

中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本手順の技術評価に関する  
日本原子力学会への説明依頼事項（その1）への回答

2021年11月5日  
(一社) 日本原子力学会  
標準委員会

標記につきましては、以下の通り回答いたします。

1. 「表1-放射能濃度決定方法の種類及び内容」

(1) 理論計算法における「ほかの手法」について、具体的に説明してください。

廃棄物ごとに放射化計算の条件を設定して放射化計算を行い、廃棄物又は廃棄物グループごとの放射能濃度を決定する方法、原子炉燃焼計算などによって理論的に得られる放射性核種の濃度比及びほかの手法で求めた放射能濃度を用いる方法。

(2) 原廃棄物分析法は、固型化処理前の廃棄物の放射能濃度を用いていますが、固型化用物質の放射化計算の要否について説明してください。

表 1-放射能濃度決定方法の種類及び内容（抜粋）

放射能濃度決定方法の種類		内 容
理論的方法	理論計算法	廃棄物ごとに放射化計算の条件を設定して放射化計算を行い、廃棄物又は廃棄物グループごとの放射能濃度を決定する方法、原子炉燃焼計算などによって理論的に得られる放射性核種の濃度比及びほかの手法で求めた放射能濃度を用いる方法。
実証的方法	原廃棄物分析法	固型化処理前の廃棄物から代表試料を採取し、放射化学分析等を行い得られる放射能濃度などを用いる方法。

回答 1 (1)

「原子炉燃焼計算などによって理論的に得られる放射性核種の濃度比<sup>1)</sup>及びほかの手法で求めた放射能濃度を用いる方法」とは、平成4年当時に原子力安全委員会(当時)が了承した廃棄体中の放射性物質濃度の決定方法の内容を示したものです。

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

この中の「ほかの手法」とは、理論的方法とそれ以外の方法と組み合わせて評価することによって放射能濃度を決定する方法であり、標準ではこれも含めて理論的方法に分類しています。

具体的には、下記のように3つの方法を組合せて評価している実績があります。

$$\text{Ni-59 放射能濃度} = \text{濃度比}(\text{Ni-59/Ni-63})^{2)} \times \text{SF}(\text{Ni-63/Co-60})^{3)} \times \text{Co-60 放射能濃度}^{4)}$$

注2) 理論計算法（原子炉燃焼計算）で理論的に求めた濃度比

注3) 放射化学分析データによってスケーリングファクタ法で求めたSF

注4) 非破壊外部測定法で測定した廃棄体の放射能濃度

なお、「廃棄物ごとに放射化計算の条件を設定して放射化計算を行い、廃棄物又は廃棄物グループごとの放射能濃度を決定する方法」とは、学会標準で示す点推定法及び区間推定法を示しております。

## 回答1(2)

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

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

**2. 「5.2.2点推定法」の「適切なパラメータ」及び「保守的なパラメータ」について具体的に説明してください。**

**通常、放射化金属等の内部に含まれる特定対象（部位）ごとに材料仕様、中性子条件（6.1.2.3参照）及び照射条件（6.1.2.4参照）を含む適切又は保守的なパラメータを用いて計算する。**

## 回答2

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

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

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

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

3. 「5.2.3.4 濃度分布評価法」に、「原子炉内の固定された放射化金属等は、元素成分条件及び照射条件（時間）が同じで、原子炉内での設置部位の中性子フルエンス率だけが異なる」とありますが、対象部位によっては中性子スペクトルの変動のケースも考えられ、その変動性を踏まえた放射化断面積の条件に影響する可能性が考えられます。中性子フルエンス率だけとしている理由について説明してください。

### 回答 3

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

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

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

ORIGEN-S 中性子スペクトルを表すインデックスによって、計算コードの内部にて放射化断面積を計算

(附属書 F の図 F.1 参照：BWR のチャンネルボックスの例)

ORIGEN2 中性子スペクトルを考慮した放射化断面積を作成

(附属書 F の図 F.4 参照：PWR 制御棒の例)

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

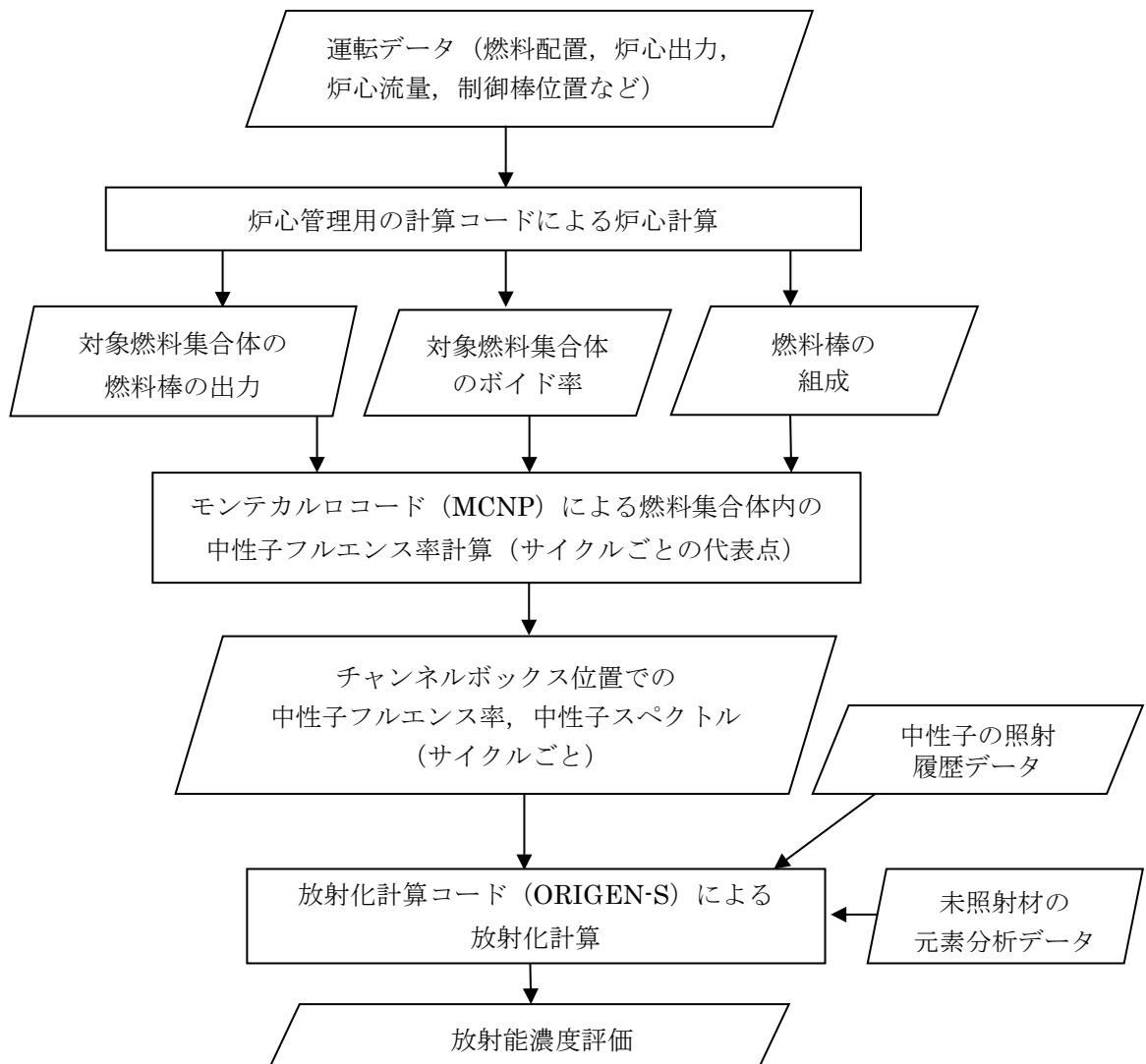


図 F.1—BWR チャンネルボックスの放射化計算フロー図

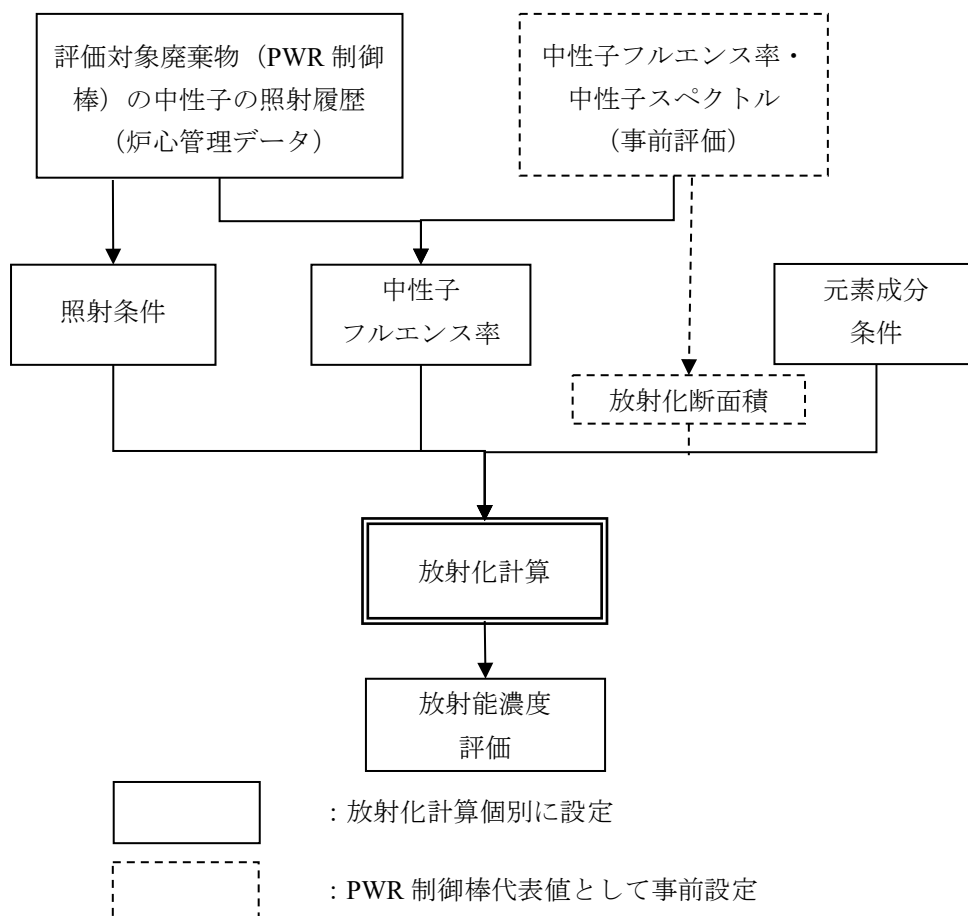


図 F.4—PWR 制御棒の放射化計算フロー図

#### 4. 「D. 1.2 換算係数法」

- (1) 「したがって、この方法は、評価対象とする放射化金属等に対する照射量と比例する因子が原子力発電所などで管理され管理指標として利用できること、又は対象物の代表的な、若しくは保守的な中性子フルエンス率が設定できることが適用の条件となる。」とありますが、「又は」として入る理由（どちらか片方でよい理由）について説明してください。
- (2) 「管理指標の例として、中性子の照射量（中性子フルエンス率と中性子の照射時間の積）に比例する因子を用いることが示されており、例として燃烧度が挙げられていますが、そのほかの管理指標としてどのようなものが想定されるか説明してください。
- (3) 例えば放射能濃度の単位として Bq/t (F. 2. 4) と Bq/g (表 K. 2) が混在していますが、本標準において使用する単位系について説明してください。
- (4) (2) 式は、換算係数に管理指標を乗じることで放射能濃度を算出していますが、管理指標としては、累積照射時間、燃烧度が例として示されて

います。ここで、対象物の放射能濃度に影響を与える管理指標が複数ある場合に、換算係数R及び変数Bの設定方法を説明してください。

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

R: 換算係数

B: 管理指標 (例えば、燃焼度)

#### 回答4 (1)

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

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

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

もう一方は、

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

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

換算係数法の評価式： $A=R \times B$

換算係数R：放射能濃度は管理指標に比例し、放射能濃度と管理指標との比例係数

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

#### 回答4 (2)

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

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

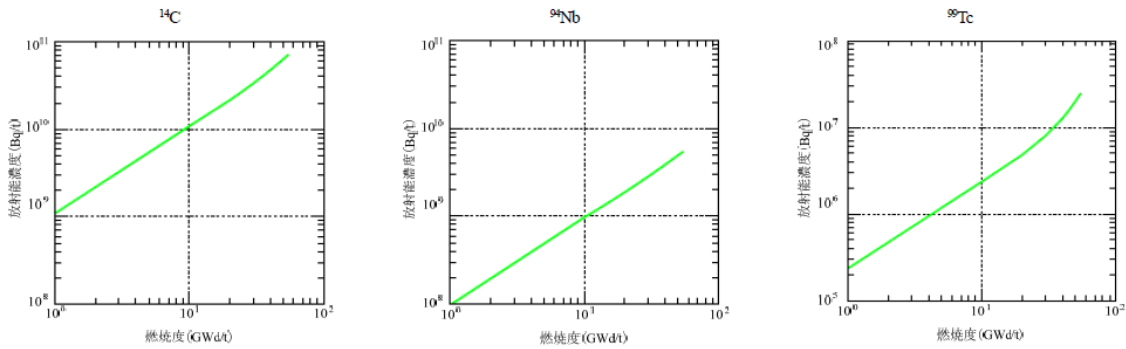


図 J.4—ZrTN804D (BWR チャンネルボックス) の放射能濃度の評価例 (管理指標: 集合体平均燃焼度)

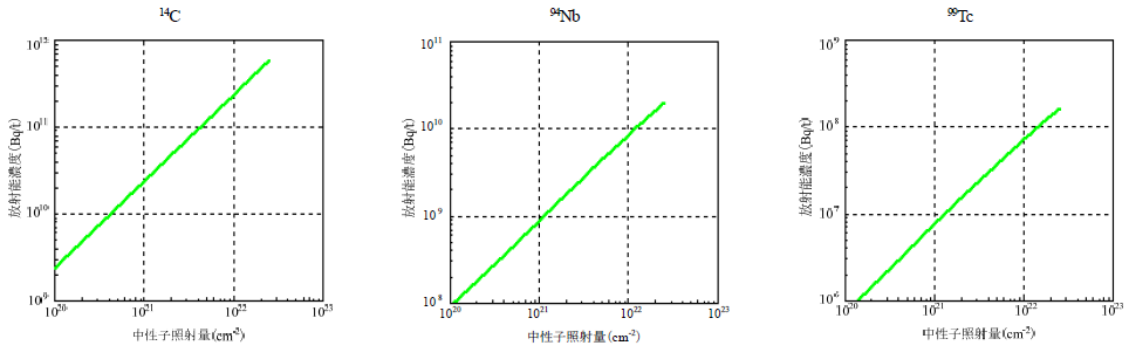


図 J.5—SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) の放射能濃度の評価例 (管理指標: 中性子の照射量)

#### 回答 4 (3)

本標準においては、評価対象が廃棄体であるため、基本的に放射能濃度の単位として Bq/t を使用しています。

なお、放射能の「Bq」は SI 組立単位であり、質量の SI 基本単位は「kg」ですが、SI と併用される単位である「t」を使用するなど、国際単位系 (SI) の使用を基本としています。

ただし、表 K.2 (下記に抜粋を示す) は放射化計算による核種生成の有無の評価のため、起源元素 1g あたりの生成 Bq で整理していますので、この意味を示すために、本表だけ Bq/g を使用しています。

表 K.2—放射化計算による核種生成の有無の評価 (二次スクリーニング評価結果)

単位: Bq/起源元素 1g

起源元素 (1次 SL 後)	評価対象核種										
	<sup>14</sup> C	<sup>36</sup> Cl	<sup>60</sup> Co	<sup>63</sup> Ni	<sup>90</sup> Sr	<sup>90</sup> Nb	<sup>99</sup> Tc	<sup>129</sup> I	<sup>137</sup> Cs	<sup>237</sup> Np	全 α
H	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
He	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Li	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Be	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C	1.00×10 <sup>5</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N	1.04×10 <sup>10</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
O	3.51×10 <sup>5</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F	3.61×10 <sup>2</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ne	1.36×10 <sup>6</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Na	4.91×10 <sup>5</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Al	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Si	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
P	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S	—	1.90×10 <sup>5</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cl	—	5.99×10 <sup>6</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ar	—	2.64×10 <sup>6</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K	—	4.88×10 <sup>6</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—

#### 回答4 (4)

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

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

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

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

$$B = \phi \times t$$

N：親核種の照射前の原子数密度 (cm<sup>-3</sup>)

σ：親核種の放射化断面積 (cm<sup>2</sup>)

λ：生成核種の崩壊定数 (s<sup>-1</sup>)

φ × t：中性子照射量 (n/cm<sup>2</sup>)

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

5. 「D.2 放射化計算の入力条件の基本設定フロー」には、点推定法について、「代表的な値 (平均値、保守的な値など) を入力条件として設定する」とあります。解説の「3 適用範囲」には、本標準は「最大放射能濃度を超えないこと」を満足していることを確認することを目的としていますが、代表的な値を「平均値」としている理由を説明してください。

#### 回答5

標準の「3 適用範囲」の詳細を示しています「解説の3 適用範囲」に、「第二種埋設事業規則の第八条第2項第二号<sup>註</sup>に定める廃棄体の放射能濃度に係る技術基準を満足していることを確認するとともに、同規則第六条第1項第一号に定める事業所に埋設された放射性物質の放射能の総量を超えていないことを確認するための標準的な放射能濃度決定方法を規定することを目的」と示しております。



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

**表 M.1－第二種廃棄物埋設規則上の廃棄体中の放射能濃度に係る基準**

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

注記 現在、第二種埋設事業規則が改正され、第八条第 2 項第三号となっている。

#### 6. 「図 D.1—区間推定法による放射化計算の入力データの基本設定フロー」

- (1) 各入力条件の設定は「代表的な条件」または「ランダムサンプリング」となっていますが、本標準の目的を「最大放射能濃度を超えないこと」とした場合に「保守的な条件」としなくてよい理由を説明してください。
- (2) 「代表的な条件」と「ランダムサンプリング」を使い分ける際の条件を説明してください。また、同一の放射化金属等について、「代表的な条件」と「ランダムサンプリング」それぞれの手法で計算した際の、計算結果の同等性を説明してください。
- (3) 「評価位置の選択」のボックスに「評価位置の存在確率分布の設定」がありますが、D. 3 に記載がないので、存在確率分布の設定方法を説明してください。
- (4) ランダムサンプリングを行う場合の計算の繰り返し回数の考え方について説明してください。
- (5) 「中性子フルエンス率の設定」のボックスと「放射化断面積の設定」のボックスの間が両矢印になっていますが、その意味を説明してください。

(6) 「入力データの充足性の評価」については、附属書 A.4 妥当性確認の例において、「なお、区間推定方法に必要な放射化計算結果の数は、図 A.2 に示す放射化計算の数による Key 核種濃度と難測定核種濃度間との相関係数の安定性の評価などによって、把握できる。」とあり、図 A.2 「に放射化計算数の増加に伴う相関係数（平均、95%信頼下限値）の安定性のイメージ」が示されていますが、これを用いて具体的にどのように充足性を判断するのか説明してください。

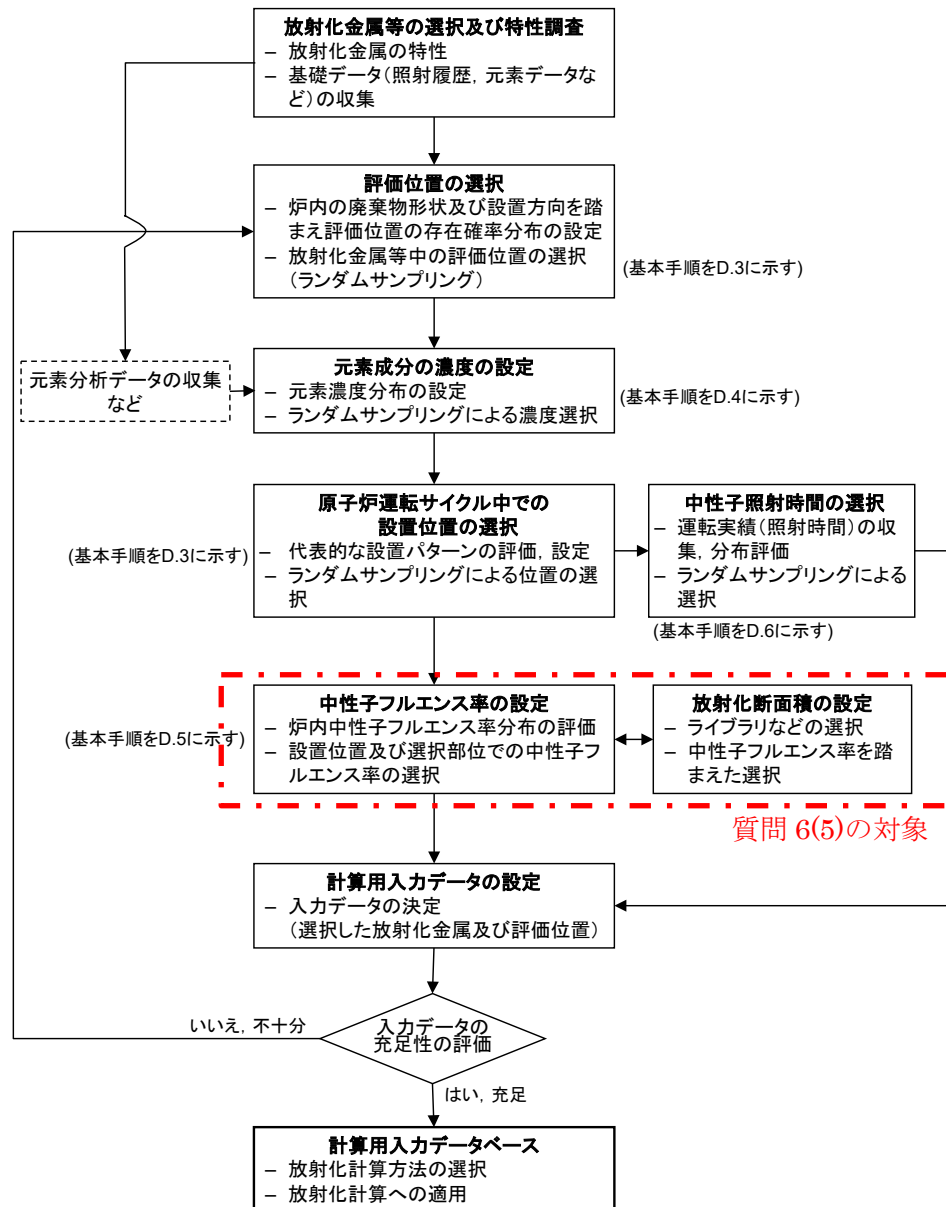


図 D.1—区間推定法による放射化計算の入力データの基本設定フロー

### 回答 6 (1)

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

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

### 回答6（2）

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

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

- 点推定法： 代表的な条件（保守的な条件での最大放射能濃度の評価に適用）
- 区間推定法： ランダムサンプリング（放射能濃度分布などの評価に適用）

### 回答6（3）

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

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

評価対象とする放射化金属等の形状及び設置方向 <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。

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

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

#### **回答6（4）**

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

##### **6.1.3.3.2 区間推定法**

実施した放射化計算結果の数が、放射能濃度決定のための評価データとして十分かについては、放射化計算を行った数とその放射化計算結果とが示す統計値の安定性の推移を踏まえて判断する。

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

##### **4.3.1 Determining the number of calculations**

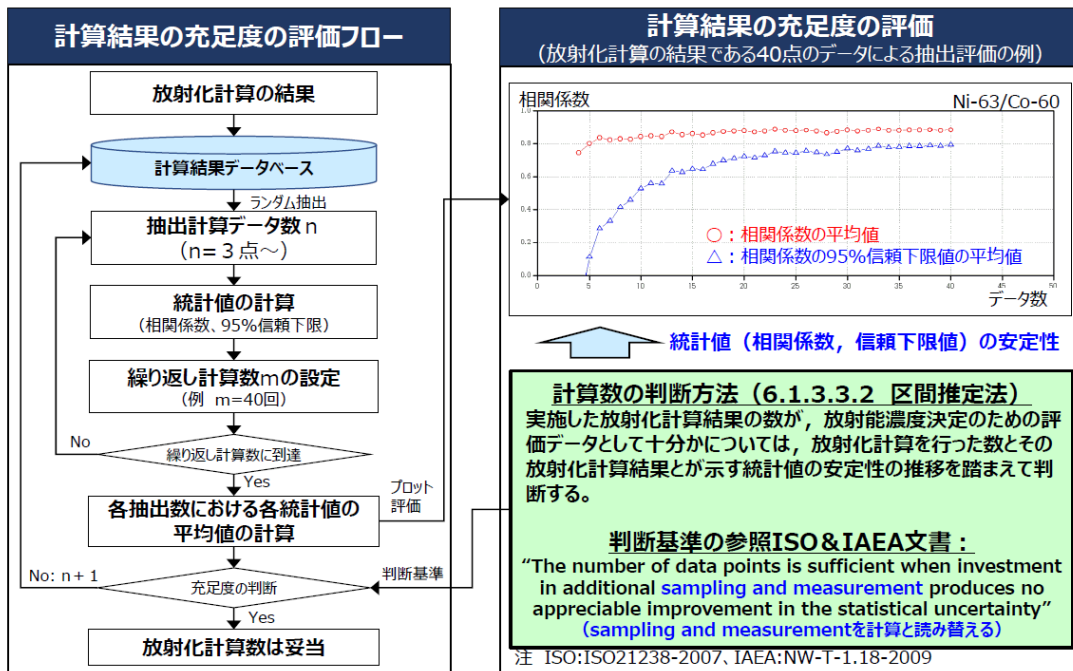
The number of calculations can be determined by one of two methods: (略)

##### **b) Range method**

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

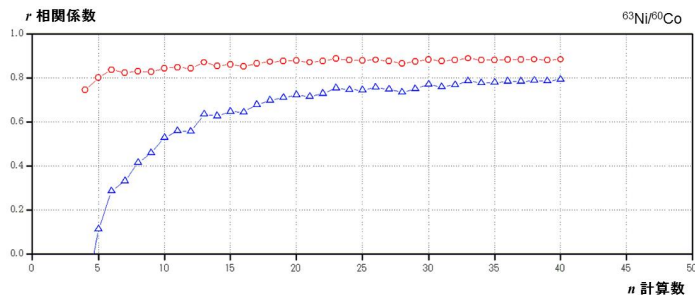
また、具体的には、附属書 A の「A.4.3 計算の実施段階」に示しますように、統計値（下図は相関係数の例）の安定性（図 A.2 では平均値と 95%信頼下限の差異の漸近性：これ以上計算回数を増やしてもそれによって得られる統計値はほとんど変わらない）を評価する方法（評価の例は第 2 回検討チーム会合資料 2-1-3 の 49 頁）で行います。

## 技術要素2-2 計算の入力データの設定方法の妥当性 - 放射化計算結果の充足度の評価の例 (区間推定法の場合) 2 - BWRチャンネルボックス本体 (ZrTN804D) の必要計算数の判断方法



### A.4.3 計算の実施段階 (略)

区間推定方法に必要な放射化計算結果の数は、**図 A.2** に示す放射化計算の数による Key 核種濃度と難測定核種濃度間との相関係数の安定性の評価などによって、把握できる。



#### 凡例

- 相関係数の平均値
- △- 相関係数の95%信頼下限値
- r 相関係数
- n 計算数

図 A.2—放射化計算数の増加に伴う相関係数 (平均, 95%信頼下限) の安定性のイメージ<sup>[1]</sup>

### 回答6 (5)

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

### 6.1.2.3 中性子条件 (中略)

評価対象とする放射化金属等に対する次の中性子フルエンス率・中性子スペクトル、及び放射化断面積を設定する。

**注記** 詳細は、**附属書F** 及び**附属書G** 参照。

- a) **中性子フルエンス率・中性子スペクトル** 中性子フルエンス率・中性子スペクトルは、原子炉及び燃料の配置を考慮した中性子輸送計算コードなどによって適切に評価して設定する。中性子輸送計算コードは、詳細モデルの要求レベル及び精度の要求レベルと合わせて適用することが適切である。
- b) **放射化断面積** a) の条件を考慮して、次のいずれかの方法で設定する。
- 使用する放射化計算コードに内蔵又は附属されている放射化断面積ライブラリから選択する。このとき、最新の計算コード及び放射化断面積ライブラリを確認する。
  - 中性子フルエンス率の評価結果から、放射化範囲の中性子スペクトルの特性を考慮して放射化断面積を設定する。

## 回答6 (6)

入力データ数 (すなわち、計算回数に相当します) の充足性を判断する方法としましては、標準 6.1.3.3.2 に示します次の考え方によって判断します。

### 6.1.3.3.2 区間推定法

実施した放射化計算結果の数が、放射能濃度決定のための評価データとして十分かについては、放射化計算を行った数とその放射化計算結果とが示す統計値の安定性の推移を踏まえて判断する。

なお、具体的な判断の方法は、回答 6 (4) を参照ください。

## 7. 「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係わる基本的な考え方」

- (1) 「照射位置の出現確率」とは何かを説明してください。
- (2) 「考慮する照射位置の出現確率の分布」について、原子炉軸方向に設置した放射化金属等については一様分布、原子炉の径方向に設置した放射化金属等については該当部の面積比に応じた分布としていますが、この設定の根拠について説明してください。
- (3) 「評価対象とする放射化金属等の形状及び設置方向」の項には放射化金属等の設置方向についての記述しかないようですが、放射化金属等の形状についてはどのように設定するのか説明してください。

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7（1）

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

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

「照射位置の出現確率」は、回答 6(3)に示しましたように、基本的には円筒状の機器、軸方向に設置する長尺の機器に関しては、軸方向の評価位置を選択する確率は一様分布です。

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

### 回答7（2）

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

一方、原子炉の径方向に設置した機器／機材（上部格子板）は、回答 7(1)に示しましたように、径方向で考えた場合の面積は一樣ではなく、外側に行くほど大きくなりますので、半径方向の位置によって面積が増える条件を加味して、評価する照射位置の選択・設定を行う際に面積比（径に比例）を乗じることで重み付けを考慮しています。

### 回答 7 (3)

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

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

#### 6.1.2.3 中性子条件

評価対象とする放射化金属等に対する次の中性子フルエンス率・中性子スペクトル、及び放射化断面積を設定する。

**注記** 詳細は、**附属書 F** 及び**附属書 G** 参照。

a) **中性子フルエンス率・中性子スペクトル** 中性子フルエンス率・中性子スペクトルは、原子炉及び燃料の配置を考慮した中性子輸送計算コードなどによって適切に評価して設定する。中性子輸送計算コードは、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。

### 8. 「表 D.3—評価対象放射化金属等の炉内外での配置位置の設定に係わる基本的な考え方」

(1) 「考慮する照射位置の出現確率の分布」について、配置位置が移動する場合には実際の分布又は代表的なパターンを用いるとしていますが、このうち代表的なパターンとはどのように代表性が担保されているのか（例えば、炉型の違い、運転サイクルの違い）を説明してください。

(2) 「代表的なパターン」とは脚注 f によると「例えば、放射能濃度評価結果が大きくなるような」とありますが、「D.4.1 元素成分条件の設定方法の選定」には「代表的な元素分析データ（元素分析データの平均値など）」とされています。本標準全体を通じて「代表的」をどのような意味で使っているのか説明してください。



(3) 各項目の「など」の内訳を説明してください。

表 D.3—評価対象放射化金属等の炉内外での配置位置の設定に関わる基本的な考え方

評価対象とする放射化金属等の配置位置 <sup>a)</sup>	考慮する条件	評価対象とする放射化金属等の一例	考慮する照射位置の出現確率の分布
配置の移動	運転サイクルごとのローテーションなどによる配置位置変化	チャンネルボックス <sup>b)</sup> , など	配置位置のローテーションなどの実際の分布又は代表的なパターン <sup>f)</sup>
	燃焼制御のための挿入位置などの配置位置変化	PWR 制御棒 <sup>c)</sup> , BWR 制御棒 <sup>d)</sup> など	挿入位置などの実際の分布又は代表的なパターン <sup>f)</sup>
配置が固定	照射期間中は、配置位置の変化がないこと	シールド, 上部格子板 など <sup>e)</sup>	固定値
<b>注</b> a) 評価対象とする放射化金属等の原子炉内外でのローテーションによる配置位置の移動の有無の条件。 b) 原子炉内での運転サイクルごとにローテーションした配置位置（中央部、最外周など）ごとの考慮が必要である。 c) PWR 制御棒では、定格出力運転時の原子炉の軸方向の配置位置（定格出力運転時の制御位置、及び定格出力運転時の制御棒全引抜き位置）ごとの考慮が必要である。 d) BWR 制御棒では、原子炉内での配置位置、及び定格出力運転時の炉心内挿入位置に対応する挿入時間の考慮が必要である。 e) 全照射期間において、原子炉内外で固定された状態で照射される。 f) ローテーションした配置位置、挿入位置などの実際の頻度分布にて設定、又は代表的な（例えば、放射能濃度評価結果が大きくなるような）配置位置のパターンにて設定する場合もある。			

回答 8 (1)

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

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

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

運転サイクル数 <sup>a)</sup>		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 <sup>d)</sup> )
サイクル数	中性子照射時間		
1	2 年未満	固定 <sup>b)</sup>	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 <sup>c)</sup>	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 <sup>c)</sup>	D : 中央→中央→中央 E : 中央→近傍→中央
4	4 年以上,	配置ローテーションの	F : 中央→中央→中央→中央

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

### 回答8 (2)

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

最大放射能濃度の評価： 保守的に設定（放射能濃度が大きくなるように設定）

総放射能量の評価： 平均的な設定

### 回答8 (3)

例示中の「など」の内訳を次に示します。

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

「挿入位置など」には、制御位置、全引き抜き位置を含んでいます。

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

「PWR 制御棒、BWR 制御棒など」には、GCR 制御棒が含まれます。

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

9. 「表D.4—対象とする放射化金属等の元素成分濃度の分布タイプの設定に関わる基本的な考え方」において、不純物成分元素及び微量成分元素については、自然での濃度分布が材料中の各元素の濃度分布にも反映されるとして対数正規分布に従うとしています。材料の製造過程を経ても、対数正規分布に従うことを説明してください。特に、不純物元素については、その濃度上限が管理されるものですが、管理の上限値ではなく対数正規分布に従う理由を説明してください。なお、説明資料では正規分布に従うとして設定しています。

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

成分 管理条件	主成分元素	不純物成分元素	微量成分元素
	管理範囲がある	管理上限がある	管理値なし
基本的 考え方	特定の工場，材料のロット管理が行われて製造される材料の主成分であり，材料の規格範囲内の目標値での成分の調整が行われる元素で，存在濃度範囲（濃度分布）が比較的狭い。	製造される材料中の不純物として一定の製造過程で低減又は管理される成分で，元素の濃度が比較的低い管理値以下である元素で，自然での濃度分布が材料中の各元素の濃度分布にも反映される。	管理されていない元素であり，自然での存在濃度分布が，材料中の各元素の濃度分布にも反映される。
各元素の 濃度分布	正規分布	対数正規分布	対数正規分布

**回答 9**

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

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

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

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

ただし、附属書 G の G.1.2.3.2 に示しますように、実際に入力データとして適用する元素の濃度分布は、②に示しましたように、最終的には実際のデータによって評価し、いずれの分布形状に属しているかを判断した上で設定することを求めており、「不純物元素」に関しては、元素分析によって得られた実際の分析データの範囲が狭く「正規分布」で評価することの方が適切と判断した場合は、「正規分布」を入力データ設定用分布の設定に適用します。

#### G.1.2.3.2 各元素の濃度分布基本形状の設定例

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

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

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

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

なお、各元素の濃度分布基本形状を設定する場合は、上記の基本的な考え方に加え、実際の元素成分データの濃度分布を踏まえて、最終的に各元素の濃度分布の基本形状を設定する必要がある。

10. 「D.4.3 元素分析データ数量に応じた濃度分布条件設定」の「c) 元素分析データ数が非常に少ない場合の設定方法」は、次のいずれかの方法で平均値、標準偏差を設定する方法がある、としていますが、それぞれの設定方法に基づく評価結果の同等性を説明してください。

- 元素分析データの検出値の平均値を推定分布の平均値と仮定し、保守的な標準偏差を適用して、濃度分布を仮定する。
- 元素分析データの検出最大値以下の濃度の低い濃度領域で、濃度分布を仮定する。

#### 回答10

標準は、元素成分の濃度分布を設定する各手法間に同等性を求めているものではありません。また、附属書 D の D.4.3 に示します 2 つの濃度分布の設定方法は、いずれも真値に対して、保守的な評価結果を得るための方法です。このため、適用する濃度分布の設定方法によって保守性が変わります。

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

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

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

<p><b>設定方法①</b></p> <p>元素分析データの検出値の平均値を推定分布の平均値と仮定し、保守的な標準偏差を適用して、濃度分布を仮定する (表 D.5 の例 1)</p>	
<p><b>設定方法②</b></p> <p>元素分析データの検出最大値以下の濃度の低い濃度領域で、濃度分布を仮定する。 (表 D.5 の例 2 に実際の分布を加筆)</p>	

1 1. 「D. 4. 3 元素分析データ数量に応じた濃度分布条件設定」には、元素分析データ数が「十分にある場合」、「比較的少ない場合」、「非常に少ない場合」に分けて規定されています。「非常に少ない場合」は元素分析データ数が 1~2 点とありますが、「十分にある場合」、「比較的少ない場合」、それぞれの具体的なデータ数を示してください。

**回答 1 1**

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

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

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

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

	まえて設定(信頼下限)	上限 ②同左		
--	-------------	-----------	--	--

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

12. 「D.4.3 元素分析データ数量に応じた濃度分布条件設定」の「d) 元素分析データに検出下限値しかない場合」は、次のいずれかの方法で平均値、標準偏差を設定できるとしていますが、それぞれの設定方法に基づく評価結果の同等性を説明してください。

- － 元素分析データの検出下限値を平均値としてそのまま使用する。
- － 元素分析データの検出下限値を最大値とする濃度分布を、既知の類似試料の標準偏差を利用して設定する。
- － 照射履歴が明確な評価対象とする放射化金属等の核種の放射能濃度データから、起源元素の濃度を推定する。

### 回答 1 2

標準は、各手法間に同等性を求めているものではありません。

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

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

設定方法① 元素分析データの検出下限値を平均値としてそのまま使用する

設定方法② 元素分析データの検出下限値を最大値とする濃度分布を既知の類似試料の標準偏差を利用して設定する

設定方法③ 照射履歴が明確な評価対象とする放射化金属等の核種の放射能濃度データから、起源元素の濃度を推定する

### 1 3. 「D.5.1 中性子条件の設定における基本事項」

- (1) 「群定数」及び「1 群実効断面積」について説明してください。
- (2) 「中性子スペクトル評価の結果などによって放射化範囲の中性子スペクトルの特性を考慮して固有の断面積を作成することもある。」との記載について、具体的にどのような方法を探るのか説明してください。
- (3) 「1 群実効断面積の作成に影響を与える中性子スペクトルの特性については、あらかじめ把握しておく必要がある。」との記載について、具体的な実施内容と、1 群実効断面積のみでよい理由を説明してください。
- (4) 中性子条件を「中性子フルエンス率」、「中性子スペクトル」及び「放射化断面積」に大別していますが、本項の説明は中性子フルエンス率と放射化断面積の設定における基本的な考慮事項に留まっています。中性子スペクトルの設定における基本的な考慮事項を説明してください。

#### 回答 1 3 (1)

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

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

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

$$\sigma_1 = \frac{\sum_g \sigma \cdot \Phi}{\sum_g \Phi}$$

$\sigma_1$  : 1 群実効核反応断面積

$\sigma$  : 核反応断面積

$\Phi$  : 中性子フルエンス率

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

### 回答 1 3 (2)

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

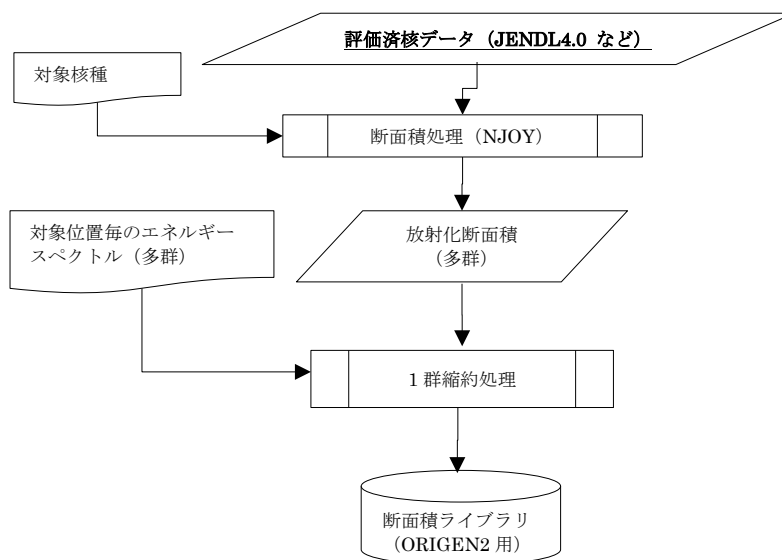


図 1 群実効核反応断面積ライブラリの作成フロー

### 回答 1 3 (3)

「既存の断面積ライブラリを使用する場合には、原子炉型式や燃料組成が類似してれば・・・」の部分については、既存の 1 群実効断面積が用意されている ORIGEN2 コードシリーズについて記載しているため、1 群実効断面積のみの記載としています。

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

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



## 回答 13 (4)

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

### G.2 中性子条件の設定例

#### G.2.1 概要

中性子条件は、中性子フルエンス率・中性子スペクトル及び放射化断面積に大別される。中性子フルエンス率・中性子スペクトルは、原子炉型式・燃料条件、照射される評価対象とする放射化金属等の位置条件、部位などによって変化する。このため、中性子フルエンス率・中性子スペクトルを計算で求めるには、実際の状況に基づいた計算モデルを作成し、必要な精度、中性子場の形成状況などを考慮した上で、目的に合った計算コード及び群定数を用いて計算する必要がある。

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

表 D.7—中性子フルエンス率の設定における基本的な考慮事項

項目		考慮する必要がある主な事項
燃料の条件		<ul style="list-style-type: none"> <li>— 濃縮度 <sup>a)</sup></li> <li>— 燃焼度 <sup>a)</sup></li> <li>— 燃料の種類 <sup>b)</sup></li> </ul>
炉内位置 <sup>c)</sup>	軸方向	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 評価対象とする放射化金属等自身の軸方向位置 <sup>d)</sup></li> <li>— 評価対象とする放射化金属等自身の軸方向（上下）の移動 <sup>e)</sup></li> </ul>
	径方向	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 評価対象とする放射化金属等自身の径方向位置 <sup>d)</sup></li> <li>— 評価対象とする放射化金属等自身の径方向の移動 <sup>e)</sup></li> </ul>
その他		<ul style="list-style-type: none"> <li>— ボイド率（BWR） <sup>f)</sup></li> <li>— ホウ素濃度（PWR）</li> <li>— 温度分布</li> <li>— ディプレッション効果 <sup>g)</sup></li> </ul>

**注** <sup>a)</sup> 評価対象とする放射化金属等の照射期間中に使用した燃料の濃縮度及び燃焼度。  
<sup>b)</sup> 燃料の種類とは、例えば、UO<sub>2</sub>, MOX。  
<sup>c)</sup> 中性子発生源、評価対象とする放射化金属等、その他の減速、反射、吸収、漏れなどの中性子のふるまいに影響する物質の位置関係。  
<sup>d)</sup> 評価対象とする放射化金属等自身の部位で中性子フルエンス率が変わる場合。評価対象とする放射化金属等が原子炉内及び原子炉外にわたる場合も該当する。  
<sup>e)</sup> 評価対象とする放射化金属等が中性子フルエンス率の変化する範囲で移動する場合。  
<sup>f)</sup> BWR の場合（BWR では、炉心部で発生した蒸気（ボイド）量が増加するに従って核反応が抑制され出力が低下する。PWR の通常の運転条件では、ボイドは発生しない。）  
<sup>g)</sup> 評価対象とする放射化金属等が強い中性子吸収体である場合（例 制御棒など）は、ディプレッション効果（中性子フルエンス率分布の歪み（ゆがみ））が生じるため、中性子フルエンス率への吸収効果に留意する。

#### 1 4. 「D. 5. 2 中性子フルエンス率などの設定方法」

(1) 「b) 代表条件を設定する方法」の「適切に代表する中性子条件」について具体的に説明してください。

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

(2) 中性子フルエンス率は、適用する放射能濃度決定方法に応じ、a) 個別に条件設定する方法と b) 代表条件を設定する方法のいずれかの方法による設定があるとしており、その選定は中性子の照射履歴に基づくとのことですが、その判断基準を具体的に説明してください。

(3) 「b) 代表条件を設定する方法」の各種中性子計算方法について、同等な結果を得るための条件について説明してください。

- ・ Sn 法（微分型中性子輸送方程式）
- ・ モンテカルロ法
- ・ 直接積分法

上記に加えて使用するもの

- ・ 外挿計算法
- ・ アルベド輸送計算法

(4) 「さらに、・・・中性子フルエンス率の評価を行う場合には、・・・適切な手法（信頼性のある放射化計算コード）を適用することがある」とありますが、中性子フルエンス率を評価するのに放射化計算コードを適用できる理由を説明してください。

#### 回答 1 4 (1)

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

#### 回答 1 4 (2)

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

個別設定： 照射履歴が特定できるすべての評価対象について、評価対象ごとに個別

の中性子フルエンス率及びスペクトルを設定する。

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

#### **回答14(3)**

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

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

- ・ Sn 法（微分型中性子輸送方程式）  
計算体系を表示する座標と放射線粒子の進行方向を表す角度座標を離散化して、偏微分型のボルツマン輸送方程式を解く方法のうち、最も一般的な計算手法です。
- ・ モンテカルロ法  
積分型ボルツマン輸送方程式を解く方法であり、発生させた乱数列を用いて、確率分布にしたがって線源から粒子を放出し、輸送カーネル及び衝突カーネルの計算を行うことで放射線束を求める方法です。
- ・ 直接積分法  
ボルツマン方程式を放射線の進行方向に沿って直接積分してメッシュごとに粒子束を評価するものです。
- ・ 外挿計算法  
他の計算結果から外挿して補正する計算方法です。
- ・ アルベド輸送計算法  
他の計算結果からアルベドデータで補正する計算方法です。

#### **回答14(4)**

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

**15. 「D.5.2 中性子フルエンス率などの設定方法」において、中性子フルエンス率は、適用する放射能濃度決定方法に応じ、a) 個別に条件設定する方法と b) 代表条件を設定する方法のいずれかの方法による設定があるとしており、その選定は中**

中性子の照射履歴に基づくとのことですが、その判断基準を具体的に説明してください。

**回答 1 5**

回答 14(2)を参照ください。

1 6. 「D. 6.1 中性子の照射条件設定の基本的考え方」の「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」において、照射時間（合計）の頻度分布による設定について、中性子の照射時間（合計）の実績などで適切な分布形状（例えば、正規分布）を設定するとありますが、実際の運転実績から考えられる照射実績は何らかの分布に従うものなのか、また分布の選定はどのような判断基準で行うのか、具体例をもって説明してください。

**表 D.8—プラント寿命中における中性子の照射時間及び照射停止時間の基本的考え方**

設定項目	照射条件の設定方法		
	設定方法	設定の基本的考え方	設定対象
照射時間 (合計)	頻度分布 による設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>評価対象とする放射化金属等の中性子の照射時間が必ずしも一律でない場合、中性子の照射時間（合計）の実績などで適切な分布形状（例えば、正規分布）を設定する。</li> <li>設定する頻度分布は、中性子の照射時間の分布形状に応じ平均、標準偏差などによって設定する。</li> </ul>	チャンネルボックス、制御棒など
照射時間 (合計)	個別値 による設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>対象原子炉ごと及び評価対象とする放射化金属等ごとに中性子の照射実績が同じ場合は、実績を踏まえ照射時間を一律に設定する。</li> </ul>	シュラウド、上部格子板など
照射停止時間 <sup>a)</sup> (原子炉供用期間中)	均等設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>評価対象とする放射化金属等の照射停止時間（合計）及び照射停止回数の実績によって、平均的な照射停止回数及び1回当たりの平均的な照射停止時間の割合（すなわち稼働率）を一律に設定する。</li> <li>平均的な照射停止時間の割合で、運転サイクルごとに均等に設定する。</li> </ul>	全評価対象廃棄物
	個別設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>評価対象とする放射化金属等の照射実績にあわせて、個別の照射停止時期及び照射停止時間を設定する。</li> </ul>	
<p><b>注</b> <sup>a)</sup> 全ての中性子の照射が終了した後の保管している経過時間は、基本的に照射条件として設定せず、評価結果に減衰補正を加えて評価することが望ましい。</p>			

**回答 1 6**

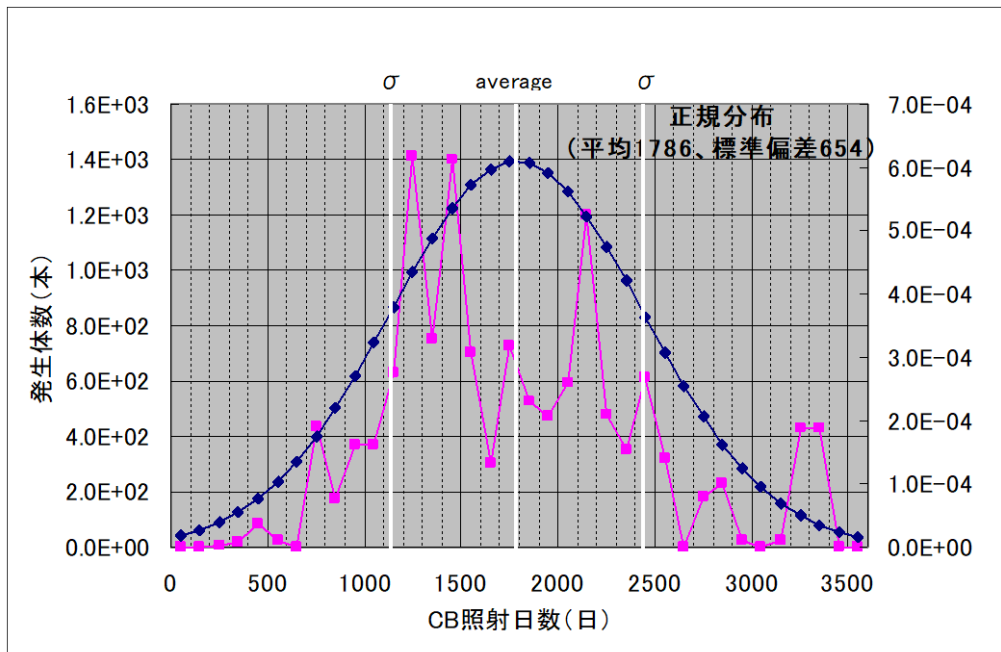
BWR チャンネルボックスの場合、附属書 I の表 I.14 に示すように、約 13,000 体の燃料集合体の燃焼度の実態調査結果より、燃焼度が正規分布となっていることを把握し

ています。

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

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

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



注：事業者より提供されたデータ

17. 「D.6.2.2 中性子の照射時間」において、「比較的短半減期核種との濃度比を用いる場合には、評価対象とする放射化金属等の中性子の全照射時間の長さに応じて放射化計算の条件設定を変えるなど、適切に考慮する必要がある」との記載がありますが、その方法について具体的な例示をもって説明してください。

**回答 17**

区間推定法の濃度比法を用いる場合には、附属書 D の D.6.2.2 に示しますように、中

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

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

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

#### **D.6.2.2 中性子の照射時間**

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

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

	比較的半減期が長い核種同士の組合せ ( $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ ) (図 B.5 抜粋)	半減期が短い核種との組合せ ( $^{63}\text{Ni}/^{60}\text{Co}$ ) (図 B.6 抜粋)
解析結果 a)		
計算条件	長期照射（～60年連続）条件で放射化計算を実施。	
影響の程度 b)	濃度比への影響：小	濃度比への影響：小（～10年程度） 中（長期照射の場合）
<p>注 a) 放射化計算コード：ORIGEN2.2，ライブラリ：JENDL3.3 シリーズ</p> <p>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。</p>		

**放射化計算結果への主な計算条件の影響評価結果（中性子の照射時間の影響：半減期）**