

資料 1-5

Doc No. MA035B-SC-D01 Rev.4

2022年10月26日

日立造船株式会社

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

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 核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性

別紙 4 遮蔽解析結果の妥当性確認について (参考)

別紙 5 遮蔽解析に使用する解析コードについて

1. 要求事項

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

(1) 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項第一号

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条第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項第三号

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条第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 $100\mu\text{Sv/h}$ 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 $50\mu\text{Sv/y}$ 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。
- (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 μ 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 μ Sv/h となるよう放射線源強度を規格化したものを用いること。ここで、放射線源強度を規格化して用いる場合は、中性子 100%又はガンマ線 100%のいずれか保守的な線量評価とすること。また、中性子及びガンマ線の表面エネルギースペクトルは、保守的な線量評価となるものを使用すること。

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 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。

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

4) 応急復旧

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

』

2. 要求事項への適合性

(1) 設置許可基準規則への適合性

Hitz-P24 型の遮蔽機能については、以下のとおり設置許可基準規則に適合している。

a. 設置許可基準規則第 16 条第 4 項第一号

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 条第 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 項第三号

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。

Hitz-P24 型は、使用済燃料集合体からの放射線を特定兼用キャスクの本体及び蓋部のガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により遮蔽する設計とし、設計貯蔵期間中における Hitz-P24 型の中性子遮蔽材の熱による遮蔽機能の低下を考慮しても特定兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下、かつ、特定兼用キャスク表面から 1 メートル離れた位置における線量当量率を 100 μ Sv/h 以下となる設計とする。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樹脂（以下「レジン」という。）を用いる。

2. (2) 審査ガイドへの適合性[確認内容]1) から 2) への説明に示すとおり、特定兼用キャスク表面及び特定兼用キャスク表面から 1 メートル離れた位置における線量当量率は、特定兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、使用済燃料の放射線源強度

を条件として二次元輸送計算コード DOT3.5（断面積ライブラリ：MATXSLIB-J33）を使用して求める。線量当量率評価に用いる放射線源強度は、使用済燃料の型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して求める。

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

また、設置許可基準規則解釈別記 4 第 1 6 条第 2 項に示される貯蔵建屋を設置する場合において、当該貯蔵建屋の損傷による工場等周辺の実効線量への影響、及び貯蔵事業許可基準規則解釈第 4 条第 1 項第 3 号に示される使用済燃料の配置の条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置を講じることについては、型式証明申請の範囲外（設置（変更）許可時の別途確認事項）である。

c. 設置許可基準規則解釈別記 4 第 1 6 条第 5 項

第 1 6 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。

Hitz-P24 型の設計貯蔵期間は 60 年である。また、補足説明資料 16-6「材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料（MA035B-SC-F01）」に示すとおり、Hitz-P24 型は、安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計である。

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、兼用キャスクの有する安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、Hitz-P24 型の遮蔽機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

[確認内容]

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

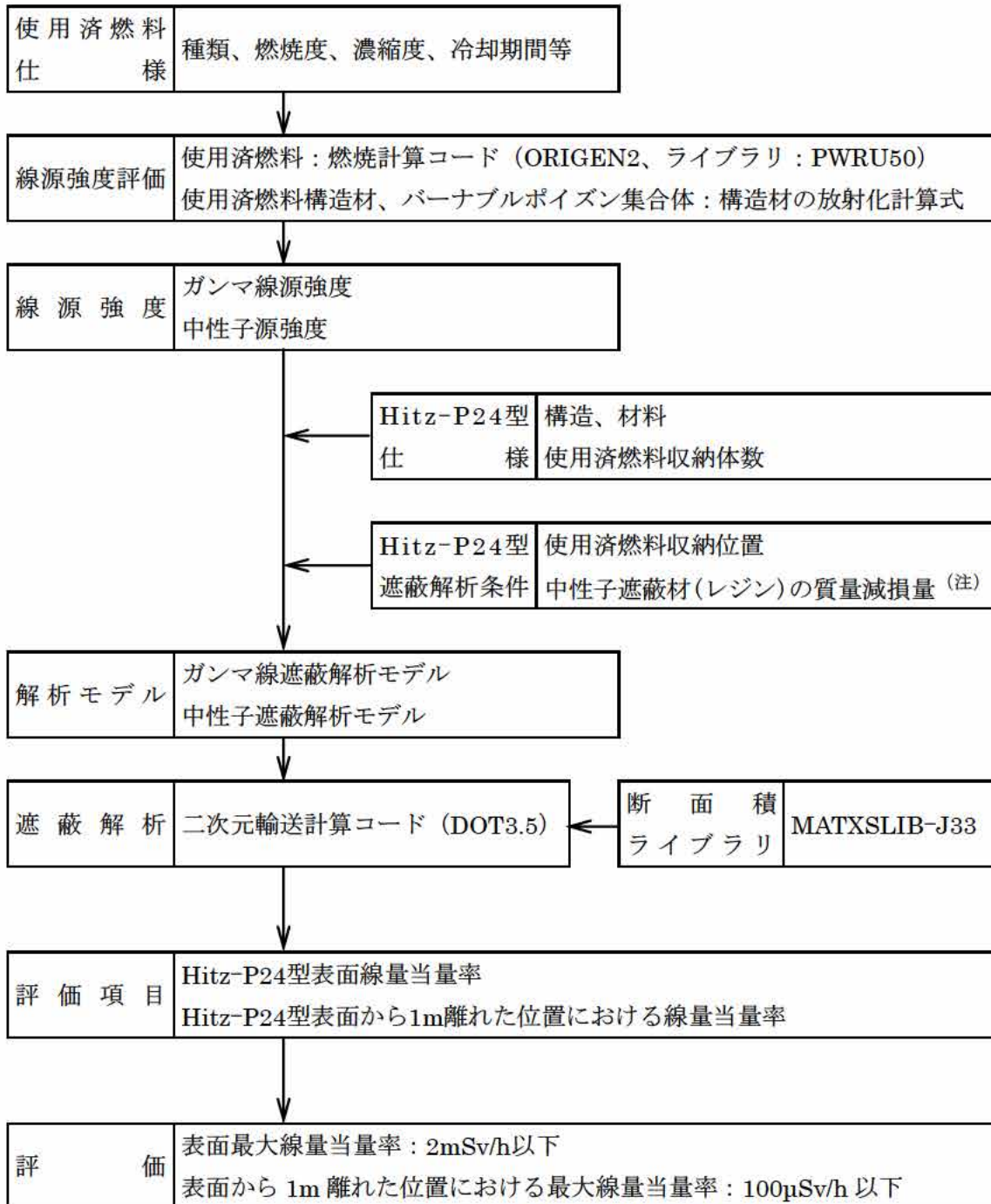
使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

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

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

Hitz-P24 型の遮蔽解析フローを図 1 に示す。遮蔽解析に用いる解析コードは、別紙 5 に示すとおり検証され、適用性が確認されている。



(注) Hitz-P24型の主要な構成材料のうち、中性子遮蔽材は、補足説明資料16-6「材料・構造健全性(長期健全性)に関する説明資料(MA035B-SC-F01)」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。

図1 遮蔽解析フロー図

(3) 使用済燃料の線源強度評価方法

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

(4) Hitz-P24 型の線量当量率評価方法

Hitz-P24 型の線量当量率は、Hitz-P24 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 を用いる。遮蔽解析における収納物条件の概要を表 1 に示す。遮蔽解析に用いる燃料タイプについては、表 1 に示す 17×17 燃料（A 型、B 型）とする。

(5) 遮蔽解析モデル

遮蔽解析モデル化の概要を図 3、解析モデル図を図 4 に示す。遮蔽解析モデルの入力条件への不確かさの考慮は以下のとおりである。

① 構成部材密度

最低保証密度を使用して原子個数密度を設定。

② 寸法公差

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

Hitz-P24 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、キャスク中心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

図 5 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

図 5 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、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 1m 離れた位置の最大線量当量率を算出し、この値と同等に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

図 5 に示すとおり、円筒としてモデル化している。なお、側部中性子遮蔽材内部に伝熱フィン及びアルミニウム合金製のスペーサがある領域では、伝熱フィン及びスペーサ（空隙を含む）は側部中性子遮蔽材と均質化している。

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差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加減算して評価している。設定方法の詳細は別紙 1 に示す。

(6) 遮蔽解析の保守性

本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・ 収納制限に対する解析条件の保守性

－ ウラン濃縮度を最小値である 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とし、中央部 48,000MWd/t、外周部 44,000MWd/t を設定している。

・モデル化の保守性

- 各部の中性子遮蔽材は評価期間中の熱的影響により質量減損が発生する。遮蔽評価上は、計算した質量減損率に裕度を加えた保守的な質量減損を考慮（原子個数密度で考慮）する。（別紙1「3. 中性子遮蔽材の質量減損について」参照）
- 使用済燃料は、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。
- 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。

表 1 遮蔽解析における収納物条件の概要

項 目		キャスク収納位置制限		解析条件		
		中央部	外周部	中央部	外周部	
収納物仕様	燃料集合体 1 体の仕様	燃料タイプ	17×17 型 (A 型・B 型)		17×17 型 (A 型・B 型)	
		初期濃縮度 (wt%)				
		ウラン重量 (kg)				
		最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)				
	冷却期間 (年)	A 型 : ≧15 B 型 : ≧17		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)				
		冷却期間 (年)				
Hitz-P24 型 1 基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≦44		46		
配置		<p>(注 3) (注 4)</p>		<p>(注 5)</p>		

(注 1) 保守的に最小値とする。

(注 2) 組み合わせる使用済燃料集合体の冷却期間以上とする。

(注 3) ◎ : 48GWd/t 以下の燃料を収納できる範囲。 ○ : 44GWd/t を超える燃料を収納できない範囲。

(注 4) A 型と B 型は区別なく同一キャスクへ混載可能である。

(注 5) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

内は商業機密のため、非公開とします。

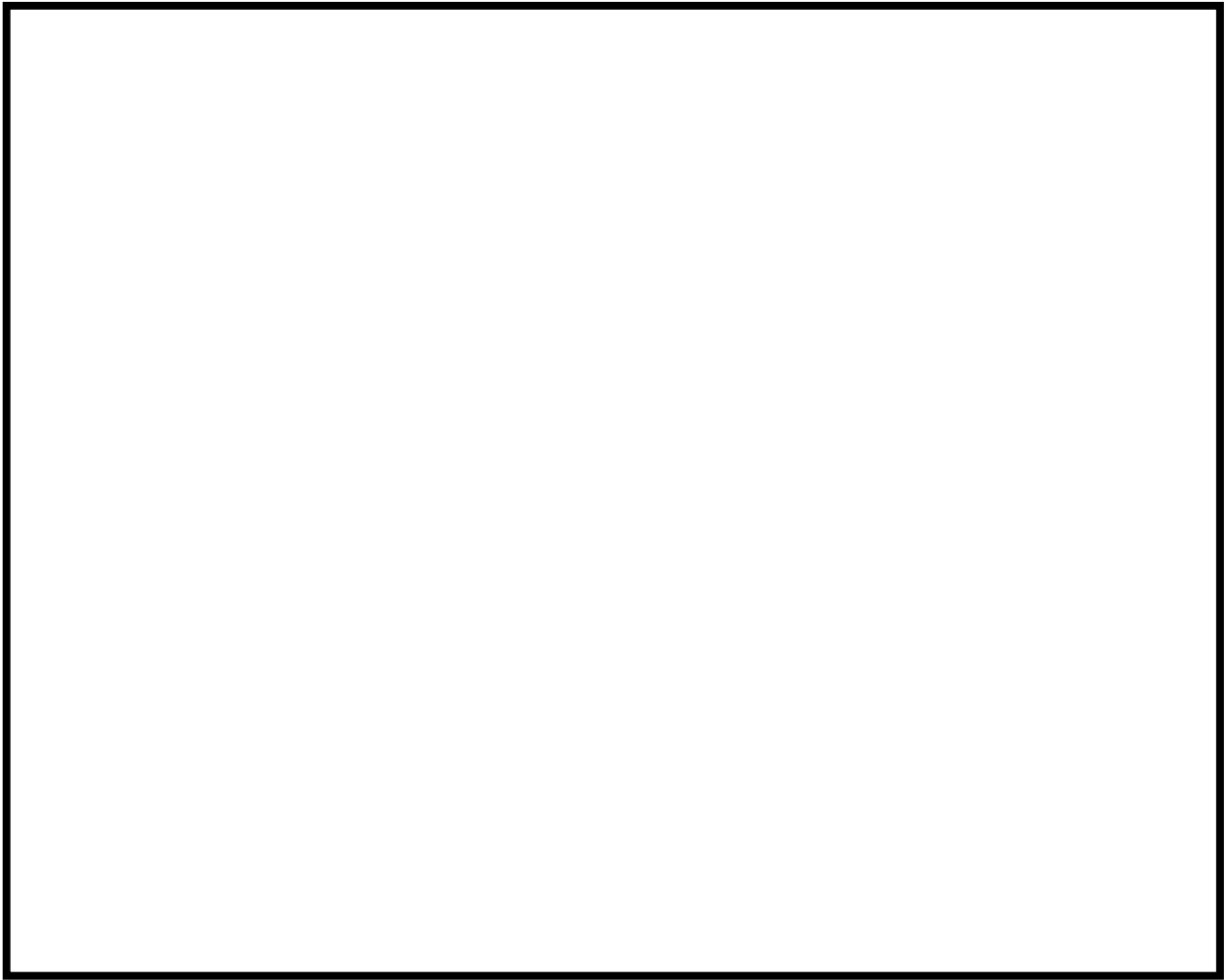

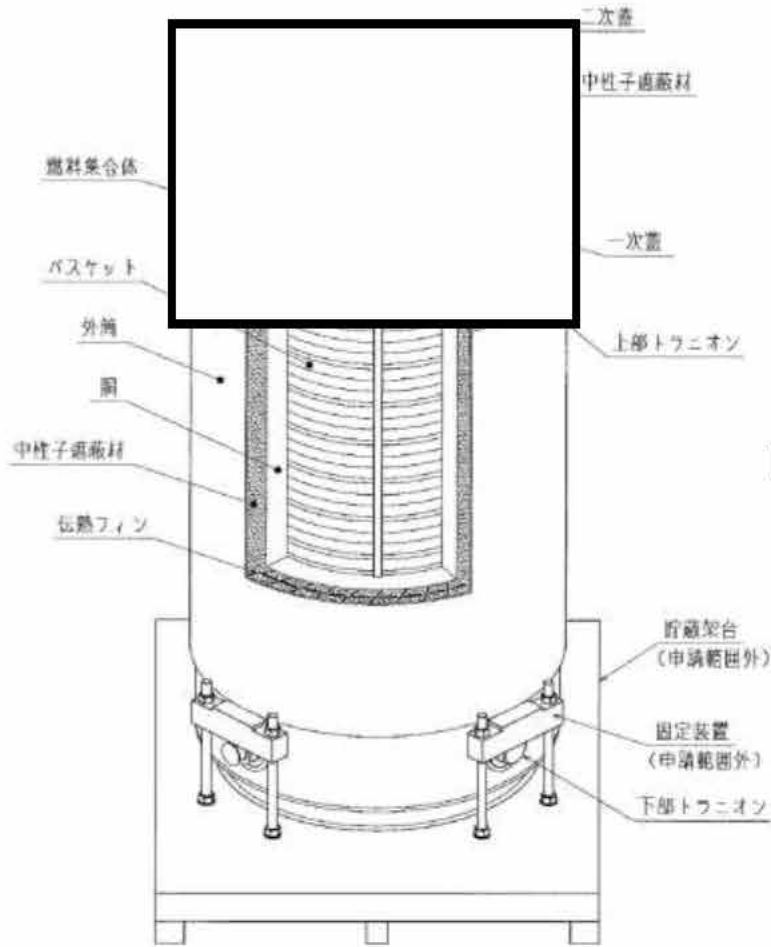


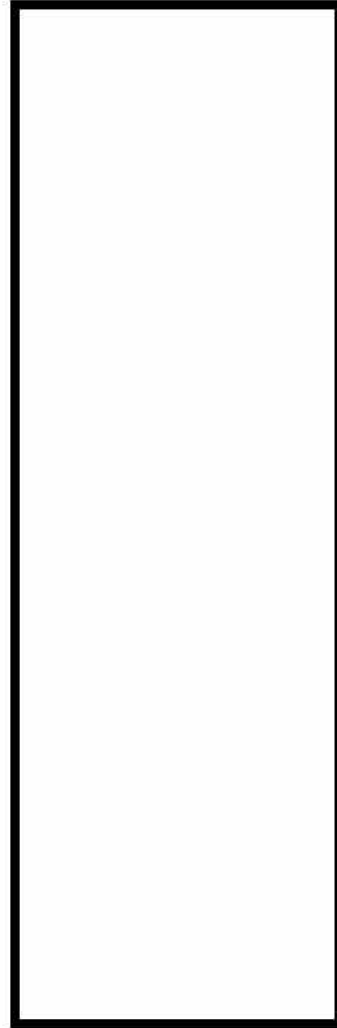
図 2 軸方向燃焼度分布の設定 (17×17 燃料)

 内は商業機密のため、非公開とします。



[実形状]

二次元
モデル化



[二次元モデル化 (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
- : 中性子遮蔽材
- : 中性子遮蔽材+スペーサ均質化領域
- : 中性子遮蔽材+伝熱フィン+スペーサ均質化領域
- : 胴、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー、下部端板、支柱
- : 真空又は空気

図3 遮蔽解析モデル化概要

内は商業機密のため、非公開とします。

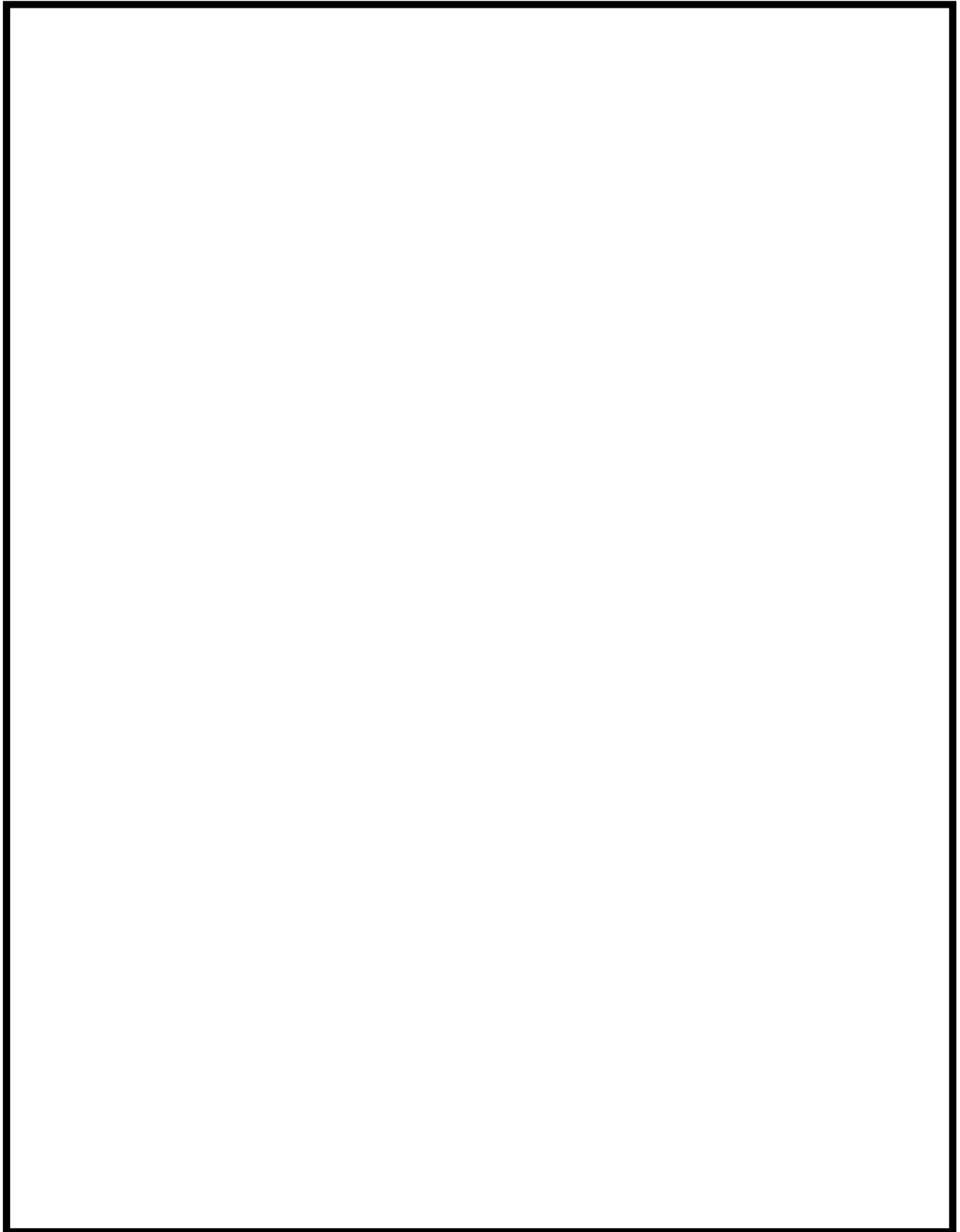


図 4 (1/4) 遮蔽解析モデル (頭部)

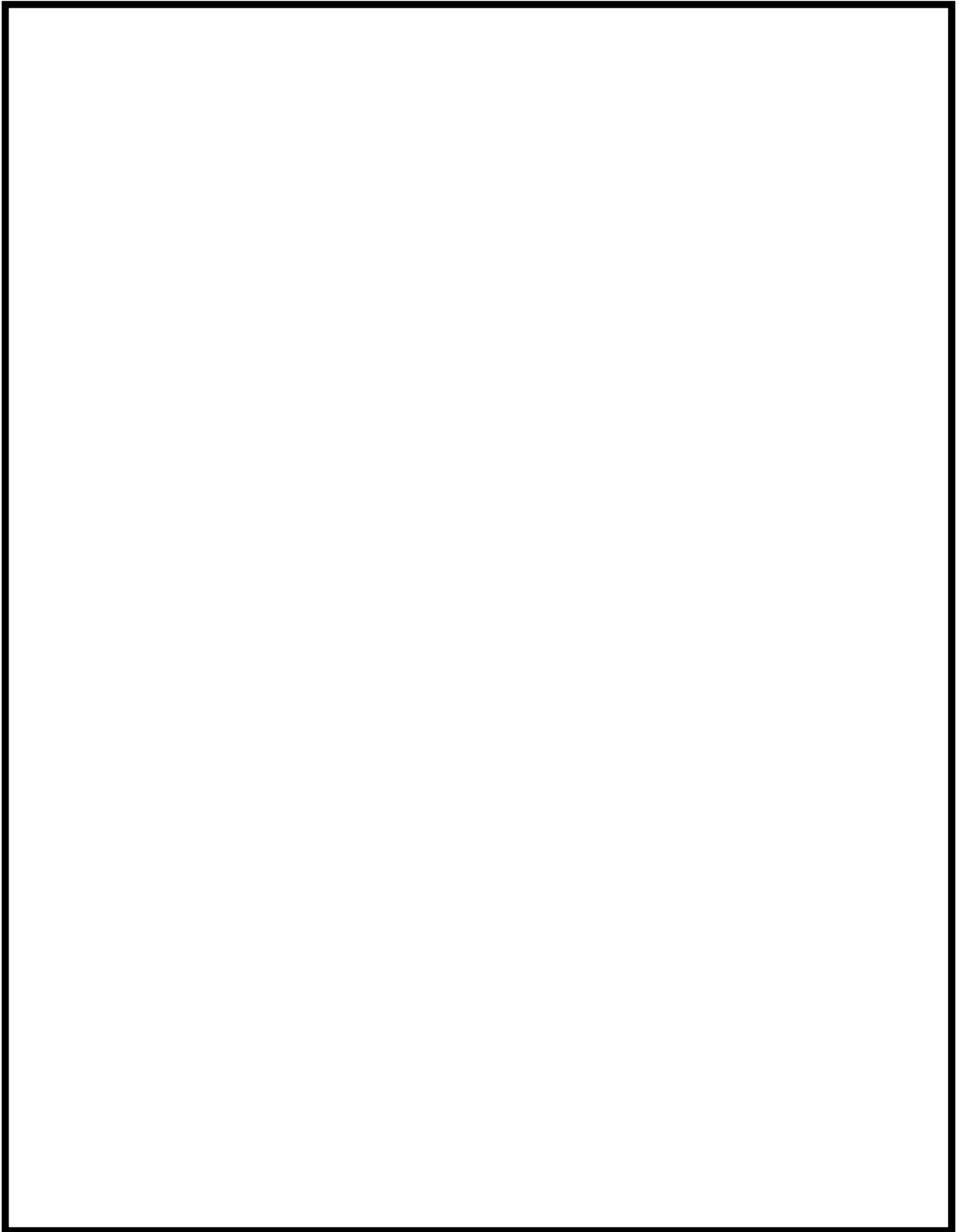


図 4 (2/4) 遮蔽解析モデル (底部)

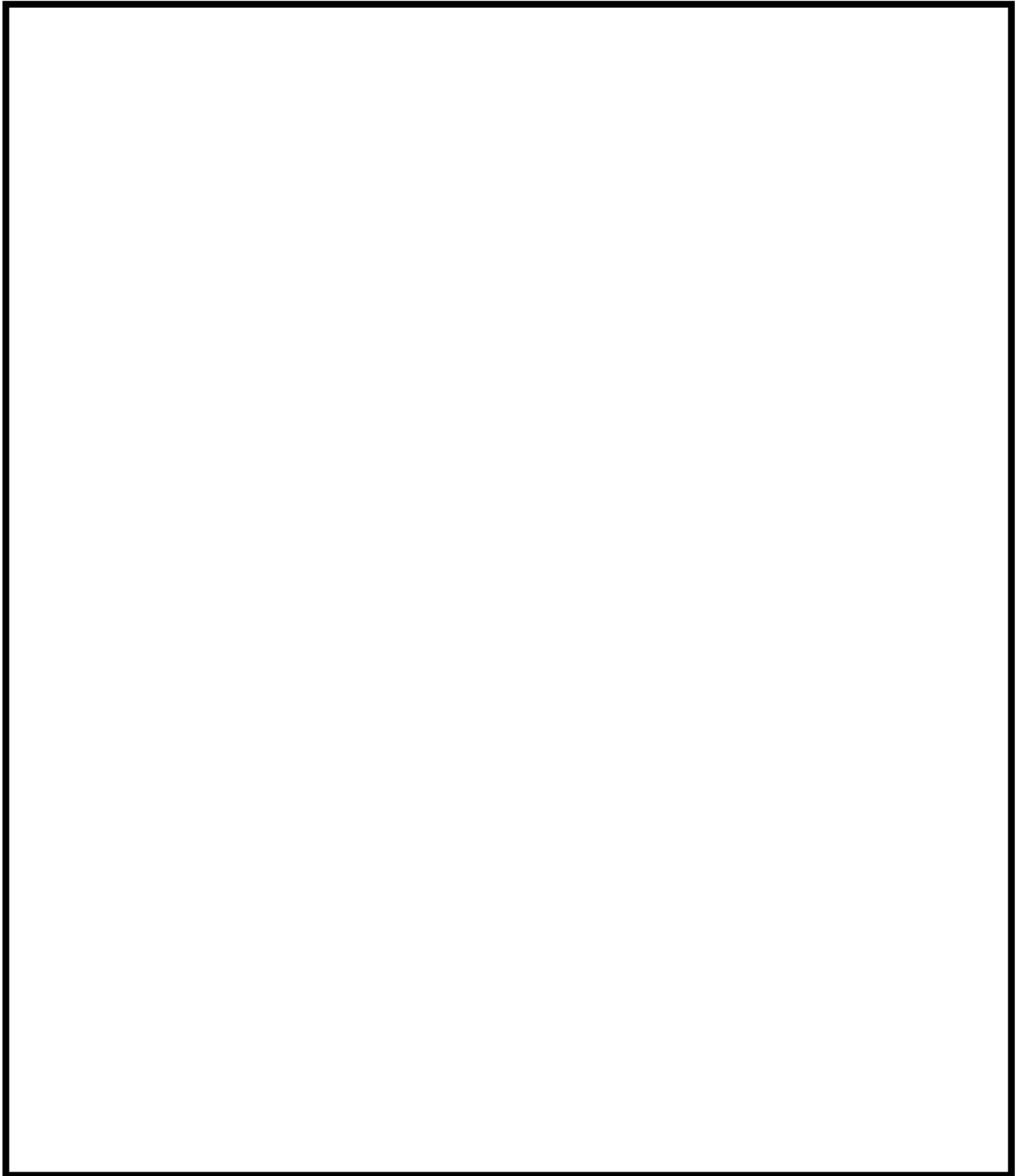


図 4 (3/4) 遮蔽解析モデル (トラニオン部)

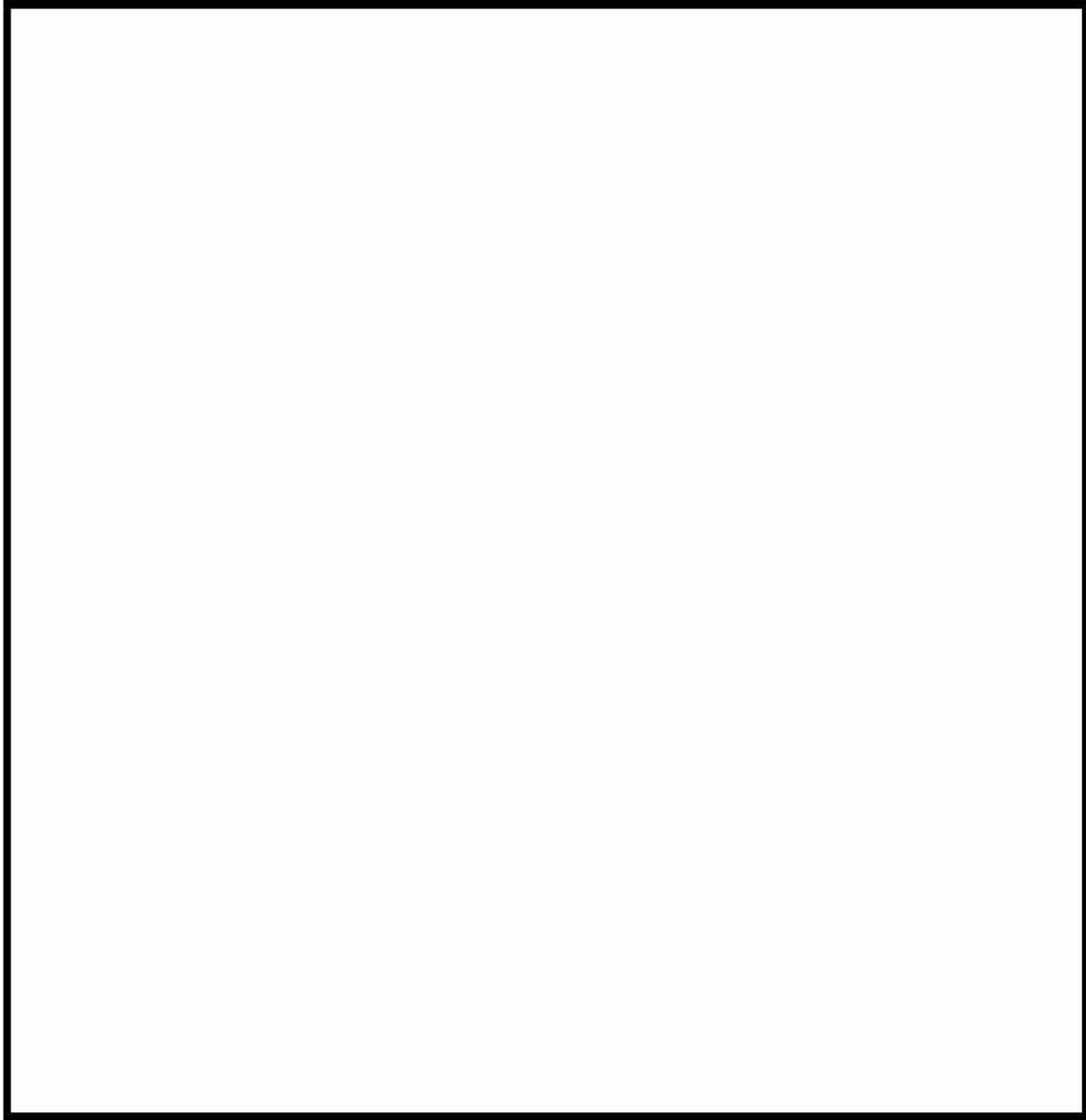

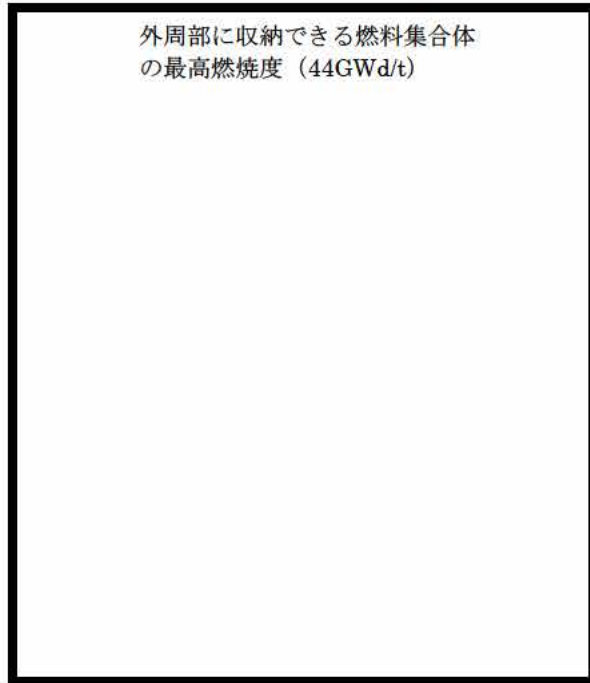
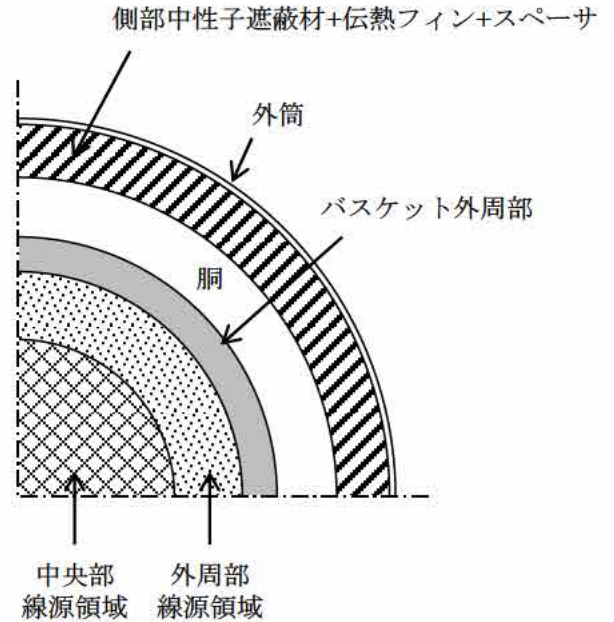


図 4 (4/4) 遮蔽解析モデル (モニタリングポート部)

 内は商業機密のため、非公開とします。



[実形状]



[二次元モデル(円筒モデル)]

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（燃料集合体が装荷される領域）として設定した断面積と等価な面積となる円（円筒）としてモデル化している。その際、燃料領域に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。バスケットプレートの [] (補足説明資料 16-1「燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設 (MA035B-SC-Z02 参照)」については、 []

[] として保守的に考慮した。

燃料領域の物性値は中央部も外周部も同じであるが、線源強度の入力としては、中央部と外周部の線源領域を、それぞれ上記同様に等価な面積となる円（円筒）として、それぞれの領域に収納体数に合わせた線源強度を入力している。

また、中性子遮蔽材（レジン）は、当該領域のレジン、伝熱フィン、スペーサ（空隙を含む）の断面積比を用いて均質化した原子個数密度を入力している。

図5 キャスク中央断面の実形状と解析モデル

[] 内は商業機密のため、非公開とします。

(7) 評価結果

Hitz-P24 型の遮蔽評価結果を表 2 に示す。

Hitz-P24 型の表面及び表面から 1m 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。

表 2 線量当量率評価結果

項 目	評価結果		評価基準	備 考
	A 型	B 型		
表面線量当量率	1.5mSv/h	1.4mSv/h	2mSv/h 以下	線量当量率の詳細 は表 3 に示す。
表面から 1m 離れた位置 における線量当量率	84μSv/h	85μSv/h	100μSv/h 以下	線量当量率の出力 位置は図 6 に示す。

表 3 (1/2) 線量当量率評価結果 (A 型 収納時)

(単位 : $\mu\text{Sv/h}$)

評 価 点		頭 部			側 部	底 部			
		軸 方 向	径 方 向	径 方 向 (トラニオン部)		径 方 向	径 方 向 (トラニオン部)	軸 方 向	
		①	③a	③b		⑤	⑦a	⑦b	⑨
表 面	ガンマ線	燃料有効部	0.8	113.9	17.5	101.3	13.6	16.2	10.1
		構造材放射化	3.9	53.1	96.2	20.9	13.8	9.6	49.3
		二次ガンマ線	1.2	17.2	5.9	19.6	9.2	6.2	7.0
	中 性 子	412.7	59.7	419.3	27.4	1427.8	593.4	128.3	
	合 計	418.6	243.9	538.9	169.2	<u>1464.4</u> [1.5] (注)	625.4	194.7	
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	0.8	29.5	28.8	48.8	43.1	32.5	5.5
		構造材放射化	16.2	23.8	16.6	11.2	16.9	15.0	26.3
		二次ガンマ線	0.3	4.9	4.9	8.2	5.3	4.4	2.0
	中 性 子	62.7	13.0	25.2	11.9	10.4	31.9	33.7	
	合 計	80.0	71.2	75.5	80.1	75.7	<u>83.8</u> [84] (注)	67.5	

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

表 3 (2/2) 線量当量率評価結果 (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 (トラニオン部)		径 方 向	径 方 向 (トラニオン部)	軸 方 向	
		①	③a	③b		⑤	⑦a	⑦b	⑨
表 面	ガンマ線	燃料有効部	0.6	36.8	14.1	85.7	11.6	14.1	8.3
		構造材放射化	7.6	216.6	179.7	17.4	25.5	14.6	84.1
		二次ガンマ線	1.1	9.7	5.4	18.3	8.6	5.9	6.6
	中 性 子	375.3	33.1	380.6	25.5	1343.3	561.5	120.3	
	合 計	384.6	296.2	579.8	146.9	<u>1389.0</u> [1.4] (注)	596.1	219.3	
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	1.0	22.7	24.2	41.3	34.0	27.9	4.6
		構造材放射化	31.9	41.3	25.6	10.5	27.7	20.4	46.4
		二次ガンマ線	0.2	4.3	4.5	7.6	4.5	4.1	1.9
	中 性 子	51.0	12.0	22.9	11.0	10.4	30.1	31.6	
	合 計	84.1	80.3	77.2	70.4	76.6	82.5	<u>84.5</u> [85] (注)	

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

[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（設置（変更）許可時の別途確認事項）である。

遮蔽解析条件

1. 使用済燃料集合体の放射線源強度について

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源強度、別紙 1-4 表に中性子源強度、別紙 1-5 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 1-6 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。

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 1.17MeV 及び 1.33MeV がそれぞれ 50%である。

なお、遮蔽評価においては、モデル化する燃料集合体各領域の放射化ガンマ線源、燃料有効部からのガンマ線源及び中性子源のそれぞれの線源強度について、17×17 燃料の A 型と B 型のうち必ずしも一方の型式が他方すべてを包絡しておらず、また、線源となる燃料集合体各領域の軸方向の位置も異なるため、A 型と B 型のどちらが線量当量率が大きくなるかは、線量当量率の評価位置によって異なる。そのため、遮蔽評価においては 24 体すべてを A 型燃料としたケースと、すべてを B 型燃料としたケースの両方を評価する。燃料タイプの違いによる線量当量率への影響については、それぞれの燃料を全数収納した条件で線量当量率の差異が最大となるため、A 型と B 型を混載した場合には燃料タイプの違いによる線量当量率の差異は緩和され、これらのいずれかの評価結果に包絡される。

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。	燃焼条件：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 軸方向燃焼度分布：別紙 1-1 図参照 実効増倍率：0.24（別紙 2 参照）
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 いて 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 : 照射期間 (日) (別紙 1-2 表参照) T ₂ : 冷却期間 (日) (別紙 1-2 表参照)
中性子源スペクトル	—	²³⁹ Pu の核分裂スペクトル(別紙 1-6 表参照(注))

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

別紙 1-2 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条件

項 目		17×17 燃料		
		A 型	B 型	
燃焼度 (MWd/t)	中央部	48,000		
	外周部	44,000		
平均比出力 (MW/t) (注 1)				
照射 期間 (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	
ウラン重量 (kg/体)				
軸方向燃焼度分布 (注 3) (ピーキングファクター : PF)				

(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。

内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 1-3 表 (1/2) 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源強度 (A 型)
(Hitz-P24 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) (注)		
	中央部	外周部	合計
上部ノズル部	1.524×10^1 (1.133×10^1)	3.649×10^0	1.889×10^1 (1.133×10^1)
上部プレナム部	3.138×10^1 (6.011×10^0)	2.367×10^1	5.505×10^1 (6.011×10^0)
燃料有効部	3.318×10^2 (2.210×10^2)	1.034×10^2	4.352×10^2 (2.210×10^2)
下部プレナム部	2.146×10^0	2.002×10^0	4.147×10^0
下部ノズル部	1.071×10^1	9.987×10^0	2.069×10^1



別紙 1-3 表 (2/2) 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源強度 (B 型)
(Hitz-P24 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) (注)		
	中央部	外周部	合計
上部ノズル部	2.009×10^1 (8.709×10^0)	1.062×10^1	3.071×10^1 (8.709×10^0)
上部プレナム部	5.212×10^1 (4.621×10^0)	4.431×10^1	9.644×10^1 (4.621×10^0)
燃料有効部	2.626×10^2 (1.699×10^2)	8.649×10^1	3.491×10^2 (1.699×10^2)
下部プレナム部	8.688×10^0	8.104×10^0	1.679×10^1
下部ノズル部	1.776×10^1	1.656×10^1	3.432×10^1



別紙 1-4 表 (1/2) 中性子源強度 (A 型)

(Hitz-P24 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 N_0 (n/s)	(α , n) 反応	9.355×10^7	7.464×10^7	1.682×10^8
	自発核分裂	4.897×10^9	3.353×10^9	8.249×10^9
	合 計	4.990×10^9	3.427×10^9	8.417×10^9
Hitz-P24 型の実効増倍率 k_{eff} (注)		0.24		
全中性子源強度 N_S (n/s)		6.566×10^9	4.510×10^9	1.108×10^{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-V.a コード) により評価して得られた結果である。

別紙 1-4 表 (2/2) 中性子源強度 (B 型)

(Hitz-P24 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 N_0 (n/s)	(α , n) 反応	9.156×10^7	7.360×10^7	1.652×10^8
	自発核分裂	4.543×10^9	3.110×10^9	7.653×10^9
	合 計	4.634×10^9	3.184×10^9	7.818×10^9
Hitz-P24 型の実効増倍率 k_{eff} (注)		0.24		
全中性子源強度 N_S (n/s)		6.098×10^9	4.189×10^9	1.029×10^{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-V.a コード) により評価して得られた結果である。

別紙 1-5 表 (1/2) 燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線の線源強度 (A 型)

(Hitz-P24 型 1 基当たり)

エネルギー 群数	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部 (photons/s)		
		中央部	外周部	合 計
1	0.01	1.432×10^{16}	1.336×10^{16}	2.768×10^{16}
2	0.025	2.887×10^{15}	2.709×10^{15}	5.597×10^{15}
3	0.0375	3.727×10^{15}	3.444×10^{15}	7.170×10^{15}
4	0.0575	2.902×10^{15}	2.724×10^{15}	5.626×10^{15}
5	0.085	1.635×10^{15}	1.528×10^{15}	3.163×10^{15}
6	0.125	1.580×10^{15}	1.445×10^{15}	3.025×10^{15}
7	0.225	1.362×10^{15}	1.274×10^{15}	2.636×10^{15}
8	0.375	5.800×10^{14}	5.450×10^{14}	1.125×10^{15}
9	0.575	2.479×10^{16}	2.277×10^{16}	4.756×10^{16}
10	0.85	1.141×10^{15}	1.002×10^{15}	2.143×10^{15}
11	1.25	7.736×10^{14}	6.780×10^{14}	1.452×10^{15}
12	1.75	2.372×10^{13}	2.088×10^{13}	4.459×10^{13}
13	2.25	1.393×10^{10}	1.288×10^{10}	2.681×10^{10}
14	2.75	6.946×10^9	5.808×10^9	1.275×10^{10}
15	3.5	6.761×10^8	5.038×10^8	1.180×10^9
16	5.0	2.151×10^8	1.474×10^8	3.625×10^8
17	7.0	2.480×10^7	1.700×10^7	4.180×10^7
18	9.5	2.849×10^6	1.952×10^6	4.802×10^6
合 計		5.572×10^{16}	5.150×10^{16}	1.072×10^{17}

別紙 1-5 表 (2/2) 燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線の線源強度 (B 型)

(Hitz-P24 型 1 基当たり)

エネルギー 群数	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部 (photons/s)		
		中央部	外周部	合 計
1	0.01	1.361×10^{16}	1.270×10^{16}	2.630×10^{16}
2	0.025	2.718×10^{15}	2.552×10^{15}	5.270×10^{15}
3	0.0375	3.493×10^{15}	3.231×10^{15}	6.724×10^{15}
4	0.0575	2.780×10^{15}	2.611×10^{15}	5.391×10^{15}
5	0.085	1.532×10^{15}	1.433×10^{15}	2.965×10^{15}
6	0.125	1.436×10^{15}	1.315×10^{15}	2.751×10^{15}
7	0.225	1.283×10^{15}	1.201×10^{15}	2.484×10^{15}
8	0.375	5.369×10^{14}	5.049×10^{14}	1.042×10^{15}
9	0.575	2.338×10^{16}	2.148×10^{16}	4.486×10^{16}
10	0.85	8.409×10^{14}	7.398×10^{14}	1.581×10^{15}
11	1.25	6.520×10^{14}	5.717×10^{14}	1.224×10^{15}
12	1.75	2.039×10^{13}	1.796×10^{13}	3.835×10^{13}
13	2.25	4.028×10^9	3.548×10^9	7.576×10^9
14	2.75	5.962×10^9	4.910×10^9	1.087×10^{10}
15	3.5	5.104×10^8	3.600×10^8	8.703×10^8
16	5.0	1.996×10^8	1.368×10^8	3.363×10^8
17	7.0	2.301×10^7	1.577×10^7	3.878×10^7
18	9.5	2.644×10^6	1.811×10^6	4.455×10^6
合 計		5.228×10^{16}	4.836×10^{16}	1.006×10^{17}

別紙 1-6 表 (1/6) 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	1.9640×10^7	0.0000×10^0
2	1.7333×10^7	7.1068×10^{-6}
3	1.6905×10^7	7.1168×10^{-6}
4	1.6487×10^7	2.3679×10^{-5}
5	1.5683×10^7	3.8351×10^{-5}
6	1.4918×10^7	2.6859×10^{-5}
7	1.4550×10^7	3.3510×10^{-5}
8	1.4191×10^7	4.1648×10^{-5}
9	1.3840×10^7	5.1106×10^{-5}
10	1.3499×10^7	1.3919×10^{-4}
11	1.2840×10^7	1.0178×10^{-4}
12	1.2523×10^7	1.0173×10^{-4}
13	1.2214×10^7	2.9166×10^{-4}
14	1.1618×10^7	4.0815×10^{-4}
15	1.1052×10^7	5.6132×10^{-4}
16	1.0513×10^7	7.5714×10^{-4}
17	1.0000×10^7	1.0017×10^{-3}
18	9.5123×10^6	1.3031×10^{-3}
19	9.0484×10^6	1.6677×10^{-3}
20	8.6071×10^6	2.1011×10^{-3}
21	8.1873×10^6	2.6077×10^{-3}
22	7.7880×10^6	3.1908×10^{-3}
23	7.4082×10^6	3.8525×10^{-3}
24	7.0469×10^6	4.5922×10^{-3}
25	6.7032×10^6	1.7082×10^{-3}
26	6.5924×10^6	3.6982×10^{-3}
27	6.3763×10^6	6.2932×10^{-3}
28	6.0653×10^6	7.2431×10^{-3}
29	5.7695×10^6	8.2509×10^{-3}
30	5.4881×10^6	9.3018×10^{-3}

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

別紙 1-6 表 (2/6) 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)
31	5.2205×10^6	1.0392×10^{-2}
32	4.9659×10^6	1.1505×10^{-2}
33	4.7237×10^6	1.2627×10^{-2}
34	4.4933×10^6	2.8588×10^{-2}
35	4.0657×10^6	3.2856×10^{-2}
36	3.6788×10^6	3.6741×10^{-2}
37	3.3287×10^6	1.9654×10^{-2}
38	3.1664×10^6	2.0424×10^{-2}
39	3.0119×10^6	2.1082×10^{-2}
40	2.8650×10^6	2.1652×10^{-2}
41	2.7253×10^6	2.2135×10^{-2}
42	2.5924×10^6	2.2516×10^{-2}
43	2.4660×10^6	1.5172×10^{-2}
44	2.3852×10^6	3.8325×10^{-3}
45	2.3653×10^6	3.8122×10^{-3}
46	2.3457×10^6	7.6572×10^{-3}
47	2.3069×10^6	1.5347×10^{-2}
48	2.2313×10^6	2.3101×10^{-2}
49	2.1225×10^6	2.3115×10^{-2}
50	2.0190×10^6	2.3053×10^{-2}
51	1.9205×10^6	2.2901×10^{-2}
52	1.8268×10^6	2.2666×10^{-2}
53	1.7377×10^6	2.2355×10^{-2}
54	1.6530×10^6	2.2004×10^{-2}
55	1.5724×10^6	2.1598×10^{-2}
56	1.4957×10^6	2.1145×10^{-2}
57	1.4227×10^6	2.0594×10^{-2}
58	1.3534×10^6	2.0103×10^{-2}
59	1.2873×10^6	1.9470×10^{-2}
60	1.2246×10^6	1.8918×10^{-2}

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

別紙 1-6 表 (3/6) 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)
61	1.1648×10 ⁶	1.8267×10 ⁻²
62	1.1080×10 ⁶	3.4600×10 ⁻²
63	1.0026×10 ⁶	1.3667×10 ⁻²
64	9.6164×10 ⁵	1.8336×10 ⁻²
65	9.0718×10 ⁵	1.5015×10 ⁻²
66	8.6294×10 ⁵	1.4367×10 ⁻²
67	8.2085×10 ⁵	1.3721×10 ⁻²
68	7.8082×10 ⁵	1.3089×10 ⁻²
69	7.4274×10 ⁵	1.2471×10 ⁻²
70	7.0651×10 ⁵	1.1860×10 ⁻²
71	6.7206×10 ⁵	1.1273×10 ⁻²
72	6.3928×10 ⁵	1.0699×10 ⁻²
73	6.0810×10 ⁵	1.0143×10 ⁻²
74	5.7844×10 ⁵	9.6048×10 ⁻³
75	5.5023×10 ⁵	9.0856×10 ⁻³
76	5.2340×10 ⁵	8.5905×10 ⁻³
77	4.9787×10 ⁵	1.5764×10 ⁻²
78	4.5049×10 ⁵	1.4011×10 ⁻²
79	4.0762×10 ⁵	6.3973×10 ⁻³
80	3.8774×10 ⁵	6.0174×10 ⁻³
81	3.6883×10 ⁵	1.0970×10 ⁻²
82	3.3373×10 ⁵	9.6698×10 ⁻³
83	3.0197×10 ⁵	1.0399×10 ⁻³
84	2.9850×10 ⁵	3.8871×10 ⁻⁴
85	2.9720×10 ⁵	7.9979×10 ⁻⁴
86	2.9452×10 ⁵	2.1589×10 ⁻³
87	2.8725×10 ⁵	4.1145×10 ⁻³
88	2.7324×10 ⁵	7.4626×10 ⁻³
89	2.4724×10 ⁵	3.3784×10 ⁻³
90	2.3518×10 ⁵	3.1601×10 ⁻³

(注) ²³⁹Pu の核分裂スペクトルを MATXSLIB-J33 ライブラリの中性子
175 群構造に振り分けたものである。

別紙 1-6 表 (4/6) 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)
91	2.2371×10^5	2.9551×10^{-3}
92	2.1280×10^5	2.7629×10^{-3}
93	2.0242×10^5	2.5808×10^{-3}
94	1.9255×10^5	2.4112×10^{-3}
95	1.8316×10^5	2.2536×10^{-3}
96	1.7422×10^5	2.1003×10^{-3}
97	1.6573×10^5	1.9635×10^{-3}
98	1.5764×10^5	1.8282×10^{-3}
99	1.4996×10^5	1.7085×10^{-3}
100	1.4264×10^5	1.5902×10^{-3}
101	1.3569×10^5	1.4845×10^{-3}
102	1.2907×10^5	1.3841×10^{-3}
103	1.2277×10^5	1.2870×10^{-3}
104	1.1679×10^5	1.2015×10^{-3}
105	1.1109×10^5	2.6529×10^{-3}
106	9.8037×10^4	2.2188×10^{-3}
107	8.6517×10^4	7.4464×10^{-4}
108	8.2500×10^4	5.4581×10^{-4}
109	7.9500×10^4	1.3244×10^{-3}
110	7.2000×10^4	7.8610×10^{-4}
111	6.7379×10^4	1.7442×10^{-3}
112	5.6562×10^4	6.2161×10^{-4}
113	5.2475×10^4	8.9579×10^{-4}
114	4.6309×10^4	7.4565×10^{-4}
115	4.0868×10^4	8.3838×10^{-4}
116	3.4307×10^4	2.9816×10^{-4}
117	3.1828×10^4	3.8306×10^{-4}
118	2.8500×10^4	1.6590×10^{-4}
119	2.7000×10^4	1.0196×10^{-4}
120	2.6058×10^4	1.3467×10^{-4}

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

別紙 1-6 表 (5/6) 中性子源スペクトル

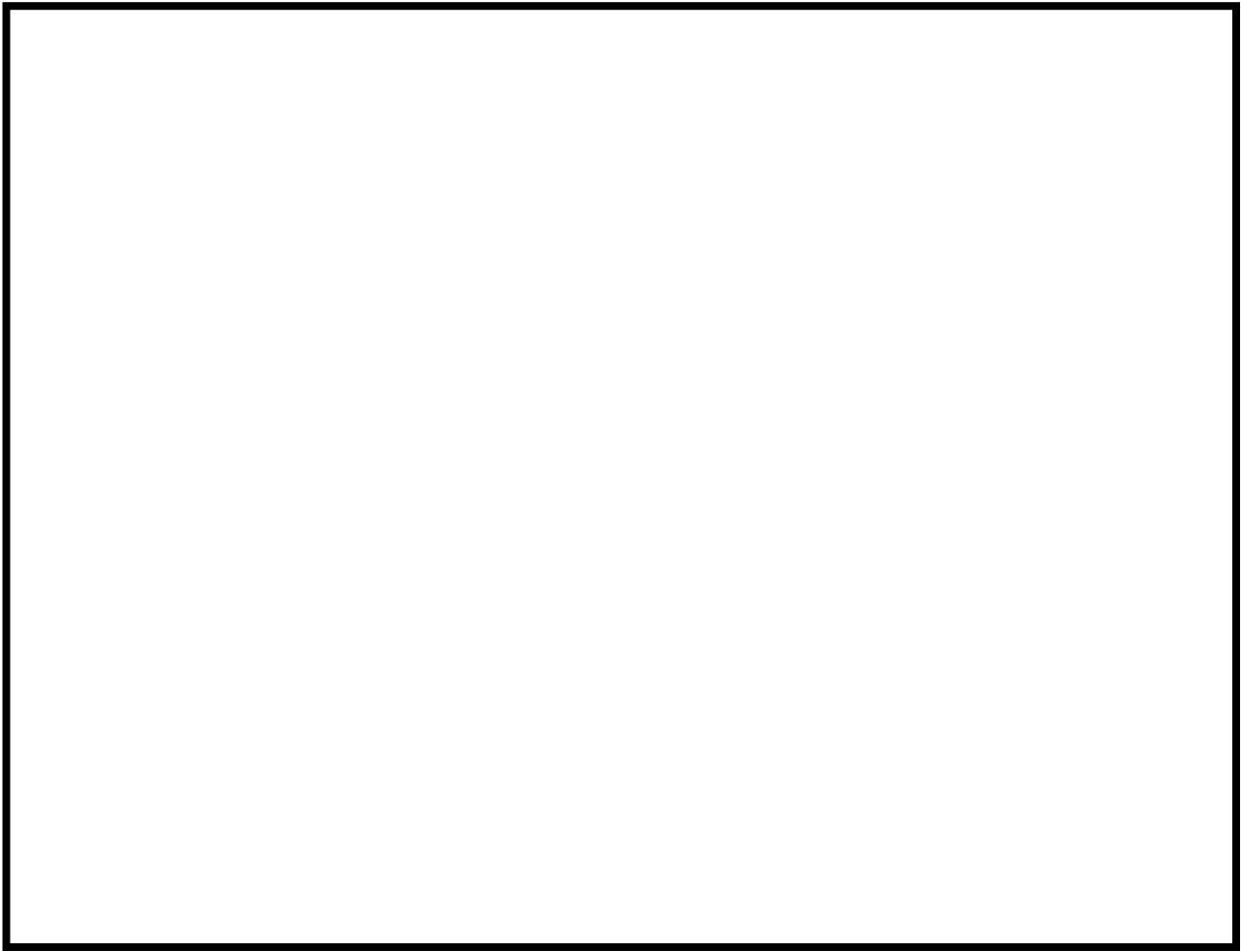
エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル (注)
121	2.4788×10^4	6.3727×10^{-5}
122	2.4176×10^4	6.1419×10^{-5}
123	2.3579×10^4	1.7116×10^{-4}
124	2.1875×10^4	2.4606×10^{-4}
125	1.9305×10^4	3.7413×10^{-4}
126	1.5034×10^4	2.5774×10^{-4}
127	1.1709×10^4	7.1002×10^{-5}
128	1.0595×10^4	1.0656×10^{-4}
129	9.1188×10^3	1.2223×10^{-4}
130	7.1017×10^3	8.4112×10^{-5}
131	5.5308×10^3	5.7866×10^{-5}
132	4.3074×10^3	2.5643×10^{-5}
133	3.7074×10^3	1.4160×10^{-5}
134	3.3546×10^3	1.2189×10^{-5}
135	3.0354×10^3	1.0497×10^{-5}
136	2.7465×10^3	4.6848×10^{-6}
137	2.6126×10^3	4.3477×10^{-6}
138	2.4852×10^3	7.7780×10^{-6}
139	2.2487×10^3	6.6958×10^{-6}
140	2.0347×10^3	1.2941×10^{-5}
141	1.5846×10^3	8.8961×10^{-6}
142	1.2341×10^3	6.1158×10^{-6}
143	9.6112×10^2	4.2041×10^{-6}
144	7.4852×10^2	2.8898×10^{-6}
145	5.8295×10^2	1.9864×10^{-6}
146	4.5400×10^2	1.3652×10^{-6}
147	3.5358×10^2	9.3853×10^{-7}
148	2.7536×10^2	6.4498×10^{-7}
149	2.1445×10^2	4.4325×10^{-7}
150	1.6702×10^2	3.0474×10^{-7}

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


別紙 1-6 表 (6/6) 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)
151	1.3007×10^2	2.0940×10^{-7}
152	1.0130×10^2	1.4393×10^{-7}
153	7.8893×10^1	9.8925×10^{-8}
154	6.1442×10^1	6.7991×10^{-8}
155	4.7851×10^1	4.6727×10^{-8}
156	3.7267×10^1	3.2011×10^{-8}
157	2.9023×10^1	2.2183×10^{-8}
158	2.2603×10^1	1.5172×10^{-8}
159	1.7603×10^1	1.0425×10^{-8}
160	1.3710×10^1	7.1675×10^{-9}
161	1.0677×10^1	4.9253×10^{-9}
162	8.3153×10^0	3.3851×10^{-9}
163	6.4760×10^0	2.3267×10^{-9}
164	5.0435×10^0	1.5990×10^{-9}
165	3.9279×10^0	1.0991×10^{-9}
166	3.0590×10^0	7.6574×10^{-10}
167	2.3824×10^0	5.0871×10^{-10}
168	1.8554×10^0	3.5680×10^{-10}
169	1.4450×10^0	2.4520×10^{-10}
170	1.1254×10^0	1.6858×10^{-10}
171	8.7642×10^{-1}	1.1583×10^{-10}
172	6.8256×10^{-1}	7.9611×10^{-11}
173	5.3158×10^{-1}	5.4719×10^{-11}
174	4.1399×10^{-1}	1.0597×10^{-10}
175	1.0000×10^{-1}	1.4269×10^{-11}

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



別紙 1-1 図 軸方向燃焼度分布の設定 (17×17 燃料)

 内は商業機密のため、非公開とします。

2. 遮蔽解析のモデル化について

遮蔽解析モデル化の概要を別紙 1-2 図、解析モデル図を別紙 1-3 図に示す。遮蔽解析モデル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、Hitz-P24 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、バスケットプレートはリーマピン及びタイロッドにより固定されているため、線量当量率に影響する隙間が生じることはない。また、二次元モデルは、キャスク中心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。

(1) 燃料領域

別紙 1-4 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。

(2) バスケット外周部

別紙 1-4 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、別紙 1-5 図に示すとおり、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 1m 離れた位置の最大線量当量率を算出し、この値と同等に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。

(3) 胴、側部中性子遮蔽材及び外筒

別紙 1-4 図に示すとおり、円筒としてモデル化している。なお、側部中性子遮蔽材内部に伝熱フィン及びアルミニウム合金製のスペーサがある領域では、伝熱フィン及びスペーサ（空隙を含む）は側部中性子遮蔽材と均質化している。

(4) 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。

別紙 1-6 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。トランニオン部は、トランニオン中心を通る断面でトランニオン及びキャスク本体の一部を含めモデル化している。

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差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加減算して評価している。

(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。

・ 収納制限に対する解析条件の保守性

ーウラン濃縮度を最小値である wt% とする。

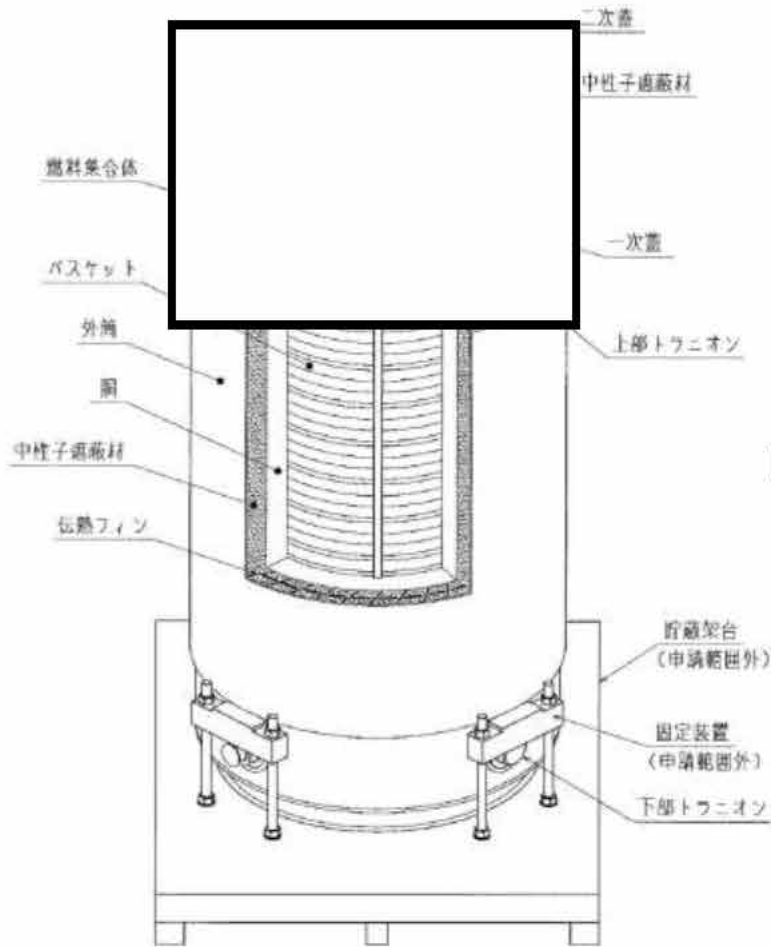
ー遮蔽評価においては、局所的な表面線量を評価する必要があるため、使用済燃料の燃焼度（集合体平均）は中央部、外周部共に当該配置の収納制限の最高燃焼度を設定している。

・ モデル化の保守性

ー各部の中性子遮蔽材は評価期間中の熱的影響により質量減損が発生する。遮蔽評価上は、計算した質量減損率に裕度を加えた保守的な質量減損を考慮（原子個数密度で考慮）する。（別紙 1「3. 中性子遮蔽材の質量減損について」参照）

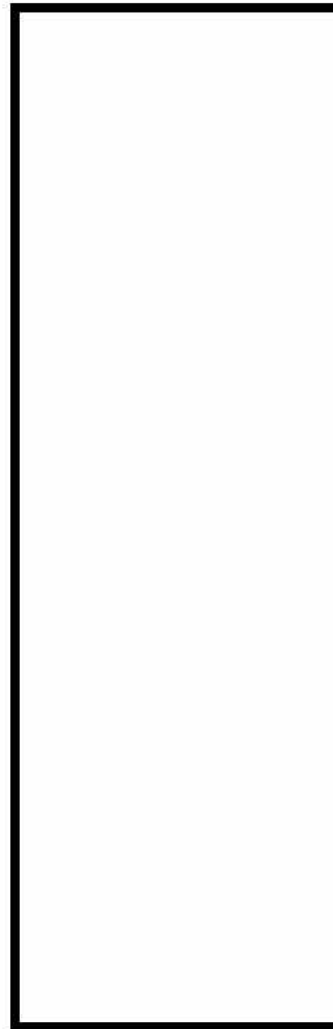
ー使用済燃料は、蓋方向、底部方向に移動したモデルとしており、線源である使用済燃料が評価点により近くなる設定としている。

ー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。



[実形状]

二次元
モデル化

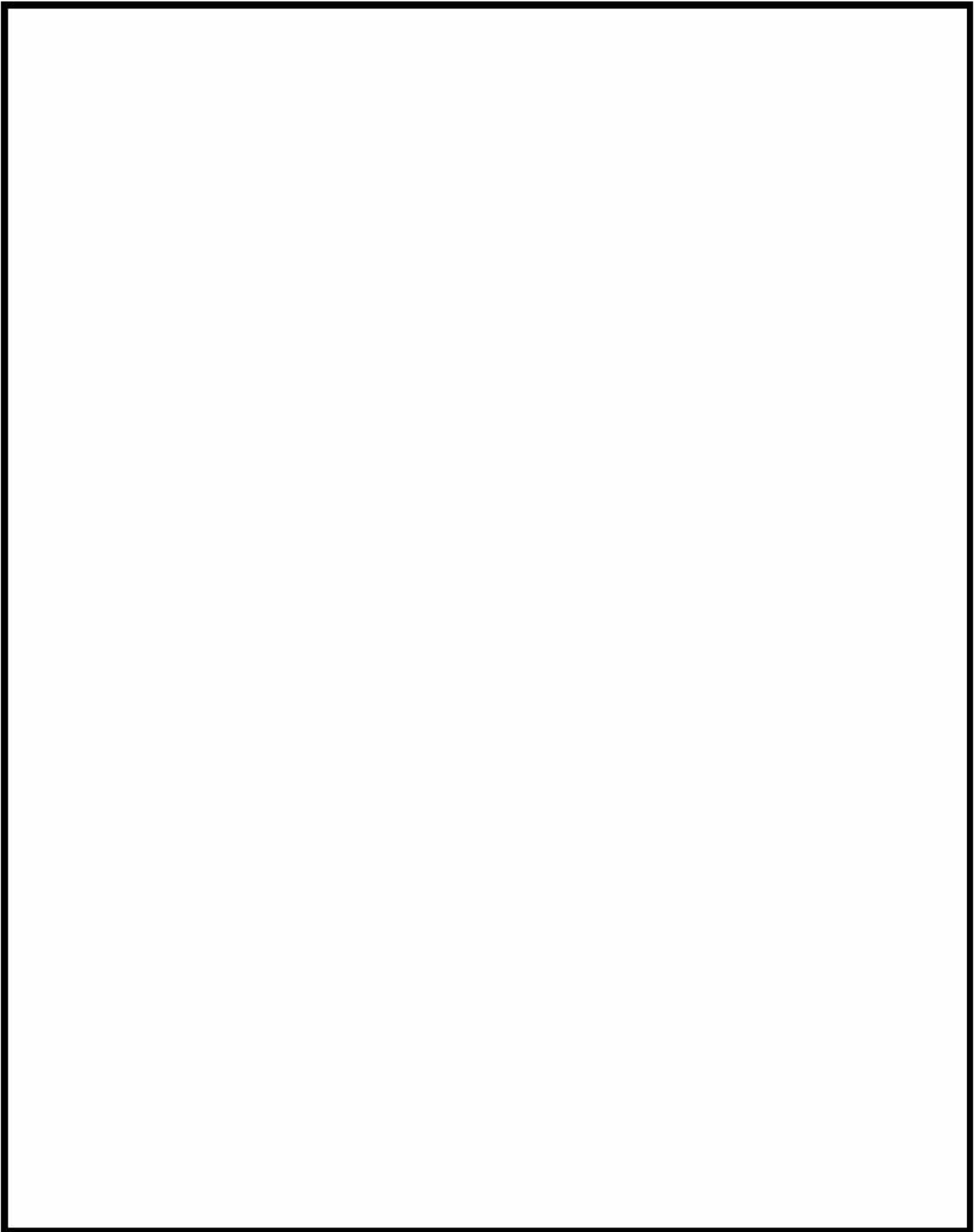


[二次元モデル化 (R-Z 体系)]

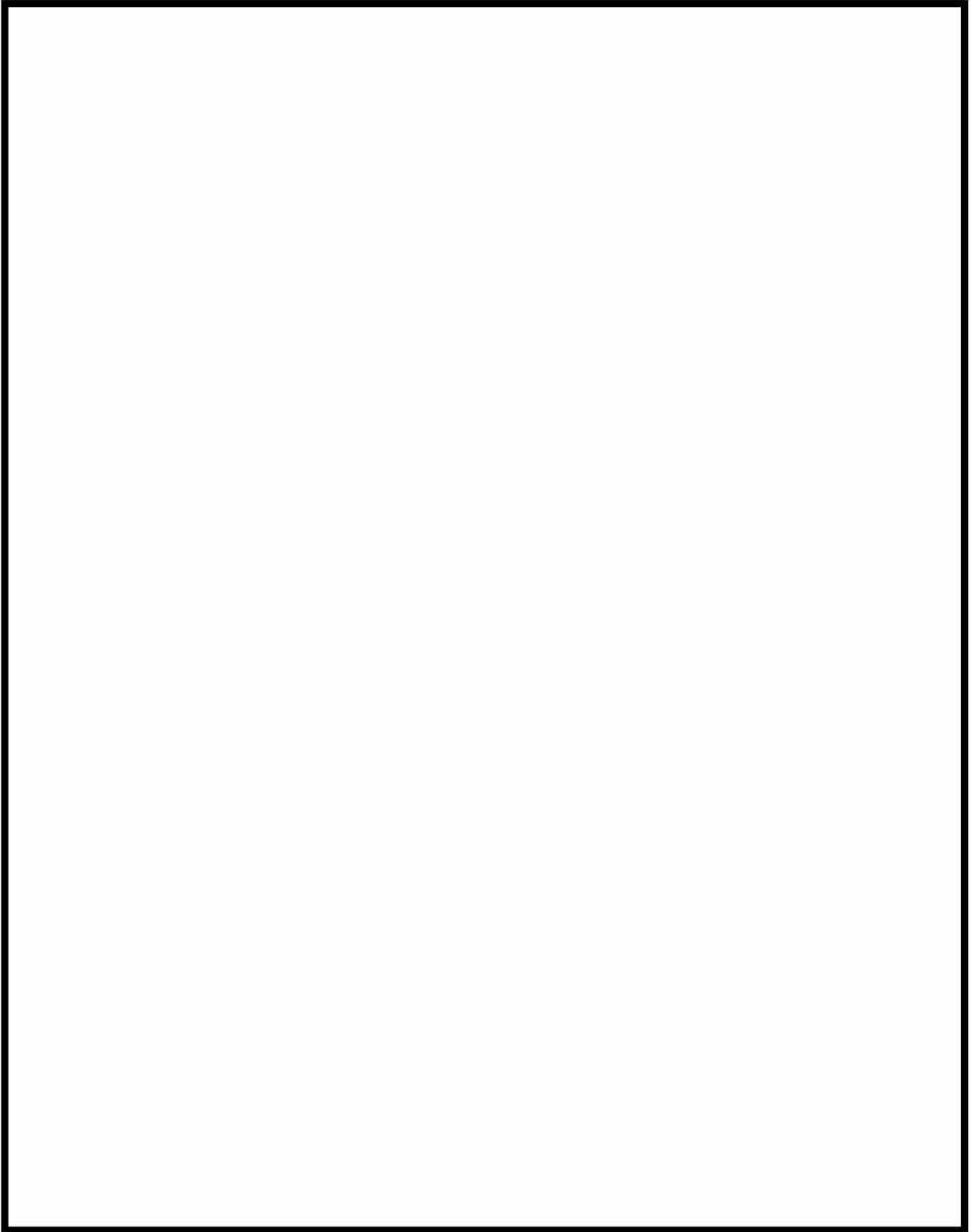
- : 燃料有効部中央+バスケット均質化領域
- : 燃料有効部外周+バスケット均質化領域
- : 燃料上部構造材中央+バスケット均質化領域
- : 燃料上部構造材外周+バスケット均質化領域
- : 燃料上部構造材中央
- : 燃料上部構造材外周
- : 燃料下部構造材中央+バスケット均質化領域
- : 燃料下部構造材外周+バスケット均質化領域
- : バスケット外周部
- : 中性子遮蔽材
- : 中性子遮蔽材+スペーサ均質化領域
- : 中性子遮蔽材+伝熱フィン+スペーサ均質化領域
- : 胴、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、底部中性子遮蔽材カバー、下部端板、支柱
- : 真空又は空気

別紙 1-2 図 遮蔽解析モデル化概要

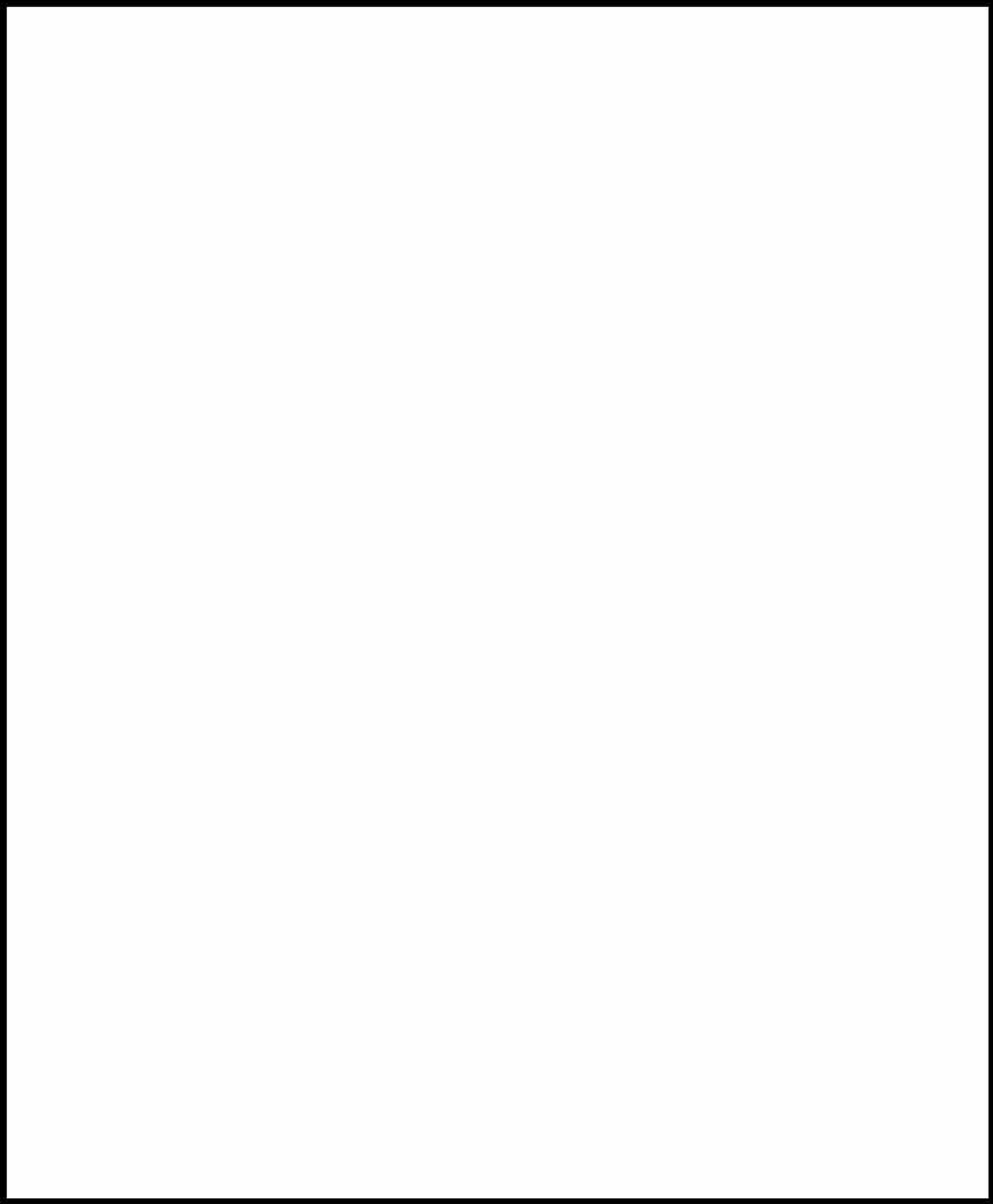
内は商業機密のため、非公開とします。



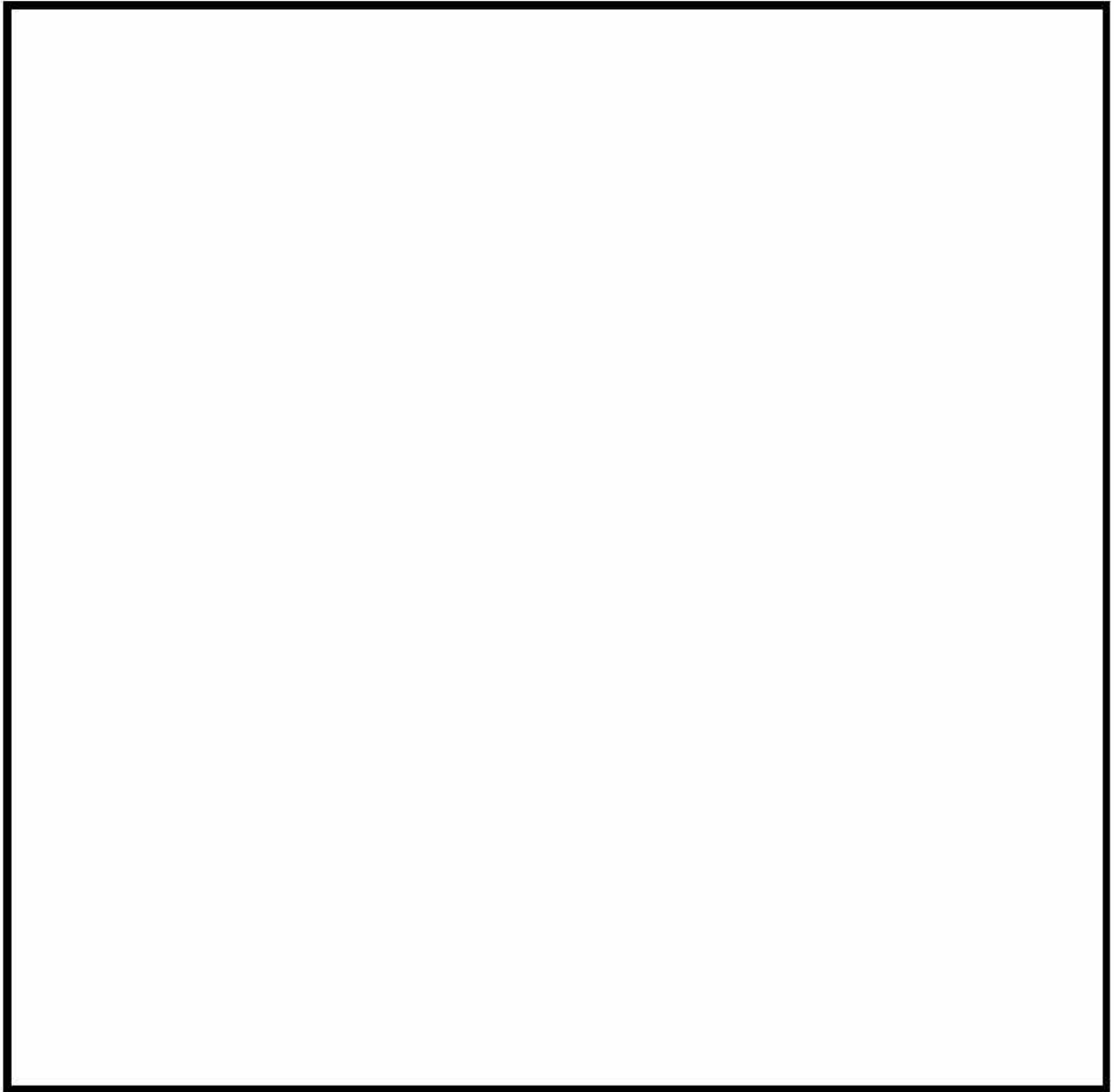
別紙 1-3 図 (1/4) 遮蔽解析モデル (頭部)



別紙 1-3 図 (2/4) 遮蔽解析モデル (底部)

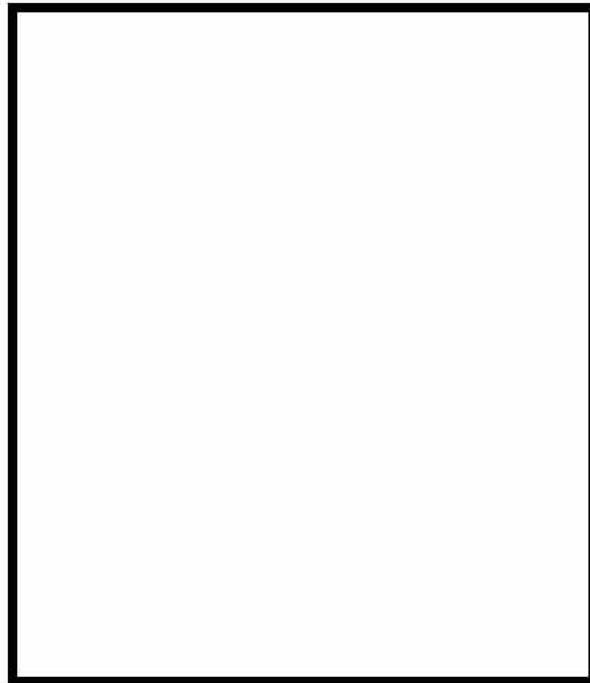


別紙 1-3 図 (3/4) 遮蔽解析モデル (トラニオン部)

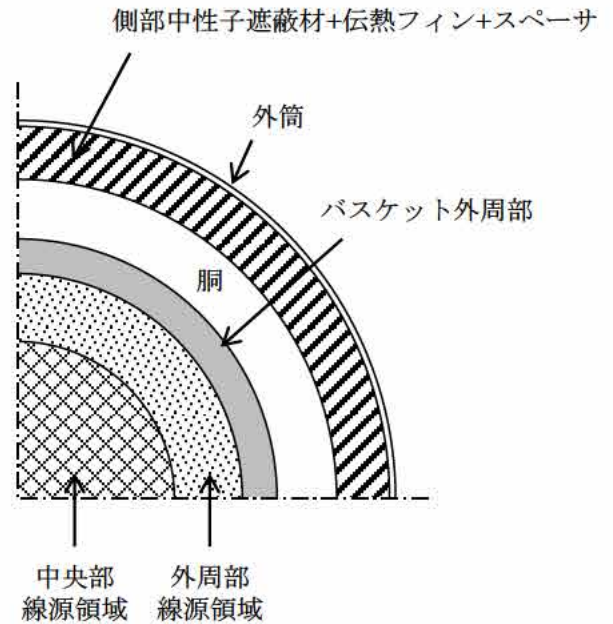


別紙 1-3 図 (4/4) 遮蔽解析モデル (モニタリングポート部)

 内は商業機密のため、非公開とします。



[実形状]



[二次元モデル(円筒モデル)]

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（燃料集合体が装荷される領域）として設定した断面積と等価な面積となる円（円筒）としてモデル化している。その際、燃料領域に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。バスケットプレートの []（補足説明資料 16-1「燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設（MA035B-SC-Z02 参照）」については、 []

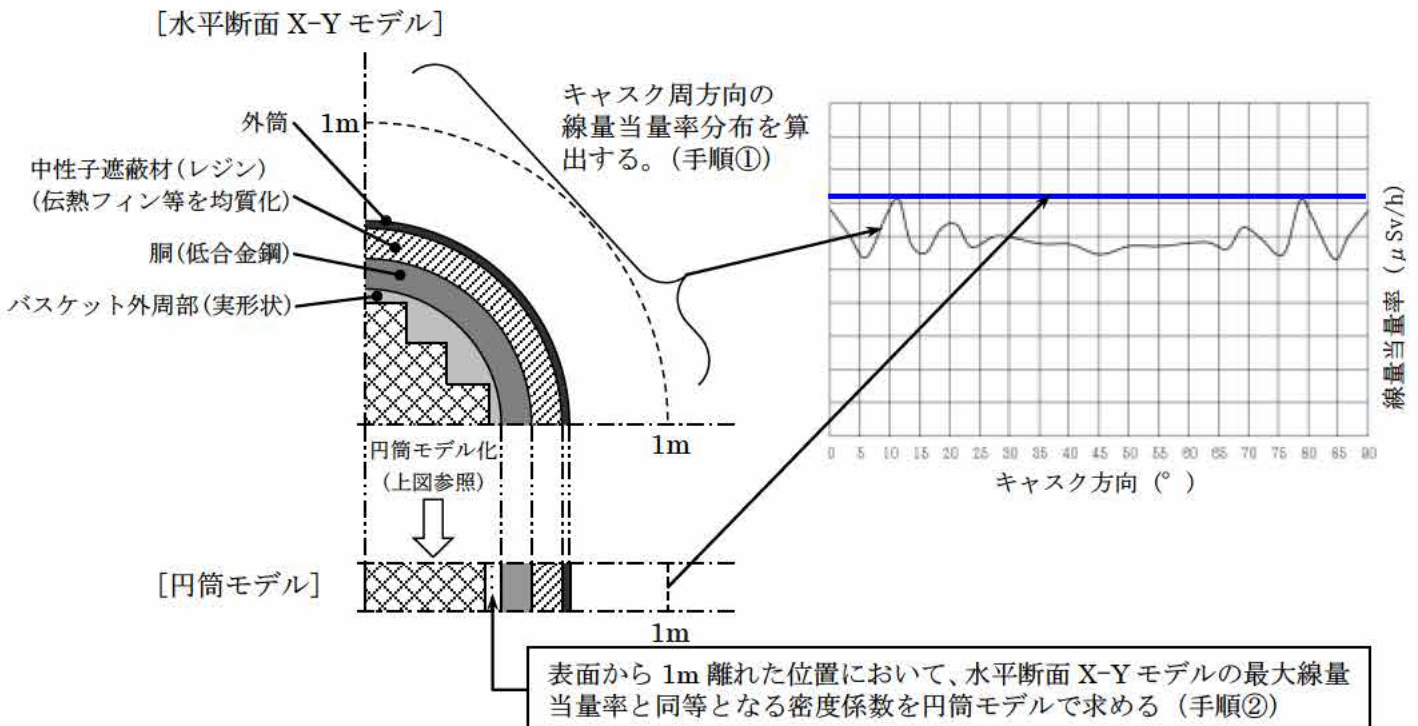
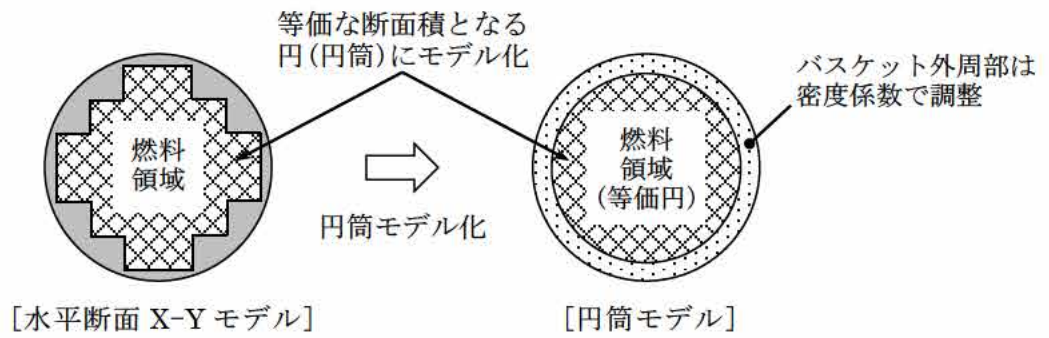
[]として保守的に考慮した。

燃料領域の物性値は中央部も外周部も同じであるが、線源強度の入力としては、中央部と外周部の線源領域を、それぞれ上記同様に等価な面積となる円（円筒）として、それぞれの領域に収納体数に合わせた線源強度を入力している。

また、中性子遮蔽材（レジン）は、当該領域のレジン、伝熱フィン、スペーサ（空隙を含む）の断面積比を用いて均質化した原子個数密度を入力している。

別紙 1-4 図 キャスク本体中央断面の実形状と解析モデル

[] 内は商業機密のため、非公開とします。



バスケット外周部の密度

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順により、バスケット外周部の密度を設定している。

手順① 水平断面 X-Y モデル遮蔽解析

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。

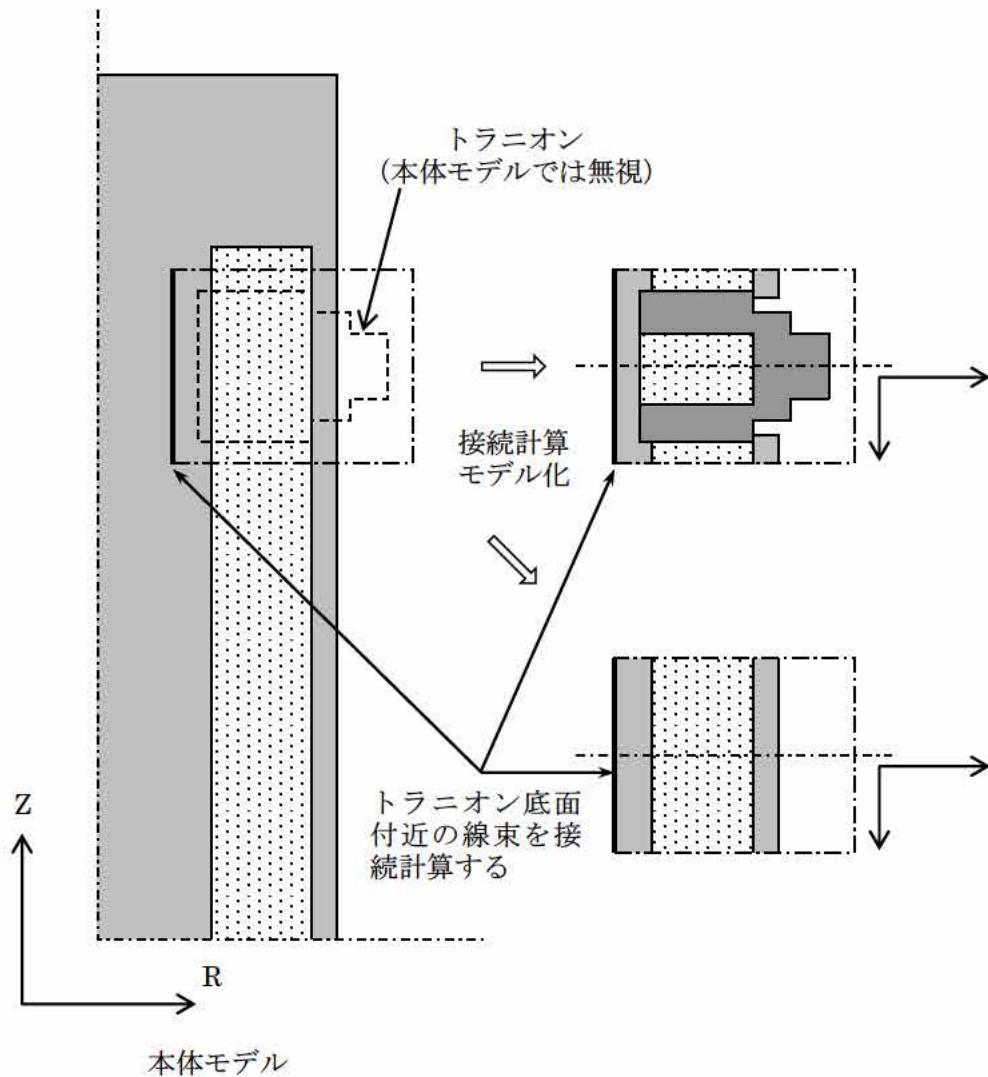
※ 算出位置を表面位置ではなく表面から 1m 離れた位置としているのは、表面位置に比べ評価基準に対する裕度が小さいためである。

手順② 円筒モデル

別紙 1-5 図により設定した円筒モデルにて、表面から 1m 離れた位置の線量当量率が、①で求め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求める。

手順②にて求めた密度係数を二次元モデルに用いることで、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 1-5 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



トランニオン部の評価方法

- 手順① トランニオンを無視した本体の二次元 (R-Z 体系) モデル (=本体モデル) によるトランニオン部の線量当量率を計算する。
- 手順② ①の計算で得られた、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部モデル (トランニオン有りモデル/トランニオン無しモデル) に接続し、表面及び表面から 1m 離れた位置の線量当量率を計算する。
- 手順③ ①、②の結果から下式により頭部径方向 (トランニオン部) 及び底部径方向 (トランニオン部) の線量当量率を算出する。

表面位置

評価結果 = トランニオン有りモデルの線量当量率

表面から 1m 離れた位置

評価結果 = (本体モデルの線量当量率) +
 {(トランニオン有りモデルの線量当量率) - (トランニオン無しモデルの線量当量率)}

別紙 1-6 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（長期健全性）に関する説明資料（MA035B-SC-F01）」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。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 18.7^{*1}$$

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)

設計貯蔵期間中の温度の低下を考慮し、設計貯蔵期間経過時までの中性子遮蔽材の減損率計算結果を保守的に丸め、蓋部中性子遮蔽材は 1.4%（減損率計算結果は 1.2%）、側部中性子遮蔽材は 1.6%（減損率計算結果は 1.5%）及び底部中性子遮蔽材は 2.0%（減損率計算結果は 1.9%）の減損があるとして評価した。

※1 : NUPEC 報告書⁽¹⁾ の評価式を 95%信頼性確度で再評価している。

4. 参考文献

- (1) (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 Hitz-P24 型の実効増倍率を求め、中性子源強度に考慮した。

$$N_S = N_O / (1 - keff)$$

ここで、

N_O : Hitz-P24 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 Hitz-P24 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期間が短い 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-V.a コードにより求めた。なお、考慮している核種⁽¹⁾は以下のとおりである。

アクチニド：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
ウラン重量 (kg/体)	□
初期濃縮度 (wt%)	□
燃焼度 (MWd/t)	44,000
比出力 (MW/t)	□
冷却期間 (年)	15
実効増倍率 (注)	□
遮蔽解析用実効増倍率	0.24

(注) 実効増倍率評価結果に統計誤差の 3 倍を加えた値。

(参考文献)

- (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：2013 (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。また、Hitz-P24 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、中性子源強度の大きい 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 (A 型)

(Hitz-P24 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 N_0 (n/s)	(α, n) 反応	9.355×10^7	7.464×10^7	1.682×10^8
	自発核分裂	4.897×10^9	3.353×10^9	8.249×10^9
	合 計	4.990×10^9	3.427×10^9	8.417×10^9

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

(参考文献)

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

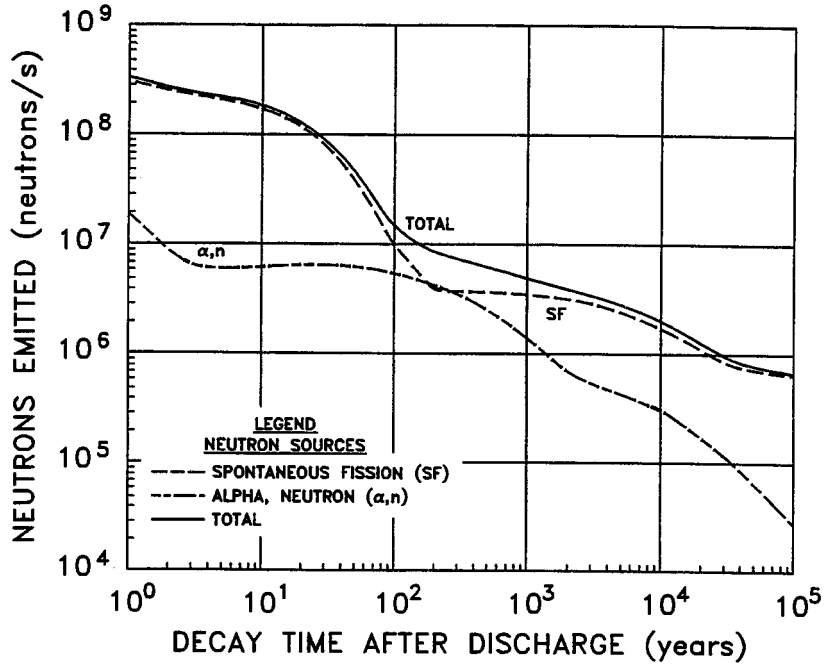


Fig. 9.2. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTIHM): PWR/33,000 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

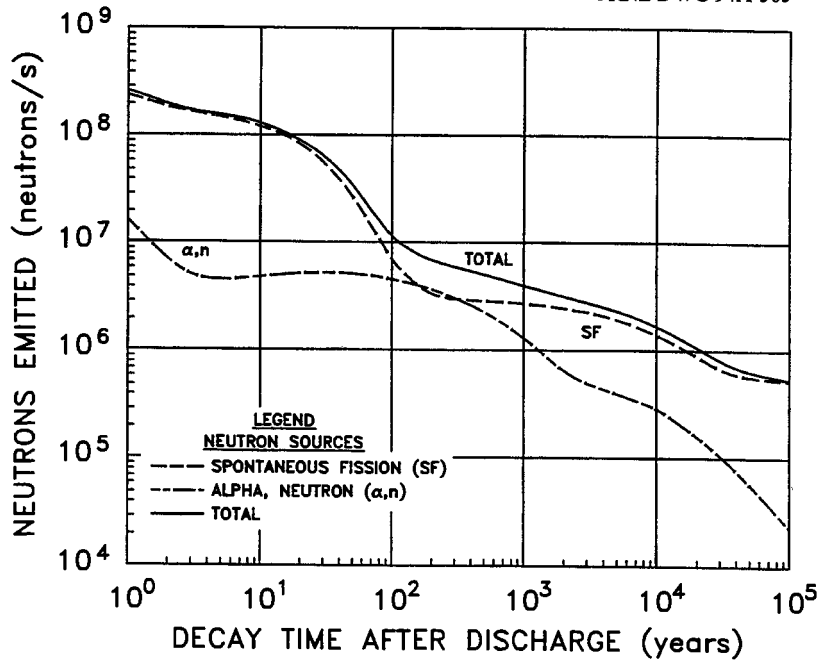
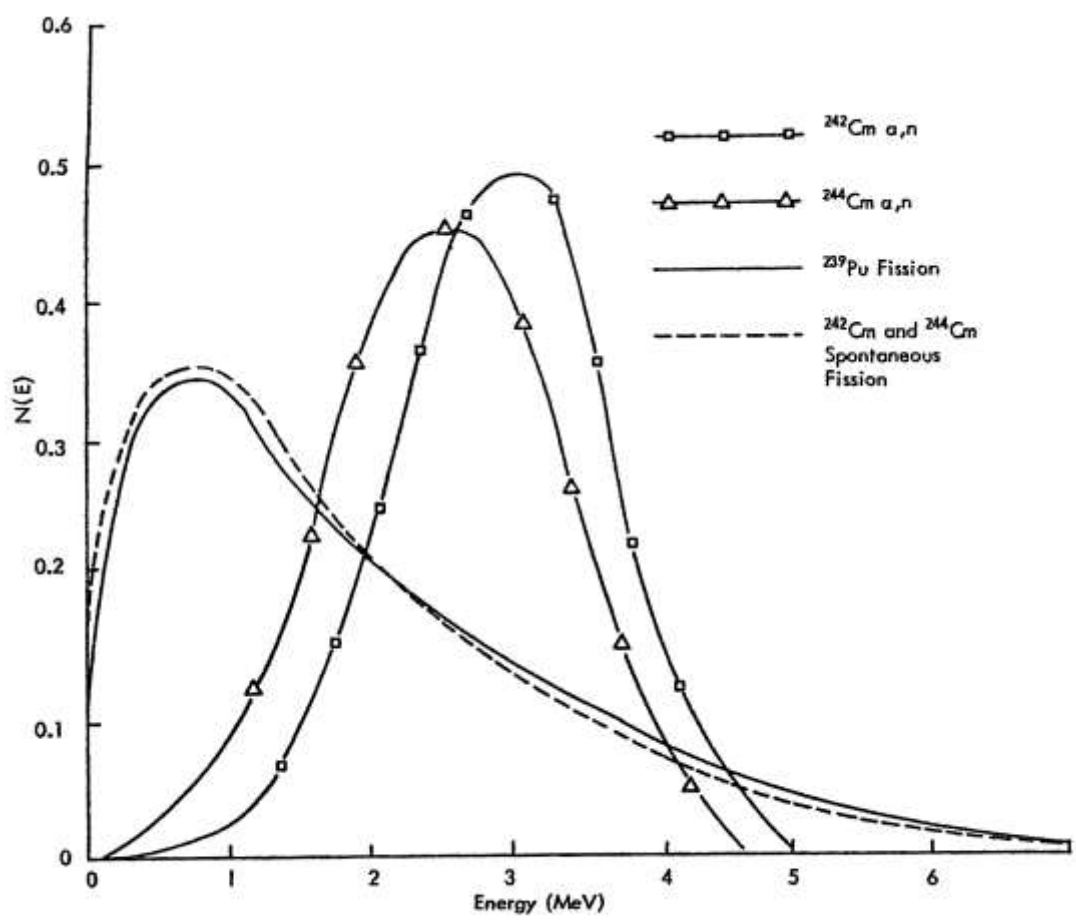


Fig. 9.3. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTIHM): BWR/27,500 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

別紙 3-1 図 使用済燃料の自発核分裂及び (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、及び ^{242}Cm 、 ^{244}Cm の自発核分裂中性子源スペクトルの比較 (2)

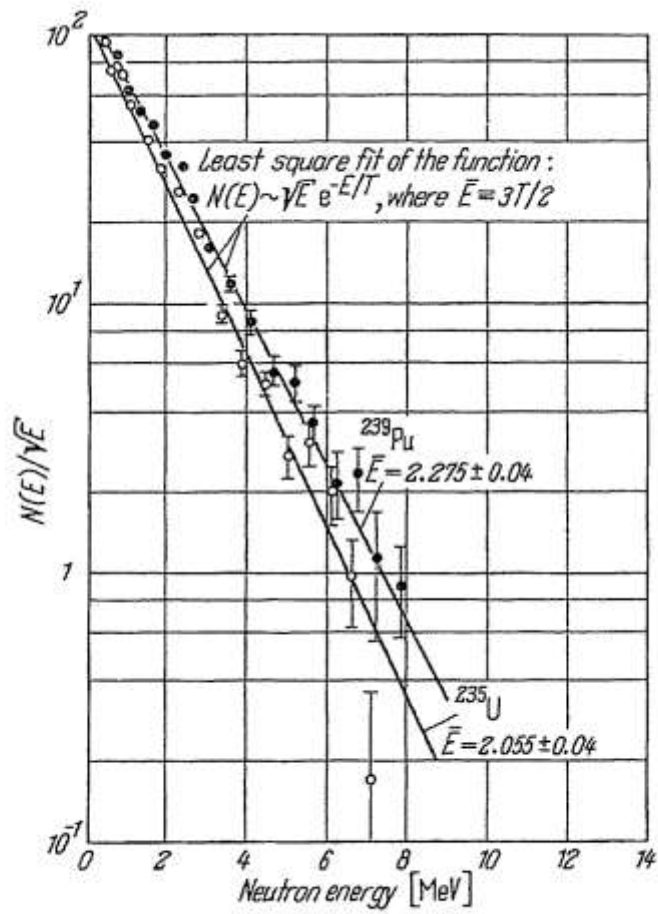


Fig. 2.3.-2. Typical measured fission neutron spectra of $^{235}\text{U} + n_{th}$ and $^{239}\text{Pu} + n_{th}$.

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

遮蔽解析結果の妥当性確認について (参考)

1. 線量当量率分布の確認

線束接続計算を行っている部位における、二次元輸送計算コード (DOT3.5) による解析結果 (線量当量率) の分布図を別紙 4-1 図に示す。線量当量率分布が連続であることが確認できる。

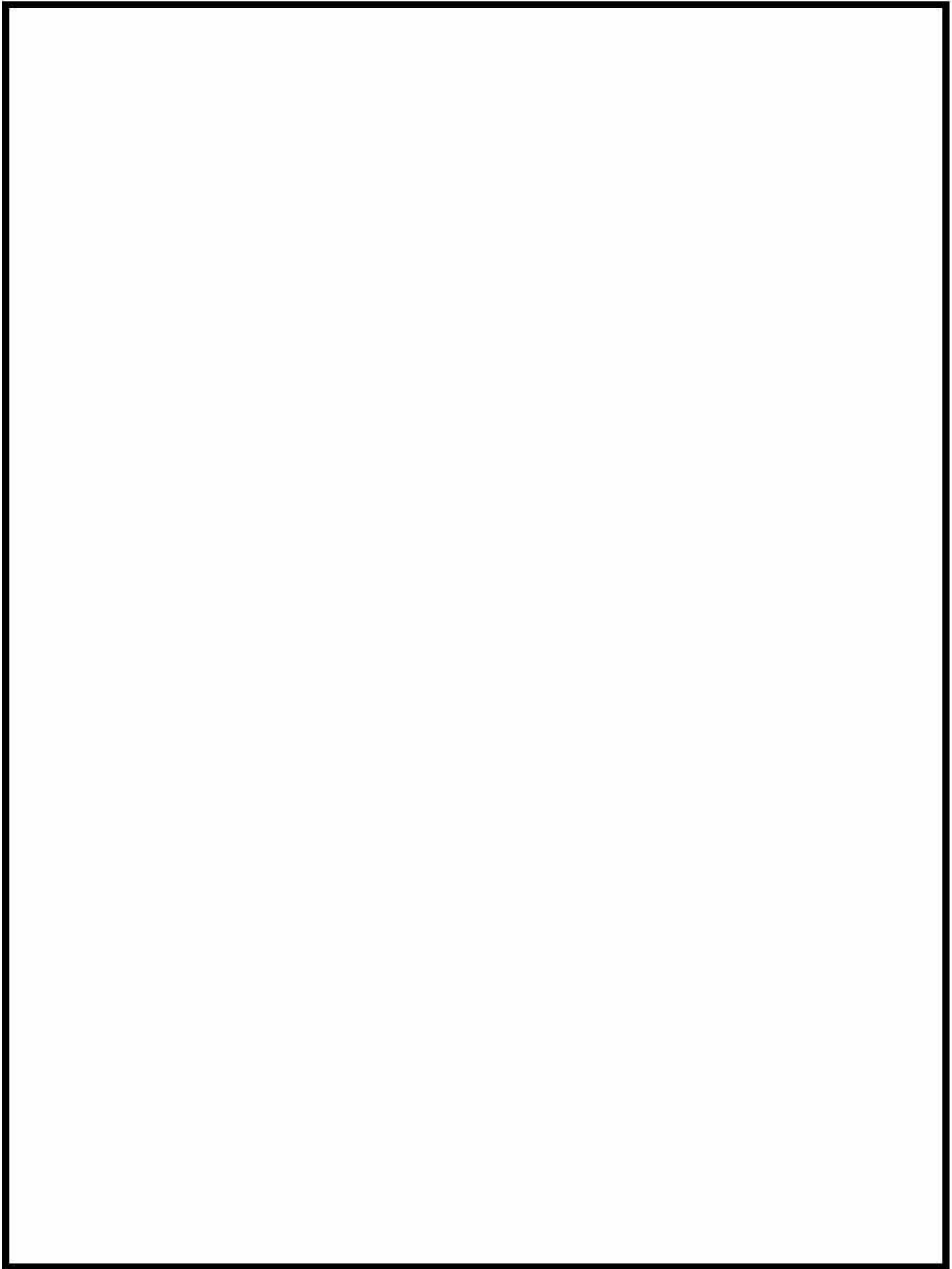
また、B 型収納時の結果には、下記 2.における三次元輸送計算コード (MCNP5) の結果についても比較として図示しており、両者の線量当量率分布は一致傾向にあることが確認できる。

なお、線束接続計算手法の詳細は添付 1 に示すとおりである。

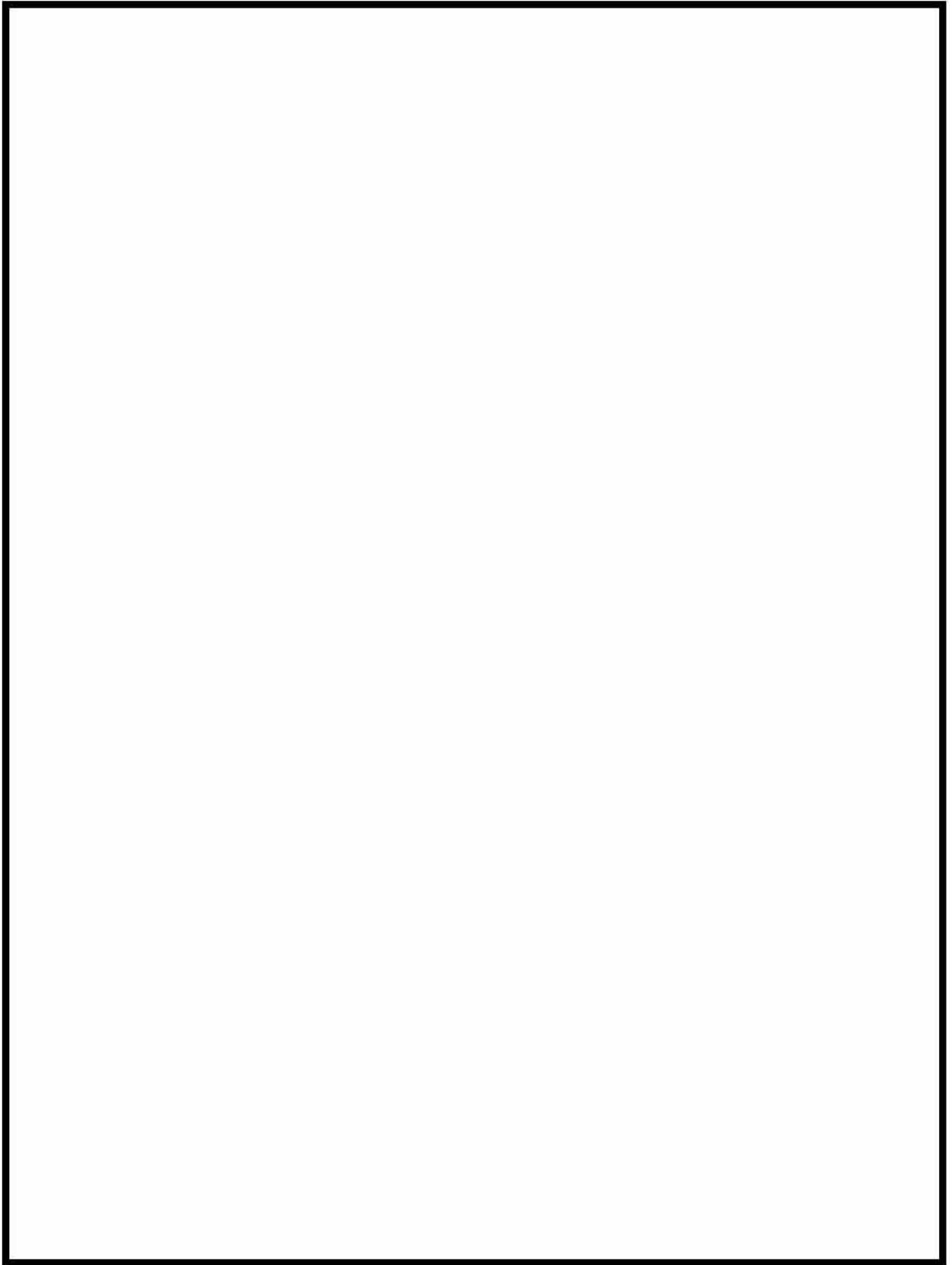
2. 三次元輸送計算コード (MCNP5) による解析結果との比較

二次元モデル設定 (線束接続計算の手法を含む) の妥当性を参考として確認するため、三次元輸送計算コード (MCNP5) を用いた解析結果との比較を行った。比較は、DOT3.5 を用いた解析結果で法令基準値に対して厳しい結果となった B 型燃料収納時で代表して行った。MCNP5 における解析モデルを別紙 4-2 図に示す。また、別紙 4-3 図に評価点位置を、別紙 4-1 表に DOT3.5 における解析結果の比較を示す。ここで、側部を 0°方向、頭部径方向のトラニオン方向 (0°、90°、180°及び 270°) ではない方向の代表を 22.5°方向としている理由については、別紙 4-2 表及び別紙 4-4 図に示すように、キャスク中央断面で代表した評価において、0°方向が最大であったこと、並びにトラニオン方向を除くと 22.5°方向が大きい結果となる傾向があったためである。これより、側部はトラニオン方向も含めた最大値として 0°方向、頭部径方向のトラニオン方向ではない方向は 22.5°方向を代表として、DOT3.5 の解析結果と比較した。両者の結果は一致傾向にあることが確認できる。

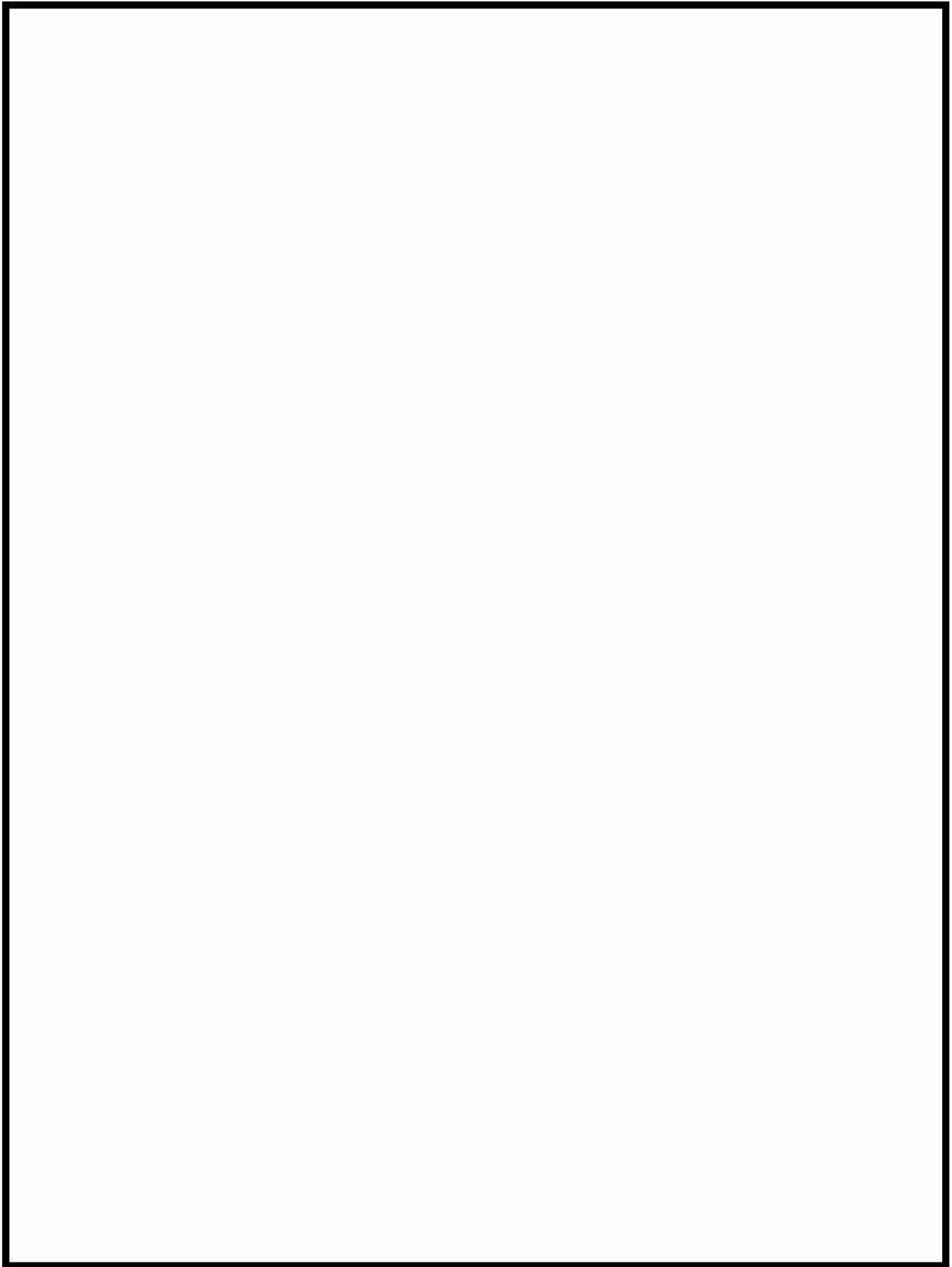
なお、MCNP5 の解析条件は別紙 4-3 表に示すとおりとした。



別紙 4-1 図 (1/3) 表面から 1m の位置における線量当量率分布 (頭部軸方向)



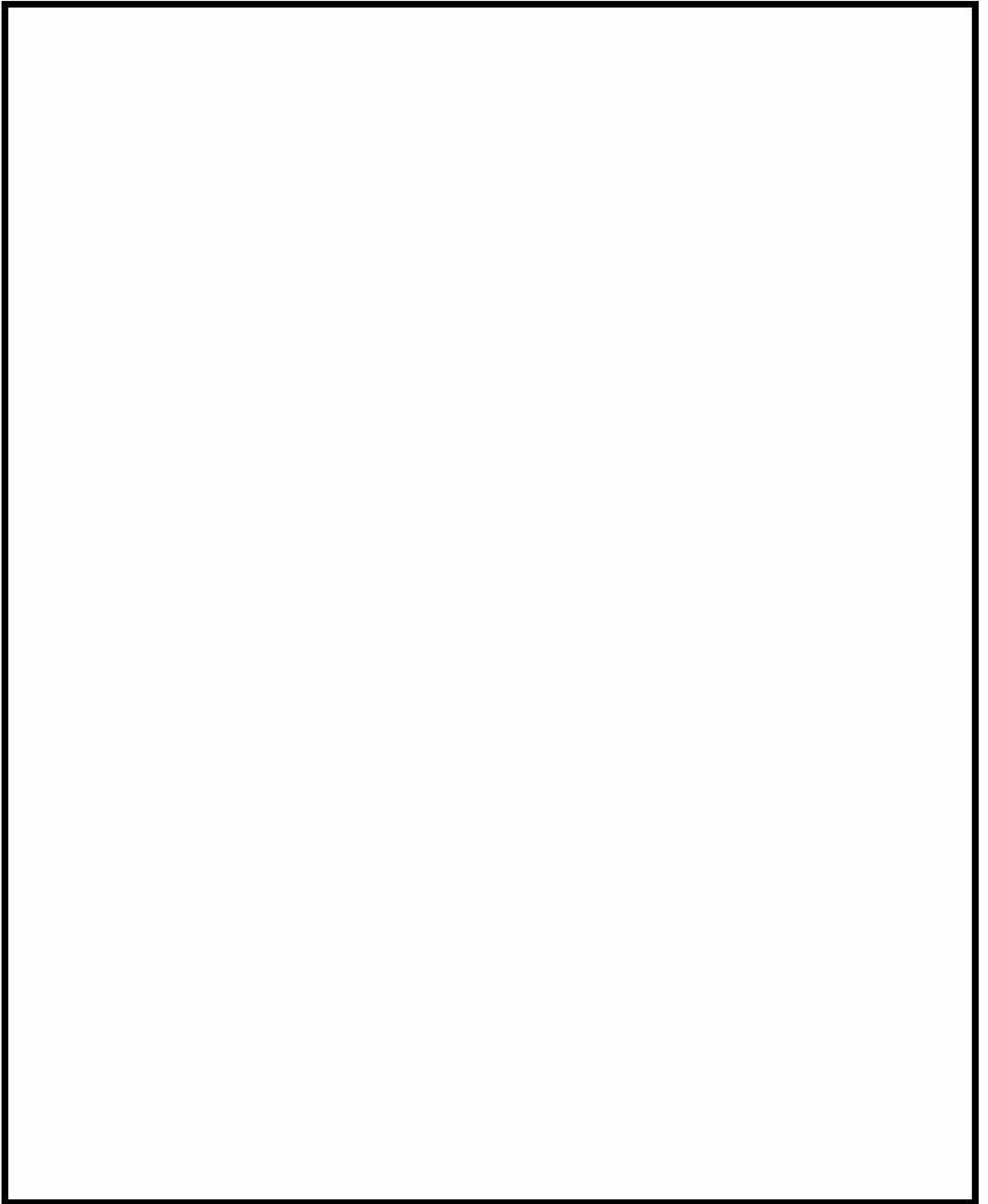
別紙 4-1 図 (2/3) 表面から 1m の位置における線量当量率分布 (頭部径方向)



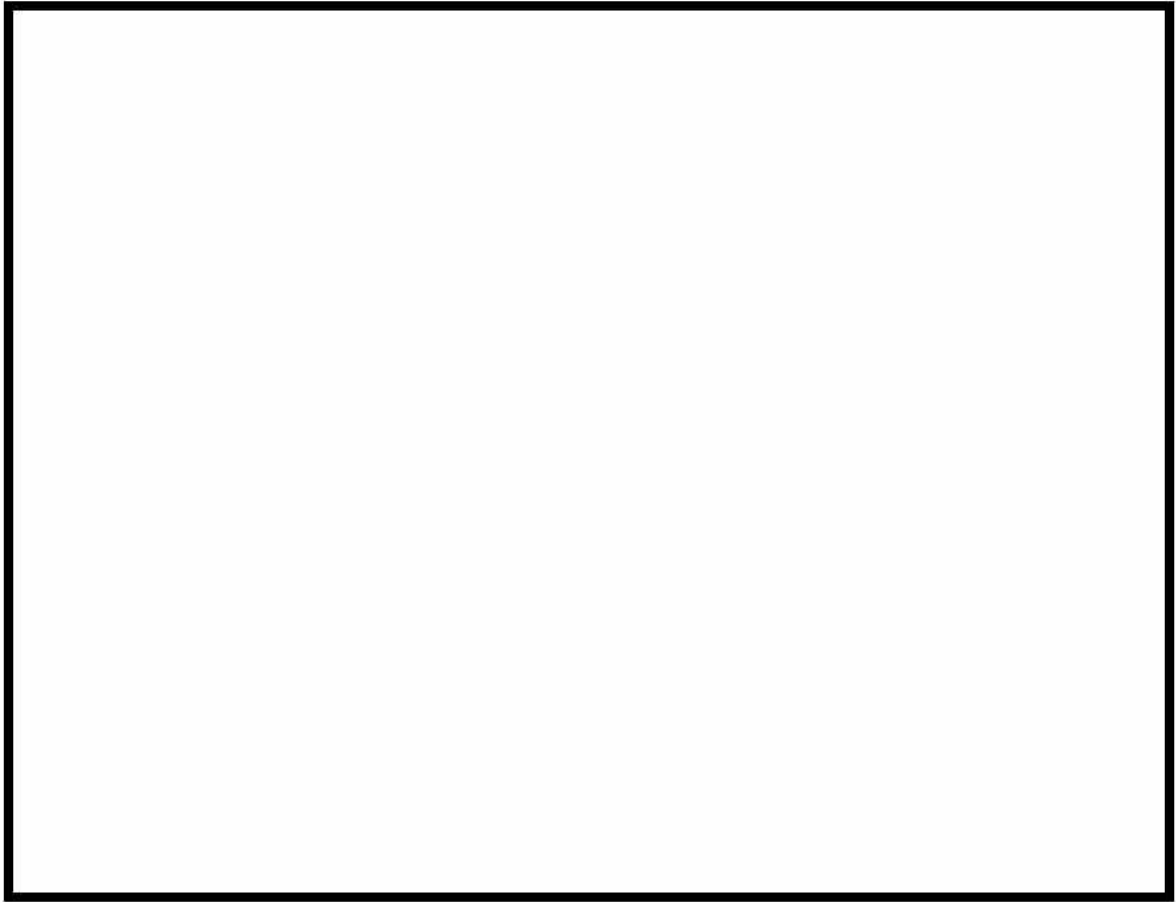
別紙 4-1 図 (3/3) 表面から 1m の位置における線量当量率分布 (底部径方向)




別紙 4-2 図 (1/5) 遮蔽解析モデル (三次元モデル、縦断面 : 0°-180°)

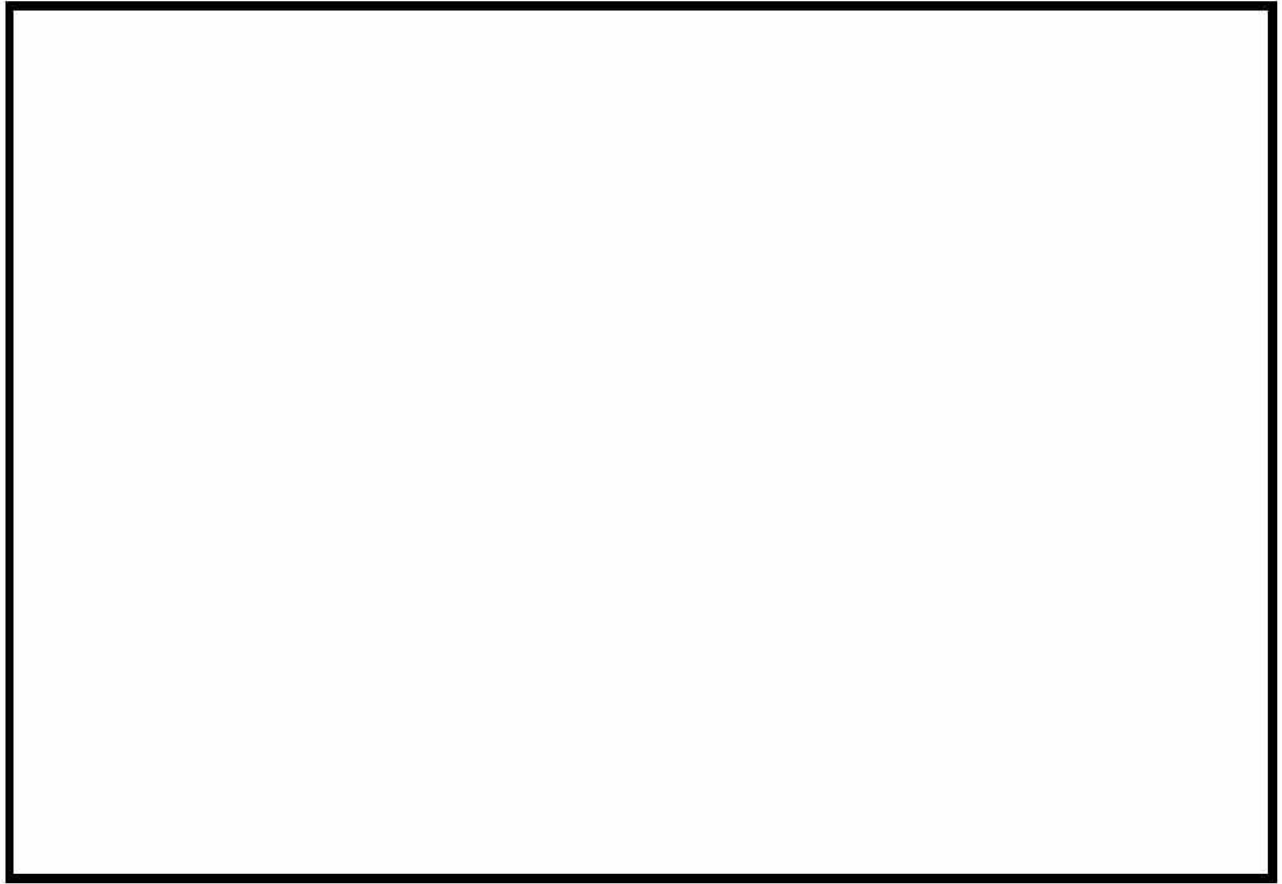


別紙 4-2 図 (2/5) 遮蔽解析モデル (三次元モデル、横断面)




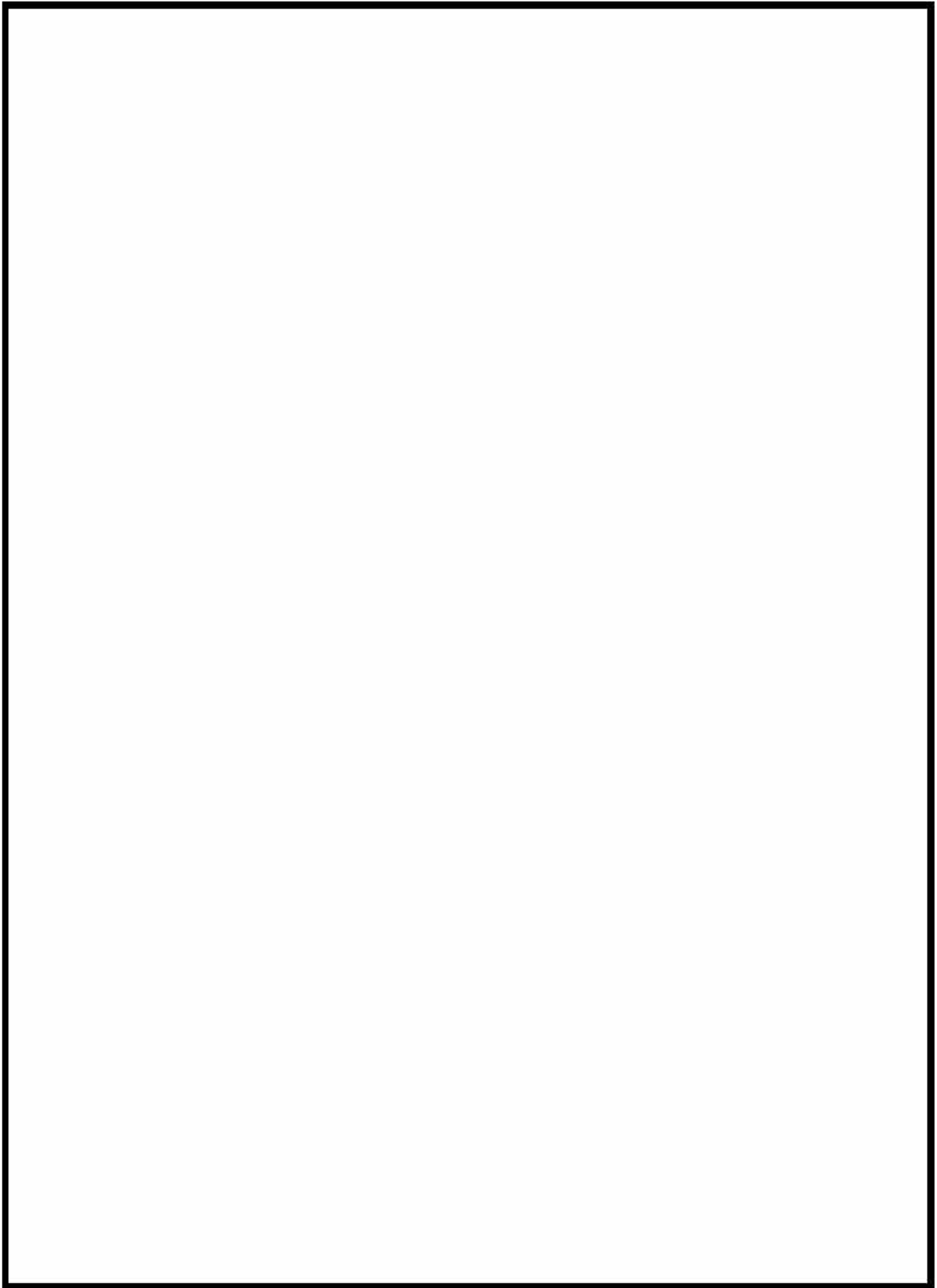
別紙 4-2 図 (3/5) 遮蔽解析モデル (三次元モデル、トラニオン部横断面 : 上部 90°-270°)

 内は商業機密のため、非公開とします。

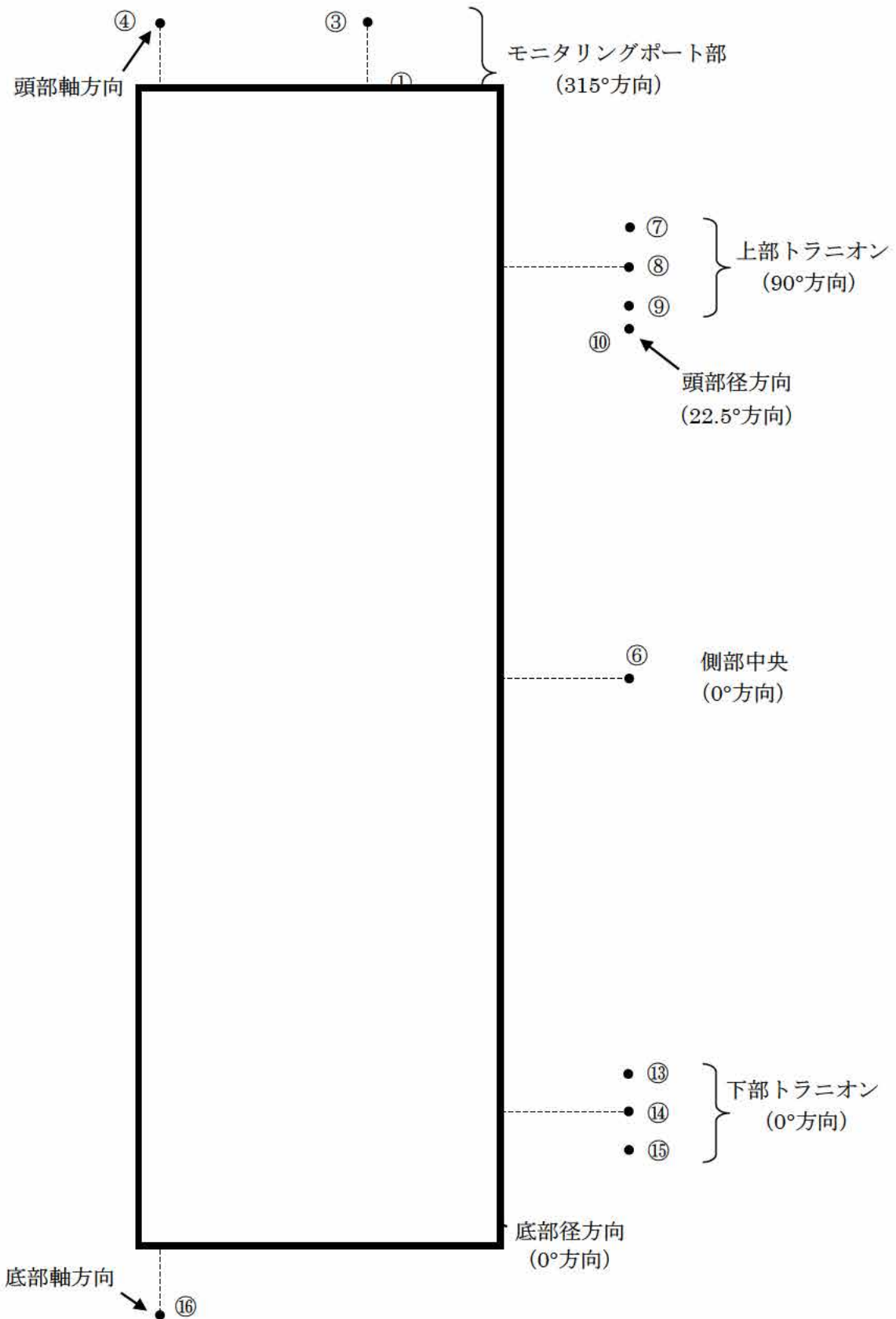


別紙 4-2 図 (4/5) 遮蔽解析モデル (三次元モデル、モニタリングポート部縦断面)

 内は商業機密のため、非公開とします。



別紙 4-2 図 (5/5) 遮蔽解析モデル (三次元モデル、バルブ部)



別紙 4-3 図 線量当量率評価点

別紙 4-1 表 (1/5) MCNP5 コード及び DOT3.5 コードの解析結果の比較
(単位 : $\mu\text{Sv/h}$)

	評価点		頭部軸方向			
			①	②	③	④
			表面		表面から 1m	
MCNP5 コード	ガンマ線	燃料有効部	< 0.1	0.2	0.4	1.0
		構造材放射化	0.3	5.0	14.2	36.4
		二次ガンマ線	0.9	1.3	0.2	0.3
	中性子		229.8	319.1	39.4	34.3
	合計		231.1	325.6	54.2	72.0
DOT3.5 コード	ガンマ線	燃料有効部	—	0.6	—	1.0
		構造材放射化	—	7.6	—	31.9
		二次ガンマ線	—	1.1	—	0.2
	中性子		—	375.3	—	51.0
	合計		—	384.6	—	84.1

別紙 4-1 表 (2/5) MCNP5 コード及び DOT3.5 コードの解析結果の比較
(単位 : $\mu\text{Sv/h}$)

	評価点		側部	
			⑤	⑥
			表面	表面から 1m
MCNP5 コード	ガンマ線	燃料有効部	68.2	34.1
		構造材放射化	12.7	7.7
		二次ガンマ線	17.8	7.3
	中性子		21.5	9.9
	合計		120.2	59.0
DOT3.5 コード	ガンマ線	燃料有効部	85.7	41.3
		構造材放射化	17.4	10.5
		二次ガンマ線	18.3	7.6
	中性子		25.5	11.0
	合計		146.9	70.4

別紙 4-1 表 (3/5) MCNP5 コード及び DOT3.5 コードの解析結果の比較

(単位 : $\mu\text{Sv/h}$)

	評価点		頭部径方向 (トラニオン部含む)			
			⑦	⑧	⑨	⑩
			表面から 1m			
MCNP5 コード	ガンマ線	燃料有効部	9.9	13.4	16.3	16.7
		構造材放射化	17.8	17.0	17.9	26.1
		二次ガンマ線	2.7	3.3	3.8	4.0
	中性子		19.4	19.8	18.9	11.9
	合計		49.8	53.5	56.9	58.7
DOT3.5 コード	ガンマ線	燃料有効部	24.2			22.7
		構造材放射化	25.6			41.3
		二次ガンマ線	4.5			4.3
	中性子		22.9			12.0
	合計		77.2			80.3

別紙 4-1 表 (4/5) MCNP5 コード及び DOT3.5 コードの解析結果の比較

(単位 : $\mu\text{Sv/h}$)

	評価点		底部径方向 (トラニオン部含む)				
			⑪	⑫	⑬	⑭	⑮
			表面		表面から 1m		
MCNP5 コード	ガンマ線	燃料有効部	3.2	23.7*	23.8	20.5	15.3
		構造材放射化	37.2	10.4*	13.5	13.3	12.7
		二次ガンマ線	7.2	8.7*	4.1	3.6	3.1
	中性子		915.2	520.3*	21.9	23.1	24.1
	合計		962.8	563.1*	63.3	60.5	55.2
DOT3.5 コード	ガンマ線	燃料有効部	11.6	14.1	27.9		
		構造材放射化	25.5	14.6	20.4		
		二次ガンマ線	8.6	5.9	4.1		
	中性子		1343.3	561.5	30.1		
	合計		1389.0	596.1	82.5		

* トラニオン部表面における評価には形状を鑑み Point Detector を使用した

別紙 4-1 表 (5/5) MCNP5 コード及び DOT3.5 コードの解析結果の比較

(単位 : $\mu\text{Sv/h}$)

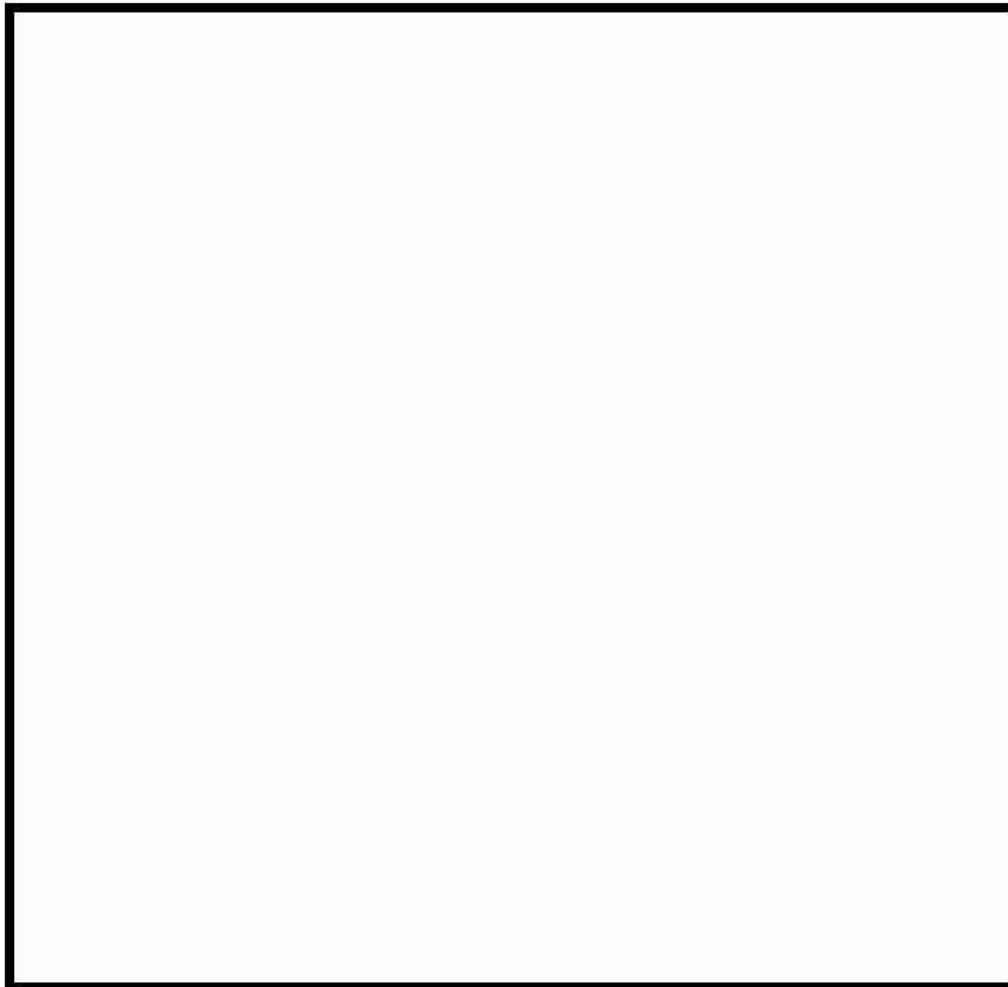
	評価点		底部軸方向
			⑩
			表面から 1m
MCNP5 コード	ガン マ 線	燃料有効部	4.3
		構造材放射化	52.8
		二次ガンマ線	2.0
	中性子		25.1
	合計		84.2
DOT3.5 コード	ガン マ 線	燃料有効部	4.6
		構造材放射化	46.4
		二次ガンマ線	1.9
	中性子		31.6
	合計		84.5

別紙 4-2 表 MCNP5 コードを用いた評価における Hitz-P24 型中央断面
の線量当量率（側部周方向）

（単位：μSv/h）

評価点		側部周方向（表面から 1m）					
		A	B	C	D	E	F
		0°	22.5°	33°	45°	67.5°	90°
ガンマ線	燃料有効部	34.1	31.5	27.3	24.4	30.7	33.3
	構造材放射化	7.7	7.3	7.0	6.9	7.3	7.8
	二次ガンマ線	7.3	7.4	7.4	7.5	7.4	7.3
中性子		9.9	9.1	8.5	8.6	9.2	9.9
合計		59.0	55.3	50.2	47.4	54.6	58.3

評価点 A は別紙 4-3 図の⑥と同じ評価点である。



別紙 4-4 図 側部周方向の線量当量率評価方向（Hitz-P24 型中央断面）

別紙 4-3 表 MCNP5 コードによる解析の主要な解析条件

項目	解析条件	備考
解析コード	MCNP5 1.60	
断面積ライブラリ	中性子：FSXLIB-J33 ガンマ線：MCPLIB84	
線源強度	二次元解析と同条件	
線源 スペクトル	中性子	Watt 型の ^{239}Pu 核分裂スペクトル (連続エネルギー)
	燃料有効部 ガンマ線	ORIGEN2 エネルギー群構造の ヒストグラム形式スペクトル
	構造材放射化 ガンマ線	1.17MeV：50% 1.33MeV：50%
評価モデル	基本的には二次元モデル同様の簡略化したモデルとするが、ガンマ線遮蔽材である鋼材、並びに中性子遮蔽材であるレジンの欠損部となるトラニオン、バルブ及びモニタリングポートについては、実形状を基に、考慮したモデル化とする。バスケットは実形状を基にモデル化し、使用済燃料集合体は燃料格子内で均質化する。	燃料集合体の軸方向位置やキャスク全長を短縮したモデル化は二次元モデル同様。
検出器	Track Length Estimator (体積検出器) 表面：半径 1cm の球形状 表面から 1m 位置：半径 10cm の球形状	キャスク表面の評価において、形状的に Track Length Estimator の適用が難しい場合には Point Detector を用いる。
分散低減法	線源カットオフ (注) エネルギーカットオフ ウェイト・ウィンドウ	
線量当量率変換係数	ICRP Publ.74 (log-log 補間)	
統計指標	統計誤差 10%以下 (目標値)	マニュアル推奨値

(注) 燃料有効部ガンマ線については、

_____線源カットオフを適用した。

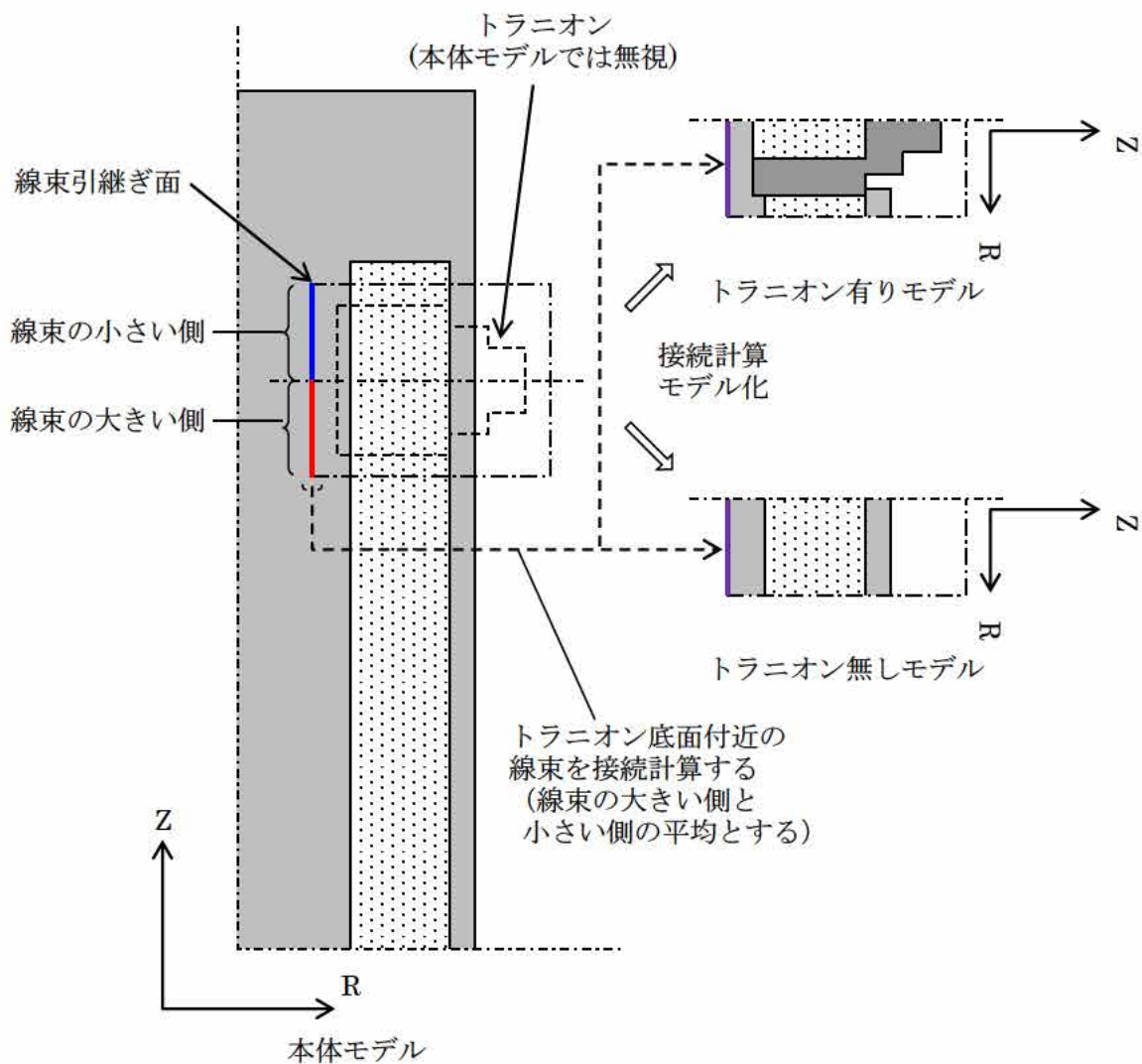
(添付 1) DOT3.5 コード解析における線束接続計算について

DOT3.5 コードを用いた遮蔽解析において、トラニオン部及びモニタリングポート部は実形状を模擬して別途モデル化し、評価している。

トラニオン部は別紙 4-5 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 体系のトラニオン部モデルに接続している。また、モニタリングポート部も同様に、別紙 4-6 図に示すとおり、一次蓋底面の線束を別途モデル化した R-Z 体系のモニタリングポート部モデルに接続している。

線束接続による線量当量率の計算は、表面位置については、部分モデルによる計算結果とし、表面から 1m 離れた位置については、トラニオンまたはモニタリングポートの有り／無しのモデルの線量当量率結果より、線種ごとの線量当量率の差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加減算して評価している。

本手法では解析コードの制約上、トラニオン部モデル及びモニタリングポート部モデル（以下、両者をあわせて「部分モデル」という。）はトラニオンまたはモニタリングポートの中心を対称とした円筒モデルとなる。部分モデルには、当該モデル底面の位置にあたる本体モデルの線束を引き継いで計算を行っている。このとき、本体モデルにおける当該位置の線束は、トラニオンまたはモニタリングポート中心を境界とした両側が同じとはならず、いずれか一方が大きい側（例えば、トラニオン部では燃料有効部に近い側）となり得る。部分モデルへの引き継ぎにおいては、この両側の線束の平均を部分モデルに適用した。これは、いずれか大きい側の線束のみを用いた過度に保守的な評価を避け、より現実的な評価結果が得られるためである（接続計算を用いた計算結果と三次元形状を模擬できる MCNP5 コードを用いた計算結果の比較は別紙 4-1 表に示したとおりである）。このように平均を用いることは、線束引き継ぎ面に近い位置（例えば、キャスク表面位置）では保守性が損なわれるおそれがあるが、表面最大線量当量率となる位置が部分モデルの中央に比較的近い位置であるため、平均した線束を用いることにより損なわれるおそれがある保守性は小さい。トラニオン部の表面において、接続計算を用いた計算結果と三次元形状を模擬した MCNP5 コードを用いた計算結果が概ね一致していることを確認している（別紙 4-1 表参照）。



線量当量率の評価方法

表面位置

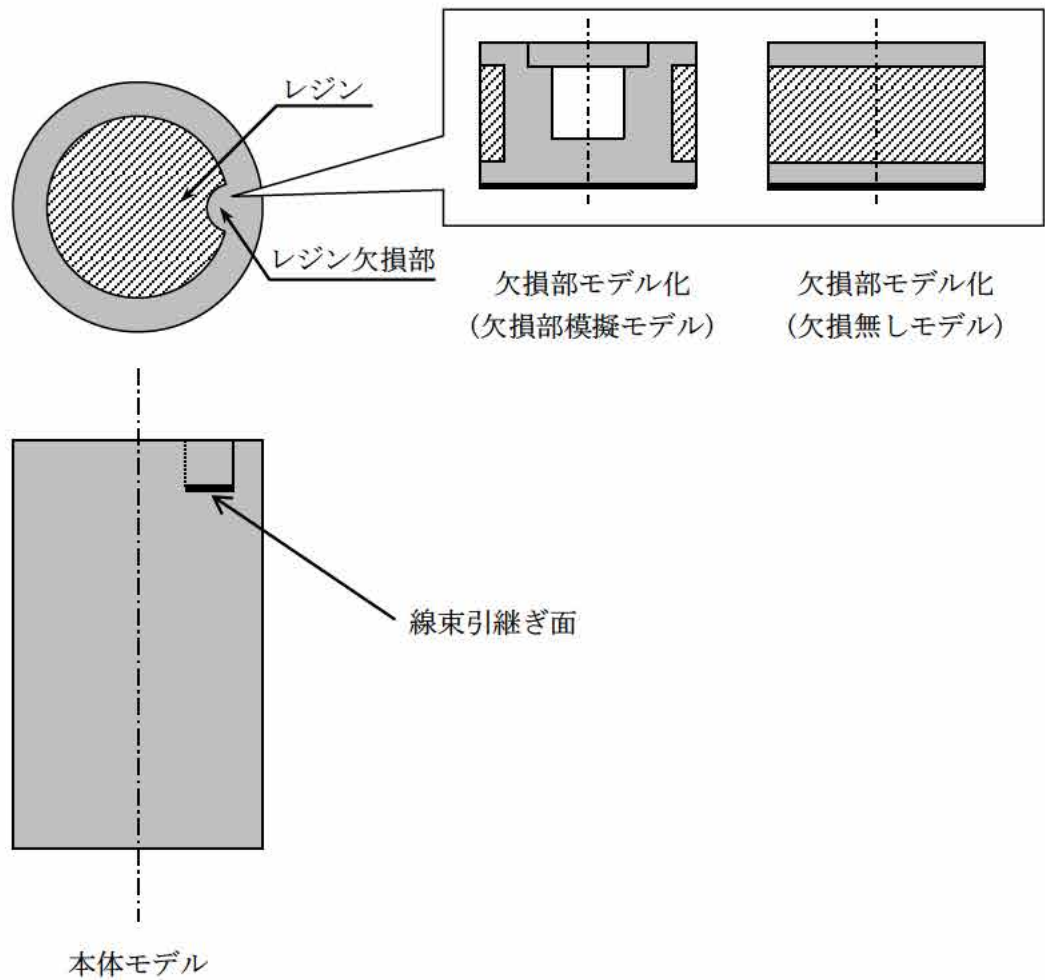
評価結果 = トラニオン有りモデルの線量当量

表面から 1m 離れた位置

補正值 = (トラニオン有りモデルの線量当量率) - (トラニオン無しモデルの線量当量率)

評価結果 = (本体モデルの線量当量率) + 補正值

別紙 4-5 図 線束接続計算の概略図 (トラニオン部の例)



線量当量率の評価方法

表面位置

評価結果 = 欠損部模擬モデルの線量当量

表面から 1m 離れた位置

補正值 = (欠損部模擬モデルの線量当量率) - (欠損部無しモデルの線量当量率)

評価結果 = (本体モデルの線量当量率) + 補正值 × 2 (注)

(注) モニタリングポートは 2 箇所あるため、補正值を 2 倍する。

別紙 4-6 図 線束接続計算の概略図 (モニタリングポート部の例)

遮蔽解析に使用する解析コードについて

Hitz-P24 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。

- a. 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、放射線源の強度、各核種の放射エネルギー等が求められる。
- b. 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。
- c. 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。
- d. 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。

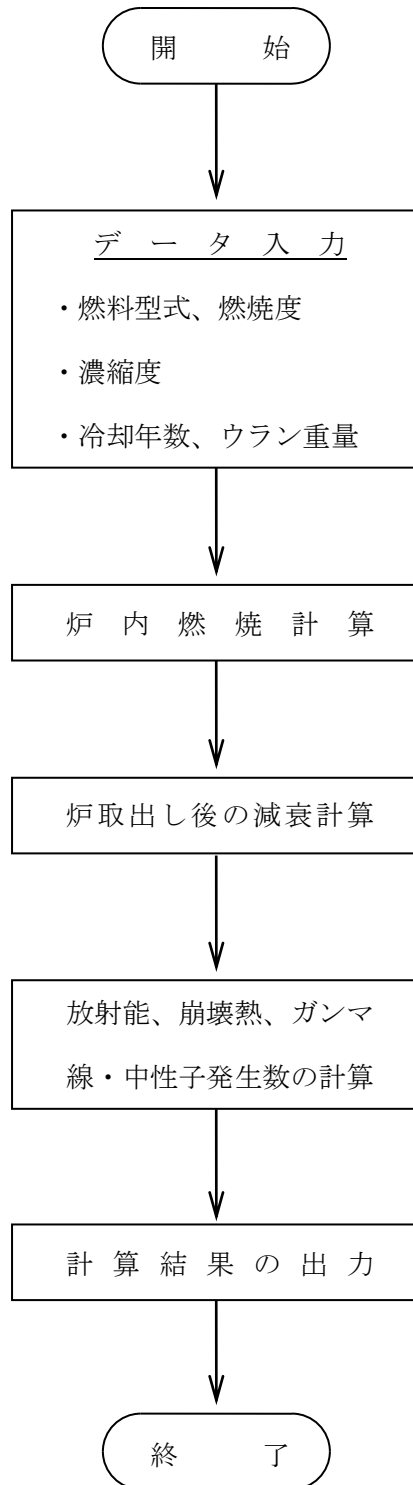
(3) 解析フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを別紙 5-1 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 コードの検証例を別紙 5-2 図に示す。



別紙 5-1 図 ORIGEN2 コードの計算フロー図

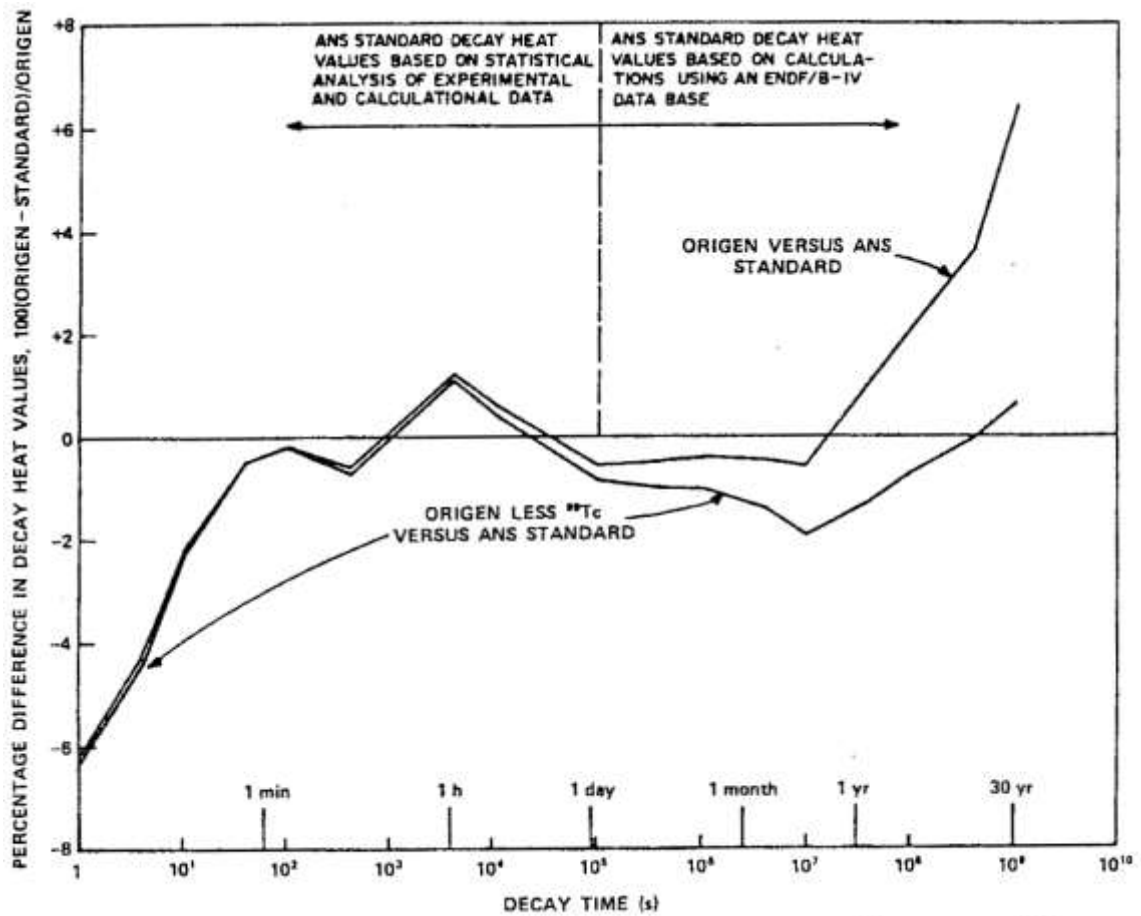


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

(注) ORIGEN2 の崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上(Hitz-P24 型に収納される燃料の冷却期間)の冷却年数に対して高めの値を示している。この理由は、ANS 標準崩壊熱は ^{99}Tc を考慮していないためである。したがって、ORIGEN2 の解析結果より ^{99}Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

別紙 5-2 図 ORIGEN2 コードの検証例 (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、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された二次元輸送計算コードである。

(2) 機能

DOT3.5 コードは、遮蔽解析に際して以下の機能を有している。

- a. ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を Sn 法により解く解析コードであり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- b. 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別紙 5-3 図に示す。

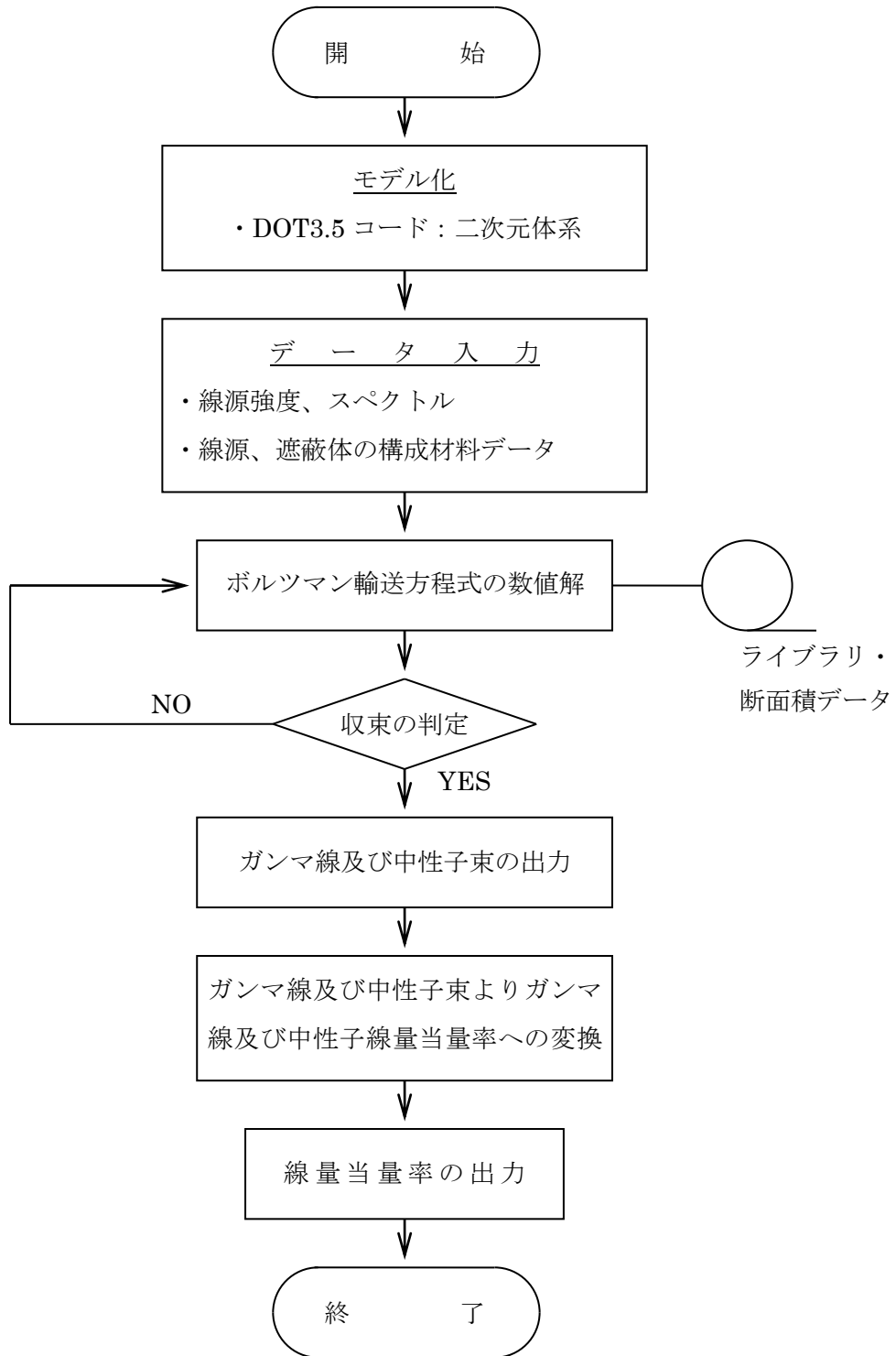
(4) 使用実績及び検証

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⁾を別紙 5-4 図に示す。測定値はすべて解析値よりも低い値を示しており、解析コードが信頼できることを示している⁽⁴⁾。

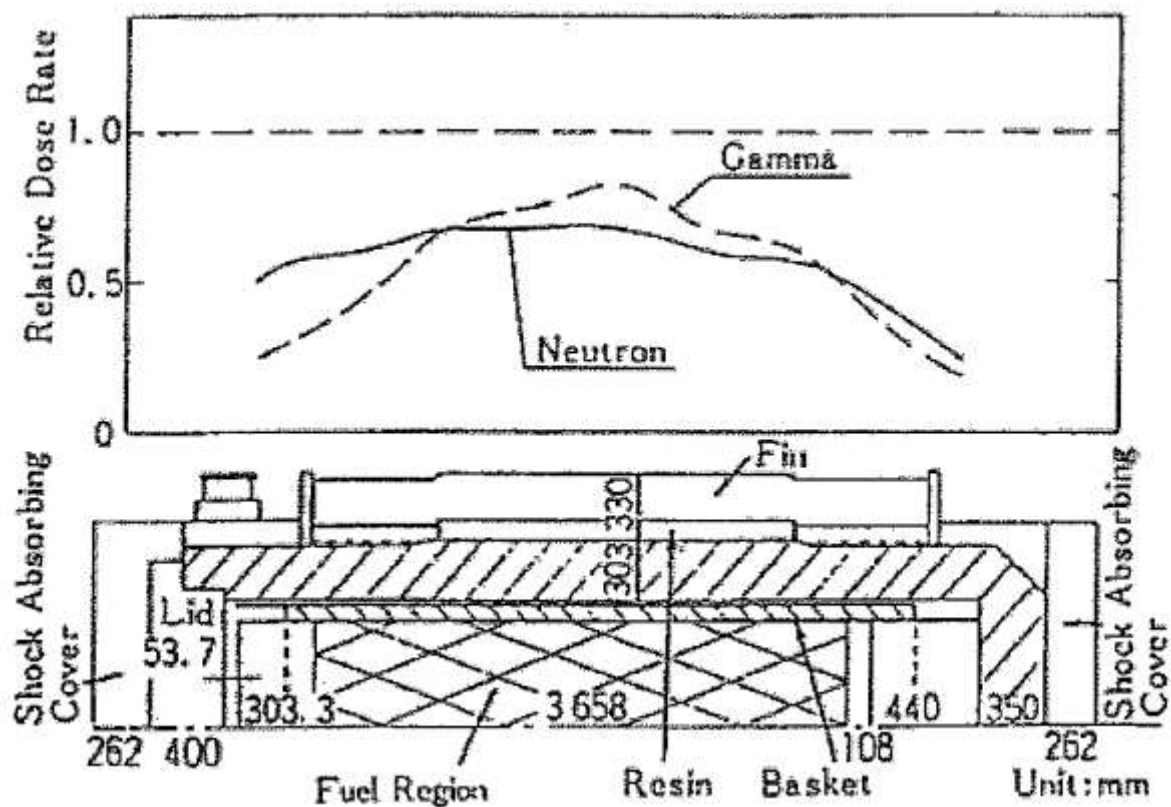
(5) 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33

MATXSLIB-J33⁽⁵⁾は、DOT3.5 コード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り、中性子 175 群、ガンマ線 42 群のエネルギー群構造を有している。MATXSLIB-J33 は、多群ライブラリ処理コード TRANSX-2.15⁽⁶⁾を用いて断面積処理を行った後、輸送計算コードで使用される。なお、TRANSX-2.15 については、公開されている修正パッチ⁽⁷⁾を適用したものをを用いている。

JENDL-3.3 の信頼性は遮蔽性能に関するベンチマーク解析で確認されている⁽⁸⁾。



別紙 5-3 図 DOT3.5 コードの解析フロー図



(注) 中性子を DOT3.5 コード、二次ガンマ線を ANISN (一次元輸送コードで計算法上の差はない)、燃料有効部のガンマ線を QAD (点減衰核積分法によるもので、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、建屋の遮蔽解析の豊富な実績がある。) の各コードで解析した結果である。

別紙 5-4 図 DOT3.5 コードの検証例 (4)

3. 参考文献

- (1) M. Ishikawa, T. JIN, J. Kataoka, H. Matsumoto, Y. Ohkawachi, S. Ohki, A. Onoue, A. Sasahara, K. 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, p335, (1983)
- (3) Oak Ridge National Laboratory, “DOT3.5-Two-Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code”, CCC-276, (1976)
- (4) 松田文夫、他、「TN-12 型輸送容器の放射性遮蔽特性（I）線量率」、日本原子力学会「昭和 56 年秋の分科会」、C17、(1981)
- (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, “TRANSX 2: 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) 大西世紀、他、「 ^{252}Cf 核分裂中性子源を用いた遮へい透過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J33 の適用性に関する研究」、海上技術安全研究所報告 第 7 巻 第 3 号 研究報告、(2007)