

放射性物質輸送容器のモンテカルロ法による 遮蔽安全評価手法ガイドライン原案の策定

浅見 光史*、平尾 好弘*、澤田 健一*、大西 世紀*、
近内 亜紀子*、小田野 直光*

Development of “Guidelines for Radiation Shielding Evaluation of Transport Casks by Monte Carlo Method”

by

Mitsufumi ASAMI, Yoshihiro HIRAO, Ken-ichi SAWADA, Seiki OHNISHI,
Akiko KONNAI and Naoteru ODANO

Abstract

Guidelines for radiation shielding evaluation by Monte Carlo method was designed and developed for practical radiation shielding for radioactive material transport casks. The guidelines consist of current technical advancement on estimating the dose equivalent rates around the surface of a transport cask. The guidelines have two unique features: one is that the procedure of the radiation shielding analyses is illustrated as flow charts, which can be used as check sheets to validate the analyses. By following the flow charts, the applicant can perform the radiation shielding analyses properly and the regulatory agency can check whether the analyses performed by the applicant are proper or not. The other is that the guidelines provide documentation of the details of results of benchmark analyses for transport casks by Monte Carlo method including measurements, modeling descriptions for the analyses, results of analyses and evaluation. The guidelines could be useful to validate the procedure and the results of radiation shielding analyses for transport casks.

* 海洋リスク評価系
原稿受付 平成25年 5月 20日
審査日 平成25年 6月 6日

目 次

1. 研究の背景	44
2. 研究の概要	44
2.1 文部科学省原子力試験研究費で実施した 研究内容	44
2.2 ガイドライン原案の作成方針と概要	45
3. 結論	46
謝辞	46
別添: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 ガイドライン原案	

1. 研究の背景

放射性物質を輸送する際の安全は、放射性物質輸送容器(以下、輸送容器)に収納可能な放射エネルギーの制限のような運用上の制限、及び輸送する条件に適合した技術上の基準により適切に設計・製造された輸送容器の両方で確保される。輸送時の放射線に関する安全確保においては、輸送中に事故に遭遇した場合においても「輸送容器内に収納された放射性物質から放出される放射線による一般公衆及び輸送従事者の被曝を防止できること」が要求事項とされている。この要求に対応すべく、「外部における放射線レベルを適切なレベルに維持できる構造を有する」ように、輸送容器の遮蔽設計が行われる。輸送容器の遮蔽構造は、収納放射性物質の種別毎に設定される輸送容器外表面近傍における放射線レベルに適合した放射線遮蔽能力を有するように設計される。

輸送容器の持つ遮蔽能力の評価(遮蔽評価)には、数値計算による解析が用いられており、信頼性の高い計算コードが使用される。近年、輸送容器の遮蔽評価には、計算技術の高度化と計算機の性能向上が反映され、輸送容器の幾何学的形状を近似せずに現実の形状をそのまま考慮でき、核反応断面積データをほぼ連続的に取り扱うことができることで、安全解析を高精度に実施できる、確率論的手法であるモンテカルロ法に基づく放射線遮蔽計算手法の導入が図られつつある。輸送容器の基本設計段階において、既に導入を開始しているところもある。しかしながら、従来、モンテカルロ法に基づく放射線遮蔽計算によって得られた計算結果の検証は、計算者の独自判断に委ねられており、標準的な手法が確立されていなかったことに加えて、計算手法が輸送容器の複雑形状部に対してどの程度保守性を有するかが不明であった。これらの理由から、輸送容器の安全審査のための安全解析には、モンテカルロ法に基づく遮

蔽計算手法は採用されていない。代わりに、30年以上前に開発された、輸送容器形状をモデル化する際に技術上大きく制約される二次元離散座標法による計算結果に基づき安全審査が行われているのが現状である¹⁾。

モンテカルロ法に基づく放射線遮蔽計算法が輸送容器に適用可能であることを明らかにすることができれば、輸送容器の安全審査において、最新の科学的知見に基づいた合理的な遮蔽評価が実現できることになる。そこで本研究では、モンテカルロ法に基づく放射線遮蔽計算法を輸送容器の安全審査に使用できるようにすることを目的として、解決すべき計算精度の考え方について詳細な検討を行い、標準的なガイドライン(原案)を策定した。

2. 研究の概要

2.1 文部科学省原子力試験研究費で実施した研究内容

ガイドライン(原案)の策定は、文部科学省原子力試験研究費による「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高度化に関する研究」として、平成19年度～23年度の5年計画で、海上技術安全研究所が実施した成果の一部である。

5年計画のうち平成19年度～平成20年度前半においては、モンテカルロ法に基づく遮蔽計算によって得られる計算結果がどの程度の保守性を有するかを把握するため、輸送容器の持つ遮蔽構造のうち、胴部及び吊具部を模擬した試験体を製作して、遮蔽実験を行うとともに、放射線測定時の幾何学的形状を忠実に再現した計算モデルを用いて遮蔽計算を行った。この結果、モンテカルロ法に基づく遮蔽計算によって得られた計算結果は、遮蔽実験によって得られた測定結果を十分な精度で再現するものであることが明らかとなった²⁾。

平成20年度後半においては、現在我が国で頻繁に使用されている代表的な加圧水型原子炉(PWR)及び沸騰水型原子炉(BWR)用使用済燃料輸送容器の外表面近傍の放射線測定を、商用原子力発電所の東京電力福島第2原子力発電所及び関西電力大飯発電所施設において実施した³⁾。測定によって得られた使用済燃料輸送容器外表面近傍の放射線測定結果は、ガイドライン(原案)の策定時に行われた遮蔽ベンチマーク解析データとして活用した。

ガイドライン(原案)の策定は、平成21年度～

平成23年度に行った。平成21年度には、輸送容器に対する遮蔽評価手法の現状、輸送容器の遮蔽実験解析結果を調査するとともに、輸送容器の放射線遮蔽解析以外での原子力施設・加速器施設等でのモンテカルロ計算法の使用状況を調査した。

2年目の平成22年度には、海外の輸送容器の許認可におけるモンテカルロ遮蔽評価手法の位置づけを調査するとともに、策定するガイドライン(原案)が対象とする適用範囲及び記載内容の項目を決定した。記載内容のうち、輸送容器に対する放射線遮蔽安全評価手法の現状、モンテカルロ法の使用上の留意点、統一用語集等を取りまとめて作成した。また、過去に輸送容器体系で詳細に実施された3種類の放射線透過試験(中性子線源として ^{252}Cf を使用した遮蔽試験用輸送容器による試験)⁴⁾、(容器内に水の無い状態で使用済燃料を運ぶ輸送容器による試験)⁵⁾、(使用済燃料を1体のみ運ぶ輸送容器による試験)⁶⁾に基づき遮蔽ベンチマーク解析を実施した(計算結果はガイドライン(原案)の附録として添付)。

最終年度である平成23年度には、ガイドライン(原案)の完成に向けて、妥当な計算結果を得るための計算プロセスを明確化するとともに、中性子とガンマ線の線種の違いによる計算結果に対する統計指標の考え方及び解の精度(Precision)・正確度(Accuracy)の評価方法に係る判定基準の設定法を検討した。また、現在日本国内で使用されている代表的なPWR及びBWRからの使用済燃料輸送容器に対する遮蔽ベンチマーク解析を行い、本研究で平成20年度後半に測定した使用済燃料輸送容器外側での中性子及びガンマ線の線量当量率の実測値³⁾との比較評価を実施した(計算結果はガイドライン(原案)の附録として添付)。

2.2 ガイドライン原案の作成方針と概要

本研究で策定するガイドライン(原案)の目的は、モンテカルロ法に基づく放射線遮蔽計算手法を効果的且つ保守的に使用するための基本的考え方、モンテカルロ法に基づいた遮蔽計算手法に特有なパラメータの設定方法及び計算結果の評価方法の手引きを、輸送容器の許認可業務に関わる規制当局及び申請に関わる事業者提供することである。

このガイドライン(原案)の利用者は、規制当局、事業者、研究者等を想定している。規制当局にとっては、輸送容器の設計承認申請書に記載された内容が安全上問題ない評価手法によっていることを検証するための指針として、事業者にとっては輸送容器の設計が妥当な遮蔽評価手法に基づ

いて行われていることを規制当局に説明するための指針として利用されることになる。これに加えて、モンテカルロ法に基づいた遮蔽計算に必要な計算パラメータの設定値や計算結果の評価手法の手引きを提供するものとなるため、輸送容器の設計段階における評価指針としての利用もできる内容とする必要がある。

このため、ガイドライン(原案)においては、モンテカルロ法に基づく遮蔽計算によって得られた輸送容器に対する遮蔽計算結果の妥当性の判断が客観的に行えるようにすることを目的に、計算過程、具体的には、計算条件の設定方法、モンテカルロ法に必要なパラメータの適切な設定方法及び計算結果に付随するモンテカルロ法に特有な統計量の判定方法に対して、要所々々にチェック項目を設定した流れ図を作成した。このチェック項目を評価することで、評価結果の妥当性の判断が合理的に行えるようにした。流れ図に組み込まれたチェック項目に対する適否を確認することで、規制当局は申請書に記載された内容が適切な手法に基づき遮蔽評価がなされたものであることが確認でき、事業者は容器の設計が適切な遮蔽評価手法に基づきなされていることを規制当局へ説明することができる。また、流れ図及びチェック項目は簡潔明瞭にまとめており、規制当局と事業者は、統一された安全評価の考え方に基づき、かつ同一の評価尺度で評価手法の確認作業が行なえるように配慮した。また、本研究で数多く実施した遮蔽ベンチマーク解析の結果、ガンマ線による放射線寄与を評価する際には、計算結果に付随する統計量の目標値を必ずしも満足できない場合があることが明らかとなった。このような、統計量の目標値を満足しない場合に対して、計算結果の正当性を示すために必要な評価方法をまとめ、結果の妥当性が判断可能であるように配慮した。

なお、ガイドライン(原案)の内容について、広く関係者の合意を得るため、放射線遮蔽に対して知見を有する研究機関、輸送容器の許認可業務に関わる規制当局、輸送容器の申請者、クロスチェック機関及び輸送容器設計メーカーからなる有識者で構成される委員会(「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」特別専門委員会)を、平成21年度～23年度まで、一般社団法人日本原子力学会に設置し、適宜、ガイドラインの目的、適用範囲、策定の方角性、内容等について議論し、本海上技術安全研究所報告の別添として掲載するガイドライン原案をとりまとめた。表・1に委員構成を示す。

表－1 「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」特別専門委員会 委員構成(所属は平成 23 年度当時)

種別	氏名	所属
主査	坂本 幸夫	独立行政法人日本原子力研究開発機構
幹事	谷内 廣明	トランスニュークリア株式会社
	松本 務	株式会社オー・シー・エル
委員	大石 晃嗣	清水建設株式会社
	奥田 泰久	独立行政法人原子力安全基盤機構
	菊池 晴晃	原燃輸送株式会社
	黒澤 正彦	株式会社東芝
	佐藤 理	三菱総合研究所
	澤村 英範	MHI 原子力エンジニアリング株式会社
	清水 大輔	株式会社オー・シー・エル
	月山 俊尚	日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社
	中島 宏	独立行政法人日本原子力研究開発機構
	山野 直樹	国立大学法人福井大学
事務局	小田野直光	独立行政法人海上技術安全研究所
	平尾 好弘	独立行政法人海上技術安全研究所
	大西 世紀	独立行政法人海上技術安全研究所
	浅見 光史	独立行政法人海上技術安全研究所
関係省庁	国土交通省海事局検査測度課	
	経済産業省原子力安全・保安院	
	内閣府原子力安全委員会	

3. 結論

輸送容器外表面近傍の放射線実測データと、モンテカルロ法に基づく放射線遮蔽計算の結果との比較評価により、モンテカルロ法に基づく遮蔽計算の持つ保守性を確認するとともに、計算条件の設定方法、モンテカルロ法に必要なパラメータの適切な設定方法及び計算結果に付随するモンテカルロ法に特有な統計量の判定方法をまとめてガイドライン(原案)を策定した。

モンテカルロ法に基づく放射線遮蔽計算は、本研究で対象とした輸送容器のみならず、原子力発電施設、核燃料等再処理施設、高エネルギー加速器施設(医療用、研究用)に対する遮蔽評価にも利

用可能である。しかし現状では、遮蔽安全評価の標準的手法をまとめたガイドラインがないことから、モンテカルロ法に基づく放射線遮蔽計算が許認可申請で使用された実績は少なく、また、その少ない実績においても、手法を検証するための膨大な資料を作成することが要求されている。したがって、本研究で策定したガイドライン(原案)は、輸送容器の安全審査を実施する規制当局、輸送容器の許認可申請を行う事業者のみならず、一般的な遮蔽解析に携わる事業者、原子力研究者にも広く有効に活用されることが期待できる。

謝 辞

本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

また、ガイドライン(原案)の審議を目的に日本原子力学会に設置した「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」特別専門委員会の委員各位には、本研究を進める上で、示唆に富んだ貴重なご意見を数多く頂いた。ここに深く感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) W. A. Rhoades et.al.: The DOT3.5 Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code, CCC0-276, Oak Ridge National Laboratory, (1975).
- 2) M. Asami, et.al.: Application of Dose Evaluation of the MCNP Code for the Spent Fuel Transport Cask, Progress in Nuclear Science and Technology, **2**, (2011), pp.855-859.
- 3) 文部科学省: 平成 20 年度国立機関等原子力試験研究成果報告書, (2009), pp.38-1~38-2.
- 4) 井上正明他: モンテカルロ法による遮蔽解析(その 1) 50 トン級キャスクの中性子遮蔽性能への適用事例, 電力中央研究所研究報告, **381034**, (1982).
- 5) H. F. Locke: Summary of the Results of the Comparison of Calculations and Measurements for the TN12 Flask Carried Out under the NEACRP Intercomparison of Shielding Codes, NEACRP-L-339, (1992).
- 6) S. Tanaka et.al.: Shielding Experiments for A Shielding Safety Evaluation Code System

of Spent Fuel Transport cask, Proceedings of
the Sixth International Conference on
Radiation Shielding, (1983).

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 ガイドライン原案

目次

1.	はじめに	53
1.1	背景	53
1.2	目的	53
1.3	適用範囲	53
1.4	構成	53
2.	放射性物質輸送容器の特徴	55
2.1	はじめに(核燃料サイクルにおける輸送の位置づけ)	55
2.2	使用済燃料輸送容器及び使用済燃料輸送貯蔵(兼用)容器	55
2.2.1	使用済核燃料輸送容器及び使用済燃料輸送貯蔵(兼用)容器の概要	55
2.2.2	放射性物質等の輸送に関する日本の法令	56
(1)	危険物安全輸送の国際的な規制枠組み	56
(2)	核燃料物質等の輸送に関する日本の法令規則	56
2.3	放射性物質等の輸送区分	60
2.4	核燃料輸送物の設計承認申請の手順	61
2.5	核燃料輸送物の放射線遮蔽機能	61
2.6	使用済核燃料輸送容器の遮蔽計算	65
(1)	遮蔽設計条件(収納物仕様)	65
(2)	放射線源強度	65
(3)	使用済燃料輸送容器の遮蔽設計	65
(4)	遮蔽設計基準	66
2.7	離散座標法及びモンテカルロ法による輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較	67
2.8	海外におけるモンテカルロ遮蔽計算の審査指針	78
(1)	日本国内	78
(2)	米国	78
(3)	欧州	79
3.	詳細な説明を要する場合の資料文書化方法	81
3.1	遮蔽解析の目的	81
3.2	遮蔽設計の方法	81
3.3	遮蔽設計条件の記述	81
3.4	遮蔽解析手法	81
3.5	遮蔽解析結果の評価	82
3.6	参考文献	82
4.	使用済燃料輸送容器/輸送貯蔵(兼用)容器の遮蔽設計に関する審査項目	83

4.1	遮蔽解析の目的.....	83
4.2	遮蔽設計の方法.....	83
4.3	遮蔽設計条件の記述.....	83
4.4	遮蔽解析手法	84
4.5	遮蔽解析結果の評価.....	84
4.6	参考文献.....	85
5.	モンテカルロ法に基づいた遮蔽計算手法	86
5.1	はじめに.....	86
5.2	適切な計算を行うための計算流れ	87
5.3	使用済燃料輸送容器体系で使用が推奨される分散低減法と使用時の留意点	93
5.3.1	分散低減法の概要.....	93
(1)	打ち切り法に基づく分散低減法の概要.....	93
(a)	エネルギー・カットオフ	93
(b)	ヒストリ・カットオフ、計算時間カットオフ	93
(c)	線源カットオフ	94
(2)	非アナログモンテカルロ法に基づく分散低減法の概要.....	94
(a)	セル・インポートランス法	94
(b)	ウェイト・ウィンドウ法	95
(c)	線源バイアス法.....	97
(d)	線源バイアス法とウェイト・ウィンドウ法の一貫性.....	97
(e)	ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータ	100
5.3.2	各分散低減法を輸送容器体系へ適用する際の留意点	102
(1)	エネルギー・カットオフ	102
(2)	線源カットオフ	102
(3)	セル・インポートランス法とウェイト・ウィンドウ法	107
(a)	分散低減のための空間領域分割厚さ.....	108
(b)	分散低減法のための軸方向セル分割の結合部	110
(c)	分散低減法のための径方向セル分割の結合部	111
(d)	スーパーインポーズドインポートランスメッシュ	111
(e)	ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータの使用方法	112
(4)	線源バイアス法	115
5.4	輸送容器体系で使用が推奨されるタリーと使用時の留意点	117
5.4.1	モンテカルロ法を用いた遮蔽計算で使用するタリーの概要 ⁽¹⁾	117
(1)	サーフェイスクロッシングエスティメータ	117
(2)	トラックレングスエスティメータ(セル形状、メッシュ形状).....	117
(3)	ネクストイベントエスティメータ (点形状、円環形状).....	118

5.4.2	各種タリーを輸送容器へ適用する際の留意点	119
(1)	サーフェイスクロッシングエスティメータ	119
(2)	トラックレングスエスティメータ (セル形状、メッシュ形状)	119
(3)	ネクストイベントエスティメータ(点形状、円環形状).....	120
(4)	設定方法の実例	121
5.5	MCNP で評価される統計指標とその概要	122
(1)	タリーの分散	123
(2)	相対誤差	123
(3)	Variance of the Variance	125
(4)	Figure of Merit (FOM)	125
(5)	確率分布関数	126
(6)	その他.....	127
5.6	統計指標の判定基準及び判定における留意点	131
6.	おわりに	133
附録 1	用語と定義	134
附録 2	車両運搬確認申請書、容器承認申請書及び核燃料輸送物設計承認申請書に添付する説明書の記載要領	141
附録 3	ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータを使用したウェイト・ウィンドウの作成方法 (密度減少法及びタリー移動法).....	143
附録 4	輸送容器の遮蔽安全設計に使用される線量換算係数.....	162
附録 5	モンテカルロ法を用いた遮蔽計算コードで使用される乱数	166
附録 6	輸送容器体系で行われた放射線透過試験のベンチマーク解析	171

1. はじめに

1.1 背景

放射性物質輸送容器の放射線遮蔽安全解析では、近年の計算技術の高度化と計算機の性能向上が反映され、より精密な現実的な幾何形状の考慮が可能であり、高精度に解析を実施できるモンテカルロ法を使用した計算手法の導入が図られつつある。しかしながら、現時点ではモンテカルロ法に基づいた放射性物質輸送容器の遮蔽計算及び計算結果の評価手法が確立されておらず、また安全裕度が明らかになっていない。この理由から、放射性物質輸送容器の設計承認申請では未だにモンテカルロ法による遮蔽安全評価手法が利用されていない。したがって、モンテカルロ法に基づく遮蔽計算手法を放射性物質輸送容器に使用するためには、遮蔽計算及び計算結果の評価手法の手引きが必要である。

1.2 目的

このガイドラインの目的は、モンテカルロ法に基づいた遮蔽計算手法を使用する際に、効果的且つ保守的に使用するための基本的考え方、モンテカルロ法に基づいた遮蔽計算手法に特有なパラメータの設定方法及び計算結果の評価方法の手引きを、放射性物質輸送容器の申請に関わる事業者及び認可業務に関わる規制当局に提供することにある。したがって、このガイドラインは、事業者は容器が妥当な遮蔽評価手法に基づいて設計されていることを規制当局に説明するために、規制当局は申請書に記載された内容が安全上問題ない評価手法で検討されていることを確認するために利用されることになる。

また、このガイドラインは、モンテカルロ法に基づいた遮蔽計算に必要な設定値や計算結果の評価方法の手引きを提供するものであるため、輸送容器の設計段階の評価指針としての利用ができる。したがって、放射性物質輸送容器の設計者及び放射性物質輸送容器の遮蔽設計に対する適正な合理化の手助けにも利用されることになる。

1.3 適用範囲

このガイドラインは、放射性物質輸送容器のうち、使用済燃料輸送容器(湿式/乾式)及び使用済燃料輸送貯蔵(兼用)容器を対象とし、これら容器に必要な放射線遮蔽計算、放射線遮蔽設計及び文書化方法に関する手引きを提供する。

1.4 構成

このガイドラインは、モンテカルロ法に基づく遮蔽計算手法で、放射性物質輸送容器の放射線遮蔽に必要な、遮蔽材の具体的な寸法を求めるために必要とされる方法を提供するものである。これは、放射性物質輸送容器の遮蔽安全評価にモンテカルロ法に基づいた遮蔽計算手法を適用する際に、これまでに妥当性の確認された計算手法及び計算結果の評価手法に関する手引きを提供するものである。的確な計算及び計算結果の評価を行うために必要なプロセスを詳述している。

このガイドラインを補完するために、下記の附属書が提供されている。それらは次の内容からなるものである。

- ・モンテカルロ法に基づく遮蔽評価手法で使用する用語
モンテカルロ法に基づく遮蔽計算で使用する用語をまとめた。
- ・輸送容器体系で行われた放射線透過試験のベンチマーク解析

輸送容器体系での放射線測定結果と比較することで、この体系でどの程度の計算精度を持った計算結果が得られるかが確認できる。また、同体系で従来輸送容器の遮蔽計算に使用されている離散座標法の計算も行っており、従来使用されている計算手法による結果と比較することで安全裕度の確認ができる。

2. 放射性物質輸送容器の特徴

2.1 はじめに(核燃料サイクルにおける輸送の位置づけ)

核燃料にウランを用いる原子力発電では、ウラン鉱石を採掘して核燃料物質を作り、核燃料体に加工し原子炉内で核分裂反応させて熱エネルギーを発生させ、蒸気を作って発電する。約3～4年の間発電した後に、原子炉から使用済燃料として取出して再処理工場に送り、残存ウラン及び生成されたプルトニウムと残渣成分に分離して、回収したウランは再加工され核燃料体に使用する。エネルギー資源に乏しい我が国では、核燃料物質の流れは精製→転換→濃縮→再転換→成型加工→核分裂反応(原子炉)→再処理→転換と環状になっており、これを核燃料サイクルという。

核燃料サイクル中の各工程間は、それぞれの施設での生成物を次の施設に運ぶ必要がある。運ぶべきウランの形態・性状に応じて各工程施設間を結ぶ作業が「輸送」である。したがって、核燃料サイクルを円滑に機能させ、最大の目的である発電を継続する上で、輸送は欠くことのできない重要なものである。

2.2 使用済燃料輸送容器及び使用済燃料輸送貯蔵(兼用)容器

核燃料サイクルを形成する「輸送」では、使用済燃料、新燃料及び廃棄物等、様々な種類の輸送がある。これらの輸送には、収納される収納物の性状に対応した輸送容器が設計され、輸送される。本章では種々ある輸送容器のうち、輸送頻度が高く、遮蔽構造の複雑な使用済核燃料輸送容器及び使用済燃料輸送貯蔵(兼用)容器に限定して、輸送に関する法令、安全解析事項について述べる。

2.2.1 使用済核燃料輸送容器及び使用済燃料輸送貯蔵(兼用)容器の概要

使用済核燃料輸送容器には湿式容器と乾式容器がある。湿式容器の特徴は輸送時に使用済燃料の収納部が水で満たされており、この水が燃料の冷却と遮蔽に使われている。乾式容器は使用済燃料の収納部に水が無く、代わりにアルミニウム合金等により除熱性能を高めたバスケットの中に燃料が収納されることで燃料の冷却が行われている。中性子遮蔽は本体胴の外側にレジン等の層が設けられる。湿式容器、乾式容器ともに直径は2～2.5m、高さは緩衝体を含めて5.5～6m、重量は70～110トン、収納可能な使用済燃料はPWR型燃料集合体で7～14体、BWR型燃料集合体では12～38体収納して輸送することができる。

一方、使用済燃料輸送貯蔵(兼用)容器は一般的に乾式容器である。特徴は使用済核燃料輸送容器の乾式容器の特徴に加え、多重蓋であること並びに容器底板及び蓋にも中性子遮蔽のためのレジンの層が設けられていることが挙げられる。また、収納可能な使用済燃料は、使用済燃料の冷却期間を延ばすことにより、使用済核燃料輸送容器よりも多く収納して輸送することができる。

2.2.2 放射性物質等の輸送に関する日本の法令

(1) 危険物安全輸送の国際的な規制枠組み

危険物の安全輸送に関する規制は、国際連合の「危険物輸送並びに化学物質の分類及び表示に係る世界調和システムに関する専門家委員会(国連経済社会理事会の下部組織)」で審議されるが、放射性物質輸送に関しては IAEA が委任されてその役割を果たしている。

IAEA は、加盟国内及び国際間輸送に関して、陸・海・空の輸送モードの放射性物質の安全輸送規則を作成している。この IAEA 放射性物質輸送規則は、加盟国及び関連する国際機関への勧告とされ、多くの加盟国で自国法令に取入れられている。日本の関係法令への取入れに際しては、原子力安全委員会及び放射線審議会の決定に基づいて行われる。

(2) 核燃料物質等の輸送に関する日本の法令規則

日本の核燃料物質等の輸送に関する法令規則類は IAEA の放射性物質安全輸送規則を取入れ、日本独自の法体系(危険物の種類毎に規制)に基づいて、法律を放射性物質の種類(核燃料、RI、放射性医薬品)毎に制定して実施されている。さらに、海上輸送については、IMO の SOLAS 条約を受けた船舶安全法、航空輸送については、ICAO の国際民間航空条約を受けた航空法、郵便については国際的には万国郵便条約、同等の内容の国内的には郵便法等で実施している。

核燃料物質等の輸送は「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(原子炉等規制法)」により、放射性物質等の輸送は「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律(障防法)」により別々に規制されている。核燃料物質等の輸送に関する法令、規則、告示、通達輸送モード毎に表 2-1 に示されるように制定されている。核燃料物質等を輸送する場合、事業所外と事業所内のそれぞれの輸送に対する規制がある。事業所内における輸送は行動や一般公衆とは関係のない範囲で管理される。核燃料物質等の輸送を規制する主務省庁分担は、事業所の内外、区分及び輸送モードの別により図 2-1(a)(b)に示すように定められている。発電炉用の核燃料サイクルにおける輸送は経済産業省と国土交通省が担当し、研究炉の燃料輸送及び放射性同位元素等の輸送は、文部科学省と国土交通省が担当する。なお、IAEA 規則では核燃料物質と放射性同位元素は放射性物質として一括されており、核分裂性輸送物に対する追加要件が設けられている。

核燃料物質等を事業所外で陸上輸送する場合、原子炉等規制法第 59 条の 2 第 1 項により布令又は省令で定める技術上の基準に従い保安上の措置を講じなければならない、同条第 2 項により災害の防止及び特定核燃料物質の防護のため必要ある場合は、主務大臣の確認を受けなければならないとされている。また、同法第 61 条の 42 及び 43 で運搬物の確認機関の指定、運搬方法の確認機関の指定が定められており、規則、告示等で詳細が定められている。公共の安全を図るため運搬の経路、日時等は都道府県公安委員会に届け出ることになっている。

核燃料物質等を海上輸送する場合、船舶安全法第28条により、危険物の船舶運送及び貯蔵に関する事項は命令によって定めるとされ、同様に規則、告示等で詳細が定められている。公共の安全を図るため運搬の経路、日時等は管区海上保安本部に届け出ることになっている。

核燃料物質等の航空輸送は航空法86条により原則的に禁止物件とされるが、同法施行規則第194条第2項により、各輸送物が技術基準に適合する場合は禁止物件に含まれないとしている。規則類は整備されているものの制約が大きく、航空輸送は行われていない。

表 2-1 核燃料物質等の輸送に係る規制法令⁽¹⁾

輸送モード	陸上輸送	海上輸送	航空輸送 ^(注2)
輸送システム	車両による道路輸送 ^(注1)	船舶(専用船、混載)による海上輸送	航空機(貨物機専用積載、旅客機混載)
法律・施工令・規則・告示等	核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規則に関する法律、同施工令 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 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技術上の基準に関する細目等を定める告示 核燃料物質等車両運搬規則 核燃料物質等車両運搬規則の細目を定める告示 核燃料物質等の運搬の届出等に関する内閣府令	船舶安全法・危険物船舶運送及び貯蔵規則 船舶による放射性物質等の運送基準の細目等を定める告示 船舶による危険物の運送基準等を定める告示 港則法、同施工令、同施行規則	航空法 航空法施行規則 航空機による放射性物質等の輸送基準を定める告示
通達等	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確認等の事務について(原子力安全・保安局長) 放射性同位元素等車両運搬規則関係取扱い容量及び核燃料物質等車両運搬規則関係取扱い容量について(貨物流通局長)	危険物船舶運送及び貯蔵規則に基づく放射性輸送物の安全の確認等について(海事局長) 放射性物質等運送届の提出等について(保警指第137号)	放射性物質等の輸送規制について(航空局長) 放射性輸送物輸送確認申請に添付する「輸送計画書」の記載事項等について(運航課長) 放射性輸送物確認申請書に添付する「安全解析書」の記載事項等について(運航課長)
共通法律・規則等	原子力災害対策特別措置法、同施行令、同施行規則		
安全協定・自主	事前説明、計画書の提出、輸送本部の設置・解散の報告、異常時通報、検査立会等		-

注1) 日本においては鉄道による貨物輸送は実施されていない。

注2) 核燃料サイクル関係の核燃料物質等の航空輸送はなく試料程度である。

(参考文献)

- (1) 有富正憲, 内野克彦, 志村重孝: 核燃料物質等の安全輸送の基礎, ERC 出版, 2007.
- (2) (社)日本原子力産業協会編: 放射性物質等の輸送法令集, 日本原子力産業協会, 2009.

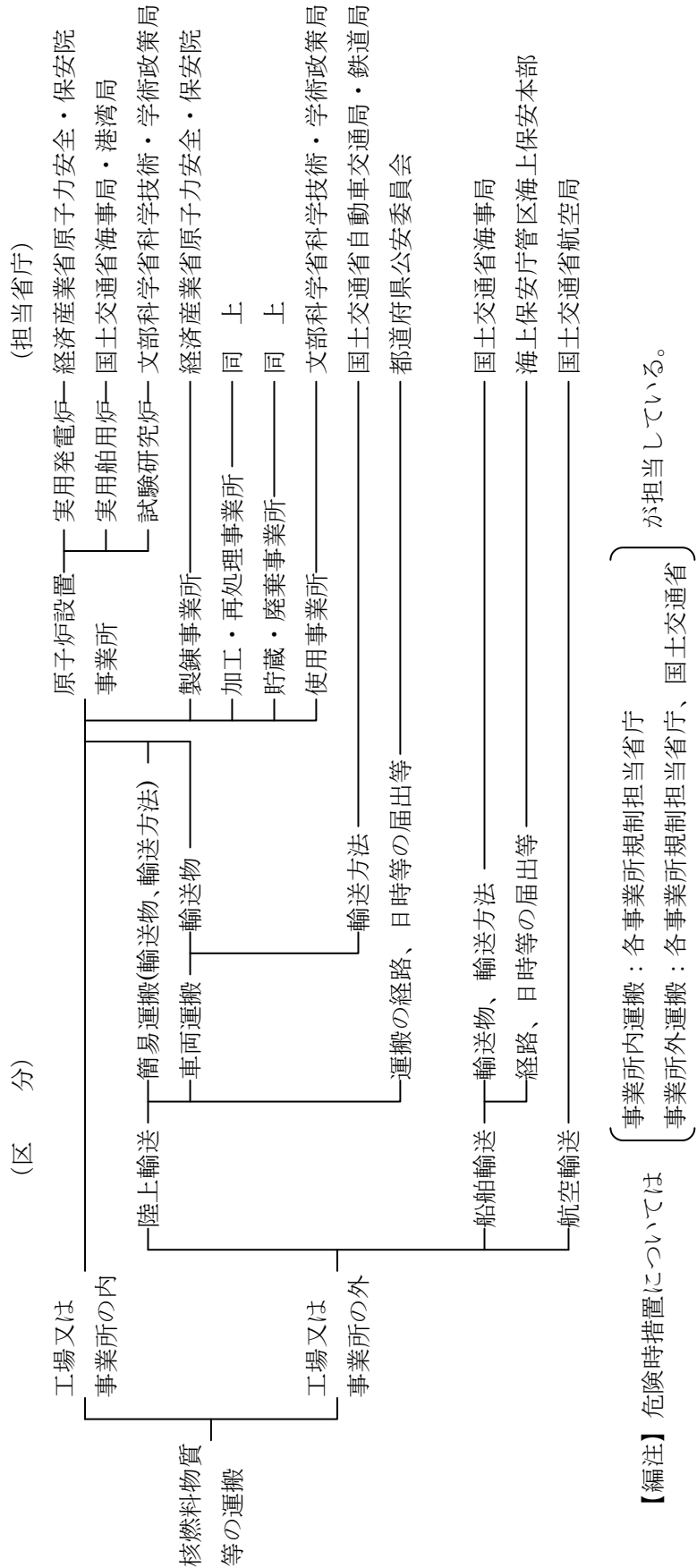


図 2-1(a) 核燃料物質等の運搬に関する基本体系⁽²⁾

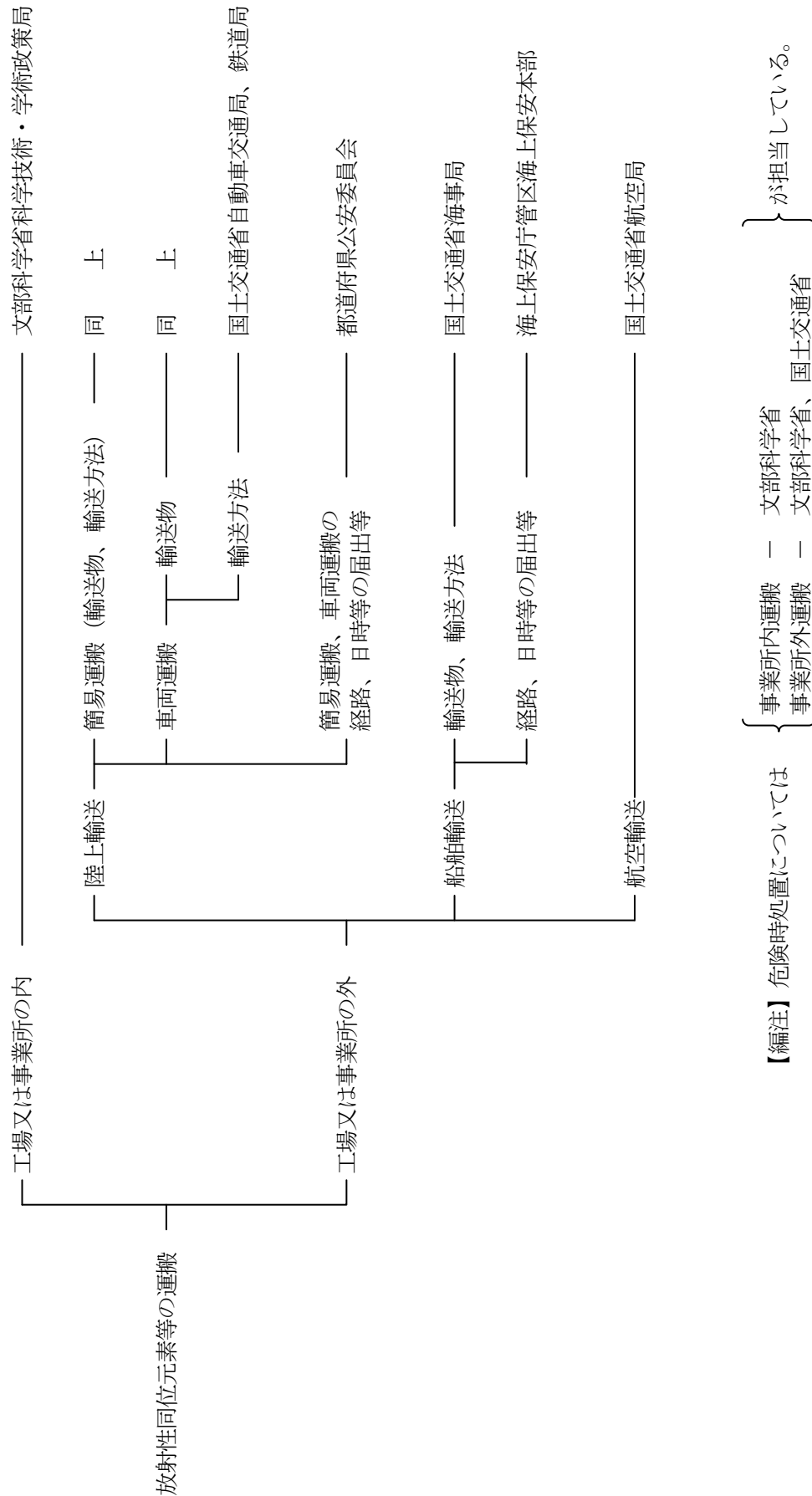


図 2-1(b) 放射性同位元素等の運搬に関する基本体系⁽²⁾

2.3 放射性物質等の輸送区分

放射性同位元素等を事業所外で運搬する場合には、原則として放射性輸送物として運搬しなければならない。放射性輸送物は、収納する放射エネルギー等により下記型式に区分される。

- ① L 型輸送物：1 輸送物中の放射性物質の収納量を極少量に制限することにより、その危険性を極めて小さなものに抑えたもの(日本だけの輸送物区分)。
- ② A 型輸送物：1 輸送物中の放射性物質の収納量を収納限度 A_1 又は A_2 以下の放射エネルギーを持つ放射性物質質量に制限し、A 型輸送物に係る技術上の基準及び A 型輸送物に係る一般試験基準(降雨、振動、取扱中の衝撃)に対する強度を持たせたもの。
- ③ IP 型輸送物：収納物の放射エネルギー濃度または表面汚染が一定限度以下のものであつて、危険性が少ないものに限定されている。輸送中に事故が発生しても、放射線障害が発生しないように、収納物と輸送容器の両方に基準が設けられている。収納物の種類によって IP 型輸送物は、IP-1 型、IP-2 型及び IP-3 型の 3 種類に分類され、次に示す性能基準が適用される。
 - ・ IP-1 型：「一般要件」の他に、どの辺の大きさも 10cm 以上とすること。
 - ・ IP-2 型：「IP-1 型輸送物の性能基準」の他に、一般の試験条件のうちの自由落下試験及び積重ね試験を行うとした場合に、放射性物質の漏洩及び表面における線量当量率等の基準を満足すること。
 - ・ IP-3 型：「IP-2 型輸送物の性能基準」の他に、一般の試験条件のうち水の吹付け試験及び貫通試験に対して、放射性物質の漏洩及び表面における線量当量率等の基準を満足すること。IP-3 型輸送物に対する試験条件は、固体の放射性物質を収納した A 型輸送物に対する一般の試験条件と同じである。
- ④ B 型輸送物：1 輸送物中に収納限度 A_1 又は A_2 を超える放射エネルギーを持つ放射性物質質量を収納し、輸送中に遭遇する大事故(火災、衝突、水没等)にも十分に耐えられるように、極めて強固な放射性輸送物としたもの。
 - ・ BM 型：国際輸送に当り、設計国、通過国及び使用国等、全ての国の当局から輸送物の安全性、輸送の安全性等に関する許可を受けなければならない輸送物。
 - ・ BU 型：設計国の許可をとれば、通貨国及び使用国は自動的にその安全性等に関する許可を与え、その使用を承認することができるようになっている輸送物。BM 型輸送物よりも厳しい技術上の基準に基づいて設計、試験される。
- ⑤ 核分裂性輸送物：平常の輸送及び事故時に遭遇しそうな条件のもとで未臨界が維持されるように梱包され、かつ輸送されなければならないもの。
- ⑥ 収納限度：A 型輸送物として輸送し得る収納放射性物質の放射エネルギー限度を示す数値を Bq 単位で表示したもの。各々の物質に対して決められている。この値は各々の物質の外部/内部被曝により人体に影響を与える限界値に対して十分な余裕を持って算出されている。A 型輸送物が事故で破損し、その一部が漏洩して、その内容物の一部を人が摂取しても影響を与えないようにこの収納限度が定められている。摂取の経路を厳密

に分析した Q システムによって A_1 値(特別形放射性物質)、 A_2 値(特別形放射性物質以外)が算出されている。

2.4 核燃料輸送物の設計承認申請の手順

核燃料物質等の輸送物で国による確認が必要とされる場合は、輸送区分のうち B 型(BM 型、BU 型)輸送物、0.1kg 以上の六フッ化ウランを収納する輸送物等である。陸上輸送あるいは海上輸送を伴う陸上輸送の場合は経済産業省に、また、海上輸送のみの場合は国土交通省に核燃料輸送物承認の申請をする。そのうち、輸送容器を繰返し輸送する場合には事前に経済産業省或いは国土交通省に輸送物の設計承認を申請することができる。これを受けた当局は輸送物の専門家の意見聴取の上、審査を行う。

輸送物の設計が技術基準に適合していれば設計承認書が交付され、引き続き容器承認申請がなされる。承認された設計どおりに輸送容器が製造され、製造時検査に合格していれば容器承認書が発行され登録される。登録容器の有効期間は 3 年である。

2.5 核燃料輸送物の放射線遮蔽機能

核燃料輸送物の放射線遮蔽機能に関する IAEA 放射性物質安全輸送規則の要求事項及び国内法を要約すると表 2-2 になる。これらの規則は、通常の輸送条件及び事故時輸送条件に曝されても使用済燃料を装荷した容器が性能を維持するものであることを要求する。通常の輸送条件は、平常の取扱あるいは輸送時に想定される小規模の事故を模擬したものである。事故時輸送条件(一般の試験条件及び特別の試験条件)は過酷な事故に遭遇しても輸送物が健全性を失わないことを証明するものである。

表から明らかなように、放射線遮蔽性能に関する国内規則は、IAEA 放射性物質安全輸送規則よりもさらに厳しい条件となっている。IAEA 放射性物質安全輸送規則では、平常輸送時における輸送容器表面から 2m の線量率が 0.1mSv/h と規定しているが、国内規則では輸送容器表面から 1m における線量率を 0.1mSv/h と規定している。

前述のように、放射性物質の輸送の中でも特に B 型に分類される使用済燃料の輸送については輸送規則に基づき、それぞれの省庁で安全審査を行っている。安全審査を受けるためには、輸送物(輸送容器+収納物)に対する安全解析書を提出することになる。表 2-3 は遮蔽に関して記載すべき解析項目、解析条件、解析方法、結果の要約をまとめる書式例である。

(参考文献)

- (1) IAEA Safety Standards for protecting people and the environment, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, TS-R-1, 2005.

表 2-2 放射線遮蔽安全機能に関する使用済燃料輸送容器の IAEA 輸送規則における

要求事項及び国内法との相違⁽¹⁾

条件	試験条件	線量当量限度	
		IAEA 輸送規則	国内
通常の輸送条件	—	輸送物表面<2mSv/h	
		輸送物表面から 2m <0.1mSv/h	輸送物表面から 1m ≤0.1mSv/h
一般の試験条件	水の吹付け試験(雨量 50mm/h 相当の水を 1 時間吹付け) 0.3m 自由落下試験(最大損傷を受ける方向で非降伏面に落下) 積重ね試験(輸送物自重の 5 倍以上の圧縮荷重で 24 時間放置) 貫通試験(直径 3.2cm, 重さ 6kg の棒を 1.0m 高さから垂直落下)	輸送物表面から 2m <0.1mSv/h	
		試験後の輸送物表面における放射線の増加が 20% 未満であること	外表面の最高線量当量率の著しい増加がなく、かつ ≤2mSv/h
特別の試験条件	落下試験 I(9m の高さから水平な非降伏面に落下) 落下試験 II(直径 15cm の軟鋼棒上に 1m の高さから落下) 耐火試験(平均火炎温度 800℃ の熱的環境に 30 分間放置) 浸漬試験(深さ 15m 相当の水圧下に 8 時間以上浸漬) (37PBq 以上の使用済燃料：深さ 200m 相当の水圧下で 1 時間以上浸漬) 環境試験(周囲温度 38℃ の環境に 1 週間放置)	耐火試験の後、輸送物表面から 1m <10mSv/h	

表 2-3 使用済核燃料輸送物安全解析書の要約記載書式の例 (1/2)

条件	解析項目	解析条件	解析方法	解析結果																							
遮 蔽	線 源	燃料集合体：PWR 型__本 解析は下記条件に対して行う。 <table><tr><td></td><td>Case.1</td><td>Case.2</td></tr><tr><td>燃焼度 (MWd/MTU)</td><td></td><td></td></tr><tr><td>比出力 (MW/MTU)</td><td></td><td></td></tr><tr><td>照射日数 (day)</td><td></td><td></td></tr><tr><td>冷却日数 (day)</td><td></td><td></td></tr></table>		Case.1	Case.2	燃焼度 (MWd/MTU)			比出力 (MW/MTU)			照射日数 (day)			冷却日数 (day)			γ線源強度 燃焼計算コード__を用いて計算する。	<table><tr><td rowspan="2"></td><td colspan="2">γ線源強度 (MeV/sec 基)</td></tr><tr><td>Case.1</td><td>Case.2</td></tr><tr><td colspan="3">核分裂生成物からのγ線合計</td></tr></table>		γ線源強度 (MeV/sec 基)		Case.1	Case.2	核分裂生成物からのγ線合計		
				Case.1	Case.2																						
燃焼度 (MWd/MTU)																											
比出力 (MW/MTU)																											
照射日数 (day)																											
冷却日数 (day)																											
	γ線源強度 (MeV/sec 基)																										
	Case.1	Case.2																									
核分裂生成物からのγ線合計																											
解 析	仕 様		構造材放射化線源について考慮する。	<table><tr><td rowspan="4">構造材の位置</td><td colspan="2">構造材放射化線源強度 (TBq/sec 基)</td></tr><tr><td>Case.1</td><td>Case.2</td></tr><tr><td>上部ノズル</td><td></td></tr><tr><td>上部プレナム</td><td></td></tr><tr><td>下部ノズル</td><td></td><td></td></tr></table>	構造材の位置	構造材放射化線源強度 (TBq/sec 基)		Case.1	Case.2	上部ノズル		上部プレナム		下部ノズル													
			構造材の位置	構造材放射化線源強度 (TBq/sec 基)																							
Case.1	Case.2																										
上部ノズル																											
上部プレナム																											
下部ノズル																											
解 析	仕 様		中性子線源強度 燃焼計算コード__を用いて計算する。なお実効増倍率は__とし、 ²³⁹ Pu の核分裂スペクトルとする。	<table><tr><td></td><td>Case.1</td><td>Case.2</td></tr><tr><td>中性子線源強度 (neutrons/sec/基)</td><td></td><td></td></tr></table>		Case.1	Case.2	中性子線源強度 (neutrons/sec/基)																			
				Case.1	Case.2																						
中性子線源強度 (neutrons/sec/基)																											

表 2-3 使用済核燃料輸送物安全解析書の要約記載書式の例 (2/2)

条件	解析項目	解析条件	解析方法	解析結果									
						輸送物表面			表面より 1m の点				
遮 蔽 解 析	最大線量 当量率	・平常輸送時 輸送容器の変形はない。 ・一般の試験条件下 フィン及び前後部の緩 衝体の変形量を考慮す る。 ・特別の試験条件下 レジン層領域内レジン 及び前後緩衝体内の木 材を無視する。	以下に示す方法により最大 線量当量率を評価する。 ・ γ 線 放射線輸送計算コード__を 用いて計算する。幾何形状 は二次元軸対称のものを使 用する。 ・中性子 放射線輸送計算コード__を 用いて計算する。幾何形状 は二次元軸対称のものを使 用する。			側面	蓋部	底部	側面	蓋部	底部		
				平常輸 送時	γ 線								
					中性子								
					合計								
				一般の試 験条件	γ 線								
					中性子								
					合計								
				特別の試 験条件下	γ 線								
					中性子								
					合計								
				基準値	通常輸送 時	2,000 μ Sv/h			100 μ Sv/h				
					一般の試 験条件下	2,000 μ Sv/h			-				
					特別の試 験条件下	-			10,000 μ Sv/h				

2.6 使用済核燃料輸送容器の遮蔽計算

使用済燃料輸送容器は、収納物から放出される放射線を輸送法令に定める通常輸送時、一般の試験条件及び特別の試験条件における線量当量率基準を超えないよう遮蔽する構造とする必要がある。容器の遮蔽構造を設計するために検討の必要な項目は、大きく分けると以下の4つとなる⁽¹⁾：

(1) 遮蔽設計条件(収納物仕様)

使用済燃料輸送容器の遮蔽設計を行うにあたり、通常設計条件として与えられる条件は、以下に示す収納燃料の核物質の量と照射履歴である。

- ・ ウラン重量
- ・ ウラン濃縮度
- ・ 燃料照射履歴(比出力、燃焼度、冷却期間)

(2) 放射線源強度

使用済燃料の線源として、燃料有効部における核分裂生成物とアクチニド核種、及び中性子の照射により放射化される燃料集合体端部の構造材を考慮する必要がある。照射中に生成したアクチニド核種と残存する核分裂性物質からは中性子が放出され、核分裂生成物、アクチニド核種及び放射化した構造材からは γ 線が放出される。さらに、中性子の遮蔽に伴う二次 γ 線も考慮する必要がある。

(3) 使用済燃料輸送容器の遮蔽設計

遮蔽設計の対象となる放射線は、 γ 線と中性子である。そのため、遮蔽設計を行う場合、両方の遮蔽材の組合せが重要となる。

① 遮蔽材の選択

高燃焼度燃料に対して、冷却期間の短い場合は γ 線が相対的に優勢であるが、冷却期間が長くなると半減期の長い ^{244}Cm (半減期：18.10year)を線源とする中性子線源の寄与が大きくなっていく。したがって、与えられた使用済燃料の仕様により γ 線遮蔽材と中性子遮蔽材を選択する必要がある。

② 中性子遮蔽材

中性子遮蔽には水素が有効な元素であるため、中性子遮蔽材として水素を多く含む物質が使用される。国内の使用済燃料輸送容器に使用されている中性子遮蔽材は、レジン及び水である。なお、中性子遮蔽では二次 γ 線の放出を伴うため、熱中性子を吸収するボロンを中性子遮蔽材に添加することが多い。

③ γ 線遮蔽材

輸送容器の構造材に使用される炭素鋼やステンレス鋼は、同時に γ 線遮蔽材としても機能する。低エネルギーの γ 線はこれらの構造材で十分減衰する。また、使用済燃料では3MeV以上の高エネルギー γ 線は強度が小さいことから、遮蔽設計上影

響が小さく、遮蔽上問題となるのは1~2MeVの γ 線である。このエネルギー領域では、種々の物質の質量減衰係数がほぼ同じであるため、密度の大きな物質ほど単位厚さ当りの γ 線遮蔽能力が優れていることになる。よって、容器に使用される主な γ 線遮蔽材は鉄及び鉛である。

④ 線源分布の考慮

使用済燃料の燃焼度の軸方向分布に対応して、線源強度も軸方向に分布を生じる。この分布は燃焼度による影響の大きい中性子線源で特に重要である。

⑤ ストリーミングの考慮

輸送容器にはバルブ、プラグ等の貫通孔が必要であり、また中性子遮蔽材の膨張代空間やトラニオン取付け部のように、構造上遮蔽材を十分に配置できない箇所が生じ、そこからストリーミングが生じる。輸送容器の設計上、ストリーミングを避けるために、これらの貫通孔等はできるだけ線源を直視しない箇所に設けられているが、これらの箇所の線量評価は遮蔽解析にとっても困難の伴う箇所である。

(4) 遮蔽設計基準

輸送容器の遮蔽設計基準として、次の法令基準を満足する必要がある。

① 通常の輸送条件

- ・ 輸送物表面の線量当量率が2mSv/hを超えないこと。
- ・ 輸送物表面より1m離れた点の線量当量率が0.1mSv/hを超えないこと。

② 一般の試験条件

- ・ 輸送物表面の線量当量率が2mSv/hを超えないこと。また、試験後の輸送物表面の最高線量当量率に著しい増加がないこと。

③ 特別の試験条件

- ・ 輸送物表面より1m離れた点の線量当量率が10mSv/hを超えないこと。

通常、大型の容器(例えば使用済燃料輸送容器)においては、表面より1mの点の線量当量率の方が厳しい条件となる。そのため、ストリーミングや部分線源を考慮する必要のある部分を除いて、表面より1mの点を基準に遮蔽設計をする場合が多い。

(参考文献)

- (1) (財)電力中央研究所バックエンド研究会編:核燃料輸送工学, 日刊工業新聞社, 1998.

2.7 離散座標法及びモンテカルロ法による輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較

2章6節で、容器の遮蔽構造を設計するために検討の必要な項目が大きく4つに分けられることが明らかとなった。本節では、国内の輸送容器設計に従来使用されてきた離散座標法における評価手法を項目別にまとめ、「日本原子力学会標準 使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準 2006(日本原子力学会)」⁽¹⁾との対応付け、及びモンテカルロ法における評価手法との対応付けを行った。本節では、2章6節での4つの分類に加えて、原子個数密度及び遮蔽材劣化を追加した5つの分類とした。離散座標法及びモンテカルロ法による輸送容器の遮蔽設計評価手法を(1)-(5)の項目に分類し、比較した表を表2-4(1)～2-4(10)に示す。

(参考文献)

- (1) 日本原子力学会標準: 使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準: 2006(AESJ-SC-F006:2006), 社団法人日本原子力学会 2006.

表 2-4(1) 輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較 (収納物仕様)

小項目	学会標準 との対応	従来設計方法例	モンテカルロ遮蔽解析
初期濃縮度	c) 1.7)	・ 事業者提示データを設定	
ウラン重量	c) 1.7)	・ 保守側の重量を設定	
燃焼度	c) 1.7)	・ 最高燃焼度、平均燃焼度を区別して燃焼度を設定	
ピーキング ファクター	c) 1.7) 附属書 18	・ 燃料有効部の上下端部：平均燃焼度以下の領域 ・ 燃料有効部の中央部：平均燃焼度以上の領域 ・ それぞれの領域で燃料の軸方向分布を安全側に包絡する線源強度を設定。 ・ 燃料中央部と端部では線源強度が大きく異なることから、軸方向の線源強度を適切に考慮するためにピーキングファクターを導入する。	
比出力	c) 1.7)	・ 事業者提示データを使用	
照射日数	c) 1.7)	・ 燃焼度/比出力から算出	
冷却日数	c) 1.7)	・ 最短期間を設定	
燃料体数、配置	c) 2.1.7.3) 附属書 24	・ 実輸送を考慮した燃料体数・配置を考慮 ・ 最高燃焼度燃料を中心配置 ・ 平均燃焼度燃料を外周配置	
構造材 及び BP 仕様	c) 1.7) 附属書 19	・ Co 重量、熱中性子束、BP 棒集合体の照射条件は事業者提示データを使用	

表 2-4(2) 輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較 (放射線源強度(1/2))

小項目	学会標準との対応	従来設計方法例	モンテカルロ遮蔽解析
線源	c) 1.1) ～ c) 1.8)	- γ線源：収納物の核種組成又は線源強度計算結果より算出 - 燃料中の放射性核種及び構造材中の ^{60}Co を考慮 - 中性子源：自発核分裂、(α, n)反応による中性子及び核分裂性核種による二次中性子を考慮 - 中性子スペクトル：自発核分裂、(α, n)反応、核分裂中性子源	
エネルギー群構造	c) 1.2) 附属書 15	- DLC-23/CASK 群構造 - SCALE 27N-18G 群構造 - FPγ線のエネルギー群構造の変換(ORIGEN2→上記ライブラリ)は線源の合計エネルギーを保存するように割る	- 出力したい群を設定 - 入力するエネルギー群構造は ORIGEN2 の群構造のまま
構造材及びBP放射化	c) 1.7) 附属書 19	- 構造材中の $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ の反応で生成される ^{60}Co を考慮 - 構造材等放射化線源の計算には次の簡易評価式を使用する： $A = N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot T_1)] \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$ A: 放射化核種(^{60}Co)の放射能(Bq)、N_0: ターゲット核種(^{59}Co)の個数(atoms) σ: 2200m/s の中性子による ^{59}Co の(n, γ)反応断面積(cm^2)(37.2(barn)=$37.2 \times 10^{-24}(\text{cm}^2)$) ϕ: 炉内照射熱中性子束($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)、$\lambda$: ^{60}Co の崩壊定数、T_1: 照射期間(day)、T_2: 冷却期間(day)	
構造材及びBP放射化スペクトル	c) 1.7) 附属書 19	1.17MeV、1.33MeV の線スペクトルを群化	1.17MeV、1.33MeV の線スペクトル (Discrete Distribution)

表 2-4(3) 輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較 (放射線源強度(2/2))

小項目	学会標準 との対応	従来設計方法例	モンテカルロ遮蔽解析
全中性子源強度	c) 1.3) 附属書 16	- 一次中性子源強度に実効増倍率を考慮 - 次式により評価： $N_S = \frac{N_0}{1 - k_{\text{eff}}}$ N_S: 体系の中性子増倍効果を考慮した全中性子源強度、N_0: 一次中性子源強度、 k_{eff}: 燃焼度を考慮した体系の実効増倍率(k_{eff}には+3σを考慮)	
中性子増倍率 の評価	c) 1.3) 附属書 16	中性子増倍率の評価の際に考慮する核種： アクチニド： ^{235}U 、 ^{236}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu 、 ^{242}Pu 核分裂生成物： ^{99}Tc 、 ^{103}Rh 、 ^{131}Xe 、 ^{133}Cs 、 ^{143}Nd 、 ^{145}Nd 、 ^{147}Pm 、 ^{149}Sm 、 ^{151}Sm 、 ^{152}Sm 、 ^{153}Sm 、 ^{155}Gd	
中性子 スペクトル	c) 1.4) 附属書 17	^{239}Pu の核分裂スペクトル	Watt 核分裂スペクトル(核種は従来と同じ ^{239}Pu)

表 2-4(4) 輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較 (遮蔽設計(1/4))

小項目	学会標準との対応	従来設計方法例	モンテカルロ遮蔽解析
解析モデル (考え方)	c) 2.1.1) ～ c) 2.1.7)	・ 通常輸送時、一般の試験条件及び特別の試験条件における構造強度設計及び除熱設計の結果を反映して収納物の移動及び変形並びに遮蔽体の移動、変形及び密度と組成変化を考慮して設定する。 ・ 特別の試験条件において遮蔽材が溶融又は分解焼失する場合(例：鉛、レジン)はモデル化に反映する。 ・ 一般の試験条件及び特別の試験条件において遮蔽材が移動又は流出する場合はモデル化に反映する。 ・ 遮蔽体の寸法公差を考慮してモデル化する。 ・ 領域を均質化する場合には、それにより線量当量率が過小評価とならないようにモデル化する。 ・ ボイド、ストリーミングパス及び変則的な形状がある場合には、その影響を考慮してモデル化する。	モンテカルロ遮蔽解析
解析モデル (実際)	c) 2.1.1) ～ c) 2.1.7)	・ 2次元 $r-z$ モデル ・ トラニオン部等の遮蔽体欠損部は線束接続計算にて評価 ・ 胴内での燃料集合体の軸方向の移動(蓋方向、底部方向への移動)を考慮(輸送容器キャビティ軸長さは実際の輸送容器の寸法より小さい)。	・ 3次元モデル ・ トラニオン部も詳細にモデル化 注意) モンテカルロ法でも、全体モデル作成する際に Sn 法と同様に燃料移動を考慮したキャビティ軸長さをを用いることが必要。

表 2-4(5) 輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較 (遮蔽設計(2/4))

小項目	学会標準との対応	従来設計方法例	モンテカルロ遮蔽解析
線源領域 (考え方)	c) 2.1.7)	使用済燃料の場合： ・ 少なくとも燃料有効部と上下部構造材部分の 3 領域に分割してモデル化 ・ 軸方向の線源強度ピーキングを考慮してモデル化 ・ 燃料の燃焼度と収納位置を考慮してモデル化	
線源径方向	c) 2.1.5) ~ c) 2.1.7) 附属書 23 附属書 24	・ 平均燃焼度燃料/最高燃焼度燃料収納領域：体積比に等価な円柱形状でモデル化 ・ 線源領域の均質化は、実際の線源面積と等価な面積を持つ円形とするか、実際の線源領域に外接する円形とする	近似モデル化は不要。
線源軸方向	c) 2.1.7.1) 附属書 23	以下の 5 領域に分割 ① 下部ノズル部、② 上部プレナム部、③ 燃料有効部、④ 下部ギャップ部、⑤ 下部ノズル部 ※BWR 及び PWR で各領域の名称は異なるが、両者とも 5 領域に分割する。	

表 2-4(6) 輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較 (遮蔽設計(3/4))

小項目	学会標準との対応	従来設計方法例	モンテカルロ遮蔽解析
燃料領域	c) 2.1.7) 附属書 23	- 燃料集合体及びバスケットを均質化 - バスケット板厚は公称値×密度係数で均質化	- 燃料集合体は直方体状に均質化 - バスケットは図面通りモデル化
キャビティ内 水位	c) 2.1.1) 附属書 21	- 水位は容器の内容容積、収納物の排水体積等から算出 - 内部水の温度による熱膨張は考慮しない(必ずしも設計発熱量の燃料が収納されるとは限らないため)。 - 温度上昇に伴う水密度の減少は考慮する。	
		2次元解析コードでは、輸送状態(通常横置き状態)での水位を設定し、燃料領域の周囲で最小となる水層厚さを用いてモデル化	横置き時の水位をモデルに反映
遮蔽体領域	c) 2.1.5) 附属書 23	伝熱フィン(主に銅製)と中性子遮蔽体を均質化 ※伝熱フィンの領域からの中性子ストリーミングに注意が必要。	
放熱フィン	c) 2.1.5) 附属書 23	フィン領域は空気置換 ※フィン領域の単純な均質化は非安全側のため均質化しない	詳細にモデル化

表 2-4(7) 輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較 (遮蔽設計(4/4))

小項目	学会標準との対応	従来設計方法例	モンテカルロ遮蔽解析
トラニオン部	c) 2.1.6)	線束接続計算を用いて評価 (トラニオンのない輸送容器モデルで得られたトラニオン近傍の線束を、トラニオン部モデルに引継ぐことによりトラニオン部の線量当量率を計算)	接続計算は不要
バルブ等周方向に非均一な部分	c) 2.1.6)	線束引継ぎ計算でバルブ部等の評価を実施	接続計算は不要
緩衝体	c) 2.1)	空気に置換してモデル化(大きさのみ考慮)。 (一般的に線量当量率に余裕があるためであり、解析手法上の制限ではない)	同左又はモデル化
評価点(表面)	b) 1.1)	至近の空気中の値とする(DOT3.5 評価値)	同左又はサーフェイスクロッシングエスティメーターによる
評価点位置 (at 1m)	b) 1.2)	緩衝体の角のみ円弧で考慮	
緩衝体表面	b) 1.1)	緩衝体表面を評価する場合は緩衝体表面までモデル化	
貫通試験 (特別の試験条件)	b) 3.1)	線量当量率が最も厳しくなるように貫通孔をモデル化 (しばしば胴側面は安全側に溝状にモデル化)	同左
モデル化に係る 安全裕度	c) 2.1.4) 附属書 22	- 寸法公差：公称寸法×密度係数で考慮 - 材料密度：最小密度 - 中性子遮蔽材の膨張代：空気	

表 2-4(8) 輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較 (解析方法及び解析結果の評価(1/2))

小項目	学会標準との対応	従来設計方法例	モンテカルロ遮蔽解析
線量当量率 (考え方)	c) 2.3)	・ γ線線量当量率は、中性子の捕獲による二次γ線も考慮して計算する。 ・ 信頼性のある線量当量率変換係数を使用する。 ・ 一般の試験条件において輸送物表面の線量当量率の著しい増加がないことを確認するときは、遮蔽体の変形又は喪失に起因する線量当量率の増加を評価する。	
遮蔽解析コード	c) 2) 附属書 20	・ 中性子及びγ線：DOT3.5 ・ 輸送物表面から 1m 線量当量率の計算： ・ DOT3.5+SPACETRAN-3	・ MCNP4C または MCNP5
群定数	c) 2) 附属書 20	・ DLC-23/CASK (22n-18γ) ・ SCALE 27n-18γ	・ 中性子：FSXLIB-J3R3 または ENDF/B-VI ・ γ線：MCLIB04
展開次数 ・ 角度分点	c) 2) 附属書 20	- Sn 解析コードを使用する場合 ・ Legendre 展開次数：P₃ 近似 ・ 角度分割数：S₈ 以上	展開次数・角度分点は不要

表 2-4(9) 輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較 (解析方法及び解析結果の評価(2/2))

小項目	学会標準 との対応	従来設計方法例	モンテカルロ遮蔽解析												
セルの分割幅	c) 2) 附属書 20	γ線-鉛：0.5cm 中性子-中性子遮蔽材：1.0cm	本ガイドライン原案 5 章参照												
タリー	-	不要													
タリーの適用性	-	不要													
計算結果信頼性	-	不要													
計算結果に対する安全裕度	-	不要													
分散低減法	-	不要													
分散低減パラメータ生成	-	不要													
線量換算係数	c) 2.3.1) 附属書 26	- 中性子・γ線：ICRP Pub.74 周辺線量当量率 - ライブラリのエネルギー群構造に対する値は原子力学会標準 AESJ-SC-R002 に示されている。	文献値を log-log 補間												
統計誤差の評価	附属書 20	不要	要検討項目												
基準線量当量率	b) 1) ～ b) 3) 附属書 13 附属書 27	<table border="1"> <tr> <td></td><td>通常輸送時</td><td>一般の試験条件</td><td>特別の試験条件</td></tr> <tr> <td>輸送物表面</td><td>2mSv/h 以下</td><td>2mSv/h 以下</td><td>-</td></tr> <tr> <td>輸送物表面から 1m</td><td>100μSv/h 以下</td><td>-</td><td>10mSv/h 以下</td></tr> </table> 輸送物表面の定義 表面線量当量率の設計基準値は、輸送物の輸送従事者が輸送物に直接身体を密着させることを想定して定めていることから、人が容易に触れることができる部位を遮蔽上の輸送物表面とする。		通常輸送時	一般の試験条件	特別の試験条件	輸送物表面	2mSv/h 以下	2mSv/h 以下	-	輸送物表面から 1m	100μSv/h 以下	-	10mSv/h 以下	
	通常輸送時	一般の試験条件	特別の試験条件												
輸送物表面	2mSv/h 以下	2mSv/h 以下	-												
輸送物表面から 1m	100μSv/h 以下	-	10mSv/h 以下												

表 2-4(10) 輸送容器の遮蔽設計及び評価手法の比較 (原子個数密度及び遮蔽材劣化)

小項目	学会標準との対応	従来設計方法例	モンテカルロ遮蔽解析
原子個数密度 (考え方)	c) 2.2.1) ～ c) 2.2.2)	・ 材料密度及び原子個数密度は、寸法公差及び材料の最低密度を考慮して、安全側の数値を使用する。 ・ 材料密度及び組成に経年変化が予想される材料に対しては、設計評価期間中の遮蔽に有効な成分の放射線及び熱による減損量を考慮して材料密度及び原子個数密度を計算する。 ・ 中性子吸収材を含有する中性子遮蔽材を使用する場合は、設計評価期間中の中性子吸収材の減損量を考慮する。	
遮蔽材 の温度変化 又は長期劣化	c) 2.2.1) 附属書 25	・ 水及び液体の遮蔽材：温度による密度変化を考慮する。 ・ レジン等固体の中性子遮蔽体：使用条件を想定した長期劣化を考慮するとともに、使用されている主要な個々の原材料の物性値を確認する。 ・ 特別の試験条件下：鉛(γ線遮蔽体)の溶融、固体の中性子遮蔽体の変質及び燃焼について留意する。	
原子量、密度、 組成等	c) 2.2.1) 附属書 25	・ 信頼性の高い規格または文献値に基づく。 ・ 密度：若干の余裕を考慮した値を使用。裕度はその材料の製造実績又は理論的に考慮すべき最小密度に基づいて設定される。使用実績が少ない場合は材料検査により確認する。	

2.8 海外におけるモンテカルロ遮蔽計算の審査指針

本節では、海外におけるモンテカルロ法による輸送容器の遮蔽設計審査指針を示した。また、現在日本国内において発行されている輸送容器の設計に関する標準を整理した。

(1) 日本国内

輸送容器、中間貯蔵容器に関する日本原子力学会標準として、下記が発行されている：

- ・ 使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2006(AESJ-SC-F006:2006)
- ・ 低レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2008(AESJ-SC-F013:2008)
- ・ 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2010(AESJ-SC-F002:2010)
- ・ 使用済燃料中間貯蔵施設用コンクリートキャスク及びキャニスタ詰替装置の安全設計及び検査基準：2007(AESJ-SC-F009:2007)

このうち、「日本原子力学会標準 使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準 2006」におけるモンテカルロ法を用いた遮蔽設計に関する記述は下記のとおりである⁽¹⁾。

- ・ 付表 1 核データライブラリ及び解析コード：輸送容器またはこれらに関連する原子力設備・機器の設計における検証例や使用実績のある遮蔽解析コードの一つに、MCNP が挙げられている。
- ・ 附属書(参考)20：遮蔽解析コードの使用上の注意点として、MCNP コードが取り上げられている。分散低減法として線源エネルギースペクトルのバイアス及びウェイト・ウィンドウの概要がまとめられている。また、統計誤差評価の考え方について若干触れられている。

(2) 米国

米国では、容器の設計標準がいくつか確立されている。

- ・ NUREG-1536 Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems²⁾
- ・ NUREG-1536 Revision 1A Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems³⁾(乾式容器貯蔵システムの標準的設計手法 NUREG-1536)
- ・ NUREG-1609 Standard Review Plan for Transportation Package for Radioactive Material⁴⁾(放射性物質輸送容器の標準的設計手法)

NUREG-1536 では、中間貯蔵用乾式容器の遮蔽設計で使用することができるコード及びシステムとして、MicroSkyshine(大気拡散計算コード)、MORSE(モンテカルロ多群三次元中性子及び γ 線輸送計算コード)、MCBEND、MCNP、RANKERN、SCALE、SKYSHINE-II、STREAMING、DOORS3.2、DANTSYS を挙げている。これらの計算コードは遮蔽計算で

広く認知されているものであるが、NRC はこれらのコードを無条件に認めているわけではない。このため、日本と同じく、容器体系の幾何形状に適用可能な実験結果やベンチマーク問題等を使用して、各計算コードの適用性を確認することが必要である。

一方、日本とは異なり、許認可申請書には遮蔽計算の入出力データ(代表的なケース)が添付されるため、計算に使用された材料組成、幾何形状及び解析手法が確認でき、またその入力データに基づきトレース計算を行うことで計算手法の妥当性を評価することができる。

(3) 欧州

欧州では、輸送物の遮蔽安全解析には通常的にモンテカルロ計算コードが使用されている。例えば、フランスでは CEA 開発の TRIPOLI コード、イギリスでは AEA 開発の MCBEND コードが主として使用されている。

欧州では、輸送物の安全解析に関するガイドとしては 2008 年頃に発行されたフランス、イギリス、ドイツ等の当局と WNTI, AREVA 等が共同で執筆した “Technical Guide Package Design Safety Reports for the Transport of Radioactive Material”があるが、この中ではモンテカルロ計算に関する記載は全くない。(正式な発行については不明)

各国についてみると、フランスでは ASN (Nuclear Safety Authority) の “Applicant's guide related to applications for shipment approval and certificate of package design or radioactive materials for civil usage transported by public roads, by water or by railroad”イギリスでは the Transport Container Standardisation Committee の “Transport of Radioactive Material Code of Practice - Design of Transport Packaging for Radioactive Material”等があるが、個々の計算手法について詳細に示したガイドはなく、“Transport of Radioactive Material Code of Practice - Design of Transport Packaging for Radioactive Material”の中で、モンテカルロコードが主たる遮蔽計算コードであるとし、英国開発の MCBEND コード以外の各国の実績のあるコード名として MCNP、TRIPOLI、MORSE コードが記載されている程度である⁽⁵⁾。

なお、この中では遮蔽解析の最後に同じく AEA 開発の ANSWERS システムの使用を推奨している。ANSWERS システムはもともと遮蔽計算を容易にできるように組まれたソフトウェアであったが、現状は遮蔽計算を含む計算手法等のスペシャリストによる精度の高い計算を実施するためのコンサルタントを含めたサービスを展開している。

(参考文献)

- (1) 日本原子力学会, 「日本原子力学会標準 使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準 2006」, 2006
- (2) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems Final Report (NUREG-1536), 1997
- (3) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems

- Draft Report for Comment (NUREG-1536 Revision 1A), 2009
- (4) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan for Transportation Package for Radioactive Material (NUREG-1609), 1999
 - (5) Transport Container Standardisation Committee, "Transport of Radioactive Material Code of Practice - Design of Transport Packaging for Radioactive Material," TCSC-1042, 2002

3. 詳細な説明を要する場合の資料文書化方法

使用済燃料輸送容器/輸送貯蔵(兼用)容器の遮蔽設計及び遮蔽計算の説明資料作成にあたり、以下の節に示す内容から成る文書化がなされるべきである。なお、設計承認申請書(正式名称:輸送容器の設計及び核燃料物質等を当該輸送容器に収納した場合の核燃料輸送物の安全性に関する説明書)に記載される内容を付録に示す。

3.1 遮蔽解析の目的

本節では、遮蔽解析を行う目的を示す。新たな容器の許認可申請の場合だけでなく、設計変更の場合もあるので、設計変更の場合には、従来の申請書と比較して変更されたこと及び見直しを行った箇所を端的に示し、従来の申請書から新たにモンテカルロ遮蔽計算手法を導入する場合にはその理由を示すべきである。また、遮蔽される放射線源、遮蔽体構成の概要や設計に使用される遮蔽設計基準も本節に明記しておく。

3.2 遮蔽設計の方法

本節では、遮蔽設計に使用する計算手法及び近似の方法を明らかにする。モンテカルロ法に基づく遮蔽計算手法の場合、ただ単に設計フローを示すだけでなく、必要に応じて計算上再現した幾何形状の程度を示すべきである。具体的には、幾何形状のうち、輸送容器の詳細図面と比較してどの程度再現したか(均質化した箇所や計算に使用する幾何形状への反映を省略した箇所等)を明記するべきである。

3.3 遮蔽設計条件の記述

本節では、輸送容器に使用する遮蔽材、遮蔽厚さ、放射線源、評価に必要な空間及び主な運用状況を考慮した遮蔽設計に関するデータを明らかにする。本節では、3章2節で示した、計算上再現した幾何形状に対応するデータを明確にする。製作公差の考え方を踏まえて、設計条件が保守的設定であることを明確にした記述にしておくべきである。3章2節で示される、均質化した箇所や計算に使用する幾何形状への反映を省略した箇所がモンテカルロ法に基づく遮蔽計算手法において保守的設定であることを示すべきである。必要に応じて遮蔽解析に使用する幾何形状の説明に必要な図表を使用する。解析に使用するデータ、あるいは幾何形状が妥当であることを示す参考文献が既存の場合、それを使用してよい理由・使用方法を説明した上で、文献の引用により詳細な説明を省略してもよい。

3.4 遮蔽解析手法

適切に定義された用語を用いて、遮蔽設計で使用する計算コード及び計算に使用する断面積データを明らかにするために、本節では、解析手法を理解するために必要な理論及び着目する利用範囲にを詳細に説明する。本節は、特別な理由のない限り、計算コード及び断面積データを説明する参考文献を引用した説明となる。輸送容器体系の遮蔽計算において実績の

ないコードを使用する場合は、本ガイドライン案附録6「輸送容器体系で行われた放射線透過試験のベンチマーク解析」と同様の解析を行うことにより、輸送容器体系に適用可能であることが示されるべきである。さらに、モンテカルロ遮蔽計算手法の場合、特定の部位で 사용되는解析方法の説明について本節に明記すべきである。3章3節に示される図表には、計算対象の幾何形状の境界及び各領域の意味が示されており、解析方法を評価部位によって変更する必要がある場合には、この図表を引用してその理由を明記すべきである。具体的には、線量当量率の計算方法として複数のエスティメータを使用した理由、分散低減法を変更した理由等である。

3.5 遮蔽解析結果の評価

本節では、遮蔽設計及び解析の概要を再掲して、目的とする遮蔽設計と計算結果が一致することを、遮蔽設計基準との比較により示す。モンテカルロ法に基づく遮蔽計算手法の場合、輸送容器外の線量当量率の分布は、線量当量率の最大値が得られる評価点を抽出するのみならず、計算結果の妥当性を判断する上で重要である。したがって、輸送容器外の線量当量率分布の計算を行い、この結果を、遮蔽解析結果の評価で使用する評価点での計算の妥当性判断に使用すべきである。

3.6 参考文献

参考文献一覧には、計算に使用したコードに関連する参考文献の他、線源あるいは計算に使用する幾何形状に適用した仮定の説明を容易にするための根拠資料が充足されるべきである。

4. 使用済燃料輸送容器/輸送貯蔵(兼用)容器の遮蔽設計に関する審査項目

前章では、使用済燃料輸送容器/輸送貯蔵(兼用)容器の遮蔽設計の説明資料作成に係る文書化方法案について示した。本章では、この遮蔽設計の説明資料を構成する各項目と対応させて、容器の遮蔽設計に関する審査項目を示す。

4.1 遮蔽解析の目的

- ・ 設計変更に伴い、従来の申請書から遮蔽計算手法を変更する場合には、計算手法を変更する理由が正当なものであること

4.2 遮蔽設計の方法

- ・ 遮蔽設計に利用する方法が適切であること

4.3 遮蔽設計条件の記述

- ・ 放射線遮蔽計算で使用された幾何形状が、平常輸送時、一般の試験条件及び特別の試験条件を適切に記述していること
- ・ 構造及び除熱性能の評価の結果、容器が健全状態にあることを説明できない場合、液体及び中性子遮蔽体が事故後に減少している、あるいは保守的に存在しないと仮定されていること
- ・ 放射線遮蔽計算で設定した想定が設計基準及び設計図面と整合していること

① 容器の遮蔽構造の幾何形状及び容器内収納物の線源強度の設定

- ・ 遮蔽計算で使用する輸送容器の幾何形状が遮蔽計算上保守性を持つ妥当なものであること
- ・ 幾何形状の寸法及び材料が詳細な製作設計図面で指定される寸法及び材料と整合していること
- ・ 平常輸送時、一般の試験条件及び特別の試験条件で幾何形状に相違がある場合、その相違が安全解析書に明確に述べていること
- ・ 使用済燃料及びその構造支持領域(燃料集合体の構造部材)両方の線源領域が適切に設定されていること
- ・ 遮蔽計算で使用する幾何形状の一部を均質化する場合、その均質化が適切であること
- ・ 損傷した燃料集合体を輸送する場合、損傷した燃料集合体の幾何形状が適切になされていること
- ・ 健全な燃料集合体とは異なる幾何形状の再構成がなされる可能性がある場合、平常輸送時、一般の試験条件及び特別の試験条件の各々に対して詳細な記述がなされていること
- ・ 軸方向の線源強度分布が適切に設定されていること

- ・ 記載された計算点が設計基準値と比較する上で適切に設定されており、これら計算点が検討範囲全体の代表点として適切であること
- ・ 特にストリーミングパス(例：吊具)近傍の計算点の設定が適切であること

② 材料特性

- ・ 計算に使用される材料組成及び密度に関する全ての情報が記載されていること(特に単位が **atoms/barn-cm** の場合、換算に注意すること)
- ・ 主要な遮蔽材の経年/温度/照射劣化による遮蔽性能の低下を考慮して、遮蔽材の基本的組成及び密度が遮蔽解析で保守的に設定されていること

4.4 遮蔽解析手法

① 計算コード

- ・ 遮蔽計算に使用する計算コードが計算したい形状及び放射線種に適切であること
- ・ 遮蔽計算に使用する計算コードの品質を保証する方法が記載されていること
- ・ 記載内容が正しいことを確認する追加計算が必要かどうかを判断すること
- ・ 遮蔽計算に使用した幾何形状が記載されていること
- ・ その他、以下の内容が記載されていること
 - 計算コードに関する参考文献及び計算コードの改訂番号、計算コードの適用可能範囲
 - 容器の遮蔽体幾何形状及び線源強度条件が類似した放射線遮蔽実験結果を用いたベンチマーク計算により、測定結果と計算結果が十分一致すること(誤差が小さいことを含む)
 - 容器の遮蔽体幾何形状及び線源強度条件が類似した仮想形状を用いて、異なる計算手法(実績のあるものがよい)を用いた計算コードによる計算結果と比較して、各々の計算結果が十分一致すること(誤差が小さいことを含む)

4.5 遮蔽解析結果の評価

- ・ 計算結果が物理的に合理性を持つこと、具体的には計算点における結果が容器の遮蔽構造及びその性能と整合のとれたものあること

① 確認計算

- ・ 必要に応じて以下の項目を考慮すること
 - 記載された計算結果と既に審査済の類似容器の計算結果及び計算精度の比較
 - 異なる計算コード及び断面積セット(実績のあるものがよい)を用いた場合との差異(典型例)
 - 遮蔽解析に使用した計算コードの入力データが正しいこと

- 適切な寸法、材料特性及び適切な断面積セットを使用していること
- 従来許認可で使用されていない計算コードを初めて使用する場合は、より詳しい審査が要求される場合、記載内容が合理的で保守的であることを確実にするため、申請者とは全く独立な方法で計算結果を確認すること(例：使用された計算手法及び断面積セットと異なる計算コードを利用)

4.6 参考文献

- ・ 参考文献が一般に閲覧可能でない場合、補足情報に該当箇所の写し、計算コードの解説、入出力ファイル及びその他必要な情報が含まれていること

5. モンテカルロ法に基づいた遮蔽計算手法

5.1 はじめに

遮蔽計算手法の中で、アナログモンテカルロ法に基づく遮蔽計算は最も厳密な方法として位置づけられる。この方法は、乱数を用いた粒子輸送シミュレーションにより、ボルツマン方程式の解が得られるという仮定に基づいている。モンテカルロ法では、解析にあたり、まず架空の粒子(疑似粒子)を設定する。次に、現実の粒子が遭遇する物理的相互作用(散乱、漏れ、吸収)を支配する確率法則と同様の法則を用いて、個々の疑似粒子に関するヒストリの追跡を行う。計算には多くの疑似粒子が必要とされる。全ての疑似粒子のヒストリからなる事象全体は、疑似粒子の置かれた環境と同じ環境に、また等価な数だけ現実の粒子が存在した場合に起り得る事象全体を表す。十分に大きな標本空間から任意に抽出されることで得られた平均値は、現実の標本粒子から得られる平均値の推定値となる。

モンテカルロ法で求めたい量は、目的とする量の平均値である。ある量、例えば線源から放出される粒子の推定値はそれぞれ確率変数の抽出標本である。また、推定値全体は確率分布関数から抽出されたものである。平均値の変化量の平方根である標準偏差は、確率分布の相対的な広がりを示す量である。全ヒストリの平均値は、標準偏差が小さいほど、現実の母集団の平均値と近い値となる。標準偏差を小さくする1つの方法は標本中のヒストリ数を増加させることである。

標本のヒストリ数を増加させる方法のうち重要なのが、統計的な重み(ウェイト)である。アナログモンテカルロ法では、線源から発生した粒子にはすべて同じウェイトが割り当てられるが、ここではエネルギーや方向に対応したインポートランスサンプリングを行うことを考える。計算対象の幾何形状で設定された遮蔽材を粒子が横断すると、粒子の持つウェイトが減少してゆく。これは、放射線が遮蔽材を通過することで減衰していくことを示している。この方法によると、衝突は全て散乱現象として取扱われる。したがって、エネルギー E 及びウェイト W で入射した粒子の衝突後におけるウェイトは、 W に散乱-全相互作用確率の比を掛けることで得られる。

使用される分散低減法のうちでも、ウェイトは期待値を保存する量であるので重要である。ウェイトを用いた分散低減法としては、ロシアン・ルーレット及びスプリッティングが代表的である。これらの手法は、使用者が適切に理解していない場合には使用すべきではない。分散低減法を不適切に使用することで、平均値が正しく得られていない計算でも、ウェイトが保存されて、結果に付随する分散が小さくなることがあるので、分散低減法は使用にあたり適用性をよく理解しておくことが重要である。

線量を求めるためには、全ヒストリのうち検出器位置まで届く粒子のみを使用するよりも統計的推定を用いた手法(ネクストイベントエスティメータ)が効果的である。線源から放出された個々の粒子は、各ヒストリにおける各衝突位置において、粒子がその点で散乱して検出器に到着すると仮定する。そして、検出器位置に粒子が到着する確率に比例するウェイトを考慮して線量寄与を求める。

モンテカルロ法は計算コードを使用することで、一般的な3次元の幾何形状を取扱うことができる。線源からの放出粒子は、乱数に基づいて選択される。計算に用いる断面積ライブラリは、連続エネルギーによるものと多群エネルギーによるものの2つの形式がある。計算過程には、計算に必要な値を選択するために乱数発生器が使用されている。モンテカルロ法に基づく遮蔽計算手法は、散乱の寄与を点減衰核コードに使用されるようなビルドアップ係数によって考慮するのではなく、直接計算することから、複雑な幾何形状からなる体系の衝突散乱問題を解くのに適している。密度の高い材質がほぼ対照的な位置関係にあり、材質の減衰曲線が2つ程度で代表できるような形状の場合は、離散座標法に基づく遮蔽計算手法での取扱いが便利である。しかしながら、計算機の発達でモンテカルロ法の実用性が大幅に増加している現在では、こうした場合においてもモンテカルロ法に基づく遮蔽計算手法を用いることが多くなっている。

5.2 適切な計算を行うための計算流れ

モンテカルロ法に基づいた遮蔽計算手法が適切に利用できるようにすることを目的として、モンテカルロ法を用いた放射性物質輸送容器の遮蔽計算フローを図5.2-1に示す。この遮蔽計算フローは次の4つから構成される：

- ・ 輸送容器の遮蔽計算幾何形状の作成方法
- ・ 容器に適用する分散低減法の設定方法
- ・ 容器に適用するエスティメータの選択方法

輸送容器の遮蔽計算幾何形状の作成方法は、モンテカルロ法に基づいた遮蔽計算手法に特有のものではなく、断面積データを使用する遮蔽計算手法であればどれにも当てはまる計算フローである。次の分散低減法の設定及びエスティメータの選択は、モンテカルロ法に基づいた遮蔽計算に特有のものである。

ある体系における分散低減法の有効性を判断するための重要なパラメータは、Figure of Merit(FOM)である。一般に、ある分散低減法を使用してFOMが改善される場合は、その適用した分散低減法はよい方法であると言える。分散低減法は、非アナログ法及び打ち切り法に基づく分散低減法に分類できる。いずれも評価体系にどのように影響するのかを把握した上で使用する必要がある。分散低減法を使用する場合は、現実的でより複雑な体系に適用する前に、まず比較的単純な体系に適用して、その分散低減法が計算時間や計算結果にどのように影響するのかを把握すべきである。深層浸透問題に対しては、セル・インポートランスあるいはウェイト・ウィンドウを使用して、評価したい領域におけるセル内の粒子の衝突数がほぼ一定に維持されるように設定する。セル・インポートランスは、粒子が空間依存性のみで支配的に分割される体系の場合、安全且つ簡単に使用できる。ウェイト・ウィンドウは、位相空間に影響されるエネルギーも考慮に入れなければならない、手入力では適切に使用することが困難であるが、パラメータが正確に得られた場合には有効な方法である。計算時間を消費する粒子の追跡、物理的反応あるいは計算体系に影響しない計算寄与を回避したい場合、

エネルギーカットやヒストリ・カットオフといった打ち切り法を適切に使用すべきである。

輸送容器の設計、収納核燃料輸送物の安全性評価に関する各解析評価項目と遮蔽解析との関係

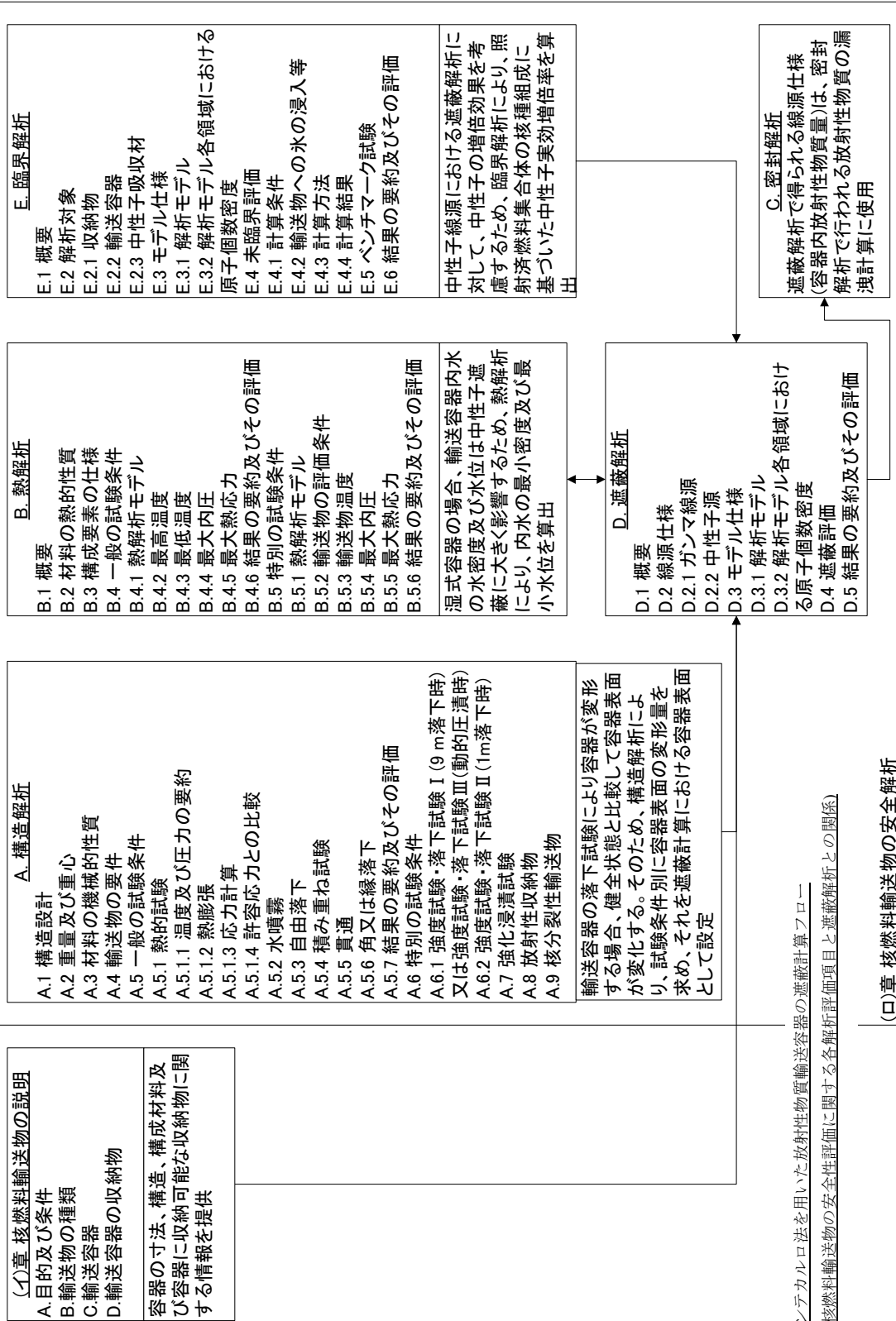


図 5.2-1 モンテカルロ法を用いた放射性物質輸送容器の遮蔽計算フロー
(輸送容器の設計、収納核燃料輸送物の安全性評価に関する各解析評価項目と遮蔽解析との関係)

(ロ)章 核燃料輸送物の安全解析

幾何形状の設定

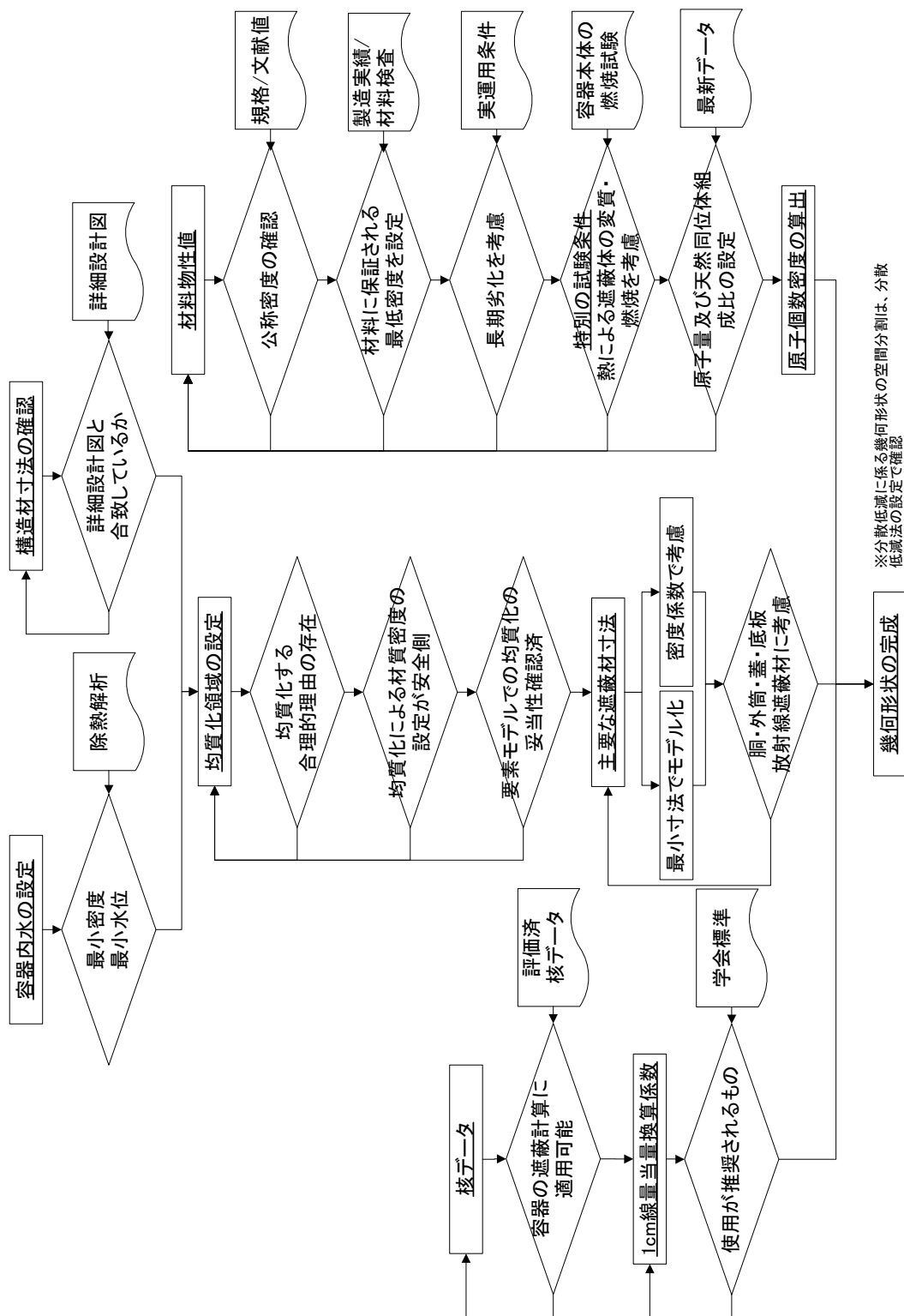


図 5.2-1 モンテカルロ法を用いた放射性物質輸送容器の遮蔽計算フロー
(輸送容器の遮蔽計算幾何形状の設定方法)

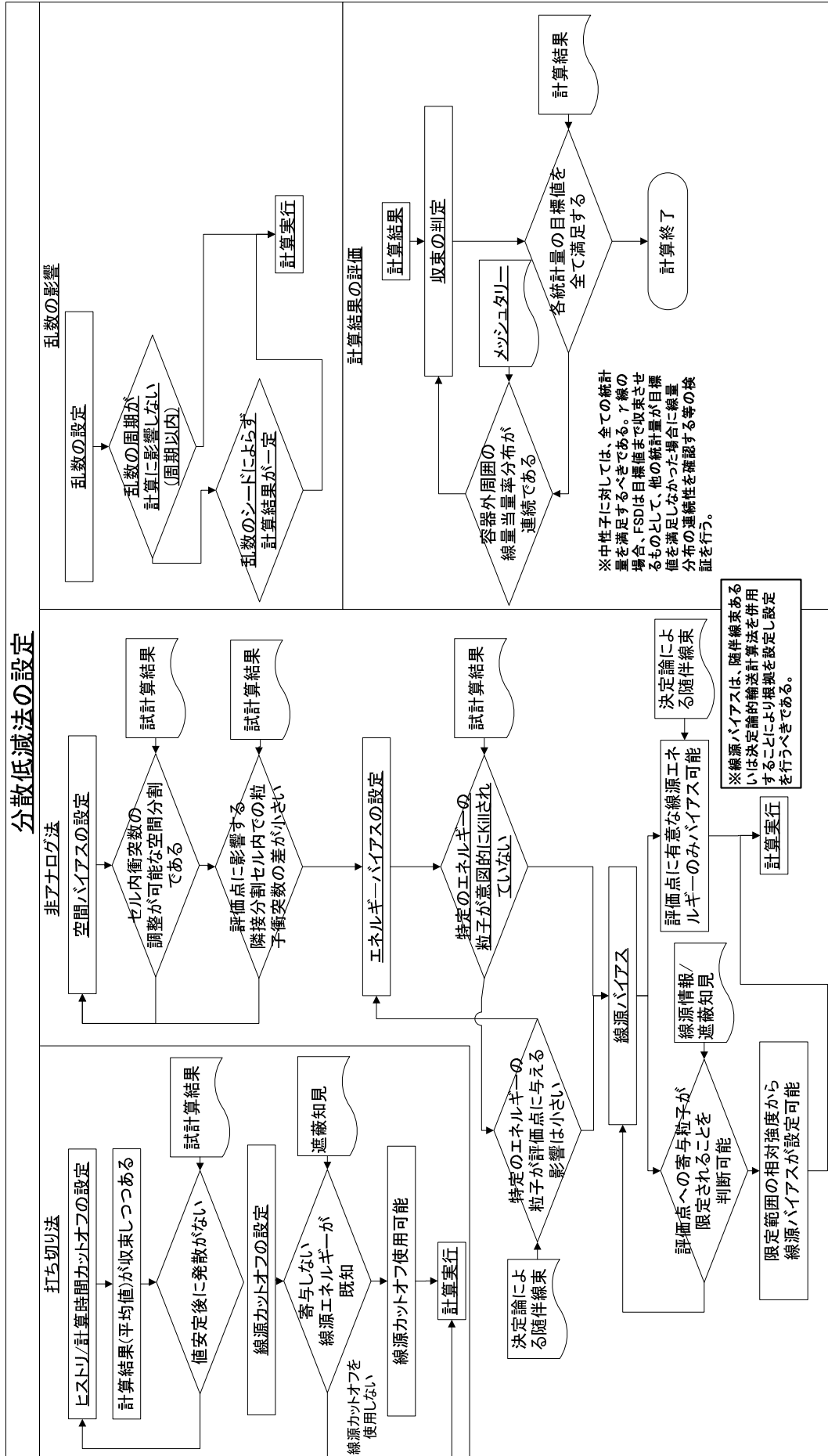


図 5.2-1 モンテカルロ法を用いた放射性物質輸送容器の遮蔽計算フロー
(容器に適用する分散低減法の設定方法)

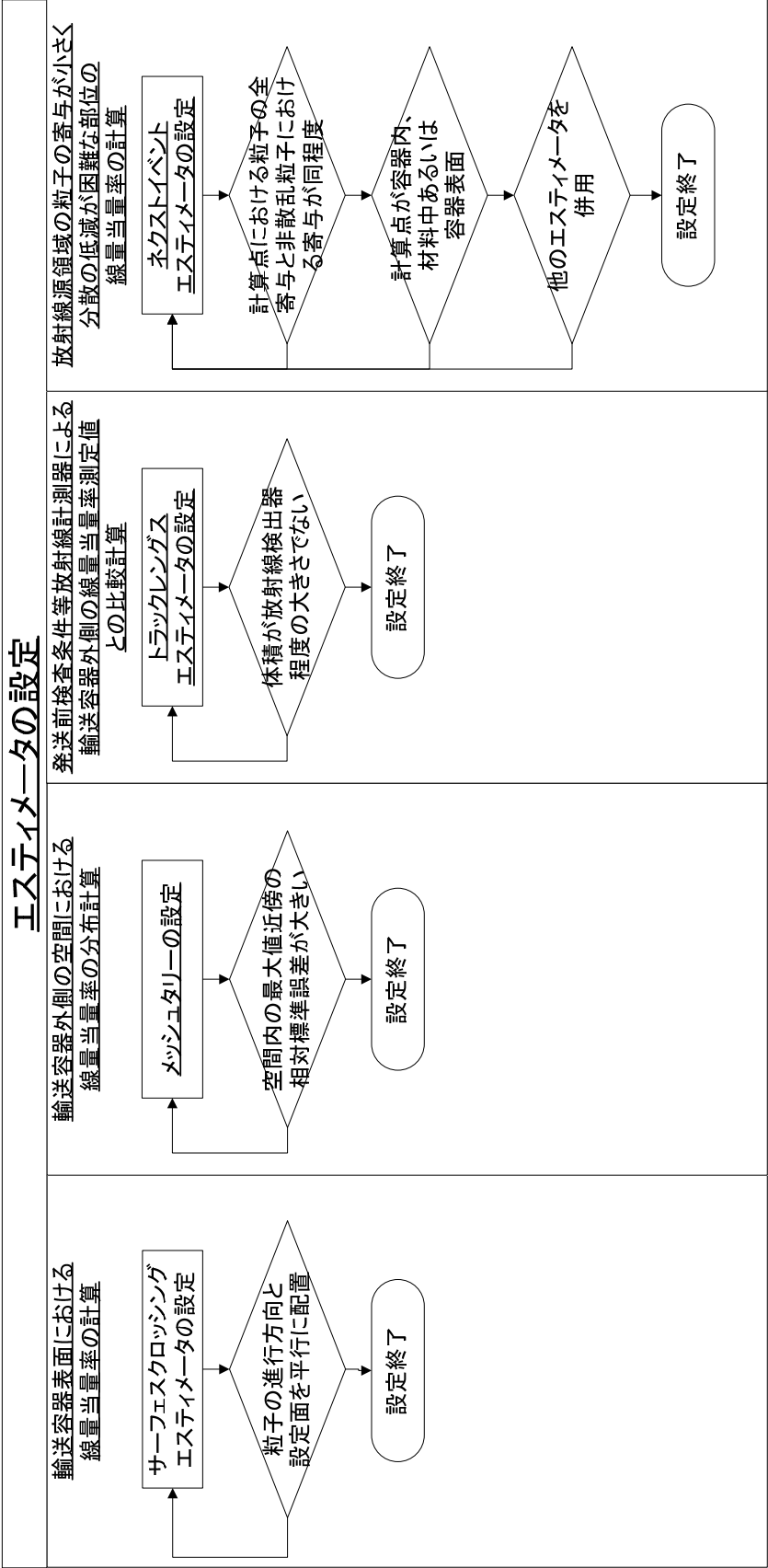


図 5.2-1 モンテカルロ法を用いた放射性物質輸送容器の遮蔽計算フロー
(容器に適用するエスティメータの選択方法)

5.3 使用済燃料輸送容器体系で使用が推奨される分散低減法と使用時の留意点

分散低減法は、“打ち切り法(Truncation Technique)”及び“非アナログモンテカルロ法”の2つに分類される。打ち切り法は、打ち切りエネルギー以下、あるいは打ち切り時間以降の粒子が、評価点において影響しないことがわかっている場合に限り使用することができる。

分散低減法は、分散低減法が適切に設定されていることを確認できる範囲で設定することが重要である。また、実計算を行う前に、試験計算で分散低減法が適切にはたっていることを確認しておくべきである。例えば、非アナログ確率密度抽出法に基づく分散低減法であるセル・インポートランスで不適切なインポートランスを空間に与え、粒子のロシアン・ルーレットが頻繁に起るよう設定すると、生き残った粒子のウェイトが不適切に大きくなり、この粒子が評価点に寄与したときの誤差が大きく変動する。逆に、粒子のスプリッティングを頻繁にし過ぎる設定にすると、粒子のウェイトが小さくなり過ぎ、評価点への寄与が無視できる粒子は消滅させるような打ち切り値を設定しておかないと、寄与の小さい粒子のためにかかる計算時間が膨大となることになる。

5.3.1 分散低減法の概要

(1) 打ち切り法に基づく分散低減法の概要

打ち切り法は、評価体系に対して影響の小さい粒子の追跡を設定値で制限することで誤差を低減することができるが、評価体系を適切に考慮した設定を行わないと非安全側の評価結果となる可能性がある。本節では、打ち切り法に基づく分散低減法の適切な設定方法を明確化する。打ち切り法に基づく分散低減法の機能の要約を表 5.3.1-1 に示す。

表 5.3.1-1 打ち切り法に基づく分散低減法の機能の要約

種別	分散低減法	機能の要約
打ち切り法	エネルギー・カットオフ	エネルギースペクトル計算において指定したエネルギー以下の計算を打ち切る
	ヒストリ・カットオフ	設定したヒストリ数で計算を打ち切る
	計算時間カットオフ	指定した計算時間以上の計算を打ち切る
	線源カットオフ	線源領域から発生する粒子のうち、評価点に与える影響の小さいエネルギー範囲にあるものの発生を打ち切る

(a) エネルギー・カットオフ

粒子のエネルギーが設定値を下回ると、その粒子の計算を終了する。ヒストリ当りの計算時間を減少させることができる。計算に対して一つだけ設定できる。

(b) ヒストリ・カットオフ、計算時間カットオフ

設定したヒストリ数で計算を打ち切る、あるいは指定した計算時間以上の計算を打

ち切る。通常はこの分散低減法により計算を終了させる。

(c) 線源カットオフ

MCNP 等のモンテカルロ計算コードに整備されている分散低減法ではなく、本委員会において提案された分散低減法である。追跡する必要のないエネルギー範囲にある線源放出粒子を予め入力条件から外しておく手法である。計算結果から評価点に与える影響の小さいエネルギー範囲を予め確認しておく必要がある。

(2) 非アナログモンテカルロ法に基づく分散低減法の概要

モンテカルロ法における分散低減の基本的な方法は、計算したい結果（ある評価点での線量など）に寄与の大きい粒子の追跡数を多くし、寄与の小さい粒子の追跡数を少なくすることである。インプリシット捕獲法は、粒子が捕獲された際に追跡を終了せず、捕獲割合だけ粒子の持つウェイトを減らして追跡を続行することで、追跡数を増やす方法である。また、計算結果への影響の大きい領域や粒子の数を増やす代わりに粒子の持つウェイトを減らして、計算位置における粒子の持つウェイトの総和を粒子数の代わりに用いるようにすれば、任意の空間領域やエネルギーについて、人為的に粒子の追跡数を増減できる。このように、人為的に粒子の追跡数を増減することを”バイアスする”と呼ぶ。また、このような粒子の持つウェイトを設定して、粒子の数ではなく粒子の持つウェイトの総和で粒子数（あるいは粒子束）を表すモンテカルロシミュレーションを非アナログ・モンテカルロ法と呼ぶ。

非アナログ法に基づく分散低減法としては、セル・インポータンス法、セル・インポータンスにさらにエネルギーサブプリッティング/ロシアン・ルーレットを組み合わせたウェイト・ウィンドウ法、そして線源の発生分布を効率化する線源バイアス法がある(表 5.3.1-2)。以下、これらの三種類の非アナログ法に基づく分散低減法について、その原理と長所・短所を説明する。

表 5.3.1-2 非アナログ法に基づく分散低減法の機能の要約

種別	分散低減法	機能の要約
非アナログ法	暗黙吸収	非アナログ吸収
	線源バイアス	与えた線源条件のうち重要なエネルギー及び放出方向にバイアスをかける
	セル・インポータンス	粒子がインポータンスの大きい領域へ移動するとサブプリッティングにより粒子数が増やされ、反対方向へ移動した場合はロシアン・ルーレットにより粒子数を小さくする
	ウェイト・ウィンドウ	空間依存のセル・インポータンスにエネルギー依存性を持たせたもの

(a) セル・インポータンス法

これは、図 5.3.1-1 に示すように、粒子が低インポータンスから高インポータンスの

(空間) 領域に移動したときに粒子をスプリッティングして飛跡数を増やし、逆に高インポートランス領域から低インポートランス領域に移動したときに粒子を統合(ロシアン・ルーレット)して飛跡数を減らすことにより、インポートランスの高い領域に居る粒子、すなわち遮蔽解析の場合は検出器への寄与が大きい粒子の数を増やす方法である。分割された粒子の持つウェイトは二分され、統合された粒子はそのウェイトを統合前の粒子の和とすることにより、粒子のウェイトの総和は保たれる。検出器では粒子の数ではなく、このウェイトを計測する。

ユーザーは、空間(MCNPの場合はセル)ごとにインポートランスを与えて分散低減を行うため、後述のウェイト・ウィンドウ法に較べれば、分散低減のためのパラメータの指定は直感的かつ容易なのが利点である。一方全てのエネルギーに対して同じインポートランスが用いられるため、粒子束の遮蔽材中での減衰の粒子エネルギー依存性を考慮することが出来ず、分散低減効果がウェイト・ウィンドウ法に劣るところが短所である。

(b) ウェイト・ウィンドウ法

(a)で用いた「領域」とは空間領域に限らず、空間とエネルギーから成る位相空間内の領域と考えもよい。MCNPでは、この空間とエネルギーの位相空間の境界を”窓”に見立てて、位相空間でロシアン・ルーレットとスプリッティングを行うことをウェイト・ウィンドウと呼ぶ(図5.3.1-2)。

図5.3.1-2に示したように、MCNPではロシアン・ルーレットとスプリッティングを行う粒子の持つウェイトを領域(この場合は空間領域とエネルギー)毎に与える。ウェイトが下限ウェイト W_L 以下になった粒子は、統合後の粒子の持つウェイトがロシアン・ルーレットで生き残るウェイト W_S 以上になるまでロシアン・ルーレットを受ける。粒子の持つウェイトが上限ウェイト W_U を越えたときはスプリッティングを受ける。MCNPでは、 W_S と W_U は、 W_L に領域によらない定数を掛けた値としている。したがって、ウェイト・ウィンドウを用いる場合には、ユーザーは領域毎に W_L の値のみを与えて、各領域のインポートランスを表す。

ウェイト・ウィンドウ法の長所は、空間とエネルギーについてウェイト・ウィンドウ下限値を与えて効率の高い分散低減が可能な点である。短所は、空間とエネルギーの双方に依存したウェイト・ウィンドウ下限値の設定の仕方の複雑さであり、手作業でこれらのパラメータを設定するのは複雑な形状ではかなり難しい。

(参考文献)

- (1) J. F. Briesmeister (Ed.), "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A," LA-12625-M (1993)

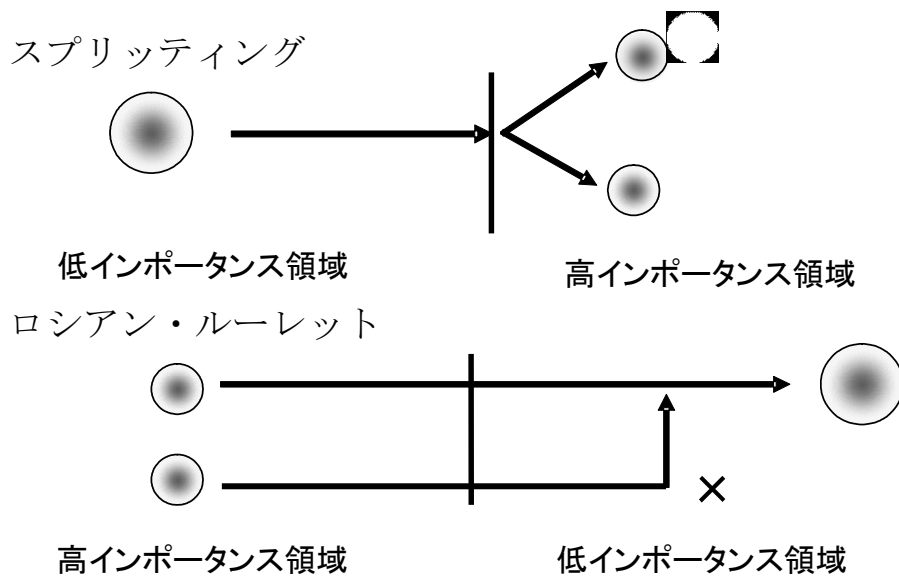


図 5.3.1-1 スプリッティングとロシアン・ルーレット

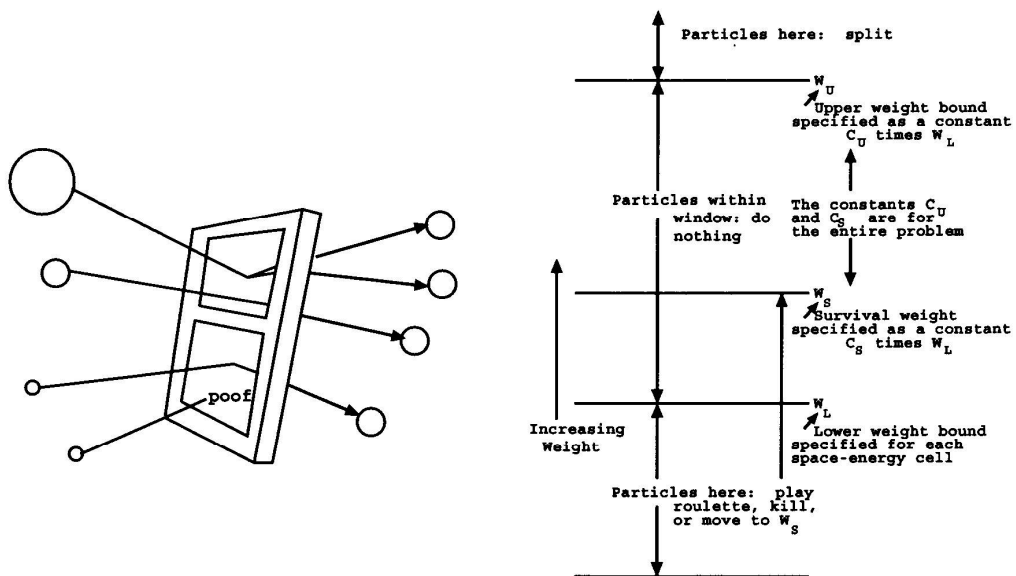


図 5.3.1-2 MCNP のウェイト・ウィンドウの概念とそのパラメータ⁽¹⁾

(c) 線源バイアス法

線源バイアス法は、線源のエネルギー、空間、あるいは角度分布をバイアスすることによって、検出点における計算量（線量など）に寄与する粒子の数を増やす方法である。計算量に影響の大きいエネルギー、空間、あるいは角度で発生する粒子の数を増やす代わりにウェイトを小さくすることによって、粒子のウェイトの和で表したこれらの分布は保ちながら、計算量に影響の大きい粒子の追跡数を増やす方法である。

中性子や γ 線で線源から検出点までのエネルギー減衰が大きく、ほとんど高エネルギーの線源しか寄与しない場合は線源エネルギーバイアスが有効である。また、線源が広い範囲に分布している場合に、線源内のある領域近傍での局所的な線束などを評価しようという場合には、検出点に近い線源をより多く出すような線源空間バイアスが有効である。コリメータを透過した場合のような、ある方向に放出された線源粒子の寄与が明らかに大きい場合は線源方向バイアスも有効である。

(d) 線源バイアス法とウェイト・ウィンドウ法の一貫性

線源バイアス法とウェイト・ウィンドウ法の一貫性に関して、ペンシルバニア州立大学（当時）の Alireza Haghighat（現・フロリダ大）と John C. Wagner（現・オークリッジ国立研究所）は、CADIS 理論という理論で考察した。CADIS 理論では、次の二つのバイアシングを関連づけて（consistent に）用いる。

線源バイアシング: (MCNP の線源バイアス法)

輸送バイアシング: (MCNP のウェイト・ウィンドウ法)

以下にそれぞれのバイアシングの定式化を示す(図 5.3.1-3 参照)。

① 線源バイアシング

バイアスされた線源分布・スペクトル: $q_b(r, E)$ は、実際の線源分布: $q(r, E)$ から次式により計算する。

$$q_b(r, E) = \frac{\phi^+(r, E) \cdot q(r, E)}{\iint_{V_s E_s} \phi^+(r', E') \cdot q(r', E') dr' dE'} \quad (1)$$

ここで、 $\phi^+(r, E)$ は随伴線束、 V_s は全線源領域、 E_s は全線源エネルギー範囲を表す。随伴線束は、評価量（例えば実効線量）の評価点におけるエネルギー応答関数（例えばフルエンスから実効線量への換算係数）を線源エネルギースペクトルとする随伴計算で得られる。

発生する粒子の持つウェイト $W_s(r, E)$ は、次式で定められる。

$$W_s(r, E) = \frac{q(r, E)}{q_b(r, E)} \quad (2)$$

空間・エネルギー線源バイアスの値 $B_c(r, E)$ は、発生粒子のウェイトの逆数であ

り、次式で得られる。

$$B_S(r, E) = \frac{1}{W_S(r, E)} = \frac{\phi^+(r, E)}{\iint_{V_S E_S} \phi^+(r', E') \cdot q(r', E') dr' dE'} \quad (3)$$

② 輸送バイアシング

変数 p を空間・エネルギー・方向 $[\equiv (\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega})]$ を表すものとしたとき、線束 $\phi(p)$ は、線源項 $q(p)$ と状態 p' から p への輸送核 $K(p' \rightarrow p)$ を用いて表される次の輸送方程式に従う。

$$\phi(p) = \int_{p'} K(p' \rightarrow p) \phi(p') dp' + q(p) \quad (4)$$

一方、バイアスされた線源を用いた場合の輸送方程式は次式となる。

$$\hat{\phi}(p) = \int_{p'} \hat{K}(p' \rightarrow p) \hat{\phi}(p') dp' + \hat{q}(p) \quad (5)$$

ここで、

$$\hat{\phi}(p) = \frac{\phi^+(p) \phi(p)}{R} \quad (6)$$

$$\hat{q}(p) = \frac{\phi^+(p) q(p)}{R} \quad (7)$$

$$\hat{K}(p' \rightarrow p) = K(p' \rightarrow p) \left[\frac{\phi^+(p)}{\phi^+(p')} \right] \quad (8)$$

$\phi^+(p)$ は随伴線束である。

モンテカルロ計算において、粒子が $p' \rightarrow p$ に移動するとき、

$$\left[\frac{\phi^+(p)}{\phi^+(p')} \right] > 1$$

ならばスプリットングにより粒子数が増やされ、

$$\left[\frac{\phi^+(p)}{\phi^+(p')} \right] < 1$$

ならばロシアン・ルーレットにより粒子数が減らされる。

このスプリットングとロシアン・ルーレットを行うのが輸送バイアシングであり、やはり随伴線束を用いる線源バイアシングと一貫した扱いとなっている。

すなわち、線源バイアスを設定する際にはウェイト・ウインドウ（空間バイアス）のパラメータ（ウェイト下限値）も連動して与えると最適な分散低減が得られることを表している。これを実際に行うには、計算機プログラムが必要であり、市販の A³MCNP⁽¹⁾や公開コードである SCALE6⁽²⁾には、随伴線束計算と組み合わせて CADIS 理論に基づく分散低減を行う機能が組み込まれている。

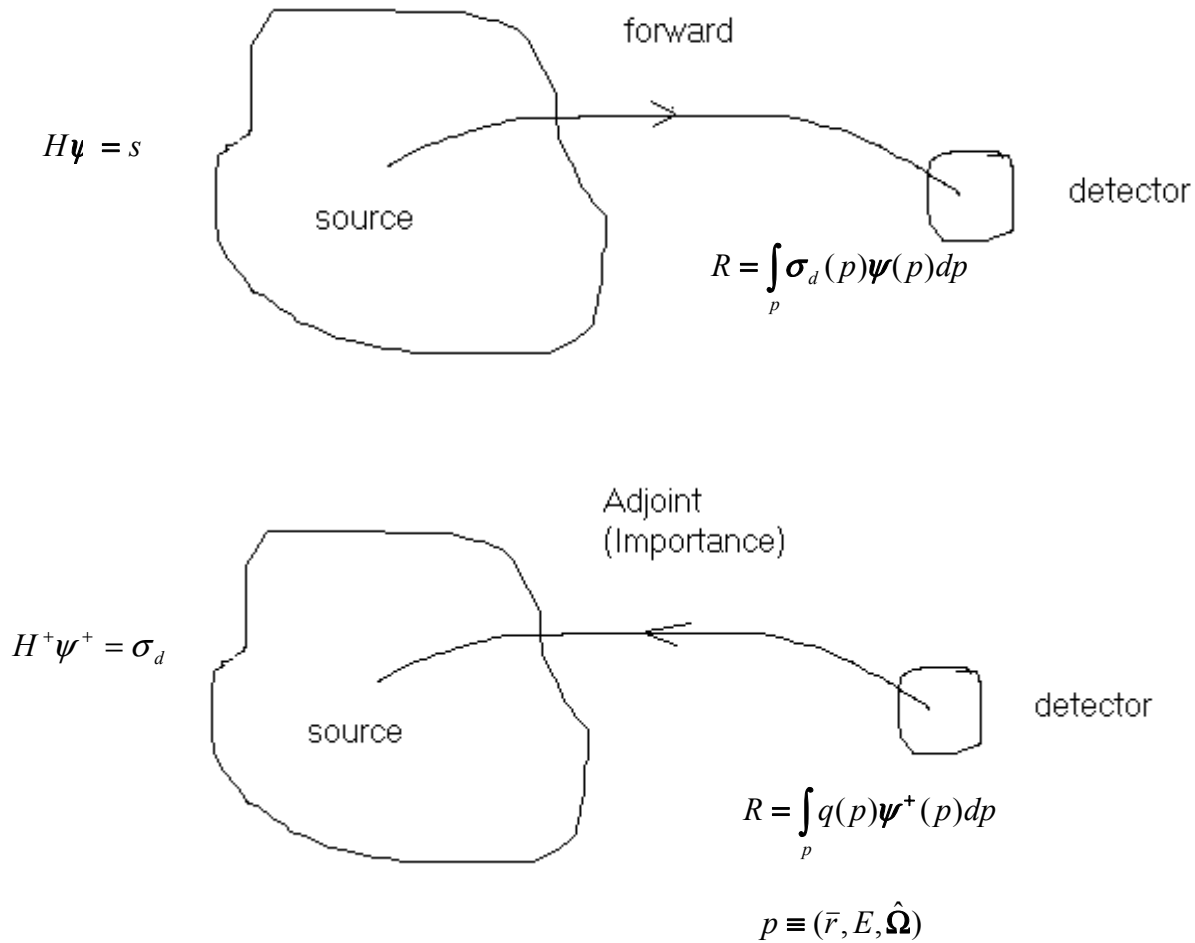


図 5.3.1-3 随伴計算 (Adjoint) によるインポートランス計算と通常の輸送計算 (Forward) の比較⁽³⁾

(参考文献)

- (1) J. C. Wagner and A. Haghighat, "Automated Variance Reduction of Monte Carlo Shielding Calculations Using the Discrete Ordinates Adjoint Function," Nucl. Sci. Eng., **128**, pp.186-208 (1998).
- (2) SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation," ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vols. I-III (January,2009).
- (3) A. Haghighat, "Monte Carlo Methods and Variance Reduction Techniques," Private Communication.

(e) ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータ

ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータは、モンテカルロ法に基づく遮蔽計算に必要な空間エネルギーバイアスであるウェイト・ウィンドウ下限値を、半自動的に求める方法である。ジェネレータを使用する際には、ウェイト・ウィンドウ下限値をジェネレータで生成するためのモンテカルロ計算が別途必要になる。このために必要な追加計算時間は割合にして約 20～50%である。

位相空間内にある粒子の持つインポートランスは、線源領域にて生成される単位ウェイトを持つ粒子によるスコアの期待値と等しい。ある位相空間を幾つかのセルで分割した場合、あるセルのインポートランスは、セルに入射後の単位ウェイトを持つ粒子によって生成された期待スコアとして定義できる。したがって、セルの持つインポートランスは次式で定義される：

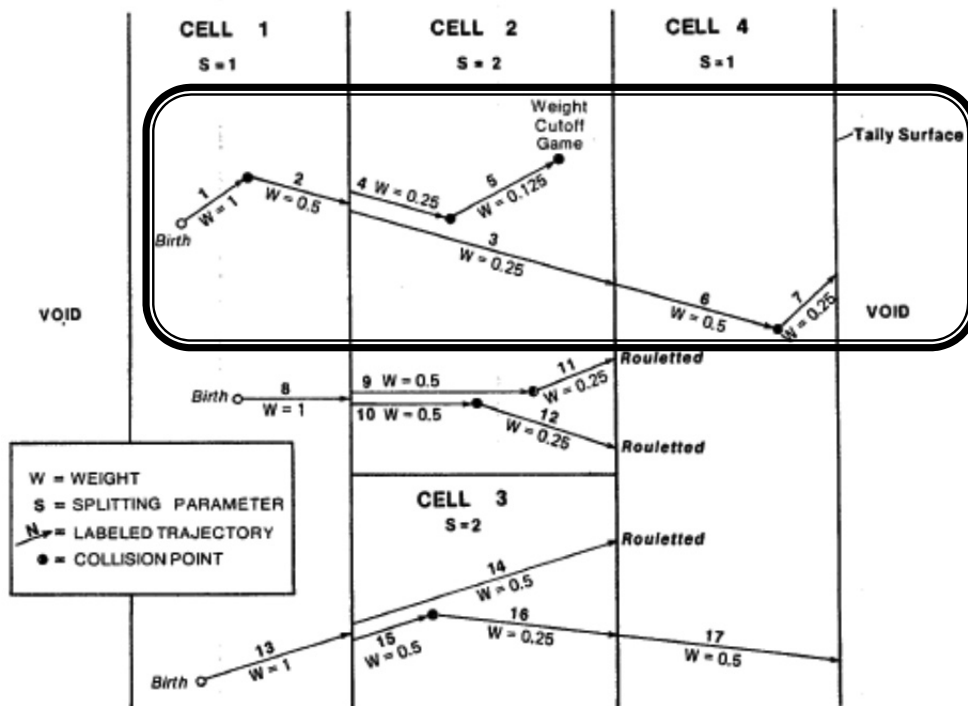
$$\text{インポートランス (粒子の存在する期待値)} = \frac{\text{セルに入射する粒子及びその 2 次粒子のもたらす全スコア}}{\text{セルに入射する全ウェイト}}$$

4 つのセルからなる一般的な位相空間における幾何形状を図 5.3-4 に示す。この例では、各衝突に対する捕獲確率を 0.5 としている。粒子の捕獲は、粒子の持つウェイトのカットオフと粒子のウェイトを減少させることで暗黙的に取扱う。粒子はセル 1 内で生成されて、セル 4 の平面を通過することによりスコアされる。値 S は、4 つの位相空間セルの境界を横切るときに、粒子をどのようにスプリッティングあるいはロシアン・ルーレットにかけるかを決めるために使用している。通常、値 S は計算者による初期推定値である。それぞれの粒子軌道には連続した番号が付けられる。表 5.3-3 は、図 5.3-4 に示した 3 つの粒子ヒストリのインポートランスを推定する過程を示したものである。

次に、得られたインポートランスからウェイト・ウィンドウ下限値を設定する。インポートランスに逆比例するウィンドウを使用することにより、評価点に対するヒストリが全て同等のスコアとなるとまでとはいかないものの、その問題における任意のトラックの平均スコアが大体一定となる程度には設定可能である。すなわち、トラックのウェイト×平均スコア(単位トラックウェイト)が近似的に一定となるようにウィンドウを選択する。これらの条件の下では、トラックのスコアが変化することよりも、寄与するトラック数の変化の方が分散に影響する。反比例定数は、あるセルにおけるウェイト・ウィンドウ下限値が適切に選択されるように選択される。例えば、図 5.3-4 の場合は、線源セル内におけるウェイト・ウィンドウ下限値を 0.5 と設定した。線源粒子は単位ウェイトを持つため、0.5～2.5 の範囲内におけるウェイト・ウィンドウ下限値を与えた。線源粒子のウェイト・ウィンドウ下限値は、以上の方法に基づき設定される。

表 5.3-3 図 5.3-4 に示した 3 つの発生粒子ヒストリのインポートランス推定過程⁽¹⁾

TABLE III. Importance Estimation Process for Particle Histories in Fig. 32.					
Row	Description	Cell 1	Cell 2	Cell 3	Cell 4
Weight					
1	Trajectories entering	1, 8, 13	3, 4, 9, 10	14, 15	6, 17
2	Weight entering associated with above trajectories	1, 1, 1	0.25, 0.25, 0.5, 0.5	0.5, 0.5	0.5, 0.5
3	Total weight entering	3	1.5	1	1
Score					
4	Trajectories entering that resulted in score	7, 17	7	17	7, 17
5	Scores associated with above trajectories	0.25, 0.5	0.25	0.5	0.25, 0.5
6	Total score	0.75	0.25	0.5	0.75
Estimate					
7	Estimated importance Row 6/Row 3	0.25	0.167	0.5	0.75

図 5.3-4 4 つのセル、3 つの粒子ヒストリからなる一般的なモンテカルロ問題⁽¹⁾

(図の右側の面を通過するとスコアされる。赤枠の過程のみ着目すると、インポートランスを定義する式の分母側は、Cell-1 においては飛程 1、Cell-2 では飛程 3,4、Cell-4 では飛程 6 となることから、「セルに入射する全ウェイト」は、Cell-1 が 1、Cell-2 が $0.25+0.25=0.5$ 、Cell-4 が 0.5 となる。分子側は Cell-1 が飛程 7、Cell-2 が飛程 7、Cell-4 が飛程 7 となることから、「全スコア」は Cell-1 が 0.25、Cell-2 が 0.25、Cell-4 が 0.25 となる。したがって、求めたい「インポートランス」は Cell-1 が $0.25/1=0.25$ 、Cell-2 が $0.25/0.5=0.5$ 、Cell-4 が $0.25/0.5=0.5$ となる。ウェイト・ウィンドウ下限値の場合、このインポートランスに反比例するとして求めている。

(参考文献)

(1) Thomas E. Booth, "A Sample Problem for Variance Reduction in MCNP," Los Alamos National

Lab. Report: LA-10363-MS, 1985.

5.3.2 各分散低減法を輸送容器体系へ適用する際の留意点

(1) エネルギー・カットオフ

輸送容器体系の中性子遮蔽解析の場合、エネルギー・カットオフ値が大きすぎると、容器外側の評価点における線量当量率を過小評価する。また、低エネルギー中性子捕獲反応で発生する二次 γ 線の生成を考慮する場合には、二次 γ 線の寄与を過小評価する。したがって、エネルギー・カットオフは大きな値を使用すべきではない。図 5.3.2-1 は容器中心軸からの距離と線量当量率の関係を示したものである。図には、中性子のエネルギー・カットオフ値を 10^{-8}MeV と設定したものと 10^{-11}MeV と設定したものを示す。エネルギー・カットオフ値を 10^{-11}MeV に設定した場合と比較して、 10^{-8}MeV で設定した計算結果は、最大 18.2% も過小評価する(評価点：容器中心軸から 241.5cm)。

このように、エネルギー・カットオフを用いることにより低エネルギー中性子の寄与が大きい系での評価において過小評価となる可能性があるので、計算結果に影響しないエネルギー・カットオフ値であることを計算により確認しておく必要がある。

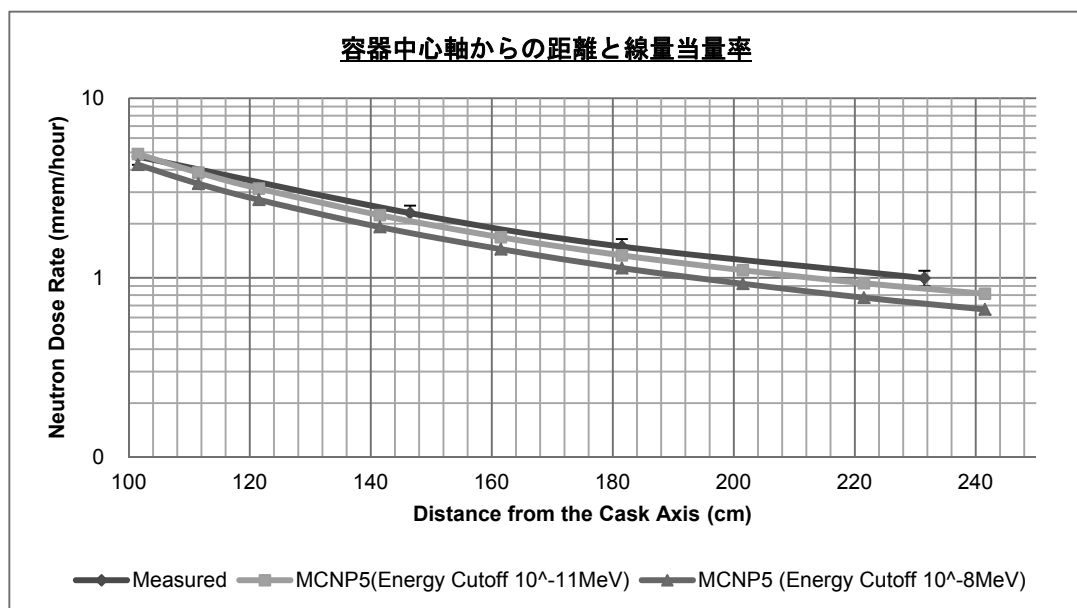


図 5.3.2-1 容器中心軸からの距離と線量当量率の関係
(測定結果と Energy Cutoff を変更した計算結果の比較)

(2) 線源カットオフ

使用済燃料の γ 線は幅広いスペクトルを有しているが、表 5.3.2-1 及び図 5.3.2-2、図 5.3.2-3 に示すように大部分は低エネルギーであり、使用済燃料輸送容器のように γ 線遮蔽厚さが厚い場合は外部の線量当量率に寄与しない(図 5.3.2-3)。また、高エネルギー側

は線源強度が極端に小さいため線量当量率への寄与は小さい。したがって、低エネルギー側及び高エネルギー側のスペクトルを無視することにより計算効率を上げることができる。ただし、本手法を用いる場合は、無視するエネルギーの γ 線の線量当量率への寄与が十分小さいことを手計算や計算コードで予め確認しておくべきである。

表 5.3.2-1 及び図 5.3.2-2 の例では γ 線のエネルギースペクトルのうち、低エネルギー側の 1～8 群と高エネルギー側の 16～18 群を無視している。使用済燃料の場合 γ 線のエネルギースペクトルのうち高エネルギー側の 16-18 群は γ 線の数が少ないため、一般的に無視して差し支えないと考えられる。しかし、図 5.3.2-4 に示すように γ 線スペクトルは冷却期間により大きく変わるため、より低エネルギーの群までカットすべきかを収納対象とする使用済燃料の仕様により検討すべきである。

一方、低エネルギー側については、どのエネルギー群まで無視できるかは容器の γ 線遮蔽性能によって変わる。したがって、収納対象とする使用済燃料の仕様によりエネルギー群毎の遮蔽評価を行い、無視できるエネルギー群を確認することが必要である。

表 5.3.2-1 使用済燃料 γ 線のスペクトルカット例

エネルギー群	平均エネルギー (MeV)	線源強度計算結果 (p/s/MTU)	光子数割合 (%)	MCNP入力 (p/s/MTU)
1	1.00E-02	6.17E+15	25.31	0.0
2	2.50E-02	1.43E+15	5.87	0.0
3	3.75E-02	1.49E+15	6.12	0.0
4	5.75E-02	1.26E+15	5.15	0.0
5	8.50E-02	8.50E+14	3.49	0.0
6	1.25E-01	9.08E+14	3.72	0.0
7	2.25E-01	7.31E+14	3.00	0.0
8	3.75E-01	4.18E+14	1.72	0.0
9	5.75E-01	8.24E+15	33.79	8.24E+15
10	8.50E-01	2.42E+15	9.91	2.42E+15
11	1.25E+00	4.32E+14	1.77	4.32E+14
12	1.75E+00	1.98E+13	8.12E-02	1.98E+13
13	2.25E+00	1.76E+13	7.21E-02	1.76E+13
14	2.75E+00	4.78E+11	1.96E-03	4.78E+11
15	3.50E+00	6.08E+10	2.49E-04	6.08E+10
16	5.00E+00	2.35E+07	9.64E-08	0.0
17	7.00E+00	2.71E+06	1.11E-08	0.0
18	9.50E+00	3.12E+05	1.28E-09	0.0

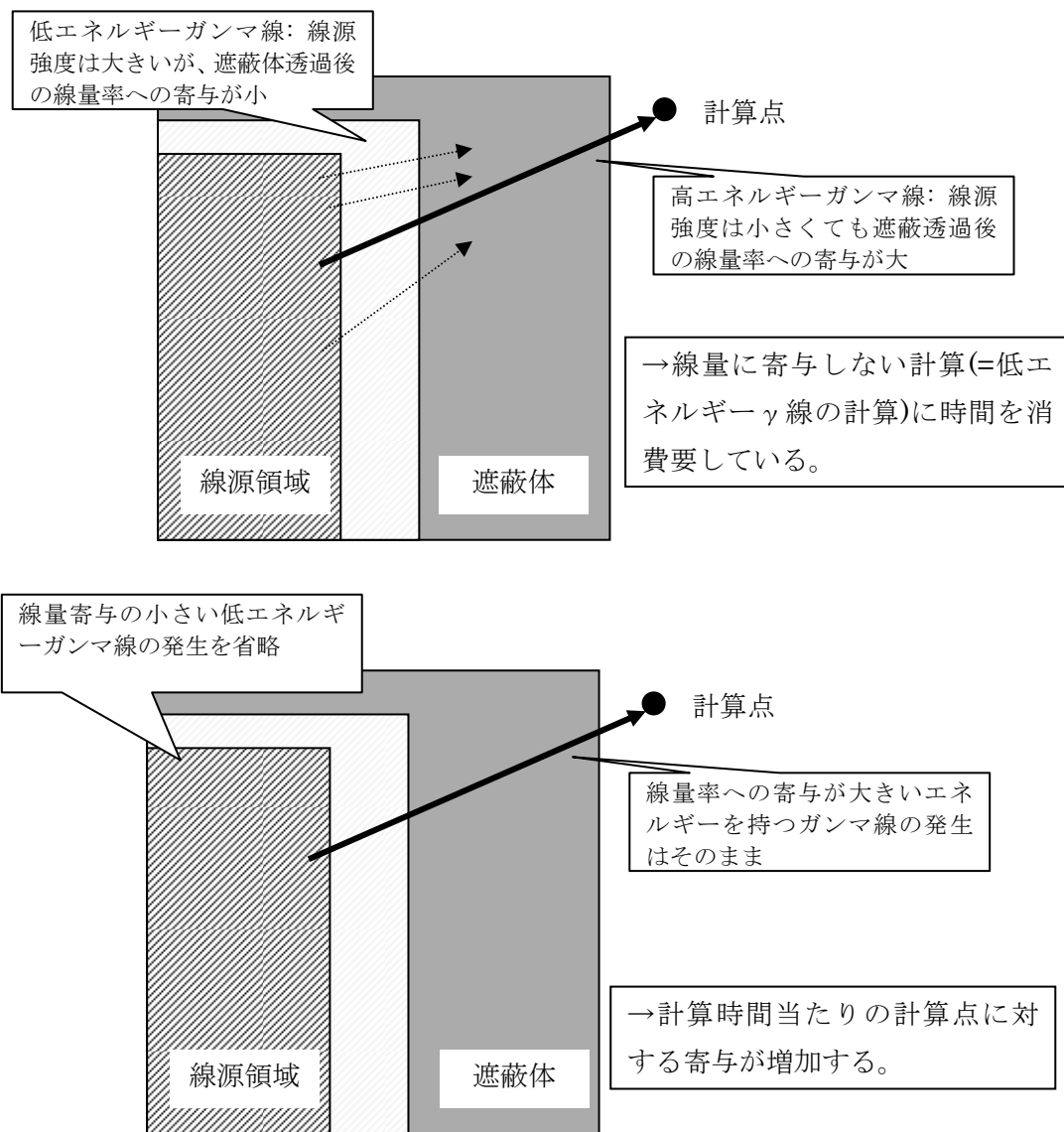
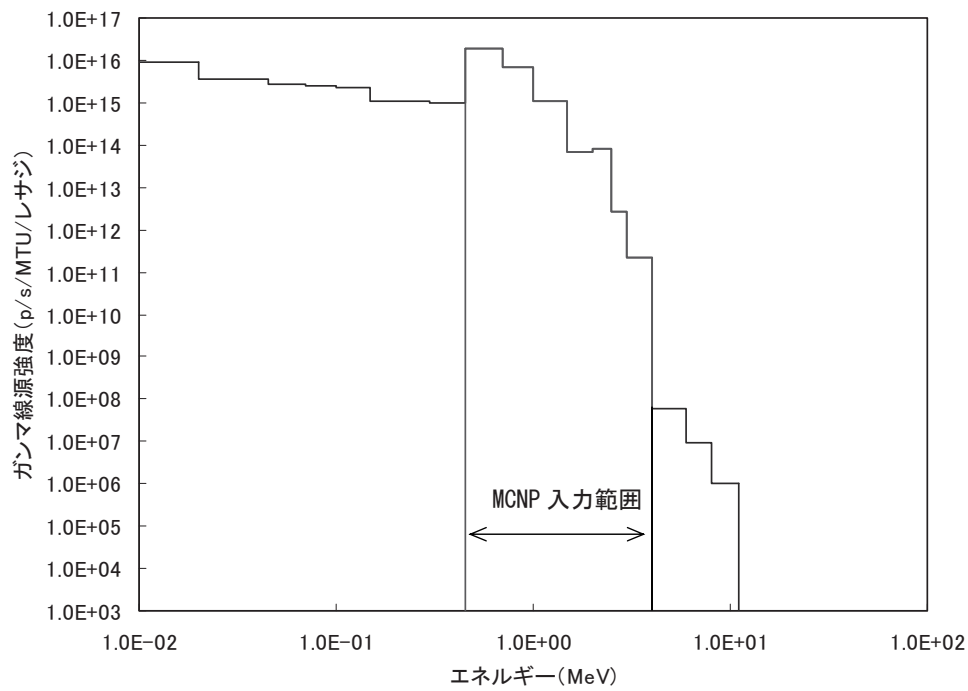


図 5.3.2-2 低エネルギー γ 線発生省略の概念図(上図：省略前、下図：省略後)



FPガンマ線スペクトル

図 5.3.2-3 使用済燃料 γ 線のスペクトルカット例

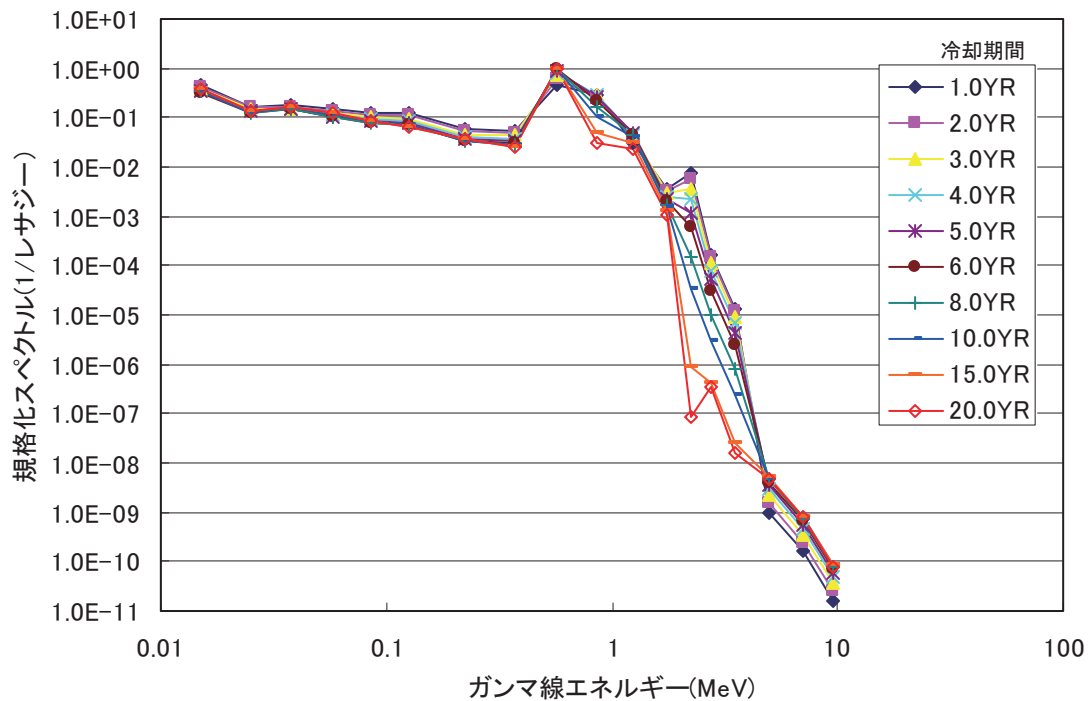


図 5.3.2-4 冷却期間による使用済燃料 γ 線のスペクトル変化

前述のように、線源カットオフを行う場合には、容器表面での線量に寄与しない粒子のみを線源から発生させないようにすることが必要である。容器表面での線量に寄与しない粒子とは、燃料有効部の γ 線スペクトルを持つ点線源に対して、輸送容器全体を見て保守的な遮蔽厚を透過した粒子の線量計算を行い、全体の寄与と比較して寄与が十分小さい γ 線の群とすることができる。省略できる γ 線エネルギーの範囲は、以下のように、手計算により線源エネルギー群構造毎の遮蔽体透過後の線量寄与を求めることにより得ることができる：

- ① 燃料有効部から放出される γ 線の代表的な線源スペクトル： S_i (i : エネルギー群番号)を用いる。計算の目的に応じて、燃料集合体の軸方向位置の影響を考慮する。
- ② 線量減衰率は、鉄の質量減衰係数 $(\mu/\rho)_i^{(1)}$ と輸送容器の最小遮蔽厚さを用いて求める。
- ③ 質量減衰係数を設定するエネルギーは、文献(1)に記載があり、保守的な設定となるエネルギーの値を設定する。
- ④ 保守的な遮蔽厚さを構成する複数の材料から成る遮蔽材を、鉄に置換えた場合の遮蔽厚さに換算して、鉄密度： ρ_{Fe} 、鉄換算遮蔽厚さ： t_{Fe} で表される減衰率 Γ_i を下式で計算する：

$$\Gamma_i = \exp[-(\mu/\rho)_i \cdot \rho_{Fe} \cdot t_{Fe}]$$

- ⑤ 1cm 線量当量換算係数⁽²⁾から線束-線量換算係数 $(H_{1cm}/\phi)_i$ を設定する。値は質量減衰係数で使用したエネルギーに対応したものをを用いる。
- ⑥ 線源エネルギー群構造毎の線量寄与を $S_i \cdot \Gamma_i \cdot (H_{1cm}/\phi)_i$ で求め、群番号 1 からある群番号 i までを加算した累積線量と全合計線量の比を求める。
- ⑦ 群番号 1 から群番号 i までの線源スペクトルからの寄与が、線量全体の寄与と比較して十分小さく発生を無視できることを確認する。

(参考文献)

- (1) 財団法人原子力安全技術センター編. 放射線施設の遮蔽計算実務マニュアル. 2007.
- (2) ICRP Publication 74

(3) セル・インポートランス法とウェイト・ウィンドウ法

セル・インポートランス法またはウェイト・ウィンドウ法を輸送容器遮蔽解析のような深層透過問題に用いる際には、次の点に留意しなければならない。

① 隣り合うセル間のインポートランスやウェイト・ウィンドウ下限値の違いが大きくなりすぎないこと

隣り合うセルに与えるインポートランスやウェイト・ウィンドウ下限値の値の違いが大きくなり過ぎると、特に低インポートランス領域から高インポートランス領域に粒子が移動した際に、一つの粒子が多くの粒子にスプリッティングすることになり、飛跡数は多いものの、入射前の低インポートランス領域における分布状況を十分に表していないことになる。このようなことを防ぐため、MCNP では隣り合う空間セル間（ウェイト・ウィンドウの場合は隣り合うエネルギー・空間セル間）のインポートランス（ウェイト・ウィンドウの場合はウェイト・ウィンドウ下限値）の値の比が 4 を超えないことを推奨している。後述のように粒子数を一定に保つようなインポートランスやウェイト・ウィンドウ下限値の設定を行う場合には、インポートランスやウェイト・ウィンドウ下限値の比が 4 を超えないよう、インポートランスやウェイト・ウィンドウ下限値設定のための領域（MCNP ではセル）の分割を十分に細かくしなければならない。

② 線源から検出点までの粒子束の減衰に応じたインポートランス設定とすること

輸送容器の遮蔽計算でセル・インポートランス法を用いる場合、線源領域から容器外側までの粒子飛跡数をほぼ一定となるようにインポートランス設定を行うと、多くの場合効率の良い計算ができる。このためには、例えば最初に全てのインポートランスを 1 に設定した計算を行い、線源から検出点までの間の領域の粒子飛跡数を出力リストから読み取って、これがほぼ領域間で一定になるようにインポートランスを設定するとよい。ウェイト・ウィンドウ法の場合は、このような設定を手作業で行うのは難しいため、MCNP で用いられているようなウェイト・ウィンドウ下限値自動生成機能(ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータ)を用いるか、決定論的手法で随伴線束を予め計算しておいてパラメータ設定を行う方法が推奨される。

③ 二次 γ 線の線量計算においては、線源となる中性子のインポートランス設定にも留意すること

輸送容器の遮蔽解析では、表面の二次 γ 線線量への、表面近くの中性子遮蔽体での中性子吸収により生じる γ 線の寄与が大きい。したがって、二次 γ 線に着目した計算を行う際には、中性子遮蔽体中での中性子吸収を精度良く取り扱えるように、中性子のインポートランスや下限ウェイト設定に注意し、中性子遮蔽体まで十分な数の中性子が来るように配慮しなければならない。特にウェイト・ウィンドウ法を用いる場合には、熱中性子吸収による二次 γ 線を考えて、中性子線量にはあまり影響の無い低いエネルギー

の中性子の飛跡も十分に追えるように設定する必要がある。

- ④ ネクストイベントエスティメータなどと組み合わせて使う場合は、インポートランス 0 の領域に留意すること

ネクストイベントエスティメータなどの原子(核)と衝突後の粒子の方向を延長して評価を行うタイプの検出器は非常に効率が良いが、セル・インポートランスやウェイト・ウィンドウ法と組み合わせて使う場合には注意を要する。衝突点から検出点の間にインポートランス 0 の領域があると、そこは粒子が通過できないことになる。インポートランス 0 の領域は外部真空を表す場合のみに使用すること。

(a) 分散低減のための空間領域分割厚さ

輸送容器外部に設定した評価点に寄与する粒子の持つウェイトの大小の差が小さくなるようにセル分割を行う。前述のように、衝突吸収数が減少しないようにすることで、エスティメータへの粒子の寄与数を稼ぐことができるので、各セルにおける粒子の衝突密度の情報が参考になる。例えば MCNP の場合であれば、出力結果の **Activity in each cell** が提供する情報のうち、**Collision Density** の値が参考になる。必要に応じて、空間・エネルギーに与えるウェイトを調整して、線源領域から評価点(エスティメータ)の位置までの経路を構成するセルにおける **Collision Density** がほぼ一定あるいはやや増加傾向となるようにすべきである。衝突密度を若干増加傾向にしておくと、ロシアン・ルーレットにかかる粒子数が抑えられるので、計算に寄与する粒子の減少が小さくなる。また、ロシアン・ルーレットにより生き残った、大きなウェイトを持つ粒子数も小さくなり、計算の収束が改善されるので、計算時間は長くなるが、シミュレーションを確実に継続することができる。

ここで、空間分割(セル分割幅)が大きすぎると、粒子の持つウェイトがセル境界で大きく減少してしまい、空間・エネルギーに与えるウェイトを調整しても隣接セルの **Collision Density** が一定しない。粒子のウェイト変化が大きい物質のセル分割幅は、隣接するセルの **Collision Density** が一定する幅に調整すべきである。

セル分割幅の目安は、単一材料に対する深層透過体系での線量減衰率が参考になる。MCNP では、隣接する分割領域間のセル・インポートランスやウェイト・ウィンドウの比が 4 以内にするのが推奨されている。この推奨値に従った設定を行うには、単一材で構成された無限平板に対する遮蔽体内部の線量減衰分布の計算を行い、実効線量率が 1/4 となる概略厚み幅で空間分割する。表 5.3.2-2 に、各単一材料に対する実効線量が 1/4 となる概略厚みの参考値を示す。一般的に、輸送容器の遮蔽構造は多層であるため、深層透過体系の線量減衰率に基づく空間分割のみで適切な分割設定が行えるわけではない。領域間のパラメータの比は、領域の厚さが薄くなるに従い小さくすべきである。

ウェイト・ウィンドウを自動生成させる場合にも空間分割が必要であるが、その際、計算結果に大きな差が発生しない空間分割厚みを試計算により予め把握した上でウェイト生成計算を行うべきである。

表に記載されていない材料に対する空間分割厚みを求める場合、例えば次に示す方法で決定論的手法に基づく輸送計算コードを使用して求める方法がある：

- ① 各材料でできた半無限平板形状について、平板の片面に ^{239}Pu 熱中性子核分裂スペクトルあるいは ^{60}Co γ線を設定した線源が等方入射する条件を使用する。
- ② 平板の厚さは、線量が10桁程度の減衰となる厚さとする。
- ③ 実効線量の計算には Discrete Ordinate Sn コード(ANISN、DOT 及び DORT)を使用することができる。鉄中での中性子及び二次γ線(核分裂中性子線源)及び ^{60}Co γ線の実効線量減衰の例を図 5.3.2-4 に示す。

(参考文献)

- (1) 「モンテカルロ計算法高度化」研究専門委員会編, “モンテカルロ計算ハンドブック,” 日本原子力学会, 2006.

表 5.3.2-2 (参考)分散低減のための空間領域分割厚さ⁽¹⁾

(実効線量が 1/4 となる概略厚み)

材質	密度	領域分割厚さ(cm)	
	g/cm ³	中性子	γ線
普通コンクリート	2.2	7.2	4.9
鉄	7.86	14	1.4
水	1.0	4.9	9.6
ポリエチレン	0.92	4.6	10
鉛	11.34	194	0.87

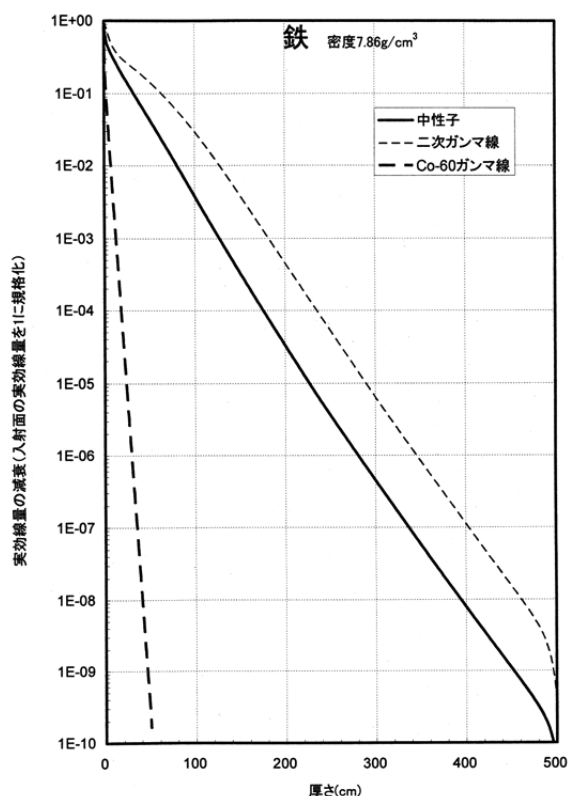


図 5.3.2-4 (参考)鉄中での中性子及び二次 γ 線(核分裂中性子線源)及び ^{60}Co 線の実効線量減衰⁽¹⁾

(b) 分散低減法のための軸方向セル分割の結合部

輸送容器外部に設定した評価点に寄与する粒子の持つウェイトの大小の差が小さくなるようにセル分割を行う。特に、軸方向及び側部方向セル分割は、容器表面から放出される粒子のウェイトに違いが現れないようにする。例えば、セル・インポートランスの等しいセルを結合させ、一つのセルとして記述する。そのような記述が困難である場合、輸送容器内部から外部に軸方向に透過した粒子と、径方向に透過した粒子のウェイトが調整できるような空間分割とすべきである(図 5.3.2-5)。

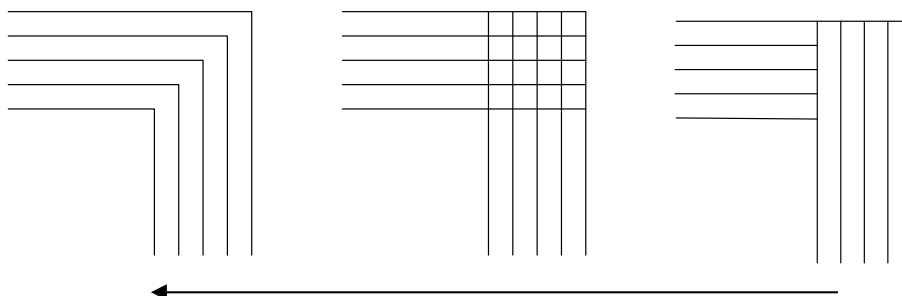


図 5.3.2-5 ウェイト調整の観点からより望ましい空間分割例

(c) 分散低減法のための径方向セル分割の結合部

輸送容器外部に設定した評価点に寄与する粒子の持つウェイトの大小の差が小さくなるようにセル分割を行う。輸送容器内部の線源から放出された粒子が容器本体胴部遮蔽体を通して、放熱フィン先端から外界に放出される粒子の持つウェイトと、放熱フィン基部から外界に放出される粒子のウェイトに大きな差があらわれないような工夫が必要である。例えば、放熱フィン領域のセル分割は、放熱フィン基部までのセル境界面から放熱フィン先端までを一つのセル、放熱フィン間の空隙領域を一つのセルで設定して、セル・インポートランスは、放熱フィンの幾何形状を表すセルと放熱フィン間の空隙領域を表すセルで等しくする(図 5.3.2-6)。

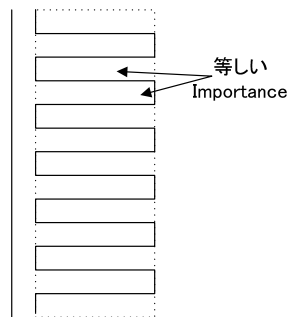


図 5.3.2-6 放熱フィン領域におけるセル分割例

(d) スーパーインポーズドインポートランスメッシュ

(a)(b)(c)で示したように、輸送容器外部に設定した評価点に寄与する粒子の持つウェイトの大小の差が小さくなるようにするために、空間のセル分割を行う必要がある。しかしながら、幾何形状及び材料境界を決めるセルに加えて空間のセル分割を行うと、複雑な幾何形状を持つ計算対象の場合、煩雑になり、未定義セルを見落とす等のミスの原因となる。複雑な幾何形状を持つ場合、スーパーインポーズドインポートランスメッシュを用いると、幾何形状とは独立に分散低減用の空間分割を行うことができるので、空間に設定するウェイトのことを考えずに幾何形状を入力することができ、形状入力が容易になる⁽¹⁾。

しかしながら、分割空間の位置とその空間に設定するウェイトの関係がわかりにくくなる。そのため、スーパーインポーズドインポートランスメッシュと空間に設定するウェイトの対応がうまく行っているかどうかの確認が難しい。さらに、スーパーインポーズドインポートランスメッシュを使用した場合、空間分割はデカルト座標あるいは円筒座標での分割の何れかで行うことになる。

ここで、(a)(b)(c)を見ると、輸送容器形状では、遮蔽材で構成される主な部位が円筒形状であることと、輸送容器外表面の計算で重要な放熱フィンや容器吊具(トラニオン)に代表される密度差の大きな部位においては、等しいウェイトとなるように設定する

べきであるということから、スーパーインポーズドインポートンスメッシュを円筒座標系で使用して、メッシュ幅を粒子の平均自由行程程度で設定しておき、後述する方法でウェイト・ウィンドウを自動生成させる方法が妥当である(図 5.3.2-7 参照)。具体的なウェイト・ウィンドウの自動生成方法は(e)に示す。

(参考文献)

- (1) X-5 Monte Carlo Team. *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*. Los Alamos National Laboratory. 2003, LA-UR-03-1987.

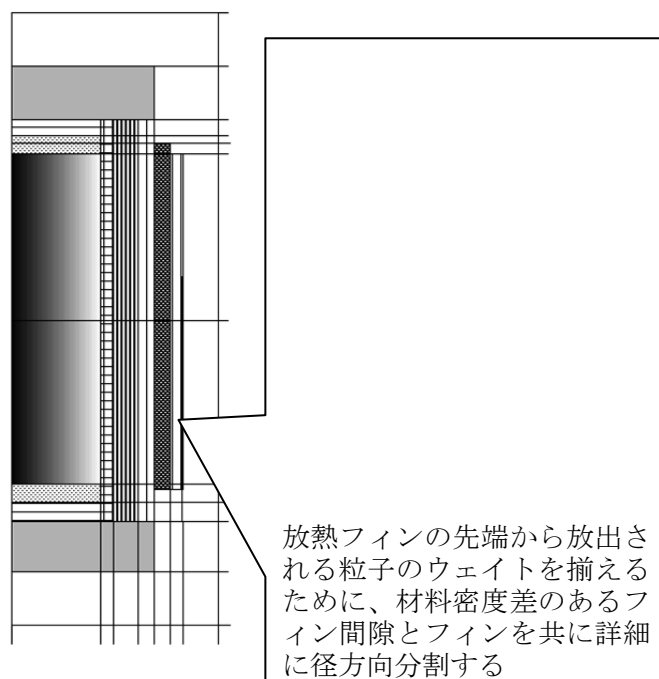


図 5.3.2-7 スーパーインポーズドインポートンスメッシュを用いた
空間分割と空間ウェイトの設定例

(e) ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータの使用法

MCNP コードではウェイト・ウィンドウ・ジェネレータにより自動的にウェイト・ウィンドウを生成する機能を有している。空間及びエネルギーに依存するウェイト・ウィンドウを手入力で設定するのは困難であることから、このウェイト・ウィンドウ・ジェネレータを併用した方がよい。以下に、ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータを用いたウェイト・ウィンドウの設定方法を示す⁽¹⁾。

- ① 最初の計算では、空間及びエネルギーに対する妥当なウェイトが不明であるため、ウェイト・ウィンドウを用いずにセル・インポートンスを使用する。目的とする放射線の遮蔽体での減衰程度を推定できる場合(例えば遮蔽材の巨視的断面積が明らかな場合)、セル・インポートンスの初期推定値として使用

することができる。遮蔽体の減衰程度を推定するための情報がない場合、値は全て1として計算する。

- ② 計算を行いたい点あるいは領域に対応したウェイト・ウィンドウを作成するために、ウェイト・ウィンドウの目標点を指定する。
- ③ ①～②の条件を設定した入力データを用いて、モンテカルロ計算を実行する。
- ④ ③の計算により、ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータで生成したウェイト・ウィンドウを用いて再度モンテカルロ計算を実施する。
- ⑤ 生成されたウェイト・ウィンドウを用いた計算結果の統計指標が妥当なものとなるまで④を繰り返す。

ただし、ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータでは、ターゲットとするタリーに当該セルから十分な粒子が到達しないと適切なウェイト・ウィンドウが生成されない。一般的に中性子計算ではウェイト・ウィンドウ・ジェネレータにより作成したウェイト・ウィンドウにより十分な分散低減が達成できるが、 γ 線計算では単にウェイト・ウィンドウ・ジェネレータを利用しても適切なウェイト・ウィンドウが得られない場合がある。そのため、ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータを用いる場合でも計算効率を上げるため、5.3.1(1)の打ち切り法や、5.3.1(2)(c)の線源バイアス法に基づく分散低減法と組み合わせて使用する。また、ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータを利用して効率よくウェイト・ウィンドウを生成する方法として、次の二つがある。

① 密度減少法

密度減少法は、遮蔽体の原子個数密度を一様に減少させることにより、仮想的に遮蔽体の厚さを薄くし、評価点に γ 線を到達させ、ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータによりウェイト・ウィンドウを作成する方法である²⁾。低密度の計算により生成したウェイト・ウィンドウを用いて徐々に密度を大きくし、実際の値に戻していく。

計算手順例を図 5.3.2-6 に示す。密度を変えながらウェイト・ウィンドウ・ジェネレータでウェイト・ウィンドウを作成していくので、セル数が膨大な使用済燃料輸送容器の幾何形状では密度を変化させたインプットの作成の手間が大きく、トータルの計算時間も大きい。ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータによる計算時間が大きい場合には有効な方法である。

(参考文献)

- (1) S. Sato, H. Iida, and T. Nishitani, "Evaluation of Shutdown Gamma-ray Dose Rates around the Duct Penetration by Three-Dimensional Monte Carlo Decay Gamma-ray Transport Calculation with Variance Reduction Method," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, 1237,

(2002).

- (2) 佐藤聡, 西谷健夫. 密度減少法で作成したウェイト・ウィンドウによるモンテカルロ計算分散低減に関する研究. 日本原子力学会和文論文誌, 2007, Vol. 6, No. 1, p. 5-9.

[密度を 0.5 倍→0.75 倍→1.0 倍に変更する例]

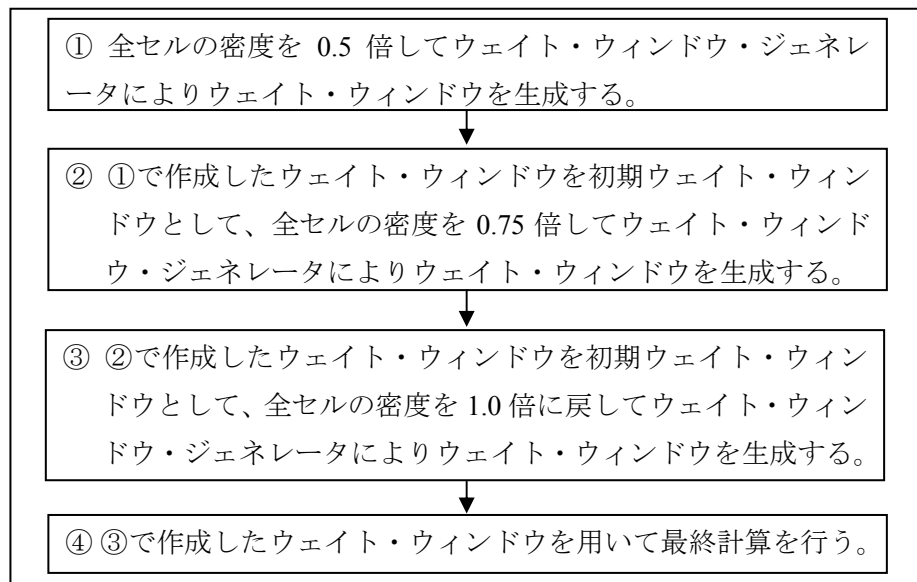


図 5.3.2-6 密度減少法による計算例

② エネルギー群分割法

使用済燃料の γ 線源は多群エネルギーで与えられるのが一般的である。各群の線源強度には大きな隔たりがあり、通常高エネルギー群の線源強度が小さく、低エネルギー群の線源強度が大きい。そのため、一度に全エネルギー群の計算を行うと、タリーに到達しない低エネルギー粒子の計算に時間を費やし、適切なウェイト・ウィンドウが生成されにくい。そこで、線源をエネルギー群によりいくつかのグループに分け、透過力の大きい高エネルギー側の計算により生成したウェイト・ウィンドウを用いて徐々にエネルギー群を増やしていき適切なウェイト・ウィンドウを作成する。エネルギー群の分割例を表 5.3.2-3 に示す。

この手法では、副次的な結果として、エネルギー群ごとの線量当量率を得ることができ、エネルギーカットの妥当性評価に利用することができる。

表 5.3.2-3 使用済燃料 γ 線の計算エネルギー群分割例

エネルギー 群番号	平均エネルギー	線源強度	1回目の 線源強度	2回目の 線源強度	3回目の 線源強度
	(MeV)	(p/s)	(p/s)	(p/s)	(p/s)
9	5.75E-01	8.24E+15			8.24E+15
10	8.50E-01	2.42E+15			2.42E+15
11	1.25E+00	4.32E+14			4.32E+14
12	1.75E+00	1.98E+13		1.98E+13	1.98E+13
13	2.25E+00	1.76E+13		1.76E+13	1.76E+13
14	2.75E+00	4.78E+11	4.78E+11	4.78E+11	4.78E+11
15	3.50E+00	6.08E+10	6.08E+10	6.08E+10	6.08E+10
合計		1.11E+16	5.39E+11	3.79E+13	1.11E+16

(4) 線源バイアス法

輸送容器の遮蔽計算における線源バイアスの設定について、考慮すべき点を示す。

① 線源空間バイアスの設定

径方向（側部）の線量当量率計算においては、径方向の線源空間バイアスの効果は小さい。輸送容器の遮蔽計算ではキャビティ内を線源領域として均質化した円筒形状の線源を用いる場合、円筒形の場合は外側の方が単位半径あたりの体積が大きいので、均一（単位体積当たり一定）な分布でも、自然に輸送容器表面の線量に影響の大きい外側から多く粒子が発生する。半径を変数とした分布で考えると、半径に比例してバイアスが掛かって外側からより多く発生するような分布となっている。

特に軽水炉からの使用済燃料輸送容器の場合、軸方向には約 4m と長い線源部となるため、蓋部・底部や側胴部の局所的な線量評価(トラニオン部など)においては、軸方向の線源空間バイアスは径方向と比較しての効果が大きい。蓋部の場合には上方にバイアスした、底部の場合には下方にバイアスした線源空間バイアスを利用して、評価する部位に合わせて異なるバイアスを用いて計算することができる。

② 線源エネルギーバイアスの設定

線源が核分裂中性子源や(α ,n)中性子源の場合は、もともと比較的高いエネルギーの線源スペクトルであるため、線源エネルギーバイアスの効果は薄く、線源エネルギーバイアスを設定する必要性は小さい(図 5.3.2-7 参照)。

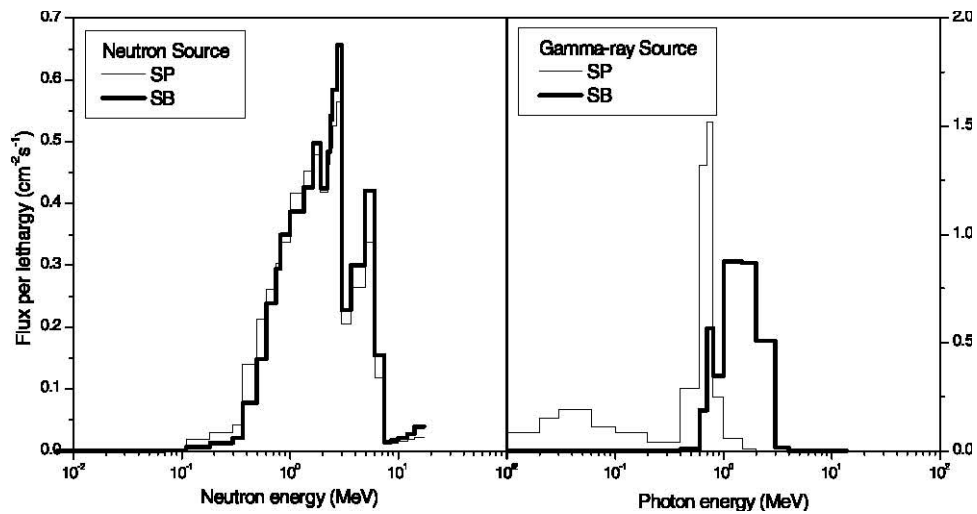


図 5.3.2-7 CADIS 理論に基づく計算によって得られた各線種に対する
エネルギーバイアス値⁽¹⁾

(細線がバイアスなしの線源スペクトル、太線がバイアスありの線源スペクトル)

γ 線源、特に FP 核種からの線源のような広がったエネルギースペクトルを持つ線源の場合は、線源エネルギーバイアスを設定すべきである。バイアスの値は、線量計算の場合は線量換算係数と、各エネルギーの γ 線の遮蔽体中での減衰に依存する。前述の CADIS 法などで得られたウェイト・ウィンドウと一貫性のある線源バイアスを利用するのが望ましいが、随伴 1 次元計算などで、大まかに検出器(線量など)への線源領域のエネルギー毎のインポートランスを求めて評価することもできる。

(参考文献)

- (1) R. J. Sheu, et. al., “Shielding Calculations for a Spent Fuel Storage Cask: A Comparison of Discrete Ordinates, Monte Carlo, and Hybrid Methods,” *Nucl. Sci. Eng.* **159**, 23-36, (2008).

5.4 輸送容器体系で使用が推奨されるタリーと使用時の留意点

本章では、タリーを2つに分類して概説して、次にタリーの設定方法及び計算結果の妥当性評価方法を明確化した。

5.4.1 モンテカルロ法を用いた遮蔽計算で使用されるタリーの概要⁽¹⁾

MCNP で利用可能な、種々の評価物理量の評価に使用できるタリーを種類別に分類したものを表 5.4.1-1 に示す。表中で特に輸送容器周辺の線量計算に有用なタリーは、面を交差する粒子束を評価できるタリー(識別番号 F2:)、セルを通過する粒子束を評価できるタリー(識別番号 F4:)、点又は円環の粒子束を評価できるタリー(識別番号 F5:)である。

表 5.4.1-1 タリーの分類

識別番号	種類	評価物理量	単位		
			Fn	*Fn	+Fn
F1:	Surface and Cell Tallies	面を交差する累積粒子数	Particles	MeV	-
F2:		面を交差する粒子束	Particles/cm ²	MeV/cm ²	-
F4:		セルを通過する粒子束			-
F6		セル平均のエネルギー付与	MeV/g	jerks/g	-
F7		セル平均の核分裂エネルギー付与			-
F5:	Detector Tally	点または円環の粒子束	Particles/cm ²	MeV/cm ²	-
FIP5:		Pinhole Image Tally			-
FIR5:		平板形状の流子束分布			-
FIC5:		円柱形状の流子束分布			-
F8	Pulse Height Tally	セル平均の波高分布	Pulses	MeV	charge

(1) サーフエィスクロッシングエスティメータ

ある面を通過した平均フラックスを求める方法。信頼性の高い結果を得るためには、面を通過する粒子数を必要とする。1回の粒子の交差当りの寄与は次式のようになる：

$$C_w = \frac{W_t}{A \cdot |\hat{n} \cdot \hat{\Omega}|}$$

ここで、

W_t ：衝突前の粒子の持つウェイト

A ：フルエンスを求めようとする面積

$\hat{n}$ ：法線ベクトル

$\hat{\Omega}$ ：粒子の方向ベクトル

(2) トラックレングスエスティメータ(セル形状、メッシュ形状)

ある領域内を通過する粒子の飛程長から粒子束を求める方法。評価体系を実際にランダムウォークする粒子を検出することから、最も基本的な方法である。評価領域を実際の大きさに設定でき、この領域を横切る粒子の数が十分に大きい場合には、信頼性の高

い結果が得られる。しかしながら、評価領域が小さく評価領域を粒子が通過しにくい場合には、発生させる粒子の増加に対して分散が減少しない。

飛程長評価子は、小体積 δV の粒子の飛程長を計算し、 δV で割って寄与を求める：

$$C_w = \frac{L}{\delta V}$$

ここで、

$$L = \sum_i W_t' \cdot l_i$$

W_t' ：衝突前の粒子の持つウェイト

l_i ： δV 中における i 番目の飛程長

(3) ネクストイベントエスティメータ (点形状、円環形状)

ランダムウォークをしている粒子が、ある点で衝突する毎にその衝突点から点検出器に寄与する量を全て合算する方法。線源から体系内で衝突せず、点検出器に直接寄与する粒子束も計算される。衝突によって評価位置まで粒子が実際に到達しなくても粒子束を求めることができる。

$$C_w = \frac{W_t \cdot e^{-\eta} \cdot f(\vec{r}, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}, E' \rightarrow E)}{R^2}$$

ここで、

W_t ：衝突前の粒子の持つウェイト

$e^{-\eta}$ ：粒子が衝突した後に次の衝突をする以前に面を交差する確率

η ：平均自由行程単位で飛行方向に沿った衝突点から評価点までの距離

$f(\vec{r}, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}, E' \rightarrow E)$ ：エネルギー E' の粒子が位置 $\vec{r}$ で衝突し、 $\hat{\Omega}'$ から $\hat{\Omega}$ のまわりの単位立体角の中に散乱される確率。当方散乱の場合 $f = 1/4\pi$ 。

R ：衝突点と評価点間の距離

(参考文献)

- (1) X-5 Monte Carlo Team. *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*. Los Alamos National Laboratory. 2003, LA-UR-03-1987.

5.4.2 各種タリーを輸送容器へ適用する際の留意点

上記に示した各種タリーを輸送物の計算に使用する場合の注意点について以下にまとめる。安全解析の観点からは輸送物外表面及び表面から1m離れた位置での線量当量率評価であるが、ここでは輸送物内部の計算を含めて説明する。

(1) サーフェイスクロッシングエスティメータ

輸送物の各構成部の境界での線量率等を計算する際に適したタリーである。特に輸送物の表面線量当量率の計算に適している。

サーフェイスクロッシングエスティメータのサイズについては、一般的には輸送物外部であれば測定に用いる測定器の断面積に準ずればよい。カウント数の目安としては1000カウント以上あれば通常は統計誤差3%程度以下となる。

局所的に線量当量率等が激しく変化する場所に適用した場合には、その場所の、あくまでも平均の線量当量率等を表すことになるため、局所的な変化を計算したい場合には用いることは難しい。ただし、線量当量率等の変化の方向等が分かっている場合には、その方向に直角の方向にタリーを設置する等の対応により、エスティメータの面積を確保することができるため、信頼度の高い評価結果を得ることも可能となる。

また、サーフェイスクロッシングエスティメータの場合は、多数の粒子の進行方向に対してサーフェイスを平行に近い形で設定すると入射する粒子の個数が少なくなることと、粒子の進行方向とサーフェイスの角度が非常に小さい場合には誤差が大きくなるため、粒子の流れの進行方向に対してサーフェイスが平行に近い形で設定することがないように注意すべきである。

MCNPでは、大きなサーフェイスを定義し、そのサーフェイスを区画していくことにより、求めたいサーフェイスクロッシングエスティメータを定義していくようになっている。これに対する計算の出力結果は、各サーフェイスクロッシングエスティメータの中から最後に定義されたエスティメータについての情報が示されるため、求めたいエスティメータが最後に来るように定義する方がよい。

サーフェイスクロッシングエスティメータはそのサーフェイスがセルの一部として定義されることによる計算時間の増加を除いてはその個数にはほとんど影響されない。このため、サーフェイスクロッシングエスティメータを用いる場合には、求めたい場所の周辺にもエスティメータを複数設置して、結果の妥当性を評価する際の補助的なデータとして使用することができる。

(2) トラッキングスエスティメータ (セル形状、メッシュ形状)

輸送物の内部及び外部の計算に適したエスティメータである。但し、局所的に線量当量率等が激しく変化する場所に適用した場合には、その場所の、あくまでも平均の線量当量率等を表すことになるため、局所的な変化を計算したい場合には用いることは難しい。

輸送物の表面線量当量率の計算ではトラックレングスエスティメータが厚さを持っているため、正確に表面直近の線量当量率等を計算するという観点からは不適であるが、実際の線量当量率の測定器がトラックレングスエスティメータと同様に厚さを持っているということを考えると実際の線量当量率の測定器と同等以下のサイズであれば実質的には問題とはならない。

トラックレングスエスティメータのサイズについては、輸送物外部であれば測定に用いる測定器の大きさに準ずればよい。カウント数の目安としては 1000 カウント以上あれば通常は統計誤差 3%程度以下となる。

形状的には球でも、円筒形でも直方体でも構わないが形状の定義が簡単な球が使用される傾向がある。

トラックレングスエスティメータはその領域がセルとして定義されることによる計算時間の増加を除いてはその個数にはほとんど影響されない。このため、トラックレングスエスティメータを用いる場合には、求めたい場所の周辺にもエスティメータを複数設置して結果の妥当性を評価する際の補助的なデータとして使用することができる。

また、MCNP コードに採用されているスーパーインボーズドメッシュタリー⁽¹⁾の場合には、使用している幾何形状に依存せずに自由に多数のトラックレングスエスティメータを設定することが可能であり、例えば、輸送物中央部での周方向や輸送物の軸方向の粒子束密度分布等を見るためのエスティメータとして使用する際には輸送物の幾何形状の入力とは完全に切り離して自由に設定することが可能であり便利である。現状はデカルト座標あるいは円筒座標での設定が可能である。

(3) ネクストイベントエスティメータ(点形状、円環形状)

点形状、円環形状は幾何形状として定義する必要もなく、設置が容易であり、どのような場所にも設定でき、かつ、計算結果も他の 2 種類のタリーに比べると比較的容易に統計誤差の少ない結果が得られるため、従来、最も使用されてきたタリーではあるが、実際には十分な計算が行われていないのに計算結果の統計指標としては十分に収束しているような値を示すことがあるため使用には細心の注意が必要である。ただし、局所的な線量率等の変化を計算するためには最も適したタリーである。

ネクストイベントエスティメータの計算結果は、非衝突粒子束と全粒子束の 2 種類の結果が出力される。ここで、非衝突粒子束の寄与の割合が全粒子束と同等である場合には十分なチェックが必要である。また、エスティメータへ寄与した粒子の存在するセルを確認することが望まれる。各セルから寄与する個数及び寄与率も計算結果から確認することができる。なお、エスティメータ近傍のセルからの寄与が多いのが通常である。

また、ネクストイベントエスティメータを使用する際には計算の最初の段階においては、前述のサーフェイスクロッシングエスティメータあるいはトラックレングスエスティメータを併用して同等の結果が得られていることを確認することが望ましい。

ネクストイベントエスティメータの場合には他の2種類のエスティメータに比べて計算時間が長くなる点が欠点のひとつである。エスティメータが増えると、それに比例するような形で計算時間も長くなるため、エスティメータの数は必要最小限に抑える必要がある。

なお、ネクストイベントエスティメータは任意の位置で利用できるが、輸送物内部および輸送物表面の計算にはあまり適していない。これはエスティメータの直近で粒子が散乱した場合のエスティメータへの寄与が極端に大きくなり、大きな計算誤差となることが大きな理由であり、これを避けるために除外半径（タリーに極端に近い場所で散乱したとしても、個々で定義された除外半径内であれば寄与の計算を実施しない）が設定されているが、空隙部以外の領域ではこの設定による誤差が発生するため、このような場合には他のエスティメータを使用することが望ましい。

(4) 設定方法の実例

附属書 6 にいくつかの計算例が掲載されているが、この中で各種タリーの比較がなされている。例えば、電力中央研究所 50 トン輸送物の測定値との比較においてトラックレングスエスティメータの大きさによる計算結果への影響が検討されており球の半径を小さくすると粒子の寄与が少なくなっていくため分散が悪くなり、解の収束が悪くなる問題が指摘されており、測定器と同等の大きさが妥当であるとされている。また、ネクストイベントエスティメータでの除外半径はタリーが空気中にあるときには計算結果に影響しないことが示されている。また、トラックレングスエスティメータとネクストイベントエスティメータ(point)の比較もなされており、適切に使用する限りは両者の計算結果はほぼ一致することが示されている。

附属書 6 では、使用済燃料輸送物 TN-12 の測定の比較において3種類のタリーの比較が行われている。サーフェイスクロッシングエスティメータに関しては側面中央部について面積として 100cm^2 と 400cm^2 の2種類の大きさを計算を実施したが、計算結果に大きな差はなくこの場合には大きな面積を用いた方が分散の小さいよい解が得られている。また、トラックレングスエスティメータに関しては半径 10cm、7cm、5cm の球とした場合の計算結果の比較が示されており、これらの計算結果は十分に分散が小さくなるまで計算すれば結果に大きな差はないことが示されている。

なお、ネクストイベントエスティメータ(point)の個数の違いによる計算時間への影響度の確認のために、同じ幾何形状を用いて計算時間を同一として比較したところ、ネクストイベントエスティメータ(point)の個数を1個と3個とした場合とで合計計算ヒストリ数に約2倍の差が発生している。サーフェイスクロッシングエスティメータやトラックレングスエスティメータでは、このような大きな計算時間の差は発生しない。

(参考文献)

(1) X-5 Monte Carlo Team. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Los Alamos National Laboratory. 2003, LA-UR-03-1987.

各統計指標の判定基準と留意点

モンテカルロ遮蔽計算手法によって得られた計算結果の信頼性を示すためには、原子炉施設等における申請側、審査側の両者が理解し納得の行くデータが提示されなければならない。両者の理解しうる提示データとしては、モンテカルロ計算結果に付随して出力される、幾つかの統計指標を引用することが適する。

例えば、MCNP コードにおいては、表 6.1-1 に示す 10 種類の統計指標が設けられている。また、他のモンテカルロ法コードにおいてもこれに類似した幾つかの統計指標が設けられている。モンテカルロ計算自体の信頼性については、各コードに設けられている統計指標を判断材料とすることが妥当である。しかしながら、これら統計指標の基準を全て満たすには難しい計算となる場合がある。本章では、解析精度の保証の観点から、統計指標の重要度及び判定基準を明確にして、統計指標の判定基準を満足しない場合の対応方法について述べる。

5.5 MCNP で評価される統計指標とその概要

MCNP を用いた計算で出力される統計指標は合計 10 項目である⁽¹⁾が、これら統計指標は、表 6.1-1 のように、平均値(mean)、相対誤差(R)、Variance of the Variance(VOV)、Figure of Merit(FOM)及び確率密度分布関数(PDF)の 5 つに分類される：

表 6.1-1 統計指標の分類

results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally 15									
tfc bin	--mean--	-----relative error-----			-----variance of the variance-----			--figure of merit--	--pdf--
behavior	behavior	value	decrease	decrease rate	value	decrease	decrease rate	value	behavior
desired	random	<0.05	yes	1/sqrt(nps)	<0.10	yes	1/nps	constant	random
observed	random	0.01	yes	yes	0.03	yes	yes	constant	random
passed?	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
									slope
									>3.00
									2.87
									no

分類	統計指標	
平均値	1	計算の後半において、平均値は、ヒストリ数 N の増加に伴い、ランダムな変動のみを示す。単調増加したり減少したりしないこと。
相対誤差	2	相対誤差は0.1以下(ネクストイベントエスティメータ(点形状、円環形状)においては0.05以下)であること。
	3	計算の後半において、相対誤差はヒストリ数 N の増加に伴い、ほぼ単調に減少すること。
VOV	4	計算の後半において、相対誤差は $1/\sqrt{N}$ で減少すること。
	5	VOVの大きさは、タリーの種類によらず0.1以下であること。
FOM	6	計算の後半において、VOVはほぼ単調に減少すること。
	7	計算の後半において、VOVはほぼ $1/N$ で減少すること。
PDF	8	計算の後半において、FOMはヒストリ数 N に関係なく一定であること。
	9	計算の後半において、FOMはヒストリ数 N の関数として単調増加あるいは単調減少しないこと。
PDF	10	タリーに記録された量の確率分布関数 $f(x)$ の最終的スロープが3以上であれば、完全なサンプリングが行われたものと見なせる。

(1) タリーの分散

モンテカルロ計算において、 i 番目のヒストリでタリーにスコア: x_i の寄与があるとする。このとき、粒子がタリー領域に到達しなかった場合はスコア: $x_i = 0$ である。一方、相互作用をせずにタリーに辿り着いた場合、スコア: x_i は場合により非常に大きくなる。 x と $x + dx$ の間でスコアに寄与する確率を $p(x)dx$ とする($p(x)$:確率密度関数(PDF))。モンテカルロ法を用いて下記に示す x の平均スコア: $\langle x \rangle$ を求めることを考える。

$$\langle x \rangle \equiv \int_0^{\infty} x \cdot p(x) dx \quad (1)$$

確率変数 x は $p(x)$ の一次モーメントであり、期待値と呼ばれる。確率密度関数: $p(x)$ は演繹的にはわからないため、モンテカルロ法では N 個の粒子のスコア数の平均値: $\bar{x}$ により $\langle x \rangle$ を近似している。

$$\bar{x} \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

(2)式によると、別の N 個の粒子の平均をとれば異なる $\bar{x}$ が得られる。しかしながら、大数の強法則により、 $N \rightarrow \infty$ とすることで $\bar{x} \rightarrow \langle x \rangle$ が保証され、有限な平均値: $\langle x \rangle$ を得ることができる。

スコア: x_i の変化量は分散によって得られる。 N が大きい場合、 x の分散は下式で表される:

$$S^2 \equiv \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cong \overline{x^2} - \bar{x}^2 \quad (3)$$

ここで、

$$\overline{x^2} \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (4)$$

平均値 $\bar{x}$ の分散値は、

$$S_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{N} S^2 \quad (5)$$

中心極限定理によると、大きなヒストリ数: N で計算を行えば、得られた平均値: $\bar{x}$ の分布は、真の平均値: $\langle x \rangle$ について分散値: $S_{\bar{x}}^2$ をもつ正規分布に近づく。モンテカルロ計算で減少させたい分散とは $S_{\bar{x}}^2$ のことであり、粒子数一定での計算では、分散値の平方根である標準偏差 $S_{\bar{x}}$ をできる限り小さくなるように分散低減法を用いる必要がある。

(2) 相対誤差

相対誤差(Relative Error): R は、下式で表されるように、平均値と平均値の標準偏差の比である:

$$R \equiv \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}} \quad (6)$$

$$R = \left[\frac{1}{N} \left(\frac{\bar{x}^2}{\bar{x}^2} - 1 \right) \right]^{1/2} = \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{(\sum_{i=1}^N x_i)^2} - \frac{1}{N} \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

R : 相対誤差

$S_{\bar{x}}$: 平均値 $\bar{x}$ の標準偏差

$\bar{x}$: 平均値

MCNPのマニュアルでは、相対誤差 R の判断基準の目安が下表のように示されている：

相対誤差 R の判断基準

相対誤差 R の範囲	解の信頼性
$0.50 < R < 1.00$	解は意味を持たない
$0.20 < R < 0.50$	数倍のファクターを考慮する解
$0.10 < R < 0.20$	疑わしい解
$R < 0.10$	一般的に信頼できる解(ネクストイベントエスティメータ(点形状、円環形状)を除く)
$R < 0.05$	一般的に信頼できる解(ネクストイベントエスティメータ(点形状、円環形状))

$S_{\bar{x}}^2$ 及び R の式(5)、(6)から、相対誤差: R はヒストリ数: N と $R \sim 1/\sqrt{N}$ の関係を持つ。したがって、原始的ではあるが、粒子のヒストリ数: N を大きくすれば、相対誤差は小さくなる。

相対誤差: R の値は次の2つの量によって決められている：

- ① ヒストリにおけるスコア効率: q 。これはスコア: $x_i \neq 0$ となるヒストリの割合である。
- ② 平均値: $\bar{x}$ に寄与する、 $x_i \neq 0$ のスコアの分散。

タリーに記録された量の確率密度分布関数: $f(x)$ には、 $x_i = 0$ での δ 関数が含まれている。 δ 関数は、線源粒子がタリーに寄与しない確率(例えば、線源粒子がタリー領域に入る前に吸収されてしまうような場合)を表す。

平均値: $\bar{x}$ の相対誤差: R は、 $R_{\text{eff}}, R_{\text{int}}$ の2つに分けられる(図2.1-1参照)。

$$R = R_{\text{eff}}^2 + R_{\text{int}}^2 \quad (7)$$

$$R_{\text{int}}^2 = \frac{\sum_{x_i \neq 0} x_i^2}{(\sum_{x_i \neq 0} x_i^2)^2} - \frac{1}{qN} \quad (8)$$

$$R_{\text{eff}}^2 = \frac{1 - q}{qN} \quad (9)$$

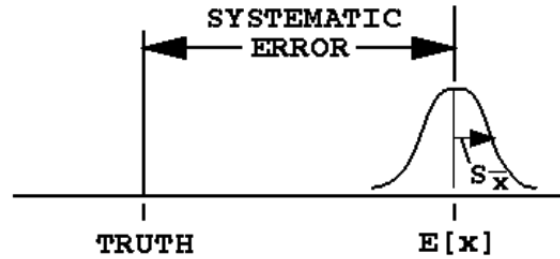


図2.1-1 真の値と期待値との間にある系統誤差及び期待値に対する推定統計誤差⁽¹⁾

R_{eff} : 非効率的にスコアされることに起因する相対誤差: R の拡がり (系統誤差)

R_{int} : スコアが $x_i \neq 0$ となる事象に内在する拡がり (推定統計誤差)

各々の線源粒子が全てタリーに寄与した場合($q = 1$)、 $R_{\text{eff}} = 0$ であるが、 $x_i = 0$ となる事象が増加してくると R_{eff} も増加する。一方、 R_{int} はスコアが $x_i \neq 0$ となる事象に内在する拡がりによる不確実性を表している。 $x_i = 0$ となるスコアがいくつかあっても、残りのスコアが全て同じになった場合、 $R_{\text{int}} = 0$ である。各々のスコア: x_i が異なってくると R_{int} は増加する。分散低減法の目的は、1)スコア効率: q を増加させ、 R_{eff} を小さくすること、2)スコアが $x_i \neq 0$ となる事象の拡がり: R_{int} を小さくすることである。

(3) Variance of the Variance

計算の平均値の精度(precision)を明らかにするためには、相対誤差: $\square R$ の評価が重要である。相対誤差: R の確度(accuracy)を示す指標として、相対誤差: R の相対変化すなわち分散の分散(VOV)がある。VOVは下式で表される:

$$\text{VOV} \equiv \frac{S^2(S_{\bar{x}}^2)}{S_{\bar{x}}^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2]^2} - \frac{1}{N} \quad (10)$$

ここで、 $S^2(S_{\bar{x}}^2)$ は $S_{\bar{x}}^2$ の分散である。

VOVは、タリーに記録された量の確率密度分布関数: $f(x)$ の3次及び4次モーメントに基づく量であり、相対誤差: $R(f(x))$ の一次及び二次モーメントに基づく量と比較して、スコアの変化量が大きい場合に対して非常に感度が高い。信頼性のあるタリーの平均値を得ようとする場合、発生確率は低いが高スコアとなる事象を適切にサンプリングすることが重要である。このため、VOVは信頼性のある結果の判断指標といえることができる。式(10)から、VOVは $1/N$ に従って減少することがわかる。MCNPでは、VOVが $1/N$ に従い単調に減少しているか否かを検証する。MCNPにおけるVOVの判断基準の目安は、タリーの種類によらず0.1以下である。

(4) Figure of Merit (FOM)

Figure of Merit (FOM)は下式で定義される:

$$\text{FOM} \equiv \frac{1}{R^2 \cdot T} \quad (11)$$

ここで、 T は計算時間(min.)である。 T は計算機によって変わるので、異なる計算機で計算した場合は同じ計算内容でもFOMが変ってくる。計算時間はヒストリ数: N に比例し、また式(5)(6)より $R^2 \sim 1/N$ であるため、計算初期の変動期間を除外してFOMは一定となる。モンテカルロ計算では、必要な計算時間ができるだけ短く、相対誤差はできるだけ小さくしたいことから、分散低減手法を評価する場合にはFOMの大きさをを用いることが多い。

(5) 確率分布関数

MCNPでは、タリーの平均値における信頼区間の推定値の質を評価するために、タリーに記録された量の確率密度分布関数: $f(x)$ を作成する。この分布の高スコア側の裾の評価は、発生確率は低いが高スコアが得られる事象において必要となる。このような事象では、以下に示す3つの場合が起り得る。

- ① 統計的に有意な信頼区間が設定されている(求めたい結果)。
- ② 発生確率は低いが高スコアとなる事象のサンプリングは、平均値と相対誤差 R を増加させ、FOMを著しく低下させる。この場合は、タリーの変動チャート(Tally Fluctuation Chart、TFC)の相対誤差: R 及びFOMを調べることで容易に発見することができる。
- ③ 平均値、相対誤差: R 、FOM及びVOVの統計的振る舞いが適切であり、一見収束しているように見える場合は最も発見しにくい。例えば、一見高スコアとなっているが、それは不適切にサンプリングされたためであり、実際には、タリーの平均値がかなり過小評価されている場合である。この場合、タリーに記録された量の確率密度分布関数: $f(x)$ の高タリー側の裾について詳細に確認する必要がある。

上述の③の場合を見つけるのが難しい主な理由は、タリーの平均値のための信頼区間の有効な推定値を求めるために必要な、十分なヒストリ数がわからないためである。中心極限定理(Central Limit Theorem)は、ヒストリ数: N が十分に大きい場合、標準偏差: σ/N をもった正規分布から抽出することと同等であることを保証する。MCNP で評価されたタリーのための信頼区間は、この正規分布の仮定に基づく。重要なことは、この仮定が有効であるためには、ヒストリ数 N はどのくらい大きければよいかということである。

中心極限定理が有効であるためには、タリーに記録された量の確率密度分布関数: $f(x)$ の一次及び二次モーメントが存在しなくてはならない:

$$E(x) = \int_0^{\infty} x \cdot f(x) dx, E(x^2) = \int_0^{\infty} x^2 \cdot f(x) dx \quad (12)$$

(VOV を有限とするため、三次及び四次モーメントも存在しなければならない。しかしながら、MCNP ではこのことについてあまり述べられていない)。

この2つのモーメントが存在する場合、タリーに記録された量の確率密度分布関数: $f(x)$ は x とともに $1/x^3$ よりも速く減衰する性質をもつ。これはタリーの確率密度分布関数の正確な振る舞いである。MCNPでは、経験的な確率密度分布関数の高スコア側の裾を分析することで、このような性質をチェックしている。

MCNPでは、最大200ヒストリにおける最高スコアを用いて、確率密度分布関数の高スコア側の裾のスロープ(傾斜)を評価する。この評価は、 a 及び k をパラメータとしたPareto関数: f_{Pareto} を高スコア側の裾に対してフィッティングすることによってなされる。

$$f_{\text{Pareto}} = \frac{1}{a \cdot (1 + kx/a)^{1+(1+k)}} \quad (13)$$

また、SLOPE(傾斜)は、次式で評価される：

$$\text{SLOPE} = 1 + \frac{1}{k} \quad (14)$$

MCNPにおける確率密度関数の出力プロット図には、Pareto関数のフィッティング及びタリー平均値が出力される。

高タリー側の裾が条件を満たすためには、中心極限定理が適用できると判断できるだけの十分なヒストリ数で計算を行わなければならない。すなわち、 $\text{SLOPE} = 3$ (10%の精度)あるいはそれより大きくなくてはならない。不十分なヒストリ数で、発生頻度が低く、高スコアとなる事象がタリーされた場合、SLOPEはこの基準を満たさない。ヒストリ数が少なすぎてスロープを評価できない場合、 $\text{SLOPE} = 0$ になる。確率密度分布関数の減衰が $1/x^{10}$ よりも大きい場合、 $\text{SLOPE} = 10$ (完全値)となる。

(6) その他

(a) 信頼区間(表6.1-2)

MCNPでは、タリーの相対誤差: R から信頼区間を推定する。得られた平均値と平均値から評価された不確実性には相関があることから、信頼区間の中点は平均値から若干シフトさせる必要がある。この中点移動量(SHIFT)は三次中央モーメント(歪度)に比例し、 $1/N$ で減少する。MCNPではこのような信頼区間の微調整が行われる。

(b) 保守的なタリー推定値(表6.1-2)

発生頻度が低く、高スコアとなる事象が、計算結果に反映されなかった懸念のある場合、MCNPの出力結果から情報が得られる。MCNPの出力結果には、例えば N ヒストリとその次のヒストリ $N + 1$ における最大スコアが同じであった場合に、平均値、相対誤差 R 、VOV、信頼区間等がどのようになるかが出力される。この二つの結果が大きく異なる場合は、結果を疑うべきである。

表 6.1-2 信頼区間の微調整及びヒストリの変化による各統計指標の変化

(confidence interval shift)/mean = 0.0000

shifted confidence interval center = 3.22680E-10

if the largest history score sampled so far were to occur on the next history, the tfc bin quantities would change as follows:

estimated quantities	value at nps	value at nps+1	value(nps+1)/value(nps)-1.
mean	3.22676E-10	3.22693E-10	0.000053
relative error	2.91969E-03	9.63926E-04	-0.669853
variance of the variance	4.61340E-04	4.75638E-04	0.030992
shifted center	3.22680E-10	3.22680E-10	0.000000
figure of merit	9.49734E+01	8.71341E+02	8.174579

(c) 10個の統計量の確認

MCNPでは、計算結果の精度を評価できるように、表6.1-1に示す10項目の統計指標が設けられている。

MCNPでは、表6.1-1に示す統計量確認項目に対する判定基準を満足しない計算結果となった場合、警告が出力される。また、タリーに記録された量の確率分布関数: $f(x)$ がプロットされる。10個の確認項目の判定基準を満足した場合、平均値と信頼区間(1 σ 、2 σ 及び3 σ レベル)が表示される。MCNPにおけるヒストリ数に対する各種統計量の推移例を図6.1-2、図6.1-3に示す。図6.1-2は、ある評価点にサーフェスクロッシングスエスティメータ(F2)とネクストイベントエスティメータ(点形状)(F5)を使用して計算したときのヒストリ数に対する各統計指標の変化を示す。この例においては、F2の場合、ヒストリ数 10^7 において、10項目の統計指標の目標値全てを満足した。ヒストリ数に対する各統計指標の変化をみると、平均値とFOMの2つの統計指標は全ヒストリをとおして一定であり、相対標準偏差は $1/\sqrt{N}$ で、VOVは $1/N$ で単調減少している。さらに、SLOPEは10を示している(SLOPEの値が大きいということは、設定したタリーに十分な数だけ粒子が到達することが期待されるということである)。

一方、F5の場合はあまり収束していない。平均値、相対標準誤差、VOV及びFOMは変化幅が大きい。これは、F5を設定した座標近傍で散乱した大きなウェイトを持つ粒子をF5がスコアしていることが理由である。SLOPEの値は小さく、ほぼ一定のままである。

この例において、ヒストリ数を5000で打ち切り、他の統計指標の評価をせずに単に相対標準誤差のみで計算結果を評価した場合、F2(相対標準誤差 >0.2)と比較して、F5(相対標準誤差 <0.06)による計算結果の方が正しいように錯覚してしまう。ヒストリ数 10^7 だけ計算を行った場合、F2による計算精度の方が高いことは明らかである。

この例に対するF2及びF5の確率分布関数を図示したものが図6.1-3である。F5のスコア幅はF2の場合と比較して大きく、さらに分布の最大値が片側に偏っており、裾を引いた確率分布となっている。このため、平均値も片側に偏っている。

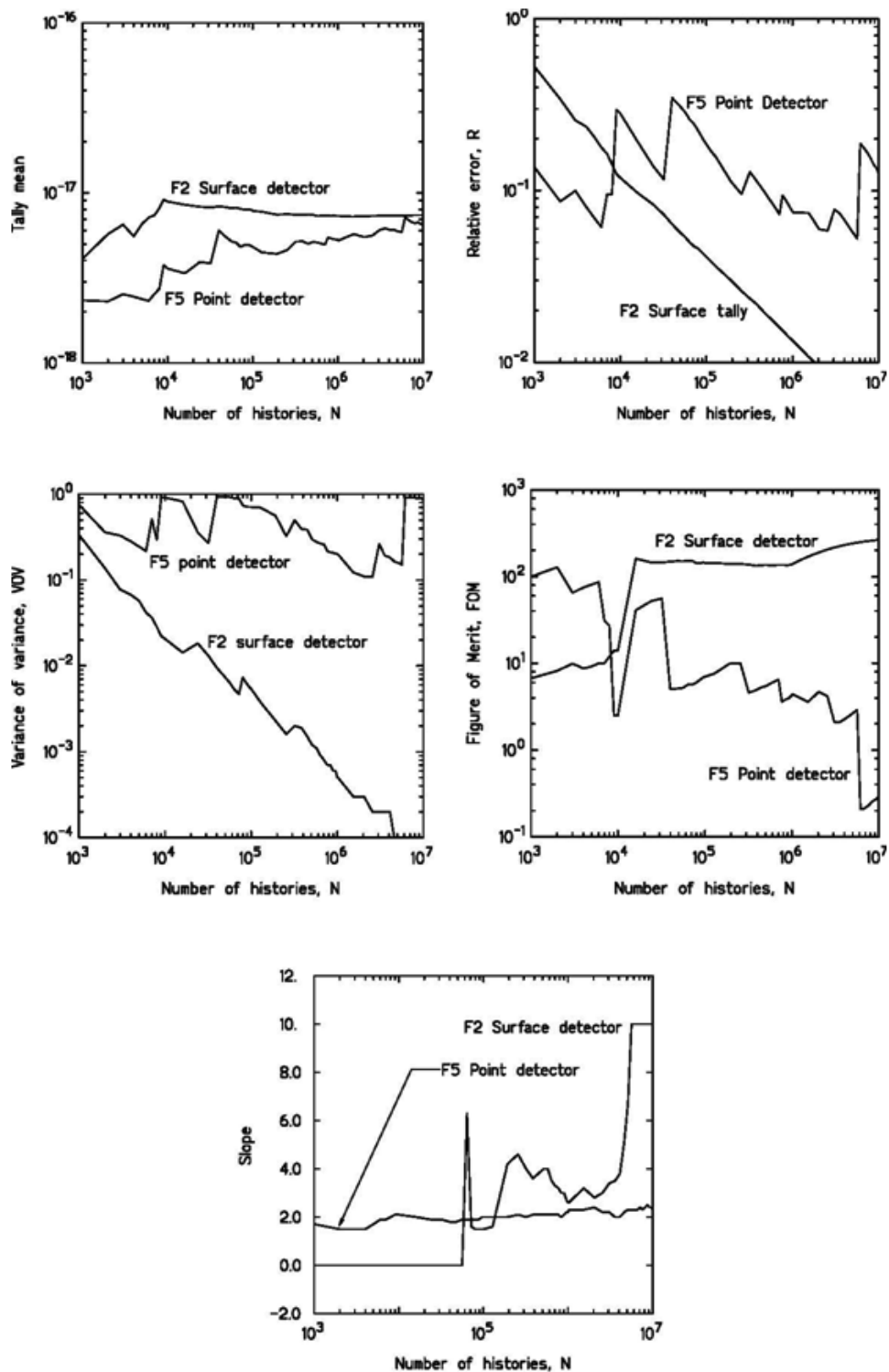


図6.1-2 MCNPにおけるヒストリ数に対する各種統計量の推移例⁽²⁾

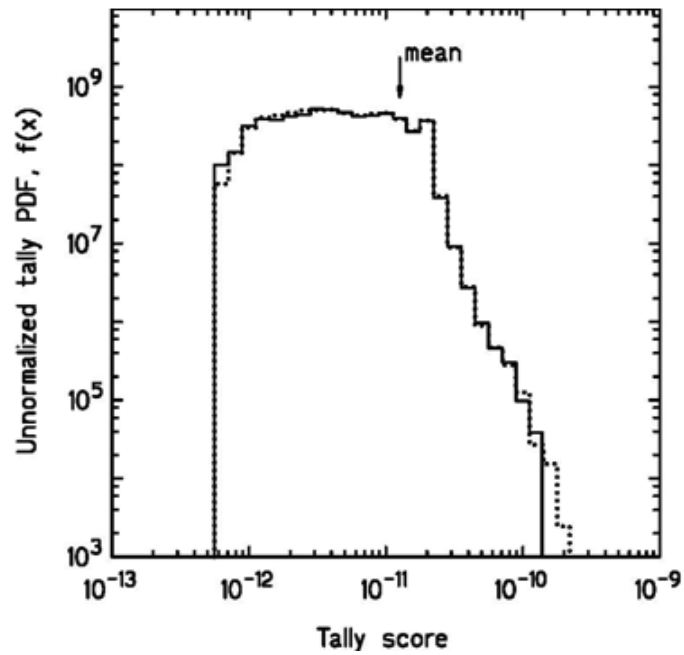


図 6.1-3(a) サーフェスエスティメータによる確率分布関数⁽²⁾
(実線はヒストリ数 10^6 、破線はヒストリ数 10^7 と対応)

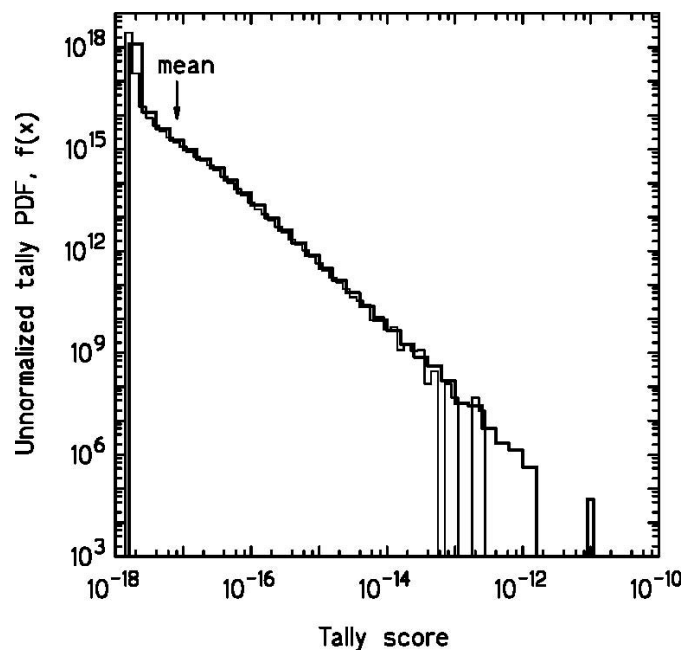


図 6.1-3(b) ネクストイベントエスティメータ(点形状)による確率分布関数
(実線はヒストリ数 10^6 、破線はヒストリ数 10^7 と対応)⁽²⁾

(参考文献)

- (1) X-5 Monte Carlo Team. *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5.* Los Alamos National Laboratory. 2003, LA-UR-03-1987.
- (2) J. K. Shultis, "An MCNP Primer," Kansas State University, 2006.

5.6 統計指標の判定基準及び判定における留意点

MCNP により信頼性の高い解析結果を得るには、使用するすべての核データや、幾何形状の正確性がまず必要である。そのもとに、6章1節で述べられた統計指標を満たすことにより、その信頼性は十分なものとなる。線源や幾何形状、また遮蔽材料などが解析対象と同様な条件の信頼できるベンチマーク実験があり、MCNP による解析結果が検証されていれば、MCNP の解析結果に統計誤差を付加して結果とすることは、問題がない。

しかしながら、解析を行うにあたって解析対象と同様な遮蔽実験は決して多くないのが現状である。解析結果の正確性を判定するには、まず統計指標を満足していることが条件となるが、計算精度(precision)がいくら高くても、正確性(accuracy)の評価はベンチマーク実験による必要がある。1章1節の背景に示すとおり、モンテカルロ計算を導入する目的の1つは、モンテカルロ計算により計算に用いる幾何形状を実際に近づけることにある。すなわち、従来の冗長な幾何形状の裕度を削減することにあるが、このことがモンテカルロ計算の課題の1つになっている。

そこで、一般に MCNP による解析結果の正確性を判定するには、まず線源条件、幾何形状、解析体系の材料成分の正確さの確認、及び統計指標が条件を満足しているかの確認が必要である。解析対象によっては指標の推奨範囲を満たさない場合もあり得る(たとえば、相対誤差が10%を超える場合)、その場合は計算結果に計算精度を明示する必要がある。その上で、正確性(accuracy)に関しては、解析対象に対し、放射線挙動が物理的に正しいと判断される場合に限り、結果が計算の精度として十分信頼できるものと判定することは可能である。

この判断方法としては、次の3項目が挙げられる(図6.2-1に概念図を示す)：

- ① 線量当量率分布が連続であることの確認
→輸送容器周辺の線量当量率をメッシュタリー等で計算することで確認可能
- ② ウェイト・ウィンドウが物理的に不正確なバイアスとなっていないことを確認
→ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータで設定する目標タリーに設定していないウェイト・ウィンドウによる結果と目標タリーに設定した場合のウェイト・ウィンドウによる結果に有意差がないことで確認可能
- ③ 異なる計算方法によるタリーでも同等の計算結果が得られることを確認
→6章1節で確認したように、ネクストイベントエスティメータは、サーフェスエスティメータやトラックレングスエスティメータと併用して利用すべき

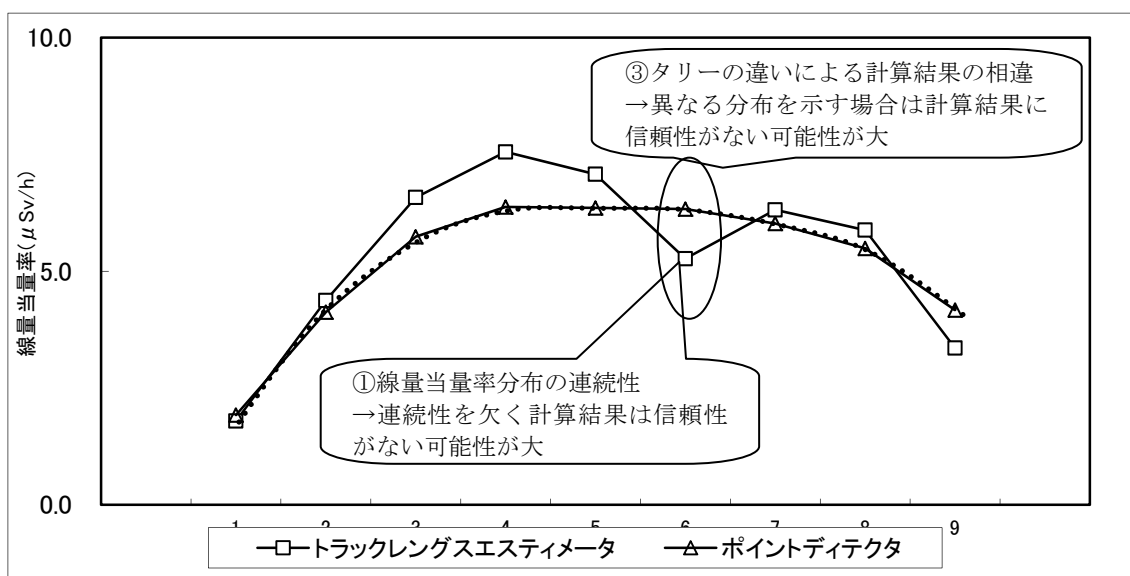
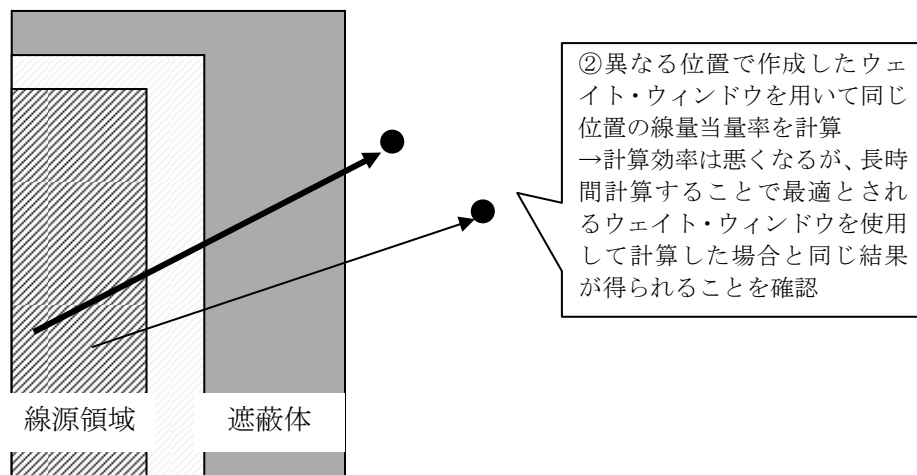


図 6.2-1 計算結果の信頼性を判定する方法(例)

6. おわりに

本ガイドライン原案は、第1章で述べたように、放射性物質輸送容器のうち、軽水炉の使用済燃料を収納物とする容器を対象として、これら容器に必要な放射線遮蔽計算、放射線遮蔽設計及び文書化方法に関する手引きを提供するものである。今後、従来検討が行われていない放射性物質の輸送を検討する場合には、輸送に先立ち、予定収納物の線源強度データの収集・整備を進めて許認可上適切な線源強度を把握しておくことと、その線源強度に類似した線源を使用した遮蔽実験結果を取得しておき、モンテカルロ遮蔽計算コードでベンチマーク解析を行うことが必要である。

附録1 用語と定義

[放射性物質輸送容器に関する用語]⁽¹⁾

輸送物

輸送に供するために放射性収納物を収納した輸送容器のこと。輸送容器の型は、放射能限度及び物質の制限に従い、かつそれぞれに対応した要件に適合するものである。核分裂性物質または六フッ化ウランを収納している輸送物には、追加要件が課せられる。

輸送容器

輸送容器とは、放射性収納物を完全に密閉するのに必要な構成要素の集まりをいう。それは、特に、一個又はそれ以上の容器、吸収材、支持構造物、放射線遮蔽体、並びに充填、取り出し、換気及び圧力逃がしのための付属機器、冷却用、機械的衝撃吸収用、取り扱い及び固ばく用並びに断熱用の装置、及び輸送物に不可欠な付属機器から構成される。輸送容器は箱、ドラム缶又は同様の容器であり得るし、若しくは貨物コンテナ、タンク又は中型容器でもあり得る。

[遮蔽計算マニュアル]⁽²⁾

散乱線

線源から着目している点に到達する放射線のうち、直接線以外の放射線をいう。遮蔽壁の中で散乱された放射線が壁を通過して外側に到達する場合と、部屋や迷路などの床や壁の表面で後方散乱された放射線が空気中を通過して到達する場合がある。

直接線

線源から出発した γ 線や中性子などの放射線が、媒質の原子と相互作用（散乱）せずに問題とする点に到達した場合、その放射線を直接線という。

ストリーミング

狭あいな遮蔽欠損部を通して放射線が漏えいする現象をいう。

一次 γ 線

線源から放出された γ 線が、直接線または散乱線として到達する γ 線をいう。

二次 γ 線

中性子などの一次放射線が原子核と相互作用することによって生成された γ 線をいう。

点等方向線源

点状の放射性物質からあらゆる方向に一様に放射線が放出される線源をいう。

[分散低減法に関する用語]

粒子ウェイト (particle weight)

粒子に与えられた任意の正の実数値。非アナログモンテカルロ計算時に用いる、粒子の重み付けを表し、例えば粒子の(暗黙)捕獲イベントが起こるとその捕獲確率に応じて減少する。アナログモンテカルロ計算時には粒子ウェイトは 1 であり、捕獲イベントが起

こると粒子は消滅する。

分散低減法 (variance reduction method):

母平均を μ 、母分散を σ^2 とすると、その標本平均(標本数 n)は n が十分大きければ正規分布 $N(\mu, \sigma^2/n)$ に従う(中心極限定理)。したがって、標本数(ヒストリ数あるいはタリーでの計数回数に相当)の増加あるいは、母分散の減少により標本平均のばらつきをより小さくすることができる。粒子分布制御等により母分散の低減や(同一時間あたりの)標本数の増加を図るテクニックを総称し、分散低減法と呼ぶ。

バイアス (bias)

計算結果の分散を低減させ、統計的収束を加速するため、(期待値を変動させないようにしながら)人為的に試行粒子の数や、イベントの発生確率を変化させること。

アナログモンテカルロ (analog Monte Carlo)

媒質中の粒子の輸送過程を忠実に再現してモンテカルロ法を用いたシミュレーションをすること。

非アナログモンテカルロ (non-analog Monte Carlo)

計算効率向上のために粒子にウェイトを与え、実際の粒子の輸送過程とは異なる人工的な操作を加えてモンテカルロ法を用いたシミュレーションをすること。

インポートランスサンプリング (importance sampling)

ある量の期待値を計算する場合に、その確率変数が大きな値をとる範囲を重点的に抽出することで、期待値を評価する際の精度を改善する手法。

暗黙吸収(捕獲)(implicit capture)

吸収反応による計算終了をなくし、代わりに粒子の持つウェイトを減少させることで粒子の吸収反応を表現する手法。

スコア (score)

タリーに到達する粒子のウェイト。

ヒストリ (history)

粒子の発生から消滅ないし計算体系の外に放出されるまでの一つの過程。

スプリッティング (splitting)

計算結果に対する寄与の大きい領域を重点的にサンプリングするために、その領域に入った粒子を複数の粒子に分け、それぞれを独立に計算する方法。計算結果(の期待値)を変化させないために、粒子が n 個にスプリッティングされた場合、分割後の各粒子ウェイトは $1/n$ に減少する。

ロシアン・ルーレット (Russian roulette)

スプリッティングとは逆に、計算結果に対する寄与の小さい領域での計算を打ち切るために、粒子をある確率で生存させ、それ以外の場合に計算を終了させる方法。生存確率を P とした場合、ロシアン・ルーレット生存後の粒子ウェイトは $1/P$ 倍に増加する。

平均自由行程 (MFP: mean free path)

光子のように電荷を有しない放射線が物質中に入ったとき、最初に相互作用するまでに通過する距離の平均値をいう。平均自由行程は線減衰係数： μ の逆数($\text{mfp} = 1/\mu$)である。

セル・インポートランス (cell importance)⁽⁷⁾

セルの重要性を表す正の実数。インポートランスが I のセルからインポートランスが J のセルに粒子が移動すると、 J/I が1より大きい場合は粒子が J/I 個にスプリッティングされ、 J/I が1より小さい場合は確率 J/I でロシアン・ルーレットが適用される。

ウェイト・ウィンドウ (weight window)⁽⁷⁾

位相空間(空間及びエネルギー)依存でロシアン・ルーレット及びスプリッティングをする基準となる粒子ウェイトの幅。ウェイトがこの幅に収まらない粒子にはスプリッティングあるいはロシアン・ルーレットを適用される。

経験式法 (empirical formula)⁽³⁾

各分割セルのウェイト・ウィンドウ下限値を経験式によって求めること。

経験式は下記のとおりである：

$$W_m = W_0 \cdot f^{m-1}$$

W_m ： m 番目のセルにおけるウェイト・ウィンドウ下限値

m ：線源から検出器までのセル数

W_0 ：ウェイト・ウィンドウ下限値の初期値($W_0 = 1.0$)

f ：エネルギー、材質及び厚さに依存する係数

エネルギー範囲において下記のような W_0, f が提案されている：

- ・ $0.005\text{MeV} < E_n < 0.0075\text{MeV}$; $W_0 = 0.64, f = 0.75$
- ・ $0.075\text{MeV} < E_n < 0.72 \text{ MeV}$; $W_0 = 0.31, f = 0.6$
- ・ $0.72 \text{ MeV} < E_n < 14.5 \text{ MeV}$; $W_0 = 0.13, f = 0.5$

現在報告されている W_0, f の値は、鉄のみである。

密度減少法 (density reduction method)⁽⁴⁾

遮蔽体の原子個数密度を一様に減少させることにより、仮想的に遮蔽体の厚さを薄くし、短い時間で評価点に中性子を到達させ、ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータによりウェイト・ウィンドウ下限値を作成する方法。密度減少によってウェイト・ウィンドウ下限値を作成後、原子個数密度をもとの値に戻し、作成したウェイト・ウィンドウ下限値を用いて計算することにより、計算時間を短縮させる。場合によって、密度の変化を数段階にわけて計算する。

単色中性子減衰曲線法 (mono-energy neutron attenuation curve method)⁽⁵⁾

中性子透過物質の巨視的全断面積を利用し、中性子束の減衰の傾向とウェイト・ウィンドウ下限値の減少傾向が類似していることを利用した方法：

- ① 分散低減のための空間分割幅は粒子の平均自由行程程度に設定する。中性子の平均自由行程は $\lambda = 1/\Sigma_t$ で表される。平均自由行程： λ は中性子の持つエネルギーにより異なるが、遮蔽計算で取扱う線源の最高エネルギーの中性子に対応する λ を用いる。

- ② ある物質中の中性子束： ϕ の減衰は近似的に $\phi = \phi_0 \cdot \exp(-\Sigma_t \cdot t)$ である。Weight Windowの変化は、定性的に中性子束減衰曲線に類似する。そこで、

$$\phi = \phi_0 \cdot \exp(-\Sigma_t \cdot t) \rightarrow W_L = W_0 \cdot \exp(-\Sigma_t \cdot t)$$

と仮定(通常、 $W_0 = 1$)して W_L を求める。

随伴線束法 (adjoint flux method)

予め決定論的輸送計算コードで随伴線束を計算してその逆数をウェイト・ウィンドウ下限値として利用する方法。

CADIS (consistent adjoint driven importance sampling)⁽⁶⁾

線源バイアスと輸送バイアスを整合させて分散低減を行う手法。

[タリーに関する用語]⁽⁷⁾

タリー(Tally 原義：(得点や件数の)勘定、集計)

モンテカルロシミュレーションでは粒子的描像で放射線の運動をシミュレートする。この微視的な粒子運動を集計し、フラックス等の巨視的な物理量を得るための機能をタリーと呼ぶ。

エスティメータ (Estimator, 推定量、統計量)

粒子運動から(例えば)フラックスへ変換する方法は複数あり、どのような量を用いてフラックスを統計的に推定するかという推定量をエスティメータという。以下の各エスティメータの説明では、各粒子からのフラックスへの寄与を C_w とした。

トラックレングスエスティメータ (track length estimator):

ある領域内を通過する粒子の飛程長から粒子束を求める方法。評価体系を実際にランダムウォークする粒子を検出することから、最も基本的な方法である。評価領域を実際の大きさに設定でき、この領域を横切る粒子の数が十分に大きい場合には、信頼性の高い結果が得られる。しかしながら、評価領域が小さく評価領域を粒子が通過しにくい場合には、発生させる粒子の増加に対して分散が減少しない。トラックレングスエスティメータは、小体積 δV の粒子の飛程長を計算し、 δV で割って寄与を求める：

$$C_w = \frac{L}{\delta V}$$

ここで、

$$L = \sum_i W_t' \cdot l_i$$

W_t' ：衝突前の粒子の持つウェイト

l_i ： δV 中における i 番目の飛程長

サーフェイスクロッシングエスティメータ (surface crossing estimator):

ある面を通過した平均フラックスを求める方法。信頼性の高い結果を得るためには、面を通過する粒子数を必要とする。1回の粒子の交差当りの寄与は次式のようになる：

$$C_w = \frac{W_t}{A \cdot |\hat{n} \cdot \hat{\Omega}|}$$

W_t : 衝突前の粒子の持つウェイト

A : フルエンスを求めようとする面積

$\hat{n}$: 法線ベクトル

$\hat{\Omega}$: 粒子の方向ベクトル

ネクストイベントエスティメータ (next event estimator):

粒子が、ある点で衝突する毎にその衝突点から評価点に寄与する量を全て合算する方法。線源から体系内で衝突せず評価点に直接寄与する、無衝突粒子束を計算することもできる。また、タリー位置まで粒子が実際に到達しなくても粒子束を求めることができる。

$$C_w = \frac{W_t \cdot e^{-\eta} \cdot f(\vec{r}, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}, E' \rightarrow E)}{R^2}$$

W_t : 衝突前の粒子の持つウェイト

$e^{-\eta}$: 粒子が衝突した後に次の衝突をする以前に面を交差する確率

η : 平均自由行程単位で飛行方向に沿った衝突点から評価点までの距離

$f(\vec{r}, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}, E' \rightarrow E)$: エネルギー E' の粒子が位置 $\vec{r}$ で衝突し、 $\hat{\Omega}'$ から $\hat{\Omega}$ のまわりの単位立体角の中に散乱される確率。当方散乱の場合 $f = 1/4\pi$ 。

R : 衝突点と評価点間の距離

また評価点は空間の一点だけでなく、円環状の領域等に設定することもある。

除外半径 (exclusion radius):

散乱媒質中で点検出器評価子あるいは円環検出器評価子を使用する際に、散乱点から評価点の距離が近い場合、非常に大きな分散が発生する($R \rightarrow 0$; $C_w \rightarrow \infty$)。この特異点的影響を除外するため、除外半径を設定する。除外半径の設定値によっては本来の寄与を除外する可能性がある。

[計算結果及び統計誤差に関する用語]

相対標準偏差 (FSD:fractional standard deviation):

FSDは下式で表されるように、平均値と平均値の標準偏差の比であり、相対的な統計誤差を表す。(以後「相対誤差」と言及した場合、とくに断りのない限りFSDを指すものとする)

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

$S_{\bar{x}}$: 平均値 $\bar{x}$ の標準偏差

$\bar{x}$: 平均値

VOV (variance of variance)

FSDの相対変化、すなわち分散の分散。FSDの確度(accuracy)を示す指標として使用される。

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

$S(S_x^2)$: S_x^2 の分散

VOVは、タリーに記録された量の確率密度分布関数: $f(x)$ の3次及び4次モーメントに基づく量であり、相対標準偏差:FSD ($f(x)$ の一次及び二次モーメントに基づく量)と比較して、スコアの変化量が大きい場合に対して非常に感度が高い。信頼性のあるタリーの平均値を得ようとする場合、発生確率は低いが高スコアとなる事象を適切にサンプリングすることが重要である。VOVは $1/N$ に従って減少する。

FOM (figure of merit)

計算効率を示す量であり、下式で定義される：

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

T : 計算時間(min.)

R : 相対誤差

T は計算機によって変わるので、異なる計算機で計算した場合は同じ計算内容でもFOMが変わる。計算時間はヒストリ数 N に比例し、また $R^2 \sim 1/N$ であるため、計算初期の変動期間を除外してFOMは一定となる。モンテカルロ計算では、必要な計算時間ができるだけ短く、相対誤差はできるだけ小さくしたいことから、分散低減手法を評価する場合にはFOMの大きさをを用いることが多い。

物理乱数

自然界のランダムな現象に基づいて生成した乱数のこと。

線形合同法 (linear congruential generator)

線形合同法では次の漸化式に従い一様乱数を生成する：

$$S_i = (aS_{i-1} + c) \bmod m$$

$$\xi_i = S_i/m$$

ここで、 a, c, m, S_i は正の整数である。 m を法(modulus)とする剰余演算より、 $0 \leq S_i < m$ であり、 $0 \leq \xi_i < 1$ である。また、 $c = 0$ の場合を乗算合同法、 $c \neq 0$ の場合を混合合同法という。線形合同法で生成される乱数の周期は最大でも m (乗算合同法の場合、 $S_i \neq 0$ であるため最大 $m - 1$)である。

(正)確度 (accuracy)

値が真値に近い値であること(系統誤差の小ささ)を示す尺度。

精度 (precision)

複数得られた計算結果の間で相互バラツキの少なさを示す尺度。

応答関数 (response function)

応答関数は次式で表される：

$$R = \int_P \psi(P) \sigma_d(P) dP$$

ここで、 ψ ：粒子束、 σ_d ：目的関数(例えば線量換算関数)、 P ：位相空間($\vec{r}, E, \hat{\Omega}$)である。

[遮蔽一般]Discrete-Ordinates Sn 法

体系を表示する座標と粒子の進行方向を表す角度座標を離散化して微分型のボルツマン方程式を有限差分法で解く方法。この数値解法は角度座標の離散化を単位球の表面において N 個の **Segment** で分割することから **Discrete-Ordinates Sn 法** と呼ばれる。この方法の問題点として、散乱が少なく線源からの直達成分が支配的な多次元体系では線源から見て角度分点の取られている方向の空間分点の粒子束が異常に過大評価されるレイエフエクトがある。

(参考文献)

- (1) IAEA 輸送規則編集委員会編：放射性物質安全輸送規則(TS-R-1). 原子力安全基盤機構訳. 2005.
- (2) 財団法人原子力安全技術センター編. 放射線施設の遮蔽計算実務マニュアル. 2007.
- (3) 植木他. モンテカルロ法による中性子・光子輸送シミュレーションの現状. 日本原子力学会誌. 1999, Vol. **41**, No. 6, p. 614-617.
- (4) 佐藤聡, 西谷健夫. 密度減少法で作成したウェイトウィンドウによるモンテカルロ計算分散低減に関する研究. 日本原子力学会和文論文誌, 2007, Vol. **6**, No. 1, p. 5-9.
- (5) 桜井淳, 山本俊弘. モンテカルロ法による中性子深層透過問題におけるウェイト下限値推定法. 日本原子力学会和文論文誌, 2009, Vol. **4**, No.2, p. 172-176.
- (6) J. C. Wagner and A. Haghghat, "Automated Variance Reduction of Monte Carlo Shielding Calculations Using the Discrete Ordinates Adjoint Function," *Nucl. Sci. Eng.*, **128**, pp.186-208 (1998).
- (7) X-5 Monte Carlo Team. *MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Los Alamos National Laboratory*. 2003, LA-UR-03-1987.

附録2 車両運搬確認申請書、容器承認申請書及び核燃料輸送物設計承認申請書に添付する説明書の記載要領

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)第19条に基づく運搬に関する確認の申請及び同令第21条に基づく容器承認の申請並びに平成2年科学技術庁告示第5号(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技術上の基準に係る細目等を定める告示)第41条に基づく設計承認の申請等について、車両運搬確認申請書、容器承認申請書及び核燃料輸送物設計承認申請書に添付する説明書の記載要領が定められている。

下記は、記載要領のうち、(ロ)-D 遮蔽解析について抜粋したものである。

D.1 概要

輸送物の遮蔽設計について説明し、一般の試験条件下及び特別の試験条件下における輸送物の遮蔽解析について説明する。

D.2 線源仕様

遮蔽解析に用いる収納物の γ 線源及び中性子源について説明する。

D.2.1 γ 線源

収納物に含まれる放射性物質について主な核種ごとの放射能の量及び全核種の放射能の合計値を記載し、 γ 線源強度のエネルギースペクトルを表にする。エネルギースペクトルを求めるために用いた手法及び条件について記載する。また、照射履歴について説明する。放射化線源強度についても記載する。

D.2.2 中性子源

中性子を発生する反応について記載し、中性子のエネルギースペクトルを表にする。エネルギースペクトルを求めるために用いた手法及び条件について説明する。また、照射履歴及び中性子実効増倍率の計算方法及び条件について説明する。

D.3 幾何形状

D.3.1 計算に用いる幾何形状

通常輸送時、一般の試験条件下及び特別の試験条件下における輸送物について、実物と計算に用いる幾何形状の違いを比較し、幾何形状が妥当であることを説明する(計算に用いる幾何形状を添付する。)。各試験条件の計算で用いる幾何形状の差異を記載する。また、放射線ストリーミングの発生が予測される場合には、その部位について説明し、その影響を評価する。

D.3.2 幾何形状各領域における原子個数密度

幾何形状を構成する、領域ごとに遮蔽材等の密度、原子個数密度及び各領域を構成する物質の体積比を表に示す。密度及び原子個数密度の算出に当たっては温度を考慮する。

D.4 遮蔽評価

通常輸送時、一般の試験条件下及び特別の試験条件下における輸送物について、各計算に対する幾何形状毎に、 γ 線量当量率及び中性子線量当量率を評価するとともに、算出に用いられた手法及び条件(計算プログラム、定数、各データ等)について記載する。実測による線量当量率を用いる場合には、測定器、測定精度、測定条件等を説明する。なお、一般の試験条件下においては輸送物表面における最大線量当量率が著しく増加しないことを説明する。

D.5 結果の要約及びその評価

輸送容器の重要な遮蔽設計の特性及び遮蔽評価の解析結果を各試験条件ごとに整理して表で記載し、輸送物が通常輸送時、一般の試験条件下及び特別の試験条件下において、規則及び告示に定める技術基準を満足することを説明する。

附録3 ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータを使用したウェイト・ウィンドウの作成方法 (密度減少法及びタリー移動法)

本内容は、Los Alamos National Laboratory の Thomas E. Booth 氏による“MCNP Variance Reduction Examples(2004)”を参考とした。この文献ではウェイト・ウィンドウ・ジェネレータを使用したウェイト・ウィンドウの作成方法を5つ紹介している。ここでは、国内における輸送容器に対して利用実績の大きい密度減少法及びタリー移動法によるウェイトの作成方法を本文より詳細に説明する。

・ 密度減少法

線源には変更を加えず、粒子がスコアされるように、遮蔽体の密度を減少させてウェイト・ウィンドウ下限値を作成する。次に、遮蔽体の密度をもとに戻して、遮蔽体の密度を減少させた計算によって得られたウェイト・ウィンドウ下限値を用いて計算を行う。場合によって、密度の変化を数段階にわけて計算する。

・ タリー移動法

本計算で使用したいタリーの代りに、ウェイト・ウィンドウ下限値が容易に得られると推測される別のタリーを用いて、ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータによりウェイト・ウィンドウ下限値を生成させて最適化を図る。この方法によって得られたウェイト・ウィンドウは本計算で使用したいタリーに最適化されたものではないので、目的とするタリーに対しては推定値として利用する。

① 計算条件

遮蔽材がコンクリートである中性子の深層透過問題を考える。幾何形状、線源・タリーの位置及び材料密度について図1に示す。

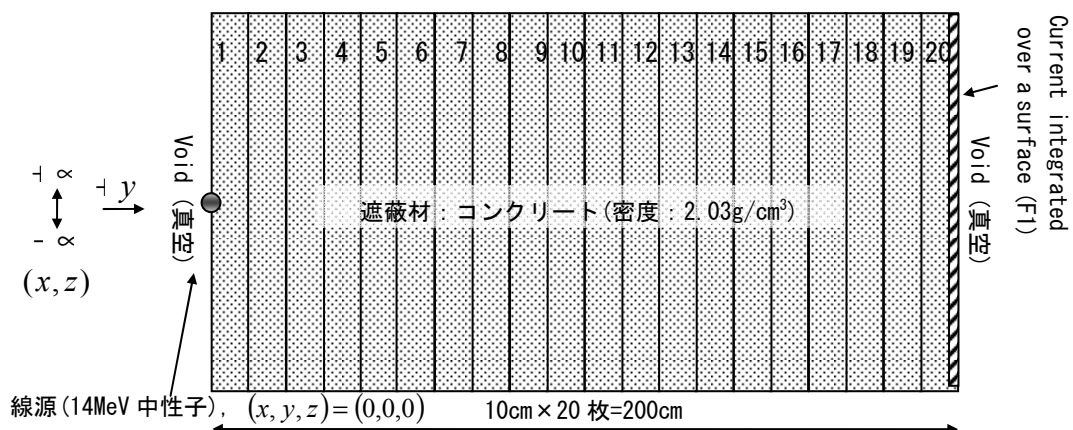


図1 中性子深層透過問題

図1に示した中性子深層透過問題の入力データを表1に示す。以下、分散低減に係る計算上のバイアスを与えていない本計算条件を Case.0 とする。

表 1 Case.0 の入力データ

```

slab0:    200 cm concrete slab problem
  1  1 -2.03 -2  1
  2  1 -2.03 -3  2
  3  1 -2.03 -4  3
  4  1 -2.03 -5  4
  5  1 -2.03 -6  5
  6  1 -2.03 -7  6
  7  1 -2.03 -8  7
  8  1 -2.03 -9  8
  9  1 -2.03 -10 9
 10  1 -2.03 -11 10
 11  1 -2.03 -12 11
 12  1 -2.03 -13 12
 13  1 -2.03 -14 13
 14  1 -2.03 -15 14
 15  1 -2.03 -16 15
 16  1 -2.03 -17 16
 17  1 -2.03 -18 17
 18  1 -2.03 -19 18
 19  1 -2.03 -20 19
 20  1 -2.03 -21 20
 21  0 -1
 22  0 21

  1 py  0
  2 py 10
  3 py 20
  4 py 30
  5 py 40
  6 py 50
  7 py 60
  8 py 70
  9 py 80
 10 py 90
 11 py 100
 12 py 110
 13 py 120
 14 py 130
 15 py 140
 16 py 150
 17 py 160
 18 py 170
 19 py 180
 20 py 190
 21 py 200

mode  n
imp:n 1 19r 0 0
c      the following is schaeffer portland concrete
m1
    1001.50c -.010
    8016.50c -.529
    11023.51c -.016
    12000.51c -.002
    13027.50c -.034
    14000.51c -.337
    19000.51c -.013
    20000.51c -.044
    26000.55c -.014
    6012.50c -.001
sdef  x=0 y=1.e-6 z=0 cel=1 wgt=1 erg=14
c generate spatial windows
wwg   1 1 .5
fl:n  21
cut:n 1.e20 .01 0 0
ctme  5
nps   100000
prdmp  j -60 j 2
print

```

表1のData Cardより、Case.0の計算条件は下記のとおりである：

項目	数値	Data Card 上の記述
セル・インポートランス	全て 1	imp:n 1 19r 0 0
線源から発生する粒子の持つウェイト平均値	1	wgt=1
ウェイト・ウィンドウのパラメータ	参照するタリー：1	wwg 1 1.5
	参照 Cell：1	
	Weight Window 下限値：0.5	

Case.0の計算結果の一部を表2及び表3に示す。

表2 各CellにおけるTracks Entering (計算条件：Case.0)

cell	tracks entering	population	collisions	collisions * weight (per history)	number weighted energy	flux weighted energy	average track weight (relative)	average track mfp (cm)
1	1	110011	100581	169059	1.6906E+00	3.7101E+00	1.0000E+00	7.7535E+00
2	2	32444	23197	105918	1.0592E+00	1.5631E+00	1.0000E+00	6.5357E+00
3	3	17821	12562	60205	6.0205E-01	1.1263E+00	1.0000E+00	6.0578E+00
4	4	9466	6599	33094	3.3094E-01	9.7722E-01	1.0000E+00	5.8706E+00
5	5	4822	3408	16760	1.6760E-01	8.8063E-01	1.0000E+00	5.7257E+00
6	6	2378	1691	8240	8.2400E-02	8.9272E-01	1.0000E+00	5.7490E+00
7	7	1241	845	4564	4.5640E-02	8.4128E-01	1.0000E+00	5.6490E+00
8	8	612	419	1952	1.9520E-02	8.4466E-01	1.0000E+00	5.7729E+00
9	9	293	202	1084	1.0840E-02	8.5992E-01	1.0000E+00	5.7555E+00
10	10	142	100	451	4.5100E-03	8.9456E-01	1.0000E+00	5.6081E+00
11	11	61	48	203	2.0300E-03	7.1139E-01	1.0000E+00	5.3612E+00
12	12	34	23	125	1.2500E-03	5.2635E-01	1.0000E+00	5.0330E+00
13	13	19	13	86	8.6000E-04	5.7828E-01	1.0000E+00	5.0071E+00
14	14	9	5	30	3.0000E-04	5.6881E-01	1.0000E+00	4.2407E+00
15	15	4	3	14	1.4000E-04	9.2253E-01	1.0000E+00	6.7548E+00
16	16	3	1	8	8.0000E-05	1.2307E+00	1.0000E+00	7.3662E+00
17	17	2	1	8	8.0000E-05	1.7174E-01	1.0000E+00	3.1108E+00
18	18	1	1	2	2.0000E-05	9.2232E-02	1.0000E+00	2.9299E+00
19	19	0	0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
20	20	0	0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

Cellに入る粒子数の推移を確認すると、Cell 18以降のCellには粒子が入っていないことがわかる。したがって、Cell 20の外側面に配置しているタリー(fl)には粒子が1つも交差しないので、スコア 0 である。生成されたウェイト・ウィンドウ下限値(以下 WWLB)は表3のようになり、真空領域以外の領域の WWLB は全て 0 となる。

表3 Case.0の計算によって得られた WWLB

```

wwe:n 1.0000E+02
wwn1:n 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
        0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
        0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
        0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
        -1.0000E+00 -1.0000E+00

```

次に、ヒストリカットオフ(NPS)を 10 倍、計算時間カットオフ(CTME)を 10 倍として計算する(この計算条件を Case.1 とする)。Case.1 の計算結果の一部を表 4 及び表 5 に示す。

表 4 各 Cell における Tracks Entering (計算条件 : Case.1)

		tracks	population	collisions	collisions	number	flux	average	average
cell		entering			* weight	weighted	weighted	track weight	track mfp
					(per history)	energy	energy	(relative)	(cm)
1	1	1098394	1005539	1683380	1.6834E+00	3.7033E+00	8.8849E+00	1.0000E+00	7.7552E+00
2	2	322941	229488	1041528	1.0415E+00	1.5769E+00	5.3827E+00	1.0000E+00	6.5565E+00
3	3	178528	124924	604950	6.0495E-01	1.1564E+00	4.2418E+00	1.0000E+00	6.1069E+00
4	4	94199	65709	327603	3.2760E-01	9.8709E-01	3.6519E+00	1.0000E+00	5.8831E+00
5	5	47839	33604	169969	1.6997E-01	8.8997E-01	3.2689E+00	1.0000E+00	5.7287E+00
6	6	23859	16703	84668	8.4668E-02	8.3864E-01	3.0397E+00	1.0000E+00	5.6463E+00
7	7	11937	8328	42885	4.2885E-02	7.9348E-01	2.8561E+00	1.0000E+00	5.5628E+00
8	8	5797	4055	20861	2.0861E-02	7.8187E-01	2.7020E+00	1.0000E+00	5.5597E+00
9	9	2827	1977	10467	1.0467E-02	7.2399E-01	2.5474E+00	1.0000E+00	5.4568E+00
10	10	1394	985	4880	4.8800E-03	7.4080E-01	2.5494E+00	1.0000E+00	5.5082E+00
11	11	620	455	2213	2.2130E-03	6.6804E-01	2.3885E+00	1.0000E+00	5.5069E+00
12	12	319	222	1211	1.2110E-03	6.2560E-01	2.2461E+00	1.0000E+00	5.4268E+00
13	13	161	109	686	6.8600E-04	6.7219E-01	2.1171E+00	1.0000E+00	5.4227E+00
14	14	77	48	210	2.1000E-04	7.5782E-01	2.2880E+00	1.0000E+00	5.4814E+00
15	15	35	22	146	1.4600E-04	6.0812E-01	1.6000E+00	1.0000E+00	4.9122E+00
16	16	13	8	69	6.9000E-05	4.4553E-01	1.2924E+00	1.0000E+00	4.9504E+00
17	17	5	3	15	1.5000E-05	2.2590E-01	3.8405E-01	1.0000E+00	3.4400E+00
18	18	2	2	4	4.0000E-06	9.8197E-02	1.0310E-01	1.0000E+00	2.9962E+00
19	19	1	1	3	3.0000E-06	5.3178E-02	5.5094E-02	1.0000E+00	2.6349E+00
20	20	0	0	0	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

表 5 Case.1 の計算によって得られた WWLB

```

wwe:n 1.0000E+02
wwn1:n 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
        0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
        0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
        0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
        -1.0000E+00 -1.0000E+00

```

Case.1 では、計算時間と粒子数を Case.0 の 10 倍としているが、これでも粒子は Cell 20 に到達しない。ここでは、この問題を解決する方法として、密度減少法について示す。線源には変更を加えず、粒子がスコアされるように、遮蔽体の密度を減少させて WWLB を作成する。次に、遮蔽体の密度をもとに戻して、遮蔽体の密度を減少させた計算によって得られた WWLB を用いて計算を行う。場合によって、密度の変化を数段階にわけて計算する。

② 密度減少法

特別なバイアスを用いなかった Case.0 の場合であっても、コンクリート層の半ば以上まである程度の粒子数が到達しているという事実から、b) 密度減少法では、遮蔽体の密度を 1/2 にすることで、ある程度の粒子をタリーに到達させ、WWLB の生成に寄与させ

るようにする。密度を減少させて生成させた WWLB は、本来の遮蔽体密度に依っていないため正確なインポートランスとは言えないが、何度か WWLB を計算することにより修正していけば正しいものに近くなる(この計算条件を Case.2 とする)。Case.2 の計算結果の一部を表 6 及び表 7 に示す。

表 6 各 Cell における Tracks Entering (計算条件: Case.2)

		tracks	population	collisions	collisions	number	flux	average	average
	cell	entering			* weight	weighted	weighted	track weight	track mfp
					(per history)	energy	energy	(relative)	(cm)
1	1	112901	100479	97806	9.7806E-01	4.8474E+00	9.9563E+00	1.0000E+00	1.5947E+01
2	2	45233	31351	74419	7.4419E-01	2.3737E+00	6.9507E+00	1.0000E+00	1.4067E+01
3	3	34419	22958	59562	5.9562E-01	1.6848E+00	5.6529E+00	1.0000E+00	1.3107E+01
4	4	25566	17022	46443	4.6443E-01	1.3575E+00	4.9093E+00	1.0000E+00	1.2529E+01
5	5	18658	12370	34344	3.4344E-01	1.1996E+00	4.4207E+00	1.0000E+00	1.2152E+01
6	6	13736	9028	25443	2.5443E-01	1.1089E+00	4.1158E+00	1.0000E+00	1.1916E+01
7	7	10011	6524	18918	1.8918E-01	1.0455E+00	3.8294E+00	1.0000E+00	1.1759E+01
8	8	7242	4727	14106	1.4106E-01	9.8202E-01	3.5476E+00	1.0000E+00	1.1561E+01
9	9	5177	3360	10002	1.0002E-01	9.1135E-01	3.3263E+00	1.0000E+00	1.1336E+01
10	10	3658	2387	7361	7.3610E-02	8.5858E-01	3.1342E+00	1.0000E+00	1.1148E+01
11	11	2576	1684	5023	5.0230E-02	8.2886E-01	3.0982E+00	1.0000E+00	1.1134E+01
12	12	1797	1179	3615	3.6150E-02	7.8161E-01	2.9453E+00	1.0000E+00	1.1036E+01
13	13	1244	805	2524	2.5240E-02	7.7071E-01	2.7536E+00	1.0000E+00	1.0782E+01
14	14	878	558	1701	1.7010E-02	7.9222E-01	2.8926E+00	1.0000E+00	1.0898E+01
15	15	622	393	1193	1.1930E-02	8.4350E-01	2.9937E+00	1.0000E+00	1.1262E+01
16	16	435	279	829	8.2900E-03	8.1469E-01	2.9593E+00	1.0000E+00	1.1065E+01
17	17	308	204	631	6.3100E-03	7.9397E-01	2.8392E+00	1.0000E+00	1.1002E+01
18	18	201	142	475	4.7500E-03	7.1549E-01	2.5009E+00	1.0000E+00	1.0452E+01
19	19	120	86	232	2.3200E-03	1.0472E+00	3.0770E+00	1.0000E+00	1.1868E+01
20	20	64	56	125	1.2500E-03	1.0833E+00	3.1019E+00	1.0000E+00	1.2253E+01

表 7 Case.2 の計算によって得られた WWLB

```

wwe:n 1.0000E+02
wnn1:n 5.0000E-01 1.5584E-01 1.1426E-01 8.4810E-02 6.1680E-02
4.4995E-02 3.2525E-02 2.3585E-02 1.6785E-02 1.1930E-02
8.4200E-03 5.8800E-03 4.0200E-03 2.7900E-03 1.9600E-03
1.3950E-03 1.0200E-03 7.1000E-04 4.3000E-04 2.8000E-04
-1.0000E+00 -1.0000E+00

```

Case.2 で生成された WWLB を本来の遮蔽密度に戻した入力データに適用して再計算する。これを Case.3 とする。Case.3 の計算結果の一部を表 8 及び表 9 に示す。

表 8 各 Cell における Tracks Entering (計算条件: Case.3)

		tracks	population	collisions	collisions	number	flux	average	average
	cell	entering			* weight	weighted	weighted	track weight	track mfp
					(per history)	energy	energy	(relative)	(cm)
1	1	119482	108665	206375	1.6870E+00	3.7207E+00	8.8777E+00	8.7796E-01	7.7569E+00
2	2	43797	48167	219355	1.0604E+00	1.5633E+00	5.3413E+00	4.8756E-01	6.5372E+00
3	3	42758	30470	149270	6.0464E-01	1.1493E+00	4.2142E+00	4.2236E-01	6.0867E+00
4	4	25942	27598	136637	3.2997E-01	9.7299E-01	3.6306E+00	2.4293E-01	5.8634E+00
5	5	23397	16533	83943	1.7260E-01	8.8286E-01	3.2969E+00	2.1212E-01	5.7347E+00
6	6	13230	14135	72237	8.7637E-02	8.5326E-01	3.0956E+00	1.2194E-01	5.6892E+00
7	7	11339	8071	41881	4.3657E-02	8.0796E-01	2.8942E+00	1.0725E-01	5.6194E+00
8	8	6319	6727	34229	2.0936E-02	7.7883E-01	2.7606E+00	6.1341E-02	5.5798E+00
9	9	5420	3791	20425	1.0643E-02	7.3994E-01	2.5330E+00	5.3762E-02	5.4581E+00
10	10	3038	3217	16836	5.1490E-03	6.9652E-01	2.4810E+00	3.0650E-02	5.3652E+00
11	11	2532	1810	9185	2.4122E-03	6.9963E-01	2.4660E+00	2.6866E-02	5.3990E+00
12	12	1424	1480	7697	1.1741E-03	6.9240E-01	2.4336E+00	1.5284E-02	5.3733E+00
13	13	1235	847	4633	5.9888E-04	6.8274E-01	2.3489E+00	1.3352E-02	5.2542E+00
14	14	639	664	3299	2.5234E-04	7.0210E-01	2.4271E+00	7.6812E-03	5.3583E+00
15	15	532	361	1988	1.2996E-04	6.9003E-01	2.2375E+00	6.7477E-03	5.2426E+00
16	16	270	291	1599	6.1661E-05	6.9331E-01	2.1097E+00	3.8438E-03	5.2072E+00
17	17	204	145	904	3.0098E-05	5.0690E-01	1.7741E+00	3.3720E-03	4.9434E+00
18	18	93	110	537	1.0332E-05	6.1659E-01	2.0714E+00	1.9374E-03	5.3424E+00
19	19	71	54	286	4.3359E-06	8.3284E-01	2.3074E+00	1.6242E-03	5.8422E+00
20	20	32	46	152	1.4844E-06	1.1900E+00	3.2888E+00	9.7656E-04	6.6734E+00

表 9 Case.3 の計算によって得られた WWLB

```

wwe:n 1.0000E+02
wwn1:n 5.0000E-01 1.1528E-01 6.2738E-02 3.3215E-02 1.7151E-02
        8.5562E-03 4.2231E-03 2.0497E-03 1.0004E-03 4.8758E-04
        2.3900E-04 1.1243E-04 5.5200E-05 2.5313E-05 1.1992E-05
        5.5469E-06 2.4414E-06 1.0547E-06 4.4922E-07 2.2461E-07
        -1.0000E+00 -1.0000E+00

```

この後、何度か WWLB を繰返し計算することにより最適化を図れば、さらにより WWLB を得ることができる。また、密度を 1/2 にして WWLB を生成した後に、密度を完全に元に戻すのではなく、例えば 1/3→2/3→3/3 と多段階に分けて少しずつ密度を元に戻していけばより最適化を図ることができる。

③ タリー移動法

タリー移動法では、線源から発生してタリーまで到達する粒子は、線源-タリー間の一部分は必ず通過するという事実を用いる。Case.4 では、線源と評価位置の間にサーフェスエスティメータを仮配置し(fl1:n 11, すなわち線源から 100cm 離れた面にサーフェスエスティメータを配置する), この仮配置したタリーに基づきウェイト・ウィンドウ・ジェネレータによって WWLB を生成させる。インポートランスは, [imp:n 1 9r 0 1 8r 0 0]と設定した。その他の計算条件は Case.0 と同じである。計算によって生成された WWLB を表 10 に示す。

表 10 Case.4 の計算によって得られた WWLB

```

wwe:n 1.0000E+02
wn1:n 5.0000E-01 1.1528E-01 6.2555E-02 3.2895E-02 1.7015E-02
      8.4250E-03 4.2100E-03 2.0900E-03 1.0050E-03 5.0000E-04
      -1.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
      0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
      -1.0000E+00 -1.0000E+00

```

WWLB を生成させるタリーを Surface 11 に設定したため、Surface 11 の先の WWLB が全て 0 となっている。また、Cell 11 のインポートランスが-1 となる。実際の計算では、Cell 11 に到達しても粒子を終らせる必要がないので、Cell 11 のインポートランスを-1 から 0 に変更する(表 11)。

表 11 表 10 の Cell 11 の WWLB を変更

```

wwe:n 1.0000E+02
wn1:n 5.0000E-01 1.1528E-01 6.2555E-02 3.2895E-02 1.7015E-02
      8.4250E-03 4.2100E-03 2.0900E-03 1.0050E-03 5.0000E-04
      0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
      0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
      -1.0000E+00 -1.0000E+00

```

表 11 に示した WWLB を用いて計算を行い(Case.5), 出力された WWLB を表 12 に示す。

表 12 Case.5 の計算によって得られた WWLB

```

wwe:n 1.0000E+02
wn1:n 5.0000E-01 1.1527E-01 6.2910E-02 3.3247E-02 1.6984E-02
      8.5136E-03 4.2658E-03 2.1041E-03 1.0341E-03 5.0156E-04
      2.4304E-04 1.1727E-04 5.5618E-05 2.5767E-05 1.2380E-05
      5.9279E-06 2.9239E-06 1.3360E-06 5.8594E-07 2.5391E-07
      -1.0000E+00 -1.0000E+00

```

表 10 と表 12 を比較すると、Cell 1～Cell 10 までの WWLB が非常に似ていることがわかる。タリー11 とタリー21 には非常に高い相関があり、仮想的なタリー11 は、実際の評価位置におけるタリー21 の代役を果たしていることがわかる。

Case.6 では、Case.4 の計算で、Cell 11 のインポートランスが 0 になる理由について説明する。特に、Case.6 は、インポートランスを[imp:n 1 19r 0 0]と設定したこと以外は Case.4 と同じである。Case.6 の計算では、次のような WWLB が生成される(表 13)。

表 13 Case.6 の計算によって得られた WWLB

wwn1:n	5.0000E-01	1.1528E-01	6.2565E-02	3.2895E-02	1.7015E-02
	8.4250E-03	4.2100E-03	2.0900E-03	1.0100E-03	5.0000E-04
	8.4632E-04	1.5410E-03	1.4517E-03	0.0000E+00	0.0000E+00
	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
	-1.0000E+00	-1.0000E+00			

表 13 によると, Cell 10 の先の WWLB が Cell 10 の WWLB よりも大きい。すなわち, この WWLB が Case.5 の代りに使用された場合, 粒子は Surface 11(仮想タリー)から Surface 21(実計算タリー)の方向へ進むときに Russian Roulette かけられることになる。これは, Surface 11(仮想タリー)は, 粒子の方向によらず, タリーから離れるに従って WWLB が増加していることが理由である。

④ エネルギー依存のウェイト・ウィンドウ

Case.6 までは 1 つのエネルギー群で WWLB を評価していたが, 以降の議論では, エネルギー群を 8 群(<0.1MeV, 0.3MeV, 1MeV, 2MeV, 3MeV, 5MeV, 8MeV, 16MeV)に分割して WWLB を計算した。Case.5 において, ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータのエネルギー群を 8 群に設定して WWLB を生成させた結果を表 14 に示す(これを Case.7 とする)。

各セルについて生成された WWLB を見ると, 高エネルギーに関しては WWLB が 0 以外で満たされているが, エネルギーが低くなるに従い 0 となる箇所が多くなる。WWLB をエネルギーに依存しない WWLB として, 高エネルギー中性子の WWLB を用いれば, 低エネルギー中性子はスコアされなくなることは明らかである。全セルに対して, 空間・エネルギー依存の WWLB を適切に(0 以外に)設定することは, 空間依存のみの場合と比較して非常に困難である。

表 14 Case.5 の条件で, ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータのエネルギー群を
8 群に設定(Case.7)して生成させた WWLB

wwen	1. 0000E-01	3. 0000E-01	1. 0000E+00	2. 0000E+00	3. 0000E+00
	5. 0000E+00	8. 0000E+00	1. 6000E+01		
wwn1:n	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	0. 0000E+00	1. 7913E-04	1. 8089E-05	1. 3290E-06
	-1. 0000E+00	-1. 0000E+00			
wwn2:n	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	5. 7098E-04	5. 5807E-05	5. 0814E-06	7. 9160E-07
	-1. 0000E+00	-1. 0000E+00			
wwn3:n	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	1. 0372E-04	1. 4200E-05	2. 4648E-06	5. 3619E-07
	-1. 0000E+00	-1. 0000E+00			
wwn4:n	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	0. 0000E+00	9. 1766E-03	4. 2984E-03	2. 9196E-04
	5. 9042E-05	1. 4474E-05	3. 5741E-06	1. 0660E-06	3. 6739E-07
	-1. 0000E+00	-1. 0000E+00			
wwn5:n	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00	0. 0000E+00
	0. 0000E+00	2. 7202E-02	1. 4535E-02	4. 2355E-03	1. 6839E-03
	8. 6794E-04	4. 0984E-04	1. 5438E-04	5. 4347E-05	2. 4817E-05
	1. 0141E-05	4. 1023E-06	1. 6014E-06	6. 9490E-07	3. 1557E-07
	-1. 0000E+00	-1. 0000E+00			
wwn6:n	3. 3333E+00	5. 6746E-01	2. 7517E-01	1. 3336E-01	8. 0779E-02
	3. 3973E-02	2. 1641E-02	1. 3506E-02	4. 5737E-03	1. 7146E-03
	9. 7314E-04	4. 0262E-04	9. 0860E-05	2. 9877E-05	1. 5873E-05
	7. 9925E-06	4. 2870E-06	1. 3067E-06	6. 0036E-07	3. 1448E-07
	-1. 0000E+00	-1. 0000E+00			
wwn7:n	2. 4824E+00	1. 7749E-01	1. 2103E-01	5. 5493E-02	1. 7977E-02
	8. 0714E-03	3. 8287E-03	1. 6807E-03	7. 7002E-04	2. 3986E-04
	8. 9187E-05	3. 9580E-05	2. 0818E-05	1. 0598E-05	6. 7783E-06
	2. 9829E-06	1. 4390E-06	6. 7568E-07	4. 0832E-07	2. 5974E-07
	-1. 0000E+00	-1. 0000E+00			
wwn8:n	5. 0000E-01	6. 7056E-02	3. 0592E-02	1. 3709E-02	6. 9265E-03
	3. 5548E-03	1. 6576E-03	7. 8467E-04	4. 2039E-04	1. 6068E-04
	8. 9353E-05	4. 0319E-05	2. 0668E-05	1. 0932E-05	5. 6682E-06
	2. 1028E-06	1. 3396E-06	7. 2921E-07	4. 2023E-07	2. 5431E-07
	-1. 0000E+00	-1. 0000E+00			

⑤ ウェイト・ウィンドウが 0 となる場合の問題点

Case.21 で得られたエネルギー依存のウェイト・ウィンドウを用いたときの計算結果を表 28 に示す：

表 15 表 14 の WWLB を使用したときの計算結果

tally 1					
nps	mean	error	vov	slope	fom
4000	2.8688E-07	0.1390	0.0506	0.0	159
8000	2.6981E-07	0.0988	0.0323	0.0	161
12000	2.6836E-07	0.0819	0.0239	0.0	158
16000	2.9351E-07	0.0734	0.0207	0.0	145
20000	2.8532E-07	0.0652	0.0169	10.0	149
24000	2.7497E-07	0.0592	0.0145	10.0	152
28000	2.6941E-07	0.0549	0.0122	10.0	153
32000	2.7504E-07	0.0518	0.0123	10.0	149
36000	2.6788E-07	0.0497	0.0117	6.1	145
40000	2.6369E-07	0.0470	0.0105	5.7	146
44000	2.7792E-07	0.0629	0.2095	2.5	73
48000	2.7354E-07	0.0595	0.1973	2.5	75
50000	2.7331E-07	0.0579	0.1880	2.6	68

この計算では、ヒストリ数 40000 で打ち切った場合、Figure of Merit(FOM)が一定であり、MCNP の統計量チェック(FOM は初期変動期間を除いてほぼ一定であることを)をパスしてしまう。このようなケースは、乱数を変更して再計算させても明らかにならない可能性がある。

FOM が振れるような統計量の変化が発生した場合、粒子の挙動に問題のある箇所があるはずである。実際、本検討の場合、出力を見ると、次のような部分があることがわかる：

```
history number of largest tally = 42000          largest unnormalized history tally = 5.11163E-04
```

粒子(42000 番目)のヒストリを再現するために、計算条件に次の行を追加する：

```
rand hist = 42000
```

Case.7 は 118372 番目から計算している：

```
rand hist = 118372
```

Case.8 は、次に示すような rand 及び dbcn を用いることにする：

```
rand hist = 160371
dbcn j j 1 1 100000
```

Case.8 で設定したヒストリ数は、Case.7 がヒストリ数 118372 から開始しているので、そこから 42000 粒子-1 だけ進めたヒストリ数(118372+42000-1=160371)である。Case.8 をみると、最初のヒストリで最大タリーとなっており、Case.7 における 42000 番目のヒスト

リが再現されていることがわかる。

history number of largest tally = 1 largest unnormalized history tally = 5.11163E-04

イベントログ中で、タリーされたトラックを確認する。イベントログのうち、y座標が200cm(タリーのy座標)で、イベント(nch)“escape”の列を抽出したものを表16に示す。

表16 Case.8 のイベントログ(y=200, nch=escape の列を抽出)

cell	x	y	z	u	v	w	erg	wgt	nch	nrn
1317 t 22	-1.871+01	2.000+02	-9.185+01	6.539-02	5.612-01	-8.251-01	7.926-01	1.286-06	escape	6634
1376 t 22	-3.571+01	2.000+02	-6.708+01	2.827-01	9.005-01	3.304-01	1.187+00	1.286-06	escape	6950
2173 t 22	8.368+00	2.000+02	-3.053+01	-6.390-01	7.292-01	-2.448-01	1.088+00	1.286-06	escape	12985
2178 t 22	1.113+01	2.000+02	-3.200+01	-2.889-01	8.175-01	4.982-01	1.309+00	1.286-06	escape	12994
2219 t 22	1.309+01	2.000+02	-4.238+01	4.631-01	8.003-01	3.809-01	1.652-01	1.286-06	escape	13294
2262 t 22	2.079+01	2.000+02	-4.887+01	1.573-01	9.865-01	-4.616-02	2.354+00	1.286-06	escape	13599
2266 t 22	2.079+01	2.000+02	-4.887+01	1.573-01	9.865-01	-4.616-02	2.354+00	1.286-06	escape	13600
2276 t 22	1.953+01	2.000+02	-4.911+01	5.142-01	7.470-01	4.215-01	1.798+00	1.286-06	escape	13642
2280 t 22	2.079+01	2.000+02	-4.887+01	1.573-01	9.865-01	-4.616-02	2.354+00	1.286-06	escape	13643
2515 t 22	1.321+01	2.000+02	-7.452+01	7.012-01	6.602-01	2.689-01	1.162+00	1.286-06	escape	14974
2531 t 22	-3.495+00	2.000+02	-7.951+01	1.263-01	9.644-01	2.324-01	2.134+00	1.286-06	escape	15022
2696 t 22	1.254+01	2.000+02	-2.895+01	-5.254-01	8.442-01	-1.058-01	6.794-01	1.286-06	escape	15994
2848 t 22	-4.835+01	2.000+02	-5.132+01	1.075-01	6.523-01	-7.503-01	9.626-02	2.662-06	escape	16923
2857 t 22	-5.473+01	2.000+02	-4.412+01	1.032-01	8.753-01	4.725-01	1.408-01	2.662-06	escape	16971
2865 t 22	-5.263+01	2.000+02	-5.885+01	-3.770-01	9.122-01	1.606-01	4.814-01	2.662-06	escape	17012
2884 t 22	-4.874+01	2.000+02	-4.743+01	-2.263-01	9.702-01	8.663-02	1.422-02	2.662-06	escape	17167
2898 t 22	-6.673+01	2.000+02	-4.541+01	-3.375-01	9.413-01	6.386-03	1.127+00	1.286-06	escape	17239
2908 t 22	-5.213+01	2.000+02	-4.484+01	5.758-01	5.713-01	-5.848-01	5.837-01	1.286-06	escape	17301
3870 t 22	-5.082+01	2.000+02	-5.706+01	6.731-01	7.297-01	-1.199-01	1.394+00	1.286-06	escape	24346
3978 t 22	-2.854+01	2.000+02	-4.659+01	2.573-02	9.954-01	9.281-02	2.364+00	1.286-06	escape	24981
3999 t 22	-1.796+01	2.000+02	-8.932+01	-3.588-02	6.135-01	7.889-01	6.730-01	1.286-06	escape	25104
4007 t 22	-7.401+00	2.000+02	-8.823+01	2.061-01	7.805-01	-5.903-01	1.995-01	1.286-06	escape	25153
4224 t 22	-3.612+01	2.000+02	-2.735+01	-1.687-02	9.975-01	6.923-02	2.148+00	1.286-06	escape	26622
4243 t 22	-3.908+01	2.000+02	-2.941+01	2.593-01	9.532-01	1.553-01	2.179+00	1.286-06	escape	26751
4249 t 22	-4.945+01	2.000+02	-3.037+01	7.399-01	4.587-01	-4.921-01	5.176-01	1.286-06	escape	26775
4258 t 22	-4.021+01	2.000+02	-1.370+01	2.084-01	8.411-01	4.992-01	1.526+00	1.286-06	escape	26815
4262 t 22	-4.391+01	2.000+02	1.390+00	-8.516-02	3.691-01	9.255-01	2.246+00	1.286-06	escape	26816
4361 t 22	-4.279+01	2.000+02	-4.651+01	-4.521-01	8.866-01	9.776-02	2.353+00	1.286-06	escape	27470
4365 t 22	-4.279+01	2.000+02	-4.651+01	-4.521-01	8.866-01	9.776-02	2.353+00	1.286-06	escape	27471
4375 t 22	-3.911+01	2.000+02	-4.113+01	6.993-01	6.057-01	-3.796-01	3.390-01	1.286-06	escape	27544
4380 t 22	-3.728+01	2.000+02	-4.577+01	-3.394-01	8.549-01	3.923-01	2.347+00	1.286-06	escape	27553
4386 t 22	-3.719+01	2.000+02	-4.765+01	-5.103-01	8.576-01	6.426-02	2.349+00	1.286-06	escape	27563
4836 t 22	-2.430+01	2.000+02	-5.431+01	9.565-02	9.949-01	3.314-02	2.138+00	1.286-06	escape	31063
4849 t 22	-3.005+01	2.000+02	-7.247+01	-2.052-01	4.596-01	-8.641-01	1.621+00	1.286-06	escape	31131
4911 t 22	-2.075+00	2.000+02	-4.966+01	6.162-01	7.276-01	3.014-01	3.034-01	1.286-06	escape	31541
5000 t 22	-9.106+00	2.000+02	-7.014+01	2.460-02	8.525-01	-5.222-01	1.266+00	1.715-06	escape	32125
5064 t 22	-2.417+01	2.000+02	-3.466+01	2.824-01	8.111-01	5.122-01	5.625-01	1.286-06	escape	32560
5070 t 22	-3.531+01	2.000+02	-4.087+01	-7.285-01	6.836-01	4.478-02	1.242+00	1.286-06	escape	32577
5079 t 22	-3.500+00	2.000+02	-4.544+01	3.181-01	9.007-01	2.959-01	1.385+00	1.286-06	escape	32638
5169 t 22	-2.363+01	2.000+02	-5.173+01	-1.536-01	9.881-01	4.301-03	1.724+00	1.286-06	escape	33195
5187 t 22	-3.065+01	2.000+02	-5.466+01	-7.462-01	6.639-01	-4.992-02	9.001-01	1.286-06	escape	33314
5686 t 22	-1.089+01	2.000+02	-1.622+01	6.566-02	8.495-01	5.235-01	2.349+00	1.286-06	escape	37179
5690 t 22	-1.089+01	2.000+02	-1.622+01	6.566-02	8.495-01	5.235-01	2.349+00	1.286-06	escape	37180
5710 t 22	-1.675+01	2.000+02	-4.487-01	4.110-01	5.154-01	7.519-01	2.486-01	1.286-06	escape	37333
5715 t 22	-2.261+01	2.000+02	-1.139+01	-7.380-01	6.689-01	-8.883-02	7.674-01	1.286-06	escape	37351
5723 t 22	-8.725+00	2.000+02	-1.685+01	5.771-01	5.345-01	6.174-01	1.570+00	1.286-06	escape	37379
5727 t 22	-1.089+01	2.000+02	-1.622+01	6.566-02	8.495-01	5.235-01	2.349+00	1.286-06	escape	37380
5733 t 22	-1.089+01	2.000+02	-1.622+01	6.566-02	8.495-01	5.235-01	2.349+00	1.286-06	escape	37383
5737 t 22	-1.089+01	2.000+02	-1.622+01	6.566-02	8.495-01	5.235-01	2.349+00	1.286-06	escape	37384
5745 t 22	-8.156+00	2.000+02	-2.030+01	6.829-01	7.304-01	9.500-03	5.154-01	2.572-06	escape	37423
5762 t 22	-1.028+01	2.000+02	-4.584+01	-1.717-01	6.741-01	-7.184-01	1.541+00	1.286-06	escape	37499
5793 t 22	-5.877+00	2.000+02	1.071+00	1.842-02	9.389-01	3.436-01	3.395-01	1.286-06	escape	37698

表 16 中のエネルギー(erg)の列を見ると、そのほとんどが 3MeV 以下のエネルギーを持つ粒子であることがわかる。また、生成されたウェイト・ウィンドウを見ると、3MeV よりも大きなエネルギー範囲では、ウェイト・ウィンドウは 0 とならない(表 17 参照)。

表 17 Case.8 で得られた WWLB

weight-window lower bounds									
energy:	1.000E-01	3.000E-01	1.000E+00	2.000E+00	3.000E+00	5.000E+00	8.000E+00	1.000E+36	
cell									
1	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.333E+00	2.482E+00	5.000E-01	
2	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.675E-01	1.775E-01	6.706E-02	
3	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.752E-01	1.210E-01	3.059E-02	
4	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.334E-01	5.549E-02	1.371E-02	
5	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.078E-02	1.798E-02	6.927E-03	
6	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.397E-02	8.071E-03	3.555E-03	
7	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.720E-02	2.164E-02	3.829E-03	1.658E-03	
8	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.453E-02	1.351E-02	1.681E-03	7.847E-04	
9	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.235E-03	4.574E-03	7.700E-04	4.204E-04	
10	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.684E-03	1.715E-03	2.399E-04	1.607E-04	
11	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	8.679E-04	9.731E-04	8.919E-05	8.935E-05	
12	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.098E-04	4.026E-04	3.958E-05	4.032E-05	
13	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	9.177E-03	1.544E-04	9.086E-05	2.082E-05	2.067E-05	
14	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.298E-03	5.435E-05	2.988E-05	1.060E-05	1.093E-05	
15	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.920E-04	2.482E-05	1.587E-05	6.778E-06	5.668E-06	
16	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.904E-05	1.014E-05	7.993E-06	2.983E-06	2.103E-06	
17	0.000E+00	5.710E-04	1.037E-04	1.447E-05	4.102E-06	4.287E-06	1.439E-06	1.340E-06	
18	1.791E-04	5.581E-05	1.420E-05	3.574E-06	1.601E-06	1.307E-06	6.757E-07	7.292E-07	
19	1.809E-05	5.081E-06	2.465E-06	1.066E-06	6.949E-07	6.004E-07	4.083E-07	4.202E-07	
20	1.329E-06	7.916E-07	5.362E-07	3.674E-07	3.156E-07	3.145E-07	2.597E-07	2.543E-07	
21	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	
22	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	

イベントログの最初の数行のうち、セル 7-9 に入ったトラックとして、乱数インデックスが 157~160 の npa を見ると(表 18 参照)、スプリッティングが多く発生していることがわかる(npa=4 は 5:1 ということを示し、1 つの track が 4 つになる)。

Cell 1~6 は、エネルギー範囲 2~3MeV においてウェイト・ウィンドウが 0 であるため、スプリッティング前のトラック(progenitor track)は、Cell 1(nrn=105)にあるときから Cell 7 に入るまで、ウェイト・ウィンドウによるチェックを受けない。トラックが Cell 7 に入る直前のウェイトは 8.333 である。一方、Cell 7 のウェイト・ウィンドウの幅は $0.0272 \sim 5 \times 0.0272$ であり、トラックのウェイトは Cell 7 の上限値の 61 倍($=8.333/(5 \times 0.0272)$)である。この後、イベントログには、2.375MeV のエネルギーを持つ粒子が 556 回出現するが、これらのほとんど全てが nrn=105 のトラックに起因するものである。このような状態に陥らないように計算をする必要がある(トラックはスプリッティングにより違う振る舞いをする傾向になるはずであるが、この場合は全く同じエネルギーとなるトラックが多数発生している)。

表 18 Case.8 のイベントログ(抜粋)

1 event log for particle history no. 1 ijk = 29601896213953

cell	x	y	z	u	v	w	erg	wgt	nch	nrn
src 1	0.000+00	1.000-06	0.000+00	-7.072-01	5.246-01	-4.740-01	1.400+01	1.000+00	particle=neutron 2	
c 1	-1.047+01	7.765+00	-7.017+00	-6.643-01	6.961-01	-2.724-01	1.396+01	1.000+00	14000.51c	r= 2 1 12
s 2	-1.260+01	1.000+01	-7.891+00	-6.643-01	6.961-01	-2.724-01	1.396+01	3.333-01	surf= 2 npa=	2 13
c 2	-1.821+01	1.587+01	-1.019+01	-7.211-01	-6.769-02	6.895-01	2.747+00	3.333-01	8016.50c	r= 58 2 21
c 2	-1.849+01	1.585+01	-9.920+00	2.102-01	-1.898-01	9.591-01	2.586+00	3.333-01	8016.50c	r= 2 3 31
c 2	-1.482+01	1.253+01	6.834+00	-1.401-01	9.164-01	3.748-01	2.434+00	3.333-01	14000.51c	r= 2 4 39
s 3	-1.596+01	2.000+01	9.889+00	-1.401-01	9.164-01	3.748-01	2.434+00	3.333-01	surf= 3 npa=	0 40
c 3	-1.611+01	2.099+01	1.029+01	-1.940-01	-7.644-01	-6.149-01	2.206+00	3.333-01	19000.51c	r= 2 5 48
s 2	-1.636+01	2.000+01	9.497+00	-1.940-01	-7.644-01	-6.149-01	2.206+00	3.333-01	surf= 3 npa=	0 49
s 1	-1.890+01	1.000+01	1.453+00	-1.940-01	-7.644-01	-6.149-01	2.206+00	3.333-01	surf= 2 npa=	0 50
s 21	-2.144+01	0.000+00	-6.591+00	-1.940-01	-7.644-01	-6.149-01	2.206+00	3.333-01	surf= 1 npa=	0 51
t 21	-2.144+01	0.000+00	-6.591+00	-1.940-01	-7.644-01	-6.149-01	2.206+00	3.333-01	escape 51	
bnk 2	-1.260+01	1.000+01	-7.891+00	-6.643-01	6.961-01	-2.724-01	1.396+01	3.333-01	n wws split	13 51
c 2	-2.050+01	1.828+01	-1.113+01	-6.643-01	6.961-01	-2.724-01	1.396+01	3.333-01	14000.51c	r= 2 6 54
t 2	-2.050+01	1.828+01	-1.113+01	-6.643-01	6.961-01	-2.724-01	1.396+01	3.333-01	capture 54	
bnk 2	-1.260+01	1.000+01	-7.891+00	-6.643-01	6.961-01	-2.724-01	1.396+01	3.333-01	n wws split	13 54
c 2	-1.292+01	1.034+01	-8.022+00	-8.473-01	5.080-01	1.549-01	1.207+01	3.333-01	14000.51c	r= 52 7 65
c 2	-1.499+01	1.157+01	-7.644+00	-8.241-01	-4.400-01	3.567-01	3.390+00	3.333-01	1001.50c	r= 2 8 82
s 1	-1.794+01	1.000+01	-6.368+00	-8.241-01	-4.400-01	3.567-01	3.390+00	8.333+00	surf= 2 npa=	0 85
c 1	-1.897+01	9.450+00	-5.922+00	-4.867-01	-7.311-01	4.782-01	3.345+00	8.333+00	8016.50c	r= 2 9 97
c 1	-2.063+01	6.958+00	-4.292+00	-2.867-01	9.511-01	-1.146-01	2.729+00	8.333+00	8016.50c	r= 2 10 105
s 2	-2.155+01	1.000+01	-4.658+00	-2.867-01	9.511-01	-1.146-01	2.729+00	8.333+00	surf= 2 npa=	0 106
c 2	-2.183+01	1.095+01	-4.773+00	-3.477-01	4.215-01	-8.375-01	2.651+00	8.333+00	14000.51c	r= 2 11 114
c 2	-2.422+01	1.384+01	-1.052+01	-8.502-02	5.971-01	-7.977-01	2.645+00	8.333+00	20000.51c	r= 2 12 122
c 2	-2.454+01	1.609+01	-1.353+01	-2.001-02	5.858-01	-8.102-01	2.633+00	8.333+00	1001.50c	r= 2 13 137
s 3	-2.467+01	2.000+01	-1.893+01	-2.001-02	5.858-01	-8.102-01	2.633+00	8.333+00	surf= 3 npa=	0 138
s 4	-2.501+01	3.000+01	-3.276+01	-2.001-02	5.858-01	-8.102-01	2.633+00	8.333+00	surf= 4 npa=	0 139
c 4	-2.527+01	3.741+01	-4.301+01	-6.239-01	5.079-01	-5.939-01	2.594+00	8.333+00	14000.51c	r= 2 14 147
s 5	-2.845+01	4.000+01	-4.604+01	-6.239-01	5.079-01	-5.939-01	2.594+00	8.333+00	surf= 5 npa=	0 148
c 5	-4.064+01	4.993+01	-5.765+01	2.774-01	9.605-01	2.076-02	2.375+00	8.333+00	8016.50c	r= 2 15 156
s 6	-4.062+01	5.000+01	-5.765+01	2.774-01	9.605-01	2.076-02	2.375+00	8.333+00	surf= 6 npa=	0 157
s 7	-3.774+01	6.000+01	-5.743+01	2.774-01	9.605-01	2.076-02	2.375+00	1.667+00	surf= 7 npa=	4 158
s 8	-3.485+01	7.000+01	-5.722+01	2.774-01	9.605-01	2.076-02	2.375+00	3.333-01	surf= 8 npa=	4 159
s 9	-3.196+01	8.000+01	-5.700+01	2.774-01	9.605-01	2.076-02	2.375+00	6.667-02	surf= 9 npa=	4 160

実際には、高いエネルギーを持つ粒子の方がコンクリートを透過しやすいにもかかわらず、高エネルギー範囲においては分散の問題が見えないことにも注意すべきである。ウェイト・ウィンドウを用いて粒子のウェイトが操作できない最高エネルギー範囲においては、ウェイト・ウィンドウ下限値を 0 で埋めてしまう。ウェイト・ウィンドウが 0 ということは、位相空間範囲からスコアされたトラックがないということを示しており、次のいずれかの状態にあるということである：

- ・ トラックが領域に入らなかった。
- ・ 入ったトラックがスコアされなかった。

どちらの状態も、評価したいタリーに対して、該当の空間エネルギー範囲があまり重要でないということを示している。そのため、常軌を逸していなければ、この箇所にはどのような値を入れてもあまり問題はない。

⑥ エネルギー・空間依存の WWLB の設定方法

表 14 より，最も高いエネルギー範囲(8～16MeV)においては，WWLB はタリー領域から離れるに従っておよそ factor-2 だけ増加している。一方，最も低いエネルギー範囲(0～0.1MeV)においては，WWLB はタリー領域から離れるに従っておよそ factor-10 だけ増加している。

Cell が高い WWLB を持つ場合，低い WWLB を持つ場合と比較して，スプリッティングの起る確率が減少し，ロシアン・ルーレットに供される確率が大きくなるため，計算時間が短縮される。しかるに，これと同時にヒストリの分散が増加することにもなる。したがって，ウェイト・ウィンドウ・ジェネレータにより生成された WWLB=0 の空間領域内の WWLB を factor-2 で設定すれば保守的な観点から適切と考えられる。factor-2 で設定した WWLB を表 19 に示す。この WWLB を用いて粒子数 500000 の計算(Case.9 とする)で生成した WWLB を表 20 に示す。また，Case.9 のタリー変動チャートを表 21 に示す。

表 19 factor-2 で設定した WWLB(Case.9)

wwp:n	5	3	5	0	0	0
we:n	1.0000E-01	3.0000E-01	1.0000E+00	2.0000E+00	3.0000E+00	
	5.0000E+00	8.0000E+00	1.6000E+01			
wn1:n	23.4789	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	0.5m	1.7913E-04	1.8089E-05	1.3290E-06	
	-1.0000E+00	-1.0000E+00				
wn2:n	37.4197	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	5.7098E-04	5.5807E-05	5.0814E-06	7.9160E-07	
	-1.0000E+00	-1.0000E+00				
wn3:n	6.79739	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	1.0372E-04	1.4200E-05	2.4648E-06	5.3619E-07	
	-1.0000E+00	-1.0000E+00				
wn4:n	37.5874	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	0.5m	9.1766E-03	4.2984E-03	2.9196E-04	
	5.9042E-05	1.4474E-05	3.5741E-06	1.0660E-06	3.6739E-07	
	-1.0000E+00	-1.0000E+00				
wn5:n	1.74093	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
	0.5m	2.7202E-02	1.4535E-02	4.2355E-03	1.6839E-03	
	8.6794E-04	4.0984E-04	1.5438E-04	5.4347E-05	2.4817E-05	
	1.0141E-05	4.1023E-06	1.6014E-06	6.9490E-07	3.1557E-07	
	-1.0000E+00	-1.0000E+00				
wn6:n	3.3333E+00	5.6746E-01	2.7517E-01	1.3336E-01	8.0779E-02	
	3.3973E-02	2.1641E-02	1.3506E-02	4.5737E-03	1.7146E-03	
	9.7314E-04	4.0262E-04	9.0860E-05	2.9877E-05	1.5873E-05	
	7.9925E-06	4.2870E-06	1.3067E-06	6.0036E-07	3.1448E-07	
	-1.0000E+00	-1.0000E+00				
wn7:n	2.4824E+00	1.7749E-01	1.2103E-01	5.5493E-02	1.7977E-02	
	8.0714E-03	3.8287E-03	1.6807E-03	7.7002E-04	2.3986E-04	
	8.9187E-05	3.9580E-05	2.0818E-05	1.0598E-05	6.7783E-06	
	2.9829E-06	1.4390E-06	6.7568E-07	4.0832E-07	2.5974E-07	
	-1.0000E+00	-1.0000E+00				
wn8:n	5.0000E-01	6.7056E-02	3.0592E-02	1.3709E-02	6.9265E-03	
	3.5548E-03	1.6576E-03	7.8467E-04	4.2039E-04	1.6068E-04	
	8.9353E-05	4.0319E-05	2.0668E-05	1.0932E-05	5.6682E-06	
	2.1028E-06	1.3396E-06	7.2921E-07	4.2023E-07	2.5431E-07	
	-1.0000E+00	-1.0000E+00				

表 20 Case.9 で得られた WWLB

weight-window lower bounds								
energy:	1.000E-01	3.000E-01	1.000E+00	2.000E+00	3.000E+00	5.000E+00	8.000E+00	1.000E+36
cell								
1	2.348E+01	3.742E+01	6.797E+00	3.759E+01	1.741E+00	3.333E+00	2.482E+00	5.000E-01
2	1.174E+01	1.871E+01	3.399E+00	1.879E+01	8.705E-01	5.675E-01	1.775E-01	6.706E-02
3	5.870E+00	9.355E+00	1.699E+00	9.397E+00	4.352E-01	2.752E-01	1.210E-01	3.059E-02
4	2.935E+00	4.677E+00	8.497E-01	4.698E+00	2.176E-01	1.334E-01	5.549E-02	1.371E-02
5	1.467E+00	2.339E+00	4.248E-01	2.349E+00	1.088E-01	8.078E-02	1.798E-02	6.927E-03
6	7.337E-01	1.169E+00	2.124E-01	1.175E+00	5.440E-02	3.397E-02	8.071E-03	3.555E-03
7	3.669E-01	5.847E-01	1.062E-01	5.873E-01	2.720E-02	2.164E-02	3.829E-03	1.658E-03
8	1.834E-01	2.923E-01	5.310E-02	2.937E-01	1.453E-02	1.351E-02	1.681E-03	7.847E-04
9	9.171E-02	1.462E-01	2.655E-02	1.468E-01	4.235E-03	4.574E-03	7.700E-04	4.204E-04
10	4.586E-02	7.309E-02	1.328E-02	7.341E-02	1.684E-03	1.715E-03	2.399E-04	1.607E-04
11	2.293E-02	3.654E-02	6.638E-03	3.671E-02	8.679E-04	9.731E-04	8.919E-05	8.935E-05
12	1.146E-02	1.827E-02	3.319E-03	1.835E-02	4.098E-04	4.026E-04	3.958E-05	4.032E-05
13	5.732E-03	9.136E-03	1.660E-03	9.177E-03	1.544E-04	9.086E-05	2.082E-05	2.067E-05
14	2.866E-03	4.568E-03	8.298E-04	4.298E-03	5.435E-05	2.988E-05	1.060E-05	1.093E-05
15	1.433E-03	2.284E-03	4.149E-04	2.920E-04	2.482E-05	1.587E-05	6.778E-06	5.668E-06
16	7.165E-04	1.142E-03	2.074E-04	5.904E-05	1.014E-05	7.993E-06	2.983E-06	2.103E-06
17	3.583E-04	5.710E-04	1.037E-04	1.447E-05	4.102E-06	4.287E-06	1.439E-06	1.340E-06
18	1.791E-04	5.581E-05	1.420E-05	3.574E-06	1.601E-06	1.307E-06	6.757E-07	7.292E-07
19	1.809E-05	5.081E-06	2.465E-06	1.066E-06	6.949E-07	6.004E-07	4.083E-07	4.202E-07
20	1.329E-06	7.916E-07	5.362E-07	3.674E-07	3.156E-07	3.145E-07	2.597E-07	2.543E-07
21	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00
22	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00

表 21 Case.9 のタリー変動チャート

tally fluctuation charts					
tally	1				
nps	mean	error	vov	slope	fom
32000	2.4724E-07	0.0496	0.0104	5.1	293
64000	2.5002E-07	0.0364	0.0055	5.0	274
96000	2.5163E-07	0.0297	0.0037	10.0	272
128000	2.5832E-07	0.0261	0.0042	6.0	261
160000	2.5450E-07	0.0236	0.0035	5.6	259
192000	2.5251E-07	0.0216	0.0028	6.4	259
224000	2.5510E-07	0.0198	0.0023	7.6	261
256000	2.5781E-07	0.0186	0.0022	8.5	258
288000	2.5777E-07	0.0176	0.0019	10.0	258
320000	2.5721E-07	0.0168	0.0021	6.6	254
352000	2.5921E-07	0.0160	0.0019	5.4	253
384000	2.5817E-07	0.0153	0.0017	5.0	256
416000	2.5792E-07	0.0146	0.0015	5.5	257
448000	2.5838E-07	0.0141	0.0014	6.3	258
480000	2.5835E-07	0.0135	0.0013	5.7	260
500000	2.5849E-07	0.0133	0.0012	6.2	260

dump no. 2 on file slab23.r nps = 500000 coll = 8020654 ctm = 21.86 nrn = 84378048					

次に、factor-2 の代りに、factor-3 で設定する。factor-3 で設定した WWLB を表 22 に示す。この WWLB を用いて粒子数 500000 の計算(Case.10 とする)で生成した WWLB を表 23 に示す。また、Case.9 のタリー変動チャートを表 24 に示す。なお、Case.9 の結果は、10 の統計量を全て満足する。

表 22 factor-3 で設定した WWLB(Case.10)

```

wwp:n 5 3 5 0 0 0
wwe:n 1.0000E-01 3.0000E-01 1.0000E+00 2.0000E+00 3.0000E+00
      5.0000E+00 8.0000E+00 1.6000E+01
wwn1:n 23129.0 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 0.3333334m 1.7913E-04 1.8089E-05 1.3290E-06
      -1.0000E+00 -1.0000E+00
wwn2:n 73620.2 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 5.7098E-04 5.5807E-05 5.0814E-06 7.9160E-07
      -1.0000E+00 -1.0000E+00
wwn3:n 4464.81 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 1.0372E-04 1.4200E-05 2.4648E-06 5.3619E-07
      -1.0000E+00 -1.0000E+00
wwn4:n 4876.82 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 0.3333334m 9.1766E-03 4.2984E-03 2.9196E-04
      5.9042E-05 1.4474E-05 3.5741E-06 1.0660E-06 3.6739E-07
      -1.0000E+00 -1.0000E+00
wwn5:n 19.8303 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m 0.3333334m
      0.3333334m 2.7202E-02 1.4535E-02 4.2355E-03 1.6839E-03
      8.6794E-04 4.0984E-04 1.5438E-04 5.4347E-05 2.4817E-05
      1.0141E-05 4.1023E-06 1.6014E-06 6.9490E-07 3.1557E-07
      -1.0000E+00 -1.0000E+00
wwn6:n 3.3333E+00 5.6746E-01 2.7517E-01 1.3336E-01 8.0779E-02
      3.3973E-02 2.1641E-02 1.3506E-02 4.5737E-03 1.7146E-03
      9.7314E-04 4.0262E-04 9.0860E-05 2.9877E-05 1.5873E-05
      7.9925E-06 4.2870E-06 1.3067E-06 6.0036E-07 3.1448E-07
      -1.0000E+00 -1.0000E+00
wwn7:n 2.4824E+00 1.7749E-01 1.2103E-01 5.5493E-02 1.7977E-02
      8.0714E-03 3.8287E-03 1.6807E-03 7.7002E-04 2.3986E-04
      8.9187E-05 3.9580E-05 2.0818E-05 1.0598E-05 6.7783E-06
      2.9829E-06 1.4390E-06 6.7568E-07 4.0832E-07 2.5974E-07
      -1.0000E+00 -1.0000E+00
wwn8:n 5.0000E-01 6.7056E-02 3.0592E-02 1.3709E-02 6.9265E-03
      3.5548E-03 1.6576E-03 7.8467E-04 4.2039E-04 1.6068E-04
      8.9353E-05 4.0319E-05 2.0668E-05 1.0932E-05 5.6682E-06
      2.1028E-06 1.3396E-06 7.2921E-07 4.2023E-07 2.5431E-07
      -1.0000E+00 -1.0000E+00

```

表 23 Case.10 で得られた WWLB

weight-window lower bounds								
energy: 1.000E-01 3.000E-01 1.000E+00 2.000E+00 3.000E+00 5.000E+00 8.000E+00 1.000E+36								
cell								
1	2.313E+04	7.362E+04	4.465E+03	4.877E+03	1.983E+01	3.333E+00	2.482E+00	5.000E-01
2	7.710E+03	2.454E+04	1.488E+03	1.626E+03	6.610E+00	5.675E-01	1.775E-01	6.706E-02
3	2.570E+03	8.180E+03	4.961E+02	5.419E+02	2.203E+00	2.752E-01	1.210E-01	3.059E-02
4	8.566E+02	2.727E+03	1.654E+02	1.806E+02	7.345E-01	1.334E-01	5.549E-02	1.371E-02
5	2.855E+02	9.089E+02	5.512E+01	6.021E+01	2.448E-01	8.078E-02	1.798E-02	6.927E-03
6	9.518E+01	3.030E+02	1.837E+01	2.007E+01	8.161E-02	3.397E-02	8.071E-03	3.555E-03
7	3.173E+01	1.010E+02	6.125E+00	6.690E+00	2.720E-02	2.164E-02	3.829E-03	1.658E-03
8	1.058E+01	3.366E+01	2.042E+00	2.230E+00	1.453E-02	1.351E-02	1.681E-03	7.847E-04
9	3.525E+00	1.122E+01	6.805E-01	7.433E-01	4.235E-03	4.574E-03	7.700E-04	4.204E-04
10	1.175E+00	3.740E+00	2.268E-01	2.478E-01	1.684E-03	1.715E-03	2.399E-04	1.607E-04
11	3.917E-01	1.247E+00	7.561E-02	8.259E-02	8.679E-04	9.731E-04	8.919E-05	8.935E-05
12	1.306E-01	4.156E-01	2.520E-02	2.753E-02	4.098E-04	4.026E-04	3.958E-05	4.032E-05
13	4.352E-02	1.385E-01	8.401E-03	9.177E-03	1.544E-04	9.086E-05	2.082E-05	2.067E-05
14	1.451E-02	4.618E-02	2.800E-03	4.298E-03	5.435E-05	2.988E-05	1.060E-05	1.093E-05
15	4.836E-03	1.539E-02	9.335E-04	2.920E-04	2.482E-05	1.587E-05	6.778E-06	5.668E-06
16	1.612E-03	5.131E-03	3.112E-04	5.904E-05	1.014E-05	7.993E-06	2.983E-06	2.103E-06
17	5.373E-04	5.710E-04	1.037E-04	1.447E-05	4.102E-06	4.287E-06	1.439E-06	1.340E-06
18	1.791E-04	5.581E-05	1.420E-05	3.574E-06	1.601E-06	1.307E-06	6.757E-07	7.292E-07
19	1.809E-05	5.081E-06	2.465E-06	1.066E-06	6.949E-07	6.004E-07	4.083E-07	4.202E-07
20	1.329E-06	7.916E-07	5.362E-07	3.674E-07	3.156E-07	3.145E-07	2.597E-07	2.543E-07
21	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00
22	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00	-1.000E+00

表 24 Case.10 のタリー変動チャート

tally fluctuation charts						
tally 1						
nps	mean	error	vov	slope	fom	
32000	2.4608E-07	0.0526	0.0126	10.0	288	
64000	2.5135E-07	0.0371	0.0066	10.0	287	
96000	2.5795E-07	0.0304	0.0047	9.6	282	
128000	2.6604E-07	0.0260	0.0037	8.7	283	
160000	2.6151E-07	0.0235	0.0030	9.1	280	
192000	2.6199E-07	0.0214	0.0024	7.7	282	
224000	2.6122E-07	0.0196	0.0020	6.9	288	
256000	2.6400E-07	0.0184	0.0017	7.6	286	
288000	2.6541E-07	0.0177	0.0029	4.2	273	
320000	2.6241E-07	0.0169	0.0026	4.5	272	
352000	2.6166E-07	0.0161	0.0023	4.8	272	
384000	2.5933E-07	0.0154	0.0021	5.1	275	
416000	2.5896E-07	0.0148	0.0020	5.1	272	
448000	2.5884E-07	0.0142	0.0018	5.2	274	
480000	2.5980E-07	0.0137	0.0017	4.9	275	
500000	2.5983E-07	0.0134	0.0016	4.8	276	

dump no. 2 on file slab24.r nps = 500000 coll = 7666762 ctm = 20.14 nrn = 80432811						

ロシアン・ルーレットは、ヒストリの分散を増加させ、ヒストリ当りの計算時間を減少させる。例えば、生存確率 0.1 のロシアン・ルーレットでは、時間を 90%節約することができる。生存確率を 0.01 とすれば、時間は 99%節約することができる。しかし、生存確率を 0.1 から 0.01 に変更した場合、節約される時間はたったの 9%である。一方、粒

子のウェイトは **factor-10** で増加するため、粒子のスコアに対して、穏やかなロシアン・ルーレットと比較して 10^2 倍のインパクトを与えてしまう。すなわち、**Case.10** で使用した WWLB よりも **Case.9** で使用した WWLB の方を利用すべきである。

(参考文献)

- (1) Thomas E. Booth, “MCNP Variance Reduction Examples”, Los Alamos National Laboratory, 2004.

附録4 輸送容器の遮蔽安全設計に使用される線量換算係数

遮蔽計算に用いる線量換算係数は、国際放射線防護委員会 ICRP の勧告に従って、時代とともに変遷している。30 年ほど前は、MADE と呼ばれる最大線量当量が評価線量とされており、その線量換算係数は ANSI/ANS6.1.1-1977 の光子又は中性子のエネルギーに対する多項式で近似された値を用いていた。その後 ICRP1977 年勧告に沿った ICRU30cm 球の 1cm 深さでの周辺線量当量（1 センチメートル線量当量）が評価線量とされた。これは、人体の全身に対する評価線量であり、線量換算係数には ICRP Publication 51 に掲載の値が用いられる。なお、目の水晶体及び皮膚に対する評価線量には別の深さの周辺線量当量が用いられた。ICRP の 1990 年勧告が取入れられた後は、人体の数学ファントムモデルを用いて評価された実効線量が評価線量とされ、その線量換算係数には ICRP Publication 74 に掲載の値が用いられる。実効線量は、放射線の人体への照射方向により異なる。放射線障害防止法では、人体の前方から後方への照射条件に対する値が採用されており、これは光子及び中性子において、エネルギーが低い場合、前方照射条件が他の照射条件に比べて線量換算係数が大きくなるため、安全側の評価を行うために採用されている。

[1 センチメートル線量当量]

1 センチメートル線量当量は ICRP1990 年勧告取り入れ前の遮蔽計算時の評価線量の指標であるが、同勧告が障害防止法等に取り入れられた後も、サーベイメータ等による線量測定値の指標となっている。このため、線量測定値との比較を行う遮蔽計算では 1 センチメートル線量当量の評価が必要である。

実効線量が原子力施設及び RI 取り扱い施設等の遮蔽計算の評価対象とされた後、輸送容器に対する評価線量を何にするのかの議論が規制当局、遮蔽計算及び保健物理の専門家間で行われた。その結果、放射性物質、使用済燃料、廃棄物等の輸送に用いる輸送容器の遮蔽設計には、この 1 センチメートル線量当量を用いることで合意された。なお、これらの輸送に係る法律では、線量を「線量当量」と明記されている。1 センチメートル線量当量を引き続き採用する理由は下記の通りである。

- ・ 放射性物質、使用済燃料、廃棄物等の輸送が、諸外国との間でも行われることから国によって線量の概念が異なると混乱することになる。IAEA の輸送規則では、評価線量を特段規定しておらず、欧州では 1 センチメートルを用いている国が多い。
- ・ 輸送時には輸送容器の表面及び 1m 離れた位置において線量率測定を行うことが義務づけられている。測定値と計算値の整合をとる意味でも 1 センチメートル線量当量を採用することが望ましい。
- ・ 光子に対する 1 センチメートル線量当量への換算係数は、全エネルギーにおいて実効線量への換算係数に比べて大きくなっている（図 1 参照）。一方、使用済燃料輸送における放射線防護の対象となる核分裂中性子スペクトルに対する 1 センチメートル線量当量は、AP(前方-後方照射条件)での実効線量に比べて大きめの評価となって

いる。しかし、約 10eV から 20eV の中性子及び 20MeV 以上の高エネルギー中性子に対して 1 センチメートル線量当量は、実効線量を下回り安全側の評価とは言い難くなる (図2 参照)。

ICRP Publication74 に記載された線量換算係数から、DLC23/CASK ライブラリの群構造に対応した 1 センチメートル線量当量への換算係数の値を、光子と中性子について、それぞれ表1と表2に示す。

(参考文献)

- (1) 日本原子力学会標準: 放射線遮へい計算のための線量換算係数: 2010(AESJ-SC-R002: 2010), 社団法人日本原子力学会
- (2) 実効線量評価のための光子・中性子・ベータ線制動輻射線に対する遮へい計算定数, JAERI-Data/Code 2000-044

表1 DLC23/CASK の群構造に対する

1 センチメートル線量当量($H^*(10)$)率への線量換算係数 (光子)⁽¹⁾

光子 群番号	上限光子 エネルギー (MeV)	下限光子 エネルギー (MeV)	単位フルエンス率当たりの 換算係数 [($\mu\text{Sv h}^{-1}$)/($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)]	
			実効線量(E)	1 センチメートル 線量当量 ($H^*(10)$)
1	1.000E+01	8.000E+00	0.0701	0.0848
2	8.000E+00	6.500E+00	0.0621	0.0724
3	6.500E+00	5.000E+00	0.0531	0.0612
4	5.000E+00	4.000E+00	0.0461	0.0519
5	4.000E+00	3.000E+00	0.0396	0.0443
6	3.000E+00	2.500E+00	0.0335	0.0380
7	2.500E+00	2.000E+00	0.0292	0.0333
8	2.000E+00	1.660E+00	0.0253	0.0290
9	1.660E+00	1.330E+00	0.0219	0.0252
10	1.330E+00	1.000E+00	0.0181	0.0210
11	1.000E+00	8.000E-01	0.0148	0.0174
12	8.000E-01	6.000E-01	0.0120	0.0141
13	6.000E-01	4.000E-01	0.00887	0.0105
14	4.000E-01	3.000E-01	0.00632	0.00756
15	3.000E-01	2.000E-01	0.00452	0.00541
16	2.000E-01	1.000E-01	0.00272	0.00323
17	1.000E-01	5.000E-02	0.00154	0.00192
18	5.000E-02	1.000E-02	0.000950	0.00263

表 2 DLC23/CASK の群構造に対する

1 センチメートル線量当量($H^*(10)$)率への線量換算係数 (中性子)⁽¹⁾

中性子 群番号	上限中性子 エネルギー	下限中性子 エネルギー	単位フルエンス率当たりの 換算係数 [($\mu\text{Sv h}^{-1}$)/($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)]	
			実効線量(E)	1 センチメートル 線量当量 ($H^*(10)$)
1	1.492E+01	1.220E+01	1.79	1.81
2	1.220E+01	1.000E+01	1.80	1.64
3	1.000E+01	8.180E+00	1.79	1.51
4	8.180E+00	6.360E+00	1.76	1.46
5	6.360E+00	4.960E+00	1.72	1.45
6	4.960E+00	4.060E+00	1.68	1.46
7	4.060E+00	3.010E+00	1.60	1.48
8	3.010E+00	2.460E+00	1.52	1.49
9	2.460E+00	2.350E+00	1.47	1.50
10	2.350E+00	1.830E+00	1.40	1.51
11	1.830E+00	1.110E+00	1.21	1.53
12	1.110E+00	5.500E-01	0.903	1.40
13	5.500E-01	1.110E-01	0.469	0.808
14	1.110E-01	3.350E-03	0.103	0.0980
15	3.350E-03	5.830E-04	0.0517	0.0282
16	5.830E-04	1.010E-04	0.0517	0.0316
17	1.010E-04	2.900E-05	0.0532	0.0355
18	2.900E-05	1.070E-05	0.0543	0.0386
19	1.070E-05	3.060E-06	0.0540	0.0427
20	3.060E-06	1.120E-06	0.0519	0.0466
21	1.120E-06	4.140E-07	0.0477	0.0485
22	4.140E-07	1.000E-08	0.0308	0.0414

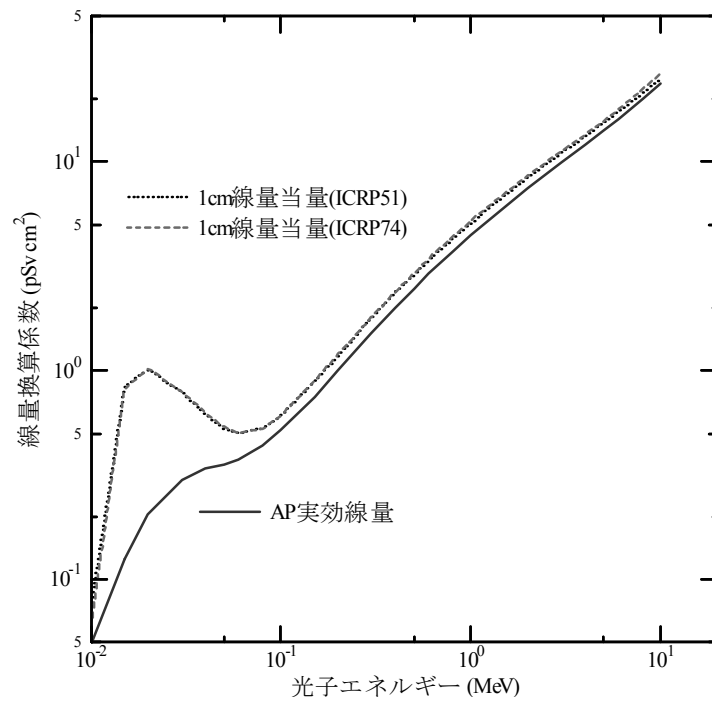


図 2-1 光子に対する線量換算係数のエネルギー依存性⁽²⁾

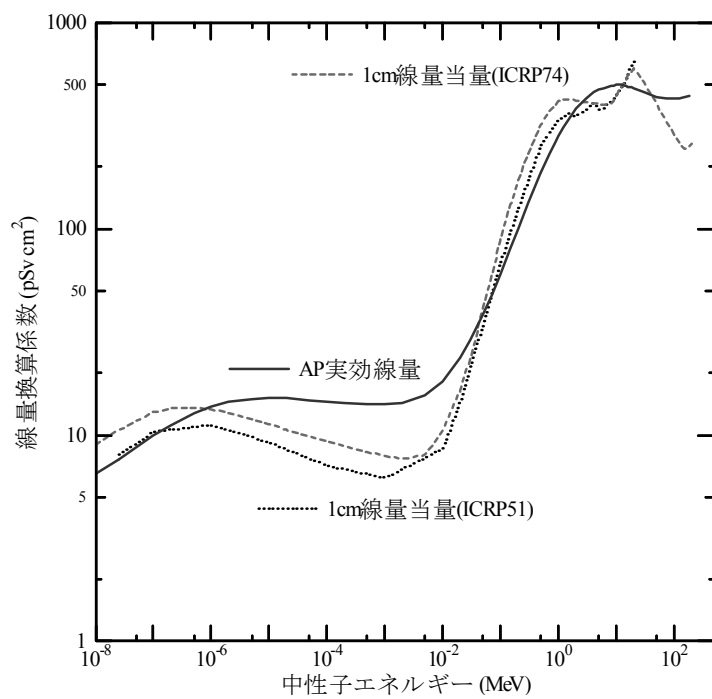


図 2-2 中性子に対する線量換算係数のエネルギー依存性⁽²⁾

附録5 モンテカルロ法を用いた遮蔽計算コードで使用する乱数

モンテカルロ法を用いた遮蔽計算コードを使用する際には、コード内部で生成される疑似乱数の乱数性の確認を実施する必要がある。乱数性とは生成した乱数の数値分布の偏りを表すものであり、計算に用いる乱数にはこの偏りが小さいことが望ましい。乱数性が悪い場合には、真の乱数を用いた場合に比べてサンプリングされる状態が異なり、モンテカルロ計算結果にもバイアスがかかる恐れがある。このような危険性がないことを確認するために、生成される乱数を統計的に検定する方法が考案されている。ここでは、モンテカルロ法を用いた遮蔽計算コードで使用されている乱数のうち、MCNPで用いられている線形合同法について概要を示した後に、この線形合同法によって得られた乱数の検定結果について述べ、物理乱数とMCNPの線形合同法による疑似乱数の結果がほぼ完全に理論値と一致したという報告を添付する。

① モンテカルロ計算で使用する乱数

モンテカルロ計算では、区間 $[0,1]$ (文献によっては $(0,1)$)に一様に分布する乱数を使用される。一様に分布するとは、いま N 個の乱数があるとして0と1の間を L 個の等しい区間に分割したときに各区間に入る乱数の個数のその平均値 N/L からの差が理論的に許される範囲に入っていることである。モンテカルロ計算では試行を何度も繰り返す必要があることから、乱数は計算機上のアルゴリズムにより生成する。本来、乱数は互いに無関係・無秩序でなければならない。しかしながら、実際にはある周期を持っていることから、アルゴリズムにより生成された乱数は疑似乱数(Pseudorandom number)と呼ばれる。

粒子輸送モンテカルロ計算では、乱数としてLehmerにより考案された線形合同法(linear congruential method)が最も多く使用されている。この手法は原理が単純であるため、高速に乱数を生成できる。しかしながら、他のアルゴリズムと比較して周期が短い欠点がある。

② 線形合同法⁽¹⁾

線形合同法では次の漸化式に従い一様乱数を生成する：

$$S_i = (aS_{i-1} + c) \bmod m$$

$$\xi_i = S_i/m$$

ここで、 a, c, m, S_i は正の整数である。 $n = 0, 1, 2, \dots$ と置いて順次 S_i を計算する。 $\bmod m$ は、 $aS_{i-1} + c$ を整数 m で割った0と m の間の整数の剰余を S_i とすることである(例： $5=13 \pmod{8}$)。このとき、 S_i は法(modulus) m に関して $aS_{i-1} + c$ と合同であるという。

S_{n-1} は $0, 1, 2, \dots, m-1$ の最大で m 個の異なる値をとり得る($0 \leq S_i < m$)。 S_{i-1} を m で割った値 ξ_i が0と1の間で一様に分布すると期待される乱数を与える($0 \leq \xi_i < 1$)。また、 $c = 0$ の場合を乗算合同法、 $c \neq 0$ の場合を混合合同法という。線形合同法で生成される乱数の周期は最大でも m (乗算合同法の場合、 $S_i \neq 0$ であるため最大 $m-1$)である。あらゆる (a, c, m)

の組合せに対して最大周期 m となるのではなく、最大周期をとるには下記条件を満たす必要がある：

[混合合同法]

- ・ c は m と互いに素
- ・ $a - 1$ は m の全ての素因数 p の倍数
- ・ m が4の倍数であるなら、 $a - 1$ は4の倍数

[乗算合同法]

- ・ m は素数
- ・ $a^{m-1} \equiv 0 \pmod{m}$ であり、 $i < m - 1$ となる全ての整数に対して $(a^i - 1)/m$ は整数でない場合(この場合「 a は m の原始根である」という)

モンテカルロ計算では、乱数の周期と長さとともに乱数生成速度も重要である。演算速度が速くなるように法は2の冪乗が選択される。また、使用する乱数の数に比べて周期が十分に長く、1周期上でも部分的にも統計的な諸検定に合格するものであれば、実用上問題がないものと見なされている。法を大きくとれば、計算に十分な数の乱数が得られるので、法が2の冪乗であるとき、混合合同法と乗算合同法が最大周期をとる条件は次のようになる：

[法が 2^β であるときの混合合同法が最大周期 2^β をとる条件]

- ・ $a \equiv 1 \pmod{4}$
- ・ c は奇数

[法が 2^β であるときの乗算合同法が最大周期 $2^{\beta-2}$ をとる条件]

- ・ $a \equiv \pm 3 \pmod{8}$
- ・ S_0 は奇数

③ 計算コードで使用されている線形合同法のパラメータ及びその周期

代表的モンテカルロコードで使用されている線形合同法のパラメータを表1に示す。法は全て2の冪乗が選択されている。MCNPにおいては、デフォルト値として、

$$S_i = 5^{19} S_{i-1} \pmod{2^{48}}$$

が用いられており、その周期は $2^{46} \sim 7.04 \times 10^{13}$ となっている。また、オプションとして $2^{63} \sim 9.22 \times 10^{18}$ に改善したものも利用できるようになっており、実用上疑似乱数の周期への懸念はないと考えて良い。

④ 乱数の検定

乱数の検定には、理論的検定及び統計的検定がある。線形合同法によって得られる乱数の理論的検定にはスペクトル検定が用いられ、よく用いられる法に最適なパラメータ (a, c) が調べられている⁽²⁾。また、統計的検定においては、63ビットの混合合同法による乱数はDIEHARD検定(表2)に合格することが確認されている⁽³⁾。

また、5.で後述するように、物理乱数と MCNP の線形合同法による疑似乱数の結果がほぼ完全に理論値と一致したという報告があることから、MCNP の疑似乱数は物理乱数と同等の性能があり、モンテカルロ法における乱数の問題は原則的に問題ではないことが実例から示されている。

表1 モンテカルロ法で使用する線形合同法のパラメータ⁽²⁾

コード名	法(m)	a	c	周期
MCNP5	2^{48}	5^{19}	0	2^{46}
	2^{63}	9219741426499971445	1	2^{63}
		2806196910506780709	1	2^{63}
		3249286849523012805	1	2^{63}
MVP ver.2	2^{63}	9219741426499971445	1	2^{63}
MCNP4	2^{48}	5^{19}	0	2^{46}
MVP ver.1	2^{31}	32771	1234567891	2^{31}
MORSE	2^{47}	5^{19}	0	2^{45}

c.f. EGS5では、RANLUX (luxury random numbers) と呼ばれる乱数生成法が使用されている。乱数の周期はおおよそ10171であり、1-231のシードにより、オーバーラップすることのない独立した乱数を発生することができる。このアルゴリズムは数学的に各種の性質が証明されており、現在知られているレベルでの無作為性において、真に相関を持たない乱数を発生する。この乱数生成方法では三段階の「贅沢さ」レベルが選択可能で、贅沢レベルを上げると相関を小さくすることができる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

表 2 DIEHARD 検定項目

DIEHARD Statistical Tests
Birthday spacings test
Overlapping 5-permutation test
Binary rank test for 31x31 matrices
Binary rank test for 32x32 matrices
Binary rank test for 6x8 matrices
Bitstream test
Overlapping pairs sparse occupancy
Overlapping quadruples sparse occupancy
DNA test
Count the 1's in a stream of bytes
Count the 1's for specific bytes
Parking lot test
Minimum distance test
3D spheres test
Squeeze test
Overlapping sums test
Runs test
Craps test

⑤ 物理乱数との比較⁽⁶⁾

物理乱数とは、自然界におけるランダム現象を利用して生成された乱数で、算術アル

ゴリズムで生成される擬似乱数とは全く系統が異なるものである。物理乱数の長所は、周期性が無く擬似乱数に見られる多次元格子性が無い点である。過去に、放射性同位元素の崩壊を利用した物理乱数発生装置が考案されたが、これらは、高価格、遅い乱数発生速度、装置の大きさ、から一般中性子工学者が手軽に扱えるものではなかった。今回用いた物理乱数発生装置は、半導体の熱雑音を利用したもので、東芝・原子力事業部で開発・製品化したものである。本装置(製品名ランダムマスター)は、毎秒16メガビットのランダムなビット信号をPCに送り出し、現在の高速なPCの演算速度と同等な速度で乱数を発生できる。通常のPCの一部品として手軽に実装でき、プログラムから関数副プログラムを呼ぶ方式で物理乱数を利用できる。

MCNPの乱数発生関数rang()中に、物理乱数ボードの倍精度乱数を呼び出す関数を追加し再コンパイルすることによりMCNPで物理乱数を用いることができる。Fortran CompilerはLahey/Fujitsu Fortran-95-R.5.00fを用いた。適用した問題としては、乱数の違いが出やすい単純で基礎的なもので実用的意義の高い以下の4つを選択した：

- ・ $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ 断面積の共鳴積分
- ・ 軽水中での中性子減速問題
- ・ 軽水中での熱中性子の上方散乱問題
- ・ 軽水炉単位セル形状の臨界問題

これら4つの問題では、擬似乱数と物理乱数の差は統計精度で説明できる程度のもので、有意差は検出できなかった。図1に理論値がわかっている共鳴積分の結果を示す。■の物理乱数と□の擬似乱数(MCNP固有の合同法)の結果は、ほぼ完全に理論値(実線)と一致した。これらの結果から、MCNPの擬似乱数は、物理乱数と同等の性能があり、モンテカルロ法における乱数の問題は原則的に問題ではないことを実例でもって示せた。また、実績のあるMCNPの擬似乱数と同等の答えを出したことにより、本物理乱数発生装置の実用問題適用における品質の高さを示すことができた。

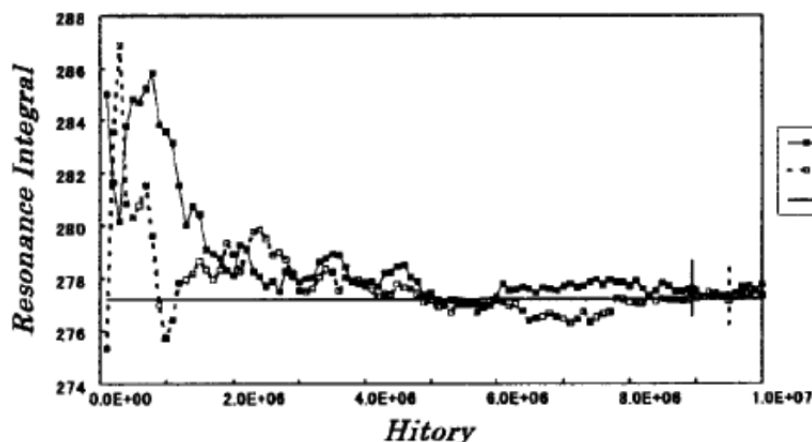


図1 共鳴積分の評価結果

(参考文献)

- (1) Brown, F.; “Fundamentals of Monte Carlo Particle Transport,” LA-UR-05-4983 (2005)
- (2) L'Ecuyer, P.; “Tables of Linear Congruential Generators of Different Sizes and Good Lattice Structure,” *Math. Comp.*, Vol.**68**, p.249-260(1999).
- (3) Brown, F.B. and Nagaya, Y.; “The MCNP5 Random Number Generator,” *Trans. Am. Nucl. Soc.*, Vol.**87**, p.230-232(2002)
- (4) M. Lüscher, "A portable high-quality random number generator for lattice field theory calculations", *Computer Physics Communications*, Vol.**79** (1994) p.100-110.
- (5) F. James, "RANLUX: A Fortran implementation of the high-quality pseudo-random number generator of Lüscher", *Computer Physics Communications*, Vol.**79** (1994) p.111-114.
- (6) 原子力コード研究委員会原子力コード評価専門部会編, “原子力研究におけるモンテカルロシミュレーション(II),” JAERI-Review 2000-027, (2000), p32.

附録6 輸送容器体系で行われた放射線透過試験のベンチマーク解析

1. 電力中央研究所 50ton キヤスク

1.1. 実験の概略

1.1.1. 遮蔽実験室及び 50ton 輸送容器の形状

遮蔽実験室の形状を図 1-1 に示す。建屋中央に容器が縦置きされた状態である。容器の形状を図 1-2 に示す。

実験室の構造は下記のとおりである：

- ・ 実験室の周囲は厚さ 40cm の普通コンクリート
- ・ 床は厚さ 100cm の普通コンクリート
- ・ 天井は厚さ約 1cm の鉄板

50ton 輸送容器の主要構造は下記のとおりである：

- ・ 主構造：ステンレス鋼および鉛を主材料とする多重円筒体
- ・ 蓋および底部：ステンレス鋼が主材料
- ・ フィン：円環状で銅が主材料
- ・ 遮蔽材： γ 線の減衰には主に鉛及び鋼，中性子の減衰には主にキャビティ内の水及び外側のレジン層が寄与

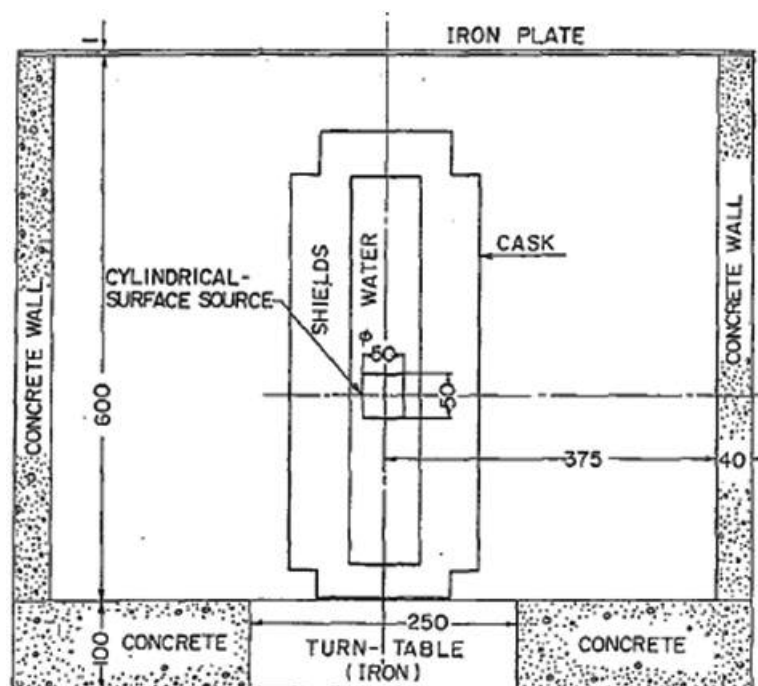


図 1-1 遮蔽実験室の形状⁽¹⁾

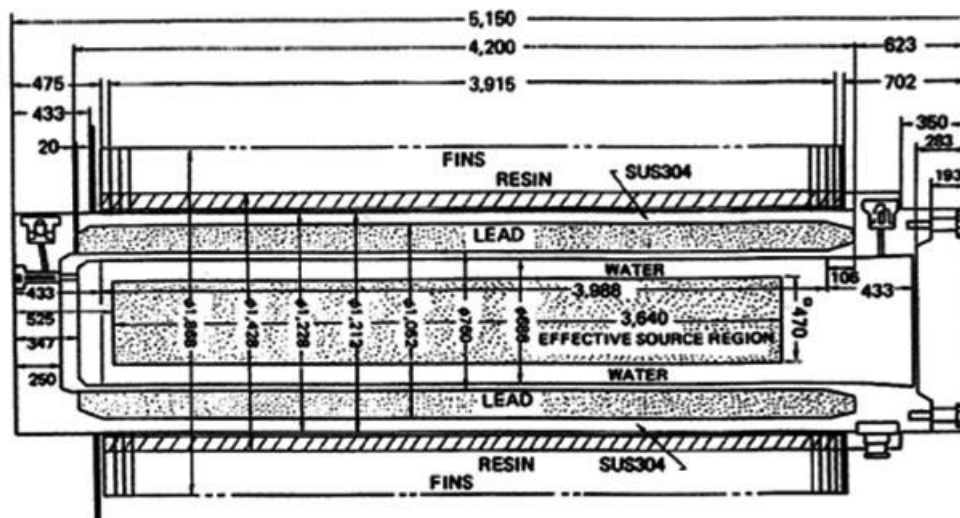


図 1-2 50ton 輸送容器形状⁽¹⁾

1.1.2. 中性子線源

実験では、表 1-1 に示す特性・形状をもつ ^{252}Cf が中性子線源として使用された。

表 1-1 線源の特性及び性状⁽¹⁾

	特性・形状
総量	1.026mg
線源強度	$2.4 \times 10^9 \text{ n/sec}$ (1980/11/30)
形状	1mg を 80 個に分割し、アルミニウム中空円筒の表面に一様に分布させたもの (アルミニウム中空円筒：半径 25cm、高さ 50cm、厚さ 3.5mm)

1.1.3. 中性子測定器

中性子線量率測定には Studsvik 社製のレムカウンタ 2202D(図 1-3、大きさ $\phi 212\text{mm} \times h 232\text{mm}$)が使用されている。中性子の測定結果の換算は、レムカウンタのカウント数を記録し、mrem/hr に換算している。レムカウンタを標準中性子場で較正したときの感度($\text{cps}/(\text{mrem/hr})$) ε_0 は次のとおりである：

$$\varepsilon_0 = 3.35 (\text{cps}/(\text{mrem/hr})) \text{ (誤差} \pm 15.5\%)^3$$

測定の実効的中心を検出器表面から 5cm 入った位置とした⁽¹⁾。較正に用いられた標準中性子源は、電総研(当時)の ^{252}Cf である。

1.1.4. 補正因子の算出

ICRP-21(71)⁽³⁾により勧告されている中性子線量計の各中性子エネルギーに対する効率曲線の値と実際の効率曲線を比較した結果を図 1-4 に示す。また、ICRP-21 の勧告値に対

する実際の効率値を比で示したものを表1-2に示す。これらの図表より、このレムカウンタは局所的には中性子エネルギー10keVにおいて 3.5 ± 1.1 倍、熱中性子及び15MeVにおいて0.5倍の過大あるいは過小評価をする可能性があるため、測定対象の中性子スペクトルに対応した補正因子を考慮した。

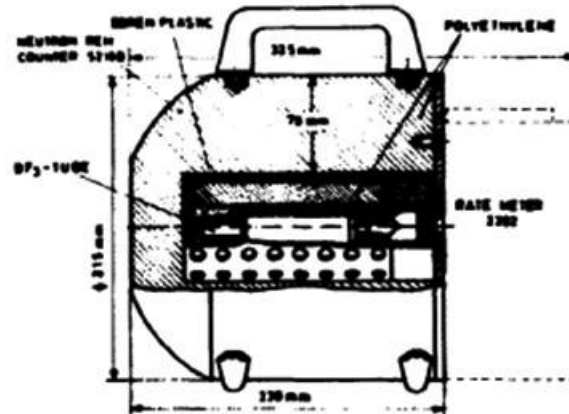


図1-3 レムカウンタ断面図⁽²⁾

表1-2 ICRP-21 中性子線量換算係数⁽³⁾、補正因子及び補正後中性子線量換算係数

エネルギー	ICRP-21 ⁽³⁾ 中性子線量 当量率換算 係数	補正因子 $\varepsilon(E)/(\text{ICRP-21}$ 中性子線量当 量率換算係数)	補正後 中性子線量 当量率 換算係数*
MeV	(mrem/hr) /(n/cm ² ・s)	-	(mrem/hr) /(n/cm ² ・s)
2.50E-08	3.85E-03	0.54±0.20	2.08E-03
1.00E-07	4.17E-03	0.6	2.50E-03
1.00E-06	4.55E-03	0.65	2.96E-03
1.00E-05	4.35E-03	1.0	4.35E-03
1.00E-04	4.17E-03	1.44	6.00E-03
1.00E-03	3.70E-03	2.0	7.40E-03
1.00E-02	3.57E-03	3.5±1.1	1.25E-02
1.00E-01	2.08E-02	1.3±0.3	2.70E-02
5.00E-01	7.14E-02	1.05±0.1	7.50E-02
1.00E+00	1.18E-01	1.0±0.1	1.18E-01
2.00E+00	1.43E-01	0.95±0.1	1.36E-01
5.00E+00	1.47E-01	0.8±0.08	1.18E-01
1.00E+01	1.47E-01	0.6±0.09	8.82E-02
2.00E+01	1.54E-01	0.45±0.09	6.93E-02

*補正には中央値を使用した。

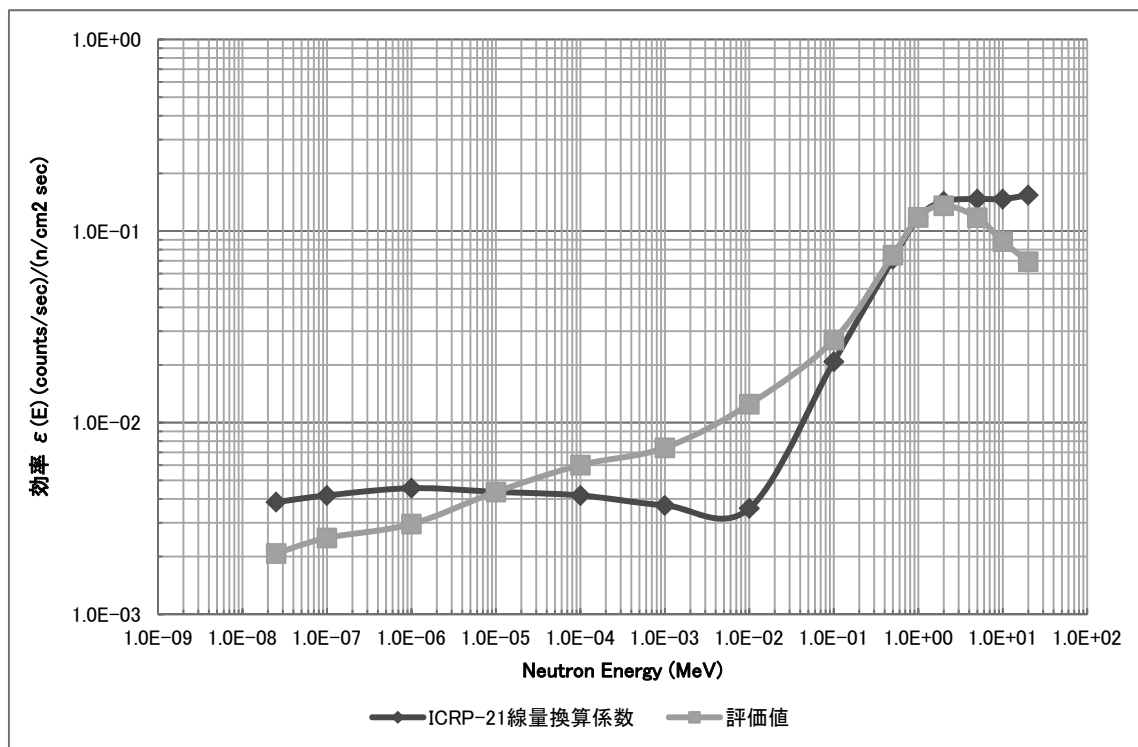


図 1-4 レムカウンタの効率曲線⁽³⁾

(参考文献)

- (1) 井上正明他, “モンテカルロ法による遮蔽解析(その 1) -50 トン級キャスクの中性子遮蔽性能試験への適用例- 電力中央研究所・研究報告:381034,” (1982 年 5 月)
- (2) Benny Majborn, “The response of a neutron rem counter to thermal, to intermediate- energy, and to fast neutrons,” Risø National Laboratory, Risø-M-1994 (1978).
- (3) ICRP Publication 21, Pergamon Press (1973).

1.2. 計算モデルの作成

容器周辺の中性子線量当量率分布について、モンテカルロ計算と実測で比較検討を行った。

1.2.1. 解析ケース

本検討では、計算体系、分散低減法及びタリーの適用性・使用法を確認するために、表 1-3 にまとめた解析ケースについて計算を行った。

表 1-3 本検討で行った計算ケースの概要※

計算体系 (放熱フィン)	分散低減法		タリー
	打ち切り法	非アナログ法	
モデル化	エネルギー・カット オフ $10 \times 10^{-11}(\text{MeV})$	単色中性子減衰曲線法 エネルギービン：1MeV, 5MeV, 10MeV, 16MeV (Implicit Capture)	トラックレングス エスティメータ

※分散低減法、タリーの名称は本ガイドライン附録 1 及び文献(2)を参照

1.2.2. 計算手法

計算手法は、単色中性子減衰曲線法で作成したウェイト・ウィンドウ(エネルギービン)を用いた。単色中性子減衰曲線は、中性子束の減衰とウェイト・ウィンドウ： W_L の減衰の傾向が類似していることを利用した方法であり、中性子透過物質の巨視的全断面積： Σ_t を利用する⁽¹⁾。

⑥ 分散低減のための空間分割幅は粒子の平均自由行程程度に設定する。中性子の平均自由行程は $\lambda = 1/\Sigma_t$ で表される。平均自由行程： λ は中性子の持つエネルギーにより異なるが、遮蔽計算で取扱う線源の最高エネルギーの中性子に対応する λ を用いる。

⑦ ある物質中の中性子束： ϕ の減衰は近似的に $\phi = \phi_0 \cdot \exp(-\Sigma_t \cdot t)$ である。ウェイト・ウィンドウの変化は、定性的に中性子束減衰曲線に類似する。そこで、

$$\phi = \phi_0 \cdot \exp(-\Sigma_t \cdot t) \rightarrow W_L = W_0 \cdot \exp(-\Sigma_t \cdot t)$$

と仮定(通常、 $W_0 = 1$)して W_L を求める。

1.2.3. 容器のモデル化

容器のモデル化は、遮蔽実験の目的が容器の円筒側面を透過した中性子測定であることから、蓋、底部にあるバルブ及びボルトを無視した。

1.2.4. 実験室のモデル化

容器は図 1-1 に示すような遮蔽実験室の中央の回転台の上に置かれている。キャスクを透過した中性子が室内散乱して検出器へ寄与するため、実験室まで含めて計算範囲とした。

1.2.5. 各領域における原子個数密度

各領域における原子個数密度を表 1-4 に示す。

表 1-4 各領域における原子個数密度⁽¹⁾ (単位 : atom/barn・cm)

Material Element	Water	Stainless Steel (SUS304)	Lead	Resin	Fin-region (homogen- ized)	Fin-region *	Air	Ordinary Concrete
Hydrogen	6.675E-02			5.909E-02				1.195E-02
Carbon		3.181E-04		3.435E-02				5.917E-02
Nitrogen				2.703E-04	3.811E-05		3.964E-05	
Oxygen	3.338E-02			1.330E-02	1.026E-05		1.067E-05	4.201E-02
Magnesium								1.412E-03
Aluminum				3.715E-03				1.898E-03
Silicon		1.700E-03						7.340E-03
Sulphur								1.315E-04
Potassium								6.162E-05
Calcium								8.745E-03
Chromium		1.837E-02						
Manganese		1.739E-03						
Iron		5.722E-02						2.804E-04
Nickel		8.134E-03						
Copper					3.758E-03	4.246E-02		
Lead			3.296E-02					

* 図面より原子個数密度を算出

参考文献

- (1) 井上正明他, “モンテカルロ法による遮蔽解析(その 1) -50 トン級キャスクの中性子遮蔽性能試験への適用例- 電力中央研究所・研究報告:381034,” (1982 年 5 月)
- (2) X-5 Monte Carlo Team: “MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5”, LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory (2003)

1.3. 各解析ケースに対する計算結果と考察

1.3.1. 入力データ

入力データは表 1-5 のように設定した :

表 1-5 MCNP の入力

カード名	設定項目	設定方法
Cell Card	容器を構成する Cell	SUS304: 1cm 鉛: 0.5cm レジン: 4cm フィン・空間: 材料境界のみ設定 フィンを詳細モデル化
Surface Card	Cell を構成する表面	各材料の境界面のみ設定
Material Card	断面積	JENDL-3.3
	原子個数密度	前回と同様
Source Card	幾何形状	容器底面から高さ 227.5cm に線源領域中心があると設定 線源: 半径 25cm、高さ 50cm、厚さ 3.5mm の円筒形状(表 1-1 参照)
	エネルギースペクトル	^{252}Cf の Watt の式を使用
Tally Card	タリー	トラックレングスエスティメータ(TLE) (半径: 10cm)
	線量換算係数	ICRP-21 に補正因子を考慮した線量換算係数を使用
分散低減 (打ち切り法)	エネルギー・カットオフ	1.0×10^{-11}
	ヒストリ・カットオフ	1.0×10^6
分散低減法 (非アナログ法)	単色中性子減衰曲線法 (暗黙吸収)	ウェイト・ウィンドウ・エネルギービン: 1M, 5M, 10M, 16MeV

1.3.2. 単色中性子減衰曲線を利用したウェイト・ウィンドウの設定方法

電中研容器を構成する核種同位体と原子個数密度を表 1-6 に示す。電中研容器を構成する核種の中性子微視的全断面積 σ_t を表 1-7 に示す。各材料の中性子巨視的全断面積 Σ_t を表 1-8 に示す。なお、放熱フィン先端から外界に放出される粒子のウェイトと放熱フィン溶接部から外界に放出される粒子のウェイトに大きな差があらわれないように、放熱フィン領域のセル分割は、放熱フィン溶接部までのセル境界面から放熱フィン先端までを一つのセルとした。放熱フィン間の空隙領域も一つのセルとして設定した。放熱フィン領域におけるインポートランスは、放熱フィンの幾何形状を表すセルと放熱フィン間の空隙領域を表すセルで等しく設定した。

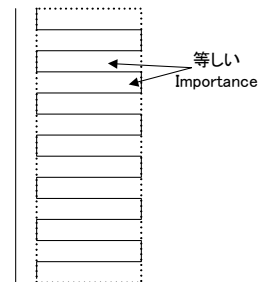


表 1-6 電中研容器を構成する核種同位体と原子個数密度

材質名	核種同位体	原子個数密度 (核種毎)	原子個数密度 (各材質)
		atom/(burn・cm)	atom/(burn・cm)
キャビティ 内水	H-1	6.674E-02	1.001E-01
	H-2	1.001E-05	
	O-16	3.338E-02	
容器本体 (SUS304)	C-12	3.181E-04	8.748E-02
	Si-28	1.568E-03	
	Si-29	7.939E-05	
	Si-30	5.270E-05	
	Cr-50	7.982E-04	
	Cr-52	1.539E-02	
	Cr-53	1.745E-03	
	Cr-54	4.345E-04	
	Mn-55	1.739E-03	
	Fe-54	3.319E-03	
	Fe-56	5.248E-02	
	Fe-57	1.259E-03	
	Fe-58	1.602E-04	
	Ni-58	5.537E-03	
	Ni-60	2.134E-03	
	Ni-61	9.272E-05	
	Ni-62	2.956E-04	
	Ni-64	7.532E-05	
γ 線 遮蔽材 (Lead)	Pb-204	4.614E-04	3.296E-02
	Pb-206	7.943E-03	
	Pb-207	7.284E-03	
	Pb-208	1.727E-02	
中性子 遮蔽材 (Resin)	H-1	5.908E-02	1.107E-01
	H-2	8.864E-06	
	C-12	3.435E-02	
	N-14	2.693E-04	
	N-15	9.893E-07	
	O-16	1.330E-02	
	Al-27	3.715E-03	
放熱フィン +空気均質化 Cu+Air	N-14	3.797E-05	3.806E-03
	N-15	1.395E-07	
	O-16	1.026E-05	
	Cu-63	2.599E-03	
	Cu-65	1.159E-03	
空気	N-14	3.949E-05	5.031E-05
	N-15	1.451E-07	
	O-16	1.067E-05	
放熱フィン (Cu)	Cu-63	5.874E-02	8.492E-02

表 1-7 各核種の中性子微視的断面積

核種	エネルギー別 中性子微視的断面積： σ_t (単位：barn= 10^{-24}cm^2)					
	0-1keV	1k-1MeV	1M-5MeV	5M-10MeV	10M-16MeV	16M-20MeV
H	20.00	4.30	1.60	0.95	0.60	0.46
O	3.75	5.00	1.20	1.30	1.60	1.65
C	4.70	2.60	1.20	1.20	1.50	1.50
Si	2.20	3.40	2.70	1.90	1.85	1.90
Cr	4.80	3.60	3.80	2.90	2.25	2.20
Mn	15.00	3.50	3.60	3.35	2.65	2.30
Fe	10.00	3.00	3.70	3.10	2.40	2.25
Ni	16.00	3.00	3.60	3.25	2.65	2.50
Pb	11.00	5.20	7.40	5.20	5.70	6.00
B	8.00	2.00	1.70	1.35	1.33	1.30
N	9.00	1.70	1.20	1.30	1.58	1.55
Al	1.40	3.00	2.30	1.75	1.75	1.80
Cu	6.00	3.30	3.80	3.50	2.70	2.50

参考文献: BNL-325⁽²⁾

表 1-8 各材料の中性子巨視的全断面積

	核種	原子個数密度 (核種毎)	エネルギー別/核種別 中性子巨視的全断面積 : Σ_t (単位 : cm^{-1})						
			0-1keV	1k-1MeV	1k-5MeV	5M-10MeV	10M~16MeV	16M~20MeV	
キャビティ内水	H	6.675E-02	1.335E+00	2.870E-01	1.068E-01	6.341E-02	4.005E-02	3.071E-02	
	O	3.338E-02	1.252E-01	1.669E-01	4.006E-02	4.339E-02	5.341E-02	5.508E-02	
	巨視的全断面積 : Σ_t		1.460E+00	4.539E-01	1.469E-01	1.068E-01	9.346E-02	8.578E-02	
容器本体 (SUS304)	C	3.181E-04	1.495E-03	8.271E-04	3.817E-04	3.230E-03	4.772E-04	4.772E-04	
	Si	1.700E-03	3.740E-03	5.780E-03	4.590E-03	3.230E-03	3.145E-03	3.230E-03	
	Cr	1.837E-02	8.816E-02	6.612E-02	6.980E-02	5.327E-02	4.133E-02	4.041E-02	
	Mn	1.739E-03	2.609E-02	6.087E-03	6.260E-03	5.826E-03	4.608E-03	4.000E-03	
	Fe	5.722E-02	5.722E-01	1.717E-01	2.117E-01	1.774E-01	1.373E-01	1.287E-01	
	Ni	8.135E-03	1.302E-01	2.440E-02	2.928E-02	2.644E-02	2.156E-02	2.034E-02	
	巨視的全断面積 : Σ_t		8.218E-01	2.749E-01	3.220E-01	2.665E-01	2.084E-01	1.972E-01	
γ 線遮蔽材 (Lead)	Pb	3.296E-02	3.625E-01	1.714E-01	2.439E-01	1.714E-01	1.879E-01	1.978E-01	
	巨視的全断面積 : Σ_t		3.625E-01	1.714E-01	2.439E-01	1.714E-01	1.879E-01	1.978E-01	
中性子遮蔽材 (Resin)	H	5.909E-02	1.182E+00	2.541E-01	9.454E-02	5.613E-02	3.545E-02	2.718E-02	
	C	3.435E-02	1.614E-01	8.931E-02	4.122E-02	4.122E-02	5.153E-02	5.153E-02	
	N	2.703E-04	2.433E-03	4.595E-04	3.243E-04	3.514E-04	4.271E-04	4.189E-04	
	O	1.330E-02	4.988E-02	6.650E-02	1.596E-02	1.729E-02	2.128E-02	2.195E-02	
	Al	3.715E-03	5.201E-03	1.115E-02	8.545E-03	6.501E-03	6.501E-03	6.687E-03	
	巨視的全断面積 : Σ_t		1.401E+00	4.215E-01	1.606E-01	1.215E-01	1.152E-01	1.078E-01	
放熱フィン +空気均質化 Cu+Air	N	3.811E-05	3.430E-04	6.479E-05	4.573E-05	4.954E-05	6.021E-05	5.907E-05	
	O	1.026E-05	3.848E-05	5.130E-05	1.231E-05	1.334E-05	1.642E-05	1.693E-05	
	Cu	3.758E-03	2.255E-02	1.240E-02	1.428E-02	1.315E-02	1.015E-02	9.395E-03	
	巨視的全断面積 : Σ_t		2.293E-02	1.252E-02	1.434E-02	1.322E-02	1.022E-02	9.471E-03	
空気	N	3.964E-05	3.567E-04	6.738E-05	4.756E-05	5.153E-05	6.262E-05	6.143E-05	
	O	1.067E-05	4.001E-05	5.335E-05	1.280E-05	1.387E-05	1.707E-05	1.761E-05	
	巨視的全断面積 : Σ_t		3.967E-04	1.207E-04	6.037E-05	6.540E-05	7.970E-05	7.904E-05	
放熱フィン (Cu)	Cu	8.492E-02	5.095E-01	2.802E-01	3.227E-01	2.972E-01	2.293E-01	2.123E-01	
	巨視的全断面積 : Σ_t		5.095E-01	2.802E-01	3.227E-01	2.972E-01	2.293E-01	2.123E-01	

1.3.3. 中性子線量当量率分布

モンテカルロ遮蔽計算を実施し、半径方向(線源軸方向の中点を通る水平方向)及び軸方向の中性子線量当量率分布を求め、実測値との比較を行った。

(1) 径方向中性子線量当量率分布

径方向中性子線量当量率分布は、容器のフィン先端(容器表面)からの水平距離をグラフの横軸にとり、中性子線源が実効燃料領域の中央に置かれた場合の線量当量率である。径方向中性子線量当量率分布を図 1-5 に示す。

換算係数変更後の輸送容器中心軸から 181.5cm 離れた点における C/E は、 $1.34[\text{mrem/h}]/1.42[\text{mrem/h}]=0.94$ である。

(2) 軸方向中性子線量率分布

容器表面からの距離を一定として、垂直方向の線量率分布についてモンテカルロ計算と実測値とを比較した。比較図を図 1-6 に示す。

計算値と測定値の差が大きい底面から 127.5cm の位置(容器中心軸からの距離=101.5cm)における線量当量率の C/E は、 $0.43[\text{mrem/h}]/0.53[\text{mrem/h}]=0.82$ である。

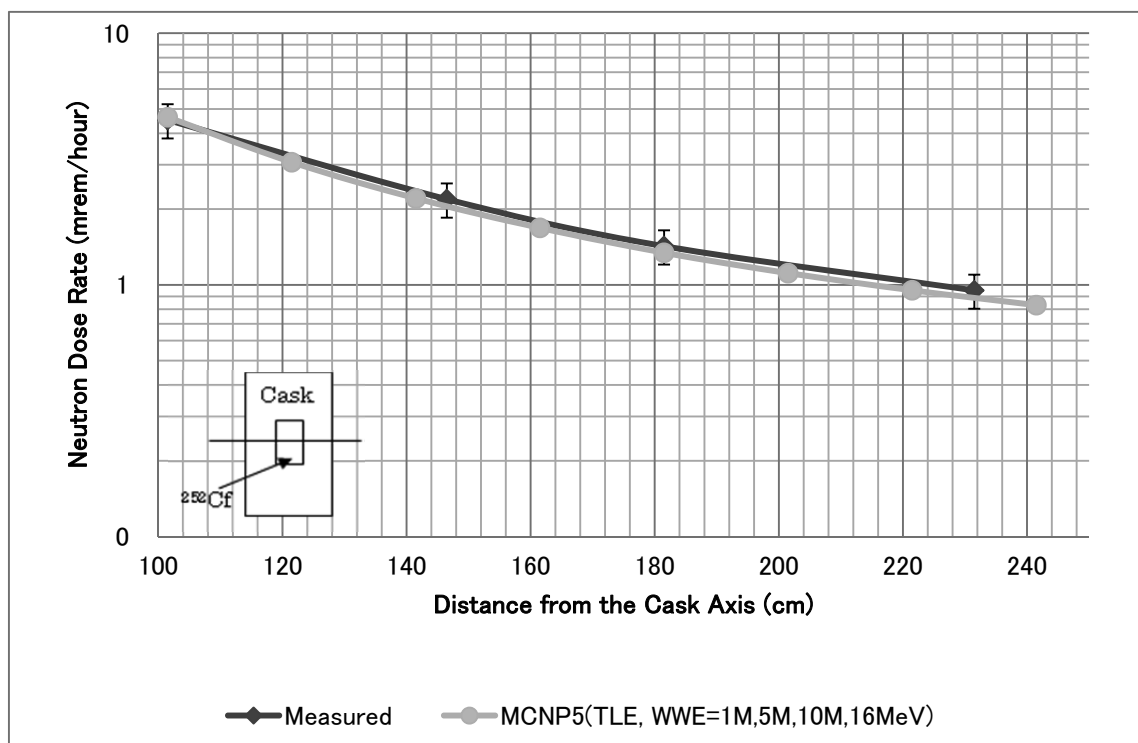


図 1-5 容器中心軸からの距離と線量当量率

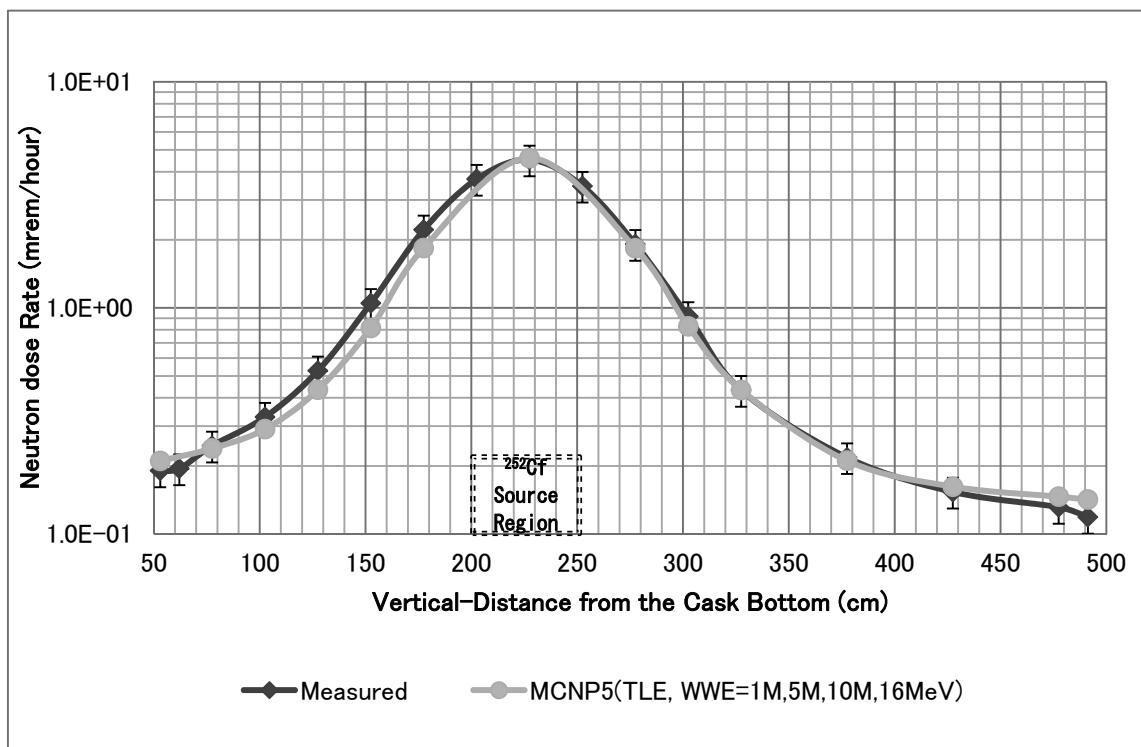


図 1-6 容器底面からの距離と線量当量率 (容器中心軸からの距離=101.5cm)

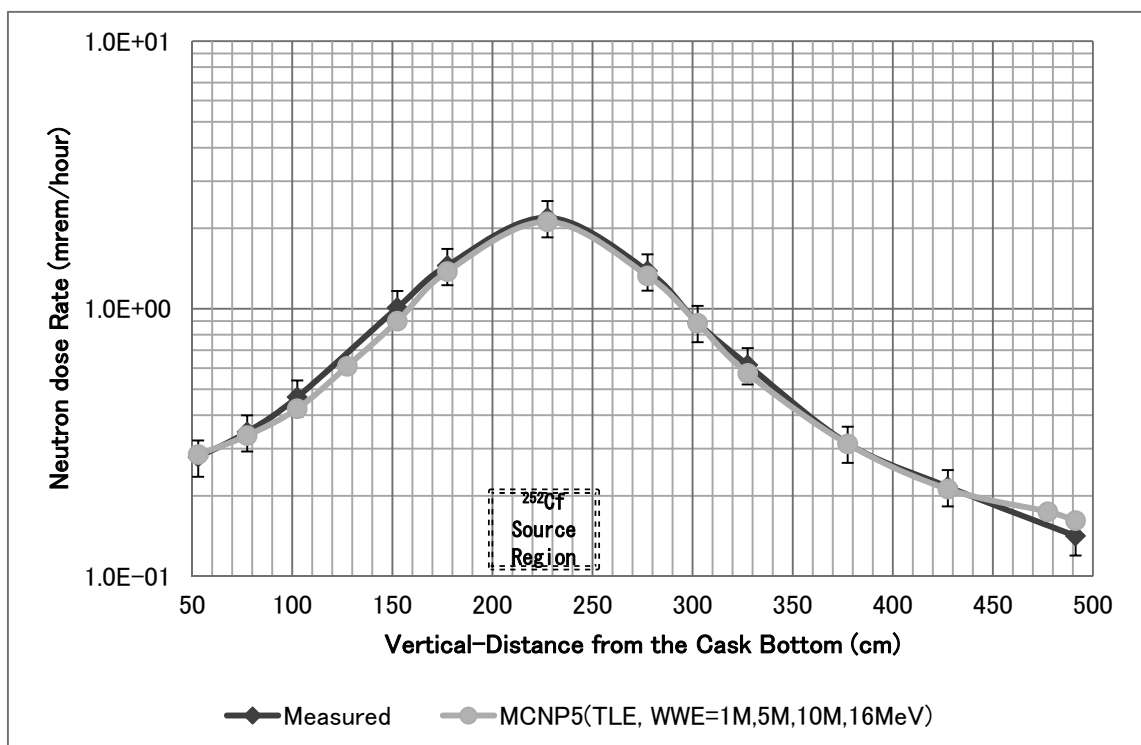


図 1-6 容器底面からの距離と線量当量率 (容器中心軸からの距離=146.5cm)

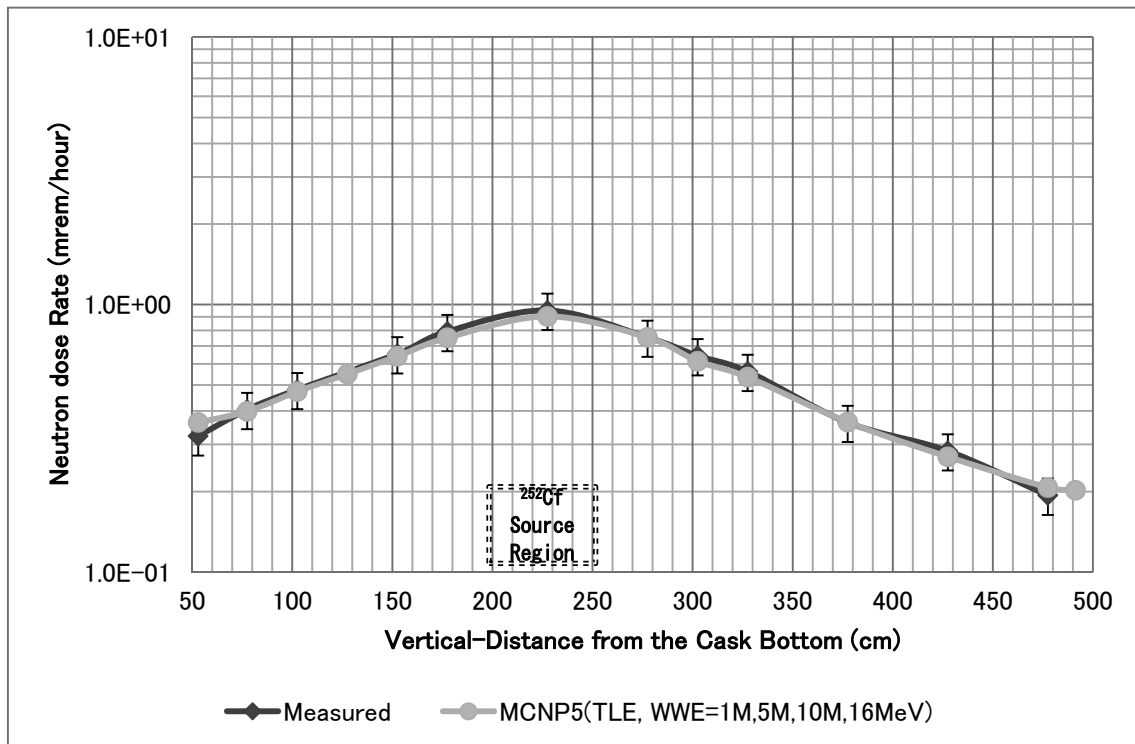


図 1-6 容器底面からの距離と線量当量率 (容器中心軸からの距離=231.5cm)

(7) 異なるタリーによる計算

図 1-7 は、トラックレンジスエスティメータとネクストイベントエスティメータ(点形状、PD)を用いて計算した線量当量率分布である。両計算結果は統計指標の基準値をすべて下回っている。本ケースのように、容器の幾何形状及び容器の構成材がネクストイベントエスティメータの利用範囲に適合する場合、統計指標が全て満足するまで十分に収束させた計算は、他のタリーを使用した場合と同等の結果に収束することがわかる。

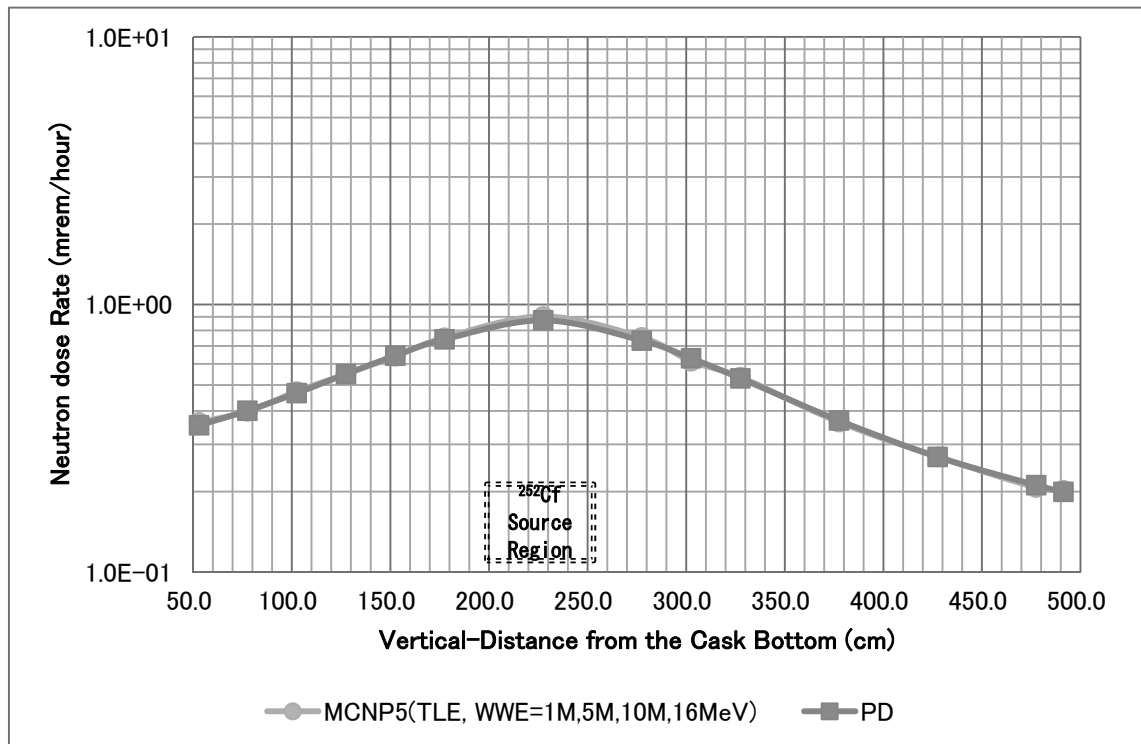


図 1-7 容器底面からの距離と線量当量率 (トラックレンジスエスティメータ及びネクストイベントエスティメータ(点形状)による計算結果)

(8) タリーの大きさが計算に与える影響

- ・ トラックレンジスエスティメータ(球形状)の半径

径方向中性子線量当量率分布について、トラックレンジスエスティメータ(球形状)の半径を変更して計算した結果を図 1-8 に示す。

図より明らかなように、半径を小さくするに従って十分な粒子数の寄与が得られなくなり、その結果、分散が大きくなり解が収束しなくなることがわかる。タリーの位置によっては、過小評価する箇所もある。適切なタリーの大きさとしては、実測時の代表的な大きさ、中性子の場合であれば中性子レムカウンタ程度とする必要がある。

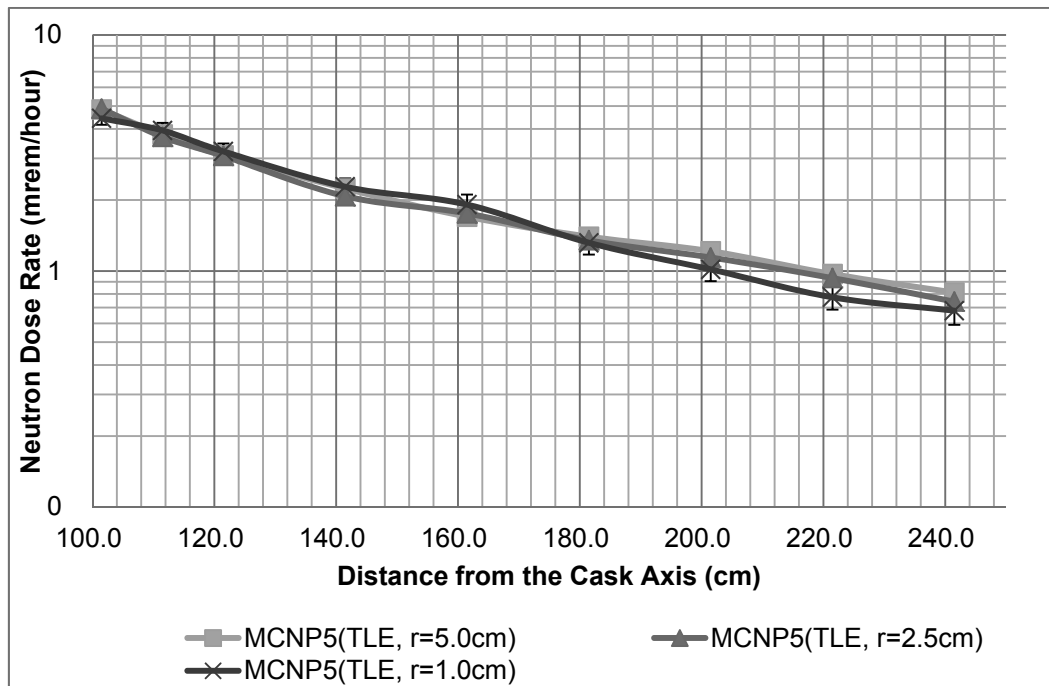


図 1-8 径方向中性子線量当量率分布
(トラックレンジスエスティメータ(球形状)の半径の違い)

(9) ネクストイベントエスティメータ(点形状)の不感半径

径方向中性子線量当量率分布について、ネクストイベントエスティメータ(点形状)の不感半径を変更して計算した結果を表 1-9 に示す。表より明らかなように、本体系及び評価点においては、不感半径は計算に影響しない。これは、散乱のない空間にタリーを設定していることが理由である。したがって、輸送容器外表面近傍の計算においては不感半径が計算に影響することはない。

表 1-9 径方向中性子線量当量率分布
(ネクストイベントエスティメータ(点形状)の不感半径の違い)

x (cm)	y (cm)	z (cm)	不感半径	mrem/hr	Error
101.5	101.5	227.5	0.5	2.02	3.03E-03
101.5	101.5	227.5	0.5	1.27	2.03E-03
231.5	231.5	227.5	0.5	0.50	6.44E-04
231.5	231.5	227.5	0.5	0.45	5.83E-04
101.5	101.5	227.5	5.0	2.02	3.03E-03
101.5	101.5	227.5	5.0	1.27	2.03E-03
231.5	231.5	227.5	5.0	0.50	6.44E-04
231.5	231.5	227.5	5.0	0.45	5.84E-04

1.3.4. 二次ガンマ線

(1) 入力データ

入力データは表 1-10 のように設定した：

表 1-10 MCNP の入力

カード名	設定項目	設定方法
Cell Card	容器を構成する Cell	SUS304: 1cm 鉛: 0.5cm レジン: 4cm フィン・空間: 材料境界のみ設定 フィンを詳細モデル化
Surface Card	Cell を構成する表面	各材料の境界面のみ設定
Material Card	断面積	JENDL-3.3
	原子個数密度	前回と同様
Source Card	幾何形状	容器底面から高さ 152.5cm に線源領域中心 があると設定 線源：半径 25cm、高さ 50cm、厚さ 3.5mm の円筒形状
	エネルギースペクトル	²⁵² Cf の Watt の式を使用
Tally Card	タリー	トラックレングスエスティメータ (半径：5cm, 高さ 2.5cm の円筒形状)
	線量換算係数	ICRP-90 線量換算係数を使用
分散低減法 (打ち切り法)	エネルギー・カットオフ	なし
	ヒストリ・カットオフ	1.0×10^6
分散低減法 (非アナログ法)	単色中性子減衰曲線法 (暗黙吸収)	ウェイト・ウィンドウ・エネルギー・ビン (中性子) : 1M, 5M, 10M, 16MeV ウェイト・ウィンドウ・エネルギー・ビン (ガンマ線) : 16MeV

(2) 単色中性子減衰曲線を利用したウェイト・ウィンドウの設定方法

二次ガンマ線の発生源である中性子の輸送を適切に行うため、中性子については単色中性子減衰曲線法で作成したウェイト・ウィンドウを用いた。二次ガンマ線のためのウェイト・ウィンドウは、中性子に使用したエネルギービン 16MeV のウェイト・ウィンドウを使用した。このエネルギービンのウェイト・ウィンドウを使用した理由は、粒子が必要以上にロシアン・ルーレットで消滅されずに、代わりにスプリッティングされるようにすることで計算結果の悪化を防ぐためである(表 1-11)。

表 1-11 本検討で行った計算ケースの概要

計算体系 (放熱フィン)	分散低減法		タリー
	打ち切り法	非アナログ法	
モデル化	エネルギー・カットオフ $10 \times 10^{-11}(\text{MeV})$	単色中性子減衰曲線法 中性子エネルギービン: 1MeV, 5MeV, 10MeV, 16MeV (暗黙吸収) ガンマ線エネルギービン: 16MeV	トラックレングス エスティメータ

(3) 二次ガンマ線線量当量率分布

モンテカルロ遮蔽計算を実施し、軸方向及び径方向(線源軸方向の midpoint を通る水平方向)の二次ガンマ線線量当量率分布を求め、実測値との比較を行った。

- 軸方向二次ガンマ線線量当量率分布

容器表面における垂直方向(+z 軸方向)の線量率分布についてモンテカルロ計算と実測値とを比較した。軸方向二次ガンマ線線量当量率分布を図 1-9 に示す。実測値と比較して計算値が過大評価する結果となり、C/E は 1.11~1.25 である。

- 径方向二次ガンマ線線量当量率分布

径方向二次ガンマ線線量当量率分布は、容器のフィン先端(容器表面)からの水平距離をグラフの横軸にとり、中性子線源が輸送容器底面から 152.5cm の位置に置かれた場合の線量当量率である。径方向二次ガンマ線線量当量率分布を図 1-10 に示す。輸送容器表面近傍においては、計算値は実測値と比較して過大評価する結果となるが、距離が離れるに従い、次第に過小評価していく。C/E は 0.84~1.12 である。

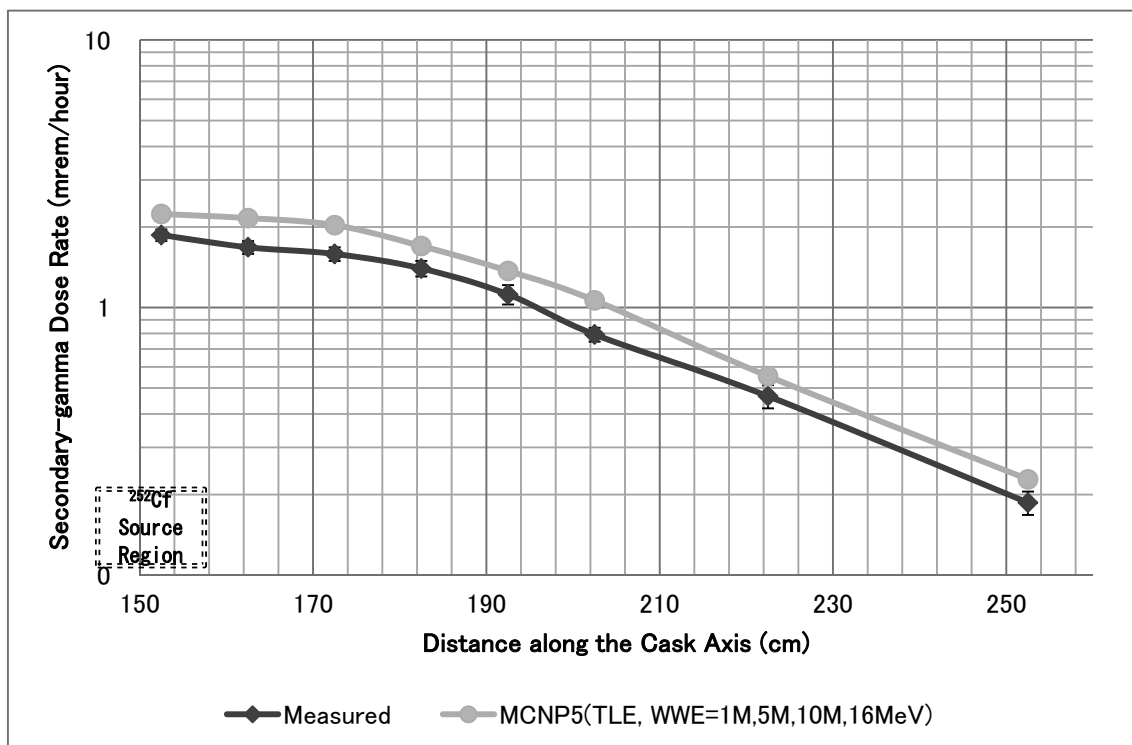


図 1-9 軸方向線源中心($z=152.5\text{cm}$)から+z 方向の距離と線量当量率(2 次ガンマ線)の関係 (容器表面 $r=93.5\text{cm}$)

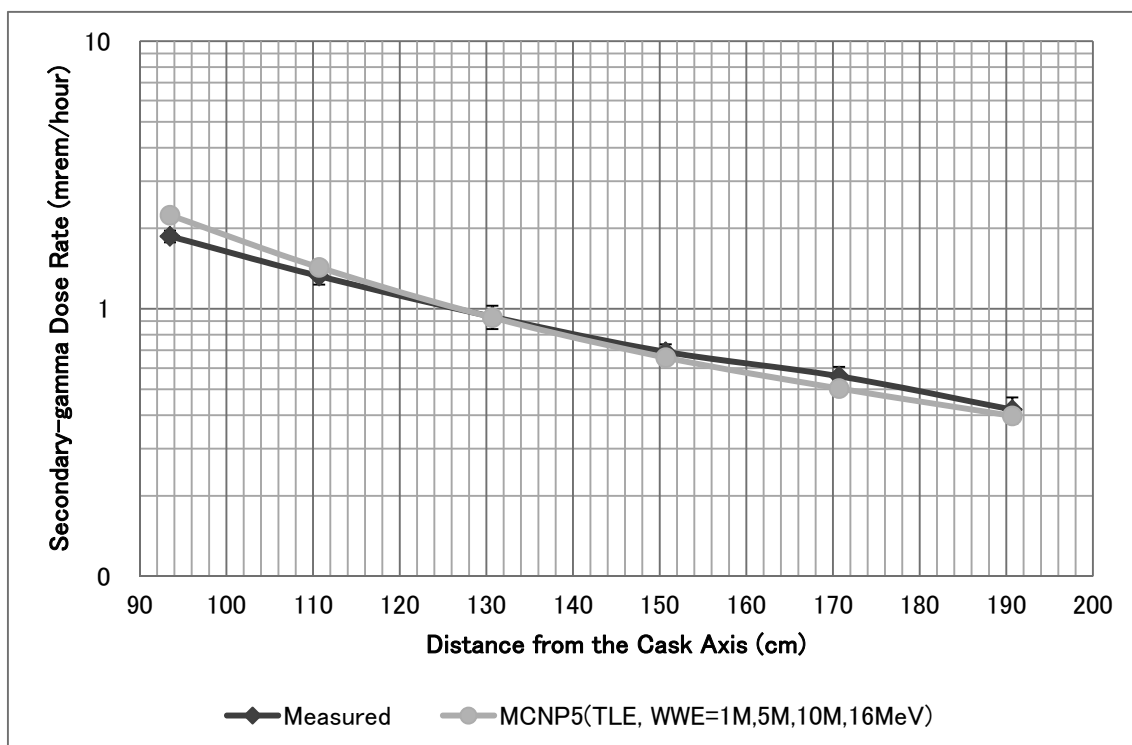


図 1-10 容器表面 $r=93.5\text{cm}$ から+r 方向の距離と線量当量率(2 次ガンマ線)の関係(軸方向線源中心($z=152.5\text{cm}$))

1.3.5. ボロンを含有した中性子遮蔽材を使用した場合のエネルギーカット値の影響

電力中央研究所 50ton キヤスクはボロンを含有しない中性子遮蔽材を使用しているため、モンテカルロ遮蔽計算におけるエネルギーカット値の影響が大きいことが前回のエネルギーカットの評価で明らかとなった。実際に運用されている輸送容器の中性子遮蔽材においては、熱エネルギー中性子を吸収するために、中性子吸収材として作用するボロン(^{10}B が中性子吸収材)を添加したものも存在する。このボロン添加中性子遮蔽材を用いた場合、モンテカルロ遮蔽計算におけるエネルギーカット値としてどの程度まで許容できるかについて確認した。

中性子遮蔽材として、代表的な輸送容器で使用されている NS-4-FR を仮定し、エネルギーカットを「無し」「 1.0×10^{-13} 、 1.0×10^{-12} 、 1.0×10^{-11} 、 1.0×10^{-10} 、 1.0×10^{-9} 、 1.0×10^{-8} 、 1.0×10^{-7} 、 1.0×10^{-6} [MeV]」で計算を行ったが、有意差を確認するために、エネルギーカットなし、 1.0×10^{-6} 、 1.0×10^{-9} [MeV]で比較した。容器中心軸からの距離と線量当量率を図 1-11 に、容器底面からの距離と線量当量率 (容器中心軸からの距離=101.5cm)を図 1-12 に示す。

結果として、エネルギーカットなしと 1.0×10^{-8} [MeV]の計算結果は差が小さい ($C/E=0.94 \sim 1.02$)が、エネルギーカットなしと 1.0×10^{-6} [MeV]の計算結果では、 $C/E=0.90 \sim 9.94$ と過小評価する。したがって、熱中性子吸収材を含む中性子遮蔽材の場合、エネルギー・カットオフ値として、最大 1.0×10^{-8} [MeV]を用いる必要がある。

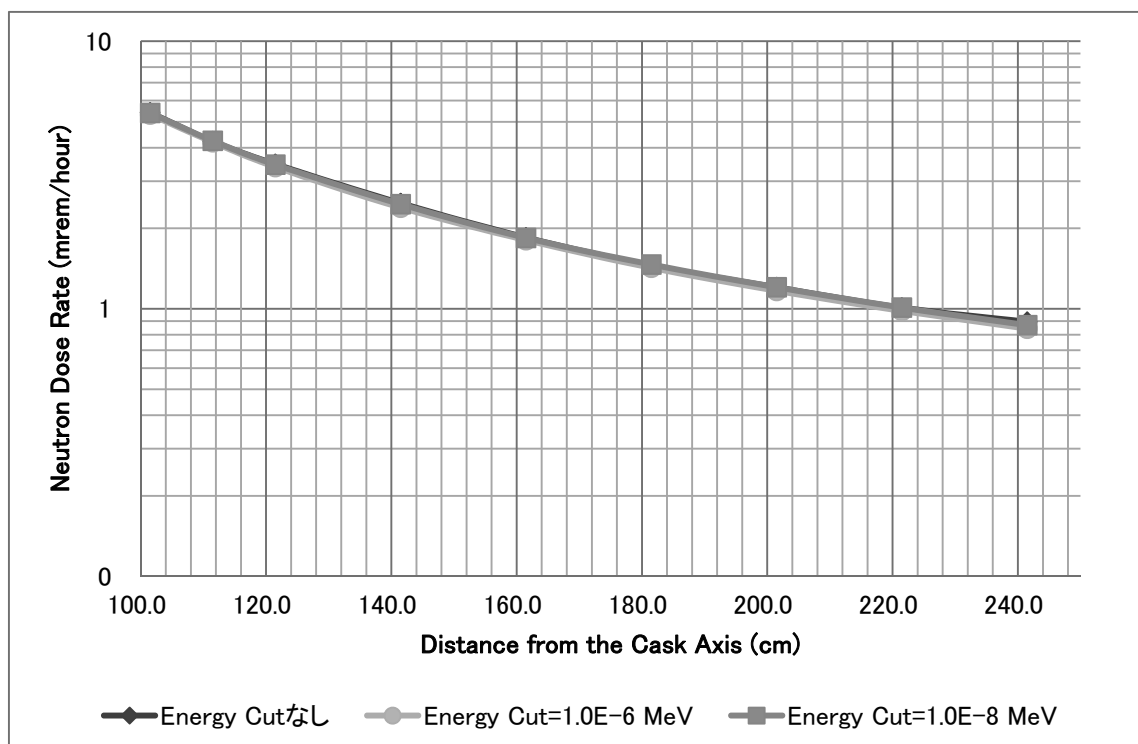


図 1-11 容器中心軸からの距離と線量当量率

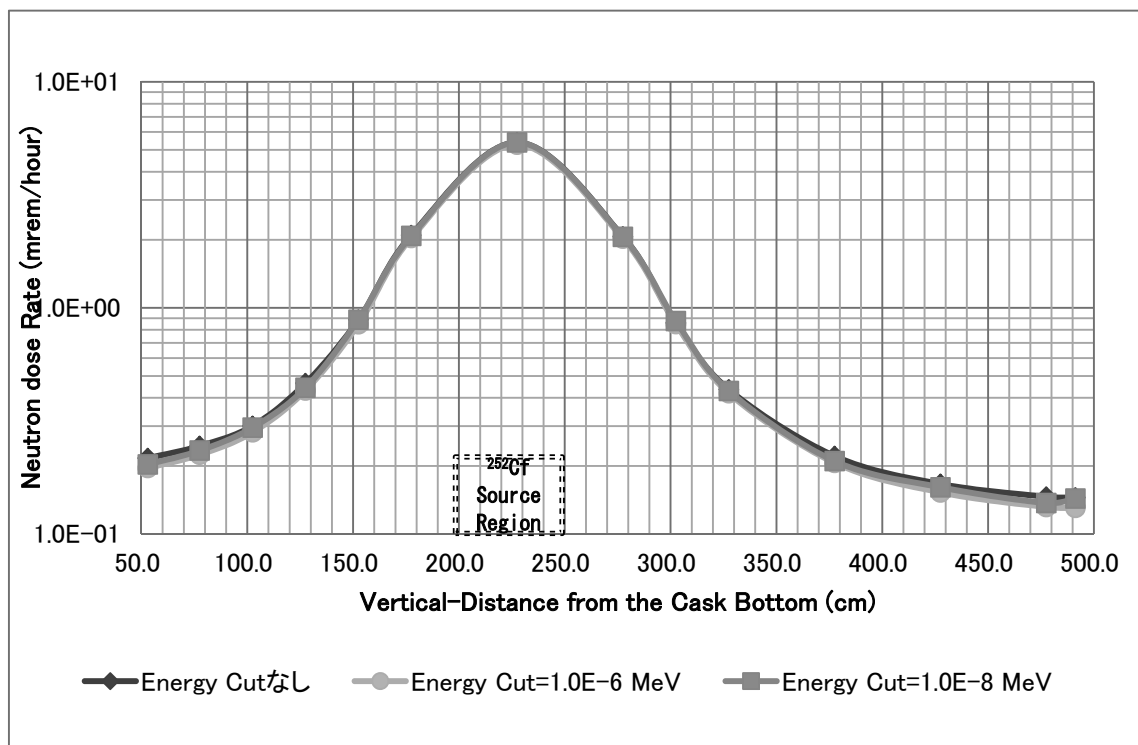


図 1-12 容器底面からの距離と線量当量率 (容器中心軸からの距離=101.5cm)

1.4. DOT3.5 による計算

1.4.1. 計算条件

(1) 使用コード及びライブラリ

使用コード：2次元Sn輸送計算コードDOT3.5

群定数ライブラリ：DLC-23F⁽¹⁾(中性子22群、 γ 線18群)(表1-12参照)

：SFCX-J33-n50g18⁽²⁾(中性子50群、 γ 線18群)

SFCX-J33-n50g18はJENDL-3.3から作成したVITAMIN-B6群構造(中性子199群、 γ 線42群)の実効断面積セットVITAMIN-J33を中性子50群、 γ 線18群に縮約したものである。(表1-13参照)

(2) 計算形状

モンテカルロ計算コードMCNP5による解析で使用された計算形状図に基づき、DOT3.5の計算モデルを作成した(図1-13参照)。図1-13の計算モデルには各領域のメッシュ分割数を示したが、メッシュ幅は基本的に空気の領域を除き、半径方向について1cm程度、軸方向は3cm程度に設定した。空気の領域は測定に使用されたレムカウンタの実効半径5cmを考慮して、メッシュ分割を行った。この結果、半径方向の総メッシュは147、軸方向の総メッシュは183となっている。

(3) 線源条件

線源は直径50cm、高さ50cmの円筒形状面線源を、該当する径方向位置の1メッシュと軸方向位置のメッシュに分布させることで模擬し、中性子の総発生数を 2.4×10^9 n/sに規格化した。線源スペクトルは²⁵²CfのWattの式をDLC-23FとSFCX-J33-n50g18のエネルギー群構造に合わせて積分し、全エネルギー群を合計して1.0になるように規格化した。

(4) 物質の組成

MCNP5の計算による解析で使用した各物質の原子数密度を使用した。但し、DLC-23FにはSulphurが、SFCX-J33-n50g18にはManganeseが含まれていないため、マクロ断面積を作成する際に無視するものとした。

(5) 角度分点数と散乱断面積の P_l 展開次数

DOT3.5に使用する角度分点数は96分点と160分点を使用した。散乱断面積の P_l 展開次数は P_3 まで使用した。

(6) 検出器の応答関数

測定に使用されたレムカウンタはICRP Publ.21に則して設計されているが、標準中性子場で較正されている。この較正に基づいて補正された中性子線量換算係数を使用した(表1-2)。

この補正した中性子線量換算係数を基にして、DLC-23FとSFCX-J33-n50g18のエネルギー群構造に合わせた換算係数をLog-Log内挿により求めた(図1-14参照)。

1.4.2. 計算結果

1.4.1 の計算条件を使用して DOT3.5 による計算を実施した。MCNP5 による計算結果と、DOT3.5 による計算結果(ライブラリ: DLC-23F, SFCX-J33-n50g18, 角度分点: S_{96} 分点, S_{160} 分点)を比較して、図 1-15 に示した。本容器の幾何形状及び構成材においては、容器表面の上下端部において DOT3.5 による計算結果が MCNP5 の計算結果を上回るが、容器表面の中央近傍及び表面から離れた位置においては、MCNP5 及び DOT3.5 による計算結果に有意な相違のないことが明らかとなった。

(参考文献)

- (1) "CASK - 40 Group Coupled Neutrons and Gamma-Ray Cross-section Data", DLC-023, RSIC Data Library Collection (1973)
- (2) 大西 世紀他, “ ^{252}Cf 核分裂中性子源を用いた遮へい透過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J33 の適用性に関する研究,” 海上技術安全研究所報告, 第 7 巻, 第 3 号(平成 19 年度)

表 1-12 DLC-23F のエネルギー群構造

(上限値)

DLC23F			
群番号	中性子線 (MeV)	群番号	γ 線 (MeV)
1	1.492E+01	23	1.00E+01
2	1.220E+01	24	8.00E+00
3	1.000E+01	25	6.50E+00
4	8.180E+00	26	5.00E+00
5	6.360E+00	27	4.00E+00
6	4.960E+00	28	3.00E+00
7	4.060E+00	29	2.50E+00
8	3.010E+00	30	2.00E+00
9	2.460E+00	31	1.66E+00
10	2.350E+00	32	1.33E+00
11	1.830E+00	33	1.00E+00
12	1.110E+00	34	8.00E-01
13	5.500E-01	35	6.00E-01
14	1.110E-01	36	4.00E-01
15	3.350E-03	37	3.00E-01
16	5.830E-04	38	2.00E-01
17	1.010E-04	39	1.00E-01
18	2.900E-05	40	5.00E-02
19	1.070E-05		
20	3.060E-06		
21	1.120E-06		
22	4.140E-07		

表 1-13(1/3) VITAMIN-J33 の中性子縮約群構造

VITAMIN-J33		VITAMIN-C		50群 構造 群番号	VITAMIN-J33		VITAMIN-C		50群 構造 群番号
群	上限 エネルギー (eV)	群	上限 エネルギー (eV)		群	上限 エネルギー (eV)	群	上限 エネルギー (eV)	
1	1.9640E+07	1	1.7333E+07	1	51	1.9205E+06	48	1.920500	19
2	1.7332E+07				52	1.8268E+06	49	1.8268E+06	20
3	1.6905E+07				53	1.7377E+06	50	1.7377E+06	21
4	1.6487E+07				54	1.6530E+06	51	1.6530E+06	22
5	1.5683E+07				55	1.5724E+06	52	1.5724E+06	
6	1.4918E+07				56	1.4957E+06	53	1.4957E+06	
7	1.4550E+07				57	1.4227E+06	54	1.4227E+06	
8	1.4191E+07				58	1.3534E+06	55	1.3534E+06	23
9	1.3840E+07				59	1.2874E+06	56	1.2873E+06	
10	1.3499E+07				60	1.2246E+06	57	1.2246E+06	
11	1.2840E+07				61	1.1648E+06	58	1.1648E+06	
12	1.2523E+07	10	1.2214E+07	2	62	1.1080E+06	59	1.1080E+06	24
13	1.2214E+07				63	1.0026E+06	60	1.0026E+06	
14	1.1618E+07				64	9.6164E+05	61	9.6164E+05	
15	1.1052E+07				65	9.0718E+05	62	9.0718E+05	
16	1.0513E+07	15	9.5123E+06	3	66	8.6294E+05	63	8.6294E+05	25
17	1.0000E+07				67	8.2085E+05	64	8.2085E+05	
18	9.5123E+06				68	7.8082E+05	65	7.8082E+05	
19	9.0484E+06				69	7.4274E+05	66	7.4274E+05	
20	8.6071E+06	19	7.7880E+06	4	70	7.0651E+05	67	7.0651E+05	26
21	8.1873E+06				71	6.7206E+05	68	6.7206E+05	
22	7.7880E+06				72	6.3928E+05	69	6.3928E+05	
23	7.4082E+06				73	6.0810E+05	70	6.0810E+05	
24	7.0469E+06	23	6.5924E+06	5	74	5.7844E+05	71	5.7844E+05	27
25	6.7032E+06				75	5.5023E+05	72	5.5023E+05	
26	6.5924E+06				76	5.2340E+05	73	5.2340E+05	
27	6.3763E+06				77	4.9787E+05	74	4.9787E+05	
28	6.0653E+06	26	5.7695E+06	6	78	4.5049E+05	75	4.5049E+05	28
29	5.7695E+06				79	4.0762E+05	76	4.0762E+05	
30	5.4881E+06				80	3.8774E+05	77	3.8774E+05	
31	5.2205E+06				81	3.6883E+05	78	3.6883E+05	
32	4.9659E+06	30	4.7237E+06	7	82	3.3373E+05	79	3.3373E+05	29
33	4.7237E+06				83	3.0197E+05	80	3.0197E+05	
34	4.4933E+06				84	2.9849E+05	81	2.9850E+05	
35	4.0657E+06				85	2.9721E+05	82	2.9720E+05	
36	3.6788E+06	33	3.6788E+06	8	86	2.9452E+05	83	2.9452E+05	30
37	3.3287E+06				87	2.8725E+05	84	2.8725E+05	
38	3.1664E+06				88	2.7324E+05	85	2.7324E+05	
39	3.0119E+06				89	2.4724E+05	86	2.4724E+05	
40	2.8651E+06	36	3.0119E+06	9	90	2.3518E+05	87	2.3518E+05	31
41	2.7253E+06				91	2.2371E+05	88	2.2371E+05	
42	2.5924E+06				92	2.1280E+05	89	2.1280E+05	
43	2.4660E+06				93	2.0242E+05	90	2.0242E+05	
44	2.3852E+06	41	2.3852E+06	10	94	1.9255E+05	91	1.9255E+05	32
45	2.3653E+06				95	1.8316E+05	92	1.8316E+05	
46	2.3457E+06				96	1.7422E+05	93	1.7422E+05	
47	2.3069E+06				97	1.6573E+05	94	1.6573E+05	
48	2.2313E+06	42	2.3653E+06	11	98	1.5764E+05	95	1.5764E+05	33
49	2.1225E+06				99	1.4996E+05	96	1.4996E+05	
50	2.0190E+06				100	1.4264E+05	97	1.4264E+05	

表 1-13(2/3) VITAMIN-J33 の中性子縮約群構造

VITAMIN-J33		VITAMIN-C		50群 構造 群番号	VITAMIN-J33		VITAMIN-C		50群 構造 群番号			
群	上限 エネルギー (eV)	群	上限 エネルギー (eV)		群	上限 エネルギー (eV)	群	上限 エネルギー (eV)				
101	1.3569E+05	98	1.3569E+05	35	151	1.3007E+02	147	1.3007E+02	43			
102	1.2907E+05	99	1.2907E+05		152	1.0130E+02	148	1.0130E+02				
103	1.2277E+05	100	1.2277E+05		153	7.8893E+01	149	7.8893E+01	44			
104	1.1679E+05	101	1.1679E+05		154	6.1442E+01	150	6.1442E+01				
105	1.1109E+05	102	1.1109E+05		155	4.7851E+01	151	4.7851E+01				
106	9.8037E+04	103	9.8037E+04	36	156	3.7266E+01	152	3.7267E+01		45		
107	8.6517E+04	104	8.6517E+04		157	2.9023E+01	153	2.9203E+01				
108	8.2503E+04	105	8.2500E+04	37	158	2.2603E+01	154	2.2603E+01	46			
109	7.9499E+04	106	7.9500E+04	38	159	1.7604E+01	155	1.7603E+01				
110	7.1998E+04	107	7.2000E+04		160	1.3710E+01	156	1.3710E+01				
111	6.7379E+04	108	6.7379E+04		161	1.0677E+01	157	1.0677E+01				
112	5.6562E+04	109	5.6562E+04		162	8.3153E+00	158	8.3153E+00				
113	5.2475E+04	110	5.2475E+04		163	6.4760E+00	159	6.4760E+00				
114	4.6309E+04	111	4.6309E+04		164	5.0435E+00	160	5.0435E+00				
115	4.0868E+04	112	4.0868E+04		165	3.9279E+00	161	3.9279E+00				
116	3.4307E+04	113	3.4307E+04		166	3.0590E+00	162	3.0590E+00				
117	3.1828E+04	114	3.1828E+04	39	167	2.3824E+00	163	2.3724E+00	47			
118	2.8501E+04	115	2.8500E+04		168	1.8554E+00	164	1.8554E+00				
119	2.7000E+04	116	2.7000E+04	40	169	1.4450E+00	165	1.4450E+00	48			
120	2.6058E+04	117	2.6058E+04		170	1.3000E+00	166	1.1254E+00				
121	2.4788E+04	118	2.4788E+04		171	1.1253E+00						
122	2.4176E+04	119	2.4176E+04		172	1.0800E+00						
123	2.3579E+04	120	2.3579E+04	173	1.0400E+00	167	8.7642E-01	49				
124	2.1875E+04	121	2.1875E+04	174	1.0000E+00							
125	1.9305E+04	122	1.9305E+04	175	8.7643E-01							
126	1.5034E+04	123	1.5034E+04	176	8.0000E-01							
127	1.1709E+04	124	1.1709E+04	177	6.8256E-01							
128	1.0595E+04	125	9.1188E+03	178	6.2506E-01							
129	9.1188E+03	126	7.1017E+03	179	5.3158E-01							
130	7.1017E+03	127	5.5308E+03	180	5.0000E-01							
131	5.5308E+03	128	4.3074E+03	181	4.1399E-01				170	4.1399E-01	50	
132	4.3074E+03	129	3.7074E+03		182	3.6680E-01						
133	3.7074E+03				183	3.2500E-01						
134	3.3546E+03	130	3.3546E+03	184	2.7500E-01	171	1.0000E-01					
135	3.0354E+03	131	3.0354E+03	42	185							2.2500E-01
136	2.7465E+03	132	2.7465E+03		186							1.8400E-01
137	2.6126E+03	133	2.6126E+03		187							1.5000E-01
138	2.4852E+03	134	2.4852E+03		188							1.2500E-01
139	2.2487E+03	135	2.2487E+03		189							1.0000E-01
140	2.0347E+03	136	2.0347E+03		190				7.0000E-02			
141	1.5846E+03	137	1.5846E+03		191				5.0000E-02			
142	1.2341E+03	138	1.2341E+03		192				4.0000E-02			
143	9.6112E+02	139	9.6112E+02		193				3.0000E-02			
144	7.4852E+02	140	7.4852E+02		194				2.1000E-02			
145	5.8295E+02	141	5.8295E+02		195				1.4500E-02			
146	4.5400E+02	142	4.5400E+02	43	196				1.0000E-02			
147	3.5357E+02	143	3.5358E+02		197				5.0000E-03			
148	2.7536E+02	144	2.7536E+02		198				2.0000E-03			
149	2.1445E+02	145	2.1445E+02		199				5.0000E-04			
150	1.6702E+02	146	1.6702E+02						1.0000E-05			

表 1-13(3/3) VITAMIN-J33 の γ 線縮約群構造と重みスペクトル

VITAMIN-J33 詳細群		VITAMIN-J33 縮約群 (DLC-23E/CASK)		縮約の重み flux ($d\phi/dE$ 一定)
群	上限 エネルギー (eV)	群	上限 エネルギー (eV)	
1	3.00E+01			0
2	2.00E+01			0
3	1.40E+01			0
4	1.20E+01			0
5	1.00E+01	1	1.00E+01	6.67E-02
6	8.00E+00	2	8.00E+00	1.67E-02
7	7.50E+00			1.67E-02
8	7.00E+00			1.67E-02
9	6.50E+00	3	6.50E+00	1.67E-02
10	6.00E+00			1.67E-02
11	5.50E+00			1.67E-02
12	5.00E+00	4	5.00E+00	1.67E-02
13	4.50E+00			1.67E-02
14	4.00E+00	5	4.00E+00	1.67E-02
15	3.50E+00			1.67E-02
16	3.00E+00	6	3.00E+00	1.67E-02
17	2.50E+00	7	2.50E+00	1.67E-02
18	2.00E+00	8	2.00E+00	1.13E-02
19	1.66E+00	9	1.66E+00	5.33E-03
20	1.50E+00			5.33E-03
21	1.34E+00			3.33E-04
22	1.33E+00	10	1.33E+00	1.10E-02
23	1.00E+00	11	1.00E+00	6.67E-03
24	8.00E-01	12	8.00E-01	3.33E-03
25	7.00E-01			3.33E-03
26	6.00E-01	13	6.00E-01	2.93E-03
27	5.12E-01			6.67E-05
28	5.10E-01			2.00E-03
29	4.50E-01			1.67E-03
30	4.00E-01	14	4.00E-01	3.33E-03
31	3.00E-01	15	3.00E-01	3.33E-03
32	2.00E-01	16	2.00E-01	1.67E-03
33	1.50E-01			1.67E-03
34	1.00E-01	17	1.00E-01	8.33E-04
35	7.50E-02			1.67E-04
36	7.00E-02			3.33E-04
37	6.00E-02			5.00E-04
38	4.50E-02	18	5.00E-02	1.67E-04
39	4.00E-02		1.00E-02	3.33E-04
40	3.00E-02			3.33E-04
41	2.00E-02			3.33E-04
42	1.00E-02			1.67E-04
	5.00E-03			1.67E-04

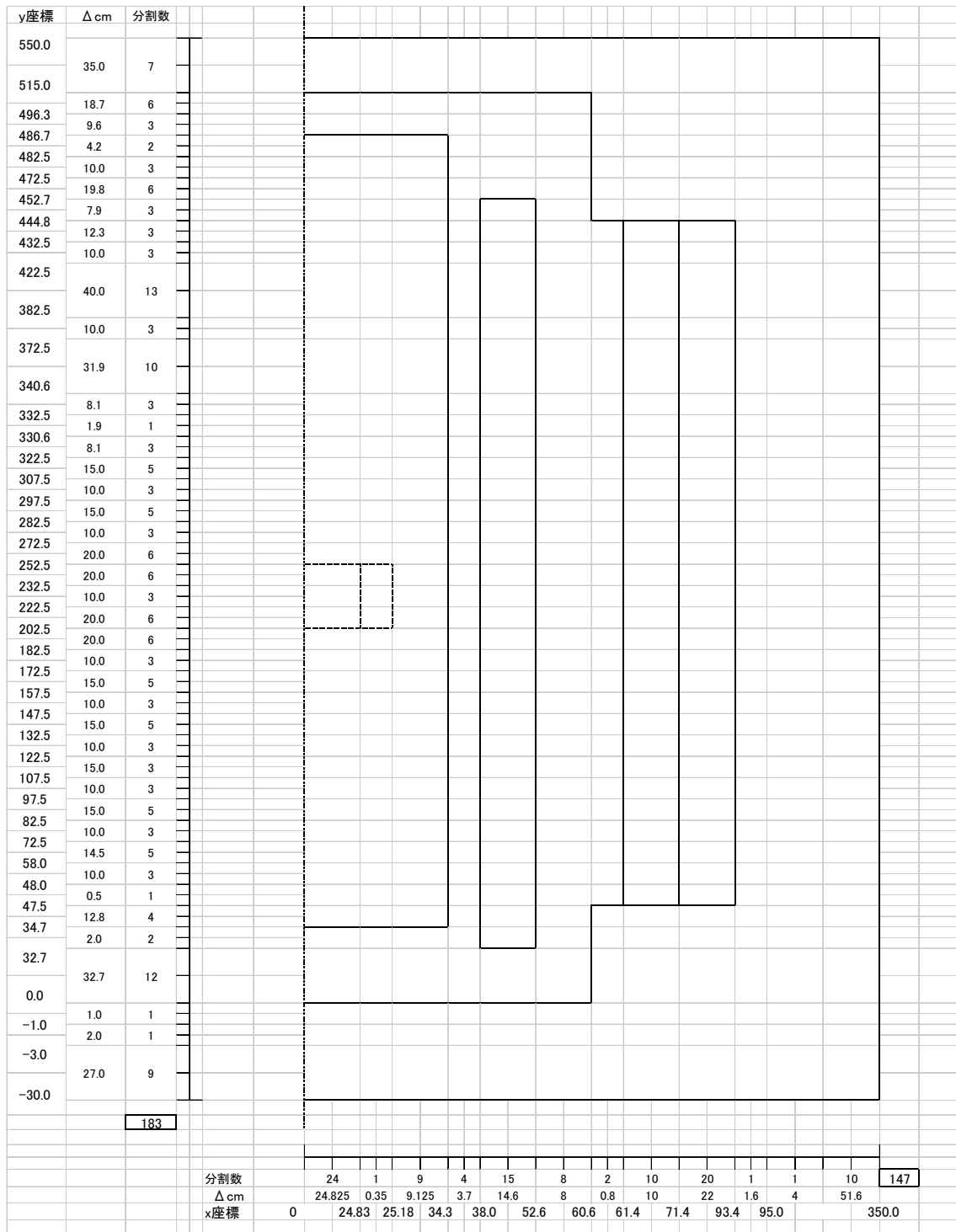


図 1-13 DOT3.5 の計算モデル

(容器中心軸からの距離と線量当量率)

図 1-15(1/4) DOT3.5 と MCNP5 による計算結果の比較

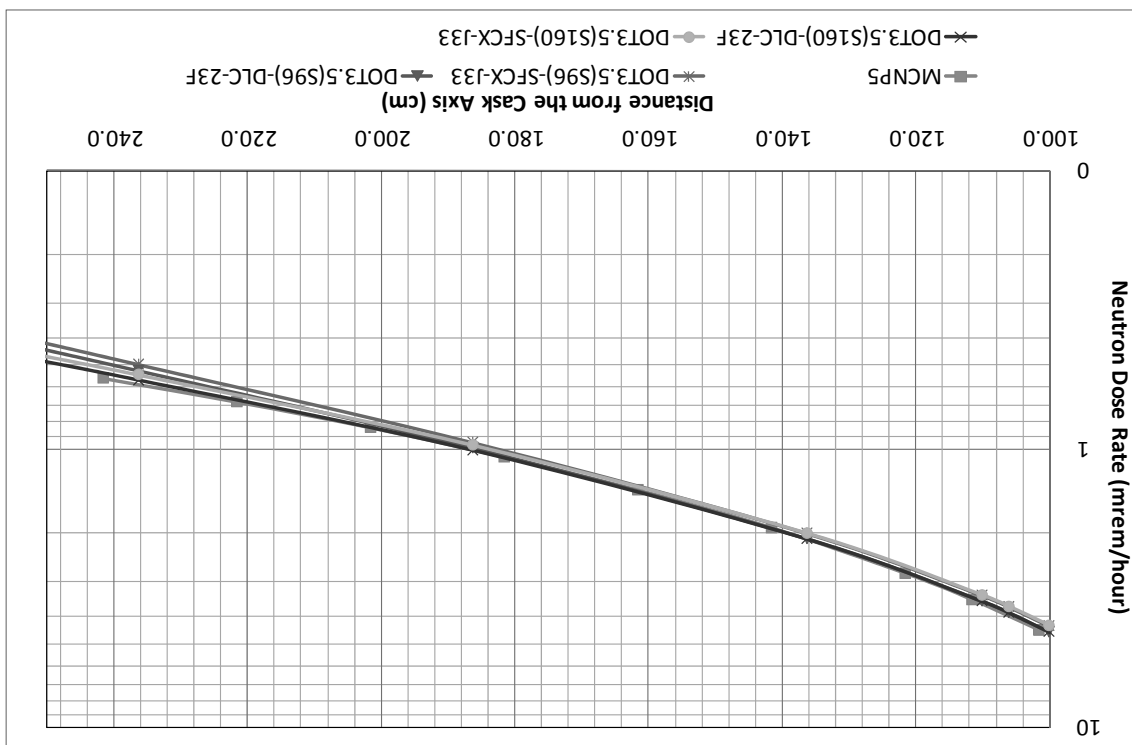
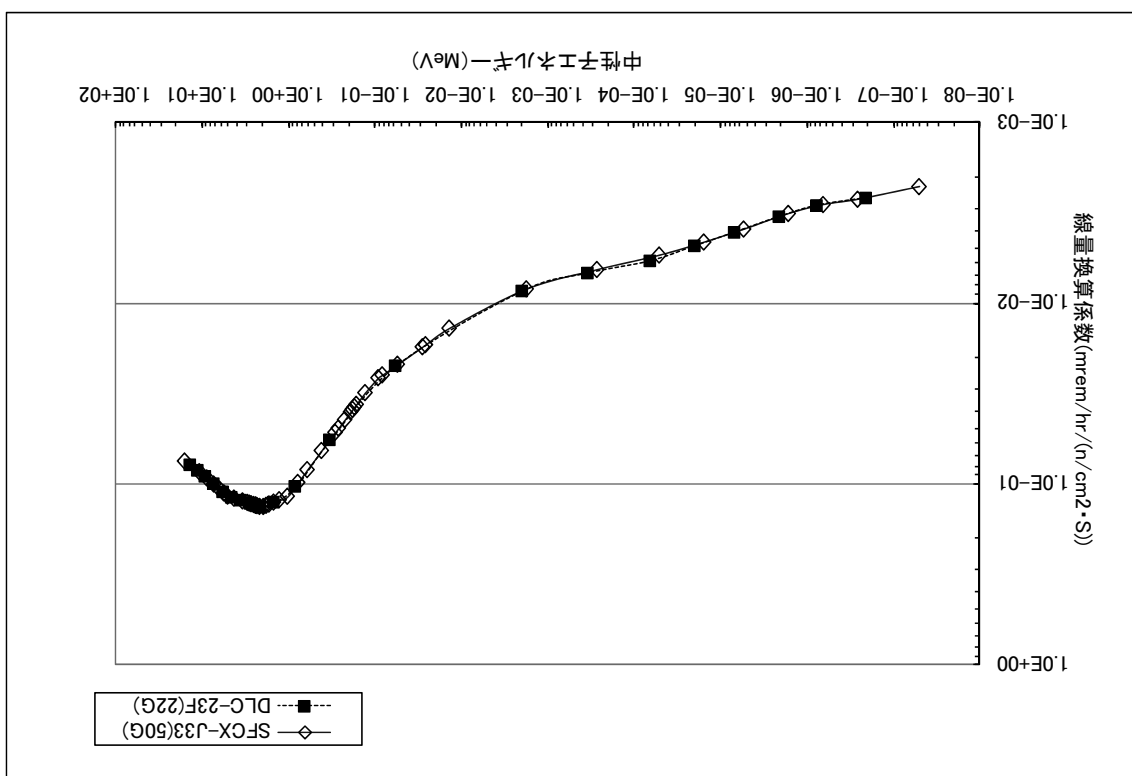


図 1-14 中性子線量換算係数



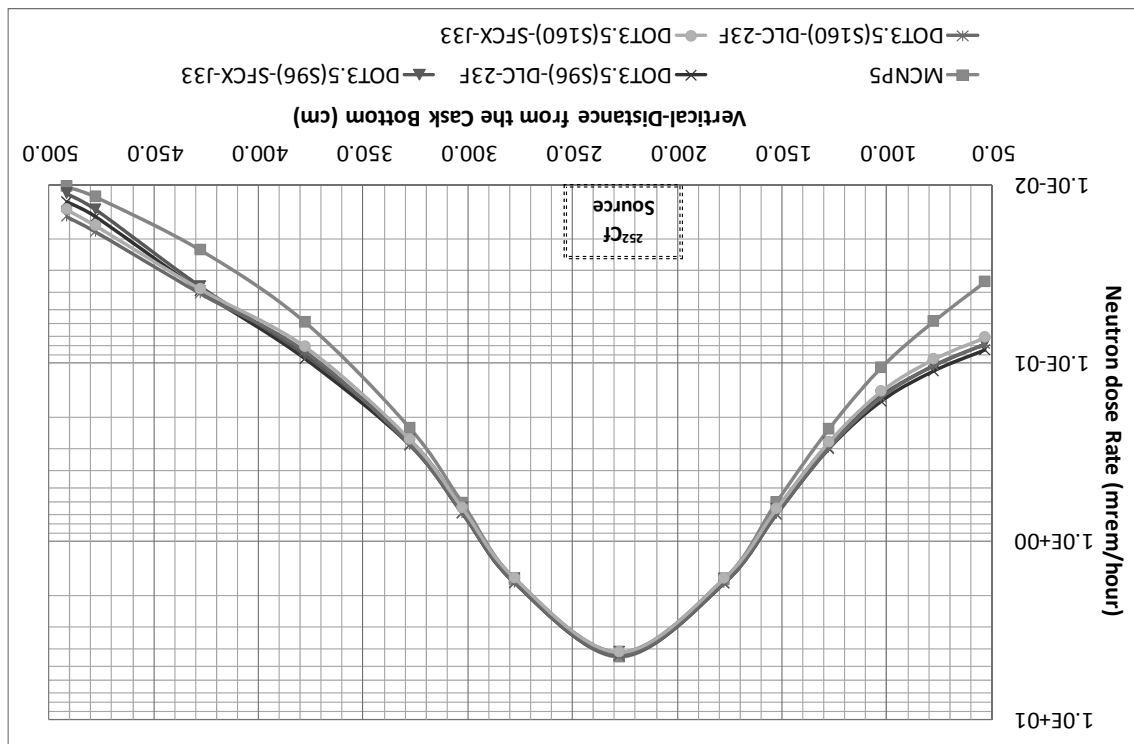


図 1-15(2/4) DOT3.5 と MCNP5 による計算結果の比較
(容器底面からの距離と線量当量率(容器中心軸からの距離: 101.5cm))

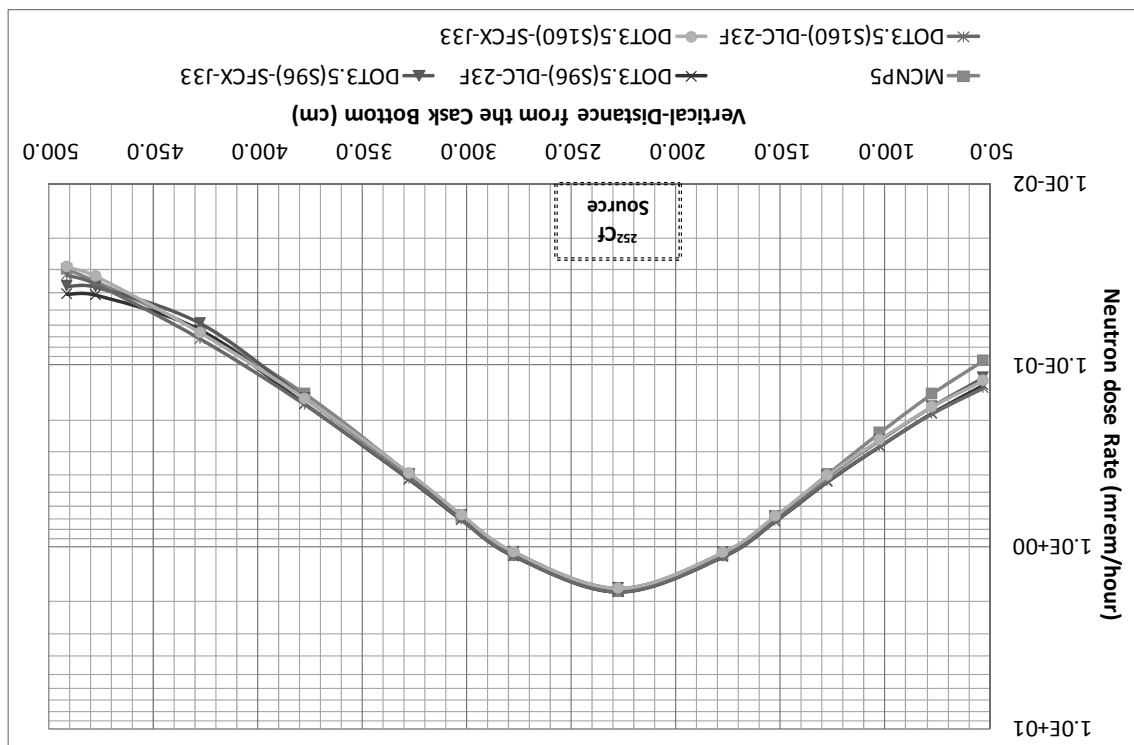
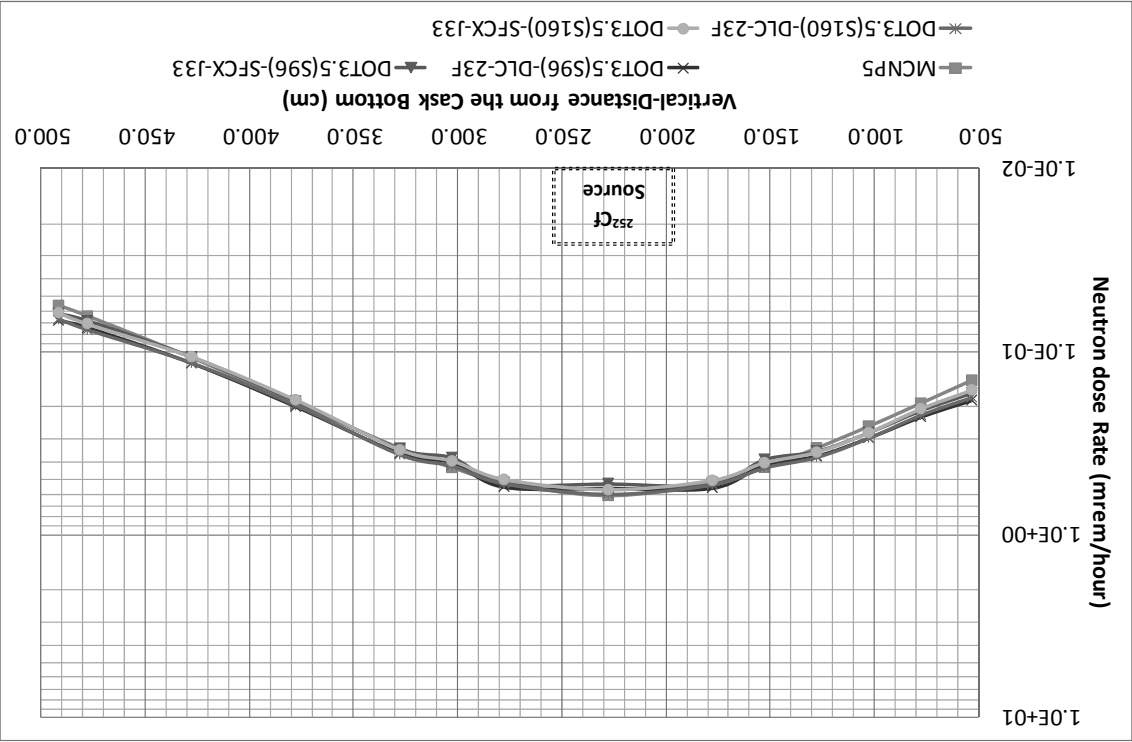


図 1-15(3/4) DOT3.5 と MCNP5 による計算結果の比較
(容器底面からの距離と線量当量率(容器中心軸からの距離: 146.5cm))

図 1-15(4/4) DOT3.5 と MCNP5 による計算結果の比較
(容器底面からの距離と線量当量率(容器中心軸からの距離: 231.5cm))



2. TN-12 容器の計算

2.1. 実験の概要

TN-12 型使用済燃料輸送キャスク(以下、TN-12 型キャスクと言う)に実際の使用済燃料を装荷した時の中性子及びガンマ線の線量率測定結果がベンチマーク問題として使用済燃料の詳細データ等を含めてまとめられている。⁽¹⁾

今回は、この中から中性子線量率の測定結果に対して MCNP5 による計算を実施した。なお、ガンマ線測定と中性子測定とは異なる使用済燃料が使用されているため、中性子測定に使用された使用済燃料のみのデータを以下に記載している。

本ベンチマーク問題は、遮蔽計算ばかりでなく、線源強度計算を含めての比較となっている。

2.2. 測定配置

使用済燃料 12 体を収納した TN12 型キャスクを横向きにおいて測定を行っている。TN12 型キャスクの鳥瞰図及び燃料を収納した場合の縦断面図を図 2-1 に示す。また、簡略化された遮へい計算計算用の本体縦断面図、バスケットの横断面図、本体両端部の横断面図を図 2-2～図 2-4 にそれぞれ示す。

2.3. TN12 型キャスクの構成及び燃料の仕様

TN12 型キャスクの構成は図 2-2～図 2-4 に示したとおりであるが、この構造に対して表 2-1 には本体の主要な部位の構成材料とその存在比率が与えられている。また、図 2-5 および表 2-2～表 2-4 には燃料集合体のデータが与えられている。

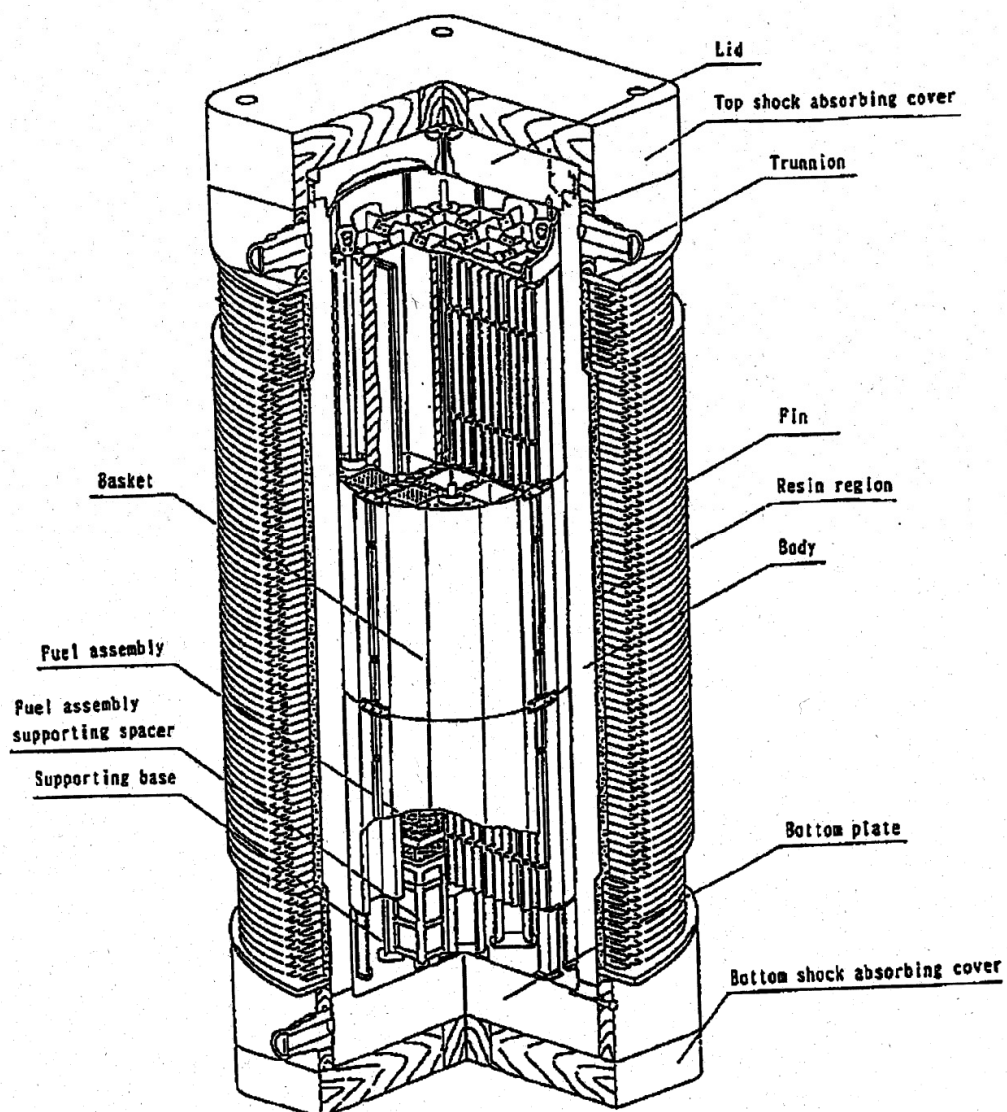


図 2-1(a) TN-12 型キャスクの鳥瞰図

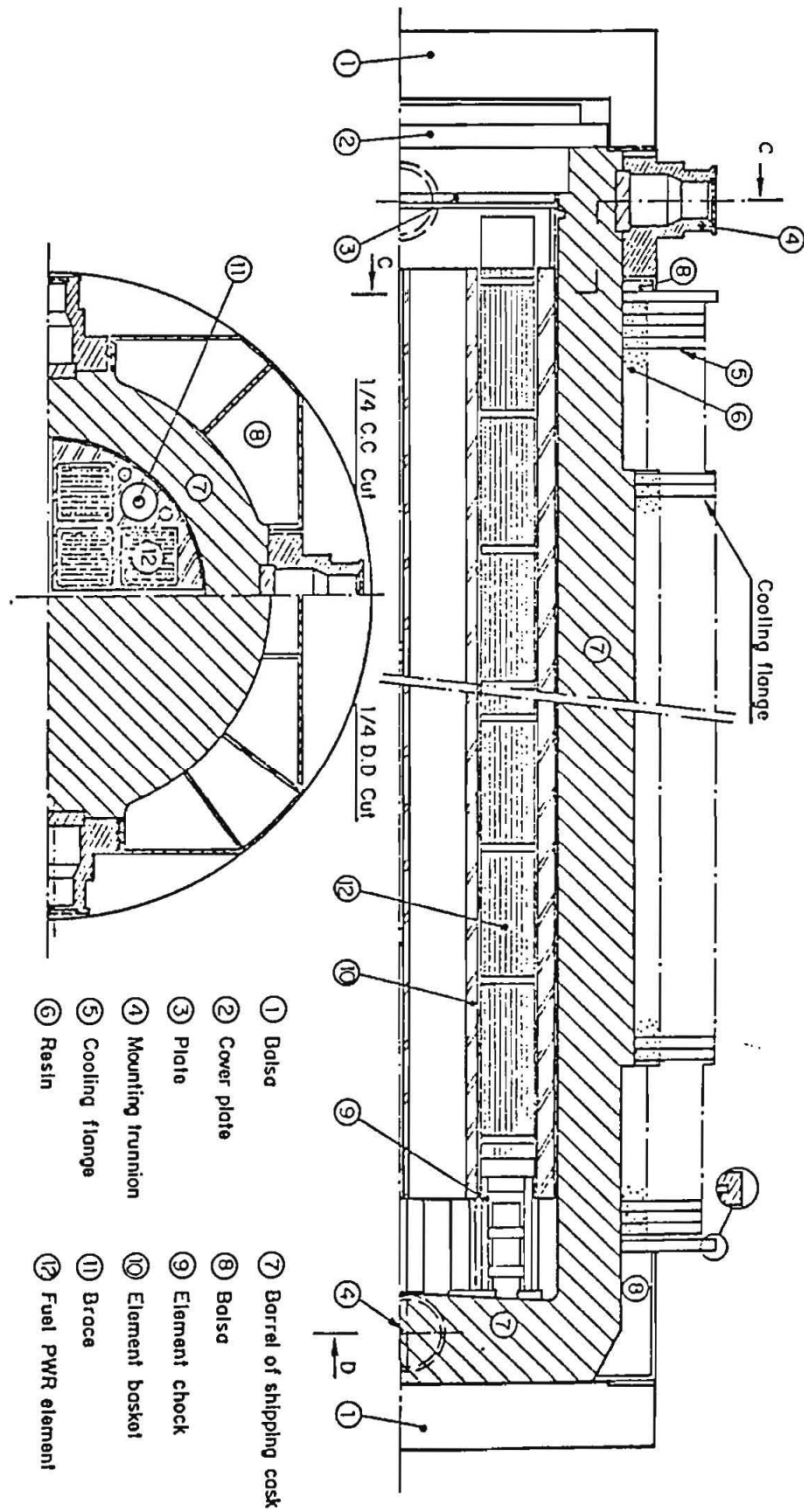


図 2-1(b) TN-12 型キャスクの縦断面図(燃料集合体を収納した図)

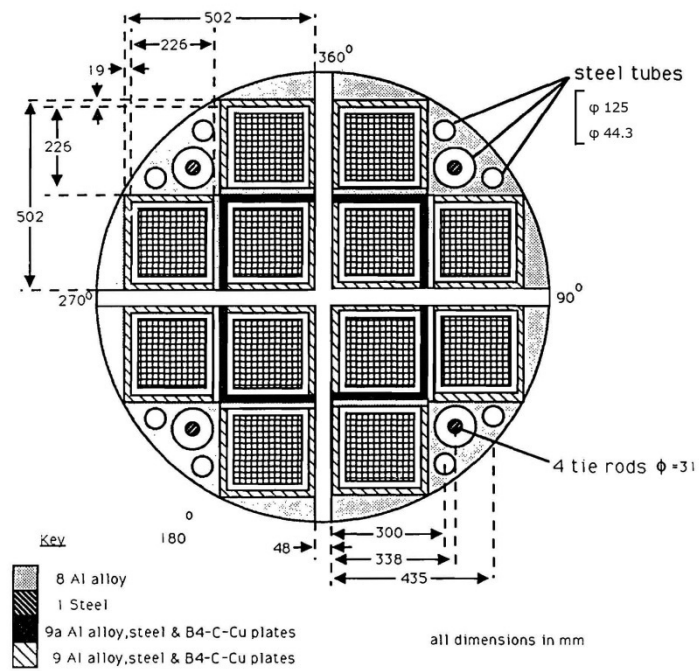


図 2-3 TN-12 型キャスクのバスケット横断面図

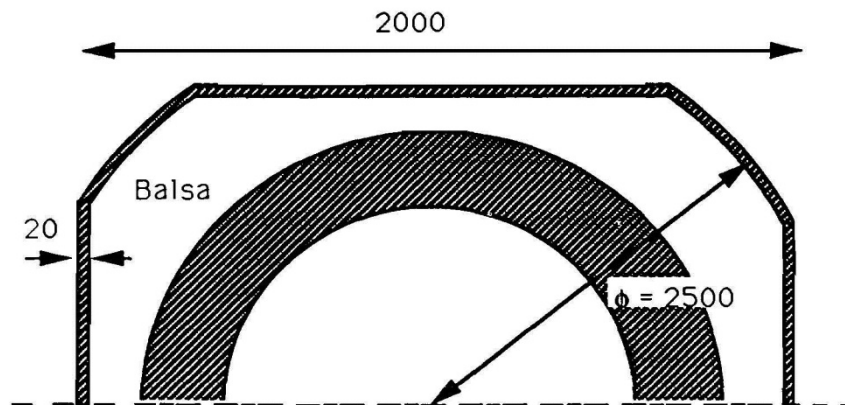


図 2-4 TN-12 型キャスク両端部の横断面図

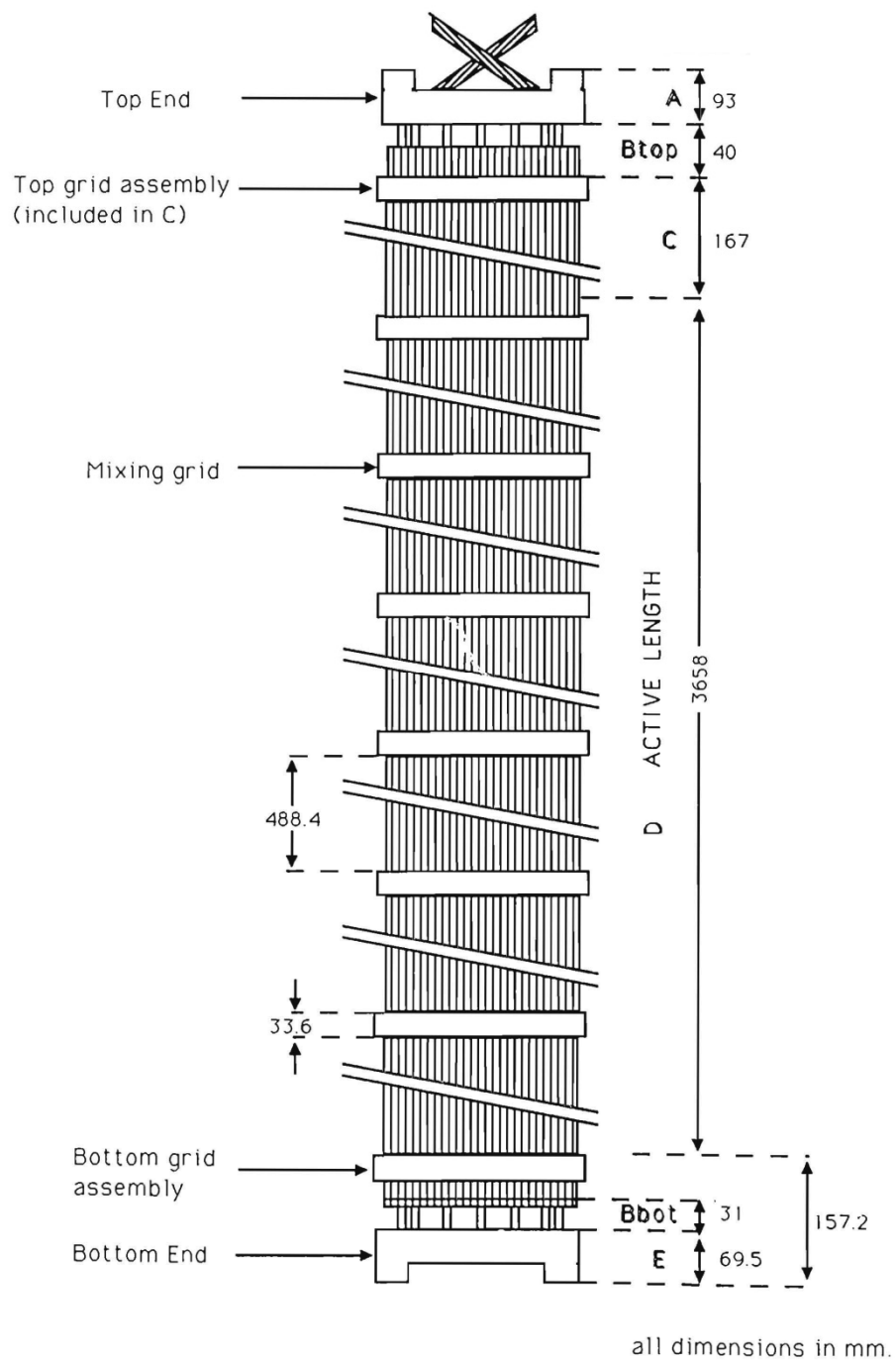


図 2-5 燃焼集合体の構造

表 2-1 各領域の組成

Material	Location (See figures 1 and 2)	Description	composition	% by weight	Density (g/cm ³)
1	Container body Closure head Shock absorber shells Basket skirt	Steel equivalent to ASTM-350 grade LF5 steel	Fe Ni Mn Misc.	96.8 1.4 1.2 0.6	7.85
2	Copper fin and resin smear	47.3% polyester resin coated with . silicone 52.7% Cu (by mass)	Cu	100.0	8.93
2a	Copper fin and resin smear	48.5% polyester resin coated with silicone 51.5% Cu (by mass)	Resin H C O Cl Al Ni B Sb Zn	5.1 42.3 21.1 14.1 7.2 1.4 1.0 5.7 2.1	1.40
3	Copper fin and air smear	12.6% Cu, 87.4% air by volume	Cu	100.0	8.93
3a	Copper fin and air smear	12.2% Cu, 87.8% air by volume			
4	Skirt supports	81.2% steel (AISI 316) 18.8% air (by volume)	Steel Fe Cr Ni Mo Mn Misc.	67.4 17.0 12.0 2.5 2.0 1.1	7.85
5	Support shims	14.5% steel (AISI 304L) 84.5% air (by volume)	Steel Fe Cr Ni Mn Misc.	67.8 19.0 10.0 2.0 1.2	7.85
6	Support shims, basket support feet	13.4% steel (AISI 304L) 86.6% air (by volume)	As5		
7	Cruciform structure separating basket structure	14.5% steel (mixture of AISI 309 & 316L, 85.5% air (by volume)	Steel Fe Cr Ni Mo Mn Misc.	61.4 22.2 13.5 1.7 0.2 1.0	7.85
8	Basket zones	Aluminium alloy	Al Si Fe Misc.	86.3 12.2 0.5 1.0	
8a	Basket zones	90% Al alloy, 10% steel (AISI 316) (by volume)			
9	Basket walls reinforced with stainless steel grids and B4C-Cu plates	50.3% Al alloy, 26.2% B ₄ C-Cu, 23.5% steel (AISI 321) (by weight)	B4C-Cu Cu B C Misc.	65.7 27.5 6.6 0.2	
9a	Basket walls reinforced with stainless steel grids and B4C-Cu plates	37.0% Al alloy, 23.4% B ₄ C-Cu, 39.6% steel (AISI 321) (by weight)	Steel Fe Cr Ni Mn Misc.	70.4 17.9 9.3 1.5 0.9	
10	Balsa wood inside shock absorbers	Balsa	H ₂ O		0.25
		Composition used by UK(AEA) and Belgium in n calculations	H O C	6.5 40.2 53.3	0.2(UK) 0.25(Belg.)

表 2-2 燃料集合体の仕様

Parameter	Value
Configuration	17 x 17
Assembly pitch (cm)	21.504 1.7x1.26+0.084
Lattice pitch (cm)	1.26
Active fuel height (cm)	365.76
Number of pins	264
Number of guide tubes	24
Number of Instrument tubes	1
External diameter of guide tubes (cm)	1.224
Guide tube thickness (cm)	0.042
Guide tube material	Zircaloy 4
Minimum internal diameter of guide tubes (cm)	1.138
Minimum thickness of Instrumentation tube (cm)	0.04
Instrumentation tube material	Zircaloy 4
Diameter of sheath (cm)	0.95
Nominal sheathing tube thickness (cm)	0.057
Diameter of pellet (cm)	0.819

表 2-3 燃料集合体の構造材料の組成

		Number per assembly	Mass per assembly (kg)	Material (see table)
<u>SKELETON</u>				
Top nozzle	Nozzle	1	6.500	Z2-CN18.10
	Flanges	2	0.258	Z2-CN18.10
	Flange screws	2	0.020	Z5-CN18.10
	Springs	4	0.960	Inconel 718
	Spring screws	4	0.132	Inconel 600
Bottom nozzle	Nozzle	1	5.600	Z2-CN18.10
	Support screws	24	0.180	Z5-CN18.10
Mixing grids	Straps	6	3.660	Inconel 718
	Sleeves		0.795	Z5-CN18.10
Top grid	Straps	1	0.510	Inconel 718
	Sleeves		0.290	Z2-CN18.10
Bottom grid	Straps	1	0.510	Inconel 718
	Inserts		0.310	Z2-CN18.10
Tubes	Guides	24	9.216	Zircaloy 4
	Instrumentation	1	0.380	Zircaloy 4
<u>ROD</u>				
Clads	Nozzle	264	105.600	Zircaloy 4
End plugs	Bottom	264	1.637	Zircaloy 4
	Top	264	1.584	Zircaloy 4
Fuel pellets			523.400	UO ₂
Springs		264	5.016	Z5-CN20.11

表 2-4 燃料集合体の材料組成

Material	Composition	% by weight	Density(g/cm ³)
Z2 CN 18.10 & Z5 CN 18.10 Z5 CN 20.11	Fe	72.0	7.85
	Cr	18.0	
	Ni(+Co)	10.0	
	Co	0.1	
	Fe	69.0	7.85
	Cr	20.0	
	Ni(+Co)	11.0	
	Co	0.1	
Inconel 718	Fe	29.0	8.40
	Cr	19.0	
	Ni(+Co)	52.0	
	Co	0.8	
Inconel 600 Zr-4	Fe	8.0	8.40
	Cr	16.0	
	Ni(+Co)	76.0	
	Co	0.8	
	Fe	0.2	6.55
	Cr	0.1	
	Ni(+Co)	98.2	
	Co	1.5	

2.4. 測定方法と測定器

測定にはレムカウンタ(^3He カウンターの外側を厚さ 12cm のパラフィンで囲んだもの。 ^{252}Cf 線源を用いて較正されている)が使用されている。このレムカウンタのレスポンスが通常の線量率変換係数と大きく異なっているため、このレムカウンタのレスポンスは別途計算されている。このレスポンスと当時の ANSI の変換係数の比較を表 2-5 に示す。

表 2-5 中性子線量率への変換係数

Emax	Emin	ANSI Conversion factor ($\mu\text{Sv/h}$)/(n/cm ² s)	Diop calculated Response function ($\mu\text{Sv/h}$)/(n/cm ² s)
14.0	10.0	1.450	1.310
10.0	5.6	1.450	1.310
5.6	3.2	1.450	1.450
3.2	1.8	1.400	1.530
1.8	1.0	1.450	1.420
1.0	5.60E-01	1.200	1.190
5.60E-01	3.20E-01	0.800	0.990
3.20E-01	1.80E-01	0.580	0.770
1.80E-01	1.00E-01	0.360	0.600
1.00E-01	5.60E-02	0.250	0.480
5.60E-02	3.20E-02	0.140	0.460
3.20E-02	1.80E-02	0.100	0.430
1.80E-02	1.00E-02	0.065	0.390
1.00E-02	5.60E-03	0.055	0.380
5.60E-03	3.20E-03	0.042	0.380
3.20E-03	1.80E-03	0.041	0.340
1.80E-03	1.00E-03	0.041	0.340
1.00E-03	5.60E-04	0.040	0.330
5.60E-04	3.20E-04	0.040	0.320
3.20E-04	1.80E-04	0.040	0.310
1.80E-04	1.00E-04	0.040	0.290
1.00E-04	5.60E-05	0.040	0.270
5.60E-05	3.20E-05	0.040	0.270
3.20E-05	1.80E-05	0.039	0.260
1.80E-05	1.00E-05	0.039	0.230
1.00E-05	5.60E-06	0.038	0.220
5.60E-06	3.20E-06	0.038	0.200
3.20E-06	1.80E-06	0.038	0.190
1.80E-06	1.00E-06	0.038	0.150
1.00E-06	5.60E-07	0.037	0.150
5.60E-07	3.20E-07	0.037	0.130
3.20E-07	1.80E-07	0.036	0.130

2.5. 測定結果

中性子線量率の測定結果は五箇所の値が提示されているが、評価点 1 は底側の中性子遮へい体領域を外れた箇所、評価点 2 は蓋側で中性子遮蔽体領域を外れた箇所、残りの評価点 3 から 5 は側面中央でキャスク表面からの距離を変えたものである。これらの点は周方向には、いずれも 90 度方向である。各燃料との位置関係は図 2-6 に示されている。また、得られた中性子線量率の測定結果を表 2-6 に示す。

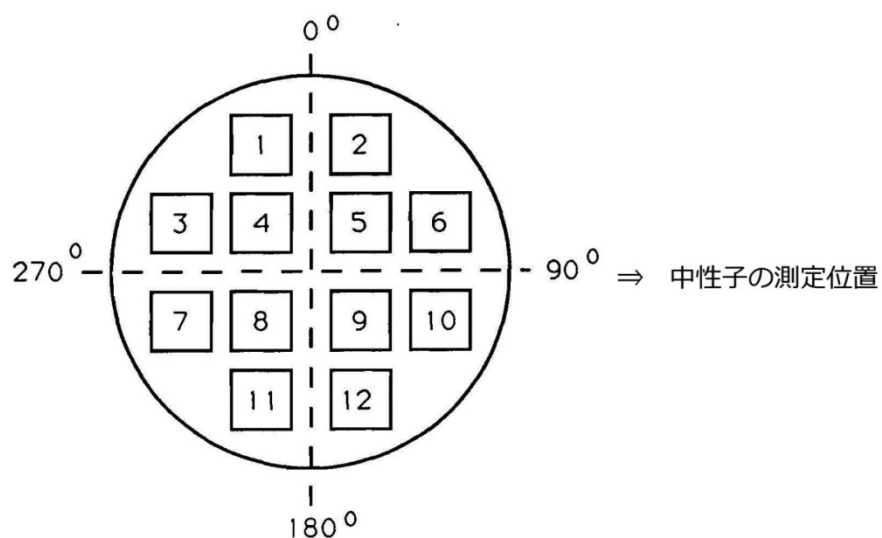


図 2-6 TN-12 型キャスクの燃焼集合体装荷位置の番号と中性子線量率測定位置との関係

表 2-6 中性子線量率測定結果

評価点	周囲方向 (θ)	キャスク表面 からの距離 (r : cm)	キャスク底面 からの距離 (z : cm)	測定値 ($\mu\text{Sv/h}$)
1	90°	15.5	47.5	35.0
2	90°	15.5	467.0	59.3
3	90°	15.5	271.9	52.9
4	90°	100	271.9	28.6
5	90°	181.5	271.9	19.0

2.6. ベンチマーク計算

2.6.1. 線源計算

TN-12 型容器に収納されている使用済燃料 12 体の仕様は以下の通りである。

- (1) 照射、冷却履歴：表 2-7 に示すように全ての使用済燃料は同一サイクルで 3 サイクル運転された燃料であり、冷却日数は 647 日である。

表 2-7 使用済燃料の照射履歴(中性子ベンチマーク)

Cycle	Beginning	End	Full Power Equivalent days
1	8-Dec-77	6-Jul-79	445
2	14-Oct-79	9-Aug-80	280
3	5-Oct-80	29-Aug-81	282
Measurement	7-Jun-83	7-Jun-83 Cooling time 647 days	

- (2) 各サイクルの燃焼度履歴：12 体のそれぞれの履歴は表 2-8 に示されているが、ほとんど同じ履歴となっている。あえて分類すると 36000MWD/t U 以上燃焼した 5 体とそれより低い燃焼度の 7 体となる。

表 2-8 使用済燃料の各サイクルの燃焼度(中性子ベンチマーク)

Assembly	End of Cycle 1	End of Cycle 2	End of Cycle 3
1	14080	25209	34896
2	14080	25209	34896
3	15740	26829	36596
4	15740	26829	36582
5	14080	25498	35230
6	15740	26829	36581
7	14080	25498	35232
8	14080	25498	35532
9	15740	26829	36596
10	14080	25209	34897
11	15740	26828	36675
12	14080	25497	35148

- (3) 軸方向燃焼度分布：表 2-9～表 2-11 に各使用済燃料の各サイクル末の軸方向燃焼度分布が示されているが、いずれも同様の分布をしており特異な使用済燃料が混じっていないことがわかる。

表 2-9 第1 サイクル終了時の軸方向燃焼度分布(中性子ベンチマーク)

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Top	4042.18	4388.83	8123.10	8237.84	4490.33	8239.97	4473.81	4301.27	8184.88	4434.21	8238.04	4443.85
57 Values Corresponding to regular intervals	8930.72	8042.02	8998.31	7115.33	8423.37	7117.39	8404.18	8440.78	7034.83	8344.88	7138.28	8338.95
	8338.81	7988.13	8819.18	8962.20	8233.03	8964.48	8207.98	8253.30	8903.24	8131.98	9008.84	8150.18
	9744.98	9483.88	10383.42	10573.81	9570.18	10578.13	9839.30	9394.27	10484.92	9430.88	10808.98	9472.04
	10813.87	10824.44	11888.72	11882.91	10881.18	11883.29	10848.32	10708.17	11780.85	10348.08	11917.95	10872.48
	11181.14	11198.03	12248.88	12473.82	11147.84	12478.05	11111.19	11178.20	12388.75	11009.18	12512.70	11033.29
	11783.37	11814.05	12810.88	13048.19	11844.88	13050.14	11808.37	11874.37	12938.25	11500.22	13088.78	11528.57
	13248.31	12903.35	14323.87	14793.48	13028.32	14797.30	12983.18	13059.78	14888.34	12884.83	14839.22	12397.17
	13983.89	13893.19	15353.28	15838.37	13973.38	15839.95	13828.75	13911.19	15504.27	13703.15	15884.71	13738.74
	14517.44	14300.17	15997.80	16295.25	14451.32	16298.40	14402.32	14488.91	16155.41	14271.88	16343.30	14310.09
	14925.74	14948.90	16489.78	16778.38	14877.28	16777.11	14824.88	14918.33	16832.38	14892.59	16828.11	14732.99
	15183.75	15250.48	16788.37	17101.50	15148.02	17101.75	15094.48	15188.11	16934.39	14938.12	17152.11	15000.23
	15279.19	15410.87	16980.20	17297.05	15281.31	17298.82	15229.18	15322.10	17148.34	15091.87	17348.43	15133.39
	14730.88	15178.04	16308.29	16818.70	14900.88	16818.00	14849.39	14940.87	16872.00	14713.82	16888.77	14739.30
	14378.78	14888.38	15949.20	16847.80	14470.10	16848.38	14420.74	14309.49	16107.98	14891.21	16293.98	14334.75
	15398.18	15443.88	17243.93	17988.98	15434.94	17985.25	15402.33	15497.27	17415.29	15284.10	17819.31	15311.03
	15879.75	16082.38	17534.80	17883.38	15901.82	17881.48	15847.35	15943.38	17709.19	15703.20	17918.18	15734.29
	16017.14	16248.38	17738.98	18089.80	16080.77	18087.38	16008.27	16105.49	17913.34	15882.54	18123.80	15912.81
	16088.80	16349.27	17884.30	18199.85	16137.13	18197.05	16082.51	16182.42	18042.33	15938.09	18254.29	15969.27
	16073.34	16373.28	17872.84	18208.82	16151.87	18205.71	16097.21	16197.47	18051.11	15932.89	18283.33	16004.55
	15987.09	16308.15	17757.23	18091.35	16073.27	18087.91	16020.99	16120.91	17934.48	15877.12	18143.98	15929.22
	15331.88	15828.00	17082.25	17404.02	15308.00	17400.30	15153.38	15352.40	17252.95	15318.85	17458.22	15387.82
	14733.00	15064.27	16231.82	16358.11	14845.19	16354.17	14793.33	14887.95	16414.18	14882.59	16807.73	14712.18
	13838.03	13830.13	17570.09	17901.50	13883.37	17897.18	13811.42	13788.98	17453.88	13551.42	17953.18	13523.18
	16038.53	16188.91	17937.85	18278.02	16038.37	18271.57	15983.11	16084.89	18117.11	15841.28	18330.87	15895.08
	16111.33	16300.38	18128.39	18488.88	16131.88	18483.99	16078.34	16178.84	18308.08	15933.81	18324.10	15988.12
	16123.27	16374.55	18280.74	18803.37	16173.08	18800.82	16121.45	16222.29	18443.82	15978.33	18881.31	16031.22
	16105.44	16373.31	18259.58	18804.21	16185.57	18599.41	16112.04	16212.89	18442.30	15988.97	18880.21	16022.11
	16019.75	16283.18	18105.97	18447.78	16078.88	18442.93	16023.44	16123.75	18287.42	15879.18	18303.34	15934.14
	15413.15	15817.33	17437.82	17787.02	15542.39	17782.32	15490.85	15588.27	17812.80	15351.42	17820.85	15404.85
	14871.97	15084.37	16442.05	16752.58	14808.45	16747.91	14759.55	14852.08	16808.92	14828.75	16803.10	14878.10
	15938.55	15574.74	17738.97	18073.94	15893.89	18068.98	15842.83	15739.92	17918.77	15501.82	18128.48	15555.57
	16280.84	16184.70	18028.93	18387.21	16148.02	18382.27	16095.08	16193.34	18207.80	15849.95	18422.81	16005.44
	16487.14	16381.19	18193.09	18538.29	16338.87	18531.48	16283.22	16388.84	18373.39	16138.43	18592.22	16194.48
	16495.18	16320.78	18289.41	18834.14	16431.98	18829.54	16377.94	16479.90	18472.59	16230.35	18890.44	16288.82
	16434.03	16822.50	18291.34	18833.90	16448.90	18831.44	16392.88	16494.71	18474.48	16244.98	18892.21	16301.13
	16302.59	16554.08	18240.51	18583.92	16352.81	18579.84	16298.53	16399.93	18423.09	16151.72	18840.07	16207.38
	15880.34	16100.57	17893.57	18028.38	15817.18	18022.05	15784.47	15882.85	17870.88	15822.58	18080.89	15878.30
	14837.08	15329.71	16813.00	16922.25	15013.48	16921.75	14983.81	15088.83	16779.21	14829.05	16978.41	14880.04
	16088.31	15780.45	17987.84	18325.52	15882.13	18322.19	15810.04	15907.28	18187.83	15887.54	18380.88	15720.50
	16349.19	16434.82	18282.94	18825.71	16318.08	18822.75	16284.03	16384.31	18485.48	16117.53	18882.00	16171.83
	16308.10	16553.71	18409.20	18753.98	16438.93	18751.04	16402.30	16503.34	18592.93	16254.51	18810.81	16308.84
	16573.24	16588.45	18488.32	18813.77	16491.88	18811.55	16438.82	16537.79	18832.48	16288.59	18870.58	16342.24
	16518.88	16480.08	18437.18	18781.59	16417.32	18779.84	16382.81	16482.84	18820.81	16214.98	18838.28	16287.59
	16315.88	16508.82	18287.28	18807.87	16240.23	18808.77	16198.10	16284.93	18448.99	16039.94	18884.05	16091.09
	15584.80	15837.57	17812.34	17940.22	15843.04	17939.70	15590.48	15883.88	17787.23	15449.71	17994.37	15498.23
	14514.59	14903.58	16254.83	16557.02	14870.25	16558.98	14821.09	14709.81	16418.02	14489.01	16808.93	14533.87
	15433.00	15098.77	17328.42	17848.03	15302.89	17848.82	15152.82	15243.32	17497.89	15015.29	17701.12	15080.18
	15253.07	15422.42	17205.70	17524.48	15273.44	17525.77	15224.89	15313.80	17373.85	15088.48	17577.21	15130.48
	14858.48	15101.55	16759.33	17089.25	14919.00	17071.22	14889.73	14908.09	16924.57	14734.25	17120.88	14778.15
	14212.01	14584.90	16030.70	16347.10	14330.29	16349.52	14283.04	14387.98	16208.88	14152.59	16398.28	14191.78
	13354.28	13791.91	15041.43	15318.71	13518.75	15321.81	13474.22	13553.84	15189.19	13350.89	15384.84	13388.80
	12194.78	12725.90	13858.53	13910.08	12410.89	13913.08	12370.10	12442.78	13792.31	12258.58	13951.93	12288.83
	10839.74	11319.87	11878.93	12093.42	10948.49	12098.41	10910.43	10974.45	11993.28	10810.12	12131.82	10837.98
	8718.48	9039.98	9707.48	9885.98	9092.20	9888.82	9115.35	9882.09	9115.35	9882.45	9913.59	9000.78
	8370.85	7414.83	7291.57	7425.41	8885.05	7427.88	8842.13	8882.50	7382.82	8779.09	7447.73	8793.32
Bottom	8729.95	8383.45	8094.18	8242.38	8524.23	8245.28	8504.39	8540.39	8173.05	8443.23	8287.19	8457.81

表 2-10 第 2 サイクル終了時の軸方向燃焼度分布(中性子ベンチマーク)

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Top	9944.91	9739.19	12962.46	13022.81	9961.98	12999.39	9998.62	10029.67	13017.34	9782.06	13082.48	9969.34
57 Values Cooresponding to regular intervals	13888.41	13148.47	13819.89	14911.34	13116.97	13843.36	13133.79	13219.12	13864.91	13394.26	13828.49	13112.89
	17088.84	18844.38	17278.38	17821.43	18679.83	17319.89	18891.63	18868.42	17331.73	18721.38	17425.91	18673.78
	19290.99	19133.34	20173.26	20427.67	19178.74	20229.79	19293.88	19316.92	20239.28	19046.66	20369.34	19171.29
	21189.28	21198.83	22347.64	22884.32	21189.74	22411.98	21187.93	21311.98	22423.19	20961.99	22647.89	21189.79
	21894.26	21843.71	23162.48	23343.88	21783.91	23223.99	21788.93	21918.96	23233.92	21673.91	23363.73	21781.19
	22997.44	22978.69	23497.99	23797.38	22377.88	23682.18	22491.98	22633.78	23684.31	21986.16	23721.98	22382.88
	24882.96	24486.94	28271.91	28627.22	24834.11	28373.38	24889.84	26998.68	28372.22	24339.79	28628.38	24818.18
	26797.79	26787.32	27461.29	27713.33	26983.38	27672.98	26987.87	28242.72	27688.99	26666.98	27734.16	26941.63
	28382.14	28614.36	28231.96	28488.39	28821.49	28363.91	28844.67	27994.87	28346.93	28196.92	28618.39	28798.86
	29834.13	27997.29	28748.29	28999.91	27333.11	28877.88	27366.19	27818.88	28898.86	28889.74	29844.98	27989.13
	27063.72	27298.27	29904.22	29289.87	27899.99	29179.18	27839.14	27798.89	29188.19	28914.82	29338.44	27889.68
	27974.93	27964.99	29123.42	29082.49	27881.48	29284.39	27881.63	27848.99	29247.88	28844.97	29382.73	27932.11
	28143.92	28713.41	28242.82	28614.48	28788.26	28389.33	28891.29	28893.44	28394.97	28184.33	28644.91	28783.77
	24848.83	26393.66	28829.23	27196.12	26721.83	28899.97	26738.13	28883.87	28899.69	24916.68	27114.28	26882.48
	27992.87	28992.19	28836.48	29144.66	27824.26	28988.93	27842.26	27798.84	28984.92	28726.24	29184.91	27484.92
	27811.18	27849.61	28939.29	28997.91	28188.87	28486.99	28298.29	28377.43	28479.92	27994.17	28884.18	28187.97
	27884.17	28979.82	28624.91	28786.43	28383.91	28884.79	28419.47	28883.98	28888.83	27897.49	28884.81	28381.23
	27778.89	28297.48	28937.84	28888.77	28486.13	28899.24	28892.68	28876.98	28773.23	27798.36	28971.96	28483.91
	27773.39	28222.92	28926.63	28878.68	28481.43	28788.37	28488.72	28872.36	28781.18	27719.46	28889.42	28489.27
	27898.98	28974.91	28489.74	28272.64	28332.88	28931.92	28349.93	28822.81	28994.69	27884.84	28891.78	28382.14
	28818.26	27263.12	28832.99	28899.62	27378.78	28884.89	27396.41	27883.12	28881.93	28887.29	28861.41	27889.28
	28114.77	28897.48	28883.12	27138.98	28897.76	27912.29	28886.83	28144.73	28887.29	28899.23	27188.37	28882.91
	28883.79	28918.99	28838.88	28173.36	27899.11	28999.98	27817.82	27788.99	28873.69	28872.93	28179.94	27872.48
	27499.99	27796.78	28888.98	28999.31	28281.14	28784.67	28289.93	28472.93	28728.96	27881.79	28888.84	28283.88
	27887.46	27893.26	28882.94	30184.87	28482.49	30929.12	28479.77	28844.86	28899.83	27837.26	30183.78	28484.82
	27738.39	28136.19	30916.47	30949.97	28843.14	30186.82	28881.79	28738.29	30186.62	27847.29	30389.22	28618.92
	27781.44	28179.61	30923.91	30942.93	28847.12	30189.91	28888.88	28749.48	30189.94	27881.97	30388.76	28629.48
	27843.88	28886.21	28831.73	30146.98	28414.99	28999.41	28433.79	28898.91	28979.38	27881.33	30173.64	28388.86
	28777.48	27328.19	28889.88	28282.84	27889.97	28188.88	27889.61	27788.98	28883.12	28872.49	28278.79	27888.79
	28131.22	28878.87	27888.88	27388.21	27388.78	28881.34	28189.98	27212.67	28139.91	27897.21	28889.29	28889.29
	27988.94	28828.78	28828.48	28287.33	27888.92	28994.91	27878.82	27846.28	28889.29	28888.88	28283.94	27882.91
	27911.86	27843.19	28229.91	30982.89	28819.17	28888.34	28829.38	28793.38	28887.62	27838.91	30979.41	28484.27
	28193.44	28148.16	30993.89	30886.79	28897.88	30171.78	28828.81	28992.69	30142.73	27833.11	30347.38	28789.96
	28289.21	28484.79	30173.41	30849.18	28886.64	30942.19	28884.88	28181.38	30312.91	28923.23	30618.91	28888.61
	28243.97	28883.82	30198.32	30886.69	28998.87	30888.79	28926.97	28928.93	30337.88	28124.23	30843.36	28879.89
	28119.98	28822.71	30116.11	30448.94	28887.11	30282.98	28898.22	28882.98	30283.98	28888.62	30489.92	28889.23
	27292.37	27889.97	28888.81	28848.93	28121.86	28828.21	28149.79	28312.67	28489.78	27292.84	28888.27	28888.98
	28639.48	28189.96	27444.92	27872.12	28434.76	27897.19	28881.67	28812.78	27871.92	28678.67	27767.38	28489.21
	27993.62	27141.47	28188.81	28489.33	27817.89	28939.89	27986.92	28196.14	28996.14	28841.26	28897.48	27889.88
	28112.43	28349.94	30949.79	30878.19	28884.69	30219.87	28914.99	28889.36	30179.62	27849.17	30384.84	28888.98
	28489.14	28888.62	30279.94	30877.34	28176.79	30489.68	28196.38	28972.32	30419.39	28298.88	30826.72	28147.81
	28617.18	28883.82	30426.78	30842.36	28289.74	30888.69	28919.71	28487.16	30888.62	28282.92	30772.41	28271.39
	28889.71	28886.49	30487.71	30888.64	28274.44	30838.96	28284.84	28417.81	30888.86	28288.88	30812.93	28248.28
	28348.34	28482.17	30838.17	30792.79	28996.92	30891.72	28118.87	28282.33	30472.91	28131.42	30878.97	28998.32
	27889.89	27887.87	28842.67	28988.76	28349.39	28788.48	28382.99	28832.98	28772.93	27478.48	28888.79	28918.84
	28878.19	28267.98	27838.83	27793.69	28479.94	27877.98	28489.71	28449.86	27867.73	28798.28	27838.28	28488.18
	28888.34	28883.39	28822.89	28137.62	27448.78	28879.49	27479.24	27833.87	28881.48	28829.91	28144.48	27421.91
	27812.82	27838.46	28891.41	28741.89	28897.69	28844.69	28121.94	28289.31	28826.69	27496.83	28818.43	28873.93
	27212.39	27816.69	28189.98	28974.61	27741.44	28284.66	27787.97	27991.84	28289.62	27189.41	28488.81	27719.99
	28888.94	27929.44	28388.42	28849.19	28897.88	28489.39	27924.43	27184.37	28489.68	28619.63	28867.94	28879.91
	28388.96	28882.18	27196.87	27426.93	28883.86	27212.84	28881.38	28894.18	27298.62	28486.23	27374.37	28888.69
	28742.99	24423.28	28289.93	28384.81	24189.69	28348.18	24188.34	24339.86	28389.89	23881.79	28891.97	24149.49
	21372.87	22712.27	22888.21	22786.12	21774.37	22782.88	21891.66	21829.87	22772.32	21878.74	22892.67	21787.88
	18198.81	19146.88	18888.73	18489.68	18889.89	18411.69	18889.21	18718.74	18488.41	18888.41	18633.72	18679.23
	14879.47	18229.42	18282.92	18312.76	14481.38	18284.96	14892.93	14888.43	18389.89	14822.89	18382.73	14483.89
Bottom	12788.79	12471.71	14291.78	14479.18	12839.98	14384.88	12886.87	12728.19	14347.83	12892.47	14437.82	12891.48

表2-11 第3サイクル終了時の軸方向燃焼度分布(中性子ベンチマーク)

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Top	13889.83	13886.99	17903.03	18238.46	14882.13	17862.19	14482.88	16424.89	17888.28	13549.68	18599.07	14899.46
57Values Cooresponding to regular intervals	18906.24	18212.89	19414.88	19488.06	18709.20	19070.19	18693.54	18307.89	19491.39	18063.94	18063.47	18772.99
	23369.22	22869.06	23909.67	23968.26	23366.19	23882.61	23672.21	23467.87	23918.98	22866.27	24117.48	23497.87
	28473.42	28361.29	27677.12	27891.98	28993.92	27629.08	28997.93	27129.92	27898.99	28244.47	27799.23	28997.16
	29049.26	29009.37	30366.73	30483.22	29672.82	30319.31	29642.26	29043.62	30361.18	28889.87	30801.66	29873.66
	29779.76	29871.88	31119.34	31449.41	30041.88	31072.78	30389.81	30848.41	31111.88	29801.37	31387.24	30442.91
	30171.98	30196.09	31833.17	31871.29	30649.99	31804.94	30949.12	31076.91	31837.46	29949.61	32106.96	30936.78
	30792.63	30663.29	36481.93	36649.82	34239.41	36438.68	34273.12	34887.87	36489.98	33477.26	36779.77	34346.71
	36177.98	36397.38	37009.91	37171.39	36886.94	36999.87	36919.68	36298.39	37022.89	36987.43	37338.69	36973.44
	36878.87	36899.19	38008.82	38183.76	38008.93	37994.41	38864.86	37167.89	38923.61	36997.17	38389.48	38913.61
	38888.94	38893.49	38883.28	38889.76	37439.88	38878.94	37478.91	37896.89	38793.69	38823.84	38888.89	37648.88
	38879.71	37288.38	38967.18	38282.76	37783.89	38968.99	37823.14	38189.88	38989.22	38949.82	38421.99	37889.66
	38886.81	37327.88	38133.32	38419.28	37829.42	38137.28	37871.73	38191.62	38189.11	38893.83	38862.48	37908.27
	38786.12	38378.83	37729.19	38298.28	38843.31	37728.99	38881.89	37914.39	37748.28	38878.88	38878.43	38748.08
	38996.17	34487.69	38128.89	38148.39	34822.93	38139.32	38916.96	38194.81	38164.62	33888.87	38477.97	38816.87
	38786.23	38796.67	38824.89	38878.89	37499.67	38841.23	37429.64	37784.82	38866.88	38868.24	38204.99	37611.26
	37899.48	37981.87	38617.32	38729.99	38418.97	38634.97	38899.33	38733.26	38849.13	37669.94	38894.11	38823.93
	37882.43	38312.43	38778.98	38877.44	38793.33	38797.83	38793.87	38921.36	38811.42	37849.17	40179.43	38899.76
	38909.08	38612.39	38989.14	40186.34	38833.32	38981.67	38983.89	38172.33	38994.32	38999.88	40388.37	38849.08
	38908.13	38841.38	38973.89	40193.08	38833.68	38986.12	38887.89	38188.87	40097.84	38926.37	40379.89	38849.77
	37833.34	38364.78	38799.46	40046.89	38843.36	38799.12	38884.69	38999.61	38989.38	37889.99	40184.79	38789.68
	38839.68	37228.28	38388.12	38983.18	37491.71	38387.16	37423.29	38778.73	38482.82	38726.81	38748.66	37697.39
	34387.19	34998.39	38339.44	38448.82	36224.92	38389.22	36378.34	36449.88	38379.87	34399.12	38793.22	36329.82
	38828.99	38812.89	38918.81	38183.16	37499.83	38944.93	37414.94	37899.89	38963.99	38881.41	38412.77	37613.63
	37727.94	38977.21	40088.14	40028.78	38692.88	40089.84	38624.14	38889.88	40092.79	37888.76	40489.49	38811.81
	37983.98	38363.88	40416.34	40874.36	38789.92	40439.23	38777.67	38186.48	40489.83	37928.48	40822.31	38871.23
	38991.88	38842.82	40826.97	40889.36	38988.99	40889.98	38914.88	38994.84	40881.96	38999.16	41006.98	38914.27
	38149.88	38813.99	40834.99	40867.77	38981.12	40889.24	38943.83	38933.36	40879.84	38183.94	41044.48	38943.33
	38818.89	38484.47	40883.99	40886.71	38789.18	40489.89	38794.19	38179.68	40418.48	38944.18	40789.97	38882.88
	38912.14	37813.84	38987.88	38818.98	37728.96	38987.88	37724.11	38133.83	38191.89	37888.71	38488.82	37838.48
	34881.16	36188.98	38889.87	38872.96	36411.94	38889.88	36663.69	36842.23	38791.94	34676.92	37909.88	36612.97
	38878.44	38799.13	38218.18	38986.89	37488.37	38244.94	37818.87	37881.28	38282.12	38886.11	38818.27	37882.46
	38189.98	38286.88	40389.37	40713.87	38988.11	40389.49	38889.98	38231.13	40482.86	37849.98	40776.42	38921.11
	38803.21	38799.84	40774.29	41189.86	38912.27	40796.93	38419.42	38931.49	40897.84	38361.91	41184.99	38426.89
	38886.48	38908.36	41038.67	41489.81	38899.11	41088.73	38897.29	38822.23	41089.62	38813.88	41448.48	38813.82
	38847.82	38822.76	41191.91	41618.49	38849.39	41121.16	38828.42	38873.43	41134.29	38749.88	41613.89	38863.89
	38889.36	38161.49	40879.83	41388.48	38877.36	40889.98	38444.39	38728.26	41002.91	38889.98	41389.98	38489.29
	37944.37	38287.87	38889.88	40881.99	38497.73	38878.42	38432.27	38793.21	38899.86	37793.87	40289.23	38829.11
	38181.84	38841.64	37232.28	37886.89	38877.28	37289.69	38116.18	38218.62	37882.38	38209.97	37894.79	38878.89
	37213.81	37193.89	38889.12	38981.18	37871.91	38829.33	37879.44	38989.87	38826.82	38873.61	38994.14	37774.99
	38878.96	38888.39	40889.94	41111.49	38288.16	40881.67	38297.66	38888.98	40891.97	38482.87	41289.28	38878.41
	38861.78	38286.46	41289.86	41644.29	38879.34	41224.71	38794.49	40867.99	41236.46	38839.84	41816.61	38781.88
	38197.74	38999.96	41419.26	41778.48	38843.48	41439.42	38876.79	40233.79	41441.61	38861.41	41822.34	38964.99
	38113.18	38284.69	41447.74	41811.48	38828.13	41448.32	38863.46	40222.26	41478.98	38911.98	41868.86	38997.88
	38828.87	38128.26	41261.98	41891.19	38913.89	41288.79	38862.48	38999.82	41279.72	38743.23	41868.77	38726.16
	37944.36	38486.96	40239.83	40723.39	38889.73	40248.99	38889.46	38977.32	40284.81	38888.82	40828.67	38782.66
	38889.93	38892.83	37289.81	37796.93	38199.64	37289.18	38229.29	38383.89	37313.18	38483.24	37848.96	38211.99
	38773.21	38889.89	38989.38	38199.11	37888.82	38988.13	37878.24	37486.19	38988.91	38389.39	38489.86	37189.21
	37898.99	38188.12	40188.99	40289.36	38371.47	40188.29	38389.76	38799.94	40128.23	37828.89	40484.46	38482.98
	37481.24	37988.38	38984.62	38983.88	38841.86	38983.99	38819.34	38489.98	38788.18	37846.29	40888.84	38186.32
	38661.39	37118.82	38888.49	38883.78	37188.77	38846.66	37139.87	37862.88	38874.34	38738.61	38913.81	37884.82
	36119.19	36784.86	37913.98	37189.66	36794.27	36884.41	36744.62	36248.88	37917.29	36389.91	37338.66	36889.99
	32888.99	33889.12	34878.32	34816.99	33849.27	34636.12	33889.21	34886.27	34672.28	33289.43	34888.89	33782.91
	28841.46	30886.93	31182.14	31487.88	30662.99	31191.98	30644.83	30913.73	31142.81	30239.76	31486.39	30889.98
	28833.91	28818.49	28888.74	27888.92	28318.82	28889.98	28348.88	28888.91	28842.97	28142.83	28881.78	28414.71
	28988.89	21272.94	28982.43	21631.99	28981.93	28988.99	28848.98	28988.28	28988.43	28787.99	21194.29	28888.97
Bottom	17487.91	17178.78	18828.94	19142.17	17411.98	18827.27	17632.69	17487.91	18838.91	17088.28	18887.88	17486.39

以上のことから、今回の計算では使用済燃料を大きく二つのグループに分けることが妥当であると考え、燃焼度 36606MWd/tU と 35118 MWd/tU の 2 ケースについて ORIGEN-ARP により線源強度を計算した。

2.6.2. 計算モデル

文献に与えられたデータを用いて形状及び各領域の密度設定を行った。燃料構造材端部の組成等で寸法的に明確でない場所があるが結果には大きな影響を与えないと思われるため、簡略化して密度設定を行っている。

中性子線源スペクトルは主要な中性子発生核種である ^{244}Cm の自発核分裂スペクトルを使用した。

検出器としては、点検出器と体積検出器(TLE)の 2 種類の検出器を使用して同一の位置における計算結果の比較を行った。体積検出器の大きさとしては半径 7cm と設定した。もう少し大きくても問題ないと思われる。計算モデルのキャスクと検出点の関係について図 2-7、図 2-8 に示す。

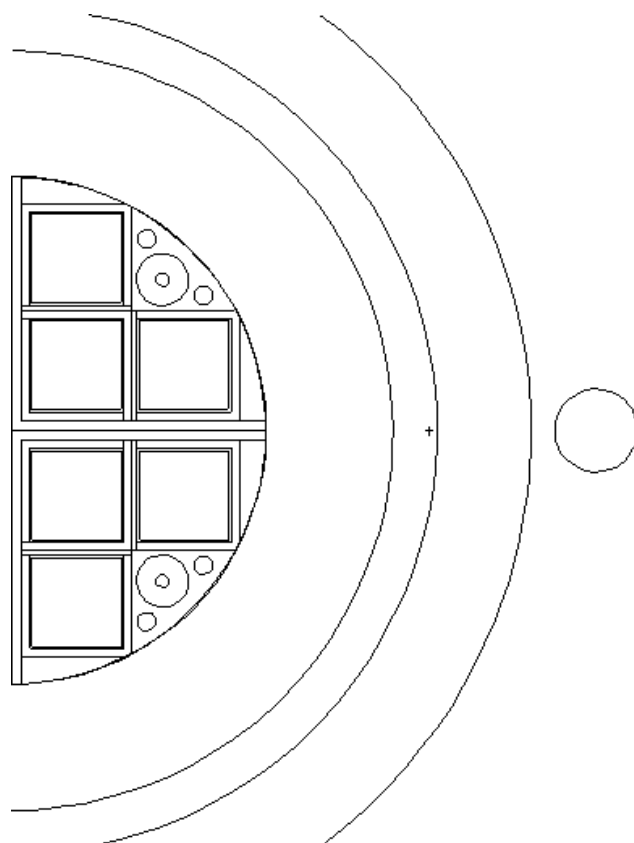


図 2-7 TN-12 型キャスクと検出器の位置関係(側面中央)

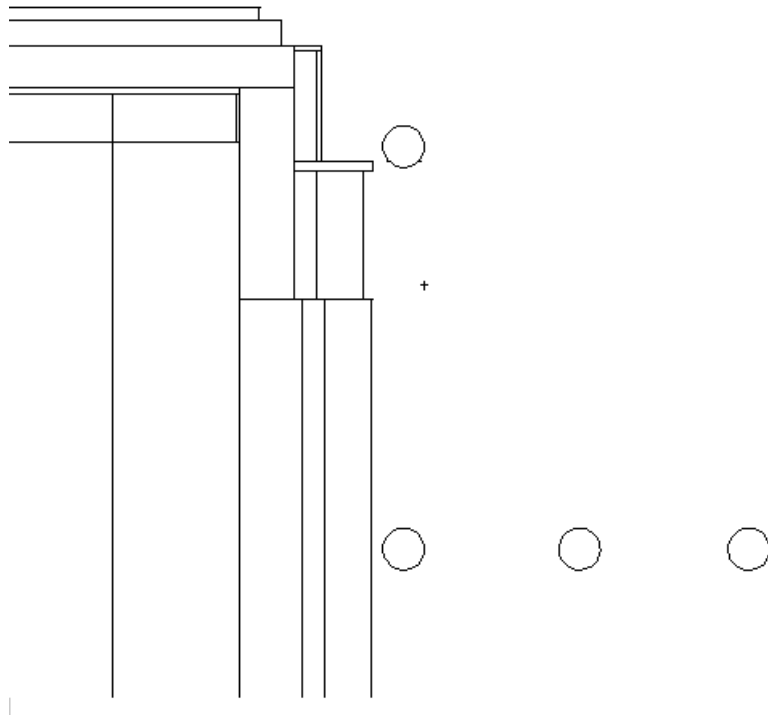


図 2-8 TN-12 型キャスクと検出器の位置関係(側面中央と蓋側)

2.6.3. 計算方法

断面積ライブラリーとしては ENDF/B-VII 等の MCNPDATA として添付されているものを使用した。

計算は、メッシュを用いた WWG(weight window generator)を使用した。

最初の計算は、まずセル・インポートランスを設定した。

側面中央の計算では、最初に設定するセル・インポートランスの影響がそれほどないことを確認するため 3 種類の設定を行った。ただし、計算モデルでは各領域をセルで細かく定義していないため、いずれも大雑把なセル・インポートランスの設定となる。計算に用いた PC の CPU はインテル CORE2 DUO 1.33GHz であり、各計算の計算時間は基本的に 4 時間に設定した。

両端部の計算は、上記セル・インポートランスの影響の結果を考慮して初期のセル・インポートランスを設定した。

2.7. 計算と測定値の比較

2.7.1. 計算結果

(1) 線源強度

ORIGEN-ARP により得られた線源強度を表 2-12 に示す。キャスク 1 基あたりの全線源

強度は線源強度に対して、増倍効果として文献に示されている $k_{\text{eff}}=0.15$ を採用して補正を行った。軸方向燃焼度分布については表 2-11 に示された燃焼度分布についてタイプ 1、タイプ 2 それぞれの平均を求め、この燃焼度分布に対して、近似的に中性子線源強度は燃焼度の 4.25 乗に比例するものとして、全線源強度を軸方向に割り振った。実際には燃焼度が高い領域では 4.05 乗程度が妥当であるが、低燃焼度側の線源強度をより実際に近い形で表現することができるように、この値を使用した。基準点が平均燃焼度にあるため、高燃焼度側での誤差は数%以内である。

表 2-12 中性子源強度評価結果

	タイプ 1	タイプ 2
燃料体数	5	7
平均燃焼度(MWd/tU)	36,606	35,118
中性子源強度(n/sec/tU)	5.464E+08	4.600E+08
k_{eff}	0.15	
ウラン重量(kg/集合体)	461.4	
全中性子源強度(n/sec/基)	3.231E+09	

(2) 側面中央の線量当量率

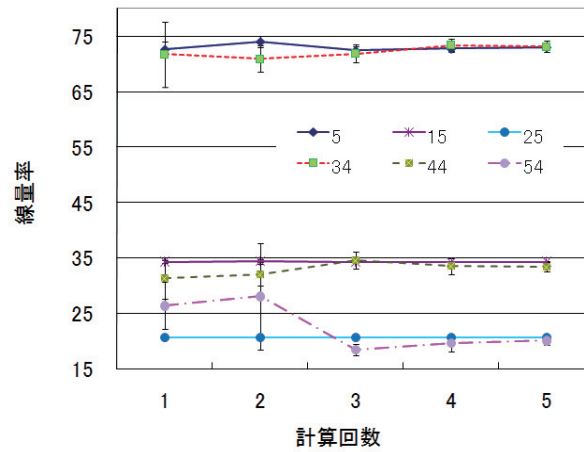
・ 初期 IMP 値の影響

メッシュを用いた WWG(weight window generator)を使用する場合には、最初の計算において各メッシュに初期の WW を手入力した **wwinp** ファイルを準備する方法とセルに IMP を入れる方法があるが、手入力で **wwinp** ファイルを準備するのは手間がかかるため、ここではセルに IMP を入れる方法を採用した。ただし、セルは従来のセル・インポートランスを用いる方法のようにキャスク本体を細かいセルに区切ることはしないため、どうしても、大雑把な初期値となってしまう。

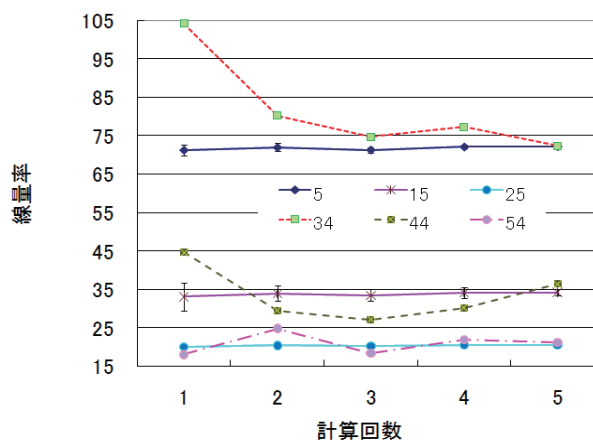
ここでは、側面中央を対象に①全セルに $\text{IMP}=1$ をいれた場合、②線源領域の IMP を 1 に設定し、キャスク外周の IMP を 16 となるように割り振った場合、③線源領域の IMP を 1 に設定し、キャスク外周の IMP を 128 となるように割り振った場合の 3 ケースについてパラメータサーベイを行った。各ケースについて同一の計算時間のモンテカルロ計算を実施し、得られた **wwinp** を次のモンテカルロ計算に使用するという方法を繰り返して、計算結果への影響を検討した。図 2-9 の(a),(b),(c)に各ケースの収束状況を示す。各ケースとも 5 回の計算としているが、①、③のケースでは 5 回目の計算時間は 2 倍(8 時間)としている。最初の計算では大きな差が発生している場合もあるが、最終的にはいずれの点においてもよく一致しているといえることができる。

また、最終の計算結果の比較を表 2-13 に示すが、数値的に見ても体積検出器の $\text{IMP}=1$

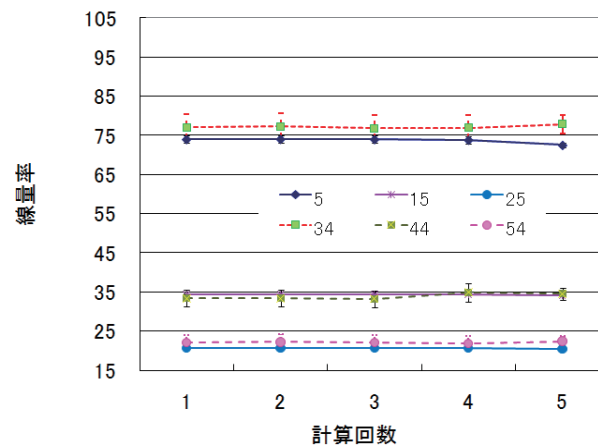
のケースで若干の差が見受けられるが、いずれの点においてもよく一致しているとい
うことができる。



(a) その1、IMP=16 まで



(b) その2、IMP=1 のみ

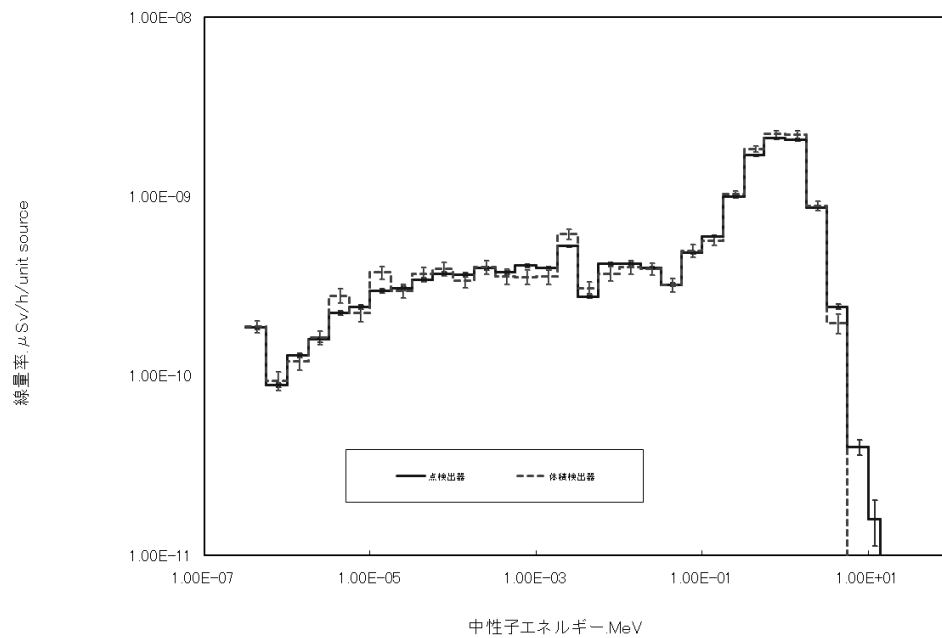


(c) その3、IMP=128 まで

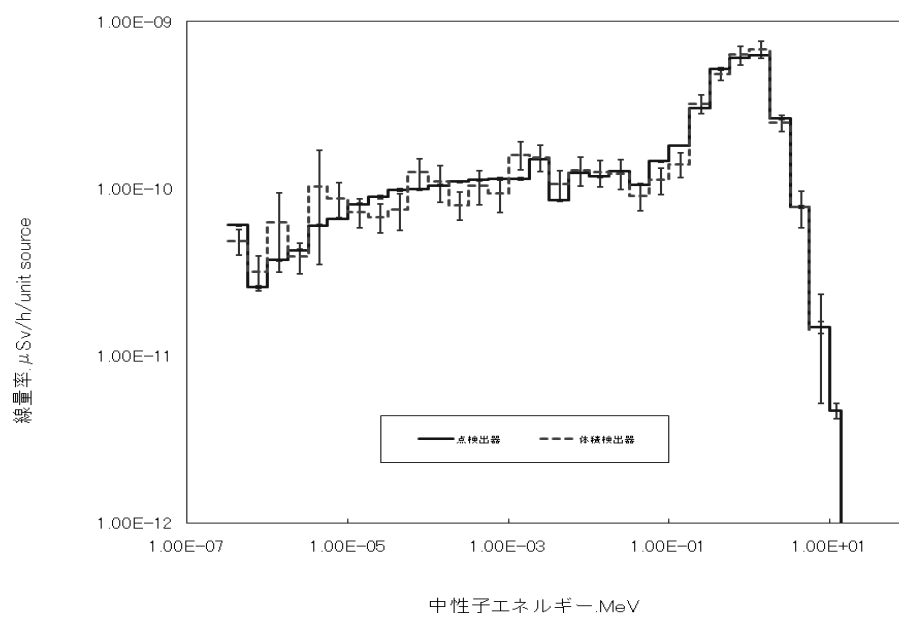
図2-9 初期IMPの違いによる計算結果への影響

- 中性子スペクトル

参考として、中性子スペクトルの比較を図 10 に示す。



(a) 側面中央 表面から 15.5cm



(b) 側面中央 表面から 181.5cm

図 2-10 TN-12 型キャスクの中性子線量率スペクトルの比較(中性子遮蔽体密度変更後)

・ 測定との比較

計算と測定値の比較を表 2-13 に示すが、測定値との一致はあまり良くない。この理由として、文献に示されているように TN-12 型キャスクの中性子遮蔽体形状が実際は円筒形状ではなく、このために遮蔽厚さを薄く計算していることが原因の一つと考えられる。また、遮蔽体の密度も保守的な設定値となっている可能性がある。このため、ここでは中性子遮蔽体領域の密度を単純に 1.1 倍した場合の計算を追加した。この結果を表 2-13 に併記しているが、この場合の計算結果は測定値とよく一致する方向にある。例えば、室内散乱等によるバックグラウンドが $4\mu\text{Sv/h}$ のレベルであると仮定すると非常によい一致となるが、文献にはこの点に関して記載が全くないため、あくまで推論でしかない。なお、本ベンチマークが提案された際のレポートには本キャスクは壁から 7 m 以上離れた場所にあるとされている。

表 2-13 IMP の初期値設定による最終結果への影響(側面中央)

	Point ($\mu\text{Sv/h}$)						Volume(TLE) ($\mu\text{Sv/h}$)					
	15.5cm	fsd	100cm	fsd	181.5cm	fsd	15.5cm	fsd	100cm	fsd	181.5cm	fsd
imp=16	73.98	0.95	34.40	0.22	20.61	0.11	76.98	3.33	33.30	2.11	22.13	1.92
imp=1	72.22	0.31	34.23	0.09	20.56	0.06	72.33	0.80	36.43	1.29	21.25	0.98
imp=128	72.51	0.65	34.16	0.15	20.50	0.08	77.87	2.35	34.53	1.53	22.42	1.38
密度変更	51.03	0.34	24.51	0.09	15.06	0.06	52.25	0.78	24.21	0.65	15.17	0.59
測定値	52.9	-	28.6	-	19	-	52.9	-	28.6	-	19	-

(3) 両端部の線量当量率

表 2-14 に TN-12 型キャスクの両端部表面近傍の中性子線量の計算結果を示す。端部については計算点が少ないこともあり、蓋方向は 2 回、底方向は 3 回の計算で十分な FSD となる結果が得られた。しかし、表 2-14 に示したように蓋側については計算は測定値よりはるかに高い数値を示しているが、底側については反対に測定値よりもかなり低い数値となっており、傾向が異なる。

端部の測定点は中央部の中性子遮蔽体の影響をそれほど多く受けないが、両端部には中性子遮へい性能のあるバルサ材が充填されており、この影響を受けやすい。

このため、蓋側に関しては表 2-1 に示したように使用されているバルサ材の密度が 2 種類与えられているため高めの数値(密度 0.25 g/cm^3)を使用した場合のケースについて追加計算を実施した。計算結果を表 2-14 に示すが、少しは改善されるものの依然として、その差は大きい。

この原因として考えられることは、実際の TN-12 型キャスクの形状は図 2-1 に示したとおりであるが、この図にあるように 90 度方向の中性子遮蔽体を外れた両端部分に

はトラニオンが存在し、実際にはかなり複雑な形状となっているが、計算モデルではこれらが考慮されていないこと、また、キャスクを横置きに置いた場合には、通常は輸送架台上に載せられ、トラニオン近傍には架台の構造物が存在するはずであるが、この架台による効果も計算では考慮されていないこと等が挙げられる。このため、端部の比較は非常に難しいと思われる。

表 2-14 TN-12 型キャスク両端部の中性子線量率の比較

		Point ($\mu\text{Sv/h}$)		Volume(TLE) ($\mu\text{Sv/h}$)	
		15.5cm	fsd	15.5cm	fsd
蓋側端部	imp=16	110.80	1.34	110.00	6.94
	密度変更	91.29	0.34	89.76	0.48
	測定値	59.30	-	59.30	-
底側端部	imp=16	27.23	0.33	25.90	0.36
	測定値	35.00	-	35.00	-

2.8. まとめ

以上の検討に示すように、本ベンチマーク問題は、線源強度の計算から、遮蔽計算までを含み、かつ、与えられたデータにも不明な点もあり、完全に計算結果と測定値を比較することはできないが、少なくとも側面中央部については計算の補正を行うとよい一致が得られることが確認できた。

(参考文献)

- (1) H.F. Locke, “Summary of the Results of the Comparison of Calculations and Measurements for the TN12 Flask Carried Out under the NEACRP Intercomparison of Shielding Codes”, NEACRP-L-339, March 1992

2.9. DOT3.5 による計算

2.9.1. 計算条件

(1) 使用コード及びライブラリ

使用コード：2次元Sn輸送計算コードDOT3.5

群定数ライブラリ：DLC-23F⁽¹⁾(中性子22群、 γ 線18群)(表1-11参照)

：SFCX-J33-n50g18⁽²⁾(中性子50群、 γ 線18群)

SFCX-J33-n50g18はJENDL-3.3から作成したVITAMIN-B6群構造(中性子199群、 γ 線42群)の実効断面積セットVITAMIN-J33を中性子50群、 γ 線18群に縮約したものである。(表1-12参照)

(2) 3.2 計算形状

モンテカルロ計算コードMCNP5による解析で使用された計算形状図に基づき、DOT3.5の計算モデルを作成した。

線源領域の均質化については、日本原子力学会標準「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2006」⁽⁴⁾に記載されている方法の内、実際の線源領域に外接する円形を均質化線源領域とする方法を使用した。この燃料領域の均質化に基づき、各層での構成物質の体積比を算出し、表2-15に示した。

中性子線及びFPガンマ線とCoガンマ線で線源部の範囲が異なっており、計算モデルは2種類作成した。DOT3.5の中性子線の計算モデルを図2-11に、FPガンマ線の計算モデルを図2-12に、Coガンマ線の計算モデルを図2-13に示した。

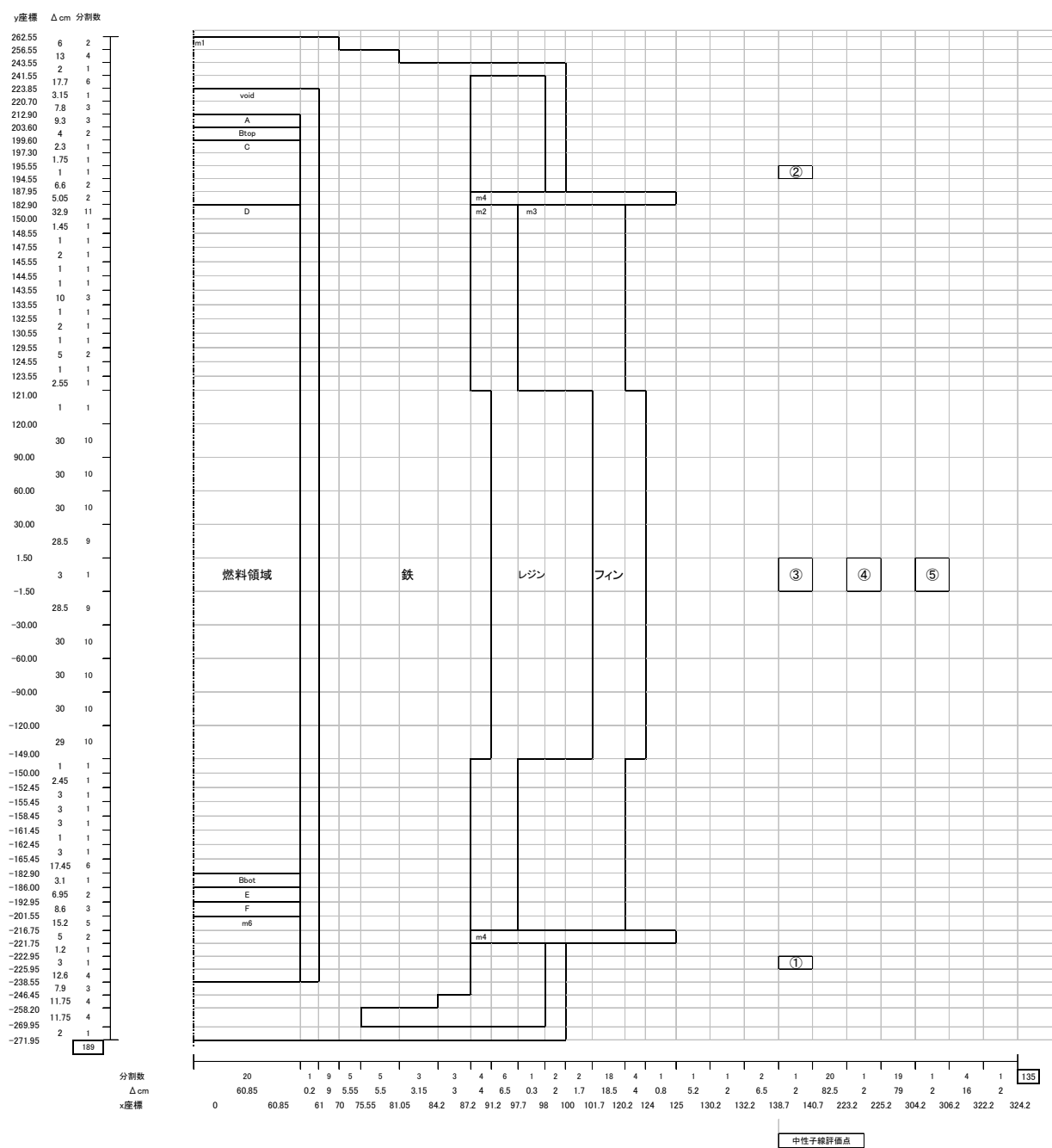
図2-11～図2-13の計算モデルには各領域のメッシュ分割数を示したが、メッシュ幅は基本的に空気の領域を除き、半径方向について1cm程度、軸方向は3cm程度に設定した。

この結果、中性子線及びFPガンマ線の計算モデルは半径方向の総メッシュは135、軸方向の総メッシュは189となった。Coガンマ線の計算モデルは半径方向の総メッシュは135、軸方向の総メッシュは186となった。

表 2-15 各層での構成物質の体積比

	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m8	m81	m9
領域 A	0.0631	0	0	0	0	0	0	0	0
領域 B	0.0631	0	0	0	0	0	0	0	0
領域 C	0.0111	0	0	0	0	0	0.836	0.0575	0.1068
領域 D	0.0026	0	0	0	0	0	0.0973	0.067	0.1243
領域 E	0.0026	0	0	0	0	0	0.0973	0.067	0.1243
領域 F	0.0026	0	0	0	0	0	0.0973	0.067	0.1243
領域 G	0.0026	0	0	0	0.4733	0	0.0973	0.067	0.1243

	m91	m10	m11	m12#1	m12#2	m12#3	m13	m14	void
領域 A	0	0	0.4733	0	0	0	0	0	0.4636
領域 B	0	0	0	0.4733	0	0	0	0	0.4636
領域 C	0.0286	0	0	0	0	0	0.4733	0	0.239
領域 D	0.0333	0	0	0	0	0	0	0.4733	0.2022
領域 E	0.0333	0	0	0	0.4733	0	0	0	0.2022
領域 F	0.0333	0	0	0	0	0.4733	0	0	0.2022
領域 G	0.0333	0	0	0	0	0	0	0	0.2022



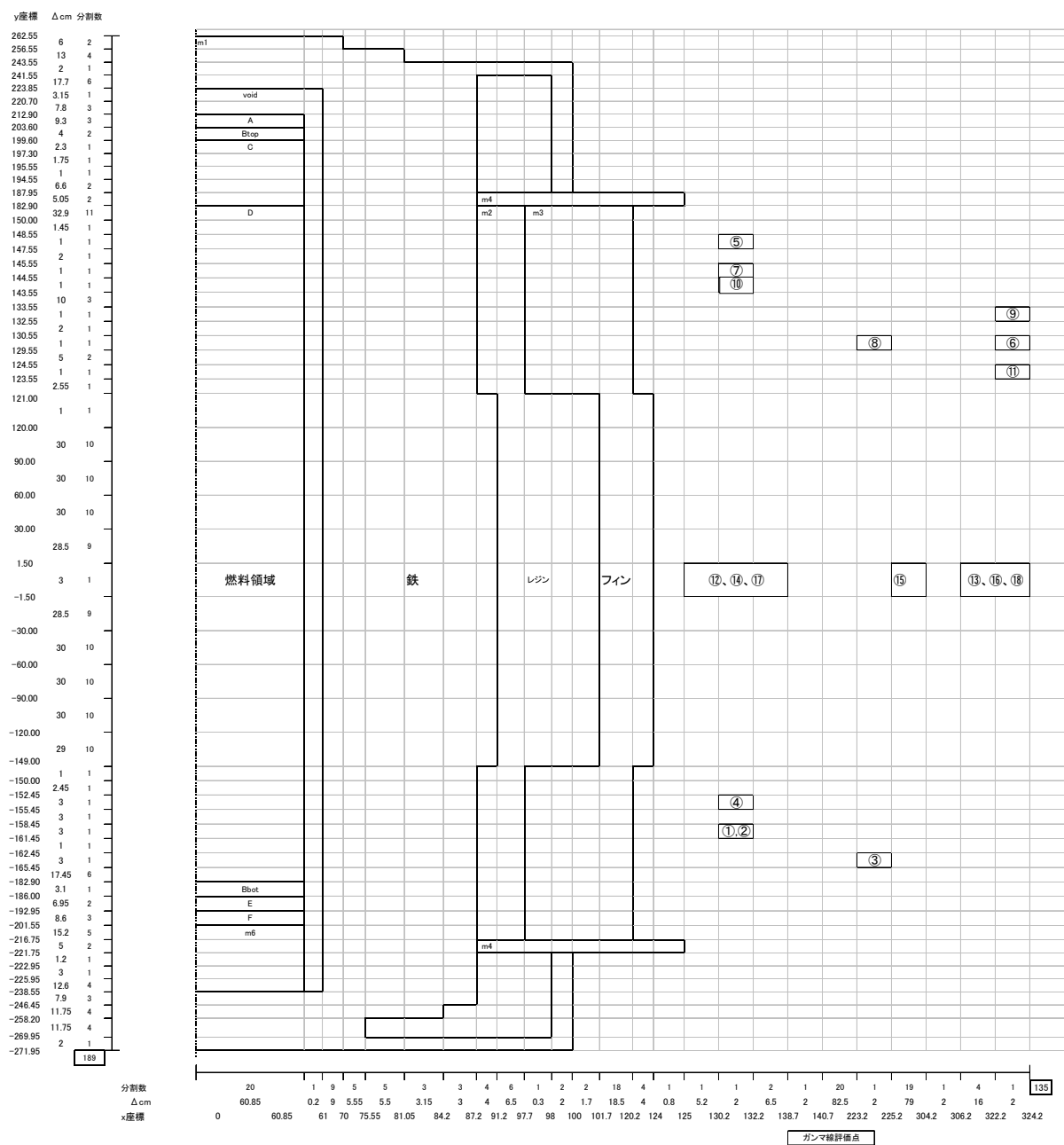


図 2-12 DOT3.5 の FP ガンマ線計算モデル

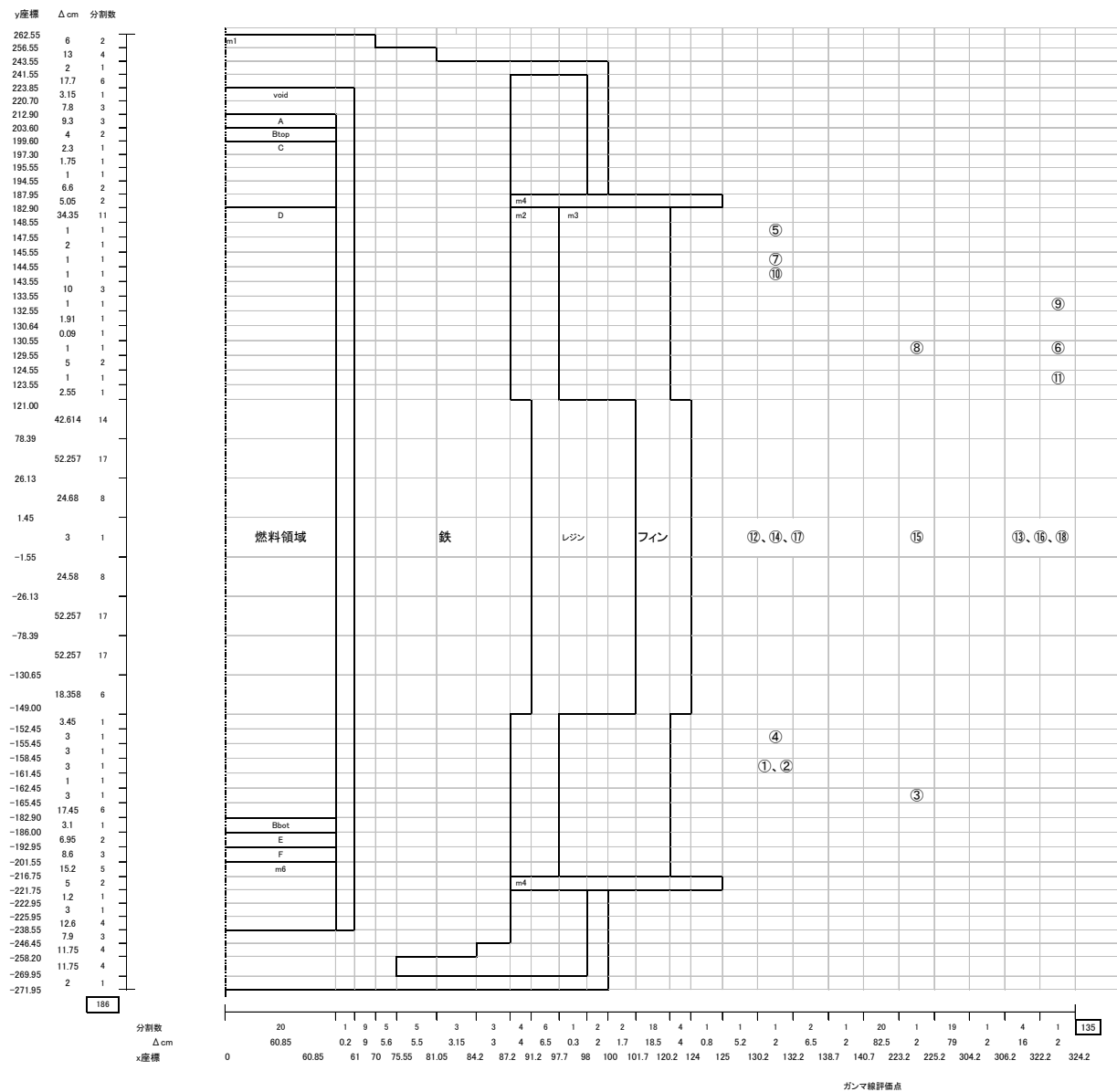


図 2-13 DOT3.5 の Co ガンマ線計算モデル

(3) 線源条件

・ 線源強度

中性子線

AEA-RS-1063 に記載されている中性子線源強度を表 2-16 に示した。

中性子線源強度は AEA テクノロジが実施した燃料集合体の増倍係数を考慮した線源強度計算結果を使用した。

FP ガンマ線

FP ガンマ線源強度は AEA テクノロジが実施した FP 線源評価結果を使用し、表 2-17 に示した。

Co ガンマ線

Co ガンマ線源強度についても、AEA テクノロジが実施した FP 線源評価結果を使用し、表 2-18 に示した。

・ 線源スペクトル

中性子線源スペクトル

中性子線源スペクトルは AEA-RS-1063 (Table.6) に記載されている Watt の式を DLC-23F と SFCX-J33-n50g18 のエネルギー群構造に合わせて積分し、全エネルギー群を合計して 1.0 になるように規格化した。

DLC-23F のエネルギー群構造で作成した中性子線源スペクトルを表 2-19 に、SFCX-J33-n50g18 のエネルギー群構造で作成した中性子線源スペクトルを表 2-20 に示した。

ガンマ線源スペクトル

FP ガンマ線源スペクトルは、AEA-RS-1063(Table.2)に記載された FP ガンマ線スペクトルから DLC-23F 及び SFCX-J33-n50g18 のエネルギー群構造になるように補正した。Co ガンマ線は ^{60}Co より放出されるガンマ線エネルギーの DLC-23F と SFCX-J33-n50g18 に該当するエネルギー群に単位スペクトルを設定した。作成した FP ガンマ線源スペクトルを表 2-21 に、Co ガンマ線源スペクトルを表 2-22 に示した。

表 2-16 中性子線源強度

Upper [cm]	Lower [cm]	Assemblies		AVERAGE MULTIPLIC ATION FACTOR	Assemblies		volume [cm ³]	total [n/cm ³ /s]
		2,4,6,9,11 [n/s]	1,2,5,7,8,10,12 [n/s]		2,4,6,9,11 [n/s]	1,2,5,7,8,10,12 [n/s]		
182.9	150	1.89E+07	2.30E+07	1.29	2.44E+07	2.96E+07	3.83E+05	1.41E+02
150	120	7.60E+07	9.31E+07	1.18	8.97E+07	1.10E+08	3.49E+05	5.72E+02
120	90	1.19E+08	1.38E+08	1.16	1.37E+08	1.60E+08	3.49E+05	8.52E+02
90	60	1.19E+08	1.38E+08	1.18	1.40E+08	1.63E+08	3.49E+05	8.67E+02
60	30	1.19E+08	1.38E+08	1.19	1.41E+08	1.64E+08	3.49E+05	8.74E+02
30	0	1.31E+08	1.48E+08	1.18	1.55E+08	1.75E+08	3.49E+05	9.45E+02
0	-30	1.31E+08	1.48E+08	1.18	1.55E+08	1.75E+08	3.49E+05	9.45E+02
-30	-60	1.40E+08	1.62E+08	1.17	1.64E+08	1.89E+08	3.49E+05	1.01E+03
-60	-90	1.40E+08	1.62E+08	1.17	1.64E+08	1.89E+08	3.49E+05	1.01E+03
-90	-120	1.40E+08	1.62E+08	1.17	1.64E+08	1.89E+08	3.49E+05	1.01E+03
-120	-150	1.27E+08	1.41E+08	1.15	1.46E+08	1.62E+08	3.49E+05	8.82E+02
-150	-182.9	3.12E+07	4.22E+07	1.24	3.86E+07	5.23E+07	3.83E+05	2.38E+02
				total	1.52E+09	1.76E+09	4.26E+06	
					3.28E+09			

表 2-17 FP ガンマ線源強度

Upper [cm]	Lower [cm]	Assemblies			volume [cm ³]	total [γ /s/cm ³]
		1 – 3 [γ /s]	4 – 7 [γ /s]	8 – 12 [γ /s]		
182.9	150	3.63E+14	3.71E+14	2.06E+15	3.83E+05	7.30E+09
150	120	6.78E+14	8.96E+14	3.40E+15	3.49E+05	1.42E+10
120	90	8.58E+14	1.19E+15	3.98E+15	3.49E+05	1.73E+10
90	60	9.42E+14	1.26E+15	4.19E+15	3.49E+05	1.83E+10
60	30	9.42E+14	1.26E+15	4.19E+15	3.49E+05	1.83E+10
30	0	9.42E+14	1.26E+15	4.19E+15	3.49E+05	1.83E+10
0	-30	9.42E+14	1.26E+15	4.19E+15	3.49E+05	1.83E+10
-30	-60	9.42E+14	1.26E+15	4.19E+15	3.49E+05	1.83E+10
-60	-90	9.42E+14	1.26E+15	4.19E+15	3.49E+05	1.83E+10
-90	-120	9.42E+14	1.26E+15	4.19E+15	3.49E+05	1.83E+10
-120	-150	8.43E+14	1.14E+15	4.08E+15	3.49E+05	1.74E+10
-150	-182.9	4.83E+14	6.76E+14	2.66E+15	3.83E+05	9.98E+09
total		9.82E+15	1.31E+16	4.55E+16	4.26E+06	
		6.84E+16				

表 2-18 Co ガンマ線線源強度

Assembly region	total decay rate [Bq]	total decay rate [γ /region]	volume [cm ³]	total decay rate [γ /cm ³ /s]
A	5.73E+12	1.15E+13	1.082E+05	1.06E+08
Btop	–	–	4.653E+04	–
C	5.24E+13	1.05E+14	1.943E+05	5.39E+08
D a	3.23E+13	6.47E+13	6.079E+05	1.06E+08
D b	4.03E+13	8.05E+13	6.079E+05	1.32E+08
D c	4.11E+13	8.23E+13	6.079E+05	1.35E+08
D d	4.13E+13	8.25E+13	6.079E+05	1.36E+08
D e	4.19E+13	8.37E+13	6.079E+05	1.38E+08
D f	4.13E+13	8.25E+13	6.079E+05	1.36E+08
D g	2.32E+13	4.63E+13	6.079E+05	7.62E+07
Bbot	–	–	3.606E+04	–
E	1.04E+13	2.07E+13	8.085E+04	2.56E+08
total	3.30E+14	6.59E+14	4.72E+06	1.76E+09

表 2-19 中性子線線源スペクトル(DLC-23F)

群番号	Wattの式による 計算値	規格化
1	1.72230E-04	1.7245E-04
2	8.94260E-04	8.9539E-04
3	3.47370E-03	3.4781E-03
4	1.39090E-02	1.3927E-02
5	3.43070E-02	3.4350E-02
6	4.78250E-02	4.7885E-02
7	1.06360E-01	1.0649E-01
8	8.81330E-02	8.8244E-02
9	2.33040E-02	2.3333E-02
10	1.18770E-01	1.1892E-01
11	2.15680E-01	2.1595E-01
12	1.96060E-01	1.9631E-01
13	1.33720E-01	1.3389E-01
14	1.60410E-02	1.6061E-02
15	8.18840E-05	8.1988E-05
16	5.93860E-06	5.9461E-06
17	3.92730E-07	3.9323E-07
18	5.52660E-08	5.5336E-08
19	1.34390E-08	1.3456E-08
20	1.89110E-09	1.8935E-09
21	4.22010E-10	4.2254E-10
22	1.21190E-10	1.2134E-10
	9.98737E-01	1.00000E+00

表 2-20 中性子線線源スペクトル(SFCX-J33-n50g18)

群番号	Wattの式による 計算値	規格化
1	2.85160E-04	2.8552E-04
2	1.29780E-03	1.2994E-03
3	4.63040E-03	4.6362E-03
4	9.43930E-03	9.4512E-03
5	1.34920E-02	1.3509E-02
6	1.46410E-02	1.4659E-02
7	1.91130E-02	1.9137E-02
8	6.88240E-02	6.8911E-02
9	7.52250E-02	7.5320E-02
10	2.10520E-02	2.1079E-02
11	2.17930E-02	2.1820E-02
12	2.23930E-02	2.2421E-02
13	3.83800E-02	3.8428E-02
14	3.91840E-03	3.9233E-03
15	3.90010E-03	3.9050E-03
16	7.84140E-03	7.8513E-03
17	1.57450E-02	1.5765E-02
18	4.76120E-02	4.7672E-02
19	4.75730E-02	4.7633E-02
20	2.35280E-02	2.3558E-02
21	4.61330E-02	4.6191E-02
22	6.59930E-02	6.6076E-02
23	6.09840E-02	6.1061E-02
24	1.04000E-01	1.0413E-01
25	6.79700E-02	6.8056E-02
26	5.25060E-02	5.2572E-02
27	7.56600E-02	7.5755E-02
28	6.41300E-03	6.4211E-03
29	7.62110E-03	7.6307E-03
30	1.51250E-02	1.5144E-02
31	2.45420E-03	2.4573E-03
32	2.29280E-03	2.2957E-03
33	2.13600E-03	2.1387E-03
34	1.99600E-03	1.9985E-03
35	1.33330E-02	1.3350E-02
36	3.00100E-03	3.0048E-03
37	5.53310E-04	5.5401E-04
38	7.72100E-03	7.7307E-03
39	1.67580E-04	1.6779E-04
40	3.03140E-04	3.0352E-04
41	1.61820E-03	1.6202E-03
42	7.15990E-05	7.1689E-05
43	4.08180E-06	4.0869E-06
44	2.69930E-07	2.7027E-07
45	3.79830E-08	3.8031E-08
46	9.23670E-09	9.2483E-09
47	1.29980E-09	1.3014E-09
48	2.52120E-10	2.5244E-10
49	1.06810E-10	1.0694E-10
50	1.43900E-11	1.4408E-11
	9.98741E-01	1.0000E+00

表 2-21 FP ガンマ線線源スペクトル

上限 MeV	下限 MeV	total	
		γ/s	規格化
10	8	0	0.0000E+00
8	6.5	0	0.0000E+00
6.5	5	0	0.0000E+00
5	4	0	0.0000E+00
4	3	6.42E+10	1.0048E-05
3	2.5	3.95E+11	6.1780E-05
2.5	2	3.35E+13	5.2360E-03
2	1.66	6.42E+12	1.0046E-03
1.66	1.33	1.04E+14	1.6301E-02
1.33	1	1.04E+14	1.6301E-02
1	0.8	1.60E+14	2.5053E-02
0.8	0.6	4.36E+15	6.8290E-01
0.6	0.4	9.27E+14	1.4508E-01
0.4	0.3	2.45E+12	3.8261E-04
0.3	0.2	8.08E+12	1.2644E-03
0.2	0.1	5.49E+14	8.5973E-02
0.1	5.00E-02	7.93E+13	1.2412E-02
5.00E-02	1.00E-06	5.13E+13	8.0226E-03
total			1.0000E+00

表 2-22 Co ガンマ線線源スペクトル

上限 MeV	下限 MeV	total
		規格化
10	8	0.0000E+00
8	6.5	0.0000E+00
6.5	5	0.0000E+00
5	4	0.0000E+00
4	3	0.0000E+00
3	2.5	0.0000E+00
2.5	2	0.0000E+00
2	1.66	0.0000E+00
1.66	1.33	0.0000E+00
1.33	1	1.0000E+00
1	0.8	0.0000E+00
0.8	0.6	0.0000E+00
0.6	0.4	0.0000E+00
0.4	0.3	0.0000E+00
0.3	0.2	0.0000E+00
0.2	0.1	0.0000E+00
0.1	5.00E-02	0.0000E+00
5.00E-02	1.00E-06	0.0000E+00
total		1.0000E+00

(4) 物質の組成

高さ方向の各層毎の構成物質の体積比より、各領域の物質組成を算出した。ここで、DLC-23F には Cl,Co,Zn,Pb が、SFCX-J33-n50g18 には Cl,Mn,Co,Zn,Mo,Sn,Pb の断面積が含まれていないため、マクロ断面積を作成する際にこれらの断面積は無視するものとした。DLC-23F の計算で用いる物質組成を表 2-23 に、SFCX-J33-n50g18 の計算で用いる物質組成を表 2-24 に示した。

表 2-23 物質組成 (DLC-23F)

元素	m1	m2	m3*	m4	m6	m10*	領域A	領域Btop	領域C	領域D	領域Bbot	領域E	領域F	[atoms/b/cm] 空氣
1	H	3.6315E-02				7.7669E-03			1.9266E-03	2.2421E-03	2.2421E-03	2.2421E-03	2.2421E-03	
5	B	6.6388E-04							4.1620E-04	4.8435E-04	4.8435E-04	4.8435E-04	4.8435E-04	
6	C	2.5277E-02				5.3448E-03								3.9640E-05
7	N													1.0670E-05
8	O	9.4652E-03				3.0262E-03				6.5843E-03				
13	Al	1.9152E-03							1.3689E-02	1.5931E-02	1.5931E-02	1.5931E-02	1.5931E-02	
14	Si								1.8591E-03	2.1636E-03	2.1636E-03	2.1636E-03	2.1636E-03	
24	Cr			1.2438E-02	2.3428E-03		1.8288E-03	5.0362E-06	1.0892E-03	4.3138E-04	4.3470E-04	4.3802E-04	1.6280E-03	
25	Mn			1.3849E-03	2.3341E-04		6.5512E-05	6.5512E-05	3.9981E-05	3.9981E-05	3.9981E-05	3.9981E-05	1.5952E-04	
26	Fe	8.2436E-02		4.5915E-02	7.7840E-03		1.1382E-02	5.2082E-03	4.6155E-03	1.8354E-03	1.8415E-03	1.8477E-03	5.8159E-03	
28	Ni	1.1344E-03		7.7780E-03	1.0924E-03		1.5076E-03	7.1540E-05	5.4318E-04	2.1715E-04	2.1715E-04	2.1715E-04	7.7663E-04	
29	Cu		1.0663E-02						7.8307E-04	9.1131E-04	9.1131E-04	9.1131E-04	9.1131E-04	
40	Zr	1.2584E-02						2.8189E-03	2.0189E-03	1.8482E-03	3.7020E-03	5.5615E-03		
42	Mo			9.9112E-04					7.1239E-06	8.2906E-06	8.2906E-06	8.2906E-06	8.2906E-06	
50	Sn							3.3088E-05	2.1695E-05	2.1695E-05	4.3455E-05	6.5283E-05		
92238	U238									3.2921E-03				

表 2-24 物質組成 (SFCX-J33-n50g18)

元素	m1	m2	m3*	m4	m6	m10*	領域A	領域Btop	領域C	領域D	領域Bbot	領域E	領域F	[atoms/b/cm] 空氣
1	H	3.6315E-02				7.7669E-03			3.8339E-04	4.4618E-04	4.4618E-04	4.4618E-04	4.4618E-04	
5	B-10	1.3211E-04							1.5432E-03	1.7959E-03	1.7959E-03	1.7959E-03	1.7959E-03	
5	B-11	5.3176E-04							4.1620E-04	4.8435E-04	4.8435E-04	4.8435E-04	4.8435E-04	
6	C	2.5277E-02				5.3448E-03								
7	N													3.9640E-05
8	O	9.4652E-03				3.0262E-03				6.5843E-03				1.0670E-05
13	Al	1.9152E-03							1.3689E-02	1.5931E-02	1.5931E-02	1.5931E-02	1.5931E-02	
14	Si								1.8591E-03	2.1636E-03	2.1636E-03	2.1636E-03	2.1636E-03	
24	Cr			1.2438E-02	2.3428E-03		1.8288E-03	5.0362E-06	1.0892E-03	4.3138E-04	4.3470E-04	4.3802E-04	1.6280E-03	
26	Fe			4.5915E-02	7.7840E-03		1.1382E-02	5.2082E-03	4.6155E-03	1.8354E-03	1.8415E-03	1.8477E-03	5.8159E-03	
28	Ni	1.1344E-03		7.7780E-03	1.0924E-03		1.5076E-03	7.1540E-05	5.4318E-04	2.1715E-04	2.1715E-04	2.1715E-04	7.7663E-04	
29	Cu		1.0663E-02						7.8307E-04	9.1131E-04	9.1131E-04	9.1131E-04	9.1131E-04	
40	Zr	1.2584E-02						2.8189E-03	2.0189E-03	1.8482E-03	3.7020E-03	5.5615E-03		
92238	U238									3.2921E-03				

(5) 角度分点数と散乱断面積の P_l 展開次数

DOT3.5 に使用する角度分点数は 96 分点と 160 分点を使用した。散乱断面積の P_l 展開次数は P_3 まで使用した。

(6) 検出器の応答関数

実際の測定に使用された中性子、ガンマ線の応答関数は不明であるが、中性子については AEA-RS-1063 に Diop 等が提示された応答関数⁽⁵⁾(Table.9)を DLC-23F と SFCX-J33-n50g18 のエネルギー群構造に合わせて内挿し、DLC-23F については表 2-25 に、SFCX-J33-n50g18 については、表 2-26 に示した。

ガンマ線の応答関数については、AEA-RS-1063 に記載が無いため、日本原子力学会標準の「放射線遮へい計算のための線量換算係数:2004」⁽⁶⁾(AESJ-SC-R002:2004)の解説表 7.5 に記載されている DLC23/CASK の群構造に対する 1cm 線量等量率への線量換算係数(表 2-27 参照)を応答関数として使用した。

表 2-25 中性子応答関数(DLC-23F)

MeV	$\mu \text{ Sv/h}/(\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
1.356E+01	1.31E+00
1.110E+01	1.31E+00
9.090E+00	1.31E+00
7.270E+00	1.33E+00
5.660E+00	1.39E+00
4.510E+00	1.44E+00
3.535E+00	1.48E+00
2.735E+00	1.52E+00
2.405E+00	1.52E+00
2.090E+00	1.50E+00
1.470E+00	1.43E+00
8.300E-01	1.21E+00
3.305E-01	8.72E-01
5.718E-02	4.69E-01
1.967E-03	3.40E-01
3.420E-04	3.16E-01
6.500E-05	2.70E-01
1.985E-05	2.48E-01
6.880E-06	2.15E-01
2.090E-06	1.77E-01
7.670E-07	1.49E-01
2.070E-07	1.30E-01

表 2-26 中性子応答関数(SFCX-J33)

MeV	$\mu \text{ Sv/h}/(\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
1.5629E+01	1.3100E+00
1.0565E+01	1.3100E+00
8.6502E+00	1.3100E+00
7.1902E+00	1.3100E+00
6.1810E+00	1.3700E+00
5.4950E+00	1.3900E+00
4.9721E+00	1.4200E+00
4.2013E+00	1.4600E+00
3.3454E+00	1.4900E+00
2.9385E+00	1.5100E+00
2.7952E+00	1.5100E+00
2.6589E+00	1.5200E+00
2.4888E+00	1.5300E+00
2.3753E+00	1.5200E+00
2.3555E+00	1.5200E+00
2.3263E+00	1.5200E+00
2.2691E+00	1.5100E+00
2.1252E+00	1.5000E+00
1.9229E+00	1.4800E+00
1.7823E+00	1.4600E+00
1.6551E+00	1.4500E+00
1.4629E+00	1.4300E+00
1.2591E+00	1.3800E+00
1.0139E+00	1.2900E+00
7.6750E-01	1.1800E+00
5.9773E-01	1.0900E+00
4.0896E-01	9.5800E-01
2.8388E-01	8.1500E-01
2.6024E-01	7.8400E-01
2.1990E-01	7.2900E-01
1.8786E-01	6.8100E-01
1.7869E-01	6.6600E-01
1.6998E-01	6.5200E-01
1.6169E-01	6.3800E-01
1.2784E-01	5.8000E-01
9.0270E-02	5.0800E-01
8.1001E-02	4.8700E-01
5.4000E-02	4.6700E-01
2.7751E-02	4.3500E-01
2.5588E-02	4.3100E-01
1.3606E-02	3.9000E-01
1.7447E-03	3.4000E-01
2.6645E-04	3.1100E-01
5.0748E-05	2.7000E-01
1.5459E-05	2.3500E-01
5.3489E-06	2.0700E-01
1.6294E-06	1.6000E-01
6.4521E-07	1.4300E-01
2.5700E-07	1.3000E-01
5.0005E-08	1.3000E-01

表 2-27 ガンマ線 1cm 線量当量換算係数 (DLC23/CASK ガンマ線)

MeV	$\mu\text{ Sv/h}/(\gamma/\text{cm}^2\cdot\text{s})$
10.00	8.480E-02
8.00	7.240E-02
6.50	6.120E-02
5.00	5.190E-02
4.00	4.430E-02
3.00	3.800E-02
2.50	3.300E-02
2.00	2.900E-02
1.66	2.520E-02
1.33	2.100E-02
1.00	1.740E-02
0.80	1.410E-02
0.60	1.050E-02
0.40	7.560E-03
0.30	5.410E-03
0.20	3.230E-03
0.10	1.920E-03
0.05	2.630E-03
0.01	

2.9.2. 計算結果

2.9.1 の計算条件を使用して DOT3.5 による計算を実施した。DOT3.5 による計算結果と、測定値を比較した。中性子の解析結果と測定値の比較を表 2-28 に、ガンマ線の解析結果と測定値の比較を表 2-29 に示した。

表 2-28 中性子の解析結果と測定値の比較

DLC-23F

番号	測定点	フィン先端からの距離(cm)	容器中心軸からの距離(cm)	容器底からの高さ(cm)	測定値 ($\mu\text{Sv/h}$)	フィン効果	計算値 (補正無) ($\mu\text{Sv/h}$)	C/E 補正無	C/E 補正有
1	容器底部のピーク	15.5	139.5	47.5	35.0	1.06	21.788	0.623	0.660
2	容器頂部のピーク	15.5	139.5	467	59.3	1.06	41.968	0.708	0.750
3	燃料領域の中心高さ	15.5	139.5	271.9	52.9	1.06	51.863	0.980	1.039
4		100.0	224	271.9	28.6	1.07	23.863	0.834	0.893
5		181.0	305	271.9	19.0	1.07	13.917	0.732	0.784

SFCX-J33-n50g18

番号	測定点	フィン先端からの距離(cm)	容器中心軸からの距離(cm)	容器底からの高さ(cm)	測定値 ($\mu\text{Sv/h}$)	フィン効果	計算値 (補正無) ($\mu\text{Sv/h}$)	C/E 補正無	C/E 補正有
1	容器底部のピーク	15.5	139.5	47.5	35.0	1.06	30.867	0.882	0.935
2	容器頂部のピーク	15.5	139.5	467	59.3	1.06	57.948	0.977	1.036
3	燃料領域の中心高さ	15.5	139.5	271.9	52.9	1.06	73.647	1.392	1.476
4		100.0	224	271.9	28.6	1.07	33.778	1.181	1.264
5		181.0	305	271.9	19.0	1.07	19.602	1.032	1.104

表 2-29 ガンマ線の解析結果と測定値の比較(1/2)

DLC-23F 番号	測定点	フィン先端からの距離 (cm)	容器中心軸からの距離 (cm)	容器底からの高さ (cm)	メッシュ			θ (deg)	測定値 (μSv/h)	フィン効果	計算値 (補正無) (μSv/h)			C/E 補正無	C/E 補正有
					I(径方向)	J(軸方向, 2次, FP)	J(軸方向, Co)				2次	FP	Co		
1	容器底部のピーク	7.0	131.0	118.0	86	42	42	135	150.0	1.36	1.88	140.6	2.55	145.03	1.315
2		7.0	131.0	118.0	86	42	42	153	162.0	1.36	1.88	140.6	2.55	145.03	1.218
3		100.0	224.0	108.0	110	38	38	153	54.0	1.26	0.81	40.9	1.03	42.77	0.998
4		7.0	131.0	112.0	86	40	40	160	145.0	1.36	1.77	148.0	2.91	152.71	1.432
5		7.0	131.0	420.0	86	148	146	135	210.0	1.36	1.69	182.7	5.94	190.34	1.233
6		200.0	324.0	402.0	135	139	136	135	39.0	1.19	0.52	29.2	1.43	31.13	0.950
7	容器頂部のピーク	7.0	131.0	416.0	86	145	143	153	248.0	1.36	1.78	188.1	5.58	195.48	1.072
8		100.0	224.0	402.0	110	139	136	153	80.0	1.26	0.88	54.1	2.60	57.60	0.907
9		200.0	324.0	405.0	135	141	139	153	42.0	1.19	0.51	28.0	1.43	29.95	0.848
10		7.0	131.0	417.0	86	146	144	180	210.0	1.36	1.76	187.3	5.69	194.79	1.262
11		200.0	324.0	396.0	135	136	133	180	38.0	1.19	0.54	31.4	1.53	33.43	1.047
12		7.0	131.0	271.9	86	94	92	135	80.0	1.36	3.09	94.8	1.13	99.07	1.684
13	燃料領域の中心高さ	200.0	324.0	271.9	135	94	92	135	31.0	1.19	0.69	33.0	0.80	34.52	1.325
14		7.0	131.0	271.9	86	94	92	153	97.0	1.36	3.09	94.8	1.13	99.07	1.389
15		100.0	224.0	271.9	110	94	92	153	49.0	1.26	1.32	50.9	0.82	53.05	1.364
16		200.0	324.0	271.9	135	94	92	153	33.0	1.19	0.69	33.0	0.80	34.52	1.245
17		7.0	131.0	271.9	86	94	92	180	79.0	1.36	3.09	94.8	1.13	99.07	1.705
18		200.0	324.0	271.9	135	94	92	180	31.0	1.19	0.69	33.0	0.80	34.52	1.325

表 2-29 ガンマ線の解析結果と測定値の比較(2/2)

SFCX-J33-n50g18

番号	測定点	フィン先端からの距離 (cm)	容器中心軸からの距離 (cm)	容器底からの高さ (cm)	メッシュ			θ (deg)	測定値 (μSv/h)	フィン効果	計算値 (補正無) (μSv/h)				C/E 補正無	C/E 補正有
					I(径方向)	J(軸方向, 2 次, FP)	J(軸方向, Co)				2 次	FP	Co	合計		
1	容器底部のピーク	7.0	131.0	118.0	86	42	42	135	150.0	1.36	3.48	138.4	2.52	144.42	0.963	1.309
2		7.0	131.0	118.0	86	42	42	153	162.0	1.36	3.48	138.4	2.52	144.42	0.891	1.212
3		100.0	224.0	108.0	110	38	38	153	54.0	1.26	1.50	40.3	1.02	42.79	0.792	0.998
4		7.0	131.0	112.0	86	40	40	160	145.0	1.36	3.29	145.7	2.88	151.87	1.047	1.424
5		7.0	131.0	420.0	86	148	146	135	210.0	1.36	3.09	179.9	5.89	188.84	0.899	1.223
6		200.0	324.0	402.0	135	139	136	135	39.0	1.19	0.95	28.7	1.43	31.08	0.797	0.948
7	容器頂部のピーク	7.0	131.0	416.0	86	145	143	153	248.0	1.36	3.27	185.2	5.53	194.00	0.782	1.064
8		100.0	224.0	402.0	110	139	136	153	80.0	1.26	1.62	53.3	2.61	57.50	0.719	0.906
9		200.0	324.0	405.0	135	141	139	153	42.0	1.19	0.94	27.5	1.43	29.91	0.712	0.847
10		7.0	131.0	417.0	86	146	144	180	210.0	1.36	3.22	184.4	5.64	193.29	0.920	1.252
11		200.0	324.0	396.0	135	136	133	180	38.0	1.19	0.99	30.8	1.53	33.36	0.878	1.045
12		7.0	131.0	271.9	86	94	92	135	80.0	1.36	5.75	93.2	1.12	100.05	1.251	1.701
13	燃料領域の中心高さ	200.0	324.0	271.9	135	94	92	135	31.0	1.19	1.27	32.3	0.63	34.17	1.102	1.312
14		7.0	131.0	271.9	86	94	92	153	97.0	1.36	5.75	93.2	1.12	100.05	1.031	1.403
15		100.0	224.0	271.9	110	94	92	153	49.0	1.26	2.45	50.0	0.73	53.21	1.086	1.368
16		200.0	324.0	271.9	135	94	92	153	33.0	1.19	1.27	32.3	0.63	34.17	1.036	1.232
17		7.0	131.0	271.9	86	94	92	180	79.0	1.36	5.75	93.2	1.12	100.05	1.266	1.722
18		200.0	324.0	271.9	135	94	92	180	31.0	1.19	1.27	32.3	0.63	34.17	1.102	1.312

2.9.3. まとめ

TN-12型輸送容器のベンチマーク解析についてDOT3.5コードを使用し、S160分点によるC/Eを確認した。使用した群定数ライブラリはDLC23FとSFCX-J33-n50g18である。得られた中性子のC/Eは、引用文献に記載されているMCBENDコードによるC/Eにほぼ合うことを確認した。ガンマ線のC/EはMCBENDのC/Eに比べて高目の結果となっているが、MCBENDの解析に使用された線量換算係数が不明なため、DOT3.5による解析では1cm線量当量率換算係数を使用しており、この線量換算係数による違いが生じている可能性と、断面積が異なる事による影響を考慮すると、問題ないと考えられる。

(参考文献)

- (1)“NEACRP Intercomparison of Codes for the Shielding Assessment of Transport packaged-Solution for the TN12 Benchmark Problem by Mrs H.Locke,”AEA-RS-1063, June (1991).
- (2)“CASK-40 Group Coupled Neutrons and Gamma-Ray Cross-section Data”, DLC-023, RSIC Data Library Collection, (1973).
- (3)大西 世紀他,“252Cf核分裂中性子源を用いた遮へい透過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J33 の適用性に関する研究,”海上技術安全研究所報告, 第7巻, 第3号, (2007).
- (4)日本原子力学会標準,“使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準:2006”, AESJ-SC-F006:2006, (2006).
- (5)“Detector Response Function for the Neutron Case Note to NEACRP participants from C M Dio CEA”,(1990).
- (6)日本原子力学会標準,“放射線遮へい計算のための線量換算係数:2004”,AESJ-SC-R002:2004

3. NH-25 型輸送容器

3.1. 解析モデル

3.1.1. NH-25 型輸送容器の概要

NH-25 型輸送容器の縦断面図を図 3-1 に示す。同輸送容器は主として軽水炉の PIE 用燃料を輸送するための小型キャスクであり、収納体数は 1~2 体である。今回は PWR 使用済燃料 1 体収納時の遮蔽解析を行った。

NH-25 型輸送容器の本体はステンレス鋼の 3 重円筒であり、内筒と中間円筒の間には、ガンマ線遮蔽材の鉛が、中間円筒と外筒の間には中性子遮蔽材のエチレングリコール水溶液(以下 EG 水という)が配置されている。本体の鉛は、内筒底部に回り込んでいる。また、蓋の内部にも鉛が配置されている。

輸送時には容器の頭部と底部に緩衝体に取り付けられるが、本解析の対象である線量測定時には容器は縦置きされており、緩衝体は取り外されていた。

内筒内にはボトルと呼ばれる収納装置に収納された燃料集合体が装荷されている。ボトルの中は水で満たされている。

内筒とボトルの間は水が入れているが、本解析の対象である線量測定時にはほぼ半分の高さまで水抜きされていた。

3.1.2. MCNP 解析モデル

解析モデルを図 3-2 に示す。また、各部の原子個数密度を表 3-1 に示す。原子個数密度は文献 1)及び文献 2)によった。

半径方向のメッシュ間隔は次のとおりとした。なお、内筒内及びボトル内の水については形状どおりとし、特に分割していない。

- ・ ステンレス鋼 : 0.6~1.75cm
- ・ 鉛 : 3cm
- ・ EG 水 : 1cm

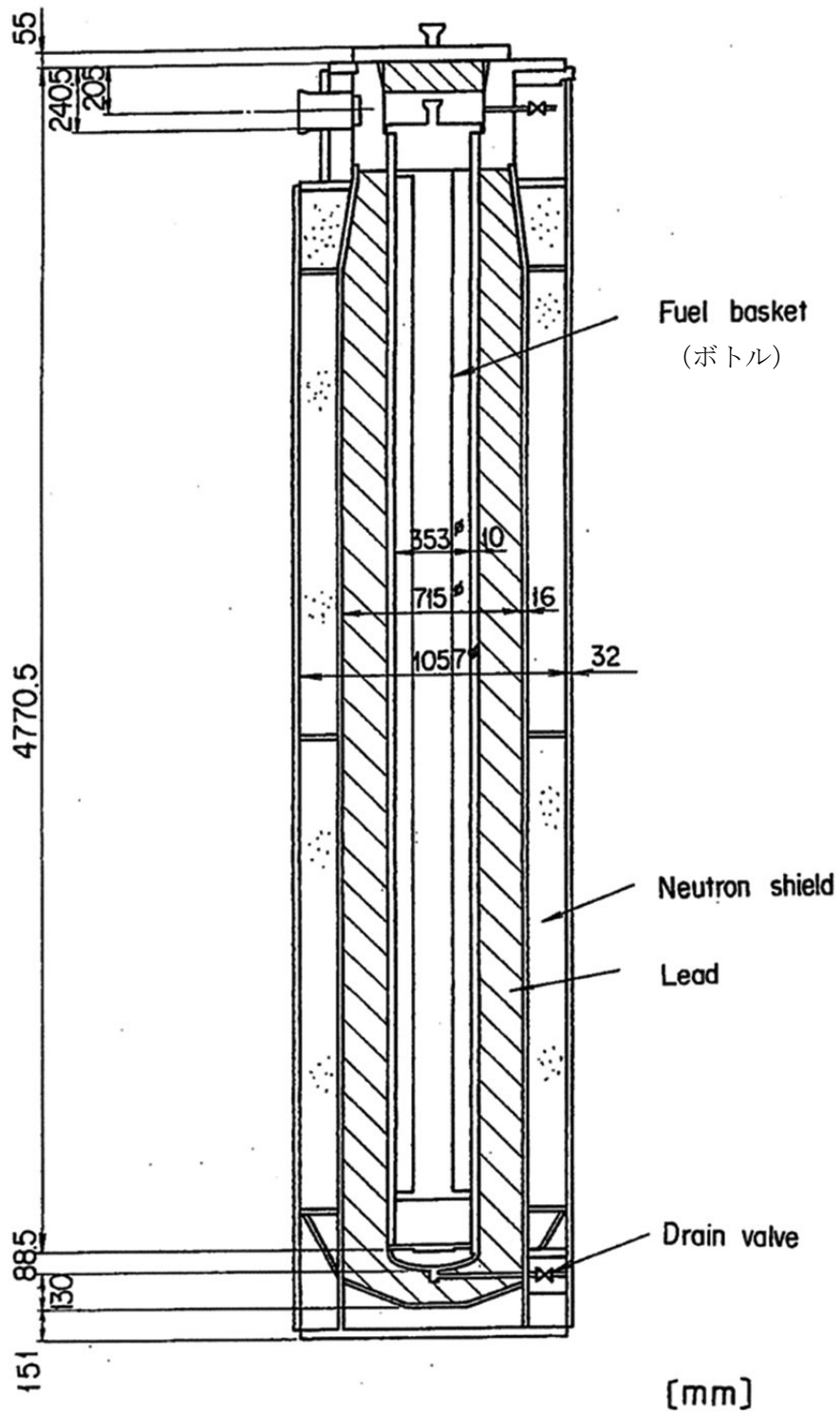


図 3-1 NH-25 型輸送容器断面⁽¹⁾

表 3-1 計算モデル各部の原子個数密度⁽¹⁾⁽²⁾

元素等	燃料集合体				ステンレス鋼	鉛	EG 水	水	空気
	上部ノズル	上部プレナム	下部ノズル	有効部					
H	5.010E-02	3.637E-02	4.890E-02	3.945E-02			6.565E-02	6.674E-02	
B-10									
C		2.570E-05			3.173E-04		1.185E-02		
N									3.653E-05
O	2.506E-02	1.820E-02	2.447E-02	3.408E-02			2.690E-02	3.337E-02	9.125E-06
Si	2.978E-04	1.466E-04	2.854E-04		1.741E-03				
Cr	3.343E-03	1.418E-03	3.482E-03		1.741E-02				
Mn	2.735E-04	1.405E-04	2.553E-04		1.734E-03				
Fe	9.568E-03	4.702E-03	9.195E-03		5.787E-02				
Ni	2.804E-03	6.570E-04	3.547E-03		8.112E-03				
Zr	2.579E-03	4.255E-03	3.052E-03	4.366E-03					
Mo	1.478E-04		2.280E-04						
Pb						3.296E-02			
U-235				8.567E-05					
U-238				6.792E-03					
合計	9.417E-02	6.591E-02	9.341E-02	8.477E-02	8.718E-02	3.296E-02	1.044E-01	1.001E-01	4.566E-05

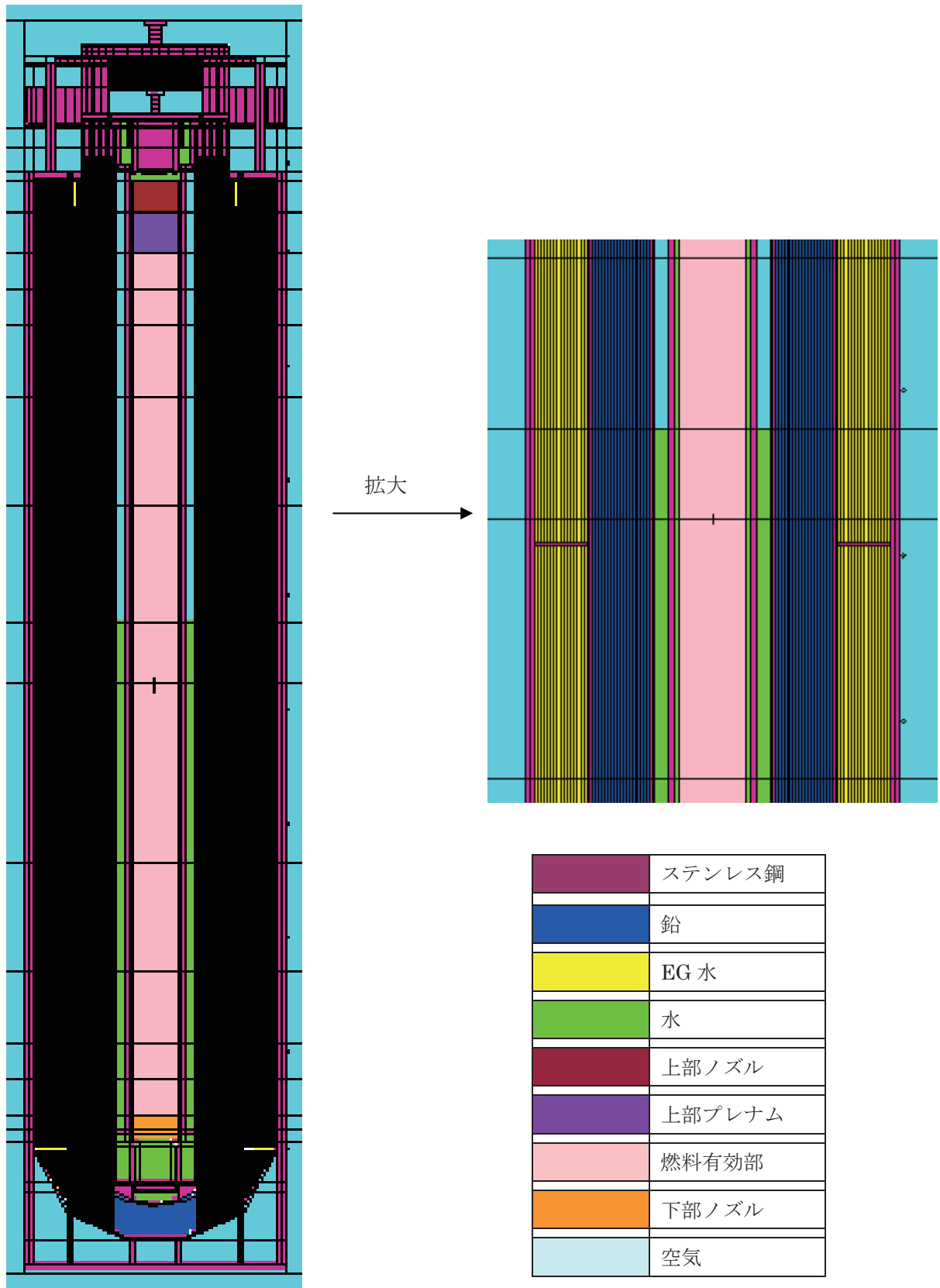


図 3-2 NH-25 型輸送物 MCNP モデル(ガンマ線計算用)

3.2. 線源強度の設定

3.2.1. 中性子線源強度の設定

(1) 冷却期間の補正

中性子線源強度は、PIE により表 3-2⁽³⁾に示すように 5.5 年冷却における UO_2 体積当たりの線源強度が得られているが、NH-25 型キャスクの線量測定時（1050 日冷却）と冷却期間が異なっている。そのため、ORIGEN2 コードにより冷却期間の違いを補正した。表 3-3 に補正結果を示す。

表 3-2 中性子線源強度測定値（5.5 年冷却）

位置	中性子線源強度(n/s/cm ³)
上部	4.05×10^3
中部	4.87×10^3
下部	4.69×10^3

表 3-3 ORIGEN2(82)コードによる中性子線源強度の減衰と測定値の補正

冷却期間		5.5 年	1050 日	比率
ORIGEN2 中性子線源強度(n/s/MTU)		2.929E+08	3.275E+08	1.118
	位置	中性子線源強度(n/s/cm ³)		
中性子線源強度測定値	上部	4.05E+03	4.528E+03	
	中部	4.87E+03	5.445E+03	
	下部	4.69E+03	5.244E+03	

(2) 中性子増倍の考慮

中性子実効増倍率は文献(4)によると 0.613 である。全中性子源強度は次式により求められる。

$$N = \frac{N_0}{1 - k_{\text{eff}}}$$

ここで、

N ：増倍を考慮した全中性子源強度

N_0 ：一次中性子源強度

k_{eff} ：中性子実効増倍率

増倍を考慮した線源強度を表 3-4 に示す。

表 3-4 全中性子線源強度 (1050 日冷却)

位置	中性子線源強度(n/s/cm ³)
上部	1.17E+04
中部	1.41E+04
下部	1.36E+04

(3) 遮蔽計算に用いる中性子源強度

中性子源強度は軸方向に分布を有しており、文献(1)によれば中央部は比較的平坦であるが、端部では急激に中性子源強度が低下する。文献(3)では、中性子源強度が低下する端部の線源強度は測定されていないため、文献(1)のキャスク内 $^{232}\text{Th}(\text{n},\text{f})\text{Reaction Rate}$ の軸方向分布を参考にして軸方向分布を設定する。

軸方向の分割は 24 分割とする。また、文献(3)の測定点は 3 点と少ないので、上下対象であると仮定して設定する。

文献(3)の中性子源強度測定値（上下対象として 6 点をプロット）と、文献(1)のキャスク内 $^{232}\text{Th}(\text{n},\text{f})\text{Reaction Rate}$ 及び中性子線源の軸方向分布設定の比較を図 3-3 に示す。

遮蔽解析に用いる中性子源強度を表 3-5 に示す。なお、 UO_2 体積は以下のとおり計算した。

$$V=\pi/4\times d^2\times L\times n$$

ここで、

V：燃料集合体の UO_2 体積(cm^3)

d：ペレット径=0.93 cm

L：燃料有効長=364.2 cm

n：燃料棒数=179 本

よって、

$$V=\pi/4\times 0.93^2\times 364.2\times 179=44284 \text{ cm}^3$$

表 3-5 軸方向分布を考慮した中性子源強度

位置	中性子線源強度 (n/s/cm ³)	備考 (表 2-3 参照)	中性子線源強度 (n/s/領域)
1/24	2.925E+03	上部の 1/4	5.398E+06
2/24	5.851E+03	上部の 1/2	1.080E+07
3,4/24	1.170E+04	上部の値	4.318E+07
5～7/24	1.355E+04	下部の値 (対称)	7.501E+07
8～17/24	1.407E+04	中部の値	2.596E+08
18～20/24	1.355E+04	下部の値	7.501E+07
21,22/24	1.170E+04	上部の値 (対称)	4.318E+07
23/24	5.851E+03	上部の 1/2 (対称)	1.080E+07
24/24	2.925E+03	上部の 1/4 (対称)	5.398E+06
合計			5.284E+08

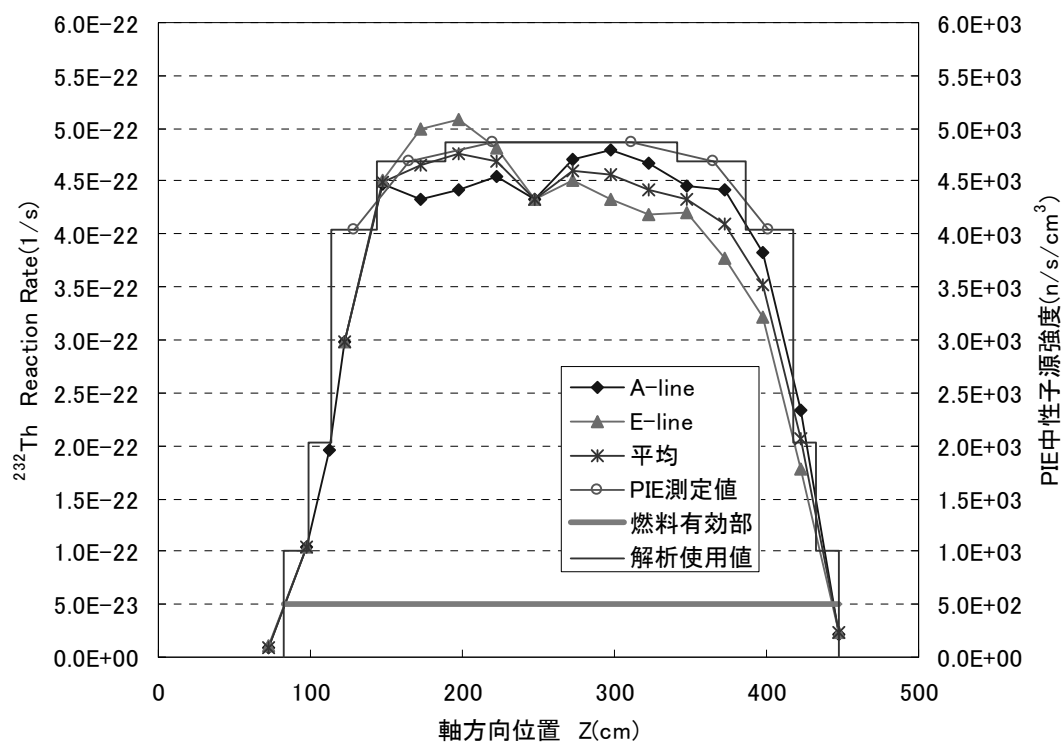


図 3-3 中性子源強度測定値の比較と軸方向分布の設定

3.2.2. ガンマ線源強度の設定

(1) 設定方法

中性子線源強度の評価に用いた ORIGEN2 データに基づいて、中性子源強度が表 3-5 の値と一致するようにピーキングファクター(PF)を設定して比出力を調整し、ORIGEN2 コードによりガンマ線源強度を求めた。表 3-6 に設定した PF を示す。

表 3-6 軸方向分布を考慮した PF

位置	備考	PF
1/24	上部の 1/4	0.813
2/24	上部の 1/2	0.942
3,4/24	上部の値	1.092
5～7/24	下部の値 (対称)	1.127
8～17/24	中部の値	1.136
18～20/24	下部の値	1.127
21,22/24	上部の値 (対称)	1.092
23/24	上部の 1/2 (対称)	0.942
24/24	上部の 1/4 (対称)	0.813

(2) 遮蔽計算に用いるガンマ源強度

ORIGEN2 コードにより計算したガンマ線源強度を表 3-7 に示す。

ここで、ORIGEN2 コードで出力されるガンマ線のエネルギースペクトルのうち、照射線量率への寄与が小さい低エネルギー側の 1～8 群と高エネルギー側の 16～18 群は MCNP の計算上無視した。

表 3-7 軸方向分布を考慮したガンマ線源強度 (1050 日冷却)

エネルギー 群数	平均エネルギー (MeV)	ガンマ線源強度(photons/s/領域)				
		1/24	2/24	3,4/24	5~7/24	18~20/24
		24/24	23/24	21,22/24	18~20/24	
1	0.01	9.75E+13	1.15E+14	2.71E+14	4.22E+14	1.42E+15
2	0.025	2.26E+13	2.67E+13	6.31E+13	9.81E+13	3.30E+14
3	0.0375	2.32E+13	2.73E+13	6.45E+13	1.00E+14	3.37E+14
4	0.0575	1.99E+13	2.35E+13	5.56E+13	8.64E+13	2.91E+14
5	0.085	1.36E+13	1.61E+13	3.81E+13	5.92E+13	1.99E+14
6	0.125	1.47E+13	1.74E+13	4.14E+13	6.44E+13	2.17E+14
7	0.225	1.17E+13	1.39E+13	3.31E+13	5.14E+13	1.73E+14
8	0.375	6.72E+12	8.00E+12	1.90E+13	2.97E+13	9.98E+13
9	0.575	1.01E+14	1.25E+14	3.08E+14	4.84E+14	1.63E+15
10	0.85	2.64E+13	3.54E+13	9.40E+13	1.50E+14	5.07E+14
11	1.25	4.86E+12	6.37E+12	1.66E+13	2.62E+13	8.86E+13
12	1.75	2.75E+11	3.48E+11	8.82E+11	1.39E+12	4.70E+12
13	2.25	3.64E+11	4.21E+11	9.72E+11	1.50E+12	5.05E+12
14	2.75	7.35E+09	9.27E+09	2.34E+10	3.69E+10	1.24E+11
15	3.5	9.24E+08	1.17E+09	2.96E+09	4.67E+09	1.58E+10
16	5.0	8.60E+04	1.75E+05	7.01E+05	1.22E+06	4.22E+06
17	7.0	9.91E+03	2.01E+04	8.09E+04	1.41E+05	4.86E+05
18	9.5	1.14E+03	2.31E+03	9.29E+03	1.61E+04	5.59E+04
全合計		1.20E+16				
mcnp 用合計		5.01E+15				

3.3. 評価点

3.3.1. 中性子評価点

(1) 測定位置

文献(1)に示されている中性子線量当量率測定点は、図 3-4、図 3-5 及び表 3-8～表 3-11 に示すとおりである。

(2) タリー

中性子タリーは表 3-12 に示す仕様とする。線量当量率換算係数は、測定器の換算係数に合わせ、表 3-13 に示す値を用いる。

表 3-8 側部軸方向線量分布測定点

No.	図 3-1		図 3-2		No.	図 3-1		図 3-2		No.	図 3-1		図 3-2	
	断面 No.	z 座標	周方向	表面から の距離		断面 No.	z 座標	周方向	表面から の距離		断面 No.	z 座標	周方向	表面から の距離
1	-2	-400	A	20	14	-2	-400	A	100	27	-2	-400	G	20
2	-1	0			15	-1	0			28	-1	0		
3	0	450			16	0	450			29	0	450		
4	1	827			17	1	827			30	1	827		
5	2	1310			18	2	1310			31	2	1310		
6	3	1794			19	3	1794			32	3	1794		
7	4	2277			20	4	2277			33	4	2277		
8	4.5	2519			21	4.5	2519			34	4.5	2519		
9	5	2760			22	5	2760			35	5	2760		
10	6	3244			23	6	3244			36	6	3244		
11	7	3727			24	7	3727			37	7	3727		
12	8	4210			25	8	4210			38	8	4210		
13	9	4620			26	9	4620			39	9	4620		

表 3-9 頭部軸方向測定点

No.	図 3-1、z 座標	蓋からの距離(cm)
40	-235	18
41	-455	40

表 3-10 中央部周方向測定点

No.	図 3-1		図 3-2	
	断面 No.	z 座標	周方向	表面からの距離
11	7	3727	A	200
42		3727	E	200
43		3727	F	200
37		3727	G	200
44		3727	H	200

表 3-11 スペクトル評価点

No.	図 3-1		図 3-2	
	断面 No.	z 座標	周方向	表面からの距離
32	3	1794	G	200
37	7	3727	G	200
19	3	1794	A	1000

表 3-12 中性子タリー

項目	内容
タリー	トラックレンジスエスティメータ
形状	半径 10cm の球 (表面等に干渉する場合は適宜小さくする)
線量換算係数	ICRP Pub.21 ⁵⁾ に補正因子を考慮した線量換算係数使用 (表 3-6 参照)

表 3-13 線量当量率換算係数

エネルギー (MeV)	ICRP Pub.21 中性子 線量当量率換算係数 (mrem/h)/(n/cm ² /s)	補正因子 ϵ	補正後 中性子線量 当量率換算係数 (μ Sv/h)/(n/cm ² /s)
2.50E-08	3.85E-03	0.54	2.08E-02
1.00E-07	4.17E-03	0.6	2.50E-02
1.00E-06	4.55E-03	0.65	2.96E-02
1.00E-05	4.35E-03	1.0	4.35E-02
1.00E-04	4.17E-03	1.44	6.00E-02
1.00E-03	3.70E-03	2.0	7.40E-02
1.00E-02	3.57E-03	3.5	1.25E-01
1.00E-01	2.08E-02	1.3	2.70E-01
5.00E-01	7.14E-02	1.05	7.50E-01
1.00E+00	1.18E-01	1.0	1.18E+00
2.00E+00	1.43E-01	0.95	1.36E+00
5.00E+00	1.47E-01	0.8	1.18E+00
1.00E+01	1.47E-01	0.6	8.82E-01
2.00E+01	1.54E-01	0.45	6.93E-01

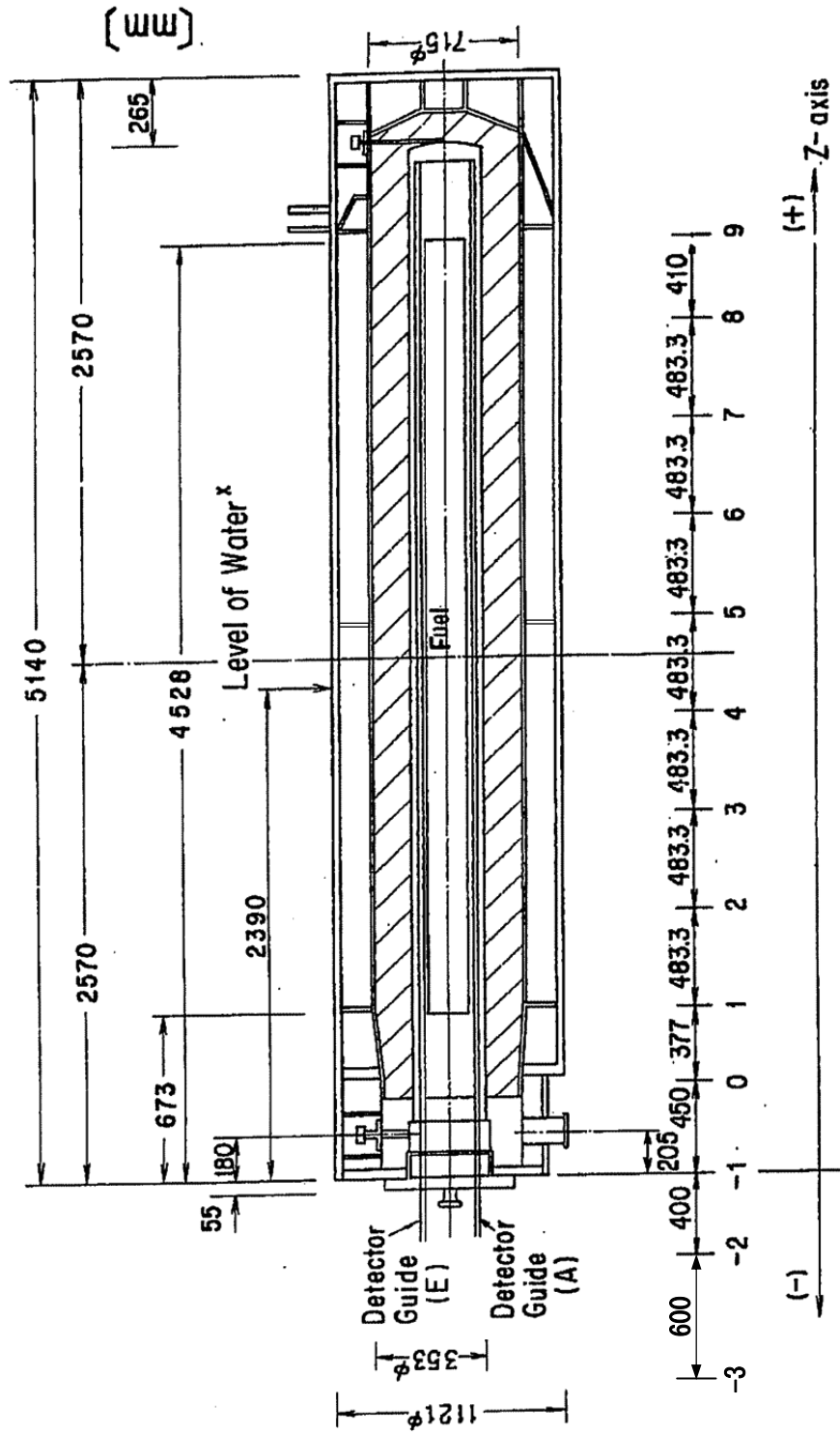
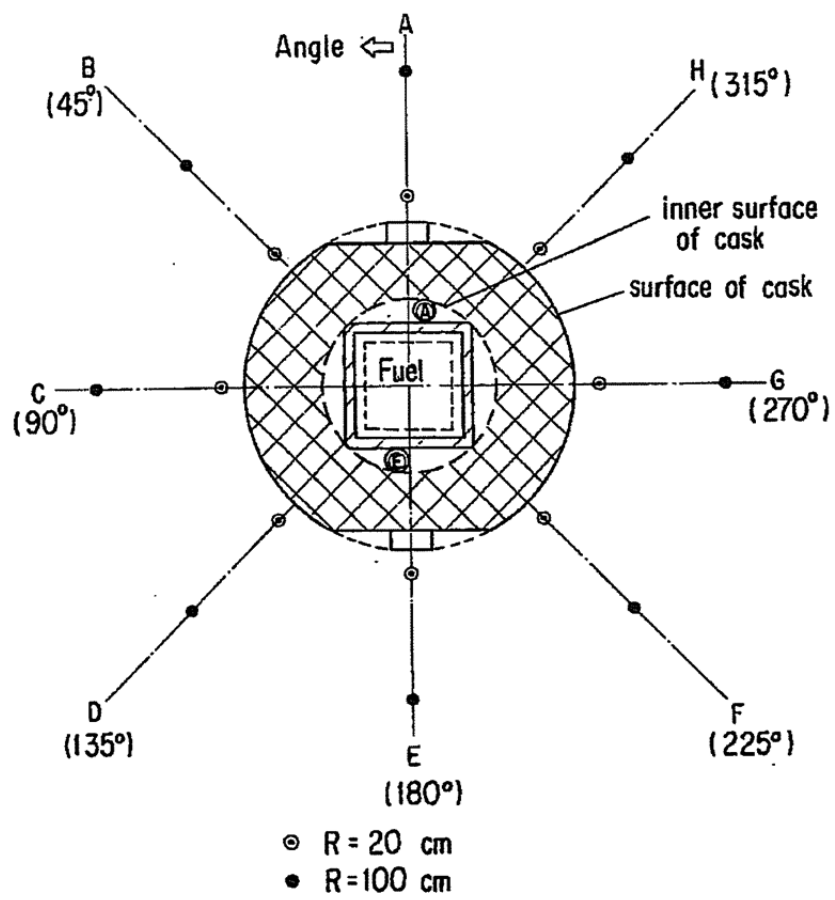


図 3-4 軸方向測定位置 (1)



(R : Distance from the surface of the cask)

图 3-5 周方向測定位置⁽¹⁾

3.3.2. ガンマ線評価点

(1) 測定位置

文献1)に示されているガンマ線線量率測定点の内、表3-14に示す点の評価を行った。

(2) タリー

ガンマ線タリーは表3-15に示す仕様とする。

また、線量率換算係数を表3-16に示す。線量率換算係数は、ICRU REPORT 47の線量率換算係数を $1(\text{nR cm}^2)=3600 \times 10^{-6}(\text{mR/h})/(\text{photons/cm}^2/\text{s})$ で換算した値を使用した。

表3-14 側部軸方向線量分布測定点

No.	図 3-1		図 3-2		No.	図 3-1		図 3-2	
	断面 No.	z 座標	周方向	表面から の距離		断面 No.	z 座標	周方向	表面から の距離
1	-3	-1000	A, C, E, G	0 (表面)	14	-3	-1000	A, C, E, G	100
2	-2	-400			15	-2	-400		
3	-1	0			16	-1	0		
4	0	450			17	0	450		
5	1	827			18	1	827		
6	2	1310			19	2	1310		
7	3	1794			20	3	1794		
8	4	2277			21	4	2277		
9	5	2760			22	5	2760		
10	6	3244			23	6	3244		
11	7	3727			24	7	3727		
12	8	4210			25	8	4210		
13	9	4620			26	9	4620		

表3-15 ガンマ線タリー

項目	内容
タリー	ネクストイベントエスティメータ(点形状)
形状	除外半径 0.5cm

表 3-16 ガンマ線線量率換算係数

エネルギー (MeV)	ICRU REPORT 47 ガンマ線線量率換算係数	
	(nR cm ²)	(mR/h) / (photons/cm ² /s)
1.00E-02	0.848	3.05E-03
1.50E-02	0.357	1.29E-03
2.00E-02	0.192	6.91E-04
3.00E-02	0.0823	2.96E-04
4.00E-02	0.0489	1.76E-04
5.00E-02	0.0369	1.33E-04
6.00E-02	0.0330	1.19E-04
8.00E-02	0.0350	1.26E-04
1.00E-01	0.0424	1.53E-04
1.50E-01	0.069	2.48E-04
2.00E-01	0.098	3.53E-04
3.00E-01	0.157	5.65E-04
4.00E-01	0.216	7.78E-04
5.00E-01	0.271	9.76E-04
6.00E-01	0.324	1.17E-03
8.00E-01	0.422	1.52E-03
1.00E+00	0.509	1.83E-03
1.50E+00	0.699	2.52E-03
2.00E+00	0.857	3.09E-03
3.00E+00	1.127	4.06E-03

3.4. 計算条件

3.4.1. 中性子計算条件

(1) 中性子源スペクトル

中性子線源全体としては二次中性子源の方が大きいので、 ^{239}Pu の核分裂スペクトルを用いる。MCNP へのインプットとしては Watt の式を使用する。

(2) 断面積

JENDL3.3 に基づく断面積ライブラリを用いる。

(3) FSD 低減方法

WWG により生成させた WW を使用する。

3.4.2. ガンマ線計算条件

(1) ガンマ線スペクトル

表 3-7 に示した ORIGEN2 の計算結果を用いる。

(2) 断面積

MCPLIB02 を用いる。

(3) FSD 低減方法

① WWG により生成させた WW を使用する。

② スペクトルカット：表 3-7 に示すように、低エネルギー側 8 群と高エネルギー側 3 群を無視する。

③ 密度減少法：WWG による WW 生成において、遮蔽体の密度を 60%、80%、100% と順次上げていく密度減少法を使用する。

3.5. 計算結果

3.5.1. 中性子計算結果

(1) 中性子線量当量率

中性子線量当量率計算結果と測定値との比較を表 3-17～表 3-20 及び図 3-6～図 3-9 に示す。なお、測定値は文献値を $1\text{mrem/h}=10\mu\text{Sv/h}$ で換算した値である。

輸送容器側部の軸方向中性子線量当量率分布の計算値は、周方向 A の再下端の評価点のみ測定値を僅かに下回っている他は、測定値より若干高めとなっており、分布は良く一致している。計算値の方が若干高くなる原因としては、中性子源のスペクトルを安全側に ^{239}Pu としていることが考えられる。

輸送容器頭部の軸方向中性子線量当量率分布の計算値は、測定値より若干高めとなっており、分布は良く一致している。

輸送容器側部の周方向中性子線量当量率分布の計算値は、測定値より若干高めとなっている。計算値の周方向変化がほとんどないのに対し、測定値は 270° 方向(G)が 180° (E)、 360° (A)方向と比べて若干低くなっている。

(2) 中性子スペクトル

中性子スペクトルの計算結果を表 3-21 に、測定値を表 3-22 に示す。また、スペクトルの比較を図 3-10～図 3-12 に示す。計算結果の各エネルギーの FSD は比較的大きく、特に、 5MeV より上のエネルギーでは 0.1 を超え、エネルギーが大きくなるほど大きくなっている。

表 3-17 側部軸方向線量分布測定点の中性子線量当量率 (A) (μSv/h)

No.	計算値	FSD	測定値 ¹⁾	C/E	No.	計算値	FSD	測定値 ¹⁾	C/E
1	2.52E-01	0.0351	1.95E-01	1.294	14	3.23E-01	0.0584	2.29E-01	1.409
2	5.71E-01	0.0187	3.39E-01	1.683	15	4.63E-01	0.0445	4.31E-01	1.073
3	1.11E+00	0.0195	8.42E-01	1.319	16				
4	1.74E+00	0.0247	1.26E+00	1.379	17	1.19E+00	0.0394	9.80E-01	1.218
5	5.46E+00	0.0223	4.14E+00	1.319	18				
6	7.18E+00	0.0185	5.60E+00	1.282	19	2.35E+00	0.0333	2.08E+00	1.131
7	6.22E+00	0.0186	5.05E+00	1.231	20				
8	5.34E+00	0.0193	4.44E+00	1.202	21				
9	4.78E+00	0.0199	3.84E+00	1.246	22	2.13E+00	0.0350	2.02E+00	1.056
10	4.23E+00	0.0180	3.51E+00	1.204	23				
11	3.79E+00	0.0184	3.23E+00	1.174	24	1.50E+00	0.0438	1.33E+00	1.127
12	2.14E+00	0.0287	1.72E+00	1.241	25				
13	7.66E-01	0.0306	7.87E-01	0.973	26	6.30E-01	0.0356	6.57E-01	0.958

表 3-18 側部軸方向線量分布測定点の中性子線量当量率 (G) (μSv/h)

No.	計算値	FSD	測定値 ¹⁾	C/E
27				
28	7.28E-01	0.0154	6.87E-01	1.060
29	1.07E+00	0.0228	8.03E-01	1.330
30	1.78E+00	0.0175	9.74E-01	1.823
31	5.16E+00	0.0152	4.94E+00	1.045
32	6.71E+00	0.0121	6.46E+00	1.039
33	6.06E+00	0.0139	5.77E+00	1.050
34				
35	4.76E+00	0.0142	4.25E+00	1.120
36	4.23E+00	0.0132	3.73E+00	1.134
37	3.78E+00	0.0125	2.98E+00	1.269
38	2.23E+00	0.0146	1.52E+00	1.468
39	7.34E-01	0.0215	6.35E-01	1.155

表 3-19 頭部軸方向測定点の中性子線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

No.	計算値	FSD	測定値 ⁽¹⁾	C/E
40	3.28E-01	0.0138	2.72E-01	1.206
41	2.51E-01	0.0180	1.91E-01	1.316

表 3-20 中央部周方向測定点の中性子線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

No.	計算値	FSD	測定値 ⁽¹⁾	C/E
11(A)	3.79E+00	0.0184	3.23E+00	1.174
42(E)	3.79E+00	0.0184	3.50E+00	1.083
43(F)	3.73E+00	0.0173	3.20E+00	1.166
37(G)	3.78E+00	0.0125	2.82E+00	1.269
44(H)	3.73E+00	0.0173	2.98E+00	1.252

注) 計算値は対称性により、No.42=No.11、No.43=No.44 とした。

表 3-21 中性子スペクトル計算値 (n/s/cm²)

エネルギー 群	上限エネルギー (MeV)	測定点 No.					
		32 (G)		37 (G)		19 (A)	
		平均	FSD	平均	FSD	平均	FSD
1	1.0E-08	6.30E-02	0.077	3.30E-02	0.0906	2.39E-02	0.1325
2	1.0E-07	4.77E+00	0.0126	2.27E+00	0.0163	1.63E+00	0.0193
3	1.6E-07	9.04E-01	0.0201	4.32E-01	0.0293	3.00E-01	0.0334
4	2.5E-07	2.53E-01	0.0496	1.11E-01	0.0684	7.31E-02	0.0675
5	4.0E-07	8.51E-02	0.0627	4.18E-02	0.1014	3.21E-02	0.1358
6	6.3E-07	8.62E-02	0.0743	4.11E-02	0.0991	2.39E-02	0.1115
7	1.0E-06	9.68E-02	0.0827	4.51E-02	0.0860	2.75E-02	0.1240
8	1.6E-06	8.98E-02	0.0611	5.14E-02	0.0876	2.76E-02	0.0982
9	2.5E-06	9.12E-02	0.0680	4.53E-02	0.0807	3.69E-02	0.1059
10	4.0E-06	8.72E-02	0.0728	4.95E-02	0.0705	3.74E-02	0.1085
11	6.3E-06	9.76E-02	0.0715	4.39E-02	0.0686	3.29E-02	0.1253
12	1.0E-05	1.06E-01	0.0608	5.06E-02	0.0761	3.58E-02	0.1051
13	1.6E-05	1.04E-01	0.0624	7.34E-02	0.2118	3.53E-02	0.1146
14	2.5E-05	9.80E-02	0.0670	6.71E-02	0.3061	2.86E-02	0.1131
15	4.0E-05	9.55E-02	0.0684	4.93E-02	0.0608	3.23E-02	0.1167
16	6.3E-05	9.01E-02	0.0649	5.47E-02	0.0916	4.04E-02	0.1073
17	1.0E-04	9.19E-02	0.0667	4.30E-02	0.0661	3.21E-02	0.1077
18	1.6E-04	1.06E-01	0.0631	5.73E-02	0.0745	3.41E-02	0.0948
19	2.5E-04	1.13E-01	0.0681	5.89E-02	0.1072	3.68E-02	0.1254
20	4.0E-04	5.10E-02	0.0901	3.17E-02	0.0983	1.73E-02	0.1646
21	6.3E-04	9.73E-02	0.0800	4.64E-02	0.0756	3.45E-02	0.1356
22	1.0E-03	9.39E-02	0.0701	5.35E-02	0.1153	3.45E-02	0.1086
23	1.6E-03	1.07E-01	0.0813	4.66E-02	0.0717	3.71E-02	0.1282
24	2.5E-03	8.74E-02	0.0687	4.10E-02	0.0728	2.94E-02	0.1445
25	4.0E-03	9.60E-02	0.0762	5.53E-02	0.0861	3.37E-02	0.1259
26	6.3E-03	7.36E-02	0.0745	3.11E-02	0.0677	2.48E-02	0.1186
27	1.0E-02	5.55E-02	0.0974	2.80E-02	0.1084	1.73E-02	0.1586
28	1.6E-02	9.58E-02	0.0620	5.55E-02	0.0723	3.52E-02	0.1107
29	2.5E-02	1.57E-01	0.0644	1.00E-01	0.0810	5.40E-02	0.1236
30	4.0E-02	1.24E-01	0.0687	6.83E-02	0.0799	4.25E-02	0.1065
31	6.3E-02	1.74E-01	0.0570	8.71E-02	0.0628	5.60E-02	0.0901
32	1.0E-01	2.24E-01	0.0614	1.14E-01	0.0630	7.89E-02	0.0883
33	1.6E-01	3.31E-01	0.0495	1.62E-01	0.0545	8.81E-02	0.0755
34	2.5E-01	3.73E-01	0.0642	1.86E-01	0.0488	1.24E-01	0.0701
35	4.0E-01	5.94E-01	0.0387	3.22E-01	0.0421	2.13E-01	0.0768
36	6.3E-01	6.92E-01	0.0311	3.71E-01	0.0371	2.27E-01	0.0856
37	1	9.70E-01	0.0365	5.44E-01	0.0335	3.33E-01	0.0438
38	1.5	9.26E-01	0.0296	5.68E-01	0.0357	3.34E-01	0.0491
39	2	6.93E-01	0.0546	3.81E-01	0.0485	2.43E-01	0.0543
40	3	8.00E-01	0.0426	4.70E-01	0.0349	3.07E-01	0.0510
41	4	2.99E-01	0.0568	1.82E-01	0.0552	1.04E-01	0.0986
42	5	2.11E-01	0.0691	1.50E-01	0.0686	7.38E-02	0.0989
43	6	1.99E-01	0.1146	1.19E-01	0.0888	7.53E-02	0.1141
44	7	1.09E-01	0.1151	9.12E-02	0.1059	4.32E-02	0.1613
45	8	4.53E-02	0.2154	3.50E-02	0.1307	1.68E-02	0.3150
46	9	2.62E-02	0.2392	2.53E-02	0.2084	1.42E-02	0.3038
47	10	1.45E-02	0.4510	7.86E-03	0.3347	7.89E-03	0.6857
48	11	2.13E-03	0.5572	4.58E-03	0.4959	7.81E-04	0.6756
49	12	2.75E-04	1.0000	6.08E-04	0.7115	1.19E-04	1.0000
50	13	1.82E-03	0.8971	4.68E-05	1.0000	7.41E-04	1.0000
51	15	6.12E-03	0.6687	8.26E-04	0.7277	0.00E+00	0.0000
52	20	1.66E-03	1.0000	4.66E-04	1.0000	0.00E+00	0.0000

表 3-22 中性子スペクトル測定値⁽¹⁾ (n/s/cm²/MeV)

エネルギー (MeV)	測定点 No.					
	32 (G)		37 (G)		19 (A)	
	上限	下限	上限	下限	上限	下限
2	2.18E+00	2.56E+00	9.55E-01	1.14E+00	4.86E-01	7.47E-01
2.2	1.88E+00	2.06E+00	8.17E-01	9.12E-01	4.70E-01	5.57E-01
2.4	1.58E+00	1.75E+00	6.69E-01	7.74E-01	3.93E-01	4.71E-01
2.6	1.35E+00	1.51E+00	5.60E-01	6.69E-01	3.38E-01	4.06E-01
2.8	1.18E+00	1.32E+00	4.90E-01	5.87E-01	3.00E-01	3.60E-01
3	1.03E+00	1.17E+00	4.40E-01	5.23E-01	2.71E-01	3.22E-01
3.2	8.90E-01	1.04E+00	3.95E-01	4.66E-01	2.42E-01	2.86E-01
3.4	7.66E-01	9.03E-01	3.48E-01	4.09E-01	2.12E-01	2.50E-01
3.6	6.59E-01	7.78E-01	3.03E-01	3.56E-01	1.84E-01	2.16E-01
3.8	5.74E-01	6.79E-01	2.65E-01	3.11E-01	1.61E-01	1.90E-01
4	5.17E-01	6.11E-01	2.36E-01	2.77E-01	1.46E-01	1.71E-01
4.2	4.86E-01	5.69E-01	2.18E-01	2.54E-01	1.36E-01	1.59E-01
4.4	4.69E-01	5.43E-01	2.05E-01	2.37E-01	1.30E-01	1.50E-01
4.6	4.53E-01	5.19E-01	1.94E-01	2.22E-01	1.22E-01	1.40E-01
4.8	4.25E-01	4.82E-01	1.79E-01	2.04E-01	1.11E-01	1.27E-01
5	3.80E-01	4.30E-01	1.60E-01	1.81E-01	9.77E-02	1.11E-01
5.2	3.26E-01	3.68E-01	1.38E-01	1.56E-01	8.31E-02	9.48E-02
5.4	2.72E-01	3.06E-01	1.15E-01	1.30E-01	6.93E-02	8.03E-02
5.6	2.25E-01	2.54E-01	9.54E-02	1.08E-01	5.76E-02	6.86E-02
5.8	1.89E-01	2.13E-01	7.96E-02	9.22E-02	4.86E-02	5.91E-02
6	1.62E-01	1.83E-01	6.78E-02	8.12E-02	4.17E-02	5.17E-02
6.2	1.42E-01	1.61E-01	5.97E-02	7.31E-02	3.58E-02	4.60E-02
6.4	1.27E-01	1.44E-01	5.41E-02	6.57E-02	3.09E-02	4.14E-02
6.6	1.14E-01	1.30E-01	4.91E-02	5.92E-02	2.67E-02	3.75E-02
6.8	1.01E-01	1.18E-01	4.29E-02	5.42E-02	2.31E-02	3.41E-02
7	9.00E-02	1.07E-01	3.64E-02	4.96E-02	2.02E-02	3.10E-02
7.2	7.99E-02	9.61E-02	3.09E-02	4.46E-02	1.78E-02	2.79E-02
7.4	7.08E-02	8.52E-02	2.65E-02	3.94E-02	1.58E-02	2.49E-02
7.6	6.15E-02	7.55E-02	2.29E-02	3.43E-02	1.40E-02	2.22E-02
7.8	5.22E-02	6.72E-02	2.00E-02	2.97E-02	1.23E-02	1.96E-02
8	4.40E-02	5.98E-02	1.74E-02	2.58E-02	1.07E-02	1.73E-02
8.2	3.76E-02	5.31E-02	1.52E-02	2.25E-02	9.12E-03	1.52E-02
8.4	3.27E-02	4.72E-02	1.33E-02	1.97E-02	7.70E-03	1.33E-02
8.6	2.90E-02	4.19E-02	1.17E-02	1.71E-02	6.56E-03	1.16E-02
8.8	2.61E-02	3.74E-02	1.03E-02	1.49E-02	5.72E-03	1.02E-02
9	2.39E-02	3.36E-02	9.25E-03	1.32E-02	5.14E-03	9.27E-03
9.2	2.24E-02	3.05E-02	8.35E-03	1.20E-02	4.81E-03	8.84E-03
9.4					4.74E-03	8.77E-03
9.6					4.87E-03	8.90E-03
9.8					5.12E-03	9.05E-03
10					5.29E-03	9.14E-03
10.2					5.24E-03	9.07E-03
10.4					4.87E-03	8.71E-03
10.6					4.24E-03	7.95E-03
10.8					3.50E-03	6.70E-03
11					2.76E-03	5.07E-03

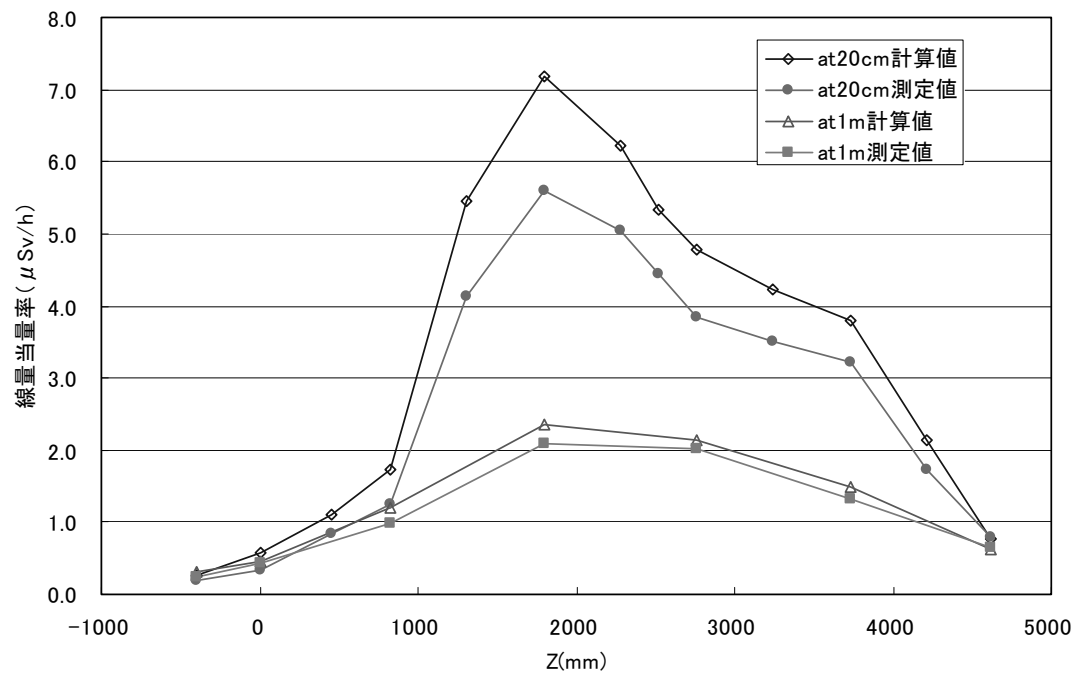


図 3-6 輸送容器側面の軸方向中性子線量当量率分布の比較 (A ; トラニオン方向)

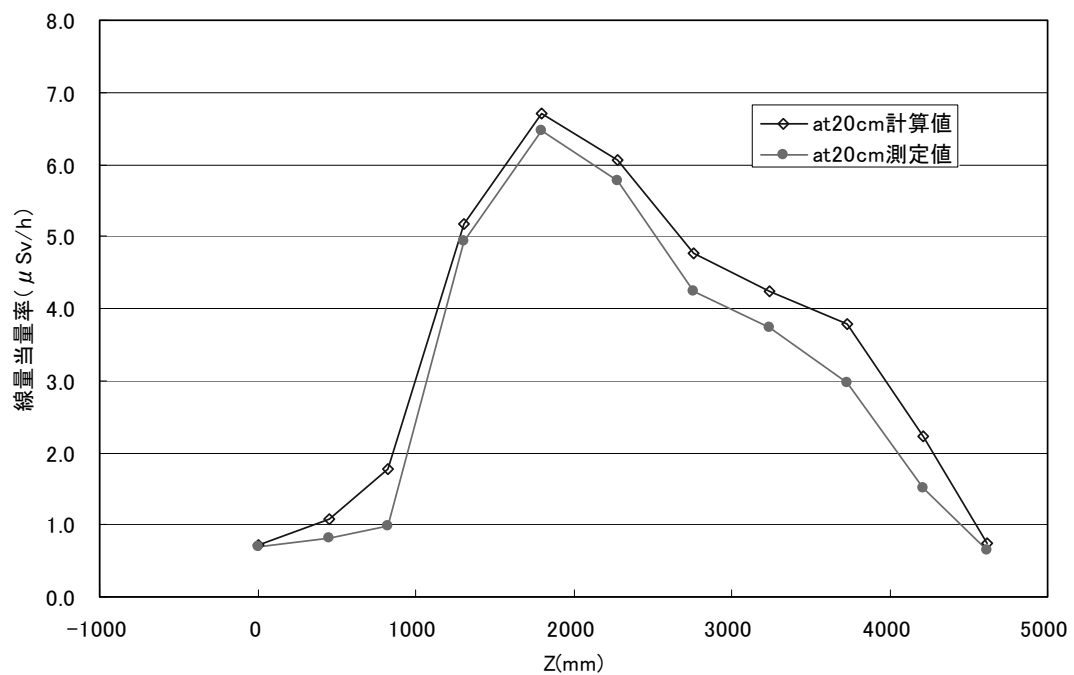


図 3-7 輸送容器側面の軸方向中性子線量当量率分布の比較 (G ; トラニオンと直角方向)

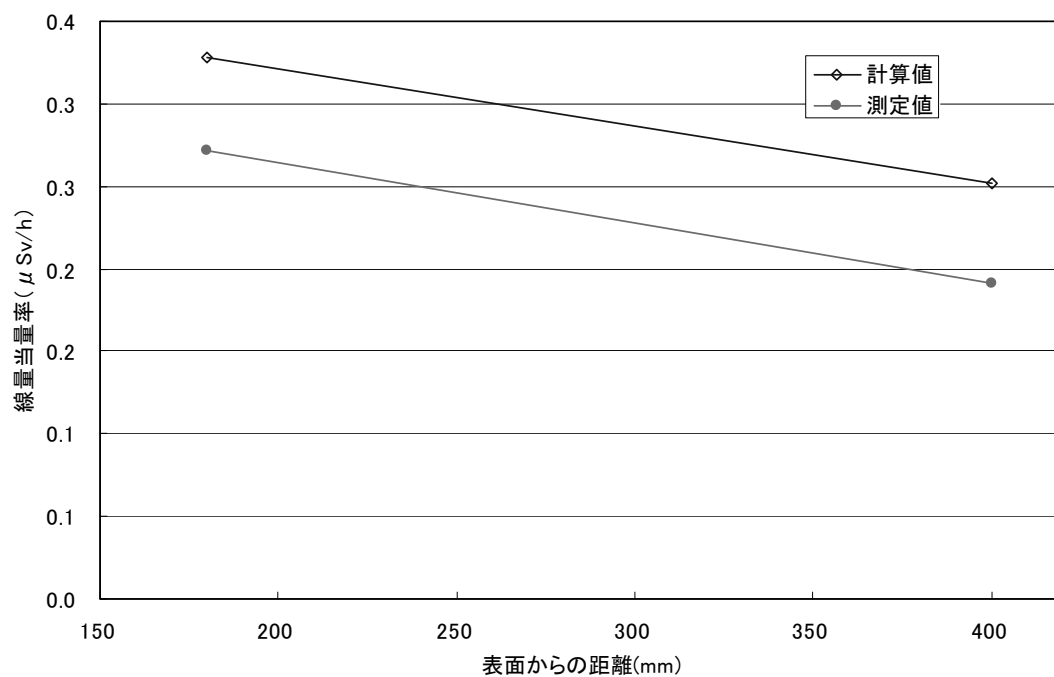


図 3-8 輸送容器蓋部の軸方向中性子線量当量率分布の比較

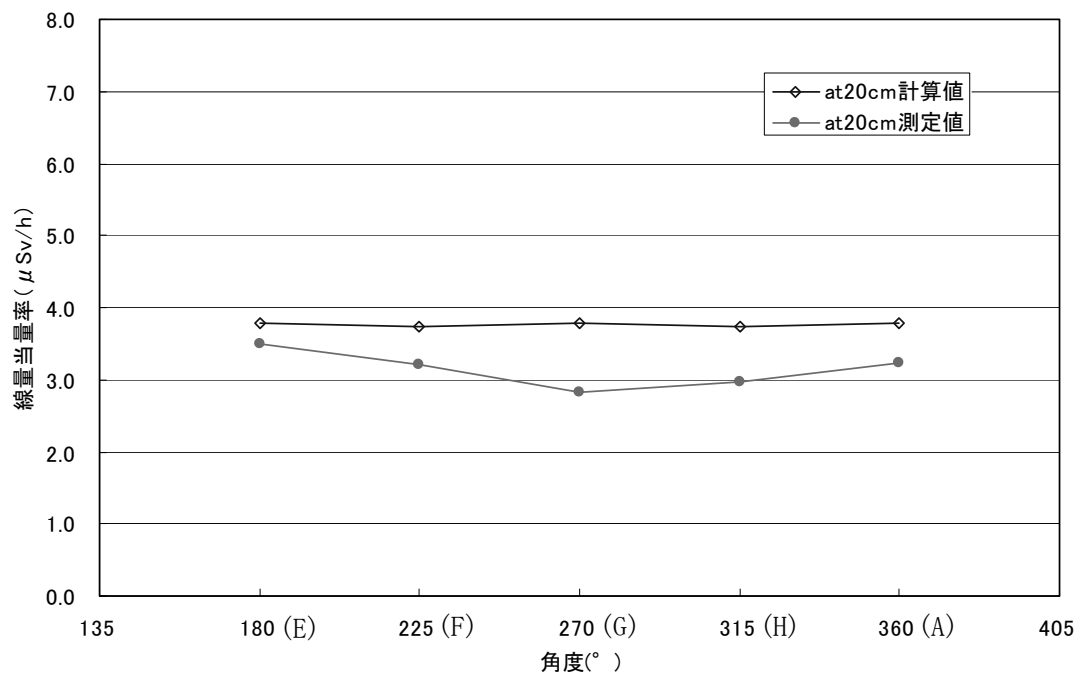


図 3-9 輸送容器中央側面の周方向中性子線量当量率分布の比較

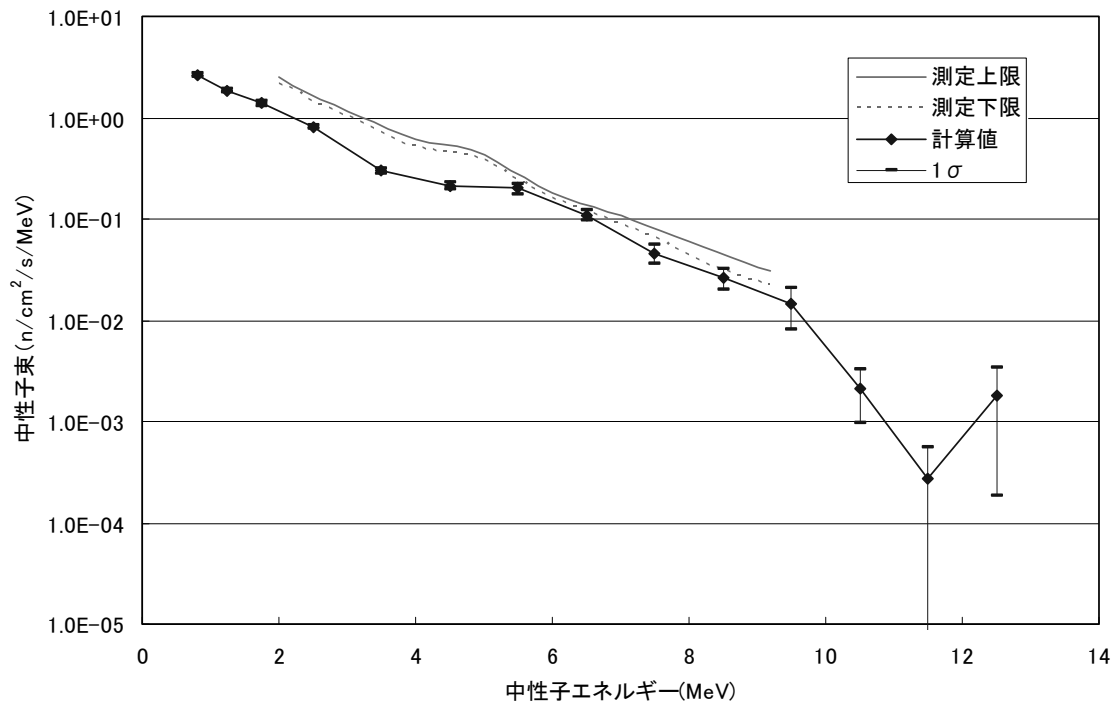


図 3-10 高速中性子スペクトル (G; 評価点 No.32)

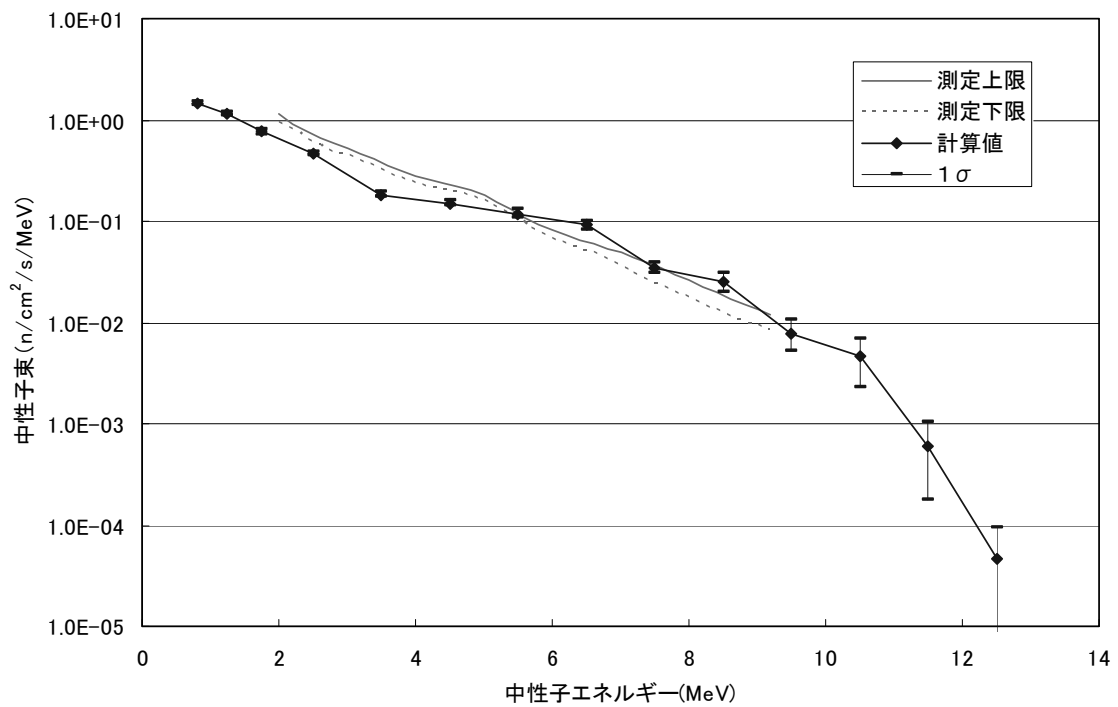


図 3-11 高速中性子スペクトル (G; 評価点 No.37)

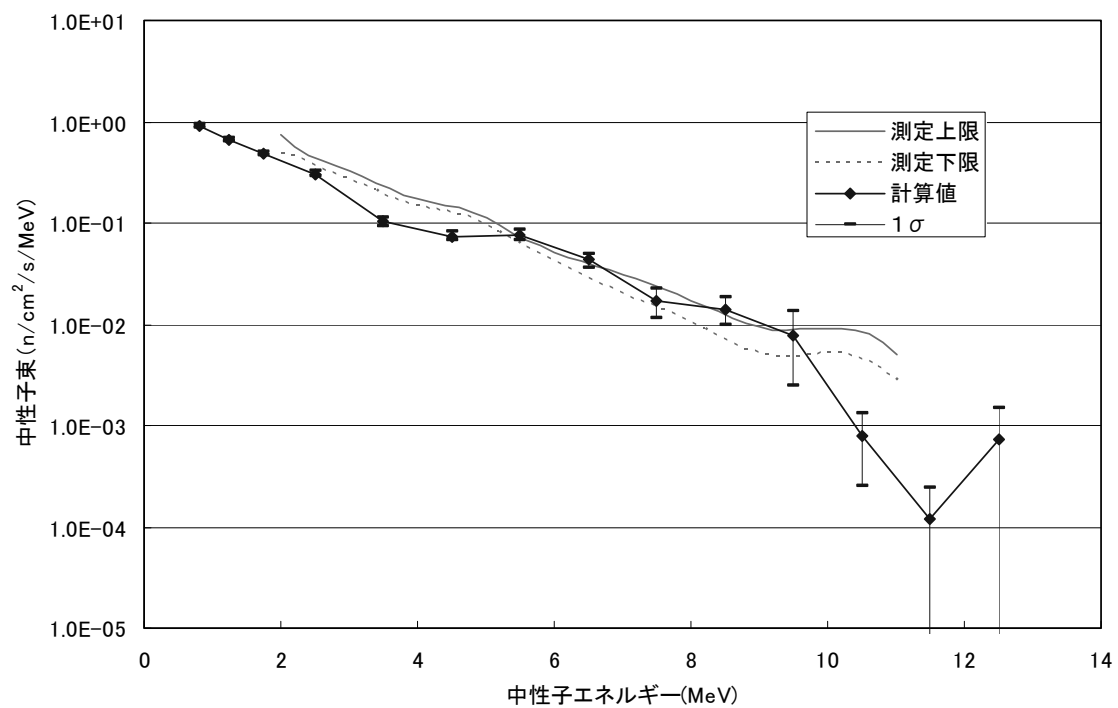


図 3-12 高速中性子スペクトル (A ; 評価点 No.6)

3.5.2. ガンマ線計算結果

(1) ガンマ線照射線量率

ガンマ線照射線量率について、計算結果及び線量測定時の測定値¹⁾を表3-23～表3-26及び図3-13～図3-16に示す。

輸送容器側部表面の軸方向ガンマ照射線量率分布の計算値は、上下端部を除いて測定値より高めとなっているが、C,G方向では分布は一致している。C/Eとしては最大2程度と大きくなっている。上下端部の測定値が計算値より高くなる原因としては、端部構造材の放射化線源の影響が考えられる。

輸送容器側部表面から1mの軸方向ガンマ照射線量率分布の計算値は、上端部を除いて測定値より高めとなっているが、分布は一致している。C/Eとしては1.2～1.4程度である。上端部の測定値が計算値より高くなる原因としては、表面同様端部構造材の放射化線源の影響が考えられる。

(2) キャスク内部のガンマ線照射線量率による補正

線源強度の妥当性確認のため、キャスク内部のガンマ線照射線量率について計算し、測定値と比較した結果を表3-27及び図3-17に示す。

表5-11に示す計算値は燃料有効部ガンマ線源のものであり、C/EはA,Eの測定値の平均値と計算値の比である。C/Eの平均値は1.22であり、線源強度が2割程度過大評価である可能性がある。

内部線量のC/E分だけ線源強度を補正するとして、(1)に示した燃料有効部ガンマ線量率を1.22で除した結果を図3-18～図3-21に示す。

キャスク表面のガンマ線照射線量は、補正後も計算値が測定値を大きく上回っている。

キャスク表面から1mのガンマ線照射線量は、補正により計算値が測定値を僅かに上回る結果となる。

表 3-23 側部軸方向線量分布測定点のガンマ線量当量率 (G 表面) (mR/h)

No.	計算値					測定値 ¹⁾		C/E	
	燃料有効部		二次ガンマ		平均合計				
	平均	FSD	平均	FSD		C	G	C	G
1	7.11E-03	0.0421	1.37E-03	0.0138	8.48E-03	0.205	0.146	0.041	0.058
2	7.90E-03	0.0367	2.75E-03	0.0107	1.06E-02	0.247	0.171	0.043	0.062
3	2.74E-02	0.0480	2.44E-03	0.0330	2.99E-02	0.568	0.536	0.053	0.056
4	5.08E-02	0.0927	1.36E-02	0.0472	6.44E-02	1.01	0.955	0.064	0.067
5	7.59E-01	0.0314	1.51E-01	0.0648	9.10E-01	1.14	1.21	0.798	0.752
6	3.00E+00	0.0380	5.56E-01	0.0194	3.56E+00	2.03	2.31	1.754	1.541
7	3.19E+00	0.0298	7.11E-01	0.0130	3.90E+00	2.39	2.65	1.632	1.472
8	2.93E+00	0.0242	6.28E-01	0.0134	3.56E+00	2.32	2.28	1.534	1.561
9	2.14E+00	0.0315	3.82E-01	0.0239	2.52E+00	1.78	1.51	1.415	1.668
10	2.76E+00	0.0400	3.95E-01	0.0181	3.15E+00	2.09	1.75	1.508	1.801
11	2.60E+00	0.0336	3.70E-01	0.0382	2.97E+00	1.95	1.51	1.521	1.965
12	2.10E+00	0.0331	2.07E-01	0.0166	2.31E+00	1.75	1.21	1.318	1.906
13	2.56E-01	0.0398	3.43E-02	0.0408	2.91E-01	0.510	0.33	0.57	0.881

表 3-24 側部軸方向線量分布測定点のガンマ線量当量率 (G 表面から 1m) (mR/h)

No.	計算値					測定値 ¹⁾	C/E
	燃料有効部		二次ガンマ		平均合計		
	平均	FSD	平均	FSD			
14	—	—	—	—	—	—	—
15	3.38E-02	0.0100	1.39E-02	0.0137	4.77E-02	0.209	0.228
16	7.91E-02	0.0157	2.57E-02	0.0121	1.05E-01	0.356	0.295
17	2.05E-01	0.0117	5.04E-02	0.0170	2.55E-01	0.501	0.509
18	4.32E-01	0.0091	7.89E-02	0.0109	5.11E-01	0.589	0.867
19	7.54E-01	0.0086	1.22E-01	0.0099	8.76E-01	0.764	1.146
20	8.84E-01	0.0070	1.47E-01	0.0201	1.03E+00	0.847	1.217
21	9.00E-01	0.0083	1.49E-01	0.0097	1.05E+00	0.828	1.267
22	8.44E-01	0.0059	1.35E-01	0.0107	9.79E-01	0.751	1.303
23	8.16E-01	0.0062	1.18E-01	0.0111	9.34E-01	0.664	1.407
24	7.35E-01	0.0072	9.46E-02	0.0154	8.30E-01	0.608	1.365
25	5.33E-01	0.0071	6.54E-02	0.0149	5.98E-01	0.457	1.308
26	2.81E-01	0.0081	4.15E-02	0.0134	3.23E-01	0.258	1.250

表 3-25 側部軸方向線量分布測定点のガンマ線量当量率 (A,E 表面) (mR/h)

No.	計算値					測定値 ¹⁾		C/E	
	燃料有効部		二次ガンマ		平均合計				
	平均	FSD	平均	FSD		A	E	A	E
1	5.23E-03	0.0324	1.12E-03	0.0124	6.35E-03	0.174	0.184	0.036	0.034
2	5.28E-03	0.0285	1.68E-03	0.0163	6.96E-03	0.165	0.222	0.042	0.031
3	5.49E-03	0.0264	1.74E-03	0.0447	7.23E-03	0.187	0.274	0.039	0.026
4	1.05E-01	0.0351	1.93E-02	0.0213	1.25E-01	2.190	1.510	0.057	0.083
5	7.82E-01	0.0374	1.41E-01	0.0139	9.23E-01	1.300	—	0.710	—
6	3.27E+00	0.0264	5.60E-01	0.0186	3.83E+00	2.510	2.430	1.524	1.574
7	3.28E+00	0.0297	7.02E-01	0.0107	3.98E+00	2.960	2.710	1.345	1.469
8	3.28E+00	0.0303	6.49E-01	0.0185	3.93E+00	2.830	2.590	1.387	1.516
9	2.38E+00	0.0314	3.90E-01	0.0180	2.77E+00	2.440	1.940	1.137	1.430
10	2.63E+00	0.0252	3.98E-01	0.0154	3.03E+00	2.300	1.970	1.316	1.537
11	2.75E+00	0.0273	3.61E-01	0.0134	3.11E+00	2.350	1.660	1.323	1.873
12	2.29E+00	0.0338	2.08E-01	0.0166	2.49E+00	1.830	1.620	1.363	1.540
13	4.65E-01	0.4518	3.62E-02	0.0470	5.01E-01	0.490	0.510	1.022	0.982

表 3-26 側部軸方向線量分布測定点のガンマ線量当量率 (E 表面から 1m) (mR/h)

No.	計算値					測定値 ¹⁾	C/E
	燃料有効部		二次ガンマ		平均合計		
	平均	FSD	平均	FSD			
14	—	—	—	—	—	—	—
15	3.81E-02	0.0151	1.42E-02	0.0167	5.23E-02	0.240	0.218
16	8.39E-02	0.0111	2.64E-02	0.0150	1.10E-01	0.390	0.283
17	2.14E-01	0.0101	5.05E-02	0.0141	2.65E-01	0.549	0.482
18	4.60E-01	0.0096	7.94E-02	0.0098	5.39E-01	0.635	0.849
19	7.96E-01	0.0097	1.20E-01	0.0093	9.16E-01	0.767	1.194
20	9.40E-01	0.0070	1.50E-01	0.0110	1.09E+00	0.902	1.209
21	9.41E-01	0.0072	1.53E-01	0.0122	1.09E+00	0.905	1.209
22	8.81E-01	0.0069	1.32E-01	0.0090	1.01E+00	0.827	1.226
23	8.52E-01	0.0090	1.16E-01	0.0107	9.68E-01	0.770	1.257
24	7.73E-01	0.0085	9.36E-02	0.0210	8.66E-01	0.693	1.250
25	5.67E-01	0.0085	6.27E-02	0.0123	6.30E-01	0.486	1.295
26	3.00E-01	0.0089	4.10E-02	0.0197	3.41E-01	0.271	1.257

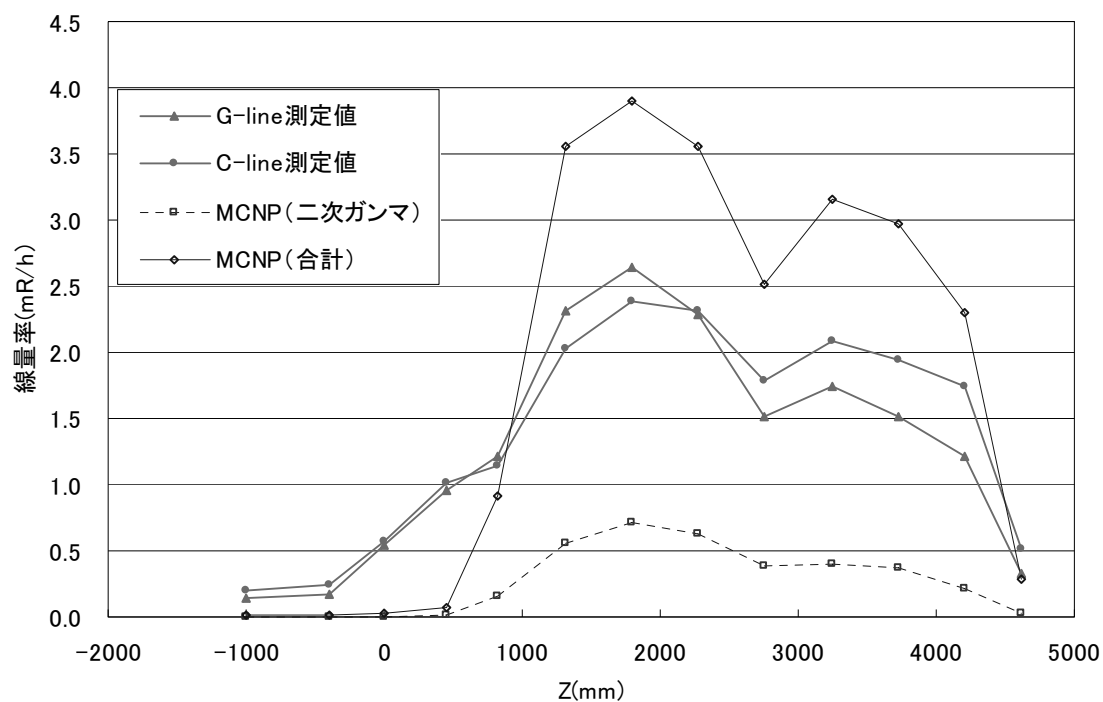


図 3-13 輸送容器側面の軸方向ガンマ線照射線量率分布の比較 (C,G 表面)

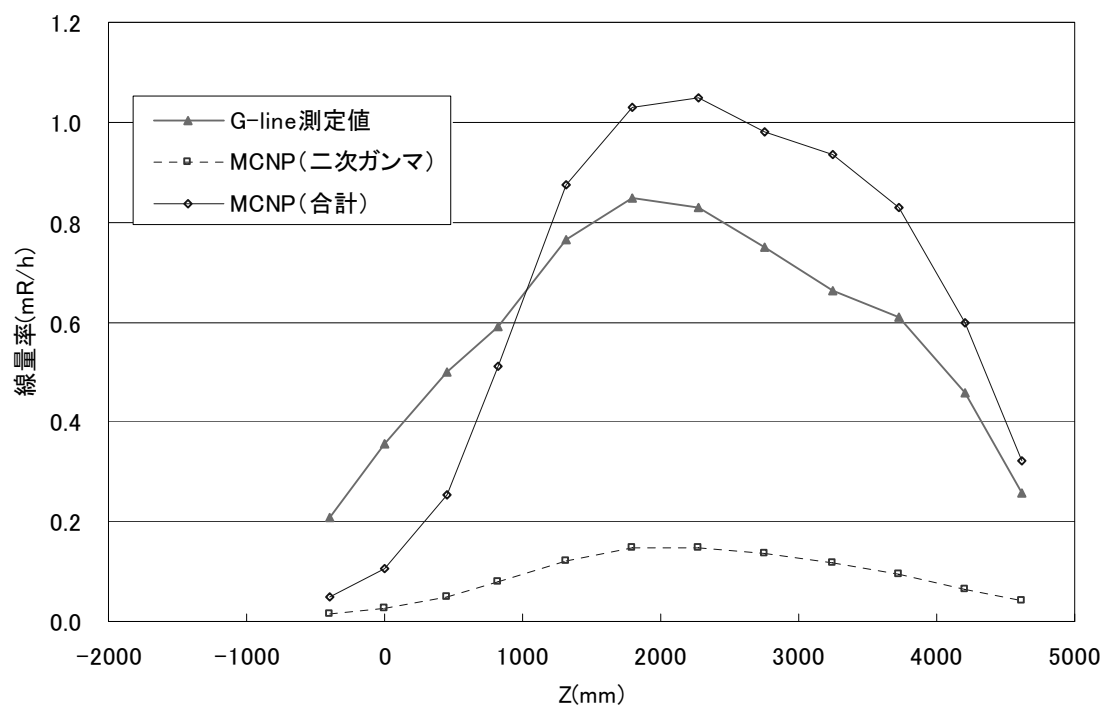


図 3-14 輸送容器側面の軸方向ガンマ線照射線量率分布の比較 (G 表面から 1m)

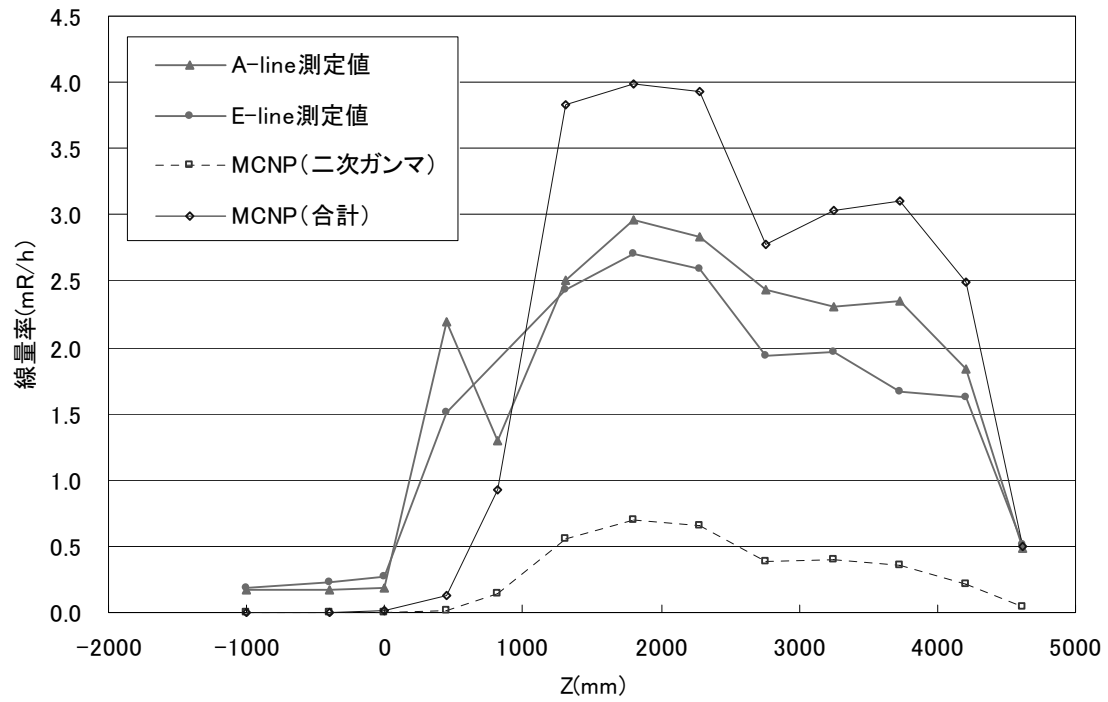


図 3-15 輸送容器側面の軸方向ガンマ線照射線量率分布の比較 (A,E 表面)

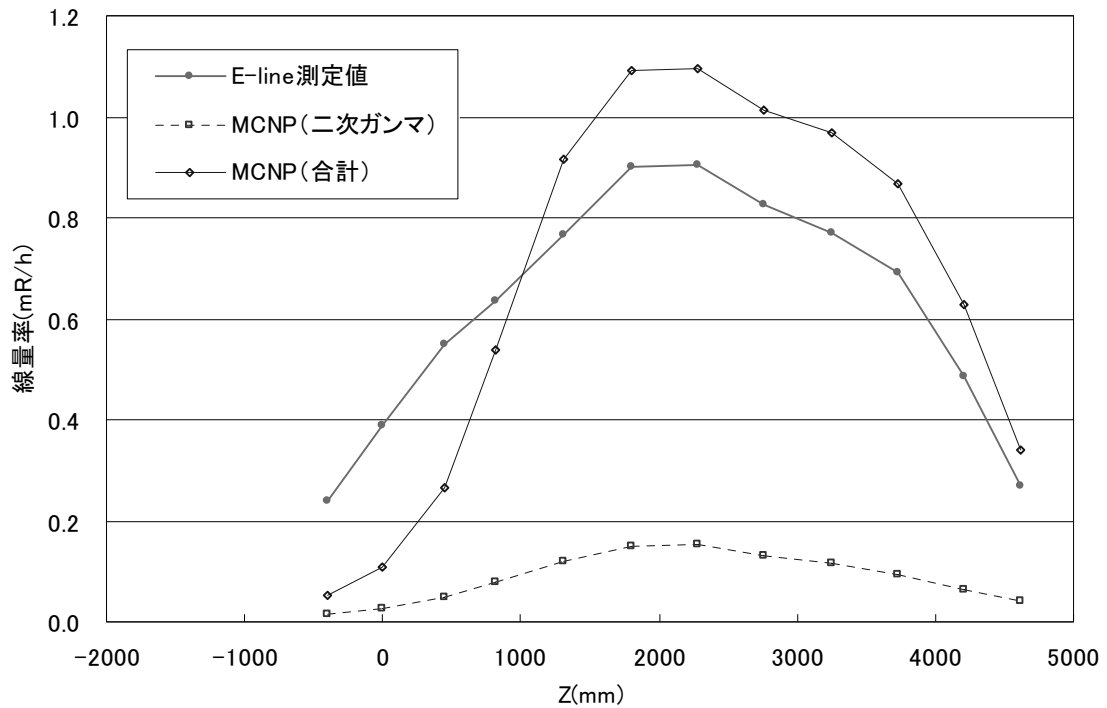


図 3-16 輸送容器側面の軸方向ガンマ線照射線量率分布の比較 (E 表面から 1m)

表 3-27 キャスク内部ガンマ線照射線量率の比較

Z(mm)	測定値		MCNP 計算値	C/E
	A-line	E-line		
990	1.18E+04	1.19E+04	1.64E+04	1.39
1240	1.84E+04	1.91E+04	2.32E+04	1.24
1490	1.99E+04	2.15E+04	2.39E+04	1.15
1740	1.96E+04	2.16E+04	2.39E+04	1.16
1990	1.95E+04	2.17E+04	2.44E+04	1.18
2240	1.97E+04	2.17E+04	2.49E+04	1.20
2490	1.95E+04	2.11E+04	2.47E+04	1.22
2740	1.93E+04	2.14E+04	2.46E+04	1.21
2990	1.96E+04	2.12E+04	2.48E+04	1.22
3240	1.97E+04	2.06E+04	2.46E+04	1.22
3490	2.04E+04	2.08E+04	2.41E+04	1.17
3740	2.06E+04	2.03E+04	2.40E+04	1.18
3990	1.95E+04	1.89E+04	2.29E+04	1.20
4240	1.49E+04	1.34E+04	1.83E+04	1.29
				1.22

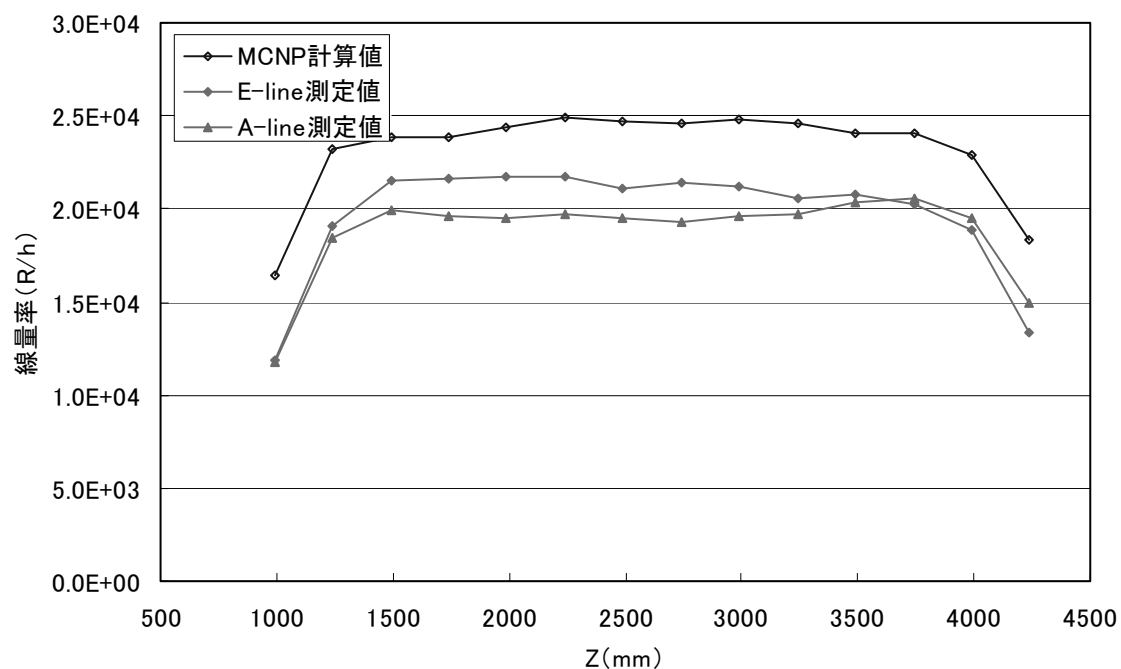


図 3-17 輸送容器内部の軸方向ガンマ線照射線量率分布の比較

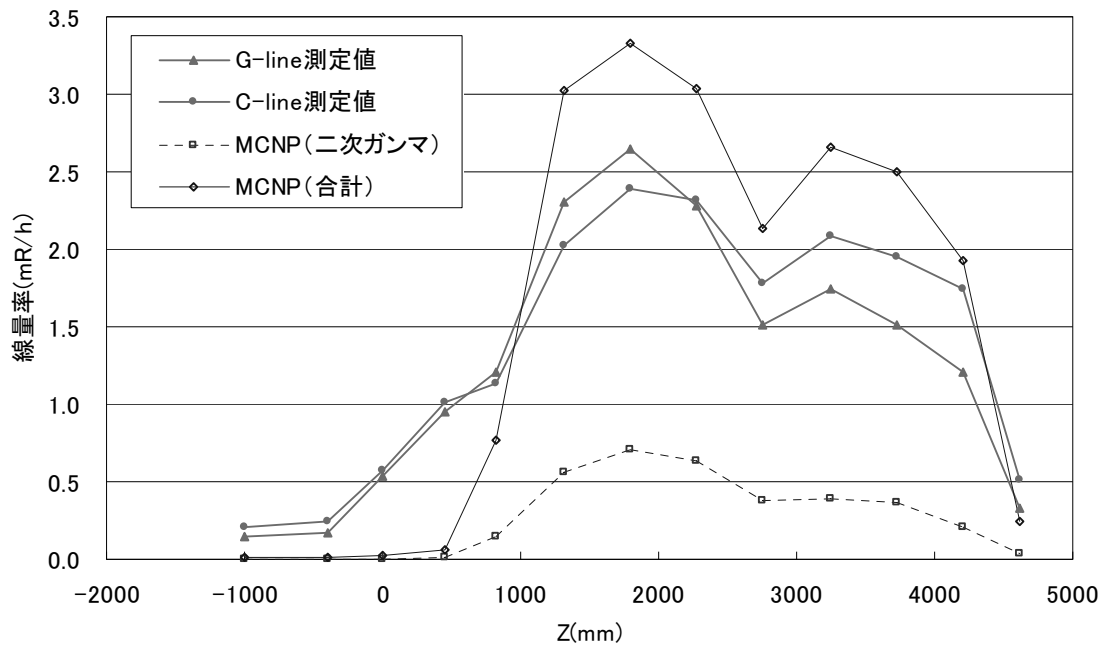


図 3-18 輸送容器側面の軸方向ガンマ線照射線量率分布の比較 (C,G 表面) 補正後

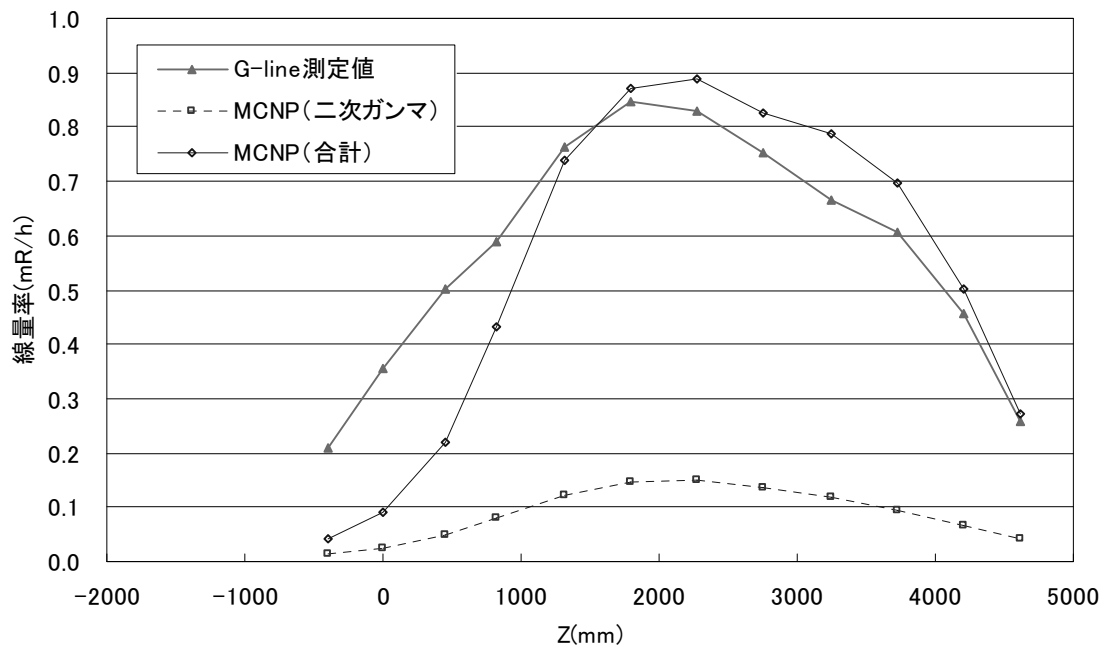


図 3-19 輸送容器側面の軸方向ガンマ線照射線量率分布の比較 (G 表面から 1m) 補正後

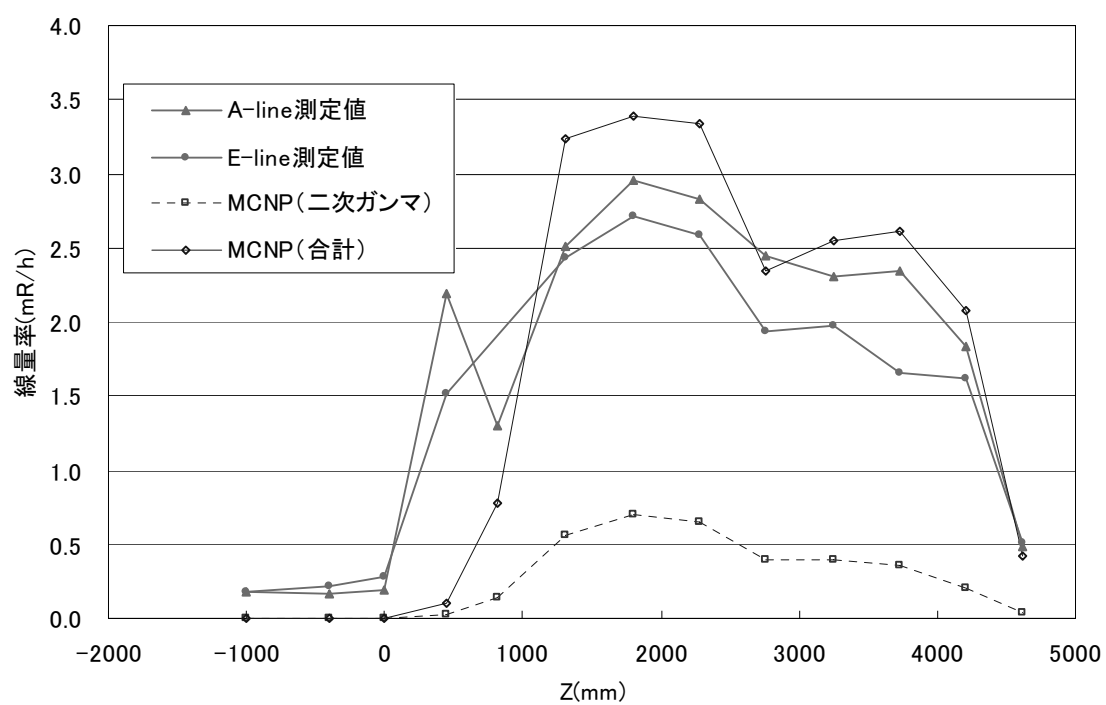


図 3-20 輸送容器側面の軸方向ガンマ線照射線量率分布の比較 (A,E 表面) 補正後

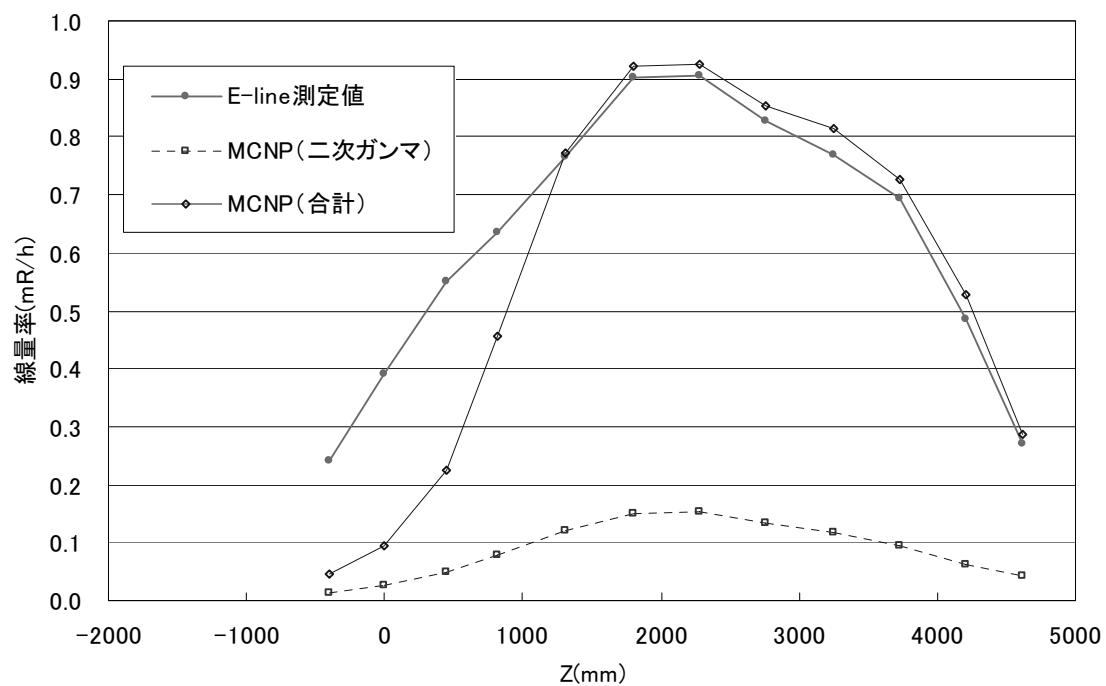


図 3-21 輸送容器側面の軸方向ガンマ線照射線量率分布の比較 (E 表面から 1m) 補正後

(参考文献)

- (1) 田中俊一、山路昭雄、坂本幸夫、他、“使用済燃料輸送キャスクの遮蔽実験(1)－PWR 使用済燃料による「キャスクの形状評価のための実験」－”、JAERI-M 82-201
- (2) 田中俊一、坂本幸夫、山路昭雄、他、“使用済燃料輸送キャスクの遮蔽実験(3)－BWR 使用済燃料による「キャスクの形状評価のための実験」－”、JAERI-M 84-019
- (3) 田中俊一、坂本幸夫、山路昭雄、他、“使用済燃料輸送キャスクの遮蔽実験(5)－PWR 使用済燃料からの中性子発生量の測定－”、JAERI-M 84-227
- (4) 田中俊一、坂本幸夫、山路昭雄、他、“SHIELDING EXPERIMENTS FOR A SHIELDING SAFETY EVALUATION CODE SYSTEM OF SPENT FUEL TRANSPORT CASK”、PROCEEDINGS OF THE SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RADIATION SHIELDING, 1983
- (5) ICRP Pub.21

4. NFT-38B 型使用済燃料輸送容器

4.1. 概要

NFT-38B 型使用済燃料輸送容器(以下、NFT-38B 型容器という)に実際の使用済燃料を装荷した時の中性子及びガンマ線の線量当量率測定が独立行政法人海上技術安全研究所により実施されている¹⁾。今回は、この中から中性子及び γ 線量当量率の測定結果に対して MCNP5 による計算を実施した。なお、本ベンチマーク問題は、遮蔽計算ばかりでなく、線源強度計算を含めての比較となっている。

4.2. 試験内容

4.2.1. 測定配置

BWR 型使用済燃料 38 体を収納した NFT-38B 型容器を横向きに置いて測定を行っている。NFT-38B 型容器に収納した使用済燃料と今回の計算対象とした測定点の位置関係を図 4-1 に示す。軸方向端部に関しては上部、下部のトラニオン位置及びトラニオンがない下部端部の 90°方向については 0°方向にあるトラニオンに対応した位置となっている。また、側面中央部は外部フィン領域の中央部であり、その位置より両端部に約 1.3m 外れた位置 2 点での測定点についても対象とした。なお、評価点は表面(フィン先端、トラニオン上端面、外筒表面)および表面から 1m の点である。また、バスケットの横断面図、本体両端部の縦断面図を図 4-2、図 4-3 にそれぞれ示す。

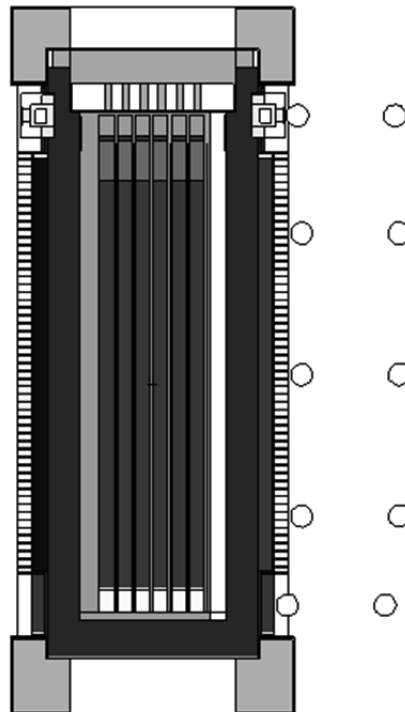


図 4-1 NFT-38B 型容器の縦断面図及び測定位置 (燃料集合体を収納した図)

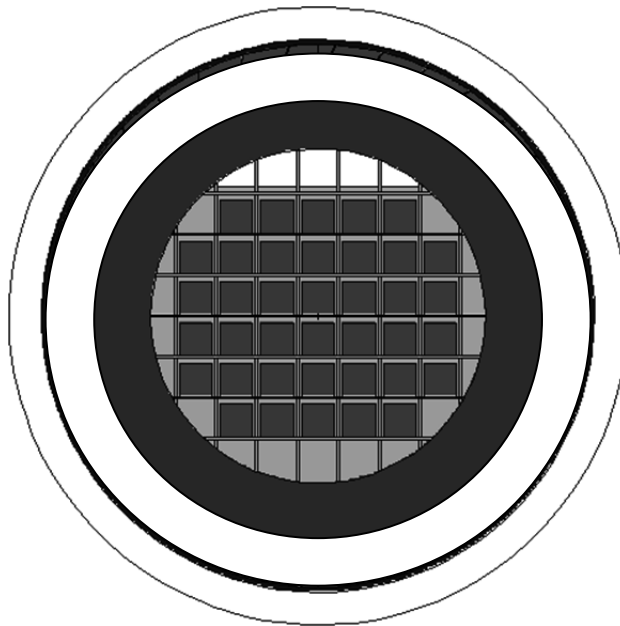


図 4-2 NFT-38B 型容器のバスケット横断面図

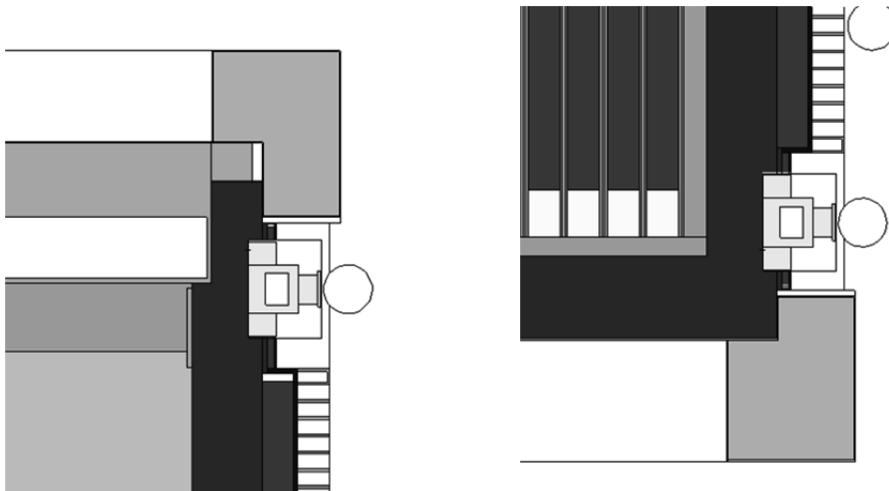


図 4-3 NFT-38B 型容器両端部の縦断面図(拡大図)

4.2.2. 測定方法と測定器

(1) 中性子

測定にはレムカウンタが使用されている。測定は一定時間内の中性子カウント数を時間で割り換算係数を掛けることにより線量当量率を求めている。

(2) γ 線

測定にはエネルギー補償型 NaI シンチレーションサーベイメータが使用されている。測定は各位置において 5 回実施し、その平均をとることにより線量当量率を求めている。

4.2.3. 測定結果

各方向について中性子及び γ 線量当量率の測定結果が提示されているが、今回対象としたのは中性子については側面の上部(0 度方向)、右側(90 度方向)それぞれについて、トラニオン上を含む 5 箇所、 γ 線については側面の右側(90 度方向)について、トラニオン上を含む 5 箇所である。各測定点の位置関係は縦断面に関しては図 4-1 に示したが横断面に関しては図 4-4 に示す。また、得られた中性子線量当量率の測定結果を表 4-1 に、 γ 線量当量率の測定結果を表 4-2 に示す。なお、表面はレムカウンタの大きさが大きいため実際の測定は表面から 11.5cm 離れた位置で測定しており、表面から 1m の点はトラニオンがある場所についてはトラニオン端部から 1m の点としている。

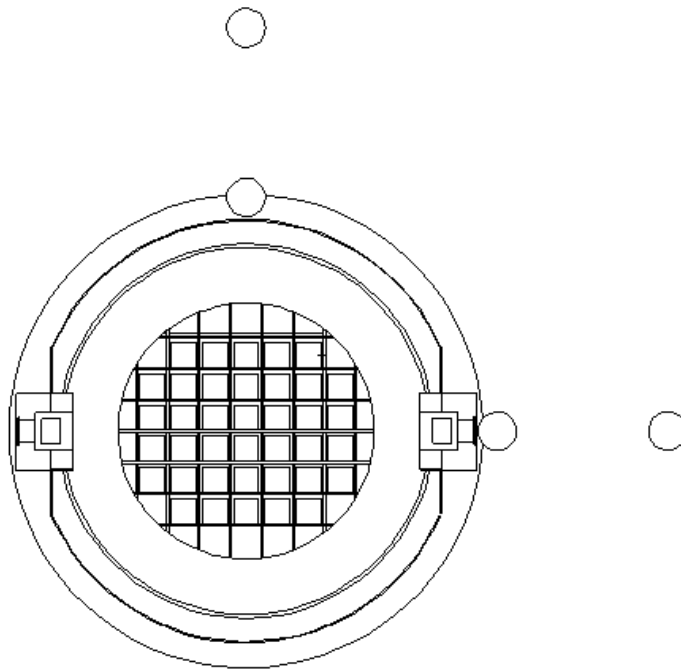


図 4-4 NFT-38B 型容器の測定位置 (横断面)

表 4-1 NFT-38B 型容器の中性子線量当量率測定結果 (単位: $\mu\text{Sv/h}$)

	0度方向(上方向)				
	上部トラニオン		側面中央		下部トラニオン
	UT-00-C	L-00-1	L-00-4	L-00-7	BT-00-C
表面	0.73	0.94	2.5	1.65	0.37
1m	0.31	0.54	0.92	0.8	0.37
	90度方向(側面右側)				
	上部トラニオン		側面中央		下部トラニオン
	UT-90-C	L-90-1	L-90-4	L-90-7	BT-90-C
表面	0.28	0.76	1.7	1.26	1.47
1m	0.26	0.52	0.78	0.72	0.55

表 4-2 NFT-38B 型容器の γ 線線量当量率測定結果 (単位: $\mu\text{Sv/h}$)

	0度方向(上方向)				
	上部トラニオン		側面中央		下部トラニオン
	UT-00-C	L-00-1	L-00-4	L-00-7	BT-00-C
表面	1.86	5.88	9.67	8.14	2.53
1m	1.48	2.84	4.02	3.2	1.21
	90度方向(側面右側)				
	上部トラニオン		側面中央		下部トラニオン
	UT-90-C	L-90-1	L-90-4	L-90-7	BT-90-C
表面	1.26	6.04	10.05	8.98	0.71
1m	1.48	3.5	5.02	4.02	1.31

4.3. ベンチマーク計算

4.3.1. 線源計算

NFT-38B 型容器に収納されている使用済燃料 38 体の仕様の概要は以下の通りである。

- (1) 照射、冷却履歴：燃焼度は 42500～45000MWd/tU の範囲内であり平均燃焼度も 44000MWd/tU 程度であり、特異な使用済燃料は存在していない。冷却日数は全ての燃料に対して 1503 日である。濃縮度は約 3.5%である。
- (2) 燃焼履歴：4 サイクル運転された使用済燃料 28 体、5 サイクル運転された使用済燃料 10 体が収納されているが後半の 4 サイクルはすべての使用済燃料について同一サイクルの運転となっている。
- (3) 軸方向燃焼度分布：軸方向に 24 ノードでの分布が与えられている。

以上のことから、今回の計算では使用済燃料を 4 サイクル運転と 5 サイクル運転の大きく二つに分類することが妥当であると考えた。さらに今回の線量当量率評価点が 0°方向及び 90°方向であることを考慮し、この方向に寄与する使用済燃料の燃焼度に対応させるため 4 サイクル運転は燃焼度 43200MWd/tU、5 サイクル運転は燃焼 42900MWd/tU の 2 ケースについて ORIGEN-ARP により線源強度を計算した。

4.3.2. 計算モデル

安全解析書のデータをベースに形状及び各領域の密度設定を行ったが、安全解析書では安全側の評価とするために遮蔽体密度、寸法等が保守的に設定されているのに対し、本計算ではできる範囲内で公称値を使用するようにした。

中性子線源スペクトルは主要な中性子発生核種である ^{244}Cm の自発核分裂スペクトルを使用した。

計算モデルでは容器に関しては、中性子遮蔽体内の銅製フィン及び外筒外側に取り付けられた放熱フィンを詳細にモデル化している。さらに、上部および下部の緩衝体もモデル化したが、今回の計算は側面のみであるため、内部の木材の密度等に関しては概略の値を入力している。また、収納された使用済燃料の位置は各バスケットチャネルに対し、上下方向には下側のバスケット壁に接触するように、左右方向についてはバスケットチャネル内の中央部にあるものとした。燃料集合体についてはチャネルボックスを無視し、断面が 13.1cm 角の直方体とし均質化を行っている。

検出器としては、体積検出器(TLE)を使用した。数点については点検出器を同一の位置において計算結果の比較を行い、両方の計算結果に大きな差がないことを確認している。体積検出器の大きさとしては半径 10cm と設定した。計算モデルの容器と検出器の関係については図 4-1、図 4-4 に示されている。

4.3.3. 計算方法

断面積ライブラリとしては ENDF/B-VII 等の MCNPDATA として添付されているものを使用した。計算は、メッシュを用いたウェイト・ウィンドウ・ジェネレータを使用した。

最初の計算は、まずセル・インポートランスを設定した。ただし、計算モデルでは各領域をセルで細かく定義していないため、いずれも大雑把なセル・インポートランスの設定となる。計算に用いた PC の CPU はインテル CORE i5 2.53GHz である。今回の計算は計算モデルが中性子遮蔽体内のフィンおよび外部フィンを詳細にモデル化したこと、および容器内部の水による散乱が多いことにより乾式容器に比べると計算時間がかなり長くなっているようである。

4.4. 計算と測定値の比較

4.4.1. 線源強度

(1) 中性子

ORIGEN-ARP により得られた線源強度を表 4-3 に示す。容器 1 基あたりの全線源強度は増倍効果として $k_{\text{eff}}=0.65$ を採用して ORIGEN-ARP により得られた線源強度の補正を行った。軸方向燃焼度分布については表 4-4 に示されたピーキングファクタを用いてタイプ 1、タイプ 2 それぞれの燃焼度分布に対して、近似的に中性子線源強度は燃焼度の 4.6 乗に比例するものとして、全線源強度を軸方向に割り振った。基準点が平均燃焼度にあるため、高燃焼度側での誤差は数%以内である。

表 4-3 中性子源強度評価結果

	タイプ 1	タイプ 2
燃料体数	28	10
平均燃焼度 (MWd/ t U)	43,200	42,900
中性子源強度 (n/sec/tU)	5.23E+08	4.97E+08
k_{eff}	0.65	
ウラン重量 (kg/集合体)	171.5	
全中性子源強度(n/sec/基)	9.53E+9	

表 4-4 BWR 燃料用軸方向燃焼度分布に使用したピーキングファクタ

ケース	ピーキングファクタ
1	0.6
2	0.9
3	1.1
4	1.2
5	1.27

(2) FP γ 線

ORIGEN-ARP による線源強度のベースとなるデータは中性子と同じであり、表 4-3 に示す。タイプ 1、タイプ 2 それぞれに対して、軸方向燃焼度分布を表 4-4 に示されたピーキングファクタを用いて ORIGEN-ARP により計算したスペクトルを表 4-5 に示す。

表 4-5 軸方向 γ 線源スペクトル

(a) タイプ 1 燃料のスペクトル

エネルギー (MeV)		ガンマ線源強度 (photons/s/tU)				
		PF				
下限	上限	0.6	0.9	1.1	1.2	1.27
0.45	0.70	3.229E+15	5.310E+15	6.879E+15	7.699E+15	8.283E+15
0.70	1.00	3.995E+14	9.177E+14	1.382E+15	1.639E+15	1.824E+15
1.00	1.50	6.961E+13	1.456E+14	2.060E+14	2.373E+14	2.593E+14
1.50	2.00	4.269E+12	8.073E+12	1.087E+13	1.226E+13	1.322E+13
2.00	2.50	2.280E+12	3.458E+12	4.259E+12	4.662E+12	4.945E+12
2.50	3.00	6.019E+10	1.181E+11	1.665E+11	1.924E+11	2.108E+11
3.00	4.00	5.507E+09	1.092E+10	1.548E+10	1.793E+10	1.969E+10
4.00	6.00	1.848E+06	1.325E+07	3.450E+07	5.133E+07	6.599E+07
6.00	8.00	2.127E+05	1.526E+06	3.974E+06	5.913E+06	7.602E+06
8.00	11.00	2.445E+04	1.755E+05	4.571E+05	6.802E+05	8.745E+05

(b) タイプ 2 燃料のスペクトル

エネルギー (MeV)		ガンマ線源強度 (photons/s/tU)				
		PF				
下限	上限	0.6	0.9	1.1	1.2	1.27
0.45	0.70	3.534E+15	5.919E+15	7.745E+15	8.706E+15	9.390E+15
0.70	1.00	5.192E+14	1.187E+15	1.782E+15	2.111E+15	2.348E+15
1.00	1.50	8.490E+13	1.763E+14	2.493E+14	2.874E+14	3.142E+14
1.50	2.00	5.665E+12	1.051E+13	1.410E+13	1.592E+13	1.718E+13
2.00	2.50	3.938E+12	5.951E+12	7.313E+12	7.999E+12	8.481E+12
2.50	3.00	9.694E+10	1.892E+11	2.665E+11	3.085E+11	3.385E+11
3.00	4.00	8.846E+09	1.744E+10	2.470E+10	2.866E+10	3.149E+10
4.00	6.00	1.959E+06	1.398E+07	3.622E+07	5.386E+07	6.923E+07
6.00	8.00	2.254E+05	1.609E+06	4.172E+06	6.204E+06	7.974E+06
8.00	11.00	2.592E+04	1.851E+05	4.800E+05	7.137E+05	9.173E+05

(3) 構造材放射化線源

燃料集合体端部の構造材に含まれる ^{59}Co 含有量については安全解析書のデータをベースに照射、冷却期間の補正を行い設定した。

(4) 二次 γ 線

中性子の(n, γ)反応によって生じる二次 γ 線の計算のための中性子源強度及び軸方向分布は先の中性子線量率計算に用いた手法により設定した。

4.4.2. 側面側部の線量当量率

(1) 中性子

- ・ 計算パラメータ

まずは固定線源を設定して計算を実施した。次に湿式容器特有と思われるキャビティ内に水が存在することによる効果をチェックするために核分裂を計算中に考慮する計

算を行った。燃料ピン等を正確にモデル化できないためこの「核分裂を計算中に考慮する計算」の精度がどの程度確保されているのかは疑問であるが、キャビティ内の核分裂分布の考慮の有無で大きな差が発生することは確認された。なお、このキャビティ内の核分裂分布を考慮することが妥当であることを確認するために別途臨界計算を行い、各使用済燃料の核分裂数相対値について計算した結果を図4-5に示す。核分裂はキャビティの中央部で多く発生し、外周部では少ないことが示されている。このために容器外部の線量当量率計算に大きく影響する結果となることがわかる。ただし、実際にはBWR燃料について線源分布を正確に評価することは困難である。これは図4-6に示すようにBWR燃料は燃料ピン毎および軸方向について複雑な濃縮度の分布があり、かつ可燃性毒物としてガドリニアが混合された燃料ピンも存在する。さらに燃焼中は軸方向のボイド率も変化しているため、燃焼中における各燃料ピンの燃焼度分布を正確に評価することが難しいことと、たとえ、この燃焼度分布を正確に評価できたとしても、この線源分布を詳細にMCNPのインプットデータで示すためには非常に細かなモデル化が必要になるためである。

	0°						
	0.400	0.620	0.698	0.627	0.404		
0.390	0.861	1.215	1.346	1.222	0.868	0.393	
0.599	1.204	1.633	1.803	1.658	1.212	0.602	
0.645	1.279	1.729	1.885	1.732	1.275	0.641	90°
0.482	1.041	1.449	1.580	1.431	1.031	0.478	
	0.531	0.822	0.900	0.801	0.514		

図4-5 NFT-38B型輸送物の各バスケット孔内の使用済燃料の核分裂数の比較
(相対強度)

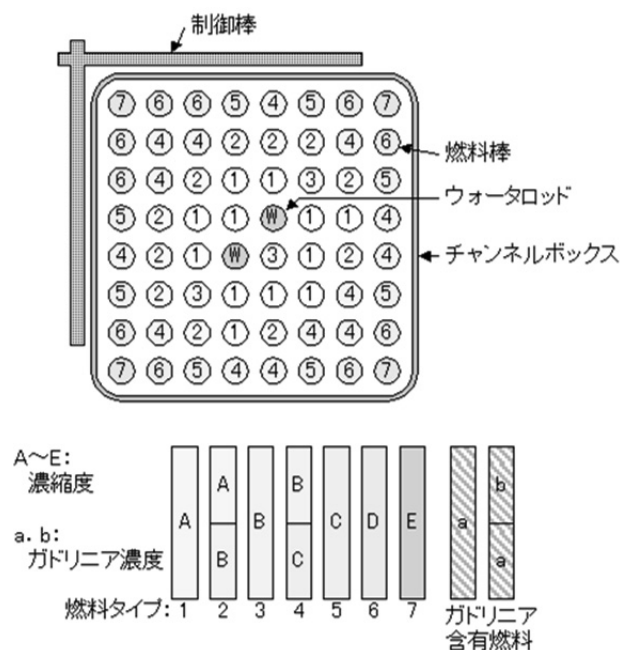


図4-6 燃料集合体の濃縮度分布とガドリニア分布の例⁽²⁾

・ 測定との比較

計算と測定値の比較を表 4-6 に示す。乾式容器と同様に固定線源による計算を実施した場合には場所によって少し異なるが、計算は 2 倍ほど過大評価する結果となっている。一方、核分裂分布等を考慮するとかなり良い一致が得られている。ただし、先に述べたように今回の核分裂分布の考慮の仕方が妥当であるかどうかは、検討が必要である。

今回の計算における誤差としては主として以下の点が考えられる。

- ・ 計算に用いた燃焼度の軸方向分布は実際の燃焼度分布を表わしていないこと。
(今回は相対強度として使用した)
- ・ 収納している使用済燃料の k_{eff} は過大評価であること。
- ・ 使用済燃料内部での核分裂の発生分布は正確に考慮されていないこと。

なお、乾式容器の場合には、内部に水が存在しないために、実効増倍係数が小さく核分裂数の分布が小さいこと、また、分布があつたとしても中性子遮蔽に優れる水が存在しないため、容器内部での分布の影響をそれほど受けないためにこの効果を考慮する必要はないと思われる。

表 4-6 NFT-38B 型容器側面側部の中性子線量当量率の比較 ($\mu\text{Sv/h}$)

		90度方向(側面右側)									
		上部トリウム				側面中央				下部トリウム	
		UT-90-C		L-90-1		L-90-4		L-90-7		BT-90-C	
表面	測定値	0.28		0.76		1.7		1.26		1.47	
	固定線源	0.48	0.013	1.99	0.032	3.27	0.025	2.78	0.027	4.15	0.008
	核分裂分布考慮	0.21	0.011	0.83	0.025	1.47	0.019	1.19	0.040	1.83	0.005
1m	測定値	0.26		0.52		0.78		0.72		0.55	
	固定線源	0.35	0.016	1.10	0.041	1.64	0.031	1.40	0.035	1.15	0.012
	核分裂分布考慮	0.15	0.014	0.45	0.032	0.73	0.025	0.60	0.028	0.51	0.010

表中の細字は σ を示している。

(2) γ 線

・ 測定との比較

計算と測定値の比較を表 4-7 に示す。計算は 2 倍ほど過大評価する結果となっている。今回の計算における誤差としては主として以下の点が考えられる。

- ・ 計算に用いた燃焼度の軸方向分布は実際の燃焼度分布を表わしていないこと。
(燃焼度で 1.25 倍程度)
- ・ $\text{FP}\gamma$ 線に対しては遮蔽体として寄与するチャンネルボックスを計算モデルでは無視していること。
- ・ $\text{FP}\gamma$ 線源は群構造を採用しているが、主たる γ 線源の一つである ^{106}Rh の γ 線源スペクトルと今回採用している群構造の平均エネルギーとに乖離がある可

能性がある。

- ・ 構造材放射化線源の評価において、 ^{59}Co の含有量が保証値となっているため、かなり保守的な設定となっていること。

表 4-7 NFT-38B 型容器側面側部の γ 線量当量率の比較 ($\mu\text{Sv/h}$)

		90度方向(側面右側)									
		上部トラニオン				側面中央				下部トラニオン	
		UT-90-C		L-90-1		L-90-4		L-90-7		BT-90-C	
表面	測定値	1.26		6.04		10.05		8.98		0.71	
	計算値(合計)	5.13		11.97		17.58		17.02		5.91	
	FPガンマ線	0.10	0.141	11.17	0.074	16.58	0.049	16.16	0.058	3.87	0.078
	放射化ガンマ線	4.99	0.003	0.22	0.018	0.00	0.233	0.03	0.032	1.75	0.005
	二次ガンマ線	0.05	0.046	0.58	0.037	1.00	0.034	0.83	0.036	0.29	0.017
1m	測定値	1.48		3.5		5.02		4.02		1.31	
	計算値(合計)	3.54		6.60		8.80		8.09		4.53	
	FPガンマ線	0.83	0.043	5.60	0.088	8.26	0.057	7.40	0.072	3.43	0.077
	放射化ガンマ線	2.63	0.005	0.66	0.010	0.01	0.041	0.29	0.009	0.91	0.005
	二次ガンマ線	0.08	0.045	0.34	0.054	0.53	0.045	0.40	0.048	0.18	0.185

表中の細字は σ を示している。

4.4.3. 側面上部の中性子線量当量率

表 4-8 に NFT-38B 型容器の側面上部の中性子線量の計算結果を示す。側面上部も側面側部と同様の傾向であるが、差は少し大きくなる傾向があり、これに関しては側面側部の計算の誤差に加えて水位の影響を受けていると思われる。

表 4-8 NFT-38B 型容器側面上部の中性子線量当量率の比較 ($\mu\text{Sv/h}$)

		0度方向(上方向)									
		上部トラニオン				側面中央				下部トラニオン	
		UT-00-C		L-00-1		L-00-4		L-00-7		BT-00-C	
表面	測定値	0.73		0.94		2.5		1.65		0.37	
	固定線源	1.69	0.020	3.29	0.052	6.16	0.040	4.63	0.043	0.96	0.020
	核分裂分布考慮	0.76	0.041	1.38	0.051	2.48	0.036	1.84	0.041	0.41	0.017
1m	測定値	0.31		0.54		0.92		0.8		0.37	
	固定線源	0.67	0.031	1.59	0.070	2.69	0.052	1.69	0.066	0.92	0.031
	核分裂分布考慮	0.32	0.070	0.67	0.061	1.08	0.051	0.77	0.058	0.39	0.019

表中の細字は σ を示している。

4.5. まとめ

(1) 中性子

今回、計算を実施した湿式容器の場合にはキャビティ内部に中性子遮蔽性能に優れる水が存在するため中性子遮蔽計算への影響がかなり大きく、また、未臨界増倍効果により中性子発生量が増大する効果による影響も大きい、これらの効果を遮蔽計算において正確に評価する方法が確立されていないため、計算誤差が発生するが、これらの誤差は過大評価となる方向であり、安全解析上は問題ない。

(2) γ 線

今回の計算は安全解析書をベースに計算を実施したこともあり、計算結果は測定値よりもかなり大きくなっているが、詳細については不明であり今後の検討課題である。

(参考文献)

- (1) 文部科学省, “平成 20 年度国立機関等原子力試験研究成果報告書,” (2008).
- (2) 原子力安全研究協会 (編) : 軽水炉燃料のふるまい第 4 版 (平成 15 年 7 月) p.73

5. NFT-14P 型輸送容器

5.1. MCNP 計算条件

(1) モデル化条件

NFT-14P 型について、バスケットやトラニオン部を実寸形状に合わせた3次元全体モデルにより MCNP コードで遮蔽解析を実施した。NFT-14P 型のモデル化条件を表 5-1 に示す。これらのモデル化条件を用いてモデル化した NFT-14P 型のモデル図を図 5-1 に示す。

表 5-1 NFT-14P 型のモデル化条件

項 目	MCNP モデル化条件(実機測定値比較解析モデル)
燃焼度分布	・ 端部 P.F.=約 0.52～0.90 ・ 中央部 P.F.=約 1.07
線源スペクトル	・ 中性子スペクトル : ^{239}Pu 核分裂スペクトル (Watt の式を使用) ・ γ 線スペクトル : ORIGEN2 出力の γ 線スペクトル
燃料集合体	・ 燃料集合体を 1 体ごとに均質化 ・ 上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部に分割 ・ 軸方向の燃料位置は底部側寄せ配置 ・ 燃料格子内の燃料配置は、キャスク横置き時上下方向は下側寄せ配置、左右方向は中央配置
バスケット	・ 基本的に形状どおりモデル化 ・ バスケットガイド部⇒無視 ・ 吊り具⇒無視
本体	・ 基本的に形状どおりモデル化 ・ バルブ⇒無視(バルブが無い部分と同形状) ・ 内部水位⇒水の膨張無視
蓋	・ 基本的に形状どおりモデル化 ・ 蓋ボルト部簡略化
緩衝体	・ カバープレート⇒無視 ・ 内部リブ⇒無視(木材に置き換え) ・ 吊り金具、近接防止金網⇒無視
架台、地面	・ 無視
組成・密度	・ 鋼材、鉛：最小密度 ・ レジン組成：カタログ値、密度は公称値に初期収縮 1%を考慮 ・ 水密度：水温を発熱量より概算して設定
寸法公差	・ 考慮しない

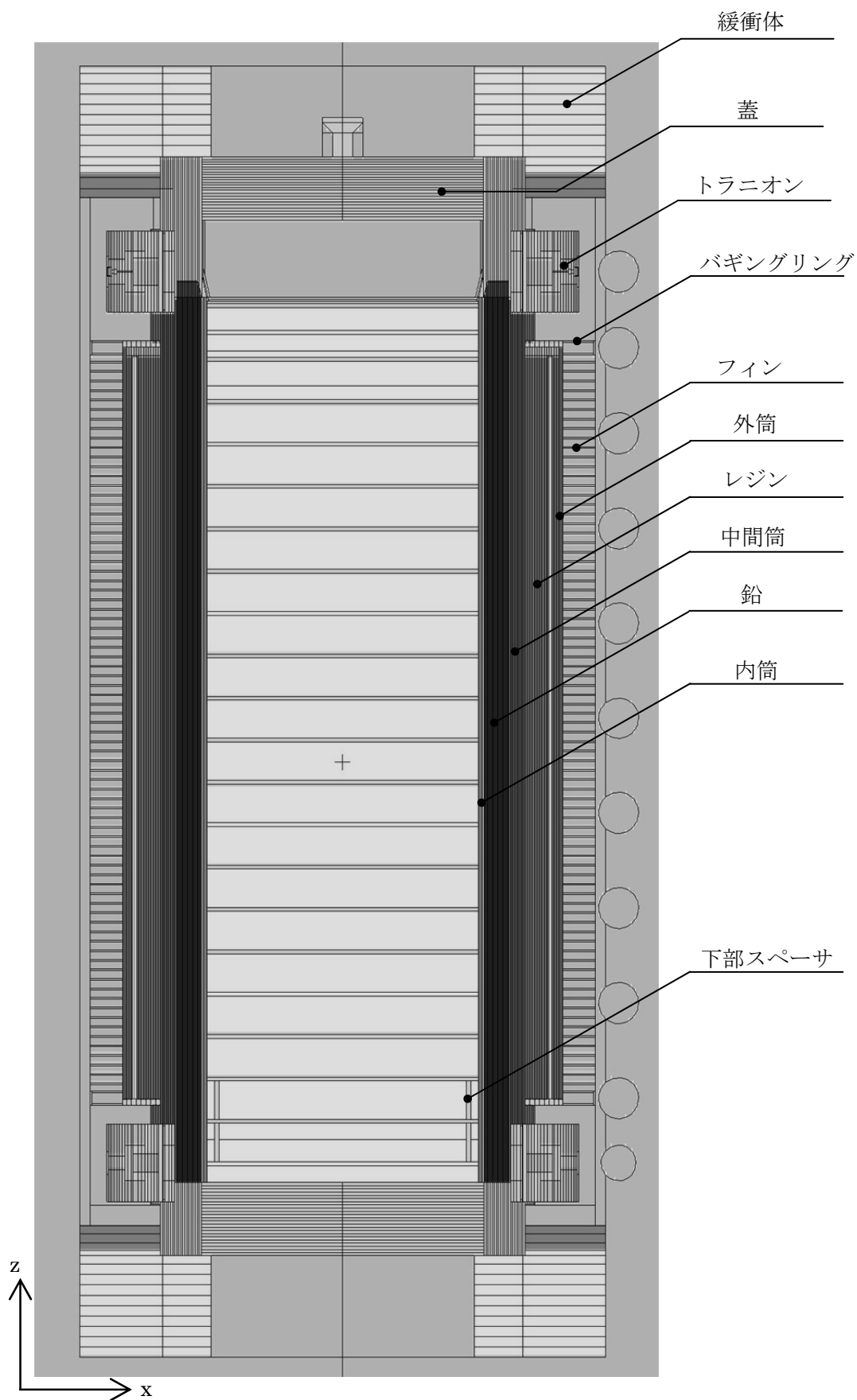


図 5-1 NFT-14P 型 MCNP 計算モデル (x-z 断面)

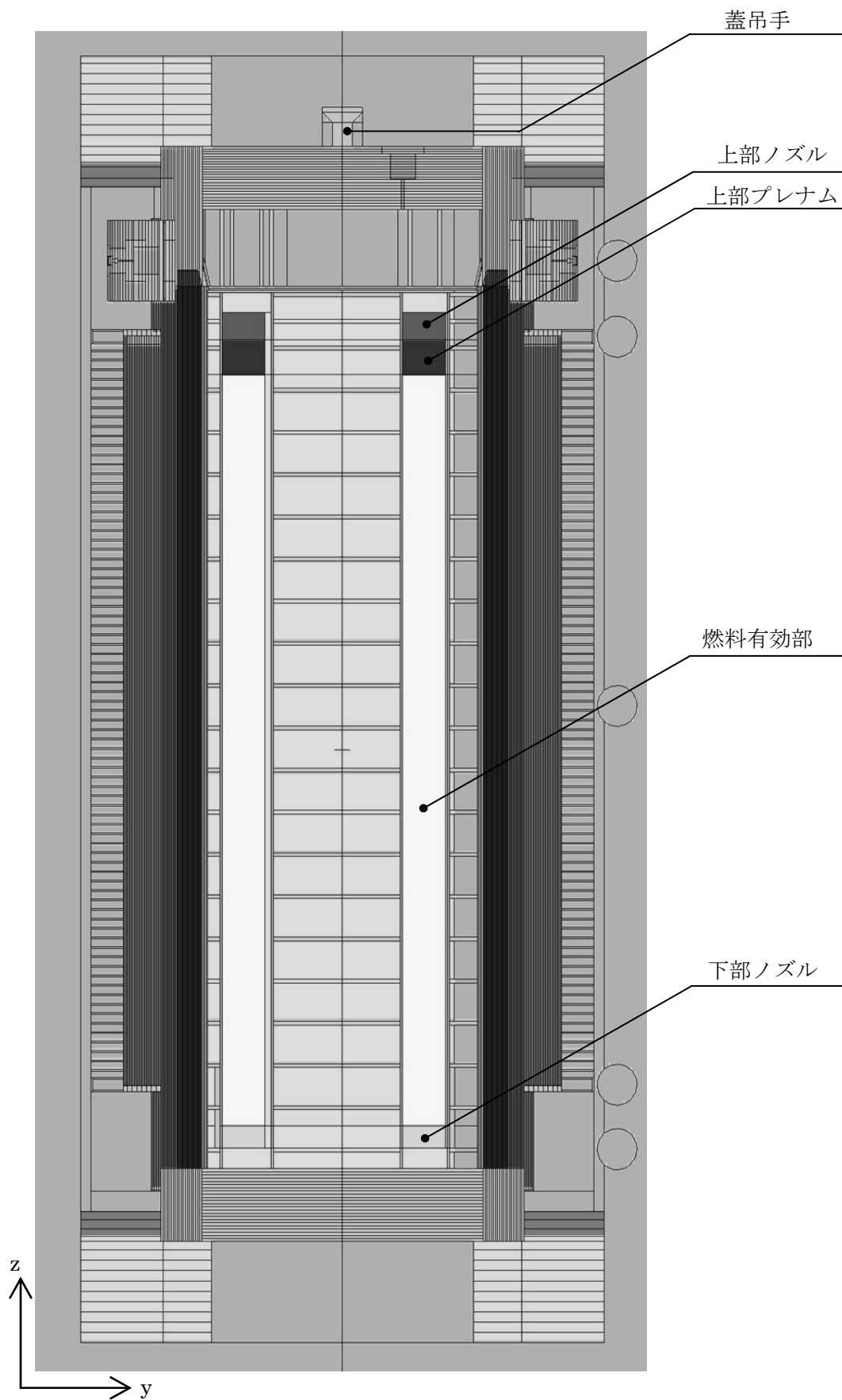


図 5-1 NFT-14P 型 MCNP 計算モデル (y-z 断面)

(2) 線源強度

a. 収納物仕様

線源強度の計算に使用した収納物仕様を表 5-2 及び図 5-2 に示す。

b. 軸方向燃焼度分布の考慮

軸方向燃焼度分布は各収納物共通とした。軸方向燃焼度分布を図 5-3 に示す。

表 5-2 収納物仕様

格子 №	ウラン重量 (kg)	濃縮度 (%)	燃焼度 (MWd/MtU)	冷却期間 (日)
#1	461.1	4.1	33000	1532
#2			40000	1059
#3			40000	1059
#4			45000	1059
#5			41000	843
#6			43000	843
#7			45000	1059
#8			42000	1059
#9			45500	843
#10			45500	843
#11			42000	1059
#12			36000	843
#13			42000	843
#14			36000	843



図 5-3 軸方向燃焼度分布 (収納物共通)



c. 線源強度計算結果

(a) 中性子線源強度計算結果

中性子線源強度を ORIGEN2.2-UPJ コードで計算した結果を表 5-3 に示す。なお、全中性子源強度は増倍効果を考慮して次式により計算した。ここで、 $k_{\text{eff}}=0.66$ とした。

$$(\text{全中性子源強度}) = (\text{一次中性子源強度}) / (1 - k_{\text{eff}})$$

なお、中性子のスペクトルは MCNP コード内蔵の Watt の式により、次式であらわされる ^{239}Pu の核分裂スペクトルを使用する。

$$P(E) = C \cdot \exp(-E/0.966) \cdot \sinh(2.842 \cdot E)^{1/2}$$

ここで、

$P(E)$: 中性子スペクトル

C : 定数

E : 中性子エネルギー(MeV)

表 5-3 中性子源強度 (neutrons/s)

格子 №	ノード 1	ノード 2	ノード 3～21	ノード 22	ノード 23	ノード 24	合計
#1	1.022E+06	4.949E+06	2.029E+08	4.949E+06	2.216E+06	4.222E+05	2.165E+08
#2	2.642E+06	1.263E+07	5.046E+08	1.263E+07	5.827E+06	1.057E+06	5.394E+08
#3	2.642E+06	1.263E+07	5.046E+08	1.263E+07	5.827E+06	1.057E+06	5.394E+08
#4	4.601E+06	2.125E+07	8.338E+08	2.125E+07	9.917E+06	1.783E+06	8.926E+08
#5	3.256E+06	1.485E+07	5.811E+08	1.485E+07	6.935E+06	1.332E+06	6.223E+08
#6	4.208E+06	1.878E+07	7.222E+08	1.878E+07	8.808E+06	1.758E+06	7.745E+08
#7	4.626E+06	2.155E+07	8.313E+08	2.155E+07	1.001E+07	1.868E+06	8.909E+08
#8	3.311E+06	1.564E+07	6.224E+08	1.564E+07	7.293E+06	1.317E+06	6.656E+08
#9	6.457E+06	2.568E+07	9.568E+08	2.568E+07	1.276E+07	2.912E+06	1.030E+09
#10	6.457E+06	2.568E+07	9.568E+08	2.568E+07	1.276E+07	2.912E+06	1.030E+09
#11	3.311E+06	1.564E+07	6.224E+08	1.564E+07	7.293E+06	1.317E+06	6.656E+08
#12	1.825E+06	8.317E+06	3.322E+08	8.317E+06	3.895E+06	7.570E+05	3.553E+08
#13	3.777E+06	1.697E+07	6.573E+08	1.697E+07	8.037E+06	1.581E+06	7.046E+08
#14	1.825E+06	8.317E+06	3.322E+08	8.317E+06	3.895E+06	7.570E+05	3.553E+08
容器 1 基当たり (neutrons/s/基)							9.283E+09

(b) γ 線源強度計算結果

γ 線の線源強度を ORIGIN2.2-UPJ コードで計算した結果を表 5-4 に示す。1～8 群及び 16～18 群をカットしている。また、表 5-5 に#1 格子燃料のスペクトル例を示す。

なお、今回放射化線源は評価していない。

表 5-4 γ 線源強度 (photons/s)

格子№	ノード 1	ノード 2	ノード 3～ 21	ノード 22	ノード 23	ノード 24	合計
#1	7.530E+13	1.221E+14	2.964E+15	1.221E+14	9.530E+13	5.718E+13	3.436E+15
#2	1.201E+14	2.026E+14	5.009E+15	2.026E+14	1.558E+14	8.915E+13	5.779E+15
#3	1.201E+14	2.026E+14	5.009E+15	2.026E+14	1.558E+14	8.915E+13	5.779E+15
#4	1.441E+14	2.433E+14	6.029E+15	2.433E+14	1.864E+14	1.057E+14	6.952E+15
#5	1.463E+14	2.488E+14	6.168E+15	2.488E+14	1.900E+14	1.077E+14	7.110E+15
#6	1.411E+14	2.408E+14	5.964E+15	2.408E+14	1.831E+14	1.040E+14	6.874E+15
#7	1.336E+14	2.268E+14	5.588E+15	2.268E+14	1.734E+14	9.919E+13	6.447E+15
#8	1.293E+14	2.183E+14	5.408E+15	2.183E+14	1.680E+14	9.577E+13	6.238E+15
#9	1.276E+14	2.171E+14	5.395E+15	2.171E+14	1.655E+14	9.421E+13	6.217E+15
#10	1.276E+14	2.171E+14	5.395E+15	2.171E+14	1.655E+14	9.421E+13	6.217E+15
#11	1.293E+14	2.183E+14	5.408E+15	2.183E+14	1.680E+14	9.577E+13	6.238E+15
#12	1.200E+14	2.025E+14	5.017E+15	2.025E+14	1.556E+14	8.851E+13	5.786E+15
#13	1.359E+14	2.320E+14	5.753E+15	2.320E+14	1.772E+14	1.002E+14	6.630E+15
#14	1.200E+14	2.025E+14	5.017E+15	2.025E+14	1.556E+14	8.851E+13	5.786E+15
容器 1 基当り (photons/s/基)							8.549E+16

表 5-5 γ 線スペクトル例 (#1 格子燃料)

№	Energy (MeV)	ノード 1	ノード 2	ノード 3～ 21	ノード 22	ノード 23	ノード 24
1	1.00E-02	2.871E-01	2.714E-01	2.629E-01	2.714E-01	2.797E-01	2.952E-01
2	2.50E-02	6.457E-02	6.127E-02	5.944E-02	6.127E-02	6.302E-02	6.623E-02
3	3.75E-02	6.641E-02	6.308E-02	6.119E-02	6.308E-02	6.485E-02	6.808E-02
4	5.75E-02	5.710E-02	5.422E-02	5.260E-02	5.422E-02	5.576E-02	5.851E-02
5	8.50E-02	3.689E-02	3.512E-02	3.413E-02	3.512E-02	3.605E-02	3.779E-02
6	1.25E-01	3.510E-02	3.376E-02	3.294E-02	3.376E-02	3.449E-02	3.573E-02
7	2.25E-01	3.138E-02	3.001E-02	2.923E-02	3.001E-02	3.074E-02	3.206E-02
8	3.75E-01	1.666E-02	1.605E-02	1.570E-02	1.605E-02	1.638E-02	1.695E-02
9	5.75E-01	3.369E-01	3.478E-01	3.539E-01	3.478E-01	3.420E-01	3.314E-01
10	8.50E-01	5.741E-02	7.482E-02	8.446E-02	7.482E-02	6.559E-02	4.866E-02
11	1.25E+00	9.229E-03	1.121E-02	1.217E-02	1.121E-02	1.019E-02	8.147E-03
12	1.75E+00	5.008E-04	5.532E-04	5.773E-04	5.532E-04	5.267E-04	4.707E-04
13	2.25E+00	7.332E-04	6.843E-04	6.578E-04	6.843E-04	7.100E-04	7.584E-04
14	2.75E+00	1.348E-05	1.494E-05	1.567E-05	1.494E-05	1.419E-05	1.266E-05
15	3.50E+00	1.686E-06	1.883E-06	1.983E-06	1.883E-06	1.782E-06	1.575E-06
16	5.00E+00	7.621E-11	2.546E-10	4.506E-10	2.546E-10	1.385E-10	3.810E-11
17	7.00E+00	8.769E-12	2.934E-11	5.195E-11	2.934E-11	1.595E-11	4.375E-12
18	9.50E+00	1.006E-12	3.369E-12	5.967E-12	3.369E-12	1.831E-12	5.017E-13
合計		1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00

(3) 評価点

a. 中性子

文献に示されている中性子線量当量率測定点のうち、表 5-6 及び図 5-4 に示す点の計算を行った。

表 5-6 中性子線量当量率評価点

計算 No.	測定点 No.	角度 方向	軸方向位置	径方向位置	計算 No.	測定点 No.	角度 方向	軸方向 位置	径方向位置
1	UT-00-C	0°	上部トラニオン	表面(フィン先端位置から 115mm)	17	同左	同左	同左	表面から 1m
2	UT-00-3		上部バギングリング		18	同左	同左	同左	
3	L-00-4		側部中央		19	同左	同左	同左	
4	BT-00-1		下部バギングリング		20	同左	同左	同左	
5	BT-00-C		下部レジンカバー部		21	同左	同左	同左	
6	UT-90-C	90°	上部トラニオン		22	同左	同左	同左	
7	UT-90-3		上部バギングリング		23	同左	同左	同左	
8	L-90-1		側部上端部		24	同左	同左	同左	
9	L-90-2				25	同左	同左	同左	
10	L-90-3				26	同左	同左	同左	
11	L-90-4		側部中央		27	同左	同左	同左	
12	L-90-5				28	同左	同左	同左	
13	L-90-6				29	同左	同左	同左	
14	L-90-7		側部下端部		30	同左	同左	同左	
15	BT-90-1		下部バギングリング		31	同左	同左	同左	
16	BT-90-C		下部トラニオン		32	同左	同左	同左	

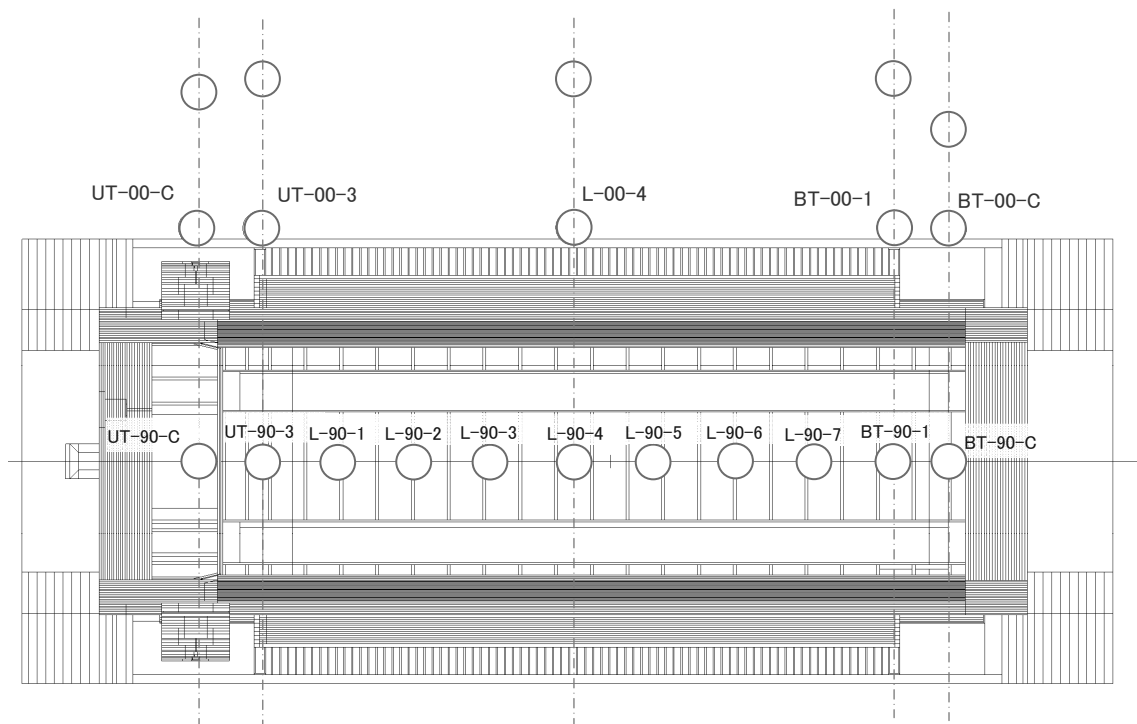


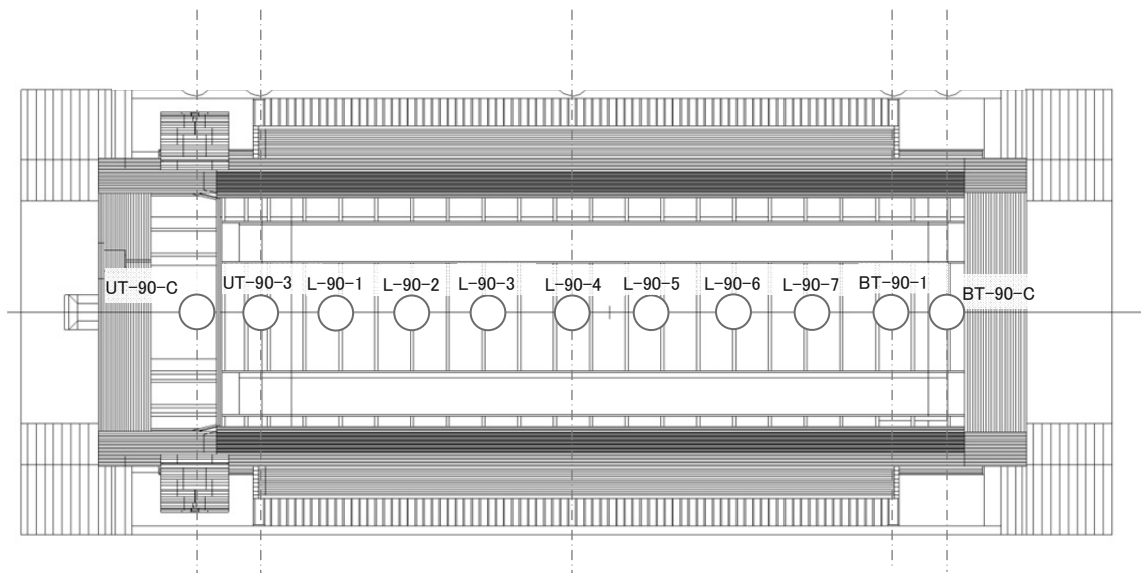
図 5-4 中性子線量当量率評価点

b. γ 線

文献に示されている γ 線量当量率測定点のうち、表 5-7 及び図 5-5 に示す点の計算を行った。

表 5-7 γ 線量当量率評価点

計算 No.	測定点 No.	角度 方向	軸方向位置	径方向位置	計算 No.	測定点 No.	角度 方向	軸方向 位置	径方向位置
1	UT-90-C	90°	上部トラニオン	表面（フィン 先端位置か ら 115mm）	12	同左	同左	同左	表面から 1m
2	UT-90-3		上部バギングリング		13	同左	同左	同左	
3	L-90-1		側部上端部		14	同左	同左	同左	
4	L-90-2				15	同左	同左	同左	
5	L-90-3				16	同左	同左	同左	
6	L-90-4		側部中央		17	同左	同左	同左	
7	L-90-5				18	同左	同左	同左	
8	L-90-6				19	同左	同左	同左	
9	L-90-7		側部下端部		20	同左	同左	同左	
10	BT-90-1		下部バギングリング		21	同左	同左	同左	
11	BT-90-C		下部トラニオン		22	同左	同左	同左	

図 5-5 γ 線量当量率評価点

(4) 線量当量率換算係数

(5) 線量当量率換算係数には ICRP Pub.74 の周辺線量当量率($H^*(10)$)換算係数を用いた。

(6) MCNP 計算条件

MCNP の計算条件を表 5-8 に示す。タリーとしてはトラックレングスエスティメータとネクストイベントエスティメータ(点形状)の両方の計算を行った。

表 5-8 MCNP 計算条件

項目	内容等	
MCNP バージョン	MCNP version5	
ライブラリ	中性子	fsxlb331
	ガンマ線	MCPLIB02
タリー	ネクストイベントエスティメータ(点形状) トラックレングスエスティメータ: 半径 10cm の球	
線源強度区別	燃料集合体毎	
燃料有効部ガンマ線スペクトル	ORIGEN2 出力スペクトル	
中性子スペクトル	Watt Fission Spectrum (^{239}Pu)	
線量当量率変換係数	ICRP Pub.74 周辺線量当量率($H^*(10)$)換算係数 (文献値を log-log 補間)	
分散低減法	ウェイト・ウィンドウ	

5.2. 計算結果

(1) 中性子

中性子線量当量率計算結果と測定値との比較を表 5-9 及び図 5-6～図 5-9 に示す。0°方向表面においては、計算値が測定値を大きく上回っているが、軸方向の傾向は一致している。

0°方向表面から 1m においては、下部トラニオン部を除いて計算値が測定値をやや上回っている。下部トラニオン部では計算値が測定値を大きく上回っている。

90°方向表面においては、計算値が測定値を上回っているが、裕度は軸方向位置によりバラツキがあり、上部の裕度がやや大きい。

90°方向表面から 1m においては、計算値と測定値はほぼ一致し、中央部から下部では計算値が測定値を若干下回っている。測定値が計算値を上回る原因としては、測定時のキャスク 90°方向近傍に壁があったため、下部トラニオン部からの中性子が反射されて測定値が大きくなっている可能性がある。

表 5-9 中性子線量当量率の比較

計算 No.	測定点 No.	径方向 位置	測定値	トラックレンジスエスティメータ			ネクストイベントエスティメータ (点形状)		
				計算値	FSD	C/E	計算値	FSD	C/E
1	UT-00-C	表面	0.816	2.274	0.0535	2.79	2.100	0.0119	2.57
2	UT-00-3		0.796	2.304	0.0413	2.89	2.623	0.0197	3.30
3	L-00-4		2.099	3.079	0.0515	1.47	2.892	0.0159	1.38
4	BT-00-1		2.954	4.270	0.0231	1.45	3.950	0.0130	1.34
5	BT-00-C		4.991	7.470	0.0357	1.50	7.708	0.0092	1.54
6	UT-90-C		0.813	1.676	0.0588	2.06	1.595	0.0117	1.96
7	UT-90-3		0.949	1.925	0.0446	2.03	2.098	0.0179	2.21
8	L-90-1		1.518	2.128	0.0529	1.40	2.154	0.0175	1.42
9	L-90-2		2.494	3.367	0.0458	1.35	3.448	0.0145	1.38
10	L-90-3		2.994	3.727	0.0421	1.24	3.804	0.0139	1.27
11	L-90-4		3.217	3.780	0.0384	1.18	3.851	0.0148	1.20
12	L-90-5		3.305	4.041	0.0435	1.22	3.906	0.0150	1.18
13	L-90-6		3.185	3.887	0.0186	1.22	3.740	0.0144	1.17
14	L-90-7		3.113	3.478	0.0405	1.12	3.341	0.0142	1.07
15	BT-90-1		5.489	6.243	0.0346	1.14	6.049	0.0124	1.10
16	BT-90-C		6.400	8.298	0.0323	1.30	8.441	0.0074	1.32
17	UT-00-C	表面か ら 1m	0.478	0.592	0.0402	1.24	0.647	0.0120	1.35
18	UT-00-3		0.595	0.842	0.0441	1.42	0.809	0.0130	1.36
19	L-00-4		1.196	1.232	0.0323	1.03	1.266	0.0123	1.06
20	BT-00-1		1.283	1.372	0.0410	1.07	1.419	0.0112	1.11
21	BT-00-C		1.383	2.485	0.0300	1.80	2.412	0.0070	1.74
22	UT-90-C		0.623	0.605	0.0801	0.97	0.621	0.0113	1.00
23	UT-90-3		0.773	0.807	0.0427	1.04	0.842	0.0119	1.09
24	L-90-1		1.087	1.027	0.0406	0.94	1.062	0.0114	0.98
25	L-90-2		1.397	1.402	0.0315	1.00	1.417	0.0127	1.01
26	L-90-3		1.613	1.580	0.0292	0.98	1.600	0.0094	0.99
27	L-90-4		1.873	1.670	0.0276	0.89	1.704	0.0087	0.91
28	L-90-5		1.887	1.710	0.0365	0.91	1.716	0.0093	0.91
29	L-90-6		1.838	1.654	0.0577	0.90	1.687	0.0089	0.92
30	L-90-7		1.928	1.767	0.0631	0.92	1.663	0.0094	0.86
31	BT-90-1		2.076	1.931	0.0365	0.93	1.805	0.0112	0.87
32	BT-90-C		2.091	2.202	0.0272	1.05	2.097	0.0091	1.00

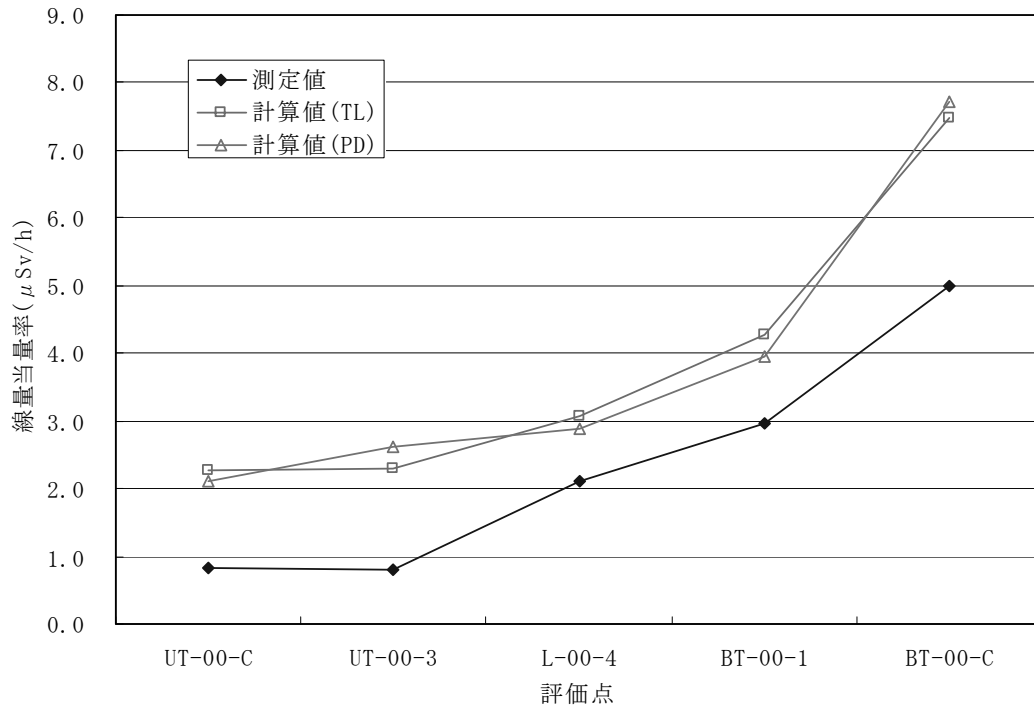


図 5-6 0° 方向表面中性子線量当量率比較

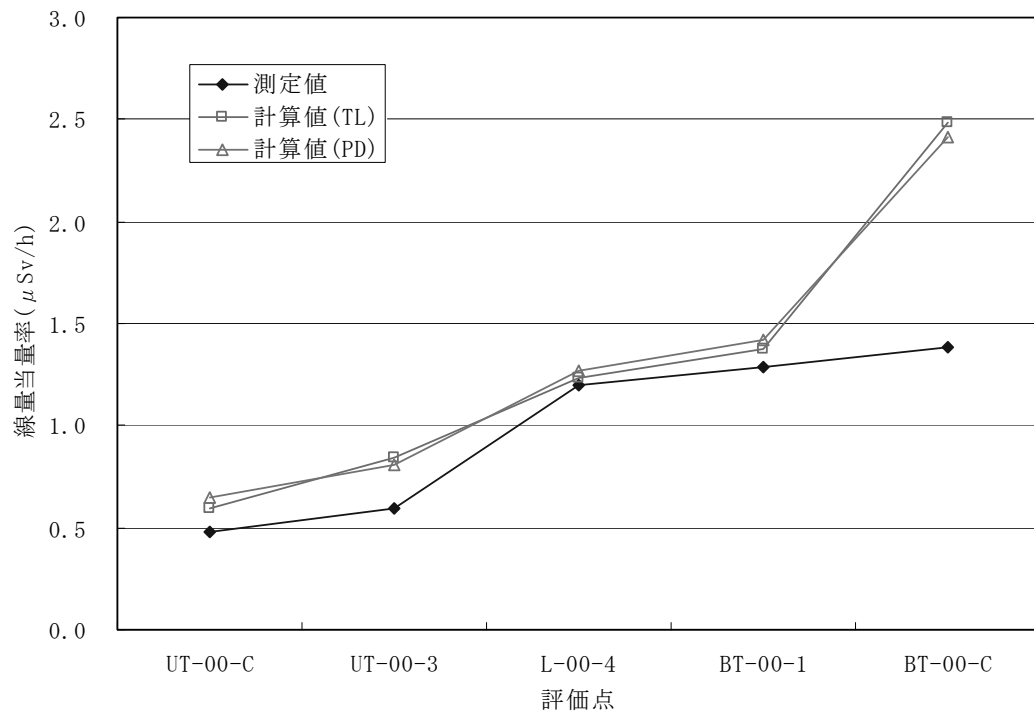


図 5-7 0° 方向表面から 1m 中性子線量当量率比較

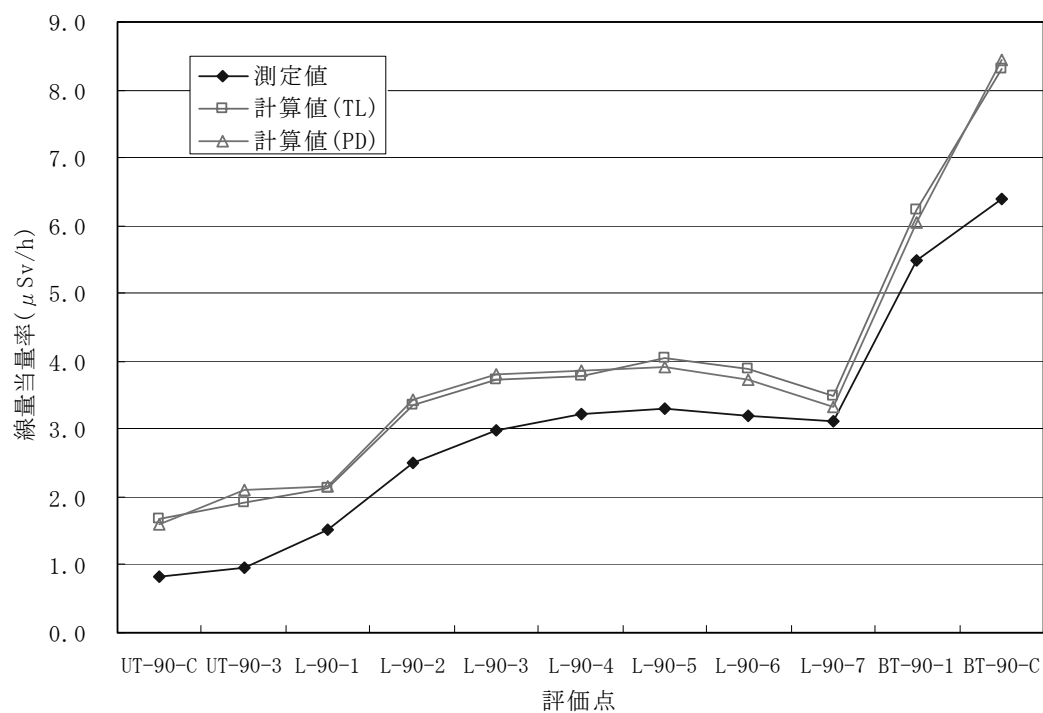


図 5-8 90° 方向表面中性子線量当量率比較

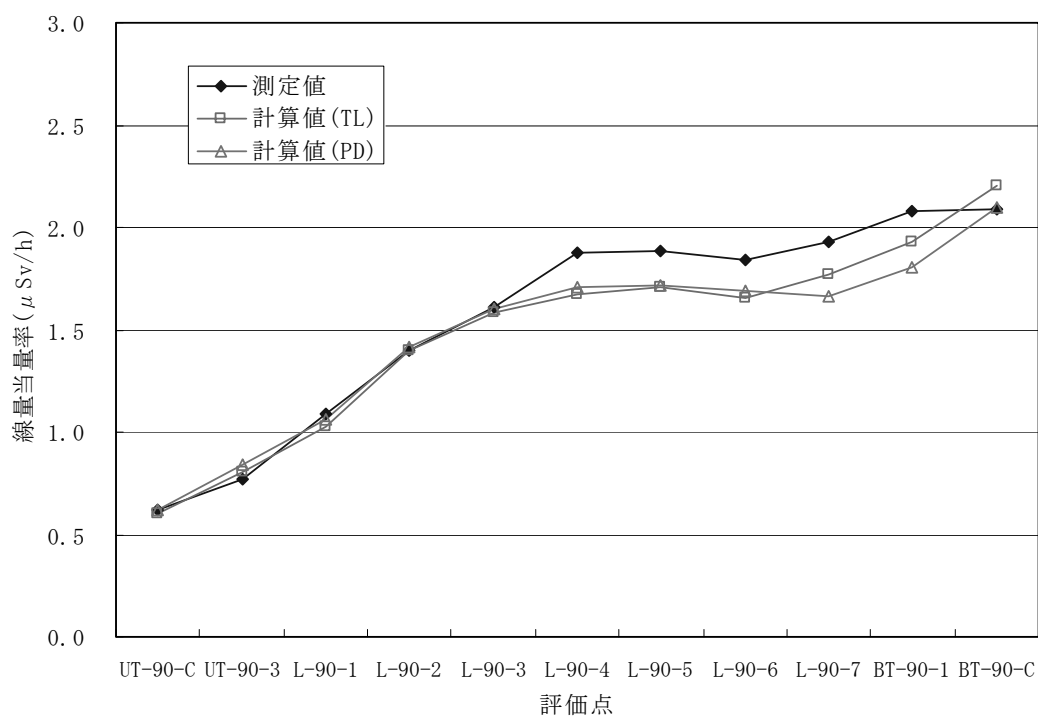


図 5-9 90° 方向表面から 1m 中性子線量当量率比較

(2) γ 線

γ 線量当量率計算結果と測定値との比較を表5-10、表5-11及び図5-10、図5-11に示す。

90°方向表面においては、中央部では計算値が測定値を2割程度上回っている。軸方向上部では計算値が測定値を下回っているが、計算値には端部構造材の放射化ガンマ線による影響が含まれていないためである。

90°方向表面から1mにおいては、中央部では計算値が測定値を5割程度上回っている。軸方向上部では計算値が測定値を下回っているが、計算値には端部構造材の放射化ガンマ線による影響が含まれていないためである。

表 2-10 ガンマ線線量当量率の比較 (トラックレンジスエスティメータ)

計算 No.	測定点 No.	評価 位置	測定値 ($\mu\text{Sv/h}$)	トラックレンジスエスティメータ					
				燃料有効部		二次ガンマ		合計 ($\mu\text{Sv/h}$)	C/E
				計算値 ($\mu\text{Sv/h}$)	FSD	計算値 ($\mu\text{Sv/h}$)	FSD		
1	UT-90-C	表面	1.13	0.80	0.0485	0.05	0.0980	0.85	0.75
2	UT-90-3		2.42	1.68	0.0355	0.08	0.0731	1.76	0.73
3	L-90-1		6.20	8.53	0.0541	0.27	0.0749	8.80	1.42
4	L-90-2		9.21	10.67	0.0446	0.46	0.0614	11.13	1.21
5	L-90-3		9.68	11.45	0.0552	0.52	0.0615	11.97	1.24
6	L-90-4		9.82	11.22	0.0585	0.55	0.0578	11.77	1.20
7	L-90-5		9.19	11.03	0.0538	0.56	0.0658	11.59	1.26
8	L-90-6		9.50	11.71	0.0627	0.51	0.0504	12.22	1.29
9	L-90-7		9.32	11.04	0.0284	0.40	0.0483	11.44	1.23
10	BT-90-1		2.31	6.92	0.0361	0.24	0.0384	7.16	3.10
11	BT-90-C		1.82	5.15	0.0285	0.22	0.0446	5.37	2.95
12	UT-90-C	表面 から 1m	1.18	0.79	0.0380	0.05	0.0919	0.84	0.71
13	UT-90-3		1.59	1.69	0.0296	0.09	0.0694	1.78	1.12
14	L-90-1		2.65	3.81	0.0246	0.14	0.0521	3.95	1.49
15	L-90-2		3.63	5.58	0.0274	0.22	0.0633	5.80	1.60
16	L-90-3		4.10	5.93	0.0293	0.25	0.0490	6.18	1.51
17	L-90-4		4.00	6.03	0.0236	0.26	0.0417	6.29	1.57
18	L-90-5		4.11	6.14	0.0334	0.26	0.0503	6.40	1.56
19	L-90-6		4.07	6.31	0.0363	0.23	0.0426	6.54	1.61
20	L-90-7		3.66	5.44	0.0339	0.19	0.0470	5.63	1.54
21	BT-90-1		2.61	4.33	0.0460	0.13	0.0513	4.46	1.71
22	BT-90-C		1.68	3.25	0.0445	0.10	0.0623	3.35	1.99

表 5-11 ガンマ線線量当量率の比較 (ネクストイベントエスティメータ(点形状))

計算 No.	測定点 No.	評価 位置	測定値 ($\mu\text{Sv/h}$)	ネクストイベントエスティメータ(点形状)					
				燃料有効部		二次ガンマ		合計 ($\mu\text{Sv/h}$)	C/E
				計算値 ($\mu\text{Sv/h}$)	FSD	計算値 ($\mu\text{Sv/h}$)	FSD		
1	UT-90-C	表面	1.13	0.84	0.0388	0.05	0.0116	0.89	0.79
2	UT-90-3		2.42	1.57	0.0293	0.08	0.0397	1.65	0.68
3	L-90-1		6.20	7.79	0.0380	0.28	0.0245	8.07	1.30
4	L-90-2		9.21	10.36	0.0290	0.47	0.0135	10.83	1.18
5	L-90-3		9.68	10.99	0.0432	0.52	0.0168	11.51	1.19
6	L-90-4		9.82	10.65	0.0307	0.54	0.0206	11.19	1.14
7	L-90-5		9.19	10.80	0.0328	0.54	0.0282	11.34	1.23
8	L-90-6		9.50	11.00	0.0346	0.51	0.0161	11.51	1.21
9	L-90-7		9.32	10.08	0.0297	0.43	0.0142	10.51	1.13
10	BT-90-1		2.31	5.16	0.0319	0.22	0.0204	5.38	2.33
11	BT-90-C		1.82	5.27	0.0218	0.22	0.0086	5.49	3.02
12	UT-90-C	表面 から 1m	1.18	0.84	0.0257	0.05	0.0094	0.89	0.75
13	UT-90-3		1.59	1.84	0.0214	0.08	0.0089	1.92	1.21
14	L-90-1		2.65	3.98	0.0210	0.15	0.0137	4.13	1.56
15	L-90-2		3.63	5.53	0.0180	0.21	0.0066	5.74	1.58
16	L-90-3		4.10	6.13	0.0276	0.25	0.0078	6.38	1.56
17	L-90-4		4.00	6.09	0.0160	0.26	0.0074	6.35	1.59
18	L-90-5		4.11	6.07	0.0171	0.26	0.0058	6.33	1.54
19	L-90-6		4.07	5.78	0.0169	0.24	0.0065	6.02	1.48
20	L-90-7		3.66	5.29	0.0201	0.20	0.0086	5.49	1.50
21	BT-90-1		2.61	4.03	0.0230	0.14	0.0125	4.17	1.60
22	BT-90-C		1.68	3.16	0.0248	0.10	0.0072	3.26	1.94

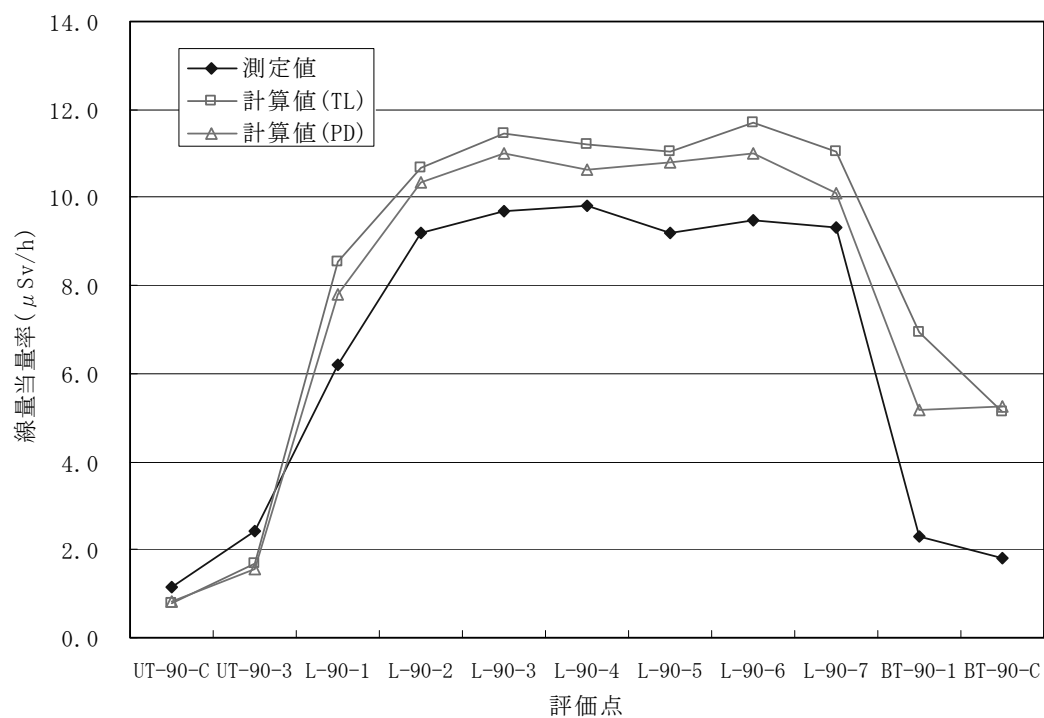


図 5-10 90° 方向表面 γ 線線量当量率比較

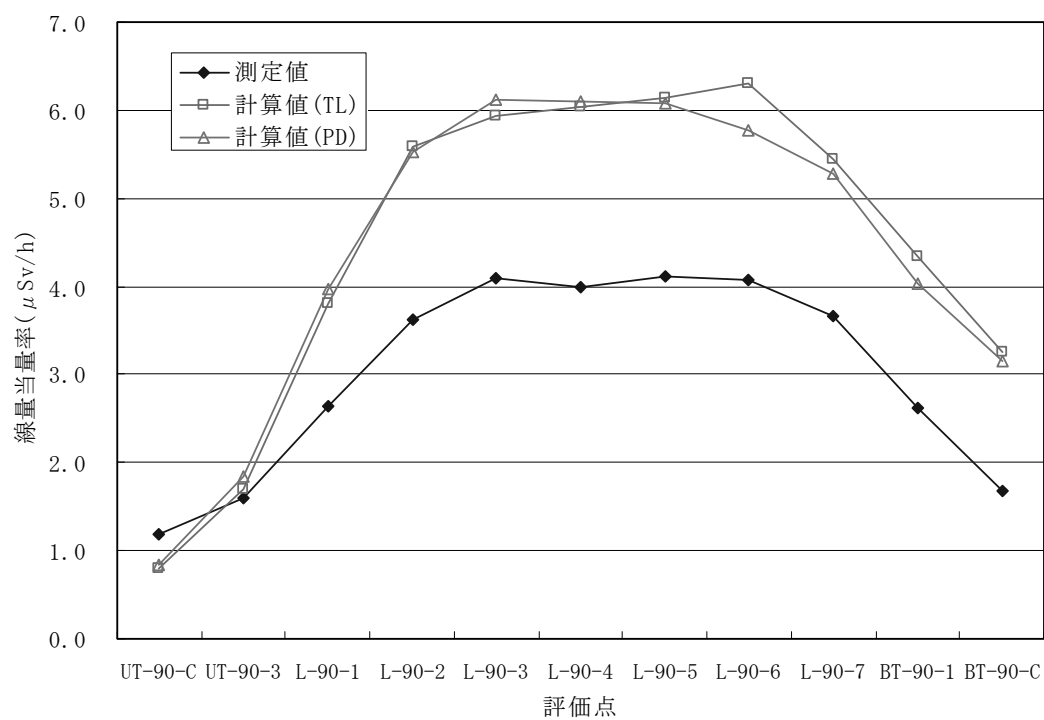


図 5-11 90° 方向表面から 1m γ 線線量当量率比較