

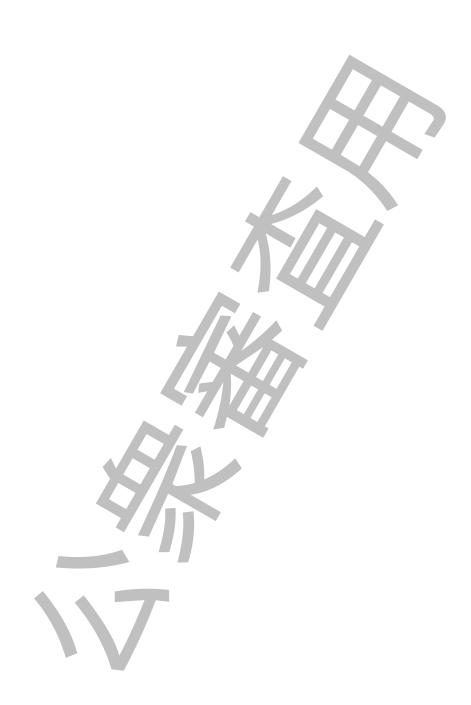
日本原子力学会標準

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:20XX(改定案)

20XX 年 XX 月

一般社団法人 日本原子力学会



まえがき

この標準は、一般社団法人日本原子力学会が標準委員会原子燃料サイクル専門部会 LLW 放射能評価分科会、同専門部会、同委員会での審議を経て制定したもので、原子力発電所から発生する中深度処分対象物の放射能濃度決定方法について、基本的な手順をまとめたものです。

比較的放射能濃度が高い中深度処分対象廃棄物の場合,既に用いられている浅地中ピット処分対象物の放射能濃度決定方法を適用すると,放射能濃度の高い廃棄物のサンプリング,放射化学分析の必要性が生じることから,作業員の被ばくを抑制できる放射能濃度決定方法が求められます。一方,中深度処分の評価対象核種は,放射化による生成が主体であり,同様の評価が可能と考えられる適切な領域区分を行うことによって,放射化計算を用いて廃棄物個別,又は類似の廃棄物をまとめた放射能評価が可能になります。また,放射化計算による評価手法に関する事例も増えてきたことから,中深度処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法に関する標準的な手順として,放射化計算を用いる放射能濃度決定方法を中心に記載し,標準化することとしました。

今回の初回改定に当たっては、この標準をベースに国際標準化機構(ISO)にて制定された ISO16966-2013 に追加された "妥当性確認" など、また、新規知見である "検出困難な起源元素の濃度分布評価方法に関する報告(電気事業者)"及び "原廃棄物分析法に関する報告(原子力安全基盤機構)"をこの標準に反映することとしました。



Foreword

This standard has been established by the Atomic Energy Society of Japan (AESJ) through deliberations by its Subcommittee on the Radioactivity Verification Method for Low-Level Radioactive Waste, Nuclear Fuel Cycle Technical Committee, and Standards Committee, and describes a basic procedure for determining the radioactivity of wastes generated at nuclear power plants in Japan, which are finally subject to Intermediate depth disposal.

Based on the procedures approved by the Nuclear Safety Commission in 1992, the method for determining the radioactivity of wastes subject to Intermediate depth disposal has been compiled as AESJ-SC-F022:2011 "Basic Procedure to determine the radioactivity concentration of near-surface disposal waste :2011". However, the relatively high activity of "Intermediate depth disposal wastes" makes it difficult to apply this method which is mainly based on radiochemical analysis, because it needs to apply the evaluation method which can be reduce the radiation exposure during sampling and radiochemical analysis on high radioactivity concentration radioactive waste. In addition, radioactive nuclides contained in such wastes are mostly formed as a result of activation by irradiation. On the other hand, the theoretical method based on activation calculations is expected to be applicable to such wastes if it is possible to classify wastes appropriately by waste characterization. Based on many recent experiences and practices of theoretical evaluation method, in this document, the theoretical method is standardized as a basic procedure for determining the radioactivity of wastes.

In this first revision of AESJ standard, "Validation" etc. which were added in ISO16966-2013 that was established based on this AESJ standard and new knowledge about "Method for evaluating distribution of difficult to measure chemical elements" (Electricity Utility) and "Activity evaluation method by radiochemical analysis of origin waste for solidification into waste packages" (Japan Nuclear Energy Safety Organization) are reflected into this standard.



制定: 20XX 年 XX 月 XX 日

この標準についての意見又は質問は、(一社)日本原子力学会事務局標準委員会担当 (〒105-0004 東京都港区新橋 2-3-7 TEL 03-3508-1263) にご連絡ください。

免責条項

この標準は、審議の公正、中立、透明性を確保することを基本方針とした標準委員会規 約に従って、所属業種のバランスに配慮して選出された委員で構成された委員会にて、専 門知識及び関心をもつ人々が参加できるように配慮しながら審議され、さらにその草案に 対して産業界、学界、規制当局を含め広く社会から意見を求める公衆審査の手続きを経て 制定されました。

一般社団法人日本原子力学会は、この標準に関する説明責任をもちますが、この標準に基づく設備の建設、維持、廃止などの活動に起因する損害に対しては、責任をもちません。また、この標準に関連して主張される特許権及び著作権の有効性を判断する責任も、それらの利用によって生じた特許権及び著作権の侵害に係る損害賠償請求に応ずる責任もありません。そうした責任は全てこの標準の利用者にあります。

なお,この標準の審議に規制当局,産業界の委員が参加している場合においても,この標準が規制当局及び産業界によって承認されたことを意味するものではありません。

Disclaimer

This standard was developed and approved by the Standards Committee of AESJ in accordance with the Standards Committee Rules, which assure fairness, impartiality, and transparency in the process of deliberating on a standard. The Committee is composed of individuals who are competent or interested in the subject and elected, keeping the balance of organizations they belong in the subject, with their professional affiliations well-balanced as specified in the Rules. Furthermore, the standard proposed by the Committee was made available for public review and comment, providing an opportunity for additional input from industry, academia, regulatory agencies and the public-at-large.

AESJ accepts the responsibility for interpreting this standard, but no responsibility is assumed for any detriment caused by the actions based on this standard during construction, operation, or decommissioning of facilities. AESJ does not endorse or approve any item, construction, device or activity based on this standard.

AESJ does not take any position with respect to the validity of any patent rights or copyrights claimed in relation to any items mentioned in this document, nor assume any liability for the infringement of patent rights or copyrights as a result of using this standard. The risk of infringement of such rights shall be assumed entirely by the users.

The Committee acknowledges with appreciation the participation by regulatory agency representatives and industry-affiliated representatives, whose contribution is not to be interpreted that the government or industry has endorsed this standard.

著作権

文書による出版者の事前了解なしに、この標準のいかなる形の複写・転載も行ってはなりません。

この標準の著作権は、全て一般社団法人日本原子力学会に帰属します。

Copyright

No part of this publication may be reproduced in any form without the prior written permission of the AESJ.

Copyright © 2017 Atomic Energy Society of Japan All Rights Reserved.



一般社団法人日本原子力学会における原子力標準の策定について

標準委員会は、原子力安全の確保を目指して公平、公正、公開の原則の遵守のもとに活動を 進めています。産業界と学界及び国に広く所属する各分野の専門家が共同して我が国の経済的、 社会的環境,国民性,産業構造,技術の発達などを十分勘案し,原子力発電所など原子力に係 る製品及びシステム, 仕組みが健全であると識別する基準を, 上述のステークホールダのみな らず広く国民に提供することを目指して、合意できるところを原子力標準として随時制定し、 それを最新の知見を反映して改定していくことを使命としています。これによって、国民が当 該技術についての最新の知見を迅速に利用することが可能になる一方、市場競争を行いながら 原子力安全を最優先としている産業界は、当該技術が標準化されたことを前提として、比較優 位性を生み出す技術領域の開発に努力することが可能になり、ひいては原子力安全をより確実 にすることにも注力することが容易となります。また、我が国においてはこれまで、国民の生 活の質を確保し、経済社会の安定な発展を支えるため、国が規制行政活動の一部として所要の 標準を国家標準として制定し、行政判断に使用してきました。この姿勢は、ここ数年来、機能 性化として標準策定の活動を学会に委ねる方向に進むこととしたものの,その体系化は整わず, 技術革新のスピードが速く、新技術の利用範囲が連続的に拡大していく今日にあり、技術の変 化に合わせて国家標準を適正化していく作業が追いつかないため、国としての原子力安全の確 保の観点で陳腐化が進んでしまいました。結果、2011年3月11日の福島第一原子力発電所の 津波被災が史上稀に見る原子力事故にまで展開する事態となった要因の一つと考えます。この ような状況を鑑み、新たに発足した原子力規制委員会の原子力安全を担う独立した行政機関を 補足すべく、学会が中心となって原子力安全に係る適正な判断基準を策定する役割を担うこと が、重要な教訓の一つと考えます。

このような精神に則り、標準委員会は、構成する委員一人ひとりが学会の倫理規程を遵守し、先に示した公正、公平、公開の原則のもとに原子力標準を策定し、国民の合意を得て制定されたいわゆるコンセンサス標準を国の行政ニーズに応じて利用していくことになれば、新しい技術的知見を迅速に、また、国民の利用に供することになります。さらに、これを国際標準化していく努力を行うことも学会でこそ可能であり、これの実現は我が国の国際技術戦略上重要な貢献となると考えます。

201X 年 XX 月

標準委員会 委員長 関村 直人

原子力標準の位置付けについて

"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:201X"は、1999年9月22日に設置された日本原子力学会標準委員会(Standards Committee of AESJ)が、原子力施設の安全性と信頼性とを確保してその技術水準の維持・向上を図る観点から、原子力施設の設計・建設・運転・廃止措置などの活動において実現すべき技術のあり方を、原子力技術の提供者、利用者、専門家のもつ最新の知見を踏まえ、影響を受ける可能性のある関係者の意見をパブリックコメントをも通じて聴取するなど、公平、公正、公開の原則を遵守しながら審議し、合意したところを文書化した原子力標準の一つです。

標準委員会は、専門家集団の果たすべきこのような役割と責任とを意識しながら、ボランティア精神を基盤に、原子力施設におけるニーズに対応する標準策定活動を行うために、公平、公正、公開の原則に則って定めた運営規約に従い、システム安全専門部会でこの標準の原案を作成しました。この標準が標準委員会設置の趣旨を踏まえて各方面で活用されることを期待します。

なお、この内容については原則として5年ごとに改定することとしておりますので、本委員会は、この標準の利用に際してのご質問及び改定に向けてのご提案をいつでも歓迎します。

201X 年 XX 月

標準委員会 委員長 関村 直人



原子燃料サイクル専門部会の活動について

原子燃料サイクル専門部会(以下,本専門部会という。)は、標準原案作成の任務を一般社団法人 日本原子力学会標準委員会から与えられ、2000年4月以来、活動を行っています。

本専門部会は, "原子燃料サイクル施設 (燃料加工施設, 使用済燃料貯蔵施設, 再処理施, 及び廃棄物処理処分施設)と核物質の輸送に供する設備などに関わる事項及びそれらの施設に特有の安全設計及び運用, 放射性物質の取り扱い"の標準原案作成を担当しています。

原子燃料のリサイクル路線をとっている我が国の原子力が,エネルギー源としての重要な役割を果たしていくためには,商業用原子炉とその周辺に展開される原子燃料サイクルとが一体となって,安全かつ経済的な発展を遂げていく必要があります。

しかし、我が国においては、これらの原子力施設において二つの重大な事故が発生した歴史があります。一つは茨城県東海村にあるウラン加工工場において 1999 年 9 月 30 日に発生した臨界事故であり、もう一つは、2011 年 3 月 11 日の津波被災に起因する福島第一原子力発電所の事故です。

このような事故が二度と起こらないようにするための方策を構築しながら、現在、原子燃料サイクルに関わる教育・研究機関、学協会及び関連事業者は、民間再処理工場の建設・運転、混合酸化物燃料の軽水炉利用、放射性廃棄物の処理・処分など、原子燃料サイクルの確立に向けた動きを安全性の確保を最優先に進めているところです。

このような状況の中にあって、本専門部会は、原子燃料サイクルに関連する施設の設計・建設・運転及び放射性廃棄物の埋設終了後の安全性と信頼性とを確保し、その技術水準の維持向上を図るために必要な民間標準の原案を、公平、公正、公開の原則に立ち、学会活動の一環として作成しております。

本専門部会の下には、必要に応じて分科会が設置され、個々の標準原案の作成のための詳細な検討が行われています。また、本専門部会は公開で行われていますので、事前に連絡していただければ、傍聴することができます。さらに、その審議の過程は議事録として残し、ホームページにも掲載されていますので、これまでの活動状況をご確認いただくことも可能です。

標準は、新技術の開発状況及び新たに得られた知見に基づいて適切に改定されていくことによって、 その利用価値が維持できるものです。そのため、少なくとも年に1度は本専門部会で見直しの検討を 行い、原則として5年ごとに改定版を作成していき、その都度、忌たん(憚)のない意見を広く求め ていきたいと考えております。

201X年X月

標準委員会 原子燃料サイクル専門部会 部会長 新堀 雄一

標準委員会,専門部会,分科会 委員名簿 標準委員会

(順不同, 敬称略)

(2016年9月13日現在)

委員長	関村	直人	東京大学				
幹事	事 山口 彰 東京大学 委員 谷本 亮二 三菱マテリアル(株)		三菱マテリアル(株)				
委員	青柳	春樹	元日本原燃(株)	委員 鶴来 俊弘 中部電力(株)		中部電力(株)	
委員	姉川	尚史	東京電力ホールディングス(株)	委員	寺井	隆幸	東京大学
委員	井口	哲夫	名古屋大学	委員	中井	良大	(国研)日本原子力研究開発機構
委員	伊藤	裕之	(一社)原子力安全推進協会	委員	成宮	祥介	関西電力(株)
委員	上田	親彦	九州電力(株)	委員	新堀	雄一	東北大学
委員	大鳥	靖樹	(一財)電力中央研究所	委員	西野	祐治	原子燃料工業(株)
委員	岡本	孝司	東京大学	委員	萩原	剛	(株)東芝
委員	岡本	太志	富士電機(株)	委員	藤森	治男	目立 GE ニュークリア・エナジ
委員	小原	徹	東京工業大学				一(株)
委員	河井	忠比古	'(一社)原子力安全推進協会	委員	本間	俊充	(国研)日本原子力研究開発機構
委員	清水 直孝 日本原子力保険プール 委員 吉原 健介 関西電力(株)		関西電力(株)				
委員	高橋	久永	三菱重工業(株)	委員	渡邉	宏	日揮(株)
委員	多田	伸雄	(一社)日本電機工業会		7		
				4			
旧委員	員(所属	属は委員	退任時)				
フェロ	フェロー委員						
常時参加者							
<u> </u>							

原子燃料サイクル専門部会

(順不同, 敬称略)

(2016年9月2日現在)

部会長	新堀	雄一	東北大学				
副部会長	髙橋	邦明	(国研)日本原子力研究開発機構	委員	斉藤	拓巳	東京大学
幹事	加藤	和之	原子力損害賠償•廃炉等支援機構	委員	坂下	章	三菱重工業(株)
委員	伊藤	真澄	国土交通省 海事局	委員	白井	茂明	リサイクル燃料貯蔵(株)
委員	上田	真三	三菱マテリアル(株)	委員	田中	忠夫	(国研)日本原子力研究開発機構
委員	大久伊	录 和俊	(原子燃料工業(株)	委員	田村	明男	(一社)原子力安全推進協会
委員	小畑	政道	(株)東芝	委員	中島	健	京都大学
委員	片岡	秀哉	関西電力(株)	委員	深澤	哲生	日立 GE ニュークリア・エナジ
委員	川上	泰	(公財)原子力安全研究協会	4			一(株)
委員	木倉	宏成	東京工業大学	委員	藤田	智成	(一財)電力中央研究所
委員	久保	美和	日揮(株)	委員	古谷	誠	電気事業連合会
委員	熊谷	守	日本原燃(株)	委員	柳原	敏	福井大学
委員	熊崎	隆啓	中部電力(株)	委員	山本	正史	(公財)原子力環境整備促進·資金
委員	小山	正史	(一財)電力中央研究所	V		7	管理センター

旧委員 (所属は委員退任時)



LLW 放射能評価分科会

(順不同, 敬称略)

(2017年1月23日現在)

主査	川上	泰	(公財)原子力安全研究協会				
副主査	岩崎	智彦	東北大学	委員	高橋	浩之	東京大学
幹事	北島	英明	(一社)原子力安全推進協会	委員	田中	雄司	日本原燃(株)
委員	池戸	康樹	中部電力(株)	委員	田辺	秀憲	日本原子力発電(株)
委員	泉田	龍男	(公財)原子力バックエンド推進セ	委員	新津	茂彦	東京電力ホールディング(株)
			ンター	委員	伴場	滋	(公財)日本分析センター
委員	尾崎	弘和	日揮(株)	委員	松居	祐介	(株)テプコシステムズ
委員	亀尾	裕	(国研)日本原子力研究開発機構	委員	見上	寿	富士電機(株)
委員	黒澤	正彦	(株)東芝	委員	三宅	裕介	三菱重工業(株)
委員	佐々ス	卞 道也	(一財)電力中央研究所	委員	脇	事一	関西電力(株)

旧委員

常時参加者

井上 亮 (原子力規制庁), 石屋 創士, 漆戸崇智 (日本原燃㈱), 柏木 誠 (日揮㈱), 副島 吾郎, 辻智之 ((国研)日本原子力研究開発機構: 2017 年 1 月 23 日まで), 林 宏一 ((国研)日本原子力研究開発機構), 田中 正人 ((公財)原子力環境整備促進・資金管理センター), 都筑 康男 ((一社)原子力安全推進協会), 中野 正明 (富士電機㈱), 西尾 隆志 (㈱神戸製鋼所), 林 隆康 (伊藤忠テクノソリューションズ㈱), 乾 実紗希 ((国研)日本原子力研究開発機構: 2017 年 1 月 23 日から)



標準の利用に当たって

標準は、対象とする技術、活動又は結果の仕様についての関係者のコンセンサスを規定しているものです。標準にはこうあるべきという義務的事項の他、こうあってもよいとして合意された非義務的な事項も含まれています。しかし、標準は、対象としている技術、活動又は結果の仕様について、規定している以外のものを排除するものではありません。また、標準が規定のために引用している他の規格・標準は、記載された年度版のものに限定されます。標準は、全体として利用されることを前提に作成されており、公式な解釈は標準委員会が行います。標準委員会は、それ以外の解釈については責任を持ちません。標準を使用するに当たってはこれらのことを踏まえてください。

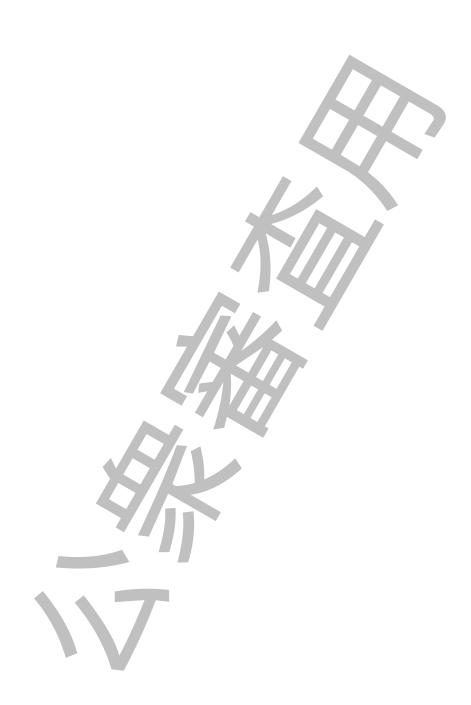
なお、標準委員会では、技術の進歩に対応するため、定期的に標準を見直しています。 利用に当たっては、標準が最新版であることを確認してください。



目 次

序.	¢	
1	適用範囲	1
2	引用規格 ·····	1
3	用語及び定義	2
4	評価対象とする廃棄物及び評価対象核種	4
5	放射能濃度決定方法	4
5.1	放射能濃度決定方法の適用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
5.2	理論計算法	4
5.3	実証的方法	6
6	放射能濃度決定方法の手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
6.1	理論的方法の手順	7
6.2	実証的方法の手順	10
6.3	妥当性確認	11
6.4	数値の丸め方	12
6.5	放射能濃度の評価における裕度	12
7	記録	12
7.1	理論的方法の記録	12
7.2	実証的方法の記録	12
8	品質マネジメントシステム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
附儿	属書 A(参考) 理論計算法の適用方法及び手順	14
附儿	国書 B(参考) 放射化計算の条件が放射能濃度に与える影響の評価例	22
附儿	属書 C(参考) 点推定法のための放射化計算の入力データ設定の推奨方法	37
附儿	国書 D(参考) 区間推定法のための放射化計算の入力データ設定の推奨方法	43
附儿	属書 E(参考) 原廃棄物分析法の基本的な適用方法	61
附	属書 F(参考) 放射化計算を行う場合の計算例	68
附儿	属書 G(参考) 放射化計算の入力条件の設定例	87
附儿	属書 H(参考) 検出困難元素の濃度分布評価方法	122
附儿	属書Ⅰ(参考) 濃度比を用いる場合の計算例	155
附	属書 J(参考) 換算係数を用いる場合の計算例	207
附	属書 K(参考) 濃度分布評価法によって決定する場合の計算例	221
附	属書 L(参考) 不確かさなどによる計算結果の評価 	247
附儿	属書 M(参考) 廃棄体中の放射能濃度の確認に対する基本的な考え方 ?	25]
附月	属書 N(参考) 理論計算法の記録の例	254

附属書 O (参考) 原廃棄物分析法の記録の例	256
解 説	
1 制定及び改定の経緯	258
1.1 制定の趣旨及び経緯	258
1.2 今回 (20XX 年) の改定の経緯 ····································	259
2 中深度処分対象廃棄物の放射能評価上の特徴	260
3 適用範囲	261
4 対象とする廃棄物及び核種	262
5 審議中に議論となった事項	263
6 その他の解説事項	264
6.1 表面汚染の取扱い	264
6.2 濃度比法を用いる場合の基本的な考え方及び計算例	265
6.3 濃度分布評価法を用いる場合の基本的な考え方及び計算例 /	277
6.4 原廃棄物分析法の基本的な試料採取方法	278
6.5 廃棄体中の放射能濃度の確認に対する基本的な考え方	283
6.6 放射能濃度決定方法の適用において必要な管理	284
6.7 検出困難元素の濃度分布評価方法	284



F015: 20XX

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:20XX (素案)

Basic procedure to determine the activity concentration of intermediate depth disposal waste

序文

この標準は、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。

1 適用範囲

この標準は、原子力発電所の運転中及び解体時に発生する低レベル放射性廃棄物のうち、 中深度処分を行う廃棄物中の放射能濃度を決定する理論的方法及び実証的方法の使用条 件・手順を規定する。

2 引用規格

次に掲げる規格及び標準は、この標準に引用されることによって、この標準の規定の一部を構成する。これらの引用規格のうちで、西暦年を付記してあるものは、記載の年の版を適用し、その後の改定版(追補を含む。)は、適用しない。西暦年の付記がない引用規格は、その最新版(追補を含む。)を適用する。

なお、引用規格とこの標準の規定との間に相違がある場合は、この標準の規定を優先する。

JIS Z 4001:1999 原子力用語

JIS Z 8101-1:2015 統計-用語と記号(第1部:一般統計用語及び確率で用いられる用語)

JIS Z 8101-2:2015 統計-用語と記号(第2部:統計の応用)

JIS Z 8401:1999 数値の丸め方

AESJ-SC-F022:2011 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

AESJ-SC-A008:2015シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン

ISO 16966:2013 Theoretical activation calculation method to evaluate the radioactivity of activated waste generated at nuclear reactors

3 用語及び定義

この標準で用いる主な用語及び定義は、JIS Z 4001:1999 による。また、統計上の用語は、 JIS Z 8101-1:2015 及び JIS Z 8101-2:2015 によるほか、この標準に使用する用語の定義は、 次による。

3.1

管理指標

放射化金属等に対する中性子照射条件と、評価対象核種の生成放射能との間に一定の関係をもち、換算によって放射能濃度が算出できる指標。

例 燃料の燃焼度,中性子照射量など。

3.2

Key 核種

廃棄体などの外部からの非破壊測定が可能なγ線を放出し,難測定核種と相関関係をもつ放射性核種。

注記 AESJ-SC-F022:2011 の定義を一部変更している。 **例** ⁶⁰Co など。

3.3

起源元素

中性子照射によって評価対象核種を生成する元素。

3.4

最大放射能濃度

放射性廃棄物の埋設事業許可申請書に記載されている、埋設できる放射性物質(核種) の放射能濃度の上限値。

3.5

使用済樹脂等

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。

3.6

申請核種

放射性廃棄物の埋設事業許可申請書に記載する放射性核種。

出典 AESJ-SC-F022:2011

3.7

代表試料

廃棄物から採取し, 処分する廃棄物を代表する試料。

3.8

中深度処分

法令などによって定められる深さ以上の地下に設置された廃棄物埋設地に、放射性廃棄

物を最終的に埋設処分すること。

例 地表から 70 m 以深の廃棄物埋設地への処分。

3.9

中性子フルエンス率

空間の与えられた点において、短い時間間隔内でその点を含む小球に入射する中性子の数を、その球の断面積及び時間間隔で除したもの。

出典 ISO 16966:2013

3.10

難測定核種

廃棄体などの外部からの非破壊測定が困難な放射性核種。

注記 AESJ-SC-F022:2011 の定義を一部変更している。

例 α 核種, β 核種, X 線放出核種など。

3.11

廃棄体

容器に封入し, 又は容器に固型化した放射性廃棄物。

出典 AESJ-SC-F022:2011

3.12

評価対象核種

廃棄体の処分又は輸送のために,放射能及び/又は放射能濃度を評価しなければならない放射性核種。

3.613

放射化学分析等

放射化学分析,放射化分析,質量分析などによって評価対象核種又は元素を定量する分析方法。

3.14

放射化金属等

原子炉内及び周辺で中性子照射によって放射化された部材、機器。

例 制御棒,チャンネルボックス,バーナブルポイズン,炉心支持構造物,生体遮蔽 コンクリート、黒鉛など。

3.15

放射化計算

中性子照射で生成した放射性核種の放射能濃度を決定するための理論的な計算方法。

3.16

放射化計算方法

理論計算法に使用する放射化計算手法又は放射化計算コード。

例 ORIGEN コードなど。

4 評価対象とする廃棄物及び評価対象核種

- a) 評価対象とする廃棄物は、放射化金属等及び使用済樹脂等とする。
- b) 評価対象核種は、申請核種とする。

5 放射能濃度決定方法

5.1 放射能濃度決定方法の適用

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。

- a) **放射化金属等** 基本的に理論的方法(理論計算法)を適用する。ただし、非破壊外部 測定法、スケーリングファクタ法などの実証的方法、又は、理論的方法と実証的方法 とを組み合わせることもできる。
- b) 使用済樹脂等 実証的方法を適用する。

表 1-放射能濃度決定方法の種類及び内容

衣 1 一					
放射能	 た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。			
	スケーリング ファクタ法 ^{a)}	代表試料の放射化学分析等の測定結果から得られる難測定 核種と Key 核種との相関関係と、個々の廃棄体外部による 非破壊測定結果とを組み合わせ評価する方法。			
実	非破壊外部測定法 a)	廃棄体の外部から非破壊測定する方法。			
(証的方法	平均放射能濃度法 a)	代表試料の放射化学分析等の測定結果から得られる平均的 な放射能濃度を用いる方法。			
	廃棄体破壊分析法 a)	廃棄体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。			
	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。			
注 a) AESJ-SC-F022:2011 の 5.1.2~5.1.4 及び 5.1.6 の方法を参照。					

5.2 理論的方法

5.2.1 理論計算法の種類

次の2種類の方法が、放射化金属等の放射能濃度の評価に適用することができる。

- **点推定法** 放射化金属等の特定の部位,又は代表的な部位の放射能濃度を計算するた

めに適用する方法。

- **区間推定法** 点推定法を発展させた方法で、同様の廃棄物特性、照射状態にあった放射化金属等に適用できる。代表的な放射能濃度の分布又は範囲の評価によって、対象物の平均放射能濃度などを計算する方法である。

注記 詳細は、附属書A及び附属書B参照。

5.2.2 点推定法

この方法は、放射化計算の基本となる方法である。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。

この方法は、全てのタイプの放射化金属等の評価に適用できる。一般的に、特定の放射 化金属等が最大放射能濃度に近い場合に適用する。

注記 詳細は, 附属書 C 参照。

5.2.3 区間推定法

5.2.3.1 区間推定法の種類

中性子条件及び照射条件は、評価対象とする放射化金属等の炉内の物理的配置によって 定まる中性子フルエンス率に依存するため、放射化金属等全体の放射能濃度は、特定の放 射化金属等の全体に対する中性子照射を網羅する中性子条件によって放射化計算を繰り返 すことで評価できる。この方法は、代表的又は平均的な値及び分布を提供する。

幾つかの種類の放射化金属等の放射能濃度は、燃料の燃焼度などと密接な関係をもつ。 一旦、平衡状態に達すると、同じ放射化金属等の同じ部位の元素組成、中性子条件及び照 射条件は同じであることから、生成された各々の放射性核種は一定の濃度比率をもつ。

原子炉中の固定された放射化金属等(**例** 原子炉圧力容器)は、起源元素の成分条件(以下、元素成分条件という。)及び照射条件が同じで、原子炉での水平位置・垂直位置の設置部位に依存する中性子フルエンス率だけが異なる。

このため、次の3種類の理論計算法が区間推定法として、適用できる。

- 換算係数法
- 一 濃度比法
- 一 濃度分布評価法

注記 詳細は、附属書 D 参照。

5.2.3.2 換算係数法

燃料と組まれる放射化金属等(チャンネルボックス、バーナブルポイズンなど)の中に中性子照射によって生成する放射性核種の放射能濃度は、燃料の燃焼度と密接な関係がある。これは、評価対象とする放射化金属等が同じ設計、材料仕様で、かつ、同じ照射条件及び中性子フルエンス率で照射されて原子炉に存在しているからである。

管理指標(例 燃料の燃焼度など)と放射化金属等の内部の放射能濃度との関係を,管

理指標が取り得る範囲を網羅する放射化計算によって評価することで、管理指標に対する 放射能濃度への換算係数を求め、管理指標に換算係数を乗じることによって放射化金属等 の内部の放射能濃度を評価する。

注記 詳細は、附属書 D 参照。

5.2.3.3 濃度比法

放射化金属等の特定部位では、中性子照射によって同時に生成する放射性核種の濃度の 比は、特定部位における元素成分条件、中性子条件及び照射条件がほとんど同じことから 一定条件にある。

同じ種類の複数の放射化金属等の複数の部位の元素成分条件、中性子条件及び照射条件を網羅する放射化計算によって、評価対象とする放射化金属等全体の難測定核種の放射能濃度と同時に生成する Key 核種¹⁾の放射能濃度との相関関係を評価し、難測定核種と Key 核種との濃度比を算定しておき、濃度比に Key 核種の放射能濃度を乗じることによって、放射化金属等の内部に含まれる各評価対象核種の放射能濃度を評価する。

なお、半減期が大きく異なる難測定核種と Key 核種との比率に、照射終了後の減衰時間が影響を与える場合は、減衰時間を考慮する(考慮する必要がない場合を、**例**に示す)。

注記 詳細は、附属書 D 参照。

- **例** Key 核種[Cs-137 (半減期 30.1 y)]と難測定核種[Sr-90 (半減期 28.8 y)]とのように、半減期の差異が小さく、かつ、減衰時間が1年未満などの場合は、難測定核種と Key 核種との比率に与える影響が小さい。
- **注** ¹⁾ Key 核種の半減期が、評価する対象の時間に関して、評価対象核種の濃度比に際立った影響を与えないように、十分に長い半減期の Key 核種を考慮するのがよい。

5.2.3.4 濃度分布評価法

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による中性子フルエンス率だけが異なる。

放射化金属等の各照射部位の中性子フルエンス率を網羅する放射化計算によって、放射 化金属等全体における放射性核種の放射能濃度の分布を評価し、この分布に基づき、放射 化金属等の内部に含まれる平均放射能濃度などを評価する。

注記 詳細は、附属書 D 参照。

5.3 実証的方法

5.3.1 原廃棄物分析法

固型化処理前の評価対象とする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評価対象核種ごとの放射能濃度を用いて、その放射能濃度及び固型化条件によって 廃棄体の放射能濃度を決定する、又は評価対象核種と Key 核種との組成比及び Key 核種の 放射能濃度を適用して廃棄体の放射能濃度を決定する。

なお、原廃棄物分析法によって放射能濃度を決定する放射性廃棄物の適用範囲は、代表 試料がカバーできる範囲とする。

注記 詳細は、**附属書**E参照。

5.3.2 その他の方法

AESJ-SC-F022:2011 に示される 5.1.2~5.1.4 の方法。

6 放射能濃度決定方法の手順

6.1 理論的方法の手順

6.1.1 放射化計算の基本手順

放射化金属等の内部に含まれる評価対象核種の放射能濃度の決定のために実施する理論計算法に適用する放射化計算の基本手順は、次の過程に従う。

- a) **対象・目的などの設定** 計算の目的の明確化。評価対象とする放射化金属等及び核種, 正確性・精度の要求,幾何形状並びに必要な計算の全体スコープの設定。
 - **例** 放射化に影響を与える,放射化金属等の構成材料,評価対象とする放射化金属 等の量,類似性,形状,サンプリングの可能性などを整理する。
- b) 計算方法の選択 (例 点推定法又は区間推定法の選択)
- c) **入力パラメータの選択・決定** 入力パラメータ及び境界条件は、選択した計算方法に 依存する。
- d) **計算の実施** 選定した方法及び入力パラメータを使用した放射化計算の実施。
- e) **計算結果の処理** 選択した方法に依存する相関,換算係数などを決定するための放射 化計算した結果の処理。

注記 詳細は、附属書 A 参照。

6.1.2 放射化計算の条件の設定

6.1.2.1 放射化計算の入力条件

入力パラメータ及び条件を設定する一般的な手順は、点推定法による計算方法及び区間 推定法による計算方法として文書化する。また、放射化計算には、次に示した基本的な入 カパラメータ及び条件が必要となる。

- 一 元素成分条件
- 一 中性子条件
- 照射条件(例 中性子照射時間,照射停止時間)

注記 詳細は、附属書 C 及び附属書 D 参照。

6.1.2.2 元素成分条件

評価の条件、評価対象とする放射化金属等の構成材料を考慮して、起源元素を選定し、

元素成分データを収集する。種々のソースから収集した起源元素の元素成分データを放射 化計算に用いることができる。

注記 詳細は、附属書 F 及び附属書 G 参照。

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。

- 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。

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。

放射性同位体は、起源元素から除外できる。ただし、天然に広く存在し、種々の放射性核種の起源元素となるU及びTh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。
- 一 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。

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。

- 一 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の試料の化学分析を行う方法。
- 一 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。

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。

- 一 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。

一濃度範囲を設定する方法 収集した起源元素の元素成分データの濃度範囲を踏まえ、 最大濃度、最小濃度を設定する。

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

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ことが可能である。
- 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。

6.1.2.4 照射条件

評価対象とする放射化金属等に関する照射条件に用いる照射時間及び照射停止時間(**例**原子炉運転時間及び照射終了後の減衰時間)は、次のいずれかの方法で設定する。また、全体の計算対象時間には、運転サイクル(**例**中性子照射及び照射停止時間並びに回数)も考慮する。

注記 詳細は、附属書 F 及び附属書 G 参照。

- a) 個別に照射履歴を設定する方法 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。
- 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。

6.1.3 放射化計算

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。

注記 詳細は、附属書 A 参照。

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。

- 一 元素成分条件
- 一 中性子条件
- 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。

注記 詳細は、附属書 I、附属書 J 及び附属書 K 参照。

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。

- **例1** 大型又は複雑な対象物の場合で、中性子フルエンス率が対象物の異なる部位で変化する場合は、中性子フルエンス率を考慮した幾つかの区分に分割して計算した平均値又は代表値を使用する。
- **例 2** 評価対象とする放射化金属等の放射能濃度の最大値を示す部位が明確な場合は、 その部位 1 点で計算した代表値で評価する。

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。

注記 詳細は, A.4.3 参照。

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。

6.2 実証的方法の手順

6.2.1 原廃棄物分析法の試料採取方法

a) AESJ-SC-F022:2011 に適用方法が示されている原廃棄物分析法の代表試料の採取方法 を示す。

- b) 原廃棄物分析法は, 固型化処理前の評価対象とする廃棄物から試料を採取し, 試料の 放射化学分析等の分析結果によって廃棄体の放射能濃度を決定するため, 適用する廃 棄体の放射能濃度に関して, 次のいずれかの方法で代表試料を採取する。
 - 1) **廃棄物の均一性が確認できる場合** あらかじめ、タンク内で廃棄物が均一混合できると見なすことが可能な場合は、均一混合後に採取する。
 - 2) 廃棄物の均一性が確認できない場合 あらかじめ、タンク内で廃棄物が均一混合できると見なすことが不可能な場合は、タンクから適切な複数の試料を採取する。 注記 詳細は、附属書 E 参照。

6.2.2 原廃棄物分析法による評価方法

- **6.2.1** に示した方法で採取した評価対象とする廃棄物の代表試料を放射化学分析し、次のいずれかの方法で、廃棄体の放射能濃度を決定する。
- a) 廃棄体の放射能濃度として決定する方法 分析によって得られた代表試料中の評価 対象核種の放射能濃度と、固型化方法を踏まえた配合条件 (例 廃棄物重量/固化体 重量の比率など)とによって、廃棄体の放射能濃度を決定する。
- b) 廃棄体中の放射性核種の組成比を適用して決定する方法 分析によって得られた代表試料中の評価対象核種と Key 核種との組成比と, 廃棄体の非破壊外部測定などによって得られた Key 核種の放射能濃度とによって, 廃棄体の放射能濃度を決定する。

6.3 妥当性確認

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

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。

妥当性確認は,適用する計算方法の結果に関する正確さ及び適用性を確認することであり,近似性の正確さ及び適正さ,相関性の適用性などで評価できる。

注記1 妥当性確認は,放射化計算方法を周知のテストケース,既に妥当性確認された計算方法などと比較することなどで行うことができる。また,放射化計算方法に関する妥当性確認は,**AESJ-SC-A008**:2015 を参照する。

注記 2 詳細は、附属書 A 参照。

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。

注記1 "正確さ"は、理論計算結果が真値にどれだけ近いかを示す。偏り及び保守性の程度は、放射能濃度の許容限度(廃棄体の受入基準、放射線防護、輸送などの限度)から決まる。また、"正確さ"は決定した放射能濃度の偏りを示し、"代表性"は正確さ及び精度を反映したパラメータで考慮することが

できる。

注記 2 詳細は、附属書 L 参照。

6.3.2 実証的方法の妥当性確認

6.3.2.1 妥当性確認の方法

妥当性確認は,分析方法及び分析結果が期待される結果を与えることを明示(客観的, 文書化された証拠によって)し,分析が恒常的に,正確に実施できることを確認する。

妥当性確認は、適用する分析方法及び分析結果に関する正確さと適用性とを把握することであり、分析方法の信頼性、分析の誤差、目的核種の回収率などで評価できる。

注記 妥当性確認は、標準試料を用いた分析試験、同一試料の複数機関による分析試験、妥当性確認された分析方法などと比較することなどで行うことができる。

6.3.2.2 不確かさの扱い

適用する分析方法による結果の正確さを定量化するために、分析結果の不確かさを評価する。

例 "不確かさ"は、分析値の偏りを示す真度、分析値におけるばらつきを示す精度などから評価する。

6.4 数値の丸め方

計算結果の整理,数値の丸め方は, **JIS Z 8401**:1999 に従う。ただし,放射能濃度評価結果の有効数字を丸めるときは,大きめにとってもよい。

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。

注記 詳細は, 附属書 M 参照。

7 記録

7.1 理論的方法の記録

記録は、評価対象とした放射化金属等、計算に使用した放射化計算方法、トレース可能 な計算用入力条件及び計算の設定条件が明確にされた計算書が示されなければならない。 また、確認のために、第三者が容易に把握できるようにする。

記録は、簡単で、容易に把握でき、追加操作を行わずに理解できるようにする。報告の 単位は、記録中に明示し、かつ、特段の指示がなければ、国際単位系で記録する。

注記 理論計算法の記録の詳細は、**附属書 N** 参照。

7.2 実証的方法の記録

記録は、評価対象とした廃棄物及び代表試料の採取方法、評価対象核種の分析方法並び

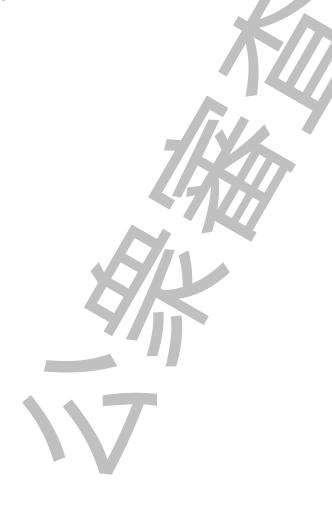
に分析値(誤差含む)が明確にされた記録,分析に使用した測定器の校正記録,及び評価値を設定した方法が示されなければならない。また,確認のために,第三者が容易に把握できるようにする。

記録は、簡単で、容易に把握できるようにする。報告の単位は、記録中に明示し、かつ、 特段の指示がなければ、国際単位系で記録する。

注記 原廃棄物分析法の記録の詳細は, 附属書 O 参照。

8 品質マネジメントシステム

この標準に規定する放射能濃度決定手順を適用するに当たって、利用者がこの標準を引用する要領などにおいて、利用者が規定している"品質マネジメントシステム"の適用を明確にする。



附属書 A (参考)

理論計算法の適用方法及び手順

この附属書は、標準本体の理解のために、理論計算法の適用の手順の例などを示すものである。

A.1 理論計算法の基本的な適用方法

A.1.1 全般

原子炉内から発生する放射化金属等の放射能濃度は非常に高い。このため、放射性廃棄物を サンプリング、分析して放射能濃度を決定する実証的な方法は、作業者が高い被ばくを受ける 可能性の観点から、制限を受ける。

この原子炉内・炉外で中性子照射によって放射化された放射化金属等中の放射能濃度を決定する手法として、放射化計算を利用した理論計算法は、被ばく低減の一つの合理的な方法である。この方法を適用するためには、照射された中性子条件及び照射履歴が明確な放射化金属等であることが必要であり、この条件を考慮した放射化計算を実施して、計算結果、又は計算結果から求められた評価係数を使用して放射化金属等中の放射能濃度を決定する。

図 A.1 は、理論計算法による廃棄体中の放射能濃度決定のため手順の基本フローを示す。この理論計算法のステップの詳細を、次に示す。

A.1.2 STEP1:計算のための基本の設定

放射化計算を始める前に、評価対象とする放射化金属等及び評価対象核種の全般条件、適用 範囲並びに目的を確認する必要がある。これは評価対象核種、中性子照射の対象材料、中性子 照射の幾何条件、必要な正確さ(accuracy)、精度(precision)などの設定に役立つ。

放射化金属等中の放射能濃度を理論的に評価するに当たっては、まず、放射化の基本である原子炉の運転条件(中性子条件及び照射条件)、対象とする放射化金属等の特性(幾何形状、元素成分条件など)などを事前に把握することが重要である。また、次の基本パラメータを含む。

- 元素成分条件
- 中性子条件
- 照射条件(中性子照射時間及び照射停止時間含む)

理論計算法の適用範囲及び目的が決定されたら、放射化計算に必要なデータを収集することが望ましい。この手順の詳細は、**附属書 D** に示される。

A.1.3 STEP2: 評価方法の選択

理論計算法は、STEP1で定めた評価対象とする放射化金属等の特性、中性子の照射条件などを踏まえて、1回又は複数回の放射化計算を実施して評価するために、放射化金属等の特性及び照射条件に応じ、"点推定法"及び"区間推定法"から、最も適切な評価方法を選択するこ

とが望ましい。

この STEP2 では、次に示す評価対象とする放射化金属等及び中性子照射元の原子炉の条件を踏まえて、適切な評価方法を選択する。

- 放射化金属等の原子炉内外での設置条件(**例** 水平位置・垂直位置, 炉内・炉外)。
- 放射化金属等の照射条件の情報(中性子の照射時間,照射停止時間(減衰時間)の両方, 原子炉の運転サイクルなどの履歴を含む)。
- 原子炉の運転履歴の情報。
- 放射化金属等のγ核種の非破壊測定の計画 など。

評価方法の選択は、データの適用性と収集状態とを踏まえ行う。例えば、評価対象とする放射化金属等の材料又は場所といった条件の情報が特定されない場合、一般的に照射履歴を網羅して評価する"区間推定法"が望ましい。

A.1.4 STEP3:計算の入力条件

放射化計算を行うための入力条件は、次の2種類に分類される。

- 点推定法の入力条件
- 区間推定法の入力条件

点推定法の場合は、STEP2で収集した放射化計算条件のデータベースを踏まえ、特定条件での代表的又は保守的な入力条件となるように設定する。

一方,区間推定法に使用する入力条件は、STEP2で収集し、整備した放射化計算条件のデータベースから、ランダムにサンプリングするなど、対象とする放射化金属等の条件範囲を網羅した複数の入力条件のセットを作成する必要がある。

A.1.5 STEP4: 結果の提示

STEP3 で設定した入力条件を用いて、適切な計算コードを選択し、放射化計算を実施して、直接的に放射能濃度を算出するか、又は濃度比、換算係数などの評価係数を計算する。

評価係数などを計算した場合は、廃棄体に収納された放射化金属等の運転管理データとして 記録されている管理指標のデータ、又は測定、若しくは評価した ⁶⁰Co などの Key 核種の放射 能濃度に、求めた評価係数を乗じることによって廃棄体中の放射能濃度を算出する。

注記 廃棄物の放射能濃度の正確な評価のためには、表面汚染が中性子照射による放射化 と比較して無視できない場合は、液体状の放射性廃棄物に接触していた放射化金属 等の表面汚染による放射能濃度を加えなければならない。

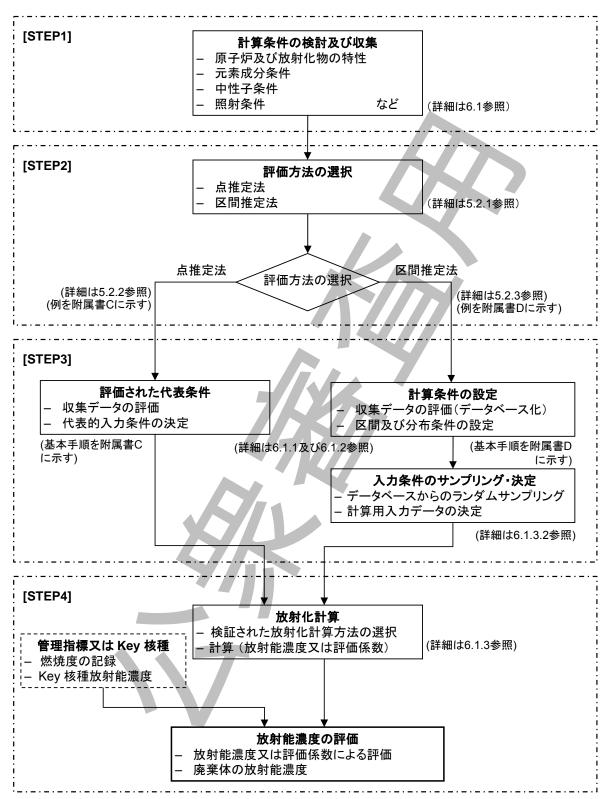


図 A.1—理論計算法の適用基本フロー

A.2 理論計算法の例

A.2.1 理論計算の方法

放射化金属等中の放射能濃度を理論的に評価する方法としては,次の2方式がある。

- **点推定法** 特定の放射化金属等の部位ごとの放射能濃度を評価する方法
- **区間推定法** 放射化金属等全体としての放射能濃度範囲を評価して、平均的な放射能濃度 などを評価する方法

上記のように、理論計算法は、放射化金属等の特定部位の放射能濃度を、特定部位の元素成分濃度、中性子条件及び照射条件を適用して放射化計算によって、放射能濃度を評価する"点推定法"、及び対象とする放射化金属等の元素成分濃度の分布範囲、中性子条件の分布範囲及び照射条件の分布範囲を推定し、これを使用して設定した条件での複数の放射化計算によって、放射化金属等が取りえる放射能濃度の範囲(区間)を網羅したデータベースを作り、これを利用して放射能濃度を評価する"区間推定法"によって構成されている。

さらに、この"区間推定法"における放射能濃度の範囲(区間)を評価した放射能濃度のデータベースの代表値を決定する方法として、"濃度比法"、"換算係数法"及び"濃度分布評価法"がある。

なお, "点推定"及び"区間推定"は, 統計用語としても存在するが, この標準内では, 理論計算法の分類・種類として使用している。

A.2.2 点推定法

放射化計算の基本となる評価方式で、評価対象となる放射化金属等の特定部位の放射能濃度 に関して、評価対象とする放射化金属等の詳細な中性子条件、詳細な照射履歴を用いて放射化 計算を実施し、中性子照射による放射化によって生成した核種の放射能濃度を計算する方法で ある。

ただし、本評価方法の特徴として、発生数量の少ない特殊な放射化金属等には適するが、数量が多く、中性子条件、照射条件などに多くの中性子照射のパターンをもつ放射化金属等に適用するには、非常に多くの放射化計算を実施しなければならないことから、本方法の適用においては、この点について十分検討した上で、適用を判断することが望ましい。

なお, "区間推定法"の個々の放射化計算には, この"点推定法"の方法を使用している。

注記 詳細は附属書 C 参照

A.2.3 区間推定法

放射化金属等中の放射能濃度は、燃料の燃焼度と密接な関係があること、放射化金属等の同一部位での生成放射性物質の比率は、元素成分条件及び中性子照射条件が同じことから一定条件にある。また、原子炉内で固定・設置された放射化金属等は、元素成分条件及び中性子照射条件が同じで、部位による中性子条件だけが異なることから、これらを考慮した次の代表的な"区間推定法"が、放射能濃度分布の評価方法として適用できる。

- 換算係数法
- 濃度比法

- 濃度分布評価法

注記 詳細は**附属書 D**参照

A.3 放射化計算コードの例

理論計算法に使用する放射化計算コードについては、基本的に一般的に使用されている放射化計算コード(ORIGEN^[1]、DCHAIN2^[2]などがある)を、放射化範囲の中性子条件の特徴を勘案し、適切に使用する必要がある。ただし、放射化計算は、超ウラン元素のような核種間の崩壊系列が複雑なものを除き、放射性核種を限定すれば上記の放射化計算コードを用いることなく実施可能であり、使用する基本データ(例 放射化断面積、崩壊データ)を整備し、放射化計算を実施する場合もある。

ここでは、代表的な放射化計算コードの一つである ORIGEN コードの概要を、次に示す。

- a) ORIGEN コードの概要 ORIGEN 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もので、数百種を超える核種に対する核反応による生成核種を評価できる。この放射化計算コードのシリーズは、使用済燃料、再処理工程の線源強度評価、放射性廃棄物の放射能評価などに広く使われている。
- b) ORIGEN コードの計算 ORIGEN コードは、与えられた燃料組成及び比出力に対する燃焼中の核分裂生成物、中性子吸収、核反応による生成核種の蓄積量の計算、及び与えられた元素成分条件並びに中性子条件に対する放射化生成核種の蓄積量の計算を実施することができる。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** 核分裂物質の量,比出力及び燃焼時間を入力することによって,燃料の燃焼 に伴う核分裂生成物,放射化生成物の生成量,放射能及び発熱量の計算を行う。
 - 2) **放射化計算** 評価対象とする放射化金属等の元素成分条件,中性子条件及び照射時間を 入力することによって,評価対象とする放射化金属等内の放射化生成物,Uなどの核分 裂性物質が含まれる場合は,核分裂生成物の生成量,放射能及び発熱量の計算を行う。
 - 3) 崩壊計算 対象とする放射性物質の量及び減衰時間を入力することによって,放射性物質の放射性崩壊及び放射性崩壊の連鎖を考慮した放射性物質量,放射能及び発熱量の計算を行う。
- c) ORIGEN コードの種類 ORIGEN コードの種類としては、次のものがある。
 - ORIGEN79
 - ORIGEN-S
 - ORIGEN2
 - ORIGEN2.1
 - ORIGEN2.2

これらのうち、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となっている。 ORIGEN2 コードシリーズ (ORIGEN2, ORIGEN2.1, ORIGEN2.2) は,原子炉型式,燃料の組み合わせに対する1群実効核反応断面積ライブラリが,あらかじめ,計算コードとともに準備されている。

なお、計算では、これらライブラリの中の適切な断面積を選択するか、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して使用 する。ここで、あらかじめ準備された断面積ライブラリを選択する場合は、原子炉型式及 び燃料組成が類似していれば、ライブラリ間の差異が放射化計算に与える影響は、基本的 に小さいが、評価対象とする放射化金属等の照射位置の中性子スペクトルの特徴について は、事前に把握しておく必要がある。ただし、ORIGEN-S では、1 群実効核反応断面積ラ イブラリを選択できる。

A.4 妥当性確認の例

A.4.1 妥当性確認

妥当性確認は,適用するソフトウェアの結果に関する正確さ及び適用性を決定することである。これは物理的近似性の正確さ,相関性の適用性,数学的近似性の適正さなどで評価できる。

妥当性確認は、ソフトウェア構成管理及び明確なバージョンのソフトウェアを使用して行う。 これは、通常、ソフトウェアの使用者によって行われる。

まず、ソフトウェアに関する"妥当性確認"と"検証"とは区分されなければならない。検証は、ソフトウェアの仕様に対する確認に相当する。通常、開発者が使用者に提供する前に実施する。計算に整合性があり、正しい結果を産み出す方法で計算を行うことができることを検証するために、ベンチマークと客観的な証拠との比較を通じて、コンピュータコードと計算方法との検証のプロセスが行われ、文書化される。

計算プロセスは、"計算の準備"、"計算の実施"及び"計算結果の記録"の段階に分けることができる。その適切な確認及び証拠となる書類が、計算プロセスの各段階を通して作られ、計算の結果は、予想される結果に対して確認される。

妥当性確認は、しばしば既知のベンチマークに対する代替の計算の使用による結果の正当性、 又は測定結果との比較によって確認することを必要とする。(例えば、クロスチェックに使用 される線量率測定、又は計算結果の妥当性確認、入力データの正当性の再評価、若しくは、放 射能濃度の評価用の代替根拠としての使用。)

A.4.2 計算の準備段階

この段階は,適切な文書,すなわち,適切,かつ一貫した検証,妥当性確認された放射化計算方法又は放射化計算コードを使用して放射化計算を行うために必要な手順書のような文書を用意するために,次の準備を行う。

- 主要な解析式及び放射化計算コード(検証された計算コード: **例** ORIGEN など)の適用性の確認。
- 使用された計算方法の適合性の確認(**例** 事前に使用され、そして実際の測定結果との比

較を通じて妥当性確認されている方法など)。

- 計算手順の文書の提供、又は参考文献の準備。

A.4.3 計算の実施段階

この段階は、文書化された放射化計算方法に従って必要な計算条件を明確化して、必要とされる計算条件の入力データが第三者によって確認できるように、次のように、入力データを明確に記録し、さらに保守性の考慮方法を明らかにする。

- 第三者によるトレーサビリティが得られるように、入力データを参考文献に含める。
- 計算の入力データを決定するための、参考文献、及び/又は、計算実績のリスト化。
- 実際のデータそして保守性の考慮条件に基づいた入力データを設定する場合のデータ処理方法(**例** 入力データのデータベースから適用する濃度分布の設定方法,又はランダム抽出の実施方法など)の明示。
- 出力の記録(例 計算数,計算結果の様式など)

注記 適切な保守性を証明できる方法の適用は、データ量に依存する。

加えて、区間推定方法は、複数の一連の計算を行うことを必要とするため、放射化計算結果の数は、放射能濃度を決定するための評価データとして使用するに十分である必要がある。ここで、"濃度比法"のケースを、例として示す。図 A.2 は、放射化計算の数を増やした場合のKey 核種濃度と難測定核種濃度間との相関係数の安定性(平均値及び 95 %信頼下限度値)の評価の例を示す。

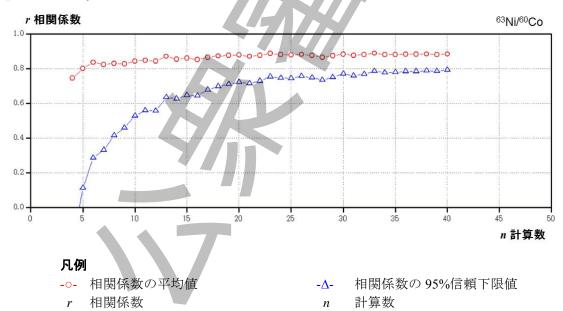


図 A.2―放射化計算数の増加に伴う相関係数(平均, 95 %信頼下限)の安定性のイメージ

A.4.4 計算結果の記録段階

この段階は文書化された放射化計算方法に従って,明確化された入力条件に基づいた放射化 計算の出力(すなわち結果)を記録して,評価する。

- 計算結果のリスト(計算出力)の提示。
- 計算結果の妥当性確認するために使われた方法及び根拠の記述。
- 計算結果の評価 (**例** 計算数の満足度,計算結果の統計値の安定性など)。
- 計算結果の妥当性確認 (例 計算結果と測定値との比較)。
- 計算の目的及び計算の期待値の明確化、結果に影響を与える要因の明確化。

参考資料

- [1] A.G. Croff, Nucl. Technol., 62, 335 (1983).
- [2] K. Tasaka, "DCHAIN2 : A Computer Code for Calculation of Transmutation of Nuclides", JAERI-M 8727 (1980).



附属書 B (参考)

放射化計算の条件が放射能濃度に与える影響の評価例

B.1 概要

6.1.2 に示した各種の放射化計算の条件の変動は、条件によっては、放射能濃度及び難測 定核種と Key 核種との濃度比の各々に対する影響が異なる場合があることから、適用する 放射能濃度決定方法の種類に応じて、適切、又は放射能濃度評価結果が保守的となるよう 条件の設定を考慮する必要がある。この附属書では、放射化計算の条件設定のための補足 として、起源元素の元素成分条件、中性子条件、中性子照射条件について、想定条件における解析を行い、各条件が放射化計算結果に与える影響の程度を整理した。

B.2 元素成分条件

a) 解析条件 元素成分条件のばらつきの影響を評価するために、元素成分条件を変化させた放射化計算を実施した計算条件を、表 B.1 及び表 B.2 に示す。

項目	設 定			
中性子フルエンス率	4×10 ¹³ n/cm ² /s (一定)			
元素成分条件	想定参考条件 : 表B.2の"元素成分A"に示す条件			
九条成万条件	各元素の濃度を変化 : 表B.2の"元素成分B"に示す条件			
中性子照射条件	10年 連続照射			

表 B.1-元素成分条件の影響評価の計算条件

表 B.2-元素成分条件(変化率は、SUS304 を想定したもの)

元素 ^{a)}	元素成分 A	元素成分 B
万元宗	(想定参考条件)	(各元素の濃度を変化 ^{b)})
Fe	0.001 kg	0.001 kg
Co	0.001 kg	0.01 kg
Ni	0.001 kg	0.000 5 kg
Cu	0.001 kg	0.000 2 kg

注 ^{a)} 評価対象核種(⁶⁰Co, ⁶³Ni)の起源元素。

b) 濃度比への影響を見るために、Key 核種 60 Co の起源元素である Co 量を増加、難測定核種 63 Ni の起源元素である Ni 量及び Cu 量を低下させた。

なお、増加又は低下の程度は、SUS304の文献データなどの濃度分布の幅(最小値と最大値との比)を考慮して、元素成分 Aの量を元素成分 Bの量に変化させた。ただし、Fe (60 Coの起源元素)は、SUSの主成分元素で、濃度が、ほぼ一定であるため、変化させていない。

b) 解析結果 解析結果を, 図 B.1 に示す。原子炉内で中性子照射される母材の放射化で

発生する核種の放射能濃度は、その他の放射化計算の条件が同一の場合、元素成分条件におおむね比例して変動する。このため、元素成分条件は、放射能濃度及び濃度比のいずれに対しても影響の比較的大きい条件である。

B.3 中性子条件

中性子条件は、中性子発生源の特徴、中性子照射される評価対象廃棄物の材質、中性子 照射位置などの条件に応じ決定される。また、放射化断面積は、中性子スペクトルがその 一つの決定因子であり、中性子条件に依存するため、ここで併せて取り扱う。ここでは、 各因子の影響を整理するため、ORIGEN2 コードシリーズで中性子エネルギー1 群での放射 化計算を行った。

B.3.1 中性子フルエンス率

a) 解析条件 中性子フルエンス率の影響を把握するため、想定した中性子フルエンス率、 及びその 4 倍の中性子フルエンス率で照射された材料の放射化計算を実施した計算条件を、表 B.3 に示す。

項目	設定
中性子フルエンス率	想定参考条件 : 4 ×10 ¹³ n/cm ² /s
	想定参考条件の4倍 : 1.6 ×10 ¹⁴ n/cm ² /s
元素成分条件	表B.2の"元素成分A"に示す条件
照射条件	10年連続照射

表 B.3-中性子フルエンス率の影響評価の計算条件

b) 解析結果 解析結果を、図 B.2 に示す。中性子フルエンス率の変化に伴い核種の反応率が変化するため、中性子フルエンス率の大小は、放射能濃度に対して影響の大きい放射化計算の条件である。一方、その他の放射化計算の条件が同一であれば、核種の反応率は、中性子フルエンス率に比例するため、核種間の反応率の比は、変化しない。したがって、中性子フルエンス率の大小は、核種の生成量には影響するが、核種の濃度比への影響はない。

B.3.2 放射化断面積

- a) 解析条件 放射化断面積の影響評価のために、PWR 制御棒の全引抜位置(ARO バンク位置)及び制御位置(D バンク位置)の中性子スペクトルを反映した放射化断面積を用いて放射化計算を実施した計算条件を、表 B.4 及び図 B.3 に示す。
- b) **解析結果** 解析結果を,**図 B.4** に示す。放射化断面積は,放射化範囲の中性子スペクトルに依存するが,制御棒で生成する放射化核種 ⁶³Ni 及び ⁶⁰Co は,熱中性子エネル

ギーで主に生成される核種であるため、中性子スペクトルの変化による放射化断面積の変化は、それほど大きくなく、放射能濃度及び濃度比のいずれに対しても影響は、小さい。中深度処分の申請核種としては、現状想定される評価対象廃棄物の範囲では、制御棒同様、熱中性子エネルギーで主に生成される核種に該当することが予想されるため、上記と同様に、放射化断面積の差異の影響は、放射能濃度及び濃度比のいずれに対しても小さい。

表 B.4-放射化断面積の影響評価の計算条件

項目	設定
中性子フルエンス率	1.7×10 ¹⁴ n/cm ² /s(一定)
元素成分条件	Fe: 708 kg, Co: 1.2 kg, Ni: 87 kg
中性子照射条件	5.5年連続照射
放射化断面積 ^{a)}	AROバンク ^{b)} 位置:
(図B.3 参照)	AROバンク先端から0.1 mのPWR制御棒被覆管の放射化断面積
	Dバンク ^{c)} 位置:
	Dバンク先端から0.1 mのPWR制御棒被覆管の放射化断面積

- 注 a) PWR の制御棒を模擬した条件で設定した
 - b) 定格出力運転時の制御棒全引き抜き位置
 - c) 定格出力運転時の制御棒挿入位置

B.4 照射条件

B.4.1 中性子の照射時間

a) **解析条件** 中性子の照射期間中の核種減衰の影響を把握するため、短半減期核種 (⁶⁰Co) 及び比較的長半減期核種(⁶³Ni)の長期照射(連続照射 60 年)を想定した放 射化計算を実施した計算条件を、**表 B.5** に示す。

表 B.5-中性子の照射時間の影響評価の計算条件

項目	設定		
中性子フルエンス率	4×10 ¹³ n/cm ² /s(一定)		
元素成分条件	表B.2の"元素成分A"に示す条件		
照射条件	60年連続照射		

b) 解析結果 解析結果を,図 B.5 及び図 B.6 に示す。比較的長半減期の核種の生成量は, 照射時間におおむね比例し, Key 核種,難測定核種ともに比較的長半減期の核種を選 定した場合は,照射時間が濃度比に与える影響は,基本的に小さい。一方,比較的短 半減期の核種については,10 年程度の照射時間では顕著な影響は,表れないが,長期 照射(数 10 年単位)の条件下においては,核種生成及び減衰の平衡状態に達する。 このため、Key 核種に比較的短半減期の核種である ⁶⁰Co (半減期 5.27 年) を、難測定 核種に比較的長半減期の核種である ⁶³Ni (半減期 100 年) を選定するような場合にお いては、原子力発電所の供用期間中に発生する廃棄物 (連続照射相当の時間が 10 年 程度以下の廃棄物) の濃度比 (⁶³Ni/⁶⁰Co) は、照射時間の影響は、小さいものの、 解体時に発生する長時間照射された廃棄物 (連続照射相当で数 10 年程度の廃棄物) については、照射時間が濃度比に与える影響は、比較的大きい。

B.4.2 中性子の照射停止時間(中性子の照射停止後の核種の減衰)

a) 解析条件 中性子の照射停止後の核種の減衰の影響を評価するために、想定した中性 子条件で、連続照射 10 年の放射化計算、及び中性子の照射停止後 30 年の減衰期間を 想定した減衰の評価を実施した計算条件を、表 B.6 に示す。

項目	設 定
中性子フルエンス率	4×10 ¹³ n/cm ² /s (一定)
	比較的長半減期核種の場合:
元素成分条件	¹³⁷ Cs : Th, U 各0.001 kg
	比較的短半減期核種及び比較的長半減期核種を組み合せた場合:
	⁶⁰ Co, ⁶³ Ni : 表B.2 の"元素成分A"に示す条件
四	10年連続照射
照射条件	(中性子照射停止後,30年の減衰期間を想定)

表 B.6-中性子照射停止後の核種の減衰の影響評価の計算条件

b) 解析結果 解析結果を、図 B.7 に示す。比較的長半減期の核種については、中性子の 照射停止時の核種の放射能濃度に対する減衰期間終了後の放射能濃度の差異は、比較 的小さく、核種の減衰の影響は、ほとんど受けない。一方、比較的短半減期の核種に ついては、中性子の照射停止時の核種の放射能濃度に対する減衰期間終了後の核種の 放射能濃度の差異は、比較的大きく、中性子の照射停止後の減衰の影響を受ける。こ のため、Key 核種に ⁶⁰Co のような比較的短半減期の核種を選定する場合は、中性子の 照射停止時の減衰補正の考慮などが必要である。

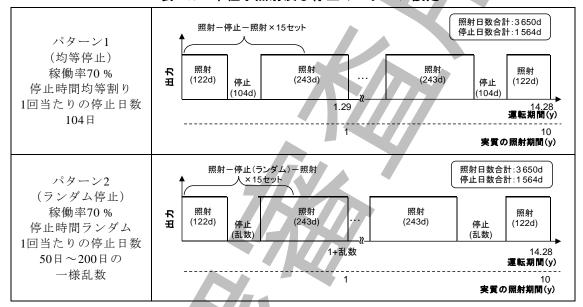
B.4.3 中性子の照射停止時間(供用期間中の核種の減衰)

a) 解析条件 原子炉供用期間中の中性子の照射停止時間(定期検査,計画点検などによる原子炉の運転停止時間)の影響を把握するために,連続照射,均等停止及びランダム停止を想定して,放射化計算を実施した計算条件を,表 B.7 及び表 B.8 に示す。

項目	設 定		
中性子フルエンス率	4×10 ¹³ n/cm ² /s(一定)		
元素成分条件	元素成分条件 表B.2 の"元素成分A"に示す条件		
	連続照射(~10年)	: 10年連続照射	
照射条件	稼働率70%(均等停止)	: 表B.8 のパターン1	
	稼働率70%(ランダム停止)	: 表B.8 のパターン2	

表 B.7-中性子の照射停止時間(供用期間中の核種の減衰)の影響評価の計算条件

表 B.8-中性子照射及び停止のパターン設定



b) 解析結果 解析結果を、図 B.8 に示す。原子炉供用期間中の中性子の照射停止時間の影響については、中性子の照射時間に対して比較的長半減期の核種[例 ⁶³Ni(半減期 100年)]については、照射時間の合計が同一であれば、照射時間の大小は、放射能濃度、濃度比のいずれに対してもほとんど影響しない。照射時間に対して比較的短半減期の核種[例 ⁶⁰Co(半減期 5.27 年)]については、停止時間における減衰によって若干影響があるものの、中性子の照射停止時間の有無については、基本的に、放射能濃度及び濃度比のいずれに対しても影響は、小さい。

B.5 放射化計算の条件の影響評価結果 (解析結果のまとめ)

B.2~B.4 の解析結果に基づき、各放射化計算の条件が放射化計算結果に及ぼす影響の程度(ただし、この解析条件における影響)を整理した結果を、**表 B.9** に示す。

元素成分条件については,評価対象核種の起源元素の濃度は,放射能濃度に直接的な影響を与えるため,濃度比を用いる場合,換算係数を用いる場合及び濃度分布評価法によっ

て決定する場合のように,評価対象廃棄物の放射能濃度を直接的に決定する場合は,評価対象廃棄物の放射能濃度を代表できる適切な放射化計算の条件,又は放射能濃度の評価結果が大きくなるような放射化計算の条件の設定が必要となる。

一方,難測定核種及び Key 核種の濃度比は,各々の起源元素の濃度比のばらつきの影響を受けるため,濃度比を用いる場合には,各元素の濃度及び濃度比のばらつきを適切に考慮した放射化計算の条件(適切な元素成分条件の範囲)の設定が必要となる。

中性子条件のうち、中性子フルエンス率が放射能濃度に与える影響は、比較的大きいため、換算係数法、濃度分布評価法のように直接的に評価対象廃棄物の放射能濃度を決定する場合は、評価対象廃棄物の放射能濃度を代表できる放射化計算の条件の設定、又は放射能濃度評価結果が大きくなるような放射化計算の条件の設定が必要となる。一方、中性子フルエンス率が濃度比に与える影響は、比較的小さいため、濃度比を用いる場合には、放射化計算の条件として適切な代表値(又は範囲)を設定すればよい。また、換算係数を用いる場合は、利用する管理指標の特徴を踏まえ、適切な放射化計算の条件を設定すればよい。

なお、中性子条件のうち、放射化断面積については、放射能濃度、濃度比のいずれに対する影響も比較的小さいため、いずれの方法を適用する場合でも、放射化計算の条件として適切な代表値(又は範囲)を設定すればよい。

照射条件のうち、中性子の照射時間については、放射能濃度に直接的な影響を与える。 核種の減衰については、⁶⁰Co のような比較的短半減期の核種は、中性子の照射停止後の減 衰の影響を受ける。また、原子炉供用期間中の減衰については、減衰(すなわち、中性子 照射停止)時間の合計が同一であれば、各減衰(中性子照射停止)時間の長短は、放射能 濃度、濃度比のいずれに対する影響も基本的に小さい。このため、照射条件については、 放射能濃度決定方法の種類に応じ、適切な放射化計算の条件設定、放射化計算結果の適切 な減衰補正などの評価が必要となる。

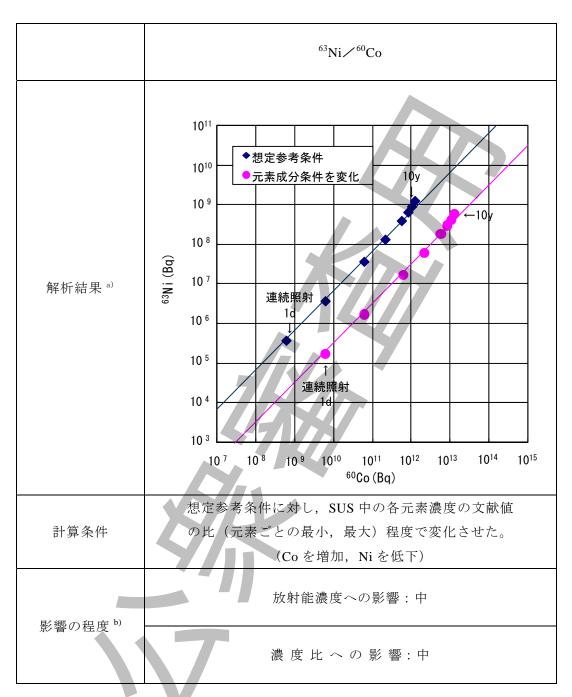
表 B.9-放射化計算の条件の放射化計算結果に対する影響の程度

ナム 白・ルラト笠 の タ ル・		上質の冬川	放射化計算結果への影響の程度 ^{a)}		
	放射化計算の条件		放射能濃度	濃 度 比	
元素成分条件		分条件	b)	c)	
中性子条件		中性子フルエンス率	中	小	
十1	生于条件	放射化断面積	小	小	
	四针吐即	~10 年程度 ^{d)}	大	47	
照射	照 照射時間 射	長期照射 e)	大 (小 ^{f)} ~)	小 (~中 ^{g)})	
射条件	照射停止	照射停止後	小 (~大 f)	小 (~大 ^{g)})	
	(減衰)	原子炉供用期間中	小	1	

- 注 a) 影響の程度は、解析結果において"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。 b) 評価対象核種の起源元素の濃度のばらつきによる。

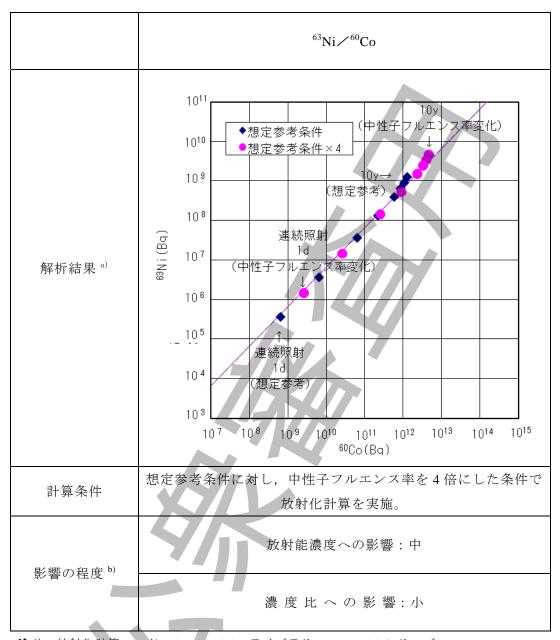
 - 難測定核種及び Key 核種の起源元素の濃度比のばらつきによる。
 - 連続照射。基本的に原子炉供用期間中に発生する主な廃棄物の中性子照射条件に相当。
 - 解体時などに発生する廃棄物の中性子照射条件に相当。
 - 比較的短半減期の核種の場合。
 - 比較的短半減期の核種と比較的長半減期の核種との組合せの場合。





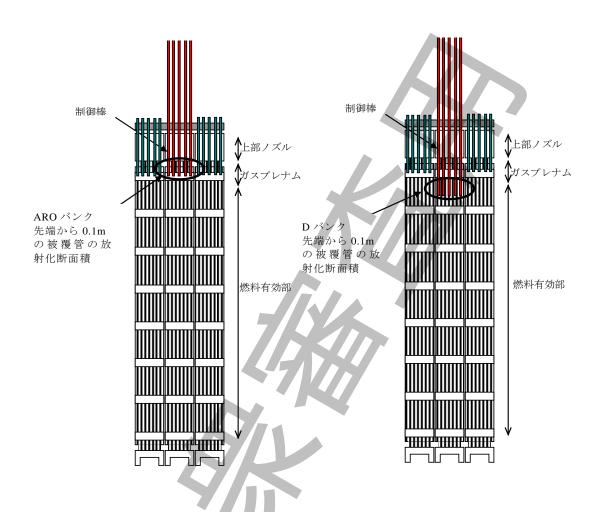
注 a) 放射化計算コード: ORIGEN2.2, ライブラリ: JENDL3.3 シリーズ b) 影響の程度は, "中:1 桁程度の差異を生む"を意味する。

図 B.1-放射化計算結果への主な計算条件の影響評価結果 (元素成分条件の影響)



注 ^{a)} 放射化計算コード: ORIGEN2.2, ライブラリ: JENDL3.3 シリーズ b) 影響の程度は, "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。

図 B.2-放射化計算結果への主な計算条件の影響評価結果 (中性子フルエンス率の影響)



a) AROバンク^{a)}位置

b) <u>Dバンク^{b)}位置</u>

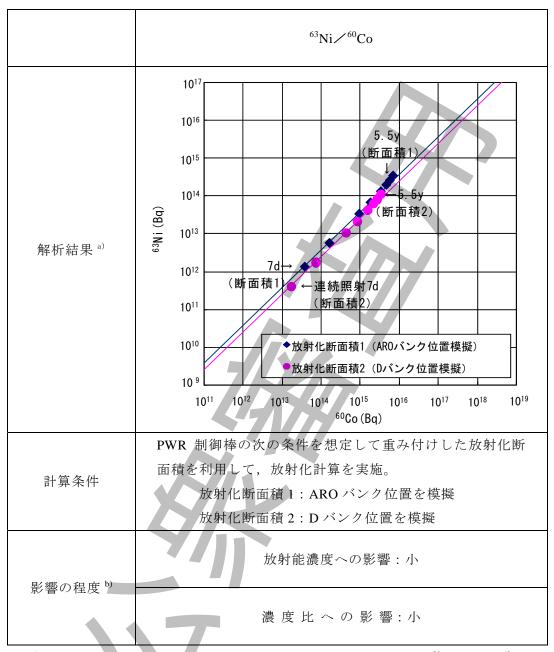
(AROバンク先端から0.1 mの被覆管の放射化断面積)

(Dバンク先端から0.1 mの被覆管の放射化断面積)

注4) 定格出力運転時の制御棒全引き抜き位置

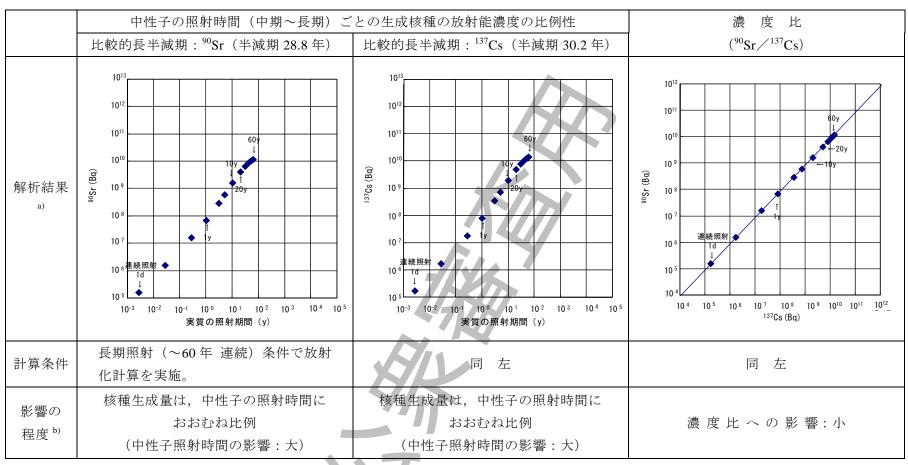
注^{b)} 定格出力運転時の制御位置

図 B.3 - 放射化断面積の影響評価のための放射化計算の条件 (PWR 制御棒に関する放射化断面積の設定位置)



注^{a)} 放射化計算コード: ORIGEN2, ライブラリ: JENDL Activation File [⁵⁹Co (n, γ) ⁶⁰Co], JENDL3.2 [⁶²Ni (n, γ) ⁶³Ni]シリーズ ^{b)} 影響の程度は, "小: 2~3 倍程度以内の差異を生む"を意味する。

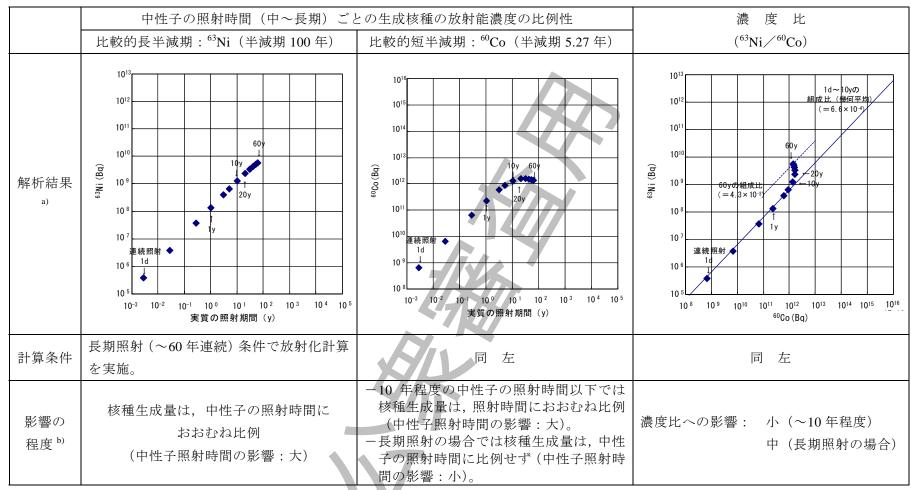
図 B.4-放射化計算結果への主な計算条件の影響評価結果 (放射化断面積の影響)



注 a) 放射化計算コード: ORIGEN2.2, ライブラリ: JENDL3.3 シリーズ

図 B.5-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:比較的長半減期核種)

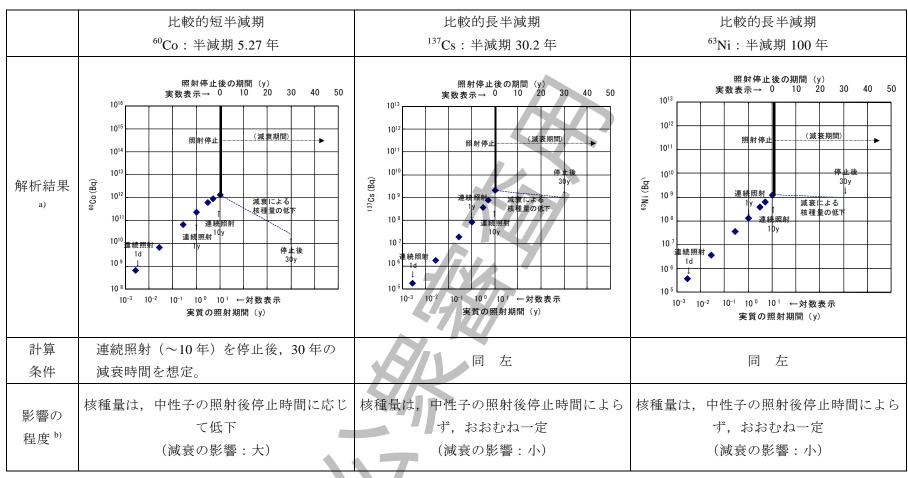
b) 影響の程度は、"大:1桁程度以上の差異を生む"、"小:2~3倍程度以内の差異を生む"を意味する。



注^{a)} 放射化計算コード: ORIGEN2.2, ライブラリ: JENDL3.3 シリーズ

図 B.6-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:比較的短半減期核種)

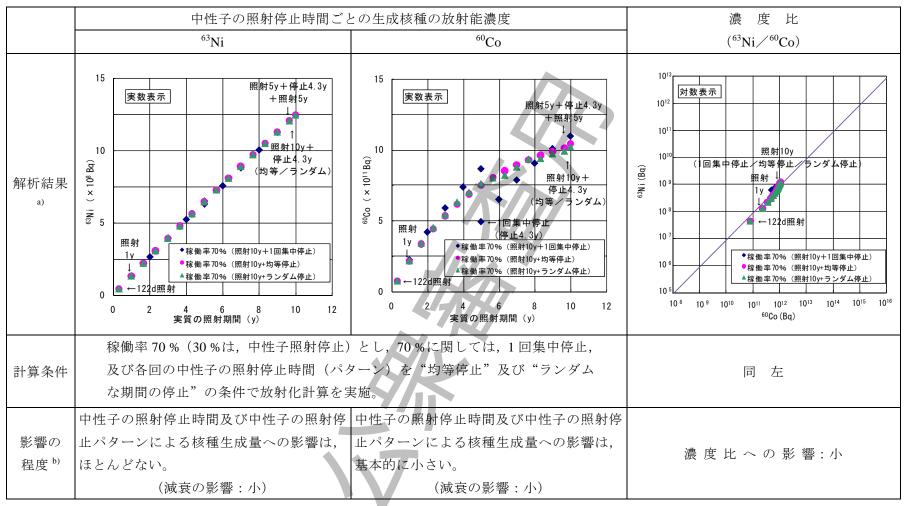
b) 影響の程度は、"大:1 桁程度以上の差異を生む"、"中:1 桁程度の差異を生む"、"小:2~3 倍程度以内の差異を生む"を意味する。



注 ^{a)} 放射化計算コード: ORIGEN2.2, ライブラリ: JENDL3.3 シリーズ

図 B.7-放射化計算結果への主な計算条件の影響評価結果(中性子の照射停止後の核種の減衰の影響)

b) 影響の程度は、"大:1桁程度以上の差異を生む"、"小:2~3倍程度以内の差異を生む"を意味する。



注^{a)} 放射化計算コード:ORIGEN2.2,ライブラリ:JENDL3.3シリーズ

図 B.8-放射化計算結果への主な計算条件の影響評価結果(中性子の照射停止時間の影響)

b) 影響の程度は、"小:2~3倍程度以内の差異を生む"を意味する。

附属書 C (参考)

点推定法のための放射化計算の入力データ設定の推奨方法

この附属書は、この標準本体の理解のために、例及び実績を示すものである。

なお、この附属書は **ISO16966**:2013 の**附属書 B** に基づき、作成したものであるが、用語の統一、一部表現の修正、示されている事項が選択肢なのかが分かる表現などについて、編集的修正を行っている。

C.1 全般

この附属書で点推定法という場合,一般的な放射化計算を実施するという広い意味で使用し, 既知の中性子の照射履歴の一つの対象物,又はその集合物に適用されている。燃料集合体,炉 内の核計装類,チャンネルボックスなどの炉心内で使用される構造物の場合,通常は,一般的 によく知られ,扱われている炉心の平均中性子フルエンス率を使用すれば,十分である。この ような構造物の場合,積算照射量は,原子力発電所の運転管理者が通常把握しており,運転日 数と原子炉の運転履歴を含む他の情報とを組み合せることで,十分な基本情報を提供できる。

しかし、炉心外にある構造物などの部材の場合、評価対象位置における中性子フルエンス率 (中性子東及びスペクトル)を計算するには、中性子輸送計算コードが必要になる場合もある。計算は、まず線源、材料種別、元素組成、密度、幾何形状、線源と評価対象との間の寸法など、全ての関連情報に基づいて行う必要がある。次に、評価対象位置(一般的には代表点)において、放射化計算コードを使用し、照射条件と一緒に中性子フルエンス率とを適用して、評価対象とする構造物の部材の放射化量を決定する。

C.2 放射化計算の実施順序

C.2.1 全般

点推定法の計算手順について、(中性子照射による)一般的な放射化計算を、三つの STEP に分けて、その詳細を次に示す (図 C.1 参照)。

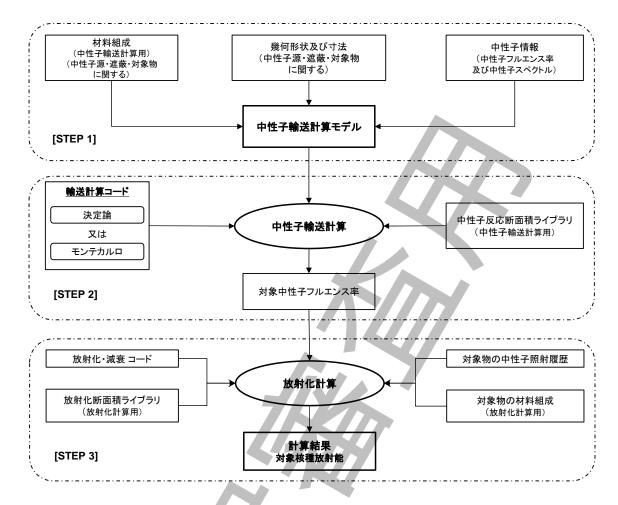


図 C.1 —放射化計算実施に関する基本手順

C.2.2 STEP 1: 中性子フルエンス率を決定するための中性子輸送計算モデルの設定

C.2.2.1 炉心内又は炉心近くの構造物

原子炉計装、制御棒、燃料集合体などを含む。

- 構造物の使用期間の追跡のために記録されている中性子フルエンス率を使用し、運転履歴 (中性子照射の開始及び終了)及び照射中の中性子東から、中性子フルエンス率を評価する。
- 放射能の全体分布は、中性子照射を最も多く受けた構造物の位置の影響を大きく受け、この分布は、構造物全体の基礎データとなる。

C.2.2.2 炉内構造物, 圧力容器及びその他の構造材

必要な全ての情報をもつ中性子輸送計算モデルとして設定する。

- a) ソースの定義
 - 燃料集合体の出力分布など。
 - 炉内構造物の部材の組成。

- b) 冷却材を含む,輸送計算に関連した構造物の部材及び幾何形状の設定など
 - -構造物の部材の材料組成及び密度(輸送計算に関連している放射性同位体情報を含む), 及び
 - 輸送計算に必要な幾何形状。

理想的には、中性子輸送計算モデルは三次元を適用するが、遮蔽などの幾何形状の簡略化、又は単純線源化(単一エネルギの点線源の適用など)を設定することなどで、単純化が適切な場合、及び炉内外の構造物の詳細なモデリングが簡略化できる場合は、全体的な中性子東分布は、二次元モデル又は一次元モデルによっても近似できる。また、図 C.2 及び図 C.3 は、ANISNコードを使用して作成した、代表的な PWR の中性子東の径方向及び軸方向の一次元モデルでの中性子東分布を示している。一次元の径方向のモデルは、炉心中心部から生体遮蔽までを含み、軸方向のモデルは、格納容器の底部から最上部までを含んでおり、各ゾーンの特徴は、燃料、燃料集合体材、冷却材(バーナブルポイズンも含む)、制御装置、構造物を含む複合要素によって特徴づけられる。

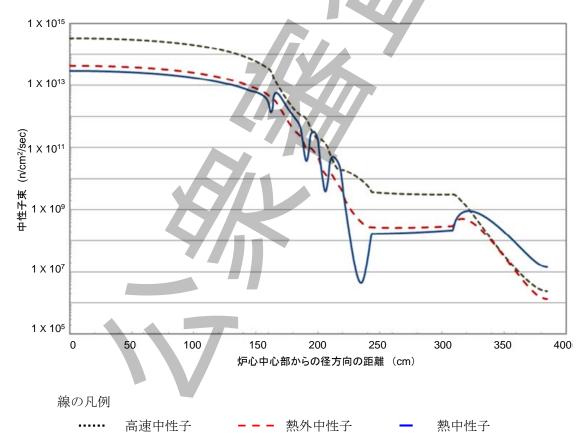


図 C.2—PWR の中性子束の径方向分布の例

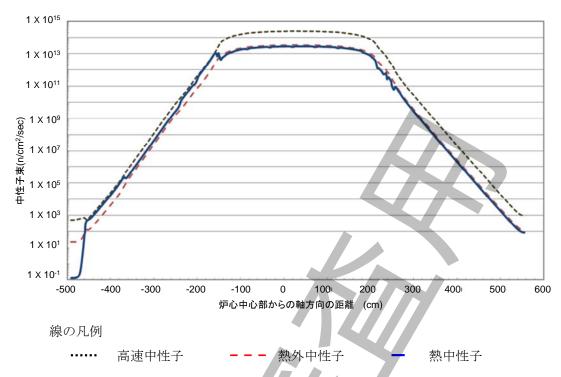


図 C.3—PWR の中性子束の軸方向分布の例

この一次元モデルによる解析の方法は、バッテル・パシフィック・ノースウエスト国立研究所が作成した 2 件の報告書^{[1], [2]}において示されている。また、燃料集合体以外の構造物に焦点をおいた一次元モデルの例が、ほかの報告書^[3]でも示されている。このほかに、詳細な三次元輸送モデル(モンテカルロモデル又は決定論的モデル)を使用した、詳細な中性子スペクトル情報を決定した例もある。^{[4], [5]}

C.2.3 STEP 2: 中性子輸送計算の実施

中性子輸送計算によって、評価対象位置(評価対象内の代表位置で評価する"点推定法")の中性子フルエンス率(中性子東及びスペクトル)を決定できる。この位置の中性子東及びスペクトルの情報は、評価対象の体積で平均化処理しても適用できる。

なお,中性子輸送計算を実施するには,次の項目が必要である。

- a) 入力データとしての輸送計算モデルの設定(STEP1参照)
- b) 輸送モデルを設定できる次のいずれかの中性子輸送計算コード
 - 決定論的コード (**例** ANISN コードなど)
 - モンテカルロコード (**例** MCNP コードなど)
- c) 中性子輸送計算コードに付属している,群又は連続したエネルギ構造体の中性子反応断面積ライブラリ(**例** ENDF/B など)。

中性子輸送計算の結果は、次のステップの放射化計算に必要となる,基準位置の中性子束, スペクトルなどである。

C.2.4 STEP 3: 放射化計算の実施

放射化計算では、評価対象の基準位置の核種組成を、評価対象とする放射化金属等の代表位置の値、又は評価対象とする放射化金属等の体積における平均値として決定する。

放射化計算を実施するには,次の要素が必要である。

- 放射化及び崩壊生成物を計算するための計算コード(**例** ORIGEN など)。
- 放射化計算コードに付属している中性子反応断面積ライブラリ。 事前に処理済みの断面積か、又は基準位置における中性子スペクトルに対応した縮約断面 積
- 重要な不純物成分元素、微量成分元素を合わせた、全ての主成分を含む評価対象とする放射化金属等の材料組成。
- 評価対象とする放射化金属等の中性子の照射履歴。
 - (**例** 中性子照射の停止期間中及び照射終了後の減衰など、中性子照射期間における中性 子東・スペクトルの変化に関する情報)

放射化計算によって、評価対象の基準位置における核種組成が得られるが、極微量の放射能 濃度は、該当するカットオフ値(cut-off value)を適用することで無視できるほど小さいことを 確認できる。ただし、使用するカットオフ値は、一般的に放射能濃度が極めて低いが、長期に わたる処分における安全性において重要となる長半減期の放射性核種に関して説明できる必要 がある。

なお、放射化計算の結果は、輸送及び放射化を説明している全ての関連情報(**例** 線源、材料、密度及び幾何形状の特徴)に基づいて得られる。さらに、使用する計算コードは、組み込まれている放射化断面積ライブラリ、モデルの単純化を、十分に理解した上で、使用することが望ましい。

C.3 線量率測定による検証,調整

評価対象とする放射化金属等の線量率測定は、正しく実施されれば、計算結果が評価対象の 実際の放射化条件に一致していることを検証できる。このことは、評価対象とする放射化金属 等の線量率測定を実施することによって、補足的に放射化計算によって得られた核種組成を検 証するか、又は、適切な線量率測定データに合わせて調整できることも意味している。

C.4 点推定法による放射化計算例

点推定法に基づいた放射化計算の例は、炉心周辺などで照射を受けた小さな構造物(**例** ジェットポンプ,ボルトなど)の放射能濃度の決定である。

放射化計算を行う場合、構造物の位置における中性子フルエンス率(中性子束及びスペクトル)を決定しておくことが望ましい。ただし、事前に設定された中性子フルエンス率がない場合、この情報(関連した炉心領域、構造物の位置、水、その他の構造材間にある遮蔽材などを含む)を設定し、中性子輸送計算を実施することが望ましい。また、炉内の評価対象とする構造物の大きさが、炉心高さより小さい場合、評価位置における中性子フルエンス率の勾配は十分小さいため、代表値とすることもできる。

中性子フルエンス率を定義した後、放射化計算コード及び放射化断面積ライブラリを使用して、構造物の部材の放射能濃度を決定できる。このときの構造物の部材の基本仕様には、構造物の部材内でよく検出され、処分において重要となるコバルト、ニオブなどの微量成分元素を含む。さらに、構造物に対する中性子照射では、照射停止期間中の減衰を考慮に入れる必要があり、次の2通りの方法によって、減衰は放射化計算コードで計算できる。

- 原子炉の利用率及び出力レベルを考慮に入れて中性子フルエンス率を調整する。
- 原子炉の運転期間及び停止期間に応じた多段階の計算を行う。

構造物の線量率測定では、構造物から指定した位置での、一つ又は複数の線量率の値が決まり、構造物を所定位置(水中、遮蔽キャスク内など)で遮蔽して測定する場合では、シミュレーション(例 遮蔽計算)を行うことによって、線量率を計算でき、線量率の測定値と比較することができる。また、線量率の計算結果と測定値との差に基づき、最初の放射能濃度の評価結果を調整し、線量率に一致させることもできる。

 γ 線スペクトルの直接測定を使用しても同様の結果を得ることができる。このとき、小さな評価対象の場合は、点減衰核遮蔽計算プログラムでも、十分シミュレーションできるが、大きな評価対象の場合は、複数の測定と、さらに幾つかの補足的計算(場合によっては、より複雑な遮蔽計算コードを使用する)とによって、主要な γ 線放出核種の全体を評価できる。また、主に構造物の 60 Co が、測定された線量率に寄与している場合(放射化された原子炉の構造物の場合、一般的である)、線量率の値は対応する 60 Co の濃度に関連付けられる。

さらに、構造物の部材の不純物成分元素 59 Co の濃度が確かである場合、放射化計算によって、 60 Co インベントリ(線量率測定の情報によって決まる)に合わせて調整することによって、構造物全体の核種インベントリを算出できる。

参考資料

- [1] PNL-6096 Volume 2, "Spent fuel assembly hardware: Characterization and 10 CFR 61 classification for Waste Disposal, Volume 2. Calculated Activity Profiles of Spent Nuclear Fuel Assembly Hardware for Pressurized Waste Reactors", Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, June 1989.
- [2] PNL-6096 Volume 3, "Spent fuel assembly hardware: Characterization and 10 CFR 61 classification for waste disposal, Volume 3. Calculated activity profiles of spent nuclear fuel assembly hardware for Boiling water reactors", Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington June 1989.
- [3] PNL-10103, "Non fuel assembly components: 10CFR61.55 classification for waste disposal", Battelle Pacific Northwest Laboratory, September 1994.
- [4] Pantelias M., et al., "MCNP modelling of the Swiss LWRs for the calculation of the in- and exvessel neutron flux distribution", Proceedings of PHYSOR 2012-Advances in reactor physics, Knoxville TN, USA, April 15-20, 2012.
- [5] Brack D., et al., "Removal of pins and rollers, dose rate measurements, calculations of activity and the conception of control rod packaging at KKL", Proceedings of KONTEC 2009, 9th International Symposium "Conditioning of radioactive operational & decommissioning wastes", Dresden, Germany, April 15-17, 2009.

附属書 D (参考)

区間推定法のための放射化計算の入力データ設定の推奨方法

この附属書は、標準本体の理解のために、区間推定法の放射化計算に使用する入力データの 設定方法の詳細を示すものである。

D.1 区間推定法

D.1.1 区間推定法の種類

放射化金属等の内部の放射能濃度は、燃料の燃焼度と密接な関係をもつ点、放射化金属等の同一部位で生成した放射性核種の濃度の比は、元素成分条件及び照射条件が同じことから一定条件にある点、並びに炉内で固定され設置された放射化金属等は元素成分条件及び照射条件が同じで、部位による中性子条件だけが異なる点から、これらを考慮した表 D.1 に示す下記の代表的な区間推定法が放射能濃度分布の評価方法として適用できる。

- 換算係数法
- 濃度比法
- 濃度分布評価法

D.1.2 換算係数法

換算係数法の概念は、放射性核種の生成量が中性子の累積照射量に比例することに基づく方 法である。

中性子の累積照射量(中性子の照射量又は燃焼度,運転日数など)などを管理指標として使用し、管理指標に比例する換算係数を乗じることによって、放射化金属等の内部の放射能濃度を決定できる。

具体的には対象物における代表的、又は保守的な放射化計算条件を用いた計算によって、管理指標の値と放射能濃度との関係を換算係数として評価し、換算係数と対象とする放射化金属等の管理指標の値との積から放射能濃度を決定する方法である。

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と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。

管理指標の例として, 次のものが挙げられる。

- 制御棒,原子炉容器又は他の炉内構造物の累積照射時間。
- BWR のチャンネルボックスの累積照射時間,又は燃料集合体の燃焼度。

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、次の式(1)のように近似的(中性子エネルギー群に単純化)に表わされる。

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

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)

ここで、評価対象とする放射化金属等の部位を考えると、放射化断面積 (σ) 、親核種の原子数密度 (N) は一定とみなすことができ、崩壊定数 (λ) も定数であることから、放射能濃度は中性子の照射量 $(\Phi \times t)$ と比例関係にがある。

さらに、評価対象物の中性子の照射量($\mathbf{\Phi} \times t$)に比例する因子を管理指標 \mathbf{B} とすれば、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を換算係数 \mathbf{R} として表せば、放射能濃度は、式(2)のように単純に表される。

$$A = \mathbf{R} \times \mathbf{B} \tag{2}$$

ここに, R: 換算係数

B : 管理指標(例えば,燃焼度)

上記のように、放射能濃度は、換算係数Rと管理指標の値Bとの積として表わすことができる。したがって、換算係数Rをあらかじめ評価しておけば、管理指標の値から評価対象とする放射化金属等の放射能濃度を求めることができる。

D.1.3 濃度比法

濃度比法の概念は、汚染した放射性廃棄物に適用されているスケーリングファクタ法と類似のものである。ただし、スケーリングファクタ法は、実際の汚染した放射性廃棄物の放射化学分析結果を用いた実証的方法であるのに対し、濃度比法は、対象とする放射化金属等の放射化に係る条件範囲(元素成分、中性子フルエンス率及び照射履歴)を網羅する放射化計算を行い、その計算結果を用いて難測定核種と Key 核種との濃度比を設定する理論的方法である。

この考えは、評価対象とする放射化金属等の照射開始から照射終了までの期間において、放射化金属等の放射能濃度は経時的に変化しても、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及び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方に基づくものである。このため、放射化計算によって対象とする放射化金属等の平均的な核種の濃度比を決定するには、廃棄物の照射条件(照射位置及び原子炉の運転条件)を考慮した範囲を放射化計算条件として設定する。

したがって、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、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確でない場合でも、Key 核種濃度を測定すれば、適用できる方法である。

D.1.4 濃度分布評価法

濃度分布評価法は、放射化金属等ごとの放射能濃度を決定するのではなく、同一種類の複数 の放射化金属等を一つのグループ (例えば、黒鉛ブロック全体を一つのグループとする)とし、 そのグループに対して放射能濃度を決定する方法である。

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。このため、そのグループ内の廃棄物について、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ことが必要となる。

この場合、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。

この考え方に基づき,放射化金属等のグループの計算条件の変動範囲を考慮した複数の放射 化計算を行い,計算結果の放射能濃度分布から放射能濃度の平均値などを求める。また,この 法によって求める廃棄物グループの放射能濃度の平均値などの決定に当たっては,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。

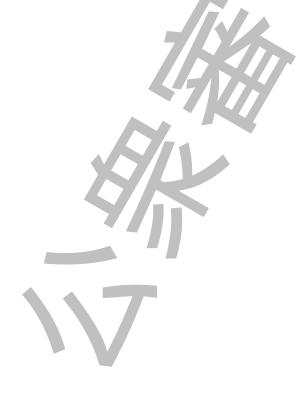


表 D.1—各区間推定法の基本的な特徴及び適用対象放射化金属等

管理指	(1/bg) 関	放射化計算 放射化計算 濃度比 機理 機度比 Key核種(Bq/t)	(1/bg) 脚 が 放射化計算結果 平均値 評価対象とする廃棄物グループ
放射能 放射化 基本的な特徴 射能濃 元素組 考慮し	5)] と放射化金属等中に生成する核種の 6濃度とには、密接な関係がある。 2金属等の内部に含まれる難測定核種の放 度は、実際の原子炉の条件範囲(例えば、 引成、中性子フルエンス率、照射条件)を た放射化計算によって得られる換算係数 目指標(燃焼度など)とを乗じることで、	別な関係がある。 難測定核種と Key 核種間との濃度の比は、実際の原子炉の条件範囲を考慮した放射化計算によって評価できる。	元素成分条件、中性子の照射履歴は、固定された原子炉及び構成材では、ほとんど同じで、唯一、個々の部位での中性子フルエンス率だけが異なっている。核種の放射能濃度の違いは、中性子フルエンス率の違いによって生まれる。 構成材中の放射能濃度は、実態の原子炉の条件及び機材の位置の範囲を考慮した放射化計算によって評価できる。
代表的な評価対象 チャン とする放射化金属等	ンネルボックス,制御棒 , バーナブルポ イズンなど。	チャンネルボックス,制御棒,バーナブルポイズ ン,黒鉛,シュラウド,圧力容器など。	黒鉛,シュラウド,圧力容器など。

D.2 放射化計算の入力条件の基本設定フロー

評価対象とする放射化金属等の放射能濃度を決定するための放射化計算を行う上で必要となる入力条件の設定方法には、次の2種類がある。

- 点推定法向け: 評価対象とする放射化金属等の元素濃度分布,中性子フルエンス率及び照射条件の代表的な値(平均値,保守的な値など)を入力条件として設定する。
- 区間推定法向け:評価対象とする放射化金属等の元素濃度分布,中性子フルエンス率及び 照射履歴を網羅する必要な複数の入力条件を準備する。

評価対象とする放射化金属等の元素濃度分布,中性子フルエンス率及び照射履歴を網羅する 十分な複数の入力条件を準備する区間推定法のための基本設定フローを,**図 D.1** に示す。各入 力条件は,次のステップで選択することで,評価対象とする放射化金属等の放射化条件を適切 に網羅できる複数の入力条件の設定が可能となる。

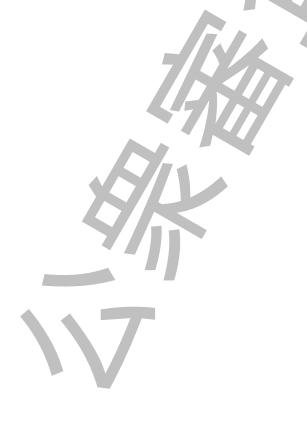
- a) **評価対象とする放射化金属等の選択及び特性の調査** 最初のステップとして,選択した評価対象とする放射化金属等の特性(**例** 形状,材質など)の把握,原子炉内での中性子照射履歴,元素分析データなどの入力条件の設定に必要となる基礎データの収集を行う。
- b) 評価対象とする放射化金属等の内部における評価位置の選択(評価位置) 評価対象とする放射化金属等の形状及び原子炉内での設置方向を踏まえて、評価対象とする放射化金属等の内部における評価対象とする位置に関する存在確率分布を設定する。入力条件を設定するため放射化金属等の内部における評価位置は、この確率分布からランダムサンプリングし、選択・設定される(D.3 参照)。
- c) 元素成分の濃度の設定 必要となる評価対象とする放射化金属等の化学分析データ(元素 成分濃度データ)を事前に準備し、この元素成分濃度データベースを用いて評価した元素 成分濃度分布を設定する。入力条件として設定する元素成分濃度は、設定した元素成分濃度分布からランダムサンプリングする (D.4 参照)。
- d) 原子炉運転サイクルにおける設置位置の選択 放射化金属等が原子炉内で移動する場合, 評価対象の設置位置に関して,原子炉内での代表的な設置位置のローテーションパターン を評価し,設定する。入力条件とする放射化金属等の原子炉内の設置位置のローテーショ ンパターンを,設定した代表的なローテーションパターンの割合を踏まえて,ランダムサ ンプリングする (D.5 参照)。
- e) 中性子の照射時間の選択 評価対象とする放射化金属等の原子炉内での照射時間は、実際の原子炉の運転実績データ (運転時間及び停止時間)を踏まえて、照射時間の分布を評価する。そして入力条件とする照射時間を、設定した照射時間の分布からランダムサンプリングする (D.6 参照)。
- f) 中性子フルエンス率の設定 原子炉内の中性子フルエンス率の分布を検証,妥当性確認された計算コードを使用して評価する。続いて,ステップ b) で選択した評価対象物の照射位置,及びステップ d) で選択した原子炉内の設置位置のローテーションパターンを踏ま

え、評価した照射期間中の中性子フルエンス率の分布から入力条件とする中性子フルエンス率を選択する (**D.5** 参照)。

- g) **放射化断面積の設定** 評価対象とする元素の放射化断面積をステップ f)で設定した中性子フルエンス率を踏まえて、入力条件として選択する (**D.5** 参照)。これらは、通常、計算コードに付随する標準ライブラリに含まれる。
- h) **放射化計算用の入力データの設定** ステップ b) から g) までで評価,選択した入力データ を放射化計算の入力条件の一つのセットとする。さらに,評価,選択して設定した入力データの数が不足している場合は,ステップ b) に戻って,引き続き,放射化計算の入力条件の評価,選択を行う。

なお,入力データの数が充足したと評価される場合は,設定した放射化計算の入力条件 のデータベースとして,これを使用して放射化計算を行う。

注記 入力データ数の充足の評価方法は, 6.1.3.3 による。



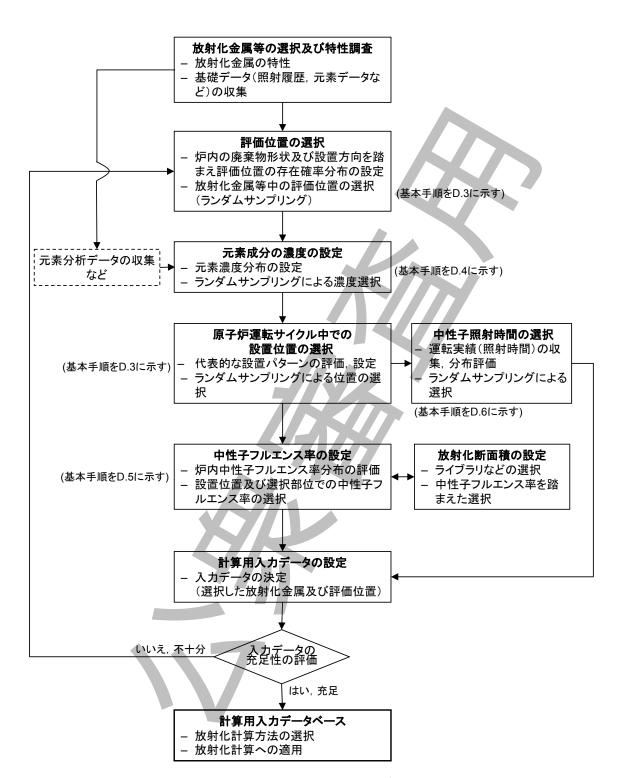


図 D.1—区間推定法による放射化計算の入力データの基本設定フロー

D.3 評価対象放射化金属等の評価位置の選択

D.3.1 評価対象放射化金属等の形状及び設置方向による照射位置の設定

中性子フルエンス率(フラックス及びスペクトル)を設定するためには、評価対象とする放射化金属等の評価する照射位置を選択し、その位置での炉内の中性子フルエンス率を特定する必要がある。このためには、まず、評価対象とする放射化金属等の形状及び原子炉内での設置方向、配置位置を考慮した照射位置を選定した上で、評価対象とする放射化金属等の選定した照射位置ごとに適切な中性子条件を設定する。

評価対象とする放射化金属等の形状及び設置方向を考慮した放射化計算の評価対象とする照 射位置を設定する場合の基本的な考え方を,**表 D.2** に示す。

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 a)	考慮する条件 ^{b)}	評価対象とする放射化 金属等の一例 ^の	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)。

D.3.2 評価対象放射化金属等の原子炉内での設置位置の移動を踏まえた照射位置の設定

評価対象とする放射化金属等の原子炉内での運転サイクルごとの設置位置の移動の有無による照射位置の設定に関する基本的な考え方を,**表 D.3** に示す。これは、どの評価対象とする放射化金属等の部位が中性子の照射を受けるか、そして放射能の一様性にも影響を与える。

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。

評価対象とする 放射化金属等の 配置位置 ^{a)}	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
第1 里 小 牧 利	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 ^{b)} , 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 ^{f)}
配置の移動	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 ⁶ , BWR 制御棒 ^{d)} など	挿入位置などの 実際の分布又は 代表的なパターン ^{f)}
配置が固定	照射期間中は,配置位置 の変化がないこと	シュラウド, 上部格子板 など ^{e)}	固定値

- 注 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。
 - り 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。

D.4 元素成分条件の設定

D.4.1 元素成分条件の設定方式の選定

評価対象とする放射化金属等の元素成分条件の設定方式は、収集した元素分析データ及び放射能濃度決定方法の種類に応じて、次のいずれかが選択できる。

- 評価対象とする放射化金属等の代表的な元素分析データ(元素分析データの平均値など) で設定する方式。
- 評価対象とする放射化金属等の元素分析データの濃度分布又は濃度範囲を設定する方式。

D.4.2 各元素の濃度分布基本形状の設定

各材料中に含まれる各元素の濃度分布の基本形状は、材料製造時の各成分の管理条件を考慮して設定できると考えられ、その基本的な考え方を、**表 D.4** に示す。

材料中の各元素は、一般に、材料製造時に成分管理目標値などを定めて調整を行う"主成分元素"及び"不純物成分元素"と、成分管理目標値などが定まっていない"微量成分元素"とに大別できる。したがって、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、分布の上限値に近い濃度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。また、収集した元素分析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できる。

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

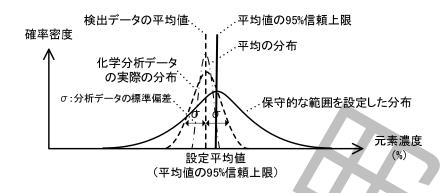
D.4.3 元素分析データ数量に応じた濃度分布条件設定

元素濃度分布条件の設定には、評価対象とする放射化金属等の材料のロット及び収集した元素分析データの数量に応じて、代表性又は保守性を考慮した上で、次の a)~d)の濃度分布条件設定方法の適用が望ましい。

なお、標準偏差は、保守性を考慮した上で適切な値を設定すればよいが、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て標準偏差を設定する方法も適用できる。

ただし、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する場合は、参考とする元素分析データを収集した上で、参考とした同一の元素の標準偏差に濃度依存性がないこと、及び参考とした化学的性質が類似した元素との間で標準偏差に差異がないことを評価する必要がある。

- a) 元素分析データ数が十分にある場合 評価対象とする放射化金属等(材料)の元素分析データの数が十分にあり、元素分析データとしての代表性をもっている場合は、保守性を見込む必要性はなく、元素分析データの平均値、標準偏差、最小値、最大値などを用いて評価対象とする元素成分濃度分布を設定できる。
- b) 元素分析データ数が比較的少ない場合 評価対象とする放射化金属等(材料)の元素分析 データの数が十分でない場合もある。この場合、分析データ数の少なさを考慮し、元素分 析データの分散の信頼上限を適用するなどの方法によって、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。



例 元素分析データ数が比較的少ない場合の濃度分布の設定のイメージ

- c) 元素分析データ数が非常に少ない場合の設定方法 評価対象とする放射化金属等(材料) の元素分析データの数が 1~2点(残りは、検出下限値の場合)と非常に少なく、標準偏差などを計算できない場合は、次のいずれかの方法による平均値、標準偏差を設定する方法がある。
 - 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。 なお、これら元素分析データ数が非常に少ない場合の、具体的な元素成分の濃度分布を 設定するために必要となる平均値及び標準偏差の決定方法の考え方を、**表 D.5** に示す。

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

方法	方法の概要	保守性の考慮	
検出値を平均値	元素分析データの検出値	例1 に示すとおり,	
として使用する	の平均値を推定する分布	平均濃度:	
方法	の平均値として適用し,	検出値の平均値とすることで、保守性を見込	
	加えて,保守性をもつ標	む。	
	準偏差を適用して、濃度	濃度分布の標準偏差:	
	分布を設定する方法	保守的な標準偏差を適用して、保守性を見込む	
		(例えば, 各元素のデータ群の標準偏差の分布	
		の 90 %までを包含する値など)。	
	確率密度 検出値の平均値 元素分析の 実際の分布 (推定). 保守的な標準偏差 (推定). 保守的な標準偏差を 適用して仮定した分布 元素濃度 (設定値)		
	例1 検出データの平	均値を使用した元素濃度布設定のイメージ	

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万法 (続き)			
方法	方法の概要	保守性の考慮	
検出値以下	元素分析データの検出最	例 2 に示すとおり,	
で元素の濃度	大値以下の濃度の低い領	平均濃度:	
分布を仮定す	域で濃度分布を設定する	分析した数が比較的多い場合は、保守的に検出	
る方法	方法	最大値を濃度分布の+2 σ (標準偏差) 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。	
		濃度分布の標準偏差:	
		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)。	
	確率密度		
	検出最大値(保守的) 200 元素濃度 (設定値)		

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 (続き)

d) 元素分析データに検出下限値しかない場合 評価対象とする放射化金属等(材料)の元素 分析データが全て検出下限値以下の場合は、次のいずれかの方法で平均値、標準偏差を設 定できる。

例2 検出最大値から分布を評価する場合のイメージ

- 一 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。

なお、検出下限値しかない場合の具体的な元素成分の、濃度分布を設定するために必要となる平均値及び標準偏差の決定方法の考え方を、**表 D.6** に示す。

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				
方 法	方法の概要	保守性の考慮		
検出下限値をそ	元素分析データの検出下	確認された最小の検出下限値などで元素濃度		
のまま使用する	限値を平均値として使用	を設定すること自体で、多大な保守性を見込		
方法	する方法。	t.		
検出下限値以下	元素分析データの検出下	例3 に示すとおり,		
で、元素の濃度	限値を最大値とする濃度	平均濃度:		
分布を仮定する	分布を, 既知の試料の標準	分析した数が比較的多い場合は,保守的に検出		
方法	偏差を利用して設定する	下限値を濃度分布の+2 σ の位置とし, 逆算して		
	方法。	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。		
		濃度分布の標準偏差:		
		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)。		
	確率密度 検出下限値 σ:平均的な標準偏差 (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) 元素濃度 (%) (設定値)			
11.51.11.31.13.15.15	77713	直以下で分布を設定する場合のイメージ		
放射化学分析結	照射履歴が明確な評価対	放射化学分析結果などを鑑み、必要に応じて、		
果から推定する	象とする放射化金属等の	適切な保守性を考慮する。		
方法	核種の放射能濃度データ			
	から,起源元素の濃度を推			

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

D.5 中性子条件の設定

D.5.1 中性子条件の設定における基本事項

定する方法。

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。まず、中性子フルエンス率は、原子炉型式、燃料条件、評価対象とする放射化金属等の種類及び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を計算で求めるには、実際の原子炉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。 中性子フルエンス率を設定する場合に考慮が必要となる基本的な事項を、**表 D.7** に示す。

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		考慮する必要のある主な事項		
燃料の条件		 濃縮度 ^{a)} 燃焼度 ^{a)} 燃料の種類 ^{b)} 		
炉内位置 ^{c)}	軸方向	一 評価対象とする放射化金属等自身の軸方向位置 ⁽¹⁾一 評価対象とする放射化金属等自身の軸方向(上下)の移動 ⁽²⁾		
	径方向	一 評価対象とする放射化金属等自身の径方向位置 ^{d)}一 評価対象とする放射化金属等自身の径方向の移動 ^{e)}		
その他		 ボイド率 (BWR) f) ホウ素濃度 (PWR) 温度分布 ディプレッション効果 g) 		

- 注 a) 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。
 - b) 燃料の種類とは、例えば、 UO₂, MOX。
 - c) 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。
 - d) 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化する場合。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。
 - 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。
 - f) 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。)
 - g) 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。

一方,放射化断面積は,基本的に,放射化計算コードに内蔵されている既存の断面積ライブラリを使用すればよいが,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。

ただし、既存の断面積ライブラリを使用する場合には、原子炉型式及び燃料組成が類似していればライブラリ間の差異が放射化計算に与える基本的に影響は、小さいと考えられるものの、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。

D.5.2 中性子フルエンス率などの設定方法

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、次のいずれかの方法による設定がある。

a) **個別に条件設定する方法** 中性子の照射履歴に基づき,評価対象とする放射化金属等ごとに,中性子条件を詳細に設定する方法。

なお、放射化断面積については、中性子スペクトルの代表性を確認した上で、値を設定す

ることもある。

b) 代表条件を設定する方法 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。

なお、濃度比を用いる場合及び濃度分布評価法によって決定する場合は、個別の条件の 代わりに、複数の評価対象とする放射化金属等を適切に代表する条件範囲を設定すること もある。

さらに、放射化計算の条件の設定を目的とした中性子フルエンス率の評価を行う場合には、中性子フルエンス率の計算に利用するコード及び群定数について、利用の目的を十分考慮した上で、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。中性子計算は、炉心核的性能計算(単位燃料集合体核特性計算コード、3次元核熱水力解析)、ボルツマンの中性子輸送方程式を解く手法が主流であり、Sn 法(微分型中性子輸送方程式),モンテカルロ法、直接積分法などが該当する。これらの計算手法に加えて、外挿計算法、アルベド輸送計算法などを、それぞれの特徴に合わせて使用する。

- **例 1** 断面積ライブラリ(核データ)としては、日本原子力研究開発機構のJENDL、米 国ブルックへブン国立研究所のENDF/B などがある。
- **例 2** 計算コードとしては、Sn 法を用いた輸送計算コードには、米国オークリッジ国立 研究所の ANISN、DOT、TORT が、モンテカルロ法を用いた輸送計算コードには、 米国ロスアラモス国立研究所の MCNP がある。

D.6 照射条件の設定

D.6.1 中性子の照射条件設定の基本的考え方

評価対象とする放射化金属等の中性子の照射時間及び原子炉の供用期間中の中性子の照射停止時間を設定する。

なお、⁶⁰Co(半減期 5.27 年)などの比較的短半減期(数年以下)の核種に対しては、長期間にわたる中性子の照射を受ける場合は、照射期間中の核種の減衰の影響を考慮する必要がある。 照射時間及び原子炉の供用期間中の照射停止時間の設定の基本的な考え方を、**表 D.8** に示す。

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

- 1. 一	照射条件の設定方法		
設定項目	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	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。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。	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	- 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。	シュラウド, 上部格子板など
照射停止 時間 ^{a)} (原子炉供 用期間中)	均等設定個別設定	 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。 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。 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。 	全評価対象 廃棄物

注 a) 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。

D.6.2 中性子の照射条件設定における考慮事項

D.6.2.1 中性子の照射における考慮事項

照射条件である中性子の照射時間及び中性子の照射停止時間については、中性子の照射履歴に基づき、放射能濃度決定方法の種類に応じて、評価対象とする放射化金属等ごとに照射条件を詳細に、又は複数の評価対象とする放射化金属等を適切に代表する条件(又は放射能濃度評価結果を大きくする保守的な条件)の設定が必要となる。また、濃度比を用いる場合、換算係数を用いる場合及び濃度分布評価法によって決定する場合は、個別の条件の代わりに、複数の評価対象とする放射化金属等を適切に代表する条件範囲を設定することもある。照射条件を設定する場合に考慮する必要のある基本的な事項を、表 D.9 に示す。

項目		考慮する必要のある主な事項
中性子の照射時間		- 中性子の照射時間の合計 a)
中性子の照射 停止 (減衰) 時間	照射終了後	 放射化計算結果の中性子の照射終了後の停止時間での減衰補正^{b)} 又は 評価対象核種濃度の発生日への適切な補正^{b), c)}
	原子炉供用期間中	- 中性子の照射停止時間及び停止時期 ^{d)}

表 D.9—照射条件の設定において考慮が必要な基本事項

- 注 a) 評価対象核種のうち、プラント運転時間より半減期が短い核種は、プラント運転初期の中性子の照 射履歴の影響は小さく、評価時点直前の中性子フルエンス率が大きく影響する。また、プラント運 転時間に対して半減期が長い核種は、総中性子照射量が影響する。
 - b) 比較的短半減期核種の場合。
 - c) 濃度比法を用いる場合において、Kev 核種を非破壊によって外部からの測定した場合。
 - d) 60Co などの半減期が中性子の照射時間と同じ程度の期間の核種については、中性子の照射終了後の 経過時間の減衰について考慮が必要である。

なお,**表 D.9** では,照射条件を設定する場合に考慮する基本的な事項を示したが,基本的な 事項については,次の考え方で整理を行うことができる。

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、⁶⁰Co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。

D.6.2.3 照射終了後の時間(全ての照射が終了した後の)

⁶⁰Co のような比較的短半減期の核種は、中性子の照射が完全に終了した後の減衰の影響を受けるため、減衰期間を適切に考慮した結果の補正を行う必要がある(ただし、減衰補正の効果が小さい場合は、中性子の照射停止時の放射化計算結果をそのまま適用してもよい)。

なお、放射能濃度比を用いる場合において、Key 核種及び難測定核種の組合せに、比較的短 半減期核種及び比較的長半減期核種の組合せを利用する場合は、Key 核種の非破壊外部測定結 果などに適切な減衰補正を考慮する必要がある。

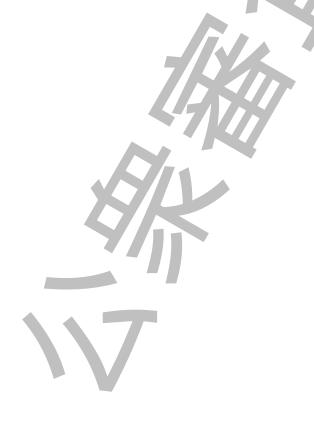
例 Key 核種に ⁶⁰Co を適用する場合は, 非破壊による外部から測定した ⁶⁰Co の放射能濃

度を廃棄物発生日に減衰補正し、これに放射化計算結果で算定した"濃度比"を乗じて廃棄物発生日での難測定核種濃度を算定した上で、難測定核種の放射能濃度を評価したい日の放射能濃度に減衰補正するなどの考慮が必要である。

D.6.2.4 照射停止時間(供用期間中における)

中性子の照射停止時間の合計が同一であれば、原子炉の供用期間中の照射が停止している各々の時間の大小は、⁶⁰Coのような比較的短半減期の核種であっても、放射能濃度、濃度比のいずれに対する影響も基本的に小さい。このため、放射化計算の条件を設定する場合は、実態に合わせた中性子の照射停止時間(合計)を設定した上で、これを中性子の照射期間中に均等に配分するなどの方法を適用することも適切である。

ただし、中性子の照射停止時間の合計が同一であっても、長期間の中性子の照射停止時間が 含まれる場合(B.4.2 参照)は、長期照射停止を終了し、再起動したしばらくの期間は、減衰に よる放射能濃度低下の影響が大きい場合もあるため、長期間の中性子の照射停止を行った場合 には、この点を配慮する必要がある。



附属書 E (参考)

原廃棄物分析法の基本的な適用方法

この附属書は、標準本体の理解のために、原廃棄物分析法に関する適用方法を示すものである。

E.1 概要

原廃棄物分析法は,固型化処理前の廃棄物から試料を採取し,試料の放射化学分析等の 測定結果によって廃棄体の放射能濃度を決定する方法である。この附属書では,原廃棄物 分析法の適用方法として,適用の前提条件となる廃棄物を代表できる試料(代表試料)の 考え方,採取方法,評価方法などを整理した。

E.2 原廃棄物分析法の試料採取方法

E.2.1 基本的な考え方

原廃棄物分析法は,適用対象とする貯蔵タンクに保管廃棄されている使用済樹脂,使用済樹脂の処理後に発生する廃液などの廃棄物全体の代表試料を採取して,これを放射化学分析等をすることで,廃棄物全体の放射能濃度を直接的に決定する方法である。このため,原廃棄物分析法を適用する場合には,廃棄物の代表試料を採取することが重要となる。

ここで、原廃棄物分析法の適用も想定される使用済樹脂等の代表試料の採取の考え方は、 貯蔵タンクでの廃棄物の均一性の確保の状況などによって異なる。原廃棄物分析法におけ る代表試料採取の基本的な考え方は、次による。

- a) 廃棄物の均一性が確認できる場合 かくはん (撹拌) 機器による混合などによって, あらかじめ貯蔵タンク内での廃棄物が均一混合できると見なすことが可能な場合は, 均一混合後に, 代表試料を 1 点採取し, 代表試料の放射化学分析等を行うことによって, 原廃棄物分析法の適切な適用が可能となる。
- b) 廃棄物の均一性が確認できない場合 貯蔵タンクに混合処理のためのかくはん(撹拌)機器などがなく、かつ、あらかじめ貯蔵タンク内で廃棄物が均一混合できると見なすことが難しい場合は、貯蔵タンクから複数の試料(一次試料)を採取し、各々の一次試料に対して放射化学分析等を実施するか、複数の一次試料から調整した二次試料を代表試料として放射化学分析等を実施することで、原廃棄物分析法の適切な適用が可能となる。

E.2.2 代表試料の採取・調整方法

E.2.2.1 廃棄物の均一性が確認できる場合

a) 均一混合処理 原廃棄物分析法の適用対象とする貯蔵タンクでのかくはん(撹拌)な

どの混合処理によって、あらかじめ貯蔵タンク内での廃棄物を均一混合できる場合と しては、表 E.1 に示す適切な混合処理方法を適用した場合がある。

	A E A A A A A A A A A A A A A A A A A A	~- <u>-</u>
	均一混合の処理方法	均一混合の判断条件
1	かくはん (撹拌) 機による混合処理	時間(かくはん(撹拌))
2	循環ラインによる混合処理	時間(循環)
3	エアレーションによる混合処理	時間(混合)

表 E.1-貯蔵タンク内の均一混合処理方法の例

注記 混合機器による均一性及び均一混合の判断条件は,機器の性能,試験・ 評価によって確認する必要がある。

- b) 混合処理による均一性の評価 貯蔵タンクの使用済樹脂等を均一混合できるかくはん (撹拌) などによる混合状態の評価は、かくはん (撹拌) 用機器の性能、又は貯蔵タンクの形状、かくはん (撹拌) 条件などを考慮した試験、若しくは解析評価によって、均一混合できることを、あらかじめ確認し、その判断条件も合わせて評価しておく必要がある。
- c) 代表試料の採取方法 あらかじめ適用対象とする貯蔵タンクで廃棄物が均一である と見なせる場合は、貯蔵タンクから試料を1点採取すればよい。ただし、代表試料の 採取においては、表 E.1 に示す均一混合の判断条件を配慮する必要がある。

E.2.2.2 廃棄物の均一混合性が確認できない場合

あらかじめ原廃棄物分析法の適用対象とする貯蔵タンク内の廃棄物の均一混合状態の評価が難しい場合は、貯蔵タンクから適切な複数の一次試料を採取し、必要に応じて、これを均一に混合した二次試料を試料として調整する。

なお,一次試料の採取方法及び二次試料の調整方法については,一般産業分野における タンクなどの試料採取方法である次の日本工業規格を参考とすることができる。

- JIS K 2251:2003 原油及び石油製品-試料採取方法
- a) 一次試料の採取方法及び採取位置 一次試料は、採取する場所(貯蔵タンク、移送・ 抜出しラインなど)、貯蔵タンクの大きさなどに応じ、適切な採取位置を決定する必 要がある。一例として、JIS K 2251:2003 における一次試料採取方法を、表 E.2 に示す。 なお、試験、解析評価などを行い、適用対象とする貯蔵タンクでの廃棄物の適切な採 取位置を、あらかじめ決定した上で、一次試料を採取することも可能である。
- **b) 二次試料の調整 a)**で採取した一次試料については、必要に応じ、複数の試料を調整して二次試料とすることができる。一例として、**JIS K 2251**:2003 における二次試料の調整方法を、**表 E.3** に示す。

なお,一次試料を二次試料に調整する場合は,複数の一次試料が均等・均一に混合するように,十分な混合が必要となる。

表 E.2-一次試料の採取方法 (JIS K 2251:2003 の代表的な例)

	一次試料の採取対象	
	貯蔵タンクから	移送・抜出しラインから
	直接採取	直接採取
火=4-10 0 校長 七 2 3)	貯蔵タンクへの採取容器投入	サンプリングラインから
一次試料の採取方法 ^{a)}	による使用済樹脂等の採取	使用済樹脂等採取
かおおりをおける	貯蔵タンクの定点	移送・抜出しの定点
一次試料の採取位置	上部, 中部, 下部 b)	初期,中期,後期 ^{c)}

注 ^{a)} 具体的な採取方法は, JIS K 2251:2003 参照。

- b) 貯蔵タンクの廃棄物層の上部 (1/6 の深さ), 中部 (1/2 の深さ), 下部 (5/6 の深さ)から試料を採取する方法。
- c) 廃棄物移送中の配管の全移送量の初期(初めの 1/6), 中期(1/2), 後期(5/6) から試料を採取する方法。

表 E.3-二次試料の調整方法 (JIS K 2251:2003 の代表的な例)

	代表試料の採取場所 貯蔵タンクから 移送・抜出しラインから	
	直接採取	直接採取
二次試料の調整方法 ^{a)}	平均試料 b)	混合試料°)

注 a) 具体的な一次試料の採取方法及び二次試料の調整方法は,JIS K 2251:2003 参照。

- b) 貯蔵タンクの各部から採取した試料を,各部の量の比に混合した試料。
- c) 同一タンクから採取した2か所以上の試料を,等量混合した試料。

E.2.3 使用済樹脂等を想定した代表試料の採取方法の例

JIS K 2251:2003 に記載された代表試料の採取方法は、液体、タンク残留物、堆積物などの半流動体を固定タンク、移送ラインなどから採取する方法について規定したものであり、貯蔵タンクなどに貯蔵されている使用済樹脂等と貯蔵状況が類似している。このため、JIS K 2251:2003 を踏まえた使用済樹脂等の貯蔵タンクからの試料採取方法(放射能濃度分布の均一性が必ずしも確認できない場合)として、まず、JIS K 2251:2003 に記載された試料採取方法のうち、使用済樹脂等の原廃棄物分析法への適用が想定される、"貯蔵タンク内の試料採取方法"、"タンク循環ラインの試料採取方法"、及び"排出・抜出しラインの試料採取方法"の3種類の試料採取方法について、主な特徴を整理した。結果を、表 E.4 に示す。また、これらの3種類の試料採取方法を使用済樹脂等の代表試料採取への適用例として整理したものを、図 E.1 に示す。

	貯蔵タンク内の	タンク循環ライン	排出・抜出しライン
	試料採取方法	の試料採取方法	の試料採取方法
	採取器を利用して使	貯蔵タンクの循環ラ	排出又は抜出しライン
概 要	用済樹脂等の貯蔵タ	インから試料を採取	から試料を採取
	ンクから試料を採取		
試料採取場所		カンカ紙型ニノンの	
(使用済樹脂	貯蔵タンク	タンク循環ラインの	排出・抜出しラインの
等の場合)		サンプリングライン	サンプリングライン
, · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	No. 11)	A1. 11 =
	一液体	一液体及び半流動体	一液体及び半流動体
適用の		ー試料採取前のタン	ーサンプリングライン
前提条件		ク内かくはん(撹	及び排出・抜出しラ
(試料性状)		拌) 又は一定の循	インの試料流速が同
		環	等
李小 拉 亞 十 汁	定点 (位置)		定点 (時間)
試料採取方法	試料採取方法	一点	試料採取方法
(一次試料)	(上部,中部,下部)		(初期,中期,後期)
試料調整方法	平均試料 など		混合試料
(二次試料)	一十岁的作 'A C		化口 叶杆

表 E.4-JIS K 2251:2003 に記載された試料採取方法の主な特徴

E.3 原廃棄物分析法による評価方法

E.2 に示した方法で採取した代表試料の放射化学分析等を実施し、次の方法で、廃棄体中の核種別の放射能濃度を決定する。

なお、固型化廃棄物に対して、加熱処理などの核種の放射能濃度に影響を与える可能性 のある廃棄物処理を適用する場合は、処理方法による影響の適切な補正が必要となる。

- a) 廃棄体の放射能濃度として決定する方法 放射化学分析等によって得られた原廃棄物中の評価対象核種の放射能濃度と、固型化方法とを踏まえた配合条件(例 廃棄物重量/固化体重量の比率など)を利用し、次のいずれかの方法で、廃棄体中の核種別の放射能濃度を決定する。
 - 1) 代表試料の放射化学分析等で得られた核種別の放射能濃度,及び廃棄体への廃棄物投入量によって,廃棄体ごとの放射能濃度を決定する方法。
 - 2) 複数の一次試料の放射化学分析等で得られた核種別の放射能濃度の平均値,及び 廃棄体への廃棄物投入量によって,廃棄体ごとの放射能濃度を決定する方法。
- b) 廃棄体中の放射性核種の組成比を適用して決定する方法 放射化学分析等によって 得られた原廃棄物中の評価対象核種と Key 核種 (⁶⁰Co など) との組成比と, 廃棄体の

非破壊外部測定法などによって得られた Key 核種の放射能濃度とによって, 廃棄体中 (1 体ごと) の核種別の放射能濃度を決定する。

E.4 原廃棄物分析方法の適用のステップ

原廃棄物分析法の基本的な適用のステップは、**図 E.2** 及び次による。

a) 原廃棄物分析法の適用性の評価 原廃棄物分析法の適用の可否を判断する場合,適用 対象廃棄物の特性(沈積物の有無など),貯蔵タンクの混合処理などの特性について 把握する必要がある。

この場合に、貯蔵タンクの混合処理用機器による均一混合の可能性を、次のいずれかによって、把握しておく必要がある。

- 1) かくはん (撹拌) 用機器の性能による均一混合性の把握。
- 2) 貯蔵タンク内の混合状態の模擬試験などによる均一混合性の把握。
- 3) 貯蔵タンク内の混合状態の計算評価による均一混合性の把握。
- b) 代表試料の採取 E.2.2 に示した均一混合による試料の採取,又は適切な複数の一次試料の採取及び均一混合による二次試料の調整が必要である。
- c) 代表試料の放射化学分析 次のいずれかの試料を放射化学分析することで,原廃棄物 分析法として適用できる適切な放射化学分析結果が得られる。
 - 1) 採取又は調整した代表試料
 - 2) 採取した複数の一次試料
- d) 原廃棄物分析法としての放射能濃度の決定方法 対象とした固型化処理前の廃棄物の範囲を適切に管理した上で, c) の放射化学分析結果から, E.3 に示す方法で, 核種別の放射能濃度を決定する。

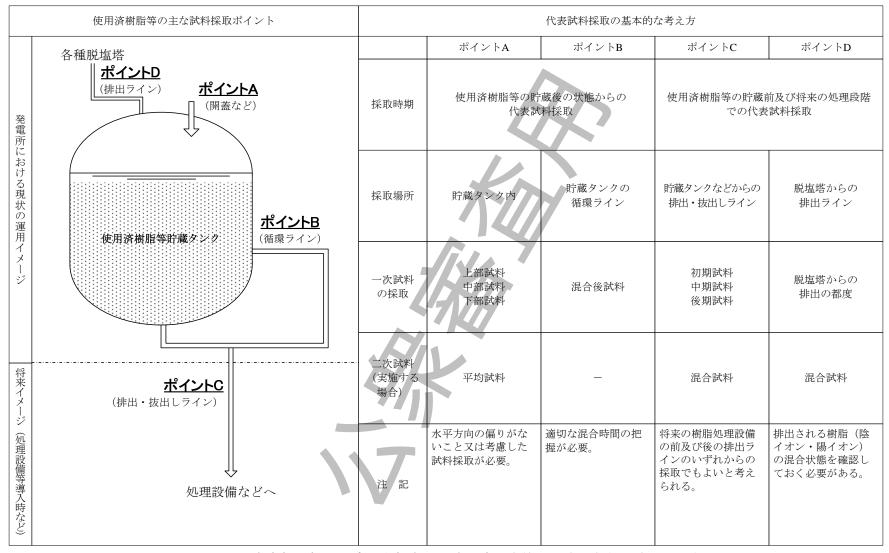


図 E.1-原廃棄物分析法の適用を想定した使用済樹脂等の代表試料採取方法の一例

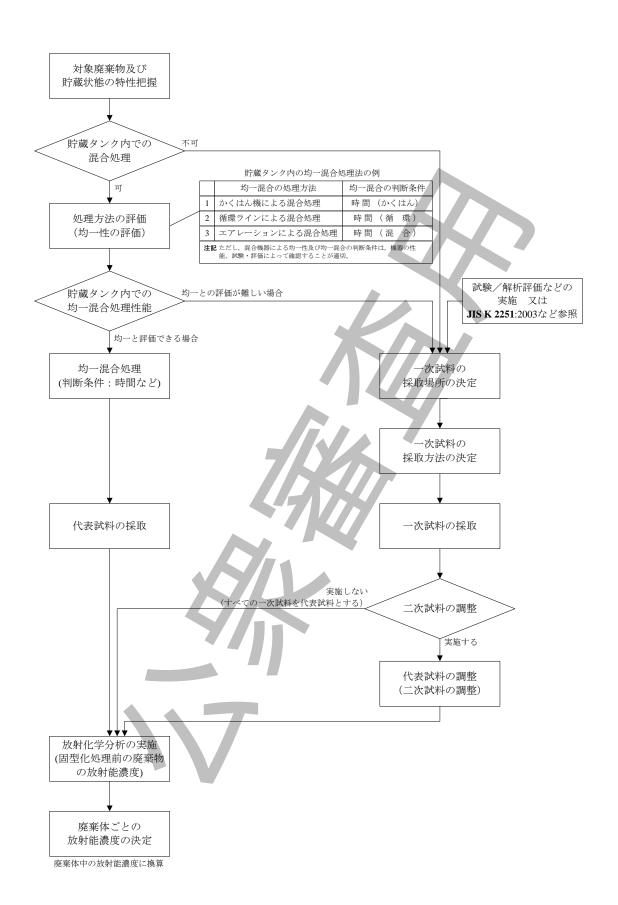


図 E.2-原廃棄物分析法の基本的な適用フロー

附属書 F (参考) 放射化計算を行う場合の計算例

この附属書は、**附属書 G** に示した各条件を BWR のチャンネルボックス, PWR の制御棒及び GCR の黒鉛減速材に各々適用して放射化計算を行い、放射化計算手法の妥当性を確認した結果 の例を示す。

F.1 BWR チャンネルボックス

F.1.1 概要

理論計算法を用いた放射化計算結果について、BWR のチャンネルボックスの例を次に示す。BWR のチャンネルボックスの放射化計算は、**図F.1**のフロー図に示す手順に従って実施した。チャンネルボックスにおける中性子フルエンス率・中性子スペクトルが、装荷位置及び炉心高さ位置によって異なることから、炉出力などの運転管理データに基づき炉心測定データを反映した炉心計算によって、中性子フルエンス率・中性子スペクトルの値をサイクルごとに決定した。また、放射化計算コードには ORIGEN-S を用いた。

放射化計算の結果については、使用済燃料のチャンネルボックスの核種分析を実施し、精度検証を実施した。精度検証の評価対象核種は、⁶⁰Coとした。

F.1.2 核種分析

- a) 分析対象試料 核種分析を行ったチャンネルボックスは、110万kW級のBWRプラントにおいて4サイクル中性子照射されたものである。また、核種分析は、**図 F.2**に示したチャンネルボックスの中央部付近位置(チャンネルボックスの軸方向位置を1(炉心下部)から24に分割した13番目の位置に相当)、横(水平)方向の中央部位置から採取された試料について実施した。
- b) **分析方法** 分析対象核種である ⁶⁰Co について、採取した試料のクラッドに含まれる放射能を除外するために、クラッドの分離・融解作業を行った後、試料を溶解した。この溶解液の一部を採取し、Ge 半導体検出器を用いて γ 線スペクトル測定を実施し ⁶⁰Co を定量した。

F.1.3 放射化計算

理論計算法の点推定法を用いて放射化計算を実施した。放射化計算の条件は、次のとおり設定した。また、計算条件を、**表 F.1** にまとめた。

a) 元素成分条件 評価対象核種の起源元素とした Co は、ジルカロイ合金の微量成分である。 元素成分は、測定されたチャンネルボックス試料片と同一ロットから作られた未照射保管試料の元素分析結果を用いた。

まず,チャンネルボックスの保管材の表面を,旋盤によって表面切削し表層部を除去した後,

切粉状の分析試料とした。この試料の元素濃度の分析方法としては、陽イオン交換-誘導結合プラズマ質量分析法を用いた。得られた Co 濃度を、次に示す。

起源元素	濃度(質量分率%)
Со	5.3×10 ⁻⁵

- b) 中性子条件 中性子フルエンス率及び放射化断面積の設定手順を,次に示す。
 - 1) **中性子フルエンス率** 中性子フルエンス率は、炉心を3次元でモデル化し、拡散・燃焼計算を行う炉心設計用の計算コード、燃料集合体のチャンネルボックスなどを詳細にモデル化できるモンテカルロ法に基づく連続エネルギ中性子輸送計算コード(以下、MCNPという。)によって、次の手順で設定した。
 - **1.1)** 評価対象とするチャンネルボックスが装着された燃料集合体について、炉心管理用の計算コードによってサイクルごとの中性子の照射履歴、燃料棒の出力及びボイド率を評価した。
 - 1.2) 燃料棒の出力及びボイド率を用い、燃料集合体内を詳細にモデル化した中性子フルエンス率分布計算を、MCNPによってサイクルごとの代表点(サイクル中期)で実施した。これから対象チャンネルボックスの試料採取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た。
 - 2) **放射化断面積** 放射化断面積は、1)で評価したチャンネルボックスの試料採取位置における中性子スペクトルを反映したものを用いた。

放射化計算コード ORIGEN-S では、放射化断面積に中性子スペクトルを反映させる方法として熱中性子,熱外中性子及び高速中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス (以下,それぞれ THERM, RES 及び FAST という。)を用いて、内蔵されている 3 群の放射化断面積を補正した。その THERM, RES, FAST の評価式を、次に示す。

$$F_T = \sqrt{\frac{\pi}{4} \frac{T_0}{T}} \tag{1}$$

$$F_{R} = \sum_{E_{g} \ge 0.625 eV}^{E_{g} \le 1.0 MeV} \phi_{g} / \phi_{th}$$
 (2)

$$F_F = \sum_{E_g \ge 1.0 MeV} \phi_g / \phi_{th} \tag{3}$$

ここに,

 F_T : 熱中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス (THERM)

 F_R : 熱外中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス (RES)

 F_F : 高速中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス (FAST)

Eg : g 群のエネルギ (eV)

T : 媒質の温度 (K)

 T_0 : 293.16 K

 ϕ_g : g 群の中性子フルエンス率 (n/cm²/s)

 ϕ_{th} :熱中性子フルエンス率 $(n/cm^2/s)$

今回の解析で用いたチャンネルボックスの試料採取位置でのスペクトルインデックスは、MCNPによる燃料集合体内の計算で得られた中性子スペクトルから求めた。

c) **照射条件** 中性子照射条件は、実際に使用したチャンネルボックスの中性子の照射履歴に 基づき、各サイクルの中性子照射期間、中性子照射停止期間を詳細に設定した。試料採取の 対象としたチャンネルボックスの中性子の照射履歴(概念図)を**図 F.3** に示す。

F.1.4 核種分析値と放射化計算結果との比較

チャンネルボックス試料片の核種分析値と放射化計算結果との比較を行った結果,中性子フルエンス率,放射化断面積及び照射条件を詳細に設定した放射化計算において,核種分析値及び放射化計算結果は,次のとおり[1]。

放射性核種	核種分析值 a)	放射化計算結果
	(Bq/t)	(Bq/t)
⁶⁰ Co	3.3×10^{12}	3.4×10^{12}
計 a) 按稱八年結σ	11. 粉(古の)な計亦動 (引来記主)	は "±020/" でも -

注^{a)} 核種分析値の計数値の統計変動 (計数誤差) は, "±0.2 %" であった。

表 F.1-放射化計算の計算条件

200 - 1- WASTIGHT SEAST				
条件	計算条件	備考		
元素成分条件	Co 濃度:	同一ロットから作られたチャンネ		
	質量分率 5.3×10 ⁻⁵ %	ルボックス未照射保管試料の元素		
		分析データを用いた。		
中性子フルエンス率	チャンネルボックス試料片の中	照射条件は,実際の照射履歴から		
及び照射条件	性子フルエンス率 (n/cm²/s) a),	詳細に設定している。		
	中性子照射日数 a)及び中性子照			
	射停止日数 a)をサイクルごとに	中性子フルエンス率分布の計算に		
	与える。	は集合体内を詳細に模擬できる三		
		次元のモンテカルロ法に基づく連		
		続エネルギ中性子輸送計算コード		
	14	MCNP を用いている。		
放射化断面積	ORIGEN-S に内蔵の3群断面積	核データは、公開された評価済み		
		核データ ENDF/B-VI などを基に		
	7/3/	作成したものである。		
		ORIGEN-S コードは、米国オーク		
計算コード	ORIGEN-S = - F	リッジ国立研究所が開発した公開		
□ □ 昇 □ □ □	ORIGEN-S 4-1	コードであり、米国を中心に広く		
		利用されている。		
注 ³ 中性子の照射履歴の情報は、ノウハウを含むため、詳細な数値については非公開				

注^a 中性子の照射履歴の情報は、ノウハウを含むため、詳細な数値については非公開



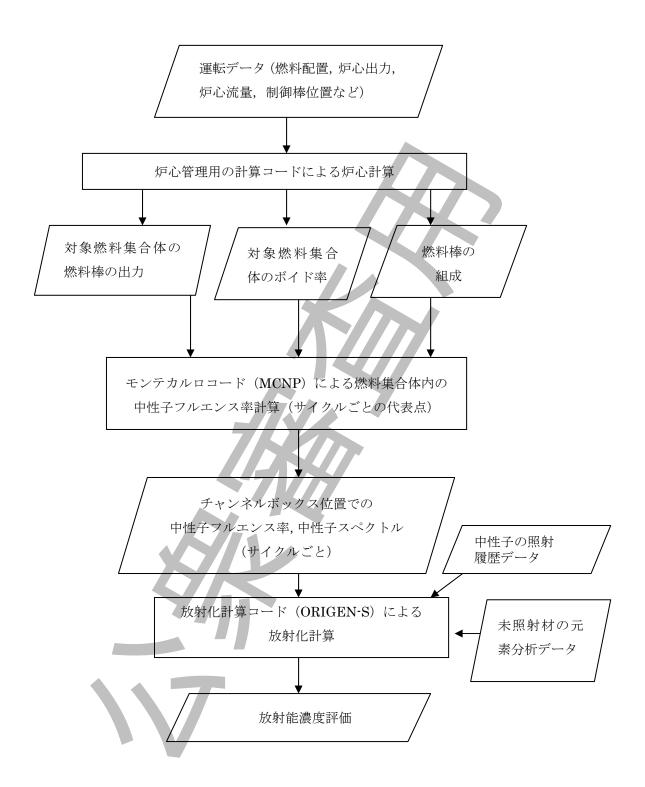


図 F.1-BWR チャンネルボックスの放射化計算フロー図

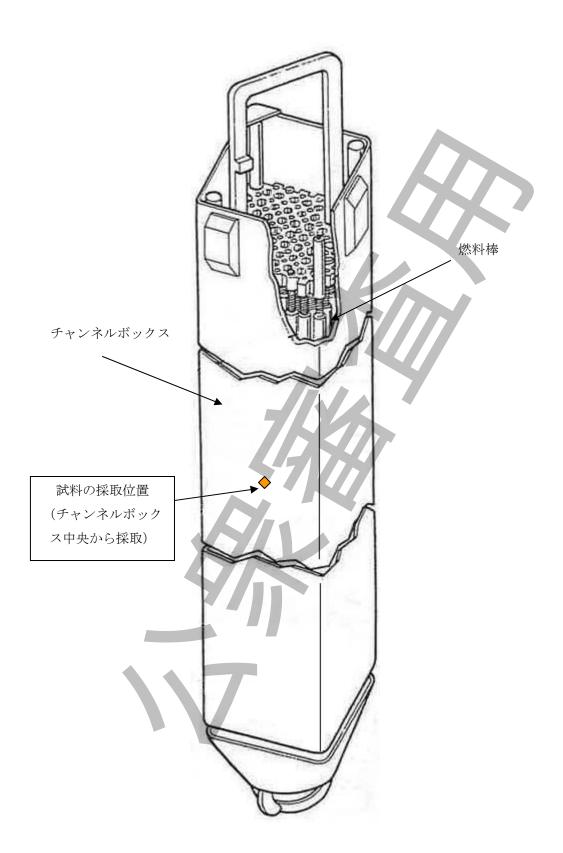


図 F.2-分析試料の採取概念図(BWR 燃料のチャンネルボックス)

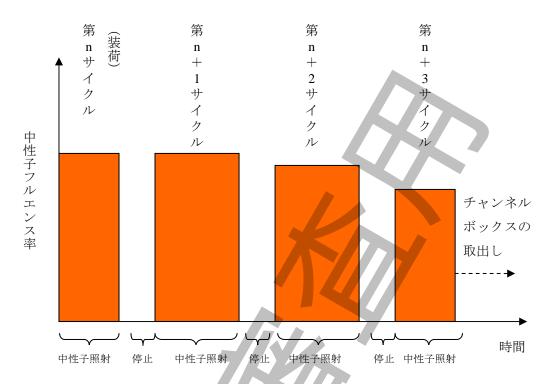


図 F.3-チャンネルボックスの中性子の照射履歴(概念図)



F.2 PWR 制御棒

F.2.1 概要

理論計算法を用いた放射化計算結果について、PWR の制御棒の例を、次に示す。

PWR の制御棒の放射化計算は、**図 F.4** の放射化計算フロー図に示すとおり、中性子フルエンス率・中性子スペクトルの事前評価によって、標準的な中性子フルエンス率及び放射化断面積を整備しておき、評価対象廃棄物の照射履歴を用いて、中性子フルエンス率及び放射化断面積の代表値又は個別の値を設定した。また、放射化計算コードは、ORIGEN2 を用いた。

放射化計算の結果については、実際に使用した制御棒の核種分析を実施し精度検証を実施した。 精度検証の評価対象核種は、ディプレッション効果の起こる制御棒吸収体中の 108mAg とした。

F.2.2 核種分析

- a) 分析対象試料 核種分析を行った制御棒は、 $50 \, \mathrm{T} \, \mathrm{kW} \, \mathrm{WO} \, \mathrm{PWR} \, \mathrm{COM} \, \mathrm{TOM} \, \mathrm{$
- b) 分析方法 分析対象核種である ^{108m}Ag について, 核種分析を実施した。試料は, まず溶解 容器に入れ, 混合酸を加えて加熱溶解し, 試料の溶け残り及び残さが生じないようにした。 次に, 混合酸で溶解した試料の溶解液は, 定容し, その一部を希釈して Ge 半導体検出器を 用いて y 線スペクトル測定を実施した。

F.2.3 放射化計算

理論計算法を用いて放射化計算を実施した。放射化計算の条件は、次のとおり設定した。また、計算条件を,表 F.2 にまとめた。

- a) 元素成分条件 評価対象核種の起源元素とした Ag は、材料メーカから調達した複数個の Ag-In-Cd 合金の Ag のミルシートに示された値の平均値を用いた。また、評価対象とする起源元素の Ag は、Ag-In-Cd 合金の主成分元素であるため、元素成分条件のばらつきは、ほとんどないとした。
- b) **中性子条件** 中性子フルエンス率及び放射化断面積の設定手順を、次に示す。
 - 1) 中性子フルエンス率 事前評価における 50 万 kW 級の PWR の代表的な燃焼条件における軸方向中性子フルエンス率の分布を、燃料集合体の出力比(集合体平均比出力の炉心平均比出力に対する比) =1 で規格化して整理したものを、図 F.6 及び図 F.7 に示した。照射履歴に基づき各サイクルにおける中性子フルエンス率を次のように設定した。
 - 1.1) "中性子フルエンス率計算データ (**図 F.6** 及び**図 F.7**)" のうち,制御棒が装荷されている燃料集合体の条件(燃焼サイクル,初期濃縮度など)に近いデータを使用した。
 - **1.2)** 制御棒先端位置から評価対象部位(先端とする)の炉心高さ位置を設定し, **1.1)** のデータを用いて, 出力比で規格化した中性子フルエンス率を設定した。
 - 1.3) 燃料集合体の出力比(集合体平均比出力の炉心平均比出力に対する比)を照射履歴から

算出(=集合体燃焼度増分のサイクル燃焼度に対する比)し,**1.2)**で設定した規格化した中性子フルエンス率に乗じ、これをサイクルの中性子フルエンス率として設定した。

- 2) **放射化断面積** 放射化断面積は、実際に使用した制御棒の照射履歴から全 11 サイクル中9サイクルをDバンクで照射されているため、Dバンクの制御棒の放射化断面積で代表し、事前に評価した D バンクにおける制御棒先端領域(先端から 0.2 m)の ORIGEN2 用の 1 群の放射化断面積で設定した。
- c) 照射条件 中性子の照射条件は、実際に使用した制御棒の照射履歴に基づき、各サイクルの中性子の照射期間、中性子の照射停止期間を詳細に設定した。実際に使用した制御棒の照射履歴(概念図)を、図 F.8 に示す。

F.2.4 核種分析値と放射化計算結果との比較

制御棒の核種分析値と放射化計算結果との比較を行った結果、中性子フルエンス率、放射化断面積及び照射条件を詳細に設定した放射化計算において、核種分析値及び放射化計算結果は、次のとおり^[2]。

放射性核種	核種分析値 ^{a)} (Bq/t)	放射化計算結果 (Bq/t)
^{108m} Ag	2.5×10 ¹⁴	2.6×10^{14}

注 ^{a)} 核種分析値の計数値の統計変動(計数誤差)は," ± 0.1 %" であった。



表 F.2-放射化計算の計算条件

条件	計算条件	備考	
元素成分	Ag-In-Cd 合金のミルシートの平均値	Ag は, Ag-In-Cd 合金の主要な構成材で	
条件	Ag 濃度:質量分率 80 %	あるため、元素分析値のばらつきは、	
		ほとんどない。	
中性子フル	制御棒先端の中性子フルエンス率	照射条件は、照射履歴から詳細に設定	
エンス率	(n/cm²/s) ^{a)} ,中性子照射日数 ^{a)} 及び	している。	
及び照射条	中性子照射停止日数®をサイクルごと	中性子の計算には制御棒を詳細に模擬	
件	に与える。	できる三次元のモンテカルロ法に基づ	
		く連続エネルギ中性子輸送計算コード	
	7	MCNP を用いており、事前に JMTR ^o 照	
		射試験を行い、MCNP による中性子フ	
	•	ルエンス率計算値とフルエンスモニタ	
		による測定結果との比較を行ってお	
		り、高速中性子、熱中性子とも、よく	
	5/1	一致していることを確認している。	
放射化	11 サイクル中 9 サイクルが D バンク	制御棒吸収体でのディプレッション効	
断面積	で照射されており, D バンクの吸収体	果によるエネルギスペクトルを反映し	
	先端 0.2 m 平均の放射化断面積で代表	た実効断面積を作成している。	
	した。	核データは、公開された評価済核デー	
	[核データ 1	タを用いている。	
	107 Ag(n, γ) 108m Ag : RNAL $^{b)}$		
計算コード	ORIGEN2 = F	ORIGEN2は、公開コードであり、許認	
	7 4 1 1	可ではキャスク及び高燃焼度化におけ	
		る使用済燃料の線源強度計算で実績が	
		ある。	

注 ^{a)} 照射履歴の情報は、ノウハウを含むため、詳細な数値については非公開。

b) RNAL は、IAEA で作成された評価済み核データライブラリである。

c) JMTR は、日本原子力研究開発機構の材料試験炉である。

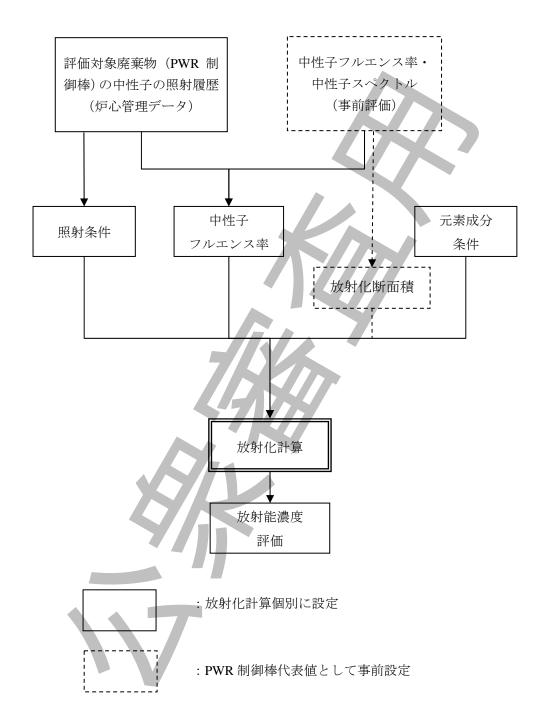


図 F.4-PWR 制御棒の放射化計算フロー図

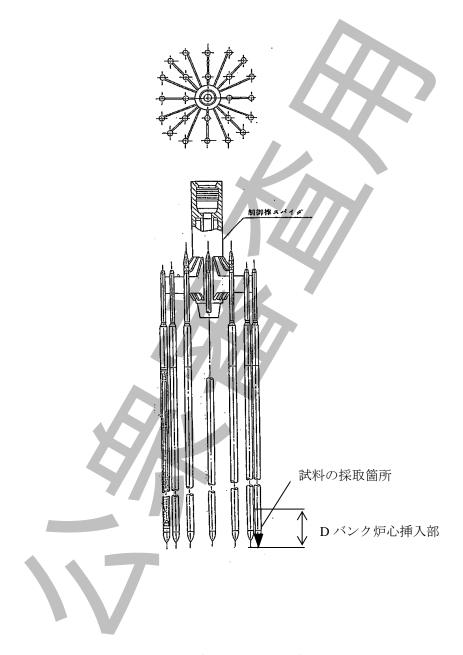
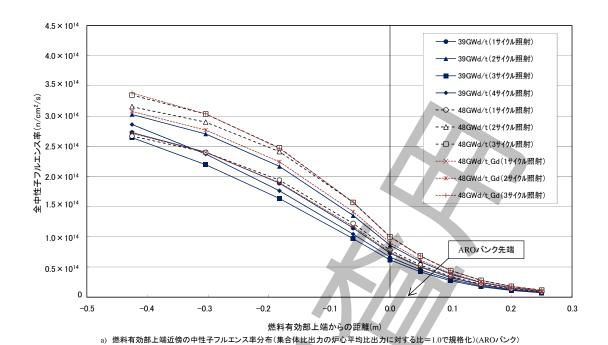


図 F.5-分析試料の採取概念図 (PWR 制御棒)



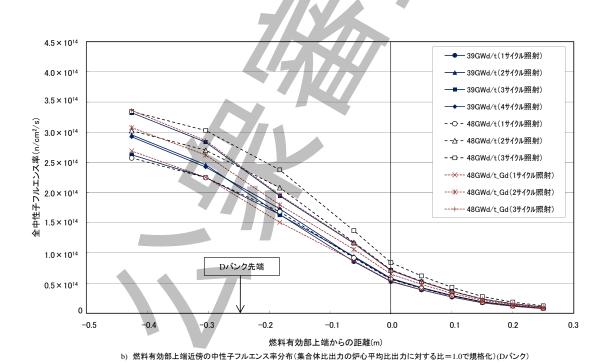
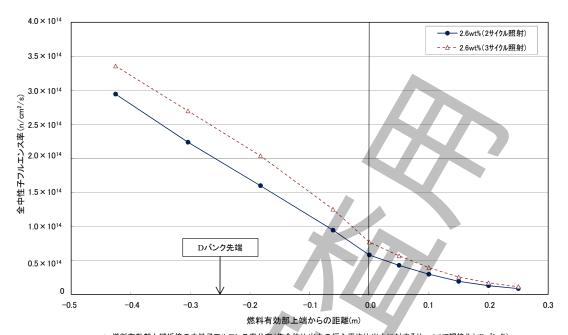


図 F.6-燃料有効部上端近傍の全中性子フルエンス率分布 (50 万 kW 級の PWR プラント)



c) 燃料有効部上端近傍の中性子フルエンス率分布(集合体比出力の炉心平均比出力に対する比=1.0で規格化)(Dパンク)

図 F.7-燃料有効部上端近傍の全中性子フルエンス率分布 (50万 kW 級の PWR プラント)

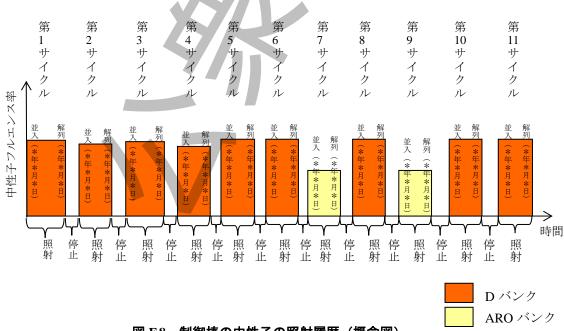


図 F.8─制御棒の中性子の照射履歴 (概念図)

F.3 GCR 黑鉛減速材

F.3.1 概要

理論計算法を用いた放射化計算結果について、GCR の黒鉛減速材の例を、次に示す。

GCR の黒鉛減速材の放射化計算は、**図 F.9** のフロー図に示す手順で実施した。黒鉛減速材における中性子フルエンス率は、装荷位置によって異なるが、黒鉛減速材は、全照射期間を通して同一位置に装荷されていることから、当該位置での代表的な値を設定した。また、放射化計算コードには、ORIGEN2を用いた。

なお、放射化計算の結果については、原子炉内の黒鉛減速材から採取した試料の核種分析を実施し、評価精度の検証を実施している。精度検証の評価対象核種は、¹⁴Cとした。

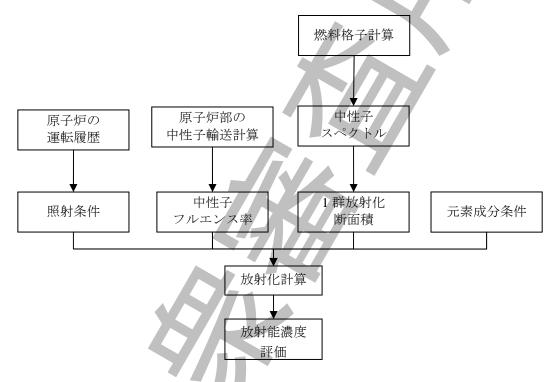


図 F.9-黒鉛減速材の放射化計算フロー図

F.3.2 黒鉛減速材の分析

- a) 対象試料 核種分析を行った黒鉛減速材の分析試料は、GCR にて全運転期間を通して照射 されたものである。また、核種分析は、原子炉内の図 F.10 に示す位置から採取された試料 について実施した。
- **b) 測定** 分析対象核種である 14 C について、採取した黒鉛減速材の分析試料を粉砕し、燃焼させて炭酸ガス化した後、液体シンチレーション計測器を用いて 14 C の β 線を測定した。

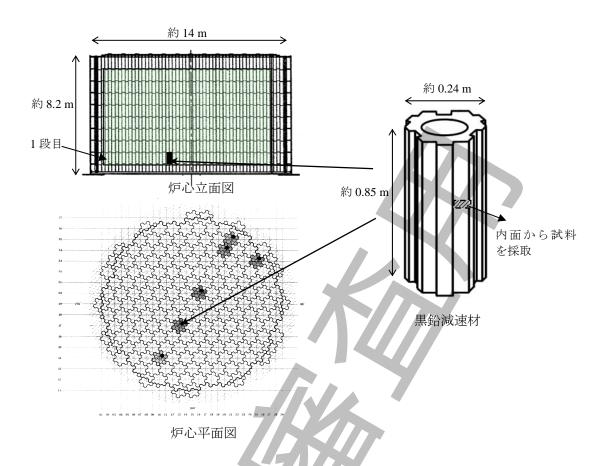


図 F.10-黒鉛減速材及び分析試料採取概念図

F.3.3 放射化計算

理論計算値法を用いて放射化計算を実施した。放射化計算の条件は、次のとおり設定し、計算 条件を表 F.3 にまとめた。

- a) 元素成分条件 ¹⁴C の生成に係わる起源元素は、主に N 及び C である。黒鉛減速材の未照射 保管試料の複数の測定データを平均することによって、N の元素成分条件を設定した。また、 C の元素成分条件については、黒鉛減速材の主成分元素であるため、分析した微量元素成分 を除いた全ての割合を放射能濃度評価結果が大きくなるように割り当てた。
- b) 中性子条件 中性子フルエンス率及び放射化断面積の設定手順を次に示す。
 - 1) **中性子フルエンス率** 減速材領域の 2 次元中性子輸送計算によって求めた試料採取位置での中性子フルエンス率を設定した。
 - 2) **放射化断面積** 燃料要素と黒鉛減速材とを含む格子計算を実施して求めた減速材部での中性子スペクトルを用いて ORIGEN2 用の 1 群放射化断面積を設定した。なお, 14 C の生成に関わる主な核反応は, 14 N(n,p) 14 C 及び 13 C(n, γ) 14 C である。
- c) 照射条件 黒鉛減速材は、全運転期間にわたり原子炉内の同一位置に装荷されているため、 照射履歴としては、表 F.4 の原子炉の全運転期間の運転履歴を用いた。

表 F.3-放射化計算の計算条件

条件	計算条件	備考
元素成分条件	N 濃度:質量分率 4.3×10 ⁻³ %	
	C 濃度:質量分率 1.0×10 ² %	
中性子フルエ	黒鉛減速材の中性子照射位置での中性	中性子フルエンス率は,二次元輸送計
ンス率	子フルエンス率とした(図 F.11 参照)。	算コード DOT3.5 によって求めた。
及び	減速材は、全運転期間にわたり原子炉	
照射条件	内の同一位置に装荷されているため,	
	中性子照射条件は,原子炉の運転履歴	
	とした。	
放射化断面積	JENDL-3 ^{a)} に基づき,黒鉛減速材部での	黒鉛減速材部での中性子スペクトル
	中性子スペクトル(図 F.12 参照)を用	は、WIMS コード ^{b)} による格子計算に
	いて1群放射化断面積を作成した。	よって求めた。
計算コード	ORIGEN2 コード	ORIGEN2 は、公開コードであり、許
		認可ではキャスク及び高燃焼度化に
		おける使用済燃料の線源強度計算で
	,	実績がある。
‡ a) IFNDL-3	け 日本で盟発している日本の煙淮として利用	Hできス評価済核データライブラリである

注 a) JENDL-3 は、日本で開発している日本の標準として利用できる評価済核データライブラリである。
b) WIMS コードは、英国で開発されている原子燃料などの群定数を作成する格子計算コードである。

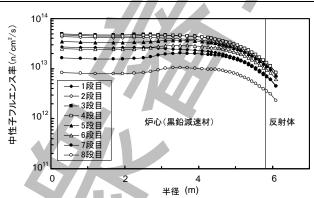


図 F.11 黒鉛減速材の中性子フルエンス率

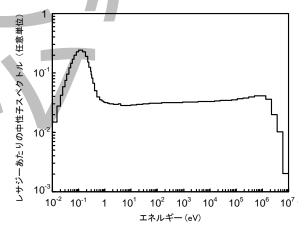


図 F.12 黒鉛減速材部での中性子スペクトル

表 F.4-GCR の運転履歴

運転区分	運転期間	運転日数	停止日数
里 料 区 刀	建 构 别 间	(目) a)	(目) b)
1	昭和 40 年 5 月 4 日~昭和 41 年 7 月 24 日	125	0
2	昭和 41 年 7 月 25 日~昭和 41 年 8 月 1 日	8	1
3	昭和41年8月3日~昭和41年9月8日	37	3
4	昭和 41 年 9 月 12 日~昭和 41 年 10 月 29 日	48	40
5	昭和 41 年 12 月 9 日 ~ 昭和 42 年 2 月 23 日	77	3
6	昭和 42 年 2 月 27 日~昭和 42 年 3 月 10 日	12	23
7	昭和 42 年 4 月 3 目~昭和 42 年 4 月 18 日	16	71
8	昭和 42 年 6 月 29 日~昭和 42 年 11 月 7 日	132	2
9	昭和 42 年 11 月 10 日~昭和 42 年 11 月 18 日	9	7
10	昭和 42 年 11 月 26 日~昭和 42 年 12 月 28 日	33	95
11	昭和43年4月2日~昭和43年9月16日	168	63
12	昭和 43 年 11 月 19 日~昭和 44 年 4 月 26 日	159	96
13	昭和 44 年 8 月 1 日~昭和 44 年 10 月 9 日	70	5
14	昭和 44 年 10 月 15 日~昭和 45 年 3 月 15 日	152	85
15	昭和 45 年 6 月 9 日~昭和 46 年 3 月 31 目	296	0
16	昭和 46 年 4 月 1 日~昭和 46 年 4 月 4 日	4	41
17	昭和 46 年 5 月 16 日~昭和 46 年 7 月 3 目	49	1
18	昭和46年7月5日~昭和46年9月23日	81	2
19	昭和 46 年 9 月 26 日~昭和 47 年 5 月 23 日	241	40
20	昭和47年7月3日~昭和47年8月19日	48	5
21	昭和47年8月25日~昭和47年10月15日	52	1
22	昭和 47 年 10 月 17 日~昭和 48 年 6 月 18 日	245	41
23	昭和 48 年 7 月 30 日~昭和 49 年 8 月 30 日	397	42
24	昭和49年10月12日~昭和49年12月5日	55	8
25	昭和49年12月14日~昭和50年9月12日	273	42
26	昭和 50 年 10 月 25 日~昭和 51 年 10 月 2 日	344	43
27	昭和 51 年 11 月 15 日~昭和 52 年 10 月 1 日	321	57
28	昭和 52 年 11 月 28 日~昭和 53 年 10 月 4 日	311	47
29	昭和 53 年 11 月 21 日~昭和 54 年 5 月 23 日	184	48
30	昭和54年7月11日~昭和55年2月3日	208	1
31	昭和55年2月5日~昭和55年3月2日	27	48
32	昭和 55 年 4 月 20 日~昭和 56 年 2 月 15 日	302	45
33	昭和56年4月2日~昭和57年3月10日	343	72
34	昭和 57 年 5 月 22 日~昭和 57 年 12 月 12 日	205	7
35	昭和 57 年 12 月 20 日~昭和 58 年 5 月 27 日	159	57
36	昭和 58 年 7 月 24 日~昭和 59 年 5 月 2 日	284	69
37	昭和59年7月11日~昭和59年9月22日	74	9
38	昭和59年10月2日~昭和60年5月21日	232	67
39	昭和60年7月28日~昭和60年8月9日	13	12
40	昭和 60 年 8 月 22 日~昭和 61 年 8 月 16 日	360	48
41	昭和 61 年 10 月 4 日~昭和 61 年 10 月 10 日	7	22
42	昭和 61 年 11 月 2 日~昭和 61 年 11 月 25 日	24	5
43	昭和61年12月1日~昭和62年4月3日	124	5
44	昭和62年4月9日~昭和62年9月26日	171	117
45	昭和 63 年 1 月 22 日~昭和 63 年 7 月 1 日	162	6
46	昭和 63 年 7 月 8 日 ~ 昭和 63 年 12 月 20 日	166	222
47	平成1年7月31日~平成2年2月4日	189	5
48	平成2年2月10日~平成2年9月8日	211	62
49	平成2年11月10日~平成3年3月26日	137	8
50	平成3年4月4日~平成3年5月10日	37	20
51	平成3年5月31日~平成3年3月16日	171	64
52	平成4年1月21日~平成4年9月26日	250	1
53	平成4年1月21日 平成4年9月26日 平成4年9月28日 平成4年9月28日 平成5年3月1日	155	456
54	平成4年9月28日~平成3年3月1日 平成6年6月1日~平成6年7月8日	38	3
55	平成6年6月1日~平成6年7月8日 平成6年7月12日~平成7年8月28日	413	52
	平成 6 年 7 月 12 日~平成 7 年 8 月 28 日 平成 7 年 10 月 20 日~平成 7 年 10 月 24 日		
56 57		5	42 52
	平成7年12月6日~平成9年1月9日	401	52

b) 次の運転期間までの停止日数を示す。

F.3.4 核種分析値と放射化計算結果との比較

黒鉛減速材の核種分析値と放射化計算結果との比較を行った結果,中性子条件(中性子フルエンス率及び放射化断面積)及び照射条件を詳細に設定した放射化計算において,核種分析値及び放射化計算結果は,次のとおり[3]。

放射性核種	核種分析値 ^{a)}	放射化計算結果
	(Bq/t)	(Bq/t)
¹⁴ C	7.2×10^{10}	7.4×10^{10}

注 ^{a)} 核種分析値の計数値の統計変動(計数誤差)は、"±0.2%"であった。

参考文献

- [1] 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
- [2] 2009 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Proceedings of ICAPP '09 Tokyo, Japan, May 10-14, 2009, "STUDY ON THE IMPROVED EVALUATION OF RADIOACTIVITY OF ACTIVATED CONTROL RODS IN PWR"
- [3] 中野正明,見上寿,市毛秀明,塚田真一,"理論計算法を利用した余裕深度処分対象廃棄物の放射能濃度評価手法 -複数の計算結果から決定する場合の考え方-",日本原子力学会 2010 年春の年会,予稿集,水戸,2010 年 3 月 26 日~28 日

附属書 G (参考)

放射化計算の入力条件の設定例

この附属書は、標準本体及び**附属書 D** の理解のために、理論計算法の基本的な放射化計算の入力条件である元素成分条件、中性子条件などの設定の例について示す。

G.1 元素成分条件の設定例

G.1.1 起源元素の選定例

G.1.1.1 概要

放射化計算の入力条件の設定のうち、起源元素に関して、評価対象とする放射化金属等の種類(材料)ごとに選定する方法の一例を、**図 G.1** に示す。また、起源元素の具体的な選定例として、**図 G.1** に示す方法に基づき起源元素の選定を行い、実際の放射化金属の構成材料を想定した起源元素を選定した結果を、**図 G.2** 及び次に示す。

G.1.1.2 起源元素の選定の前提条件

- a) 評価対象とする放射化金属等の想定 評価対象とする放射化金属等には、原子炉から発生する代表的な中深度処分対象廃棄物の主材料として、表 G.1 に示す材料 (ZrTN804D:チャンネルボックスの本体、SUS304:PWR 制御棒の被覆管)を選定した
- b) 評価対象核種の想定 評価対象核種は、本来は、中深度処分対象廃棄物の埋設処分施設の埋設事業許可申請書等に記載された放射性核種に従って評価する。ここでは、表 G.2 に示す"政令記載核種"及び浅地中ピット処分対象廃棄物の"申請核種"を参考に、腐食生成核種、核分裂生成核種などの代表例として、次の放射性核種を評価対象核種として想定した。

 14 C, 36 Cl, 60 Co, 63 Ni, 90 Sr, 94 Nb, 99 Tc, 129 I, 137 Cs, $\triangleq \alpha^{1)}$

注 1) α線を放出する全ての放射性物質

- c) **起源元素の選定の考え方** 評価対象とする放射化金属等の種類(材料)ごとに, **6.1.2.2.1** に示した次の考え方を踏まえ, 選定する。
 - 最初の起源元素は、不純物、又は微量元素として存在していると考えられる元素 とともに、評価する材料の化学組成から選定する。
 - 評価対象核種(評価対象核種と相関させる Key 核種を含む)を生成する元素は、 起源元素として抽出する。

なお,抽出した起源元素は,次のステップ(全て又はいずれか)によって,対象からスクリーニングすることができる。

- 放射性同位体は、起源元素から除外できる。ただし、天然に広く存在し、種々の 放射性核種の起源元素となる Th 及び U は、除外しない。(以下、一次スクリーニ ングという。)

- 評価対象核種を生成しない元素は、起源元素から除外できる。(以下、二次スクリーニングという。)
- 材料の精錬時などに揮散する可能性が高いと判断できる元素は、起源元素から除外できる。ただし、対象物の範囲及び評価によっては、完全に除去されず、放射化計算に考慮した方が良い元素もある。(以下、三次スクリーニングという。)
- 評価対象核種の総生成放射能に対する寄与が小さい元素は、起源元素から除外できる。(以下、四次スクリーニングという。)

G.1.1.3 起源元素の選定手順

a) 一次スクリーニング(材料共通) 全103元素のうち、天然に広く存在し、種々の核種の起源元素となるTh及びUを除く、次の21の放射性同位体については、放射化計算における最初の起源元素ではないとして、起源元素から除外した。

Tc, Pm, Bi, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac, Pa, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr

b) 二次スクリーニング(材料共通) 一次スクリーニングで残された 82 元素について, それぞれ放射化計算を実施した結果によって,評価対象核種の生成の有無を確認し (表 G.3 参照),次の 47 元素は,評価対象核種を生成しない元素として起源元素から 除外した。

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

- c) **三次スクリーニング(材料別)** 二次スクリーニングで残された 35 元素 (**表 G.4** 参照 ^[1]) について、ZrTN804D 及び SUS304 において、次の観点で、各元素が材料の精錬時などに揮散する可能性を評価した。
 - 1) 精錬時にスラグとして除去/
 - 2) 低沸点による揮発 (精錬時に除去)
 - 3) 希ガス
 - 4) 希少元素
 - 5) 精錬時の還元性雰囲気による除去
 - 6) 用途が限定されている元素

この結果, **表 G.5** に示すとおり, ZrTN804D は 15 種類, SUS304 は 16 種類の元素を, 各材料に混入する可能性の低い元素として起源元素から除外した。

なお、上記は、金属に対する場合を示したが、評価対象とする放射化金属等の材料がコンクリートの場合、製造過程において高炉などによる高温度の精錬は、行われないため、基本的には、上記のうち 2) (対象は低沸点元素だけ)、3)、4) 及び 6) の適用が想定される。

- d) 四次スクリーニング(材料別) 三次スクリーニング後に残された元素(ZrTN804D は 20 元素, SUS304 は 19 元素) について, 次に示す手順によって, 各起源元素から 生成した放射能濃度の比(生成比)の評価を行い, 評価対象核種の総生成放射能に対 する寄与率の評価を行った。
 - 1) 分析データ (放射化計算の条件を設定するために事業者が評価対象とする放射化金属等 (材料) 中の元素分析を実施した結果^[2]) 及び文献データ^{[3]~[28]}を利用して,各元素の推定存在濃度レベル (オーダー) を評価した (**表** G.6 参照)。
 - 2) 各元素の推定存在濃度レベル (**表 G.6** 参照) 及び **b**)の二次スクリーニングで実施した放射化計算結果 (**表 G.3** 参照) を利用して,評価対象核種ごとに各起源元素の総生成放射能に対する寄与率を生成比として評価した (**表 G.7** 及び**表 G.8** 参照)。
 - 3) 生成比の評価結果に基づき,生成比 0.01 %未満の元素をスクリーニング対象(評価対象元素から除外)とした。

なお、生成比のスクリーニングの判断指標は、放射化計算結果の放射能濃度又は 濃度比の最終的な値の有効数字が 2 桁(3 桁目を切り上げ)であると想定し、これ に推定存在濃度レベル評価の不確定性を考慮(1 桁を想定)し、生成比 0.01 %未満 (有効数字 5 桁以下に影響)とした。

G.1.1.4 起源元素の選定結果

G.1.1.3 に示した第一次から第四次までのスクリーニング後に残った次の元素を,起源元素とした。

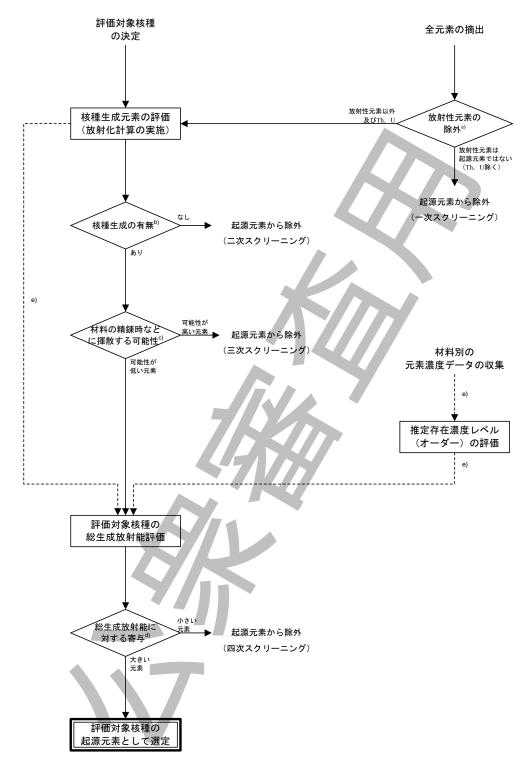
ZrTN804D : N, O, S, Cl, K, Fe, Co, Ni, Cu, Zr, Nb, Mo, Th, U

(ジルカロイ4) (14元素)

SUS304 ; N, S, Cl, K, Fe, Co, Ni, Cu, Zr, Nb, Mo, Th, U

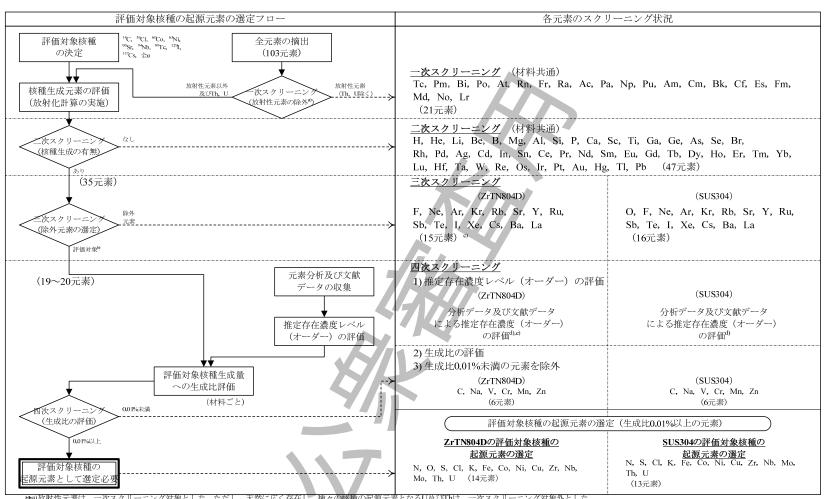
(13 元素)





- 注 か 放射性元素は、起源元素から除外できる。ただし、天然に広く存在し、種々の核種の起源元素となる ${
 m Th}$ ${
 m L}{
 m Th}$ ${
 m L}{
 m Th}$ ${
 m L}{
 m Th}$
 - b) 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。
 - $^{\mathrm{c})}$ 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。
 - ^{d)} 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。
 - e) 評価対象核種の総生成放射能に対する寄与の程度を評価する方法。

図 G.1―起源元素の選定フロー(一例)



注の放射性元素は、一次スクリーニング対象とした。ただし、天然に広く存在し、種々の核種の起源元素となるU及びThは、一次スクリーニング対象外とした。

図 G.2 一放射化計算の条件設定のための起源元素の選定例 (ZrTN804D 及び SUS304)

⁻り材料の仕様・製造上で添加している元素は、評価対象とする。

[°]ZrTN804Dの元素のうち、O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対象外)とした。

⁶⁾分析データは、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²³を、文献データは、一般公開文献情報¹³¹⁻¹²⁸を意味する。

^{e)}ZrTN804DのNa、Znについては、分析データ、文献データによる推定存在濃度の評価が困難であったため、地殻存在割合^[29]を利用した。

表 G.1—起源元素の選定例のために評価対象とする放射化金属等の想定

選定した中深度処分対象廃棄物	評価対象とする放射化金属等の材料	
BWR のチャンネルボックス	ZrTN804D	
(本体を想定)	(ジルカロイ-4)	
PWR の制御棒	SHS204	
(被覆管を想定)	SUS304	

表 G.2—中深度処分及び浅地中ピット処分の評価対象核種の例

24 OIZ 1 MAI	~~,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	IM 3.1 304 IV IX 52 13.1	
中深度処分	浅地中ピット処分		
政令記載核種 a)	規則記載核種 b)	申請核種例 c)	
¹⁴ C	¹⁴ C	³ H	
³⁶ Cl	⁶⁰ Co	¹⁴ C	
⁹⁹ Tc	⁶³ Ni	⁶⁰ Co	
$^{129}{ m I}$	⁹⁰ Sr	⁵⁹ Ni	
α核種 ^{d)}	⁹⁹ Tc	⁶³ Ni	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	
	α核種 e)	⁹⁴ Nb	
		⁹⁹ Tc	
		$^{129}\mathrm{I}$	
		¹³⁷ Cs	
		全 α ^{f)}	

- **注**^{a)} 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 第三十一条の表に放射能濃度が 記載されている核種。
 - b) 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 一条の二第2項第四号(別表第一)に放射能濃度が記載されている核種。

 - $^{d)}$ α 線を放出する放射性物質。"低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について"(原子力安全委員会,2007 年 5 月 21 日)では, 238 Pu が代表核種として記載されている。
 - e) α 線を放出する放射性物質。"低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について"(原子力安全委員会,2007年5月21日)では、 ^{241}Am が代表核種として記載されている。
 - ^{f)} α線を放出する放射性物質。六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター廃棄物埋設事業変更許可申請書の廃棄体中の放射性物質の濃度(添付書類六)では、全αとして記載されている。

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)

起源元素						並供外免核種					単位:Bq
	.,	26	- (0		00	評価対象核種		120	127	227	
(1次SL ^{a)} 後)	¹⁴ C	³⁶ Cl	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	90Sr	94Nb	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	¹³⁷ Cs	²³⁷ Np	全α
Н	_	_	_	_	_	_	_	_	_		_
He	_	_	_	_	_	_	_	_	_		_
	_	_		_			_	_		_	_
Li		_	_			_			_		
Be	_		_	_			_	_	_	_	_
В	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
C	1.00 ×10 5	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
N	1.04 ×10 ¹⁰	_	_	_	_	_	-		_	_	_
0	5.51 ×10 ⁵										
		_	_	_	_	_	_		_	_	_
F	3.61 ×10 ²	_	_	_		_	_	-		_	_
Ne	1.36 ×10 ⁶	_	_	_	_		_			_	_
Na	4.91 ×10 ¹	_	_	_	_	_	_	4	-	-	_
Mg	_	_	_	_	_	_	_				_
Al	_	_	_	_	_	_	_	4 7		-	_
Si	_	_	_	_	_	_					_
P	_	-	_	_	-	_	_	_	-		_
S	_	1.90 ×10 ⁵	_	_	ı	-		7		_	_
Cl	_	5.99 ×10 8	_	_	_	_	_			_	_
Ar	_	2.64 ×10 ⁴	_	_	1	_	_	_	7 -	_	_
K	_	4.88 ×10 ⁶	_	_	_	_	_		7 -		_
		4.88 ^10									
Ca		_							_		_
Sc	_	_	-	_	-	-	_	_		_	_
Ti	_	_	_	_	I	-	_	_	_	_	_
V	_	_	1.13 ×10 °	_	_	_	7 -4	_		_	_
Cr	<u> </u>	_	4.57 ×10 ³	_	_	4		_	_	_	_
	_	_	5.97 ×10 ⁷	9.45 ×10 ¹						_	_
Mn							</td <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>				
Fe	_	_	2.14 ×10 ⁹	2.34 ×10 ⁴	_	- /			_	_	_
Co	_	_	4.87 ×10 12	5.29 ×10 8	_				7 -	_	_
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	-			<i>F</i>	_		
Ga	_	_	_	_	_	_			_	_	_
Ge	_	_	_	_	_		-	7 47	_	_	_
As	_	_	_	_	-	-			_	_	_
Se	_	_	_	_	- /	_	_	7-	_	_	_
Br	_	_	_				_				
					251 120		_	_			
Kr	_	_	_	_	2.51 ×10 °		_	_	_	_	_
Rb	_	_	_	_	5.14×10^{-3}		_	_	_	_	_
Sr	_	_	_	_	5.98 ×10 ⁻⁵	- /	_	_	_	_	_
Y	_	_	_	_	1.34 ×10 ⁴			_		_	_
Zr	_	_	_	_	2.41 ×10 ⁴	8.64 ×10 °	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	<u> </u>	-	_	_	_
Rh	_	_	_		-		-	_	_	_	_
Pd		_	_	_					_	t	_
Ag	_	_	_			-	_	_	_	_	_
Cd	_	_	_		_	-	· –	_	_	_	_
In	_	_	_		_	_	_	_	_	_	_
Sn	_	_	_			_	_	_	_	_	_
Sb	_	_	/		7 3	. –	_	_	3.25 ×10 ⁻¹		_
			- 4			<u></u>					
Te	_	_					_	3.49 ×10 ⁴	3.84 ×10 ⁴		_
I	_	_	-		-	_	_	4.80 ×10 ³	6.60 ×10 ⁴		_
Xe	_	_				ı	_		1.94 ×10 9	_	_
Cs	_	_	-			_	_	_	6.16 ×10 8	_	_
Ba	_	_			-	_	_	_	1.71 ×10 ⁵	_	_
La	_	_	-	7 .		_	_	_	9.66 ×10 ²		_
									9.00 ×10		
Ce	_	_	- 4			_	_			_	_
Pr	_	_			-	_					_
Nd	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Sm	_	_			_	_	_	_	_	_	_
Eu	_	-	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	_			_		_	_	_	_	_	_
Gd								_		_	
Tb	_	_	_			_					-
Dy	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Но	_			_	_	_	_	_	_	_	_
Er	_	- ·	_	-	_	_	_	_	_	_	_
			_	-							
Tm	_				_	_	_	_	_	_	_
Yb	_	_		_	_	_	_	_	_	_	_
Lu	_	-		_	I	ı	_	_	_	_	_
Hf	_	-	7		_	_	_	_	_	_	_
Ta	_	- 5	- V	7 –	_	_	_	_	_	_	_
					_	_				_	
W				7					_		
Re	_	_	-	_	_	_	_	_	_	_	_
Os	_	_	_	_	I	-	_	_	_	_	_
Ir	_	_	_	_	1	_	_	_	_	_	_
Pt	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Au	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Hg	_	_	-	_	_	_	_				_
Tl	_	_	-	-	_	_	-	_	-	_	_
Pb	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Th	_	_	_	_	5.77 ×10 ¹⁰	_	1.88 ×10 ⁶	2.04 ×10 ⁴	5.77 ×10 ¹⁰		1.10 ×10 ⁹
		_			0.77 ^10	_		2.04 ^10	2.77 ^10		1.10 ^10
U					9.35 ×10 ⁹		1.27 ×10 ⁶			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 1

表 G.4―一次・二次スクリーニングで摘出された元素例(三次スクリーニング以降の評価対象元素)

																		(参考:	元素周期表[1])
		1	2	2	4	5	6	7	8	Q	族 10	11	12	12	11/	15	16	17	18
		1 H)	4		6	/	0)	10		12	13	14	13	10	1 /	2 He
	1	<u> </u>				(凡例)													<u></u> ヘリウム
		1.008		_	原子番号	1 <u>H</u>	元素記号の書	式は,単下線:	常温で気体,	二重下線:常沿	温で液体,下線	なし:常温で気	(体を表す						4.003
		3 Li	4 Be		元素名	<u>水素</u>	元素名の書式	は,下線:非金	:属, 下線なし:	金属 を表す			X	5 B	6 C	7 <u>N</u>	8 <u>O</u>	9 <u>F</u>	10 <u>Ne</u>
	2	リチウム	ヘーリリウム		原子量		】 , 同位体の天然	火左左 比が一つ	さしかい元素/	け代表的か同	位体の質量数	をカッコ内に	7 7-1-	<u>ホウ素</u>	<u>炭素</u>	<u>窒素</u>	酸素	<u>フッ素</u>	<u>ネオン</u>
		6.941 11 Na	9.012 12 Mg		女	四世中かったく	, MILHOX	WILTERN Y	E C/4 V /Lisk i	141 (4XH)/4 H)	匹件少員重数	2272110	3,7	10.81 13 Al	12.01 14 Si	14.01 15 P	16.00 16 S	19.00	20.18 18 Ar
	3		マク・ネシウム											アルミニウム		リン	10 B	17 <u>Cl</u> 塩素	1。 <u>AT</u> アルコン
	3	22.99	24.31										1	26.98	28.09	30.97	32.07	35.45	39.95
læl		19 K	²⁰ Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 <u>Br</u>	36 <u>Kr</u>
周期	4	カリウム		スカンシ・ウム		バナジウム	クロム	マンガン	鉄	コハルト	ニッケル	銅	亜鉛	カリウム	ケ・ルマニウム		<u>セレン</u>	臭素	<u> クリプトン</u>
		39.1	40.08	44.96	47.88	50.94	52	54.94	55.85	58.93	58.69	63.55	65.39	69.72	72.61	74.92	78.95	79.9	83.8
	5	37 Rb	³⁸ Sr ストロンチウム	39 Y るいよりけん	40 Zr シブルコニウム	41 Nb ニオフ'	42 Mo モリフ・テン		44 Ru ルテニウム	45 Rh ロシウム	46 Pd パラシウム	47 Ag 銀	48 Cd カト・ミウム	49 In インシ'ウム	50 Sn	51 Sb アンチモン	52 Te テルル	53 I ヨウ素	54 <u>Xe</u> キセノン
	3	85.47	87.62	88.91	91.22	92.91	95.94	/クイ/ソム	101.1	102.9	106.4	107.9	112.4	114.8	118.7	121.8	127.6	126.9	131.3
		55 Cs	56 Ba	57~71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
	6	セシウム	ハ゛リウム	∇	ハフニウム	タンタル	タングステン	レニウム	オスミウム	イリシ'ウム	白金	金	水銀	タリウム	鉛	ピスマス	ホ°ロニウム	アスタチン	<u>ラト'ン</u>
		132.9		ランタノイト	178.5	180.9	183.8	186.2	190.2	192.2	195.1	197.0	200.6	204.4	207.2	209.0	(210)	(210)	(222)
	_	87 Fr	88 Ra	89~103															
	7	フランシウム (223)	ラシ [*] ウム (226)	▼ アクチノイト															
		(223)	(220)	57~71	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 D v	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
				∇	ランタン	セリウム	プラセオシ゚ム	ネオシ・ム	プロメチウム	サマリウム		カトリニウム	テルヒ・ウム	シ゚スプロシウム	ホルミウム	エルヒ・ウム	ツリウム	イッテルヒ'ウム	ルテチウム
				ランタノイト	138.9	140.1	140.9	144.2	(145)	150.4	152.0	157.3	158.9	162.5	164.9	167.3	168.9	173.0	175.0
				89~103	89 Ac			92 U	93 Np			96 Cm			99 Es				
				▼ アクチノイト	アクチニウム (227)	トリウム 232.0	プロトアクチニウム 231.0	ウラン 238.0	ネプ°ツニウム (237)	フェルトニウム (239)	アメリシウム	キュリウム (247)		カリホルニウム (252)	アインスタイニウム (252)	フェルミウム (257)	メンテ'レヒ'ウム (256)	/-^'J7A (259)	ローレンシウム
				797741	(221)	232.0	231.0	238.0	(251)	(239)	(243)	(247)	(247)	(232)	(232)	(251)	(250)	(239)	(260)
					1										1				
					一次スクリーニ	ニング対象				二次スクリーニ	ニング対象				二次スクリーニ	ニング後に摘出	された元素		

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)

	24 0.5			REDI (ZIII1004D, DC)		
	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
三次 スクリーニンク゛ 対象元素	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 2 000℃近 くとなることを考慮する と, 飢渇する可能性が高 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。	して金属に混入する可能	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)	_	_	_	/74/7	0	_
F	_	_	_		_	(フッ素コーティング)
Ne	_	_	0		_	_
Ar	_	_	0		_	_
Kr	_	_	0		_	_
Rb	_	○ (696℃)	-	_	_	(ルビジウム原子時計)
Sr	0	○ (1 639℃)	- 5/\$/	/	_	_
Y	0	_		_	_	_
Ru	_	_	-	0	_	(水素化触媒)
Sb	0	○ (1 640°C)	\ \\ -\/1\	_	_	_
Те	0	○ (1 390℃)		_	_	_
I	_	_	7/4	_	_	(抗菌処理)
Xe	_	- 1	0	_	_	_
Cs	0	○ (760°C)	17	_	_	_
Ва	0	○ (1 537℃)	_	_	_	_
La	0		_			

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、O 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></zrtn804d>									
	∆±5	データ ^{a)}		データ ^{b)}	成分管理目標値	***				
元素		平均値		平均値	(質量分率%)	推定存在濃度 レベル				
7671	データ数	(質量分率%)	データ数	(質量分率%)	(JIS H 4751 ^[3])	(質量分率%)				
С	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				
О	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)	<u> </u>	1 (0)	3.5 ×10 ⁻³	7	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	7	1.0 ×10 ⁻³				
Cr	0 (0)		18 (0)	1.1 ×10 ⁻¹	$0.07 \sim 0.13$	1.0 ×10 ⁻¹				
Mn	0 (0)	2.1 ×10 ⁻¹	5 (1)	1.0 ×10 ⁻³ 2.1 ×10 ⁻¹	≦ 0.005	1.0 ×10 ⁻³ 1.0 ×10 ⁻¹				
Fe	5 (0)	2.1 ×10 ⁻¹ (7.6 ×10 ⁻⁴)	18 (0)	2.1 ×10 ⁻¹ 4.7 ×10 ⁻⁴	$0.18 \sim 0.24$ ≤ 0.002	5.0 ×10 ⁻⁴				
Co Ni	0 (21)	$\frac{(7.6 \times 10^{-3})}{4.2 \times 10^{-3}}$	5 (0)	$\frac{4.7 \times 10^{-4}}{3.5 \times 10^{-3}}$		5.0 ×10 -3				
Cu	0 (0)	4.2 ^10	3 (1)	1.7 ×10 ⁻³	≦ 0.007 ≦ 0.005	1.0 ×10 ⁻³				
Zn	0 (0)	_	0 (0)	-	- 0.003	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)	-	7	1.0 ×10 ⁻⁵				
U	1 (20)	(8.1 ×10 ⁻⁵)	2 (0)	3.5 ×10 ⁻⁵	≦ 3.5E-04	5.0 ×10 ⁻⁵				
			S	US304						
	分析	データ ^{a)}	文献	データ ^{b)}	成分管理目標値	推定存在濃度				
元素	データ数	平均値	データ数	平均値	(質量分率%)	レベル				
	ノーク奴	(質量分率%)) 奴	(質量分率%)	(JIS G 4305 ^[4])	(質量分率%)				
С	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 K	0 (9)	(7.3 ×10 ⁻⁴)	1 (0)	7.0×10^{-3} (3.0×10^{-4})	_	1.0 ×10 ⁻³ 1.0 ×10 ⁻⁴				
V	0 (4) 0 (0)	(1.0 ×10)	0 (1)	4.6 ×10 -2	_	5.0 ×10 ⁻²				
Cr	9 (0)	1.8 ×10 ¹	1 (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 °	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) をの推定方左濃度(オー	- ダー) を評価) た 辻里でなる	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。

注配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)。

注配4 存在濃度レベルの推定が困難な元素 ($ZrTN804D_ONa$, Zn)は、地殼存在割合 $C^{[29]}$ 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] b) 文献データ: 一般公開文献情報^{[5]~[28]}

表 G.7—四次スクリーニング評価結果例(生成比の評価による除外)(ZrTN804D の例)

40.755	評価対象核種に対する各起源元素の生成比(%)									
起源元素	¹⁴ C	³⁶ Cl	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Nb	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	¹³⁷ Cs	全α
С	0.001 92 (△)	-	_	_	_	-	-	-	-	_
N	99.892 43 (◎)		_	_	_			_	_	_
О	0.105 55 (◎)	_	-	_	-	-	4	-	_	-
Na	0.000 09 (△)		_		-	1	_	_	_	-
S	-	0.315 68 (③)	_	_	_	_	_	-	-	-
Cl	-	99.522 14 (©)	_	ı	-		_	-	_	-
K	_	0.162 18 (③)	_	_	-		_	-	-	_
V	-	_	3.9 ×10 ⁻¹¹ (△)	_	_	4	_	-	-	_
Cr	_	-	0.000 02 (△)	_	→		_	_	_	-
Mn	-	=	0.002 08 (△)	9.4 ×10 ⁻⁸ (△)		_	-	=	-	-
Fe	_	_	7.448 93 (◎)	0.002 33 (△)		/	_	_	_	_
Co	-	=	84.665 31 (③)	0.263 75 (③)	4 -7-177	_	-	=	-	-
Ni	_	_	7.866 83 (◎)	96.703 82 (③)		_	_	_	_	_
Cu	_	_	0.016 84 (○)	3.027 05 (③)		_	_	-	-	_
Zn	_	-	7.0 ×10 -9 (△)	0.003 06 (△)		_	_	_	_	-
Zr	-	_	_	-	69.35700 (③)	0.042 94 (○)	98.644 23 (◎)	-	-	_
Nb	_	_	_	- * 4	0.00004 (△)	99.956 25 (◎)	0.001 82 (△)	_	_	_
Mo	-	_	_		5.5 ×10 ⁻⁷ (△)	0.000 81 (△)	1.173 01 (③)	-	-	_
Th	_	_	_		16.92316 (③)	_	0.041 38 (○)	32.975 36 (©)	28.850 47 (③)	1.766 28 (③)
U	-	=	_	-	13.71980 (③)	-	0.139 56 (©)	67.024 64 (③)	71.149 53 (©)	98.233 72 (◎)
合計	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00

注記1 生成比は,評価対象核種ごとに,各起源元素0.001kg当たりの生成量 (Bq) (**表**G.3) ×推定存在濃度 (%) (**表**G.6) を算定したものである。

注記2 生成比の右欄(括弧内)は、生成比の程度を、"◎:0.1%以上", "○:0.01%以上", "△:0.01%未満"で示した。

表 G.8—四次スクリーニング評価結果例(生成比の評価による除外)(SUS304 の例)

+1 ME ==				評価対	象核種に対する各	起源元素の生成比	(%)			
起源元素	¹⁴ C	³⁶ Cl	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	90Sr	⁹⁴ Nb	⁹⁹ Te	¹²⁹ I	¹³⁷ Cs	全α
С	0.000 96 (△)	_	=	-	=	-	-	=	=	=
N	99.999 04 (◎)	-	-	-	-	-		_	_	_
Na	9.4 ×10 ⁻⁹ (△)	=	=	=	=	-	-	-	=	_
S	_	0.315 94 (◎)	_	_	_	-	_	_	_	_
Cl	_	99.602 91 (◎)	_	-	-		_	_	_	
K	_	0.081 15 (○)	_	_	-	7	_	_	_	_
V	_	_	5.2 ×10 ⁻¹² (△)	_	-		_	_	_	
Cr	_	_	8.4 ×10 ⁻⁶ (△)	_	-			_	_	_
Mn	-	-	0.005 48 (△)	4.9 ×10 ⁻⁸ (△)	- /X	-	-	-	-	_
Fe	_	_	13.763 45 (©)	0.000 84 (△)	74.3	_	-	_	_	_
Со	_	-	44.696 26 (◎)	0.027 22 (〇)	I FIN	_	-	-	-	_
Ni	_	_	41.530 35 (◎)	99.815 70 (◎)	-	_	-	_	_	_
Cu	_	_	0.004 45 (△)	0.156 22 (◎)	-	_	_	-	-	_
Zn	_	_	9.2 ×10 ⁻¹¹ (△)	7.9 ×10 ⁻⁶ (△)	+	_	ı		_	_
Zr	_	_	_	-	0.179 48 (©)	1.1 ×10 ⁻⁷ (△)	0.000 43 (△)	-	_	_
Nb	_	_	_		0.038 81 (○)	99.959 56 (©)	0.003 10 (△)	_	_	_
Мо	-	_	-		0.028 02 (○)	0.040 44 (○)	99.995 88 (◎)	_	-	_
Th	_	_	_		85.836 03 (◎)	_	0.000 35 (△)	71.097 79 (◎)	66.968 93 (◎)	8.248 61 (③)
U	_	_	_	-	13.917 65 (◎)	_	0.000 24 (△)	28.902 21 (③)	33.031 07 (③)	91.751 39 (◎)
合計	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100,000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00	100.000 00

注記1 生成比は,評価対象核種ごとに,各起源元素0.001kg当たりの生成量 (Bq) (表 G.3) ×推定存在濃度 (%) (表 G.6) を算定したものである。

注記2 生成比の右欄(括弧内)は、生成比の程度を、"◎:0.1%以上", "○:0.01%以上", "△:0.01%未満"で示した。

G.1.2 元素成分条件の設定における考慮事項及び例

G.1.2.1 概要

起源元素の元素成分条件の設定フロー(**図 G.3** を参照)の考え方に基づき、元素成分条件の具体的な設定の例などについて、次に示した。

G.1.2.2 元素成分データの収集例

元素成分データは、評価対象とする放射化金属等の種類、原材料の品質を考慮した上で、評価対象とする放射化金属等を適切又は保守的に代表できる方法で収集することがある。この場合の評価対象とする放射化金属等の代表性の考慮事項としては、評価対象とする放射化金属等の種類、品質、製造工程などがある。

G.1.2.3 元素成分条件の設定例

G.1.2.3.1 元素成分条件の設定方式の選定例

評価対象とする放射化金属等の元素成分条件の設定方式は、収集した元素成分データ及び 放射能濃度決定方法の種類に応じて、次のいずれかが選択できる。

- 評価対象とする放射化金属等の代表的な元素成分データ(元素成分データの平均値など) で設定する方式
- 評価対象とする放射化金属等の元素成分データ群によって濃度分布を設定する方式 評価対象とする放射化金属等の元素成分条件は、**表 G.9** に示すとおり、収集する元素成分 データの種類(代表分析値又は分析データ群)、元素成分条件の設定方式(代表値又は濃度分 布)、及び適用する放射能濃度決定方法の種類に応じて、適切な適用が必要となる。

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。

材料中の各元素は、一般に、材料製造時に成分管理目標値などを定めて調整を行う元素と、成分管理目標値などを定めない元素とに大別できる。ここで、ZrTN804D 及びステンレス鋼の製造工程の例を、それぞれ a)及びに b)に示す。材料製造時に成分管理目標値などを定めて調整を行う元素は、成分管理条件として管理範囲を定める元素及び管理上限を定める元素に区分でき、管理範囲を定める元素には、材料の"主成分"となる元素が、管理上限を定める元素には、"不純物成分"として、材料中への混入を制限する必要のある元素が該当する。

a) ジルカロイチャンネルボックスの製造工程 日本では、図 G.4 に示すジルカロイ製造工程のうち、金属ジルコニウムの精錬は行っておらず、半製品輸入が主体を占めてい

る。通常,ジルカロイの製造用としては,ジルコニウムスポンジを購入して,これを原材料として,溶解工程及び加工工程を経て,ジルコニウム合金(ジルカロイ)が製造される。

なお, ZrTN804D の化学成分の管理目標値を, 表 G.10 及び表 G.11 に示す。

b) ステンレス鋼の製造工程(SUS304:18Cr-8Ni オーステナイト系の例) ステンレス鋼は、図 G.5 に示すとおり、主にニッケル鉱石(Ni:1~3 %の酸化鉱)及びクロム鉱石(Cr:16~50%の酸化鉱)と精製した鉄との合金であるフェロニッケル及びフェロクロムを原料として混合し、溶解炉で製造される(スクラップステンレスも使用される)。このため、Fe 以外の主成分である Ni、Cr については、表 G.12 のような管理目標値を定め、これに合わせるように原料を混合して電気炉で溶解した後、脱ガス設備(AOD:Argon Oxygen Decarburization、VOD: Vacuum Oxygen Decarburization)で炭素を低減させる脱炭・脱ガス処理を行うとともに、目標内に成分を調整して仕上げられる。脱炭・脱ガス処理後の溶鋼は、取鍋に移され、連続鋳造設備に送られる。連続鋳造設備では、溶鋼が空気に触れると酸化物となり、欠陥を生じるため、アルゴン置換、粉状の溶融性耐火パウダーで覆うなどの無酸素鋳造技術で製造される。

このため、表 D.4 では、材料中の元素の種類を、"主成分元素"、"不純物成分元素"及び"微量成分元素(その他の元素)"として区分し、各々の濃度分布基本形状の設定の考え方を示している。また、各元素の濃度分布基本形状は、微量成分元素及び不純物成分元素については、対数正規分布を設定しているが、これは、表 G.13 に示すとおり、一般に、各元素の鉱物、岩石、土壌、堆積物などでの濃度分布は、基本的に低濃度側への偏りを示すこと、かつ、元素濃度が負の値を示さないことを考慮し、この鉱物、岩石、土壌、堆積物などにおける濃度分布が材料中の各元素の濃度分布にも、反映されると考えられる"微量成分元素"及び"不純物成分元素"では、対数正規分布を濃度分布基本形状としたものである。

一方,材料製造時に成分管理目標値などを定め調整する"主成分元素"については、比較的狭い濃度範囲に元素の濃度が限定されるため、管理目標値を中心とした正規分布を濃度分布基本形状としている。また、"主成分元素"の濃度分布基本形状には、分布の上限値のデータが正規分布よりも、多く出現する規格範囲内の一様分布を保守的に適用することもある。

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。

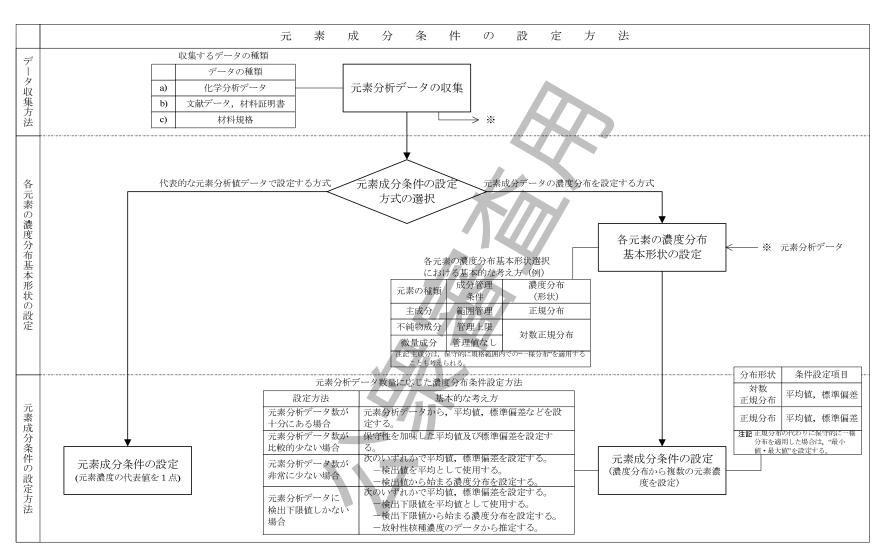


図 G.3—元素成分条件(濃度分布)の設定方法の概念フロー

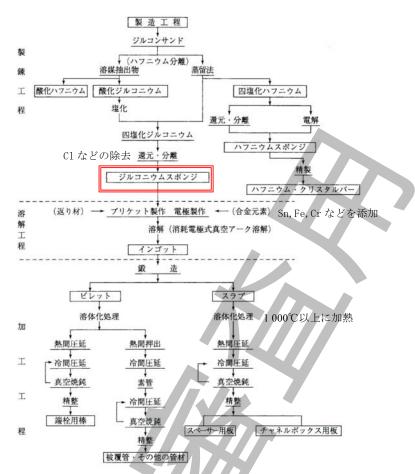


図 G.4—ジルカロイの生産プロセス(原子力用)[30]

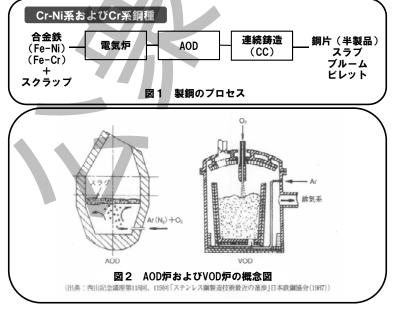


図 G.5—ステンレス鋼の製綱プロセス[31]

表 G.9—元素成分条件の設定方式及び元素成分データの種類の放射能濃度決定方法に対する 組合せの例

		元素质	対分データの種類
		代表分析値	分析データ群
		評価対象とする放射化金属等	評価対象とする放射化金属等ごとの点推
元	代表値 a)	ごとの点推定法 ^{a)} の場合:	定法 a)の場合:
系成公	による設定	同一ロットの品質サンプル	複数の同一種類、品質の元素成分デー
元素成分条件		又は実物の元素分析値。	タの平均値など。
\mathcal{O}		A	濃度比法、換算係数法を用いる場合 ^{c)} ,
設定方式	濃度分布 b)		濃度分布評価法を用いる場合:
式	による設定	- 7/3/	複数の同一種類及び品質の元素成分デ
			一タの濃度分布。

- 注 a) 点推定法による評価対象とする放射化金属等 (廃棄物単一及び単一廃棄物グループ) の放射化計算に使用する元素ごとの濃度の代表値を一つ設定することを意味する。
 - b) 放射化計算を複数実施し,評価対象とする放射化金属等の放射能濃度,又は濃度比の分布を把握するために,評価対象とする放射化金属等の元素濃度分布を実態の範囲を考慮して,元素ごとに複数の濃度(放射化計算の条件)を設定することを意味する。
 - c) 換算係数法を用いる場合は、設定した濃度分布によって各元素の代表値(起源元素ごと)を設定する。



表 G.10—ZrTN804D の化学成分の製造管理目標値(主成分)[3]

元素	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Zr
化学成分 (質量分率%)	1.2~1.7	0.18~0.24	0.07~0.13	0.28~0.37	残部

表 G.11—ZrTN804D の化学成分の製造管理目標値(不純物成分) $^{[3]}$

元素	N	Со	Ni	Cu	Nb	Mo	U
化学成分 (質量分率%)	≦0.008	≤0.002	≦0.007	≤0.005	≦ 0.01	≦ 0.005	≦0.00035

表 G.12—SUS304 の化学成分の製造管理目標値^[4]

				主成分			
元素	С	Si	Si Mn		P S		Cr
化学成分 (質量分率%)	≤0.08	≦ 1.0	≦2.0	≤ 0.045	≦ 0.03	8.0~10.5	18.0~20.0

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	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
[32]	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。
	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。
	b) 濃度は物理的に負の値にはなり得ない。
	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。
	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。
2	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
[33]	ます。実際にある数字を使うのではなくて、それこそとんでもなく高い濃度という
	のはどこで出るかわからないということを考えまして、分布の尻尾に当たる方を非
	常に長くとるような、例えばもしも計算で間違うのであったら、消費者の保護がよ
	り確保できるような方に間違う方がいいということで、対数正規分布というモデル
	化をしております。・・・(中略)・・・もちろん、ほかのいろいろな違う分布をやる
	こともありますが、今、世界では、対数正規分布というのが主に使われております。
3	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
[34]	下,省略)。
4	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
[35]	試料では分析法の確立を図りながら非汚染地域の多数の試料を分析し、約20元素を
	定量し、元素ごとの特徴を明らかにした。すなわち、必須元素は正規分布に、非必
	須元素は対数正規分布になり、これらの中央値又は幾何平均値が環境試料中の元素
	濃度の取扱いに有効であることを示した。
5	河川水中の微量元素の濃度分析
[36]	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。

表 G.13—元素の濃度分布を対数正規分布として扱う例(続き)

	濃度分布を対数正規分布とした例
6	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、
[37]	二項分布に近い分布をするといわれているが、中津河鉱床の探鉱坑道におけるよう
	に、比較的狭い範囲から相当多数の新鮮な試料が得られた場合に限って統計すると、
	ウランは二項分布型、トリウムは対数正規分布型を示す。
7	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
[38]	多量値は平均地殼存在度の付近にあって、鉱石品位領域では Lasky 法則に従うと論
	じた。
8	Geology and mining. In the Earth's crust, the concentration of elements and their
[39]	radioactivity usually follow a log-normal distribution.
	Environment. The distribution of particles, chemicals, and organisms in the environment is
	often log-normal.
9	Frequency distribution plots of K, Rb, Sc, V, Co, Ga, Cr, and Zr in Ontario diabase, Sc, V,
[40]	Ga, Cr, La, and Zr in Canadian granite, K, Rb, and Cs in New England granite and F and Mo
	in granite from various localities are regular, but assume decided positive skewness when
	dispersion is large, hence, distribution of concentration is not normal.
	All distributions become normal, or nearly so, provided the variate (concentration of an
	element) is transformed to log concentration: this leads to a statement of a fundamental
	(lognormal) law concerning the nature of the distribution of the concentration of an element
	in specific igneous rocks.



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。

項	<u> </u>	考慮する必要のある主な事項		
燃料の条件		 濃縮度 a) 燃焼度 a) 燃料の種類 b) 		
評価対象 廃棄物の 位置 [©]	軸方向	評価対象とする放射化金属等自身の軸方向位置 d)評価対象とする放射化金属等の軸方向(上下)の移動 e)		
	径方向	一 評価対象とする放射化金属等自身の径方向位置 d)一 評価対象とする放射化金属等の径方向の移動 g)		
その他		ボイド率 (BWR) ^{f)}ホウ素濃度 (PWR)ディプレッション効果 ^{g)}		

- 注 a) 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。
 - b) 燃料の種類とは、例えば、 UO₂, MOX。
 - c) 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。
 - d) 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化する場合。評価対象とする放射化金属等が原子炉内から原子炉外にわたる場合も該当する。
 - e) 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。
 - f) BWR の場合 (BWR では、炉心部で発生した蒸気 (ボイド) 量が増加するにつれ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。)
 - g) 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は、ディプレッション効果 (中性子フルエンス率分布のゆがみ) 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。

一方、放射化断面積は、基本的に、放射化計算コードに内蔵されている既存の断面積ライブラリを使用すればよいが、中性子フルエンス率・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。ただし、既存の断面積ライブラリを使用する場合には、原子炉型式及び燃料組成が類似していればライブラリ間の差異が放射化計算に与える影響は、基本的に小さいものの、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。断面積ライブラリ(核データ)としては、例えば、日本原子力研究開発機構のJENDL、 米国ブルックへブン国立研究所のENDF/B、文献 $^{[41]}$ がある。

なお、中性子条件は、放射能濃度決定方法に応じ、次のいずれかの設定方法がある。

a) 個別に条件設定する方法 照射履歴に基づき,評価対象とする放射化金属等ごとに,中 性子条件を詳細に設定する方法。

なお,放射化断面積については、中性子スペクトルの代表性を確認した上で、値を設 定することもある。

b) 代表条件を設定する方法 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。

なお、濃度比法の場合及び濃度分布評価法によって決定する場合は、個別の条件の代わりに、複数の評価対象とする放射化金属等を適切に代表する条件範囲を設定することもある。

参考として、評価対象とする放射化金属等の中性子条件の設定例として、BWR チャンネルボックス及び PWR 制御棒に対する中性子フルエンス率・中性子スペクトル条件設定の例を、G.2.2 及び G.2.3 に示す。この評価においては、BWR チャンネルボックス及び PWR 制御棒の照射位置ごとの中性子フルエンス率・中性子スペクトルを評価しているが、実際の放射化計算の条件の設定を目的とした中性子フルエンス率・中性子スペクトルの評価を行う場合には、中性子フルエンス率・中性子スペクトルの計算に利用するコード及び群定数について、利用の目的を十分考慮した上で、適切な手法(信頼性のある計算コード)を適用することがある。

なお、中性子計算は、炉心核的性能計算(単位燃料集合体核特性計算コード、三次元核熱水力解析など)、ボルツマンの中性子輸送方程式を解く手法が主流であり、Sn 法(微分型中性子輸送方程式),モンテカルロ法,直接積分法などが該当する。これらの計算手法に加えて、外挿計算法、アルベド輸送計算法などを、それぞれの特徴に合わせて使用する。また、計算コードとしては、例えば、Sn 法を用いた輸送計算コードに、米国オークリッジ国立研究所の $ANISN^{[42]}$ 、 $DOT^{[43]}$ 、 $TORT^{[44]}$ が、モンテカルロ法を用いた輸送計算コードに、米国ロスアラモス国立研究所の $MCNP^{[45]}$ がある。

G.2.2 BWR チャンネルボックスの中性子条件の設定例

BWR のチャンネルボックスに対する ORIGEN-S の適用を前提とした中性子フルエンス率・中性子スペクトルの設定例は、次による。

なお,原子炉径方向の中性子の漏れを少なくするため,通常,炉心最外周には燃焼の進んだ反応度の低い燃料を装荷するため,原子炉内の中性子フルエンス率・中性子スペクトルについては,軸方向出力分布,ボイド率分布に加え,装荷位置(径方向の分布)も,考慮した条件の設定が必要となる。

a) 設定手順

- 1) 単位燃料集合体核特性計算コードによって、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位置の中性子フルエンス率・中性子スペクトルを算出。
- 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。
- 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位置の中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定。
- b) 評価結果 図 G.6 に、チャンネルボックスの軸方向位置を 1 (炉心下部) から 24 (有効 燃料部上端) に分割し、各位置での炉心中央部及び最外周部の熱中性子フルエンス率の軸方向分布を図 G.7、及び高速中性子フルエンス率及び熱外中性子フルエンス率に対する熱中性子フルエンス率の比を図 G.8 に示す。放射化断面積は、放射化計算コードに内蔵されている値の適用を前提とした。また、その他の中性子条件は、235 U 濃縮度約 4 %、比出力約 24 MW/MtU 及び炉心平均燃焼度約 28 GWd/MtU を計算条件としており、評価結果は、単位燃料集合体核特性計算コードの計算結果を集約したものである。中性子条件については、必要に応じて変動を考慮した。

なお、チャンネルボックスの軸方向の放射能濃度分布が、**図 G.6** に示すチャンネルボックスの軸方向の中性子フルエンス率分布と同様で、炉心外の中性子フルエンス率が**図 G.6** の有効燃料部上端部と同一の値であると仮定すると、有効燃料部上端から上方の放射能濃度は、チャンネルボックス全体の数%程度であるため、放射能評価におけるこの部分の重要性は低い。

c) 中性子条件設定の考え方 b)で評価したチャンネルボックスの径方向位置(最外周,中央など)ごとの中性子フルエンス率の軸方向分布を利用して,適用する放射能濃度決定方法の種類に応じて,個別条件又は代表条件の設定が必要となる。

G.2.3 PWR 制御棒の中性子条件の設定例

PWR 制御棒に対する ORIGEN2 シリーズの適用を前提とした中性子条件の設定例は、次による。

制御棒は、熱中性子に対する極めて強い吸収体であるため、制御棒の近傍及び内部での中性子フルエンス率分布の径方向のゆがみ(ディプレッション効果)が生じる。ディプレッション効果の概念を、**図 G.9** に示す。また、制御棒が照射される燃料有効部上端近傍では、**図 G.10** に示すとおり、中性子フルエンス率分布の軸方向分布の勾配が大きい。

したがって、中性子条件の設定においては、制御棒の位置、中性子フルエンス率・中性子スペクトルの関係を適切に評価する必要がある。さらに、定格出力時には、原子炉内の全制御棒のうち、約15%の先端が炉心に挿入されている状態の制御バンク(Dバンク)、残りが

全引抜き状態のARO (All Rod Out) バンクにて運転されることも、考慮する必要がある。各 バンクの概念図を、図 G.11 に示す。

a) 設定手順

- 1) 燃料有効部の炉心計算データを基に、制御棒の燃料有効部上端付近から上方について、 3次元モンテカルロ輸送計算コード MCNP によって中性子条件を評価(**図 G.11** のモデル) し、代表的な条件の燃料集合体断面平均の全中性子フルエンス率分布及び中性子スペクトルを算出。
- 2) 中性子スペクトルについては、制御棒が炉心挿入状態 (D バンク) の制御棒先端位置、 及び全引抜き状態 (ARO バンク) の制御棒先端位置の 2 条件で代表させ、各条件にお いて代表性が確認された中性子スペクトルを用いて、1 群の放射化断面積を設定。
- 3) 評価対象とする放射化金属等の照射履歴又は炉心管理上整理されている中性子の照 射量(中性子フルエンス率×照射時間)を用いて、中性子フルエンス率及び放射化断 面積を個別設定又は代表値で設定。
- b) 評価結果 制御棒に対する中性子フルエンス率の評価結果を,図 G.12 に示す。ただし,評価結果は,2 ループプラントの代表的な条件における炉心平均軸方向中性子フルエンス率分布を整理したものである。また,ORIGEN2 シリーズでの評価を前提に,放射化計算を実施する場合,放射化断面積については,例えば JENDL3.3 などの核データを基に,MCNPで評価した ARO バンク及び D バンクにおける制御棒先端部の被覆管並びに吸収体の中性子スペクトルで,1 群の実効断面積に縮約することがある。制御棒先端部の中性子スペクトルを,図 G.13 に示す。

なお、制御棒の放射能評価においては、原子炉起動時及び停止時の制御棒挿入状態での照射量は、定格出力時の ARO バンク、D バンクの制御棒が受ける照射量と比べて無視できるほど小さく、考慮する必要はない。また、制御棒の軸方向の放射能濃度分布が、図 G.14 に示す制御棒の軸方向の中性子フルエンス率分布と同様の分布であると仮定すると、制御棒の先端から 0.75 m の位置から上方の放射能は、制御棒全体の 1 %未満であ

c) 中性子条件設定の考え方 b)で評価した制御棒の軸方向の全中性子フルエンス率分布及び中性子スペクトルを利用して、適用する放射能濃度決定方法の種類に応じて、個別条件又は代表条件の設定が必要となる。

なお,放射化断面積は,**b**)で1群に縮約した実効断面積を利用すればよい。

るため, 放射能評価におけるこの部分の重要性は低い。

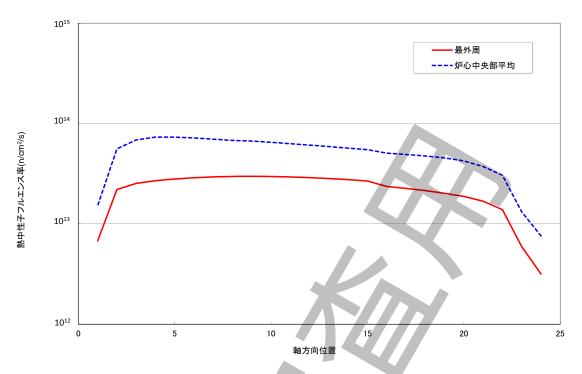


図 G.6—BWR チャンネルボックスでの熱中性子フルエンス率軸方向分布の例

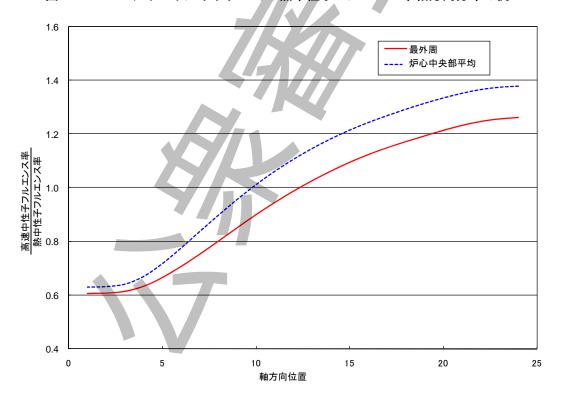


図 G.7—BWR チャンネルボックスでの高速中性子フルエンス率の 熱中性子フルエンス率に対する比の例

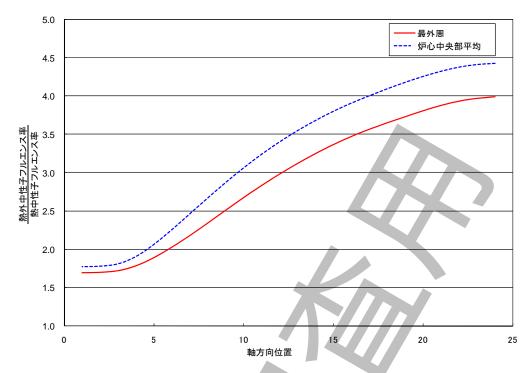
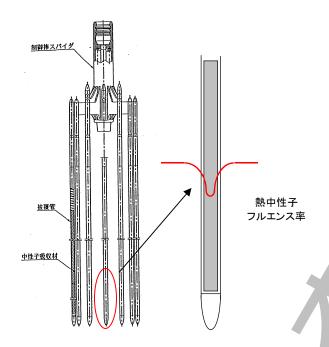


図 G.8—BWR チャンネルボックスでの熱外中性子フルエンス率の 熱中性子フルエンス率に対する比の例





制御棒は、強い吸収体であるため、制御棒の近傍及び内部での中性子フルエンス率のゆがみを適切に評価する必要がある。

⇒ 三次元モンテカルロ輸送計算コード MCNPの使用。被覆管、吸収体での 中性子スペクトルの変化を評価し、 断面積を作成。

図 G.9—PWR 制御棒における熱中性子フルエンス率のディプレッション効果(概念図)

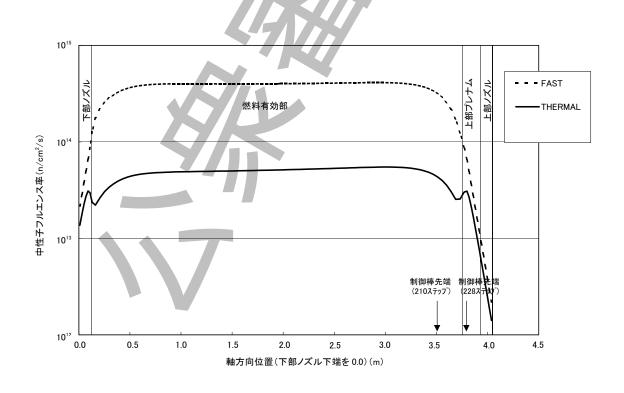
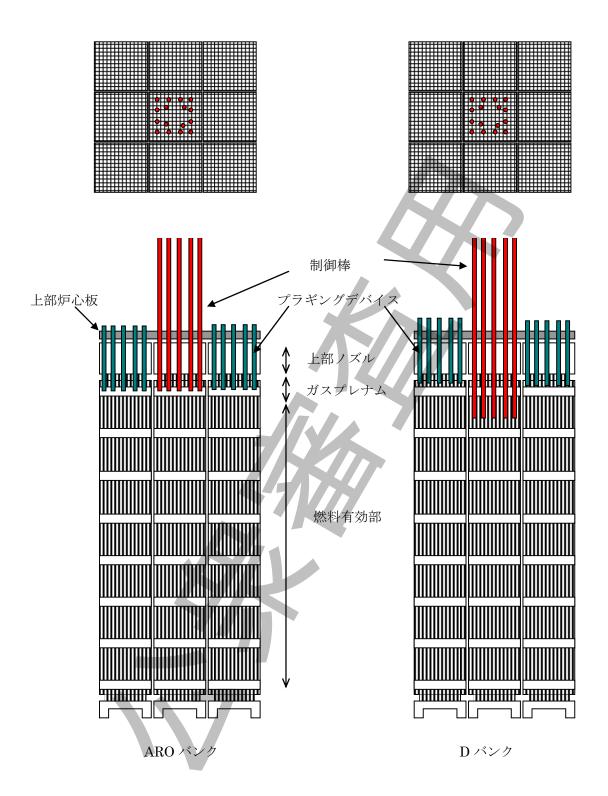
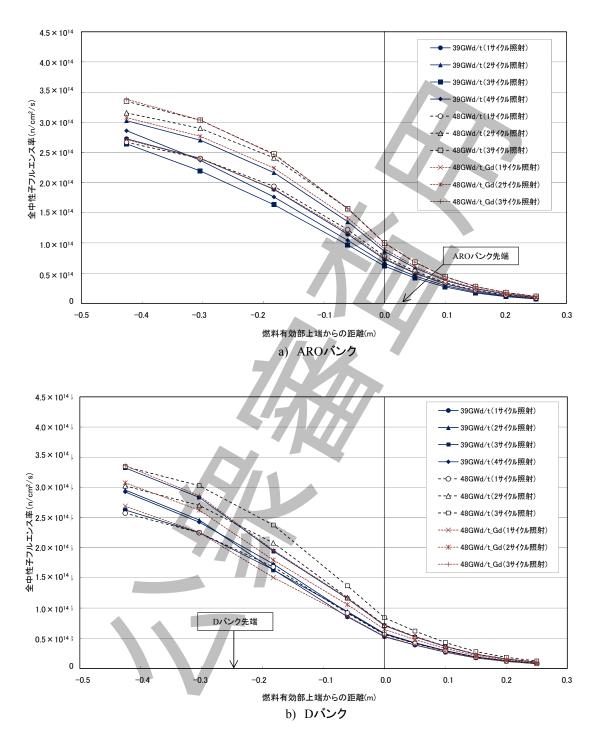


図 G.10—PWR 制御棒での軸方向中性子フルエンス率分布(4 ループプラントの例)



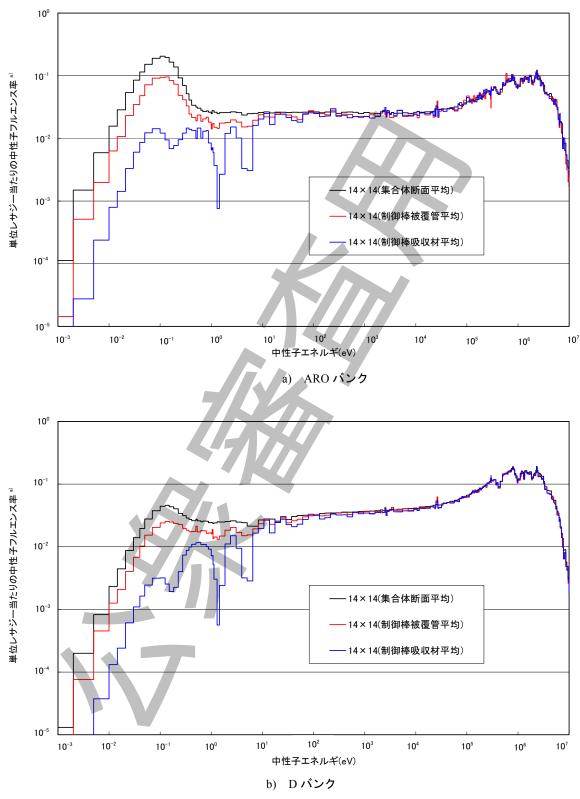
a) ARO バンク b) D バンク

図 G.11—PWR 制御棒の ARO バンク及び D バンクのモデル(概念図)



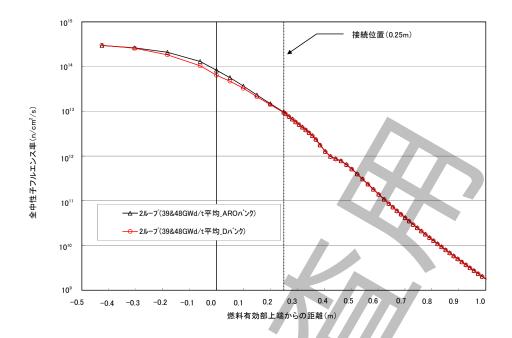
注記 集合体比出力の炉心平均比出力に対する比=1.0 で規格化

図 G.12—燃料有効部上端近傍の全中性子フルエンス率分布(2 ループプラントの例)



注 ^{a)} 集合体断面平均φで規格化

図 G.13—PWR 制御棒先端部の中性子スペクトル (2 ループプラント, 14×14 型燃料の例)



注記 図 G.12 に示す燃料有効部上端 $0.25\,\mathrm{m}$ までの MCNP による中性子フルエンス率分布の平均値を基に、 $0.25\,\mathrm{m}$ から上方については、二次元輸送計算コード DORT による中性子フルエンス率分布を接続している。

図 G.14—PWR 制御棒の燃料有効部上端近傍から上方に関する全中性子フルエンス率分布 (2 ループプラントの例)



G.3 照射条件設定における考慮事項

照射条件である照射時間及び照射停止時間については,表 D.8 に示した照射履歴に基づき,放射能濃度決定方法の種類に応じて,評価対象とする放射化金属等ごとに詳細な条件,又は複数の評価対象とする放射化金属等を適切に代表する条件(又は放射能濃度評価結果を大きめにする保守的な条件)の設定が必要となる。また,濃度比法の場合,換算係数法の場合及び濃度分布評価法の場合は,個別の条件の代わりに,複数の評価対象とする放射化金属等を適切に代表する条件範囲を設定することもある。

例 照射条件を設定する場合に考慮する必要のある基本的な事項は表 D.9 に示した次による。

項	目	考慮する必要のある主な事項
照 射	時間	- 照射時間の合計 ^{a)} 。
照射停止	照射停止後	- 放射化計算結果の照射終了後の停止時間での核種の減
(減衰)		衰補正 ^{b)} 。
時間		又は
		- 評価対象核種濃度の発生日への適切な補正 ^{b), c)} 。
	原子炉供用期間中	- 照射中の停止時間及び停止時期 ^{d)} 。

- 注 a) 評価対象核種のうち、プラント運転時間に比べて短半減期の核種は、プラント運転初期の中性子の 照射履歴の影響は小さく、評価時点直前の中性子フルエンス率が大きく影響する。また、プラント 運転時間に対して長半減期の核種は、総照射量が影響する。
 - b) 比較的短半減期核種の場合。
 - c) 濃度比法を用いる場合において、Key 核種を非破壊外部測定した場合。
 - d) 60Co などの半減期が照射時間と同程度の核種については、照射終了前の停止時間の減衰効果について考慮が必要。



参考文献

- [1] 元素周期表,日本化学会,日本物理学会,日本薬学会,日本微量元素学会,高分子学会,応用物理学会 監修 (2006)
- [2] 日本原子力発電株式会社,"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",平成22年8月
- [3] **JIS H 4751**:1998 ジルコニウム合金管
- [4] **JIS G 4305**:2005 冷間圧延ステンレス鋼及び鋼帯
- [5] "Spent Fuel Disassembly Hardware and Other Non-Fuel Bearing Components Cost Estimates, and Proposed Repository Acceptance Requirements", PNL-6046/UC-70 (1986)
- [6] 金属便覧(改定6版),日本金属学会(2000)
- [7] "Long-Lived Activation Products in Reactor Materials", NUREG/CR-3474 (1984)
- [8] 照射損傷,原子力工学シリーズ8,東京大学出版会
- [9] 原子炉構造工学,原子力工学シリーズ1,東京大学出版会
- [10] 太田・土肥・黛 他, "ステンレス鋼の照射誘起偏析に及ぼす純度の影響", 電力中央研究所報告 T96060, CODEN: DCKHDL ISSN:1340-4652, 1997 年 6 月
- [11] M. Seo, N. Sato, "Surface Characterization of Stainless Steels Prepared with Various Surface Treatments", *Transaction of the Japan Institute of Metals*, **Vol.21**, **No12**(1980)
- [12] P. Prakash, T. Mohandas, P. Dharma Raju, "Microstructural characterization of SiC ceramic and SiC-metal active metal brazed joints", *Scripta Materialia*, **52**(2005)
- [13] 高久・後河内, "原子炉冷却系配管用ステンレス鋼の応力腐食割れ挙動", 火力原子力 発電, **Vol.28**, **No.11**, Nov.1977
- [14] Y. Lu, K. Sakaguchi, T. Shoji, "Stress corrosion cracking of stainless steel pipe weldments in BWR environment. A system safety benchmark facility for evaluation of crack growth rates under different flow rate conditions", Key Engineering Materials (2004)
- [15] M. Ghosh, S. Chatterjee, "Characterization of transition joints of commercially pure titanium to 304 stainless steel.", *Materials Characterization* (Jul 2002)
- [16] 藤野・松本・前原, "エネルギ分散連続 X 線回折法による集合組をもつ鋼の相定量分析", 鉄と鋼, **67,11** (1981)
- [17] H.I. Shaaban, F.H. Hammad, "Investigation of diffusion-bonding between Zircaloy-4 and 304 stainless steel", *Journal of Nuclear Materials* (Jan 1978)
- [18] J. Kirschner, K.J. Dietz, F. Waelbroeck, "On the dependence of composition and depth profiles of stainless steel and inconel surfaces on pretreatment", *Proceedings of the 9. Symposium on fusion technology*. Commission of the European Communities (1976)
- [19] A. Boschi, C. Ferro, G. Luzzi, et al., "Surface composition of some austenitic stainless steels after different surface treatments", *The Journal of Vacuum Science and Technology* (Jul 1979)

- [20] M. Ahmad, K.A. M.A Shoaib, Shaikh., et al., "Identification of surface carbides and spinels in welded austenitic stainless steels", *Journal of Materials Science* (1 Mar 1994)
- [21] X. He, T. DebRoy, P.W. Fuerschbach, "Alloying element vaporization during laser spot welding of stainless steel", *Journal of Physics. D, Applied Physics* (7 Dec 2003)
- [22] J.Y. Park, S.Danyluk, D.E. Busch, "Scanning Auger electron spectroscopy studies of grain-boundary segregation in Type 304 stainless steel", *Conference: 5. Bolton Landing conference*, Lake George, NY, USA, 27-30 (Aug 1978)
- [23] J H. BAEK, Y H. JEONG, "Depletion of Fe and Cr within precipitates during Zircaloy-4 oxidation", *Journal of Nuclear Materials*, 304 (2002)
- [24] R. Achrya, A G C. Nair, A V R. Reddy, et al., "Standard-less analysis of Zircaloy clad samples by an instrumental neutron activation method", *Journal of Nuclear Materials* Vol.326, No.2/3
- [25] H. Anada, K. Takeda, S. Nasu, et al., "Chemical State analysis of Sn and Fe in ZrO2 Moessbauer spectroscopy" (2002)
- [26] A. Yilmazbayhan, O. Delaire, A.T. Motta, et al., "Determination of the alloying content in the matrix of Zr alloys using synchrotron radiation microprobe X-ray fluorescence", *Journal of Nuclear Materials* v. 321(2-3) (15 Sep 2003)
- [27] C.B Lee, K.H. Kim, "Analysis of corrosion behavior of KOFA zircaloy-4 cladding", *Journal* of the Korean Nuclear Society (Apr 1998)
- [28] A.M. Garde, S.R. Pati, M.A. Krammen, et al., "Corrosion behavior of Zircaloy-4 cladding with varying tin content in high-temperature pressurized water reactors Zirconium in the nuclear industry", *Tenth international symposium*. ASTM (1994)
- [29] S.R. Taylor, 岩波 理化学辞典 第 4 版 (1989)
- [30] 新金属データブック、金属時評編集部編(2002)
- [31] "ステンレス", 現場で生かす金属材料シリーズ, 工業調査会
- [32] "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
- [33] 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)
- [34] 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
- [35] 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)
- [36] 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)
- [37] ガンマ線の波高分析による人形峠地域などの花嵐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
- [38] 関根良弘,"鉱物資源の量的評価と元素の地殻存在度",(1986)

- [39] Log-normal Distributions across the Sciences: Keys and Clues, *BioScience*, **Vol. 51, No. 5**, (2001)
- [40] L.H.AHRENS, The lognormal distribution of the elements (A Fundamental Law of Geochemistry and its subsidiary), *Geochimica and Cosmochimica Acta*, Vol. 5 (1953)
- [41] S.F. Mughabghab, "BNL-325 5th edition", National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory (2006).
- [42] W. A. Engle Jr., "A User's Manual for ANISN, A One-Dimensional Discrete Ordinates
 Transport Code with Anisotropic Scattering," Union Carbide Corp. Report K-1693 (1967).
- [43] F.R. Mynatt, et al., "The DOT-III Two-Dimensional Disrete Ordinates Transport Code", ORNL /TM-4280 (1973).
- [44] W.A. Rhoades and R.L. Childs, "The TORT Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code", ORNL-6268 (November 1987).
- [45] Los Alamos Monte Carlo Group: "MCNP-A General Purpose Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport," LA-7396-M (Rev.) Version 2B (1981)

附属書 H (参考)

検出困難元素の濃度分布評価方法

この附属書は、標準本体及び**附属書 D** の理解のために、元素分析データが非常に少ない 又は検出下限値しかない検出困難元素の放射化計算条件(元素成分条件)を、濃度分布を 仮定して設定する方法の例を示すものである。

H.1 概要

6.1.2.2.3 に示す起源元素の元素成分条件の具体的な設定方法及び設定例は、附属書 D 及び附属書 G に示している。このうち、元素分析データが非常に少ない場合、又は元素分析データに検出下限値しかない検出困難元素の元素成分条件を元素濃度分布から設定する方法は、表 D.5 及び表 D.6 に示すとおりである。具体的には、図 H.1 に示すとおり、保守的に検出下限値を濃度分布の上側限界値[例 上側限界値=平均+2 σ (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から"平均的な標準偏差"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る。また、"平均的な標準偏差"は、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で、その設定例も、あわせて示している。

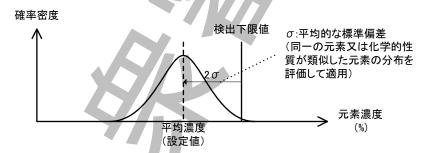


図 H.1-検出困難元素の濃度分布評価の基本的な考え方

H.2 基本的な考え方

H.2.1 考え方

H.1 に示した検出困難元素の濃度分布評価に利用する標準偏差は、鉱物、岩石、土壌、 堆積物など(以下、鉱物、岩石などからの試料という。)の元素濃度データを利用して設定 することができる。ただし、鉱物、岩石などからの試料の元素濃度データを検出困難元素 の標準偏差の設定に利用するためには、次の確認が必要である。

- 鉱物,岩石などからの試料の元素濃度データ(濃度分布)は,産地及び種類によらず標準偏差が同程度の対数正規分布を示す。
- 検出困難元素の標準偏差は、材料の製造工程(**例** 添加、熱処理、化学処理など)の

影響を受けない。

H.2.2 元素濃度データの収集方法

鉱物、岩石などからの試料の元素濃度データは、文献などから収集することができる。 ただし、元素濃度データを収集する場合には、次の考慮が必要である。

- a) **データ収集方針** 元素濃度データは、検出困難元素の特性などを考慮した種類を、可能な限り広範な産地から、収集する。
- b) **適用除外データ** a) の方針で収集した元素濃度データであっても, 検出困難元素の標準偏差の評価に適さないと判断したデータは, 除外する。
- c) **データ群の作成** 収集した元素濃度データは、産地及び種類ごとに元素濃度データを データ群 (産地及び種類ごとの元素濃度データのグループ) として分類し、各々のデータ群で標準偏差を作成する。

H.2.3 元素濃度データの適用条件

H.2.2 で収集した元素濃度データを、検出困難元素の濃度分布評価(標準偏差の設定) に適用するために、次の確認を行う。

- a) 標準偏差の同等性の確認 鉱物,岩石などからの試料の元素濃度データ (濃度分布) が産地及び種類によらず同程度の標準偏差を示すことを確認する。また,各データ群の標準偏差に濃度依存性がないことも確認する。
- b) **対数正規性の確認** 鉱物,岩石などからの試料の元素濃度データ(濃度分布)が,産 地及び種類によらず,対数正規性を示すことを確認する。
- c) 材料の製造工程の影響の確認 検出困難元素の標準偏差は、材料の製造工程(例 添加,熱処理,化学処理など)の影響を受けない、又は影響を受けても最終的には鉱物、 岩石などからの試料の元素濃度データと同等になることを、材料の製造工程及び製造工程中の元素挙動の調査結果などから確認する。

なお、材料の製造工程中の管理内容(**例** 添加物の有無、熱・化学処理の有無)、及び検出困難元素並びに添加物の製造工程中での熱・化学処理による挙動を踏まえた 検出困難元素の標準偏差の基本的な設定方法を、**図 H.2** に示す^[1]。

H.2.4 検出困難元素の濃度分布評価方法

H2.3 において、検出困難元素の濃度分布評価(標準偏差の作成)に、鉱物、岩石などからの試料の元素濃度データを適用できることが確認できた場合は、次の手順で、検出困難元素の標準偏差を作成し、濃度分布を評価する。

a) 利用する元素濃度データの選定 H.2.2 で収集した元素濃度データに対し、次の点を 考慮し、検出困難元素の標準偏差の設定に利用する範囲(実際に利用する元素濃度デ ータ)を選定する。

- 1) 元素濃度データの代表性 検出困難元素の標準偏差の設定に利用する元素濃度データは,鉱物,岩石などからの試料を適切に代表している(標準偏差に産地・種類・濃度の依存性がないなど),又は設定する標準偏差の特性などを鑑みた適切な範囲から収集されていることを,あらかじめ確認しておく必要がある。
- 2) 元素濃度データの信頼性 区分ごと (産地,種類など) に収集したデータ群がもつ 信頼性などの評価を行い,元素濃度データの適切な利用範囲 (実際に利用する元素 濃度データ) を設定する必要がある。
- b) 平均的な標準偏差の設定方法 検出困難元素の標準偏差は,a) で選定した元素濃度データを利用し、評価上の保守性などを踏まえた上で、統計的な手法などの適切な方法で設定する。平均的な標準偏差の設定方法の例を、図 H.3 及び表 H.1 に示す。

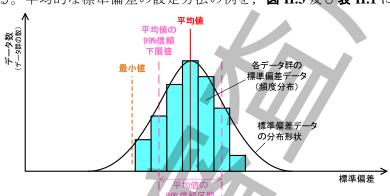


図 H.3-平均的な標準偏差の設定方法のイメージ図 (例)

ANY TATAL IN THE PROPERTY AND ANY AND AND ANY AND AND AND ANY AND ANY AND ANY AND ANY AND ANY					
設定方法	概要	特徴			
	似 安	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。	して, データ数及びデー タのばらつきの大きさ	として,標準偏差の分布		
最小値	各データ群の標準偏差の最 小値を適用する方法。		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)。		

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

c) 検出困難元素の濃度分布評価 検出困難元素の濃度分布として,平均値及び標準偏差 を設定する。平均値は,**図 H.1** に示したように,評価対象廃棄物(材料)の元素分析 データの検出値又は検出下限値を推定する元素の濃度分布の上限値として,b)で選択・設定した検出困難元素の平均的な標準偏差(鉱物,岩石などからの試料の元素濃度データで設定)を利用して設定する。濃度分布の上限値の位置(\mathbf{M} 濃度分布の上限値=平均値+2 σ の濃度)は,放射化計算で得られる廃棄物濃度の保守性などを踏まえ,適切に設定する。

なお、上記で設定した平均値と、b)で選択・設定した検出困難元素の平均的な標準偏差とが、6.1.2.2.3に示す起源元素の元素成分条件(濃度分布から設定)となる。

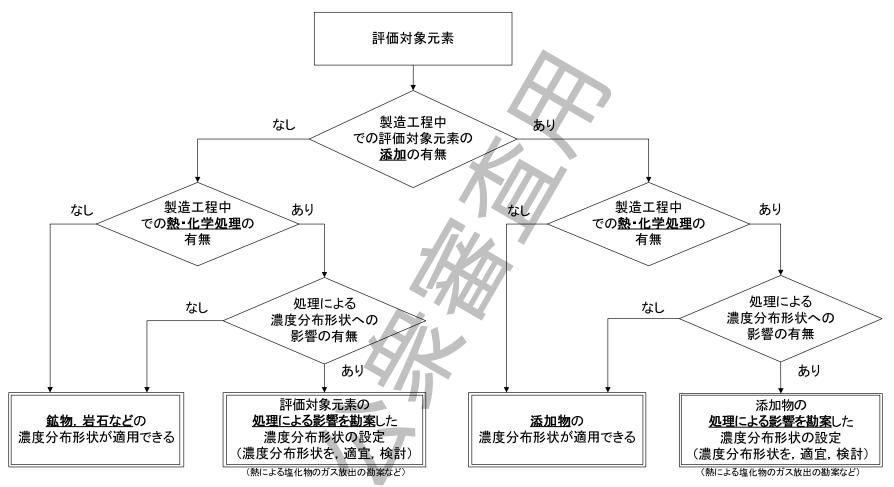
H.2.5 化学的性質が類似した元素濃度データの利用

評価対象とする検出困難元素が,不純物成分元素又は微量成分元素であれば,検出困難元素の元素濃度データの一部に,評価対象とする検出困難元素と化学的性質が類似した元素の濃度データを加えることも可能である。ただし,化学的性質が類似した元素の濃度データを参考とする場合は,あらかじめ次の確認が必要である。

- 評価対象とする検出困難元素と同様の方法 (H.2.2 の方法) で化学的性質が類似した 元素の濃度データを収集している。
- 収集した化学的性質が類似した元素の濃度データに対して、検出困難元素の濃度分布評価(すなわち、標準偏差の設定)のための適用条件の確認(H.2.3 の確認)が行われている。
- 上記で収集した元素濃度データを利用し、評価対象とする検出困難元素と化学的性質 が類似した元素の濃度分布の標準偏差とが同程度であることの評価が行われている。

上記の確認を行った化学的性質が類似した元素の濃度データは、検出困難元素の元素濃度データの一部として、**H.2.4** に示す検出困難元素の濃度分布評価に利用できる。





注記 原図では"自然界"の用語を使用しているが、用語の統一を図り"鉱物、岩石など"とした。

図 H.2-製造工程を考慮した検出困難元素の標準偏差の基本的な設定方法[1]

H.3 検出困難元素の濃度分布の評価例

検出困難元素の濃度分布の評価例として、ステンレス鋼 (SUS304) 及びジルコニウム合金 (ZrTN804D) の Cl, Th 及び U の標準偏差の設定が行われた報告[1]もある。この報告 (以下,有識者検討会の報告書という。)の概要を、次に示す。

H.3.1 元素濃度データの収集

- a) **データ収集方針** 有識者検討会の報告書では、検出困難元素の特性などを考慮し、元素濃度データを次の方針で収集している。
 - 鉱物、岩石などからの試料の元素濃度データは、文献調査にて収集する。この時、 可能な限り広範な産地からデータ収集できるよう配慮する。
 - 鉱物,岩石などからの試料の元素濃度データの種類は,河川などの堆積物,土壌, 及び各種材料の原材料である鉱物を対象とする。
- b) **適用除外データ** 有識者検討会の報告書では、a)の方針で収集した文献(元素濃度データ)であっても、次の条件に該当する場合は、検出困難元素の標準偏差の評価に適さないと判断し、除外している。
 - 分析結果の集計値(平均値など)だけが示されている文献は、対数正規分布に関する評価が行えないため、除外する。ただし、対数正規分布による平均値及び標準偏差が示されている場合は除外しない。
 - 元素濃度データが3点未満の文献は、標準偏差を算出できないため、除外する。
 - 生物,液体(海水,地下水など)の元素濃度データに関する文献は,除外する(生物では代謝活動による影響,液体では元素の溶解度などによる影響があり,微量成分元素の元素濃度データとして適切でない可能性があるため)。
 - Th 及び U の元素濃度データに関する文献では、ウラン鉱山及びジルコンに関する 文献は、除外する(ウラン鉱山及びジルコンでは、Th 及び U が部分濃集しており、 微量成分元素の元素濃度データとして適切でない可能性があるため)。
 - c) で作成する元素濃度データのデータ群に,検出下限値が含まれていた場合は,該 当するデータ群を除外する。
- c) データ群の作成 有識者検討会の報告書では、検出困難元素の標準偏差を評価するために、a)及びb)で収集した元素濃度データを、原則として、次に示す考え方に基づき、産地、種類ごとのデータ群(元素濃度データのグループ)として分類している。また、有識者検討会の報告書において、1)及び2)の方針に基づき、CI、Th及びUのデータ群を作成した結果を、表 H.2 から表 H.4 に示す。
 - 1) **産地** 収集した文献の範囲から、元素濃度データを日本、北米、欧州及びその他に 分類し、それぞれの産地に対し、次の方針でデータ群を作成する。
 - 日本は、収集した文献ごとに、都道府県単位で1データ群とする。
 - 北米は、収集した文献ごとに、州又は郡単位で1データ群とする。
 - 欧州及びその他は、収集した文献ごとに、地区単位で1データ群とする。

2) 種類 収集した文献の範囲から、元素濃度データを鉱物、火成岩、堆積岩、堆積物 (河川,湖沼)及び土壌に分類し、それぞれの種類に対し、データ群を作成する。

表 H.2-収集した CI の元素濃度データの産地及び種類別のデータ群数[1]

種類		産地					
		日本	欧州	北米	その他	合計	
鉱物		3	12	6	29 b)	50	
火成岩	火山岩	5	9	8	7 °)	29	
	深成岩	17	3	9	7 ^{d)}	36	
	火山砕屑岩	12	4	3	1 ^{e)}	20	
	変成岩	3	3	1	1 f)	8	
	火成岩合計	37	19	21	16	93	
堆積岩		6	1	6	0	13	
堆積物 (河川, 湖沼) a)		0	0	0	0	0	
土壌		9	2	0	1 ^{g)}	12	
合計		55	34	33	46	168	

注 a) 堆積物 (河川, 湖沼) は、いずれのデータ群も検出下限値をもっているため評価対象外としている。 b) 産地内訳:イラン、インド、チリ、ペルー、ロシア (極東)、中国、南極、西インド諸島、南アフリカ共和国 c) 産地内訳:ハワイ諸島、イラン、ケニア d) 産地内訳:チリ、イラン、インド洋、太平洋、大西洋

e) 産地内訳:中国 f) 産地内訳:イラン g) 産地内訳: ブラジル

表 H.3-収集した Th の元素濃度データの産地及び種類別のデータ群数[1]

種類	産地					
性 類	日本	欧州	北米	その他	合計	
鉱物	15	0	6	7 ^{a)}	28	
火成岩	37	6	28	10 ^{b)}	81	
堆積岩	8	3	13	7 ^{c)}	31	
堆積物 (河川, 湖沼)	47	0	9	0	56	
土壌	3	0	9	0	12	
合計	110	9	65	24	208	

注 ^{a)} 産地内訳:大西洋,アフリカ,豪州,チリ,イラン,パプアニューギニア,スリナム,ジャマイカ

b) 産地内訳:イラン, 中国

°) 産地内訳:オーストラリア,インドネシア,ベネズエラ

種類	産地				
性知	日本	欧州	北米	その他	合計
鉱物	6	0	5	6 a)	17
火成岩	27	5	31	8 b)	71
堆積岩	6	3	17	6 c)	32
堆積物 (河川, 湖沼)	47	0	17	0	64
土壌	3	0	9	0	12
合計	89	8	79	20	196

表 H.4-収集した U の元素濃度データの産地及び種類別のデータ群数[1]

注 a) 産地内訳:大西洋,アフリカ,豪州,チリ,中国,パプアニューギニア,スリナム,ジャマイカ

b) 産地内訳:イラン,中国

[©] 産地内訳:オーストラリア,インドネシア

H.3.2 元素濃度データの適用性の確認

- a) 標準偏差の同等性の確認 有識者検討会の報告書では、CI、Th 及び U に対し、H3.1 で収集した元素濃度データ(データ群)を利用し、次の評価を行っている。
 - CI, Th 及び U の全データ群の標準偏差の平均は 0.18~0.20(対数値)であり、元素 濃度に対する移動平均からも明らかな濃度依存性は認められなかった(図 H.4 から 図 H.6 参照)。
 - CI は鉱物,火山岩,深成岩, Th 及び U は鉱物,火成岩,堆積岩のそれぞれのデータ群において,産地ごとの標準偏差の比較を行った結果,明らかな濃度依存性は認められなかった(図 H.7 から図 H.9 参照)。
 - CI は日本, 欧州, 北米, Th 及び U は日本, 北米のそれぞれのデータ群において, 種類ごとの標準偏差の比較を行った結果, 明らかな濃度依存性は認められなかった (図 H.10 から図 H.12 参照)。

上記評価結果から、有識者検討会の報告書では、Cl, Th 及び U の鉱物、岩石など からの試料の元素濃度分布(標準偏差)は、産地、種類及び濃度に依存せず、同程度 の値を示すと評価している。

- b) 対数正規性の確認 有識者検討会の報告書では、CI、Th 及び U に対し、H.3.1 で収集 した元素濃度データ(データ群)を利用して代表的なデータ群の元素濃度分布を整理 し、対数正規確率図上のプロットがおおむね直線関係にあることを確認しており、こ の結果から、いずれの元素も鉱物、岩石などからの試料の元素濃度分布は、対数正規 分布を示していると評価している(図 H.13 から図 H.15 参照)。
- c) 材料の製造工程の影響の確認 有識者検討会の報告書では、Cl, Th 及び U の標準偏差が、SUS304 及び ZrTN804D の製造工程(例 添加,熱処理,化学処理など)の影響を受けないこと、又は影響を受けても最終的には鉱物、岩石などからの試料の元素濃度データと同等になることを、次のとおり、評価している。

1) SUS304

有識者検討会の報告書では、次の点を踏まえ、鉱物、岩石などからの試料の Cl, Th 及び U の標準偏差が材料 (SUS304) 中でも維持されると評価している (**図 H.16** 参 照)。

- 製造工程及び製造工程中の元素挙動の調査結果(**図 H.17** 参照)から、製造工程中に Cl, Th 及び U の添加が行われていない。
- Cl, Th 及び U の化合物などの温度特性(**表 H.5** 参照)を考慮すれば、製造工程中の除去の可能性は低く、また、特段の除去操作が行われていない。

2) ZrTN804D

有識者検討会の報告書では、次の点を踏まえ、鉱物、岩石などからの試料の Cl, Th 及び U の標準偏差を材料 (ZrTN804D) 中の標準偏差として適用しても問題ないと評価している (**図 H.18** 参照)。

- 製造工程及び製造工程中の元素挙動の調査結果(図 H.19 参照)から,製錬工程における塩化・還元操作において,Clが添加・除去されている。図 H.20 に示す製錬工程(二次塩化及び還元操作)でのClの物質収支からも分かるように,添加されたClは全て除去されており,原料中(すなわち,鉱物,岩石などからの試料)におけるClの標準偏差は,ZrTN804中では維持されていない。ただし,Clの濃度分布(標準偏差)は,物理的要因(温度,圧力)に支配され^[2],鉱物,岩石などからの試料と製造工程中の温度環境とに大きな違いがないことから,両者の標準偏差は同等とみなすことができる。
- Th 及び U は、製造工程中での添加はないものの、真空蒸留分離(900~950℃)、 真空溶解(1700℃程度)などの熱処理によって除去され(ThCl₄の沸点は921℃, UCl₄の沸点は791℃)、最終的に、鉱物、岩石などからの試料にもともと微量成分 として存在している Th, U の標準偏差と同等になる。

表 H.5-Cl.	Th及びU	の化合物の)温度特件[]
-----------	-------	-------	---------

塩	素(Cl)	トリウム (Th)		ウラン (U)	
化合物	沸点	化合物	沸点	化合物	沸点
CaCl ₂	1 935℃	金属 Th	4 788℃	金属 U	3 800°C
NaCl	1 413℃	ThO_2	3 300℃ (融点)	UO_2	2800℃ (融点)
MgCl ₂	1 410℃	ThC	2773℃ (融点)	UC	2 560℃ (融点)

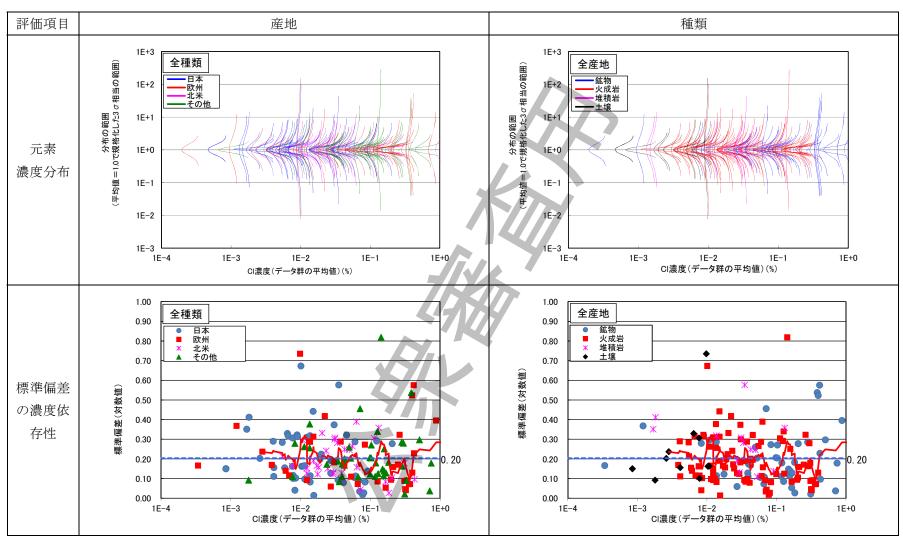


図 H.4-Cl の全データ群の元素濃度分布及び標準偏差の濃度依存性(産地・種類別の全体図)[1]

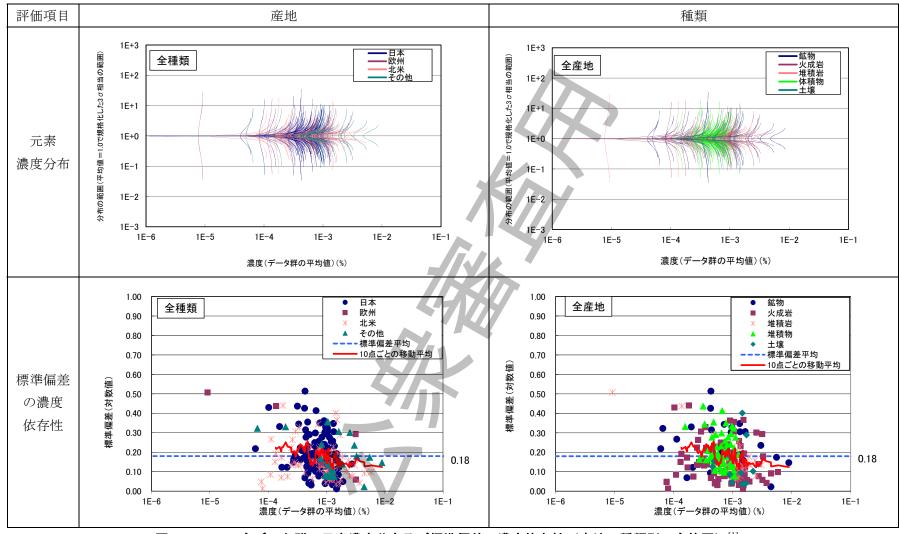


図 H.5-Th の全データ群の元素濃度分布及び標準偏差の濃度依存性(産地・種類別の全体図)[1]

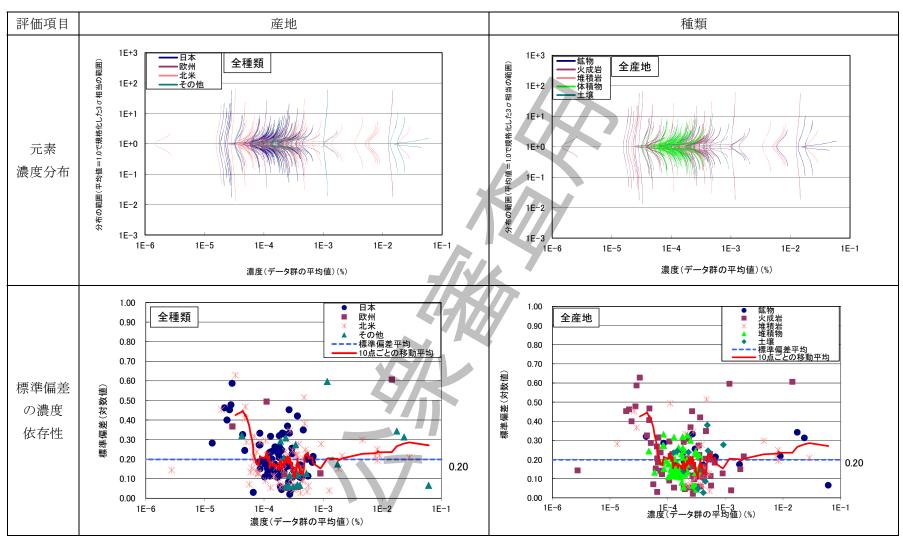
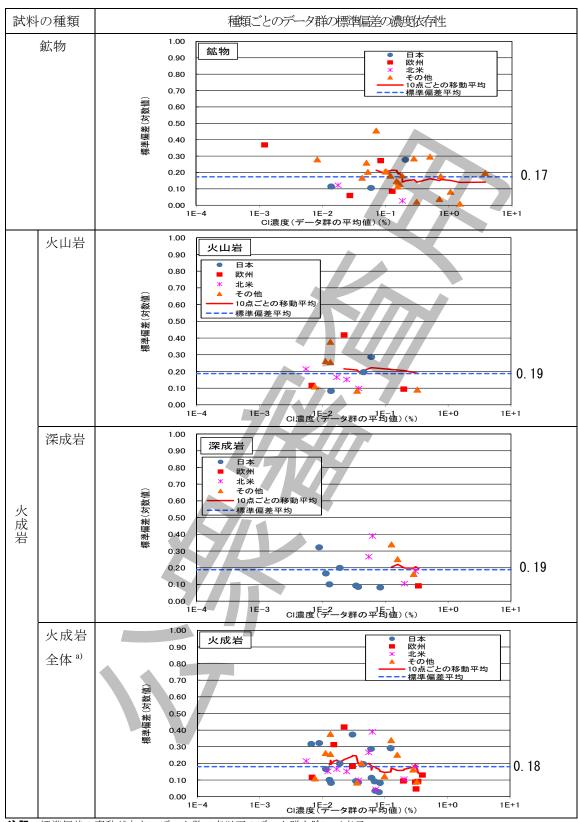


図 H.6-U の全データ群の元素濃度分布及び標準偏差の濃度依存性(産地・種類別の全体図)[1]



注記 標準偏差の変動が大きいデータ数 5 点以下のデータ群を除いて表示。

注 ^{a)} 火山岩,深成岩,火山砕屑岩及び変成岩。

図 H.7-Cl データ群の種類ごとの標準偏差の濃度依存性 [1]

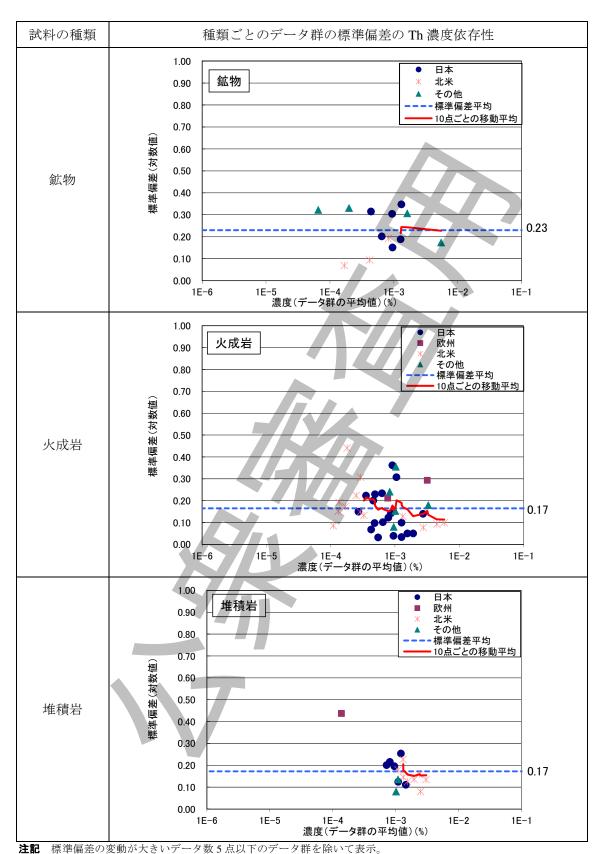
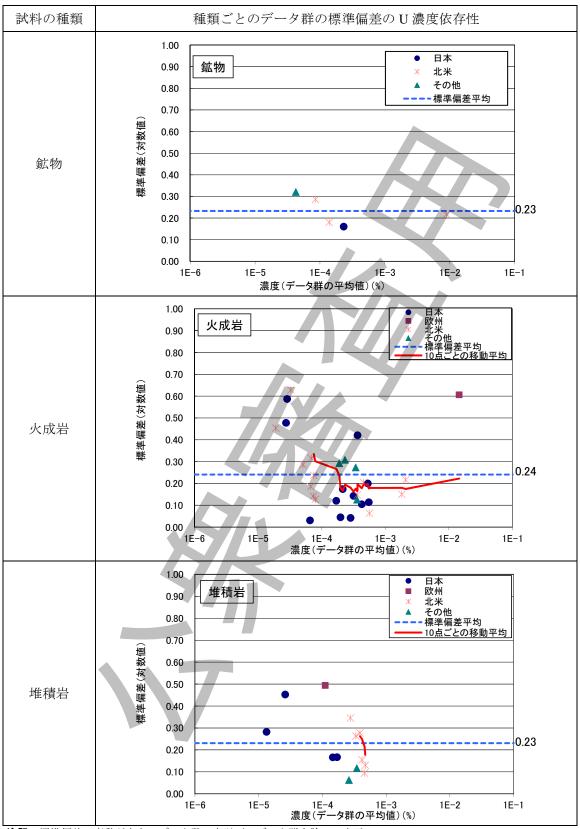


図 H.8-Th データ群の種類ごとの標準偏差の濃度依存性 [1]



注記 標準偏差の変動が大きいデータ数5点以下のデータ群を除いて表示。

図 H.9-U データ群の種類ごとの標準偏差の濃度依存性 [1]

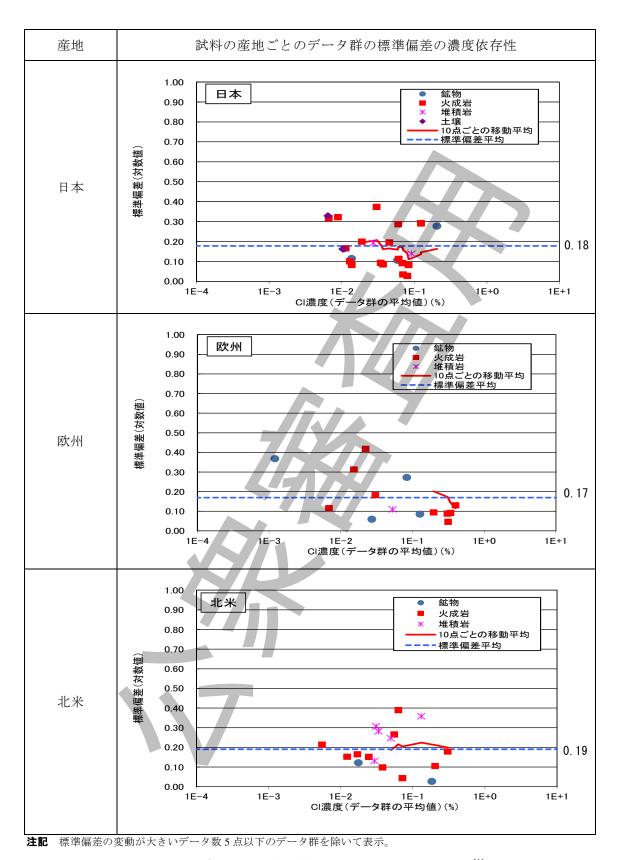
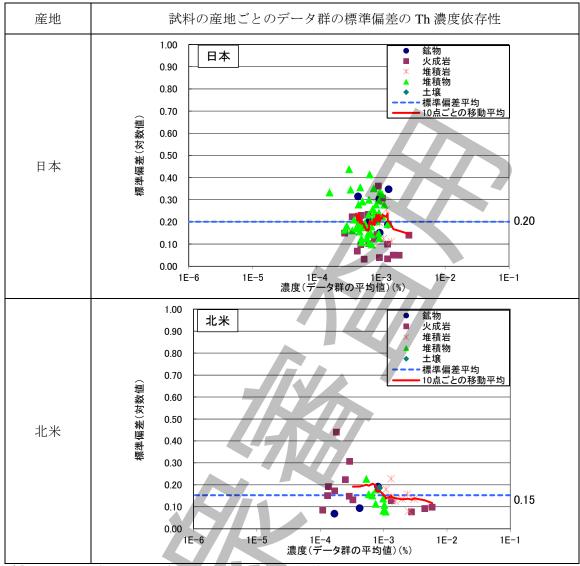


図 H.10-Cl データ群の産地ごとの標準偏差の濃度依存性 [1]



注記 標準偏差の変動が大きいデータ数5点以下のデータ群を除いて表示。

図 H.11-Th データ群の産地ごとの標準偏差の濃度依存性 [1]



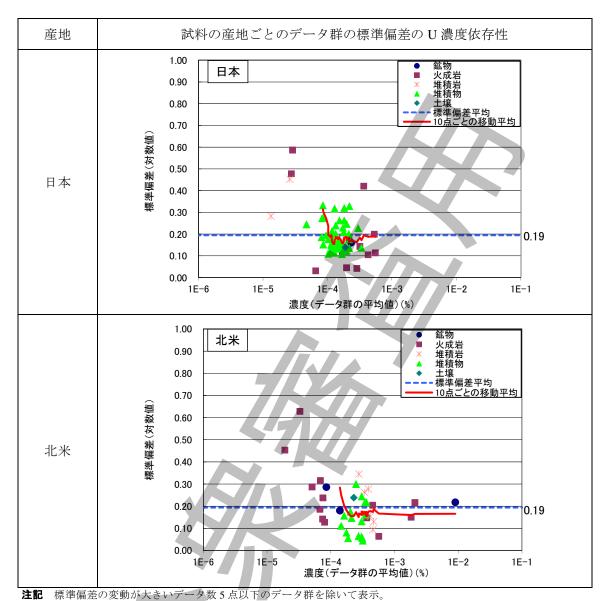
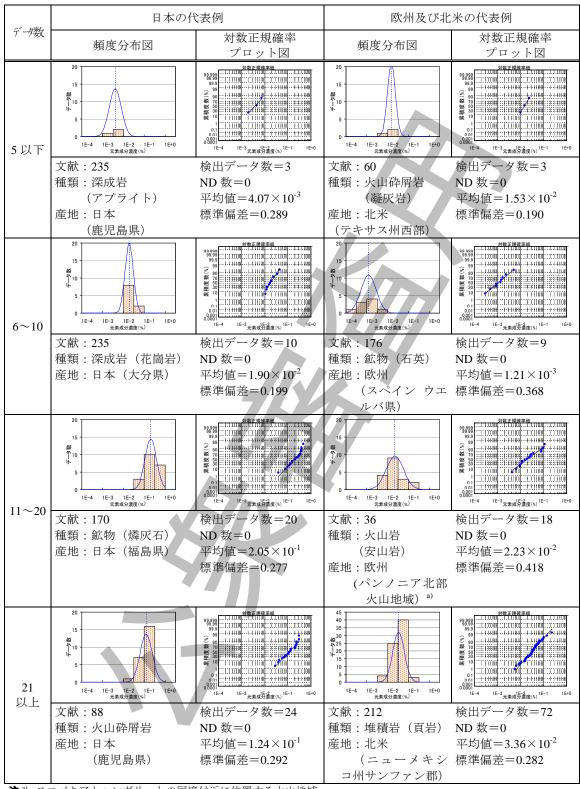


図 H.12-U データ群の産地ごとの標準偏差の濃度依存性 [1]



注 * スロバキアとハンガリーとの国境付近に位置する火山地域

図 H.13-Cl の元素濃度データの対数正規性の確認(代表例) [1]

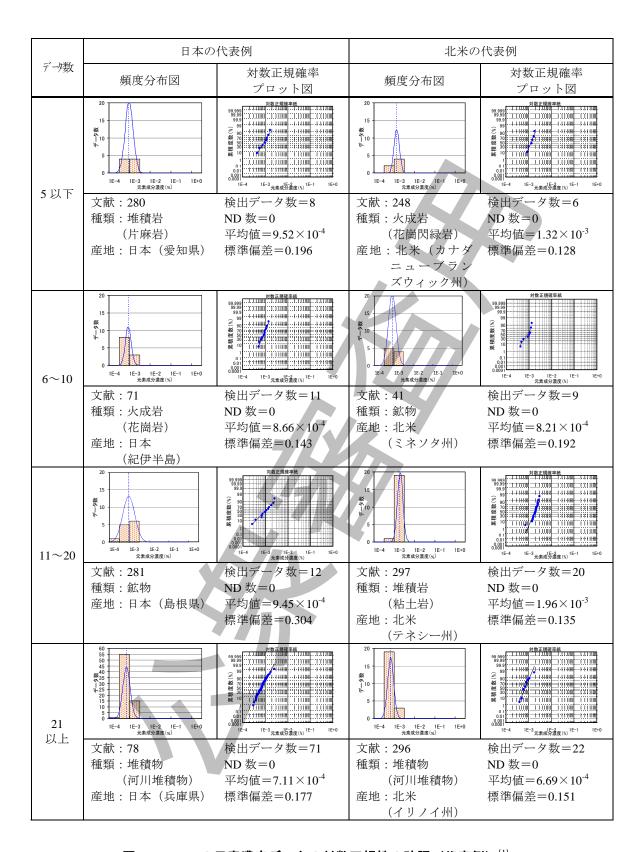


図 H.14-Th の元素濃度データの対数正規性の確認(代表例)[1]

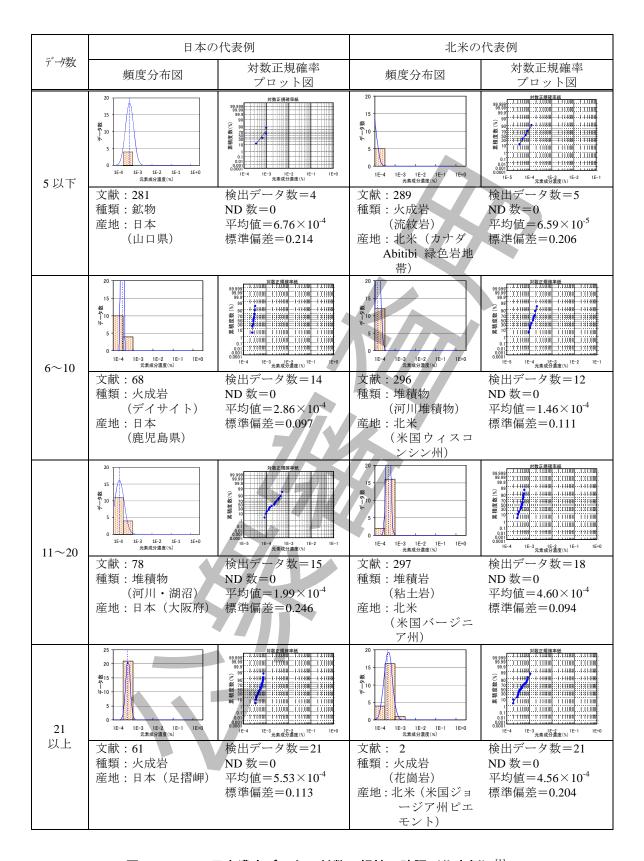
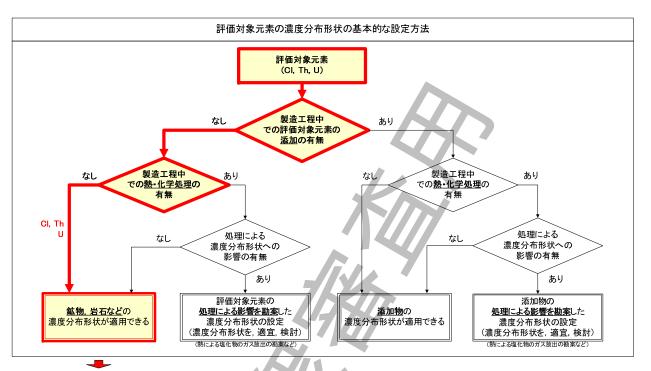


図 H.15-U の元素濃度データの対数正規性の確認(代表例)[1]



	SUS304のCI, Th. Uの濃度分布形状の設定例				
С	【存在量(添加・除去)】 CI、Th、Uのいずれも製造工程中の添加はなかった。また、各元素の化合物の温度特性を考慮すると除去の可能性は低く、特段の除去操作も行われていなかった。このことから、SUS	-	_	-	
Т	304の製造工程において原材料中の各元素の存在量は、基本的に変化しないと考えられる。 【濃度分布形状】 SUS304の製造工程中では、上記評価対象元素の添加がなく、製造工程中での熱化学処理はあ	7	-	_	
ι	るものの、評価対象元素を狙った除去が行われていないことから、濃度分布形状への影響はな	-	<u>-</u>	-	

注記 原図では"自然界"の用語を使用しているが、用語の統一を図り"鉱物、岩石など"とした。

図 H.16-SUS304 の製造工程を考慮した Cl, Th 及び U の標準偏差の設定例^[1]

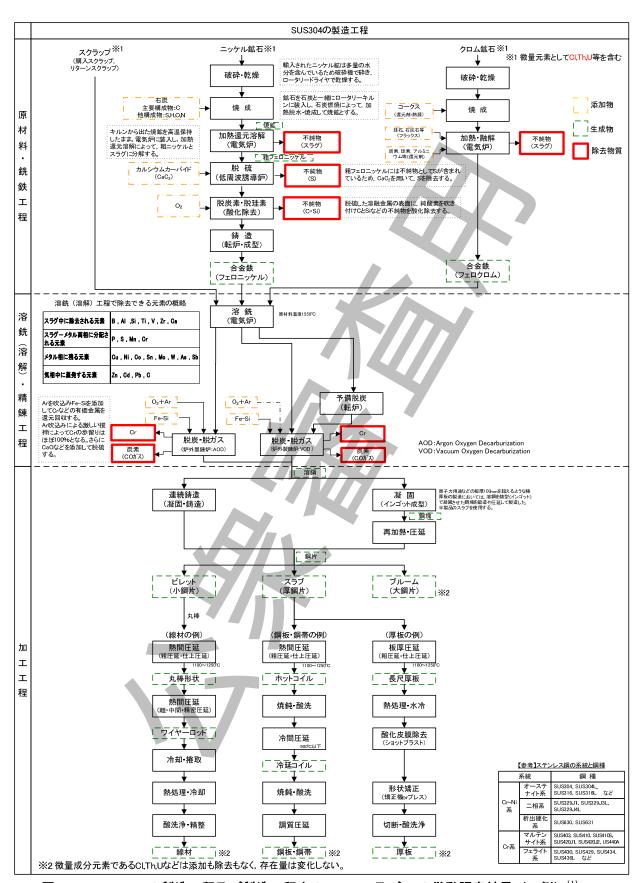
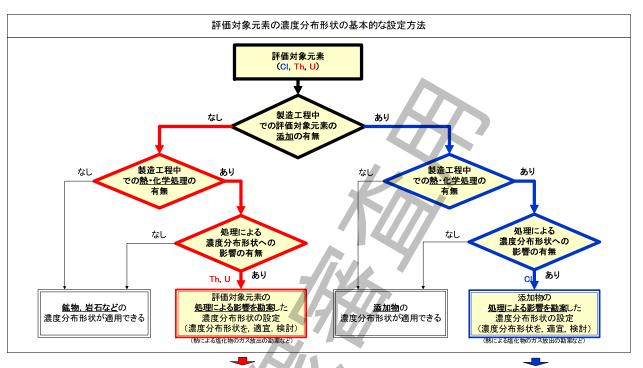


図 H.17-SUS304 の製造工程及び製造工程中の Cl, Th 及び U の挙動調査結果 (一例) [1]



	ZrTN804DのCl, Th, Uの濃度分布形状の設定例				
CI	_		_	【存在量(添加・除去)】 CIは、添加された後、塩化物として除去される。 【濃度分布形状】 CI園度分布形状】、温度環境に依存する可能性があるが、製造工程中と鉱物、岩石などの温度環境とは同等であり、結果的に、CIの濃度分布形状は鉱物、岩石などと同等になる。	
Th	_	【存在量(添加・除去)】 Th. いとも製造工程中での添加はなかったものの、塩化物として除去される可能性がある。 【濃度分布形状】	_	-	
U	_	Th. Uは基本的に除去されるため、原材料中のTh. U の存在の有無にかかわらず、元々築物、岩石などに微 重成分として存在しているTh. Uの濃度分布形状と、結 果的に、同等になる。	_	_	

注記 原図では"自然界"の用語を使用しているが、用語の統一を図り"鉱物、岩石など"とした。

図 H.18-ZrTN804D の製造工程を考慮した Cl, Th 及び U の標準偏差の設定例^[1]

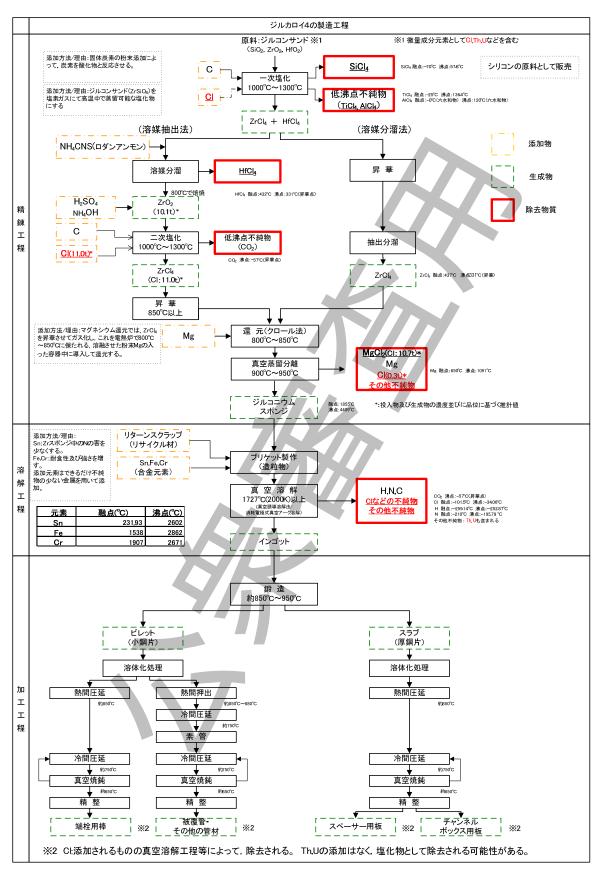


図 H.19-ZrTN804Dの製造工程及び製造工程中の Cl. Th 及び U の挙動調査結果(一例)

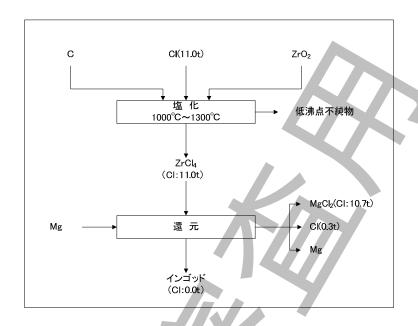


図 H.20-ZrTN804D の二次塩化及び還元操作における投入元素及び Cl の物質収支[3]



H.3.3 検出困難元素の濃度分布評価

有識者検討会の報告書では、H.3.2 において、H.3.1 で収集した元素濃度データを利用し、次のとおり、SUS304 及び ZrTN804D の Cl、Th 及び U の濃度分布を評価(標準偏差を設定)している。

a) 利用する元素濃度データ

- 1) 元素濃度データの代表性 有識者検討会の報告書では、H3.2 の評価結果をもって、H.3.1 で収集した Cl, Th 及び U の元素濃度データは、鉱物、岩石などからの試料を適切に代表していると評価している。
- 2) 元素濃度データの信頼性 収集した元素濃度データ (データ群) は、データ群ごと に必ずしも一定以上のデータ数があるわけではなく、また、データ数の少ないデー タ群ほど算出した標準偏差のばらつきが大きくなることを考慮し、有識者検討会の 報告書では、利用するデータの信頼性を向上する意味で、元素濃度データの適切な 利用範囲をあらかじめ設定している。

具体的には、まず、データ群ごとに元素濃度データを対数正規確率図(元素濃度と累積度数との関係)にプロットし、対数正規確率図上での相関係数を算出する(相関係数が大きいほどデータ群の対数正規性が高い)。次に、各データ群のデータ数と相関係数との関係を整理し、相関係数の平均値と相関係数の 99 %信頼下限値の平均との関係から、両者が安定する範囲として、データ数が 20 点以上のデータ群だけを、検出困難元素の濃度分布評価に利用している(図 H.21 から図 H.23 参照)。

b) 検出困難元素の濃度分布評価(標準偏差の設定) 有識者検討会の報告書では, a)で利用範囲を設定した元素濃度データ(データ数が 20 点以上のデータ群)を利用し, 表 H.6 に示す 3 種類の方法 (表 H.1 に示す方法と同じ)で, Cl, Th 及び U の標準偏差を設定している。

なお、有識者検討会の報告書では、a)に示したとおり、CI、Th 及び U とも代表性及び信頼性を評価した上で元素濃度データの適切な利用範囲を設定していることから、必ずしも過度な保守性をもった標準偏差の設定を行う必要はないとの理由で、標準偏差の平均値の99%信頼下限値で設定した標準偏差の利用を推奨している。

ATI.O CI, TII X O CV	71末午MM 左り以,	足帕木	
設定方法	Cl	Th	U
平均値で設定(全データ群の平均値)	0.22	0.22	0.19
全データ群から求めた標準偏差の平均値の 99%信頼下限値で設定(推奨)	0.16	0.18	0.17
全データ群の標準偏差の最小値で設定	0.037	0.097	0.062

表 H.6-Cl. Th 及び U の標準偏差の設定結果[1]

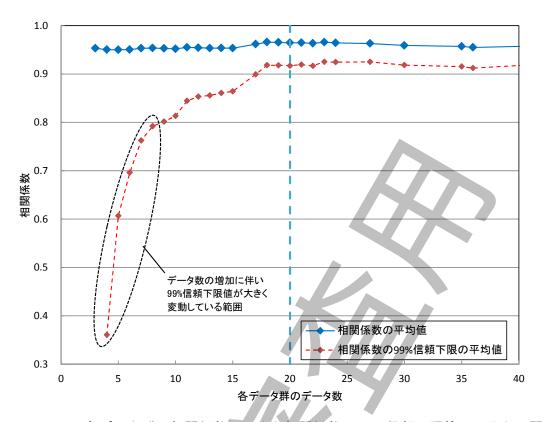


図 H.21-Cl の各データ群の相関係数の平均と相関係数の 99%信頼下限値の平均との関係[1]

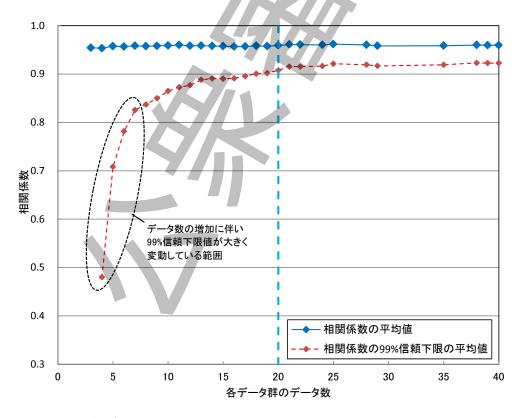


図 H.22-Th の各データ群の相関係数の平均と相関係数の 99 %信頼下限値の平均との関係

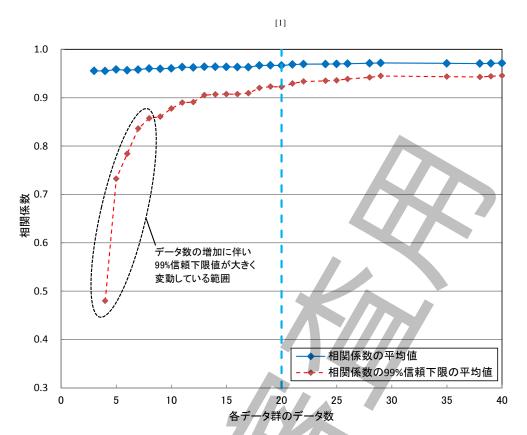


図 H.23-U の各データ群の相関係数の平均と相関係数の 99 %信頼下限値の平均との関係[1]

H.3.4 化学的性質が類似した元素濃度データの利用

有識者検討会の報告書では、同じアクチノイド元素である Th 及び U を例にして、次の 点を踏まえ、化学的性質が類似した元素濃度データを利用した検出困難元素の濃度分布評 価(標準偏差の設定)も可能であると評価している。

a) **評価に利用した元素濃度データ** 化学的性質が類似した元素の濃度データは、区分 (産地・種類など)ごとに収集したデータ群がもつ信頼性などについて評価を行い、 適切な利用範囲を設定する必要がある。

このため、有識者検討会の報告書では、Th、Uの標準偏差の類似性の評価には、H.3.2 及び H.3.3 において、代表性及び信頼性を評価した上で利用範囲を設定した元素濃度 データを利用している。

b) 評価結果 有識者検討会の報告書では、上記 a)の元素濃度データを利用し、まず、Th 及び U の標準偏差を種類別(鉱物、火成岩、堆積岩、堆積物及び土壌)に整理し、この結果から、Th のほうが U より元素濃度が高いものの、全体の傾向としては両者の標準偏差の平均値には差異はなく、また、濃度依存性も見られないと評価している(図 H.24 参照)。

次に、Th と U との標準偏差を比較し、Th と U との標準偏差の平均値には、統計的にも有意な差異は認められず、また、標準偏差のばらつきの差異も見られないと評価している(\mathbf{Z} $\mathbf{H}.25$ 参照)。

上記のことを踏まえ、有識者検討会の報告書では、評価対象とする検出困難元素と 化学的性質が類似した元素とであれば、化学的性質の類似した元素の濃度データを参 考にすることも可能であると評価している。



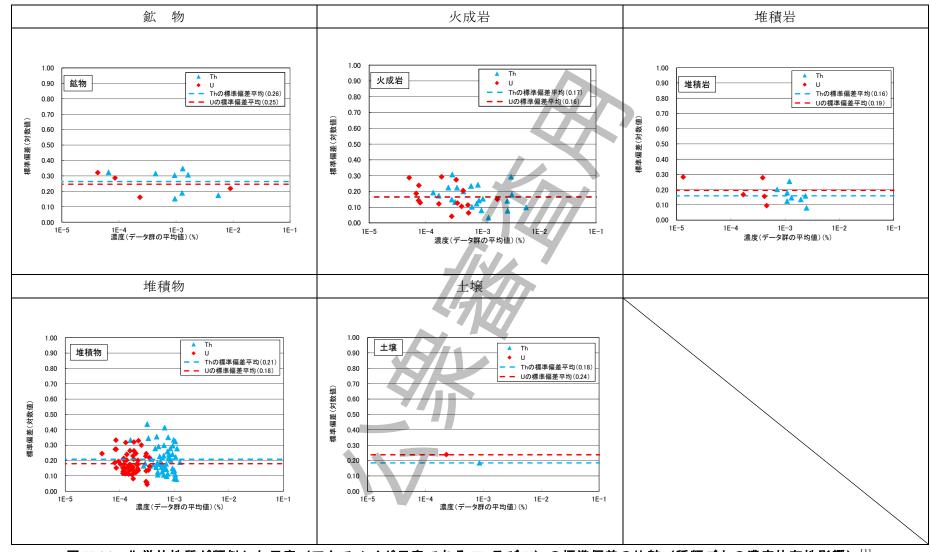


図 H.24-化学的性質が類似した元素(アクチノイド元素である Th 及び U)の標準偏差の比較(種類ごとの濃度依存性影響) $^{[1]}$

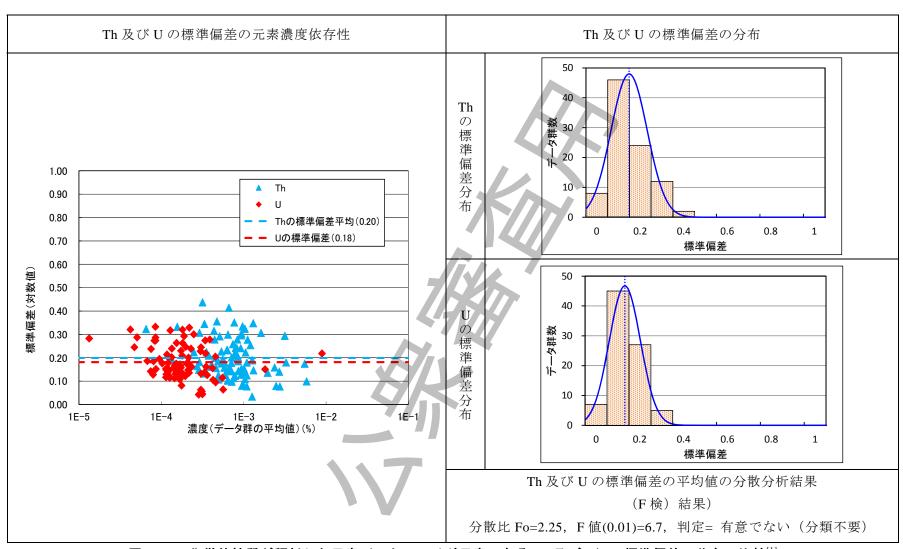


図 H.25-化学的性質が類似した元素(アクチノイド元素である Th 及び U)の標準偏差の分布の比較[1]

参考文献

- [1] 北海道電力株式会社,東北電力株式会社,東京電力株式会社,中部電力株式会社, 北陸電力株式会社,関西電力株式会社,中国電力株式会社,四国電力株式会社,九 州電力株式会社,日本原子力発電株式会社,電源開発株式会社,日本原燃株式会社, "平成 25 年度 検出困難元素の濃度分布評価について",平成 26 年 7 月
- [2] 岩崎他, "火山岩中の塩素", 日本化学雑誌, 第78巻 第1号, 昭和32年1月
- [3] (独) 物質・材料研究機構 エコマテリアル研究センター, "金属元素の精錬・精製段階における環境負荷算定に関する調査", 平成 15 年 3 月



附属書 I (参考)

濃度比を用いる場合の計算例

この附属書は、理論計算法を利用した放射能濃度決定方法のうち、濃度比を用いる場合の基本的な考え方及び計算例(放射化計算の条件の設定、放射化計算の実施、及び濃度比の算出)を示す。

I.1 基本的な考え方

I.1.1 考え方

濃度比を用いる場合とは、複数の放射化計算結果から算定した難測定核種と Key 核種との濃度比、非破壊外部測定法などで定量した Key 核種の放射能濃度から、廃棄物(又は廃棄体)の放射能濃度を決定する方法である。このため、適用対象とする廃棄物グループを代表できる放射化計算の条件(中性子の照射履歴など)の範囲が明確であることが適用の前提条件となる。

I.1.2 放射化計算の条件の設定

放射化計算の条件の設定方法は, 次による。

- a) 元素成分条件 評価対象廃棄物ごとに、評価対象核種の起源元素を選定し、元素成分 条件を設定。
- b) 中性子条件 評価対象廃棄物の中性子照射位置ごと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した上で,評価対象廃棄物の形状及び設置方向,配置位置を考慮した中性子照射位置を設定し,設定した評価対象廃棄物の中性子照射位置ごとに中性子条件を選定。
 - **例1** 評価対象廃棄物の形状及び設置方向による中性子照射位置設定の基本的な考え 方は、次による。

評価対象廃棄物 の形状及び設置 方向 ^{a)}	考慮すべき条件 ^{b)}	評価対象廃棄物の 一例 ^の	考慮すべき照射位置 の出現頻度
原子炉の	評価対象廃棄物自身の	チャンネルボックス,	せい た
軸方向	炉心軸方向の設置状態	制御棒、シュラウドなど	一様分布
原子炉の	評価対象廃棄物自身の	上部格子板 など	該当部の面積比に
径方向	炉心径方向の設置状態	上部俗子似 なと	応じた分布

- **注**^{a)} 評価対象廃棄物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廃棄物の形状及び 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。

例 2 評価対象廃棄物の配置位置による中性子照射位置設定の基本的な考え方は、次による。

評価対象廃棄物	考慮すべき条件	評価対象廃棄物の	考慮すべき中性子照射
の配置位置 a)	ラ	一例	位置の出現頻度
	運転サイクルごとの	チャンネルボック	配置位置のローテーシ
	ローテーションなど	フャンネルホック ス ^り など	ョンなどの実際の分布,
移動	による配置位置変化	7,42	又は代表的なパターン f)
19 19 19 1	燃焼制御のための	PWR 制御棒 [©]),	挿入位置などの
	挿入位置などの	BWR 制御棒 d)など	実際の分布、又は
	配置位置変化	BWK制御倅づなど	代表的なパターン ^{f)}
固定	中性子照射期間中は,配置	シュラウド	田学は
直 た	位置の変化がないこと	上部格子板など °	固定値

- 注^{a)} 評価対象廃棄物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挿入位置(定格出力運転時の制御位置、及び定格出力運転時の制御榛全引抜き位置)ごとの考慮が必要である。
 - 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中性子照射される。
 - 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(若しくは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。



c) **中性子照射条件** 評価対象廃棄物の中性子照射時間及び原子炉供用期間中の中性子 照射停止時間を設定。

なお、⁶⁰Co などの比較的短半減期の核種に対しては、長期間にわたる中性子照射を 受ける場合は、中性子照射期間中の核種の減衰の影響を考慮する必要がある。

例3 中性子照射時間及び原子炉供用期間中の中性子照射停止時間の設定の基本的な考え方は、次による。

机会伍口		中性子照射条件の設定方法	
設定項目	設定方法	設定の考え方	設定対象
中性子照射時間(合計)	頻度分布 による設定	 一評価対象廃棄物の中性子照射時間が必ずしも一律でない場合,中性子照射時間(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。 一設定する頻度分布は,中性子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。 	チャンネルボッ クス,制御棒 など
	個別値 による設定	一対象原子炉ごと及び評価対象廃棄物ごと に中性子照射実績が同じ場合は,実績を踏 まえ中性子照射時間を一律に設定する。	シュラウド, 上部格子板 など
中性子照射 停止時間 ^{a)} (原子炉 供用期間中)	均等設定	一評価対象廃棄物の中性子照射停止時間(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。 一平均的な中性子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。	全評価対象 廃棄物
注 a) 由班之照	個別設定	ー評価対象廃棄物の中性子照射実績に合わせて,個別の照射停止時期及び照射停止時間を設定する。	· ボ

注^{a)} 中性子照射終了後の照射停止時間は,基本的に中性子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(I.2.4.2 参照)。

I.1.3 放射化計算

放射化計算の実施手順は, 次による。

a) **放射化計算用データの設定 I.1.2** で設定した放射化計算の条件(元素成分条件,中性 子条件及び中性子照射条件)について,放射化計算用データ(放射化計算コードへの 入力条件)を設定。

b) 放射化計算の実施 a)で設定した放射化計算用データに基づき,放射化計算を実施。

I.1.4 適用方法

濃度比を用いる場合(I.1.3 の放射化計算結果を利用)の基本的な適用方法は、次による。

- a) Key 核種の選定 次のいずれかに適合する Key 核種を選定
 - 1) 外部から検出が比較的容易なγ線放出核種である。
 - 2) 評価対象廃棄物ごとの放射能濃度を放射化計算によって算出できる核種である。
- b) **放射能濃度の決定方法** 式(1)を適用して,評価対象廃棄物の放射能濃度を決定する。 なお,放射能濃度を決定する場合は,次を考慮する。
 - 1) Key 核種濃度を放射化計算で設定した日に減衰補正する。
 - 2) ⁶⁰Co などの比較的短半減期の核種に対して適用する場合,中性子照射時間が適切 な適用範囲にあること,又は適切な補正を行う。

$$A = R \times B$$
 (1)

ここに, A: 難測定核種の放射能濃度 (Bq/t)

R : 濃度比

B : Key 核種の放射能濃度 (Bq/t)

- c) 濃度比の決定方法 式(1)に示す濃度比 R の決定手順は, 次による。
 - 1) **濃度比の算出方法** 式(2)を使用して,式(1)の濃度比 R を算出する。

なお,代表条件による放射化計算を行う場合は,放射化計算結果の濃度比をそのまま適用する。

$$\mathbf{R} = \sqrt[n]{(y_1/x_1 \times y_2/x_2 \times \cdots \times y_n/x_n)}$$
 (2)

ここに、 x_i : Key 核種の放射能濃度 (i=1...n)

v_i : 難測定核種の放射能濃度 (*i = 1...n*)

n: 放射化計算結果の数

- 2) **濃度比決定のための放射化計算結果(評価データ)の充足性** 評価対象廃棄物中の難測定核種及び Key 核種の濃度比の値を決定するための放射化計算結果の数が、十分であるかどうかの判断は、**ISO21238**:2007^[1]に示されている適切なデータ数の取得の考え方を踏まえた次の判断を適用できる。
 - 得られた放射化計算結果の数に応じた放射化計算結果群(データベース)が 示す統計値の安定性に関して,放射化計算の追加によって統計値の安定性に 明確な向上が見込めなければ,十分と判断してよい。

I.2 計算例

I.2.1 事前準備

a) **評価対象廃棄物の選定** 評価対象廃棄物としては、原子力発電所から発生する代表的な中深度処分対象廃棄物として、BWR のチャンネルボックス及び PWR の制御棒を選定し、この廃棄物を代表する主材料として表 I.1 に示す材料を選定した。

表 I.1-	評価	対象廃	棄物の	選定
--------	----	-----	-----	----

選定した中深度処分対象廃棄物	評価対象廃棄物の材料
BWR のチャンネルボックス	ZrTN804D
(本体を想定)	(ジルカロイ-4)
PWR の制御棒	SUS304
(被覆管を想定)	303304

b) **評価対象核種の選定** 評価対象核種については、**附属書 G** の起源元素の選定と同様に、 次の放射性核種を評価対象核種として選定した。

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

- c) **放射化計算コードの選定** 放射化計算コードには、広く使用されて実績のある放射化 計算コードから、評価対象廃棄物ごとに、次の計算コードを選定した。
 - ZrTN804D (BWR チャンネルボックスの本体を想定) : ORIGEN-S

- SUS304 (PWR 制御棒の被覆管を想定) : ORIGEN2

I.2.2 放射化計算の条件の設定

I.2.2.1 元素成分条件

I.2.2.1.1 評価対象核種の起源元素の選定

評価対象核種の起源元素については**, 附属書 G** の起源元素の選定に関する四段階の考え方(一次~四次スクリーニング)に基づき, 評価対象廃棄物(材料)ごとに, **表 I.2** に示す起源元素を選定した。

▲ 表 L2-評価対象核種の起源元素として選定した元素

評価対象廃棄物(材料)	評価対象核種の起源元素
ZrTN804D	N, O, S, Cl, K, Fe, Co, Ni, Cu, Zr, Nb, Mo, Th, U
(ジルカロイ-4)	(14 元素)
SUS304	N, S, Cl, K, Fe, Co, Ni, Cu, Zr, Nb, Mo, Th, U
	(13 元素)

I.2.2.1.2 元素成分条件の設定

a) 元素成分データの収集 各元素の元素分析データについては, 表 I.3 及び表 I.4 に示す

とおり、"評価対象廃棄物自体の品質サンプル又は同じ材料種類のサンプルの化学分析を行う方法"によって収集した元素分析データ(事業者が評価対象廃棄物(材料)中の元素の化学分析を実施した結果^[2]),及び"評価対象廃棄物と同じ材料種類の試料の化学分析を行った文献データ,材料証明書を収集する方法"で収集した文献データ [^{5]~[28]}から、分析データ群を作成した。

なお、元素成分データは、元素分析の履歴などが明確な"元素分析データ"を優先的に使用し、元素分析データが存在しない場合だけ"文献データ"を使用した。

- b) 元素成分条件の設定方式の選択 元素成分条件の設定方法は, a)で作成した分析データ群を使用し, "評価対象廃棄物の元素分析データの濃度分布を設定する方式"を選択した。
- c) 各元素の濃度分布基本形状の設定 評価対象廃棄物である ZrTN804D (チャンネルボックスの本体) 及び SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) の各元素について,主成分元素及び不純物元素の成分管理目標値の有無を踏まえ,濃度分布の基本形状を設定した結果を表 I.5 に示す。ただし,表 I.6 に示す元素については,元素分析データを踏まえ,濃度分布基本形状を設定した。
- d) 各元素の濃度分布条件の設定 各元素の濃度分布条件(平均値,標準偏差,最小値及 び最大値)の設定については,各元素の元素分析データの収集状況を考慮し,元素分 析データ数に応じた分類ごとに,各元素の適切な濃度分布条件の設定を行った。
 - 1) 元素分析データ数が比較的少ない元素 ZrTN804D及びSUS304の元素分析データ数 (検出値)が比較的少ない元素の濃度分布条件は、次のとおり設定し、設定した結果を、図 I.1 に示す。
 - 1.1) 対数正規分布及び正規分布形状で設定した元素 ZrTN804D 及び SUS304 の元素 の濃度分布は、表 1.7 に示すように、対数正規分布又は正規分布を設定した。 なお、標準偏差は、元素分析データの少なさを考慮し、母分散の 95 %信頼上 限値(母分散の推定)を適用して設定した。

		/			
= 17-	37 767 IL 4A	\sim μ	7 L L 48 43	布形状で設定	· T

評価対象	対数正	規分布	正規分布		
廃棄物 (材料)	微量成分元素	不純物成分元素	不純物成分元素 であるが,実デ ータの分布を考 慮し設定	主成分元素	
ZrTN804D	О	N	Ni, Cu	_	
SUS304	N, Co, Cu, Zr, Nb, Mo	S	_	Fe	

1.2) 一様分布形状で設定した元素の場合 主成分である ZrTN804D の Fe, Zr 及び SUS304 の Ni の濃度分布は, データ数が必ずしも十分ではないため, 保守的に

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 JIS 規格の成分管理範囲で設定し、上限値(最大値)及び下限値(最小値)としては、 JIS 規格の成分管理範囲の上限値及び下限値で設定した。

2) 元素分析データ数が非常に少ない元素 元素分析データ数(検出値)が 1 点しかない ZrTN804D の S 及び U は、分布の設定に必要な平均値、標準偏差などを直接評価設定することができない。このため、元素分析データの検出値を平均値とし、保守的な標準偏差を適用して、濃度分布を設定する方法を適用する。濃度分布条件の設定結果を、図 1.2 に示す。

なお、標準偏差には、全ての元素の標準偏差の分布の小さいほうから 90 %の範囲を包含する条件(ここでは、対数正規分布として、標準偏差=0.5(対数))を設定することで、保守性を見込む。

3) 元素分析データに検出下限値しかない元素 表 1.8 に示す元素分析データが全て 検出下限値以下の元素については、検出下限値より低い濃度領域に元素の濃度分 布を仮定して、濃度分布条件を設定する方法を適用することとした。設定した結 果を、図 1.3 に示す。標準偏差は、同一の濃度分布を設定する元素の濃度分布デー タの標準偏差の分布を使用して設定した。

具体的には**図 I.4** に示すように、実際の元素濃度分布は、検出下限値より低い濃度領域にあるが、ここでは、元素濃度分布がより高い濃度で分布するように、検出下限値が元素濃度分布の+2σ (分布の95.4%を包含する範囲の上限値)の位置と仮定し、濃度分布の標準偏差を利用した平均値を設定した。

なお、標準偏差は、平均値の推定に使用する標準偏差は、小さいほうが、元素 濃度分布がより高い濃度で分布することになるため、2)とは異なり、同一の濃度 分布形状を設定する全ての元素の標準偏差の平均値(ここでは、標準偏差=0.2(対 数値))で設定する。

4) 各元素の濃度分布条件設定結果 1) から **3)** に基づき, ZrTN804D 及び SUS304 の 各元素の濃度分布条件を設定した結果を,元素分析データとともに, **図 I.5**, **図 I.6**, 及び表 **I.9**, 表 **I.10** に示す。

評価対象廃棄物	検出下限値しかない元素				
(材料)	不純物成分元素	微量成分元素			
ZrTN804D	Co, Nb, Mo	Cl, K, Th			
SUS304	_	Cl, K, Th, U			

表 1.8 - 元素分析データに検出下限値しかない元素

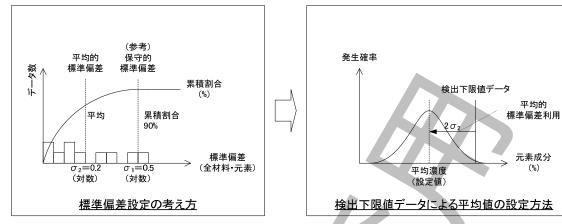


図 I.4-検出下限値による濃度分布条件設定方法

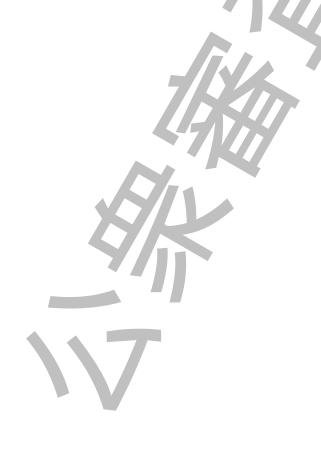


表 I.3-各元素の元素分析データ収集結果(ZrTN804D)

		元素分析データ ^{a)}					文献データ ^{b)}					成分管理目標値
元素		対数正規分布 正規分布(実数)		一様分布							分布	成方官连日標値 (JIS H 4751 ^[3])
儿糸	データ数	平均値 標準偏差 (質量分率%) (平均値+1g)	平均値 (質量分率%) 標準偏差	最小値 (質量分率%)	最大値 (質量分率%)	データ数	平均値 標準偏差 (質量分率%) (平均値+1s)	平均値 (質量分率%)	標準偏差	最小値 (質量分率%)	最大値 (質量分率%)	(JIS H 4751 ⁽³⁾) (質量分率%)
N	21 (0)	3.1 ×10 ⁻³ 3.7 ×10 ⁻³ (-2.5) (0.08	3.2 ×10 ⁻³ 5.2 ×10 ⁻⁴	2.2 ×10 ⁻³	4.1 ×10 ⁻³	10 (1)	(-2.6×10^{-3}) (-2.6×10^{-3}) (0.22)	3.2 ×10 ⁻³	2.0 ×10 ⁻³	1.4 ×10 ⁻³	8.0 ×10 ⁻³	≦ 0.008 (不純物)
0	5 (0)	1.3 ×10 ⁻¹ 1.4 ×10 ⁻¹ (-0.9) (0.01) 1.3 ×10 ⁻¹ 3.7 ×10 ⁻³	1.3 ×10 ⁻¹	1.4 ×10 ⁻¹	5 (0)	1.1 ×10 ⁻¹ 1.3 ×10 ⁻¹ (-0.9) (0.05)	1.1 ×10 ⁻¹	1.3 ×10 ⁻²	9.5 ×10 ⁻²	1.3 ×10 ⁻¹	-
S	0 (0)			-	_	1 (0)	3.5 ×10 ·3 (-2.5)	3.5 ×10 ⁻³	_	_	_	_
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 ⁻¹ 2.2 ×10 ⁻¹ (0.01) 2.1 ×10 ⁻¹ 5.5 ×10 ⁻³	2.1 ×10 ⁻¹	2.2 ×10 ⁻¹	18 (0)	2.1 ×10 ⁻¹ 2.2 ×10 ⁻¹ (0.03)	2.1 ×10 ⁻¹	1.3 ×10 ⁻²	1.8 ×10 ⁻¹	2.4 ×10 ⁻¹	$0.18 \sim 0.24$
Со	0 (21)	(3.3 ×10 ⁻⁴) (-3.5)	(7.6 ×10 ⁻⁴)	(1.0 ×10 ⁻⁵)	(1.0 ×10 ⁻³)	5 (0)	2.8 ×10 ⁻⁴ 9.0 ×10 ⁻⁴ (-3.5) (0.50)	4.7 ×10 ⁻⁴	4.8 ×10 ⁻⁴	1.1 ×10 ⁻⁴	1.0 ×10 ⁻³	≦ 0.002 (不純物)
Ni	11 (10)	4.2 ×10 ⁻³) 4.2 ×10 ⁻³ 3.4 ×10 ⁻⁴	3.5 ×10 ⁻³	4.8 ×10 ⁻³	3 (1)	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	3.5 ×10 ⁻³	1.5 ×10 ⁻³	2.0 ×10 ⁻³	5.0 ×10 ⁻³	≦ 0.007 (不純物)
Cu	0 (0)			ı	_	3 (0)	1.6 ×10 ⁻³ 2.4 ×10 ⁻³ (-2.8) (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	_	_	_	残部
Nb	0 (21)	(2.9 ×10 ⁻³) (-2.5)	(3.9 ×10 ⁻³)	(5.0 ×10 ⁻⁴)	(5.0 ×10 ⁻³)	1 (0)	1.2 ×10 ⁻² (-1.9)	1.2 ×10 ⁻²	_	_	_	≦ 0.010 (不純物)
Мо	0 (21)	(3.3 ×10 ⁻⁴) (-3.5)	(7.6 ×10 ⁻⁴)	(1.0 ×10 ⁻⁵)	(1.0 ×10 ⁻³)	1 (1)	2.0 ×10 ⁻³ (-2.7)	2.0 ×10 ⁻³	_	_	_	≦ 0.005 (不純物)
Th	0 (16)	(1.0 ×10 ⁻⁵) (-5.0)	(1.0 ×10 ⁻⁵) —	(1.0 ×10 ⁻⁵)	(1.0 ×10 ·5)	0 (0)		_	_	_	_	-
U	1 (20)	2.0 ×10 ⁻⁴ (-3.7)	(8.1 ×10 ·5) —	-		2 (0)	3.2 ×10 ⁻⁵ (-4.5) –	3.5 ×10 ⁻⁵	-	2.0 ×10 ⁻⁵	5.0 ×10 ⁻⁵	≦ 3.5E-04 (不純物)

注記1 上記は、元素分析データ及び文献データの平均値、標準偏差などを評価した結果である。また、集計結果のうち、対数正規分布の標準偏差は、"平均値+1g"で表示し、下段(括弧内)に対数値を合わせて表記した。

定配2 エロロ・ハボガリ / 人及シストン / シャース (大手間) たんこく (計画) にんれている。 から、末日間 木シノラ、外数エルカ パッパ・甲原子は、 下っ直 | 10 とながら、 「投(日本) 主配3 平均値、標準偏差などの集計結果のうち、括弧書きは、検出下限値データ変も合わせて記載した。 主配3 平均値、標準偏差などの集計結果のうち、括弧書きは、検出下限値データで集計した結果を意味する(ただし、括弧書きがない場合は、検出値データだけで集計した結果である)。 主配4 データ数が3点未満の元素は、標準偏差の欄を"ー"とした。また、データ数が1点の元素は、一様分布の欄を"ー"とした。

注¹⁾ 元素分析データ: 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)中の元素の化学分析を実施した結果^[2]

b) 文献データ: 一般公開文献情報^{[5],[6],[8],[23]~[28]}

表 I.4-各元素の元素分析データ収集結果 (SUS304)

	元素分析データ						成分管理目標値				
元素	対数正規分布			正規分布(実数) 一村		長分布		文献データ ^{b)} 対数正規分布 正規分布(実数)		一様分布	成分官垤自标值 (JIS G 4305 ^[4])
儿界	データ数	平均値 標準((質量分率%) (平均値		標準偏差	最小値 (質量分率%)	最大値 (質量分率%)	データ数	平均值 標準偏差 (質量分率%) (平均值+1g)	平均値 (質量分率%) 標準偏差	最小値 最大値 (質量分率%) (質量分率%)	(質量分率%)
N	21 (0)	4.6 ×10 ⁻² 5.3 × (-1.3) (0.0	4.6 ×10 ⁻²	6.7 ×10 ⁻³	3.6 ×10 ⁻²	6.2 ×10 ⁻²	5 (0)	5.7 ×10 ⁻² 1.1 ×10 ⁻¹ (0.31)	6.9 ×10 ⁻² 4.7 ×10 ⁻²	3.0 ×10 ⁻² 1.3 ×10 ⁻¹	_
S	9 (0)	3.9 ×10 ⁻³ 5.5 × (-2.4) (0.1	3.9 ×10 ⁻⁵	1.3 ×10 ⁻³	2.0 ×10 ⁻³	6.0 ×10 ⁻³	11 (3)	1.3 ×10 ⁻² 2.8 ×10 ⁻² (0.35)	1.6 ×10 -2 1.1 ×10 -2	3.0 ×10 ⁻³ 3.0 ×10 ⁻²	≦ 0.03
Cl	0 (9)	(2.7 ×10 ⁻⁴) (-3.6)	(7.3 ×10 ⁻⁴) –	(1.0 ×10 ⁻⁴)	(2.0 ×10 ⁻³)	1 (0)	7.0 ×10 ⁻³ (-2,2)	7.0 ×10 ⁻³		-
K	0 (4)	(1.0 ×10 ⁻⁴) (-4.0)	(1.0 ×10 ⁻⁴) –	(1.0 ×10 ⁻⁴)	(1.0 ×10 ⁻⁴)	0 (1)	(3.0 ×10 · 4) (-3.5) –	(3.0 ×10 ⁻⁴)		-
Fe	9 (0)	7.2 ×10 ¹ 7.4 × (1.9) (0.0	7.2 ×10 ⁻¹	1.6 ×10 °	6.9 ×10 ¹	7.3 ×10 ¹	4 (0)	7.0 ×10 ¹ 7.2 ×10 ¹ (1.8) (0.02)	7.0 ×10 ¹ 2.6 ×10 ⁰	6.7 ×10 ¹ 7.3 ×10 ¹	(主成分)
Со	21 (0)	1.2 ×10 ⁻¹ 3.1 × (-0.9) (0.4	1 2 ×10 ⁻¹	8.4 ×10 ⁻²	1.2 ×10 ⁻²	2.9 ×10 ⁻¹	3 (0)	$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	7.7 ×10 ⁻² 6.6 ×10 ⁻²	1.0 ×10 ⁻² 1.4 ×10 ⁻¹	-
Ni	21 (0)	8.7 ×10 ° 9.3 × (0.9) (0.0	8.7 ×10 °	5.7 ×10 ⁻¹	8.0 ×10 °	9.6 ×10 ⁰	18 (0)	9.3 ×10 ° 1.0 ×10 ¹ (0.04)	9.4 ×10 ° 8.0 ×10 -1	8.1 ×10 ° 1.1 ×10 ¹	8.00 ~ 10.50
Cu	0 (0)		_	_	_	- 4	5 (0)	1.6 ×10 ⁻¹ 2.9 ×10 ⁻¹ (-0.8) (0.27)	1.8 ×10 ⁻¹ 9.9 ×10 ⁻²	8.0 ×10 ⁻² 3.1 ×10 ⁻¹	-
Zr	5 (7)	2.8 ×10 ⁻⁴ 4.8 × (-3.6) (0.2	2.8 ×10 ⁻⁴	1.1 ×10 ⁻⁴	1.0 ×10 ⁻⁴	4.0 ×10 ⁻⁴	1 (0)	1.0 ×10 ⁻³ (-3.0)	1.0 ×10 ⁻³		-
Nb	15 (0)	2.0 ×10 ⁻² 3.8 × (-1.7) (0.2	2.0 ×10 ⁻²	1.2 ×10 ⁻²	3.6 ×10 ⁻³	5.8 ×10 ⁻²	2 (0)	9.4 ×10 ⁻³ (-2.0)	9.5 ×10 ⁻³	8.9 ×10 ⁻³ 1.0 ×10 ⁻²	-
Мо	15 (6)	1.6 ×10 ⁻¹ 4.2 × (-0.8) (0.4	1.6 ×10 ⁻¹	7.9 ×10 ⁻²	7.0 ×10 ⁻³	2.7 ×10 ⁻¹	5 (0)	1.3 ×10 ⁻¹ 3.5 ×10 ⁻¹ (-0.9) (0.44)	1.8 ×10 ⁻¹ 1.3 ×10 ⁻¹	3.0 ×10 ⁻² 3.3 ×10 ⁻¹	-
Th	0 (9)	(5.0 ×10 ⁻⁷) (-6.3)	(5.0 ×10 ⁻⁷) –	(5.0 ×10 ⁻⁷)	(5.0 ×10 ⁻⁷)	0 (1)	(1.0 ×10 ⁻⁴) (-4.0)	(1.0 ×10 ⁻⁴)		-
U	0 (9)	(5.0 ×10 ⁻⁷) (-6.3)	(5.0 ×10 ⁻⁷		(5.0 ×10 ⁻⁷)	(5.0 ×10 ⁻⁷)	0 (1)	(2.0 ×10 ⁻⁴) (-3.7)	(2.0 ×10 ⁻⁴)		-

注記1 上記は、元素分析データ及び文献データの平均値、標準偏差などを評価した結果である。また、集計結果のうち、対数正規分布の標準偏差は、"平均値+16"で表示し、下段(括弧内)に対数値を合わせて表記した。

注配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下限値データ数も合わせて記載した。 注配3 平均値、標準偏差などの集計結果のうち、括弧書きは、検出下限値データで集計した結果を意味する(ただし、括弧書きがない場合は、検出値データだけで集計した結果である)。 注配4 データ数が3点未満の元素は、標準偏差の欄を"ー"とした。また、データ数が1点の元素は、一様分布の欄を"ー"とした。

注¹⁾ 元素分析データ: 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)中の元素の化学分析を実施した結果^[2]

b) 文献データ: 一般公開文献情報^{[5]~[22]}

表 I.5-基本的な考え方に従って選択した各元素の濃度分布基本形状

I) A) Andre warre	成分管理	DA MARTINE			
成分管理 条件	主成分元素として 濃度範囲管理	不純物成分元素とし て上限管理	成分管理されていない 微量成分元素		
ZrTN804D	Γ. 7.	N, Co, Ni, Cu, Nb,	O G Cl V Th		
(JIS H 4751 :1998)	Fe, Zr	Mo, U	O, S, Cl, K, Th		
SUS304	Eo Ni	S	N, Cl, K, Co, Cu, Zr,		
(JIS G 4305 :2005)	Fe, Ni	5	Nb, Mo, Th, U		
基本的な濃度分布	正規分布	対数正規分布	対数正規分布		
(形状)	11.7元八八川	A) 数 11 A A A A A A A A A A A A A A A A A	NJ 数亚- 风刀 们		

表 I.6-実際の元素分析データを踏まえ設定した濃度分布基本形状

	材料	ZrTN80	04D	
	元素	Ní	Cu	
元素	成分の区分	不純物成分元素	不純物成分元素	
	的な考え方 よる設定	対数正規分布	対数正規分布	
, .	元素分析データ まえた設定	正規分布	正規分布	
	濃度分布の 推定範囲 (±3σ)	質量分率 2.9×10 ⁻³ % ~質量分率 7.1×10 ⁻³ % (約 2.5 倍)	質量分率 2.7×10 ⁻⁴ % ~質量分率 3.7×10 ⁻³ % (約 14 倍)	
理 由	実際の 元素分析 データ の分布	^{無強権} (s) +3a ^{99.9} 99.5 -3a ^{99.9} 100 -1a 20 -1a 20 -1a 20 -3a 0.1 0.000 0.002 0.004 0.006 0.008 0.010 Ni(質量分率等) 上でも、正規性を示したため。	基本的考え方から選択した"対数正規分布"を仮定すると、JIS 規格で規定されている上限値(不純物成分元素としての許容範囲)を大幅に超えてしまうため、正規分布を適用した。	

表 I.9-ZrTN804D の各元素の濃度分布条件設定結果

	濃度分布の設定				濃度分布条件の設定結果							
元素	成分	濃度分布	基本形状		収集デ	ータ	対数正		正規	分布	一様	分布
	管理条件	選択	設定	分析	文献	データ数	平均値 (質量分率%)	標準偏差 (平均+1σ)	平均値 (質量分率%)	標準偏差	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	\rightarrow	0	_	比較的少	3.2 ×10 ⁻³ (-2.5)	5.0 ×10 ⁻³ (0.2)	_	_	-	-
0	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	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	\rightarrow	_	0	非常に少	4.0 ×10 ⁻³ (-2.4)	1.3 ×10 ⁻² (0.5)	-	_	-	-
Cl	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	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	\rightarrow	0	_	ND値だけ	4.0 ×10 ⁻⁵ (-4.4)	6.3 ×10 ⁻⁵ (0.2)	_	_	-	-
Fe	主成分	一様分布	\rightarrow	0	_	比較的少	-	-	_	_	0.18	0.24
Со	不純物成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	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	0	_	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	_	0	比較的少	_	-	2 ×10 ⁻³	6 ×10 ⁻⁴	-	_
Zr	主成分	一様分布	\rightarrow	0	X	比較的少	-	_	_	_	98	100
Nb	不純物成分	対数正規分布	\rightarrow	0	7	ND値だけ	2.0 ×10 ⁻³ (-2.7)	3.2 ×10 ⁻³ (0.2)	_	_	-	_
Mo	不純物成分	対数正規分布	\rightarrow	0		ND値だけ	4.0 ×10 ⁻⁴ (-3.4)	6.3 ×10 ⁻⁴ (0.2)	_	_	_	_
Th	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	-	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	\rightarrow	0		非常に少	2.5 ×10 ⁻⁴ (-3.6)	7.9 ×10 ⁻⁴ (0.5)	— — ——————————————————————————————————		_	_

建配1 収集データの分析及び文献は、"分析: 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)中の元素の化学分析を実施した結果^[2]"、"文献:一般公開文献情報^{[5],[6],[6],[23]~[29]}"を意味する。

注記2 収集データのデータ数は、濃度分布条件設定の観点から、"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)しかない元素"で区分した。

[|]**注記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、対数正規分布の括弧書き(下段)には、平均値と標準偏差(1σの値)の対数表示値を示した。

注配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.10-SUS304 の各元素の濃度分布条件設定結果

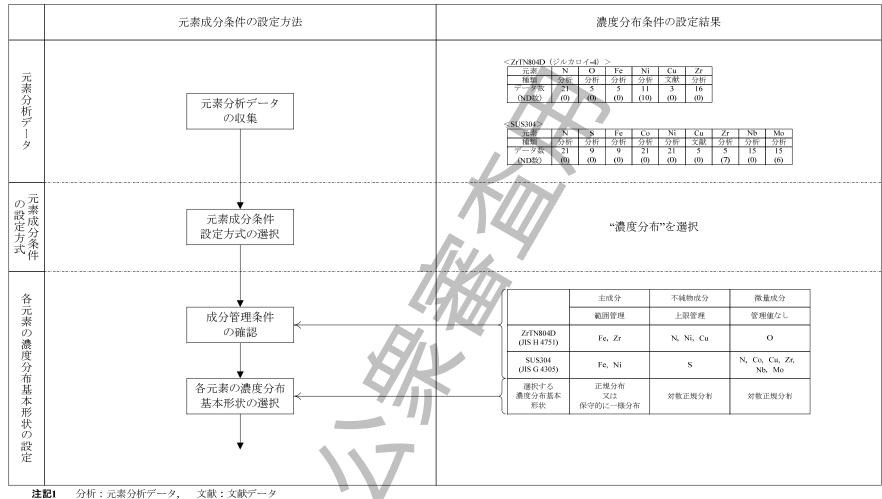
	濃度分布の設定			濃度分布条件の設定結果								
元素	成分	濃度分布	基本形状		収集デ	ータ	対数正	規分布	正規	分布	一様	分布
	管理条件	選択	設定	分析	文献	データ数	平均値 (質量分率%)	標準偏差 (平均+lσ)	平均値 (質量分率%)	標準偏差	最小値(%)	最大値 (質量分率%)
N	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	比較的少	5.0 ×10 ⁻² (-1.3)	6.3 ×10 ⁻² (0.1)	-	_	_	_
S	不純物成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	比較的少	4.0 ×10 ⁻³ (-2.4)	1.0 ×10 ⁻² (0.4)	_	_	_	_
Cl	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	ND値だけ	1.0 ×10 ⁻³ (-3.0)	1.6 ×10 ⁻³ (0.2)	_	_	_	_
K	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	ND値だけ	4,0 ×10 ⁻⁵ (-4,4)	6.3 ×10 ⁻⁵ (0.2)	-	-		-
Fe	主成分	正規分布	\rightarrow	0	_	比較的少		_	72	4	_	_
Со	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	比較的少	1.0 ×10 ⁻¹ (-1.0)	5.0 ×10 ⁻¹ (0.7)	_	_	_	_
Ni	主成分	一様分布	\rightarrow	0	_	比較的少	_	_	_	_	8.0	10.5
Cu	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	_	0	比較的少	1.6 ×10 ⁻¹ (-0.8)	1.3 ×10 ° (0.9)	1	_		_
Zr	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	X	比較的少	3.2 ×10 ⁻⁴ (-3.5)	2.0 ×10 ⁻³ (0.8)	_	_	_	_
Nb	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	Y	比較的少	2.0 ×10 ⁻² (-1.7)	6.3 ×10 ⁻² (0.5)	_	_	_	_
Мо	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0		比較的少	1.3 ×10 ⁻¹ (-0.9)	6.3 ×10 ⁻¹ (0.7)	_	_	_	_
Th	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	-7	ND値だけ	2.0 ×10 ⁻⁷ (-6.7)	3.2 ×10 ⁻⁷ (0.2)	_	_	_	_
U	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	V	ND値だけ	2.0 ×10 ⁻⁷ (-6.7)	3.2 ×10 ⁻⁷ (0.2)	_	_		_

注記1 収集データの分析及び文献は、"分析: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)中の元素の化学分析を実施した結果^[2]"を、"文献:一般公開文献情報^{[5]~[22]}"を意味する。

[|]建記2 収集データのデータ数は、濃度分布条件設定の観点から、"比較的少:元素成分データ数が比較的少ない元素"、"ND値だけ:元素成分データに検出下限値(ND値)しかない元素"で区分した。

注記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、対数正規分布の括弧書き(下段)には、平均値と標準偏差(1σの値)の対数表示値を示した。

[|]注記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。



注記1

ND:検出下限値データ 注記2

図 I.1-元素分析データ数が比較的少ない元素の濃度分布条件の設定方法及び結果

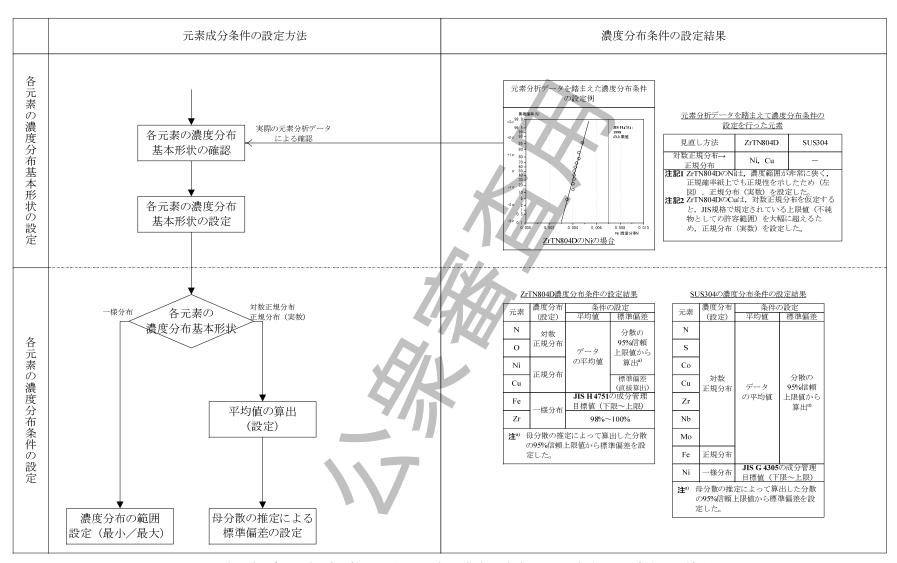
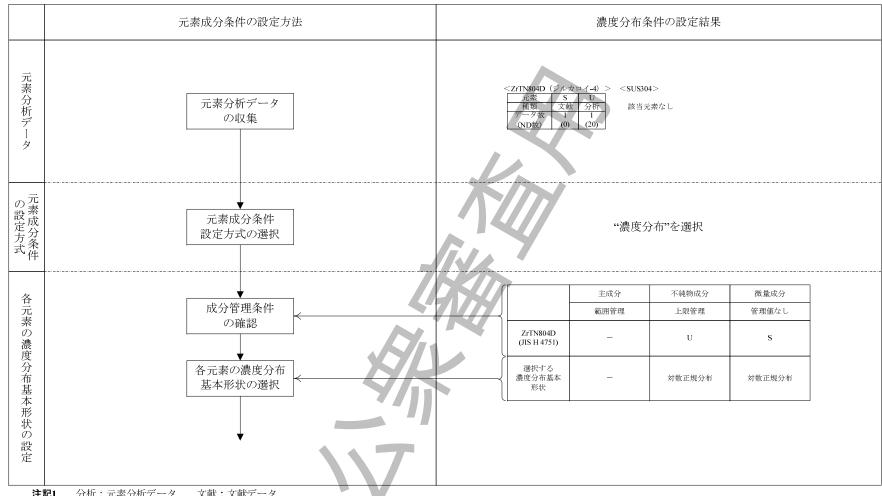


図 I.1-元素分析データ数が比較的少ない元素の濃度分布条件の設定方法及び結果 (続き)

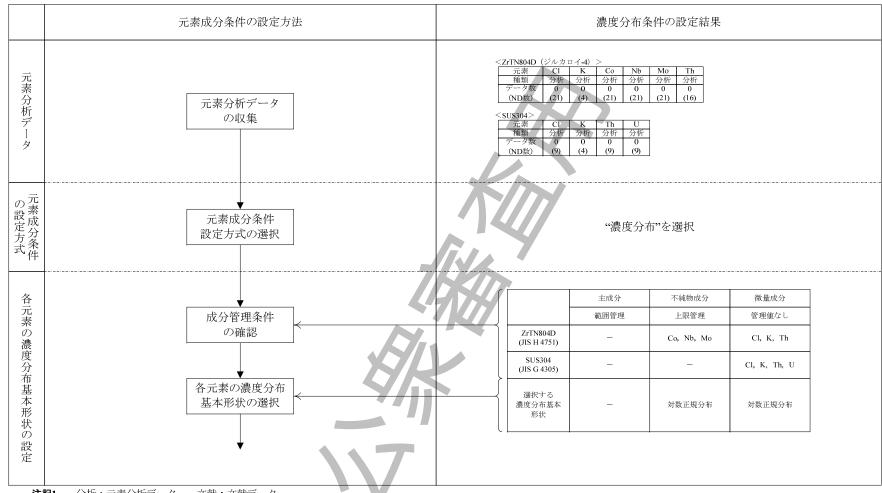


分析:元素分析データ, 文献:文献データ 注記1

注記2 ND:検出下限値データ

図 I.2-元素分析データ数が非常に少ない元素の濃度分布条件の設定方法及び結果

図 I.2-元素分析データ数が非常に少ない元素の濃度分布条件の設定方法及び結果 (続き)



分析:元素分析データ, 文献:文献データ 注記1

注記2 ND:検出下限値データ

図 I.3-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設定方法及び結果

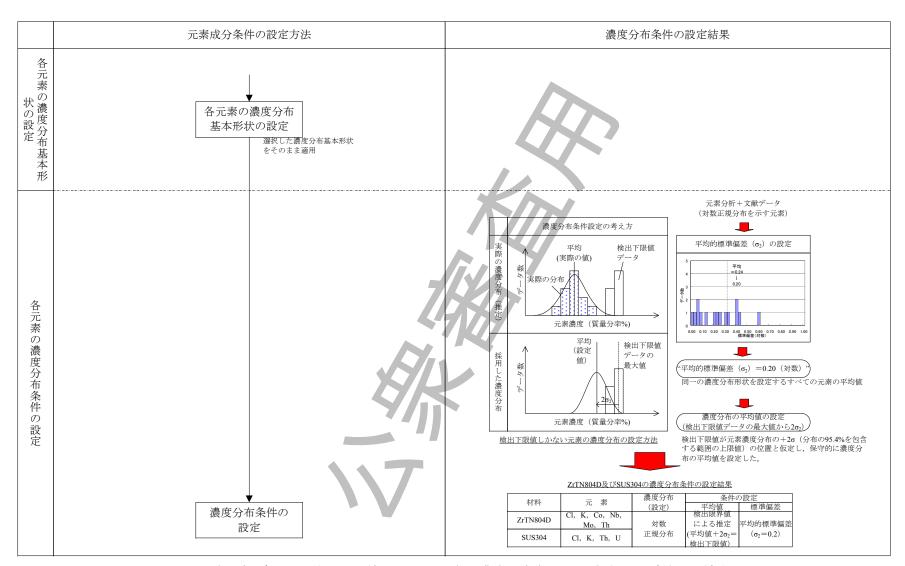
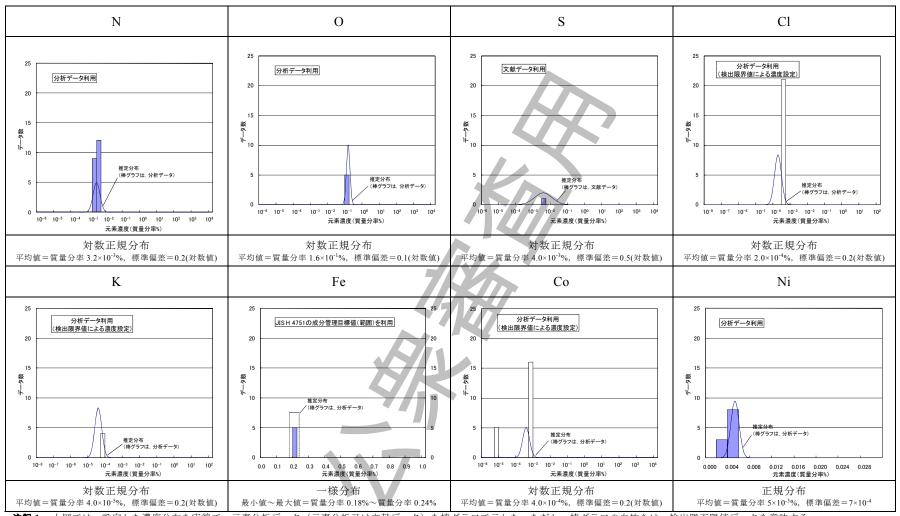
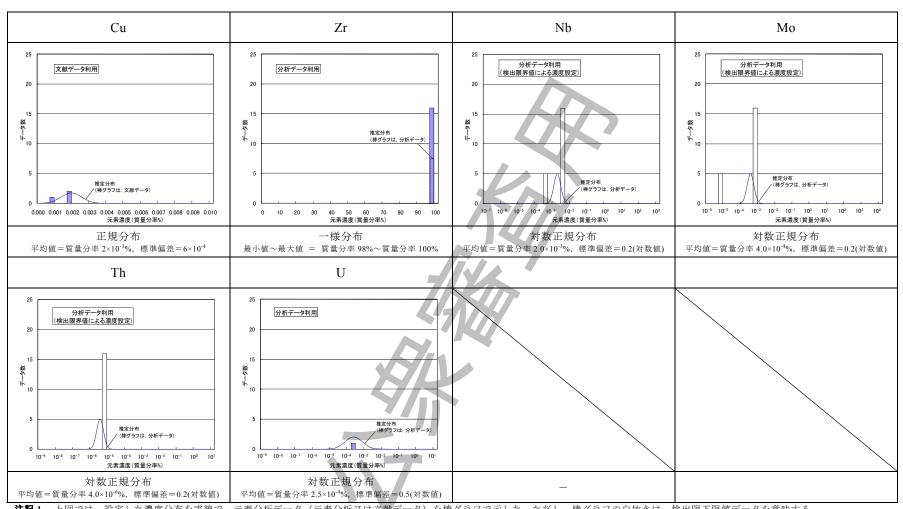


図 I.3-元素分析データに検出下限値しかない元素の濃度分布条件の設定方法及び結果 (続き)



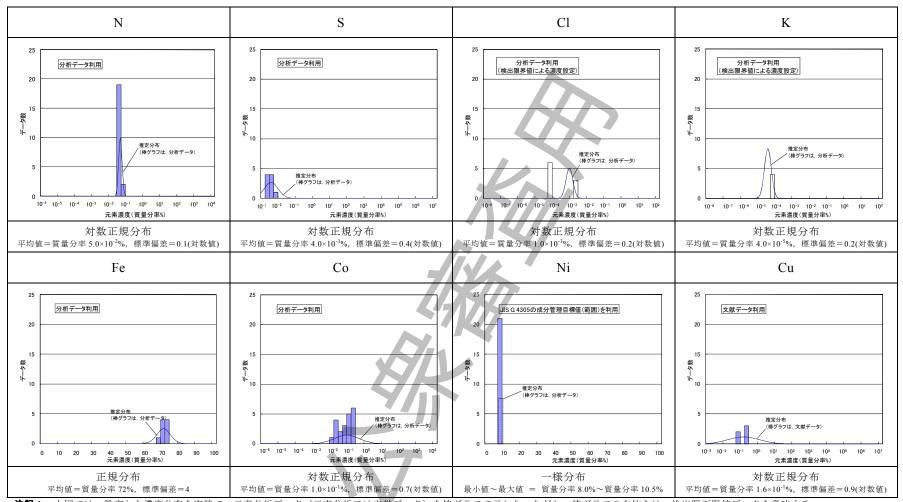
注記1 上図では、設定した濃度分布を実線で、元素分析データ(元素分析又は文献データ)を棒グラフで示した。ただし、棒グラフの白抜きは、検出限下限値データを意味する。 **注記2** 図の下欄には設定した濃度分布基本形状及び元素成分条件(平均、標準偏差又は最小値及び最大値)を記載した。ただし、対数正規分布の標準偏差は、対数値での表示とした。

図 I.5-ZrTN804D の元素分析データ及び濃度分布条件設定結果



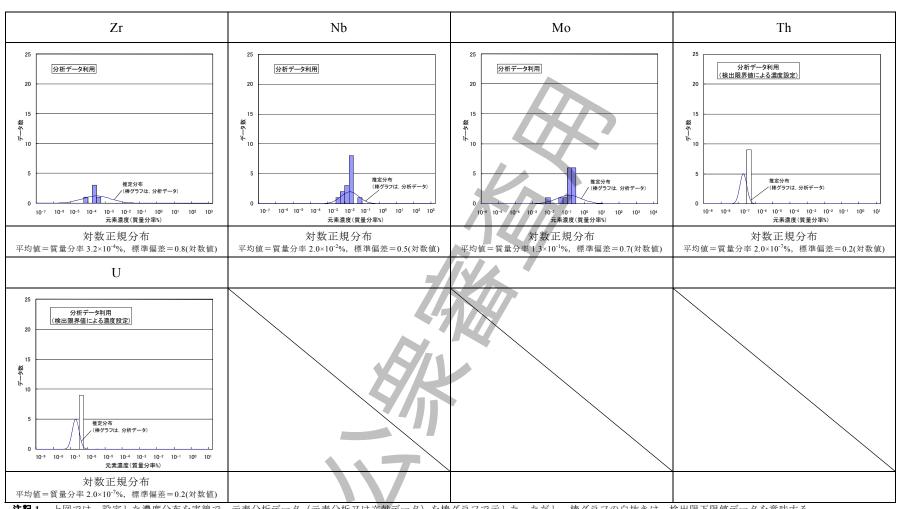
注記1 上図では、設定した濃度分布を実線で、元素分析データ(元素分析又は文献データ)を棒グラフで示した。ただし、棒グラフの白抜きは、検出限下限値データを意味する。 **注記2** 図の下欄には設定した濃度分布基本形状及び元素成分条件(平均、標準偏差又は最小値及び最大値)を記載した。ただし、対数正規分布の標準偏差は、対数値での表示とした。

図 I.5-ZrTN804D の元素分析データ及び濃度分布条件設定結果 (続き)



注記1 上図では、設定した濃度分布を実線で、元素分析データ(元素分析又は文献データ)を棒グラフで示した。ただし、棒グラフの白抜きは、検出限下限値データを意味する。 **注記2** 図の下欄には設定した濃度分布基本形状及び元素成分条件(平均、標準偏差又は最小値及び最大値)を記載した。ただし、対数正規分布の標準偏差は、対数値での表示とした。

図 I.6-SUS304 の元素分析データ及び濃度分布条件設定結果



注記1 上図では、設定した濃度分布を実線で、元素分析データ(元素分析又は文献データ)を棒グラフで示した。ただし、棒グラフの白抜きは、検出限下限値データを意味する。 **注記2** 図の下欄には設定した濃度分布基本形状及び元素成分条件(平均、標準偏差又は最小値及び最大値)を記載した。ただし、対数正規分布の標準偏差は、対数値での表示とした。

図 I.6-SUS304 の元素分析データ及び濃度分布条件設定結果 (続き)

I.2.2.2 中性子条件

I.2.2.2.1 ZrTN804D (BWR チャンネルボックス)

a) 中性子フルエンス率・中性子スペクトルの設定 附属書 G に示したとおり、ZrTN804D (チャンネルボックスの本体)の中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定する上で考慮すべき事項としては、軸方向の出力分布、ボイド率分布及び装荷位置(径方向の分布)がある。チャンネルボックスは、運転の1サイクルを通して同一の装荷位置で中性子照射されるため、附属書 G に示した平均的な条件を設定して得られた中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定条件として利用する。

なお、この附属書の目的が濃度比を用いる場合の適用性評価であることを考慮し、放射化計算結果で算出する難測定核種及び Key 核種の濃度比のばらつきの程度(影響)も把握できるように、平均的な条件に加え、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設定した。

- b) **放射化断面積の設定** ZrTN804D の評価では、放射化計算コードとして ORIGEN-S を適用するため、熱中性子フルエンス率、高速中性子フルエンス率に対する熱中性子フルエンス率の比、及び熱外中性子フルエンス率に対する熱中性子フルエンス率の比を与えることで中性子照射位置ごとの放射化断面積を設定する。
- c) 中性子条件の設定 チャンネルボックスは、燃料集合体として燃料と一緒に原子炉内に 配置され、通常、炉心最外周には燃焼の進んだ反応度の低い燃料集合体が装荷される。 このため、チャンネルボックスの配置位置は、原子炉内中央部の平均的な中性子条件の 領域、炉心最外周位置、a) で設定した制御棒挿入近傍位置などで、中性子フルエンス率・ 中性子スペクトルが異なり、燃料集合体の装荷期間、すなわち中性子照射時間に応じて 幾つか配置位置のローテーションの組合せがある。

チャンネルボックスの配置位置のローテーション(燃料集合体の装荷位置のローテーション)の条件は、実際には運転管理上正確に把握されているものの、この評価においては、配置位置の範囲を網羅することが重要であるため、代表的な配置位置のローテーションとして表 I.11 に示す条件を設定する。また、"形状及び設置方向の条件"については、a) にも示したとおり、チャンネルボックスの中性子フルエンス率・中性子スペクトルは、配置位置ごとに軸方向分布が異なるが、チャンネルボックスの軸方向の中性子照射位置の確率は、一定であるため、表 I.12 に示すとおり、設定した配置位置ごとに軸方向の中性子照射位置を一様分布で設定する。

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)}		配置位置の設定条件
业/ 53.米/-	中性子照射	出現頻度分布	に直位直の設定未行 (ローテーションの種類 ^{d)})
サイクル数	時間		(ローノーションの種類・)
1	2年未満	固 定 ^{b)}	A : 中央
2	2年以上,	配置ローテーションの	B : 中央→中央
	3年未満	種類の一様分布の	C : 中央→近傍
3	3年以上,	配置ローテーションの	D : 中央→中央→中央
	4年未満	種類の一様分布の	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
	5 年未満	種類の一様分布 ©	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	K :中央→中央→中央→中央→最外
		種類の一様分布の	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。
 - 。 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.12-ZrTN804D(BWR チャンネルボックスの本体)の形状及び設置方向の設定

	出現頻度分布	中性子照射位置条件(分割位置)
原子炉の	軸方向の一様分布 a)	1~25
軸方向の設置	(25 分割)	1 723

注^{a)} BWR チャンネルボックスの軸方向位置を 1 (炉心下部) から 25 に分割し,この中から擬似一様 乱数で中性子照射位置を設定する。また、軸方向位置については、原子炉内は、有効燃料部の 24 分割した各中性子照射位置(分割位置=1~24)、原子炉外は、共通の中性子照射位置(分割位置 は 25) として扱う。

I.2.2.2.2 SUS304 (PWR 制御棒)

a) 中性子フルエンス率・中性子スペクトルの設定 附属書 G に示したとおり、SUS304(PWR 制御棒の被覆管)の中性子照射位置として考慮すべき事項は、定格出力運転時における制御棒の原子炉軸方向の配置位置(定格出力運転時の制御位置(以下,D バンクという。)、及び制御棒全引抜き位置(以下,ARO バンクという。))である。

このため、SUS304(PWR 制御棒の被覆管)の放射化計算の条件としての中性子フルエンス率については、**附属書 G** に示した 2 ループプラントの代表的な条件における軸方向中性子フルエンス率分布を制御棒の出力比=1(集合体平均出力/炉心平均出力=1)で規格化した結果(D バンク、ARO バンクごとの軸方向中性子フルエンス率分布)を、中性子スペクトルについては、**図 I.7** に示す定格出力運転時の原子炉の軸方向の配置位置(D バンク、ARO バンク)ごとの各中性子照射位置の中性子スペクトルを、それぞれ利用する。

- b) 放射化断面積の設定 附属書 G に示したとおり、PWR 制御棒では、放射化断面積の濃度 比への影響は、小さく、中性子照射位置ごとの詳細な放射化断面積の設定は基本的に不 要であるものの、ここでは、この附属書の目的が濃度比を用いる場合の適用性評価であ ることを考慮し、放射化計算結果で算出する難測定核種及び Key 核種の濃度比のばらつ きの程度(影響)も把握できるように、図 1.7 に示す定格出力運転時の原子炉の軸方向の 配置位置ごとの中性子スペクトルに基づき、各代表的中性子照射位置の放射化断面積を それぞれ設定する。
- c) 中性子条件の設定 PWR 制御棒の運転サイクル間の定格出力運転時の原子炉の軸方向 の燃焼制御のための配置位置の組合せは、一般的に、"ARO バンク照射から D バンク連続"、"D バンク照射から ARO バンク照射"、"ARO バンク及び D バンクの交互照射"の 3 ケースがある。

¹⁴C, ⁶³Ni のような比較的長半減期の核種の放射能濃度は、中性子照射量の合計に依存して増大するため、配置位置の影響は、基本的に小さいものの、⁶⁰Co のような比較的短半減期の(減衰の影響を受けやすい)核種の放射能濃度は、最終中性子照射時の条件での影響を受けやすい(例えば、最終中性子照射時に D バンクでの強い中性子照射を受けた場合のほうが減衰による核種濃度低下の影響を受けにくい)。

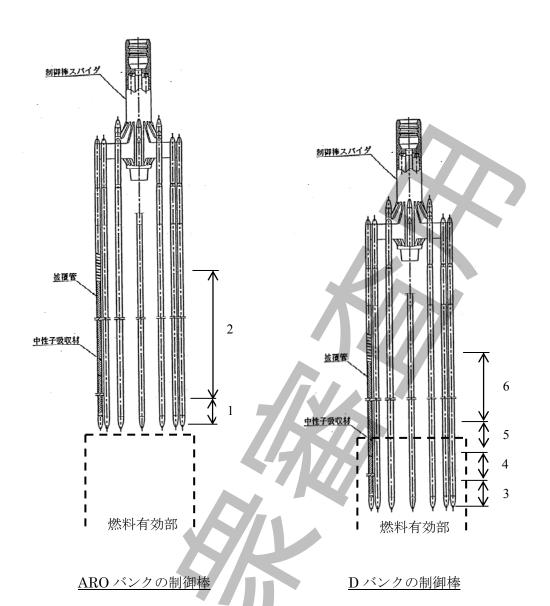
このため、この附属書における濃度比を用いる場合の適用性評価では、Key 核種に ⁶⁰Co を利用する場合(I.2.4.1 参照)を考慮し、 ⁶⁰Co 量が小さくなる(難測定核種及び Key 核種の濃度比が大きくなる=保守的な評価となる)配置位置として、"D バンク照射から ARO バンク照射"を代表的な配置位置の組合せパターン条件(固定)として設定することとした。また、軸方向の中性子照射位置については、PWR 制御棒の先端から 0.75 m までの位置で全体を代表させ、範囲内で一様分布を想定する。

上記を整理した結果を,表 I.13 に示す。

表 I.13-SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) の中性子条件の出現頻度分布の設定

	出現頻度分布	設定条件
配置位置	代表配置位置の組合せパターン (固定)	D バンク照射から ARO バンク照射
形状及び設置方向	軸方向分布の一様分布	最小値= 0 m (先端) 最大値= 0.75 m





- 1 ARO バンクの制御棒先端から 0 m~0.1 m 位置
 - 2 ARO バンクの制御棒先端から 0.1 m~0.75 m 位置 a)
 - 3 D バンクの制御棒先端から 0 m~0.1 m 位置
 - 4 Dバンクの制御棒先端から 0.1 m~0.2 m 位置
 - 5 Dバンクの制御棒先端から 0.2 m~0.3 m 位置
 - 6 Dバンクの制御棒先端から 0.3 m~0.75 m 位置 a)
- 注 a) 保守的に ARO バンクの制御棒先端から 0.1 m~0.2 m の放射化断面積で代表。

図 I.7-PWR 制御棒の放射化断面積を設定した中性子照射位置

I.2.2.3 中性子照射条件

I.2.2.3.1 ZrTN804D (BWR チャンネルボックス)

ZrTN804D (チャンネルボックスの本体) の中性子照射条件のうち、中性子照射時間については、燃料集合体の装荷実績の実態調査結果に基づき、**表 I.14** に示す条件で合計時間を設定する。

なお、中性子照射時間については、合計時間を、中性子条件で設定した配置位置(1~5 サイクルの配置位置のローテーション)に応じて、各サイクルに均等設定(中性子照射時間の合計を運転サイクル数で除して算出)する。

中性子照射停止時間(原子炉供用期間中)については、BWR の設備利用率を 70 %と設定し、中性子条件で設定した配置位置の間に均等設定 ⁶⁾する。

注 ⁶ 中性子照射停止時間の合計=中性子照射時間の合計÷0.7 (設備利用率)×0.3 (1-設備利用率)。これを中性子条件の配置位置に応じ、各配置位置の間に均等設定した (例えば、配置位置のローテーションが"中央→中央→中央"の場合、"中央→停止→中央→停止→中央"となるよう、中性子照射停止時間の合計を2分割(均等)し、停止の条件として設定した)。

なお,運転サイクル数=1となる配置位置固定の条件(中性子照射時間2年未満)では,中性子照射停止時間は,考慮しない。

表 I.14-ZrTN804D (BW)	R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	約13000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。	正規分布	平 均 値=1 786 日
時間の条件	燃焼度: 正規分布		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。

I.2.2.3.2 SUS304 (PWR 制御棒)

SUS304 (PWR 制御棒の被覆管)の中性子照射条件のうち、中性子照射時間については、Dバンク、ARO バンクごとの中性子照射実績の実態調査結果に基づき、**表 I.15** に示す条件を設定する。

中性子照射停止時間 (原子炉供用期間中) については、PWR の設備利用率を 70 %と設定し、運転サイクルごとに均等設定する。

なお、運転サイクル数については、まず、中性子照射期間及び中性子照射停止時間の合計 (D バンク + ARO バンク + 中性子照射停止) から 13 ヶ月を引いた値 7 を 18.6 ヶ月 8 で除し、

サイクル数を算定した上で、これを整数回に補正 (小数点以下切り上げ) することで設定する。

- 注⁷⁾ 最終中性子照射後に照射停止時間を設定しないことへの配慮。 13 ヶ月は、電気事業法施行規則に示される定期検査の間隔(運転サイクルの最大時間相当)。
 - 8) 電気事業法施行規則に示される定期検査の間隔(運転サイクルの最大時間相当)の 13 ヶ月 (18.6 ヶ月の 70 %) 及びこれに対応する中性子照射停止時間 5.6 ヶ月 (18.6 ヶ月の 30 %) の合計。

表 I.15-SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) の中性子照射時間の出現頻度分布の設定

	中性子照射時間の実態調査結果	設定頻度分布	中性子照射時間の設定条件
Dバンク	約7百数十体の制御棒の制御位置 ごとの中性子照射時間の実態調 査結果,次の実態分布が評価され	指数分布	y=534.12e ^{-0.8254x} (x:中性子照射時間(年), y:発生頻度)
ARO バンク	た。 D バンク : 指数分布 ARO バンク : 正規分布	正規分布	平均値 = 7.68 年 標準偏差= 2.92 年



I.2.3 放射化計算

I.2.3.1 放射化計算用データの設定

濃度比を用いる場合の基本的な考え方は、評価対象となる放射化金属等を実際にサンプリング及び放射化学分析した多数の代表試料の放射能濃度データによって難測定核種及び Key 核種の濃度比(すなわち、スケーリングファクタ)を評価、設定する代わりに、適切に代表した放射化計算の条件での多数の放射化計算結果(評価データ)によって難測定核種及び Key 核種の濃度比を評価、設定する。

したがって、対象となる放射化金属等の元素成分条件、中性子条件及び照射条件の範囲、 並びにその分布を適切に設定し、これを網羅した代表的な放射化計算用の入力データ群を作成して、放射化計算による評価を進めることが必要となる。

このため、放射化計算の条件としての放射化計算コードへの入力条件として設定するデータ(すなわち、放射化計算用データ)については、評価対象廃棄物の中性子照射条件などの 実績などを十分考慮した放射化計算範囲を適切に設定した上で、それぞれの計算条件をラン ダムにサンプリングすることで、次の設定必要項目ごとに放射化計算用入力データを作成する。

- 元素成分条件 : 分析結果などに基づき元素濃度の分布を設定

- 中性子条件 : 評価対象廃棄物の形状,原子炉内外での設置状態,及び運転サイクル

ごとにローテーションした配置位置,原子炉供用期間中の運転モードによる配置位置(以下,配置位置という。)の実績を考慮し,中性子照射位置の出現頻度分布を適切に設定し、この中性子照射位置での中性

子条件を設定

- 照射条件 : 原子炉での実際の中性子照射実績を踏まえて設定

元素成分条件は, **I.2.2.1.2** で設定した化学分析データなどに基づく分布を踏まえ,元素ごとに適切な濃度分布を設定した。

中性子条件は,評価対象である ZrTN804D (BWR チャンネルボックスの本体) 及び SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) に対する中性子条件を設定する上での評価対象廃棄物の配置位置の移動条件及び形状,設置方向の原子炉軸方向の一様分布を考慮して **I.2.2.2** で設定した中性子条件とした。

中性子照射条件は、**附属書** B に示したように、中性子照射条件は、全体的な設定値が同一であれば、各運転サイクルの間の差異の影響は、非常に小さいため、**I.2.2.3** で設定した実態の分布を踏まえた中性子照射時間及び均等設定した中性子照射停止期間とした。

元素成分条件,中性子条件及び照射条件の放射化計算の条件の出現頻度分布の設定結果を まとめたものを、**表 I.16** に示す。

表 I.16-放射化計算の条件の出現頻度分布の設定(設定結果の整理)

		放射化計算の条件を決定するための出現頻度分布の設定				
設定必要項目		BWR チャンネルボックスの本体	PWR 制御棒の被覆管			
		(ZrTN804D)	(SUS304)			
元素成分	各元素の	対数正規分布,正	規分布, 一様分布			
条件	濃度分布	(元素ごとに設定, 表 1.9)	及び表 I.10 に詳細を示す。)			
中性子	配置位置の 出現頻度分布	中性子照射時間に応じた代表的 配置位置のローテーション の組合せパターン a)	代表的照射パターン組合せ での設定 (D バンク照射後, ARO バンク 照射のパターン)			
条件	形状及び設置 状態の出現頻 度分布	軸方向の一様分布も	軸方向の一様分布 ^{c)}			
中性子	中性子照射 時間の分布	正規分布	D バンク: 指数分布 ^{d)} ARO バンク: 正規分布			
照射 条件	中性子照射 停止時間	運転サイクルごとに均等設定 ⁶⁾ (設備利用率を 70%とした)	運転サイクルごとに均等設定 ⁶⁾ (設備利用率を 70 %とした)			
	11 77:4119	(BX VIII 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	(HX NIH 1 1 1 1 1 1 0 1 0 C 0 1 C)			

注^{a)} 中性子照射時間ごとの配置位置のローテーションの組合せパターン(**例** 3 サイクル照射の場合, 最外周-中央部-中央部などの組合せ)の分布で出現する。

なお、配置位置ローテーションの組合セパターンは、中性子照射時間に依存する。

- b) チャンネルボックス全体の原子炉内の軸方向位置の一様分布とした。
- 。) 制御棒の放射能のほとんどを占める先端から 0.75 m までの炉心軸方向位置内で一様分布とした。
- d) Dバンクにおける制御棒の中性子照射期間は、正規分布が認められ、AROバンクにおける制御棒の中性子照射期間は、指数分布が認められた。
- e) 設備利用率を70%とし、運転サイクルごとに中性子照射停止時間を均等に設定した。

放射化計算用データの作成方法は、擬似乱数を使用したランダムサンプリング (40 点) によって作成した。具体的には、**表 I.16** に示した放射化計算の条件の出現頻度分布として決定した分布形状、データなどに基づく分布範囲を踏まえ、次の方法を適用した。

なお、放射化計算用入力データの作成結果は、表 I.17 から表 I.20 に示すとおりである。

- a) 対数正規分布及び正規分布の場合 ランダムサンプリングのための乱数発生法として JIS Z 9031:2012 に示されているメルセンヌツイスター法を採用し、擬似乱数を必要数 発生させ、分布設定のために評価した平均値、標準偏差を使用した逆関数法^[29]で、放射 化計算用入力データを作成した。
- b) **一様分布の場合** a)と同様の方法で発生させた擬似乱数の範囲(0 から 1)を一様分布の 最小から最大の範囲に変換して放射化計算用入力データを作成した。
- c) 指数分布の場合 a)と同様の方法で擬似乱数を発生させ、JIS Z 9031:2012 に示されている指数分布に関する擬似乱数の生成方法で、放射化計算用入力データを作成した。

I.2.3.2 放射化計算の実施

I.2.3.1 で設定した 40 点の放射化計算用データに基づき, BWR のチャンネルボックスの本体 (ZrTN804D) 及び PWR 制御棒の被覆管 (SUS304) を評価対象廃棄物とする放射化計算を行った。計算結果を, 表 **I.21** 及び表 **I.22** に示す。

なお, α核種に関しては, ²³⁷Np で代表させた。

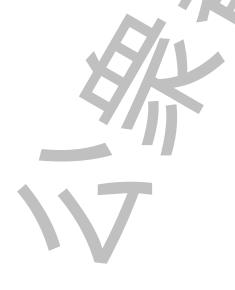


表 I.17-ZrTN804D の元素成分条件の放射化計算用データの設定結果

単位·質量分率%

													- 単	位:質量分率%
計算 No.	N	О	S	Cl	K	Fe	Co	Ni	Cu	Zr	Nb	Mo	Th	U
1	5.94 ×10 ⁻³	1.57 ×10 ⁻¹	8.45 ×10 ⁻³	2.33 ×10 ⁻⁴	2.63 ×10 ⁻⁵	2.15 ×10 ⁻¹	3.40 ×10 ⁻⁴	5.38 ×10 ⁻³	2.46 ×10 ⁻³	9.83 ×10 ¹	2.19 ×10 ⁻³	9.48 ×10 ⁻⁴	3.24 ×10 ⁻⁶	2.94 ×10 ⁻⁵
2	6.40 ×10 ⁻³	2.16 ×10 ⁻¹	2.06 ×10 ⁻³	1.60 ×10 ⁻⁴	2.89 ×10 ⁻⁵	1.82 ×10 ⁻¹	3.93 ×10 ⁻⁴	4.89 ×10 ⁻³	1.50 ×10 -3	9.99 ×10 ¹	1.15 ×10 ⁻³	4.86 ×10 ⁻⁴	2.44 ×10 ⁻⁶	2.92 ×10 ⁻⁴
3	2.44 ×10 ⁻³	1.10 ×10 ⁻¹	4.07 ×10 ⁻³	1.44 ×10 ⁻⁴	4.39 ×10 ⁻⁵	1.80 ×10 ⁻¹	3.00 ×10 ⁻⁴	4.41 ×10 ⁻³	1.68 ×10 ⁻³	9.87 ×10 ¹	1.08 ×10 ⁻³	5.00 ×10 ⁻⁴	4.85 ×10 ⁻⁶	9.33 ×10 ⁻⁴
4	4.91 ×10 ⁻³	1.79 ×10 ⁻¹	4.98 ×10 ⁻³	1.73 ×10 ⁻⁴	3.32 ×10 ⁻⁵	2.03 ×10 ⁻¹	4.51 ×10 ⁻⁴	5.51 ×10 ⁻³	3.30×10^{-3}	9.80 ×10 ¹	2.28 ×10 ⁻³	2.68 ×10 ⁻⁴	8.22 ×10 ⁻⁶	4.90 ×10 ⁻⁴
5	3.74 ×10 ⁻³	1.42 ×10 ⁻¹	4.73 ×10 ⁻⁴	1.67 ×10 ⁻⁴	2.84 ×10 ⁻⁵	1.95 ×10 ⁻¹	1.83 ×10 ⁻⁴	5.02 ×10 ⁻³	1.53 ×10 ⁻³	9.98 ×10 ¹	2.69 ×10 ⁻³	3.37 ×10 ⁻⁴	6.25 ×10 ⁻⁶	3.62 ×10 ⁻⁴
6	3.24 ×10 ⁻³	1.63 ×10 ⁻¹	1.17 ×10 ⁻³	1.56 ×10 ⁻⁴	4.79 ×10 ⁻⁵	1.87 ×10 ⁻¹	3.11 ×10 ⁻⁴	3.81 ×10 ⁻³	2.58 ×10 ⁻³	9.90 ×10 ¹	2.40 ×10 ⁻³	4.80 ×10 ⁻⁴	3.39 ×10 ⁻⁶	6.52 ×10 ⁻⁴
7	4.24 ×10 ⁻³	1.77 ×10 ⁻¹	3.42 ×10 ⁻³	1.42 ×10 ⁻⁴	7.03 ×10 ⁻⁵	2.39 ×10 ⁻¹	3.00 ×10 ⁻⁴	5.37 ×10 ⁻³	2.41 ×10 ⁻³	9.97 ×10 ¹	9.98 ×10 ⁻⁴	8.39 ×10 ⁻⁴	2.88 ×10 ⁻⁶	1.26 ×10 ⁻³
8	1.90 ×10 ⁻³	1.59 ×10 ⁻¹	6.44 ×10 ⁻⁴	2.13 ×10 ⁻⁴	4.44 ×10 ⁻⁵	1.82 ×10 ⁻¹	2.21 ×10 ⁻⁴	5.26 ×10 ⁻³	1.86 ×10 ⁻³	9.81 ×10 ¹	1.64 ×10 ⁻³	4.98 ×10 ⁻⁴	5.27 ×10 ⁻⁶	1.81 ×10 ⁻⁴
9	3.81 ×10 ⁻³	1.29 ×10 ⁻¹	1.00 ×10 ⁻³	1.32 ×10 ⁻⁴	6.82 ×10 ⁻⁵	2.27 ×10 ⁻¹	4.12 ×10 ⁻⁴	3.79 ×10 ⁻³	3.14 ×10 ⁻³	9.80 ×10 ¹	1.38 ×10 ⁻³	6.81 ×10 ⁻⁴	2.99 ×10 ⁻⁶	3.30 ×10 ⁻³
10	4.06 ×10 ⁻³	2.06 ×10 ⁻¹	3.44 ×10 ⁻³	6.15 ×10 -5	8.43 ×10 -5	2.08 ×10 ⁻¹	6.12 ×10 ⁻⁴	4.13 ×10 -3	1.27 ×10 ⁻³	9.81 ×10 ¹	2.40 ×10 ⁻³	7.35 ×10 ⁻⁴	4.39 ×10 ⁻⁶	4.84 ×10 -5
11	3.01 ×10 ⁻³	1.49 ×10 ⁻¹	8.61 ×10 ⁻⁴	1.71 ×10 ⁻⁴	2.99 ×10 ⁻⁵	2.21 ×10 ⁻¹	2.94 ×10 ⁻⁴	4.81 ×10 ⁻³	2.01 ×10 ⁻³	9.97 ×10 ¹	3.41 ×10 ⁻³	2.47 ×10 ⁻⁴	1.69 ×10 ⁻⁶	1.30 ×10 ⁻⁴
12	4.13 ×10 ⁻³	1.26 ×10 ⁻¹	6.01 ×10 ⁻⁵	3.43 ×10 ⁻⁴	2.22 ×10 ⁻⁵	2.00 ×10 ⁻¹	3.72 ×10 ⁻⁴	4.57 ×10 ⁻³	2.31 ×10 ⁻³	9.97 ×10 ¹	8.99 ×10 ⁻⁴	9.16 ×10 ⁻⁴	4.78 ×10 ⁻⁶	9.73 ×10 ⁻⁵
13	6.34 ×10 ⁻³	1.73 ×10 ⁻¹	1.14 ×10 ⁻²	1.58 ×10 ⁻⁴	4.85 ×10 ⁻⁵	2.34 ×10 ⁻¹	2.35 ×10 ⁻⁴	5.25 ×10 ⁻³	1.43 ×10 ⁻³	9.82 ×10 ¹	2.29 ×10 ⁻³	3.95 ×10 ⁻⁴	3.51 ×10 ⁻⁶	1.29 ×10 ⁻⁴
14	2.33 ×10 ⁻³	1.37 ×10 ⁻¹	1.19 ×10 ⁻³	1.91 ×10 ⁻⁴	1.95 ×10 ⁻⁵	2.11 ×10 ⁻¹	4.85 ×10 ⁻⁴	4.00 ×10 ⁻³	1.60 ×10 ⁻³	1.00 ×10 ²	2.03 ×10 ⁻³	4.05 ×10 ⁻⁴	4.32 ×10 ⁻⁶	1.11 ×10 ⁻⁴
15	3.03 ×10 ⁻³	1.56 ×10 ⁻¹	3.30 ×10 ⁻³	1.84 ×10 ⁻⁴	5.55 ×10 ⁻⁵	2.16 ×10 ⁻¹	1.09 ×10 -3	4.59 ×10 ⁻³	7.40 ×10 ⁻⁴	9.94 ×10 ¹	1.26 ×10 ⁻³	2.32 ×10 ⁻⁴	5.00 ×10 ⁻⁶	6.68 ×10 -5
16	6.47 ×10 ⁻³	1.75 ×10 ⁻¹	1.39 ×10 ⁻³	1.80 ×10 ⁻⁴	4.81 ×10 -5	2.34 ×10 ⁻¹	1.50 ×10 ⁻⁴	5.32 ×10 ⁻³	2.05 ×10 ⁻³	9.91 ×10 ¹	2.85 ×10 ⁻³	1.92 ×10 ⁻⁴	2.85 ×10 ⁻⁶	3.61 ×10 ⁻⁴
17	8.02 ×10 ⁻³	1.35 ×10 ⁻¹	6.30 ×10 ⁻⁴	4.59 ×10 ⁻⁴	8.71 ×10 ⁻⁵	2.20 ×10 ⁻¹	4.79 ×10 ⁻⁴	5.68 ×10 ⁻³	1.33 ×10 -3	9.83 ×10 ¹	3.94 ×10 ⁻³	9.02 ×10 ⁻⁴	9.48 ×10 ⁻⁶	6.28 ×10 ⁻⁴
18	1.83 ×10 ⁻³	1.32 ×10 ⁻¹	3.28 ×10 ⁻³	1.22 ×10 ⁻⁴	2.39 ×10 ⁻⁵	2.28 ×10 ⁻¹	2.73 ×10 ⁻⁴	4.76 ×10 ⁻³	1.58 ×10 ⁻³	9.88 ×10 ¹	1.84 ×10 ⁻³	1.87 ×10 ⁻⁴	4.44 ×10 ⁻⁶	3.12 ×10 ⁻⁴
19	3.07 ×10 ⁻³	1.02 ×10 ⁻¹	1.52 ×10 ⁻³	1.79 ×10 ⁻⁴	4.46 ×10 -5	2.01 ×10 ⁻¹	3.86 ×10 ⁻⁴	3.99 ×10 ⁻³	2.21 ×10 ⁻³	9.96 ×10 ¹	2.87 ×10 ⁻³	5.73 ×10 ⁻⁴	5.89 ×10 ⁻⁶	4.00 ×10 ⁻⁴
20	3.39 ×10 ⁻³	1.20 ×10 ⁻¹	2.16 ×10 ⁻³	1.44 ×10 ⁻⁴	4.18 ×10 -5	2.10 ×10 ⁻¹	3.80 ×10 ⁻⁴	4.33 ×10 ⁻³	1.18 ×10 ⁻³	9.95 ×10 ¹	2.05 ×10 ⁻³	1.85 ×10 ⁻⁴	2.54 ×10 ⁻⁶	7.64 ×10 ⁻⁴
21	5.77 ×10 ⁻³	2.40 ×10 ⁻¹	6.04 ×10 ⁻³	1.19 ×10 ⁻⁴	5.60 ×10 -5	2.03 ×10 ⁻¹	3.09 ×10 ⁻⁴	5.21 ×10 ⁻³	1.47 ×10 ⁻³	9.91 ×10 ¹	2.31 ×10 ⁻³	8.57 ×10 ⁻⁴	4.22 ×10 ⁻⁶	1.56 ×10 ⁻³
22	1.92 ×10 ⁻³	2.07 ×10 ⁻¹	2.94 ×10 ⁻³	1.61 ×10 ⁻⁴	2.67 ×10 ⁻⁵	1.96 ×10 ⁻¹	6.34 ×10 ⁻⁴	4.40 ×10 ⁻³	1.89 ×10 ⁻³	9.91 ×10 ¹	1.44 ×10 ⁻³	1.86 ×10 ⁻⁴	4.51 ×10 ⁻⁶	4.53 ×10 ⁻⁴
23	9.06 ×10 ⁻³	1.27 ×10 ⁻¹	2.74 ×10 ⁻³	2.20 ×10 ⁻⁴	1.10 ×10 ⁻⁴	2.39 ×10 ⁻¹	3.90 ×10 ⁻⁴	5.39 ×10 ⁻³	3.04 ×10 ⁻³	9.84 ×10 ¹	1.91 ×10 -3	4.97 ×10 ⁻⁴	2.96 ×10 ⁻⁶	1.51 ×10 ⁻⁴
24	6.65 ×10 ⁻³	9.29 ×10 ⁻²	3.84 ×10 ⁻³	2.42 ×10 ⁻⁴	2.61 ×10 -5	2.09 ×10 ⁻¹	5.82 ×10 ⁻⁴	5.70 ×10 ⁻³	9.90 ×10 ⁻⁴	9.83 ×10 ¹	1.38 ×10 -3	5.02 ×10 ⁻⁴	2.65 ×10 ⁻⁶	6.82 ×10 ⁻⁴
25	1.67 ×10 ⁻³	1.46 ×10 ⁻¹	1.72 ×10 ⁻³	3.52 ×10 ⁻⁴	1.64 ×10 -5	2.29 ×10 ⁻¹	2.37 ×10 ⁻⁴	4.65 ×10 ⁻³	3.05 ×10 ⁻³	9.91 ×10 ¹	3.15 ×10 ⁻³	3.60 ×10 ⁻⁴	2.12 ×10 ⁻⁶	2.74 ×10 ⁻⁴
26	3.21 ×10 ⁻³	1.26 ×10 -1	2.36 ×10 ⁻³	1.01 ×10 ⁻⁴	3.04 ×10 -5	2.38 ×10 ⁻¹	6.89 ×10 ⁻⁴	5.27 ×10 ⁻³	2.00 ×10 ⁻³	9.98 ×10 ¹	3.00 ×10 ⁻³	5.05 ×10 ⁻⁴	6.64 ×10 ⁻⁶	2.55 ×10 ⁻⁴
27	2.78 ×10 ⁻³	2.05 ×10 ⁻¹	1.77 ×10 -3	4.19 ×10 ⁻⁴	3.35 ×10 -5	2.07 ×10 ⁻¹	6.79 ×10 ⁻⁴	5.14 ×10 ⁻³	1.21 ×10 -3	9.86 ×10 ¹	9.12 ×10 ⁻⁴	4.97 ×10 ⁻⁴	3.14 ×10 ⁻⁶	2.88 ×10 ⁻⁴
28	5.79 ×10 ⁻³	1.65 ×10 ⁻¹	9.42 ×10 ⁻³	2.72 ×10 ⁻⁴	2.34 ×10 -5	1.85 ×10 ⁻¹	2.56 ×10 ⁻⁴	4.54 ×10 ⁻³	2.21 ×10 ⁻³	9.83 ×10 ¹	2.67 ×10 ⁻³	5.28 ×10 ⁻⁴	3.52 ×10 ⁻⁶	3.74 ×10 ⁻⁴
29	2.97 ×10 ⁻³	1.81 ×10 ⁻¹	2.62 ×10 ⁻³	2.40 ×10 ⁻⁴	3.61 ×10 -5	2.38 ×10 ⁻¹	8.34 ×10 ⁻⁴	4.68 ×10 ⁻³	1.33 ×10 -3	9.98 ×10 ¹	4.23 ×10 ⁻³	1.42 ×10 ⁻⁴	3.29 ×10 ⁻⁶	2.21 ×10 ⁻⁴
30	4.97 ×10 ⁻³	1.51 ×10 ⁻¹	1.12 ×10 -2	1.39 ×10 ⁻⁴	3.63 ×10 -5	2.11 ×10 ⁻¹	2.48 ×10 ⁻⁴	4.76 ×10 -3	2.02 ×10 ⁻³	9.95 ×10 ¹	1.11 ×10 -3	1.87 ×10 ⁻⁴	2.61 ×10 ⁻⁶	3.98 ×10 ⁻⁴
31	4.24 ×10 ⁻³	2.55 ×10 ⁻¹	4.65 ×10 -3	1.76 ×10 ⁻⁴	2.61 ×10 -5	1.80 ×10 -1	4.90 ×10 ⁻⁴	4.75 ×10 ⁻³	2.26 ×10 ⁻³	9.87 ×10 ¹	1.48 ×10 -3	2.18 ×10 ⁻⁴	5.33 ×10 ⁻⁶	5.30 ×10 ⁻⁴
32	4.74 ×10 ⁻³	1.26 ×10 ⁻¹	9.06 ×10 ⁻³	1.62 ×10 ⁻⁴	6.17 ×10 -5	2.05 ×10 ⁻¹	5.14 ×10 ⁻⁴	4.84 ×10 ⁻³	2.53 ×10 -3	9.89 ×10 ¹	3.40 ×10 ⁻³	2.32 ×10 ⁻⁴	7.96 ×10 ⁻⁶	4.13 ×10 ⁻⁴
33	2.77 ×10 ⁻³	2.22 ×10 ⁻¹	2.63 ×10 ⁻²	1.96 ×10 ⁻⁴	4.09 ×10 -5	1.92 ×10 -1	2.20 ×10 ⁻⁴	4.89 ×10 ⁻³	2.68 ×10 ⁻³	9.96 ×10 ¹	1.01 ×10 -3	4.56 ×10 ⁻⁴	3.92 ×10 ⁻⁶	9.08 ×10 ⁻⁵
34	3.94 ×10 ⁻³	1.05 ×10 -1	9.79 ×10 ⁻⁴	3.20 ×10 ⁻⁴	1.11 ×10 ⁻⁴	1.81 ×10 ⁻¹	4.23 ×10 ⁻⁴	5.21 ×10 ⁻³	1.47 ×10 -3	9.99 ×10 ¹	2.48 ×10 ⁻³	2.31 ×10 ⁻⁴	3.40 ×10 -6	3.72 ×10 -5
35	9.31 ×10 ⁻⁴	1.08 ×10 -1	7.94 ×10 ⁻⁴	1.86 ×10 ⁻⁴	5.15 ×10 -5	2.06 ×10 ·1	2.02 ×10 ⁻⁴	4.46 ×10 -3	1.86 ×10 -3	9.99 ×10 ¹	2.15 ×10 -3	3.44 ×10 ⁻⁴	6.24 ×10 ⁻⁶	4.98 ×10 -5
36	4.93 ×10 ⁻³	1.75 ×10 ⁻¹	5.07 ×10 ⁻³	2.01 ×10 ⁻⁴	3.11 ×10 -5	2.06 ×10 ·1	4.18 ×10 ⁻⁴	5.23 ×10 ⁻³	1.47 ×10 -3	9.82 ×10 ¹	1.21 ×10 -3	5.41 ×10 ⁻⁴	4.27 ×10 ⁻⁶	1.55 ×10 ⁻⁴
37	1.03 ×10 ⁻³	1.66 ×10 ⁻¹	1.31 ×10 ⁻¹	1.13 ×10 ⁻³	3.31 ×10 -5	2.25 ×10 ⁻¹	7.13 ×10 ⁻⁴	4.18 ×10 ⁻³	1.46 ×10 -3	9.87 ×10 ¹	9.91 ×10 ⁻⁴	2.74 ×10 ⁻⁴	2.33 ×10 ⁻⁶	1.27 ×10 ⁻⁴
38	2.17 ×10 ⁻³	1.50 ×10 -1	2.44 ×10 ⁻³	1.57 ×10 ⁻⁴	4.12 ×10 -5	2.33 ×10 ⁻¹	4.35 ×10 ⁻⁴	5.37 ×10 ⁻³	1.52 ×10 -3	9.91 ×10 ¹	2.59 ×10 ⁻³	1.72 ×10 ⁻⁴	3.08 ×10 ⁻⁶	3.47 ×10 ⁻⁴
39	5.81 ×10 ⁻³	1.34 ×10 ⁻¹	1.58 ×10 ⁻²	9.33 ×10 -5	4.83 ×10 -5	2.11 ×10 ⁻¹	4.50 ×10 ⁻⁴	4.77 ×10 -3	2.13 ×10 ⁻³	9.89 ×10 ¹	2.01 ×10 ⁻³	6.65 ×10 ⁻⁴	3.45 ×10 ⁻⁶	1.92 ×10 ⁻⁴
40	3.61 ×10 ⁻³	1.32 ×10 ⁻¹	3.75 ×10 ⁻³	1.64 ×10 ⁻⁴	4.18 ×10 ⁻⁵	1.93 ×10 ⁻¹	2.74 ×10 ⁻⁴	4.93 ×10 ⁻³	1.15 ×10 ⁻³	9.99 ×10 ¹	2.92 ×10 ⁻³	3.14 ×10 ⁻⁴	2.58 ×10 ⁻⁶	1.27 ×10 ⁻⁴

表 I.18-ZrTN804D の中性子条件及び中性子照射条件の放射化計算用データの設定結果

女1.10 2/11/00年以上1本日本の十日1 2/11 2/11 2/11 2/11 2/11 2/11 2/11 2/																						
								中性子多	:子条件 ^{a)}						照射条件			条件				
計算					熱中性子フルエンス率(n/cm²/s)					高速中性	上子フルエン	ス率(比)			熱外中性	生子フルエン	⁄ス率(比)		照射時間	(d)	照射停止	時間(d)
No.	軸方向位置 ^{b)}	運転	配置	第1	第2	第3	第4	第5	第1	第2	第3	第4	第5	第1	第2	第3	第4	第5	全サイクル	1サイクル	全サイクル	サイクル間
		サイクル数 ^{c)}	ローテーションロ	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	サイクル	合計	あたり ^{d)}	合計 ^{e)}	あたり
1	2	5	K	5.6 ×10 ¹³	5.6 ×10 ¹³	5.6 ×10 ¹³	5.6 ×10 ¹³	2.2 ×10 ¹³	0.63	0.63	0.63	0.63	0.61	1.78	1.78	1.78	1.78	1.71	3 217	643	1 379	345
2	11	4	G	6.3 ×10 ¹³	6.3 ×10 ¹³	4.2 ×10 ¹³	6.3 ×10 ¹³	-	1.06	1.06	1.45	1.06	-	3.25	3.25	4.38	3.25	-	1 642	410	704	235
3	16	4	G	5.1 ×10 ¹³	5.1 ×10 ¹³	3.7 ×10 13	5.1 ×10 ¹³	-	1.24	1.24	1.72	1.24	_	3.91	3.91	5.35	3.91	_	1 670	417	716	239
4	8	4	I	6.8 ×10 13	6.8 ×10 ¹³	3.0 ×10 ¹³	3.0 ×10 13	-	0.90	0.90	0.80	0.80	- /	2.68	2.68	2.35	2.35	_	1 653	413	708	236
5	5	4	J	7.3 ×10 ¹³	3.8 ×10 13	2.8 ×10 13	2.8 ×10 13	-	0.72	1.01	0.67	0.67	- /	2.07	2.90	1.90	1.90	-	1 665	416	713	238
6	22	5	L	3.1 ×10 13	3.1 ×10 13	3.1 ×10 13	1.4 ×10 13	1.4 ×10 13	1.37	1.37	1.37	1.25	1.25	4.38	4.38	4.38	3.94	3.94	2 581	516	1 106	276
7	22	1	A	3.1 ×10 13	-	-	-	-	1.37	-	_	_	-	4.38		-	-	-	147	147	-	
8	23	2	В	1.3 ×10 13	1.3 ×10 ¹³	-	-	-	1.38	1.38	-	_	-	4.42	4.42	-	-	-	872	436	374	374
9	1	3	D	1.5 ×10 13	1.5 ×10 13	1.5 ×10 13	-	-	0.63	0.63	0.63	-	- .	1.78	1.78	1.78	-	-	1 422	474	609	305
10	19	5	K	4.6 ×10 ¹³	4.6 ×10 13	4.6 ×10 13	4.6 ×10 13	2.0 ×10 13	1.32	1.32	1.32	1.32	1.19	4.18	4.18	4.18	4.18	3.74	2 259	452	968	242
- 11	1	4	Н	1.5 ×10 ¹³	1.5 ×10 ¹³	1.5 ×10 13	6.8 ×10 12	_	0.63	0.63	0.63	0.61		1.78	1.78	1.78	1.70	_	1 692	423	725	242 461
12	17	2	C	4.9 ×10 ¹³	3.8 ×10 ¹³	-	-	-	1.27	1.75	_	X	- /	4.01	5.48	-		-	1 075	537	461	
13	17	5	L	4.9 ×10 ¹³	4.9 ×10 ¹³	4.9 ×10 ¹³	2.3 ×10 ¹³	2.3 ×10 ¹³	1.27	1.27	1.27	1.15	1.15	4.01	4.01	4.01	3.57	3.57	2 500	500	1 071	268
14	18	4	J	4.8 ×10 ¹³	4.3 ×10 ¹³	2.1 ×10 ¹³	2.1 ×10 ¹³	-	1.29	1.79	1.17	1.17	-	4.10	5.60	3.66	3.66		1 687	422	723	241
15	原子炉外	3	原子炉外	1.2 ×10 ¹³	→	\rightarrow	-	-	0.26	→	→ "	-	7 7 L	0.99	\rightarrow	→		_	1 379	460	591	295
16	14	5	L	5.7 ×10 ¹³	5.7 ×10 ¹³	5.7 ×10 ¹³	2.8 ×10 ¹³	2.8 ×10 ¹³	1.18	1.18	1.18	1.06	1.06	3.69	3.69	3.69	3.25	3.25	2 559	512	1 097	274
17	21	3	D	3.7 ×10 ¹³	3.7 ×10 ¹³	3.7 ×10 ¹³	-	_	1.35	1.35	1.35	-	-	4.33	4.33	4.33	-	_	1 193	398	511	256
18	12	4	Н	6.1 ×10 ¹³	6.1 ×10 ¹³	6.1 ×10 ¹³	2.9 ×10 ¹³	2.9 ×10 ¹³	1.11	1.11	1.11	0.99	0.99	3.41	3.41	3.41	2.99	2.99	1 556	389	667	222
19	21	2	В	3.7 ×10 ¹³	3.7 ×10 ¹³	-	-	-	1.35	1.35	VFA	V		4.33	4.33				744	372	319	319
20	11	5	L	6.3 ×10 ¹³	6.3 ×10 ¹³	6.3 ×10 ¹³	2.9 ×10 ¹³	2.9 ×10 ¹³	1.06	1.06	1.06	0.95	0.95	3.25	3.25	3.25	2.84	2.84	2 280	456	977	244
21	16	5	K	5.1 ×10 ¹³	5.1 ×10 ¹³	5.1 ×10 ¹³	5.1 ×10 ¹³	2.4 ×10 ¹³	1.24	1.24	1.24	1.24	1,12	3.91	3.91	3.91	3.91	3.48	1 984	397	850	213
22	原子炉外	4	原子炉外	1.2 ×10 12	→ · · ·	→	→ ··	-	0.28	-	[,]	/	_	1.01	→	→	→		1 566	392	671	224
23	1	5	L	1.5 ×10 ¹³	1.5 ×10 ¹³	1.5 ×10 ¹³	6.8 ×10 12	6.8 ×10 12	0.63	0.63	0.63	0.61	0.61	1.78	1.78	1.78	1.70	1.70	2 855	571	1 224	306
24	12	5	K	6.1 ×10 ¹³	6.1 ×10 ¹³	6.1 ×10 ¹³	6.1 ×10 ¹³	2.9 ×10 ¹³	1.11	1.11	1.11	1.11	0.99	3.41	3.41	3.41	3.41	2.99	2 180	436	934	234
25	1	3	Е	1.5 ×10 ¹³	8.9 ×10 12	1.5 ×10 ¹³		,	0.63	0.92	0.63	7	-	1.78	2.58	1.78	_	_	1 379	460	591	296
26	15	5	L	5.5 ×10 ¹³	5.5 ×10 ¹³	5.5 ×10 ¹³	2.7 ×10 ¹³	2.7 ×10 ¹³	1.22	1.22	1.22	1.10	1.10	3.81	3.81	3.81	3.37	3.37	2 479	496	1 063	266
27	13	5	L	5.9 ×10 ¹³	5.9 ×10 ¹³	5.9 ×10 ¹³	2.8 ×10 ¹³	2.8 ×10 ¹³	1,15	1,15	1.15	1.03	1.03	3.55	3.55	3.55	3.13	3.13	2 092	418	896	224
28	6	3	E = F	7.2 ×10 ¹³	4.0 ×10 ¹³	7.2 ×10 ¹³	-		0.78	1.08	0.78	_		2.26	3.12	2.26	-		1 366	455	586	293
29	原子炉外	5	原子炉外	2.2 ×10 ¹² 6.8 ×10 ¹³	→ 10 13	→ 6.8 ×10 ¹³	→	→ - /	0.32	122	0.90	→	→	1.19	→	→	→	_ →	2 714 1 406	543	1 163	291 301
30	8 24	5	E K	7.6 ×10 ¹²	4.2 ×10 ¹³ 7.6 ×10 ¹²	7.6 ×10 ¹²	7.6 ×10 12	3.2 ×10 ¹²	0.90	1.23	1.38	1.38	1.26	2.68	3.62 4.43	2.68	4.43	4.00	1 406	469 372	603 796	199
32	6	5	K	7.6 ×10 ¹³	7.6 ×10 ¹³	7.6 ×10 ¹³	7.6 ×10 ¹³	2.9 ×10 ¹³	0.78	0.78	0.78	0.78	0.71	2.26	2.26	2.26	2.26	2.03	2 934	587	1 257	314
33	原子炉外	5	原子炉外	1.4 ×10 ¹²	7.2 ×10 ··	7.2 ×10 ··	7.2 ×10 ··	2.9 ×10 ··	0.78	0.78	0.78	0.78	0.71	0.77	2.26	2.26	2.26	2.03	3 009	602	1 25 /	314
34	原于炉が	4	原士炉外 H	4.2 ×10 ¹³	4.2 ×10 ¹³	4.2 ×10 ¹³	1.9 ×10 ¹³	7	1.34	1.34	1.34	1.21	_	4.26	4.26	4.26	3.81	-	1 609	402	690	230
35	5	3	E	7.3 ×10 ¹³	3.8 ×10 ¹³	7.3 ×10 ¹³	1.9 ×10	_	0.72	1.01	0.72	1.21	-	2.07	2.90	2.07	3.61	-	1 112	371	477	238
36	18	2	C	4.8 ×10 ¹³	4.3 ×10 ¹³	7.3 ^10	_	_	1.29	1.79	0.72			4.10	5.60	2.07	<u> </u>	-	1 030	515	441	441
37	9	2	C	6.7 ×10 ¹³	4.3 ×10 ¹³	_	-	-	0.96	1.79	 			2.88	3.88	 	 		909	454	389	389
38	17	5	L	4.9 ×10 ¹³	4.9 ×10 ¹³	4.9 ×10 ¹³	2.3 ×10 ¹³	2.3 ×10 ¹³	1.27	1.27	1.27	1.15	1.15	4.01	4.01	4.01	3.57	3.57	2 217	434	950	238
39	2	5	L	5.6 ×10 ¹³	5.6 ×10 ¹³	5.6 ×10 ¹³	2.2 ×10 ¹³	2.2 ×10 ¹³	0.63	0.63	0.63	0.61	0.61	1.78	1.78	1.78	1.71	1.71	2 149	430	921	230
40	7	2.	C	7.0 ×10 ¹³					0.84	1.15	- 0.03	- 0.01	- 0.01	2.47	3.37	1.70	-	-	901	450	386	386
	,	-		7.0 ~10	7.110		1		0.04	1.15		1	1	2.77	3.31	1			501	431	300	300

^{★・}中性子条件は、各サイクルの照射位置(運転パターン)ごとの熱中性子フルエンス率よ。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は、軸方向位置に応じて利用することとした。ただし、高速中性子フルエンス率と熱外中性子フルエンス率は、熱中性子フルエンス率との比(熱中性子フルエンス率に)が、中性子子ルエンス率に対した値)を記載。

[■] BWRチャンネルボックスの軸方向位置を1(炉心下部)から25に分割し、この中かに凝似一條乱数で照射位置を設定することとした。また、軸方向位置については、原子炉内は、有効燃料部の24分割した各原射位置(分割位置=1~24)、原子炉内は、共通の照射位置を設定することとした。また、軸方向位置については、原子炉内は、有効燃料部の24分割した各原射位置(分割位置=1~24)、原子炉内は、共通の照射位置(分割位置=25)として扱うこととした。

[○] 運転サイクル数と配置ローテーションの詳細は、**表 I.11**参照。

d) 全サイクル合計の照射時間を運転サイクル数で除した値。

[⇒] 全照射時間(全サイクル数の合計)=設備稼働率70%とした場合の照射停止時間(供用期間の30%相当)

[○]サイクル間に均等に照射停止時間を設定した場合の、1回あたりの照射停止時間。例えば、サイクル数=5の場合は、照射停止時間の合計を4回(=サイクル間の数)で除した値。ただし、サイクル数=1の場合は、照射停止時間は、設定しない。

表 I.19-SUS304 の元素成分条件の放射化計算用データの設定結果

												単	位:質量分率%
計算 No.	N	S	Cl	K	Fe	Со	Ni	Cu	Zr	Nb	Mo	Th	U
1	4.07 ×10 ⁻²	4.86 ×10 ⁻³	6.79 ×10 ⁻⁴	4.51 ×10 -5	7.17 ×10 ¹	2.90 ×10 ⁻²	9.27 ×10 °	4.66 ×10 ⁻²	2.07 ×10 ⁻⁵	3.78 ×10 ⁻²	4.34 ×10 ⁻²	3.05 ×10 ⁻⁷	1.15 ×10 ⁻⁷
2	5.66 ×10 ⁻²	4.50 ×10 ⁻⁴	1.25 ×10 ⁻³	8.07 ×10 ⁻⁵	6.87 ×10 ¹	4.16 ×10 ⁻³	8.77×10^{-0}	1.77 ×10 ⁻⁴	1.68×10^{-3}	9.06 ×10 ⁻³	2.22 ×10 ⁻¹	2.58 ×10 ⁻⁷	1.96 ×10 ⁻⁷
3	5.22 ×10 ⁻²	2.42 ×10 ⁻³	1.89 ×10 ⁻³	2.98 ×10 ⁻⁵	7.54 ×10 ¹	2.68 ×10 ⁻²	9.07×10^{-0}	1.67 ×10 ⁻¹	5.78 ×10 ⁻³	1.45 ×10 ⁻²	2.00 ×10 °	4.62 ×10 ⁻⁷	2.39 ×10 ⁻⁷
4	4.02 ×10 ⁻²	2.31 ×10 ⁻³	7.69 ×10 ⁻⁴	3.46 ×10 ⁻⁵	7.36 ×10 ¹	2.81 ×10 ⁻²	9.73 ×10 °	1.67 ×10 ⁻³	1.02×10^{-4}	4.31 ×10 ⁻³	1.56 ×10 ⁻¹	1.04 ×10 ⁻⁷	1.00 ×10 ⁻⁷
5	7.23 ×10 ⁻²	9.04 ×10 ⁻³	5.61 ×10 ⁻⁴	5.94 ×10 ⁻⁵	7.01 ×10 ¹	7.96 ×10 ⁻²	8.21 ×10 °	6.84 ×10 ⁻³	5.43 ×10 ⁻⁵	1.54 ×10 ⁻¹	3.80 ×10 °	9.51 ×10 ⁻⁸	1.70 ×10 ⁻⁷
6	7.21 ×10 ⁻²	2.20 ×10 ⁻³	1.27 ×10 ⁻³	1.01 ×10 ⁻⁴	7.43 ×10 ¹	1.68 ×10 ⁻²	8.56 ×10 °	5.30 ×10 °	1.09 ×10 ⁻⁵	1.43 ×10 ⁻³	1.32 ×10 ⁻¹	2.18 ×10 ⁻⁷	1.41 ×10 -/
7	3.86 ×10 ⁻²	6.89 ×10 ⁻³	1.03 ×10 ⁻³	8.81 ×10 ⁻⁵	6.98 ×10 ¹	6.40 ×10 ⁻²	8.69 ×10 °	9.42 ×10 ⁻³	5.81 ×10 ⁻⁵	2.48 ×10 ⁻²	1.40 ×10 °	1.75 ×10 ⁻⁷	1.55 ×10 ⁻⁷
8	6.27 ×10 ⁻²	1.34 ×10 ⁻²	1.49 ×10 ⁻³	5.53 ×10 ⁻⁵	7.80 ×10 ¹	5.83 ×10 ⁻²	8.68 ×10 °	5.04 ×10 ⁻²	6.17 ×10 ⁻⁴	4.57 ×10 ⁻²	9.42 ×10 ⁻²	2.02 ×10 ⁻⁷	2.17 ×10 ⁻⁷
9	4.92 ×10 ⁻²	1.79 ×10 ⁻²	2.20 ×10 ⁻³	4.03 ×10 ⁻⁵	7.49 ×10 ¹	2.02 ×10 ⁻¹	9.54 ×10 °	1.80 ×10 °	7.98 ×10 ⁻⁶	7.43 ×10 ⁻²	1.19 ×10 ⁻¹	1.71 ×10 -7	3.13 ×10 ⁻⁷
10	5.16 ×10 ⁻²	1.04 ×10 ⁻³	5.69 ×10 ⁻⁴	1.98 ×10 ⁻⁵	7.35 ×10 ¹	4.90 ×10 °	9.07 ×10 °	1.44 ×10 ⁻²	3.85 ×10 ⁻⁶	2.70 ×10 ⁻³	7.74 ×10 ⁻²	1.39 ×10 ⁻⁷	2.63 ×10 ⁻⁷
11	5.16 ×10 ⁻²	7.52 ×10 ⁻³	7.57 ×10 ⁻⁴	4.72 ×10 ⁻⁵	7.16 ×10 ¹	1.48 ×10 ⁻²	9.63 ×10 °	2.29 ×10 ⁻²	1.91 ×10 ⁻⁴	3.22 ×10 ⁻²	9.16 ×10 ⁻¹	2.36 ×10 ⁻⁷	1.79 ×10 ⁻⁷
12	4.26 ×10 ⁻²	2.37 ×10 ⁻³	9.89 ×10 ⁻⁴	7.52 ×10 ⁻⁵	6.66 ×10 ¹	2.13 ×10 ⁻³	9.42 ×10 °	1.16 ×10 ⁻¹	1.64 ×10 ⁻³	7.64 ×10 ⁻²	2.60 ×10 ⁻²	2.74 ×10 ⁻⁷	1.88 ×10 ⁻⁷
13	5.90 ×10 ⁻²	1.22 ×10 ⁻³	8.05 ×10 ⁻⁴	2.18 ×10 ⁻⁵	7.13 ×10 ¹	6.82 ×10 ⁻¹	8.28 ×10 °	2.50 ×10 °	1.77 ×10 ⁻⁴	8.22 ×10 ⁻²	1.14 ×10 ⁻¹	1.08 ×10 ⁻⁷	2.90 ×10 ⁻⁷
14	4.06 ×10 ⁻²	1.88 ×10 ⁻²	1.07 ×10 ⁻³	3.10 ×10 ⁻⁵	7.25 ×10 ¹	4.32 ×10 ⁻²	9.49 ×10 °	1.40 ×10 °	1.81 ×10 ⁻⁴	2.42 ×10 ⁻²	6.75 ×10 ⁻¹	1.58 ×10 ⁻⁷	3.86 ×10 ⁻⁷
15	4.74 ×10 -2	3.27 ×10 ⁻³	7.46 ×10 ⁻⁴	5.60 ×10 -5	6.76 ×10 ¹	9.71 ×10 ⁻²	8.90 ×10 °	5.78 ×10 ⁻¹	9.93 ×10 ⁻⁵	2.62 ×10 ⁻²	7.05 ×10 ⁻¹	6.07 ×10 -7	1.42 ×10 -7
16	6.38 ×10 ⁻²	3.59 ×10 ⁻³	6.81 ×10 ⁻⁴	2.94 ×10 ⁻⁵	7.78 ×10 ¹	1.00 ×10 ⁻¹	9.07 ×10 °	2.33 ×10 ⁻¹	2.39 ×10 ⁻⁴	1.34 ×10 ⁻²	3.55 ×10 ⁻¹	1.16 ×10 -7	3.65 ×10 ⁻⁷
17	7.91 ×10 ⁻²	2.29 ×10 ⁻²	8.77 ×10 ⁻⁴	4.06 ×10 ⁻⁵	6.00 ×10 ¹	6.70 ×10 ⁻²	8.13 ×10 °	1.44 ×10 ⁻¹	2.60 ×10 ⁻⁴	1.31 ×10 ⁻²	6.85 ×10 ⁻²	2.06 ×10 ⁻⁷	1.77 ×10 -7
18	4.22 ×10 ⁻²	4.84 ×10 ⁻³	1.75 ×10 ⁻³	4.92 ×10 ⁻⁵	6.95 ×10 ¹	2.50 ×10 °	8.66 ×10 °	6.40 ×10 ⁻²	3.82 ×10 ⁻⁴	2.61 ×10 ⁻²	2.59 ×10 ⁻¹	8.97 ×10 ⁻⁸	2.16 ×10 ⁻⁷
19	4.85 ×10 ⁻²	2.05 ×10 ⁻²	1.07 ×10 ⁻³	2.45 ×10 -5	6.96 ×10 ¹	5.57 ×10 ⁻²	9.00 ×10 °	1.98 ×10 ⁻²	6.95 ×10 ⁻⁴	7.13 ×10 ⁻²	6.76 ×10 ⁻¹	4.06 ×10 -7	1.83 ×10 ⁻⁷
20	3.60 ×10 ⁻²	7.67 ×10 ⁻³	1.59 ×10 ⁻³	5.07 ×10 -5	7.22 ×10 ¹	9.66 ×10 -2	1.01 ×10 ¹	1.43 ×10 ⁻¹	3.39 ×10 ⁻⁵	3.43 ×10 ⁻²	1.86 ×10 ⁻¹	1.00 ×10 -7	3.14 ×10 ⁻⁷
21	5.52 ×10 ⁻²	6.71 ×10 ⁻³	1.76 ×10 -3	8.83 ×10 -5	6.90 ×10 ¹	7.83 ×10 ⁻¹	1.02 ×10 ¹	2.84 ×10 ⁻²	7.55 ×10 -5	5.66 ×10 ⁻³	6.79 ×10 ⁻²	8.38 ×10 ⁻⁸	2.54 ×10 ⁻⁷
22	4.69 ×10 ⁻²	4.82 ×10 ⁻²	1.31 ×10 -3	6.17 ×10 -5	7.11 ×10 ¹	3.75 ×10 -3	9.54 ×10 °	4.19 ×10 ⁻¹	1.38 ×10 -3	2.29 ×10 ⁻²	9.08 ×10 ⁻²	1.19 ×10 -7	4.44 ×10 -7
23	6.28 ×10 ⁻²	4.04 ×10 ⁻³	6.92 ×10 ⁻⁴	2.31 ×10 -5	7.32 ×10 ¹	4.70 ×10 ⁻²	9.94 ×10 °	7.69 ×10 ⁻²	2.92 ×10 ⁻⁵	3.40 ×10 ⁻²	2.04 ×10 ⁻¹	3.03 ×10 -7	3.00 ×10 ⁻⁷
24	3.95 ×10 ⁻²	3.89 ×10 ⁻³	7.06 ×10 ⁻⁴	2.88 ×10 ⁻⁵	6.88 ×10 ¹	1.42 ×10 ⁻²	8.89 ×10 °	7.14 ×10 ⁻²	8.75 ×10 ⁻⁴	2.16 ×10 ⁻²	2.81 ×10 ⁻¹	3.57 ×10 -7	3.28 ×10 ⁻⁷
25	4.58 ×10 ⁻²	5.66 ×10 ⁻³	6.08 ×10 ⁻⁴	5.38 ×10 -5	7.37 ×10 ¹	1.12 ×10 ⁻¹	9.01 ×10 ⁰	6.55 ×10 ⁻³	7.52 ×10 ⁻⁵	4.17 ×10 ⁻³	3.73 ×10 ⁻¹	1.09 ×10 -7	2.62 ×10 ⁻⁷
26	4.98 ×10 ⁻²	9.62 ×10 ⁻³	9.77 ×10 ⁻⁴	3.19 ×10 -5	8.00 ×10 ¹	8.93 ×10 ⁻¹	9.77 ×10 ⁰	1.45 ×10 ⁻¹	1.01 ×10 ⁻⁴	2.84 ×10 ⁻²	2.05 ×10 ⁻¹	2.52 ×10 ⁻⁷	2.07 ×10 -7
27	3.94 ×10 ⁻²	3.82 ×10 ⁻³	9.29 ×10 ⁻⁴	3.36 ×10 -5	6.68 ×10 ¹	6.52 ×10 -2	1.01 ×10 ¹	9.33 ×10 ⁻²	3.24 ×10 ⁻⁴	2.36 ×10 ⁻³	7.85 ×10 ⁻²	2.03 ×10 ⁻⁷	1.82 ×10 -7
28	4.60 ×10 ⁻²	1.00 ×10 ⁻²	2.32 ×10 ⁻³	7.48 ×10 ⁻⁵ 3.02 ×10 ⁻⁵	7.31 ×10 ¹ 7.23 ×10 ¹	6.17 ×10 ⁻²	8.60 ×10 ⁰ 9.93 ×10 ⁰	1.88 ×10 ⁻³	6.22 ×10 ⁻⁵ 2.39 ×10 ⁻⁴	1.79 ×10 ⁻²	1.38 ×10 ⁻¹ 2.77 ×10 ⁻¹	1.87 ×10 -7	2.04 ×10 ⁻⁷
30	7.55 ×10 ⁻² 3.87 ×10 ⁻²	4.11 ×10 ⁻³ 4.27 ×10 ⁻³	6.11 ×10 ⁻⁴ 2.18 ×10 ⁻³		7.23 ×10 ¹ 7.56 ×10 ¹	2.00 ×10 ⁰ 5.26 ×10 ⁻¹	9.93 ×10 ⁰ 8.89 ×10 ⁰	1.46 ×10 ⁻² 9.29 ×10 ⁻²		1.20 ×10 ⁻² 2.96 ×10 ⁻²	1.29 ×10 ⁻²	1.39 ×10 ⁻⁷ 1.61 ×10 ⁻⁷	2.70 ×10 ⁻⁷ 1.95 ×10 ⁻⁷
31	3.87 ×10 ⁻² 2.94 ×10 ⁻²	4.27 ×10 ⁻³	2.18 ×10 ⁻³ 9.38 ×10 ⁻⁴	3.68 ×10 ⁻⁵ 4.08 ×10 ⁻⁵	6.87 ×10 1	2.58 ×10 ⁻²	9.34 ×10 °	1.63 ×10 ⁻¹	7.11 ×10 ⁻⁴ 8.65 ×10 ⁻⁵	_	5.22 ×10 ⁻¹	1.61 ×10 ⁻⁷ 3.48 ×10 ⁻⁷	1.77 ×10 -7
32	4.00 ×10 ⁻² 6.14 ×10 ⁻²	2.07 ×10 ⁻³ 1.16 ×10 ⁻²	4.88 ×10 ⁻⁴ 7.60 ×10 ⁻⁴	2.35 ×10 ⁻⁵ 8.75 ×10 ⁻⁵	7.33 ×10 ¹ 7.80 ×10 ¹	2.20 ×10 ⁰ 8.83 ×10 ⁻²	8.23 ×10 ⁰ 8.42 ×10 ⁰	6.28 ×10 ⁻² 9.98 ×10 ⁻²	3.13 ×10 ⁻³ 2.82 ×10 ⁻³	1.51 ×10 ⁻² 9.95 ×10 ⁻²	2.16 ×10 ⁻² 2.50 ×10 ⁰	1.98 ×10 ⁻⁷	2.31 ×10 ⁻⁷
33	6.14 ×10 ⁻²	5.74 ×10 ⁻³	4.24 ×10 ⁻⁴	5.51 ×10 -5	6.84 ×10 ¹	7.94 ×10 ⁻¹	-	2.82 ×10 ⁻²	1.64 ×10 ⁻³	5.46 ×10 ⁻²	2.30 ×10 ° 2.39 ×10 °	1.30 ×10 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2.93 ×10 ⁻⁷
35	5.06 ×10 ⁻²	3.82 ×10 ⁻³	3.66 ×10 ⁻⁴	2.40 ×10 -5	7.09 ×10 ¹	1.47 ×10 ⁻³	1.03 ×10 ¹ 9.06 ×10 ⁰	9.98 ×10 ⁻¹	5.92 ×10 ⁻⁴	2.24 ×10 ⁻²	1.70 ×10 °	1.46 ×10 -7	3.81 ×10 ⁻⁷
36	5.40 ×10 -2	2.28 ×10 ⁻²	9.86 ×10 ⁻⁴	7.87 ×10 ⁻⁵	7.09 ×10 ¹	6.55 ×10 ⁻¹	9.06 ×10 ° 9.87 ×10 °	3.37 ×10 ⁻¹	5.64 ×10 ⁻³	4.78 ×10 ⁻³	1.70 ×10 1.97 ×10 ⁻²	2.64 ×10 -7	2.88 ×10 ⁻⁷
37	6.32 ×10 ⁻²	3.63 ×10 -3	1.12 ×10 ⁻³	3.48 ×10 ⁻⁵	7.82 ×10 ¹	4.19 ×10 ⁻¹	1.01 ×10 ¹	4.65 ×10 ⁻²	8.05 ×10 ⁻⁴	1.75 ×10 ⁻²	1.57 ×10 -1	3.68 ×10 -7	2.52 ×10 -7
38	4.40 ×10 ⁻²	5.30 ×10 -3	1.12 ×10 -3	1.94 ×10 ⁻⁵	7.82 ×10 1	1.30 ×10 °	1.01 ×10 1.04 ×10 ¹	1.16 ×10 ⁻²	2.03 ×10 -3	3.07 ×10 ⁻³	1.37 ×10 1.11 ×10 ⁻¹	2.00 ×10 -7	2.53 ×10 ⁻⁷
39	5.53 ×10 ⁻²	3.07 ×10 ⁻³	8.87 ×10 ⁻⁴	1.94 ×10 ⁻⁴	7.83 ×10 7.11 ×10 ¹	3.20 ×10 -2	9.71 ×10 ⁰	4.07 ×10 ⁻²	1.84 ×10 ⁻⁴	4.48 ×10 ⁻²	7.28 ×10 ⁻¹	2.47 ×10 -7	1.45 ×10 ⁻⁷
40	3.95 ×10 ⁻²	4.06 ×10 ⁻⁴	8.87 ×10 ⁻⁴	5.57 ×10 ⁻⁵	7.46 ×10 ¹	3.04 ×10 ⁻¹	9.71 ×10 ° 9.25 ×10 °	6.08 ×10 ⁻³	1.84 ×10 1.90 ×10 ⁻⁴	4.48 ×10 4.07 ×10 -3	2.03 ×10 ⁻¹	1.89 ×10 ⁻⁷	1.43 ×10 1.39 ×10 -7
40	J.73 ^10	4.00 ^10	0.0/ ^10	J.J/ ^10 ·	/. 4 0 ^10	J.04 ^10	7.43 ^1U	0.00 ^10	1.90 ^10	+.U/ ^1U	2.03 ^10	1.09 ^10	1.39 ^10

表 I.20-SUS304 の中性子条件及び中性子照射条件の放射化計算用データの設定結果

		中性子条件a)			照射	 条件			
計算		中性子ファ	レエンス率	照射		照射停止時間	運転 サイクル数		
No.	軸方向位置 (m) ^{b)}	(n/cı	m^2/s)	(у		(y) c)			
	(m)	Dバンク	AROバンク	Dバンク	AROバンク	合計	d)		
1	0.34	3.6 ×10 ¹³	2.2 ×10 ¹²	0.3	11.8	5.2	11		
2	0.16	1.2 ×10 ¹⁴	1.6 ×10 ¹³	0.6	5.6	2.7	6		
3	0.71	7.9 ×10 ¹¹	2.6 ×10 ¹⁰	1.8	6.9	3.7	8		
4	0.02	2.1 ×10 ¹⁴	5.5 ×10 ¹³	1.8	10.8	5.4	11		
5	0.69	8.8 ×10 ¹¹	3.2 ×10 ¹⁰	2.3	9.8	5.2	11		
6	0.60	3.1 ×10 ¹²	9.5 ×10 ¹⁰	1.2	3.9	2.2	5		
7	0.57	4.4 ×10 ¹²	1.4 ×10 ¹¹	0.6	9.9	4.5	9		
8	0.74	6.0 ×10 ¹¹	1.8 ×10 ¹⁰	1.6	11.5	5.6	12		
9	0.74	6.0 ×10 ¹¹	1.8 ×10 ¹⁰	0.5	8.2	3.7	8		
10	0.68	9.4 ×10 ¹¹	3.6 ×10 ¹⁰	1.4	9.3	4.6	10		
11	0.32	4.1 ×10 ¹³	3.0 ×10 ¹²	0.2	4.4	2.0	4		
12	0.29	5.1 ×10 ¹³	4.2 ×10 ¹²	0.4	5.0	2.3	5		
13	0.72	7.3 ×10 ¹¹	2.3 ×10 ¹⁰	0.3	6.8	3.0	6		
14	0.29	5.1 ×10 ¹³	4.2 ×10 ¹²	0.2	10.2	4.5	9		
15	0.01	2.2 ×10 ¹⁴	5.9 ×10 ¹³	0.4	9.8	4.4	9		
16	0.21	9.0 ×10 ¹³	1.0 ×10 ¹³	2.1	4.4	2.8	6		
17	0.35	3.3 ×10 ¹³	1.8 ×10 ¹²	0.5	3.4	1.7	3		
18	0.20	9.7 ×10 ¹³	1.1 ×10 ⁻¹³	0.2	8.7	3.8	8		
19	0.19	1.1 ×10 ¹⁴	1.2 ×10 ¹³	2.4	8.2	4.5	10		
20	0.06	1.9 ×10 ¹⁴	3.9 ×10 ¹³	0,5	6.7	3.1	6		
21	0.10	1.6 ×10 ¹⁴	2.7 ×10 ¹³	1.2	8.5	4.2	9		
22	0.62	2.4 ×10 ¹²	7.4 ×10 ¹⁰	0.0	5.2	2.2	5		
23	0.46	1.3 ×10 ¹³	5.7 ×10 ¹¹	0.2	14.7	6.4	14		
24	0.31	4.5 ×10 ¹³	3.4 ×10 ¹²	0.0	5.7	2.4	5		
25	0.19	1.1 ×10 ¹⁴	1.2 ×10 ¹³	1.6	6.3	3.4	7		
26	0.36	3.1 ×10 ¹³	1.5 ×10 ¹²	0.2	7.7	3.4	7		
27	0.16	1.2 ×10 ¹⁴	1.6 ×10 ¹³	0.4	8.2	3.7	8		
28	0.24	7.1 ×10 ¹³	7.3 ×10 ¹²	0.5	10.4	4.7	10		
29	0.22	8.3 ×10 ¹³	9.2 ×10 ¹²	0.6	8.5	3.9	8		
30	0.09	1.7 ×10 ¹⁴	2.9 ×10 ¹³	0.0	4.6	2.0	4		
31	0.61	2.8 ×10 ¹²	8.4 ×10 10	0.8	8.6	4.0	8		
32	0.21	9.0 ×10 ¹³	1.0 ×10 ¹³	0.3	10.6	4.7	10		
33	0.74	6.0 ×10 ¹¹	1.8 ×10 ¹⁰	1.2	10.1	4.8	10		
34	0.25	6.5 ×10 ¹³	6.6 ×10 ¹²	0.1	9.8	4.2	9		
35	0.26	6.1 ×10 ¹³	5.9 ×10 ¹²	1.0	10.8	5.1	11		
36	0.43	1.7 ×10 ¹³	7.8 ×10 ¹¹	1.5	3.7	2.2	5		
37	0.45	1.4 ×10 ¹³	6.4 ×10 ¹¹	0.4	10.1	4.5	9		
38	0.14	1.3 ×10 ¹⁴	1.9 ×10 ¹³	0.4	12.0	5.3	11		
39	0.45	1.4 ×10 ¹³	6.4 ×10 ¹¹	1.3	6.6	3.4	7		
40	0.64	1.7 ×10 ¹²	5.8 ×10 ¹⁰	0.0	8.1	3.5	7		

注 放射化断面積は、配置ローテーション (Dバンク、AROバンク) ごとに、軸方向の照射位置に応じて設定することとした。

b) PWR制御棒の先端 (=0.00m) からの距離を意味する。

[©] 全照射時間 (Dバンク+AROバンク) =設備稼働率70%とした場合の照射停止時間 (供用期間の30%相当)

 $^{^{0}}$ 照射期間と照射停止時間の合計(Dバンク + AROバンク + RO + RO + RO がらRO + RO がらRO + RO +

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/t
計算 No.	¹⁴ C	³⁶ Cl	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Nb	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	¹³⁷ Cs	²³⁷ 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 ²	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 ⁴	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 °	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 ³	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 /	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 ²	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 ¹	3.42 ×10 ⁸	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 ³	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	6.53 ×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 °	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 /	4.74 ×10 ¹¹	1.24 ×10 ¹⁰	8.46 ×10 ⁷	2.93 ×10 /	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 ⁹	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 ³	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}

表 I.22-SUS304 の放射化計算結果 (PWR 制御棒の被覆管)

単位:Bq/t

計算	¹⁴ C	³⁶ Cl	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Nb	⁹⁹ Te	129 _I	¹³⁷ Cs	字位: Bq/t ²³⁷ Np
No.	1.6010 10	5.50 ×10 7			~-			1 1010 -		
1	7.10 ×10 ¹⁰		3.80 ×10 ¹³ 3.30 ×10 ¹³	1.40 ×10 ¹³ 4.10 ×10 ¹³	1.90 ×10 ⁵ 2.10 ×10 ⁶	1.50 ×10 ⁹	2.20 ×10 ⁶ 5.20 ×10 ⁷	1.10 ×10 ⁻¹ 1.60 ×10 ⁰	2.80 ×10 ⁵ 4.00 ×10 ⁶	1.60 ×10 ⁻¹ 1.20 ×10 ⁰
2	9.20 ×10 ⁸	2.90 ×10 ⁸ 6.70 ×10 ⁶	1.30 ×10 ¹²	6.00 ×10 ¹¹	2.10 ×10 ⁶ 8.10 ×10 ³	1.40 ×10 ⁹ 2.50 ×10 ⁷	4.50 ×10 ⁶	3.10 ×10 ⁻³	4.00 ×10 ⁶ 9.10 ×10 ³	1.30 ×10 -2
3	3.20 ×10 ¹¹	9.90 ×10 ⁸	7.80 ×10 ¹⁴	2.80 ×10 ¹⁴	1.10 ×10 ⁷	3.80 ×10 9	1.90 ×10 8	8.90 ×10 °	2.20 ×10 ⁷	4.80 ×10 °
	1.90 ×10 ⁹	2.90 ×10 ⁶	3.70 ×10 ¹²	7.70 ×10 ¹¹	7.50 ×10 ³	3.90 ×10 ⁸	1.30 ×10 ⁷	3.30 ×10 ⁻³	8.60 ×10 ³	1.40 ×10 ⁻²
6	3.30 ×10 ⁹	1.20 ×10 ⁷	3.70 ×10 12	1.60 ×10 ¹²	1.30 ×10 ⁴	6.40 ×10 6	7.70 ×10 ⁵	5.40 ×10 ⁻³	1.70 ×10 ⁴	2.00 ×10 ⁻²
7	1.70 ×10 ⁹	9.30 ×10 ⁶	7.50 ×10 ¹²	1.40 ×10 ¹²	1.30 ×10 ⁴	1.10 ×10 ⁸	7.90 ×10 ⁶	5.70 ×10 ⁻³	1.60 ×10 ⁴	2.10 ×10 ⁻²
8	8.10 ×10 ⁸	3.90 ×10 ⁶	1.20 ×10 ¹²	4.00 ×10 ¹¹	4.60 ×10 ³	5.70 ×10 ⁷	1.60 ×10 ⁵	1.90 ×10 ⁻³	5.20 ×10 ³	8.60 ×10 ⁻³
9	2.50 ×10 ⁸	2.20 ×10 ⁶	3.20 ×10 ¹²	1.80 ×10 ¹¹	2.90 ×10 ³	3.60 ×10 ⁷	7.60 ×10 ⁴	1.00 ×10 ⁻³	3.20 ×10 ³	4.80 ×10 ⁻³
10	9.50 ×10 ⁸	2.10 ×10 ⁶	2.00 ×10 ¹⁴	6.10 ×10 ¹¹	8.50 ×10 ³	4.80 ×10 ⁶	1.80 ×10 ⁵	3.40 ×10 ⁻³	9.60 ×10 ³	1.50 ×10 ⁻²
11	1.20 ×10 ¹⁰	3.60 ×10 ⁷	2.20 ×10 ¹³	8.90 ×10 ¹²	1.30 ×10 ⁵	7.40 ×10 ⁸	2.80 ×10 ⁷	6.60 ×10 ⁻²	1.90 ×10 ⁵	1.40 ×10 ⁻¹
12	1.50 ×10 ¹⁰	6.40 ×10 ⁷	5.00 ×10 ¹²	1.30 ×10 ¹³	2.70 ×10 ⁵	3.20 ×10 9	1.60 ×10 ⁶	1.70 ×10 ⁻¹	4.40 ×10 ⁵	2.50 ×10 ⁻¹
13	2.50 ×10 ⁸	6.80 ×10 ⁵	1.20 ×10 ¹³	1.30 ×10 ¹¹	2.30 ×10 ³	3.30 ×10 ⁷	6.10 ×10 ⁴	7.90 ×10 ⁻⁴	2.50 ×10 ³	3.70 ×10 ⁻³
14	2.20 ×10 ¹⁰	1.10 ×10 ⁸	9.90 ×10 ¹³	1.90 ×10 ¹³	7.10 ×10 ⁵	1.30 ×10 ⁹	5.10 ×10 ⁷	5.50 ×10 ⁻¹	1.30 ×10 ⁶	7.60 ×10 ⁻¹
15	3.20 ×10 ¹¹	8.50 ×10 ⁸	2.60 ×10 ¹⁵	2.20 ×10 ¹⁴	2.90 ×10 ⁷	1.70 ×10 ¹⁰	5.90 ×10 ⁸	1.30 ×10 ¹	4.10 ×10 ⁷	5.30 ×10 °
16	1.00 ×10 ¹¹	1.80 ×10 ⁸	7.70 ×10 ¹⁴	5.30 ×10 ¹³	3.70 ×10 ⁶	3.00 ×10 9	1.20 ×10 ⁸	4.00 ×10 ⁰	8.80 ×10 ⁶	3.30 ×10 ⁰
17	2.00 ×10 ¹⁰	4.50 ×10 ⁷	1.00 ×10 ¹⁴	8.00 ×10 ¹²	1.30 ×10 ⁵	3.20 ×10 ⁸	2.20 ×10 ⁶	7.00 ×10 ⁻²	1.90 ×10 ⁵	1.50 ×10 ⁻¹
18	4.80 ×10 ¹⁰	3.90 ×10 ⁸	1.40 ×10 ¹⁶	3.80 ×10 ¹³	1.20 ×10 ⁶	3.10 ×10 ⁹	4.20 ×10 ⁷	1.10 ×10 °	2.50 ×10 ⁶	1.10 ×10 ⁰
19	1.00 ×10 ¹¹	3.60 ×10 ⁸	4.30 ×10 ¹⁴	6.60 ×10 ¹³	6.30 ×10 ⁶	2.30×10^{-10}	3.50 ×10 ⁸	4.60 ×10 °	1.10 ×10 ⁷	2.90 ×10 °
20	1.20 ×10 ¹¹	8.80 ×10 ⁸	1.60 ×10 ¹⁵	1.20 ×10 ¹⁴	7.50 ×10 ⁶	1.20×10^{-10}	8.80 ×10 ⁷	7.70 ×10 °	1.80 ×10 ⁷	5.10 ×10 ⁰
21	1.80 ×10 ¹¹	9.50 ×10 ⁸	1.00 ×10 ¹⁶	1.20 ×10 ¹⁴	6.80 ×10 6	2.20 ×10 ⁹	3.90 ×10 ⁷	7.40 ×10 °	1.70 ×10 ⁷	5.00 ×10 °
22	2.00 ×10 ⁸	1.10 ×10 ⁶	1.10 ×10 ¹¹	1.60 ×10 ¹¹	4.00 ×10 ³	9.50 ×10 ⁶	5.00 ×10 ⁴	1.20 ×10 ⁻³	4.40 ×10 ³	5.70 ×10 ⁻³
23	7.70 ×10 ⁹	1.70 ×10 ⁷	1.60 ×10 ¹³	4.40 ×10 ¹²	7.90 ×10 ⁻⁴	4.00 ×10 ⁸	3.20 ×10 ⁶	4.20 ×10 ⁻²	1.10 ×10 ⁵	1.20 ×10 ⁻¹
24	8.40 ×10 9	3.00 ×10 ⁷	1.90 ×10 ¹³	7.40 ×10 ¹²	2.00 ×10 ⁵	4.50 ×10 ⁸	7.60 ×10 ⁶	1.00 ×10 ⁻¹	2.90 ×10 ⁵	2.20 ×10 ⁻¹
25	6.90 ×10 ¹⁰	1.50 ×10 ⁸	8.00 ×10 ¹⁴	4.90 ×10 ¹³	3.10 ×10 ⁶	9.60 ×10 ⁸	1.30 ×10 ⁸	3.20 ×10 °	7.20 ×10 ⁶	2.50 ×10 °
26	9.90 ×10 ⁹	3.90 ×10 ⁷	7.80 ×10 ¹⁴	7.40 ×10 ¹²	1.10 ×10 ⁵	5.50 ×10 ⁸	5.20 ×10 ⁶	5.80 ×10 ⁻²	1.60 ×10 ⁵	1.30 ×10 ⁻¹
27	6.40 ×10 ¹⁰	2.80 ×10 ⁸	5.10 ×10 ¹⁴	6.10 ×10 ¹³	2.30 ×10 ⁶	4.20 ×10 ⁸	2.00 ×10 ⁷	1.90 ×10 ⁰	4.50 ×10 ⁶	1.40 ×10 °
28	4.80 ×10 ¹⁰	4.60 ×10 ⁸	2.50 ×10 ¹⁴	3.30 ×10 ¹³	1.20 ×10 ⁶	2.00 ×10 ⁹	2.20 ×10 ⁷	9.80 ×10 ⁻¹	2.20 ×10 ⁶	9.20 ×10 ⁻¹
29	8.70 ×10 ¹⁰	1.30 ×10 8	1.00 ×10 ¹⁶	4.30 ×10 ¹³	1.60 ×10 6	1.60 ×10 9	5.10 ×10 ⁷	1.50 ×10 °	3.40 ×10 ⁶	1.40 ×10 °
30	5.80 ×10 ¹⁰	5.90 ×10 ⁸	5.00 ×10 ¹⁵	5.20 ×10 ¹³	1.70 ×10 ⁶	4.10 ×10 ⁹	2.40 ×10 ⁶	1.30 ×10 °	3.40 ×10 ⁶	1.10 ×10 °
31	9.50 ×10 ⁸	6.10 ×10 ⁶	2.30 ×10 ¹²	1.10 ×10 ¹²	1.10 ×10 ⁴	5.00 ×10 ⁷	2.20 ×10 ⁶	4.50 ×10 ⁻³	1.30 ×10 ⁴	1.80 ×10 ⁻²
32	5.40 ×10 ¹⁰	1.30 ×10 8	1.20 ×10 ¹⁶	4.10 ×10 ¹³	1.80 ×10 ⁶	2.10 ×10 ⁹	4.10 ×10 ⁶	1.50 ×10 °	3.50 ×10 ⁶	1.40 ×10 °
33	6.20 ×10 ⁸ 4.90 ×10 ¹⁰	1.50 ×10 ⁶	1.80 ×10 ¹² 2.70 ×10 ¹⁵	3.10 ×10 ¹¹ 2.90 ×10 ¹³	2.60 ×10 ³ 8.50 ×10 ⁵	9.70 ×10 ⁷ 4.10 ×10 ⁹	3.20 ×10 ⁶ 2.40 ×10 ⁷	1.00 ×10 ⁻³ 6.90 ×10 ⁻¹	2.90 ×10 ³	4.70 ×10 ⁻³ 8.30 ×10 ⁻¹
35	4.90 ×10 ¹⁰ 5.40 ×10 ¹⁰	6.30 ×10 ⁷	2.70 ×10 ¹⁵ 6.50 ×10 ¹²	2.90×10^{-13} 3.50×10^{-13}	8.50 ×10 ⁵		2.40 ×10 / 3.00 ×10 ⁸	6.90 ×10 ⁻¹	1.60 ×10 ⁶ 4.10 ×10 ⁶	8.30 ×10 ⁻¹
36	1.70 ×10 ¹⁰	6.20 ×10 ⁷	9.80 ×10 ¹⁴	1.20 ×10 ¹³	2.70 ×10 ⁵	2.80 ×10 ⁹ 1.40 ×10 ⁸	7.80 ×10 ⁵	1.60 ×10 -1	4.10 ×10 ⁵	3.00 ×10 -1
37	8.50 ×10 ⁹	3.00 ×10 ⁷	1.80 ×10 ¹⁴	5.00 ×10 ¹²	8.00 ×10 ⁴	2.30 ×10 ⁸	2.70 ×10 ⁶	4.10 ×10 -2	4.20 ×10 ⁵	3.00 ×10 ···
38	1.20 ×10 ¹¹	5.80 ×10 ⁸	1.30 ×10 1.30 ×10 16	1.00 ×10 ¹⁴	5.40 ×10 ⁶	8.70 ×10 ⁸	4.30 ×10 ⁷	4.10 ×10 4.90 ×10 °	1.10 ×10 ⁷	3.70 ×10 ⁰
39	1.40 ×10 ¹⁰	4.50 ×10 ⁷	2.60 ×10 ¹³	9.20 ×10 ¹²	1.00 ×10 ⁵	1.10 ×10 ⁹	2.30 ×10 ⁷	6.00 ×10 -2	1.50 ×10 ⁵	1.20 ×10 ⁻¹
40	2.10 ×10 ⁸	9.30 ×10 ⁵	8.40 ×10 ¹²	1.90 ×10 ¹¹	1.50 ×10 ³	2.10 ×10 ⁶	1.40 ×10 ⁵	4.90 ×10 ⁻⁴	1.60 ×10 ³	2.20 ×10 ⁻³
+0	2.10 ^10	7.50 ^10	0.70 ^10	1.70 ^10	1.50 ^10	2.10 ^10	1.70 ^10	7.70 ^10	1.00 ^10	2.20 ^10

I.2.4 適用例

I.2.4.1 Key 核種の選定

濃度比を用いる場合に必要となる Key 核種の選定の基本要件としては、外部からの検出が 比較的容易なγ線放出核種である(すなわち、非破壊外部測定も可能)、又は評価対象廃棄物 ごとの放射能濃度を放射化計算によって算出できる核種であることが挙げられる。このため、 ここでは、濃度比を用いる場合の Key 核種の例として、代表的なγ線放出核種である ⁶⁰Co を選定する。難測定核種(評価対象核種)及び Key 核種の散布図、並びに統計計算を行った 結果を、図 1.8 及び図 1.9 に示す。

なお、 137 Cs も γ 線を放出する核種であるが、放射化金属の場合は、 60 Co 放射能濃度が非常に高く、 60 Co の γ 線によるコンプトン散乱の影響で非破壊外部測定による 137 Cs の検出性が大幅に低下する(137 Cs の放射線の検出下限値が 60 Co 濃度の上昇に応じて見かけ上高くなる)可能性が高いことを考慮し、全ての難測定核種に対して 60 Co を適用する。

I.2.4.2 適用性の判断

濃度比を用いる場合では、評価対象廃棄物の中性子照射開始から中性子照射終了までの期間において、評価対象廃棄物の放射能濃度が経時的に変化しても、中性子照射される廃棄物の個々の部位では、同一元素成分条件、同一中性子条件及び同一中性子照射条件という同一の放射化条件であるため、放射能濃度が変化しても、放射化物中の難測定核種及び Key 核種の濃度比は、基本的に一定である。すなわち、濃度比が汚染の仕方及びプロセス間の移行による変動のおそれが考えられた汚染廃棄物と異なり、放射化物に関しては、原理的に濃度比を用いる場合の方法が適用可能である。ただし、難測定核種及び Key 核種の濃度比は、評価対象廃棄物の中性子照射終了日の値であるため、比較的短半減期の Key 核種の放射能濃度を非破壊外部測定法で決定する場合は、測定した Key 核種の放射能濃度を中性子照射終了日に減衰補正する必要があり、60 Co は、これに該当する。

このため、実際に濃度比を用いる場合において、非破壊外部測定法で ⁶⁰Co を測定する場合には、非破壊外部測定で測定した Key 核種(⁶⁰Co)の放射能濃度は、廃棄物発生日(中性子照射終了日)に減衰補正する必要がある。また、**附属書 B** に基づけば、比較的短半減期の核種の中性子照射時間が 10 年程度であれば顕著な影響は、表れないが、長期中性子照射(数10 年単位)の条件下においては、核種の生成及び減衰の平衡状態に達する。

このため、解体時に発生するような長時間中性子照射された廃棄物(連続照射で数 10 年程度の廃棄物)について濃度比を用いる場合は、⁶⁰Co(半減期 5.27 年)などの比較的短半減期の核種に対しては、この影響に対する補正を考慮する必要がある。ただし、この附属書での計算例の場合は、比較的短半減期の核種として ⁶⁰Co に対しても濃度比を用いる場合を適用するが、評価対象廃棄物は、原子力発電所の供用期間中に発生する廃棄物であり、中性子照射時間は、それほど長期にはわたらないため、減衰の考慮が要求されるわけではない。

さらに、補足的に、図 1.8 及び図 1.9 の散布図に示した放射化計算結果(難測定核種及び

Key 核種の放射能濃度)が数桁にわたる広範囲の濃度分布を示していることを考慮し、参考として、式(3)に示す相関関係を検定する統計手法(t 検定)を適用して難測定核種及び Key 核種の相関関係を確認している。結果は、図 I.8 及び図 I.9 に示したとおりであり、いずれの難測定核種と Key 核種との間で相関関係が確認され、かつ、相関係数も比較的高い(0.6 から 0.9 程度)。

上記に基づけば,I.2.3.2 の放射化計算結果に対しては,いずれの難測定核種(評価対象核種)についても,Key 核種を 60 Co とした濃度比を用いる場合の方法が適用可能である。

$$t_0 = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \qquad (3)$$

ここに、r : 相関係数

n : データ数

 $t_0 \ge t \, (n-2, 0.01)$ の場合、無相関が棄却され、相関関係があると判断される。なお、 $t \, (n-2, 0.01)$ は、 $t \, 分布表の危険率 1 \, \%の \, t \, 値である。$

I.2.4.3 濃度比の決定方法

a) 濃度比の算出 評価対象廃棄物全体の放射能濃度は、様々な放射化条件下にあり、数桁にわたる広範囲の放射能濃度で分布するものもあり、一般に、難測定核種及び Key 核種の放射能濃度は、対数正規分布で評価される。また、難測定核種及び Key 核種の濃度比も基本的に相関関係をもつ二変量対数正規分布に従うため、複数回の放射化計算結果を使用して濃度比を算出する場合には、幾何平均 9の適用が適切である。図 I.8 及び図 I.9 に示した BWR のチャンネルボックスの本体及び PWR 制御棒の被覆管の難測定核種、並びに Key 核種の濃度比は、図 I.10 及び図 I.11 に示すとおり、難測定核種及び Key 核種の濃度比が対数正規分布を示すため、式(2)に示した埋設総放射能の評価に適用する放射能濃度の決定に適用する濃度比は、幾何平均を適用して算出している(濃度比は、値が大きくなるように、有効数字 3 桁目を切り上げて表示している)。

なお、濃度比の分布形状が対数正規分布に明らかに従わず、最大放射能濃度の評価の観点では、ばらつきを踏まえた保守性の考慮が必要な場合には、算術平均などによって濃度比を算出する。

注 9 **AESJ-SC-F10**:2007 では、浅地中ピット処分廃棄物の放射能濃度決定方法に適用するスケーリングファクタの算出方法として、式(2)に示した幾何平均が記載されている。

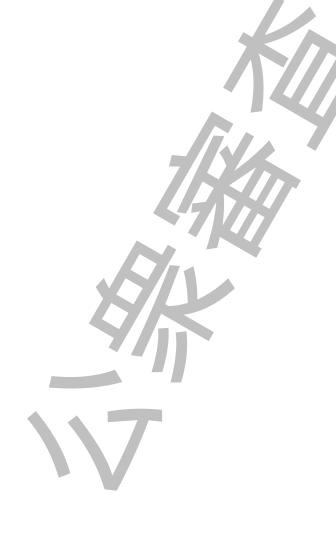
b) **放射化計算結果(評価データ)の充足性** 放射化計算結果(評価データ)の数が、濃度 比決定のための評価データとして十分であるかどうかについては、計算して得られた放 射化計算結果の数に応じて、放射化計算結果群(データベース)が示す統計値の安定性 を踏まえて判断すればよい。

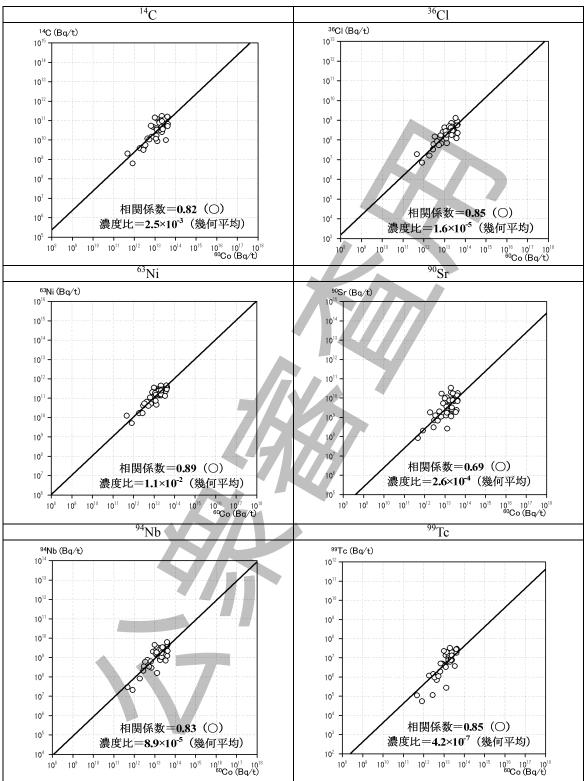
ここで, ISO21238:2007 に示されている適切なデータ数の取得の考え方(I.1.4 参照)を踏まえて, 今回の放射化計算結果である 40 点のデータベースに関して, 代表的な統

計値である相関係数の安定性(すなわち,各データ数における相関係数の平均値及び相関係数の 95 %信頼下限値の差が示す不確定性の減少の度合い)について評価した結果を、**図 I.12** に示す。

この結果に基づけば、放射化計算によって集積したデータ数の推移に応じて、相関係数の95%信頼下限値が上昇し、次第に安定領域に入り、40点の計算用入力データ群では、追加計算によっても、統計値の明確な改善は、生じないことが十分予測されるため、濃度比を決定するためのデータ数としては、充足している。

なお、参考として、同様の方法で濃度比の安定性(各データ数における濃度比の平均値及び濃度比の95%信頼上限値の差が示す不確定性の減少の度合い)を評価した結果を、**図 I.13**に示すが、濃度比の安定性の観点でも、上記と同様である。

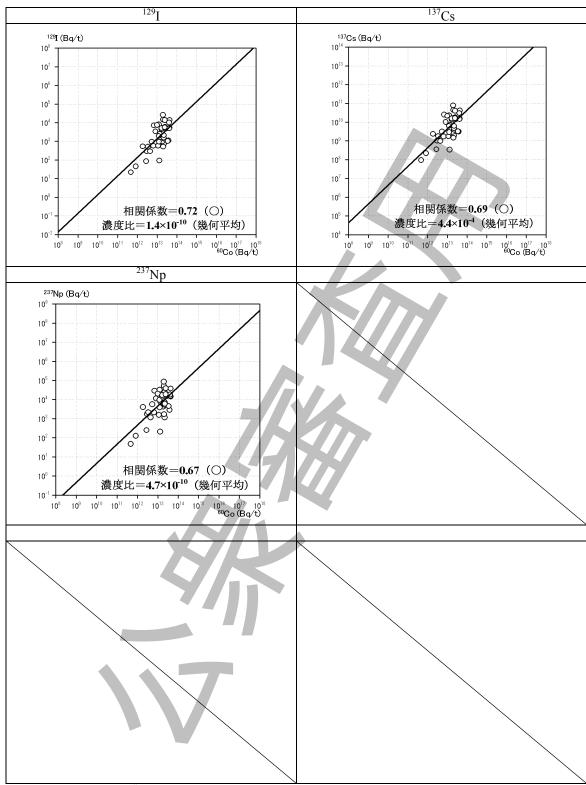




注記1 上記は,Key 核種を ⁶⁰Co と想定した場合の結果を図示した。また,図中の濃度比は,放射化計算結果の幾何平均値を表示した。

注記 2 相関係数の右欄(括弧内)には、 t 検定(相関性の検定)の結果が、相関関係が認められる(=危険率 1 %にて相関関係 =0 は、棄却される)場合に"○"を、相関関係が認められない場合に"×"を付した。

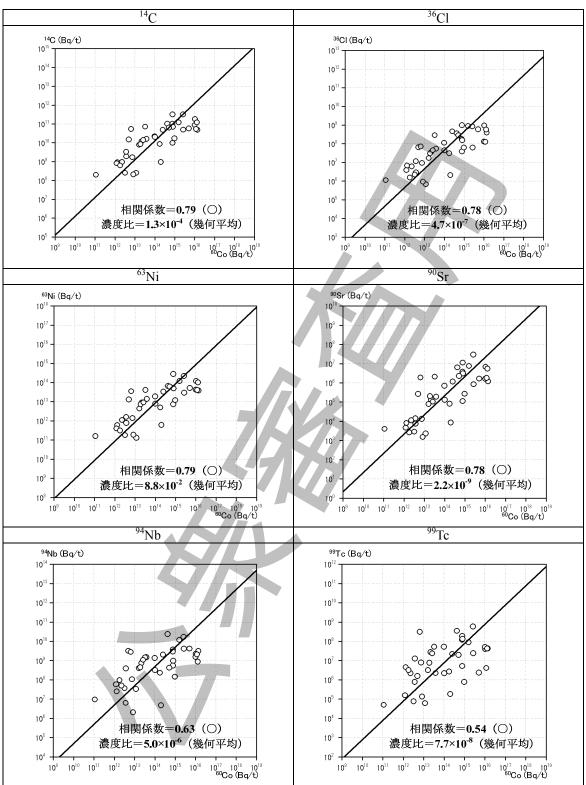
図 I.8-ZrTN804D (BWR チャンネルボックスの本体) の 難測定核種及び Key 核種 (⁶⁰Co) の散布図 (放射化計算結果)



注記1 上記は、Key 核種を ⁶⁰Co と想定した場合の結果を図示した。また、図中の濃度比は、放射化計算結果の幾何平均値を表示した。

注記 2 相関係数の右欄(括弧内)には, t 検定(相関性の検定)の結果が,相関関係が認められる(=危険率 1 %にて相関関係 =0 は,棄却される)場合に"〇"を,相関関係が認められない場合に"×"を付した。

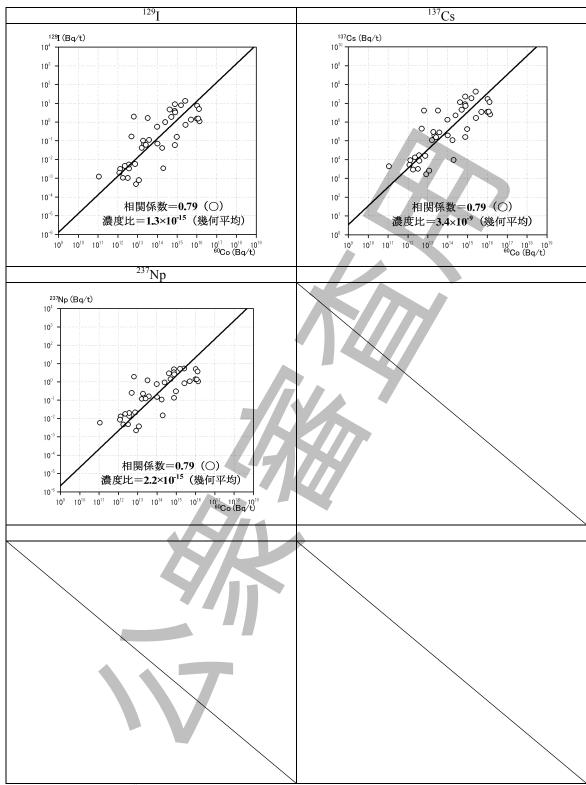
図 I.8-ZrTN804D(BWR チャンネルボックスの本体)の 難測定核種及び Key 核種(60 Co)の散布図(放射化計算結果)(続き)



注記1 上記は、Key 核種を ⁶⁰Co と想定した場合の結果を図示した。また、図中の濃度比は、放射化計算結果の幾何平均値を表示した。

注記 2 相関係数の右欄(括弧内)には、 t 検定(相関性の検定)の結果が、相関関係が認められる(=危険率 1 %にて相関関係 =0 は、棄却される)場合に"○"を、相関関係が認められない場合に"×"を付した。

図 I.9-SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) の 難測定核種及び Key 核種 (⁶⁰Co) の散布図 (放射化計算結果)



注記1 上記は、Key 核種を 60Co と想定した場合の結果を図示した。また、図中の濃度比は、放射化計算結果の幾何平均値を表示した。

注記 2 相関係数の右欄(括弧内)には, t 検定(相関性の検定)の結果が,相関関係が認められる(=危険率 1 %にて相関関係 =0 は,棄却される)場合に" \bigcirc "を,相関関係が認められない場合に" \times "を付した。

図 I.9-SUS304 (PWR 制御棒の被覆管)の 難測定核種及び Key 核種 (⁶⁰Co) の散布図 (放射化計算結果) (続き)

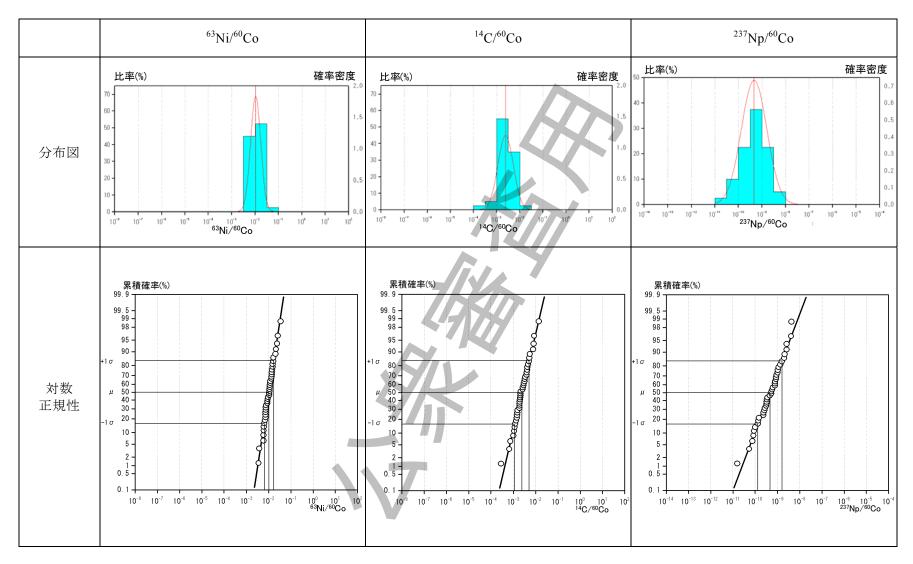


図 I.10-ZrTN804D(BWR チャンネルボックスの本体)の難測定核種及び Key 核種の濃度比の対数正規性

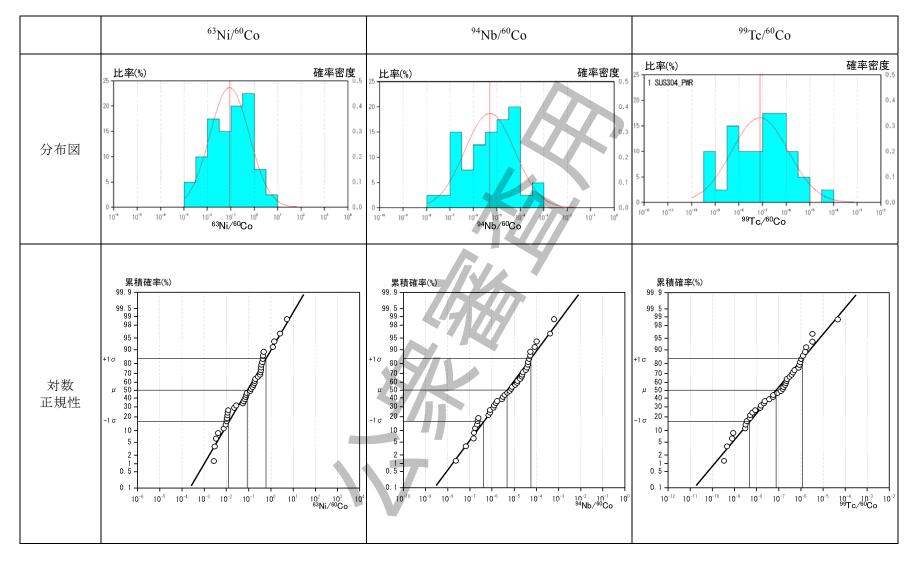
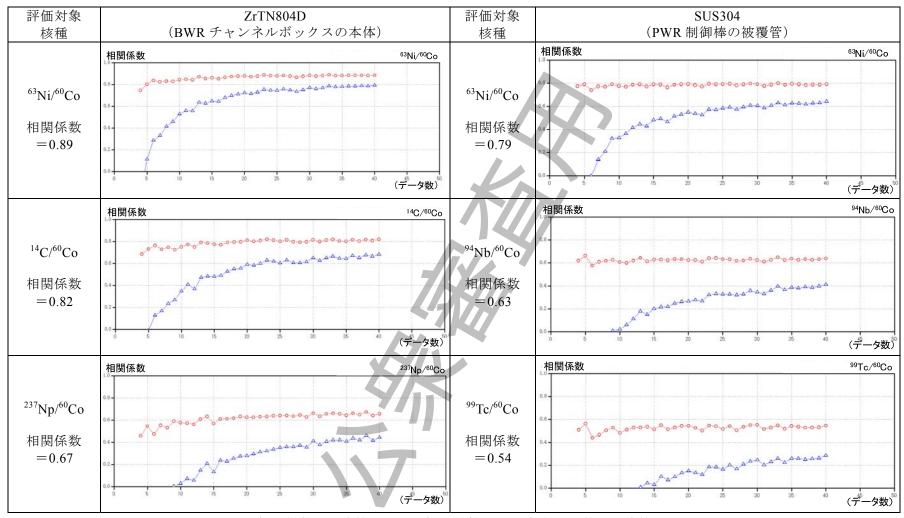
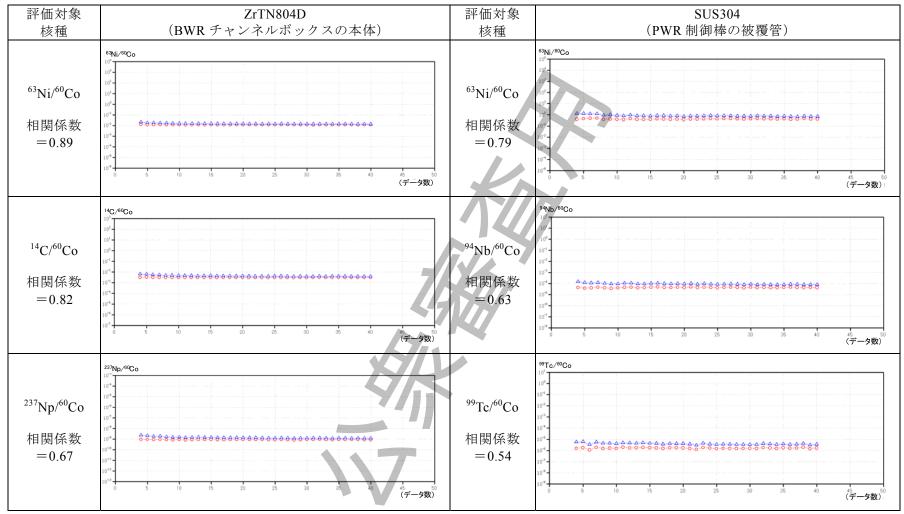


図 I.11-SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) の難測定核種及び Key 核種の濃度比の対数正規性



○:相関係数の平均値 △:相関係数の95%信頼下限値の平均値

図 I.12-相関係数の安定性の評価(放射化計算結果の数(評価データ数)及び相関係数の統計値の推移による評価)



○:濃度比の平均値 △:濃度比の95%信頼上限値の平均値

図 I.13-濃度比の安定性の評価(放射化計算結果の数(評価データ数)及び濃度比の統計値の推移による評価)

参考文献

- [1] **ISO 21238**:2007 Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants (The contents taken from ISO21238:2007 are reproduced with the permission of the International Organization for Standardization, ISO. The ISO standards can be obtained from ISO member (Japanese Standards Association: http://www.jsa.or.jp) and from the Web site of the ISO Central Secretariat at the following address: http://www.iso.org. Copyright remains with ISO.)
- [2] 日本原子力発電株式会社,"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",平成22年8月
- [3] JIS H 4751:1998 ジルコニウム合金管
- [4] JIS G 4305:2005 冷間圧延ステンレス鋼及び鋼帯
- [5] "Spent Fuel Disassembly Hardware and Other Non-Fuel Bearing Components Cost Estimates, and Proposed Repository Acceptance Requirements", 1986, PNL-6046/UC-70
- [6] 金属便覧(改定6版), 日本金属学会(2000)
- [7] NUREG/CR-3474, "Long-Lived Activation Products in Reactor Materials", 1984
- [8] 原子力工学シリーズ 8 照射損傷, 東京大学出版会
- [9] 原子力工学シリーズ1原子炉構造工学,東京大学出版会
- [10] 電力中央研究所報告,太田・土肥・黛・草薙・鈴木,"ステンレス鋼の照射誘起偏析に及 ぼす純度の影響", 1997 年 6 月, CODEN: DCKHDL ISSN:1340-4652
- [11] M.Seo; N.Sato, "Surface Characterization of Stainless Steels Prepared with Various Surface Treatments", Transaction of the Japan Institute of Metals, Vol.21, No12(1980)
- [12] P.Prakash; T.Mohandas; P.Dharma Raju(2005), "Microstructural characterization of SiC ceramic and SiC-metal active metal brazed joints", Scripta Materialia 52(2005)
- [13] 高久・後河内, "原子炉冷却系配管用ステンレス鋼の応力腐食割れ挙動", 火力原子力 発電, Vol.28, No.11, Nov.1977
- [14] Lu, Y.; Sakaguchi, K.; Shoji, T.(2004), "Stress corrosion cracking of stainless steel pipe weldments in BWR environment. A system safety benchmark facility for evaluation of crack growth rates under different flow rate conditions.", Key Engineering Materials (2004)
- [15] Ghosh,M.; Chatterjee,S, "Characterization of transition joints of commercially pure titanium to 304 stainless steel.", Materials Characterization (Jul 2002)
- [16] 藤野・松本・前原, "エネルギ分散連続 X 線回折法による集合組をもつ鋼の相定量分析", 鉄と鋼 (Sep 1981)
- [17] Shaaban, H.I.; Hammad, F.H., "Investigation of diffusion-bonding between Zircaloy-4 and 304 stainless steel", Journal of Nuclear Materials (Jan 1978)
- [18] Kirschner, J.; Dietz, K.J.; Waelbroeck, F., "On the dependence of composition and depth

- profiles of stainless steel and inconel surfaces on pretreatment", Proceedings of the 9. Symposium on fusion technology. Commission of the European Communities, 1976
- [19] Boschi, A.; Ferro, C.; Luzzi, G.; Papagno, L., "Surface composition of some austenitic stainless steels after different surface treatments", The Journal of Vacuum Science and Technology (Jul 1979)
- [20] Ahmad,M.; Shoaib,K.A.; Shaikh,M.A.; Akhtar,J.I., "Identification of surface carbides and spinels in welded austenitic stainless steels", Journal of Materials Science (1 Mar 1994)
- [21] He,X; DebRoy,T; Fuerschbach,P.W., "Alloying element vaporization during laser spot welding of stainless steel", Journal of Physics. D, Applied Physics (7 Dec 2003)
- [22] Park, J.Y.; Danyluk, S.; Busch, D.E., "Scanning Auger electron spectroscopy studies of grain-boundary segregation in Type 304 stainless steel", Conference: 5. Bolton Landing conference, Lake George, NY, USA, 27-30, Aug 1978
- [23] BAEK J H; JEONG Y H, "Depletion of Fe and Cr within precipitates during Zircaloy-4 oxidation", Journal of Nuclear Materials, 304 (2002)
- [24] ACHARYA R, NAIR A G C, REDDY A V R, GOSWAMI A, "Standard-less analysis of Zircaloy clad samples by an instrumental neutron activation method", Journal of Nuclear Materials Vol.326, No.2/3
- [25] Anada,H; Takeda,K; Nasu,S; Kobayashi,Y; Nakamichi,T, "Chemical State analysis of Sn and Fe in ZrO2 Moessbauer spectroscopy
- [26] Yilmazbayhan, A.; Delaire, O.; Motta, A.T.; Birtcher, R.C.; Maser, J.M.; Lai, B, "Determination of the alloying content in the matrix of Zr alloys using synchrotron radiation microprobe X-ray fluorescence", Journal of Nuclear Materials (15 Sep 2003) v. 321(2-3)
- [27] Lee, Chan Bock; Kim, Ki Hang, "Analysis of corrosion behavior of KOFA zircaloy-4 cladding", Journal of the Korean Nuclear Society (Apr 1998)
- [28] Garde, A.M.; Pati, S.R.; Krammen, M.A.; Smith, G.P.; Endter, R.K., "Corrosion behavior of Zircaloy-4 cladding with varying tin content in high-temperature pressurized water reactors Zirconium in the nuclear industry", Tenth international symposium. ASTM. 1994
- [29] JIS Z 9031:2012 乱数発生及びランダム化の手順

附属書 J (参考)

換算係数を用いる場合の計算例

この附属書は、理論計算法を利用した放射能濃度決定方法のうち、換算係数を用いる場合の 基本的な考え方、及び計算例(放射化計算の条件の設定、放射化計算の実施、換算係数の算出 及び放射能濃度の決定方法)を示す。

J.1 基本的な考え方

J.1.1 考え方

換算係数を用いる方法は、核種生成量が中性子照射量に対し基本的に正の比例関係となることから、評価対象廃棄物の中性子照射量に比例する因子(中性子照射量,燃焼度,運転日数など)を管理指標として利用し、放射能濃度を求めるものである。次に換算係数を用いる場合の原理、管理指標の選定の方法、評価手順について説明する。

放射化によって生成する放射能は、中性子照射時間が生成する放射性核種の半減期に比べて 短いなどの条件 $^{10)}$ では、式 $^{(1)}$ のように近似的に表わされる。

 $A = \sigma \times N \times \Phi \times t \times \lambda \tag{1}$

ここに、 A : 評価対象廃棄物の放射能濃度 (Bq/cm³)

σ : 親核種の放射化断面積 (cm²)

N : 親核種の中性子照射前の原子数密度 (cm⁻³)

Φ: 中性子フルエンス率 (n/cm²/s)

t : 中性子照射時間 (s)

λ : 生成核種の崩壊定数 (s⁻¹)

ここで、評価対象廃棄物の部位を考えると、放射化断面積 (σ) 、親核種の原子数密度 (N)は、一定とみなすことができ、崩壊定数 (λ) も定数であることから、放射能濃度 (A) は、中性子照射量 $(\Phi \times t)$ と比例関係がある。

さらに、評価対象廃棄物の中性子照射量($\mathbf{\Phi} \times \mathbf{t}$)に比例するよう管理指標(\mathbf{B})を定義すると、放射能濃度は、管理指標(\mathbf{B})に比例する。放射能濃度と管理指標との比例係数を換算係数 \mathbf{R} として表せば、放射能濃度は、式(2)のように単純に表される。

 $A = \mathbf{R} \times \mathbf{B} \tag{2}$

ここに、 R : 換算係数B : 管理指標

上記のように放射能濃度は、換算係数Rと管理指標の値Bとの積として原理的に表わすことができる。したがって、換算係数Rをあらかじめ決定しておけば、管理指標の値から評価対象廃棄物の放射能濃度を求めることができる。

換算係数 R は、管理指標の値 B に対応する形で放射化計算によって決定することができ、

管理指標の値によって換算係数 R が変化する場合には、換算係数は、R (B) のように B の関数で決めることができる。

注 10) 次の条件での放射能濃度。"中性子照射時間が生成する放射性核種の半減期に比べて短い","変換される起源元素の割合(起源元素の減少分)が無視できる","生成した放射性核種が中性子照射によって変換される割合は、崩壊によって失われる割合より十分小さい"。

この方法で使用する管理指標は、評価対象廃棄物の中性子照射量に比例する因子を選定する。 具体的な管理指標の例として、制御棒に対して原子力発電所で管理されている中性子照射量が、 BWR 燃料集合体のチャンネルボックスなどに対して燃料の燃焼度が、また、炉心近傍に固定 された機器に対して炉心の運転期間などがあげられる。

この方法による換算係数及び放射能濃度の評価は、次の手順で行う。

まず、上記に示したように評価対象廃棄物に対し適切な管理指標を決定する。次に、評価対象廃棄物のもつ管理指標の値の範囲を考慮して代表的な中性子照射量を設定し、平均的又は放射能濃度評価結果が大きくなるような中性子条件で放射化計算を実施する。

この結果から管理指標の値と放射能濃度との関係を換算係数として決定し、換算係数及び評価対象廃棄物がもつ管理指標の値の積から放射能濃度を決定する。この方法による評価手順の概略を、**図 J.1** に示す。

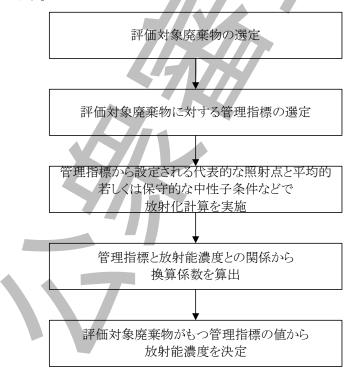


図 J.1-換算係数を用いる場合の評価手順の概略

J.1.2 放射化計算の条件の設定

a) 元素成分条件 附属書 G に示す方法で,評価対象廃棄物ごとに起源元素を選定し,各元素の濃度の代表値を 1 点設定する。

b) **中性子条件** 中性子フルエンス率・中性子スペクトルは,評価対象廃棄物の設置位置,移動の有無などの中性子照射条件などを踏まえ,中性子照射期間中における評価対象廃棄物自身の平均的又は保守的な(放射能濃度評価結果が大きくなるような)中性子フルエンス率・中性子スペクトル¹¹⁾を設定する。

具体的には、評価対象廃棄物の炉心内外での配置位置の移動の有無を考慮し、**表 J.1** に示す方法で設定する。

なお、評価対象廃棄物の中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定する場合は、**附属書** G に示す事項を考慮する。また、放射化断面積は、上記の条件を考慮した上で、**附属書** G を踏まえ、設定する。

注 ¹¹⁾ 中性子スペクトルの保守性は、中深度処分対象核種の評価に対しての保守性。

表 J.1-換算係数を用いる場合における中性子条件設定の考え方

評価	西対象廃棄物の配置位置	評価対象廃棄物の例	中性子条件の設定の考え方
運転サイクルごとのロー テーションなどによる配置位置の移動のあるもの		(BWR) チャンネルボックス (PWR) バーナブルポイズン, プラギングデバイス	移動及び中性子照射期間中による中性子フルエンス率・中性子スペクトルの変化に対し、評価対象廃棄物自身における平均的な中性子フルエンス率・中性子スペクトル分布を設定するか、又は評価対象廃棄物自身の全領域に一つの保守的りな(放射能濃度評価結果が大きくなるような)代表値を設定する。
	燃焼制御のための挿入位 置などの配置位置が変化	(BWR) 制御棒 (PWR) 制御棒 ^{a)}	同上
	するもの	など	10.T.
固定	中性子照射期間中は、配置位置の変化がないもの	(BWR) シュラウド,核計装管,上部格子板 (PWR) 炉心槽,上部炉心板	中性子照射期間中の中性子フルエンス率・中性子スペクトルの変化に対し、評価対象廃棄物における平均的な中性子フルエンス率・中性子スペクトル分布を設定するか、又は評価対象廃棄物自身の全領域に一つの保守的 b)な代表値を設定する。
注 a) ₁	通堂 PWR でけ 運転中に挿入	 	Nが 運転サイクルごとに挿入位置の変

注 ³⁾ 通常, PWR では, 運転中に挿入位置の移動は, 行われないが, 運転サイクルごとに挿入位置の変更がある。

c) 中性子照射条件 中性子照射時間の範囲は、個々の評価対象廃棄物の管理指標の値から中性子照射時間の実績を包含するように設定する。範囲の設定には管理されている管理指標の実績値、評価対象廃棄物に認可されている最大照射量などから計算される中性子照射時間が利用できる。

b) 中性子スペクトルの保守性は、中深度処分対象核種の評価に対しての保守性。

放射化計算を行うための中性子照射時間の代表計算点は、評価対象廃棄物の中性子照射時間の範囲内で適切に設定する。また、停止期間は、実績を踏まえて平均値又は放射能濃度評価結果が大きくなるよう設定するか、若しくは基礎的な検討(**附属書 B** 参照)などによって中性子照射停止時間の放射能濃度への影響が小さいことが明らかな場合は、設定しない。

J.1.3 放射化計算

a) 放射化計算用データの設定 J.1.2 で設定した元素成分及び中性子条件によって平均的,又は放射能濃度評価結果が大きくなる条件を設定する。また,中性子照射条件は,個々の評価対象廃棄物における中性子照射時間の実績を包含する範囲で設定された中性子照射時間の代表計算点とする。

一 元素成分条件 :各元素の濃度について代表値を1点設定

中性子条件 : 評価対象廃棄物自身の中性子照射位置ごとの平均的な中性子フルエン

ス率・中性子スペクトル分布,又は放射能濃度を保守的に(大きめに)

評価する代表値、放射化断面積を設定

- 中性子照射条件 :評価対象廃棄物の中性子照射時間を包含する範囲で設定された中性子

照射時間の代表計算点を設定する。停止期間は,実績を踏まえて平均 値又は放射能濃度評価結果が大きくなるように設定するか,基礎解 析結果を踏まえ中性子照射停止時間の放射能濃度への影響が小さいこ

とが明らかな場合は、設定しない。

b) **放射化計算の実施** a)で設定した複数の放射化計算用入力データに基づき,放射化計算コードを使用して放射化計算を行う。

J.1.4 適用方法

J.1.4.1 適用性

評価対象廃棄物の放射化による放射能は、プロセス間の移行による変動のおそれが考えられた汚染廃棄物と異なり、同一元素成分条件、同一中性子条件のもとでは、ほぼ中性子照射量に比例する。したがって、管理指標として中性子照射量に比例する因子(燃焼度、運転時間など)をとれば、管理指標の値と放射能濃度との間に比例関係がある。そのため、原理的に換算係数を用いる場合が適用できる。

この換算係数は、同一の中性子条件の廃棄物に対して適用できる。また、元素成分条件が異なる場合には、元素成分条件に応じた比例計算によって、元素組成成分条件に応じた換算係数を求めることができる。

J.1.4.2 換算係数の決定方法

a) 換算係数の算出 J.1.3 で実施した放射化計算によって放射能濃度と管理指標の値との比

として換算係数を算出し決定する。また、換算係数は、中性子照射時間の代表計算点ごと に算出されるが、代表計算点間の換算係数は、内挿によって設定することができる。

b) **換算係数の妥当性の評価** 換算係数の妥当性は,詳細計算とサンプリングによる測定結果 との比較などによって,その妥当性を,適用前にあらかじめ検証しておくことが必要であ る。

J.1.4.3 放射能濃度の決定方法

決定された換算係数と評価対象廃棄物の管理指標の値との積から、放射能濃度を決定する。

J.2 計算例

J.2.1 事前準備

J.1 の換算係数を用いる場合の基本的な考え方に基づき、放射化計算の条件の設定、放射化計算の実施、換算係数の算出を行い、その適用性を評価するとともに、放射能濃度を決定した例を、次に示す。

a) **評価対象廃棄物の選定** 原子力発電所から発生する代表的な中深度処分対象廃棄物として,**表 J.2** に示す評価対象廃棄物を選定した。

表 J.2-換算係数を用いる場合の評価対象廃棄物の選定

選定した中深度処分廃棄物	評価対象廃棄物の材料
BWR のチャンネルボックス	ZrTN804D
(本体)	(ジルカロイ4)
PWR 制御棒(被覆管)	SUS304

b) **評価対象核種の選定** 評価対象核種については、**附属書 G** の起源元素の選定と同様に、次の放射性核種を評価対象核種として選定した。

 14 C, 36 Cl, 60 Co, 63 Ni, 90 Sr, 94 Nb, 99 Tc, 129 I, 137 Cs, 2 Cα

- c) **放射化計算コードの選定** 放射化コードには、評価対象廃棄物ごとに、広く使用されて実績のある放射化コードから、次の計算コードを選定した。
 - BWR チャンネルボックス (本体の ZrTN804D を想定) : ORIGEN-S
 - PWR 制御棒(被覆管の SUS304 を想定) : ORIGEN2
- d) 評価管理指標の選定 換算係数を用いる場合の適用性を評価するための管理指標として は,表J.3 の管理指標を選定した。燃料の集合体平均燃焼度及び制御棒の中性子照射量は, 中性子フルエンスに比例する量であり, 評価対象廃棄物の中性子照射量と関連する因子で ある。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ある。

表 J.3-	換質係数を用い	る場合の適用性を評価するための	の管理指標(例)
12.0.0	JX # IN XX C / I V		// ID === 10 10x \ (1/1/

評価対象廃棄物	管理指標
BWR チャンネルボックス(本体)	装荷された燃料の集合体平均燃焼度
PWR 制御棒(被覆管)	制御棒先端の中性子照射量 ^{a)}
★ a) 古風フの眞見 DUD 別がはの然間のより	にきる数で数川としていて制御技出典の古典フ切り

注 a) 中性子照射量: PWR 制御棒の管理のため、炉心計算で算出されている制御棒先端の中性子照射量 (>0.625 eV)

J.2.2 放射化計算の条件の設定

J.2.2.1 元素成分条件

a) 評価対象核種の起源元素の選定 附属書 I と同様に、表 J.4 に示す起源元素を選定した。

表 J.4-評価対象核種の起源元素として選定した元素

	大象廃棄物 材料)	評価対象核種の起源元素						
ZrT	N804D	N, O, S, Cl, K, Fe, Co, Ni, Cu, Zr, Nb, Mo, Th, U (14 元素)						
SU	JS304	N, S, Cl, K, Fe, Co, Ni, Cu, Zr, Nb, Mo, Th, U (13 元素)						

b) 元素成分条件の設定 元素成分条件については、附属書 I に示した分析データなどの元素 成分の平均値を使用した。

J.2.2.2 中性子条件

J.2.2.2.1 ZrTN804D (BWR チャンネルボックス)

- a) 中性子フルエンス率・中性子スペクトルの設定 BWR の炉心燃料集合体では、軸方向に 出力・ボイド率が大きく変化し、中性子フルエンス率・中性子スペクトルを軸方向に考慮 する必要がある。また、チャンネルボックスは、運転サイクルごとに、炉心内でローテー ションによる配置位置の移動がある。ここでは、チャンネルボックスの炉心内での移動に 対し、平均的な軸方向の中性子フルエンス率・中性子スペクトル分布を設定するため、代 表炉心におけるサイクル及び炉心平均の軸方向出力及びボイド率分布を用いて算出した。 次にその手順を示す。
 - 1) 代表炉心におけるサイクル及び炉心平均の軸方向出力及びボイド率分布を算出する。
 - 2) 上記の出力及びボイド率分布を用いてチャンネルボックスの軸方向位置(炉心下部から 24 に分割)ごとに単位燃料集合体核特性計算コードによってチャンネルボックス位置の 中性子フルエンス率・中性子スペクトルを設定する。
- **b) 放射化断面積の設定** 放射化断面積は、**附属書 F** のとおり、放射化計算コード ORIGEN-S に内蔵されている既存の断面積ライブラリを使用した。ただし、ボイド率の違いによる中

性子スペクトルの差を考慮した。

J.2.2.2.2 SUS304 (PWR 制御棒の被覆管)

- a) 中性子フルエンス率・中性子スペクトルの設定 中性子フルエンス率については、附属書 I と同様に、2 ループプラントの代表的な条件における軸方向中性子フルエンス率分布を制 御棒の出力比(集合体平均出力の炉心平均出力に対する比)=1 で規格化した結果(D バンク、ARO バンクごとの軸方向中性子フルエンス率分布)を、中性子スペクトルについて は定格出力運転時の原子炉の軸方向の配置位置(D バンク、ARO バンク)ごとの各照射位置の中性子スペクトルをそれぞれ利用した。
- b) **放射化断面積の設定** 放射化断面積については、**附属書**Iと同様に、定格出力運転時の原子炉の軸方向の配置位置ごとの中性子スペクトルに基づき、PWR制御棒被覆管のディプレッションを考慮した放射化断面積をそれぞれ設定した。
- c) 中性子条件の設定 ここでは例示として、附属書 I に示した PWR 制御棒被覆管 (SUS304) の濃度比を用いる場合の計算例の No.4 の中性子条件 ¹²⁾を使用した。

中性子照射パターンは、ARO バンク照射で代表した。これは、ARO バンクの中性子スペクトルは、放射化反応への寄与が大きい低エネルギ中性子の成分が多い。そのため、同一の中性子照射量 ¹³⁾の場合は、ARO バンクの中性子スペクトルで照射されたほうが厳しくなることを考慮したものである。

- **注** ¹²⁾ PWR 制御棒被覆管(SUS304)の濃度比を用いる場合の計算例の No.4 の中性子条件 (**表 I.20** 参照) は、制御棒先端部(先端から 0.02 m) の中性子条件であり、中性子 照射量が 2.5×10²² cm⁻² の PWR 制御棒の平均的な条件である。
 - 13) PWR 制御棒の管理のため、炉心計算で算出されている制御棒先端の中性子照射量(> 0.625 eV)。

J.2.2.3 照射条件

J.2.2.3.1 ZrTN804D (BWR チャンネルボックス)

ZrTN804D (BWR チャンネルボックスの主材質)の中性子照射条件のうち、燃焼度は、J.1 に基づき、評価対象としたチャンネルボックスに装荷される燃料集合体の認可上の最高燃焼度 55 GWd/t から、範囲を $0\sim55$ GWd/t と設定する。また、燃焼度に対する代表ポイントは 10,20,30,40,45,50,55 GWd/t の 7 点を設定した。

なお、中性子照射時間は、燃焼度を比出力で除したものとした。また、運転を通じて一定出力にて燃焼するものと仮定した。実際の炉心は、取出直前の出力が低い傾向にあるため、この仮定は、⁶⁰Co などの短半減期核種を保守的に評価する。また、停止期間は、設備利用率として80%を仮定し中性子照射日数から算出した。

J.2.2.3.2 SUS304 (PWR 制御棒の被覆管)

ここでは、例示のため、**附属書 I** に示した PWR 制御棒被覆管(SUS304)の濃度比を用いる

場合の計算 No.4 (**表 I.20** 参照)に基づき、中性子照射量算出値から照射時間を設定した。中性子照射量の代表点は、 $2.5 \times 10^{22} \, \mathrm{cm}^{-2}$ を最大とし、全 $11 \, \mathrm{th}$ サイクル中の各サイクルに対する中性子照射量とした。

なお,基礎解析結果から,中性子照射停止時間の放射能濃度への影響は,小さいため,中性 子照射停止時間は,設定しない。

J.2.3 放射化計算

J.2.3.1 放射化計算データの設定

J.2.2 で設定を行った放射化計算の条件に基づき、放射化計算入力データの設定を行う。

- 元素成分: 評価対象廃棄物ごとに J.2.2 で示された設定を使用

- 中性子条件: BWR のチャンネルボックス, PWR 制御棒の中性子フルエンス率, 中

性子スペクトル,放射化断面積などをまとめ,表J.5,表J.6及び表

J.7 にそれぞれ示す。

- 中性子照射条件 : 評価対象廃棄物ごとに J.2.2 で示された設定を使用

J.2.3.2 放射化計算の実施

J.2.3.1 で設定した放射化計算用入力データに基づき、燃料の設置許可申請されている最高燃焼度を包含するよう、BWR チャンネルボックス本体、及び PWR 制御棒被覆管を評価対象とする放射化計算を行った。

J.2.4 適用例

J.2.3.2 で行った放射化計算結果に基づき、換算係数を用いる方法の適用性の評価を行った。

J.2.4.1 適用性の判断

BWR チャンネルボックス及び PWR 制御棒の放射化による放射能濃度は、汚染の仕方及びプロセス間の移行による変動のおそれが考えられた汚染廃棄物と異なり、中性子照射量に比例する管理指標として、それぞれ集合体平均燃焼度及び制御棒先端の中性子照射量を設定することができる。これによって原理的に換算係数を用いる方法が適用できる。

J.2.4.2 換算係数の決定方法

J.2.4.2.1 ZrTN804D (BWR チャンネルボックス)

BWR チャンネルボックスに対し,集合体平均燃焼度を管理指標とした換算係数の例を ¹⁴C, ⁹⁴Nb, ⁹⁹Tc について,**図 J.2** に示す。

J.2.4.2.2 SUS304 (PWR 制御棒の被覆管)

PWR 制御棒に対し,中性子照射量を管理指標とし,放射能濃度との相関を評価した例を ¹⁴C, ⁹⁴Nb, ⁹⁹Tc について, **図 J.3** に示す。

J.2.4.3 放射能濃度の決定方法

J.3.4.3.1 ZrTN804D (BWR チャンネルボックス)

BWR チャンネルボックスに対し、集合体平均燃焼度を管理指標とした放射能濃度の評価例を 14 C, 94 Nb, 99 Tc について**図 J.4** に示す。この計算結果によれば、BWR チャンネルボックスの放射能濃度と集合体平均燃焼度との関係については、どの核種の場合も単純比例に近い。

J.2.4.3.2 SUS304 (PWR 制御棒の被覆管)

PWR 制御棒に対し、中性子照射量を管理指標とした放射能濃度の評価例を ¹⁴C, ⁹⁴Nb, ⁹⁹Tc について、**図 J.5** に示す。

この計算結果によれば、PWR 制御棒の放射能濃度と中性子照射量との関係については、どの 核種の場合も単純比例に近い。この計算では制御棒の先端部の放射能濃度との相関を求めたた め、中性子照射量と制御棒全体の放射能濃度との相関については、この結果に基づき制御棒軸 方向の中性子フルエンス率分布を用いて推定することができる。



表 J.5-換算係数を用いる場合の条件設定

設定項目		BWR の例	PWR の例		
		チャンネルボックス(ZrTN804D)	PWR 制御棒(SUS304)		
管理指標		- 集合体平均燃焼度	- 制御棒先端の中性子照射量		
	元素成分条件	- 分析データなどの平均値を代表設定。	- 分析データなどの平均値を代表設定。		
中性子条	中性子 フルエンス率	- 代表炉心でのサイクル及び炉心軸方向平均出力分布・ボイド率分布を用いて単位燃料集合体計算によってチャンネルボックス位置の中性子フルエンス率・中性子スペクトルをチャンネルボックスの軸方向位置[1(炉心下部)から24に分割]ごとに設定。	- 平均的な条件のAROバンクの中性子フルエンス率分布から、制御棒の先端部の平均中性子フルエンス率を設定。 - 中性子照射パターンは、全AROバンクの照射パターンを設定。		
件	放射化断面積	ORIGEN-Sで中性子スペクトルを考慮。BWRでは 軸方向にボイド率分布があり中性子スペクトルが 異なることを反映。	- 放射化反応に対して保守側となる ARO バンク の放射化断面積を設定。		
	中性子照射条件	装荷された燃料の設置許可申請上の最大燃焼度などから中性子照射時間の範囲と代表計算点7点とを算定して設定。停止時間は保守的な(放射能濃度評価結果が大きくなるような)設備利用率を仮定して設定。	平均的な中性子照射量及び上記で設定した中性子フルエンス率の関係から算出して設定。各サイクルの中性子照射量を代表点として設定。停止時間は、考慮していない。		



表 I 6-RWR チャ	ノネルボックスの	評価条件(45GWd/t)
72 J.U — D W K J T Y .	ノイトノレノト・ソ・ノ へいい	## 11111 # # 1# 1 (43(

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

注 a) BWR チャンネルボックスの軸方向位置を 1 (炉心下部) から 24 に分割。

$$F_{T} = \sqrt{\frac{\pi}{4} \frac{T_{0}}{T}} \text{ , } F_{R} = \sum_{E_{g} \ge 0.625 eV}^{E_{g} \le 1.0 MeV} \phi_{g} / \phi_{th} \text{ , } F_{F} = \sum_{E_{g} \ge 1.0 MeV} \phi_{g} / \phi_{th}$$

ここに

 F_T : 熱中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス(THERM) F_R : 熱外中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス(RES) F_F : 高速中性子フルエンス率に対するスペクトルインデックス(FAST) E_g : g 群のエネルギ (eV)

 E_g : g群のエネルギ (eV) T : 媒質の温度 (K) T_0 : 293.16 (K)

 ϕ_g : g群の中性子フルエンス率 (n/cm²/s) ϕ_h : 熱群の中性子フルエンス率 (n/cm²/s)

表 J.7-PWR 制御棒の評価条件

		中性子	条件	中性子照射条件		
	中性子照射 パターン ^の	中性子 フルエンス率 (n/cm²/s)	放射化 断面積	中性子 照射時間 ^{d)} (y)	停止時間 (y)	
PWR 制御棒 a), b)	ARO バンク のみ	ARO: 5.5×10^{13}	ARO バンク	19.6	0	

- **注**^{a)} 制御棒の中性子照射量(>0.625 eV)は 2.5×10²² (cm⁻²)
 - b) 制御棒の中性子照射位置は**、附属書 I** に示した PWR 制御棒被覆管 (SUS304) の濃度比を用いる 場合の計算例の計算 No.4 (**表 I.20** 参照) に基づき,先端部 (先端から 0.02 m の位置) とする。
 - 。 中性子照射パターンは、PWR 制御棒被覆管 (SUS304) の濃度比を用いる場合の計算例の計算 No.4 (D バンク→ARO バンク照射) に基づき中性子照射量を保存して ARO バンクのみの中性子照射パターンとした。
 - d) 中性子照射時間は、中性子照射量と ARO バンクの中性子フルエンス率との関係から算出して設定した。

図 J.3-SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) の換算係数の例 (管理指標:中性子の照射量)

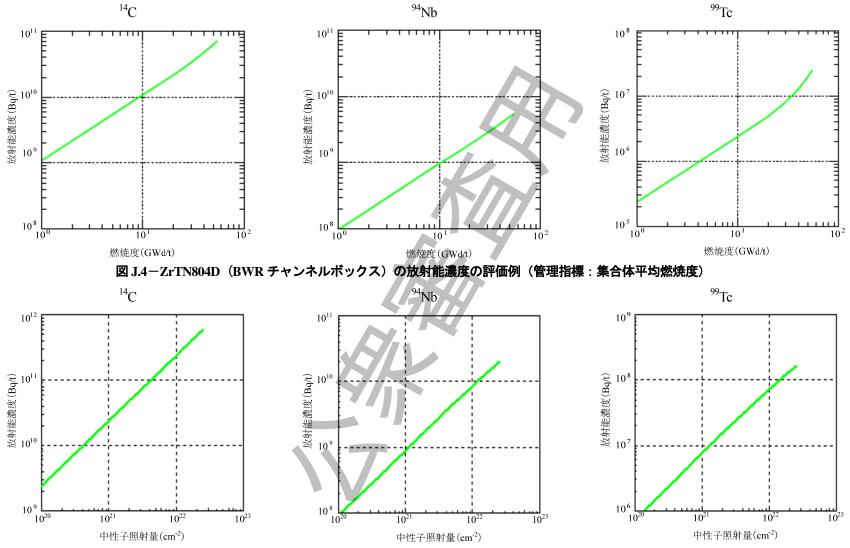


図 J.5-SUS304 (PWR 制御棒の被覆管) の放射能濃度の評価例 (管理指標:中性子の照射量)

附属書 K (参考)

濃度分布評価法によって決定する場合の計算例

この附属書は、理論計算法を利用した放射能濃度決定方法のうち、濃度分布評価法によって決定する場合の基本的な考え方及び計算例(放射化計算の条件の設定、放射化計算の実施及び放射能濃度の決定方法)を示す。

K.1 基本的な考え方

K.1.1 考え方

濃度分布評価法によって決定する場合とは、評価対象とする廃棄物グループの放射化計算の条件が明確であり、その計算条件において求められる放射能濃度が一定範囲にある場合、廃棄物グループの放射能濃度を、複数の理論計算によって求めた放射能濃度の平均値などによって決定する方法である。このため、廃棄物グループの計算条件の変動幅を考慮した複数の放射化計算を行い、計算結果の分布から廃棄物グループの放射能濃度を決定する。基本的な流れは、**図 K.1** のとおりとなる。

例えば、原子炉の運転開始から恒久停止まで原子炉内の一定の位置に設置された一種類の材料で構成される構造物を適用対象の廃棄物グループと考えると、廃棄物グループの元素分析データから元素成分条件の変動範囲が把握できることから、その変動範囲を考慮して複数の元素成分条件を適切に設定できる。

一方、中性子条件、中性子の照射条件は、一定であることから、放射化量が大きい値となるような中性子条件及び中性子の照射条件をそれぞれ一つ設定できる。それらの条件を用い、元素成分条件の変動に基づく放射化計算を複数実施し、計算結果のばらつきがある一定の範囲内に安定し、かつ、平均値が一定値に収束していることを確認し、複数の放射能濃度の計算結果からの平均値などを決定する。

この評価方法の具体的な対象廃棄物の例として、東海発電所(GCR)の黒鉛減速材を示す。

K.1.2 放射化計算の条件の設定

附属書 G を踏まえ、次の放射化計算の条件を設定する。

- a) 元素成分条件 附属書 G に示す方法で、評価対象となる廃棄物グループに対して、評価対象核種の起源元素を選定し、元素成分条件を設定する。
- b) 中性子条件 附属書 G に示す方法で、廃棄物グループに対して、中性子の照射位置ごとの中性子フルエンス・中性子スペクトル及び放射化断面積を設定する。次に、廃棄物グループの形状及び設置方向、並びに配置位置を考慮した中性子の照射位置を設定し、設定した廃棄物グループの放射化量が大きい値となるような中性子条件を選定する。
- c) 中性子の照射条件 附属書 G を踏まえ、評価対象廃棄物の放射化量が大きい値となるよう

な中性子の照射時間及び原子炉供用期間中の中性子の照射停止時間を設定する。



図 K.1-濃度分布評価法によって決定する場合の基本的な流れ

K.1.3 放射化計算

放射化計算は,次の手順で実施する。

- a) **放射化計算用データの設定 K.1.2** で設定した放射化計算の条件に基づき、元素成分条件、中性子条件及び中性子の照射条件について、放射化計算コードの入力条件とする放射化計算用データを設定する。放射化計算用データは、基本的に変動範囲を考慮して複数の値を設定するが、計算値の変動による影響が小さいことが明らかな条件については、一つの値に設定することが可能である。
- b) 放射化計算の実施 a)で設定した放射化計算用データに基づき,放射化計算を行う。

K.1.4 適用方法

K.1.3 の放射化計算結果に基づき、濃度分布評価法によって決定する場合の基本的な適用方法 を次に示す。

a) 計算結果の安定性及び充足性の確認 計算結果のばらつきが、ある一定の範囲内に安定し、かつ、平均値が一定値に収束していることを確認する。具体的には、平均値が示す統計値の放射能濃度の安定性で評価でき、統計値の安定性の判断については、ISO 21238:2007^[1]に示される適切なデータ数の取得の考え方を適用できる。

- b) 放射能濃度の決定方法 複数の計算結果から、次の方法によって廃棄物グループの放射能濃度を決定する。
 - 1) **廃棄物の総放射能を評価する場合** 放射能濃度の複数の計算結果の算術平均値に廃棄物 の総質量を乗じれば、廃棄物の総放射能となることから、廃棄物の総放射能を評価する場合には、放射能濃度の算術平均値と廃棄物の総質量とを用いる。
 - 2) 最大放射能濃度を評価する場合 起源元素の濃度が対数正規分布である場合,放射化計算結果によって得られた複数の放射能濃度の対数値は,正規分布を示す。したがって,対数値の平均値(幾何平均)と標準偏差とによって最大値を推定することができることから,最大放射能濃度を評価する場合には,計算値における正のばらつきを考慮し,放射能濃度の幾何平均値及び標準偏差を用いる。

K.2 計算例

K.2.1 事前準備

a) **評価対象廃棄物の選定** 評価対象廃棄物としては、原子力発電所から発生する代表的な中深度処分対象廃棄物を選定し、この廃棄物を代表させる主材料として、**表 K.1** に示す廃棄物を評価対象廃棄物として選定した。

表 K.1-評価対象廃棄物の選定

選定した中深度処分廃棄物	評価対象廃棄物の材料
GCR の黒鉛減速材	黒鉛
OCK 52 無動中央大型中	(ペシネ1級)

b) **評価対象核種の選定** 評価対象核種については、**附属書 G** の起源元素の選定と同様に、次の放射性核種を評価対象核種として選定した。

 14 C, 36 Cl, 60 Co, 63 Ni, 90 Sr, 94 Nb, 99 Tc, 129 I, 137 Cs, 2 Cα

- c) **放射化計算コードの選定** 放射化計算コードには、広く使用されて実績のある放射化計算 コードから、次の計算コードを選定した。
 - ORIGEN 2.2

K.2.2 放射化計算の条件の設定

K.2.2.1 元素成分条件

K.2.2.1.1 評価対象核種の起源元素の選定

評価対象核種の起源元素については、**附属書** G の起源元素の選定に関する四段階の考え方に基づき、次に示す方法(一次~四次スクリーニング)で選定した。

a) **一次スクリーニング** 全 103 元素のうち、Th 及び U を除外した次の 21 の放射性元素については、一次スクリーニング対象(評価対象核種の起源元素から除外)とした。

Tc, Pm, Bi, Po, At, Rn, Fr, Fa, Ac, Pa, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr

- b) 二次スクリーニング 一次スクリーニングで残された 82 元素について, 表 K.2 のように, それぞれ放射化計算を実施し, 評価対象核種を生成しない元素については, 二次スクリーニング対象(評価対象核種の起源元素から除外)とした。
- c) **三次スクリーニング** 二次スクリーニングで残された元素のうち,次の1)~4)の観点で,黒 鉛減速材料の製造方法において黒鉛化時などに各種材料に混入する可能性の低いと判断で きる元素については,三次スクリーニング対象(評価対象核種の起源元素から除外)とした。 三次スクリーニングを行った結果を**表 K.3** に示す。ただし,材料の仕様,製造上で,次の 1)~4)に該当する元素を添加している場合には,これら元素は三次スクリーニング対象外と した。
 - 1) 製造時の揮発 (黒鉛化時に除去)
 - 2) 希ガス
 - 3) 希少元素
 - 4) 用途が限定されている元素
- d) 四次スクリーニング 三次スクリーニング後で残された元素について、次の手順で、評価 対象核種の総生成放射能に対する各起源元素の生成比を評価し、生成比の小さい元素は、四 次スクリーニング対象 (評価対象核種の起源元素から除外) とした。
 - 1) 評価対象廃棄物中(材料)の元素分析データから、各元素の推定存在濃度レベル(オーダ)の評価を行った(**表 K.4**参照)。
 - 2) 各起源元素の推定存在濃度レベルと生成する放射能とから,評価対象核種ごとに各起源 元素の総生成放射能に対する寄与率を生成比として評価した(表 K.5 参照)。
 - 3) 生成比評価結果に基づき、生成比 0.01 %未満の元素をスクリーニング対象 (評価対象 元素から除外) とした。

なお、生成比のスクリーニングの判断指標は、放射化計算結果で算出する放射能濃度の最終的な値の有効数字が2桁(3桁目を切り上げ)であると想定し、これに推定存在濃度レベル評価の不確定性を考慮(1桁を想定)し、生成比0.01%未満(有効数字5桁以下に影響)とした。

e) **評価対象核種の起源元素の選定** 四次スクリーニング後で残された**表 K.6** に示す元素を, 評価対象核種の起源元素として選定した。

表 K.6-評価対象核種の起源元素として選定した元素

評価対象核種の起源元素

C, N, O, S, Cl, K, Fe, Co, Ni, Cu, Y, Zr, Nb, Mo, Th, U (16 元素)

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

	1					aland from 1 1 day 1 1 days				毕业. b q/	/起源元素 1
起源元素		7/		(7	on.	評価対象核種	an .	120	127	227	
(1 次 SL 後)	¹⁴ C	³⁶ Cl	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁹⁰ Sr	94Nb	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	¹³⁷ Cs	²³⁷ Np	全α
H	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
He	_	_	_		_	_	_	_	_	_	_
Li Be	_	_	_	_			_	_	_	_	_
В		_	_					_		_	
C	1.00×10^{5}	_	_					_	_	_	
N	1.04×10^{10}	_	_	_	_	_	_		_	_	_
0	5.51×10^{5}	_	_	_	-	_	-	- 🖺	_	_	_
F	3.61×10^{2}	_	_	_	_	_	_		-	_	_
Ne	1.36×10^{6}	_	_	_	_	_	_			_	_
Na	4.91×10^{1}	_	_		-	-				_	
Mg	_	_	_	_	_	_	_	4	-	-	_
Al	_	_	_	_	_	_	_				_
Si		_	_								
P	_	1.90×10 ⁵	_	_	_	_	_	-		-	
S Cl	_	5.99×10^{8}	_					7			
Ar	_	2.64×10^4	_	_	_	_	_			7 -	_
K	_	4.88×10^{6}	_	_	_	_	_	-	_	_	_
Ca	_	-	_	_	_	_	_	-	7 –	_	_
Sc	_	_	_	_	_	_	<u> </u>	-	-	_	_
Ti	_	_	_	_	_	_	7		_	_	_
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 Ga	_	_	2.01×10 ¹	3.07×10 ⁵	_	3	1 7 /		_	_	_
Ge	_	_	_		_	_	1 4 /		_	_	
As	_	_	_				-	77	_	_	
Se	_	_	_						_	_	
Br	_	_	_	_	_	73	_	7	_	_	_
Kr	_	_	_	_	2.51×10^{0}		_	7-	_	_	_
Rb	-	-	-	-	5.14×10^{3}			-	-	-	-
Sr	_	_	_	_	5.98×10^{5}		-	_	_	_	_
Y	_	_	_	-	1.34×10^4		ļ	_	-	_	-
Zr	_	_	_	_	2.41×10^4	$8.64E \times 10^{0}$	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}	<i>J</i>	_	_	_	
Rh Pd	-	_	_		45/		7	_	_	_	
Ag	_	_	_		3	7 1 7 4	-	_	_	_	_
Cd	_	_	_	_	-		7 -	_	_	_	_
In	_	_	_	-			7 –	_	_	_	_
Sn	_	_	_	- /			_	_	_	_	_
Sb	_	_	_	-	+	_	_	_	3.25×10^{-1}	_	_
Te	_	_	_			_	_	3.49×10^{4}	3.84×10^{4}	_	_
I	_	_	_				_	4.80×10^{3}	6.60×10^4	_	_
Xe	_	_	_		7 -		_	_	1.94×10 ⁹	_	_
Cs	_	_	_					_	6.16×10 ⁸	_	
Ba	_	_	_			_	_	_	1.71×10^{5}	_	_
La Ce	-	_					_	_	9.66×10 ²	_	
Pr						_		_			
Nd	_	_	_	-		-	_	_	_	_	
Sm	_	_	_	4		_	_	_	_	_	_
Eu	_	_	_		7-1	-	-	-	-	-	_
Gd	_	_	_	I		_	_	_	_	_	_
Tb	_	_	_		-	_	_	_	_	_	_
Dy	_	_	_	_		_	_	_	_	_	_
Но	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Er	_	-	_	_	_			_	_	_	
Tm	_	-	-	_	_			_	_	_	
Yb	-	_	-				_	_	_	_	
Lu Hf	-	_	-	_					_	_	_
Та	_	_	- 1	-				_		_	
W			-	-				_			
Re	_	_		7	_	_	_	_	_	_	
Os	_	_		7-7	_	_	_	_	_	_	_
Ir	_	_	_	7	_	_	_	_	_	_	_
Pt	-	-	-		-	-	-	-	-	_	-
Au	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
Hg	_	_	_	_	-	_	_	_	-	_	_
T1	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_
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^{2}	2.30×10^{10}	$6.70E \times 10^{10}$	3.94×10^{8}	3.68×10^{6}	6.84×10^{4}	8.87×10^{10}	2.16×10^{4}	1.33×10^{10}

 合計
 1.04×10¹⁰
 6.04×10⁵
 4.92×10²
 2.30×10¹⁰
 6.70E×10¹⁰
 3.94×10⁵
 3.68×10⁰
 6.84×10⁴
 8.87×10¹⁰
 2.16×10⁴
 1.33×10¹⁰

 注配 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。

 注配 2
 放射化計算の条件は、計算コード:ORIGEN2.2、断面積ライブラリ:PWR41L33、照射期間:30 年、中性子フルエンス率・中性子スペクトル:4.72×10¹⁴ n/cm²/s 元素量:各元素とも等量(0.001 kg)

表 K.3-三次スクリーニング対象元素

	製造時の揮発	希ガス	希少元素	用途が限定される
三次スクリ ーニング 対象元素	黒鉛製造時に原料を2800℃近くまで 昇温することによって揮発する可能 性が高い元素 (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黒鉛に混入する可能性が低い元素(黒鉛が多孔性のため細孔に含まれる可能性はあるが, 原子炉起動時に炭酸ガス雰囲気にて高温精製運転実施によって大半は,除去)。	希少性が高く,不純物として黒鉛 に混入する可能性が低い元素。	
F	_	_	_	○ (フッ素コーティング)
Ne	_	0		_
Ar	_	0	_	_
Kr	_	0	_	_
Rb	○ (696°C)	- 7/5//	_	_
Sr	○ (1 639℃)	- 4/4//	_	_
Y	_	- ~ ~ ~ ~	_	_
Ru	_	4//1/	0	_
Sb	○ (1 640℃)		_	_
Те	○ (1 390°C)		_	_
I	○ (185°C)	_	_	○ (抗菌処理)
Xe	_	0	_	_
Cs	○ (760°C)	¥		_
Ва	○ (1 537°C)	_	_	_

表 K.4-評価対象核種の起源元素の推定存在濃度レベル(オーダ)

→ #		分析データ a)		文献データ ^{b)}	- 八 然 理 口 捶 	推定存在濃度
元素	データ数	平均値 (質量分率%)	データ数	平均値 (質量分率%)	成分管理目標値	レベル (質量分率%)
С	_	_	_	-	主成分 (100%)	100
N	8	4.3×10^{-3}	_	_	_	5.0×10^{-3}
О	6	8.4×10^{-2}	_	_	_	1.0×10^{-1}
Na	2	7.0×10^{-5}	1	1.0×10^{-4}	_	5.0×10 ⁻⁵
S	9	4.8×10^{-3}	_	_	_	5.0×10^{-3}
Cl	9	8.0×10^{-4}	_		_	1.0×10^{-3}
K	6	1.5×10^{-4}	_		_	1.0×10^{-4}
V	2	5.4×10^{-3}	1	1.2×10^{-3}	_	5.0×10^{-3}
Cr	2	3.3×10^{-5}	1	2.8×10^{-5}	_	5.0×10 ⁻⁵
Mn	2	2.0×10^{-6}	1	2.0×10^{-6}	_	1.0×10^{-6}
Fe	9	2.5×10^{-3}	_		_	5.0×10^{-3}
Co	8	6.9×10^{-6}	_	7/1/2	_	5.0×10 ⁻⁶
Ni	9	8.5×10^{-4}	_		_	1.0×10^{-3}
Cu	6	2.4×10^{-5}	_	<-7 <i>U/7</i>	_	1.0×10 ⁻⁵
Zn	4	4.9×10^{-5}	-		_	5.0×10^{-5}
Y	5	1.7×10^{-6}	-	_	_	1.0×10^{-6}
Zr	6	6.0×10^{-6}	->	_	_	5.0×10 ⁻⁶
Nb	6	9.4×10^{-7}	4	_	_	1.0×10^{-6}
Mo	8	1.5×10^{-5}	- 7 /	_	_	1.0×10^{-5}
La	_	_	1	1.8×10^{-3}	_	1.0×10^{-3}
Th	5	2.4×10^{-7}	_	_	_	1.0×10^{-7}
U	7	7.4×10^{-7}		_	_	5.0×10 ⁻⁷

注記1 上記は、分析データ及び文献データから、各元素の推定存在濃度(オーダ)を評価した結果である。 注記2 存在濃度レベルの推定が困難な元素(La)は、地殼存在割合^[2]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:放射化計算の条件を設定するために事業者が材料中の元素分析を実施した結果[3]

b) 文献データ: 一般公開文献情報^[4]

表 K.5-四次スクリーニング評価結果(生成比の評価)

起源	評価対象核種に対する各起源元素の生成比 (%)																			
元素	¹⁴ C		³⁶ Cl		⁶⁰ Co		⁶³ Ni		⁹⁰ Sr		⁹⁴ Nb		⁹⁹ Tc		¹²⁹ I		¹³⁷ Cs		全 α	
С	16.1	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	7		_	_	_	_	_	_	
N	83.8	0	=	_	_	_	_	_	=	_	_	+	I			_	=	_		
О	0.089	\circ	_	_	_			_			_	Ţ		1						_
Na	3.96×10^{-9}	\triangle	_	_	_	_	1	_	ı	-	_	/		_	l	_		_		_
S	_	—	0.16	0	_	—	_	_	_	_	-/			_	_	_	_	_	_	_
Cl		_	99.8	0	_	_	_	_	_	_	-			_	_	_	-	_		
K		_	0.081	\bigcirc	_	_	_	_	_	_		7	X -F	_	_	_	-	_		
V		_	_	_	7.03×10^{-9}	\triangle	_	_	_	_		-	_		_	_	_		_	_
Cr	_	_	_	_	2.84×10^{-7}	\triangle	_	_	_	_	-		_	_	_	_	_	_	_	
Mn		_	_	_	7.43×10^{-5}		4.86×10^{-10}		_	= .	_	7	_	_		_	_	_	_	
Fe		_		_	13.3	0	6.02×10^{-4}	Δ	_	#	V	4	_	_	_	_	_	_	_	
Co		_		_	30.3	0	0.014	0	- 7/	A		_	=	_	=	_	_	_	_	
Ni	_	_		_	56.4	0	99.8	0	_//		5-//	_	=	_	=	_	_	_	_	
Cu	_	_		_	0.0060	Δ	0.16	0	_		//-	_	=	_	=	_	_	_	_	
Zn	_	_		_	1.25×10^{-9}	Δ	7.90×10^{-5}	\triangle	15.	-	4	_	=	_	=	_	_	_	_	
Y	_	_		_	_	_	_	_	0.013	0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	
Zr		_		_	_	_	_	<u> </u>	0.0012	Δ	1.10	\triangle	0.037	\circ	_	_	_	_	_	
Nb		_		_	_	_	_	7	2.50×10^{-6}	\triangle	99.96	0	0.003	\triangle	_	_	_	_	_	
Mo		_		_	_	_	_	`	1.80×10^6	\triangle	0.041	\circ	86.6	0	_	_	_	_	_	
La	_			_	_	_		_		_	_	_	_	_	_	<u> </u>	0.0048	\triangle	_	
Th	_	_		_	_	_	_	_	55.2	0	_	_	3.1	0	33.0	0	28.8	0	1.8	0
U	_	_	_	_	_	_	_	_	44.8	0	_	_	10.3	0	67.0	0	71.2	0	98.2	0
合計	100	—	100	_	100	_	100	F	100	_	100	_	100	_	100	_	100	_	100	

注記1 生成比は,評価対象核種ごとに,各起源元素 0.001 kg 当たりの生成量 (Bq) (表 K.2) に推定存在濃度 (%) (表 K.4) を乗じたものである。

注記 2 生成比の右欄は、生成比の程度を、"◎:0.1%以上"、"○:0.01%以上"、"△:0.01%未満"で示した。

K.2.2.1.2 元素成分条件の選定

次の手順によって元素成分条件を選定した。

- a) 元素成分データの収集 各元素の元素成分データについては、表 K.7 に示すとおり、 "評価対象廃棄物自体の品質サンプル又は同じ材料種類のサンプルの化学分析を行 う方法"によって収集した元素分析データ(事業者が評価対象廃棄物(材料)中の元 素の化学分析を実施した結果^[3])から、分析データ群を作成した。
- b) 元素成分条件の設定方法の選択 元素成分条件の設定方法は, a)で作成した分析データ群を使用し, "評価対象廃棄物の元素分析データの濃度分布を設定する方式"を選択した。
- c) 各元素の濃度分布基本形状の設定 評価対象廃棄物である黒鉛の各元素について,主成分,不純物の成分管理目標値の有無を踏まえ,濃度分布の基本形状を設定した結果を表 K.8 に示す。
- d) 各元素の濃度分布条件の設定 各元素の濃度分布条件(平均値,標準偏差,最小値, 最大値など)の設定については,各元素の元素分析データの収集状況を考慮し,元素 分析データ数に応じた分類ごとに,各元素の適切な濃度分布条件の設定を行った。 なお,Cの元素成分条件については,黒鉛減速材の主要成分であるため,放射能濃度 評価結果が大きくなるように,分析した微量元素成分を除いた全ての割合を保守的に 割り当てた。
 - 1) 元素分析データ数が比較的少ない元素 元素分析データ数(検出値)が比較的少ない元素の濃度分布条件の設定結果を図 K.2 に示す。元素の濃度分布としては、表 K.9 に示すように対数正規分布を設定した。

なお、標準偏差は、元素分析データの検出値の少なさを考慮し、母分散の推定の 95%信頼上限値から求めた値を標準偏差として設定した。

2) **各元素の濃度分布条件設定結果** 1)に基づき,各元素の濃度分布条件を設定した結果を,元素分析データとともに,**図 K.3** 及び**表 K.10** に示す。



表 K.7-各元素の元素分析データ収集結果

			1100	77 70 3 77 711 7	ノル末門	-14					
	元素分析データ										
元素	データ	対数正	E規分布	正規分布	(実数)	一様分布					
儿糸	数	平均旭 " 標準偏差 "		平均値 (質量分率%)	標準偏差	最小値	最大値				
С	0	_	_	_	_	_	_				
N	8	$ \begin{array}{c} 4.1 \times 10^{-3} \\ (-2.3) \\ 8.2 \times 10^{-2} \end{array} $	6.3×10^{-3} (0.1)	4.3×10 ⁻³	1.5×10^{-3}		_				
О	6	$ \begin{array}{c} 8.2 \times 10^{-2} \\ (-1.0) \\ 4.1 \times 10^{-3} \end{array} $	$ \begin{array}{c} 1.3 \times 10^{-1} \\ (0.1) \\ 1.0 \times 10^{-2} \end{array} $	8.4×10^{-2}	2.0×10^{-2}	1	-				
S	9	$ \begin{array}{c} 4.1 \times 10^{-3} \\ (-2.3) \\ \hline 6.1 \times 10^{-4} \end{array} $	$ \begin{array}{r} 1.0 \times 10^{-2} \\ (0.3) \\ \hline 1.6 \times 10^{-3} \end{array} $	4.8×10^{-3}	3.4×10^{-3}		_				
Cl	9	$ \begin{array}{c} 6.1 \times 10^{-4} \\ (-3.2) \\ 1.4 \times 10^{-4} \end{array} $	$ \begin{array}{c} 1.6 \times 10^{-3} \\ (0.4) \\ 2.5 \times 10^{-4} \end{array} $	8.0×10^{-4}	5.7×10^{-4}		_				
K	6	1.4×10^{-4} (-3.8) 9.8×10^{-4}	$ \begin{array}{c} 2.5 \times 10^{-4} \\ (0.2) \\ 4.0 \times 10^{-3} \end{array} $	1.5×10^{-4}	6.0×10^{-5}	_	_				
Fe	9	9.8×10^{-4} (-3.0) 5.4×10^{-6}	$ \begin{array}{r} 4.0 \times 10^{-3} \\ (0.6) \\ 1.3 \times 10^{-5} \end{array} $	2.5×10^{-3}	4.1×10^{-3}		_				
Co	8	5.4×10^{-6} (-5.2) 7.3×10^{-4}	$ \begin{array}{r} 1.3 \times 10^{-5} \\ (0.3) \\ 1.6 \times 10^{-3} \end{array} $	6.9×10^{-6}	5.2×10^{-6}		_				
Ni	9	7.3×10^{-4} (-3.1) 1.6×10^{-5}	$ \begin{array}{r} 1.6 \times 10^{-3} \\ (0.3) \\ 6.3 \times 10^{-5} \end{array} $	8.5×10 ⁻⁴	5.3×10^{-4}	_	_				
Cu	6	$ \begin{array}{c} 1.6 \times 10^{-5} \\ (-4.7) \\ \hline 6.8 \times 10^{-7} \end{array} $	$ \begin{array}{c} 6.3 \times 10^{-5} \\ (0.5) \\ 4.0 \times 10^{-6} \end{array} $	2.4×10^{-5}	2.0×10^{-5}	_	_				
Y	5	6.8×10^{-7} (-6.1) 2.6×10^{-6}	$ \begin{array}{c} 4.0 \times 10^{-6} \\ (0.7) \\ 1.6 \times 10^{-5} \end{array} $	1.7×10^{-6}	2.3×10^{-6}	_	_				
Zr	6	2.6×10^{-6} (-5.5) 7.3×10^{-6}	(0.7)	6.0×10^{-6}	6.8×10^{-6}	_	_				
Nb	6	7.3×10^{-6} (-6.1) 1.4×10^{-5}	1.6×10^{-6} (0.3)	9.4×10 ⁻⁷	7.3×10^{-7}	_	_				
Mo	8	$ \begin{array}{c} 1.4 \times 10^{-5} \\ (-4.8) \\ 1.3 \times 10^{-7} \end{array} $	2.5×10^{-5} (0.2)	1.5×10 ⁻⁵	5.7×10^{-6}	_	_				
Th	5	(-6.8)	6.3×10^{-7} (0.6)	2.4×10 ⁻⁷	2.3×10^{-7}	_	_				
U	7	3.8×10 ⁻⁷ (-6.4)	1.6×10^{-6} (0.6)	7.4×10^{-7}	8.4×10^{-7}	_	_				

| 注記1 上記は、元素分析データ及び文献データの平均値、標準偏差などを評価した結果である。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、下段(括弧内)に対数値を合わせて表記 注記2 データ数が3点以下の元素は、標準偏差の欄を"ー"とした。 注 3 対数正規分布の平均値のうち、下段の対数値(括弧内)は、有効数字2桁に丸めている(値が大きくなるように切りたげている)

b) 対数正規分布の標準偏差 (上段) は、下段の 1σの対数値 (括弧内) と平均値の欄の対数値 (下段, 括弧内の数値) とを利用して算出している。



り上げている)。

表 K.8-基本的な考え方に従って選択した各元素の濃度分布基本形状

出八年 理	成分管理目	目標値あり	成分管理されていない			
成分管理 条件	主成分元素とし	不純物成分元素	,,,,,,,,			
条件	て濃度範囲管理	として上限管理	微量成分元素			
黒鉛減速材用	С	-	N, O, S, Cl, K, Fe, Co, Ni, Cu, Y, Zr, Nb, Mo, Th, U			
基本的な濃度分布 (形状)	一様分布	対数正規分布	対数正規分布			

表 K.9-対数正規分布形状で設定した元素

評価対象廃棄物	対数正規分布				
(材料)	微量成分元素	不純物成分元素			
黒鉛減速材	N, O, S, CI, K, Fe,	_			
(ペシネ1級黒鉛)	Co, Ni, Cu, Y, Zr,				
	Nb, Mo, Th, U				



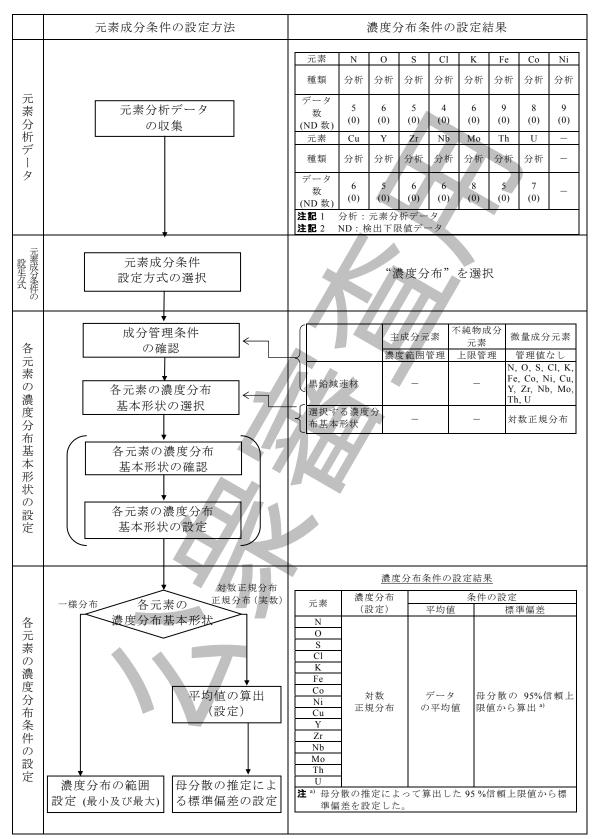
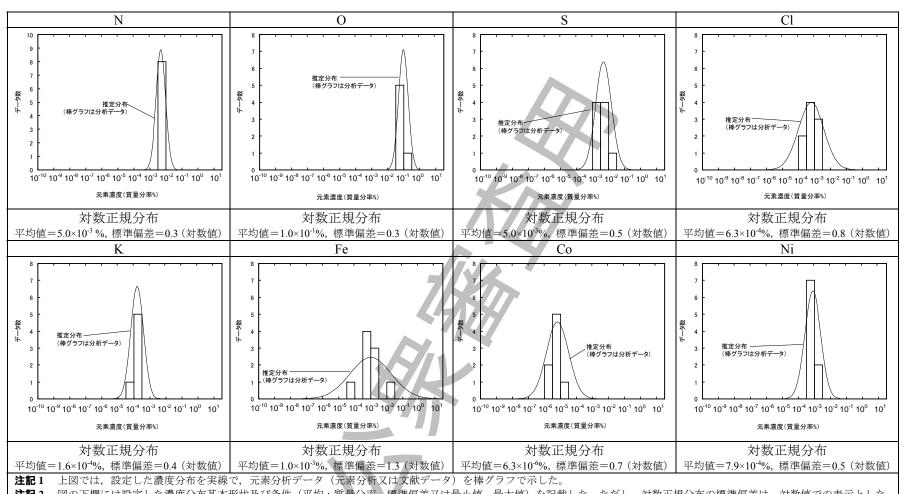
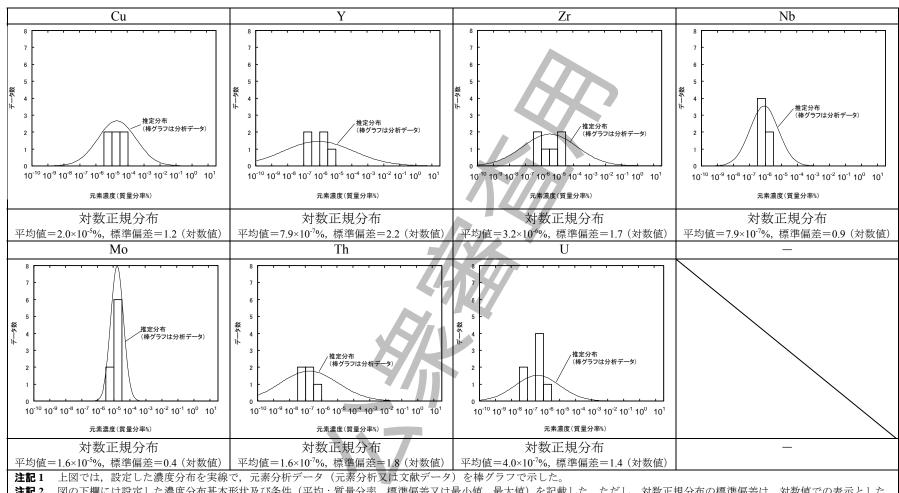


図 K.2-元素分析データ数が比較的少ない元素の濃度分布条件の設定方法及び結果



注記2 図の下欄には設定した濃度分布基本形状及び条件(平均:質量分率、標準偏差又は最小値、最大値)を記載した。ただし、対数正規分布の標準偏差は、対数値での表示とした。

図 K.3-元素分析データ及び濃度分布条件設定結果



注記2 図の下欄には設定した濃度分布基本形状及び条件(平均:質量分率,標準偏差又は最小値,最大値)を記載した。ただし,対数正規分布の標準偏差は,対数値での表示とした。

図 K.3-元素分析データ及び濃度分布条件設定結果 (続き)

表 K.10-各元素の濃度分布条件設定結果

		濃度分布の設定		濃度分布条件の設定結果									
元素	成分元素	濃度分布基本形状			収集データ	対数正規分布							
儿糸	管理条件	選択	設定	分析	文献	データ数	平均値 (質量分率%)	標準偏差 (平均+σ)					
С	主成分	_		_	-/	- //)-	_	_					
N	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	-	比較的少	5.0×10 ⁻³ (対数-2.3)	1.0×10 ⁻² (対数 0.3)					
0	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	/-/	比較的少	1.0×10 ⁻¹ (対数-1.0)	2.0×10 ⁻¹ (対数 0.3)					
S	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	X	比較的少	5.0×10 ⁻³ (対数-2.3)	1.6×10 ⁻² (対数 0.5)					
Cl	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	4 4///	比較的少	6.3×10 ⁻⁴ (対数-3.2)	4.0×10 ⁻³ (対数 0.8)					
K	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0		比較的少	1.6×10 ⁻⁴ (対数-3.8)	4.0×10 ⁻⁴ (対数 0.4)					
Fe	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0 7/3	1 /17-	比較的少	1.0×10 ⁻³ (対数-3.0)	2.0×10 ⁻² (対数 1.3)					
Со	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0 45	777/-	比較的少	6.3×10 ⁻⁶ (対数-5.2)	3.2×10 ⁻⁵ (対数 0.7)					
Ni	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	比較的少	7.9×10 ⁻³ (対数-3.1)	2.5×10 ⁻³ (対数 0.5)					
Cu	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	比較的少	2.0×10 ⁻⁵ (対数-4.7)	3.2×10 ⁻⁴ (対数 1.2)					
Y	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	90/11	-	比較的少	7.9×10 ⁻⁷ (対数-6.1)	1.3×10 ⁻⁴ (対数 2.2)					
Zr	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	-	比較的少	3.2×10 ⁻⁶ (対数-5.5)	1.6×10 ⁻⁴ (対数 1.7)					
Nb	微量成分	対数正規分布	→ (-9-	-	比較的少	7.9×10 ⁻⁷ (対数-6.1)	6.3×10 ⁻⁶ (対数 0.9)					
Mo	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	比較的少	1.6×10 ⁻⁵ (対数-4.8)	4.0×10 ⁻⁵ (対数 0.4)					
Th	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0		比較的少	1.6×10 ⁻⁷ (対数-6.8)	1.0×10 ⁻⁵ (対数 1.8)					
U	微量成分	対数正規分布	\rightarrow	0	_	比較的少	4.0×10 ⁻⁷ (対数-6.4)	1.0×10 ⁻⁵ (対数 1.4)					

K.2.2.2 中性子条件

中性子条件を,次のように設定した。

a) 中性子フルエンス率・中性子スペクトルの設定 黒鉛減速材は、原子炉の運転期間中を通して同一の位置で中性子照射されるため、中性子フルエンス率・中性子スペクトルの設定上考慮すべき事項は、黒鉛減速材の軸方向、径方向の位置である。附属書 F に示すように、黒鉛減速材の設置範囲の平均的な条件を設定して得られた中性子フルエンス率・中性子スペクトルを利用する。

なお、中性子フルエンス率は、中央部が平坦で周辺部付近で小さくなる傾向を示しており、その範囲は、ほぼ 1 桁以内であること及び放射能濃度評価結果が大きくなるような評価を行うことを考慮して、中性子フルエンス率は、黒鉛減速材の設置範囲の最大値 5×10^{13} $n/cm^2/s$ に設定する。

b) 放射化断面積の設定 黒鉛減速材用黒鉛の評価では、ORIGEN2 を適用するため、黒 鉛減速材の設置範囲の平均的な条件を設定して得られた中性子スペクトルを設定条 件として利用し、放射化断面積を設定する。

K.2.2.3 照射条件

黒鉛減速材の中性子の照射条件については、原子炉の運転期間中を通して同一の位置で中性子照射されるため、中性子の照射時間及び中性子の照射停止時間については、**附属書** F に示す GCR 原子炉の運転履歴に基づき、設定する。

K.2.3 放射化計算

K.2.3.1 放射化計算用データの設定

濃度分布評価法によって決定する場合の基本的な考え方は、適切な放射化計算の条件での多数の放射化計算結果によって廃棄物グループの放射能濃度を評価・設定することである。

したがって、対象となる廃棄物の元素成分条件、中性子条件及び照射条件の範囲並びに その分布を適切に設定し、これを考慮した放射化計算用の入力データ群を作成し、放射化 計算による評価を進めることが必要となる。

このため、放射化計算に必要な放射化計算入力データについては、評価対象廃棄物の照射条件などを考慮した放射化計算範囲を適切に設定した上で、ランダムサンプリングによる複数の計算条件を設定した上で、計算を実施するように設定するか、全体の分布を評価した結果に基づき一つの値を設定する。

上記の手順によって、次の放射化計算用入力データの設定を行う。

一 元素成分条件 : 分析結果などに基づき元素濃度の分布を適切に設定。

中性子条件 : 評価対象廃棄物の形状及び原子炉内外での設置状態を適切に設定

し,中性子の照射位置での中性子条件で設定。

- 照射条件: 原子炉での実際の中性子の照射実績を踏まえて適切に設定。

元素成分条件は, **K.2.2.1** で設定した化学分析データなどに基づく分布を踏まえ,元素ごとに適切な濃度分布を設定した。中性子条件は,評価対象である黒鉛減速材に対する中性子条件を設定する上での評価対象廃棄物の形状,配置位置を考慮し, **K.2.2.2** で設定した中性子条件とした。照射条件は,原子炉運転中の黒鉛減速材の装荷位置が一定である特徴を考慮し, **K.2.2.3** で設定した実際の原子炉の運転実績に基づく照射条件とする。

上記の元素成分条件、中性子条件及び照射条件の放射化計算の条件の設定結果をまとめたものを**表 K.11** に示す。

設定	必要項目	放射化計算の条件を決定するための設定
元素成分条件	各元素の濃度分布	微量成分: 対数正規分布 主成分: Cは,微量成分元素の残量
中性子条件	配置位置	運転期間で同一位置に設置 一つの値(最大値)に設定
照射条件	中性子の照射時間 及び 中性子の照射停止時間	運転履歴

表 K.11-放射化計算の条件の設定

放射化計算用の入力データの設定において、分布を考慮するものについては、"擬似乱数"を使用したランダムサンプリングによって設定した。具体的には、**表 K.11** に示した放射化計算の条件のうち元素成分条件については、出現頻度分布として決定した分布形状、データなどに基づく分布範囲を踏まえ、次の方法を適用する。

ランダムサンプリングのための乱数発生法として JIS Z 9031: 2012 [5]に示されているメルセンヌツイスター法を採用し、擬似乱数を必要数発生させ、分布設定のために評価した平均値、標準偏差を使用した逆関数法で、放射化計算用入力データを作成した放射化計算用入力データの設定結果を、**表 K.12** に示す。

なお、放射化計算用データとして設定した各元素の濃度分布を、**図 K.4** に示すが、各元素の濃度分布は、全て対数正規分布としており、放射化計算用データの数は、対数正規分布の平均値、標準偏差から定まる分布(図中の実線)を再現する結果となっていることから、適切に入力データは、設定されているといえる。

K.2.3.2 放射化計算の実施

K.2.3.1 で設定した放射化計算用入力データに基づき、GCR の黒鉛減速材を評価対象とする放射化計算を行った結果を、**表 K.13** に示す。

表 K.12-元素成分条件の放射化計算用入力データの設定結果

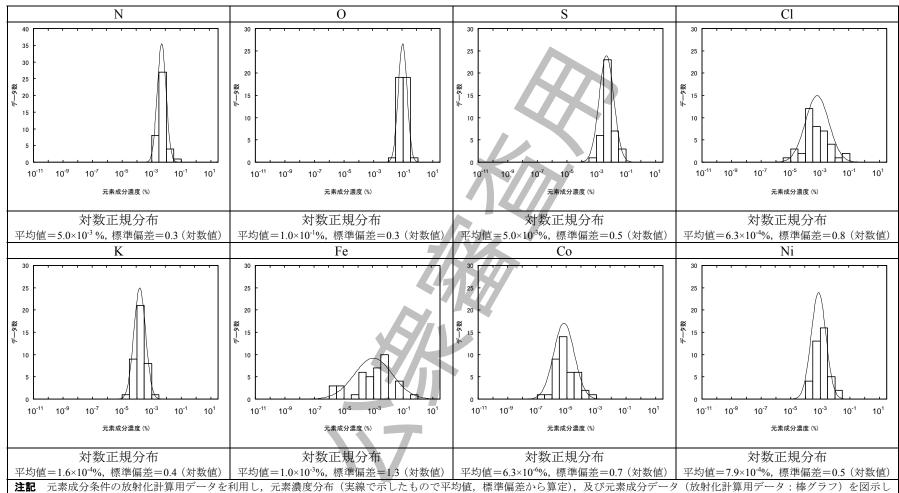
単位·質量分率%

															₽似:	質量分率%
計 算 No.	С	N	О	S	Cl	K	Fe	Со	Ni	Cu	Y	Zr	Nb	Mo	Th	U
1	9.99×10 ¹	2.96×10 ⁻³	4.30×10 ⁻²	3.59×10 ⁻²	3.38×10 ⁻²	3.21×10 ⁻⁴	7.90×10 ⁻⁶	1.52×10 ⁻⁶	1.07×10 ⁻³	3.91×10 ⁻⁵	2.62×10 ⁻⁵	5.52×10 ⁻⁸	3.47×10 ⁻⁷	1.29×10 ⁻⁴	2.59×10 ⁻⁶	1.96×10 ⁻⁷
2	9.99×10^{1}	3.71×10 ⁻³	6.90×10 ⁻²	8.21×10 ⁻³	4.17×10 ⁻⁴	5.22×10 ⁻⁴	1.74×10 ⁻⁶	7.89×10 ⁻⁶	1.08×10 ⁻³	1.33×10 ⁻⁴	5.61×10 ⁻⁶	7.41×10 ⁻⁸	8.55×10 ⁻⁸	3.87×10 ⁻⁶	1.98×10 ⁻⁸	4.27×10 ⁻⁴
3	9.99×10 ¹	1.09×10 ⁻²	9.82×10 ⁻²	1.82×10 ⁻²	1.55×10 ⁻³	1.22×10 ⁻⁴	1.48×10 ⁻³	1.96×10 ⁻⁶	8.49×10 ⁻⁴	1.88×10 ⁻⁵	2.57×10 ⁻⁵	2.02×10 ⁻³	2.69×10 ⁻⁸	1.87×10 ⁻⁵	3.01×10 ⁻⁷	1.23×10 ⁻⁶
4	9.99×10 ¹	5.07×10 ⁻³	8.95×10 ⁻²	7.65×10 ⁻³	1.97×10 ⁻²	3.23×10 ⁻⁴	8.39×10 ⁻³	1.45×10 ⁻⁶	8.33×10 ⁻⁴	8.42×10 ⁻⁵	3.45×10 ⁻⁷	3.06×10 ⁻⁶	5.46×10 ⁻⁹	9.20×10 ⁻⁶	8.01×10 ⁻⁹	4.27×10 ⁻⁷
5	9.97×10 ¹	6.86×10 ⁻³	2.33×10 ⁻¹	9.34×10 ⁻³	2.38×10 ⁻⁴	4.81×10 ⁻⁵	2.88×10 ⁻³	2.68×10 ⁻⁶	2.94×10 ⁻³	2.92×10 ⁻⁷	3.33×10 ⁻⁶	8.20×10 ⁻⁶	2.52×10 ⁻⁶	1.19×10 ⁻⁴	9.81×10 ⁻⁹	6.36×10 ⁻⁷
6	9.99×10 ¹	7.22×10 ⁻³	9.42×10 ⁻²	9.17×10 ⁻³	1.76×10 ⁻⁴	1.10×10 ⁻⁴	2.73×10 ⁻⁶	8.38×10 ⁻⁶	1.53×10 ⁻³	7.07×10 ⁻⁴	1.28×10 ⁻⁸	7.09×10 ⁻⁴	9.20×10 ⁻⁷	2.07×10 ⁻⁵	6.32×10 ⁻⁷	2.76×10 ⁻⁷
7	9.99×10 ¹	6.71×10 ⁻³	4.98×10 ⁻²	5.23×10 ⁻³	6.51×10 ⁻⁵	3.82×10 ⁻⁵	1.24×10 ⁻⁴	4.96×10 ⁻⁵	4.96×10 ⁻⁴	5.46×10 ⁻⁵	3.27×10 ⁻⁴	4.50×10 ⁻⁶	2.71×10 ⁻⁶	1.10×10 ⁻⁶	1.96×10 ⁻⁹	7.90×10 ⁻⁸
8	9.99×10 ¹	2.52×10 ⁻³	7.50×10 ⁻²	2.08×10 ⁻³	4.34×10 ⁻⁴	8.22×10 ⁻⁵	6.51×10 ⁻⁴	3.65×10 ⁻⁵	7.23×10 ⁻³	1.13×10 ⁻⁵	2.67×10 ⁻⁹	2.62×10 ⁻⁴	2.85×10 ⁻⁶	1.14×10 ⁻⁵	3.52×10 ⁻⁷	2.73×10 ⁻⁹
9	9.99×10^{1}	7.11×10 ⁻³	8.71×10 ⁻²	2.11×10 ⁻³	3.45×10 ⁻³	2.19×10 ⁻⁴	4.14×10 ⁻⁴	6.67×10 ⁻⁶	1.50×10 ⁻³	3.62×10 ⁻⁴	1.79×10 ⁻⁵	1.04×10 ⁻⁵	4.39×10 ⁻⁷	1.33×10 ⁻⁵	2.57×10 ⁻⁷	3.94×10 ⁻⁸
10	9.90×10^{1}	5.06×10 ⁻³	1.19×10 ⁻¹	1.82×10 ⁻³	1.90×10 ⁻⁴	1.07×10 ⁻⁴	8.64×10 ⁻¹	1.42×10 ⁻⁴	1.09×10^{-3}	9.95×10 ⁻⁵	3.80×10 ⁻¹⁰	1.22×10 ⁻⁶	3.09×10 ⁻⁷	8.10×10 ⁻⁶	4.84×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻⁶
11	9.99×10 ¹	1.31×10 ⁻³	1.13×10 ⁻¹	1.79×10 ⁻²	2.45×10 ⁻³	4.49×10 ⁻⁴	1.01×10 ⁻⁴	9.61×10 ⁻⁶	3.84×10^{-4}	5.41×10 ⁻⁴	5.53×10 ⁻⁶	1.72×10 ⁻⁷	4.84×10 ⁻⁶	7.31×10 ⁻⁶	2.19×10 ⁻⁹	2.26×10 ⁻⁹
12	9.99×10 ¹	1.05×10 ⁻²	8.86×10 ⁻²	3.47×10 ⁻³	8.83×10 ⁻³	2.14×10 ⁻⁴	8.90×10 ⁻⁶	3.02×10 ⁻⁵	1.90×10 ⁻³	1.46×10^{-3}	2.07×10 ⁻⁸	1.57×10 ⁻⁷	1.50×10 ⁻⁵	1.96×10 ⁻⁵	3.08×10 ⁻⁶	1.82×10 ⁻⁶
13	9.98×10 ¹	4.57×10 ⁻³	1.90×10 ⁻¹	3.29×10 ⁻³	6.56×10 ⁻⁴	3.06×10 ⁻⁴	1.50×10 ⁻³	8.33×10 ⁻⁵	3.75×10 ⁻³	5.22×10 ⁻⁵	1.33×10 ⁻¹¹	2.83×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻⁷	2.30×10 ⁻⁵	7.50×10 ⁻⁸	6.54×10 ⁻⁷
14	9.97×10^{1}	9.23×10 ⁻³	3.23×10 ⁻¹	8.16×10 ⁻³	1.38×10 ⁻⁴	1.30×10 ⁻⁴	2.37×10 ⁻⁴	1.98×10 ⁻⁵	8.62×10 ⁻⁴	8.41×10 ⁻⁵	2.08×10 ⁻⁵	1.32×10 ⁻⁷	1.41×10 ⁻⁷	2.91×10 ⁻⁴	2.04×10 ⁻⁴	3.35×10 ⁻⁶
15	9.97×10 ¹	5.69×10 ⁻³	1.98×10 ⁻¹	5.33×10 ⁻³	2.47×10 ⁻³	1.52×10 ⁻⁴	3.31×10 ⁻²	4.16×10 ⁻⁶	1.91×10 ⁻²	5.35×10 ⁻⁵	6.37×10 ⁻⁶	2.14×10 ⁻⁸	3.00×10 ⁻⁶	1.58×10 ⁻⁶	3.77×10 ⁻⁵	2.63×10 ⁻⁷
16	9.76×10 ¹	8.93×10 ⁻³	1.64×10 ⁻¹	3.91×10 ⁻³	5.77×10 ⁻²	1.37×10 ⁻⁴	7.57×10 ⁻³	4.24×10 ⁻⁶	5.12×10 ⁻³	6.61×10 ⁻⁵	3.42×10 ⁻⁸	9.92×10 ⁻⁹	4.77×10 ⁻⁷	1.41×10 ⁻⁵	1.48×10 ⁻¹⁰	1.06×10 ⁻⁸
17	9.98×10 ¹	6.30×10 ⁻³	1.80×10 ⁻¹	1.71×10 ⁻²	1.14×10 ⁻⁴	7.44×10 ⁻⁵	5.19×10 ⁻⁴	5.16×10 ⁻⁵	1.11×10 ⁻³	3.83×10 ⁻⁶	1.15×10 ⁻⁷	3.93×10 ⁻⁵	4.02×10 ⁻⁷	9.46×10 ⁻⁶	6.29×10 ⁻⁹	1.12×10 ⁻⁶
18	9.98×10 ¹	4.73×10 ⁻³	8.77×10 ⁻²	7.63×10 ⁻³	3.46×10 ⁻⁶	1.13×10 ⁻⁴	2.03×10 ⁻⁶	7.84×10 ⁻⁷	2.16×10 ⁻³	8.42×10 ⁻⁷	8.75×10 ⁻⁵	4.26×10 ⁻⁶	3.81×10 ⁻⁶	2.94×10 ⁻⁵	1.64×10 ⁻⁷	3.80×10 ⁻⁶
19	9.99×10 ¹	7.11×10 ⁻³	3.41×10 ⁻²	8.20×10 ⁻³	1.86×10 ⁻³	1.99×10 ⁻⁴	3.95×10 ⁻³	1.09×10 ⁻⁵	3.42×10 ⁻⁴	3.67×10 ⁻⁵	1.70×10 ⁻⁶	7.27×10 ⁻⁹	7.38×10 ⁻⁷	1.34×10 ⁻⁵	3.10×10 ⁻⁸	1.59×10 ⁻⁶
20	9.99×10 ¹	5.26×10 ⁻³	5.22×10 ⁻²	6.75×10 ⁻³	2.70×10 ⁻⁴	2.17×10 ⁻⁵	6.47×10 ⁻⁴	6.02×10 ⁻⁶	6.25×10 ⁻⁴	2.99×10 ⁻⁷	7.30×10 ⁻¹⁰	5.91×10 ⁻³	8.35×10 ⁻⁸	3.20×10 ⁻⁶	3.62×10 ⁻⁸	5.08×10 ⁻⁹
21	9.98×10 ¹	3.21×10 ⁻³	1.51×10 ⁻¹	1.77×10 ⁻²	1.28×10 ⁻⁴	3.87×10 ⁻⁴	4.10×10 ⁻⁵	4.64×10 ⁻⁴	6.75×10 ⁻⁴	3.42×10 ⁻⁸	3.24×10 ⁻⁵	3.08×10 ⁻⁷	6.73×10 ⁻⁶	5.56×10 ⁻⁵	7.00×10 ⁻⁹	5.53×10 ⁻⁸
22	9.99×10 ¹	2.11×10 ⁻³	7.75×10 ⁻²	1.85×10 ⁻³	1.65×10 ⁻⁴	8.50×10 ⁻⁵	1.06×10 ⁻⁴	9.18×10 ⁻⁵	6.49×10 ⁻⁴	7.73×10 ⁻⁴	1.01×10 ⁻⁶	9.32×10 ⁻⁷	1.99×10 ⁻⁶	3.88×10 ⁻⁵	4.91×10 ⁻⁹	2.23×10 ⁻⁸
23	9.98×10 ¹	6.62×10 ⁻³	1.64×10 ⁻¹	2.76×10 ⁻²	2.97×10 ⁻⁵	1.32×10 ⁻⁴	3.36×10 ⁻³	1.48×10 ⁻⁶	1.32×10 ⁻²	1.60×10 ⁻⁶	3.42×10 ⁻⁴	1.67×10 ⁻⁵	1.63×10 ⁻⁶	8.51×10 ⁻⁶	3.62×10 ⁻⁶	3.08×10 ⁻⁷
24	9.99×10 ¹	2.90×10 ⁻³	6.55×10 ⁻²	3.61×10 ⁻³	8.85×10 ⁻⁴	2.04×10 ⁻⁴	9.98×10 ⁻³	3.37×10 ⁻⁶	5.54×10 ⁻³	1.13×10 ⁻⁴	8.35×10 ⁻⁵	3.41×10 ⁻³	5.84×10 ⁻⁸	1.58×10 ⁻⁵	1.24×10 ⁻⁸	1.50×10 ⁻⁵
25	9.97×10 ¹	7.82×10 ⁻³	1.87×10 ⁻¹	5.29×10 ⁻³	1.67×10 ⁻⁴	5.20×10 ⁻⁵	7.02×10 ⁻³	2.07×10 ⁻⁶	3.07×10 ⁻³	1.28×10 ⁻¹	1.05×10 ⁻⁸	4.73×10 ⁻⁷	1.85×10 ⁻⁶	6.67×10 ⁻⁶	2.83×10 ⁻⁷	2.04×10 ⁻⁶
26	9.99×10 ¹	4.87×10 ⁻³	6.78×10 ⁻²	2.91×10 ⁻²	2.75×10 ⁻⁴	2.80×10 ⁻⁴	3.56×10 ⁻²	1.72×10 ⁻⁶	1.33×10 ⁻³	9.95×10 ⁻⁶	4.26×10 ⁻⁵	1.06×10 ⁻⁵	1.63×10 ⁻⁷	4.89×10 ⁻⁵	2.17×10 ⁻⁷	1.26×10 ⁻⁶
27	9.97×10 ¹	5.58×10 ⁻³	1.25×10 ⁻¹	6.56×10 ⁻²	2.06×10 ⁻⁴	1.08×10 ⁻³	7.02×10 ⁻²	3.98×10 ⁻⁶	7.63×10 ⁻⁴	3.50×10 ⁻³	2.32×10 ⁻⁶	8.44×10 ⁻⁷	1.18×10 ⁻⁷	7.93×10 ⁻⁶	1.94×10 ⁻⁸	3.86×10 ⁻⁶
28	9.99×10 ¹	3.94×10 ⁻³	1.44×10 ⁻¹	2.45×10 ⁻³	2.31×10 ⁻³	1.03×10 ⁻⁴	2.05×10 ⁻⁴	6.82×10 ⁻⁶	1.79×10 ⁻⁴	1.40×10 ⁻⁴	5.24×10 ⁻¹²	9.79×10 ⁻⁷	4.60×10 ⁻⁷	1.64×10 ⁻⁵	3.66×10 ⁻⁹	1.18×10 ⁻⁶
29	9.98×10 ¹	1.47×10 ⁻³	1.07×10 ⁻¹	4.13×10 ⁻³	7.88×10 ⁻⁵	3.94×10 ⁻⁵	2.74×10 ⁻³	4.24×10 ⁻⁶	2.59×10 ⁻³	1.07×10 ⁻⁶	4.13×10 ⁻⁴	8.60×10 ⁻²	5.24×10 ⁻⁶	1.76×10 ⁻⁵	3.28×10 ⁻⁵	2.30×10 ⁻⁸
30	9.96×10 ¹	3.35×10 ⁻²	9.78×10 ⁻²	4.61×10 ⁻³	3.35×10 ⁻⁴	3.41×10 ⁻⁴	4.91×10 ⁻³	1.96×10 ⁻⁵	1.33×10 ⁻³	1.20×10 ⁻⁴	1.44×10 ⁻¹	3.84×10 ⁻⁷	1.82×10 ⁻⁷	7.06×10 ⁻⁶	4.17×10 ⁻⁶	9.84×10 ⁻⁶
31	9.98×10 ¹	1.34×10 ⁻³	1.32×10 ⁻¹	3.01×10 ⁻³	2.26×10 ⁻⁴	9.17×10 ⁻⁵	1.18×10 ⁻³	4.39×10 ⁻⁶	1.39×10 ⁻⁴	3.41×10 ⁻²	1.74×10 ⁻⁷	3.40×10 ⁻⁴	2.74×10 ⁻⁹	2.57×10 ⁻⁶	3.68×10 ⁻⁷	7.80×10 ⁻⁸
32	9.99×10 ¹	1.95×10 ⁻²	4.25×10 ⁻²	8.70×10 ⁻³	4.60×10 ⁻⁴	2.06×10 ⁻⁴	3.95×10 ⁻²	1.40×10 ⁻⁶	4.85×10 ⁻³	4.56×10 ⁻⁶	3.14×10 ⁻⁸	1.14×10 ⁻⁹	7.74×10 ⁻⁷	4.85×10 ⁻⁶	1.08×10 ⁻⁷	8.29×10 ⁻⁵
33	9.98×10 ¹	8.62×10 ⁻³	1.98×10 ⁻¹	5.86×10 ⁻³	1.46×10 ⁻³	4.39×10 ⁻⁴	2.45×10 ⁻³	2.57×10 ⁻⁵	1.56×10 ⁻³	8.96×10 ⁻⁴	3.03×10 ⁻⁶	1.10×10 ⁻⁸	2.87×10 ⁻⁶	7.27×10 ⁻⁶	3.69×10 ⁻⁹	4.08×10 ⁻⁷
34	9.99×10 ¹	4.51×10 ⁻³	1.53×10 ⁻²	5.30×10 ⁻³	3.49×10 ⁻⁴	5.60×10 ⁻⁴	1.02×10 ⁻³	3.13×10 ⁻⁷	1.82×10 ⁻⁴	1.39×10 ⁻⁵	3.61×10 ⁻¹⁰	4.26×10 ⁻⁹	6.33×10 ⁻⁶	1.18×10 ⁻⁵	1.90×10 ⁻⁵	1.79×10 ⁻⁶
35	9.98×10 ¹	7.22×10 ⁻³	2.18×10 ⁻¹	7.03×10 ⁻³	5.49×10 ⁻³	9.04×10 ⁻⁵	3.72×10 ⁻³	2.69×10 ⁻⁵	1.54×10 ⁻³	2.22×10 ⁻⁴	2.42×10 ⁻⁷	1.26×10 ⁻⁵	3.93×10 ⁻⁸	1.22×10 ⁻⁵	6.71×10 ⁻⁵	1.08×10 ⁻⁸
36	9.98×10 ¹	3.37×10 ⁻³	1.40×10 ⁻¹	2.09×10 ⁻²	6.34×10 ⁻³	1.88×10 ⁻⁴	8.14×10 ⁻³	3.08×10 ⁻⁶	4.48×10 ⁻⁴	2.58×10 ⁻⁵	1.71×10 ⁻⁵	1.64×10 ⁻⁴	1.04×10 ⁻⁵	5.27×10 ⁻⁵	2.80×10 ⁻⁸	7.85×10 ⁻⁶
37	9.99×10 ¹	3.39×10 ⁻³	6.44×10 ⁻²	6.76×10 ⁻⁴	1.66×10 ⁻³	2.27×10 ⁻⁴	4.82×10 ⁻⁶	5.01×10 ⁻⁶	5.86×10 ⁻⁴	3.50×10 ⁻⁶	1.85×10 ⁻⁹	5.63×10 ⁻⁵	2.17×10 ⁻⁵	3.95×10 ⁻⁵	3.15×10 ⁻¹⁰	2.40×10 ⁻⁸
38	9.98×10 ¹	1.10×10 ⁻²	1.20×10 ⁻¹	5.14×10 ⁻²	1.14×10 ⁻⁵	3.06×10 ⁻⁴	3.17×10 ⁻³	5.08×10 ⁻⁶	1.07×10 ⁻³	5.49×10 ⁻⁶	8.18×10 ⁻⁸	5.83×10 ⁻¹⁰	9.83×10 ⁻⁶	2.59×10 ⁻⁵	7.16×10 ⁻⁷	4.69×10 ⁻⁶
39	9.97×10 ¹	1.75×10 ⁻³	2.85×10 ⁻¹	9.82×10 ⁻³	3.55×10 ⁻⁴	1.76×10 ⁻⁴	1.96×10 ⁻⁴	2.36×10 ⁻⁴	7.90×10 ⁻⁴	8.75×10 ⁻⁵	1.26×10 ⁻²	2.32×10 ⁻⁸	3.49×10 ⁻⁶	5.95×10 ⁻⁶	2.09×10 ⁻⁸	4.58×10 ⁻⁹
40	9.99×10 ¹	5.29×10 ⁻³	8.57×10 ⁻²	7.83×10 ⁻³	1.07×10 ⁻⁵	2.40×10 ⁻⁴	4.00×10 ⁻⁴	5.74×10 ⁻⁵	1.81×10 ⁻⁴	1.16×10 ⁻⁵	1.20×10 ⁻⁶	3.09×10 ⁻³	1.55×10 ⁻⁵	3.77×10 ⁻⁵	1.12×10 ⁻⁷	5.84×10 ⁻¹⁰

表 K.13-放射化計算結果

単位:Bq/t

										₽₩ D q/ι
計算 No.	¹⁴ C	³⁶ Cl	⁶⁰ Co	⁶³ Ni	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Nb	⁹⁹ Tc	¹²⁹ I	¹³⁷ Cs	全 α
1	1.09×10 ¹¹	1.02×10 ¹¹	4.52×10 ¹⁰	1.03×10 ¹¹	1.10×10 ⁸	3.03×10 ⁵	2.06×10 ⁵	1.41×10^{2}	3.25×10^{8}	5.28×10 ⁷
2	1.30×10 ¹¹	1.26×10 ⁹	2.32×10 ¹¹	1.04×10 ¹¹	2.50×10^{10}	7.50×10 ⁴	1.21×10 ⁷	3.07×10^4	7.77×10 ¹⁰	1.13×10 ¹¹
3	3.26×10 ¹¹	4.68×10 ⁹	5.96×10 ¹⁰	8.13×10 ¹⁰	8.32×10 ⁷	2.36×10 ⁴	6.27×10 ⁴	1.03×10^{2}	2.56×10 ⁸	3.26×10^{8}
4	1.67×10 ¹¹	5.94×10 ¹⁰	5.26×10 ¹⁰	7.98×10 ¹⁰	2.52×10 ⁷	4.80×10^{3}	2.34×10 ⁴	3.10×10^{1}	7.82×10^{7}	1.13×10 ⁸
5	2.16×10 ¹¹	7.21×10 ⁸	8.34×10 ¹⁰	2.81×10 ¹¹	3.75×10^{7}	2.21×10^{6}	1.63×10^5	4.60×10^{1}	1.16×10 ⁸	1.69×10 ⁸
6	2.25×10 ¹¹	5.34×10 ⁸	2.47×10 ¹¹	1.47×10 ¹¹	4.01×10^{7}	8.05×10^5	4.37×10^4	5.06×10^{1}	1.21×10 ⁸	7.31×10^{7}
7	2.11×10 ¹¹	1.98×10 ⁸	1.46×10 ¹²	4.75×10 ¹⁰	4.69×10^6	2.37×10 ⁶	3.60×10^3	5.75×10°	1.45×10 ⁷	2.09×10 ⁷
8	9.75×10 ¹⁰	1.31×10 ⁹	1.08×10 ¹²	6.92×10 ¹¹	1.35×10 ⁷	2.49×10^6	2.00×10^4	1.74×10 ¹	3.98×10^{7}	8.55×10 ⁵
9	2.22×10 ¹¹	1.04×10^{10}	1.97×10 ¹¹	1.44×10 ¹¹	1.21×10 ⁷	3.84×10^{5}	2.16×10 ⁴	1.54×10^{1}	3.59×10^{7}	1.05×10 ⁷
10	1.66×10 ¹¹	5.74×10 ⁸	5.15×10 ¹²	1.04×10 ¹¹	1.90×10 ⁹	2.70×10 ⁵	8.66×10 ⁵	2.44×10^{3}	5.59×10 ⁹	2.83×10 ⁸
11	6.45×10^{10}	7.41×10 ⁹	2.83×10 ¹¹	3.71×10^{10}	2.15×10 ⁵	4.23×10 ⁶	8.98×10^{3}	2.68×10 ⁻¹	6.56×10 ⁵	5.99×10 ⁵
12	3.15×10 ¹¹	2.67×10 ¹⁰	8.88×10 ¹¹	1.83×10 ¹¹	2.23×10 ⁸	1.32×10 ⁷	1.28×10 ⁵	2.81×10^{2}	6.74×10^{8}	4.84×10 ⁸
13	1.53×10 ¹¹	1.98×10 ⁹	2.45×10 ¹²	3.60×10 ¹¹	4.10×10 ⁷	1.18×10^5	4.77×10^4	5.05×10^{1}	1.27×10 ⁸	1.73×10 ⁸
14	2.80×10 ¹¹	4.19×10 ⁸	5.82×10 ¹¹	8.26×10 ¹⁰	7.95×10 ⁹	1.24×10^5	3.94×10^{6}	1.02×10^4	2.34×10^{10}	9.61×10 ⁸
15	1.84×10 ¹¹	7.44×10^9	1.69×10 ¹¹	1.83×10 ¹²	1.45×10 ⁹	2.62×10^6	6.53×10 ⁵	1.86×10^{3}	4.26×10 ⁹	8.38×10 ⁷
16	2.71×10 ¹¹	1.74×10 ¹¹	1.36×10 ¹¹	4.91×10 ¹¹	6.25×10 ⁵	4.17×10^5	1.74×10^4	7.67×10 ⁻¹	1.94×10^6	2.81×10 ⁶
17	2.00×10 ¹¹	3.48×10^{8}	1.52×10 ¹²	1.06×10 ¹¹	6.57×10^{7}	3.51×10^{5}	4.33×10 ⁴	8.04×10^{1}	2.04×10^{8}	2.96×10 ⁸
18	1.58×10 ¹¹	1.21×10 ⁷	2.40×10^{10}	2.07×10 ¹¹	2.28×10 ⁸	3.33×10^{6}	1.46×10 ⁵	2.80×10^{2}	7.05×10^{8}	1.01×10 ⁹
19	2.22×10 ¹¹	5.61×10 ⁹	3.26×10 ¹¹	3.28×10^{10}	9.38×10^{7}	6.45×10 ⁵	6.17×10 ⁴	1.15×10^2	2.91×10 ⁸	4.20×10 ⁸
20	1.72×10 ¹¹	8.17×10 ⁸	1.78×10 ¹¹	5.99×10 ¹⁰	-1.67×10^6	7.30×10 ⁴	4.70×10^{3}	2.13×10^{0}	4.96×10^{6}	1.36×10 ⁶
21	1.16×10 ¹¹	3.89×10^{8}	1.36×10 ¹³	6.46×10^{10}	3.50×10^6	5.88×10 ⁶	6.93×10 ⁴	4.30×10^{0}	1.08×10^{7}	1.47×10 ⁷
22	8.63×10^{10}	5.00×10 ⁸	2.70×10 ¹²	6.26×10^{10}	1.49×10^6	1.74×10^6	4.79×10^4	1.84×10^{0}	4.60×10^{6}	5.91×10 ⁶
23	2.09×10 ¹¹	9.56×10 ⁷	5.35×10 ¹⁰	1.27×10 ¹²	1.55×10 ⁸	1.42×10 ⁶	8.09×10^4	1.99×10^{2}	4.60×10^{8}	8.29×10 ⁷
24	1.08×10 ¹¹	2.67×10 ⁹	1.13×10 ¹¹	5.31×10 ¹¹	8.77×10^{8}	5.11×10 ⁴	4.45×10^{5}	1.07×10^3	2.72×10^9	3.96×10^9
25	2.42×10 ¹¹	5.04×10 ⁸	7.82×10^{10}	3.70×10 ¹¹	1.30×10 ⁸	1.62×10 ⁶	7.06×10^4	1.60×10^2	4.01×10^{8}	5.41×10 ⁸
26	1.61×10 ¹¹	8.35×10 ⁸	9.18×10 ¹⁰	1.27×10 ¹¹	8.17×10 ⁷	1.43×10 ⁵	9.86×10^4	1.01×10^{2}	2.52×10^{8}	3.33×10 ⁸
27	1.81×10 ¹¹	6.37×10 ⁸	1.98×10 ¹¹	7.52×10^{10}	2.27×10 ⁸	1.03×10 ⁵	1.20×10 ⁵	2.78×10^{2}	7.04×10^{8}	1.02×10 ⁹
28	1.36×10 ¹¹	6.98×10 ⁹	2.01×10 ¹¹	1.72×10 ¹⁰	6.93×10 ⁷	4.02×10 ⁵	5.35×10 ⁴	8.49×10^{1}	2.15×10 ⁸	3.13×10 ⁸
29	6.89×10^{10}	2.39×10^{8}	1.29×10 ¹¹	2.48×10 ¹¹	1.25×10 ⁹	4.58×10 ⁶	5.83×10 ⁵	1.61×10^3	3.67×10^9	1.84×10^{7}
30	9.38×10 ¹¹	1.01×10 ⁹	5.82×10 ¹¹	1.27×10 ¹¹	7.33×10^{8}	1.59×10 ⁵	3.58×10^{5}	9.08×10^{2}	2.25×10 ⁹	2.61×10 ⁹
31	6.56×10^{10}	6.82×10^{8}	1.33×10 ¹¹	3.38×10^{10}	1.85×10 ⁷	2.41×10^{3}	1.16×10 ⁴	2.36×10^{1}	5.53×10^{7}	2.08×10^{7}
32	5.60×10 ¹¹	1.39×10 ⁹	8.86×10 ¹⁰	4.64×10 ¹¹	4.86×10 ⁹	6.77×10 ⁵	2.37×10 ⁶	5.96×10 ³	1.51×10 ¹⁰	2.20×10 ¹⁰
33	2.63×10 ¹¹	4.41×10 ⁹	7.57×10 ¹¹	_1.50×10 ¹¹	2.40×10 ⁷	2.51×10 ⁶	2.05×10 ⁴	2.94×10 ¹	7.46×10^7	1.08×10 ⁸
34	1.51×10 ¹¹	1.05×10 ⁹	1.05×10 ¹⁰	1.74×10 ¹⁰	8.24×10 ⁸	5.53×10 ⁶	3.89×10 ⁵	1.06×10^3	2.44×10 ⁹	4.81×10 ⁸
35	2.25×10 ¹¹	1.66×10 ¹⁰	7.95×10 ¹¹	1.47×10 ¹¹	2.56×10 ⁹	3.45×10^4	1.17×10 ⁶	3.30×10^{3}	7.53×10 ⁹	2.82×10 ⁷
36	1.21×10 ¹¹	1.91×10 ¹⁰	1.00×10 ¹¹	4.30×10 ¹⁰	4.60×10 ⁸	9.07×10 ⁶	2.87×10 ⁵	5.64×10 ²	1.43×10 ⁹	2.08×10 ⁹
37	1.21×10 ¹¹	5.02×10 ⁹	1.47×10 ¹¹	5.61×10^{10}	1.41×10 ⁶	1.90×10 ⁷	4.86×10 ⁴	1.73×10 ⁰	4.40×10^6	6.34×10 ⁶
38	3.28×10 ¹¹	4.53×10 ⁷	1.53×10 ¹¹	1.03×10 ¹¹	3.01×10^{8}	8.59×10^{6}	1.76×10 ⁵	3.71×10^{2}	9.29×10^{8}	1.24×10 ⁹
39	7.67×10 ¹⁰	1.08×10 ⁹	6.93×10 ¹²	7.57×10^{10}	1.07×10 ⁶	3.05×10^6	7.71×10^3	1.35×10 ⁰	3.16×10^6	1.22×10 ⁶
40	1.73×10 ¹¹	3.42×10^7	1.69×10 ¹²	1.74×10^{10}	4.27×10^{6}	1.35×10 ⁷	4.77×10^4	5.50×10^{0}	1.26×10^7	1.96×10 ⁵



注記 元素成分条件の放射化計算用データを利用し,元素濃度分布(実線で示したもので平均値,標準偏差から算定),及び元素成分データ(放射化計算用データ:棒グラフ)を図示し こ。

図 K.4-各元素の放射化計算の条件の設定結果(放射化計算用データの元素濃度分布)

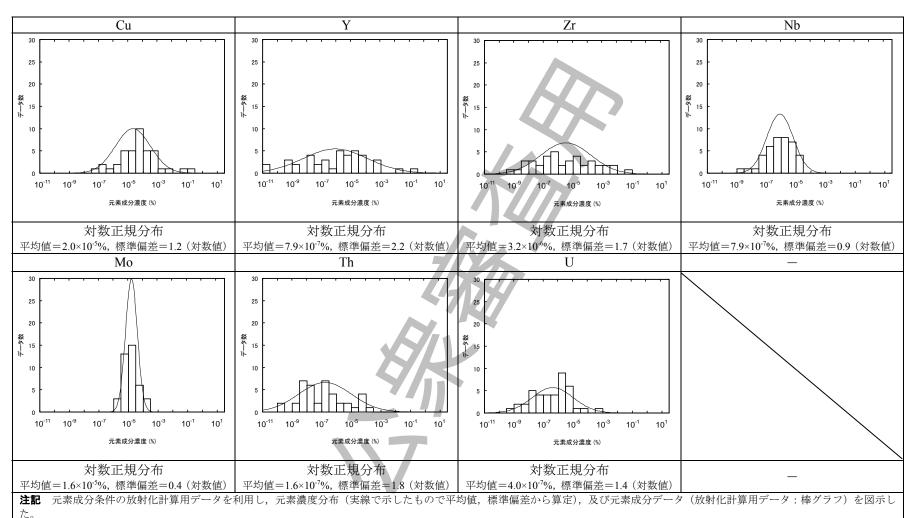


図 K.4-各元素の放射化計算の条件の設定結果(放射化計算用データの元素濃度分布)(続き)

K.2.4 適用例

K.2.4.1 適用性の判断

濃度分布評価法によって決定する場合は、適用対象とする廃棄物グループの放射化計算の条件が明確であり、その計算条件において求められる放射能濃度が一定範囲にあれば、この廃棄物グループの放射能濃度は、理論計算によって求められた放射能濃度の平均値などによって代表することができるという考え方に基づいている。

したがって、元素成分がある一定の範囲にあり、中性子フルエンス率及び中性子の照射履歴が限られた範囲又は一定であるように、廃棄物グループの放射化計算の条件が明確であることが確認できれば、原理的に濃度分布評価法によって決定する場合が適用できる。

黒鉛減速材の成分は、主成分元素である C 以外は、微量成分元素であるが、全ての黒鉛減速材について、製造された時期が建設時に限定されており製造場所が同一であることから、その元素成分は、ほぼ一定の範囲にある。また、全ての黒鉛減速材は、原子炉の運転開始から恒久停止まで原子炉内の同一の場所に存在していたため、中性子フルエンス率は、限られた範囲にある。さらに、中性子の照射履歴は、原子炉の全運転履歴と同一であり、全ての黒鉛減速材について等しい。

上記から,黒鉛減速材は,濃度分布評価法によって決定する場合を用いて廃棄物グループの放射能濃度を決定することができると判断した。

K.2.4.2 放射能濃度の決定方法

- a) 放射化計算結果の安定性及び充足性の確認 放射化計算結果が安定しているか、計算結果 の数が放射能濃度を決定するための評価データとして十分であるかどうかについては、 K.1.4 a)に示した判断基準によって確認することとした。今回の放射化計算結果である 40 点のデータベースに関して、代表的な統計値である"放射能濃度の安定性"(すなわち、各データ数における放射能濃度の平均値と 95 %信頼上限値の差とが示す不確定性の減少の度合い)について評価した結果を、図 K.5 に示した。この結果から、放射化計算によって集積したデータ数の推移に応じて、放射能濃度の 95 %信頼上限が小さくなって、次第に安定領域に入り、40 点の放射化計算用データでは、放射化計算を追加しても統計値の安定性に明確な向上が見込まれないことが十分予測されることから、放射能濃度を決定するためのデータ数としては、充足しているといえる。
- b) **放射能濃度の算出 K.1.4 b**)の考え方によって決定した値を, **表 K.14** 及び**図 K.6** に示す。

表 K.14-各核種の放射能濃度の平均値

	A IN IE TO MAN INCIDENCE OF THE
放射性核種	平均放射能濃度 a) (Bq/t)
¹⁴ C	2.1×10 ¹¹
³⁶ Cl	1.2×10^{10}
⁶⁰ Co	1.1×10^{12}
⁶³ Ni	2.3×10 ¹¹
⁹⁰ Sr	1.3×10^9
⁹⁴ Nb	2.9×10^{6}
⁹⁹ Te	6.3×10^5
^{129}I	1.6×10^3
¹³⁷ Cs	3.9×10^9
全α	3.9×10^9
注 a) 計算結果	県の算術平均値。

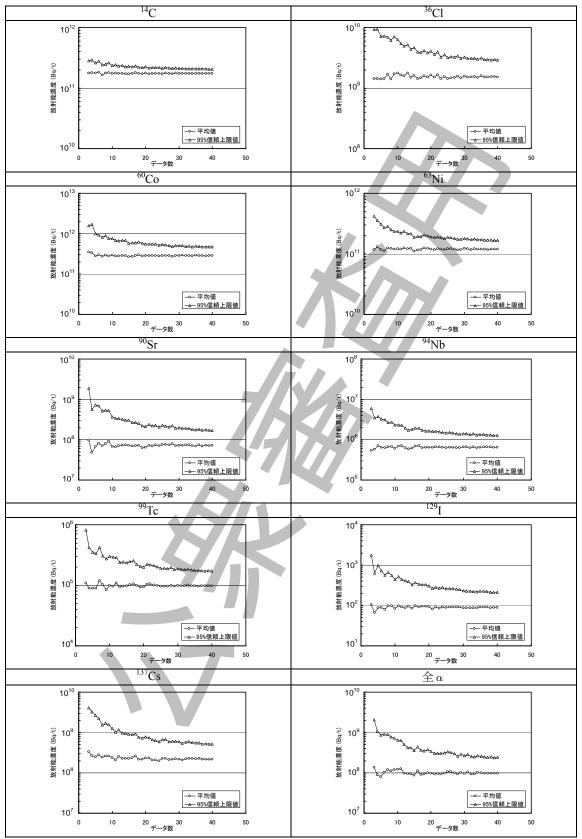


図 K.5-放射能濃度評価値の安定性及び充足性の確認(原子炉停止直後)

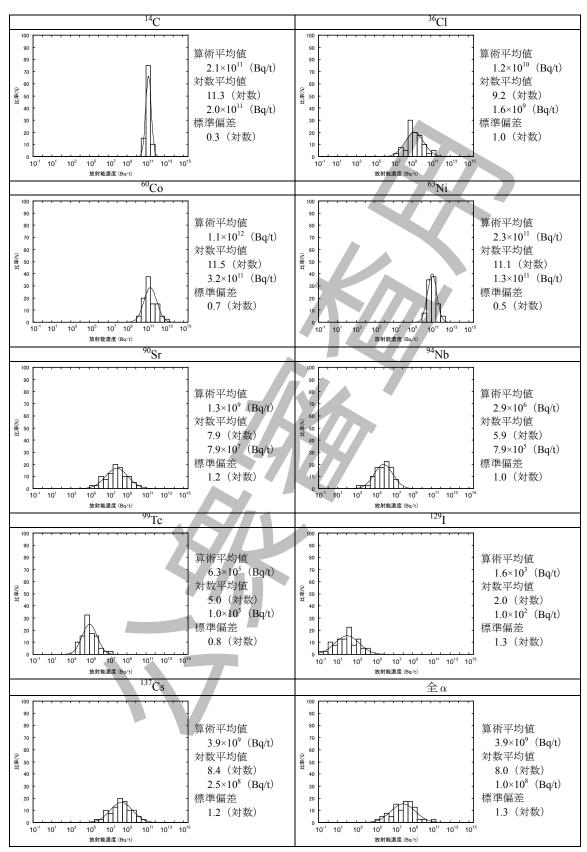


図 K.6-放射能濃度の決定(原子炉停止直後)

参考文献

- [1] **ISO 21238**:2007 Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants (The contents taken from ISO21238:2007 are reproduced with the permission of the International Organization for Standardization, ISO. The ISO standards can be obtained from ISO member (Japanese Standards Association: http://www.jsa.or.jp) and from the Web site of the ISO Central Secretariat at the following address: http://www.iso.org. Copyright remains with ISO.)
- [2] Clarke, F. W., Washington, H. S. "The composition of the earth's crust". US. Geol. Surv. Prof. Paper: 127. (1924)
- [3] 中野正明, 見上寿, 市毛秀明, 塚田真一, "理論計算法を利用した余裕深度処分対象廃棄物の放射能濃度評価手法 複数の計算結果から決定する場合の考え方-", 日本原子力学会 2010 年春の年会, 予稿集, 水戸, 2010 年 3 月 26 日~28 日
- [4] Bibby, D., Goddard, A. J. H., "Long-lived activity of structural materials and its implications for containment", IAEA-SM-234/12.
 - Table 1. Materials Composition on p. 402 of International Atomic Energy Agency,
 Decommissioning of Nuclear Facilities: Proceedings of a Symposium, Vienna 13-17 November 1978, IAEA, Vienna, 1979
- [5] JIS Z 9031:2012 乱数生成及びランダム化の手順

247 15 - 201 V

F015: 201X

附属書 L (参考)

不確かさなどによる計算結果の評価

この附属書は、標準本体の理解のために、計算結果の代表性及び保守性の評価に関する基本 的な考え方などを示すものである。

L.1 代表性及び保守性

理論計算法の主な目的の一つは、計算結果を測定値と比較することによって、開発したモデルを検証し、その代表性及び/又は保守性評価することである。

この標準においては、実際の値と計算結果との差を評価することを推奨する。実際の値は、 関連した全ての変動因子(元素組成、中性子フルエンス率、中性子の照射条件など)の可能な 範囲全体にわたって無限数の計算又は測定を実施しない限り、知ることができない。

したがって、式(1)に示すように、実際の値と計算結果又は評価値との間の平均平方和を求めることによって、代表性という概念を分析することを推奨する。この場合、計算結果の代表性は、正確さ(偏り)及び精度(不確かさ)の両方によって定量化される。

$$R^2 = b^2 + S^2 \tag{1}$$

ここで

R : 代表性

b : 正確さ:偏り又はゆが(歪) み。

(評価された放射能濃度の計算結果と実際の放射能濃度の値との差の平均。正確 さが高ければ小さい偏りを,正確さが低ければ大きい偏りを意味する。)

 S^2 : 精度:評価された値の分散(不確かさ)。

(小さい分散は高い精度を,大きい分散は低い精度を意味する)

したがって、代表性は、偏りの有無、及び許容可能な分散で特徴づけられ、この標準においては、これを代表性の客観的かつ科学的な定義としている。また、代表性を解析するとは、精度(不確かさ)及び正確さ(偏り)の両方を考慮することを意味する。

適用を受ける放射能濃度の制限(廃棄物受入基準,放射線障害防止の要件,遮蔽設計など)を確実に保証するために、放射能濃度分布又は保守性を前提にすることがよくある。このような場合、保守性によって放射能濃度の計算結果の信頼限界を確認するために、不確かさの評価を実施することが望ましい。

決定される放射能濃度の値は、計算の条件及び適用範囲によって設定された正確さ、又は保 守性を保証する必要があるため、不確かさは、その目的のために正しく評価することが望まし い。 放射能濃度の計算結果の不確かさは、その目的のために考案された方法を使用して評価できる。例えば、**ISO/IEC GUIDE** 98-3:2008^[1]に示されている不確かさの伝搬法則は、該当する解析の解を評価するために一般的に使用されている方法である。

L.2 点推定法

評価対象について、計算結果の最終的な不確かさを正しく決定するために、関連した主なパラメータ、すなわち、化学組成、中性子フルエンス率及び中性子の照射条件に対する設定値の不確かさを、事前に評価することが望ましい。

関連したパラメータの不確かさ(測定に基づいたもの,又は仕様,判断などに基づいたもの) を決定し、不確かさの誤差伝搬法則を理論計算に適用する。

最終的に、この不確かさについて、評価された値に関連させて、信頼区間(ここでは、一般的な95%で例示した)を設定することが望ましい(**図 L.1**を参照)。

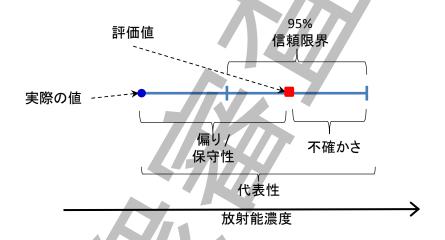


図 L.1—点推定法による放射能濃度の代表性分析イメージ

L.3 区間推定法

区間推定法の場合,関連した主なパラメータ(材料の元素成分,中性子フルエンス率及び中性子の照射条件)の全て又は一部に分布関数が適用されている。

確率密度関数に合致させた最終的な入力データの分布は、評価式(モンテカルロ法など)を 使用し、分布関数ごとにランダム抽出された入力データによって生成する。

入力データがもつ分布によって、最終的な計算結果もこの分布に従うため、計算結果の信頼 区間を最終分布から評価できる(**図 L.2** を参照)。

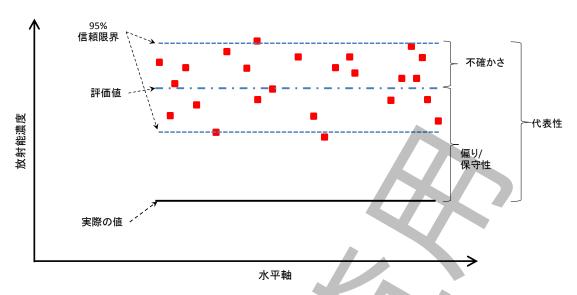


図 L.2—区間推定法による放射能濃度の代表性分析イメージ

この標準では、不確かさには、理論的モデルでは予測できないばらつきだけとする必要があり、それ以外のばらつき(モデルから予想できるもの)は不確かさから除くことが好ましい。例えば、構造材のある大きな一片の部材の位置の違いによる中性子フルエンス率の違いから、その部材内での放射能濃度のばらつきが生じるが、このばらつきは、既知の中性子フルエンス率に関する定義を踏まえれば不確かさではない。それぞれの位置の中性子フルエンス率の不確かさだけが、その位置の放射能の不確かさを生じさせる。

同様に、**図 L.3** から分かるように、**Key** 核種及び難測定核種の放射能濃度の主な計算結果の範囲は、(濃度比の) 傾きによって推定され、モデルで説明又は推定できない項目(すなわち、不確かさ)は、傾きからの計算結果の乖離だけである。



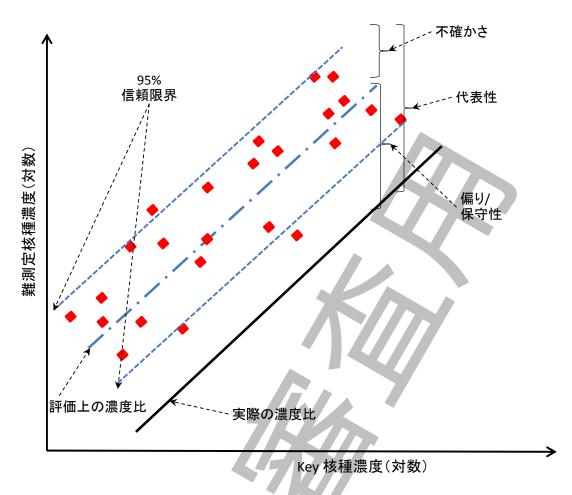
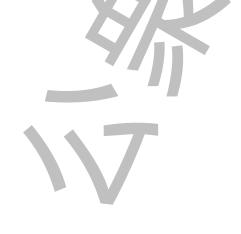
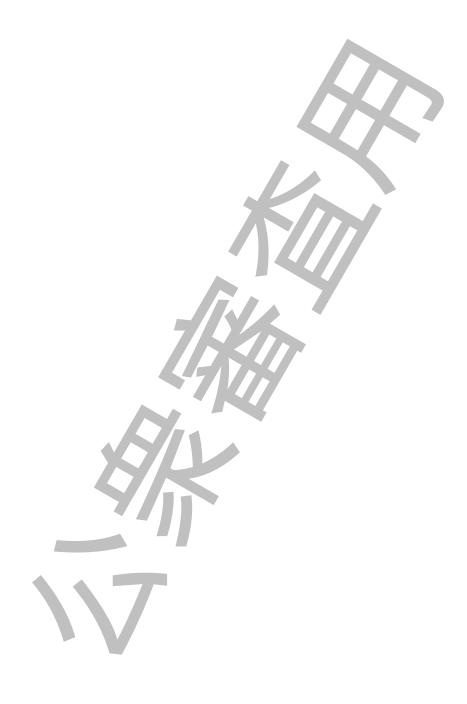


図 L.3—区間推定法による放射能濃度比の代表性分析イメージ



参考資料

[1] ISO/IEC GUIDE 98-3: 2008 "Guide to Expression of Uncertainty in Measurement".



附属書 M (参考)

廃棄体中の放射能濃度の確認に対する基本的な考え方

この附属書は、理論計算法及び原廃棄物分析法を適用して中深度処分対象廃棄物の放射 能濃度を決定する場合の廃棄体中の放射能濃度の確認について、放射能濃度の評価値(放 射能濃度又は濃度比などの係数)の評価精度を考慮した上で、基本的な考え方を整理する ものである。

M.1 廃棄体中の放射能濃度の評価精度に要求される条件

"核燃料物質又は核燃料物質によっ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"(以下,第二種廃棄物埋設規則という。)に基づけば,埋設する廃棄体中の放射能濃度に対しては,**表 M.1** に示すとおり,次の確認を行う必要がある。

- a) 廃棄体ごとの放射能濃度が最大放射能濃度を超えない。 (廃棄体ごとの放射能濃度のばらつきの加味)
- b) 埋設された放射性廃棄物は、放射性物質の種類ごとの総放射能を超えない。 (廃棄体全体の放射能濃度の平均値に対する妥当性)

M.2 放射能濃度の評価値について

中深度処分対象廃棄物の放射能濃度を決定するための評価値は,放射能濃度決定方法の 種類によって,次の2種類に大別できる。

- a) 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 放射能濃度決定 方法を適用する個々の対象廃棄物ごとに,個別に廃棄物の放射能濃度を決定(核種ご とに1点の放射能濃度データを算定)する。
 - この方法には、廃棄物個々の詳細な中性子の照射履歴を考慮した放射化計算を行う場合が該当する。
- b) 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 放射能濃度決定方法の適用対象廃棄物ごとに、種類、プラントなどの廃棄物グループ の各廃棄物に、共通に適用できる平均的な放射能濃度の評価値を決定する。 この方法には、管理指標及び評価値の関係から放射能濃度を決定する換算係数を用い る場合、対象廃棄物全体に一律に同一放射能濃度を適用する複数の計算結果から決定

する場合, Key 核種及び評価値の関係から放射能濃度を決定する濃度比を用いる場合 が該当する。

M.3 評価精度に対する要求に対する対応

放射能濃度の評価値のばらつきは、保守的に評価値に大きな値を適用する場合を除けば、

必ずしも,一方向だけに生じるものではなく,平均値を中心とした加減双方向の分布をもつ。このことを考慮し,放射能濃度の評価精度を踏まえた裕度に求められる基本的な考え方は,次による。

M.3.1 埋設放射能の確認における要求評価精度の考え方

埋設放射能(すなわち,平均放射能濃度)の確認においては,廃棄体個々の放射能濃度 のばらつきは,推定した平均放射能濃度を中心とした対称的な分布を示す。このため,全 埋設廃棄体の総放射能としては,放射能濃度のばらつきは,最終的に相殺されるため,埋 設放射能の確認においては,評価結果である個々の廃棄物の放射能濃度及び平均放射能濃 度の妥当性が確認されれば,得られた評価は,そのまま適用できる。

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

- 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。
 - 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。
 - 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。
- 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 れかの方法などによって提示することが可能である。
 - 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。
 - **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。
 - 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。
- c) 最大放射能濃度を超えないことの確認 b)の廃棄体個々の推定放射能濃度のばらつき を踏まえて、次のいずれかの方法によって、廃棄体の放射能濃度が最大放射能濃度を 超えないことを、妥当性の評価又は裕度の確保によって確認する必要がある。
 - 1) 平均放射能濃度を適用しても、最大放射能濃度を超えるおそれが低い範囲を設定する (例えば、平均放射能濃度の評価が適用できる範囲を示すスクリーニングレベルなどを設定する)。

- 2) 放射化計算の条件に適切な裕度を考慮し、到達する可能性のある最大放射能濃度を 評価して確認する。
- 3) 放射能濃度を"平均放射能濃度+偏差"の形式で推定範囲を示し、これによって最 大放射能濃度を超えないこと確認する。

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	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		
	放射能濃度が申請書等に記載した	埋設を行うことによって, 廃棄物		
	最大放射能濃度を超えないこと。	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		
確認内容		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		
	5//3/	いこと。		
亜土として	京本 ナントのばとったのお唐	廃棄体全体(平均値)としての		
要求される	廃棄体ごとのばらつきの考慮 (スパケリス はん)	妥当性		
条件	(又は保守性 ^{a)})	(又は保守性 ^{a)})		
注 a) 放射能濃度評価結果が大きな値をとるような安全祐度の考慮。				





附属書 N (参考) 理論計算法の記録の例

この附属書は、標準本体の理解のために、放射化計算に係る記録に関する例を示すものである。

N.1 結果の記録内容

放射化計算の結果の主要な記録は、知識をもつ評価者が計算の背景及び計算をトレースできるようにするために、詳細に記載するのがよい。また、できる限り、次の情報を含むことが望ましい。

a) 理論計算の内容及び範囲

- 計算の目的
- 基本的な仮定条件
- 適用性及び制限

b) 評価対象とした放射化金属等の説明

- 幾何形状などの説明 (評価対象とした放射化金属等の説明)。
- 総重量
- 材質ごとの重量
- 材料試験記録,又はその他の化学組成,若しくは元素分析結果。
- 評価対象とした放射化金属等ごとの中性子フルエンス率。
- 評価対象とした放射化金属等ごとの中性子の照射履歴。

c) **放射線(線量率)測定方法の説明**(放射線測定を適用した場合)

- 放射線測定記録の要旨 (放射線測定記録の原本の複写は、計算記録の一部として保管する。)

d) 理論計算方法の説明

- 適用した放射化計算の方法の説明、又は参考文献。 (計算コード又は計算モデルの検証及び妥当性確認の報告は、ソフトウェア製作者に 帰属する場合もある。しかしながら、少なくとも、これらは、検証などが行われた証

e) 理論計算の結果の要約

- 評価対象とした放射化金属等の材料の基礎資料。
- 放射線測定データの使用及び適用に関する検討書(放射線測定を適用した場合)。
- 計算に含まれる放射性核種の放射能濃度。

拠を残すために含ませる。)

- 要求されるその他のデータの要約及び解析結果。

f) 結果の妥当性確認、及び/又は不確定性の検討

g) 参考文献(含むことが望ましい)

- 計算プログラム
- 評価対象とした放射化金属等の構造図。
- 原子炉の運転データ
- 評価対象とした放射化金属等の照射履歴。
- 放射線測定結果(放射線測定を適用した場合)
- 理論計算法の報告書(上記に含まれていなければ)

h) 評価, 検証などの結果

- 報告書の作成者,評価者,検証者,承認者の署名。

N.2 再利用可能な結果

その他の計算のために参考にできる重要な計算部分及び報告書は、分割して、作成、評価、 検証、承認する。

N.3 情報の取り扱い

放射化計算に使用した主な基礎情報は、別途、文書及び参考文献として示す。

N.4 報告範囲

理論計算の結果は、(測定値と対比すると)最小値に対する限度を持っていないため、報告された計算結果は、数値の処理だけで限定(数値の丸め)される。このため、重要でなく、かつ無意味な値の報告をなくすために、カットオフ(cut-off)のレベルを、確立することが望ましい。また、報告範囲は、報告書中に明記する。

N.5 評価結果の報告

数値の精度は、全ての入力項目に関して、最小の有効桁数とし、一般には、計算結果は3桁で報告する。ただし、線量率測定結果及び材料試験結果は、1又は2桁の場合もある。

なお、数値の丸め方としての値の切り上げは望ましい(6.4を参照)。

附属書 O (参考)

原廃棄物分析法の記録の例

この附属書は、標準本体の理解のために、原廃棄物分析法の評価に利用した記録(ただし、 放射化学分析等自体に関する記録は除く)に関する例を示すものである。

0.1 結果の記録内容

原廃棄物分析法の評価に利用した主要な記録は、知識をもつ評価者が評価の背景及び評価をトレースできるようにするために、詳細に記載するのがよい。また、できる限り、次の情報を含むことが望ましい。

a) 原廃棄物分析法の内容及び範囲

- 評価の目的
- 基本的な前提条件
- 適用性及び制限
- b) **評価対象とした試料の説明** 評価対象とした試料(廃棄物)に対し、目的に応じて、次の中から適切な項目を選定し、管理する。
 - 試料番号(試料管理番号)
 - 発生日(対象が廃棄物として発生した年月日)
 - 採取日(試料を採取した年月日)
 - 発生履歴 (原子炉型式,発電所名,号機名,発生場所,廃棄物の種類・性状など)

c) 放射化学分析等の説明

- 放射化学分析等の方法及び結果の要旨。 (放射化学分析等の結果の原本の複写は、記録の一部として保管する。)

d) 原廃棄物分析法の説明

- 適用した原廃棄物分析法の説明。 (原廃棄物分析法における放射化学分析等の結果の利用方法などを記載する。)

e) 原廃棄物分析法を利用した評価結果の要約

- 評価対象とした試料に関する情報。
- 放射化学分析等の結果の使用及び適用に関する検討書。
- 評価に利用した放射性核種の放射能濃度。
- 要求されるその他のデータの要約及び評価結果。
- f) 結果の妥当性確認,及び/又は不確定性の検討 原廃棄物分析法で決定した放射性核種 の放射能濃度に対し、その結果が妥当であること、及び/又は不確定性を踏まえていて も問題ないことを、放射能評価上の裕度等の観点から、確認する必要がある(附属書 M 参照)。

なお、評価結果及び/又は放射化学分析等の結果に外れ値が見られた場合は、原因を確認した上で、その外れ値は訂正又は棄却すべきである。外れ値の原因が特定できない場合は、JIS Z 8402-2:1999^[1]に記載されているグラッブズ(Grubbs)の検定などを外れ値の取扱い方法として適用してもよい。

g) 参考文献

h) 評価, 検証などの結果

- 報告書の作成者,評価者,検証者,承認者の署名。

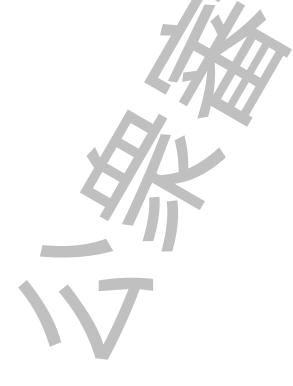
O.2 情報の取り扱い

原廃棄物分析法に利用した主な基礎情報は、別途、文書及び参考文献として示す。

O.3 評価結果の報告

数値の精度は、放射能濃度の確認において要求される評価精度を踏まえ、有効桁数などを 決定する (**附属書 M** 参照)。

なお、数値の丸め方としての値の切り上げは望ましい(6.4を参照)。



参考文献

[1] **JIS Z 8402-2**:1999 測定方法及び測定結果の精確さ(真度及び精度)-第2部:標準 測定方法の併行精度及び再現精度を求めるための基本的方法

AESJ-SC-F015: 20XX 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: 20XX 解 説

この解説は、標準本体及び附属書に記載した事柄、並びにこれらに関連した事柄を説明 するものであって、標準の一部ではない。

1 制定及び改定の経緯

1.1 制定の趣旨及び経緯

低レベル放射性廃棄物の処分形態には、極めて放射能濃度が低い廃棄物を対象とし、コンクリートピットなどの人工バリアを設けず、素掘りの溝状などの空間に廃棄物を定置して埋設処分する"浅地中トレンチ処分"、比較的放射能濃度が低い廃棄物を対象とし、地表を掘削した後、コンクリート製の人工構築物を設置して、その中に廃棄物を定置し、モルタルなどで充塡して処分する"浅地中ピット処分"、及び比較的放射能濃度が高い廃棄物を対象とし、一般的な地下利用に対して十分余裕をもった深度(地下 70 m 以深)へ処分する"中深度処分"がある。

これらの埋設する廃棄体中の放射性核種の放射能濃度の決定方法については、平成4年4月に原子力安全委員会にて、"日本原燃産業(株)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)について"が了承され、濃縮廃液などを固型化した均質・均一固化体の放射能濃度決定方法として、解説表1に示すスケーリングファクタ法などの6種類の方法が示された。

解説表 1-原子力安全委員会で了承された廃棄体中の放射能濃度決定方法 2)

放射能濃度決定方法	内容
非破壞外部測定法	廃棄体の外部から非破壊測定し,当該廃棄体中の放射能濃度を 決定する方法。
スケーリングファクタ法	代表試料 b)の放射化学分析等の測定によって得られる難測定 核種 c)と Key 核種 d)との相関関係と個々の廃棄体外部による非 破壊測定結果とを組み合わせて当該廃棄体中の放射能濃度を 決定する方法。
平均放射能濃度法	代表試料 ^{b)} の放射化学分析等の測定によって得られる平均的 な放射能濃度によって当該廃棄体中の放射能濃度を決定する 方法。
理論計算法	原子炉燃焼計算などによって理論的に当該廃棄体中の放射能 濃度を決定する方法。
廃棄体破壊分析法	廃棄体から代表試料を採取して,これを放射化学分析し,当該 廃棄体中の放射能濃度を決定する方法。

解説表 1-原子力安全委員会で了承された廃棄体中の放射能濃度決定方法(続き)』

放射能濃度決定方法	内 容
原廃棄物分析法	固型化処理間近のプロセス廃棄物から代表試料を採取して,こ
	れを放射化学分析し、廃棄体中の放射能濃度を決定する方法。

- 注 a) 原子力安全委員会"日本原燃産業(株)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)について(了承)"(平成4年4月)。
 - b) 母集団を適切に代表している廃棄体又は廃棄物から採取した試料。
 - c) 廃棄体外部から非破壊測定が困難な核種。
 - d) 廃棄体外部から非破壊測定が可能な γ 線を放出し、難測定核種と相関関係をもつ核種。

このうち、浅地中ピット処分する廃棄物の放射能濃度決定方法については、日本における放射能濃度決定方法の適用の実績、スケーリングファクタ法のガイドラインを示した ISO 21238:2007^[1] "Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants" などを踏まえ、放射化廃棄物を除いた浅地中ピット処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の基本的な手順をまとめた AESJ-SC-F010:2007 "放射性廃棄物の放射能濃度決定方法一原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物の放射能濃度決定方法に関する基本手順:2007ー浅地中ピット処分廃棄物について一"(現在、後継標準 AESJ-SC-F022:2011 の発行を受けて廃版となっている)が制定されて、その後、浅地中トレンチ処分対象廃棄物を含めたAESJ-SC-F022:2011 "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"に移行した。

一方,原子力発電所から発生する放射能濃度が比較的低い廃棄物の埋設処分は,平成 4年度から運転中廃棄物を対象とした浅地中ピット処分が開始されている。さらに,浅地中トレンチ処分は,日本原子力研究開発機構の動力試験炉(JPDR)の解体にともなって発生した極めて放射能濃度が低い廃棄物を対象に,同研究機構敷地内で試験的に実施され,平成 8年に埋設を終了している。

各処分形態に対応する埋設処分を円滑に推進するためには、残る放射能濃度が比較的高い廃棄物の放射能濃度決定方法に関する民間規格を整備する必要があり、その一環として、AESJ-SC-F015:2010 "余裕深度処分対象廃物の放射能濃度決定方法の基本手順"を制定した。

1.2 今回(20XX年)の改定の経緯

日本原子力学会標準 **AESJ-SC-F015**:2010 の内容を踏まえて, **ISO** において, 放射化金属等の理論計算法に関する **ISO** 16966:2013^[2] "Theoretical activation calculation method to evaluate the radioactivity of activated waste generated at nuclear reactors"が, 2013 年に新たに制定された。ISO の標準化の中で, **ISO** 16966:2013 には, "妥当性確認"に係る規定, "記録"に係る規定などの **AESJ-SC-F015**:2010 に含まれていない規定が追加された。

このため, **ISO 16966**:2013 とこの標準との内容の整合性を図るとともに,今回の改定において, **ISO 16966**:2013 に含まれた"妥当性確認","記録"の規定などを,この標準に取り込むこととした。

なお、ISO 標準を、この標準に取り込むときに、中性子輸送計算の一次元モデル、二次元モデル及び三次元モデルの選択肢としての位置付けを明確にする、日本語表現として適正化するなどの編集を行った。

さらに、この標準で規定している"原廃棄物分析法"に関しても、2010年の制定後、浅地中ピット処分対象廃棄物ではあるが、原子力発電所で発生した液体状の放射性廃棄物の放射能濃度決定方法としての"原廃棄物分析法"に関する適用事例^[8,9]が報告されたため、この事例などに関しても、合わせて、この標準に取り込むこととした。

加えて、この標準の附属書で示した"元素分析データに検出下限値しかない場合の元素分析データの検出下限値から始まる濃度の低い領域で濃度分布を設定する"方法に関しても、"鉱物、岩石などからの試料"の元素分析データを利用した検出下限値以下の分布の設定方法に関する報告書[11]が発行されため、この事例などに関しても、合わせて、この標準に取り込むこととした。

今回の改定において、比較的放射能濃度の高い廃棄物の処分形態の名称に関して、"余裕深度処分"から"中深度処分"に変更した。これは、原子力規制委員会が平成 28 年 8 月 31 日に定めた"炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について"において、"炉内等廃棄物に必要となる離隔のための深度や閉じ込めの程度は、総放射能量や長半減期核種の濃度等に見合ったものとし、深度は浅地中処分よりも深いものとする。"として、このような処分概念を"中深度処分"と呼ぶこととする、とされたことを受けて名称を統一するために変更した。

なお, "中深度処分"の英語は, 国際的には"Intermediate depth disposal"を使用してきたことを踏まえて, "Intermediate depth disposal"に統一した。

2 中深度処分対象廃棄物の放射能評価上の特徴

原子力発電所から発生する中深度処分対象廃棄物は、放射化金属等及び使用済樹脂等に 大別でき、これらは、炉心近傍において直接中性子照射されて、又は中性子照射されて生 じた放射性核種を含んでいるため、浅地中ピット処分対象廃棄物と比較して高い放射能濃 度をもつ。したがって、中深度処分対象廃棄物を取扱う場合には、浅地中ピット処分対象 廃棄物を取り扱う場合に比べて、被ばく抑制などに大きな配慮が必要となる。これらの廃 棄物の放射能評価上の特徴を、次に示す。

a) **放射化金属等** 原子力発電所から発生する廃棄物のうち、炉心内及び炉心近傍で使用 される金属材料などは、中性子照射によって放射化され、放射能濃度の比較的高い中 深度処分対象廃棄物となることが想定される。

これらは, 炉心近傍などで強く放射化された部位に限定されるため, 廃棄物の種類,

材料,使用状況が明確なものが多く,放射化計算の評価精度も高いため,放射化計算による放射能濃度の推定が比較的容易である。

原子炉供用期間中に発生する放射化金属等は、廃棄物種類にもよるが、原子炉内の特定範囲において管理された形で移動するが、必ずしも照射履歴は一定条件ではない(中性子の照射条件が変動する)ことが多い。また、燃料プール、放射能濃度が比較的高い固体状の廃棄物の専用貯蔵プールなどに発生時の状態で、1 体ごとに廃棄物の照射履歴の把握が可能な廃棄物及び切断された状態、又はこれらの複数の廃棄物を保管容器に収納した状態で保管され、保管容器単位での廃棄物の中性子の照射履歴(範囲)の把握が可能な廃棄物の発生も見込まれる。

一方,解体時に発生する放射化金属等は,数サイクル(数年~10数年程度)の使用 (中性子照射)で供用期間中に発生する放射化金属等とは異なり,長期間,同一の場 所に設置された状態で放射化(中性子照射)されるという特徴をもつ。

なお、放射化金属等の放射能は、基本的に炉内での中性子照射による放射化が主体であるものの、同時に原子炉冷却材などとも接触しているため、原子力発電所の燃料被覆管状況(損傷の程度)によっては、金属表面に付着した核分裂生成(FP)核種及びα核種の汚染の影響を受ける場合も想定される。

b) 使用済樹脂等 中深度処分対象廃棄物に該当する使用済樹脂の放射能は、主に軽水炉の原子炉冷却材などの液体中に存在するクラッド成分などの付着による汚染に起因しており、既に埋設を実施している濃縮廃液を固型化した廃棄体などの浅地中ピット処分対象廃棄物(汚染廃棄物)と放射能評価上の特徴が、類似している。ただし、使用済樹脂等は、発生の都度、貯蔵タンクに移送され、貯蔵タンク内に比較的長期間保管されるため、同一貯蔵タンク内に発生時期の異なる(すなわち、60°Coなどの減衰の程度が異なる)使用済樹脂が混在する場合が多い。また、一部の原子力発電所では、溶離処理として核種の使用済樹脂から分離によって発生する溶離廃液を、中深度処分対象廃棄物とすることも計画されている。

なお、原子力発電所の供用期間中に発生する使用済樹脂のうち、BWR の復水系統設備(復水脱塩装置、復水ろ過装置)及び液体廃棄物処理設備から発生する比較的低線量の使用済樹脂については、均質・均一固化体(セメント固化体など)として、既に浅地中ピット(六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター1号廃棄物埋設施設)処分されており、放射能濃度決定方法としては、実際の放射性廃棄物の放射化学分析データを用いた放射能濃度決定方法が適用されており、使用済樹脂等の放射能濃度決定方法にも同様な方法が適用可能である。

3 適用範囲

この標準は、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っ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。ただし、放射性廃棄物の代表試料に関する放射化学分析方法は、この標準に含んでいない。

放射能濃度決定方法は、中深度処分の対象となる放射性廃棄物の特性を踏まえた方法についての記載を行うことが適切であるため、原子炉内での中性子照射によって放射性核種が生成する放射化金属等を対象とする理論的方法に当たる"放射化計算を用いる放射能濃度決定方法",及び原子炉冷却材浄化系などで、放射性物質をろ過・吸着した使用済樹脂等に適用する実証的方法に当たる"原廃棄物分析法"を示したものである。また、使用済燃料とともに原子力発電所から搬出され、再処理工場において廃棄物となるチャンネルボックス、バーナブルポイズンなどの放射能評価上の特徴は、原子力発電所から発生する廃棄物と同じであり、この標準が適用できる。

なお、原子力規制委員会などにおいて、この標準に関連する内容などの検討を行った結果によって、この標準の記載内容に影響がある場合には、最新の法令などを確認した上で、この標準を使用する必要がある。

4 対象とする廃棄物及び核種

この標準が対象とする原子力発電所から発生する中深度処分対象廃棄物を,"放射化金属等"及び"使用済樹脂等"に大別した放射性廃棄物の主な例を,解説表2に示す。

なお、評価対象核種は、廃棄体の輸送又は処分のために、放射能濃度及び/又は放射能 を評価しなければならない核種であり、輸送規則、中深度処分施設の自然条件、埋設の具 体的方法、埋設量、管理期間などを考慮した安全評価を踏まえて決定されることとなる。

解説表 2-中深度処分対象廃棄物の例及び適用する放射能濃度決定方法

種類	発生場所など	主な放射性廃棄物の例	主な放射能濃度 決定手法
放射化金属	原子炉内及び周辺	- 制御棒 (種々の炉型)	理論的方法
等		- チャンネルボックス(BWR)	(理論計算法)
		- バーナブルポイズン (PWR)	
		- 炉内構造物 (種々の炉型)	
		- 生体遮蔽コンクリート (PWR)	
		- 黒鉛 (GCR)	

種類	発生場所など	主な放射性廃棄物の例	主な放射能濃度 決定手法
使用済樹脂	原子炉冷却材浄化	- 使用済のイオン交換樹脂(種々の	実証的方法
等	設備, 化学体積制	炉型)	(原廃棄物分析
	御系,使用済燃料	- 使用済のフィルタースラッジ	法,スケーリン
	プール水冷却浄化	(BWR)	グファクタ法な
	設備など	- 溶離廃液(PWR)	ど)

解説表 2-中深度処分対象廃棄物の例及び適用する放射能濃度決定方法 (続き)

5 審議中に議論となった事項

a) "自然界"の用語の表現 放射化計算の入力条件の一つである元素成分データの設定における、元素分析データに検出下限値しかない検出困難元素の濃度分布の標準偏差を推定する方法の一つとして、"環境試料、金属、鉱物、岩石、堆積物、土壌など"の広く自然環境の中に存在している"物質"の元素濃度分布から設定する方法が示されているが、これらの"物質"の略称として、"自然界"の用語を用いている。

この用語は、過去の標準制定の時にも議論し、ほかの良い略語が見いだせず、"自然界"の用語の使用に至ったものであるが、今回の改定においても見直した方がよいとの意見が出され、再度、議論したものの、適切な用語を見いだせられなかった。

しかしながら、この改定においては、違和感の残る"自然界"の用語の使用を止め、 暫定的に、"鉱物、岩石などからの試料"に替えて使用した。

b) 品質保証 この標準は、放射能濃度を決定する理論計算法の手順などを示すものであるが、計算結果、入力データなどの"記録"に関する内容も示していることから、利用者における"品質保証"又は"品質マネジメントシステム"の適用・組込みなどに関しても示すことも重要ではないかとの意見が提示された。

単に手法・基準を示す学会標準に関しては、利用者が学会標準を引用して実際に使用する要領書などで、"品質保証"又は"品質マネジメントシステム"に関して、示すことになるため、必ずしも、標準内で"品質保証"又は"品質マネジメントシステム"までを要求する必要はないのではないかという考え方もある。さらに、原子燃料サイクル専門部会が関わっている学会標準での品質保証に係る記述の有無などを調査したが、"品質マネジメントシステム"に関する標準内での扱いに関しても、明確な方針は見えなかった。

このため、この内容に関しては、この分科会では、"品質マネジメントシステム"に関する標準内での扱いは、個々の標準で議論する内容でなく、標準委員会としての基本方針に基づいて、記載内容を検討することが適切であると考え、この標準においては、暫定的に、次の規定に留めた。

8 品質マネジメントシステム

この標準に規定する放射能濃度決定手順を適用するに当たって,利用者がこの標準を引用する要領などにおいて,利用者が規定している"品質マネジメントシステム"の適用を明確にする。

c) ほかの標準との引用関係における改定の影響 2010 年版の AESJ-SC-F015 の解説の "7.6 放射能濃度決定方法の適用において必要な管理"において、放射能濃度決定に必要となる廃棄物及び廃棄体の管理項目について示していたが、今回の AESJ-SC-F015 の改定前に、中深度処分対象廃棄体の製作要件及び検査方法を示す日本原子力学会標準 AESJ-SC-F-014: 2015 "余裕深度処分対象廃棄体の製作要件及び検査方法"が制定され、標準の"附属書 F 放射能濃度決定方法に必要な廃棄体製作時の管理項目の考え方"の中に、この標準の内容が全て取り込まれた。

このことを受けて、今回の改定において、この標準の解説からは、この内容を削除し、解説中に **AESJ-SC-F-014**: 2015 を参照することを示した。

しかしながら、将来のこの標準の改定、引用関係のある学会標準間及び他の規格の 改定時における整合性の維持、反映については、何らかのルールが必要と考えられた。 このため、この件に関しても、標準委員会としての標準の改定、見直しに対する引用 標準間の取扱いに関して、基本方針を明確にしてもらうことが重要と考えた。

d) 国際規格との整合性 この標準の改定は、日本原子力学会標準 AESJ-SC-F015: 2010 の内容を踏まえて、ISO において、放射化金属等の理論計算法に関する ISO 16966:2013 "Theoretical activation calculation method to evaluate the radioactivity of activated waste generated at nuclear reactors"が、2013 年に新たに制定された。これを受けて、その時に ISO 規格に追加された内容 "妥当性確認"、"記録"などを、今回の改定で、この標準に反映したが、附属書 C (ISO 規格では附属書 B) に関しては、例えば、"適用する中性子輸送の解析モデルは、三次元モデルを適用するように規定している"などの誤解を生じないように、"あくまでも三次元モデルは選択肢(ほかに一、二次元モデルもある)の一つである"ことが理解できるように、一部表現に関して編集的な修正を行うとともに、日本文として適切な表現になるように、編集した。

6. その他の解説事項

6.1 表面汚染の取扱い

この標準では、中深度処分対象廃棄物のうち、放射化金属等に対する放射能濃度決定方法として、理論計算法の適用方法を示している。ただし、放射化金属の表面には、核分裂生成物及びα核種を含む腐食生成物(以下、クラッドという。)が付着しており、放射化金属の放射能濃度を決定するためには、このクラッドの放射能も考慮する必要がある。

a) **除染する場合** 放射化金属の表面に付着したクラッドを除去できる適切な方法によ

って除染を行えば、理論計算法で決定した放射化金属の放射能濃度に対し、廃棄物の 表面に付着したクラッドの放射能の影響は、ないといえる。

適切な方法の例としては、除染方法の一つである研磨法(機械的方法)^[3]の場合、水流動又は空気旋回流に研磨材を随伴させて除染を行うため、研磨材の種類によっては金属母材までの研削能力があるため、放射化金属の表面に付着したクラッドを十分に除去できる方法といえる。

b) **除染しない場合** 放射化金属の表面に付着するクラッドの放射能は、プラントの水質、燃料損傷の有無によって異なるため、これらを考慮して適切に評価する必要がある。 ただし、除染しない場合においても、放射化金属の表面に付着した放射能の影響が小さい可能性もある。

その一例として、JNES-SS-0403^[4]において燃料損傷の影響が有意ではないプラントと定義される福島第二原子力発電所1号機で発生したチャンネルボックスの母材及びクラッドの放射能比を、**解説表3**に示すが、クラッドの放射能は、母材の放射能に対して非常に小さい(1%以下)ことが分かる。このように、母材に対してクラッドの放射能の影響が非常に小さい放射化金属については、クラッドの放射能の影響は、ないとして評価できる場合もある。

なお、クラッドの放射能は、同様に表面汚染している固体状の放射性廃棄物(浅地中ピット処分対象廃棄物)の放射能濃度決定方法(AESJ-SC-F022:2011)などを参考にできるが、具体的な評価方法は、今後、クラッドの放射化学分析データなどの蓄積を図った上で決定する必要がある。

解説表 3-チャンネルボックス *)の母材に対するクラッドの放射能比 *)[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。

6.2 濃度比法を用いる場合の基本的な考え方及び計算例

6.2.1 元素成分条件の設定

元素成分条件の設定では、元素分析データ数が非常に少ない元素及び検出下限値しかない元素の標準偏差を、同一の濃度分布形状(対数正規分布)を設定する全ての元素の標準偏差を利用し、保守的な値を設定している。

ここで、**附属書 H** に示した"鉱物、岩石などからの試料"における土壌などの中の微量成分元素のデータと、収集した SUS304 及び ZrTN804D の元素分析データ(ただし、元素

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)。

分析データ数が比較的少ない元素で、かつ、濃度分布形状に対数正規分布を設定する元素)とを利用して、同一の濃度分布(対数正規分布)を設定する元素の濃度分布データの標準偏差の分布を評価した結果を、解説図1に示すが、標準偏差の分布に大きな差異は、見受けられない(収集した元素分析データの標準偏差の最大は、SUS304 中の Co である。これは、試料サンプルに一般材料及び原子力仕様材料の両者を加えたことによって元素濃度分布範囲が大きくなったもので、一般材料を除いた場合の標準偏差の分布の範囲は、ほぼ同等である)。

したがって、保守的な標準偏差(元素分析データが非常に少ない元素)、平均的な標準偏差(元素分析データに検出下限値だけの元素)を設定する必要がある場合は、同一の濃度分布を設定する元素の濃度分布データを参考にした評価を行うことも可能である。

6.2.2 SUS304 (PWR 制御棒)

PWR 制御棒の被覆管 (SUS304) の中性子条件では、保守的となる (⁶⁰Co 量が小さくなる、すなわち、難測定核種と Key 核種との濃度比が大きくなる) 配置位置として、"制御用位置 (D バンク) での中性子照射から全引抜位置 (ARO バンク) での中性子照射"を代表的な配置位置の組合せパターン条件 (固定) として設定している。PWR 制御棒の燃焼制御のための配置位置は、比較的長半減期の核種への影響は、基本的に小さいものの、比較的短半減期の核種では、核種の減衰の影響もあり、最終照射条件の影響を受けやすい。ここでは、最終照射条件の影響の程度の評価例を示した。

6.2.2.1 評価条件

PWR 制御棒の原子炉内の配置位置は,D バンク又は ARO バンクのいずれかであり,配置位置は,運転サイクルごとに中性子の照射量を考慮して決定される。ここでは,最終照射条件の異なる評価上の極端な配置位置の例として,**解説図 2** に示す 2 ケースについて,比較的短半減期核種である 60 Co,及び比較的長半減期核種である 14 C, 63 Ni の放射化計算を行い,各々の放射能濃度の比較評価例を示した。

なお、配置位置以外の放射化計算の条件については、基本的に、**附属書**Iの放射化計算 用入力データ(元素成分条件、中性子条件及び中性子の照射条件)を利用した。放射化計 算の条件の概要を、**解説表**4に示す。

6.2.2.2 評価結果

6.2.2.1 で設定した放射化計算の条件に基づき,放射化計算(放射化計算コードは,ORIGEN2 を利用)を実施し,極端な配置位置ごとの各核種の生成量(放射能濃度)を比較した例を,解説図3に示す。

¹⁴C, ⁶³Ni のような比較的長半減期の核種の放射能濃度は、中性子の照射量の合計に依存して増大するため、配置位置の影響は、基本的に小さい。一方、⁶⁰Co のような比較的短半減期の核種の放射能濃度は、最終照射時に D バンクでの強い中性子照射を受けた場合のほうが減衰による放射能濃度低下の影響を受けにくく、ケース 1 (ARO バンクでの中性子照

射からDバンクでの中性子照射)のほうが、放射能濃度は若干大きくなる傾向にある。

6.2.3 放射化計算用データの設定

附属書Iに記載した疑似乱数を使用したランダムサンプリングによる放射化計算用データの作成方法は、次による。

6.2.3.1 擬似乱数

放射化計算の計算用データを作成する場合は、作成した計算用データが、あらかじめ設定した放射化計算の条件(元素成分条件、中性子条件及び照射条件)を適切に模擬するための配慮が必要である。このため、放射化計算の条件が恣意的に設定されないよう、一般的な擬似乱数¹⁾を使用した放射化計算の条件の設定を行う。

なお、擬似乱数の生成には、**JIS Z 9031**:2012 "乱数発生及びランダム化の手順"の擬似乱数生成方法のアルゴリズムの一つであるメルセンヌツイスター法 2)を使用した。

注 ¹⁾ アルゴリズムによって生成した乱数。ここで、乱数とは、特定の確率変数の実現値とみな し得る数を指す。

なお, 誤解がなければ, 擬似乱数を単に乱数と呼んでもよい。

- 2) M 系列法 3)の一つで、高速で非常に長い周期とすぐれた多次元均等性分布とをもつ。
- 3) アルゴリズムによって擬似一様乱数を生成する方法の一つ。幾つかの変種があるが、いずれもかなり高速であり、実用的観点では、周期は無限ともいえるほど長くできる。また、高次元のランダム点列の生成にも向いている。

6.2.3.2 擬似乱数を使用した放射化計算用データの作成方法

附属書Iにおける擬似乱数を使用した放射化計算用データの作成方法は、次による。

6.2.3.2.1 正規分布の場合

- a) メルセンヌツイスター法で擬似乱数(範囲 0~1の擬似一様乱数)を40点生成。
- b) 放射化計算の条件として設定した平均値と標準偏差とを利用し、各種分布に従う乱数を発生させる方法として、JIS Z 9031:2012に示されている標準正規分布に使用できる逆関数法を適用(具体的には、正規累積分布の逆関数を返す関数を使用)し、40点の擬似一様乱数を正規分布の擬似乱数に変換。

6.2.3.2.2 対数正規分布の場合

- a) JIS Z 9031: 2012 に示されている対数正規分布に使用できる擬似乱数の生成方法に基づき、標準正規乱数 Z を利用した方法($Y=10^{Z}$)で擬似乱数を生成。
- b) 具体的には、正規分布を想定する対数上において、a) の方法で標準正規乱数 Z を算定し(対数値に変換した平均値及び標準偏差を利用し、逆関数法を適用して、メルセンヌツイスター法で生成した 40 点の擬似一様乱数を正規分布の擬似乱数に変換)、これを対数値(log Y) から実数値(Y) に変換。

6.2.3.2.3 一様分布の場合

- a) メルセンヌツイスター法で擬似乱数(範囲 0~1 の擬似一様乱数)を 40 点生成。
- b) 40点の擬似一様乱数を,放射化計算の条件として設定した最小値から最大値の範囲に 変換。

6.2.3.2.4 指数分布の場合

- a) メルセンヌツイスター法で擬似乱数(範囲 0~1 の擬似一様乱数)を 40 点生成。
- **b) JIS Z 9031**: 2012 に示されている標準指数分布に関して使用できる擬似乱数の生成方法に準じ、放射化計算の条件として設定した指数分布の式($y=e^{-x}$)の両辺を対数に変換。
- c) Y (対数) =擬似乱数 (40点) とし, x を算出。

6.2.4 適用例

附属書Iの濃度比を用いる場合の適用例の評価において整理した難測定核種及び Key 核種の散布図に関して、元素成分条件が放射能濃度データのばらつきに与える影響の程度を把握するために、附属書Iの放射化計算で得られた各核種の放射能濃度データ(放射化計算結果)を利用した検討例を示す。

- a) **放射化計算結果の補正** 元素成分条件の影響を暫定的に排除するために,放射化計算 結果について,次の手順で補正を行った。
 - 1) 各核種の放射能濃度を, **附属書 G** に示した起源元素の選定における二次スクリーニングの元素別の放射能濃度の比を利用し、起源元素別の核種生成量(放射能濃度)として比例配分した。
 - 2) 各起源元素の放射化計算用入力データ (元素成分条件の 40 点のデータ) ごとに,放射化計算用入力データと元素成分条件設定の平均値との比を算出した。
 - 3) 各核種の放射化計算結果 (40 点の結果) ごとに, 1) で算定した起源元素別の放射能 濃度を, 2) で算定した各元素成分条件との比を利用して, 元素成分条件の平均値相 当の放射能濃度に補正した。
 - 4) 核種ごとに, 3) で元素成分条件の平均値相当に補正した起源元素別の放射能濃度を 集計(合計)した。
- b) 元素成分条件が放射化計算結果に与える影響 a) で補正した各核種の放射能濃度データを利用し、ZrTN804D 及び SUS304 の代表的な核種について、補正前後の放射能濃度を比較した結果を、解説図 4 及び解説図 5 に示す。いずれの核種についても、難測定核種と Key 核種(⁶⁰Co) との相関関係は、補正後のほうが向上しており、各放射化計算のばらつきは、元素成分条件の影響が大きいことが分かる。

さらに、 60 Co の減衰などが放射化計算結果に与える影響の可能性もあるため、参考として、Key 核種を仮に 63 Ni とした場合の散布図を、**解説図 6** に示す。この結果に基づけば、補正後の難測定核種と 63 Ni との濃度比のばらつきは、ほとんどない(相関係数 $\stackrel{5}{=}$ $\stackrel{1.0}{=}$ \stackrel

したがって、放射化計算で得られた各核種の放射能濃度データのばらつきは、基本的に、元素成分条件のばらつき、Key 核種とした ⁶⁰Co の減衰などに起因して生じている。

6.2.5 濃度比の決定方法

附属書Iにおいて利用した、放射能濃度を評価するための濃度比を決定するために必要な放射化計算結果(評価データ数)の充足性を判断するための相関係数の安定性による評価方法の例を、次に示す。

a) 相関係数 相関係数とは,二つの確率変数の間の相関を示す統計指標であり,相関係数 (r) は,二つの確率変数 x, y を利用した次式で表す。原則,単位はなく, $-1\sim1$ の間の値をとり,1 に近い場合は,二つの確率変数には,正の相関があるといい,-1 に近ければ負の相関があるという。また,0 に近い場合は,確率変数の相関は弱い。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (y_i - \overline{y})^2}}$$

- b) 相関係数の安定性による充足数の評価方法 相関係数の安定性を使用した評価データ数の充足性の判断については、解説図7に示すとおり、相関関係を示す二変量のデータ群(データベース)を使用して、評価データが集められている各段階における相関係数の安定性について、次の2種類の統計量を用いて比較評価することで判断する。
 - 相関係数の平均値:複数のサンプリングデータの相関係数の平均値。
 - 相関係数の信頼下限値 : 将来的に相関係数が下がる可能性の範囲 (下限値)。

まず、採取又は計算したデータ数ごとに、データベースからランダムにデータをサンプリングする作業(サンプリングするデータ数は3点から開始)を、複数回(**解説 図7**では50回)繰り返し、各々のサンプリングするデータ数ごとに算出した50点の相関係数の平均値を、当該データ数における相関係数の平均値として表示した。

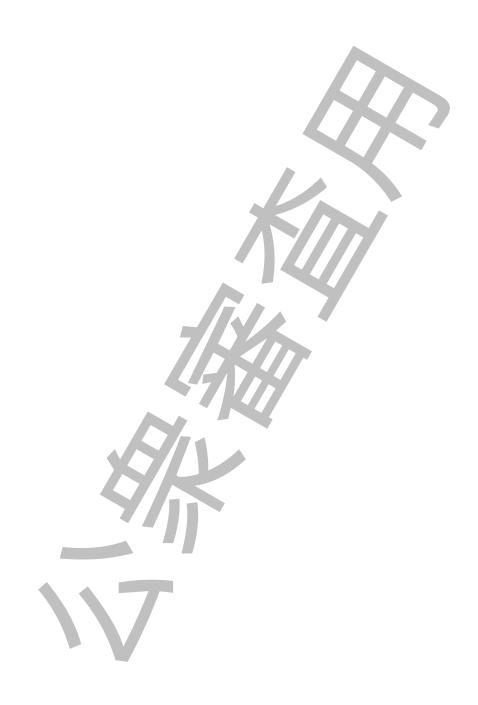
例えば、放射化計算によって集積されたデータ数(集積データ数)が 20 の場合、データベースからランダムに 20 点のデータをサンプリングし、この 20 点のデータで相関係数を算出する。これを複数回繰り返し、得られた複数の相関係数の平均値を、**解説図 7** のデータ数=20 における相関係数の平均値として図示している。また、各集

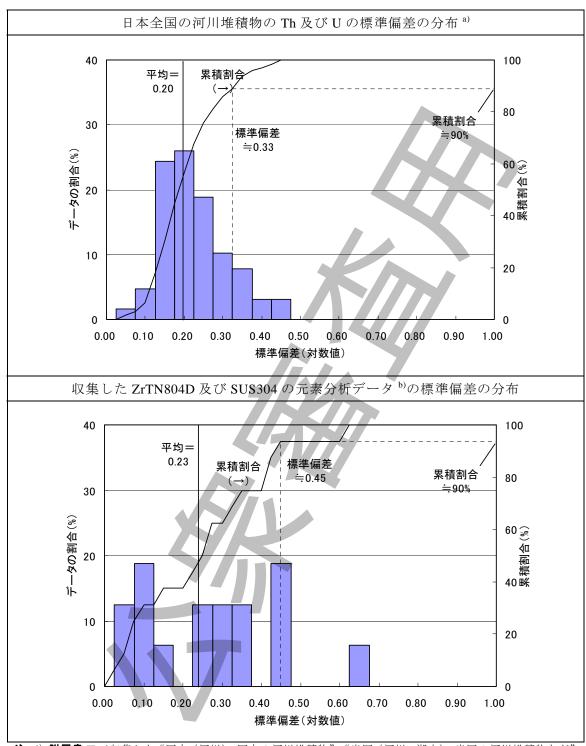
構成 700 700 3 年 20 におりる相関係数の平均値として因がしている。また、音楽積データ数における"相関係数の 95 %信頼下限値"も合わせて算出し、同様の方法で相関係数の 95 %信頼下限値の平均値を図に示した。

この両者の間隔が、相関係数の安定性の状態を示し、95 %信頼下限値が相関係数の 平均値に斬近し、95 %信頼下限値の上昇率が低下するほど、統計値が安定していることを示している。

なお、データ数の充足の程度は、二変量の相関係数に依存するので、相関係数に応じた目安としての目標数量を報告した事例もある(**解説表 5** 参照)。この結果に基づ

けば、相関係数が 0.6 以上の相関関係をもつデータ群であれば、40 点程度のデータを 集積することで統計量は、十分安定するといえる。

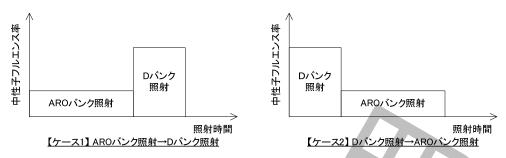




注 a) 附属書 H で収集した "国内 (河川): 国内の河川堆積物", "米国 (河川・湖水): 米国の河川堆積物など", "地殻: 中国, コロンビア, マライタ島 (西太平洋ソロモン諸島), 豪州の地殻"の元素成分データ。

解説図 1-同一の濃度分布を設定する元素の標準偏差の分布

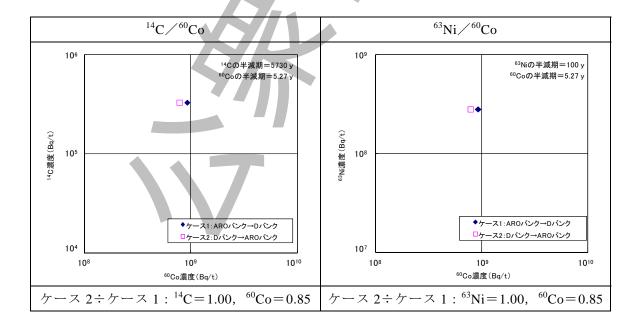
b) **附属書I**で収集した ZrTN804D 及び SUS304 の元素分析データ(元素分析データ及び文献データ)のうち、 濃度分布形状に対数正規分布を設定し、かつ、標準偏差が設定可能(元素分析データ数が比較的少ない 元素に相当)である元素の元素分析データ。



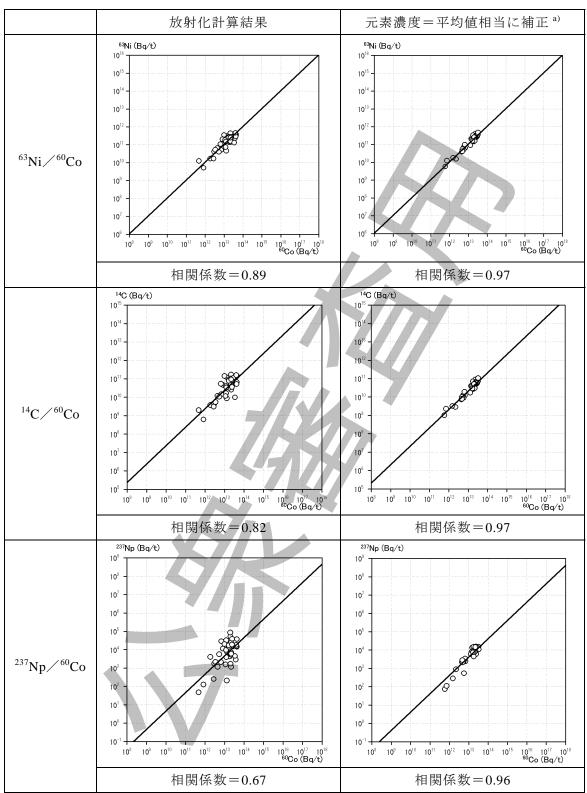
解説図 2-PWR 制御棒の最終照射条件の異なる極端な配置位置の組合せ

放射化計算用入力データ 放射化計算の条件 (項 目) Dバンク ARO バンク 元素成分条件 SUS304 (各元素の詳細は、**附属書 I** 参照) ケース 1: ARO バンク照射から D バンク照射 配置位置の 中性子 組合せ ケース 2: D バンク 照射から ARO バンク 照射 条件 軸方向位置 先端から 0.02 m 同左 $2.1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ $5.5\!\times\!10^{13}\;n/cm^2/s$ 中性子フルエンス率 1.8 y 中性子 照射時間 10.8 y 5.4 y (稼働率 70 %, 均等設定) 照射条件 照射停止時間

解説表 4-主な放射化計算の条件 (概要)

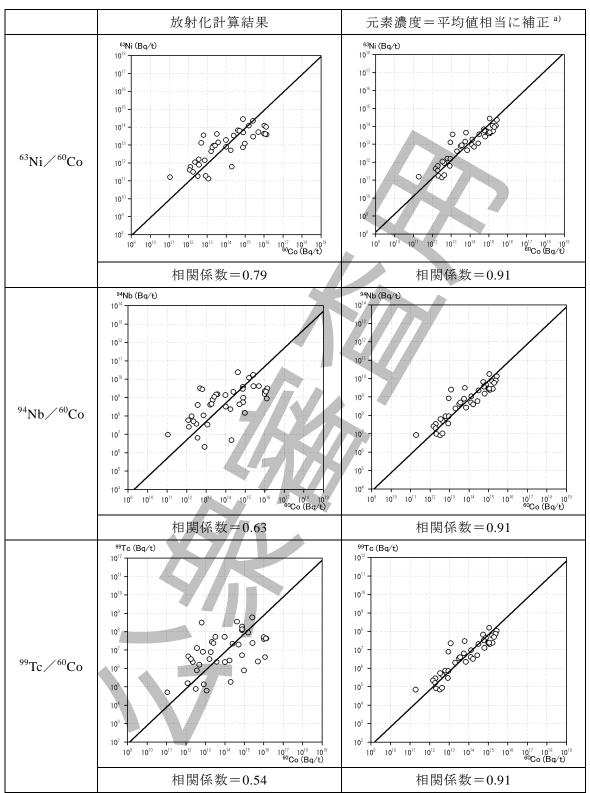


解説図3-極端な配置位置の組合せでの各核種の放射能濃度の比較



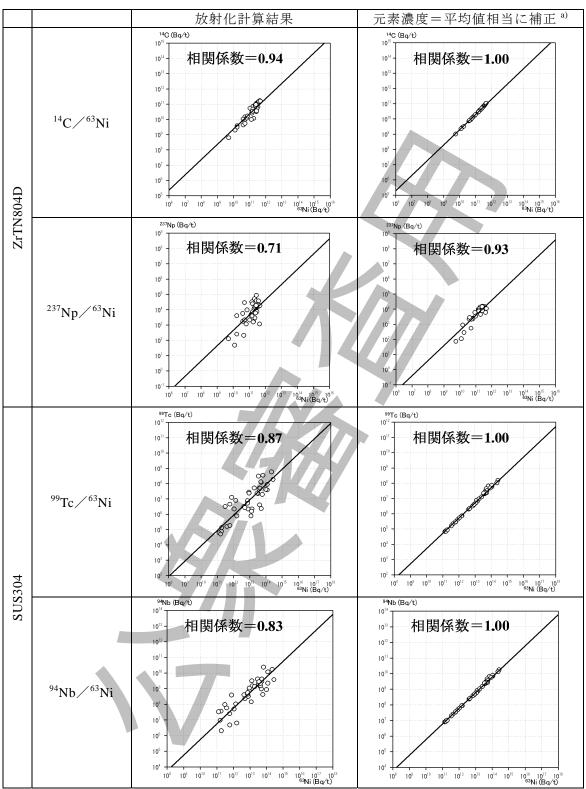
注 **) **附属書 G** の二次スクリーニングの放射能濃度の比を利用した起源元素別の放射能濃度の算定を行い、これを元素濃度の平均値となるよう比例補正した。

解説図 4-元素成分条件が放射化計算結果に与える影響 (ZrTN804D の場合)



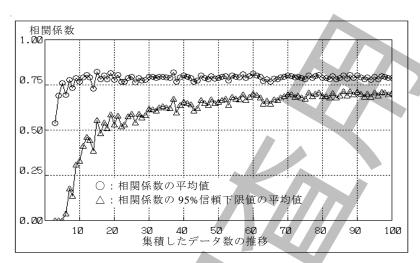
注 a) **附属書 G** の二次スクリーニングの放射能濃度の比を利用した起源元素別の放射能濃度の算定を行い、これを元素濃度の平均値となるよう比例補正した。

解説図 5-元素成分条件が放射化計算結果に与える影響(SUS304 の場合)



注) 附属書 G の二次スクリーニングの放射能濃度の比を利用した起源元素別の放射能濃度の算定を行い、これを元素濃度の平均値となるよう比例補正した。

解説図 6^{-60} Co の減衰などが放射化計算結果に与える影響 $(Key 核種を ^{63}Ni とした場合の元素成分条件が放射化計算結果に与える影響)$



解説図 7-相関係数 0.8 を示すデータ群における統計値の安定性の評価例[6]

解説表 5-相関関係ごとの統計量が安定したと判断される集積データ数[6]

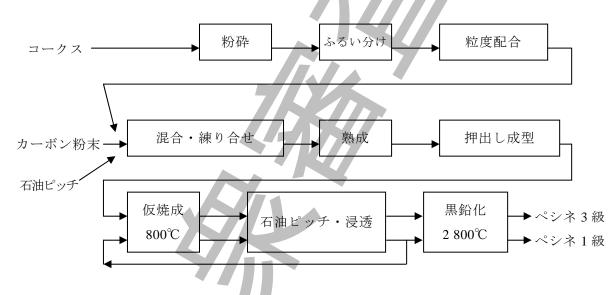
		相	関 係	数	_
	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
統計量の安定に必要な 集積データ数	40	35	30	25	20

6.3 濃度分布評価法を用いる場合の基本的な考え方及び計算例

附属書 K では、評価対象とする放射化金属等として、黒鉛減速材を東海発電所 (GCR) から発生する代表廃棄物として選定している。東海発電所に用いられていた黒鉛減速材は、フランスの天然ウランー黒鉛型原子炉開発計画を遂行するためにフランス原子力庁の技術指導で研究開発されたものであり、主な特長は、細粒のコークスを原料として作られ、材料の方向性が小さく、機械的強度が大きく、かつ密度、熱中性子吸収断面積などの品質が均質なことである。

ここで、当時の黒鉛減速材の製造場所、製造時期及び製造方法を、次に示す。[7]

- a) **黒鉛減速材の製造場所** 黒鉛は、ペシネ社の Chedde 工場で製造された。また、同社 の原子炉用黒鉛の製造能力は、毎月約 500 トン以上であった。
- **b) 黒鉛減速材の製造時期** 東海発電所の原子炉・炉心用黒鉛は,1962 年~1963 年に製造された。
- c) 黒鉛減速材の製造方法 ペシネ社の黒鉛の製造工程を,解説図8に示す。



解説図8-ペシネ黒鉛の製造工程

黒鉛の製造工程は、原料として細かく粉砕・ふるい分けし、粒度配合を行ったテキサス・ロックポート・コークス(Texas Lockport Cokes)及びカーボン粉末を約77%、及び石油ピッチ約23%を、約150℃で混合し、十分に練り合わせる。さらに、約100℃で熟成させ内部の気泡などを取り除く。

この混合物を、押し出し成型機で丸棒状に連続押し出し、所要の長さに裁断する。 次に、この粗成型物を約800℃で仮焼成し、含有・有機物を分解・炭化させるとともに 分解ガスを発散させる。

黒鉛のかさ比重を高めるために、真空減圧下で約 220℃で仮焼成した黒鉛の気孔中に、さらに石油ピッチを浸透させ仮焼成を行う。この石油ピッチ浸透・仮焼成工程の

繰り返し回数によって黒鉛のかさ比重を適当に制御でき、ペシネ1級黒鉛とは2回浸透処理、ペシネ3級黒鉛とは1回浸透処理したものである。

浸透処理・仮焼成後,黒鉛化炉に入れて1週間~2週間の間,約2800℃に保ち,黒鉛化を行う。この工程で微結晶は,成長するとともに,非結晶部分は,結晶して黒鉛になる。また,大抵の不純物は,高温のため気化・蒸発するが,核的性質上,特に,存在量をできるだけ少なくしたいホウ素などを除去するために,アルカリフッ化物などを使用してフッ化ボロンの形で揮発させる。黒鉛化温度からの冷却時には,熱応力による割れなどを避けるために徐々に冷却される。

このようにして製造された丸棒状の黒鉛素材は、粗加工後、フランス原子力庁のマルクール工場に送られ、品質検査を受けるとともに、六角ブロック状に仕上げ加工される。

6.4 原廃棄物分析法の基本的な試料採取方法

6.4.1 原廃棄物分析法の適用実績

原廃棄物分析法については、浅地中ピット処分対象廃棄物ではあるが、旧原子力安全基盤機構の技術評価報告書 JNES-EV-2013-9005^[8]にて浜岡原子力発電所から発生する均質・均一固化体(セメント固化体), JNES-EV-2013-9006^[9]にて柏崎刈羽原子力発電所から発生する均質・均一固化体(セメント固化体)に対して、原廃棄物分析法の適用性が評価されている。また、いずれの場合においても、セメント固化体の放射能濃度決定方法として、固型化処理前の廃棄物から試料を採取し、放射化学分析等によって得られる評価対象核種と Key 核種 (JNES-EV レポートでは指標核種と呼んでいる) との核種組成比と個々の廃棄体外部による非破壊測定結果とを組み合わせる方法が示されており、原廃棄物分析法は、評価対象核種と Key 核種 (指標核種) との核種組成比の設定に利用されている。

6.4.2 貯蔵タンク内の均一混合処理

E.2.1 に示した貯蔵タンク内の均一混合処理法は、貯蔵タンクの形状、均一混合の処理方法などによって異なるものの、基本的には、処理時間(かくはん(撹拌)時間、循環時間など)によって、貯蔵タンク内の均一性が判断できる。

貯蔵タンク内の均一性の判断条件として、**解説図 9** 及び**解説図 10** に示すとおり、処理時間(かくはん(撹拌)時間、循環時間)に対して、貯蔵タンク内の放射性核種の濃度、循環ラインの表面線量当量率を測定し、これが安定する時間を判断条件する報告もある^{[8]、[9]}。また、貯蔵タンク内の放射性核種の濃度をほぼ均一にするための循環時間として、貯蔵タンクの容量分を循環させる考え方も報告されている^[10]。ただし、これらの報告では、均一混合が比較的容易である液体を対象としているため、粒状の使用済樹脂などの均一混合処理を考える場合は、廃棄物自体の性状などに対し更なる考慮が必要となる。

6.4.3 廃棄物の均一混合性が確認できない場合の試料採取方法

E.1.2.2 に示した廃棄物の均一混合性が確認できない場合の試料採取方法は、貯蔵タンク

の仕様、運用状況などによって異なるものの、基本的には、貯蔵タンクから直接、又は貯蔵タンク周辺からの試料採取が基本となる。廃棄物の均一混合性が確認できない場合の試料採取方法の参考とするため、一般産業分野における貯蔵タンク及びその周辺の試料採取方法として、次のJIS 規格の主な内容などの整理を行った。

- JIS K 2251:2003 原油及び石油製品-試料採取方法

JIS K 2251:2003 は、原油、石油製品、半製品、タンク残留物及び堆積物の試料を、固定タンク、パイプラインなどから採取する方法について規定したものである。JIS K 2251:2003 に一例として示された試料の採取方法のうち、廃棄物の均一混合性が確認できない場合の代表試料採取の考え方の参考となる方法を、解説表 6 に示す。原子力発電所の使用済樹脂の貯蔵タンクを想定した場合、適用可能な JIS K 2251:2003 に示される試料採取方法として、固定タンクの試料採取を想定した"タンク内の試料採取方法"、"循環ライン試料採取方法"、及び送液ラインからの試料採取を想定した"連続ライン試料採取方法"の3種類の方法が摘出される。各採取方法の概要を、次に示す。

a) タンク内の試料採取方法 おもり付き採取器などによる貯蔵タンク内からの試料採取方法は、蒸気圧(リード法 4) が 180 kPa 以下の液体試料を固定タンクなどから採取する方法である。おもり付き採取器などを利用して固定タンクから一次試料を採取する。一次試料には、全層試料、ランニング試料、定点試料などがあるが、使用済樹脂等の貯蔵タンク内が、必ずしも放射能濃度が一定とはいえない場合を想定すれば、貯蔵タンク内の放射能濃度分布のばらつきを把握する観点では、"定点試料を採取する方法"が使用済樹脂等の代表試料採取方法の参考になる。

なお、固定タンクの一次試料の採取個数については、直立円筒形タンクでは、3点法 5 、2点法 6 、1点法 7 によって、横置円筒形タンクでは、**解説表7**による数量を採取する。採取した一次試料は、混合して二次試料(放射化学分析対象試料)とする。

b) 循環ライン試料採取方法 タンク循環ラインからの試料の採取方法は、蒸気圧(リード法)が 180 kPa以下の液体及び半流動体試料を固定タンクの循環ラインから採取する方法である。この方法を適用するに当たっては、タンクの内容物が均一であり、十分な時間でライン内を循環しているなど、採取した試料がロットの品質の平均的特性をもつものであることを、あらかじめ確認しておく必要がある。

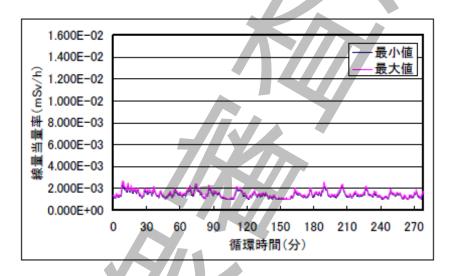
試料採取に先立ち、十分な時間でラインを循環させ、循環中又は循環を止めて短時間内に一次試料を採取し、これをそのまま二次試料(放射化学分析対象試料)とする。

- c) 連続ライン試料採取方法 連続試料の送液ラインからの採取方法は、蒸気圧(リード法)が110 kPa以下の液体及び半流動体試料を送液ラインから、連続的に採取する方法である。
 - 一次試料の採取方法は、手動の場合、試料の単位時間当たりの採取量を求め、サンプリング装置を通る試料の流速が、ラインを通る試料の流速にほぼ等しいように調整

した上で、試験に必要な量を試料受け器に連続、又は初期、中期、後期試料(それぞれ、全移送量の1/6、1/2、5/6移送した時点で採取した試料)を断続的に採取し、これをそのまま二次試料とする。

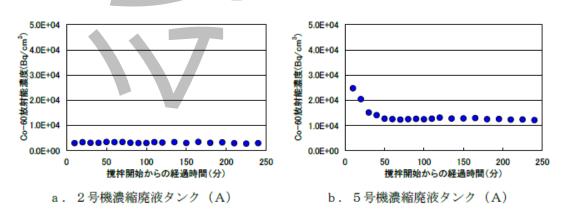
なお、試料の採取に当たり、自動採取装置を設置した方法を採用することも可能で ある。

- **注** "JIS K 2258-1:2009 原油及び石油製品 蒸気圧の求め方 第1部: リード 法"に定める蒸気圧の測定方法。
 - 5) 油深が 5 m を超えるタンク又は船槽では、上・中・下の各部から採取する。
 - 6) 油深が3m~5mのタンク又は船槽では、上及び下の各部から採取する。
 - ⁷⁾ 油深が3m未満のタンク又は船槽では、できるだけ油深の中央部付近から 採取する。



注記 図は、タンク内のかくはん(攪拌)のために行った廃液の循環の初期から終期まで、配管の表面線量当量率の最大値と最小値との差異が小さいこと[すなわち,タンク内が均一にかくはん(撹拌)されている状態であること]を示している。

解説図 9一貯蔵タンクの配管(循環ライン)の表面線量当量率と循環時間との関係[8]



解説図 10一貯蔵タンク内の放射性核種の濃度とかくはん(撹拌)時間との関係[9]

解説表 6-JIS K 2251:2003 の試料採取方法 (抜粋)

11 DATE OF OTHER TERMINATION OF BANK LINEAR ALL MARTINE							
ロットの種類		一次試料 a)		二次試料 b)名			
		試料名 採取方法名					
静止	固定タンク	上部試料 °)	タンク内の試	平均試料 j)			
ロット	(直立円筒形タン	中部試料 d)	料採取方法	混合試料 k)			
	ク,横置円筒形タン	下部試料 e)		単タンク混合試料 ¹⁾			
	クなど)			複数タンク混合試料 m)			
		循環ライン試料 ^{f)}	循環ライン試	/			
			料採取方法	_			
移動	ライン	初期試料 g)	連続ライン試	混合試料 k)			
ロット	(循環・送液ラインな	中期試料 h)	料採取方法	連続試料 ")			
	ど)	後期試料 i)					

注記 用語は、この標準に合わせて変更している。

- 注 a) ロットから直接採取した試料の総称。
 - b) 一次試料を等量混合,等比混合などで調整し、ロットの代表値として試験などに用いる試料 の総称。
 - c) タンク内液の表面から油層の 1/6 の深さから採取した試料。
 - d) タンク内液の表面から油層の 1/2 の深さから採取した試料。
 - e) タンク内液の表面から油層の 5/6 の深さから採取した試料。
 - ^{f)} タンク内の原油及び石油製品を均一にするための循環ライン系に設けられた採取口から、代表試料が得られるように採取した試料。
 - g) ロット移送中の送液ラインの全移送量の初めの 1/6 から採取した試料。
 - h) ロット移送中の送液ラインの全移送量の 1/2 から採取した試料。
 - i) ロット移送中の送液ラインの全移送量の 5/6 から採取した試料。
 - ^{j)} タンクなどの各部から採取した<mark>試料を</mark>,各部の量の比に混合した試料。
 - k) 同一タンクから採取した2か所以上の定点試料を,等量混合した試料。
 - ¹⁾ 同一タンク内の,各部の試料を混合した試料。直立円筒形タンクのように均一横断面をもつ ものの場合は,各部を等量混合した試料をいう。横置円筒形タンクの場合には,**解説表7**に よって採取し,混合した試料をいう。
 - m) 同一製品の原油及び石油製品が入っているタンク、船などの各ハッチから全層試料を採取し、これを各タンク又はハッチの油量の比に混合した試料。
 - n) ロット移送中の送液ラインから代表試料を得るように、連続採取した試料。

解説表 7-JIS K 2251:2003 における横置円筒形タンクの試料採取位置及び試料混合比

THUS, OR IN THE PROPERTY OF TH						
油深 (直径に対する%)	採取位置		試料混合比			
	(直径に対する底部からの距離%)			(上中下での体積比)		
	上	中	下	F	中	下
100	80	50	20	3	4	3
90	75	50	20	3	4	3
80	70	50	20	2	5	3
70	_	50	20	7	6	4
60	_	50	20	-	5	5
50	_	40	20	-	4	6
40	_	-	20	_	_	10
30	_	- (15	_	_	10
20	_	_	10	_	_	10
10	_		5	_	_	10



6.5 廃棄体中の放射能濃度の確認に対する基本的な考え方

6.5.1 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

M.3.2 の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方法の一例として、浅地中ピット処分対象廃棄物ではあるが、JNES-EV-2013-9005^[8]にて浜岡原子力発電所から発生する均質・均一固化体(セメント固化体)、JNES-EV-2013-9006^[9]にて柏崎刈羽原子力発電所から発生する均質・均一固化体(セメント固化体)に対して、放射能濃度の評価値に評価精度(ばらつき)を踏まえた保守性を加味する方法が示されている。

具体的には、試料採取時及び分析時の評価精度(ばらつき)を評価し、このばらつきから評価される保守性を、原廃棄物分析法で設定する評価対象核種と Key 核種(JNES-EV レポートでは指標核種と呼んでいる)との核種組成比に加味している(放射化学分析結果で算出した核種組成比に保守性を加えた値を、放射能濃度決定用の核種組成比として設定している)。

なお、JNES-EV-2013-9005^[8]、JNES-EV-2013-9006^[9]とも、上記の核種組成比への保守性の加味は、M.3.2 の最大放射能濃度を超えないことの確認だけでなく、M.3.1 の埋設放射能の確認に利用する核種組成比に対しても同一の保守性を加味している(核種組成比(評価値)の妥当性を、保守性を加味することで担保している)。

6.5.2 最大放射能濃度を超えないことを確認する方法

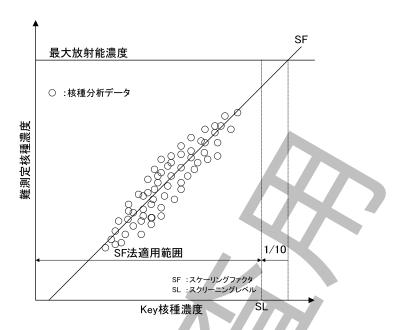
廃棄体の放射能濃度が最大放射能濃度を超えないことを確認する方法の一例として,浅 地中ピット処分対象廃棄物の放射能濃度決定方法の一つである"スケーリングファクタ法" 適用時の"スクリーニングレベル"の考え方を,次に整理した。

なお、スケーリングファクタ法は、**附属書 M** に示す "廃棄物グループを代表する平均的な放射能濃度を評価する方法"に該当する。

a) スケーリングファクタ法の適用範囲 浅地中ピット処分対象廃棄物の放射能濃度決定にスケーリングファクタ法を適用する場合は、スケーリングファクタを決定した核種分析データ (放射化学分析データ) のばらつきを考慮し、確認の対象となる放射能濃度の値が最大放射能濃度の10分の1となるよう運用上の制限を設けている。

具体的には、**解説図 11** に示すとおり、スケーリングファクタが難測定核種の最大放射能濃度と交差する点の Key 核種濃度の 10 分の 1 を、"スクリーニングレベル"とし、これを超えない濃度範囲が、スケーリングファクタ法を適用できる範囲としている。

b) 最大放射能濃度を超えないことの確認方法 浅地中ピット処分対象廃棄物の廃棄確認では、スケーリングファクタ法を適用する核種ごとにスクリーニングレベル (すなわち、スケーリングファクタ法を適用できる Key 核種濃度の上限値)を定めて制限することによって、非破壊外部測定で計測した Key 核種の放射能濃度が "スクリーニングレベル"を超えていないことを確認することによって、難測定核種が最大放射能濃度を超えないことを確認している。



解説図 11-スケーリ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)

6.6 放射能濃度決定方法の適用において必要な管理

この標準に示す放射能濃度決定方法を適用する場合、廃棄体中に収納されている廃棄物が、理論計算法の適用条件の範囲内にあることを確認する必要がある。このためには、放射能濃度を決定するための算定条件を把握する、又は評価係数(換算係数、濃度比など)を適切に選択するための、廃棄体中の廃棄物の履歴情報⁸⁾が必要となる。

これらの放射能濃度決定方法から求められる廃棄物の履歴情報の把握,すなわち,廃棄体製作時の廃棄物の管理を行うことが重要となる。この管理項目については, AESJ-SC-F015 を制定した 2010 年当時には、含んでいたものであるが、その後、中深度処分対象廃棄体の製作及び検査方法を示す日本原子力学会標準 AESJ-SC-F-014:2015 "余裕深度処分対象廃棄体の製作要件及び検査方法"が制定され、この標準の附属書 Fに放射能濃度決定方法の適用において必要な管理項目として反映された。

このため, AESJ-SC-F-014:2015を参考にすることとし,この標準からは、削除した。

注 8) 放射化計算の算定条件又は評価条件を把握するための廃棄物の情報。材料,中性子の照射 条件,発生場所,廃棄物処理の条件などが該当する。

6.7 検出困難元素の濃度分布評価方法

6.7.1 背景及び経緯

放射化計算においては、分析による検出が困難で元素分析データに検出下限値しか得られない検出困難元素の元素成分条件の設定が必要となる場合もある。この場合、元素成分 条件の設定に、保守的に、検出下限値を利用することも考えられる一方で、設定値に過度 な保守性をもつ可能性が懸念される。

AESJ-SC-F015:2010では、上記の状況を踏まえ、元素分析データが非常に少ない又は検出下限値しかない検出困難元素の元素成分条件を、濃度分布を仮定して設定する考え方を示している(表 D.5 及び表 D.6 参照)。しかしながら、検出困難元素の濃度分布の具体的な評価方法は、AESJ-SC-F015:2010の標準解説に一例を示しただけであり、この方法は必ずしも無条件で適用できるわけではなく、元素濃度データを収集し妥当性を確認した上で、適用の可否の判断が必要であるとも記載している。

このため、材料工学を含む各分野の専門家を委員とした"検出困難元素の濃度分布評価検討会"(以下、有識者検討会)において、具体的な検出困難元素の濃度分布評価方法が検討され、その検討結果(以下、有識者検討会の報告書)が公開された[11]。

附属書 H では、有識者検討会の報告書を踏まえた上で、検出困難元素の濃度分布評価方法を適用する場合の基本的な考え方を H.2 に示すとともに、評価例として有識者検討会の報告書の概要を H.3 に示した。

なお、有識者検討会では、中深度処分施設を想定した安全評価(線量評価)において相対的に重要となる核種(概念的には埋設放射能上の裕度があまりなく、放射能評価上の重要度が高いといえる核種)のうち、材料中の起源元素の検出性が低いと考えられた Cl(Cl-36を生成)、Th 及び U (I-129、種々の α 核種などを生成)を評価対象元素として選定している。また、材料は、BWR から発生するチャンネルボックスの主材料である ZrTN804D、及び PWR の制御棒、BWR、PWR の炉内構造物の主要材料である SUS304 を、評価対象として選定している。

6.7.2 適用除外する元素濃度データ

a) ジルコンの Th 及び U の元素濃度データの除外 H3.1 に示したとおり、有識者検討会の報告書では、ウラン鉱山及びジルコンに関する文献から収集された Th 及び U の元素濃度データは、適用除外データとしている。これは、ウラン鉱山及びジルコンでは、Th 及び U が部分濃縮しているため、微量成分元素の元素濃度データとして適切でないことに配慮した措置である。

このうち、ジルコンについては、次に示す特徴によって、濃度のばらつき(設定する標準偏差)が大きくなる傾向があると報告されている[11]。

- ジルコン ($\mathbf{ZrSiO_4}$) は、 \mathbf{Zr} が \mathbf{Hf} , \mathbf{Th} , \mathbf{U} などによって置換され、ハフノン ($\mathbf{HfSiO_4}$)、トール石 ($\mathbf{ThSiO_4}$)、コフィン石 ($\mathbf{USiO_4}$)などの同形鉱物を生成し、広い組成変化を示す。
- Th 及び U は、鉱物結晶中に取り込まれにくく、マントル物質の溶融によってマグマが生じると鉱物結晶からマグマに放出され、マグマの固化後に花崗岩などの岩石中に濃集する。
- ジルコンの晶析する温度の範囲が広く、また、温度範囲によって Th, U の含有量が異なる。

有識者検討会の報告書において,文献調査で収集した Th 及び U の元素濃度データ(ジルコン含む)を利用した評価結果においても,ジルコンの元素濃度データのばらつき (各データ群の標準偏差)が大きくなることが確認された(解説図 12 参照)。

b) 検出下限値が含まれているデータ群の扱い 文献を収集し整理したデータ群であって も、検出下限値データを含んだ場合もあり、必ずしも対称性をもつ対数正規分布になっているとは限らない(対数正規分布の低濃度側の裾が示されない場合もある)。検 出下限値データをもつデータ群については、対数正規確率紙などを利用した補正評価 を行った上で、検出困難元素の濃度分布評価に利用することも考えらえたが、有識者 検討会の報告書では、正確を期す意味で、評価上は除外している。

6.7.3 データ数が少ないデータ群の標準偏差

H.3.2 に示したとおり、Cl、Th、Uの全データ群の標準偏差に、明らかな濃度依存性は認められなかったと評価している。

一方,**解説図 13** に示すとおり,データ数の少ないデータ群では、標準偏差の変動範囲が大きい傾向も認められた。このため,有識者検討会の報告書では、標準偏差の変動が特に大きいデータ数が 5 点以下のデータ群に着目し、全データ群での評価及びデータ数が 5 点以下のデータ群を除いた条件での評価(2 種類の評価)を行い、標準偏差の同等性の確認を行っている。

なお、**図 H.7** から**図 H.12** には、標準偏差の同等性を、より明確に確認できるデータ数が、5 点以下のデータ群を除いた条件での評価結果を示している。

6.7.4 材料の製造工程の影響の確認

- a) **ZrTN804D 中の Cl の標準偏差 ZrTN804D** の製錬工程では、大量の Cl を添加しているが、その後の還元及び溶解工程での加熱によって、添加された Cl は全て除去される。このため、直接的には、"鉱物、岩石などからの試料"の Cl の濃度分布(標準偏差)は、**ZrTN804D** 中に維持されない。
 - 一方,有識者検討会の報告書では, **H.3.2 c)**に示すとおり, CI の濃度分布(標準偏差) は物理的要因(温度, 圧力)に支配され, かつ, "鉱物, 岩石などからの試料"と製造工程中との温度環境に大きな違いがないことから, 両者の標準偏差を同等とみなしている。

この点について、有識者検討会の報告書では、製造工程中の温度環境(ZrTN804D の真空溶解工程は約1700°C)でのCl の濃度分布について、環境中で熱影響(マグマの温度は ~ 1300 °C程度)などを受けた地殻試料(火成岩など)中のCl の濃度データなどを利用し、次の評価を行っている。

- 一般に(地球科学の分野では),マグマ分化作用(晶出温度の違いによる岩の分化・ 生成)によって種々の火成岩ができる(**解説図 14** 参照)。

- 火成岩の種類ごとに、各データ群の CI の標準偏差と濃度との関係を評価した結果、 生成温度の上昇に伴い CI 濃度は低くなるが、標準偏差に大きな差異は見受けられ い (解説図 15 及び解説図 16 参照)。
- ZrTN804D 中の Cl は、"鉱物、岩石などからの試料"の元素データより低い濃度を示す可能性はあるが(ZrTN804D の温度環境は環境中で火成岩が受ける温度より高いため)、標準偏差への影響は小さい。
- b) "鉱物,岩石などからの試料"と材料中との標準偏差の比較 有識者検討会の報告書では、材料中で検出された微量成分元素の濃度データを利用し(検出困難元素は検出下限値データしか得られないため)、"鉱物、岩石などからの試料"の標準偏差の範囲と材料中の元素の標準偏差との比較を行い、実際に、"鉱物、岩石などからの試料"の元素の標準偏差の範囲に材料中の元素の標準偏差の範囲が包含されることを評価している。

評価は、SUS304 の Mo 及び Nb に対して行われ、"鉱物、岩石などからの試料"の元素濃度データは、H.3.1 と同様の方法で収集し、材料中の元素濃度データは、表 G.6 に相当する元素濃度データが利用されている。"鉱物、岩石などからの試料"と材料中との元素濃度データを比較した結果を、解説図 17 に示す。

Moでは、材料中のほうが"鉱物、岩石などからの試料"の濃度範囲より高い値を示した。この原因として、SUS304の原材料としてスクラップが利用されており、この中に Mo が含まれていることが考えられた。しかしながら、材料中の Mo の標準偏差は、"鉱物、岩石などからの試料"の平均値より高い値を示すものの、"鉱物、岩石などからの試料"の元素濃度データの標準偏差のばらつきの範囲に包含されていた。

Nb も同様に、材料中の元素濃度データの標準偏差は、"鉱物、岩石などからの試料"の元素濃度データの標準偏差のばらつきの範囲に包含されていた。

上記を踏まえ,有識者検討会の報告書では,検出困難元素の濃度分布評価の前提として, "鉱物,岩石などからの試料"の元素濃度分布(標準偏差)は材料中でも維持されるとして問題ないとしている。

なお、SUS304 の原材料使用されるスクラップに Mo が含まれている可能性があるように、ほかの元素に対しても同様の事象が生じる可能性も否定はできないが、一般には当該元素が添加されたスクラップと、添加されていないスクラップとを混合して利用した場合、材料中の標準偏差は"鉱物、岩石などからの試料"の標準偏差より大きくなる(元素濃度データのばらつきは大きくなる)と考えられる。

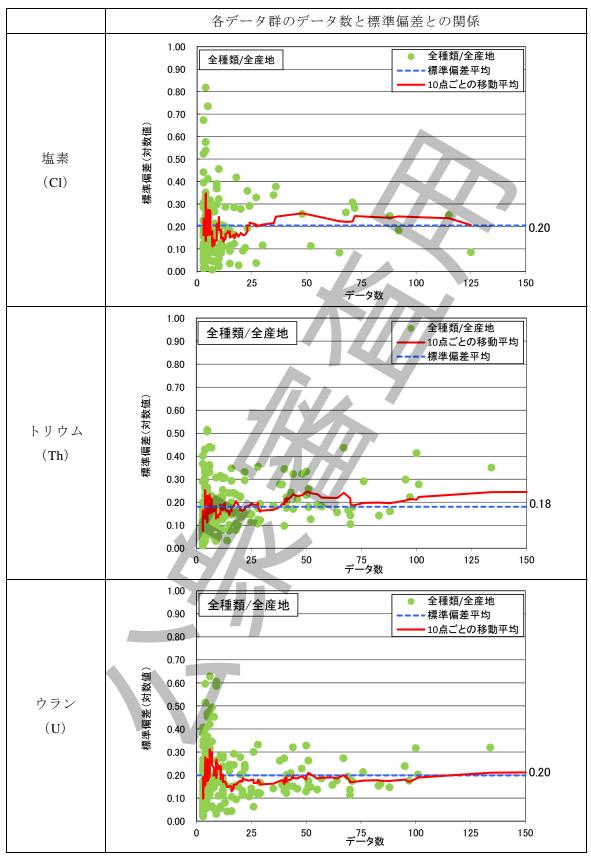
このため、有識者検討会の報告書では、検出困難元素の濃度分布評価(元素成分条件の設定)において、"鉱物、岩石などからの試料"の標準偏差を用いることによって、放射能濃度の評価結果が過小評価にはならないと考察されている。

6.7.5 対数正規確率図上での相関係数について

H.3.3 a) に示すとおり、有識者検討会の報告書では、元素濃度データの適切な利用範囲の評価に適用するために(利用する各データ群の信頼性などを向上させる目的で)、データ群ごとに元素濃度データを対数正規確率図(元素濃度と累積度数との関係)にプロットし、対数正規確率図上の相関係数を算出している。具体的には、解説図 18 に示すように、データ群ごとに元素濃度データを対数正規確率図(元素濃度データと累積度数との関係)にプロットし、この図での相関係数を算出している。



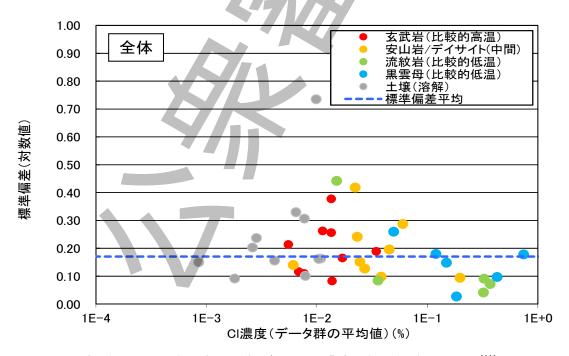
解説図 12-ジルコンの Th, U の元素濃度データが標準偏差の設定に与える影響[11]



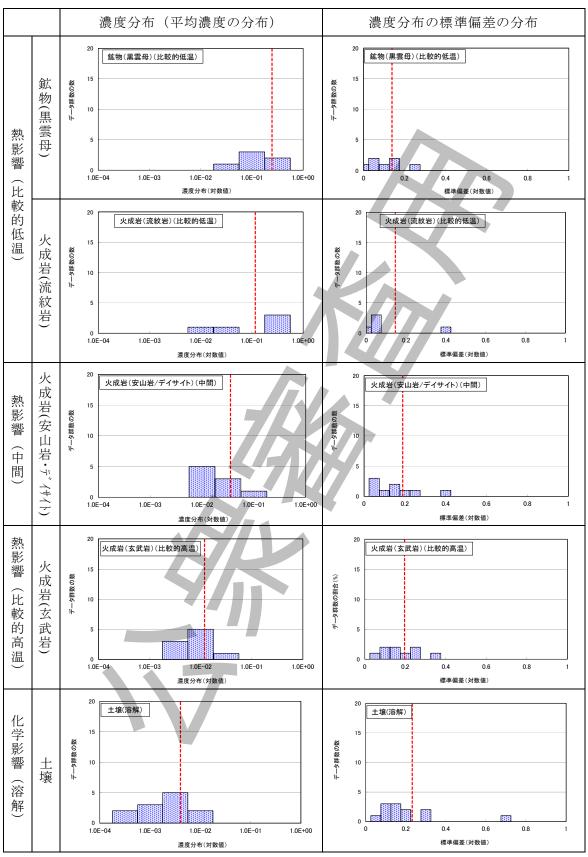
解説図 13-各データ群のデータ数と標準偏差との関係 $^{[11]}$

温度		比較的高温	中間	中間	比較的低温
凡例					
模豆	式 図				
マグマ温度					
		1200度	*		800度
種別	火成岩	玄武岩,	安山岩,	デイサイト	流紋岩
		斑れい岩	せん(閃)緑岩		D10.127.71
	鉱物	かんらん石	輝石	角せん(閃)石	黒雲母

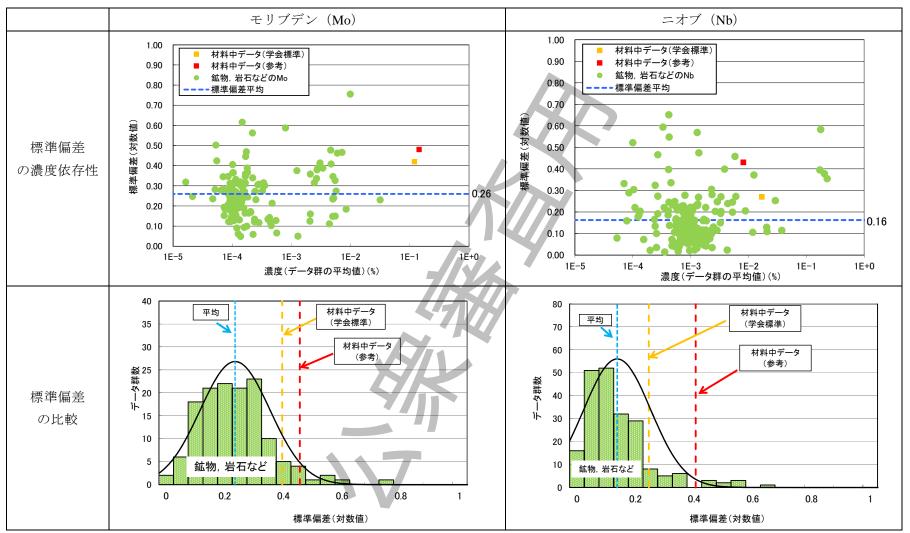
解説図 14-マグマの分化のイメージ図[11]



解説図 15-地殻試料の種類ごとの CI 濃度の標準偏差との関係[11]

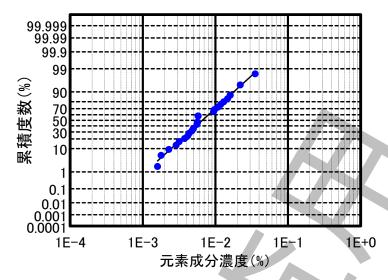


解説図 16-地殻試料の種類ごとの Cl 濃度の比較[11]



注記 原図では"自然界"の用語を使用しているが、用語の統一を図り"鉱物、岩石など"とした。

解説図 17- "鉱物、岩石などからの試料"と材料中との元素濃度データの標準偏差の比較[11]



(データ数=27, 相関係数=0.991)

注記 元素,産地,種類を区分した一つのデータ群の例

解説図 18-対数正規確率図上の相関関係の評価例[11]

参考文献

- [1] ISO 21238:2007 Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants (The contents taken from ISO 21238:2007 are reproduced with the permission of the International Organization for Standardization, ISO. The ISO standards can be obtained from ISO member (Japanese Standards Association: http://www.jsa.or.jp) and from the Web site of the ISO Central Secretariat at the following address: http://www.iso.org. Copyright remains with ISO.)
- [2] **ISO 16966**:2013 Theoretical activation calculation method to evaluate the radioactivity of activated waste generated at nuclear reactors
- [3] "廃止措置技術ハンドブック 除染・解体・再利用編",(財)原子力発電技術機構, 2007 年 5 月
- [4] JNES-SS-0403 "平成 10 年度以降に発生する充填固化体に対するスケーリングファクタ等の継続使用について",(独)原子力安全基盤機構,2005年3月
- [5] Y. Aoki, N. Shichida, M. Nomura, T. Mukohara, E., M. Obata, "THE RATIO OF RADIOACTIVITY OF THE CRUD TO THE BASE METAL IN THE PIECES TAKEN FROM A BWR CHANNEL BOX", IRPA Regional Congress AOCRP-3, The Third Asian and Oceanic Congress on Radiation Protection, Tokyo Japan, May 24-28, 2010
- [6] M. Kashiwagi, W. Müller and B.Lantès, Considerations on the Activity Concentration Determination Method for Low-Level Waste Packages and Nuclide Data Comparison between Different Countries (International Conference on the Safety of Radioactive Waste Management 13-17 March 2000, Cordoba, Spain, IAEA-CN-78/43, 2000)
- [7] 中野正明,見上寿,市毛秀明,塚田真一,"理論計算法を用いた余裕深度処分対象 廃棄物の放射能濃度決定による GCR 減速材の放射能評価例",日本原子力学会 第 26回バックエンド夏期セミナー,資料集,名古屋,2010年8月2日~4日
- [8] JNES-EV-2013-9005 "中部電力㈱浜岡原子力発電所で製作される均質・均一固化体の廃棄確認方法について",(独)原子力安全基盤機構,平成26年2月
- [9] JNES-EV-2013-9006 "東京電力㈱柏崎刈羽原子力発電所で製作される均質・均一固 化体の廃棄確認方法について",(独)原子力安全基盤機構,平成26年2月
- [10] 原子力安全委員会 "発電用軽水型原子炉施設における放出放射性物質の測定に関する指針",昭和53年9月29日 (原子力委員会決定),平成13年3月29日一部改定
- [11] 北海道電力株式会社,東北電力株式会社,東京電力株式会社,中部電力株式会社, 北陸電力株式会社,関西電力株式会社,中国電力株式会社,四国電力株式会社,九 州電力株式会社,日本原子力発電株式会社,電源開発株式会社,日本原燃株式会社, "平成25年度 検出困難元素の濃度分布評価について",平成26年7月