	—	—	—	≧ 0.005 (不純物)
Ti	0 (16)	1.0 × 10 ⁻⁴ (-5.0)	—	1.0 × 10 ⁻⁴	—	1.0 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻⁴	0 (0)	—	—	—	—	—	—	—
U	1 (20)	2.0 × 10 ⁻⁴ (-3.7)	—	8.1 × 10 ⁻⁴	—	—	—	2 (0)	3.2 × 10 ⁻⁴ (-4.5)	—	3.5 × 10 ⁻⁴	—	2.0 × 10 ⁻⁴	5.0 × 10 ⁻⁴	≧ 3.5E-04 (不純物)

注1) 上記は、元素分析データ及び文献データの平均値、標準偏差などを算出した結果である。また、集計結果のうち、対数正規分布の標準偏差は、平均値+1σで表示し、下限(括弧内)に対数値を合わせて表記した。
 注2) データ数は、検出値のデータ数と、その欄に格納書まで検出下限値データ数も合わせて記載した。
 注3) 平均値、標準偏差などの集計結果のうち、格納書では、検出下限値データで集計した結果を意味する(ただし、格納書がない場合は、検出値データだけで集計した結果である)。
 注4) データ数が0未満の元素は、標準偏差の値を“-”とした。また、データ数が1点の元素は、一般分布の値を“-”とした。
 注5) 元素分析データ：放射能測定条件を設定するために事業者が詳細対象燃焼物(材料)中の元素の化学分析を実施した結果²⁾
 注6) 分析データ：一般公開文獻情報³⁾(JIS H 4751-10)

表 I.9-ZrTN804D の各元素の濃度分布条件設定結果

元素	成分 管理条件	濃度分布の検定		濃度分布条件の設定結果									
		濃度分布基本形状		収集データ			対数正規分布		正規分布		一般分布		
		選択	設定	分析	文獻	データ数	平均値 (質量分率%)	標準偏差 (質量分率%) (平均+1σ)	平均値 (質量分率%)	標準偏差 (質量分率%)	最小値 (質量分率%)	最大値 (質量分率%)	
N	不純物成分	対数正規分布	→	○	—	比較的少	3.2 × 10 ⁻² (-2.5)	5.0 × 10 ⁻² (0.2)	—	—	—	—	
O	微量成分	対数正規分布	→	○	—	比較的少	1.6 × 10 ⁻¹ (-0.8)	2.0 × 10 ⁻¹ (0.1)	—	—	—	—	
S	微量成分	対数正規分布	→	—	○	非常に少	4.0 × 10 ⁻¹ (-2.4)	1.3 × 10 ⁻² (0.5)	—	—	—	—	
Cl	微量成分	対数正規分布	→	○	—	ND値だけ	2.0 × 10 ⁻⁴ (-3.7)	3.2 × 10 ⁻⁴ (0.2)	—	—	—	—	
K	微量成分	対数正規分布	→	○	—	ND値だけ	4.0 × 10 ⁻⁵ (-4.4)	6.3 × 10 ⁻⁶ (0.2)	—	—	—	—	
Fe	主成分	一般分布	→	○	—	比較的少	—	—	—	—	0.18	0.24	
Co	不純物成分	対数正規分布	→	○	—	ND値だけ	4.0 × 10 ⁻⁴ (-3.4)	6.3 × 10 ⁻⁴ (0.2)	—	—	—	—	
Ni	不純物成分	対数正規分布	正規分布	○	—	比較的少	—	—	5 × 10 ⁻³	7 × 10 ⁻⁴	—	—	
Cu	不純物成分	対数正規分布	正規分布	—	○	比較的少	—	—	2 × 10 ⁻³	6 × 10 ⁻⁴	—	—	
Zr	主成分	一般分布	→	○	—	比較的少	—	—	—	—	98	100	
Nb	不純物成分	対数正規分布	→	○	—	ND値だけ	2.0 × 10 ⁻¹ (-2.7)	3.2 × 10 ⁻¹ (0.2)	—	—	—	—	
Mo	不純物成分	対数正規分布	→	○	—	ND値だけ	4.0 × 10 ⁻⁴ (-3.4)	6.3 × 10 ⁻⁴ (0.2)	—	—	—	—	
Ti	微量成分	対数正規分布	→	○	—	ND値だけ	4.0 × 10 ⁻⁶ (-5.4)	6.3 × 10 ⁻⁶ (0.2)	—	—	—	—	
U	不純物成分	対数正規分布	→	○	—	非常に少	2.5 × 10 ⁻⁴ (-3.6)	7.9 × 10 ⁻⁴ (0.5)	—	—	—	—	

注1) 収集データの分析及び文献は、“分析-放射能測定条件を設定するために事業者が詳細対象燃焼物(材料)中の元素の化学分析を実施した結果²⁾”と文獻-一般公開文獻情報³⁾(JIS H 4751-10)を意味する。
 注2) 収集データのデータ数は、濃度分布条件設定の結果から、“比較的少”=元素成分データ数が比較的少ない元素、“非常に少”=元素成分データ数が非常に少ない元素、“ND値だけ”=元素成分データ
 に検出下限値(ND値)1点ない元素”で区分した。
 注3) 対数正規分布の標準偏差は、平均値+標準偏差(1σ)で表示した。また、対数正規分布の格納書(下段)には、平均値+標準偏差(1σの値)の対数表示値を示した。
 注4) 平均値及び標準偏差は、有効数字3桁目(ただし、対数正規分布の場合は、対数値の有効数字3桁目)を切り上げて設定した。

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

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

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

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

	燃焼度の実態調査	設定頻度分布	中性子照射時間の設定条件 ^{a)}
中性子照射時間の条件	約 13 000 体の燃料集合体 (すなわち、付随するチャンネルボックス) の燃焼度の実態調査結果を踏まえ、次の実態分布が評価された。 燃焼度 : 正規分布	正規分布	平均値=1786 日 標準偏差=654 日

注 ^{a)} 中性子照射時間の設定条件は、燃料集合体の燃焼度 (実績) に基づき比出力を踏まえて算出した。なお、比出力にはプラントの設置許可申請書記載値の最小値を利用した。

表 I.21-ZrTN804D の放射化計算結果 (BWR チャンネルボックスの本体)

単位: Bq/g

計算 No.	¹⁴ C	³⁶ Cl	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Nb	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	¹³⁷ Cs	²³⁹ Np
1	1.68 ×10 ¹¹	6.95 ×10 ⁸	2.16 ×10 ¹³	4.47 ×10 ¹¹	1.74 ×10 ⁹	3.09 ×10 ⁹	2.00 ×10 ⁷	7.09 ×10 ³	1.95 ×10 ⁹	1.16 ×10 ³
2	1.14 ×10 ¹¹	3.16 ×10 ⁸	2.86 ×10 ¹³	2.72 ×10 ¹¹	6.90 ×10 ⁹	1.47 ×10 ⁹	1.71 ×10 ⁷	4.77 ×10 ³	1.46 ×10 ¹⁰	1.52 ×10 ⁴
3	3.80 ×10 ¹⁰	2.52 ×10 ⁸	2.01 ×10 ¹³	2.16 ×10 ¹¹	1.96 ×10 ¹⁰	1.36 ×10 ⁹	2.09 ×10 ⁷	1.46 ×10 ³	4.43 ×10 ¹⁰	5.22 ×10 ⁴
4	7.37 ×10 ¹⁰	3.00 ×10 ⁸	2.49 ×10 ¹³	2.68 ×10 ¹¹	8.73 ×10 ⁹	2.17 ×10 ⁹	7.58 ×10 ⁶	5.98 ×10 ³	1.79 ×10 ¹⁰	1.93 ×10 ⁴
5	4.66 ×10 ¹⁰	2.46 ×10 ⁸	8.33 ×10 ¹²	2.03 ×10 ¹¹	5.24 ×10 ⁹	1.98 ×10 ⁹	4.99 ×10 ⁶	3.38 ×10 ³	1.02 ×10 ¹⁰	1.14 ×10 ⁴
6	3.95 ×10 ¹⁰	2.19 ×10 ⁸	1.24 ×10 ¹³	1.49 ×10 ¹¹	1.06 ×10 ¹⁰	2.45 ×10 ⁹	1.33 ×10 ⁷	8.06 ×10 ³	2.29 ×10 ¹⁰	3.22 ×10 ⁴
7	3.77 ×10 ⁹	1.59 ×10 ⁷	1.88 ×10 ¹²	1.67 ×10 ¹⁰	1.82 ×10 ⁹	8.15 ×10 ⁷	1.17 ×10 ⁶	5.31 ×10 ²	2.34 ×10 ⁹	4.01 ×10 ³
8	4.31 ×10 ⁹	5.99 ×10 ⁷	2.97 ×10 ¹²	4.05 ×10 ¹⁰	6.97 ×10 ⁸	3.38 ×10 ⁸	1.44 ×10 ⁶	2.92 ×10 ²	1.02 ×10 ⁹	1.74 ×10 ³
9	1.46 ×10 ¹⁰	6.51 ×10 ⁷	6.97 ×10 ¹²	5.13 ×10 ¹⁰	1.67 ×10 ¹⁰	2.94 ×10 ⁸	4.99 ×10 ⁶	7.18 ×10 ²	2.51 ×10 ¹⁰	2.88 ×10 ⁴
10	7.34 ×10 ¹⁰	1.23 ×10 ⁸	3.83 ×10 ¹³	2.29 ×10 ¹¹	2.35 ×10 ⁹	3.43 ×10 ⁹	2.50 ×10 ⁷	1.11 ×10 ³	3.11 ×10 ⁹	2.89 ×10 ³
11	1.17 ×10 ¹⁰	8.48 ×10 ⁷	4.43 ×10 ¹²	6.45 ×10 ¹⁰	6.69 ×10 ⁸	7.31 ×10 ⁸	6.82 ×10 ⁵	2.93 ×10 ²	9.89 ×10 ⁸	1.15 ×10 ³
12	3.81 ×10 ¹⁰	3.70 ×10 ⁸	1.85 ×10 ¹³	1.39 ×10 ¹¹	1.84 ×10 ⁹	7.42 ×10 ⁸	1.19 ×10 ⁷	9.98 ×10 ³	3.02 ×10 ⁹	4.30 ×10 ³
13	1.18 ×10 ¹¹	3.25 ×10 ⁸	1.37 ×10 ¹³	2.98 ×10 ¹¹	3.91 ×10 ⁹	3.27 ×10 ⁹	1.96 ×10 ⁷	2.51 ×10 ³	7.16 ×10 ⁹	7.39 ×10 ³
14	2.55 ×10 ¹⁰	2.42 ×10 ⁸	2.20 ×10 ¹³	1.41 ×10 ¹¹	2.28 ×10 ⁹	1.91 ×10 ⁹	8.61 ×10 ⁶	1.37 ×10 ³	3.96 ×10 ⁹	5.21 ×10 ³
15	8.63 ×10 ⁹	6.92 ×10 ⁷	1.31 ×10 ¹³	4.62 ×10 ¹⁰	2.62 ×10 ⁸	1.57 ×10 ⁸	2.78 ×10 ⁵	9.20 ×10 ²	3.42 ×10 ⁹	2.06 ×10 ²
16	1.42 ×10 ¹¹	4.27 ×10 ⁸	10.00 ×10 ¹²	3.52 ×10 ¹¹	9.76 ×10 ⁹	4.50 ×10 ⁹	2.28 ×10 ⁷	7.42 ×10 ³	2.16 ×10 ¹⁰	2.01 ×10 ⁴
17	6.99 ×10 ¹⁰	4.75 ×10 ⁸	2.16 ×10 ¹³	1.62 ×10 ¹¹	8.58 ×10 ⁹	2.98 ×10 ⁹	1.20 ×10 ⁷	5.47 ×10 ³	1.68 ×10 ¹⁰	2.42 ×10 ⁴
18	3.26 ×10 ¹⁰	2.42 ×10 ⁸	1.70 ×10 ¹³	2.62 ×10 ¹¹	7.16 ×10 ⁹	2.30 ×10 ⁹	1.19 ×10 ⁷	5.07 ×10 ³	1.50 ×10 ¹⁰	1.57 ×10 ⁴
19	1.65 ×10 ¹⁰	1.17 ×10 ⁸	1.23 ×10 ¹³	7.30 ×10 ¹⁰	3.54 ×10 ⁹	1.36 ×10 ⁹	4.53 ×10 ⁶	1.93 ×10 ²	6.23 ×10 ⁹	9.66 ×10 ³
20	7.10 ×10 ¹⁰	3.30 ×10 ⁸	2.46 ×10 ¹³	2.75 ×10 ¹¹	1.75 ×10 ¹⁰	2.90 ×10 ⁹	1.90 ×10 ⁷	1.38 ×10 ⁴	4.08 ×10 ¹⁰	3.90 ×10 ⁴
21	1.00 ×10 ¹¹	2.30 ×10 ⁸	1.98 ×10 ¹³	2.79 ×10 ¹¹	3.31 ×10 ¹⁰	3.07 ×10 ⁹	3.23 ×10 ⁷	2.60 ×10 ⁴	7.76 ×10 ¹⁰	8.58 ×10 ⁴
22	6.23 ×10 ⁸	7.05 ×10 ⁶	8.42 ×10 ¹¹	5.11 ×10 ⁹	2.05 ×10 ⁸	2.08 ×10 ⁷	5.43 ×10 ⁴	4.47 ×10 ¹	2.22 ×10 ⁸	1.26 ×10 ²
23	5.41 ×10 ¹⁰	1.66 ×10 ⁸	6.33 ×10 ¹²	1.09 ×10 ¹¹	1.07 ×10 ⁹	6.25 ×10 ⁸	1.91 ×10 ⁶	5.72 ×10 ²	1.72 ×10 ⁹	2.12 ×10 ³
24	1.50 ×10 ¹¹	5.91 ×10 ⁸	4.33 ×10 ¹³	3.87 ×10 ¹¹	1.76 ×10 ¹⁰	2.16 ×10 ⁹	2.90 ×10 ⁷	1.38 ×10 ⁴	4.13 ×10 ¹⁰	3.75 ×10 ⁴
25	5.39 ×10 ⁹	1.46 ×10 ⁸	3.45 ×10 ¹²	5.27 ×10 ¹⁰	1.23 ×10 ⁹	5.93 ×10 ⁸	9.51 ×10 ⁵	5.05 ×10 ²	1.79 ×10 ⁹	2.14 ×10 ³
26	6.61 ×10 ¹⁰	2.26 ×10 ⁸	4.30 ×10 ¹³	3.30 ×10 ¹¹	7.53 ×10 ⁹	4.54 ×10 ⁹	2.54 ×10 ⁷	5.28 ×10 ³	1.52 ×10 ¹⁰	1.44 ×10 ⁴
27	5.16 ×10 ¹⁰	8.60 ×10 ⁸	4.22 ×10 ¹³	2.93 ×10 ¹¹	6.89 ×10 ⁹	1.21 ×10 ⁹	1.83 ×10 ⁷	4.95 ×10 ³	1.46 ×10 ¹⁰	1.51 ×10 ⁴
28	8.90 ×10 ¹⁰	4.84 ×10 ⁸	1.69 ×10 ¹³	2.27 ×10 ¹¹	6.72 ×10 ⁹	2.53 ×10 ⁹	9.38 ×10 ⁶	4.44 ×10 ³	1.39 ×10 ¹⁰	1.45 ×10 ⁴
29	3.07 ×10 ⁹	3.30 ×10 ⁷	2.82 ×10 ¹²	1.70 ×10 ¹⁰	3.00 ×10 ⁸	2.06 ×10 ⁸	1.14 ×10 ⁵	8.63 ×10 ¹	3.56 ×10 ⁸	2.49 ×10 ²
30	7.64 ×10 ¹⁰	2.46 ×10 ⁸	1.66 ×10 ¹³	2.35 ×10 ¹¹	7.51 ×10 ⁹	1.14 ×10 ⁹	7.78 ×10 ⁶	5.11 ×10 ³	1.59 ×10 ¹⁰	1.72 ×10 ⁴
31	1.05 ×10 ¹⁰	5.41 ×10 ⁷	5.39 ×10 ¹²	3.97 ×10 ¹⁰	2.03 ×10 ⁹	3.32 ×10 ⁸	1.10 ×10 ⁶	9.51 ×10 ²	3.11 ×10 ⁹	5.66 ×10 ³
32	1.58 ×10 ¹¹	5.45 ×10 ⁸	4.02 ×10 ¹³	4.63 ×10 ¹¹	1.37 ×10 ¹⁰	6.13 ×10 ⁹	2.80 ×10 ⁷	1.01 ×10 ⁴	3.02 ×10 ¹⁰	1.83 ×10 ⁴
33	1.99 ×10 ⁹	1.90 ×10 ⁷	4.74 ×10 ¹¹	1.24 ×10 ¹⁰	8.46 ×10 ⁷	2.93 ×10 ⁷	1.09 ×10 ⁵	2.19 ×10 ¹	9.54 ×10 ⁷	4.79 ×10 ¹
34	4.42 ×10 ¹⁰	4.18 ×10 ⁸	2.05 ×10 ¹³	1.88 ×10 ¹¹	1.12 ×10 ⁹	2.32 ×10 ⁹	6.19 ×10 ⁶	5.17 ×10 ²	1.47 ×10 ⁹	1.72 ×10 ³
35	1.15 ×10 ¹⁰	2.72 ×10 ⁸	1.13 ×10 ¹³	1.82 ×10 ¹¹	1.23 ×10 ⁹	1.58 ×10 ⁹	3.89 ×10 ⁶	5.83 ×10 ²	1.73 ×10 ⁹	1.56 ×10 ³
36	4.64 ×10 ¹⁰	2.21 ×10 ⁸	2.17 ×10 ¹³	1.60 ×10 ¹¹	2.69 ×10 ⁹	1.04 ×10 ⁹	8.81 ×10 ⁶	1.57 ×10 ³	4.83 ×10 ⁹	7.12 ×10 ³
37	9.83 ×10 ⁹	1.28 ×10 ⁸	3.44 ×10 ¹³	1.31 ×10 ¹¹	1.85 ×10 ⁹	6.89 ×10 ⁸	3.71 ×10 ⁶	1.04 ×10 ³	3.25 ×10 ⁹	4.48 ×10 ³
38	3.57 ×10 ¹⁰	2.90 ×10 ⁸	2.43 ×10 ¹³	2.73 ×10 ¹¹	7.61 ×10 ⁹	3.30 ×10 ⁹	1.33 ×10 ⁷	5.62 ×10 ³	1.64 ×10 ¹⁰	1.88 ×10 ⁴
39	9.38 ×10 ¹⁰	1.76 ×10 ⁸	2.20 ×10 ¹³	2.47 ×10 ¹¹	3.22 ×10 ⁹	1.70 ×10 ⁹	7.64 ×10 ⁶	2.12 ×10 ²	6.23 ×10 ⁹	6.11 ×10 ³
40	3.32 ×10 ¹⁰	1.82 ×10 ⁸	1.25 ×10 ¹³	1.51 ×10 ¹¹	1.71 ×10 ⁹	1.82 ×10 ⁹	3.31 ×10 ⁶	9.39 ×10 ²	2.97 ×10 ⁹	3.92 ×10 ³

解説表 3-チャンネルボックス^{a)}の母材に対するクラッドの放射能比^{b)}[5]

³ H	¹⁴ C	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	¹³⁷ Cs
0.18 %	0.0041 %	0.95 %	0.21 %	0.27 %

注^{a)} 福島第二発電所 1号機から発生したチャンネルボックス。
^{b)} 放射化学分析等によって得られた単位面積当たりの放射能の比 (クラッドの母材に対する比)。

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

(1)炉心配置位置の違いによる中性子スペクトルの変動幅について

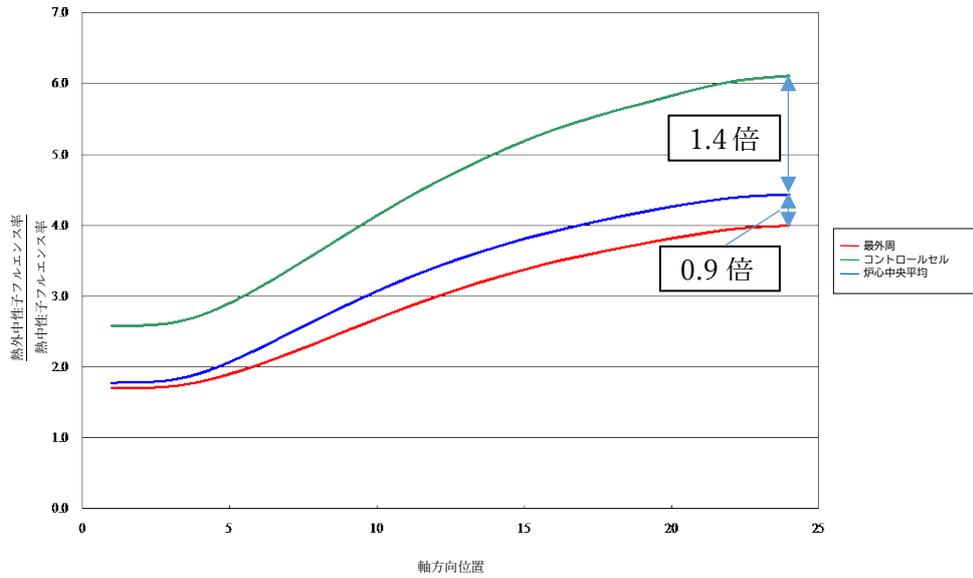
BWRの径方向の炉心配置位置（最外周、コントロールセル（注1）、炉心中央平均）の違いによる中性子スペクトルの変動幅の評価として、熱中性子フルエンス率に対する高速中性子フルエンス率及び熱外中性子フルエンス率の比率がどの程度変動するか評価した結果を図に示します。

図に示すとおり、高速中性子、熱外中性子ともに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は、炉心中央平均の中性子スペクトル（下図グラフの青線）に対して0.9（グラフの赤線）～1.4倍（グラフの緑線）（-10%～+40%）程度の範囲となります。

炉心配置位置による中性子スペクトルの変動範囲

	軸方向	径方向
中性子スペクトル	軸方向の位置における中性子スペクトルの分布を考慮	炉心配置位置の違い（最外周、コントロールセル、炉心中央平均）による熱外中性子スペクトル、高速中性子スペクトルの変動範囲を確認
変動幅の評価例		
高速中性子スペクトル	<p style="text-align: center;">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</p> <p>本グラフは標準図 G.6 に事業者から提示されたコントロールセルのデータを追加したもの</p> <p>評価結果：炉心中央平均の高速中性子スペクトルに対し 0.9～1.4 倍</p>	

熱外中性子
スペクトル



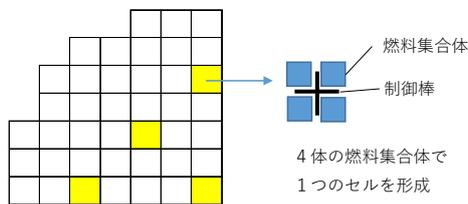
BWR チャンネルボックスでの熱外中性子フルエンス率の
熱中性子フルエンス率に対する比

本グラフは標準図 G.7 に事業者から提示されたコントロールセルのデータを追加したもの

評価結果：炉心中央平均の熱外中性子スペクトルに対し 0.9～1.4 倍

注 1：コントロールセルとは、BWR の出力運転中に反応度制御のために制御棒を挿入するセルをいう。一般的にコントロールセルの位置は限定され、燃焼の進んだ燃料が装荷される。

コントロールセルは運転中も制御棒を挿入しているため、当該セルの中性子フルエンス率は低くなり、またスペクトルは炉心平均と比較して高速、熱外中性子の寄与が高くなる。



■ : コントロールセル

BWR炉心を上からみた図 (1/4 炉心)

(2)中性子スペクトルの違いによる放射化放射エネルギーの変動範囲について

(1)で評価した炉心配置位置の違いによる高速中性子及び熱外中性子のスペクトルの変動が放射化放射エネルギーに及ぼす影響を確認するため、スペクトルインデックスを任意に設定できる ORIGEN79 コードを用い、高速中性子及び熱外中性子のスペクトルインデックスを0～10 倍に振って、放射化放射エネルギーの感度を評価しました。感度解析は、埋設施設の申請核種を想定した核種に対し実施しました。

各解析ケースにおいては、基本ケース (F4：基本ケース 1、R2：基本ケース 2) から高速中性子、熱外中性子についてそれぞれ桁で振ってスペクトルインデックスの違いに対する放射化放射エネルギーの感度解析を実施しました。(下表参照：高速中性子スペクトルインデックスの感度解析条件：F4 (基本ケース 1) と F5、熱外中性子スペクトルインデックスの感度解析条件：R2 (基本ケース 2) と R4)

感度解析結果のうち、感度が高かった核種の結果例を下図に示します。Ni-63 と Tc-99 の放射化放射エネルギーについて、各基本ケースに対する比較ケースにおける放射化放射エネルギーの比を見ると、高速中性子に対して感度はありませんでした。一方、熱外中性子に対しては、スペクトルインデックスが 10 倍になると Ni-63 の生成量は約 3～8 倍 (比例係数 (注 2) で 0.3～0.8) となり、Tc-99 の生成量は約 3～9 倍 (比例係数で 0.3～0.9) となりました。その他の核種についても同様な傾向を示しました。

以上より、中性子スペクトルの変動による放射化放射エネルギーへの影響は、高速中性子スペクトルの変動比率に対しては感度はなく、熱外中性子スペクトルの変動比率に対する放射化放射エネルギーの変動比率は最大でも 0.9 倍程度であることを確認しました。

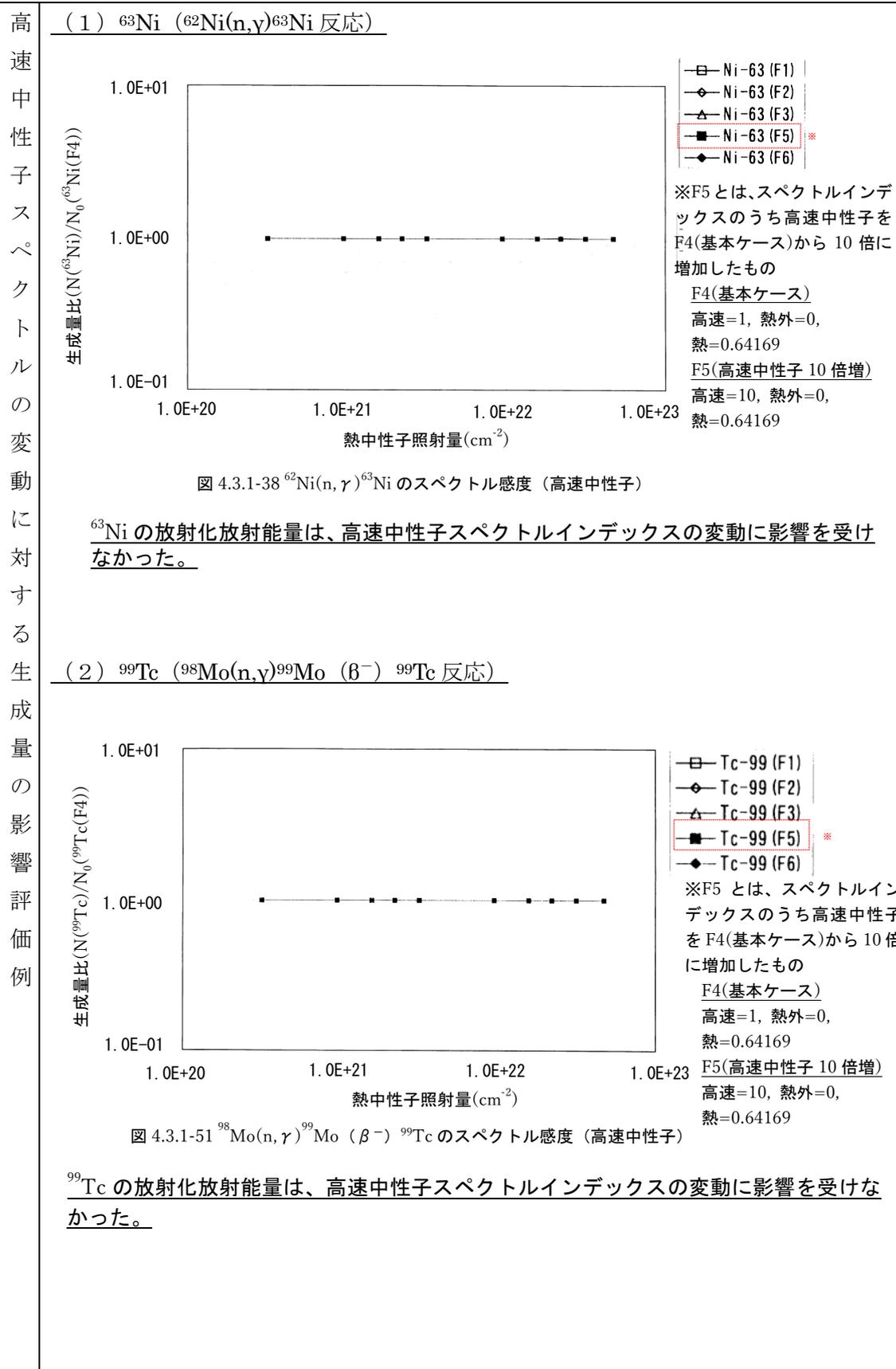
注 2：比較ケースの生成放射能比／比較ケースの中性子フルエンス率比
(各々の比は基本ケースとの比を意味します)

表 中性子スペクトルの違いに対する放射化放射エネルギーの感度解析条件 (ORIGEN index)

感度解析のケース		中性子スペクトルインデックス			中性子束 (cm ⁻² ・sec ⁻¹)		
		高速中性子	熱外中性子	熱中性子	高速中性子	熱外中性子	熱中性子
F4	基本ケース 1 (高速中性子の影響評価)	1	0	0.64169	6.9E13	0.0E00	1.0E14
F5	高速中性子のスペクトルインデックスを 10 倍に設定したケース	10	0	0.64169	6.9E14	0.0E00	1.0E14
R2	基本ケース 2 (熱外中性子の影響評価)	0	0.1	0.64169	0.0E00	1.45E14	1.0E14
R4	熱外中性子のスペクトルインデックスを 10 倍に設定したケース	0	1	0.64169	0.0E00	1.45E15	1.0E14

事業者より提供されたデータ

中性子スペクトルの変動による放射化放射エネルギーの変動範囲



熱外中性子スペクトルの変動に対する核種生成量の影響評価例

(1) ^{63}Ni ($^{62}\text{Ni}(n,\gamma)^{63}\text{Ni}$ 反応)

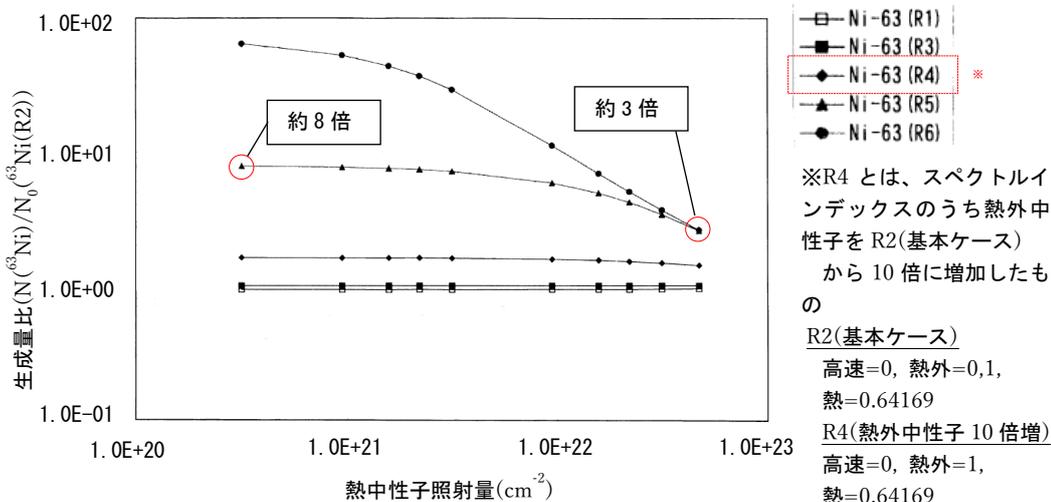


図 4.3.1-39 $^{62}\text{Ni}(n,\gamma)^{63}\text{Ni}$ のスペクトル感度 (熱外中性子)

熱外中性子スペクトルインデックスの変動比率に対する ^{63}Ni 生成反応の感度は、熱外中性子の基本ケース (R2) から熱外中性子の 10 倍増に対し、 ^{63}Ni 放射化放射量量は約 3~8 倍増 (比率 0.3~0.8) であった。

(2) ^{99}Tc ($^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}(\beta^-)^{99}\text{Tc}$ 反応)

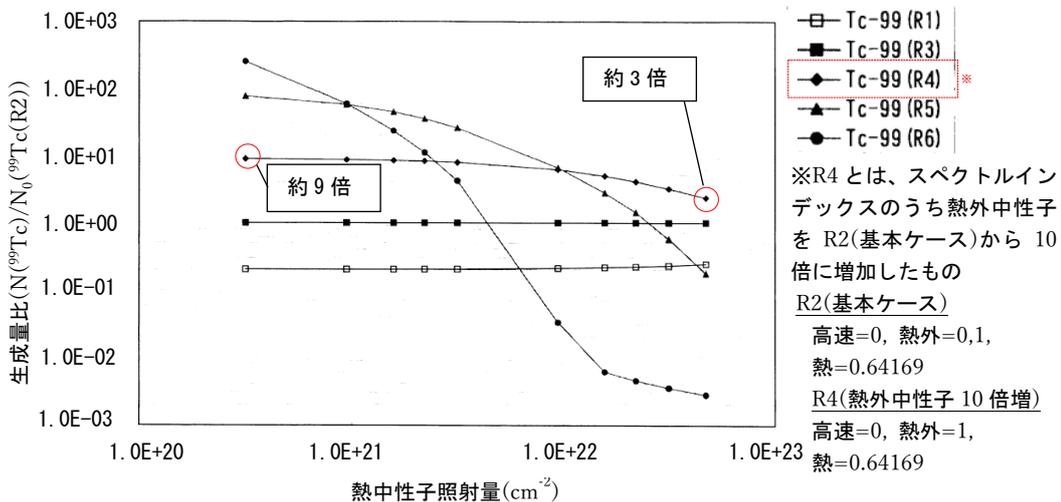


図 4.3.1-52 $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}(\beta^-)^{99}\text{Tc}$ のスペクトル感度 (熱外中性子)

熱外中性子スペクトルインデックス変動に対する ^{99}Tc 生成反応の感度は、熱外中性子の基本ケース (R2) から熱外中性子の 10 倍増に対し、 ^{63}Ni 放射化放射量量は約 3~9 倍増 (比率 0.3~0.9) であった。

事業者より提供されたデータ

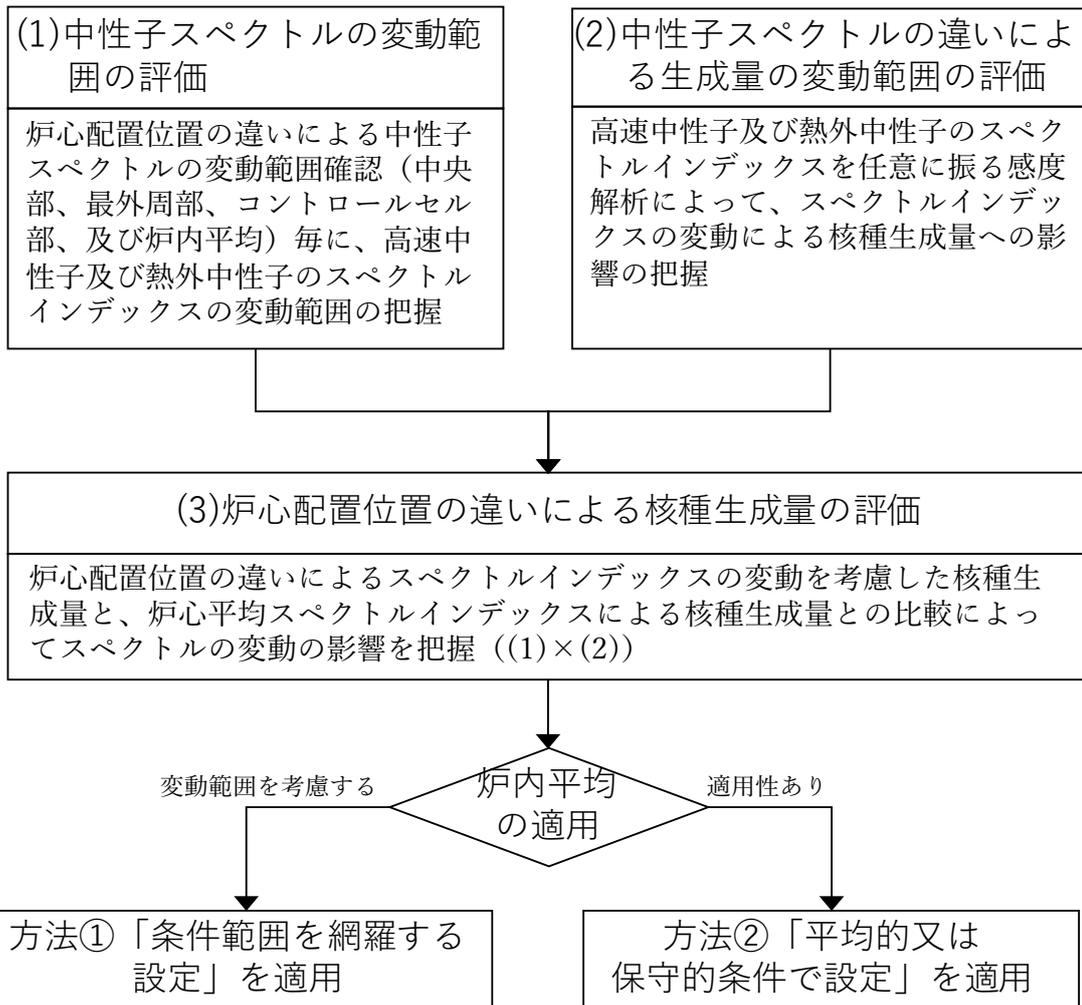
(3) 炉心配置位置の違いによる放射化放射エネルギーの影響評価

(1)(2)の結果より、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範囲は、炉心平均のスペクトルに対して高速、熱外ともに0.9~1.4倍(-10%~+40%)程度となっています。また、スペクトルの変動による放射化放射エネルギーへの影響は高速中性子スペクトルの変動に対しては影響がなく、熱外中性子スペクトルの変動比率に対する放射化放射エネルギーの感度は最大でも0.9倍であることから、炉心配置位置の違いによる放射化放射エネルギーの影響は、-9%~+36%程度となることがわかります。

なお+36%となるのはチャンネルボックスがコントロールセルに配置されている場合となりますが、実際にはチャンネルボックスは炉心内をローテーションして使用されますのでコントロールセルのみに配置されることはなく、炉心配置位置の違いによる中性子スペクトルの変動によって生じる放射化放射エネルギーへの影響はさらに小さなものになります。

上記評価は、燃料タイプの違い等による影響を考慮する必要があり、また申請核種確定後に放射化放射エネルギーの感度解析の追加評価が必要になると考えられますが、その場合でも上記に示した中性子条件設定のための手順を適用できるものと考えています。炉心平均(径方向)の中性子条件を適用するための確認手順を下図に示します。

今後、中深度処分施設の事業許可申請が行われる時期までに、実機プラントでの両者の計算結果の比較例が蓄積され、本手順の妥当性の定量的な根拠がより明確になることが期待されます。



炉心平均（径方向）の中性子条件を適用するための確認手順

以上

放射化計算結果の妥当性確認について

放射化計算結果の妥当性確認として、基本的には分析値と計算結果の比較により妥当性を確認しますが、すべて分析値と比較する訳ではなく、計算条件の相違点から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の具体例を説明します。

放射化によって生成する核種の放射能は、中性子の照射時間が生成する核種の半減期に比べて短いなどの条件では、次式のように近似的に表されます。(附属書D参照)

$$A = \sigma \times N \times \Phi \times t \times \lambda$$

ここに、	A	: 評価対象とする放射化金属等の放射能濃度 (Bq/cm ³)
	σ	: 親核種の放射化断面積 (cm ²)
	N	: 親核種の照射前の原子数密度 (cm ⁻³)
	Φ	: 中性子フルエンス率 (n/cm ² /s)
	t	: 中性子の照射時間 (s)
	λ	: 生成核種の崩壊定数 (s ⁻¹)

さらに、放射能濃度の減衰は下式で考慮できるため、

$$\exp(-\lambda \times T)$$

ここに、	λ	: 生成核種の崩壊定数 (s ⁻¹)
	T	: 冷却時間 (s)

上記の2式を合わせると、下記のように時間減衰を考慮した放射能濃度が簡易的に評価できます。中性子フルエンス率が同じである場合は、①の差異が②～④の影響度の積と同等であることを確認することで放射化計算結果の妥当性を確認します。

$$\boxed{A} = \sigma \times \boxed{N} \times \Phi \times \boxed{t} \times \lambda \times \boxed{\exp(-\lambda \times T)}$$

① ② ③ ④

表 I.21 に BWR チャンネルボックスの本体の放射化計算結果が示されていますが、この計算 No.13 及び 38 の ⁶⁰Co 放射能濃度を参照して、放射化計算結果の妥当性確認の具体例

を説明します。

表 I.21 における計算 No.13 及び 38 の ^{60}Co 放射能濃度は表 1 のとおりです。計算 No.13 の放射化計算結果は妥当性確認が済んでいるとして、計算 No.38 の放射化計算結果が計算 No.13 の約 1.77 倍 (①に相当) であることが妥当であることを具体例により確認します。

表 1 表 I.21 における計算 No.13 及び 38 の ^{60}Co 放射能濃度 (①に相当)

計算No.	^{60}Co	影響度
13	1.37E+13	-
38	2.43E+13	1.77

この放射化計算条件は表 I.17 の元素成分条件と表 I.18 の中性子条件及び中性子照射条件であります。

表 I.18 における計算 No.13 及び 38 の中性子条件は共通であるため、この計算条件の影響はありません。

表 I.17 における計算 No.13 及び 38 の Co 濃度は表 2 のとおりであり、他に計算条件の相違がなければ、計算 No.38 の放射化計算結果は計算 No.13 の約 1.85 倍 (②に相当) となります。

また、表 I.18 における計算 No.13 及び 38 の全サイクル合計の照射時間は表 3 のとおりであり、他に計算条件の相違がなければ、計算 No.38 の放射化計算結果は計算 No.13 の約 0.887 倍 (③に相当) となります。

さらに、表 I.18 における計算 No.13 及び 38 の全サイクル合計の照射停止時間は表 4 のとおりであり、他に計算条件の相違がなければ、 ^{60}Co の半減期を考慮すると計算 No.38 の放射化計算結果は計算 No.13 の約 1.04 倍 (④に相当) となります。

表 2 表 I.17 における計算 No.13 及び 38 の Co 濃度 (②に相当)

計算No.	Co	影響度
13	2.35E-04	-
38	4.35E-04	1.85

表 3 表 I.18 における計算 No.13 及び 38 の全サイクル合計の照射時間 (③に相当)

計算No.	全サイクル合計の照射時間	影響度
13	2500	-
38	2217	0.887

表4 表I.18における計算 No.13 及び 38 の全サイクル合計の照射停止時間 (④に相当)

計算No.	全サイクル合計の照射停止時間	⁶⁰ Coの半減期を考慮した 照射停止時間における減衰率	影響度
13	1071	0.680	-
38	950	0.710	1.04

表2～表4の影響度をすべて積算すると約1.71 (②③④に相当) であり、表1の影響度の約1.77 (①に相当) と同等であるため、計算 No.38 の放射化計算結果は妥当であると判断します。

以上