

第26回 特定兼用キャスクの設計の型式証明等に係る審査会合(2023年6月22日)

資料1-3-1

Doc. No. L5-95LC204 R1

# 発電用原子炉施設に係る特定機器の 設計の型式証明申請 [MSF-28P型・MSF-76B型]

## 指摘事項への回答

2023.6.22

三菱重工業株式会社

枠囲いの内容は商業機密のため、非公開とします。

1. 指摘事項リスト	…2
2. 指摘事項への回答	…3

# 1. 指摘事項リスト

No.	受領日	コメント内容	区分	コメント回答	対応状況
1	2023/2/7 審査会合	[MSF-28P型及びMSF-76B型] 使用済燃料の収納領域、燃焼度、冷却期間に条件があるが、遮蔽評価や除熱評価の解析条件への考慮方法(評価の代表性)について説明すること。	16条 (遮蔽・除熱)	安全機能評価では、各評価における解析結果が最も厳しくなるよう代表燃料を選定し、解析条件として考慮している。【P.3~5参照】	本審査会合で説明。
2	2023/2/7 審査会合	[MSF-28P型] MSF-28P型のバスケット構造が非対称であることについて、強度評価及び安全機能評価での考慮方法を説明すること。	4条 5条 6条 16条	安全機能評価(16条)において、MSF-28P型の実形状を三次元でモデル化(バスケットの非対称性を解析モデルとして考慮)したモデルにより解析を行っている。【P.6参照】 強度評価(4条、5条、6条)での考慮方法は、次回審査会合で説明予定。	16条関連は、本審査会合で説明。 4条、5条、6条関連は次回審査会合で説明予定。
3	2023/2/7 審査会合	[MSF-28P型及びMSF-76B型] 中性子遮蔽材(レジン)温度の評価基準値根拠及び評価保守性について説明すること。	16条 (除熱)	16条4項二号(除熱)への適合性説明で示した中性子遮蔽材(レジン)の温度に対し、型式証明申請書では、8°C(MSF-28P型)及び7°C(MSF-76B型)切り上げた温度を記載している。 また、中性子遮蔽材の評価基準値は中性子遮蔽材(エポキシ系レジン)の使用可能温度の上限とし、除熱評価では、崩壊熱量や除熱解析モデルにおける使用済燃料集合体の配置等について保守的な設定を適用している。【P.7参照】	本審査会合で説明。
4	2023/2/7 審査会合	[MSF-28P型及びMSF-76B型] 遮蔽評価におけるMCNPコードの適用性について、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に則して説明すること。	16条 (遮蔽)	原子力学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015」のモデル検証及び妥当性確認方法を参考に以下確認を行い、特定兼用キャスクの遮蔽解析にMCNP5コードを適用することは妥当と判断している。【P.8~30参照】 (1)遮蔽解析での確認範囲の整理 (2)数値的解法が検証されていることの確認 (3)MCNP5コードを用いた線量当量率評価値と測定値の比較による評価傾向の確認 (4)既認可で認められたDOT3.5コードを用いた保守的な評価手法に基づく特定兼用キャスク(MSF-24P(S)型)での線量当量率評価値との比較による同等性の確認	本審査会合で説明。

## 2. 指摘事項への回答

### 指摘事項(No.1)

[MSF-28P型及びMSF-76B型] 使用済燃料の収納領域、燃焼度、冷却期間に条件があるが、遮蔽評価や除熱評価の解析条件への考慮方法(評価の代表性)について説明すること。

### (回答)

安全機能評価では、各評価における解析結果が最も厳しくなるよう代表燃料を選定し、解析条件として考慮している。安全機能評価の解析条件における代表燃料及びその選定根拠を下表(MSF-28P型)及び次頁の表(MSF-76B型)に示す。

### [MSF-28P型]

評価項目 <sup>(注1)</sup>	17×17燃料収納時				15×15燃料収納時			
	収納領域A,B,C				収納領域A,B,C			
	48,000MWd/t型		39,000MWd/t型		48,000MWd/t型		39,000MWd/t型	
	A型	B型	A型	B型	A型	B型	A型	B型
臨界防止	代表燃料	代表燃料より濃縮度が低く(又は同じ)、反応度が小さい(又は同じ) <sup>(注2)</sup>			代表燃料	代表燃料より濃縮度が低く(又は同じ)、反応度が小さい(又は同じ) <sup>(注2)</sup>		
遮蔽	代表燃料	代表燃料より線量当量率(最大値)に寄与する線源強度が小さい <sup>(注3)</sup>			17×17燃料収納時の代表燃料より線量当量率(最大値)に寄与する線源強度が小さい <sup>(注3)</sup>			
除熱	代表燃料	代表燃料より崩壊熱量が小さい <sup>(注4)</sup>			17×17燃料収納時の代表燃料より崩壊熱量が小さい <sup>(注4)</sup>			

(注1) 閉じ込め及び長期健全性評価では、表中の代表燃料収納時に **[MSF-28P型の燃料配置]** おける特定兼用キャスク及び使用済燃料の温度を条件とする。

(注2) 濃縮度は以下のとおり。

- ・17×17燃料 48,000MWd/t型(A型・B型) : 4.2wt%以下
- ・17×17燃料 39,000MWd/t型(A型・B型) : 3.7wt%以下
- ・15×15燃料 48,000MWd/t型(A型・B型) : 4.1wt%以下
- ・15×15燃料 39,000MWd/t型(A型・B型) : 3.5wt%以下

(注3) 線源強度の詳細は資料1-1-1のP15~18参照。

(注4) 崩壊熱量の詳細は資料1-1-1のP35~36参照。

## 2. 指摘事項への回答

[MSF-76B型]

評価項目 <sup>(注1)</sup>	配置(1)				配置(2)			
	収納領域A		収納領域B及びC		収納領域A		収納領域B	
	高燃焼度 8×8燃料	新型8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8燃料	新型8×8 ジルコニウム ライナ燃料	8×8燃料	新型8×8 燃料	8×8燃料	新型8×8 燃料
臨界防止	代表燃料	代表燃料より濃縮度が低く反応度が小さい <sup>(注2)</sup>	代表燃料	代表燃料より濃縮度が低く反応度が小さい <sup>(注2)</sup>	配置(1)の代表燃料より濃縮度が低く反応度が小さい <sup>(注2)</sup>			
遮蔽	代表燃料	代表燃料より線量当量率(最大値)に寄与する線源強度が小さい <sup>(注3)</sup>	代表燃料	代表燃料	配置(1)の代表燃料より線源強度が小さい <sup>(注3)</sup>			
除熱	代表燃料 <sup>(注5)</sup>	代表燃料より崩壊熱量が小さい <sup>(注4)</sup>	代表燃料 <sup>(注5)</sup>	代表燃料 <sup>(注5)</sup>	代表燃料 <sup>(注5)</sup>	代表燃料より崩壊熱量が小さい <sup>(注4)</sup>	代表燃料 <sup>(注5)</sup>	代表燃料 <sup>(注5)</sup>

(注1) 閉じ込め及び長期健全性評価では、表中の代表燃料収納時における特定兼用キャスク及び使用済燃料の温度を条件とする。

(注2) 濃縮度は以下のとおり。

- ・高燃焼度8×8燃料 : 3.66wt%以下
- ・新型8×8ジルコニウムライナ燃料 : 3.09wt%以下
- ・8×8燃料 : 2.80wt%以下
- ・新型8×8燃料 : 3.09wt%以下

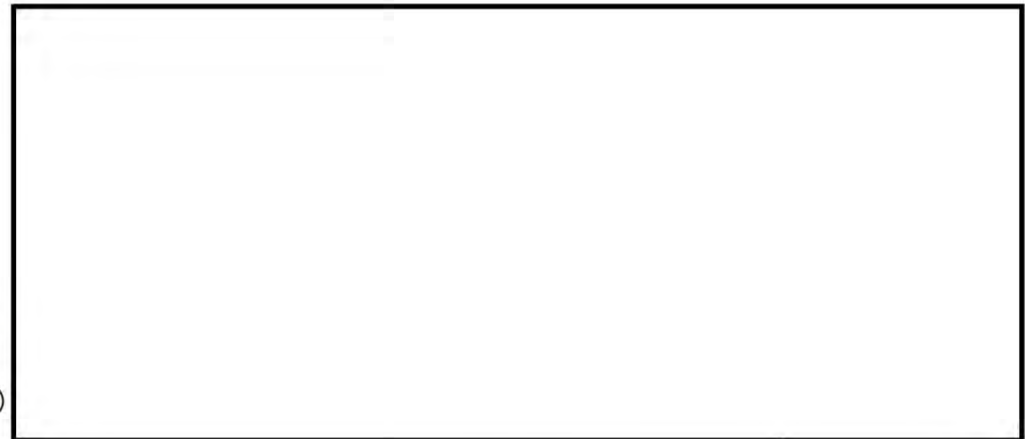
(注3) 線源強度の詳細は資料1-2-1のP15～17参照。

(注4) 崩壊熱量の詳細は資料1-2-1のP34～36参照。

(注5) 特定兼用キャスクの温度評価における代表燃料を示す。

燃料被覆管の温度評価では、特定兼用キャスクの中央(収納領域A)の方が燃料被覆管温度が高くなるため、収納領域Aの崩壊熱量が大きい燃料を代表燃料(配置(1):高燃焼度8×8燃料、配置(2):8×8燃料)としている。(詳細を次頁に示す)。

[MSF-76B型の燃料配置]



## 2. 指摘事項への回答

### <MSF-76B型の除熱解析における代表燃料選定に関する補足>

除熱評価の燃料被覆管温度評価では、評価に用いる燃料型式を以下のとおり選定している。

- 配置(1)については、燃料被覆管温度が高くなる収納領域Aのうち、燃料集合体1体当たりの発熱量が大きい高燃焼度8×8燃料を代表燃料とする。なお、構造仕様及び燃料被覆管の設計基準値は同じである。
- 配置(2)については、燃料被覆管温度が高くなる収納領域Aのうち、燃料集合体1体当たりの発熱量が大きい8×8燃料を代表燃料とする。なお、構造仕様及び燃料被覆管の設計基準値は同じである。

### 除熱評価の燃料被覆管温度評価に使用する燃料集合体の仕様比較

配置(1)	項目	収納領域A		配置(2)	項目	収納領域A	
		高燃焼度 8×8燃料	新型8×8ジルコニウム ライナ燃料			8×8燃料	新型8×8燃料
材料・構造	燃料材質	二酸化ウラン	左記と同じ	材料・構造	燃料材質	二酸化ウラン	左記と同じ
	被覆管材質	ジルカロイ-2			被覆管材質	ジルカロイ-2	
	燃料集合体幅	約134mm			燃料集合体幅	約134mm	
	燃料集合体全長	約4470mm			燃料集合体全長	約4470mm	
	燃料棒配列	8×8			燃料棒配列	8×8	
発熱量 計算条件	濃縮度			発熱量 計算条件	濃縮度		
	燃焼度(最大)				燃焼度(最大)		
	冷却期間(最短)				冷却期間(最短)		
燃料集合体1体当たりの発熱量		260.8W	207.8W	燃料集合体1体当たりの発熱量		135.5W	(注1)
燃料被覆管の設計基準値		300°C	左記と同じ	燃料被覆管の設計基準値		200°C	左記と同じ

(注1) 新型8×8燃料の崩壊熱量は、8×8燃料と同燃焼度、同冷却期間の場合、濃縮度が低い8×8燃料の崩壊熱量以下である。

## 2. 指摘事項への回答

### 指摘事項(No.2)

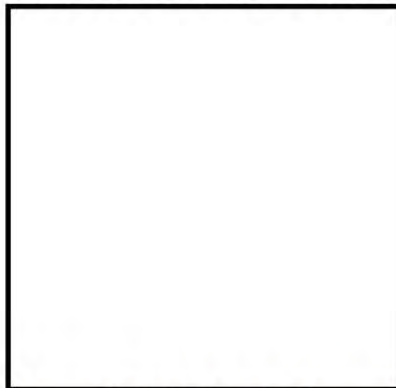
[MSF-28P型] MSF-28P型のバスケット構造が非対称であることについて、強度評価及び安全機能評価での考慮方法を説明すること。

### (回答)

下表に示すとおり、強度評価及び安全機能評価において、バスケット構造の非対称性を考慮している。

評価項目	考慮方法
4条 地震 5条 津波 6条 竜巻	次回審査会合で説明予定。
16条 臨界防止	MSF-28P型の実形状を三次元でモデル化(バスケットの非対称性を解析モデルとして考慮 <sup>(注1)</sup> )したモデルにより解析を実施しており、解析結果は非対称性の影響が反映されている。
16条 遮蔽	
16条 除熱	
16条 閉じ込め	基準漏えい率を算出するために用いる特定兼用キャスク本体内部の空間体積は、MSF-28P型の実形状(バスケットの非対称性を考慮)に基づき設定。

(注1)臨界解析、遮蔽解析及び除熱解析に用いる解析コードは、評価対象の形状を三次元でモデル化できるため、バスケット構造等の対称/非対称性を問わず、実形状を忠実にモデル化できる。



[臨界解析モデル]



[除熱解析モデル(180° 対称モデル)]



[遮蔽解析モデル]

## 2. 指摘事項への回答

### 指摘事項(No.3)

[MSF-28P型及びMSF-76B型] 中性子遮蔽材(レジン)温度の評価基準値根拠及び評価保守性について説明すること。

#### (回答)

16条4項二号(除熱)への適合性説明で示した中性子遮蔽材(レジン)の温度に対し、型式証明申請書では、8°C(MSF-28P型)及び7°C(MSF-76B型)切り上げた温度<sup>(注)</sup>を記載している。

(注)除熱解析で得られた温度に対して5°C以上切上げ、5°C刻みの温度として記載

評価部位	MSF-28P型		MSF-76B型		設計基準値 (°C)
	評価結果(°C)	申請書記載値(°C)	評価結果(°C)	申請書記載値(°C)	
中性子遮蔽材	137	145	133	140	149

中性子遮蔽材の評価基準値根拠及び除熱評価における保守性を下表に示す。上表の中性子遮蔽材の温度は主に下表(1)①の保守性により、程度(MSF-28P型)、程度(MSF-76B型)高めに評価されている。

項目	根拠又は保守性
中性子遮蔽材 評価基準値の根拠	中性子遮蔽材(エポキシ系レジン)の使用可能温度 <sup>(注)</sup> の上限
除熱評価における 保守性	<p>(1)収納制限に対する解析条件の保守性</p> <p>①使用済燃料の崩壊熱量に仕様上の最大崩壊熱量(A)を約14%上回る設計崩壊熱量(B)を適用。 (MSF-28P型: (A)15.7kW → (B)18.0kW、MSF-76B型: (A)14.2kW → (B)16.1kW )</p> <p>②使用済燃料の崩壊熱量算定における濃縮度の公差下限値に対し更に保守的に設定。 (例: MSF-28P型における17×17燃料・・・濃縮度4.1<input type="text"/>wt% ⇒ (計算上の濃縮度)<input type="text"/>wt%)</p> <p>(2)除熱解析モデル化の保守性(主なもの)</p> <p>①本体内のバスケット及びバスケット内の使用済燃料は、燃料温度を高めに評価するよう、空間の中央に配置。</p> <p>②燃料集合体モデルは、軸方向への伝熱を無視し断熱とする。</p> <p>③熱伝導体となるバーナブルポイズン集合体をモデル化しない(MSF-28P型の場合のみ)。</p>

(注) (出典) BISCO PRODUCTS, Inc., "NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material", (1986).



## 2. 指摘事項への回答

### 指摘事項(No.4)

[MSF-28P型及びMSF-76B型] 遮蔽評価におけるMCNPコードの適用性について、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に則して説明すること。

### (回答)

原子力学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン:2015」のモデル検証及び妥当性確認方法を参考に、P.9～19(MSF-28P型)及びP.20～30(MSF-76B型)に示すとおり、特定兼用キャスクの遮蔽解析にMCNP5コードを適用することの妥当性を確認している。

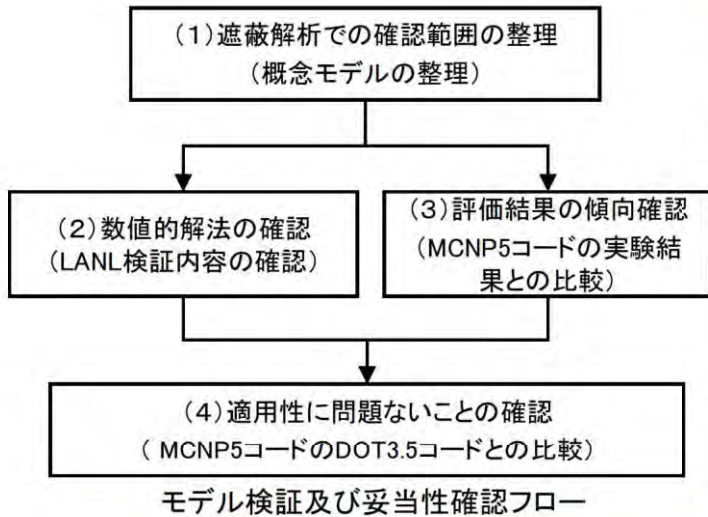
## ● MCNPコードの適用妥当性確認について : MSF-28P型

MCNP5コードの適用妥当性について、特定兼用キャスクに対するMCNP5コードの適用性について、MCNP5コードによる線量当量率分布の評価値は測定値の分布の傾向に対して良い一致を示し、許認可で認められたDOT3.5コードを用いた保守的な手法に基づく線量当量率評価値と同等の結果となることを示すことで説明する。なお、MCNP5コードを用いた遮蔽解析結果の妥当性については、統計指標の確認結果を示すとともに、正確性についてはMSF-28P型に対するMCNP5コードでの遮蔽解析において放射線の挙動が物理的に正しいことを説明する方針とする。

原子力学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン:2015」のモデル検証及び妥当性確認方法を参考に、(1)遮蔽解析での確認範囲の整理、(2)数値的解法が検証されていることの確認、(3)MCNP5コードを用いた線量当量率評価値と測定値の比較による評価傾向の確認、(4)既認可で認められたDOT3.5コードを用いた保守的な評価手法に基づく特定兼用キャスクでの線量当量率の評価値との比較による同等性の確認を行った。

(1)から(3)の確認結果に加え、型式証明での遮蔽解析条件は、(4)で確認したMCNP5コードの保守的な条件設定を踏襲しており、保守性を有する解を得ることができる。以上より、本申請の遮蔽解析にMCNP5コードを適用することは妥当であると判断した。

- (1)本申請の遮蔽解析での確認範囲を考慮すべき概念モデル要素として整理。
- (2)MCNP5は、LANLでのソフトウェア品質保証計画に従って開発されており、LANLで実施したリグレッションテスト、実験値との比較、三次元輸送計算コードの精度確認のためのベンチマーク問題に対する解析解及び参照解との比較結果を基に、数値的解法が精度よく実施できていることを確認。
- (3)MSF-28P型の遮蔽解析と(1)で整理した概念モデル要素が類似した使用済燃料輸送・貯蔵容器体系でのベンチマーク解析により線量当量率分布の傾向を確認し、MCNP5コードによる評価値と測定値の分布の傾向が良い一致を示すことを確認。
- (4)MSF-28P型と同様の体系のMSF-24P型におけるDOT3.5コードによる保守的な手法に基づく既認可評価値と、DOT3.5コードと同様の条件で実施したMCNP5コードによる評価値を比較した結果、同等の結果であり、DOT3.5コードと同様の条件とすればMCNP5コードで保守性を有する解が得られることを確認。



No.	確認結果	備考
(1)	MSF-28P型の遮蔽解析での確認範囲を考慮すべき概念モデル要素として整理。(P.10~13)	考慮すべき概念モデル要素としてミクロ的な物理現象(散乱、吸収等)、マクロ的物理現象(構造材透過、ストリーミング効果、線源の相互遮蔽)を整理。
(2)	解析コード開発機関(LANL)で実施したリグレッションテスト、実験値との比較や三次元輸送計算コード精度確認のためのベンチマーク(解析解及び参照解)との比較により、数理モデルへの変換及び数値モデルへの変換は精度良く実施できていることを確認済み。(P.14)	ベンチマークは散乱無し(解析解)と散乱有の条件(MVPコードによる参照解)での比較で良く一致していると検証されていることを確認。
(3)	使用済燃料輸送・貯蔵容器体系におけるベンチマーク解析より、評価値の傾向が良い一致を示すことを確認。(P.15~17)	使用済燃料輸送・貯蔵容器体系におけるベンチマーク解析は、(1)で整理した概念モデル要素の内容がMSF-28P型と類似したものを選定。
(4)	MSF-28P型と類似の体系であるMSF-24P型を対象とした認可済のDOT3.5コードを用いた解析結果との比較により、同等の結果が得られることを確認。(P.18~19)	DOT3.5コードを用いた解析は実形状を二次元でモデル化したものとして認可されたものである。なお、MSF-28P型の評価条件は、使用済燃料の収納条件や評価モデルの不確かさを保守的に設定。

## 2. 指摘事項への回答

### (1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(1/4)

- MSF-28P型の線量当量率の評価結果に影響を与える要素として、確認が必要な項目を整理した。
- 収納される使用済燃料のミクロ的な物理現象(散乱・吸収)に基づく遮蔽材の透過、遮蔽材欠損部でのストリーミング効果及び使用済燃料が複数収納されることによる相互遮蔽といったマクロ的な物理現象の考慮が必要。これら物理現象を考慮するにあたり、使用済燃料の線源条件、線源形状、遮蔽材質及び形状が必要。
- (3)(P. 15~17)のMCNP5コードによる評価値と線量率測定値を比較するベンチマーク解析の選定では、各要素が類似のものを選定した。

MSF-28P遮蔽解析 で考慮すべき 概念モデル要素	評価に影響 のある因子	評価条件				備考
		MSF-28P型 遮蔽解析	MSF-24P(S)型 先行キャスク	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系)	ベンチマーク (乾式貯蔵容器体系)	
【物理現象】 ミクロ ・散乱 ・吸収 マクロ ・遮蔽材の透過 ・遮蔽材欠損部で のストリーミング ・相互遮蔽	計算コード	MCNP5 ver.1.60コードを 用いて評価	MCNP5 ver.1.60コードを 用いて評価	MCNP5コードを用いて評価	MCNP5 ver.1.60コードを用い て評価	・MSF-28P型及び24P(S)型 は同じコードを採用。
	断面積 ライブラリ	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	・MSF-28P型及び24P(S)型 は同じ断面積ライブラリを 採用。
		ガンマ線 ・MCPLIB84	ガンマ線 ・MCPLIB84	ガンマ線 ・MCPLIB02	ガンマ線 ・MCPLIB84	・MSF-28P型及び24P(S)型 は同じ断面積ライブラリを 採用。
【線源】 PWR使用済燃料	中性子 線源条件	スペクトル ・Watt型 <sup>239</sup> Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・Watt型 <sup>239</sup> Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・Watt型 <sup>239</sup> Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・Watt型 <sup>244</sup> Cm 核分裂スペクトル	・MSF-28P型及び24P(S)型 は同じ <sup>239</sup> Pu核分裂スペク トルを採用。
		線源強度 ・ORIGEN2出力(2.2UPJ)	線源強度 ・ORIGEN2出力(2.2UPJ)	線源強度 ・ORIGEN2出力(2.2UPJ)	線源強度 ・ORIGEN2出力(2.2UPJ)	・MSF-28P型及び24P(S) 型はウラン初期濃縮度 を保守的に設定。
		燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	・MSF-28P型及び24P(S) 型は収納燃料を包含す る燃焼度を設定。
		冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・実績考慮	冷却期間 ・実績考慮	・MSF-28P型及び24P(S)型 は収納燃料を包含する冷 却期間を設定。

## 2. 指摘事項への回答

### (1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(2/4)

MSF-28P遮蔽解析 で考慮すべき 概念モデル要素	評価に影響 のある因子	評価条件				備考
		MSF-28P型 遮蔽解析	MSF-24P(S)型 先行キャスク	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系)	ベンチマーク (乾式貯蔵容器体系)	
【線源】 使用済燃料	ガンマ線 線源条件	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ:-	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	・MSF-28P型及び24P(S)型は同じ手法で設定。
		線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: <sup>59</sup> Co含有量からの計算値	線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: <sup>59</sup> Co含有量からの計算値	線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ:未考慮	線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: <sup>59</sup> Co含有量からの計算値	・MSF-28P型及び24P(S)型はウラン初期濃縮度を保守的に設定。
		燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	・MSF-28P型及び24P(S)型は同じ手法で設定。
		冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・実績考慮	冷却期間 ・実績考慮	・MSF-28P型及び24P(S)型は同じ手法で設定。

## 2. 指摘事項への回答

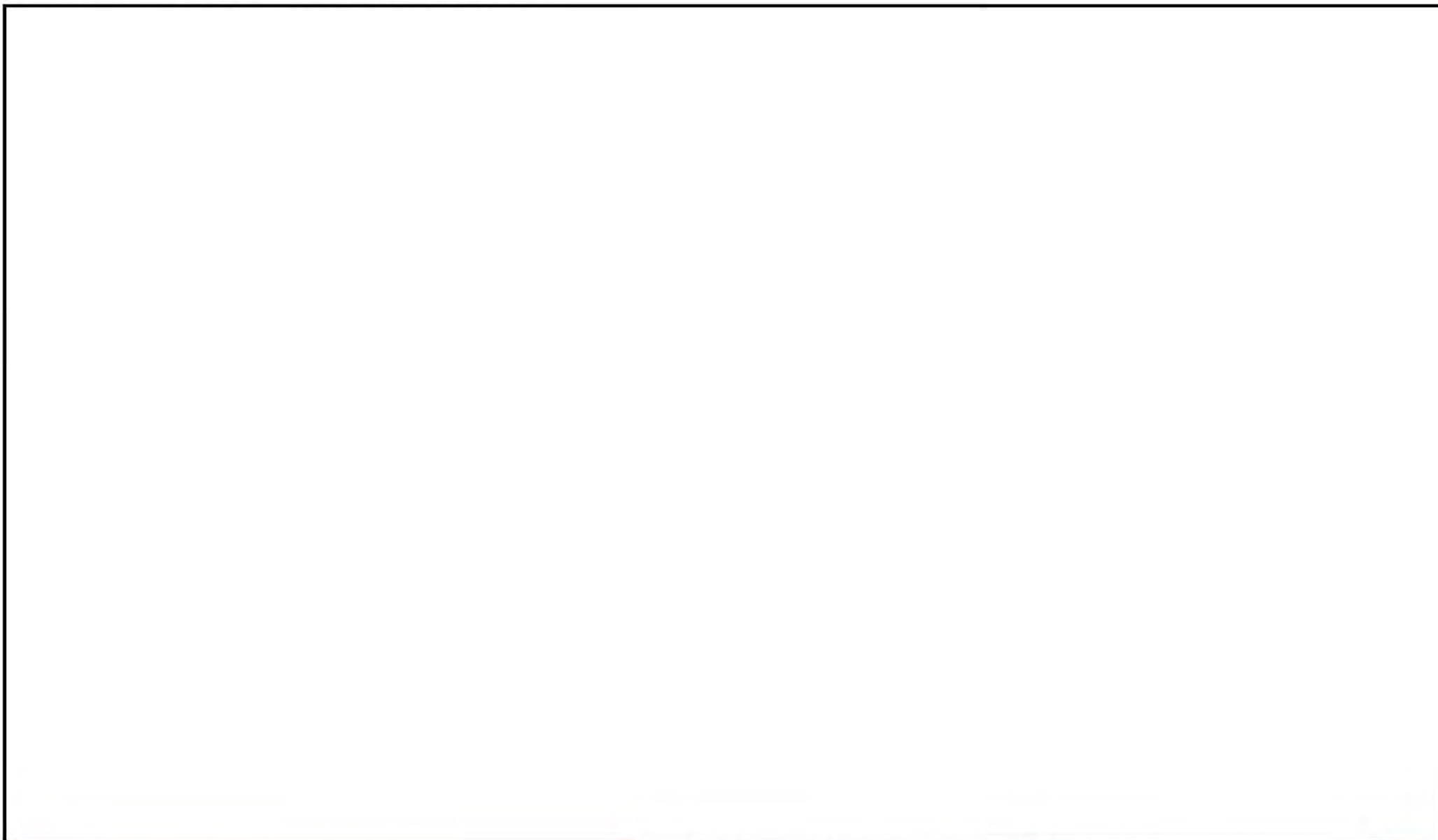
### (1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(3/4)

MSF-28P遮蔽解析 で考慮すべき 概念モデル要素	評価に影響 のある因子	評価条件				備考
		MSF-28P型 遮蔽解析	MSF-24P(S)型 先行キャスク	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系)	ベンチマーク (乾式貯蔵容器体系)	
【線源形状】 使用済燃料	燃料集合 体(線源 領域)の 設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・使用済PWR燃料28体</li> <li>・1体ごとに均質化</li> <li>・上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割</li> <li>・バスケット内均質化</li> <li>・燃料集合体は一次蓋及び胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置</li> <li>・燃料配置:1/2対称</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・使用済PWR燃料24体</li> <li>・1体ごとに均質化</li> <li>・上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割</li> <li>・バスケット内均質化</li> <li>・燃料集合体は一次蓋及び胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置</li> <li>・燃料配置:1/4対称</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・使用済PWR燃料14体</li> <li>・1体ごとに均質化</li> <li>・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</li> <li>・燃料集合体は胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置</li> <li>・燃料配置:1/2対称</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・使用済PWR燃料1体</li> <li>・1体ごとに均質化</li> <li>・上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割</li> <li>・バスケット内均質化</li> <li>・燃料集合体は胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置</li> <li>・燃料配置:1/2対称</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各燃料仕様に基づき、MCNP5コードの条件として設定。</li> <li>・MSF-28P型及び24P(S)型は軸方向での燃料集合体の移動を考慮し、一次蓋及び胴(底板)に接した状態となるよう設定。</li> <li>・MSF-28P型及び24P(S)型は使用済燃料を燃料集合体1体毎に均質化したモデルを採用。</li> <li>・燃料配置はMCNP5コードで実際の配置通りに設定。</li> </ul>
【遮蔽材質及び形状】 放射性物質輸送・貯蔵 容器構造材の材料 及び形状、組成、密度 公差	材質	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、レジン、銅等</li> <li>・緩衝体:なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、レジン、銅等</li> <li>・緩衝体:なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、鉛、レジン、水等(湿式キャスク)</li> <li>・緩衝体:木材</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、レジン等</li> <li>・緩衝体:なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MSF-28P型及び24P(S)型の遮蔽材は同等。(P.13参照)</li> </ul>
	形状	実形状 <ul style="list-style-type: none"> <li>・外径約2.7m</li> <li>・長さ約5.2m</li> </ul>	実形状 <ul style="list-style-type: none"> <li>・外径約2.6m</li> <li>・長さ約5.2m</li> </ul>	実形状 <ul style="list-style-type: none"> <li>・外径約2.6m(緩衝体含む)</li> <li>・長さ約6.3m(緩衝体含む)</li> </ul>	実形状 <ul style="list-style-type: none"> <li>・外径約1.7m</li> <li>・長さ約5.2m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MSF-28P型及び24P(S)型の形状や構造は同等。(P.13参照)</li> </ul>
	組成/密度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最小密度</li> <li>・レジン組成カタログ値</li> <li>・設計貯蔵期間のレジン質量減損考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最小密度</li> <li>・レジン組成カタログ値</li> <li>・設計貯蔵期間のレジン質量減損考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最小密度</li> <li>・レジン組成カタログ値</li> <li>・水組成:発熱量より概算</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最小密度</li> <li>・レジン組成カタログ値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MSF-28P型及び24P(S)型ではレジン減損を考慮。</li> <li>・MSF-28P型及び24P(S)型ではバーナブルポイズン集合体の遮蔽効果を無視。</li> </ul>
	寸法公差	<ul style="list-style-type: none"> <li>・密度に考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・密度に考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・考慮しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・考慮しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MSF-28P型及び24P(S)型では寸法公差を密度係数として考慮。</li> </ul>

## 2. 指摘事項への回答

(1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(4/4)

➤ MSF-28P型とMSF-24P(S)型の構造比較



## 2. 指摘事項への回答

### (2) 数値的解法の確認

- MCNP5コードは、LANLのソフトウェア品質保証計画<sup>(注1)</sup>に従って開発されており、計算コードの検証と妥当性確認がなされたものである。
- LANLでMCNP5コードに対して実施された検証内容<sup>(注2)</sup>を確認した。
- LANLの検証では、リグレッションテスト、中性子及びガンマ線遮蔽に関する遮蔽実験値との比較、3次元輸送計算コードの精度確認のためのベンチマーク問題(Kobayashiベンチマーク)での解析解とMVPコードによる参照解との比較を実施している。
- 以下のLANLでの検証結果より、MCNP5コードの数値的解法に問題無いことを確認した。

#### ① リグレッションテスト

- リグレッションテストで今回のバージョン(ver1.60)での変更以外に影響がないことを確認。
- なお、リグレッションテストで用いられている計算は、ガンマ線や中性子のベンチマーク問題として整理されたものが含まれており、キャスクの評価に必要なガンマ線や中性子の輸送計算に必要な散乱・吸収といった現象が考慮された実験値や解析値に対して、MCNPコードを用いて精度よく予測できることが確認されている<sup>(注3)</sup><sup>(注4)</sup>。

#### ② 遮蔽実験値との比較

- 中性子スペクトル測定、中性子・ガンマ線遮蔽及びガンマ線スカイシャイン実験値とMCNP5コードでの解析値の比較で良い一致を得ている。

#### ③ Kobayashiベンチマーク

- 3次元輸送ベンチマーク問題として、吸収の強い体系中にボイド領域があるような、ストリーミングのベンチマークとの比較を実施。
- 散乱がない場合は解析解との比較、散乱がある場合はMVPコードを用いた参照解との比較を実施し、良い一致を得ている。

(注1) Hilary. M. Abhold, John. S. Hendricks, “MCNP™ Software Quality Assurance Plan”, LA-13138, (1996).

(注2) Forrest Brown, Brain Kiedrowski, Jeffery Bull, Matthew Gonzales, Nathan Gibson, “Verification of MCNP5-1.60”, LA-UR-10-05611, (2010).

(注3) Daniel J. Whalen, David E. Hollowell and John S. Hendricks, “MCNP: Photon Benchmark Problems”, LA-12196, (1991).

(注4) Daniel J. Whalen, David. A. Cardon, Jennifer L. Uhle and John S. Hendricks, “MCNP: Neutron Benchmark Problems”, LA-12212, (1991).

## 2. 指摘事項への回答

### (3) 評価結果の傾向確認(MCNP5コードの実験結果との比較) (1/3)

<評価条件(使用済燃料輸送容器体系及び乾式貯蔵容器体系)>

- ベンチマーク解析に用いる評価条件は下表に示すとおり、現実的な設定としているが、遮蔽材の密度を最小密度とする等、保守的な条件設定も存在する。

項目		使用済燃料輸送容器体系(P.16)	乾式貯蔵容器体系(P.17)
容器名称		NFT-14P型輸送容器(PWR使用済燃料14体収納)	乾式貯蔵試験容器(PWR使用済燃料1体収納)
線源	線源スペクトル	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子スペクトル: 239Pu核分裂スペクトル</li> <li>燃料有効部ガンマ線スペクトル: ORIGEN2(2.2UPJ)出力</li> <li>構造材ガンマ線スペクトル: -(注1)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子スペクトル: 244Cm核分裂スペクトル</li> <li>燃料有効部ガンマ線スペクトル: ORIGEN2出力(2.2UPJ)</li> <li>構造材ガンマ線スペクトル: 1.17MeV-50%、1.33MeV-50%</li> </ul>
	燃焼度	<ul style="list-style-type: none"> <li>集合体燃焼度: 実績燃焼度</li> <li>軸方向分布: 実績燃焼度を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>集合体燃焼度: 実績燃焼度</li> <li>軸方向分布: 実績燃焼度を考慮</li> </ul>
線源形状	燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料集合体を1体ごとに均質化</li> <li>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</li> <li>軸方向の燃料位置は底部側寄せ配置</li> <li>バスケット内の左右方向は中央配置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料集合体を均質化</li> <li>上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割</li> <li>軸方向の燃料位置は底部側寄せ配置</li> <li>バスケット内の燃料集合体は均質化</li> </ul>
材質及び形状	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及び吊り具は無視)	基本的に形状どおりモデル化
	本体	基本的に形状どおりモデル化 (内部水位は水膨張無視)	基本的に形状どおりモデル化
	蓋	基本的に形状どおりモデル化 (蓋ボルト部は簡略化)	基本的に形状どおりモデル化 (蓋ボルトは簡略化)
	緩衝体	基本的に形状どおりモデル化 (カバープレート、内部リブは無視(木材に置き換え))	(緩衝体は未装着)
	架台、地面	無視	簡略化してモデル化
	周囲構造物	無視	無視
	組成・密度	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼材、鉛: 最小密度</li> <li>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)</li> <li>水密度: 水温を発熱量より換算して設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼材: 最小密度</li> <li>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)</li> </ul>
寸法公差	考慮しない	考慮しない	

(注1) 使用済燃料輸送容器体系ではベンチマーク解析において構造材ガンマ線を考慮していない。

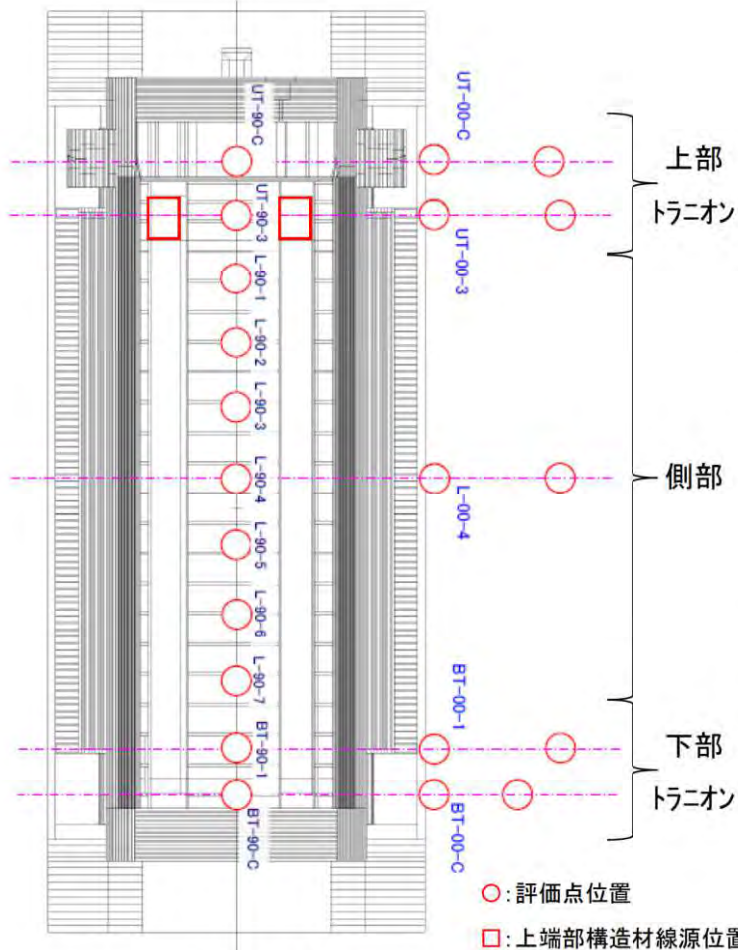


## 2. 指摘事項への回答

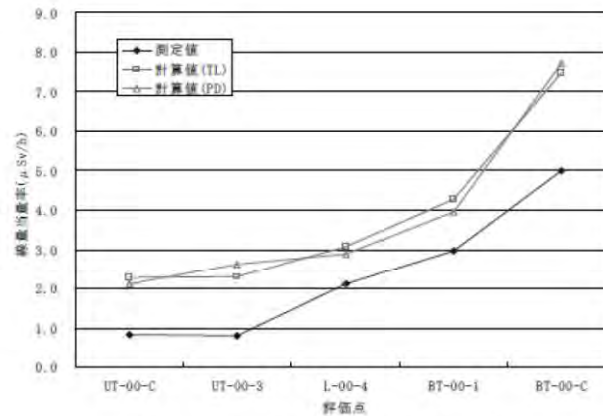
### (3) 評価結果の傾向確認 (MCNP5コードの実験結果との比較) (2/3)

#### <評価モデル及び評価結果(使用済燃料輸送容器体系)>

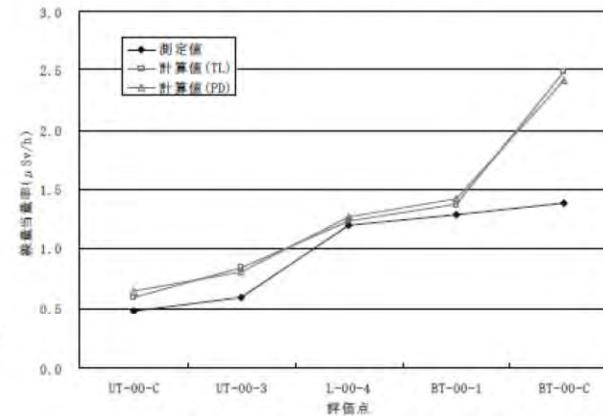
線量当量率の計算値と測定値の比較では、遮蔽材の密度を最小密度としており基本的に測定値を上回るが、分布としては同様の傾向を示していることが確認されている。計算値が測定値を下回る点について、中性子についてはベンチマーク解析では考慮されていない使用済燃料輸送容器近傍の壁による反射の影響により解析結果に対して測定値が高くなったとされている。また、ガンマ線についてはベンチマーク解析において端部線源強度の高い構造材放射化ガンマ線源を考慮していないことが原因と考えられる。



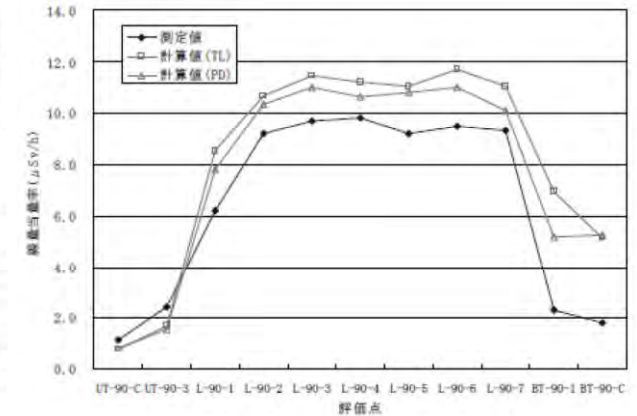
(解析モデル)



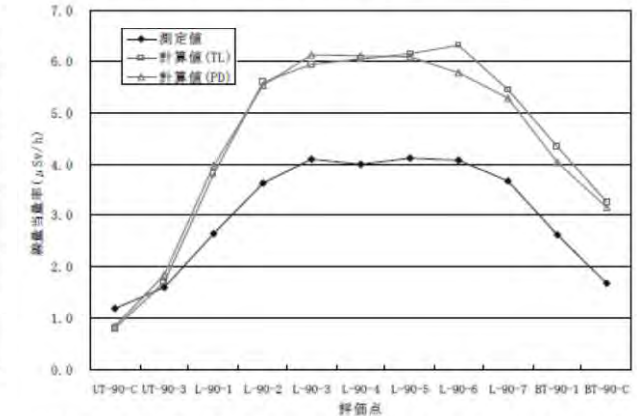
(中性子線量当量率、表面位置 0° 方向)



(中性子線量当量率、表面から 1 m 離れた位置 0° 方向)



(ガンマ線線量当量率、表面位置 90° 方向)



(ガンマ線線量当量率、表面から 1 m 離れた位置 90° 方向)

(評価結果例)

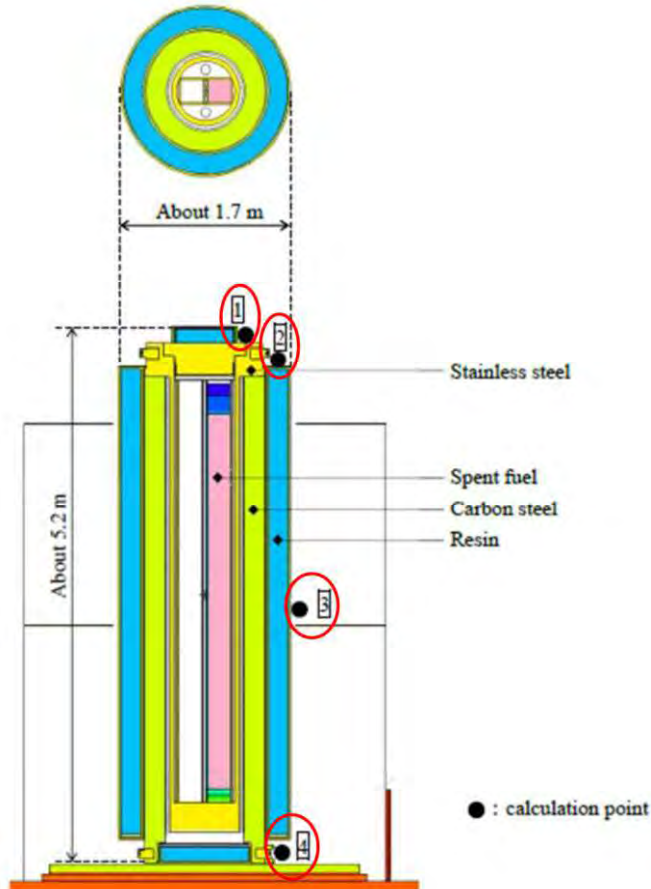
#### NFT-14P型輸送容器によるMCNP5コードの検証

(出典) 一般社団法人日本原子力学会、「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 平成23年度報告書」, (2012).

### (3) 評価結果の傾向確認 (MCNP5コードの実験結果との比較) (3/3)

#### <評価モデル及び評価結果(乾式貯蔵容器体系)>

線量当量率の計算値と測定値の比較では、良い一致を示している。なお、測定は建屋内部で実施されたが、ベンチマーク解析では乾式貯蔵容器周辺の周囲構造物はモデル化されておらず、周囲構造物による中性子やガンマ線の反射が考慮されていないため、一部の計算値が測定値を下回っているものと考えられる。



(解析モデル)

Table 3. Experimental and calculated results (neutron dose equivalent rate)

Measurement point	Experimental value (μSv/h)	Calculated value (μSv/h)	Calculated / Experimental
1	9.93±0.17	10.20±1.8E-02	1.03±0.02
2	9.71±0.13	9.01±3.2E-02	0.93±0.01
3	0.47±0.02	0.52±9.8E-03	1.11±0.04
4	9.66±0.18	11.33±3.7E-02	1.17±0.02

Table 4. Experimental and calculated results (gamma-ray dose equivalent rate)

Measurement point	Experimental value (μSv/h)	Calculated value (μSv/h)	Calculated / Experimental
1	N/D*	-	-
2	N/D*	-	-
3	2.5±0	2.25±0.04	0.90±0.02
4	N/D*	-	-

\*below the detection limit 0.5 μSv/h

(評価結果)

#### 乾式貯蔵容器によるMCNP5コードの検証

(出典) M. Ueyama M. Osaki, "Dose Equivalent Rate Benchmark Calculations of a Dry Storage Cask for Spent Fuel by 3D Monte Carlo Code", PATRAM 2019, (2019).

## 2. 指摘事項への回答

### (4) DOT3.5による既認可評価値(MSF-24P型)との同等性の確認(1/2)

- 許認可実績が豊富な二次元輸送計算コードDOT3.5による既認可評価値との比較を実施した。
- 比較対象は、MSF-28P型の輸送様態と同じ仕様・構造であるMSF-24P型での既認可の核燃料輸送物質設計変更承認申請(原規規発第22061412号により令和4年6月14日承認)<sup>(注1)</sup>のうち17×17燃料 48,000MWd/t型(A型)収納時とした。各解析コードでの計算方法及び条件設定概要を下表に示す。
- DOT3.5コードを用いた評価手法は既認可申請において文献<sup>(注2)</sup>を基に保守性があるものとして妥当であると判断されている。
- 先行キャスクにおけるMCNP5コードによる評価は、DOT3.5コードと同様の条件で実施している。
- MCNP5コード及びDOT3.5コードによるMSF-24P型表面及び表面から1m離れた位置における線量当量率をP.19に示す。DOT3.5コードの特性上の要因により、頭部及び底部の径方向の一部(トラニオン部近傍)において線量当量率評価値に差異が生じる<sup>(注3)</sup>ものの、その他の領域では同様の線量当量率及び傾向であり、MCNP5コードを使用済燃料輸送・貯蔵容器体系に適用した場合において、DOT3.5コードと比較して同等の結果が得られている。したがって、MCNP5コードにより、DOT3.5コードと同様に妥当な解が得られることを確認した。

(注1) 四国電力株式会社「核燃料輸送物設計変更承認申請書」,原子力発21329号, (2021).

(注2) 一般社団法人 日本原子力学会「中性子遮蔽設計ハンドブック」, (1993).

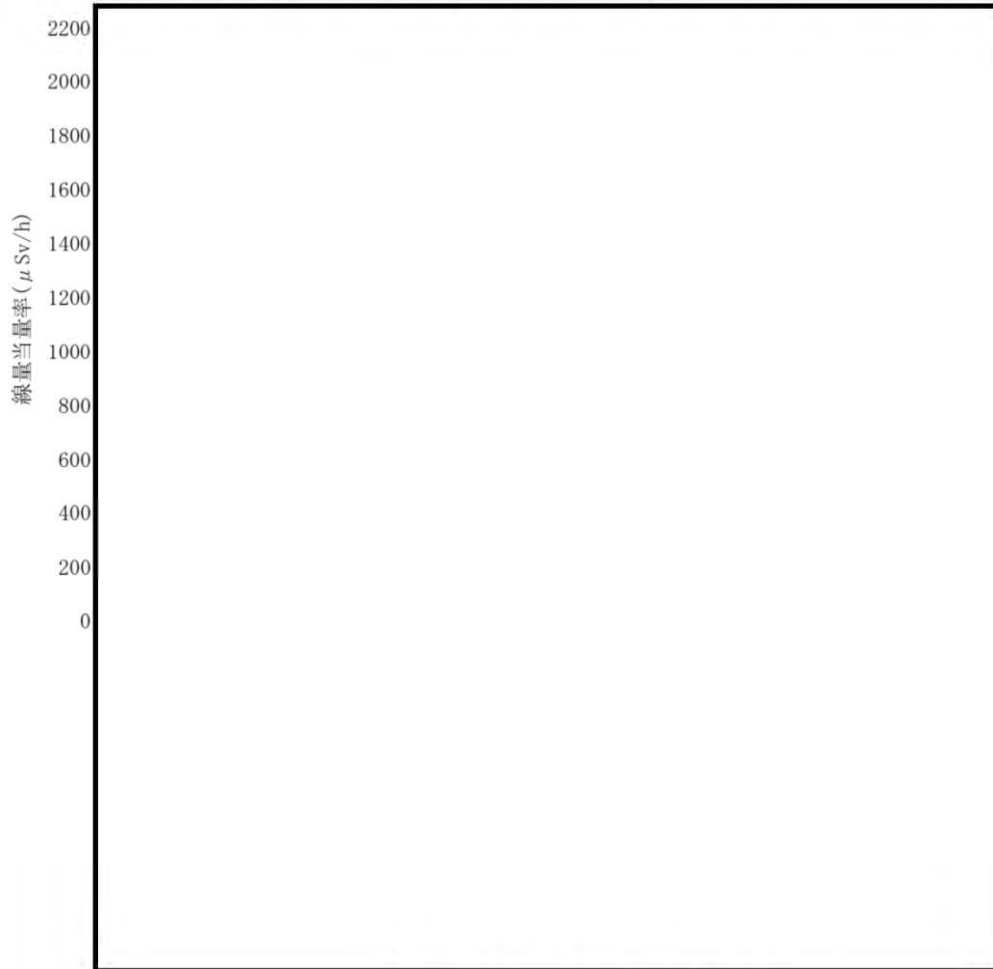
(注3) DOT3.5コードでは取り扱えるモデル形状が二次元円筒形状であるため保守的なモデルを設定して計算しており、DOT3.5コード計算値はMCNP5コード計算値より高い。MSF-24P型と同等の体系である使用済燃料輸送・貯蔵容器体系のベンチマーク解析でトラニオン近傍のMCNP評価結果と測定値の傾向がよく一致することを確認している。したがって、DOT3.5の解析結果は保守的なものであり、MCNP5コードによる評価結果は妥当である。

各解析コードの計算方法及び条件設定概要

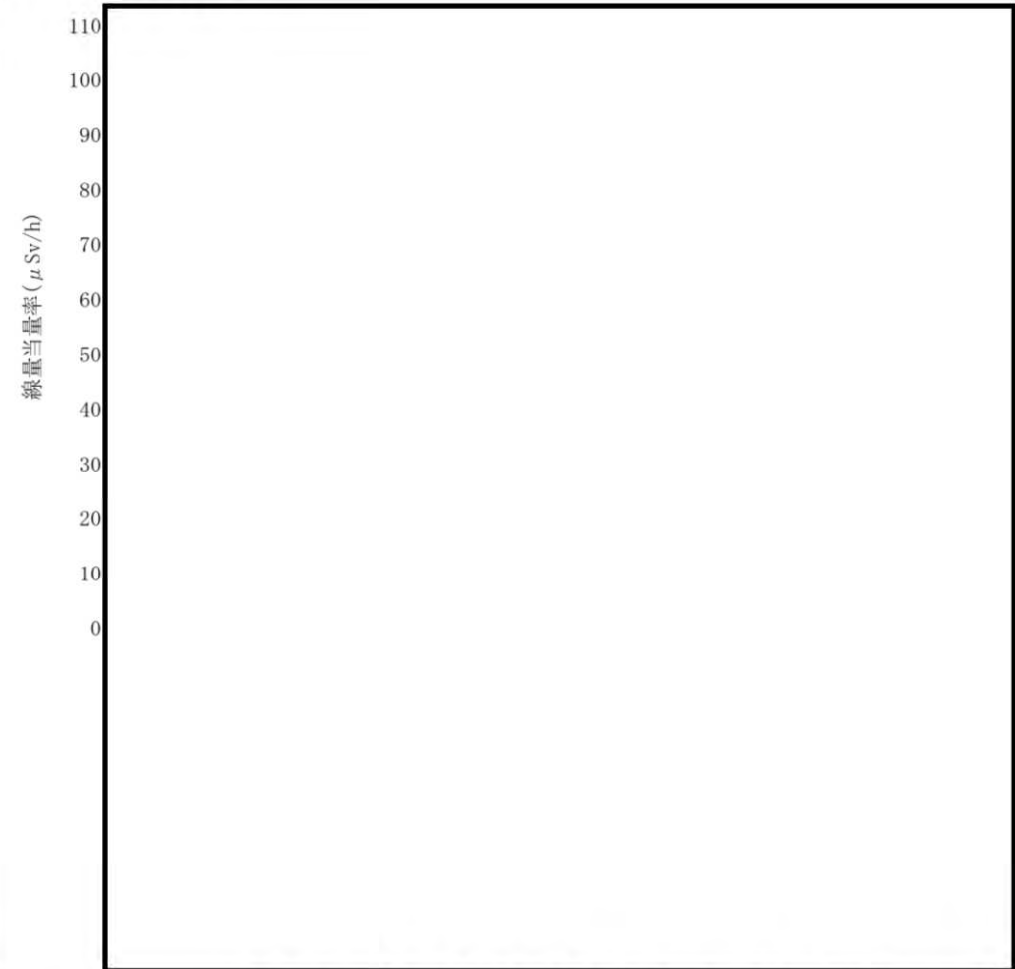
項目	MCNP5コード	DOT3.5コード	備考
計算方法	放射線の衝突や散乱等を再現。評価位置に対する放射線情報を統計的に処理するため、計算値に対して統計誤差を持つ。	ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式をSn法により解く。放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性を表現。	—
線源強度設定	ORIGEN2.2UPJコードにより評価した線源強度(17×17燃料 48,000MWd/t型(A型)収納時)を設定	左記と同じ	線源強度は同一
モデル化設定	MSF-24P型全体を三次元でモデル化。バスケットプレートは中性子吸収材及びポイド層を含めた格子形状を均質化	二次元円筒体系でモデル化。本体部は有限円筒形状(燃料部等は均質化)でモデル化。トラニオン部は本体モデルと別にモデル化。(異なる中心軸のモデルを同一計算することができない。)	両方で解析コードの特性上モデル化方法が異なる。DOT3.5コードでのトラニオン部評価は線束引継ぎ計算を実施。

## 2. 指摘事項への回答

### (4) DOT3.5による既認可評価値(MSF-24P型)との同等性の確認(2/2)



側部方向線量当量率評価結果(表面)



側部方向線量当量率評価結果(表面から1 m離れた位置)

(結果差異の要因)

- ①: DOT3.5のトリニオン部の評価点は、本体モデルとは別に保守的な条件でモデル化するため、MCNP5に比べて線量当量率が高くなる。  
なお、MCNP5による評価は、(3)で使用済燃料輸送・貯蔵容器体系のベンチマーク解析でトリニオン近傍の領域も測定値と傾向がよく一致することを確認している。  
したがって、DOT3.5の評価結果は保守的なものであり、MCNP5による評価結果は妥当である。
- ②: ①と同様の設定で評価を行うが、表面から1m離れた位置ではキャスク全体からの線量当量率の寄与が支配的であり、MCNP5とDOT3.5で概ね一致する。
- ③: DOT3.5解析は、燃料領域を均質円筒モデル化するにあたり線量当量率への影響を保守的に考慮できるモデル設定としており、MCNP5に比べ線量当量率が高くなる。

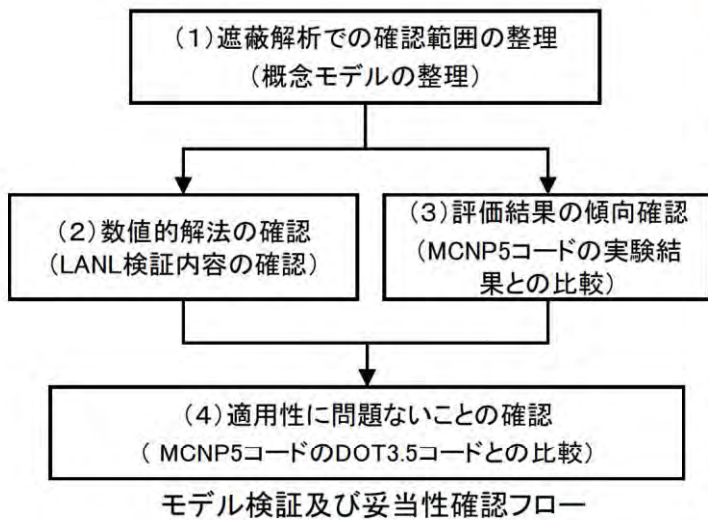
## ● MCNPコードの適用妥当性確認について : MSF-76B型

MCNP5コードの適用妥当性について、特定兼用キャスクに対するMCNP5コードの適用性について、MCNP5コードによる線量当量率分布の評価値は測定値の分布の傾向に対して良い一致を示し、許認可で認められたDOT3.5コードを用いた保守的な手法に基づく線量当量率評価値と同等の結果となることを示すことで説明する。なお、MCNP5コードを用いた遮蔽解析結果の妥当性については、統計指標の確認結果を示すとともに、正確性についてはMSF-76B型に対するMCNP5コードでの遮蔽解析において放射線の挙動が物理的に正しいことを説明する方針とする。

原子力学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン:2015」のモデル検証及び妥当性確認方法を参考に、(1)遮蔽解析での確認範囲の整理、(2)数値的解法が検証されていることの確認、(3)MCNP5コードを用いた線量当量率評価値と測定値の比較による評価傾向の確認、(4)既認可で認められたDOT3.5コードを用いた保守的な評価手法に基づく特定兼用キャスクでの線量当量率の評価値との比較による同等性の確認を行った。

(1)から(3)の確認結果に加え、型式証明での遮蔽解析条件は、(4)で確認したMCNP5コードの保守的な条件設定を踏襲しており、保守性を有する解を得ることができる。以上より、本申請の遮蔽解析にMCNP5コードを適用することは妥当であると判断した。

- (1)本申請の遮蔽解析での確認範囲を考慮すべき概念モデル要素として整理。
- (2)MCNP5は、LANLでのソフトウェア品質保証計画に従って開発されており、LANLで実施したリグレッションテスト、実験値との比較、三次元輸送計算コードの精度確認のためのベンチマーク問題に対する解析解及び参照解との比較結果を基に、数値的解法が精度よく実施できていることを確認。
- (3)MSF-76B型の遮蔽解析と(1)で整理した概念モデル要素が類似した使用済燃料輸送・貯蔵容器体系でのベンチマーク解析により線量当量率分布の傾向を確認し、MCNP5コードによる評価値と測定値の分布の傾向が良い一致を示すことを確認。
- (4)MSF-76B型と同様の体系のMSF-24P型におけるDOT3.5コードによる保守的な手法に基づく既認可評価値と、DOT3.5コードと同様の条件で実施したMCNP5コードによる評価値を比較した結果、同等の結果であり、DOT3.5コードと同様の条件とすればMCNP5コードで保守性を有する解が得られることを確認。



No.	確認結果	備考
(1)	MSF-76B型の遮蔽解析での確認範囲を考慮すべき概念モデル要素として整理。(P.21～24)	考慮すべき概念モデル要素としてミクロ的な物理現象(散乱、吸収等)、マクロ的物理現象(構造材透過、ストリーミング効果、線源の相互遮蔽)を整理。
(2)	解析コード開発機関(LANL)で実施したリグレッションテスト、実験値との比較や三次元輸送計算コード精度確認のためのベンチマーク(解析解及び参照解)との比較により、数理モデルへの変換及び数値モデルへの変換は精度良く実施できていることを確認済み。(P.25)	ベンチマークは散乱無し(解析解)と散乱有の条件(MVPコードによる参照解)での比較で良く一致していると検証されていることを確認。
(3)	使用済燃料輸送・貯蔵容器体系におけるベンチマーク解析より、評価値の傾向が良い一致を示すことを確認。(P.26～28)	使用済燃料輸送・貯蔵容器体系におけるベンチマーク解析は、(1)で整理した概念モデル要素の内容がMSF-76B型と類似したものを選定。
(4)	MSF-76B型と類似の体系であるMSF-24P型を対象とした認可済のDOT3.5コードを用いた解析結果との比較により、同等の結果が得られることを確認。(P.29～30)	DOT3.5コードを用いた解析は実形状を二次元でモデル化したものとして認可されたものである。なお、MSF-76B型の評価条件は、使用済燃料の収納条件や評価モデルの不確かさを保守的に設定。

## 2. 指摘事項への回答

### (1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(1/4)

- MSF-76B型の線量当量率の評価結果に影響を与える要素として、確認が必要な項目を整理した
- 収納される使用済燃料のミクロ的な物理現象(散乱・吸収)に基づく遮蔽材の透過、遮蔽材欠損部でのストリーミング効果及び使用済燃料が複数収納されることによる相互遮蔽といったマクロ的な物理現象の考慮が必要。これら物理現象を考慮するにあたり、使用済燃料の線源条件、線源形状、遮蔽材質及び形状が必要。
- (3)(P.26~28)のMCNP5コードによる評価値と線量率測定値を比較するベンチマーク解析の選定では、各要素が類似のものを選定した。

MSF-76B型の遮蔽解析で考慮すべき概念モデル要素	評価に影響のある因子	評価条件				備考
		MSF-76B型遮蔽解析	MSF-24P(S)型先行キャスク	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系)	ベンチマーク (乾式貯蔵容器体系)	
【物理現象】 ミクロ ・散乱・吸収 マクロ ・遮蔽材の透過 ・遮蔽材欠損部でのストリーミング ・相互遮蔽	計算コード	MCNP5 ver.1.60コードを用いて評価	MCNP5 ver.1.60コードを用いて評価	MCNP5コードを用いて評価	MCNP5 ver.1.60コードを用いて評価	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じコードを採用。
	断面積ライブラリ	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じ断面積ライブラリを採用
		ガンマ線 ・MCPLIB84	ガンマ線 ・MCPLIB84	ガンマ線 ・MCPLIB02	ガンマ線 ・MCPLIB84	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じ断面積ライブラリを採用
【線源】 使用済燃料	中性子線源条件	スペクトル ・Watt型 <sup>239</sup> Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・Watt型 <sup>239</sup> Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・Watt型 <sup>239</sup> Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・Watt型 <sup>244</sup> Cm 核分裂スペクトル	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じ <sup>239</sup> Pu核分裂スペクトルを採用。
		線源強度 ・ORIGEN2出力 (2.2UPJ)	線源強度 ・ORIGEN2出力 (2.2UPJ)	線源強度 ・ORIGEN2出力 (2.2UPJ)	線源強度 ・ORIGEN2出力 (2.2UPJ)	・MSF-76B型及び24P(S)型はウラン初期濃縮度を保守的に設定。 ・MSF-76B型及び24P(S)型に収納する燃料型式は異なるが、同じ手法で線源強度を設定。
		燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	・MSF-76B型及び24P(S)型は収納燃料を包含する燃焼度を設定。
		冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・実績考慮	冷却期間 ・実績考慮	・MSF-76B型及び24P(S)型は収納燃料を包含する冷却期間を設定。

## 2. 指摘事項への回答

### (1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(2/4)

MSF-76B型の遮蔽解析で考慮すべき概念モデル要素	評価に影響のある因子	評価条件				備考
		MSF-76B型遮蔽解析	MSF-24P(S)型先行キャスク	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系)	ベンチマーク (乾式貯蔵容器体系)	
【線源】 使用済燃料	ガンマ線線源条件	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ:-	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	・MSF-76B型及び24P(S)型に収納する燃料型式は異なるが、同じ手法で線源強度を設定。
		線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: <sup>59</sup> Co含有量からの計算値	線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: <sup>59</sup> Co含有量からの計算値	線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ:未考慮	線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: <sup>59</sup> Co含有量からの計算値	・MSF-76B型及び24P(S)型はウラン初期濃縮度を保守的に設定。 ・MSF-76B型及び24P(S)型に収納する燃料型式は異なるが、同じ手法で線源強度を設定。
		燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じ手法で設定。
		冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・実績考慮	冷却期間 ・実績考慮	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じ手法で設定。

## 2. 指摘事項への回答

### (1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(3/4)

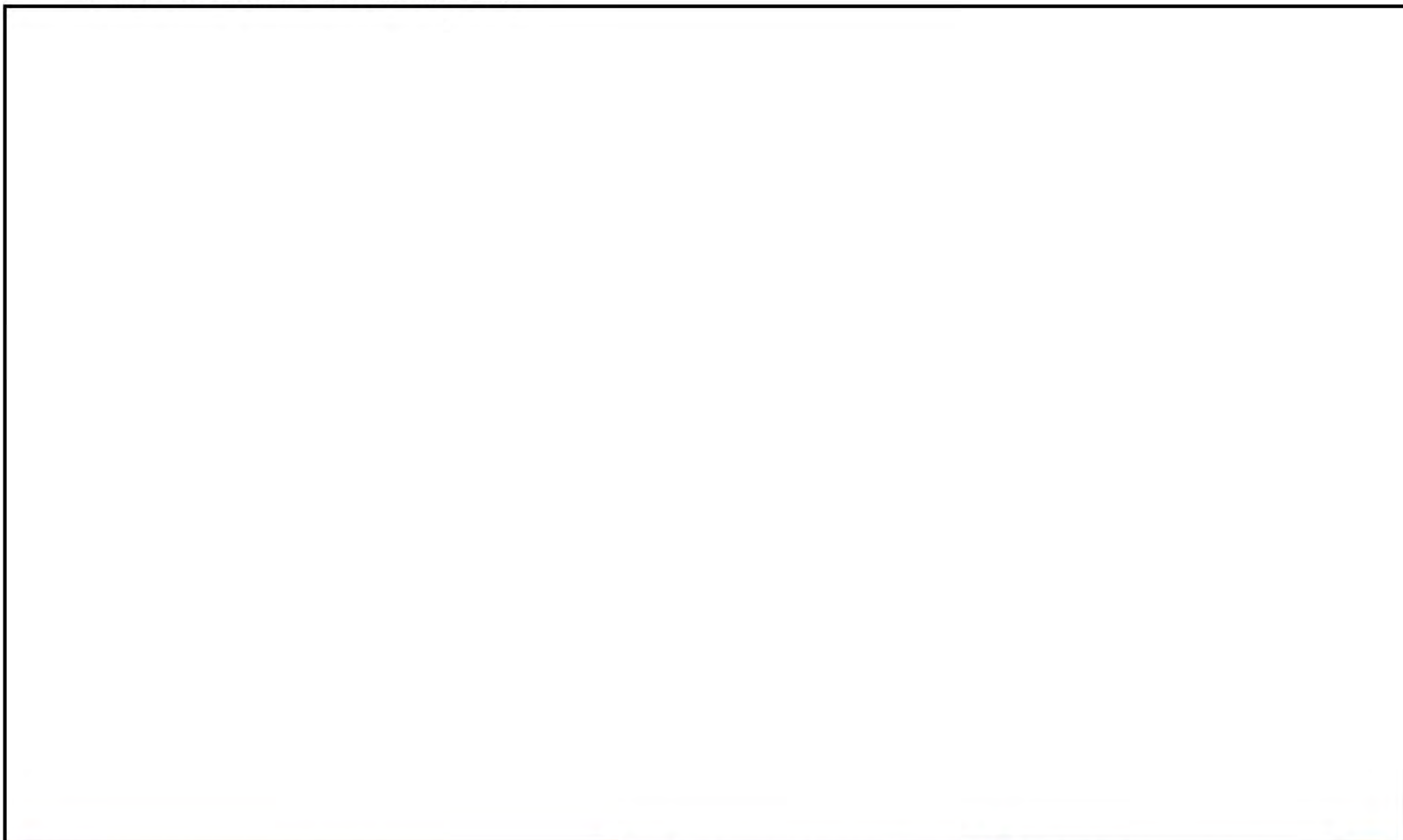
MSF-76Bの 遮蔽解析で考慮すべき 概念モデル要素	評価に影響 のある因子	評価条件				備考
		MSF-76B型 遮蔽解析	MSF-24P(S)型 先行キャスク	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系)	ベンチマーク (乾式貯蔵容器体系)	
【線源形状】 使用済燃料	燃料集合 体(線源 領域)の 設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用済BWR燃料76体</li> <li>1体ごとに均質化</li> <li>上部ハンドル部、上部グリッド部、上部プレナム部、燃料有効部、下部燃料有効部、下部端栓部に分割</li> <li>バスケット内均質化</li> <li>燃料集合体は一次蓋及び胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置</li> <li>燃料配置:1/4対称</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用済PWR燃料24体</li> <li>1体ごとに均質化</li> <li>上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割</li> <li>バスケット内均質化</li> <li>燃料集合体は一次蓋及び胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置</li> <li>燃料配置:1/4対称</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用済PWR燃料14体</li> <li>1体ごとに均質化</li> <li>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</li> <li>燃料集合体は胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置</li> <li>燃料配置:1/2対称</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用済PWR燃料1体</li> <li>1体ごとに均質化</li> <li>上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割</li> <li>バスケット内均質化</li> <li>燃料集合体は胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置</li> <li>燃料配置:1/2対称</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>各燃料仕様に基づき、MCNP5コードの条件として設定。</li> <li>MSF-76B型及び24P(S)型は軸方向での燃料集合体の移動を考慮し、一次蓋及び胴(底板)に接した状態となるよう設定。</li> <li>MSF-76B型及び24P(S)型は使用済燃料を燃料集合体1体毎に均質化したモデルを採用。</li> <li>燃料配置はMCNP5コードで実際の配置通りに設定。</li> </ul>
【遮蔽材質及び形状】 放射性物質輸送・貯蔵 容器構造材の材料 及び形状、組成、密度 公差	材質	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、レジン、銅等</li> <li>緩衝体:なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、レジン、銅等</li> <li>緩衝体:なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、鉛、レジン、水等(湿式キャスク)</li> <li>緩衝体:木材</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、レジン等</li> <li>緩衝体:なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>MSF-76B型及び24P(S)型の遮蔽材は同等。(P.24参照)</li> </ul>
	形状	実形状 <ul style="list-style-type: none"> <li>外径約2.6m</li> <li>長さ約5.5m</li> </ul>	実形状 <ul style="list-style-type: none"> <li>外径約2.6m</li> <li>長さ約5.2m</li> </ul>	実形状 <ul style="list-style-type: none"> <li>外径約2.6m(緩衝体含む)</li> <li>長さ約6.3m(緩衝体含む)</li> </ul>	実形状 <ul style="list-style-type: none"> <li>外径約1.7m</li> <li>長さ約5.2m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>MSF-76B型及び24P(S)型の形状や構造は同等。(P.24参照)</li> </ul>
	組成/密度	<ul style="list-style-type: none"> <li>最小密度</li> <li>レジン組成カタログ値</li> <li>設計貯蔵期間のレジン質量減損考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最小密度</li> <li>レジン組成カタログ値</li> <li>設計貯蔵期間のレジン質量減損考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最小密度</li> <li>レジン組成カタログ値</li> <li>水組成:発熱量より概算</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>最小密度</li> <li>レジン組成カタログ値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>MSF-76B型及び24P(S)型ではレジン減損を考慮。</li> <li>MSF-76B型ではチャンネルボックスの遮蔽効果を無視。</li> </ul>
	寸法公差	<ul style="list-style-type: none"> <li>密度に考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>密度に考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>考慮しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>考慮しない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>MSF-76B型及び24P(S)型では寸法公差を密度係数として考慮。</li> </ul>



## 2. 指摘事項への回答

(1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(4/4)

➤ MSF-76B型とMSF-24P(S)型の構造比較



## 2. 指摘事項への回答

### (2) 数値的解法の確認

- MCNP5コードは、LANLのソフトウェア品質保証計画<sup>(注1)</sup>に従って開発されており、計算コードの検証と妥当性確認がなされたものである。
- LANLでMCNP5コードに対して実施された検証内容<sup>(注2)</sup>を確認した。
- LANLの検証では、リグレッションテスト、中性子及びガンマ線遮蔽に関する遮蔽実験値との比較、3次元輸送計算コードの精度確認のためのベンチマーク問題(Kobayashiベンチマーク)での解析解とMVPコードによる参照解との比較を実施している。
- 以下のLANLでの検証結果より、MCNP5コードの数値的解法に問題無いことを確認した。

#### ① リグレッションテスト

- リグレッションテストで今回のバージョン(ver1.60)での変更以外に影響がないことを確認。
- なお、リグレッションテストで用いられている計算は、ガンマ線や中性子のベンチマーク問題として整理されたものが含まれており、キャスクの評価に必要なガンマ線や中性子の輸送計算に必要な散乱・吸収といった現象が考慮された実験値や解析値に対して、MCNPコードを用いて精度よく予測できることが確認されている<sup>(注3)</sup><sup>(注4)</sup>。

#### ② 遮蔽実験値との比較

- 中性子スペクトル測定、中性子・ガンマ線遮蔽及びガンマ線スカイシャイン実験値とMCNP5コードでの解析値の比較で良い一致を得ている。

#### ③ Kobayashiベンチマーク

- 3次元輸送ベンチマーク問題として、吸収の強い体系中にボイド領域があるような、ストリーミングのベンチマークとの比較を実施。
- 散乱がない場合は解析解との比較、散乱がある場合はMVPコードを用いた参照解との比較を実施し、良い一致を得ている。

(注1) Hilary. M. Abhold, John. S. Hendricks, “MCNP™ Software Quality Assurance Plan”, LA-13138, (1996).

(注2) Forrest Brown, Brain Kiedrowski, Jeffery Bull, Matthew Gonzales, Nathan Gibson, “Verification of MCNP5-1.60”, LA-UR-10-05611, (2010).

(注3) Daniel J. Whalen, David E. Hollowell and John S. Hendricks, “MCNP: Photon Benchmark Problems”, LA-12196, (1991).

(注4) Daniel J. Whalen, David. A. Cardon, Jennifer L. Uhle and John S. Hendricks, “MCNP: Neutron Benchmark Problems”, LA-12212, (1991).

## 2. 指摘事項への回答

### (3) 評価結果の傾向確認 (MCNP5コードの実験結果との比較) (1/3)

<評価条件(使用済燃料輸送容器体系及び乾式貯蔵容器体系)>

- ベンチマーク解析に用いる評価条件は下表に示すとおり、現実的な設定としているが、遮蔽材の密度を最小密度とする等、保守的な条件設定も存在する。

項目		使用済燃料輸送容器体系(P.27)	乾式貯蔵容器体系(P.28)
容器名称		NFT-14P型輸送容器(PWR使用済燃料14体収納)	乾式貯蔵試験容器(PWR使用済燃料1体収納)
線源	線源スペクトル	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子スペクトル: 239Pu核分裂スペクトル</li> <li>燃料有効部ガンマ線スペクトル: ORIGEN2(2.2UPJ)出力</li> <li>構造材ガンマ線スペクトル: -(注1)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子スペクトル: 244Cm核分裂スペクトル</li> <li>燃料有効部ガンマ線スペクトル: ORIGEN2出力(2.2UPJ)</li> <li>構造材ガンマ線スペクトル: 1.17MeV-50%、1.33MeV-50%</li> </ul>
	燃焼度	<ul style="list-style-type: none"> <li>集合体燃焼度: 実績燃焼度</li> <li>軸方向分布: 実績燃焼度を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>集合体燃焼度: 実績燃焼度</li> <li>軸方向分布: 実績燃焼度を考慮</li> </ul>
線源形状	燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料集合体を1体ごとに均質化</li> <li>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</li> <li>軸方向の燃料位置は底部側寄せ配置</li> <li>バスケット内の左右方向は中央配置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料集合体を均質化</li> <li>上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割</li> <li>軸方向の燃料位置は底部側寄せ配置</li> <li>バスケット内の燃料集合体は均質化</li> </ul>
材質及び形状	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及び吊り具は無視)	基本的に形状どおりモデル化
	本体	基本的に形状どおりモデル化 (内部水位は水膨張無視)	基本的に形状どおりモデル化
	蓋	基本的に形状どおりモデル化 (蓋ボルト部は簡略化)	基本的に形状どおりモデル化 (蓋ボルトは簡略化)
	緩衝体	基本的に形状どおりモデル化 (カバープレート、内部リブは無視(木材に置き換え))	(緩衝体は未装着)
	架台、地面	無視	簡略化してモデル化
	周囲構造物	無視	無視
	組成・密度	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼材、鉛: 最小密度</li> <li>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)</li> <li>水密度: 水温を発熱量より換算して設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼材: 最小密度</li> <li>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)</li> </ul>
寸法公差	考慮しない	考慮しない	

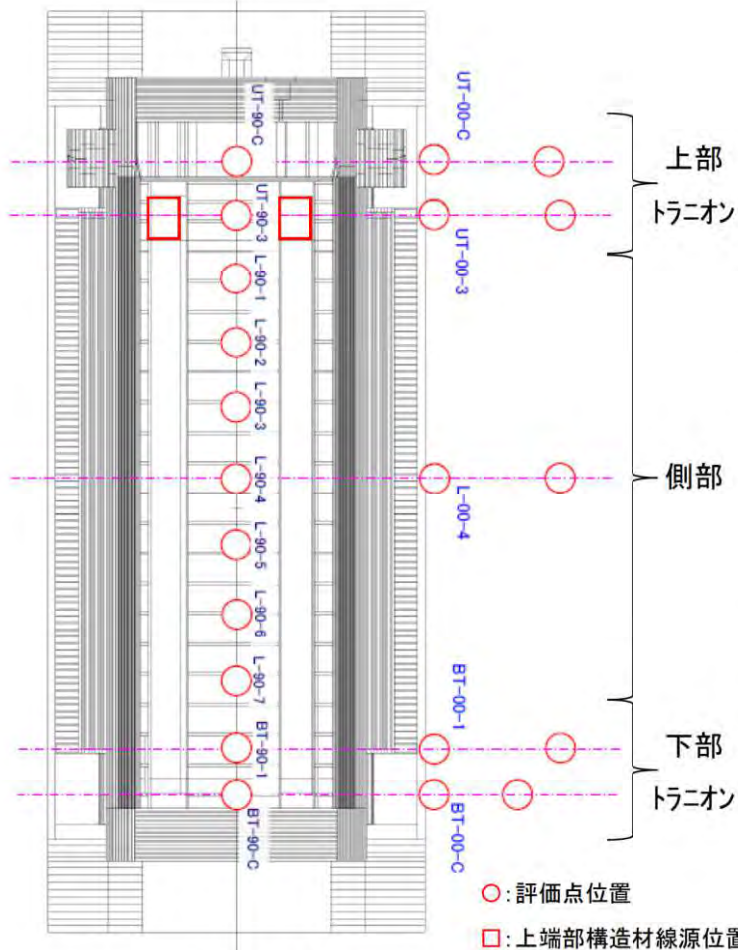
(注1) 使用済燃料輸送容器体系ではベンチマーク解析において構造材ガンマ線を考慮していない。

## 2. 指摘事項への回答

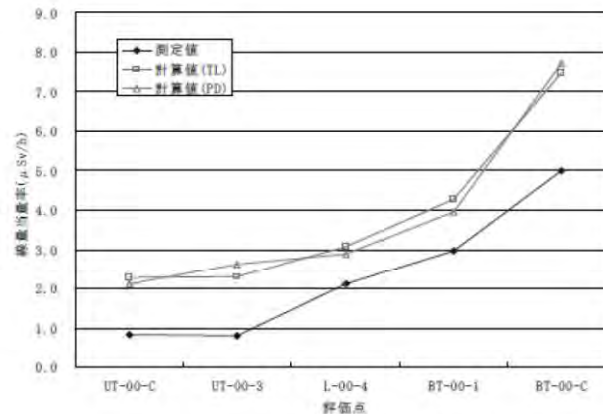
### (3) 評価結果の傾向確認 (MCNP5コードの実験結果との比較) (2/3)

#### <評価モデル及び評価結果(使用済燃料輸送容器体系)>

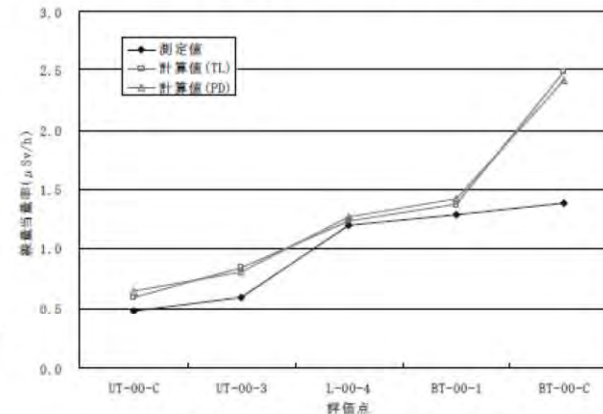
線量当量率の計算値と測定値の比較では、遮蔽材の密度を最小密度としており基本的に測定値を上回るが、分布としては同様の傾向を示していることが確認されている。計算値が測定値を下回る点について、中性子についてはベンチマーク解析では考慮されていない使用済燃料輸送容器近傍の壁による反射の影響により解析結果に対して測定値が高くなったとされている。また、ガンマ線についてはベンチマーク解析において端部線源強度の高い構造材放射化ガンマ線源を考慮していないことが原因と考えられる。



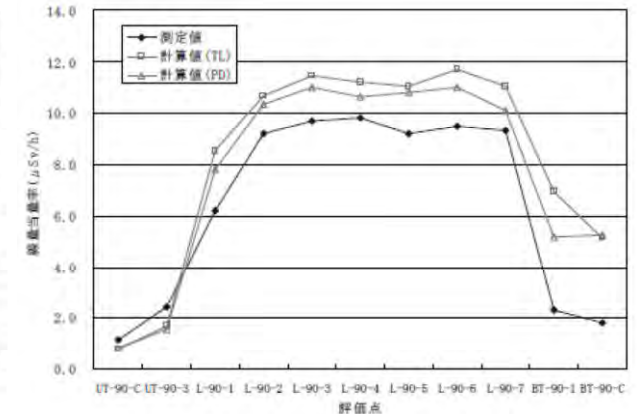
(解析モデル)



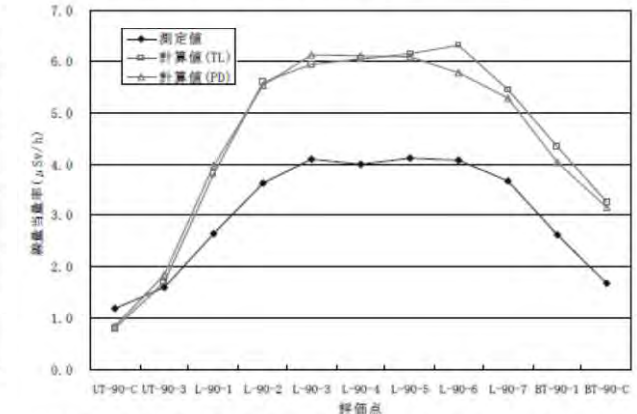
(中性子線量当量率、表面位置 0° 方向)



(中性子線量当量率、表面から 1 m 離れた位置 0° 方向)



(ガンマ線線量当量率、表面位置 90° 方向)



(ガンマ線線量当量率、表面から 1 m 離れた位置 90° 方向)

(評価結果例)

#### NFT-14P型輸送容器によるMCNP5コードの検証

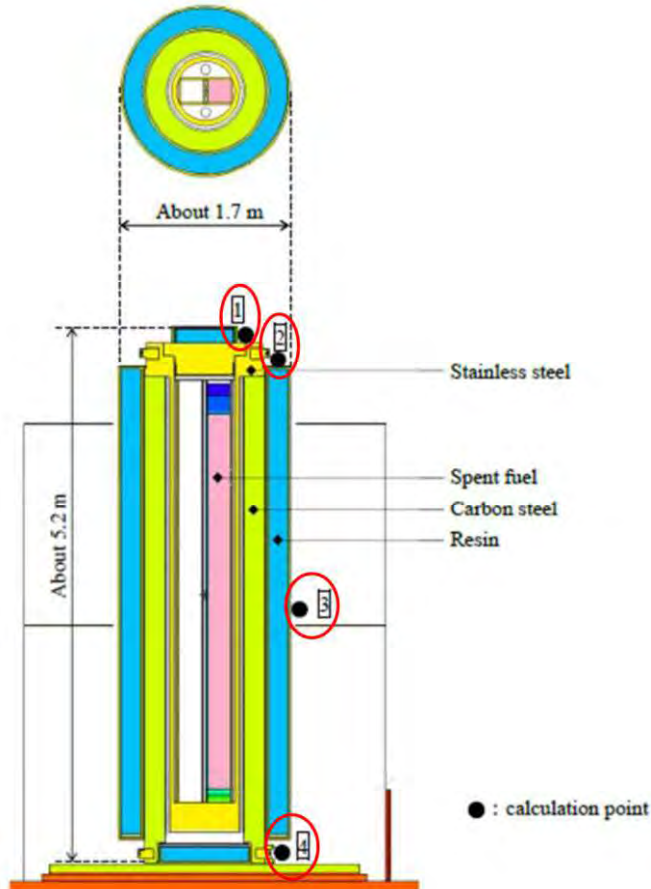
(出典) 一般社団法人日本原子力学会, 「モンテカルロ法による放射性物質輸送容器の遮蔽安全評価手法の高度化 平成23年度報告書」, (2012).

## 2. 指摘事項への回答

### (3) 評価結果の傾向確認 (MCNP5コードの実験結果との比較) (3/3)

#### <評価モデル及び評価結果(乾式貯蔵容器体系)>

線量当量率の計算値と測定値の比較では、良い一致を示している。なお、測定は建屋内部で実施されたが、ベンチマーク解析では乾式貯蔵容器周辺の周囲構造物はモデル化されておらず、周囲構造物による中性子やガンマ線の反射が考慮されていないため、一部の計算値が測定値を下回っているものと考えられる。



(解析モデル)

Table 3. Experimental and calculated results (neutron dose equivalent rate)

Measurement point	Experimental value (μSv/h)	Calculated value (μSv/h)	Calculated / Experimental
1	9.93±0.17	10.20±1.8E-02	1.03±0.02
2	9.71±0.13	9.01±3.2E-02	0.93±0.01
3	0.47±0.02	0.52±9.8E-03	1.11±0.04
4	9.66±0.18	11.33±3.7E-02	1.17±0.02

Table 4. Experimental and calculated results (gamma-ray dose equivalent rate)

Measurement point	Experimental value (μSv/h)	Calculated value (μSv/h)	Calculated / Experimental
1	N/D*	-	-
2	N/D*	-	-
3	2.5±0	2.25±0.04	0.90±0.02
4	N/D*	-	-

\*below the detection limit 0.5 μSv/h

(評価結果)

#### 乾式貯蔵容器によるMCNP5コードの検証

(出典) M. Ueyama M. Osaki, "Dose Equivalent Rate Benchmark Calculations of a Dry Storage Cask for Spent Fuel by 3D Monte Carlo Code", PATRAM 2019, (2019).

## 2. 指摘事項への回答

### (4) DOT3.5による既認可評価値(MSF-24P型)との同等性の確認(1/2)

- MCNP5コードを用いた先行キャスクの解析結果について、許認可実績が豊富な二次元輸送計算コードDOT3.5による既認可評価値との比較を確認した。
- 比較対象は、MSF-76B型の輸送様態と同じ仕様・構造であるMSF-24P型での既認可の核燃料輸送物質設計変更承認申請(原規規発第22061412号により令和4年6月14日承認)<sup>(注1)</sup>のうち17×17燃料 48,000MWd/t型(A型)収納時とした。各解析コードでの計算方法及び条件設定概要を下表に示す。
- DOT3.5コードを用いた評価手法は既認可申請において文献<sup>(注2)</sup>を基に保守性があるものとして妥当であると判断されている。
- 先行キャスクにおけるMCNP5コードによる評価は、DOT3.5コードと同様の条件で実施している。
- MCNP5コード及びDOT3.5コードによるMSF-24P型表面及び表面から1m離れた位置における線量当量率をP.30に示す。DOT3.5コードの特性上の要因により、頭部及び底部の径方向の一部(トラニオン部近傍)において線量当量率評価値に差異が生じる<sup>(注3)</sup>ものの、その他の領域では同様の線量当量率及び傾向であり、MCNP5コードを使用済燃料輸送・貯蔵容器体系に適用した場合において、DOT3.5コードと比較して同等の結果が得られている。したがって、MCNP5コードにより、DOT3.5コードと同様に妥当な解が得られることを確認した。

(注1) 四国電力株式会社、「核燃料輸送物設計変更承認申請書」,原子力発21329号, (2021).

(注2) 一般社団法人 日本原子力学会,「中性子遮蔽設計ハンドブック」, (1993).

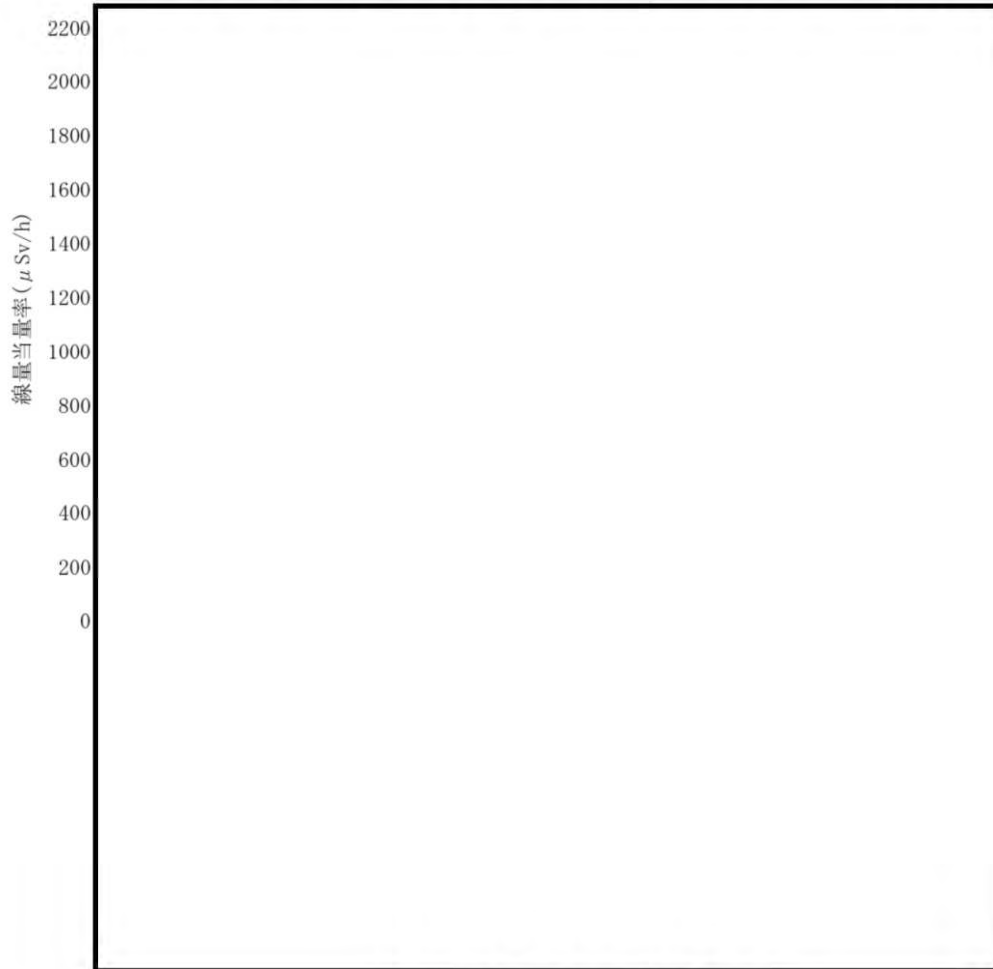
(注3) DOT3.5コードでは取り扱えるモデル形状が二次元円筒形状であるため保守的なモデルを設定して計算しており、DOT3.5コード計算値はMCNP5コード計算値より高い。MSF-24P型と同等の体系である使用済燃料輸送・貯蔵容器体系のベンチマーク解析でトラニオン近傍のMCNP評価結果と測定値の傾向がよく一致することを確認している。したがって、DOT3.5の解析結果は保守的なものであり、MCNP5コードによる評価結果は妥当である。

各解析コードの計算方法及び条件設定概要

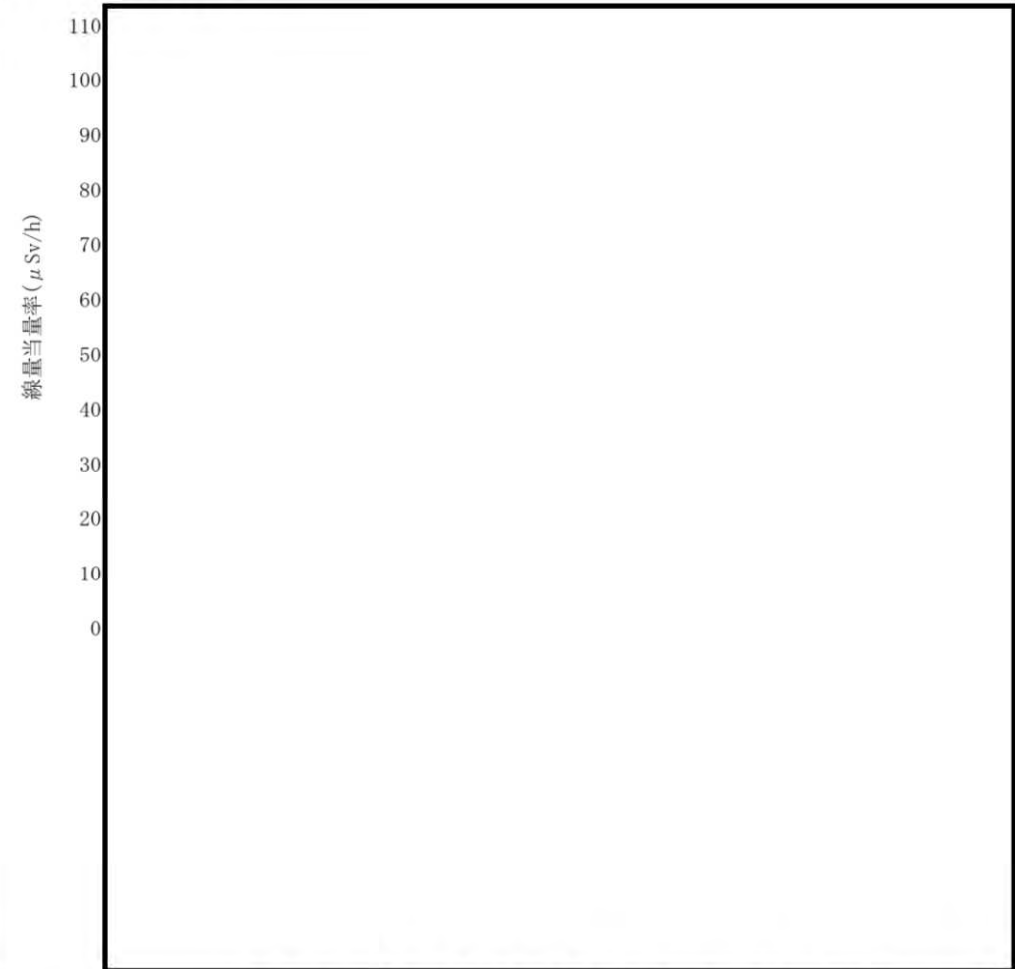
項目	MCNP5コード	DOT3.5コード	備考
計算方法	放射線の衝突や散乱等を再現。評価位置に対する放射線情報を統計的に処理するため、計算値に対して統計誤差を持つ。	ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式をSn法により解く。放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性を表現。	—
線源強度設定	ORIGEN2.2UPJコードにより評価した線源強度(17×17燃料 48,000MWd/t型(A型)収納時)を設定	左記と同じ	線源強度は同一
モデル化設定	MSF-24P型全体を三次元でモデル化。バスケットプレートは中性子吸収材及びポイド層を含めた格子形状を均質化	二次元円筒体系でモデル化。本体部は有限円筒形状(燃料部等は均質化)でモデル化。トラニオン部は本体モデルと別にモデル化。(異なる中心軸のモデルを同一計算することができない。)	両方で解析コードの特性上モデル化方法が異なる。DOT3.5コードでのトラニオン部評価は線束引継ぎ計算を実施。

## 2. 指摘事項への回答

### (4) DOT3.5による既認可評価値(MSF-24P型)との同等性の確認(2/2)



側部方向線量当量率評価結果(表面)



側部方向線量当量率評価結果(表面から1 m離れた位置)

(結果差異の要因)

- ①: DOT3.5のトリニオン部の評価点は、本体モデルとは別に保守的な条件でモデル化するため、MCNP5に比べて線量当量率が高くなる。  
なお、MCNP5による評価は、(3)で使用済燃料輸送・貯蔵容器体系のベンチマーク解析でトリニオン近傍の領域も測定値と傾向がよく一致することを確認している。  
したがって、DOT3.5の評価結果は保守的なものであり、MCNP5による評価結果は妥当である。
- ②: ①と同様の設定で評価を行うが、表面から1m離れた位置ではキャスク全体からの線量当量率の寄与が支配的であり、MCNP5とDOT3.5で概ね一致する。
- ③: DOT3.5解析は、燃料領域を均質円筒モデル化するにあたり線量当量率への影響を保守的に考慮できるモデル設定としており、MCNP5に比べ線量当量率が高くなる。

**MOVE THE WORLD FORWARD**

**MITSUBISHI  
HEAVY  
INDUSTRIES  
GROUP**

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社