

補足説明資料 16-3

16条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

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	20
4. 遮蔽機能データ	37
5. 参考文献	42

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 ^{239}Pu の核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性

別紙 4 三次元輸送計算コード MCNP5 による遮蔽解析結果の詳細

別紙 5 二次元輸送計算コード DOT3.5 と三次元輸送計算コード MCNP5 による遮蔽解析結果比較

別紙 6 三次元輸送計算コード MCNP5 による A 型燃料の包絡性確認

別紙 7 遮蔽機能データの適用確認方法

1. 要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、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) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則第 16 条第 4 項一号

- ・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ものとする。

b. 設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条 2 項

第 16 条第 4 項第 1 号に規定する「適切な遮蔽能力を有する」とは、第 5 項に規定するもののほか、以下をいう。

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第 4 条第 1 項第 3 号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすこと。

▶ 貯蔵事業許可基準規則解釈第 4 条第 1 項第 3 号

三 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、遮蔽機能に関する評価で考慮した使用済燃料の燃焼度に応じた当該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が講じられること。

- ・兼用キャスク表面の線量当量率が 1 時間当たり 2 ミリシーベルト以下であり、かつ、兼用キャスク表面から 1 メートル離れた位置における線量当量率が 1 時間当たり 100 マイクロシーベルト以下であること。
- ・貯蔵建屋（工場等内において兼用キャスクを収納する建物をいう。以下この条において同じ。）を設置する場合には、当該貯蔵建屋の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下したときにおいても、工場等周辺の実効線量は周辺監視区域外における線量限度を超えないこと。

なお、当該貯蔵建屋が損傷したときからその遮蔽機能の応急の復旧が完了するまでの間は、第 29 条に規定する「通常運転時」には当たらない。

c. 設置許可基準規則解釈別記 4 第 16 条 5 項

第 16 条第 2 項第 1 号ハ及び同条第 4 項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。

- ・設計貯蔵期間を明確にしていること。

- ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

(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%のいずれかが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

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 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。

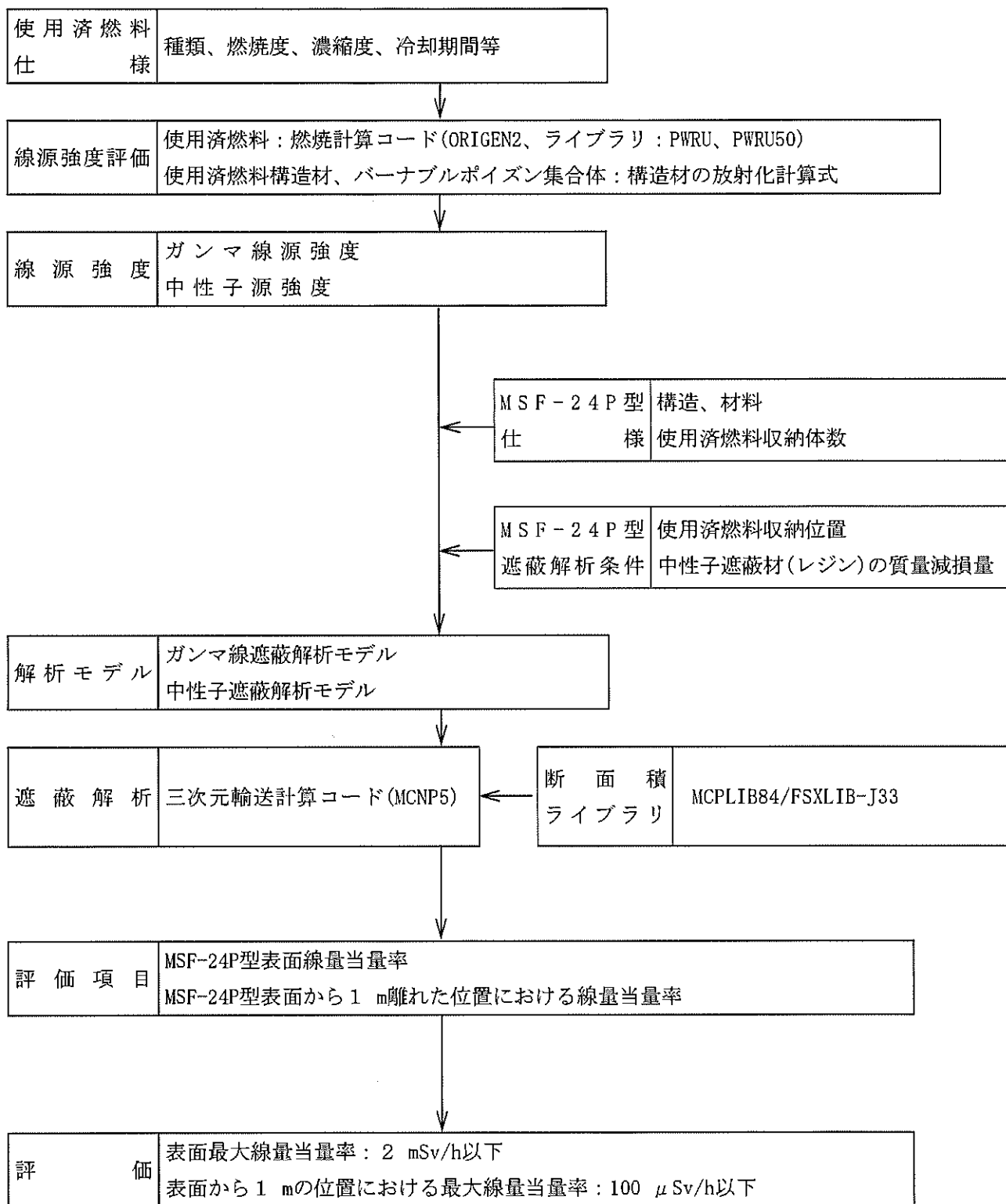
2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

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 μ Sv/h 以下とすること。

MSF-24P 型は、使用済燃料からの放射線を MSF-24P 型のガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により遮蔽する。ガンマ線遮蔽材には、鋼製の材料を用い、中性子遮蔽材には、水素を多く含有するレジンを用いる。

MSF-24P 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。



第1図 遮蔽解析フロー図

(1) 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。

(2) MSF-24P 型の線量当量率評価方法

MSF-24P 型の線量当量率は、MSF-24P 型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あたっては、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。

線量当量率評価は、三次元輸送計算コード 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。燃料タイプについては第 1 表に示す条件のうち、17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A型）及び 15×15 燃料 48,000MWd/t 型（A型）を代表とする^(注)。

(注) A型燃料を代表燃料として評価することの妥当性は、別紙 1 及び別紙 6 に示すとおり線源強度の比較及び最大線量当量率の比較にて確認している。

(3) 遮蔽解析モデル

遮蔽解析は、MSF-24P 型の実形状を基に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。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。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。

(4) 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 $4.1 \pm \square$ wt% 及び $4.0 \pm \square$ wt% を保守的に \square wt% 及び \square 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

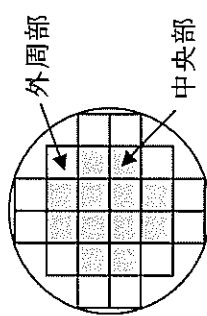
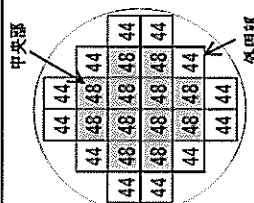
－中性子遮蔽材は、評価期間中の熱的影響により質量減損（2.0 %程度）が発生するため、遮蔽評価上、保守的に 2.5 %の質量減損を考慮（原子個数密度で考慮）する。

－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。

－緩衝体は、安全側に空気に置き換え、距離のみ考慮する。

－バ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) 遮蔽解析における収納物条件の概要

項目	17×17 燃料			
	キャスタク収納位置制限	解析条件		
	中央部	外周部	中央部	外周部
燃料集合体 1体の仕様	種類	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型)
	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)	≤48	≤44	44
収納物仕様	冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17		15
	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90	-	90
	冷却期間 (年)	≥15	-	15
MSF-24P型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		46
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48GWd/t、外周部の最高燃焼度は44GWd/t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。

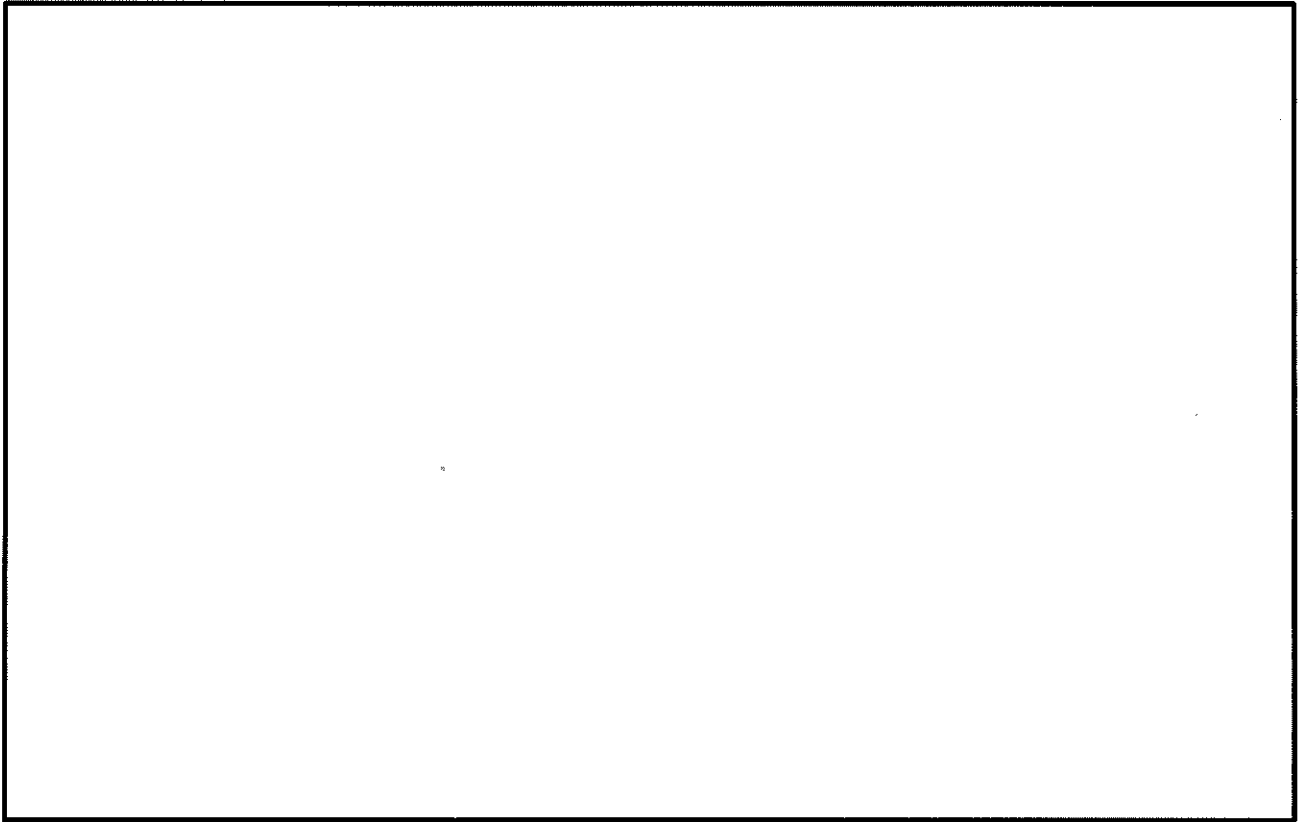
[]内は商業機密のため、非公開とします。

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	
		中央部	外周部	中央部	外周部
燃料集合体 1体の仕様	種類	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型)	
	初期濃縮度 (wt%)	39,000MWd/t型 (A型・B型)	39,000MWd/t型 (A型・B型)	□	
収納物仕様	ウラン重量 (kg)	≤4.1		□	
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	48	44
	冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17		15	
	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90	—	90	—
バーナブル ポイズン集合体 の仕様	冷却期間 (年)	≥15	—	15	—
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		46	
配置 (注1) (注2)	配置 (注1) (注2)				

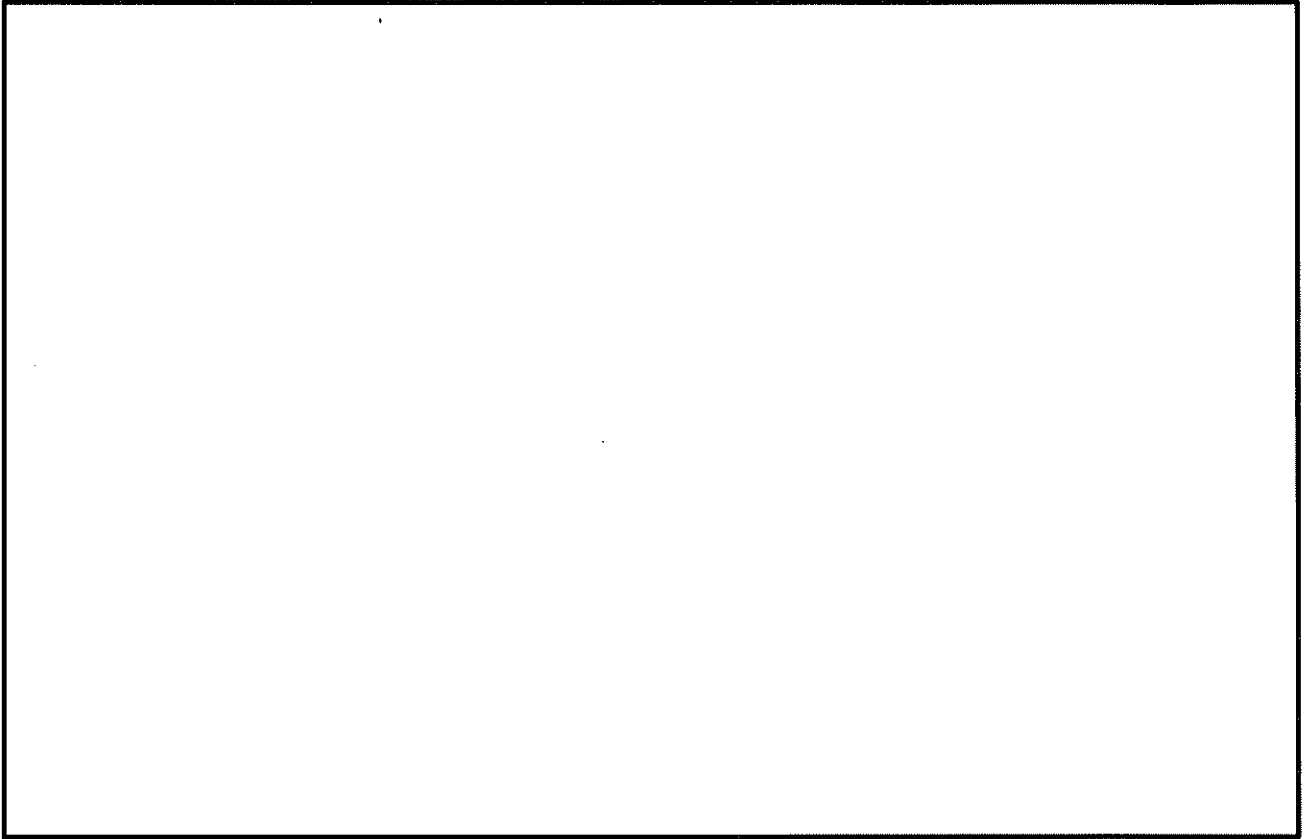
(注1) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

(注2) 中央部の最高燃焼度は48GWd/t、外周部の最高燃焼度は44GWd/t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。



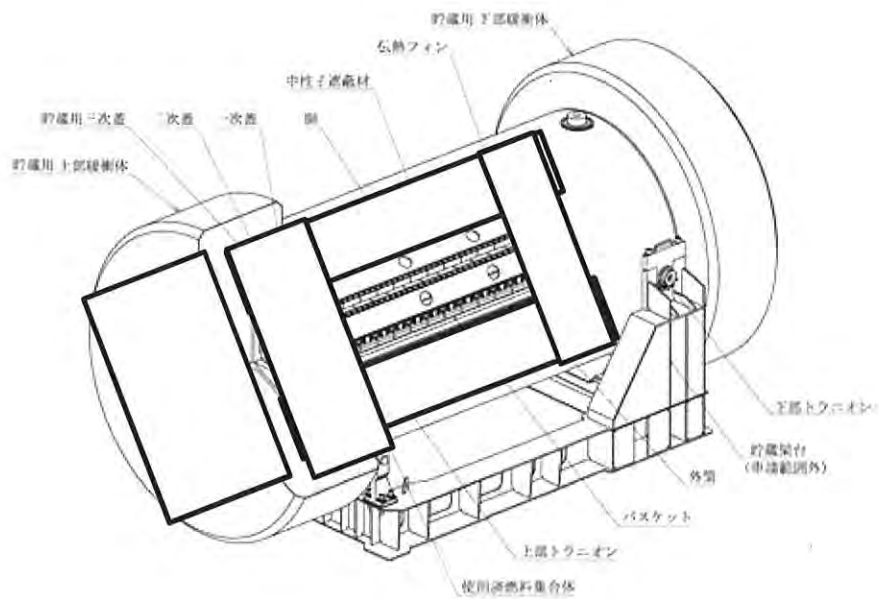
---- 相对燃焼度分布設定値

第 2 図 (1 / 2) 軸方向燃焼度分布の設定 (17×17 燃料)



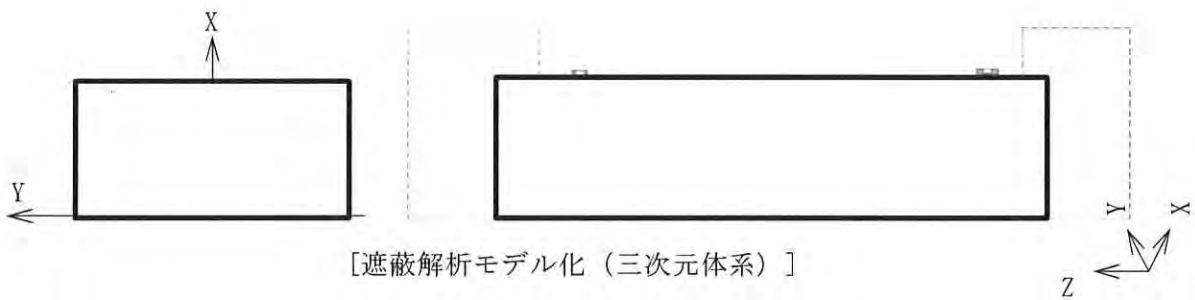
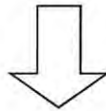
---- 相对燃焼度分布設定値

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

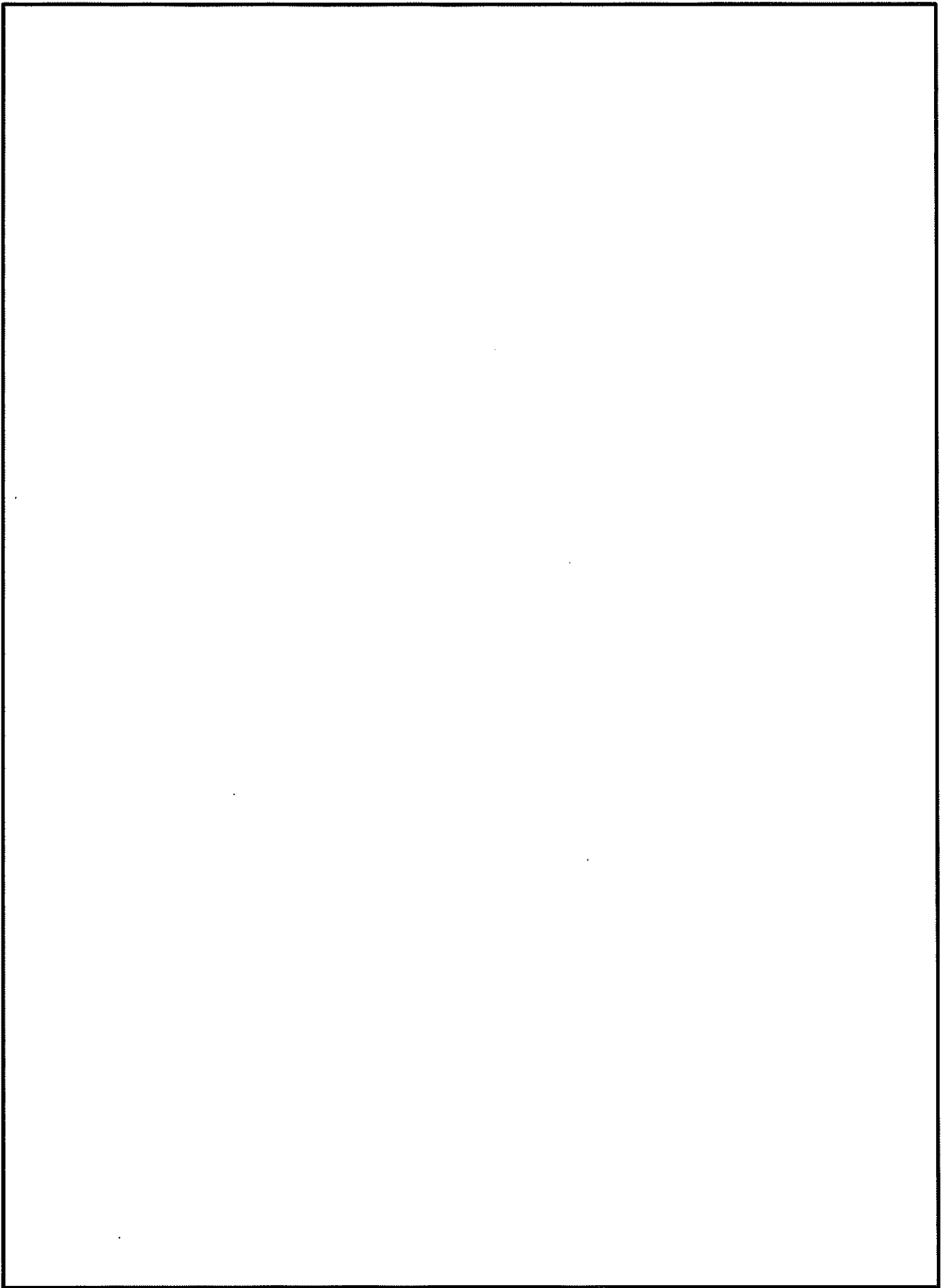


[遮蔽解析モデル化（三次元体系）]

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。

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	貯蔵用三次蓋、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、モニタリングポート部
真空	貯蔵用緩衝体（空気）

第3図 遮蔽解析モデル化概要



第4図 遮蔽解析モデル

(5) 評価結果

MSF-24P 型の遮蔽評価結果を第 2 表に示す。

MSF-24P 型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。

第 2 表 線量当量率評価結果

項 目	評 価 結 果		評 価 基 準	備 考
	17×17 燃料 収納時	15×15 燃料 収納時		
表面線量当量率	0.79 mSv/h	0.81 mSv/h	2 mSv/h 以下	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。
表面から 1 m 離れた 位置における 線量当量率	85 μ Sv/h	83 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	

第3表 (1/2) 線量当量率評価結果 (17×17燃料 (A型) 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
表面	ガンマ線		⑤	⑧	
	燃料有効部	<0.1 (6.6)	113.6 (0.9)	91.3 (3.2)	6.5 (1.0)
	構造材放射化	0.2 (1.8)	26.8 (0.9)	69.1 (3.8)	37.9 (0.6)
	二次ガンマ線	0.3 (3.4)	25.4 (1.2)	12.1 (2.7)	4.8 (1.7)
	中性子	41.3 (1.0)	40.7 (0.9)	616.2 (1.2)	21.8 (0.9)
	合計	41.9 ^(注2)	206.5	<u>788.7</u> [0.79] ^(注1)	71.0
評価点					
表面から1m	ガンマ線		⑥	⑩	
	燃料有効部	<0.1 (1.1)	45.0 (0.3)	27.1 (0.6)	2.9 (0.4)
	構造材放射化	0.2 (0.5)	11.5 (0.2)	13.0 (1.0)	16.8 (0.3)
	二次ガンマ線	0.2 (1.2)	10.0 (0.4)	5.5 (0.5)	1.8 (0.7)
	中性子	20.3 (0.3)	17.7 (0.2)	29.1 (1.0)	12.9 (0.3)
	合計	20.8 ^(注2)	<u>84.2</u> [85] ^(注1)	74.7	34.4

※ () 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1m離れた位置における線量当量率の最大値である。

(注1) []内は型式証明申請書に記載する有効けた2けたでの値 (表面の単位: mSv/h。表面から1mでの単位: $\mu\text{Sv/h}$)。

(注2) 0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

第3表 (2/2) 線量当量率評価結果 (15×15燃料 (A型) 収納時)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

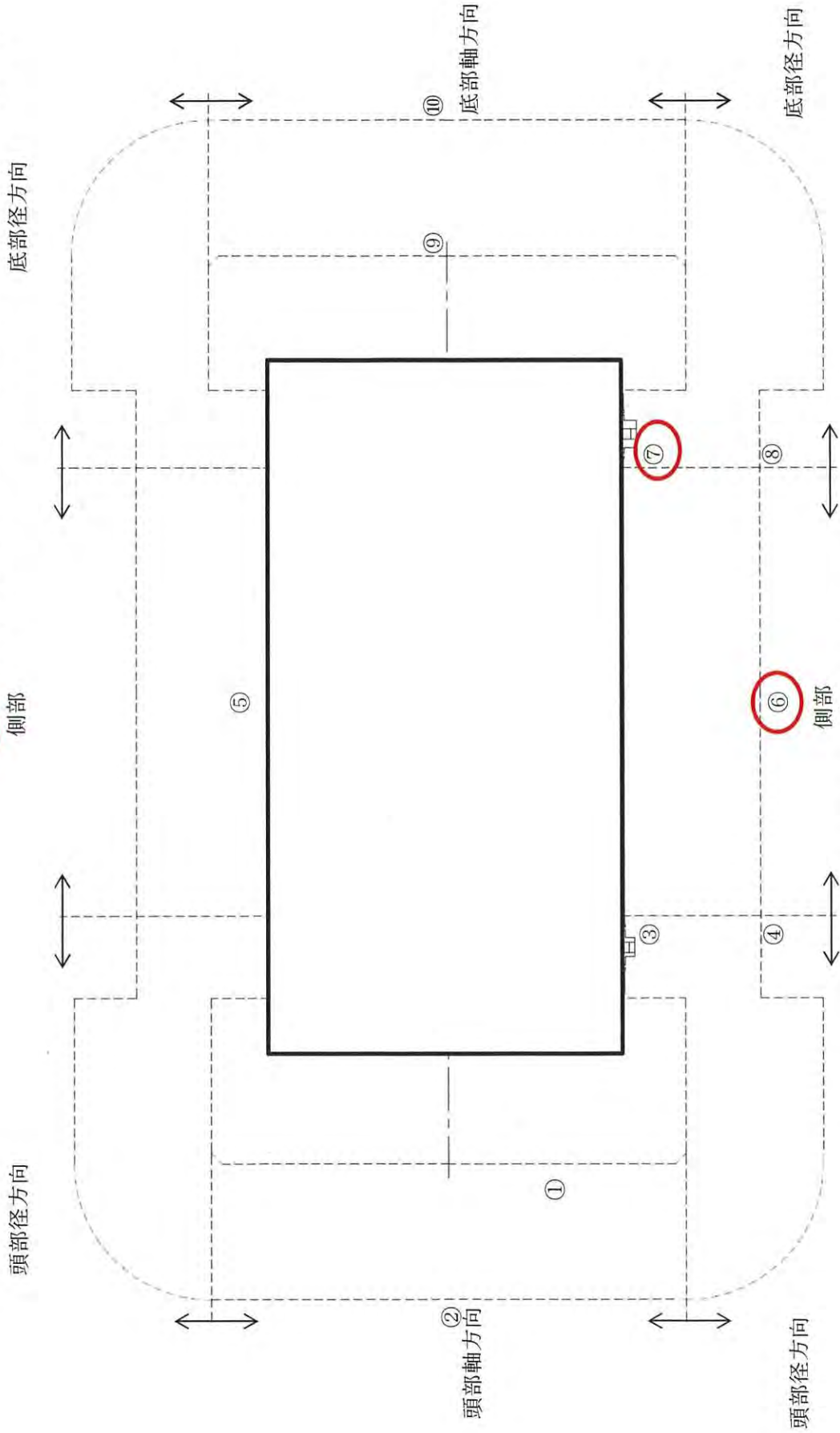
評価点	頭部		側部	底部			
	軸方向	径方向		径方向	軸方向		
	①	③		⑦	⑨		
表面	ガンマ線	燃料有効部	0.1 (4.5)	61.6 (2.0)	108.1 (0.6)	93.1 (4.2)	0.9 (1.2)
		構造材放射化	0.1 (2.1)	114.3 (1.2)	19.3 (0.6)	43.3 (1.6)	1.7 (1.1)
		二次ガンマ線	0.3 (3.5)	10.3 (1.8)	25.5 (1.0)	12.8 (2.0)	1.3 (3.0)
	中性子	45.3 (1.7)	464.4 (0.7)	43.4 (0.5)	655.2 (0.9)	56.3 (1.8)	
	合計	45.8	650.6	196.3	<u>804.4</u> [0.81] (注1)	60.2	
評価点		②	④	⑥	⑧	⑩	
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	0.1 (0.5)	22.4 (0.3)	44.9 (0.2)	25.4 (0.3)	3.1 (0.3)
		構造材放射化	0.1 (0.3)	16.2 (0.5)	8.5 (0.2)	8.3 (0.5)	10.6 (0.2)
		二次ガンマ線	0.2 (1.2)	5.3 (0.4)	10.5 (0.3)	5.5 (0.4)	1.9 (0.6)
	中性子	22.2 (0.2)	35.9 (0.5)	19.0 (0.1)	32.0 (0.6)	14.0 (0.2)	
	合計	22.6	79.8	<u>82.9</u> [83] (注1)	71.2	29.6	

※ () 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1m離れた位置における線量当量率の最大値である。

(注1) []内は型式証明申請書に記載する有効けた2けたの値 (表面の単位: mSv/h。表面から1mでの単位: $\mu\text{Sv/h}$)。

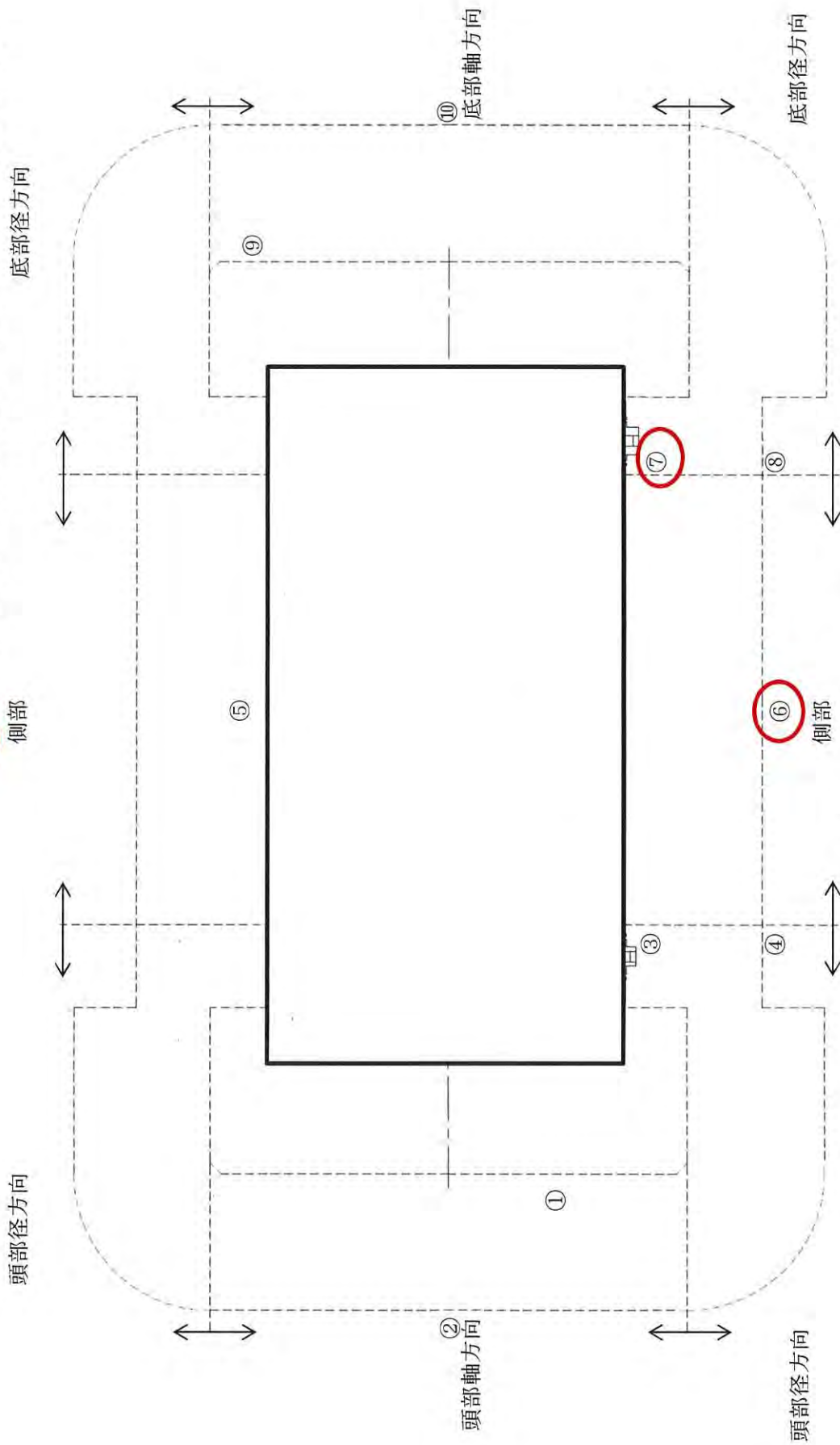
○: 表面及び表面から 1 m 離れた位置における最大線量当量率の位置



(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 (A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
側部



(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 (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 (A型) 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。

敷地境界における実効線量評価及び応急復旧は型式証明申請の範囲外である。

3. 使用する解析コード

MSF-24P 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、輸送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。

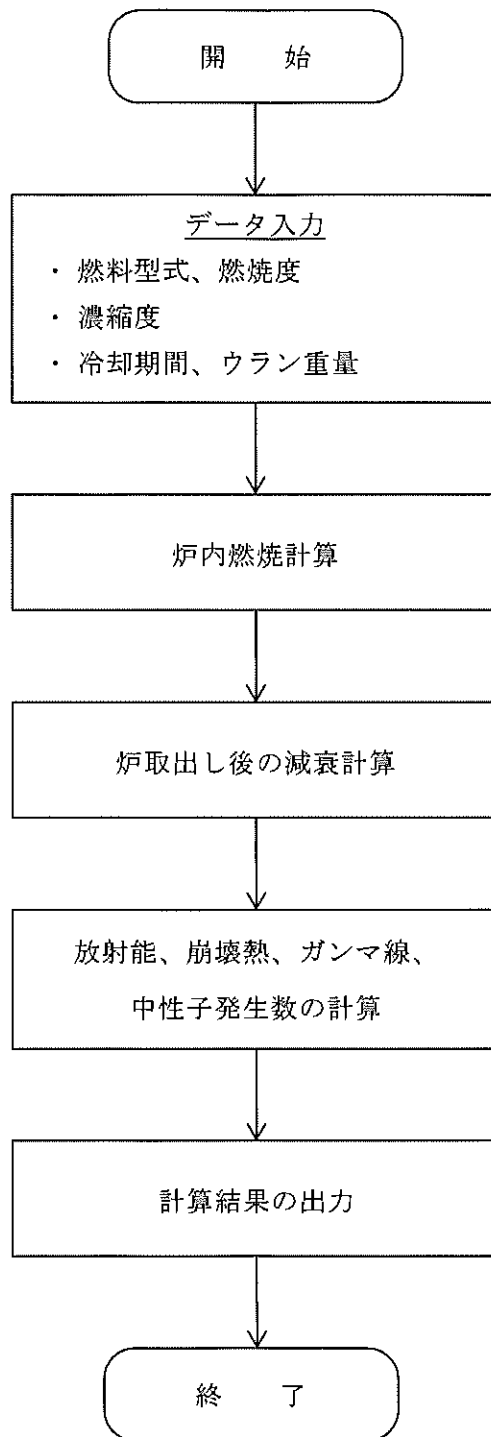
3) 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを第 6 図 (1/2) に示す。

4) 使用実績及び検証

ORIGEN2 コードは、輸送キャスク、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 6 図 (2/2) に示す。



第6図 (1/2) ORIGEN2 コードについて (計算フロー図)

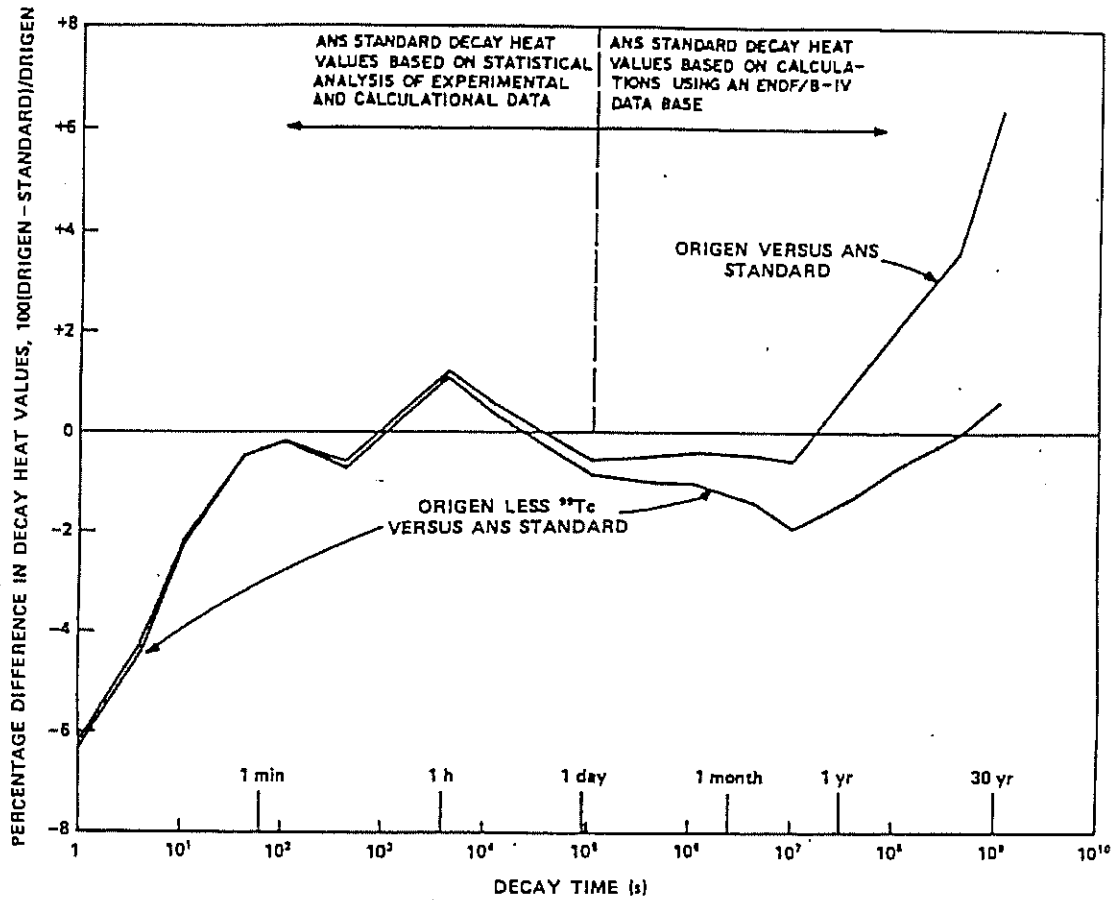


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10¹³-s irradiation of ²³⁵U.

(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 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 ⁹⁹Tc を考慮していないためである。ORIGEN2 コードの解析結果より ⁹⁹Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

第6図 (2/2) ORIGEN2 コードについて (検証例 (2))

(2) MCNP5 コード

1) 概要

三次元輸送計算コード MCNP5⁽³⁾ (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7図に示す。

4) 使用実績及び検証

MCNP5 コードは、放射性物質輸送・貯蔵容器などの遮蔽計算に用いられており、米国では容器の設計基準が確立されている。ガイドライン原案⁽⁴⁾にて解析コードの妥当性検証として類似の遮蔽体幾何形状及び線源条件での比較検証が求められているが、MCNP コードは国内での許認可審査での使用実績^(注)があり、今回の解析対象の線源条件及び解析対象の物理現象が同一であることから、新規性はない。第4表に先行使用実績と今回の解析における解析条件の比較結果をまとめる。また、参考に放射性物質輸送・貯蔵容器などの遮蔽計算として許認可実績の豊富な二次元輸送計算コード DOT3.5 との比較を第5表に示す。

(注)リサイクル燃料貯蔵 (株)、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

さらに MCNP コードについてはガイドライン原案⁽⁴⁾にて、遮蔽解析における適用性が明らかにされている。また、放射性物質輸送・貯蔵容器体系において、実験値と MCNP コードによる解析値との比較が行われており、以下に説明するとおり MCNP5 コードの妥当性を検証している。

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⁽⁵⁾に則り、MCNP5 コードを MSF-24P 型の遮蔽解析に適用することの妥当性確認を以下により実施した。

モデル検証及び妥当性確認として①概念モデルの開発、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判断の4要素の確認を行う必要があるが、①及び②についてはLANLにて実施済みであるため対象外とする。③物理的モデル化については検証が必要となる。④シミュレーションモデルの予測性能の判断については、③物理的モデル化において実験結果を用いた検証を実施するため対象外とする。

MSF-24P型において③物理的モデル化の検証は、第8図及び第9図に示す文献⁽⁴⁾⁽⁶⁾の確認により実施する。

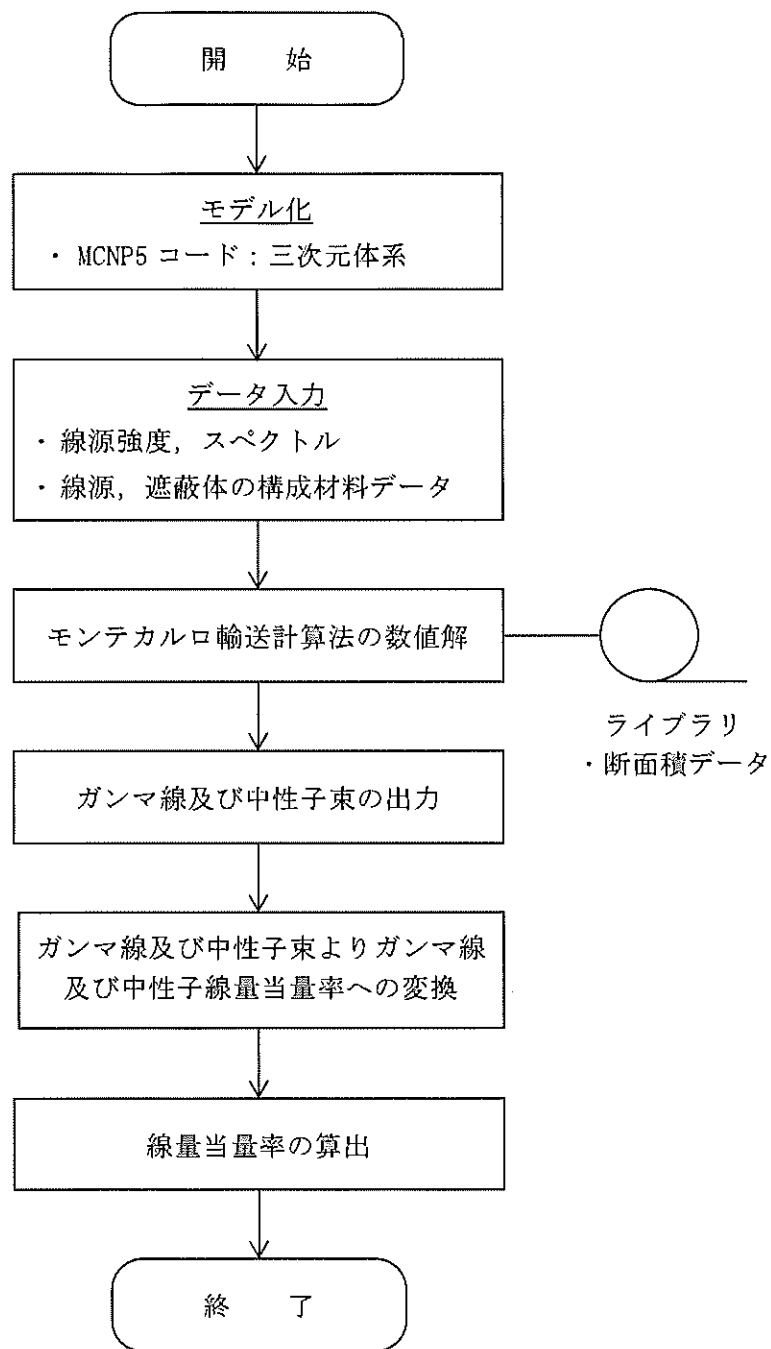
第8図(1/3)及び第8図(3/3)に示すとおり、使用済燃料輸送容器体系での放射線透過試験での測定値に対して、JENDL-3.3に基づく断面積ライブラリFSXLIB-J33並びにENDF/B-IV及びEPDL89に基づく断面積ライブラリMCPLIB02を用いてベンチマーク解析を実施⁽⁴⁾しており、妥当性が検証されている。ベンチマーク解析結果は、測定値と同様の傾向を示している。

また、第9図(1/2)から第9図(2/2)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を用いてベンチマーク解析を実施⁽⁶⁾しており、妥当性が検証されている。ベンチマーク解析結果は、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いる。

妥当性を検証した文献での解析条件とMSF-24P型遮蔽評価での条件の比較を第6表に示す。ライブラリ、線源、モデル化、評価点及び評価手法が文献とMSF-24P型で同様の設定であるため、MSF-24P型評価へのMCNP5コードの適用性は問題ない。なお、第8図に示す結果は、文部科学省原子力試験研究費による「放射性物質輸送容器のモンテカルロ法による遮蔽安全評価手法の高度化に関する研究」として平成19年度～平成23年度の5か年計画で海上技術安全研究所が実施した成果の一部である「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」⁽⁴⁾によるものである。

第6表に示す測定値と評価値の比C/Eに対して、別紙1-7表に示す解析条件の保守性が線量当量率に与える影響が包絡されることから、遮蔽解析の不確実さを考慮してもMSF-24P型運用時の線量当量率測定値は基準値を上回ることが無い。

さらに、MCNP5コードによるMSF-24P型の線量当量率評価は別紙5に示すとおり、許認可実績の豊富な二次元輸送計算コードDOT3.5評価結果とおおむね一致していることを確認している。

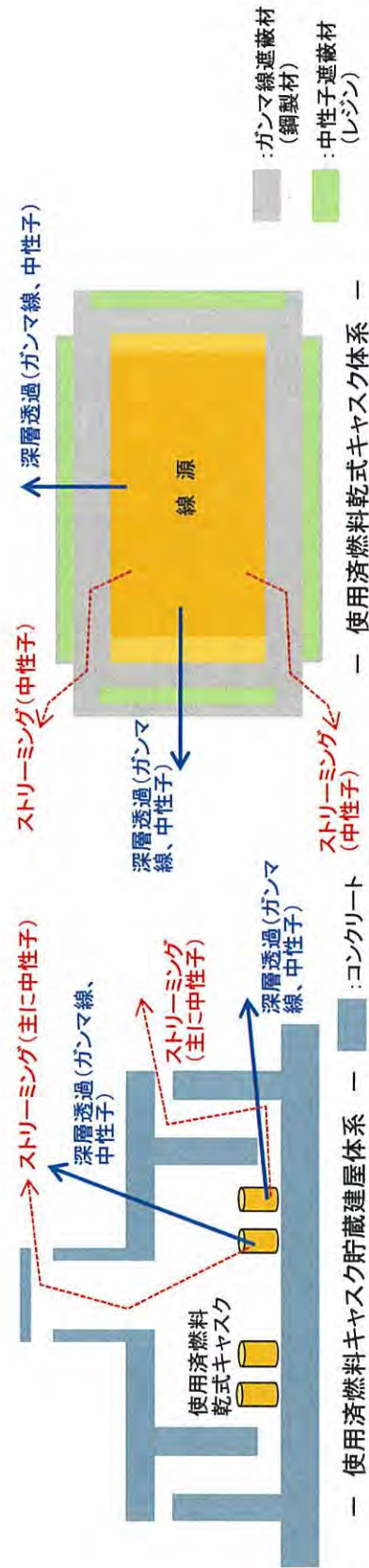


第 7 図 MCNP5 コードの解析フロー

第4表 使用実績のある使用済燃料キヤスク貯蔵建屋の評価内容との比較

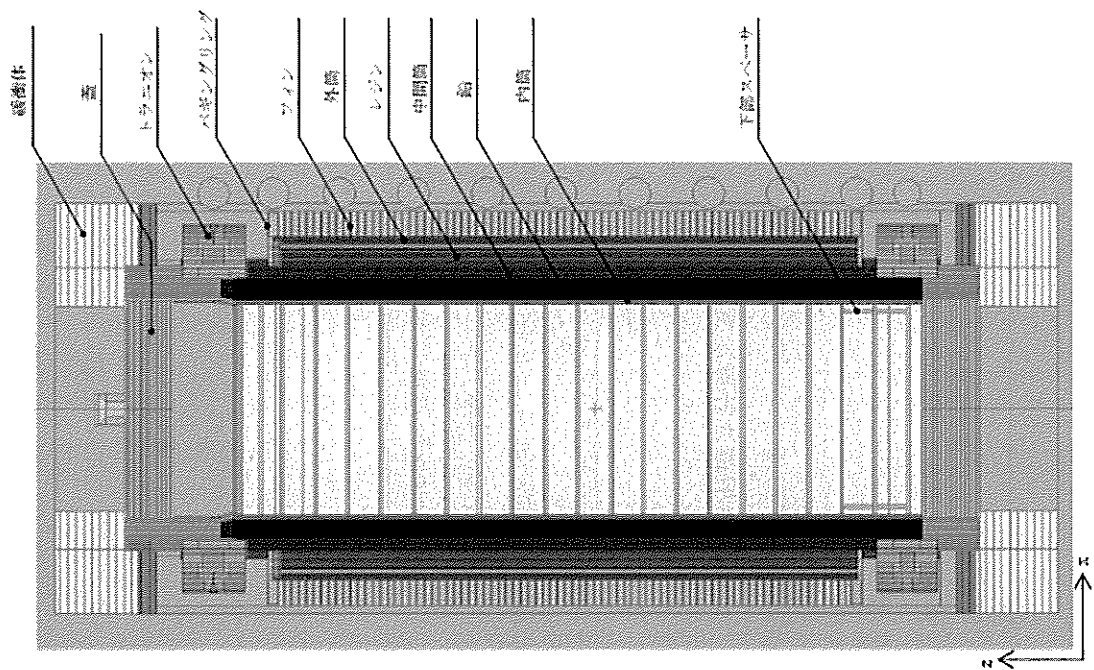
項目	使用済燃料キヤスク貯蔵建屋(注)	MSF-24P 型式証明(使用済燃料キヤスク)	備考
解析コード	MCNP4C	MCNP5	MCNP5はMCNP4Cのバージョンアップ版であり、開発元、解析手法は同一
線源条件	使用済燃料からのガンマ線、中性子	同 左	線源条件は同一
解析対象の物理現象	建屋遮蔽体の深層透過・ストリーミング	キヤスク遮蔽体の深層透過・ストリーミング	下図に示すとおり、いずれも遮蔽体を透過する放射線(深層透過)及び遮蔽体損部を通過する放射線(ストリーミング)を解析が対象であり、物理現象が同一
数学モデル	ボルツマン輸送方程式	同 左	数学モデルは同一

(注)リサイクル燃料貯蔵(株)、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

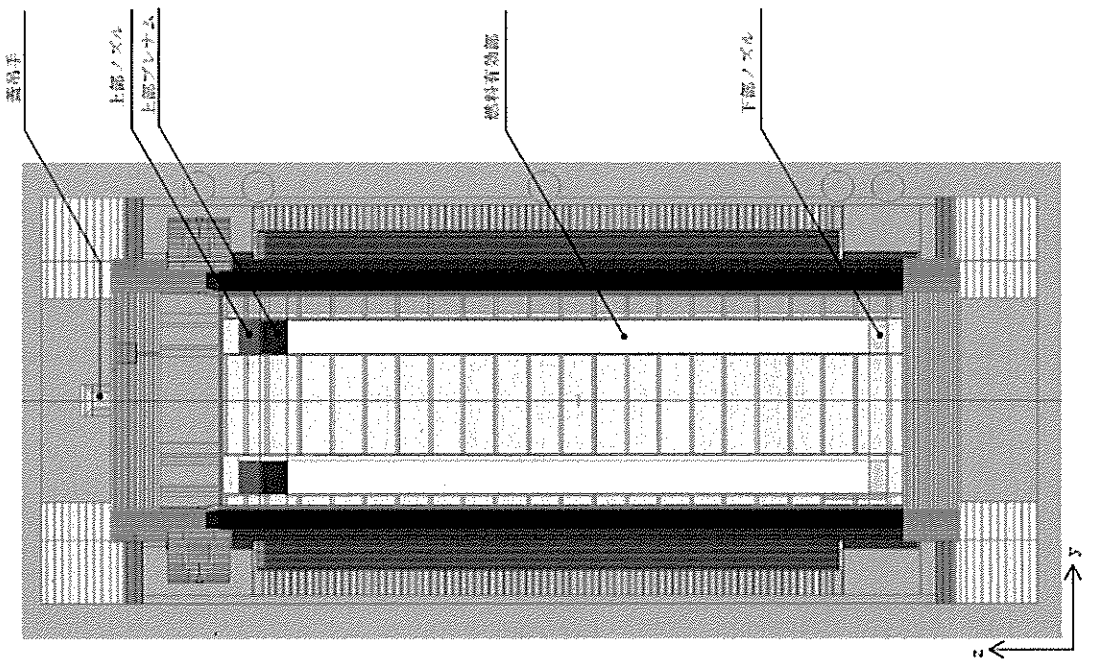


第5表 MCNP5 コード及び DOT3.5 コードの特徴及び許認可審査実績

		MCNP5 コード	DOT3.5 コード	備考
使用方法	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。	
	モデル化	MSF-24P 型全体を三次元でモデル化。	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。	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。
	エネルギー	連続エネルギー。	エネルギー群。	
許認可審査実績		リサイクル燃料備蓄センター (リサイクル燃料貯蔵株式会社)	キヤスク設計承認、型式申請 (MSF-21P、MSF-52B) 等。	DOT3.5 コードによるキヤスク許認可審査では、異なるコードでの確認及び遮蔽欠損部評価の確認として MCNP5 コードを利用。

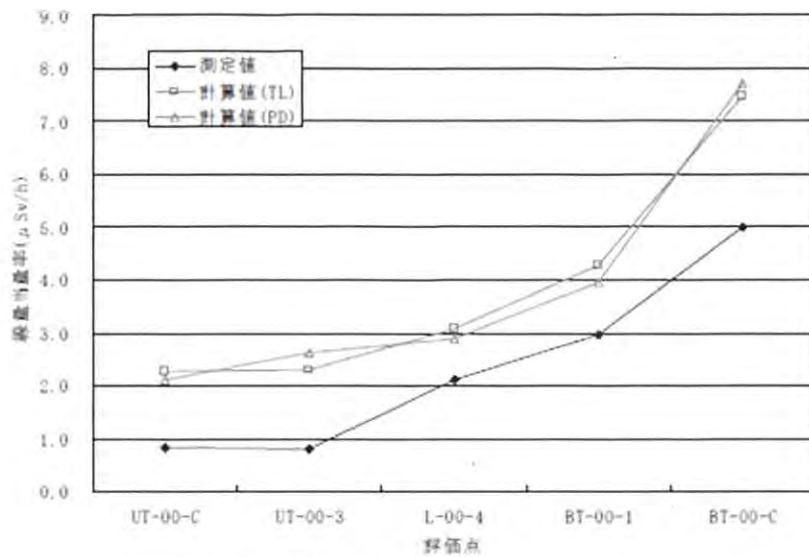


(x-z 断面)

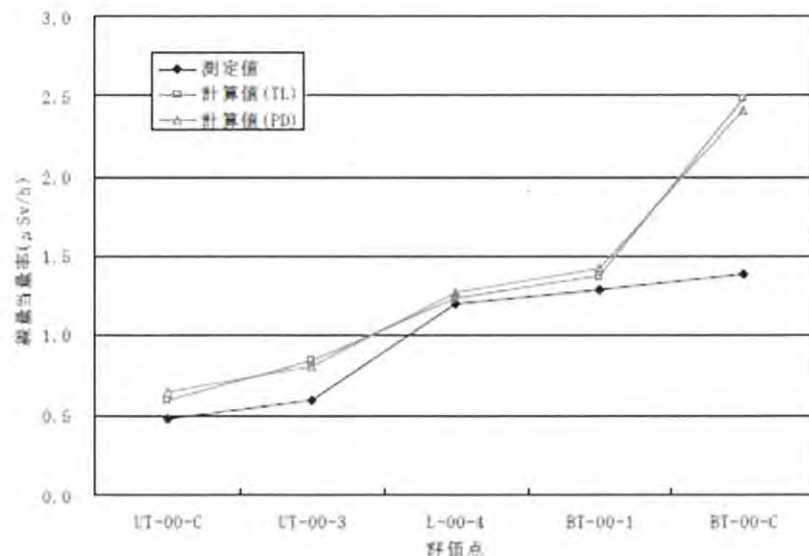


(y-z 断面)

第 8 図 (1/3) NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証⁽⁴⁾ (解析モデル)



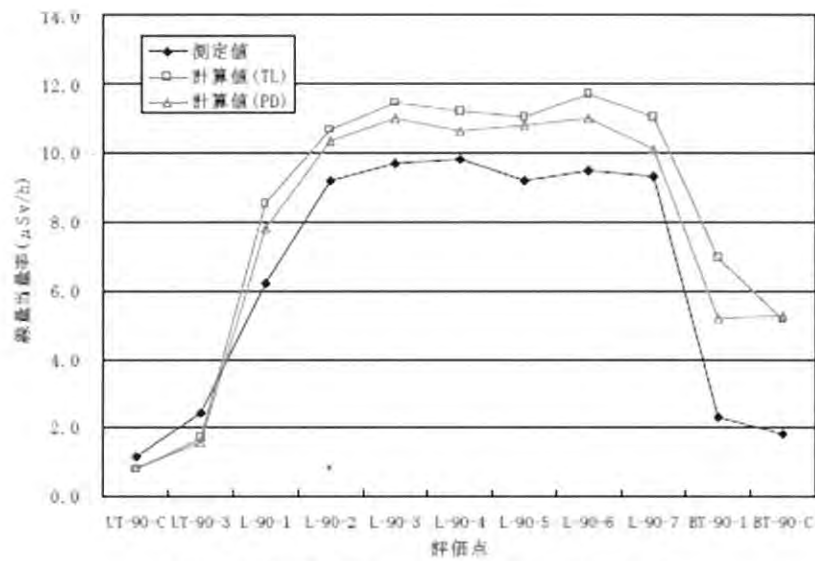
(中性子線量当量率、表面位置 0° 方向)



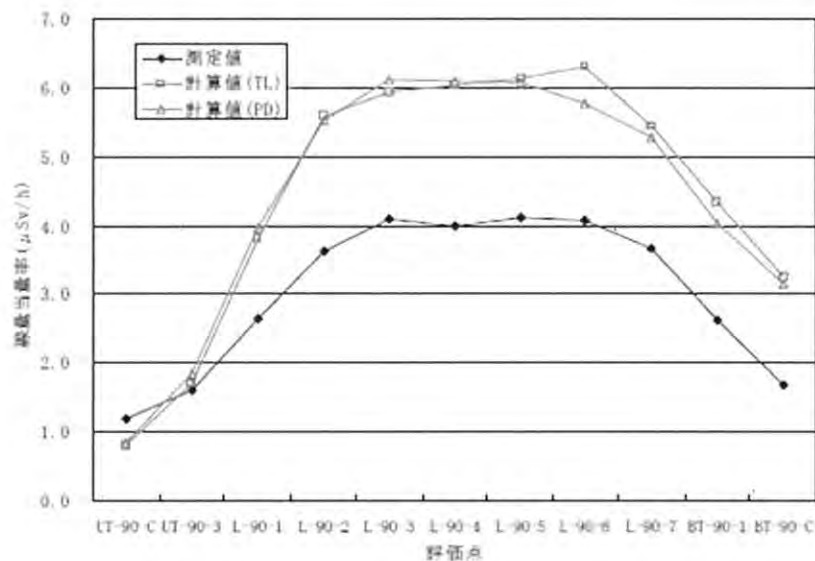
(中性子線量当量率、表面から 1 m 離れた位置 0° 方向)

(注) NFT-14P 型について、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-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、表面では計算値が測定値を大きく上回っているが軸方向の傾向は一致しており、表面から 1 m 離れた位置においては計算値が測定値をやや上回っている。

第 8 図 (2/3) NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証⁽⁴⁾ (評価結果)



(ガンマ線量当量率、表面位置 90° 方向)



(ガンマ線量当量率、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。軸方向上部では計算値が測定値を下回っているが、計算値には端部構造材の放射化ガンマ線による影響が含まれていないためである。表面から 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 8 図 (3/3) NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証⁽⁴⁾ (評価結果)

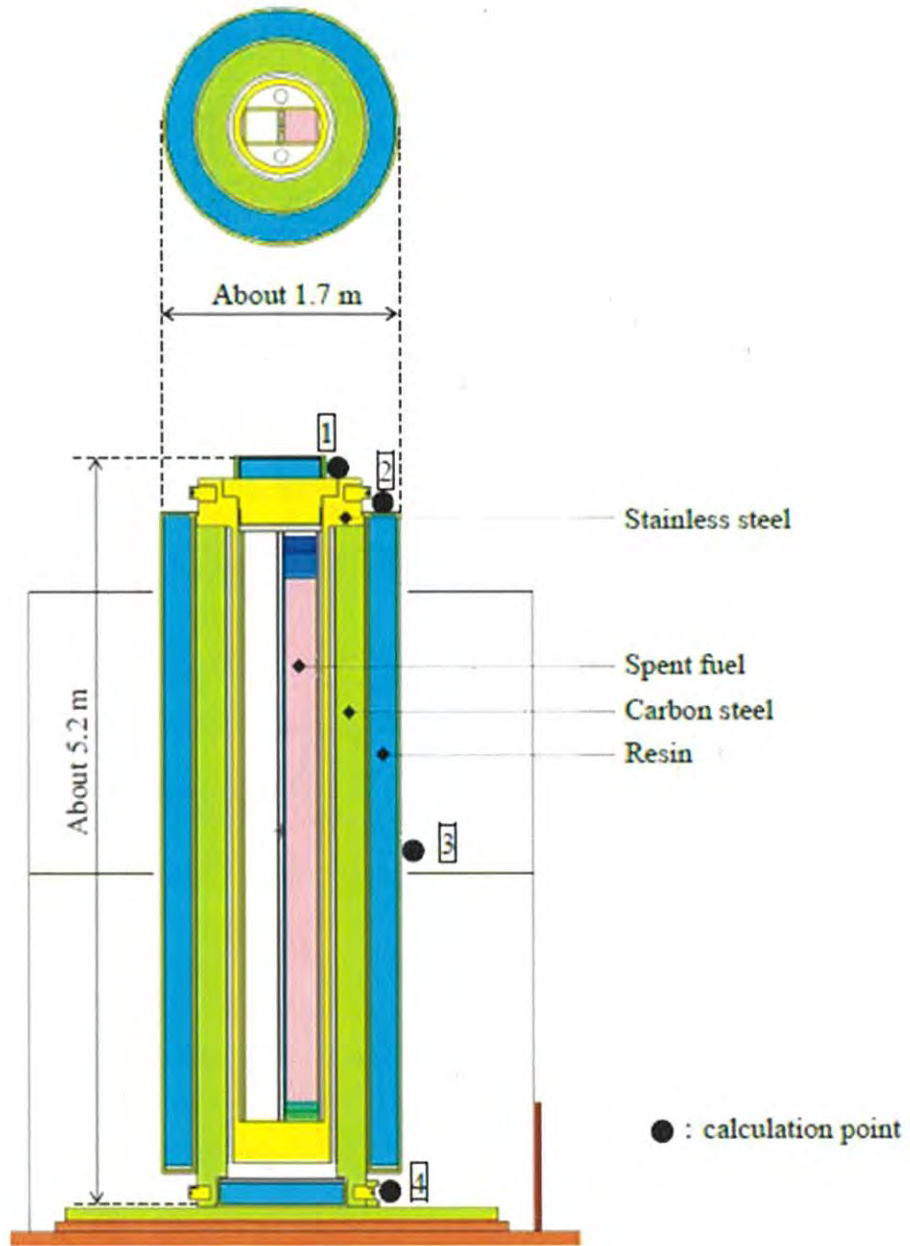


Figure 2. MCNP calculation model for the experiment

第9図 (1/2) 乾式貯蔵容器によるMCNP5コードの検証⁽⁶⁾ (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。

第9図 (2/2) 乾式貯蔵容器による MCNP5 コードの検証⁽⁶⁾ (評価結果)

第6表 (1/3) MCNP5 コードの検証で用いた評価と MSF-24P 型遮蔽評価の条件比較

項目	評価ケース			備考
	ガイドライン原案 ⁽⁴⁾ (第8図)	PATRAM 2019 ⁽⁶⁾ (第9図)	今回の型式証明の 遮蔽解析	
コード	MCNP5	MCNP5 ver. 1.60	MCNP5 ver. 1.60	
ライブラリ	中性子	FSXLIB-J33	FSXLIB-J33	FSXLIB-J33 : JENDL-3.3 を基にしたライブラリ
	ガンマ線	MCPLIB02	MCPLIB84	MCPLIB02 : ELDL89 を基にしたライブラリ MCPLIB84 : EPDL97 を基にした断面積 MCPLIB04 の Doppler broadening data 修正版
線源強度	中性子	ORIGEN2 出力	ORIGEN2 出力	
	燃料有効部 ガンマ線	ORIGEN2 出力	ORIGEN2 出力	
	放射化 ガンマ線	評価していない	⁵⁹ Co 含有量からの 計算値	⁵⁹ Co 含有量からの 計算値
線源 スペクトル	中性子	Watt 型 ²³⁹ Pu 核分裂スペクトル	Watt 型 ²³⁹ Pu 核分裂スペクトル	
	燃料有効部 ガンマ線	ORIGEN2 出力	ORIGEN2 出力	
	放射化 ガンマ線	評価していない	1.17MeV:50% 1.33MeV:50%	1.17MeV:50% 1.33MeV:50%

第6表 (2/3) MCNP5 コードの検証で用いた評価と MSF-24P 型遮蔽評価の条件比較

項目	評価ケース			備考	
	ガイドライン原案 ⁽⁴⁾ (第8図)	PATRAM 2019 ⁽⁶⁾ (第9図)	今回の型式証明の 遮蔽解析		
燃焼度	<ul style="list-style-type: none"> 軸方向分布考慮 実績燃焼度 	<ul style="list-style-type: none"> 軸方向分布考慮 実績燃焼度 	<ul style="list-style-type: none"> 軸方向分布考慮 燃焼度最大値 		
	燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> 使用済 PWR 燃料 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 下側/中央側に寄付き 	<ul style="list-style-type: none"> 使用済 PWR 燃料 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 	<ul style="list-style-type: none"> 使用済 PWR 燃料 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 	
評価モデル	キヤスク	<ul style="list-style-type: none"> 湿式キヤスク 実形状 	<ul style="list-style-type: none"> 乾式キヤスク 実形状 	<ul style="list-style-type: none"> 乾式キヤスク 実形状 	
	緩衝体	木材としてモデル化	なし	キヤスクからの距離のみ考慮	
組成・密度	<ul style="list-style-type: none"> 最小密度 レジン組成カログ値 水組成:発熱量より概算 	<ul style="list-style-type: none"> 最小密度 レジン組成カログ値 	<ul style="list-style-type: none"> 最小密度 レジン組成カログ値 設計貯蔵期間のレジン質量減損考慮 		
寸法公差	考慮しない	考慮しない	密度に考慮		

第6表 (3/3) MCNP5 コードの検証で用いた評価と MSF-24P 型遮蔽評価の条件比較

項目	評価ケース			備考
	ガイドライン原案 ⁽⁴⁾ (第8図)	PATRAM 2019 ⁽⁶⁾ (第9図)	今回の型式証明の 遮蔽解析	
タリー	トラックリング・エスティメータ (F4 Tally) ウエイト ウィンドウ	トラックリング・エスティメータ (F4 Tally) ウエイト ウィンドウ	トラックリング・エスティメータ (F4 Tally, F2 Tally) ウエイト ウィンドウ	ガイドライン原案は、初ストイベント・エスティメータ - (F5 Tally) についても評価。
分散低減法				
評価結果 (計算値/ 測定値)	中性子	0.9~2.89 (第8図参照)	0.90~1.17 (第9図参照)	・ガイドライン原案は F4Tally 結果について記載。C/E<1 のものについては、モデル化していない周囲構造物による中性子反射が考慮できていないため評価値が低くなっている影響。
	ガンマ	0.71~3.10 (第8図参照)	0.90 (第9図参照)	・ガイドライン原案は F4Tally 結果について記載。C/E<1 のものについては、端部構造材の放射化ガンマ線について評価していないことの影響。

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 ⁽⁷⁾ は、MCNP5 等の三次元輸送計算コード用に、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 ⁽⁸⁾ は、MCNP5 等の三次元輸送計算コード用に、JENDL-3.3 に基づく中性子断面積ライブラリとして、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 の信頼性は 4) に示すベンチマーク解析で確認されている。

4. 遮蔽機能データ

MSF-24P 型を貯蔵あるいは保管する施設（以下「貯蔵等施設」という。）の設置にあたっては、設置許可基準規則第 29 条及び第 30 条に適合する必要があるとあり、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^(注)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 型に収納する燃料について、型式証明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、型式証明の遮蔽機能データを用いて第 29 条及び第 30 条の適合性を説明することは合理的である。

MSF-24P 型の遮蔽機能データを用いる場合は、型式証明申請における設置許可基準規則第 16 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 型の遮蔽機能データの作成方法については、本型式証明申請第 16 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%の何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)

貯蔵等施設の設置（変更）許可申請においては、MSF-24P 型の遮蔽機能データの適用が適切であることを次の方法で確認することができる。

- ・ MSF-24P 型をソースターム条件とする設置許可基準規則第 29 条及び第 30 条の遮蔽評価において、MSF-24P 型の遮蔽機能データを用いて評価した MSF-24P 型表面から 1 m 離れた位置の第 10 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 型の遮蔽適合性として評価した第 7 表に示す結果と同等*になることの確認をもって、遮蔽機能データが適切に使用されていることを確認する。

遮蔽機能データの適用確認方法の概要を別紙 7 に示す。

*：MCNP5 コードを用いた評価につき同一の値にならない場合がある。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。

第7表 (1/2) MSF-24P 型の表面から 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)

(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	<0.1 (1.1)	23.4 (0.5)	45.0 (0.3)	27.1 (0.6)
	構造材放射化	0.2 (0.5)	22.7 (0.9)	11.5 (0.2)	13.0 (1.0)
	二次ガンマ線	0.2 (1.2)	5.1 (0.5)	10.0 (0.4)	5.5 (0.7)
中性子	20.3 (0.3)	32.3 (0.9)	17.7 (0.2)	29.1 (1.0)	12.9 (0.3)
合計	20.8	83.5	84.2	74.7	34.4

※ () 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

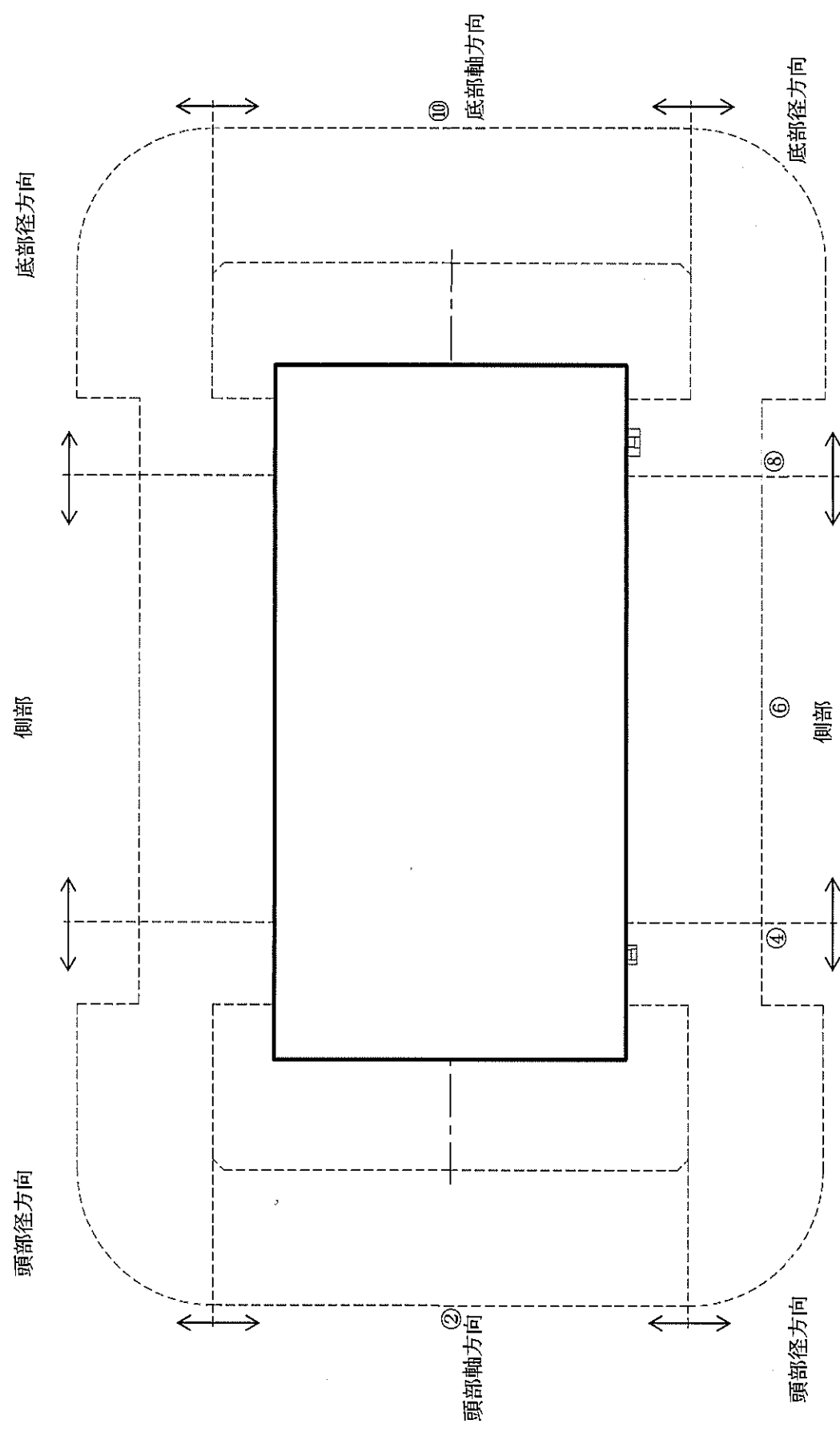
第7表 (2/2) MSF-24P 型の表面から 1 m 離れた位置における代表評価点の線量当量率 (15×15 燃料)

(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	22.4 (0.3)	44.9 (0.2)	25.4 (0.3)	3.1 (0.3)
	構造材放射化	0.1 (0.3)	8.5 (0.2)	8.3 (0.5)	10.6 (0.2)
	二次ガンマ線	0.2 (1.2)	10.5 (0.3)	5.5 (0.4)	1.9 (0.6)
中性子	22.2 (0.2)	35.9 (0.5)	19.0 (0.1)	32.0 (0.6)	14.0 (0.2)
合計	22.6	79.8	82.9	71.2	29.6

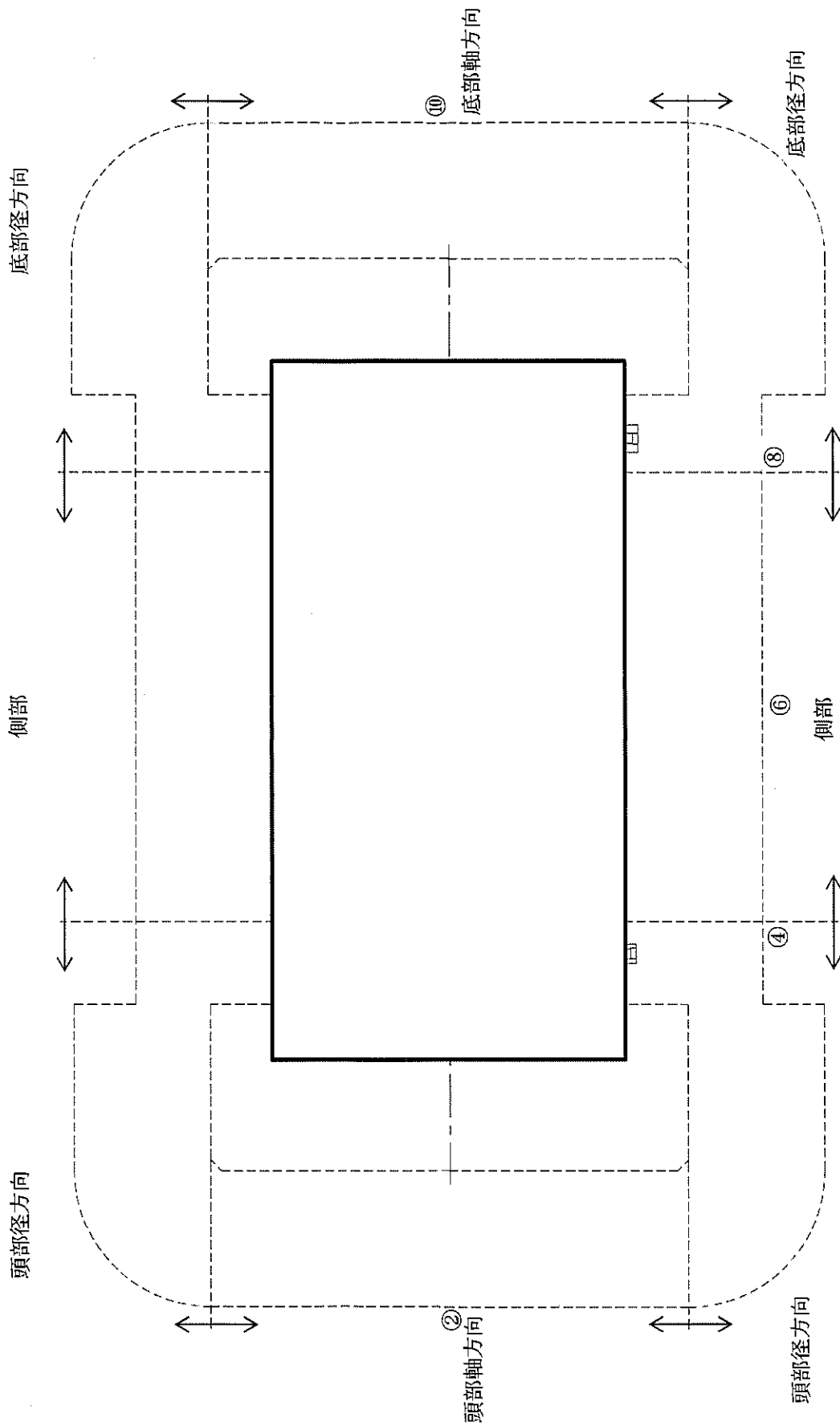
※ () 内は統計誤差 (単位: %) を示す。

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10図 (1/2) MSF-24P 型の表面から1 m 離れた位置における代表評価点 (17×17 燃料)



(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10図 (2/2) MSF-24P 型の表面から1 m離れた位置における代表評価点 (15×15 燃料)

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 I: Overview and Theory”, LA-UR-03-1987, (2003).
- (4) 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 研究調査資料, (2013).
- (5) 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).
- (6) 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).
- (7) 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).
- (8) K. Kosako, et al., “The Libraries FSXLIB and MATXSLIB Based on JENDL-3.3”, JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).

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 表に中性子源強度を示す。

別紙 1-3 表より、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）を代表燃料型式に設定した。別紙 4-1 表及び別紙 4-2 表に示すとおり、MSF-24P 型の表面及び表面から 1 m 離れた位置における最大となる線量当量率において支配的な線源は中性子及び燃料有効部ガンマ線であることから、線源強度比較より代表燃料として A 型燃料を選定する。

なお、代表燃料型式とした A 型燃料収納時の線量当量率評価結果が B 型燃料収納時の線量当量率評価結果を包絡*していることを確認している（別紙 6 参照）。

代表燃料型式の燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度を別紙 1-6 表に示す。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。

*：「包絡」するとは、MSF-24P 型表面及び表面から 1 m 離れた位置における線量当量率（合計値）が、それぞれ比較対象より大きいことを指す。

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	<p>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。</p>	<p>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)</p>
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	<p>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⁵⁹Co含有量に従い、放射化計算式に基づき⁵⁹Coから⁶⁰Coへの放射化量を計算。</p>	<p>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 (⁶⁰Co) の放射能 (Bq) N₀ : ターゲット核種 (⁵⁹Co) の個数 (atoms) σ : 2200m/s の中性子による ⁵⁹Co の (n, γ) 反応断面積 (cm²) φ : 炉内照射熱中性子束 (n/(cm²·s)) λ : ⁶⁰Co の崩壊定数 (3.6001×10⁻⁴/日) T₁ : 照射日数 (日) (別紙1-2表参照) T₂ : 冷却日数 (日) (別紙1-2表参照)</p>
中性子源スペクトル	—	<p>MCNP5 コード内で以下の条件を基に処理する。 Watt 型 ²³⁹Pu 核分裂スペクトル (注) (1) Watt 型連続分布スペクトル $P(E) = C \exp(-E/a) \times \sinh(bE)^{1/2}$ ²³⁹Pu 中性子スペクトル定数 : a=0.966 (MeV)、b=2.842 (MeV⁻¹)</p>

(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		48,000		39,000					
	外周部		44,000							
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		2,344 (約90,000MWd/t相当)								
初期濃縮度(wt%) ^(注2)										
冷却期間(年)			15	17	15	17				
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	48,000		39,000						
	外周部	44,000								
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		2,671 (約90,000MWd/t相当)								
初期濃縮度 (wt%) (注2)										
冷却期間 (年)			15	17	15	17				
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1-4

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 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^{10}	1.120×10^{10}	8.408×10^9	7.811×10^9

(注 1) 中央部 12 体の燃焼度を 48,000Mwd/t、外周部 12 体の燃焼度を 44,000Mwd/t とした MSF-24P 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 39,000Mwd/t とした MSF-24P 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 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)	4.438×10^2	4.984×10^2	4.919×10^2	4.880×10^2
燃料有効部中性子 (注 4) (n/s)	1.266×10^{10}	1.175×10^{10}	8.380×10^9	7.787×10^9

(注 1) 中央部 12 体の燃焼度を 48,000Mwd/t、外周部 12 体の燃焼度を 44,000Mwd/t とした MSF-24P 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 39,000Mwd/t とした MSF-24P 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 1-4 表 (1/2) 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)
(MSF-24P 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

(注)燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体の放射化によるガンマ線源強度の合計値 () 内はバーナブルポイズン集合体の放射化によるガンマ線源強度)

別紙 1-4 表 (2/2) 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)
(MSF-24P 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

(注)燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体の放射化によるガンマ線源強度の合計値 () 内はバーナブルポイズン集合体の放射化によるガンマ線源強度)

別紙 1-5 表 (1/2) 中性子源強度 (17×17 燃料)

(MSF-24P 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 (2/2) 中性子源強度 (15×15 燃料)

(MSF-24P 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1-6表(1/2) 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)
(MSF-24P型1基当たり)

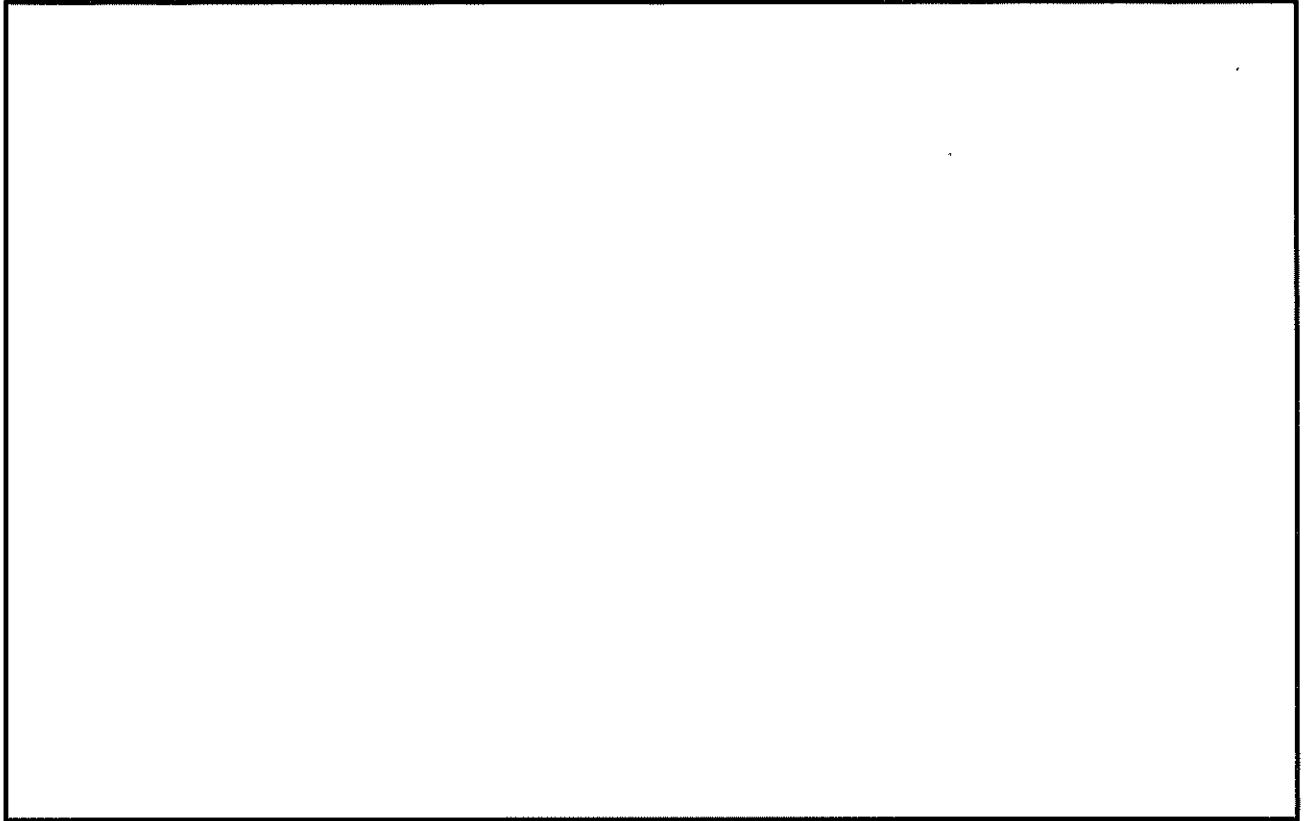
エネルギー 群数	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部 (photons/s)		
		中央部	外周部	合計
1	0.01	1.433×10^{16}	1.337×10^{16}	2.770×10^{16}
2	0.025	2.888×10^{15}	2.710×10^{15}	5.599×10^{15}
3	0.0375	3.729×10^{15}	3.445×10^{15}	7.174×10^{15}
4	0.0575	2.903×10^{15}	2.725×10^{15}	5.628×10^{15}
5	0.085	1.636×10^{15}	1.528×10^{15}	3.165×10^{15}
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}

別紙1-9

別紙1-6表(2/2) 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)
(MSF-24P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)		
		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	6.904×10^8	5.128×10^8	1.203×10^9
16	5.0	2.261×10^8	1.555×10^8	3.816×10^8
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}

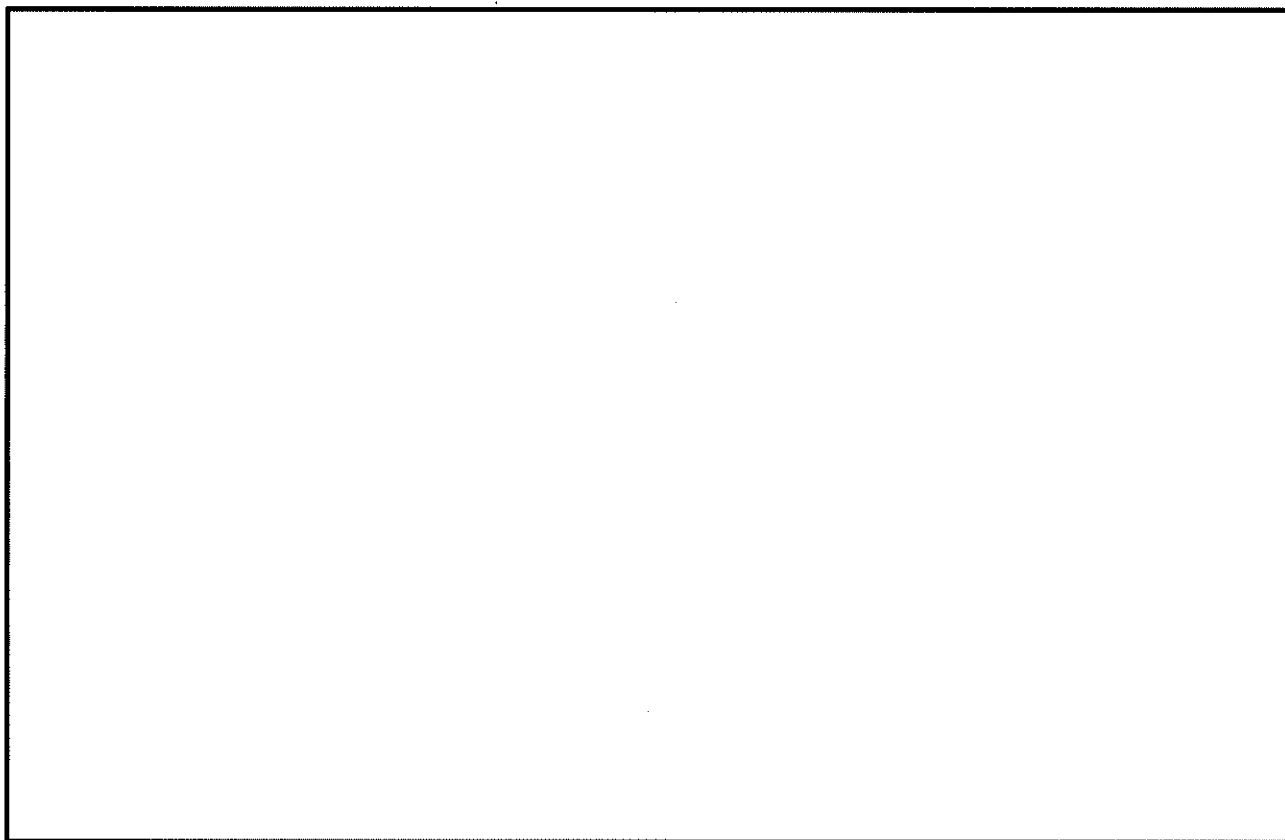
別紙1-10



---- 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)

別紙 1-11



---- 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)

2. 遮蔽解析のモデル化について

遮蔽解析は、MSF-24P 型の実形状を基にしたモデルにより評価している。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。

(1) 燃料領域

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（ワシヤ、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) 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。

(3) 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 $4.1 \pm \square$ wt% 及び $4.0 \pm \square$ wt% を保守的に \square wt% 及び \square 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。

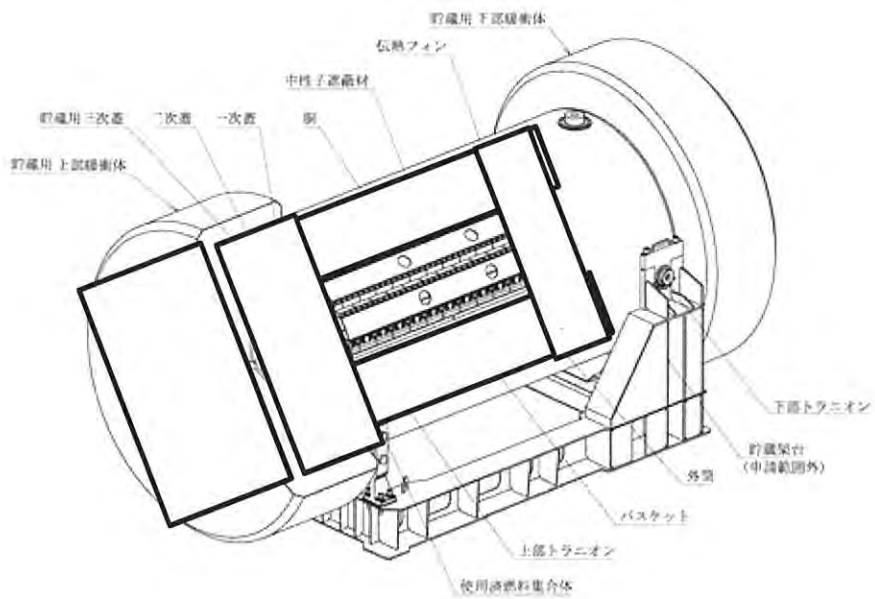
・モデル化の保守性

- －中性子遮蔽材は、評価期間中の熱的影響により質量減損（2.0 %程度）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。
- －緩衝体は、安全側に空気に置き換え、距離のみ考慮する。
- －バ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

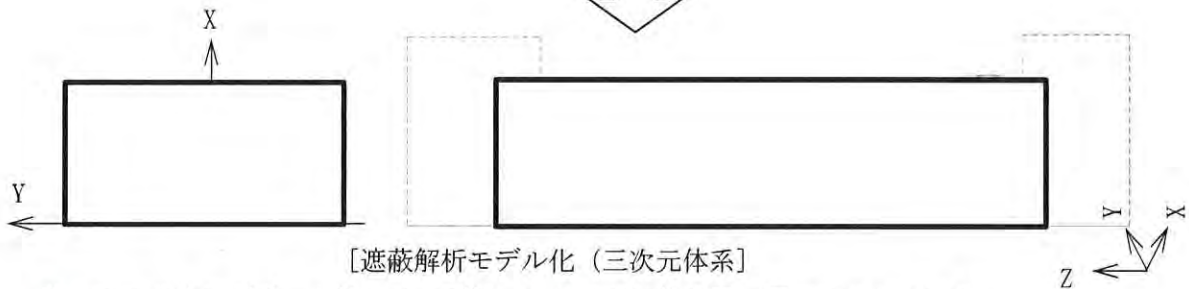
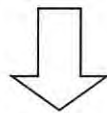
項目	詳細条件	遮蔽解析条件	線量当量率 (注) への影響 (保守性)
ウラン初期濃縮度	4.1 ± <input type="checkbox"/> wt% (ノミナル値、公差)	<input type="checkbox"/> wt%	約 0.5%程度
燃料集合体燃焼度	キヤスク平均 44GWd/t	中央部全て 48GWd/t 外周部全て 44GWd/t (キヤスク平均 46GWd/t)	約 10%程度
中性子遮蔽材質量減損	質量減損 2.0%	質量減損 2.5%	約 10%程度
燃料集合体の軸方向移動	燃料集合体と一次蓋間に約 8 cm の隙間	胴 (底板) 及び一次蓋に接した状態	約 7%程度 (頭部軸方向のみ)
バーナブルポイズン集合体	中央部領域全ての燃料集合体と共に収納可能。	構造材としての遮蔽効果は無視	約 1%程度

(注) 基準に対して裕度の少ない MSF-24P 型表面から 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



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。

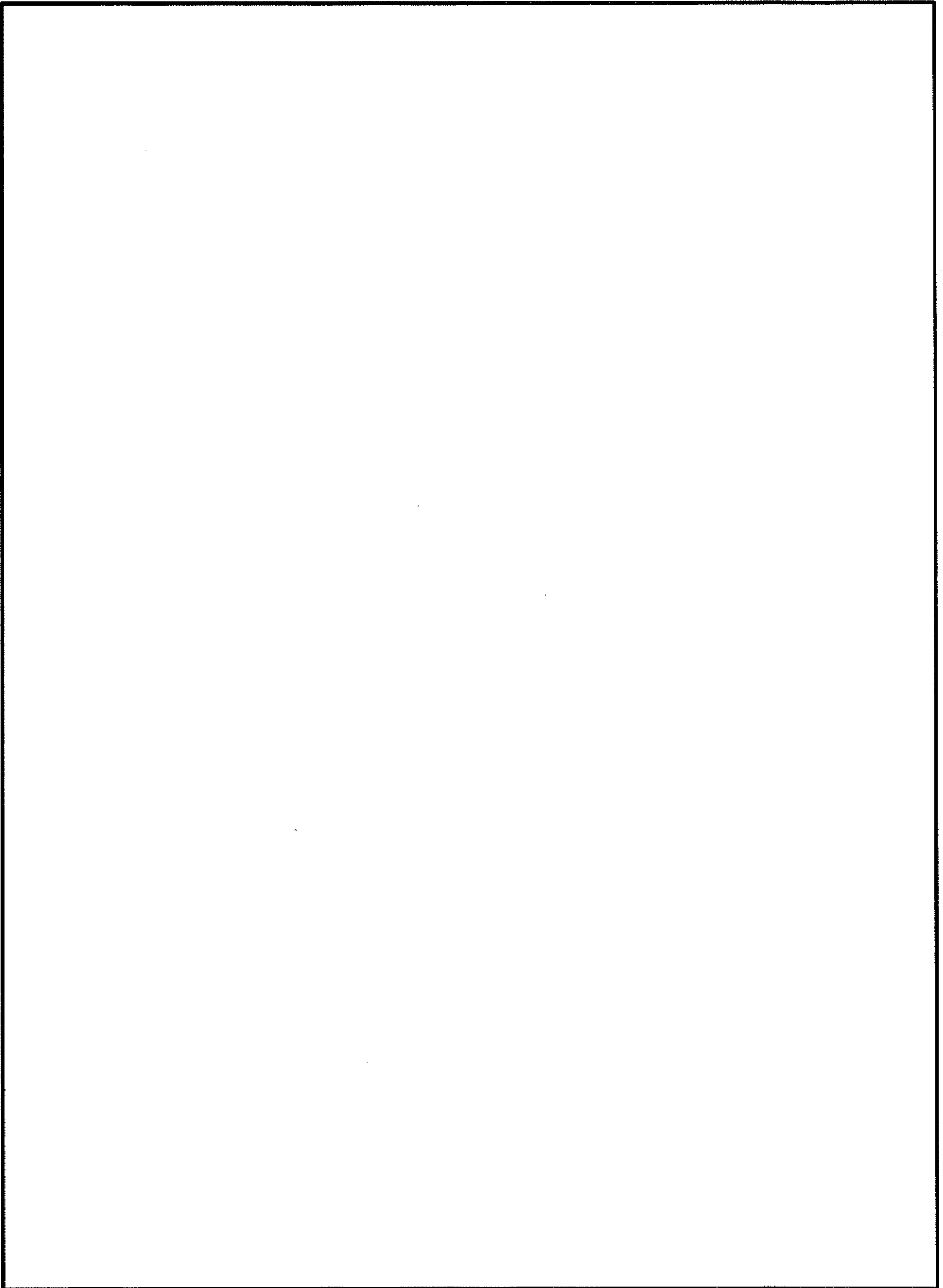
燃料有効部中央	燃料有効部外周
燃料上部構造材中央	燃料上部構造材外周
燃料上部構造材中央	燃料上部構造材外周
燃料下部構造材中央	燃料下部構造材外周
バスケット領域	胴、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー
中性子遮蔽材	トランニオン
伝熱フィン	貯蔵用三次蓋、底部中性子遮蔽材カバー、下部端板、バルブ部カバープレート、モニタリングポート部
真空	貯蔵用緩衝体 (空気)

別紙 1-2 図 遮蔽解析モデル化概要

別紙 1-16

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 1-3 図 遮蔽解析モデル

別紙 1-17

内は商業機密のため、非公開とします。

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 16-6「材料・構造健全性に関する説明資料(L5-95JY215)」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。

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

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型は約2.0%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. 三次元輸送計算コード MCNP5 による解析の評価条件

三次元輸送計算コード 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、その他の評価条件について以下に示す。

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	群構造	ORIGEN2 群構造 (18 群)
ガンマ線源強度	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
分散低減法		ウェイト・ウィンドウ
タリー		表面 : F2 タリー (半径 2. 5cm の面もしくは 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)

(1) 分散低減法

三次元輸送計算コード MCNP5 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、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。

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・ウィンドウという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

容器表面評価では、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、サーフェイクロッシングエスティメーター（面タリー）を設定した。

容器表面から 1 m 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グスエスティメーター（体積タリー）を用いた。

(3) 統計指標

三次元輸送計算コード 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。

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

ここで、

N_0 : MSF-24P 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 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。

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。

アクチノイド : ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu

核分裂生成物 : ^{99}Tc , ^{103}Rh , ^{131}Xe , ^{133}Cs , ^{143}Nd , ^{145}Nd , ^{147}Pm , ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{151}Sm , ^{152}Sm , ^{153}Eu , ^{155}Gd

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 (A型) 収納時	15×15 燃料 (A型) 収納時
ウラン重量 (kg/体)	□	□
初期濃縮度 (wt%)	□	□
燃焼度 (MWd/t)	44,000	44,000
比出力 (MW/t)	□	□
冷却日数 (日)	5,479	5,479
実効増倍率 ^(注)	□	□
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 ^{239}Pu 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 ^{239}Pu 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 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。

別紙 3-1 表 中性子源強度 (17×17 燃料 (A型) 収納時)

(MSF-24P 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 (A型) 収納時)

(MSF-24P 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

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、 ^{242}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).

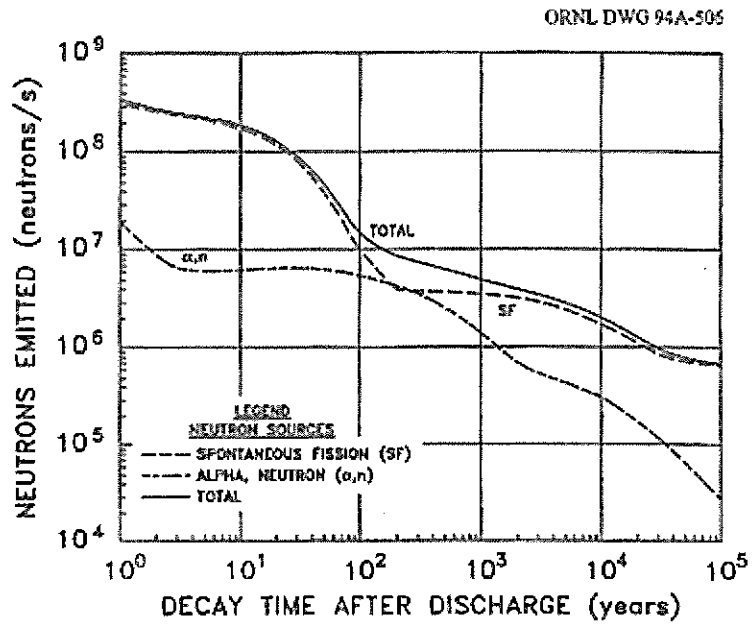


Fig. 9.2. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTHM): PWR/33,000 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

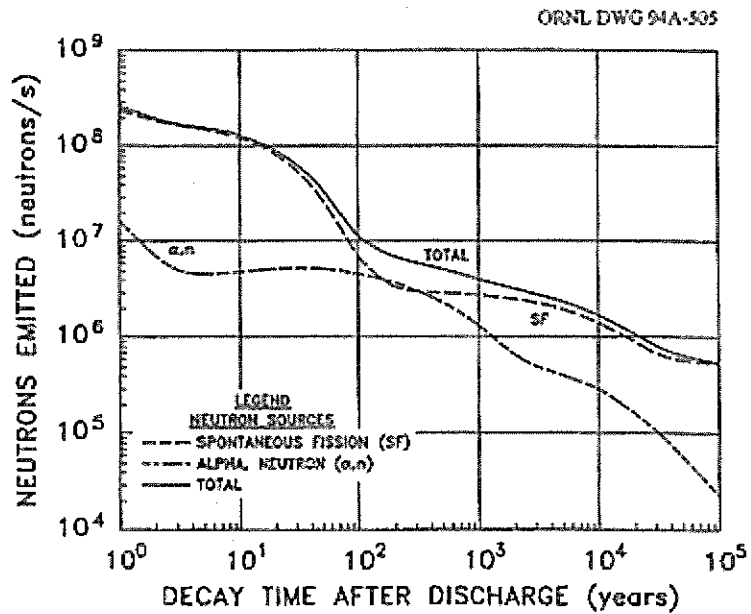
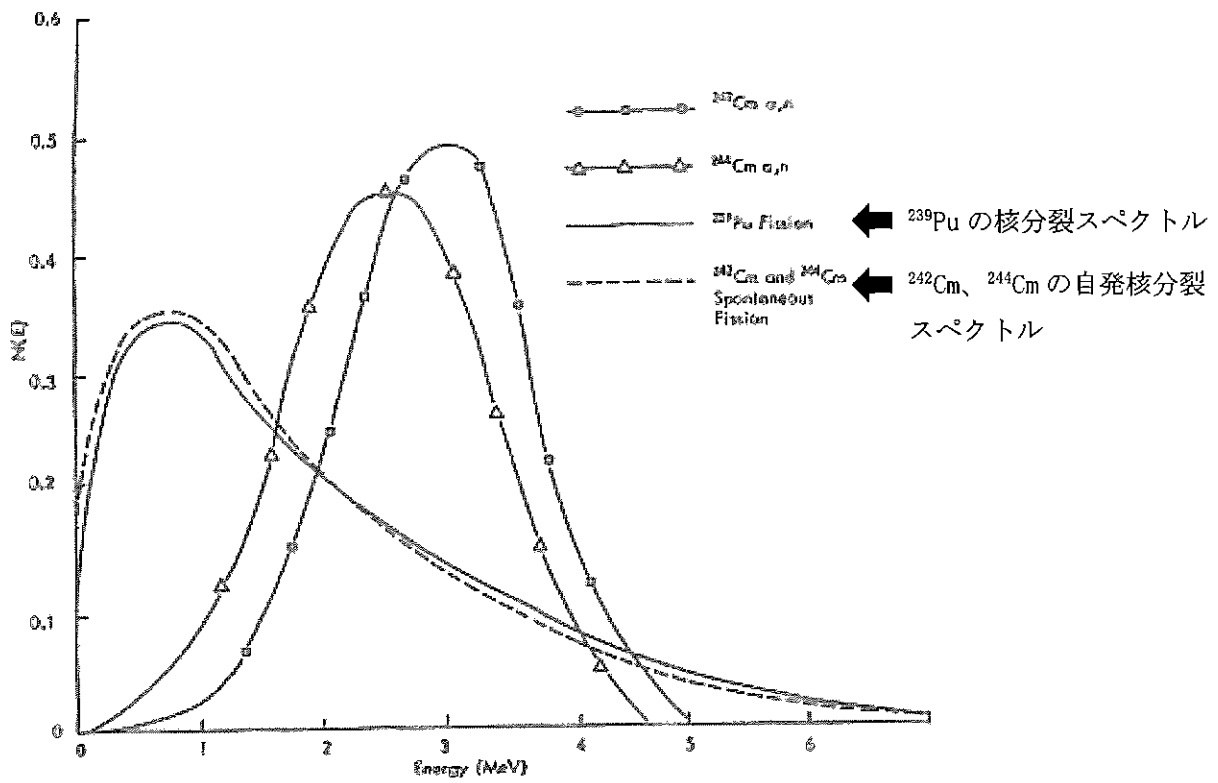


Fig. 9.3. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTHM): BWR/27,500 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

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⁽²⁾

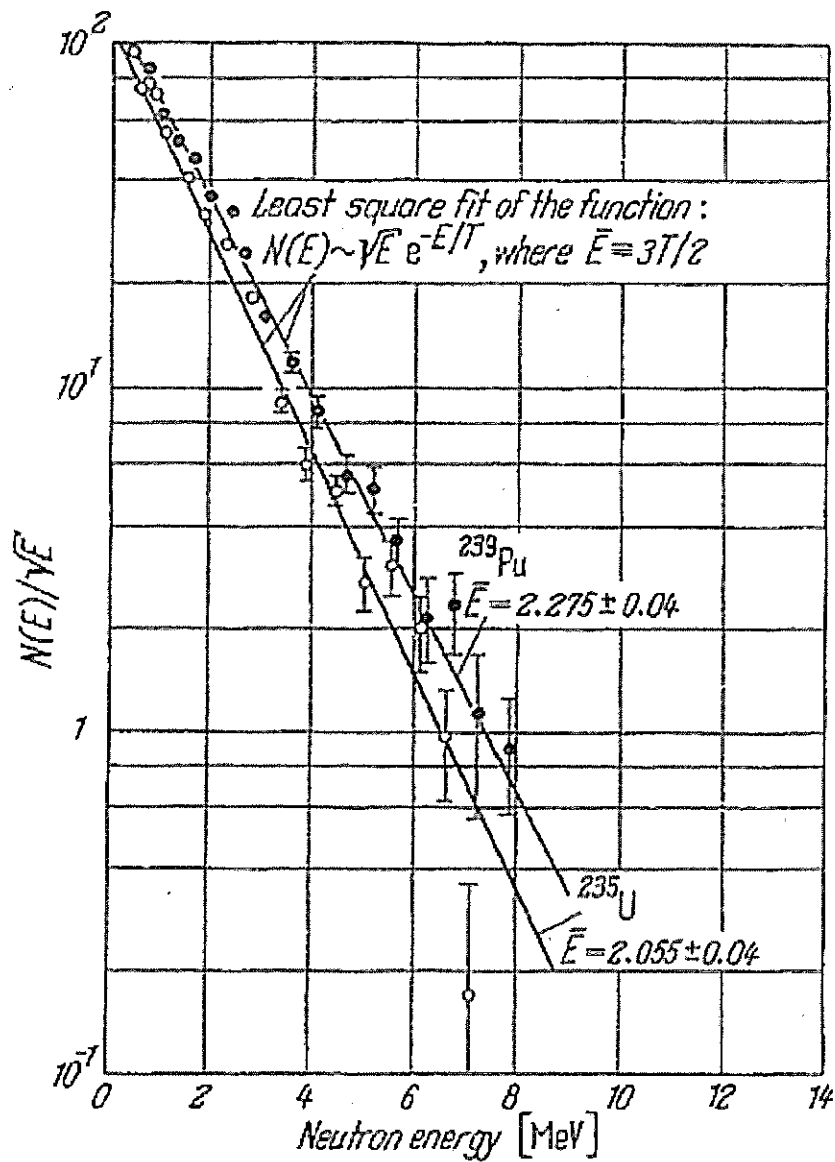


Fig. 2.3.-2. Typical measured fission neutron spectra of $^{235}\text{U} + n_{th}$ and $^{239}\text{Pu} + n_{th}$.

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⁽³⁾

三次元輸送計算コード MCNP5 による遮蔽解析結果の詳細

1. 線量当量率評価結果

三次元輸送計算コード MCNP5 による遮蔽解析（以下「MCNP5 解析」という。）における結果詳細を示す。

MCNP 解析の線量当量率結果を別紙4-1表及び別紙4-2表に、最大線量当量率となる評価点位置を別紙4-1図及び別紙4-2図に示す。

また、別紙4-3図から別紙4-14図に MCNP 解析の線量当量率分布図を示す。

別紙 4-1 表 線量当量率評価結果 (17×17 燃料 (A型) 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
表面	ガンマ線	燃料有効部	113.6 (0.9)	91.3 (3.2)	6.5 (1.0)
		構造材放射化	26.8 (0.9)	69.1 (3.8)	37.9 (0.6)
		二次ガンマ線	25.4 (1.2)	12.1 (2.7)	4.8 (1.7)
表面から 1 m	ガンマ線	中性子	40.7 (0.9)	616.2 (1.2)	21.8 (0.9)
		合計	206.5	<u>788.7</u> (注1) [0.79]	71.0
表面から 1 m	ガンマ線	燃料有効部	45.0 (0.3)	27.1 (0.6)	2.9 (0.4)
		構造材放射化	11.5 (0.2)	13.0 (1.0)	16.8 (0.3)
		二次ガンマ線	10.0 (0.4)	5.5 (0.5)	1.8 (0.7)
表面から 1 m	ガンマ線	中性子	17.7 (0.2)	29.1 (1.0)	12.9 (0.3)
		合計	<u>84.2</u> (注1) [85]	74.7	34.4

※ () 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。

(注1) [] 内は型式証明申請書に記載する有効けた 2 けたでの値 (表面の単位: mSv/h 、表面から 1 m での単位: $\mu\text{Sv/h}$)。

(注2) 0.1 未満の値は 0.1 として合計に考慮した。

別紙4-2表 線量当量率評価結果 (15×15燃料 (A型) 収納時)

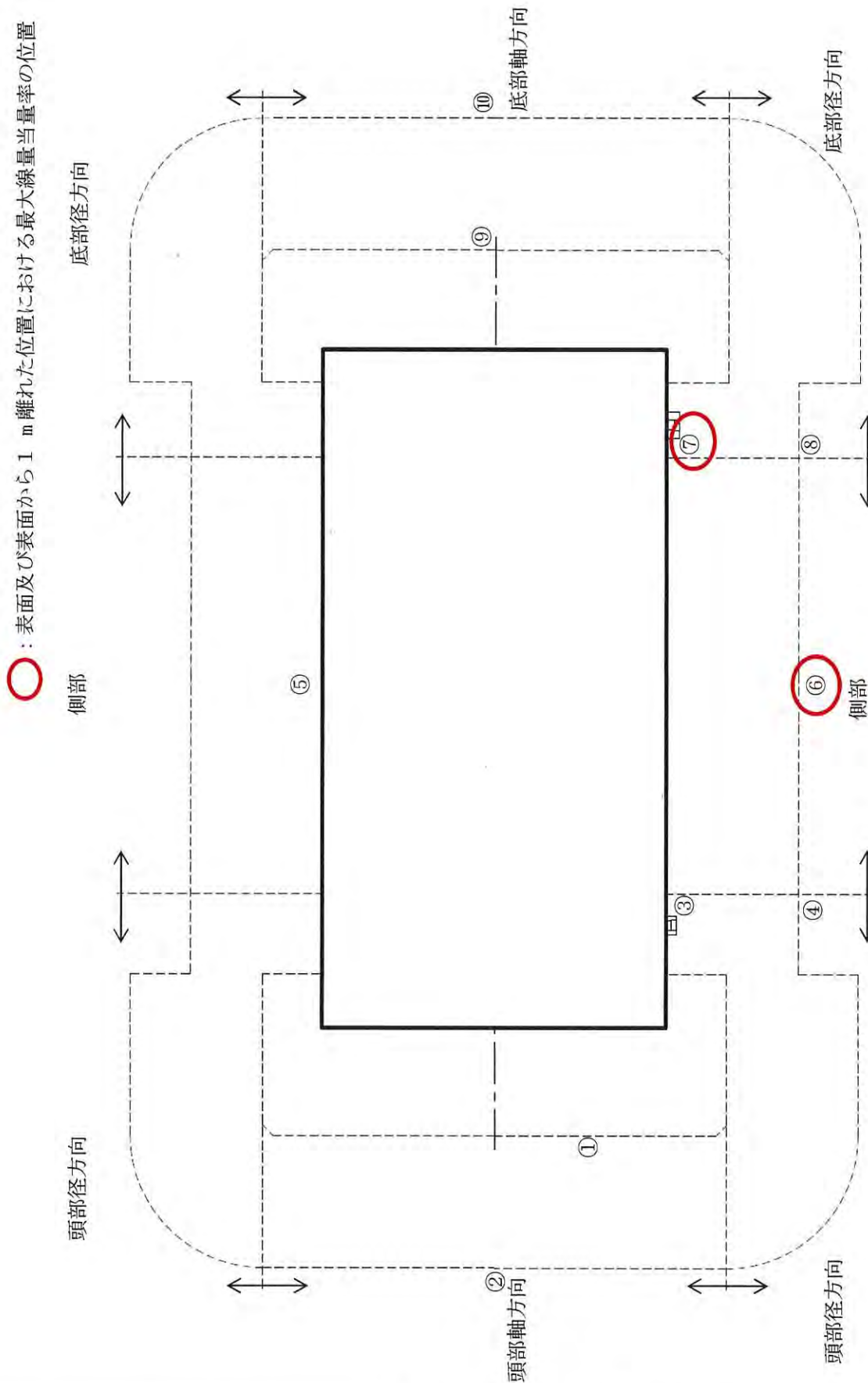
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

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
表面	ガンマ線	燃料有効部	108.1 (0.6)	93.1 (4.2)	0.9 (1.2)
		構造材放射化	19.3 (0.6)	43.3 (1.6)	1.7 (1.1)
	二次ガンマ線	0.3 (3.5)	10.3 (1.8)	12.8 (2.0)	1.3 (3.0)
	中性子	45.3 (1.7)	464.4 (0.7)	655.2 (0.9)	56.3 (1.8)
合計	45.8	650.6	196.3	<u>804.4</u> [0.81] (注1)	60.2
評価点					
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	44.9 (0.2)	25.4 (0.3)	3.1 (0.3)
		構造材放射化	8.5 (0.2)	8.3 (0.5)	10.6 (0.2)
	二次ガンマ線	0.2 (1.2)	5.3 (0.4)	5.5 (0.4)	1.9 (0.6)
	中性子	22.2 (0.2)	35.9 (0.5)	32.0 (0.6)	14.0 (0.2)
合計	22.6	79.8	<u>82.9</u> [83] (注1)	71.2	29.6

※ () 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1m離れた位置における線量当量率の最大値である。

(注1) []内は型式証明申請書に記載する有効けた2けたでの値 (表面の単位: mSv/h 。表面から1mでの単位: $\mu\text{Sv/h}$)。

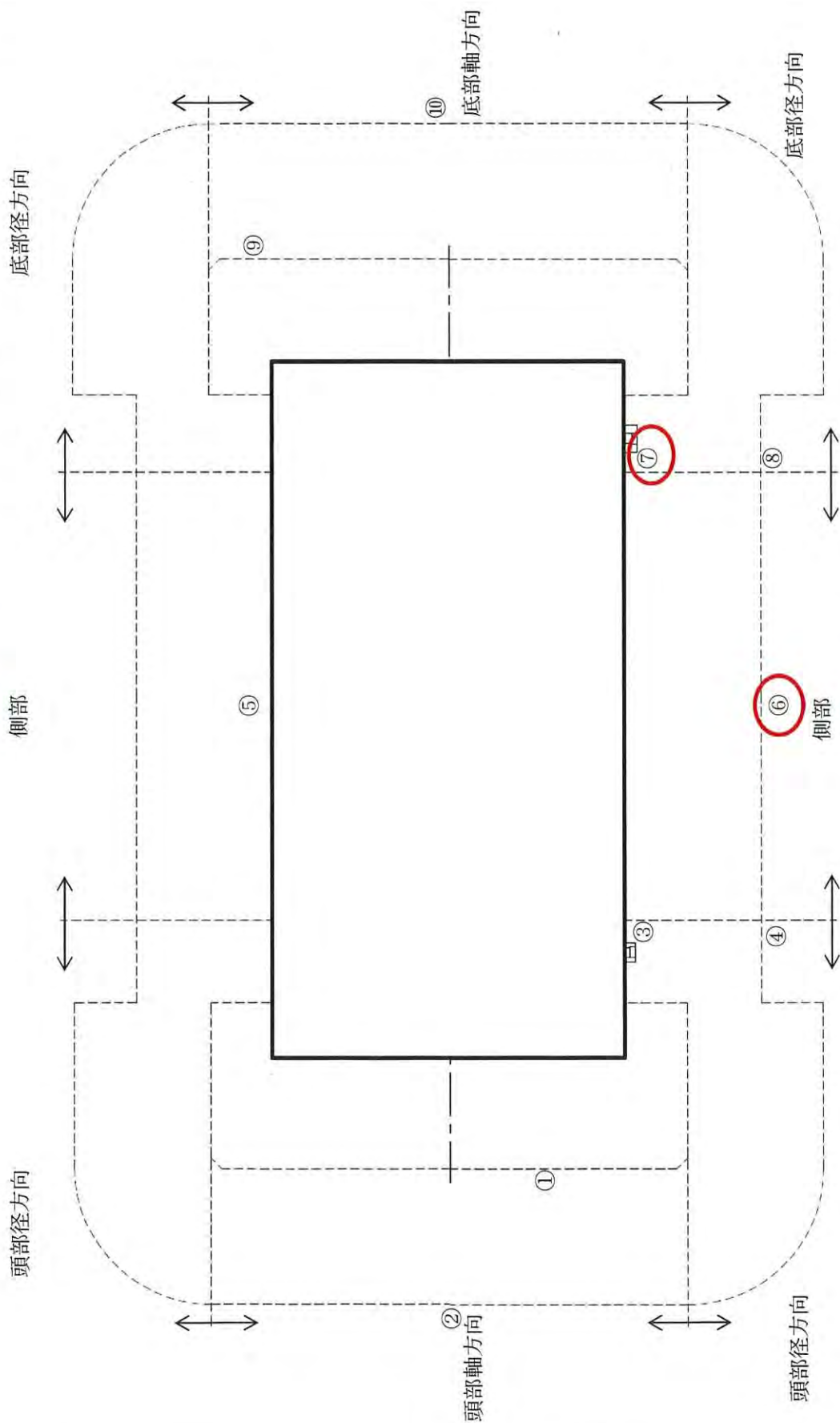


(注) ①~⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

別紙 4-1 図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置

(17×17 燃料 (A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

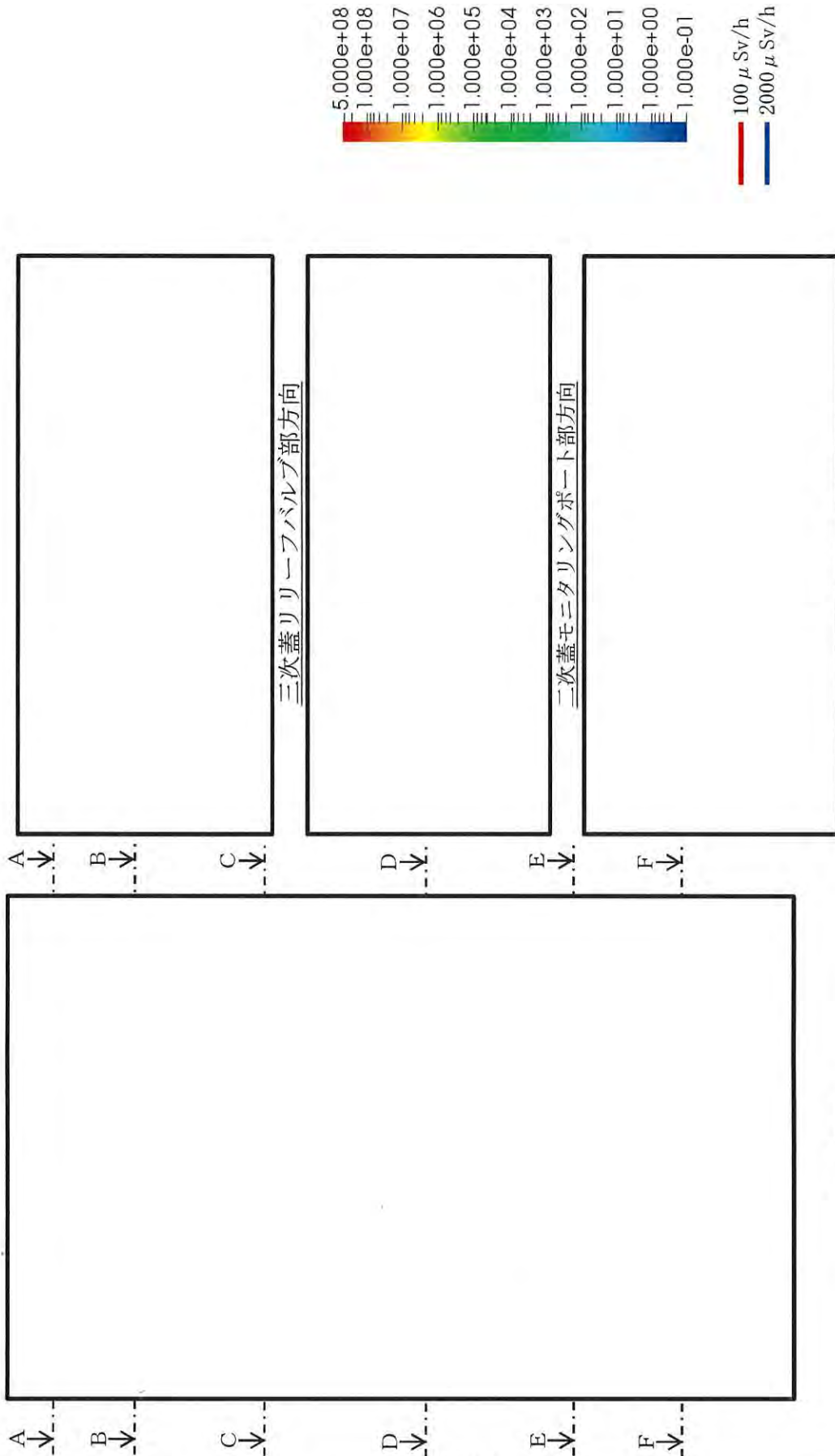


(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

別紙 4-2 図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置

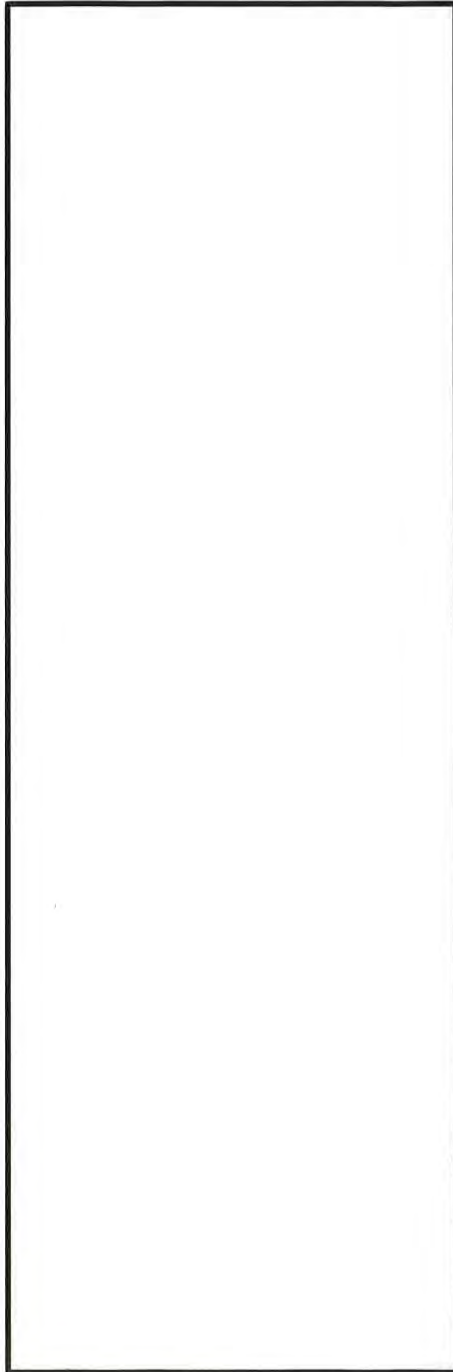
(15×15 燃料 (A 型) 収納時)

□内は商業機密のため、非公開とします。



X-Z断面

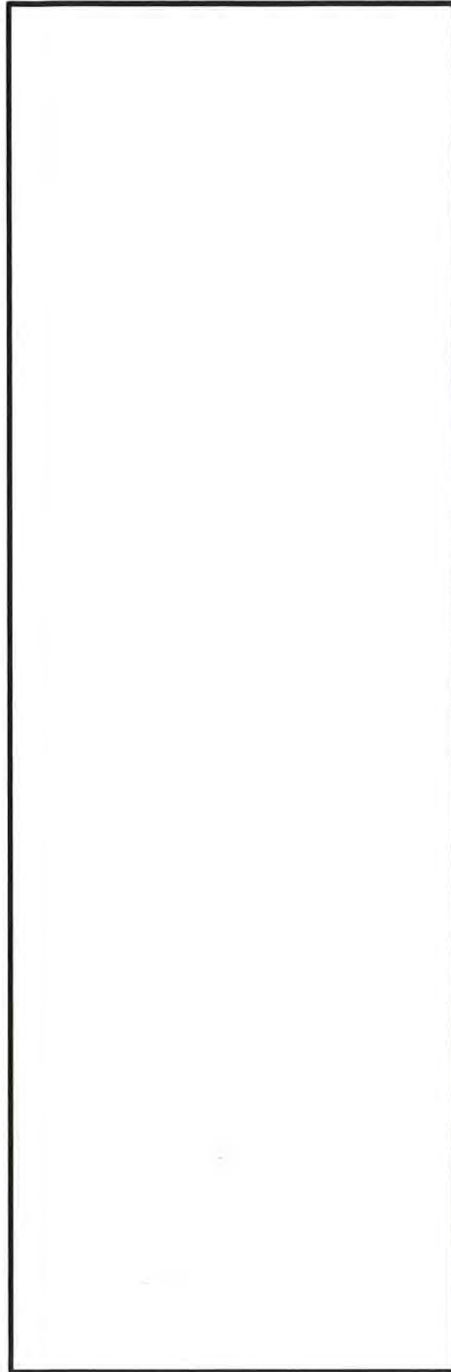
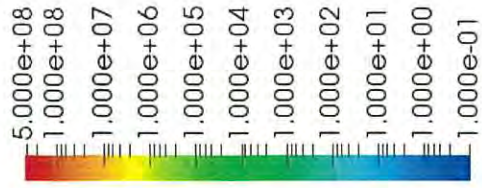
別紙 4-3 図 線量当量率分布 (全線源) (17×17 燃料 (A型) 収納時)



A-A断面

B-B断面

C-C断面



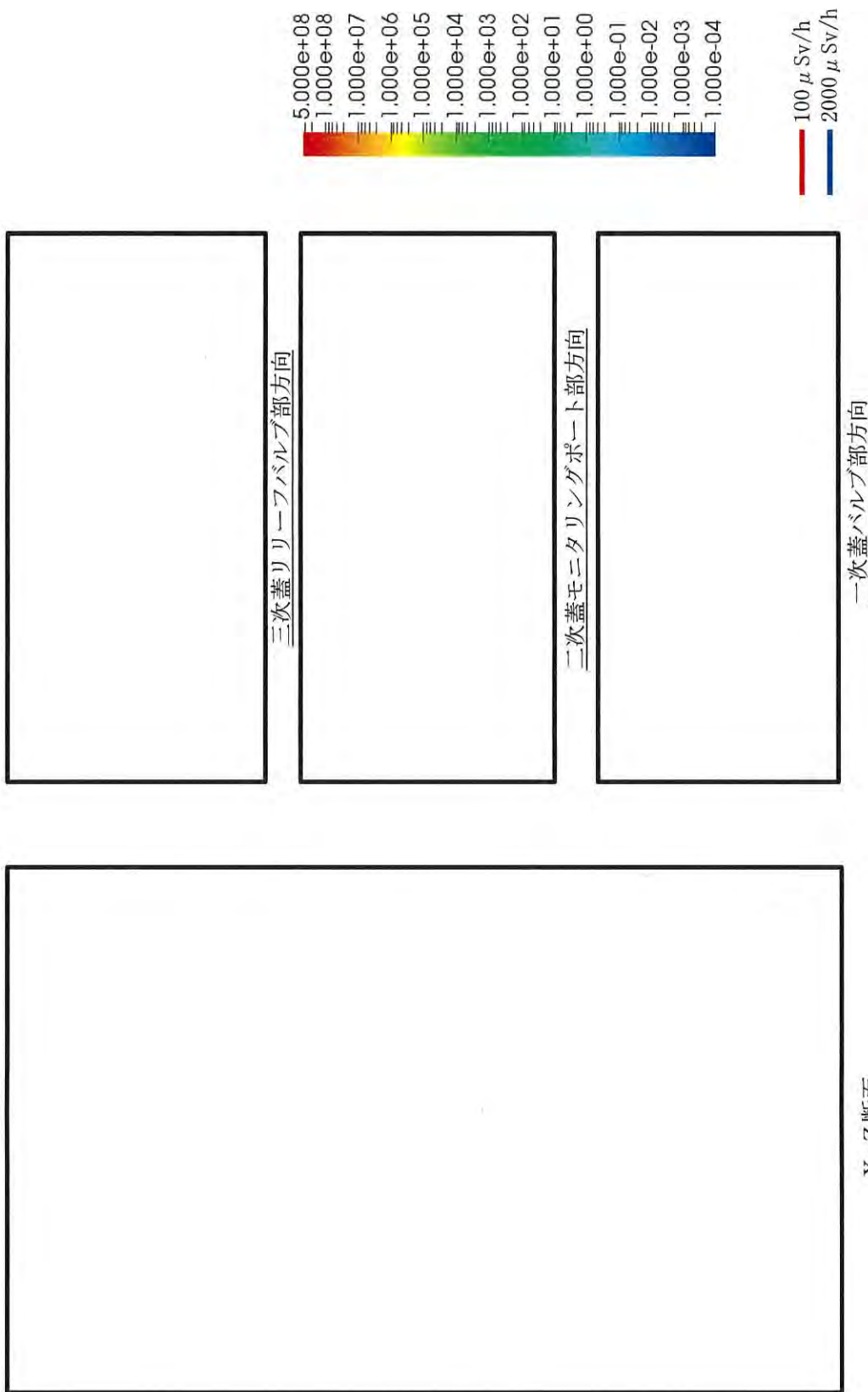
D-D断面

E-E断面

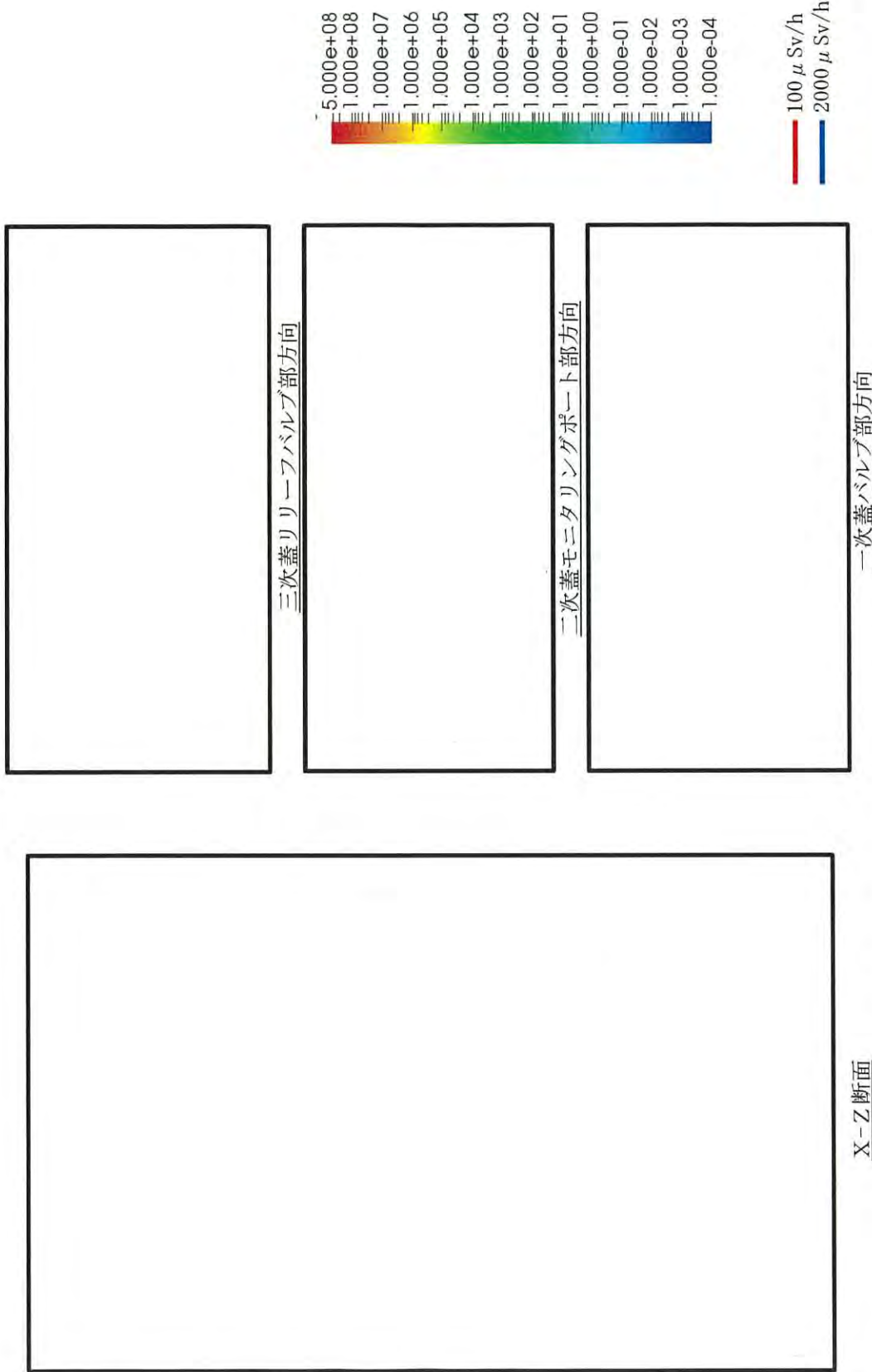
F-F断面

(注) 断面位置は別紙 4-3 図参照

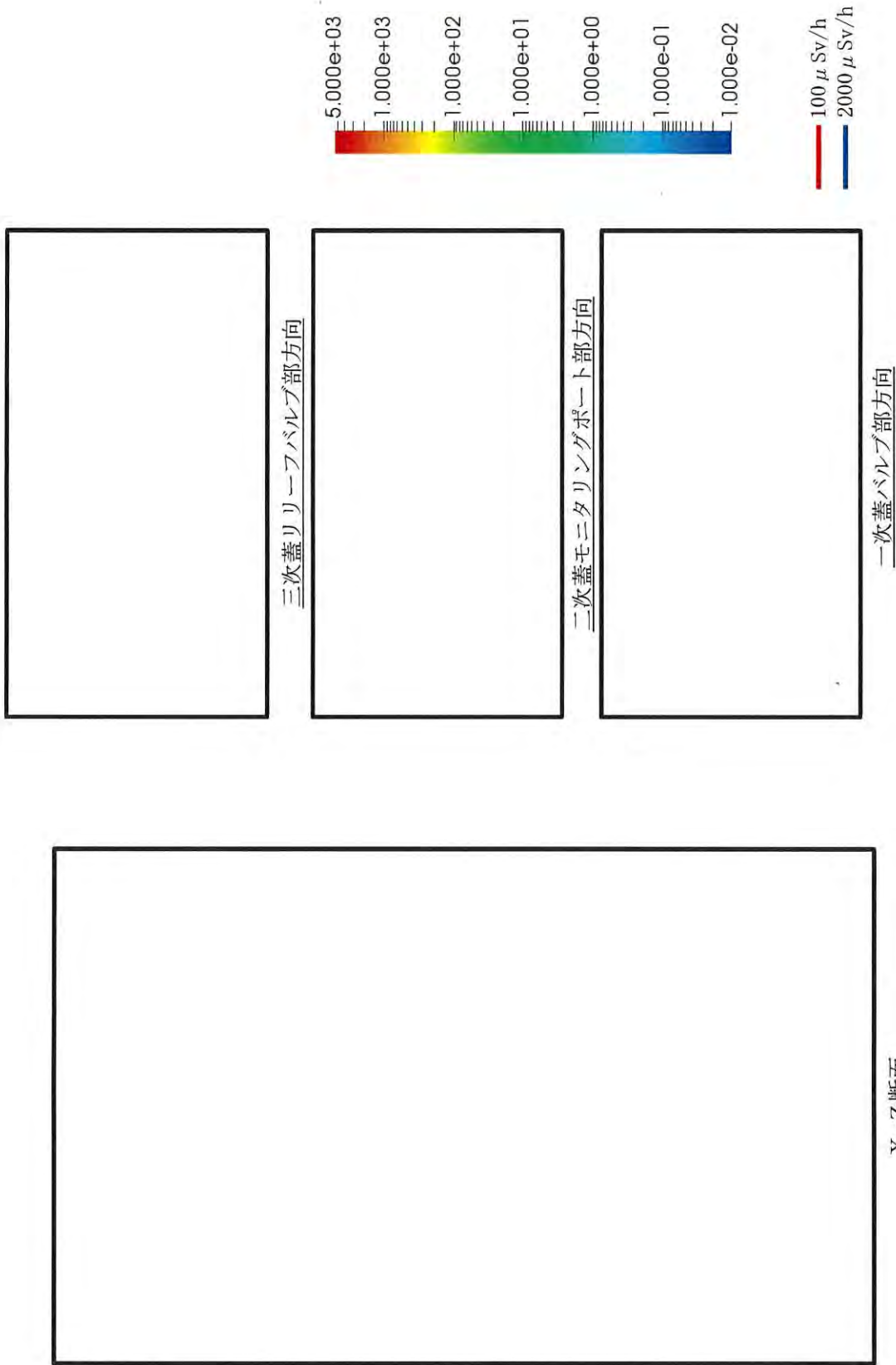
別紙 4-4 図 線量当量率分布 (全線源) (17×17 燃料 (A 型) 収納時)



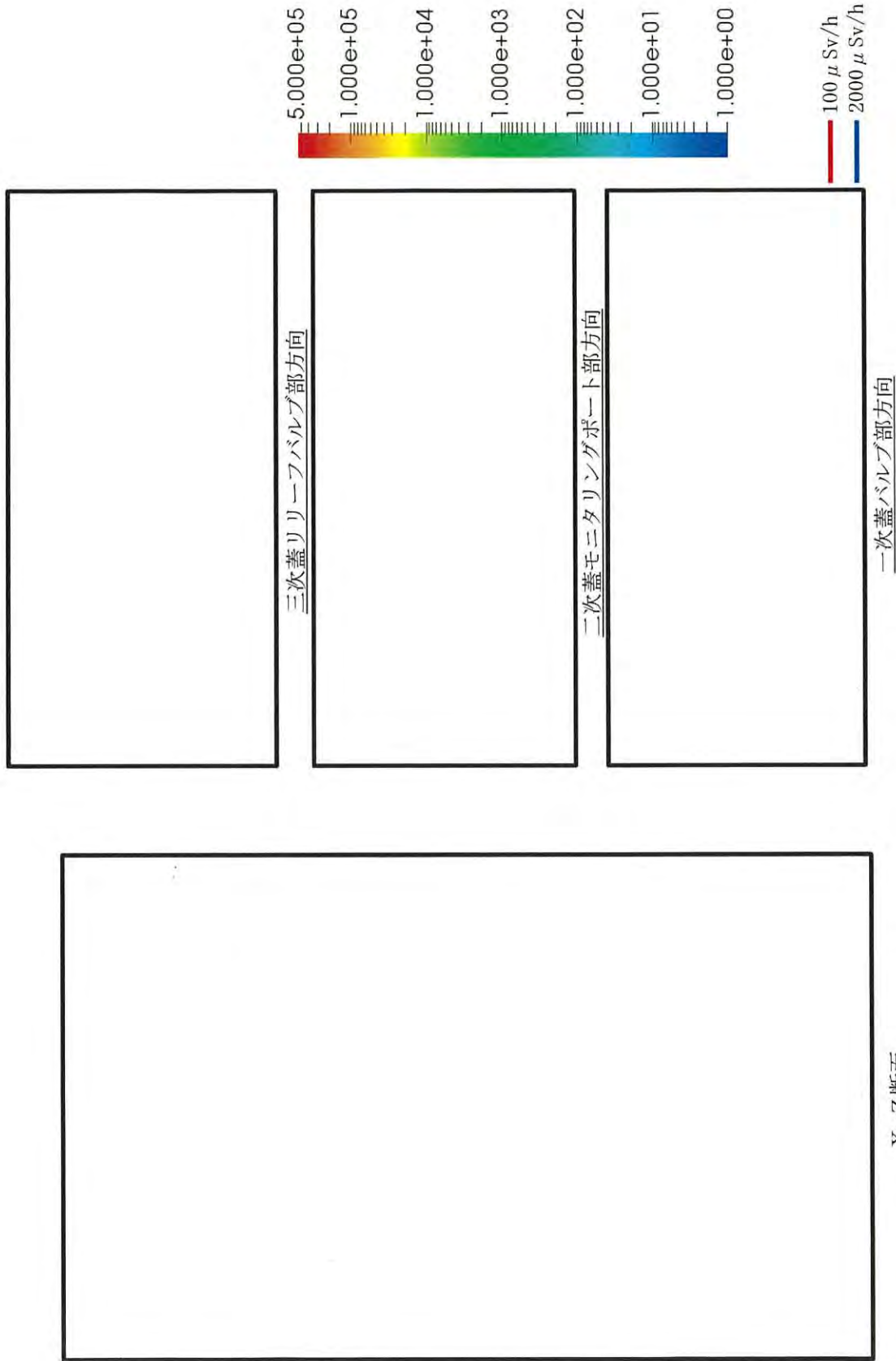
別紙 4-5 図 線量当量率分布 (燃料有効部ガンマ線) (17×17 燃料 (A型) 収納時)



別紙 4-6 図 線量当量率分布 (構造材放射化ガンマ線) (17×17 燃料 (A型) 収納時)

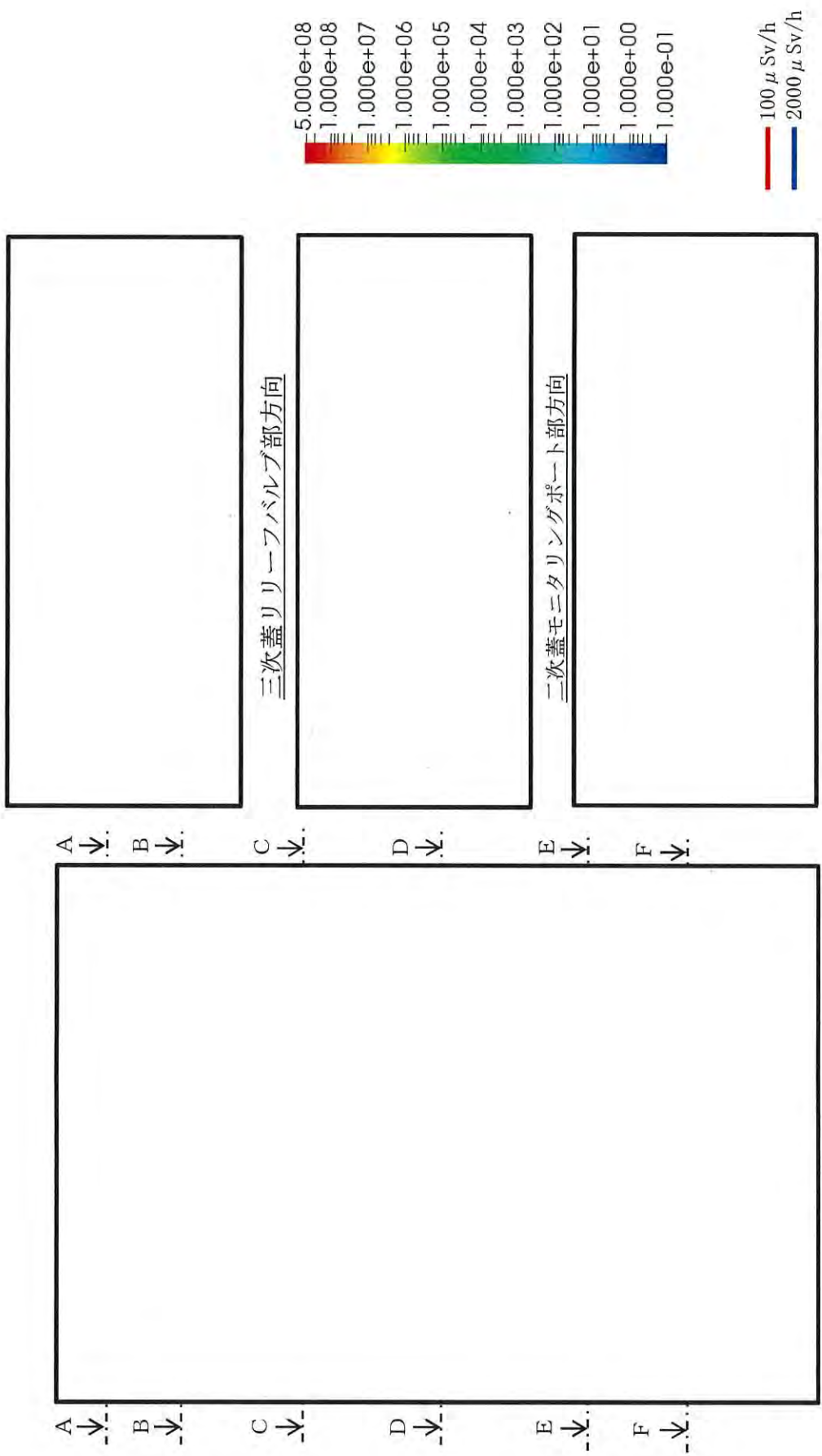


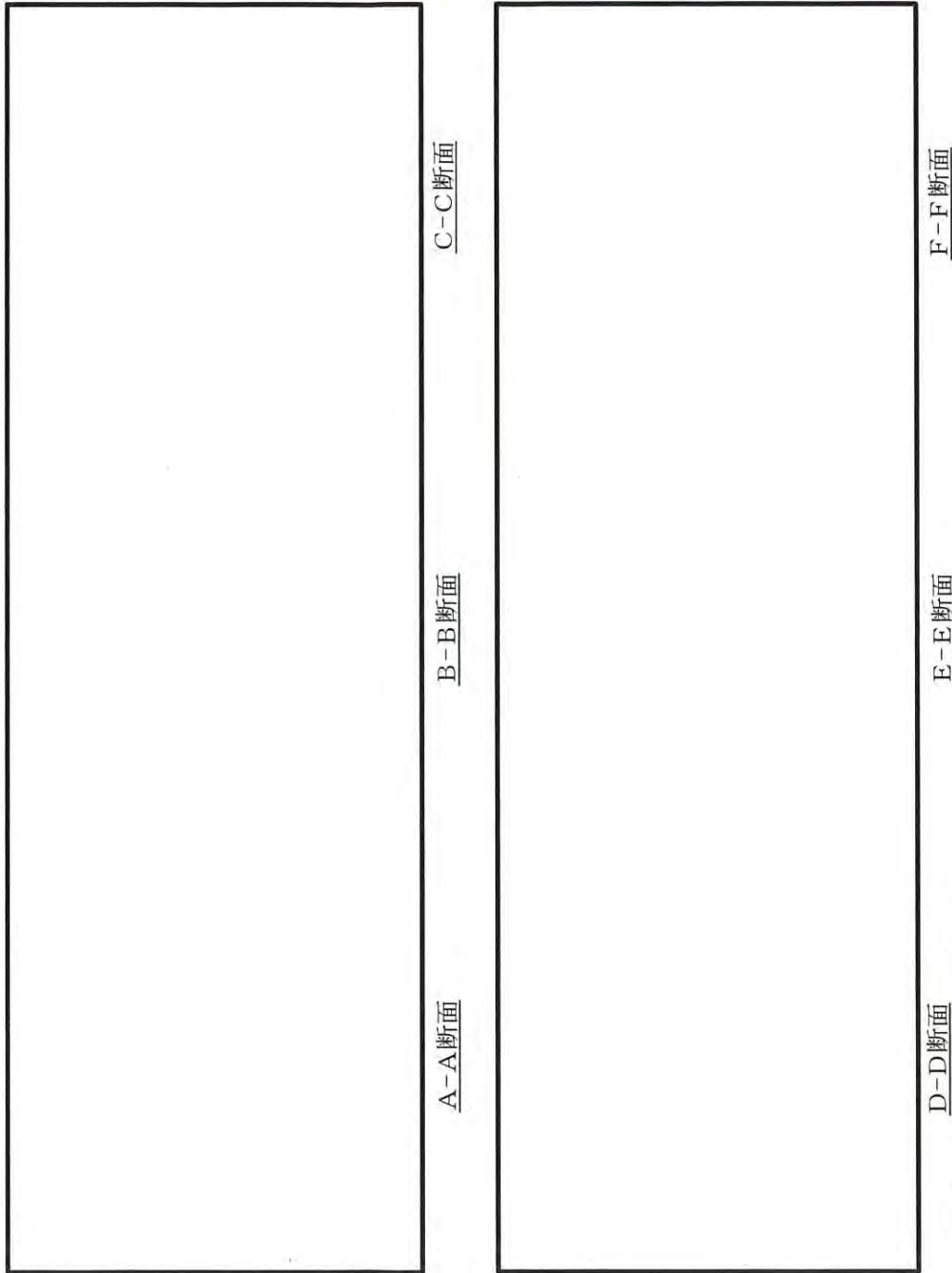
別紙 4-7 図 線量当量率分布 (二次ガンマ線) (17×17 燃料 (A 型) 収納時)



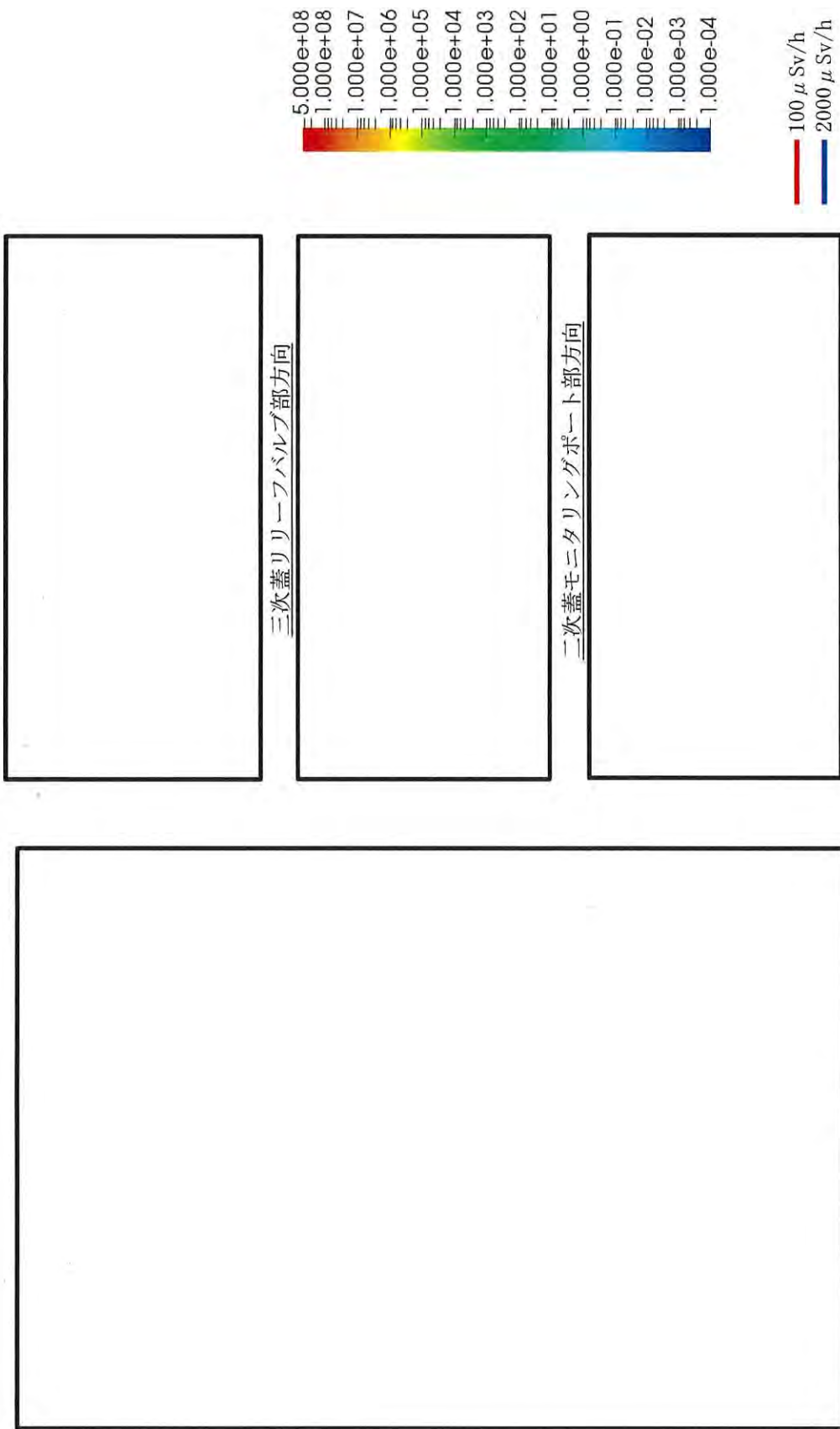
別紙 4-8 図 線量当量率分布 (中性子) (17×17 燃料 (A 型) 収納時)

□内は商業機密のため、非公開とします。

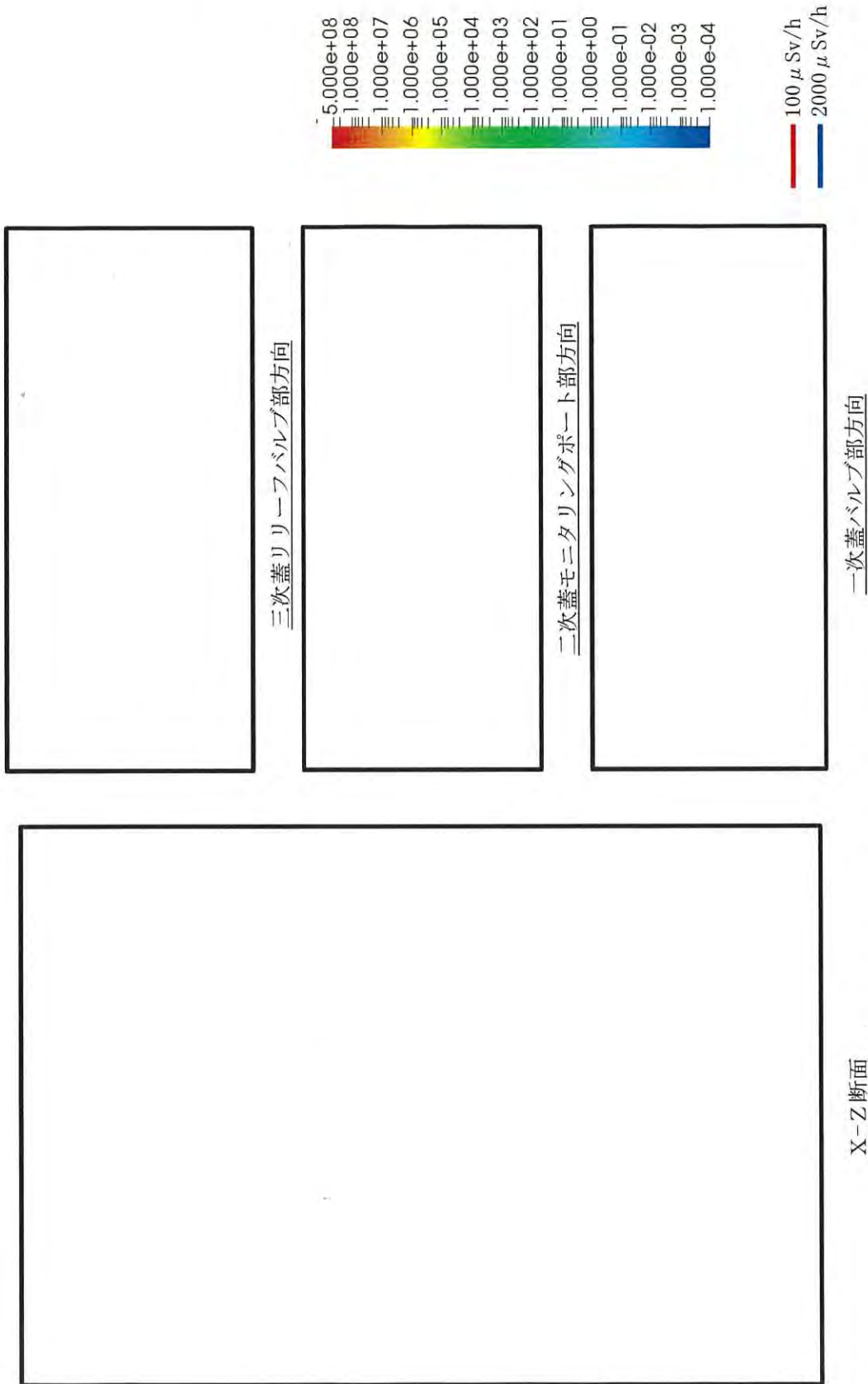




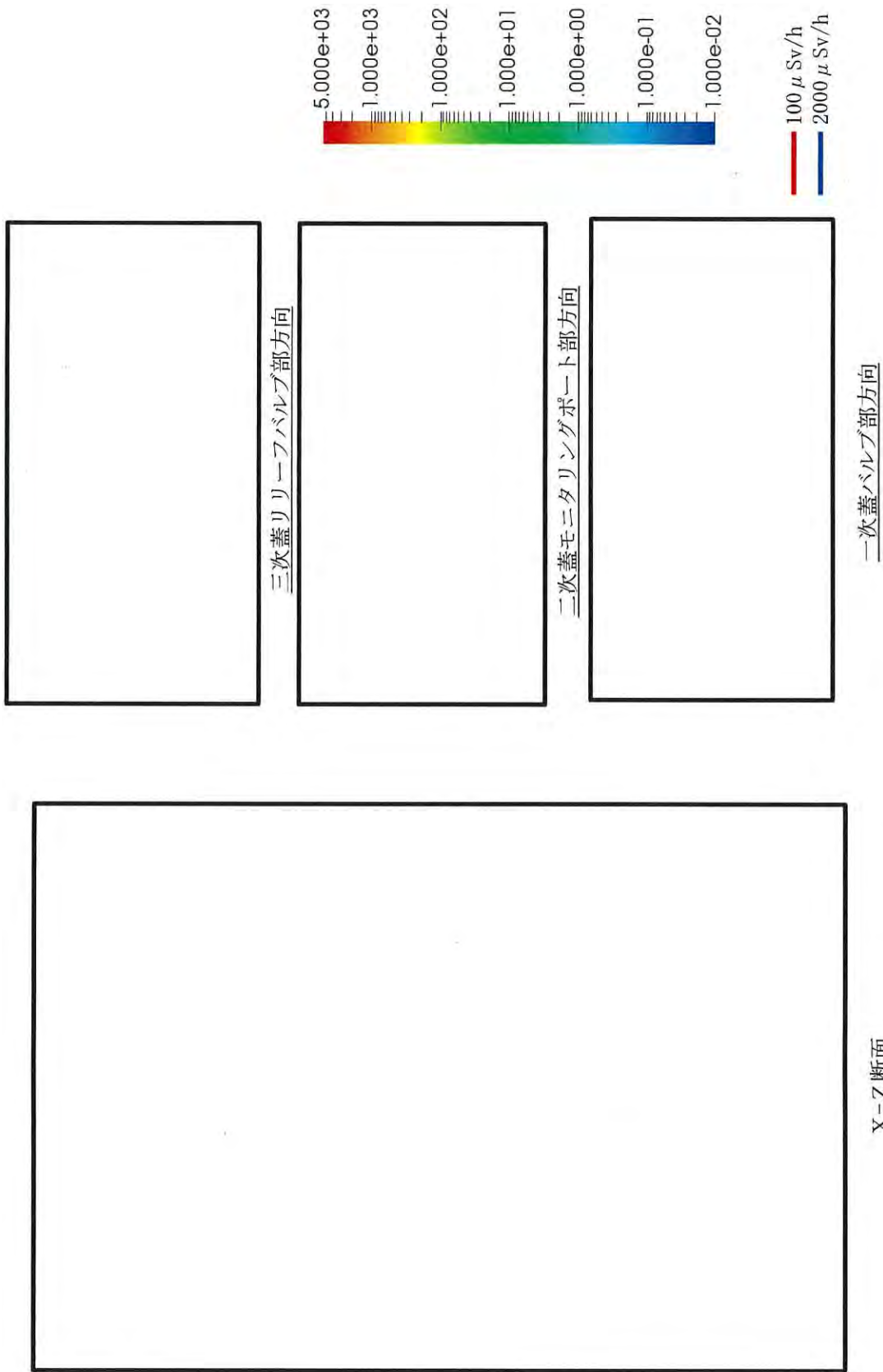
(注) 断面位置は別紙 4-9 図参照
別紙 4-10 図 線量当量率分布 (全線源) (15×15 燃料 (A型) 収納時)



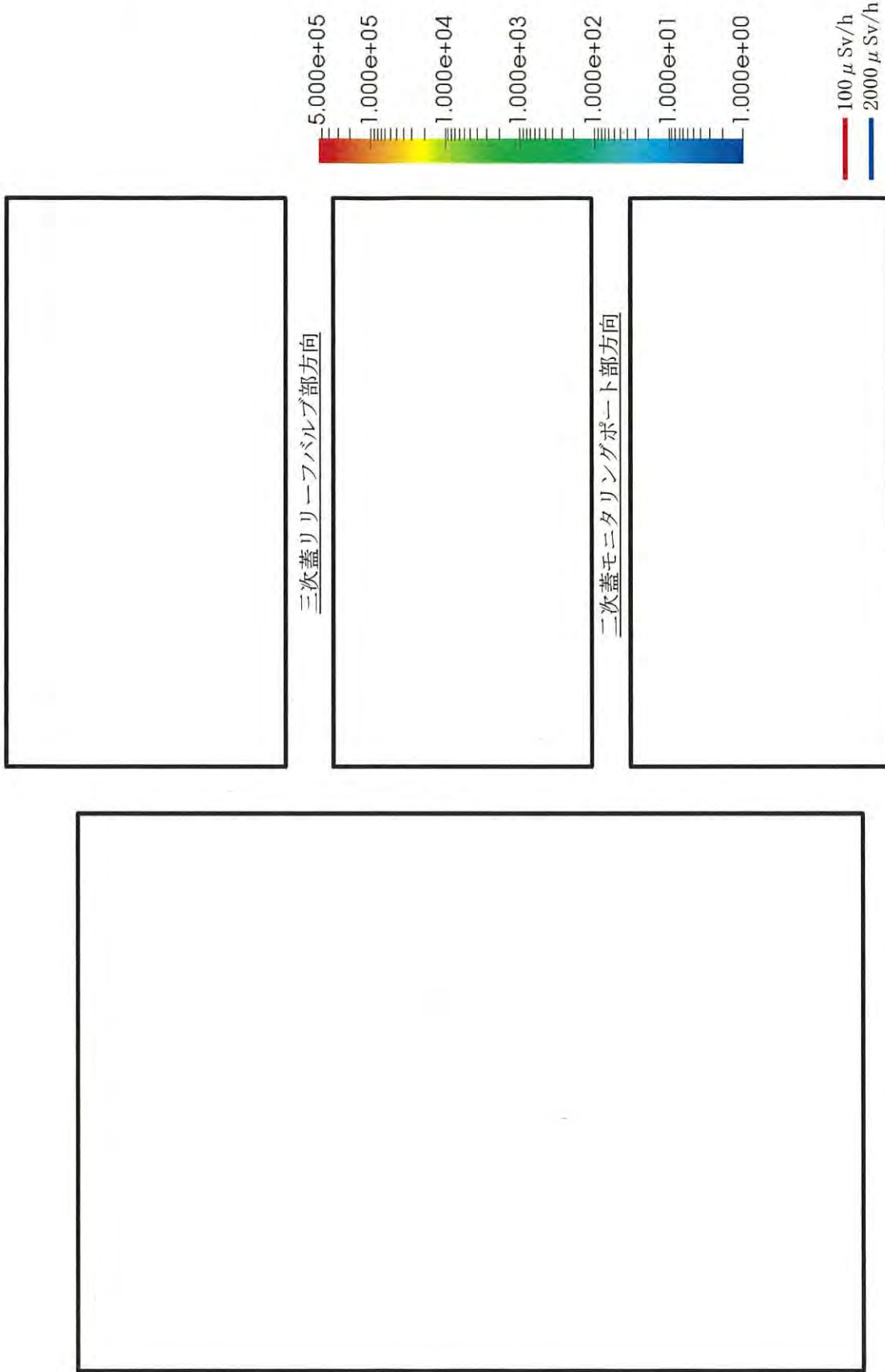
別紙 4-11 図 線量当量率分布 (燃料有効部ガンマ線) (15×15 燃料 (A 型) 収納時)



別紙 4-12 図 線量当量率分布 (構造材放射化ガンマ線) (15×15 燃料 (A型) 収納時)



別紙 4-13 図 線量当量率分布 (二次ガンマ線) (15×15 燃料 (A型) 収納時)



X-Z断面
別紙4-14図 線量当量率分布 (中性子) (15×15 燃料 (A型) 収納時)

二次元輸送計算コード DOT3.5 と三次元輸送計算コード MCNP5 による遮蔽解析結果比較

三次元輸送計算コード MCNP5 による遮蔽解析（以下「MCNP5 解析」という。）と、許認可実績が豊富な二次元輸送計算コード DOT3.5 による遮蔽解析（以下「DOT3.5 解析」という。）の結果の比較を実施した。DOT3.5 解析の主要な評価条件は別紙 5-1 表のとおりである。

DOT3.5 解析の線量当量率結果を別紙 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 解析と DOT3.5 解析における、頭部、側部、底部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。

第 3 表及び別紙 5-2 表に示すとおり、MCNP5 解析結果と DOT3.5 解析結果による最大線量当量率は同等である。別紙 5-2 図から別紙 5-5 図に示すとおり、両者の線量当量率の分布は同様の傾向である。

別紙 5-1 表 DOT3.5 解析の評価条件

項目		解析条件
解析コード		DOT3.5
核データ		MATXSLIB-J33 (JENDL-3.3 に基づく)
対象収納燃料		17×17 燃料 48,000Mwd/t 型 (A型) (燃料仕様は別紙 1-2 表と同じ)
燃料有効部 ガンマ線源強度	群構造	MATXSLIB-J33 群構造 (42 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	MATXSLIB-J33 群構造 (42 群)
	スペクトル	放射化計算式による計算値を 以下エネルギーが該当するエネルギー群に等分で振り分け 1.17MeV、 1.33MeV
中性子源強度	群構造	MATXSLIB-J33 群構造 (175 群)
	スペクトル	²³⁹ Pu の核分裂スペクトル
モデル化	本体モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・横置き (架台を含まない)。 ・R-Z 体系の有限円筒モデル。(トラニオン、一次蓋・二次蓋などの遮蔽体欠損部は含まない) ・キャスク中央付近で 2 分割して、頭部評価モデルにおいては燃料集合体が一次蓋に接した状態として、線源である使用済燃料集合体から評価点までの距離が短い保守的なモデル。
	燃料領域	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料集合体とバスケットを均質化。 ・燃料領域は実形状と同等となるように、中央部と外周部の断面積と等価となる二重円 (円筒) で設定。 ・中央部に最高燃焼度、外周部に平均燃焼度の燃料を収納。 ・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。
	バスケット 外周部領域	<ul style="list-style-type: none"> ・円筒形状としてモデル化するが、実形状におけるキャスク表面から 1 m 離れた位置の線量当量率と同等となるよう、密度係数を考慮。
	側部中性子 遮蔽材領域	<ul style="list-style-type: none"> ・側部中性子遮蔽材と伝熱フィンを均質化。
	トラニオン部	<ul style="list-style-type: none"> ・本体モデルとは別に、実形状を模擬したトラニオン部モデルを作成し、線束を引継ぎ評価。
解析モデルの 入力条件への 不確かさ	材料密度	<ul style="list-style-type: none"> ・最低保証密度を使用して原子個数密度を設定
	寸法公差	<ul style="list-style-type: none"> ・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で考慮。

別紙 5-2

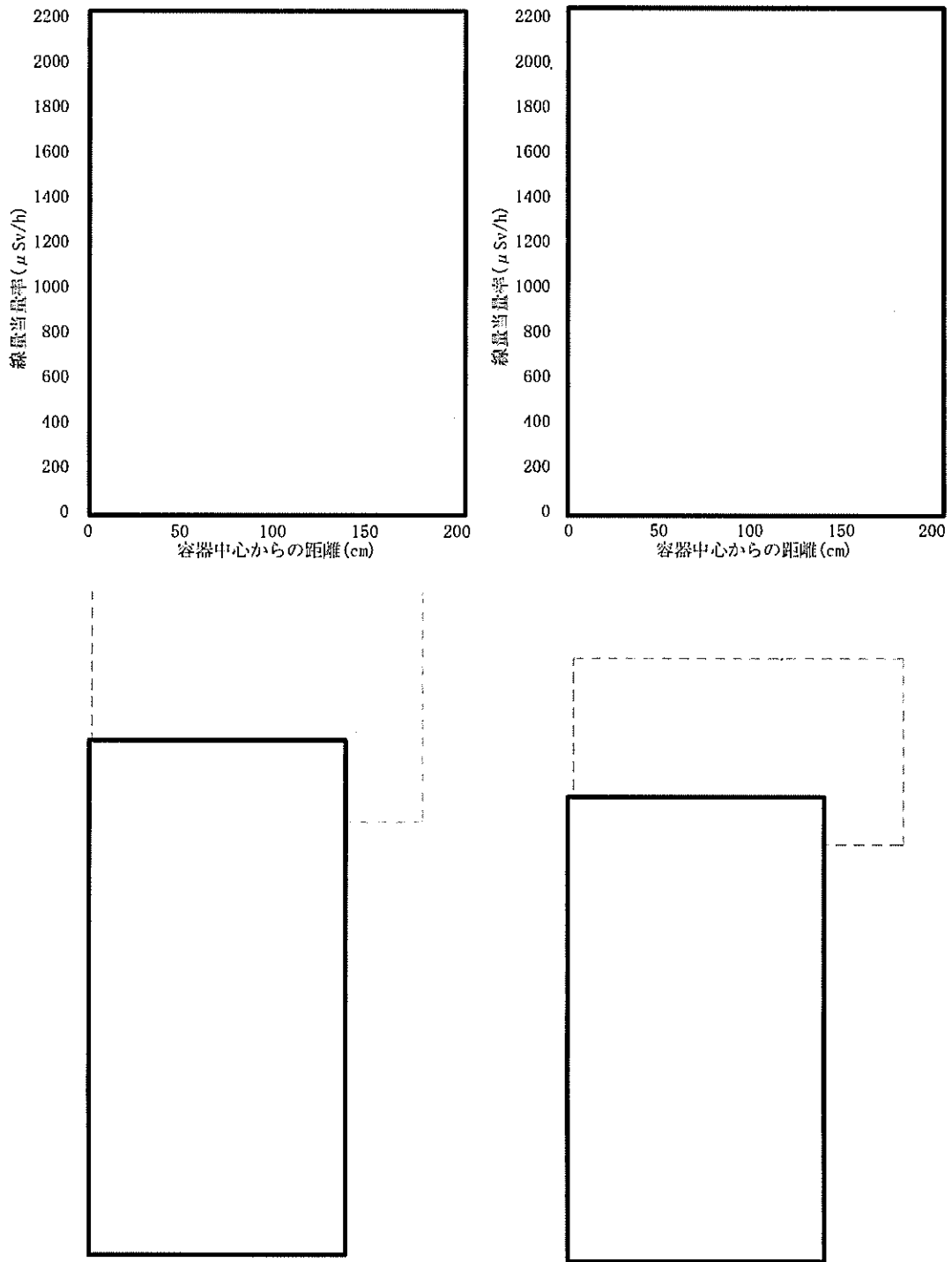
別紙5-2表 線量当量率評価結果 (17×17燃料 (A型) 収納時)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

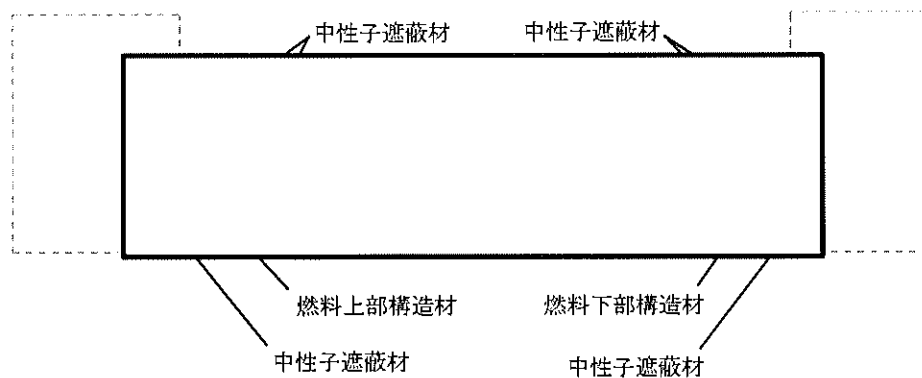
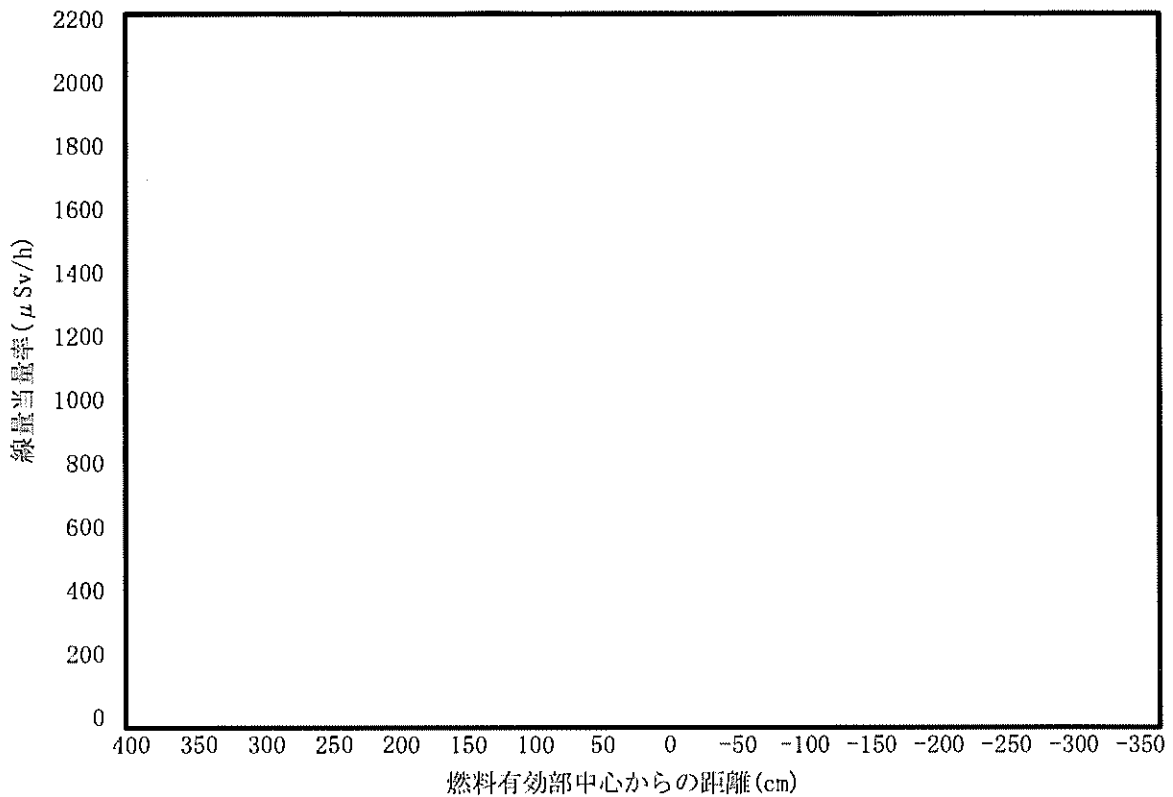
評価点	頭部			側部	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トラネオン部)		径方向	径方向 (トラネオン部)	軸方向
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨
表面 ガンマ線	燃料有効部	<0.1	8.0	100.7	5.4	6.0	
	構造材放射化	0.2	103.0	25.9	13.4	35.9	
	二次ガンマ線	0.2	5.7	25.7	4.8	4.6	
中性子	41.7	389.3	753.8	45.1	1108.3	25.2	
合計	42.2 ^(注)	391.1 ^(注)	870.5	197.4	<u>1131.9</u>	71.7	
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から1m ガンマ線	燃料有効部	<0.1	22.5	44.8	25.8	2.6	
	構造材放射化	<0.1	20.1	12.5	14.6	14.8	
	二次ガンマ線	<0.1	5.4	10.4	5.8	1.7	
中性子	20.9	24.5	34.0	18.4	26.3	15.8	
合計	21.2 ^(注)	72.5	82.9	<u>86.1</u>	61.4	34.9	

(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

※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。



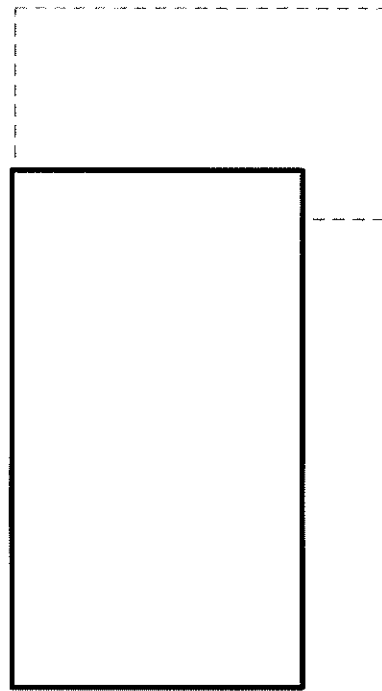
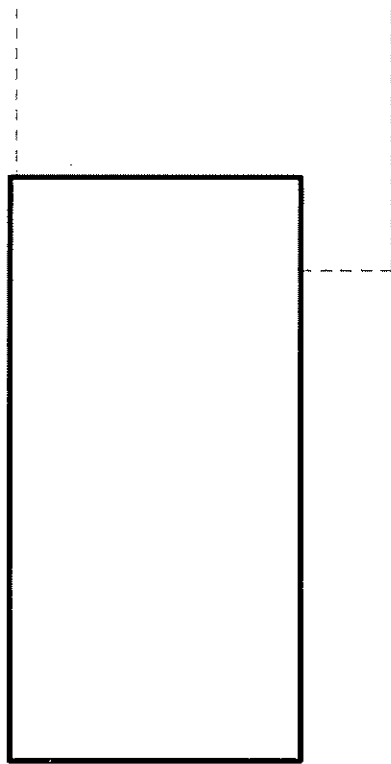
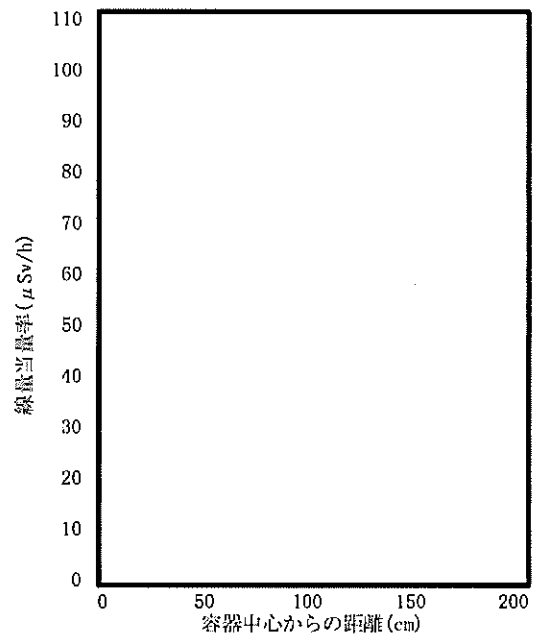
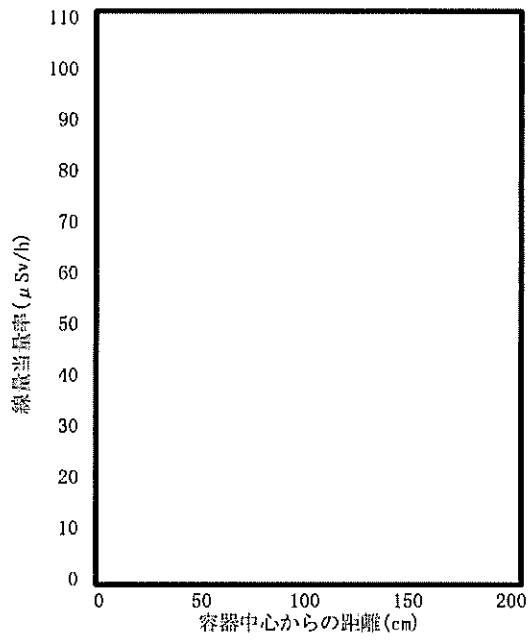
別紙5-2図 表面の線量当量率分布の比較（頭部軸方向・底部軸方向）
 (17×17 燃料 (A型) 収納時)



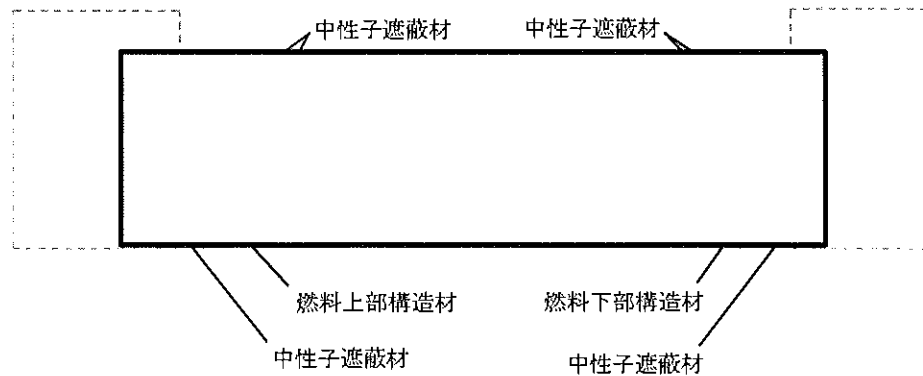
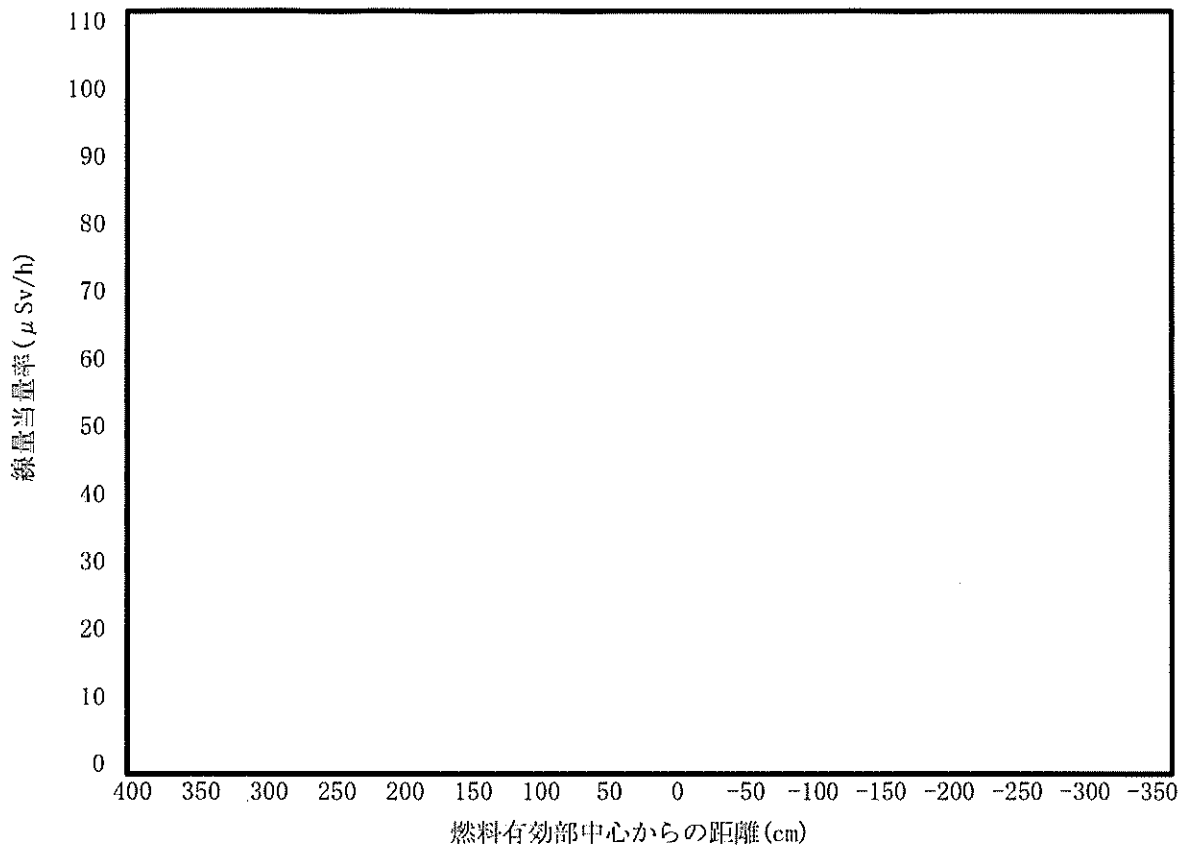
(注 1) MCNP5 解析の線量当量率は、周方向の最大となる方向の MCNP5 解析値である (ト
ラニオン方向も含まれる)。

(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。

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))
(17×17 燃料 (A型) 収納時)



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)
(17×17燃料(A型)収納時)



- (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) D0T3.5 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。

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 (トラニオン方向含む))
(17×17 燃料 (A型) 収納時)

(添付) 二次元輸送計算コード DOT3.5 について

i 概要

二次元輸送計算コード DOT3.5⁽¹⁾ (以下「DOT コード」という。)は、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された二次元輸送コードである。

ii 機能

DOT コードは、遮蔽解析に関して以下の機能を有する。

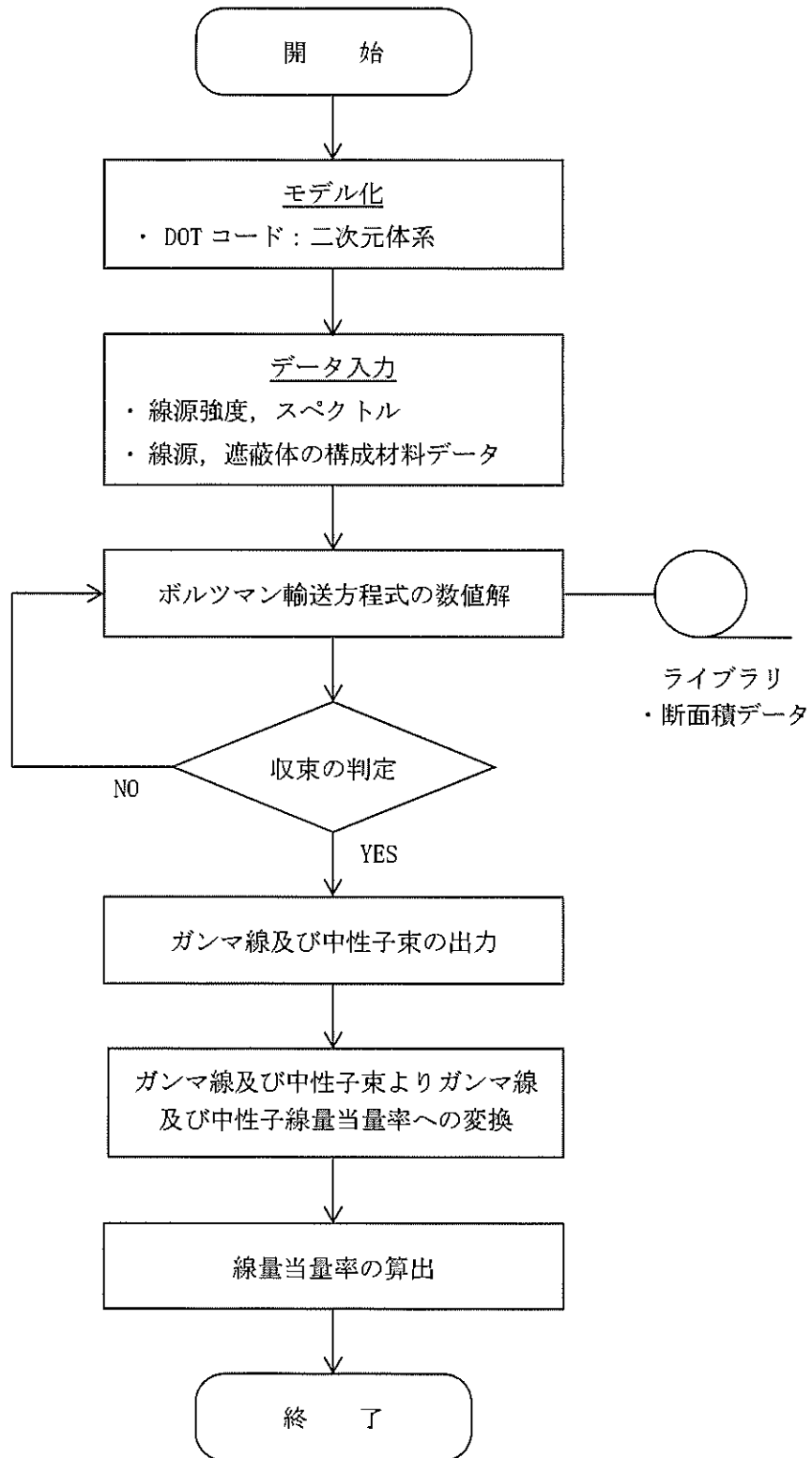
- a) ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を Sn 法により解く解析コードであり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- b) DOT コードは、二次元の体系を扱うことができる。

iii 解析フロー

DOT コードの解析フローを別紙 5-6 図 (1/2) に示す。

iv 使用実績及び検証

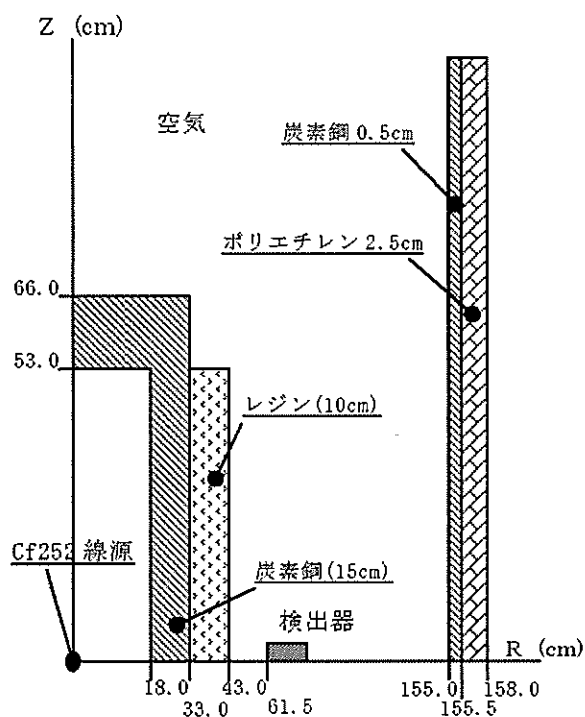
DOT コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、輸送キャスクの遮蔽解析の豊富な実績がある。使用済燃料輸送容器の解析事例と測定値⁽²⁾を別紙 5-6 図 (2/2) に示す。使用済燃料輸送容器体系での放射線透過試験での測定値に対して、DOT コードによる JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 を用いた計算値は中性子、ガンマ線共によく一致しており、輸送容器体系での線量当量率評価に使用することの妥当性を確認した。



別紙 5-6 図 (1/2) DOT コードについて (解析フロー図)

輸送容器体系ベンチマーク計算結果

項目	線量当量率 ($\mu\text{Sv/h}$)			
	中性子	ガンマ線		
		2次 ガンマ	^{252}Cf ガンマ	合計
測定値	28.4	-	-	2.52
計算値 (DOT3.5+MATXSLIB-J33)	29.0	2.04	0.200	2.24



(注) 使用済燃料輸送容器において、 ^{252}Cf 線源を設置した放射線透過試験での線量当量率測定値と、DOT コードによる JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 を用いたベンチマーク計算値を比較すると、良い一致を示している。

別紙 5-6 図 (2/2) DOT コードについて (計算モデル⁽²⁾ 及びベンチマーク計算結果)

別紙 5-11

v 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33

MATXSLIB-J33⁽³⁾ は、DOT3.5等の輸送計算コード用に、JENDL-3.3に基づく断面積ライブラリとして、日本原子力研究所にて整備されたものである。MATXSLIB-J33を用いた断面積ライブラリの作成条件は別紙5-3表に示すとおりであり、多群ライブラリ処理コードTRANSX-2.15⁽⁴⁾を用いて、輸送計算コード用に中性子175群、ガンマ線42群のエネルギー群構造に変換され作成されている。

なお、TRANSX-2.15については公開されている修正パッチ⁽⁵⁾を適用したものをを用いている。

JENDL-3.3の信頼性はivに示すベンチマーク解析(別紙5-6図(2/2)参照)で確認されている。

別紙5-3表 MATXSLIB-J33を用いた断面積ライブラリの作成条件

多群ライブラリ 処理コード	TRANSX-2.15
エネルギー群数	中性子175群、ガンマ線42群
自己遮蔽因子	考慮 heterogeneity option : constant escape cross section mean chord length : 1000000cm (体系からの漏れなしを想定)
輸送近似	diagonal (コードマニュアルで推奨されている近似オプション)
ルジャンドル 展開次数	P-5 (P-6まで整備済みのMATXSLIB-J33を用いて、P-5断面積を作成)

vi 参考文献

- (1) Oak Ridge National Laboratory, “DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code”, CCC-276, (1977).
- (2) 大西世紀 ほか, 「 ^{252}Cf 核分裂中性子源を用いた遮へい透過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J33 の適用性に関する研究」, 海上技術安全研究所報告 第7巻 第3号 研究報告, (2007).
- (3) K. Kosako, et al., “The Libraries FSXLIB and MATXSLIB Based on JENDL-3.3”, JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).
- (4) R. E. MacFarlane, “TRANSX2:A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes”, LA-12312-MS, (1992).
- (5) International Atomic Energy Agency Nuclear Data Services, “TRANSX Patches”, <https://www-nds.iaea.org/fendl20/transx-patches.htm>,

三次元輸送計算コード MCNP5 による A 型燃料の包絡性確認

線量当量率評価は線源強度比較により、17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A 型) 及び 15×15 燃料 48,000MWd/t 型 (A 型) を代表とし実施している。加えて、17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A 型) 及び 15×15 燃料 48,000MWd/t 型 (A 型) がそれぞれ B 型燃料の線量当量率評価値を包絡*することを線量当量率評価にて確認している。

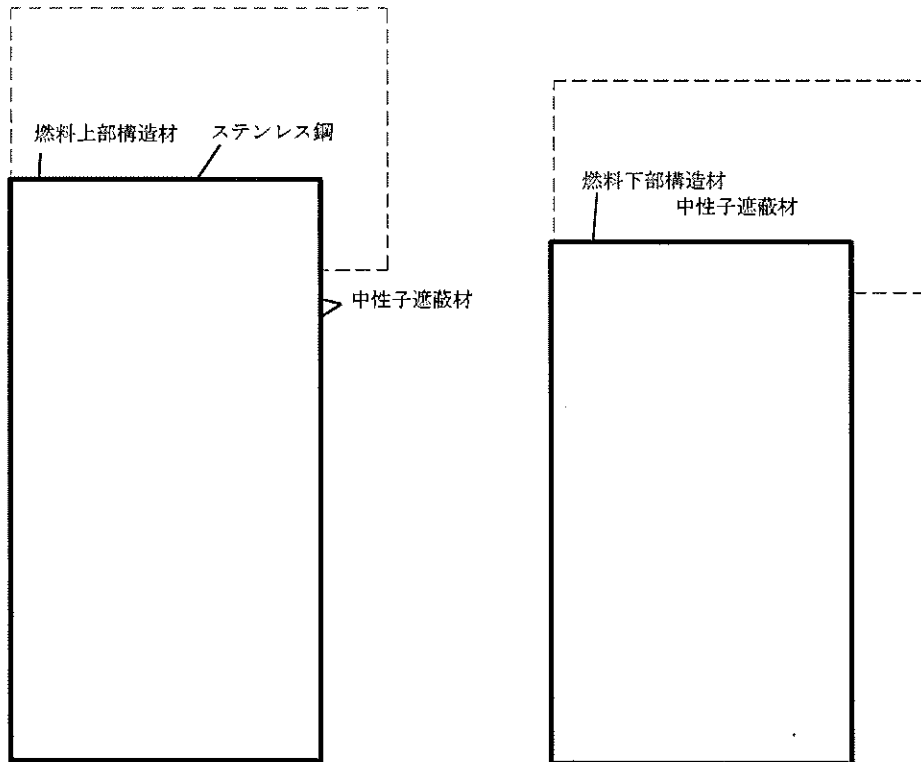
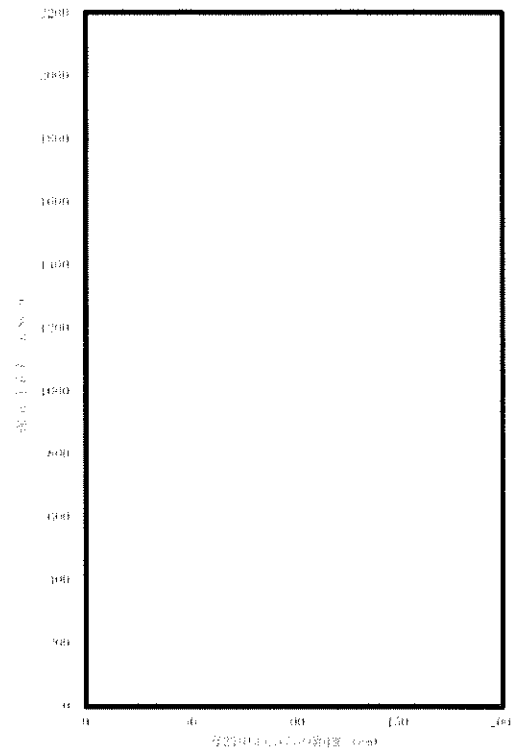
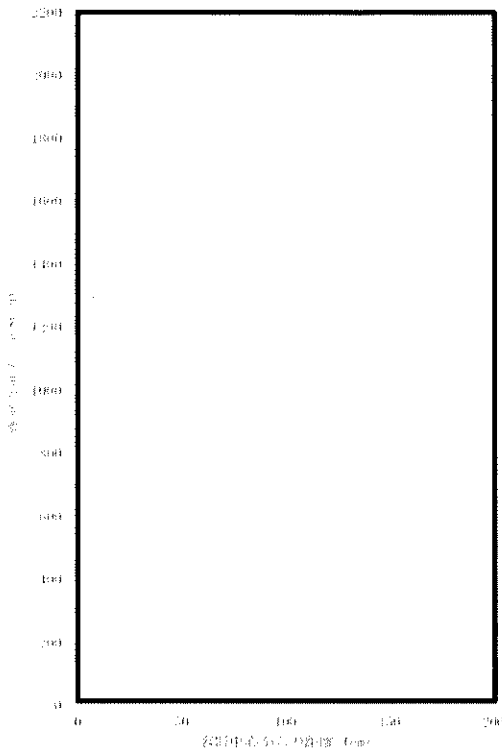
ここでは、遮蔽解析における MSF-24P 型への A 型燃料収納時の包絡性について確認するため、三次元輸送計算コード MCNP5 による 17×17 燃料 (B 型) 収納時及び 15×15 燃料 (B 型) 収納時の遮蔽評価との比較を行った。

最大線量当量率の比較結果を別紙 6-1 表に、線量当量率分布の比較を別紙 6-1 図及び別紙 6-2 図に示す。別紙 6-1 図及び別紙 6-2 図に示すとおり、放射化ガンマ線源の寄与が大きい箇所 (燃料集合体上下端付近) では放射化ガンマ線源強度が大きい B 型燃料収納時の線量当量率が高くなる。しかし、当該箇所は局所的であり、大部分の箇所は冷却年数が短く、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 A 型燃料収納時の線量当量率の方が高くなる。別紙 6-1 表に示すとおり、MSF-24P 型表面及び MSF-24P 型表面から 1 m 離れた位置における線量当量率は、それぞれ 17×17 燃料 (A 型) 収納時及び 15×15 燃料 (A 型) 収納時が B 型燃料収納時を包絡していることを確認した。

*:「包絡」とは、MSF-24P 型表面及び表面から 1 m 離れた位置における線量当量率 (合計値) が、それぞれ比較対象より大きいことを指す。

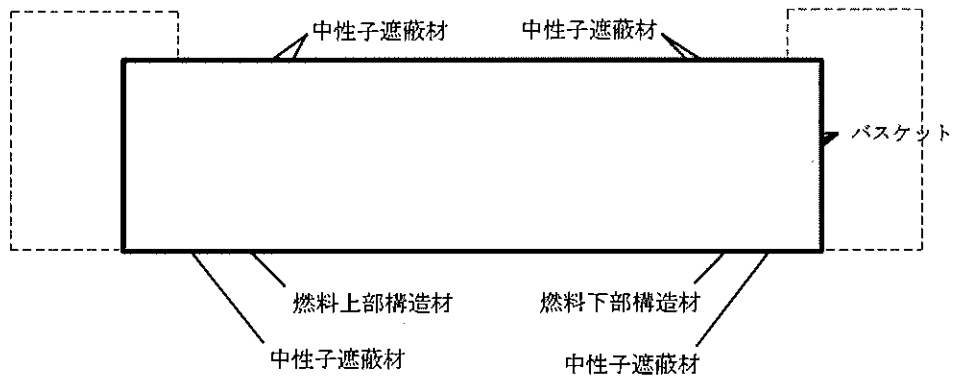
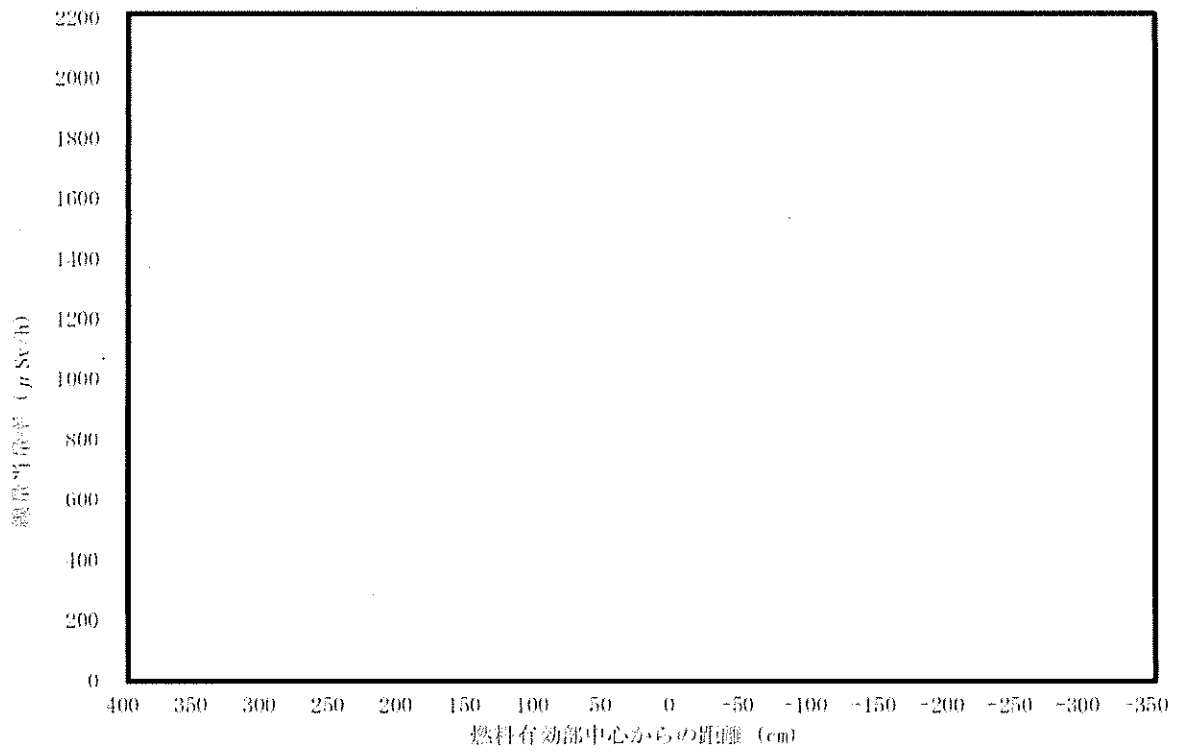
別紙6-1表 線量当量率評価結果

項目	評価		結果		評価基準	備考
	17×17 燃料収納時		15×15 燃料収納時			
	A 型	B 型	A 型	B 型		
表面における線量当量率	0.79 mSv/h	0.58 mSv/h	0.81 mSv/h	0.56 mSv/h	2 mSv/h 以下	線量当量率の分布図を、別紙6-1図及び別紙6-2図に示す。
表面から1 m離れた位置における線量当量率	85 μSv/h	83 μSv/h	83 μSv/h	79 μSv/h	100 μSv/h 以下	



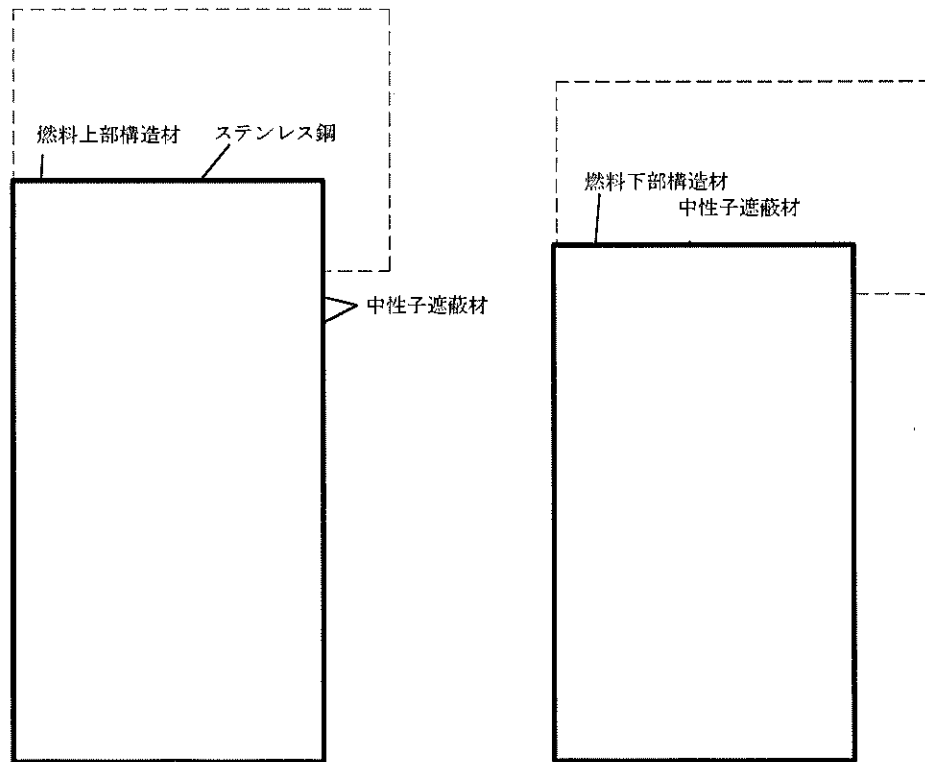
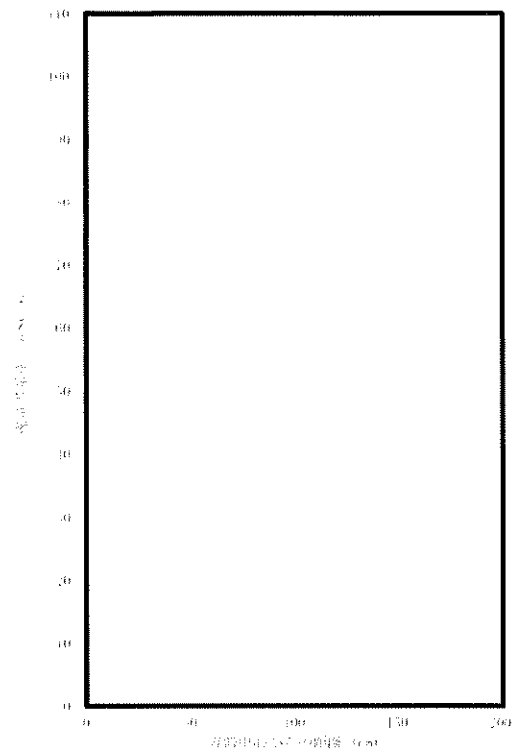
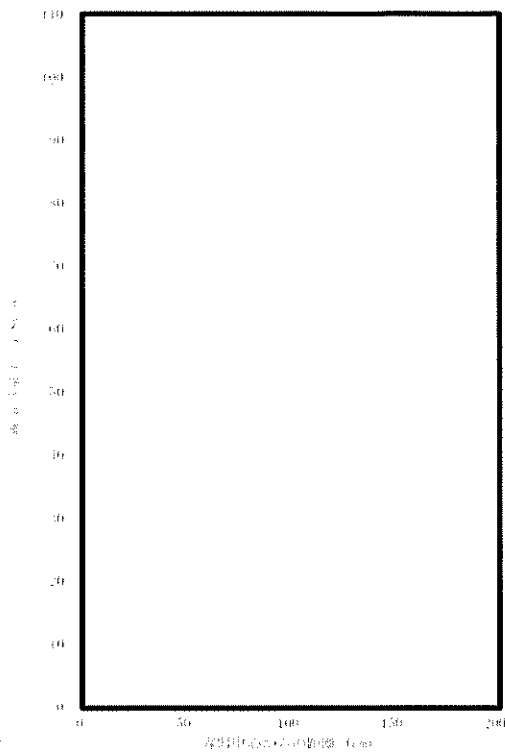
注：モニタリングポート部、バルブ部、トラニオン等を同一平面に示している。

別紙6-1図(1/4) 17×17燃料収納時 MSF-24P型線量当量率分布
(表面位置、頭部軸方向、底部軸方向)



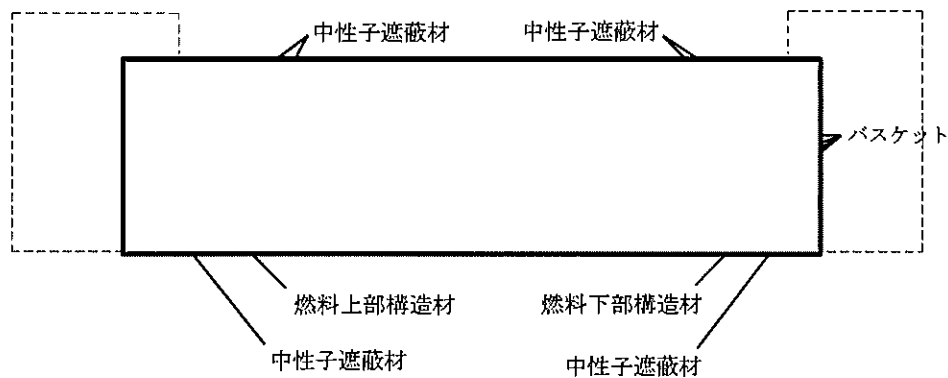
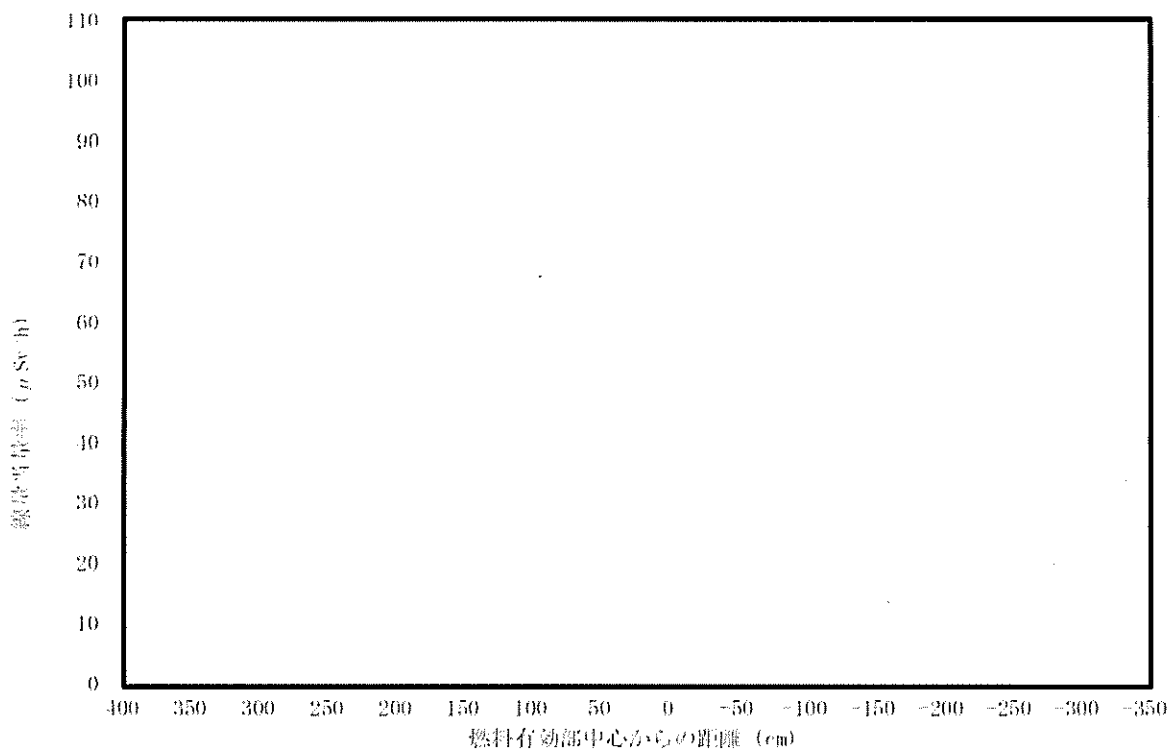
注：モニタリングポート部、バルブ部、トラニオン等を同一平面に示している。

別紙6-1図(2/4) 17×17燃料収納時 MSF-24P型線量当量率分布
(表面位置、側部方向)



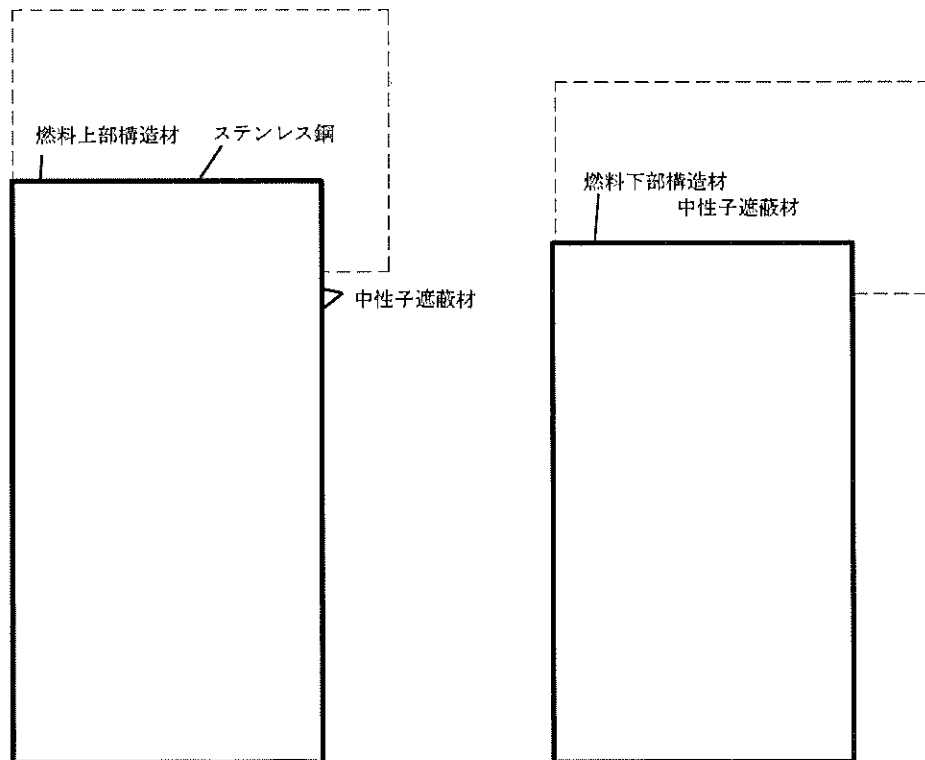
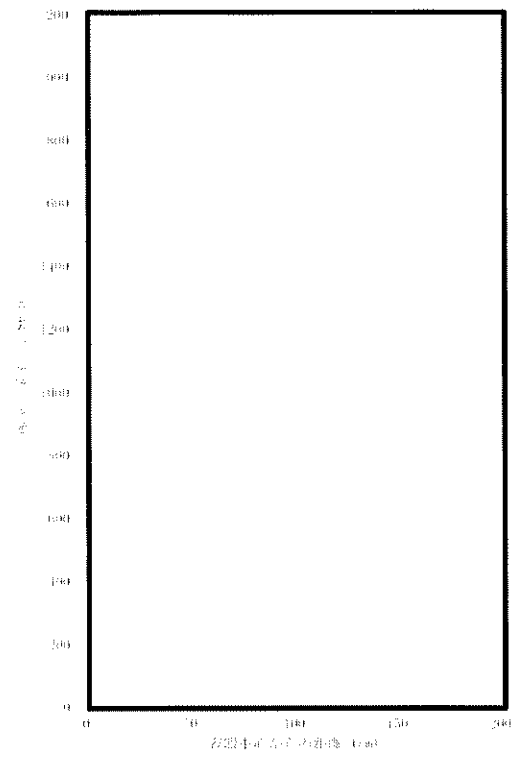
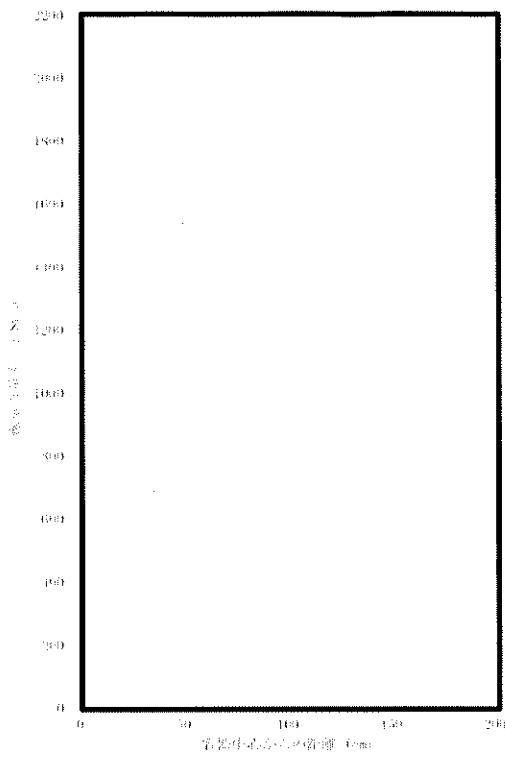
注：モニタリングポート部、バルブ部、トランニオン等を同一平面に示している。

別紙6-1図(3/4) 17×17燃料収納時 MSF-24P型線量当量率分布
(表面から1 m離れた位置、頭部軸方向、底部軸方向)



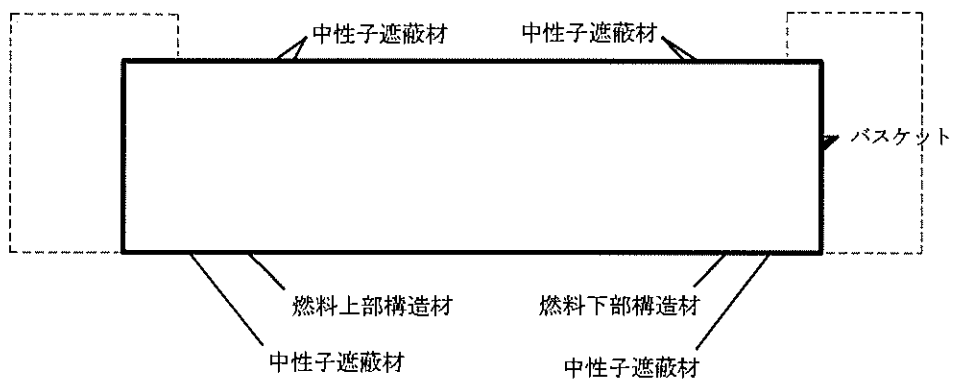
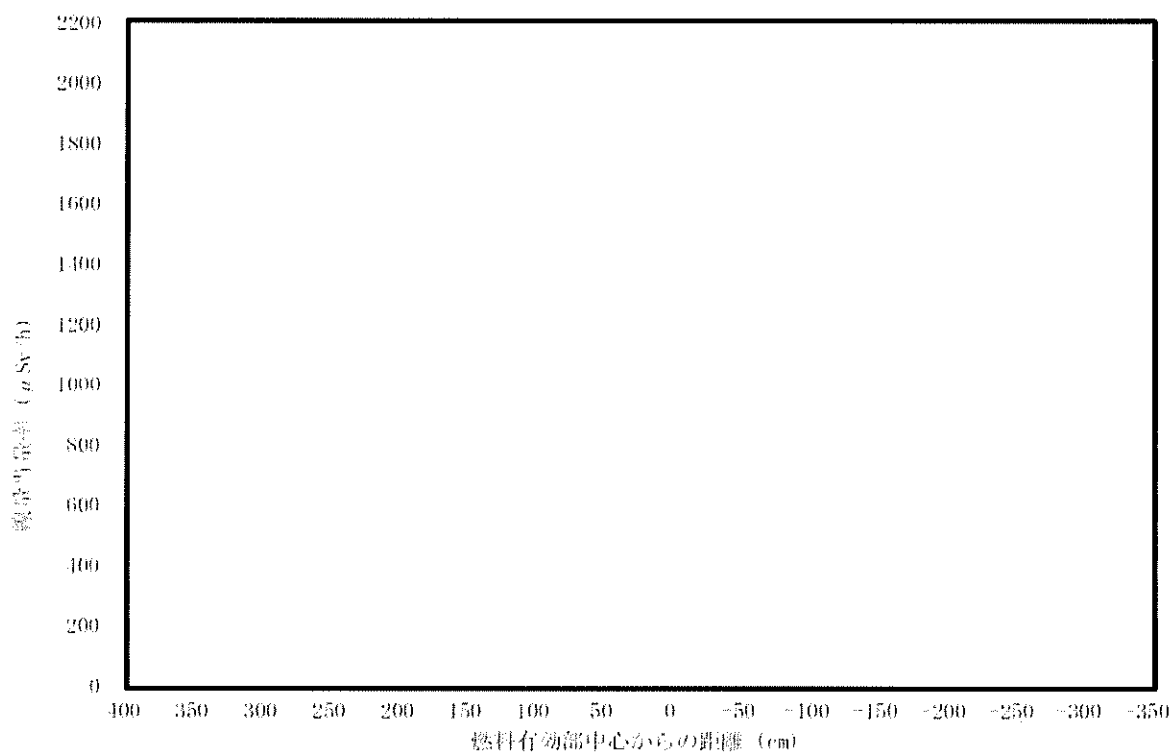
注：モニタリングポート部、バルブ部、トラニオン等を同一平面に示している。

別紙6-1図(4/4) 17×17燃料収納時 MSF-24P型線量当量率分布
(表面から1 m離れた位置、側部方向)



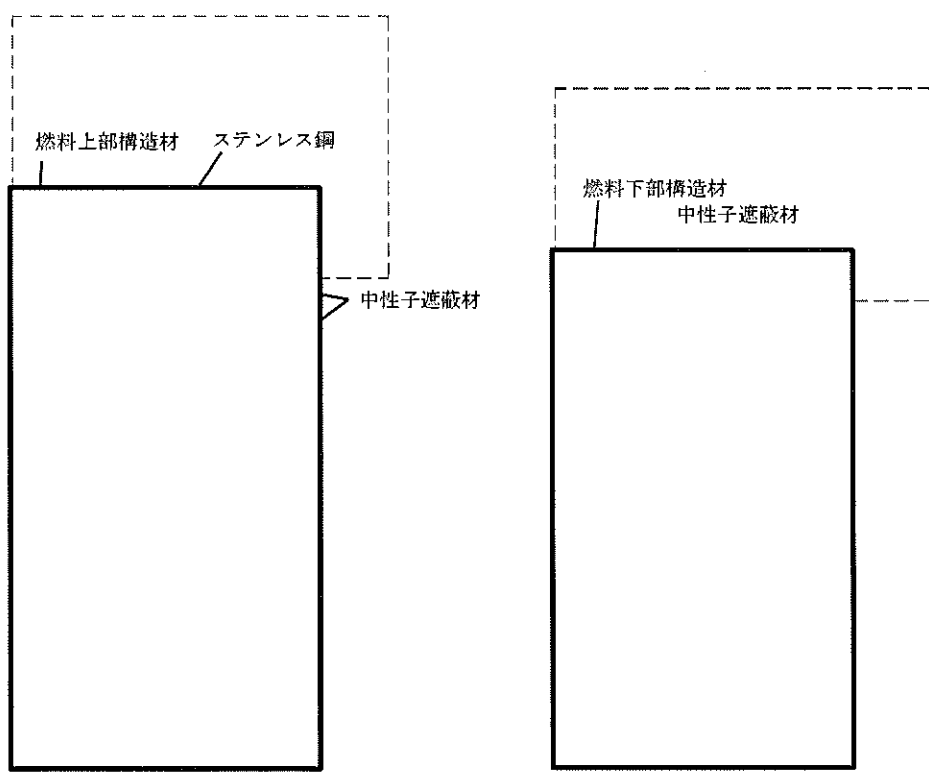
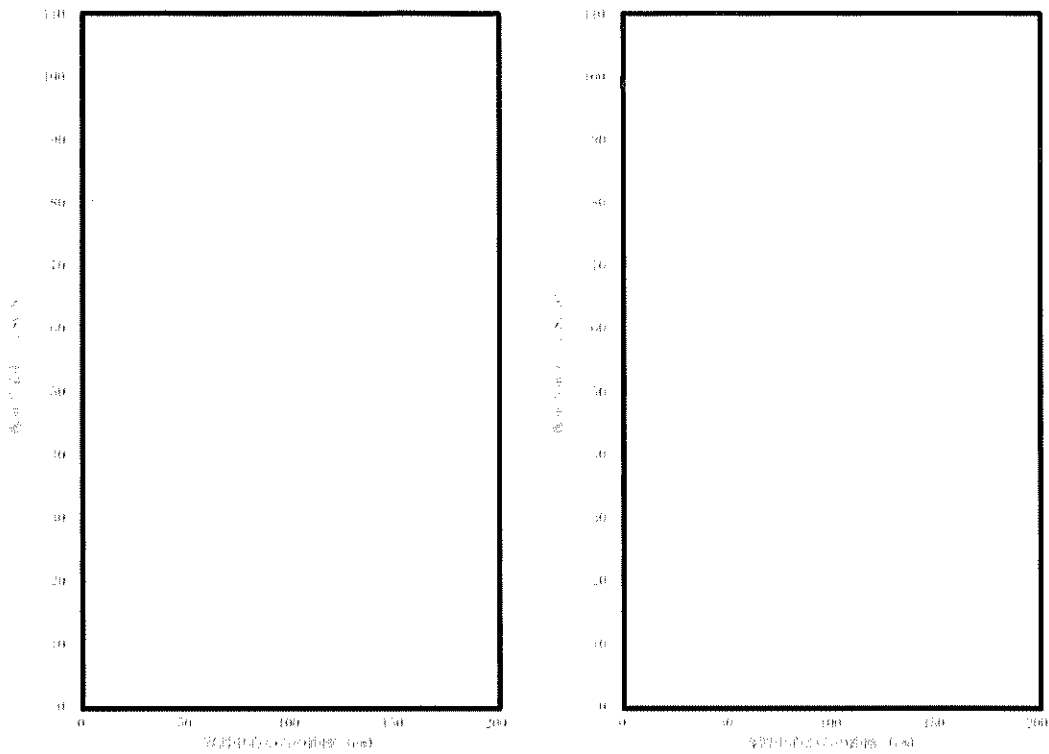
注：モニタリングポート部、バルブ部、トラニオン等を同一平面に示している。

別紙6-2図(1/4) 15×15燃料収納時 MSF-24P型線量当量率分布
(表面位置、頭部軸方向、底部軸方向)

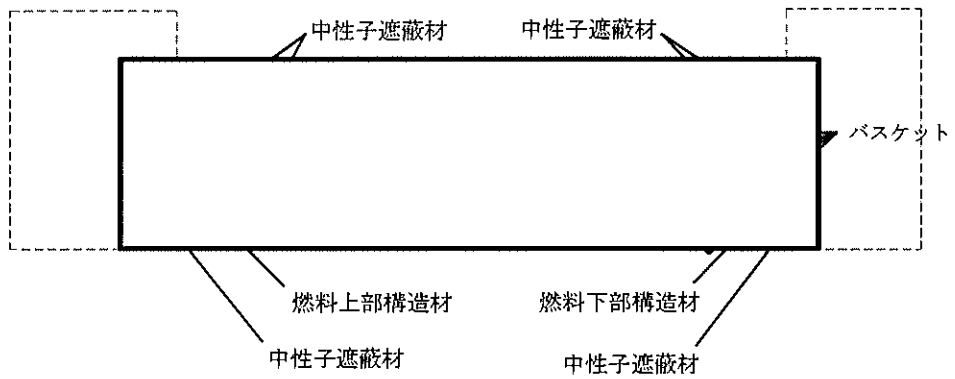
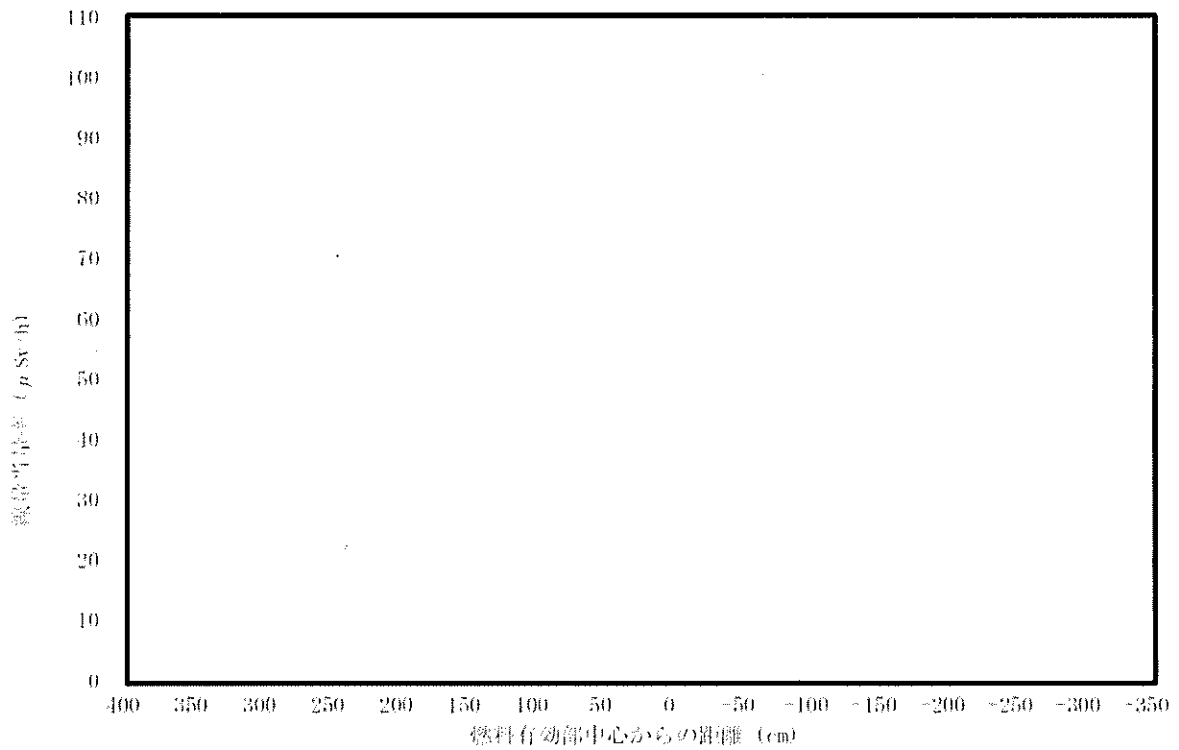


注：モニタリングポート部、バルブ部、トラニオン等を同一平面に示している。

別紙6-2図(2/4) 15×15燃料収納時 MSF-24P型線量当量率分布
(表面位置、側部方向)



注：モニタリングポート部、バルブ部、トラニオン等を同一平面に示している。
 別紙6-2図(3/4) 15×15燃料収納時 MSF-24P型線量当量率分布
 (表面から1 m離れた位置、頭部軸方向、底部軸方向)



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。

別紙6-2図(4/4) 15×15燃料収納時 MSF-24P型線量当量率分布
(表面から1 m離れた位置、側部方向)

遮蔽機能データの適用確認方法

設置許可基準規則第 29 条及び第 30 条の遮蔽評価に用いるソースタム条件として、MSF-24P 型の遮蔽機能データを用いる場合は、型式証明申請第 16 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 型の遮蔽機能データの作成方法については、本型式証明申請第 16 条で妥当性確認済）。

設置（変更）許可申請時に実施する第 29 条及び第 30 条の遮蔽評価では、別紙 7-1 図に示す MSF-24P 型表面から 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 16 条の遮蔽評価結果（別紙 7-1 表）と同等*となることをもって、遮蔽機能データが適切に使用されていることを確認することができる。別紙 7-2 図に遮蔽機能データの確認のイメージを示す。

*：MCNP5 コードを用いた評価につき同一の値にならない場合がある。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 7-1 表 (1/2) MSF-24P 型の表面から 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)
(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	<0.1 (1.1)	23.4 (0.5)	45.0 (0.3)	27.1 (0.6)
	構造材放射化	0.2 (0.5)	22.7 (0.9)	11.5 (0.2)	13.0 (1.0)
	二次ガンマ線	0.2 (1.2)	5.1 (0.5)	10.0 (0.4)	5.5 (0.5)
中性子	20.3 (0.3)	32.3 (0.9)	17.7 (0.2)	29.1 (1.0)	12.9 (0.3)
合計	20.8	83.5	84.2	74.7	34.4

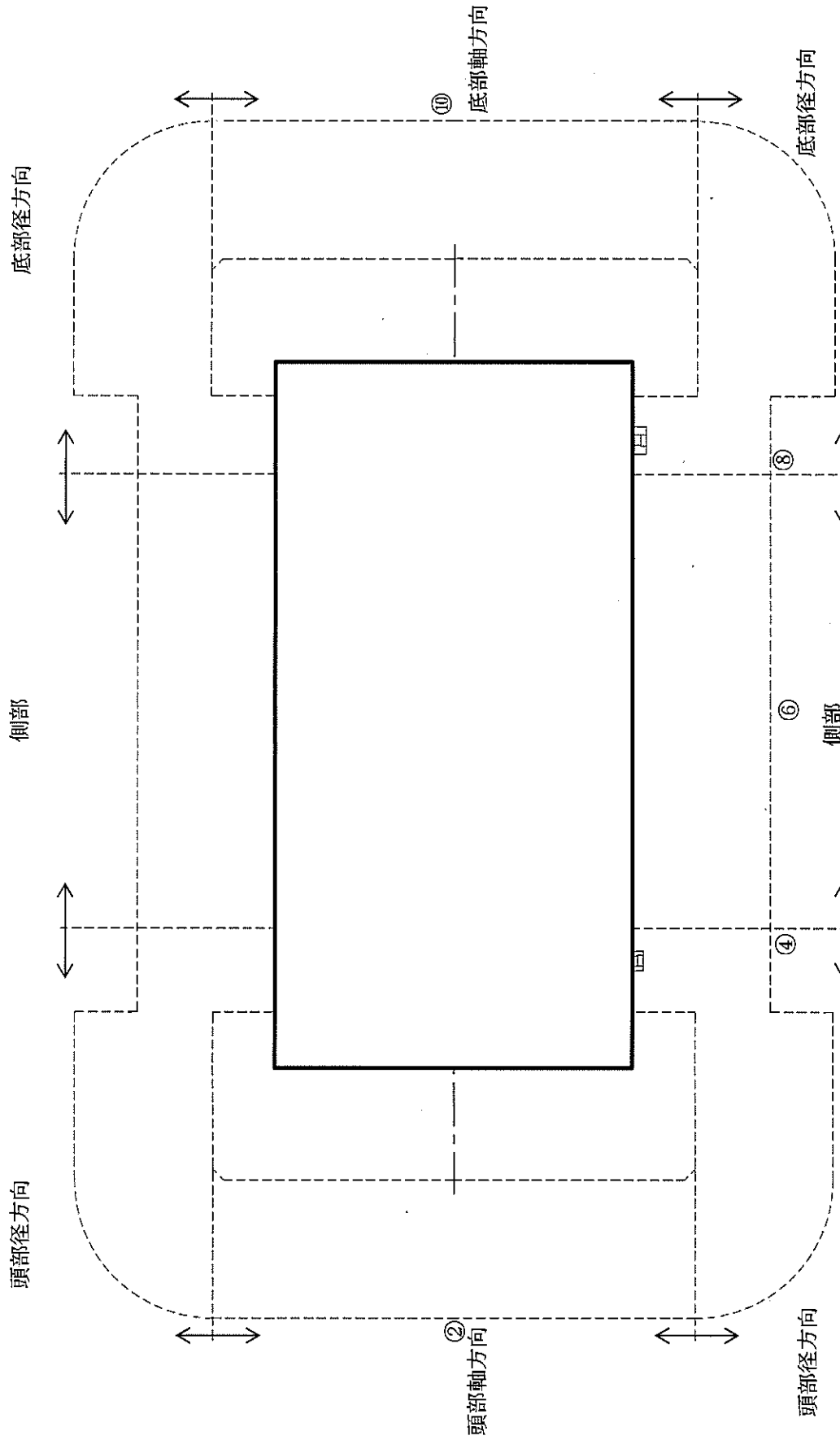
※ () 内は統計誤差 (単位: %) を示す。

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 7-1 表 (2/2) MSF-24P 型の表面から 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)
(単位: μ Sv/h)

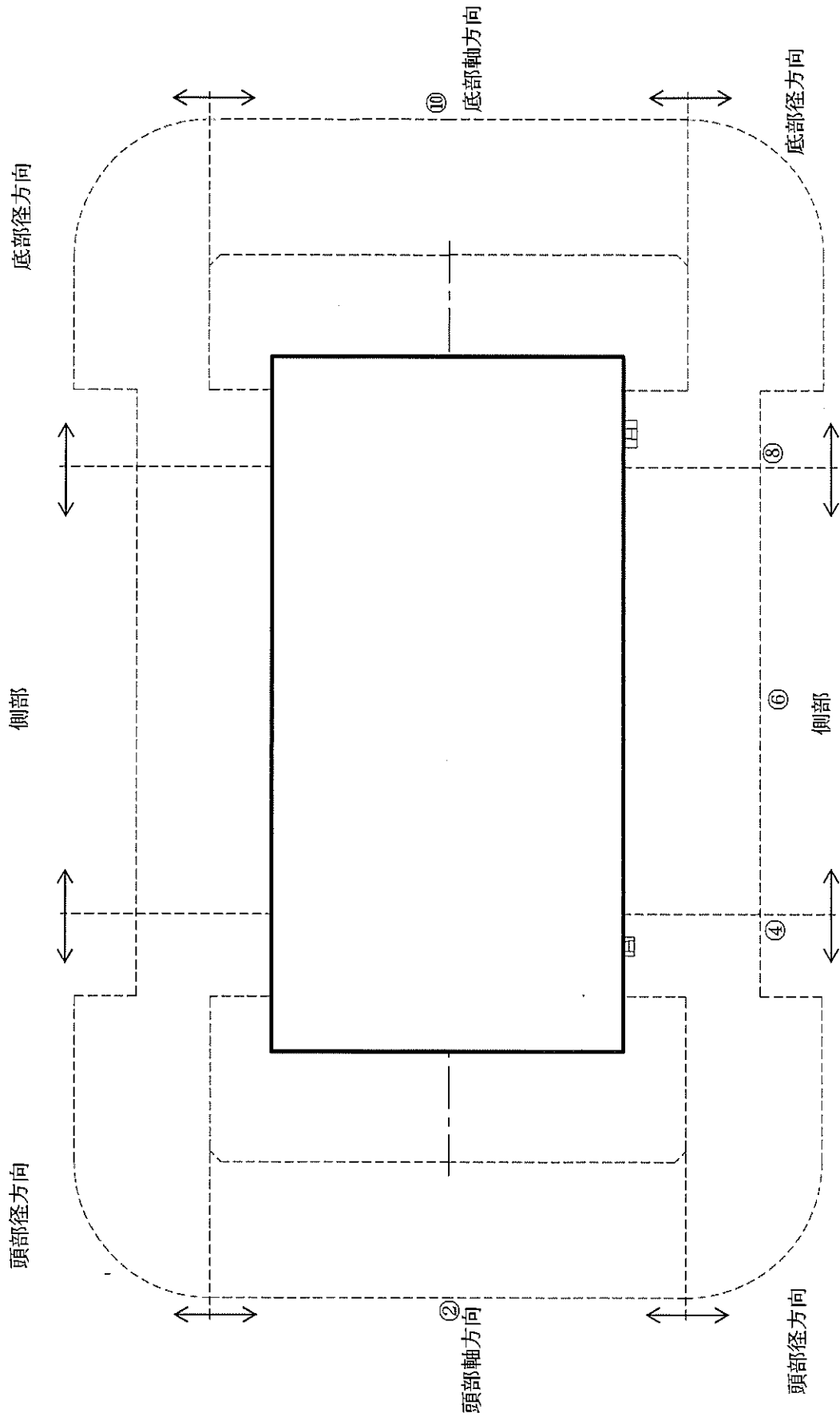
評価点	頭部		側部	底部		
	軸方向	径方向		径方向	軸方向	
	②	④		⑧	⑩	
ガンマ線 表面から 1 m	燃料有効部	0.1 (0.5)	22.4 (0.3)	44.9 (0.2)	25.4 (0.3)	3.1 (0.3)
	構造材放射化	0.1 (0.3)	16.2 (0.5)	8.5 (0.2)	8.3 (0.5)	10.6 (0.2)
	二次ガンマ線	0.2 (1.2)	5.3 (0.4)	10.5 (0.3)	5.5 (0.4)	1.9 (0.6)
中性子	22.2 (0.2)	35.9 (0.5)	19.0 (0.1)	32.0 (0.6)	14.0 (0.2)	
合計	22.6	79.8	82.9	71.2	29.6	

※ () 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



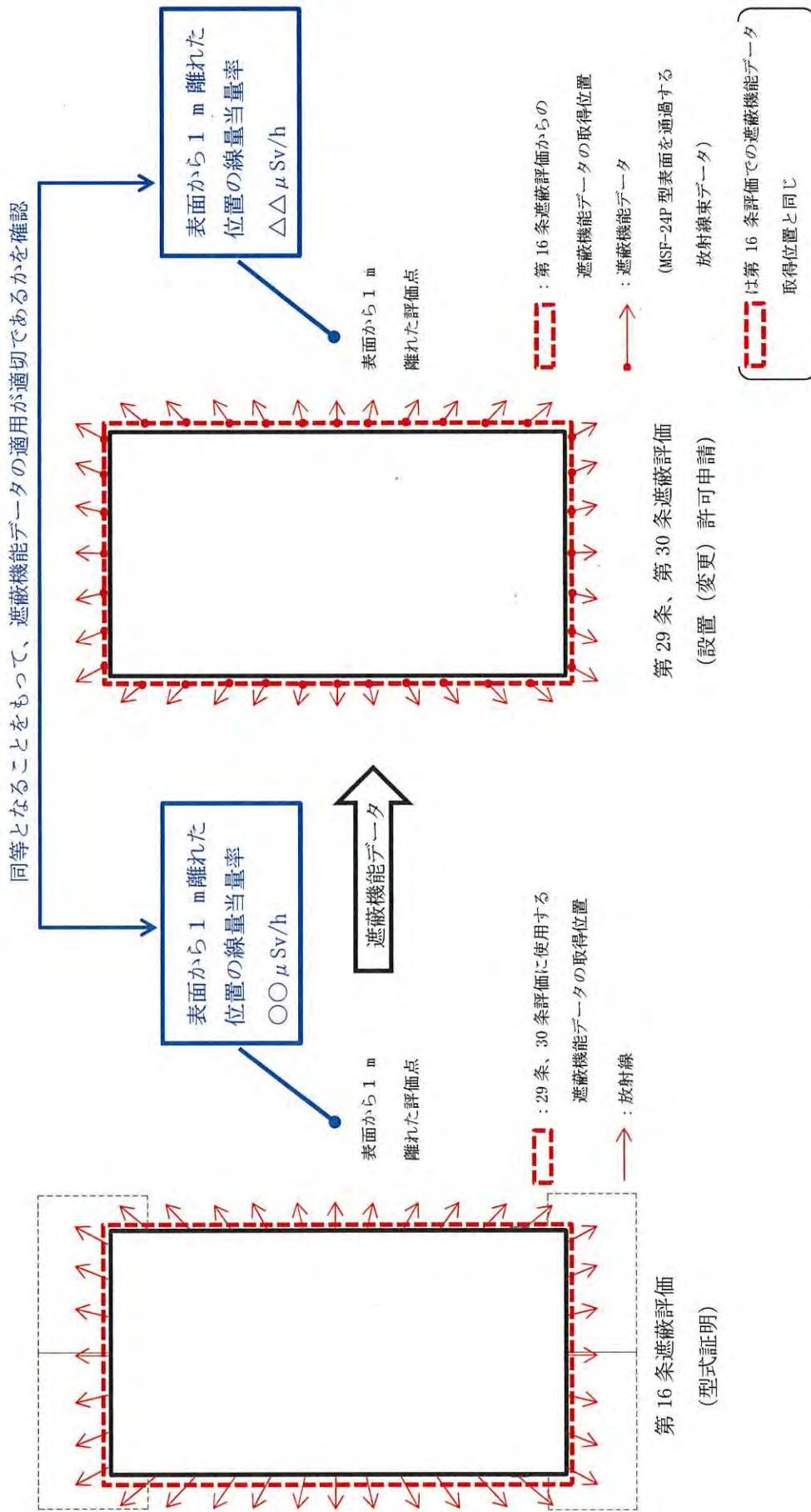
(注) ②, ④, ⑥, ⑧, ⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。
モニタリングポート、バルブ、トラニオンを同一断面に図示している。

別紙 7-1 図 (1/2) MSF-24P 型の表面から 1 m 離れた位置における代表評価点 (17×17 燃料)



(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 7-1 図 (2/2) MSF-24P 型の表面から 1 m 離れた位置における代表評価点 (15×15 燃料)



別紙 7-2 図 遮蔽機能データ確認イメージ