

補足説明資料 26-2

26 条

燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備

遮蔽機能に関する説明資料

目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	4
3. 使用する解析コード	22
4. 遮蔽機能データ	44
5. 参考文献	49

別紙1 遮蔽解析条件

別紙2 中性子実効増倍率の設定について

別紙3 中性子源スペクトルを²³⁹Puの核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性

別紙4 遮蔽解析結果の詳細 (MCNP5 コード)

別紙5 MCNP5 コードによる評価値と DOT3.5 コードによる既認可結果の比較

別紙6 遮蔽機能データの適用確認方法

1. 要求事項

型式設計特定機器の型式指定申請において、特定兼用キャスクの遮蔽機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 技術基準規則要求事項

a. 技術基準規則第 26 条第 2 項六号ロ

- ・使用済燃料を工場等内に貯蔵する乾式キャスクは、次に定めるところによること。
- ロ 使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有すること。

(2) 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確認事項

「2. 安全機能の確保 2.2 遮蔽機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

- 1) 設計上想定される状態において、使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽機能を有すること。
- 2) 通常貯蔵時の兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を 100 μ Sv/h 以下とすること。
- 3) 通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で 50 μ Sv/y 以下となることを目標に、線量限度 (1mSv/y) を十分下回る水準とすること。
- 4) 貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、工場等周辺の実効線量が線量限度 (1mSv/y) を超えないこと。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ遮蔽設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

- a. 兼用キャスクからの線量当量率は、兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、及び1) で求めた放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリ（以下「遮蔽解析コード等」と総称する。）を使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の兼用キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。
- b. 兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を $100\mu\text{Sv/h}$ 以下とすること。

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

兼用キャスクが敷地境界に近い場所に設置される場合等に、使用済燃料から放出される中性子の敷地境界線量への寄与が大きくなる可能性があることを適切に考慮した上で、通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線（ガンマ線及び中性子）による実効線量について評価すること。

② ソースターム

兼用キャスクの遮蔽機能データ又は兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率が $100\mu\text{Sv/h}$ となるよう放射線源強度を規格化したものを用いること。ここで、放射線源強度を規格化して用いる場合は、中性子 100%又はガンマ線 100%のいずれか保守的な線量評価とすること。また、中性子及びガンマ線の表面エネルギースペクトルは、保守的な線量評価となるものを使用すること。

③ 遮蔽解析コード等

検証され適用性が確認された遮蔽解析コード等を使用すること。なお、モンテカルロコードを用いる場合は、相互遮蔽効果、ストリーミング及びコンクリート深層透過の観点から検証され適用性が確認されたものであること。

④ 通常貯蔵時の線量

通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で $50\mu\text{Sv/y}$ 以下となることを目標に、線量限度 (1mSv/y) を十分下回る水準とすること。

なお、兼用キャスク以外の施設の線量は、既評価の空気カーマ (Gy/y) を実効線量 (Sv/y) へ換算し、又は新たに実効線量 (Sv/y) を評価するものとする。換算に当たっては、係数を 1 とすること。

4) 応急復旧

貯蔵建屋等を設置する場合は、貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、必要に応じて土嚢による遮蔽の追加等の適切な手段による応急復旧を行うことにより、工場等周辺の実効線量が敷地全体で線量限度（1mSv/y）を超えないこと。この場合において、応急復旧による遮蔽機能の回復を期待する場合には、その実施に係る体制を適切に整備すること。

↓

2. 要求事項への適合性

(1) 技術基準規則への適合性

MSF-24P(S)型の遮蔽機能については、以下のとおり技術基準規則に適合している。

a. 技術基準規則第26条第2項六号

- ・使用済燃料を工場等内に貯蔵する乾式キャスクは、次に定めるところによること。
 - 使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有すること。

MSF-24P(S)型は、使用済燃料から放出される放射線を特定兼用キャスクの本体及び蓋部により遮蔽する設計とし、ガンマ線遮蔽材には十分な厚みを有する鋼製の材料を用い、中性子遮蔽材にはレジンを用いる。設計貯蔵期間における特定兼用キャスクの中性子遮蔽材の熱による遮蔽能力の低下を考慮しても、特定兼用キャスク表面及び特定兼用キャスク表面から1m離れた位置における最大線量当量率は、それぞれ2mSv/h以下、100 μ Sv/h以下となるように設計する。

MSF-24P(S)型の遮蔽機能に関する評価は、収納する使用済使用済燃料の種類、燃焼度、冷却期間等の条件を基に、遮蔽評価の結果が厳しくなる入力条件を設定したうえで、線源強度を求める。特定兼用キャスクの実形状を三次元でモデル化して求めた特定兼用キャスク表面及び特定兼用キャスク表面から1m離れた位置における線量当量率が評価基準以下となり、特定兼用キャスクが適切な遮蔽能力を有することを確認する。

2. (2) 審査ガイドへの適合性 [確認内容]1)から2)への説明に示すとおり、特定兼用キャスク表面及び特定兼用キャスク型表面から1メートル離れた位置における線量当量率は、特定兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、使用済燃料の放射線源強度を条件として三次元モンテカルロコードMCNP5 (断面積ライブラリ: MCPLIB84/FSXLIB-J33) を使用して求める。線量当量率評価に用いる放射線源強度は、使用済燃料の型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コードORIGEN2を使用して求める。

放射線源強度計算に当たっては、中性子について実効増倍率を考慮するとともに、使用済燃料の軸方向の燃焼度分布を考慮する。また、線量当量率の評価に当たっては、使用済燃料集合体の燃焼度に応じた収納位置を考慮するとともに、設計貯蔵期間中における中性子遮蔽材の熱による遮蔽性能の低下を考慮する。上記条件に基づく解析の結果、特定兼用キャスク表面及び特定兼用キャスク表面から1メートル離れた位置における最大線量当量率は、それぞれ2mSv/h以下及び100 μ Sv/h以下を満足することを確認した。

また、貯蔵建屋を設置する場合において、当該貯蔵建屋の損傷による工場等周辺の実効線量への影響、及び使用済燃料の配置の条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置を講じることについては、型式指定申請の範囲外（設工認時の別途確認事項）である。

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、兼用キャスクの有する安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、MSF-24P(S)型の遮蔽機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

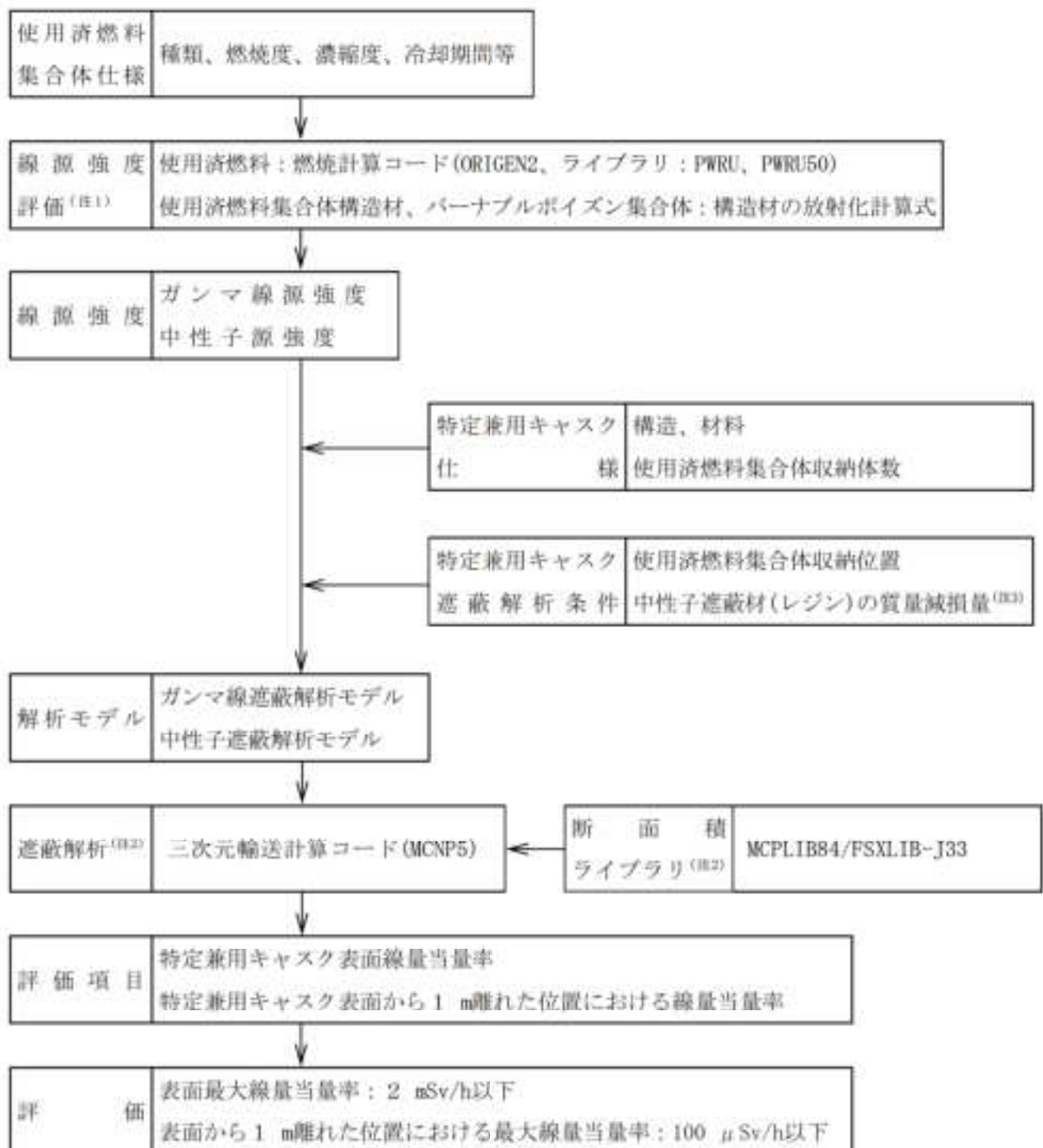
使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

a. 兼用キャスクからの線量当量率は、兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、及び1)で求めた放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリ（以下「遮蔽解析コード等」と総称する。）を使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の兼用キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。

b. 兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を $100\mu\text{Sv/h}$ 以下とすること。

MSF-24P(S)型の遮蔽解析フローを第1図に示す。遮蔽解析に用いる解析コードは、3. に示すとおり検証され、適用性が確認されている。



(注1) 線源強度評価は型式証明及び型式指定において ORIGEN2 コードを用いる。

(注2) 遮蔽解析は型式指定においては型式証明で用いたコードのうち MCNP5 コードを選択する。

(注3) 特定兼用キャスクの主要な構成部材のうち、中性子遮蔽材は、補足説明資料 26-5 「材料・構造健全性(長期健全性)に関する説明資料(L5-96KV265)」に示すとおり、熱による質量減損が生じる。遮蔽解析では、設計貯蔵期間(60年)経過後の中性子遮蔽材の質量減損を考慮する。

第1図 遮蔽解析フロー図

(3) 使用済燃料の線源強度評価方法

使用済燃料の型式、燃焼度（集合体平均）、濃縮度及び冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して核種の生成、崩壊及びそれに基づく放射線源強度（以下「線源強度」という。）を計算する。線源評価の具体的な条件は別紙 1 に示す。使用済燃料の軸方向燃焼度分布を考慮して、軸方向燃焼度分布を第 2 図のとおりとし、線源強度を計算している。

(4) 特定兼用キャスクの線量当量率評価方法

特定兼用キャスクの線量当量率は、特定兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、使用済燃料の線源強度を条件として、遮蔽解析コードを使用して求める。線量当量率の算定に当たっては、設計貯蔵期間（60 年）中における熱による中性子遮蔽材の遮蔽性能の低下を考慮する。線量当量率評価の具体的な条件は別紙 1 に示す。

型式指定において、線量当量率評価は、三次元モンテカルロコード MCNP5 を用いる。遮蔽解析における収納物条件の概要を第 1 表に示す。遮蔽解析に用いる燃料タイプについては第 1 表に示す燃料のうち、別紙 1-3 表に示すとおり燃料有効部ガンマ線源強度及び燃料有効部中性子源強度が高い、17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A 型）及び 15×15 燃料 48,000MWd/t 型（A 型）とする。

(5) 遮蔽解析モデル

遮蔽解析モデル化の概要を第 3 図、解析モデル図を第 4 図に示す。

特定兼用キャスクの実形状を基に、ガンマ線遮蔽材である鋼材の欠損となるトラニオン、バルブ及びモニタリングポート、並びに中性子遮蔽材であるレジンの欠損となる伝熱フィン、トラニオン、バルブ及び支柱を考慮したモデルにより評価している。使用済燃料集合体は燃料各領域の高さ寸法は固定して一次蓋及び胴（底板）に接した状態となるようキャスク全長を短縮し、径方向についてはバスケットセル内部に均質化している。なお、貯蔵時の運用では貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体を装着するが、遮蔽評価では保守的に装着しないものとして特定兼用キャスク表面及び表面から 1 m 離れた位置の線量当量率を評価する。

また、遮蔽解析モデルの入力条件への不確かさの考慮は、以下のとおりである。

① 構成部材密度

最低保証密度を使用して原子個数密度を設定。

② 寸法公差

解析モデルの各種寸法は公称寸法でモデル化するが、各構成部材の寸法公差については最小厚さを密度係数（＝最小寸法／公称寸法）で考慮。

(6) 遮蔽解析の保守性

本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・ 収納制限に対する解析条件の保守性

— 、、ウラン濃縮度 $4.1 \pm \text{ wt\%}$ 及び $4.0 \pm \text{ wt\%}$ を保守的に wt% 及び wt% とする。

— 遮蔽評価においては、局所的な表面線量を評価する必要があるため、使用済燃料の燃焼度（集合体平均）は中央部、外周部共に当該配置の収納制限の最高燃焼度を設定している。

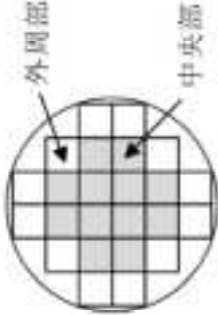
・ モデル化の保守性

— 中性子遮蔽材は、評価期間中の熱的影響により質量減損（1.9 %）が発生するため、遮蔽評価上、保守的に 2.5 % の質量減損を考慮（原子個数密度で考慮）する。

— 使用済燃料について胴内での軸方向の移動を考慮し、安全側に蓋方向、底部方向に移動したモデルとしており、線源である使用済燃料が評価点により近くなる設定としている。

— パーナブルポイズン集合体は、放射化による線源強度については考慮するが、構造材としての遮蔽効果は無視する。

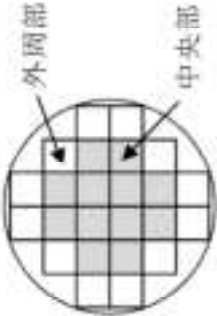
第1表 (1/2) 遮蔵解析における収納物条件の概要

項目		17×17 燃料		解析条件	
		キヤスク収納位置制限		中央部	外周部
収納物仕様	種類	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型, B型)	
	初期濃縮度 (wt%)	≤4.2			
	ウラン重量 (kg)				
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)				
	冷却期間 (年)				
バーナブル ボイズン集合体 の仕様	最高燃焼度 (GWd/t)				
	冷却期間 (年)				
	平均燃焼度 (GWd/t)				
配置 (注1) (注2)					

(注1) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す

(注2) 中央部の最高燃焼度は [] 外周部の最高燃焼度は [] であり、遮蔵解析においては、最高燃焼度の燃料集合体が収納されている条件とした。なお、17×17 燃料と 15×15 燃料は MSF-24P(S) 型に混載しないが、48,000MWd/t と 39,000MWd/t、及び A 型と B 型は区別なく同一キヤスクへ混載可能である。

第1表 (2/2) 遮蔽解析における収納物条件の概要

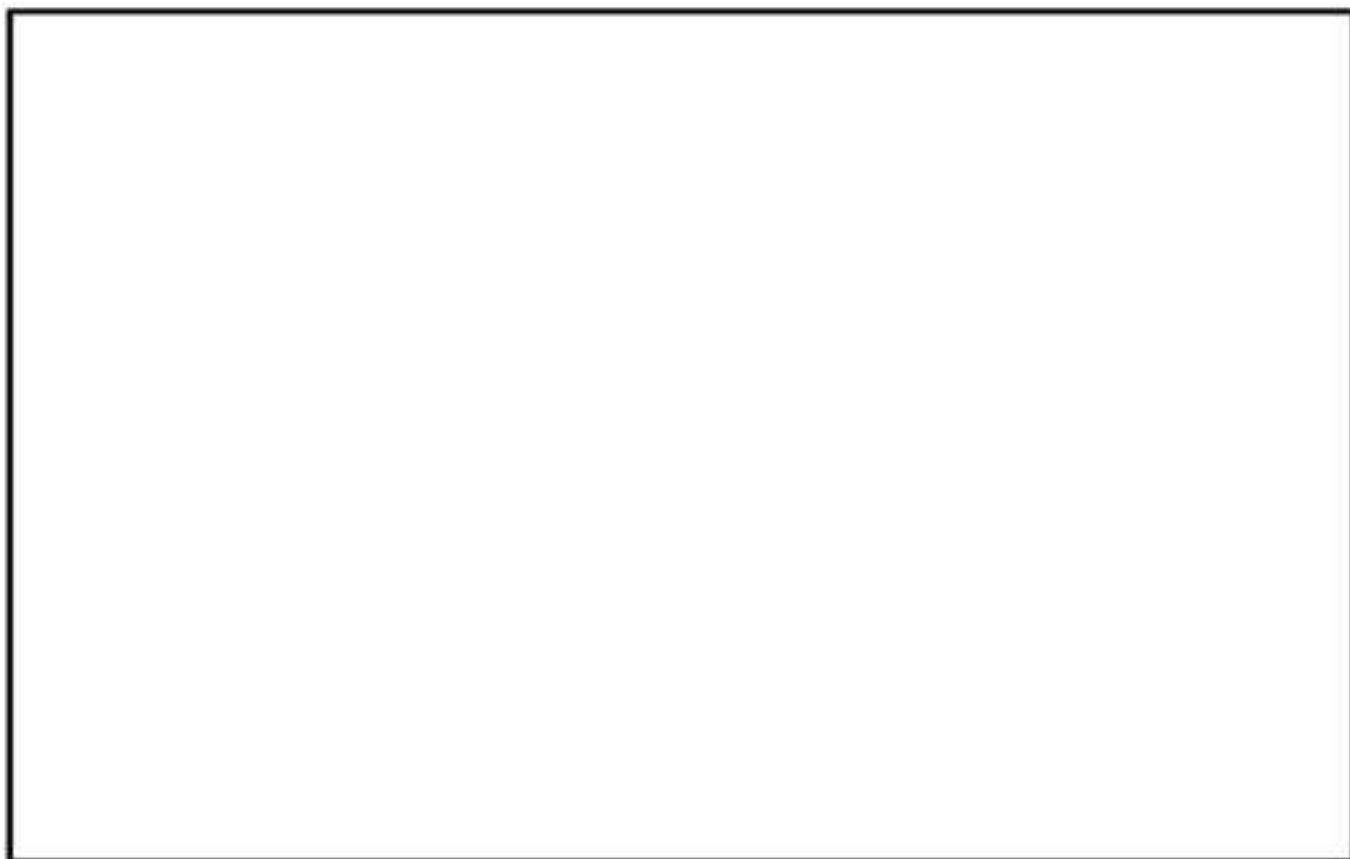
項目		15×15 燃料		解析条件	
		キャスタク収納位置制限		中央部	外周部
収納物仕様	種類	中央部 48,000MWd/t型 (A型・B型)	外周部 48,000MWd/t型 (A型・B型)	中央部	外周部 48,000MWd/t型 (A型, B型)
	初期濃縮度 (wt%)	≤4.1			
	ウラン重量 (kg)	[]			
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	[]			
	冷却期間 (年)	[]			
バーナブル ボイズン集合体 の仕様	最高燃焼度 (GWd/t)	[]			
	冷却期間 (年)	[]			
	平均燃焼度 (GWd/t)	[]			
配置 (注1) (注2)				[]	

(注1) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

(注2) 中央部の最高燃焼度は []、外周部の最高燃焼度は [] であり、遮蔽解析においては、最高燃焼度の燃料集合体が

収納されている条件とした。なお、17×17燃料と15×15燃料はMSF-24P(S)型に混載しないが、48,000MWd/tと39,000MWd/t、

及びA型とB型は区別なく同一キャスタクへ混載可能である。



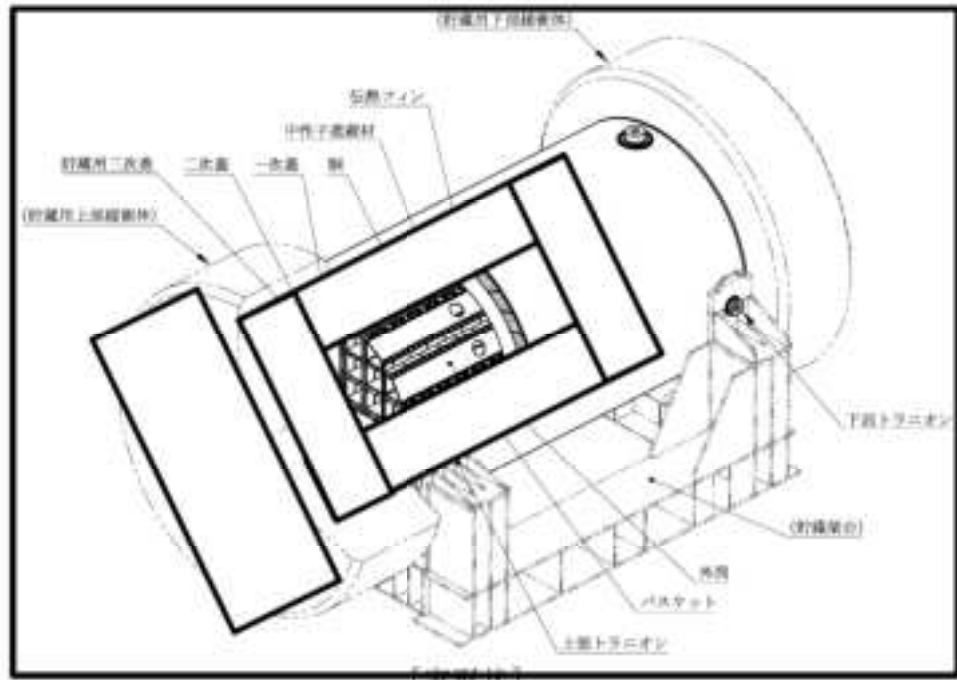
----- 相対燃焼度分布設定値

第2図(1/2) 軸方向燃焼度分布の設定(17×17燃料)



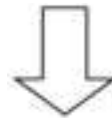
----- 相对燃焼度分布設定値

第2図（2/2） 軸方向燃焼度分布の設定（15×15 燃料）



【実形状】

三次元モデル化



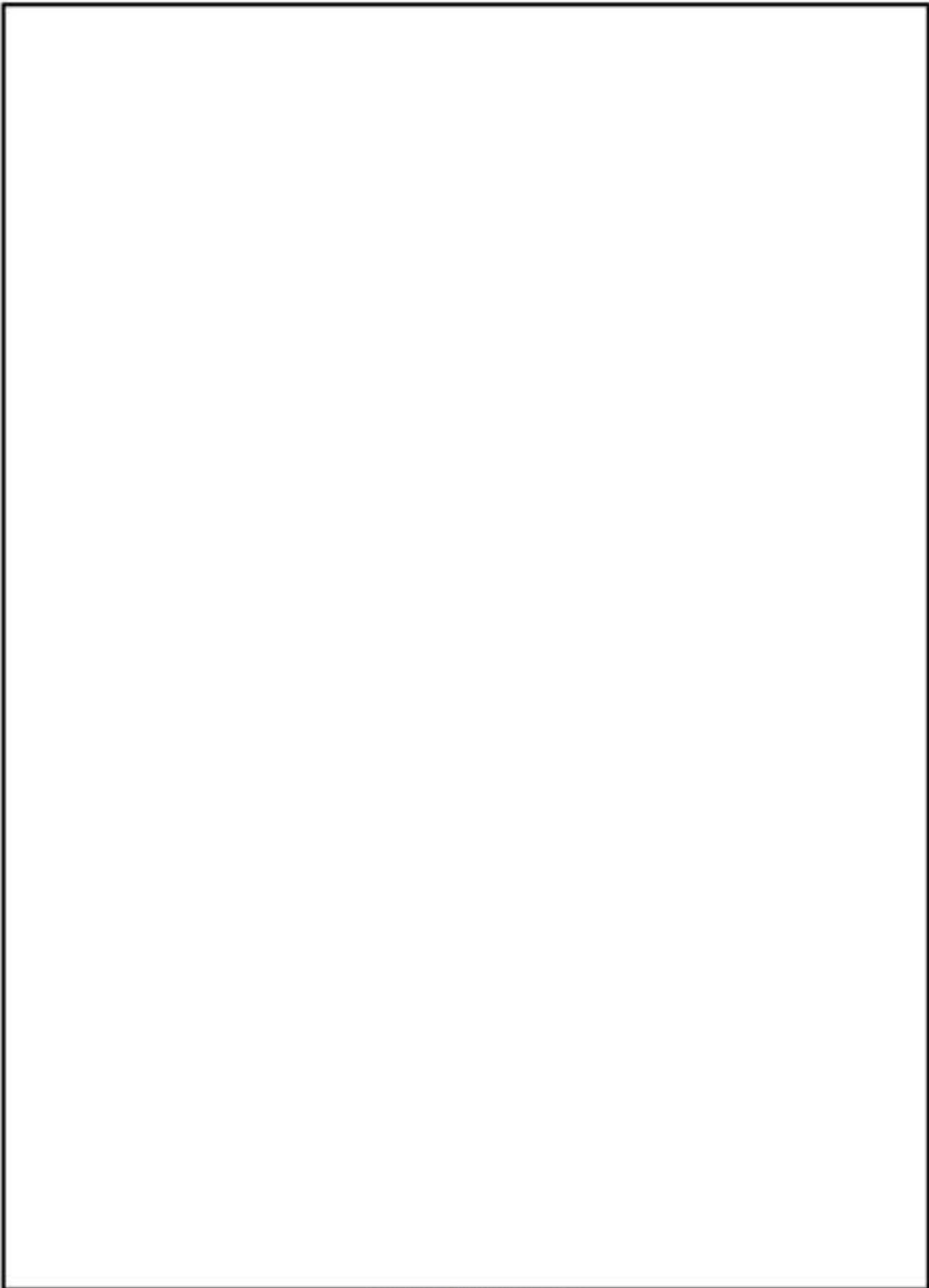
【遮蔽解析モデル化（三次元体系）】

注：モニタリングポート部、バルブ部、トランニオン等を同一平面に示している。

貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体はないものとしてモデル化する。

燃料有効部中央	燃料有効部外周
燃料上部構造材中央	燃料上部構造材外周
燃料上部構造材中央	燃料上部構造材外周
燃料下部構造材中央	燃料下部構造材外周
バスケット領域	銅、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー
中性子遮蔽材	トランニオン
伝熱フィン	底部中性子遮蔽材カバー、下部端板、バルブ部カバープレート
真空	

第3図 遮蔽解析モデル化概要



第4図 遮蔽解析モデル

(7) 評価結果

MSF-24P(S)型の遮蔽評価結果を第2表に示す。

特定兼用キャスクの表面及び表面から1 m離れた位置における線量当量率は、評価基準を満たしている。

なお、線量当量率が最大となる評価点位置は、第5図に示すとおり、表面は底部トランオン付近コーナー部の中性子遮蔽材が少ない領域、表面から1 m離れた位置は側部中心の中性子遮蔽材でカバーされた領域である。

評価点位置までの遮蔽構造の特徴から、線量当量率について表面は中性子が支配的になる。一方、表面から1 m離れた位置はガンマ線が支配的になる。

別紙1-3表に示すとおり、中性子線源強度は15×15燃料が高く、ガンマ線源強度は17×17燃料が高いため、表面の線量当量率は中性子線源強度が高い15×15燃料収納時、表面から1 m離れた位置の線量当量率はガンマ線源強度が高い17×17燃料収納時が高い結果となっている。

第2表 線量当量率評価結果

(単位：μSv/h)

		表面			表面から1m離れた位置		
		側部	蓋部	底部	側部	蓋部	底部
線量 当量率	17×17燃料収納時	1528.9	395.6	207.1	84.6	64.8	60.1
	15×15燃料収納時	1639.6	422.1	220.2	83.0	67.1	50.4
評価基準		2,000以下			100以下		

注：線量当量率の詳細は、第3表(1/2)及び第3表(2/2)に示す。

線量当量率の出力位置は、第5図(1/2)及び第5図(2/2)に示す。

第3表 (1/2) 線量当量率評価結果 (17×17 燃料収納時)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部		側部		底部		
	軸方向	径方向	軸方向	径方向	軸方向	径方向	
	①	③	⑤	⑦	⑨		
表面	ガンマ線	燃料有効部	0.4 (2.0)	0.1 (4.5)	111.4 (0.5)	1.8 (1.8)	0.1 (6.7)
		構造材放射化	1.1 (1.6)	0.7 (2.4)	26.9 (0.6)	1.7 (2.3)	0.2 (4.8)
		二次ガンマ線	1.3 (2.0)	2.2 (1.8)	25.0 (0.8)	6.8 (1.4)	0.7 (2.6)
	中性子	392.8 (0.7)	695.2 (0.7)	40.8 (0.6)	1518.6 (0.6)	206.1 (0.9)	
	合計	395.6	698.2	204.1	<u>1528.9</u>	207.1	
表面から 1 m	ガンマ線	燃料有効部	0.7 (0.5)	23.4 (0.3)	45.1 (0.1)	25.6 (0.3)	5.4 (0.2)
		構造材放射化	7.0 (0.2)	22.8 (0.5)	11.7 (0.2)	12.3 (0.5)	31.5 (0.1)
		二次ガンマ線	0.4 (0.6)	5.1 (0.3)	10.0 (0.3)	5.3 (0.3)	3.8 (0.3)
	中性子	56.7 (0.3)	31.5 (0.6)	17.8 (0.2)	30.4 (0.7)	19.4 (0.2)	
	合計	64.8	82.8	<u>84.6</u>	73.6	60.1	

※ () 内は統計誤差 (単位: %) を示す。

下線で示す値は、表面及び表面から 1 m 離れた位置における線量当量率の最大値である。

第3表 (2/2) 線量当量率評価結果 (15×15 燃料収納時)

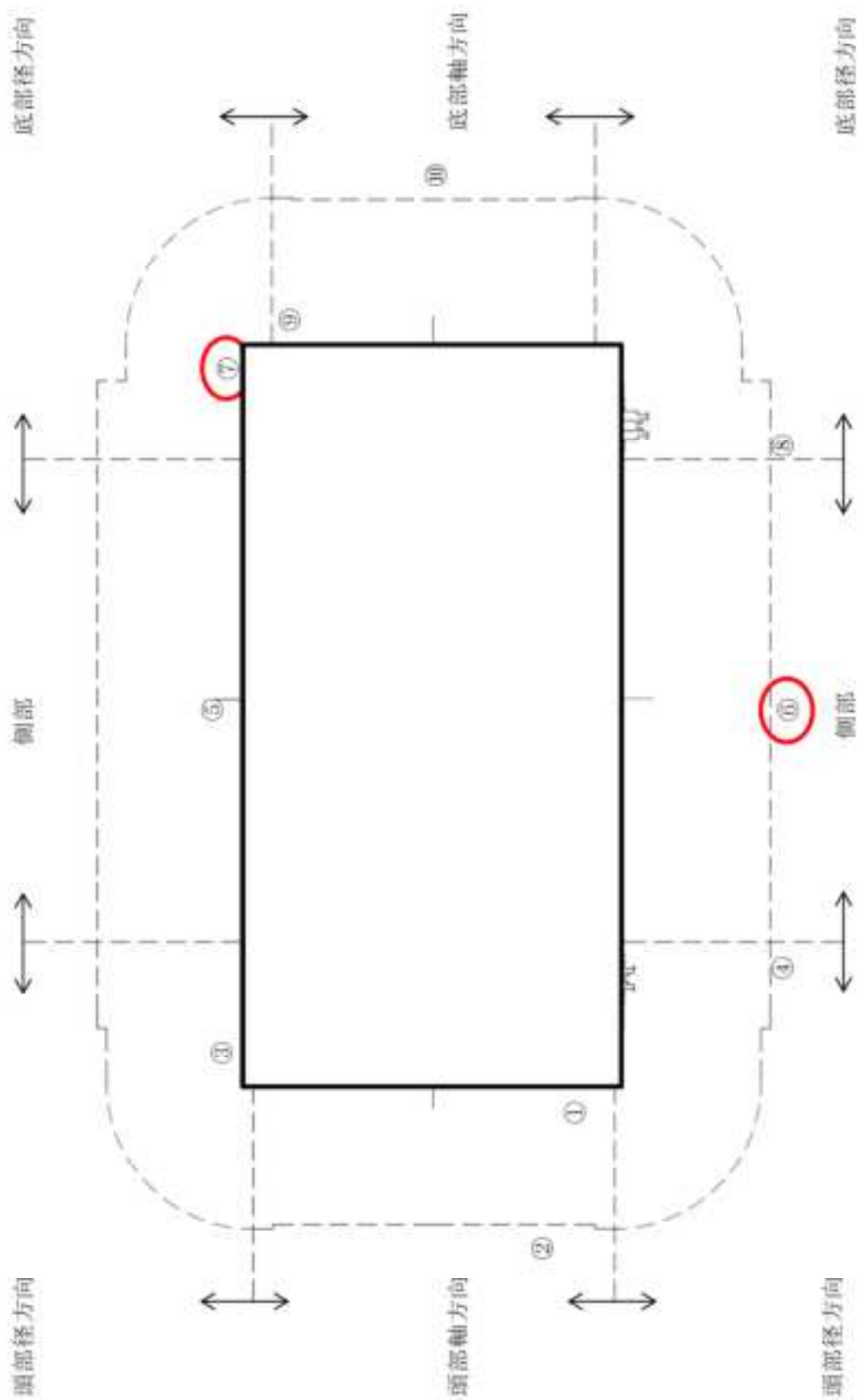
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部		側部	底部		
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	
	①	③		⑦	⑨	
ガンマ線 表面	燃料有効部	0.2 (2.3)	0.1 (4.3)	112.3 (0.4)	1.7 (2.0)	0.1 (8.9)
	構造材放射化	0.5 (1.9)	0.6 (2.7)	19.5 (0.6)	1.2 (2.6)	0.1 (6.4)
	二次ガンマ線	1.2 (2.0)	2.2 (2.1)	25.9 (0.9)	7.3 (2.0)	0.8 (3.1)
中性子	420.2 (1.2)	743.7 (1.0)	43.3 (0.8)	1629.4 (1.0)	219.2 (1.8)	
合計	422.1	746.6	201.0	<u>1639.6</u>	220.2	
評価点	②	④	⑥	⑧	⑩	
ガンマ線 表面から 1 m	燃料有効部	0.3 (0.3)	22.5 (0.2)	45.1 (0.1)	26.8 (0.3)	5.6 (0.2)
	構造材放射化	1.7 (0.2)	16.3 (0.4)	8.5 (0.2)	8.8 (0.6)	20.1 (0.1)
	二次ガンマ線	0.4 (0.7)	5.3 (0.4)	10.5 (0.3)	5.8 (0.4)	4.0 (0.4)
中性子	64.7 (0.5)	35.8 (0.9)	18.9 (0.2)	30.9 (1.0)	20.7 (0.2)	
合計	67.1	78.9	<u>83.0</u>	72.3	50.4	

※ () 内は統計誤差 (単位: %) を示す。

下線で示す値は、表面及び表面から 1 m 離れた位置における線量当量率の最大値である。

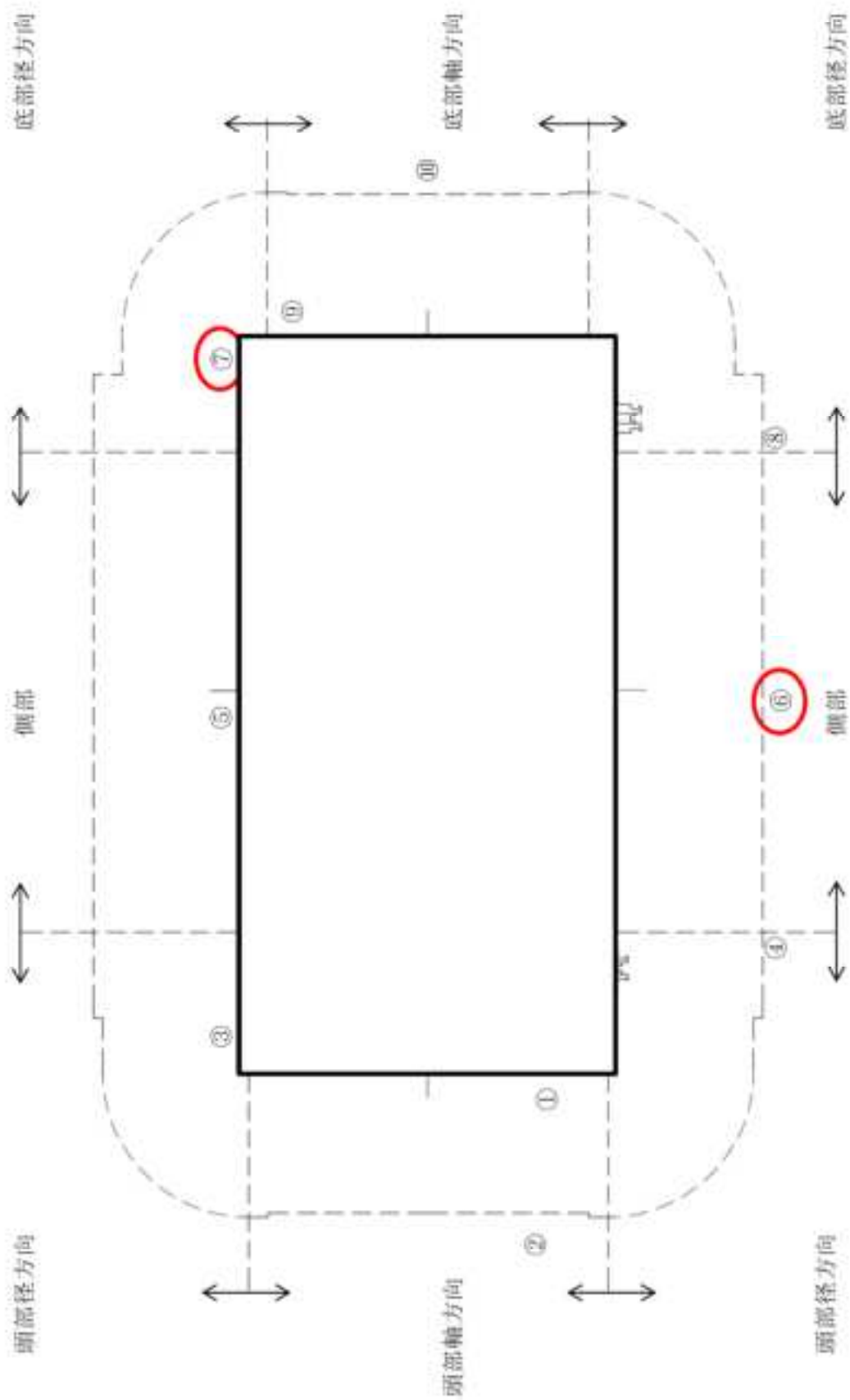
○ : 表面及び表面から 1 m 離れた位置における最大線量当量率の位置



(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第5図 (1/2) 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (17×17 燃料収納時)

○ : 表面及び表面から 1 m 離れた位置における最大線量当量率の位置



(注) ①～⑦の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第 5 図 (2 / 2) 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (15 × 15 燃料収納時)

〔確認内容〕

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

兼用キャスクが敷地境界に近い場所に設置される場合等に、使用済燃料から放出される中性子の敷地境界線量への寄与が大きくなる可能性があることを適切に考慮した上で、通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線（ガンマ線及び中性子）による実効線量について評価すること。

② ソースターム

兼用キャスクの遮蔽機能データ又は兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ となるよう放射線源強度を規格化したものを用いること。ここで、放射線源強度を規格化して用いる場合は、中性子 100%又はガンマ線 100%のいずれか保守的な線量評価とすること。また、中性子及びガンマ線の表面エネルギースペクトルは、保守的な線量評価となるものを使用すること。

③ 遮蔽解析コード等

検証され適用性が確認された遮蔽解析コード等を使用すること。なお、モンテカルロコードを用いる場合は、相互遮蔽効果、ストリーミング及びコンクリート深層透過の観点から検証され適用性が確認されたものであること。

④ 通常貯蔵時の線量

通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下となることを目標に、線量限度 (1mSv/y) を十分下回る水準とすること。

なお、兼用キャスク以外の施設の線量は、既評価の空気カーマ (Gy/y) を実効線量 (Sv/y) へ換算し、又は新たに実効線量 (Sv/y) を評価するものとする。換算に当たっては、係数を 1 とすること。

4) 応急復旧

貯蔵建屋等を設置する場合は、貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、必要に応じて土壌による遮蔽の追加等の適切な手段による応急復旧を行うことにより、工場等周辺の実効線量が敷地全体で線量限度 (1mSv/y) を超えないこと。この場合において、応急復旧による遮蔽機能の回復を期待する場合には、その実施に係る体制を適切に整備すること。

敷地境界における実効線量評価及び応急復旧は型式指定申請の範囲外（設工認時の別途確認事項）である。なお、敷地境界における実効線量評価で確認が必要な遮蔽解析コードの内容（相互遮蔽効果、ストリーミング及びコンクリート深層透過）は、本型式指定における特定兼用キャスク評価でも以下のとおり確認した。

- 相互遮蔽効果については、線源である使用済燃料が複数体収納され、使用済燃料同士の相互遮蔽を考慮する必要のある使用済燃料輸送容器体系でのベンチマーク解析により適用性を確認した。(3.(2)4)②MCNP5 コードの妥当性確認のベンチマーク(第10図)において、使用済燃料輸送容器に複数の使用済燃料が収納された体系で、使用済燃料同士の相互の遮蔽効果がある場合でも MCNP コード計算値と測定値の線量当量率分布の傾向がよい一致を示すことを確認。))
- ストリーミング効果については、使用済燃料輸送容器体系及び乾式貯蔵容器体系でのストリーミングの影響のある領域付近でのベンチマーク解析結果より適用性を確認した。(3.(2)4)②MCNP5 コードの妥当性確認のベンチマーク(第10図及び第11図)により、構造物中に隙間が存在するトラニオン構造や蓋部周辺の評価点における MCNP コード計算値と測定値がよい一致を示すことを確認。)
- コンクリート深層透過については、MSF-24P(S)型ではコンクリートを使用しないため、確認対象外である。

3. 使用する解析コード

MSF-24P(S)型の遮蔽設計に用いられる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

(1) ORIGEN2 コード

1) 概要

ORIGEN2 コード⁽¹⁾は、米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)で開発された燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは公開コードであり、放射性物質輸送・貯蔵容器の崩壊熱計算等に広く用いられている。

2) 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼計算に際して以下の機能を有している。

- ① 燃料の炉内での燃焼計算、炉取出後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線の強度、各核種の放射エネルギー等が求められる。
- ② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリデータが内蔵されており、任意に選択できる。
- ③ 計算結果は、放射化生成物、アクチニド、核分裂生成物に分類して出力される。
- ④ 燃焼計算に必要な放射性核種のデータ(崩壊熱、ガンマ線のエネルギー分布、自発核分裂と (α, n) 反応により発生する中性子源強度等)は、ライブラリデータとしてコードに内蔵されている。

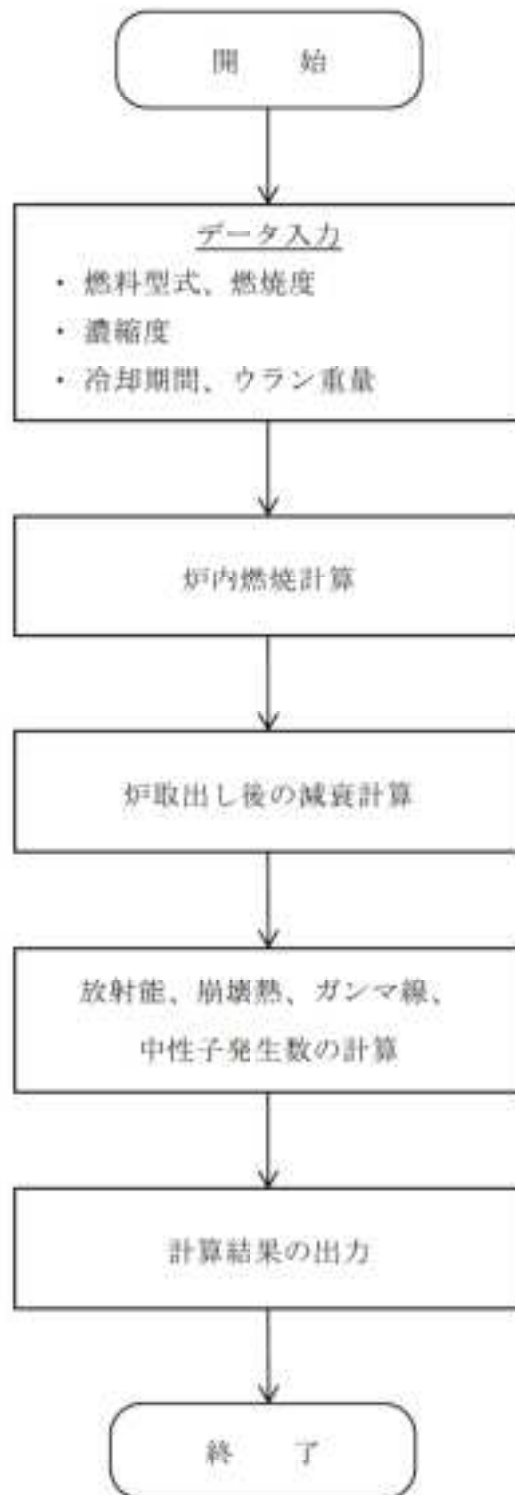
3) 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを第6図に示す。

4) 使用実績及び検証

ORIGEN2 コードは、放射性物質輸送・貯蔵容器、原子燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている。また、ORNLではORIGEN2 コードの崩壊熱計算結果をANS標準崩壊熱の値と比較し、ORIGEN2 コードの妥当性を検証している⁽²⁾。

ORIGEN2 コードの検証例を第7図に示す。



第6図 ORIGEN2 コード計算フロー図

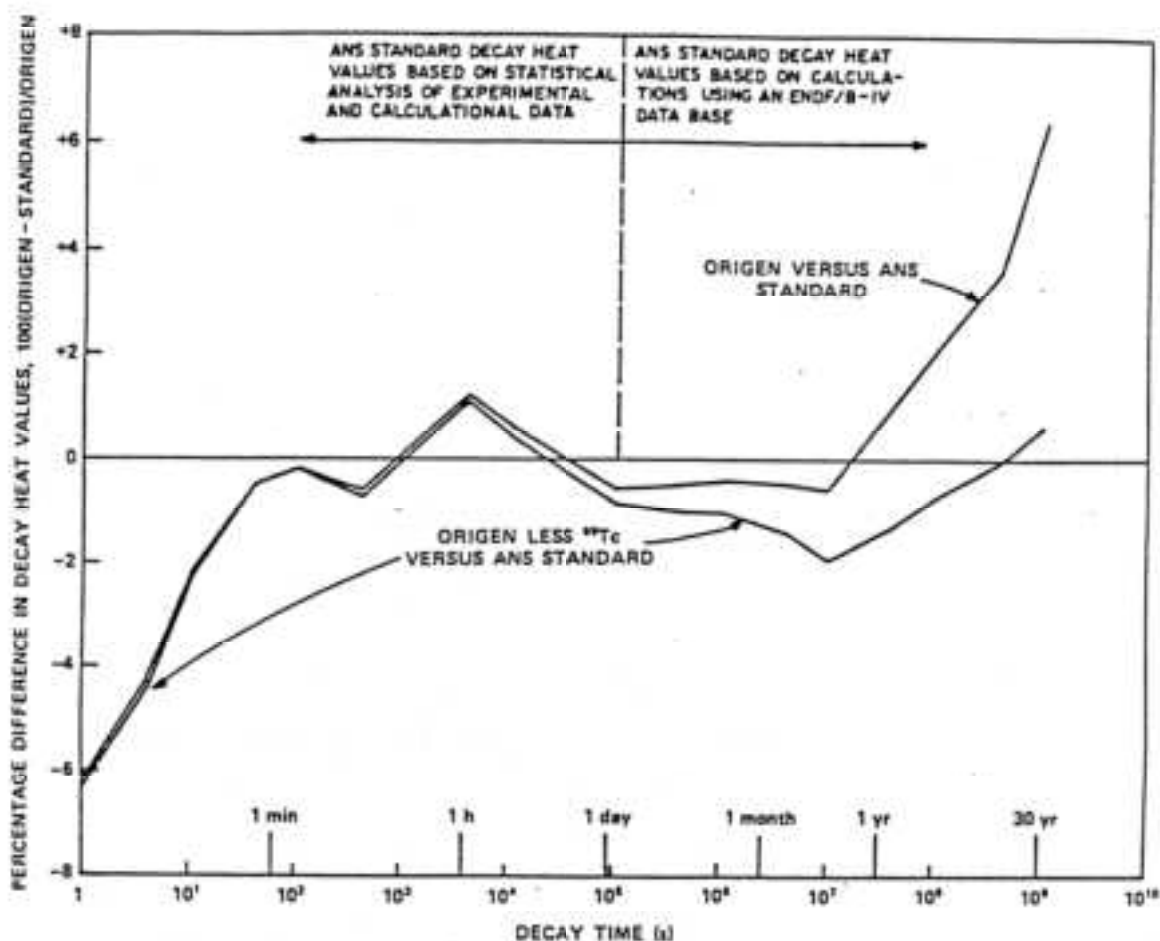


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13-4} irradiation of ^{235}U .

(注)ORIGEN2 コードの崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上 (MSF-24P(S)型に収納される燃料の冷却期間) の年数に対して高めの値となっている。この理由は、ANS 標準崩壊熱は ^{99}Tc を考慮していないためである。ORIGEN2 コードの解析結果より ^{99}Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

第 7 図 ORIGEN2 コード検証例 (2)

(2) MCNP5 コード

1) 概要

三次元モンテカルロコード MCNP5⁽⁴⁾ (以下「MCNP5 コード」という。)は、米国のロスアラモス国立研究所 (LANL) で開発された、中性子、光子及び電子輸送問題を解くための汎用モンテカルロコードである。

2) 機能

MCNP5 コードは、遮蔽解析に関して以下の機能を有する。

- ① 放射線の衝突、散乱などの物理現象の忠実な模擬ができる。
- ② 二次曲面の論理演算によって表現された任意の三次元領域を取扱うことができ、形状モデルや断面積データを正確に取り扱うことができる。
- ③ 幾何形状の設定の自由度が大きいことや、断面積の取り扱いに連続エネルギーを採用していること等の利点がある。

3) 解析フロー

MCNP5 コードの解析フローを第 8 図に示す。

4) 使用実績及び検証

MCNP5 コードは、国内では「原子力発電所放射線遮へい設計規程」JEAC4615⁽⁴⁾において原子力発電所附属施設遮蔽のための計算コードとして3次元の連続エネルギーモンテカルロ法も利用可能とされ、放射性物質輸送・貯蔵容器などの遮蔽計算に用いられている。米国では乾式キャスク貯蔵システムの審査指針 NUREG-1536⁽⁵⁾及び乾式キャスク貯蔵施設の審査指針 NUREG-1567⁽⁶⁾において遮蔽計算ツールとして MCNP コードが記載され、また安全評価で使用⁽⁷⁾されている。

以下では、兼用キャスクの線量当量率分布から兼用キャスク表面での線量当量率が 2 mSv/h 以下、表面から 1 m 離れた位置における線量当量率が 100 μ Sv/h 以下であることを確認する目的のため、MCNP5 コードを遮蔽解析に用いる適用性について、①類似許認可実績の確認、②MCNP5 コードが使用済燃料輸送・貯蔵体系での線量当量率分布に使用できることの妥当性を確認した。妥当性を確認する項目については、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⁽⁸⁾ (以下「シミュレーションガイドライン」という。)を参考にした。

① MCNP5 コードの許認可実績

MCNP5 コードの使用について、兼用キャスクではないものの、核燃料物質輸送容器での実績がある⁽⁹⁾。先行輸送容器許認可実績と今回の解析における解

析条件の比較結果を第4表にまとめる。今回の解析対象の線源条件及び遮蔽構造は同等であり、新規性はない。また、先行輸送容器以外では MCNP5 コードの旧バージョンである MCNP4C コード⁽⁴⁹⁾による使用済燃料貯蔵施設の許認可での使用実績もあり⁽⁴⁰⁾、MCNP コードは放射性物質輸送・貯蔵容器の遮蔽解析に限らず、広く遮蔽解析に使用できる汎用計算コードである。

(注) 主な変更点はプログラム言語の変更であり、物理・数学モデルは同じ

② MCNP5 コードの妥当性確認

MCNP5 コードを兼用キャスクの遮蔽解析に適用することについて、シミュレーションガイドラインを参考に、妥当性確認のための項目を確認した。シミュレーションガイドラインでは、(1)概念モデルの整理、(2)数学的モデル化、(3)物理的モデル化及び(4)シミュレーションモデルの予測性能の判断から、所期の利用目的に対してシミュレーションモデルの予測性能が要求を満たすか否かを判断するとしている。シミュレーションガイドラインに従って適用性確認を行う場合、数学的モデル化における不確かさ及び物理的モデルにおける不確かさの定量化を統合して妥当性確認実験が存在しない条件におけるモデルの予測性能を評価する必要があるが、ここでは、(3)物理的モデル化及び(4)予測性能の評価の代わりに、MCNP5 コードでは使用済燃料輸送・貯蔵容器体系で測定線量当量率の分布を良く再現できること及び許認可実績が豊富な DOT3.5 コードとの線量解析結果との比較により MCNP5 コードでも保守的な評価が可能であることを確認した。

(1)概念モデルの整理については、妥当性確認する範囲(兼用キャスクの遮蔽解析に MCNP5 コードを適用するにあたって確認する必要のある物理プロセスとして中性子とガンマ線の遮蔽に係る実現象や条件)について整理した。(2)数学的モデル化については、概念モデルを数学的に表現した数理モデルと、その数理モデルを計算機で数値的に解く数値モデルに関し、MCNP5 コードにおいて数値的な解法が問題ないことが検証されていることを、MCNP5 コードの開発機関である ORNL での検証内容の確認を実施した。(3)物理的モデル化については、MSF-24P(S)型と同等の使用済燃料輸送・貯蔵容器体系での線量当量率の測定試験結果より MCNP5 コードでの計算が線量当量率分布の傾向を精度良く再現できることの確認を実施した。(4)シミュレーションモデルの予測性能判断については、MCNP5 コードを用いた使用済燃料輸送・貯蔵容器体系での線量当量率の予測性能判断に必要な不確かさ情報を含む実験データが十分でないことから、代替として、既認可コードである DOT3.5 との比較により DOT3.5 との同等性を確認した。

妥当性確認の方法と確認結果の概要について第9図に示す。

(1)概念モデル(妥当性を確認する範囲)の整理については、MSF-24P(S)型に収納される使用済燃料から発生したガンマ線や中性子が構造材で遮蔽される現象をシミュレーションし、MSF-24P(S)型周辺での線量当量率が基準値を満足するかどうかを確認する目的を考慮して第5表に示すとおり整理した。MSF-24P(S)型の遮蔽解析では、使用済燃料輸送・貯蔵容器体系特有の収納される使用済燃料から放出される中性子やガンマ線の散乱及び吸収といったミクロ的な物理現象に基づく、遮蔽材の透過、構造物間隙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物理現象を考慮しなければならない。また、これら物理現象を考慮するにあたって、使用済燃料の線源条件、線源形状、遮蔽材質及び形状の情報が必要であり、線量当量率のシミュレーション結果に影響を与える要素として整理した。

(2)数学的モデル化の確認はLANLにて実施済みである。MCNP5コードはLANLのソフトウェア品質保証計画⁽¹¹⁾に従って開発されており、計算コードの検証と妥当性が確認されたものである。ここでは、リグレッションテストによる確認や、Kobayashiの3次元輸送ベンチマークを用いて散乱がない場合は解析解との比較及び散乱がある場合はMVPコードを用いた参照解と比較し良い一致を得ている⁽¹²⁾。なお、リグレッションテストのベースとなる計算結果の妥当性については、ガンマ線や中性子に関するベンチマークにより、キャスクの評価に必要なガンマ線や中性子の輸送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⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

(3)物理的モデル化については、(1)で整理した概念モデル要素が類似した内容で構成される使用済燃料輸送・貯蔵容器体系のベンチマーク解析を選定し、MCNP5コードによる計算値と測定値との比較により、**傾向が良い一致を示すことを確認した**。ベンチマーク解析の概要を第10図⁽¹⁵⁾及び第11図⁽¹⁶⁾に示す。これらのベンチマーク解析は、使用済燃料輸送・貯蔵容器体系へのモンテカルロ法の適用性を明らかにするための作業の一つとして、使用済燃料の集合体燃焼度や冷却期間などを現実的に設定した条件により計算を実施したものであり、放射線測定結果と比較することで、使用済燃料輸送・貯蔵容器体系での計算精度を確認できる。

第10図は、線源である使用済燃料が複数体収納された使用済燃料輸送容器体系であり、使用済燃料同士の相互遮蔽や構造物中に隙間が存在するトランニオ

ン構造や蓋部周辺でのストリーミングの影響の考慮が必要となる。この使用済燃料輸送容器体系での放射線透過試験での測定値に対して、JENDL-3.3に基づく断面積ライブラリ FSXLIB-J33 並びに ENDF/B-IV 及び EPDL89 に基づく断面積ライブラリ MCPLIB02 を用いたベンチマーク解析結果を示す。ガンマ線及び中性子線の線量当量率分布は測定値と同様の傾向を示し、計算条件及び計算値と測定値の比較（以下「C/E」という。）は中性子で 0.89～2.89、ガンマ線で 0.71～3.10 となっているが、大部分の領域で C/E は 1 以上となっており、測定値を上回ることが確認されている⁽¹⁰⁾。なお、C/E が 1 を下回る領域について、中性子は測定時のキャスク 90 度方向に解析では考慮されていない壁があり、中性子の反射による影響として測定値が上昇した可能性があると報告されている。また、ガンマ線は上端部の位置においてのみ測定値が解析結果を上回るが、解析では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ためである。なお、第 10 図に示す内容及び結果は、文部科学省原子力試験研究費で実施された研究成果であり、その内容や適用範囲等については研究機関、規制当局及びメーカー等により構成された委員会を日本原子力学会に設立し、議論され取り纏められたものである。

第 11 図は、乾式貯蔵容器に使用済燃料が 1 体収納された条件での放射線透過試験である。トラニオン構造や蓋部周辺ではストリーミングの影響の考慮が必要となるが、乾式貯蔵容器体系での放射線透過試験での測定値に対して、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ FSXLIB-J33 並びに ENDF/B-VI 及び EPDL97 に基づく断面積ライブラリ MCPLIB84 を用いてベンチマーク解析を実施し、C/E は中性子で 0.93～1.17、ガンマ線は 0.90 であり、よい一致を示すことが確認されている⁽¹⁰⁾。なお、放射線透過試験は建屋内部で実施されているが、乾式貯蔵容器周囲の構造物がモデル化されていないため、周囲構造によるガンマ線や中性子の反射が考慮されておらず、C/E が一部 1 を下回っていると考えられる。

第 10 図及び第 11 図に示すベンチマーク解析結果より、使用済燃料輸送・貯蔵容器体系での線量当量率評価において、MCNP5 コードを用いて実体系を模擬することで、その分布の傾向が良い一致を示す結果を得ることが可能であることが確認できた。MSF-24P(S)型の遮蔽解析は、第 5 表に示すとおり、(3)ベンチマーク解析体系と同じ使用済燃料輸送・貯蔵容器体系であり、線量当量率評価手法についても線源設定 (ORIGEN2 コードでの解析)、線量当量率評価方法 (MCNP5 コードでのモデル化、使用する断面積ライブラリ (中性子: FSXLIB-J33、ガンマ線: MCPLIB84)) が類似の内容であるため、適用範囲内で評価条件が同様であれば、測定値に対して同じ線量当量率の分布の傾向になると判断できる。

(4)DOT3.5 コードとの同等性の確認については、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、使用済燃料輸送・貯蔵容器体系において 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。比較対象は MSF-24P(S)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⁽¹⁷⁾）とした。なお、DOT3.5 コードの評価手法は、伊方発電所 3 号機 使用済燃料乾式貯蔵施設の設置工事に係る設計及び工事計画認可申請（原規規発第 2107076 号 令和 3 年 7 月 7 日認可）において第 12 図に示す文獻をもと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。また、比較対象ケースは、核燃料輸送物設計変更承認申請ケースと同様の 17×17 燃料 48,000Mwd/t 型（A 型）収納時とした。MCNP5 コードによる遮蔽評価値と DOT3.5 コードによる評価値の比較を別紙 5 に示す。

別紙 5 に示すとおり DOT3.5 コードの特性上の要因により、頭部及び底部の表面径方向の一部部位では線量当量率評価値に差異⁽¹⁸⁾が生じるものの、その他の領域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・貯蔵容器体系に対して使用した場合でも、許認可実績のある DOT3.5 コードと同等の結果が得られることを確認した。

（注）頭部及び底部の表面径方向の一部について、DOT3.5 コードを用いた計算ではコードの特性上保守的なモデルを設定して計算しており、DOT3.5 コードの結果が MCNP5 コードの結果と比較して高い値となっている。

DOT3.5 コードを用いた線量当量率の解析については、使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明や型式指定、核燃料輸送物設計承認申請での使用実績がある。これらの DOT3.5 コードを用いた許認可においては、使用済燃料輸送・貯蔵容器の実形状の軸方向断面を二次元でモデル化し実績のある保守的な手法で行われていることから評価手法及び結果は妥当なものと判断されている。また、核燃料輸送物設計承認申請においては、DOT3.5 コードを用いて申請された線量当量率の解析結果に対し、独立行政法人 原子力安全基盤機構が MCNP5 コードを用いたクロスチェックにより、申請者による DOT3.5 コードによる解析結果は遮蔽安全上妥当な結果であることが確認されている。

③ MCNP5 コードの適用妥当性確認のまとめ

兼用キャスクに対する MCNP5 コードの適用性について、①類似許認可実績の確認により新規性はなく、②使用済燃料輸送・貯蔵容器体系における測定結果との比較による線量当量率分布の傾向確認や DOT3.5 を用いた解析結果との比

較により問題ないことが確認できた。比較した DOT3.5 コードの解析モデルは許認可実績のある保守的なモデルであり、その結果と同等の結果であることから、MCNP5 コードを用いた結果も保守的であると判断できる。以上より、MSF-24P(S)型の遮蔽解析への MCNP5 コードの適用妥当性に問題ないことが確認できた。

5) 断面積ライブラリ MCPLIB84 及び FSXLIB-J33

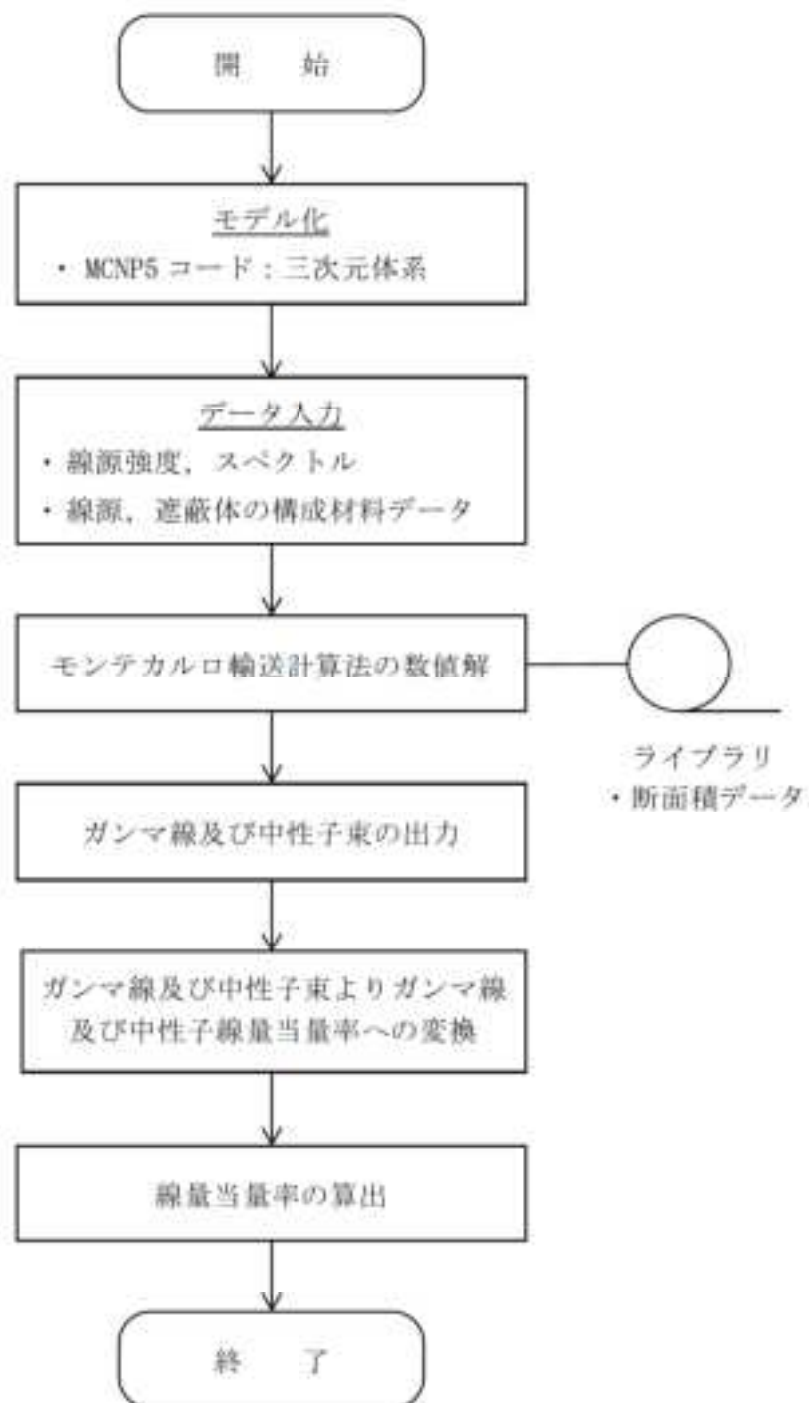
ガンマ線量当量率評価で用いている MCPLIB84⁽¹⁰⁾ は、MCNP5 等の三次元モンテカルロコード用に、核データ ENDF/B-VI 及び EPDL97 に基づく光子断面積ライブラリとして、米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) にて整備されたものである。

中性子線量当量率評価で用いている FSXLIB-J33⁽¹⁰⁾ は、MCNP5 等の三次元モンテカルロコード用に、JENDL-3.3 に基づく中性子断面積ライブラリとして、旧日本原子力研究所にて整備されたものである。

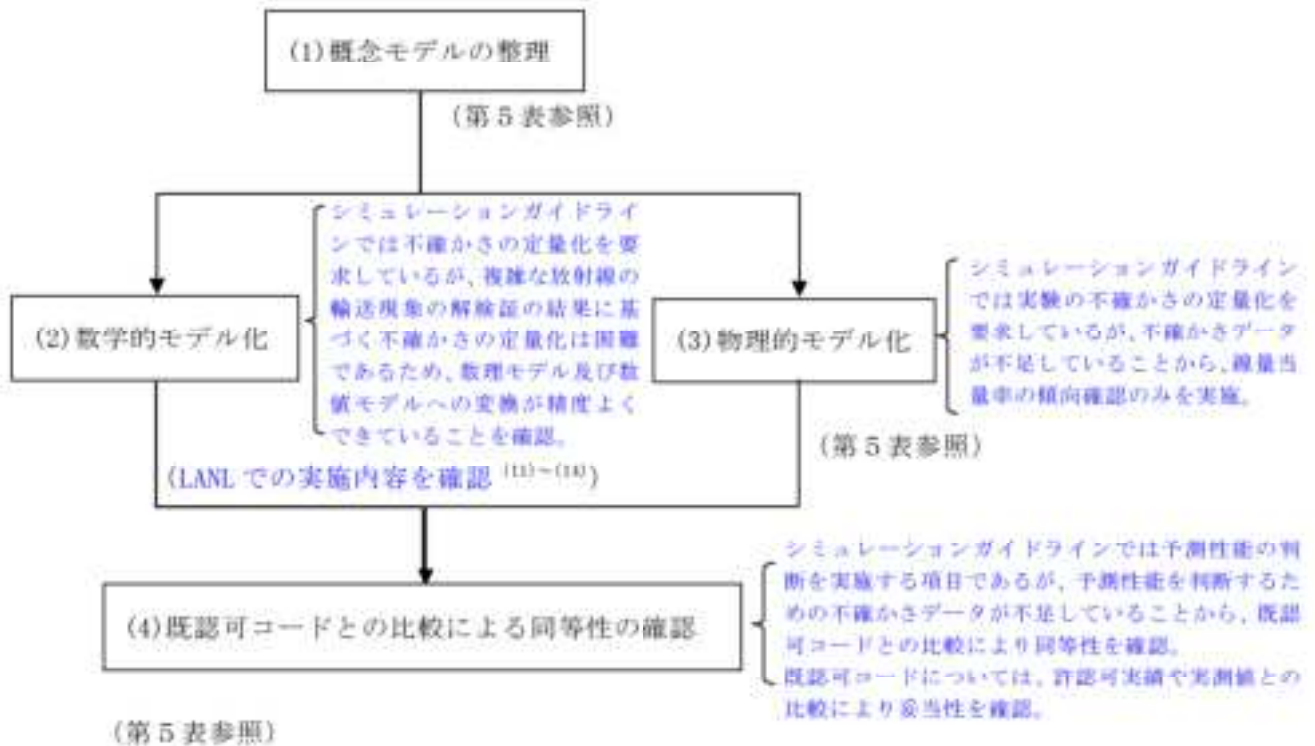
MCPLIB84 及び FSXLIB-J33 の使用済燃料輸送・貯蔵容器体系における信頼性は、4)②の(3) 物理的モデル化確認におけるベンチマーク解析⁽¹⁰⁾ により確認する。

第 11 図に示すとおり、乾式貯蔵容器体系での放射線透過試験での測定値に対して、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ FSXLIB-J33 並びに ENDF/B-VI 及び EPDL97 に基づく断面積ライブラリ MCPLIB84 を用いたベンチマーク解析は、表面において測定値と計算値を比較するとよい一致を示しており、信頼性があるものと確認した。

また、MCPLIB84 については、浅見らにより MCNP6 コードを用いて低レベル放射性廃棄物運搬船に対する線量当量率の計算結果と測定結果との比較により計算モデルの妥当性を含めた確認を実施し、信頼性のある結果を得られたことが報告されている⁽²⁰⁾。FSXLIB-J33 については、シグマ委員会 Shielding 積分テストワーキンググループにより、評価済核データライブラリ JENDL-3.3 に対する積分テストを遮蔽ベンチマークとして実施されている。遮蔽ベンチマーク解析は MCNP や多群離散座標コード ANISN、DORT や TORT を用いて実施され、JENDL-3.3 から作成された FSXLIB-J33 を含む断面積ライブラリは十分な性能を有していることが確認⁽²¹⁾ されている。



第8図 MCNP5 コード解析フロー



	確認結果	備考
(1)	MSP-24P(S)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。(第5表)	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)	数理モデルへの変換及び数値モデルへの変換は解析コード開発機関(LANL)にてリグレッションテストやベンチマーク(解析解及び参照解)との比較で精度良く実施できることを確認済み。(iii)~(iv)。	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すると検証されていることを確認。
(3)	ベンチマーク解析(第10図、第11図)により、使用済燃料輸送・貯蔵容器体系における線量当量率分布の傾向が良い一致を示すことを確認。	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MSP-24P(S)型と類似したものを選定。
(4)	MSP-24P(S)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。	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、MSP-24P(S)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。(別紙1-7表参照)

第9図 MCNP5コード評価 モデル検証及び妥当性確認の内容

第4表 先行輸送容器許認可実績と MSF-24P(S)型式指定の解析条件の比較

項目	核燃料物質輸送容器 ⁽⁹⁾	MSF-24P(S)型式指定 (特定兼用キヤスク)	備考
解析コード	MCNP5	MCNP5	解析コードは同一
線源条件	収納物からの ガンマ線、中性子	使用済燃料からの ガンマ線、中性子	線源条件は同等
遮蔽構造	ガンマ線遮蔽材： 炭素鋼、ステンレス鋼 中性子遮蔽材：ポリエチレン	ガンマ線遮蔽材： 炭素鋼、ステンレス鋼 中性子遮蔽材：レジン	遮蔽厚や材質は異なるものの、ガンマ線遮蔽材＋中性子遮蔽材の複合遮蔽構造であり遮蔽構造は同等
判断基準	表面：2mSv/h 表面から1 m離れた位置： 100 μSv/h	同 左	基準は同一

第5表 (1/3) MCNP5 コードの検証で用いた評価と MSF-24P(S)型遮蔽評価の条件比較

MSF-24P(S)型型式指定の 遮蔽解析で考慮すべき 現象モデル要素	評価に影響 のある因子	評価条件		備考
		MSF-24P(S)型型式指定の 遮蔽解析	ベンチマーク ⁽¹⁰⁾ (第10回)	
【物理現象】 ミクロ ・散乱 ・吸収 マクロ ・遮蔽材欠損部での ストリーミング ・相互遮蔽 ・遮蔽材の透過	計算コード	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
	断面積 ライブラリ	中性子 ・ FSXLIB-J33 ガンマ線 ・ MCPLIB84	中性子 ・ FSXLIB-J33 ガンマ線 ・ MCPLIB02	中性子 ・ FSXLIB-J33 ガンマ線 ・ MCPLIB84
【燃料】 PWR 使用済燃料	中性子 燃料条件	スペクトル ・ Watt 型 ⁽¹¹⁾ Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・ Watt 型 ⁽¹¹⁾ U 核分裂スペクトル	スペクトル ・ Watt 型 ⁽¹¹⁾ U 核分裂スペクトル
		線源強度 ・ ORIGEN2 出力 (2.20PJ) ^(*) 燃焼度 ・ 軸方向分布考慮 ・ 燃焼度最大値	線源強度 ・ ORIGEN2 出力 燃焼度 ・ 軸方向分布考慮 ・ 実績燃焼度	線源強度 ・ ORIGEN2 出力 (2.20PJ) ^(*) 燃焼度 ・ 軸方向分布考慮 ・ 実績燃焼度
		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

注) ベンチマーク⁽¹⁰⁾ は NPT-14P 型キャスタ (湿式、PWR 燃料 14 体収納型)、ベンチマーク⁽¹⁰⁾ は乾式貯蔵容器 (乾式、PWR 燃料 1 体収納型)。

*1: 1991 年に ORIGEN2.1 がリリース (燃焼度向上に合わせて作成されたライブラリ追加及び計算出力方法改良)され、2002 年に内容変更は殆どない ORIGEN2.2 がリリースされた。

ORIGEN2.2PJ は 2006 年に ORELIBJ32 及び ORELIBJ33 に対応するよう ORIGEN2.2 をアップデートしたものであり、コードバージョンの違いによる線源強度への影響は軽微であることとを
確認している。

第5表 (2/3) MCNP5 コードの検証で用いた評価と MSF-24P(S)型遮蔽評価の条件比較

MSF-24P(S)型型式指定の 遮蔽解析で考慮すべき 観念モデル要素	評価に影響 のある因子	評価条件		備考
		MSF-24P(S)型型式指定の 遮蔽解析	ベンチマーク ⁽¹⁰⁾ (第10図)	
【燃料】 PWR 使用済燃料	ガンマ線 遮蔽条件	スペクトル ・燃料有効部：ORIGEN2 出力 (2.20PJ) ^{*1} ・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 ・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 (2.20PJ) ^{*1} ・放射化ガンマ： 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%
		燃焼強度 ・燃料有効部：ORIGEN2 出力 (2.20PJ) ^{*1} ・放射化ガンマ：%含有量 からの計算値	燃焼強度 ・燃料有効部：ORIGEN2 出力 ・放射化ガンマ：未考慮	燃焼強度 ・燃料有効部：ORIGEN2 出力 (2.20PJ) ^{*1} ・放射化ガン マ：%含有量からの計算 値
【燃料形状】 PWR 使用済燃料	燃料集合体 (燃料領域) の設定	燃焼強度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼強度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	燃焼強度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度
		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
		使用済 PWR 燃料 24 体 ・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、下部プレナム部 に分割 ・バスケット内均質化	使用済 PWR 燃料 14 体 ・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 ・下部/中央側に書付き ・バスケット内均質化	型式指定評価は軸方向での燃料集合体 の移動を考慮し、燃料集合体が一次側と 接した状態に設定。

注) ベンチマーク⁽¹⁰⁾ は NPT-14P 型キヤスタク (組式、PWR 燃料 14 体収納型)、ベンチマーク⁽¹⁰⁾ は組式貯蔵容器 (組式、PWR 燃料 1 体収納型)。

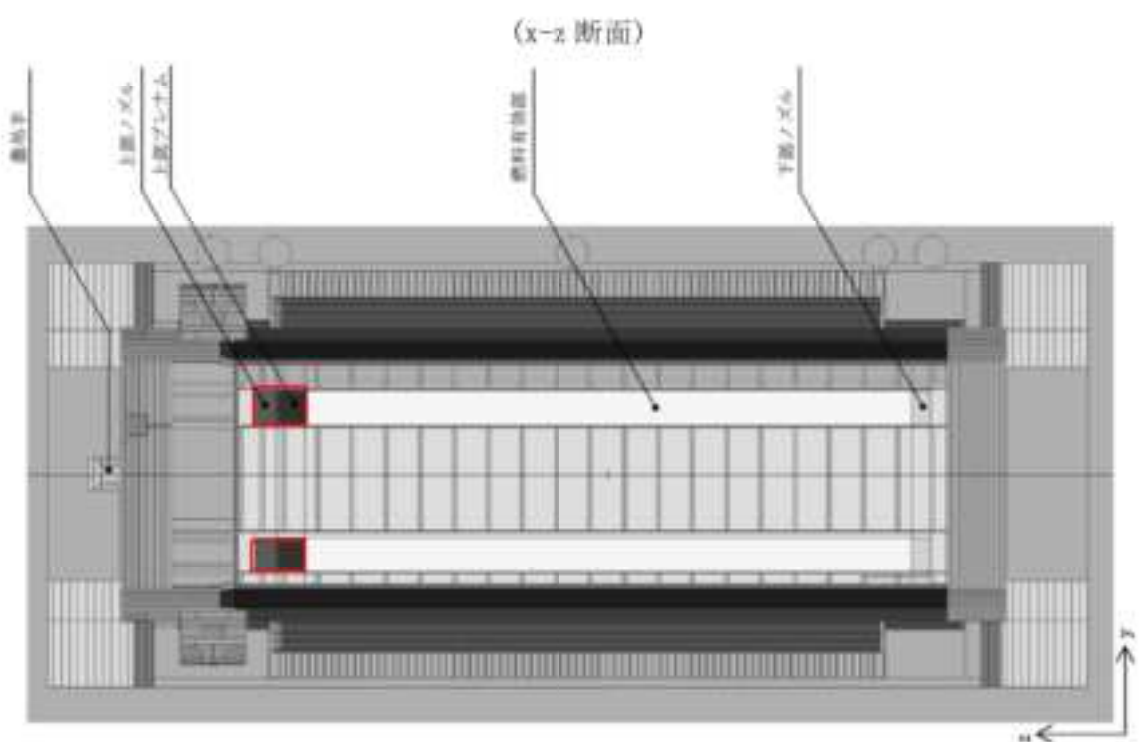
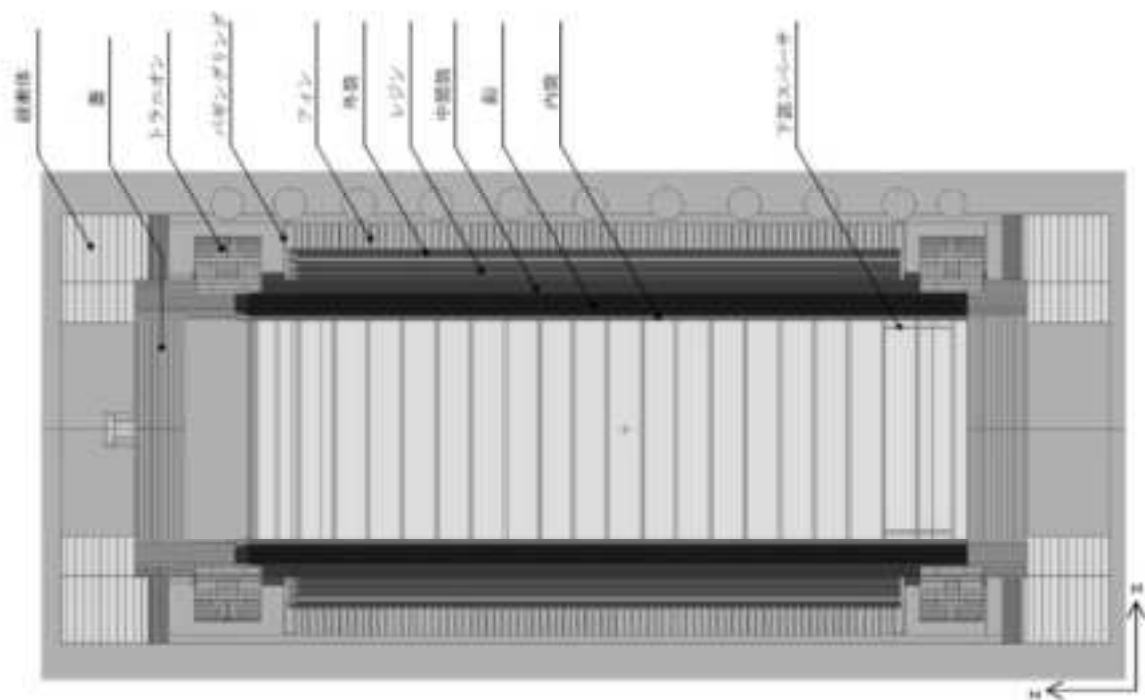
*1: 1991 年に ORIGEN2.1 がリリース (高燃焼度化に合わせて作成されたライブラリ追加及び出力方法改良)され、2002 年に内容変更は殆どない ORIGEN2.2 がリリースされた。

ORIGEN2.20PJ は 2006 年に ORLIBJ32 及び ORLIBJ33 に対応するよう ORIGEN2.2 をアップデートしたものであり、コードバージョンの違いによる燃焼強度への影響は軽微であること
を確認している。

第5表 (3/3) MCNP5 コードの検証で用いた評価と MSF-24P(S)型遮蔽評価の条件比較

MSF-24P(S)型型式指定の 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-24P(S)型型式指定の 遮蔽解析	ベンチマーク ⁽¹⁰⁾ (第10図)	
【遮蔽材質及び形状】 放射線物質輸送・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"> 構造材：炭素鋼、ステンレス鋼、レジン、銅等 積層体：なし 	<ul style="list-style-type: none"> 構造材：炭素鋼、ステンレス鋼、レジン等 積層体：なし 	—
	形状	<ul style="list-style-type: none"> 実形状 外径約 2.6m 長さ約 5.2m 	<ul style="list-style-type: none"> 実形状 外径約 1.7m 長さ約 5.2m 	—
組成/密度	<ul style="list-style-type: none"> 最小密度 レジン組成⁽¹¹⁾値 設計許容期間のレジン質量減損考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 最小密度 レジン組成⁽¹¹⁾値 本組成：発熱量より概算 	<ul style="list-style-type: none"> 最小密度 レジン組成⁽¹¹⁾値 	型式指定評価はレジン減損を考慮（別紙1-7表参照） 型式指定評価はバーナブルポリブレン集合体収納の遮蔽効果は無視（別紙1-7表参照）
寸法公差	<ul style="list-style-type: none"> 密度に考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 考慮しない 	<ul style="list-style-type: none"> 考慮しない 	型式指定評価は寸法公差を密度係数として考慮

注) ベンチマーク⁽¹⁰⁾ は NPT-14P型キヤスク（型式、FTR燃料14体収納型）、ベンチマーク⁽¹⁰⁾ は 乾式貯蔵容器（型式、FTR燃料1体収納型）。



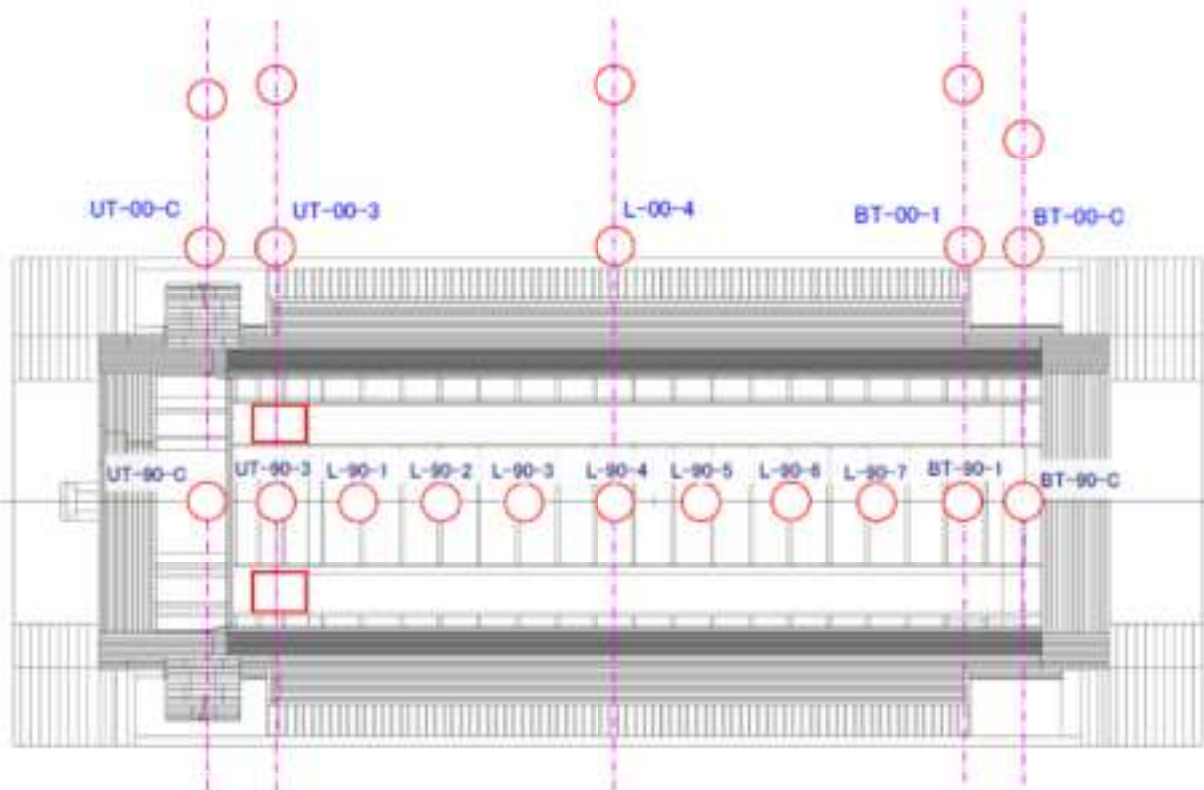
注) 赤四角は本資料にて追加。
 MCNP 計算で考慮していない構造材放射化ガンマ線源の上端部位置を示す。
 (y-z 断面)

第 10 図 (1 / 4) NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証⁽¹⁵⁾ (解析モデル)

計算 No.	測定点 No.	角度方向	軸方向位置
1	UT-00-C	0°	上部トラニオン
2	UT-00-3		上部バギングリング
3	L-00-4		側部中央
4	BT-00-1		下部バギングリング
5	BT-00-C		下部レジシカパー部

計算 No.	測定点 No.	角度方向	軸方向位置
1	UT-90-C	90°	上部トラニオン
2	UT-90-3		上部バギングリング
3	L-90-1		側部上端部
4	L-90-2		
5	L-90-3		
6	L-90-4		側部中央
7	L-90-5		
8	L-90-6		
9	L-90-7		側部下端部
10	BT-90-1		下部バギングリング
11	BT-90-C		下部トラニオン

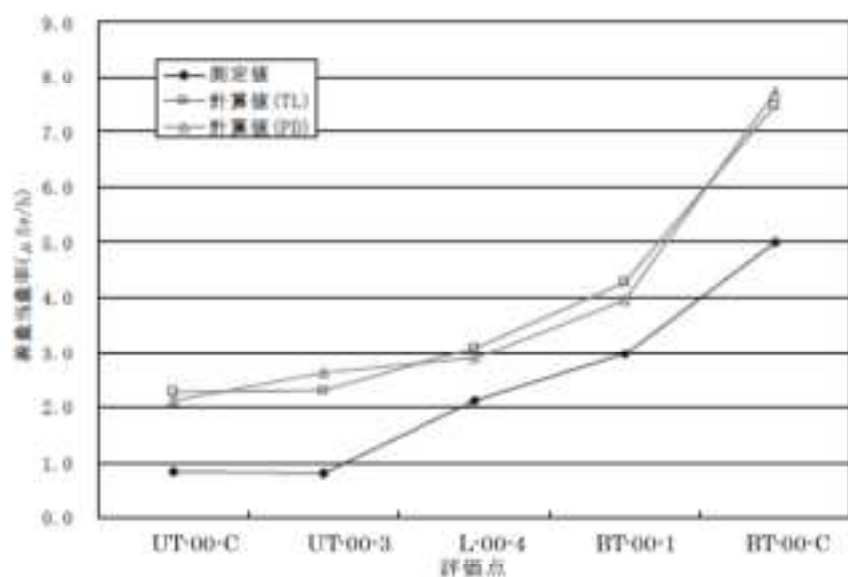
(左：中性子評価点 右：ガンマ線評価点)



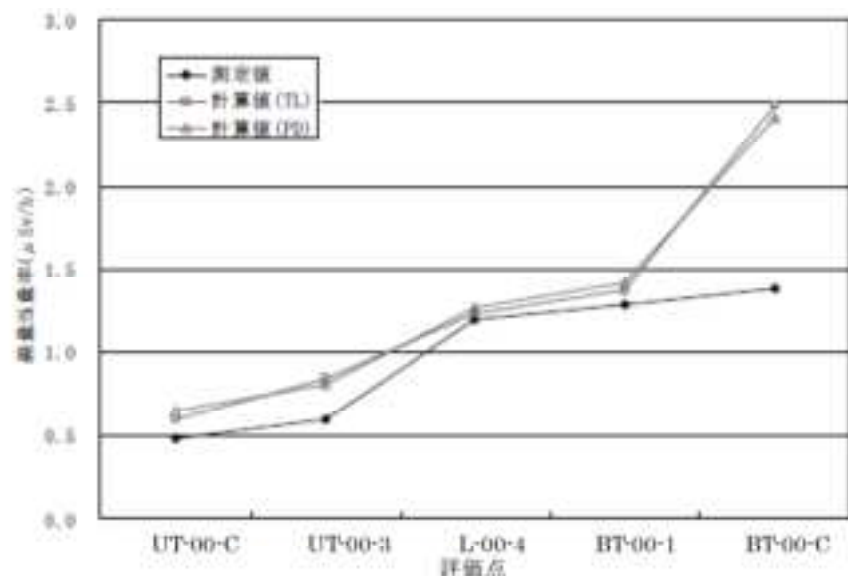
注) 赤四角は本資料にて追加。

MCNP 計算で考慮していない構造材放射化ガンマ線源の上端部位置を示す。

第10図 (2/4) NFT-14P型輸送容器によるMCNP5コードの検証⁽¹⁵⁾ (評価点)



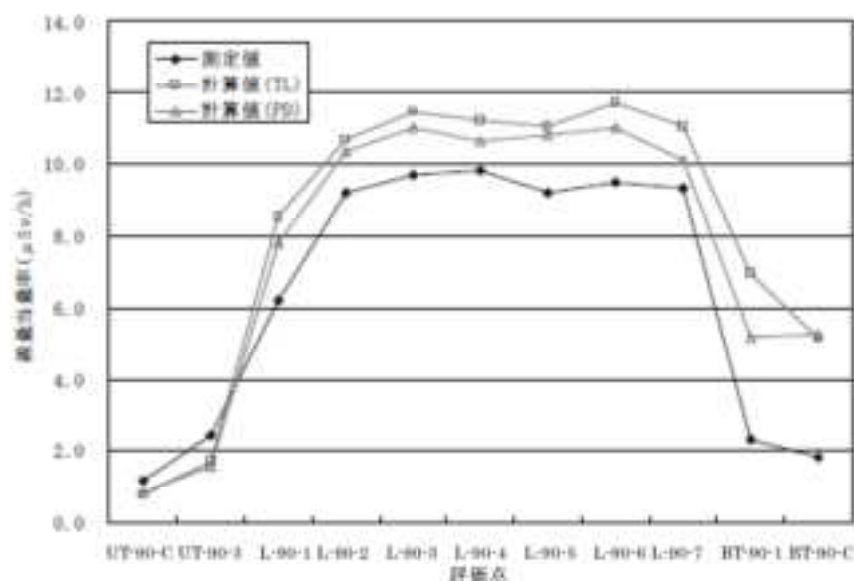
(中性子線量当量率、表面位置 0° 方向)



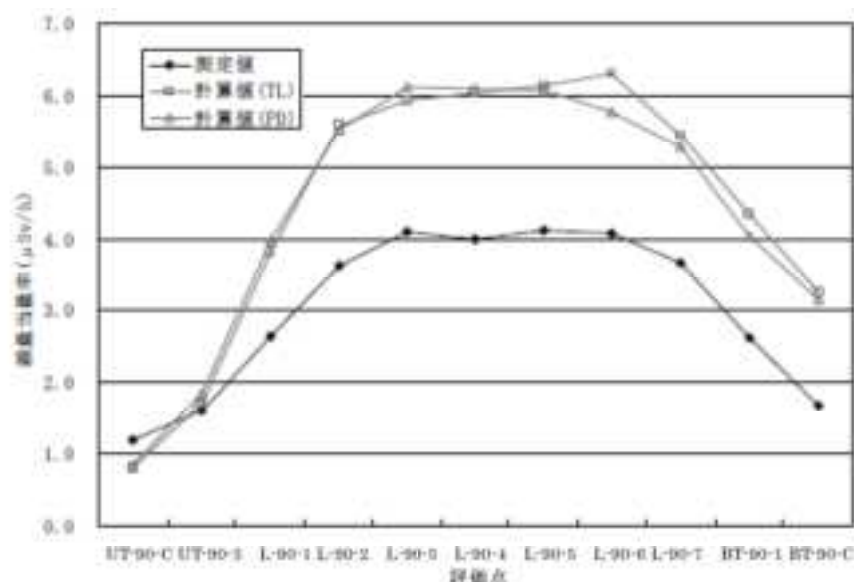
(中性子線量当量率、表面から 1 m 離れた位置 0° 方向)

(注) 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て三次元モデル化し、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ FSXLIB-J33 並びに ENDF/B-IV 及び EPDL89 に基づく断面積ライブラリ MCPLIB02 を用いたベンチマーク解析が実施された。中性子線量当量率について、上部トラニオンや胴部と比較して、遮蔽体欠損部に対して燃料領域が近い底部トラニオンが高くなる傾向は一致している。

第 10 図 (3/4) NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証⁽¹⁵⁾ (評価結果)



(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)

(注) 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て三次元モデル化し、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ FSXLIB-J33 並びに ENDF/B-IV 及び EPDL89 に基づく断面積ライブラリ MCPLIB02 を用いたベンチマーク解析が実施された。ガンマ線線量当量率について、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が傾向は一致している。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ためである。表面から 1 m 離れた位置においては、中央部では計算値が測定値を 5 割程度上回っているが傾向は一致している。

第 10 図 (4/4) NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証⁽¹⁶⁾ (評価結果)

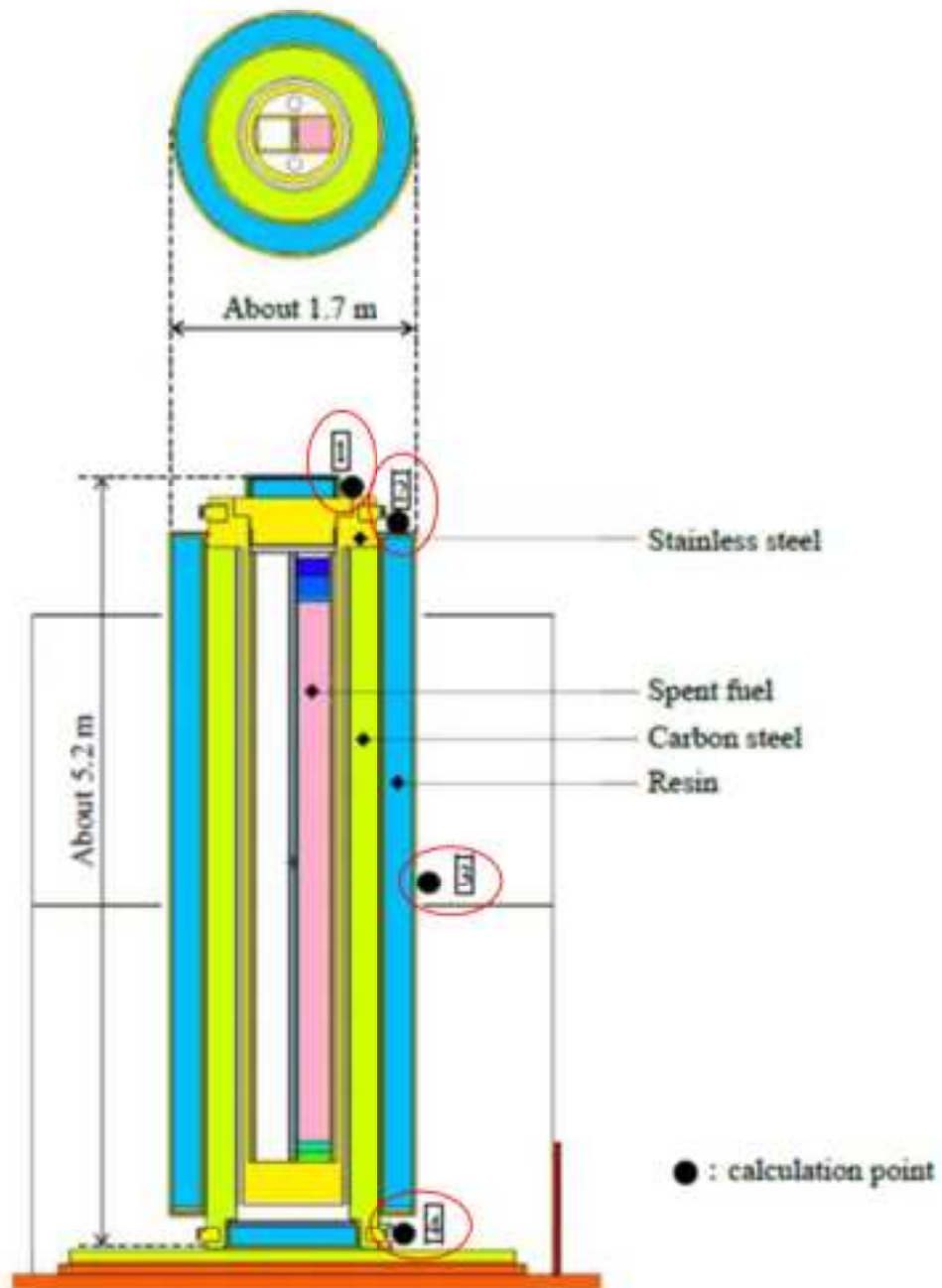


Figure 2. MCNP calculation model for the experiment

注) 赤丸は本資料にて追加。評価点の位置と評価点番号を示す。

第11図 (1/2) 乾式貯蔵容器による MCNP5 コードの検証⁽¹⁶⁾ (解析モデル)

	Condition
Code version	MCNP5 ver.1.60
Calculation model	Based on Figure 2
Cross section library	FSXLIB-J33 [5] MCPLIB84

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

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

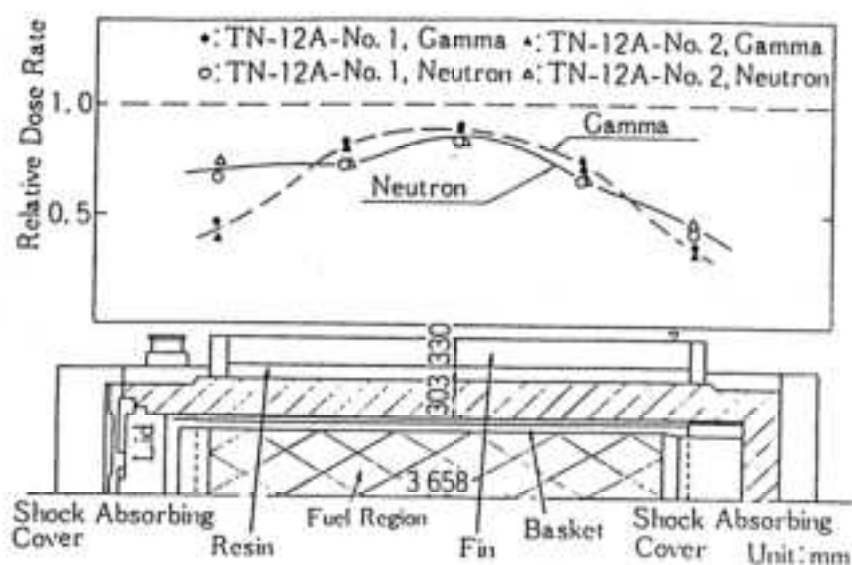
Table 4. Experimental and calculated results (gamma-ray dose equivalent rate)

Measurement point	Experimental value ($\mu\text{Sv/h}$)	Calculated value ($\mu\text{Sv/h}$)	Calculated / Experimental
1	N/D*	-	-
2	N/D*	-	-
3	2.5 ± 0	2.25 ± 0.04	0.90 ± 0.02
4	N/D*	-	-

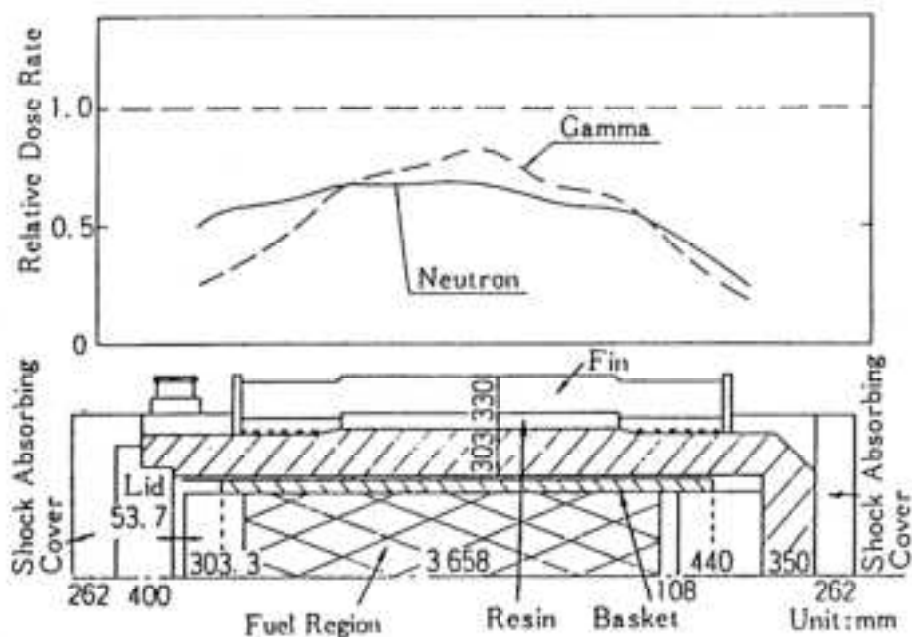
*below the detection limit $0.5 \mu\text{Sv/h}$

(注) 乾式貯蔵容器について、バスケットやトランニオン部を実寸形状に合わせて三次元モデル化し、JENDL-3.3に基づく断面積ライブラリ FSXLIB-J33 並びに ENDF/B-VI及び EPDL97に基づく断面積ライブラリ MCPLIB84 を用いたベンチマーク解析が実施された。表面において、測定値と計算値を比較するとよい一致を示している。なお、ベンチマーク解析では乾式貯蔵容器周辺の構造はモデル化しておらず、中性子やガンマ線の周辺構造物による反射を考慮していない。一方ベンチマーク解析では、構造材の微量元素は考慮しないなど正確な値が把握できない条件については保守的な条件を設定しており、基本的には $C/E > 1$ となる結果が得られているが、 $C/E < 1$ の評価点については、モデル化していない周囲構造物による中性子及びガンマ線の散乱が考慮できていないため評価値が低くなっていると考えられる。

第 11 図 (2/2) 乾式貯蔵容器による MCNP5 コードの検証 ⁽¹⁶⁾ (評価結果)



第12図 (1/2) DOT3.5の検証例 (その1) ⁽²⁾



第12図 (2/2) DOT3.5の検証例 (その2) ⁽²⁾

4. 遮蔽機能データ

MSF-24P(S)型を貯蔵あるいは保管する施設（以下「貯蔵等施設」という。）の設置に当たっては、技術基準規則第42条に適合する必要があるため、適合性評価として実施する線量評価におけるソースターム条件として、遮蔽機能データ^{III}を使用できることが「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」に規定されている。

（注）MSF-24P(S)型に収納する燃料について、型式指定で示す収納物仕様と実際の燃料仕様の差に応じた適度な保守性を有することとなり、型式指定の遮蔽機能データを用いて第42条の適合性を説明することは合理的である。

MSF-24P(S)型の遮蔽機能データを用いる場合は、型式指定申請における技術基準規則第26条の適合性評価と同じ手法で求めた線束を用いるものとする（※MSF-24P(S)型の遮蔽機能データの作成方法については、本型式指定申請第26条で妥当性確認済）。

「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」より抜粋

2.2 遮蔽機能

[確認内容]

3) 敷地境界における実効線量評価

② ソースターム

兼用キャスクの遮蔽機能データ又は兼用キャスク表面から1 m離れた位置における線量当量率が100 μ Sv/hとなるよう放射線源強度を規格化したものを用いること。ここで、放射線源強度を規格化して用いる場合は、中性子100%又はガンマ線100%のいずれか保守的な線量評価とすること。また、中性子及びガンマ線の表面エネルギースペクトルは、保守的な線量評価となるものを使用すること。

(参考)

設工認申請においては、MSF-24P(S)型の遮蔽機能データを用いた場合、特定兼用キャスク表面での遮蔽機能データに基づく線量当量率が表面以外でも適切に設定されていることの確認方法の一例を次に示す。

- ・ MSF-24P(S)型をソースターム条件とする技術基準規則第42条の遮蔽評価において、MSF-24P(S)型の遮蔽機能データを用いて評価した特定兼用キャスク型表面から1 m離れた位置の第13図に示す代表評価点5点における線量当量率を評価する。
- ・ その評価結果が、MSF-24P(S)型の遮蔽適合性として評価した第6表に示す結果と同等*になることを確認する。

遮蔽機能データの適用確認方法の概要を別紙6に示す。

*:



この場合、遮蔽機能データとの差異（線量当量率比）を設工認申請における線量解析値に加味する（解析値に線量当量率比を考慮する）等で妥当な引き継ぎとする。

第6表 (1/2) 特定兼用キャスクの表面から1 m離れた位置における代表評価点の線量当量率
(17×17燃料収納時)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部		側部	底部		
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	
	②	④		⑧	⑩	
ガンマ線	燃料有効部	0.7 (0.5)	23.4 (0.3)	45.1 (0.1)	25.6 (0.3)	5.4 (0.2)
	構造材放射化	7.0 (0.2)	22.8 (0.5)	11.7 (0.2)	12.3 (0.5)	31.5 (0.1)
	二次ガンマ線	0.4 (0.6)	5.1 (0.3)	10.0 (0.3)	5.3 (0.3)	3.8 (0.3)
中性子	56.7 (0.3)	31.5 (0.6)	17.8 (0.2)	30.4 (0.7)	19.4 (0.2)	
合計	64.8	82.8	84.6	73.6	60.1	

※ () 内は統計誤差 (単位: %) を示す。

第3表 (1/2) に示す表面から1 m離れた位置における線量当量率の評価結果と同じ

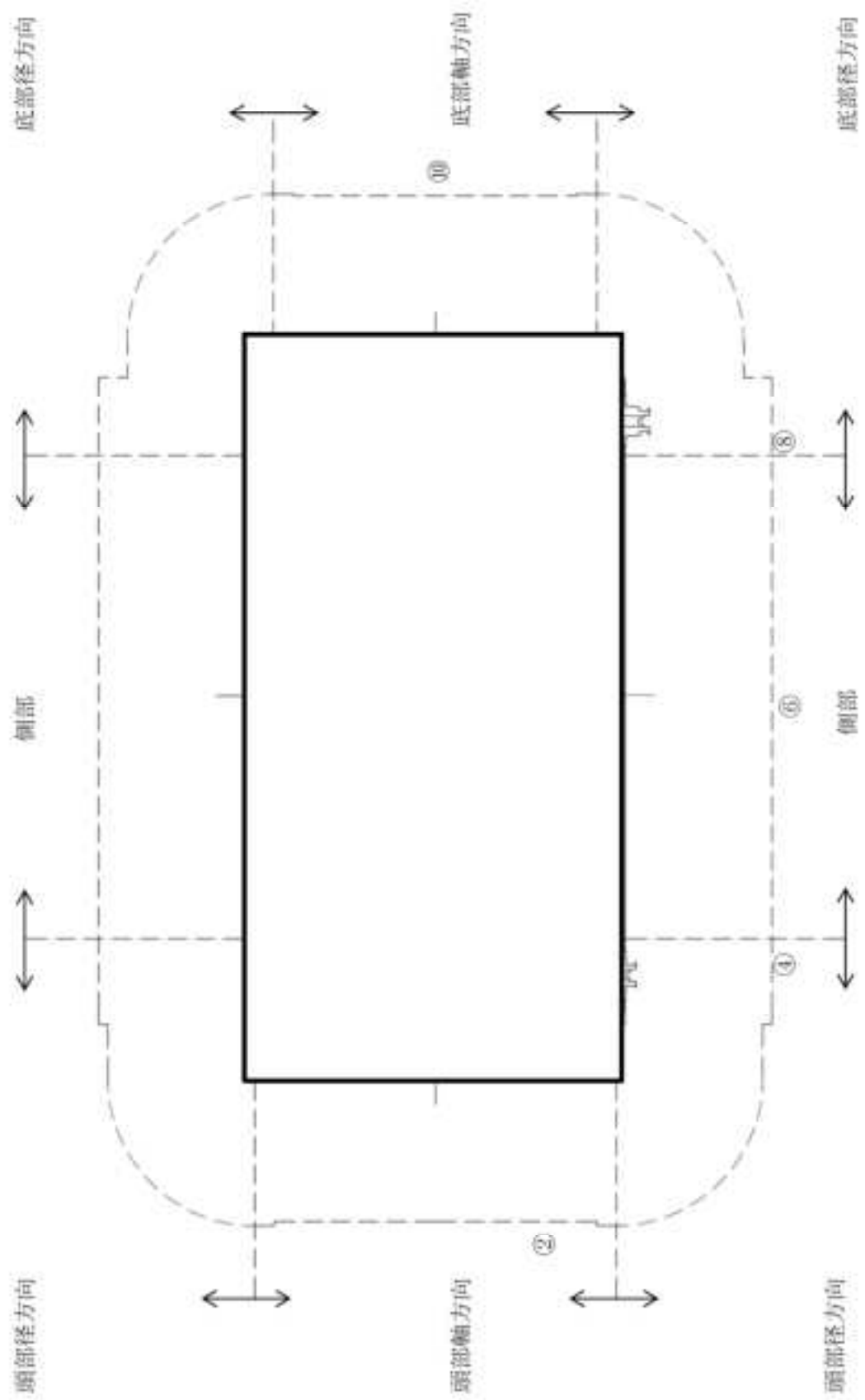
第6表(2/2) 特定兼用キャスクの表面から1 m離れた位置における代表評価点の線量当量率
(15×15 燃料収納時)

(単位：μSv/h)

評価点	頭部		側部	底部		
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	
	②	④		⑧	⑩	
ガンマ線	燃料有効部	0.3 (0.3)	22.5 (0.2)	45.1 (0.1)	26.8 (0.3)	5.6 (0.2)
	構造材放射化	1.7 (0.2)	16.3 (0.4)	8.5 (0.2)	8.8 (0.6)	20.1 (0.1)
	二次ガンマ線	0.4 (0.7)	5.3 (0.4)	10.5 (0.3)	5.8 (0.4)	4.0 (0.4)
中性子	64.7 (0.5)	35.8 (0.9)	18.9 (0.2)	30.9 (1.0)	20.7 (0.2)	
合計	67.1	78.9	83.0	72.3	50.4	

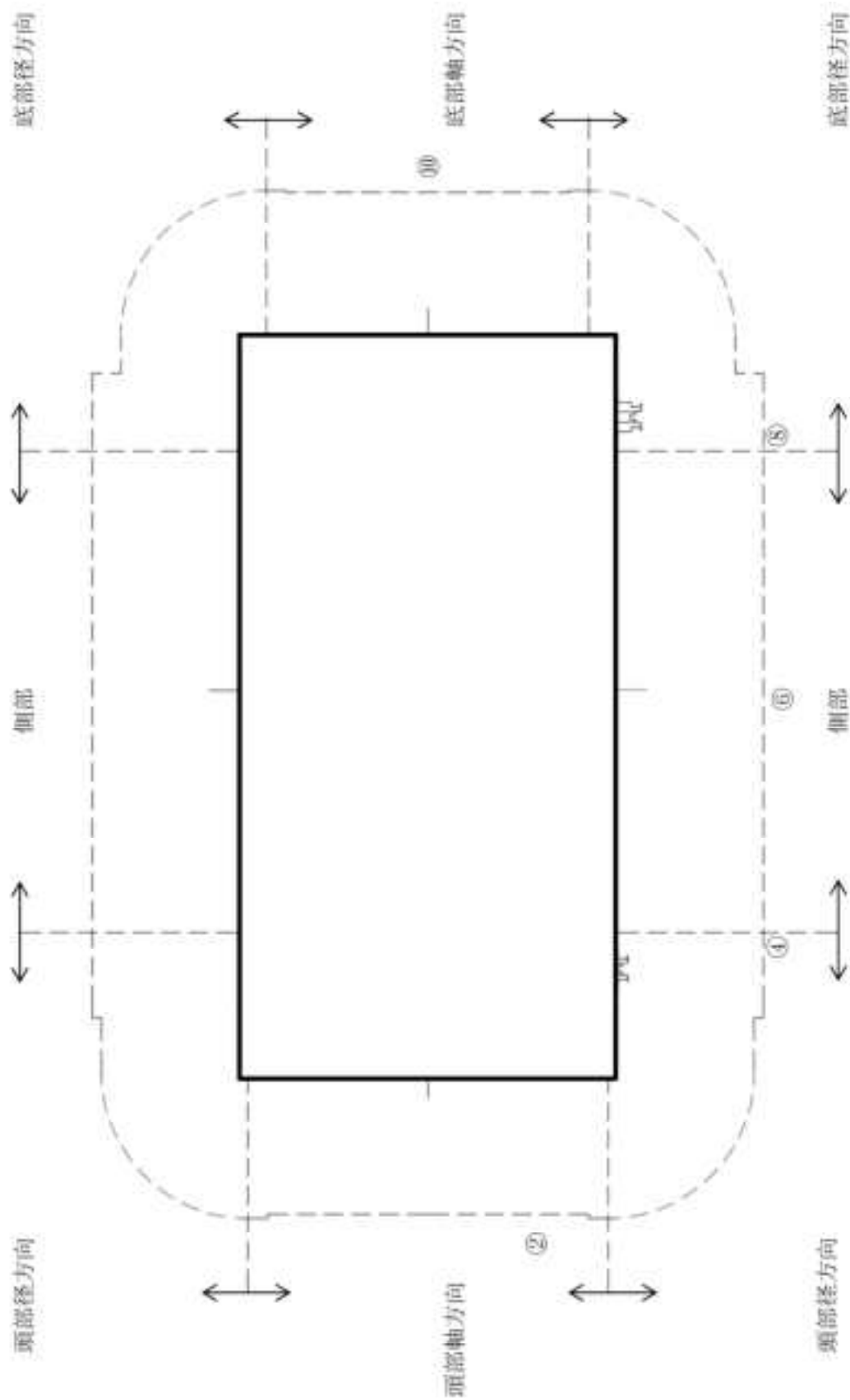
※ () 内は統計誤差 (単位：%) を示す。

第3表(2/2) に示す表面から1 m離れた位置における線量当量率の評価結果と同じ



(注) ②, ④, ⑥, ⑧, ⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。
モニタリングポート、バルブ、トラニオンを同一断面に図示している。

第13図 (1/2) 特定兼用キャスクの表面から1 m離れた位置における代表評価点 (17×17 燃料収納時)



(注) ②, ④, ⑥, ⑧, ⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。
モニタリングポート、バルブ、トラニオンを同一断面に図示している。

第13図 (2/2) 特定兼用キャスクの表面から1 m離れた位置における代表評価点 (15×15 燃料収容時)

5. 参考文献

- (1) M. Ishikawa, T. Jin, J. Katakura, M. Kataoka, H. Matsumoto, Y. Ohkawachi, S. Ohki, A. Onoue, A. Sasahara, K. Suyama, H. Yanagisawa, "ZZ-ORIGEN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3", Computer Programs NEA-1642, OECD/NEA Databank, (2006).
- (2) A. G. Croff, "ORIGEN2: A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Nuclear Technology, Vol.62, (1983).
- (3) X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume 1: Overview and Theory", LA-UR-03-1987, (2003).
- (4) 社団法人 日本電気協会 原子力規格委員会, 「原子力発電所放射線遮へい設計規程」, JEAC 4615-2008, (2008).
- (5) U.S.Nuclear Regulatory Commission, "Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility", NUREG-1536 Revision 1, (2010).
- (6) U.S.Nuclear Regulatory Commission, "Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities", NUREG-1567, (2000).
- (7) U.S.Nuclear Regulatory Commission, "Final Safety Evaluation Report", <https://www.nrc.gov/docs/ML2030/ML20307A119.pdf>, (2020).
- (8) 一般社団法人 日本原子力学会, 「日本原子力学会標準 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」, AESJ-SC-A008:2015, (2016).
- (9) 国立大学法人東京工業大学, 「核燃料輸送物設計承認申請」, 東工大研 第4-3号, (2016).
- (10) リサイクル燃料貯蔵株式会社, 「リサイクル燃料備蓄センターの使用済燃料貯蔵事業変更許可申請」, RFS 発官25第11号, (2014).
- (11) Hilary M. Abhold and John S. Hendricks, "MCNPTM Software Quality Assurance Plan", Los Alamos National Laboratory, LA-13138, (1996).
- (12) Forrest Brown, Brian Kiedrowski, Jeffrey Bull, Matthew Gonzales, Nathan Gibson, "Verification of MCNP5-1.60", LA-UR-10-05611, (2010).
- (13) Daniel J. Whalen, David E. Hollowell, John S. Hendricks, "MCNP: Photon Benchmark Problems", LA-12196, (1991).
- (14) Daniel J. Whalen, David A. Cardon, Jennifer L. Uhle, John S. Hendricks, "MCNP: Neutron Benchmark Problems", LA-12212, (1991).
- (15) 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).
- (16) Masahiko Ueyama, Masashi Osaki, "Dose Equivalent Rate Benchmark Calculations

- of a Dry Storage Cask for Spent Fuel by 3D Monte Carlo Code”, PATRAM 2019, (2019).
- (17) 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).
- (18) Brian C. Kiedrowski, Forrest B. Brown, Morgan C. White, D. Kent Parsons, “Testing for the Photon Doppler Broadening Data Sampling Bug in MCNP5/X”, LA-UR-12-00121, (2012).
- (19) K. Kosako, et al., “The Libraries FSXLIB and MATXSLIB Based on JENDL-3.3”, JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).
- (20) 浅見光史, 大西世紀, 鎌田創, 「FW-CADIS 法により導出した分散低減パラメータを用いた Monte-Carlo 粒子輸送計算による低レベル放射性廃棄物輸送船「青栄丸」の線量当量率評価」, 日本原子力学会和文論文誌(2020), (2020).
- (21) Shielding Integral Test Working Group (FY2006-2010), “Integral Test of JENDL-3.3 Based on Shielding Benchmarks”, JAEA-Research 2018-017, (2019).
- (22) 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).

遮蔽解析条件

1. 使用済燃料集合体の線源強度について

使用済燃料集合体の放射線源強度（以下「線源強度」という。）は、「燃料有効部からのガンマ線及び中性子」、「使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体からの放射化ガンマ線」に分けて計算する。

使用済燃料集合体の線源強度計算方法及び条件を別紙 1-1 表及び別紙 1-2 表に示す。また、別紙 1-3 表に燃料集合体の種類と型式ごとの線源強度、別紙 1-4 表に燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体からの放射化によるガンマ線源強度、別紙 1-5 表に中性子源強度、別紙 1-6 表に燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度を示す。

燃料有効部ガンマ線強度及び燃料有効部中性子源強度が高いため、遮蔽解析に用いる燃料タイプは 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A 型）及び 15×15 燃料 48,000MWd/t 型（A 型）とする。

燃料有効部のエネルギーごとの中性子線強度は、MCNP5 内で Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトルに処理される。また、使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体からの放射化ガンマ線のエネルギーごとの粒子放出割合は 1.17 MeV 及び 1.33 MeV がそれぞれ 50 %である。

別紙1-1表 使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算方法及び条件

項目	計算方法	計算条件
燃料有効部からのガンマ線及び中性子	燃焼計算コードORIGEN2を用い、ガンマ線及び中性子源強度を計算。使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布を考慮。また、中性子については実効増倍率を考慮。	燃料条件：別紙1-2表参照 解析コード：ORIGEN2.2UPJ ライブラリ：PWRU50ライブラリ（48,000MWd/t型） PWRUライブラリ（39,000MWd/t型） 軸方向燃焼度分布：別紙1-1図参照 実効増倍率：0.30（別紙2参照）
使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体からの放射化ガンマ線	使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体の ⁵⁹ Co含有量に従い、放射化計算式に基づき ⁵⁹ Coから ⁶⁰ Coへの放射化量を計算。	放射化計算式 $A = N_0 \sigma \phi [1 - \exp(-\lambda T_1)] \times \exp(-\lambda T_2)$ 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 ） φ：炉内照射熱中性子束（n/(cm ² ・s)） λ： ⁶⁰ Coの崩壊定数（3.6001×10 ⁻⁴ /日） T ₁ ：照射日数（日）（別紙1-2表参照） T ₂ ：冷却日数（日）（別紙1-2表参照）
中性子源スペクトル	—	コード内で以下の条件を基に処理する。 Watt型 ²³⁹ Pu核分裂スペクトル ⁽¹⁾⁽⁸⁾ Watt型連続分布スペクトル ：P(E)=C exp(-E/a) × sinh(bE) ^{1/2} ²³⁹ Pu中性子スペクトル定数 ：a=0.966（MeV）、b=2.842（MeV ⁻¹ ）

（注）中性子スペクトルを²³⁹Puの核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性については、別紙3に示す。

別紙1-2表(1/2) 使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の
線源強度計算条件(17×17燃料)

項 目		17×17燃料 48,000MWd/t型		17×17燃料 39,000MWd/t型		
		A型	B型	A型	B型	
燃焼度(MWd/t)	中央部					
	外周部					
平均比出力(MW/t) ^(注1)						
照射 日数 (日)	使用済燃料 集合体					中央部
						外周部
	バーナブルポイズン 集合体					
初期濃縮度(wt%) ^(注2)						
冷却期間(年)						
ウラン重量(kg/体)						
(上部)						
軸方向燃焼度分布 ^(注3)						
(下部)						

(注1)比出力は定格出力に相当する炉平均値を用いた。

(注2)初期濃縮度は最低濃縮度とした。

(注3)ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

別紙1-3

別紙1-2表(2/2) 使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の
線源強度計算条件(15×15燃料)

項 目		15×15燃料 48,000MWd/t型		15×15燃料 39,000MWd/t型		
		A型	B型	A型	B型	
燃焼度 (MWd/t)	中央部	[Redacted]				
	外周部					
平均比出力 (MW/t) (注1)						
照射 日数 (日)	使用済燃料 集合体					中央部
						外周部
	バーナブルポイズン 集合体					
初期濃縮度 (wt%) (注2)						
冷却期間 (年)						
ウラン重量 (kg/体)						
(上部)						
軸方向燃焼度分布 (注3)						
(下部)						

(注1)比出力は定格出力に相当する炉平均値を用いた。

(注2)初期濃縮度は最低濃縮度とした。

(注3)ノードは燃料有効部を軸方向に [Redacted] したものである。

別紙1-4

別紙1-3表(1/2) 燃料集合体の種類と型式ごとの線源強度(17×17燃料)

(MSF-24P(S)型1基当たり)

項目	17×17燃料 48,000MWd/t型 ^(注1)		17×17燃料 39,000MWd/t型 ^(注2)	
	A型	B型	A型	B型
燃料有効部ガンマ線 (photons/s)	1.073×10^{17}	1.007×10^{17}	9.067×10^{16}	8.518×10^{16}
構造材放射化ガンマ線 ^(注3) (⁶⁰ Co TBq)	5.922×10^2	6.024×10^2	5.801×10^2	5.736×10^2
燃料有効部中性子 ^(注4) (n/s)	1.205×10^{19}	1.120×10^{19}	8.408×10^9	7.811×10^9

(注1)中央部12体の燃焼度を□、外周部12体の燃焼度を□としたMSF-24P(S)型1基当たりの線源強度である。

(注2)中央部12体及び外周部12体の燃焼度を全て□としたMSF-24P(S)型1基当たりの線源強度である。

(注3)バーナブルポイズン集合体の放射化線源を考慮した値である。

(注4)記載値は実効増倍率 k_{eff} を考慮した全中性子源強度である。

別紙1-3表 (2/2) 燃料集合体の種類と型式ごとの線源強度 (15×15燃料)

(MSF-24P(S)型1基当たり)

項目	15×15燃料 48,000MWd/t型 ^(注1)		15×15燃料 39,000MWd/t型 ^(注2)	
	A型	B型	A型	B型
燃料有効部ガンマ線 (photons/s)	1.062×10^{17}	9.967×10^{16}	9.018×10^{16}	8.474×10^{16}
構造材放射化ガンマ線 ^(注3) (⁶⁰ Co TBq)	4.438×10^7	4.984×10^7	4.919×10^7	4.880×10^7
燃料有効部中性子 ^(注4) (n/s)	1.266×10^{19}	1.175×10^{19}	8.380×10^9	7.787×10^9

(注1) 中央部12体の燃焼度を []、外周部12体の燃焼度を [] としたMSF-24P(S)型1基当たりの線源強度である。

(注2) 中央部12体及び外周部12体の燃焼度を全て [] としたMSF-24P(S)型1基当たりの線源強度である。

(注3) パーナブルポイズン集合体の放射化線源を考慮した値である。

(注4) 記載値は実効増倍率 k_{eff} を考慮した全中性子源強度である。

別紙1-4表(1/4) 燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源強度
(17×17燃料48,000MWd/t型(A型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

モデル化領域	燃料集合体構造材の線源強度 (⁶⁰ Co TBq)		
	中央部 (注)	外周部	合計
上部ノズル部	9.676×10 ⁰ (5.339×10 ⁰)	4.046×10 ⁰	1.372×10 ¹ (5.339×10 ⁰)
上部プレナム部	4.126×10 ¹ (6.583×10 ⁰)	3.235×10 ¹	7.361×10 ¹ (6.583×10 ⁰)
燃料有効部	3.356×10 ² (1.939×10 ²)	1.322×10 ²	4.678×10 ² (1.939×10 ²)
下部プレナム部	6.278×10 ⁰	5.857×10 ⁰	1.214×10 ¹
下部ノズル部	1.288×10 ¹	1.201×10 ¹	2.489×10 ¹

別紙1-4表(2/4) 燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源強度
(17×17燃料48,000MWd/t型(B型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

モデル化領域	燃料集合体構造材の線源強度 (⁶⁰ Co TBq)		
	中央部 (注)	外周部	合計
上部ノズル部	1.672×10 ¹ (5.339×10 ⁰)	1.062×10 ¹	2.734×10 ¹ (5.339×10 ⁰)
上部プレナム部	7.269×10 ¹ (6.583×10 ⁰)	6.167×10 ¹	1.344×10 ² (6.583×10 ⁰)
燃料有効部	2.866×10 ² (1.939×10 ²)	8.649×10 ¹	3.731×10 ² (1.939×10 ²)
下部プレナム部	1.570×10 ¹	1.465×10 ¹	3.035×10 ¹
下部ノズル部	1.928×10 ¹	1.799×10 ¹	3.727×10 ¹

別紙1-4表(3/4) 燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源強度
(15×15燃料48,000MWd/t型(A型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

モデル化領域	燃料集合体構造材の線源強度 (⁶⁰ Co TBq)		
	中央部 (注)	外周部	合計
上部ノズル部	7.199×10 ⁰ (4.265×10 ⁰)	2.742×10 ⁰	9.941×10 ⁰ (4.265×10 ⁰)
上部プレナム部	2.995×10 ¹ (5.398×10 ⁰)	2.295×10 ¹	5.290×10 ¹ (5.398×10 ⁰)
燃料有効部	2.639×10 ² (1.617×10 ²)	9.552×10 ¹	3.594×10 ² (1.617×10 ²)
下部プレナム部	2.842×10 ⁰	2.657×10 ⁰	5.499×10 ⁰
下部ノズル部	8.272×10 ⁰	7.732×10 ⁰	1.600×10 ¹

別紙1-4表(4/4) 燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源強度
(15×15燃料48,000MWd/t型(B型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

モデル化領域	燃料集合体構造材の線源強度 (⁶⁰ Co TBq)		
	中央部 (注)	外周部	合計
上部ノズル部	8.770×10 ⁰ (4.265×10 ⁰)	4.211×10 ⁰	1.298×10 ¹ (4.265×10 ⁰)
上部プレナム部	6.378×10 ¹ (5.398×10 ⁰)	5.457×10 ¹	1.183×10 ² (5.398×10 ⁰)
燃料有効部	2.484×10 ² (1.617×10 ²)	8.105×10 ¹	3.295×10 ² (1.617×10 ²)
下部プレナム部	1.009×10 ¹	9.428×10 ⁰	1.952×10 ¹
下部ノズル部	9.368×10 ⁰	8.757×10 ⁰	1.813×10 ¹

別紙1-8

別紙1-5表(1/4) 中性子源強度 48,000MWd/t 型 (17×17 燃料 (A型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

		燃料有効部		
		中央部	外周部	合計
一次中性子源強度 No (n/s)	(α, n) 反応	9.369×10^7	7.472×10^7	1.684×10^8
	自発核分裂	4.909×10^9	3.360×10^9	8.269×10^9
	合計	5.003×10^9	3.435×10^9	8.437×10^9
輸送物の実効増倍率 keff ^(注)		0.30		
全中性子源強度 Ns (n/s)		7.147×10^9	4.907×10^9	1.205×10^{10}

(注)ORIGEN2 コードにより、燃焼に伴う核分裂性物質の減少及びポイズンとなる核分裂生成物の生成量を求め、これらを考慮した核種組成を用いて臨界解析に示す手法と同一手法 (KENO-VIコード) により評価して得られた値である。

別紙1-5表(2/4) 中性子源強度 48,000MWd/t 型 (17×17 燃料 (B型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

		燃料有効部		
		中央部	外周部	合計
一次中性子源強度 No (n/s)	(α, n) 反応	9.170×10^7	7.367×10^7	1.654×10^8
	自発核分裂	4.555×10^9	3.117×10^9	7.672×10^9
	合計	4.647×10^9	3.191×10^9	7.837×10^9
輸送物の実効増倍率 keff ^(注)		0.30		
全中性子源強度 Ns (n/s)		6.638×10^9	4.558×10^9	1.120×10^{10}

(注)ORIGEN2 コードにより、燃焼に伴う核分裂性物質の減少及びポイズンとなる核分裂生成物の生成量を求め、これらを考慮した核種組成を用いて臨界解析に示す手法と同一手法 (KENO-VIコード) により評価して得られた値である。

別紙1-5表(3/4) 中性子源強度 48,000MWd/t 型 (15×15 燃料 (A型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

		燃料有効部		
		中央部	外周部	合計
一次中性子源強度 No (n/s)	(α, n) 反応	9.669×10^7	7.716×10^7	1.739×10^8
	自発核分裂	5.148×10^9	3.537×10^9	8.685×10^9
	合計	5.245×10^9	3.614×10^9	8.859×10^9
輸送物の実効増倍率 keff ^(注)		0.30		
全中性子源強度 Ns (n/s)		7.492×10^9	5.163×10^9	1.266×10^{10}

(注)ORIGEN2 コードにより、燃焼に伴う核分裂性物質の減少及びポイズンとなる核分裂生成物の生成量を求め、これらを考慮した核種組成を用いて臨界解析に示す手法と同一手法 (KENO-VIコード) により評価して得られた値である。

別紙1-5表(4/4) 中性子源強度 48,000MWd/t 型 (15×15 燃料 (B型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

		燃料有効部		
		中央部	外周部	合計
一次中性子源強度 No (n/s)	(α, n) 反応	9.454×10^7	7.600×10^7	1.705×10^8
	自発核分裂	4.776×10^9	3.281×10^9	8.057×10^9
	合計	4.871×10^9	3.357×10^9	8.228×10^9
輸送物の実効増倍率 keff ^(注)		0.30		
全中性子源強度 Ns (n/s)		6.958×10^9	4.796×10^9	1.175×10^{10}

(注)ORIGEN2 コードにより、燃焼に伴う核分裂性物質の減少及びポイズンとなる核分裂生成物の生成量を求め、これらを考慮した核種組成を用いて臨界解析に示す手法と同一手法 (KENO-VIコード) により評価して得られた値である。

別紙1-6表(1/4) 燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度
(17×17燃料48,000MWd/t型(A型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

エネルギー 群数	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部 (photons/s) ^(注)		
		中央部	外周部	合計
1	0.01	1.433×10^{16}	1.337×10^{16}	2.770×10^{16}
2	0.025	2.888×10^{15}	2.710×10^{15}	5.599×10^{15}
3	0.0375	3.729×10^{15}	3.445×10^{15}	7.174×10^{15}
4	0.0575	2.903×10^{15}	2.725×10^{15}	5.628×10^{15}
5	0.085	1.636×10^{15}	1.528×10^{15}	3.165×10^{15}
6	0.125	1.581×10^{15}	1.445×10^{15}	3.027×10^{15}
7	0.225	1.363×10^{15}	1.275×10^{15}	2.637×10^{15}
8	0.375	5.802×10^{14}	5.452×10^{14}	1.125×10^{15}
9	0.575	2.481×10^{16}	2.278×10^{16}	4.759×10^{16}
10	0.85	1.142×10^{15}	1.003×10^{15}	2.145×10^{15}
11	1.25	7.743×10^{14}	6.784×10^{14}	1.453×10^{15}
12	1.75	2.373×10^{13}	2.089×10^{13}	4.463×10^{13}
13	2.25	1.395×10^{10}	1.289×10^{10}	2.684×10^{10}
14	2.75	6.962×10^9	5.818×10^9	1.278×10^{10}
15	3.5	6.777×10^8	5.046×10^8	1.182×10^9
16	5.0	2.157×10^8	1.477×10^8	3.634×10^8
17	7.0	2.487×10^7	1.703×10^7	4.190×10^7
18	9.5	2.857×10^6	1.957×10^6	4.814×10^6
合計		5.576×10^{16}	5.152×10^{16}	1.073×10^{17}

(注)MCNP5コードによる評価の[]については、線量当量率評価への寄与が無視できることを確認の上線源カットオフの対象とした。(17×17燃料48,000MWd/t型(A型)、側部方向表面評価点で代表して、[]のカットオフ有無による線量当量率を評価し、カットオフ有無で差異が[]であることを確認)

別紙1-6表(2/4) 燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度
(17×17燃料48,000MWd/t型(B型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

エネルギー 群数	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部 (photons/s) ^(注)		
		中央部	外周部	合計
1	0.01	1.361×10^{16}	1.270×10^{16}	2.632×10^{16}
2	0.025	2.719×10^{15}	2.553×10^{15}	5.272×10^{15}
3	0.0375	3.495×10^{15}	3.232×10^{15}	6.728×10^{15}
4	0.0575	2.781×10^{15}	2.612×10^{15}	5.393×10^{15}
5	0.085	1.533×10^{15}	1.433×10^{15}	2.966×10^{15}
6	0.125	1.437×10^{15}	1.316×10^{15}	2.753×10^{15}
7	0.225	1.284×10^{15}	1.202×10^{15}	2.485×10^{15}
8	0.375	5.372×10^{14}	5.051×10^{14}	1.042×10^{15}
9	0.575	2.339×10^{16}	2.149×10^{16}	4.489×10^{16}
10	0.85	8.416×10^{14}	7.403×10^{14}	1.582×10^{15}
11	1.25	6.525×10^{14}	5.720×10^{14}	1.225×10^{15}
12	1.75	2.040×10^{13}	1.797×10^{13}	3.837×10^{13}
13	2.25	4.034×10^9	3.551×10^9	7.584×10^9
14	2.75	5.961×10^9	4.907×10^9	1.087×10^{10}
15	3.5	5.116×10^8	3.607×10^8	8.723×10^8
16	5.0	2.001×10^8	1.371×10^8	3.371×10^8
17	7.0	2.307×10^7	1.580×10^7	3.888×10^7
18	9.5	2.650×10^6	1.815×10^6	4.466×10^6
合計		5.231×10^{16}	4.838×10^{16}	1.007×10^{17}

(注)MCNP5コードによる評価の[]については、線量当量率評価への寄与が無視できることを確認の上線源カットオフの対象とした。(17×17燃料48,000MWd/t型(A型)、側部方向表面評価点で代表して、[]のカットオフ有無による線量当量率を評価し、カットオフ有無で差異が[]であることを確認)

別紙1-6表(3/4) 燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度
(15×15燃料48,000Mwd/t型(A型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

エネルギー 群数	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部 (photons/s) ^(注)		
		中央部	外周部	合計
1	0.01	1.414×10^{16}	1.320×10^{16}	2.734×10^{16}
2	0.025	2.843×10^{15}	2.670×10^{15}	5.512×10^{15}
3	0.0375	3.689×10^{15}	3.411×10^{15}	7.100×10^{15}
4	0.0575	2.866×10^{15}	2.692×10^{15}	5.558×10^{15}
5	0.085	1.612×10^{15}	1.507×10^{15}	3.119×10^{15}
6	0.125	1.566×10^{15}	1.432×10^{15}	2.998×10^{15}
7	0.225	1.342×10^{15}	1.256×10^{15}	2.598×10^{15}
8	0.375	5.700×10^{14}	5.360×10^{14}	1.106×10^{15}
9	0.575	2.462×10^{16}	2.262×10^{16}	4.724×10^{16}
10	0.85	1.128×10^{15}	9.922×10^{14}	2.120×10^{15}
11	1.25	7.723×10^{14}	6.781×10^{14}	1.450×10^{15}
12	1.75	2.368×10^{13}	2.088×10^{13}	4.456×10^{13}
13	2.25	1.295×10^{10}	1.198×10^{10}	2.493×10^{10}
14	2.75	6.936×10^9	5.801×10^9	1.274×10^{10}
15	3.5	6.904×10^9	5.128×10^9	1.203×10^9
16	5.0	2.261×10^9	1.555×10^9	3.816×10^9
17	7.0	2.607×10^7	1.793×10^7	4.400×10^7
18	9.5	2.995×10^6	2.059×10^6	5.054×10^6
合計		5.517×10^{16}	5.101×10^{16}	1.062×10^{17}

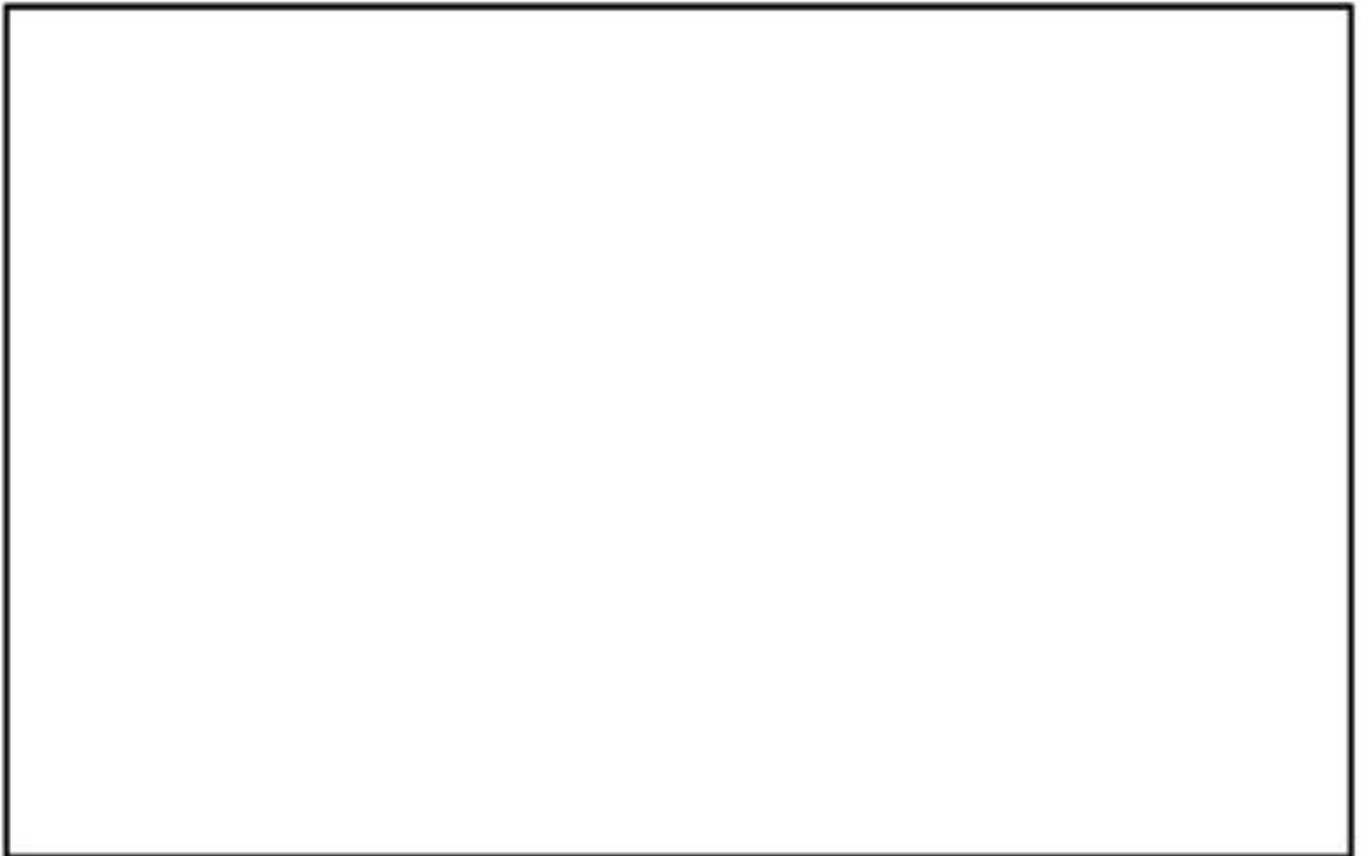
(注)MCNP5コードによる評価の[]については、線量当量率評価への寄与が無視できることを確認の上線源カットオフの対象とした。(17×17燃料48,000Mwd/t型(A型)、側部方向表面評価点で代表して、[]のカットオフ有無による線量当量率を評価し、カットオフ有無で差異が[]であることを確認)

別紙1-6表(4/4) 燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度
(15×15燃料48,000MWd/t型(B型))

(MSF-24P(S)型1基当たり)

エネルギー 群数	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部 (photons/s) ^(注)		
		中央部	外周部	合計
1	0.01	1.343×10^{16}	1.254×10^{16}	2.597×10^{16}
2	0.025	2.677×10^{15}	2.515×10^{15}	5.192×10^{15}
3	0.0375	3.458×10^{15}	3.200×10^{15}	6.658×10^{15}
4	0.0575	2.746×10^{15}	2.581×10^{15}	5.327×10^{15}
5	0.085	1.511×10^{15}	1.413×10^{15}	2.924×10^{15}
6	0.125	1.422×10^{15}	1.304×10^{15}	2.726×10^{15}
7	0.225	1.264×10^{15}	1.184×10^{15}	2.448×10^{15}
8	0.375	5.279×10^{14}	4.968×10^{14}	1.025×10^{15}
9	0.575	2.322×10^{16}	2.134×10^{16}	4.457×10^{16}
10	0.85	8.333×10^{14}	7.345×10^{14}	1.568×10^{15}
11	1.25	6.511×10^{14}	5.719×10^{14}	1.223×10^{15}
12	1.75	2.035×10^{13}	1.796×10^{13}	3.831×10^{13}
13	2.25	3.847×10^9	3.378×10^9	7.224×10^9
14	2.75	5.998×10^9	4.944×10^9	1.094×10^{10}
15	3.5	5.313×10^9	3.750×10^9	9.063×10^9
16	5.0	2.098×10^9	1.442×10^9	3.540×10^9
17	7.0	2.419×10^7	1.663×10^7	4.082×10^7
18	9.5	2.779×10^6	1.911×10^6	4.689×10^6
合計		5.177×10^{16}	4.790×10^{16}	9.967×10^{16}

(注)MCNP5コードによる評価の[]については、線量当量率評価への寄与が無視できることを確認の上線源カットオフの対象とした。(17×17燃料48,000MWd/t型(A型)、側部方向表面評価点で代表して、[]のカットオフ有無による線量当量率を評価し、カットオフ有無で差異が[]であることを確認)



----- 実燃料相対燃焼度分布包絡線

別紙 1-1 図 (1/2) 軸方向燃焼度分布の設定 (17×17 燃料)



----- 実燃料相対燃焼度分布包絡線

別紙1-1図(2/2) 軸方向燃焼度分布の設定(15×15燃料)

別紙1-16

□内は商業機密のため、非公開とします。

2. 遮蔽解析のモデル化について

遮蔽解析モデル化の概要を別紙1-2図、解析モデル図を別紙1-3図に示す。遮蔽解析のモデル化方針は以下のとおりである。

特定兼用キャスクをその実形状に基づき三次元体系のモデル（以下「三次元モデル」という。）でモデル化している。なお、使用済燃料集合体が一次蓋及び胴（底板）に接した状態として、線源である使用済燃料から評価点までの距離が短い保守的なモデルとしている。

(1) 燃料領域

別紙1-2図に示すとおり、使用済燃料集合体とバスケットをそれぞれモデル化している。

バスケットの留め具（ワッシャ、ボルト、ナット）は無視しており、バスケット領域に空孔が存在する場合は空孔の体積も考慮して均質化している。また、バーナブルポイズン集合体は、放射化線源強度のみ考慮し、構造材としての遮蔽効果は無視している。

使用済燃料集合体の移動を考慮するため、軸方向については燃料各領域の高さ寸法は固定して一次蓋及び胴（底板）に接した状態となるようキャスク全長を短縮し、径方向についてはバスケットセル内に均質化している。

(2) バスケット外周部

別紙1-2図に示すとおり、実形状に基づきモデル化している。

(3) 胴、側部中性子遮蔽材及び外筒

別紙1-2図に示すとおり、実形状に基づきモデル化している。

(4) トラニオン部

実形状に基づきモデル化している。

(5) 解析モデルの入力条件への不確かさの考慮について

解析モデルの入力条件への不確かさとして以下を考慮している。

①構成部材密度

最低保証密度を使用して原子個数密度を設定。

②寸法公差

解析モデルの各種寸法は公称寸法でモデル化するが、各構成部材の寸法公差については最小厚さを密度係数（＝最小寸法／公称寸法）で考慮。

(6) 遮蔽解析の保守性

本評価においては、以下の点について保守性を有している。解析条件の保守性が線量当量率に与える影響を別紙1-7表に示す。

・収納制限に対する解析条件の保守性

— []
[] ウラン濃縮度 $4.1 \pm []$ wt% 及び $4.0 \pm []$ wt% を保守的に [] wt% 及び [] wt% とする。

— 遮蔽評価においては、局所的な表面線量を評価する必要があるため、使用済燃料の燃焼度（集合体平均）は中央部、外周部共に当該配置の収納制限の最高燃焼度を設定している。

・モデル化の保守性

— 中性子遮蔽材は、評価期間中の熱的影響により質量減損（1.9%）が発生するため、遮蔽評価上、保守的に2.5%の質量減損を考慮（原子個数密度で考慮）する。

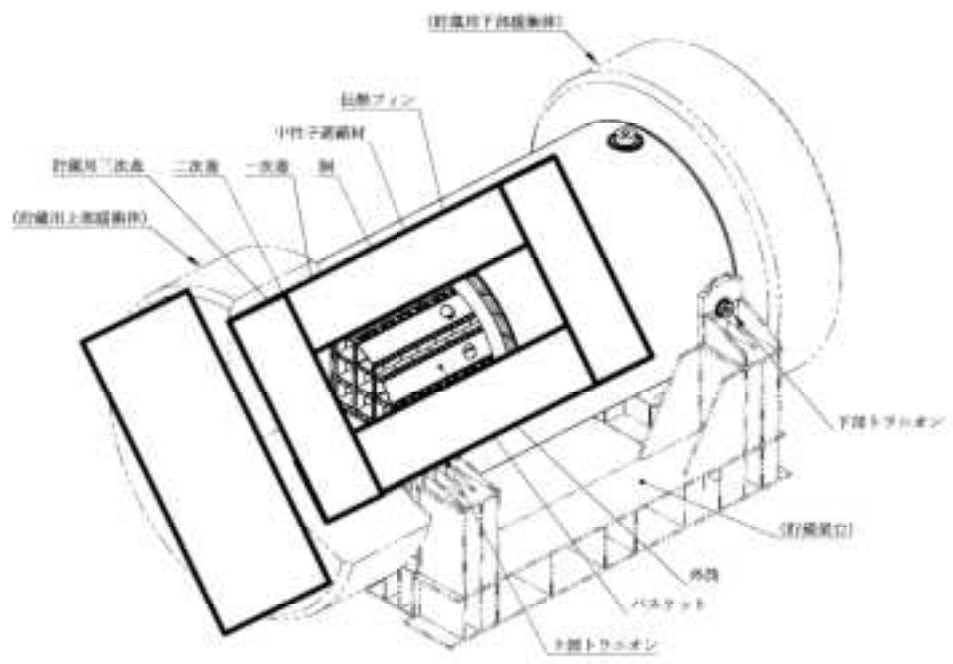
— 使用済燃料について胴内での軸方向の移動を考慮し、安全側に蓋方向、底部方向に移動したモデルとしており、線源である使用済燃料が評価点により近くなる設定としている。

— パーナブルポイズン集合体は、放射化による線源強度については考慮するが、構造材としての遮蔽効果は無視する。

別紙1-7表 解析条件の保守性による線量当量率への影響

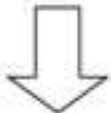
項目	詳細条件	遮蔽解析条件	線量当量率 (m) への影響 (保守性)
ウラン初期濃縮度	4.1±□wt% (ノミナル値、公差)	□wt%	約0.5%程度
燃料集合体燃焼度	キヤスク平均□	中央部全て 外周部全て (キヤスク平均□)	約10%程度
中性子遮蔽材質量減損	質量減損1.9%	質量減損2.5%	約10%程度
燃料集合体の軸方向移動	燃料集合体と一次蓋間に□の隙間	胴(底板)及び一次蓋に接した状態	約7%程度 (胴部軸方向のみ)
バーナブルポイズン集合体	中央部領域12体全ての燃料集合体と共に収納可能	バーナブルポイズン集合体自体の自己遮蔽効果は無視	約1%程度

(注) 基準に対して裕度の少ない特定兼用キヤスク表面から1 m離れた位置における線量当量率



[実形状]

三次元モデル化

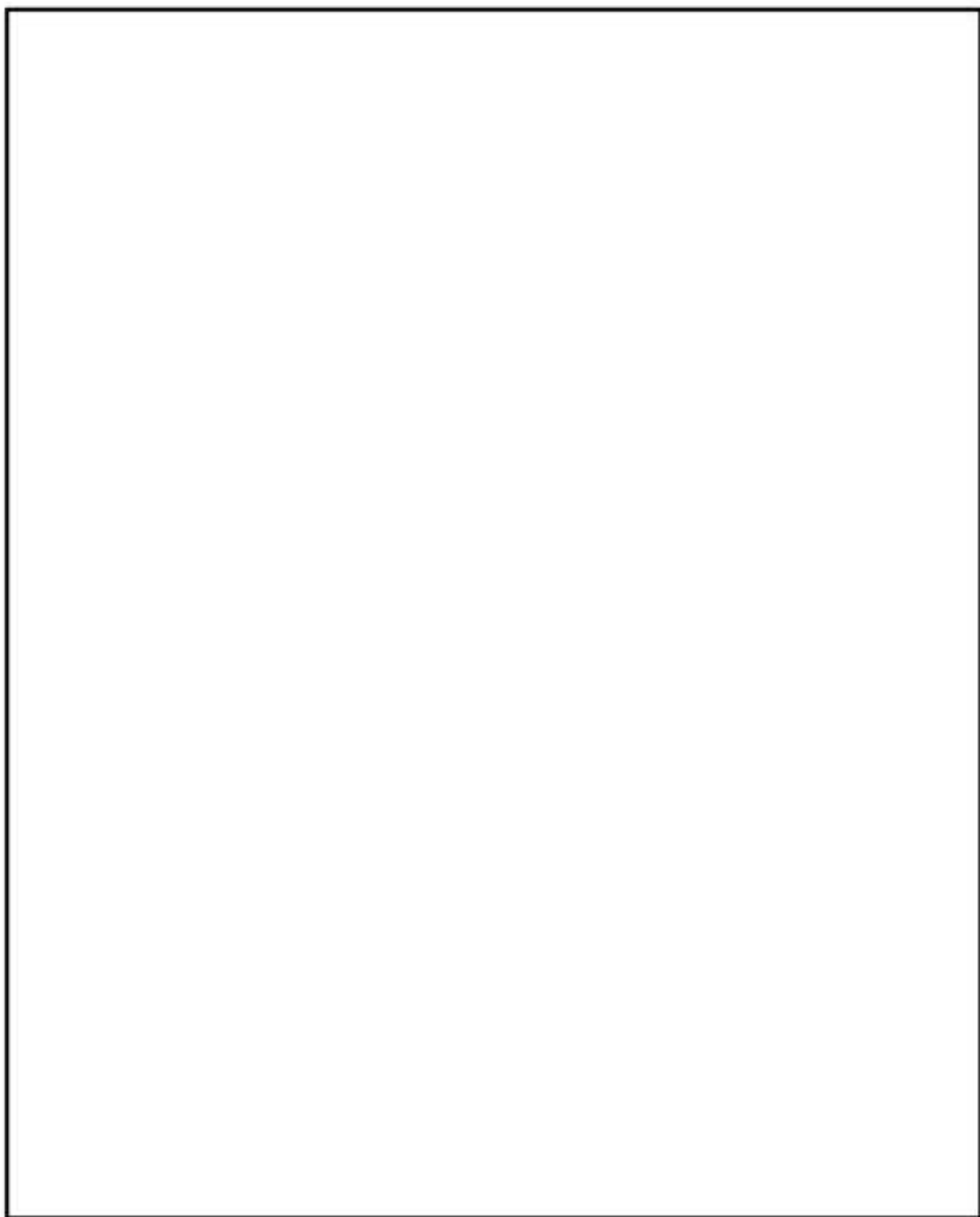


[遮蔽解析モデル化 (三次元体系)]

注：モニタリングポート部、バルブ部、トランニオン等を同一平面に示している。
貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体はモデル化しない。

燃料有効部中央	燃料有効部外周
燃料上部構造材中央	燃料上部構造材外周
燃料上部構造材中央	燃料上部構造材外周
燃料下部構造材中央	燃料下部構造材外周
バスケット領域	胴、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー
中性子遮蔽材	トランニオン
伝熱フィン	底部中性子遮蔽材カバー、下部端板、バルブ蓋カバープレート
真空	

別紙1-2図 遮蔽解析モデル化概要 (三次元モデル)



別紙1-3図 遮蔽解析モデル（三次元モデル）

別紙1-21

3. 中性子遮蔽材の質量減損について

中性子遮蔽材（レジン）は、補足説明資料 26-6「材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料（L5-95KV265）」に示すとおり、熱による質量減損が生じる。遮蔽解析では、設計貯蔵期間（60年）経過後の中性子遮蔽材の質量減損を考慮した原子個数密度を用いている。

中性子遮蔽材の質量減損は、劣化パラメータにより次式で表される。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2 \quad (2)$$

ここで、

- Δw : 中性子遮蔽材の質量減損率 (%)
- E_p : 劣化パラメータ = $T \times (77.6 + \ln(t))$
- T : 中性子遮蔽材温度 (K)
- t : 中性子遮蔽材加熱時間 (h)

貯蔵中は、使用済燃料の崩壊熱量の低下に伴い、中性子遮蔽材の温度も低下するが、設計貯蔵期間中の温度を保守的に貯蔵開始直後の中性子遮蔽材の最高温度が設計貯蔵期間にわたり一定として考慮すると、設計貯蔵期間経過時までの中性子遮蔽材の質量減損率はMSF-24P(S)型は1.9%となる。これを保守的に2.5%の質量減損があるとして評価した。

4. 詳細評価条件

三次元モンテカルロコード MCNP5 による解析（以下「MCNP5 解析」という。）の主要な評価条件は別紙1-8表に示すとおりである。解析コード、断面積ライブラリ及び線源強度設定については前述のとおりであり、ここでは分散低減、タリーの設定及び統計指標に係る事項について説明する。

なお、17×17 燃料と 15×15 燃料は MSF-24P(S) 型に混載しないが、48,000MWd/t と 39,000MWd/t、及び A 型と B 型は区別なく同一キャスクへ混載可能である。遮蔽解析条件は収納燃料を全て A 型の 48,000MWd/t 型燃料としている。

本資料本文 3. (2) に示すとおり、MCNP5 コード妥当性検証のベンチマーク解析において適切なモデル化により保守的な評価が可能であることを確認しており、本評価では線量率評価に対して別紙1-7表に示す保守性を考慮していることから、線量当量率評価値は基準値を上回ることがない。

別紙1-8表 MCNP5 解析の主要な評価条件

項目		解析条件
解析コード		MCNP5 ver. 1. 60
断面積ライブラリ		FSXLIB-J33 (中性子) MCPLIB84 (ガンマ線)
燃料有効部 ガンマ線源強度	群構造	ORIGEN2 群構造 (18 群)
	スペクトル	ORIGEN2 評価値
構造材放射化 ガンマ線源強度	群構造	1. 17MeV 1. 33MeV
	スペクトル	1. 17MeV : 50% 1. 33MeV : 50%
中性子源強度	群構造	連続エネルギー
	スペクトル	Watt 型 ²³⁹ Pu 核分裂スペクトル
	実効増倍率	0. 30 *
分散低減法		線源カットオフ エネルギー・カットオフ ウェイト・ウィンドウ
タリー		表面 : F2 タリー (半径 2. 5cm の面 若しくは 5 cm × 5 cm の曲面) 表面から 1 m 位置 : F4 タリー (半径 10cm の球形状)
統計指標		統計誤差 10% 以下 (マニュアル推奨値)

* : 線源強度算出時に実効増倍率を考慮。MCNP 解析では、体系内での実効増倍率を考慮しない固定線源として評価を実施し、燃料内での核分裂はしないものとして取り扱う。

(1)分散低減法

三次元モンテカルロコード MCNP6 では線源で発生する放射線粒子1つ1つについて計算を実施している。評価点に到達する粒子が多いほど結果の統計誤差が小さくなり、計算精度が良くなる。評価点により多くの粒子を到達させ、効率的に統計誤差を小さくする方法を分散低減法と言う。

本評価は、線源形状が比較的大きく、かつ遮蔽体が厚く複雑な評価体系であるため、粒子が評価点に到達しづらく、統計誤差が小さくなりづらい評価体系である。よって、本評価では、統計誤差を低下させるための分散低減法として、燃料有効部ガンマ線の線源放出粒子を入力からあらかじめ外しておく線源カットオフ法、打ち切り法のうち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エネルギー・カットオフ、及び非アナログモンテカルロ法のうち、空間及びエネルギーごとに分散低減のパラメータを設定するウェイト・ウィンドウ法を使用した。

線源カットオフ設定値は、
とした。エネルギー・カットオフ設定値は、

とした。

ウェイト・ウィンドウ法では粒子を分割・結合させ、計算結果への影響が大きい領域でより多くの粒子の計算を行い、計算精度の向上を図る手法である。ウェイト・ウィンドウ法では粒子のウェイト（計算結果への影響度を示す値）が過大な状態で評価点に到達した際に発生する大きな変動や、粒子のウェイトが過小になり寄与の小さい粒子について計算時間を費やすことによる計算効率の低下を防止するため、領域ごとにウェイト・ウィンドウと呼ばれるウェイト制限範囲を設定し粒子のウェイトをこの範囲に収めてばらつきを小さくし、計算精度の向上を図っている。

本評価でのウェイト・ウィンドウパラメータは、Superimposed Importance Mesh を用いて基本的に空気、鉄、レジンなどの物質ごとに分割し、隣り合う分割領域での粒子ウェイトが大きく変わらない分割厚さを設定、補助ツールである ADVANTG ver. 3.0.3 の
により算出した。ウェイト・ウィンドウパラメータの設定が妥当であることは、評価結果の連続性により確認した。

(2)タリーの設定

特定兼用キャスク表面評価では、線源から方位性を持つ表面直近の中性子及びガンマ線の線量当量率を評価することを目的に、サーフェスクロッシングエスティメータ（面タリー）を設定した。また、トラニオン近傍等では中性子ストリーミングの発生により比較的線量当量率の変化が大きいことを考慮し、遮蔽欠損部の大きさや線量当量率分布を基にストリーミングの最大線量当量率を適切に計算できる位置及び遮蔽欠損部程度の大きさとした。

特定兼用キャスク表面から 1 m 離れた位置評価では、評価位置に対して全方位からの中性子及びガンマ線の線量当量率を評価することを目的に、球形状のトラックレンジエスティメータ

(体積タリー)を用いた。表面から1 m離れた位置の線量当量率分布より十分に計算精度が得られる大きさとした。

(3)統計指標

三次元モンテカルロコードMCNP5では、解析値に統計誤差を持つことから、解析値が解析精度として十分に信頼できるものとなっているか確認するため、統計誤差がMCNPコードマニュアル推奨値である10%以下となることを目標として計算を実施する。

5. 参考文献

- (1) X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5", LA-UR-03-1987, (2003).
- (2) (財)原子力発電技術機構,「平成14年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確証試験)報告書」, (2003).

中性子実効増倍率の設定について

中性子源強度は、体系の増倍効果を考慮して次式により、乾燥状態において使用済燃料集合体を収納した場合のキャスクの実効増倍率を求め、中性子源強度に考慮した。

$$N_0 = N_0 / (1 - keff)$$

ここで、

N_0 : MSF-24P(S)型1基当たりの一次中性子源強度

keff : 使用済燃料集合体を収納した場合のMSF-24P(S)型の実効増倍率

実効増倍率の評価に用いた使用済燃料集合体の条件、評価結果及び線源強度設定に用いた実効増倍率を別紙2-1表に示す。実効増倍率評価は、冷却期間の短い条件による評価結果が保守的となるため、B型燃料に比べて冷却日数が短いA型燃料を評価対象とした。

なお、実効増倍率は、ORIGEN2コードにより、燃焼に伴う核分裂性物質の減少及び中性子の吸収に対して寄与が大きな核分裂生成物の生成量を求め、これらを考慮した核種組成を用いて、臨界解析で用いるKENO-VIコードにより求めた。なお、考慮している核種⁽¹⁾は以下のとおりである。

アクチニド：²³⁸U, ²³⁵U, ²³⁹U, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu, ²⁴²Pu

核分裂生成物：⁹⁹Tc, ¹⁰³Rh, ¹²¹Xe, ¹³³Cs, ¹⁴⁰Nd, ¹⁴⁵Nd, ¹⁴⁷Pm, ¹⁴⁷Sm, ¹⁴⁹Sm, ¹⁵¹Sm, ¹⁵²Sm, ¹⁵³Eu, ¹⁵⁵Gd

別紙2-1表 実効増倍率評価条件及び評価結果

項目	17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A型) 収納時		15×15 燃料 48,000MWd/t 型 (A型) 収納時	
ウラン重量 (kg/体)				
初期濃縮度 (wt%)				
燃焼度 (MWd/t)				
比出力 (MW/t)				
冷却日数 (日)				
実効増倍率 ⁽¹⁾				
遮蔽解析用実効増倍率	0.30		0.30	

(注)実効増倍率評価結果に統計誤差の3倍を加えた値。

- (1) (一社)日本原子力学会,「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 (AESJ-SC-F006:2013)」, (2014).

中性子源スペクトルを²³⁹Puの核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性

中性子源スペクトルを²³⁹Puの核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性について下記に示す。

使用済燃料からの主要な中性子源としては、以下の3つが挙げられる。

1. 一次中性子源であるCmの自発核分裂による中性子
2. 一次中性子源である(α, n)反応による中性子
3. 二次中性子源である核分裂反応により増倍される中性子

このうち、一次中性子源においては、別紙3-1図に示すとおり使用済燃料の場合、冷却期間が数十年までの間は自発核分裂による中性子が支配的である。MSF-24P(S)型に収納する使用済燃料集合体の中性子源強度は、別紙3-1表及び別紙3-2表に示すとおり自発核分裂による中性子が支配的である。なお、それぞれ中性子源強度の高いA型燃料について記載している。

別紙3-1表 中性子源強度 (17×17燃料 48,000MWd/t型 (A型) 収納時)
(MSF-24P(S)型1基当たり)

		燃料有効部		
		中央部	外周部	合計
一次中性子源強度 No (n/s)	(α, n) 反応	9.369×10 ⁷	7.472×10 ⁷	1.684×10 ⁸
	自発核分裂	4.909×10 ⁹	3.360×10 ⁹	8.269×10 ⁹
	合計	5.003×10 ⁹	3.435×10 ⁹	8.437×10 ⁹

別紙3-2表 中性子源強度 (15×15 燃料 48,000Mwd/t 型 (A型) 収納時)
(MSF-24P(S)型1基当たり)

		燃料有効部		
		中央部	外周部	合計
一次中性子源強度 No (n/s)	(α, n) 反応	9.669×10^7	7.716×10^7	1.739×10^8
	自発核分裂	5.148×10^8	3.537×10^8	8.685×10^8
	合計	5.245×10^8	3.614×10^8	8.859×10^8

上記より、中性子源スペクトルの候補 (主要な核分裂核種) は以下の3つとなる。

- ① Cmの自発核分裂反応
- ② ^{239}Pu の核分裂反応
- ③ ^{235}U の核分裂反応

ここで、Cmの自発核分裂及び ^{239}Pu 及び ^{235}U の核分裂による中性子源スペクトルの比較を別紙3-2図及び別紙3-3図に示す。

別紙3-2図に示すとおり、 ^{248}Cm 、 ^{244}Cm の自発核分裂による中性子源スペクトルに対して ^{239}Pu の核分裂による中性子源スペクトルの方がより高エネルギー成分が多い。

また、別紙3-3図に示すとおり、 ^{235}U の核分裂による中性子源スペクトルに対しても ^{239}Pu の核分裂による中性子源スペクトルの高エネルギー成分が多い。

したがって、中性子源スペクトルを ^{239}Pu の核分裂スペクトルで代表させる設定は保守側の設定であり妥当である。

(出典)

- (1) L. B. Shappert, et al., "The Radioactive Materials Packaging Handbook", ORNL/M-5003, Oak Ridge National Laboratory, 9-9, (1998).
- (2) H. S. Bailey, R. N. Evatt, G. L. Gyorey, et al., "Neutron Shielding Problems in the Shielding of High Burnup Thermal Reactor Fuel", Nuclear Technology, ANS, 17, 222, (1973).
- (3) E. D. Arnold, R. G. Jaeger, et al., "Engineering Compendium on Radiation Shielding", Volume I Shielding Fundamentals and Methods, Springer-Verlag, Germany, 69 (1968).

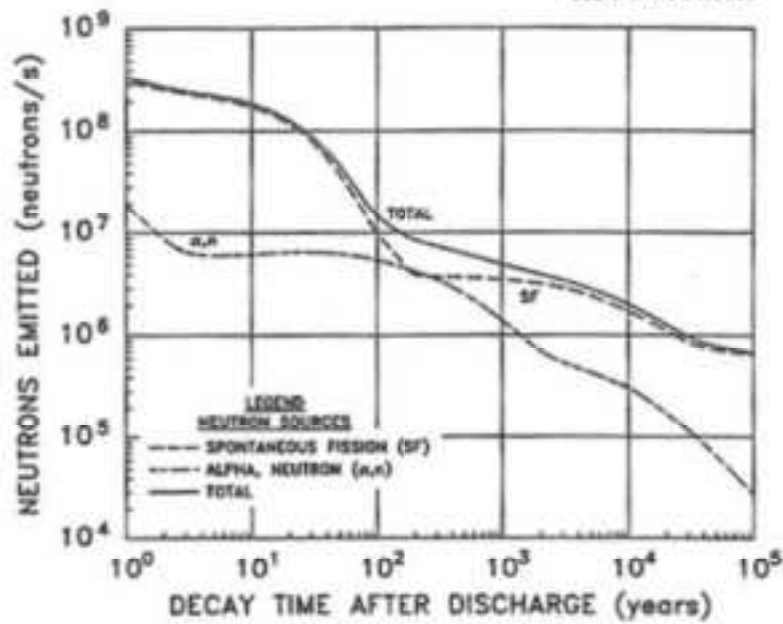


Fig. 9.2. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTHM): PWR/33,000 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

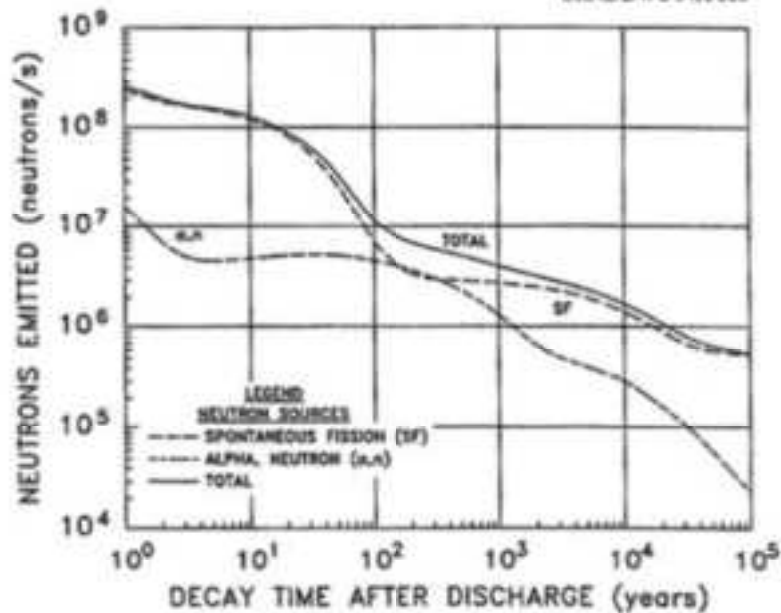
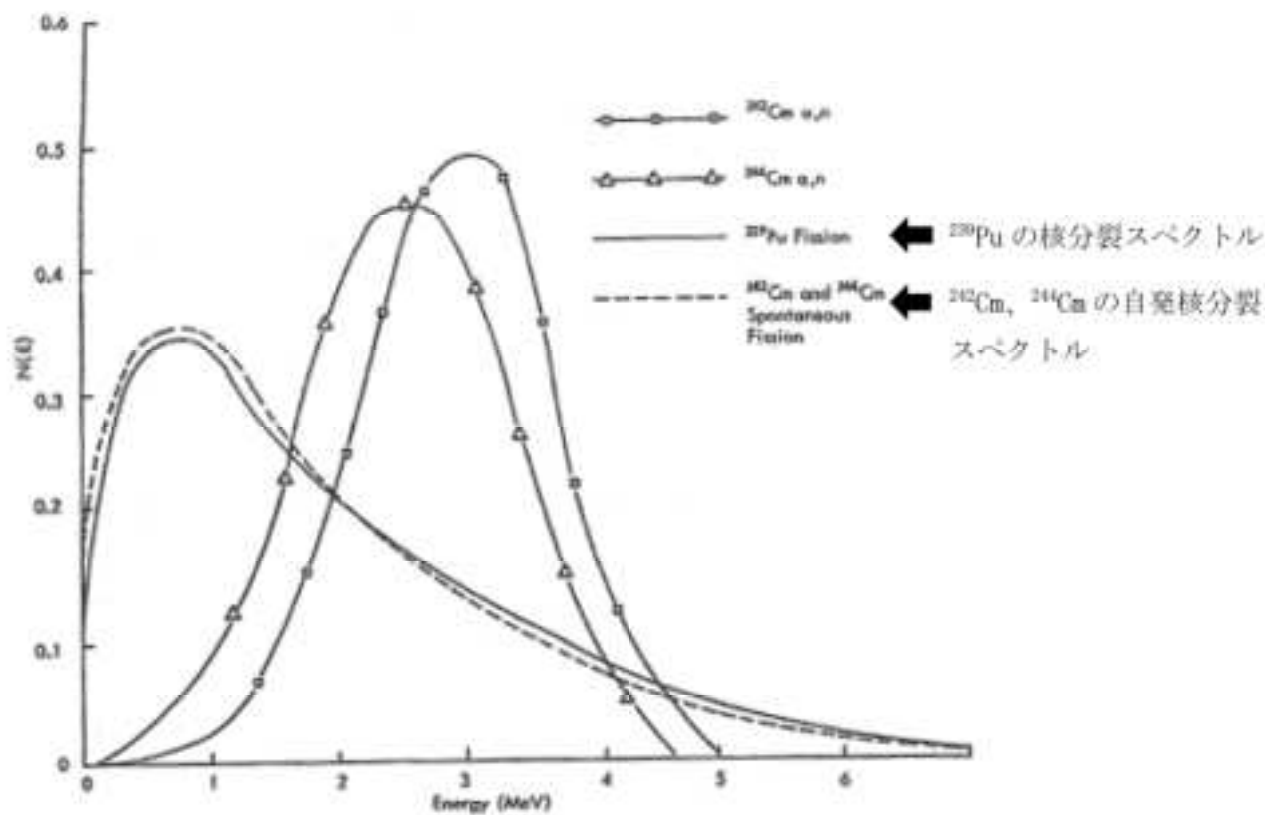


Fig. 9.3. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTHM): BWR/27,500 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

別紙3-1図 自発核分裂及び (α, n) 反応に伴う中性子源強度と冷却期間との関係⁽¹⁾



Neutron emission spectra for several sources.

別紙3-2図 ^{239}Pu の核分裂、 Cm の自発核分裂中性子源スペクトルの比較¹⁾

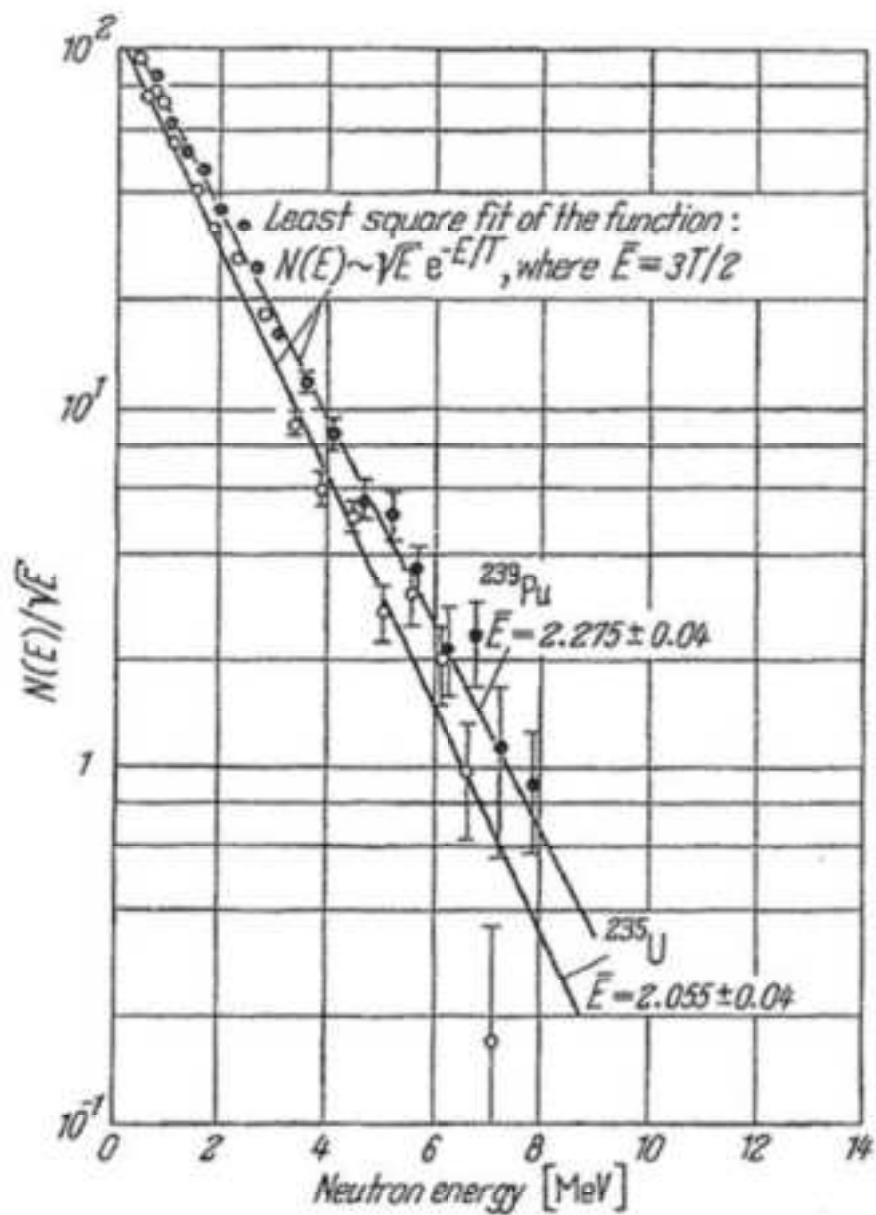


Fig. 2.3.-2. Typical measured fission neutron spectra of $^{235}\text{U} + n_{th}$ and $^{239}\text{Pu} + n_{th}$.

別紙3-3図 ^{239}Pu 及び ^{235}U の核分裂中性子源スペクトルの比較⁽⁹⁾

遮蔽解析結果の詳細 (MCNP5 コード)

1. 線量当量率評価結果

三次元モンテカルロコード MCNP5 による遮蔽解析（以下「MCNP5 解析」という。）の結果うち、17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A 型）収納時については本文第 2 表及び第 3 表に示しているが、MCNP コードを用いた解析結果の信頼性の確認のために別紙 4-1 表に示される 10 個の統計指標を確認する必要がある。本統計指標項目に対し、「yes」が指標を満足し、「no」が指標を満足しない項目として記載した結果を別紙 4-2 表に示す。一部に統計指標を満足していない項目があるが本文第 10 図及び第 11 図に示すベンチマーク文献により MCNP6 コードは MSF-24P(S) 型と同様の体系での遮蔽解析は信頼性があること及び別紙 4-1 図から別紙 4-6 図に示すとおり線量当量率分布は連続的であり、物理現象的に正しいと判断できることから、MCNP5 コードによる計算が適切に行われていることが確認できる。ここで、線量当量率分布図は線量当量率の連続性を確認するものであり、参考結果である。いずれの評価点においても別紙 4-1 表の統計誤差の指標（10%以下）を満足しており、評価点周辺においても統計誤差の指標を満足していることを確認している。一部の線量当量率が低い部位（遮蔽材透過距離が長くキャスク外に放射線が到達しない部位）については統計誤差が他部位より若干高いが線量当量率は低く、統計誤差が高い点を勘案しても基準適合性には問題ない。

また、17×17 燃料 48,000MWd/t 型（B 型）収納時及び 15×15 燃料 48,000MWd/t 型（B 型）収納時について、MCNP5 コードによる線量当量率結果を別紙 4-3 表、線量当量率が最大となる評価点位置を別紙 4-7 図に示す。B 型燃料収納時における特定兼用キャスク表面及び表面から 1 m 離れた位置における最大線量当量率は A 型燃料収納時に比べて低い。

なお、型式証明との比較では、蓋部方向について貯蔵用三次蓋及び緩衝体のモデル化の差異により、以下のとおり線量当量率が増加している。



別紙 4-1

別紙4-1表 統計指標項目

指標の項目	指標の確認目的	統計指標 ⁽¹⁾
mean	適切にモンテカルロ法で計算できていることの確認。	計算収束判定段階において、発生粒子数Nの増加に伴い、平均値が単調増加したり減少したりしないこと。(random)
value		0.1より小さいこと。(< 0.10)
relative error	統計的な精度を表す指標。	計算収束判定段階において、発生粒子数Nの増加に伴い、valueが単調に減少すること。(yes)
decrease		計算収束判定段階において、valueが $1/\sqrt{N}$ で減少すること。(1/sqrt(nps))
decrease rate		0.1より小さいこと。(< 0.10)
variance of the variance	相対誤差の精度を表す指標。	計算収束判定段階において、valueが単調に減少すること。(yes)
value		計算収束判定段階において、valueが1/Nで減少すること。(1/nps)
decrease		計算収束判定段階において、発生粒子数Nに関係なくvalueが一定であること。(constant)
decrease rate		計算収束判定段階において、発生粒子数Nの関数としてvalueが単調増加あるいは単調減少しないこと。(random)
figure of merit	タリーの信頼性を表す指標。	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より大きいこと。(> 3.00)
pdf	適切にサンプリングされていることの確認。	

(1) 浅見光史 ほか、「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」、海上技術安全研究所報告 第13巻 第1号 (平成25年度) 研究調査資料, (2013).

別紙4-2表 解析結果の信頼性を示す10個の統計指標結果（17×17燃料収納時）

指標の項目	表面で最大となる評価点⑦					表面から1m離れた位置で最大となる評価点⑧					desired
	燃料有効部ガンマ線	構造材放射化ガンマ線	二次ガンマ線	中性子	燃料有効部ガンマ線	構造材放射化ガンマ線	二次ガンマ線	中性子	中性子		
mean											random
value											< 0.10
relative error											yes
decrease rate											1/sqrt(nps)
value											< 0.10
decrease rate											yes
variance of the variance											1/nps
figure of merit											constant
behavior											random
pdf											> 3.00

注) 別紙4-1表に示す統計指標を満足するものを「yes」、満足しないものを「no」と記載。

「no」となる評価点結果については、異なる評価方法や放射線挙動が物理的に問題ないことの確認などにより計算が問題ないことを判断する。

別紙4-3表(1/2) 線量当量率評価結果(17×17燃料(B型)取納時)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部		側部	底部		
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	
	①	③		⑦	⑨	
ガンマ線	燃料有効部	0.3 (3.1)	0.1 (3.2)	46.1 (0.4)	1.6 (1.3)	0.2 (1.8)
	構造材放射化	2.0 (0.6)	1.3 (1.1)	85.5 (0.2)	2.7 (0.9)	0.9 (1.3)
	二次ガンマ線	1.1 (1.0)	2.0 (1.1)	10.5 (0.6)	6.6 (0.9)	1.0 (1.6)
中性子	313.6 (0.7)	632.0 (0.6)	24.1 (0.5)	1413.0 (0.5)	180.7 (0.9)	
合計	317.0	635.4	166.2	<u>1423.9</u>	182.8	
評価点	②	④	⑥	⑧	⑩	
ガンマ線	燃料有効部	0.6 (0.9)	16.9 (0.2)	20.3 (0.2)	7.6 (0.3)	4.6 (0.3)
	構造材放射化	12.1 (0.3)	31.9 (0.3)	28.9 (0.3)	10.2 (0.4)	52.5 (0.1)
	二次ガンマ線	0.4 (1.7)	4.4 (0.3)	5.1 (0.3)	2.9 (0.6)	3.5 (0.7)
中性子	50.9 (0.8)	29.0 (0.7)	25.3 (0.7)	48.2 (0.8)	18.1 (0.4)	
合計	64.0	<u>82.2</u>	79.6	68.9	78.7	

※ () 内は統計誤差(単位: %)を示す。

下線で示す値は、表面及び表面から1 m離れた位置における線量当量率の最大値である。

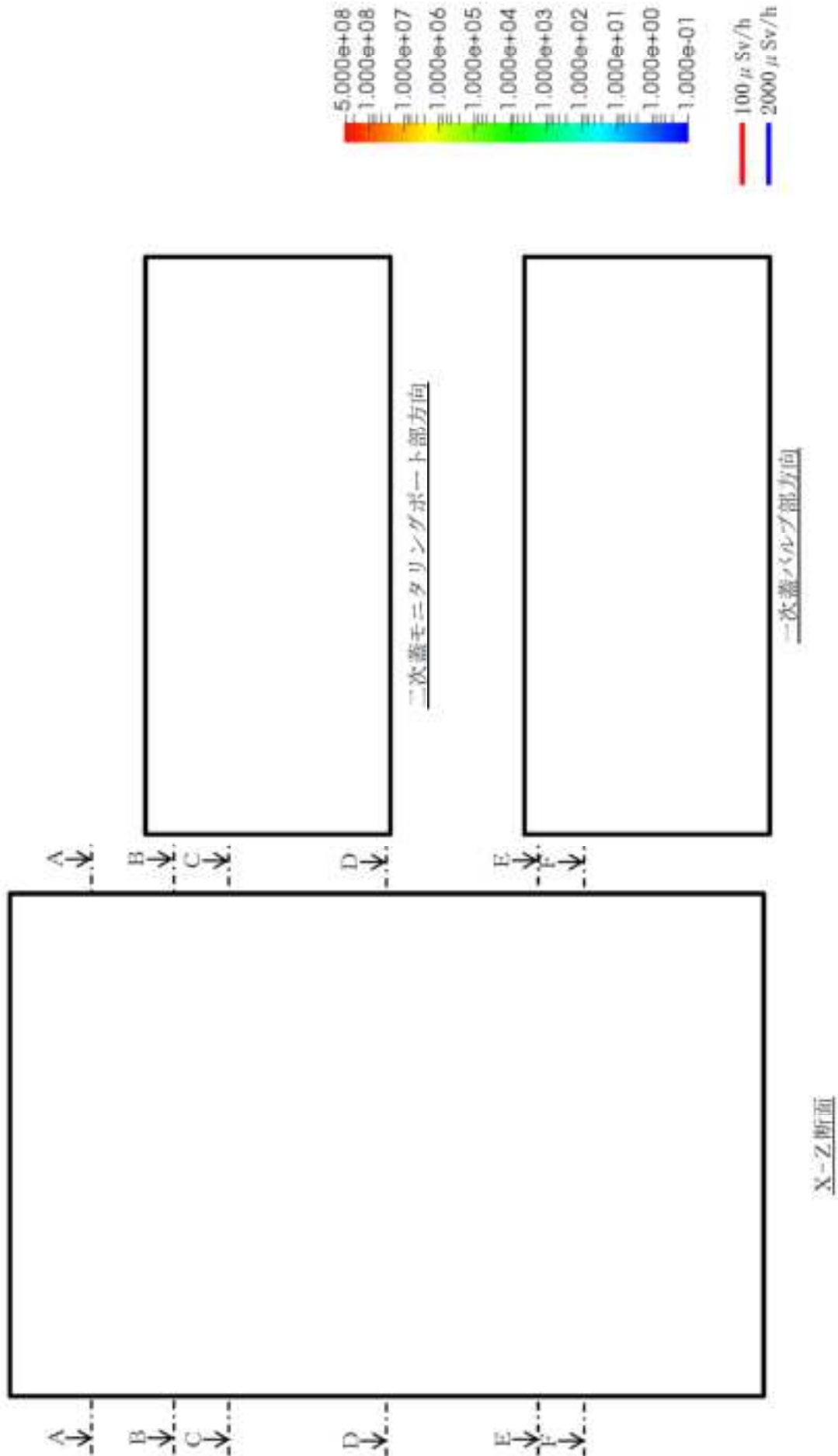
別紙4-3表 (2/2) 線量当量率評価結果 (15×15 燃料 (B型) 取納時)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

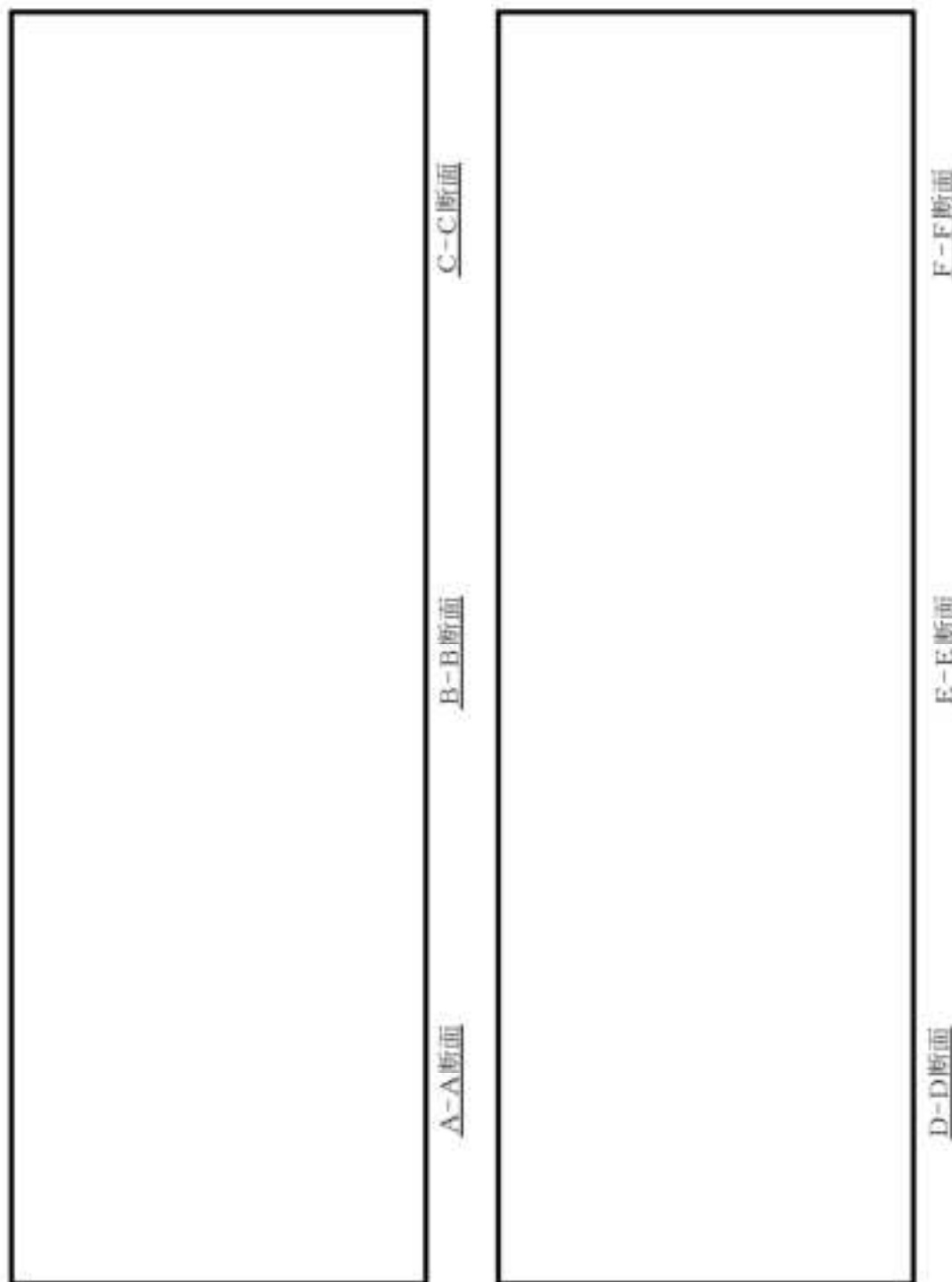
評価点	頭部		側部	底部			
	軸方向	径方向		径方向	軸方向		
	①	③		⑦	⑨		
表面	ガンマ線	燃料有効部	0.3 (2.1)	0.1 (2.7)	85.3 (0.4)	1.7 (1.3)	0.2 (1.6)
		構造材放射化	1.6 (0.6)	1.0 (1.1)	14.7 (0.3)	1.8 (0.9)	0.5 (1.3)
		二次ガンマ線	1.1 (1.1)	2.2 (1.3)	23.6 (0.6)	7.1 (1.1)	1.1 (1.8)
表面から1m	ガンマ線	中性子	328.5 (0.4)	657.9 (0.4)	40.5 (0.3)	1500.0 (0.3)	193.1 (0.6)
		合計	331.5	661.2	164.1	<u>1510.6</u>	194.9
		評価点	②	④	⑥	⑧	⑩
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	0.6 (0.9)	18.2 (0.2)	20.4 (0.2)	7.7 (0.3)	4.6 (0.3)
		構造材放射化	9.1 (0.3)	25.7 (0.3)	23.4 (0.2)	6.4 (0.5)	28.7 (0.1)
		二次ガンマ線	0.4 (1.8)	4.9 (0.4)	5.3 (0.3)	3.1 (0.7)	3.7 (0.8)
表面から1m	ガンマ線	中性子	53.6 (0.5)	29.0 (0.4)	26.5 (0.3)	52.3 (0.5)	19.5 (0.2)
		合計	63.7	<u>77.8</u>	75.6	69.5	56.5

※ () 内は統計誤差 (単位: %) を示す。

下線で示す値は、表面及び表面から1 m離れた位置における線量当量率の最大値である。

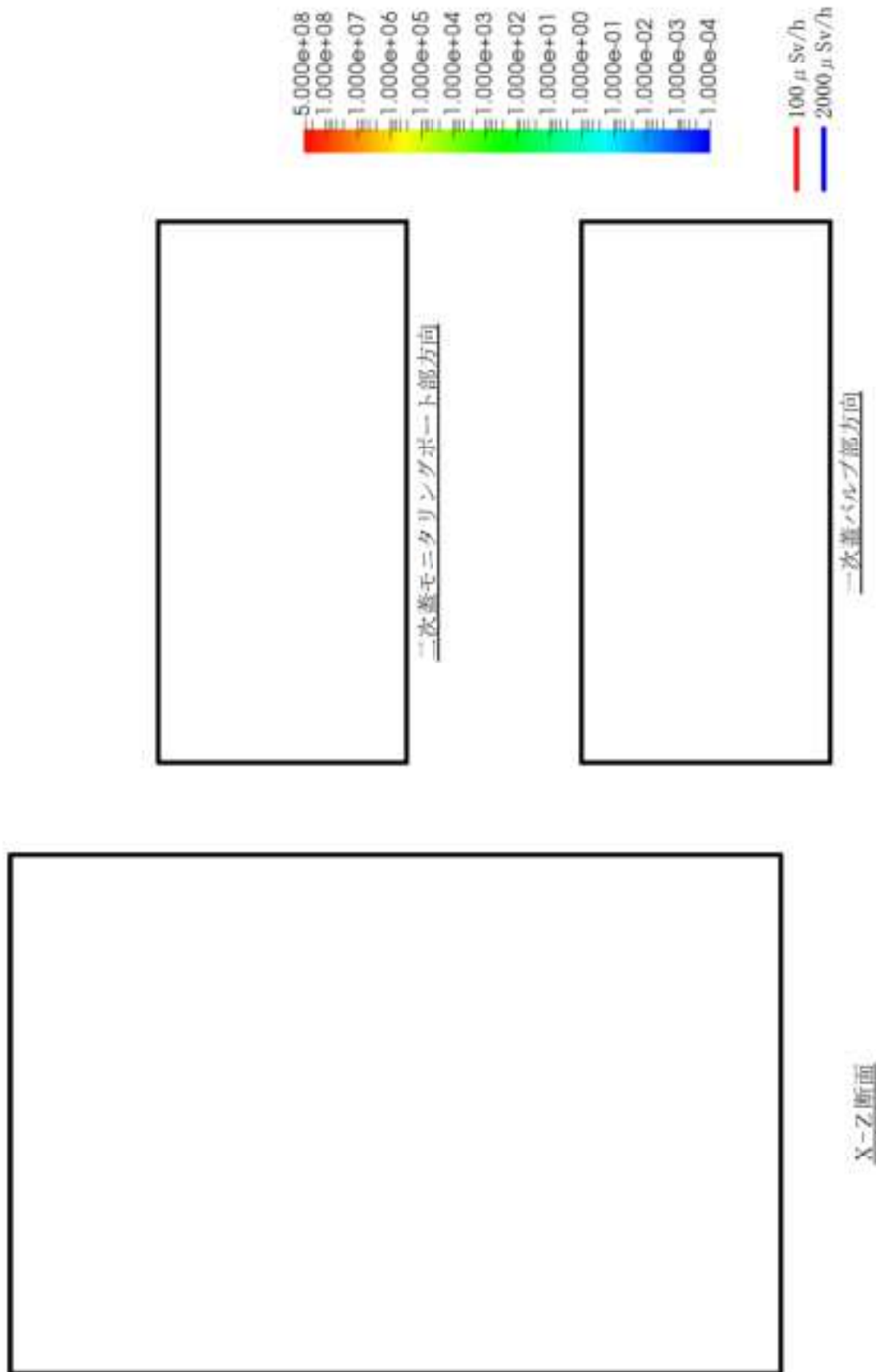


別紙 4-1 図 線量当量率分布 (全線源) (17×17 燃料 48,000Mwd/t 型 (A 型) 収納時)

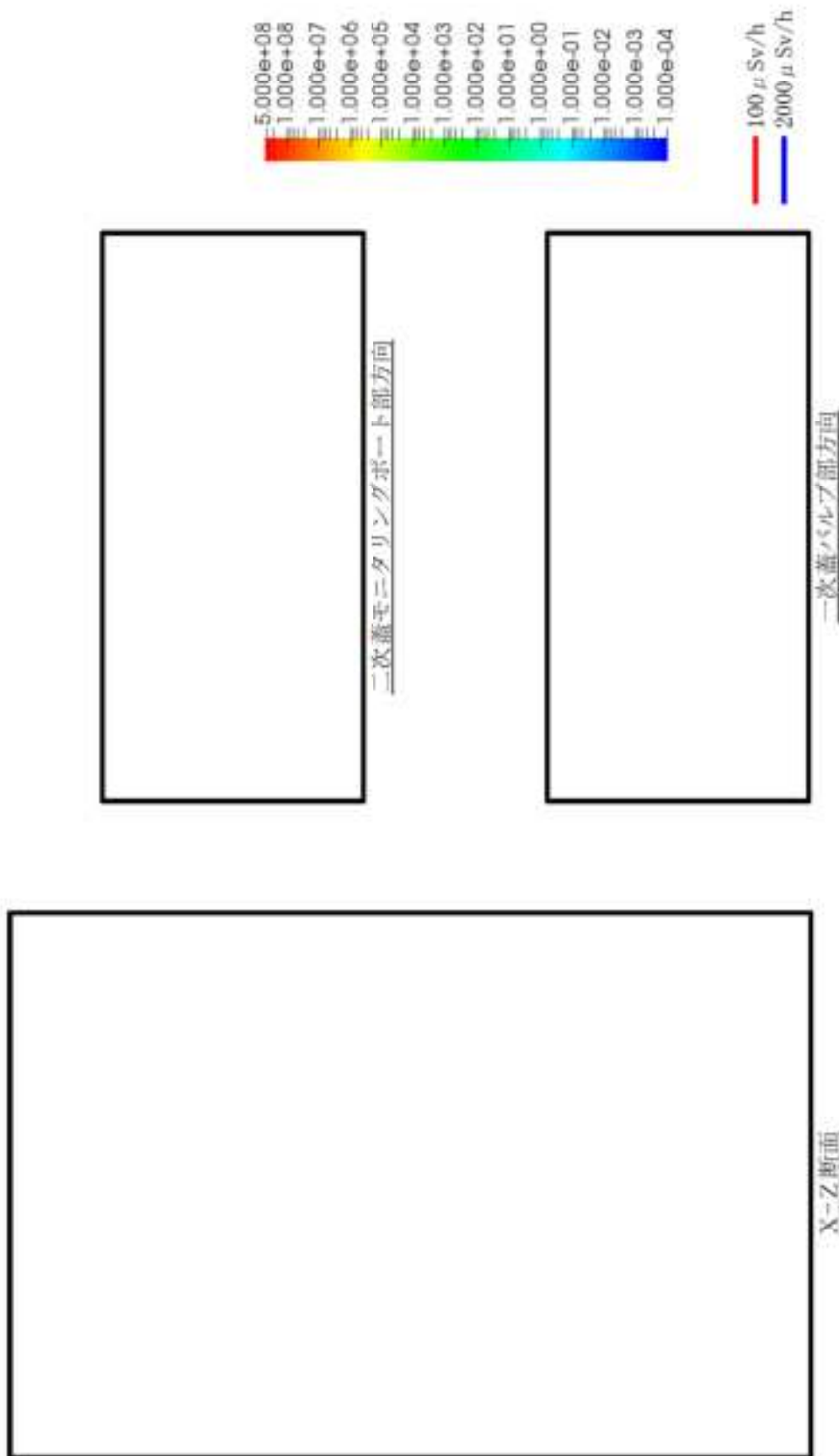


(注) 断面位置は別紙 4-1 図参照

別紙 4-2 図 線量当量率分布 (全線源) (17×17 燃料 48,000Mwd/t 型 (A 型) 収納時)



別紙 4-3 図 線量当量率分布 (燃料有効部ガンマ線) (17×17 燃料 48,000Mwd/t 型 (A型) 収納時)



別紙 4-4-4 図 線量当量率分布 (構造材放射化ガンマ線) (17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A型) 収納時)



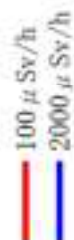
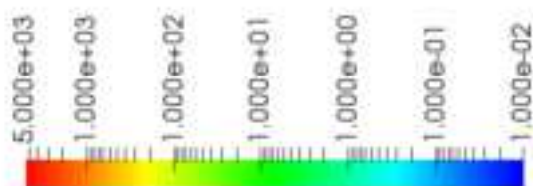
X-Z断面



二次蓋モニタリングポート部方向



二次蓋シールド部方向



別紙 4-5 図 線量当量率分布 (二次ガンマ線) (17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A型) 収納時)



X-Z断面

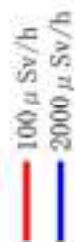
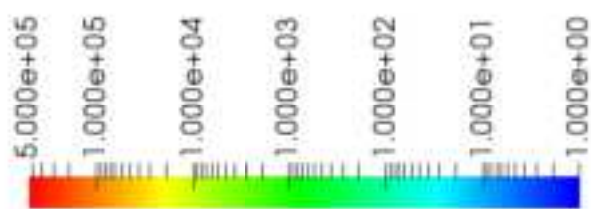
別紙 4-6 図 線量当量率分布 (中性子) (17×17 燃料 48,000Mwd/t 型 (A型) 収納時)



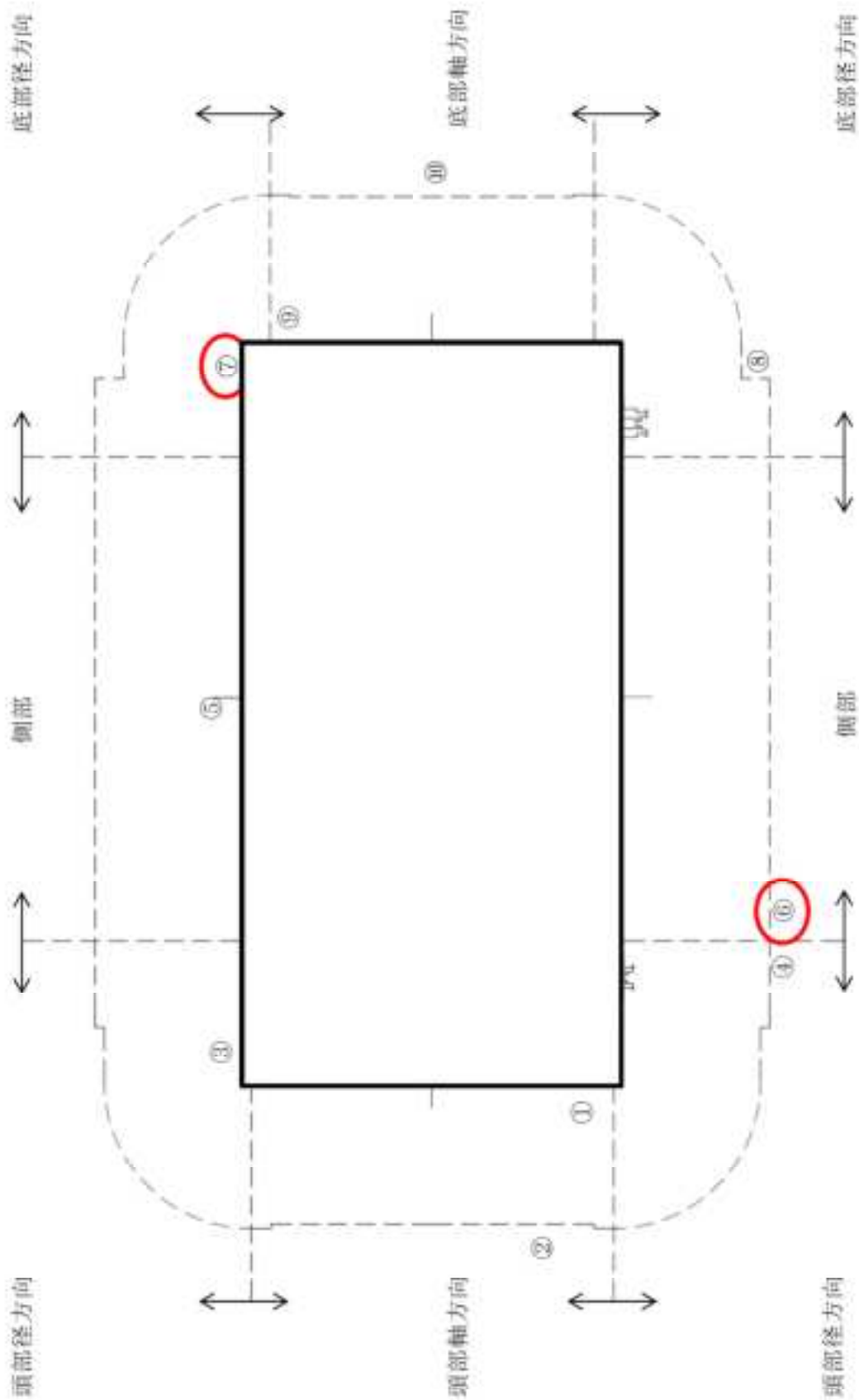
二次環モニタリングポート部方向



一次環モニタリング部方向



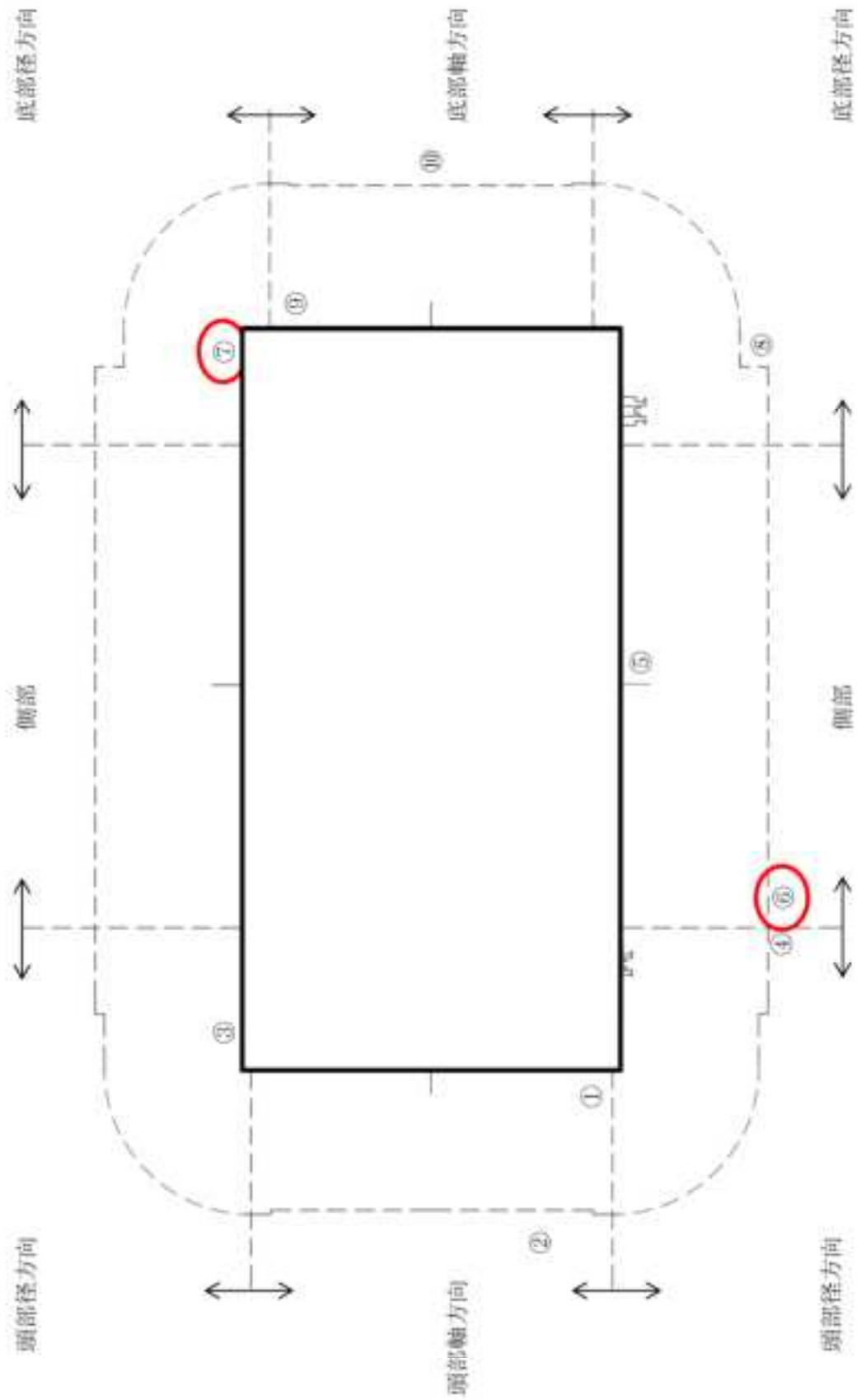
○：表面及び表面から 1 m 離れた位置における最大線量当量率の位置



(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

別紙 4-7 図 (1/2) 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (17×17 燃料 (B 型) 収納時)

○：表面及び表面から 1 m 離れた位置における最大線量当量率の位置



(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

別紙 4-7 図 (2/2) 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (15×15 燃料 (B 型) 収納時)

MCNP5 コードによる評価値と DOT3.5 コードによる既認可結果の比較

MCNP5 コードによる評価値と、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の比較を実施した。比較対象となる DOT3.5 コードによる評価値は、MSF-24P(S) 型の輸送様態と同一仕様・構造である MSF-24P 型での既認可の核燃料輸送物設計変更承認申請（原規規発第 22061412 号により令和 4 年 6 月 14 日承認）とした。

また、比較対象ケースは、核燃料輸送物設計変更承認申請ケースと同様の 17×17 燃料 48,000Mwd/t 型（A 型）収納時とした。

MCNP5 コード及び DOT3.5 コードの特徴を別紙 5-1 表に示す。別紙 5-1 表に示すとおり評価条件の差異は、評価に用いた解析コードの特性による評価モデル設定によるものであり、線源強度や物性値等の評価条件は同じである。

MCNP5 コード及び DOT3.5 コードによる各評価点の最大線量当量率を別紙 5-2 表に、最大線量当量率となる評価点位置を別紙 5-1 図に示す。

また、MCNP5 コード及び DOT3.5 コードによる各部位の線量当量率分布の比較を別紙 5-2 図から別紙 5-5 図に示す。併せて、各部位で MCNP5 コードと DOT3.5 コードによる評価結果の差異が生じた要因を別紙 5-3 表に示す。

以上より、MCNP5 コードと DOT3.5 コードの評価値は、一部の評価点位置によっては差異が生じる^(注)ものの要因は解析コードの特性による評価モデル設定であり、その他の評価点位置はほぼ同様の線量当量率結果傾向である。

(注) 頭部径方向、底部径方向について、表面評価点は DOT3.5 コード結果が MCNP5 コード結果より 30 %～40 %程度高いが、表面から 1 m 離れた位置においては概ね同等となっている。要因は別紙 5-3 表に示すとおり、DOT3.5 コードによる線量当量率評価値がコード制約上保守的（高い）な結果となっているためである。

別紙5-1表 MCNP5 コード及びDOT3.5 コードの特徴

項目	MCNP5 コード	DOT3.5 コード	備考
計算	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	ORIGEN2 コードにより評価した線源強度。	+	両者で基本的には差異は無い。
モデル化	MSF-24P 型全体を三次元でモデル化。	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。	両者で解析コードの特性上モデル化方法が異なる。 DOT3.5 コードでの均質化方法については添付1参照。 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。（添付2参照）

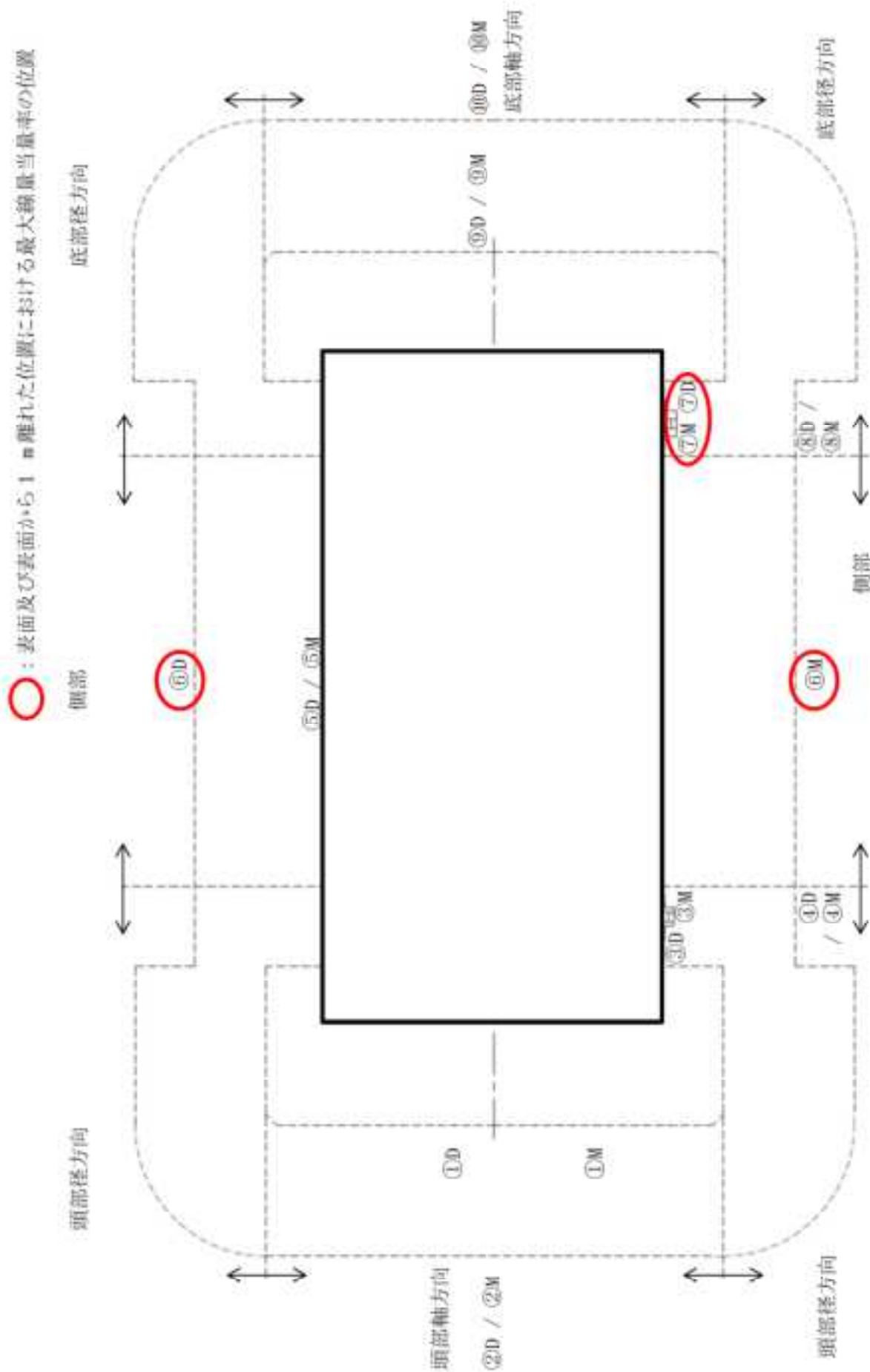
別紙5-2表 MCNP5コード及びDOT3.5コードによる線量当量率評価結果

(単位: μ Sv/h)

評価点	頭部				側部				底部				
	軸方向		径方向		軸方向		径方向		軸方向		径方向		
	①		③		⑤		⑦		⑨		⑪		
表面	ガンマ線	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5
	燃料有効部	<0.1	<0.1	60.6	8.0	113.6	100.7	91.3	5.4	6.5	6.0		
	構造材放射化	0.2	0.2	161.7	103.0	26.8	25.9	69.1	13.4	37.9	35.9		
	二次ガンマ線	0.3	0.2	9.6	5.7	25.4	25.7	12.1	4.8	4.8	4.6		
	中性子	41.3	41.7	433.6	753.8	40.7	45.1	616.2	1108.3	21.8	25.2		
合計	41.9	42.2	665.5	870.5	206.5	197.4	788.7	1131.9	71.0	71.7			
表面から1m	ガンマ線	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5
	燃料有効部	<0.1	<0.1	23.4	22.6	45.0	44.8	27.1	25.1	2.9	2.6		
	構造材放射化	0.2	<0.1	22.7	20.9	11.5	12.5	13.0	12.8	16.8	14.8		
	二次ガンマ線	0.2	<0.1	5.1	5.4	10.0	10.4	5.5	5.7	1.8	1.7		
	中性子	20.3	20.9	32.3	34.0	17.7	18.4	29.1	26.3	12.9	15.8		
合計	20.8	21.2	83.5	82.9	84.2	86.1	74.7	69.9	34.4	34.9			

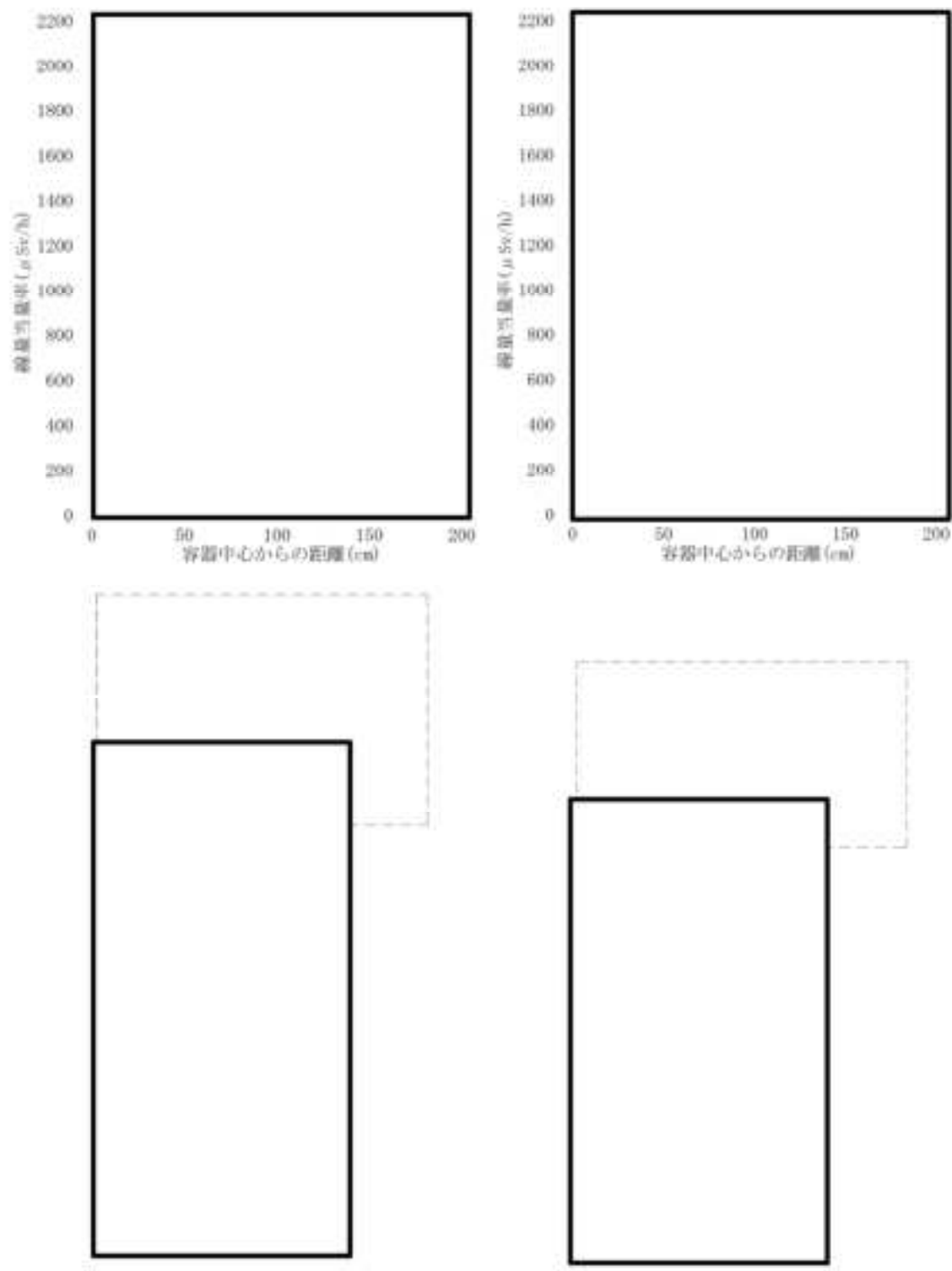
(注1)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

(注2)DOT3.5コードによる評価の頭部径方向及び底部径方向はそれぞれトロン方向を含めた結果である。
 表下線で示す値は、表面及び表面から1 m離れた位置における線量当量率の最大値である。

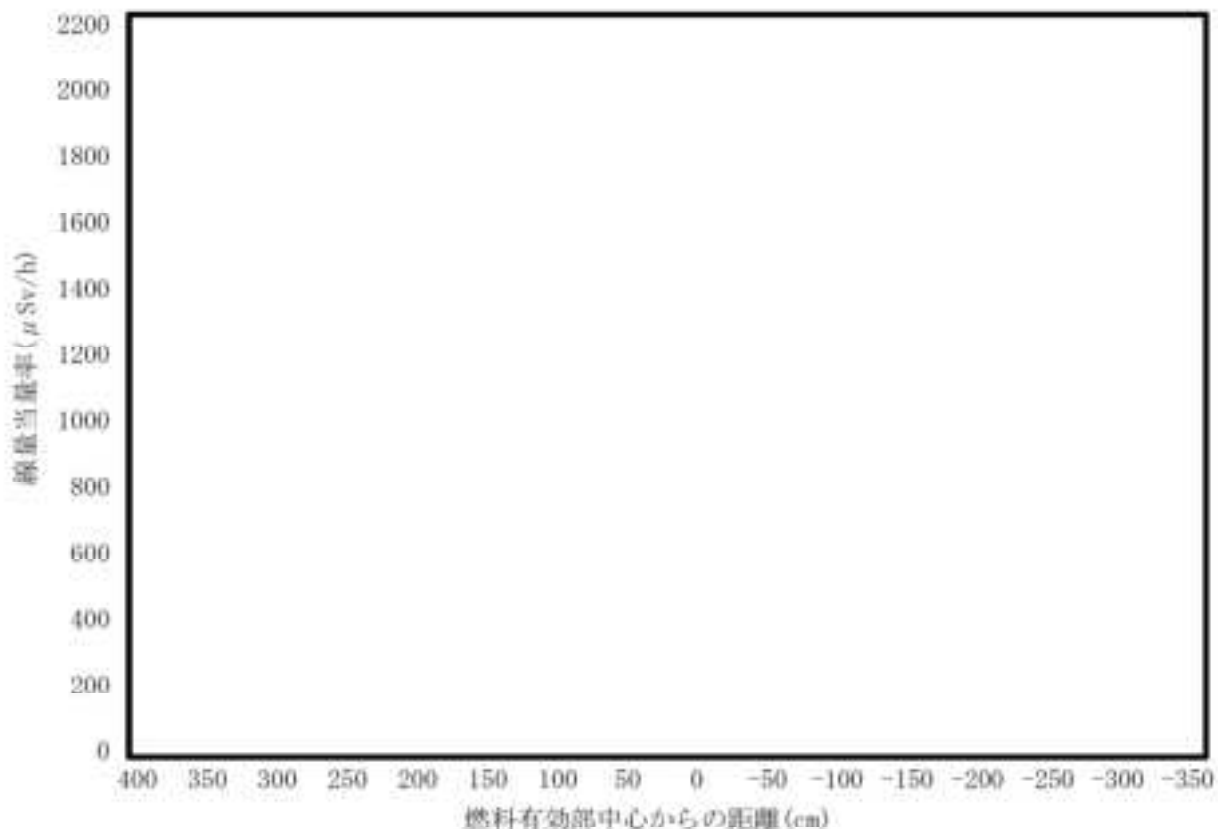


(注 1) ①~⑧の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。「D」はDOT3.5コード、「M」はMCNP5コード結果。
 (注 2) MCNP5 解析の実形状を考慮したモデルイメージを図示している。

別紙 5-1 図 最大線量当量率位置

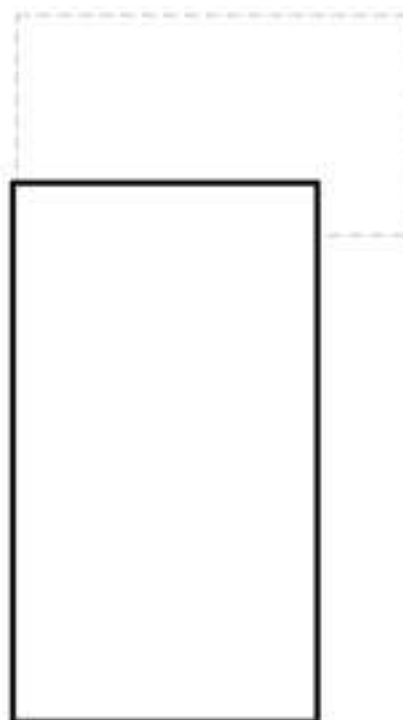
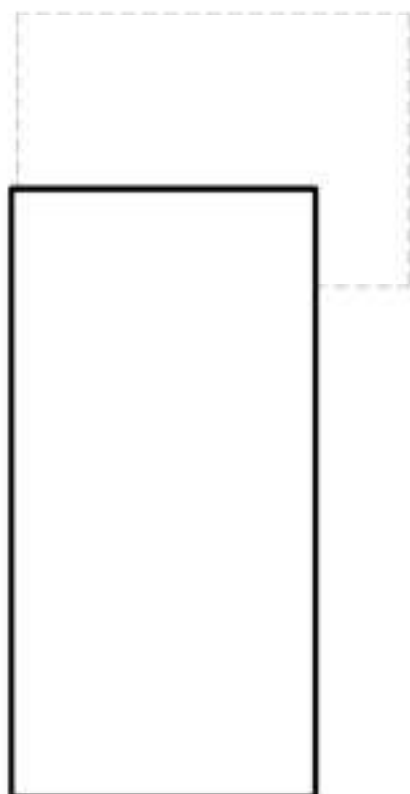
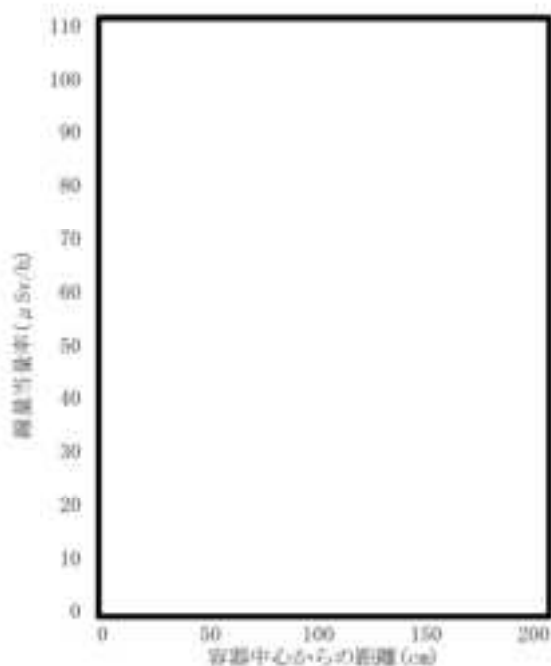
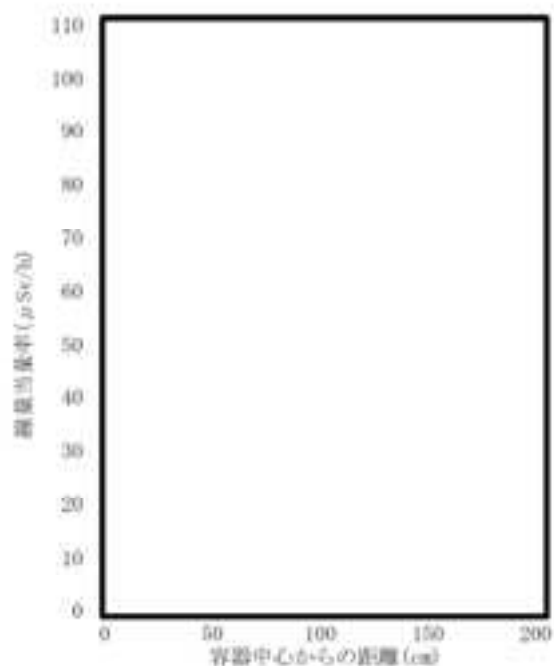


別紙5-2図 表面の線量当量率分布の比較
(頭部軸方向・底部軸方向)



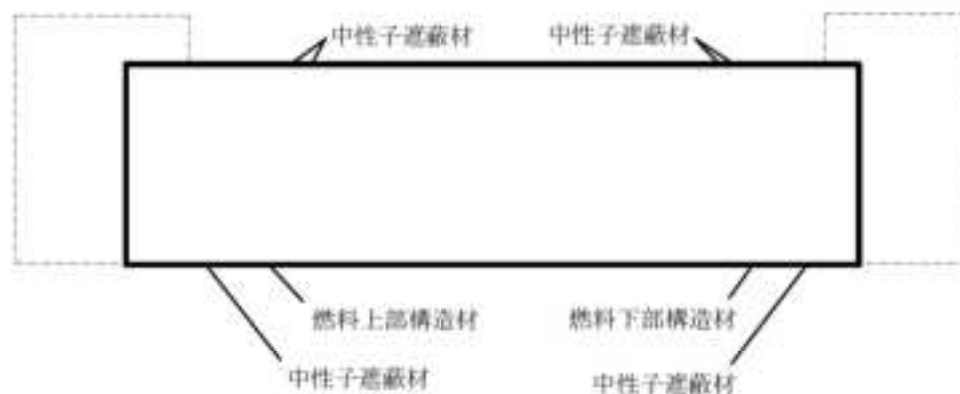
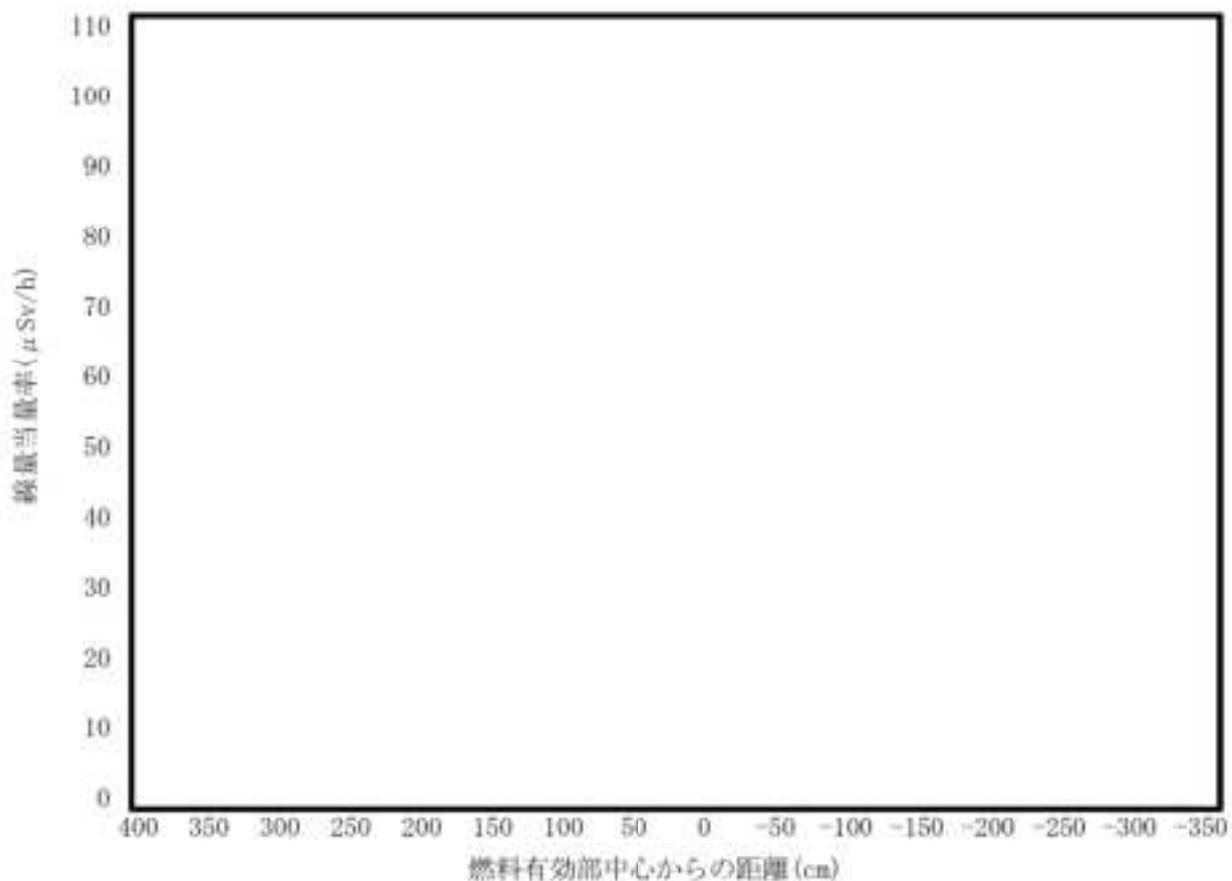
- (注1) MCNP5 解析の線量当量率は、周方向の最大となる方向の MCNP5 解析値である（トラニオン方向も含まれる）。
- (注2) DOT3.5 解析の線量当量率は、頭部径方向・側部・底部径方向の線量当量率分布にトラニオン方向の分布を重ねて示した。
- (注3) 図中の数字部の線量当量率評価結果の差異要因について別紙5-3表に示す。

別紙5-3図 表面の線量当量率分布の比較
(頭部径方向・側部・底部径方向 (トラニオン方向含む))



(注1) 図中の数字部の線量当量率評価結果の差異要因について別紙5-3表に示す。

別紙5-4図 表面から1 m離れた位置の線量当量率分布の比較
(頭部軸方向・底部軸方向)



- (注1) MCNP5 解析の線量当量率は、周方向の最大となる方向の MCNP5 解析値である（トランニオン方向も含まれる）。
- (注2) DOT3.5 解析の線量当量率は、頭部径方向・側部・底部径方向の線量当量率分布にトランニオン方向の分布を重ねて示した。
- (注3) 図中の数字部の線量当量率評価結果の差異要因について別紙5-3表に示す。

別紙5-5図 表面から1 m離れた位置の線量当量率分布の比較
(頭部径方向・側部・底部径方向 (トランニオン方向含む))

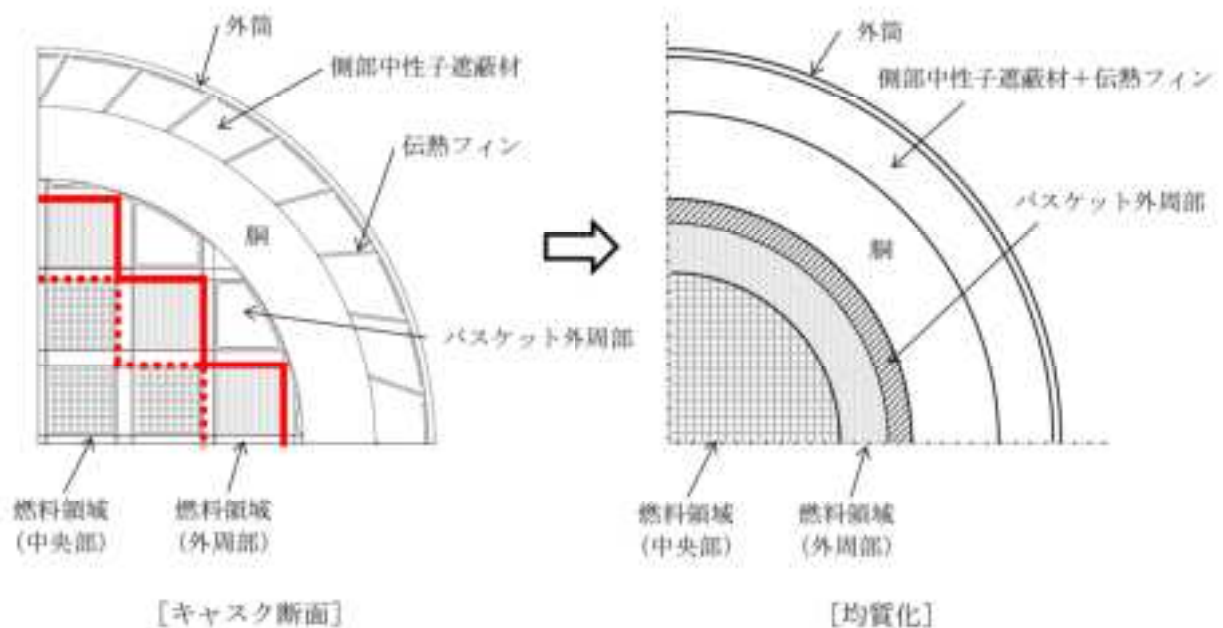
別紙5-3表 評価結果の傾向まとめ

項目	場所	傾向の差分要因	影響
1			
2			
3			
4			
5			

(添付1) DOT3.5 コード解析におけるキャビティ内均質化について

DOT3.5 コードを用いた遮蔽解析において、キャビティ内の燃料、バスケット、伝熱フィン、コードの制約上、均質化した円筒形状としてモデル化している。均質化方法を別紙5-6図及び別紙5-7図に示す。

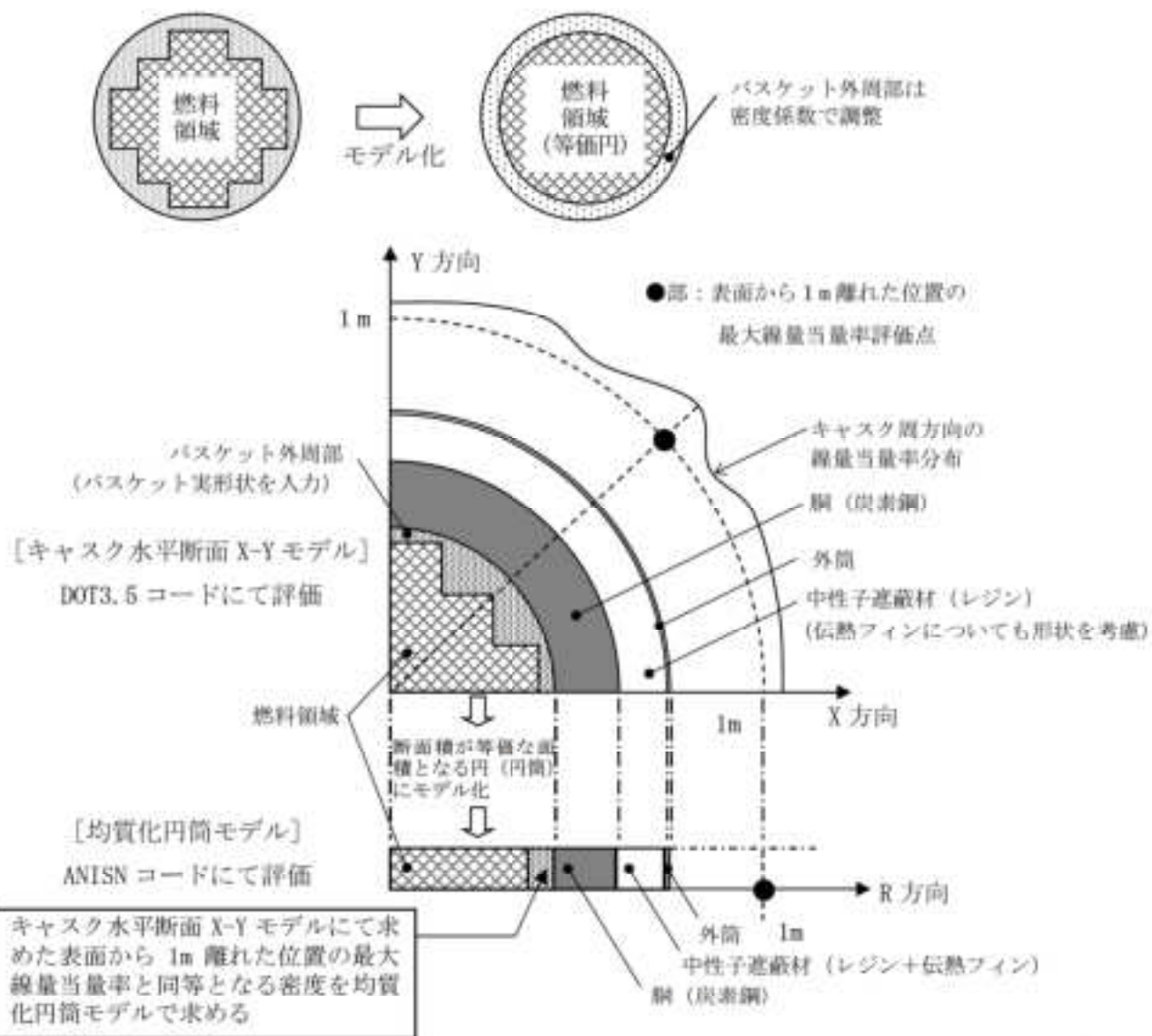
DOT3.5 コードは、実形状（評価点に対して線源となる燃料領域の位置が非均等な形状）のキャスク断面の燃料領域と解析モデル断面の燃料領域が同じ面積となるように均質円筒モデル化し、均質化モデルのキャスク表面から1 m離れた位置における線量当量率が実形状でのキャスク表面から1 m離れた位置における局所的に最大となる線量当量率と同等となるよう、バスケット外周部の密度補正係数を設定する。全周囲に対して局所的な線量当量率と同等となるよう設定しているため、保守的な評価となる。



DOT3.5 コードによる遮蔽解析モデルへの入力

本体モデルの解析では、円筒形状での入力となるため、燃料領域の断面積と等価な面積となる円（円筒）にモデル化している。その際、燃料領域は使用済燃料集合体とバスケットを均質化した物性値を設定した。

別紙5-6図 キャスク中央断面の実形状と解析モデル



バスケット外周部の均質化

バスケット外周部は円周方向に不均一な厚さとなっている構造であることから、本体モデルでは下記に示す手法により、バスケット外周部の密度を設定している。

(i) キャスク水平断面 X-Y モデル遮蔽解析

キャスク水平断面 X-Y モデルによる表面から 1m 離れた位置での最大線量当量率を算出する。

※算出位置を表面から 1m 離れた位置としているのは、表面位置に比べ、基準線量当量率に対する裕度が少ないためである。

(ii) キャスク均質化円筒モデル遮蔽解析

別紙 5-6 図により設定した均質化モデルにて、表面から 1m 離れた位置での線量当量率が (i) で算出した最大線量当量率と同等となるバスケット外周部の密度係数を算出する。

(i) にて算出したバスケット外周部の密度係数を用いることで、実形状の最大線量当量率を包絡する結果を得ることができる。

別紙 5-7 図 燃料領域及び側部中性子遮蔽材と伝熱フィン領域のモデル化の詳細

(添付2) DOT3.5 コード解析におけるトランニオン部評価について

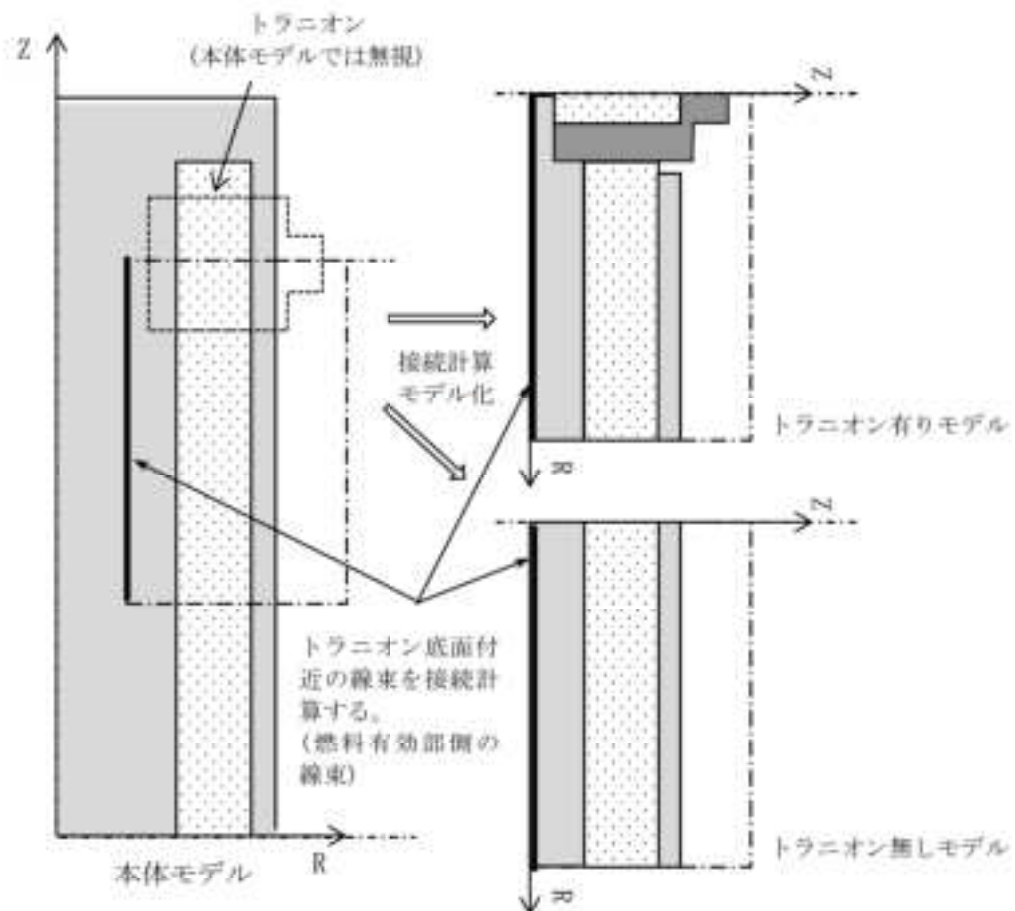
DOT3.5 コードを用いた遮蔽解析において、トランニオン部は DOT3.5 コードを用いて実形状を模擬して別途モデル化し、評価している。

別紙5-8図に示すとおり、トランニオンを無視した本体モデルにて得られたトランニオン底面付近の線束を、別途モデル化した R-Z 体系のトランニオンモデルに接続している。

トランニオン部の線量当量率は、トランニオン有りモデルとトランニオン無しモデルの線量当量率結果より、線種ごとの線量当量率結果の比を補正値として求め、本体モデルの線量当量率にその補正値を乗じて評価している。次頁以降に詳細方法を示す。

本手法では、接続計算で引き継ぐ線束は円筒モデルの制約上トランニオン中心を対称として線量当量率の高い燃料有効部側（キャスク中央側）の値を線量当量率の低いキャスク端部側に対しても適用することとなるため、トランニオン部はキャスク端部側において保守的な評価となる。

なお、本保守的な評価傾向は、キャスク表面評価点においては特に顕著であるが、表面から 1 m 離れた位置における線量当量率算出は、キャスク全体からの線量当量率の寄与が支配的でありトランニオン部からの局所的な線量当量率寄与の影響は表面に比べて小さいことから当該影響は小さい。



別紙5-8図 トランニオン部の線束接続計算の概略図

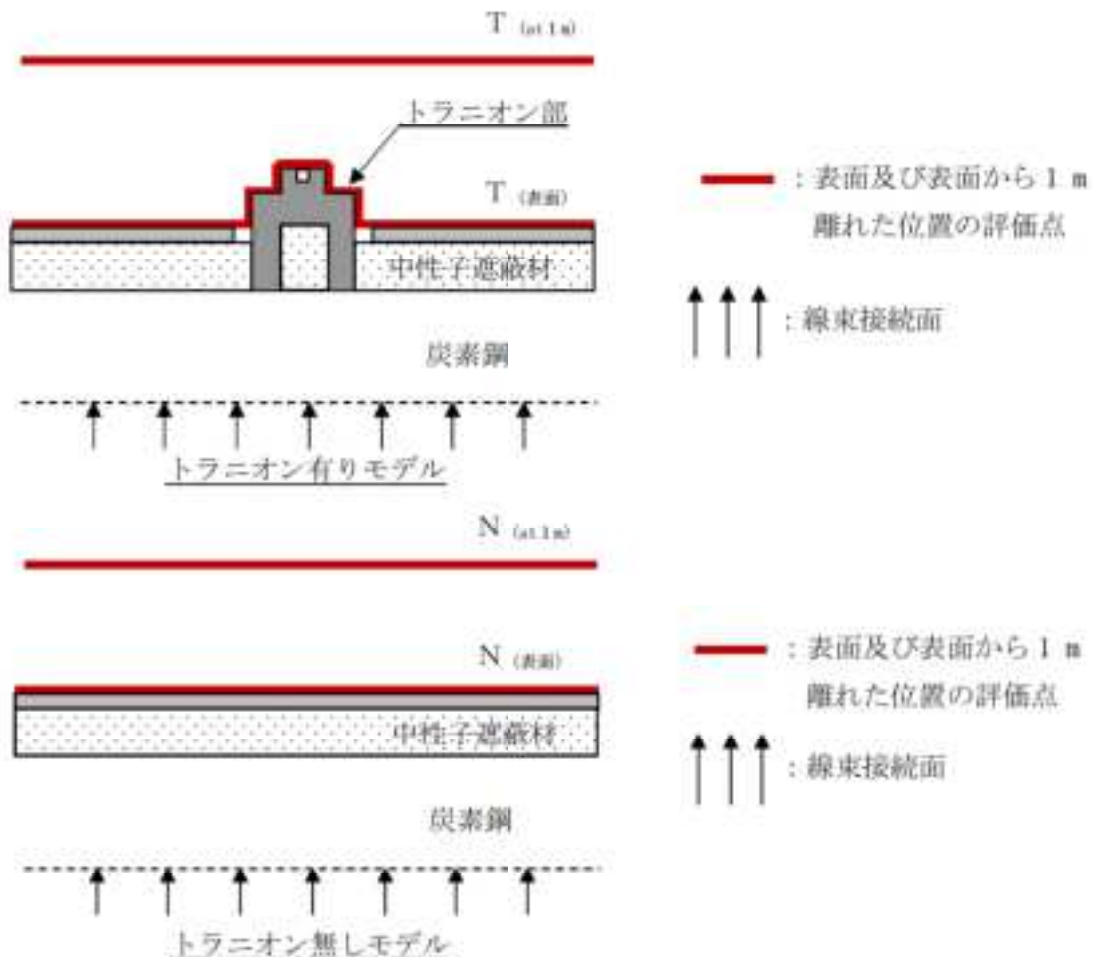
トランニオン部の接続計算の詳細

トランニオン部の線量当量率は、本体モデルにおけるトランニオン部の線量当量率に、別途トランニオン有りモデル/無しモデルで算出した線量当量率補正値を乗じて評価している。
補正値は以下の手順で算出している。

ステップ-1]

トランニオン有りモデルとトランニオン無しモデルを用いた線束接続計算より、表面及び表面から1 m離れた位置の線量当量率を算出する。
各モデル及び位置の線量当量率を別紙5-9図に示すとおり定義する。

トランニオン有りモデル：表面の線量当量率を $T_{(表面)}$
表面から1 m離れた位置の線量当量率を $T_{(at 1m)}$
トランニオン無しモデル：表面の線量当量率を $N_{(表面)}$
表面から1 m離れた位置の線量当量率を $N_{(at 1m)}$



別紙5-9図 トランニオン部の線量当量率の定義

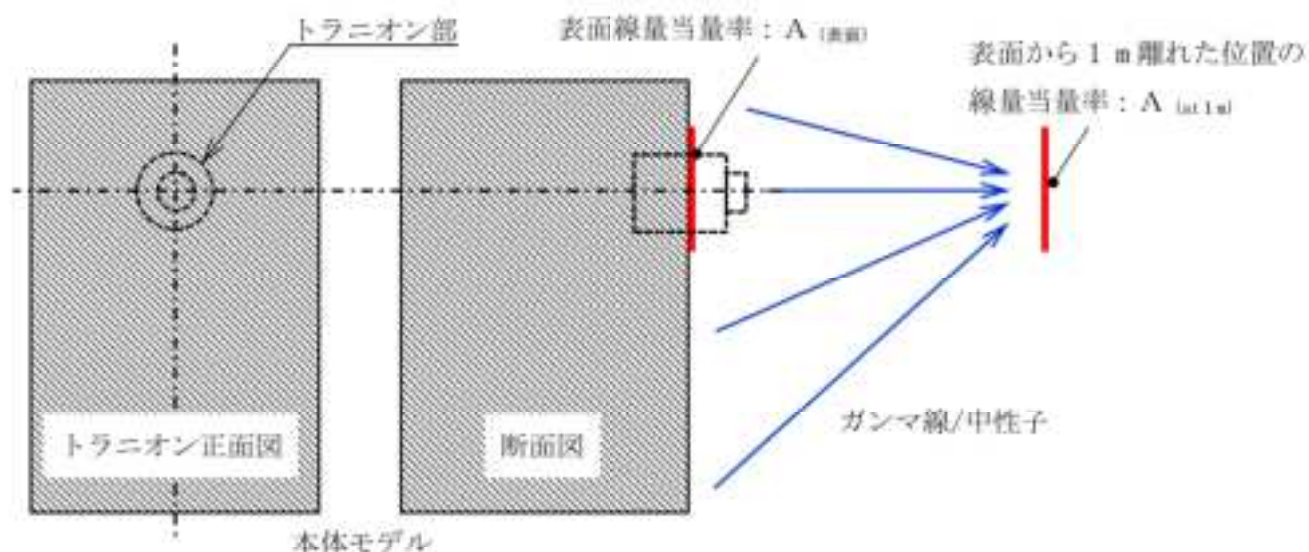
ステップ-2

本体モデルからトランニオン部の線量当量率に寄与する範囲を別紙5-10図に示すとおり定義する。

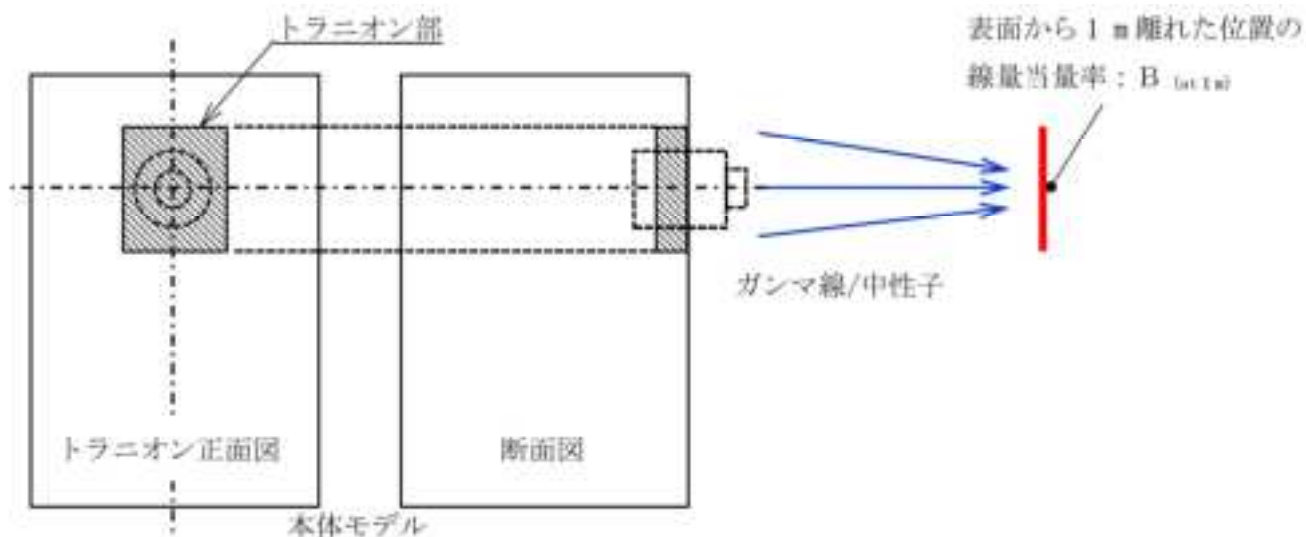
本体モデルの表面の線量当量率： $A_{(表面)}$

本体モデルの表面から1 m離れた位置の線量当量率： $A_{(at1m)}$

本体モデルのトランニオン範囲より寄与する表面から1 m離れた位置の線量当量率： $B_{(at1m)}$



キャスク全体からの線量当量率寄与A



トランニオン部の線量当量率寄与B

別紙5-10図 トランニオン部の線量当量率に寄与する範囲の定義

ステップ-3

ステップ-1、2の結果から下式により頭部径方向（トラニオン部）及び底部径方向（トラニオン部）の線量当量率を算出する。

表面線量当量率は評価点近傍からの寄与で決まるため、以下のとおり線量当量率補正値を考慮する。

トラニオン部表面の線量当量率： $A_{(表面)} \times (T_{(表面)} / N_{(表面)})$

表面から1 m離れた位置の線量当量率はキャスク全体からの寄与で決まるため、以下のとおり線量当量率補正値を考慮する。

トラニオン部表面から1 m離れた位置の線量当量率：

$$A_{(at 1m)} - B_{(at 1m)} + (B_{(at 1m)} \times (T_{(at 1m)} / N_{(at 1m)}))$$

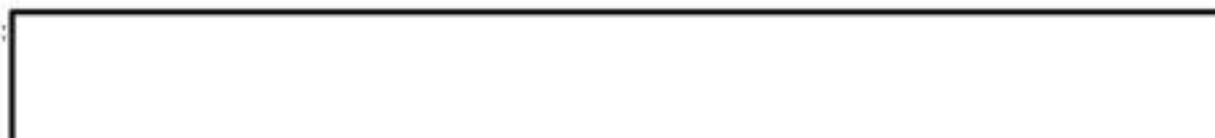
なお、ステップ-1の計算に用いる線束接続面の線束については、保守的に燃料有効部に近い側の線束を、トラニオン底面に接続する。

遮蔽機能データの適用確認方法

技術基準規則第42条の遮蔽評価に用いるソースターム条件として、MSF-24P(S)型の遮蔽機能データを用いる場合は、型式指定申請第26条の適合性評価と同じ手法で求めた線束を用いるものとする（※MSF-24P(S)型の遮蔽機能データの作成方法については、本型式指定申請第26条及び型式証明申請第16条で妥当性確認済）。

設工認申請時に実施する技術基準規則第42条の遮蔽評価では、MSF-24P(S)型の遮蔽機能データを用いた場合、特定兼用キャスク表面での遮蔽機能データに基づく線量当量率が表面以外でも適切に設定されていることの確認方法の一例として、別紙6-1図に示す特定兼用キャスク表面から1 m離れた位置の代表評価点（5点）における遮蔽機能データを用いて計算した線量当量率が、第26条の遮蔽評価結果（別紙6-1表）と同等*となることを確認する方法があげられる。別紙6-2図に遮蔽機能データの確認例のイメージを示す。

*:



この場合、遮蔽機能データとの差異（線量当量率比）を設置（変更）許可申請における線量解析値に加味する（解析値に線量当量率比を考慮する）等で妥当な引き継ぎとする。

別紙6-1表 (1/2) 特定兼用キャスクの表面から1 m離れた位置における代表評価点の線量当量率
(17×17燃料収納時)

(単位：μSv/h)

評価点	頭部		側部	底部		
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	
	②	④		⑧	⑩	
ガンマ線 表面から 1 m	燃料有効部	0.7 (0.5)	23.4 (0.3)	45.1 (0.1)	25.6 (0.3)	5.4 (0.2)
	構造材放射化	7.0 (0.2)	22.8 (0.5)	11.7 (0.2)	12.3 (0.5)	31.5 (0.1)
	二次ガンマ線	0.4 (0.6)	5.1 (0.3)	10.0 (0.3)	5.3 (0.3)	3.8 (0.3)
中性子	56.7 (0.3)	31.5 (0.6)	17.8 (0.2)	30.4 (0.7)	19.4 (0.2)	
合計	64.8	82.8	84.6	73.6	60.1	

※ () 内は統計誤差 (単位：%) を示す。

第3表 (1/2) に示す表面から1 m離れた位置における線量当量率の評価結果と同じ

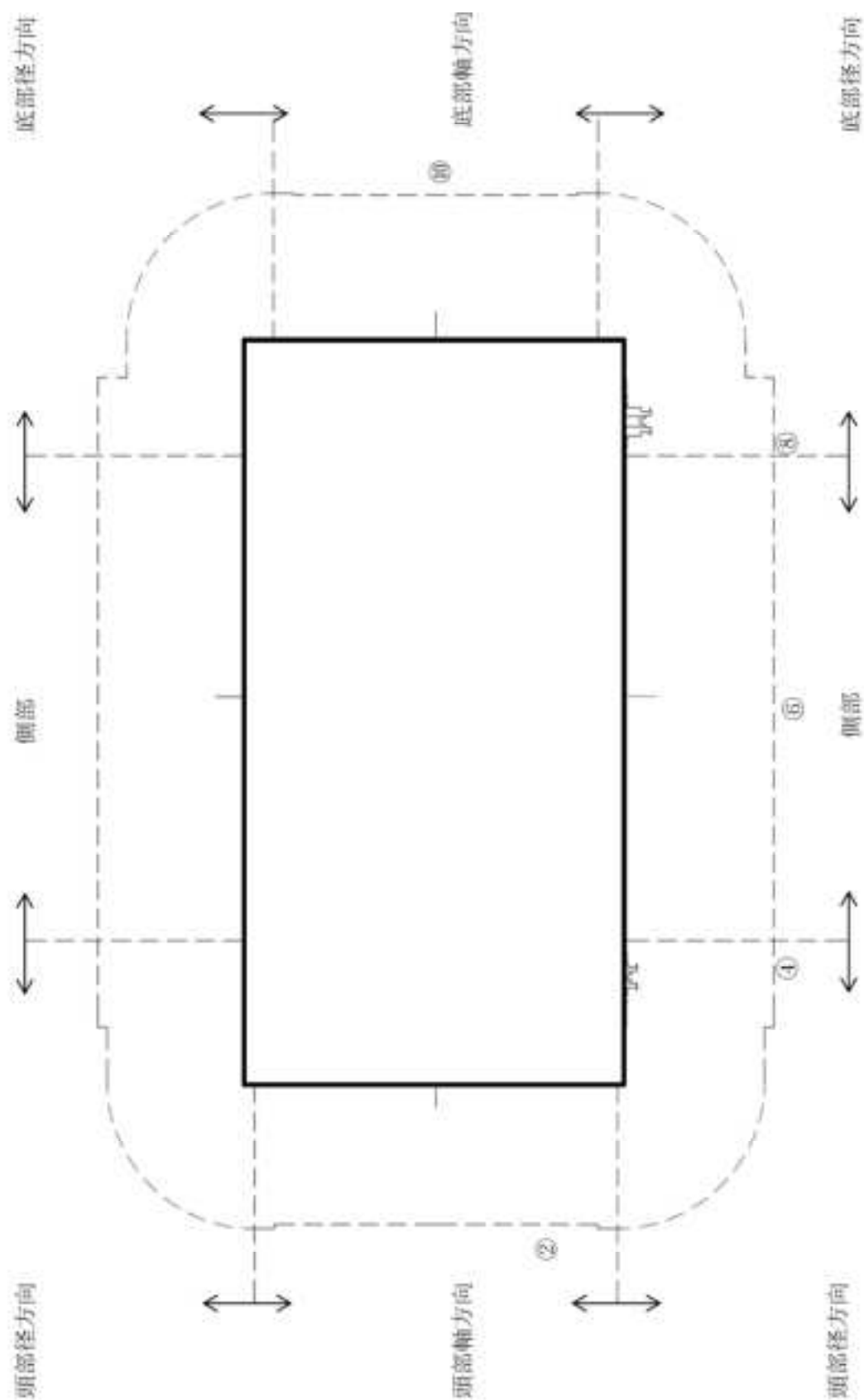
別紙6-1表(2/2) 特定兼用キャスクの表面から1 m離れた位置における代表評価点の線量当量率
(15×15燃料収納時)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部		側部	底部	
	軸方向	径方向		径方向	軸方向
	②	④		⑧	⑩
ガンマ線 表面から 1 m	燃料有効部	0.3 (0.3)	22.5 (0.2)	45.1 (0.1)	26.8 (0.3)
	構造材放射化	1.7 (0.2)	16.3 (0.4)	8.5 (0.2)	8.8 (0.6)
	二次ガンマ線	0.4 (0.7)	5.3 (0.4)	10.5 (0.3)	5.8 (0.4)
中性子	64.7 (0.5)	35.8 (0.9)	18.9 (0.2)	30.9 (1.0)	20.7 (0.2)
合計	67.1	78.9	83.0	72.3	50.4

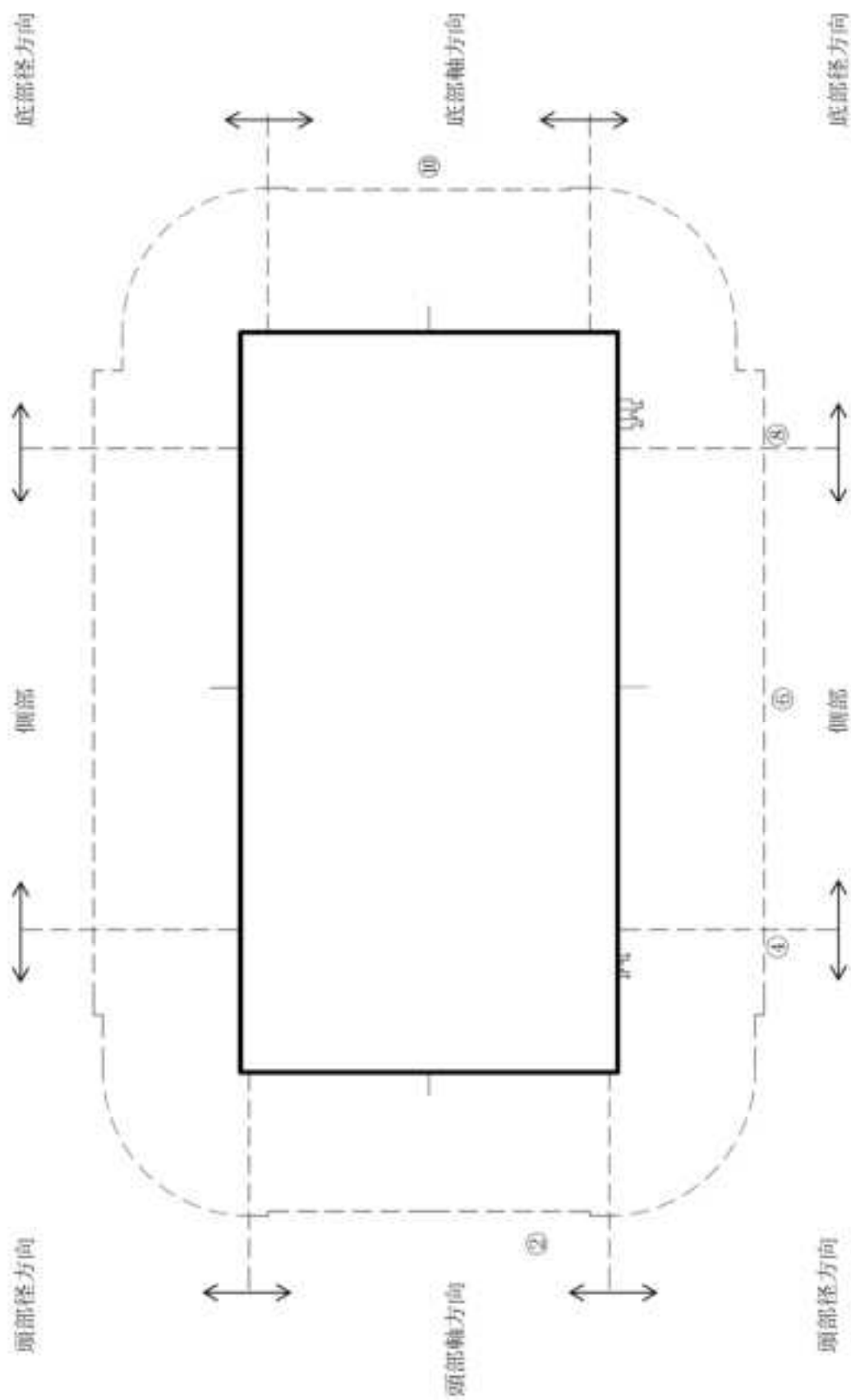
※ () 内は統計誤差 (単位: %) を示す。

第3表(2/2) に示す表面から1 m離れた位置における線量当量率の評価結果と同じ



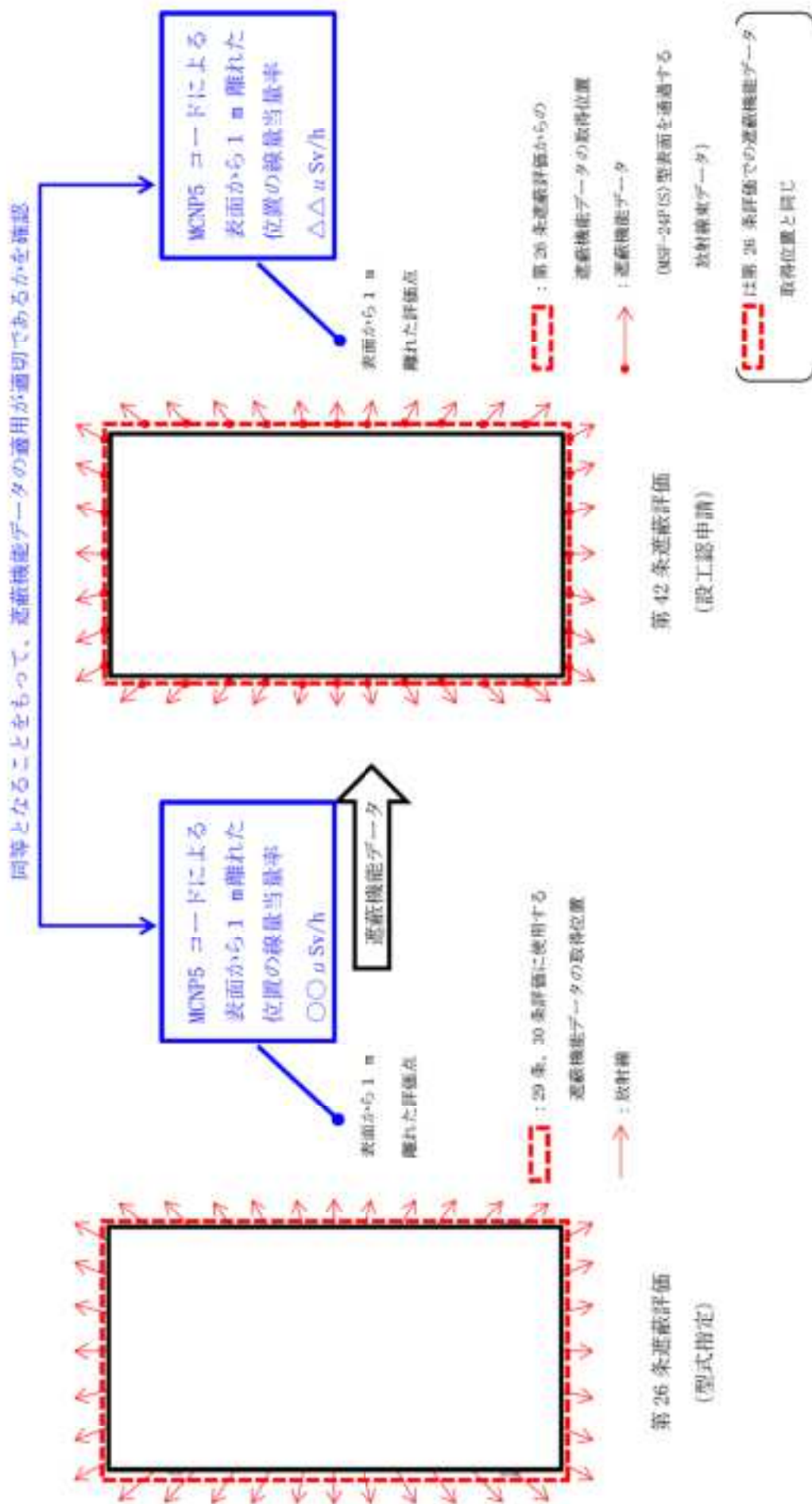
(注) ②, ④, ⑥, ⑧, ⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。
モニタリングポート、バルブ、トラニオンを同一断面に図示している。

別紙 6-1 図 (1/2) 特定兼用キャスタの表面から 1 m 離れた位置における代表評価点
(17×17 燃料収納時)



(注) ②, ④, ⑥, ⑧, ⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。
 モニタリングポート、バルブ、トラニオンを同一断面に図示している。

別紙6-1図(2/2) 特定兼用キャスクの表面から1 m離れた位置における代表評価点
 (15×15 燃料収納時)



別紙 6-2 図 遮蔽機能データ確認イメージ