

資料1-4

Doc No. 22-180-I-103 Rev. 1

2023年5月29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<sup>239</sup>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 $2\text{mSv/h}$ 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から $1\text{m}$ 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 ( $1\text{mSv/y}$ ) 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 ( $1\text{mSv/y}$ ) 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 $2\text{mSv/h}$ 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から $1\text{m}$ 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 $1\text{m}$ 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（ $1\text{mSv/y}$ ）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（ $\text{Gy/y}$ ）を実効線量（ $\text{Sv/y}$ ）へ換算し、又は新たに実効線量（ $\text{Sv/y}$ ）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（ $1\text{mSv/y}$ ）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  $\mu$  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 $\mu$ 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

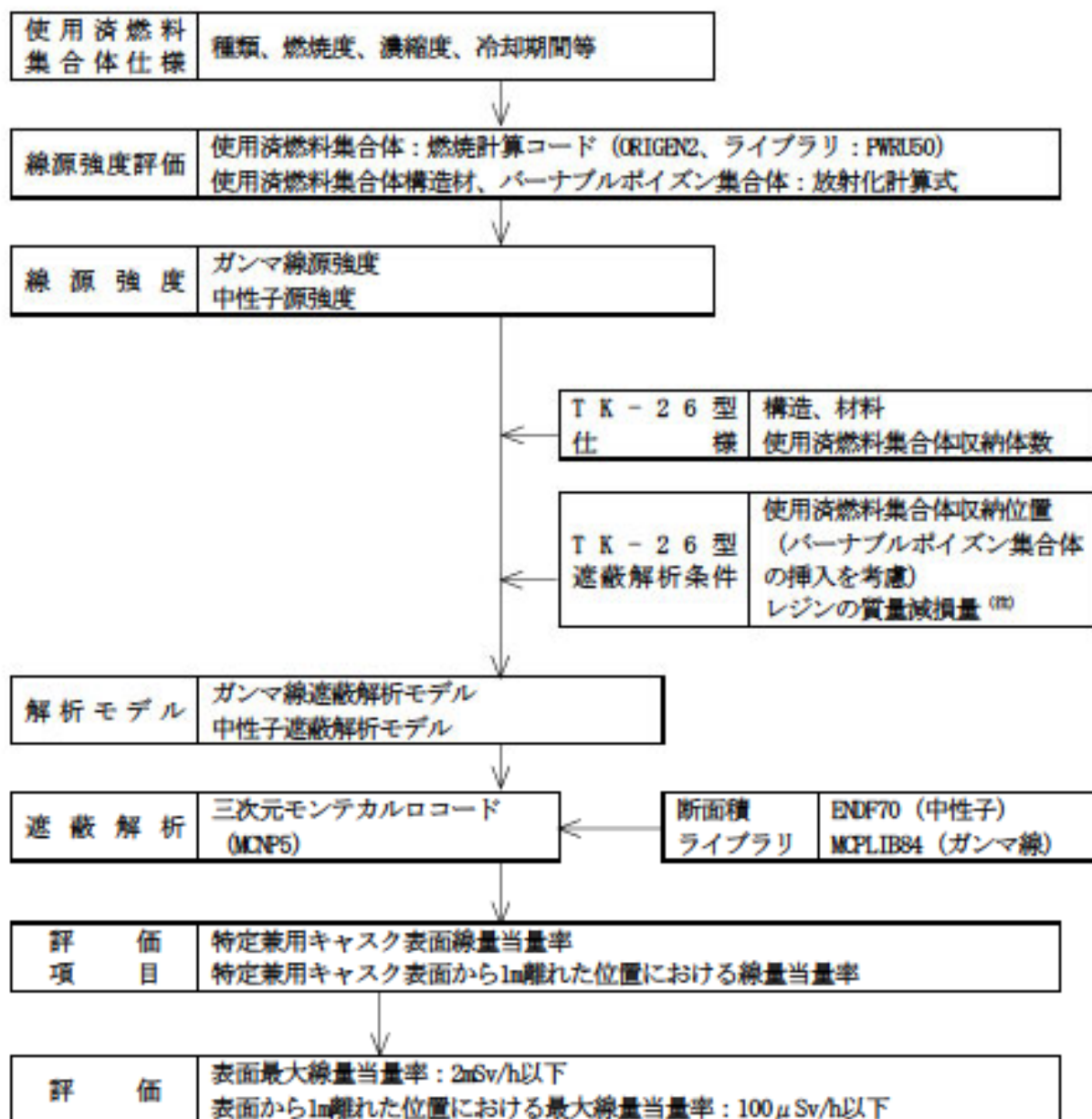
使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。

#### 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 $2\text{mSv/h}$  以下とし、かつ、兼用キャスク表面から $1\text{m}$  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等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高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。

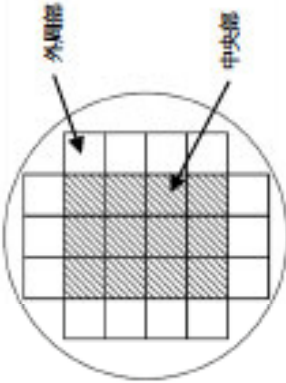
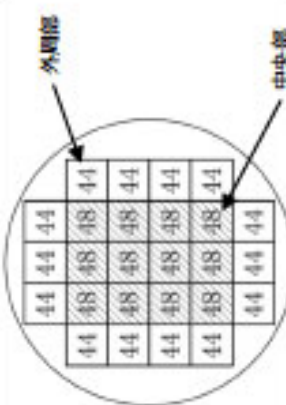
（別紙1「3. 中性子遮蔽材の質量減損について」参照）

—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。



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	
		キヤスク収納位置制限	解析条件
		中央部	外周部
収納物仕様	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	48
	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
	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
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44	45.8
	配置 (注2) (注3) (注4)		

(注1) ハ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45GWd/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		
		キヤスク収納位置制限	解析条件	
		中央部	外周部	
収納物仕様	種類	48,000MWd/t型 (A型・B型) 39,000MWd/t型 (A型・B型) ≤4.1	48,000MWd/t型 (A型・B型)	
	初期濃縮度 (wt%)			
	ウラン重量 (kg)			
	最高燃焼度 (GWd/t) (使用済燃料集合体平均)	≤47	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	
照射期間 (日)				
パーナブルポイズン 集合体の仕様	冷却期間 (年) (注)	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)	≤43	44.8	
配置 (注)				

(注1) パーナブルポイズン集合体が入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入る条件とした。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)



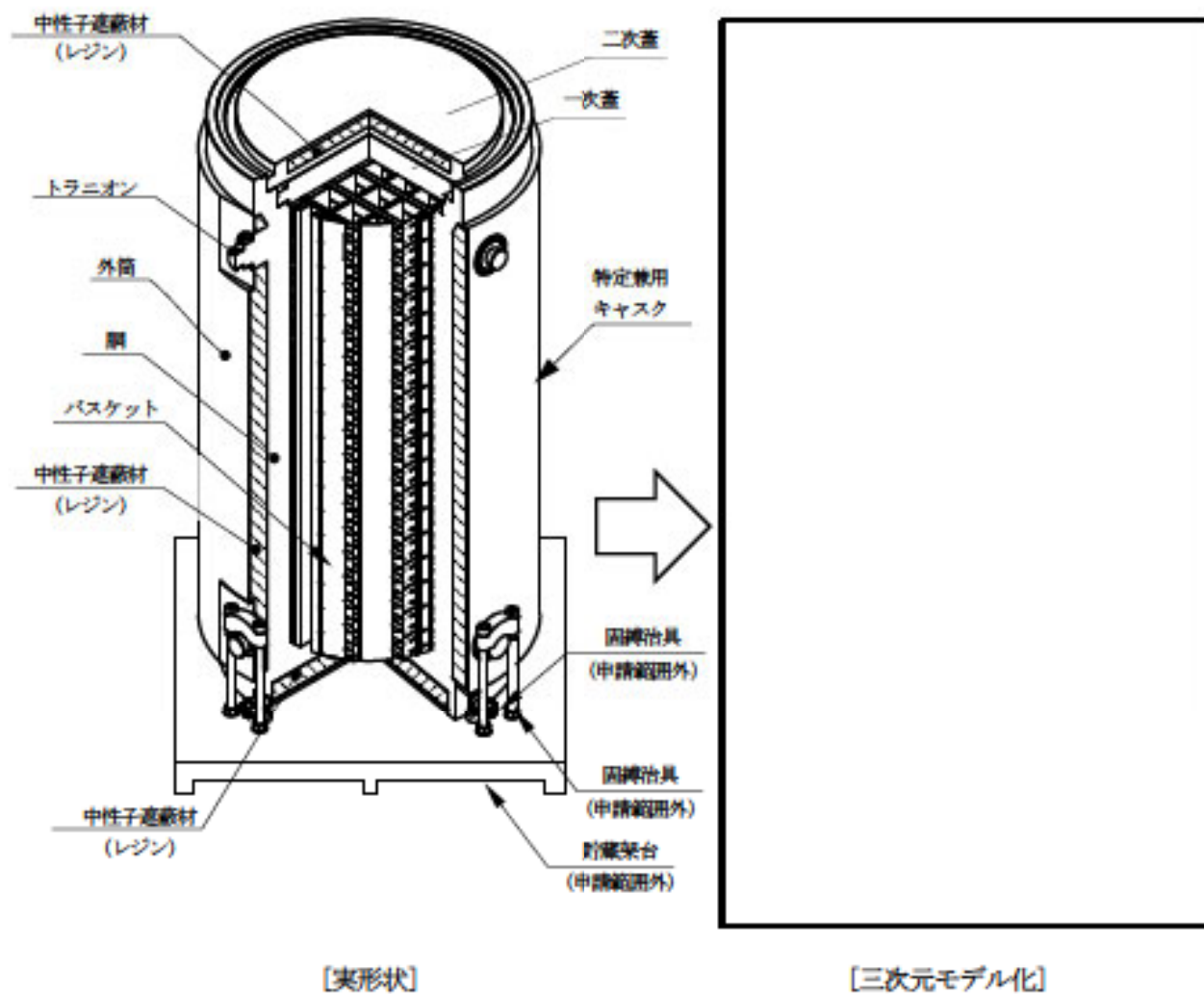


図3 遮蔽解析のモデル化の概要

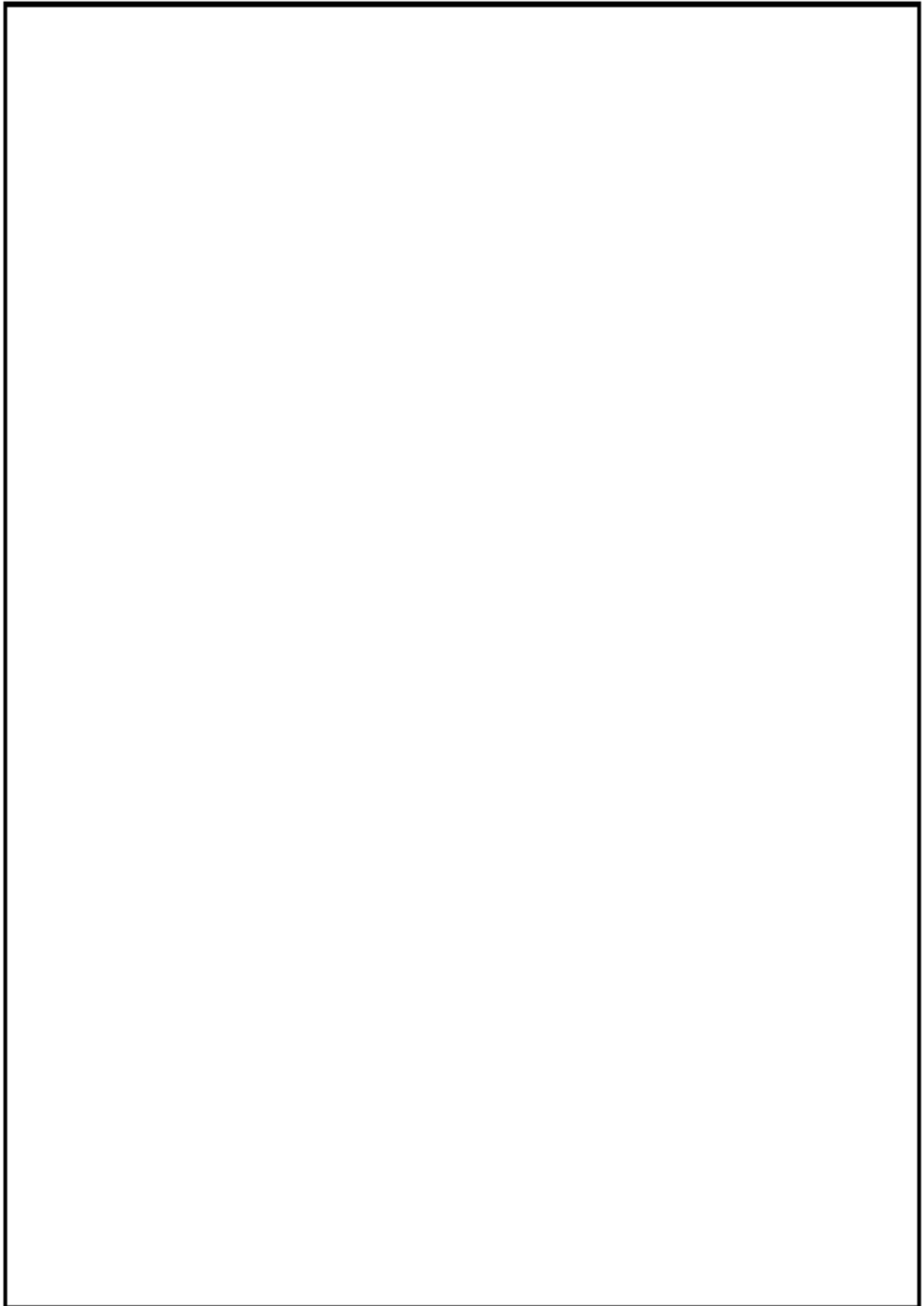


図4 (1/3) 遮蔽解析モデル (17×17燃料 A型、45° 断面)

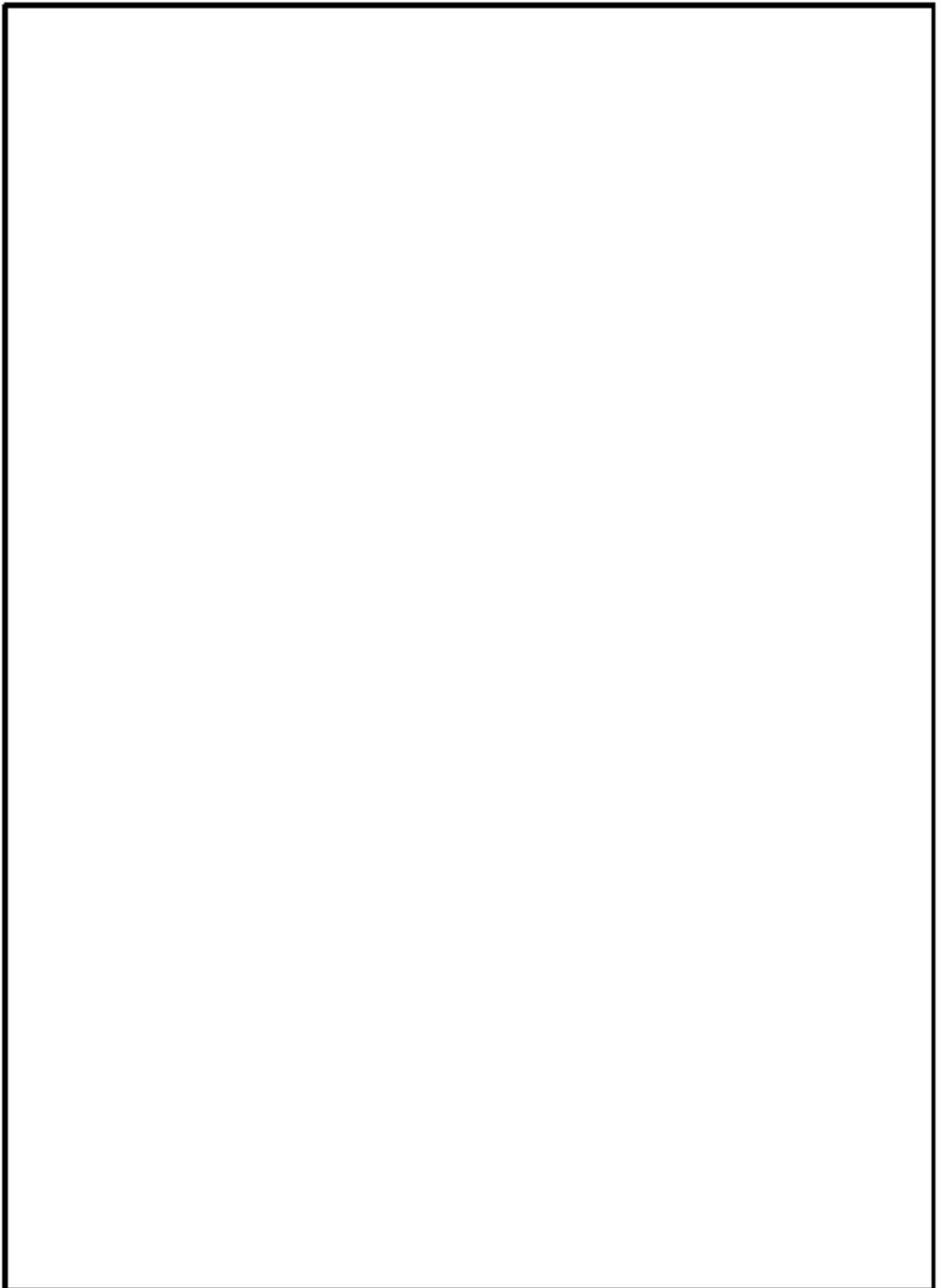


図4 (2/3) 遮蔽解析モデル (17×17燃料 A型、90° 断面)



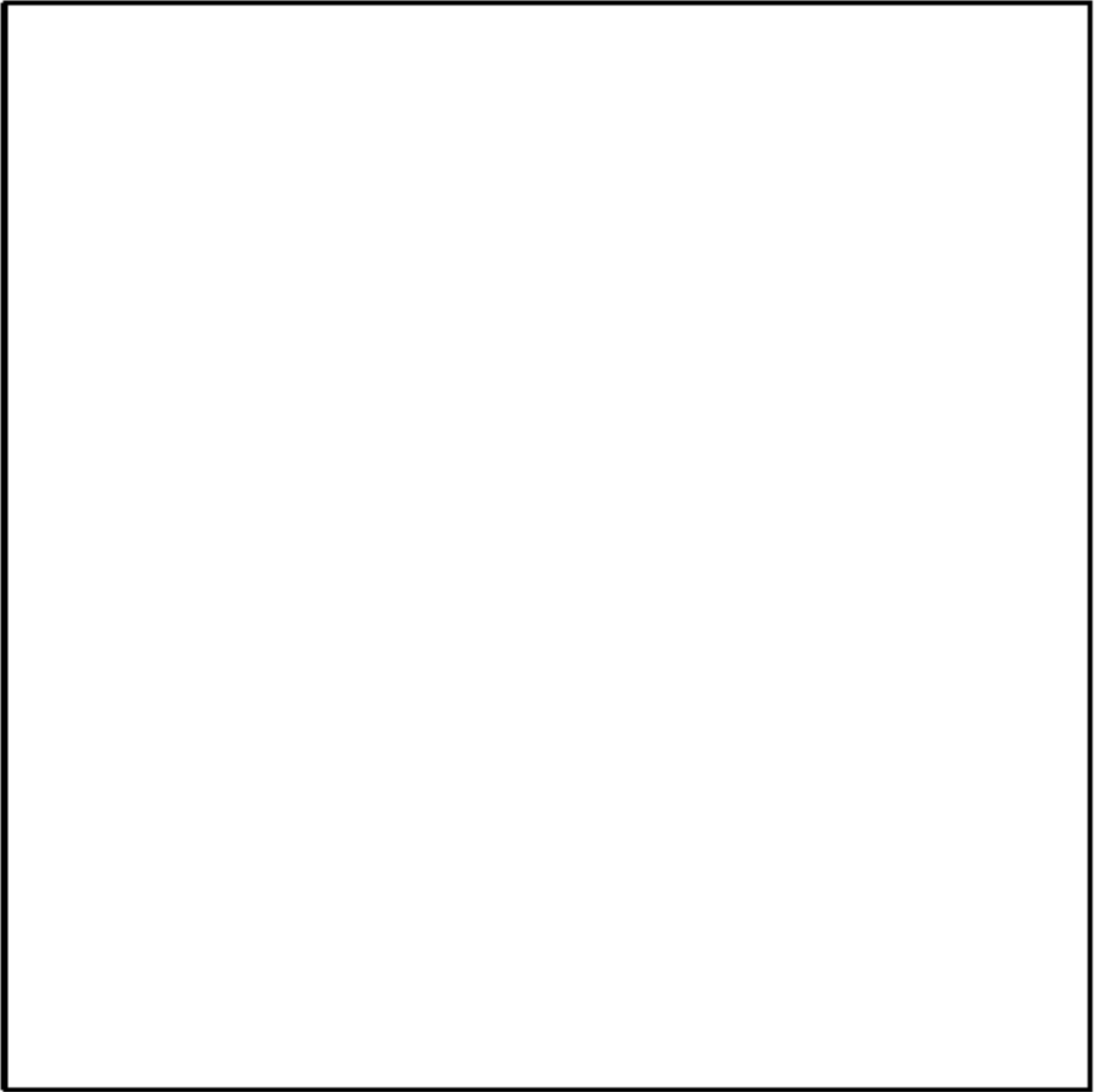


図4 (3/3) 遮蔽解析モデル (横断面)

(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 $\mu$ Sv/h	75 $\mu$ Sv/h	100 $\mu$ Sv/h 以下	

表3 (1/2) 総量当量率評価結果 (17×17燃料 (A型) 収納時)

(単位:  $\mu\text{Sv/h}$ )

評価点	頭部			側中央	底部			
	軸方向	径方向	径方向 (燃料部)		径方向	径方向 (燃料部)		
						③a	③b	⑦a
①	②	④a	④b	⑤	⑥a	⑥b	⑩	
表面から1m	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)	495.6 (0.6)	42.4 (0.7)	1177.1 (0.4)	1104.1 (0.4)	123.4 (2.1)	
合計	698.7	521.5	499.5	172.6	1196.3 [1.2] (注2)	1119.9	136.4	
表面から1m	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	81.9 [82] (注3)	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総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材2桁での値 (表面の単位:  $\text{mSv/h}$ 、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:  $\mu\text{Sv/h}$ )

評価点	頭部			側中央	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (燃料部)		径方向	径方向 (燃料部)	
						⑦a	⑦b
①	③a	③b	⑤	⑧a	⑧b	⑩	
表面から1m	燃料有効部	0.2 (1.2) (注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)	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)	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	999.5 [1.0] (注2)	937.3	164.0
表面から1m	燃料有効部	1.1 (0.3)	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)	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)	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	74.7 [75] (注3)	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:  $\text{mSv/h}$ 、表面から1mでの単位:  $\mu\text{Sv/h}$ )



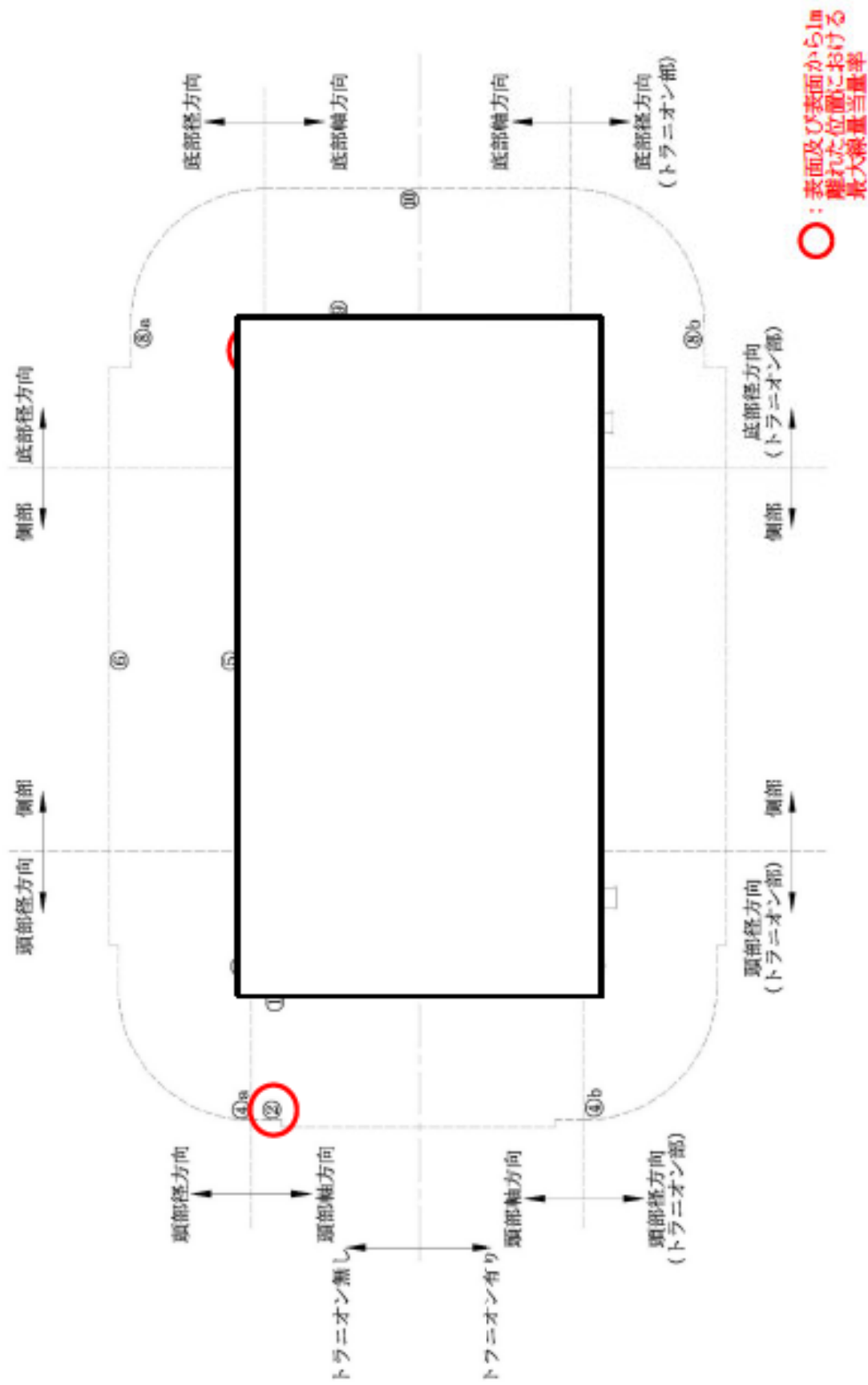
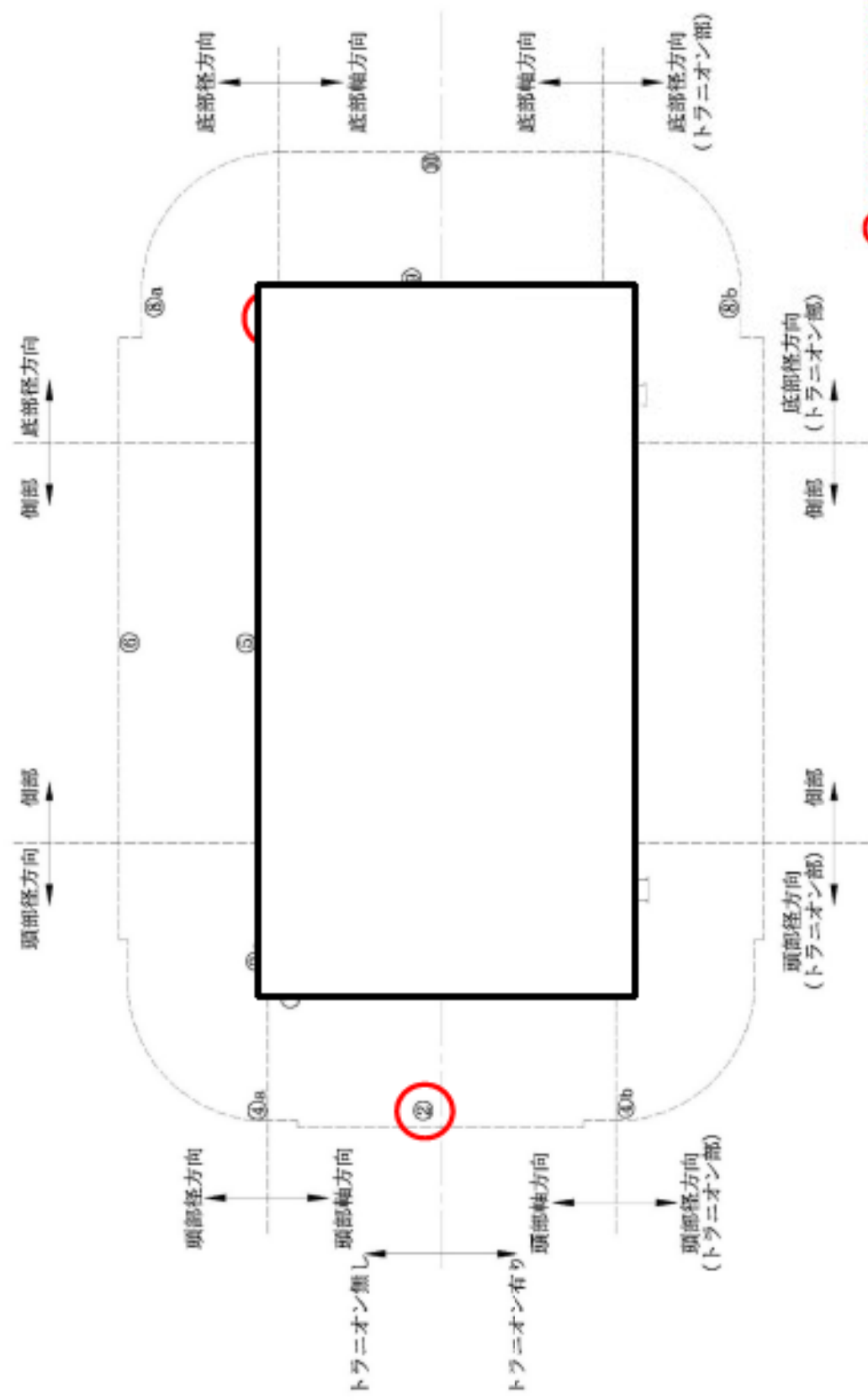


図5 0.2) 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (17×17燃料 (A型) 収納時)



○ : 表面及び端面から加  
離れた位置における  
最大線量当量率

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 ③型 収束時)

[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( $\text{mSv/y}$ )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( $\text{Gy/y}$ )を実効線量( $\text{Sv/y}$ )へ換算し、又は新たに実効線量( $\text{Sv/y}$ )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( $\text{mSv/y}$ )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、 $^{240}\text{Cm}$ の自発核分裂線源と増倍による $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ の核分裂線源であり、 $(\alpha, n)$ 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 $^{239}\text{Pu}$ 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、 $^{239}\text{Pu}$ 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：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 <sup>60</sup> Co含有量に従い、放射化計算式に基づいて <sup>60</sup> Coから <sup>60</sup> 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( <sup>60</sup> Co)の放射能 (Bq) N <sub>0</sub> ：ターゲット核種( <sup>60</sup> Co)の個数 (atoms) σ：2200m/sの中性子による <sup>60</sup> Coの(n, γ)反応断面積 (cm <sup>2</sup> ) φ：炉内照射熱中性子束 (n/(cm <sup>2</sup> ・s)) λ： <sup>60</sup> Coの崩壊定数 (3.6001×10 <sup>-4</sup> /日) T <sub>1</sub> ：照射期間 (日) (別紙1-2表参照) T <sub>2</sub> ：冷却期間 (日) (別紙1-2表参照)
中性子源スペクトル	—	<sup>239</sup> Puの核分裂スペクトル <sup>(註)</sup> Watt型連続分布スペクトル ：p(E)=C・exp(-E/a)・sinh(bE) <sup>1/2</sup> <sup>239</sup> Pu中性子スペクトル定数 ：a=0.966MeV、b=2.842MeV <sup>-1</sup>

1

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

別紙1-2表 (1/3) 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) <sup>(注1)</sup>					
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%) <sup>(注2)</sup>					
冷却期間 (年)			15	20	
ウラン重量 (kg/体)					
軸方向燃焼度分布 <sup>(注3)</sup> (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) <sup>(注1)</sup>				
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%) <sup>(注2)</sup>				
冷却期間 (年)		15	20	
ウラン重量 (kg/体)				
軸方向燃焼度分布 <sup>(注3)</sup> (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) <sup>(注1)</sup>		39,000		39,000	
平均燃焼度 (MWd/t) <sup>(注2)</sup>		— <sup>(注3)</sup>		— <sup>(注3)</sup>	
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)					
(上部)					
(下部)					
軸方向燃焼度分布 <sup>(注5)</sup> (ピーキング ファクター：PF)					

(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) 48,000 MWd/t型の線源条件に包絡される範囲で一部の初装荷燃料も含めた濃縮度を設定。

(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)	$4.6 \times 10^{15}$	$4.0 \times 10^{15}$	$4.5 \times 10^{15}$	$3.9 \times 10^{15}$
		構造材放射化 ( <sup>60</sup> Co:Bq) <sup>(注1)</sup>	$3.1 \times 10^{13}$	$2.0 \times 10^{13}$	$2.6 \times 10^{13}$	$1.7 \times 10^{13}$
	中性子	燃料有効部 (n/s) <sup>(注2)</sup>	$5.9 \times 10^8$	$4.9 \times 10^8$	$5.7 \times 10^8$	$4.8 \times 10^8$
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)	$4.3 \times 10^{15}$	$3.7 \times 10^{15}$	$4.2 \times 10^{15}$	$3.6 \times 10^{15}$
		構造材放射化 ( <sup>60</sup> Co:Bq)	$1.2 \times 10^{13}$	$1.0 \times 10^{13}$	$1.1 \times 10^{13}$	$8.7 \times 10^{12}$
	中性子	燃料有効部 (n/s) <sup>(注2)</sup>	$4.1 \times 10^8$	$3.4 \times 10^8$	$3.9 \times 10^8$	$3.3 \times 10^8$
金属キャスク 1基当たり	ガンマ線	燃料有効部 (photons/s)	$1.2 \times 10^{17}$	$1.0 \times 10^{17}$	$1.1 \times 10^{17}$	$9.7 \times 10^{16}$
		構造材放射化 ( <sup>60</sup> Co:Bq) <sup>(注1)</sup>	$5.4 \times 10^{14}$	$3.8 \times 10^{14}$	$4.6 \times 10^{14}$	$3.2 \times 10^{14}$
	中性子	燃料有効部 (n/s) <sup>(注2)</sup>	$1.3 \times 10^{10}$	$1.1 \times 10^{10}$	$1.2 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^{10}$

(注1) パーナブルポイズン集合体の放射化線源を考慮した値である。

(注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 <sup>15</sup>		3.2×10 <sup>15</sup>	
		構造材放射化 ( <sup>60</sup> Co:Bq) <sup>(注1)</sup>	1.7×10 <sup>13</sup> (7.9×10 <sup>12</sup> )	1.9×10 <sup>13</sup> (9.6×10 <sup>12</sup> )	1.4×10 <sup>13</sup> (6.9×10 <sup>12</sup> )	1.6×10 <sup>13</sup> (8.2×10 <sup>12</sup> )
	中性子	燃料有効部 (n/s) <sup>(注2)</sup>	3.8×10 <sup>6</sup>		3.4×10 <sup>6</sup>	
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)	— <sup>(注3)</sup>		— <sup>(注3)</sup>	
		構造材放射化 ( <sup>60</sup> Co:Bq) <sup>(注1)</sup>	— <sup>(注3)</sup>		— <sup>(注3)</sup>	
	中性子	燃料有効部 (n/s) <sup>(注2)</sup>	— <sup>(注3)</sup>		— <sup>(注3)</sup>	
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 <sup>16</sup>		8.4×10 <sup>16</sup>	
		構造材放射化 ( <sup>60</sup> Co:Bq) <sup>(注1)</sup>	3.1×10 <sup>14</sup>	3.6×10 <sup>14</sup>	2.7×10 <sup>14</sup>	3.0×10 <sup>14</sup>
	中性子	燃料有効部 (n/s) <sup>(注2)</sup>	1.0×10 <sup>10</sup>		8.7×10 <sup>9</sup>	

(注1) パーナブルポイズン集合体の放射化線源を考慮した値である。なお、括弧内は、パ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 ( <sup>60</sup> Co TBq) <sup>(注)</sup>		
	中央部	外周部	合計
上部ノズル部	9.261×10 <sup>0</sup> (5.349×10 <sup>0</sup> )	4.257×10 <sup>0</sup>	1.352×10 <sup>1</sup> (5.349×10 <sup>0</sup> )
上部プレナム部	3.635×10 <sup>1</sup> (8.015×10 <sup>0</sup> )	3.083×10 <sup>1</sup>	6.718×10 <sup>1</sup> (8.015×10 <sup>0</sup> )
燃料有効部	3.061×10 <sup>2</sup> (1.939×10 <sup>2</sup> )	1.221×10 <sup>2</sup>	4.282×10 <sup>2</sup> (1.939×10 <sup>2</sup> )
下部プレナム部	2.553×10 <sup>0</sup>	2.778×10 <sup>0</sup>	5.331×10 <sup>0</sup>
下部ノズル部	1.288×10 <sup>1</sup>	1.401×10 <sup>1</sup>	2.689×10 <sup>1</sup>

(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 ( <sup>60</sup> Co TBq) <sup>(注)</sup>		
	中央部	外周部	合計
上部ノズル部	1.044×10 <sup>1</sup> (2.772×10 <sup>0</sup> )	8.348×10 <sup>0</sup>	1.879×10 <sup>1</sup> (2.772×10 <sup>0</sup> )
上部プレナム部	4.673×10 <sup>1</sup> (4.153×10 <sup>0</sup> )	4.634×10 <sup>1</sup>	9.307×10 <sup>1</sup> (4.153×10 <sup>0</sup> )
燃料有効部	1.629×10 <sup>2</sup> (1.004×10 <sup>2</sup> )	6.800×10 <sup>1</sup>	2.309×10 <sup>2</sup> (1.004×10 <sup>2</sup> )
下部プレナム部	6.971×10 <sup>0</sup>	7.586×10 <sup>0</sup>	1.456×10 <sup>1</sup>
下部ノズル部	1.197×10 <sup>1</sup>	1.302×10 <sup>1</sup>	2.499×10 <sup>1</sup>

(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 ( <sup>60</sup> Co TBq) <sup>(注)</sup>		
	中央部	外周部	合計
上部ノズル部	7.084×10 <sup>0</sup> (4.225×10 <sup>0</sup> )	3.112×10 <sup>0</sup>	1.020×10 <sup>1</sup> (4.225×10 <sup>0</sup> )
上部プレナム部	2.999×10 <sup>1</sup> (5.844×10 <sup>0</sup> )	2.628×10 <sup>1</sup>	5.627×10 <sup>1</sup> (5.844×10 <sup>0</sup> )
燃料有効部	2.622×10 <sup>2</sup> (1.617×10 <sup>2</sup> )	1.094×10 <sup>2</sup>	3.716×10 <sup>2</sup> (1.617×10 <sup>2</sup> )
下部プレナム部	2.796×10 <sup>0</sup>	3.043×10 <sup>0</sup>	5.839×10 <sup>0</sup>
下部ノズル部	8.136×10 <sup>0</sup>	8.857×10 <sup>0</sup>	1.699×10 <sup>1</sup>

(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 ( <sup>60</sup> Co TBq) <sup>(注)</sup>		
	中央部	外周部	合計
上部ノズル部	5.176×10 <sup>0</sup> (2.189×10 <sup>0</sup> )	3.251×10 <sup>0</sup>	8.427×10 <sup>0</sup> (2.189×10 <sup>0</sup> )
上部プレナム部	4.174×10 <sup>1</sup> (3.028×10 <sup>0</sup> )	4.214×10 <sup>1</sup>	8.388×10 <sup>1</sup> (3.028×10 <sup>0</sup> )
燃料有効部	1.413×10 <sup>2</sup> (8.378×10 <sup>1</sup> )	6.258×10 <sup>1</sup>	2.039×10 <sup>2</sup> (8.378×10 <sup>1</sup> )
下部プレナム部	6.397×10 <sup>0</sup>	6.963×10 <sup>0</sup>	1.336×10 <sup>1</sup>
下部ノズル部	6.211×10 <sup>0</sup>	6.761×10 <sup>0</sup>	1.297×10 <sup>1</sup>

(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)	( $\alpha, n$ ) 反応	$9.358 \times 10^7$	$8.706 \times 10^7$	$1.806 \times 10^8$
	自発核分裂	$4.902 \times 10^9$	$3.914 \times 10^9$	$8.816 \times 10^9$
	合計	$4.996 \times 10^9$	$4.001 \times 10^9$	$8.997 \times 10^9$
TK-26型の実効増倍率 $k_{eff}^{(M)}$		0.30		
全中性子源強度 $N_0$ (n/s)		$7.137 \times 10^9$	$5.716 \times 10^9$	$1.285 \times 10^{10}$

(注) ORIGEN2.2UPJ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)	( $\alpha, n$ ) 反応	$8.877 \times 10^7$	$8.406 \times 10^7$	$1.728 \times 10^8$
	自発核分裂	$4.065 \times 10^9$	$3.245 \times 10^9$	$7.310 \times 10^9$
	合計	$4.154 \times 10^9$	$3.329 \times 10^9$	$7.483 \times 10^9$
TK-26型の実効増倍率 $k_{eff}^{(M)}$		0.30		
全中性子源強度 $N_0$ (n/s)		$5.934 \times 10^9$	$4.756 \times 10^9$	$1.069 \times 10^{10}$

(注) ORIGEN2.2UPJ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)	( $\alpha, n$ ) 反応	$9.181 \times 10^7$	$8.520 \times 10^7$	$1.770 \times 10^8$
	自発核分裂	$4.735 \times 10^9$	$3.751 \times 10^9$	$8.486 \times 10^9$
	合計	$4.827 \times 10^9$	$3.836 \times 10^9$	$8.663 \times 10^9$
TK-26型の実効増倍率 $k_{eff}^{(M)}$		0.30		
全中性子源強度 $N_0$ (n/s)		$6.895 \times 10^9$	$5.480 \times 10^9$	$1.238 \times 10^{10}$

(注) ORIGEN2.2UPJ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)	( $\alpha, n$ ) 反応	$8.723 \times 10^7$	$8.241 \times 10^7$	$1.696 \times 10^8$
	自発核分裂	$3.926 \times 10^9$	$3.110 \times 10^9$	$7.036 \times 10^9$
	合計	$4.013 \times 10^9$	$3.192 \times 10^9$	$7.206 \times 10^9$
TK-26型の実効増倍率 $k_{eff}^{(M)}$		0.30		
全中性子源強度 $N_0$ (n/s)		$5.733 \times 10^9$	$4.561 \times 10^9$	$1.029 \times 10^{10}$

(注) ORIGEN2.2UPJ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)

(TX-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	$1.433 \times 10^{15}$	$1.559 \times 10^{15}$	$2.992 \times 10^{15}$
2	0.025	$2.888 \times 10^{15}$	$3.162 \times 10^{15}$	$6.050 \times 10^{15}$
3	0.0375	$3.728 \times 10^{15}$	$4.018 \times 10^{15}$	$7.746 \times 10^{15}$
4	0.0575	$2.903 \times 10^{15}$	$3.178 \times 10^{15}$	$6.081 \times 10^{15}$
5	0.085	$1.636 \times 10^{15}$	$1.783 \times 10^{15}$	$3.419 \times 10^{15}$
6	0.125	$1.581 \times 10^{15}$	$1.685 \times 10^{15}$	$3.266 \times 10^{15}$
7	0.225	$1.362 \times 10^{15}$	$1.487 \times 10^{15}$	$2.849 \times 10^{15}$
8	0.375	$5.802 \times 10^{14}$	$6.360 \times 10^{14}$	$1.216 \times 10^{15}$
9	0.575	$2.480 \times 10^{15}$	$2.657 \times 10^{15}$	$5.137 \times 10^{15}$
10	0.85	$1.141 \times 10^{15}$	$1.169 \times 10^{15}$	$2.310 \times 10^{15}$
11	1.25	$7.732 \times 10^{14}$	$7.906 \times 10^{14}$	$1.564 \times 10^{15}$
12	1.75	$2.370 \times 10^{13}$	$2.435 \times 10^{13}$	$4.805 \times 10^{13}$
13	2.25	$1.395 \times 10^{13}$	$1.504 \times 10^{13}$	$2.899 \times 10^{13}$
14	2.75	$6.947 \times 10^9$	$6.774 \times 10^9$	$1.372 \times 10^{10}$
15	3.5	$6.770 \times 10^8$	$5.882 \times 10^8$	$1.265 \times 10^9$
16	5.0	$2.153 \times 10^8$	$1.721 \times 10^8$	$3.874 \times 10^8$
17	7.0	$2.483 \times 10^7$	$1.984 \times 10^7$	$4.467 \times 10^7$
18	9.5	$2.853 \times 10^6$	$2.279 \times 10^6$	$5.132 \times 10^6$
合計		$5.575 \times 10^{15}$	$6.010 \times 10^{15}$	$1.158 \times 10^{17}$



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

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

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



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 $\square$ %とする。15×15燃料 48,000MWD/t型についても最小値である $\square$ %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高燃焼度を設定している。

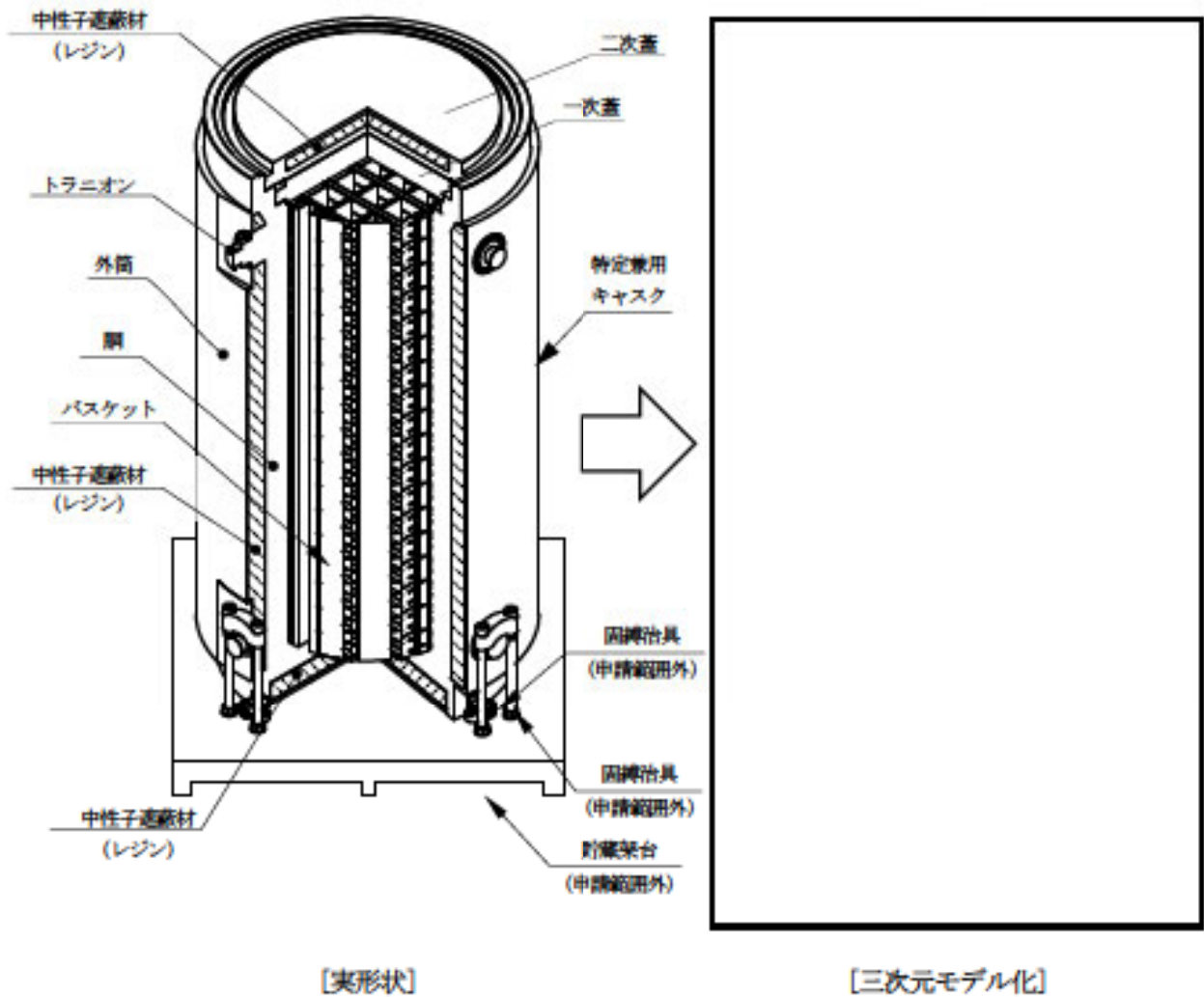
#### ・モデル化の保守性

—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。

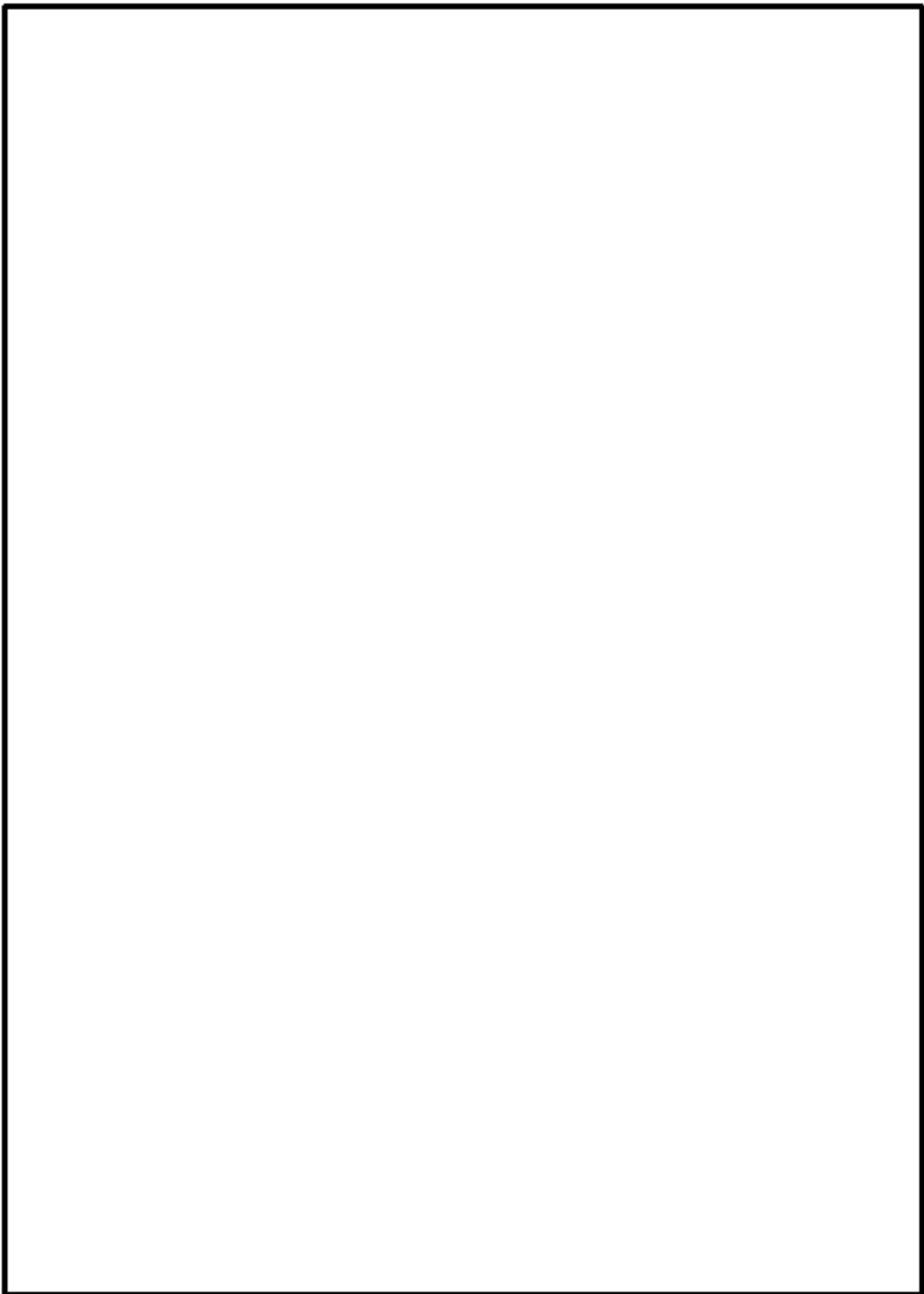
（別紙1「3. 中性子遮蔽材の質量減損について」参照）

—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。



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)

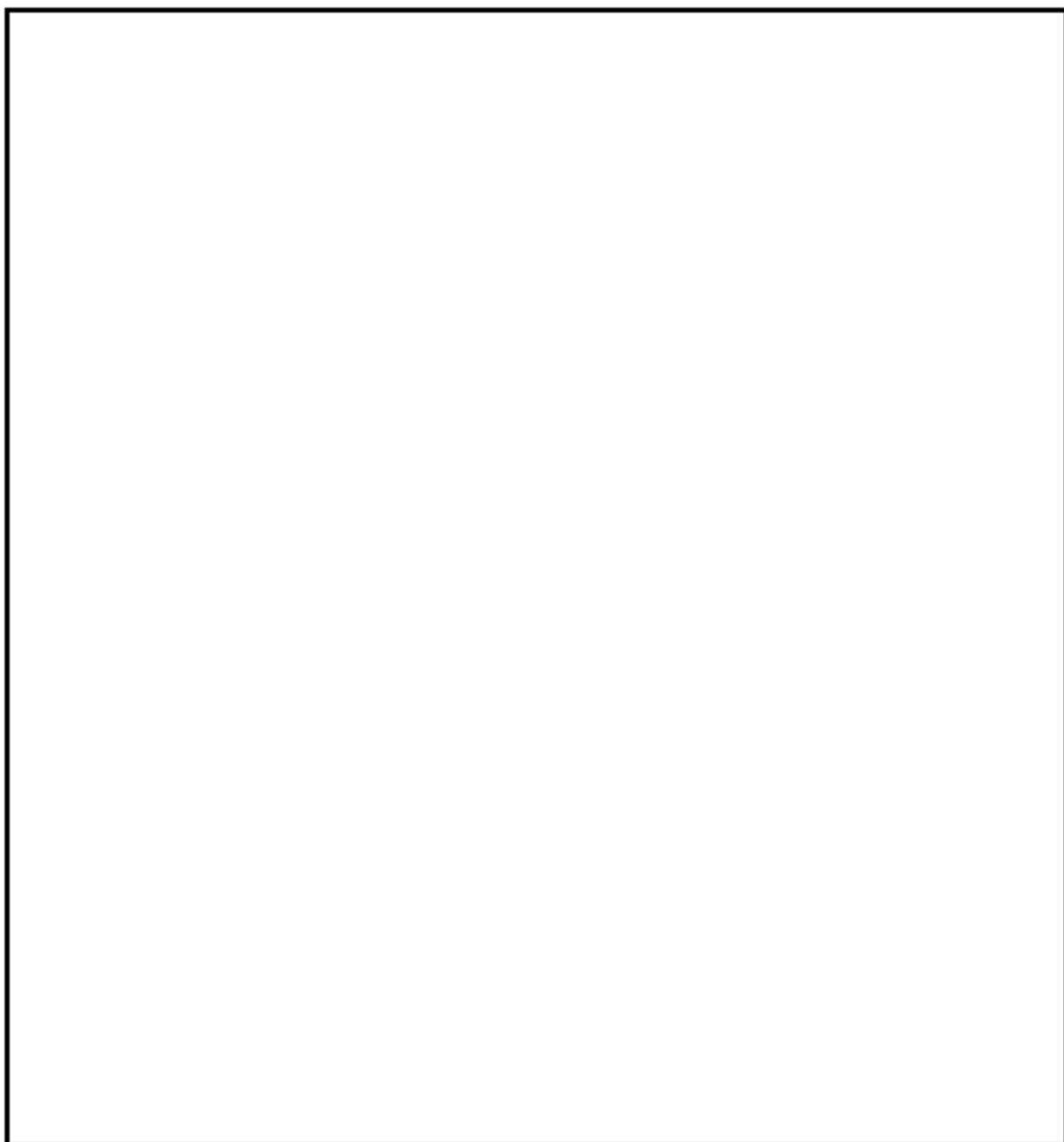
別紙1-21





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<sup>①</sup>。

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

ここで、

- $\Delta_w$  : 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低分子の炭化水素である<sup>①</sup>。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。

#### 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 <sup>239</sup> 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) 表面から1mの位置 : F2タリー (半径5cm又は半径10cmの面)
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。MCNP5解析では、体系内での実効増倍率を考慮しない固定線源として評価を実施し、燃料内での核分裂はしないものとして取り扱う。

(注2) TK-26型の表面及び表面から1m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評価点を抽出し、その評価点における線量当量率をF2タリーにて評価した。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の面のF2タリーを使用し、その他の評価点の線量当量率評価には半径5cmの面のF2タリーを使用した。



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

ウェイト・ウィンドウ法では粒子を分割・結合させ、計算結果への影響が大きい領域でより多くの粒子の計算を行い、計算精度の向上を図る手法である。ウェイト・ウィンドウ法では粒子のウェイト（計算結果への影響度を示す値）が過大な状態で評価点に到達した際に発生する大きな変動や、粒子のウェイトが過小になり寄与の小さい粒子について計算時間を費やすことによる計算効率の低下を防止するため、領域ごとにウェイト・ウィンドウと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、Superimposed Importance Meshを用いて基本的に空気、鉄、レジンなどの物質ごとに分割して隣り合う分割領域での粒子のウェイトが大きく変わらない分割厚さを設定し、補助ツールであるADVANTG ver. 3.0.3の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ィスクロッシングエスティメータ（面タリー）にて評価した。面タリーの大きさは半径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の面タリーを使用した。

### (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MNPコードマニュアルの推奨値である10%以下となってことを確認している。

また、MNP5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、FMESEタリーによる線量当量率分布の結果とよく合っていることを確認して面タリー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	統計的な精度を表す指標。	0.1以下であること。(≤ 0.10)
		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。
		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	相対誤差の精度を表す指標。	0.1以下であること。(≤ 0.10)
		計算収束判定段階において、valueが単調に減少すること。
		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	タリ一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)
		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。	タリ一に記録された量の確率分布関数(x)の最終的スロープが3以上であること。(≥ 3.00)

(注) 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)

5. 参考文献

- (1) A. Oishi, et al., "Evaluation of Neutron Shielding Materials, TN VYAL B<sup>TM</sup> and KOBESH EPR<sup>TM</sup> 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。

$$N_0 = N_1 / (1 - k_{eff})$$

ここで、

$N_0$  : TK-26型1基当たりの一次中性子源強度

$k_{eff}$  : 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KEND-VIコードにより求めた。なお、考慮している核種<sup>(1)</sup>は以下のとおりである。

アクチニド：<sup>235</sup>U、<sup>238</sup>U、<sup>239</sup>U、<sup>240</sup>Pu、<sup>241</sup>Pu、<sup>242</sup>Pu、<sup>243</sup>Pu

核分裂生成物：<sup>90</sup>Tc、<sup>103</sup>Rh、<sup>135</sup>Xe、<sup>137</sup>Cs、<sup>140</sup>Nd、<sup>144</sup>Nd、<sup>147</sup>Pm、<sup>148</sup>Sm、<sup>149</sup>Sm、<sup>151</sup>Sm、<sup>152</sup>Sm、<sup>154</sup>Eu、<sup>155</sup>Gd

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 <sup>(1)</sup>	□
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<sup>239</sup>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<sup>239</sup>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<sup>240</sup>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/s)	(α, n) 反応	9.358×10 <sup>7</sup>	8.706×10 <sup>7</sup>	1.806×10 <sup>8</sup>
	自発核分裂	4.902×10 <sup>9</sup>	3.914×10 <sup>9</sup>	8.816×10 <sup>9</sup>
	合計	4.996×10 <sup>9</sup>	4.001×10 <sup>9</sup>	8.997×10 <sup>9</sup>

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 <sup>240</sup>Cmの自発核分裂反応
- ② <sup>239</sup>Puの核分裂反応
- ③ <sup>235</sup>Uの核分裂反応

ここで、<sup>239</sup>Puの核分裂、及び<sup>240</sup>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、<sup>239</sup>Pu及び<sup>235</sup>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、<sup>240</sup>Cm、<sup>244</sup>Cmの自発核分裂による中性子源スペクトルに対して、<sup>239</sup>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、<sup>235</sup>Uの核分裂による中性子源スペクトルに対しても<sup>239</sup>Pu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 $^{239}\text{Pu}$ 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)

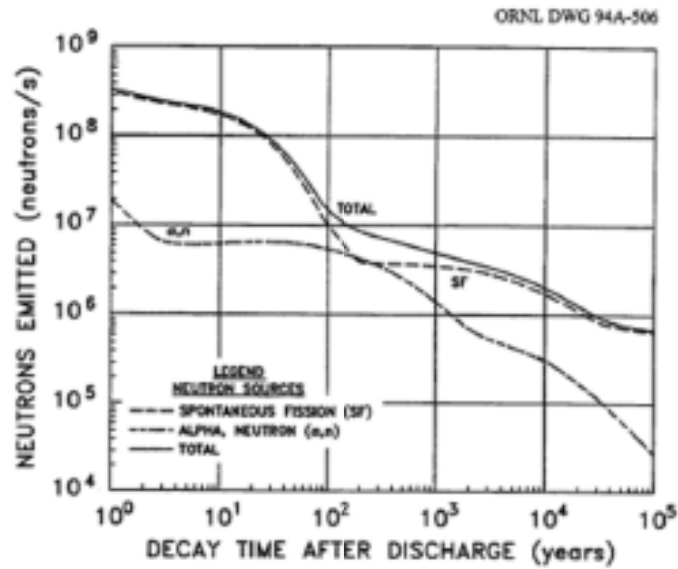


Fig. 9.2. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTHM): PWR/33,000 MWd/MTU.  
Source: ref. 24.

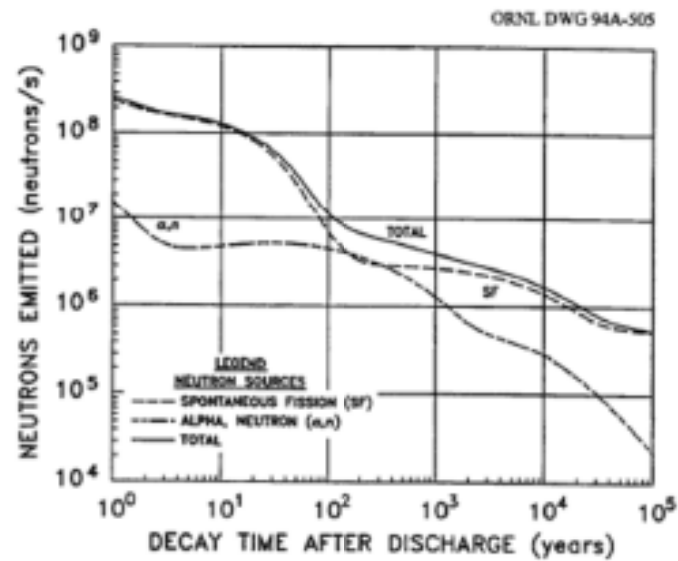
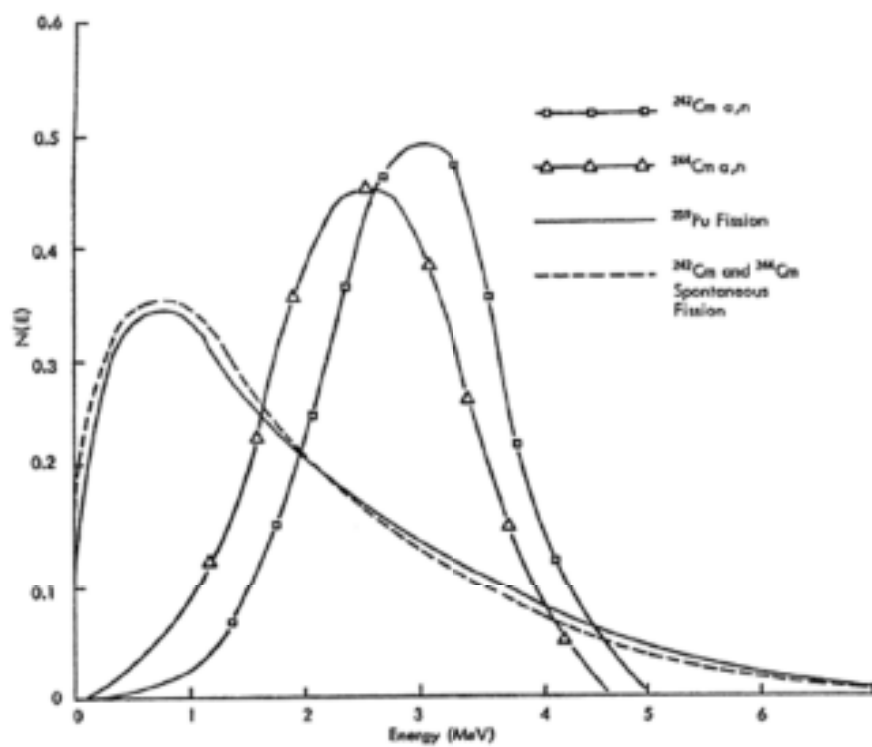


Fig. 9.3. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTHM): BWR/27,500 MWd/MTU.  
Source: ref. 24.

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  $^{239}\text{Pu}$ の核分裂、及び $^{242}\text{Cm}$ 、 $^{244}\text{Cm}$ の自発核分裂中性子源スペクトルの比較 <sup>(2)</sup>



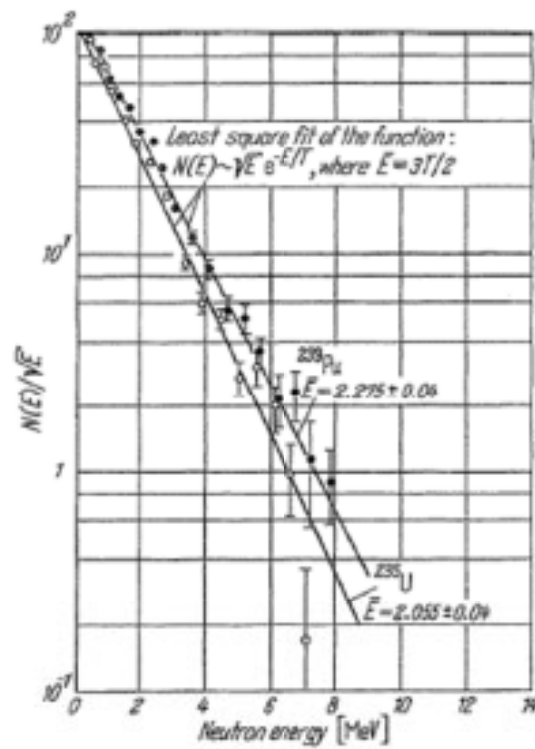


Fig. 2.3.-2. Typical measured fission neutron spectra of  $^{238}\text{U} + n_{th}$  and  $^{239}\text{Pu} + n_{th}$ .

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

### 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<sup>①</sup>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 $(\alpha, n)$ 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。

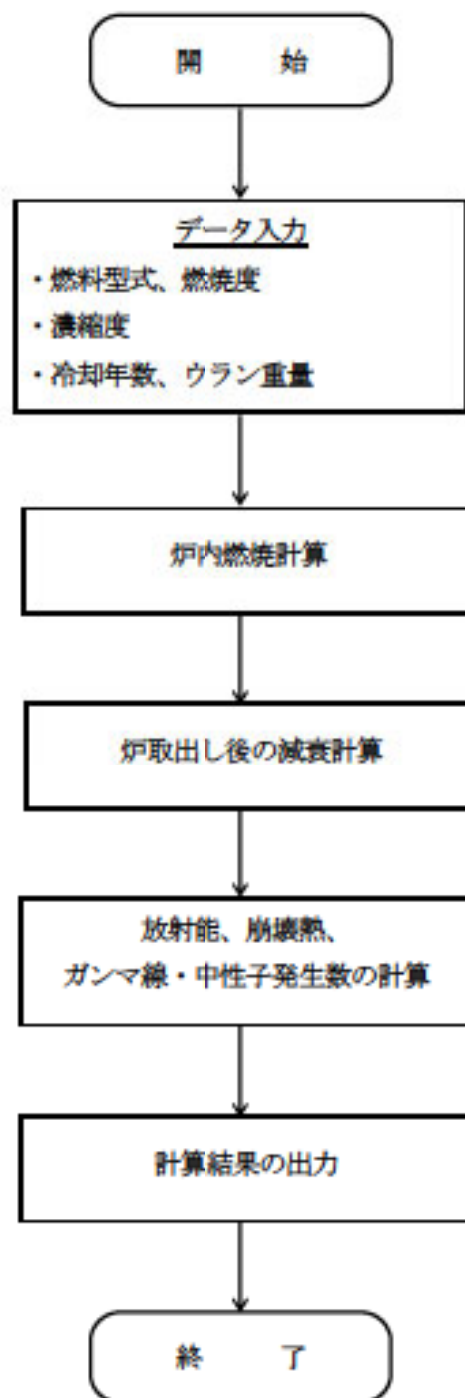
##### (3) 解析フロー

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<sup>②</sup>。

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

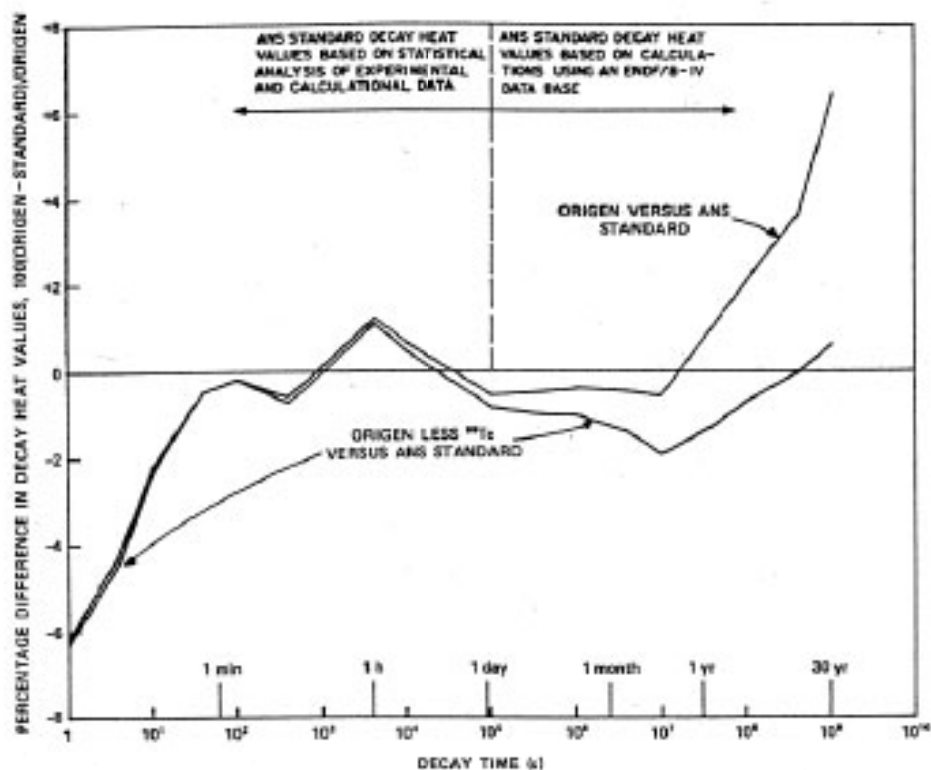


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for  $10^{11}$ -s irradiation of  $^{235}\text{U}$ .

(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 $^{99}\text{Tc}$ 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 $^{99}\text{Tc}$ 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4-2図 ORIGEN2コードの検証例<sup>②</sup>

## 2. MCNP5コード

### (1) 概要

三次元輸送計算コードMCNP5<sup>(3)</sup>（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計算に用いられ、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<sup>(4)</sup>では、遮蔽計算ツールとして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<sup>(5)</sup>においてMCNP4R2コード<sup>(6)</sup>、TN-40型の遮蔽解析<sup>(6)</sup>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<sup>(7)</sup>において原子力発電所附属施設遮蔽のための輸送計算コードとしてモンテカルロ法を用いた計算手法の適用が可能とされ、放射性物質輸送・貯蔵容器などの遮蔽計算に用いられている。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<sup>(9)</sup>。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コードの妥当性検証

MCNP5コードは、放射性物質輸送・貯蔵容器体系において、実験値とMCNP5コードによる解析値との比較が行われており、以下に説明するとおりMCNP5コードの妥当性が検証されている。原子力学会標準シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015<sup>(10)</sup>に示されている4つの附属書を参考に、MCNP5コードをTK-26型の遮蔽解析に適用することの妥当性確認を以下のとおり実施した。

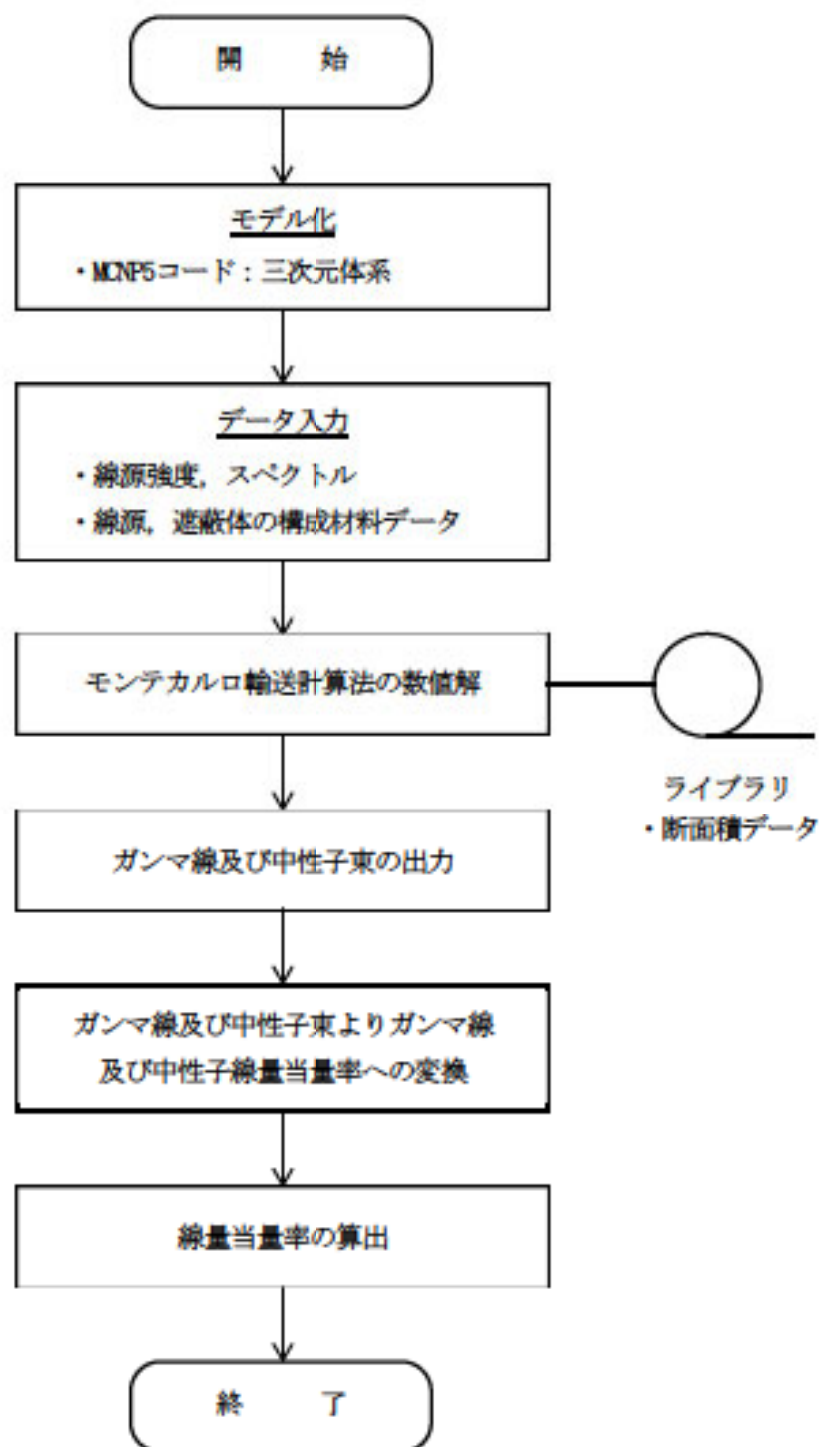
モデル検証及び妥当性確認としては、(1)概念モデルの開発、(2)数学的モデル化、(3)物理的モデル化、及び(4)シミュレーションモデルの予測性能判断の4要素の確認を行う必要があるが、(1)、(2)及び(3)についてはJANLにて実施済み<sup>(11)</sup>であるため対象外とする。**(4)シミュレーションモデルの予測性能の判断については、別紙4-4図及び別紙4-5図に示すベンチマーク文献<sup>(12)</sup>の確認により実施する。**

別紙4-4図及び別紙4-5図に示す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に対し、中性子についてはENDF5T及びガンマ線についてはMCPLIB02の断面積ライブラリを用いて、MCNP4Aコード<sup>(13)</sup>によるベンチマーク解析が実施されている。ベンチマーク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。測定値と計算値を比較した結果、**傾向が概ね一致し妥当性が検証されている。**TN-12/2型と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4-2表にまとめる。両者の解析コード、線源条件、及び遮蔽構造は同等であり、本ベンチマーク文献をTK-26型の物理的モデル化の検証として用いることは妥当である。

また、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型使用済燃料輸送容器の中性子線量率分布<sup>(14)</sup>、国内のNFT-38B型使用済燃料輸送容器の中性子及びガンマ線量率分布<sup>(15)</sup>について、ENDF/B-VII等MCNP5のMCNPDATAとして添付されている断面積ライブラリを使用してMCNP5コードで計算した結果と比較され、概ね一致していることが確認されている。



(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。



別紙4-3図 MCNP5コードの解析フロー

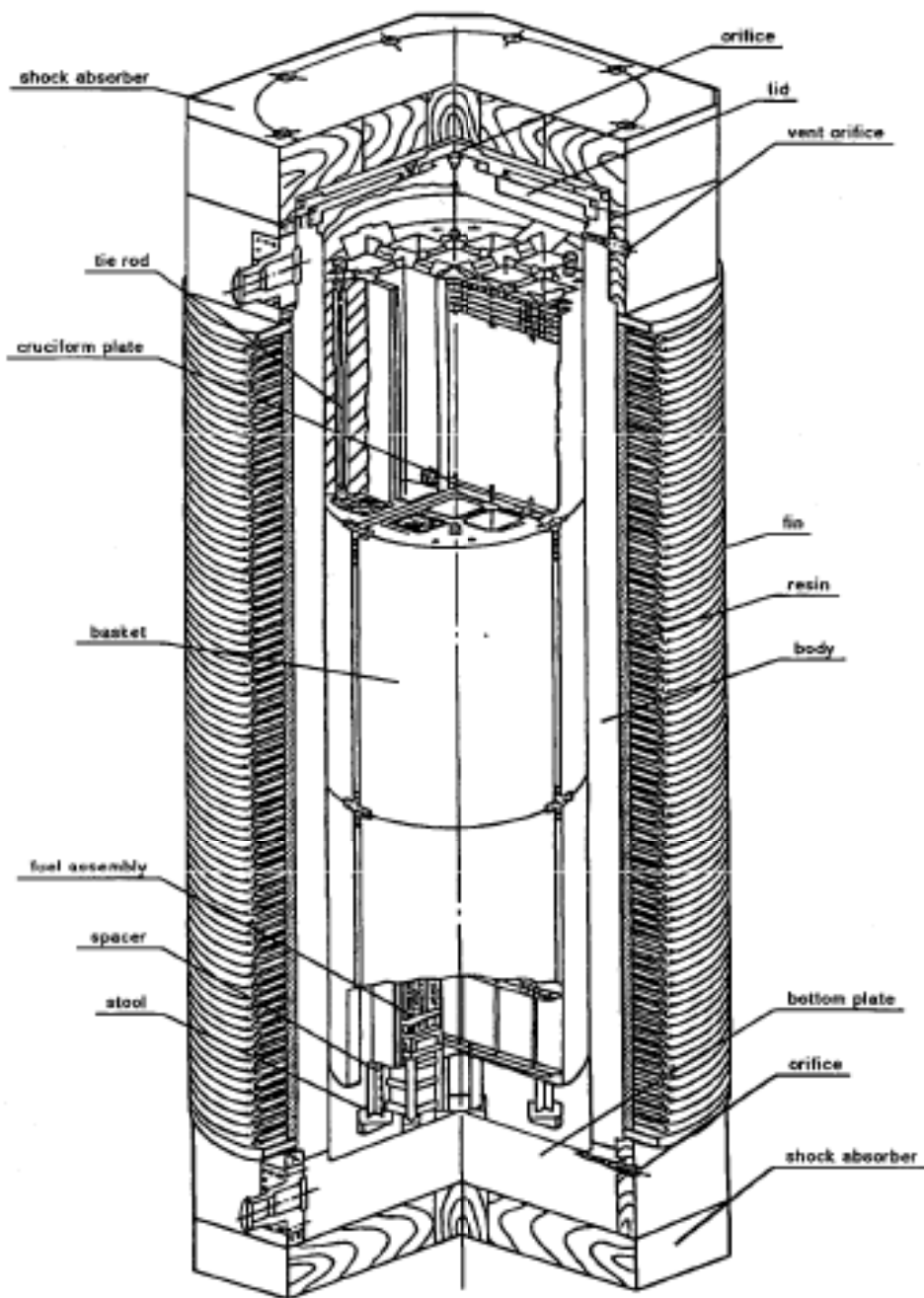
別紙4-1表 先行輸送容器許認可実績とTK-26型の遮蔽解析条件の比較

項目	核燃料物質輸送容器 <sup>④</sup>	TK-26型 (特定兼用キヤスク)	備考
解析コード	MCNP5	MCNP5	同一
	中性子	ENDF70	ENDF70: ENDF/B-VIIを基にLANLで整備
ライブラリ	ガンマ線	MCPLIB84	同一
	中性子	ORIGEN-Sの出力	ORIGEN2の出力
線源条件	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	-	<sup>60</sup> 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	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於いて、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)
半定基準	容器表面	2mSv/h	2mSv/h
	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

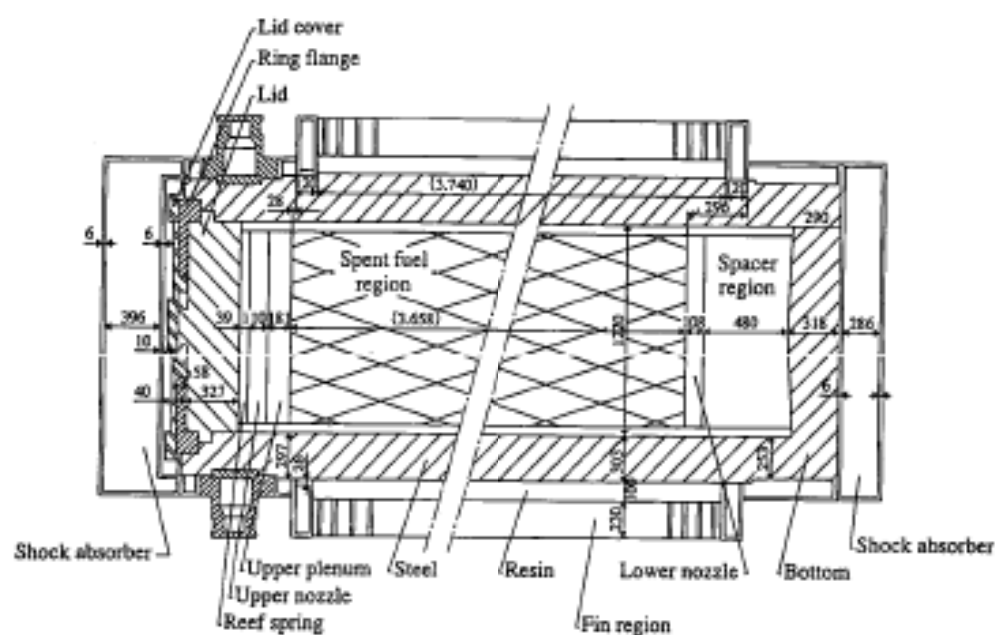
項目	TN-12/2型 <sup>(a)</sup>	TK-26型 (特定兼用キヤスク)	備考
解析コード	MCNP4A	MCNP5	解析コードのバージョンが異なるが、主な変更点はプログラム言語の変更であり、物理・数学モデルは同じである。
	中性子	ENDF70	
ライブラリ	ガンマ線	MCFLIB84	MCFLIB84: EPFL97を基にLANLで整備
	中性子	ORIGEN2の出力	
線源条件	燃料有効部ガンマ線	ORIGEN2の出力	同一
	放射化ガンマ線	<sup>60</sup> Coの放射化	
線源スペクトル	中性子	SCALE SAS2の出力	
	燃料有効部ガンマ線	ORIGEN2の出力	
本体遮蔽構造	放射化ガンマ線	1.17MeV: 50% 1.33MeV: 50%	同一
	ガンマ線遮蔽材	炭素鋼	
燃料集合体	中性子遮蔽材	レジン	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於いて、同等の機能有する。
	燃料集合体	PWR使用済燃料	
検出器 (タリー)	面検出器 (P2)	面検出器 (P2)	同一



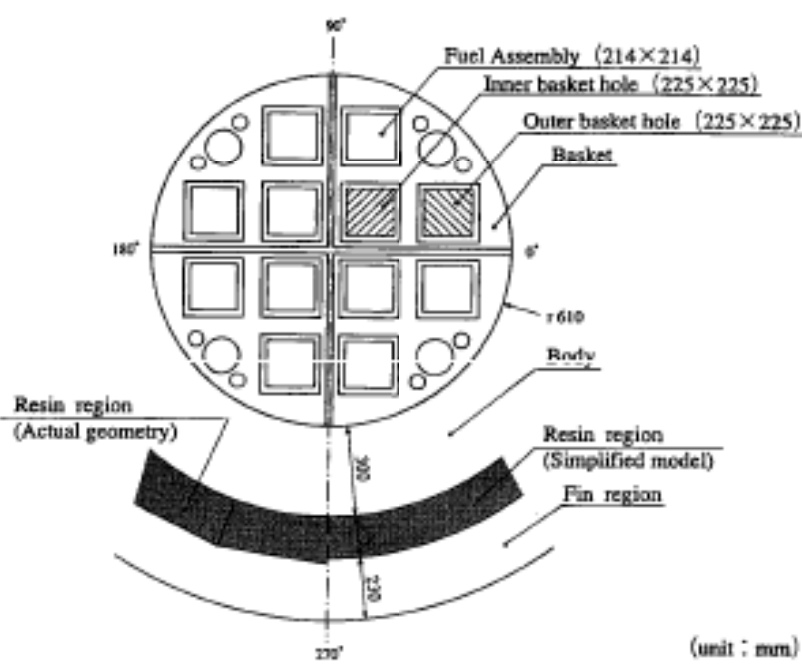


別紙4-4図 TN-12/2型輸送容器

別紙4-10

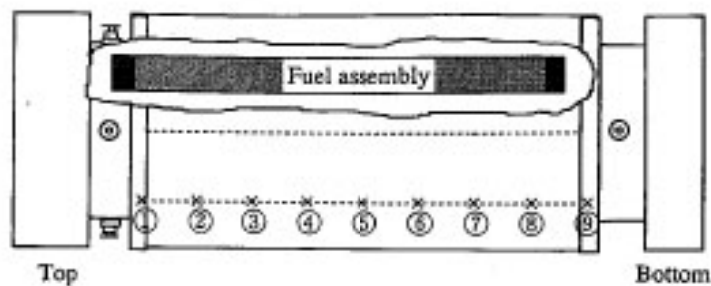


(a)

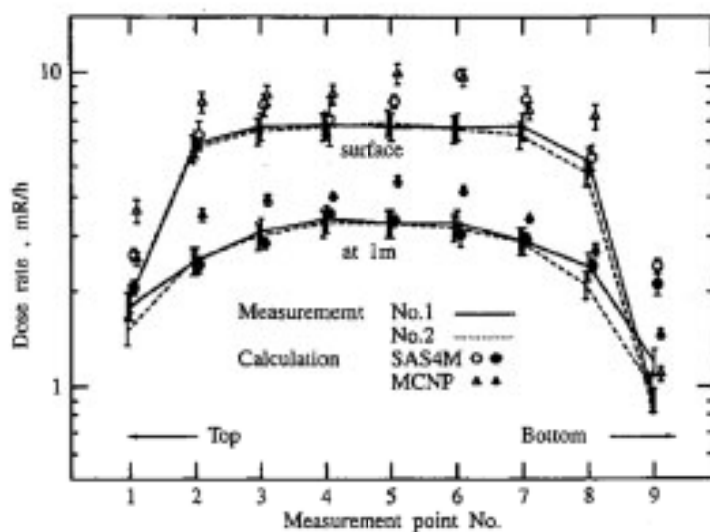


(b)

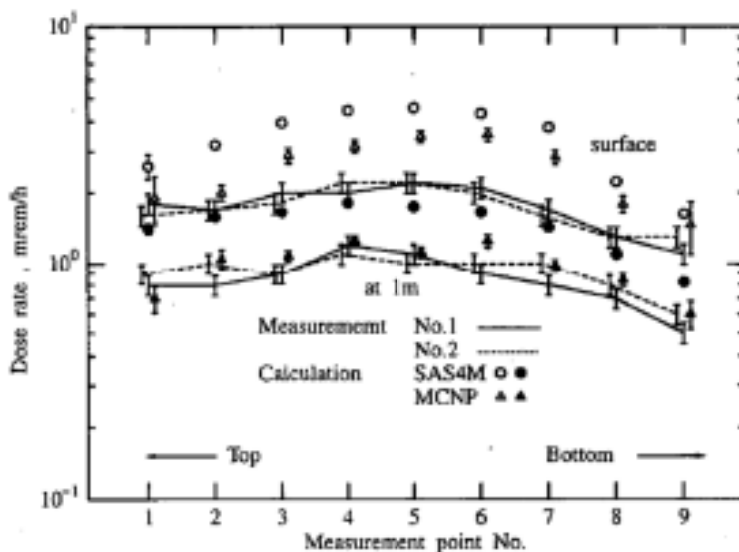
別紙4-5図 TN-12/2型輸送容器の遮蔽計算モデル



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、ガンマ線についてMCPLIB84を使用している。

ガンマ線線量当量率評価で用いるMCPLIB84<sup>(33)</sup>は、MCNP5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<sup>(34)</sup>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LANL、Oak Ridge National Laboratory (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", 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) F. Brown, B. Kiedrowski, J. Bull, M. Gonzales, N. Gibson, "Verification of MCNP5-1.60", LA-UR-10-05611, (2010)
- (11) H. Taniuchi, and F. Matsuda, "Dose rate measurements and calculation of TN-12/2 packages", Nuclear Technology, Vol. 127, pp. 88-101, (1999)
- (12) 浅見光史 ほか, 「放射性物質輸送容器のモンテカルロ法による遮蔽安全評価手法ガイドライン原案の策定」, 海上技術安全研究所報告, 第13巻, 第1号, 研究調査資料, (2013)
- (13) 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)
- (14) 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





## 軸方向燃焼度分布の妥当性について

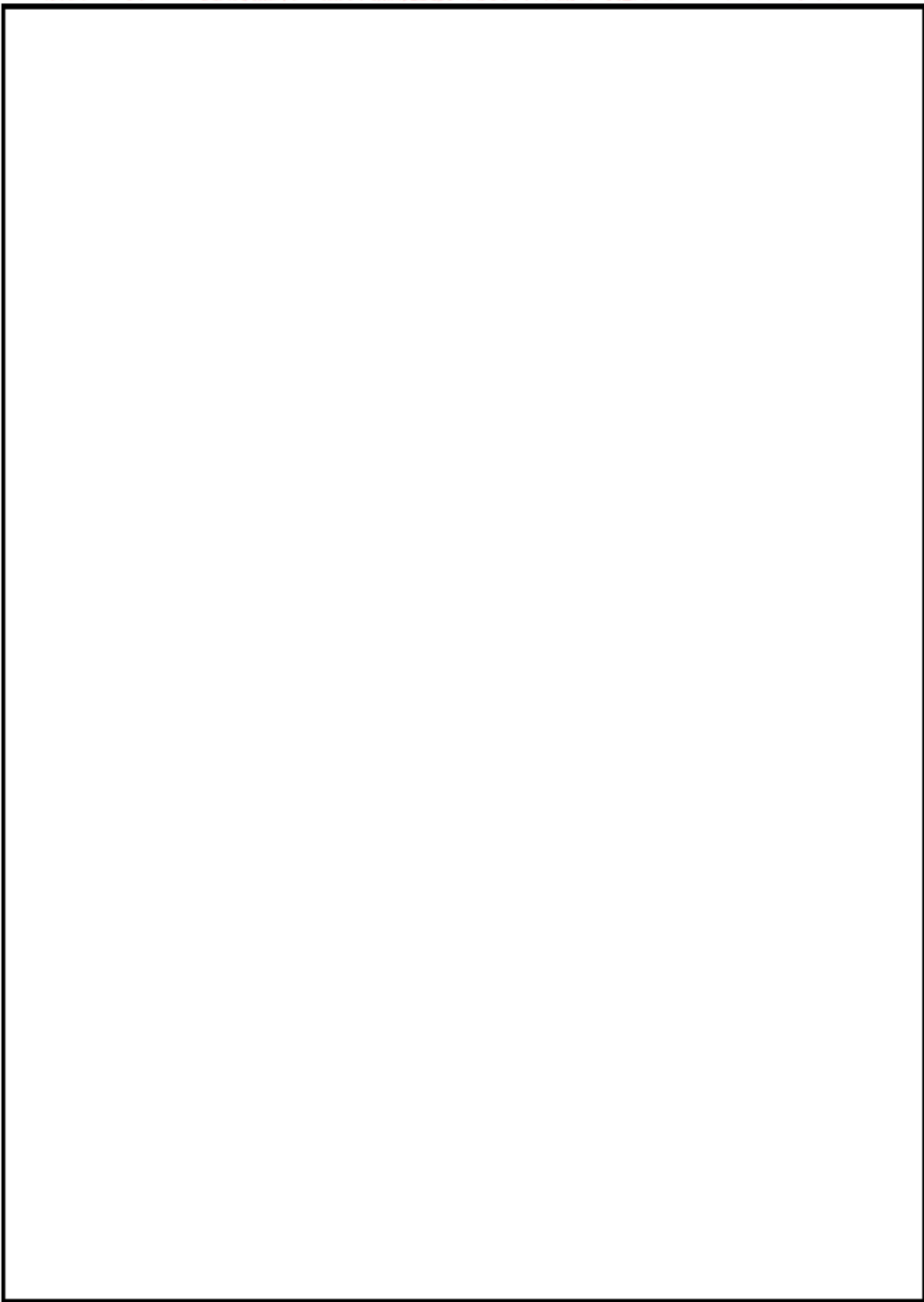
## 1. はじめに

TK-26型に収納する使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布は、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<sup>(1)</sup>と本申請で考慮した軸方向燃焼度分布(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<sup>(1)</sup>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、別紙5-1図及び別紙5-1表に示した1に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。



### 3. 参考文献

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

