

資料1-5

Doc No. 22-180-I-103 Rev.7

2023年11月22日

トランスニュークリア株式会社

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

本資料のうち、枠囲みについては商業機密のため非公開とします。

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²³⁹Pu核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性

別紙4 遮蔽解析に使用する解析コードについて

別紙5 軸方向燃焼度分布の妥当性について

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】

『

以上を踏まえ遮蔽設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

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

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

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

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

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

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

② ソースターム

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

③ 遮蔽解析コード等

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

④ 通常貯蔵時の線量

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

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

4) 応急復旧

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

』

2. 要求事項への適合性

(1) 設置許可基準規則への適合性

TK-26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。

TK-26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TK-26型の中性子遮蔽材の熟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エチレンプロピレン系ゴム（以下「レジン」という。）を用いる。

後述する2. (2) 審査ガイドへの適合性 [確認内容] 1)から2)への説明に示すとおり、特定兼用キャスク表面及び特定兼用キャスク表面から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、使用済燃料集合体の放射線源強度を条件として三次元モンテカルロコードMCNP5（断面積ライブラリ：ENDF70（中性子）、MCPLIB84（ガン

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

また、設置許可基準規則解釈別記4第16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。

TK-26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」に示すとおり、TK-26型は、特定兼用キャスクの構成部材について、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集合体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、特定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、TK-26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]

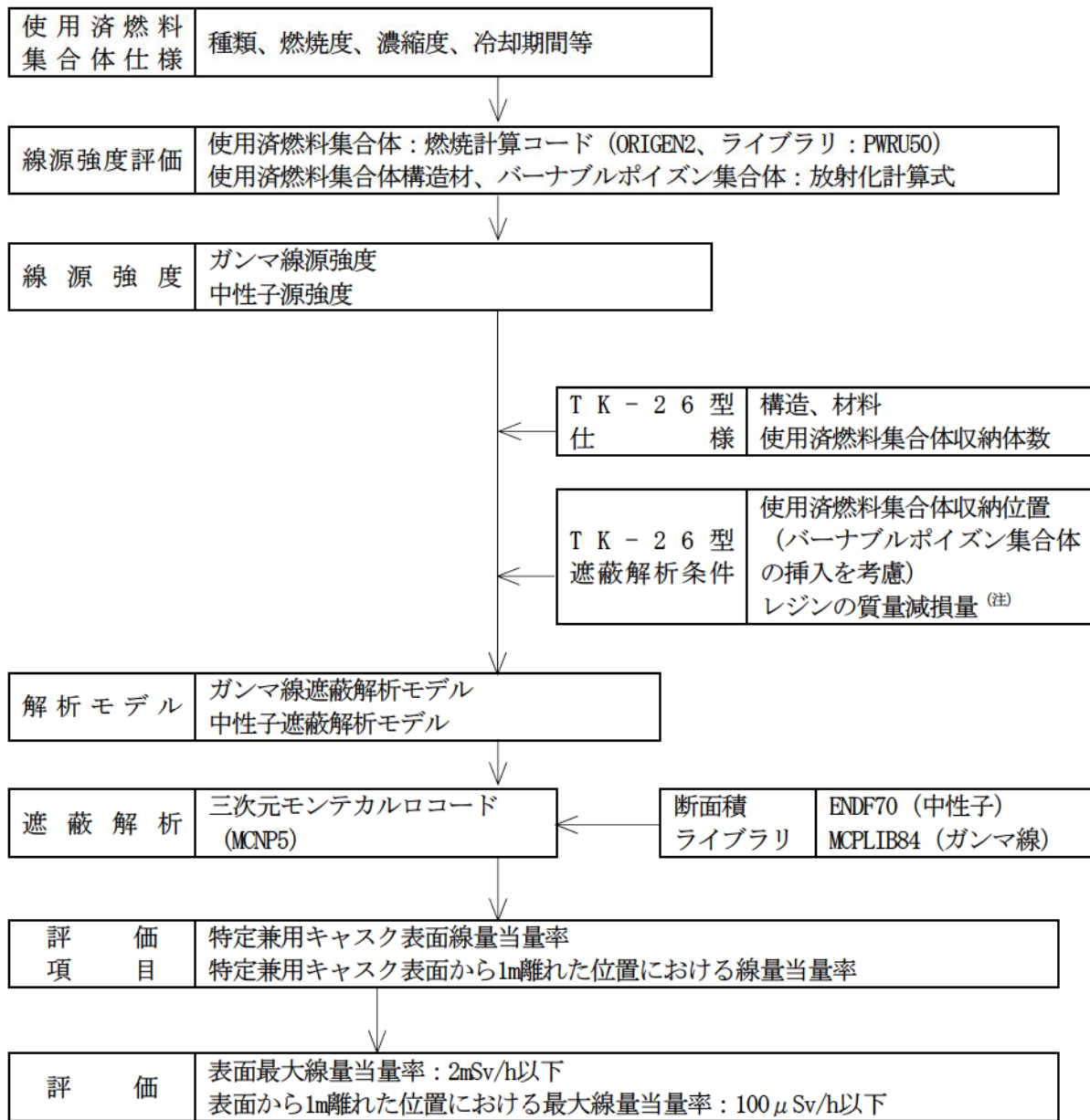
1) 使用済燃料の放射線源強度評価

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。

TK-26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4に示すとおり検証され、適用性が確認されている。



(注) TK-26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」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) 使用済燃料集合体の線源強度評価方法

使用済燃料集合体の型式、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。使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布を図2に示すとおり考慮して、線源強度を計算している。

(4) TK-26型の線量当量率評価方法

TK-26型の線量当量率は、TK-26型の実形状を適切にモデル化し、使用済燃料集合体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、三次元モンテカルロコードMCNP5を用い、検出器は面検出器を使用した。遮蔽解析における収納物条件の概要を表1に示す。MCNP5により遮蔽解析を行う燃料タイプについては、15×15燃料 48,000Mwd/t型（A型、B型）の線源強度は、計算結果より17×17燃料 48,000Mwd/t型（A型、B型）にそれぞれ包絡されるため、表1（1/2）に示す17×17燃料 48,000Mwd/t型（A型、B型）を対象とする。

(5) 遮蔽解析モデル

遮蔽解析のモデル化の概要を図3、解析モデル図を図4に示す。ここで、図4(1/3)及び(2/3)に示す縦断面図は17×17燃料A型の解析モデルを示しているが、A型とB型では使用済燃料集合体の軸方向の寸法が若干異なることを除きその他は同じである。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。

TK-26型の実形状を三次元でモデル化している。ただし、使用済燃料集合体は、バスケットの格子内で均質化して評価している。なお、キャビティ長は安全側に使用済燃料集合体の長さに等しくモデル化している。

(6) 遮蔽解析の保守性

本評価については、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17×17燃料 48,000MWd/t型については最小値である□wt%とする。15×15燃料 48,000MWd/t型についても最小値である□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、使用済燃料集合体の燃焼度（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大の燃焼度を設定している。

・ 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）

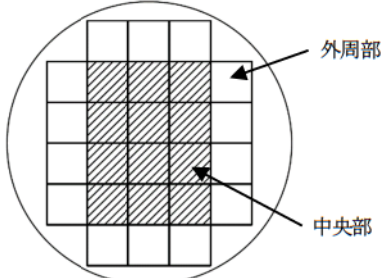
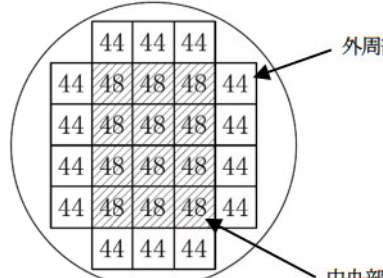
—使用済燃料集合体は、蓋方向、底部方向に移動したモデルとしており、線源である使用済燃料集合体が評価点により近くなる設定としている。

—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。

・ ピーキングファクターの保守性

—使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布として設定したピーキングファクターは、燃焼度の平均値を1として規格化した軸方向燃焼度分布に対して平均値は□であり、燃料有効部全体で□高く評価している。

表1 (1/2) 遮蔽解析における収納物条件の概要

項目		17×17燃料					
		キャスク収納位置制限		解析条件			
		中央部	外周部	中央部	外周部		
収納物仕様	使用済燃料集合体 1体の仕様	種類	48,000MWd/t型 (A型・B型) 39,000MWd/t型 (A型・B型)		48,000MWd/t型 (A型・B型)		
		初期濃縮度 (wt%)	≤4.2				
		ウラン重量 (kg)	[]		[]		
		最高燃焼度 (GWd/t) (使用済燃料集合体平均)	≤48	≤44	48	44	
		冷却期間 (年)	48,000MWd/t型 A型: ≥15、B型: ≥20 39,000MWd/t型 A型: ≥20、B型: ≥20		A型: 15 B型: 20		
	バーナブルポイズン 集合体の仕様	照射期間 (日)	[]		[]		
		冷却期間 (年) (注1)	48,000MWd/t型: ≥15、又は≥20 39,000MWd/t型: ≥20		[] : 15 [] : 20		
	TK-26型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		45.8		
配置 (注2) (注3) (注4)							

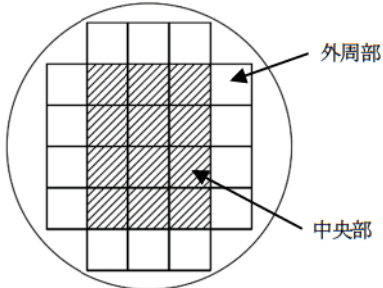
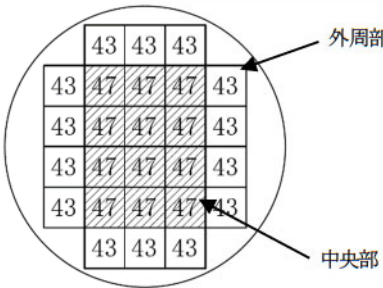
(注1) バーナブルポイズン集合体が挿入される使用済燃料集合体タイプの冷却期間による。

(注2) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

(注3) 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、最高燃焼度の使用済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、48,000MWd/t型と39,000MWd/t型、A型とB型は混載可能である。

(注4) []

表1 (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	使用済燃料集合体 1体の仕様	種類	48,000MWd/t型 (A型・B型) 39,000MWd/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) (使用済燃料集合体平均)	≤47	≤43	47	43
		冷却期間 (年)	48,000MWd/t型 A型 : ≥15、B型 : ≥20 39,000MWd/t型 A型 : ≥20、B型 : ≥20		A型 : 15 B型 : 20	
	バーナブルポイズン 集合体の仕様	照射期間 (日)				
		冷却期間 (年) (注1)	48,000MWd/t型 : ≥15、又は≥20 39,000MWd/t型 : ≥20			
TK-26型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≤43		44.8		
配置 (注2) (注3) (注4)						

(注1) バーナブルポイズン集合体が挿入される使用済燃料集合体タイプの冷却期間による。

(注2) 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

(注3) 中央部の最高燃焼度は47GWd/t、外周部の最高燃焼度は43GWd/tであり、遮蔽解析においては、最高燃焼度の使用済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、48,000MWd/t型と39,000MWd/t型、A型とB型は混載可能である。

(注4)

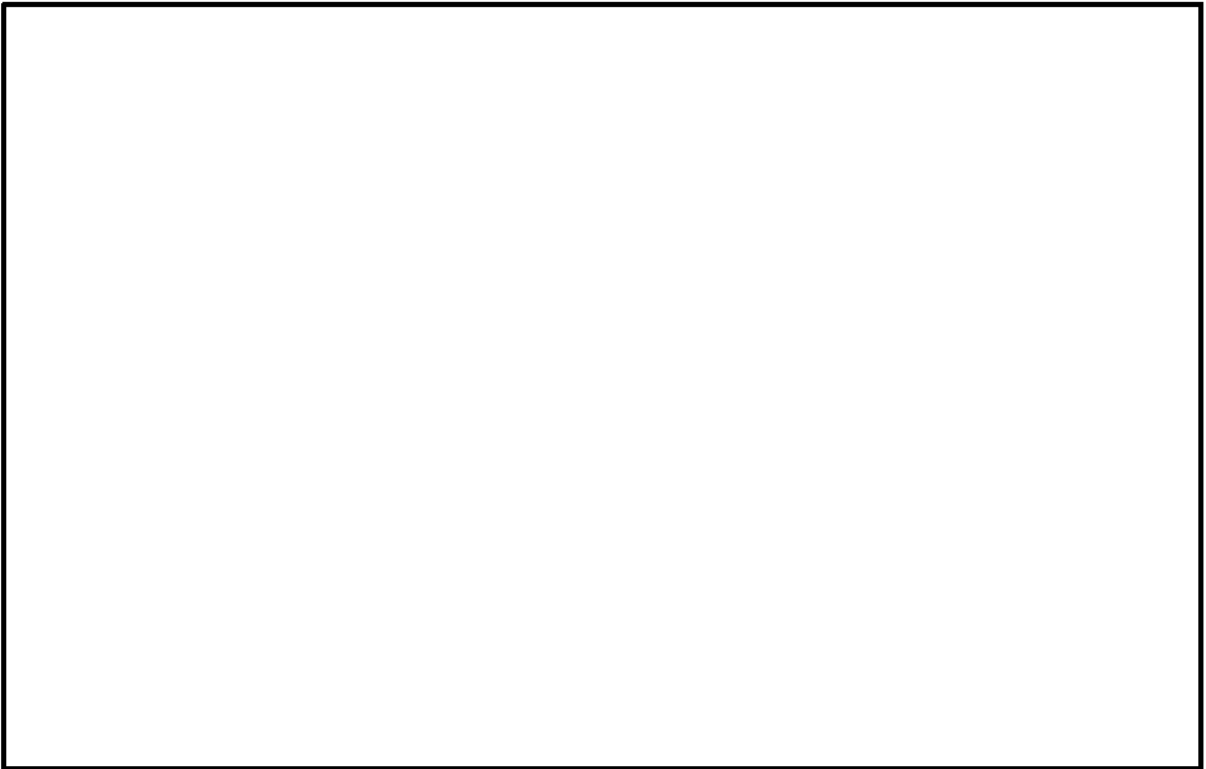


図2 軸方向燃焼度分布の設定 (17×17燃料、15×15燃料)

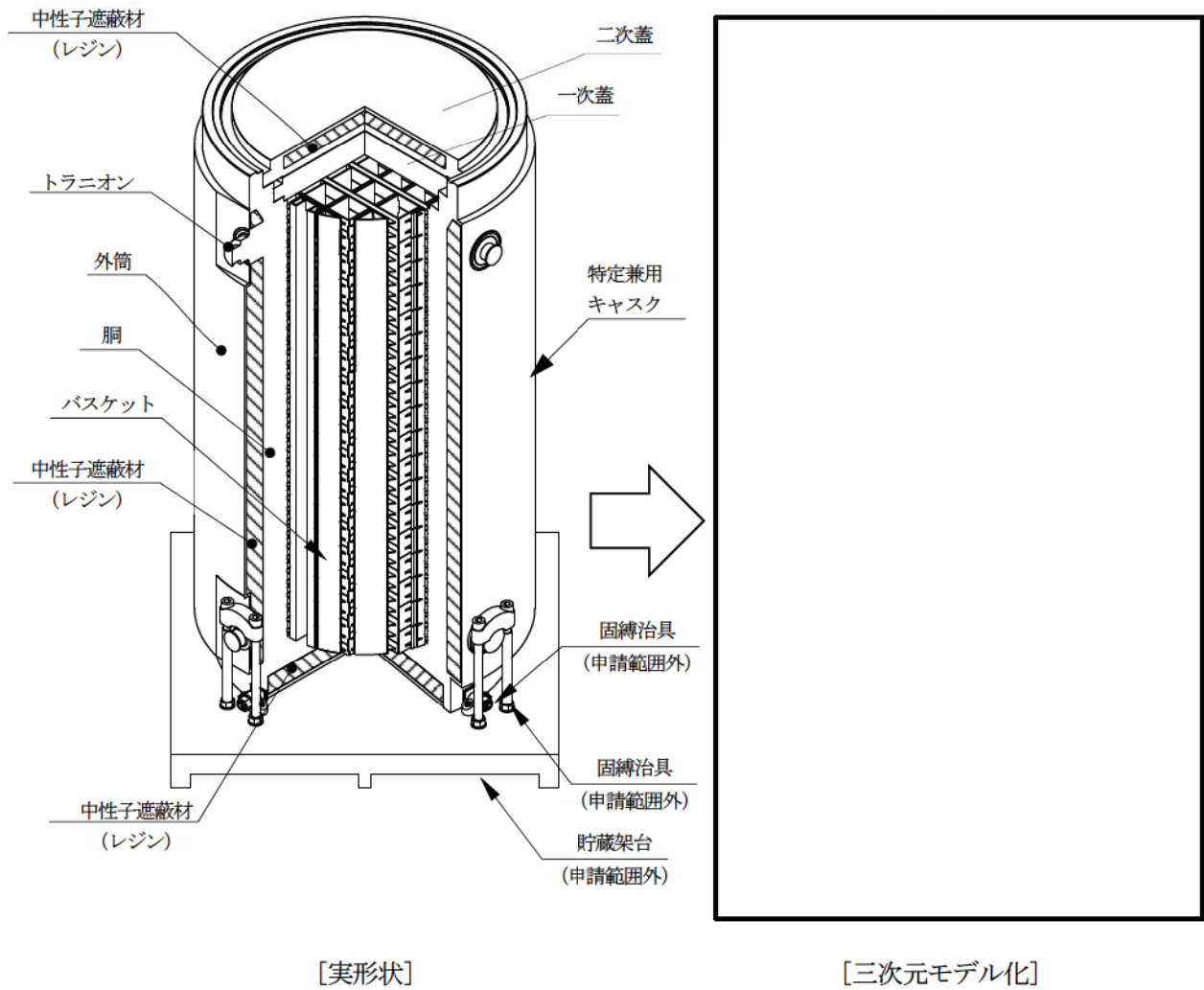


図3 遮蔽解析のモデル化の概要

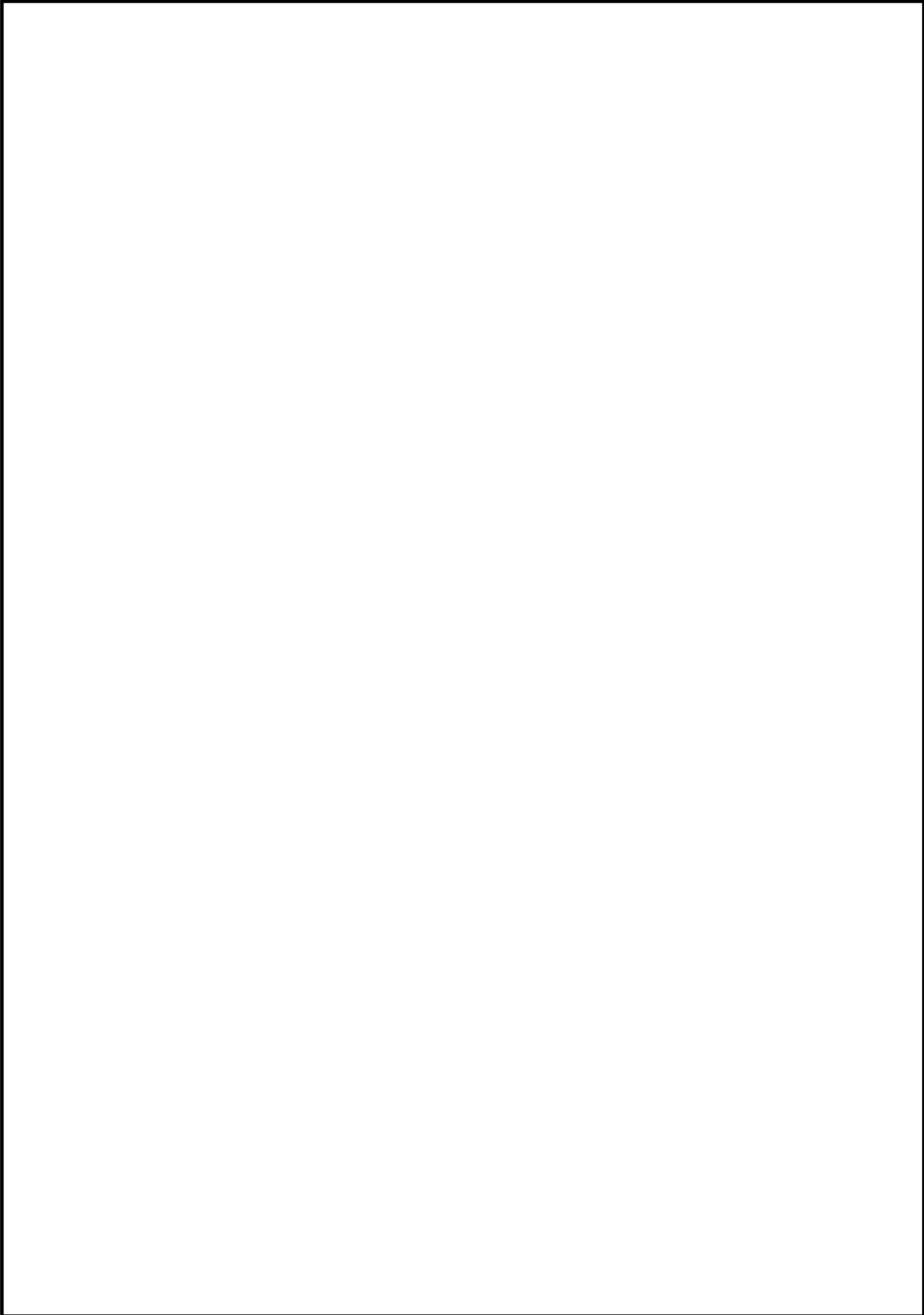


図4 (1/3) 遮蔽解析モデル (17×17燃料 A型、45° 断面)

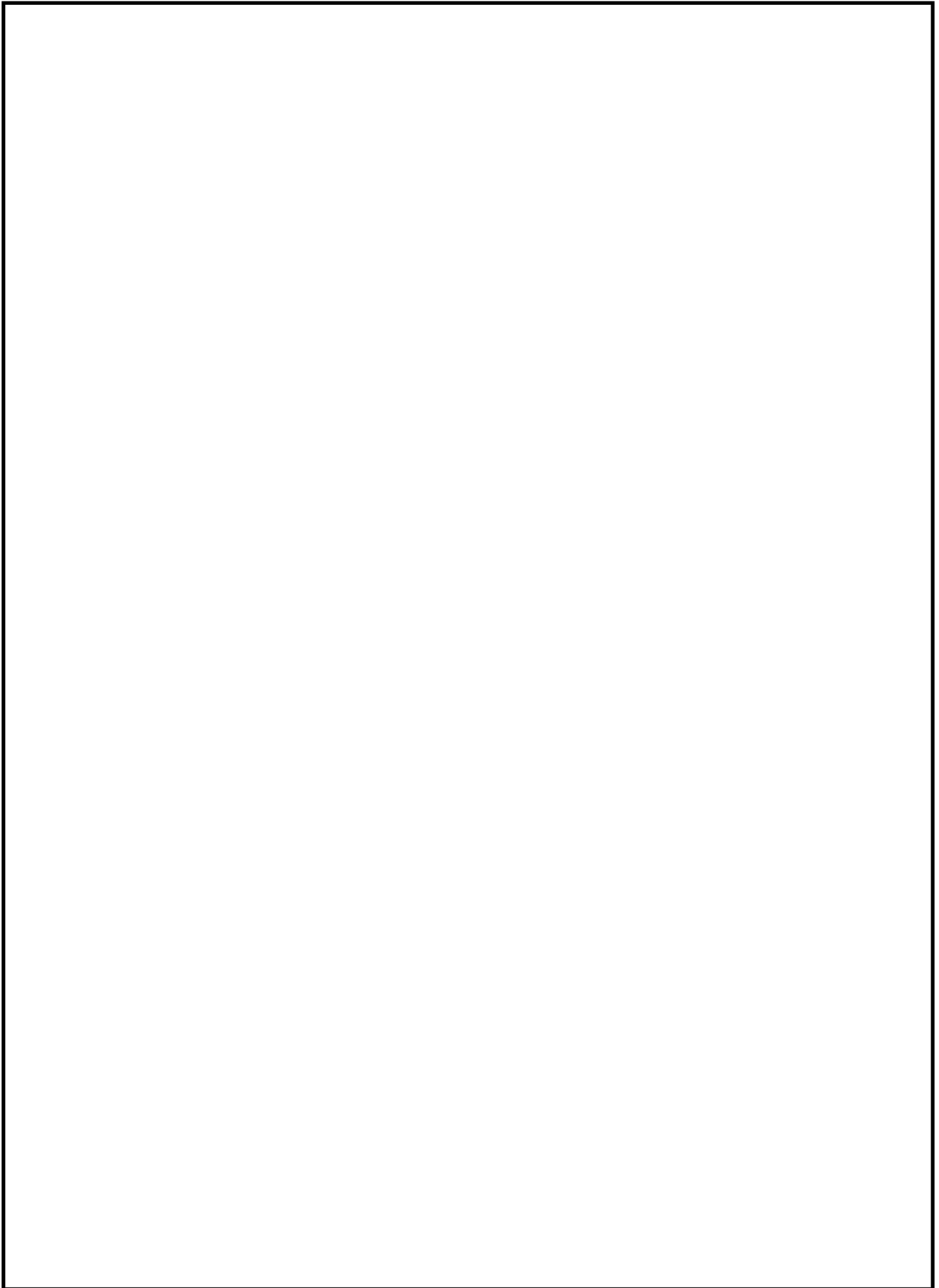


図4 (2/3) 遮蔽解析モデル (17×17燃料 A型、90° 断面)

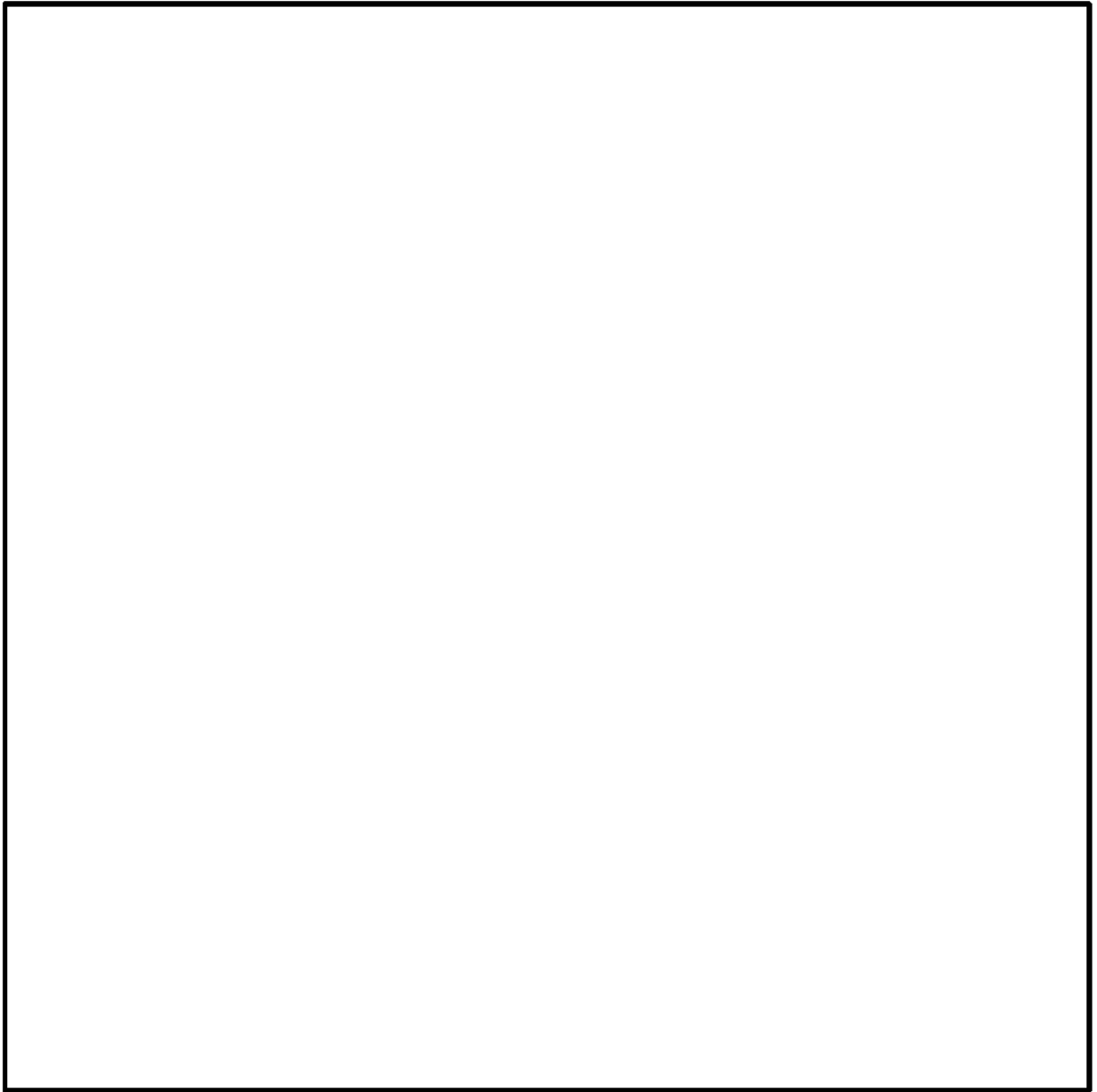


図4 (3/3) 遮蔽解析モデル (横断面)

(7) 評価結果

TK-26型の遮蔽評価結果を表2に示す。

TK-26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
	17×17燃料 収納時			
	A型	B型		
表面 線量当量率	1.2mSv/h	1.0mSv/h	2mSv/h 以下	線量当量率の詳細を 表3に示す。 線量当量率の出力位置を 図5に示す
表面から1m離れた 位置における 線量当量率	82 μ Sv/h	75 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	

表3 (1/2) 線量当量率評価結果 (17×17燃料 (A型) 収納時)

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点		頭 部			側 部 中 央	底 部			
		軸 方 向	径 方 向	径 方 向 (トランス部)		径 方 向	径 方 向 (トランス部)	軸 方 向	
		①	③a	③b		⑤	⑦a	⑦b	⑨
表 面	ガンマ線	燃料有効部	0.3 (1.2) ^(注1)	0.3 (2.9)	0.1 (4.3)	80.2 (0.6)	2.6 (2.9)	2.6 (1.3)	8.1 (0.4)
		構造材放射化	2.4 (1.3)	2.2 (2.7)	0.8 (2.7)	16.5 (0.6)	8.7 (1.8)	6.0 (1.7)	40.9 (0.5)
		二次ガンマ線	1.8 (1.4)	3.2 (2.3)	2.0 (2.2)	33.5 (0.6)	7.9 (1.5)	7.2 (1.1)	9.0 (0.4)
	中 性 子	694.2 (0.4)	515.8 (0.4)	486.6 (0.6)	42.4 (0.7)	1177.1 (0.4)	1104.1 (0.4)	128.4 (2.1)	
	合 計	698.7	521.5	489.5	172.6	<u>1196.3</u> [1.2] ^(注2)	1119.9	186.4	
評価点		②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
表 面 か ら 1m	ガンマ線	燃料有効部	0.5 (0.4)	0.3 (0.4)	0.3 (0.5)	32.2 (0.5)	6.5 (0.8)	4.3 (0.9)	8.4 (0.4)
		構造材放射化	5.3 (0.4)	3.6 (0.5)	3.3 (0.5)	7.5 (0.5)	9.0 (0.7)	6.0 (0.8)	38.9 (0.4)
		二次ガンマ線	2.2 (0.9)	1.8 (1.0)	1.7 (1.1)	13.8 (0.7)	3.1 (2.1)	3.9 (1.7)	4.7 (0.7)
	中 性 子	73.9 (1.2)	73.6 (1.6)	73.8 (1.8)	16.7 (0.7)	56.2 (0.9)	61.2 (1.1)	21.8 (0.4)	
	合 計	<u>81.9</u> [82] ^(注2)	79.3	79.1	70.2	74.8	75.4	73.8	

(注1) ()内は統計誤差 (単位: %) を示す。

(注2) 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。

[]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 (17×17燃料 (B型) 収納時)

(単位: μ Sv/h)

評価点		頭 部			側 部 中 央	底 部			
		軸 方 向	径 方 向	径 方 向 (トランス部)		径 方 向	径 方 向 (トランス部)	軸 方 向	
		①	③a	③b		⑤	⑦a	⑦b	⑨
表 面	ガンマ線	燃料有効部	0.2 (1.2) ^(注1)	0.2 (3.1)	0.1 (3.5)	53.9 (0.6)	1.7 (1.7)	1.7 (1.2)	12.9 (0.3)
		構造材放射化	3.5 (1.2)	2.6 (1.8)	1.6 (1.8)	9.0 (0.7)	10.1 (1.7)	7.2 (1.3)	93.8 (0.3)
		二次ガンマ線	1.5 (1.4)	2.7 (2.2)	2.3 (1.9)	28.0 (0.6)	6.5 (1.2)	6.1 (1.0)	12.1 (0.3)
	中 性 子	571.7 (0.4)	418.9 (0.4)	402.0 (0.5)	35.0 (0.7)	981.2 (0.3)	922.3 (0.4)	45.2 (0.2)	
	合 計	576.9	424.4	406.0	125.9	<u>999.5</u> [1.0] ^(注2)	937.3	164.0	
評価点		②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
表 面 か ら 1m	ガンマ線	燃料有効部	1.1 (0.3)	0.2 (0.5)	0.2 (0.5)	21.7 (0.5)	4.5 (0.9)	3.0 (1.0)	5.4 (0.4)
		構造材放射化	25.9 (0.3)	4.7 (0.5)	4.4 (0.5)	4.7 (0.6)	9.1 (0.8)	6.6 (0.7)	41.1 (0.4)
		二次ガンマ線	3.6 (0.7)	1.5 (1.0)	1.4 (1.1)	11.4 (0.7)	3.3 (1.4)	2.6 (1.7)	3.9 (0.5)
	中 性 子	44.1 (0.8)	60.2 (1.8)	60.6 (1.6)	14.1 (0.6)	46.9 (1.0)	51.4 (1.1)	18.2 (0.5)	
	合 計	<u>74.7</u> [75] ^(注2)	66.6	66.6	51.9	63.8	63.6	68.6	

(注1) ()内は統計誤差 (単位: %) を示す。

(注2) 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。

[]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: μ Sv/h)

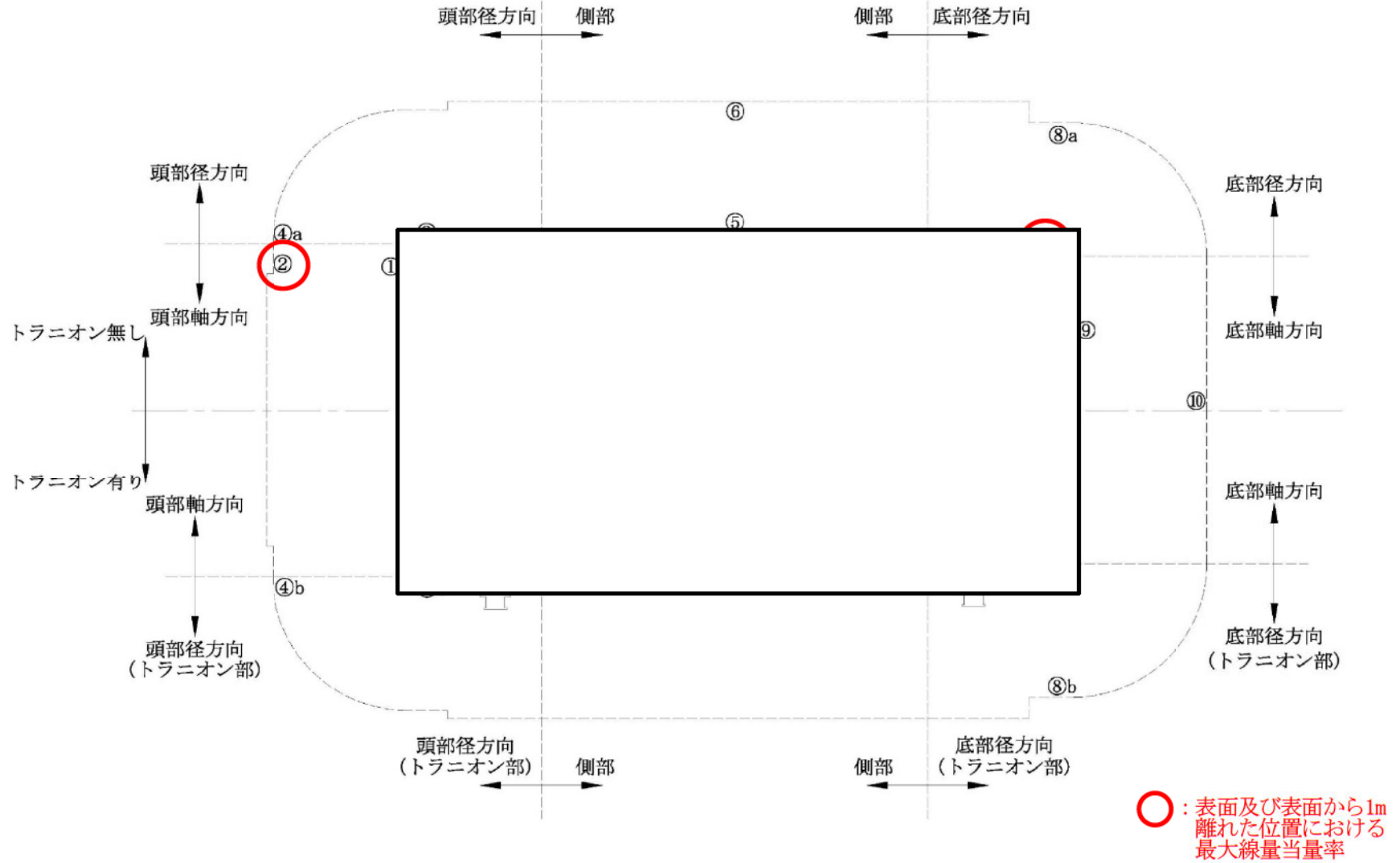


図5 (1/2) 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (17×17燃料 (A型) 収納時)

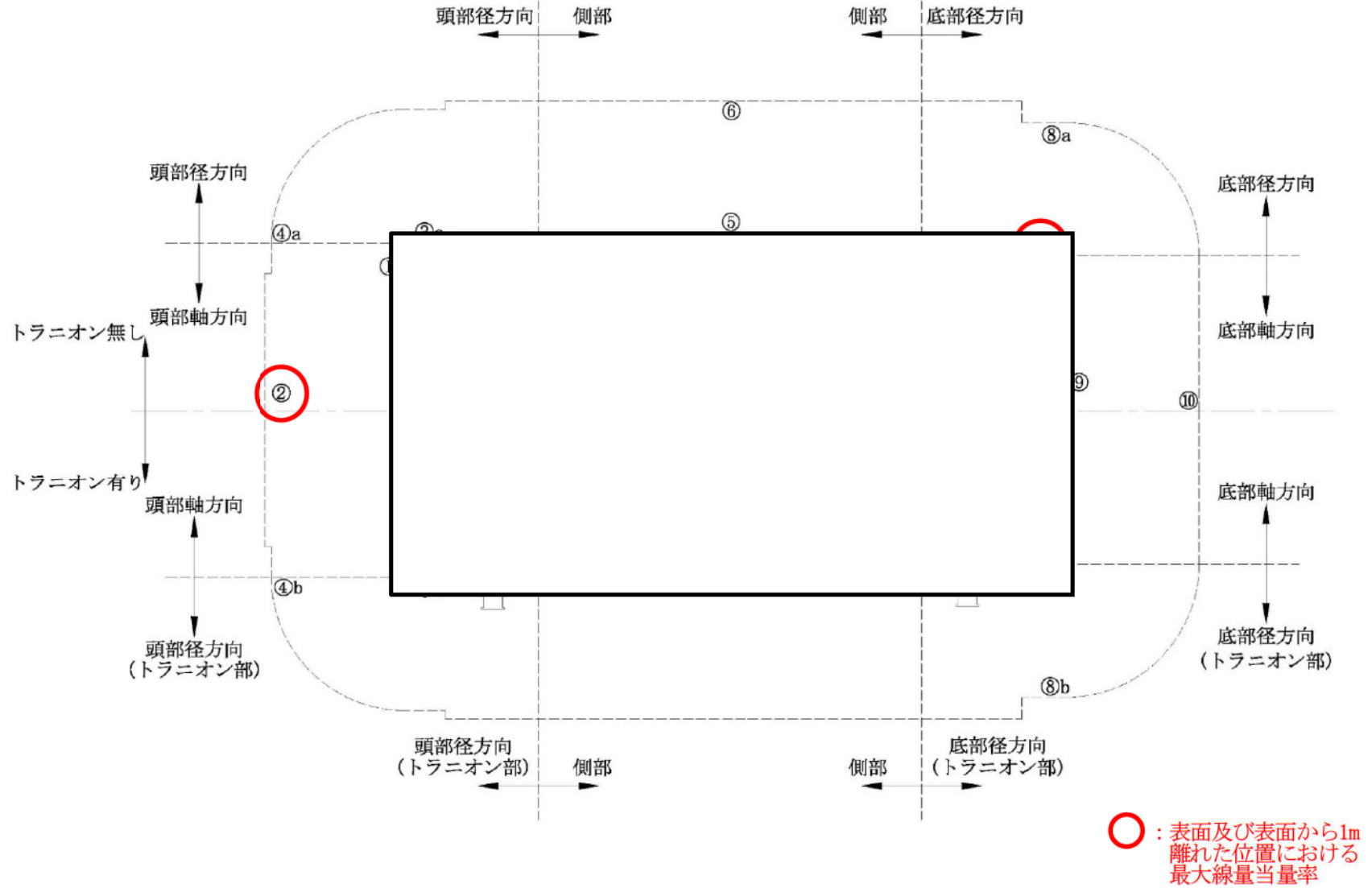


図5 (2/2) 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (17×17燃料 (B型) 収納時)

[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の申請外（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を別紙1-1表及び別紙1-2表に示す。また、別紙1-3表にガンマ線及び中性子の線源強度、別紙1-4表に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源強度、別紙1-5表に中性子源強度、別紙1-6表に燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度を示す。

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。また、別紙1-4表～別紙1-6表の結果から、15×15燃料のA型及びB型の線源強度は、17×17燃料のA型及びB型にそれぞれ包絡される。よって、遮蔽評価においては26体すべてを17×17燃料A型としたケース、すべてを17×17燃料B型としたケースの2ケースについて評価する。なお、17×17燃料A型の下部プレナム部の放射化ガンマ線源強度は15×15燃料A型の値より僅かに下回るが、下部ノズル部を含めた合計値は17×17燃料A型の方が大きい。よって、解析モデルを考慮した線源強度の包絡性に問題はない。

中性子源強度のうち大部分は、 ^{244}Cm の自発核分裂線源と増倍による ^{235}U 、 ^{239}Pu の核分裂線源であり、 (α, n) 反応による線源はわずかである。そこで、計算に用いる線源のエネルギースペクトルは、線源強度に支配的な核分裂線源のうち最もスペクトルが硬い ^{239}Pu の核分裂スペクトルとする。エネルギースペクトルは、以下に示すとおり、 ^{239}Pu 核分裂スペクトルをWatt型連続分布エネルギースペクトルで入力した。

$$\begin{aligned} \text{Watt型連続分布スペクトル} & : p(E)=C \cdot \exp(-E/a) \cdot \sinh(bE)^{1/2} \\ {}^{239}\text{Pu中性子スペクトル定数} & : a=0.966\text{MeV}, b=2.842\text{MeV}^{-1} \end{aligned}$$

使用済燃料集合体の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、使用済燃料集合体のタイプの違いによる線量当量率への影響については、それぞれの使用済燃料集合体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、17×17燃料のA型とB型、15×15燃料のA型とB型を混載した場合には使用済燃料集合体の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 解析コードの詳細バージョン：ORIGEN2.2UPJ ライブラリ：PWRU50ライブラリ 軸方向燃焼度分布：別紙1-2表及び別紙1-1図参照（別紙5参照） 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 ⁶⁰ Co含有量に従い、放射化計算式に基づいて ⁶⁰ 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(⁶⁰ Co)の個数 (atoms) σ：2200m/sの中性子による ⁶⁰ 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 ^(注) Watt型連続分布スペクトル $p(E) = C \cdot \exp(-E/a) \cdot \sinh(bE)^{1/2}$ ²³⁹ Pu中性子スペクトル定数 : a=0.966MeV、b=2.842MeV ⁻¹

(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 (1/3) 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、48,000MWd/t型)

項目		17×17燃料 48,000MWd/t型		
		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	20	
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)	(上部)			
	(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1-2表 (2/3) 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、48,000MWd/t型)

項目		15×15燃料 48,000MWd/t型		
		A型	B型	
燃焼度 (MWd/t)	中央部	47,000		
	外周部	43,000		
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	20	
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)				
	(上部)			
	(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1-2表 (3/3) 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燃料及び15×15燃料、39,000Mwd/t型)

項目			17×17燃料 39,000Mwd/t型		15×15燃料 39,000Mwd/t型				
			A型	B型	A型	B型			
最高燃焼度 (Mwd/t) (注1)			39,000		39,000				
平均燃焼度 (Mwd/t) (注2)			— (注3)		— (注3)				
照射 期間 (日)	使用済燃料 集合体	最高燃焼度							
		平均燃焼度							
	バーナブルポイズン集合体								
濃縮度 (wt%)									
冷却期間 (年)							20		20
ウラン重量 (kg/体)									
軸方向燃焼度分布 (注5) (ピーキング ファクター：PF)							(上部)		
(下部)									

(注1) 最高燃焼度とは、収納する使用済燃料集合体1体の燃焼度の最大値を示す。

(注2) 平均燃焼度とは、収納する全使用済燃料集合体に対する燃焼度の平均値を示す。

(注3) 39,000Mwd/t型には平均燃焼度を設定しない。

(注4) 遮蔽解析で代表燃料としている17×17燃料の48,000 Mwd/t型の線源強度に包絡される範囲で濃縮度を保守的に小さく設定した。

(注5) 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表(1/2) ガンマ線及び中性子の線源強度 (17×17燃料及び15×15燃料、48,000MWd/t型)

項目			17×17燃料 48,000MWd/t型		15×15燃料 48,000MWd/t型	
			A型	B型	A型	B型
最高燃焼度となる 使用済燃料集合体 1体当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)	4.6×10^{15}	4.0×10^{15}	4.5×10^{15}	3.9×10^{15}
		構造材放射化 (^{60}Co :Bq) ^(注1)	3.1×10^{13}	2.0×10^{13}	2.6×10^{13}	1.7×10^{13}
	中性子	燃料有効部 (n/s) ^(注2)	5.9×10^8	4.9×10^8	5.7×10^8	4.8×10^8
平均燃焼度となる 使用済燃料集合体 1体当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)	4.3×10^{15}	3.7×10^{15}	4.2×10^{15}	3.6×10^{15}
		構造材放射化 (^{60}Co :Bq)	1.2×10^{13}	1.0×10^{13}	1.1×10^{13}	8.7×10^{12}
	中性子	燃料有効部 (n/s) ^(注2)	4.1×10^8	3.4×10^8	3.9×10^8	3.3×10^8
金属キャスク 1基当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)	1.2×10^{17}	1.0×10^{17}	1.1×10^{17}	9.7×10^{16}
		構造材放射化 (^{60}Co :Bq) ^(注1)	5.4×10^{14}	3.8×10^{14}	4.6×10^{14}	3.2×10^{14}
	中性子	燃料有効部 (n/s) ^(注2)	1.3×10^{10}	1.1×10^{10}	1.2×10^{10}	1.0×10^{10}

(注1) 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2) 中性子増倍の効果を考慮した値である。

別紙1-3表(2/2) ガンマ線及び中性子の線源強度 (17×17燃料及び15×15燃料、39,000MWd/t型)

項 目			17×17燃料 39,000MWd/t型		15×15燃料 39,000MWd/t型	
			A型	B型	A型	B型
最高燃焼度となる 使用済燃料集合体 1体当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)	3.2×10 ¹⁵		3.2×10 ¹⁵	
		構造材放射化 (⁶⁰ Co:Bq) ^(注1)	1.7×10 ¹³ (7.9×10 ¹²)	1.9×10 ¹³ (9.6×10 ¹²)	1.4×10 ¹³ (6.9×10 ¹²)	1.6×10 ¹³ (8.2×10 ¹²)
	中性子	燃料有効部 (n/s) ^(注2)	3.8×10 ⁸		3.4×10 ⁸	
平均燃焼度となる 使用済燃料集合体 1体当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)	— ^(注3)		— ^(注3)	
		構造材放射化 (⁶⁰ Co:Bq) ^(注1)	— ^(注3)		— ^(注3)	
	中性子	燃料有効部 (n/s) ^(注2)	— ^(注3)		— ^(注3)	
金属キャスク 1基当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)	8.4×10 ¹⁶		8.4×10 ¹⁶	
		構造材放射化 (⁶⁰ Co:Bq) ^(注1)	3.1×10 ¹⁴	3.6×10 ¹⁴	2.7×10 ¹⁴	3.0×10 ¹⁴
	中性子	燃料有効部 (n/s) ^(注2)	1.0×10 ¹⁰		8.7×10 ⁹	

(注1) 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。なお、括弧内は、バーナブルポイズン集合体を挿入していない状態 の値である。

(注2) 中性子増倍の効果を考慮した値である。

(注3) 39,000MWd/t型には平均燃焼度を設定しない。

別紙1-4表 (1/4) 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
放射化ガンマ線源強度 (17×17燃料、A型)

(TK-26型1基あたり)

モデル化領域	使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン 集合体の線源強度 (⁶⁰ Co TBq) (注)		
	中央部	外周部	合計
上部ノズル部	9.261×10 ⁰ (5.349×10 ⁰)	4.257×10 ⁰	1.352×10 ¹ (5.349×10 ⁰)
上部プレナム部	3.635×10 ¹ (8.015×10 ⁰)	3.083×10 ¹	6.718×10 ¹ (8.015×10 ⁰)
燃料有効部	3.061×10 ² (1.939×10 ²)	1.221×10 ²	4.282×10 ² (1.939×10 ²)
下部プレナム部	2.553×10 ⁰	2.778×10 ⁰	5.331×10 ⁰
下部ノズル部	1.288×10 ¹	1.401×10 ¹	2.689×10 ¹

(注) () 内の値は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 (2/4) 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
放射化ガンマ線源強度 (17×17燃料、B型)

(TK-26型1基あたり)

モデル化領域	使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン 集合体の線源強度 (⁶⁰ Co TBq) (注)		
	中央部	外周部	合計
上部ノズル部	1.044×10 ¹ (2.772×10 ⁰)	8.348×10 ⁰	1.879×10 ¹ (2.772×10 ⁰)
上部プレナム部	4.673×10 ¹ (4.153×10 ⁰)	4.634×10 ¹	9.307×10 ¹ (4.153×10 ⁰)
燃料有効部	1.629×10 ² (1.004×10 ²)	6.800×10 ¹	2.309×10 ² (1.004×10 ²)
下部プレナム部	6.971×10 ⁰	7.586×10 ⁰	1.456×10 ¹
下部ノズル部	1.197×10 ¹	1.302×10 ¹	2.499×10 ¹

(注) () 内の値は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 (3/4) 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
放射化ガンマ線源強度 (15×15燃料、A型)

(TK-26型1基あたり)

モデル化領域	使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン 集合体の線源強度 (⁶⁰ Co TBq) (注)		
	中央部	外周部	合計
上部ノズル部	7.084×10 ⁰ (4.225×10 ⁰)	3.112×10 ⁰	1.020×10 ¹ (4.225×10 ⁰)
上部プレナム部	2.999×10 ¹ (5.844×10 ⁰)	2.628×10 ¹	5.627×10 ¹ (5.844×10 ⁰)
燃料有効部	2.622×10 ² (1.617×10 ²)	1.094×10 ²	3.716×10 ² (1.617×10 ²)
下部プレナム部	2.796×10 ⁰	3.043×10 ⁰	5.839×10 ⁰
下部ノズル部	8.136×10 ⁰	8.857×10 ⁰	1.699×10 ¹

(注) () 内の値は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 (4/4) 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
放射化ガンマ線源強度 (15×15燃料、B型)

(TK-26型1基あたり)

モデル化領域	使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン 集合体の線源強度 (⁶⁰ Co TBq) (注)		
	中央部	外周部	合計
上部ノズル部	5.176×10 ⁰ (2.189×10 ⁰)	3.251×10 ⁰	8.427×10 ⁰ (2.189×10 ⁰)
上部プレナム部	4.174×10 ¹ (3.028×10 ⁰)	4.214×10 ¹	8.388×10 ¹ (3.028×10 ⁰)
燃料有効部	1.413×10 ² (8.378×10 ¹)	6.258×10 ¹	2.039×10 ² (8.378×10 ¹)
下部プレナム部	6.397×10 ⁰	6.963×10 ⁰	1.336×10 ¹
下部ノズル部	6.211×10 ⁰	6.761×10 ⁰	1.297×10 ¹

(注) () 内の値は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1-5表 (1/4) 中性子源強度 (17×17燃料、A型)

(TK-26型1基あたり)

		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	9.358×10^7	8.706×10^7	1.806×10^8
	自発核分裂	4.902×10^9	3.914×10^9	8.816×10^9
	合計	4.996×10^9	4.001×10^9	8.997×10^9
TK-26型の実効増倍率 k_{eff} (注)		0.30		
全中性子源強度 N_0 (n/s)		7.137×10^9	5.716×10^9	1.285×10^{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結果である。

別紙1-5表 (2/4) 中性子源強度 (17×17燃料、B型)

(TK-26型1基あたり)

		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	8.877×10^7	8.406×10^7	1.728×10^8
	自発核分裂	4.065×10^9	3.245×10^9	7.310×10^9
	合計	4.154×10^9	3.329×10^9	7.483×10^9
TK-26型の実効増倍率 k_{eff} (注)		0.30		
全中性子源強度 N_0 (n/s)		5.934×10^9	4.756×10^9	1.069×10^{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結果である。

別紙1-5表 (3/4) 中性子源強度 (15×15燃料、A型)

(TK-26型1基あたり)

		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	9.181×10^7	8.520×10^7	1.770×10^8
	自発核分裂	4.735×10^9	3.751×10^9	8.486×10^9
	合計	4.827×10^9	3.836×10^9	8.663×10^9
TK-26型の実効増倍率 k_{eff} (注)		0.30		
全中性子源強度 N_0 (n/s)		6.895×10^9	5.480×10^9	1.238×10^{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結果である。

別紙1-5表 (4/4) 中性子源強度 (15×15燃料、B型)

(TK-26型1基あたり)

		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	8.723×10^7	8.241×10^7	1.696×10^8
	自発核分裂	3.926×10^9	3.110×10^9	7.036×10^9
	合計	4.013×10^9	3.192×10^9	7.206×10^9
TK-26型の実効増倍率 k_{eff} (注)		0.30		
全中性子源強度 N_0 (n/s)		5.733×10^9	4.561×10^9	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-VIコード) により評価して得られた結果である。

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の
線源強度 (17×17燃料、A型)

(TK-26型1基あたり)

エネルギー 群数	平均エネルギー (MeV)	燃料有効部 (photons/s)		
		中央部	外周部	合計
1	0.01	1.433×10^{16}	1.559×10^{16}	2.992×10^{16}
2	0.025	2.888×10^{15}	3.162×10^{15}	6.050×10^{15}
3	0.0375	3.728×10^{15}	4.018×10^{15}	7.746×10^{15}
4	0.0575	2.903×10^{15}	3.178×10^{15}	6.081×10^{15}
5	0.085	1.636×10^{15}	1.783×10^{15}	3.419×10^{15}
6	0.125	1.581×10^{15}	1.685×10^{15}	3.266×10^{15}
7	0.225	1.362×10^{15}	1.487×10^{15}	2.849×10^{15}
8	0.375	5.802×10^{14}	6.360×10^{14}	1.216×10^{15}
9	0.575	2.480×10^{16}	2.657×10^{16}	5.137×10^{16}
10	0.85	1.141×10^{15}	1.169×10^{15}	2.310×10^{15}
11	1.25	7.732×10^{14}	7.906×10^{14}	1.564×10^{15}
12	1.75	2.370×10^{13}	2.435×10^{13}	4.805×10^{13}
13	2.25	1.395×10^{10}	1.504×10^{10}	2.899×10^{10}
14	2.75	6.947×10^9	6.774×10^9	1.372×10^{10}
15	3.5	6.770×10^8	5.882×10^8	1.265×10^9
16	5.0	2.153×10^8	1.721×10^8	3.874×10^8
17	7.0	2.483×10^7	1.984×10^7	4.467×10^7
18	9.5	2.853×10^6	2.279×10^6	5.132×10^6
合計		5.575×10^{16}	6.010×10^{16}	1.158×10^{17}

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の
線源強度 (17×17燃料、B型)

(TK-26型1基あたり)

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	1.264×10^{16}	1.376×10^{16}	2.640×10^{16}
2	0.025	2.504×10^{15}	2.743×10^{15}	5.246×10^{15}
3	0.0375	3.189×10^{15}	3.444×10^{15}	6.633×10^{15}
4	0.0575	2.615×10^{15}	2.867×10^{15}	5.482×10^{15}
5	0.085	1.399×10^{15}	1.529×10^{15}	2.928×10^{15}
6	0.125	1.254×10^{15}	1.344×10^{15}	2.598×10^{15}
7	0.225	1.178×10^{15}	1.287×10^{15}	2.465×10^{15}
8	0.375	4.866×10^{14}	5.341×10^{14}	1.021×10^{15}
9	0.575	2.162×10^{16}	2.318×10^{16}	4.480×10^{16}
10	0.85	5.840×10^{14}	6.012×10^{14}	1.185×10^{15}
11	1.25	5.097×10^{14}	5.217×10^{14}	1.031×10^{15}
12	1.75	1.629×10^{13}	1.677×10^{13}	3.306×10^{13}
13	2.25	1.344×10^9	1.232×10^9	2.576×10^9
14	2.75	5.576×10^9	5.333×10^9	1.091×10^{10}
15	3.5	4.231×10^8	3.397×10^8	7.628×10^8
16	5.0	1.786×10^8	1.427×10^8	3.213×10^8
17	7.0	2.059×10^7	1.646×10^7	3.705×10^7
18	9.5	2.366×10^6	1.890×10^6	4.256×10^6
合計		4.799×10^{16}	5.183×10^{16}	9.983×10^{16}

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の
線源強度 (15×15燃料、A型)

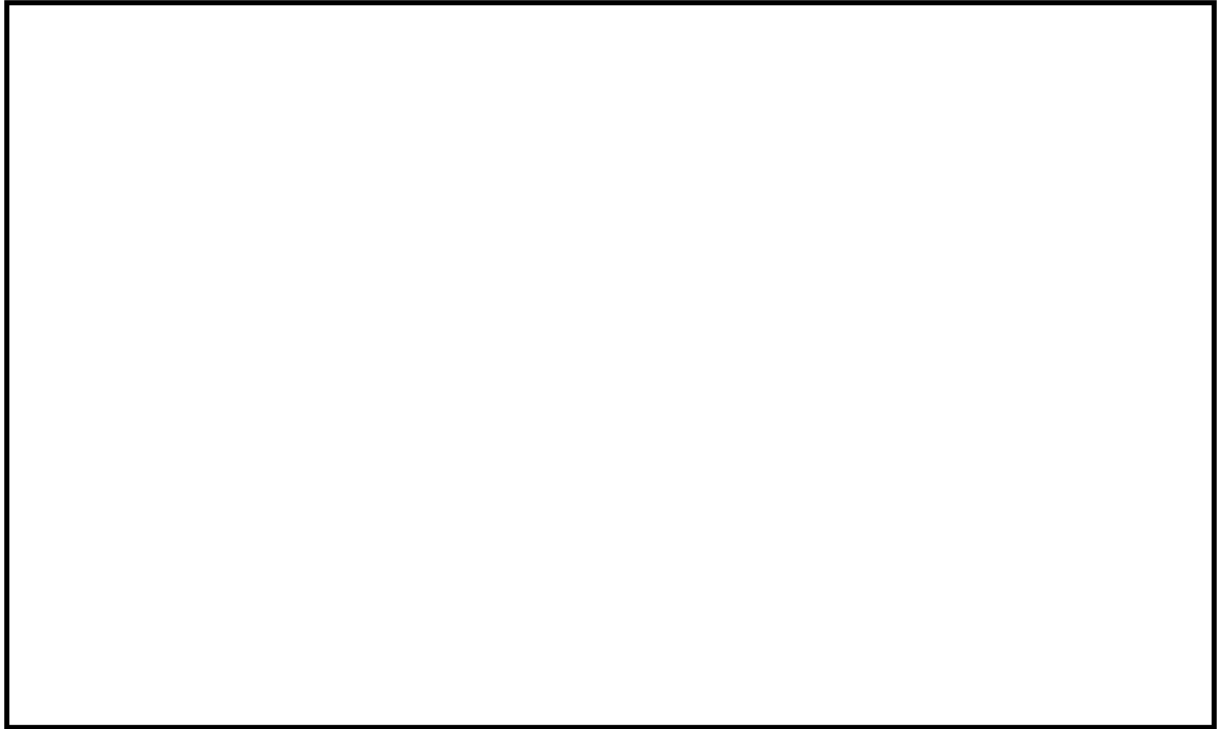
(TK-26型1基あたり)

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	1.392×10^{16}	1.513×10^{16}	2.906×10^{16}
2	0.025	2.804×10^{15}	3.065×10^{15}	5.869×10^{15}
3	0.0375	3.626×10^{15}	3.901×10^{15}	7.527×10^{15}
4	0.0575	2.826×10^{15}	3.091×10^{15}	5.917×10^{15}
5	0.085	1.589×10^{15}	1.728×10^{15}	3.317×10^{15}
6	0.125	1.535×10^{15}	1.633×10^{15}	3.168×10^{15}
7	0.225	1.323×10^{15}	1.442×10^{15}	2.764×10^{15}
8	0.375	5.624×10^{14}	6.157×10^{14}	1.178×10^{15}
9	0.575	2.416×10^{16}	2.583×10^{16}	4.999×10^{16}
10	0.85	1.096×10^{15}	1.120×10^{15}	2.216×10^{15}
11	1.25	7.502×10^{14}	7.645×10^{14}	1.515×10^{15}
12	1.75	2.302×10^{13}	2.356×10^{13}	4.658×10^{13}
13	2.25	1.275×10^{10}	1.375×10^{10}	2.649×10^{10}
14	2.75	6.662×10^9	6.469×10^9	1.313×10^{10}
15	3.5	6.455×10^8	5.566×10^8	1.202×10^9
16	5.0	2.080×10^8	1.649×10^8	3.729×10^8
17	7.0	2.398×10^7	1.902×10^7	4.300×10^7
18	9.5	2.755×10^6	2.185×10^6	4.940×10^6
合計		5.422×10^{16}	5.835×10^{16}	1.126×10^{16}

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の
線源強度 (15×15燃料、B型)

(TK-26型1基あたり)

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	1.228×10^{16}	1.336×10^{16}	2.564×10^{16}
2	0.025	2.432×10^{15}	2.661×10^{15}	5.093×10^{15}
3	0.0375	3.103×10^{15}	3.345×10^{15}	6.447×10^{15}
4	0.0575	2.548×10^{15}	2.791×10^{15}	5.339×10^{15}
5	0.085	1.359×10^{15}	1.482×10^{15}	2.842×10^{15}
6	0.125	1.218×10^{15}	1.303×10^{15}	2.521×10^{15}
7	0.225	1.144×10^{15}	1.248×10^{15}	2.392×10^{15}
8	0.375	4.722×10^{14}	5.177×10^{14}	9.898×10^{14}
9	0.575	2.107×10^{16}	2.256×10^{16}	4.363×10^{16}
10	0.85	5.649×10^{14}	5.799×10^{14}	1.145×10^{15}
11	1.25	4.949×10^{14}	5.048×10^{14}	9.997×10^{14}
12	1.75	1.582×10^{13}	1.623×10^{13}	3.205×10^{13}
13	2.25	1.282×10^9	1.168×10^9	2.450×10^9
14	2.75	5.395×10^9	5.137×10^9	1.053×10^{10}
15	3.5	4.084×10^8	3.254×10^8	7.338×10^8
16	5.0	1.725×10^8	1.368×10^8	3.093×10^8
17	7.0	1.989×10^7	1.577×10^7	3.566×10^7
18	9.5	2.285×10^6	1.812×10^6	4.097×10^6
合計		4.671×10^{16}	5.036×10^{16}	9.707×10^{16}



別紙1-1図 軸方向燃焼度分布の設定

2. 遮蔽解析のモデル化について

遮蔽解析の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。

三次元モンテカルロコードMCNP5では、TK-26型の実形状を三次元でモデル化している。ただし、使用済燃料集合体は、バスケット内で均質化して評価している。なお、キャビティ長は安全側に使用済燃料集合体の長さに等しくモデル化している。

(1) 燃料領域

使用済燃料集合体をバスケット内で均質化してモデル化している。

(2) 解析モデルの入力条件への不確かさの考慮について

解析モデルの入力条件への不確かさとして以下を考慮している。

① 構成部材密度

最低保証密度を使用して原子個数密度を設定。

② 寸法公差

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

(3) 遮蔽解析の保守性

本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・収納制限に対する解析条件の保守性

—ウラン濃縮度を17×17燃料 48,000MWd/t型については最小値である□wt%とする。15×15燃料 48,000MWd/t型についても最小値である□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、使用済燃料集合体の燃焼度（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大の燃焼度を設定している。

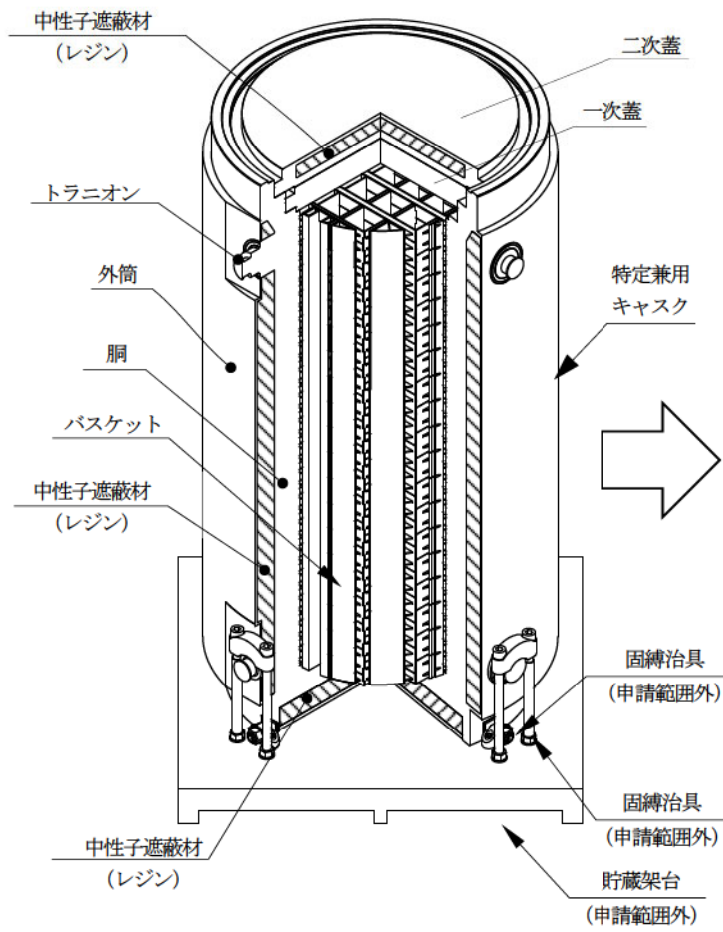
・モデル化の保守性

—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）

—使用済燃料集合体は、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集合体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。



[実形状]

[三次元モデル化]

別紙1-2図 遮蔽解析のモデル化概要

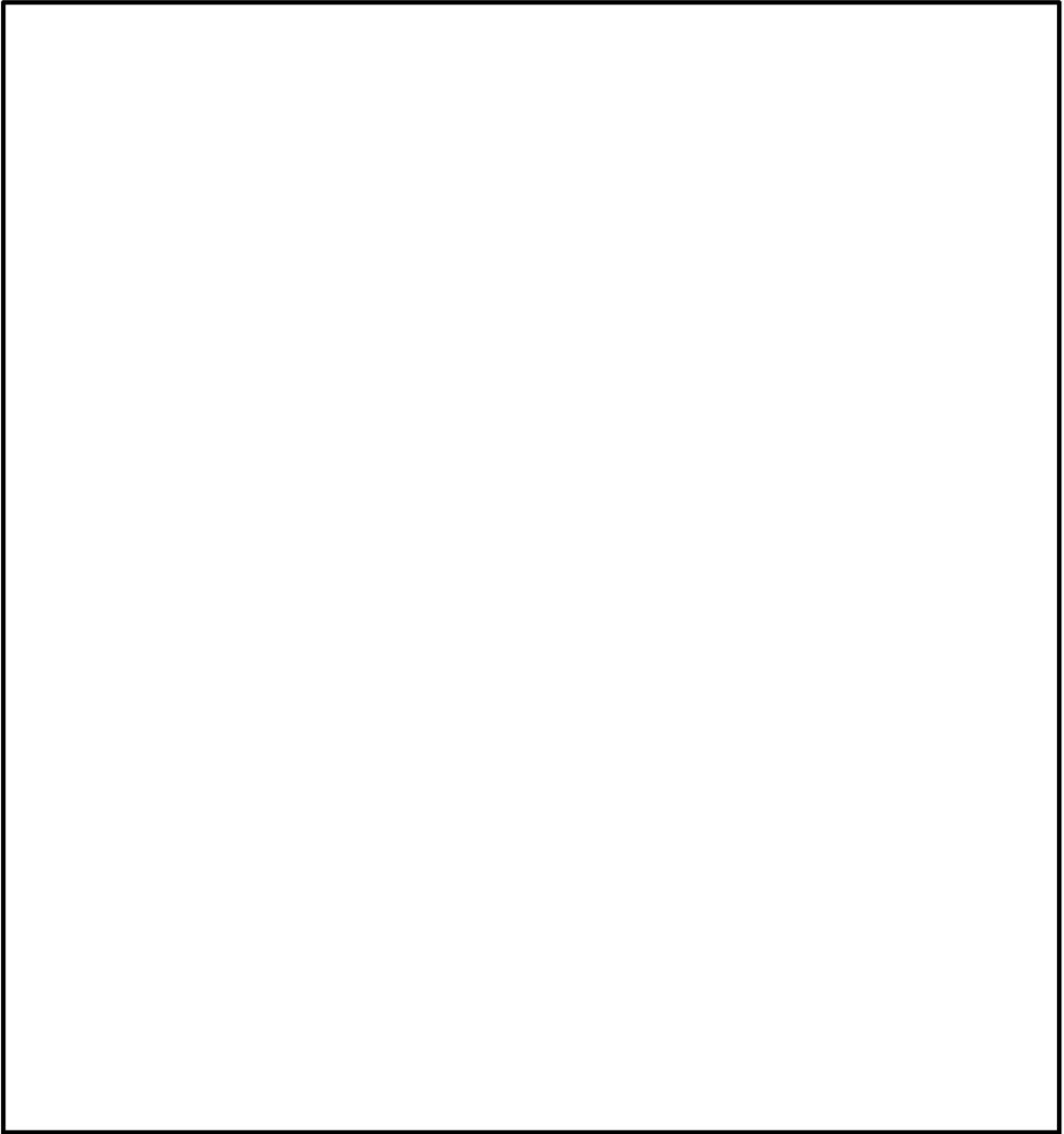


別紙1-3図 (1/3) 遮蔽解析モデル (17×17燃料 A型、45° 断面)

別紙1-21

別紙1-3図 (2/3) 遮蔽解析モデル (17×17燃料 A型、90° 断面)

別紙1-22



別紙1-3図 (3/3) 遮蔽解析モデル (横断面)

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」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⁽¹⁾。

$$\Delta w = 6.18 \times 10^{-4} \times E_p - 5.99$$

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 = $T \times (17 + \ln(t))$
 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、使用済燃料集合体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。設計貯蔵期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率の算定に当たっては、貯蔵初期の最高温度を用いて温度一定の条件で質量減損率を算定する方法もあるが、より合理的な算定方法として、中性子遮蔽材の温度低下を考慮して質量減損率を算定する。温度低下を考慮する際には、劣化パラメータを用いた質量減損率の算定式を、時間区分して適用する。ここで、中性子遮蔽材の温度は部位（蓋部、側部及び底部）により異なり、また、各部位の中性子遮蔽材内においても温度分布を有しているが、保守的に各部位の中性子遮蔽材の最高温度を包絡する温度を用いて算定する。

温度の低下を考慮すると、設計貯蔵期間の劣化パラメータは、各部位のうち温度の最も高い底部中性子遮蔽材で貯蔵初期の最高温度を保守的に基準値である150℃に切り上げて評価すると約□となり質量減損率は約□となる。遮蔽解析ではこれらに裕度を考慮し□の質量減損があるものとして評価する。また、蓋部中性子遮蔽材及び側部中性子遮蔽材についても保守的に同様の質量減損率を適用する。

なお、中性子遮蔽材から放出される主なガス成分は二酸化炭素及び比較的 low molecular weight の炭化水素である⁽¹⁾。遮蔽解析においては、中性子遮蔽材の密度が低下するものとして評価している。ここで、中性子遮蔽に最も寄与する水素に着目した場合、中性子遮蔽材の密度が□低下するものとして評価した水素減損量は、発生ガスによる水素減損量より大きく、保守的であることを確認している。

4. 詳細評価条件

三次元モンテカルロコードMCNP5による解析（以下「MCNP5解析」という。）の主要な評価条件は別紙1-7表に示すとおりである。解析コード及び断面積ライブラリについては別紙4に述べる。また、線源強度設定については前述のとおりである。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。

別紙1-7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		ENDF70 (中性子) MCPLIB84 (ガンマ線)
燃料有効部 ガンマ線源強度	群構造	ORIGEN2群構造 (18群)
	スペクトル	ORIGEN2評価値
構造材放射化 ガンマ線源強度	群構造	1.17MeV 1.33MeV
	スペクトル	1.17MeV : 50% 1.33MeV : 50%
中性子線源強度	群構造	連続エネルギー
	スペクトル	Watt型 ²³⁹ Pu核分裂スペクトル
	実効増倍率	0.30 (注1)
分散低減法		ウェイト・ウィンドウ
タリー (注2)		表面 : F2タリー (半径5cm又は半径10cmの面検出器) 表面から1mの位置 : F2タリー (半径5cm又は半径10cmの面検出器)
統計指標		統計誤差 10%以下 (マニュアル推奨値)

(注1) 線源強度算出時に実効増倍率を考慮しているため、MCNP5による解析では燃料内での核分裂は考慮せず、体系内での実効増倍率を考慮しない固定線源として評価を実施している。

(注2) TK-26型の表面及び表面から1m離れた位置での線量当量率分布をFMESHタリーにて評価し、TK-26型の各領域の最大線量当量率を示す部位の線量当量率をF2タリー (面検出器) を用いて評価した。線量当量率の変動がわずかである側部中央の表面及び表面から1mの位置での線量当量率評価には半径10cmの面検出器を使用し、その他の評価点の線量当量率評価には半径5cmの面検出器を使用した。

(1) 分散低減法

三次元モンテカルロコード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。一般的には、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、かつ遮蔽体が比較的厚い複雑な評価体系であるため、粒子が評価点に到達しづらく、統計誤差が小さくなりづらい評価体系である。よって、本評価では、統計誤差を低下させるための分散低減法として、非アナログモンテカルロ法のうち、空間及びエネルギーごとに分散低減のパラメータを設定するウェイト・ウィンドウ法を使用した。

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

本評価でのウェイト・ウィンドウパラメータは、補助ツールであるADVANTG ver. 3.0.3において、基本的に空気、鉄、レジンなどの物質ごとに隣り合うメッシュ分割領域での粒子のウェイトが大きく変わらないメッシュ分割厚さを設定し、FW-CADIS法を使用して算出した。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

TK-26型の表面及び表面から1m離れた位置での線量当量率分布の評価にはFMESHタリーを使用し、線量当量率分布の連続性を確認した。その後、得られた線量当量率分布からTK-26型の各領域の最大線量当量率を示す評価点を抽出し、その評価点における線量当量率をサーフェスクロッシングエスティメータであるF2タリー（面検出器）にて評価した。面検出器の大きさは半径5cmの円を基本としたが、線量当量率の変動がわずかである側部中央の表面及び表面から1mの位置での線量当量率評価には半径10cmの面検出器を使用した。

(3) 統計指標

三次元モンテカルロコードMCNP5では、解析値に統計誤差を持つことから、解析値が解析精度として十分に信頼できるものとなっているかを確認するため、統計誤差（relative error）が全ての解析結果においてMCNPコードマニュアルの推奨値である10%以下となっていることを

確認している。

また、MCNP5コードによる解析結果の信頼性を確認するため、別紙1-8表に示す10個の統計指標を確認している。解析結果の中には一部の統計指標が「no」（満足していない）となっているものもあるが、統計誤差は統計指標を満足し（10%以下）、かつ、tally fluctuation charts（最終ヒストリに至るまでの、タリーの統計上重要な値の変動チャート）により、統計指標が「yes」の範囲から「no」の範囲に変化する前後での線量当量率の値が大きく変化しないこと等を確認して、解析結果は信頼性のあるものと判断している。

ここでは、17×17燃料（A型）収納時の底部径方向表面の中性子線量当量率（表面の最大値）についての評価例を一例として示す。

このタリーのアウトプットデータを別紙1-4図(1/3)に示す。このタリーでは、10個の統計指標のうち、以下に示すとおり4個の統計指標が「no」となっている。しかしながら、相対誤差は統計指標を満足し（10%以下）、かつ、tally fluctuation charts（最終ヒストリに至るまでの、タリーの統計上重要な値の変動チャート）の分析により、解析結果は信頼性のあるものと判断している。

relative error (相対誤差)	relative errorの値が単調に減少すること。
	relative errorの値が $1/N^{0.5}$ で減少すること。
variance of the variance (相対誤差の相対変化)	variance of the varianceの値が単調に減少すること。
	variance of the varianceの値が $1/N$ で減少すること。

即ち、ヒストリ数が393216000から425984000の間にrelative errorが0.0038から0.0044に増加しており、VOVも大きく増加している。これはweightの大きな粒子がタリーに到達したため、その影響を受けて上記4個の統計指標が「no」と判定されたと考えられる。しかしながら、この時の線量当量率（mean）の変化は3.8（=1177.4-1173.6）であり、この値はerror（relative error × mean=0.0044×1177.4=5.2）程度である。（別紙1-4図（2/3）参照）

また、ヒストリ数 425984000以降の統計指標の変動チャートを見ると、meanの値はほぼランダムであり、relative error（相対誤差）及びvariance of the variance（相対誤差の相対変化）は単調に減少している。よって、大きな変動のあったヒストリ数以降においては、「no」になった統計指標についてもその判定条件にほぼ合致した傾向を示していると考えられる。（別紙1-4図（3/3）参照）

以上の検討結果から、このタリーの結果は信頼性のあるものと判断している。

上記の検討結果に合わせて、面検出器により求めた解析結果がFMESHタリーによる線量当量率分布の結果と数%以内の範囲で合っていることを確認して面検出器により求めた解析結

果は妥当であると判断している。

別紙1-8表 統計指標項目

指標の項目		指標の確認目的	統計指標 ^(注)
mean		適切にモンテカルロ法で計算できていることの確認。	計算収束判定段階において、発生粒子数Nの増加に伴い、平均値が単調増加したり減少したりしないこと。(random)
relative error	value	統計的な精度を表す指標。	0.1以下であること。(≤ 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。
	decrease rate		計算収束判定段階において、valueが $1/N^{0.5}$ で減少すること。(1/sqrt(nps))
variance of the variance	value	相対誤差の確度を表す指標。	0.1以下であること。(≤ 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。
	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	タリーの信頼性を表す指標。	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		適切にサンプリングされていることの確認。	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以上であること。(≥ 3.00)

(注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)

[10個の統計指標の判定例] (注)

results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally 122

tfc bin behavior	--mean-- behavior	-----relative error----- value	decrease	decrease rate	----variance of the variance---- value	decrease	decrease rate	--figure of merit-- value	behavior	-pdf-slope
desired	random	<0.10	yes	1/sqrt(nps)	<0.10	yes	1/nps	constant	random	>3.00
observed	random	0.00	no	no	yes	no	no	constant	random	yes
passed?	yes	yes	no	no	yes	no	no	yes	yes	yes

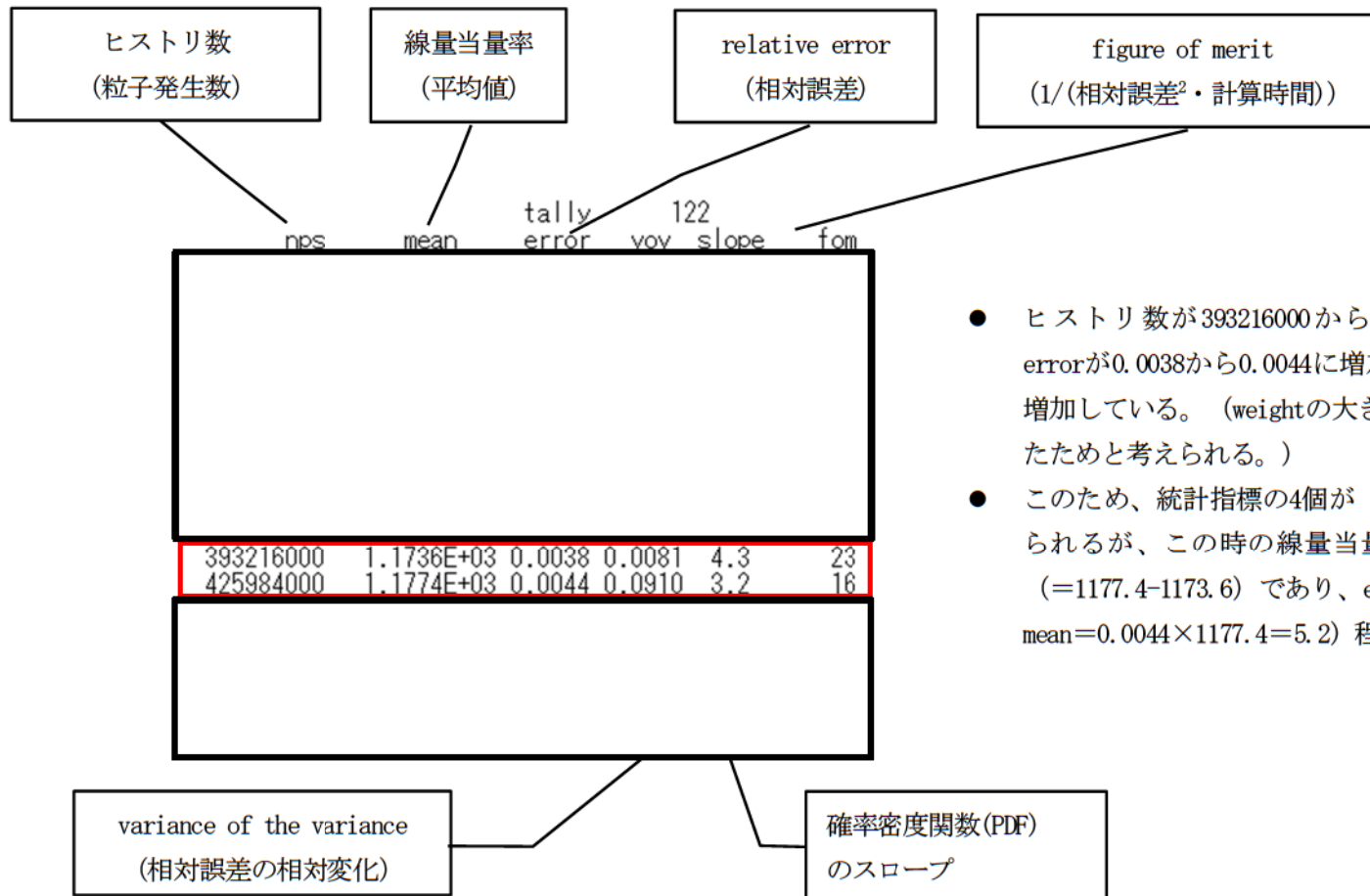
(注) 17×17燃料 (A型) 収納時の底部径方向表面の中性子線量当量率 (表面の最大値) の例 (MCNPのアウトプットより抜粋)

- このタリーの10個の統計指標のうち、以下の4個が「no」である。

relative error (相対誤差)	relative errorの値が単調に減少すること。
	relative errorの値が $1/N^{0.5}$ で減少すること。
variance of the variance (相対誤差の相対変化)	variance of the varianceの値が単調に減少すること。
	variance of the varianceの値が $1/N$ で減少すること。

- 上記のようにこのタリーの統計指標は10個の内、4個が「no」と判定されているが、相対誤差は統計指標を満足し (10%以下)、かつ、tally fluctuation charts (最終ヒストリに至るまでの、タリーの統計上重要な値の変動チャート) の分析により、解析結果は信頼性のあるものと判断している。(別紙1-4図 (2/3) 及び別紙1-4図 (3/3) 参照)

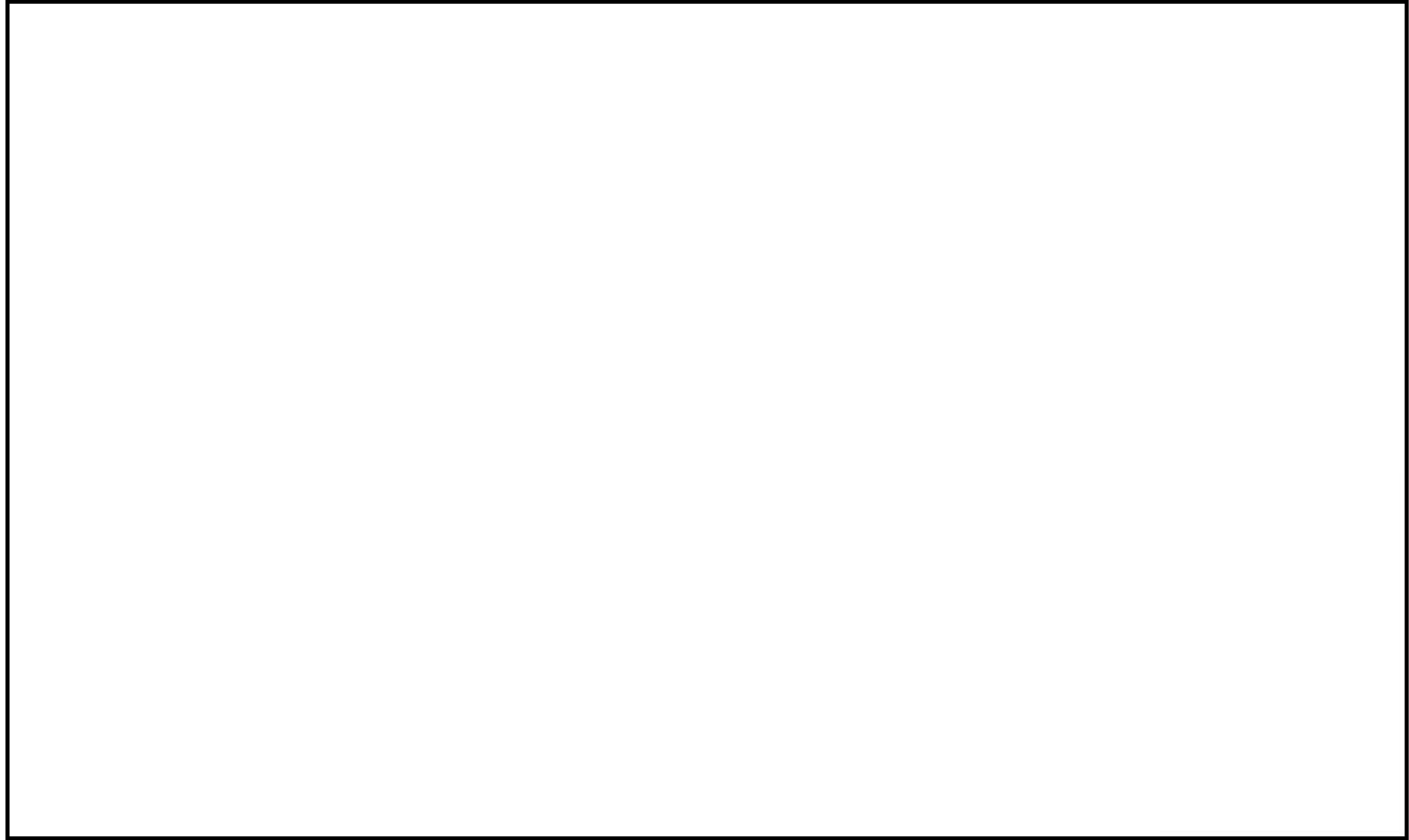
[tally fluctuation chartの例] (注)



- ヒストリ数が393216000から425984000の間にrelative errorが0.0038から0.0044に増加しており、VOVも大きく増加している。(weightの大きな粒子がタリーに到達したためと考えられる。)
- このため、統計指標の4個が「no」と判定されたと考えられるが、この時の線量当量率 (mean) の変化は3.8 (=1177.4-1173.6) であり、error (relative error × mean=0.0044×1177.4=5.2) 程度である。

(注) 17×17燃料 (A型) 収納時の底部径方向表面の中性子線量当量率 (表面の最大値) の例 (MCNPのアウトプットより抜粋)

[統計指標の変動の例] ^(注)



(注) 17×17燃料 (A型) 収納時の底部径方向表面の中性子線量当量率 (表面の最大値) の例 (MCNPのアウトプットより作成)

5. 参考文献

- (1) A. Oishi, et al., “Evaluation of Neutron Shielding Materials, TN VYAL B™ and KOBESH EPR™ Resin for Interim Storage Casks” The 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 2013, August 18-23, 2013, San Francisco, CA, USA.

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TK-26型の実効増倍率を求め、中性子源強度に考慮した。

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

ここで、

N_0 : TK-26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TK-26型の実効増倍率

実効増倍率評価は17×17燃料のA型とB型、15×15燃料のA型とB型、それぞれについて行った。結果として15×15燃料のA型を収納した場合が最も実効増倍率が高かった。15×15燃料のA型を収納した場合の実効増倍率の評価に用いた使用済燃料集合体の条件、評価結果及び線源強度設定に用いた実効増倍率を別紙2-1表に示す。

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

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

核分裂生成物：⁹⁹Tc、¹⁰³Rh、¹³¹Xe、¹³³Cs、¹⁴⁵Nd、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	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)	43,000
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	0.30

(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)

中性子スペクトルを²³⁹Puの核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性

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

使用済燃料集合体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集合体の場合、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、TK-26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、中性子源強度の最も大きい17×17燃料のA型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)

(TK-26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	9.358×10^7	8.706×10^7	1.806×10^8
	自発核分裂	4.902×10^9	3.914×10^9	8.816×10^9
	合計	4.996×10^9	4.001×10^9	8.997×10^9

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 ²³⁹Puの核分裂反応
- ③ ²³⁵Uの核分裂反応

ここで、²³⁹Pu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、²³⁹Pu及び²³⁵U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、²⁴²Cm、²⁴⁴Cmの自発核分裂による中性子源スペクトルに対して、²³⁹Pu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、²³⁵Uの核分裂による中性子源スペクトルに対しても²³⁹Puの核分裂による中性子源スペクトルの高エ

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²³⁹Pu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)

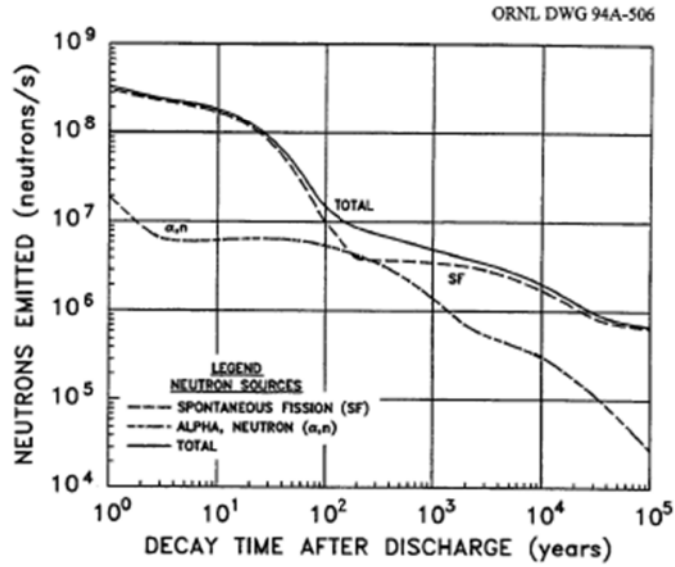


Fig. 9.2. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTHM): PWR/33,000 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

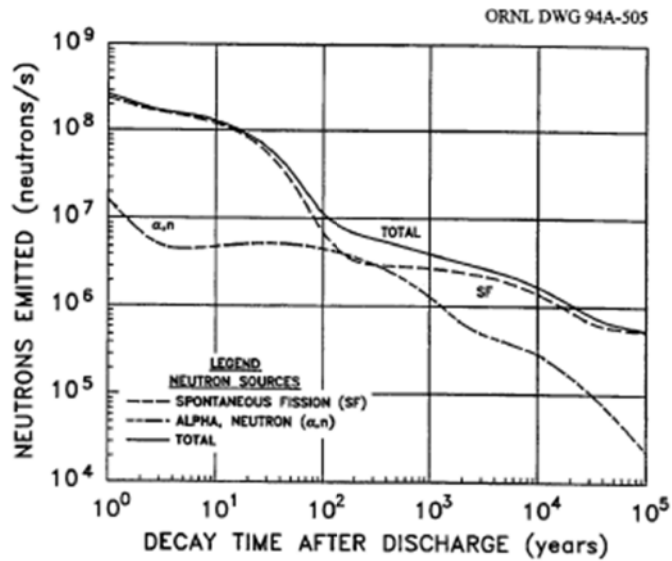
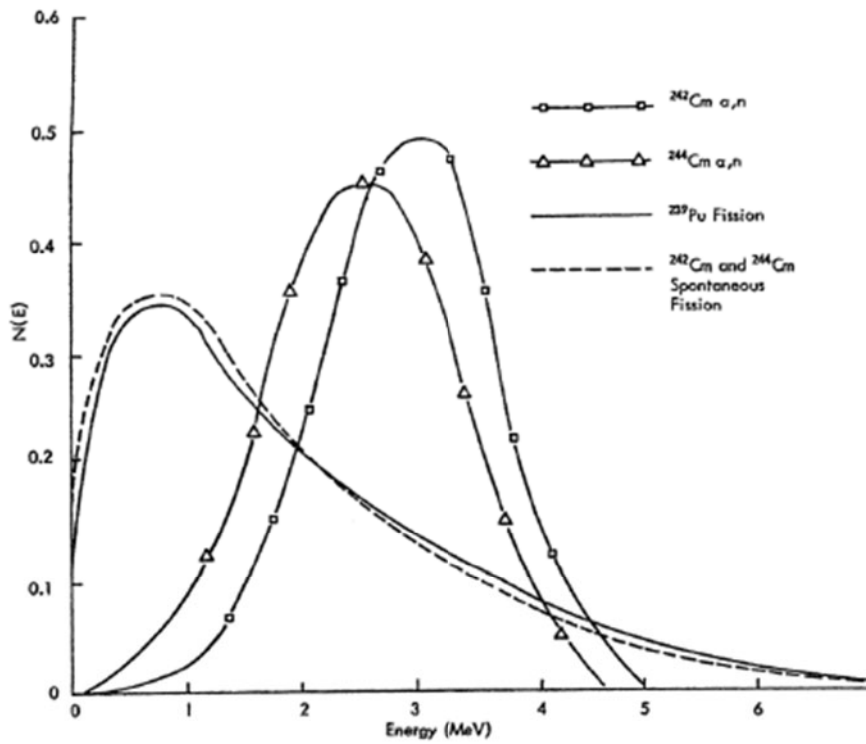


Fig. 9.3. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTHM): BWR/27,500 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

別紙3-1図 使用済燃料集合体の自発核分裂及び (α, n) 反応に伴う中性子源強度と冷却期間との関係



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⁾

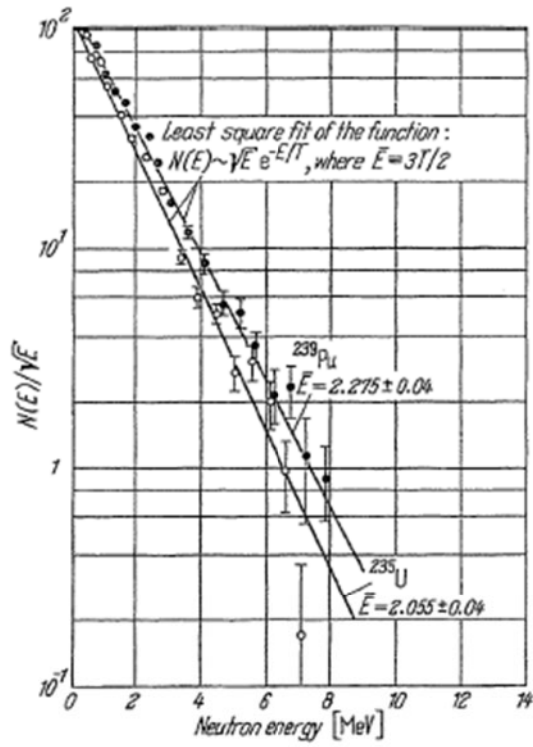


Fig. 2.3.-2. Typical measured fission neutron spectra of $^{235}\text{U} + n_{th}$ and $^{239}\text{Pu} + n_{th}$.

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

遮蔽解析に使用する解析コードについて

TK-26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Oak Ridge National Laboratory（以下「ORNL」という。）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。

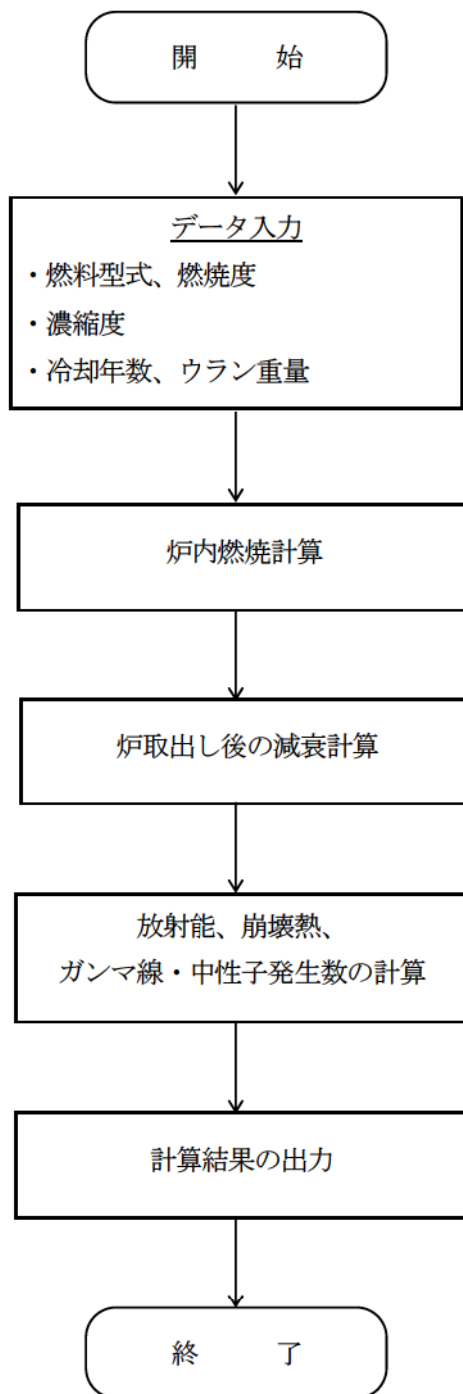
(3) 解析フロー

ORIGEN2コードの計算フローを別紙4-1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4-2図に示す。



別紙4-1図 ORIGIN2コードの計算フロー図

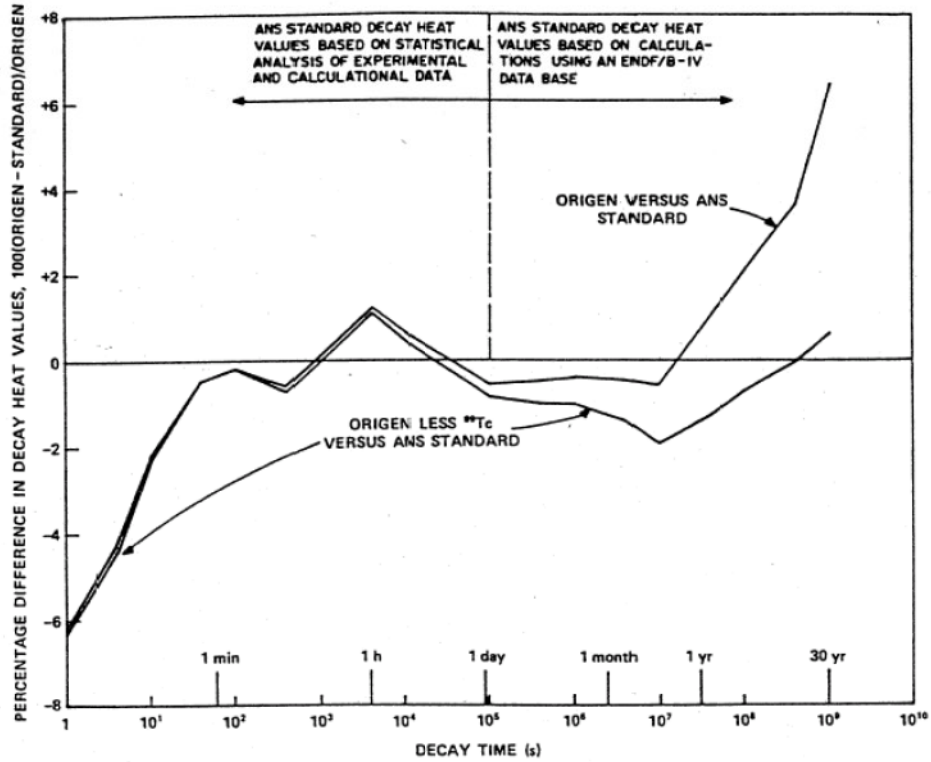


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10¹³-s irradiation of ²³⁵U.

(注) ORIGEN2の崩壊熱は、ANS標準崩壊熱と比較して、15年以上（TK-26型に収納される使用済燃料集合体の冷却期間）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⁹⁹Tc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⁹⁹Tc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4-2図 ORIGEN2コードの検証例⁽²⁾

別紙4-3

2. MCNP5コード

(1) 概要

三次元輸送計算コードMCNP5⁽³⁾（以下「MCNP5コード」という。）は、米国のLos Alamos National Laboratory（以下「LANL」という。）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り扱うことができ、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別紙4-3図に示す。

(4) 使用実績及び検証

MCNP5コードが開発された米国では、MCNP5コードが放射性物質の輸送・貯蔵容器などの遮蔽解析に用いられ、容器の設計基準が確立されている。米国規制当局による、乾式キャスク貯蔵システムの審査指針NUREG-2215⁽⁴⁾では、遮蔽解析ツールとしてMCNPコードが記載されている。また、使用済燃料集合体の貯蔵容器であるTN-32型の遮蔽解析⁽⁵⁾においてMCNP4B2コード^(注)、TN-40型の遮蔽解析⁽⁶⁾においてMCNP5コードによる評価が行われている。

国内では「原子力発電所放射線遮蔽設計規程」JEAC 4615⁽⁷⁾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解析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解析に用いられている。ただし、国内の使用済燃料乾式貯蔵容器でのMCNP5コードによる許認可実績が少ないため、以下のとおり適用性を検証する。

(注) MCNP5コードの旧バージョンであるが、主な変更点はプログラム言語の変更であり、物理・数学モデルは同じである。

a. MCNP5コードの許認可実績

国内の型式証明申請及び型式指定においては、原子炉等規制法第四十三条の二十六の二第1項の規定により、特定容器等の型式の設計について型式証明（M-DPC21001）を受けたTK-26型、及び発電用原子炉施設に係る特定機器の型式の指定（D-SE-2305311）を受けたMSF-24P(S)型の遮蔽設計にMCNP5コードが用いられた実績がある。

また、核燃料物質の輸送容器でも遮蔽設計にMCNP5コードが用いられた実績がある⁽⁸⁾。先行輸送容器の許認可実績とTK-26型の遮蔽解析における解析条件を比較した結果を別紙4-1表にまとめる。両者の解析コード、線源条件、遮蔽構造、及び判定基準は同等であり、新規性はない。

b. MCNP5コードの適用妥当性検証

MCNP5コードをTK-26型の遮蔽解析に適用することの妥当性について、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」⁽⁹⁾（以下「学会標準」という。）に示されている以下のエレメントを参考に確認を実施した。

- エレメント1 概念モデルの開発
- エレメント2 数学的モデル化
- エレメント3 物理的モデル化
- エレメント4 シミュレーションモデルの予測性能の判断

(a) 概念モデルの開発（エレメント1）

使用済燃料の輸送・貯蔵容器の遮蔽解析においては、使用済燃料から放出される中性子やガンマ線と、容器を構成する物質の原子核との相互作用を数学的、かつ物理的に裏付けされた解法によって解析を行い、容器表面及び表面から1mの位置での線量当量率を評価する。

MCNPコードは、放射線粒子の吸収・散乱等、放射線と物質との相互作用等のミクロ的現象について、ボルツマンの輸送方程式をモンテカルロ法を用いて放射線を伴う物理現象をほぼ近似なしで解く解析コードである。よって、物質透過やストリーミング等を含む一般的な放射線挙動を評価することが可能である。

MCNPコードでの概念モデルは、中性子やガンマ線等の吸収・散乱反応等のミクロ的現象のシミュレーションに対して開発が行われており⁽¹⁰⁾、その結果は、原子炉や使用済燃料の輸送・貯蔵容器等の個々の遮蔽解析で考慮が必要となる放射線と物質との相互作用等のミクロ的現象に対するシミュレーションの概念モデルを包含し、物質透過やストリーミング等の物理的現象に対するシミュレーションの概念モデルも包含する。

(b) 数学的モデル化 (エレメント2)

MCNPコードでは、中性子やガンマ線等の放射線挙動について、ボルツマンの輸送方程式を疑似乱数を用いた統計学的手法であるモンテカルロ法によりシミュレーションを行っている。この数学的モデル化は、本解析コードの開発元であるLANLにて長年に渡り検討されており、概念モデルに対し、どれだけの忠実度をもって数学的モデル化が行われているかを、数理モデルへの変換に関する検証が、検証プロセスも含めた観点から繰り返し検討されている⁽¹⁰⁾、⁽¹¹⁾、⁽¹²⁾。

また、最新バージョンのリリースの際には、後述の物理的モデル化の有効性並びに検証を含むリグレッションテスト（機能追加やバグ修正などで解析コードの一部が改修された際に、それまでの動作に意図しない変更や問題が生じていないか確かめるテスト）及び、以前のバージョンにおける問題（バグ、出力形式、エラーチェック等）の修正が行われている⁽¹³⁾。なお、これらの検証では、ユーザーが使用可能な適用範囲（計算機OS及びコンパイラの違いと、並列計算を行う場合の適用性）が示されている。

(c) 物理的モデル化 (エレメント3)

MCNPコードにおける物理的モデル化については、開発元のLANLにおける検証で、評価済みの実験データを用い計算を実行して、MCNPコードが解くように設計された方程式（数学的モデル）が、物理的モデルを忠実に解けることを確認するために、ベンチマークテスト及び他の解析コードによる解析結果との比較が多数実施されている。なお、参考にした学会標準の本エレメントでの確認事項は、ベンチマークテストに用いる実験データ等の整備までであり、ベンチマークテスト結果等による不確かさの定量評価は「シミュレーションモデルの予測性能の判断 (エレメント4)」での確認事項とされているが、本説明資料における物理的モデル化の説明では、ベンチマークテスト結果等も併せて記載した。

中性子に関する検証は、1960年代後半から1980年代にかけて米国のLawrence Livermore National Laboratory (LLNL) で行われたパルス式中性子源からの検出器時間応答実測値、1980年に米国のOak Ridge National Laboratory (ORNL) で行われたD-T核融合炉の遮蔽実験についてベンチマーク解析結果が示されており、中性子束の実測値と解析値が良く一致することが示されている⁽¹³⁾、⁽¹⁴⁾。なお、D-T核融合炉遮蔽実験には、使用済燃料の輸送・貯蔵容器の遮蔽評価における、遮蔽材の有無によるストリーミングや中性子の吸収・散乱反応等の検証が含まれている。

また、MCNPコードと同様にモンテカルロ法を用いている三次元輸送計算コードMVP（旧：日本原子力研究所、現：日本原子力研究開発機構）との比較結果も示されており、

類似の解析コードの計算結果とも良く一致することが示されている⁽¹³⁾、⁽¹⁴⁾。この比較解析では、ボイド領域を含む単純な幾何形状で、単一エネルギーで等方散乱する線源による中性子の吸収・散乱反応に対する中性子束の比較結果が示されている。

ガンマ線に関する検証は、LANLからガンマ線のベンチマーク問題として、6種類の検証結果が報告されている⁽¹⁵⁾。LANLは、この検証により、MCNPコードがモンテカルロ法に固有の統計誤差の範囲内で、6種類全てのシミュレーションが実験結果を予測でき、MCNPコードが広範囲の光子輸送問題を正確にモデル化できると結論付けている。以下に6種類の検証結果について概要を示す。

1) 無限媒質中における等方散乱と断面積に関する問題

ガンマ線 (1MeV) が無限媒質中で0% (全吸収)、30%及び90%散乱する場合の解析解との比較による検証結果。

2) 単純な球体での散乱に関する問題

半径1cmの真空の中心からガンマ線 (1MeV) を発生させ、球体の媒質 (30%散乱) を散乱無しの場合と1回散乱する場合の解析解との比較による検証結果。

3) 無限媒質中におけるガンマ線源に関する問題

無限媒質中心からガンマ線 (1MeV、若しくは10MeV) を発生させ、媒質中 (アルミニウム、若しくは鉛) でのガンマ線の主要な反応 (光電効果、コンプトン散乱、電子対生成) の解析解との比較による検証結果。

4) スカイシャイン実験 (参考文献(13)にも引用されている)

1980年にカンザス平原の遮蔽研究施設で実施された⁶⁰Co線源によるスカイシャイン実験で測定された線量率に対するベンチマーク解析。

5) 放射性物質降下場における実験

1957～1968年に行われた核兵器実験での放射性物質 (⁶⁰Co) 降下で測定された線量率に対するベンチマーク解析。

6) HUMOBILE TLDの実験

熱ルミネッセンス線量計 (TLD) により測定された線量率に対するベンチマーク解析。鉄キャニスターで覆われたテフロン内にTLDディスク (LiF) を配置し、6種類の線源を用いて線量率を測定。

(d)シミュレーションモデルの予測性能の判断 (エレメント4)

MCNPコードで採用されているモンテカルロ法は、ランダムサンプリングを使用して確率論的問題を解決する手法であり、コンピュータ上で数値的に実行される物理実験 (シミュレーション) と言え、このシステムは、個々の物理現象に対する多数の試行を行い、平均

値又は確率を算出するように構築されている。なお、物理現象の試行には、信頼性の高い断面積ライブラリが必要であり、シミュレーションの予測性能を判断する上で重要なものとなる。（断面積ライブラリについては(5)項参照）

MCNPコードのシミュレーションの予測性能については、1983年までは主に米国内で検討され改良が重ねられていたが、1983年以降はコードが配布された国々における検証結果等も踏まえた検討が行われるようになり、MCNP5コードが公開されるまでに、シミュレーションの予測性能に関する膨大な知見が蓄積され、プログラムに反映されている⁽¹⁶⁾。

その結果、MCNPコードは、保健物理、原子炉、臨界安全性、核保障措置、高エネルギー物理学、荷電粒子輸送、遮蔽、複雑な実験の計画など、幅広い分野に適用されており、TK-26型の遮蔽評価を行う上で、十分な信頼に足るシミュレーションの予測性能を持つものと判断している。

c. MCNP5コードのTK-26型への適用妥当性について

前項にて、MCNP5コードの適用妥当性を示した。TK-26型の遮蔽評価では、適用妥当であると判断したMCNP5コードを用い、安全解析条件に保守性を考慮した解析を行っている。しかしながら、LANLでは使用済燃料用キャスクに対するベンチマーク解析が直接行われていないため、使用済燃料輸送容器の測定実験に対するベンチマーク解析に関する参考文献をベースにTK-26型への適用妥当性、及び安全解析条件における保守性について確認した。

確認には、使用済燃料輸送容器であるTN-12/2型の体系での放射線透過試験の測定値とモンテカルロ計算コードによる遮蔽解析結果とを比較した参考文献⁽¹⁷⁾を用いて検討した。なお、TN-12/2型は、国内の原子力発電所の使用済燃料を仏国で再処理するための輸送に用いられた輸送容器である。

TN-12/2型の遮蔽解析では、TK-26型の遮蔽評価と同様の保守的な結果を得るための安全解析条件についてMCNP4Aコード及びSAS4Mコードの2つのモンテカルロ解析コードを用いて行われている。TN-12/2型とTK-26型の解析条件の比較を別紙4-2表に示すが、両者の解析条件はほぼ同等である。

ここでは、安全解析条件の解析結果について、測定点が多く線量当量率の分布が確認できる側部方向の測定値とその比較解析結果について主に着目して行った。

TN-12/2型の線量当量率の実測値について、比較解析の評価位置を別紙4-6図に、評価結果を別紙4-7図に示す。また、比較解析で使用された解析コード及び断面積ライブラリを別紙4-3表に示す。なお、本参考文献では、MCNP5コードの旧バージョンであるMCNP4Aコードが使用されているが、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

同じである。

比較解析において、TN-12/2型輸送キャスクの安全解析条件で解析が行われており、測定N数2の実測値との比較において全体的な線量当量率の分布傾向が概ね一致していることが確認されている。しかしながら、安全解析条件で解析しているため、実測値 (測定N数2のばらつきを含む) を上回る線量当量率が得られている。以下に参考文献における実測値と解析結果との比較、及び比較解析の保守性についてまとめた。

(a) ガンマ線の線量率評価結果について

測定でのガンマ線の最大線量当量率は、容器側部表面では別紙4-6図の⑤、容器側部表面から1mでは同図の④の評価位置で得られる。最大線量率が得られる位置での各解析コードによる解析結果は実測値に対して以下となる。

- ・MCNP4Aコード（ガンマ線）： 表面で約1.5倍、表面から1mで約1.2倍
- ・SAS4Mコード（ガンマ線）： 表面で約1.2倍、表面から1mで約1.1倍

(b) 中性子の線量率評価結果について

測定での中性子の最大線量当量率は、容器側部表面では別紙4-6図の⑤、容器側部表面から1mでは同図の④の評価位置で得られる。最大線量率が得られる位置での各解析コードによる解析結果は実測値に対して以下となる。

- ・MCNP4Aコード（中性子）： 表面で約1.6倍、表面から1mで約1.1倍
- ・SAS4Mコード（中性子）： 表面で約2.1倍、表面から1mで約1.6倍

上記の実測値と解析結果との比較結果を別紙4-4表にまとめて示す。

(c) 安全解析条件の保守性について

以下に安全解析条件で考慮されている保守性についてまとめる。

1) レジン厚さ及びバルサ材の密度

安全解析条件では、レジン厚さ及びバルサ材の密度として最低保証値が用いられている。すなわち、レジン厚さについて、実際の平均厚さである11.2cmに対し、製造で保証されている最小厚さの10cmで評価されている。また、バルサ材の密度について、実際の密度である 0.21g/cm^3 に対し、最小密度の 0.20g/cm^3 で評価されている。

2) 燃焼度分布の影響

使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布については、ピーキングファクター（PF）を最大燃焼度と平均燃焼度の典型的な比率として一律1.15と設定している。実測時に実装された使用済燃料の燃焼度分布に関するデータが非公開であったため、これ以上の詳細な議論はできないが、側面方向で解析結果が過大評価の傾向にあるのは、PFの設定に起因している可能性がある。

3) ^{60}Co による放射化ガンマ線

^{60}Co による放射化ガンマ線源については、使用済燃料集合体の構造材の各材料中に ^{60}Co 不純物が最大0.1%含有されるとして保守的な条件が設定されている。しかしながら、実際の平均的な不純物レベルはもっと小さいと考えられるが、詳細なデータがないので実際の放射化ガンマ線源強度を詳細に評価することはできない。

(d) 中性子レムカウンターの影響について

参考文献(17)では、中性子の表面線量当量率の測定値に及ぼす検出器（中性子レムカウンター）の影響について検討されている。一般的に、中性子レムカウンターは、メーカー及び製品毎に形状が異なり、有感部までの距離による減衰や検出器の角度依存性の影響を受ける。の位置や領域が異なる。本論文で用いられた中性子レムカウンターの有感部は、容器表面に最も近い位置でも約6cmの距離があるが、解析では、容器表面で線量当量率を算出している。容器表面と表面から6cm離れた位置での線量当量率は、厳密には、距離による減衰や検出器の角度依存性の影響がある。

本参考文献では、レムカウンターの応答の角度依存性による容器表面の線量当量率の測定値は、解析結果の約0.9倍程度となると考察されている。また、レムカウンターのサイズの影響により、実際の測定値は容器表面の値から10%程度低くなると考察されている。しなかしながら、容器表面における解析結果は測定値に対して、概ね20%程度、又はそれ以上に上回っており、その影響は、前述の1)～3)に示した解析条件の保守性に包含される。

以上のとおり、TN-12/2型使用済燃料輸送容器の測定値と比較解析の結果から、MCNPコードの解析結果は、測定値の線量当量率分布の傾向と概ね一致しており、安全解析条件では実測値よりも保守的に評価されていることが確認されている。

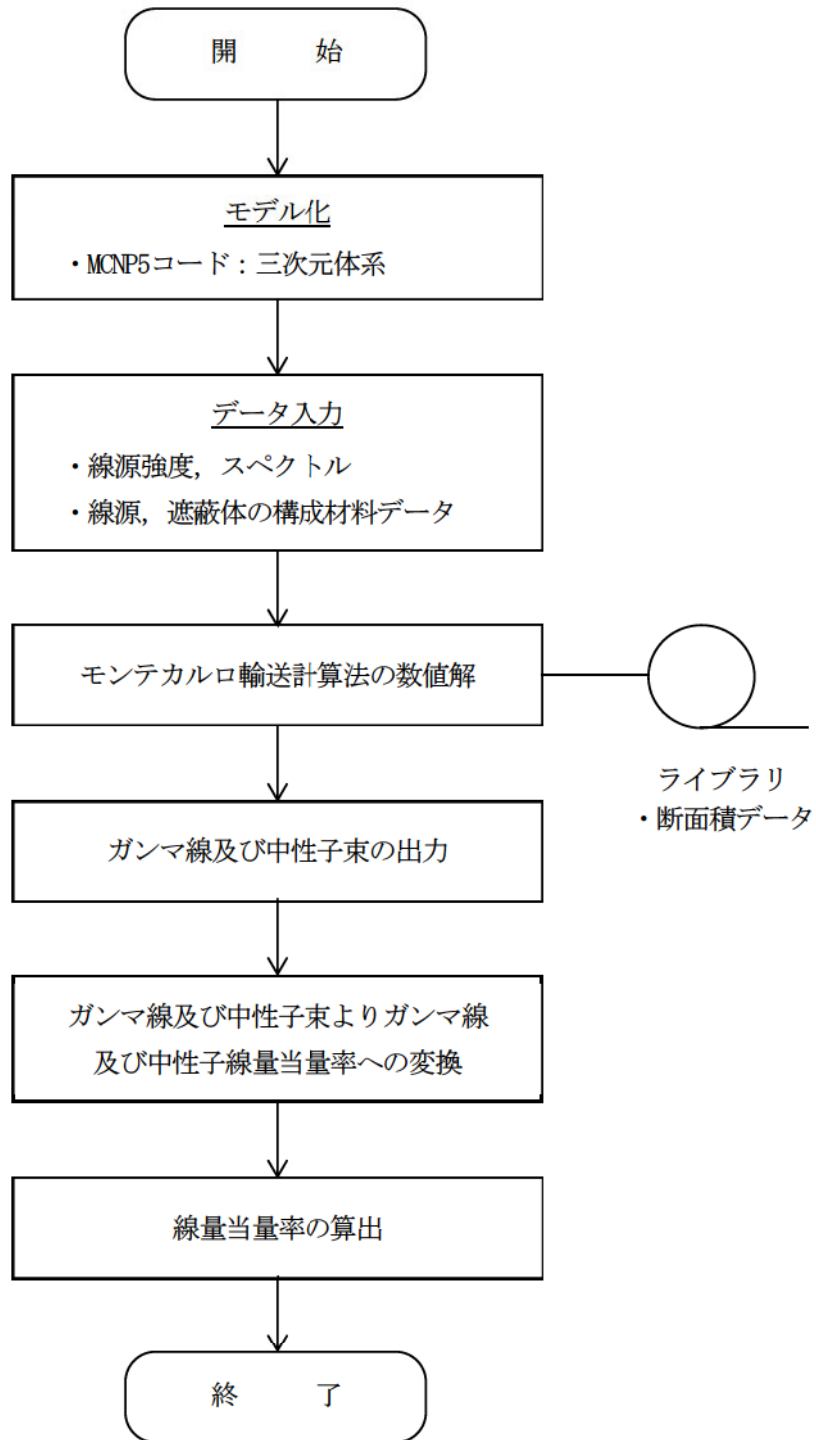
また、以上の文献に加えて、NEACRPのキャスクベンチマーク問題として採用されたTN-12/1型使用済燃料キャスクの中性子線量率分布⁽¹⁸⁾、国内のNFT-38B型使用済燃料キャスクの中性子及びガンマ線量率分布⁽¹⁸⁾においてMCNP5コードで断面積ライブラリENDF/B-VII等

のMCNPDATAを用いた解析値と比較され妥当性が検証されている。また、NFT-14P型使用済燃料キャスクの中性子及びガンマ線量率分布⁽¹⁸⁾において、MCNP5コードで断面積ライブラリfsx1b331、MCPLIB02を用いた解析値と比較され妥当性が検証されている。

参考文献(18)において、NFT-38B型及びNFT-14P型輸送容器のベンチマーク解析ではレムカウンターのサイズの影響を考慮した計算結果と実施値の比較が行われている。その解析結果は、測定値の線量当量率分布の傾向と概ね一致していることが確認されている。

以上より、MCNP5コードをTK-26型の遮蔽解析に適用可能であると判断した。

なお、TK-26型の遮蔽評価では、参考文献(17)における評価と同様に保守的な結果を得るために、収納する使用済燃料集合体の燃焼度分布を考慮した線源強度、⁶⁰Coによる放射線源強度、遮蔽材の寸法及び密度等の条件を保守的に設定したうえで、TK-26型の表面及び表面から1mの位置における線量当量率を評価している。したがって、TK-26型の安全解析では、TN-12/2型使用済燃料輸送容器と同様に保守的な条件設定をしていることから、本論文と同等の保守性を有した評価となっていると考えられる。



別紙4-3図 MCNP5コードの解析フロー

別紙4-1表 先行輸送容器許認可実績とTK-26型の遮蔽解析条件の比較

項目		核燃料物質輸送容器 ⁽⁸⁾	TK-26型 (特定兼用キャスク)	備考
解析コード		MCNP5	MCNP5	同一
ライブラリ	中性子	JENDL-3.3	ENDF70	ENDF70 : ENDF/B-VIIを基にLANLで整備
	ガンマ線	MCPLIB84	MCPLIB84	同一
線源条件	中性子	ORIGEN-Sの出力	ORIGEN2の出力	
	燃料有効部ガンマ線	ORIGEN-Sの出力	ORIGEN2の出力	
	放射化ガンマ線	—	⁵⁹ Coの放射化	
本体遮蔽構造	ガンマ線遮蔽材	炭素鋼、ステンレス鋼	炭素鋼	遮蔽に用いられる材料厚さや材質は異なるが、ガンマ線及び中性子を遮蔽することにおいて、同等の機能を有する。
	中性子遮蔽材	ポリエチレン	レジン (エチレンプロピレン系ゴム)	
判定基準	容器表面	2mSv/h	2mSv/h	同一
	容器表面から 1m離れた位置	100 μSv/h	100 μSv/h	

別紙4-2表 TN-12/2型とTK-26型の遮蔽解析条件の比較

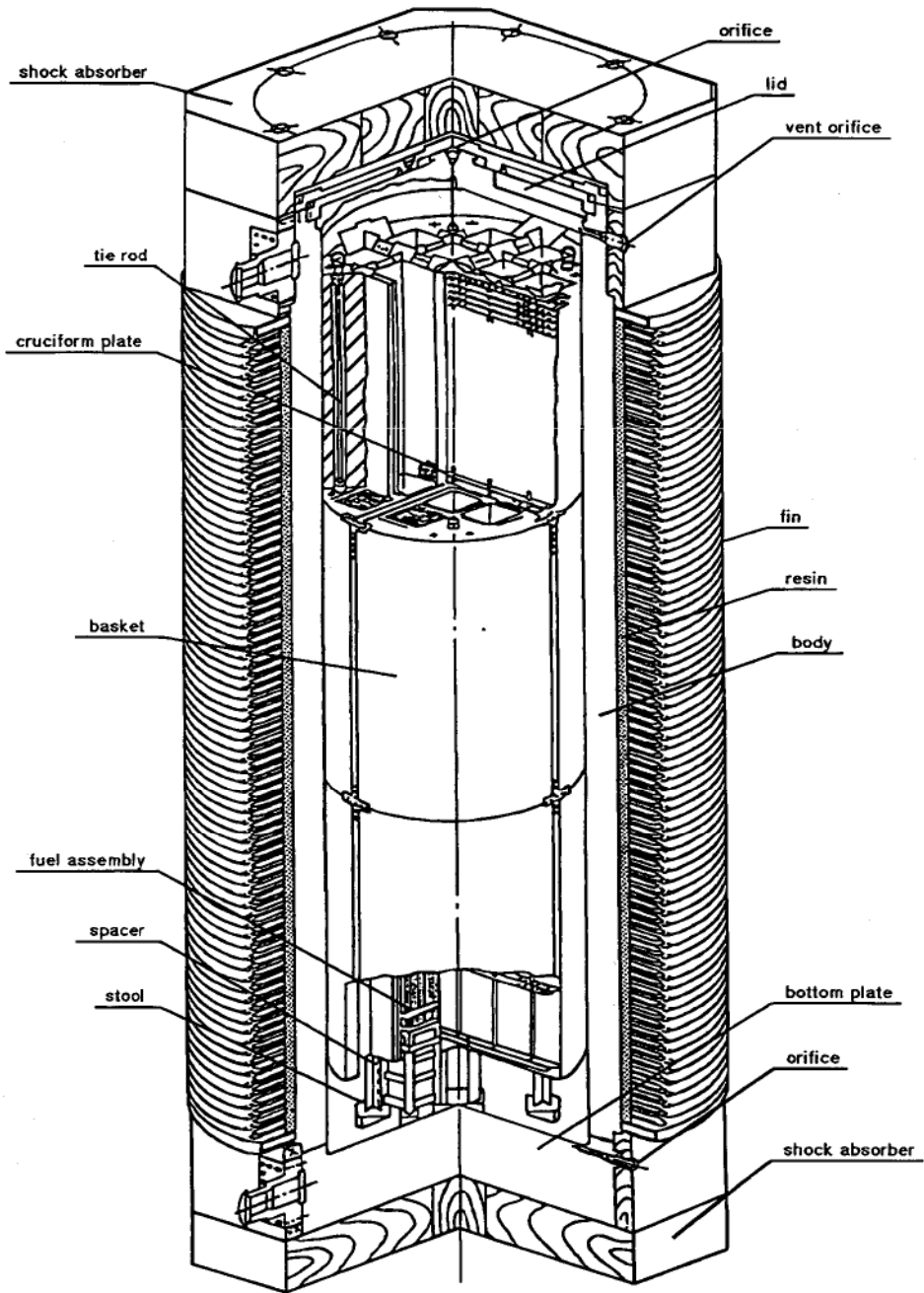
項目		TN-12/2型 ⁽¹⁷⁾	TK-26型 (特定兼用キャスク)	備考
解析コード		MCNP4A	MCNP5	解析コードのバージョンが異なるが、主な変更点はプログラム言語の変更であり、物理・数学モデルは同じである。
ライブラリ	中性子	ENDF5T	ENDF70	ENDF70 : ENDF/B-VIIを基にLANLで整備
	ガンマ線	MCPLIB02	MCPLIB84	MCPLIB84: EPDL97を基にLANLで整備
線源条件	中性子	ORIGEN2の出力	ORIGEN2の出力	同一
	燃料有効部ガンマ線	ORIGEN2の出力	ORIGEN2の出力	
	放射化ガンマ線	⁵⁹ Coの放射化	⁵⁹ Coの放射化	
線源スペクトル	中性子	SCALE SAS2の出力	Watt型 ²³⁹ Puの核分裂スペクトル	²³⁹ Puの核分裂スペクトルの方が保守側 (別紙3参照)
	燃料有効部ガンマ線	ORIGEN2の出力	ORIGEN2の出力	同一
	放射化ガンマ線	1.17MeV:50% 1.33MeV:50%	1.17MeV:50% 1.33MeV:50%	
本体遮蔽構造	ガンマ線遮蔽材	炭素鋼	炭素鋼	遮蔽に用いられる材料厚さや材質は異なるが、ガンマ線及び中性子を遮蔽することにおいて、同等の機能を有する。
	中性子遮蔽材	レジン	レジン (エチレンプロピレン系ゴム)	
燃料集合体		PWR使用済燃料	PWR使用済燃料	同一
検出器 (タリー)		面検出器 (F2)	面検出器 (F2)	同一

別紙4-3表 TN-12/2型の比較解析で使用された解析コード及び断面積ライブラリ

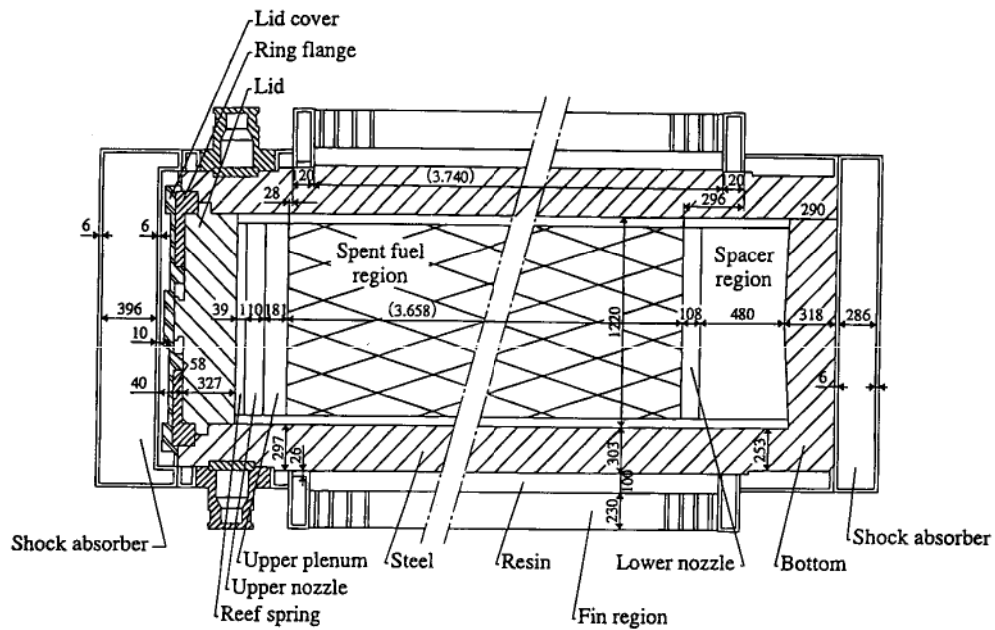
解析コード	断面積ライブラリ	備考
SAS4M	SCALE (中性子27群, ガンマ線18群)	米国ORNLにて開発 SCALEコードシステムの一部であり、放射線輸送計算はMORSEコードで行われる。MORSEコードの解法は、MCNP同様の三次元モンテカルロ法。
MCNP4A	ENDF/B-V等のMCNPDATA及びMCPLIB02	米国LANLにて開発 MCNP5コードの旧バージョンであるが、主な変更点はプログラム言語の変更であり、物理・数学モデルは同じである。

別紙4-4表 実測値と解析結果との比較結果

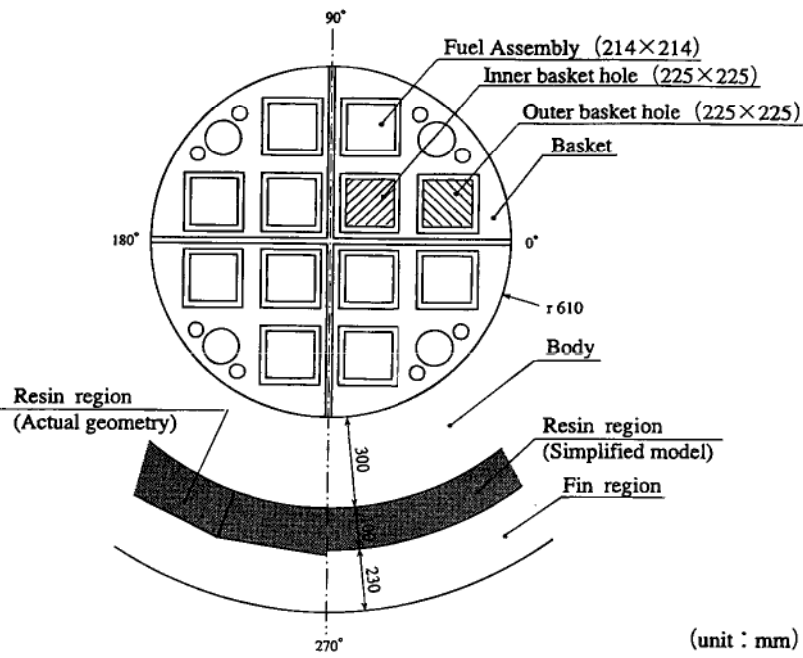
	中性子線量率		ガンマ線線量率	
	表面	表面から1m	表面	表面から1m
MCNP4A	約1.6倍 (評価点⑤)	約1.1倍 (評価点④)	約1.5倍 (評価点⑤)	約1.2倍 (評価点④)
SAS4M	約2.1倍 (評価点⑤)	約1.6倍 (評価点④)	約1.2倍 (評価点⑤)	約1.1倍 (評価点④)



別紙4-4図 TN-12/2型輸送容器

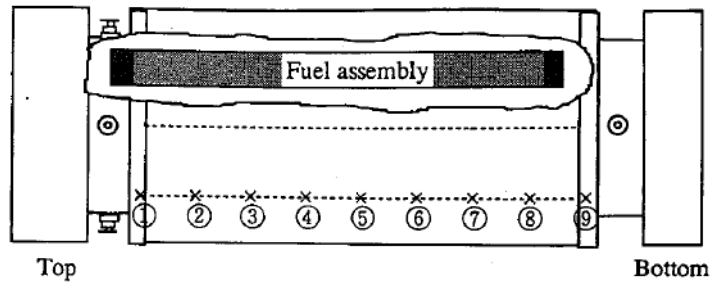


(a)

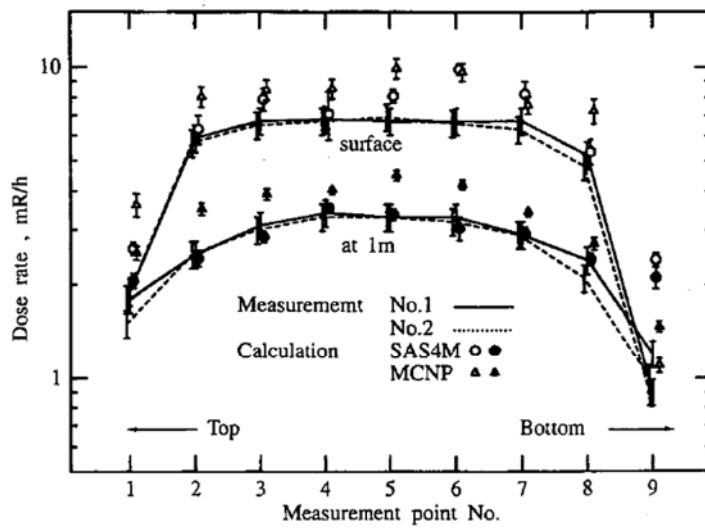


(b)

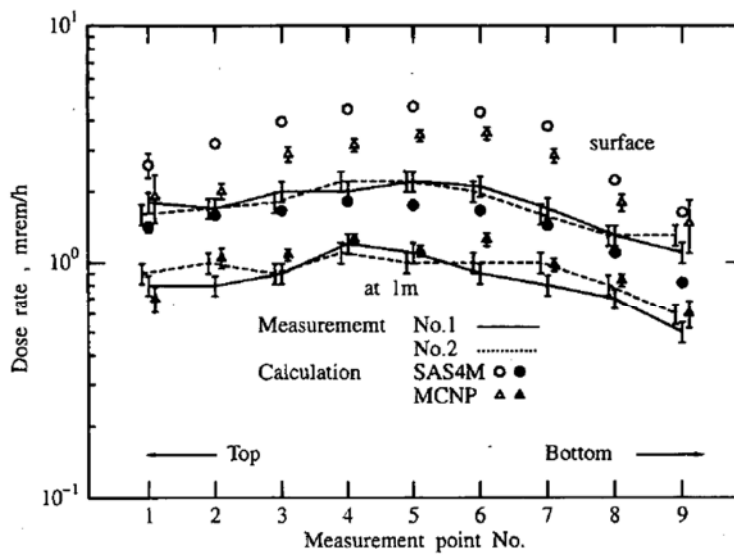
別紙4-5図 TN-12/2型輸送容器の遮蔽計算モデル



別紙4-6図 TN-12/2型ベンチマーク解析評価位置



(a) ガンマ線線量率



(b) 中性子線量率

別紙4-7図 TN-12/2型ベンチマーク解析評価結果

(5) 断面積ライブラリ

TK-26型の遮蔽解析における断面積ライブラリは、中性子についてENDF70⁽¹⁹⁾、ガンマ線についてMCPLIB84⁽²⁰⁾を使用している。

ガンマ線線量当量率評価で用いるMCPLIB84は、MCNP5コード等のモンテカルロ計算コード用に、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、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るENDF70は、MCNP5等のモンテカルロ計算コード用に、核データENDF/B-VIIに基づく中性子断面積ライブラリとしてLANLにて整備されたものである。

なお、ENDF/Bライブラリは、米国のORNL、及びBrookhaven National Laboratory（以下「BNL」という）等の国立研究所で、それぞれの研究に必要とする核種に集中して評価が行われBNLで集約され公開されており、ENDF/B-VII以降は、他国に、より良い評価済ライブラリがあれば積極的に取り入れられている。

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) X-5 Monte Carlo Team, “MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5”, LA-UR-03-1987, (2003)
- (4) U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems and Facilities Final Report”, NUREG-2215, (2020)
- (5) “Attachment 4 TN-32 Final Safety Analysis Report (FSAR), Revision 2”, TN-32 Final Safety Analysis Report (FSAR), Revision 2, Docket No. 72-16, (2002)
- (6) “Dose Rates Estimate for Prairie Island ISFSI Comprised with TN40HT Casks Loaded with WE 14x14 OFA and WE 14x14 STD Fuel Assemblies”, AREVA Inc. Calculation TN40HT-0511, Revision 0, Non-Proprietary, L-PI-14-075 Attachment 4, (2007)
- (7) (一社) 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)
- (8) 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).
- (9) (一社) 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)
- (10) Gregg C. Giesler, CIC-12, “MCNP SOFTWARE QUALITY: THEN AND NOW”, LA-UR-00-2532, (2000)
- (11) Hilary M. Abhold, John S. Hendricks, “MCNP™ Software Quality Assurance Plan”, LA-13138, (1996)
- (12) Forrest Brown, Brian Kiedrowski, Jeffrey Bull, “MCNP5-1.60 Release Notes”, LA-UR-10-06235, (2010)
- (13) Forrest Brown, Brian Kiedrowski, Jeffrey Bull, Matthew Gonzales, Nathan Gibson, “Verification of MCNP5-1.60”, LA-UR-10-05611, (2010)
- (14) Daniel J. Whalen, David A. Cardon, Jennifer L. Uhle, John S. Hendricks, “MCNP: Neutron Benchmark Problems”, LA-12212, (1991)
- (15) Daniel J. Whalen, David E. Hollowell, John S. Hendricks, “MCNP: Photon Benchmark

- Problems”, LA-12196, (1991)
- (16) Avneet Sood, R. Arthur Forster, B. J. Archer and R. C. Little, “Neutronics Calculation Advances at Los Alamos: Manhattan Project to Monte Carlo”, Nuclear Technology, Vol. 207, S100-S133, Supplement 1, (2021)
 - (17) H. Taniuchi, and F. Matsuda, “Dose rate measurements and calculation of TN-12/2 packages”, Nuclear Technology, Vol. 127, pp. 88-101, (1999)
 - (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) H. R. Trellue, R. C. Little, M. C. White, R. E. MacFarlane and A. C. Kahler, “ENDF70: A Continuous-Energy MCNP Neutron Data Library Based on ENDF/B-VII.0”, Nuclear Technology, Vol. 168, Num. 3, (2009)
 - (20) M. C. White, “Further Notes on MCPLIB03/04 and New MCPLIB63/84 Compton Broadening Data For All Versions of MCNP5”, LA-UR-12-00018, (2012)

軸方向燃焼度分布の妥当性について

1. はじめに

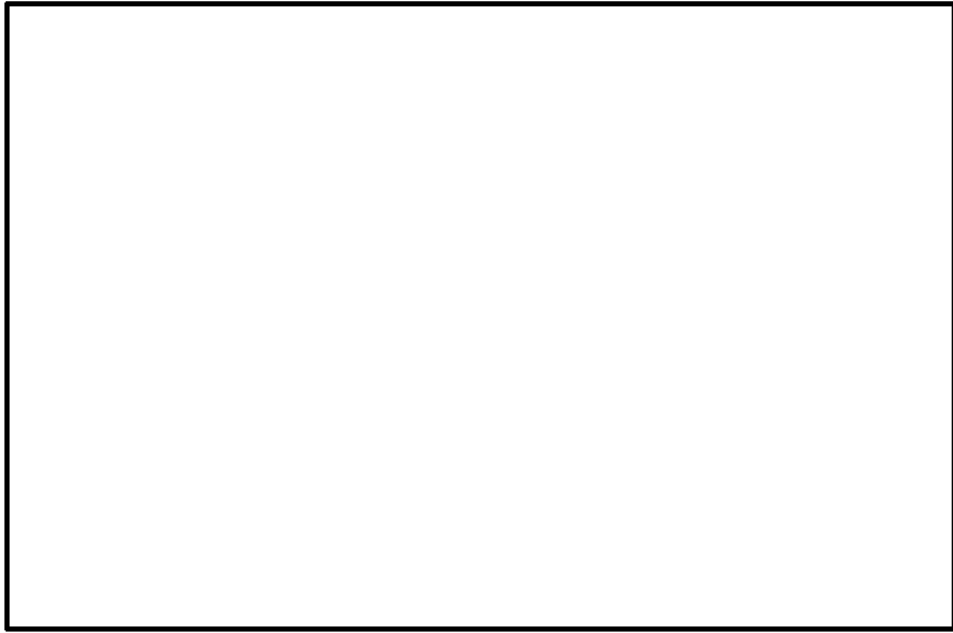
TK-26 型に収納する使用済燃料集合体のピーキングファクター (PF) は、電力事業者から開示頂いたものである。ここでは、OECD/NEA から提供されている PWR 使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布データベース⁽¹⁾と本申請で考慮した PF と比較することによりその妥当性を確認した。

2. 軸方向燃焼度分布の妥当性確認

OECD/NEA から提供されている PWR 使用済燃料の軸方向燃焼度分布データベース⁽¹⁾より本申請の燃料と同等の燃料型式 []、かつ遮蔽評価の対象とする燃料と同等の集合体平均燃焼度 [] の使用済燃料の軸方向燃焼度分布を抽出し []、本申請で考慮した PF と比較した。その結果を別紙 5-1 図及び別紙 5-1 表に示す。

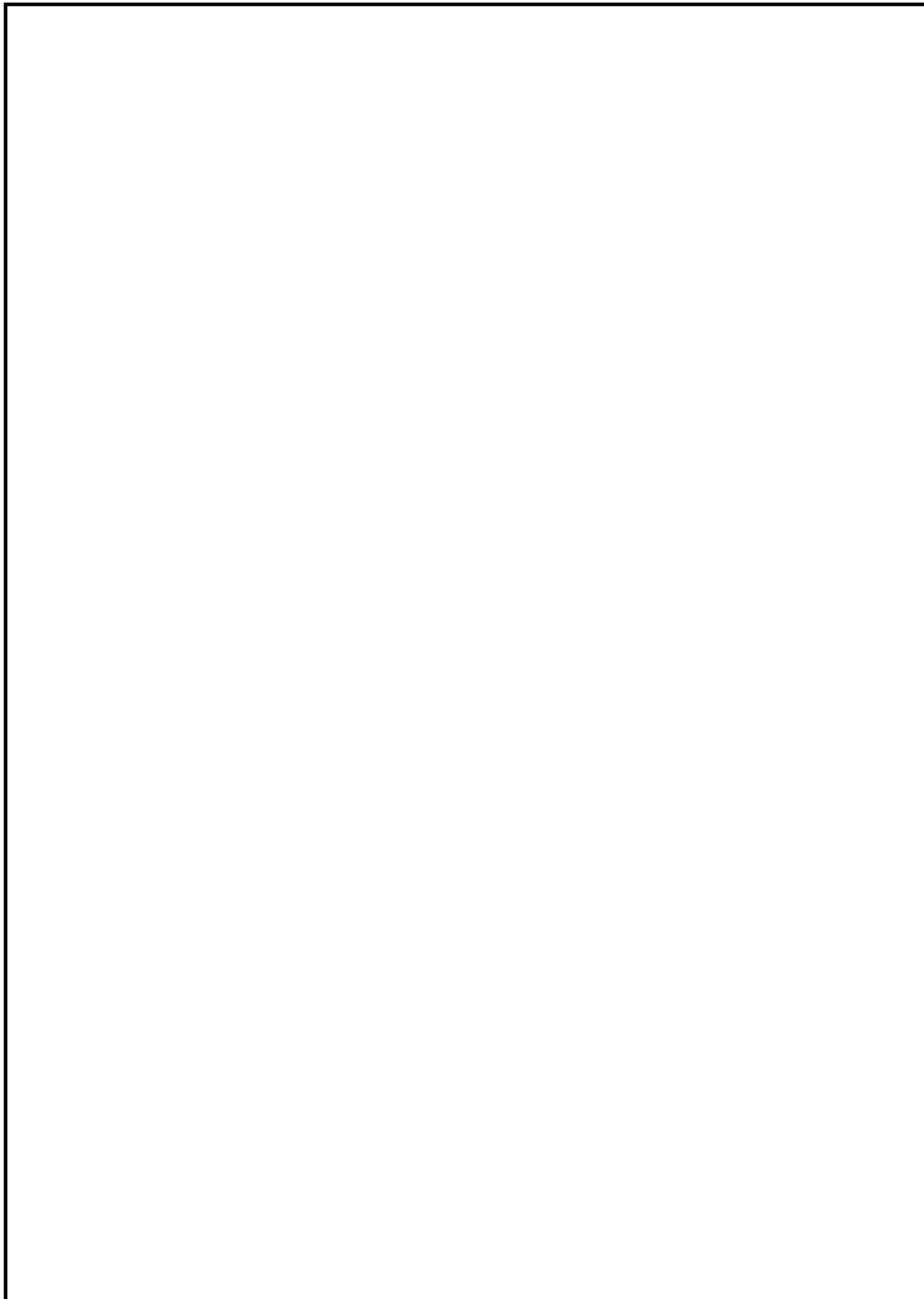
別紙 5-1 図及び別紙 5-1 表に示したように、17×17 燃料及び 15×15 燃料の軸方向燃焼度分布は同様の形状であり、かつ本申請の PF は何れの軸方向燃焼度分布の値をも上回っている。なお、軸方向上部の一部で僅かに包絡されていない箇所があるが、これは TK-26 と文献データで軸方向のノード分割幅が若干異なっているためであり、TK-26 型で設定した PF の全体的な保守性に影響を及ぼすものではない。

別紙 5-1 図及び別紙 5-1 表に示した、燃焼度の平均値を 1 として規格化された軸方向燃焼度分布に対し、本申請での PF の平均値は [] であることから、本申請の PF は燃料有効部全体で []%燃焼度を高く評価しており、十分安全側の設定となっている。



別紙 5-1 図 PWR 使用済燃料の軸方向燃焼度分布及び本申請で考慮したピーキングファクター

別紙 5-1 表 PWR 使用済燃料の軸方向燃焼度分布及び本申請で考慮したピーキングファクター



別紙5-3

3. 参考文献

- (1) R. J. Cacciapouti, S. Van Volkinbourg, "AXIAL BURNUP PROFILE DATABASE FOR PRESSURIZED WATER REACTORS", YAEC-1937, (1997)