

NRA 技術報告

NRA Technical Report Series

使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における モンテカルロコードによる遮蔽評価結果の 信頼性確認手法

Method for confirming the reliability of shielding analysis results using a Monte Carlo code for transportation and storage of spent fuels

後神 進史

GOKO Shinji

システム安全研究部門

Division of Research for Reactor System Safety

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

原子力規制委員会

Nuclear Regulation Authority

令和8年3月

March 2026

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究等の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ システム安全研究部門
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電話：03-5114-2223
ファックス：03-5114-2233

使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における モンテカルロコードによる遮蔽評価結果の信頼性確認手法

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
システム安全研究部門
後神 進史

要 旨

使用済燃料等の輸送・貯蔵分野で実施されている遮蔽安全解析では、我が国においては、簡易遮蔽計算コードや離散座標 Sn コード等が主に使用されてきたが、近年では確率論的な解法に基づくモンテカルロ粒子輸送計算コード（以下「モンテカルロコード」という。）の使用頻度が増加傾向にあり、金属キャスク等の許認可申請において用いられるケースが増加している。モンテカルロコードでは、入力パラメータの種類や入力できる条件の制限等がこれまでの解析コードとは異なるため、計算結果の妥当性を確認する際の観点等も異なることとなるが、原子力規制庁では、その妥当性を迅速に確認するための知見が不足している状況であった。そこで、原子力規制庁では、この問題を解決するために、令和2年度から令和5年度にかけて安全研究プロジェクト「使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法の研究」¹を実施した。研究の中では、外部専門家による検討委員会を開催し、モンテカルロコードを用いた金属キャスク体系及び使用済燃料乾式貯蔵施設体系の遮蔽評価結果の信頼性確認手法を検討した。また、検討内容の定量的な確認のために、入力パラメータが計算結果へ与える影響を感度解析により検証した。さらに、モンテカルロ法による計算結果の統計的な信頼性を確認する方法の検討に資する解析を行い、それらの結果に基づく検討委員会での議論に基づき、成果を取りまとめた。

本技術報告では上記の研究内容を取りまとめた遮蔽評価結果の信頼性確認手法について報告するとともに、確認内容の留意点を得るために実施した検証解析の条件及び結果並びに結果に対する考察について解説する。

Method for confirming the reliability of shielding analysis results using a Monte Carlo code for transportation and storage of spent fuels

GOKO Shinji

Division of Research for Reactor System Safety,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

In Japan, simplified shielding calculation codes and discrete ordinate Sn codes are mainly used for shielding safety analysis in the fields of transportation and storage of spent fuels. In recent years, Monte Carlo particle transport calculation codes based on a probabilistic solution method are being increasingly used in the licensing process. To utilize these new calculation codes, new perspectives are required to assess the validity of the calculation results obtained using various types of input parameters and calculation condition constraints. However, the Nuclear Regulation Authority (NRA) lacks the knowledge to assess these results quickly. Therefore, to obtain the knowledge necessary to validate the calculation results using new Monte Carlo codes, NRA conducted a safety research project “Research on evaluation methods related to the latest analysis techniques in the fields of transportation and storage of spent fuels” from the fiscal year 2020-2023. As a part of this project, method for confirming the reliability of shielding analysis results for the geometries of the metal cask and the spent fuel dry storage facility on the results of the shielding calculations using the Monte Carlo codes was discussed by a review committee of external experts. To quantitatively confirm the results of the above discussion, the influence of input parameters on the calculation results was verified by sensitivity analyses. Additionally, several analyses were conducted to provide information for considering methods to verify the statistical reliability of the Monte Carlo calculation results. The research findings were compiled through discussions in the review committee based on these calculation results.

This technical document presents the method for confirming the reliability of shielding analysis results that were obtained as a finding of research on these topics. It also explains the conditions and results of the validation analysis to obtain some notable points for confirmation, as well as considerations regarding the analysis results.

5.1	モンテカルロ法遮蔽解析結果の信頼性確認の流れ.....	86
5.2	モンテカルロ法遮蔽解析結果の信頼性確認項目の検証.....	90
5.2.1	分散低減法.....	90
5.2.2	解析結果の収束性.....	100
5.2.3	解析結果の空間連続性.....	108
5.3	基準に対する評価結果の確認.....	110
5.4	モンテカルロ法遮蔽解析結果の信頼性確認のまとめ.....	113
6.	まとめ	118
	謝辞	119
	参考文献一覧	120
	執筆者一覧	124
	付録 モンテカルロコードの解析結果に付随する統計指標.....	125

表 目 次

表 3.1	金属キャスクの基本解析における線源条件	10
表 3.2	金属キャスクの基本解析における物質組成	11
表 3.3	金属キャスクの基本解析の線量評価結果	14
表 3.4	各種の中性子源エネルギースペクトルを用いた場合の キャスク外部線量の比較	20
表 3.5	中性子増倍の影響評価に設定した燃料部組成と中性子源強度分布	21
表 3.6	燃料集合体型式及び燃焼計算の条件	22
表 3.7	中性子増倍の取扱い方法による金属キャスク外部線量への影響比較	25
表 3.8	燃料収納部のモデル化による金属キャスク外部線量への影響比較 (②集合体モデル)	29
表 3.9	燃料収納部のモデル化による金属キャスク外部線量への影響比較 (③燃料棒モデル)	29
表 3.10	燃料集合体のバスケット内配置による金属キャスク外部線量への影響比較 ...	32
表 3.11	中性子遮蔽材の減損を考慮した物質組成	33
表 3.12	中性子遮蔽材の密度減損による金属キャスク外部線量への影響比較	35
表 3.13	核データの開発状況	36
表 3.14	核データ影響解析における計算ケース	37
表 3.15	核データの種類による金属キャスク外部線量への影響比較 (中性子)	38
表 3.16	核データの種類による金属キャスク外部線量への影響比較 (二次ガンマ線)	38
表 3.17	核データの種類による金属キャスク外部線量への影響比較 (FP ガンマ線)	39
表 3.18	核データの種類による金属キャスク外部線量への影響比較 (構造材放射化ガンマ線) ...	39
表 3.19	核データの種類による金属キャスク外部線量への影響比較 (全線量)	40
表 3.20	レジンに対する $S(\alpha, \beta)$ の設定による金属キャスク外部線量への影響比較	42
表 3.21	確認項目、確認内容及び留意点 (金属キャスク)	44
表 4.1	使用済燃料乾式貯蔵施設の基本解析の線源強度	53
表 4.2	使用済燃料乾式貯蔵施設の基本解析の物質組成	54
表 4.3	使用済燃料乾式貯蔵施設の基本解析結果	57
表 4.4	線源設定による敷地境界線量への影響比較	60
表 4.5	外部遮蔽物による敷地境界線量への影響比較	63

表 4.6	キャスクモデルによる線量への影響比較	66
表 4.7	コンクリートの組成による影響評価における元素組成比	67
表 4.8	コンクリートの組成による敷地境界線量への影響比較	69
表 4.9	空気の組成に対する計算ケース	72
表 4.10	空気の組成による敷地境界線量への影響比較	73
表 4.11	大地の組成による影響評価における物質組成	75
表 4.12	大地の組成による敷地境界線量への影響比較	75
表 4.13	高さ 0 m と 20 m での実効線量比（近似曲線による評価）	77
表 4.14	確認項目、確認内容及び留意点（使用済燃料乾式貯蔵施設）	80
表 5.1	MCNP コードにおける 10 個の統計チェック項目	86
表 5.2	分散低減法の検証に対する計算ケース	93
表 5.3	分散低減法検証の計算結果（①キャスク遮蔽体の深層透過）	95
表 5.4	分散低減法検証の計算結果（②コンクリートの深層透過）	95
表 5.5	分散低減法検証の計算結果（③遮蔽体及び欠損部）	96
表 5.6	分散低減法検証の計算結果（④迷路ストリーミング）	97
表 5.7	分散低減法検証の計算結果（⑤スカイシャイン）	98
表 5.8	分散低減法検証の計算結果（⑥迷路ストリーミング及びスカイシャイン）	99
表 5.9	確認項目、確認内容及び留意点（解析結果の信頼性）	114

目 次

図 1.1	評価結果の信頼性確認手法の全体の流れ	2
図 2.1	金属キャスクの遮蔽解析の流れの例	5
図 2.2	使用済燃料乾式貯蔵施設の遮蔽解析の流れの例	5
図 3.1	金属キャスクの解析条件の妥当性確認全体の流れ	6
図 3.2	金属キャスクの各解析条件の妥当性確認の流れ	7
図 3.3	金属キャスクの基本解析に使用した体系モデル	13
図 3.4	周方向で平均した側部表面での線量分布	15
図 3.5	周方向で平均した側部表面から 1m での線量分布	15
図 3.6	周方向で平均した蓋部表面での線量分布	16
図 3.7	周方向で平均した蓋部表面から 1m での線量分布	16
図 3.8	周方向で平均した底部表面での線量分布	17
図 3.9	周方向で平均した底部表面から 1m での線量分布	17
図 3.10	中性子エネルギースペクトルの比較（使用済燃料）	19
図 3.11	中性子増倍計算に用いた燃料棒の寸法及び バスケット中央付近の燃料集合体モデル	22
図 3.12	McGuire 2 号機 17×17 型燃料集合体の燃焼度分布と計算に用いた 階段状に近似された燃焼度分布	23
図 3.13	燃料収納部の解析モデル	27
図 3.14	燃料集合体のバスケット内配置の変化に関する感度解析ケース	31
図 3.15	S(α,β)の設定によるレジン中での中性子エネルギースペクトルの比較	42
図 4.1	使用済燃料乾式貯蔵施設の解析条件の妥当性確認全体の流れ	49
図 4.2	使用済燃料乾式貯蔵施設の各解析条件の妥当性確認の流れ	50
図 4.3	使用済燃料乾式貯蔵施設の体系モデル	55
図 4.4	敷地境界線量評価の体系モデル	56
図 4.5	中性子エネルギースペクトルの比較（金属キャスク表面）	60
図 4.6	ガンマ線エネルギースペクトルの比較（金属キャスク表面）	61
図 4.7	直接線のための敷地境界線量評価モデル	62
図 4.8	貯蔵建屋外表面の線量評価位置	65
図 4.9	コンクリート中の水分量と敷地境界（0°方向）における線量との関係	70
図 4.10	コンクリートの密度と敷地境界（0°方向）における線量との関係	70
図 4.11	敷地境界での高さ方向線量分布（距離 500 m、0°方向）	77
図 4.12	敷地境界での高さ方向線量分布（距離 500 m、90°方向）	78
図 4.13	敷地境界での高さ方向線量分布（距離 500 m、180°方向）	78
図 5.1	解析結果の信頼性確認全体の流れ	87

図 5.2	解析結果の各信頼性確認の流れ	88
図 5.3	分散低減法検証の計算体系	94
図 5.4	解析結果の収束性確認のための図の例	101
図 5.5	ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向 (側部中央表面)	103
図 5.6	ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向 (側部中央表面から 1m)	103
図 5.7	ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向 (頭部軸方向表面)	104
図 5.8	ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向 (頭部軸方向表面から 1m)	104
図 5.9	ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向 (頭部径方向表面)	105
図 5.10	ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向 (頭部径方向表面から 1m)	105
図 5.11	ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向 (底部軸方向表面)	106
図 5.12	ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向 (底部軸方向表面から 1m)	106
図 5.13	ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向 (底部径方向表面)	107
図 5.14	ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向 (底部径方向表面から 1m)	107
図 5.15	解析結果の空間連続性検証のための計算体系	109
図 5.16	解析結果の空間連続性検証の計算結果	110
図 5.17	信頼区間の概念図	111
図 5.18	信頼区間の設定及び妥当性確認の例	112

略 語 表

ENDF	Evaluated Nuclear Data File (米国製の評価済み核データライブラリ)
FOM	Figure of Merit (モンテカルロコードにおける計算効率に係る統計指標)
FP	Fission Products (核分裂生成物)
JENDL	Japanese Evaluated Nuclear Data Library (日本製の評価済み核データライブラリ)
MCNP	Monte Carlo N-Particle (米国製のモンテカルロコードの名称)
PDF	Probability Density Function (モンテカルロコードにおける確率密度関数に係る統計指標)
PHITS	Particle and Heavy Ion Transport code System (粒子・重イオン輸送統合コードシステム)
PWR	Pressurized Water Reactor (加圧水型原子炉)
VOV	Variance of the Variance (モンテカルロコードにおける分散の分散を示す統計指標)
V&V	Verification and Validation (検証と妥当性確認)

用語の定義

アクチノイド核種	原子番号 89 のアクチニウムから原子番号 103 のローレンシウムまでの元素であり、すべて放射性核種。
一回散乱コード	ガンマ線によるスカイシャイン線量を計算するための簡易遮蔽計算コードの一つ。
核燃料輸送物	輸送容器に放射線源となる核燃料等（輸送対象物）を装荷し輸送荷姿の状態にしたもの。
核分裂生成核種 （核分裂生成物）	ウラン等のアクチノイド核種が核分裂反応を起こした後に残る分裂片の原子核。
確率密度関数（PDF）	モンテカルロコードにおいて、タリーに記録された計算結果の確率密度の分布を示す関数であり、統計指標の一つ。
簡易遮蔽計算コード	モンテカルロコード、測定データ等により事前に求めてデータベース化した透過率等に基づき、評価条件に対する近似解を短時間で得る計算コード。
（金属）キャスク	新燃料、使用済燃料、放射性廃棄物等の輸送及び使用済燃料の貯蔵のために構造強度、除熱機能、閉じ込め機能、遮蔽機能及び臨界防止機能を持つ堅牢な容器。金属製及びコンクリート製があるが、本書では金属製のキャスクのみを扱う。
グラウンドシャイン	本書では、放射線が大地を構成する物質と散乱を起こすことで、より遠くまで到達する現象を指す。地表面に沈着した放射性物質からの被ばく影響を意味する場合もある。
計装用案内シンプル	PWR 用の燃料集合体を炉心に装荷する際に、燃料集合体内の所定の位置に炉内計装機器をスムーズに導入するために設置されるガイド管。
検証と妥当性確認 （V&V）	解析コードの数値解法精度を検証し、測定値との比較によって解析結果の妥当性を確認することにより、解析コードの予測性能を定量評価する技術。英表記の Verification and Validation より一般的に V&V と呼ばれる。
使用済燃料乾式貯蔵施設	原子力発電所で発生した使用済燃料を再処理するための準備として、乾式の金属キャスクに収納して数十年間冷却するための施設。
初期濃縮度	製造直後の核燃料に含有されるウラン原子における ^{235}U の割合。
随伴線束	線源から評価位置への輸送計算の逆問題として、両者を入れ替えた計算により求まる線束分布。
スカイシャイン	内部に放射線源を有する施設の天井部等を放射線が透過し、上空

	において大気を構成する物質と散乱を起こすことで、遠方の地表面付近に到達する現象。
ストリーミング	放射線が遮蔽体間の空隙や遮蔽材欠損部を通過することで、周囲より透過率が高くなる現象。
正確度	測定値や計算値において、真値への近さを表す尺度であり、系統誤差の小ささに相当する。
制御棒	中性子の運動を阻害することにより、運転中の原子炉の出力を制御するために使用される部材。
制御棒案内シンプル	PWR 用の燃料集合体を炉心に装荷する際に、燃料集合体内の所定の位置に制御棒をスムーズに導入するために設置されるガイド管。
性能指標 (FOM)	モンテカルロコードにおいて、統計誤差及び計算時間との関係から計算効率を表す統計指標。
線源バイアス	モンテカルロコードにおける分散低減機能の一つで、線源のエネルギー、角度分布等に対し、評価結果に寄与の高い成分の比率を高める代わりに輸送粒子の weight (重み) を下げる操作を行うことにより、統計的なバランスを保ちつつ計算効率を上げる方法。
タリー	モンテカルロコードにおいて、指定領域を通過する粒子数、エネルギー等を集計して計算終了後に出力する機能であり、現実における測定器と同様の役割を果たす。
断面積ライブラリ	放射線と物質の相互作用の確率を示す反応断面積をデータベース化した評価済み核データに基づき、解析コードの計算に活用するためにコンピュータライブラリ化したもの。
中性子増倍	核分裂性核種が中性子を吸収して核分裂を起こす際に、1 個以上の中性子を放出することにより、領域内の中性子数が増加する現象。
直接線	放射線源から評価位置方向に放出され、線量等の評価結果に寄与を与える放射線成分。
統計誤差	モンテカルロコードの計算結果である正規分布の平均値に対する相対標準偏差 (平均値と平均値の標準偏差の比) を意味する。なお、参考文献 2 に記載された「相対誤差」と同じ概念である。
統計指標	統計量としての性質を持つモンテカルロコードの解析結果の信頼性を確認するために用いられる統計的な状態を示す評価値。
トラニオン	金属キャスクをクレーンで吊り上げる、又は架台に固定する際に使用される部位。金属キャスクを支持する構造強度が必要なために中性子遮蔽材を使用することが難しく、周辺部とは遮蔽構造が

二次ガンマ線	異なることが多い。 物質を構成する原子核に中性子が吸収されて核変換が起こる中性子捕獲反応の一環として、生成された娘核種の脱励起により放出されるガンマ線。
熱出力	原子炉の出力を、核燃料物質の核分裂反応により放出される熱エネルギーとして表現したもの。
燃焼計算	原子炉内の環境において起こる各種の核反応のネットワーク(燃焼チェーン)を計算し、生成核種や放射能強度、発熱量を評価するもの。
燃焼度	核燃料の燃焼(核分裂反応)による消費の度合いを、重量当たりの熱出力に燃焼時間を乗じて表現したもの。
バスケット	金属キャスク内に複数の燃料集合体等を装荷する領域を区切るための格子状の仕切り板。
バーナブルポイズン (可燃性毒物)	原子炉の余剰反応度を調整するために使用される中性子吸収効率の高い物質で構成されたもの。
比出力	原子炉の出力を、核燃料物質の単位質量当たりの熱出力として表現したもの。
ヒストリー数	モンテカルロコードにおいて、放射線源から輸送粒子を発生させ、粒子輸送の追跡を行った試行回数。
分散低減機能	モンテカルロコードで計算を行う際に、輸送粒子に weight(重み)パラメータを設定し人為的な操作を加えること等により、計算効率を向上させる機能。
分散の分散 (VOV)	モンテカルロコードにおいて、タリーに記録された計算結果の確率密度関数の 3 次及び 4 次モーメントに基づき、統計誤差の相対変化を表す統計指標。
ボイド	放射線輸送計算において、物質の存在しない真空として定義される空間領域。
放射化計算	安定核種の中性子捕獲反応により生成された放射性核種の放射能強度を評価する計算。
放射線輸送計算	想定する体系内において放射線粒子が起こす運動として、他の粒子との衝突による散乱、吸収、体系外への漏出等の全てに対する計算。
モンテカルロ粒子輸送 計算コード (モンテカルロコード)	コンピュータで発生させた疑似乱数を用いて統計的現象の数値シミュレーションを行うモンテカルロ法により、放射線粒子の物質中の輸送現象をボルツマン輸送方程式に基づき確率論的に解く詳細計算コード。本書では、広い適用範囲を持つ汎用コードを

離散座標 Sn コード	対象としている。 解析体系の空間、角度及びエネルギーを離散化して位相空間を作成し、その相互関係をボルツマン輸送方程式に基づいて放射線粒子の物質中の輸送現象を決定論的に解く詳細計算コード。主に遮蔽解析及び臨界解析に使用される。
臨界計算	核分裂連鎖反応による体系の中性子増倍率から臨界状態について評価するために行われる計算。
ACE 形式ライブラリ	MCNP、PHITS 等のモンテカルロコードの計算で使用できるフォーマット形式で編集された断面積ライブラリ。
Cell Importance 法	モンテカルロコードの分散低減機能の一つで、計算に使用する空間を領域分割し、それぞれに設定されたパラメータにより輸送粒子の分割及び消滅、並びに weight (重み) を制御することで、計算効率を向上させる方法。
MCNP コード	米国のロス・アラモス国立研究所で開発され、米国の原子力許認可の遮蔽安全解析における主流であり、我が国の遮蔽安全解析においても近年利用頻度が高まっているモンテカルロコード。
Next Event Estimator	モンテカルロコードの分散低減機能を持ったタリーの一つで、輸送計算中に輸送粒子と物質との衝突イベントが起こる度に、衝突点からタリーへの寄与を計算して積算することにより、効率的に評価結果である線量値等を推測する機能。
PHITS コード	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が中心となって開発した国産のモンテカルロコード。
Weight Window 法	モンテカルロコードの分散低減機能の一つで、計算に使用する空間及びエネルギーを領域分割し、それぞれに設定されたパラメータにより輸送粒子の分割及び消滅、並びに weight (重み) を制御することで、計算効率を向上させる方法。
(α, n)反応	原子核が α 粒子を吸収して複合核を形成した後に中性子を一つ放出する相互作用。

1. はじめに

1.1 背景

「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(昭和 32 年法律第 166 号) 第五十九条第三項に基づき放射性物質を収納した輸送容器(核燃料輸送物)について承認を受けようとする者は、「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」(昭和 53 年総理府令第 57 号)に規定する線量基準を同容器が満足することを示す必要がある。また、発電用原子炉の設置許可を受けた者が同法律第四十三条の三の八に基づき、附属施設として使用済燃料乾式貯蔵施設を設置するために変更の許可を受けようとする場合は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」(平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号)及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」(平成 25 年原子力規制委員会規則第 6 号)に規定する線量基準に対して満足することを示す必要がある。さらに、同法律第四十三条の四に基づき、使用済燃料の貯蔵の事業の許可を受けようとする者は、「使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」(平成 25 年原子力規制委員会規則第 24 号)に規定する線量基準に対して満足することを示す必要があり、これらは通常、遮蔽解析コードにより評価される。

我が国においては、当該分野の許認可申請に係る遮蔽解析では、これまで簡易遮蔽計算コード、離散座標 Sn コード等が主に使用されてきたが、近年ではモンテカルロコードの使用頻度が増加傾向にある。これまでの決定論的な解法とは異なり、確率論的な解法に基づく計算コードを使用するに当たり、解法の変更による入力パラメータの違い、入力できる条件の制限の違い等により、計算結果の妥当性を確認する際の観点等が異なることとなるが、それらを適合性審査において確認するための知見が不足している状況であった。同種の知見については日本原子力学会において輸送容器を対象とした検討結果「放射性物質輸送容器のモンテカルロ法による遮蔽安全評価手法のガイドライン原案の策定」²が平成 24 年度にまとめられているが、貯蔵分野への適用、近年進展した計算機能の評価等については検討されておらず、参照できる研究成果が限られている状況であった。

1.2 本技術報告の位置づけ

原子力規制庁では、1.1 節に記載した背景の状況に鑑み、令和 2 年度から令和 5 年度にかけて安全研究プロジェクト「使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法の研究」¹(以下「プロジェクト」という。)を実施した。当該研究では、中性子の遮蔽評価が必要であるとの事情もあり、近年の許認可申請でモンテカルロコードの活用が増加している金属キャスク及び使用済燃料乾式貯蔵施設を対象とした。それらの適合性審査において、モンテカルロコードを用いた遮蔽評価結果の信頼性確認を適切に実施するため、図 1.1 に示す確認手法の全体の流れの各要素である「解析条件の妥当性確認」及

び「解析結果の信頼性確認^(注1)」それぞれの確認手法について知見を拡充した。また、請負事業（令和3年度から令和5年度 使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法案の高度化）³⁻⁵において「遮蔽解析コード（モンテカルロコード）の信頼性確認手法案に関する高度化検討委員会」（以下「検討委員会」という。）を設置し、先行研究成果²等を参照しながら関連分野の専門家による議論に基づき検討を進め、令和5年度請負事業成果物⁵の一部として、検討委員会に承認を受けた「使用済燃料等の輸送・貯蔵におけるモンテカルロ法放射線遮蔽解析の評価結果の信頼性確認手法」を整備した。

本技術報告には、前述の請負事業成果物に基づき、規制側の視点による確認の流れ、確認項目及び確認内容を記載した。さらに、確認内容の詳細及び根拠を明確にするために、米国製モンテカルロコード MCNP⁶、国産モンテカルロコード PHITS⁷による検証解析の結果等を基に確認内容の技術的妥当性を評価し、検証解析の条件及び結果並びに結果に対する考察より得られた確認内容の留意点を記載した。それらの内容は、原子力規制庁における適合性審査での遮蔽解析結果の妥当性確認に活用可能である。

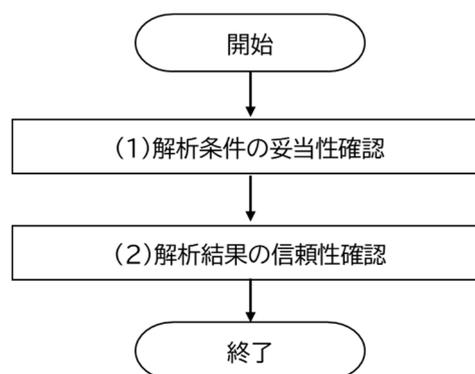


図 1.1 評価結果の信頼性確認手法の全体の流れ

Fig.1.1 Overall flow of the method for confirming the reliability of analysis results

1.3 本技術報告の適用範囲及び注意事項

本技術報告は 1.2 節に記載したように金属キャスク及び使用済燃料乾式貯蔵施設を対象とした安全研究で実施した解析や検討の結果に基づいている。金属キャスクは主に輸送貯蔵兼用の乾式金属キャスクを想定しており、それ以外にも輸送用、貯蔵用、湿式の金属キャスク等があるが、類似性が十分であれば（場合によっては部分的に）本技術報告の適用は可能である。使用済燃料乾式貯蔵施設は複数の乾式金属キャスクを収納するコンクリート構造物を想定しており、それ以外にも現状の我が国では未導入のコンクリートキャスク、サイロ型の貯蔵施設等があるが、後述する空気の組成変化に対する影響等、共通する事象に対しては本技術報告の部分的な適用を検討することは可能である。一方で、燃焼計算等

^(注1)本技術報告では、モンテカルロ法による解析結果の統計的な信頼性についての確認内容を主な対象としている。

による線源評価は対象外であり、ダブルチェック等の解析全般の品質保証に関する信頼性確認作業は対象外である。また、後述している信頼性確認項目として、解析コードの信頼性や正確度（Accuracy）が確認されていることを求めている。これは、モンテカルロコードの利用方法として正しくあったとしても、使用済燃料の輸送・貯蔵における遮蔽解析への適用性がなければ、評価全体として正しいことが説明できないためである。モンテカルロコードの適用性に関しては、上記請負事業にて整備した「使用済燃料等の輸送・貯蔵におけるモンテカルロ法放射線遮蔽解析の検証と妥当性確認の手順書」⁵に基づいて NRA 技術報告としてまとめ、別途公表予定である。許認可申請においてモンテカルロコードが利用された場合、使用済燃料の輸送・貯蔵の分野におけるコード予測性能の幅を定量化してモンテカルロコードそのものの適用性を明らかにし、本技術報告を参照してモンテカルロコードの遮蔽評価結果の信頼性を確認することの二つをもって適切な評価が実施されることを想定している。

また、本技術報告に掲載した検証解析は近年主流となっている輸送・貯蔵に係る機器又は施設的设计情報を参照して構築した独自のモデルに対する解析結果であり、多様な設計の全てを代表できるものではない。したがって、本技術報告の検証解析に係る記載内容は、解析条件の変化に対する解析結果への影響を評価することにより、解析結果が持つ保守性を相対評価したものであり、解析結果の絶対値は検証解析対象の遮蔽性能の本質を表したのではなく、定量的な判断基準を提供する性質のものではないことに注意が必要である。

2. 許認可申請における金属キャスク又は使用済燃料乾式貯蔵施設の遮蔽解析の概要

2.1 適合性審査における確認事項

発電用原子炉の設置変更許可申請に係る金属キャスクの設計等が、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）及び同規則の解釈（原規技発第 2403133 号）、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（平成 25 年原子力規制委員会規則第 6 号）及び同規則の解釈（原規技発第 2310116 号）に規定する要求事項を満たすことを審査官が判断する際に参考とするものとして、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」（原規規発第 20033110 号）（以下「審査ガイド」という。）がある。「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」及び審査ガイドには具体的な線量基準の数値が示されており、線量基準の代表例として、審査ガイドにおける遮蔽機能に関する確認事項を以下に抜粋する。

【審査における確認事項】

- (2) 通常貯蔵時の兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を 100 μ Sv/h 以下とすること。
- (3) 通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で 50 μ Sv/y 以下となることを目標に、線量限度（1mSv/y）を十分下回る水準とすること。

上記については発電所敷地内での貯蔵に対する線量基準であるが、発電所敷地外での貯蔵、又は輸送時でも同様であり、使用済燃料の貯蔵の事業に関する内規「使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（原規技発第 2403133 号）においても類似の記載がある。適合性審査では、解析結果が規則等に定める線量基準を満足していることに加えて、解析条件の妥当性及び解析結果の信頼性について詳細な確認を行う。

2.2 許認可申請における金属キャスクの遮蔽解析の流れ

金属キャスクの遮蔽解析では、規則等で定められた位置での線量を評価するために、放射線源の評価、解析対象である金属キャスクの解析モデル設定、解析に使用するコードの入力設定等を図 2.1 に例示するような流れで実施する。適合性審査では、このような遮蔽解析の流れを考慮したうえで、各項目の条件や評価の妥当性を確認する。また、確率論的な解法によるモンテカルロコードが使用される場合は、これまで主流であった決定論的な解法によるコードには無い視点である解析結果の統計的な信頼性等についても確認が必要となる。

2.3 許認可申請における使用済燃料乾式貯蔵施設の遮蔽解析の流れ

使用済燃料乾式貯蔵施設の遮蔽解析においても 2.2 節と同様に図 2.2 に例示するような流れで条件設定を実施する。適合性審査においても 2.2 節と同様に遮蔽解析の流れを考慮

したうえで、各項目の条件や評価の妥当性を確認し、モンテカルロコードが使用される場合は、解析結果の統計的な信頼性等についても確認が必要となる。

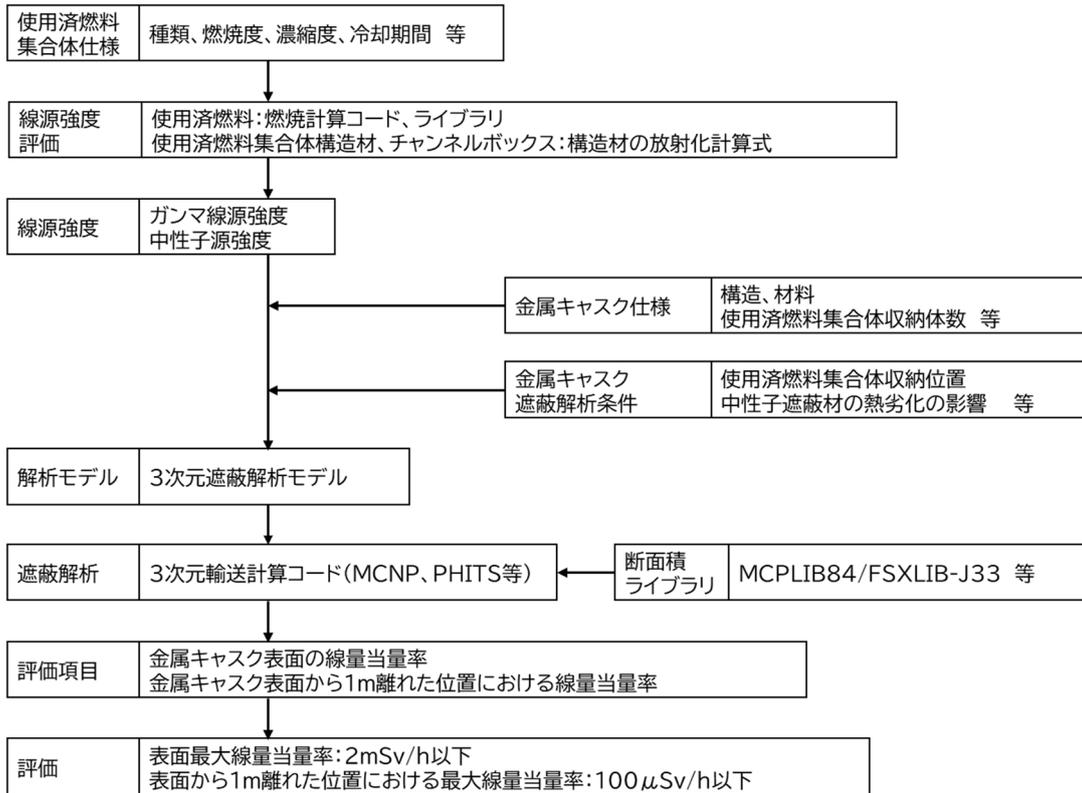


図 2.1 金属キャスクの遮蔽解析の流れの例

Fig.2.1 Example of the shielding analysis flow for a metal cask

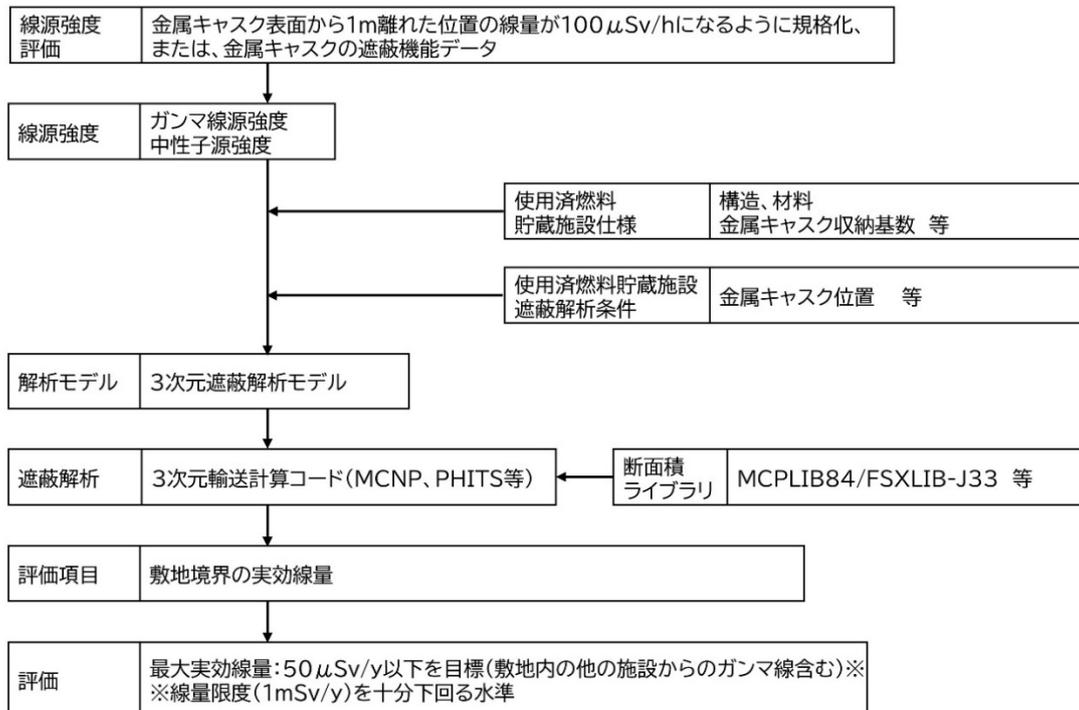


図2.2 使用済燃料乾式貯蔵施設の遮蔽解析の流れの例

Fig.2.2 Example of the shielding analysis flow for a spent fuel dry storage facility

3. 金属キャスクの解析条件の妥当性確認

本章では、先行研究成果²等を参照して検討委員会での議論により取りまとめた、金属キャスクの許認可において遮蔽解析にモンテカルロコードが使用された際の妥当性確認について解説する。3.1節では解析条件の妥当性確認の流れ及び確認すべき項目について、3.2節では確認内容の詳細及び根拠を明確にするために実施した検証解析の詳細及び結果から得られた確認内容の留意点について、3.3節ではそれらを整理してまとめた結果をそれぞれ記述する。

3.1 金属キャスクの解析条件の妥当性確認の流れ

2.2 節に記載した金属キャスクの遮蔽解析の流れに基づき検討した適合性審査における解析条件の妥当性確認全体の流れを図 3.1 にフロー図として示す。また、図 3.1 中の(1)～(4)各項目に対する個別の確認の流れを図 3.2 にフロー図として示す。

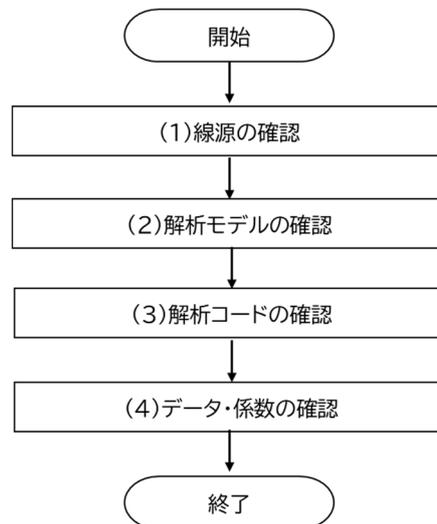
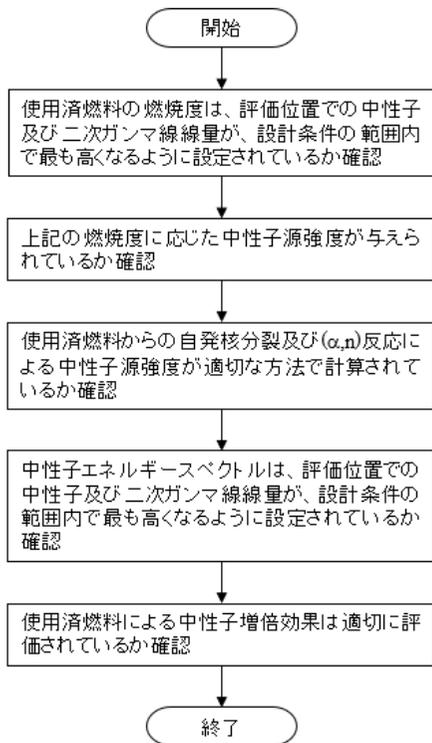
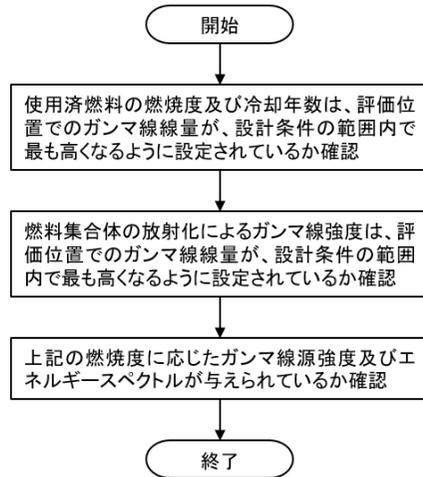


図 3.1 金属キャスクの解析条件の妥当性確認全体の流れ
Fig.3.1 Overall flow of validation of analytical conditions for a metal cask

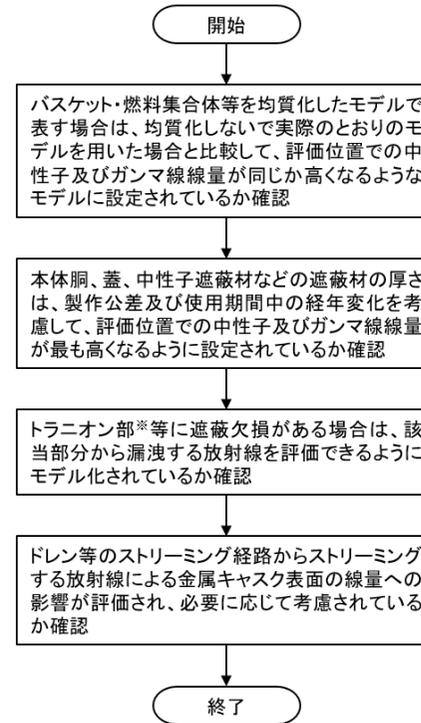


(中性子源)

(1) 線源の確認の流れ

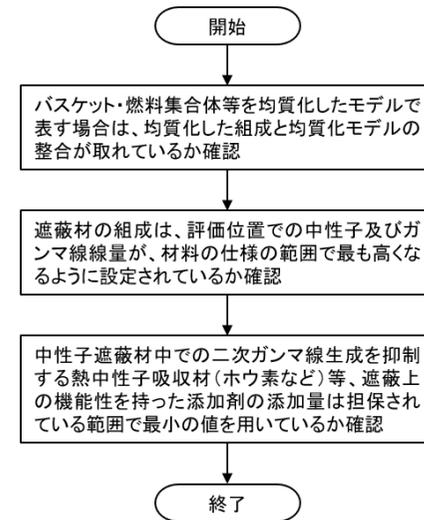


(ガンマ線源)



(形状・寸法)

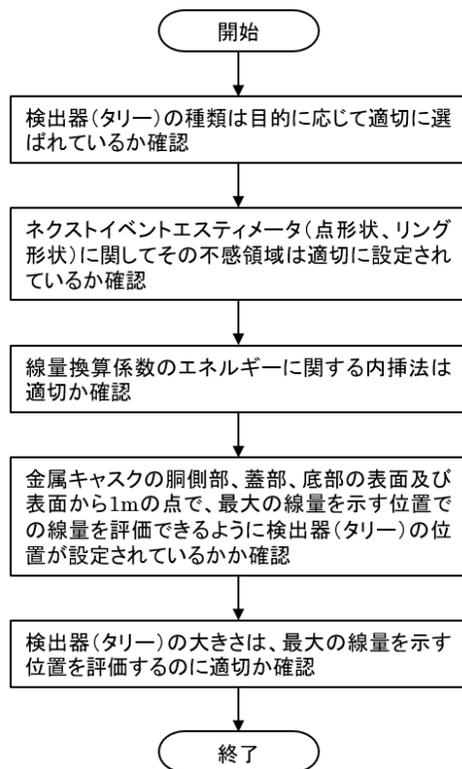
(2) 解析モデルの確認の流れ



(組成)

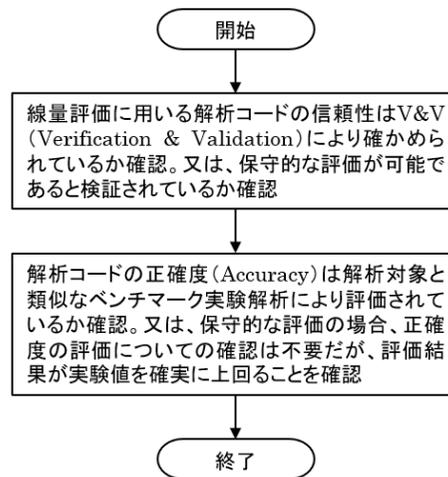
※トランニオン部は中性子遮蔽材の欠損部となる構造が多い。

図 3.2 金属キャスクの各解析条件の妥当性確認の流れ (1/2)
Fig.3.2 Validation flow of each analytical condition for a metal cask (1/2)

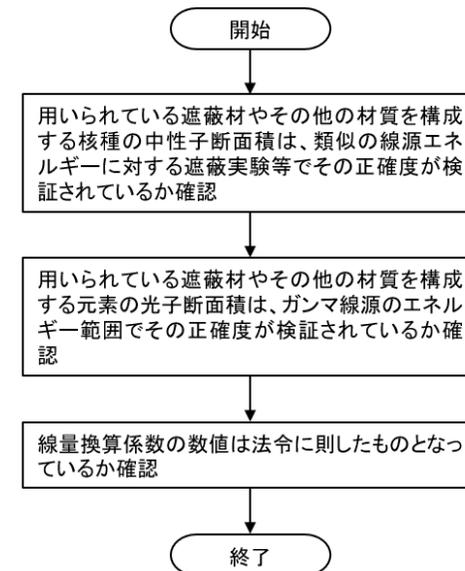


(線量評価法・位置)

(2) 解析モデルの確認の流れ



(3) 解析コードの確認の流れ



(4) データ・係数の確認の流れ

図 3.2 金属キャスクの各解析条件の妥当性確認の流れ (2/2)
 Fig.3.2 Validation flow of each analytical condition for a metal cask (2/2)

3.2 金属キャスクの解析条件の妥当性確認項目の検証

3.1 節に示した図 3.2 中の各確認内容に対し、先行研究²、許認可実績等により評価結果への影響が明確化されているもの、または数値評価により影響を判断しないものを除き、プロジェクトの中で種々の解析条件に対する検証解析を実施し、得られた解析結果に基づいて確認内容の留意点について考察した。本節では、3.2.1 項に、各検証解析と比較するための基準となる解析結果を提供するものとして、これまでの許認可申請に多く採用された解析条件を設定した基本解析について記載した。また、3.2.2 項以降には、各確認内容項目に対する影響を評価する検証解析及び解析結果より得られた留意点を示した。

なお、本章での検証解析は明示のないものは全て、モンテカルロコード MCNP6.2⁶ 及び JENDL-4.0⁸ に基づく ACE 形式ライブラリを使用した。

3.2.1 基本解析

(1) はじめに

使用済燃料を装荷する金属キャスクにはその使用目的に応じて、輸送用、貯蔵用、輸送貯蔵兼用の三種類がある。冷却期間が短い等の理由により発熱量が大きい使用済燃料を装荷する輸送用の金属キャスクでは燃料収納部に水を入れることで除熱効率を高めた湿式の型式もあるが、長期間使用し続ける貯蔵用及び輸送貯蔵兼用の金属キャスクでは、収納物の腐食防止のために燃料収納部に不活性ガスを満たす乾式等、様々な設計方針が存在する。

本項では、近年の許認可申請で主流となっている輸送貯蔵兼用の乾式金属キャスクを対象として計算条件を設定し、次項以降の各確認項目に対する検証解析結果との比較の基準となる解析結果を得るために、金属キャスク体系での表面及び表面から 1m での線量当量率を計算した。

(2) 計算条件

金属キャスク体系に係る検証の基準となる基本解析における計算条件は、公開情報⁹の調査結果に基づき、以下のように設定した。

- ・解析コード MCNP6.2⁶
- ・断面積ライブラリ JENDL-4.0⁸ に基づく ACE 形式ライブラリ
- ・体系モデル 図 3.3 に示したものを使用
- ・線源条件 PWR 用 17×17 燃料（燃焼度 48 GWd/tU、連続照射）を想定して、燃料有効部の線源強度は ORIGEN2.2UPJ コード¹⁰ の燃焼計算により評価し、構造材放射化ガンマ線強度は炉内照射熱中性子束を基にした放射化計算により求め、表 3.1 に示したものを設定
- ・物質組成 表 3.2 に示した原子個数密度を設定
- ・分散低減法 ADVANTG コード¹¹ により、Weight Window 下限値パラメータ

- 及び線源バイアスを計算し、設定
- ・ 評価位置 キャスク表面及び表面から 1m 地点における、側部方向、頭部軸方向、頭部径方向、底部軸方向及び底部径方向、並びに上下トラニオン部表面
 - ・ タリー
 (検出器機能) F4 タリー (体積検出器) ⁶
 ※体積検出器は一部の高さを除き、線量分布がほぼ周方向に均一であることから、円環状の領域 (半径方向幅 1 cm、軸方向幅 5 cm) を設定し、周方向の平均値として 1cm 線量当量率を計算
 - ・ 線量換算係数 ICRP Publ.74¹² 記載の 1cm 線量当量率換算係数を対数内挿

表 3.1 金属キャスクの基本解析における線源条件

Table 3.1 Source conditions for the basic analysis of a metal cask model

放射線種	線源強度	エネルギースペクトル
燃料有効部 ガンマ線 (FP ガンマ線)	1.073×10^{17} photons/s	ORIGEN2.2UPJ ¹⁰ コードによる燃焼計算結果 ※計算条件である初期濃縮度、照射日数等は非公開情報
構造材放射化 ガンマ線	5.922×10^2 ⁶⁰ Co TBq	1 Bq あたり、1.17 MeV 及び 1.33 MeV の光子を 1 個ずつ放出
燃料有効部 中性子	1.205×10^{10} neutrons/s	²³⁹ Pu 熱中性子核分裂スペクトル (Watt 型 ⁶ 、175 群) 臨界解析で評価した実効増倍率 $k_{\text{eff}}=0.30$ を考慮 ※Watt 型、175 群の詳細については、3.2.2 項参照

表 3.2 金属キャスクの基本解析における物質組成 (1/2)

Table 3.2 Elemental compositions for the basic analysis of a metal cask model

部材、領域		燃料均質化領域 (内側)	燃料均質化 領域 (外側)	下部構造物 バスケット	上部構造物 バスケット	上部構造物	バスケット	
規格、 参照文献		Kamiya et al. ¹³					BC-A6N01 ¹⁴ , MB-A3004- H112 ¹⁵	
密度 [単位]		3.2468E-02	3.2468E-02	2.3940E-02	2.3918E-02	7.9100E-03	1.4659E-02	
		[10 ²⁴ atoms/cm ³]						
B	B-10	4.36553E-05	4.36553E-05	4.36553E-05	4.36553E-05	—	3.99201E-05	
	B-11	1.75718E-04	1.75718E-04	1.75718E-04	1.75718E-04	—	1.60683E-04	
C	C-12	1.53243E-04	1.53243E-04	7.33527E-05	7.51727E-05	2.37300E-05	4.70412E-05	
N	N-14	8.52700E-07	8.52700E-07	2.19900E-06	2.19900E-06	2.19900E-06	—	
O	O-16	5.88400E-03	5.88400E-03	3.16300E-06	1.61700E-06	1.61700E-06	—	
Mg	Mg-24	1.30192E-04	1.30192E-04	1.30192E-04	1.30192E-04	—	1.19232E-04	
	Mg-25	1.64821E-05	1.64821E-05	1.64821E-05	1.64821E-05	—	1.50946E-05	
	Mg-26	1.81468E-05	1.81468E-05	1.81468E-05	1.81468E-05	—	1.66191E-05	
Al	Al-27	1.54077E-02	1.54077E-02	1.54077E-02	1.54077E-02	—	1.41092E-02	
Si	Si-28	1.48553E-04	1.48553E-04	1.57097E-04	1.67065E-04	1.28440E-04	3.53561E-05	
	Si-29	2.84133E-06	2.84133E-06	2.90973E-06	2.98953E-06	1.02828E-06	1.79530E-06	
	Si-30	6.26069E-06	6.26069E-06	6.64679E-06	7.09724E-06	5.80437E-06	1.18347E-06	
Ti	Ti-46	1.38089E-07	1.38089E-07	1.38089E-07	1.38089E-07	—	1.26464E-07	
	Ti-47	1.24531E-07	1.24531E-07	1.24531E-07	1.24531E-07	—	1.14048E-07	
	Ti-48	1.23393E-06	1.23393E-06	1.23393E-06	1.23393E-06	—	1.13005E-06	
	Ti-49	9.05531E-08	9.05531E-08	9.05531E-08	9.05531E-08	—	8.29299E-08	
	Ti-50	8.67033E-08	8.67033E-08	8.67033E-08	8.67033E-08	—	7.94043E-08	
Cr	Cr-50	4.99166E-05	4.99166E-05	5.23498E-05	5.66948E-05	5.66588E-05	3.29809E-08	
	Cr-52	9.62592E-04	9.62592E-04	1.00951E-03	1.09330E-03	1.09261E-03	6.36004E-07	
	Cr-53	1.09150E-04	1.09150E-04	1.14471E-04	1.23972E-04	1.23893E-04	7.21178E-08	
	Cr-54	2.71698E-05	2.71698E-05	2.84942E-05	3.08592E-05	3.08396E-05	1.79516E-08	
Mn	Mn-55	1.91154E-04	1.91154E-04	1.94054E-04	2.04154E-04	1.29700E-04	6.81943E-05	
Fe	Fe-54	2.40574E-04	2.40574E-04	2.35605E-04	2.55186E-04	2.53147E-04	1.86756E-06	
	Fe-56	3.77649E-03	3.77649E-03	3.69850E-03	4.00588E-03	3.97387E-03	2.93166E-05	
	Fe-57	8.72156E-05	8.72156E-05	8.54145E-05	9.25131E-05	9.17739E-05	6.77049E-07	
	Fe-58	1.16068E-05	1.16068E-05	1.13671E-05	1.23118E-05	1.22134E-05	9.01028E-08	
Ni	Ni-58	3.59378E-04	3.59378E-04	3.80754E-04	4.12886E-04	4.12886E-04	—	
	Ni-60	1.38432E-04	1.38432E-04	1.46666E-04	1.59043E-04	1.59043E-04	—	
	Ni-61	6.01753E-06	6.01753E-06	6.37546E-06	6.91349E-06	6.91349E-06	—	
	Ni-62	1.91865E-05	1.91865E-05	2.03278E-05	2.20432E-05	2.20432E-05	—	
	Ni-64	4.88624E-06	4.88624E-06	5.17688E-06	5.61376E-06	5.61376E-06	—	
Cu	Cu-63	7.78860E-06	7.78860E-06	7.78860E-06	7.78860E-06	—	7.13361E-06	
	Cu-65	3.47148E-06	3.47148E-06	3.47148E-06	3.47148E-06	—	3.17955E-06	
Zr	Zr-90	8.25258E-04	8.25258E-04	9.79094E-04	7.07952E-04	7.07952E-04	—	
	Zr-91	1.79969E-04	1.79969E-04	2.13517E-04	1.54387E-04	1.54387E-04	—	
	Zr-92	2.75086E-04	2.75086E-04	3.26365E-04	2.35984E-04	2.35984E-04	—	
	Zr-94	2.78775E-04	2.78775E-04	3.30741E-04	2.39149E-04	2.39149E-04	—	
	Zr-96	4.49120E-05	4.49120E-05	5.32840E-05	3.85280E-05	3.85280E-05	—	
U	U-235	1.02000E-04	1.02000E-04	—	—	—	—	
	U-238	2.77800E-03	2.77800E-03	—	—	—	—	

組成は原子個数密度 [10²⁴atoms/cm³]

表 3.2 金属キャスクの基本解析における物質組成 (2/2)

Table 3.2 Elemental compositions for the basic analysis of a metal cask model

部材、領域		本体胴	レジン	レジン 伝熱フィン	外筒	一次蓋	二次蓋	トラニオン
規格、 参照文献		GLF1 ¹⁶	Ueki et. al. ¹⁷		SGV480 ¹⁸	GLF1 ¹⁶ , Ueki et al. ¹⁷	GLF1 ¹⁶	SUS630- H1150 ¹⁹
密度 [単位]		7.85	1.68	1.80	7.85	7.85	7.85	7.78
		[g/cm ³]						
H	H-1	—	5.95215E-02	5.85498E-02	—	—	—	—
B	B-10	—	1.77154E-05	1.74261E-05	—	—	—	—
	B-11	—	7.05718E-04	6.94197E-04	—	—	—	—
C	C-12	1.18185E-03	2.33312E-02	2.29503E-02	1.18185E-03	1.18185E-03	1.18185E-03	2.73305E-04
N	N-14	—	1.43278E-03	1.40939E-03	—	—	—	—
O	O-16	—	2.67912E-02	2.63539E-02	—	—	—	—
Al	Al-27	—	7.97674E-03	7.84652E-03	—	—	—	—
Si	Si-28	4.69763E-04	—	—	6.26351E-04	4.69763E-04	4.69763E-04	1.55191E-03
	Si-29	2.38534E-05	—	—	3.18046E-05	2.38534E-05	2.38534E-05	7.88024E-05
	Si-30	1.57244E-05	—	—	2.09658E-05	1.57244E-05	1.57244E-05	5.19471E-05
P	P-31	5.34189E-04	—	—	3.05251E-05	5.34189E-04	5.34189E-04	6.05057E-05
S	S-32	5.59807E-04	—	—	2.79903E-05	5.59807E-04	5.59807E-04	4.16111E-05
	S-33	4.48176E-06	—	—	2.24088E-07	4.48176E-06	4.48176E-06	3.33134E-07
	S-34	2.52983E-05	—	—	1.26492E-06	2.52983E-05	2.52983E-05	1.88046E-06
	S-36	1.17941E-07	—	—	5.89705E-09	1.17941E-07	1.17941E-07	8.76670E-09
Cr	Cr-50	1.18512E-05	—	—	—	1.18512E-05	1.18512E-05	6.85153E-04
	Cr-52	2.28538E-04	—	—	—	2.28538E-04	2.28538E-04	1.32125E-02
	Cr-53	2.59143E-05	—	—	—	2.59143E-05	2.59143E-05	1.49819E-03
	Cr-54	6.45063E-06	—	—	—	6.45063E-06	6.45063E-06	3.72931E-04
Mn	Mn-55	1.16167E-03	—	—	1.03259E-03	1.16167E-03	1.16167E-03	8.52820E-04
Fe	Fe-54	4.77966E-03	—	—	4.85190E-03	4.77966E-03	4.77966E-03	3.42822E-03
	Fe-56	7.50304E-02	—	—	7.61644E-02	7.50304E-02	7.50304E-02	5.38158E-02
	Fe-57	1.73278E-03	—	—	1.75897E-03	1.73278E-03	1.73278E-03	1.24284E-03
	Fe-58	2.30601E-04	—	—	2.34086E-04	2.30601E-04	2.30601E-04	1.65399E-04
Ni	Ni-58	2.19327E-04	—	—	—	2.19327E-04	2.19327E-04	2.71714E-03
	Ni-60	8.44842E-05	—	—	—	8.44842E-05	8.44842E-05	1.04664E-03
	Ni-61	3.67247E-06	—	—	—	3.67247E-06	3.67247E-06	4.54965E-05
	Ni-62	1.17094E-05	—	—	—	1.17094E-05	1.17094E-05	1.45063E-04
	Ni-64	2.98205E-06	—	—	—	2.98205E-06	2.98205E-06	3.69432E-05
Cu	Cu-63	—	—	9.50731E-04	—	—	—	2.54996E-03
	Cu-65	—	—	4.23753E-04	—	—	—	1.13655E-03
Nb	Nb-93	—	—	—	—	—	—	2.26933E-04

組成は原子個数密度 [10²⁴atoms/cm³]

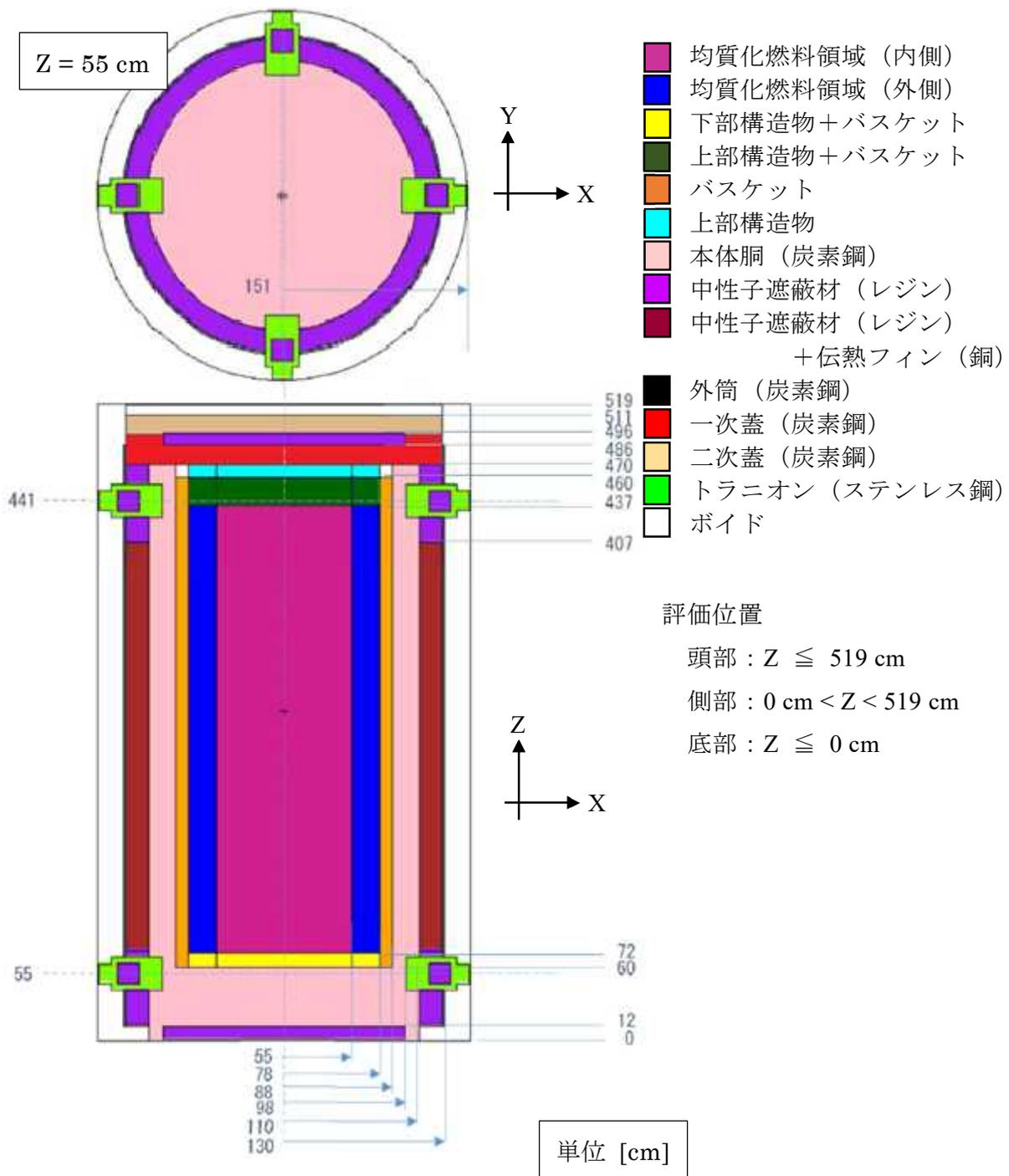


図 3.3 金属キャスクの基本解析に使用した体系モデル

Fig. 3.3 Geometry model for the basic analysis of a metal cask model

(3) 計算結果

金属キャスクの基本解析における各評価位置での線量評価結果を表 3.3 に示す。また、側部、頭部、底部方向の表面及び表面から 1m の位置での線量分布を図 3.4~3.9 にそれぞれ示す。次項以降に記載する解析条件の変化が解析結果に与える影響を評価するための検証解析を実施するに当たり、次項以降で本項の基本解析結果と比較を行う場合は、基本解

析の結果を基準とする。

なお、本線量評価結果は近年主流となっている輸送貯蔵兼用の金属製乾式キャスクの設計情報を参照して構築した架空のモデルに特定の使用済燃料を装荷したものに対する結果の一例であり、中性子及びガンマ線の線量絶対値や相対比率、外部線量の分布状況等は、金属キャスクの一般的な遮蔽性能を示すものではない。

表 3.3 金属キャスクの基本解析の線量評価結果

Table 3.3 Results of dose analysis for the basic analysis of a metal cask model

評価位置		線量当量率[μSv/h]				
		中性子	二次ガンマ線	FPガンマ線	放射化ガンマ線	全線量
側部表面	①最大中性子線量の高さ	91.0±0.31%	2.68±1.15%	2.78±0.87%	8.63±1.27%	105.1±0.29%
	②燃料中心高さ	6.74±0.28%	30.2±0.39%	98.4±0.27%	24.1±0.34%	159.4±0.19%
	③最大放射化ガンマ線線量の高さ	26.3±0.22%	10.5±0.70%	25.6±0.43%	81.3±0.33%	143.7±0.21%
側部表面 から1m	④最大中性子線量の高さ	20.0±0.49%	4.73±0.92%	11.8±0.46%	14.6±0.50%	51.2±0.28%
	⑤燃料中心高さ	4.27±0.25%	16.8±0.39%	58.8±0.23%	15.3±0.28%	95.2±0.16%
	⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	14.8±0.31%	7.49±0.76%	24.4±0.38%	26.1±0.45%	72.8±0.23%
頭部表面	⑦最大中性子線量の半径	95.8±0.14%	0.475±0.39%	0.229±0.51%	2.06±0.71%	98.6±0.14%
	⑧最外周	20.0±0.20%	3.04±0.24%	6.24±0.28%	6.82±0.24%	36.1±0.13%
	⑨中央	40.4±1.77%	1.82±5.42%	2.34±3.91%	73.0±3.14%	117.6±2.04%
頭部表面 から1m	⑩中央	24.7±1.74%	0.903±6.75%	1.11±4.44%	35.0±4.62%	61.7±2.72%
	⑪最外周	10.9±0.18%	0.626±0.43%	1.12±0.65%	1.61±0.48%	14.3±0.16%
底部表面	⑫最大中性子線量の半径	121±0.59%	2.99±0.59%	0.0401±0.60%	0.0510±0.69%	124.3±0.58%
	⑬中央	16.5±1.64%	29.4±1.98%	0.00995±6.48%	0.0244±7.69%	45.9±1.40%
	⑭最外周	3.91±0.29%	3.89±0.61%	7.71±0.24%	4.48±0.23%	20.0±0.17%
底部表面 から1m	⑮最大中性子線量の半径	11.5±1.14%	3.03±0.62%	0.0110±3.87%	0.0137±2.08%	14.5±0.91%
	⑯中央	8.53±1.64%	7.73±3.52%	0.00581±7.19%	0.0112±8.43%	16.3±1.88%
	⑰最外周	6.94±1.18%	1.59±0.60%	1.25±0.54%	0.610±0.53%	10.4±0.80%

±〇%はモンテカルロ計算の統計誤差

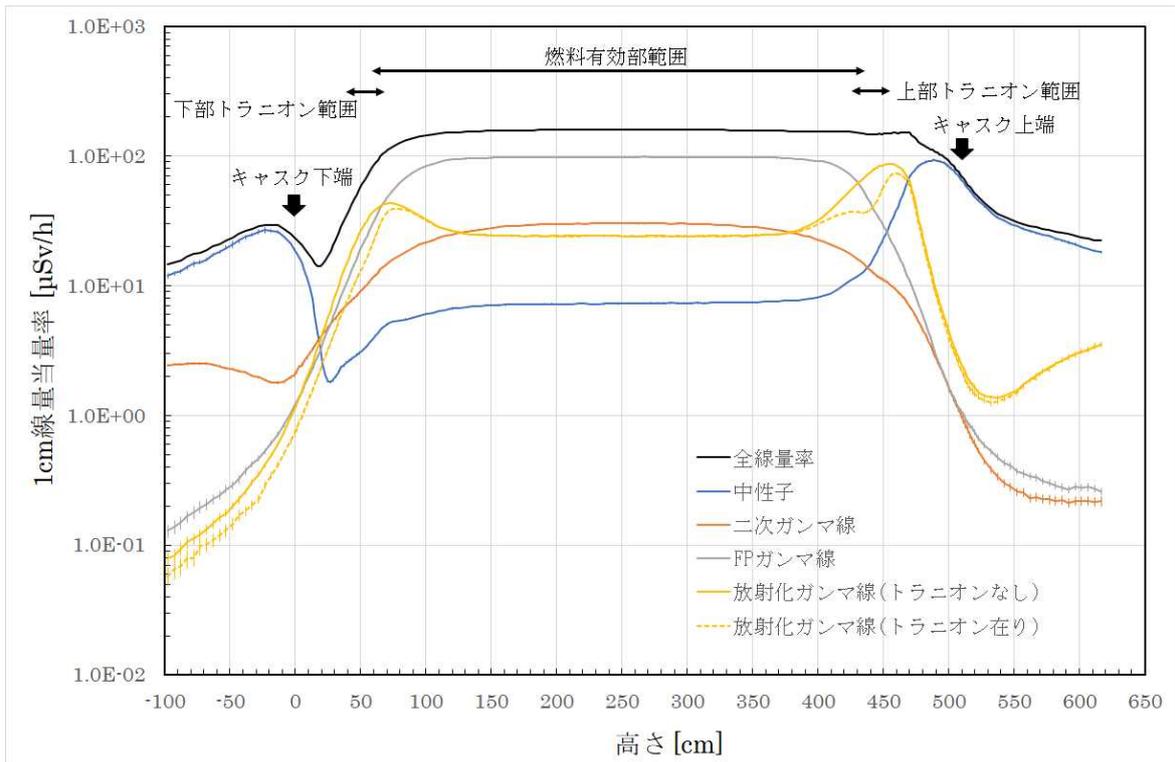


図 3.4 周方向で平均した側部表面での線量分布

Fig. 3.4 Circumferentially averaged dose distribution on the side surface

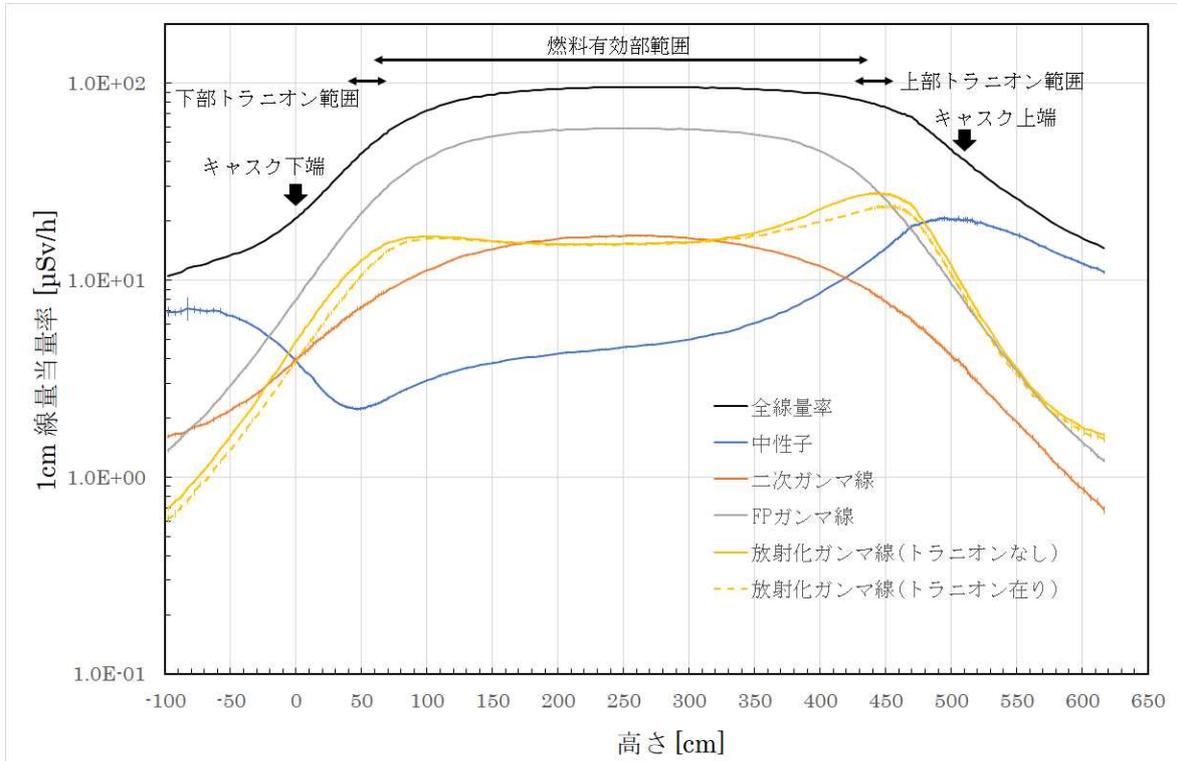


図 3.5 周方向で平均した側部表面から 1m での線量分布

Fig. 3.5 Circumferentially averaged dose distribution 1m away from the side surface

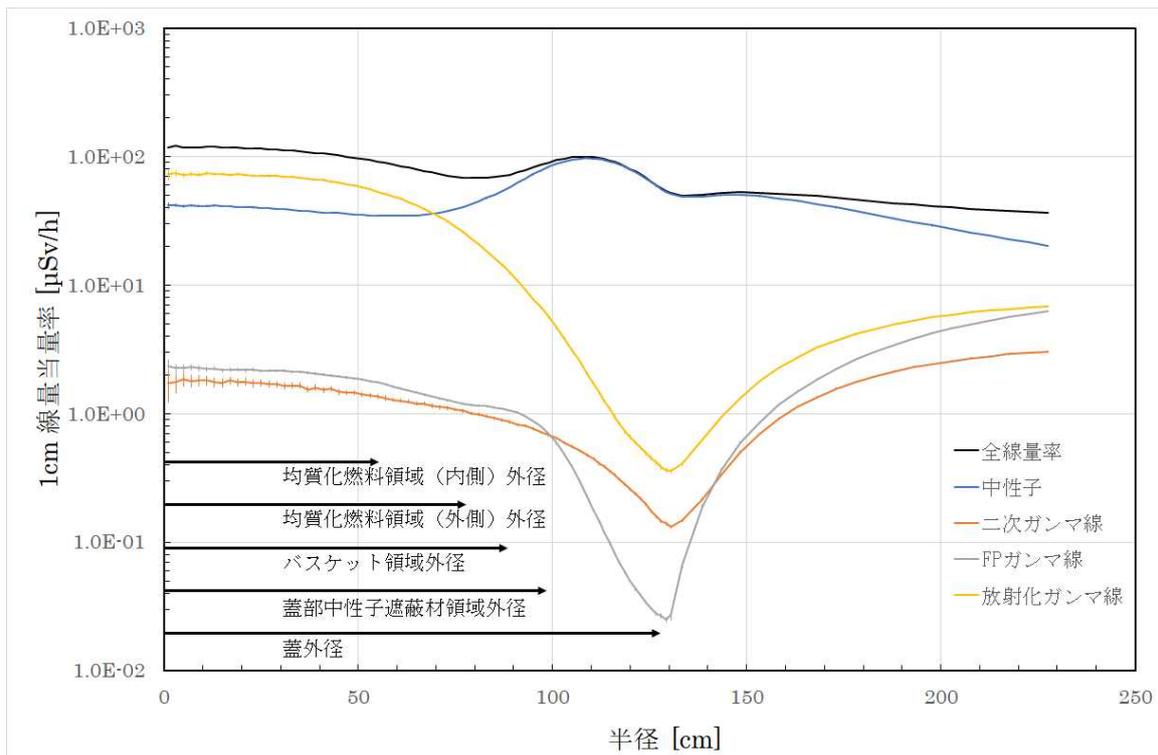


図 3.6 周方向で平均した蓋部表面での線量分布

Fig. 3.6 Circumferentially averaged dose distribution on the lid surface

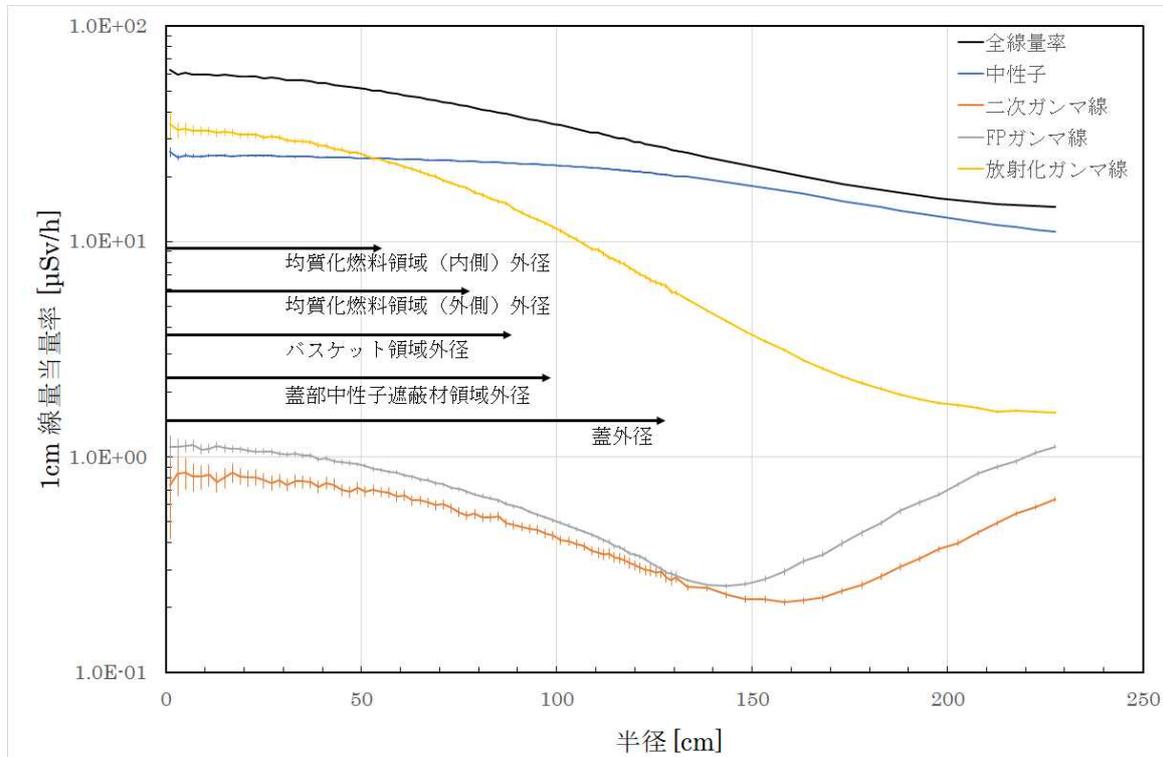


図 3.7 周方向で平均した蓋部表面から 1m での線量分布

Fig. 3.7 Circumferentially averaged dose distribution 1m away from the lid surface

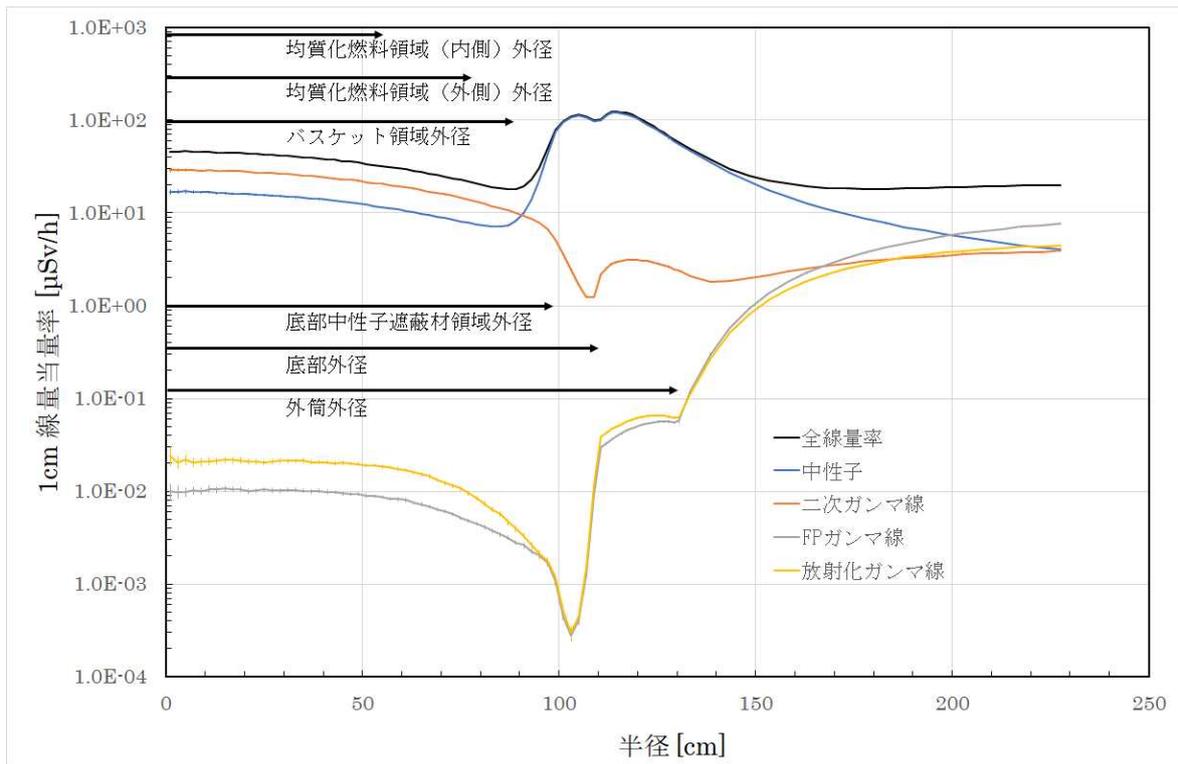


図 3.8 周方向で平均した底部表面での線量分布

Fig. 3.8 Circumferentially averaged dose distribution on the bottom surface

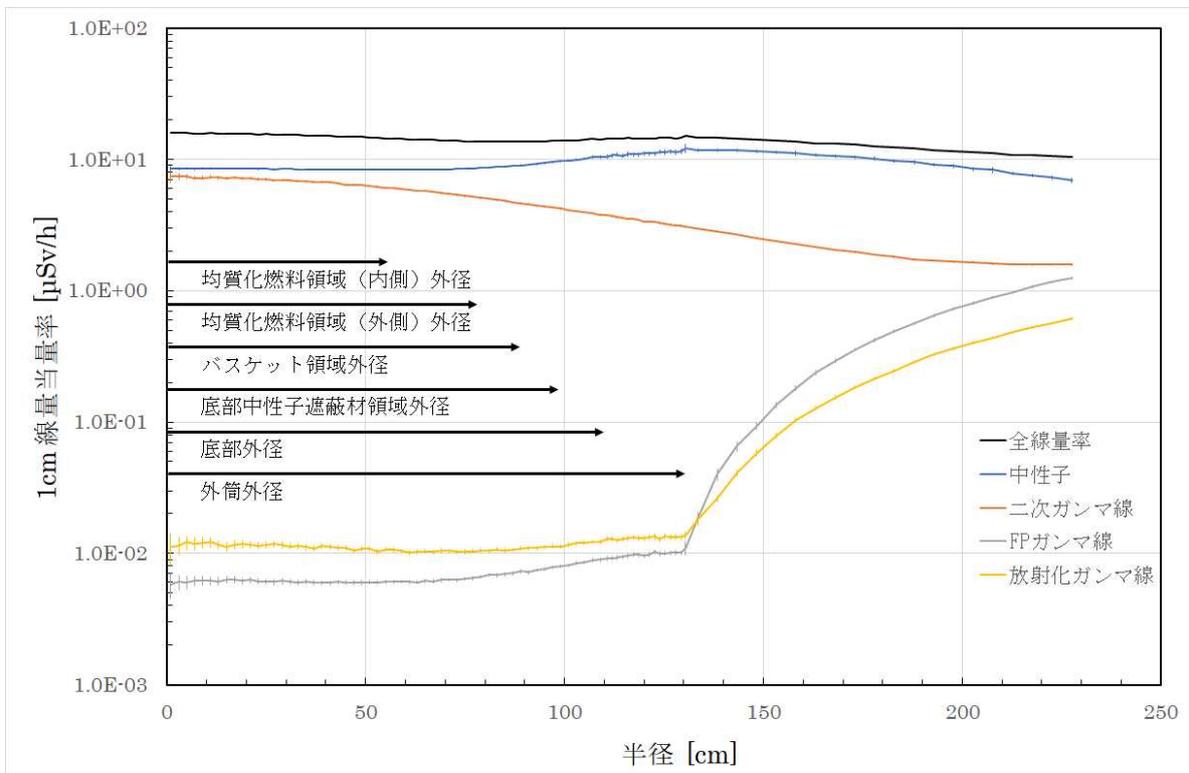


図 3.9 周方向で平均した底部表面から 1m での線量分布

Fig. 3.9 Circumferentially averaged dose distribution 1m away from the bottom surface

3.2.2 中性子源スペクトル

本項では、図3.2の(1)線源の確認の流れ（中性子源）に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・中性子エネルギースペクトルは、評価位置での中性子及び二次ガンマ線線量が、設計条件の範囲内で最も高くなるように設定されているか確認

(1) はじめに

金属キャスクの放射線源である使用済燃料における中性子源強度は通常、初期濃縮度、燃焼度等に基づき燃焼計算コードにより評価される。一方で、中性子源スペクトルは (α, n) 反応による中性子よりも線源強度が大きい核分裂核種のうち、エネルギースペクトルの硬い^(注2) ^{239}Pu を代表として選定することで保守的な線源設定とすることが多い。本項では、中性子エネルギースペクトルの設定の違いが金属キャスク外部線量に与える影響を評価することで、中性子源スペクトル設定に対する確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

中性子エネルギースペクトルについて下記の4条件を設定し、金属キャスク体系の外部線量を評価した。

- ① ^{239}Pu の熱中性子核分裂で生成する中性子（Watt型、175群）：基本解析ケース
- ② ^{239}Pu の熱中性子核分裂で生成する中性子（Watt型、連続エネルギー）
- ③ ^{244}Cm の自発核分裂で生成する中性子（Watt型、連続エネルギー）
- ④ (α, n) 反応で生成する中性子

核分裂反応に対するWatt型エネルギースペクトルは3.1式に示すWatt式⁶により得られる確率密度関数である。

$$f(E) = C \cdot \exp(-E/a) \sinh(\sqrt{bE}) \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

ここで、 $f(E)$ はエネルギー E の中性子発生の確率密度、 C は規格化定数であり、 a, b は中性子を発生する核分裂反応（自発核分裂や中性子誘起核分裂など）の種類（核種及び中性子誘起核分裂での入射中性子エネルギーを含む）に固有のパラメータである。また、これまで主流であった離散座標Snコードで使用されていた群構造スペクトルと、より現実的な評価が可能な連続エネルギースペクトルの違いによる影響も評価した。上記①～④の計算ケースに設定するエネルギースペクトルの具体的なパラメータを下記に示す。また、各エネルギースペクトルを図3.10に示す。

^(注2) 放射線のエネルギースペクトルに対して、高エネルギー成分が多い状態を「硬い」と表現し、低エネルギー成分が多い状態を「軟らかい」と表現する。

- ① Watt 式のパラメータ $a=0.966$ 、 $b=2.842$
エネルギー群の分割：VITAMIN-E²⁰における中性子 175 群に分割
- ② Watt 式のパラメータ $a=0.966$ 、 $b=2.842$
- ③ Watt 式のパラメータ $a=0.902523$ 、 $b=3.72033$
- ④ エネルギー分布： α 粒子（Jacobs (1983)の 5.5 MeV）が UO₂ に入射したときの(α ,n) 反応中性子の測定データ²¹
エネルギー群の分割：0.0.1 MeV 間隔で 4.5 MeV までの 45 群に分割

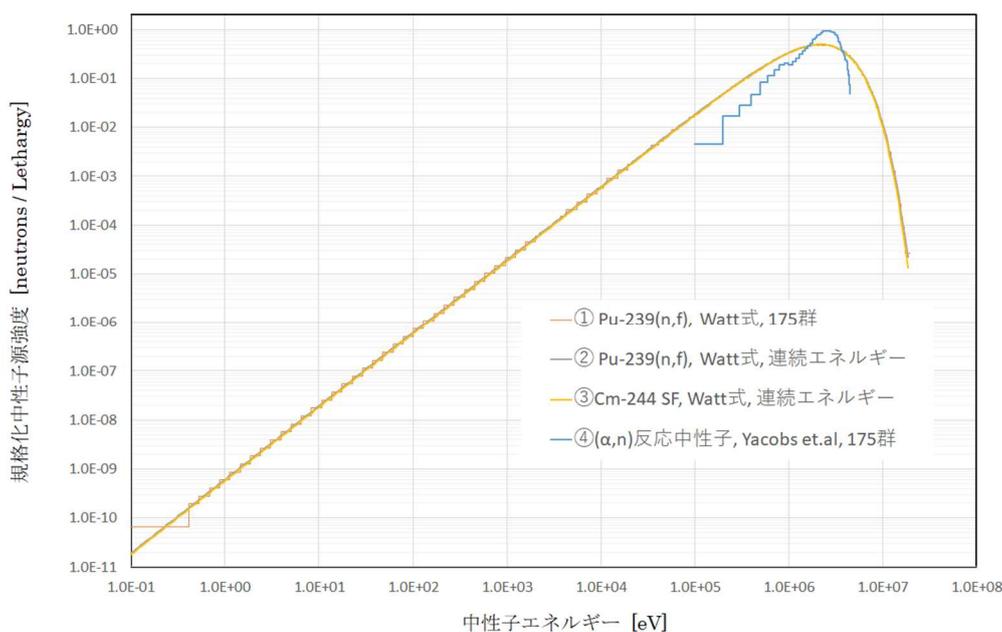


図 3.10 中性子エネルギースペクトルの比較（使用済燃料）

Fig. 3.10 Comparison of the neutron energy spectra (spent fuel)

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～④について、3.2式に示す中性子源スペクトルの違いによる金属キャスク表面及び表面から1mにおける線量への影響 $E_{spectra}$ によって比較した結果を表3.4に示す。

$$E_{spectra} = \frac{\text{ケース②～④の各中性子源スペクトル条件による外部線量}}{\text{ケース①の中性子源スペクトル条件による外部線量}} - 1 \quad \dots\dots(3.2)$$

②及び③の他種の核分裂中性子源との比較からは有意な差は見られないが、④の (α ,n) 反応による中性子源（以下「(α ,n) 中性子源」という。）との比較では差が比較的大きくなっている。一般的には使用済燃料における中性子源強度は核分裂線源の割合が大きいが、(α ,n) 中性子源強度の割合が大きい場合や、線量評価結果が基準に対して余裕の少ない場合には、線源設定の保守性には注意が必要となる。これらの考察より、中性子源スペクト

ルの設定においては、ケース①を核分裂中性子源の代表として設定することには通常は問題がないが、(α,n) 中性子源の取扱いが解析の保守性に影響を与える場合も考えられることが確認内容の留意点として得られた。

表 3.4 各種の中性子源エネルギースペクトルを用いた場合のキャスク外部線量の比較
Table 3.4 Comparison of the external cask doses with several neutron source energy spectra

計算ケース 中性子スペクトル 評価位置		②		③		④	
		²³⁹ Pu熱中性子核分裂 (Watt型、連続)		²⁴⁴ Cm自発核分裂 (Watt型、連続)		(α, n)反応による中性子	
		中性子	二次ガンマ線	中性子	二次ガンマ線	中性子	二次ガンマ線
側部表面	①最大中性子線量の高さ	-0.1±0.5%	-0.4±1.1%	+0.5±0.4%	-0.4±1.3%	+7.3±0.4%	+1.1±1.4%
	②燃料中心高さ	-0.1±0.4%	-0.3±8.2%	-0.1±0.3%	-0.3±0.4%	-4.2±0.3%	+1.6±0.5%
	③最大放射化ガンマ線線量の高さ	+0.4±0.4%	+0.0±0.7%	+0.8±0.3%	+0.9±0.8%	+7.5±0.3%	+0.9±0.8%
側部表面 から1m	④最大中性子線量の高さ	-0.5±0.7%	+3.0±1.0%	+0.0±0.5%	+3.4±1.0%	+7.8±0.6%	+3.4±1.1%
	⑤燃料中心高さ	-0.2±0.4%	+0.0±6.1%	-0.7±0.3%	+0.0±0.4%	-2.1±0.3%	+1.2±0.4%
	⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	+0.0±0.5%	+0.1±0.8%	+0.0±0.4%	-0.1±0.8%	+6.7±0.4%	+4.0±0.9%
頭部表面	⑦最大中性子線量の半径	-0.1±0.2%	+0.6±0.4%	+0.5±0.2%	+0.8±1.0%	+8.2±0.2%	+1.3±2.3%
	⑧最外周	-0.5±0.3%	-0.7±0.3%	+0.0±0.3%	+0.0±0.3%	+7.9±0.3%	+1.3±0.4%
	⑨中央	-1.9±2.5%	+3.2±5.1%	+0.7±1.8%	+1.1±6.3%	+13.3±2.0%	+14.6±10.2%
頭部表面 から1m	⑩中央	-4.0±2.2%	-2.7±6.4%	-1.6±1.7%	-2.9±10.7%	+7.1±1.8%	+14.7±23.6%
	⑪最外周	+0.0±0.3%	+0.3±0.5%	+0.9±0.2%	+0.3±0.7%	+9.1±0.2%	+1.3±1.9%
底部表面	⑫最大中性子線量の半径	-0.8±0.9%	+1.0±0.6%	+0.0±0.6%	+1.3±0.7%	+8.9±0.6%	+5.0±0.8%
	⑬中央	+1.2±2.4%	+2.7±6.7%	+1.2±1.7%	+2.7±2.2%	+8.3±1.9%	+6.5±2.3%
	⑭最外周	+0.0±0.5%	-0.5±0.9%	+0.5±0.4%	+0.0±0.7%	+5.3±0.4%	+2.3±0.7%
底部表面 から1m	⑮最大中性子線量の半径	+0.9±2.1%	-0.3±0.6%	+1.7±1.6%	-0.3±0.7%	+12.1±1.8%	+4.5±0.8%
	⑯中央	+5.3±2.4%	-0.4±4.3%	+3.5±1.7%	-4.0±3.4%	+12.9±1.9%	-3.1±3.5%
	⑰最外周	+0.6±1.9%	+0.0±0.6%	+0.6±1.1%	+0.0±0.8%	+10.0±1.2%	+5.0±0.9%

注) ±〇%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 3.2 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5%は計算ケース①の場合に比べて計算ケース②～④の場合の外部線量が 0.5～1.5%程度大きくなることを示す。

3.2.3 中性子増倍の扱い

本項では、図3.2の(1)線源の確認の流れ(中性子源)に示されている以下に関して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・使用済燃料による中性子増倍効果は適切に評価されているか確認

(1) はじめに

放射線源となる使用済燃料を装荷した金属キャスクは、燃料収納部においてアクチノイド核種の核分裂反応による中性子増倍が発生する。許認可申請における遮蔽解析では、線量評価のための計算中は中性子増倍効果をキャンセルし、別途実施した臨界計算で求めた実効増倍率 k_{eff} により中性子源強度を $1/(1-k_{\text{eff}})$ 倍で補正することで中性子増倍を考慮することが一般的である。一方で、モンテカルロコードの場合、燃料収納部における中性子増倍効果を現実的に発現させながら線量評価位置への輸送計算も可能である。本項では、いくつかの線源条件に対する中性子増倍の取扱い方法の違いが金属キャスク表面線量に与える

影響を評価することで、中性子増倍の扱いに対する確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

線源領域の組成及び中性子源強度分布を表3.5に示す①～④のケースで設定し、それぞれのケースに対して、遮蔽計算内で中性子増倍を考慮する方法による計算結果及び臨界計算で求めた実効増倍率で中性子増倍を考慮する方法による計算結果について金属キャスク体系の外部線量を評価した。

臨界計算及び中性子の増倍を考えた遮蔽計算では、中性子増倍に影響を与える燃料棒の構造（ペレット、被覆管の寸法、組成）、制御棒案内シングル及び計装用案内シングルをできるだけ正確にモデル化する必要があるため、燃料収納部は図3.11に示す詳細なモデル化を行い²²、図3.3の均質化燃料領域に設定した。中性子源の特徴を決める燃料集合体の燃焼条件はYankee Atomic Electric Company がまとめてOECD/NEA から出された燃焼度プロファイルのデータベース²³等を参照し、表3.6に示す燃料及び燃焼の条件に基づき、燃焼計算コードORIGEN2.2-UPJ¹⁰を用いて照射後の中性子源強度を計算し、また、燃料ペレット内組成として、アクチノイド核種及び核分裂生成核種の組成変化を計算した。また、軸方向の燃焼度分布は、同データベース²³から、制御棒やバーナブルポイズン棒による軸方向燃焼度分布への影響を比較的受けていない、上記燃焼計算条件と同等の燃焼度である米国ノースカロライナ州のMcGuire 2 号機（4 ループPWR、熱出力3,469 MW）からの17×17 型燃料集合体（平均燃焼度35,892 MWd/t）のものを、図3.12に示すように6 段の階段状に近似して用いた。許認可申請における安全解析では、実際の軸方向燃焼度分布を包絡するように階段状の分布を設定することで計算の保守性を示すことが多いが、計算目的に鑑みて燃焼度積分量を保存する現実的な設定とした。

表3.5 中性子増倍の影響評価に設定した燃料部組成と中性子源強度分布

Table 3.5 Compositions of the fuel region and neutron intensity distributions input into the sensitivity analysis of the effect of neutron multiplication

計算ケース	燃焼度	燃料部組成	中性子源強度分布
①	未照射	未照射条件で一樣	一樣
②	35,720 MWd/t	平均燃焼度条件で一樣	一樣
③	35,720 MWd/t	軸方向燃焼度分布を考慮	一樣
④	35,720 MWd/t	軸方向燃焼度分布を考慮	軸方向燃焼度分布を考慮

表3.6 燃料集合体型式及び燃焼計算の条件

Table 3.6 Type of fuel assembly and burnup calculation conditions

項目	条件
燃料集合体型式	PWR 17×17型燃料集合体
UO ₂ 密度	10.412 g/cm ³ (理論密度比95%)
初期濃縮度	3.5% ²³
平均燃焼度	35,720 MWd/t ²³
比出力	38.4 MW/t (平均) ²⁴ 24.7~40.9 MW/t (22,976~38,045 MWd/tに相当)
燃焼期間	930.2 day ²³ (連続照射を仮定)
冷却期間	10 year

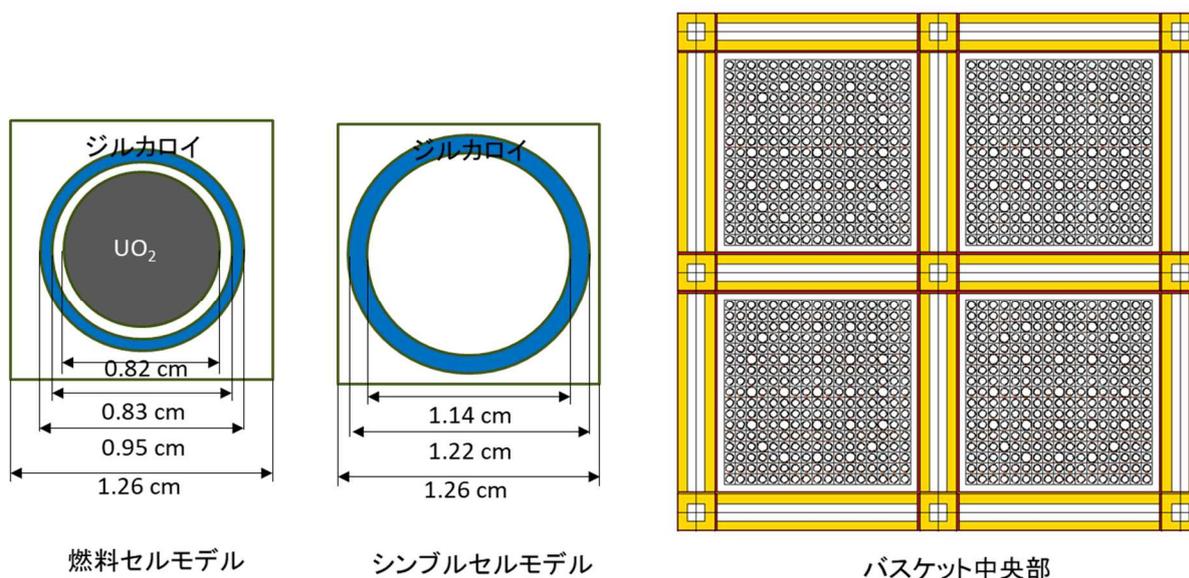


図3.11 中性子増倍計算に用いた燃料棒の寸法及びバスケット中央付近の燃料集合体モデル

Fig. 3.11 Dimensions of the fuel rods used in the neutron multiplication calculations and the fuel assembly model near the center of the basket

注) 図中の白部はボイドを設定

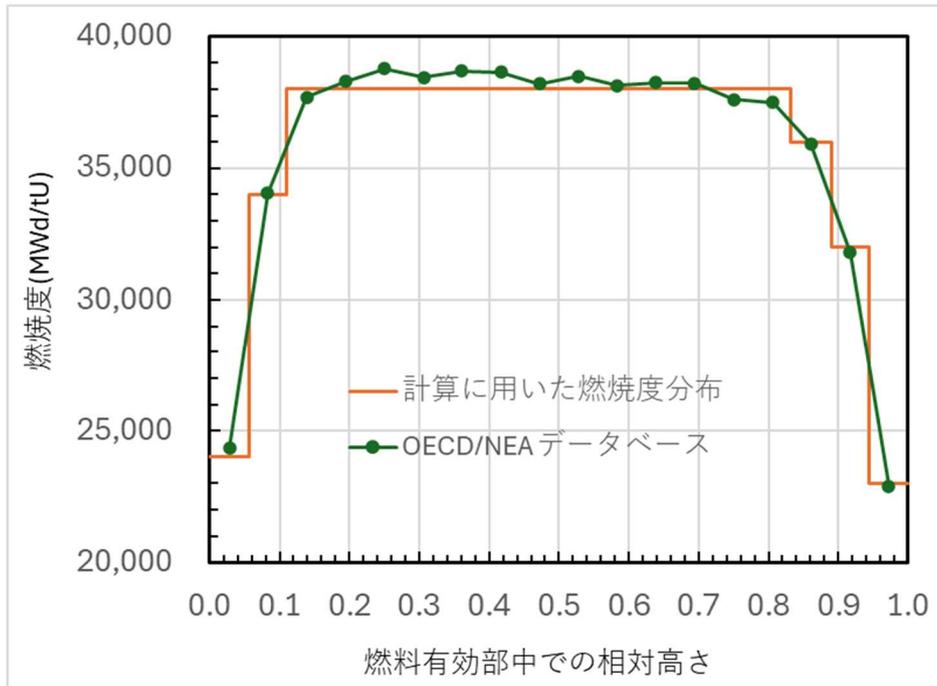


図3.12 McGuire 2号機17×17型燃料集合体の軸方向燃焼度分布と計算に用いた階段状に近似された燃焼度分布

Fig. 3.12 Axial burnup distribution of the 17×17 fuel assembly in McGuire Unit 2 and the step-like approximate model used in the analysis

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～④について、3.3式に示す中性子増倍の取扱い方法による金属キャスク表面線量への影響 E_{multi} によって比較した結果を表3.7に示す。ここで、3.3式中の「臨界計算結果の実効増倍率で線源強度補正する方法」は基本解析ケースを意味する。

$$E_{multi} = \frac{\text{臨界計算結果の実効増倍率で線源強度補正する方法による表面線量}}{\text{遮蔽計算内で増倍効果を考慮する方法による表面線量 (ケース①～④)}} - 1 \dots\dots\dots(3.3)$$

許認可申請における安全解析で多く用いられている臨界計算による実効増倍率で線源強度を補正する方法による計算結果は、遮蔽計算内で中性子増倍を考慮する方法による計算結果に比べて、中性子線量では大部分で上回り、二次ガンマ線線量では有意な差異は認められない。一部で前者が下回る結果も存在するが、誤差を含めて考慮すると影響は軽微であると考えられることから、前者は基本的に安全側の条件と考えられる。また、臨界計算条件を保守的とすることで遮蔽計算結果の保守性を増大させることもできる。なお、頭部表面及び頭部表面から1mの中央位置のように、主に二次ガンマ線線量に対して誤差が10%を超えるデータが一部存在するが、評価結果である線量の値が小さい（二次ガンマ線

がほとんど到達しない) 評価位置であり、本結果に有意な影響を与えるものではない。

以上より、臨界計算による実効増倍率で線源強度を補正する方法は安全側の条件であり、臨界計算条件が非保守的でなければ、その詳細までは確認不要である。

表3.7 中性子増倍の取扱い方法による金属キャスク外部線量への影響比較

Table 3.7 Comparison of the effects of neutron multiplication handling methods on the external dose of a metal cask model

計算ケース 燃焼度 燃料部組成 評価位置		①		②		③		④	
		未照射燃料		約35 GWd/tU		約35 GWd/tU		約35 GWd/tU	
		未照射条件で同様		平均燃焼度条件で同様		軸方向燃焼度分布を考慮		軸方向燃焼度分布を考慮	
		中性子	二次ガンマ線	中性子	二次ガンマ線	中性子	二次ガンマ線	中性子	二次ガンマ線
側部表面	①最大中性子線量の高さ	+10.2±2.6%	+5.7±4.7%	+5.8±1.7%	+5.1±5.1%	+6.0±1.1%	+1.1±3.5%	-1.4±2.5%	-1.0±5.1%
	②燃料中心高さ	-1.8±9.1%	+1.5±1.7%	+3.5±2.2%	+0.9±1.7%	+4.1±1.2%	+0.7±1.2%	+5.3±2.4%	+0.4±1.5%
	③最大放射化ガンマ線線量の高さ	+11.1±2.6%	+5.4±3.0%	+6.7±1.3%	+4.4±3.4%	+6.6±1.0%	+0.5±2.2%	-1.2±2.1%	-5.1±2.9%
側部表面 から1m	④最大中性子線量の高さ	+11.6±3.1%	+4.2±4.0%	+9.3±3.0%	+5.4±4.2%	+5.6±1.7%	+0.2±2.9%	-2.5±3.4%	+2.3±4.1%
	⑤燃料中心高さ	+0.9±7.7%	-0.1±1.7%	+3.8±1.6%	+1.8±1.7%	+4.7±1.0%	+1.3±1.2%	+6.7±2.2%	-0.6±1.5%
	⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	+10.3±2.9%	+7.0±3.3%	+5.6±1.6%	+3.1±3.5%	+5.9±1.3%	+2.6±2.5%	+0.8±2.8%	+2.2±3.3%
頭部表面	⑦最大中性子線量の半径	+3.0±4.5%	+7.2±3.5%	+6.7±0.9%	+7.6±3.7%	+4.7±0.8%	+2.3±2.5%	-6.7±4.7%	-1.9±3.3%
	⑧最外周	+3.2±4.6%	+3.6±2.1%	+6.6±1.2%	+1.7±2.1%	+4.4±1.0%	+2.2±1.5%	-6.9±5.1%	+1.9±2.1%
	⑨中央	+3.8±10.0%	-14.5±39.4%	+15.4±9.1%	-51.6±27.5%	+5.5±6.5%	+32.7±46.1%	-13.0±12.1%	-0.4±41.1%
頭部表面 から1m	⑩中央	-3.7±7.9%	+2.2±48.2%	-2.9±7.2%	-46.9±33.3%	-2.0±5.5%	+10.5±50.3%	-11.9±15.7%	-28.3±36.0%
	⑪最外周	+3.3±4.3%	-0.2±3.5%	+6.2±1.2%	+4.2±4.1%	+4.9±0.9%	+5.9±3.0%	-7.7±4.7%	+3.0±4.5%
底部表面	⑫最大中性子線量の半径	+15.1±4.0%	+7.1±2.5%	+7.6±2.6%	+3.9±2.6%	+5.2±2.0%	+1.2±1.9%	+0.8±5.6%	-4.8±2.5%
	⑬中央	+23.7±7.9%	-7.3±7.6%	+6.7±7.4%	+5.1±9.9%	+8.7±6.0%	-3.6±6.4%	-2.2±11.0%	+0.8±9.3%
	⑭最外周	+16.9±1.9%	+6.6±2.6%	+7.6±2.1%	+1.7±2.7%	+3.3±2.0%	-0.3±1.9%	-5.0±4.5%	-4.6±2.4%
底部表面 から1m	⑮最大中性子線量の半径	+20.0±6.7%	+7.4±2.7%	+5.5±5.5%	+3.9±2.8%	+2.2±4.0%	+3.4±2.0%	+0.8±8.1%	-1.6±2.7%
	⑯中央	+26.1±8.0%	-3.3±15.6%	+3.1±6.8%	-3.6±15.1%	+6.0±4.9%	+22.1±14.4%	-2.5±9.7%	-0.5±15.4%
	⑰最外周	+15.0±3.6%	+3.2±2.4%	+7.1±3.5%	+1.2±2.6%	+4.6±2.7%	+3.4±1.9%	-6.7±5.3%	+0.9±2.8%

注) ±○%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 3.3 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5% は、遮蔽計算内で増倍効果を考慮する場合に比べて、臨界計算による実効増倍率で線源強度補正を実施した場合の外部線量が 0.5～1.5%程度大きくなることを示す。

3.2.4 燃料収納部のモデル化

本項では、図3.2の(2)解析モデルの確認の流れ（形状・寸法）に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・バスケット・燃料集合体等を均質化したモデルで表す場合は、均質化しないで実際のとおりモデルを用いた場合と比較して、評価位置での中性子及びガンマ線線量が同じか高くなるようなモデルに設定されているか確認

(1) はじめに

金属キャスクは円筒形の設計が多いため、従前の遮蔽解析では 2 次元離散座標 Sn コード DOT3.5²⁵ 等の R-Z 体系でモデル化して計算することが一般的であったが、燃料収納部のバスケット格子や収納物である燃料集合体は R-Z 体系では形状を再現できないため、同部を均質化することも一般的であった。一方、3 次元体系で詳細にモデル化が可能であるモンテカルロコードでは燃料収納部の構造も設計どおりに再現可能であり、逆に従来の均質化モデルとすることも可能である。本項では、燃料収納部のモデル化が金属キャスク外部線量計算結果へ与える影響を評価することで、各燃料収納部モデルが使用された際の確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

燃料収納部のモデル化を下記の①～③の条件とした場合を計算ケースとし、金属キャスク体系の外部線量を評価した。各計算ケースのモデル化の詳細を図 3.13 に示す。

① 均質化モデル（基本解析条件）

- ・ 中心に内側燃料集合体（12 体）を均質化
- ・ 中間層に外側燃料集合体（12 体）を均質化
- ・ 最外層にバスケット（体積割合約 25%）を均質化
- ・ 燃料集合体の上部・下部構造物はバスケットとともに均質化

② 集合体モデル

- ・ バスケット格子は基本解析情報を基に、格子内の空間が燃料集合体の外寸²²と等しくなる形状で再現
- ・ 燃料集合体は上部・燃料有効部・下部に領域分割し、物質組成を①と整合させたいうで、それぞれ均質化

③ 燃料棒モデル

- ・ 集合体モデルにおける燃料集合体部を、燃料棒間隔が PWR 用 17×17 型より大きく、ストリーミング効果が発現しやすい 15×15 型と仮定し、物質組成を①と整合させたいうで、燃料棒一本ずつを設計形状²²で再現

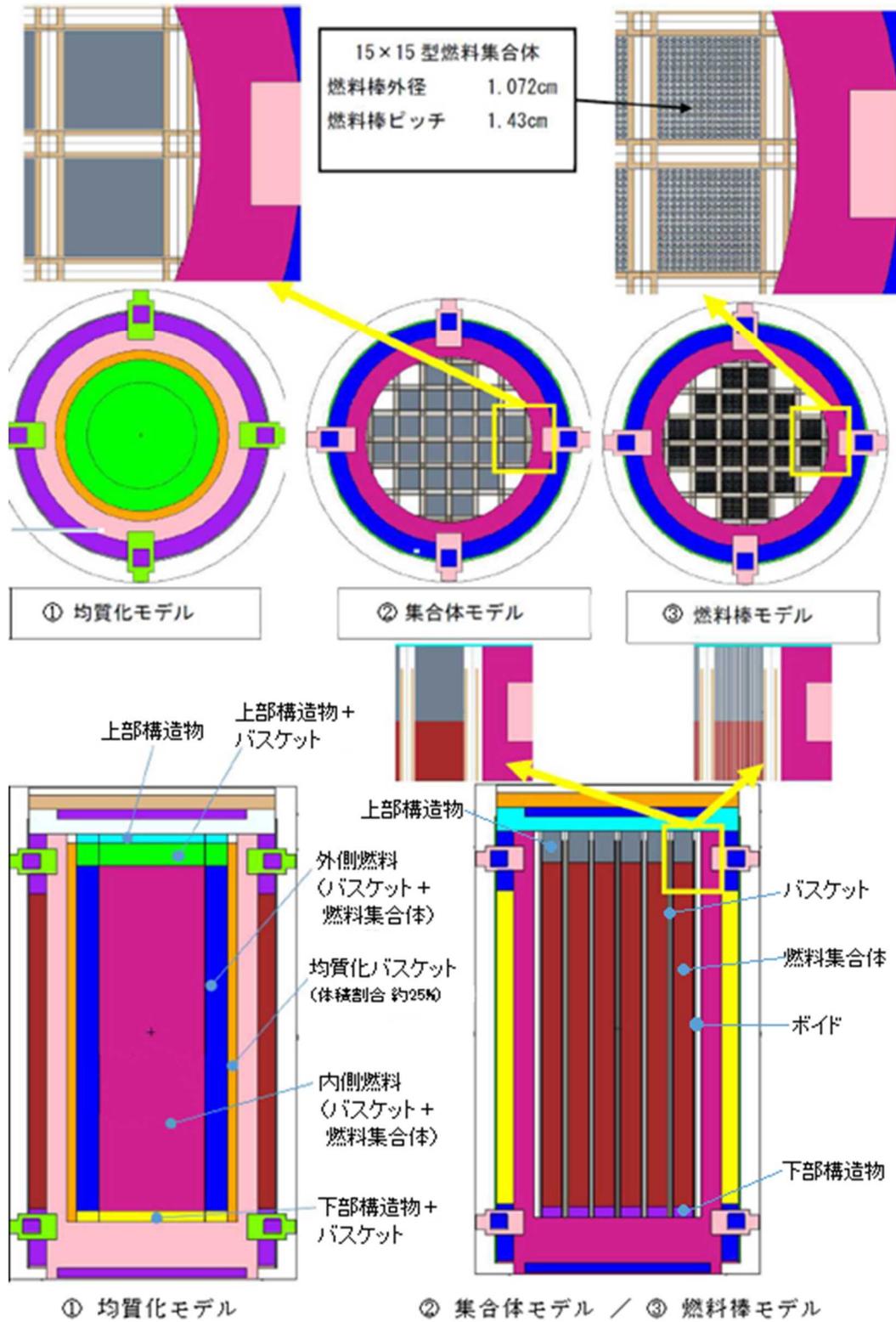


図 3.13 燃料収納部の解析モデル

Fig. 3.13 Geometry models of the fuel storage compartment

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～③について、3.4式に示す燃料収納部のモデル化による金属キャスク外部線量への影響 $E_{compartment}$ によって比較した結果を表3.8及び3.9に示す。

$$E_{compartment} = \frac{\text{②集合体モデル又は③燃料棒モデルによる外部線量}}{\text{①均質化モデルによる外部線量}} - 1 \quad \dots\dots(3.4)$$

中性子及び二次ガンマ線の結果より、①均質化モデルは影響の大きい評価位置では他ケースと比べて50%程度の過小評価となっている。これは燃料収納部の最外周部に一様に設定された均質化バスケット領域（主にアルミニウム及びホウ素添加アルミニウム製のバスケットを均質化し、体積割合で25%に希釈したもの）の遮蔽厚が、②集合体モデル及び③燃料棒モデルと比較して過剰となったためである。このような場合を想定し、均質化モデルを使用する場合は、安全側の均質化モデルとなるように設定条件の補正が必要となる。許認可申請の安全解析では、外部線量が非保守的とならないように、燃料領域より外層の遮蔽体の密度を調整すること等による補正が施されることが一般的となっている。また、構造材放射化ガンマ線に対する結果では、③燃料棒モデルが②集合体モデルより20%以上高い線量を示す評価位置もあり、燃料棒間の空隙がストリーミング経路として作用していることが考えられる。一方で、燃料棒を再現したモデルと均質化したモデルで有意な影響は無いとする評価結果²⁶も報告されており、燃料集合体や金属キャスクの構造により、外部線量への影響を一律に論じるのは困難であると考えられる。したがって、軸対称の均質化モデル（①均質化モデル）を設定する際の影響及び集合体ごとに均質化したモデル（②集合体モデル）を設定する際の構造材放射化ガンマ線による外部線量への影響を確認し、燃料収納部以外のモデル化、条件設定等も含め、全体として保守的となっていることの必要性が確認内容の留意点として得られた。

表 3.8 燃料収納部のモデル化による金属キャスク外部線量への影響比較
(②集合体モデル)

Table 3.8 Comparison of the effects on the external dose of the metal casks by modeling the fuel storage compartment

(②Model including the homogenized fuel assembly)

評価位置		中性子	二次ガンマ線	FPガンマ線	放射化ガンマ線	全線量
側部表面	①最大中性子線量の高さ	+55.0±0.9%	+19.8±1.9%	+1.1±1.2%	+33.3±1.8%	+50.3±0.8%
	②燃料中心高さ	+23.4±0.5%	+10.6±0.6%	-6.9±0.4%	+5.8±0.5%	-0.3±0.3%
	③最大放射化ガンマ線線量の高さ	+49.8±0.5%	+20.0±1.1%	-1.6±0.6%	+34.1±0.6%	+30.1±0.4%
側部表面 から1m	④最大中性子線量の高さ	+54.0±1.2%	+12.5±1.4%	-5.1±0.6%	+34.9±0.9%	+31.1±0.6%
	⑤燃料中心高さ	+27.2±0.4%	+9.5±0.6%	-7.0±0.3%	+6.5±0.4%	-0.3±0.2%
	⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	+50.0±0.7%	+13.0±1.2%	-5.7±0.5%	+31.4±0.8%	+21.0±0.4%
頭部表面	⑦最大中性子線量の半径	+53.4±0.3%	+34.3±1.1%	+70.3±1.1%	+9.2±1.1%	+52.1±0.3%
	⑧最外周	+53.5±0.5%	+14.5±0.6%	-5.1±0.4%	+35.6±0.4%	+36.6±0.3%
	⑨中央	+69.8±4.1%	+20.9±13.2%	+93.6±9.1%	+3.0±4.5%	+28.4±3.4%
頭部表面 から1m	⑩中央	+59.5±3.7%	+10.3±17.0%	+104.5±11.6%	-8.6±5.9%	+21.1±4.2%
	⑪最外周	+53.2±0.4%	+14.2±1.1%	-3.6±0.9%	+18.0±0.8%	+42.7±0.3%
底部表面	⑫最大中性子線量の半径	+19.0±1.0%	+17.1±1.0%	-4.0±0.8%	+3.7±1.0%	+18.3±1.0%
	⑬中央	+19.4±4.6%	+8.2±3.0%	+14.6±10.7%	-10.3±9.8%	+12.2±2.6%
	⑭最外周	+21.0±0.5%	+12.9±1.0%	-6.7±0.3%	+4.0±0.3%	+5.0±0.3%
底部表面 から1m	⑮最大中性子線量の半径	+20.0±3.0%	+15.2±1.0%	-7.3±4.5%	+8.8±8.3%	+19.3±2.4%
	⑯中央	+17.1±2.6%	+4.3±4.9%	-12.4±9.0%	-1.8±12.6%	+11.0±2.8%
	⑰最外周	+17.3±1.7%	+13.8±0.9%	-7.2±0.7%	+4.1±0.8%	+12.5±1.1%

表 3.9 燃料収納部のモデル化による金属キャスク外部線量への影響比較
(③燃料棒モデル)

Table 3.9 Comparison of the effects on the external dose of the metal casks by modeling the fuel storage compartment

(③Model including the fuel rods)

評価位置		中性子	二次ガンマ線	FPガンマ線	放射化ガンマ線	全線量
側部表面	①最大中性子線量の高さ	+56.0±0.9%	+23.5±2.0%	+1.4±1.2%	+71.5±2.3%	+55.1±0.8%
	②燃料中心高さ	+32.0±0.5%	+14.2±0.6%	-7.8±0.4%	+41.9±0.7%	+5.4±0.3%
	③最大放射化ガンマ線線量の高さ	+52.9±0.5%	+22.9±1.2%	-2.0±0.6%	+71.0±0.7%	+51.0±0.4%
側部表面 から1m	④最大中性子線量の高さ	+56.0±1.4%	+17.3±1.5%	-5.1±0.6%	+72.6±1.1%	+43.0±0.7%
	⑤燃料中心高さ	+34.4±0.5%	+13.7±0.6%	-7.5±0.3%	+43.1±0.5%	+6.1±0.2%
	⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	+53.4±0.8%	+15.4±1.2%	-6.1±0.5%	+66.7±1.0%	+34.3±0.4%
頭部表面	⑦最大中性子線量の半径	+56.6±0.3%	+35.4±1.1%	+74.7±1.2%	+47.1±1.3%	+56.2±0.3%
	⑧最外周	+56.5±0.5%	+17.1±0.6%	-4.6±0.5%	+74.5±0.5%	+46.0±0.3%
	⑨中央	+61.4±4.1%	+30.8±13.9%	+112.4±10.2%	-17.7±3.9%	+13.1±3.1%
頭部表面 から1m	⑩中央	+61.9±3.9%	+29.6±19.1%	+121.6±12.2%	-12.3±5.9%	+20.4±4.2%
	⑪最外周	+57.8±0.4%	+17.6±1.1%	-3.6±0.9%	+42.9±0.9%	+49.0±0.4%
底部表面	⑫最大中性子線量の半径	+23.1±1.0%	+20.7±1.0%	-4.7±0.8%	+48.8±1.5%	+23.1±1.0%
	⑬中央	+5.5±2.5%	+5.8±3.0%	5.5±9.6%	-30.3±8.0%	+5.4±2.1%
	⑭最外周	+25.6±0.6%	+14.9±1.0%	-7.4±0.3%	+44.4±0.4%	+15.0±0.3%
底部表面 から1m	⑮最大中性子線量の半径	+23.5±2.3%	+16.5±1.0%	-2.7±6.5%	+45.3±3.7%	+22.8±1.8%
	⑯中央	+17.2±2.5%	+11.8±5.4%	-1.9±10.1%	+12.5±14.3%	+14.7±2.9%
	⑰最外周	+23.1±2.0%	+15.1±1.0%	-8.0±0.7%	+44.8±1.0%	+19.2±1.3%

3.2.5 燃料集合体の配置

本項では、図3.2の(2)解析モデルの確認の流れ(形状・寸法)に関連する確認内容として、燃料集合体の配置が金属キャスク外部線量へ与える影響を考慮すべきかを検討するうえで、上記の影響を評価するための検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

(1) はじめに

金属キャスクの燃料収納部であるバスケットの収納空間のサイズは、装荷する燃料集合体に対して余裕を持つことが通常であり、その余裕の範囲内で燃料集合体の移動、偏りが発生し得る。本項では、バスケット内で燃料集合体がキャスク半径方向に一定の偏りを示した場合に、金属キャスク外部線量へ与える影響を評価することで、燃料集合体の配置の設定に対する確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

燃料集合体のバスケット内での偏りを以下に示す①～④のケースで設定し、①のケースを基準として②～④のケースを比較することにより、金属キャスク体系の外部線量への影響を評価した。

- ① 全燃料集合体がバスケット内収納部の中心にある場合 (基準ケース)
- ② 全燃料集合体がトラニオンのある 0°方向に偏った場合
- ③ 全燃料集合体が最外側に偏った場合
- ④ 全燃料集合体が最内側に偏った場合

各計算ケースにおける詳細な体系モデルを図 3.14 に示す。金属キャスクの体系モデルは 3.2.3 項の 17×17 型燃料集合体を用いたモデルとした。また、バスケット内収納部の断面寸法は 23.0×23.0 cm、燃料集合体の断面寸法は 21.4×21.4 cm であり、燃料集合体はバスケット内収納部中心から径方向の上下左右に 0.8 cm ずつの移動が可能と仮定したモデルである。

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～④について、3.5式に示す燃料集合体の配置による金属キャスク表面線量への影響 $E_{position}$ によって比較した結果を表3.10に示す。

$$E_{position} = \frac{\text{燃料集合体の配置に偏りがある場合における表面線量 (②～④)}}{\text{燃料集合体の配置に偏りがない場合における表面線量 (①)}} - 1$$

……………(3.5)

各評価点での 1cm 線量当量率分布には、統計誤差を超えるような大きな相違はいずれの配置の場合でも見られなかった。したがって、8 mm 程度のバスケット内での燃料集合体の

径方向移動では、キャスク外部の線量に与える影響は非常に小さい。

以上より、燃料集合体の配置の設定による影響は軽微であり、確認内容に対する特記すべき留意点は無い。

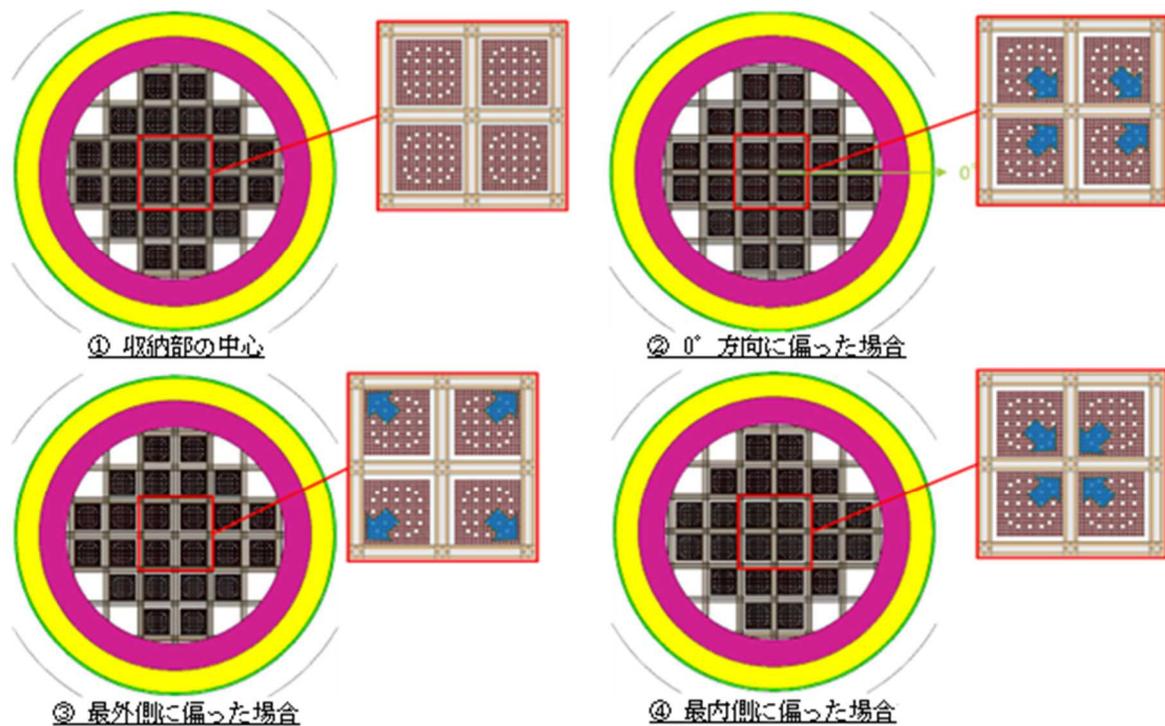


図 3.14 燃料集合体のバスケット内配置の変化に関する感度解析ケース

Fig. 3.14 Sensitivity analysis cases for the fuel assembly position in the basket

表 3.10 燃料集合体のバスケット内配置による金属キャスク外部線量への影響比較

Table 3.10 Comparison of the effects of the fuel assembly position in the basket on the external dose of a metal cask model

計算ケース		㉒	㉓	㉔
評価位置 \ 燃料集合体の偏り		0° 方向	最外側	最内側
側部表面	㉑最大中性子線量の高さ	+0.0±0.6%	+1.4±0.7%	+0.1±0.5%
	㉒燃料中心高さ	+0.3±0.3%	+0.0±0.4%	+0.3±0.3%
	㉓最大放射化ガンマ線線量の高さ	+0.2±0.4%	+1.1±0.4%	+0.0±0.3%
側部表面 から1m	㉔最大中性子線量の高さ	-0.8±0.5%	-0.4±0.7%	-0.3±0.5%
	㉒燃料中心高さ	+0.2±0.3%	-0.1±0.3%	+0.1±0.3%
	㉓最大放射化ガンマ線線量の高さ	+0.2±0.4%	-0.5±0.5%	-0.3±0.4%
頭部表面	㉕最大中性子線量の半径	+0.3±0.4%	+1.0±0.4%	-0.1±0.4%
	㉖最外周	+0.7±0.4%	+1.0±0.4%	+0.1±0.4%
	㉗中央	-1.3±1.6%	+2.5±4.3%	-3.0±1.5%
頭部表面 から1m	㉗中央	-0.3±0.3%	+0.2±0.3%	-0.6±0.3%
	㉕最外周	-0.3±0.5%	+0.6±0.5%	-0.7±0.4%
	㉖最大中性子線量の半径	+0.5±1.5%	+1.5±1.7%	-0.5±1.5%
底部表面	㉗中央	-1.0±2.0%	-0.5±2.0%	-2.4±1.9%
	㉖最外周	-0.4±0.4%	+0.1±0.4%	-0.2±0.4%
	㉕最大中性子線量の半径	+0.9±2.5%	+1.0±2.5%	+4.8±5.5%
底部表面 から1m	㉗中央	-0.5±0.3%	+0.6±0.3%	-0.9±0.3%
	㉖最外周	+5.4±2.7%	+1.0±1.2%	+2.2±1.5%

注) ±〇%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 3.5 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5%は、全燃料集合体がバスケット内収納部の中心にある場合に比べて、外部線量が 0.5～1.5 %程度大きくなることを示す。

3.2.6 中性子遮蔽材の減損

本項では、図3.2の(2)解析モデルの確認の流れ(形状・寸法)に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・本体胴、蓋、中性子遮蔽材などの遮蔽材の厚さは、製作公差及び使用期間中の経年変化を考慮して、評価位置での中性子及びガンマ線線量が最も高くなるように設定されているか確認

(1) はじめに

使用済燃料の貯蔵に供する金属キャスクは、50～60年間の貯蔵期間中に熱等の影響により中性子遮蔽材が経年劣化する可能性がある。劣化要因は放射線照射による分解、酸化反応等も微小な影響を与えると考えられるが、許認可申請における遮蔽解析では一般的に、遮蔽性能の低下に優位な影響を与え得る熱による密度減損について評価を行っている。本項では、中性子遮蔽材全体の密度減損が発生した際の金属キャスク外部線量への影響を評価することで、中性子遮蔽材の密度減損の各条件設定に対する確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

中性子遮蔽材（エポキシ系レジン）全体の密度が3%減損したと仮定し、それらが下記の②～④の条件であった場合を計算ケースとし、①の密度減損を考慮しない場合とともに金属キャスク体系の外部線量を評価した。

- ① 中性子遮蔽材の密度減損を非考慮：基本解析条件
- ② 中性子遮蔽材の構成元素が一様に3%減損
- ③ 水酸化アルミニウムからの脱水により3%減損
- ④ エポキシ樹脂の分解等、水素のみにより3%減損

上記計算ケースにおける中性子遮蔽材（レジン）の物質組成を表3.11に示す。

表 3.11 中性子遮蔽材の減損を考慮した物質組成（1/2）

Table 3.11 Elemental compositions for the neutron shield material considering the depletion

計算ケース	レジン			
	①	②	③	④
想定条件	減損なし	全元素一様減損	水分のみ減損	水素のみ減損
H 1	5.95215E 02	5.77359E 02	5.61511E 02	2.94056E 02
B 10	1.77154E 05	1.71839E 05	1.77154E 05	1.77154E 05
B 11	7.05718E 04	6.84546E 04	7.05718E 04	7.05718E 04
C 12	2.33312E 02	2.26312E 02	2.33312E 02	2.33312E 02
N 14	1.43278E 03	1.38980E 03	1.43278E 03	1.43278E 03
O 16	2.67912E 02	2.59875E 02	2.51060E 02	2.67912E 02
Al 27	7.97674E 03	7.73744E 03	7.97674E 03	7.97674E 03

組成は原子個数密度 [10^{24} atoms/cm³]

表 3.11 中性子遮蔽材の減損を考慮した物質組成（2/2）

Table 3.11 Elemental compositions for the neutron shield material considering the depletion

計算ケース	レジン+伝熱フィン			
	①	②	③	④
想定条件	減損なし	全元素一様減損	水分のみ減損	水素のみ減損
H 1	5.85498E 02	5.67933E 02	5.52344E 02	2.89255E 02
B 10	1.74261E 05	1.69034E 05	1.74261E 05	1.74261E 05
B 11	6.94197E 04	6.73371E 04	6.94197E 04	6.94197E 04
C 12	2.29503E 02	2.22618E 02	2.29503E 02	2.29503E 02
N 14	1.40939E 03	1.36711E 03	1.40939E 03	1.40939E 03
O 16	2.63539E 02	2.55633E 02	2.46962E 02	2.63539E 02
Al 27	7.84652E 03	7.61112E 03	7.84652E 03	7.84652E 03
Cu 63	9.50731E 04	9.50731E 04	9.50731E 04	9.50731E 04
Cu 65	4.23753E 04	4.23753E 04	4.23753E 04	4.23753E 04

組成は原子個数密度 [10^{24} atoms/cm³]

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～④について、3.6式に示す中性子遮蔽材の密度減損による金属キャスク側部表面及び表面から1mにおける線量への影響 $E_{density}$ によって比較した結果を表3.12に示す。

$$E_{density} = \frac{\text{中性子遮蔽材が 3\%密度減損した場合の外部線量 (②～④)}}{\text{中性子遮蔽材の密度減損が無い場合の外部線量 (①)}} - 1 \quad \dots\dots(3.6)$$

全ての結果において、中性子遮蔽材の密度減損を考慮した場合に、線量評価結果が大きくなり、特に中性子に対する遮蔽効果の高い水素のみが減損するケース④において、中性子線量の増加が顕著であり、全線量の比較においても最も影響が大きい。一方でガンマ線については中性子ほどの顕著な影響はないが、増加傾向が認められる。また、各ケースの中性子線量において、最大中性子線量高さでの影響が他の評価位置に対して相対的に小さいのは、図 3.4（基本解析結果の線量分布）から分かるように、側部方向の中性子最大線量位置が中性子遮蔽材の欠損部であるトラニオン部近辺であり、中性子遮蔽材の遮蔽性能の差異による影響が現れにくいためである。

以上より、中性子遮蔽材の経年劣化により密度減損の可能性がある場合は、線量評価結果への影響を無視することはできず、密度減損を考慮しない場合は非安全側の設定となる。本項で確認したケースの中では、密度減損が水素のみで発生する場合に水素の原子個数密度がほぼ半減することから最も影響が大きく、その仮定に基づいて遮蔽評価を行うことが最も保守的となる。一方で、中性子遮蔽材の密度減損についての記載もある参考文献²⁷には、エポキシ系レジンに対する試験結果では 180°C×5,000 時間での重量損失 4%以下、170°C×5,000 時間での重量損失 3%以下であり（いずれも約 2,000 時間で重量損失が飽和状態）、重量減損が発生した際の原因のほとんどは水分の放出であるとの安全側の知見が得られている。上記の他にも設計貯蔵期間を包含する条件での評価結果を示す参考文献²⁸等もあり、それらを参照しつつ金属キャスクに使用される中性子遮蔽材の組成や経年変化の特性を考慮し、現実的に起こり得る現象に対する試験結果等を確認したうえで、評価が非保守的とならないように適切な解析条件を設定することの必要性が確認内容の留意点として得られた。

表 3.12 中性子遮蔽材の密度減損による金属キャスク外部線量への影響比較

Table 3.12 Comparison of the effects of the density depletion of the neutron shield material on the external dose of a metal cask model

計算ケース	条件	評価位置		中性子	二次ガンマ線	FPガンマ線	放射化ガンマ線	全線量
②	全元素一様減損	側部表面	①最大中性子線量高さ	+1.8±0.7%	+4.1±2.0%	+5.8±1.3%	+4.4±1.5%	+1.8±0.6%
			②燃料中心高さ	+23.6±0.5%	+4.3±0.7%	+4.7±0.4%	+5.8±0.6%	+6.0±0.3%
			③最大放射化ガンマ線線量の高さ	+3.4±0.5%	+5.7±1.2%	+5.5±0.7%	+5.0±0.5%	+5.1±0.4%
		側部表面から1m	④最大中性子線量高さ	+3.5±1.1%	+6.1±1.6%	+5.1±0.7%	+4.8±0.8%	+4.4±0.6%
			⑤燃料中心高さ	+21.1±0.6%	+3.6±0.7%	+5.4±0.4%	+5.2±0.5%	+6.1±0.3%
			⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	+4.1±0.6%	+5.5±1.3%	+4.9±0.6%	+5.4±0.7%	+5.0±0.4%
③	水分のみ減損	側部表面	①最大中性子線量高さ	+2.9±1.4%	+8.6±3.1%	+7.9±1.7%	+5.3±1.7%	+3.7±1.2%
			②燃料中心高さ	+32.0±1.0%	+5.0±1.0%	+5.7±0.6%	+6.6±0.8%	+6.6±0.4%
			③最大放射化ガンマ線線量の高さ	+3.4±0.7%	+7.6±1.8%	+5.5±0.9%	+5.4±0.7%	+5.1±0.5%
		側部表面から1m	④最大中性子線量高さ	+4.5±1.9%	+5.3±2.3%	+4.2±0.9%	+4.8±1.1%	+4.6±0.9%
			⑤燃料中心高さ	+29.0±1.0%	+3.0±1.0%	+5.8±0.5%	+5.9±0.6%	+6.1±0.4%
			⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	+3.4±0.9%	+4.1±1.9%	+4.9±0.8%	+6.1±1.0%	+5.0±0.5%
④	水素のみ減損	側部表面	①最大中性子線量高さ	+15.4±1.0%	+17.2±2.0%	+10.1±1.4%	+8.5±1.5%	+14.2±0.8%
			②燃料中心高さ	+560.2±2.4%	+12.3±0.7%	+9.8±0.5%	+10.0±0.6%	+33.6±0.4%
			③最大放射化ガンマ線線量の高さ	+68.1±0.7%	+13.3±1.2%	+10.2±0.7%	+9.5±0.6%	+20.4±0.4%
		側部表面から1m	④最大中性子線量高さ	+39.0±1.2%	+12.5±1.5%	+9.3±0.7%	+8.9±0.8%	+20.9±0.6%
			⑤燃料中心高さ	+478.5±1.8%	+8.3±0.6%	+9.9±0.4%	+9.8±0.5%	+30.3±0.3%
			⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	+74.3±0.9%	+12.8±1.3%	+10.2±0.6%	+10.0±0.7%	+23.4±0.4%

注) ±〇%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 3.6 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5%は、計算ケース①の場合に比べて、計算ケース②～④の場合の外部線量が 0.5～1.5%程度大きくなることを示す。

3.2.7 核データ

本項では、図3.2の(4)データ・係数の確認の流れに示されている以下に関連して、各反応断面積データによる影響の観点で検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・用いられている遮蔽材やその他の材質を構成する核種の中性子断面積は、類似の線源エネルギーに対する遮蔽実験等でその正確度が検証されているか確認
- ・用いられている遮蔽材やその他の材質を構成する元素の光子断面積は、ガンマ線源のエネルギー範囲でその正確度が検証されているか確認

(1) はじめに

モンテカルロコードにより 20 MeV 以下の中性子及びガンマ線の輸送計算を行う際は評価済み核データライブラリ (以下「核データ」という。) に基づいて作成された専用形式の断面積ライブラリを用いることが一般的である。表 3.13 に示すように日本、米国、欧州等で独自の核データが開発され (他の核データから一部を参照して収録することもある。)、新規の実験データ、核反応理論等が取り込まれてデータの更新や拡張が進められている。計算に使用する核データ (断面積ライブラリ) の精度は、そのまま計算結果に直結することから、本項では、核データの種類が計算結果へ与える影響を評価することで、各核デー

タが使用された際の確認内容の留意点を検討した。

表 3.13 核データの開発状況

Table 3.13 Development status of the evaluated nuclear data files

核データ	JENDL (日本)					ENDF/B-VIII (米)	JEFF-3.3 (欧)
	1	2	3.3	4.0	5		
公開年	1977	1985	2002	2010	2021	2018	2017
収録核種数	72	181	337	406	795	557	562
天然存在核種	48	130	228	260	287	286	286
ガンマ線データ	0	0	114	354	788	420	559
放射化データ	0	0	2	3	794	119	355

出典) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機、

「原子核の基礎データベース JENDL の最新版を公開」、令和 3 年

<https://www.jaea.go.jp/02/press2021/p21122701/> (2025 年 8 月 20 日確認) ²⁹

(2) 計算ケース及び条件

下記の 4 種類の核データを表 3.14 に示すように全ての物質に設定した場合に加え、主要遮蔽体への影響を評価するために炭素鋼のみ、あるいは中性子遮蔽材のみに異なる核データを設定した場合を計算ケースとし、金属キャスク体系の外部線量を評価した。

- ・ JENDL-4.0 ⁸ (J4：研究開始時点での最新版日本製核データ：基本解析条件)
- ・ JENDL-5 ³⁰ (J5：本技術報告執筆時における最新版日本製核データ)
- ・ JENDL-3.3 ³¹ (J33：許認可における使用実績が豊富な日本製核データ)
- ・ ENDF/B-VII.1 ³² (B7：米国製で使用頻度の高い核データ)

ここで、上記の使用実績及び使用頻度は、遮蔽解析への適用に限る。

表 3.14 核データ影響解析における計算ケース

Table 3.14 Sensitivity analysis cases for the effect of the evaluated nuclear data files

計算ケース	使用する核データ		
	炭素鋼 ^{※1}	中性子遮蔽材 ^{※2}	その他 ^{※3}
① J4	JENDL-4.0	JENDL-4.0	JENDL-4.0
② J5	JENDL-5	JENDL-5	JENDL-5
③ J33	JENDL-3.3	JENDL-3.3	JENDL-3.3
④ B7	ENDF/B-VII.1	ENDF/B-VII.1	ENDF/B-VII.1
⑤ J5-CS ^{※4}	JENDL-5	JENDL-4.0	JENDL-4.0
⑥ J5-NS ^{※5}	JENDL-4.0	JENDL-5	JENDL-4.0
⑦ J33-CS	JENDL-3.3	JENDL-4.0	JENDL-4.0
⑧ J33-NS	JENDL-4.0	JENDL-3.3	JENDL-4.0

※1：キャスク本体胴、一次蓋、二次蓋及び外板

※2：側部、蓋部、底部及びトラニオン内

※3：バスケット内等、炭素鋼及び中性子遮蔽材以外

※4：CSは炭素鋼（Carbon Steel）へ設定した場合を示す

※5：NSは中性子遮蔽材（Neutron Shield）へ設定した場合を示す

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～⑧について、3.7式に示す核データの種類による金属キャスクの外部線量への影響 E_{N-data} によって放射線の種類ごとに比較した結果を表3.15～3.19にそれぞれ示す。

$$E_{N-data} = \frac{\text{各核データを全体又は一部に設定した場合の外部線量 (②～⑧)}}{\text{JENDL-4.0を全体に設定した場合の外部線量 (①)}} - 1$$

……………(3.7)

頭部の中央位置における二次ガンマ線線量のように、評価位置にほとんど到達しないことで誤差が大きい（10%以上）結果を除けば、線量の比較結果は概ね5%以内に収まっており、また、全線量での比較では誤差を考慮すれば有意な影響はほぼ無いことから、本評価体系及び使用物質に対しては、核データの種類による影響は小さい。一方で表3.13が示すように、核データは更新が進むにつれて収録データ数が増加するとともにデータ内容の修正も進んでおり、信頼できる検証結果が示されていることが確認されれば、より新しい核データを用いることが推奨される。特に、過去のバージョンでは遮蔽解析を実施するうえで重要な二次ガンマ線のデータが不足しており、解析に必要なデータが収録されていない場合は過小評価に繋がる可能性が高いため、使用する核データバージョンのデータ収録状況について確認が必要である。

表 3.15 核データの種類による金属キャスク外部線量への影響比較（中性子）

Table 3.15 Comparison of the effects of different evaluated nuclear data files on the external dose of a metal cask model (neutron)

評価位置		中性子						
		② J5	③ J33	④ B7	⑤ J5-CS	⑥ J5-NS	⑦ J33-CS	⑧ J33-NS
側部表面	①最大中性子線量の高さ	-5.1±0.6%	-3.3±0.6%	+4.6±0.7%	+1.3±1.2%	+0.7±0.8%	+1.7±0.5%	+1.1±0.9%
	②燃料中心高さ	-4.7±0.4%	-4.8±0.4%	-2.1±0.4%	+0.0±0.7%	-0.4±0.5%	-1.3±0.3%	-1.2±0.5%
	③最大放射化ガンマ線線量の高さ	-5.2±0.4%	-4.9±0.4%	+0.7±0.4%	-0.7±0.8%	-0.4±0.5%	+0.2±0.3%	+0.0±0.5%
側部表面 から1m	④最大中性子線量の高さ	-5.4±0.9%	-2.5±0.9%	+6.9±1.2%	+3.4±2.9%	+2.0±1.5%	+2.2±0.7%	+2.0±1.2%
	⑤燃料中心高さ	-5.0±0.4%	-4.6±0.4%	-1.7±0.4%	-1.3±0.7%	-0.4±0.4%	-1.0±0.3%	-0.9±0.4%
	⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	-4.6±0.6%	-4.0±0.6%	+2.0±0.6%	+0.0±1.2%	+0.0±0.7%	+1.0±0.5%	+0.0±0.7%
頭部表面	⑦最大中性子線量の半径	-5.9±0.2%	-3.4±0.4%	+4.0±0.5%	+0.1±0.3%	+0.0±0.3%	+0.2±0.4%	+0.2±0.3%
	⑧最外周	-5.4±0.3%	-2.5±0.6%	+5.9±0.7%	+1.0±0.5%	+1.0±0.4%	+1.0±0.6%	+1.0±0.4%
	⑨中央	-1.7±2.3%	+2.9±4.5%	-5.0±4.1%	+0.0±3.3%	-1.7±2.9%	+6.5±4.4%	+3.6±3.0%
頭部表面 から1m	⑩中央	-10.4±2.1%	-8.1±3.8%	+1.2±4.1%	-3.1±3.1%	-3.1±3.0%	-1.2±4.4%	-1.5±2.9%
	⑪最外周	-6.3±0.3%	-3.6±0.5%	+5.4±0.6%	+0.0±0.4%	+0.0±0.4%	+0.0±0.5%	+0.0±0.4%
底部表面	⑫最大中性子線量の半径	-5.8±0.8%	-1.7±1.6%	+15.0±2.6%	+1.7±1.3%	+0.8±1.1%	+1.7±1.4%	+1.7±1.1%
	⑬中央	-6.6±2.4%	+0.0±4.1%	+1.8±4.1%	+2.4±3.9%	+2.4±3.4%	-5.4±3.9%	-3.0±2.9%
	⑭最外周	-6.0±0.5%	-3.2±1.3%	+5.7±1.4%	+0.5±0.7%	+0.5±0.6%	+0.5±0.9%	+0.7±0.6%
底部表面 から1m	⑮最大中性子線量の半径	-11.5±2.6%	-11.5±3.0%	+0.0±4.3%	-4.9±3.2%	-6.6±2.9%	-3.3±4.0%	-0.8±3.9%
	⑯中央	-6.8±2.0%	-6.2±3.5%	+4.0±3.7%	+1.4±2.8%	+1.4±2.6%	-3.6±3.5%	-2.9±2.5%
	⑰最外周	-7.5±1.7%	-2.6±2.5%	+17.8±7.5%	+0.4±3.0%	+1.6±2.9%	+2.0±3.7%	+1.7±2.4%

注) ±〇%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 3.7 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5 %は、計算ケース①の場合に比べて、計算ケース②～⑧の場合の外部線量が 0.5～1.5 %程度大きくなることを示す。

表 3.16 核データの種類による金属キャスク外部線量への影響比較（二次ガンマ線）

Table 3.16 Comparison of the effects of different evaluated nuclear data files on the external dose of a metal cask model (secondary gamma-ray)

評価位置		二次ガンマ線						
		② J5	③ J33	④ B7	⑤ J5-CS	⑥ J5-NS	⑦ J33-CS	⑧ J33-NS
側部表面	①最大中性子線量の高さ	-1.9±1.5%	-1.5±1.5%	+0.4±1.6%	+3.7±3.3%	+0.4±2.0%	+0.0±2.8%	+0.4±2.0%
	②燃料中心高さ	-3.3±0.5%	-1.3±0.5%	+1.0±0.5%	-1.7±1.0%	-0.7±0.7%	-0.3±0.9%	-0.3±0.7%
	③最大放射化ガンマ線線量の高さ	-3.7±0.9%	-0.9±0.9%	+0.9±1.0%	+0.0±1.8%	-0.9±1.2%	-1.9±1.7%	+0.0±1.2%
側部表面 から1m	④最大中性子線量の高さ	-3.4±1.2%	-2.3±1.1%	-0.2±1.2%	-2.1±2.3%	-1.3±1.5%	-3.8±2.1%	-1.3±1.4%
	⑤燃料中心高さ	-2.4±0.5%	-1.2±0.5%	+0.6±0.5%	-1.2±1.0%	-0.6±0.7%	+0.0±0.9%	-0.6±0.6%
	⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	-1.6±1.0%	-0.7±1.0%	+0.5±1.0%	-0.9±2.0%	-1.1±1.2%	-1.9±1.8%	+0.8±1.2%
頭部表面	⑦最大中性子線量の半径	-1.1±0.9%	+1.7±1.9%	-1.5±1.9%	+1.7±1.4%	+2.1±1.2%	+0.2±1.8%	+1.9±1.2%
	⑧最外周	-3.3±0.5%	+3.0±1.2%	+0.7±1.1%	+0.0±0.8%	+0.3±0.7%	+1.3±1.1%	+0.0±0.7%
	⑨中央	-9.7±10.6%	-49.9±13.1%	+31.4±28.7%	-10.3±22.2%	-18.9±17.3%	+20.0±27.2%	-19.5±12.8%
頭部表面 から1m	⑩中央	-14.2±13.7%	-1.2±39.9%	-27.0±24.9%	-30.0±15.2%	+0.7±17.3%	-53.8±13.6%	-34.8±11.5%
	⑪最外周	-4.4±0.9%	-2.7±1.9%	+3.9±2.0%	-3.0±1.4%	-2.7±1.3%	+0.2±2.0%	+0.3±1.3%
底部表面	⑫最大中性子線量の半径	-2.0±0.9%	-3.7±1.4%	-1.7±1.5%	+0.0±1.2%	+0.0±1.1%	+2.0±1.6%	+0.7±1.1%
	⑬中央	-2.4±2.8%	-4.5±4.9%	-2.1±5.2%	-2.1±3.8%	-1.0±3.4%	+2.1±5.2%	+1.0±3.5%
	⑭最外周	-4.1±0.9%	-2.6±1.5%	+1.0±1.6%	-1.0±1.2%	-1.8±1.1%	-0.3±1.6%	-1.5±1.1%
底部表面 から1m	⑮最大中性子線量の半径	-3.2±0.9%	-4.2±1.5%	-1.0±1.5%	-0.3±1.2%	-1.0±1.1%	+1.9±1.6%	+1.0±1.1%
	⑯中央	-6.3±4.6%	-8.5±8.0%	-15.6±7.0%	-7.8±6.0%	-7.0±5.5%	-4.4±7.9%	+1.1±5.8%
	⑰最外周	-3.8±0.9%	-1.3±1.5%	+0.6±1.6%	-0.6±1.2%	-1.3±1.1%	+1.9±1.6%	+1.3±1.1%

注) ±〇%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 3.7 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5 %は、計算ケース①の場合に比べて、計算ケース②～⑧の場合の外部線量が 0.5～1.5 %程度大きくなることを示す。

表 3.17 核データの種類による金属キャスク外部線量への影響比較 (FP ガンマ線)

Table 3.17 Comparison of the effects of different evaluated nuclear data files on the external dose of a metal cask model (FP gamma-ray)

評価位置		FPガンマ線						
		② J5	③ J33	④ B7	⑤ J5-CS	⑥ J5-NS	⑦ J33-CS	⑧ J33-NS
側部表面	①最大中性子線量の高さ	+0.0±1.6%	-0.4±1.5%	-0.4±1.5%	+0.0±1.3%	-0.4±1.3%	+0.4±1.6%	+0.0±1.3%
	②燃料中心高さ	-0.1±0.5%	-0.1±0.5%	-0.2±0.5%	-0.4±0.4%	-0.4±0.4%	-0.2±0.5%	-0.4±0.4%
	③最大放射化ガンマ線線量の高さ	-0.4±0.8%	-1.6±0.8%	-1.6±0.8%	-0.4±0.7%	-0.4±0.7%	-0.4±0.8%	-0.4±0.7%
側部表面 から1m	④最大中性子線量の高さ	+0.0±0.9%	+0.0±0.9%	+0.0±0.9%	+0.0±0.7%	+0.0±0.7%	+0.0±0.9%	+0.0±0.7%
	⑤燃料中心高さ	-0.5±0.5%	+0.9±0.5%	+0.9±0.5%	-0.7±0.4%	-0.7±0.4%	-0.5±0.5%	-0.5±0.4%
	⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	-1.2±0.7%	-0.4±0.7%	-0.4±0.7%	-0.8±0.6%	-0.4±0.6%	-1.2±0.7%	-0.4±0.6%
頭部表面	⑦最大中性子線量の半径	-0.9±0.9%	+0.0±0.9%	+0.0±0.9%	-0.9±0.8%	-0.9±0.8%	-0.9±0.9%	-0.9±0.8%
	⑧最外周	-1.1±0.5%	+0.3±0.5%	+0.3±0.5%	-0.8±0.4%	-0.8±0.4%	-1.0±0.5%	-0.8±0.4%
	⑨中央	-7.3±6.1%	-4.3±6.1%	-4.3±6.1%	-8.5±5.0%	-8.5±5.0%	-6.0±6.1%	-8.1±5.0%
頭部表面 から1m	⑩中央	+0.0±7.5%	+0.0±7.7%	+0.0±7.8%	-0.9±6.4%	-0.9±6.4%	+0.9±7.5%	+0.0±6.4%
	⑪最外周	+0.0±1.1%	-0.9±1.2%	-0.9±1.2%	+0.0±1.0%	+0.0±1.0%	-0.9±1.1%	-0.9±1.0%
底部表面	⑫最大中性子線量の半径	-0.7±0.9%	+0.5±1.1%	+0.5±1.1%	-0.7±0.9%	-0.7±0.9%	-0.5±1.2%	-0.5±0.9%
	⑬中央	+2.5±9.3%	+13.6±12.4%	+13.6±12.3%	+2.5±9.3%	+2.5±9.3%	+4.5±11.2%	+2.5±9.3%
	⑭最外周	-0.4±0.4%	-0.3±0.5%	-0.3±0.5%	-0.4±0.4%	-0.4±0.4%	-0.4±0.5%	-0.5±0.4%
底部表面 から1m	⑮最大中性子線量の半径	-2.7±4.5%	-3.6±5.6%	-3.6±5.6%	-2.7±4.5%	-2.7±4.5%	-0.9±5.0%	-4.5±4.2%
	⑯中央	+1.5±11.1%	+18.9±14.9%	+20.8±15.1%	+1.5±11.1%	+1.5±11.1%	+7.2±13.9%	+3.1±11.2%
	⑰最外周	-0.8±0.8%	+0.8±1.0%	+0.8±1.0%	-0.8±0.8%	-0.8±0.8%	-0.8±0.9%	-0.8±0.8%

注) ±〇%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 3.7 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5 %は、計算ケース①の場合に比べて、計算ケース②～⑧の場合の外部線量が 0.5～1.5 %程度大きくなることを示す。

表 3.18 核データの種類による金属キャスク外部線量への影響比較
(構造材放射化ガンマ線)

Table 3.18 Comparison of the effects of different evaluated nuclear data files on the external dose of a metal cask model (gamma-ray from activated structural materials)

評価位置		放射化ガンマ線						
		② J5	③ J33	④ B7	⑤ J5-CS	⑥ J5-NS	⑦ J33-CS	⑧ J33-NS
側部表面	①最大中性子線量の高さ	-1.4±1.5%	+0.0±1.5%	-0.1±1.5%	-0.1±1.9%	-0.2±1.8%	-1.5±1.5%	-0.6±1.8%
	②燃料中心高さ	-0.4±0.7%	+0.4±0.7%	+0.8±0.7%	+0.0±0.5%	+0.0±0.5%	-0.4±0.7%	+0.0±0.5%
	③最大放射化ガンマ線線量の高さ	+0.2±0.6%	-0.4±0.6%	-0.4±0.6%	-0.1±0.5%	-0.1±0.5%	+0.4±0.6%	+0.0±0.5%
側部表面 から1m	④最大中性子線量の高さ	+0.0±1.0%	-1.4±0.9%	-1.4±0.9%	-0.7±0.8%	-0.7±0.8%	+0.0±0.9%	-0.7±0.8%
	⑤燃料中心高さ	-0.7±0.5%	+0.0±0.5%	+0.0±0.5%	-0.7±0.5%	-0.7±0.4%	+0.0±0.5%	-0.7±0.4%
	⑥最大放射化ガンマ線線量の高さ	-0.4±0.8%	+0.8±0.9%	+1.1±0.8%	-0.4±0.7%	-0.4±0.7%	-0.4±0.8%	-0.4±0.7%
頭部表面	⑦最大中性子線量の半径	+0.0±1.3%	-1.0±1.3%	-0.5±1.2%	-0.5±1.0%	-0.5±1.0%	+0.0±1.3%	-0.5±1.0%
	⑧最外周	-0.1±0.5%	+1.0±0.5%	+1.2±0.5%	-0.4±0.4%	-0.4±0.4%	+0.0±0.5%	-0.4±0.4%
	⑨中央	+2.7±5.6%	-7.9±5.1%	-5.9±5.2%	-0.4±4.5%	-0.4±4.5%	+1.8±5.5%	-0.4±4.5%
頭部表面 から1m	⑩中央	+3.4±8.2%	+1.1±8.4%	+0.6±8.3%	-2.0±6.5%	-2.0±6.5%	+5.4±8.2%	-1.7±6.5%
	⑪最外周	-0.6±0.9%	+0.6±0.9%	+0.6±0.9%	-0.6±0.7%	-0.6±0.7%	-0.6±0.9%	-0.6±0.7%
底部表面	⑫最大中性子線量の半径	-0.6±1.0%	+0.0±1.2%	+0.0±1.2%	-0.6±1.0%	-0.6±1.0%	-0.8±1.2%	-0.6±1.0%
	⑬中央	-6.1±10.7%	-19.3±11.2%	-19.3±11.0%	-6.1±10.7%	-6.1±10.7%	-4.1±13.1%	-5.7±10.7%
	⑭最外周	-0.4±0.4%	+0.9±0.4%	+0.9±0.4%	-0.4±0.4%	-0.4±0.4%	+0.7±0.4%	-0.4±0.4%
底部表面 から1m	⑮最大中性子線量の半径	-3.6±2.7%	-1.5±3.1%	-1.5±3.0%	-3.6±2.7%	-3.6±2.7%	-3.6±3.3%	-3.6±2.7%
	⑯中央	+0.0±12.0%	-1.8±14.6%	-3.6±14.2%	+0.0±12.0%	+0.0±12.0%	-7.1±13.4%	+0.9±12.0%
	⑰最外周	-0.3±0.8%	+0.3±1.0%	+0.2±1.0%	-0.3±0.8%	-0.3±0.8%	-0.5±0.9%	-0.3±0.8%

注) ±〇%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 3.7 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5 %は、計算ケース①の場合に比べて、計算ケース②～⑧の場合の外部線量が 0.5～1.5 %程度大きくなることを示す。

表 3.19 核データの種類による金属キャスク外部線量への影響比較（全線量）

Table 3.19 Comparison of the effects of different evaluated nuclear data files on the external dose of a metal cask model (total dose)

評価位置		全線量						
		② J5	③ J33	④ B7	⑤ J5-CS	⑥ J5-NS	⑦ J33-CS	⑧ J33-NS
側部表面	①最大中性子線量の高さ	-4.7±0.6%	-2.8±0.5%	+3.8±0.6%	+0.9±1.1%	+0.9±0.7%	+1.5±0.4%	+0.9±0.8%
	②燃料中心高さ	-0.6±0.4%	-0.6±0.4%	+0.0±0.4%	-0.6±0.4%	-0.6±0.3%	-0.3±0.4%	-0.6±0.3%
	③最大放射化ガンマ線量の高さ	-0.7±0.4%	-1.4±0.4%	+0.0±0.4%	+0.0±0.4%	+0.0±0.4%	+0.2±0.4%	+0.0±0.4%
側部表面 から1m	④最大中性子線量の高さ	-2.5±0.5%	-1.7±0.5%	+2.3±0.6%	+1.0±1.2%	+0.4±0.7%	+0.5±0.5%	+0.4±0.6%
	⑤燃料中心高さ	-0.9±0.3%	+0.0±0.3%	+0.5±0.3%	-0.7±0.3%	-0.5±0.3%	-0.4±0.4%	-0.5±0.3%
	⑥最大放射化ガンマ線量の高さ	-1.6±0.4%	-0.7±0.4%	+0.7±0.4%	-0.4±0.5%	-0.5±0.4%	-0.9±0.5%	-0.1±0.4%
頭部表面	⑦最大中性子線量の半径	-5.8±0.2%	-3.4±0.4%	+4.1±0.5%	+0.1±0.3%	-0.1±0.3%	+0.1±0.4%	+0.1±0.3%
	⑧最外周	-3.8±0.2%	-1.1±0.4%	+3.3±0.4%	+0.0±0.3%	+0.0±0.3%	+0.3±0.4%	+0.0±0.3%
	⑨中央	+0.8±3.6%	-5.0±3.6%	-5.0±3.5%	-0.8±3.0%	-1.7±2.9%	+3.4±3.8%	+0.0±3.0%
頭部表面 から1m	⑩中央	-2.5±4.6%	-2.9±5.0%	+0.3±4.9%	-2.9±3.8%	-2.4±3.8%	+1.7±4.9%	-2.2±3.8%
	⑪最外周	-4.2±0.3%	-2.1±0.4%	+4.9±0.5%	+0.7±0.4%	+0.0±0.3%	+0.0±0.4%	+0.0±0.3%
底部表面	⑫最大中性子線量の半径	-5.7±0.8%	-1.6±1.5%	+14.6±2.5%	+1.6±1.3%	+1.6±1.1%	+1.6±1.4%	+1.6±1.1%
	⑬中央	-4.0±2.0%	-2.7±3.4%	-0.7±3.7%	-0.4±2.8%	+0.2±2.5%	-0.7±3.6%	-0.4±2.5%
	⑭最外周	-2.0±0.3%	-1.0±0.5%	+1.5±0.5%	-0.5±0.3%	-0.5±0.3%	+0.0±0.4%	-0.5±0.3%
底部表面 から1m	⑮最大中性子線量の半径	-9.8±2.1%	-10.5±2.5%	+0.0±3.5%	-4.6±2.6%	-5.2±2.3%	-2.0±3.2%	-0.7±3.1%
	⑯中央	-6.3±2.4%	-6.9±4.2%	-5.0±3.9%	-2.5±3.2%	-2.5±2.9%	-3.8±4.2%	-0.6±3.0%
	⑰最外周	-5.7±1.2%	-1.9±1.7%	+12.5±5.0%	+0.0±2.1%	+1.0±2.0%	+1.9±2.5%	+1.0±1.6%

注) ±〇%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 3.7 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5 %は、計算ケース①の場合に比べて、計算ケース②～⑧の場合の外部線量が 0.5～1.5 %程度大きくなることを示す。

3.2.8 熱中性子散乱則データ

本項では、図3.2の(4)データ・係数の確認の流れに示されている以下に関連して、熱中性子散乱則データによる影響の観点で検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・用いられている遮蔽材やその他の材質を構成する核種の中性子断面積は、類似の線源エネルギーに対する遮蔽実験等でその正確度が検証されているか確認

(1) はじめに

モンテカルロ法による 20 MeV 以下のエネルギー領域での中性子輸送計算では、中性子と物質原子核との相互作用（散乱、吸収等）の確率等をデータベース化した断面積ライブラリに基づいて輸送計算が進行するが、中性子のエネルギーが物質の熱運動領域付近まで低下すると、物質の分子運動や結晶構造が中性子散乱に影響を与えるため、熱中性子に対する散乱現象を高精度で評価するためには、これらの影響を散乱断面積として考慮するための熱中性子散乱則データ（以下「S(α,β)」という。）が必要になる。S(α,β)は軽水炉内の核特性計算等では重要であるが、これまで許認可における遮蔽計算で考慮されたことは少なく、影響の程度に対する知見は不足している。

金属キャスクの中性子遮蔽材には、S(α,β)データが存在しないエポキシ系レジンを始めとする炭化水素系の材料を用いることが多く、二次ガンマ線線量に影響する中性子遮蔽材中での熱中性子吸収を計算する際に、代替として他のどの化合物を用いるのが安全側かは

明確になっていない。

本項では、 $S(\alpha,\beta)$ データの設定が金属キャスク外部線量への影響を評価することで、各 $S(\alpha,\beta)$ データの設定に対する確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

最新の核データ JENDL-5³⁰に基づく断面積ライブラリには、以下の炭化水素化合物に対する $S(\alpha,\beta)$ が収録されている。

- ① ポリエチレン
- ② ベンゼン
- ③ キシレン
- ④ メシチレン
- ⑤ トリフェニルメタン
- ⑥ エタノール
- ⑦ アクリル

レジン内の水素を自由気体として取り扱い、結晶構造を考慮するための $S(\alpha,\beta)$ を設定しない場合（基本解析条件）を基準として、①～⑦のケースを比較することにより、金属キャスク体系の外部線量への影響を評価した。なお、ケース①のポリエチレンについては、物質温度を 300 K 及び使用済燃料を装荷した金属キャスクで想定される中性子遮蔽材温度により近い 350 K の 2 条件を計算した。

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～⑦について、3.8式に示すレジンに対する $S(\alpha,\beta)$ の設定の違いが金属キャスク胴側部の燃料有効部中心高さにおける表面から1mの点での線量に与える影響 $E_{S(\alpha,\beta)}$ によって放射線の種類ごとに比較した結果を表3.20に示す。ここで、3.8式内右辺の分母である「 $S(\alpha,\beta)$ を設定しない場合」は基本解析条件であり、レジン内の水素を自由気体として取り扱うことに相当する。

$$E_{S(\alpha,\beta)} = \frac{\text{炭化水素化合物の } S(\alpha,\beta) \text{ をレジンに設定した場合の外部線量}}{S(\alpha,\beta) \text{ をレジンに設定しない場合の外部線量}} - 1 \quad \dots\dots(3.8)$$

評価結果より、JENDL-5 に収録された $S(\alpha,\beta)$ の設定により有意に保守的となる炭化水素系の代替化合物は無く、熱中性子散乱則を考慮しない条件が安全側の仮定となる。これは、図 3.15 に示すようにレジン中の水素を自由気体とする（ $S(\alpha,\beta)$ を設定しない）ほうが熱中性子スペクトルは軟らかくなり、より多くの二次ガンマ線が生成されるためである。以上より、炭化水素系素材を用いた中性子遮蔽材には、熱中性子散乱則 $S(\alpha,\beta)$ を考慮しない方が保守的であることが確認内容の留意点として得られた。

表 3.20 レジンに対する $S(\alpha,\beta)$ の設定による金属キャスク外部線量への影響比較

Table 3.20 Comparison of the effects of the $S(\alpha,\beta)$ settings for the resin on the external dose of a metal cask model

計算ケース	化合物	温度 [K]	中性子	二次ガンマ線
①	ポリエチレン (C ₂ H ₄) _{nn}	300	-2.9±1.9%	-4.2±0.7%
	ポリエチレン (C ₂ H ₄) _{nn}	350	+0.2±2.5%	-4.2±0.7%
②	アクリル (C ₅ H ₈ O ₂) _{nn}	300	-3.6±1.8%	-4.8±0.7%
③	ベンゼン C ₆ H ₆	300	-2.9±1.9%	-4.8±0.7%
④	エタノール C ₂ H ₆ O	300	-3.6±1.8%	-4.2±0.7%
⑤	メシチレン C ₉ H ₁₂	300	-2.6±2.1%	-4.2±0.7%
⑥	トリフェニルメタン C ₁₉ H ₁₆	300	-3.1±1.8%	-4.8±0.7%
⑦	キシレン C ₈ H ₁₀	300	-1.4±2.0%	-7.1±0.7%

注) ±○%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 3.8 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5%は、基本解析条件に比べて、計算ケース①～⑦の場合の外部線量が 0.5～1.5%程度大きくなることを示す。

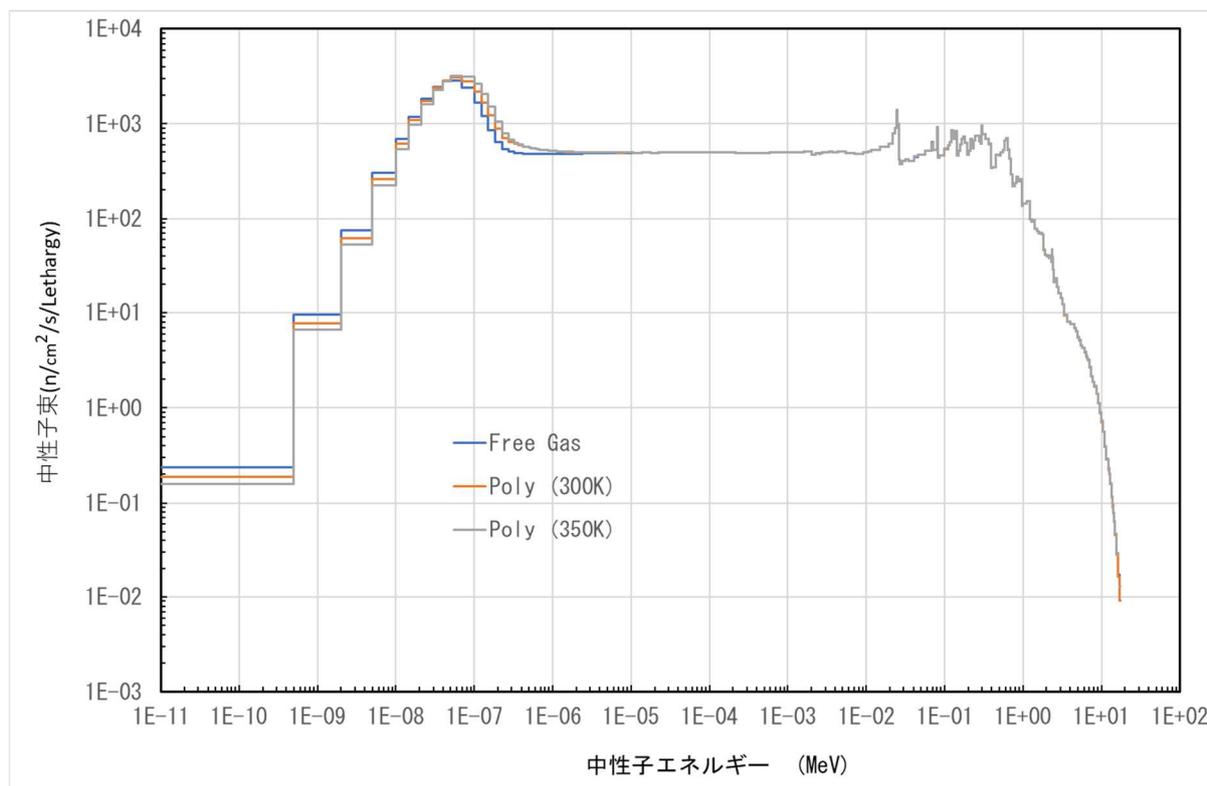


図 3.15 $S(\alpha,\beta)$ の設定によるレジン中での中性子エネルギースペクトルの比較

Fig. 3.15 Comparison of the neutron energy spectra in the resin with $S(\alpha,\beta)$ settings

3.3 金属キャスクの解析条件の妥当性確認のまとめ

3.1 節にフロー図としてまとめた金属キャスクの各解析条件の妥当性確認の流れに基づき、確認項目、確認内容及び特記すべき留意点を表 3.21 にまとめた。特記すべき留意点は、定性的あるいは原理的に得られる項目については検討委員会での議論を整理した結果を記載し、解析による定量的な検証が必要な項目については 3.2 節に記載した検証解析の詳細及び結果の考察により得られた確認内容の留意点を記載した。

適合性審査の際には、これらを網羅的に確認することで、解析条件の妥当性判断の根拠とすることができる。

表 3.21 確認項目、確認内容及び留意点（金属キャスク）

Table 3.21 Validation items, validation contents and points to note (a metal cask)

確認項目		確認内容	特記すべき留意点
1.線源	1.1 中性子源	使用済燃料の燃焼度は、評価位置での中性子及び二次ガンマ線線量が、設計条件の範囲内で最も高くなるように設定されているか。	
		上記の燃焼度に応じた中性子源強度が与えられているか。	
		使用済燃料からの自発核分裂及び (α,n) 反応による中性子源強度が適切な方法で計算されているか。	【補足】 中性子源強度の計算は、一般的には燃焼計算コード（ORIGEN 等）が用いられ、燃焼計算の条件や使用した断面積ライブラリが、対象の使用済燃料の条件に即しているかを確認する。
		中性子エネルギースペクトルは、評価位置での中性子及び二次ガンマ線線量が、設計条件の範囲内で最も高くなるように設定されているか。	【3.2.2 項に基づく留意点】 核分裂反応の方が (α,n) 反応よりも線源強度が大きく、その中で高エネルギー成分の多い ^{239}Pu 熱中性子核分裂スペクトルが保守側の設定として用いられることが多いが、 (α,n) 中性子源強度の割合が大きい場合や、線量評価結果が基準に対して十分な余裕がない場合には、中性子源が保守的な設定になっているか留意する必要がある。 【定性的あるいは原理的に得られる留意点】 線源設定として一般に用いられる多群構造は反応断面積のエネルギー変化の観点で作られているが、それよりも粗いエネルギー分割を独自に設定するなどの場合、分散低減法が十分機能しない可能性等に留意する必要がある。

確認項目		確認内容	特記すべき留意点
1.線源	1.1 中性子源	使用済燃料による中性子増倍効果は適切に評価されているか。	【3.2.3 項に基づく留意点】 臨界計算による実効増倍率で線源強度を補正する方法は安全側の条件であり、臨界計算条件が非保守的でないければ、その詳細までは確認不要である。
	1.2 ガンマ線源	使用済燃料の燃焼度及び冷却年数は、評価位置でのガンマ線線量が、設計条件の範囲内で最も高くなるように設定されているか。	
		燃料集合体の放射化によるガンマ線強度は、評価位置でのガンマ線線量が、設計条件の範囲内で最も高くなるように設定されているか。 上記の燃焼度に応じたガンマ線源強度及びエネルギースペクトルが与えられているか。	【定性的あるいは原理的に得られる留意点】 一般に用いられる多群構造は反応断面積のエネルギー変化の観点で作られているが、それよりもエネルギー分割が粗い場合、分散低減法が十分機能しない可能性等に留意する必要がある。
2.解析モデル	2.1 形状・寸法	バスケット・燃料集合体等を均質化したモデルで表す場合は、均質化しないで実際のとおりモデルを用いた場合と比較して、評価位置での中性子及びガンマ線線量が同じか高くなるようなモデルに設定されているか。	【3.2.4 項に基づく留意点】 軸対称の均質化モデルを適用する場合、周囲のモデル化等も併せて、保守的な設定になっているか留意する必要がある。 燃料棒間のストリーミングを考慮できない集合体ごとに均質化したモデルを適用する場合、放射化ガンマ線源については保守的でない可能性に留意する必要がある。

確認項目		確認内容	特記すべき留意点
2.解析モデル	2.1 形状・寸法	本体胴、蓋、中性子遮蔽材などの遮蔽材の厚さは、製作公差及び使用期間中の経年変化を考慮して、評価位置での中性子及びガンマ線線量が最も高くなるように設定されているか。	【3.2.6 項に基づく留意点】 中性子遮蔽材の密度減損による非安全側の影響は無視することができず、素材に対して現実的に起こり得る現象を考慮する必要がある。エポキシ系レジン ²⁷ の熱的影響に係る試験結果 ²⁷ では、放出ガスはほとんど水分との知見が得られており、他種の中性子遮蔽材についても申請者に資料（別の参考文献又は試験結果）の提示を要求し、内容を確認する必要がある。
		トラニオン部等に遮蔽欠損がある場合は、該当部分から漏洩する放射線を評価できるようにモデル化されているか。 ※トラニオン部は中性子遮蔽材の欠損部となる構造が多い	
	2.2 組成	ドレン等のストリーミング経路からストリーミングする放射線による金属キャスク表面の線量への影響が評価され、必要に応じて考慮されているか。	
		バスケット・燃料集合体等を均質化したモデルで表す場合は、均質化した組成と均質化モデルの整合が取れているか。	
		遮蔽材の組成は、評価位置での中性子及びガンマ線線量が、材料の仕様の範囲で最も高くなるように設定されているか。 中性子遮蔽材中での二次ガンマ線生成を抑制する熱中性子吸収材（ホウ素など）等、遮蔽上の機能性を持った添加剤の添加量は担保されている範囲で最小の値を用いているか。	
	2.3 線量評価法・位置	検出器（タリー）の種類は目的に応じて適切に選ばれているか。	【補足】 一般的に数 cm～10 cm 程度が設定されるが、不感領域

確認項目		確認内容	特記すべき留意点
2.解析モデル	2.3 線量評価法・位置	ネクストイベントエスティメータ（点形状、リング形状）に関してその不感領域は適切に設定されているか。	内に高密度物質（空気等の気体以外）が存在する場合は誤差が発生するため、表面線量の評価にネクストイベントエスティメータの使用は適切ではない。
		線量換算係数のエネルギーに関する内挿法は適切か。	【補足】 エネルギー分点の間隔は線形、あるいは対数をベースに与えられており、内挿法はそれに合わせる必要がある。
		金属キャスクの胴側部、頭部、底部の表面及び表面から 1m の点で、最大の線量を示す位置での線量を評価できるように検出器（タリー）の位置が設定されているか。	【定性的あるいは原理的に得られる留意点】 中性子遮蔽欠損部等については線量の空間的変化を適切に評価できる遮蔽欠損部の大きさと位置に検出器（タリー）が設定されているか留意する必要がある。
		検出器（タリー）の大きさは、最大の線量を示す位置を評価するのに適切か。	【補足】 検出器の大きさは、評価位置での線量変化の程度を考慮して設定し、金属キャスク表面では数 cm～10 cm 程度、表面から 1m の位置では 10 cm～数十 cm 程度が一般的である。（大きさは四角形の一辺、あるいは円の直径であり、体積検出器の場合は厚さ方向を薄くすることが望ましい。）
3.解析コード	3.1 信頼性	線量評価に用いる解析コードの信頼性は V&V（Verification & Validation）により確かめられているか。又は、保守的な評価が可能であると検証されているか。	【定性的あるいは原理的に得られる留意点】 線量評価に用いる解析コードの信頼性は V&V 手法等により確かめられているか、保守的な評価が可能であると検証されているかのいずれかの説明記載が必要である。必要に応じて、後日公表予定の V&V 手法に係る NRA 技術報告を参照のこと。
	3.2 正確度	解析コードの正確度（Accuracy）は解析対象と類似なベンチマーク実験解析により評価されているか（保守的な評価の場合、正確度の評価についての確認は不要だが、評価結果が実験値を確実に上回ることを確認する必要がある。）。	

確認項目		確認内容	特記すべき留意点
4.データ・係数	4.1 中性子断面積	用いられている遮蔽材やその他の材質を構成する核種の中性子断面積は、類似の線源エネルギーに対する遮蔽実験等でその正確度が検証されているか。	<p>【3.2.7 項に基づく留意点】 評価実績の豊富な体系や物質に対しては核データの種類による影響は小さいが、核データは更新が進むにつれて収録データ数が増加するとともにデータ内容の修正も進んでおり、信頼できる検証結果が示されていることが確認できれば、より新しい核データを用いることが推奨される。</p> <p>【定性的あるいは原理的に得られる留意点】 過去のバージョンでは遮蔽解析を実施するうえで重要な二次ガンマ線のデータが不足しており、解析に必要なデータが収録されていない場合は過小評価に繋がる可能性が高いため、データ収録状況について確認が必要である。</p> <p>【3.2.8 項に基づく留意点】 炭化水素系素材を用いた中性子遮蔽材には、熱中性子散乱則を考慮しない方が保守的な評価結果となる。 (JENDL-5 収録データを使用する場合)</p>
	4.2 光子断面積	用いられている遮蔽材やその他の材質を構成する元素の光子断面積は、ガンマ線源のエネルギー範囲でその正確度が検証されているか。	
	4.3 線量換算係数	線量換算係数の数値は法令に則したものとなっているか。	

4. 使用済燃料乾式貯蔵施設の解析条件の妥当性確認

本章では、許認可実績等を参照して検討委員会での議論により取りまとめた、使用済燃料乾式貯蔵施設の許認可において遮蔽解析にモンテカルロコードが使用された際の妥当性確認について解説する。4.1節では解析条件の妥当性確認の流れ及び確認すべき項目について、4.2節では確認内容の詳細及び根拠を明確にするために実施した検証解析の詳細及び結果から得られた確認内容の留意点について、4.3節ではそれらを整理してまとめた結果をそれぞれ記述する。

4.1 使用済燃料乾式貯蔵施設の解析条件の妥当性確認の流れ

2.3 節に記載した使用済燃料乾式貯蔵施設の遮蔽解析の流れに基づき検討した適合性審査における解析条件の妥当性確認全体の流れを図 4.1 にフロー図として示す。また、図 4.1 中の(1)～(4)各項目に対する個別の確認内容の流れを図 4.2 にフロー図として示す。

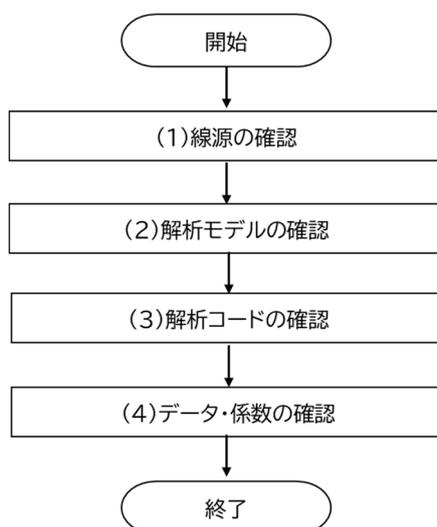


図 4.1 使用済燃料乾式貯蔵施設の解析条件の妥当性確認全体の流れ

Fig.4.1 Overall flow of validation of analytical conditions for a spent fuel dry storage facility

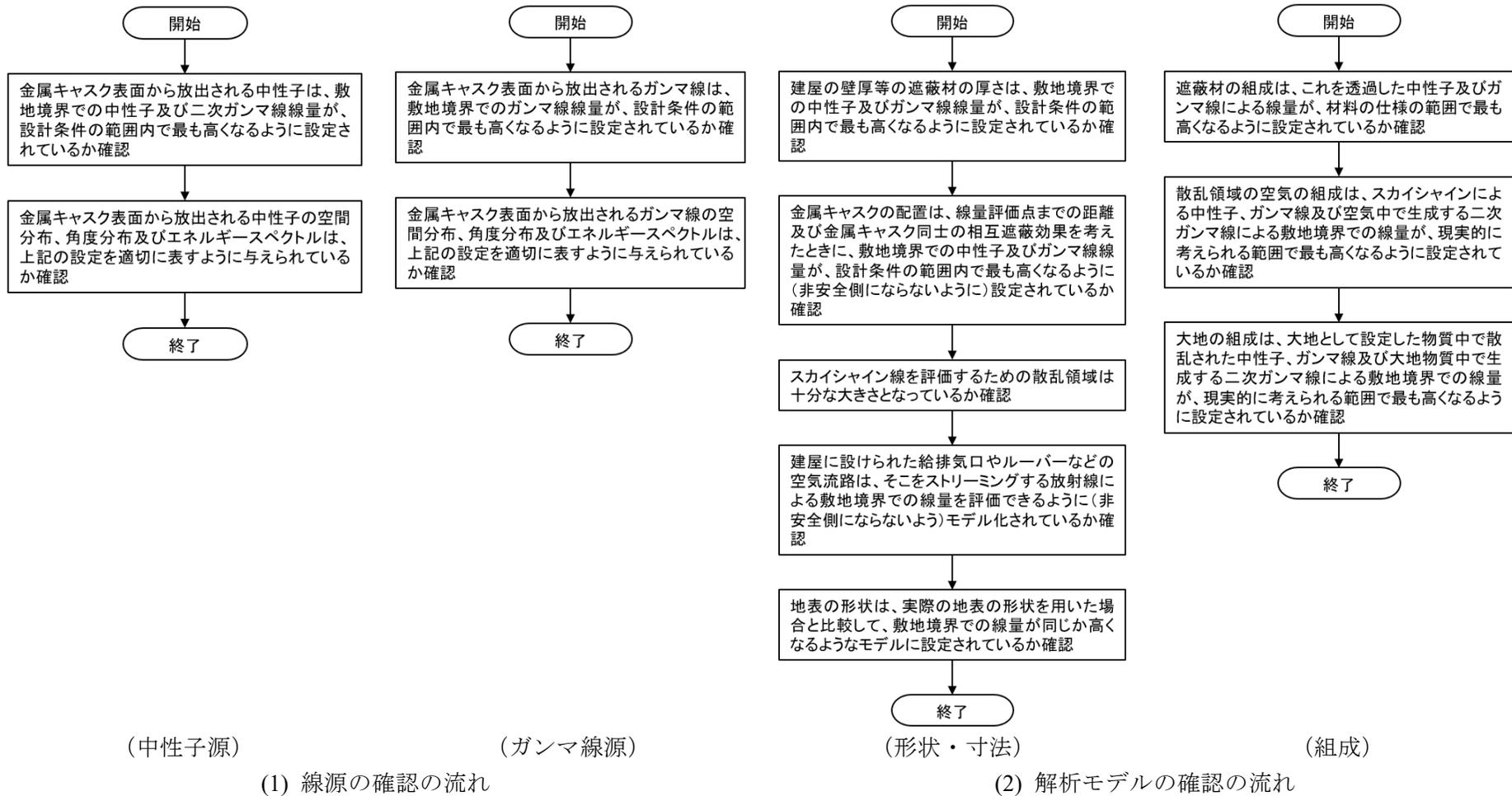


図 4.2 使用済燃料乾式貯蔵施設の各解析条件の妥当性確認の流れ (1/2)
 Fig.4.2 Validation flow of each analytical condition for a spent fuel dry storage facility (1/2)

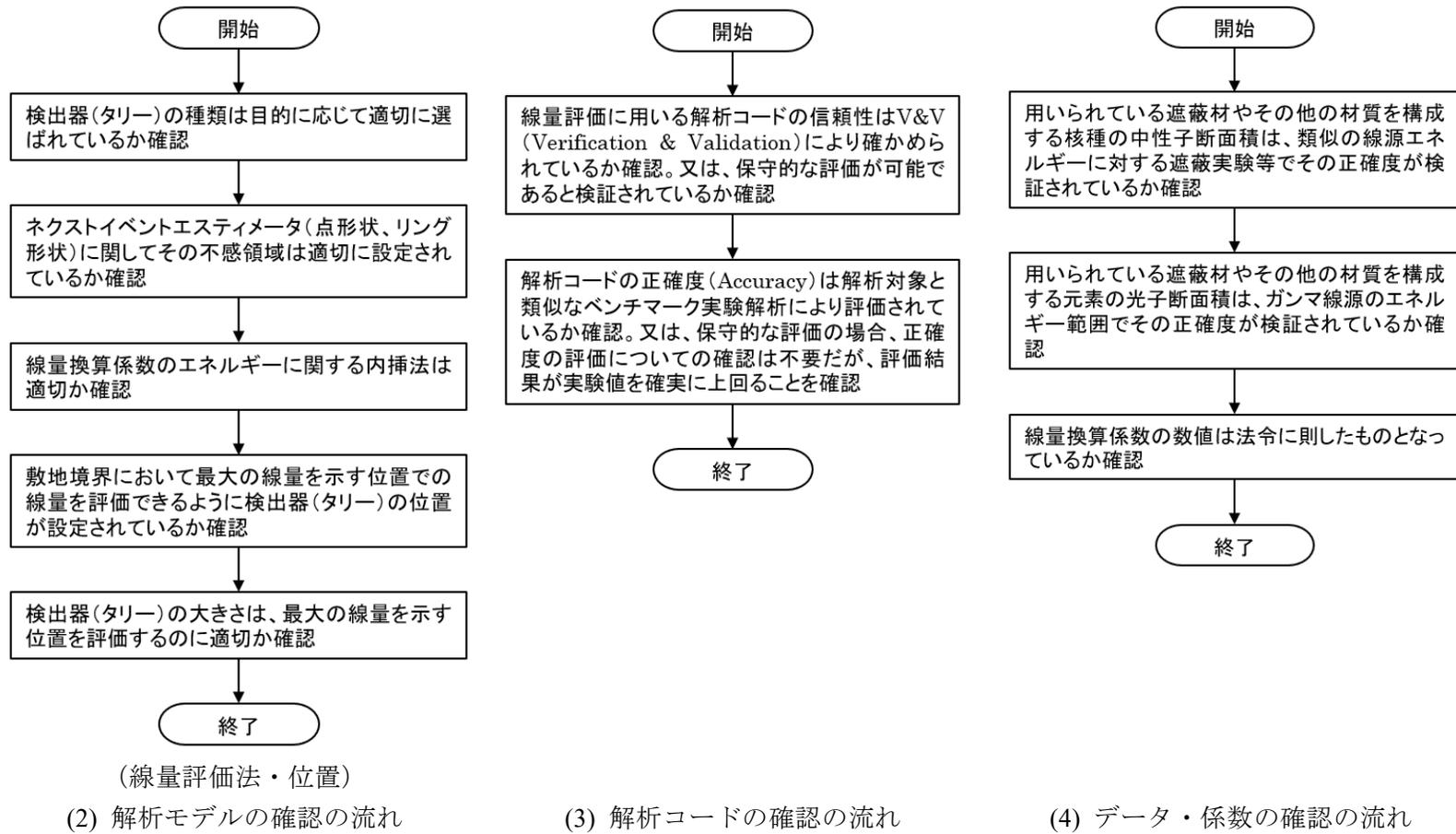


図 4.2 使用済燃料乾式貯蔵施設の各解析条件の妥当性確認の流れ (2/2)
 Fig. 4.2 Validation flow of each analytical condition for a spent fuel dry storage facility (2/2)

4.2 使用済燃料乾式貯蔵施設の解析条件の妥当性確認項目の検証

4.1 節に示した図 4.2 中の各確認内容に対し、許認可実績等により評価結果への影響が明確化されているもの、または数値評価により影響を判断しないものを除き、プロジェクトの中で種々の解析条件に対する検証解析を実施し、得られた解析結果に基づいて確認内容の留意点について考察した。本節では、4.2.1 項に、各検証解析と比較するための基準となる解析結果を提供するものとして、これまでの許認可申請に多く採用された解析条件を設定した基本解析について記載した。また、4.2.2 項以降には、各確認項目に対する影響を評価する検証解析及び解析結果より得られた確認内容の留意点を示した。

ここで、海外では金属製の密封容器（キャニスタ）に使用済燃料を装荷し、コンクリート製の遮蔽体に収納するコンクリートキャスクやサイロ型の貯蔵施設等が供用されているが、2025 年現在の我が国では実用化されていないため、本技術報告では乾式金属キャスクの貯蔵施設のみを対象とする。

なお、本節での検証解析は明示のないものは全て、モンテカルロコード MCNP6.2⁶ 及び JENDL-4.0⁸ に基づく ACE 形式ライブラリを使用した。

4.2.1 基本解析

(1) はじめに

使用済燃料を収納した多数の乾式金属キャスクを 50～60 年程度の期間貯蔵する施設が使用済燃料乾式貯蔵施設である。本施設の特徴の一つは、空気の自然循環により無電源で金属キャスクの除熱を行うことであり、そのために外気の給気口及び排気口が設けられている。遮蔽機能としては、これらの給排気口が放射線のストリーミング経路となり得るため、解析コードにはストリーミングを適切に評価可能であることが求められる。他にも審査ガイドには、複数基の金属キャスクによる相互遮蔽効果、貯蔵建屋構造体（遮蔽体）であるコンクリートの深層透過の観点から検証されていることが求められている。また、貯蔵建屋の外部空間では、数百メートル程度離れた事業所の敷地境界外における直接線及びスカイシャイン線（評価体系によってはグラウンドシャインも発生する。）を適切に評価する必要がある。

近年の許認可申請例では設計方針として単基の金属キャスクをコンクリートパネルで覆ったものや、少数基を収納する比較的小規模な施設もあるが、本項では数十基を格納できる規模の使用済燃料乾式貯蔵施設を評価対象として計算条件を設定し、次項以降の各確認項目に対する検証解析結果との比較の基準となる解析結果を得るために、想定敷地境界における実効線量を計算した。

(2) 計算条件

使用済燃料乾式貯蔵施設体系に係る検証の基準となる基本解析における計算条件は、公開情報³³の調査結果に基づき、以下のように設定した。

- ・解析コード MCNP6.2⁶
- ・断面積ライブラリ JENDL-4.0⁸に基づく ACE 形式ライブラリ
- ・体系モデル 図 4.3 及び 4.4 に示したものを使用
- ・線源条件 貯蔵建屋内に格納された 48 基の金属キャスクモデルの表面に以下を設定（表 4.1 参照）
 - ・エネルギースペクトル：包絡スペクトル³⁴
 - ・線源強度：金属キャスクモデル表面から 1m における 1cm 線量当量率が 100 $\mu\text{Sv/h}$ となるように線源強度を規格化
 - ・中性子、ガンマ線比：3.2.1 項の金属キャスク体系の基本解析結果に準じる
- ・物質組成 表 4.2 に示した原子個数密度を設定
- ・分散低減法 ADVANTG コード¹¹により、Weight Window 下限値パラメータ及び線源バイアスを計算し、設定
- ・評価位置 想定敷地境界：図 4.4 に示す貯蔵建屋中心から水平方向に 500 m、高さ 1 m
- ・タリー 貯蔵建屋外表面：メッシュタリー (FMESH)⁶
(検出器機能) 想定敷地境界：円環状メッシュタリー (R-MESH) 及び点検出器 (F5 (point))⁶
- ・線量換算係数 ICRP Publ.74¹² 記載の実効線量換算係数を対数内挿

表 4.1 使用済燃料乾式貯蔵施設の基本解析の線源強度

Table 4.1 Source intensity for the basic analysis of a spent fuel dry storage facility model

位置	放射線種	キャスク計算による表面から1mでの線量当量率		包絡スペクトルでの線量率及び貯蔵施設解析で使用する線源強度			
		線量当量率 [$\mu\text{Sv/h}$]	割合 [%]	線源粒子当たりの線量当量率 [($\mu\text{Sv/h}$)/particle]	キャスク表面線源強度 [particle/s]	線量当量率 [$\mu\text{Sv/h}$]	
側面	中性子	4.94	5.2	2.67×10^{-6}	1.94×10^6	5.2	
	ガンマ線	二次	16.5	17.3	2.42×10^{-8}	3.92×10^9	94.8
		FP	58.6	61.3			
		放射化	15.5	16.2			
		合計	90.7	94.8			
全線量	95.6	100	-	-	100		
上面	中性子	25.3	41.3	1.86×10^{-5}	2.23×10^6	41.4	
	ガンマ線	二次	0.6	1.0	1.68×10^{-7}	3.48×10^8	58.6
		FP	1.1	1.8			
		放射化	34.2	55.9			
		合計	35.9	58.7			
全線量	61.2	100	-	-	100		

表 4.2 使用済燃料乾式貯蔵施設の基本解析の物質組成

Table 4.2 Elemental compositions for the basic analysis of a spent fuel dry storage facility model

元素	空気	土壌	コンクリート	鉄	ポリエチレン
参考文献	Koyama et al. ³⁵	放射線遮蔽ハンドブック 基礎編 ³⁶			JAERI-Tech 96-001 ³⁷
密度 [g/cm ³]	0.00120	1.52	2.20	7.86	0.870
H-1	7.199E-09	2.263E-02	5.790E-03	—	7.470E-02
C-12	7.585E-09	—	—	—	3.735E-02
N-14	3.910E-05	—	—	—	—
O-16	1.054E-05	3.259E-02	3.993E-02	—	—
Na-23	—	4.007E-04	1.080E-03	—	—
Mg-24	—	2.004E-04	3.713E-04	—	—
Mg-25	—	2.537E-05	4.700E-05	—	—
Mg-26	—	2.793E-05	5.175E-05	—	—
Al-27	—	3.397E-03	2.850E-03	—	—
Si-28	—	6.377E-03	1.277E-02	—	—
Si-29	—	3.238E-04	6.482E-04	—	—
Si-30	—	2.135E-04	4.273E-04	—	—
S-32	—	—	4.747E-05	—	—
S-33	—	—	3.800E-07	—	—
S-34	—	—	2.145E-06	—	—
S-36	—	—	1.000E-08	—	—
K-39	—	9.503E-05	8.207E-04	—	—
K-40	—	1.192E-08	1.030E-07	—	—
K-41	—	6.858E-06	5.923E-05	—	—
Ca-40	—	2.190E-04	2.491E-03	—	—
Ca-42	—	1.462E-06	1.663E-05	—	—
Ca-43	—	3.050E-07	3.470E-06	—	—
Ca-44	—	4.712E-06	5.361E-05	—	—
Ca-46	—	9.036E-09	1.028E-07	—	—
Ca-48	—	4.224E-07	4.806E-06	—	—
Ti-46	—	7.534E-06	9.075E-06	—	—
Ti-47	—	6.794E-06	8.184E-06	—	—
Ti-48	—	6.732E-05	8.109E-05	—	—
Ti-49	—	4.940E-06	5.951E-06	—	—
Ti-50	—	4.730E-06	5.698E-06	—	—
Fe-54	—	5.596E-05	3.507E-05	4.953E-03	—
Fe-56	—	8.785E-04	5.505E-04	7.776E-02	—
Fe-57	—	2.029E-05	1.271E-05	1.796E-03	—
Fe-58	—	2.700E-06	1.692E-06	2.390E-04	—

組成は原子個数密度 [10^{24} atoms/cm³]

- コンクリート
- 土壌
- 空気

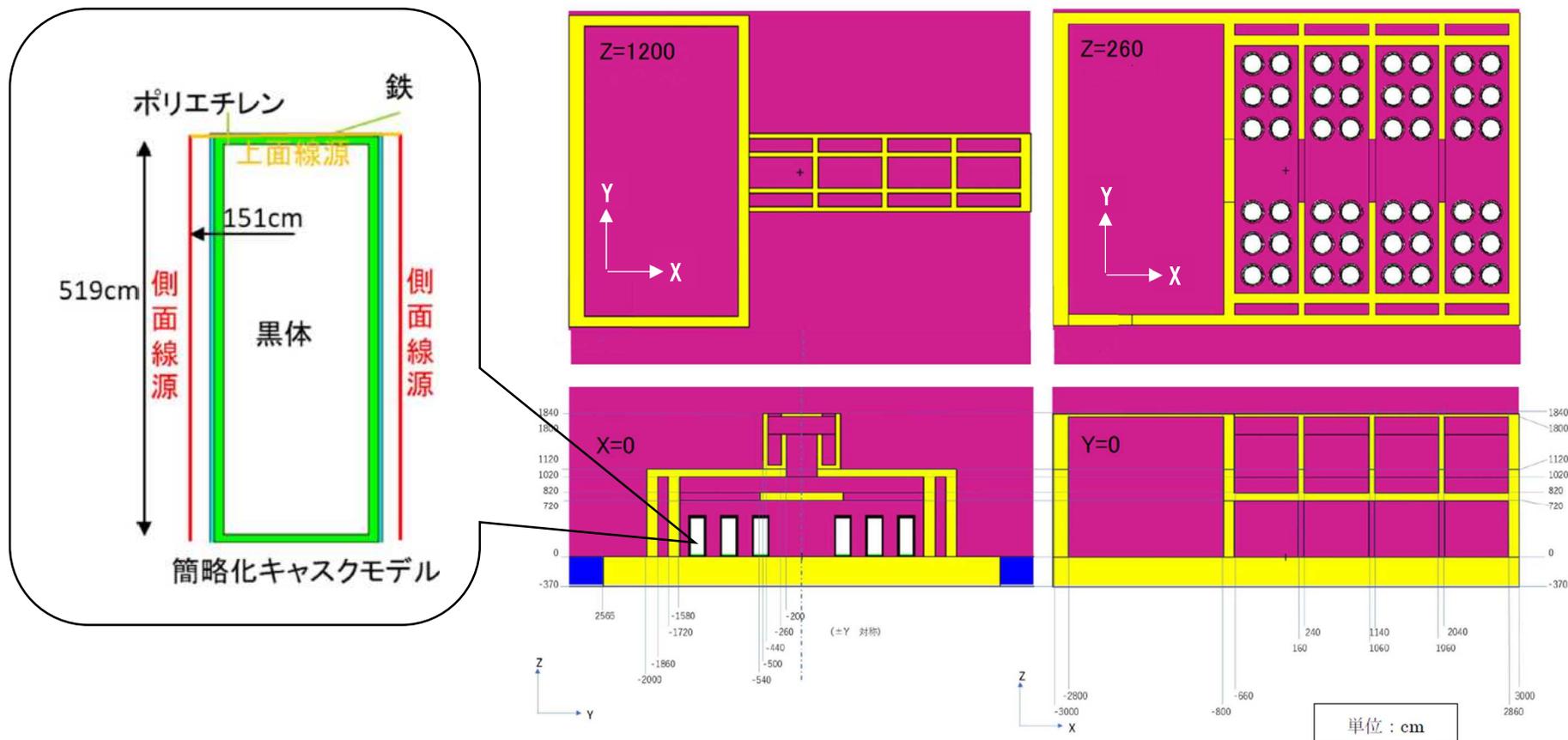


図 4.3 使用済燃料乾式貯蔵施設の体系モデル

Fig4.3 Geometry model of the spent fuel dry storage facility model

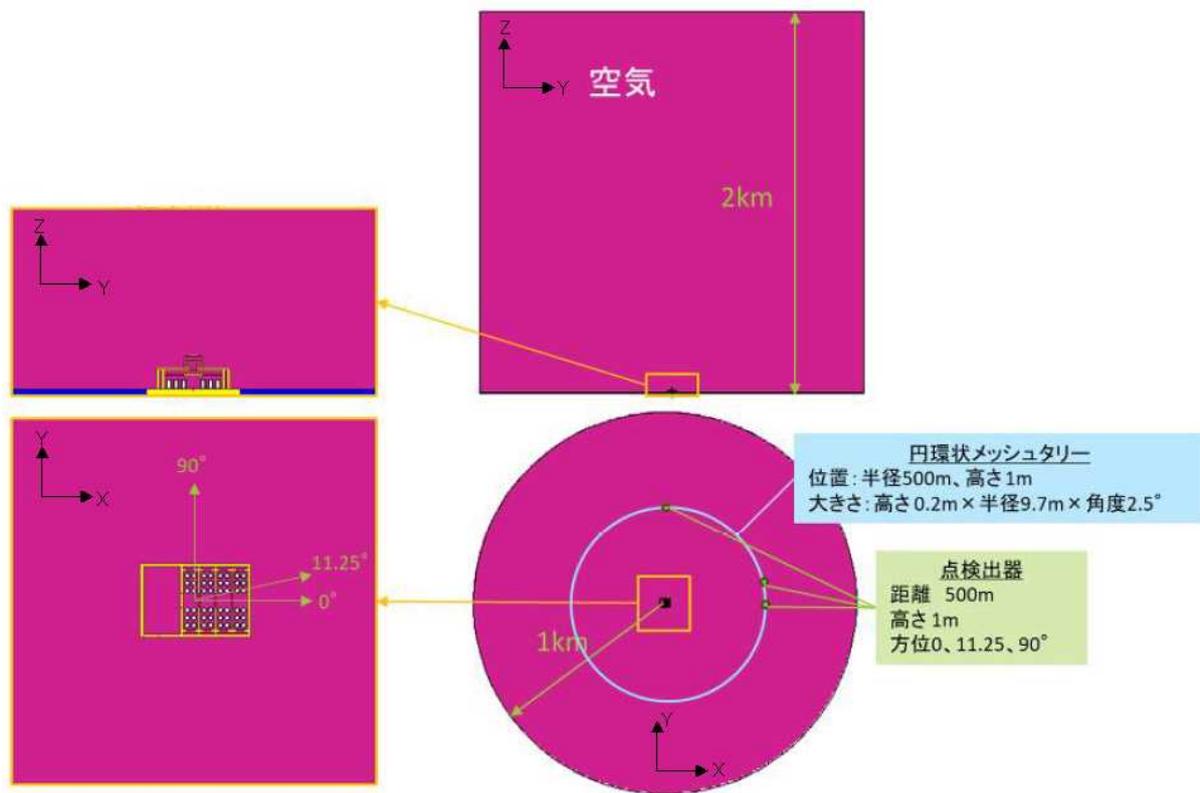


図 4.4 敷地境界線量評価の体系モデル

Fig. 4.4 Geometry model for the dose analysis at the site boundary

注) 方位 11.25°は予備解析で最も線量の高くなった方位

(3) 計算結果

使用済燃料乾式貯蔵施設の基本解析における各評価位置での線量解析結果を表 4.3 に示す。ここで、「二次ガンマ線」は、金属キャスク表面線源から放出された中性子により輸送計算中に発生した二次ガンマ線を示す。「ガンマ線」は、金属キャスク表面線源として放出されるガンマ線であり、線源情報を得るための金属キャスク体系での遮蔽解析において金属キャスク外部まで透過した二次ガンマ線、FP ガンマ線及び構造材放射化ガンマ線である。表 4.3 の解析結果はこれらの合計をそれぞれ示す。表 4.3 に示した円環状メッシュタリ (R-MESH) の結果では線量数値が点検出器 (F5 (point)) と一致しない結果や統計誤差が大きい結果が見られる。本章のような遠方のスカイシャイン線量評価を行う場合、円環状メッシュタリ等の体積検出器では十分な統計精度を確保することが難しく、線量評価結果の収束状況も信頼性確保が難しくなる。その要因として、二次ガンマ線は空気中を飛行する中性子の捕獲反応により発生するために、その発生位置から評価位置までの距離が一定ではなく、輸送計算における追跡粒子の重み (weight) も様々であり、評価位置への線量寄与が安定しないことが考えられる。また、一次ガンマ線は空気中での主要な散乱効果であるコンプトン散乱による前方散乱成分が強く、大角散乱による寄与が大きいスカイ

シャイン現象の計算効率が低くなっていること等が考えられる。これらの状況に鑑み、次項以降で本項の基本解析結果と比較を行う場合は点検出器の結果による比較を行った。

なお、本線量評価結果は近年の許認可申請例を参考に構築した数十基の金属キャスクを格納できる規模の架空の使用済燃料乾式貯蔵施設に対する結果の一例であり、中性子及びガンマ線の線量絶対値や相対比率、外部線量の分布状況等は、乾式貯蔵施設の一般的な遮蔽性能を示すものではない。

表 4.3 使用済燃料乾式貯蔵施設の基本解析結果

Table 4.3 Results of the basic analysis of a spent fuel dry storage facility model

方位	Tally	実効線量 [$\mu\text{Sv/y}$]			
		中性子	二次ガンマ線	ガンマ線	全線量
0°	R-MESH	4.02E-03 ± 0.74 %	9.64E-04 ± 32.2 %	1.14E-02 ± 10.64 %	1.64E-02 ± 7.65 %
	F5 (point)	4.01E-03 ± 1.19 %	5.83E-04 ± 2.57 %	1.22E-02 ± 0.85 %	1.67E-02 ± 0.68 %
11.25°	R-MESH	4.11E-03 ± 0.86 %	5.55E-04 ± 5.35 %	1.45E-02 ± 14.44 %	1.92E-02 ± 10.94 %
	F5 (point)	4.30E-03 ± 2.03 %	5.57E-04 ± 1.91 %	1.08E-02 ± 0.69 %	1.56E-02 ± 0.74 %
90°	R-MESH	3.91E-03 ± 0.92 %	6.00E-04 ± 2.52 %	4.97E-03 ± 21.02 %	9.47E-03 ± 10.86 %
	F5 (point)	3.96E-03 ± 1.54 %	4.53E-04 ± 1.81 %	5.41E-03 ± 0.85 %	9.82E-03 ± 0.78 %

±〇%はモンテカルロ計算の統計誤差

注) 方位 11.25°は予備解析で最も線量の高くなった方位であり、0°及び90°の基本解析結果との比較のために参考として示すが、以降の感度解析での比較対象とはしない。

4.2.2 線源条件の設定

本項では、図4.2の(1)線源の確認の流れ（中性子源）及び（ガンマ線源）に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・金属キャスク表面から放出される中性子の空間分布、角度分布及びエネルギースペクトルは、上記の設定を適切に表すように与えられているか確認
- ・金属キャスク表面から放出されるガンマ線の空間分布、角度分布及びエネルギースペクトルは、上記の設定を適切に表すように与えられているか確認

(1) はじめに

使用済燃料乾式貯蔵施設の審査における判断の参考となる審査ガイドには下記の記載がある。

2.2 遮蔽機能

【確認内容】

3) 敷地境界における実効線量評価

② ソースターム

兼用キャスクの遮蔽機能データ又は兼用キャスク表面から 1m 離れた位置に

おける線量当量率が 100 $\mu\text{Sv/h}$ となるよう放射線源強度を規格化したものを用いること。ここで、放射線源強度を規格化して用いる場合は、中性子 100%又はガンマ線 100%のいずれか保守的な線量評価とすること。また、中性子及びガンマ線の表面エネルギースペクトルは、保守的な線量評価となるものを使用すること。

上記に基づき、敷地境界線量評価における線源として、保守的な線量評価を行う目的で作成された包絡スペクトル^(注3) 34 を線源強度の規格化をしたうえで設定されることが多い。一方で、使用済燃料を線源とした金属キャスクの遮蔽解析結果（遮蔽機能データ）を敷地境界線量評価の線源とする評価方法もある。本項では、線源条件の設定が計算結果へ与える影響を評価することで、包絡スペクトルが設定された際の確認内容の留意点について検討した。

(2) 計算ケース及び条件

以下に示す①～③を線源条件として設定した計算ケースとし、敷地境界における線量を評価した。本評価では統計量を向上させるために、貯蔵建屋中心からの距離が 100 m から 500 m までの区間の 100 m ごとにリング検出器を設定して、周平均の線量を評価した。

- ① 使用済燃料を線源とした金属キャスクの遮蔽解析（金属キャスクの基本解析条件）によりキャスク表面を通過した線束を VITAMIN-E²⁰における中性子 175 群に分割した遮蔽機能データとして、線源条件に設定
- ② 中性子の包絡スペクトルに対して、表面から 1m 離れた位置における線量当量率が 100 $\mu\text{Sv/h}$ となるように線源強度を規格化し、線源条件に設定
- ③ ガンマ線の包絡スペクトルに対して、表面から 1m 離れた位置における線量当量率が 100 $\mu\text{Sv/h}$ となるように線源強度を規格化し、線源条件に設定

上記①～③の各エネルギースペクトルを図 4.5 及び 4.6 に示す。

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～③について、4.1 式に示す線源条件による敷地境界線量への影響 E_{source} により評価した結果を表 4.4 に示す。

$$E_{source} = \frac{\text{中性子 or ガンマ線包絡スペクトル線源による敷地境界線量 (②、③)}}{\text{遮蔽機能データ線源による敷地境界線量 (①)}} \dots\dots\dots(4.1)$$

^(注3) 包絡スペクトルは BWR 燃料用金属キャスク 10 種類、PWR 燃料用金属キャスク 4 種類の設計から得られたガンマ線及び中性子線のそれぞれの表面エネルギースペクトルに対して保守的な線量評価になるよう作成されている。

本評価における敷地境界線量による比較では、中性子の包絡スペクトルを設定したケース②がケース①と比べて過度に保守的な結果となった。その要因として、金属キャスクの基本解析条件による計算結果を用いるケース①では、中性子：ガンマ線の線源強度比がおおよそ 5 : 95 (表 4.1) であることが挙げられる。ここで、4.2.1 項の基本解析における金属キャスク側部方向の線源強度設定と、表 4.3 における 0°方向の F5 タリーによる敷地境界線量評価結果を参照すると、金属キャスクの遮蔽解析における表面から 1m の解析結果より求めた中性子：ガンマ線の強度比は上記のとおりおおよそ 5 : 95 であるが、その線源設定に対する敷地境界線量評価結果の中性子 (計算中に発生した二次ガンマ線を含む) : ガンマ線の比率はおおよそ 27 : 73 (表 4.3) であり、本評価条件では少数の中性子が敷地境界線量に寄与している。本項のケース②では中性子の線源強度比が 100% であるため、敷地境界線量が過大評価となっている。

ガンマ線の包絡スペクトルを設定したケース③については、比較対象であるケース①のガンマ線源強度が上述のように支配的であるため、ケース②ほどの過大評価は見られなかった。

ここで、包絡スペクトルの使用に関して注意が必要な点として、図 4.5 及び 4.6 に示すように包絡スペクトルが非常に硬い (高エネルギー成分が多い) 特徴を持つことが挙げられる。線量への寄与が強い高エネルギー成分の多い包絡スペクトルに対する線源強度を決定するために一定の線量に規格化すると、線量への寄与が弱い低エネルギー成分の多いスペクトルと比べて、線源強度 (発生粒子数) が低くなる。モンテカルロ計算では、線源粒子 1 つに対する評価位置への寄与率に線源強度を乗じることで評価結果を求めるため、計算の体系や条件によっては包絡スペクトルを用いた計算が非保守側の結果を生む場合もある。ガンマ線の包絡スペクトルを使用したケース③の距離 100 m での評価結果がケース①を下回ったのは、上記が一因と考えられる。

以上より、包絡スペクトルを線源設定に使用する際は、中性子 100% 又はガンマ線 100% のいずれか保守的な線量評価とすることで、十分に保守的な (場合によっては過度に保守的な) 敷地境界線量評価結果が得られることが確認できた。一方で、線量への規格化により包絡スペクトルの線源強度が低く見積もられるため、中性子源及びガンマ線源の強度比、規格化する線量値等を現実的な条件にする場合には、非保守的な結果となっていないかを確認することの必要性が確認内容の留意点として得られた。

表 4.4 線源設定による敷地境界線量への影響比較

Table 4.4 Comparison of the effects of the source settings on the dose at the site boundary

計算ケース	②	③
距離[m]\線源	中性子	ガンマ線
100	7.46±0.21	0.90±0.02
200	10.5±0.13	1.40±0.02
300	12.7±0.10	1.77±0.01
400	13.2±0.09	1.93±0.01
500	12.6±0.08	1.98±0.01

注) 値はケース①との線量比を示し、±○で表記した線量比の誤差は各計算ケースの統計誤差を 4.1 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示す。

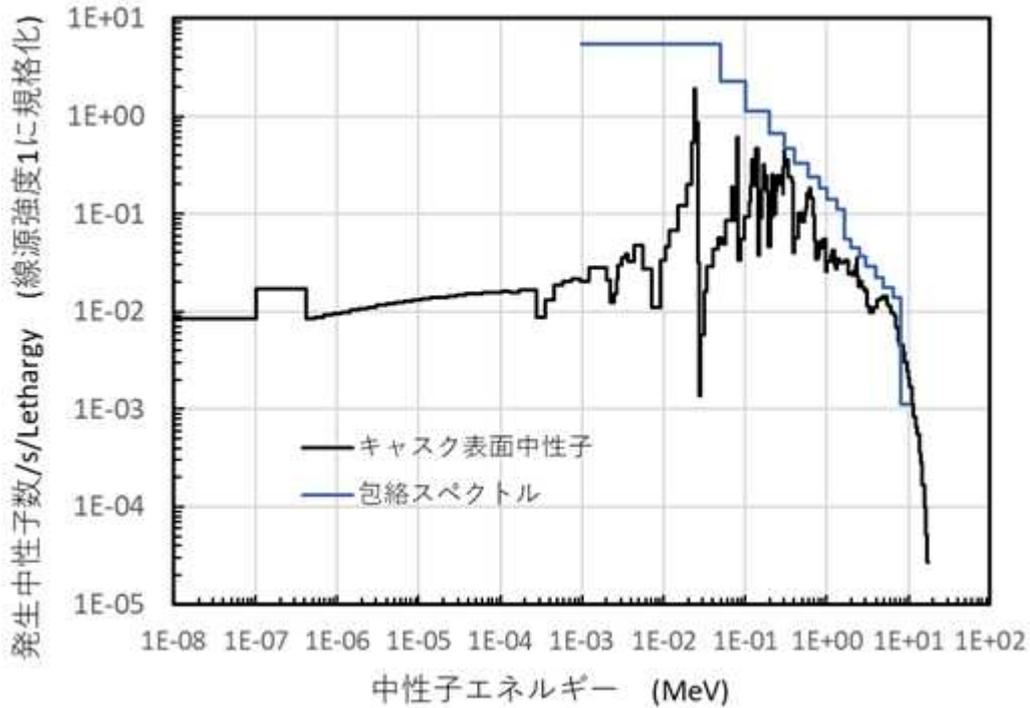


図 4.5 中性子エネルギースペクトルの比較 (金属キャスク表面)

Fig 4.5 Comparison of the neutron energy spectra (metal cask surface)

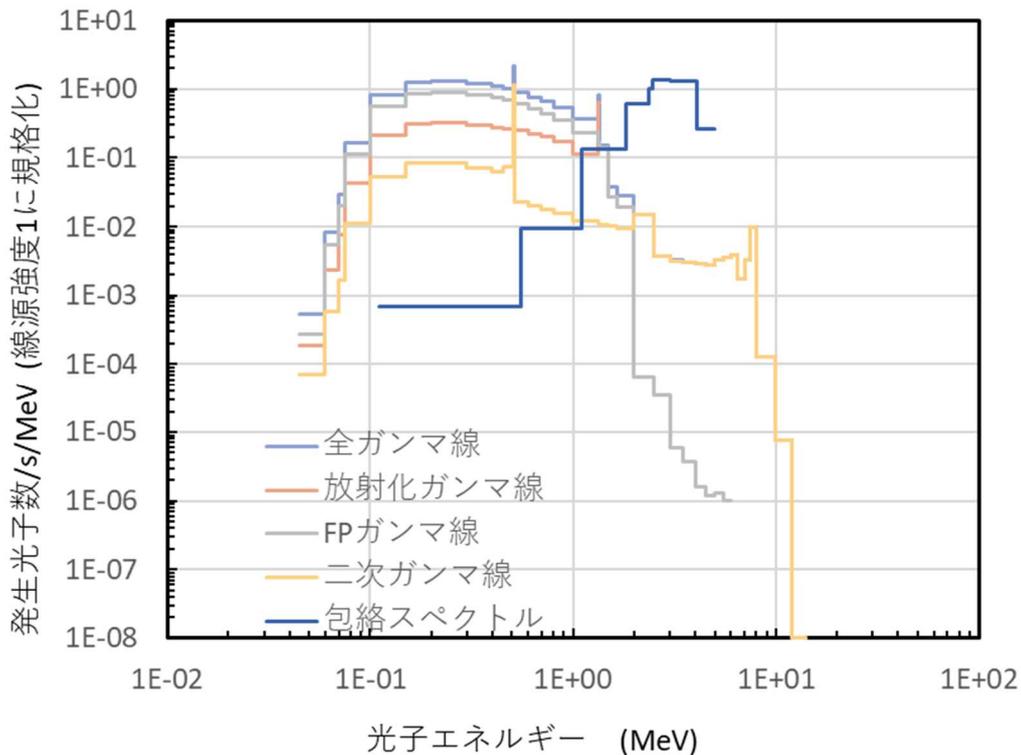


図 4.6 ガンマ線エネルギースペクトルの比較 (金属キャスク表面)

Fig. 4.6 Comparison of the gamma-ray energy spectra (metal cask surface)

4.2.3 外部遮蔽物の影響

本項では、図4.2の(2)解析モデルの確認の流れ(形状・寸法)に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・地表の形状は、実際の地表の形状を用いた場合と比較して、敷地境界での線量が同じか高くなるようなモデルに設定されているか確認

(1) 概要

貯蔵建屋の外部に放出された放射線が敷地境界の線量評価点に到達するまでの間、事業所の状況によっては周辺建造物、隆起した地形等による遮蔽効果が得られる場合もあるが、許認可における評価では将来的な周辺建造物の取り壊しの可能性や保守性の考慮のために無視されることも多い。本項では、外部遮蔽物の存在が計算結果へ与える影響を評価することで、下記評価モデルに対して外部遮蔽物を無視することによる保守性の程度について、その一例を検証した。

(2) 計算ケース及び条件

原子力事業所には基本的に超高層の建造物や、それに匹敵する急峻な地形が無いことを考慮すると、それらによる放射線の遮蔽効果は主に、貯蔵建屋から敷地境界線量評価点ま

での直接線に影響を与え、上空を經由するスカイシャイン線への影響は限定的と考えられる。一方で、外部遮蔽物による影響はその形状、大きさ、貯蔵建屋からの距離等に応じて変動し、代表的なモデルを構築することは困難である。従って本項では、直接線の経路に外部遮蔽物が存在することで直接線の敷地境界線量への寄与が著しく低下することが全ての外部遮蔽物条件に共通する項目と考え、直接線とスカイシャイン線の線量寄与における比率を評価する。計算ケースとしては全ての線量寄与を評価している基本解析条件に加え、直接線だけの線量評価を行い、前者との差を取ることでスカイシャイン線による線量寄与を F5 タリー（点検出器）により評価した。

- ① 直接線＋スカイシャイン線（基本解析条件）
- ② 直接線のみ
- ③ スカイシャイン線のみ（①－②）

ここで、直接線だけの線量評価モデルは、図 4.7 に示したように評価領域の垂直方向を貯蔵建屋最上面である 18.4 m に制限したものであり、それ以下の高度を經由して敷地境界線量評価点（高度 1 m）まで到達した放射線による線量を評価するものである。なお、基本解析（直接線＋スカイシャイン線）の評価モデルでは図 4.4 に示したように上空 2000 m までを評価領域と設定した。

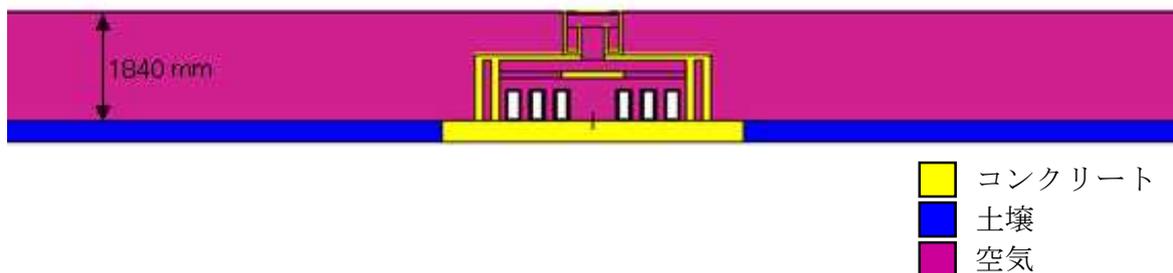


図 4.7 直接線だけの敷地境界線量評価モデル

Fig. 4.7 Geometry model for dose analysis at the site boundary for direct radiation only

注) 貯蔵建屋及び簡略化キャスクモデルは図 4.3 と同一である。

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～③について、4.2 式に示す外部遮蔽物による敷地境界線量への影響 $E_{objects}$ により評価した結果を表 4.5 に示す。

$$E_{objects} = \frac{\text{直接線 or スカイシャイン線のみによる敷地境界線量 (②、③)}}{\text{直接線＋スカイシャイン線による敷地境界線量 (①)}} \dots\dots(4.2)$$

本評価体系における敷地境界線量による比較では、中性子はスカイシャイン線が支配的であり、外部遮蔽物の影響は軽微となる。二次ガンマ線は貯蔵建屋のコンクリート透過時

に発生したものが直接線又はスカイシャイン線として到達する成分や、貯蔵建屋を透過した中性子により空气中で発生する成分があり、割合が同程度となることから、外部遮蔽物の影響が考えられる。ガンマ線はキャスク側面から放出される成分が直接線として到達する割合が高く、外部遮蔽物の影響は大きくなる。上記の全線源による寄与を合計すると、直接線の寄与は40～60%程度であるため、それを遮蔽する外部構造物等による影響も同程度と考えられる。ここで、本結果は本評価体系における貯蔵建屋の構造（壁・天井の厚さ、ストリーミング経路となる給排気口の構造等）や、敷地境界の線量評価位置までの距離が500 mである等の条件に対するものであり、外部遮蔽物による影響の程度は、それぞれの評価条件に依存する。本項の評価結果による傾向が一般的な確認内容の留意点を示すわけではないが、放射線の種類、評価方位等により、外部遮蔽物の設定が評価結果に与える影響の程度が変動することは明確であるため、外部遮蔽物を設定する際はその設定根拠を確認する必要がある。また、外部遮蔽物の存在を無視した評価条件が最も保守的であることは明確である。

表 4.5 外部遮蔽物による敷地境界線量への影響比較

Table 4.5 Comparison of the effects of the outer shielding objects on the dose analysis at the site boundary

計算ケース		②直接線	③スカイシャイン線		
方位	線源	線量寄与の割合	線量寄与の割合		
0°	中性子	側面線源	2.0±0.0%	98.0±1.9%	
		上面線源	0.7±0.0%	99.3±1.7%	
		計	1.0±0.0%	99.0±1.5%	
	二次ガンマ線	側面線源	49.2±0.6%	50.8±1.4%	
		上面線源	30.6±0.8%	69.4±2.0%	
		計	36.2±0.6%	63.8±1.4%	
	ガンマ線	側面線源	81.7±0.6%	18.3±0.7%	
		上面線源	27.0±0.4%	73.0±1.3%	
		計	78.4±0.6%	21.6±0.7%	
	合計		58.3±0.4%	41.7±0.6%	
	90°	中性子	側面線源	4.5±0.1%	95.5±2.8%
			上面線源	0.6±0.0%	99.4±2.0%
計			1.5±0.0%	98.5±1.7%	
二次ガンマ線		側面線源	41.7±0.9%	58.3±2.3%	
		上面線源	25.3±0.6%	74.7±2.6%	
		計	30.2±0.5%	69.8±2.0%	
ガンマ線		側面線源	75.7±0.6%	24.3±0.7%	
		上面線源	16.8±0.3%	83.2±1.5%	
		計	70.5±0.6%	29.5±0.7%	
合計		41.0±0.3%	59.0±0.7%		

4.2.4 線源領域としての金属キャスクモデルの設定

本項では、図4.2の(2)解析モデルの確認の流れ（組成）に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・遮蔽材の組成は、これを透過した中性子及びガンマ線による線量が、材料の仕様の範囲で最も高くなるように設定されているか確認

(1) はじめに

使用済燃料乾式貯蔵施設の遮蔽解析では、貯蔵建屋内に格納している金属キャスクが線源となり、複数基格納されている金属キャスク同士による相互遮蔽効果を考慮する場合には、近隣の金属キャスクによる散乱、吸収の影響を評価しなければならない（保守的な評価結果を得るために相互遮蔽効果を考慮しない設定とする場合もある。）。しかし、金属キャスクの内部は図 3.3 にも示したように複雑であり、詳細なモデルの作成には時間と労力を要する。また、金属キャスクは放射線減衰効果が高い、すなわち金属キャスク内部で多くの相互作用が発生する結果、放射線輸送計算に多くの時間を要するため、相互遮蔽効果を考慮するための金属キャスクモデルは図 4.3 に示したように、金属キャスク表面付近の素材での輸送粒子の散乱のみを考慮し、それより内部に侵入し線量評価への寄与が極めて小さくなった輸送粒子は黒体（完全吸収体）によって粒子輸送を打ち切ることで、計算時間の短縮を図ることが合理的と考えられている。本項では、貯蔵建屋内の金属キャスクモデル詳細度の差異が計算結果へ与える影響を評価することで、金属キャスク（線源）モデルの設定に対する確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

下記の2種類の金属キャスクモデルを貯蔵建屋内に48基設定した場合を計算ケースとし、貯蔵建屋の外表面における線量を体積検出器により評価した。

- ・ ケース①：簡略化した金属キャスクモデル（基本解析条件）
- ・ ケース②：金属キャスク体系の解析で使用した詳細なモデル（図 3.3）

また、評価位置は下記A～Dの4つとした（図4.8を参照）。

- A. 燃料中心高さにおける+X側の貯蔵建屋外壁面
($X=3000\text{ cm}, -2000 \leq Y[\text{cm}] \leq 2000, Z=260\text{ cm}$)
- B. 給気口中心高さにおける+Y側の貯蔵建屋外壁面
($-560 \leq X[\text{cm}] \leq 2860, Y=2000\text{ cm}, Z=980\text{ cm}$)
- C. キャスク貯蔵室の屋上面
($X=1580\text{ cm}, -2000 \leq Y[\text{cm}] \leq 2000, Z=1120\text{ cm}$)
- D. 排気塔の上端面
($X=1580\text{ cm}, -500 \leq Y[\text{cm}] \leq 500, Z=1840\text{ cm}$)

※図4.8ではY座標が評価範囲から外れているが、評価範囲内には排気塔が存在する。

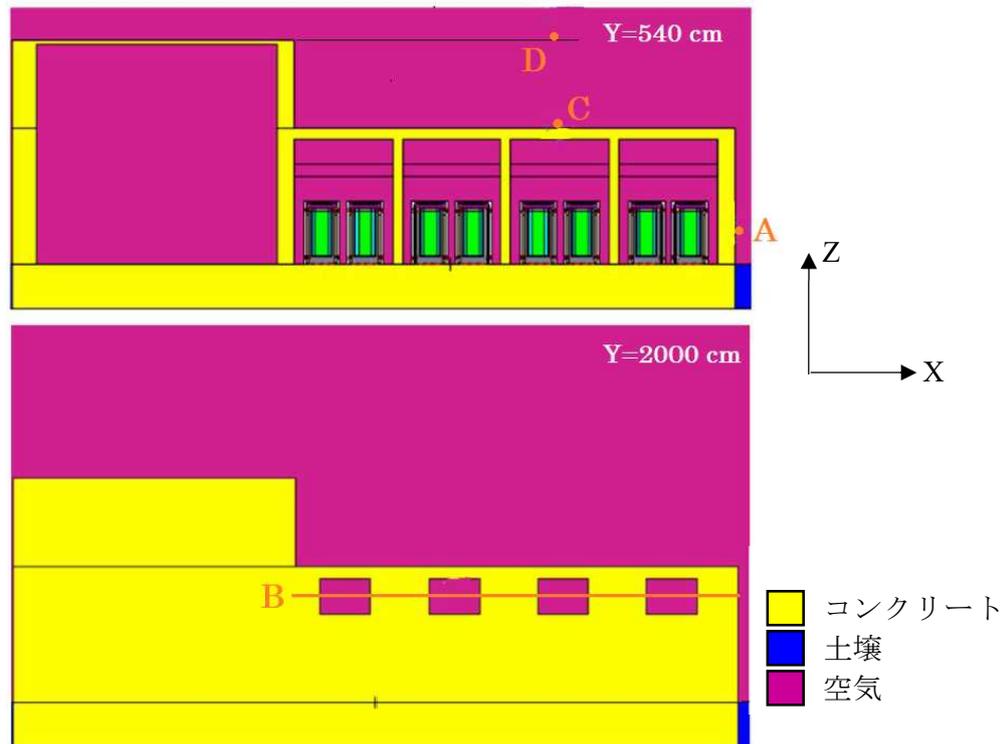


図4.8 貯蔵建屋外表面の線量評価位置

Fig. 4.8 The dose calculation positions for outer surface of the storage building

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①及び②について、A～Dの評価位置に対して各計算ケースの最大線量値を抽出し、4.3式に示す金属キャスクモデルの詳細度による影響 E_{cask} によって放射線の種類ごとに比較した結果を表4.6に示す。

$$E_{cask} = \frac{\text{詳細金属キャスクモデルを設定した場合の貯蔵建屋外部線量 (②)}}{\text{簡略化金属キャスクモデルを設定した場合の貯蔵建屋外部線量 (①)}} - 1 \dots\dots\dots(4.3)$$

両計算ケースの比較からは、誤差が10%を超えたことにより結果の信頼性が低くなる評価位置を除けば、線量評価結果に有意な影響を与えないとの結果が得られ、使用済燃料乾式貯蔵施設の線源となる金属キャスクは簡略化したモデルを使用しても、金属キャスク同士の相互遮蔽効果を適切に評価でき、線量評価結果に大きな影響を与えることはない。ただし、線量評価結果が基準に対して十分な余裕がない場合は、モデル化による不確かさ幅に留意する必要がある。

表 4.6 キャスクモデルによる線量への影響比較

Table 4.6 Comparison of the effects of the metal cask models on the dose

評価位置 放射線種	A (+X面) Z=260 cm 燃料中心高さ	B (Y面) Z=980 cm 側面の排気口	C (Z1面) X=1580 cm キャスク配列上部	D (Z2面) X=1580 cm キャスク配列上部
中性子	-4.5±9.3%	-3.1±9.3%	+0.8±2.5%	+1.1±3.7%
二次ガンマ線	+16.4±22.2%	+14.0±13.3%	+1.8±5.3%	-20.0±13.9%
ガンマ線	-0.5±4.3%	-4.0±4.1%	+3.4±2.4%	+29.3±16.9%
全線量	-0.3±4.1%	-3.8±3.7%	+3.0±2.0%	+4.8±4.0%

Z1面：キャスク貯蔵室の屋上面 (Z=1120 cm)

Z2面：排気塔の上端面 (Z=1840 cm)

注) ±〇%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 4.3 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5%は、計算ケース①の場合に比べて、計算ケース②の場合の各評価位置における実効線量が 0.5～1.5%程度大きくなることを示す。

4.2.5 コンクリートの組成

本項では、図4.2の(2)解析モデルの確認の流れ(組成)に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・遮蔽材の組成は、これを透過した中性子及びガンマ線による線量が、材料の仕様の範囲で最も高くなるように設定されているか確認

(1) はじめに

コンクリートはセメント等の結合剤、骨材及び水の混合物を固化した素材であるが、使用される骨材の組成が一定ではなく、採集場所による地域性等による違いもあり、また固化後の密度及び水分含有量も一定とはならない。したがって、遮蔽計算に適したコンクリートの組成については従前より様々な議論があり、本技術報告の執筆時点でも日本原子力学会において遮蔽計算用の標準コンクリート組成を検討している³⁸。乾式貯蔵施設のコンクリート壁は厚さが1mを超える例もあり、構成元素の種類や密度の少しの差異が遮蔽機能に影響を与えることが考えられる。本項では、コンクリートの組成の設定が計算結果へ与える影響を評価することで、コンクリートの組成の設定に対する確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

以下に示す①～⑦をコンクリートの組成として設定した計算ケースとし、敷地境界における線量をF5タリー(点検出器)により評価した。各ケースにおける元素組成比を表4.7に示す。

- ① 「放射線遮蔽ハンドブック 基礎編³⁶」(日本原子力学会)に掲載されている花崗岩を骨材とするコンクリート組成：基本解析条件
- ② 「放射線施設の遮蔽計算実務(放射線)データ集³⁹」(原子力安全技術センター)に記載されているコンクリート組成
- ③ SCALE6.2.4システム⁴⁰の標準組成に含まれるNRC向け「規制用コンクリート」におけるコンクリート組成
- ④ 日本原子力学会標準に掲載する組成の検討事例(暫定値)³⁸におけるSi系絶乾組成
- ⑤ 日本原子力学会標準に掲載する組成の検討事例(暫定値)³⁸におけるCa系絶乾組成
- ⑥ 日本原子力学会標準に掲載する組成の検討事例(暫定値)³⁸におけるSi系自由水3%組成
- ⑦ 日本原子力学会標準に掲載する組成の検討事例(暫定値)³⁸におけるCa系自由水3%組成

表4.7 コンクリートの組成による影響評価における元素組成比

Table 4.7 Elemental composition ratios in the sensitivity analysis of the concrete compositions

計算ケース	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
密度 [g/cm ³]	2.20	2.10	2.30	2.10	2.10	2.17	2.17
水分量 [%]	3.9	9.2	8.9	3.1	3.1	6.1	6.1
H	0.44%	1.03%	1.00%	0.35%	0.35%	0.69%	0.69%
C	-	0.10%	-	-	9.97%	-	9.66%
O	48.22%	54.68%	53.20%	51.63%	30.38%	52.79%	32.18%
Na	1.88%	-	2.90%	-	-	-	-
Mg	0.86%	0.22%	-	-	-	-	-
Al	5.81%	3.48%	3.40%	-	-	-	-
Si	29.36%	34.60%	33.70%	33.11%	-	32.08%	-
S	0.12%	-	-	-	-	-	-
K	2.60%	-	-	-	-	-	-
Ca	7.78%	4.46%	4.40%	7.93%	59.30%	7.68%	57.47%
Ti	0.40%	-	-	-	-	-	-
Fe	2.53%	1.43%	1.40%	6.98%	-	6.76%	-

組成は重量比

注) 各元素の同位体比は表4.2の比率に準じる。

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～⑦について、コンクリートの組成による敷地境界における線量を評価した結果を表4.8に示す。顕著な差異としては、計算ケース②は計算ケース①に比べて水分量が多いため中性子線量は低くなる一方で、鉄の含有量が少ないためガンマ線線量は高くなる。また、計算ケース③は水分量も密度も大きいため、全要素で低い線量となる。

表4.8に基づき、水分量に対する方位0°方向の線量の変化を図4.9に示す。水分量以外のパラメータが一定ではないため、多少の上下変動は見られるが、傾向として中性子及び二次ガンマ線は水分量とともに指数関数的に線量が低くなり、ガンマ線線量に対しては有意な変化は見られない。また、コンクリート密度に対する方位0°方向の線量の変化を図4.10に示す。コンクリート密度に対しても中性子及び二次ガンマ線は水分量とともに指数関数的に線量が低くなり、ガンマ線線量に対しても緩やかな減少傾向となった。

以上の結果より、水分量やコンクリート密度の変化によって、敷地境界線量に50%以上の変化が現れ、特に中性子（二次ガンマ線を含む）に対しての影響が大きい。したがって、解析条件を設定する際には現実的に想定される組成や密度と比較して過小評価を導く組成となっていないかの確認が重要であることが確認内容の留意点として得られた。

表 4.8 コンクリートの組成による敷地境界線量への影響比較

Table 4.8 Comparison of the effects of the concrete compositions on the dose at the site boundary

		実効線量[$\mu\text{Sv/y}$]						
方位	計算ケース	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
	密度 [g/cm^3]	2.2	2.1	2.3	2.1	2.1	2.17	2.17
	水分量 [%]	3.9	9.2	8.9	3.1	3.1	6.1	6.1
0°	中性子	4.01E-03±1.19%	1.33E-03±2.35%	9.94E-04±2.31%	8.43E-03±1.49%	1.88E-02±0.58%	2.68E-03±1.53%	4.12E-03±1.02%
	二次ガンマ線	5.83E-04±2.57%	2.70E-04±1.80%	1.75E-04±2.59%	1.03E-03±1.63%	1.28E-03±1.08%	4.01E-04±1.81%	3.79E-04±2.42%
	ガンマ線	1.22E-02±0.85%	1.78E-02±0.34%	9.15E-03±0.40%	1.65E-02±0.45%	1.03E-02±0.62%	1.31E-02±0.48%	8.23E-03±0.59%
90°	中性子	3.96E-03±1.54%	1.35E-03±1.62%	1.10E-03±2.40%	7.50E-03±0.76%	1.61E-02±0.63%	2.69E-03±1.78%	3.72E-03±0.94%
	二次ガンマ線	4.53E-04±1.81%	2.29E-04±1.73%	1.77E-04±3.02%	7.71E-04±1.72%	9.84E-04±1.31%	3.29E-04±2.02%	2.89E-04±1.48%
	ガンマ線	5.41E-03±0.85%	7.82E-03±0.51%	4.09E-03±0.62%	7.26E-03±0.63%	4.64E-03±1.04%	5.80E-03±0.63%	3.72E-03±1.38%

±〇%はモンテカルロ計算の統計誤差

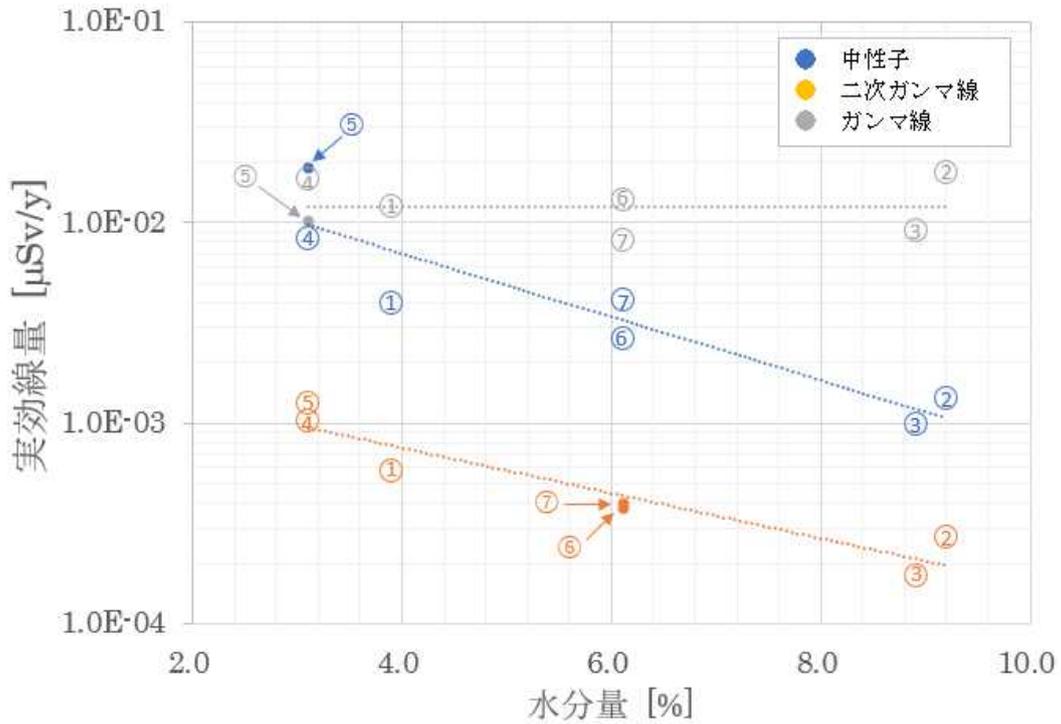


図 4.9 コンクリート中の水分量と敷地境界 (0°方向) における線量との関係

Fig. 4.9 Relationship between moisture content in the concrete and the dose at the site boundary (0° direction)

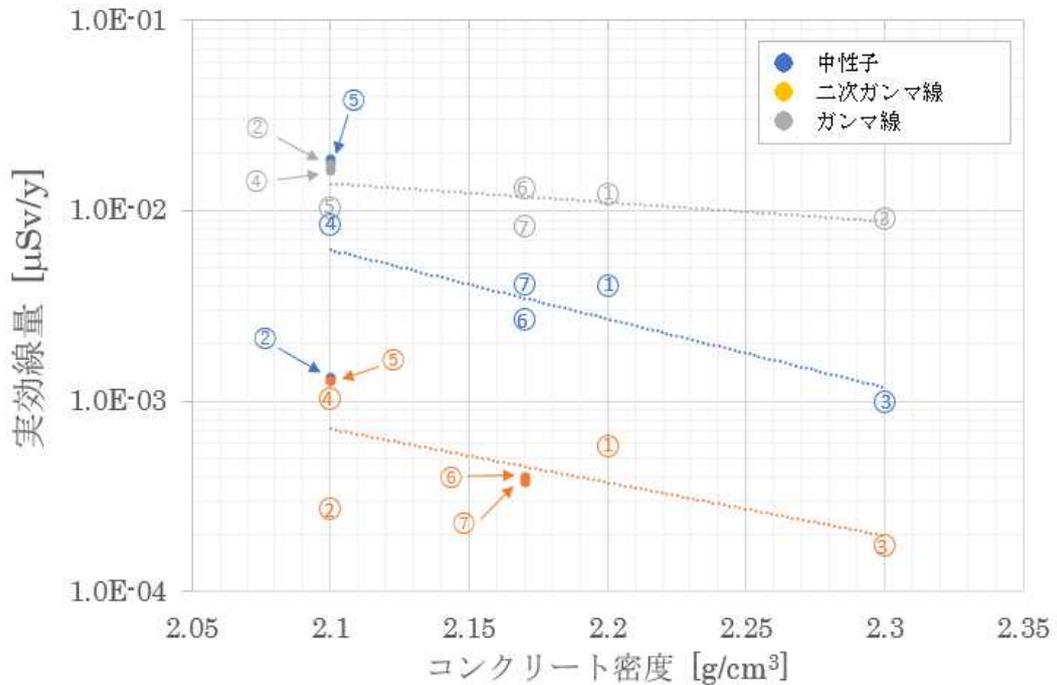


図 4.10 コンクリートの密度と敷地境界 (0°方向) における線量との関係

Fig. 4.10 Relationship between the concrete density and the dose at the site boundary (0° direction)

4.2.6 空気の組成

本項では、図4.2の(2)解析モデルの確認の流れ（組成）に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・ 散乱領域の空気の組成は、スカイシャインによる中性子、ガンマ線及び空気中で生成する二次ガンマ線による敷地境界での線量が、現実的に考えられる範囲で最も高くなるように設定されているか確認

(1) はじめに

スカイシャイン線による線量は、その媒質である空気の組成により影響を受ける。短期的に見れば空気の主要構成元素である窒素や酸素原子の比率は大きく変化しないが、気象条件により気圧（密度）、湿度（水素原子量）は変化する。本項では、空気の気圧又は湿度をパラメータとした際に計算結果へ与える影響を評価することで、空気の条件設定に対する確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

気圧については、過去に我が国で観測された最低気圧（台風による局所的な低気圧、高山地帯を除く。）及び最高気圧を包絡する条件とし、湿度については0～100%の間とした。この時、湿度が変化した場合の空気密度は4.4式で表される⁴¹。

$$\sigma_w = \sigma \left(1 - \frac{0.378p}{H} \right) \dots\dots\dots(4.4)$$

ここで、

- σ_w : 空気の密度
- H : 大気圧 [torr]
- p : 水蒸気分圧 [torr]
- σ : 同温同圧の乾燥した空気の密度

である。これらの条件に基づき表4.9に示す①～⑥を空気の組成として設定した計算ケースとし、敷地境界における線量を評価した。

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～⑥について、4.5式に示す空気の組成による敷地境界線量への影響 E_{air} によって比較した結果を表4.10に示す。

$$E_{air} = \frac{\text{気圧又は湿度の変更を設定した場合の敷地境界線量 (②～⑥)}}{\text{標準大気圧、湿度0.6%を設定した場合の敷地境界線量 (①)}} - 1 \dots\dots(4.5)$$

本評価においては、湿度を上げると増加した水素原子による中性子の減速、吸収が促進され、中性子による線量が減少傾向となる。一方で、4.4式により空気の密度が減少する影響により、ガンマ線による線量は多少の増加傾向を示す。全線量については中性子とガンマ線の線源強度比に依存するため、敷地境界線量に対してより影響の大きい中性子の線源強度比が強い場合は乾燥空気と設定した方が安全側となる。気圧の変化については、空気密度による遮蔽効果の影響が現れるのみであり、気圧が低い設定において安全側となる。我が国の実情からは想定しにくい、標高の高い位置に乾式貯蔵施設を建設する場合等、定常的に気圧の低い環境下では影響を考慮する必要がある。

以上より、湿度及び気圧の設定による敷地境界線量の変化傾向を確認することの必要性が確認内容の留意点として得られた。

表4.9 空気の組成に対する計算ケース

Table 4.9 Sensitivity analysis cases for the air atmosphere composition

計算ケース	①	②	③	④	⑤	⑥
参考文献	Koyama et al. ³⁵	地球環境化学入門 ⁴² の数値をケース④として、他ケースを換算				
気圧[hPa]	1013.25	1013.25	1013.25	1013.25	950	1050
相対湿度[%]	0.6	100	50	0	0	0
密度[g/cm ³]	1.205E-03	1.194E-03	1.199E-03	1.205E-03	1.130E-03	1.249E-03
H-1	7.199E-09	1.157E-06	5.786E-07	-	-	-
C-12	7.585E-09	4.434E-09	4.486E-09	4.538E-09	4.255E-09	4.703E-09
N-14	3.910E-05	3.847E-05	3.892E-05	3.938E-05	3.693E-05	4.081E-05
O-16	1.054E-05	1.091E-05	1.074E-05	1.056E-05	9.903E-06	1.095E-05
Ar-40	-	1.272E-07	1.288E-07	1.303E-07	1.221E-07	1.350E-07

組成は原子個数密度 [10²⁴atoms/cm³]

注) 計算ケース①～⑥の温度は全て20℃。

表4.10 空気の組成による敷地境界線量への影響比較

Table 4.10 Comparison of the effects of the atmosphere compositions on the dose at the site boundary

方位	計算ケース	気圧 [hPa]	湿度 [%]	中性子	二次ガンマ線	ガンマ線	全線量
0°	②	1013.25	100	-19.9±1.9%	-2.7±1.3%	+3.6±1.0%	-2.1±0.8%
	③	1013.25	50	-7.6±2.2%	+3.3±1.4%	+1.4±1.0%	-0.5±0.9%
	④	1013.25	0	+3.3±2.4%	-3.6±1.3%	-0.7±0.9%	+0.5±0.9%
	⑤	950	0	+22.3±2.8%	+8.3±1.5%	+10.8±1.1%	+13.6±1.0%
	⑥	1050	0	-3.7±2.2%	-10.4±1.2%	-5.8±0.9%	-5.2±0.8%
90°	②	1013.25	100	-21.9±1.3%	-3.5±1.6%	+1.5±0.7%	-8.0±0.7%
	③	1013.25	50	-12.6±1.5%	+0.4±1.7%	+0.5±0.7%	-4.5±0.7%
	④	1013.25	0	+1.1±1.7%	+21.1±1.8%	+0.0±0.7%	+1.8±0.8%
	⑤	950	0	+14.6±1.9%	+11.4±1.8%	+9.2±0.8%	+11.6±0.9%
	⑥	1050	0	-8.4±1.6%	-5.2±1.6%	-6.6±0.6%	-7.1±0.7%

注) ±〇%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 4.5 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5 %は、計算ケース①の場合に比べて、計算ケース②～⑥の場合の敷地境界線量が 0.5～1.5 %程度大きくなることを示す。

4.2.7 大地の組成

本項では、図4.2の(2)解析モデルの確認の流れ(組成)に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・大地の組成は、大地として設定した物質中で散乱された中性子、ガンマ線及び大地物質中で生成する二次ガンマ線による敷地境界での線量が、現実的に考えられる範囲で最も高くなるように設定されているか確認

(1) はじめに

これまでスカイシャイン線の評価に主に用いられてきた一回散乱コード G33⁴³ (ガンマ線のみ) 等では、コードの制約により解析モデルに大地による反射を考慮できないものもあったが、モンテカルロコードでは大地の組成として主に土壌を設定し、大地による放射線の反射や吸収効果を評価の対象に含めることができる。一方で、乾式貯蔵建屋から事業所の敷地境界までの大地は、土壌以外の組成である場合もある。本項では、大地の組成の設定が計算結果へ与える影響を評価することで、大地の組成に対する確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

以下に示す①～④を大地の組成として設定した計算ケースとし、敷地境界における線量を評価した。表4.11に各ケースの大地の組成を原子個数比で示す。

- ① 土壌 (基本解析条件)

- ② コンクリート
- ③ 水
- ④ 空気

(3) 計算結果及び考察

計算ケース①～④について、4.6式に示す大地の組成による敷地境界における線量への影響 E_{ground} によって比較した結果を表4.12に示す。

$$E_{ground} = \frac{\text{大地がコンクリート or 水 or 空気の場合の敷地境界線量 (②～④)}}{\text{大地が土壌の場合の敷地境界線量 (①)}} - 1 \dots\dots\dots(4.6)$$

本評価においては、ケース②の大地の組成をコンクリートとした場合に、特に中性子線量の増加が現れた。また、ケース④の大地の組成を空気とした場合に線量が減少しているが、本評価では大地の層を370 cmとして計算してあるため、地表面に相当する高度を下向きに通過した放射線の多くが空気と相互作用を起こすことなく計算領域外に流出し、線量に寄与しないためである。ここで、地表下の空気層厚さを上空方向と同程度と条件設定した場合には、地表下にも存在することとなる空気との散乱現象(スカイシャイン)により、敷地境界線量が増加することはよく知られている事実である。

以上より、近年の原子力事業所では、重要施設に森林火災の影響が及ばないように地面をコンクリートとしている箇所が増加していることもあり、事業所の実情に合わせて、非安全側の解析条件とならないような設定となっているかが確認内容の留意点として得られた。

表4.11 大地の組成による影響評価における物質組成

Table 4.11 Elemental composition ratios in the sensitivity analysis of the ground compositions

計算ケース	①	②	③	④
組成	土壌	コンクリート	水	空気
参考文献	放射線遮蔽ハンドブック基礎編 ³⁶		理論値	Koyama et al. ³⁵
密度[g/cm ³]	1.52	2.20	1.00	0.00120
H	2.2630E-02	5.7900E-01	6.6867E-02	7.1991E-09
C	-	-	-	7.5847E-09
N	-	-	-	3.9099E-05
O	3.2590E-02	3.9930E+00	3.3434E-02	1.0538E-05
Na	4.0070E-04	1.0800E-01	-	-
Mg	2.5370E-04	4.7000E-02	-	-
Al	3.3970E-03	2.8500E-01	-	-
Si	6.9141E-03	1.3840E+00	-	-
S	-	5.0000E-03	-	-
K	1.0190E-04	8.8000E-02	-	-
Ca	2.2590E-04	2.5700E-01	-	-
Ti	9.1320E-05	1.1000E-02	-	-
Fe	9.5740E-04	6.0000E-02	-	-

組成は原子個数密度 [10²⁴atoms/cm³]

注) 各元素の同位体比は表4.2の比率に準じる。

表4.12 大地の組成による敷地境界線量への影響比較

Table 4.12 Comparison of the effects of the ground compositions on the dose at the site boundary

方位	計算ケース	中性子	二次ガンマ線	ガンマ線	全線量
0°	②コンクリート	+36.5±2.3%	-4.2±2.7%	-0.7±1.0%	+8.4±0.9%
	③水	-7.6±7.7%	-93.1±0.3%	+0.0±1.1%	-4.7±2.0%
	④空気	-33.6±0.9%	-28.9±2.0%	-25.2±1.0%	-27.2±0.7%
90°	②コンクリート	+29.6±2.7%	-3.9±2.0%	-0.3±1.0%	+11.6±1.2%
	③水	-17.5±1.8%	-89.8±1.0%	+3.9±3.2%	-8.9±1.9%
	④空気	-36.7±1.0%	-29.4±1.5%	-27.1±0.7%	-31.1±0.6%

注) ±〇%で表記した線量変化量の誤差は各計算ケースの統計誤差を 4.6 式の関係に基づき誤差伝播則により求めた値を示し、+1.0±0.5 %は、計算ケース①の場合に比べて、計算ケース②～④の場合の敷地境界線量が 0.5～1.5 %程度大きくなることを示す。

4.2.8 評価点の方位及び高度

本項では、図4.2の(2)解析モデルの確認の流れ(線量評価法・位置)に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・敷地境界において最大の線量を示す位置での線量を評価できるように検出器(タリ

一) の位置が設定されているか確認

(1) はじめに

敷地境界線量の評価位置は、最近接位置の方位、貯蔵建屋との標高差等の情報を基に最も線量の高くなる評価条件を検討することが多いのが一般的である。また、貯蔵建屋内の金属キャスクの配置、各方位の壁の厚さ、ストリーミング経路である給排気口の開口方位、高さ等によっても、敷地境界線量の評価結果への影響が考えられる。

本項では、評価点の方位及び高度が計算結果へ与える影響を評価することで、下記評価モデルの線量評価結果に対する評価点の方位及び高度の依存性について、その一例を検証した。

(2) 計算ケース及び条件

4.2.1 項の基本解析では、貯蔵建屋中心から水平距離 500 m 地点の地表からの高さ 1 m を評価点として設定した。一方で、線源である金属キャスクは 5 m 程度の高さがあり、18.4 m の高さがある貯蔵建屋上部には排気口が開口している。また、方位に対する貯蔵建屋の構造は、0-180°方向では 0°方向に偏って金属キャスクが配置され、180°方向は二層の壁によって遮蔽されている。90-270°方向については対称形となっており、各方向に給排気口の開口部が存在する。

- ・ 以上より、基本解析のモデル及び条件に対して、円筒形のメッシュタリーを用いて下記の条件による評価を行った。距離：貯蔵建屋中心から水平方向に 499.9～500.0 m の間
- ・ 高さ：0 m～20 m（100 等分分割）
- ・ 方向：0°、90°及び 180°（角度広がり 2°）

(3) 計算結果及び考察

各方向の評価位置高度に対する感度の傾向を検討するため、0 m～20 m での線量評価結果を図 4.11～4.13 にそれぞれ示す。また、広い空間を対象とした遠方のスカイシャイン線量は、あらゆる方向及び距離から低確率で寄与する散乱線の合計として求まることから、実際の測定であっても統計誤差以上のばらつきが発生することが多いため、線形最小二乗法による近似直線を同図にそれぞれ示す。さらに、近似直線の式により求めた 0 m 及び 20 m での線量、並びに両者の比率を表 4.13 に示す。各結果とも、高度が上がるに従い線量が増加傾向であった。方位については、0-180°方向の比較では壁の厚さ及び金属キャスクの配置による影響が明確に現れ、特にガンマ線では 0°方向の線量が 10 倍以上となった。また、給排気口が存在する 90°方向については、0°方向と比較して線量に対する中性子の寄与が増大しており、中性子ストリーミングの影響が現れていると考えられる。

以上の結果は本評価に用いた貯蔵建屋モデルの形状等に依存したものであり、他のモデルに対しては形状的特徴に依存した結果が得られることとなるため、本項の評価結果によ

る傾向が一般的な確認内容の留意点を示すわけではない。ただし、評価位置の方位及び高度のパラメータは評価結果に影響を及ぼすことは明確であるため、評価位置の設定根拠を確認することが確認内容の留意点となる。

表 4.13 高さ 0 m と 20 m での実効線量比（近似曲線による評価）

Table 4.13 Effective dose ratios at heights of 0 and 20 m (evaluation by approximation curves)

方向[°]	高さ[m]	実効線量[$\mu\text{Sv/y}$]		
		中性子	二次ガンマ線	ガンマ線
0	0	4.77E-07	6.37E-08	1.36E-06
	20	5.64E-07	7.88E-08	1.53E-06
	20 / 0	1.18	1.24	1.13
90	0	4.54E-07	5.14E-08	6.28E-07
	20	5.31E-07	6.30E-08	6.87E-07
	20 / 0	1.17	1.23	1.09
180	0	3.36E-07	2.65E-08	8.56E-08
	20	4.13E-07	3.07E-08	1.09E-07
	20 / 0	1.23	1.16	1.27

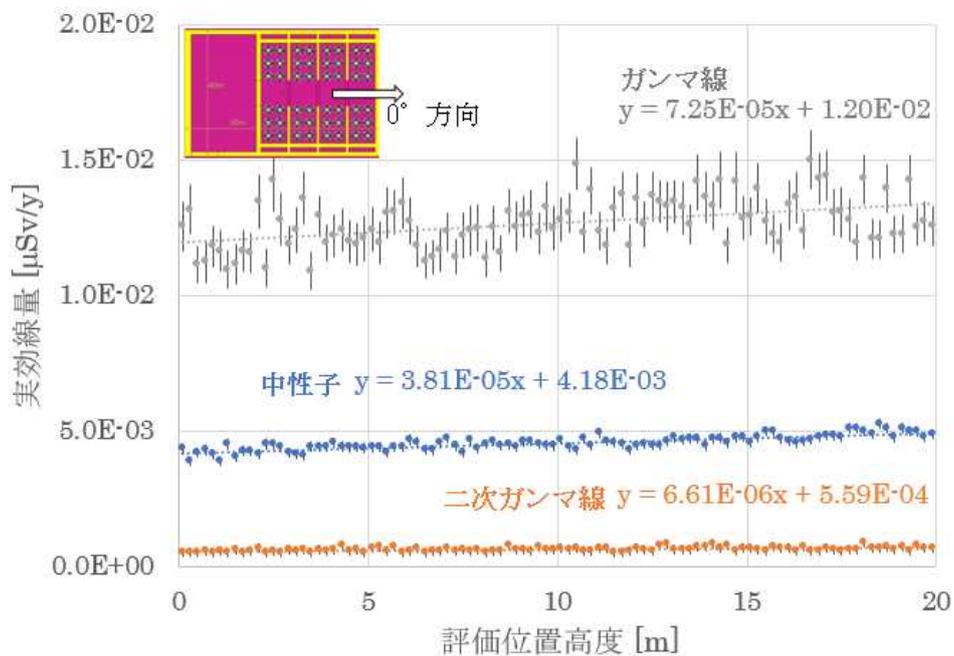


図 4.11 敷地境界での高さ方向線量分布（距離 500 m、0°方向）

Fig. 4.11 Vertical-direction dose distribution at the site boundary
(distance 500 m; 0° direction)

注) 左上の図は貯蔵建屋に対する評価方向を示す。(図 4.3 を参照。)

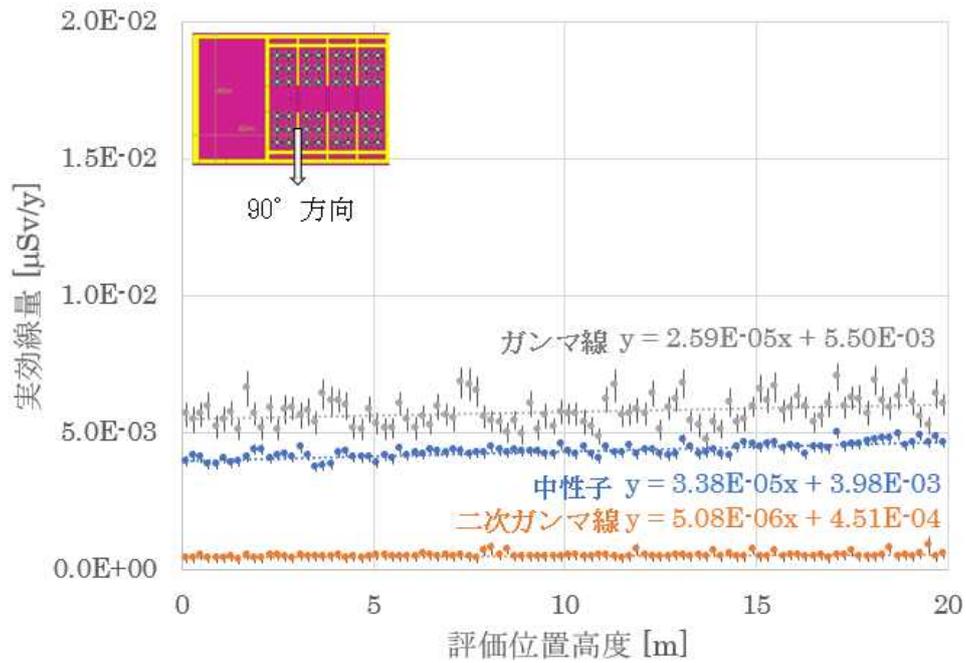


図 4.12 敷地境界での高さ方向線量分布（距離 500 m、90°方向）

Fig. 4.12 Vertical-direction dose distribution at the site boundary (distance 500 m; 90° direction)

注) 左上の図は貯蔵建屋に対する評価方向を示す。(図 4.3 を参照。)

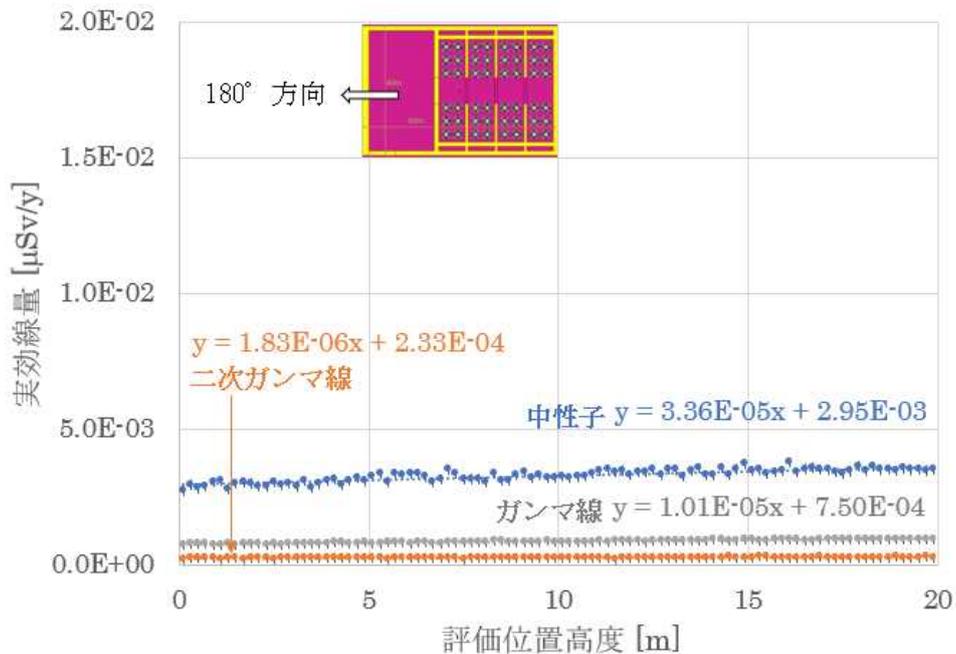


図 4.13 敷地境界での高さ方向線量分布（距離 500 m、180°方向）

Fig. 4.13 Vertical-direction dose distribution at the site boundary (distance 500 m; 180° direction)

注) 左上の図は貯蔵建屋に対する評価方向を示す。(図 4.3 を参照。)

4.3 使用済燃料乾式貯蔵施設の解析条件の妥当性確認のまとめ

4.1 節にフロー図としてまとめた使用済燃料乾式貯蔵施設の各解析条件の妥当性確認の流れに基づき、確認項目、確認内容及び特記すべき留意点をまとめたものを表 4.14 に示す。特記すべき留意点は、定性的あるいは原理的に得られる項目については検討委員会での議論を整理した結果を記載し、解析による定量的な検証が必要な項目については 4.2 節に記載した検証解析の詳細及び結果の考察により得られた確認内容の留意点を記載した。

適合性審査の際には、これらを網羅的に確認することで、解析条件の妥当性判断の根拠とすることができる。

表 4.14 確認項目、確認内容及び留意点（使用済燃料乾式貯蔵施設）

Table 4.14 Validation items, validation contents and points to note (a spent fuel dry storage facility)

確認項目		確認内容	特記すべき留意事項
1.線源	1.1 中性子源	金属キャスク表面から放出される中性子は、敷地境界での中性子及び二次ガンマ線線量が、設計条件の範囲内で最も高くなるように設定されているか。	
		金属キャスク表面から放出される中性子の空間分布、角度分布及びエネルギースペクトルは、上記の設定を適切に表すように与えられているか。	<p>【4.2.2 項に基づく留意点】 放射線源に包絡スペクトル³⁴が用いられた際、線源強度を中性子 100%又はガンマ線 100%とすれば保守的であるが、現実的な線源強度比を設定する場合は包絡スペクトル作成時の前提条件等も確認した上で、適用された使用済燃料乾式貯蔵施設において保守的な設定になっているか留意する必要がある。</p> <p>【定性的あるいは原理的に得られる留意点】 一般に用いられる多群構造は反応断面積のエネルギー変化の観点で作られているが、それよりもエネルギー分割が粗い場合、分散低減法が十分機能しない可能性等に留意する必要がある。</p>
	1.2 ガンマ線源	金属キャスク表面から放出されるガンマ線は、敷地境界でのガンマ線線量が、設計条件の範囲内で最も高くなるように設定されているか。	

確認項目		確認内容	特記すべき留意事項
1.線源	1.2 ガンマ線源	金属キャスク表面から放出されるガンマ線の空間分布、角度分布及びエネルギースペクトルは、上記の設定を適切に表すように与えられているか。	<p>【4.2.2 項に基づく留意点】</p> <p>放射線源に包絡スペクトル³⁴が用いられた際、線源強度を中性子 100%又はガンマ線 100%とすれば保守的であるが、現実的な線源強度比を設定する場合は包絡スペクトル作成時の前提条件等も確認した上で、適用された使用済燃料乾式貯蔵施設において保守的な設定になっているか留意する必要がある。</p> <p>【定性的あるいは原理的に得られる留意点】</p> <p>一般に用いられる多群構造は反応断面積のエネルギー変化の観点で作られているが、それよりもエネルギー分割が粗い場合、分散低減法が十分機能しない可能性等に留意する必要がある。</p>
2.解析モデル	2.1 形状・寸法	建屋の壁厚等の遮蔽材の厚さは、敷地境界での中性子及びガンマ線線量が、設計条件の範囲内で最も高くなるように設定されているか。	
		金属キャスクの配置は、線量評価点までの距離及び金属キャスク同士の相互遮蔽効果を考えたときに、敷地境界での中性子及びガンマ線線量が、設計条件の範囲内で最も高くなるように（非安全側にならないように）設定されているか。	
		スカイシャイン線の評価するための散乱領域は十分な大きさとなっているか。	<p>【補足】</p> <p>十分な大きさの散乱領域とは、それ以上大きくしても評価結果に優位な影響を与えない大きさである。</p>
		建屋に設けられた給排気口やルーバーなどの空気流路は、そこをストリーミングする放射線による敷地境界での線量を評価できるように（非安全側にならないよう）モデル化されているか。	

確認項目		確認内容	特記すべき留意事項
2.解析モデル	2.1 形状・寸法	地表の形状は、実際の地表の形状を用いた場合と比較して、敷地境界での線量が同じか高くなるようなモデルに設定されているか。	【4.2.3 項に基づく留意点】 外部遮蔽物の設定が評価結果に影響を与えることは明確であるため、外部遮蔽物を設定する際はその設定根拠を確認する必要がある。
	2.2 組成	遮蔽材の組成は、これを透過した中性子及びガンマ線による線量が、材料の仕様の範囲で最も高くなるように設定されているか。	【4.2.4 項に基づく留意点】 キャスクの内側を黒体（完全吸収体）にした簡略化キャスクモデルと実際のキャスクを模擬した詳細キャスクモデルを比較して線量に有意な差はないものと考えられるが、線量評価結果が基準に対して十分な余裕がない場合、簡略化キャスクモデルでの線量の不確かさ幅について留意する必要がある。 【4.2.5 項に基づく留意点】 水分量やコンクリート密度の変化によって、敷地境界線量に大きな変化が現れる可能性がある。 解析条件を設定する際には現実的に想定される組成や密度と比較して過小評価を導く組成となっていないかに留意する必要がある。
		散乱領域の空気の組成は、スカイシャインによる中性子、ガンマ線及び空気中で生成する二次ガンマ線による敷地境界での線量が、現実的に考えられる範囲で最も高くなるように設定されているか。	【4.2.6 項に基づく留意点】 湿度が高くなると中性子は水分子中の水素原子核に吸収されて敷地境界線量は下がり、ガンマ線の線量は増加する傾向がある。 気圧が低くなると中性子及びガンマ線ともに線量は増加する傾向がある。

確認項目		確認内容	特記すべき留意事項
2.解析モデル	2.2 組成	大地の組成は、大地として設定した物質中で散乱された中性子、ガンマ線及び大地物質中で生成する二次ガンマ線による敷地境界での線量が、現実的に考えられる範囲で最も高くなるように設定されているか。	<p>【4.2.7 項に基づく留意点】</p> <p>大地を土壌等でモデル化すると空気より保守的な結果となる（地表下の空気層が薄い場合に限る。）。</p> <p>近年の原子力施設は森林火災対策等で大地がコンクリートで覆われている範囲が以前より広がっており、敷地境界近傍含めてコンクリートで覆われている可能性について留意する必要がある。</p> <p>【定性的あるいは原理的に得られる留意点】</p> <p>土壌の組成については、中性子の散乱に寄与する元素等に留意する必要がある。</p>
	2.3 線量評価法・位置	検出器（タリー）の種類は目的に応じて適切に選ばれているか。	<p>【補足】</p> <p>リング形状の体積検出器やネクストイベントエスティメータは、水平方向が線源を中心とした点対称体系の場合にのみ適用が可能である。（リング形状の体積検出器を周方向に領域分割する場合は適用可能である。）</p>
		ネクストイベントエスティメータ（点形状、リング形状）に関してその不感領域は適切に設定されているか。	<p>【補足】</p> <p>一般的に数 cm～10 cm 程度が設定されるが、不感領域内に高密度物質（空気等の気体以外）が存在する場合は誤差が発生するため、ネクストイベントエスティメータの使用は適切ではない。</p>
		線量換算係数のエネルギーに関する内挿法は適切か。	<p>【補足】</p> <p>エネルギー分点の間隔は線形、あるいは対数をベースに与えられており、内挿法はそれに合わせる必要がある。</p>
		敷地境界において最大の線量を示す位置での線量を評価できるように検出器（タリー）の位置が設定されているか。	<p>【4.2.8 項に基づく留意点】</p> <p>評価位置の方位及び高度のパラメータは評価結果に影響を及ぼすことは明確であるため、評価位置の設定根拠を確認する必要がある。</p>

確認項目		確認内容	特記すべき留意事項
2.解析モデル	2.3 線量評価法・位置	検出器（タリー）の大きさは、最大の線量を示す位置を評価するのに適切か。	【補足】 検出器の大きさは、評価位置での線量変化の程度を考慮して設定し、1m～数m程度が一般的である。（大きさは立方体の一辺、あるいは円筒の直径や長さである。）
3.解析コード	3.1 信頼性	線量評価に用いる解析コードの信頼性は V&V (Verification & Validation) により確かめられているか。又は、保守的な評価が可能であると検証されているか。	【定性的あるいは原理的に得られる留意点】 線量評価に用いる解析コードの信頼性は V&V 手法等により確かめられているか、保守的な評価が可能であると検証されているかのいずれかが必要である。必要に応じて、後日公表予定の V&V 手法に係る NRA 技術報告を参照のこと。
	3.2 正確度	解析コードの正確度 (Accuracy) は解析対象と類似なベンチマーク実験解析により評価されているか。又は、保守的な評価の場合、正確度の評価についての確認は不要だが、評価結果が実験値を確実に上回ることを確認する必要がある。	
4.データ・係数	4.1 中性子断面積	用いられている遮蔽材やその他の材質を構成する核種中性子断面積は、類似の線源エネルギーに対する遮蔽実験等でその正確度が検証されているか。	【3.2.7 項に基づく留意点】 評価実績の豊富な体系や物質に対しては核データの種類による影響は小さいが、核データは更新が進むにつれて収録データ数が増加するとともにデータ内容の修正も進んでおり、信頼できる検証結果が示されていることが確認されれば、より新しい核データを用いることが推奨される。 【定性的あるいは原理的に得られる留意点】 過去のバージョンでは遮蔽解析を実施するうえで重要な二次ガンマ線のデータが不足しており、解析に必要なデータが収録されていない場合は過小評価に繋がる可能性が高いため、注意が必要である。 【3.2.8 項に基づく留意点】 炭化水素系素材を用いた中性子遮蔽材には、熱中性子散乱則を考慮しない方が保守的な評価結果となる。

確認項目		確認内容	特記すべき留意事項
4.データ・係数	4.2 光子断面積	用いられている遮蔽材やその他の材質を構成する元素の光子断面積は、ガンマ線源のエネルギー範囲でその正確度が検証されているか。	
	4.3 線量換算係数	線量換算係数は法令に基づき適切な種類（実効線量）のものが用いられているか。	
		線量換算係数の数値は法令に則したものとなっているか。	

5. モンテカルロ法遮蔽解析結果の信頼性確認

モンテカルロコードによる遮蔽解析には、統計誤差をはじめとする幾つかの統計指標が付随し、それらを確認することで解析結果の信頼性を評価することが一般的である。MCNPコード⁶では表5.1に示す10個の統計チェック項目が出力され、SCALEシステム⁴⁰の最適分散低減遮蔽解析システムMAVRIC⁴⁴及び国産のモンテカルロコードPHITS⁷では6個の項目について出力され、それらを確認することにより解析結果の信頼性確認に資することができる。統計指標の詳細については、付録に記載した。

本章では、上記の統計チェック項目の確認も含め、先行研究成果²等を参照して検討委員会での議論により取りまとめた、使用済燃料乾式貯蔵施設の許認可において遮蔽解析にモンテカルロコードが使用された際の信頼性確認について解説する。5.1節では解析結果の信頼性確認の流れ及び確認すべき項目について、5.2節では確認内容の詳細及び根拠を明確にするために実施した検証解析の詳細及び結果から得られた確認内容の留意点について、5.3節では線量基準に対する評価結果の確認をする際の考え方やその留意点について、5.4節ではそれらを整理してまとめた結果をそれぞれ記述する。

表 5.1 MCNP コードにおける 10 個の統計チェック項目

Table 5.1 Ten statistical checks in the MCNP code

番号	分類	判断基準
①	計算結果 (Dose)	ヒストリーに対して単調減少又は単調増加していない
②	統計誤差 (R)	値が 0.1 以下 (Next Event Estimator では 0.05 以下)
③		ヒストリーに対して減少する
④		ヒストリーの平方根に対して反比例する
⑤	分散の分散 (VOV)	値が 0.1 以下
⑥		ヒストリーに対して減少する
⑦		ヒストリーに対して反比例する
⑧	性能指標 (FOM)	ヒストリーに対して値が一定
⑨		ヒストリーに対して単調減少又は単調増加していない
⑩	確率密度関数(PDF)	関数の高スコア側の傾斜が 3 以上

5.1 モンテカルロ法遮蔽解析結果の信頼性確認の流れ

先行研究成果²等を参照して検討委員会での議論により整理した適合性審査における解析結果の信頼性確認全体の流れを図 5.1 にフロー図として示す。また、図 5.1 中の(1)～(5)各項目に対する個別の確認の流れを図 5.2 にフロー図として示す。

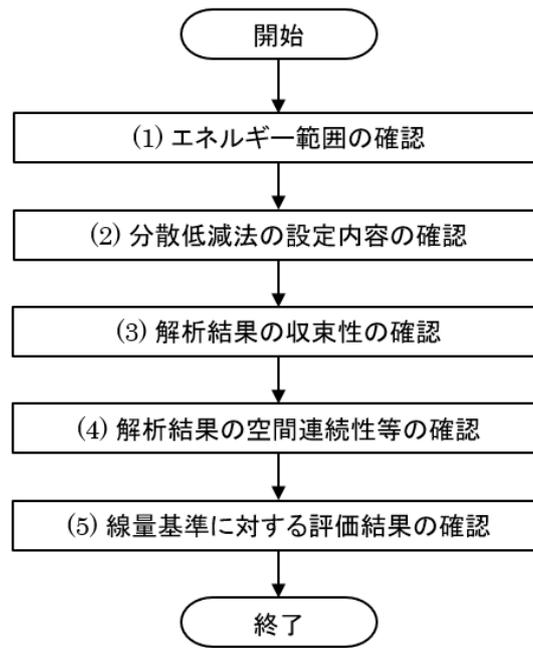
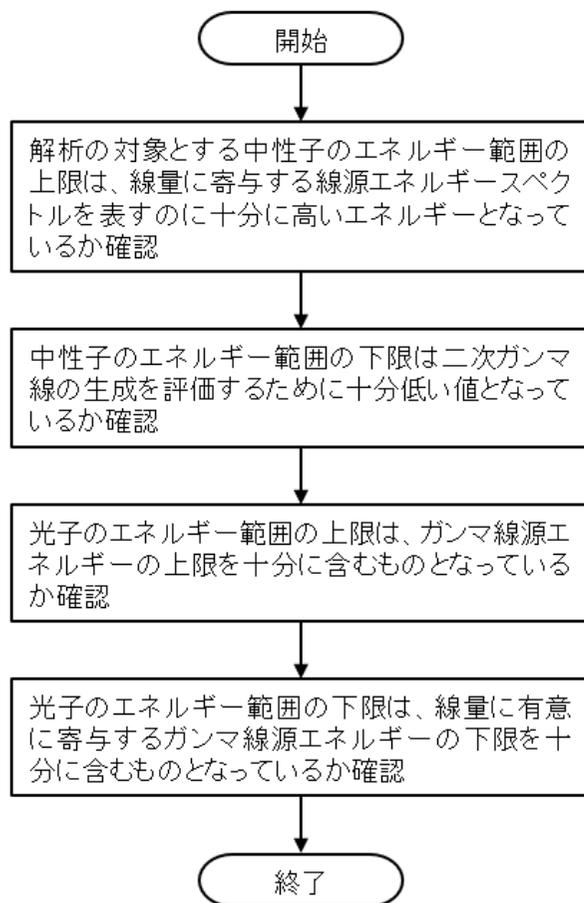
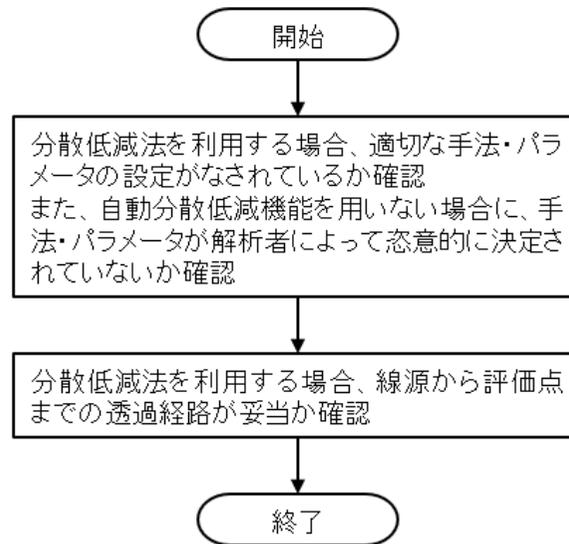


図 5.1 解析結果の信頼性確認全体の流れ

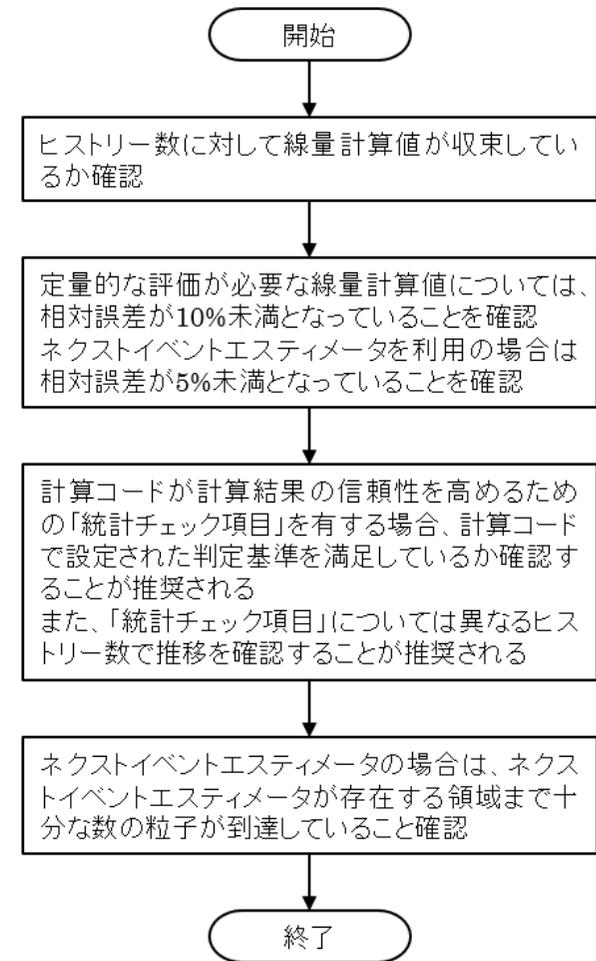
Fig. 5.1 Overall flow of confirming the reliability of analysis results



(1)エネルギー範囲の確認



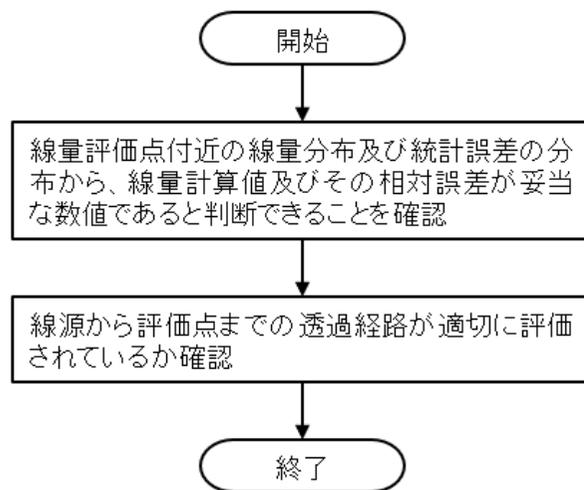
(2)分散低減法の設定内容の確認



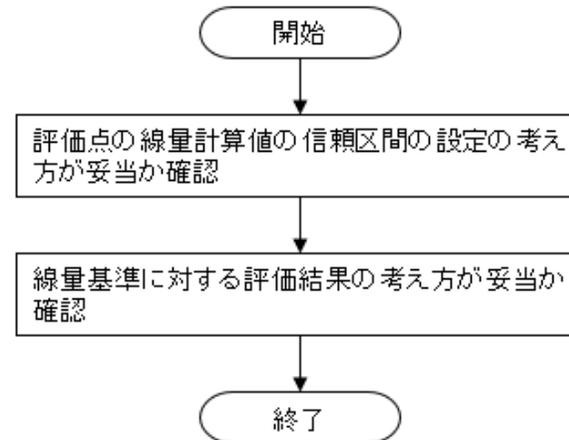
(3)解析結果の収束性の確認

図 5.2 解析結果の各信頼性確認の流れ (1/2)

Fig. 5.2 Validation flow of each item to confirm the reliability of analysis results (1/2)



(4)解析結果の空間連続性等の確認



(5)線量基準に対する評価結果の確認

図 5.2 遮蔽評価結果の各項目の信頼性確認の流れ (2/2)

Fig. 5.2 Validation flow of each item to confirm the reliability of analysis results (2/2)

5.2 モンテカルロ法遮蔽解析結果の信頼性確認項目の検証

5.1節に示した図5.2の各確認内容に対し、プロジェクトの中で解析条件やヒストリー数による統計指標への影響について検証する解析を実施した。また、解析結果の空間連続性についても検証解析を実施した。それらから得られた解析結果に基づいて確認内容の留意点について考察した。

なお、本節での検証解析は、5.2.1項及び5.2.2項はモンテカルロコードMCNP6.2⁶及びJENDL-4.0⁸に基づくACE形式ライブラリを使用し、5.2.3項はモンテカルロコードPHITS3.33⁷及びJENDL-4.0に基づくACE形式ライブラリを使用した。

5.2.1 分散低減法

本項では、図5.2の(2)分散低減法の設定内容の確認に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・分散低減法を利用する場合、適切な手法・パラメータの設定がなされているか確認

(1) はじめに

MCNP コードを用いた近年の遮蔽解析では、分散低減パラメータを自動生成する機能を有する外部コードである ADVANTG¹¹ を利用するケースが増えており、これまで行われてきた MCNP コードの内部機能や計算者の個人的ノウハウに基づくパラメータ設定とは異なる視点による分散低減法の妥当性確認が必要となった。ADVANTG コードは、その構成要素の一つである 3次元直行格子座標系 Sn 法中性子・ガンマ線輸送計算コード DENOVO⁴⁵ により求めた随伴線束に基づいて、MCNP コードに設定する分散低減パラメータを自動生成する。そのため、不適切な分散低減パラメータの設定によるリスクは低減されたものの、Sn 法計算の精度が分散低減パラメータの妥当性に直結する。Sn 法計算のパラメータはいくつかあるが、計算目的に対して選択肢が自明なものや、蓄積された知見により設定方針が確立されたものを除くと、個別の解析条件に対して放射線輸送計算の精度を左右する重要なパラメータとして計算体系のメッシュ幅が挙げられる。本項では、金属キャスク体系及び使用済燃料乾式貯蔵施設体系を部分的に模擬した簡易な計算体系に対して、ADVANTG コードにおける Sn 計算体系のメッシュ幅を変えた解析を実施することで、ADVANTG コードによる自動分散低減法の妥当性に対する確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

金属キャスク体系及び使用済燃料乾式貯蔵施設体系を対象とした遮蔽解析に対する特徴を反映させた計算ケースを検討した。各ケースの計算条件を表 5.2 に、計算体系を図 5.3 に示す。これらの条件に対して、ADVANTG コードにおける Sn 計算のメッシュ幅の違いによる MCNP 計算結果への影響を評価した。また、分散低減法を用いなかった場合とも比較した。また、各計算モデルの物質組成は表 3.2 及び表 4.2 の値を設定している。

(3) 計算結果及び考察

表 5.3～5.8 に、各ケースに対する計算結果や統計チェック項目の合否判断結果等を示す。ここで、表内右側の統計チェック項目（10 statistical checks）①～⑩の内容は表 5.1 に示したとおりである。以後、本節の図表における 10 statistical checks 各項目に対する○あるいは×は、表 5.1 の判断基準に基づく MCNP コードによる基準達成の判断結果（yes あるいは no）を示す。以下に同表に現れている主要な影響を記述する。

ケース①キャスク遮蔽体の深層透過

分散低減法使用の有無で計算効率（FOM が大きいほど高効率）の違いはあるが、計算結果の線量値に大きな差異はない。中性子に対しては、メッシュ幅が最も粗い 16 cm の場合に統計チェック項目が全て満たされている。

ケース②コンクリートの深層透過

上記①同様に計算結果に大きな差異はなく、メッシュ幅が細かいほど計算効率が高まる傾向にあるが、VOV 及び PDF との相関は確認できない。

ケース③遮蔽体及び欠損部

遮蔽体欠損部の無いケース①では、中性子はメッシュ幅による計算効率への影響は小さいが、本ケースではメッシュ幅が粗い場合に計算効率が高くなる。一方で、二次ガンマ線はメッシュ幅が細かい場合に計算効率が高くなる。

ケース④迷路ストリーミング

中性子及び二次ガンマ線に対しては、条件の違いによる計算結果への大きな影響は見られない。ガンマ線に対して点検出器を用いた場合に、分散低減法を使わない際に計算効率が向上した。また、ガンマ線に対して体積検出器を用いた場合に、条件により計算結果が変動し、線量減衰が 1/4 となるメッシュ幅の時に統計誤差が急激に悪化した。

ケース⑤スカイシャイン

全体的に条件の違いによる計算結果への大きな影響は見られないが、統計チェック項目の多くを満たさないケースが多い。計算効率については、分散低減法を用いなくても大きな差異はなく、統計チェック項目を満たしやすい傾向が見られる。

ケース⑥迷路ストリーミング及びスカイシャイン

上記⑤とは異なり、分散低減法を用いないと計算効率が低く、統計誤差の基準も含めて統計チェック項目を満たしにくい傾向が見られるが、計算結果への大きな影響は現れていない。

以上の結果より、比較的単純な計算体系においても分散低減法の設定条件の違いによる計算結果及び統計チェック項目の変化傾向について、論理的な根拠を基に普遍的な法則性を見出すことは非常に難しい。分散低減パラメータの生成計算をする際の Sn メッシュ幅を細かくすれば、必ずしもモンテカルロ計算の効率や計算結果の統計チェック項目の判断結果が良好になるわけではなく、放射線の種類、遮蔽体の材質、透過経路の特徴、使用す

る検出器の種類等により計算結果への影響は様々である。したがって、分散低減法の設定条件に対しては Sn 法計算の下記パラメータが一般論に基づいて適切に設定されていることについて最低限の確認をすることが必要である。

- ・ 随伴線束計算法を計算目的に合わせて、CADIS 法^(注4)か、又は Forward-CADIS 法^(注5)かを選択しているか
- ・ ターゲットとする検出器を適切に選択しているか（特定の位置か分布か）
- ・ DENOVO による Sn 法計算（随伴線束計算）のメッシュ幅が、物質透過率等を考慮したうえで妥当か
- ・ DENOVO による Sn 法計算のエネルギー群数が不必要に粗くないか
- ・ DENOVO による Sn 法計算の基本パラメータ（Sn 分点数、 P_L 次数）³⁶ は一般的な設定か

上記の確認を行ったうえで、分散低減パラメータの妥当性に関する詳細な判断基準を模索するよりも、5.2.2 項で後述するような観点から計算結果の信頼性について確認することにより、分散低減法の設定に対する妥当性確認とすることが現実的であると考えられる。以上より、Sn 法計算のパラメータに対する設定方針について確認することが、分散低減法の設定に対する確認内容の留意点として得られた。

^(注4) CADIS（Consistent Adjoint Driven Importance Sampling）理論はインポートランス関数（随伴線束）を、「線源分布のバイアス」と「最適な重みをもった粒子の輸送方程式」の設定に使用する。随伴線束は Sn 法等の決定論的方法で計算する。単一の検出器応答に有効である。

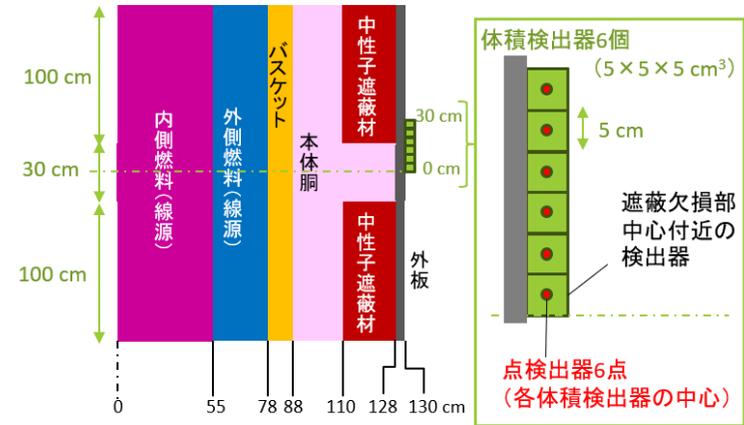
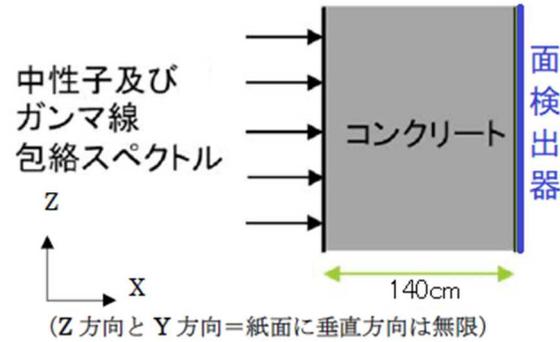
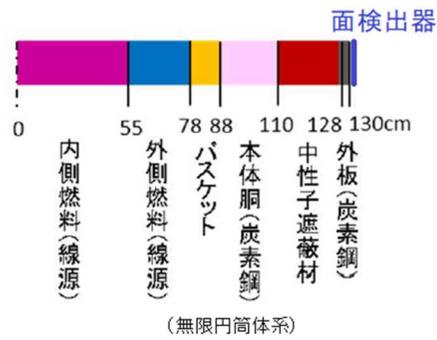
^(注5) 決定論的手法を用いた Forward 計算結果を利用して、CADIS 法における随伴線源を計算して最適化する。線量分布のような複数の検出器応答の計算に有効な理論である。

表5.2 分散低減法の検証に対する計算ケース

Table 5.2 Sensitivity analysis cases for variance reduction

計算ケース	計算体系	線源スペクトル	検出器	分散低減法 (CADIS 法)	表 5.3～5.8 の表記
①キャスク遮蔽体の深層透過	図 5.3 ①	3.2.1 項と同じ	・面検出器	・分散低減無し ・メッシュ幅：2 cm 4 cm 8 cm 16 cm	・無し ・CADIS (2 cm) ・CADIS (4 cm) ・CADIS (8 cm) ・CADIS (16 cm)
②コンクリートの深層透過	図 5.3 ②	4.2.1 項と同じ	・面検出器	・分散低減無し ・メッシュ幅：線量減衰が以下となる厚さ 1/10 (中性子 35 cm、ガンマ線 70 cm) 1/4 (中性子 23 cm、ガンマ線 35 cm) 1/2 (中性子 13 cm、ガンマ線 20 cm)	・無し ・CADIS (1/10) ・CADIS (1/4) ・CADIS (1/2)
③遮蔽体及び欠損部	図 5.3 ③	3.2.1 項と同じ	・体積検出器 ・点検出器	①と同じ	①と同じ
④迷路ストリーミング	図 5.3 ④	4.2.1 項と同じ	・体積検出器 ・点検出器	・②と同じ ・線量減衰が 1/4 となるメッシュ幅 (中性子 23 cm、ガンマ線 35 cm) での FW-CADIS 法による随伴計算	・②と同じ ・FW-CADIS
⑤スカイシャイン	図 5.3 ⑤	4.2.1 項の計算における建屋外表面の平均	・点検出器 ・円環検出器 ・体積検出器 (円環形状)	・分散低減無し ・メッシュ幅：線量減衰が以下となる厚さ 1/10 (100 m) 1/4 (50 m) 1/2 (20 m) ・線量減衰が 1/4 となるメッシュ幅 (50 m) での FW-CADIS 法による随伴計算	・無し ・CADIS (1/10) ・CADIS (1/4) ・CADIS (1/2) ・FW-CADIS
⑥迷路ストリーミング及びスカイシャイン	図 5.3 ⑥	④と同じ	⑤と同じ	・迷路ストリーミング部分は②の CADIS (1/4)と同じ ・空気部分は⑤と同じ	・⑤と同じ

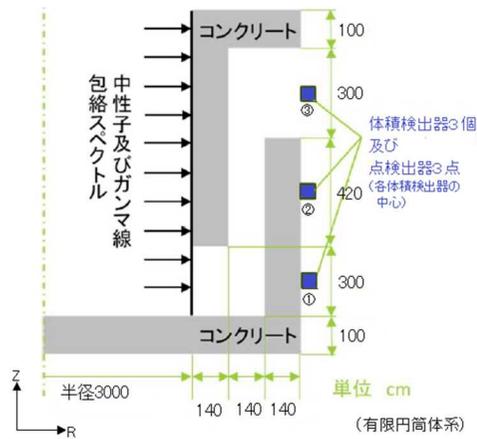
注) FW-CADIS は、Forward-CADIS を意味する。



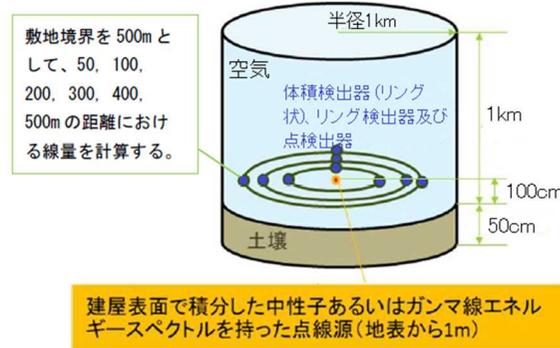
①カスク遮蔽体の深層透過

②コンクリートの深層透過

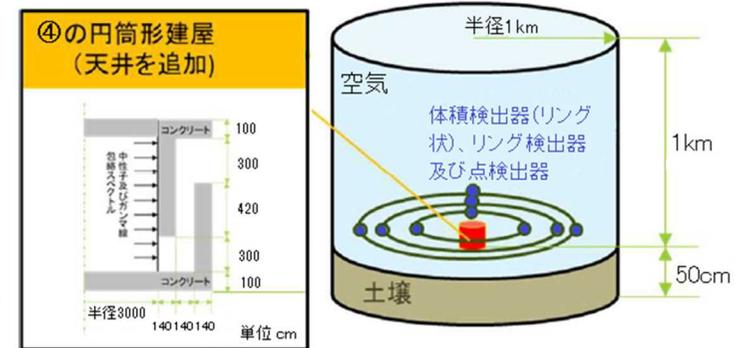
③カスク遮蔽体及び欠損部



④迷路ストリーミング



⑤スカイシャイン



⑥迷路ストリーミング及びスカイシャイン

図 5.3 分散低減法検証の計算体系

Fig. 5.3 Geometry model for the sensitivity analysis of variance reduction

表 5.3 分散低減法検証の計算結果 (①キャスク遮蔽体の深層透過)

Table 5.3 Results of the sensitivity analysis of variance reduction
(①Deep penetration for the cask shield)

線源	分散低減法 (メッシュ幅)	History	計算結果 [μSv/h]	相対誤差 [%]	CPU time [min]	FOM	10 statistical checks											
							①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩		
中性子	無し	1.00E+07	3.73E+00	3.01	172.0	6.0E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	CADIS (2cm)	1.00E+07	3.65E+00	0.25	27.2	5.9E+03	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	×	
	CADIS (4cm)	1.00E+07	3.70E+00	0.35	26.9	3.0E+03	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	×	
	CADIS (8cm)	1.00E+07	3.71E+00	0.21	47.0	4.8E+03	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	
	CADIS (16cm)	1.00E+07	3.71E+00	0.38	51.9	1.3E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
二次ガンマ線	無し	1.00E+07	1.68E+01	0.28	199.8	6.4E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	CADIS (2cm)	1.00E+07	1.68E+01	0.10	354.8	2.8E+03	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	
	CADIS (4cm)	1.00E+07	1.68E+01	0.11	227.4	3.6E+03	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	
	CADIS (8cm)	1.00E+07	1.68E+01	0.14	316.3	1.6E+03	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	
	CADIS (16cm)	1.00E+07	1.68E+01	0.18	265.5	1.2E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○
FPガンマ線	無し	2.00E+11	5.41E-06	5.13	7329.6	5.0E-02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	CADIS (2cm)	1.00E+07	5.23E-06	0.49	4.1	1.0E+04	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	CADIS (4cm)	1.00E+07	5.26E-06	0.62	3.2	8.1E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	CADIS (8cm)	1.00E+07	5.18E-06	1.06	4.1	2.2E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	CADIS (16cm)	1.00E+07	5.42E-06	3.11	3.2	3.2E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
放射化ガンマ線	無し	4.59E+11	2.46E-04	0.54	25258.5	1.0E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	CADIS (2cm)	1.00E+07	2.46E-04	0.51	6.1	6.3E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	CADIS (4cm)	1.00E+07	2.48E-04	0.61	2.8	9.6E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	CADIS (8cm)	1.00E+07	2.49E-04	0.89	3.3	3.8E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	CADIS (16cm)	1.00E+11	2.47E-04	0.06	3861.9	7.2E+02	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×

表 5.4 分散低減法検証の計算結果 (②コンクリートの深層透過)

Table 5.4 Results of the sensitivity analysis of variance reduction
(②Deep penetration for concrete)

線源	分散低減法 (メッシュ幅)	History	計算結果 [μSv/h]	相対誤差 [%]	CPU time [min]	FOM	10 statistical checks											
							①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩		
中性子	無し	8.00E+07	9.27E-04	1.00	425.9	2.3E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	CADIS (1/10)	1.00E+07	9.16E-04	0.76	18.4	9.4E+02	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	×
	CADIS (1/4)	1.00E+07	9.28E-04	0.43	20.3	2.7E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	CADIS (1/2)	1.00E+07	9.26E-04	0.22	58.8	3.5E+03	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×
二次ガンマ線	無し	1.00E+07	2.17E-04	1.07	78.8	1.1E+02	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	○	○
	CADIS (1/10)	1.00E+07	2.17E-04	0.37	116.7	6.3E+02	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○
	CADIS (1/4)	1.00E+07	2.17E-04	0.36	89.7	8.6E+02	○	○	×	×	○	×	×	○	○	○	○	×
	CADIS (1/2)	1.00E+07	2.17E-04	0.20	238.6	1.0E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
ガンマ線	無し	1.00E+07	1.67E-05	1.79	5.5	5.7E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	CADIS (1/10)	1.00E+07	1.68E-05	0.47	4.8	9.4E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	CADIS (1/4)	1.00E+07	1.67E-05	0.17	6.3	5.5E+04	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○
	CADIS (1/2)	1.00E+07	1.67E-05	0.11	24	3.4E+04	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×

表 5.5 分散低減法検証の計算結果 (③遮蔽体及び欠損部)

Table 5.5 Results of the sensitivity analysis of variance reduction

(③The cask shield and a defective part)

線源	検出器	分散低減法 (メッシュ幅)	History	計算結果 [μ Sv/h]	相対誤差 [%]	CPU time [min]	FOM	10 statistical checks													
								①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩				
中性子	点検出器	無し	3.35E+08	1.69E-07	0.60	26,161	1.1E+00	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		CADIS (2cm)	1.00E+08	1.82E-07	3.72	1,372	5.3E-01	○	○	○	○	×	○	×	×	○	○	○	×	×	
		CADIS (4cm)	1.00E+08	1.71E-07	1.72	2,090	1.6E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×
		CADIS (8cm)	1.00E+08	1.71E-07	0.56	1,993	1.6E+01	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS (16cm)	1.00E+08	1.71E-07	0.43	3,140	1.7E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	体積検出器	無し	3.35E+08	3.39E-07	1.17	26,161	2.8E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS (2cm)	1.00E+08	3.44E-07	3.34	1,372	6.5E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS (4cm)	1.00E+08	3.42E-07	2.39	2,090	8.4E-01	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS (8cm)	1.00E+08	3.44E-07	1.21	1,993	3.4E+00	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	×
		CADIS (16cm)	1.00E+08	3.42E-07	0.86	3,140	4.3E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
二次ガンマ線	点検出器	無し	3.00E+08	1.34E-09	1.72	6,283	5.4E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		CADIS (2cm)	1.00E+08	1.37E-09	0.49	3,679	1.1E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS (4cm)	1.00E+08	1.36E-09	0.59	3,560	8.1E+00	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○
		CADIS (8cm)	1.00E+08	1.36E-09	0.83	2,571	5.7E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS (16cm)	1.00E+08	1.33E-09	1.40	2,705	1.9E+00	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○	○
	体積検出器	無し	3.00E+08	2.97E-09	3.29	6,283	1.5E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS (2cm)	1.00E+08	2.91E-09	0.76	3,679	4.7E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS (4cm)	1.00E+08	2.94E-09	0.92	3,560	3.3E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS (8cm)	1.00E+08	2.95E-09	1.53	2,571	1.7E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS (16cm)	1.00E+08	2.88E-09	2.62	2,705	5.4E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注) 遮蔽欠損の中心付近における計算結果

表 5.6 分散低減法検証の計算結果 (④迷路ストリーミング)

Table 5.6 Results of the sensitivity analysis of variance reduction

(④Streaming in the labyrinth structure)

線源	検出器	分散低減法 (メッシュ幅)	History	計算結果 [μSv/h]	相対誤差 [%]	CPU time [min]	FOM	10 statistical checks											
								①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩		
中性子	体積検出器	無し	5.00E+09	5.83E-10	0.15	99447	4.5E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		CADIS(1/10)	1.00E+08	5.84E-10	0.25	1404.3	1.1E+02	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	
		CADIS(1/4)	1.00E+09	5.84E-10	0.07	15180.5	1.3E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		CADIS(1/2)	1.00E+09	5.83E-10	0.07	16548.3	1.2E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		FW-CADIS	1.00E+08	5.85E-10	0.27	1219.6	1.1E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	点検出器	無し	5.00E+09	5.83E-10	0.02	99447	2.5E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		CADIS(1/10)	1.00E+08	5.83E-10	0.07	1404.3	1.5E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		CADIS(1/4)	1.00E+09	5.84E-10	0.02	15180.5	1.6E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		CADIS(1/2)	1.00E+09	5.84E-10	0.02	16548.3	1.5E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	
		FW-CADIS	1.00E+08	5.84E-10	0.08	1219.6	1.3E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
二次ガンマ線	体積検出器	無し	5.00E+09	1.23E-11	0.20	43496.4	5.7E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		CADIS(1/10)	1.00E+08	1.23E-11	0.84	1261.1	1.1E+01	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	×	
		CADIS(1/4)	1.00E+08	1.23E-11	0.60	1368.9	2.0E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	
		CADIS(1/2)	1.00E+08	1.23E-11	0.53	1605.8	2.2E+01	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	
		FW-CADIS	1.00E+08	1.22E-11	0.71	1555.6	1.3E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	点検出器	無し	5.00E+09	1.23E-11	0.03	43496.4	2.6E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/10)	1.00E+08	1.22E-11	0.11	1261.1	6.6E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/4)	1.00E+08	1.23E-11	0.10	1368.9	7.3E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/2)	1.00E+08	1.23E-11	0.09	1605.8	7.7E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		FW-CADIS	1.00E+08	1.23E-11	0.42	1555.6	3.6E+01	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×
ガンマ線	体積検出器	無し	5.00E+09	2.40E-13	0.61	12775.7	2.1E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		CADIS(1/10)	1.00E+08	2.19E-13	4.44	148.8	3.4E+00	○	○	○	○	×	×	×	×	○	×	×	
		CADIS(1/4)	1.00E+08	2.94E-13	22.24	159.6	1.0E-01	○	×	○	○	×	○	×	○	×	×	×	
		CADIS(1/2)	1.00E+08	2.51E-13	5.75	179.3	1.7E+00	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	
		FW-CADIS	1.00E+08	2.24E-13	3.92	188.8	3.4E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	点検出器	無し	5.00E+09	2.42E-13	0.07	12775.7	1.6E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/10)	1.00E+08	2.40E-13	2.77	148.8	8.8E+00	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	
		CADIS(1/4)	1.00E+08	2.37E-13	0.84	159.6	8.9E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/2)	1.00E+08	2.39E-13	0.86	179.3	7.5E+01	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	
		FWCADIS	1.00E+08	2.40E-13	1.06	188.8	4.7E+01	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○

注) 迷路ストリーミング経路出口位置 (評価位置③) における計算結果

表 5.7 分散低減法検証の計算結果 (⑤スカイシャイン)

Table 5.7 Results of the sensitivity analysis of variance reduction (⑤Skyshine)

線源	検出器	分散低減法 (メッシュ幅)	History	計算結果 [$\mu\text{Sv/h}$]	相対誤差 [%]	CPU time [min]	FOM	10 statistical checks										
								①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
中性子	体積検出器	無し	2.00E+08	9.97E-13	2.66	10,442	1.4E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/10)	2.00E+08	9.97E-13	2.34	2,357	7.7E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/4)	2.00E+08	1.08E-12	6.29	1,767	1.4E-01	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/2)	2.00E+08	1.03E-12	0.41	3,510	1.7E+01	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	×
		FW-CADIS	2.00E+08	9.87E-13	1.81	2,340	1.3E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	点検出器	無し	2.00E+08	1.02E-12	5.56	10,442	3.0E-02	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/10)	2.00E+08	1.09E-12	4.85	2,357	1.8E-01	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×
		CADIS(1/4)	2.00E+08	9.89E-13	5.37	1,767	2.0E-01	○	×	○	○	×	○	×	×	×	×	×
		CADIS(1/2)	2.00E+08	1.04E-12	1.24	3,510	1.9E+00	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	○
		FW-CADIS	2.00E+08	1.01E-12	2.56	2,340	6.5E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	円環検出器	無し	2.00E+08	1.02E-12	0.27	10,442	1.3E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/10)	2.00E+08	1.00E-12	0.43	2,357	2.3E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/4)	2.00E+08	9.90E-13	1.06	1,767	5.0E+00	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/2)	2.00E+08	1.02E-12	0.07	3,510	5.8E+02	○	○	×	×	○	×	×	○	○	○	×
		FW-CADIS	2.00E+08	1.01E-12	0.44	2,340	2.2E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
二次ガンマ線	体積検出器	無し	4.00E+08	5.05E-14	1.86	5,073	5.7E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○
		CADIS(1/10)	4.00E+08	5.17E-14	1.84	6,939	4.3E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/4)	4.00E+08	5.39E-14	4.00	5,661	1.1E-01	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	×
		CADIS(1/2)	4.00E+08	5.18E-14	0.38	10,051	6.9E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		FW-CADIS	4.00E+08	5.16E-14	1.53	7,510	5.7E-01	○	○	○	○	○	×	×	×	○	○	○
	点検出器	無し	4.00E+08	4.91E-14	2.37	5,073	3.5E-01	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×
		CADIS(1/10)	4.00E+08	5.16E-14	1.04	6,939	1.3E+00	○	○	×	×	○	×	×	×	○	○	○
		CADIS(1/4)	4.00E+08	4.94E-14	1.74	5,661	5.8E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/2)	4.00E+08	5.27E-14	0.91	10,051	1.2E+00	○	○	×	×	×	×	×	×	○	○	○
		FW-CADIS	4.00E+08	5.08E-14	2.54	7,510	2.1E-01	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	×
	円環検出器	無し	4.00E+08	5.18E-14	0.19	5,073	5.5E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○
		CADIS(1/10)	4.00E+08	5.17E-14	0.29	6,939	1.7E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/4)	4.00E+08	5.15E-14	0.46	5,661	8.4E+00	○	○	×	×	×	×	×	×	○	○	○
		CADIS(1/2)	4.00E+08	5.17E-14	0.05	10,051	4.0E+02	○	○	×	×	○	×	×	○	○	○	○
		FW-CADIS	4.00E+08	5.18E-14	0.24	7,510	2.3E+01	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
ガンマ線	体積検出器	無し	1.00E+08	1.69E-13	1.96	1,235	2.1E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/10)	4.00E+08	1.70E-13	1.12	1,891	4.2E+00	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×
		CADIS(1/4)	4.00E+08	1.83E-13	6.81	3,238	7.0E-02	○	○	×	×	×	×	×	×	○	○	×
		CADIS(1/2)	4.00E+08	1.71E-13	0.51	2,107	1.8E+01	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×
		FW-CADIS	4.00E+08	1.71E-13	0.99	1,828	5.6E+00	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○
	点検出器	無し	1.00E+08	1.69E-13	0.61	1,235	2.2E+01	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×
		CADIS(1/10)	4.00E+08	1.72E-13	0.30	1,891	5.9E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/4)	4.00E+08	1.70E-13	0.77	3,238	5.2E+00	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	×
		CADIS(1/2)	4.00E+08	1.71E-13	0.22	2,107	9.8E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		FW-CADIS	4.00E+08	1.97E-13	12.63	1,828	3.0E-02	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×
	円環検出器	無し	1.00E+08	1.71E-13	0.09	1,235	1.0E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/10)	4.00E+08	1.71E-13	0.14	1,891	2.7E+02	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	○
		CADIS(1/4)	4.00E+08	1.71E-13	0.26	3,238	4.6E+01	○	○	×	×	×	×	×	×	○	○	×
		CADIS(1/2)	4.00E+08	1.71E-13	0.03	2,107	5.3E+03	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		FW-CADIS	4.00E+08	1.71E-13	0.09	1,828	6.8E+02	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×

注) 線源から 500 m の距離における計算結果

表 5.8 分散低減法検証の計算結果 (⑥迷路ストリーミング及びスカイシャイン)

Table 5.8 Results of the sensitivity analysis of variance reduction

(⑥Streaming in the labyrinth structure and skyshine)

線源	検出器	分散低減法 (メッシュ幅)	History	計算結果 [μSv/h]	相対誤差 [%]	CPU time [min]	FOM	10 statistical checks									
								①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
中性子	体積検出器	無し	2.00E+08	2.48E-13	11.55	15,988	0.0E+00	○	×	○	○	×	○	○	○	×	×
		CADIS(1/10)	2.00E+08	2.35E-13	0.43	5,958	9.1E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/4)	2.00E+08	2.36E-13	0.28	6,159	2.1E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/2)	2.00E+08	2.35E-13	0.24	6,904	2.5E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		FW-CADIS	2.00E+08	2.36E-13	0.43	5,654	9.6E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	点検出器	無し	2.00E+08	2.78E-13	27.49	15,988	0.0E+00	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×
		CADIS(1/10)	2.00E+08	2.35E-13	0.86	5,958	2.3E+00	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
		CADIS(1/4)	2.00E+08	2.39E-13	0.72	6,159	3.1E+00	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
		CADIS(1/2)	2.00E+08	2.34E-13	0.56	6,904	4.6E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		FW-CADIS	2.00E+08	2.33E-13	1.01	5,654	1.7E+00	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○
	円環検出器	無し	2.00E+08	2.36E-13	0.74	15,988	1.1E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/10)	2.00E+08	2.36E-13	0.07	5,958	3.4E+02	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
		CADIS(1/4)	2.00E+08	2.36E-13	0.06	6,159	4.5E+02	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○
		CADIS(1/2)	2.00E+08	2.36E-13	0.05	6,904	5.8E+02	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
		FW-CADIS	2.00E+08	2.36E-13	0.06	5,654	4.9E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
二次ガンマ線	体積検出器	無し	2.00E+08	2.57E-15	9.74	5,412	2.0E-02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/10)	2.00E+08	3.37E-15	1.30	5,512	1.1E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/4)	2.00E+08	3.34E-15	1.31	6,742	8.6E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/2)	2.00E+08	3.37E-15	1.28	8,322	7.3E-01	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×
		FW-CADIS	2.00E+08	3.39E-15	1.25	5,752	1.1E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	点検出器	無し	2.00E+08	3.59E-15	12.90	5,412	1.0E-02	○	×	○	○	×	○	○	×	○	×
		CADIS(1/10)	2.00E+08	3.47E-15	1.90	5,512	5.0E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/4)	2.00E+08	3.41E-15	1.23	6,742	9.8E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/2)	2.00E+08	3.35E-15	1.00	8,322	1.2E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		FW-CADIS	2.00E+08	3.37E-15	2.09	5,752	4.0E-01	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
	円環検出器	無し	2.00E+08	3.37E-15	1.51	5,412	8.1E-01	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/10)	2.00E+08	3.40E-15	0.14	5,512	9.3E+01	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○
		CADIS(1/4)	2.00E+08	3.39E-15	0.09	6,742	1.8E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/2)	2.00E+08	3.39E-15	0.07	8,322	2.5E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		FW-CADIS	2.00E+08	3.40E-15	0.10	5,752	1.7E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
ガンマ線	体積検出器	無し	1.00E+08	6.46E-17	32.81	558	2.0E-02	○	×	○	○	×	○	×	○	○	×
		CADIS(1/10)	2.00E+08	8.16E-17	1.98	2,877	8.9E-01	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×
		CADIS(1/4)	2.00E+08	8.29E-17	1.25	2,938	2.2E+00	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×
		CADIS(1/2)	2.00E+08	8.21E-17	1.16	2,987	2.5E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		FW-CADIS	2.00E+08	8.09E-17	1.09	2,954	2.9E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	点検出器	無し	1.00E+08	6.83E-17	6.98	558	3.7E-01	○	×	○	○	×	×	×	×	○	×
		CADIS(1/10)	2.00E+08	8.50E-17	1.72	2,877	1.2E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		CADIS(1/4)	2.00E+08	8.27E-17	0.81	2,938	5.2E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/2)	2.00E+08	8.35E-17	1.37	2,987	1.8E+00	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○
		FW-CADIS	2.00E+08	8.11E-17	0.84	2,954	4.8E+00	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
	円環検出器	無し	1.00E+08	8.27E-17	3.00	558	2.0E+00	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×
		CADIS(1/10)	2.00E+08	8.23E-17	0.16	2,877	1.4E+02	○	○	×	×	○	×	×	○	○	○
		CADIS(1/4)	2.00E+08	8.25E-17	0.10	2,938	3.4E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		CADIS(1/2)	2.00E+08	8.24E-17	0.11	2,987	2.8E+02	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
		FW-CADIS	2.00E+08	8.25E-17	0.11	2,954	2.8E+02	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○

注) 線源から 500 m の距離における計算結果

5.2.2 解析結果の収束性

本項では、図5.2の(3)解析結果の収束性の確認に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・ 定量的な評価が必要なタリー値については、ヒストリー数に対してタリー値が収束しているか確認
- ・ 定量的な評価が必要なタリー値については、統計誤差が10%未満となっていることを確認
- ・ ネクストイベントエスティメータを利用の場合は統計誤差が5%未満となっていることを確認
- ・ 計算コードが計算結果の信頼性を高めるための「統計チェック項目」を有する場合、計算コードで設定された判断基準を満足しているか確認することが推奨される。また、「統計チェック項目」については異なるヒストリー数で推移を確認することが推奨される

ここで、最終評価結果に対して寄与が非常に小さい、あるいは最大線量率を示しえない箇所でのタリー値に対しては上記を厳密に適用する必要はない。

(1) はじめに

モンテカルロ法による計算では原理的にヒストリー数を増加させるほど計算結果が収束し、統計精度は向上する。本項では、金属キャスク体系を例に取り、ヒストリー数の増大に伴う計算結果及び統計チェック項目の変化傾向に着目した解析を実施した。そこから得られたデータにおける当該変化傾向に基づき、解析結果の信頼性確認方法に対する確認内容の留意点を検討した。

(2) 計算ケース及び条件

3.2.1 項の金属キャスク体系の基本解析条件に基づいて、ヒストリー数の増加に対する計算結果及び統計チェック項目の変化を評価した。本評価の目的がヒストリー数に対する計算結果等の変化傾向を評価するものであり、局所的な線量の強弱を評価するものではないため、評価領域はキャスク中心軸に対する円環状の領域を径方向や軸方向に設定し、周方向の平均線量を評価した。

(3) 計算結果及び考察

図 5.5～5.14 に各評価領域におけるヒストリー数に対する中性子の計算結果等の変化傾向をそれぞれ示す。また、同図中下部表に統計チェック項目（10 statistical checks）の合否判断結果を示す。いずれのケースにおいてもヒストリー数の増加に伴って統計誤差が減少したうえで計算結果である線量が収束しており、計算の終盤ではヒストリー数最大時の線量に対して統計誤差の範囲内で一致していることから、計算精度は十分高いことが分か

る。一方で、その他の統計チェック項目は計算の終盤においても一時的に判断基準を満足できていない項目や、ヒストリー数最大時においても判断基準を満足できていないケースも確認できる。これらについて、二次ガンマ線、FP ガンマ線及び構造材放射化ガンマ線の各線源に対する同様の評価に加え、使用済燃料乾式貯蔵施設体系においても同様の評価を実施したが、ヒストリー数を増加させることで必ず全項目が判断基準を満たす結果は得られず、また、変化傾向についても論理的な根拠を基に普遍的な法則性を見出すことはできなかった。以上の結果に基づき、解析結果の収束性に関して検討委員会での議論に基づき得られた確認内容の留意点を以下の①～③にまとめた。

① ヒストリー数依存性

評価結果の中心的な要素である平均値（計算結果）及び統計誤差について、各々のヒストリーに対する収束性を確認することにより総合的に解析結果の信頼性を判断することが重要である。参考として、ヒストリー数に対して解析結果が収束していることを統計誤差も含めて確認するための例を図 5.4 に示す。この場合、ヒストリー数が 2×10^8 以上になると、十分小さくなった統計誤差の範囲内で平均値が一致しており、解析結果が収束していると見なせる。

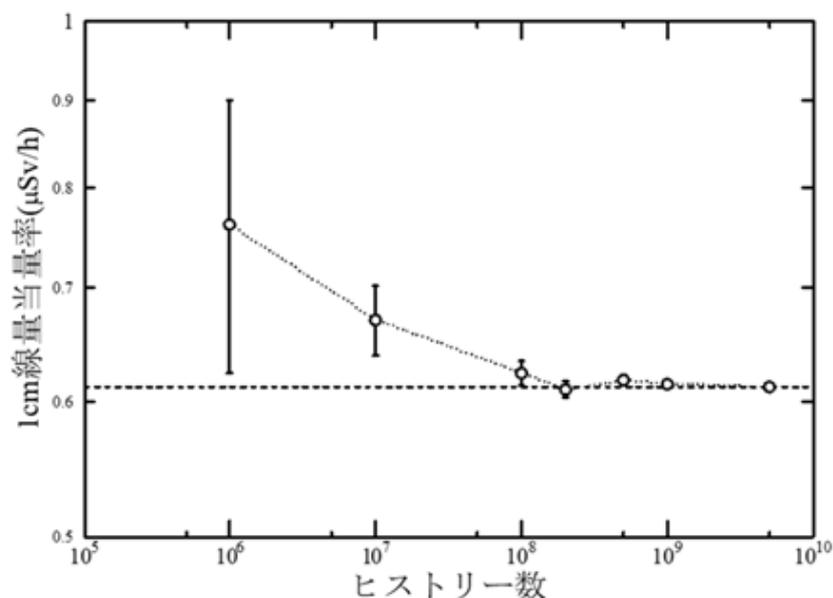


図 5.4 解析結果の収束性確認のための図の例

Fig. 5.4 Example of a diagram for confirming the convergence of analysis results

② 統計誤差

統計誤差 R は、平均値と平均値の標準偏差の比である。また、統計誤差 R はヒストリー数 N の平方根に反比例する関係がある。

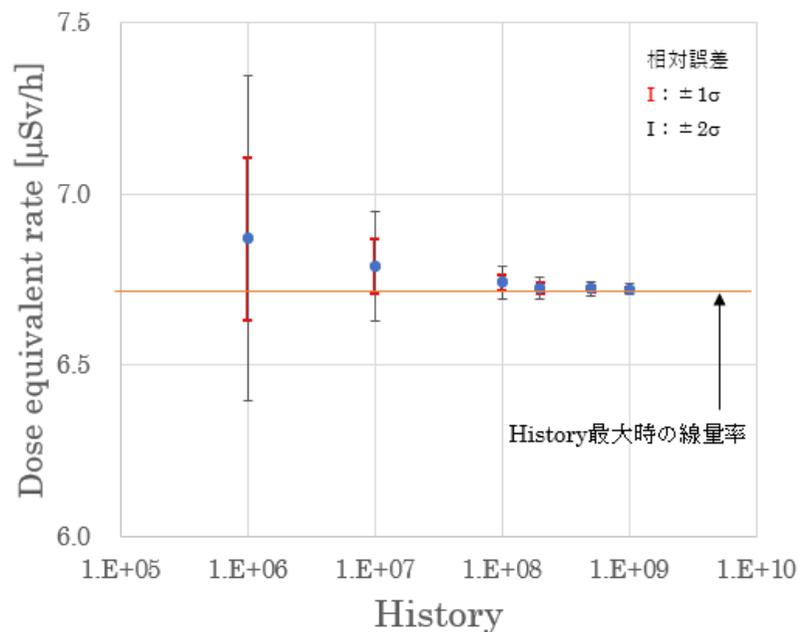
MCNP のマニュアル⁶では定性分析とモンテカルロ法の専門家の経験に基づいて、解析結果を信頼するための統計誤差の判断基準として $R < 0.1$ を導いており、 R をより小さ

くすることを推奨している。また、SCALE システム⁴⁰の最適分散低減遮蔽解析システム MAVRIC⁴⁴ 及び国産モンテカルロコード PHITS⁷ で採用されている統計誤差の基準は、 $R < 0.05$ となっている。さらに、本検証解析で得られたデータに基づくと、 $R \sim 0.01$ 程度になると解の収束性は増す傾向にある。

以上より、評価点の解析結果については、統計誤差 $R < 0.05$ が推奨される。ただし、統計誤差の基準は、計算の目的や必要精度を基に判断されるものであり、判断内容が適切であれば、統計誤差 $R > 0.05$ であっても問題はない。一方で統計誤差 $R > 0.1$ では、統計誤差の範囲内に求めるべき値が存在しない可能性が高まるため、評価結果の信頼性は低いことに留意する必要がある。

③ 統計チェック項目

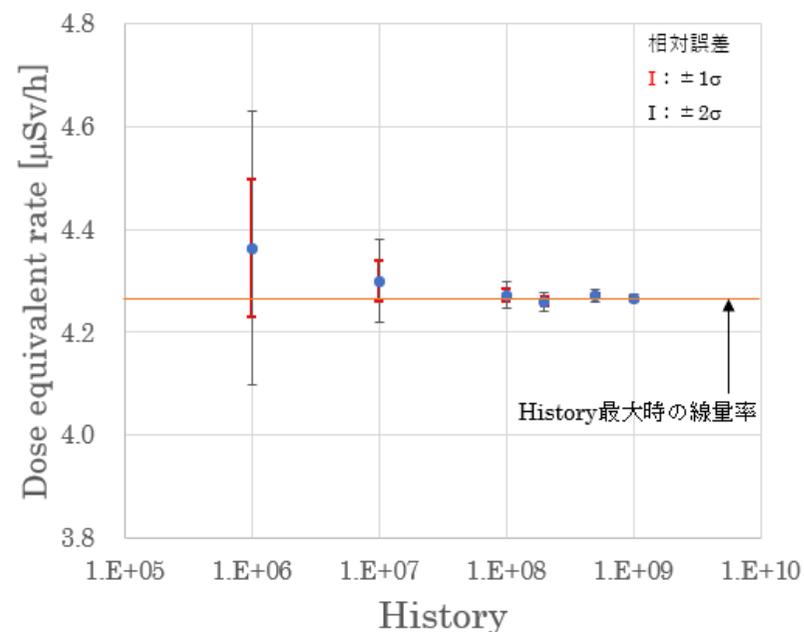
表 5.1 に示す 10 個の統計チェック項目を全て満足する際には解析結果の信頼性の高さを示す指標の一つとはなるが、全項目が基準を満たすか否かについては、あくまでも目安として考慮されるべきであることに留意しなければならない。仮に、10 個の統計チェック項目を満たしつつも、ヒストリー数に対して評価値が著しく変動するということがあれば、信頼できる評価結果とは判断しがたい。したがって、「解析結果の信頼性」については統計チェック項目と合わせ、評価値についても、ヒストリー数に対する変動を上記①に例示したようにグラフあるいは表として示すこと等により、その評価結果の信頼性について確認する必要がある。



History	Dose [μSv/h]	Error [%]	10 statistical checks										
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
1.0E+06	6.87E+00	3.45	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+07	6.79E+00	1.17	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○
1.0E+08	6.74E+00	0.35	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○
2.0E+08	6.72E+00	0.25	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○
5.0E+08	6.72E+00	0.15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+09	6.72E+00	0.11	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×

図 5.5 ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向
(側部中央表面)

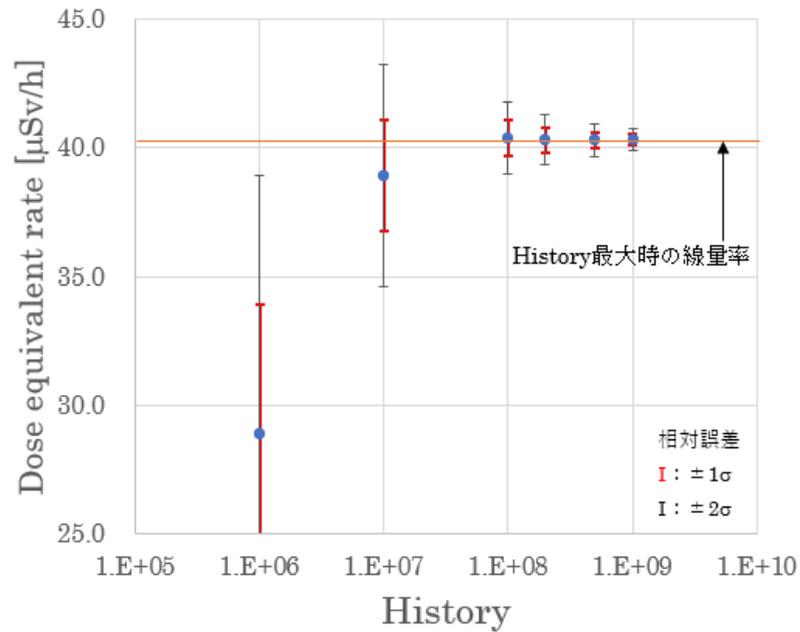
Fig. 5.5 Trends in neutron analysis results versus history
(the surface at the center of a side)



History	Dose [μSv/h]	Error [%]	10 statistical checks										
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
1.0E+06	4.36E+00	3.04	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+07	4.30E+00	0.95	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+08	4.27E+00	0.30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0E+08	4.26E+00	0.21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5.0E+08	4.27E+00	0.14	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+09	4.27E+00	0.10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○

図 5.6 ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向
(側部中央表面から 1m)

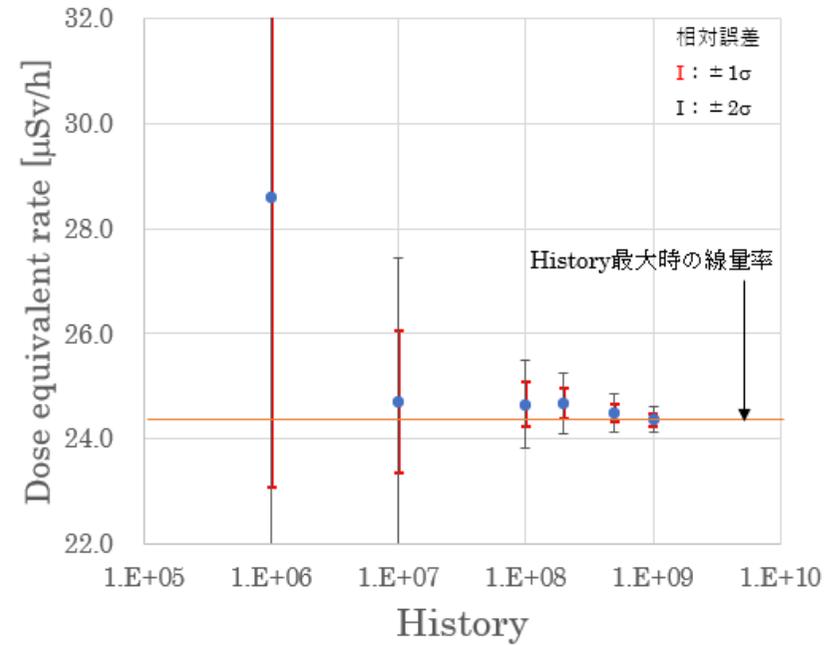
Fig. 5.6 Trends in neutron analysis results versus history
(1m away from the surface at the center of a side)



History	Dose [μSv/h]	Error [%]	10 statistical checks									
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
1.0E+06	2.89E+01	17.42	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×
1.0E+07	3.89E+01	5.53	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+08	4.04E+01	1.73	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0E+08	4.03E+01	1.21	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5.0E+08	4.03E+01	0.77	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+09	4.03E+01	0.55	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

図 5.7 ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向
(頭部軸方向表面)

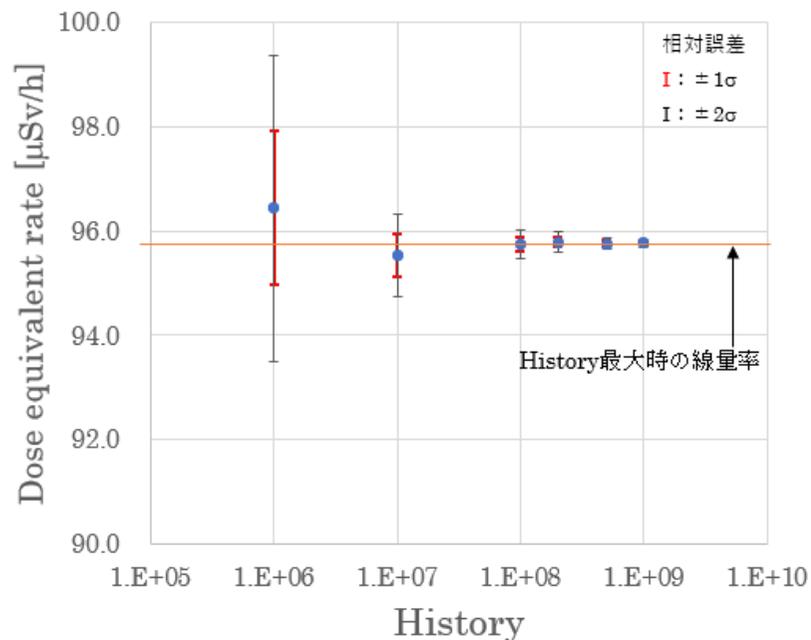
Fig. 5.7 Trends in neutron analysis results versus history
(the lid surface)



History	Dose [μSv/h]	Error [%]	10 statistical checks									
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
1.0E+06	2.86E+01	19.25	○	×	○	○	×	○	○	○	○	×
1.0E+07	2.47E+01	5.50	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+08	2.47E+01	1.69	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○
2.0E+08	2.47E+01	1.17	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○
5.0E+08	2.45E+01	0.72	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+09	2.44E+01	0.50	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

図 5.8 ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向
(頭部軸方向表面から 1m)

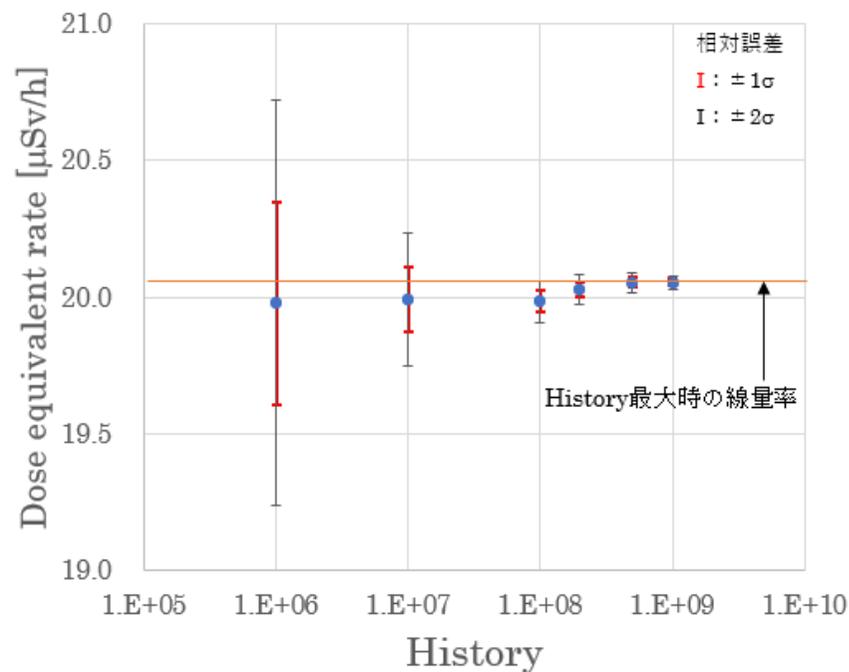
Fig. 5.8 Trends in neutron analysis results versus history
(1m away from the lid surface)



History	Dose [μSv/h]	Error [%]	10 statistical checks									
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
1.0E+06	9.64E+01	1.52	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
1.0E+07	9.55E+01	0.42	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
1.0E+08	9.57E+01	0.14	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0E+08	9.58E+01	0.10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5.0E+08	9.58E+01	0.06	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+09	9.58E+01	0.04	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

図 5.9 ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向
(頭部径方向表面)

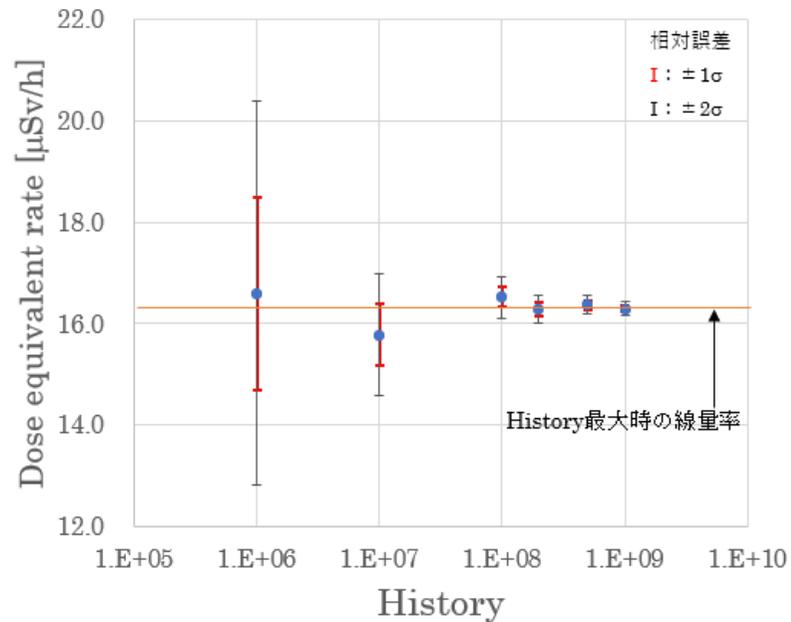
Fig. 5.9 Trends in neutron analysis results versus history
(the radial surface of the lid)



History	Dose [μSv/h]	Error [%]	10 statistical checks									
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
1.0E+06	2.00E+01	1.85	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
1.0E+07	2.00E+01	0.60	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+08	2.00E+01	0.19	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0E+08	2.00E+01	0.14	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5.0E+08	2.01E+01	0.09	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○
1.0E+09	2.01E+01	0.06	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

図 5.10 ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向
(頭部径方向表面から 1m)

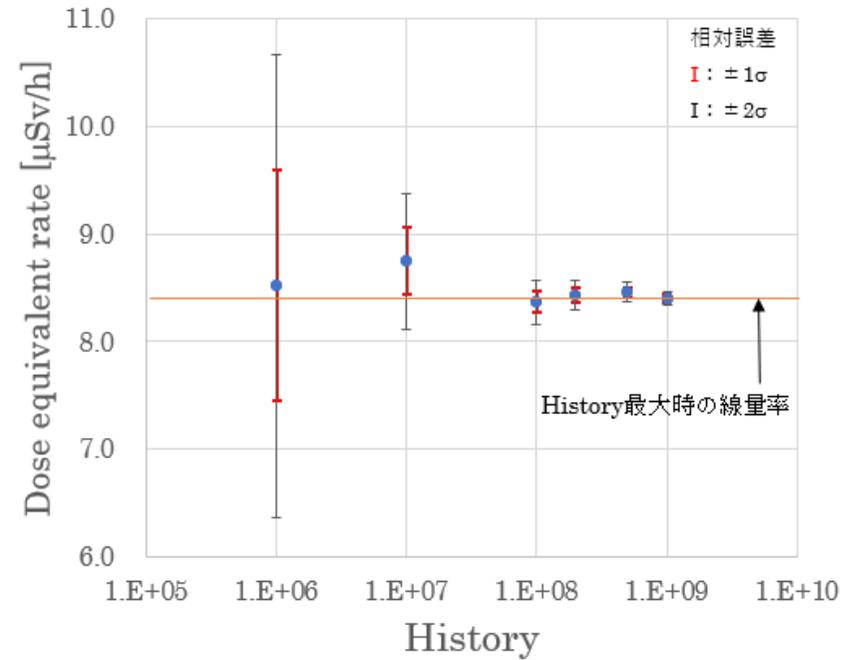
Fig. 5.10 Trends in neutron analysis results versus history
(1m away from the radial surface of the lid)



History	Dose [μSv/h]	Error [%]	10 statistical checks									
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
1.0E+06	1.66E+01	11.4	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×
1.0E+07	1.58E+01	3.81	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+08	1.65E+01	1.23	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○
2.0E+08	1.63E+01	0.87	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5.0E+08	1.64E+01	0.55	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○
1.0E+09	1.63E+01	0.39	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

図 5.11 ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向
(底部軸方向表面)

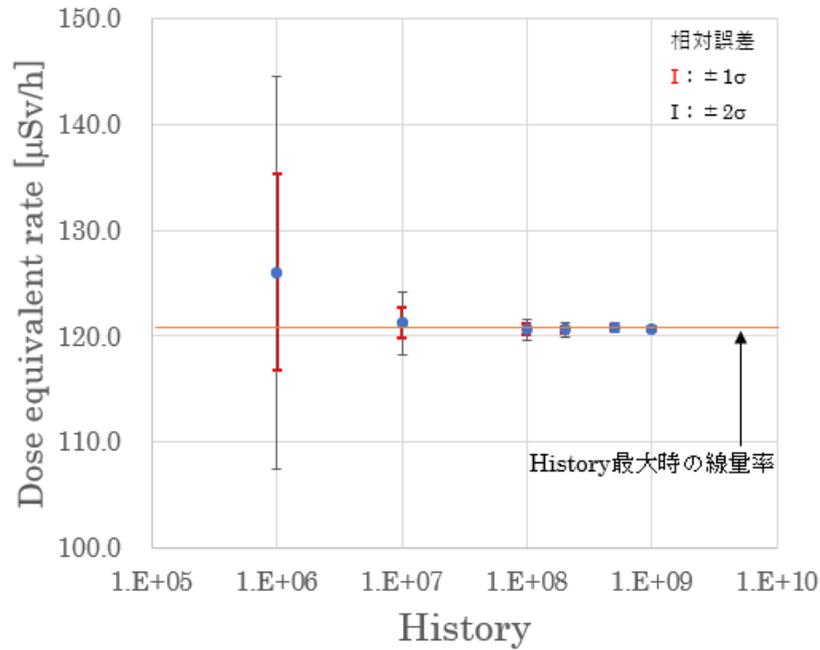
Fig. 5.11 Trends in neutron analysis results versus history
(the bottom surface)



History	Dose [μSv/h]	Error [%]	10 statistical checks									
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
1.0E+06	8.52E+00	12.6	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×
1.0E+07	8.75E+00	3.60	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+08	8.37E+00	1.22	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○
2.0E+08	8.43E+00	0.84	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×
5.0E+08	8.46E+00	0.54	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○
1.0E+09	8.40E+00	0.38	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×

図 5.12 ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向
(底部軸方向表面から 1m)

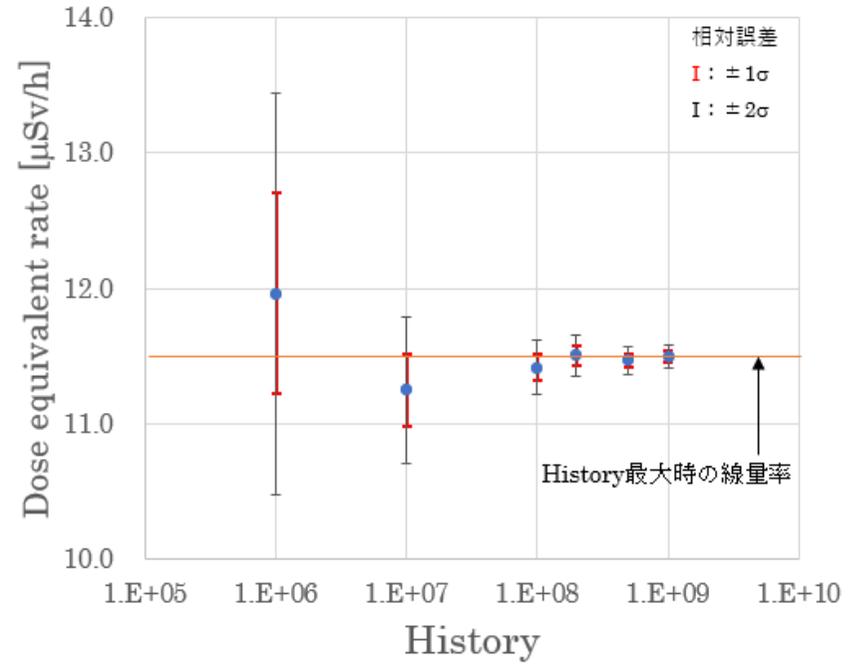
Fig. 5.12 Trends in neutron analysis results versus history
(1m away from the bottom surface)



History	Dose [μSv/h]	Error [%]	10 statistical checks									
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
1.0E+06	1.26E+02	7.35	×	○	○	○	×	○	×	○	×	×
1.0E+07	1.21E+02	1.22	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×
1.0E+08	1.21E+02	0.41	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0E+08	1.21E+02	0.28	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5.0E+08	1.21E+02	0.18	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1.0E+09	1.21E+02	0.13	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○

図 5.13 ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向
(底部径方向表面)

Fig. 5.13 Trends in neutron analysis results versus history
(radial surface of the bottom)



History	Dose [μSv/h]	Error [%]	10 statistical checks									
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
1.0E+06	1.20E+01	6.20	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×
1.0E+07	1.12E+01	2.41	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×
1.0E+08	1.14E+01	0.86	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0E+08	1.15E+01	0.65	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5.0E+08	1.15E+01	0.46	○	○	×	×	○	×	×	○	○	○
1.0E+09	1.15E+01	0.36	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

図 5.14 ヒストリー数に対する中性子計算結果等の変化傾向
(底部径方向表面から 1m)

Fig. 5.14 Trends in neutron analysis results versus history
(1m away from the radial surface of the bottom)

5.2.3 解析結果の空間連続性

本項では、図5.2の(4)解析結果の空間連続性等の確認に示されている以下に関連して検証解析を実施し、確認内容の留意点を考察した。

- ・線量評価点付近の線量分布及び統計誤差の分布から、線量計算値及びその統計誤差が妥当な数値であると判断できることを確認

(1) はじめに

解析結果の信頼性を確認する手段の一つとして、解析結果である線量の空間分布図に基づき、同一物質中で線量減衰の急激な変化が起こっていないか等の空間分布の連続性を確認する方法が挙げられる。近年では解析結果に付随する統計誤差も空間分布図として出力できる機能を有するモンテカルロコードが増え、同図からも解析結果の信頼性を確認するための情報が得られる。本項では、解析条件の入力ミスを想定して敢えて不適切な分散低減パラメータを与えた際に、線量及び統計誤差の空間分布図に現れる影響を評価することで、空間連続性に対する確認内容の留意点を検討した。なお、本検証は PHITS コードの講習会中級コースにおける分散低減法の教材⁴⁶を参考にした。

(2) 計算ケース及び条件

図 5.15 に示すように、z 軸を中心とした半径 50 cm (x、y 方向)、長さ 150 cm (z 方向) の円筒状のコンクリートに対する熱中性子の透過計算を行った。計算体系内には、原点を中心とした同心球面で区切った領域 (Cell) を作成し、それぞれの領域に分散低減パラメータを設定した。その他の計算条件は以下に示す。

- ・解析コード PHITS 3.33⁷
- ・断面積ライブラリ JENDL-4.0⁸に基づく ACE 形式ライブラリ
- ・体系モデル 図 5.15 に示したものを使用
- ・線源条件 +z 側のみに熱中性子を放出する等方点線源を原点に設定 (E = 0.025 eV)
- ・物質組成 表 4.2 に示したコンクリートの組成
- ・分散低減法 Cell Importance 法 (imp は分散低減パラメータ)
ケース① (分散低減無し) :
全領域に imp=1.0 を設定
ケース② (適切な設定) :
Cell 1 を imp=1.0 とし、Cell 2~16 に掛けて、imp を 2.3 倍ずつ増加
ケース③ (誤った設定) :
上記ケース②のうち、Cell 1~9 までを imp=1.0 (Cell 9・10 の境界で imp が $2.3^9=1801$ 倍に急増する)

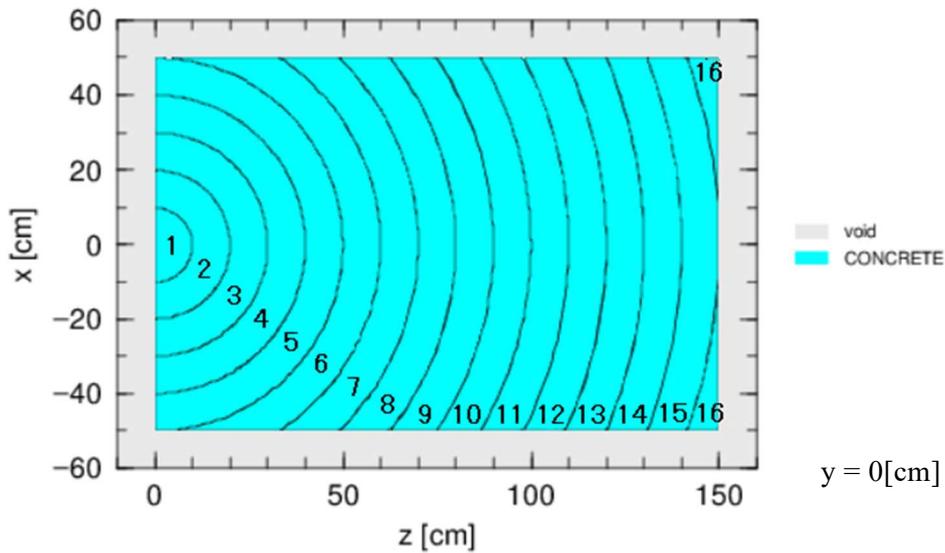


図 5.15 解析結果の空間連続性検証のための計算体系

Fig. 5.15 Geometry model for the sensitivity analysis of spatial continuity

注) 図中の 1~16 は Cell 番号

(3) 計算結果及び考察

図 5.16 に各計算ケースに対して、ヒストリー数 1.0×10^7 で計算した実効線量及び統計誤差の空間分布を示す。分散低減無しの場合①では右端の $z=150$ cm まで中性子が到達していないのに対し、分散低減パラメータを適切に設定した場合②では同じヒストリー数で右端まで中性子が到達し、線量の空間分布が連続性を有していることが分かる。また、統計誤差の空間分布は連続的かつ領域全体でほぼ均一に低く抑えられている。これは、領域全体に十分な数の輸送粒子が到達していることを示しており、統計精度の高い計算が行われたことが分かる。分散低減パラメータの入力ミスを想定した場合③では、線量の空間分布はケース②と同様の連続性を有しており、不適切な条件設定が検知できていない。一方で、統計誤差の空間分布では Cell 9 と 10 の境界で不連続な分布が発生しており、右端近辺での統計誤差の値は低くなっているものの、解析結果の信頼性は十分ではないと判断できる。

以上より、計算結果である線量等の空間分布の連続性だけでは解析結果の信頼性確認が不十分な場合もあり、特に分散低減法を使用した計算では統計誤差の空間分布に対する連続性も、距離、位置等に対する変化曲線、等値線図等により確認することの必要性が、確認内容の留意点として得られた。

さらに、検討委員会での議論に基づく確認内容の留意点として、線源から評価点までの放射線の透過経路を考慮できているか確認する必要がある。また、主要な経路から離れた箇所にストリーミング経路がある場合には注意が必要である。確認の方法として、確認が

必要な透過経路の線量分布及び統計誤差の分布（距離、位置等に対する変化曲線、等値線図等）から、線量計算値及びその統計誤差が妥当な数値であること、空間連続性があることを確認する。透過経路については基準となる評価点ではないため、線量分布のみで透過経路が考慮できていると判断可能であれば、統計誤差の確認は必須ではない。

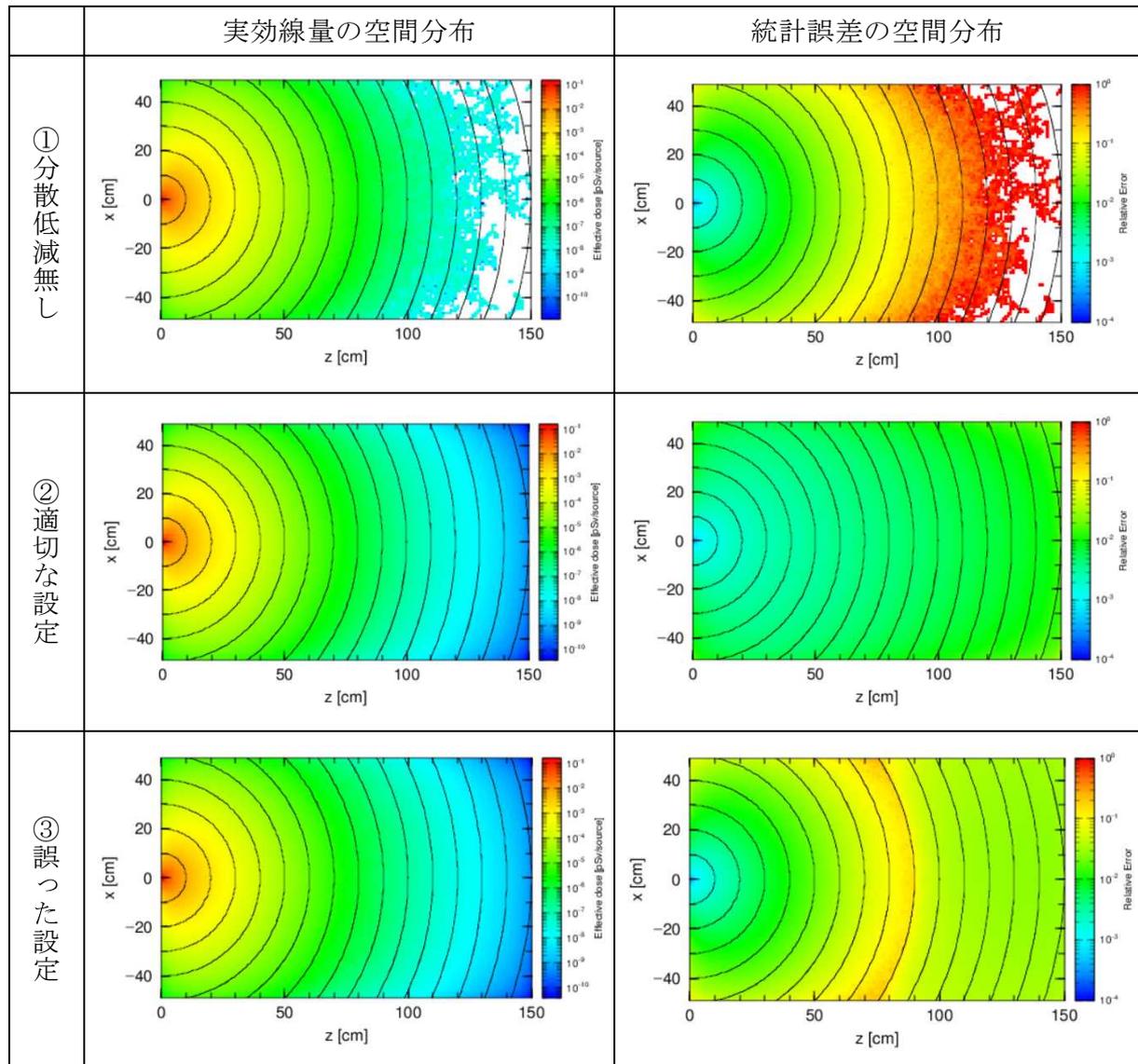


図 5.16 解析結果の空間連続性検証の計算結果

Fig. 5.16 Results of the sensitivity analysis of spatial continuity

5.3 線量基準に対する評価結果の確認

本節では、図5.2の(5)線量基準に対する評価結果の確認に示されている以下に関連して、その判断に係る確認内容の留意点に係る検討委員会での議論を整理した結果を記載する。

- ・評価点の線量計算値の信頼区間の設定の考え方は妥当か確認

モンテカルロコードによる線束、線量等の計算値は正規分布を示し、その平均値 μ を計算結果とし、標準偏差 σ により統計誤差を求める。その際の各値の関係は統計学に基づき図5.17に示したとおりとなり、 $\mu\pm\sigma$ の区間には68.3%、 $\mu\pm2\sigma$ の区間には95.4%、 $\mu\pm3\sigma$ の区間には99.7%の確率で真の値が存在することとなる。このように、母集団の統計量（真の値）がある確率で収まる値の範囲を信頼区間と呼ぶ。一般的に規格標準類は $\mu\pm2\sigma$ 、臨界安全評価等の高い安全が求められる分野は $\mu\pm3\sigma$ の信頼区間を設定する例が多いが、モンテカルロコードによる遮蔽解析の計算値に対しては習慣的に $\mu\pm\sigma$ で評価されることが多い。

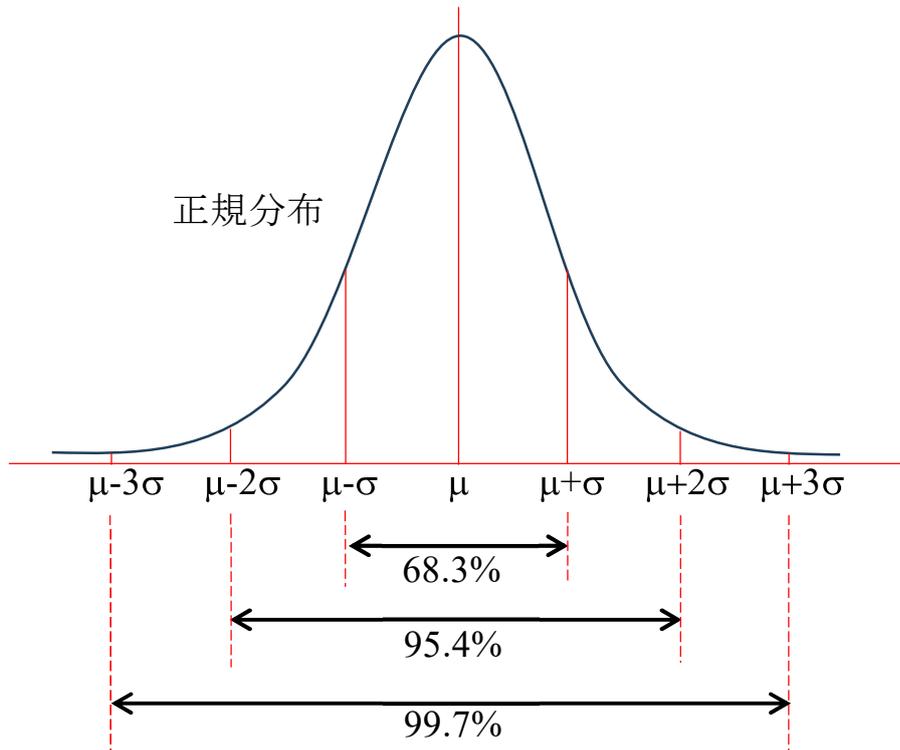


図5.17 信頼区間の概念図

Fig. 5.17 Conceptual diagram of confidence interval

評価点の線量計算値の信頼性については、5.2 節に記載したように、透過経路や線量評価点付近の線量分布（連続性）、統計誤差の分布（連続性）、統計チェック項目等の確認に加え、ヒストリー数の増加に対する線量の収束状況を組み合わせて確認した上で評価結果の信頼性を多角的かつ総合的に判断することが必要である。その際には図5.18に例示するように、統計誤差（標準偏差）に基づいて信頼区間を設定し、ヒストリー数の増加に対する計算値の収束状況及び信頼区間の妥当性を確認すること等で信頼性を示すことができる。図5.18の例の場合、 1×10^7 ヒストリーの線量当量率を用いる場合は、エラーバーとして示した信頼区間の範囲内に破線の値を収めることができる $\mu\pm2\sigma$ 以上を設定する必要がある。以上のように、信頼区間の設定方針及び妥当性を適切に評価することが確認内容の留意点となる。

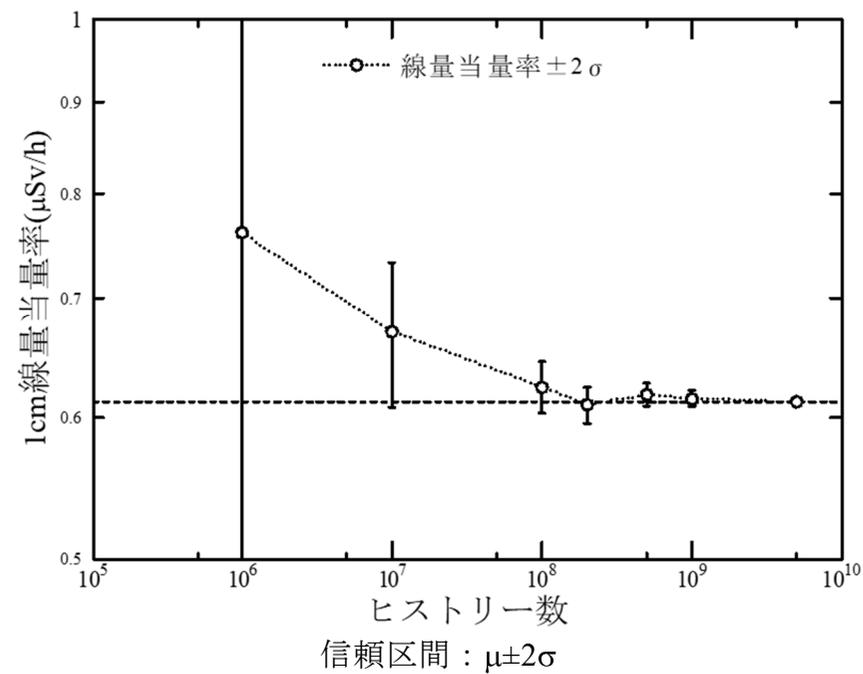
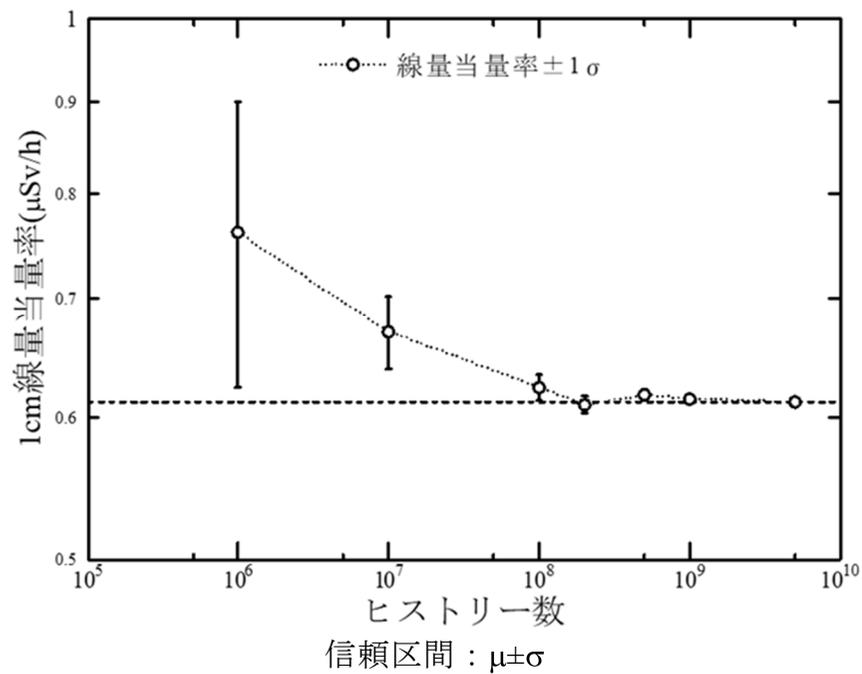


図5.18 信頼区間の設定及び妥当性確認の例

Fig. 5.18 Example of setting and validating confidence intervals

注) σ は標準偏差(統計誤差)を示し、図中の破線は最大ヒストリー時の1cm線量当量率の値を示す。

5.4 モンテカルロ法遮蔽解析結果の信頼性確認のまとめ

解析結果の信頼性確認は、評価方針（保守的な評価とするか、現実的な評価とするか等。）や必要精度に基づき最終判断をすべきである。解析条件の保守性により評価結果の妥当性を示す場合は、本章の確認項目を一通り確認した上で、保守性が不確かさを十分に上回ることを確認する必要がある。一方で、保守性の少ない現実的な解析条件による評価や、線量基準に対して評価結果の余裕が少ない場合は、本章の確認項目を組み合わせる詳細な確認をした上で、評価結果の信頼性を多角的かつ総合的に判断することが必要である。

上記も踏まえ、5.1 節にフロー図としてまとめた解析結果の信頼性確認の流れに基づき、確認項目、確認内容及び特記すべき留意点をまとめたものを表 5.9 に示す。特記すべき留意点は、定性的あるいは原理的に得られる項目については検討委員会での議論を整理した結果であり、解析による定量的な検証が必要な項目については 5.2 節に記載した検証解析の詳細及び結果の考察により得られた確認内容の留意点を記載した。

適合性審査の際には、これらを網羅的に確認することで、適合性判断における解析条件の妥当性判断の根拠とすることができる。

表5.9 確認項目、確認内容及び留意点（解析結果の信頼性）

Table 5.9 Validation items, validation contents and points to note (reliability of the analysis results)

確認項目		確認内容	特記すべき留意事項
5. モンテカルロ法解析パラメータ	5.1 エネルギー範囲	解析の対象とする中性子のエネルギー範囲の上限は、線量に寄与する線源エネルギースペクトルを表すのに十分に高いエネルギーとなっているか。	【補足】 通常 10～20 MeV 程度に設定する。
		中性子のエネルギー範囲の下限は二次ガンマ線の生成を評価するために十分低い値となっているか。	【補足】 低エネルギーの中性子は捕獲反応により二次ガンマ線を放出し、線量への寄与が大きいため、 10^{-11} ～ 10^{-10} MeV 程度を下限とする必要がある。
		光子のエネルギー範囲の上限は、ガンマ線源エネルギーの上限を十分に含むものとなっているか。	【補足】 通常 10～20 MeV 程度に設定する。
		光子のエネルギー範囲の下限は、線量に有意に寄与するガンマ線源エネルギーの下限を十分に含むものとなっているか。	【補足】 計算コードの機能及び断面積ライブラリの収録データ範囲では 10^{-3} MeV が下限となることが多いが、 10^{-2} MeV 未満の光子は評価位置まで到達する可能性が低く、到達しても線量への寄与は軽微であり、無視することも多い。 また、線量に優位に寄与する下限エネルギーを解析で求めることも現実的である。
	5.2 分散低減法	分散低減法を利用する場合、適切な手法・パラメータの設定がなされているか。 また、自動分散低減機能を用いない場合に、手法・パラメータが解析者によって恣意的に決定されていないか。	【5.2.1 項に基づく留意点】 ADVANTG コード ¹¹ を使用する場合は、随伴線束計算における Sn 法計算のパラメータに対する設定方針について留意する必要がある。
		分散低減法を利用する場合、線源から評価点までの透過経路が妥当か。	【定性的あるいは原理的に得られる留意点】 重要なストリーミング経路の優先度が下がっていないか、線源の空間バイアスに異常はないかを確認することが推奨される。

確認項目		確認内容	特記すべき留意事項								
5. モンテカルロ法解析パラメータ	5.3 解析結果の収束性	ヒストリー数に対して線量計算値が収束しているか。	【5.2.2 項①に基づく留意点】 ヒストリー数に対する線量計算値の収束状況を、統計誤差も含めて図示されたもの等で確認することが推奨される。								
		定量的な評価が必要な線量計算値については、統計誤差が 10%未満となっていることを確認する。 ネクストイベントエスティメータ（点形状、円環形状）を利用の場合は統計誤差が 5%未満となっていることを確認する。	【5.2.2 項②に基づく留意点】 評価点における線量計算値の統計誤差 R の判断基準については、以下が目安となる。								
		計算コードが計算結果の信頼性を高めるための「統計チェック項目」を有する場合、計算コードで設定された判断基準を満足しているか確認することが推奨される。また、「統計チェック項目」については異なるヒストリー数で推移を確認することが推奨される。	<table border="1"> <tr> <td>0.1<R</td> <td>評価結果の信頼性は低い。</td> </tr> <tr> <td>0.05<R<0.1</td> <td>計算の目的や必要精度を基にした判断内容が適切であれば問題ない。</td> </tr> <tr> <td>R<0.05</td> <td>推奨される精度。</td> </tr> <tr> <td>R<0.01</td> <td>経験的に解の収束性が増す傾向にある。</td> </tr> </table>	0.1<R	評価結果の信頼性は低い。	0.05<R<0.1	計算の目的や必要精度を基にした判断内容が適切であれば問題ない。	R<0.05	推奨される精度。	R<0.01	経験的に解の収束性が増す傾向にある。
		0.1<R	評価結果の信頼性は低い。								
0.05<R<0.1	計算の目的や必要精度を基にした判断内容が適切であれば問題ない。										
R<0.05	推奨される精度。										
R<0.01	経験的に解の収束性が増す傾向にある。										
ネクストイベントエスティメータ（点形状、リング形状）の場合は、ネクストイベントエスティメータが存在する領域まで十分な数の粒子が到達していること。	【5.2.2 項③に基づく留意点】 統計チェック項目を全て満たすことは、あくまでも目安として考慮されるべきであることに留意しなければならない。仮に、統計チェック項目を満たしつつも、ヒストリー数に対して評価値が著しく変動するということがあれば、信頼できる評価結果とは判断し難い。 【補足】 同じ評価位置に体積検出器を設定した際に、統計誤差が 10%未満となる必要がある。										

確認項目		確認内容	特記すべき留意事項
	5.4 計算結果の空間連続性	線量評価点付近の線量分布及び統計誤差の分布から、線量計算値及びその統計誤差が妥当な数値であると判断できること。	【5.2.3 項に基づく留意点】 線量評価点付近の線量分布及び統計誤差の分布(距離、位置等に対する変化曲線、等値線図等)から、線量計算値及びその統計誤差が妥当な数値であること、空間連続性があることを確認することが必要である。 線量値に統計誤差を重ねて図示すること等も考えられる。
5. モンテカルロ法解析パラメータ	5.4 計算結果の空間連続性	線源から評価点までの透過経路が適切に評価されているか。	【定性的あるいは原理的に得られる留意点】 線源から評価点までの放射線の透過経路を考慮できているか確認する必要がある。また、主要な経路から離れた箇所にストリーミング経路がある場合には注意が必要である。確認の方法として、確認が必要な透過経路の線量分布及び統計誤差の分布(距離、位置等に対する変化曲線、等値線図等)から、線量計算値及びその統計誤差が妥当な数値であること、空間連続性があることを確認する。
	5.5 線量基準に対する評価結果	評価点の線量計算値の信頼区間の設定の考え方が妥当か。	【5.3 節に基づく留意点】 信頼区間の設定方針及び妥当性の確認が必要である。妥当性の示し方の例として、統計誤差(標準偏差)に基づいて信頼区間を設定し、ヒストリー数の増加に対する計算値の収束状況及び信頼区間の妥当性を確認すること等で信頼性を示すことができる。

確認項目		確認内容	特記すべき留意事項
		線量基準に対する評価結果の考え方が妥当か。	<p>【定性的あるいは原理的に得られる留意点】 解析条件の保守性により評価結果の妥当性を示す場合は、確認項目 5.1 から 5.5 を一通り確認した上で、保守性が不確かさを十分に上回ることを確認する必要がある。</p> <p>保守性の少ない現実的な解析条件による評価や、線量基準に対して評価結果の余裕が少ない場合は、確認項目 5.1 から 5.5 を組み合わせて確認した上で評価結果の信頼性を多角的かつ総合的に判断することが必要である。</p>

6. まとめ

使用済燃料等の輸送・貯蔵分野の適合性審査でモンテカルロコードによる遮蔽評価結果の適切な信頼性確認を行うために、金属キャスク体系及び使用済燃料乾式貯蔵施設体系の解析条件の妥当性を確認する作業の流れ、確認項目及びその留意点について、検討委員会における議論に基づき検討し、本技術報告にまとめた。また、確率論的な解法であるモンテカルロ法により得られた計算結果の統計的な信頼性を確認する方法についても同様にまとめた。確認内容の留意点を得るために定量的な確認が必要な項目については検証解析を実施し、その解析の条件及び結果並びに考察の内容を記述した。3～5章の最後に示した確認項目、確認内容及びその留意点をまとめた表 3.21（金属キャスク）、表 4.14（使用済燃料乾式貯蔵施設）及び表 5.9（解析結果の信頼性）を網羅的に確認することで、適合性審査での判断に資することができる。

なお、本技術報告に記載した解析結果は、プロジェクトの中で実施した検証解析で設定した特定の条件から得られたものである。したがって、多様な設計の全てを代表できるものではなく、解析結果の絶対値は検証解析対象の遮蔽性能の本質を表したものではない。また、定量的な判断基準を提供する性質のものではないことに注意が必要である。

謝辞

本技術報告を作成するに当たり、多方面で様々な方の協力をいただいた。遮蔽解析コード（モンテカルロコード）の信頼性確認手法案に関する高度化検討委員会において闊達な議論や貴重な意見を賜るとともに、統計学の有識者に専門的な知見に基づく助言をいただいた。また、上記検討委員会の事務局には会合の運営及び議論の取りまとめに協力いただいた。加えて、検証解析の作業者により詳細な解析条件の設定や解析結果の分析も含め、多くの解析を実施していただいた。本技術報告を公表するに当たり、下記の関係者各位に深く謝意を表す。

遮蔽解析コード（モンテカルロコード）の信頼性確認手法案に関する高度化検討委員会の委員各位（敬称略）

（委員長）

坂本 幸夫 株式会社アトックス

（委員）

浅見 光史 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

佐藤 理 合同会社ニュークリア・テクノロジー・コンサルティング

橋本 信太郎 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

仁井田 浩二 一般財団法人高度情報科学技術研究機構

統計学の知見に基づく助言をいただいた有識者各位（敬称略）

田中 秀幸 国立研究開発法人産業技術総合研究所

城野 克広 //

高井 絢之介 //

検討委員会事務局

エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社

検証解析作業

ナイス株式会社

参考文献一覧

- 1 後神進史、森憲治、菱田政清、「使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法の研究」安全研究成果報告、RREP-2024-1002、令和6年
<https://www.nra.go.jp/data/000473310.pdf> (2026年3月16日確認)
- 2 一般社団法人日本原子力学会、「日本原子力学会特別専門委員会成果報告書 モンテカルロ法による放射性物質輸送容器の遮蔽安全評価手法の高度化」、平成25年
- 3 エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社、「令和3年度原子力規制庁請負成果報告書 使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法案の高度化」、令和4年
- 4 エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社、「令和4年度原子力規制庁請負成果報告書 使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法案の高度化」、令和5年
- 5 エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社、「令和5年度原子力規制庁請負成果報告書 使用済燃料等の輸送・貯蔵の分野における最新解析手法に係る評価手法案の高度化」、令和6年
- 6 Werner, C. J. ed., “MCNP User’s Manual Code Version 6.2”, Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LA-UR-17-29981, 2017.
- 7 Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., atsuya, Y., Matsuda, N., Hirata, Y., Sekikawa, T., Yao, L., Tsai, P. E., Hunter, H. N., Iwase, H., Sakaki, Y., Sugihara, K., Shigyo, N., Sihver, L., Niita, K., “Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.61, Issue 1, pp.127-135, 2024.
- 8 Shibata, K., Iwamoto, O., Nakagawa, T., Iwamoto, N., Ichihara, A., Kunieda, S., Chiba, S., Furutaka, K., Otuka, N., Ohsawa, T., Murata, T., Matsunobu, H., Zukeran, A., Kamada, S., Katakura, J., “JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 48, Issue 1, pp. 1-30, 2011.
https://rpg.jaea.go.jp/main/ja/library_fsxlibj40/ (2026年3月16日確認)
- 9 四国電力株式会社、核燃料輸送物設計承認申請書 (MSF-24P)、原燃発第18-78号、平成30年
- 10 Croff, A. G., “ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials”, Nuclear Technology, Vol.62, 1983.
- 11 Mosher, S. W., Johnson, S. R., Bevill, A. M., Ibrahim, A. M., Daily, C. R., Evans, T. M., Wagner, J. C., Johnson, J. O. and Grove, R. E., “ADVANTG An Automated Variance Reduction Parameter Generator”, ORNL/TM-2013/416 Rev. 1, Oak Ridge National Laboratory, 2015.
- 12 International Commission on Radiological Protection, “Conversion Coefficients for use in

- Radiological Protection against External Radiation”, ICRP Publication 74, 1996.
- 13 Kamiya, M., Yamano, N., Shimooke, T., “Shielding Analysis on Spent Fuel Transport Cask by RADHEAT-V3 Code System”, JAERI-M 9562, 1981.
- 14 Kaufman, J. G., “The Properties of Aluminum Alloys, Aluminum Association”, 1999.
- 15 三菱重工業株式会社、「型式設計特定容器等の型式指定申請書添付書類の一部補正について」、Doc No. L5-95HU13、添付書類 8-2-4、平成29年
- 16 日本機械学会、「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格」、JSME S Fa1-2007
- 17 Ueki, K., Ohashi, A., Nariyama, N., Nagayama, S., Fujita, T., Hattori, K. and Anayama, Y., “Systematic Evaluation of Neutron Shielding Effects for Materials”, Nucl. Sci. and Eng., Vol. 124, Issue 3, pp. 455-464, 1996
- 18 日本産業規格、「中・常温圧力容器用炭素鋼鋼板」、JIS G 3118:2017
- 19 日本産業規格、「ステンレス鋼棒」、JIS G 4303:2012
- 20 Weisbin, C., Roussin, R., Wagschal, J., White, J. and Wright, R. O., “VITAMIN-E: An ENDF/B-V Multigroup Cross-Section Library for LMFBR Core and Shield, LWR Shield, Dosimetry and Fusion Blanket Technology”, ORNL- 5505 (ENDF-274), 1979.
- 21 Jacobs, G. J. H. and Liskien, H., "Energy Spectra of Neutrons Produced by α -particles in Thick Targets of Light Elements," Ann, Nucl. Energy, Vol. 10, No. 10, pp. 541-552, 1983.
- 22 一般社団法人日本原子力学会、「炉物理教科書：中級編 原子炉物理（シリーズ：現代核科学の基礎）」、p. 177、平成20年
https://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/others/study/text_aesj.html（2026年3月16日確認）
- 23 Cacciapouti, R.J., Van Volkinburg, S., “Axial Burnup Profile Database for Pressurized Water Reactors”, YAEC-1937,1997.
- 24 リサイクル燃料貯蔵株式会社、「リサイクル燃料備蓄センター 使用済燃料貯蔵事業変更許可申請書（補足説明資料）本申請にて追加した金属キャスクの設計で想定したピーキングファクターの包絡性について」、リサイクル燃料貯蔵株式会社による使用済燃料貯蔵事業変更許可申請に関する資料提出（令和5年12月13日）、資料2
<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA029008932?contents=NRA029008932-002-003#pdf=NRA029008932-002-003>（2026年3月16日確認）
- 25 ORNL-RSIC, “DOT III : A Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code”, CCC-209, 1973.
- 26 Saito, A., Terada, A., Yokoe, D., Sakamoto, H. and Taniuchi, H., “Study of Analysis Methods of Shielding Calculation Codes for Casks”, The 18th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2016, September 18-23, 2016.
- 27 原子力安全委員会、「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設のため

- の安全審査指針及び使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」、平成14年
<https://www.mlit.go.jp/common/000054763.pdf> (2026年3月16日確認)
- 28 独立行政法人原子力安全基盤機構、「平成15年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書」、平成16年
- 29 国立研究開発法人日本原子力研究開発機、「原子核の基礎データベースJENDLの最新版を公開」、令和3年
<https://www.jaea.go.jp/02/press2021/p21122701/> (2026年3月16日確認)
- 30 Iwamoto, O., Iwamoto, N., Kunieda, S., Minato, F., Nakayama, S., Abe, Y., Tsubakihara, K., Okumura, S., Ishizuka, C., Yoshida, T., Chiba, S., Otuka, N., Sublet, J. C., Iwamoto, H., Yamamoto, K., Nagaya, Y., Tada, K., Konno, C., Matsuda, N., Yokoyama, K., Taninaka, H., Oizumi, A., Fukushima, M., Okita, S., Chiba, G., Sato, S., Ohta, M. and Kwon, S., “Japanese evaluated nuclear data library version 5: JENDL-5,” J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 60, Issue 1, pp. 1-60, 2023.
- 31 Shibata, K., Kawano, T., Nakagawa, T., Iwamoto, O., Katakura, J., Fukahori, T., Chiba, S., Hasegawa, A., Murata, T., Matsunobu, H., Ohsawa, T., Nakajima, Y., Yoshida, T., Zukeran, A., Kawai, M., Baba, M., Ishikawa, M., Asami, T., Watanabe, T., Watanabe, Y., Igashira, M., Yamamuro, N., Kitazawa, H., Yamano N. and Takano H., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3", J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 39, Issue 11, pp. 1125-1136, 2002.
- 32 Chadwick, M. B., Herman, M., Chadwick, M. B., Herman, M., Oblozinsky, P., Dunn, M. E., Danon, Y., Kahler, A. C., Smith, D. L., Pritychenko, B., Arbanas, G., Arcilla, R., Brewer, R., Brown, D. A., Capote, R., Carlson, A. D., Cho, Y. S., Derrien, H., Guber, K., Hale, G. M., Hoblit, S., Kawano, T., Kiedrowski, B. C., Kim, H., Kunieda, S., Larson, N. M., Leal, L., Lestone, J. P., Little, R. C., McCutchan, E. A., MacFarlane, R. E., MacInnes, M., Mattoon, C. M., McKnight, R. D., Mughabghab, S. F., Nobre, G. P. A., Palmiotti, G., Palumbo, A., Pigni, M. T., Pronyaev, V. G. Sayer, R. O., Sonzogni, A. A., Summers, N. C., Talou, P., Thompson, I. J., Trkov, A., Vogt, R. L., van der Marck, S. C., Wallner, A., White, M. C., Wiarda, D. and Young, P. G., “ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data”, Nuclear Data Sheets, Vol. 122, Issue 12, pp. 2887-2996, 2011.
- 33 四国電力株式会社、「伊方発電所3号炉 設置許可基準規則等への適合性について (使用済燃料乾式貯蔵施設)」、第785回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合、資料1-2、令和元年
- 34 公益財団法人原子力安全研究協会、「使用済燃料中間貯蔵施設の直接線・スカイチェーン線量の評価手法について [金属キャスク貯蔵方式]」、平成12年

- 35 Koyama, K., Okumura, Y., Furuta, K. and Miyasaka, S., “Multi-group Cross Section Sets for Shielding Materials – 100 neutron groups and 20 gamma-ray groups in P5 approximation-”, JAERI-M6928, 1977
- 36 一般社団法人日本原子力学会、「放射線遮蔽ハンドブック基礎編」、平成27年
- 37 日本原子力研究所、「核燃料施設遮蔽安全ガイド資料 実際編」、JAERI-Tech 96-001、平成8年
- 38 中田幹裕、月山俊尚、奥野功一、前中敏伸、「遮蔽材料標準の策定について(17) 遮蔽計算用コンクリートの規定組成の考え方」、日本原子力学会2021年春の年会、1D06、令和3年
<https://confit.atlas.jp/guide/event-img/aesj2021s/1D06/public/pdf?type=in>
(2026年3月16日確認)
- 39 公益財団法人原子力安全技術センター、「放射線施設の遮蔽計算実務（放射線）データ集2015」、p. 2、平成27年
- 40 Wieselquist, W. A., Lefebvre, R. A. and Jessee M. A. ed., “SCALE Code System, ORNL/TM-2005/039 ver.6.2.4”, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., 2020.
- 41 国立天文台著、「理科年表 CD-ROM版」、(1998 空気の密度)、丸善出版、平成10年
- 42 Andrews, J. E.(著), 渡辺正(訳)、「地球環境化学入門 改訂版」、p. 38、丸善出版、平成24年
- 43 Sakamoto, Y. and Tanaka, S., “QAD-CGGP2 AND G33-GP2: REVISED VERSIONS OF QAD-CGGP AND G33-GP”, JAERI-M-90-110, Japan Atomic Energy Research Institute, 1990.
- 44 Peplow, D. E., Bowman, S. M., Horwedel, J. E. and Wagner, J. C., “Monaco/MAVRIC: Computational Resources for Radiation Protection and Shielding in SCALE”, Transactions of the ANS, 95, pp. 669-671, 2006.
- 45 Evans, T. M., Stafford, A. S., Slaybaugh, R. N. and Clarno, K. T., “Denovo: A New Three-Dimensional Discrete Ordinates Code in SCALE”, Nucl. Technol., Vol. 171, 2010 - Issue 2, pp. 171-200, 2017.
- 46 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「応用実習：計算効率を上げるための variance reduction(粒子のウェイト)の利用」、令和7年改訂
<https://phits.jaea.go.jp/rieki-manualj.html> (2026年3月16日確認)

執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ システム安全研究部門
後神 進史 主任技術研究調査官

付録 モンテカルロコードの解析結果に付随する統計指標²

1. 統計誤差 (Relative Error : R)

統計誤差 R は、平均値 \bar{x} と平均値の標準偏差 $S_{\bar{x}}$ の比である。また、統計誤差 R はヒストリー数 N の平方根に反比例する関係がある。

$$R \equiv \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}} = \left[\frac{1}{N} \left(\frac{x^2}{\bar{x}^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{(\sum_{i=1}^N x_i)^2} - \frac{1}{N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

MCNP コードのマニュアル⁶では定性分析とモンテカルロの専門家の経験に基づいて、解析結果を信頼するための統計誤差の判断基準として $R < 0.1$ を導いており、 R をより小さくすることを推奨している。また、SCALE システム⁴⁰の最適分散低減遮蔽解析システム MAVRIC⁴⁴及び国産モンテカルロコード PHITS⁷で用いられている統計誤差の基準は $R < 0.05$ となっている。

2. 分散の分散 (Variance Of the Variance : VOV)

統計誤差 R の評価をする際の重要な指標である分散の分散があり、次式で示される。

$$VOV \equiv \frac{S^2(S_{\bar{x}}^2)}{S_{\bar{x}}^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2]^2} - \frac{1}{N}$$

※ $S^2(S_{\bar{x}}^2)$ は $S_{\bar{x}}^2$ の分散

上式より VOV は $1/N$ (N はヒストリー数) で減少するので、計算でもそのことを確認する。また、MCNP のコードマニュアルによれば、 VOV の判断基準は 0.1 以下とされている。

3. 性能指標 (Figure Of Merit : FOM)

計算効率を示す指標として FOM があり、次式で示される。

$$FOM = \frac{1}{R^2 \cdot T}$$

※ T は計算時間 (分)

統計誤差の二乗 R^2 はヒストリー数 N に反比例し、計算時間 T は N に比例するため、 FOM は一定となる。計算でもそのことを確認する。

4. 確率密度関数 (Probability Density Function : PDF)

MCNP コードでは、タリーの平均値における信頼区間の推定値の質の評価のため、タリーで測定された評価値に対する確率密度関数： $f(x)$ を作成する。発生確率が低く高スコア ($f(x)$ が正規分布の場合、 x が大きい側) の事象を評価する上で、確率密度分布の高スコア側の裾の評価が必要になる。

MCNP コードでは、確率密度関数の高スコア側の裾のスロープを評価し、中心極限定理が適用できると判断できる $SLOPE=3$ 以上であることを確認することになっている。