

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	39
4. 遮蔽機能データ	60
5. 参考文献	69

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 遮蔽解析結果の詳細 (DOT3.5 コード)

別紙 5 遮蔽解析結果の詳細 (MCNP5 コード)

別紙 6 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 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

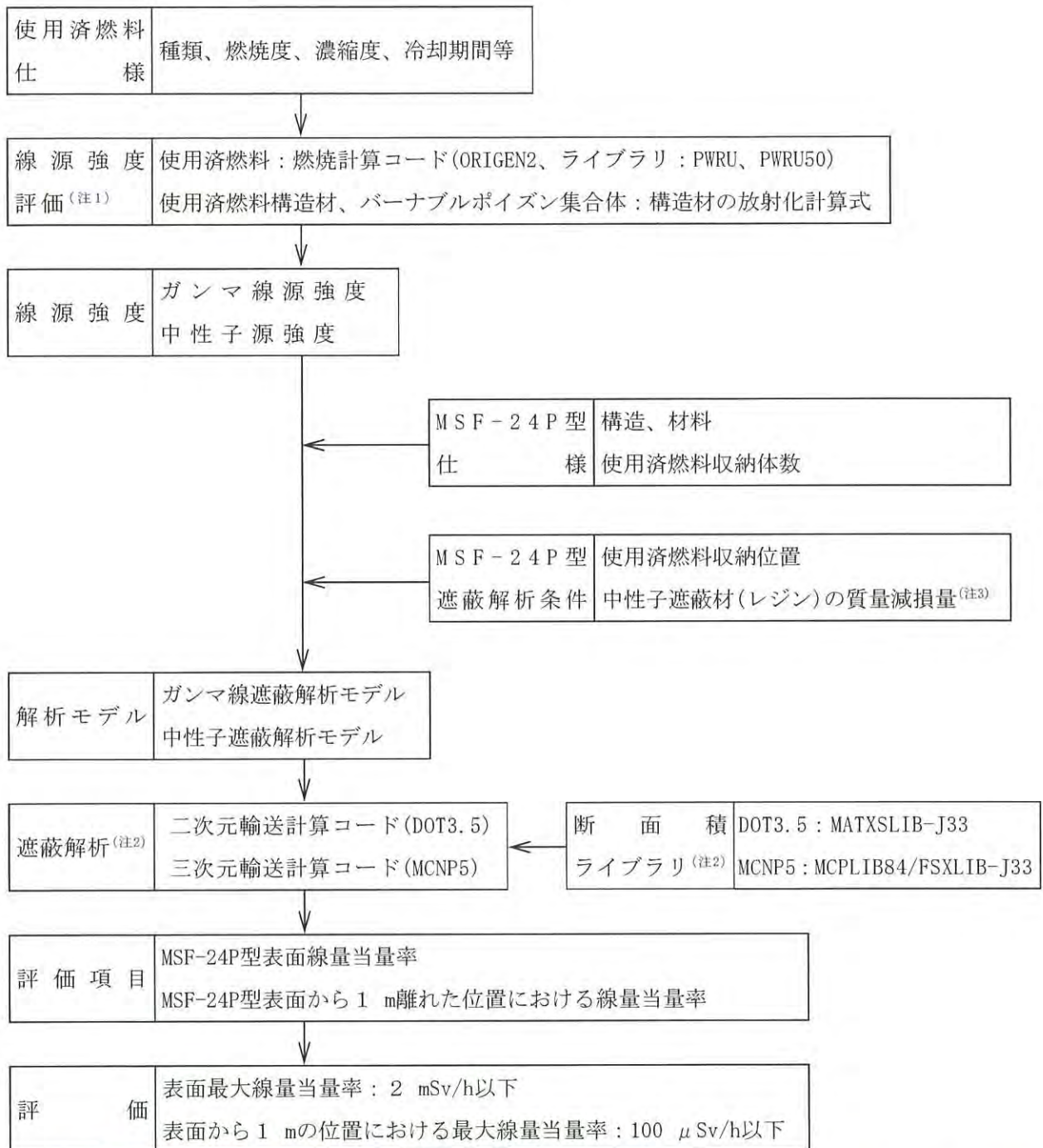
a. 兼用キャスクからの線量当量率は、兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、及び1) で求めた放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリ（以下「遮蔽解析コード等」と総称する。）を使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の兼用キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。

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。

なお、遮蔽機能に係る要求事項への適合性の確認について、線源強度の評価は型式証明及び型式指定ともに ORIGEN2 コードを用いる。また、線量当量率の評価は、型式証明においては既認可実績のある DOT3.5 コード（断面積ライブラリ：MATXSLIB-J33）及び現実的な評価モデルが取り扱える MCNP5 コード（断面積ライブラリ：MCPLIB84/FSXLIB-J33）を用い、型式指定においては型式証明で用いたコードのうちどちらかのコードを選択する設計方針とする。



(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) 遮蔽解析は型式証明においては DOT3.5 コード (断面積ライブラリ：MATXSLIB-J33) 及び MCNP5 コード (断面積ライブラリ：MCPLIB84/FSXLIB-J33) を用い、型式指定においては型式証明で用いたコードのうちどちらかのコードを選択する。

(注3) MSF-24P 型の主要な構成部材のうち、中性子遮蔽材は、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する。

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。

線量当量率評価は、二次元輸送計算コード DOT3.5 及び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。遮蔽解析に用いる燃料タイプについては第 1 表に示す、17×17 燃料 48,000Mwd/t 型（A 型、B 型）及び 15×15 燃料 48,000Mwd/t 型（A 型、B 型）とする。

(3) 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。遮蔽解析モデルの入力条件への不確かさの考慮は、二次元遮蔽解析モデル及び三次元遮蔽解析モデル共通で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。

1) 二次元遮蔽解析モデル

MSF-24P 型を R-Z 体系の有限円筒モデル（以下「二次元モデル」という。）でモデル化している。ただし、有限円筒モデルで直接モデル化できない使用済燃料集合体、バスケット、トラニオン等は、構造上の特徴を考慮して、均質化あるいは線束接続によって評価している。なお、二次元モデルは、キャスク中央付近で二分割しており、頭部評価モデルは、使用済燃料集合体が一次蓋に接した状態とし、底部評価モデルは、使用済燃料集合体が胴（底板）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

ルとしている。二次元モデルの均質化は以下のとおりである。

a. 燃料領域

第5図に示すとおり使用済燃料集合体とバスケットを均質化してモデル化している。中央部及び外周部燃料領域について、それぞれの燃料領域の実形状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。

b. バスケット外周部

第5図に示すとおり、燃料領域より外側から胴内面までの領域を均質化した円筒としてモデル化している。実形状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、バスケット外周部の密度を密度係数で調整している。密度係数は、キャスク水平断面 X-Y 体系のモデルにて円周方向のキャスク表面から 1 m 離れた位置の最大線量当量率を算出し、この値と同等となるようなバスケット外周部の密度係数を無限円筒モデルより求め、本体モデルに反映している。したがって、本体モデルにおける線量当量率は、実形状における最大線量当量率を包絡する設定となる。設定方法の詳細は別紙 1 に示す。

c. 胴、側部中性子遮蔽材及び外筒

第5図に示すとおり、円筒としてモデル化している。なお、側部中性子遮蔽材に伝熱フィンがある領域では、伝熱フィンは均質化している。

d. トラニオン部

トラニオン部については、実形状を模擬して別途モデル化し、評価している。

トラニオンを無視した本体モデルにて得られたトラニオン底面付近の線束を、別途モデル化した R-Z 体系のトラニオンモデルに接続している。トラニオン部は、トラニオン中心を通る断面でトラニオン底面及びキャスク本体の一部を含めモデル化している。

トラニオン部の線量当量率は、トラニオン有りモデルとトラ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值として求め、本体モデルの線量当量率にその補正值を乗じて評価している。設定方法の詳細は別紙 1 に示す。

2) 三次元遮蔽解析モデル

MSF-24P 型の実形状を基に、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。

(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

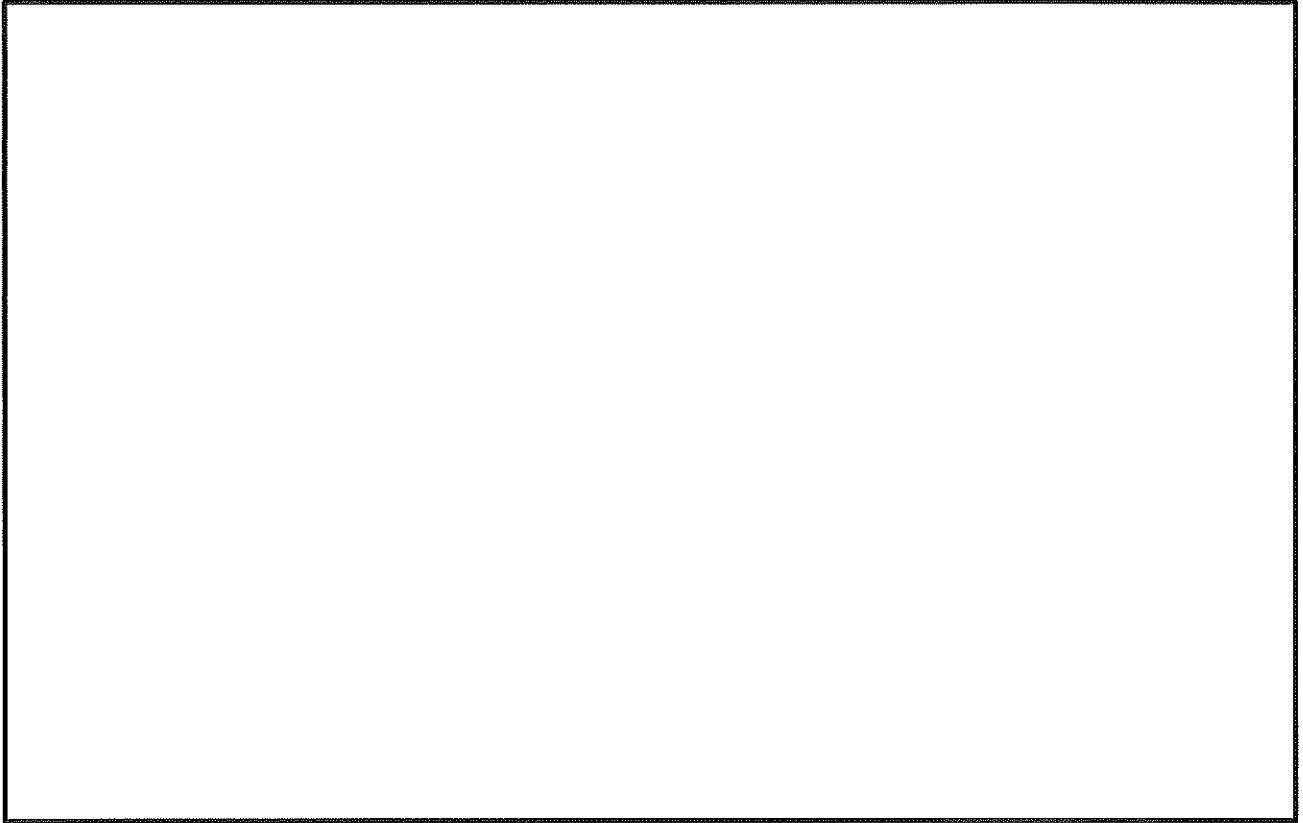
項目		17×17 燃料			
		キヤスク収納位置制限		解析条件	
		中央部	外周部	中央部	外周部
燃料集合体 1体の仕様	種類	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型、B型)	
	初期濃縮度 (wt%)	≤4.2			
	ウラン重量 (kg)	[Redacted]			
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	48	44
バーナブル ポイズン集合体 の仕様	冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17		A型: 15 B型: 17	
	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90	—	90	—
	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	
収納物仕様		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。なお、17×17燃料と15×15燃料はMSF-24P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

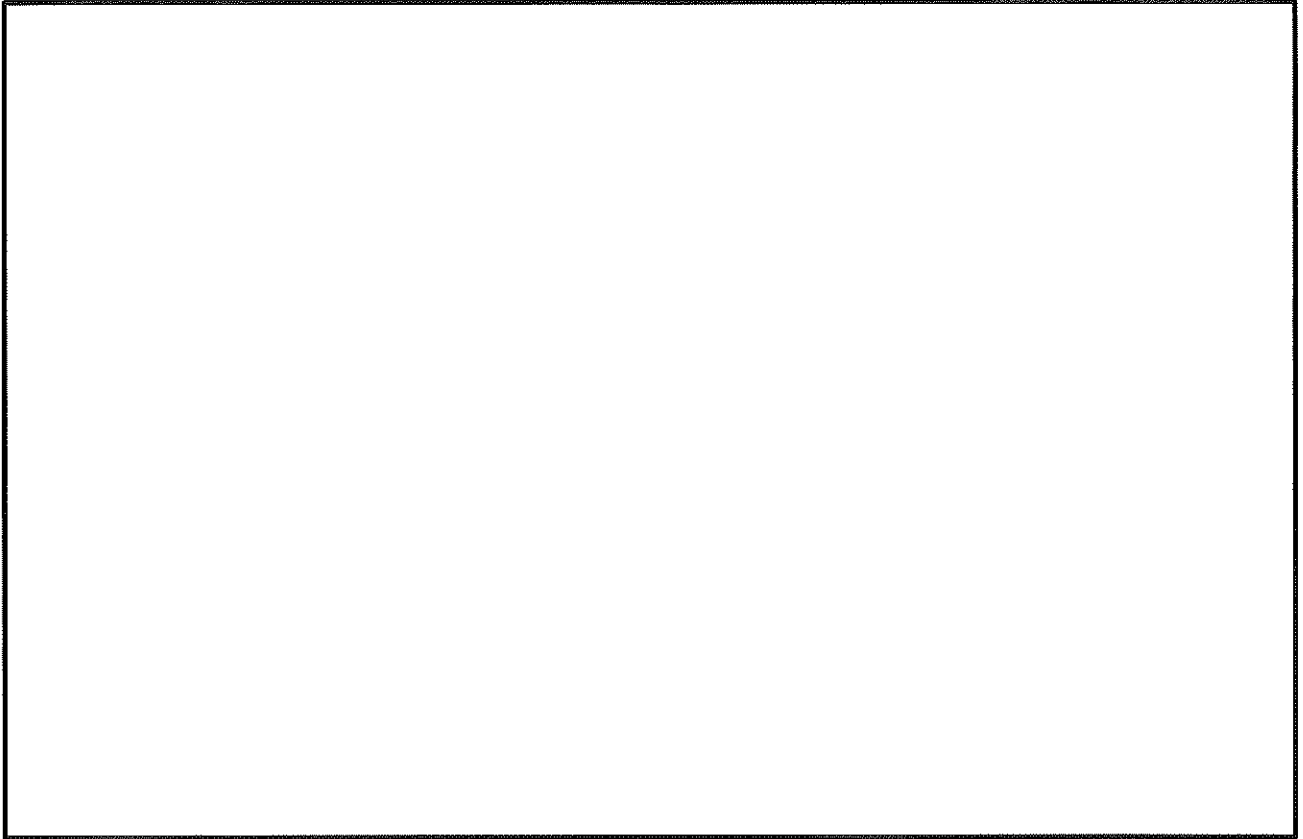
項目		15×15 燃料				
		キヤスク収納位置制限		解析条件		
		中央部	外周部	中央部	外周部	
収納物仕様	種類	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型・B型)	48,000MWd/t型 (A型、B型)		
	初期濃縮度 (wt%)	≤4.1				
	ウラン重量 (kg)	[]				
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	48	44	
	冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17				
	バーナブル ポイズン集合体 の仕様	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90	-	90	-
		冷却期間 (年)	≥15	-	15	-
	MSF-24P型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44			
	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。なお、17×17燃料と15×15燃料はMSF-24P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。



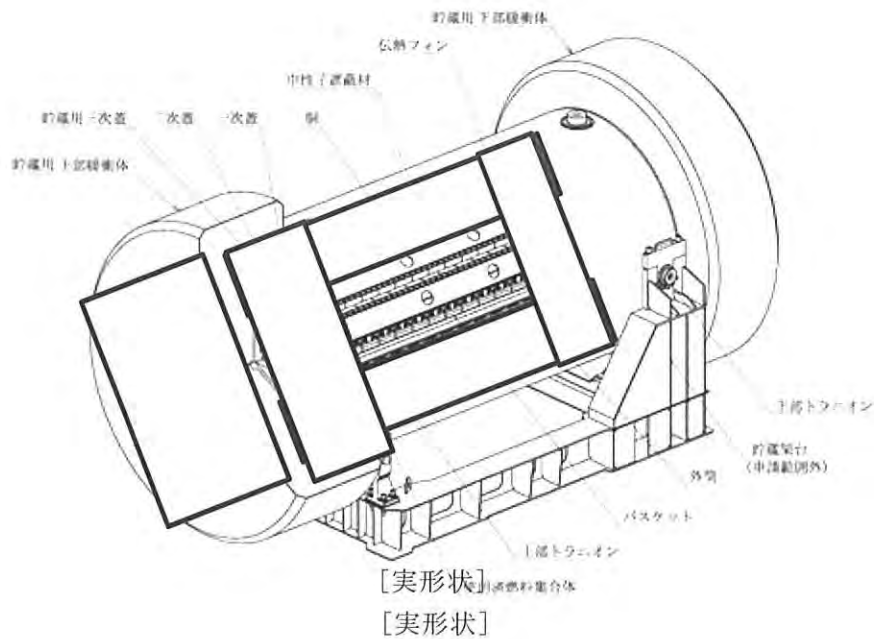
---- 相对燃焼度分布設定値

第2図 (1/2) 軸方向燃焼度分布の設定 (17×17 燃料)

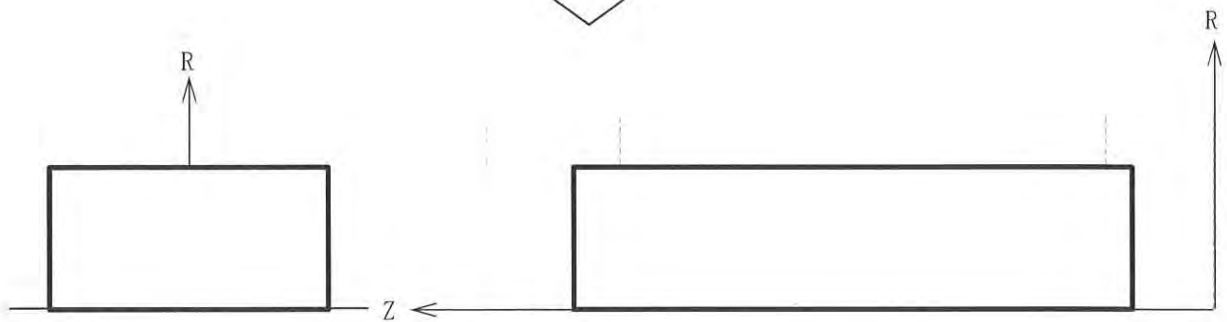
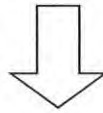


----- 相対燃焼度分布設定値

第2図 (2/2) 軸方向燃焼度分布の設定 (15×15 燃料)



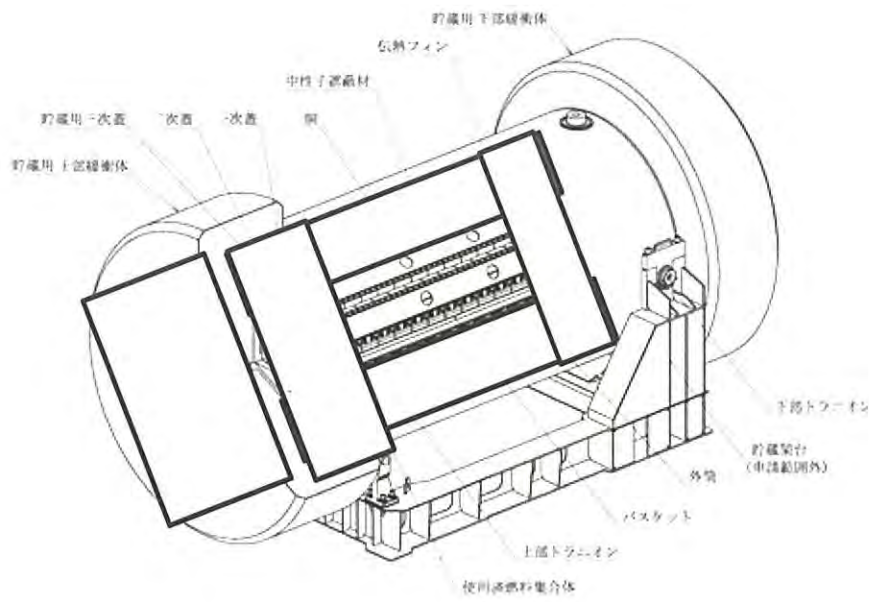
二次元モデル化



[遮蔽解析モデル化 (二次元体系 (R-Z 体系))]

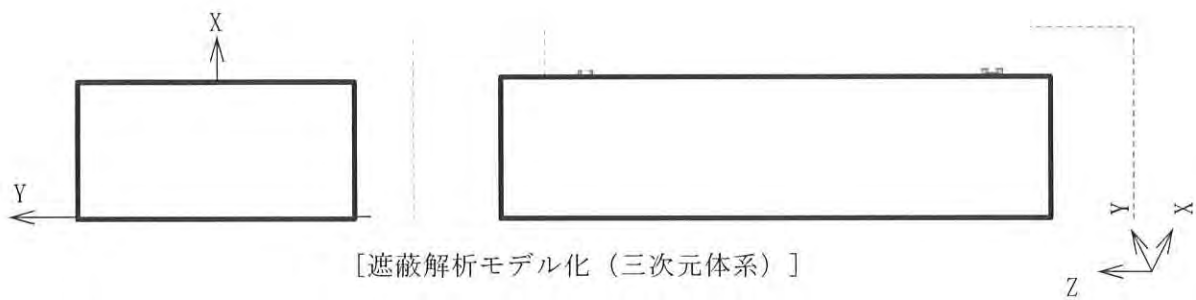
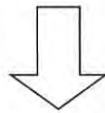
燃料有効部中央+バスケット均質化領域	燃料有効部外周+バスケット均質化領域
燃料上部構造材中央+バスケット均質化領域	燃料上部構造材外周+バスケット均質化領域
燃料上部構造材中央	燃料上部構造材外周
燃料下部構造材中央+バスケット均質化領域	燃料下部構造材外周+バスケット均質化領域
バスケット外周部	胴、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー
中性子遮蔽材	貯蔵用三次蓋、底部中性子遮蔽材カバー、下部端板
中性子遮蔽材+伝熱フィン均質化領域	真空
	貯蔵用緩衝体 (空気)

第3図 (1/2) 遮蔽解析モデル化概要 (二次元モデル)



[実形状]

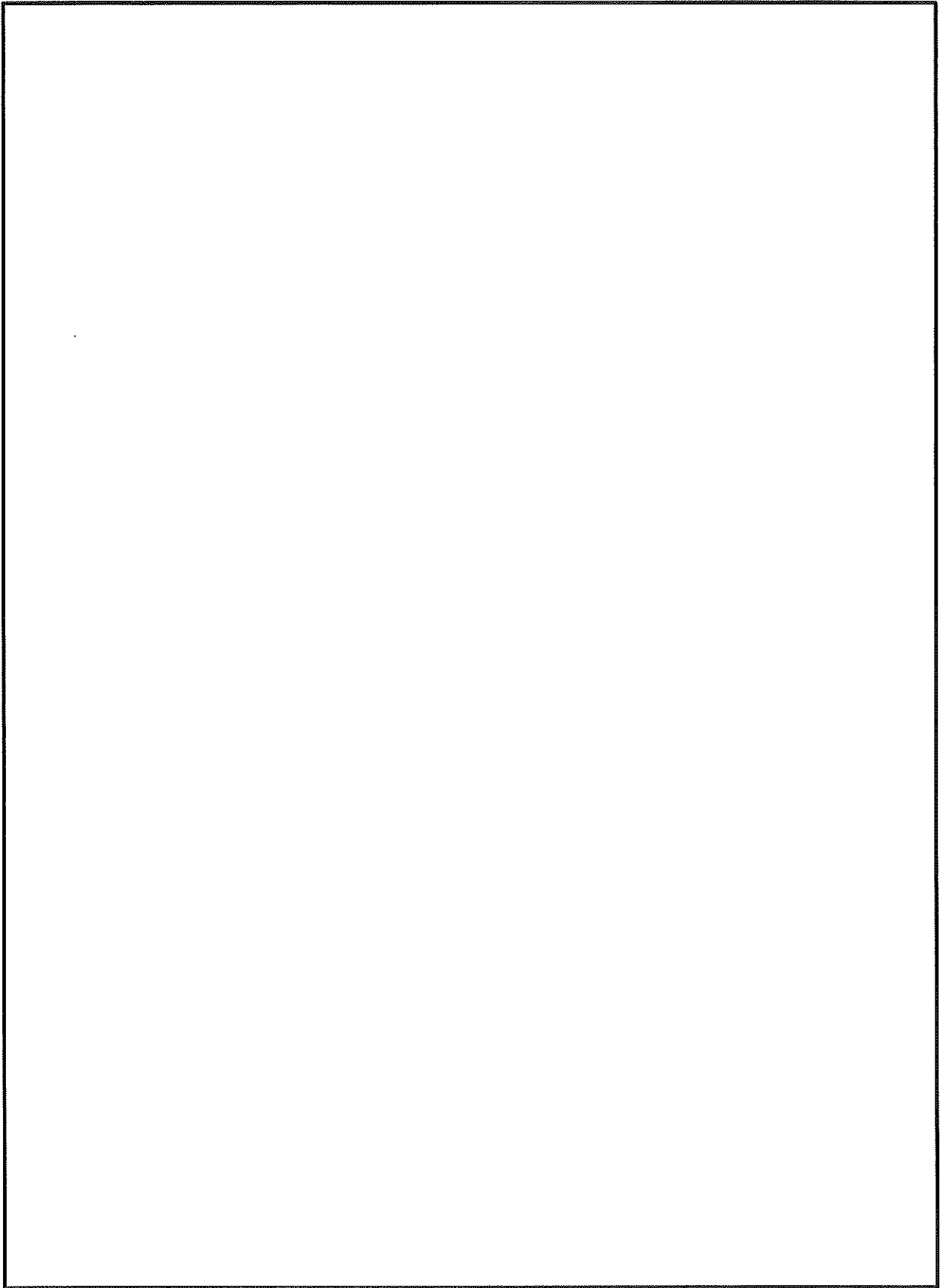
三次元モデル化



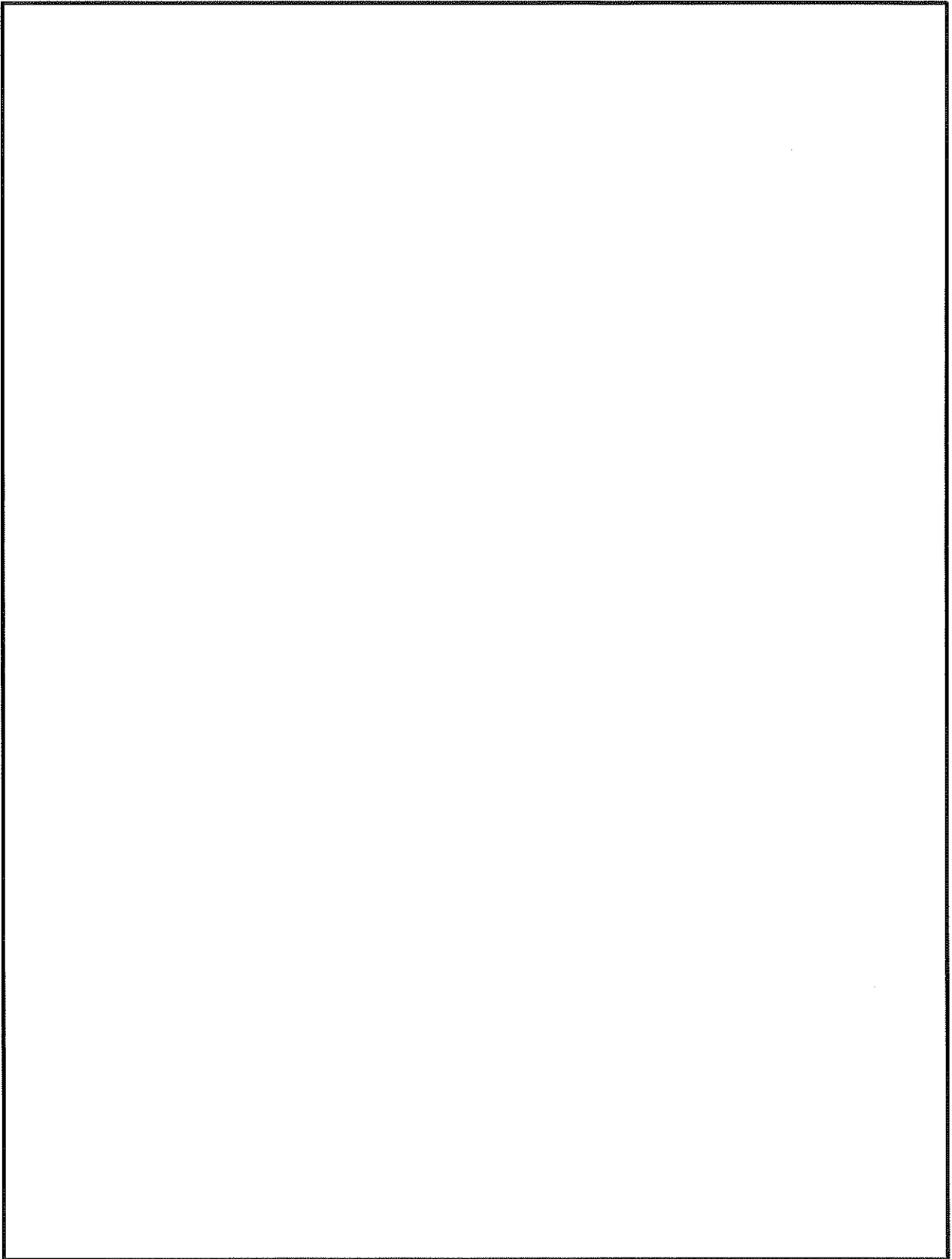
注：モニタリングポート部、バルブ部、トランニオン等を同一平面に示している。

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）

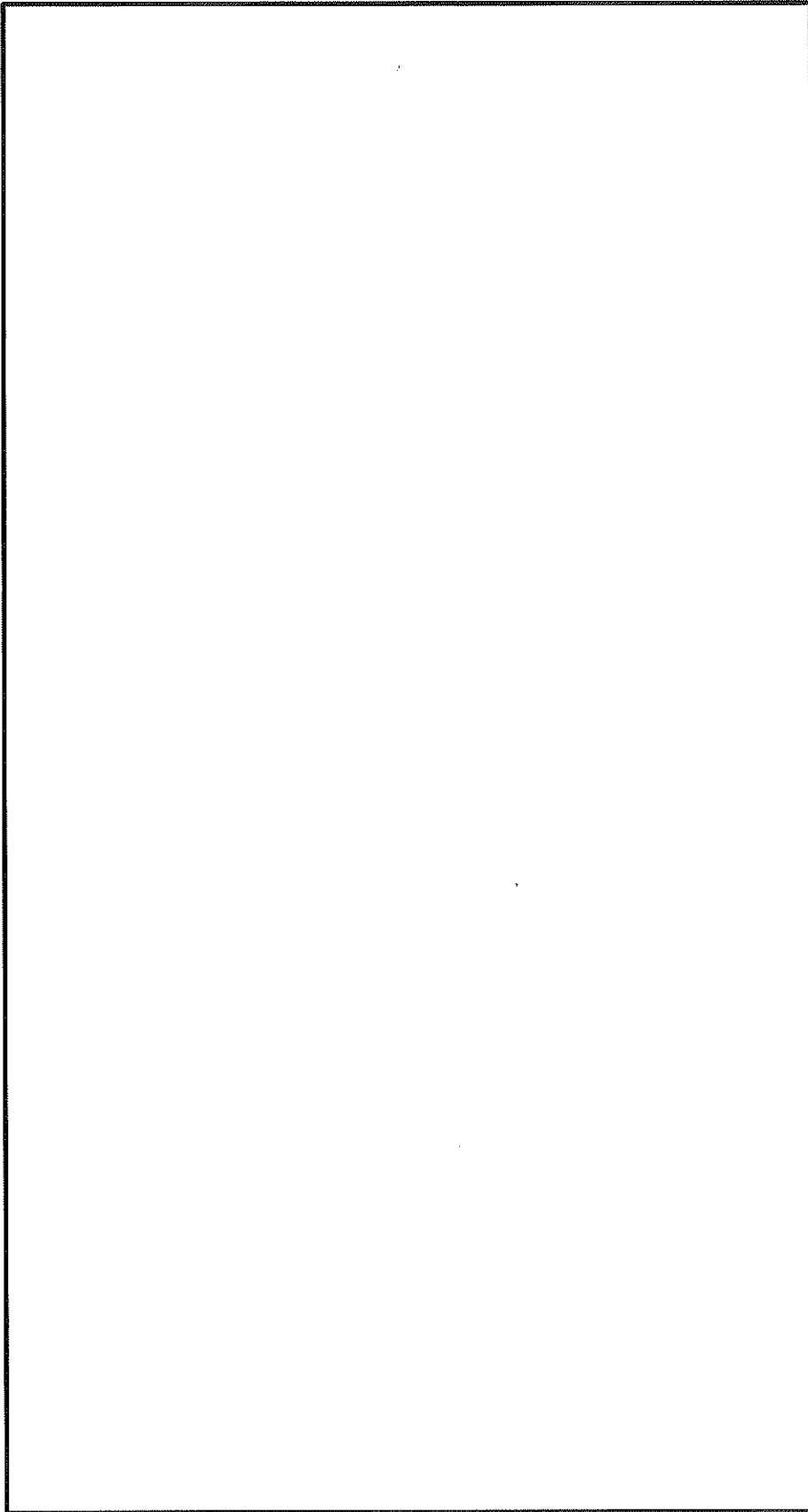
第3図（2/2） 遮蔽解析モデル化概要（三次元モデル）



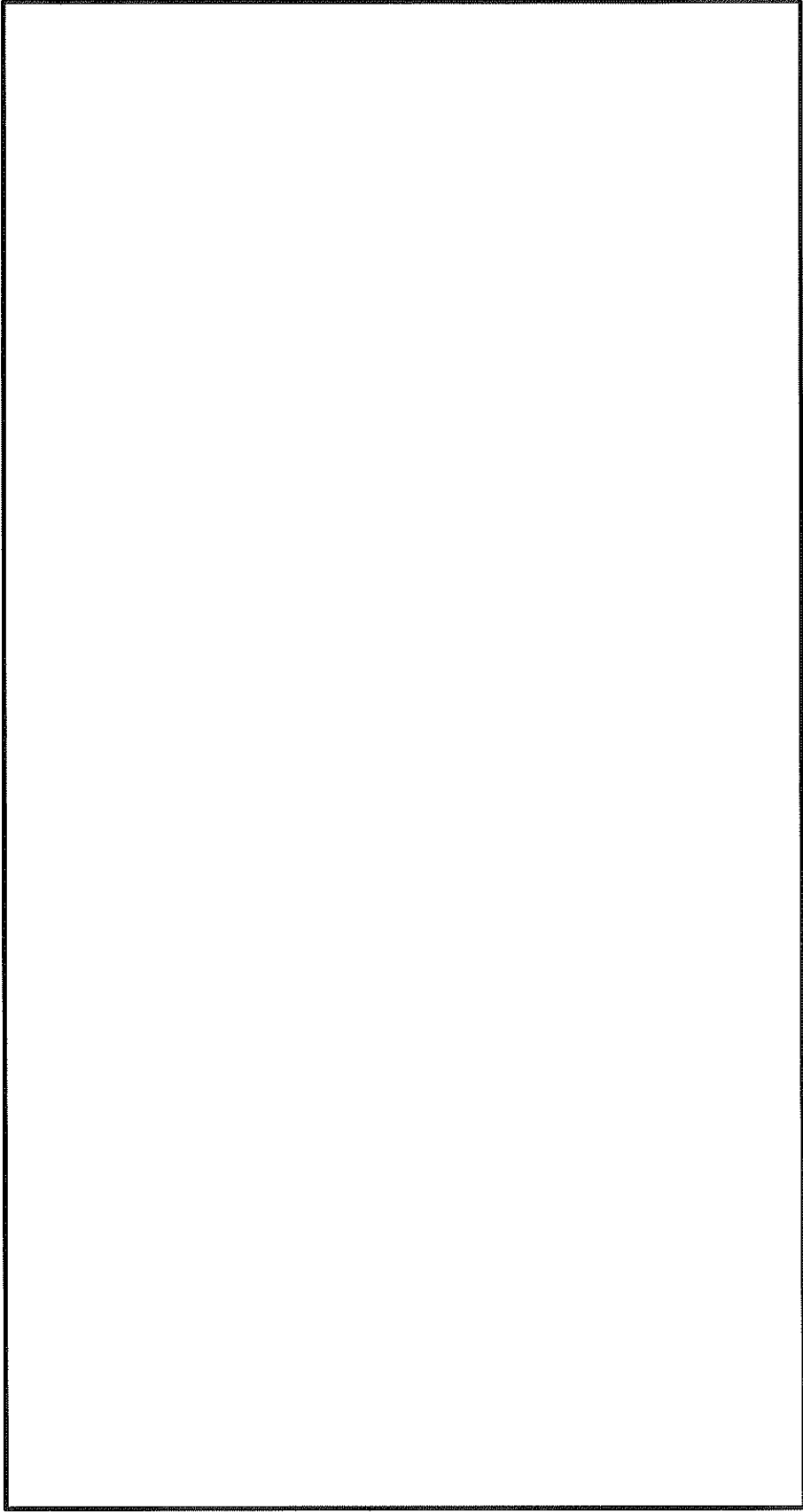
第4図（1/5） 遮蔽解析モデル（二次元モデル、頭部）



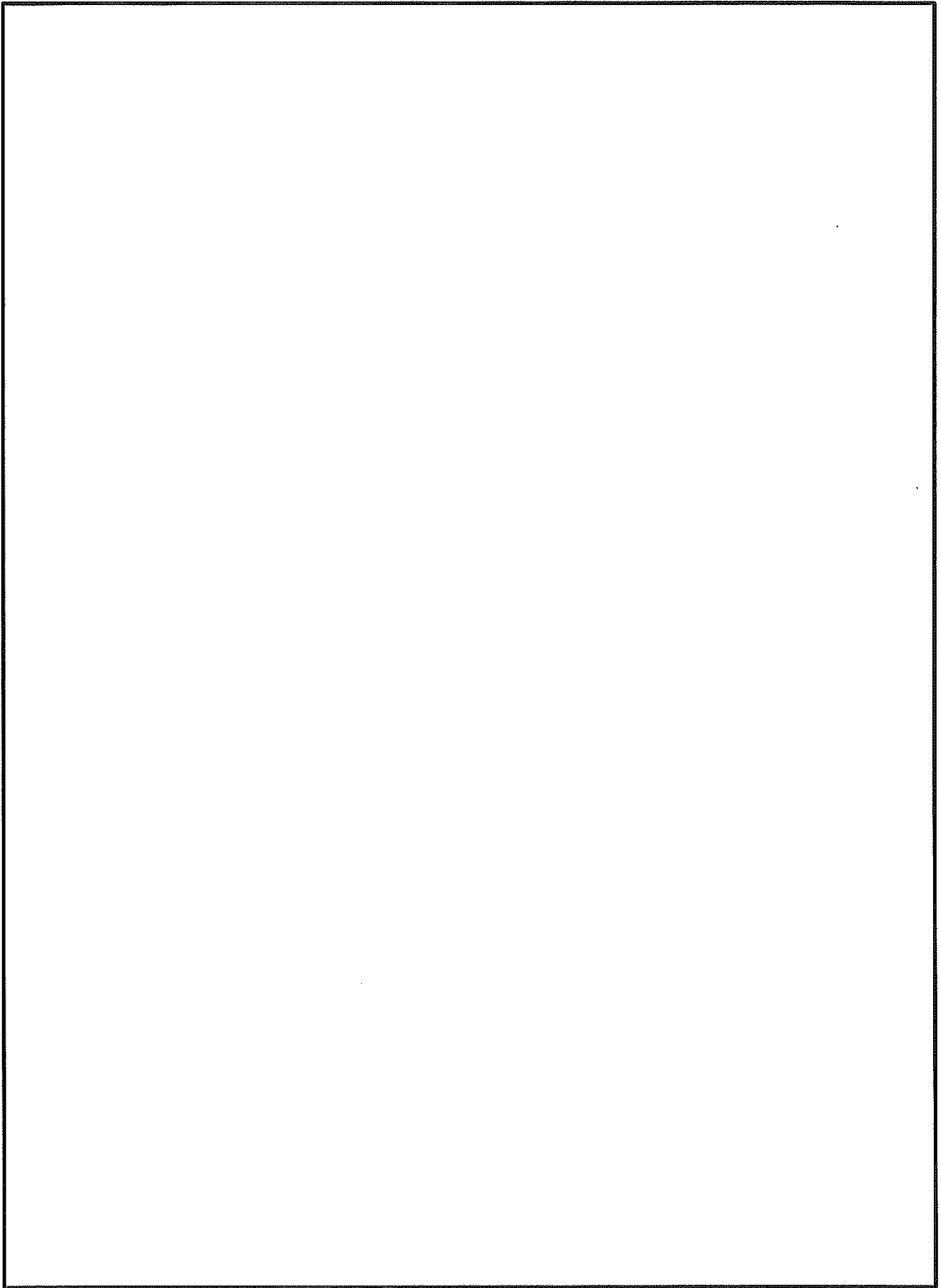
第4図（2/5） 遮蔽解析モデル（二次元モデル、底部）



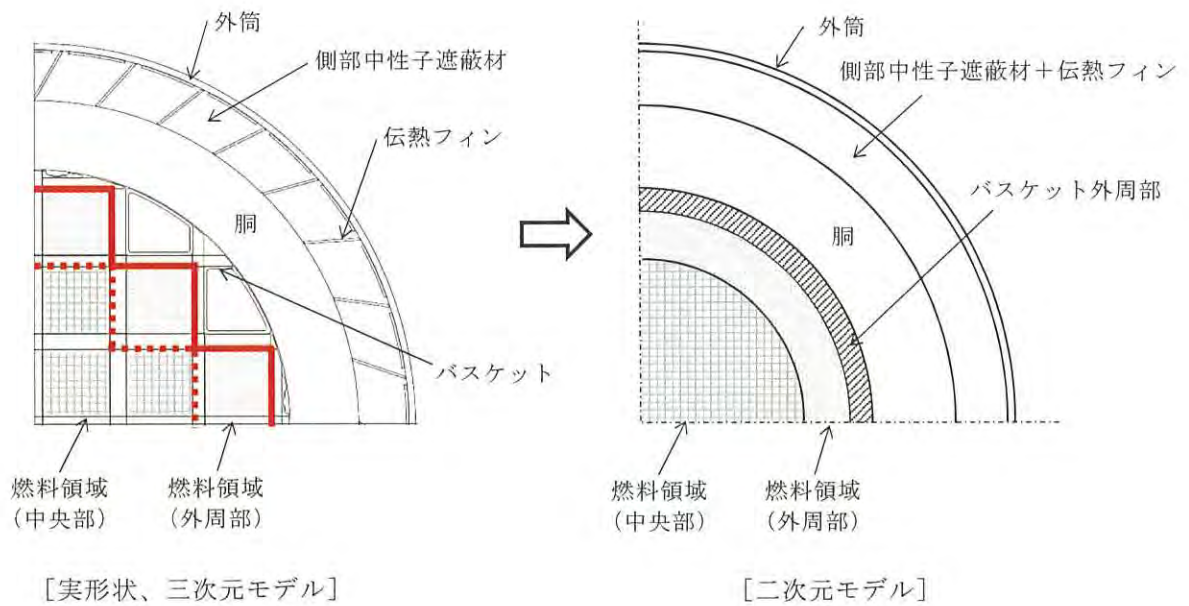
第4図 (3/5) 遮蔽解析モデル (二次元モデル、上部トラニオン部)



第4図 (4/5) 遮蔽解析モデル (二次元モデル、下部トランジオン部)



第4図(5/5) 遮蔽解析モデル(三次元モデル)



遮蔽解析モデルへの入力
 二次元モデルの解析では、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。三次元モデルでの解析では、実形状に基づきモデル化している。

第5図 キャスク中央断面の実形状と解析モデル

(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 (1/2) 線量当量率評価結果 (DOT3.5 コード)

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 線量当量率	1.2 mSv/h	1.1 mSv/h	1.2 mSv/h	1.2 mSv/h	2 mSv/h 以下	線量当量率の詳細は、 第 3 表 (1/8) から 第 3 表 (4/8) に示す。 線量当量率の出力位置は、 第 6 図 (1/8) から 第 6 図 (4/8) に示す。
表面から 1 m 離れた 位置における 線量当量率	87 μ Sv/h	87 μ Sv/h	84 μ Sv/h	83 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	

第 2 表 (2/2) 線量当量率評価結果 (MCNP5 コード)

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 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	線量当量率の詳細は、 第 3 表 (5/8) から 第 3 表 (8/8) に示す。 線量当量率の出力位置は、 第 6 図 (5/8) から 第 6 図 (8/8) 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	83 μ Sv/h	79 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	

第3表 (1/8) 線量当量率評価結果 (17×17 燃料 (A型) 収納時 DOT3.5 コード)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側部	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トラニオン部)		径方向	径方向 (トラニオン部)	軸方向
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨
表面	燃料有効部	<0.1	8.0	100.7	5.9	5.4	6.0
	ガンマ線	0.2	103.0	25.9	15.0	13.4	35.9
	二次ガンマ線	0.2	1.1	25.7	4.4	4.8	4.6
中性子	41.7	389.3	753.8	45.1	258.6	1108.3	25.2
合計	42.2 (注2)	391.1 (注2)	870.5	197.4	283.9	<u>1131.9</u> [1.2] (注1)	71.7
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から1m	燃料有効部	<0.1	22.5	44.8	25.8	25.1	2.6
	ガンマ線	<0.1	20.1	20.9	14.6	12.8	14.8
	二次ガンマ線	<0.1	5.4	5.4	10.4	5.7	1.7
中性子	20.9	24.5	34.0	18.4	15.2	26.3	15.8
合計	21.2 (注2)	72.5	82.9	<u>86.1</u> [87] (注1)	61.4	69.9	34.9

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 (2/8) 線量当量率評価結果 (17×17 燃料 (B型) 収納時 DOT3.5 コード)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側部	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨
表面	燃料有効部	<0.1	6.3	84.8	5.0	4.7	5.2
	構造材放射化	0.3	183.8	17.2	25.2	22.1	59.9
	二次ガンマ線	0.2	1.0	23.8	4.1	4.5	4.3
中性子	38.0	354.1	666.5	41.9	243.1	1021.8	23.7
合計	38.6 (注2)	356.3 (注2)	861.8	167.7	277.4	<u>1053.1</u> [1.1] (注1)	93.1
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から1m	燃料有効部	<0.1	19.0	20.4	21.8	13.8	2.3
	構造材放射化	0.2	30.6	32.0	17.3	11.9	24.8
	二次ガンマ線	<0.1	5.1	5.0	5.4	3.9	1.6
中性子	19.1	22.2	30.7	21.5	14.3	36.5	14.9
合計	19.5 (注2)	76.9	<u>86.9</u> [87] (注1)	76.8	58.8	66.1	43.6

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。

第3表 (3/8) 線量当量率評価結果 (15×15 燃料 (A型) 収納時 DOT3.5 コード)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側部	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨
表面	燃料有効部	<0.1	8.0	100.2	5.8	5.3	0.9
	構造材放射化	0.2	0.5	18.8	8.8	7.9	1.8
	二次ガンマ線	0.2	1.2	26.9	4.6	5.1	1.3
	中性子	44.3	421.0	47.4	271.8	1154.6	66.3
合計	44.8 (注2)	422.8 (注2)	862.4	193.3	291.0	<u>1172.9</u> [1.2] (注1)	70.3
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から1m	燃料有効部	<0.1	22.4	44.5	25.7	16.0	2.7
	構造材放射化	<0.1	14.7	9.1	9.7	6.4	9.5
	二次ガンマ線	<0.1	5.7	10.9	6.1	4.4	1.8
	中性子	22.2	25.9	19.4	16.0	40.9	16.6
合計	22.5 (注2)	68.7	79.1	<u>83.9</u> [84] (注1)	57.5	67.7	30.6

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 (4/8) 線量当量率評価結果 (15×15燃料 (B型) 収納時 DOT3.5コード)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側部	底部			
	軸方向	径方向	径方向 (トラニオン部)		径方向	径方向 (トラニオン部)	軸方向	
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨	
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	6.1	85.2	5.1	4.7	0.8
		構造材放射化	0.2	0.9	142.9	15.0	13.0	2.6
		二次ガンマ線	0.2	1.1	5.5	4.4	4.8	1.2
	中性子	39.9	377.7	700.8	44.2	259.3	1096.3	63.4
	合計	40.4 ^(注2)	379.8 ^(注2)	855.3	170.7	283.8	<u>1118.8</u> [1.2] ^(注1)	68.0
	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	19.1	37.8	21.8	13.8	2.3
		構造材放射化	<0.1	24.8	26.0	8.5	11.6	7.9
		二次ガンマ線	<0.1	5.3	5.3	10.2	5.7	4.2
	中性子	20.0	23.3	32.5	18.0	15.2	39.5	15.9
	合計	20.3 ^(注2)	72.5	<u>83.0</u> [83] ^(注1)	74.5	54.3	65.4	33.6

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 (5/8) 線量当量率評価結果 (17×17燃料 (A型) 収納時 MCNP5コード)

(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	0.3 (3.4)	9.6 (1.9)	12.1 (2.7)	4.8 (1.7)
	中性子	41.3 (1.0)	433.6 (1.6)	616.2 (1.2)	21.8 (0.9)
合計	41.9 ^(注2)	665.5	788.7 [0.79] ^(注1)	71.0	
評価点	②	④	⑥	⑧	⑩
表面から1m	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	0.2 (1.2)	5.1 (0.5)	5.5 (0.5)	1.8 (0.7)
	中性子	20.3 (0.3)	32.3 (0.9)	29.1 (1.0)	12.9 (0.3)
合計	20.8 ^(注2)	83.5	84.2 [85] ^(注1)	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 (6/8) 線量当量率評価結果 (17×17燃料 (B型) 収納時 MCNP5コード)
(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 (2.5)	31.1 (1.6)	46.1 (0.6)	37.3 (3.8)	5.5 (0.4)
		構造材放射化	0.2 (0.9)	197.1 (0.6)	85.9 (0.3)	31.1 (3.8)	63.3 (0.3)
		二次ガンマ線	0.2 (2.5)	8.4 (2.8)	10.7 (0.9)	9.5 (4.6)	4.6 (1.0)
		中性子	38.2 (0.7)	342.6 (0.7)	24.1 (0.5)	405.4 (1.7)	20.6 (0.4)
		合計	38.7	579.2 [0.58] (注1)	166.8	483.3	94.0
評価点		②	④	⑥	⑧	⑩	
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	0.1 (1.6)	18.1 (0.4)	20.3 (0.3)	22.3 (0.5)	2.5 (0.6)
		構造材放射化	0.2 (0.9)	31.7 (0.7)	28.6 (0.5)	13.3 (0.6)	28.2 (0.4)
		二次ガンマ線	0.2 (3.3)	4.6 (0.7)	5.0 (0.6)	5.1 (0.7)	1.6 (1.6)
		中性子	19.1 (0.7)	28.2 (0.6)	25.6 (0.5)	24.5 (0.8)	12.5 (0.5)
		合計	19.6	82.6 [83] (注1)	79.5	65.2	44.8

※ () 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: $\mu\text{Sv/h}$)。

第3表 (7/8) 線量当量率評価結果 (15×15燃料 (A型) 収納時 MCNP5コード)

(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	②	④	⑥	⑧	⑩	
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	44.9 (0.2)	22.4 (0.3)	25.4 (0.3)	3.1 (0.3)
		構造材放射化	8.5 (0.2)	16.2 (0.5)	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)	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けたでの値 (表面の単位: mSv/h 。表面から1mでの単位: $\mu\text{Sv/h}$)。

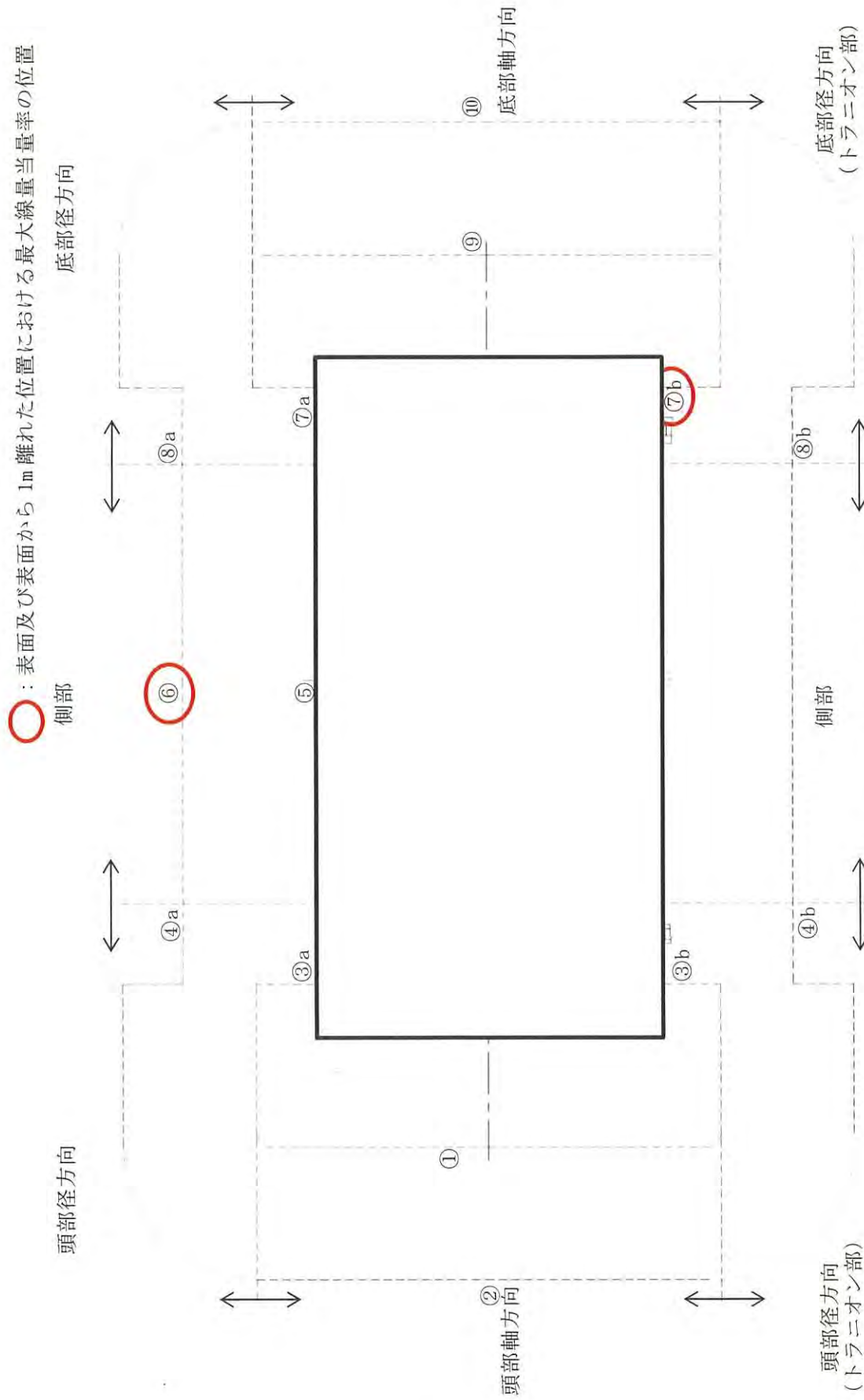
第3表 (8/8) 線量当量率評価結果 (15×15 燃料 (B型) 収納時 MCNP5 コード)
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

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 (2.9)	30.6 (1.5)	85.7 (0.5)	37.6 (3.6)	5.5 (0.4)
		構造材放射化	0.2 (0.9)	164.5 (0.7)	14.9 (0.5)	21.8 (3.6)	34.4 (0.2)
	二次ガンマ線	0.2 (1.6)	8.5 (0.7)	23.1 (0.5)	9.9 (2.9)	4.8 (0.7)	
	中性子	40.5 (0.7)	355.7 (0.6)	40.6 (0.4)	435.6 (1.9)	21.9 (0.3)	
合計	41.0	<u>559.3</u> (注1) <u>[0.56]</u>	164.3	504.9	66.6		
評価点	②	④	⑥	⑧	⑩		
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	0.1 (1.6)	18.1 (0.4)	20.4 (0.3)	21.3 (0.6)	2.5 (0.6)
		構造材放射化	0.2 (0.9)	25.5 (0.7)	23.3 (0.6)	9.2 (0.9)	15.4 (0.4)
	二次ガンマ線	0.2 (2.1)	4.8 (0.3)	5.3 (0.3)	5.2 (0.4)	1.8 (1.1)	
	中性子	20.1 (0.5)	29.8 (0.6)	27.0 (0.5)	27.2 (0.8)	13.3 (0.5)	
合計	20.6	<u>78.2</u> (注1) <u>[79]</u>	76.0	62.9	33.0		

※ () 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。

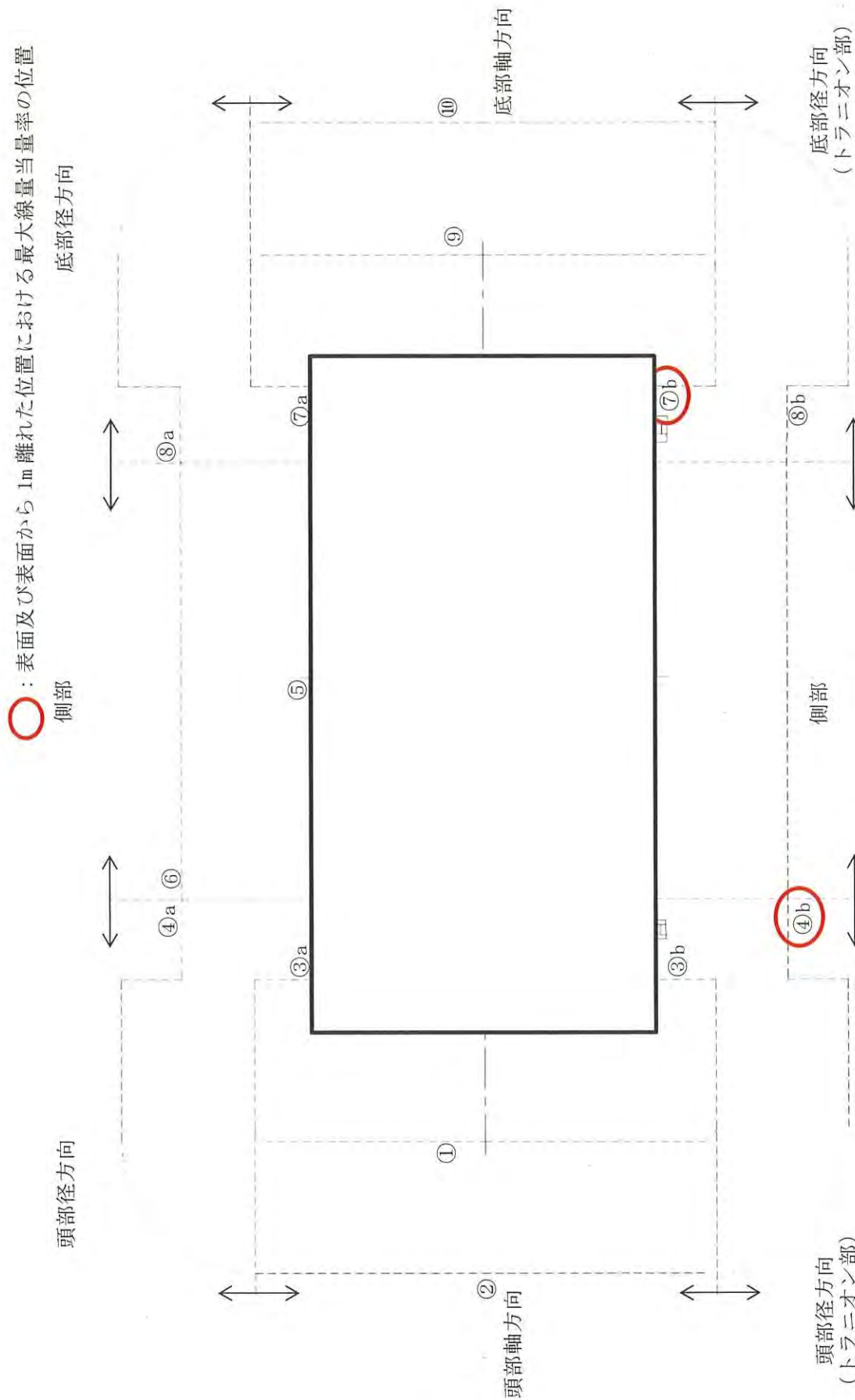
(注1) []内は型式証明申請書に記載する有効けた2けたの値 (表面の単位: mSv/h 。表面から1mでの単位: $\mu\text{Sv/h}$)。



(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6図 (1/8) 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 DOT3.5 コード)

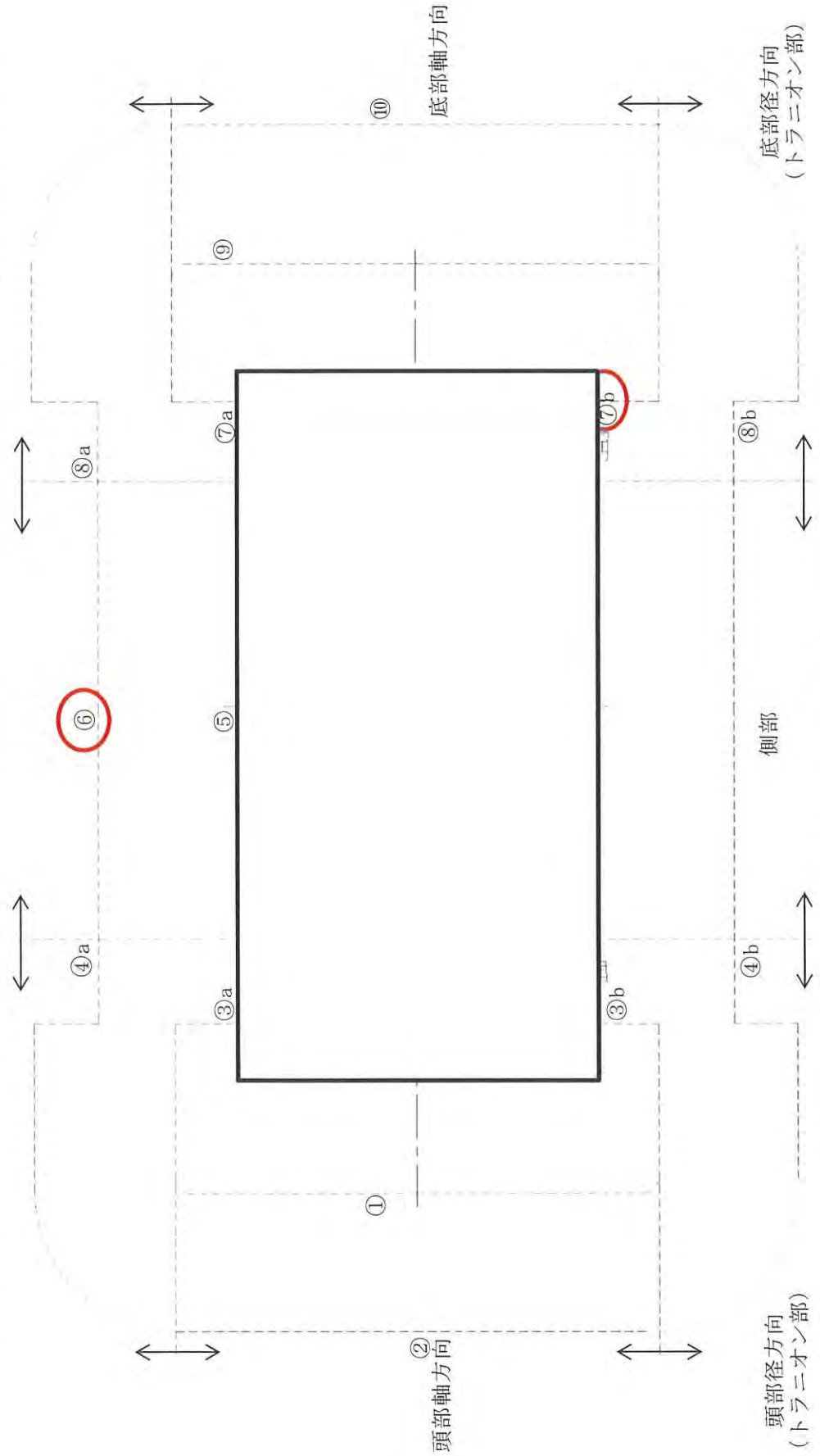


(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第6図 (2/8) 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 DOT3.5 コード)

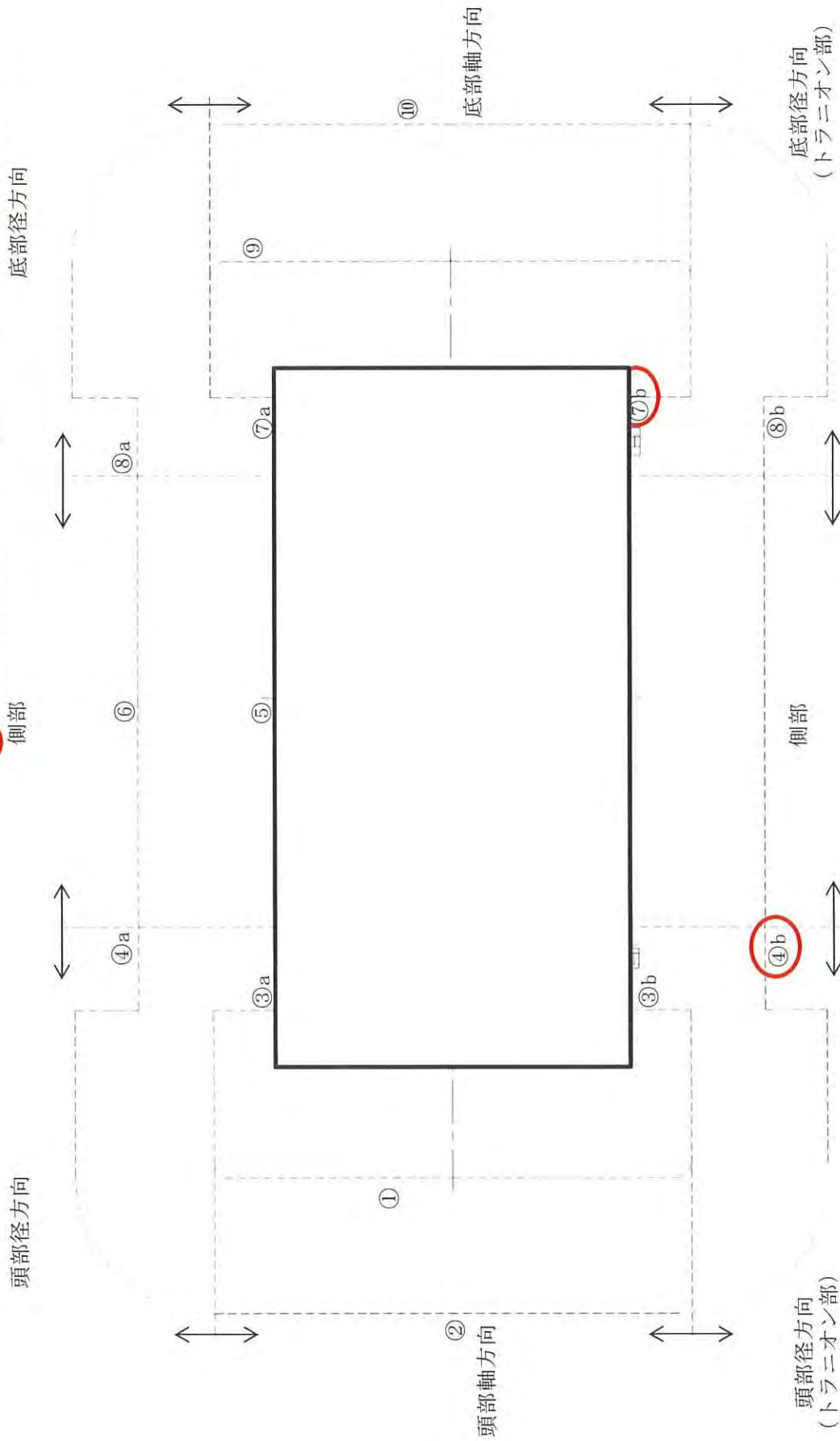
○：表面及び表面から1m離れた位置における最大線量当量率の位置
側部
頭部径方向
底部径方向



(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6図 (3/8) 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 DOT3.5 コード)

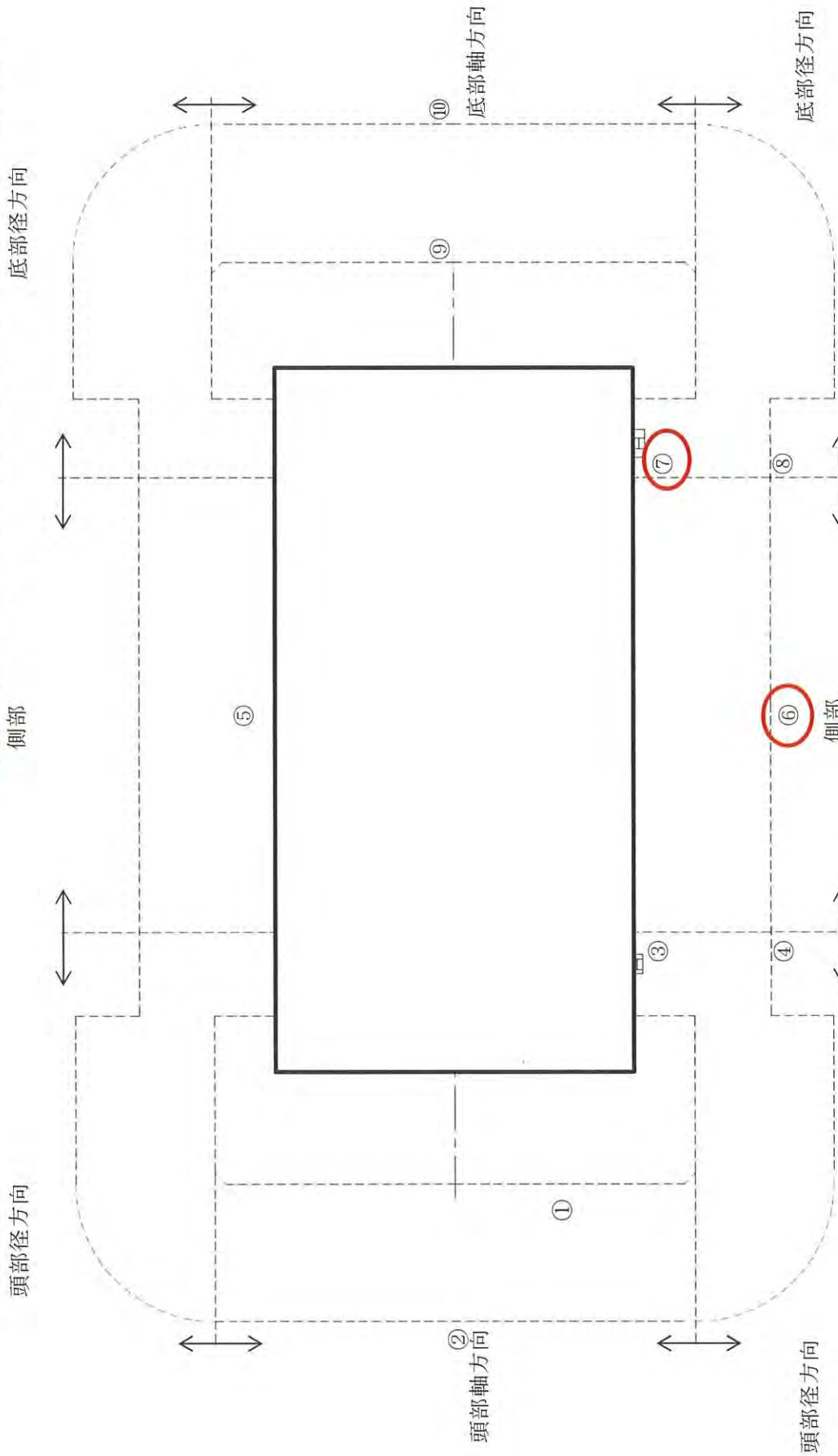
○：表面及び表面から 1m 離れた位置における最大線量当量率の位置
側部
底部径方向



(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 6 図 (4/8) 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 DOT3.5 コード)

○: 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

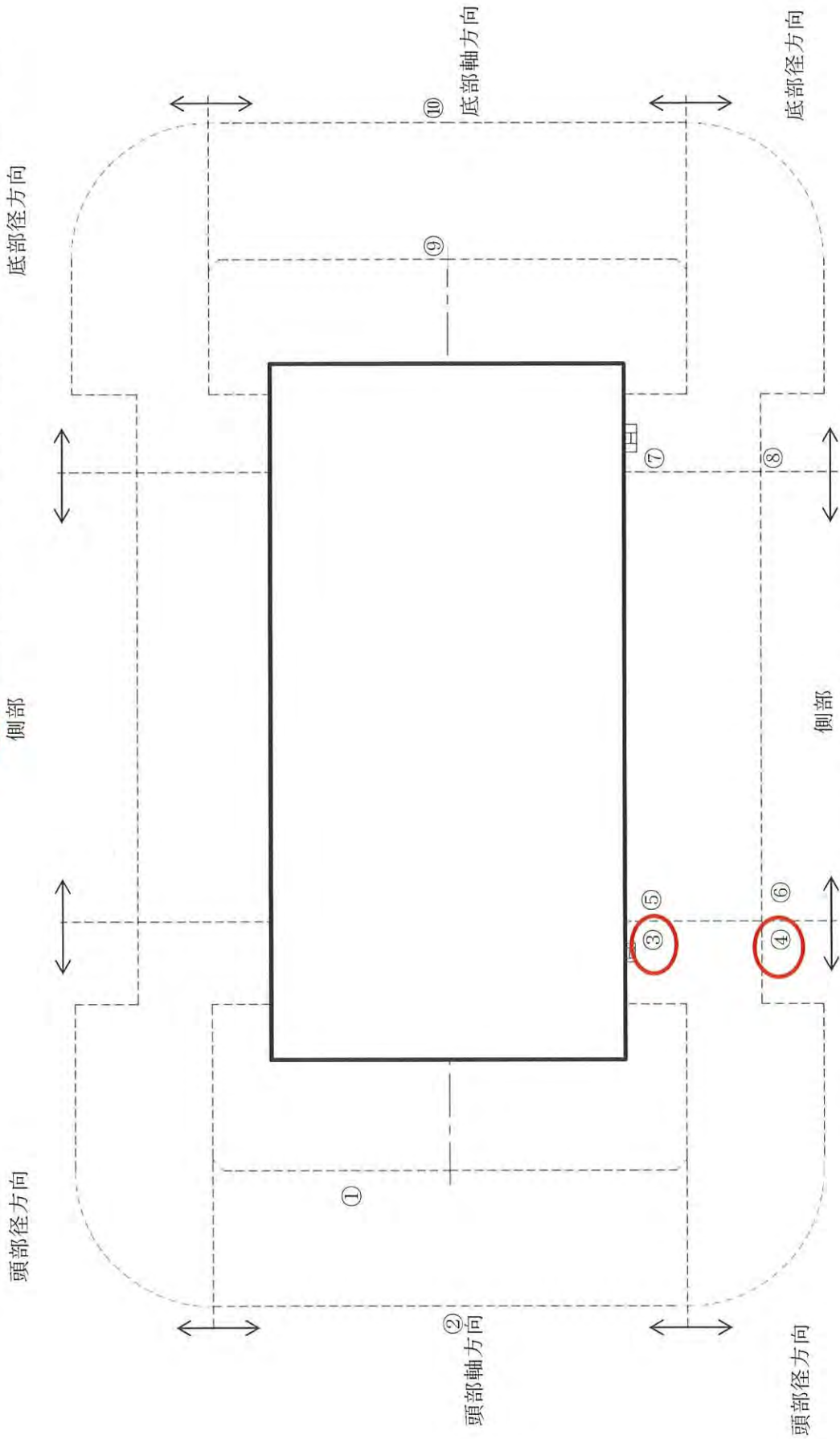


(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第 6 図 (5/8) 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 MCNP5 コード)

○ : 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
底部径方向

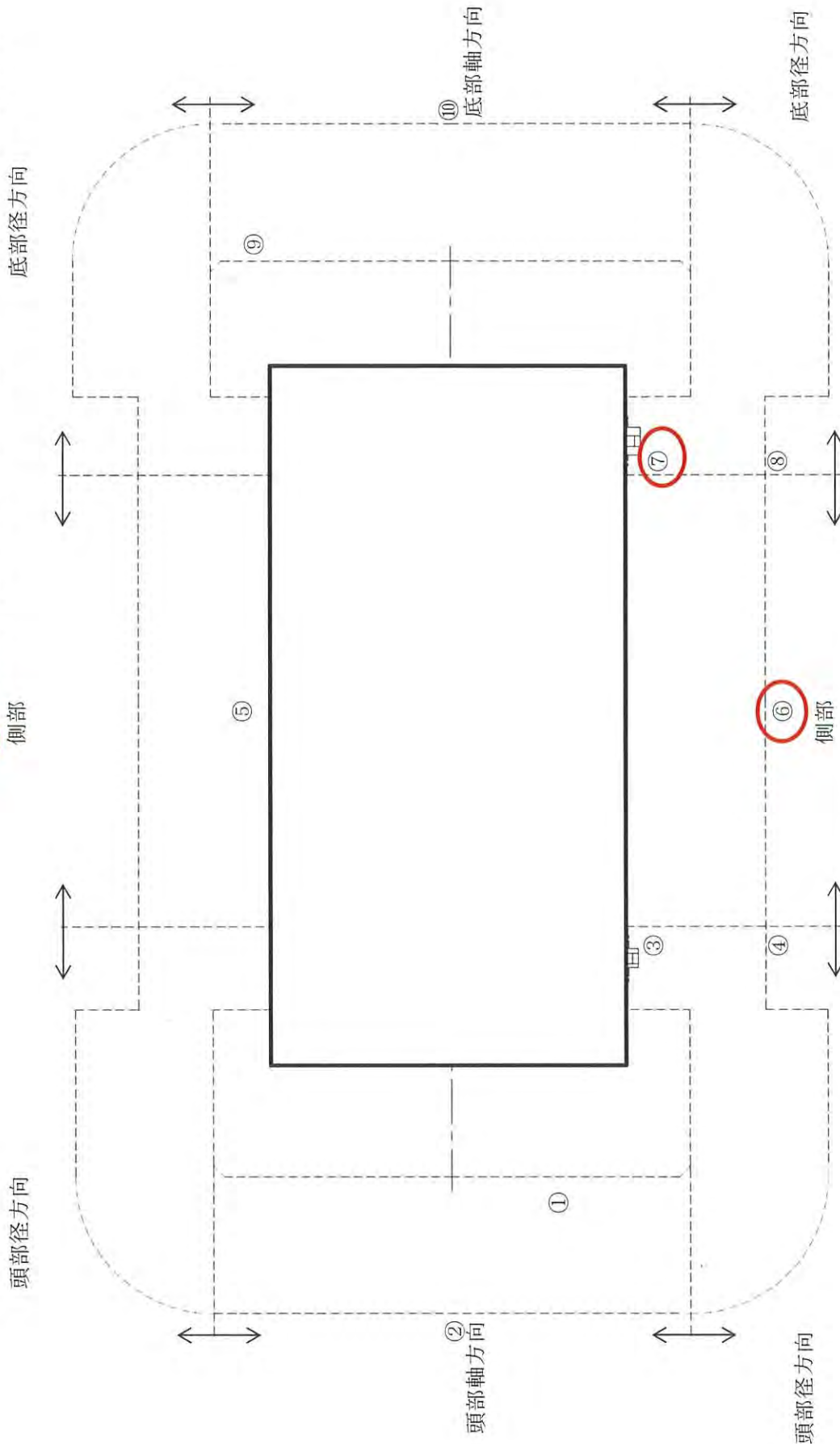


(注) ①~⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第6図 (6/8) 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 MCNP5 コード)

○ : 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

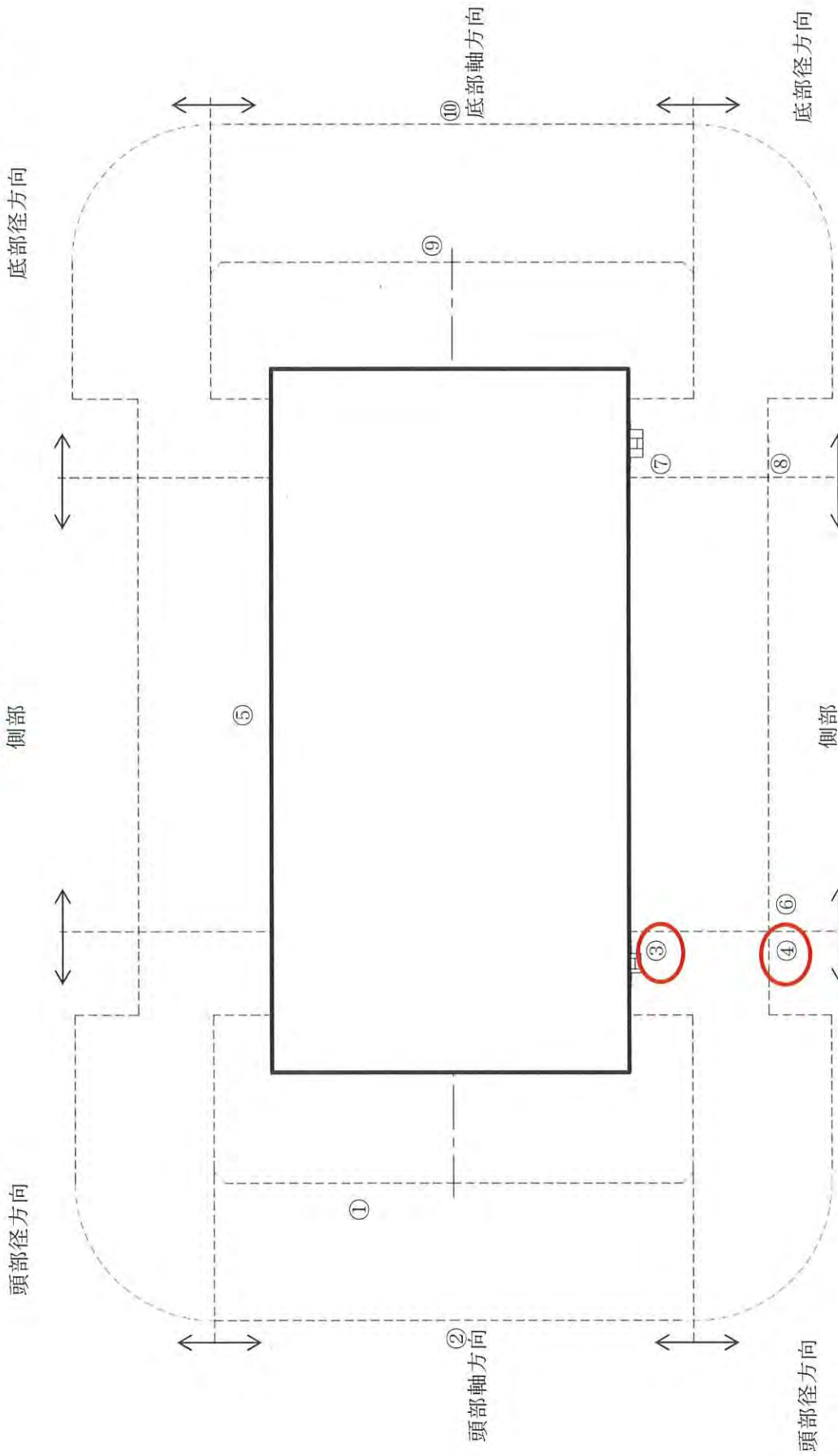


(注) ①~⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第6図 (7/8) 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 MCNP5 コード)

○：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6図 (8/8) 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)

〔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。

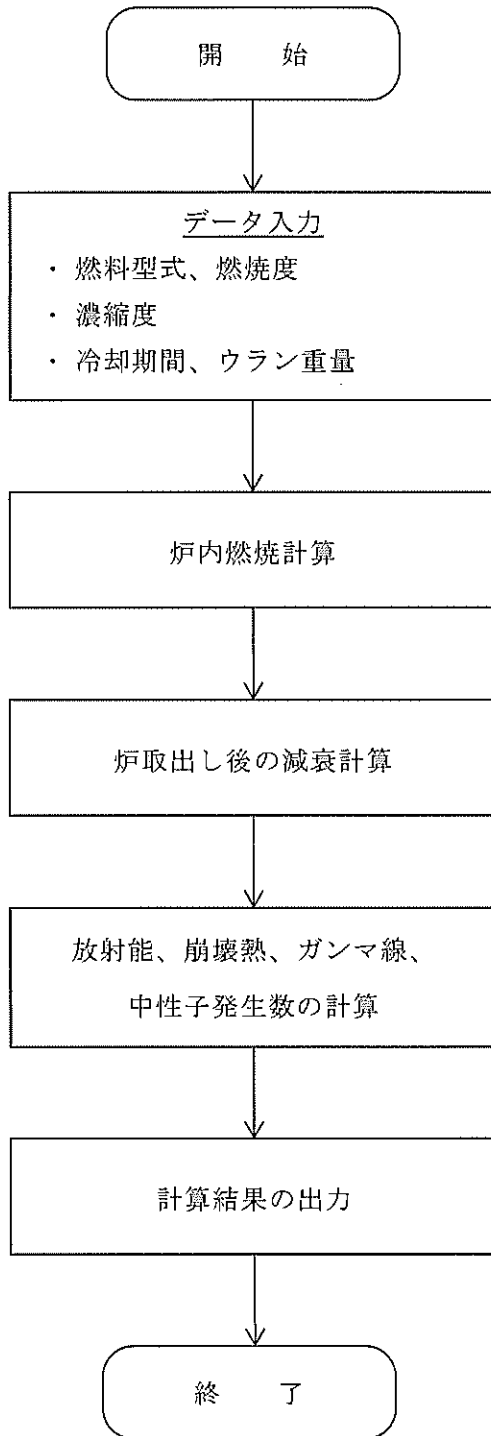
3) 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを第7図に示す。

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8図に示す。



第7図 ORIGEN2 コード計算フロー図

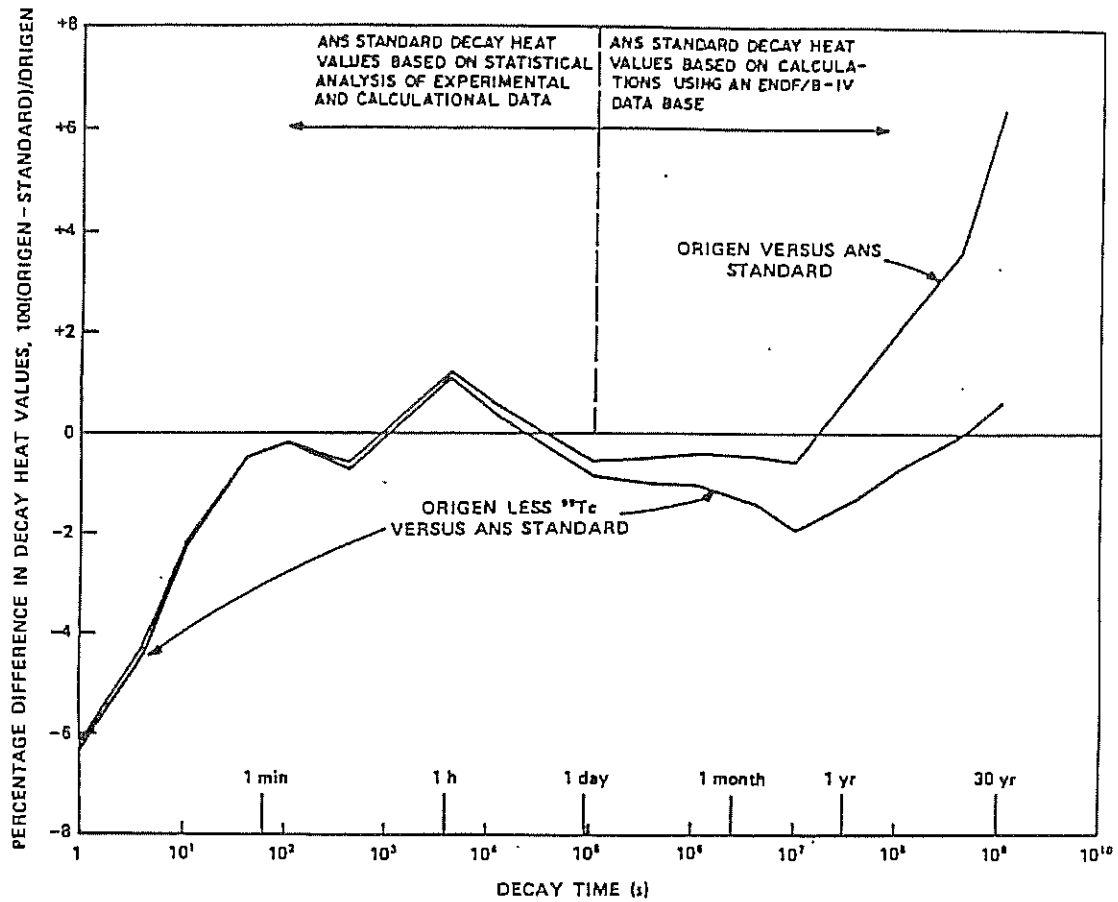


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10¹³-s irradiation of ²³⁵U.

(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 8 図 ORIGEN2 コード検証例 ⁽²⁾

(2) DOT3.5 コード

1) 概要

二次元輸送計算コード DOT3.5 コード⁽³⁾（以下「DOT3.5 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。

2) 機能

DOT3.5 コードは、遮蔽解析に関して以下の機能を有する。

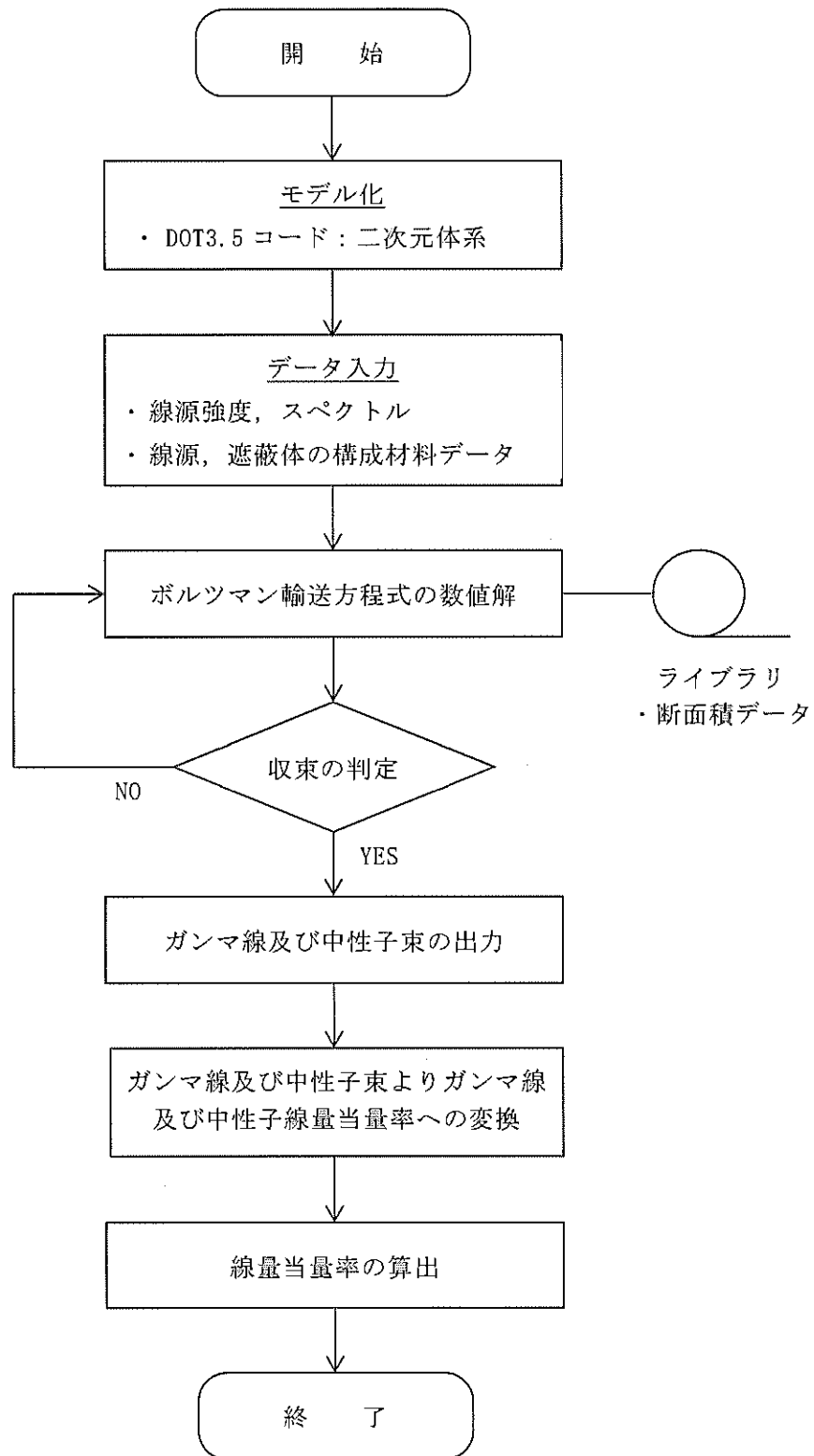
- ① ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を Sn 法により解く解析コードであり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- ② DOT3.5 コードは、二次元の体系を扱うことができる。

3) 解析フロー

DOT3.5 コードの解析フローを第 9 図に示す。

4) 使用実績及び検証

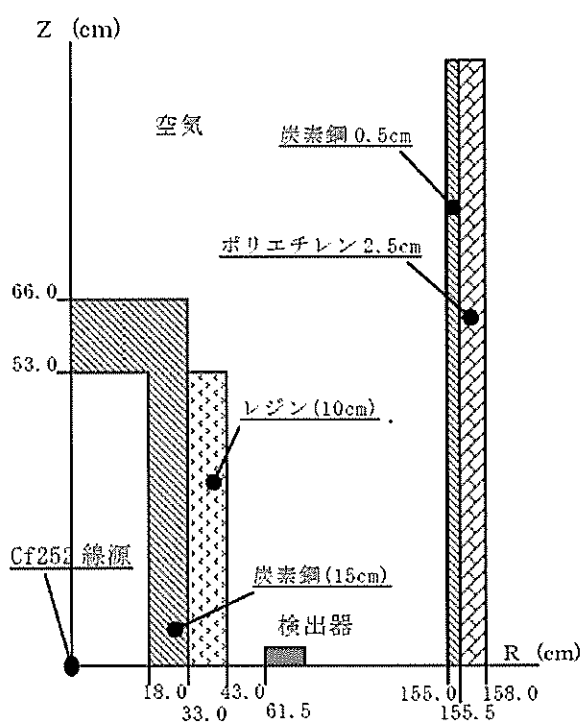
DOT3.5 コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、輸送キャスクの遮蔽解析の豊富な実績がある。使用済燃料輸送容器の解析事例と測定値⁽⁴⁾を第 10 図に示す。使用済燃料輸送容器体系での放射線透過試験での測定値に対して、DOT3.5 コードによる JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ MATXS-LIB-J33 を用いた計算値は中性子、ガンマ線共によく一致しており、輸送容器体系での線量当量率評価に使用することの妥当性を確認した。



第9図 DOT3.5コード解析フロー図

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、DOT3.5 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。

第 10 図 DOT3.5 コード解析例 (計算モデル⁽⁴⁾ 及びベンチマーク計算結果)

5) 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33

MATXSLIB-J33⁽⁵⁾ 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第4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⁽⁶⁾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し作成した。

なお、TRANSX-2.15については公開されている修正パッチ⁽⁷⁾を適用したものをしている。

JENDL-3.3の信頼性は4)に示すベンチマーク解析(第10図参照)で確認されている。

第4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)

(3) MCNP5 コード

1) 概要

三次元輸送計算コード MCNP5⁽⁹⁾（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 11 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蔽設計規程」JEAC4615⁽⁹⁾において原子力発電所附属施設遮蔽のための輸送計算コードとしてモンテカルロ法を用いた計算手法の適用が可能とされ、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⁽¹⁰⁾及び乾式キャスク貯蔵施設の審査指針 NUREG-1567⁽¹¹⁾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⁽¹²⁾されている。使用済燃料乾式貯蔵容器での国内の許認可実績がないため、以下のとおり適用性を検証した。

① 既認可値との比較（DOT3.5 コードとの比較）

許認可実績の豊富な二次元輸送計算コード DOT3.5 との比較を実施し、使用済燃料乾式貯蔵容器体系において妥当な解が得られることを確認した。比較対象は同じ MSF-24P 型での既認可の設計承認申請⁽¹³⁾とした。また、比較対象ケースは、設計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 6 に示す。

別紙 6 に示すとおり DOT3.5 コードの特性上の要因により一部部位では線量当量率評価値に差異が生じるものの、大部分は同様の傾向である。

② MCNP5 コードの許認可実績

MCNP5 コードは使用済燃料乾式貯蔵容器ではないものの、核燃料物質の輸送容器での使用実績がある⁽¹⁴⁾。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5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^(註)による使用済燃料乾式貯蔵建屋の許認可での使用実績もあり⁽¹⁵⁾、MCNP5コードは輸送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

③ MCNP5 コードの妥当性検証

MCNP5 コードは、放射性物質輸送・貯蔵容器体系において、実験値とMCNP5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⁽¹⁶⁾を参考に、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⁽¹⁷⁾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。

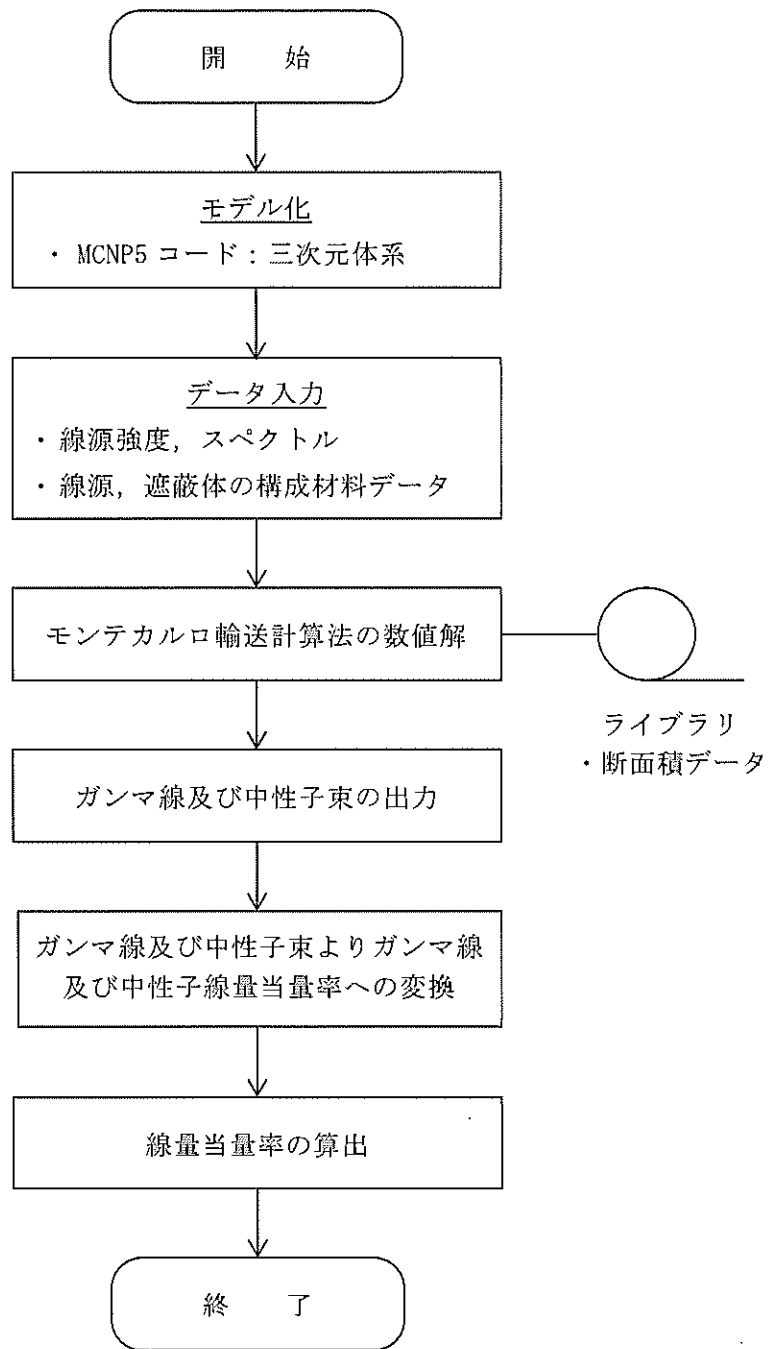
MSF-24P型において(3)物理的モデル化の検証は、第12図及び第13図に示すベンチマーク文献⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾の確認により実施する。

第12図(1/3)から第12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しており、妥当性が検証されている⁽¹⁸⁾。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。なお、第12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。

また、第 13 図（1/2）及び第 13 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しており、妥当性が検証されている⁽¹⁹⁾。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。妥当性を検証した文献の評価体系は、本型式証明申請と同じ乾式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）が文献と MSF-24P 型で同様の設定である。ここで、検証文献の C/E は良い一致を示していることから、ORIGEN2 コードにより設定した線源強度及び MCNP5 コードを用いた線量当量率評価（断面積ライブラリ（中性子：FSXLIB-J33、ガンマ線：MCPLIB84））を組み合わせた手法について、MSF-24P 型評価の遮蔽解析手法として適用することは問題ない。

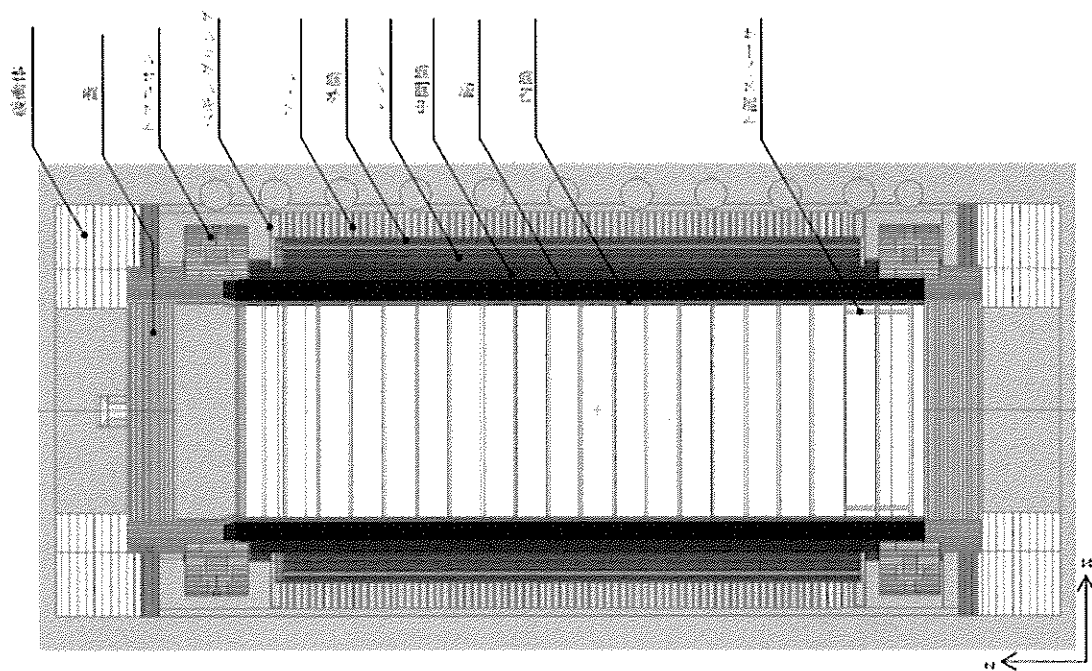
第 6 表に示す測定値と評価値の比 C/E に対して、別紙 1-8 表に示す解析条件の保守性が線量当量率に与える影響が包絡されることから、遮蔽解析の不確かさを考慮しても MSF-24P 型運用時の線量当量率測定値は基準値を上回る事が無い。



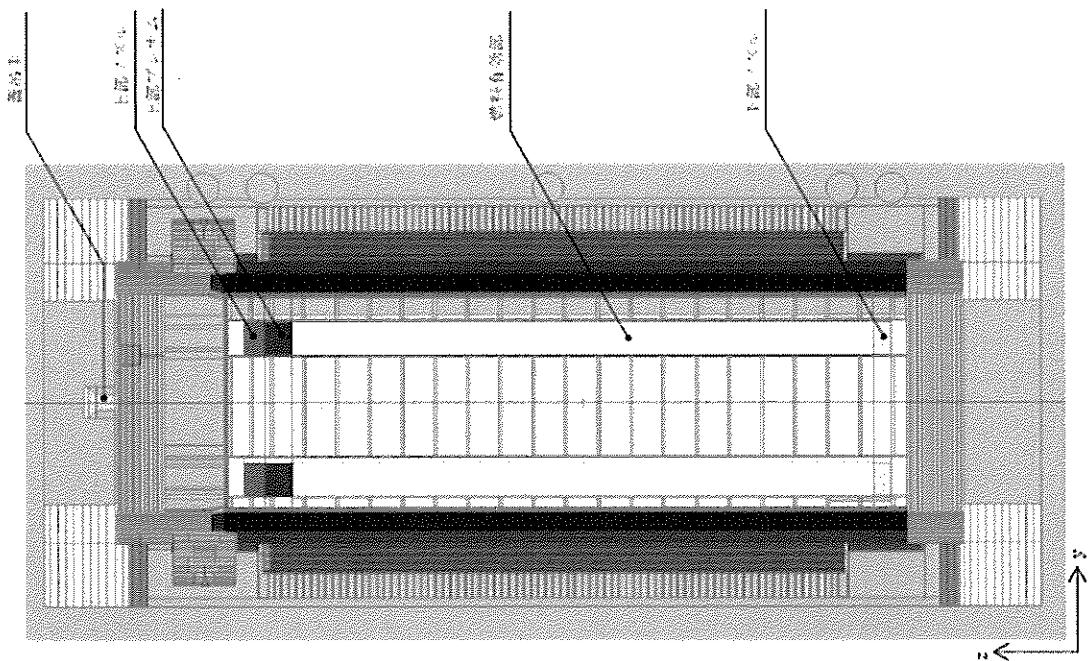
第 11 図 MCNP5 コード解析フロー

第5表 先行輸送容器許認可実績と MSF-24P 型式証明の解析条件の比較

項目	核燃料物質輸送容器 ⁽¹⁴⁾	MSF-24P 型式証明 (使用済燃料キャスク)	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	輸送容器体系 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	輸送容器体系 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

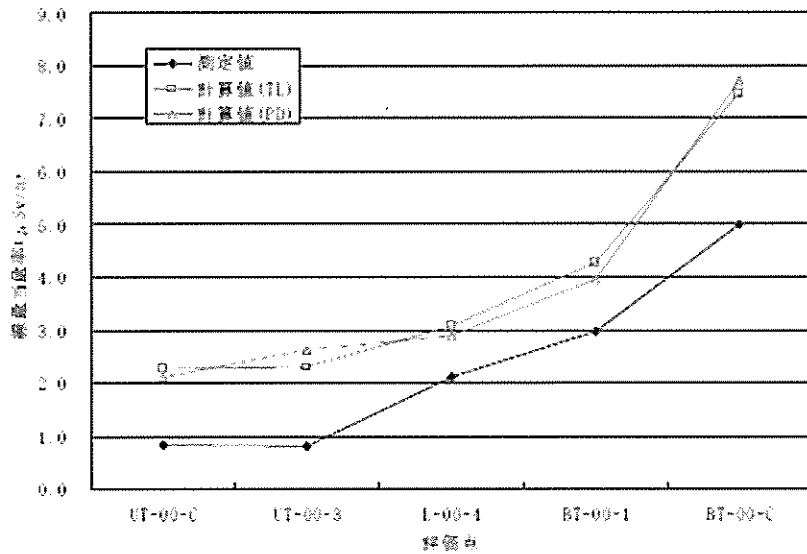


(x-z 断面)

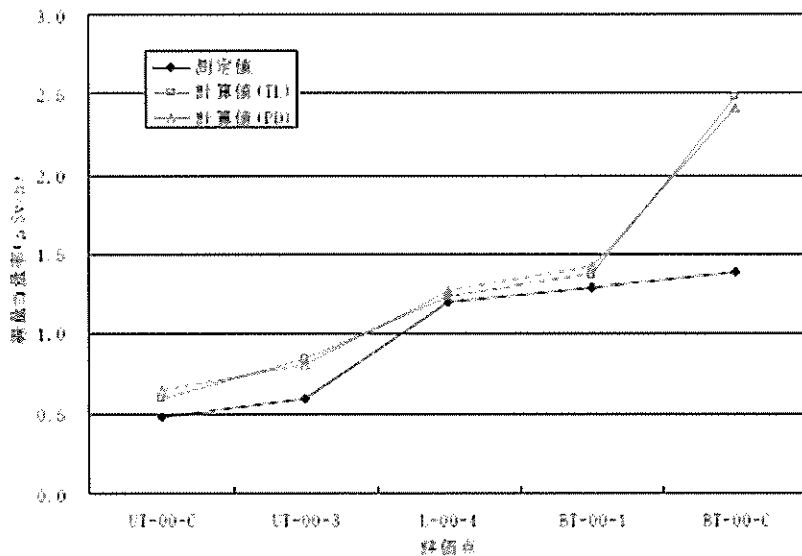


(y-z 断面)

第 12 図 (1/3) NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証⁽¹⁸⁾ (解析モデル)



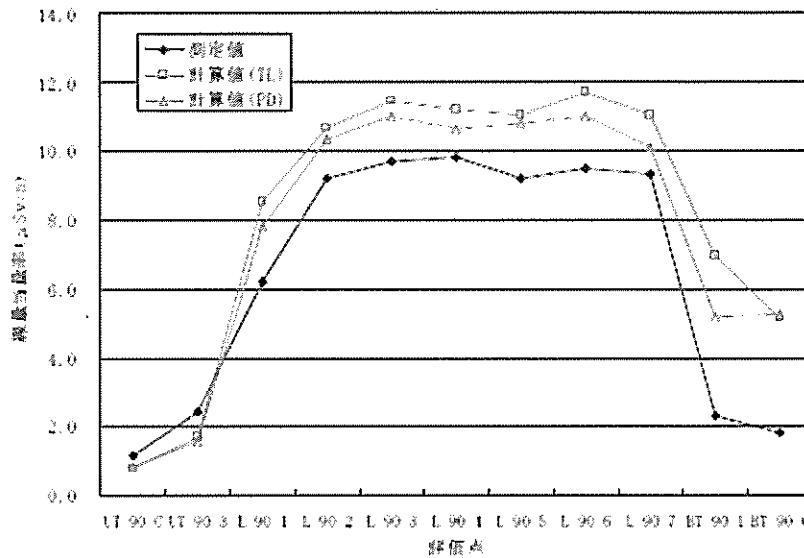
(中性子線量当量率、表面位置 0° 方向)



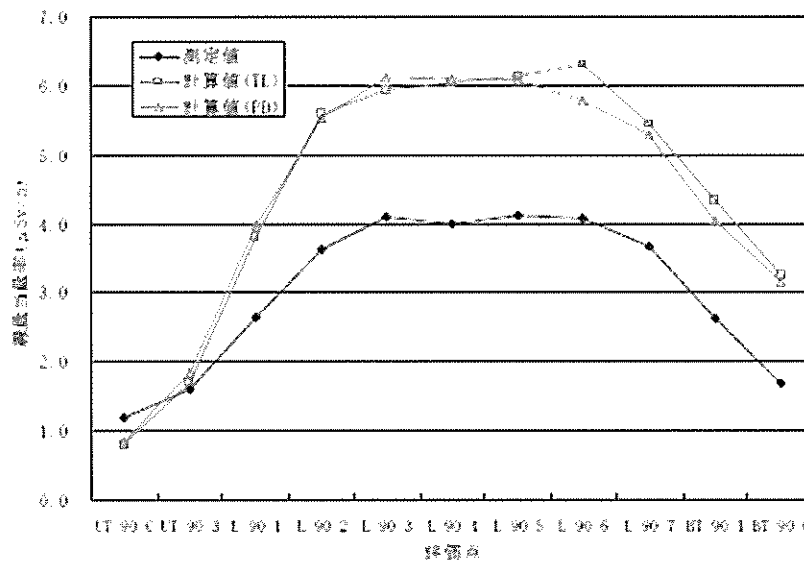
(中性子線量当量率、表面から 1 m 離れた位置 0° 方向)

(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 12 図 (2/3) NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証⁽¹⁸⁾ (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、バスケットやトランシ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。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 12 図 (3/3) NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証⁽¹⁸⁾ (評価結果)

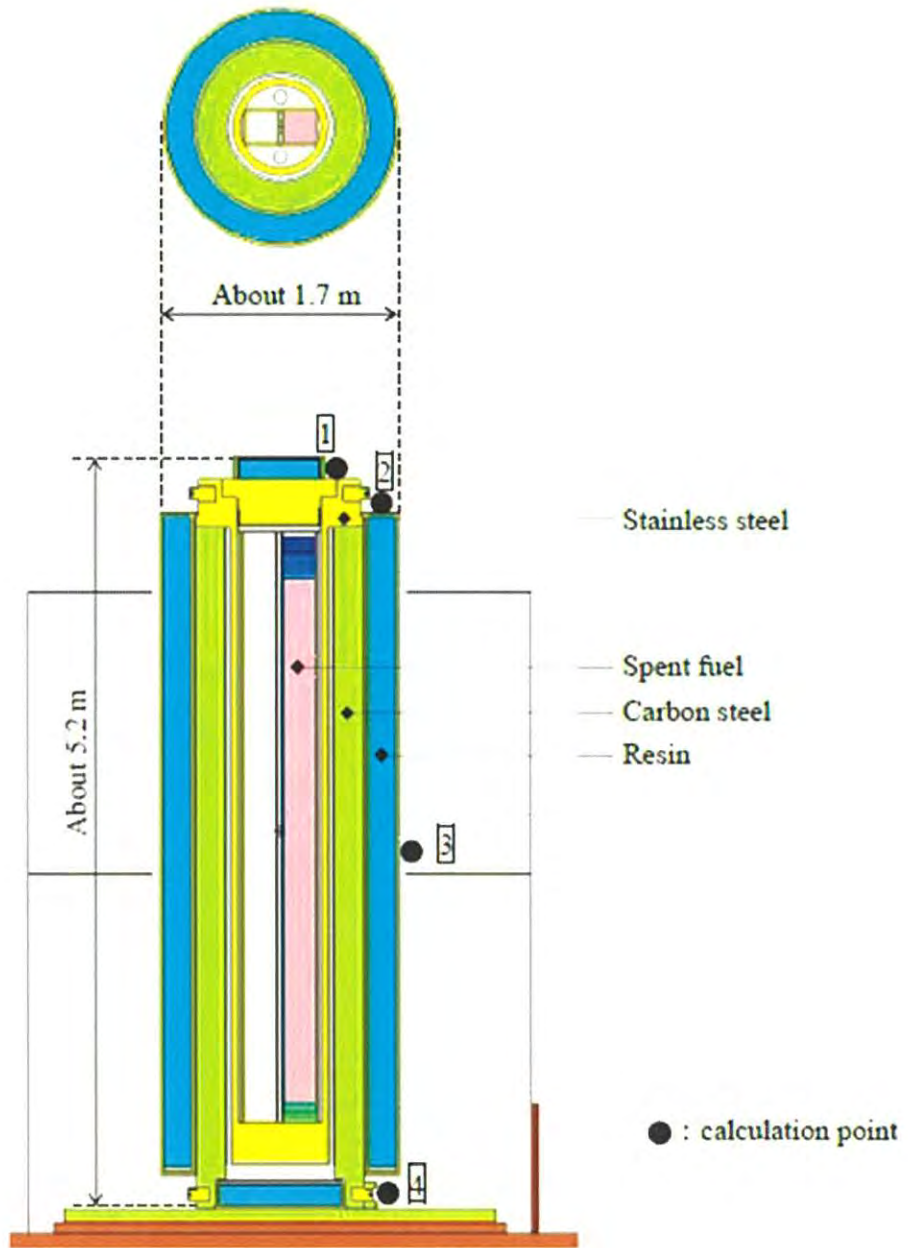


Figure 2. MCNP calculation model for the experiment

第 13 図 (1/2) 乾式貯蔵容器による MCNP5 コードの検証⁽¹⁹⁾ (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、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 13 図 (2/2) 乾式貯蔵容器による MCNP5 コードの検証⁽¹⁹⁾ (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
	ベンチマーク ⁽¹⁸⁾ (第12図)	ベンチマーク ⁽¹⁹⁾ (第13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 : EPDL89 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	
線源スペクトル	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	
	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	
線源スペクトル	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%	

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
	ベンチマーク (18) (第12図)	ベンチマーク (19) (第13図)	
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
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
	緩衝体	木材としてモデル化	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

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
	ベンチマーク (18) (第12図)	ベンチマーク (19) (第13図)	今回の型式証明の 遮蔽解析	
タリー	トラックリング エステイメータ (F4 Tally)	トラックリング エステイメータ (F4 Tally)	トラックリング エステイメータ (F4 Tally) サーフェイスクロッシング エステイメータ (F2 Tally)	ベンチマーク (第12図) はネグティブイベントエステイメータ (F5 Tally) についても評価。 型式証明の表面については F2Tally にて評価しているが、評価手法は F4 と同じである。
分散低減法	ウエイト ウィンドウ	ウエイト ウィンドウ	線源カットオフ エネルギー・カットオフ ウエイト ウィンドウ	<ul style="list-style-type: none"> 線源カットオフの設定値 燃料有効部ガンマ線：<input type="text"/> (注1) エネルギー・カットオフの設定値 ガンマ線：<input type="text"/> (注1) 中性子線：<input type="text"/> (注2)
評価結果 (計算値/ 測定値)	中性子	0.9~2.89 (第12図参照)	—	<ul style="list-style-type: none"> 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12図参照)	—	<ul style="list-style-type: none"> 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、ガンマ線の散乱が一部考慮できていないことで評価値が低くなっている影響。

(注1)：線量当量率への寄与割合が極めて小さい範囲で設定。

(注2)：線量当量率評価結果に対して影響ない。

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 ⁽²⁰⁾ 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 ⁽⁵⁾ 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。）の設置に当たっては、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 14 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 (1/4) 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 (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	
	②	④		⑤	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)	2.9 (0.4)
	構造材放射化	0.2 (0.5)	22.7 (0.9)	11.5 (0.2)	13.0 (1.0)	16.8 (0.3)
	二次ガンマ線	0.2 (1.2)	5.1 (0.5)	10.0 (0.4)	5.5 (0.5)	1.8 (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 (5/8) 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 (2/4) 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 (B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
	②	④		⑧	⑩
ガンマ線 表面から 1 m	燃料有効部	0.1 (1.6)	18.1 (0.4)	20.3 (0.3)	22.3 (0.5)
	構造材放射化	0.2 (0.9)	31.7 (0.7)	28.6 (0.5)	13.3 (0.6)
	二次ガンマ線	0.2 (3.3)	4.6 (0.7)	5.0 (0.6)	5.1 (0.7)
中性子	19.1 (0.7)	28.2 (0.6)	25.6 (0.5)	24.5 (0.8)	12.5 (0.5)
合計	19.6	82.6	79.5	65.2	44.8

※ () 内は統計誤差 (単位: %) を示す。

第3表 (6/8) 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 (3/4) 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 (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
	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)
	構造材放射化	0.1 (0.3)	16.2 (0.5)	8.5 (0.2)	8.3 (0.5)
	二次ガンマ線	0.2 (1.2)	5.3 (0.4)	10.5 (0.3)	5.5 (0.4)
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。

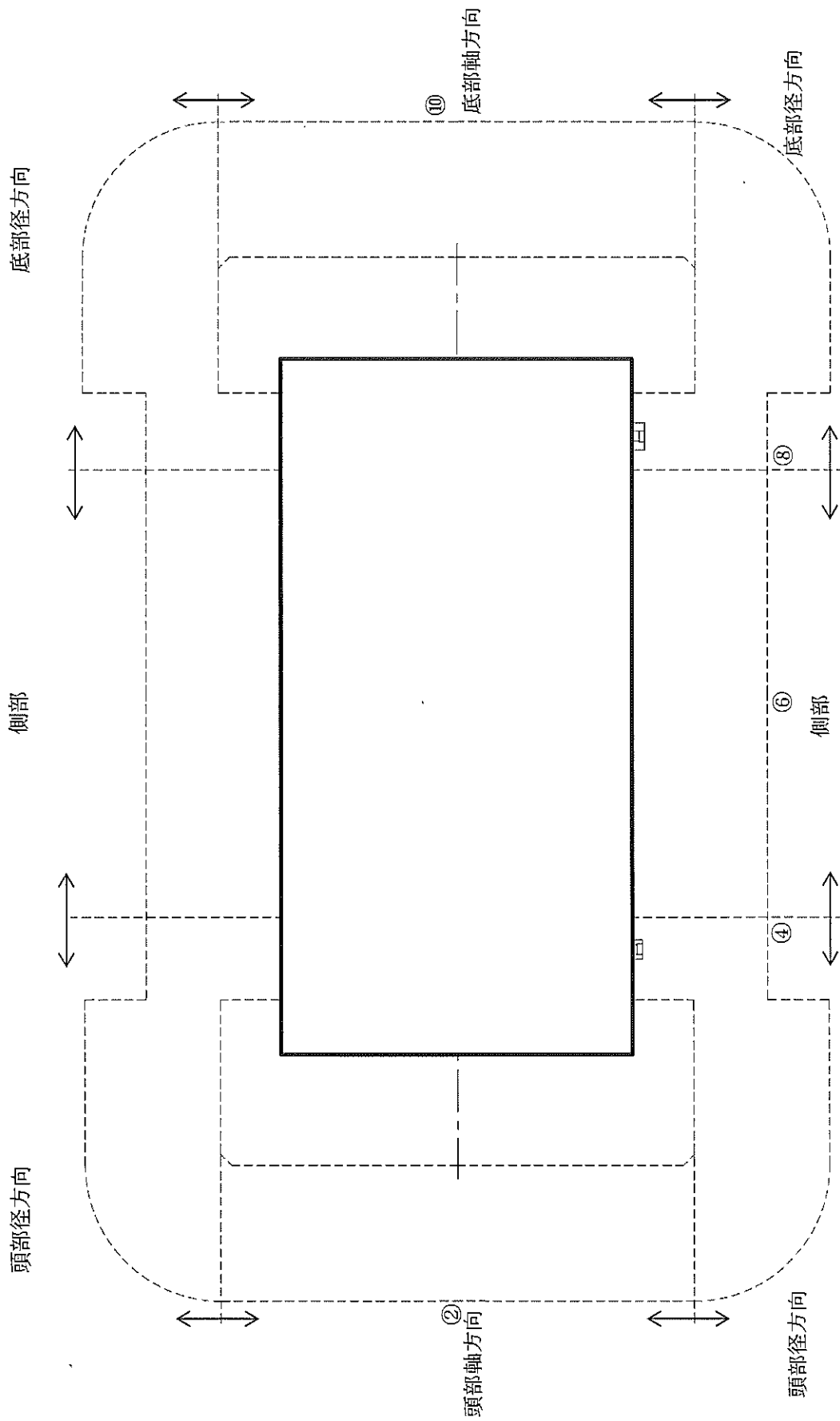
第3表 (7/8) に示す表面から1 m離れた位置における線量当量率の評価結果と同じ

第7表 (4/4) 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 (B型) 収納時)
(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 (1.6)	18.1 (0.4)	20.4 (0.3)	21.3 (0.6)
	構造材放射化	0.2 (0.9)	25.5 (0.7)	23.3 (0.6)	9.2 (0.9)
	二次ガンマ線	0.2 (2.1)	4.8 (0.3)	5.3 (0.3)	5.2 (0.4)
中性子	20.1 (0.5)	29.8 (0.6)	27.0 (0.5)	27.2 (0.8)	13.3 (0.5)
合計	20.6	78.2	76.0	62.9	33.0

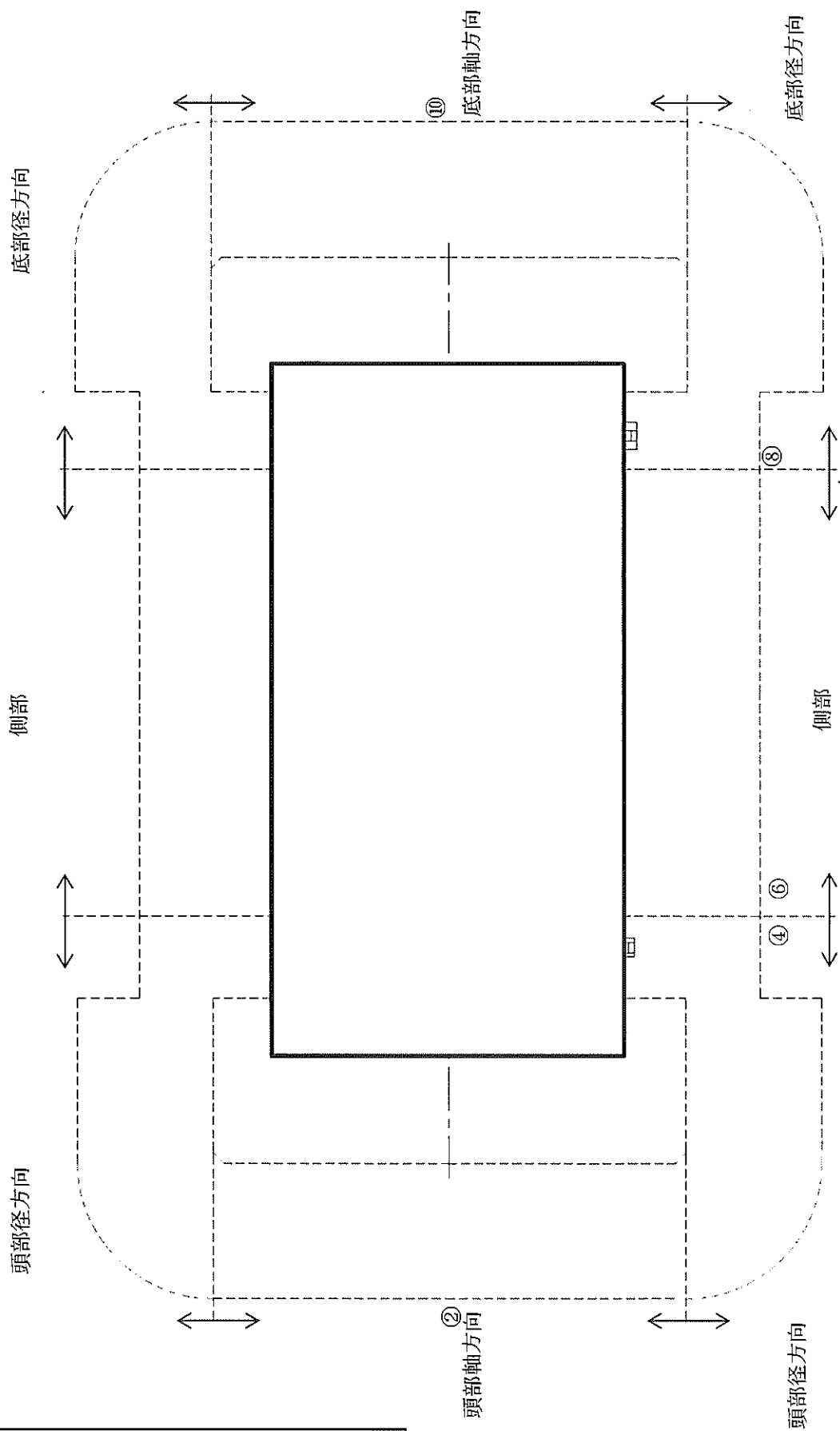
※ () 内は統計誤差 (単位: %) を示す。

第3表 (8/8) 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



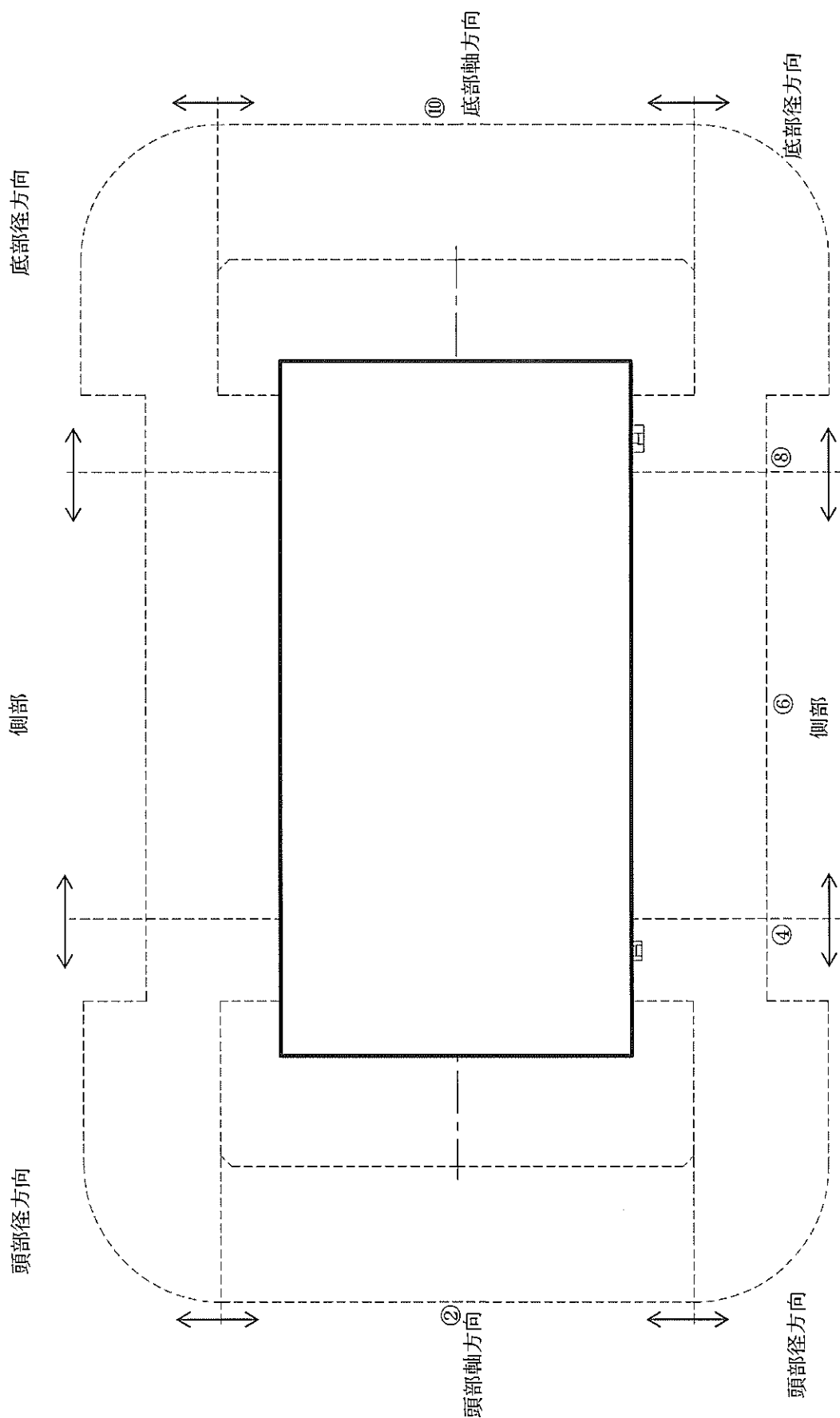
(注) ②, ④, ⑥, ⑧, ⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。
モニタリングポート、バルブ、トラニオンを同一断面に図示している。

第 14 図 (1/4) 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 (A 型) 収納時)



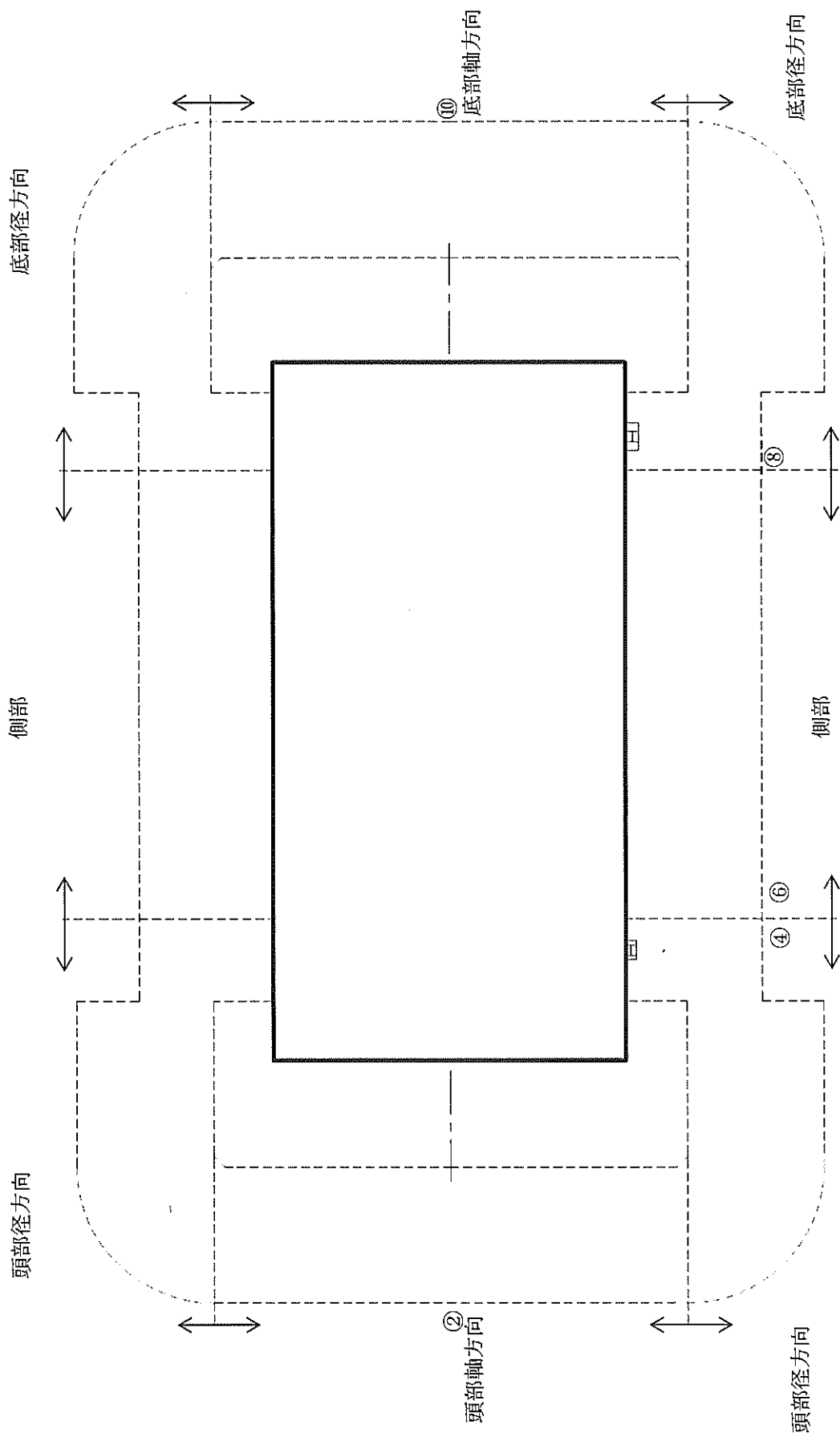
(注) ②, ④, ⑥, ⑧, ⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。
モニタリングポート、バルブ、トラニオンを同一断面に図示している。

第14図 (2/4) 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 (B型) 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14図 (3/4) 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 (A型) 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14図 (4/4) 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 (B型) 収納時)

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) Oak Ridge National Laboratory, “DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code”, CCC-276, (1977).
- (4) 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).
- (5) K. Kosako, et al., “The Libraries FSXLIB and MATXSLIB Based on JENDL-3.3”, JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).
- (6) R. E. MacFarlane, “TRANSX2: A Code for Interfacing MATXS Cross-Section Libraries to Nuclear Transport Codes”, LA-12312-MS, (1992).
- (7) International Atomic Energy Agency Nuclear Data Services, “TRANSX patches”, <https://www-nds.iaea.org/fendl20/transx-patches.htm>.
- (8) 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).
- (9) 一般社団法人 日本電気協会 原子力規格委員会, 「原子力発電所放射線遮蔽設計規程」, JEAC 4615-2020, (2020).
- (10) U. S. Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility”, NUREG-1536 Revision 1, (2010).
- (11) U. S. Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities”, NUREG-1567, (2000).
- (12) U. S. Nuclear Regulatory Commission, “Final Safety Evaluation Report”, <https://www.nrc.gov/docs/ML2030/ML20307A119.pdf>, (2020).
- (13) 四国電力株式会社, 「核燃料輸送物設計承認申請」, 原燃発 18-78 号, (2018).
- (14) 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).
- (15) 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」, R F S 発官 2 5 第 1 1 号, (2014).
- (16) 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).
- (17) Forrest Brown, Brian Kiedrowski, Jeffrey Bull, Matthew Gonzales, Nathan Gibson, “Verification of MCNP5-1.60” , LA-UR-10-05611, (2010).
- (18) 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).
- (19) 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).
- (20) 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).

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並びに別紙 1-7 表に中性子のエネルギーごとの中性子スペクトルを示す。

別紙 1-3 表に示すとおり、17×17 燃料及び 15×15 燃料の 48,000MWd/t 型はそれぞれ 39,000MWd/t 型に比べて線源強度が高いため、遮蔽解析に用いる燃料タイプは 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A型、B型）及び 15×15 燃料 48,000MWd/t 型（A型、B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	—	DOT3.5 : ^{239}Pu の核分裂スペクトル (別紙 1-7 表参照 ^(注)) MCNP5 : 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⁾ Watt 型連続分布スペクトル : $P(E) = C \exp(-E/a) \times \sinh(bE)^{1/2}$ ^{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 ^{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)			2,344 (約 90,000MWd/t 相当)							
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)			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)			2,671 (約90,000MWd/t相当)					
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)			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 (1/4) 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 (A型))

(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 (2/4) 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 (B型))

(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	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

(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 1-7

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 (A型))

(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 1-4 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 (B型))

(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	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

(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 (1/4) 中性子源強度 (17×17 燃料 (A型))

(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 (2/4) 中性子源強度 (17×17 燃料 (B型))

(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	9.170×10^7	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(15×15燃料(A型))

(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1-5表(4/4) 中性子源強度(15×15燃料(B型))

(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	9.454×10^7	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(A型))

(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) (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(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1-11

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 (B型))

(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) (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 (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 1-12

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(A型))

(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) (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	6.904×10^8	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}

(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(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1-13

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(B型))

(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) (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	5.313×10^8	3.750×10^8	9.063×10^8
16	5.0	2.098×10^8	1.442×10^8	3.540×10^8
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(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1-14

別紙1-7表 (1/5) 中性子源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注1)
1	1.964×10^7	0.0
2	1.733×10^7	7.107×10^{-6}
3	1.691×10^7	7.117×10^{-6}
4	1.649×10^7	2.368×10^{-5}
5	1.568×10^7	3.835×10^{-5}
6	1.492×10^7	2.686×10^{-5}
7	1.455×10^7	3.351×10^{-5}
8	1.419×10^7	4.165×10^{-5}
9	1.384×10^7	5.111×10^{-5}
10	1.350×10^7	1.392×10^{-4}
11	1.284×10^7	1.018×10^{-4}
12	1.252×10^7	1.017×10^{-4}
13	1.221×10^7	2.917×10^{-4}
14	1.162×10^7	4.082×10^{-4}
15	1.105×10^7	5.613×10^{-4}
16	1.051×10^7	7.571×10^{-4}
17	1.000×10^7	1.002×10^{-3}
18	9.512×10^6	1.303×10^{-3}
19	9.048×10^6	1.668×10^{-3}
20	8.607×10^6	2.101×10^{-3}
21	8.187×10^6	2.608×10^{-3}
22	7.788×10^6	3.191×10^{-3}
23	7.408×10^6	3.853×10^{-3}
24	7.047×10^6	4.592×10^{-3}
25	6.703×10^6	1.708×10^{-3}
26	6.592×10^6	3.698×10^{-3}
27	6.376×10^6	6.293×10^{-3}
28	6.065×10^6	7.243×10^{-3}
29	5.770×10^6	8.251×10^{-3}
30	5.488×10^6	9.302×10^{-3}
31	5.221×10^6	1.039×10^{-2}
32	4.966×10^6	1.151×10^{-2}
33	4.724×10^6	1.263×10^{-2}
34	4.493×10^6	2.859×10^{-2}
35	4.066×10^6	3.286×10^{-2}

(注1) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(注2) MCNP5 コードでは Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトルを使用する。

別紙1-7表(2/5) 中性子源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注1)
36	3.679×10^6	3.674×10^{-2}
37	3.329×10^6	1.965×10^{-2}
38	3.166×10^6	2.042×10^{-2}
39	3.012×10^6	2.108×10^{-2}
40	2.865×10^6	2.165×10^{-2}
41	2.725×10^6	2.214×10^{-2}
42	2.592×10^6	2.252×10^{-2}
43	2.466×10^6	1.517×10^{-2}
44	2.385×10^6	3.833×10^{-3}
45	2.365×10^6	3.812×10^{-3}
46	2.346×10^6	7.657×10^{-3}
47	2.307×10^6	1.535×10^{-2}
48	2.231×10^6	2.310×10^{-2}
49	2.123×10^6	2.312×10^{-2}
50	2.019×10^6	2.305×10^{-2}
51	1.921×10^6	2.290×10^{-2}
52	1.827×10^6	2.267×10^{-2}
53	1.738×10^6	2.236×10^{-2}
54	1.653×10^6	2.200×10^{-2}
55	1.572×10^6	2.160×10^{-2}
56	1.496×10^6	2.115×10^{-2}
57	1.423×10^6	2.059×10^{-2}
58	1.353×10^6	2.010×10^{-2}
59	1.287×10^6	1.947×10^{-2}
60	1.225×10^6	1.892×10^{-2}
61	1.165×10^6	1.827×10^{-2}
62	1.108×10^6	3.460×10^{-2}
63	1.003×10^6	1.367×10^{-2}
64	9.616×10^5	1.834×10^{-2}
65	9.072×10^5	1.502×10^{-2}
66	8.629×10^5	1.437×10^{-2}
67	8.209×10^5	1.372×10^{-2}
68	7.808×10^5	1.309×10^{-2}
69	7.427×10^5	1.247×10^{-2}
70	7.065×10^5	1.186×10^{-2}

(注1) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXSLIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(注2) MCNP5 コードでは Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトルを使用する。

別紙1-7表 (3/5) 中性子源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注1)
71	6.721×10^5	1.127×10^{-2}
72	6.393×10^5	1.070×10^{-2}
73	6.081×10^5	1.014×10^{-2}
74	5.784×10^5	9.605×10^{-3}
75	5.502×10^5	9.086×10^{-3}
76	5.234×10^5	8.591×10^{-3}
77	4.979×10^5	1.576×10^{-2}
78	4.505×10^5	1.401×10^{-2}
79	4.076×10^5	6.397×10^{-3}
80	3.877×10^5	6.017×10^{-3}
81	3.688×10^5	1.097×10^{-2}
82	3.337×10^5	9.670×10^{-3}
83	3.020×10^5	1.040×10^{-3}
84	2.985×10^5	3.887×10^{-4}
85	2.972×10^5	7.998×10^{-4}
86	2.945×10^5	2.159×10^{-3}
87	2.873×10^5	4.115×10^{-3}
88	2.732×10^5	7.463×10^{-3}
89	2.472×10^5	3.378×10^{-3}
90	2.352×10^5	3.160×10^{-3}
91	2.237×10^5	2.955×10^{-3}
92	2.128×10^5	2.763×10^{-3}
93	2.024×10^5	2.581×10^{-3}
94	1.926×10^5	2.411×10^{-3}
95	1.832×10^5	2.254×10^{-3}
96	1.742×10^5	2.100×10^{-3}
97	1.657×10^5	1.964×10^{-3}
98	1.576×10^5	1.828×10^{-3}
99	1.500×10^5	1.709×10^{-3}
100	1.426×10^5	1.590×10^{-3}
101	1.357×10^5	1.485×10^{-3}
102	1.291×10^5	1.384×10^{-3}
103	1.228×10^5	1.287×10^{-3}
104	1.168×10^5	1.202×10^{-3}
105	1.111×10^5	2.653×10^{-3}

(注1) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXSLIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(注2) MCNP5 コードでは Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトルを使用する。

別紙1-7表(4/5) 中性子源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^(注1)
106	9.804×10^4	2.219×10^{-3}
107	8.652×10^4	7.446×10^{-4}
108	8.250×10^4	5.458×10^{-4}
109	7.950×10^4	1.324×10^{-3}
110	7.200×10^4	7.861×10^{-4}
111	6.738×10^4	1.744×10^{-3}
112	5.656×10^4	6.216×10^{-4}
113	5.248×10^4	8.958×10^{-4}
114	4.631×10^4	7.457×10^{-4}
115	4.087×10^4	8.384×10^{-4}
116	3.431×10^4	2.982×10^{-4}
117	3.183×10^4	3.831×10^{-4}
118	2.850×10^4	1.659×10^{-4}
119	2.700×10^4	1.020×10^{-4}
120	2.606×10^4	1.347×10^{-4}
121	2.479×10^4	6.373×10^{-5}
122	2.418×10^4	6.142×10^{-5}
123	2.358×10^4	1.712×10^{-4}
124	2.188×10^4	2.461×10^{-4}
125	1.931×10^4	3.741×10^{-4}
126	1.503×10^4	2.577×10^{-4}
127	1.171×10^4	7.100×10^{-5}
128	1.060×10^4	1.066×10^{-4}
129	9.119×10^3	1.222×10^{-4}
130	7.102×10^3	8.411×10^{-5}
131	5.531×10^3	5.787×10^{-5}
132	4.307×10^3	2.564×10^{-5}
133	3.707×10^3	1.416×10^{-5}
134	3.355×10^3	1.219×10^{-5}
135	3.035×10^3	1.050×10^{-5}
136	2.747×10^3	4.685×10^{-6}
137	2.613×10^3	4.348×10^{-6}
138	2.485×10^3	7.778×10^{-6}
139	2.249×10^3	6.696×10^{-6}
140	2.035×10^3	1.294×10^{-5}

(注1) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXSLIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

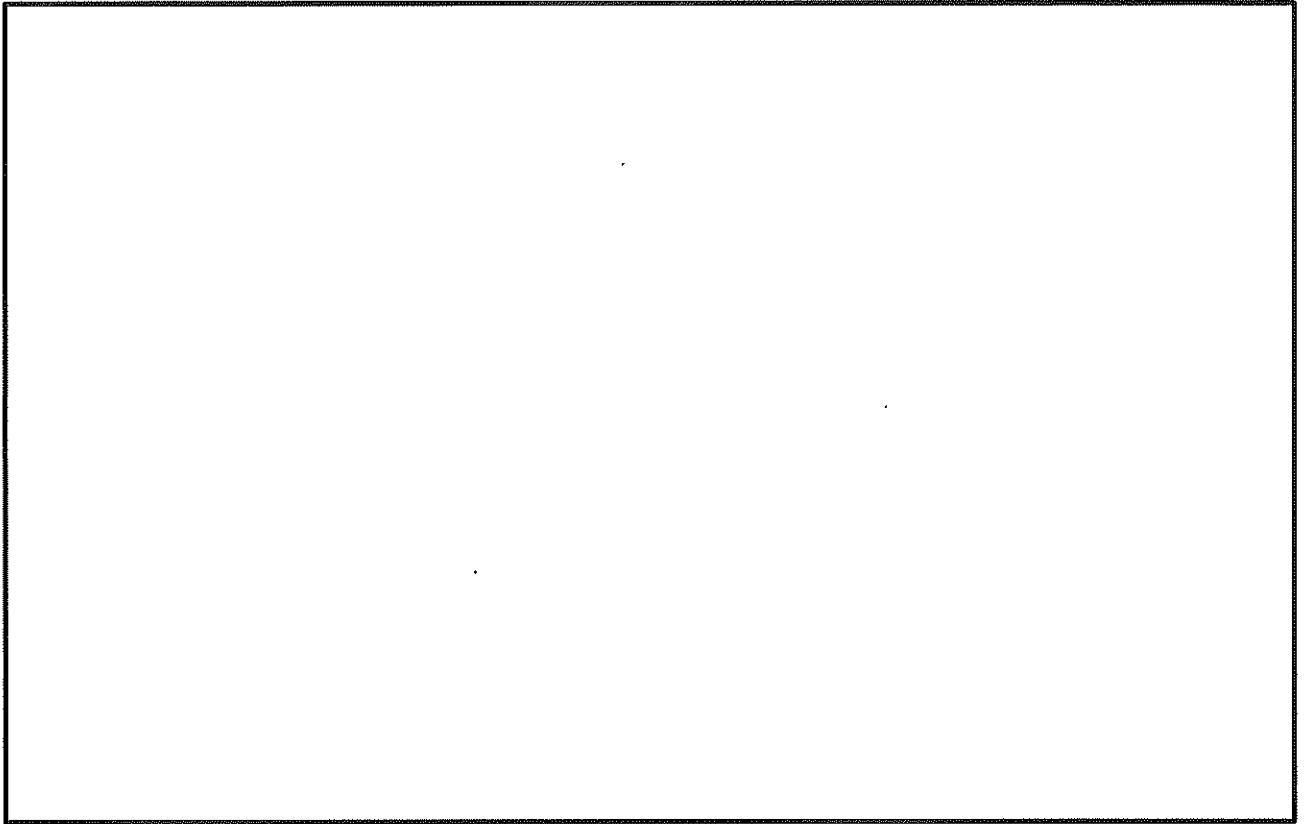
(注2) MCNP5 コードでは Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトルを使用する。

別紙1-7表(5/5) 中性子源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注1)
141	1.585×10^3	8.896×10^{-6}
142	1.234×10^3	6.116×10^{-6}
143	9.611×10^2	4.204×10^{-6}
144	7.485×10^2	2.890×10^{-6}
145	5.830×10^2	1.986×10^{-6}
146	4.540×10^2	1.365×10^{-6}
147	3.536×10^2	9.385×10^{-7}
148	2.754×10^2	6.450×10^{-7}
149	2.145×10^2	4.433×10^{-7}
150	1.670×10^2	3.047×10^{-7}
151	1.301×10^2	2.094×10^{-7}
152	1.013×10^2	1.439×10^{-7}
153	7.889×10^1	9.893×10^{-8}
154	6.144×10^1	6.799×10^{-8}
155	4.785×10^1	4.673×10^{-8}
156	3.727×10^1	3.201×10^{-8}
157	2.902×10^1	2.218×10^{-8}
158	2.260×10^1	1.517×10^{-8}
159	1.760×10^1	1.043×10^{-8}
160	1.371×10^1	7.168×10^{-9}
161	1.068×10^1	4.925×10^{-9}
162	8.315×10^0	3.385×10^{-9}
163	6.476×10^0	2.327×10^{-9}
164	5.044×10^0	1.599×10^{-9}
165	3.928×10^0	1.099×10^{-9}
166	3.059×10^0	7.657×10^{-10}
167	2.382×10^0	5.087×10^{-10}
168	1.855×10^0	3.568×10^{-10}
169	1.445×10^0	2.452×10^{-10}
170	1.125×10^0	1.686×10^{-10}
171	8.764×10^{-1}	1.158×10^{-10}
172	6.826×10^{-1}	7.961×10^{-11}
173	5.316×10^{-1}	5.472×10^{-11}
174	4.140×10^{-1}	1.060×10^{-10}
175	1.000×10^{-1}	1.427×10^{-11}

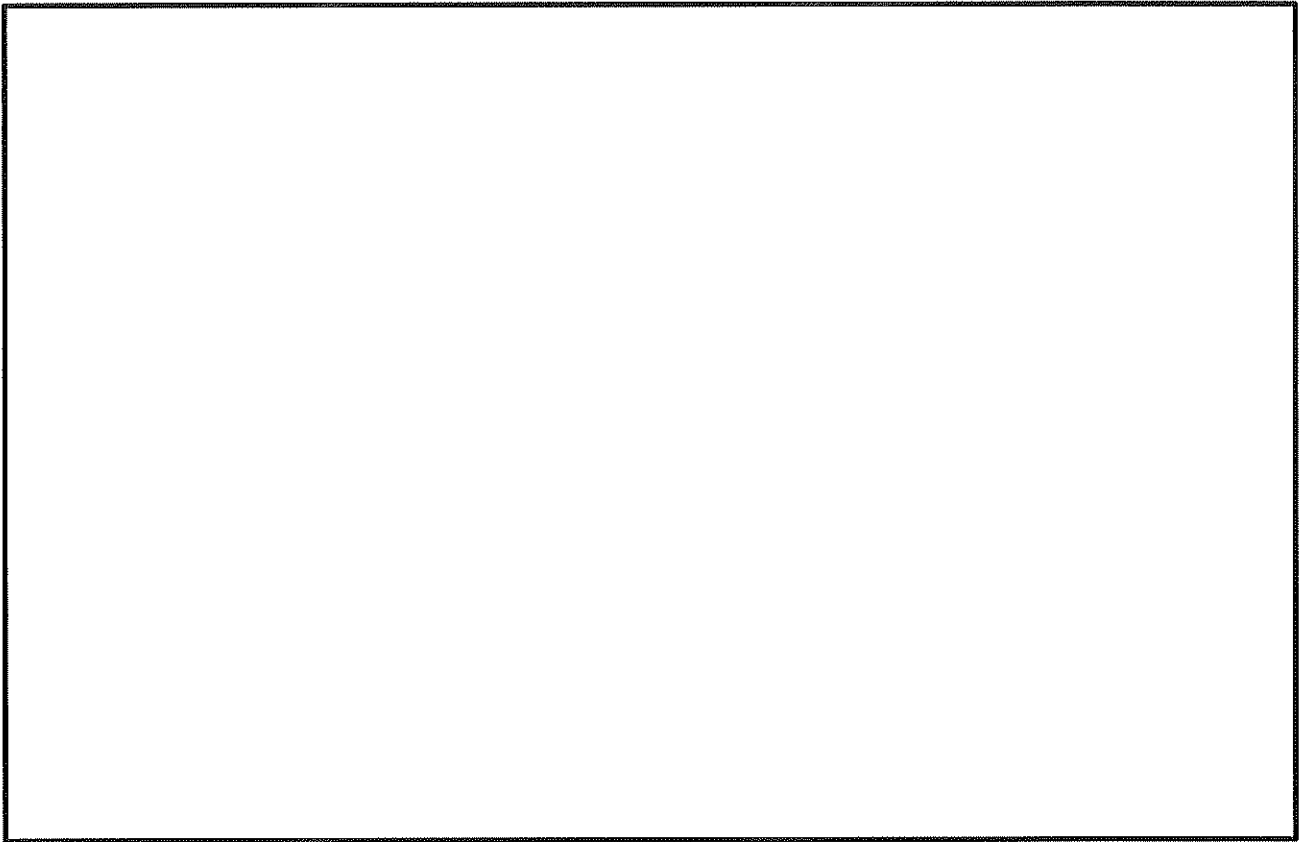
(注1) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを MATXS LIB-J33 の中性子 175 群構造に振り分けたものである。

(注2) MCNP5 コードでは Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトルを使用する。



---- 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 1-21

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。

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 図及び別紙 1-4 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。

二次元輸送計算コード DOT3.5 では、MSF-24P 型を R-Z 体系の有限円筒モデル（以下「二次元モデル」という。）でモデル化している。ただし、有限円筒モデルで直接モデル化できない使用済燃料集合体、バスケット、トラニオン等は、構造上の特徴を考慮して、均質化あるいは線束接続によって評価している。なお、二次元モデルは、キャスク中央付近で二分割しており、頭部評価モデルは、使用済燃料集合体が一次蓋に接した状態とし、底部評価モデルは、使用済燃料集合体が胴（底板）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としている。

三次元輸送計算コード MCNP5 では、MSF-24P 型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、三次元モデルについても二次元モデルと同様に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。

二次元モデル設定の妥当性は、別紙 6 に示すとおり、DOT3.5 コード評価結果と MCNP5 コード評価結果がおおむね一致していることにより確認している。

(1) 燃料領域

二次元モデルの燃料領域については、別紙 1-5 図に示すとおり使用済燃料集合体とバスケットを均質化してモデル化している。中央部及び外周部燃料領域について、それぞれの燃料領域の実形状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。

三次元モデルの燃料領域については、別紙 1-5 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、放射線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

二次元モデルの燃料領域より外側のバスケット部は、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、バスケット外周部（燃料領域より外側から胴内面までの領域）の密度を

密度係数で調整している。別紙 1-6 図に示すとおり、キャスク水平断面 X-Y 体系のモデルにて、円周方向のキャスク表面から 1 m 離れた位置の最大線量当量率を算出し、この値と同等となるようなバスケット外周部の密度係数を無限円筒モデルより求め、本体モデルに反映している。したがって、本体モデルにおける線量当量率は、実形状における最大線量当量率を包絡する設定となる。

三次元モデルについては、別紙 1-5 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

二次元モデルの胴、側部中性子遮蔽材及び外筒については、別紙 1-5 図に示すとおり、円筒としてモデル化している。

なお、側部中性子遮蔽材に伝熱フィンがある領域では、伝熱フィンは均質化している。

三次元モデルについては、別紙 1-5 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

二次元モデルのトラニオン部については、実形状を模擬して別途モデル化し、評価している。

別紙 1-7 図に示すとおり、トラニオンを無視した本体モデルにて得られたトラニオン底面付近の線束を、別途モデル化した R-Z 体系のトラニオンモデルに接続している。トラニオン部は、トラニオン中心を通る断面でトラニオン底面及びキャスク本体の一部を含めモデル化している。

トラニオン部の線量当量率は、トラニオン有りモデルとトラ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值として求め、本体モデルの線量当量率にその補正值を乗じて評価している。

三次元モデルについては、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 1-8 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。

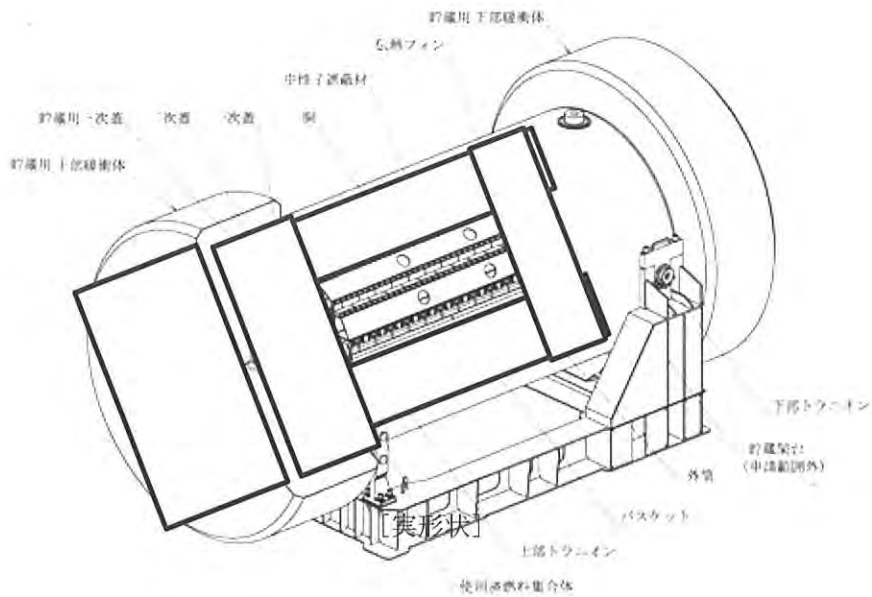
— 緩衝体は、安全側に空気に置き換え、距離のみ考慮する。

— 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 1-8 表 解析条件の保守性による線量当量率への影響

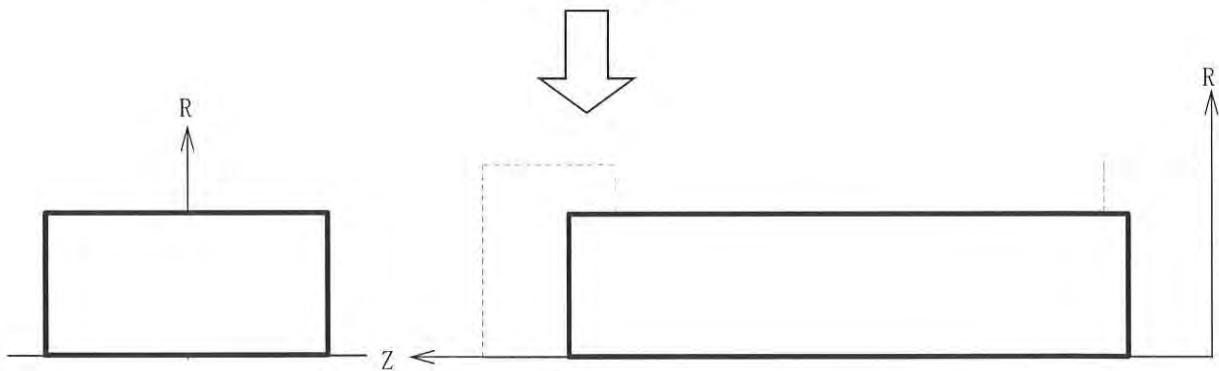
項目	詳細条件	遮蔽解析条件	線量当量率 (注) への影響 (保守性)
ウラン初期濃縮度	4.1± <input type="checkbox"/> wt% (ノミナル値、公差)	<input type="checkbox"/> wt%	約 0.5%程度
燃料集合体燃焼度	キヤスク平均 44GWd/t	中央部全て 48GWd/t 外周部全て 44GWd/t (キヤスク平均 46GWd/t)	約 10%程度
中性子遮蔽材質量減損	質量減損 2.0%	質量減損 2.5%	約 10%程度
燃料集合体の軸方向移動	燃料集合体と一次蓋間に約 8 cm の隙間	胴 (底板) 及び一次蓋に接した状態	約 7%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]

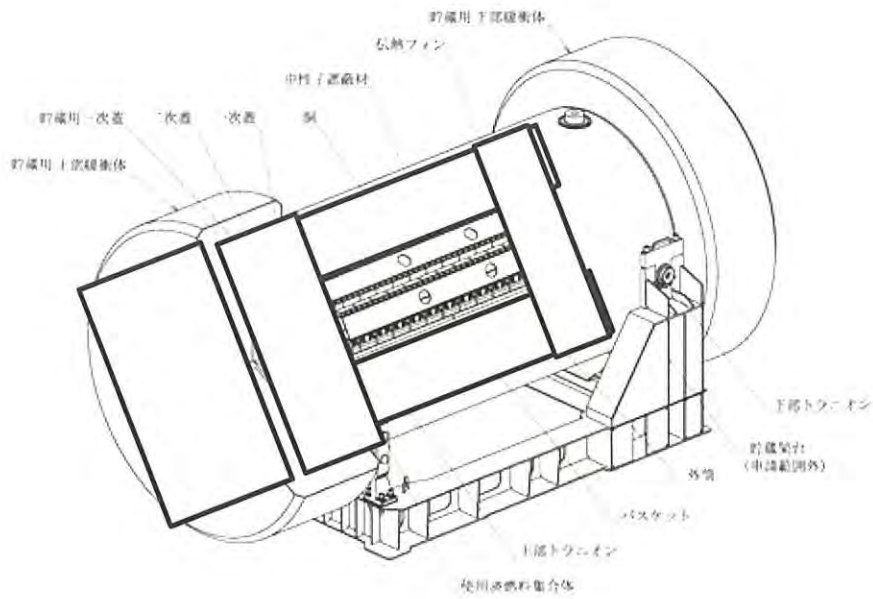
二次元モデル化



[遮蔽解析モデル化 (二次元体系 (R-Z 体系))]

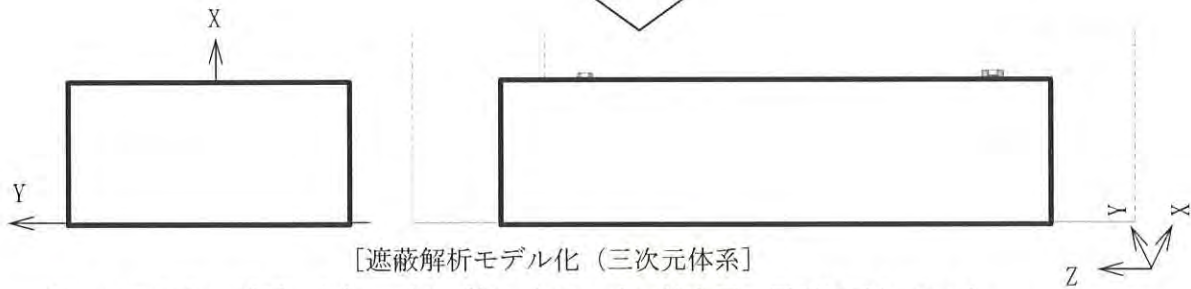
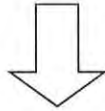
燃料有効部中央+バスケット均質化領域	燃料有効部外周+バスケット均質化領域
燃料上部構造材中央+バスケット均質化領域	燃料上部構造材外周+バスケット均質化領域
燃料上部構造材中央	燃料上部構造材外周
燃料下部構造材中央+バスケット均質化領域	燃料下部構造材外周+バスケット均質化領域
バスケット外周部	胴、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー
中性子遮蔽材	貯蔵用三次蓋、底部中性子遮蔽材カバー、下部端板
中性子遮蔽材+伝熱フィン均質化領域	真空
	貯蔵用緩衝体 (空気)

別紙 1-2 図 (1/2) 遮蔽解析モデル化概要 (二次元モデル)



[実形状]

三次元モデル化



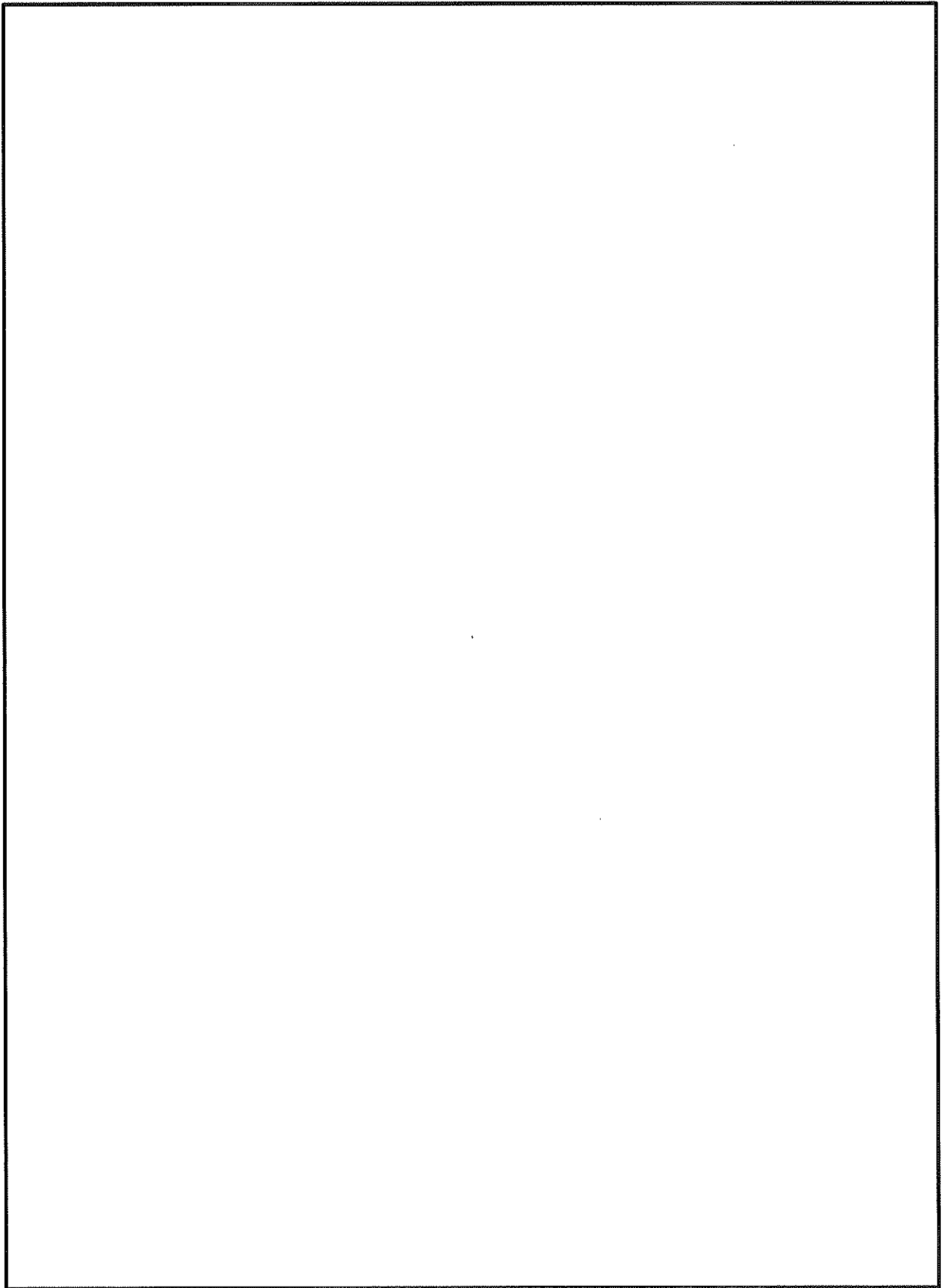
[遮蔽解析モデル化 (三次元体系)]

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)

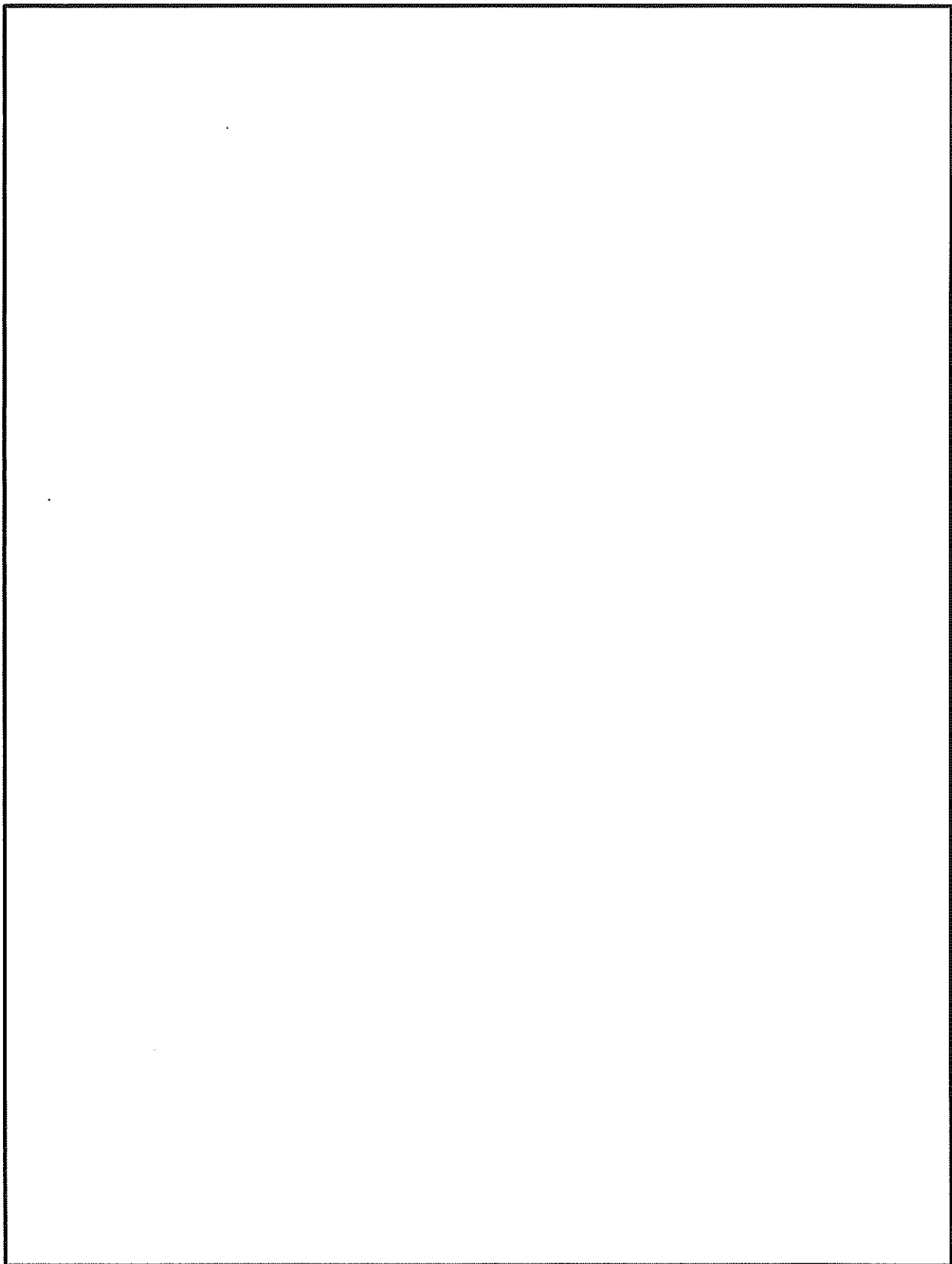
別紙1-2図 (2/2) 遮蔽解析モデル化概要 (三次元モデル)

別紙 1-27



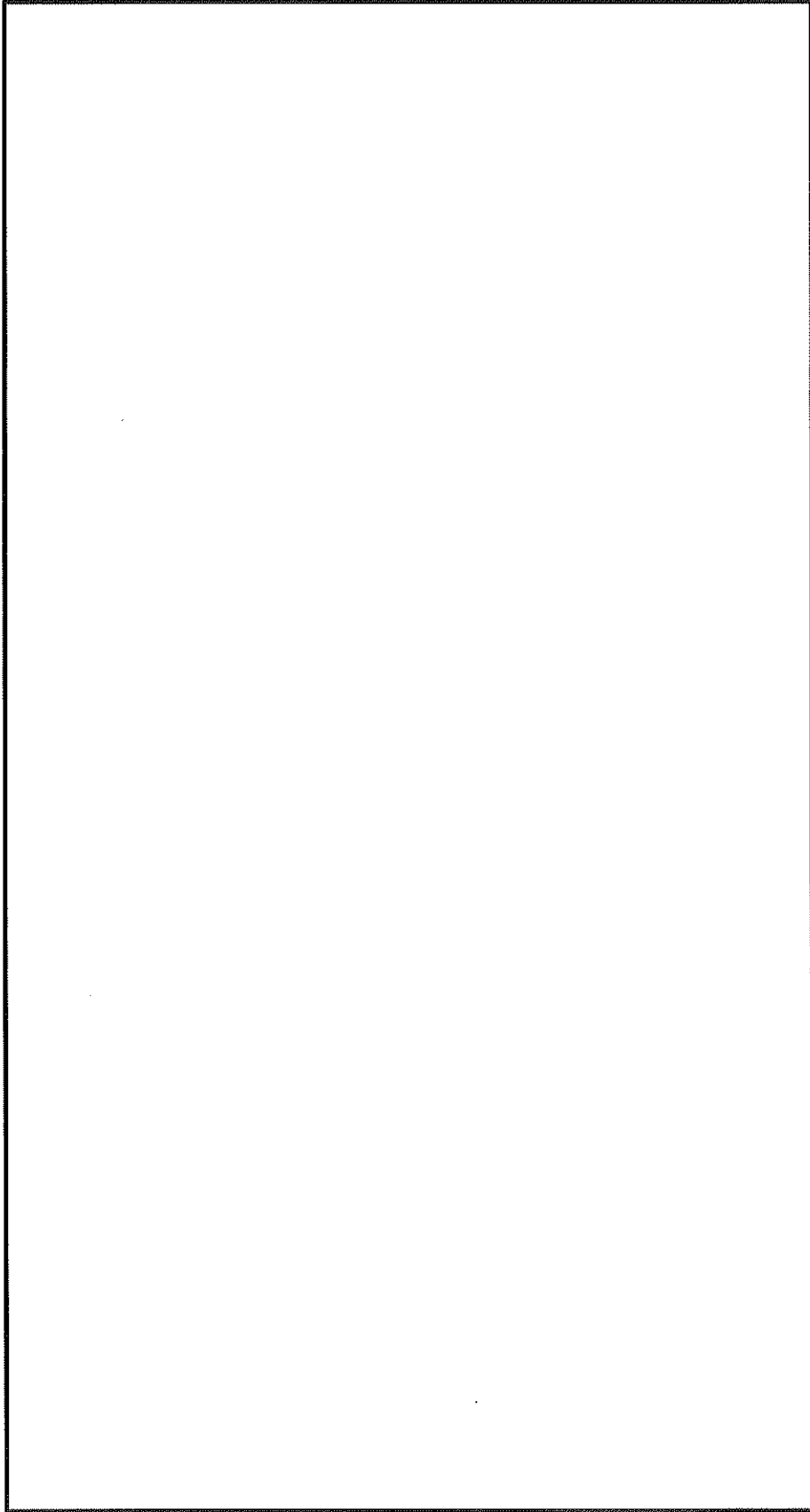
別紙 1-3 図 (1/4) 遮蔽解析モデル (二次元モデル、頭部)

別紙 1-28

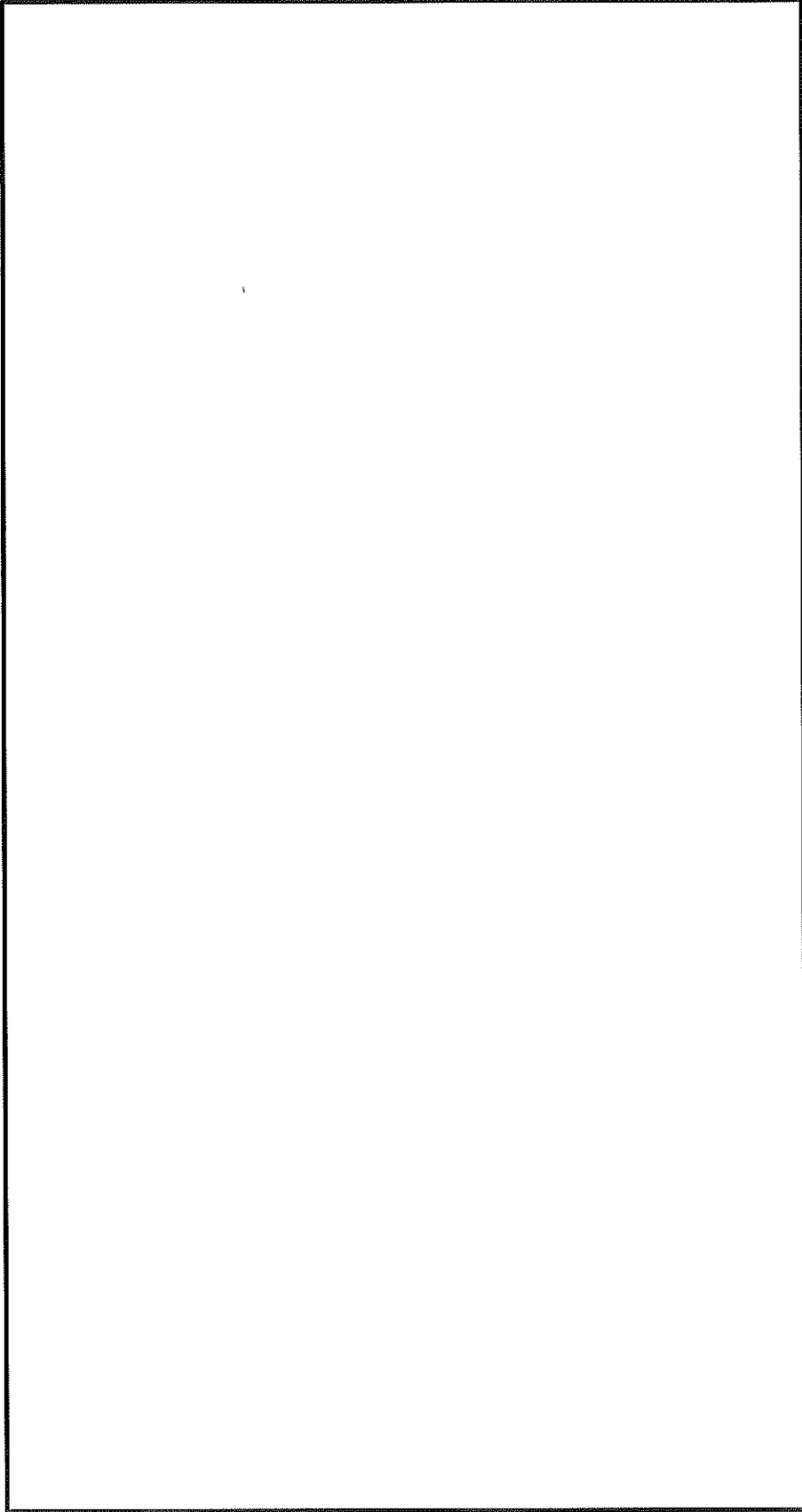


別紙 1-3 図 (2/4) 遮蔽解析モデル (二次元モデル、底部)

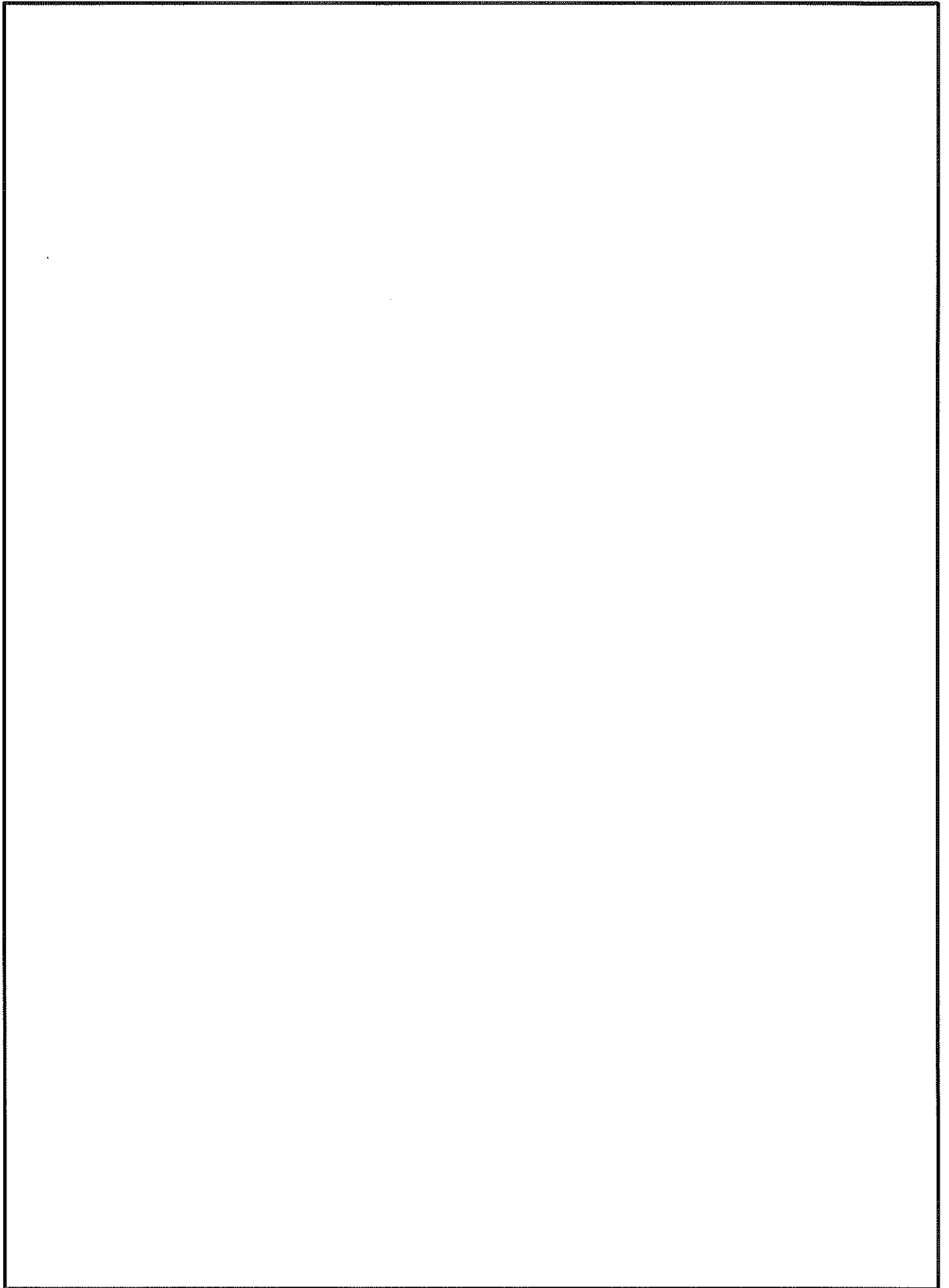
別紙 1-29



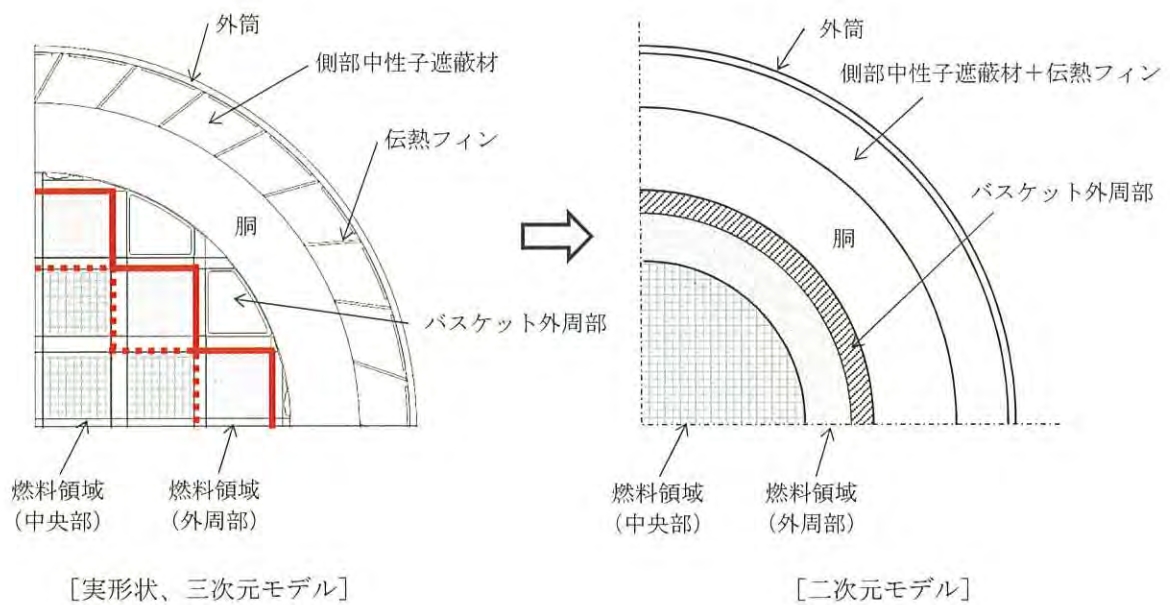
別紙 1-3 図 (3/4) 遮蔽解析モデル (二次元モデル、上部トランジション部)



別紙 1-3 図 (4/4) 遮蔽解析モデル (二次元モデル、下部トランジオン部)



別紙 1-4 図 遮蔽解析モデル（三次元モデル）

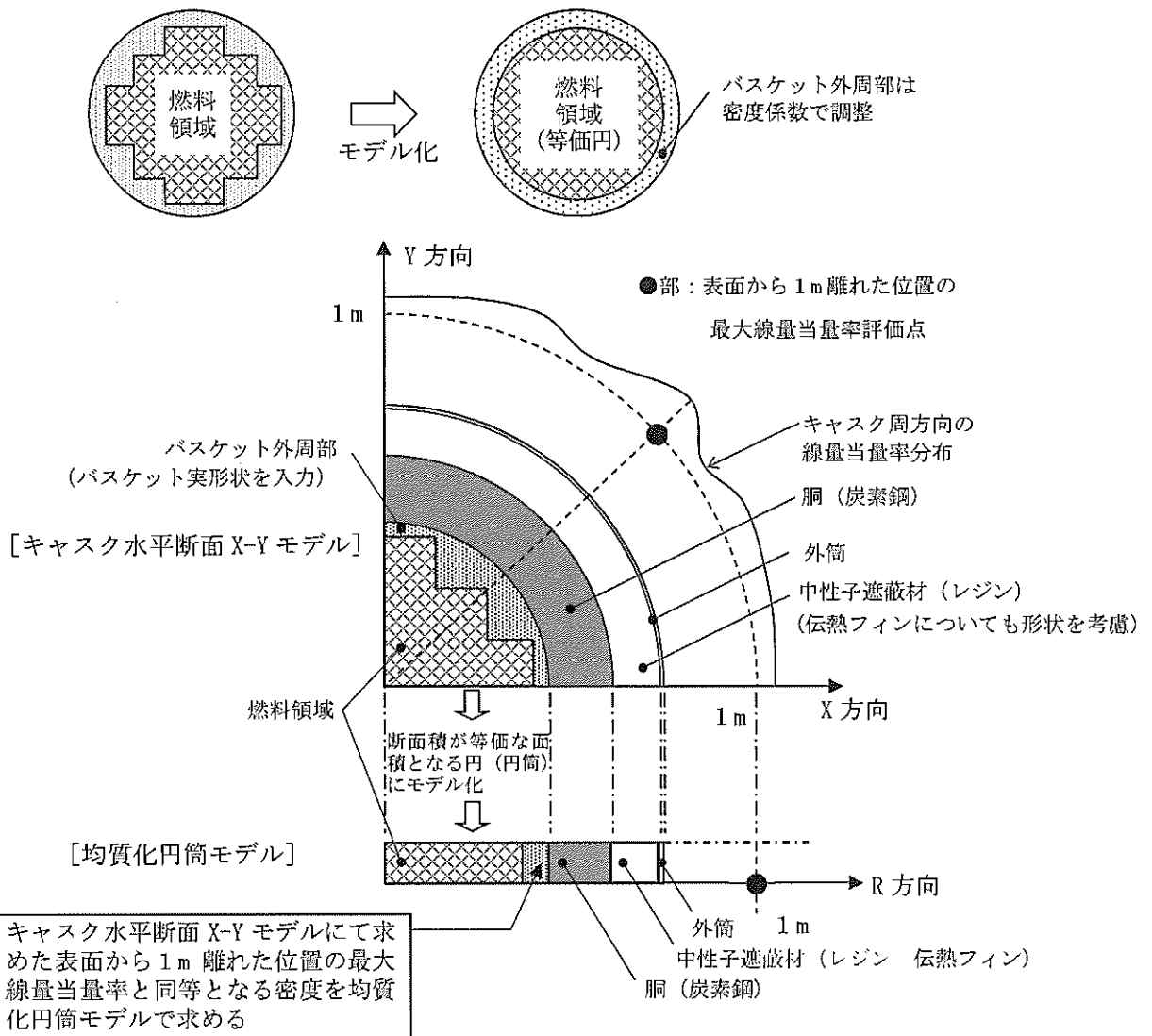


遮蔽解析モデルへの入力

二次元モデルの解析では、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。

三次元モデルでの解析では、実形状に基づきモデル化している。

別紙 1-5 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、二次元モデルでは以下に示す手法により、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。

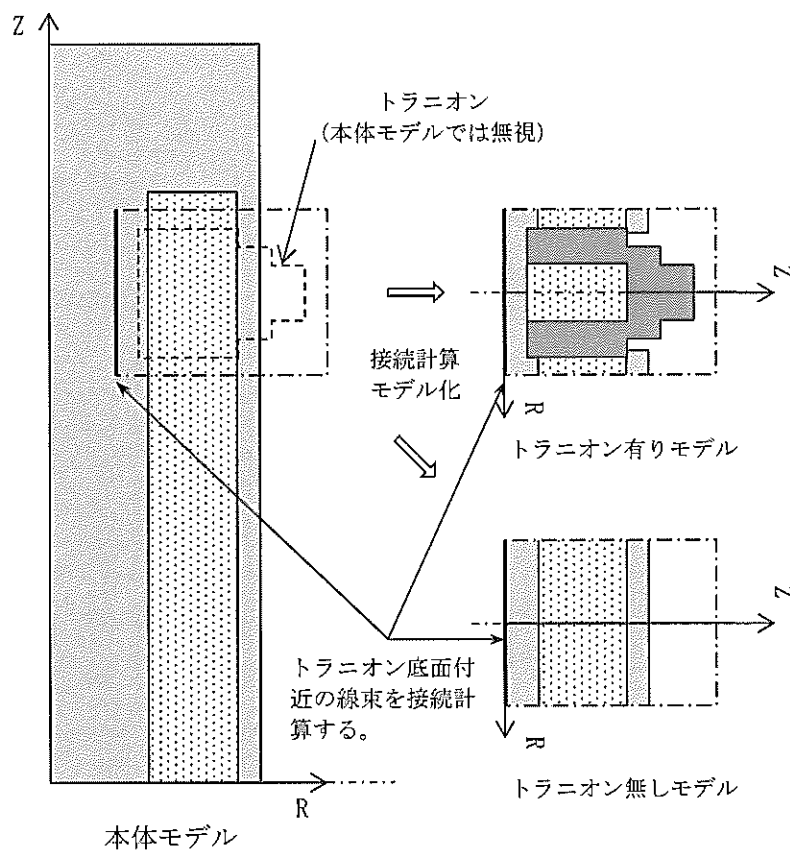
※算出位置を表面から1m離れた位置としているのは、表面位置に比べ、要求事項である基準線量当量率に対する裕度が少ないためである。

(ii) キャスク均質化円筒モデル遮蔽解析

別紙1-5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。

(ii)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1-6図 二次元モデルのバスケット外周部のモデル化について



$$\text{トランニオン部の線量当量率} = (\text{本体モデル}) \times (\text{トランニオン有りモデル}) / (\text{トランニオン無しモデル})$$

別紙 1-7 図 二次元モデルのトランニオン部の線束接続計算の概略図

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。

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

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 による詳細評価条件

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 1-9 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 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 型燃料又は全て B 型の 48,000MWd/t 型燃料としている。

別紙 1-9 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		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 5cm×5cm の曲面) 表面から 1m 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、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

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（面タリー）を設定した。また、トランゾン近傍等の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。

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（体積タリー）を用いた。表面から 1 m 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。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。

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

核分裂生成物：⁹⁹Tc, ¹⁰³Rh, ¹³¹Xe, ¹³³Cs, ¹⁴³Nd, 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 (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。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 (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).

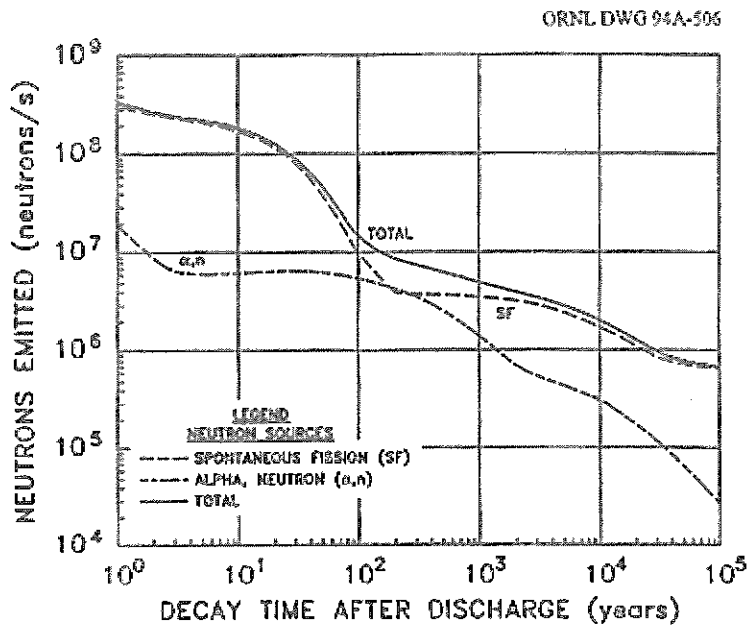


Fig. 9.3. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTHM): PWR/33,000 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

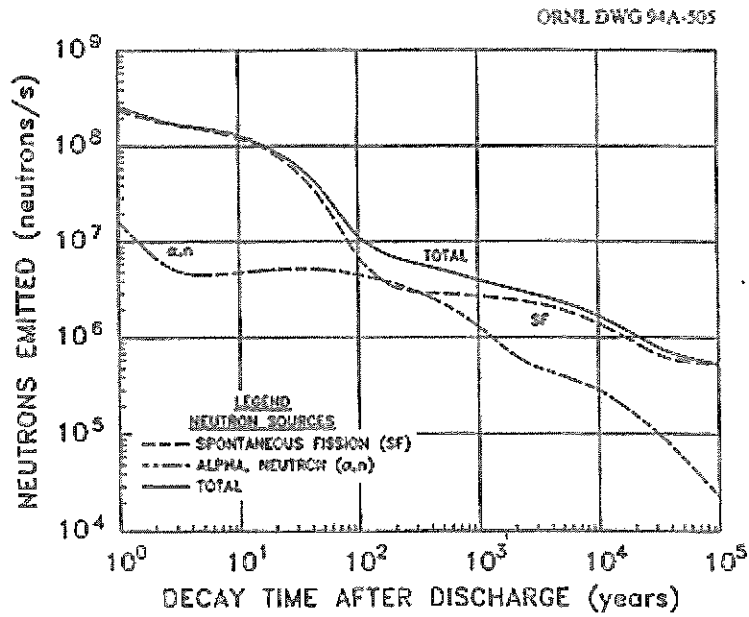
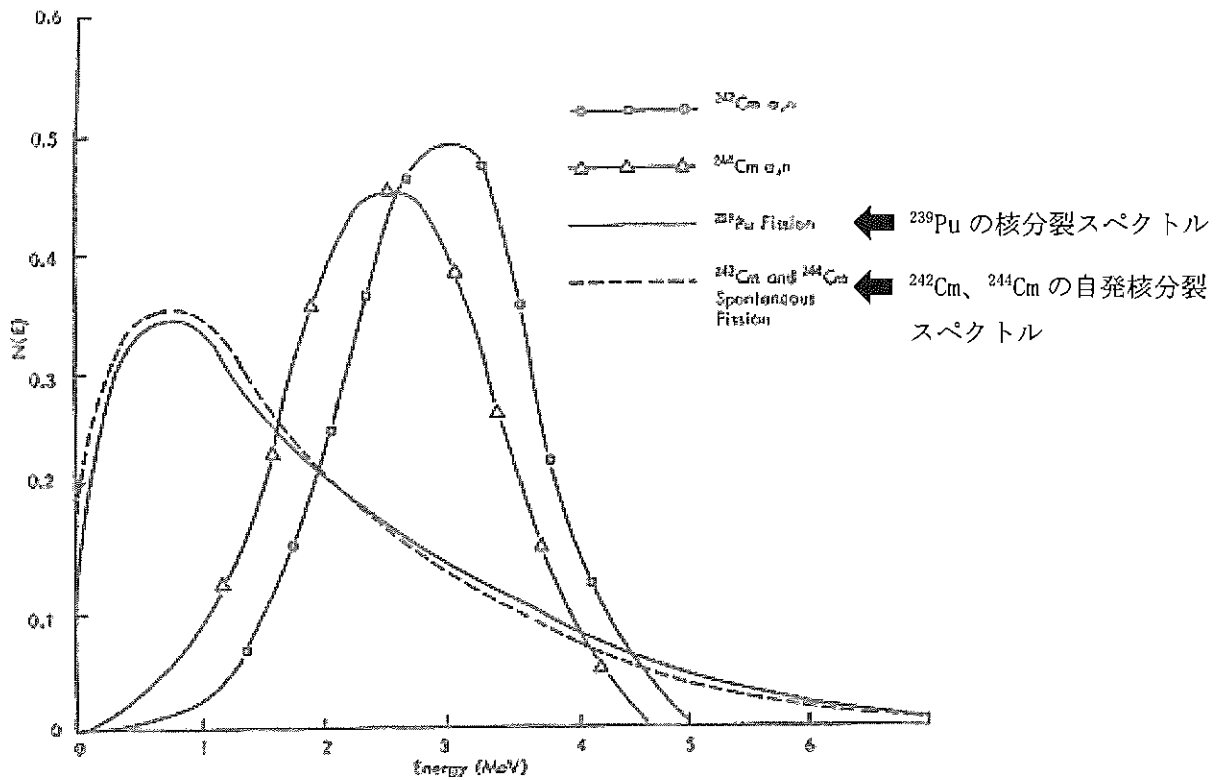


Fig. 9.3. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTHM): BWR/27,500 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

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⁾

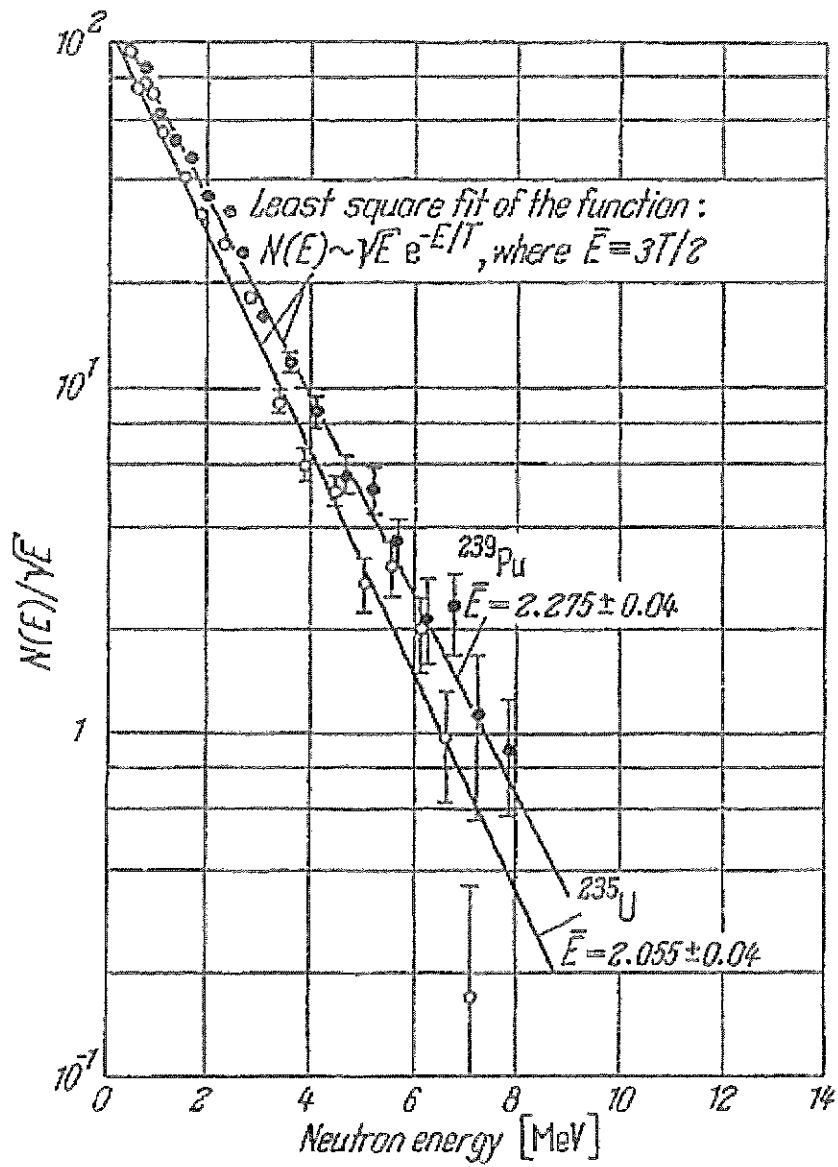


Fig. 2.3.-2. Typical measured fission neutron spectra of $^{235}\text{U} + n_{th}$ and $^{239}\text{Pu} + n_{th}$.

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⁾

遮蔽解析結果の詳細 (DOT3.5 コード)

1. 線量当量率評価結果

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。）における解析結果詳細を示す。

DOT3.5 解析の線量当量率結果を別紙4-1表から別紙4-4表に、最大線量当量率となる評価点位置を別紙4-1図から別紙4-4図に示す。また、別紙5に示す MCNP5 解析と同様に 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A型）収納時について、別紙4-1表に示す各評価点方向における線量当量率の分布図を別紙4-5図に示す。

なお、二次元モデル設定の妥当性は、別紙6に示すとおり DOT3.5 コード評価結果と MCNP5 コード評価結果がおおむね一致していることにより確認している。

別紙4-1表 線量当量率評価結果 (17×17燃料 (A型) 収納時 DOT3.5コード)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側部	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨
表面	燃料有効部	<0.1	8.0	100.7	5.9	5.4	6.0
	構造材放射化	0.2	103.0	25.9	15.0	13.4	35.9
	二次ガンマ線	0.2	1.1	25.7	4.4	4.8	4.6
中性子	41.7	389.3	753.8	45.1	258.6	1108.3	25.2
合計	42.2 (注2)	391.1 (注2)	870.5	197.4	283.9	<u>1131.9</u> [1.2] (注1)	71.7
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から1m	燃料有効部	<0.1	22.5	44.8	25.8	25.1	2.6
	構造材放射化	<0.1	20.1	20.9	12.5	12.8	14.8
	二次ガンマ線	<0.1	5.4	5.4	10.4	5.7	1.7
中性子	20.9	24.5	34.0	18.4	15.2	26.3	15.8
合計	21.2 (注2)	72.5	82.9	<u>86.1</u> [87] (注1)	61.4	69.9	34.9

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。

別紙4-2表 線量当量率評価結果 (17×17燃料 (B型) 収納時 DOT3.5コード)

(単位: μ Sv/h)

評価点	頭部			側部	底部				
	軸方向	径方向	径方向 (トラニオン部)		径方向	径方向 (トラニオン部)	軸方向		
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨		
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	6.3	84.8	5.0	4.7	5.2	
		構造材放射化	0.3	1.1	183.8	17.2	25.2	22.1	59.9
		二次ガンマ線	0.2	1.0	5.2	23.8	4.1	4.5	4.3
	中性子	38.0	354.1	666.5	41.9	243.1	1021.8	23.7	
	合計	38.6 (注2)	356.3 (注2)	861.8	167.7	277.4	<u>1053.1</u> [1.1] (注1)	93.1	
	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	19.0	20.4	21.8	13.8	2.3	
		構造材放射化	0.2	30.6	32.0	29.6	17.3	11.9	24.8
		二次ガンマ線	<0.1	5.1	5.0	5.3	5.4	3.9	1.6
	中性子	19.1	22.2	30.7	21.5	14.3	36.5	14.9	
	合計	19.5 (注2)	76.9	<u>86.9</u> [87] (注1)	76.8	58.8	66.1	43.6	

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: μ 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4-3表 線量当量率評価結果 (15×15燃料 (A型) 収納時 DOT3.5コード)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部				側部	底部			
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)	径方向		径方向 (トランニオン部)	軸方向		
	①	③a	③b	⑦a		⑦b	⑨		
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	8.0	100.2	5.8	5.3	0.9	
		構造材放射化	0.2	0.5	75.3	8.8	7.9	1.8	
		二次ガンマ線	0.2	1.2	6.0	4.6	5.1	1.3	
	中性子	44.3	421.0	773.1	47.4	271.8	1154.6	66.3	
	合計	44.8 ^(注2)	422.8 ^(注2)	862.4	193.3	291.0	<u>1172.9</u> <u>[1.2]</u> ^(注1)	70.3	
	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	22.4	44.5	25.7	16.0	2.7	
		構造材放射化	<0.1	14.7	15.2	9.1	9.7	6.4	9.5
		二次ガンマ線	<0.1	5.7	5.6	10.9	6.1	4.4	1.8
	中性子	22.2	25.9	35.8	19.4	16.0	40.9	16.6	
	合計	22.5 ^(注2)	68.7	79.1	<u>83.9</u> <u>[84]</u> ^(注1)	57.5	67.7	30.6	

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。

別紙 4-4 表 線量当量率評価結果 (15×15 燃料 (B 型) 収納時 DOT3.5 コード)

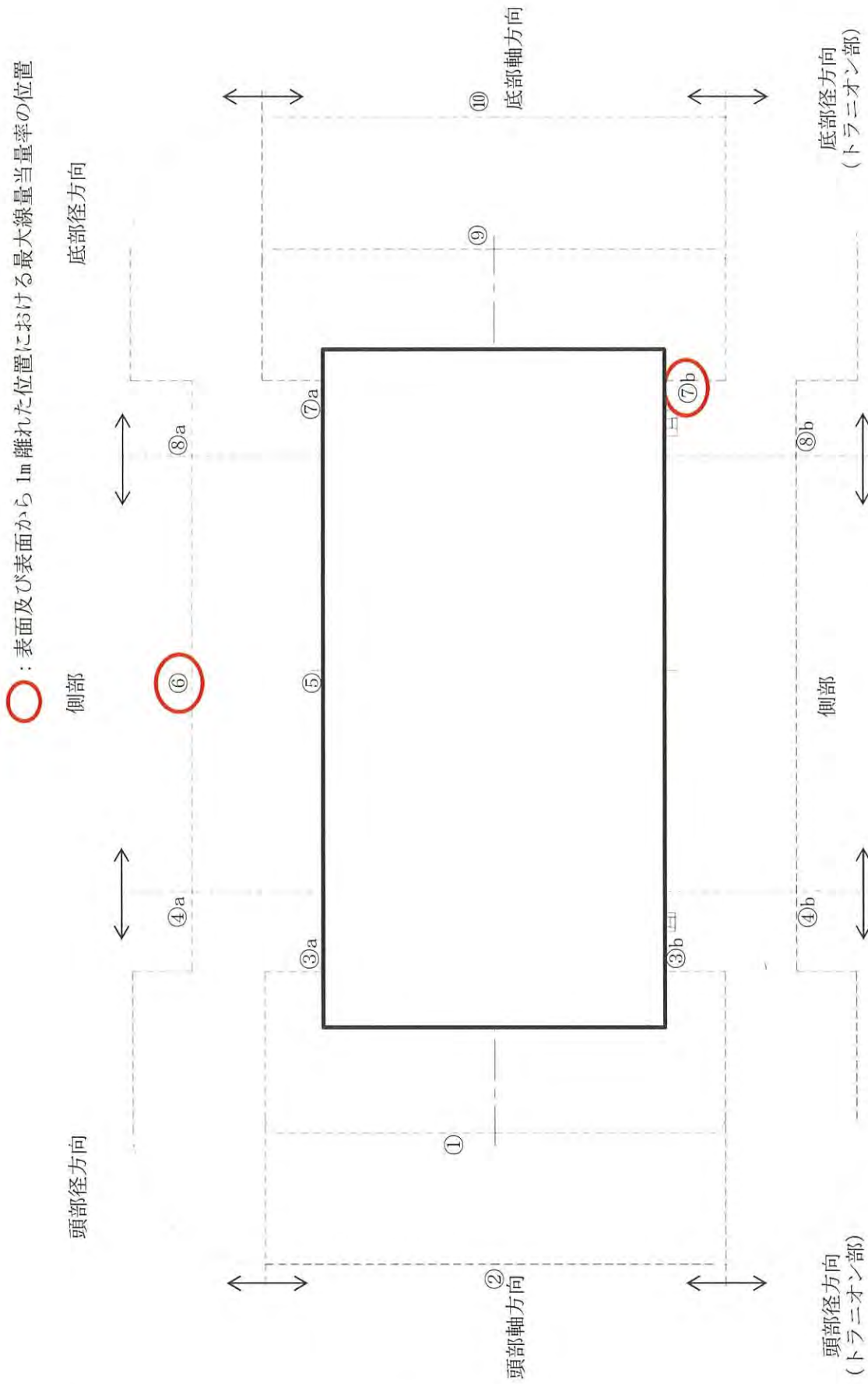
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部				側部	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)	径方向		径方向 (トランニオン部)	軸方向	
	①	③a	③b	⑦a		⑦b	⑨	
表面 ガンマ線	燃料有効部	<0.1	<0.1	6.1	85.2	5.1	4.7	0.8
	構造材放射化	0.2	0.9	142.9	16.2	15.0	13.0	2.6
	二次ガンマ線	0.2	1.1	5.5	25.1	4.4	4.8	1.2
中性子	39.9	377.7	700.8	44.2	259.3	1096.3	63.4	
合計	40.4 (注2)	379.8 (注2)	855.3	170.7	283.8	<u>1118.8</u> [1.2] (注1)	68.0	
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
表面から 1 m ガンマ線	燃料有効部	<0.1	19.1	19.2	37.8	21.8	13.8	2.3
	構造材放射化	<0.1	24.8	26.0	8.5	11.6	7.9	13.7
	二次ガンマ線	<0.1	5.3	5.3	10.2	5.7	4.2	1.7
中性子	20.0	23.3	32.5	18.0	15.2	39.5	15.9	
合計	20.3 (注2)	72.5	<u>83.0</u> [83] (注1)	74.5	54.3	65.4	33.6	

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。

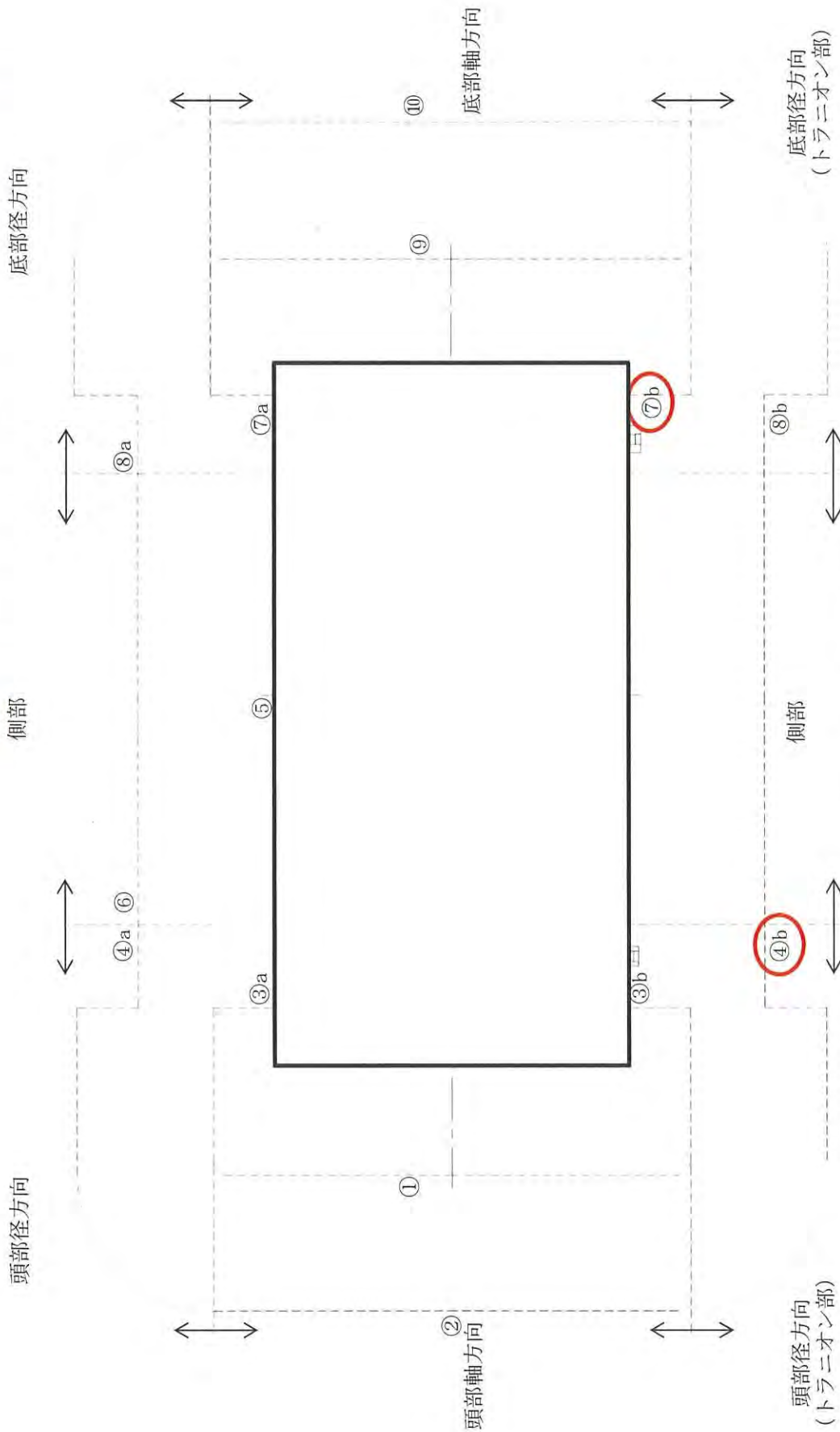


(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

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 DOT3.5 コード)

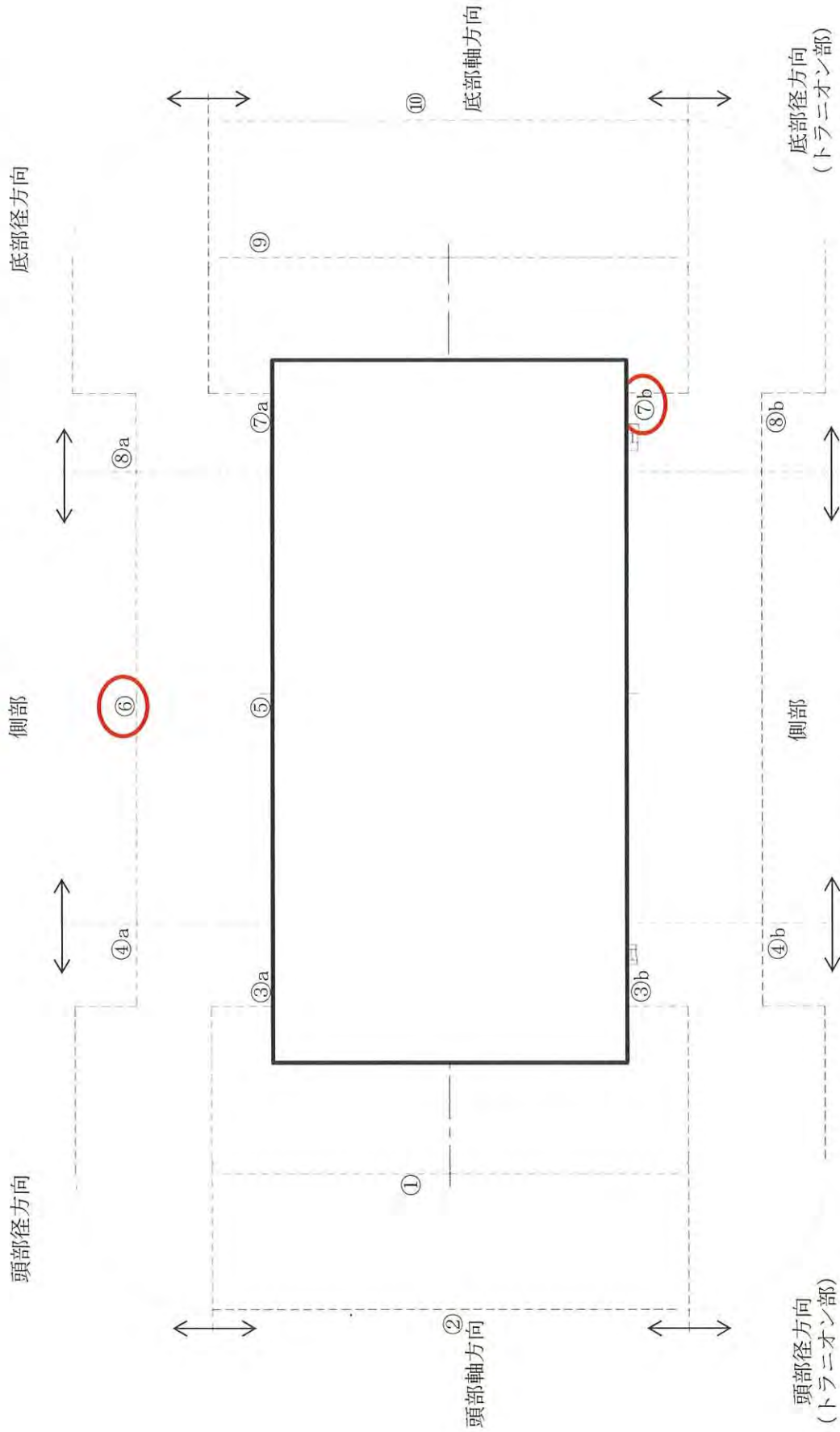
○：表面及び表面から 1m 離れた位置における最大線量当量率の位置



(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
(17×17 燃料 (B 型) 収納時 DOT3.5 コード)

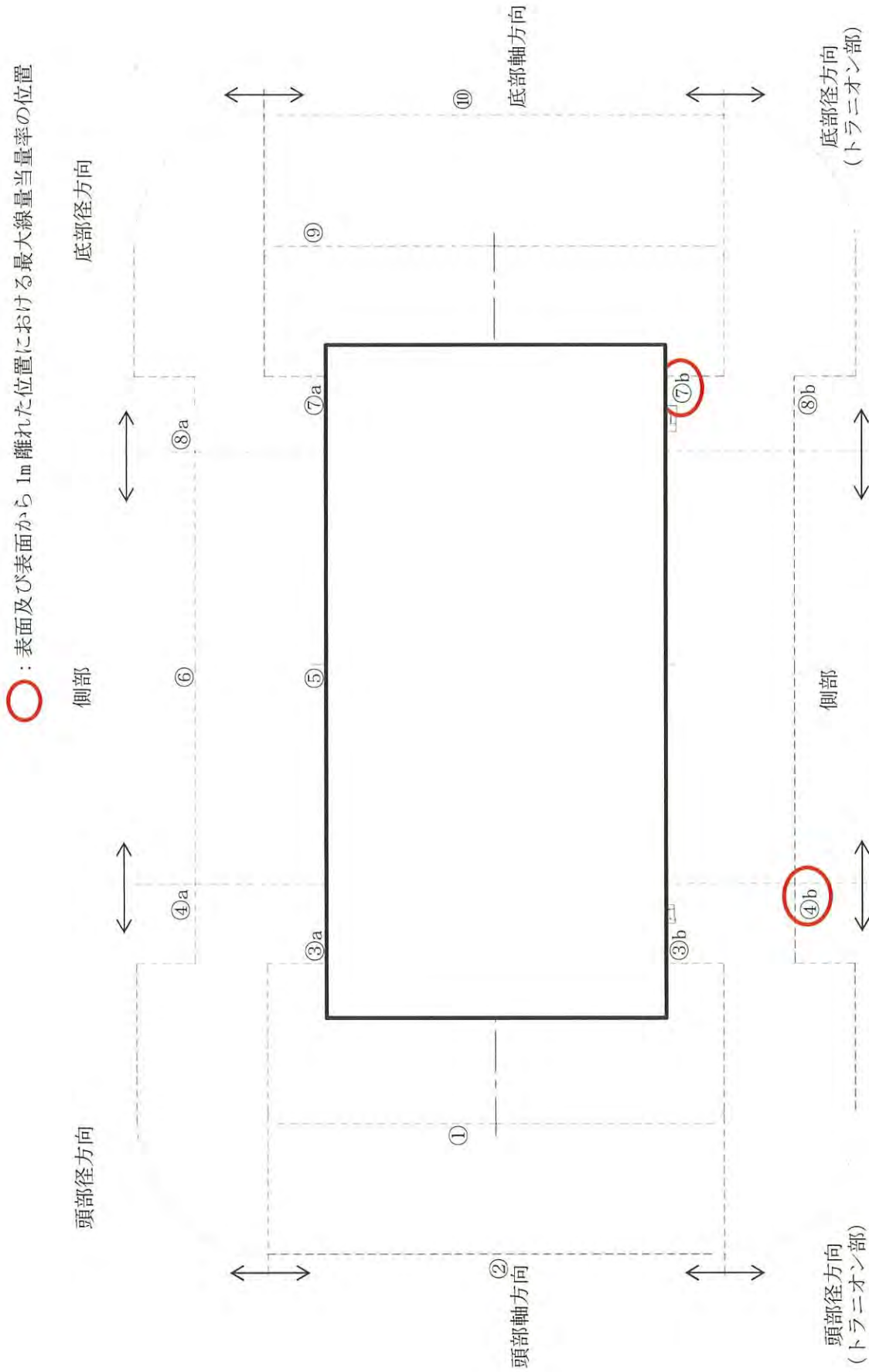
○：表面及び表面から 1m 離れた位置における最大線量当量率の位置



(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 4-3 図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置

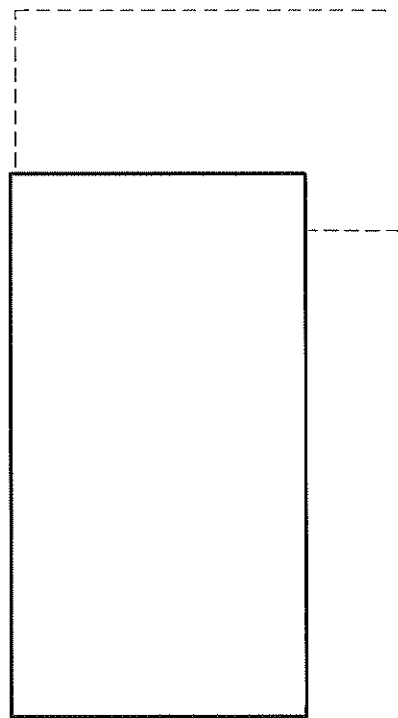
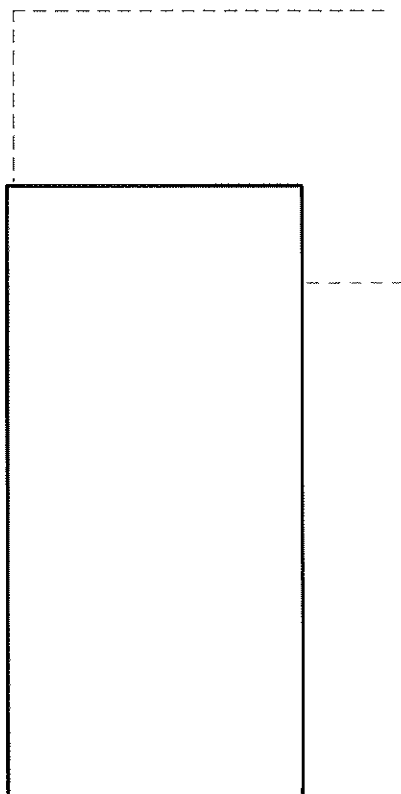
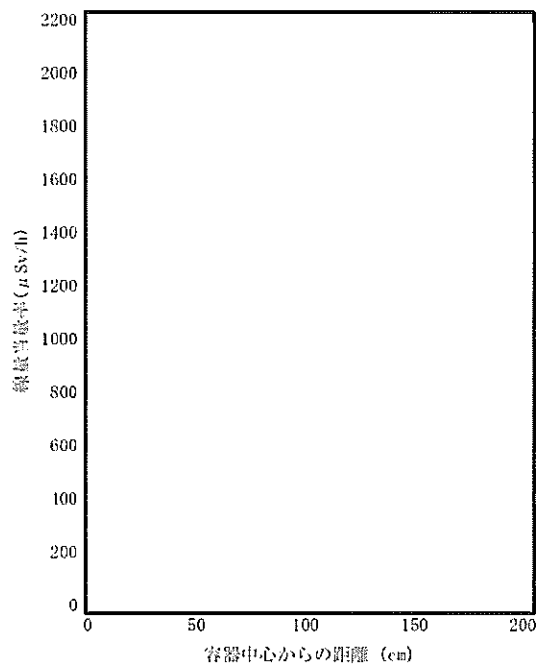
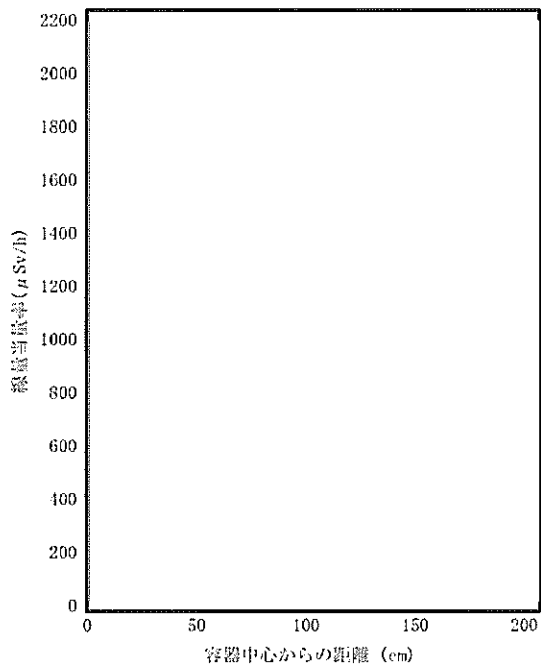
(15×15 燃料 (A 型) 収納時 DOT3.5 コード)



(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。

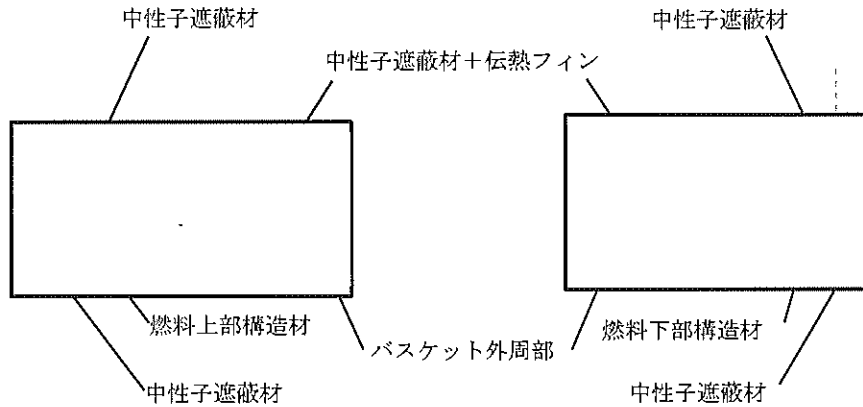
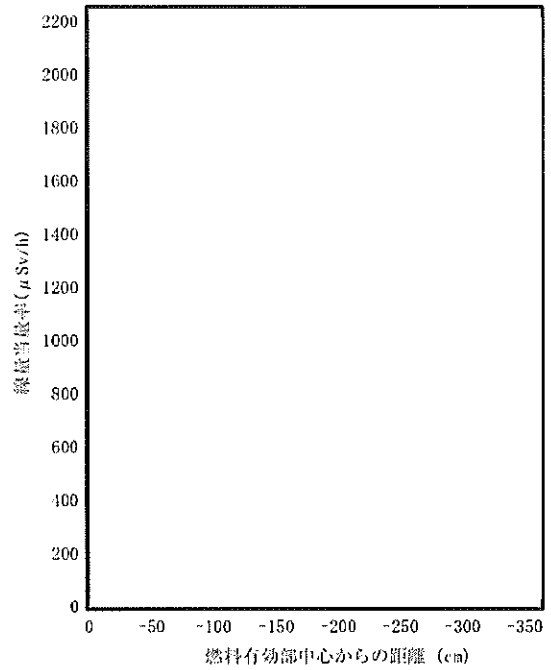
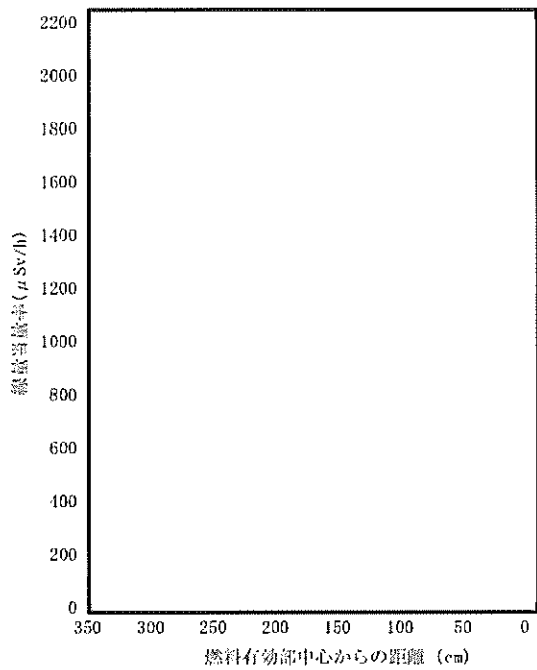
別紙 4-4 図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置

(15×15 燃料 (B 型) 収納時 DOT3.5 コード)



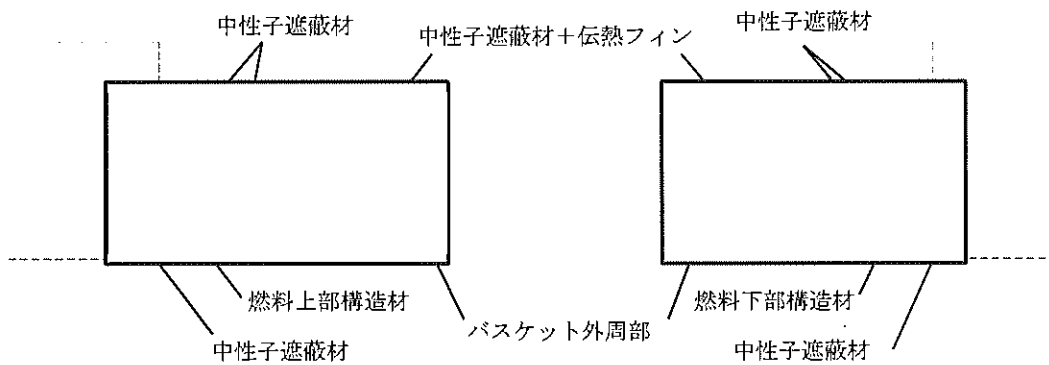
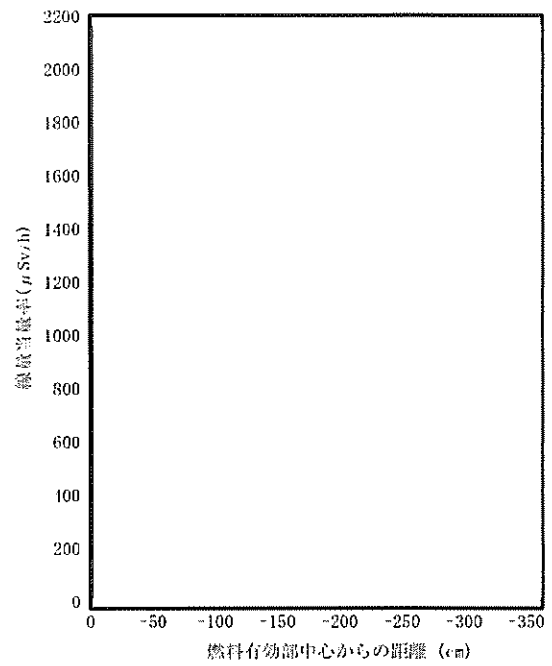
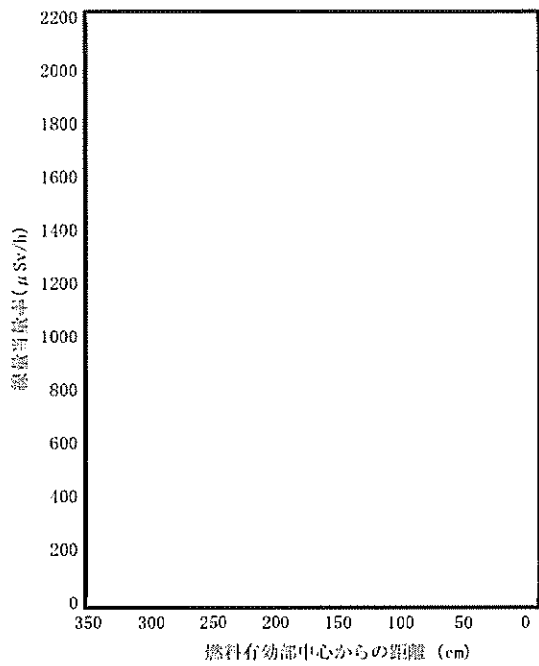
別紙4-5図(1/6) 線量当量率分布(頭部軸方向・底部軸方向表面)
(17×17燃料(A型)収納時 DOT3.5コード)

別紙4-10



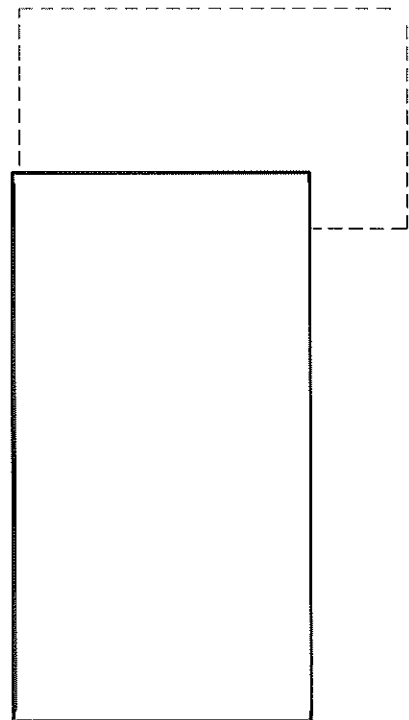
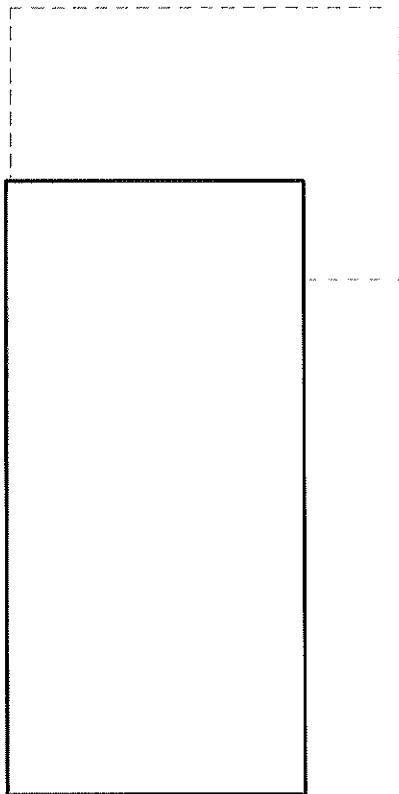
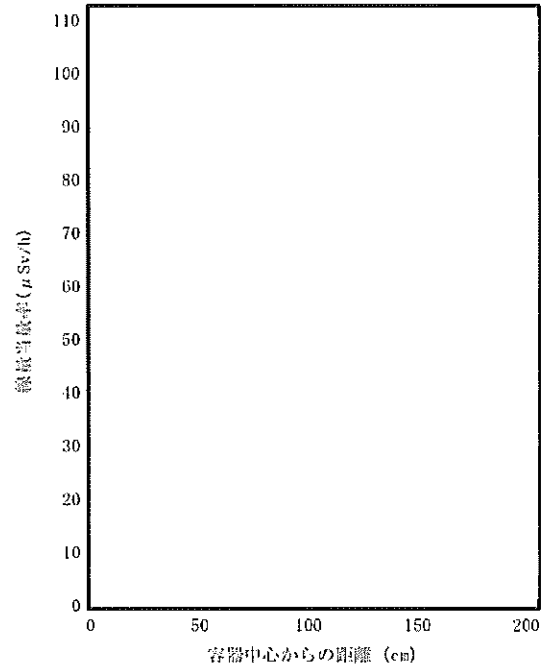
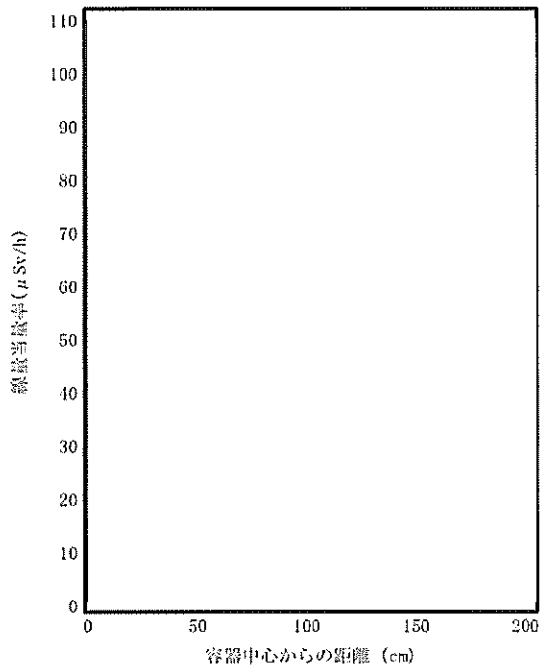
別紙 4-5 図 (2/6) 線量当量率分布 (頭部径方向・側部・底部径方向表面)
(17×17 燃料 (A型) 収納時 DOT3.5 コード)

別紙 4-11



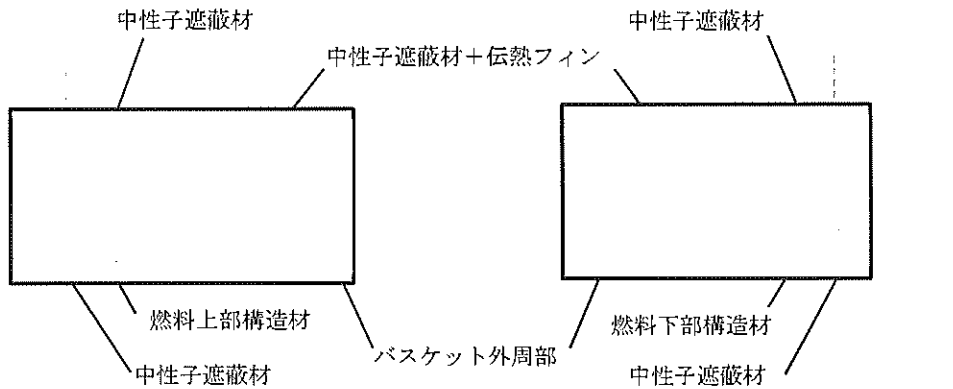
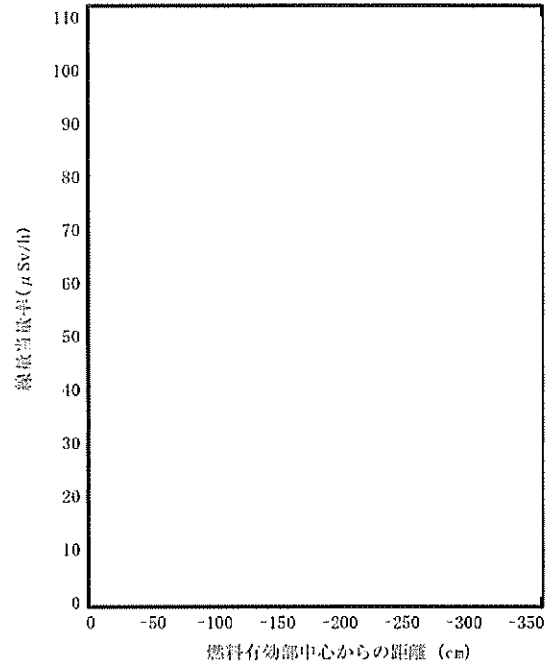
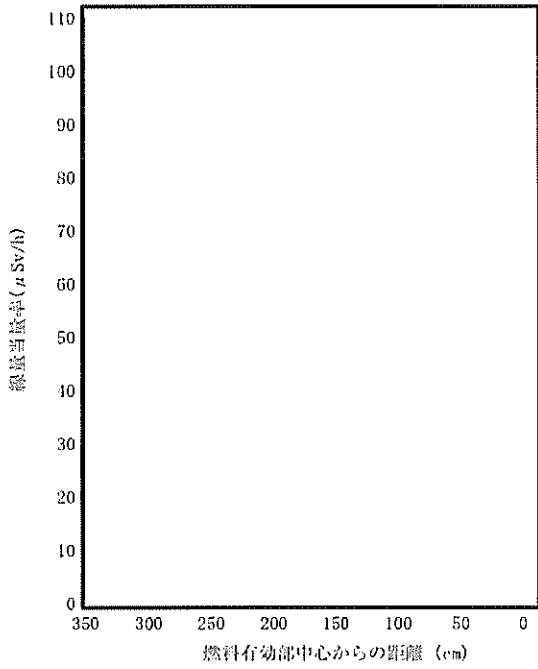
別紙4-5図 (3/6) 線量当量率分布 (トランニオン方向表面)
(17×17 燃料 (A型) 収納時 DOT3.5 コード)

別紙 4-12



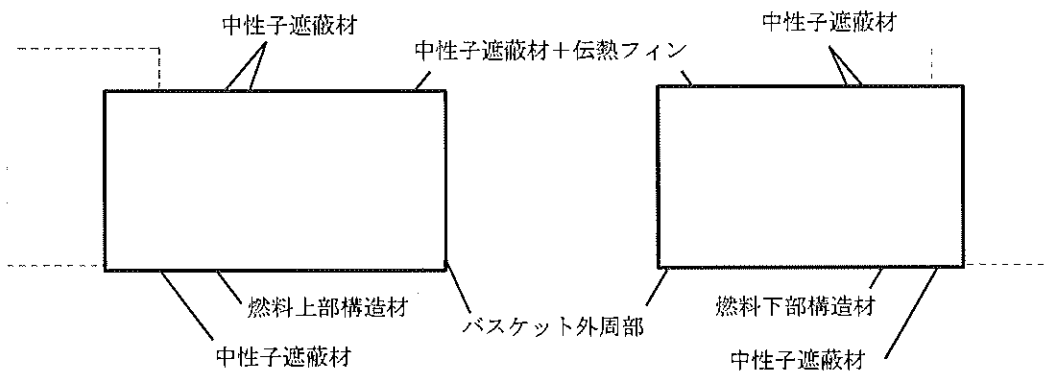
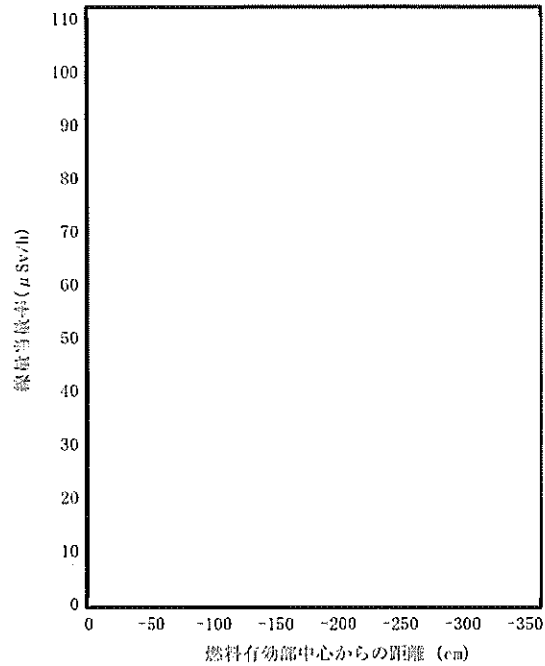
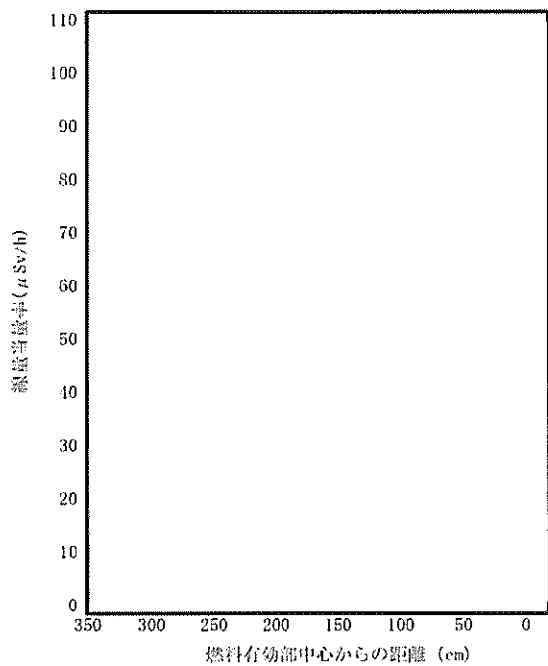
別紙 4-5 図 (4/6) 線量当量率分布 (頭部軸方向・底部軸方向表面から 1 m 離れた位置)
(17×17 燃料 (A型) 収納時 DOT3.5 コード)

別紙 4-13



別紙 4-5 図 (5/6) 線量当量率分布 (頭部径方向・側部・底部径方向表面から 1 m 離れた位置)
(17×17 燃料 (A型) 収納時 DOT3.5 コード)

別紙 4-14



別紙4-5図 (6/6) 線量当量率分布 (トランニオン方向表面から1m離れた位置)
(17×17燃料 (A型) 収納時 DOT3.5 コード)

別紙 4-15

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。

MCNP5 解析の線量当量率結果を別紙 5-1 表から別紙 5-4 表に、最大線量当量率となる評価点位置を別紙 5-1 図から別紙 5-4 図に示す。

また、MCNP5 コードによる計算結果の信頼性を確認するため、最も線量当量率基準値に対して裕度の小さい 17×17 燃料 48,000MWd/t 型 (A型) 収納時について、表面及び表面から 1 m 離れた位置において線量当量率が最大となる評価点の MCNP5 コードでアウトプットされる解析結果の信頼性を示す 10 個の統計指標結果を別紙 5-5 表に、統計指標項目の内容について別紙 5-6 表に示す。別紙 5-5 図から別紙 5-10 図に示す線量当量率分布図の連続性と合わせて 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。なお、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。

別紙5-1表 線量当量率評価結果 (17×17燃料 (A型) 収納時 MCNP5コード)

(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		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)
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> <u>[0.79]</u> ^(注1)	71.0
評価点					
表面から1m	ガンマ線		⑥	⑩	
	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)
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> <u>[85]</u> ^(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。

別紙5-2表 線量当量率評価結果 (17×17燃料 (B型) 収納時 MCNP5コード)

(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	燃料有効部	0.1 (2.5)	31.1 (1.6)	46.1 (0.6)	37.3 (3.8)	5.5 (0.4)
	構造材放射化	0.2 (0.9)	197.1 (0.6)	85.9 (0.3)	31.1 (3.8)	63.3 (0.3)
	二次ガンマ線	0.2 (2.5)	8.4 (2.8)	10.7 (0.9)	9.5 (4.6)	4.6 (1.0)
中性子	38.2 (0.7)	342.6 (0.7)	24.1 (0.5)	405.4 (1.7)	20.6 (0.4)	
合計	38.7	579.2 [0.58] (注1)	166.8	483.3	94.0	
評価点	②	④	⑥	⑧	⑩	
表面から1m	燃料有効部	0.1 (1.6)	18.1 (0.4)	20.3 (0.3)	22.3 (0.5)	2.5 (0.6)
	構造材放射化	0.2 (0.9)	31.7 (0.7)	28.6 (0.5)	13.3 (0.6)	28.2 (0.4)
	二次ガンマ線	0.2 (3.3)	4.6 (0.7)	5.0 (0.6)	5.1 (0.7)	1.6 (1.6)
中性子	19.1 (0.7)	28.2 (0.6)	25.6 (0.5)	24.5 (0.8)	12.5 (0.5)	
合計	19.6	82.6 [83] (注1)	79.5	65.2	44.8	

※ () 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: $\mu\text{Sv/h}$)。

別紙5-3表 線量当量率評価結果 (15×15燃料 (A型) 収納時 MCNP5コード)

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

※ () 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: $\mu\text{Sv/h}$)。

別紙5-4表 線量当量率評価結果 (15×15燃料 (B型) 収納時 MCNP5コード)

(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 (2.9)	30.6 (1.5)	85.7 (0.5)	37.6 (3.6)	5.5 (0.4)
		構造材放射化	0.2 (0.9)	164.5 (0.7)	14.9 (0.5)	21.8 (3.6)	34.4 (0.2)
		二次ガンマ線	0.2 (1.6)	8.5 (0.7)	23.1 (0.5)	9.9 (2.9)	4.8 (0.7)
表面	中性子		40.5 (0.7)	355.7 (0.6)	40.6 (0.4)	435.6 (1.9)	21.9 (0.3)
		合計	41.0	559.3 [0.56] (注1)	164.3	504.9	66.6
評価点							
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	0.1 (1.6)	18.1 (0.4)	20.4 (0.3)	21.3 (0.6)	2.5 (0.6)
		構造材放射化	0.2 (0.9)	25.5 (0.7)	23.3 (0.6)	9.2 (0.9)	15.4 (0.4)
		二次ガンマ線	0.2 (2.1)	4.8 (0.3)	5.3 (0.3)	5.2 (0.4)	1.8 (1.1)
表面から1m	中性子		20.1 (0.5)	29.8 (0.6)	27.0 (0.5)	27.2 (0.8)	13.3 (0.5)
		合計	20.6	78.2 [79] (注1)	76.0	62.9	33.0

※ () 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: $\mu\text{Sv/h}$)。

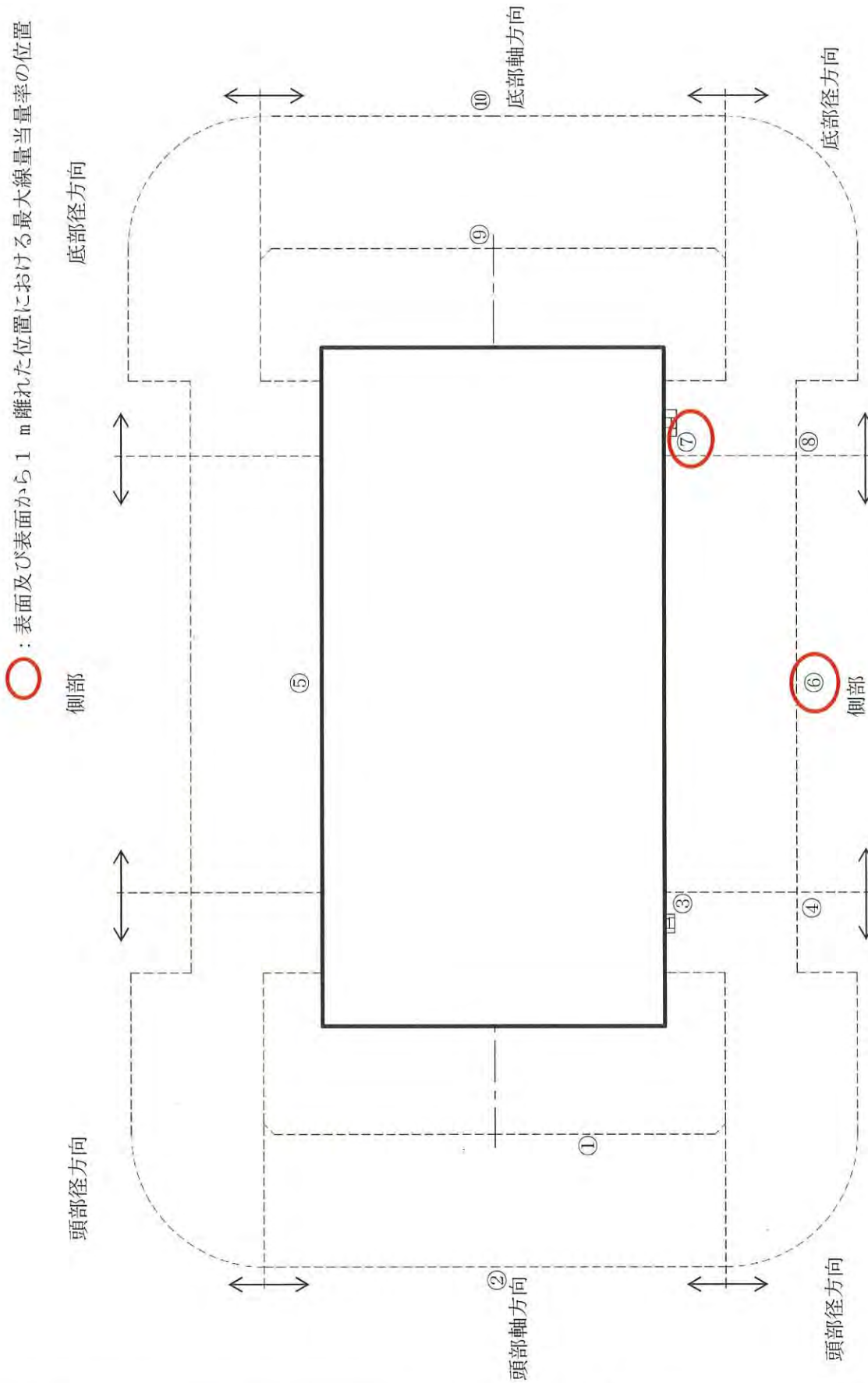
別紙 5-5 表 解析結果の信頼性を示す 10 個の統計指標結果 (17×17 燃料 (A型) 収納時)

指標の項目	表面で最大となる評価点⑦				表面から 1 m 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									
mean									random								
value																	< 0.10
decrease																	yes
decrease																	1/sqrt (nps)
rate																	< 0.10
value																	yes
decrease																	1/nps
decrease																	constant
rate																	random
figure																	> 3.00
of																	
merit																	
behavior																	
pdf																	

別紙 5-6 表 統計指標項目

指標の項目		統計指標 (1)
mean		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)
relative error	value	0.1 より小さいこと。(< 0.10)
	decrease	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 rate	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))
variance of the variance	value	0.1 より小さいこと。(< 0.10)
	decrease	計算収束判定段階において、value が単調に減少すること。(yes)
	decrease rate	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)
figure of merit	value	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)
	behavior	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)
	pdf	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)

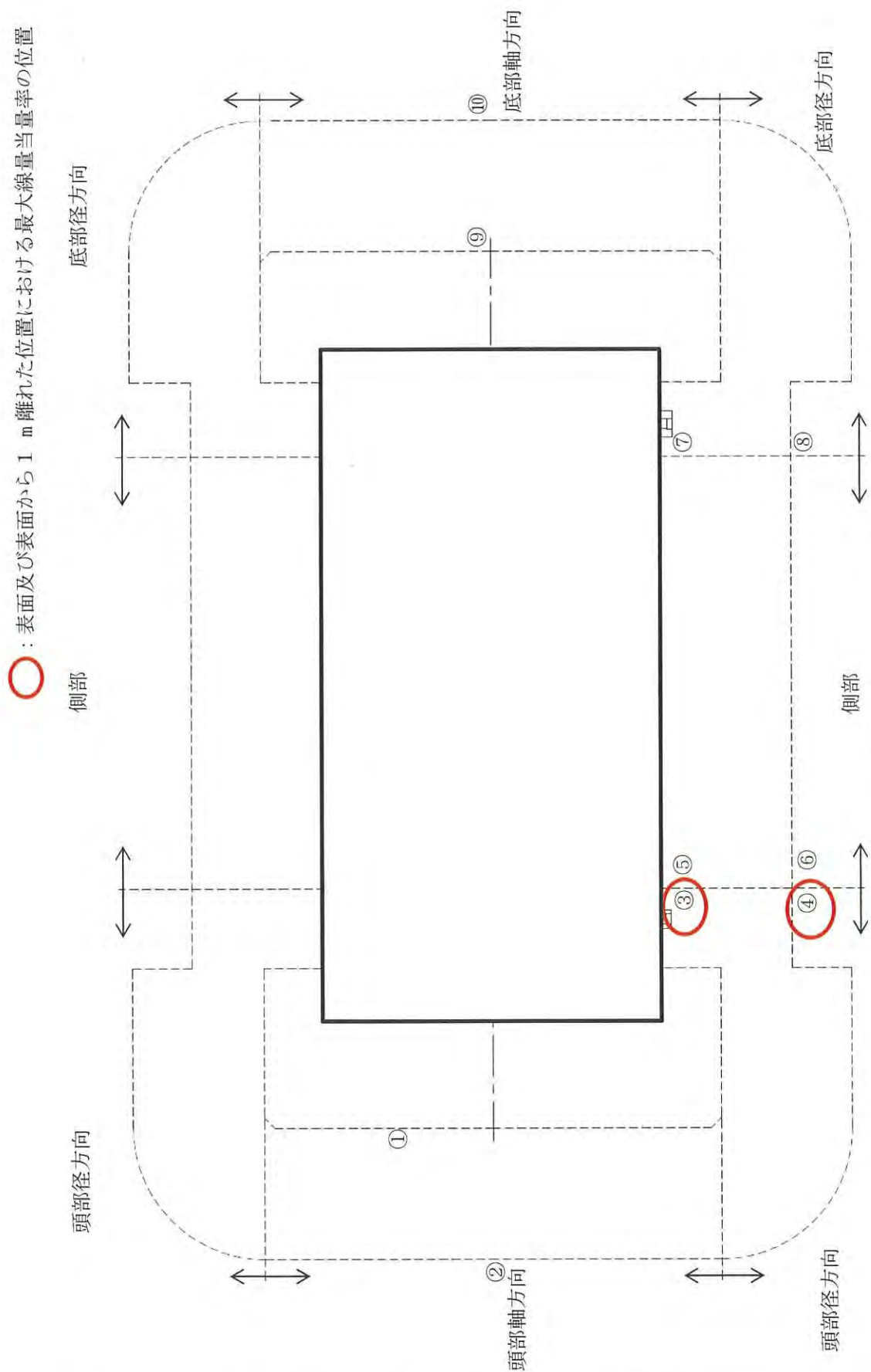
(1) 浅見光史 ほか, 「放射性物質輸送容器のモンテカルロ法による遮蔽安全評価手法ガイドライン原案の策定」, 海上技術安全研究所報告 第 13 巻 第 1 号 (平成 25 年度) 研究調査資料, (2013).



○ : 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。

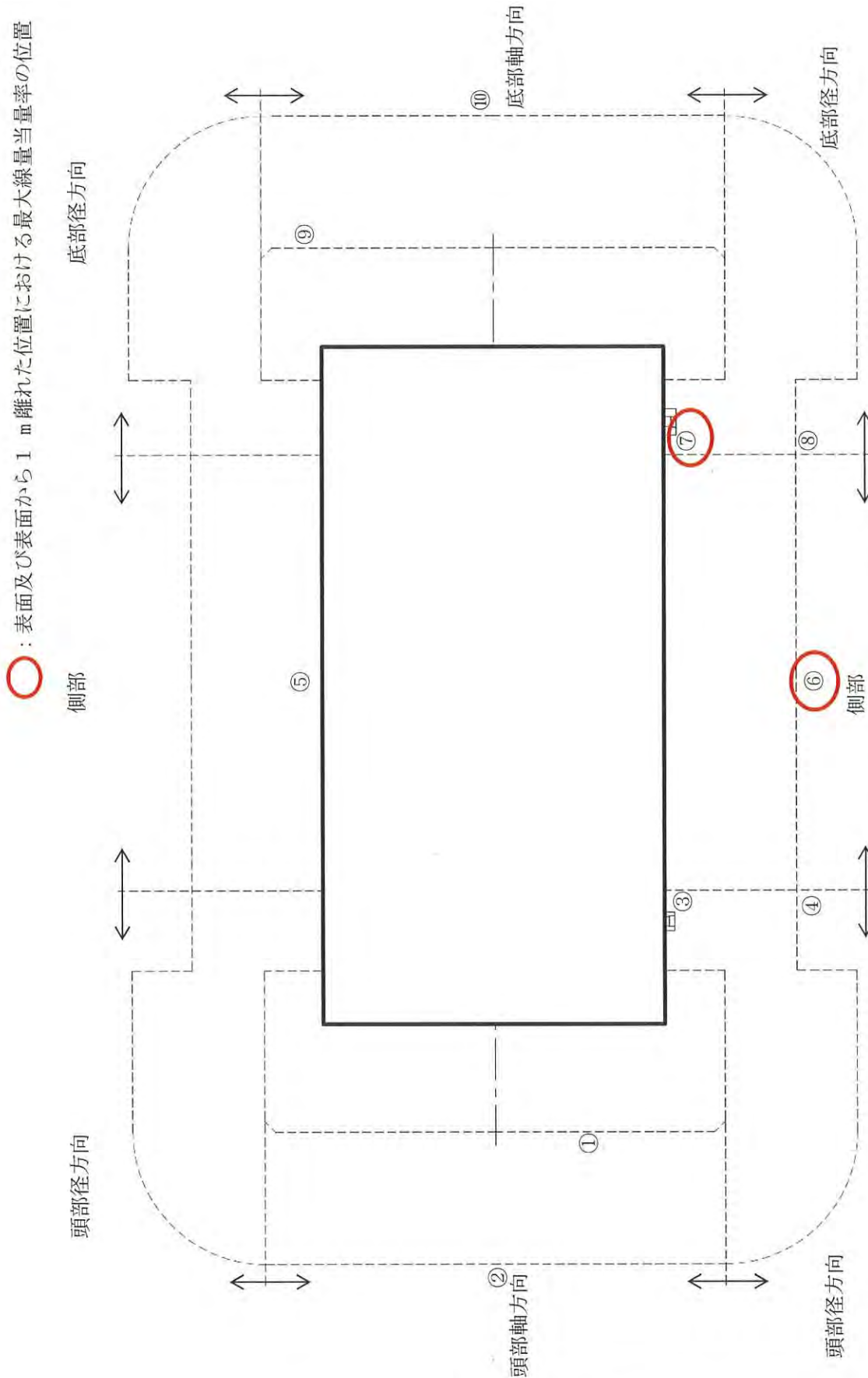
別紙 5-1 図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置
(17×17 燃料 (A 型) 収納時 MCNP5 コード)



(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 5-2 図 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 MCNP5 コード)

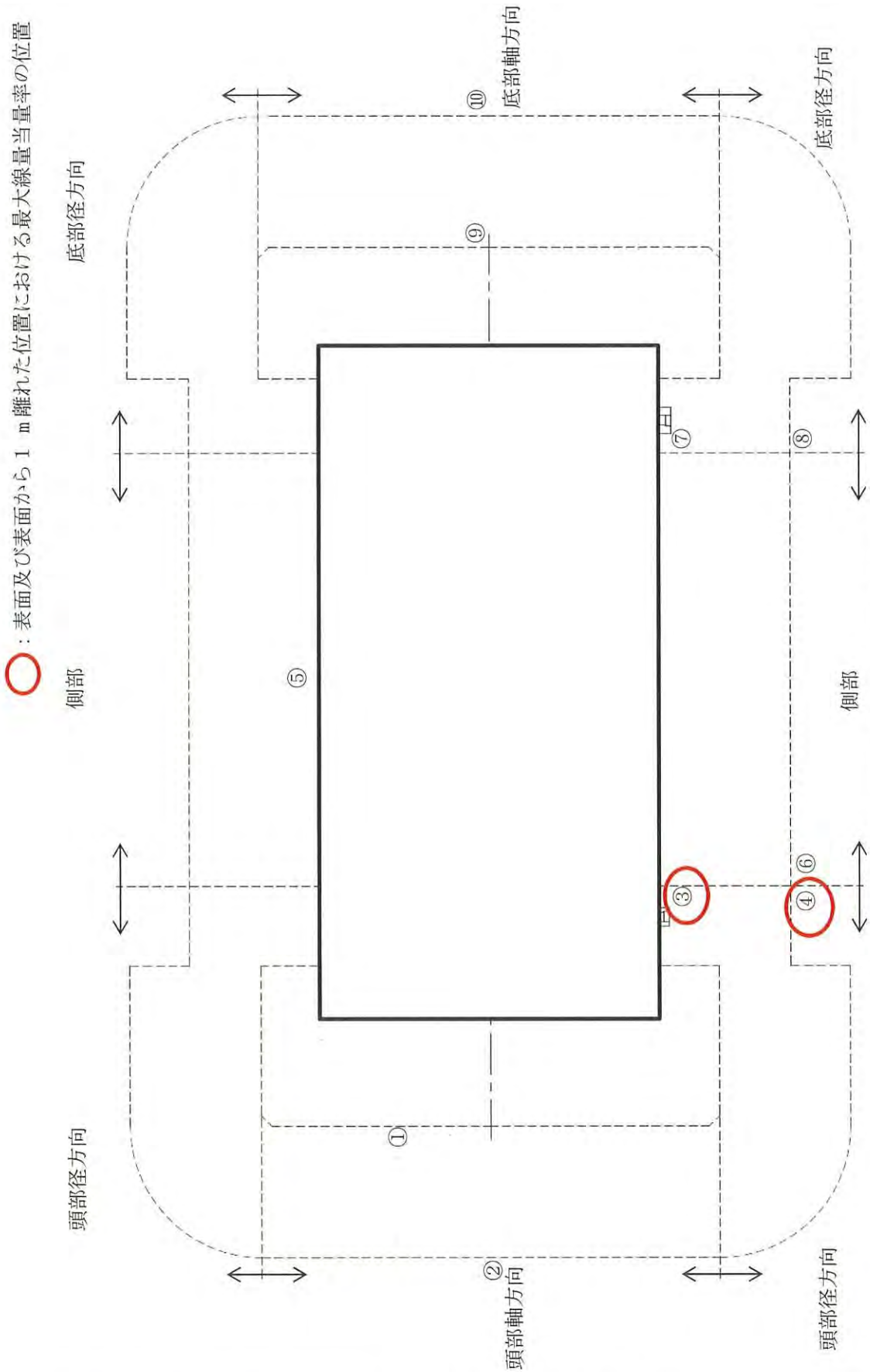


○ : 表面及び表面から 1 m 離れた位置における最大線量当量率の位置

(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 5-3 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 MCNP5 コード)

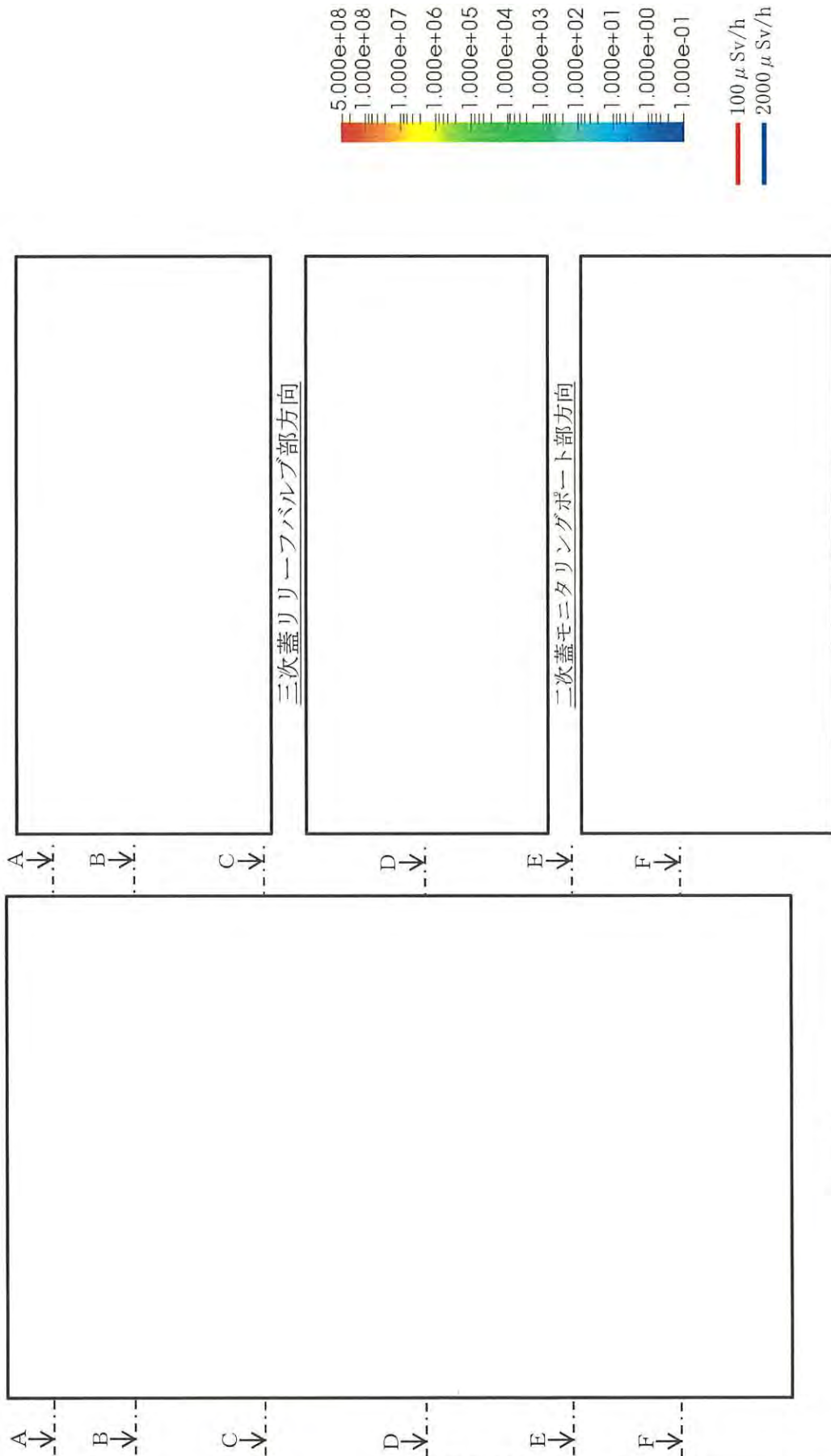


○ : 表面及び表面から 1 m 離れた位置における最大線量当量率の位置

(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。

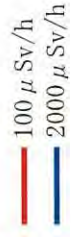
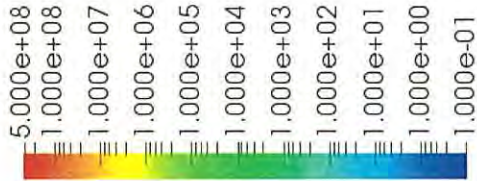
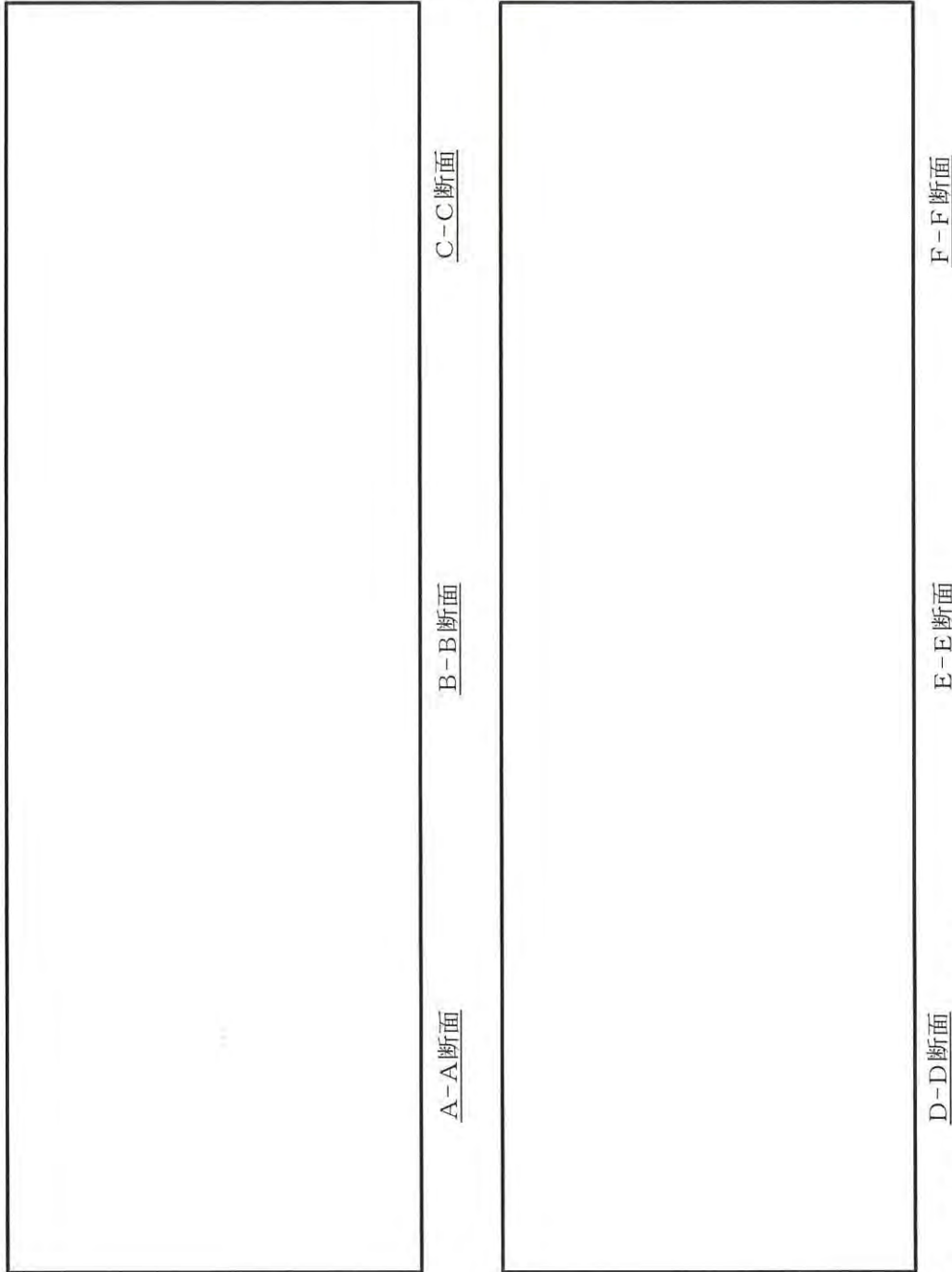
別紙 5-4 図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置

(15×15 燃料 (B 型) 収納時 MCNP5 コード)

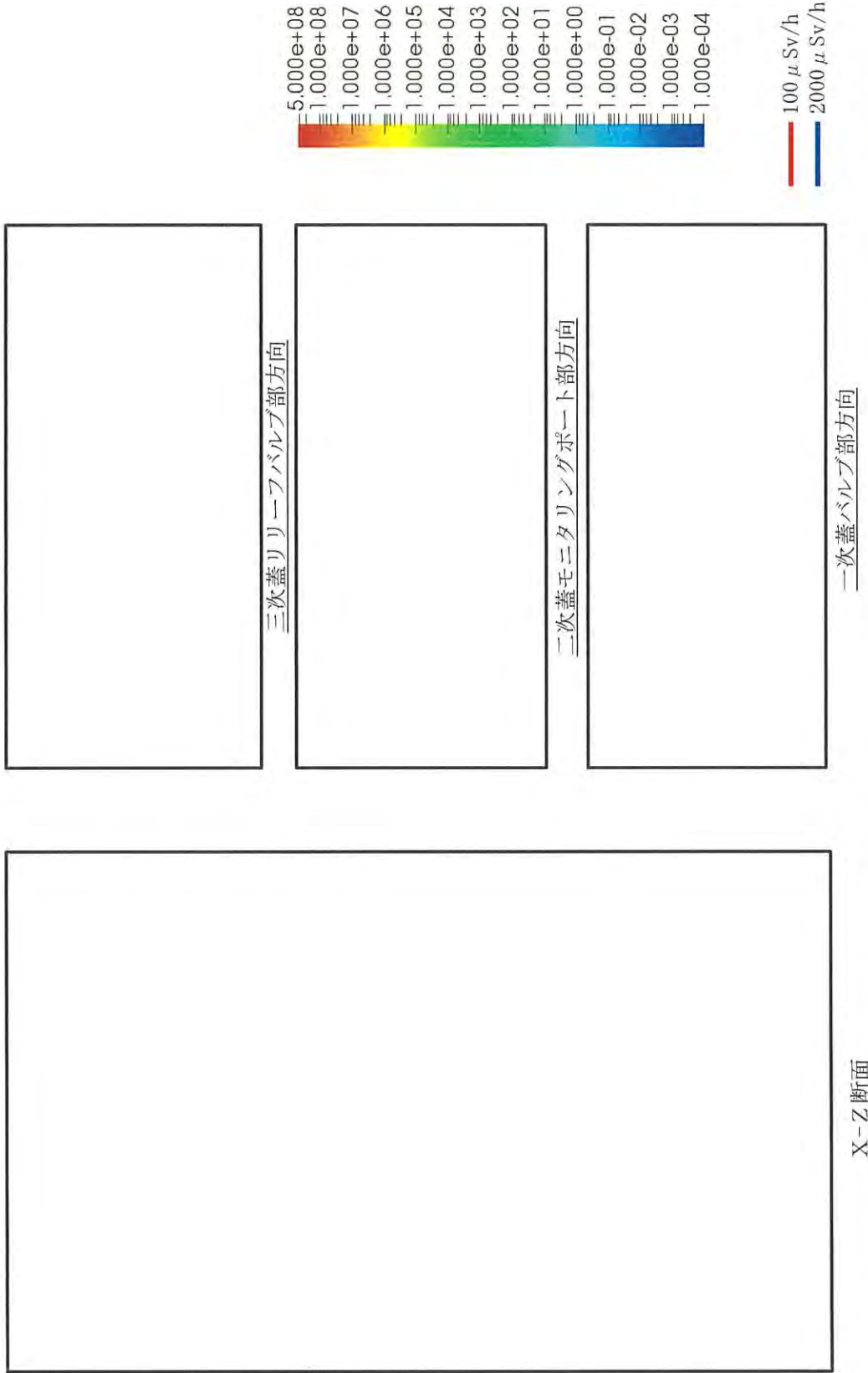


X-Z断面

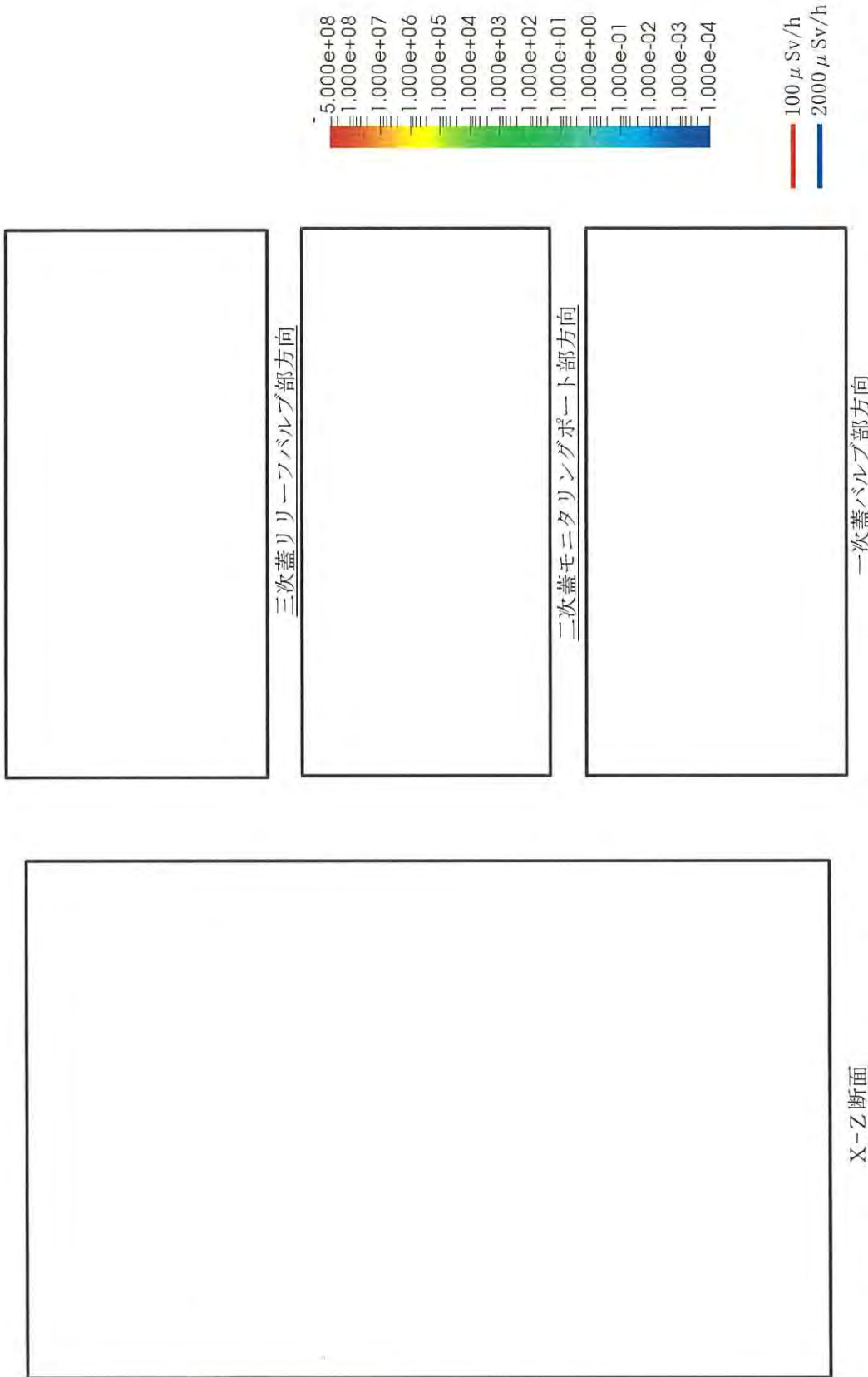
別紙 5-5 図 線量当量率分布 (全線源) (17×17 燃料 (A 型) 収納時 MCNP5 コード)



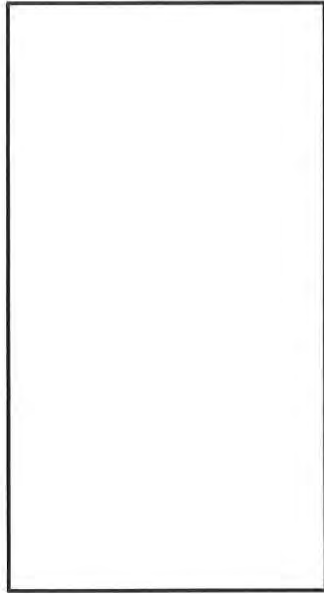
(注) 断面位置は別紙 5-5 図参照
別紙 5-6 図 線量当量率分布 (全線源) (17×17 燃料 (A型) 収納時 MCNP5 コード)



別紙 5-7 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 MCNP5 コード)



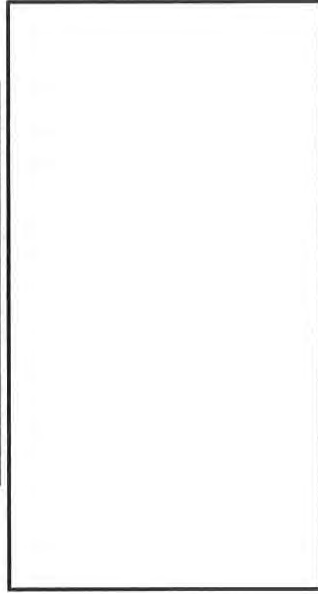
別紙 5-8 図 線量当量率分布 (構造材放射化ガンマ線) (17×17 燃料 (A 型) 収納時 MCNP5 コード)



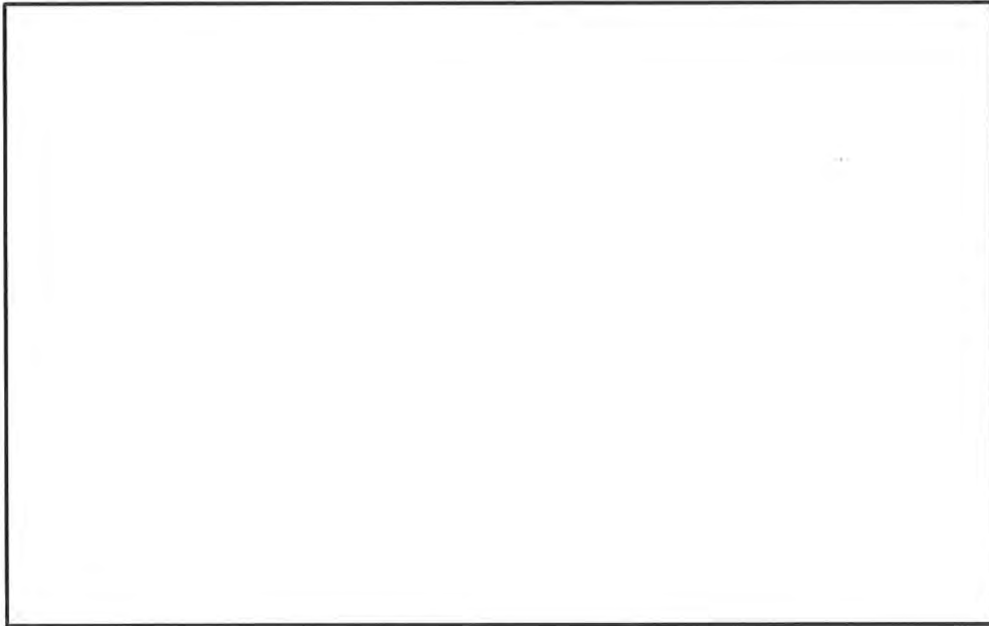
二次蓋リリースバルブ部方向



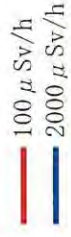
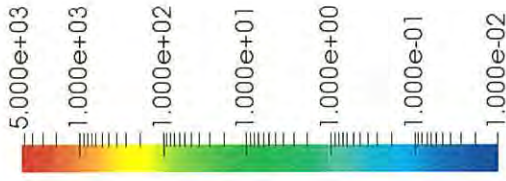
二次蓋モニタリングポート部方向



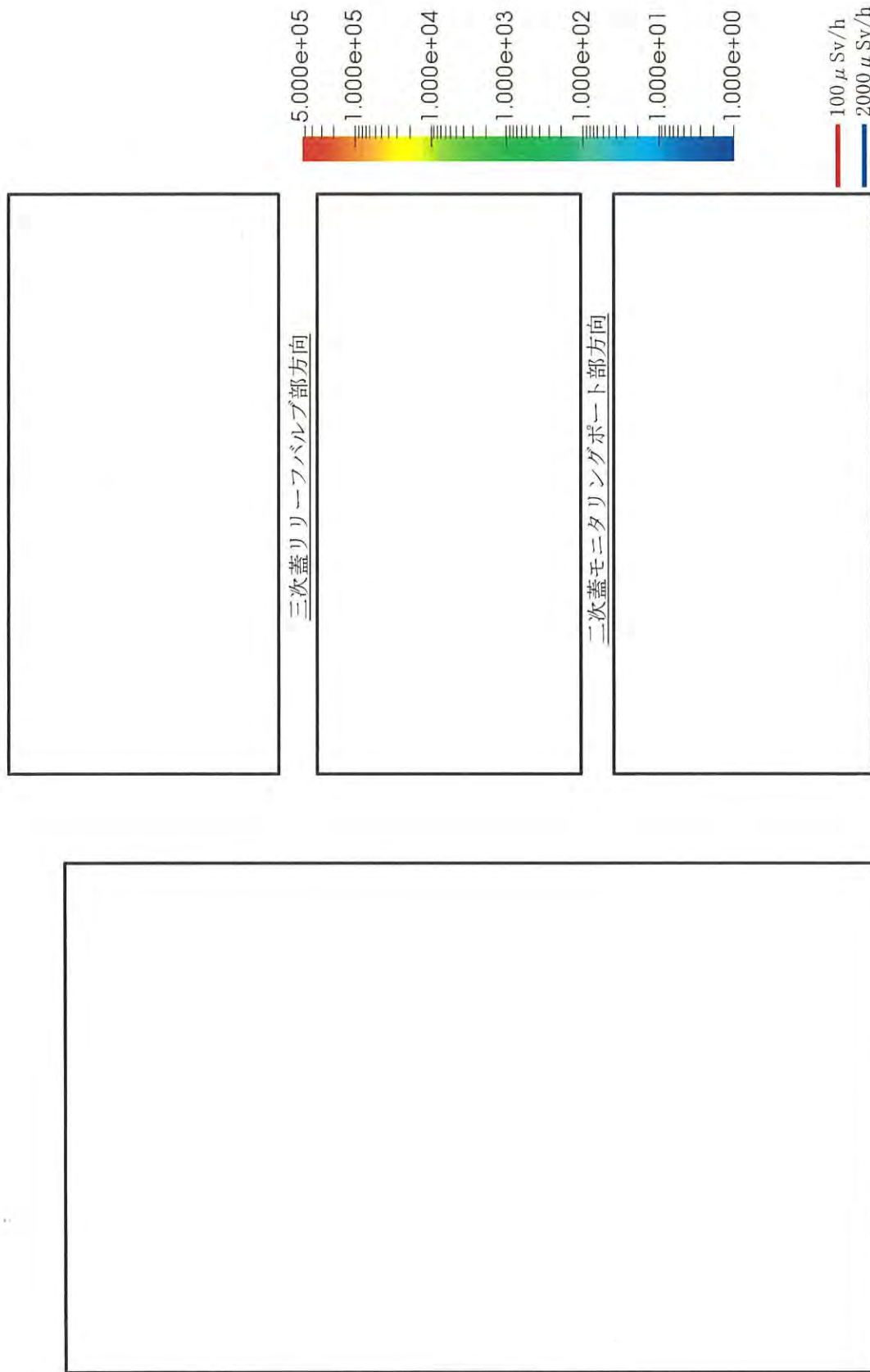
一次蓋バルブ部方向



X-Z断面



別紙5-9 図 線量当量率分布 (二次ガンマ線) (17×17 燃料 (A型) 収納時 MCNP5 コード)



X-Z断面

別紙 5-10 図 線量当量率分布 (中性子) (17×17 燃料 (A型) 収納時 MCNP5 コード)

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

本型式証明における 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、本型式証明申請と同じ MSF-24P 型での DOT3.5 コードによる許認可：設計承認申請（四国電力株式会社、核燃料輸送物設計承認申請）とした。

また、比較対象ケースは、許認可：設計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 6-1 表に示す。別紙 6-1 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 6-2 表に、最大線量当量率となる評価点位置を別紙 6-1 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 6-2 図から別紙 6-5 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 6-3 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 6-3 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6-1 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6-2表 MCNP5コード及びDOT3.5コードによる線量当量率評価結果

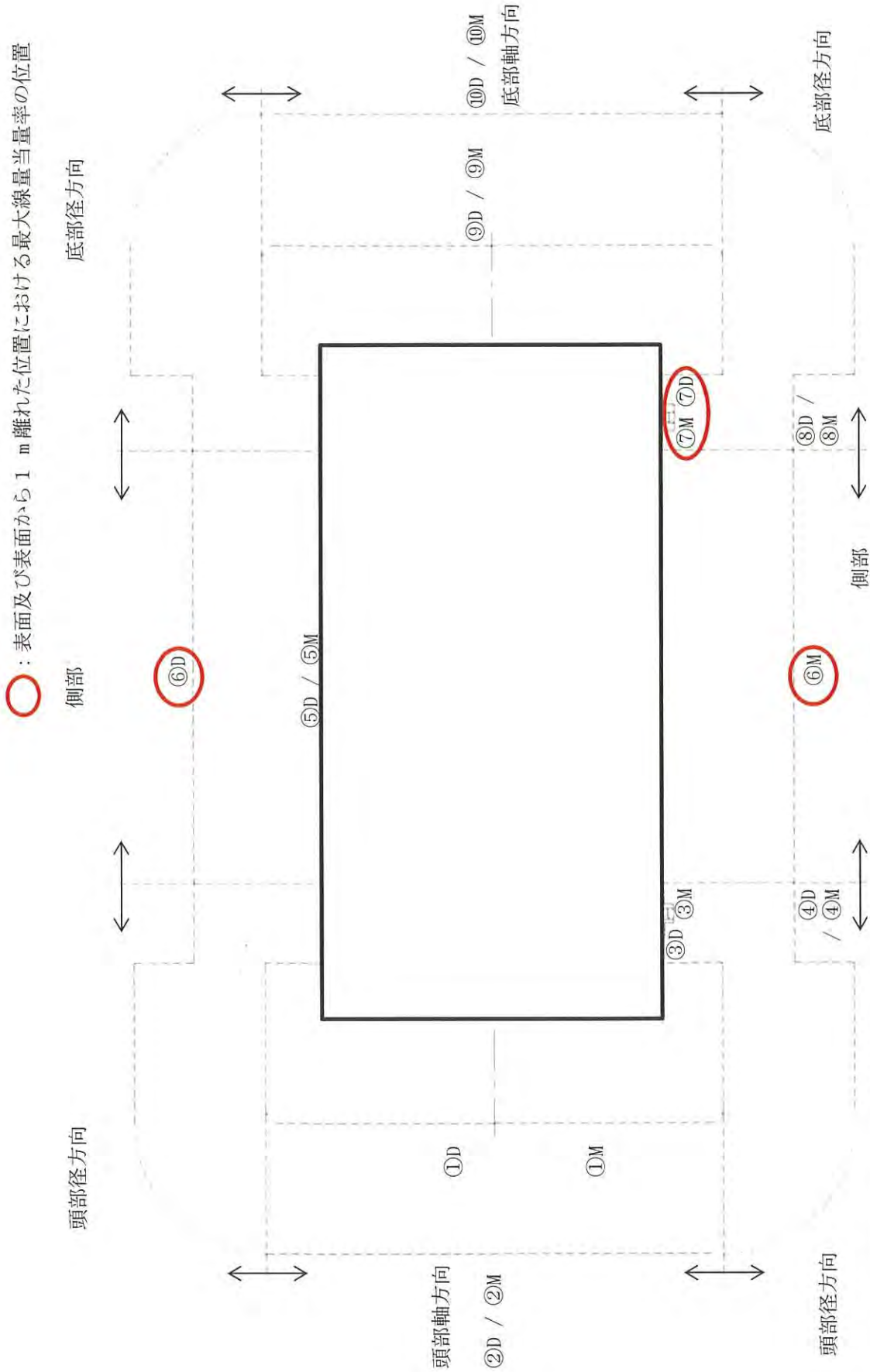
(単位：μSv/h)

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 燃料有効部 構造材放射化 二次ガンマ線 中性子 合計	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5
	<0.1	<0.1	60.6	8.0	113.6	100.7	91.3	5.4	6.5	6.0		
	0.2	0.2	161.7	103.0	26.8	25.9	69.1	13.4	37.9	35.9		
	0.3	0.2	9.6	5.7	25.4	25.7	12.1	4.8	4.8	4.6		
	41.3	41.7	433.6	753.8	40.7	45.1	616.2	1108.3	21.8	25.2		
	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 燃料有効部 構造材放射化 二次ガンマ線 中性子 合計	②		④		⑥		⑧		⑩		⑫	
	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5	MCNP5	DOT3.5
	<0.1	<0.1	23.4	22.6	45.0	44.8	27.1	25.1	2.9	2.6		
	0.2	<0.1	22.7	20.9	11.5	12.5	13.0	12.8	16.8	14.8		
	0.2	<0.1	5.1	5.4	10.0	10.4	5.5	5.7	1.8	1.7		
	20.3	20.9	32.3	34.0	17.7	18.4	29.1	26.3	12.9	15.8		
	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。

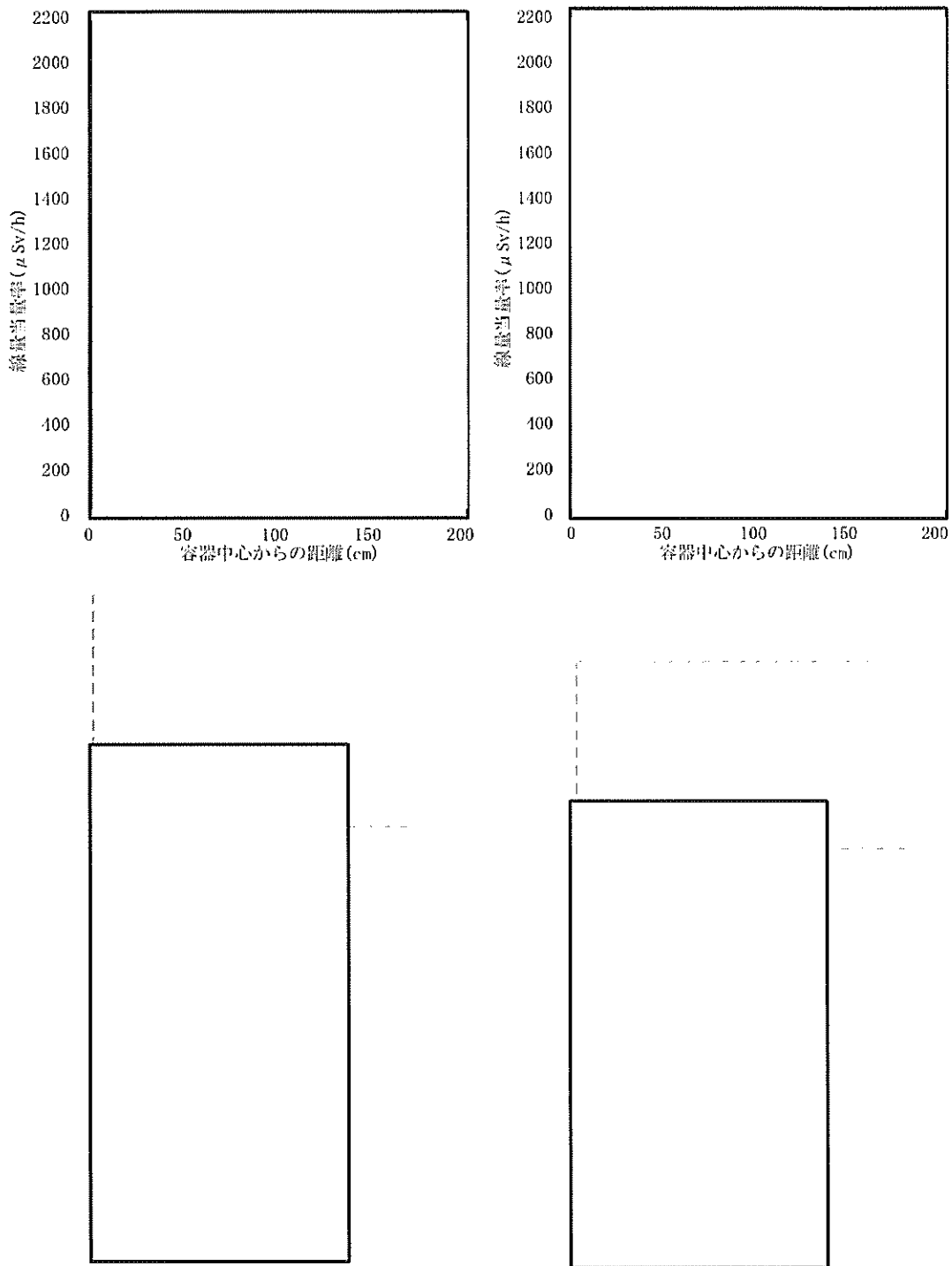
(注2)DOT3.5コードによる評価の頭部径方向及び底部径方向はそれぞれトランシオン方向を含めた結果である。

※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。

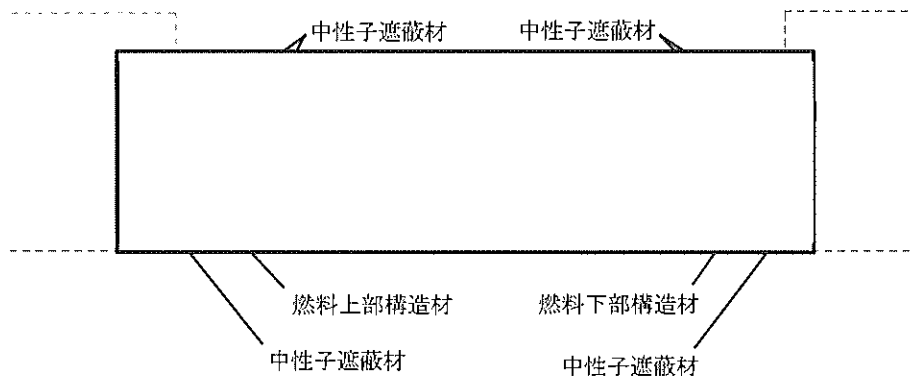
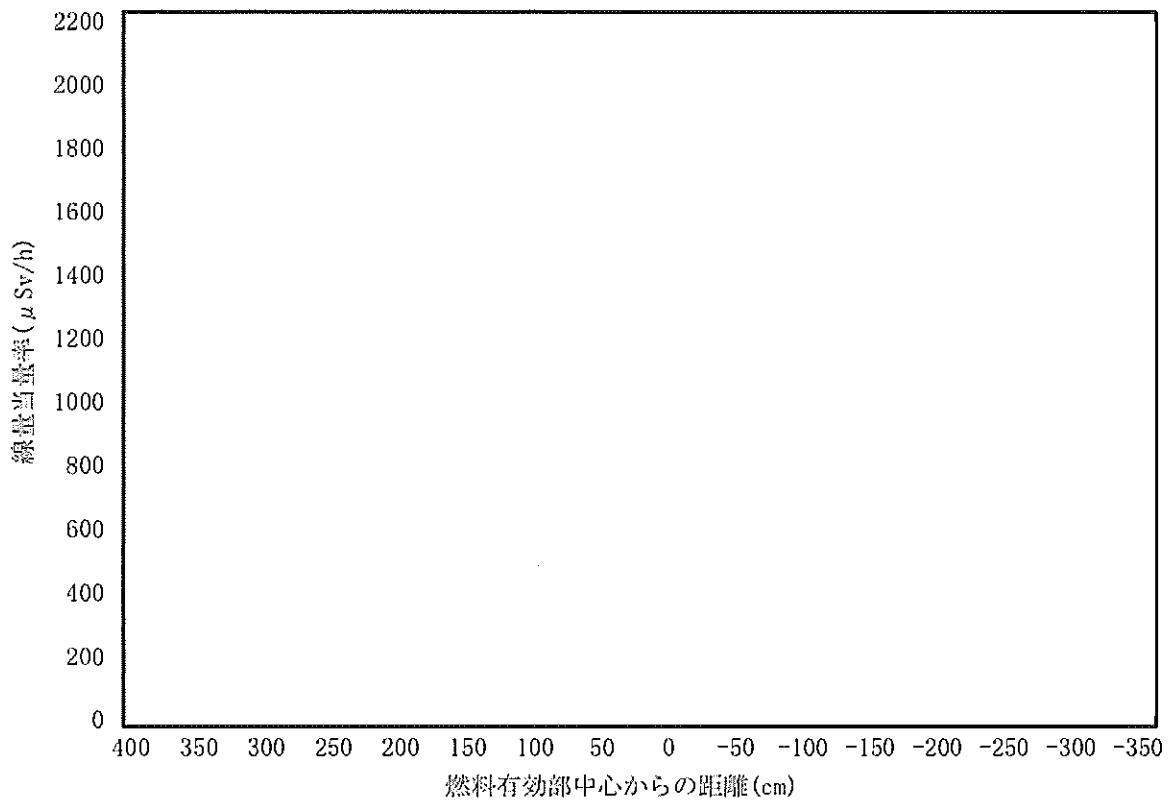


(注 1) ①~⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。「D」は DOT3.5 コード、「M」は MCNP5 コード結果。
 (注 2) MCNP5 解析の実形状を考慮したモデルイメージを図示している。

別紙 6-1 図 最大線量当量率位置

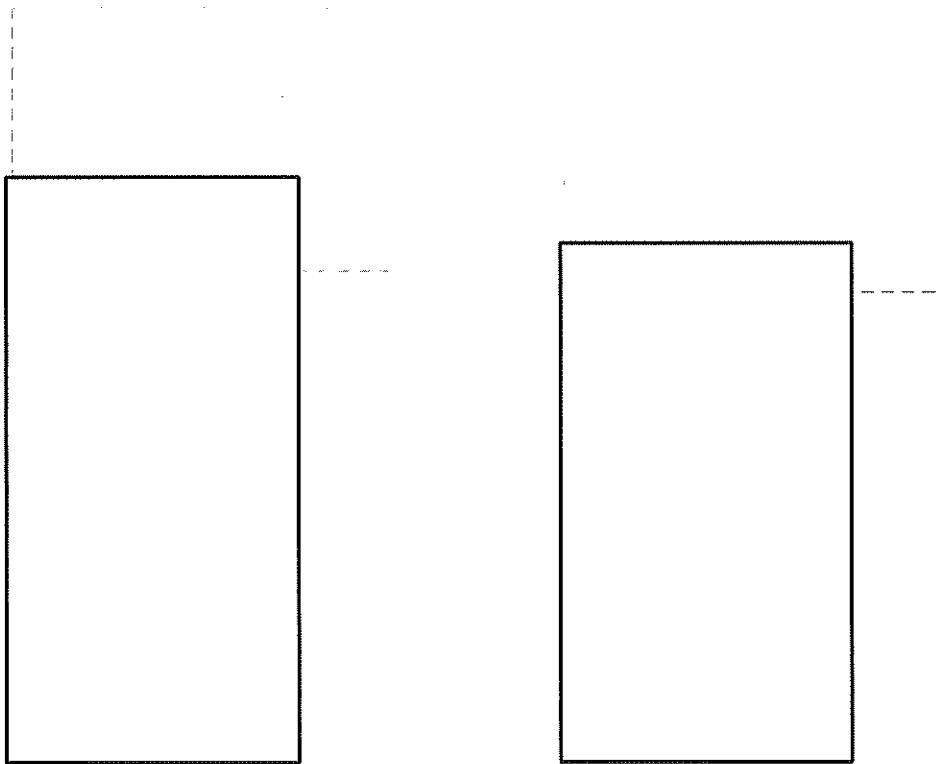
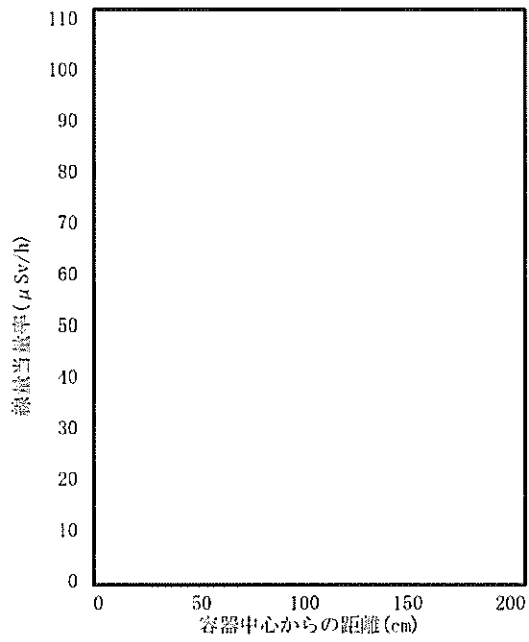
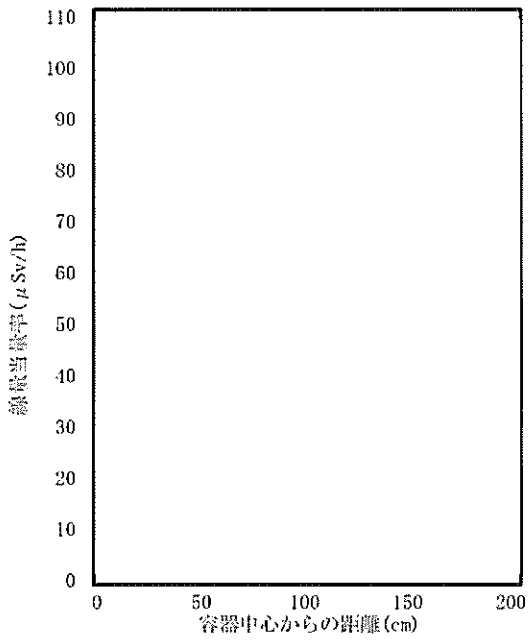


別紙 6-2 図 表面の線量当量率分布の比較
(頭部軸方向・底部軸方向)



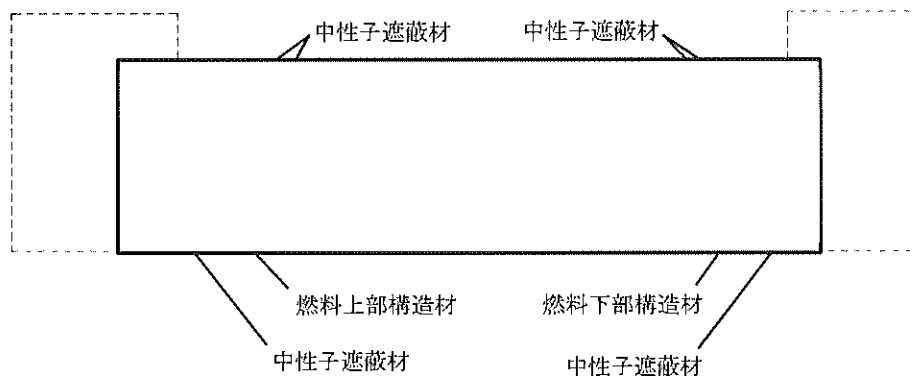
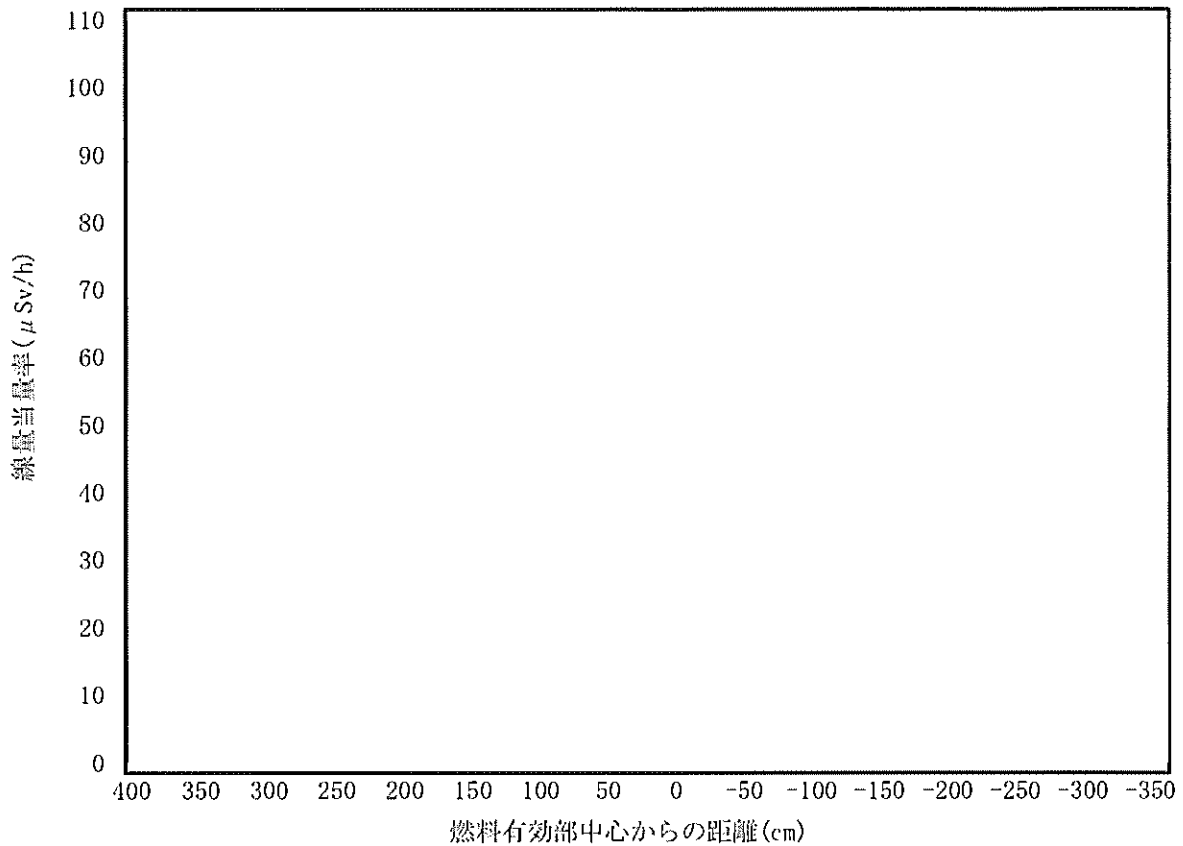
- (注 1) MCNP5 解析の線量当量率は、周方向の最大となる方向の MCNP5 解析値である（トラニオン方向も含まれる）。
- (注 2) DOT3.5 解析の線量当量率は、頭部径方向・側部・底部径方向の線量当量率分布にトラニオン方向の分布を重ねて示した。
- (注 3) 図中の数字部の線量当量率評価結果の差異要因について別紙 6-3 表に示す。

別紙 6-3 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6-3表に示す。

別紙6-4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 6-3 表に示す。

別紙 6-5 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))

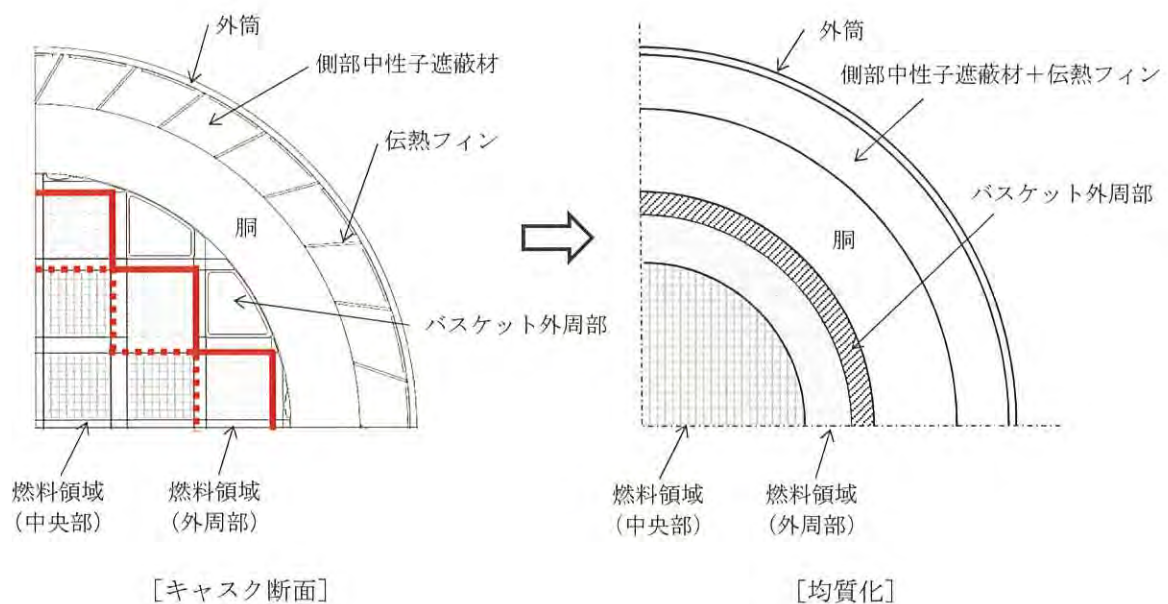
別紙 6 - 3 表 評価結果の傾向まとめ

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6-6図及び別紙6-7図に示す。

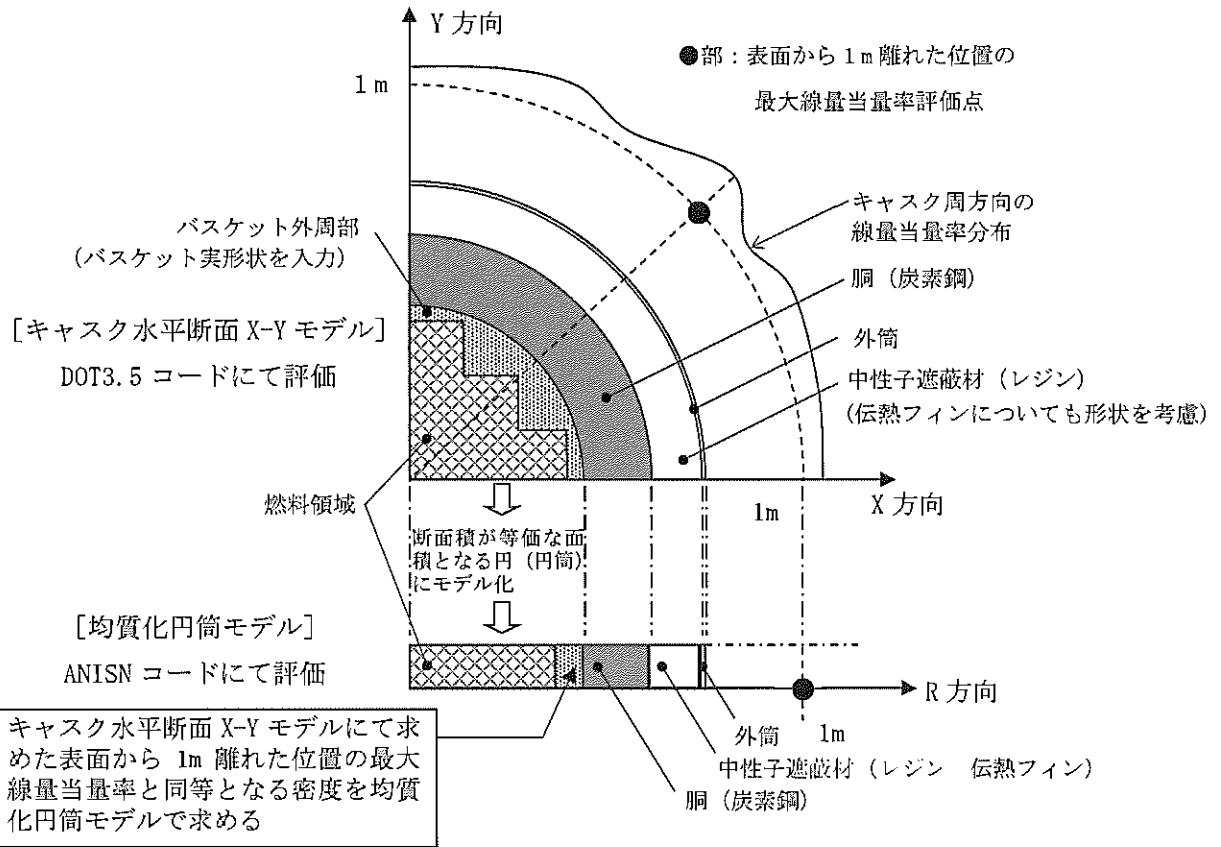
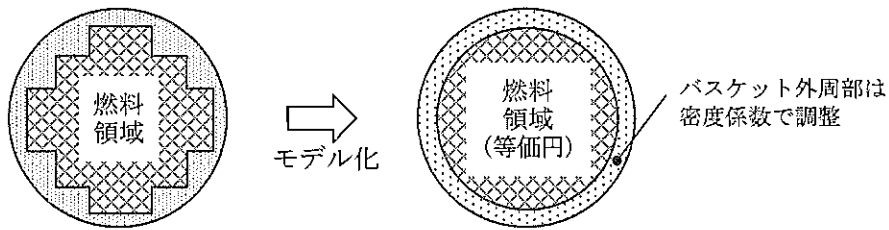
DOT3.5 コードは、実形状（評価点に対して線源となる燃料領域の位置が非均等な形状）のキャスク断面の燃料領域と解析モデル断面の燃料領域が同じ面積となるように均質円筒モデル化し、均質化モデルのキャスク表面から1 m離れた位置における線量当量率が実形状でのキャスク表面から1 m離れた位置における局所的に最大となる線量当量率と同等となるよう、バスケット外周部の密度補正係数を設定する。全周囲に対して局所的な線量当量率と同等となるよう設定しているため、保守的な評価となる。



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6-6図 キャスク中央断面の実形状と解析モデル



キャスク水平断面 X-Y モデルにて求めた表面から 1m 離れた位置の最大線量当量率と同等となる密度を均質化円筒モデルで求める

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 6-6 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。

(ii) 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 6-7 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

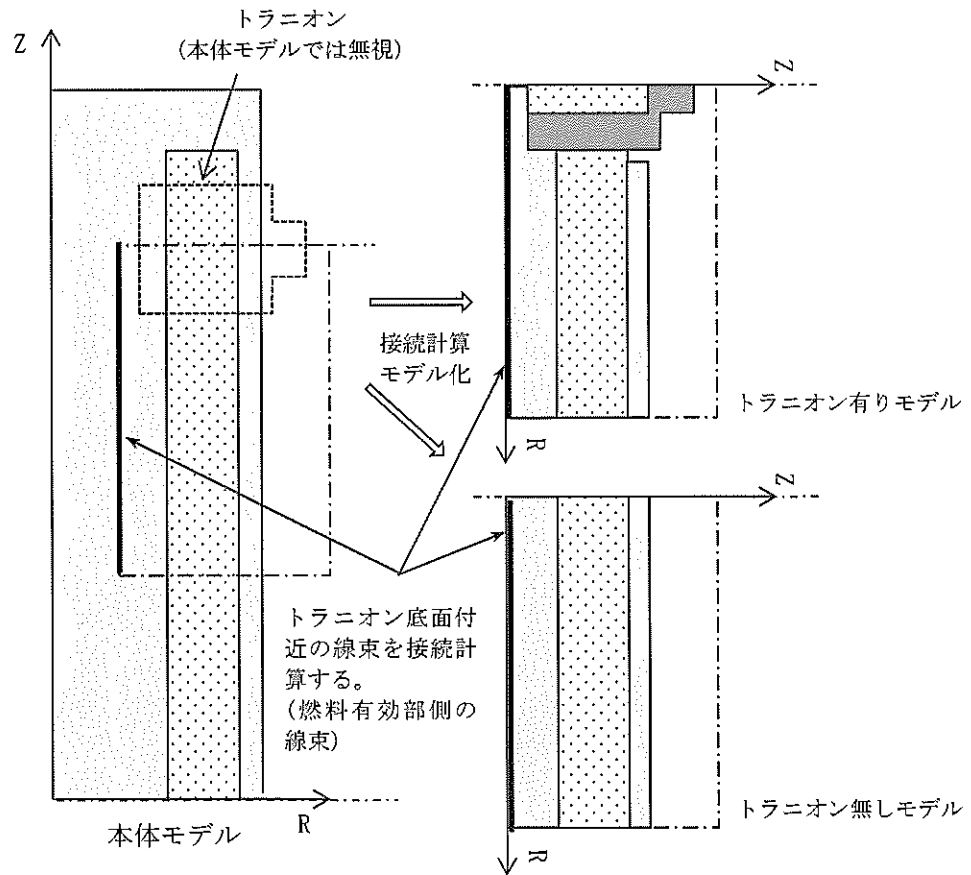
DOT3.5 コードを用いた遮蔽解析において、トランニオン部はDOT3.5 コードを用いて実形状を模擬して別途モデル化し、評価している。

別紙6-8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值として求め、本体モデルの線量当量率にその補正值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6-8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。

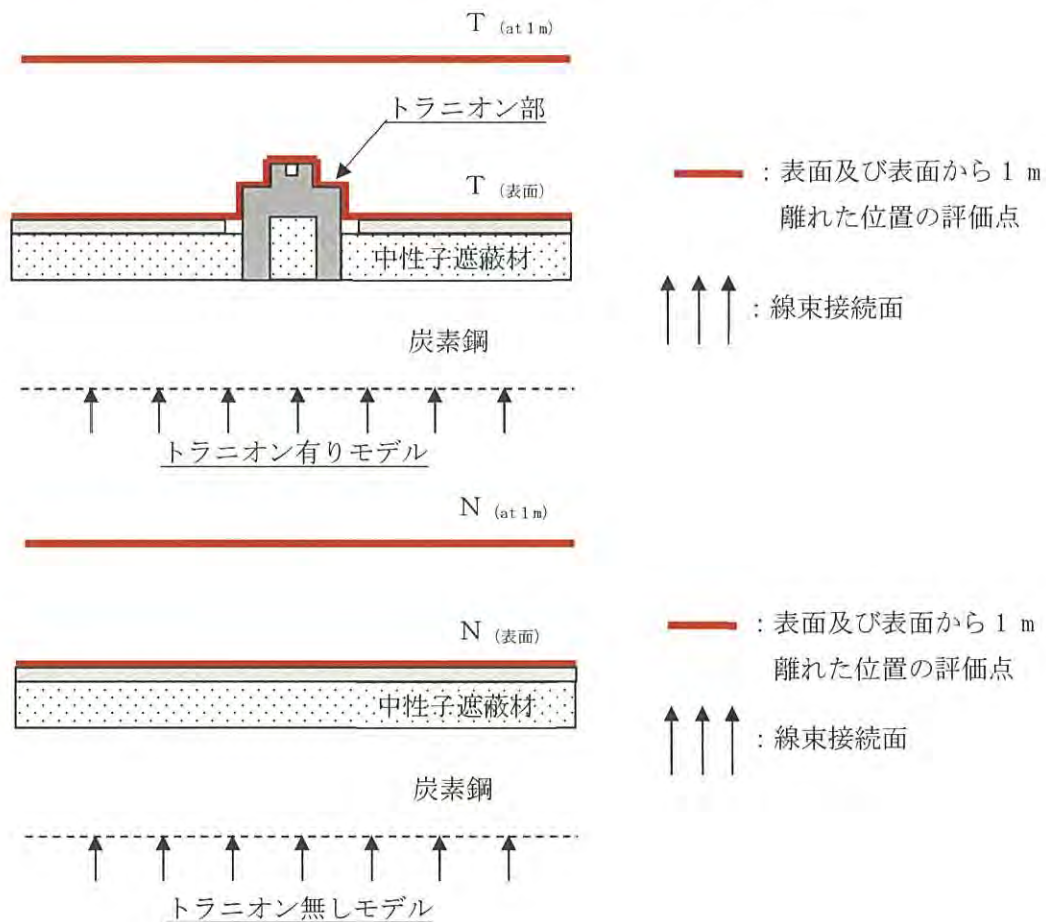
各モデル及び位置の線量当量率を別紙 6-9 図に示すとおり定義する。

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 6-9 図 トランニオン部の線量当量率の定義

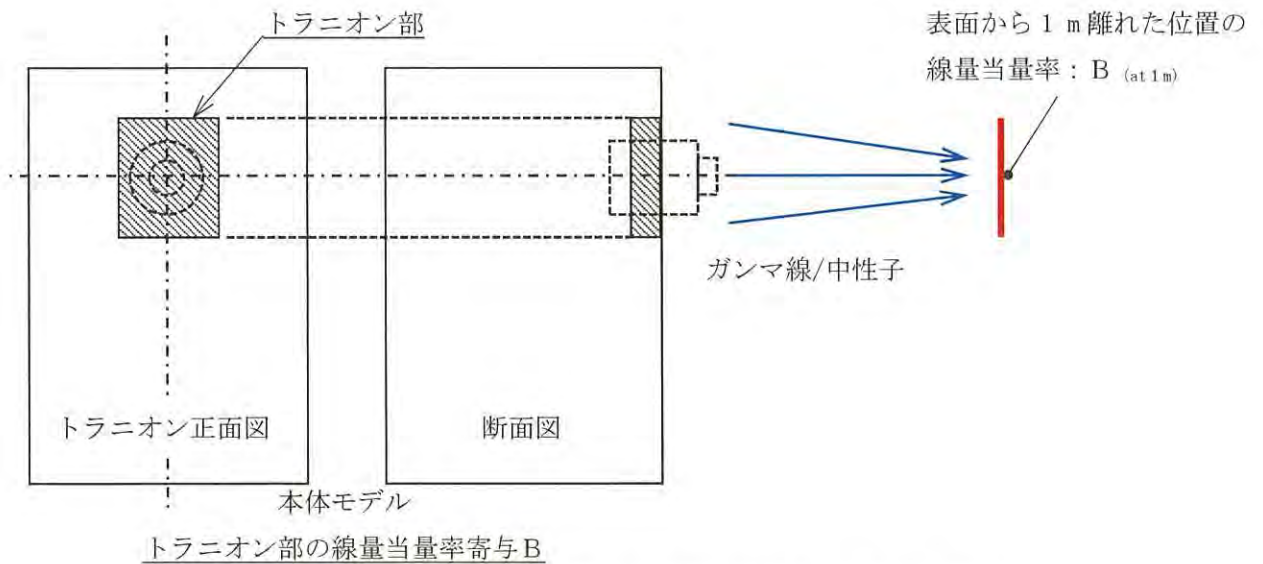
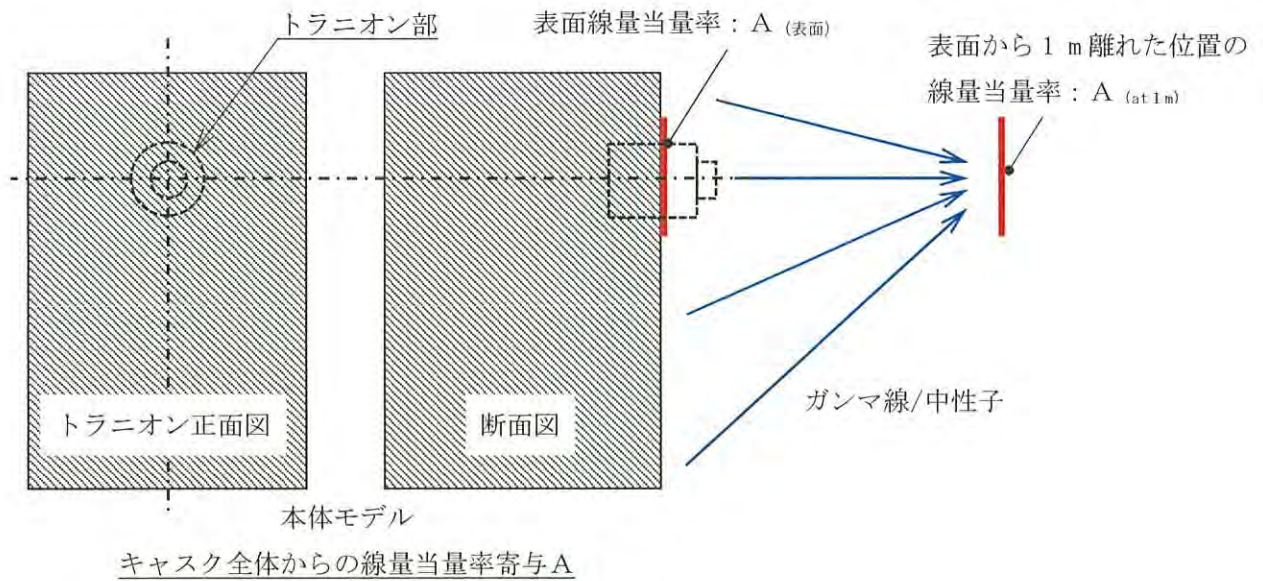
ステップ-2

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6-10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： $B_{(at1m)}$



別紙6-10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。

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

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：

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

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

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 (1/4) 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 (A 型) 収納時)
(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 (1.1)	23.4 (0.5)	45.0 (0.3)	27.1 (0.6)	2.9 (0.4)
	構造材放射化	0.2 (0.5)	22.7 (0.9)	11.5 (0.2)	13.0 (1.0)	16.8 (0.3)
	二次ガンマ線	0.2 (1.2)	5.1 (0.5)	10.0 (0.4)	5.5 (0.5)	1.8 (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 (5/8) 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 (2/4) 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 (B 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
	②	④		⑧	⑩
ガンマ線 表面から 1 m	燃料有効部	0.1 (1.6)	18.1 (0.4)	20.3 (0.3)	22.3 (0.5)
	構造材放射化	0.2 (0.9)	31.7 (0.7)	28.6 (0.5)	13.3 (0.6)
	二次ガンマ線	0.2 (3.3)	4.6 (0.7)	5.0 (0.6)	5.1 (0.7)
中性子	19.1 (0.7)	28.2 (0.6)	25.6 (0.5)	24.5 (0.8)	12.5 (0.5)
合計	19.6	82.6	79.5	65.2	44.8

※ () 内は統計誤差 (単位: %) を示す。

第 3 表 (6/8) 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 (3/4) 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 (A 型) 収納時)
(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)
	構造材放射化	0.1 (0.3)	16.2 (0.5)	8.5 (0.2)	8.3 (0.5)
	二次ガンマ線	0.2 (1.2)	5.3 (0.4)	10.5 (0.3)	5.5 (0.4)
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。

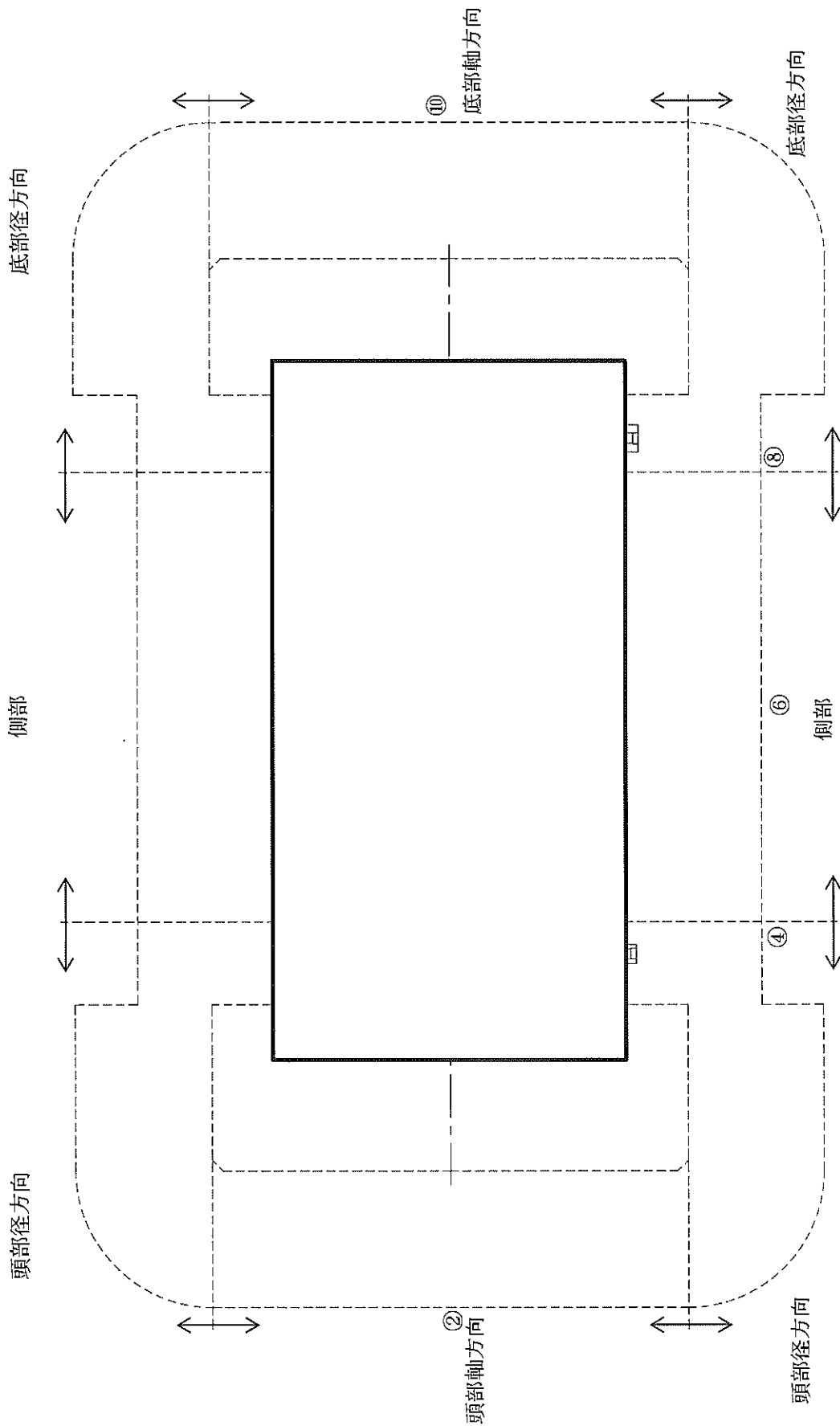
第 3 表 (7/8) に示す表面から 1 m 離れた位置における線量当量率の評価結果と同じ

別紙7-1表 (4/4) 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 (B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
	②	④		⑧	⑩
ガンマ線 表面から1 m	燃料有効部	0.1 (1.6)	18.1 (0.4)	20.4 (0.3)	21.3 (0.6)
	構造材放射化	0.2 (0.9)	25.5 (0.7)	23.3 (0.6)	9.2 (0.9)
	二次ガンマ線	0.2 (2.1)	4.8 (0.3)	5.3 (0.3)	5.2 (0.4)
中性子	20.1 (0.5)	29.8 (0.6)	27.0 (0.5)	27.2 (0.8)	13.3 (0.5)
合計	20.6	78.2	76.0	62.9	33.0

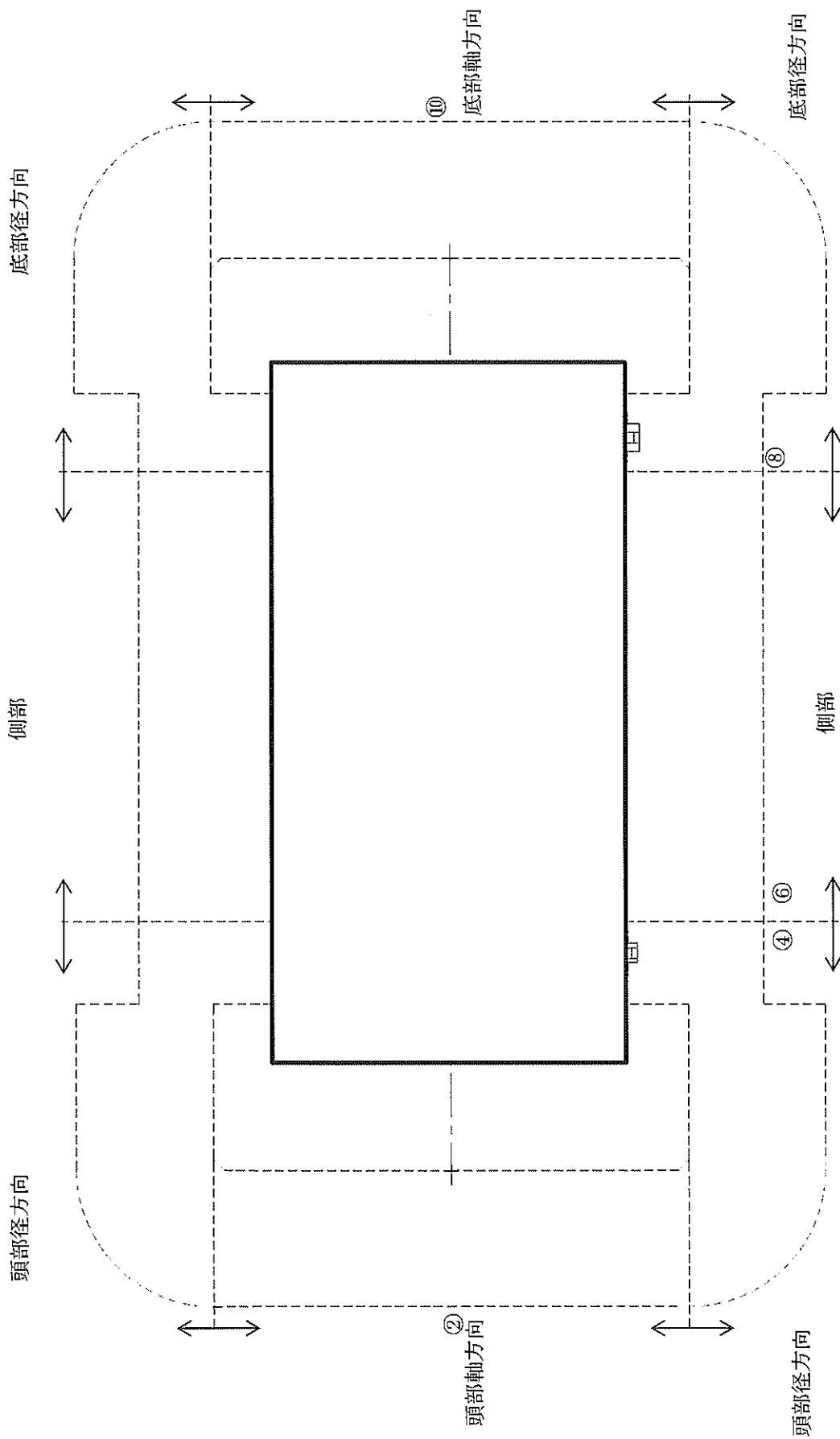
※ () 内は統計誤差 (単位: %) を示す。

第3表 (8/8) 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



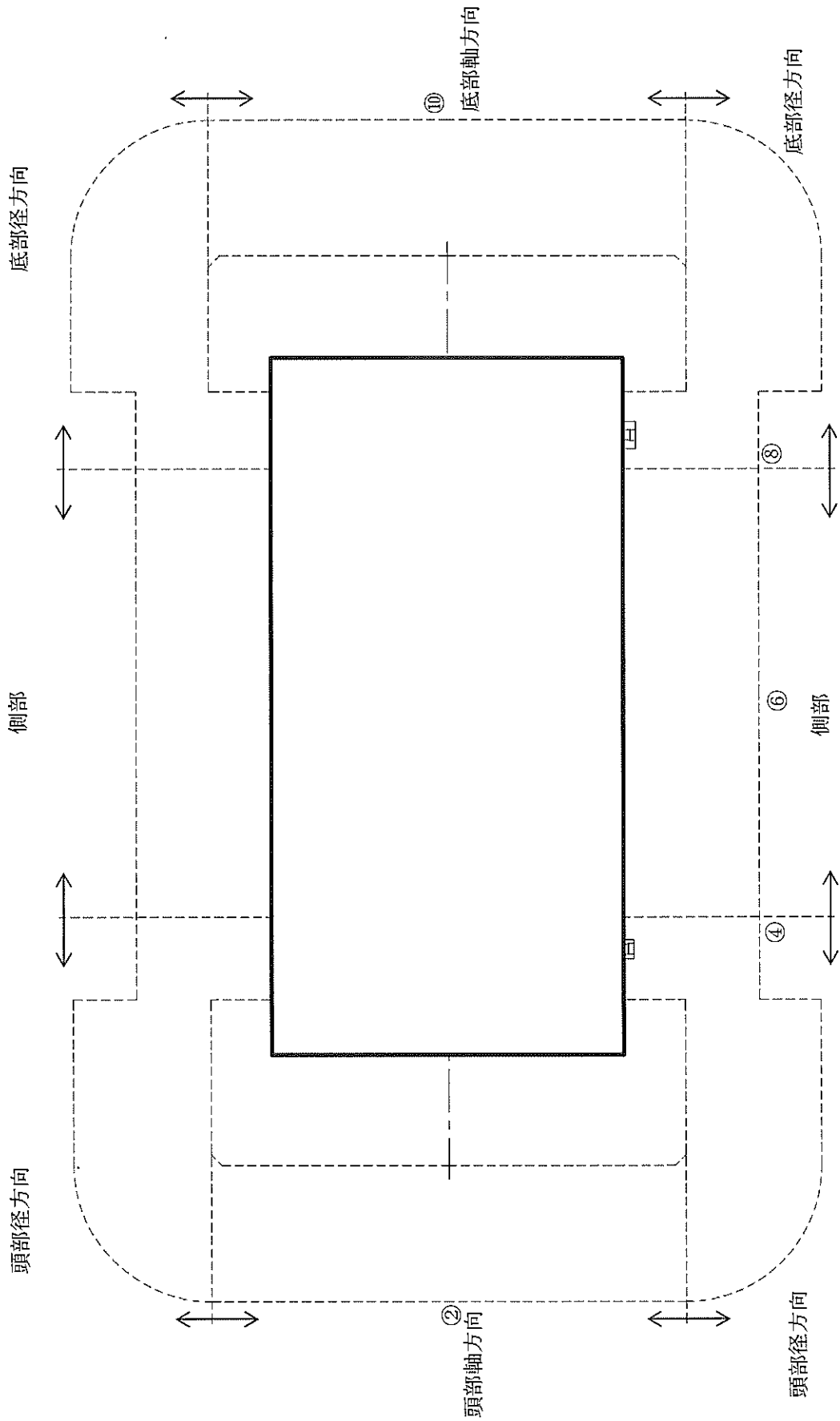
(注) ②, ④, ⑥, ⑧, ⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。
 モニタリングポート、バルブ、トラニオンを同一断面に図示している。

別紙 7-1 図 (1/4) 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 (A 型) 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。

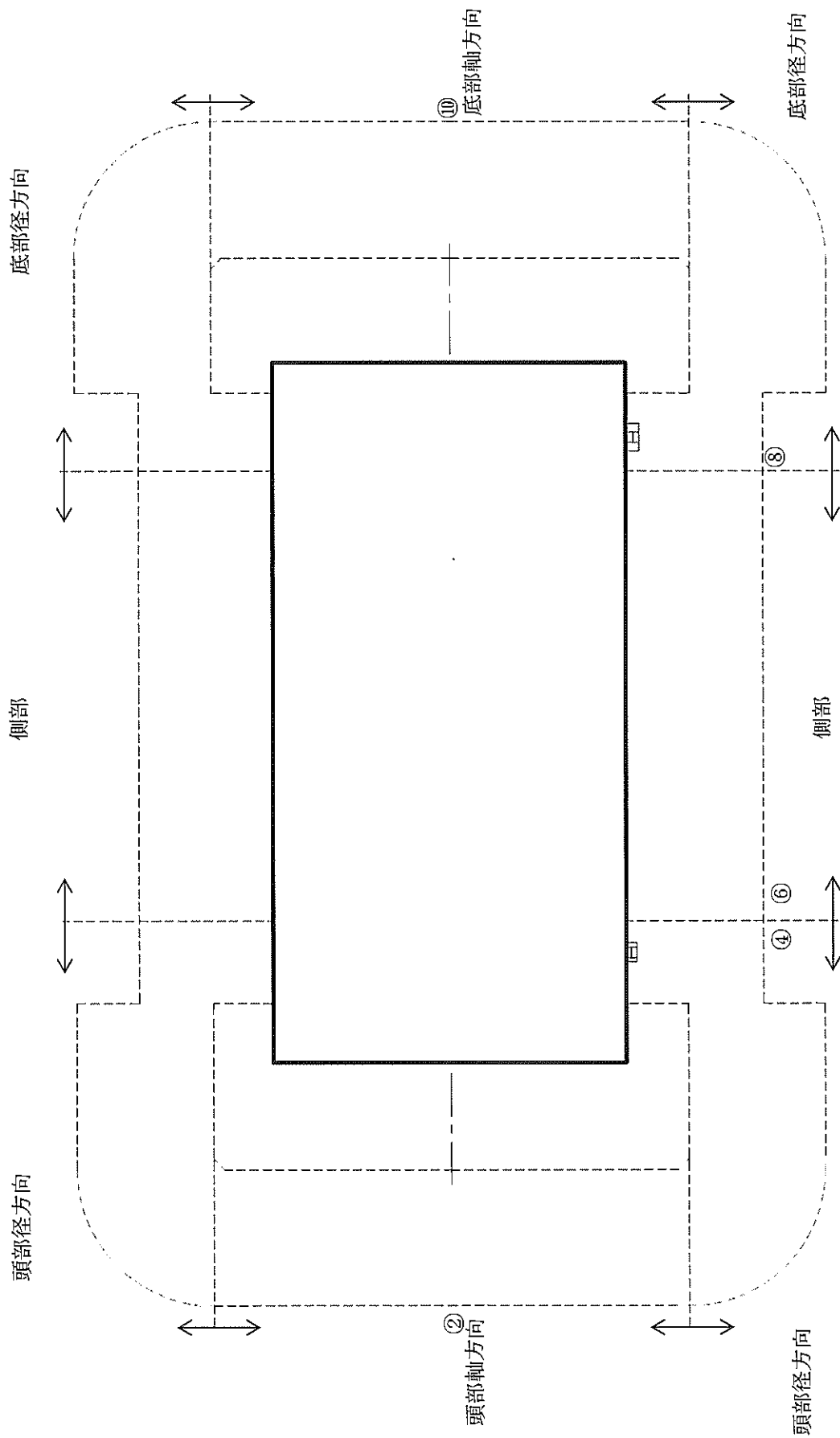
別紙 7-1 図 (2/4) MSF-24P 型の表面から 1 m 離れた位置における代表評価点 (17×17 燃料 (B 型) 収納時)



(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。

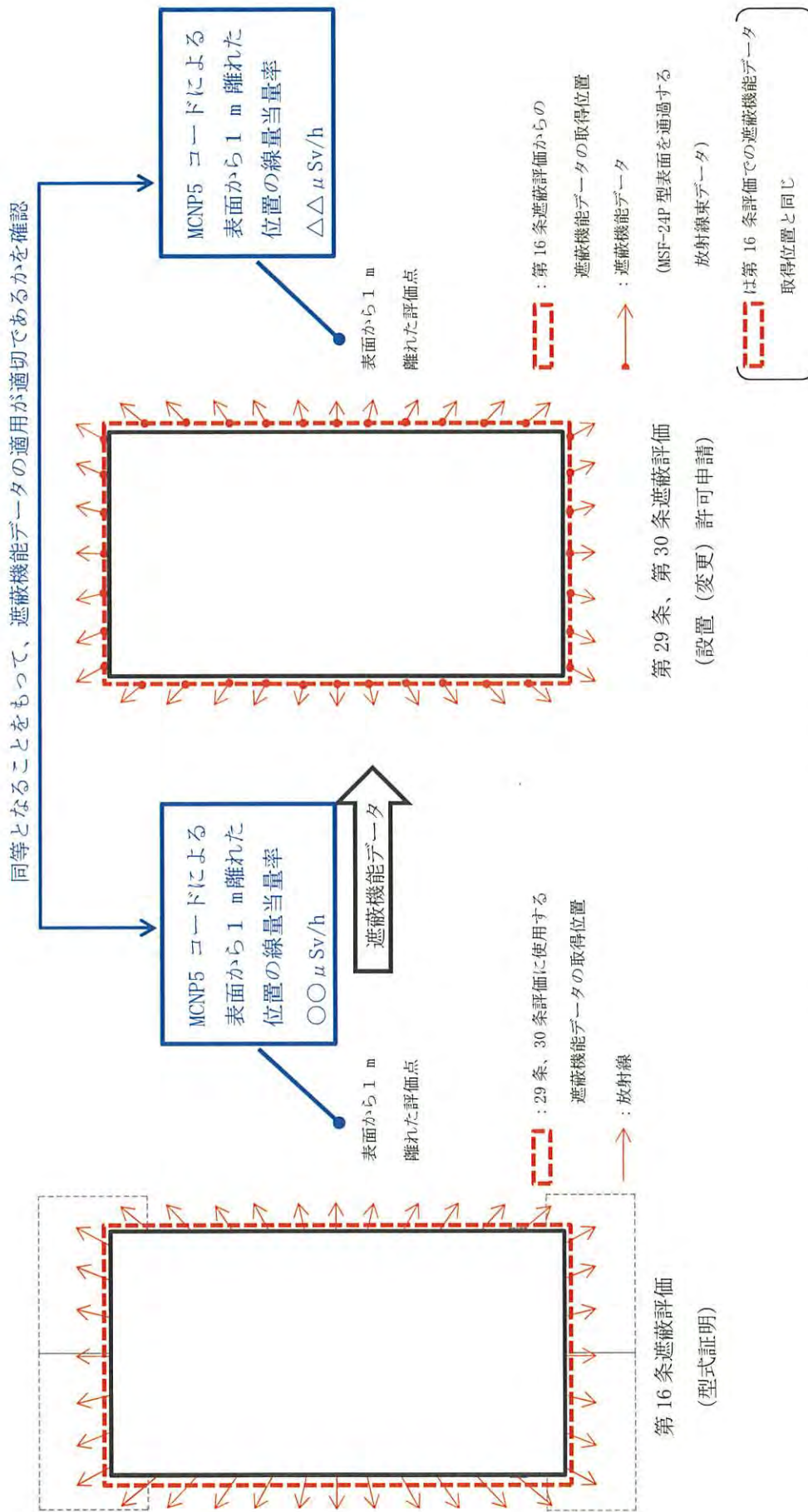
別紙 7-1 図 (3/4) MSF-24P 型の表面から 1 m 離れた位置における代表評価点 (15×15 燃料 (A 型) 収納時)

□内は商業機密のため、非公開とします。



(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 (4/4) 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 (B 型) 収納時)



別紙 7-2 図 遮蔽機能データ確認イメージ