

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

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」とその回答は資料 2-1-1^(注1) を参照ください。赤字の「更問」は、参考資料 4-1-2 を参照ください。「更問」の回答のうち黒字部分は、資料 2-1-1 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 2-1-1「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」

1. 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(以下「放射能濃度決定標準」という。)は、本文と附属書から構成されています。附属書には「(参考)」とありますが、「(参考)」とは何か説明してください。また、「解説」との違いについても説明してください。

回答 1

標準中の附属書及び解説の位置付けについては、日本原子力学会発行の、「標準作成ガイドライン」(2020年度版が最新)に記載されています。

すなわち、本来、標準の本体に含めてよい事柄ですが、標準の構成上、特に取り出して本体に準じてまとめたものを附属書としています。附属書には、附属書(規定)及び附属書(参考)の2種類あります。また、標準の一部ではありませんが、本体、附属書に記載した事柄及びこれらに関連した事柄について説明するものを解説としています。

本標準の附属書(参考)は、標準委員会における審議において技術的妥当性及び実機適用性が確認されており、将来、実機適用実績が増えた時点で附属書(規定)とする予定です。

以下、「標準作成ガイドライン：2020」より抜粋。

・附属書

内容は、本来、標準の本体に含めてよい事柄であるが、標準の構成上、特に取り出して本体に準じてまとめたもの。

・附属書(規定)

本体から、規定の一部を取り出してまとめる場合には附属書(規定)とする。

注記 附属書(規定)は規定であるが、附属書(参考)及び解説は、規定ではない。標

準は、本体及び附属書（規定）だけで誤りなく履行できるようにする。

・附属書（参考）

標準の理解又は利用を助けるための参考となる情報をまとめる場合には附属書（参考）とする。附属書（参考）にするのが望ましい例は、次のようなものである。

- 例 1 将来的には規定とするのが望ましい事項であるが、根拠となる裏付けデータ及び実績から判断して、規定とするには時期尚早のものを、考え方又は事例としてまとめたもの。
- 例 2 規定の運用に関して特に重要な事項に関するもの。例えば、利用者がこの規定を適用できるか否かの判断、結果の評価についての判断をするときに、理解を助けるもの。
- 例 3 利用者が規定を正しく理解し、運用するために参考となる適用事例。頁数が多くなる場合は別の技術レポートとして発行する。
- 例 4 一つのテーマについて見解・主張・思想をパッケージとしてまとめたもの。頁数が多くなる場合は別の技術レポートとして発行する

・解説

標準の一部ではないが、本体、附属書に記載した事柄及びこれらに関連した事柄について説明するもの。

記載内容の例：「制定、改定の趣旨」、「制定、改定の経緯」、「審議中に特に問題となった事項」、「適用範囲について」、「本体、附属書の解説（特に理解が難しいものに関する補足、国内法規・外国規格との比較など）」、「懸案事項」

2. 放射能濃度決定標準の序文において、「原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物のうち、中深度処分対象廃棄物の放射能濃度を決定する方法を示すことを目的としている。」との記載がありますが、原子力発電所のうち、本標準が対象とする炉型を説明してください。

回答 2

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

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

3. 第二種廃棄物埋設事業規則※7 は、以下の確認・評価を求めています。

- ・ **第二種廃棄物埋設を行う放射性廃棄物に含まれる放射性物質の種類ごとの最大放射能濃度、総放射エネルギー及び区画別放射エネルギー※8 の確認**
- ・ **廃棄体の放射能濃度が第二種廃棄物埋設に係る許可を受けたところによる最大放射能濃度を超えないこと※9 の確認**
- ・ **政令※10 第 31 条で定める放射性物質※11（以下「政令記載核種」という。）の放射能濃度の確認**
- ・ **廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線の評価※12**

・廃止措置の開始までに廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるものであることの評価※13

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（以下「説明資料」という。）のP5では、適用する評価対象として、「廃棄体の放射能濃度」及び「埋設施設の総埋設放射能」とありますが、上記確認・評価のうち、放射能濃度決定標準が適用できるものはどれか説明してください。

※7 核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則（昭和63年総理府令第1号）

※8 第二種廃棄物埋設に係る事業規則第2条第1項第1号

※9 第二種廃棄物埋設に係る事業規則の改正案第8条第2項第3号

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

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

※12 第二種廃棄物埋設に係る許可基準規則の改正案第8条第1項

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

回答3

標準の目的は、解説「3適用範囲」に示すとおり、「中深度処分対象である放射化金属等及び使用済樹脂等について、“核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則”第八条第2項第二号^{注1}に定める廃棄体の放射能濃度に係る技術基準を満足していることを確認するとともに、同規則第六条第1項第一号に定める事業所に埋設された放射性物質の放射能の総量を超えていないことを確認するための標準的な放射能濃度決定方法を規定することを目的に作成されたものである。」としており、上に示した技術基準を確認するための方法を規定しています。

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

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

(1) 「3用語及び定義」に記載されている、「3.5使用済樹脂等」及び「3.14放射化金属等」の中には放射能濃度によってピット処分対象物と中深度処分対象物に分かれる可能性があります。対象物の全体の放射能濃度の評価結果から、中深度処分対象物をどのように選定するのか説明してください。

(2) また、「使用済樹脂等」の説明のうち、「その他の粉状若しくは粒状の放射性廃棄物」の内訳及び、「放射化金属等」の例示のうち、「黒鉛など」の「など」の内訳を説明してください。

(3) 解体作業においては炉内構造物のほとんどが切断されて廃棄物容器に収納されると想定されます。大型の対象物（例えばシュラウド）は、放射能濃度に分布があると想定されますが、大型の対象物の放射能濃度の計算結果から、個々の切断片の放射能濃度をどのように計算するのか説明してください。

回答 4(1)

＜標準が想定している中深度処分対象廃棄物の考え方＞

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

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

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

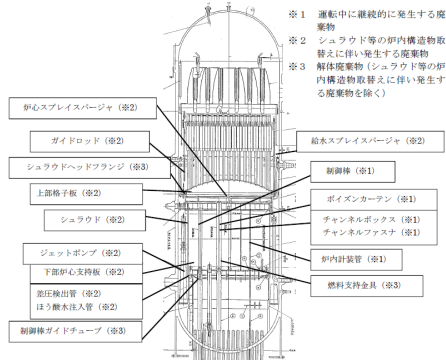
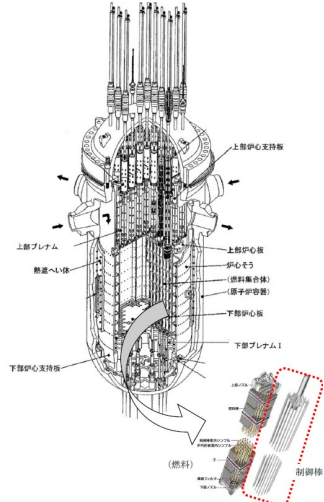
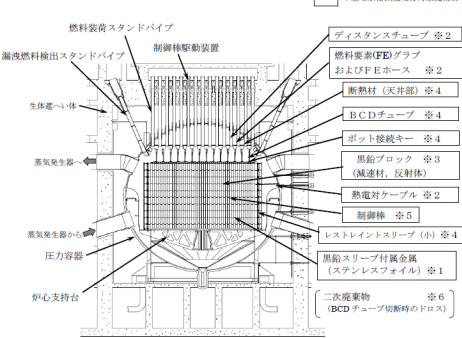
＜事業者が想定している区分の考え方＞

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

回答 4(2)

「使用済樹脂等」の定義である「液体状の放射性廃棄物又はイオン交換樹脂、フィルタスラッジその他の粉状若しくは粒状の放射性廃棄物」の表現は、第二種埋設事業規則の第八条第 2 項第一号の表現を踏襲したのですが、現時点では、「その他の粉状若しくは粒状の放射性廃棄物」に該当する廃棄物は想定しておりません。

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

炉型	対象物	対象物の発生部位 ^{注)}
BWR	上部格子板、燃料支持金具、シュラウド、炉心支持板、炉心スプレイスパージャ、CRD ガイドチューブ、シュラウドヘッドフランジ、ジェットポンプ、制御棒、チャンネルボックス、炉内計装管	
PWR	バップル、バップルフォーマ板、炉心槽、上部炉心板、制御棒クラスタ案内管、熱遮へい体、下部炉心板、下部プレナム、下部炉心支持板、コンクリート、制御棒、バーナブルポイズン、プラッキングデバイス	
GCR	炉内挿入物 (黒鉛スリーブ付属金属、制御棒、ディスタンスチューブ ³⁾ 、燃料要素(Fe)グラブ ³⁾ 及び Fe ホース ³⁾ 、熱電対ケーブル ³⁾ 、炉内構造物 (断熱材 (天井部)、BCD チューブ、ポット接続キー、レストレイントスリーブ (小))、BCD チューブ切断ドロス、黒鉛ブロック	

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

注 2) 上表に示した対象物以外に、浅地中ピット処分の最大濃度を下回ると推定されるが、中深度処分の可能性がある対象物として、圧力容器などがある。

注 3) 原子炉から取り出して、「バンカ廃棄物」として、「バンカ」内に保管している廃棄物もある。

回答 4(3)

大型の対象物については、炉内での物理的配置によって、中性子フルエンス率及びスペクトルに分布が生じるため、廃棄物中に放射化による放射能濃度の分布が生じます。した

がって、個々の切断片の放射能濃度は異なります。

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

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

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

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

5. 「4 評価対象とする廃棄物及び評価対象核種」には「b) 評価対象核種は、申請核種とする。」と規定されていますが、具体的な決定方法は規定されていないので、申請核種の決定方法を説明してください。具体的には、放射能濃度決定標準と旧原子力安全・保安院の内規※14 の以下の記載との関係を踏まえて説明して下さい。

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

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

回答 5

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

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

なお、標準の附属書 G では、放射化計算の例を示す上で、法令で規制される核種、浅地中埋設の事業申請で申請核種となった次の核種を評価対象核種として設定して、起源元素

を評価選定し理論的方法の計算例を示すと共に、計算結果の評価を行っています。

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

注1) α 線を放出する全ての放射性物質

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

6. 「5.1 放射能濃度決定方法の適用」には、「放射能濃度決定方法は、次のとおり、表1に示す方法の中から評価対象とする廃棄物の性状及び評価対象核種に最も適した方法を選定する」とあります。ここで、「表1—放射能濃度決定方法の種類及び内容」に示された方法は、ピット処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法として旧原子力安全委員会が示した手法※15 ですが、当該手法は二次的汚染物が主体です。放射化物が主体である中深度処分対象廃棄物に、当該手法が適用できる根拠を説明してください。また、「評価対象とする廃棄物の性状及び評価対象核種に最も適した方法」の選定において考慮すべき具体的内容及び、最も適した方法であると判断する上での判断基準を説明してください。

※15 日本原燃産業株式会社六ヶ所事業所における廃棄物埋設の事業に係る重要事項（廃棄体中の放射性物質濃度の具体的決定手順について）に対する報告について（平成4年4月2日 原子力安全委員会）

回答6

旧原子力安全委員会が了承した手順¹⁾は、浅地中処分を対象とした二次的汚染物が対象の放射能評価方法ですが、評価対象としている核種の生成過程は、原子炉内での中性子の照射による構造材などの放射化、核分裂生成、中性子多重捕獲です。このため、放射化物の内部に放射化によって生成した核種がそのまま残る放射化物か、放射化された機器の腐食生成物などの移行によって廃棄物表面に付く二次的汚染かの差異であり、放射性物質の生成過程は同じであることから、放射化金属等を対象とします中深度処分対象廃棄物にも適用できる方法と考えます。

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

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

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

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

標準が対象とする「理論計算法」及び「原廃棄物分析法」に対する「評価対象とする廃棄物の性状及び評価対象核種に最も適した方法」の選択は、対象物の下表に示す考慮内容、判断内容によって行います。

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

7. 「5.2.1 理論計算法の種類」には、「点推定法」と「区間推定法」が規定されています。

(1) 「点推定法」と「区間推定法」の使い分けについて、「附属書A(参考)理論計算法の適用方法及び手順」の「A.1.3 STEP2:評価方法の選択」に「例えば、評価対象とする放射化金属等の詳細情報が特定されない場合、区間推定法の選択が適切である」とありますが、より具体的に、それぞれの手法を選択する場合の判断基準を説明してください。

(2) 「A.3 放射化計算コードの例」に5種類のORIGENコードが挙げられていますが、それぞれの特徴と使い分けについて説明してください。また、各コードに内蔵される断面積ライブラリのもととなる核データとその処理方法について説明してください。

(3) 「A.3 放射化計算コードの例」に「評価対象とする放射化金属等を照射する中性子スペクトルを反映した断面積をユーザーが準備する」とありますが、具体的な設定方法について説明してください。

更問 7.(2) 断面積ライブラリの基となる核データは計算コードごとに複数の版が示されているが、旧版でも使用可能としている理由について説明してください。

(質問の背景) 計算コードはORIGEN-SとORIGEN2.2が最新で、それ以外の旧計算コ

ードは何らかの機能・データが不足していると思われることから、5種類の計算コードを使用する必要性について質問したものです。

更問 7.(3) 1 群実効核反応断面積ライブラリの作成フロー図中の「断面積処理(NJOY)」及び「1群縮約処理」について具体的な設定方法を説明してください。

(質問の背景) 断面積の設定方法について参考となる図書等があれば、それを用いての具体例を質問したものです。

7.(3) 「評価対象とする放射化金属等を照射する中性子スペクトルを反映した断面積をユーザーが準備する」については、ORIGEN2 コードシリーズの手順です。」との回答をいただきました。放射化計算コードは、ORIGEN コードに限定して技術評価することにしました。

(計算コードは ORIGEN-S と ORIGEN2.2 が最新で、それ以外の旧計算コードは何らかの機能・データが不足していると思われることから、5種類の計算コードを使用する必要性について質問したものです。)

回答 7(1)

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

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

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

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

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

注記 「条件範囲が明確な放射化金属等」とは、放射化金属等の切断等の処理が行われることによって、位置ごとの詳細条件の特定が難しくなった廃棄物（一部の切断 CB が相当する）に対しても、その廃棄物全体の条件範囲（材料、中性子、照射）は明確であるため、条件範囲を網羅する放射化計算によって評価する方法である区間推定法を適用して評価できるものを示します。

回答 7(2)

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

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

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

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

約した断面積をユーザーが作成し、計算を実施します。

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

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

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

更問 7. (2)への回答

本標準 6.1.2.3 に記載されているとおり (※)、基本的には最新の計算コード及び最新の核データを使用して計算を行います。

なお、旧版の計算コード及び核データライブラリであっても分析値のある対象物について、最新版に対して旧版の計算コードまたは核データライブラリで評価した結果、主要核種に大幅な差異がない場合は使用可能と考えます。

上述のとおり旧版を使用する場合、最新版との差異を評価した上で使用することから、技術評価のスタンスとして最新のコード及び最新の核データを使用するスタンスとすることについて、本標準と乖離はありません。

6.1.2.3 中性子条件 (標準からの抜粋)

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付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。

○標準に記載している計算結果について

標準に記載している計算結果は最新版と旧版の両方で評価されていないため大幅な差異がないことは確認されていませんが、下表に示す、付属書 I 及び J の評価例に示される核種のうち放射化以外から発生する F P およびアクチノドを除いた放射化核種についての主要な核データライブラリの比較により大幅な差異はない（注）と考えております。

（注）大幅な差異がないとは、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、放射能濃度への影響が 2～3 倍程度以内の場合は影響が小さく、大幅な差異はないとしています。

生成核種	主な生成反応*	ORLIBJ40/ORLIBJ32				ORLIBJ40/ORLIBJ33			
		BS200	BS270	PWR34	PWR47	BS200	BS270	PWR34	PWR47
C-14	N-14(n, p)	1.38	1.12	1.04	1.10	1.34	1.08	1.00	1.06
Cl-36	Cl-35(n, γ)	1.30	1.03	0.95	1.01	1.53	0.78	0.87	0.74
Co-60	Co-59(n, γ)	1.22	1.05	1.00	1.04	1.22	1.05	1.00	1.04
Ni-63	Ni-62(n, γ)	1.29	1.03	0.95	1.02	1.29	1.03	0.95	1.02
Nb-94	Nb-93(n, γ)	0.41	0.39	0.38	0.38	0.41	0.39	0.38	0.39
Tc-99	Mo-98(n, γ)	1.04	1.07	1.07	1.07	1.05	1.07	1.08	1.07

*：アイソトープ手帳12版（公益社団法人 日本アイソトープ協会）より

回答 7(3)

「評価対象とする放射化金属等を照射する中性子スペクトルを反映した断面積をユーザーが準備する」については、ORIGEN2 コードシリーズの手順です。ORIGEN2 コードシリーズについては、炉内で照射される放射化金属等（制御棒、バーナブルポイズン棒などの運転中廃棄物）に対しては、前述の炉内の燃料領域のスペクトルで縮約された 1 群実効核反応断面積ライブラリが使用できますが、燃料領域以外など中性子スペクトルが異なる位置の放射化金属等（バッド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。

更問 7. (3) への回答

断面積作成フローは、以下の文献[1]における断面積作成フロー（図 7-1）を参考としております。断面積処理（NJOY）と 1 群断面積処理について、注記と説明を追加いたしました。

[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

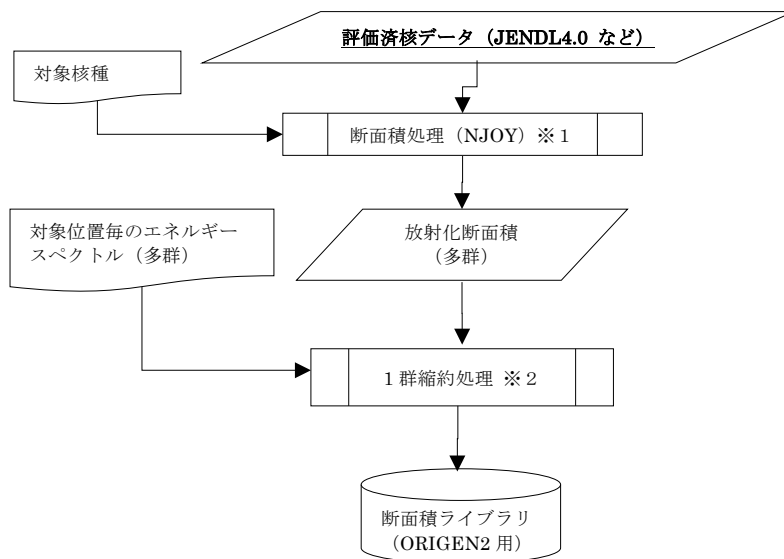


図 7-1 1群実効核反応断面積ライブラリの作成フロー

- ※1： JENDL4.0 等の評価済核データは連続エネルギーのデータであるため、放射化金属等の評価対象核種に対して、別途、中性子輸送計算コードで計算した中性子スペクトルと同一のエネルギー群構造となるように、断面積処理コード (NJOY コード) を用いて多群エネルギー群構造を有する断面積に処理する。
- ※2： 多群エネルギー群構造化した放射化断面積に、対象部位における中性子スペクトルのエネルギー群毎の割合により重み付けすることで、ORIGEN2 コードで利用可能な 1 群縮約断面積を作成する。

8. 「5.2.3.1 区間推定法の種類」には、「換算係数法」、「濃度比法」及び「放射能分布評価法」が規定されています。「表 D.1—各区間推定法の基本的な特徴及び適用対象放射化金属等」には、「代表的な廃棄物の種類」として、例えばチャンネルボックスについては「換算係数法」及び「濃度比法」が適用可能とされていますが、同一の対象物に対してそれぞれの手法を適用した際の評価結果の同等性を説明してください。

回答 8

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

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

この計算結果を用いて、評価対象核種と燃焼度との換算係数、又は評価対象核種と Key 核種（例 Co-60、Cs-137）との濃度比で評価する方法が区間推定法で、それぞれの評価

方法の特徴（例 運転管理データを利用、非破壊測定結果を利用）を踏まえて選択するものです。

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

さらに、いずれの手法でも、実際の運用段階における入力条件の設定において、不確実性があるものは、十分な保守性をもって設定するため、保守的な結果によって評価できる方法となっています。（回答 10 も参照ください。）

理論的計算法の入力条件設定から廃棄体の放射能濃度の決定までの流れと保守性

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

9. 「D.1.3 濃度比法」

- (1) 濃度比法は難測定核種と Key 核種の比を放射化計算により求める方法と規定されていますが、濃度比を用いて廃棄物の放射能濃度をどのように求めるのかを具体的に説明してください。Key 核種の放射能濃度を実測により求める場合は、「表 D.1—各区分推定法の基本的な特徴及び適用対象放射化金属等」に記載する大型の評価対象物（シュラウド、圧力容器）の測定をどのように行うのか説明してください。
- (2) 「対象とする放射化金属等の各部位においては、同一元素組成、同一中性子フルエンス率、同一照射履歴であることから、核種の濃度比は基本的に一定であるとの考えに基づく」とされていますが、中性子フルエンス率及び照射履歴は炉内での位置により異なると想定されます。ここで、中性子フルエンス率及び照射履歴を一定として扱ってよい理由を説明してください。
- (3) 難測定核種と Key 核種の比は、半減期の違いにより設定時から時間とともに変化していくと想定されますが、放射化計算で求める濃度比から廃棄体の放射能濃度に換算する際に、上記の濃度比の変化をどのように考慮するのか説明してください。
- (4) 「評価対象とする放射化金属等が特定されれば、中性子の照射履歴の詳細情報が明らかでない場合でも、Key 核種濃度を測定すれば、適用できる」とあります。この条件が当てはまるのは照射履歴が濃度比を計算した際の照射履歴の範囲に収まる場合であると想定されますが、照射履歴の詳細情報が明らかでないにも関わらず、濃度比法が適用できる理由を説明してください。

切断した大型廃棄物を収納した廃棄体の Key 核種の放射能濃度を廃棄体の非破壊外部測定によって決定する方法については、技術評価の対象外とすることとしたので、追加の質問はありません。

回答 9(1)

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

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

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

回答 9(2)

ここでの「対象とする放射化金属等の各部位（評価位置の意味）においては、同一元素組成、同一中性子フルエンス率、同一照射履歴」とは、放射化計算を行う選定位置にお

る入力条件のことを示しており、1回の放射化計算における同じ選定位置での放射化計算の入力条件は、対象物がローテーション（燃料と一緒に移動するチャンネルボックスは、燃料サイクルごとに炉内で移動すること）によって対象物の炉内の位置が変わっても、核種ごとの放射能濃度の計算に適用する入力条件としては、各炉内設置位置での照射履歴を集積した同一の中性子フルエンス率及び照射時間になります。

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

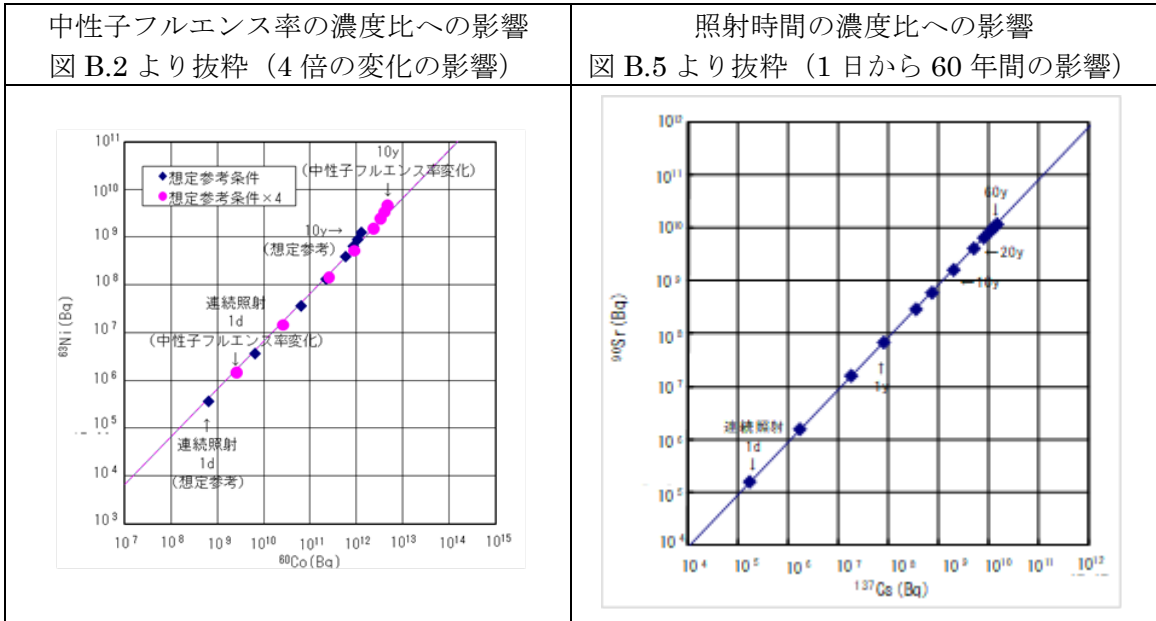
なお、附属書 D の式(1)に示しますように、放射化によって生成する核種の放射能濃度は、中性子の照射時間が生成する核種の半減期に比べて短いなどの条件では、式(1)のように近似的（中性子エネルギー群に単純化）に表わされます。

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

- ここに、
- A : 評価対象とする放射化金属等の放射能濃度 (Bq/cm³)
 - σ : 親核種の放射化断面積 (cm²)
 - N : 親核種の照射前の原子数密度 (cm⁻³)
 - Φ : 中性子フルエンス率 (n/cm²/sec)
 - λ : 生成核種の崩壊定数 (s⁻¹)
 - t : 中性子の照射時間 (s)

この式を用いると、評価対象位置の放射能濃度は経時的に変化しても、選択した評価対象位置では、「同一の中性子フルエンス率、同一の中性子の照射時間」であることから、評価対象核種と Key 核種との濃度比は、一定の定数で示すことができることになります。

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



注記 附属書 B より抜粋

回答 9(3)

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

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

回答 9(4)

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

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

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

10. 「表 D.1—各区間推定法の基本的な特徴及び適用対象放射化金属等」

三つの手法について、代表的な評価対象とする放射化金属等の種類がそれぞれ記載されています。三つの手法は原理的には放射化金属等であれば評価対象とする放射化金属等の種類によらず適用できるものと想定されますが、対象となる放射化金属等が異なる理由を説明してください。また、同一の放射化金属等を三つの手法で計算した場合の評価結果の同等性を説明してください。

回答 10

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

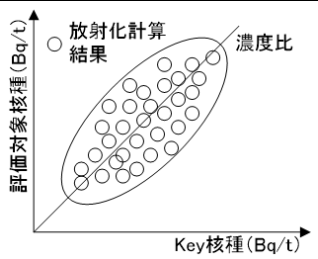
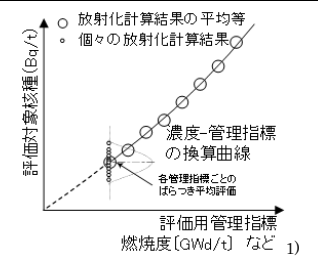
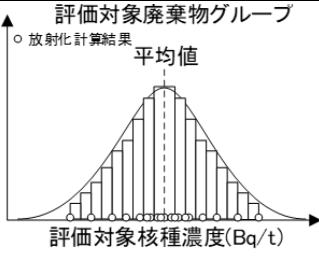
- ・ 濃度比法： 同時に中性子照射され、生成した核種間の濃度比は一定性を示す放射化物への適性を示す。
- ・ 換算係数法： 燃料の燃焼度などと密接な関係性を示す放射化物への適性を示す。
- ・ 濃度分布評価法： 同一の照射時間、材料組成で、中性子分布だけが異なる放射化物への適性を示す。

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

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

したがって、各手法を選択する場合においては、「判断基準」と言うより、より合理的に放射能濃度を評価する観点で選択するため、次表に示します評価方法ごとの特徴、適する対象及び適用条件を踏まえた評価対象の具体例が考えられます。

さらに、いずれの手法でも回答8に示しましたように、入力条件の設定において、不確実性があるものは、保守性をもって設定するため、保守的な結果をもって評価できる方法となっています。

評価法	濃度比法(5.2.3.3)	換算係数法(5.2.3.2)	濃度分布評価法(5.2.3.4)
基礎データ模式図			
評価方法の特徴	同種の放射化物の中で同時に中性子照射され生成した核種間の濃度比が一定であることを利用し、Key核種（Co-60）の放射能濃度に計算で得られた濃度比を乗じて対象核種の放射能濃度を評価する方法	核種の生成因子である燃料の燃焼度などの管理指標と密接な関係性をもつ放射化物の放射能濃度を、原子炉の運転で管理されている管理指標（燃焼度）の値から対象核種の放射能濃度を評価する方法	同一の照射時間、材料組成（中性子分布だけが異なる）の放射化物中に生成する核種の放射能濃度を位置ごとに計算し、対象とした放射化物全体の対象核種の放射能濃度分布として評価する方法
適する評価対象	材料、中性子条件、照射時間の変動範囲を考慮した評価方法であるため、これらの変動があり、多数の発生が想定される放射化物、多数の位置に配置される放射化物又は大型の放射化物に向く	燃焼度、中性子照射量との強い関係性を考慮した評価方法であり、これを管理指標として適用するため、燃料との関係が強い放射化物に向く	放射能濃度分布が比較的狭い範囲となる解体廃棄物、特に、原子炉軸方向又は径方向の中性子分布だけが異なる大型の固定された放射化物に向く
適用条件 ³⁾	①評価対象とする切断等が行われた機器/機材を廃棄体に収納した状態での放射能濃度の評価に適用する。 ②廃棄体と対象放射化金属等との連関管理が出来ること。	①燃料の燃焼度、原子炉内での中性子照射量の管理記録が示せる燃料及び燃焼制御に使用している機器/機材の放射能濃度の評価に適用する。 ②燃料の燃焼度又は照射量と対象放射化金属等との連関記録が示せること。	①解体する大型の機器、機材全体の放射能濃度の評価に適用する。 ②機器/機材が、部分的に交換されていないこと及び炉内での移動が無いこと。
適する評価対象の具体例 ³⁾	BWR: 多数発生するチャンネルボックス、制御棒、多数の位置に配置された解体廃棄物（CRD カイトチューブなど）、大型の放射化物（シュラウド、圧力容器 ²⁾ 、上部格子板、炉心支持板） PWR: 多数発生するバーナブルポイズン、制御棒、多数の位置に配置された解体廃棄物（制御棒クラスタ案内管など）、大型の解体廃棄物（圧力容器 ²⁾ 、炉心槽、熱遮へい体、バップル、下部炉心支持板）	BWR: 燃焼度との関係が強いチャンネルボックス、中性子照射量との関係が強い制御棒 PWR: 燃焼度との関係が強いバーナブルポイズン、中性子照射量との関係が強い制御棒	BWR: 大型の固定されたシュラウド、圧力容器、格子板、支持板 PWR: 大型の固定された圧力容器、炉心槽、熱遮へい体、炉心バップル、支持板

注1 換算係数法の模式図では、燃焼度ごとの個々の計算結果を評価した場合で例示している。
注2 圧力容器などは、浅地中ピット処分の最大濃度を下回ると推定されるが、中深度処分の可能性がある廃棄物である。
注3 適用条件及び具体例は、標準中に具体的には示していないが、標準はこれらを踏まえている。

1 1. 「D. 1. 4 濃度分布評価法」

- (1) 「この方法における放射化計算方法は、基本的に個別の廃棄物の放射能濃度を計算する場合と同等であるが、評価の対象とする放射化金属等のグループを代表する放射能濃度（例えば、平均放射能濃度）を保証できることが適用の前提となる。」とあります。ここで、「放射能濃度を保証する」具体的な方法について説明してください。
- (2) 本評価法の適用に当たっては、「計算条件（例えば、中性子フルエンス率）の変動範囲がある一定の範囲内となる必要がある。」とされていますが、「ある一定の範囲内」について具体的にその範囲を説明してください。
- (3) 本評価方法を適用するに当たり、変動要因となりうる計算条件に、例示された中性子フルエンス率以外の条件があればそれを示して下さい。あわせて、「計算条件の変動範囲が計算結果に与える影響が小さいことが明らかな条件については、複数の計算条件を設定せずに一つの値（代表的な値又は保守的な値）を設定できる。」で示されている「計算結果に与える影響が小さいことが明らかな条件」の具体例を示してください。
- (4) 「複数の放射化計算結果が一定の範囲内に安定して分布していることを評価し判断することが適切である。」とありますが、「安定して分布している」とはどのような状態を指すのか説明してください。

更問 1 1. (4) 「安定して分布している」とは、「平均放射能濃度」と「平均放射能濃度の 95%信頼上限値」の差が小さくなって漸近して一定の差の状態になることを指すとしているとの回答ですが、「平均放射能濃度」と「平均放射能濃度の 95%信頼上限値」の差が小さくなって漸近して一定の差の状態になる」について、「一定の差の状態」とは計算回数を増加させた場合、両者の差の変動幅が何パーセント以内に収まることをいうのか説明してください。

(質問の背景) 安定して分布していると判断する定量的な基準について質問したものです。

回答 11(1)

そのグループの個々の廃棄物について、下記の条件にあることです。

- ・ 材料が同一規格仕様のものであること
(鋼材検査証明書などの材料製造単位の品質証明ができるもので、品質変化が無いことの確認を行う)
- ・ 中性子フルエンス率がある一定の範囲内にあること
(原子炉内の中性子フルエンス率の分布を中性子輸送計算などで事前に評価し確認する)
- ・ 中性子照射条件が同一であること
(評価対象物の一部交換、移動履歴が無いことの確認を行う)

回答 11(2)

「ある一定の範囲内」とは、例えば中性子フルエンス率については、炉心を構成してい

る機器、機材を評価対象とする場合には、その機器、機材の位置に応じた中性子フルエンス率が炉心計算等により評価されているという意味です。

この中性子フルエンス率は、放射化計算を実施する前に、原子炉内の中性子輸送計算によって評価され、最大値、最小値間の分布が確認できていることから、この状態を「ある一定の範囲内」にあるという表記にしています。

回答 11(3)

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

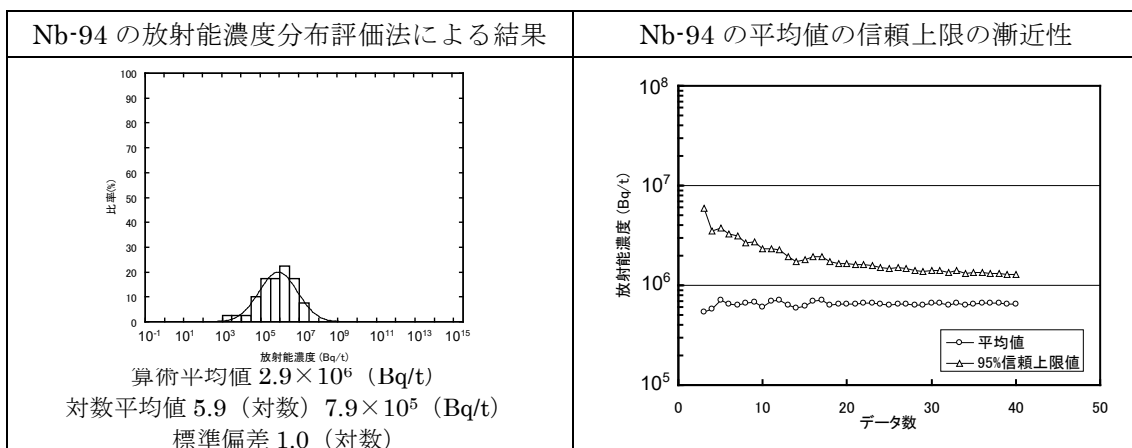
また、「計算結果に与える影響が小さいことが明らかな条件」としては、評価対象の機器又は部材を移動、交換していないことと考えます。

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

回答 11(4)

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

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



更問 11. (4) への回答

附属書 K の図 K.5 に示しましたように、計算の数量を多くすることで、「平均放射能濃度」と「平均放射能濃度の 95%信頼上限値」の差異が小さくなる傾向が見られます。これ

は両者の値が一定の値に近づく結果によるものです。

資料 2-1-1 で回答しましたように、両者の差異が小さくなって漸近して一定の差の状態になる状態を、「安定して分布している」と表記しましたが、誤解を生じさせる回答となっていました。

「安定して分布している」と表記したのは、両者の値が一定の値に近づく状態を指しているものです。その判断は、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 13(4)と同様に、統計値の安定性で評価します。すなわち、附属書の図 K.5 に示しますように、統計値安定後の濃度の平均値と 95 %信頼上限値がほとんど変化しない状態になっていることを視覚的に確認することで判断しています。定量的には、計算の数量が 30 以上になる段階から各々の値の変化が 10 %以内に安定してくることから、このケースでは、10 %が定量的な基準と判断できると考えます。

12. 「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」
放射化断面積の設定において、ORIGEN、MCNP (PHITS も用いるのであれば、それを含む) を使用する際に、どのような核データライブラリを用いるかによって計算結果に差異が生じると想定されます。使用を想定している核データライブラリとともに、核データライブラリによって計算結果に差異があるのか、差異があるならば、放射能濃度決定においてどのように考慮するのかを説明してください。

更問 12. 使用を想定している核データライブラリについては回答いただきましたが、計算結果に差があるのか、あるならば、放射能濃度決定においてどのように考慮するのかについては回答いたしません。核データライブラリによって具体的にどの程度の差があるのかを評価例等で示してください。また、差がある場合、放射能濃度にどのように考慮するのかについても、例で示してください。

(質問の背景) 各データライブラリはバージョンによってデータが異なるため、使用するライブラリの違いがどの程度放射能濃度の評価結果に影響があるかを確認したものです。

回答 12

基本的には核データライブラリは、日本原子力研究開発機構などの各国の研究機関において、実験値をベースとして核物理の理論計算値や統計学による推定値を加えることによってもっとも真値に近づくよう核データを評価された評価済核データライブラリ¹⁾であり、また、各種実験データに基づくベンチマーク解析によって臨界や遮蔽(中性子、ガンマ線)の観点でバージョン間の比較を含めて検証²⁾された信頼性の高いものであることから、どれも使用することは可能と考えます。

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

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

核データライブラリの選定においては、その時点での新しい核データライブラリとの比

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

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

JENDL-4.0、JENDL-3.3、JENDL-3.2、JENDL-3、JENDL/AD-2017³⁾

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

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

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

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

更問 12への回答

現状、ライブラリの違いによる放射能濃度への影響の評価データはありませんが、放射化断面積の値の差異により概ね評価結果の差異を推定できます。放射化断面積の差異を確認した例を以下に示します。

放射化計算の核データライブラリについて、JENDL-3.2, JENDL-3.3, JENDL-4.0 を基に日本原子力研究開発機構にて整備され公開されている ORLIBJ32, ORLIBJ33, ORLIBJ40 の同一のスペクトルで 1 群に縮約された放射化断面積の値の比をとった例を以下に示します。BS200, BS270 は BWR の炉心条件、PWR34, PWR47 は PWR の炉心条件のスペクトルで縮約された放射化断面積です。

下表の例において、ORLIBJ32, ORLIBJ33, ORLIBJ40 の放射化断面積の値の比較においては、Cl-36 の例では ORLIBJ32 に対する ORLIBJ40 の値は 0.95~1.30 倍、ORLIBJ33 に対する ORLIBJ40 の値は 0.74~1.53 倍のばらつきがあります。Cl-36 の例では旧ライブラリに対する新ライブラリの断面積の値は 0.74~1.53 倍の影響があることが確認され、断面積と比例関係(※1)にある放射能濃度への影響の程度もおおよそ同程度と推測されます。

なお、表中では核データライブラリの比較により旧ライブラリに対する新ライブラリの断面積の比が 2~3 倍程度以内に収まっていることから大幅な差異はない(※2)と考えられますが、もし旧版を使用する場合は、最新の核データライブラリに対する旧版の不確かさを確認した上で、大幅な差異がある場合にはそれを包含するように放射能濃度の評価値に補正する方法が考えられます。

生成核種	主な生成反応*	ORLIBJ40/ORLIBJ32				ORLIBJ40/ORLIBJ33			
		BS200	BS270	PWR34	PWR47	BS200	BS270	PWR34	PWR47
C-14	N-14(n, p)	1.38	1.12	1.04	1.10	1.34	1.08	1.00	1.06
Cl-36	Cl-35(n, γ)	1.30	1.03	0.95	1.01	1.53	0.78	0.87	0.74
Co-60	Co-59(n, γ)	1.22	1.05	1.00	1.04	1.22	1.05	1.00	1.04
Ni-63	Ni-62(n, γ)	1.29	1.03	0.95	1.02	1.29	1.03	0.95	1.02
Nb-94	Nb-93(n, γ)	0.41	0.39	0.38	0.38	0.41	0.39	0.38	0.39
Tc-99	Mo-98(n, γ)	1.04	1.07	1.07	1.07	1.05	1.07	1.08	1.07

*: アイソトープ手帳12版 (公益社団法人 日本アイソトープ協会) より

(※1) 放射能濃度が断面積と比例関係にあるとは、放射化の計算式は以下に示すとおりであり、断面積 (σ) と放射能 (A) は比例関係となります。

放射化計算式 (^{60}Co の例)

$$A = N_0 \sigma \phi \{1 - \exp(-\lambda T_1)\}$$

- A : 放射化核種 (^{60}Co) の放射能 (Bq)
- N_0 : ターゲット核種 (^{59}Co) の個数 (atoms)
- σ : 中性子による ^{59}Co の (n, γ) 反応断面積 (cm^2)
- ϕ : 照射中性子束 ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)
- λ : ^{60}Co の崩壊定数 ($3.6001 \times 10^{-4}/\text{日}$)
- T_1 : 照射日数 (日)

(※2) 大幅な差異がないとは、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)に示しますように、放射能濃度への影響が 2~3 倍程度以内の場合は影響が小さく、大きな差異はないとしています。

13. 「D.4.3 元素分析データ数量に応じた濃度分布条件設定」

「b) 元素分析データ数が比較的少ない場合」について、「保守性を加味した平均値、標準偏差を適用することで、評価対象とする元素成分濃度分布を設定できる」としています。例示として p46 の図では、検出データの平均値の 95%信頼上限を設定平均値とした「保守的な範囲を設定した分布」が示されていますが、この元素成分濃度分布のどの範囲を用いて放射化計算を行うか説明してください。

回答 13

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

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

理論的方法	元素成分条件 (本文 6.1.2.2)	中性子条件 (本文 6.1.2.3)	照射条件 (本文 6.1.2.4)
<p><u>点推定法</u> (特定放射化物の代表データによる設定)</p>	<p>入力用基礎データベースの起源元素濃度分布を踏まえ、<u>保守性(信頼上限値の適用など)を勘案して設定</u>する。</p>	<p>入力用基礎データベースの中性子フルエンス率分布を踏まえ、<u>保守性(最大条件の適用など)を勘案して設定</u>する。</p>	<p>入力用基礎データベースの照射時間分布を踏まえ、<u>保守性(最大時間の適用など)を勘案して設定</u>する。</p>
<p><u>区間推定法</u> (放射化物の範囲を網羅する複数の入力データの設定)</p>	<p><u>入力用設定分布からのランダムサンプリング</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 分析などにより収集された起源元素の入力用基礎データベースから設定した入力用設定分布(保守性考慮した分布)からのランダム抽出によって設定する。 ・ 必要な放射化計算用の数を満たすまで繰り返して設定する。 ・ ランダム抽出方法は、JIS Z 9031 に示される方法。(右記にも適用) 	<p><u>入力用基礎データベースの分布からのランダムサンプリング</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 評価対象廃棄物の「評価位置(部位)」をランダム抽出によって設定する。 ・ ローテーションのある場合、運転サイクルごとの炉内挿入位置の実績(例 炉内の中央部→中央部→最外周部などといった挿入パターン)からランダムに「炉内挿入位置」を設定する。 ・ 輸送計算による分布から、選定した対象廃棄物の「評価位置」及び「炉内挿入位置」における中性子フルエンス率及びスペクトル(放射化断面積)を設定する。 	<p><u>入力用設定分布からのランダムサンプリング</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 収集された運転管理データ(運転サイクル、照射時間)による入力用基礎データベースから設定した入力用設定分布からのランダム抽出によって照射時間を設定する。 ・ ローテーションのある場合、評価対象廃棄物の運転サイクルごとの「炉内挿入位置」のパターンをランダムに設定する。 ・ このサイクルごとの炉内挿入位置のパターンは、中性子条件の設定と同じ

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

(1) この方法が適用できるのは、検出下限値（以下「N.D. 値」という。）のデータ数が十分にある場合と想定されますが、そのデータ数を示してください。

(2) 検出データが 1 点の場合に、元素濃度分布の標準偏差 σ をどのように求めるか説明してください。

更問 14. (1) 「実際に適用した「測定機器、測定時間、測定試料量及びバックグラウンド」を確認し、データ数を含めた妥当性を評価することが適切であると考えます。」との回答をいただきました。「測定機器、測定時間、測定試料量及びバックグラウンド」を確認し、データ数を含めた妥当性を評価した例を提示してください。

(質問の背景) サンプリングの不確かさ、分析の不確かさがあるため、数点の検出データのみでは、その平均を推定分布の検出最大値と仮定することは非保守的となる場合があります。ND 値のデータが多くあり、かつ、数点の検出データがあるのであれば、当該検出データを推定分散の検出最大値と仮定することは一定の合理性を持ちますが、実運用として、何点の ND 値があれば当該手法を適用可能と考えているのかを確認したものです。

回答 14(1)

検出下限値のデータ必要数を定量的に評価することは、難しいと考えます。

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

その分布の信頼性を左右する検出下限値の妥当性は、種々の文献での材料種類、分析方法の情報によって評価することは可能であることから、標準ではこの入力データの設定の考え方を示しております。このため、検出下限値以下又は 1, 2 点の検出値以下の濃度領域での対数正規分布を設定して評価することは、適切であると考えています。

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

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

更問 14. (1) への回答

①「実際に適用した測定機器、測定時間、測定試料量及びバックグラウンド」を確認

第2回会合資料中の「なお、元素濃度の分析による検出下限値は、測定機器、測定時間、測定試料量、バックグラウンドなどによって決まるものですので、分析データ数に依存することは低いと考えられます。」の文章ですが、放射能計測（単位時間あたりに崩壊する原子の個数（放射性崩壊の速さ）を計測）を想定した表現であり、元素分析に関するものではありません。このため、「測定時間、測定試料量及びバックグラウンド」は、元素分析においては検出下限には関与しません。

上記を踏まえて修正した回答を以下に示します。

試料は、実機の製造工場にて、実際の機器に用いる構造材料を切り出してサンプリングしています。

また、元素分析の測定機器（分析装置）は、測定対象の元素に合わせて適用します。以下の分析装置は、国内の分析メーカーにおいても、検出感度の高い定量分析に適用されている一般的な分析装置です。

- ・ Th, U, Co, Nb, Mo 等：誘導結合プラズマ発光分光分析 (ICP-AES)、誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS)
試料を切断後、洗浄、分取、酸溶解、定容等の操作を行った後に、溶液中の元素を定量する分析装置
- ・ Cl 等：グロー放電質量分析 GD-MS
固体試料を放電によりイオン化させイオン量を測定する分析装置

さらに、測定試料量は、分析装置毎で設置できる試料量の上限があり、それを考慮して決まります。例えば、

- ・ ICP-AES の場合： 1 g 前後を溶解した溶液を使用
- ・ GD-MS の場合： 2 mm×2 mm×20 mm 角柱試料を固体のまま装置に装着
GD-MS では、決められた量の試料を分析装置内の試料フォルダーに設置して測定する方法で、分析に使用する試料量は検出下限値に起因しません。

なお、核種分析は測定時間の間に崩壊して放出される放射線を測定しますが、元素分析は単に当該元素の質量を測定する方法です。そのため、元素分析においては、測定時間とバックグラウンド（自然放射線の影響）は分析精度に影響しません。

分析装置を用いる場合でもバックグラウンド補正（ノイズの除去、自然放射線の影響除去ではない）を行います。この補正は、試料を用いずに溶解等の同一の試料調製の操作をして、試薬等のブランク値を求めることで行っています。

さらに、元素分析の分析値（定量値）は、事前に標準試料（市販されている既知濃度の試薬）を測定して検量線を作成した上で取得します。

②何点の ND 値があれば当該手法を適用可能と考えているのか

検出限界値以下の濃度領域で元素濃度分布を設定して評価する場合に、その濃度分布の領域を把握するために、必要と考えられる化学分析数につきましては、標準には示しておりませんが、表 14(1)-1 に示します考え方が適用できるのではと考えます。

表 14(1)-1 検出下限値を含む分析における必要データ数

前提条件	確率的に設定する。
検出できない濃度分布などの設定の模式図	
必要データ数の設定の考え方	上図のように、検出下限の値（検出できない濃度分布の平均+標準偏差 $N\sigma$ 注1 の位置）を超える領域にある数量（例えば、平均値+ $N\sigma$ 超となる領域での分析データ数が1点と仮定）から母集団の数量を正規確率（例 2σ を超える確率：2.3%）によって評価する。
必要データ数の評価結果 ^{注3}	推定する平均値の位置を検出下限値から 1σ の位置とする場合： 7点 推定する平均値の位置を検出下限値から 2σ の位置とする場合： 44点

注1 「 $N\sigma$ 」とは、標準偏差の 1σ 、 2σ 、 3σ の数値の意味 ($N=1, 2, 3$)

注2 「推定する平均値の位置」とは、検出下限から低い濃度領域で分布を設定する際に適用する検出下限から $N\sigma$ の標準偏差を加味した位置で決定する平均値の意味。

注3 具体的には、検出下限値を超えるデータ数が1点未満となる条件を想定し、推定する平均値の位置を検出下限値から 1σ の位置とする場合：正規分布で検出下限値を超えるデータ数が最少の1点未満となるためには、分布の平均値から $\pm 1\sigma$ (68.3%) の範囲の上側（検出下限値を超える）にある領域のデータの存在確率（上側領域の存在確率は15.8%以下とする）である条件で考えると、総データ数は7点（6.3点以上）が必要である。

推定する平均値の位置を検出下限値から 2σ の位置とする場合：正規分布で検出下限値を超えるデータ数が最少の1点未満となるためには、分布の平均値から $\pm 2\sigma$ (95.4%) の範囲の上側（検出下限値を超える）にある領域のデータの存在確率（上側領域の存在確率は2.3%以下とする）である条件で考えると、総データ数は44点（43.5点以上）が必要である。

表 G.13—元素の濃度分布を対数正規分布として扱う例

濃度分布を対数正規分布とした例	
1 [31]	<p>作業場内における有害物質の濃度の分布は、時間的にも空間的にも正規型の分布より左側（低濃度側）にかたよった型になることが多く、次のような理由から正規型ではなく対数正規型の分布に近いことが予測される。</p> <p>a) 環境中有害物質の濃度は広い範囲にわたって分布し、最低値と最高値の比はしばしば 100 倍から 1 000 倍にもなることがある。</p> <p>b) 濃度は物理的に負の値にはなり得ない。</p> <p>c) 測定値の変動の大きさは測定された濃度の程度の広がりをもっている。</p> <p>d) 飛び離れた非常に大きな値の得られる確率は、あまり大きなものではない。</p>
2 [32]	<p>食品の消費の方も、カドミウムの濃度分布の方も、モデル化というものをしておりません。実際にある数字を使うのではなくて、それこそとんでもなく高い濃度というのはどこで出るかかわからないということを考えまして、分布の尻尾に当たる方を非常に長くとするような、例えばもしも計算で間違っているのであったら、消費者の保護がより確保できるような方に間違う方がいいということで、対数正規分布というモデル化をしております。・・・(中略)・・・もちろん、ほかのいろいろな違う分布をやることもありますが、今、世界では、対数正規分布というのが主に使われております。</p>
3 [33]	<p>一般に環境中の化学物質の分布は対数正規分布で表すことができるため、・・・(以下、省略)。</p>
4 [34]	<p>兵庫県下の陸水試料や環境調査としての毛髪試料を精力的に分析した。特に、毛髪試料では分析法の確立を図りながら非汚染地域の多数の試料を分析し、約 20 元素を定量し、元素ごとの特徴を明らかにした。すなわち、必須元素は正規分布に、非必須元素は対数正規分布になり、これらの中央値又は幾何平均値が環境試料中の元素濃度の取扱いに有効であることを示した。</p>
5 [35]	<p>河川水中の微量元素の濃度分析 全国 55 の河川から集めた 77 試料について希土類元素、トリウム及びウラニウム（16 元素）の濃度の平均値と範囲が明らかにされた。対象としたすべての元素濃度は非常に低く、高くても 100 ppt レベル、低い場合には、1 ppt 以下となった。各元素の濃度幅は非常に広く 3 桁程度の広がりを示した（津村，1991）。 わが国の陸水試料約 80 点について超微量元素 38 種類を分析した結果、各元素とも濃度範囲は非常に広く頻度分布は対数正規分布をすることが分かった。</p>
6 [36]	<p>一般に金属鉱床では、地球化学的な元素の含量の分布の型は対数正規分布ないしは、二項分布に近い分布をするといわれているが、中津河鉱床の探鉱坑道におけるように、比較的狭い範囲から相当多数の新鮮な試料が得られた場合に限って統計すると、ウランは二項分布型、トリウムは対数正規分布型を示す。</p>
7 [37]	<p>元素の地殻中の品位（濃度）分布は、L.H.Ahrens によれば対数正規分布で、その最多量値は平均地殻存在度の付近にあって、鉱石品位領域では Lasky 法則に従うと論じた。</p>
8 [38]	<p>Geology and mining. In the Earth's crust, the concentration of elements and their radioactivity usually follow a log-normal distribution. Environment. The distribution of particles, chemicals, and organisms in the environment is often log-normal.</p>

濃度分布を対数正規分布とした例	
9 [39]	<p>Frequency distribution plots of K, Rb, Sc, V, Co, Ga, Cr, and Zr in Ontario diabase, Sc, V, Ga, Cr, La, and Zr in Canadian granite, K, Rb, and Cs in New England granite and F and Mo in granite from various localities are regular, but assume decided positive skewness when dispersion is large, hence, distribution of concentration is not normal.</p> <p>All distributions become normal, or nearly so, provided the variate (concentration of an element) is transformed to log concentration: this leads to a statement of a fundamental (lognormal) law concerning the nature of the distribution of the concentration of an element in specific igneous rocks.</p>

【出典】

- [31] “労働衛生管理とデザイン・サンプリングの実務”，日本作業環境測定協会
- [32] 食品に関するリスクコミュニケーション[カドミウムに関する意見交換会（第2回）]
農林水産省消費・安全局（2004年6月9日）
- [33] 詳細リスク評価書 鉛 暫定版，独立行政法人産業技術総合研究所 化学物質リスク管理研究センター
- [34] 辻治雄，2002年度日本分析化学会 学会功労賞受賞者[業績]，ぶんせき，(2002.9)
- [35] 農業環境研究，この国の20年，(3) 化学物質の動態と生物影響，農業と環境，No.48 (2004.4.1)
- [36] ガンマ線の波高分析による人形峠地域などの花崗岩質岩石の天然放射性元素の分析，地質調査所月報，Vol.18, No.9
- [37] 関根良弘，“鉱物資源の量的評価と元素の地殻存在度”，(1986)
- [38] Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues, *BioScience*, Vol. 51, No. 5, (2001)
- [39] L.H. AHRENS, The lognormal distribution of the elements (A Fundamental Law of Geochemistry and its subsidiary), *Geochimica and Cosmochimica Acta*, Vol. 5 (1953)

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

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

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

ICP-AES：誘導結合プラズマ発光分光分析

ICP-MS：誘導結合プラズマ質量分析

GD-MS: グロー放電質量分析

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

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

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

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

注1 参考までに、ジルカロイ 4 の ND 値を示す。

分析法	ICP-AES 高周波誘導結合プラズマ 発光分析法	ICP-MS 高周波誘導結合プラズマ 質量分析
分析方法の概要	溶液化された試料をネブライザーで霧化し誘導プラズマ現象を利用し、 試料をプラズマ化させる分析原理までは共通。 プラズマ内で励起された元素から 放出される光波長と強度から濃度 分析を行う。	プラズマ内でイオン化された元素 を電場や磁場を用いて分離する事 で濃度分析を行う。
一般的検出下限	ppm オーダー	ppb オーダー
適用先	主成分、不純物成分に向く	微量成分に向く
短所	<ul style="list-style-type: none"> 固体試料である場合、溶液化する必要がある。 固体試料の分解・希釈により分析精度が大きく左右される。 同位体分析が出来ない。 	<ul style="list-style-type: none"> 原子量が 80 以下の元素は、Ar 及び主成分由来の分子イオンの質量干渉を受けやすい。

(参考) U の検出下限に関する文献調査の結果

元素	対象	分析方法	分析数 ^{a)}	分析結果 ^{b)}	出典
U	コールド材	ICP-MS	9 (9)	ND (5.0×10 ⁻⁷ wt%)	1
U	管理区域内の機器、部品	ICP-MS	6 (6)	ND (5.0×10 ⁻⁶ wt%)	2
U	非管理区域内の機器、部品	GD-MS	22 (22)	ND (5.0×10 ⁻⁷ wt%)	2
U	コールド材、発電所材	—	8 (8)	ND (3.0×10 ⁻⁴ wt%)	3
注記 GD-MS：グロー放電質量分析、ICP-AES：誘導結合プラズマ発光分光分析、 ICP-MS：誘導結合プラズマ質量分析 注 ^{a)} ()内はND数 注 ^{b)} ()内はND値の平均値					

出典

- [1] 放射化金属の放射能濃度評価における照射材料中の微量元素データに関する検討について、日本原子力発電，2010年8月（附属書G参考文献）
- [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)
- [3] NUREG_CR-3474, Long-Lived Activation Products in Reactor Materials, U.S. Nuclear Regulatory Commission

回答 14(2)

起源元素の濃度を分析によって1, 2点程度しか検出できなかった場合は、実施したサンプリング分析の結果からでは、標準偏差を設定することはできません。

このため、「同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を参考にした標準偏差」で設定する方法を適用します。

(分布の設定方法について)

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

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

なお、通常、推定される濃度の分布は、回答 14(1)に示しましたように微量成分元素の分布は、対数正規分布と考えられますので、検出最大値以下の領域で検出最大値から約3σの位置を平均値とした分布で存在すると考えられます。

これに対して、入力用の分布設定では、検出最大値から 2σ の位置を平均値とした分布で上側にスライドすることで、保守性を加味します。

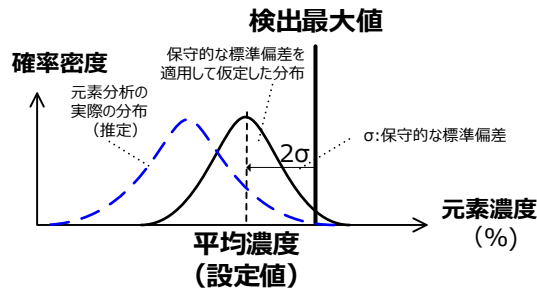


図 H.1—検出困難元素の濃度分布評価の基本的な考え方

(設定分布と推定分布を比較し易いように青破線の実際の分布を加筆しています)

（“標準偏差 σ ” の設定方法について）

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

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

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

注記 「3 点」は、統計値として標準偏差が計算できる最低数量。

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

基本的には、図 H.3 に示すように、標準偏差をより小さく設定することで保守性を考慮

することが出来ますが、表 H.1 に示すように、標準偏差のデータが示す正規性を評価することで 99%信頼下限の標準偏差を適用できると考えます。

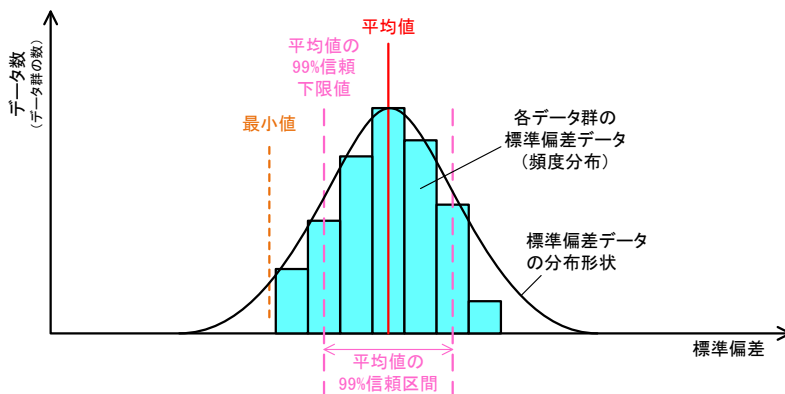


図 H.3—平均的な標準偏差の設定方法のイメージ図 (例)

注記 上記の標準偏差の分布は、文献などから収集した検出された元素濃度データをデータ群 (産地及び種類ごとに分類した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 (例 CI では 168 のデータ群、1 群は複数のデータを含む) で標準偏差を計算した結果をヒストグラムで表示するイメージを示す。

表 H.1—検出困難元素の平均的な標準偏差の設定方法の例

設定方法	概要	特徴	
		長所	短所
平均値	各データ群の標準偏差の平均値を適用する方法。	平均的な設定が可能。	放射能評価上では必ずしも保守的な評価とはいえない (特に分布のばらつきが大きい場合など)。
99 %信頼 下限値	各データ群の標準偏差の分布形状から、標準偏差の平均値の信頼区間 (99 %信頼区間の下限値) を算出し、これを設定値として適用する方法。	信頼性のある平均値として、データ数及びデータのばらつきの大きさも統計的に考慮される。	統計的な評価を行う前提として、標準偏差の分布形状に正規性が必要。
最小値	各データ群の標準偏差の最小値を適用する方法。	放射能評価上では、保守側の値が設定可能。	過度な保守性をもつ場合がある (特に分布のばらつきが大きい場合など)。

15. 「表 D. 6—元素分析データに検出下限値しかない元素の濃度分布条件設定方法」において、推定分布の平均濃度 (設定値) を N.D. 値の -2σ に設定しています。

- (1) この方法が適用できる検出下限値 (以下「N.D. 値」という。) のデータ数が十分にある場合と想定されますが、そのデータ数を示してください。
- (2) N.D. 値を平均濃度として用いるのではなく、それよりも 2σ 低い値を平均濃度として用いることができる理由を説明してください。
- (3) 濃度分布の標準偏差 σ として、「同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を評価して適用」とありますが、具体的にどのように求めるのか説明してください。

更問 15(1) (更問 14. (1) と同じ) 「実際に適用した「測定機器、測定時間、測定

「試料量及びバックグラウンド」を確認し、データ数を含めた妥当性を評価することが適切であると考えます。」との回答をいただきました。「測定機器、測定時間、測定試料量及びバックグラウンド」を確認し、データ数を含めた妥当性を評価した例を提示してください。

更問 15(2) 「検出下限値をそのまま平均濃度として用いる方法が、第 1 の適用方法として考えられます」との回答をいただきましたが、その場合、標準偏差 σ はどのように算出するのか説明してください。

(質問の背景) 質問 14 と同様に、十分な数の ND 値のデータがあれば、推定分布はそれよりも下にあると考えることは合理的と考えられる。数点の ND 値からそれを推定分布の検出最大値と仮定することは非保守的となる場合が懸念されるために確認したものです。

回答 15(1)

回答 14(1)と同じ。

回答 15(2)

検出下限値をそのまま平均濃度として用いる方法が、第 1 の適用方法として考えられますが、この方法を適用した場合で、保守性が大きくなりすぎる時は、回答 14(2)に示す考え方を適用して、下図に示しますように、検出下限値より低い領域にある濃度分布を想定し、保守的に検出下限値より 2σ 低い値を平均濃度として用いる方法を示しています。

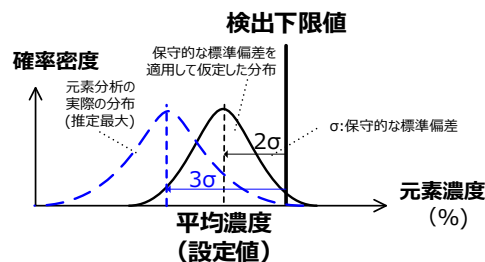


表 D.6 例 3 検出下限値以下で分布を設定する場合のイメージ

(設定分布と推定分布を比較し易いように青破線の実際の推定分布を加筆しています)

上図に示す推定される実際の分布(青破線)より高い濃度領域に入力用設定分布(黒実線)を仮定して、この分布に保守性を持たせるために、平均濃度の設定位置(通常、正規分布を示す場合は検出下限値から 3σ の位置に平均濃度があると想定されます)を、検出下限値から 2σ の位置を平均値としてより高い濃度側に分布を設定することとしています。

さらに、適用する“標準偏差 σ ”も保守性を持たせるように、分布範囲を狭く設定するために、標準偏差の信頼下限値を適用する考え方を示しています。これらによって、上側にスライドすることでの保守性を加味しています。

回答 更問 15(2) への回答

元素分析データに検出下限値しかない元素の濃度分布条件のうち、標準偏差は、実施したサンプリング分析の結果からでは、標準偏差を設定することができません。

このため、回答 14(2)に示しましたように、「同一の元素又は化学的性質が類似した元素

の分布を参考にした標準偏差」で設定する方法を適用します。

なお、検出下限値しかない元素の実際の元素濃度分布は、検出下限値以下の濃度領域で分布しておりますので、検出下限値を平均値として設定する保守的な方法だけでなく、真の分布に近い分布（回答 15(2)に示しました表 D.6 例 3 のイメージを参照ください）での評価を行うことが可能であると考えています。

このため、検出値が得られなかった場合は、少なくとも平均値は検出下限値より低くなるはずで、かつ、確率分布に正規分布を仮定すれば、最も高い領域での分布は、検出下限値から 3σ 低い値を平均濃度とする分布と考えられます。

したがって、全て ND であれば、平均値は検出下限より 3σ 以上低いと統計的に推定できます。

しかしながら、平均値の設定に保守性を加える形で 3σ でなく余裕を見て 2σ を適用したものです。

なお、分布の設定に必要なデータ数については、標準では濃度分布の設定方法は、附属書 D の表 D.6 に示しますように、分析数に応じた保守性を考慮することにしており、この分析数に関しては、回答 14(1) ②を参照ください。

（分布の設定方法について）

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

（分布の設定に必要な分析数について）

標準では、濃度分布の設定方法は、附属書 D の表 D.6 に示しますように、分析数に応じた保守性を考慮することにしております。

この分析数に関しては、回答 14(1) ②を参照ください。

表 D.6—元素分析データに検出下限値しかない元素の濃度分布条件設定方法（抜粋）

方法	方法の概要	保守性の考慮
検出下限値以下で、元素の濃度分布を仮定する方法	元素分析データの検出下限値を最大値とする濃度分布を、既知の試料の標準偏差を利用して設定する方法。	<p>例 3 に示すとおり、</p> <p><u>平均濃度:</u> 分析した数が比較的多い場合は、保守的に検出下限値を濃度分布の+2σの位置とし、逆算して設定する。 分析した数自体が少ない場合は、分析した数を考慮して、保守性を考慮する。</p> <p><u>濃度分布の標準偏差:</u> 平均的な標準偏差などの濃度分布条件を設定する（例えば、不純物成分元素及び微量成分元素であれば、同一の元素又は化学的性質が類似した元素の分布を参考にした標準偏差を設定など）。</p>

回答 15 (3)

回答 14(2)を参照願います。

検出値が 1, 2 点あった場合の標準偏差の設定方法と同じです。

16. 「D.5.2 中性子フルエンス率などの設定方法」

「b) 代表条件を設定する方法」の例 2 において、中性子輸送計算コードの例として MCNP が挙げられています。他のモンテカルロシミュレーションコード、例えば、国産の PHITS を用いる場合にどのような手順になるのかを説明してください。

回答 16

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

以上