資料 1-10

Doc No. L5-95LC218 R4

2023 年 9 月 25 日

三菱重工業株式会社

補足説明資料 16－6

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

無断複製・転載禁止　三菱重工業株式会社

枠囲いの内容は商業機密のため、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
3. 使用する解析コード ····· 20
4. 遮蔽機能データ ····· 48
5. 参考文献 ····· 52

別紙１　遮蔽解析条件
別紙２　遮蔽解析用中性子実効増倍率の設定について
別紙３　中性子源スペクトルを ^{239}Pu の核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性
別紙４　遮蔽解析結果の詳細
別紙５　遮蔽機能データの適用確認方法

1. 要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、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こと。

b. 設置許可基準規則解釈別記４第 16 条２項

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

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

➢ 貯蔵事業許可基準規則解釈第４条第１項第３号

三　使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、遮蔽機能に関する評価で考慮した使用済燃料の燃焼度に応じた当該使用済燃料の配置の条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。

・兼用キャスク表面の線量当量率が１時間当たり２ミリシーベルト以下であり、かつ、兼用キャスク表面から１メートル離れた位置における線量当量率が１時間当たり 100 マイクロシーベルト以下であること。

・貯蔵建屋（工場等内において兼用キャスクを収納する建物をいう。以下この条において同じ。）を設置する場合には、当該貯蔵建屋の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下したときにおいても、工場等周辺の実効線量は周辺監視区域外における線量限度を超えないこと。

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

c. 設置許可基準規則解釈別記４第 16 条５項

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

・設計貯蔵期間を明確にしていること。

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

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド確認事項

「2.安全機能の確保　2.2 遮蔽機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

1) 設計上想定される状態において、使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽機能を有すること。

2) 通常貯蔵時の兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を 100μSv/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 50μSv/y 以下となることを目標に、線量限度（1mSv/y）を十分下回る水準とすること。

4) 貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、工場等周辺の実効線量が線量限度（1mSv/y）を超えないこと。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ遮蔽設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

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

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

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

b. 兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を 100μSv/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 100μSv/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 50μSv/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

MSF-28P 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こと。

b. 設置許可基準規則解釈別記４第 16 条２項

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

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

➢ 貯蔵事業許可基準規則解釈第４条第１項第３号

三　使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、遮蔽機能に関する評価で考慮した使用済燃料の燃焼度に応じた当該使用済燃料の配置の条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。

・兼用キャスク表面の線量当量率が１時間当たり２ミリシーベルト以下であり、かつ、兼用キャスク表面から１メートル離れた位置における線量当量率が１時間当たり 100 マイクロシーベルト以下であること。

・貯蔵建屋（工場等内において兼用キャスクを収納する建物をいう。以下この条において同じ。）を設置する場合には、当該貯蔵建屋の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下したときにおいても、工場等周辺の実効線量は周辺監視区域外における線量限度を超えないこと。

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

MSF-28P 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、設計貯蔵期間における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最大線量当量率を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最大線量当量率を 100μSv/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レジンを用いる。

2.(2)審査ガイドへの適合性［確認内容］1)から 2)への説明に示すとおり、特定兼用キャスク表面及び特定兼用キャスク表面から１メートル離れた位置における線量当量率は、特定兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、使用済燃料の放射線源強度を条件として三次元モンテカルロコ

ードMCNP5（断面積ライブラリ：MCPLIB84/FSXLIB-J33）を使用して求める。線量当量率評価に用いる放射線源強度は、使用済燃料の型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コードORIGEN2（断面積ライブラリ：ORLIBJ40に含まれるPWR41J40及びPWR34J40）を使用して求める。

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

また、設置許可基準規則解釈別記４第16条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。

MSF-28P型の設計貯蔵期間は60年である。また、補足説明資料16-４「材料・構造健全性に関する説明資料（L5-95LC216）」に示すとおり、MSF-28P型は、安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計である。

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、兼用キャスクの有する安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、MSF-28P 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

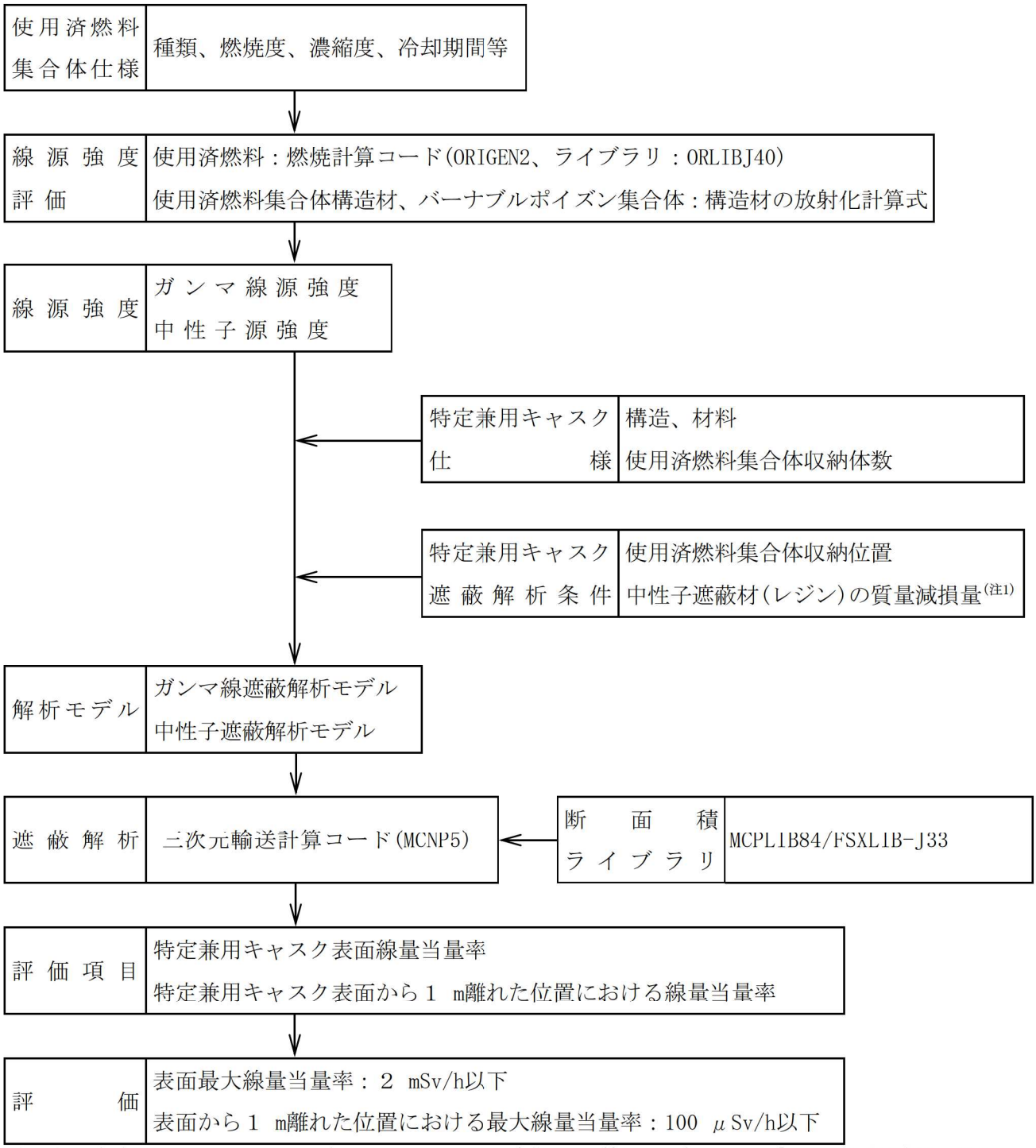
使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。

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 100μSv/h 以下とすること。

MSF-28P 型の遮蔽解析フローを第１図に示す。遮蔽解析に用いる解析コードは、3. に示すとおり検証され、適用性が確認されている。



（注１）特定兼用キャスクの主要な構成部材のうち、中性子遮蔽材は、補足説明資料 16-４「材料・構造健全性に関する説明資料（L5-95LC216）」に示すとおり、熱による質量減損が生じる。遮蔽解析では、設計貯蔵期間（60 年）経過後の中性子遮蔽材の質量減損を考慮する。

第１図　遮蔽解析フロー図

(3) 使用済燃料の線源強度評価方法

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

(4) 特定兼用キャスクの線量当量率評価方法

特定兼用キャスクの線量当量率は、特定兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、使用済燃料の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を用いる。MSF-28P型には、使用済燃料の燃焼度及び冷却期間に応じて収納制限を設けている。遮蔽解析に用いる燃料タイプについては、17×17燃料 48,000MWd/t型（A型）とする。遮蔽解析における収納物条件の概要を第１表に、17×17燃料 48,000MWd/t型（A型）の遮蔽解析条件としての代表性を別紙１に示す。

(5) 遮蔽解析モデル

遮蔽解析モデル化の概要を第３図、解析モデル図を第４図に示す。

特定兼用キャスクの実形状を基に、ガンマ線遮蔽材である鋼材の欠損となるトラニオン、バルブ及びモニタリングポート、並びに中性子遮蔽材であるレジンの欠損となる伝熱フィン、トラニオン、バルブ及び支柱を考慮したモデルにより評価している。使用済燃料集合体は燃料各領域の高さ寸法は固定して一次蓋及び胴（底板）に接した状態となるようキャスク全長を短縮し、径方向についてはバスケットセル内部に均質化している。また、バスケットプレートは、ボイド層を含めて格子形状を均質化している。なお、MSF-28P型は蓋部が金属部へ衝突しない設置方法（横置き）又は基礎等に固定する設置方法（たて置き）での貯蔵が可能であるが、遮蔽評価では横置き時に使用する貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体を保守的に装着しないものとし、横置き及びたて置きの共通のモデルとして特定兼用キャスク表面及び表面から１ m離れた位置の線量当量率を評価する。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。

(6) 遮蔽解析の保守性

本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・収納制限に対する解析条件の保守性

－[redacted]、ウラン濃縮度 4.1±[redacted] wt%を保守的に[redacted]wt%とする。

・モデル化の保守性

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

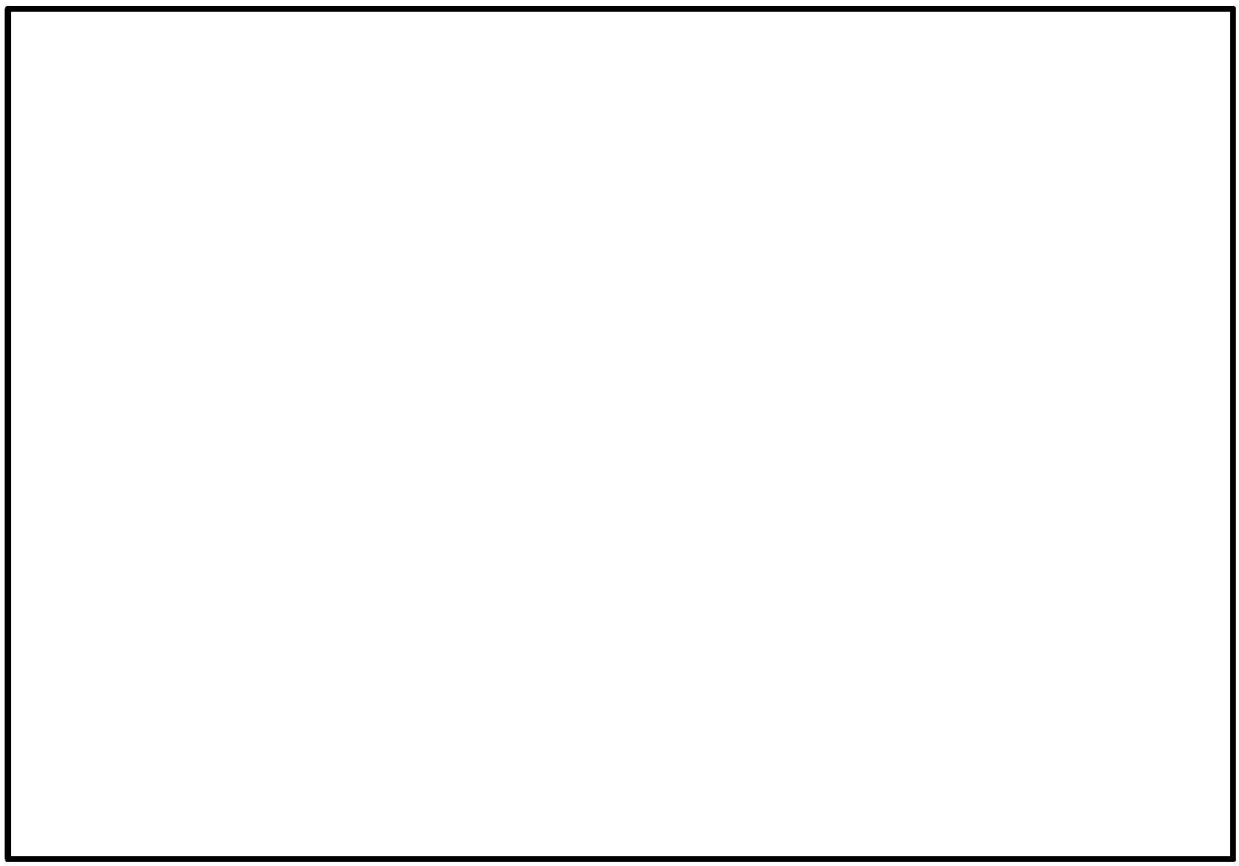
－使用済燃料について胴内での軸方向の移動を考慮し、安全側に蓋方向、底部方向に移動したモデルとしており、線源である使用済燃料が評価点により近くなる設定としている。

－バーナブルポイズン集合体は、放射化による線源強度については考慮するが、構造材としての遮蔽効果は無視する。

第１表　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		
			領域Ａ	領域Ｂ	領域Ｃ	領域Ａ	領域Ｂ	領域Ｃ
収納物仕様	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） 39,000MWd/t 型（Ａ型・Ｂ型）	48,000MWd/t 型（Ａ型・Ｂ型） 39,000MWd/t 型（Ａ型・Ｂ型）	48,000MWd/t 型（Ａ型）	48,000MWd/t 型（Ａ型）	48,000MWd/t 型（Ａ型）
		初期濃縮度（wt%）(注 1)	≦4.2					
		ウラン重量（kg）(注 1)						
		最高燃焼度（GWd/t）(注 1)						
		冷却期間（年）(注 1)						
	バーナブルポイズン集合体の仕様	最高燃焼度（GWd/t）						
		冷却期間（年）						
配置(注 2)								

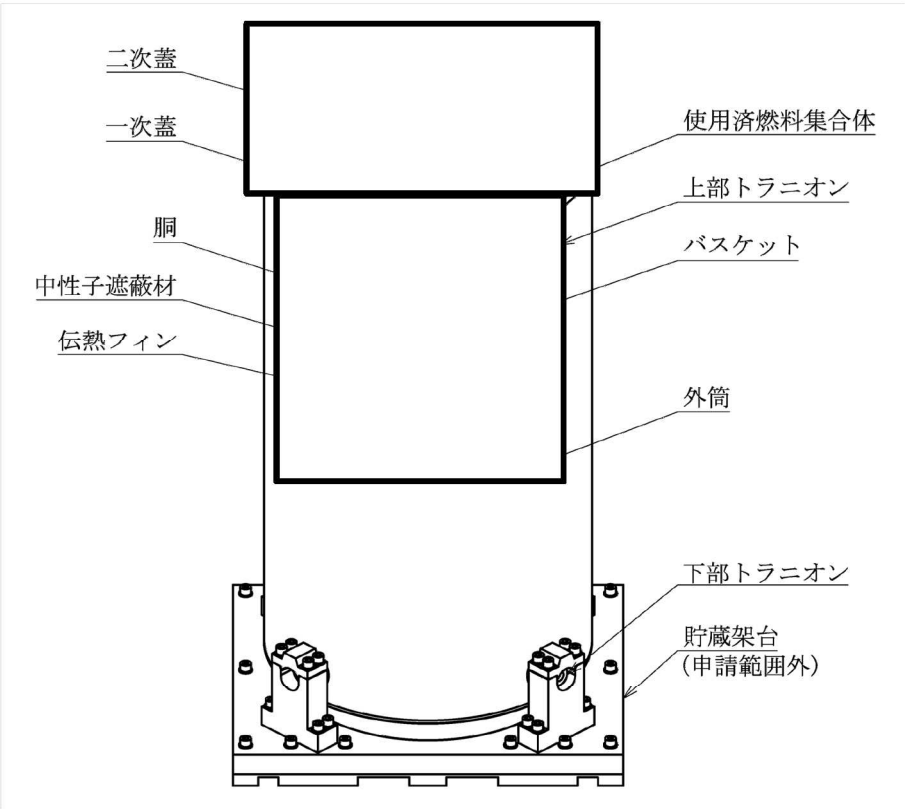
（注１）燃料集合体の仕様は、48,000MWd/t 型の仕様を代表として記載する。
（注２）赤枠内の格子には、バーナブルポイズン集合体を挿入した燃料集合体を収納することができる。



---- 相対燃焼度分布設定値

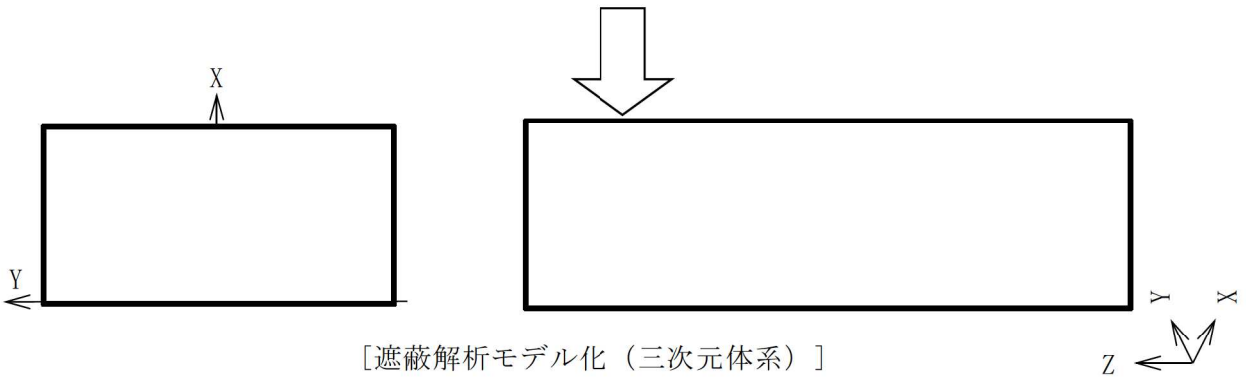
第２図　軸方向燃焼度分布の設定

□内は商業機密のため、非公開とします。



［実形状］

三次元モデル化



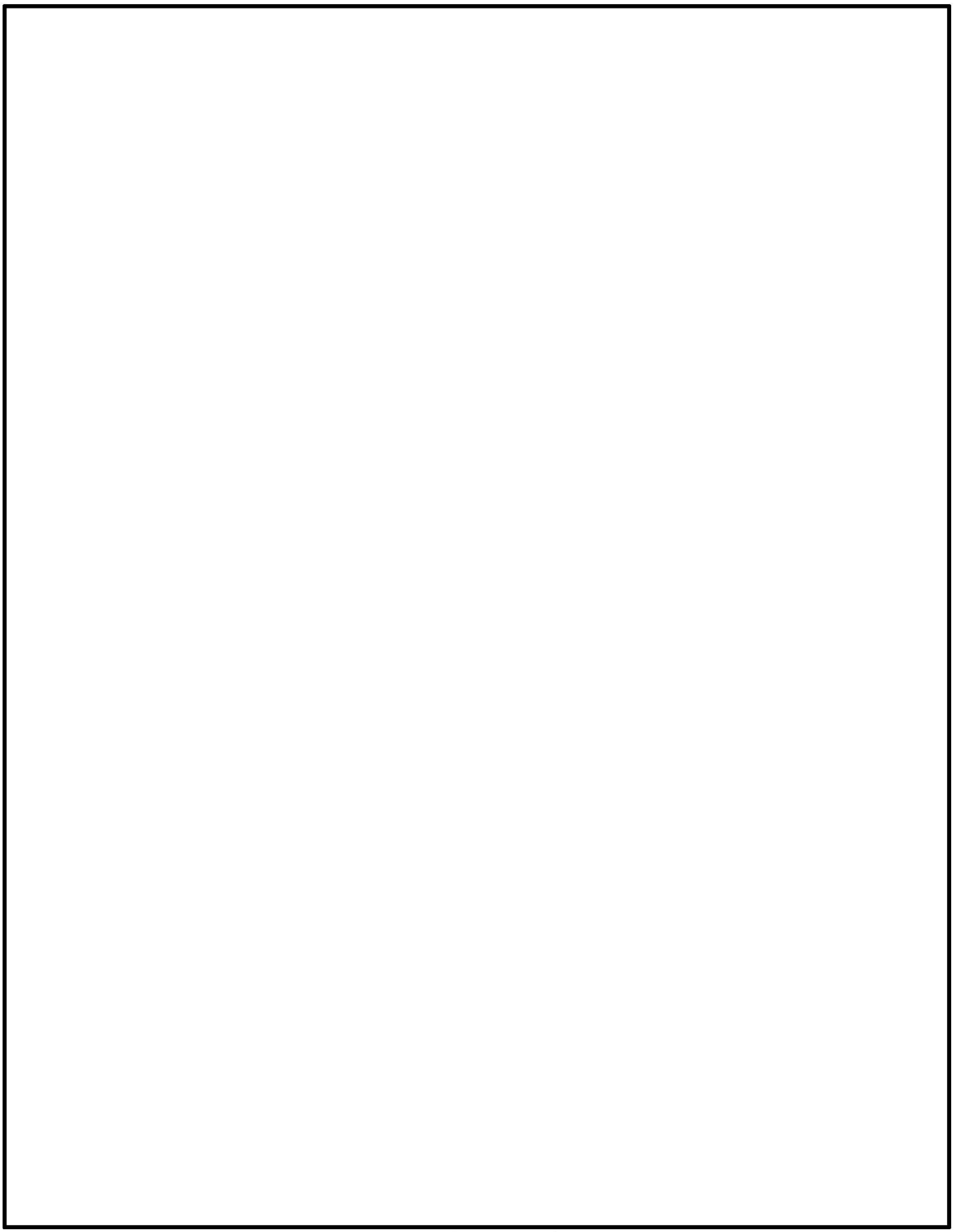
［遮蔽解析モデル化（三次元体系）］

注：モニタリングポート部、バルブ部、トラニオン等を同一平面に示している。

燃料有効部領域A	燃料有効部領域C
燃料有効部領域B	
燃料上部構造材領域A	燃料上部構造材領域C
燃料上部構造材領域A	燃料上部構造材領域C
燃料下部構造材領域A	燃料下部構造材領域C
バスケット領域	胴、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー
中性子遮蔽材	トラニオン
伝熱フィン	底部中性子遮蔽材カバー、下部端板、バルブ部カバープレート
真空	

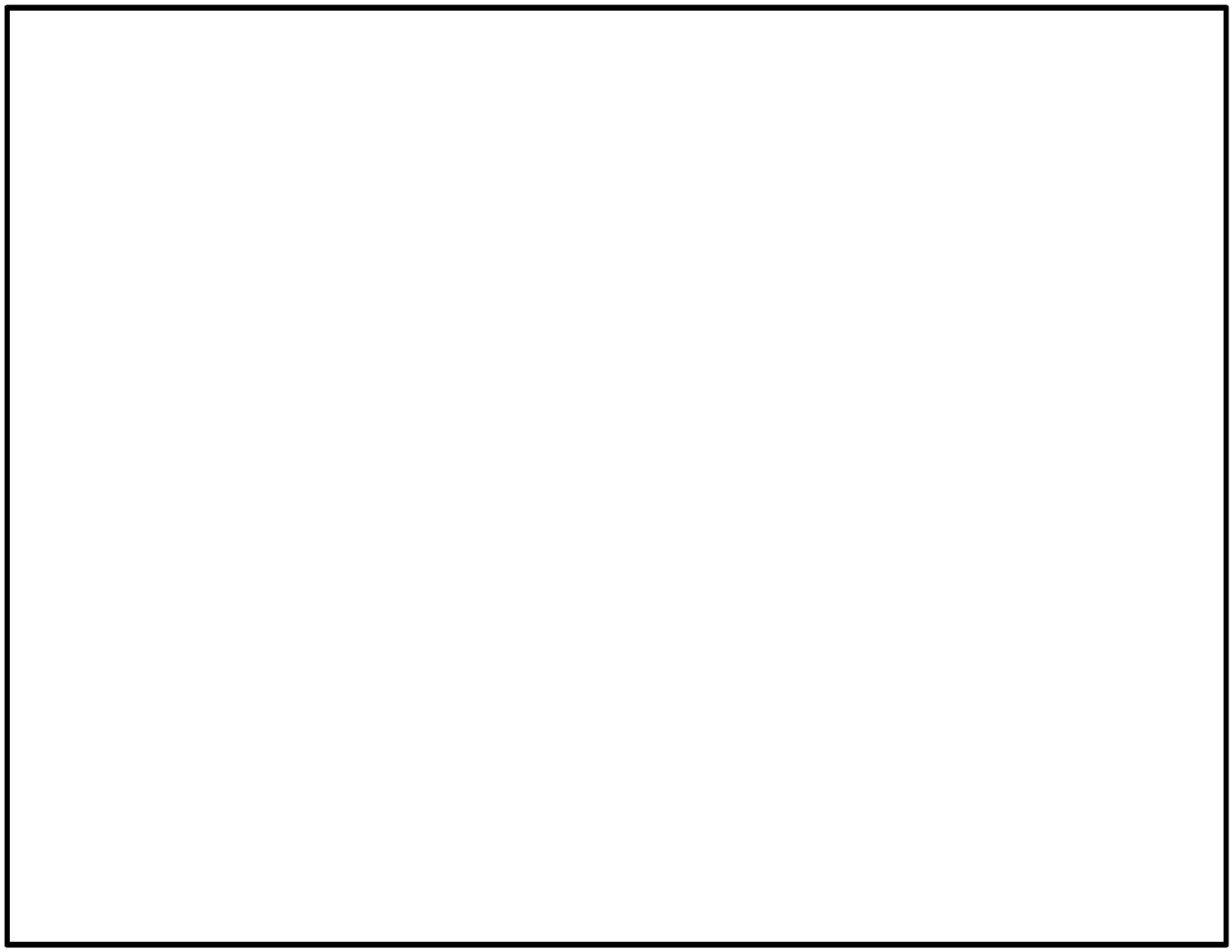
第３図　遮蔽解析モデル化概要

□内は商業機密のため、非公開とします。



第４図（１/２）　遮蔽解析モデル（たて断面）

□内は商業機密のため、非公開とします。



第４図（２／２）　遮蔽解析モデル（燃料有効部中心高さ位置水平断面）

□内は商業機密のため、非公開とします。

(7) 評価結果

MSF-28P 型の遮蔽評価結果を第２表に示す。

特定兼用キャスクの表面及び表面から１　m 離れた位置における線量当量率は、評価基準を満たしている。

なお、線量当量率が最大となる評価点位置は、第５図に示すとおり、表面は底部トラニオン付近コーナー部の中性子遮蔽材が少ない領域、表面から１　m 離れた位置は側部中心の中性子遮蔽材でカバーされた領域である。

評価点位置までの遮蔽構造の特徴から、線量当量率について表面は中性子が支配的になる。一方、表面から１　m 離れた位置はガンマ線が支配的になる。

第２表　線量当量率評価結果

（単位：μSv/h）

	表面			表面から１　m 離れた位置		
	側部	蓋部	底部	側部	蓋部	底部
線量当量率	1524.4	303.3	173.8	86.1	52.5	34.1
評価基準	2,000 以下			100 以下		

注：線量当量率の詳細は、第３表に示す。
　　線量当量率の出力位置は、第５図（１／２）及び第５図（２／２）に示す。

第３表　線量当量率評価結果

（単位：μSv/h）

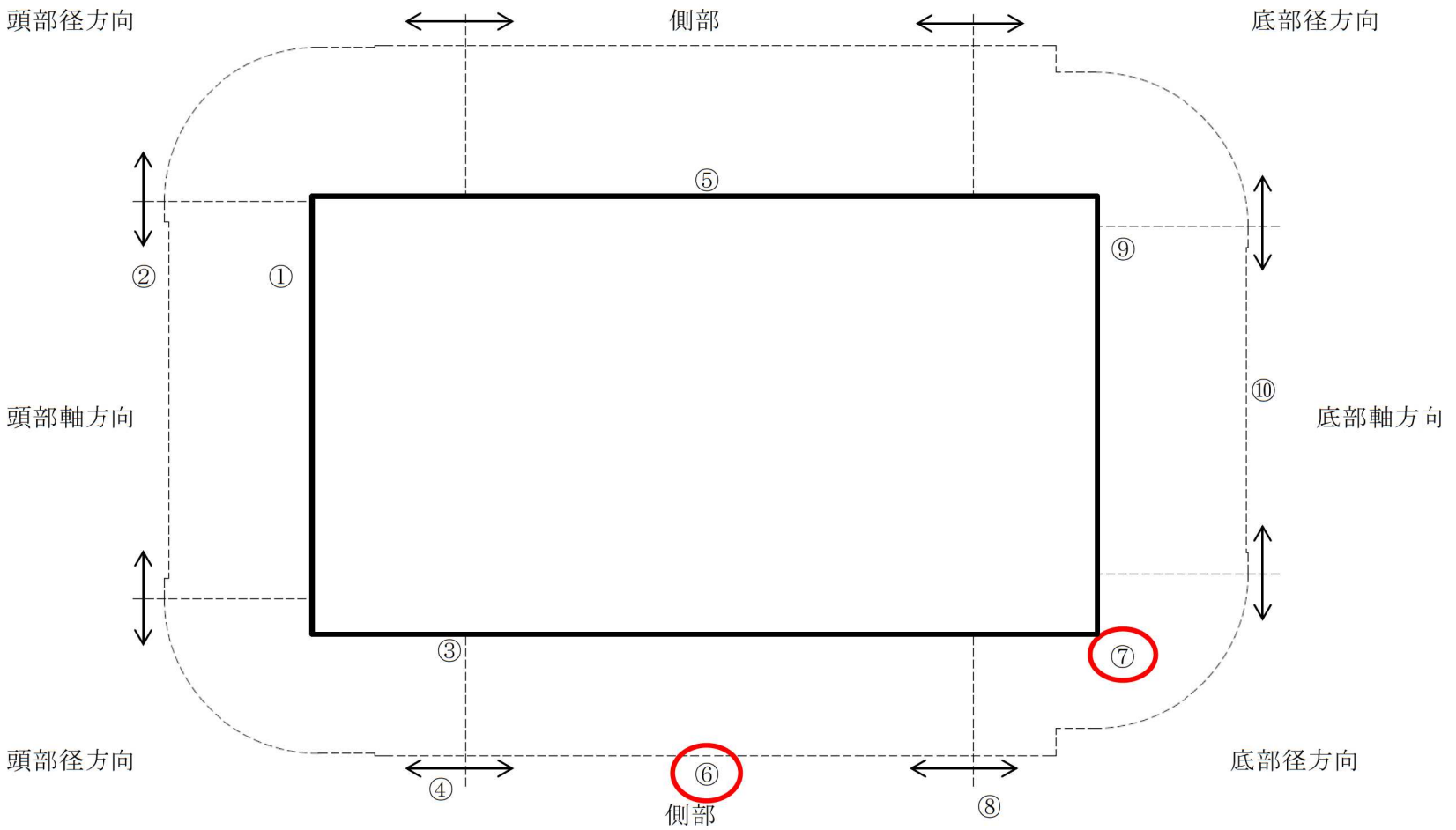
評価点			頭部		側部	底部	
			軸方向	径方向		径方向	軸方向
			①	③	⑤	⑦	⑨
表面	ガンマ線	燃料有効部	0.1 (5.4)	19.9 (2.4)	113.8 (0.6)	1.0 (2.5)	＜0.1 (7.1)
		構造材放射化	0.1 (3.8)	36.6 (1.4)	20.9 (0.7)	0.5 (3.1)	＜0.1 (4.9)
		二次ガンマ線	0.9 (2.6)	9.5 (2.1)	21.9 (1.2)	6.4 (2.2)	0.5 (4.4)
	中性子		302.2 (1.4)	573.1 (1.0)	48.1 (0.9)	1516.5 (0.6)	173.1 (1.4)
	合計		303.3	639.1	204.7	**1524.4**	173.8 (注1)
評価点			②	④	⑥	⑧	⑩
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	0.2 (0.6)	19.0 (0.2)	45.8 (0.2)	20.7 (0.2)	2.5 (0.3)
		構造材放射化	0.7 (0.2)	9.5 (0.3)	8.8 (0.2)	6.3 (0.3)	16.0 (0.1)
		二次ガンマ線	0.4 (1.0)	5.4 (0.5)	8.9 (0.4)	5.4 (0.5)	2.9 (0.5)
	中性子		51.2 (0.5)	39.8 (0.6)	22.6 (0.2)	38.6 (0.7)	12.7 (0.3)
	合計		52.5	73.7	**86.1**	71.0	34.1

※（　　）内は統計誤差（単位：%）を示す。

下線で示す値は、表面及び表面から１ｍ離れた位置における線量当量率の最大値である。

(注1)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

：表面及び表面から１ ｍ離れた位置における最大線量当量率の位置

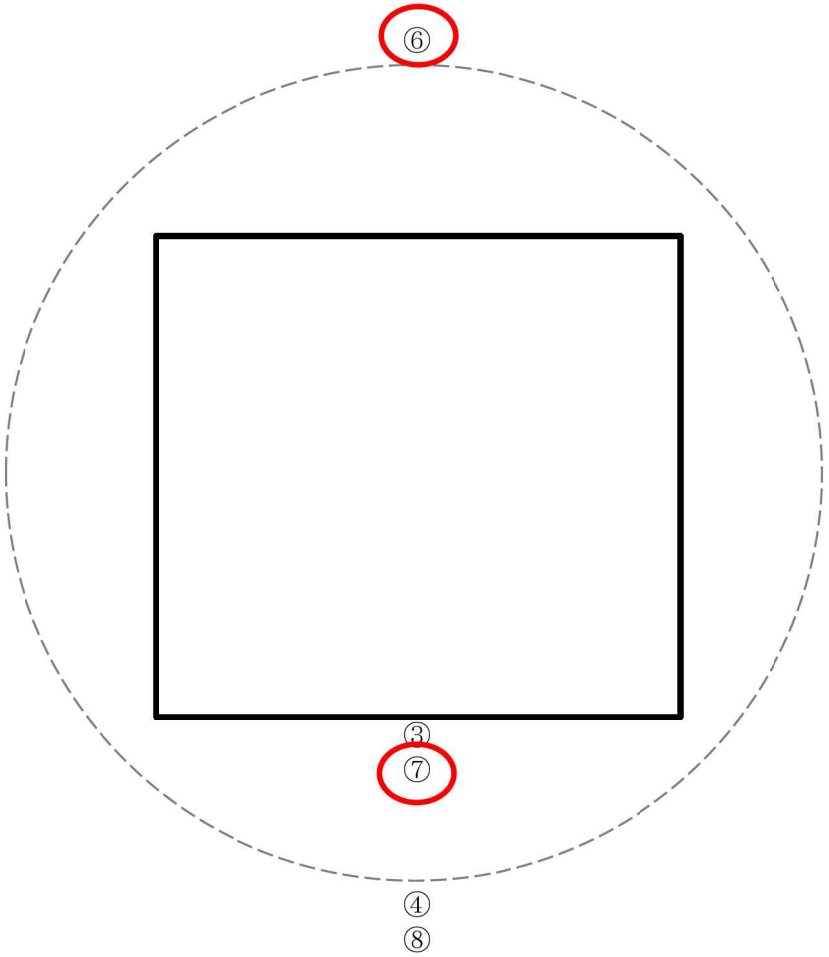


（注）①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第５図（１／２）　線量当量率評価点及び最大線量当量率位置（たて断面）

□内は商業機密のため、非公開とします。

：表面及び表面から１　m離れた位置における最大線量当量率の位置



（注）③～⑧の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第５図（２/２）　線量当量率評価点及び最大線量当量率位置（水平断面）

□内は商業機密のため、非公開とします。

〔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 100μSv/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 50μSv/y 以下となることを目標に、線量限度（1mSv/y）を十分下回る水準とすること。

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

4)　応急復旧

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

敷地境界における実効線量評価及び応急復旧は型式証明申請の範囲外（設置（変更）許可時の別途確認事項）である。

3. 使用する解析コード

MSF-28P 型の遮蔽設計に用いられる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

(1) ORIGEN2 コード

1) 概要

ORIGEN2 コード[(1)]は、米国のオークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは公開コードであり、放射性物質輸送・貯蔵容器の崩壊熱計算等に広く用いられている。

2) 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼計算に際して以下の機能を有している。

① 燃料の炉内での燃焼計算、炉取出後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線の強度、各核種の放射能量等が求められる。

② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリデータが整備[(2)]されており、任意に選択できる。

③ 計算結果は、放射化生成物、アクチニド、核分裂生成物に分類して出力される。

④ 燃焼計算に必要な放射性核種のデータ（崩壊熱、ガンマ線のエネルギー分布、自発核分裂と（α、n）反応により発生する中性子源強度等）は、ライブラリデータとしてコードに整備されている。

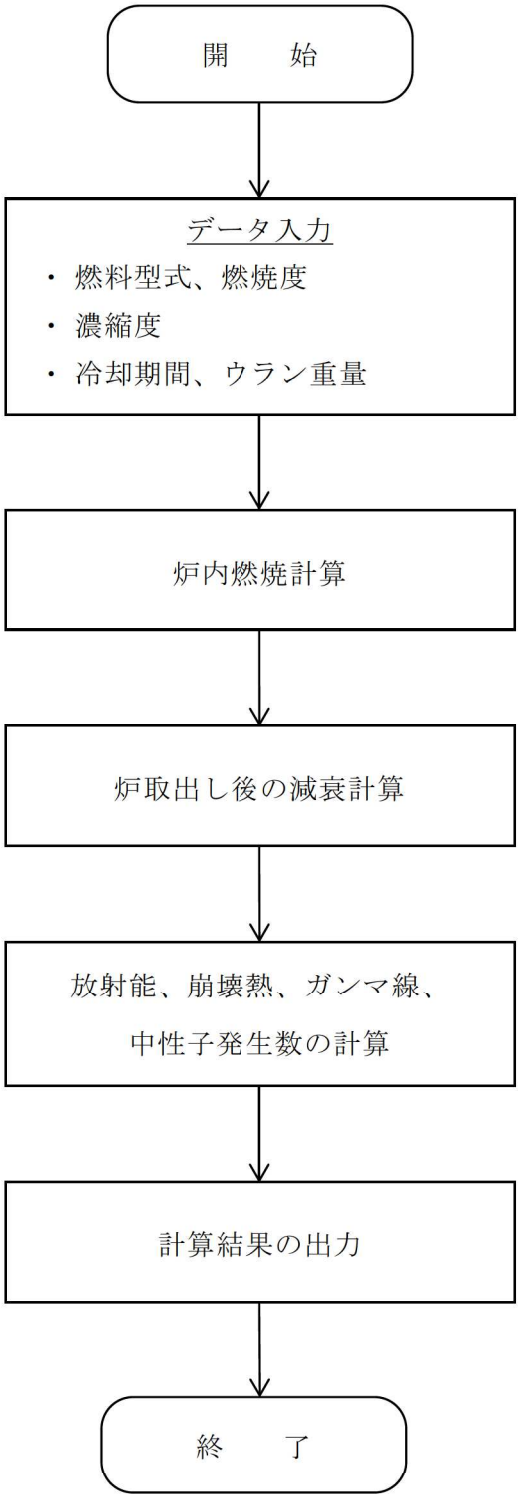
3) 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを第 6 図に示す。

4) 使用実績及び検証

ORIGEN2 コードは、放射性物質輸送・貯蔵容器、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[(3)]。

ORIGEN2 コードの検証例を第 7 図に示す。



第６図　ORIGEN2 コード計算フロー図

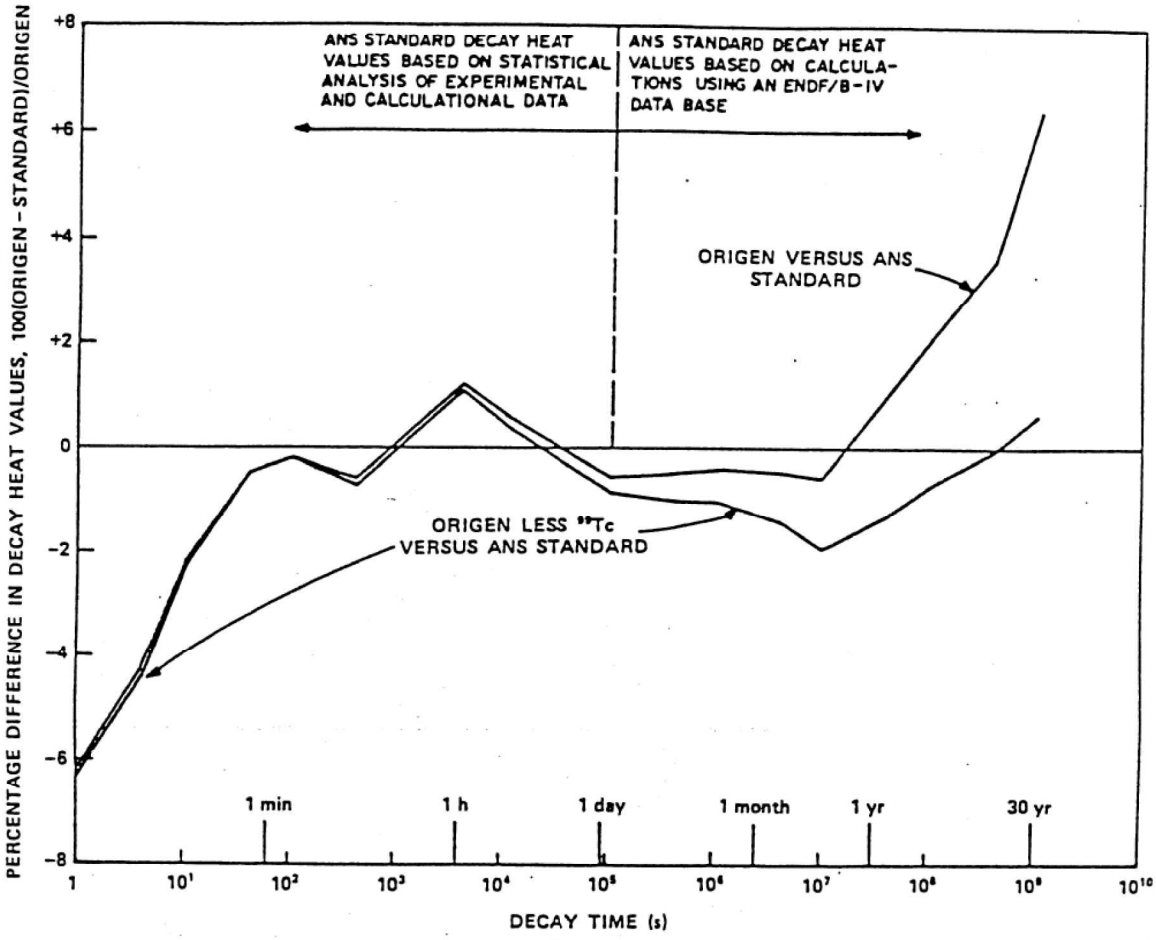


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13}-s irradiation of ^{235}U.

(注)ORIGEN2 コードの崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、20 年以上（MSF-28P 型に収納される燃料の冷却期間）の年数に対して高めの値となっている。この理由は、ANS 標準崩壊熱は ^{99}Tc を考慮していないためである。ORIGEN2 コードの解析結果より ^{99}Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

第７図　ORIGEN2 コード検証例 [3]

(2) MCNP5 コード

1) 概要

三次元モンテカルロコード MCNP5 [4] （以下「MCNP5 コード」という。）は、米国のロスアラモス国立研究所（LANL）で開発された、中性子、光子及び電子輸送問題を解くための汎用モンテカルロコードである。

2) 機能

MCNP5 コードは、遮蔽解析に関して以下の機能を有する。

① 放射線の衝突、散乱などの物理現象の忠実な模擬ができる。

② 二次曲面の論理演算によって表現された任意の三次元領域を取扱うことができ、形状モデルや断面積データを正確に取り扱うことができる。

③ 幾何形状の設定の自由度が大きいことや、断面積の取り扱いに連続エネルギーを採用していること等の利点がある。

3) 解析フロー

MCNP5 コードの解析フローを第８図に示す。

4) 使用実績及び検証

MCNP5 コードは、国内では「原子力発電所放射線遮へい設計規程」JEAC4615 [5] 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三次元の連続エネルギーモンテカルロ法も利用可能とされ、放射性物質輸送・貯蔵容器などの遮蔽計算に用いられている。米国では乾式キャスク貯蔵システムの審査指針 NUREG-1536 [6] 及び乾式キャスク貯蔵施設の審査指針 NUREG-1567 [7] において遮蔽計算ツールとして MCNP コードが記載され、また安全評価で使用 [8] されている。

以下では、兼用キャスクの線量当量率分布から兼用キャスク表面での線量当量率が２ mSv/h 以下、表面から１ m 離れた位置における線量当量率が 100 μSv/h 以下であることを確認する目的のため、MCNP5 コードを遮蔽解析に用いる適用性について、①類似許認可実績の確認、②MCNP5 コードが使用済燃料輸送・貯蔵体系での線量当量率分布に使用できることの妥当性を確認した。妥当性を確認する項目については、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「シミュレーションガイドライン」という。）を参考にした。

① MCNP5 コードの許認可実績

MCNP5 コードの使用について、発電用原子炉施設に係る型式設計特定機器の型式指定申請[10]において、兼用キャスクである MSF-24P(S)型での使用実績があり、今

回の解析における解析条件の比較結果を第４表にまとめる。今回の解析対象の線源条件及び遮蔽構造は同等であり、新規性はない。また、先行キャスク以外では MCNP5 コードの旧バージョンである MCNP4C コード(注)による使用済燃料貯蔵施設の許認可での使用実績もあり [11] 、MCNP コードは放射性物質輸送・貯蔵容器の遮蔽解析に限らず、広く遮蔽解析に使用できる汎用計算コードである。

(注) 主な変更点はプログラム言語の変更であり、物理・数学モデルは同じ

② MCNP5 コードの妥当性確認

MCNP5 コードを兼用キャスクの遮蔽解析に適用することについて、シミュレーションガイドラインを参考に、妥当性確認のための項目を確認した。シミュレーションガイドラインでは、(1)概念モデルの整理、(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想性能の判断から、所期の利用目的に対してシミュレーションモデルの予測性能が要求を満たすか否かを判断するとしている。シミュレーションガイドラインに従って適用性確認を行う場合、数値解析手法及び入力の不確かさ並びに実験における不確かさを合成してシミュレーションモデルの予測性能を評価する必要がある。しかしながら、これら不確かさを満足に設定できるデータがないため、MCNP5 コードでは使用済燃料輸送・貯蔵容器体系で線量当量率測定値の分布を良く再現できること及び許認可実績が豊富な DOT3.5 コードとの線量解析結果との比較により、予測性能評価の代わりに、MCNP5 コードでも保守的な評価が可能であることを確認した。

具体的には、(1)概念モデルの整理については、妥当性確認する範囲(兼用キャスクの遮蔽解析に MCNP5 コードを適用するに当たって確認する必要のある物理プロセスとしての中性子とガンマ線の遮蔽に係る実現象や条件)について整理した。(2)数学的モデル化については、シミュレーションガイドライン記載の不確かさの定量化の代わりに概念モデルを数学的に表現した数理モデルと、その数理モデルを計算機で数値的に解く数値モデルに関し、MCNP5 コードにおいて数値的な解法が問題ないことが検証されていることを、MCNP5 コードの開発機関である LANL での検証内容の確認を実施した（以下「LANL 検証内容の確認」という。）。(3)物理的モデル化については、シミュレーションガイドライン記載の不確かさの定量化の代わりに MSF-28P 型と同等の使用済燃料輸送・貯蔵容器体系での線量当量率の測定試験結果より MCNP5 コードでの計算が線量当量率分布の傾向を精度良く再現できることの確認を実施した（以下「MCNP5 コードの実験結果との比較」という。）。(4)シミュレーションモデルの予測性能判断については、MSF-28P 型と同様の体系である MSF-24P(S)型の申請において MCNP5 コードを用いた使用済燃料輸送・貯蔵容器体系での線量当量率の予測性能判断に必要な不確かさ情報を含む実験データが十分でな

いことから、シミュレーションガイドライン記載のモデルの予測性能の判断の代わりに、既認可の使用済燃料貯蔵施設における特定容器等の設計の型式証明や型式指定等での遮蔽解析で保守的な手法及び結果は妥当であると判断された申請に用いられたコードであるDOT3.5コードとの評価値の比較によりMCNP5コードのDOT3.5コードとの同等性を確認している。

MSF-28P型に対し、MCNP5コードを適用することの妥当性確認について、その方法と確認結果の概要について第9図に示すとともに、以下に確認内容の詳細を示す。

(1)概念モデル（妥当性を確認する範囲）の整理については、MSF-28P型に収納される使用済燃料から発生したガンマ線や中性子が構造材で遮蔽される現象をシミュレーションし、MSF-28P型周辺での線量当量率が基準値を満足するかどうかを確認する目的を考慮して第5表に示すとおり整理した。MSF-28P型の遮蔽解析では、使用済燃料輸送・貯蔵容器体系特有の収納される使用済燃料から放出される中性子やガンマ線の散乱及び吸収といったミクロ的な物理現象に基づく、遮蔽材の透過、構造物間隙部でのストリーミング効果及び使用済燃料が複数収納されることによる相互遮蔽といったマクロ的物理現象を考慮しなければならない。また、これら物理現象を考慮するに当たって、使用済燃料の線源条件、線源形状、遮蔽材質及び形状の情報が必要であり、線量当量率のシミュレーション結果に影響を与える要素として整理した。また、評価条件の差異が遮蔽評価への影響を確認するため、先行キャスク（MSF-24P(S)型）とMSF-28P型の構造・材質の比較を第10図に整理し、評価条件は同等であることを確認した。

(2)LANL検証内容の確認については、MCNP5コードはLANLのソフトウェア品質保証計画[12]に従って開発されており、計算コードの検証と妥当性が確認されたものである。ここでは、リグレッションテストによる確認に加え、中性子スペクトル測定、中性子・ガンマ線遮蔽及びガンマ線スカイシャインの実験値とMCNP5コードでの解析値の比較による一致の確認や、三次元輸送計算コードの精度確認のためのベンチマーク問題として使用されるKobayashiベンチマークを用いて散乱がない場合は解析解との比較及び散乱がある場合はMVPコードを用いた参照解と比較し良い一致を得ている[13]。なお、リグレッションテストのベースとなる計算結果の妥当性については、ガンマ線や中性子に関するベンチマークにより、キャスクの評価に必要なガンマ線や中性子の輸送といった現象が考慮された実験値や解析値に対してMCNPコードを用いて精度よく予測できることが確認されている[14][15]。以上のLANLの検証結果より、数値的解法に問題ないことを確認した。

(3)MCNP5 コードの実験結果との比較については、(1) で整理した概念モデル要素が類似した内容で構成される使用済燃料輸送･貯蔵容器体系のベンチマーク解析を選定し、MCNP5 コードによる計算値と測定値との比較により、線量当量率の傾向が良い一致を示すことを確認した。ベンチマーク解析の概要を第 11 図 [16] 及び第 12 図 [17] に示す。これらのベンチマーク解析は、使用済燃料輸送・貯蔵容器体系へのモンテカルロ法の適用性を明らかにするための作業の一つとして、使用済燃料の集合体燃焼度や冷却期間などを現実的に設定した条件により計算を実施したものであり、放射線測定結果と比較することで、使用済燃料輸送・貯蔵容器体系での計算精度を確認できる。

第 11 図は、線源である使用済燃料が複数体収納された使用済燃料輸送容器体系であり、使用済燃料同士の相互遮蔽や構造物中に隙間が存在するトラニオン構造や蓋部周辺でのストリーミングの影響の考慮が必要となる体系である。この使用済燃料輸送容器体系での放射線透過試験での測定値に対して、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ FSXLIB-J33 並びに ENDF/B-Ⅳ及び EPDL89 に基づく断面積ライブラリ MCPLIB02 を用いたベンチマーク解析結果を示す。ベンチマーク解析では、第５表に示すとおり現実的な解析条件を設定しているが、遮蔽材の密度を最小密度とする等、保守的な条件設定も存在する。ガンマ線及び中性子線の線量当量率分布は測定値と同様の傾向を示し、計算条件及び計算値と測定値の比較（以下「C/E」という。）は中性子で 0.89～2.89、ガンマ線で 0.71～3.10 となっているが、大部分の領域で C/E は 1 以上となっており、測定値を上回ることが確認されている [16] 。なお、C/E が 1 を下回る領域について、中性子は測定時のキャスク 90 度方向に解析では考慮されていない壁があり、中性子の反射による影響として測定値が上昇した可能性があると報告されている。また、ガンマ線は上端部の位置においてのみ測定値が解析結果を上回るが、解析では端部線源強度の高い構造材放射化ガンマ線源を考慮していないためである。なお、第 11 図に示す内容及び結果は、文部科学省原子力試験研究費で実施された研究成果であり、その内容や適用範囲等については研究機関、規制当局及びメーカー等により構成された委員会を日本原子力学会に設立し、議論され取りまとめられたものである。

第 12 図は、乾式貯蔵容器に使用済燃料が 1 体収納された条件での放射線透過試験である。トラニオン構造や蓋部周辺ではストリーミングの影響の考慮が必要となる体系である。乾式貯蔵容器体系での放射線透過試験での測定値に対して、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ FSXLIB-J33 並びに ENDF/B-Ⅵ及び EPDL97 に基づく断面積ライブラリ MCPLIB84 を用いてベンチマーク解析を実施している。ベンチマーク解析では、第５表に示すとおり現実的な解析条件を設定しているが、遮蔽材の

密度を最小密度とする等の保守的な条件設定も存在する。C/E は中性子で 0.93～1.17、ガンマ線は 0.90 であり、よい一致を示すことが確認されている[17]。なお、放射線透過試験は建屋内部で実施されているが、乾式貯蔵容器周囲の構造物がモデル化されていないため、周囲構造によるガンマ線や中性子の反射が考慮されておらず、C/E が一部 1 を下回っていると考えられる。

第 11 図及び第 12 図に示すベンチマーク解析結果より、使用済燃料輸送・貯蔵容器体系での線量当量率評価において、MCNP5 コードを用いて実体系を模擬することで、その分布の傾向が良い一致を示す結果を得ることが可能であることが確認できた。MSF-28P 型の遮蔽解析は、第５表に示すとおり、先行キャスク MSF-24P(S)型と同様に(3)ベンチマーク解析体系と同じ使用済燃料輸送・貯蔵容器体系であり、線量当量率評価手法についても線源設定（ORIGEN2 コードでの解析）、線量当量率評価方法（MCNP5 コードでのモデル化、使用する断面積ライブラリ（中性子：FSXLIB-J33、ガンマ線：MCPLIB84））が類似の内容であるため、適用範囲内で評価条件が同様であれば、測定値に対して同じ線量当量率の分布の傾向になると判断できる。

(4)MCNP コードの DOT3.5 コードとの比較については、MSF-28P 型は遮蔽解析において考慮すべき概念モデルや評価条件の保守性の考え方が同等である先行キャスクにおける比較結果を参照し、MCNP5 コードを使用した場合でも保守的な評価が可能であることを確認した。

比較対象は MSF-28P 型の輸送様態と類似の仕様・構造である MSF-24P 型での既認可の核燃料輸送物設計変更承認申請（原規規発第 22061412 号により令和 4 年 6 月 14 日承認[18]）とした。なお、DOT3.5 コードの評価手法は、伊方発電所３号機使用済燃料乾式貯蔵施設の設置工事に係る設計及び工事計画認可申請(原規規発第 2107076 号 令和３年７月７日認可）において第 13 図に示す文献をもとに保守性があるものとして妥当であると判断されている。また、比較対象ケースは、核燃料輸送物設計変更承認申請ケースと同様の 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）収納時とした。MCNP5 コードによる遮蔽評価値と DOT3.5 コードによる評価値の比較を第 14 図、第 15 図及び第 16 図に示す。

第 14 図、第 15 図及び第 16 図に示すとおり DOT3.5 コードの特性上の要因により、頭部及び底部の表面径方向の一部部位（トラニオン部近傍）では線量当量率評価値に差異(注)が生じるものの、その他の領域は同様の線量当量率及び傾向であり、MCNP5 コードを使用済燃料輸送・貯蔵容器体系に対して使用した場合でも、許認可実績のある DOT3.5 コードと同等の結果が得られることを確認した。なお、MCNP5 コードと DOT3.5 コードでの解析結果に差異が生じる部位について、(3)MCNP5 コードの実験結果との比較で示した第 11 図及び第 12 図では MCNP5 コードの解析値とよ

く一致しており、MCNP5 コードの解析結果は妥当であると判断した。

（注）頭部及び底部の表面径方向の一部（トラニオン部近傍）について、DOT3.5 コードを用いた計算ではコードの特性上保守的なモデルを設定して計算しており、DOT3.5 コードの結果が MCNP5 コードの結果と比較して高い値となっている。MSF-24P 型と同等の体系である使用済燃料輸送・貯容器体系のベンチマーク解析でトラニオン近傍の MCNP5 評価結果と測定値が良い一致であることを確認している。したがって、DOT3.5 コードの評価結果は保守的なものであり、MCNP5 による評価結果は妥当である。

DOT3.5 コードを用いた線量当量率の解析については、使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明や型式指定、核燃料輸送物設計承認申請での使用実績がある。これらの DOT3.5 コードを用いた許認可においては、使用済燃料輸送・貯蔵容器の実形状の軸方向断面を二次元でモデル化し実績のある保守的な手法で行われていることから評価手法及び結果は妥当なものと判断されている。また、核燃料輸送物設計承認申請においては、DOT3.5 コードを用いて申請された線量当量率の解析結果に対し、独立行政法人 原子力安全基盤機構が MCNP5 コードを用いたクロスチェックにより、申請者による DOT3.5 コードによる解析結果は遮蔽安全上妥当な結果であることが確認されている。

③ MCNP5 コードの適用妥当性確認のまとめ

兼用キャスクに対する MCNP5 コードの適用性について、①類似許認可実績の確認により新規性はなく、②使用済燃料輸送・貯蔵容器体系における測定結果との比較による線量当量率分布の傾向確認や MSF-28P 型と同等の体系である先行キャスク（MSF-24P 型）における DOT3.5 コードでの解析結果との比較により問題ないことが確認できた。先行キャスクで比較した DOT3.5 コードの解析モデルは許認可実績のある保守的なモデルであり、その結果と同等の結果であることから、MCNP5 コードを用いた結果も保守的であると判断できる。以上より、MSF-28P 型の遮蔽解析への MCNP5 コードの適用妥当性に問題ないことが確認できた。

5）断面積ライブラリ MCPLIB84 及び FSXLIB-J33

ガンマ線量当量率評価で用いている MCPLIB84 [19] は、MCNP5 等の三次元モンテカルロコード用に、核データ ENDF/B-Ⅵ及び EPDL97 に基づく光子断面積ライブラリとして、米国ロスアラモス国立研究所（LANL）にて整備されたものである。

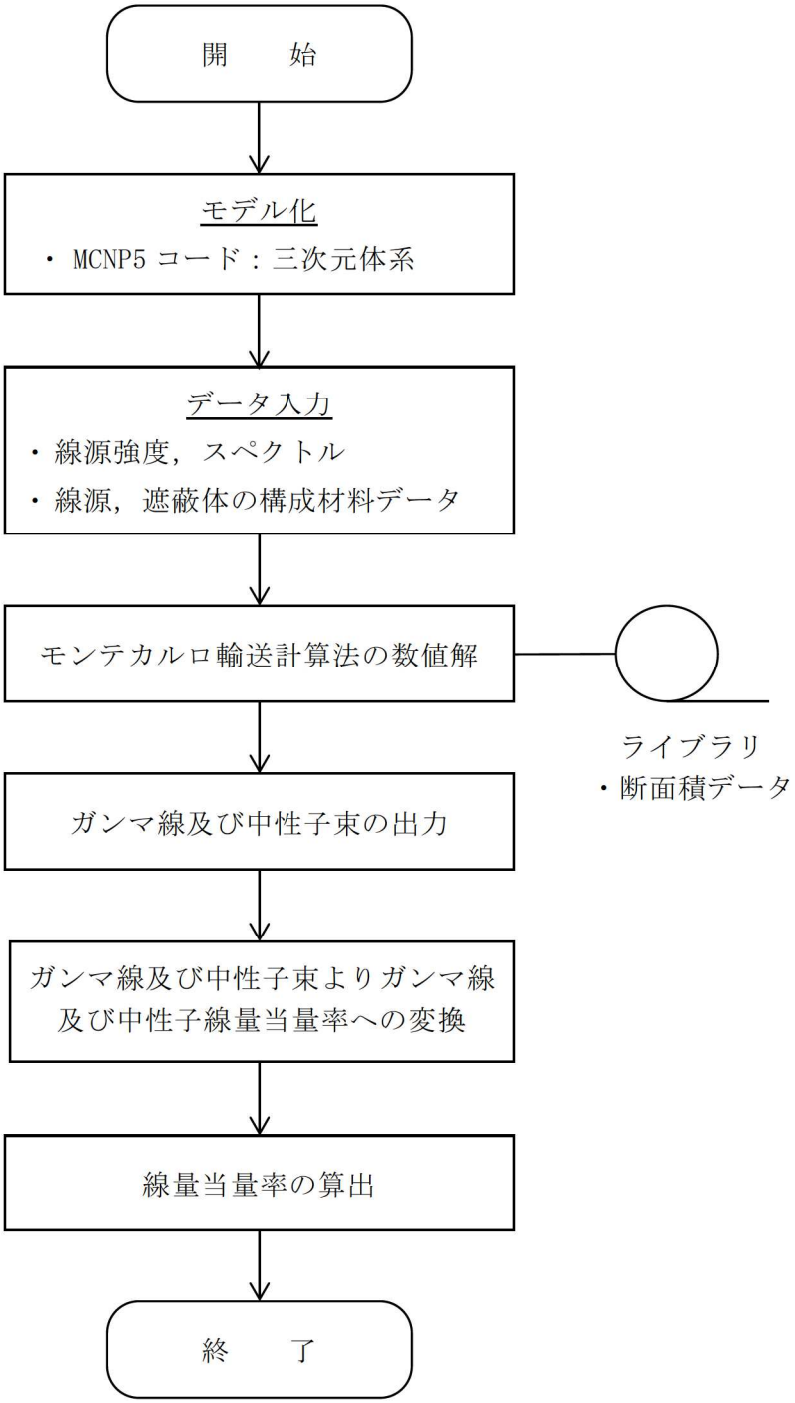
中性子線量当量率評価で用いている FSXLIB-J33 [20] は、MCNP5 等の三次元モンテカルロコード用に、JENDL-3.3 に基づく中性子断面積ライブラリとして、旧日本原子力研究所にて整備されたものである。

MCPLIB84 及び FSXLIB-J33 の使用済燃料輸送・貯蔵容器体系における信頼性は、4)②

の(3) 物理的モデル化確認におけるベンチマーク解析[17]により確認する。

第12図に示すとおり、乾式貯蔵容器体系での放射線透過試験での測定値に対して、JENDL-3.3に基づく断面積ライブラリFSXLIB-J33並びにENDF/B-Ⅵ及びEPDL97に基づく断面積ライブラリMCPLIB84を用いたベンチマーク解析は、表面において測定値と計算値を比較するとよい一致を示しており、信頼性があるものと確認した。

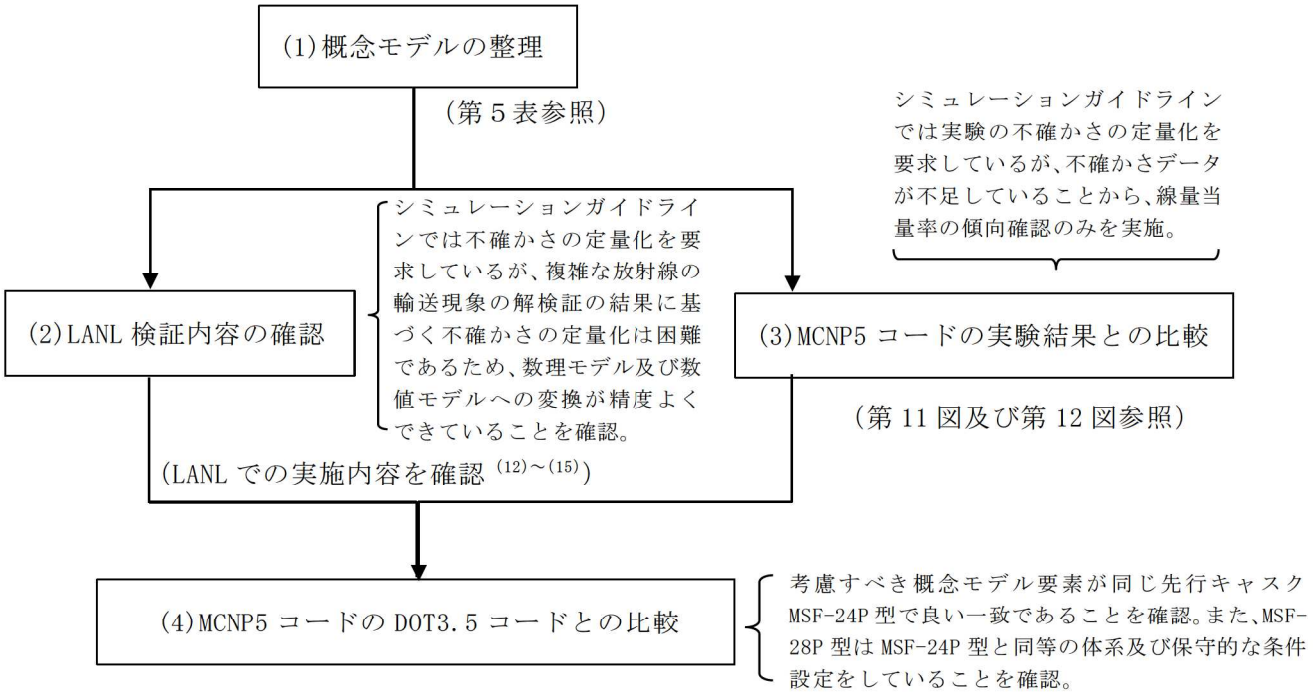
また、MCPLIB84については、浅見らによりMCNP6コードを用いて低レベル放射性廃棄物運搬船に対する線量当量率の計算結果と測定結果との比較により計算モデルの妥当性を含めた確認を実施し、信頼性のある結果を得られたことが報告されている[21]。FSXLIB-J33については、シグマ委員会Shielding積分テストワーキンググループにより、評価済核データライブラリ JENDL-3.3 に対する積分テストを遮蔽ベンチマークとして実施されている。遮蔽ベンチマーク解析はMCNPや多群離散座標コードANISN、DORTやTORTを用いて実施され、JENDL-3.3から作成されたFSXLIB-J33を含む断面積ライブラリは十分な性能を有していることが確認[22]されている。



第８図　MCNP5 コード解析フロー

第４表　先行キャスク許認可実績とMSF-28P型の解析条件の比較

項　　目	MSF-24P(S)型[10] （先行キャスク）	MSF-28P型	備　　考
解析コード	MCNP5	同　左	解析コードは同一
線源	使用済燃料からの ガンマ線、中性子	同　左	線源種類は同等
線源条件	PWR使用済燃料	同　左	線源条件は同等
遮蔽構造	ガンマ線遮蔽材： 炭素鋼、ステンレス鋼 中性子遮蔽材：レジン	同　左	遮蔽構造は同等
判断基準	表面：2mSv/h 表面から１ｍ離れた位置： 100μSv/h	同　左	基準は同一



	確認結果	備考
(1)	MSF-28P 型の遮蔽解析での確認範囲を考慮すべき概念モデル要素として整理。(第５表)	考慮すべき概念モデル要素としてミクロ的な物理現象(散乱、吸収等)、マクロ的物理現象(構造材透過、ストリーミング効果、線源の相互遮蔽)を整理。
(2)	数理モデルへの変換及び数値モデルへの変換は、解析コード開発機関 (LANL) にて実施したリグレッションテスト、実験値との比較や三次元輸送計算コードの精度確認のためのベンチマーク (解析解及び参照解) との比較結果より、精度良く実施できていることを確認済み (12) ～ (15)。	ベンチマークは散乱無し(解析解)と散乱有の条件(MVP コードによる参照解)での比較で良く一致すると検証されていることを確認。
(3)	使用済燃料輸送・貯蔵容器体系におけるベンチマーク解析 (第 11 図、第 12 図) により、使用済燃料輸送・貯蔵容器体系における線量当量率分布の傾向が良い一致を示すことを確認。	使用済燃料輸送・貯蔵容器体系におけるベンチマーク解析は、(1)で整理した概念モデル要素の内容が MSF-28P 型と類似したものを選定。
(4)	考慮すべき概念モデル要素が同じ先行キャスク MSF-24P 型において、認可済の DOT3.5 コードを用いた解析結果との比較により同等の結果が得られることを確認。	DOT3.5 コードを用いた解析は実形状を二次元でモデル化したものとして認可されたものである。なお、MSF-28P 型の評価条件は、使用済燃料の収納条件や評価モデルの不確かさを保守的に設定。(別紙１－８表参照)

第９図　MCNP5 コード評価 モデル検証及び妥当性確認の内容

第５表（１／３）　MCNP5 コードの検証で用いた評価と MSF-28P 型遮蔽評価の条件比較

MSF-28P 型の遮蔽解析で考慮すべき概念モデル要素	評価に影響のある因子	評価条件				備考
		MSF-28P 型 遮蔽解析	MSF-24(S)型 先行キャスク [10]	ベンチマーク [16] （第 11 図）	ベンチマーク [17] （第 12 図）	
【物理現象】 ミクロ ・散乱 ・吸収 マクロ ・遮蔽材欠損部でのストリーミング ・相互遮蔽 ・遮蔽材の透過	計算コード	MCNP5 ver.1.60 コードを用いて評価	MCNP5 ver.1.60 コードを用いて評価	MCNP5 コードを用いて評価	MCNP5 ver.1.60 コードを用いて評価	MSF-28P 型及び 24P(S)型は同じ計算コードを採用。
	断面積ライブラリ	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	MSF-28P 型及び 24P(S)型は同じ断面積ライブラリを採用。
		ガンマ線 ・MCPLIB84	ガンマ線 ・MCPLIB84	ガンマ線 ・MCPLIB02	ガンマ線 ・MCPLIB84	MSF-28P 型及び 24P(S)型は同じ断面積ライブラリを採用。
【線源】 使用済燃料	中性子線源条件	スペクトル ・Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・Watt 型 ^{244}Cm 核分裂スペクトル	MSF-28P 型及び 24P(S)型は同じ ^{239}Pu 核分裂スペクトルを採用。
		線源強度 ・ ORIGEN2 出力（2.2UPJ）	線源強度 ・ ORIGEN2 出力（2.2UPJ）	線源強度 ・ORIGEN2 出力（2.2UPJ）	線源強度 ・ ORIGEN2 出力（2.2UPJ）	MSF-28P 型及び 24P(S)型での遮蔽解析はウラン初期濃縮度を保守的に設定（別紙１－８表参照）
		燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	MSF-28P 型及び 24P(S)型は収納燃料を包含する燃焼度を設定。
		冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・実績考慮	冷却期間 ・実績考慮	MSF-28P 型及び 24P(S)型は収納燃料を包含する冷却期間を設定。

注）ベンチマーク [16] は NFT-14P 型キャスク（湿式。PWR 燃料 14 体収納型。）、ベンチマーク [17] は乾式貯蔵容器（乾式。PWR 燃料１体収納型）。

第５表（２/３）　MCNP5 コードの検証で用いた評価と MSF-28P 型遮蔽評価の条件比較

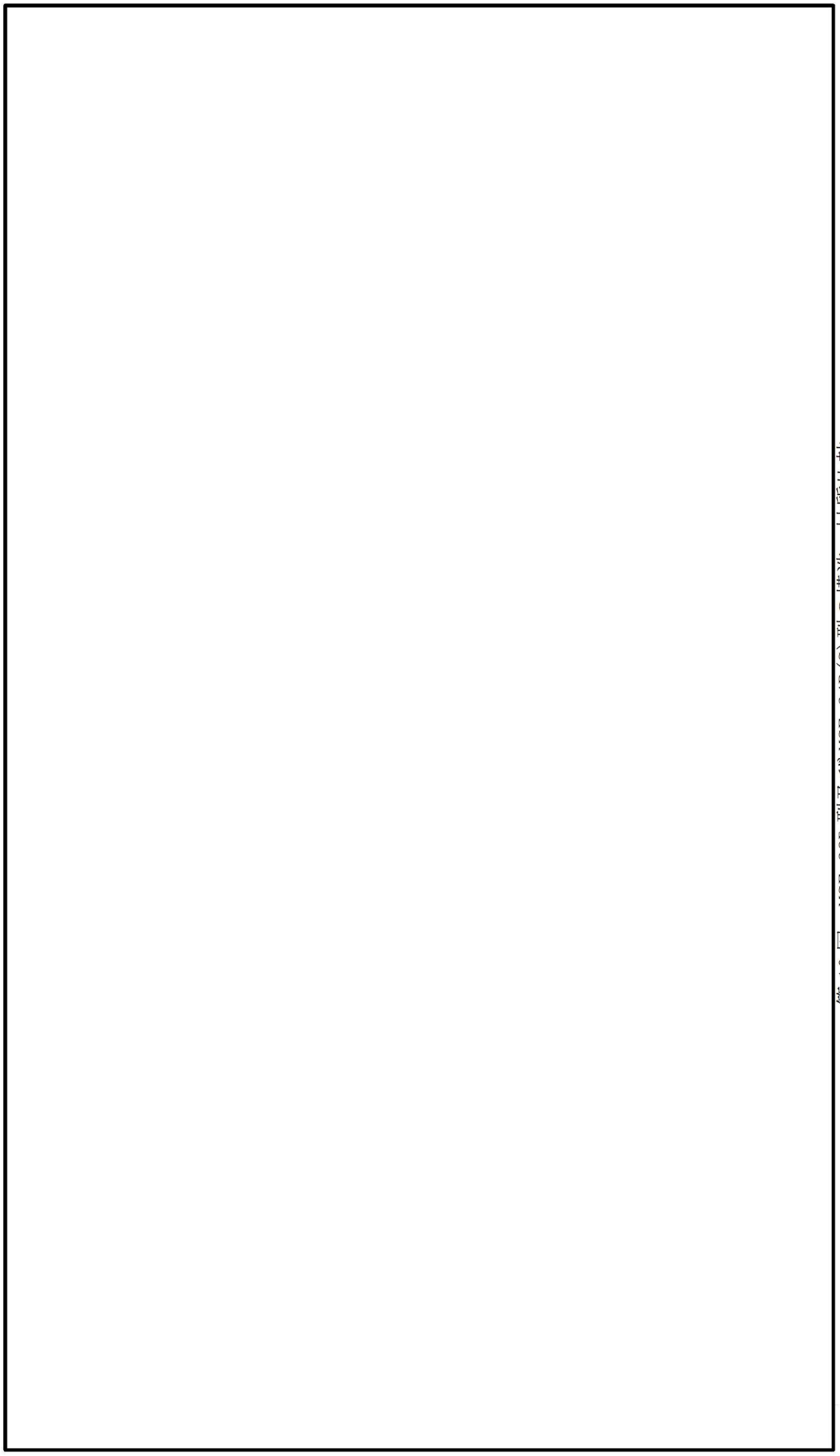
MSF-28P 型の遮蔽解析で考慮すべき概念モデル要素	評価に影響のある因子	評価条件				備考
		MSF-28P 型 遮蔽解析	MSF-24(S)型 先行キャスク [10]	ベンチマーク [16] （第 11 図）	ベンチマーク [17] （第 12 図）	
【線源】 使用済燃料	ガンマ線 線源条件	スペクトル ・燃料有効部：ORIGEN2 出力（2.2UPJ） ・放射化ガンマ： 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	スペクトル ・燃料有効部：ORIGEN2 出力（2.2UPJ） ・放射化ガンマ： 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	スペクトル ・燃料有効部：ORIGEN2 出力（2.2UPJ） ・放射化ガンマ：－	スペクトル ・燃料有効部：ORIGEN2 出力（2.2UPJ） ・放射化ガンマ： 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	燃料有効部及び放射化した燃料構造材からのガンマ線源。 中性子の吸収による二次ガンマ線は計算コード内で評価。 MSF-28P 型及び 24P(S)型は使用済燃料を燃料集合体１体毎に均質化したモデルを採用。 燃料配置は MCNP5 コードで実際の配置どおりに設定。 MSF-28P 型及び 24P(S)型は同じ手法で設定。
		線源強度 ・燃料有効部：ORIGEN2 出力（2.2UPJ） ・放射化ガンマ：^{59}Co 含有量からの計算値	線源強度 ・燃料有効部：ORIGEN2 出力（2.2UPJ） ・放射化ガンマ：^{59}Co 含有量からの計算値	線源強度 ・燃料有効部：ORIGEN2 出力（2.2UPJ） ・放射化ガンマ:未考慮	線源強度 ・燃料有効部：ORIGEN2 出力（2.2UPJ） ・放射化ガンマ：^{59}Co 含有量からの計算値	MSF-28P 型及び 24P(S)型での遮蔽解析はウラン初期濃縮度を保守的に設定（別紙１－８表参照）
		燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	MSF-28P 型及び 24P(S)型は同じ手法で設定。
		冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・実績考慮	冷却期間 ・実績考慮	MSF-28P 型及び 24P(S)型は同じ手法で設定。

注）ベンチマーク [16] は NFT-14P 型キャスク（湿式。PWR 燃料 14 体収納型。）、ベンチマーク [17] は乾式貯蔵容器（乾式。PWR 燃料１体収納型）。

第５表（３／３）　MCNP5 コードの検証で用いた評価と MSF-28P 型遮蔽評価の条件比較

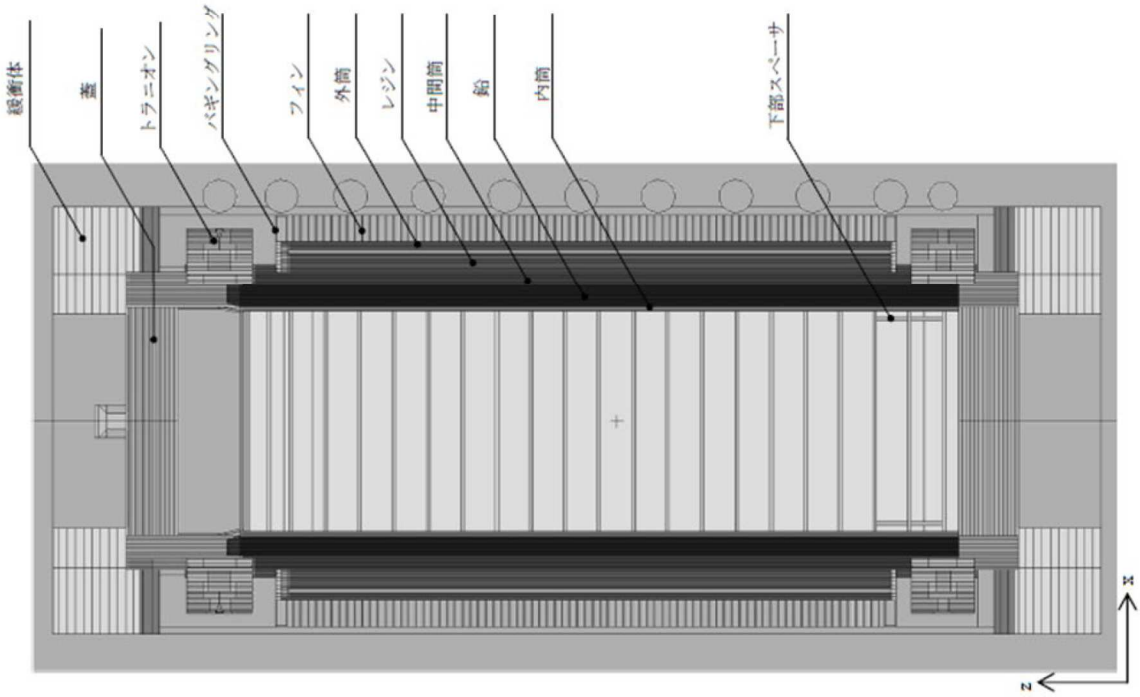
MSF-28P 型の遮蔽解析で考慮すべき概念モデル要素	評価に影響のある因子	評価条件				備考
		MSF-28P 型 遮蔽解析	MSF-24(S)型 先行キャスク [10]	ベンチマーク [16] （第 11 図）	ベンチマーク [17] （第 12 図）	
【線源形状】 使用済燃料	燃料集合体（線源領域）の設定	・使用済 PWR 燃料 28 体 ・１体ごとに均質化 ・上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割 ・バスケット内均質化 ・燃料集合体は一次蓋及び胴（底板）に接し、バスケットセル内中央に配置 ・燃料配置：1/2 対称	・使用済 PWR 燃料 24 体 ・１体ごとに均質化 ・上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割 ・バスケット内均質化 ・燃料集合体は一次蓋及び胴（底板）に接し、バスケットセル内中央に配置 ・燃料配置：1/4 対称	・使用済 PWR 燃料 14 体 ・１体ごとに均質化 ・上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部に分割 ・燃料集合体は胴（底板）に接し、バスケットセル内中央に配置 ・燃料配置：1/2 対称	・使用済 PWR 燃料 1 体 ・１体ごとに均質化 ・上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割 ・バスケット内均質化 ・燃料集合体は胴（底板）に接し、バスケットセル内中央に配置 ・燃料配置：1/2 対称	各燃料仕様に基づき、MCNP5 コードの条件として設定。 MSF-28P 型及び 24P(S)型での遮蔽解析は軸方向での燃料集合体の移動を考慮し、一次蓋及び胴（底板）に接した状態となるよう設定。 MSF-28P 型及び 24P(S)型に使用済燃料を燃料集合体 1 体毎に均質化したモデルを採用。 燃料配置は MCNP5 コードで実際の配置どおりに設定。
【遮蔽材質及び形状】 放射性物質輸送・貯蔵容器構造材の材料 及び形状、組成、密度、公差	材質	・構造材：炭素鋼、ｽﾃﾝﾚｽ鋼、レジン、銅等 ・緩衝体：なし	・構造材：炭素鋼、ｽﾃﾝﾚｽ鋼、レジン、銅等 ・緩衝体：なし	・構造材：炭素鋼、ｽﾃﾝﾚｽ鋼、鉛、レジン、水等（湿式キャスク） ・緩衝体：木材	・構造材：炭素鋼、ｽﾃﾝﾚｽ鋼、レジン等 ・緩衝体：なし	MSF-28P 型及び 24P(S)型での遮蔽材は同等。（第 10 図参照）
	形状	実形状 ・外径約 2.7m ・長さ約 5.2m	実形状 ・外径約 2.6m ・長さ約 5.2m	実形状 ・外径約 2.6m(緩衝体含む) ・長さ約 6.3m(緩衝体含む)	実形状 ・外径約 1.7m ・長さ約 5.2m	MSF-28P 型及び 24P(S)型の形状や構造は同等。（第 10 図参照）
	組成/密度	・最小密度 ・ﾚｼﾞﾝ組成ｶﾀﾛｸﾞ値 ・設計貯蔵期間のﾚｼﾞﾝ質量減損考慮	・最小密度 ・ﾚｼﾞﾝ組成ｶﾀﾛｸﾞ値 ・設計貯蔵期間のﾚｼﾞﾝ質量減損考慮	・最小密度 ・ﾚｼﾞﾝ組成ｶﾀﾛｸﾞ値 ・水組成：発熱量より概算	・最小密度 ・ﾚｼﾞﾝ組成ｶﾀﾛｸﾞ値	MSF-28P 型及び 24P(S)型での遮蔽解析はレジン減損を考慮 MSF-28P 型及び 24P(S)型での遮蔽解析はバーナブルポイズン集合体収納の遮蔽効果は無視（別紙１－８表参照）
	寸法公差	・密度に考慮	・密度に考慮	・考慮しない	・考慮しない	MSF-28P 型及び 24P(S)型での遮蔽解析は寸法公差を密度係数として考慮

注）ベンチマーク [16] は NFT-14P 型キャスク（湿式。PWR 燃料 14 体収納型。）、ベンチマーク [17] は乾式貯蔵容器（乾式。PWR 燃料１体収納型）。

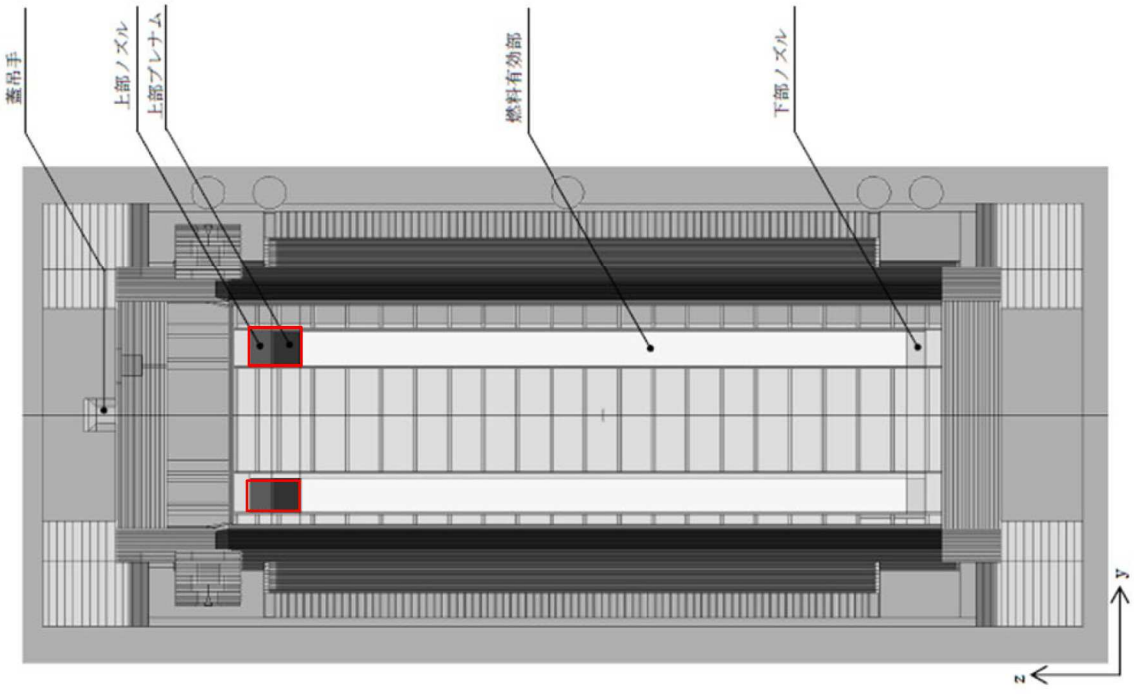


第 10 図　MSF-28P 型及び MSF-24P(S)型の構造・材質比較

□内は商業機密のため、非公開とします。



（x-z 断面）



注）赤四角は本資料にて追加。
MCNP 計算で考慮していない構造材放射化ガンマ線源の上端部位置を示す。

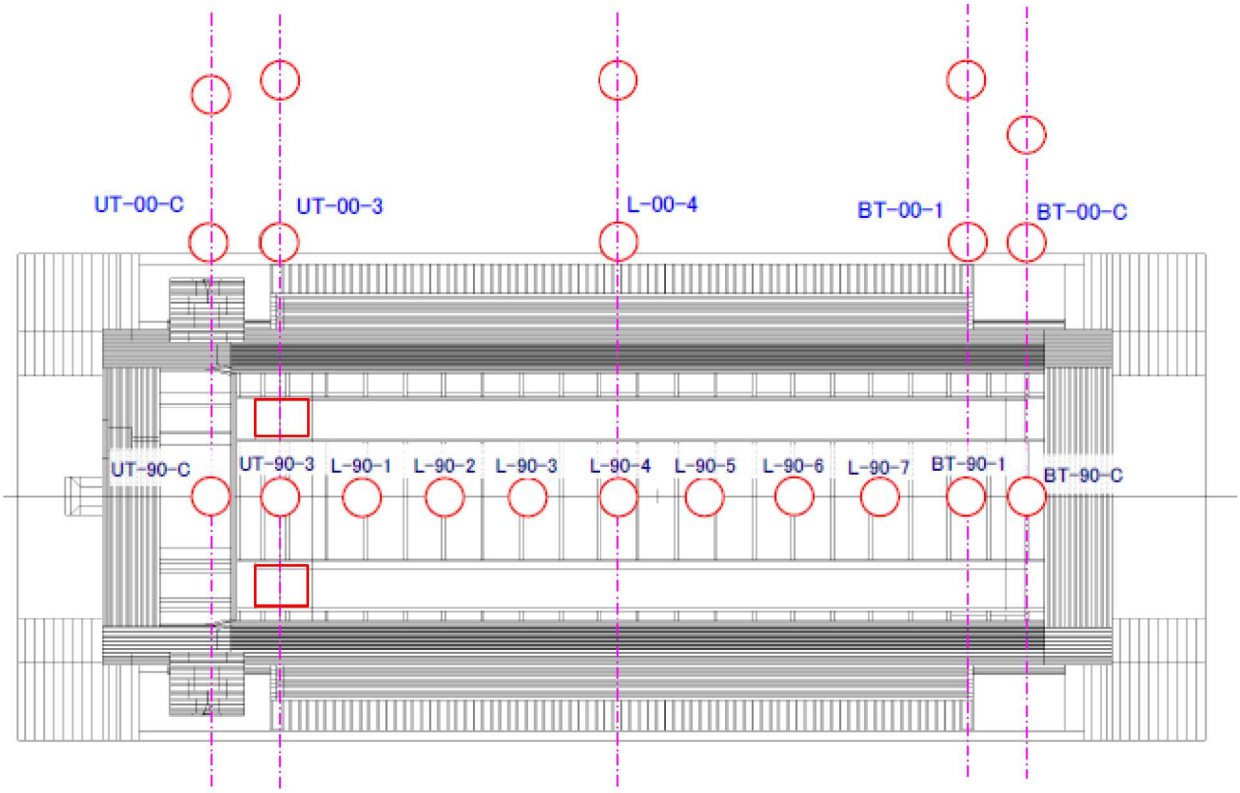
（y-z 断面）

第 11 図（１／４）　NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証 [16]　（解析モデル）

計算 No.	測定点 No.	角度 方向	軸方向位置
1	UT-00-C	0°	上部トラニオン
2	UT-00-3		上部バギングリング
3	L-00-4		側部中央
4	BT-00-1		下部バギングリング
5	BT-00-C		下部レジンカバー部

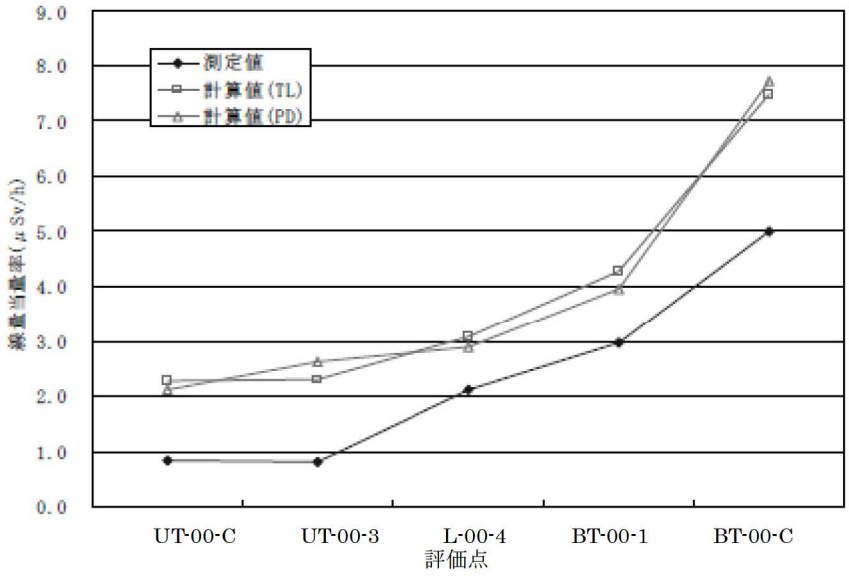
計算 No.	測定点 No.	角度 方向	軸方向位置
1	UT-90-C	90°	上部トラニオン
2	UT-90-3		上部バギングリング
3	L-90-1		側部上端部
4	L-90-2		
5	L-90-3		
6	L-90-4		側部中央
7	L-90-5		
8	L-90-6		
9	L-90-7		側部下端部
10	BT-90-1		下部バギングリング
11	BT-90-C		下部トラニオン

（左：中性子評価点　　右：ガンマ線評価点）

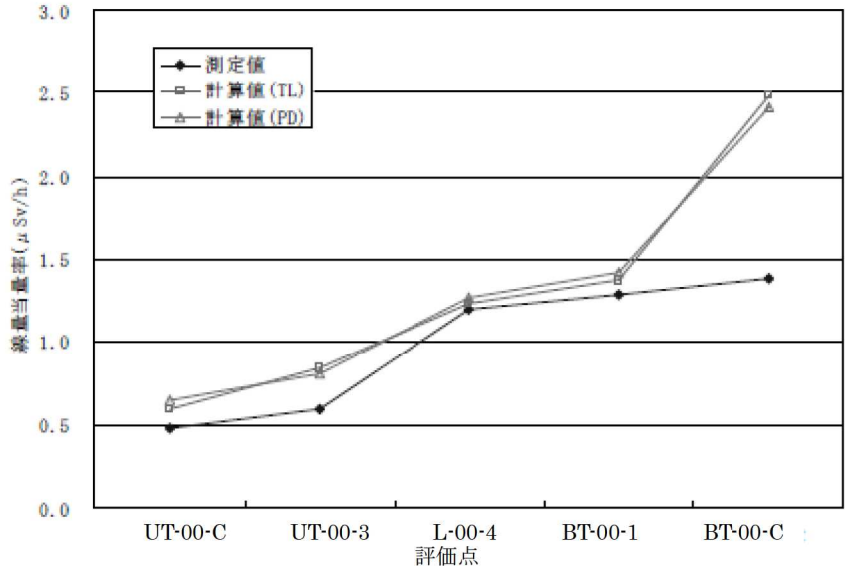


注）赤四角は本資料にて追加。
　　MCNP 計算で考慮していない構造材放射化ガンマ線源の上端部位置を示す。

第 11 図（2／4）　NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証 [16]　（評価点）



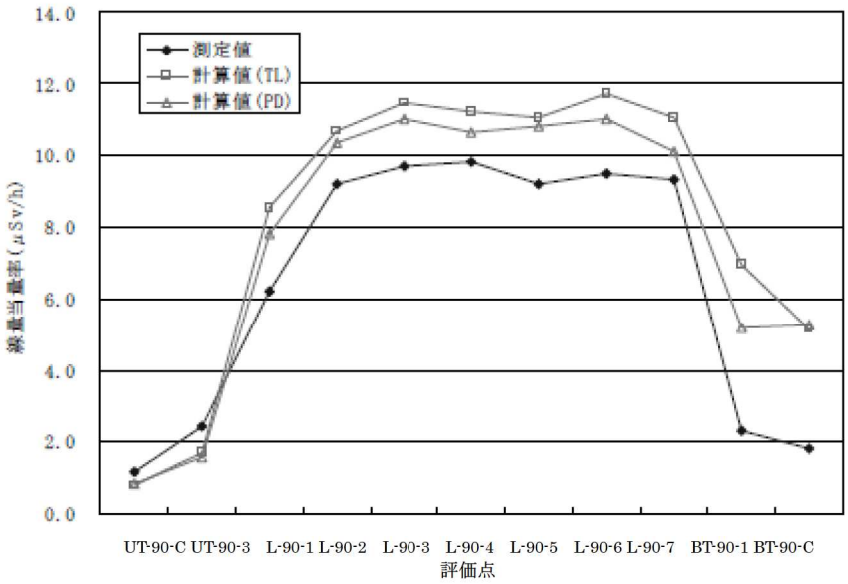
（中性子線量当量率、表面位置 0° 方向）



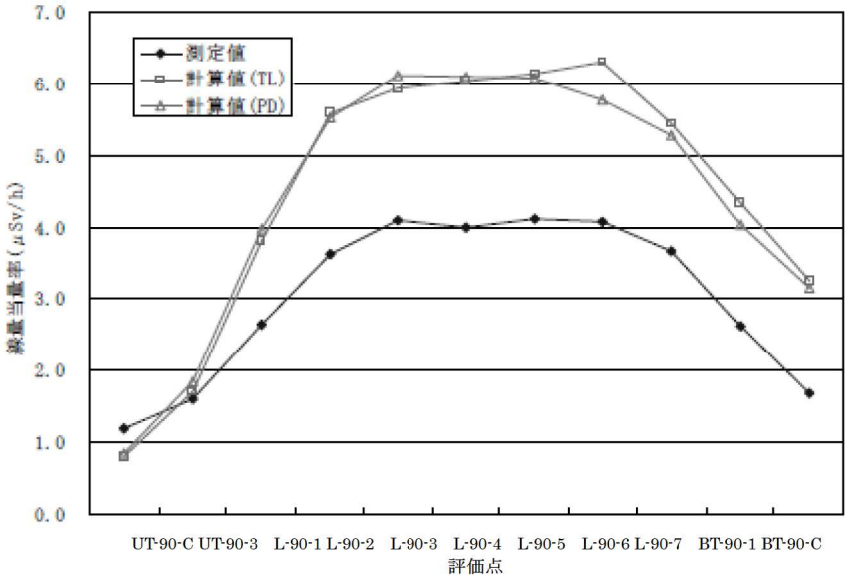
（中性子線量当量率、表面から１ m 離れた位置 0° 方向）

（注）NFT-14P 型について、バスケットやトラニオン部を実寸形状に合わせて三次元モデル化し、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ FSXLIB-J33 並びに ENDF/B-Ⅳ及び EPDL89 に基づく断面積ライブラリ MCPLIB02 を用いたベンチマーク解析が実施された。中性子線量当量率について、上部トラニオンや胴部と比較して、遮蔽体欠損部に対して燃料領域が近い底部トラニオンが高くなる傾向は一致している。

第 11 図（３／４） NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証 (16) （評価結果）



（ガンマ線線量当量率、表面位置 90° 方向）



（ガンマ線線量当量率、表面から１ m 離れた位置 90° 方向）

（注）NFT-14P 型について、バスケットやトラニオン部を実寸形状に合わせて三次元モデル化し、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ FSXLIB-J33 並びに ENDF/B-Ⅳ及び EPDL89 に基づく断面積ライブラリ MCPLIB02 を用いたベンチマーク解析が実施された。ガンマ線線量当量率について、表面においては、中央部では計算値が測定値を２割程度上回っているが傾向は一致している。軸方向上部では計算値が測定値を下回っているが、計算値には端部線源強度の高い構造材放射化ガンマ線源を考慮していないためである。表面から１ m 離れた位置においては、中央部では計算値が測定値を５割程度上回っているが傾向は一致している。

第 11 図（４／４） NFT-14P 型輸送容器による MCNP5 コードの検証 [16] （評価結果）

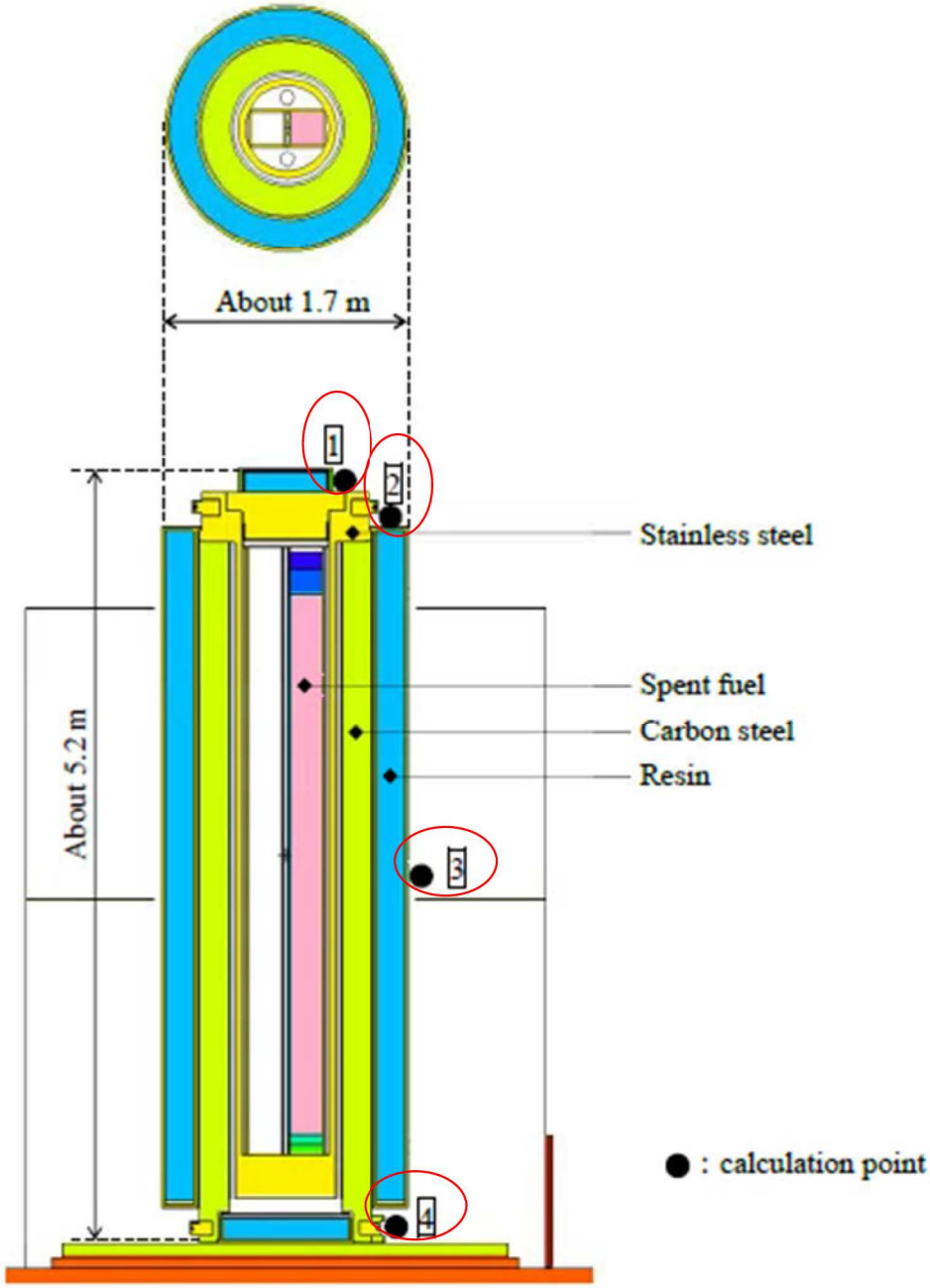


Figure 2. MCNP calculation model for the experiment

注）赤丸は本資料にて追加。評価点の位置と評価点番号を示す。

第 12 図（１／２）　乾式貯蔵容器による MCNP5 コードの検証 [17]　（解析モデル）

	Condition
Code version	MCNP5 ver.1.60
Calculation model	Based on Figure 2.
Cross section library	FSXLIB-J33 [5] MCPLIB84

Table 3. Experimental and calculated results (neutron dose equivalent rate)

Measurement point	Experimental value (μSv/h)	Calculated value (μSv/h)	Calculated / Experimental
1	9.93±0.17	10.20±1.8E-02	1.03±0.02
2	9.71±0.13	9.01±3.2E-02	0.93±0.01
3	0.47±0.02	0.52±9.8E-03	1.11±0.04
4	9.66±0.18	11.33±3.7E-02	1.17±0.02

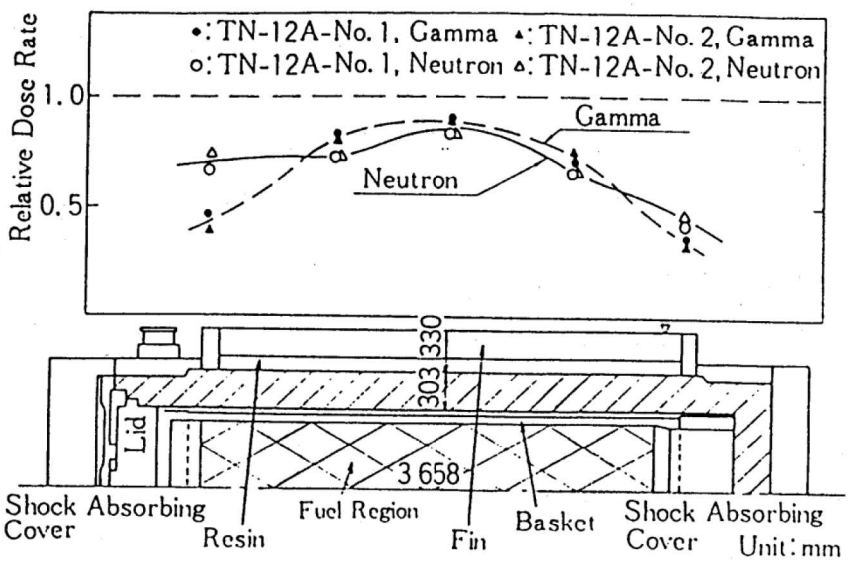
Table 4. Experimental and calculated results (gamma-ray dose equivalent rate)

Measurement point	Experimental value (μSv/h)	Calculated value (μSv/h)	Calculated / Experimental
1	N/D*	-	-
2	N/D*	-	-
3	2.5±0	2.25±0.04	0.90±0.02
4	N/D*	-	-

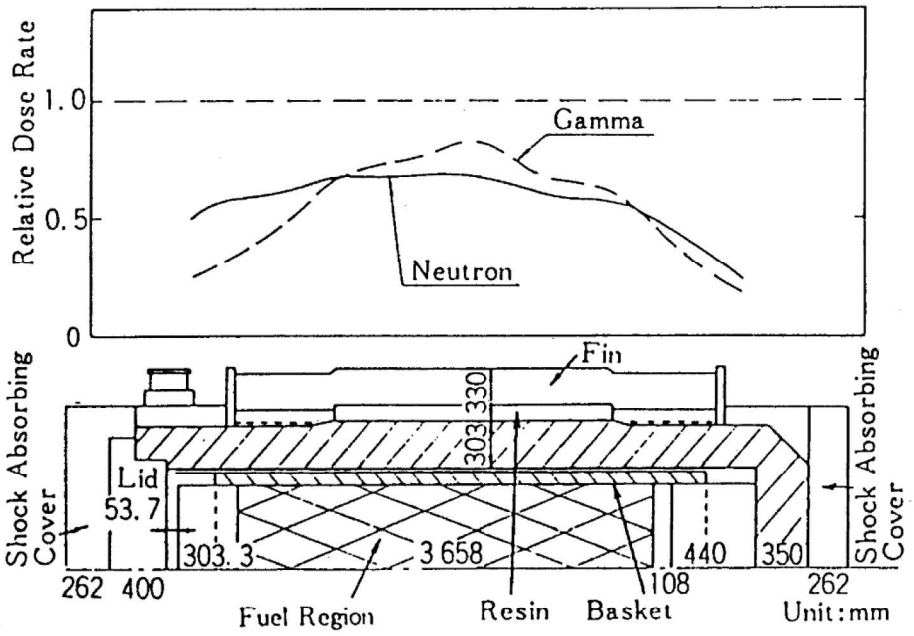
*below the detection limit 0.5 μSv/h

（注）乾式貯蔵容器について、バスケットやトラニオン部を実寸形状に合わせて三次元モデル化し、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ FSXLIB-J33 並びに ENDF/B-Ⅵ及び EPDL97 に基づく断面積ライブラリ MCPLIB84 を用いたベンチマーク解析が実施された。表面において、測定値と計算値を比較するとよい一致を示している。なお、ベンチマーク解析では乾式貯蔵容器周辺の構造はモデル化しておらず、中性子やガンマ線の周辺構造物による反射を考慮していない。一方ベンチマーク解析では、構造材の微量元素は考慮しないなど正確な値が把握できない条件については保守的な条件を設定しており、基本的には C/E＞１となる結果が得られているが、C/E＜１の評価点については、モデル化していない周囲構造物による中性子及びガンマ線の散乱が考慮できていないため評価値が低くなっていると考えられる。

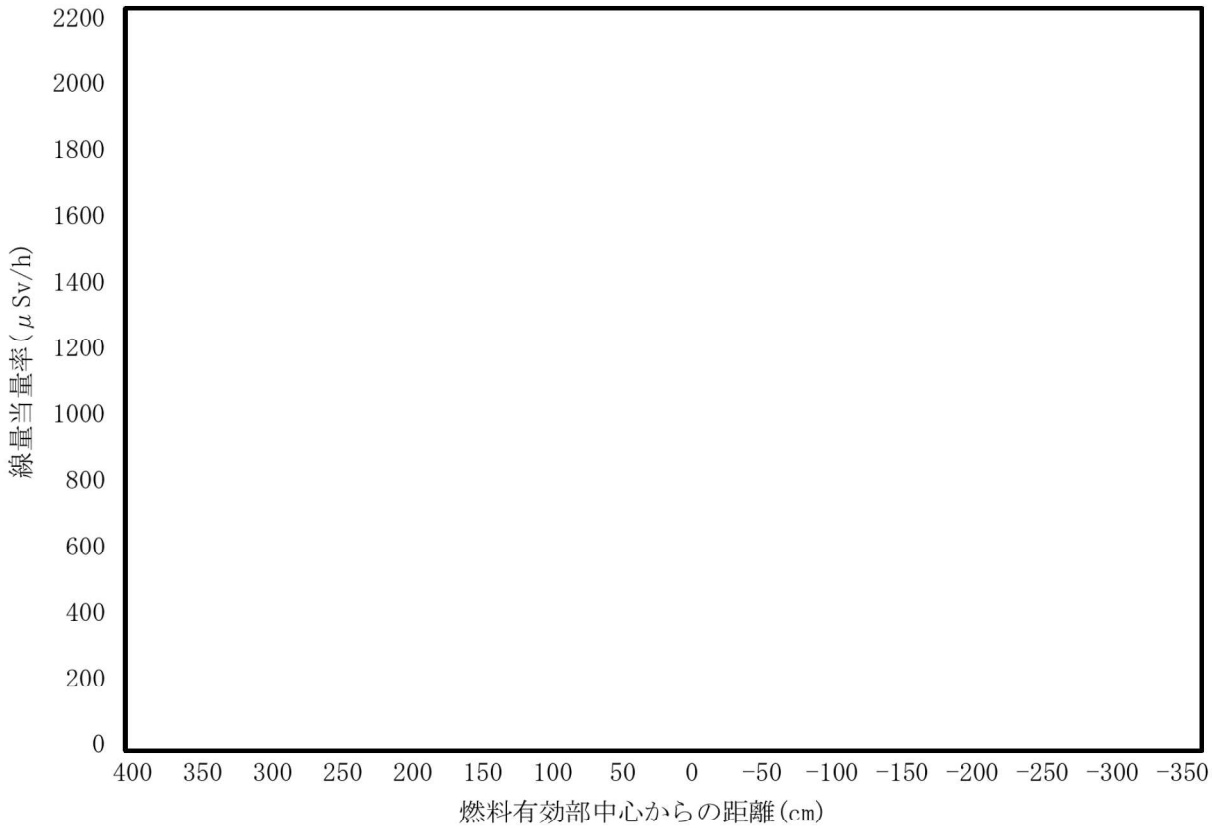
第 12 図（２/２）　乾式貯蔵容器による MCNP5 コードの検証 (17)　　（評価結果）

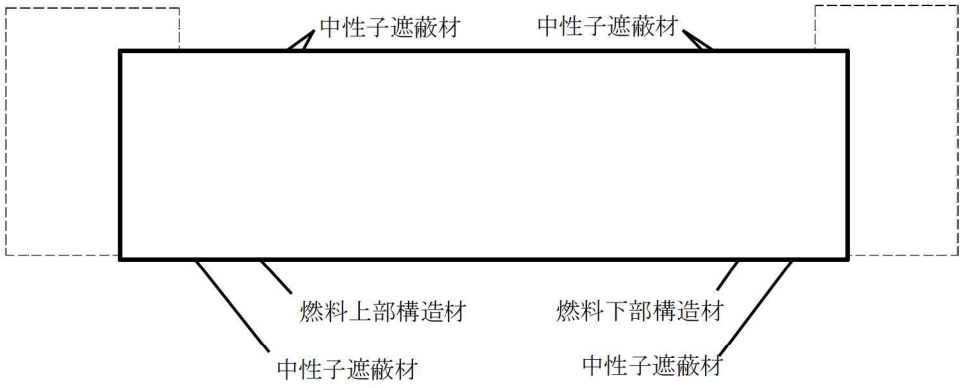


第 13 図（１/２）　DOT3.5 の検証例（その１）[23]



第 13 図（２/２）　DOT3.5 の検証例（その２）[23]





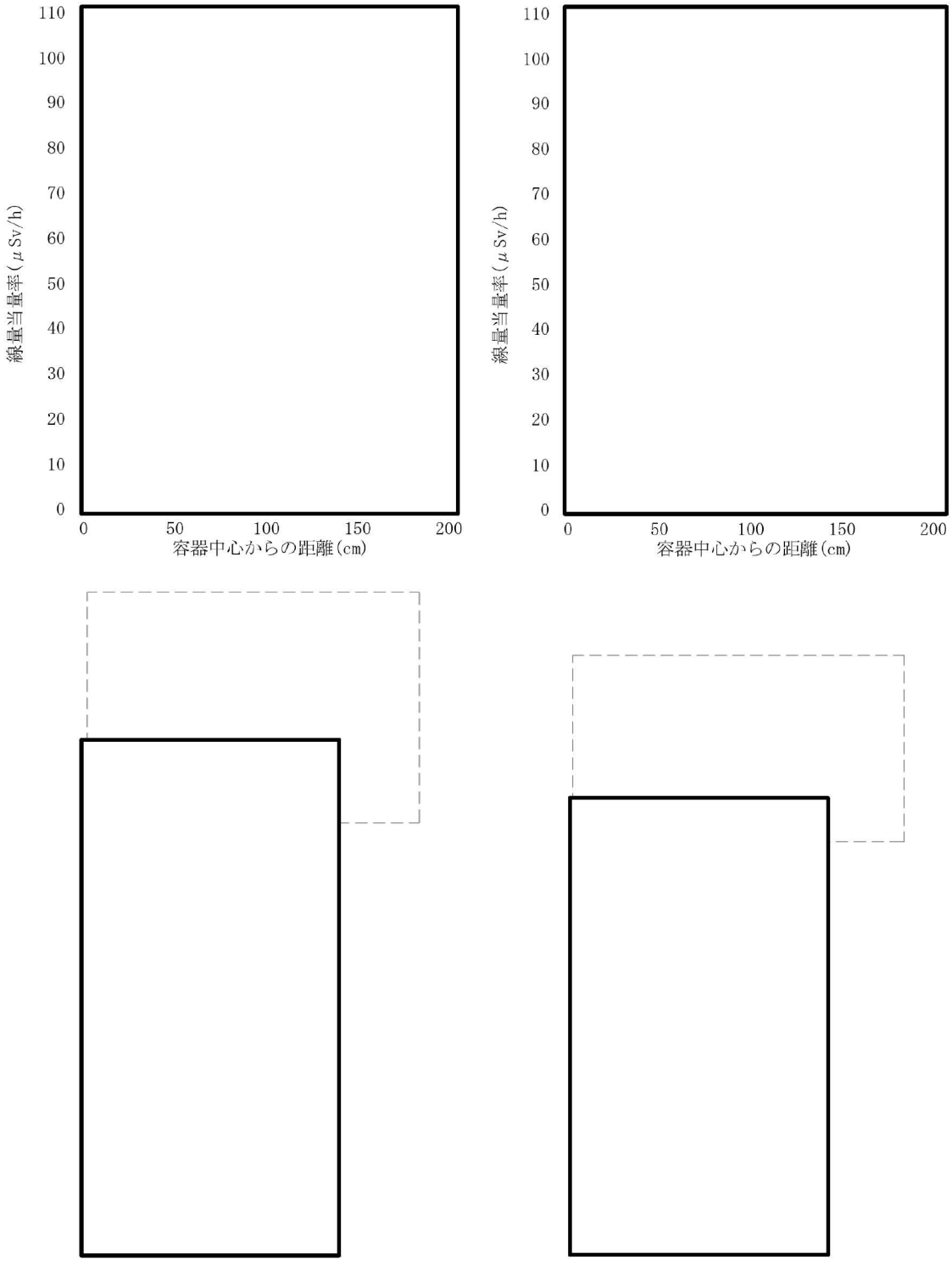
（注 1）MCNP5 解析の線量当量率は、周方向の最大となる方向の MCNP5 解析値である（トラニオン方向も含まれる）。

（注 2）DOT3.5 解析の線量当量率は、頭部径方向・側部・底部径方向の線量当量率分布にトラニオン方向の分布を重ねて示した。

（注 3）図中の数字部の線量当量率評価結果の差異要因について第６表に示す。

第 14 図　先行キャスクにおける表面の線量当量率分布の比較 (10)
（頭部径方向・側部・底部径方向（トラニオン方向含む））

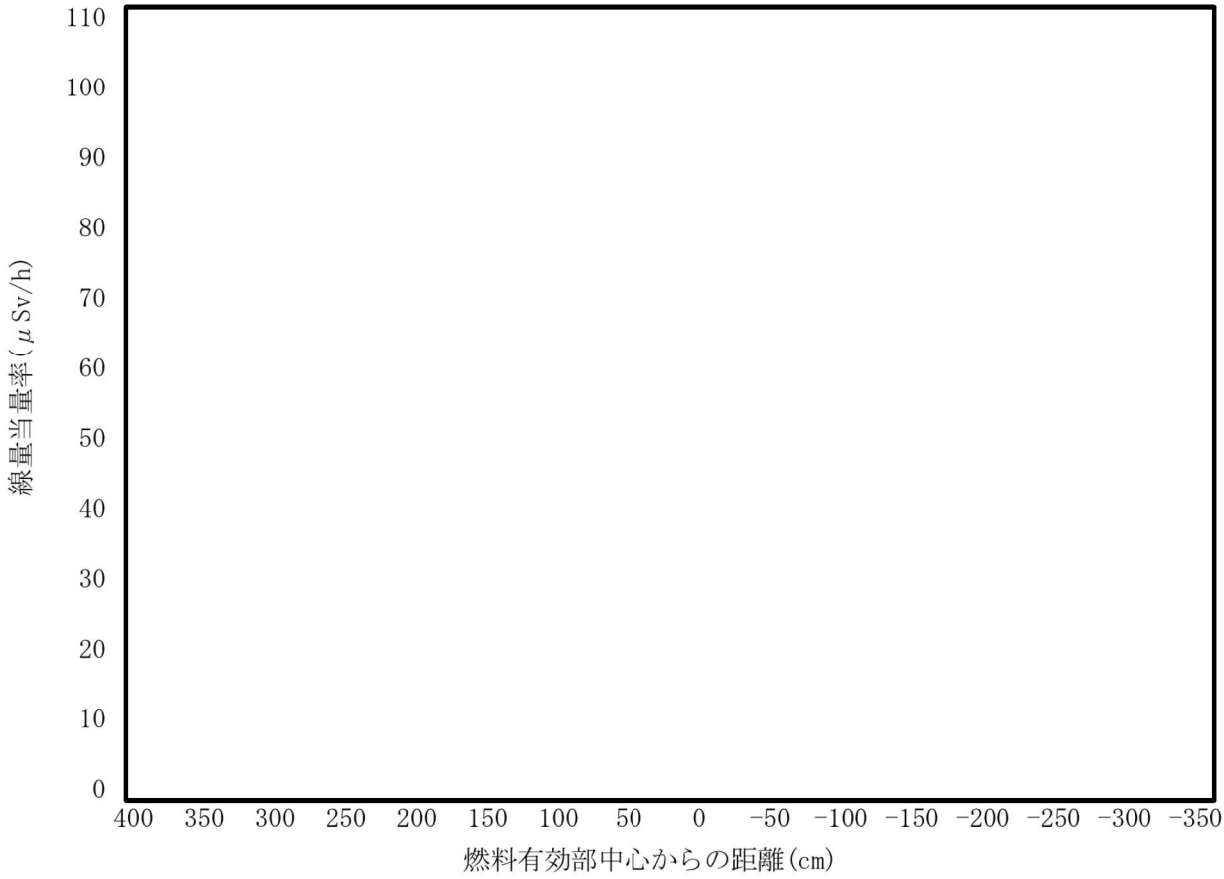
□内は商業機密のため、非公開とします。

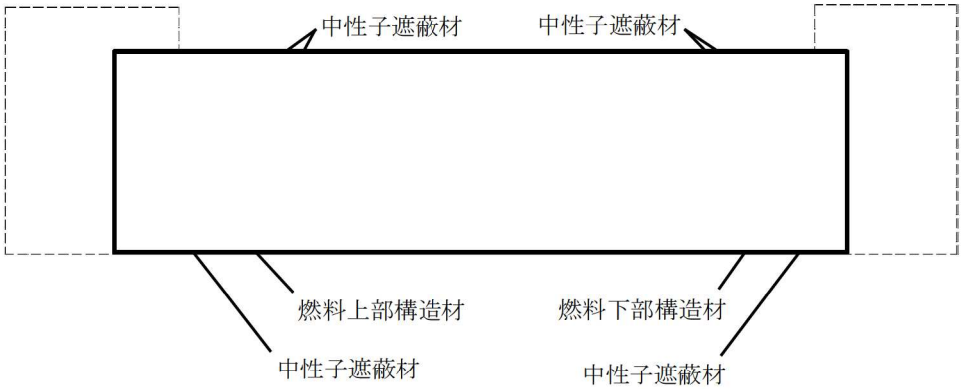


（注 1）図中の数字部の線量当量率評価結果の差異要因について第 6 表に示す。

第 15 図　先行キャスクにおける表面から 1　m 離れた位置の線量当量率分布の比較 (10)
（頭部軸方向・底部軸方向）

□内は商業機密のため、非公開とします。





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

（注 2）DOT3.5 解析の線量当量率は、頭部径方向・側部・底部径方向の線量当量率分布にトラニオン方向の分布を重ねて示した。

（注 3）図中の数字部の線量当量率評価結果の差異要因について第 6 表に示す。

第 16 図　先行キャスクにおける表面から 1　m 離れた位置の線量当量率分布の比較 [10]
（頭部径方向・側部・底部径方向（トラニオン方向含む））

□内は商業機密のため、非公開とします。

第６表　先行キャスクにおける MCNP5 コードと DOT3.5 コードの評価結果の傾向まとめ

項目	場所	傾向の差分要因	影響
1	第 14 図 トラニオン部	DOT3.5 のトラニオン部線束接続計算手法（MCNP5 は実形状で接続無し）	DOT3.5 のトラニオン部の表面評価点は、コード制約上の設定により実態より保守的（高い）な評価値となるモデルを設定している。よって MCNP5 に比べて表面の線量当量率が高くなる。 MCNP5 による評価は、MSF-24P(S)型と同等の体系である使用済燃料輸送・貯蔵容器体系でのベンチマーク解析でトラニオン近傍の領域も測定値と傾向が良い一致であることを確認している。したがって、DOT3.5 の評価結果は保守的なものであり、MCNP5 による評価結果は妥当である。
2	第 15 図 底部軸方向	DOT3.5 の燃料領域均質モデル化手法（MCNP5 は実形状）	DOT3.5 は均質円筒モデルであるが、燃料領域を均質モデル化することによる線量当量率影響を保守的に考慮できるモデル設定（線量当量率が高くなる）としている。よって、MCNP5 に比べて線量当量率が高くなる。 なお、頭部軸方向については、底部に比べて遮蔽材が厚く線量当量率が小さいため当該影響が小さくなる。
3	第 16 図 側部中央	項目２と同様の要因	項目２と同様。
4	第 16 図 トラニオン部	項目１と同様の要因	基本的には項目１と同様。ただし、表面から１ m 離れた位置における線量当量率算出はキャスク全体からの線量当量率の寄与が支配的であり、MCNP5 と DOT3.5 で概ね一致する。
5	第 16 図 頭部径方向・底部径方向	項目２と同様の要因	項目２と同様。

4. 遮蔽機能データ

MSF-28P 型を貯蔵あるいは保管する施設（以下「貯蔵等施設」という。）の設置に当たっては、設置許可基準規則第 29 条及び第 30 条に適合する必要があり、適合性評価として実施する線量評価におけるソースターム条件として、遮蔽機能データ(注)を使用できることが「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」に規定されている。

（注）MSF-28P 型に収納する燃料について、型式証明で示す収納物仕様と実際の燃料仕様の差に応じた適度な保守性を有することとなり、型式証明の遮蔽機能データを用いて第 29 条及び第 30 条の適合性を説明することは合理的である。

MSF-28P 型の遮蔽機能データを用いる場合は、型式証明申請における設置許可基準規則第 16 条の適合性評価と同じ手法で求めた線束を用いるものとする（※MSF-28P 型の遮蔽機能データの作成方法については、本型式証明申請第 16 条で妥当性確認済）。

「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」より抜粋

2.2 遮蔽機能

［確認内容］

3)敷地境界における実効線量評価

②ソースターム

兼用キャスクの遮蔽機能データ又は兼用キャスク表面から１ m 離れた位置における線量当量率が 100μSv/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。

（参　考）

貯蔵等施設の設置（変更）許可申請においては、MSF-28P 型の遮蔽機能データを用いた場合、特定兼用キャスク表面での遮蔽機能データに基づく線量当量率が表面以外でも適切に設定されていることの確認方法の一例を次に示す。

- MSF-28P 型をソースターム条件とする設置許可基準規則第 29 条及び第 30 条の遮蔽評価において、MSF-28P 型の遮蔽機能データを用いて評価した特定兼用キャスク表面から１ m 離れた位置の第 17 図に示す代表評価点５点における線量当量率を評価する。
- その評価結果が、MSF-28P 型の遮蔽適合性として評価した第７表に示す結果と同等*になることの確認をもって、遮蔽機能データが適切に使用されていることを確認する。

遮蔽機能データの適用確認方法の概要を別紙５に示す。

＊：

この場合、遮蔽機能データとの差異（線量当量率比）を設工認申請における線量解析値に加味する（解析値に線量当量率比を考慮する）等で妥当な引き継ぎとする。

□内は商業機密のため、非公開とします。

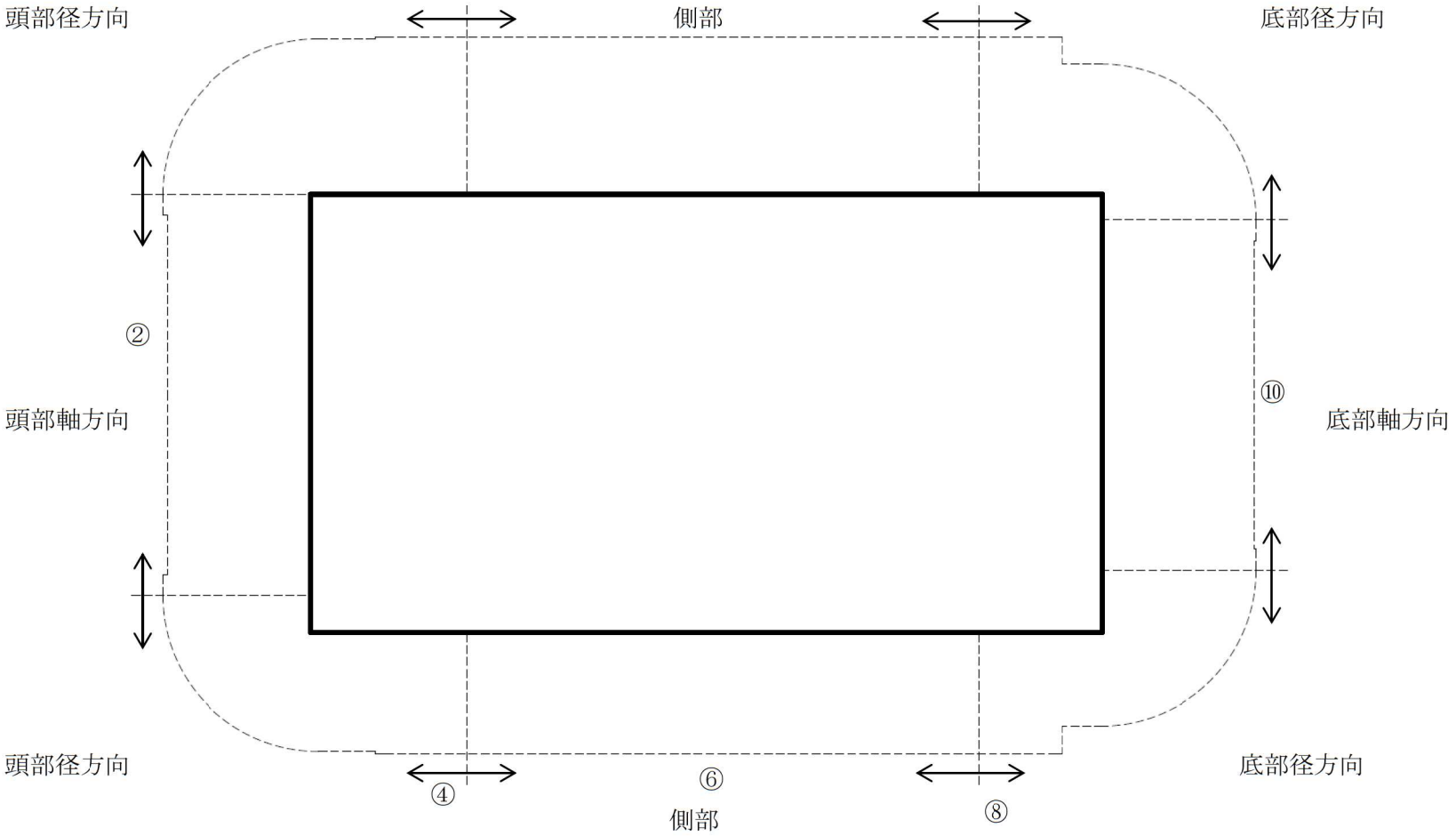
第７表　特定兼用キャスクの表面から１ｍ離れた位置における代表評価点の線量当量率

（単位：μSv/h）

評価点			頭部		側部	底部	
			軸方向	径方向		径方向	軸方向
			②	④	⑥	⑧	⑩
表面から１ｍ	ガンマ線	燃料有効部	0.2 (0.6)	19.0 (0.2)	45.8 (0.2)	20.7 (0.2)	2.5 (0.3)
		構造材放射化	0.7 (0.2)	9.5 (0.3)	8.8 (0.2)	6.3 (0.3)	16.0 (0.1)
		二次ガンマ線	0.4 (1.0)	5.4 (0.5)	8.9 (0.4)	5.4 (0.5)	2.9 (0.5)
	中性子		51.2 (0.5)	39.8 (0.6)	22.6 (0.2)	38.6 (0.7)	12.7 (0.3)
	合計		52.5	73.7	86.1	71.0	34.1

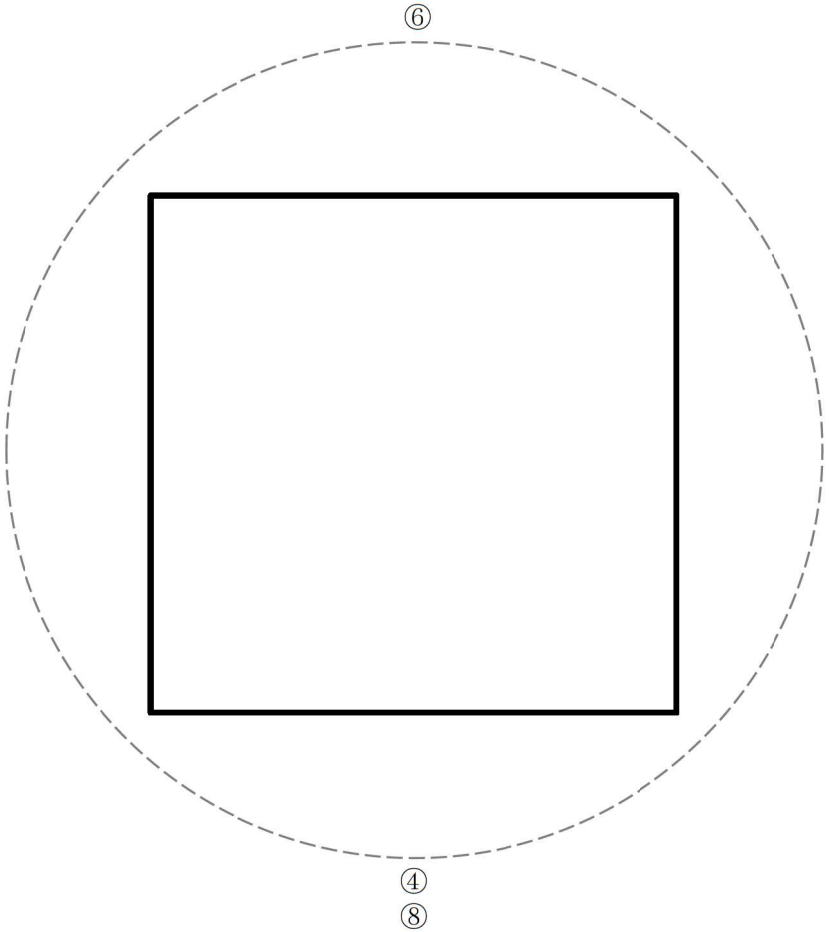
※（　　）内は統計誤差（単位：%）を示す。

第３表に示す表面から１ｍ離れた位置における線量当量率の評価結果と同じ



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

第17図（1/2）　特定兼用キャスクの表面から１ｍ離れた位置における代表評価点（たて断面）



（注）④、⑥、⑧の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第17図（２/２）　特定兼用キャスクの表面から１ ｍ離れた位置における代表評価点（水平断面）

5. 参考文献

(1) M. Ishikawa, T. Jin, J. Katakura, M. Kataoka, H. Matsumoto, Y. Ohkawachi, S. Ohki, A. Onoue, A. Sasahara, K. Suyama, H. Yanagisawa, “ZZ ORIGEN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3”, Computer Programs NEA-1642, OECD/NEA Databank, (2006).

(2) 奥村啓介,杉野和輝,小嶋健介,神智之,岡本力,片倉純一, “JENDL-4.0に基づくORIGEN2用断面積ライブラリセット：ORLIBJ40”, JAEA-Data/Code 2012-032, Japan Atomic Energy Agency, (2013).

(3) A. G. Croff, “ORIGEN2：A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials”, Nuclear Technology, Vol.62, (1983).

(4) X-5 Monte Carlo Team, “MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory”, LA-UR-03-1987, (2003).

(5) 社団法人 日本電気協会 原子力規格委員会,「原子力発電所放射線遮へい設計規程」,JEAC 4615-2008, (2008).

(6) U.S.Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility”, NUREG-1536 Revision 1, (2010).

(7) U.S.Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities”, NUREG-1567, (2000).

(8) U.S.Nuclear Regulatory Commission, “Final Safety Evaluation Report”, https://www.nrc.gov/docs/ML2030/ML20307A119.pdf, (2020).

(9) 一般社団法人 日本原子力学会,「日本原子力学会標準 シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン：2015」,AESJ-SC-A008:2015, (2016).

(10) 三菱重工業株式会社,「発電用原子炉施設に係る型式設計特定機器の型式指定申請書(特定兼用キャスク）」,L5-95KV100, (2022).

(11) リサイクル燃料貯蔵株式会社,「リサイクル燃料備蓄センターの使用済燃料貯蔵事業変更許可申請」,ＲＦＳ発官２５第１１号, (2014).

(12) Hilary M. Abhold and John S. Hendricks, “MCNP™ Software Quality Assurance Plan”, Los Alamos National Laboratory, LA-13138, (1996).

(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 E.Hollowell, John S.Hendricks, “MCNP:Photon Benchmark Problems”, LA-12196, (1991).

(15) Daniel J.Whalen, David A.Cardon, Jennifer L.Uhle, John S.Hendricks, “MCNP:Neutron Benchmark Problems”, LA-12212, (1991).

(16) 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).

(17) Masahiko Ueyama, Masashi Osaki, “Dose Equivalent Rate Benchmark Calculations of a Dry Storage Cask for Spent Fuel by 3D Monte Carlo Code”, PATRAM 2019, (2019).

(18) 四国電力株式会社,「核燃料輸送物設計変更承認申請書」,原子力発 21329 号, (2021).

(19) Brian C. Kiedrowski, Forrest B. Brown, Morgan C. White, D. Kent Parsons, “Testing for the Photon Doppler Broadening Data Sampling Bug in MCNP5/X”, LA-UR-12-00121, (2012).

(20) K.Kosako, et al., “The Libraries FSXLIB and MATXSLIB Based on JENDL-3.3”, JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).

(21) 浅見光史, 大西世紀, 鎌田創, 「FW-CADIS 法により導出した分散低減パラメータを用いた Monte-Carlo 粒子輸送計算による低レベル放射性廃棄物輸送船「青栄丸」の線量当量率評価」, 日本原子力学会和文論文誌(2020), (2020).

(22) Shielding Integral Test Working Group (FY2006-2010), “Integral Test of JENDL-3.3 Based on Shielding Benchmarks”, JAEA-Research 2018-017, (2019).

(23) 社団法人 日本原子力学会,「中性子遮蔽設計ハンドブック」, (1993).

別紙１

遮蔽解析条件

1．使用済燃料集合体の代表燃料仕様について

遮蔽解析に用いる使用済燃料集合体仕様を 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）（以下「代表燃料仕様」という。）で代表することの妥当性を下記に示す。

MSF-28P 型には、収納位置に応じて別紙１－１表に示す使用済燃料を収納可能である。各収納配置位置における代表燃料は、線量当量率基準値に対して厳しい線量当量率を与える放射線源強度（以下「線源強度」という。）の燃料とする。領域ごとに各燃料タイプの線源強度を比較することで、代表燃料を決定する。使用済燃料集合体の線源強度計算方法及び条件を別紙１－２表及び別紙１－３表に示す。ここで、39,000MWd/t 型燃料は 48,000MWd/t 型燃料に比べて線源強度が低いため、線源強度計算対象は 48,000MWd/t 型燃料のみとする。線源強度は、「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。

別紙１－４表に燃料集合体の種類と型式ごとの線源強度を示す。ここで、本文第３表に示すとおり、線量当量率の基準値に対して厳しい線量当量率を与える線種は、キャスク表面位置において燃料有効部からの中性子、キャスク表面から１ m 離れた位置において燃料有効部からのガンマ線である。よって、代表燃料は、中性子及び燃料有効部ガンマ線の線源強度の観点で決定する。以下に各収納位置における代表燃料選定根拠を示す。

（領域Ａ）

別紙１－４表（１／４）に示すとおり、中性子及び燃料有効部ガンマ線が最も大きい 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）（[redacted]）を領域Ａの代表燃料仕様とする。

（領域Ｂ）

別紙１－４表（２／４）に示すとおり、中性子及び燃料有効部ガンマ線が最も大きい 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）（[redacted]）を領域Ｂの代表燃料仕様とする。

（領域Ｃ）

別紙１－４表（３／４）及び別紙１－４表（４／４）に示すとおり、中性子が最も大きい燃料仕様は 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）（[redacted]）、燃料有効部ガンマ線が最も大きい燃料仕様は 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）（[redacted]）である。ここで、本文第３表より表面位置において評価基準値 2,000μSv/h に対して評価値 1524.4μSv/h、表面から１ m 離れた位置において評価基準値 100μSv/h に対して評価値

[redacted]内は商業機密のため、非公開とします。

86.1μSv/h であることから、表面から１ m 離れた位置の方が、基準値に対して余裕が小さい結果となっている。よって、表面から１ m 離れた位置において厳しい線量当量率を与える線種である燃料有効部ガンマ線が最も高い 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A型）（[redacted]）を領域Cの代表燃料仕様とする。

以上の代表燃料を収納した場合における MSF-28P 型の燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体からの放射化によるガンマ線源強度を別紙１－５表に、中性子源強度を別紙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別紙１－７表示す。

燃料有効部のエネルギーごとの中性子線強度は、MCNP5 内で別紙１－２表に示す Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトルに処理される。また、使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体からの放射化ガンマ線のエネルギーごとの粒子放出割合は 1.17 MeV 及び 1.33 MeV がそれぞれ 50 % である。

[redacted]内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－１表（１／３）　収納可能な使用済燃料の種類（領域Ａ）（注１）（注２）

種類	最高燃焼度	冷却期間
17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）		
17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ｂ型）		
17×17 燃料 39,000MWd/t 型（Ａ型）		
17×17 燃料 39,000MWd/t 型（Ｂ型）		
15×15 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）		
15×15 燃料 48,000MWd/t 型（Ｂ型）		
15×15 燃料 39,000MWd/t 型（Ａ型）		
15×15 燃料 39,000MWd/t 型（Ｂ型）		

（注１）収納燃料配置を本文第１表に示す。

（注２）本表のうち、48,000MWd/t 型燃料の線源強度の計算を実施。

別紙１－１表（２／３）　収納可能な使用済燃料の種類（領域Ｂ）（注１）（注２）

種類	最高燃焼度	冷却期間
17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）		
17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ｂ型）		
17×17 燃料 39,000MWd/t 型（Ａ型）		
17×17 燃料 39,000MWd/t 型（Ｂ型）		
15×15 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）		
15×15 燃料 48,000MWd/t 型（Ｂ型）		
15×15 燃料 39,000MWd/t 型（Ａ型）		
15×15 燃料 39,000MWd/t 型（Ｂ型）		

（注１）収納燃料配置を本文第１表に示す。

（注２）本表のうち、48,000MWd/t 型燃料の線源強度の計算を実施。

□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－１表（３／３）　収納可能な使用済燃料の種類（領域Ｃ）（注１）（注２）

種類	最高燃焼度	冷却期間
17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）		
17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ｂ型）		
17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）		
17×17 燃料 48,000MWd/t 型（Ｂ型）		
17×17 燃料 39,000MWd/t 型（Ａ型）		
17×17 燃料 39,000MWd/t 型（Ｂ型）		
15×15 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）		
15×15 燃料 48,000MWd/t 型（Ｂ型）		
15×15 燃料 48,000MWd/t 型（Ａ型）		
15×15 燃料 48,000MWd/t 型（Ｂ型）		
15×15 燃料 39,000MWd/t 型（Ａ型）		
15×15 燃料 39,000MWd/t 型（Ｂ型）		

（注１）収納燃料配置を本文第１表に示す。

（注２）本表のうち、48,000MWd/t 型燃料の線源強度の計算を実施。

□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－２表　使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の線源強度計算方法及び条件

項目	計算方法	計算条件
燃料有効部からのガンマ線及び中性子	燃焼計算コード ORIGEN2 を用い、ガンマ線及び中性子源強度を計算。使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布を考慮。また、中性子については実効増倍率を考慮。	燃料条件　：別紙１－３表参照 解析コード：ORIGEN2.2UPJ ライブラリ：ORLIBJ40 PWR41J40 ライブラリ（48,000MWd/t 型） PWR34J40 ライブラリ（39,000MWd/t 型） 軸方向燃焼度分布：別紙１－１図参照 実効増倍率：0.30（別紙２参照）
使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体からの放射化ガンマ線	使用済燃料集合体構造材及びバーナブルポイズン集合体の ^{59}Co 含有量に従い、放射化計算式に基づき ^{59}Co から ^{60}Co への放射化量を計算。	放射化計算式 $A=N_o \sigma \phi \{1-\exp(-\lambda T_1)\} \times \exp(-\lambda T_2)$ A　：放射化核種（^{60}Co）の放射能（Bq） N_o　：ターゲット核種（^{59}Co）の個数（atoms） σ　：2200m/s の中性子による ^{59}Co の（n，γ）反応断面積（cm^2） ϕ　：炉内照射熱中性子束（$n/(cm^2 \cdot s)$） λ　：^{60}Co の崩壊定数（3.6002×10^{-4}/日） T_1　：照射日数（日）（別紙１－３表参照） T_2　：冷却日数（日）（別紙１－３表参照）
中性子源スペクトル	－	MCNP5：コード内で以下の条件を基に処理する。 Watt 型 ^{239}Pu 核分裂スペクトル(1)（注） Watt 型連続分布スペクトル ：$P(E)=C \exp(-E/a) \times \sinh(bE)^{1/2}$ ^{239}Pu 中性子スペクトル定数 ：a=0.966（MeV）、b=2.842（MeV^{-1}）

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

別紙１－３表（１／４）　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（領域Ａ　17×17 燃料、15×15 燃料）

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
燃焼度（MWd/t）					
平均比出力（MW/t）(注 1)					
照射日数（日）	使用済燃料集合体				
	バーナブルポイズン集合体(注 2)				
初期濃縮度（wt%）(注 3)					
冷却期間（年）					
ウラン重量（kg/体）					
軸方向燃焼度分布(注 4)（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)領域Ａのうちバーナブルポイズン集合体を収納可能な位置を本文第１表に示す。

(注 3)初期濃縮度は最低濃縮度とした。

(注 4)ノードは燃料有効部を軸方向に□したものである。

□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－３表（２／４）　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（領域Ｂ　17×17 燃料、15×15 燃料）

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
燃焼度（MWd/t）					
平均比出力（MW/t）(注 1)					
照射日数（日）	使用済燃料集合体				
	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）					
ウラン重量（kg/体）					
軸方向燃焼度分布(注 3) （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。

□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－３表（３／４）　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（領域Ｃ　17×17 燃料）

項　　目		17×17 燃料 48,000MWd/t 型	
		A型	B型
燃焼度（MWd/t）			
平均比出力（MW/t）(注 1)			
照射日数（日）	使用済燃料集合体		
	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）			
ウラン重量（kg/体）			
軸方向燃焼度分布(注 3)（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。

□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－３表（４／４）　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（領域Ｃ　15×15 燃料）

項　　目		15×15 燃料 48,000MWd/t 型	
		A 型	B 型
燃焼度（MWd/t）			
平均比出力（MW/t）(注 1)			
照射日数（日）	使用済燃料集合体		
	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）			
ウラン重量（kg/体）			
軸方向燃焼度分布(注 3)（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。

[　　]内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－４表（１／４）　燃料集合体の線源強度（領域Ａ　17×17 燃料、15×15 燃料）

（燃料集合体１体当たり）

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
燃焼度（MWd/t）				
冷却期間（年）				
燃料有効部ガンマ線 (photons/s)	3.779×10^{15}	3.588×10^{15}	3.384×10^{15}	3.222×10^{15}
構造材放射化ガンマ線 (注 1) (^{60}Co TBq)	2.578×10^{1}	2.601×10^{1}	1.787×10^{1}	1.859×10^{1}
燃料有効部中性子 (注 2) (n/s)	5.390×10^{8}	5.008×10^{8}	4.904×10^{8}	4.559×10^{8}

(注 1)

(注 2)記載値は実効増倍率 keff を考慮した全中性子源強度である。

別紙１－４表（２／４）　燃料集合体の線源強度（領域Ｂ　17×17 燃料、15×15 燃料）

（燃料集合体１体当たり）

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
燃焼度（MWd/t）				
冷却期間（年）				
燃料有効部ガンマ線 (photons/s)	3.171×10^{15}	3.022×10^{15}	2.857×10^{15}	2.725×10^{15}
構造材放射化ガンマ線 (^{60}Co TBq)	3.437×10^{0}	3.529×10^{0}	1.431×10^{0}	1.718×10^{0}
燃料有効部中性子 (注 1) (n/s)	4.172×10^{8}	3.880×10^{8}	3.803×10^{8}	3.538×10^{8}

(注 1)記載値は実効増倍率 keff を考慮した全中性子源強度である。

□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－４表（３／４）　燃料集合体の線源強度（領域Ｃ　17×17 燃料）

（燃料集合体１体当たり）

項目	17×17 燃料 48,000MWd/t 型			
	Ａ型		Ｂ型	
燃焼度（MWd/t）				
冷却期間（年）				
燃料有効部ガンマ線 （photons/s）	2.709×10^{15}	2.333×10^{15}	2.582×10^{15}	2.227×10^{15}
構造材放射化ガンマ線 （^{60}Co TBq）	2.967×10^{0}	6.219×10^{-1}	3.046×10^{0}	6.386×10^{-1}
燃料有効部中性子（注 1） （n/s）	2.006×10^{8}	2.617×10^{8}	1.867×10^{8}	2.439×10^{8}

（注 1）記載値は実効増倍率 keff を考慮した全中性子源強度である。

別紙１－４表（４／４）　燃料集合体の線源強度（領域Ｃ　15×15 燃料）

（燃料集合体１体当たり）

項目	15×15 燃料 48,000MWd/t 型			
	Ａ型		Ｂ型	
燃焼度（MWd/t）				
冷却期間（年）				
燃料有効部ガンマ線 （photons/s）	2.443×10^{15}	2.110×10^{15}	2.330×10^{15}	2.015×10^{15}
構造材放射化ガンマ線 （^{60}Co TBq）	1.240×10^{0}	2.590×10^{-1}	1.489×10^{0}	3.110×10^{-1}
燃料有効部中性子（注 1） （n/s）	1.842×10^{8}	2.396×10^{8}	1.716×10^{8}	2.235×10^{8}

（注 1）記載値は実効増倍率 keff を考慮した全中性子源強度である。

□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－５表　燃料集合体構造材の放射化によるガンマ線源強度

（MSF-28P 型１基当たり）

	燃料集合体構造材の線源強度（^{60}Co TBq）			
	領域Ａ	領域Ｂ	領域Ｃ	合計（28 体）
上部ノズル部	6.181×10^{0} (3.559×10^{0})	4.476×10^{-1}	5.151×10^{-1}	7.144×10^{0} (3.559×10^{0})
上部プレナム部	2.535×10^{1} (4.388×10^{0})	3.579×10^{0}	4.119×10^{0}	3.305×10^{1} (4.388×10^{0})
燃料有効部	2.148×10^{2} (1.292×10^{2})	1.462×10^{1}	1.682×10^{1}	2.463×10^{2} (1.292×10^{2})
下部プレナム部	3.795×10^{0}	6.479×10^{-1}	7.456×10^{-1}	5.189×10^{0}
下部ノズル部	7.785×10^{0}	1.329×10^{0}	1.530×10^{0}	1.064×10^{1}

□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－６表　中性子源強度

（MSF-28P 型１基当たり）

		燃料有効部			
		領域Ａ	領域Ｂ	領域Ｃ	合計（28 体）
一次中性子源強度 No (n/s)	(α,n) 反応	1.129×10^{8}	4.501×10^{7}	4.133×10^{7}	1.992×10^{8}
	自発核分裂	5.169×10^{9}	1.707×10^{9}	1.082×10^{9}	7.958×10^{9}
	合計	5.282×10^{9}	1.752×10^{9}	1.123×10^{9}	8.157×10^{9}
遮蔽解析用中性子実効増倍率 keff (注)		0.30			
全中性子源強度 Ns (n/s)		7.546×10^{9}	2.503×10^{9}	1.605×10^{9}	1.165×10^{10}

(注)ORIGEN2 コードにより、燃焼に伴う核分裂性物質の減少及びポイズンとなる核分裂生成物の生成量を求め、これらを考慮した核種組成を用いて臨界解析に示す手法と同一手法（KENO-Ⅵコード）により評価して得られた値である。

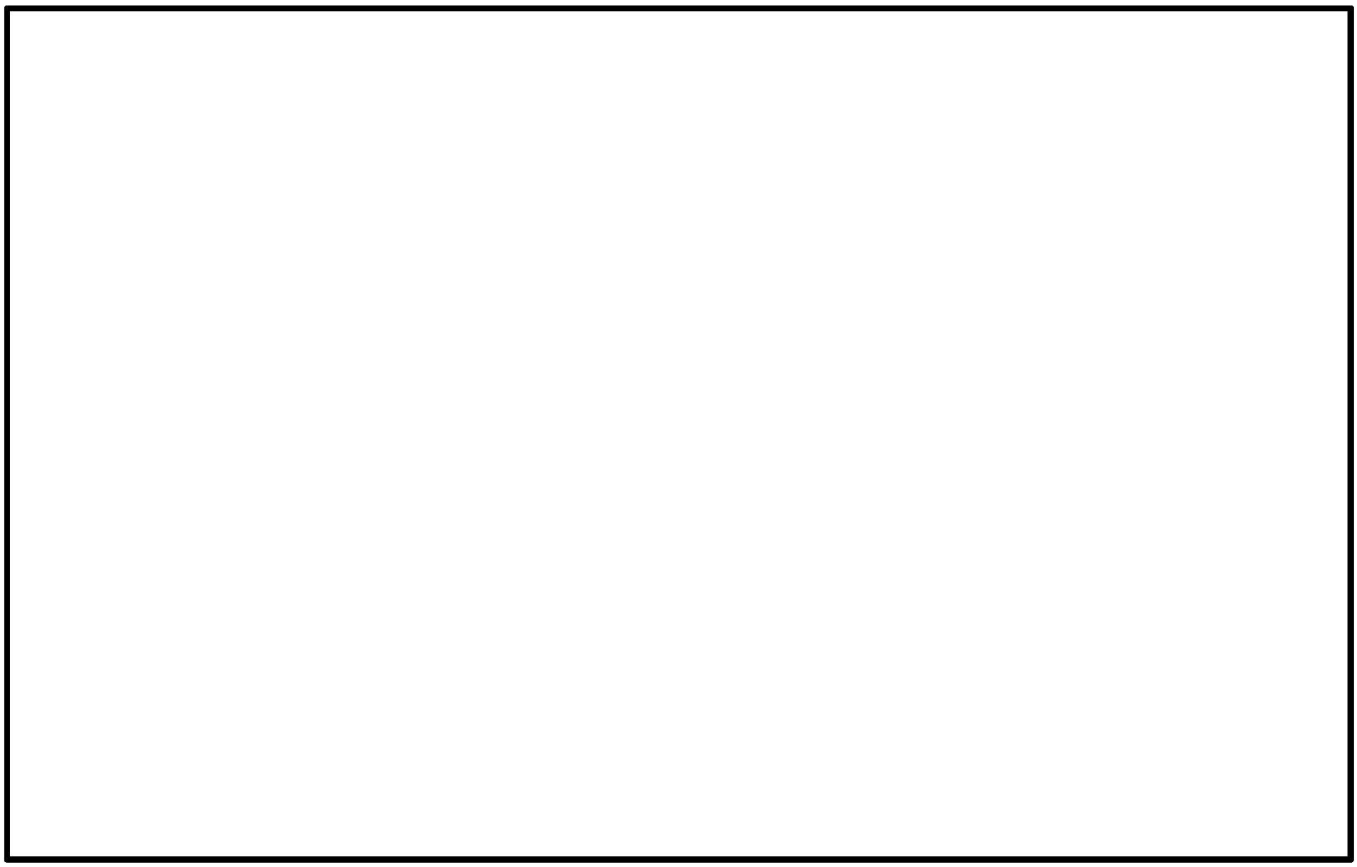
□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－７表　燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度

（MSF-28P 型１基当たり）

エネルギー群数	平均エネルギー（MeV）	燃料有効部　（photons/s）			
		領域Ａ	領域Ｂ	領域Ｃ	合計（28 体）
1	0.01	1.501×10^{16}	5.442×10^{15}	6.274×10^{15}	2.673×10^{16}
2	0.025	2.932×10^{15}	1.056×10^{15}	1.232×10^{15}	5.220×10^{15}
3	0.0375	3.754×10^{15}	1.348×10^{15}	1.538×10^{15}	6.640×10^{15}
4	0.0575	3.110×10^{15}	1.161×10^{15}	1.359×10^{15}	5.630×10^{15}
5	0.085	1.603×10^{15}	5.737×10^{14}	6.684×10^{14}	2.846×10^{15}
6	0.125	1.269×10^{15}	4.263×10^{14}	4.898×10^{14}	2.185×10^{15}
7	0.225	1.345×10^{15}	4.805×10^{14}	5.610×10^{14}	2.386×10^{15}
8	0.375	5.593×10^{14}	1.997×10^{14}	2.343×10^{14}	9.933×10^{14}
9	0.575	2.245×10^{16}	8.134×10^{15}	9.093×10^{15}	3.968×10^{16}
10	0.85	4.909×10^{14}	1.094×10^{14}	1.182×10^{14}	7.185×10^{14}
11	1.25	3.672×10^{14}	9.159×10^{13}	9.701×10^{13}	5.558×10^{14}
12	1.75	1.335×10^{13}	3.517×10^{12}	3.779×10^{12}	2.065×10^{13}
13	2.25	1.583×10^{9}	4.266×10^{8}	3.200×10^{8}	2.329×10^{9}
14	2.75	4.643×10^{9}	1.843×10^{9}	1.613×10^{9}	8.100×10^{9}
15	3.5	5.331×10^{8}	1.754×10^{8}	1.115×10^{8}	8.201×10^{8}
16	5.0	2.271×10^{8}	7.502×10^{7}	4.768×10^{7}	3.498×10^{8}
17	7.0	2.618×10^{7}	8.650×10^{6}	5.496×10^{6}	4.033×10^{7}
18	9.5	3.008×10^{6}	9.936×10^{5}	6.312×10^{5}	4.633×10^{6}
合計		5.290×10^{16}	1.903×10^{16}	2.167×10^{16}	9.360×10^{16}

□内は商業機密のため、非公開とします。



---- 実燃料相対燃焼度分布包絡線

別紙１－１図　軸方向燃焼度分布の設定（17×17 燃料及び 15×15 燃料）

□内は商業機密のため、非公開とします。

2. 遮蔽解析のモデル化について

遮蔽解析モデル化の概要を別紙１－２図、解析モデル図を別紙１－３図に示す。遮蔽解析のモデル化方針は以下のとおりである。

特定兼用キャスクをその実形状に基づき三次元体系のモデル（以下「三次元モデル」という。）でモデル化している。なお、軸方向については使用済燃料集合体が一次蓋及び胴（底板）に接した状態とし、径方向についてはバスケットセル内全てを燃料領域とすることで、線源である使用済燃料から評価点までの距離が短い保守的なモデルとしている。また、本文第５表のとおり、MSF-28P 型のモデル化設定方法は、先行キャスクの MSF-24P(S)型と同一であり、本文第 14 図、第 15 図及び第 16 図のとおり、DOT3.5 コードとの評価結果との比較によって妥当性を確認済のものである。

(1) 燃料領域

別紙１－２図に示すとおり、使用済燃料集合体とバスケットをそれぞれモデル化している。

バーナブルポイズン集合体は、放射化線源強度のみ考慮し、構造材としての遮蔽効果は無視している。また、使用済燃料集合体の移動を考慮するため、軸方向については燃料各領域の高さ寸法は固定して一次蓋及び胴（底板）に接した状態となるようキャスク全長を短縮し、径方向についてはバスケットセル内に均質化している。燃料領域の均質化の影響については、TN-32 型に収納した燃料集合体の均質/非均質影響評価が、米国 NRC によって認証された SCALE コードシステムに含まれる三次元モンテカルロ法に基づく MAVRIC コードを用いて実施され、報告[(2)]されている。別紙１－４図は TN-32 型の燃料集合体を非均質とした場合の評価モデルである。燃料集合体の全ての燃料棒の形状及び配置がモデル化されている。燃料集合体を均質とした場合の評価モデルは別紙１－４図(b)を１領域の均質化燃料領域としたものである。影響評価は、別紙１－５図のとおり TN-32 型の側部及び上部方向を対象に、一次ガンマ線、二次ガンマ線及び中性子に対して実施されている。別紙１－５図の評価結果より、中性子は非均質化モデル（Fine-CE）に対して、均質化モデル（Coarse-CE）は保守的な評価結果であり、ガンマ線及び総線量は同等であると述べられている。したがって、MSF-28P 型の燃料領域をバスケットセル内で均質化することは妥当な設定である。

(2) バスケット

別紙１－２図に示すとおり、バスケットプレートはボイド層を含めた格子形状を均質化、バスケットサポートは実形状に基づきモデル化している。

バスケットの留め具（ワッシャ、ボルト、ナット）は無視しており、バスケット領域に空孔が存在する場合は空孔の体積も考慮して均質化している。バスケット領域のモデル化確認として別紙１－９表及び別紙１－６図に示す条件で影響評価を実施した。キャスク外表面及び表面か

ら１ ｍ離れた位置での線量当量率分布をそれぞれ別紙１－７図、別紙１－８図に示す。

バスケットの空孔をモデル化した場合、キャスク外表面におけるガンマ線分布は局所的に歪が生じるが、バスケットを均質化しているモデルでは空孔の欠損を考慮したバスケット体積を基に密度設定を行っているため、キャスク外表面全体のガンマ線量当量率は同程度となっている。中性子については、バスケット領域は中性子遮蔽材であるレジンに覆われているため、中性子線量当量率の差異は非常に小さくなっている。また、キャスク外表面の線量当量率は本文第３表のとおり最大値を示す⑦位置（底部径方向）では中性子が最も大きいが、バスケットの位置から軸方向に離れた位置であるため、別紙１－７図のとおりバスケットの空孔の考慮による影響は軽微である。

表面から１ ｍ離れた位置では、バスケットを透過後、中性子・ガンマ遮蔽材を通過することからキャスク外表面で見られたようなモデルの差異による影響は緩和される。バスケットを均質化しているモデルではバスケット全体の密度を低下した影響が表れ、バスケット空孔をモデル化した場合のガンマ線量当量率及び中性子分布と比較してそれぞれ同程度となっている。以上より、バスケット領域のモデル設定は妥当なものである。

(3) 胴、側部中性子遮蔽材及び外筒

別紙１－２図に示すとおり、実形状に基づきモデル化している。

(4) トラニオン部

実形状に基づきモデル化している。

(5) 解析モデルの入力条件への不確かさの考慮について

解析モデルの入力条件への不確かさとして以下を考慮している。

①構成部材密度

最低保証密度を使用して原子個数密度を設定。

②寸法公差

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

(6) 遮蔽解析の保守性

本評価においては、以下の点について保守性を有している。解析条件の保守性が線量当量率に与える影響を別紙１－８表に示す。

・収納制限に対する解析条件の保守性

[redacted]

□内は商業機密のため、非公開とします。

[redacted]ウラン濃縮度 4.1±[redacted] wt％を保守的に[redacted] wt％とする。

・モデル化の保守性

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

－使用済燃料について胴内での軸方向の移動を考慮し、安全側に蓋方向、底部方向に移動したモデルとしており、線源である使用済燃料が評価点により近くなる設定としている。

－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。

[redacted]内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－８表　解析条件の保守性による線量当量率への影響

項目	詳細条件	遮蔽解析条件	線量当量率（注）への影響（保守性）
ウラン初期濃縮度	4.1±□wt％（ノミナル値、公差）	□wt％	約 0.5％程度
中性子遮蔽材質量減損	質量減損 2.0％	質量減損 2.5％	約 10％程度
燃料集合体の軸方向移動	燃料集合体と一次蓋間に□の隙間	胴（底板）及び一次蓋に接した状態	約６％程度（頭部軸方向のみ）
バーナブルポイズン集合体	中央部領域□の燃料集合体と共に収納可能	バーナブルポイズン集合体自体の自己遮蔽効果は無視	約１％程度

（注）基準に対して裕度の少ない特定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

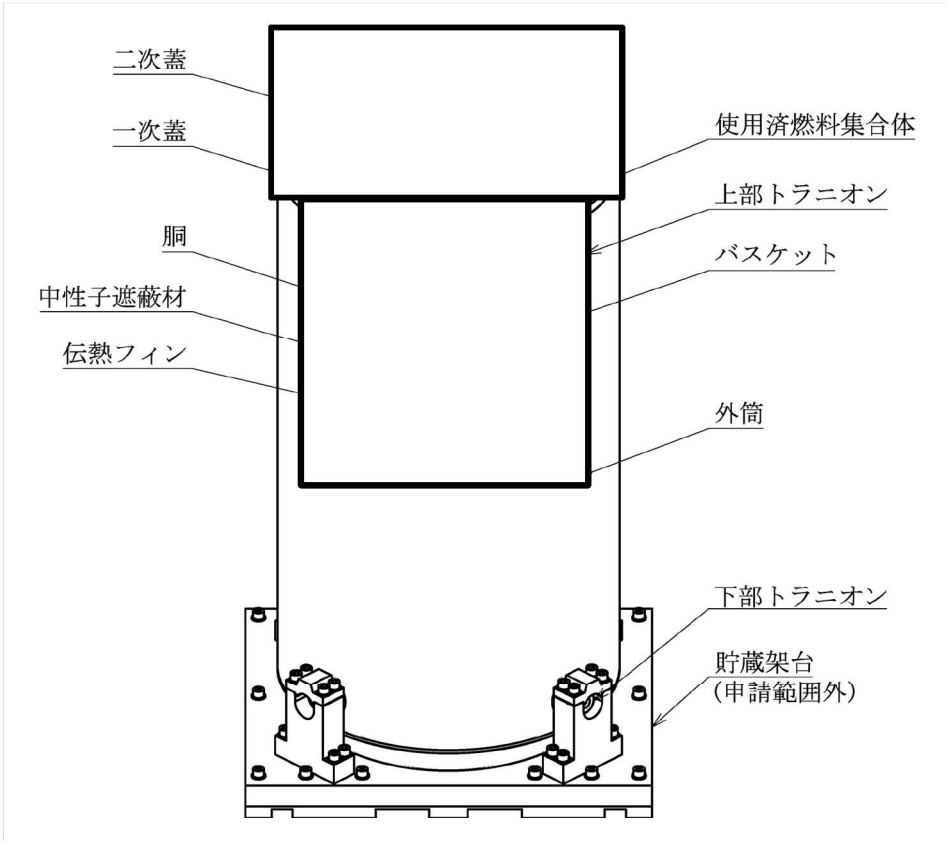
□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－９表　バスケットモデル影響評価条件

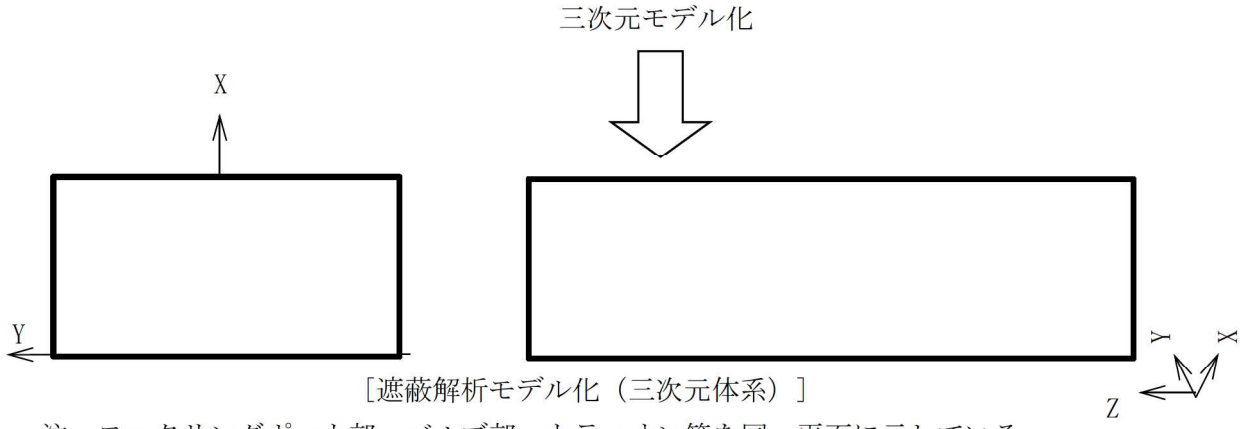
項目	遮蔽解析条件	影響評価モデル （バスケット均質化）	影響評価モデル （バスケット空孔考慮）
バスケット モデル化	・バスケット領域の空孔による体積欠損を考慮して均質化		
線源設定	・全燃料集合体28体を線源領域に設定 ・本文第２図に示す軸方向燃焼度分布を考慮		
評価結果	・最大線量当量率となる方向を考慮した各評価点に対して線量当量率を整理（本文第３表参照）		

（注）本表の項目以外の影響評価条件は遮蔽解析条件と同一

□内は商業機密のため、非公開とします。



［実形状］



［遮蔽解析モデル化（三次元体系）］

注：モニタリングポート部、バルブ部、トラニオン等を同一平面に示している。

燃料有効部領域A	燃料有効部領域C
燃料有効部領域B	
燃料上部構造材領域A	燃料上部構造材領域C
燃料上部構造材領域A	燃料上部構造材領域C
燃料下部構造材領域A	燃料下部構造材領域C
バスケット領域	胴、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー
中性子遮蔽材	トラニオン
伝熱フィン	底部中性子遮蔽材カバー、下部端板、バルブ部カバープレート
真空	

別紙１－２図　遮蔽解析モデル化概要（三次元モデル）

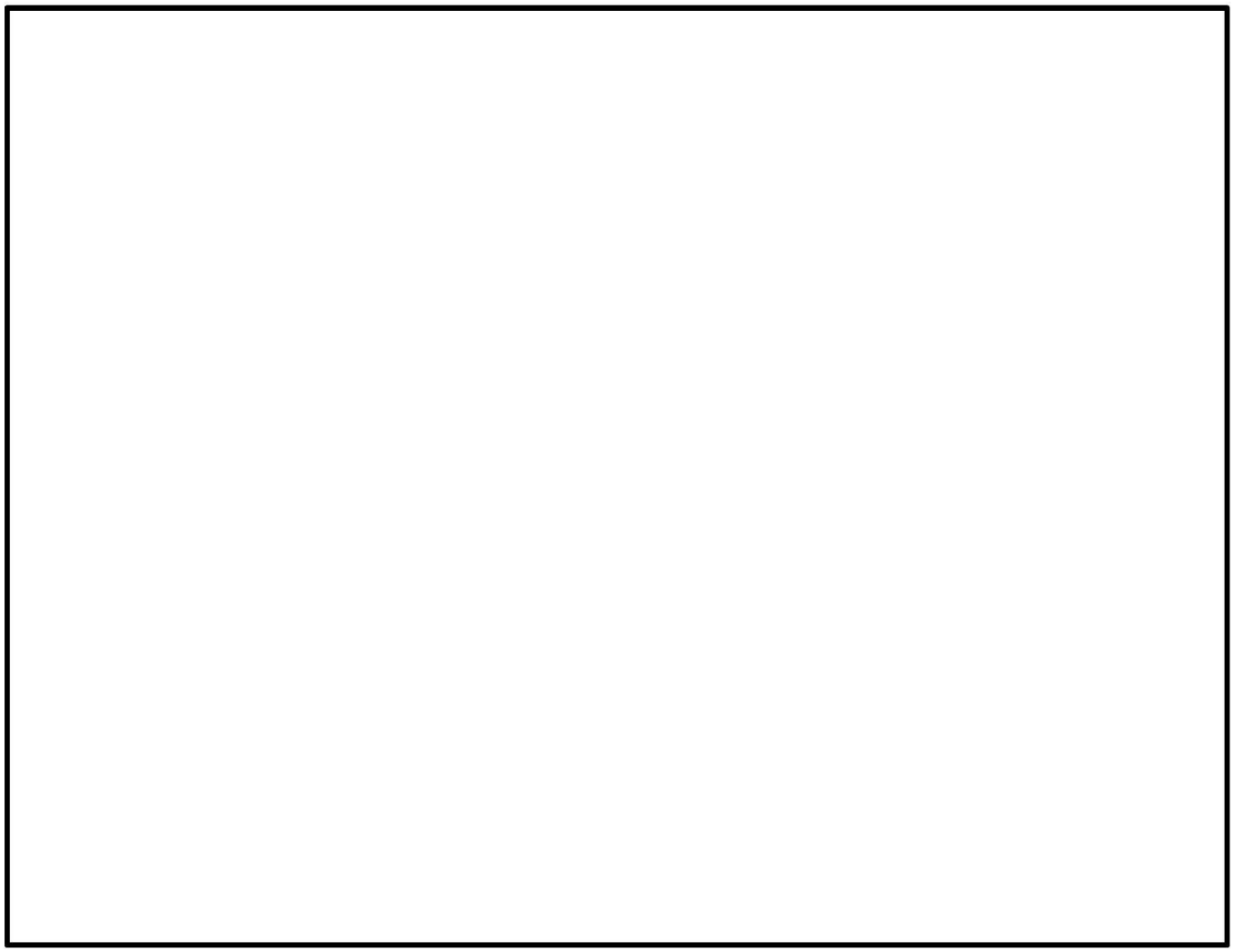
無断複製・転載禁止　三菱重工業株式会社

□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙１－３図（１／２）　遮蔽解析モデル（たて断面）

無断複製・転載禁止　三菱重工業株式会社

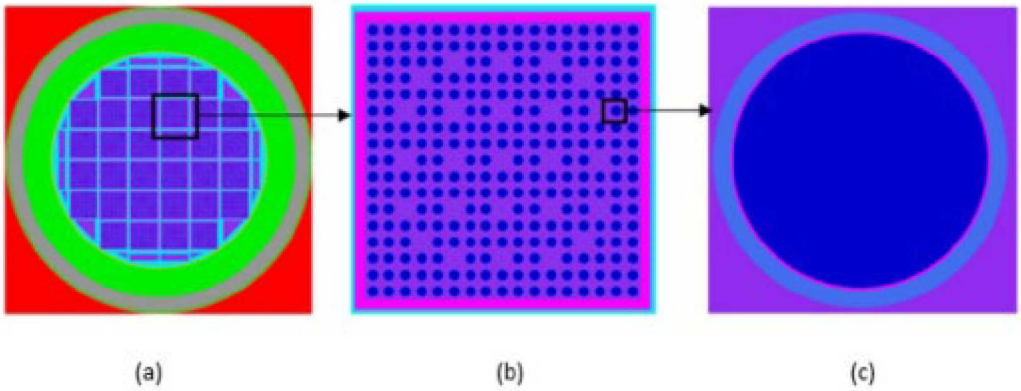
□内は商業機密のため、非公開とします。



別紙１－３図（２／２）　遮蔽解析モデル（水平断面）

無断複製・転載禁止　三菱重工業株式会社

□内は商業機密のため、非公開とします。



(a) キャスク断面図

(b) 燃料集合体詳細

(c) 燃料棒断面図

別紙１－４図　燃料領域均質/非均質影響評価モデル(2)

(TN-32 キャスク横断面図、燃料集合体非均質モデル)

Cask Surfaces	Model	Neutron Source		Gamma-ray Source	Total Dose Rate
		Neutron Dose Rate	Secondary Gamma-ray Dose Rate	Primary Gamma-ray Dose Rate	
Side	Fine–CE[a]	0.44±2.83%	1.36±2.71%	18.54±4.11%	20.34±3.99%
	Fine–MG[b]	0.43±2.79%	1.28±2.58%	20.04±3.84%	21.75±3.75%
	Coarse–CE[c]	0.76±1.69%	0.97±2.27%	18.31±3.17%	20.04±3.07%
	Coarse–MG[d]	0.67±2.08%	0.82±2.32%	20.06±3.13%	21.55±3.06%
Top	Fine–CE	0.17±4.12%	0.035±14.28%	103.14±5.16%	103.35±5.15%
	Fine–MG	0.15±4.60%	0.024±19.51%	110.26±4.78%	110.43±4.79%
	Coarse–CE	0.29±3.13%	0.047±13.62%	108.37±4.48%	108.71±4.49%
	Coarse–MG	0.25±3.04%	0.037±14.63%	114.74±4.24%	115.03±4.23%

* The average neutron and gamma-ray dose rates are in units of mrem/h

a：燃料領域非均質モデル、連続エネルギ断面積

b：燃料領域非均質モデル、多群断面積

c：燃料領域均質モデル、連続エネルギ断面積

d：燃料領域均質モデル、多群断面積

別紙１－５図　燃料領域均質/非均質影響評価結果(2)

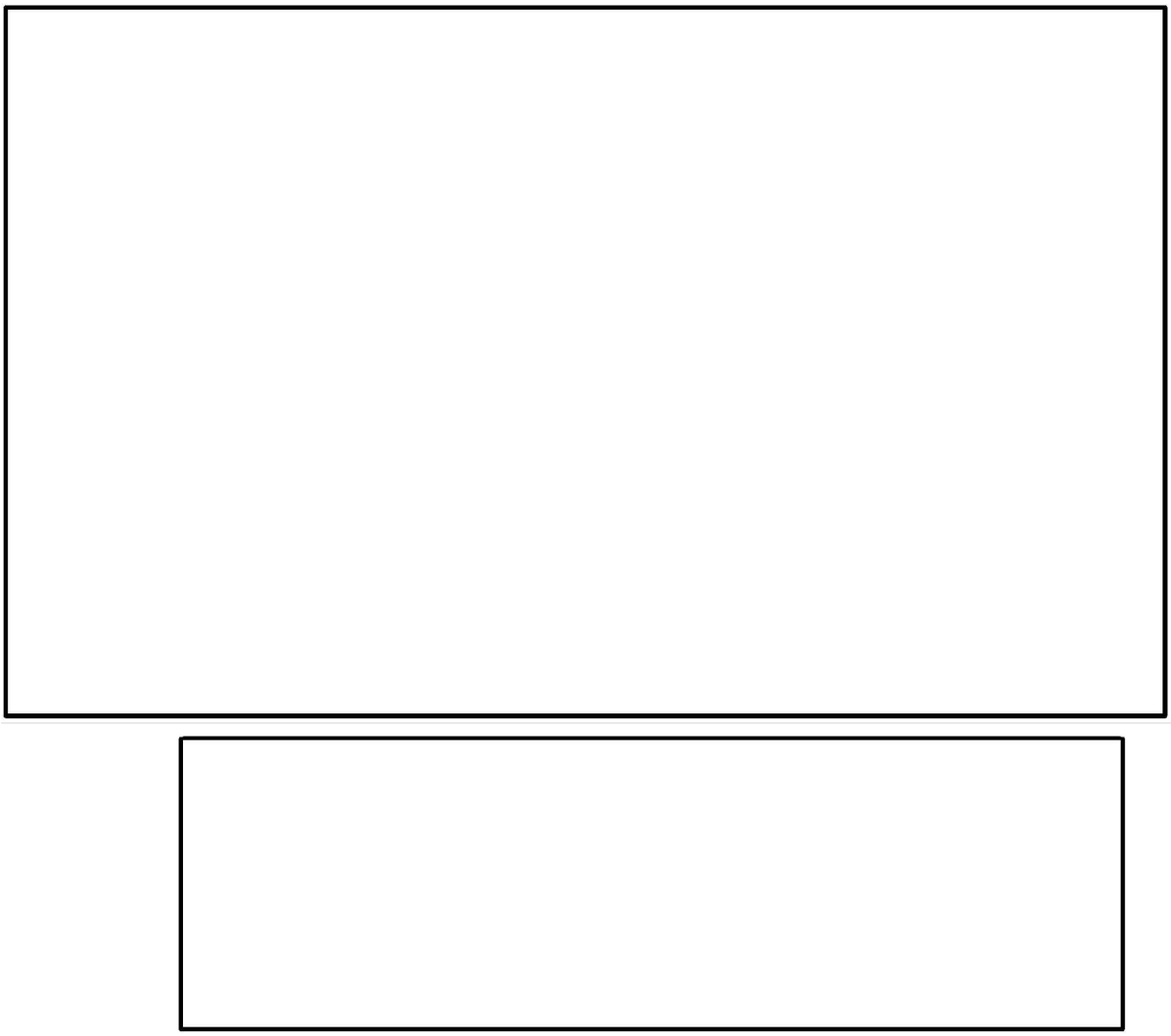
無断複製・転載禁止　三菱重工業株式会社

別紙１－６図　バスケットモデル影響評価条件

無断複製・転載禁止　三菱重工業株式会社

□内は商業機密のため、非公開とします。

（ガンマ線）



別紙１－７図（１／２）　バスケットモデル影響評価結果（キャスク外表面）

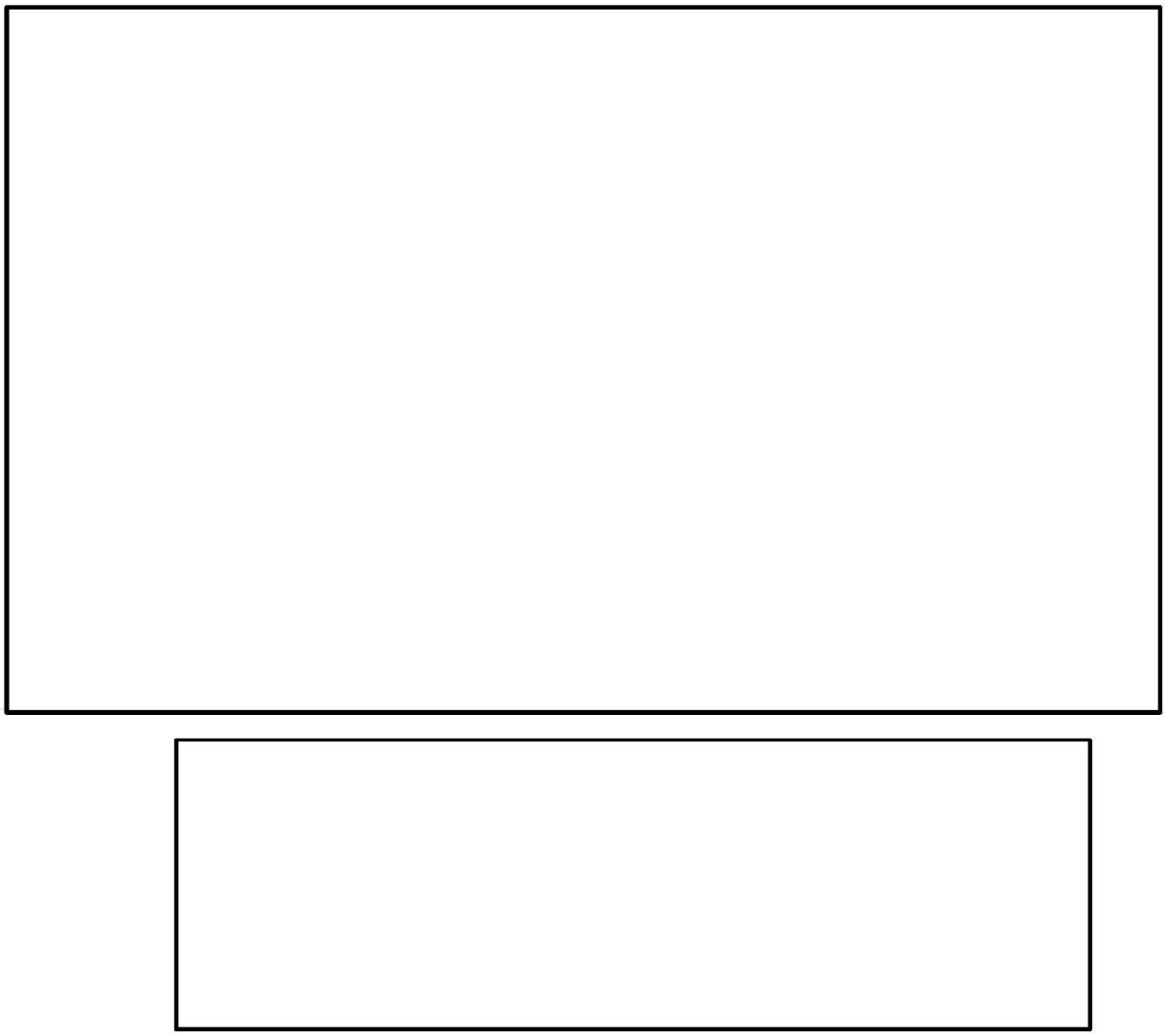
□内は商業機密のため、非公開とします。

（中性子）

別紙１－７図（２／２）　バスケットモデル影響評価結果（キャスク外表面）

□内は商業機密のため、非公開とします。

（ガンマ線）



別紙１－８図（１／２）　バスケットモデル影響評価結果（表面から１ ｍ離れた位置）

□内は商業機密のため、非公開とします。

（中性子）

別紙１－８図（２／２）　バスケットモデル影響評価結果（表面から１ ｍ離れた位置）

□内は商業機密のため、非公開とします。

3. 中性子遮蔽材の質量減損について

中性子遮蔽材（レジン）は、補足説明資料 16-４「材料・構造健全性に関する説明資料（L5-95LC216）」に示すとおり、熱による質量減損が生じる。遮蔽解析では、設計貯蔵期間（60 年）経過後の中性子遮蔽材の質量減損を考慮した原子個数密度を用いている。

中性子遮蔽材の質量減損は、劣化パラメータにより次式で表される。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times Ep - 19.2 \quad (3)$$

ここで、

Δw　：中性子遮蔽材の質量減損率（%）

E_p　：劣化パラメータ=$T \times (77.6 + \ln(t))$

T　：中性子遮蔽材温度（K）

t　：中性子遮蔽材加熱時間（h）

貯蔵中は、使用済燃料の崩壊熱量の低下に伴い、中性子遮蔽材の温度も低下するが、設計貯蔵期間中の温度を保守的に貯蔵開始直後の中性子遮蔽材の最高温度が設計貯蔵期間にわたり一定として考慮すると、設計貯蔵期間経過時までの中性子遮蔽材の質量減損率は MSF-28P 型は約 2.0 %となる。これを保守的に 2.5 %の質量減損があるとして評価した。

なお、中性子遮蔽材から放出される成分は、熱分解により生じる水分が支配的であり、その他として、炭酸ガスを多く含む空気成分が確認された。また、有機酸濃度は検出限界以下であった(4)。したがって、遮蔽解析においては、中性子の遮蔽性能を安全側に設定するため、中性子遮蔽材の質量減損の成分を全て水とし、この質量減損分を遮蔽体として無視している。

4. 三次元モンテカルロコードMCNP5による詳細評価条件

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１－９表に示すとおりである。解析コード、断面積ライブラリ及び線源強度設定については前述のとおりであり、ここでは分散低減、タリーの設定及び統計指標に係る事項について説明する。

なお、17×17燃料と15×15燃料はMSF-28P型に混載しないが、48,000MWd/t型と39,000MWd/t型、及びＡ型とＢ型は区別なく同一キャスクへ混載可能である。遮蔽解析条件は収納燃料を全て17×17燃料 48,000MWd/t型（Ａ型）としている。

別紙１－９表　MCNP5解析の主要な評価条件

項目		解析条件
解析コード		MCNP5 ver.1.60
断面積ライブラリ		FSXLIB-J33（中性子） MCPLIB84（ガンマ線）
燃料有効部 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％
中性子源強度	群構造	連続エネルギー
	スペクトル	Watt型 ^{239}Pu核分裂スペクトル
分散低減法		エネルギー・カットオフ ウェイト・ウィンドウ
タリー		表面：F2タリー(半径2.5cmの面 若しくは５cm×５cmの曲面) 表面から１m位置：F4タリー(半径10cmの球形状)
統計指標		相対誤差10%以下（マニュアル推奨値）

(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相対誤差が小さくなり、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、効率的に相対誤差を小さくする方法を分散低減法と言う。

本評価は、線源形状が比較的大きく、かつ遮蔽体が厚く複雑な評価体系であるため、粒子が評価点に到達しづらく、相対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、相対誤差を低下させるための分散低減法として、打ち切り法のうちエネルギースペクトル計算において指定したエネルギー以下の計算を打ち切るエネルギー・カットオフ、及び非アナログモンテカルロ法のうち、空間及びエネルギーごとに分散低減のパラメータを設定するウェイト・ウィンドウ法を使用した。

エネルギー・カットオフ設定値は、ガンマ線では[redacted]。

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

本評価でのウェイト・ウィンドウパラメータは、Superimposed Importance Meshを用いて基本的に空気、鉄、レジンなどの物質ごとに分割し、隣り合う分割領域での粒子ウェイトが大きく変わらない分割厚さを設定、補助ツールであるADVANTG ver.3.0.3の[redacted]により算出した。ウェイト・ウィンドウパラメータの設定が妥当であることは、評価結果の連続性により確認した。

(2)タリーの設定

容器表面評価では、線源から方位性を持つ表面直近の中性子及びガンマ線の線量当量率を評価することを目的に、サーフェイスクロッシングエスティメータ（面タリー）を設定した。また、トラニオン近傍等は中性子ストリーミングの発生により比較的線量当量率の変化が大きいことを考慮し、遮蔽欠損部の大きさや線量当量率分布を基にストリーミングの最大線量当量率を適切に計算できる位置及び遮蔽欠損部程度の大きさとした。

容器表面から１ ｍ離れた位置評価では、評価位置に対して全方位からの中性子及びガンマ線の線量当量率を評価することを目的に、球形状のトラックレングスエスティメータ（体積タリー）を用いた。表面から１ ｍ離れた位置の線量当量率分布より十分に計算精度が得られる大きさとした。

[redacted]内は商業機密のため、非公開とします。

(3)統計指標

三次元モンテカルロコードMCNP5では、解析値に統計的な誤差を持つことから、解析値が解析精度として十分に信頼できるものとなっているか確認するため、別紙４に記載するMCNPで出力される平均値、相対誤差、Variance of the Variance、Figure of Merit及び確率密度分布関数に関する統計指標を満足しているか確認する。しかしながら、これらの統計指標の基準を全て満たすことは難しい場合もあり、その場合は容器周りの放射線挙動が物理的に正しいことを確認する。

5. 参考文献

(1) X-5 Monte Carlo Team, “MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5”, LA-UR-03-1987, (2003).

(2) Yuan Gao, Christopher R Hughes, Christopher R Greulich, James E Tulenko, Andreas Enqvist, James E Baciak, “Radiation Dose Rate Distributions of Spent Fuel Dry Casks Estimated with MAVRIC Based on Detailed Geometry and Continuous-Energy Models”, Annals of Nuclear Energy Volume 117, July 2018, Pages 84-97.

(3) （財）原子力発電技術機構,「平成14年度　リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等（金属キャスク貯蔵技術確証試験）報告書」, (2003).

(4)（財）原子力発電技術機構,「平成12年度　リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等（金属キャスク貯蔵技術確証試験）　報告書」, (2001).

遮蔽解析用中性子実効増倍率の設定について

中性子源強度は、体系の増倍効果を考慮して次式により、乾燥状態において使用済燃料集合体を収納した場合のキャスクの中性子実効増倍率を求め、中性子源強度に考慮した。

$N_S = N_0 / (1 - keff)$

ここで、

N_0　　：MSF-28P 型１基当たりの一次中性子源強度

keff　：使用済燃料集合体を収納した場合の MSF-28P 型の中性子実効増倍率

遮蔽解析用中性子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中性子実効増倍率を別紙２－１表に示す。中性子実効増倍率評価は、遮蔽解析の代表燃料である 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A型）を対象とした。

なお、中性子実効増倍率は、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。

アクチニド：^{235}U, ^{236}U, ^{238}U, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu

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

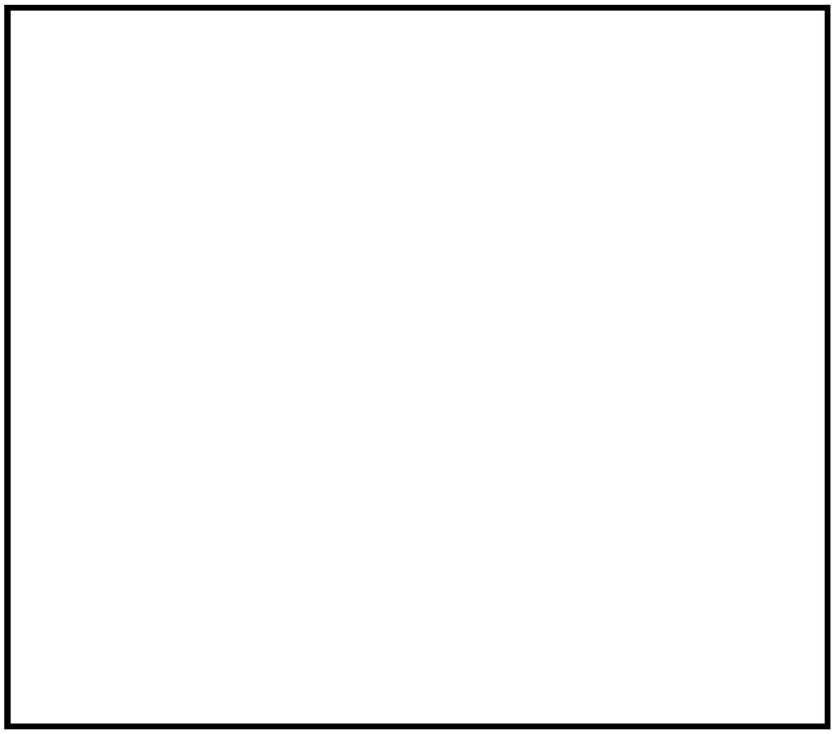
別紙２－１表　遮蔽解析用中性子実効増倍率評価条件及び評価結果

項目	17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A型）収納時
ウラン重量（kg/体）	[redacted]
初期濃縮度（wt%）	[redacted]
燃焼度	別紙２－１図に示す
比出力（MW/t）	[redacted]
冷却期間	別紙２－１図に示す
中性子実効増倍率 (注)	[redacted]
遮蔽解析用中性子実効増倍率	0.30

(注)中性子実効増倍率評価結果に統計誤差の３倍を加えた値。

(1)　（一社）日本原子力学会，「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準（AESJ-SC-F006:2013）」，(2014).

□内は商業機密のため、非公開とします。



	燃焼度（MWd/t）	冷却期間（年）
領域Ａ		
領域Ｂ		
領域Ｃ		

別紙２－１図　遮蔽解析に用いる中性子実効増倍率評価の燃焼度及び冷却期間設定

□内は商業機密のため、非公開とします。

別紙３

中性子源スペクトルを ^{239}Pu の核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性

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

使用済燃料からの主要な中性子源としては、以下の３つが挙げられる。

1. 一次中性子源である Cm の自発核分裂による中性子
2. 一次中性子源である（α，n）反応による中性子
3. 二次中性子源である核分裂反応により増倍される中性子

このうち、一次中性子源においては、別紙３－１図に示すとおり使用済燃料の場合、冷却期間が数十年までの間は自発核分裂による中性子が支配的である。MSF-28P 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、遮蔽解析の代表燃料である 17×17 燃料 48,000MWd/t 型（A型）について記載している。

別紙３－１表　中性子源強度

（MSF-28P 型１基当たり）

		燃料有効部			
		領域A	領域B	領域C	合計
一次中性子源強度 No (n/s)	(α,n) 反応	1.129×10^{8}	4.501×10^{7}	4.133×10^{7}	1.992×10^{8}
	自発核分裂	5.169×10^{9}	1.707×10^{9}	1.082×10^{9}	7.958×10^{9}
	合計	5.282×10^{9}	1.752×10^{9}	1.123×10^{9}	8.157×10^{9}

上記より、中性子源スペクトルの候補（主要な核分裂核種）は以下の３つとなる。

① Cm の自発核分裂反応

② ^{239}Pu の核分裂反応

③ ^{235}U の核分裂反応

ここで、Cm の自発核分裂、^{239}Pu 及び ^{235}U の核分裂による中性子源スペクトルの比較を別紙３－２図及び別紙３－３図に示す。

別紙３－２図に示すとおり、^{242}Cm、^{244}Cm の自発核分裂による中性子源スペクトルに対して ^{239}Pu の核分裂による中性子源スペクトルの方がより高エネルギー成分が多い。

また、別紙３－３図に示すとおり、^{235}U の核分裂による中性子源スペクトルに対しても ^{239}Pu

の核分裂による中性子源スペクトルの高エネルギー成分が多い。

したがって、中性子源スペクトルを ^{239}Pu の核分裂スペクトルで代表させる設定は保守側の設定であり妥当である。

（出典）

(1) L. B. Shappert, et al., “The Radioactive Materials Packaging Handbook”, ORNL/M-5003, Oak Ridge National Laboratory, 9-9, (1998).

(2) H.S.Bailey, R.N.Evatt, G.L.Gyorey, et al., “Neutron Shielding Problems in the Shielding of High Burnup Thermal Reactor Fuel”, Nuclear Technology, ANS, 17, 222, (1973).

(3) E.D.Arnold, R.G.Jaeger, et.al., “Engineering Compendium on Radiation Shielding”, Volume I Shielding Fundamentals and Methods, Springer-Verlag, Germany, 69 (1968).

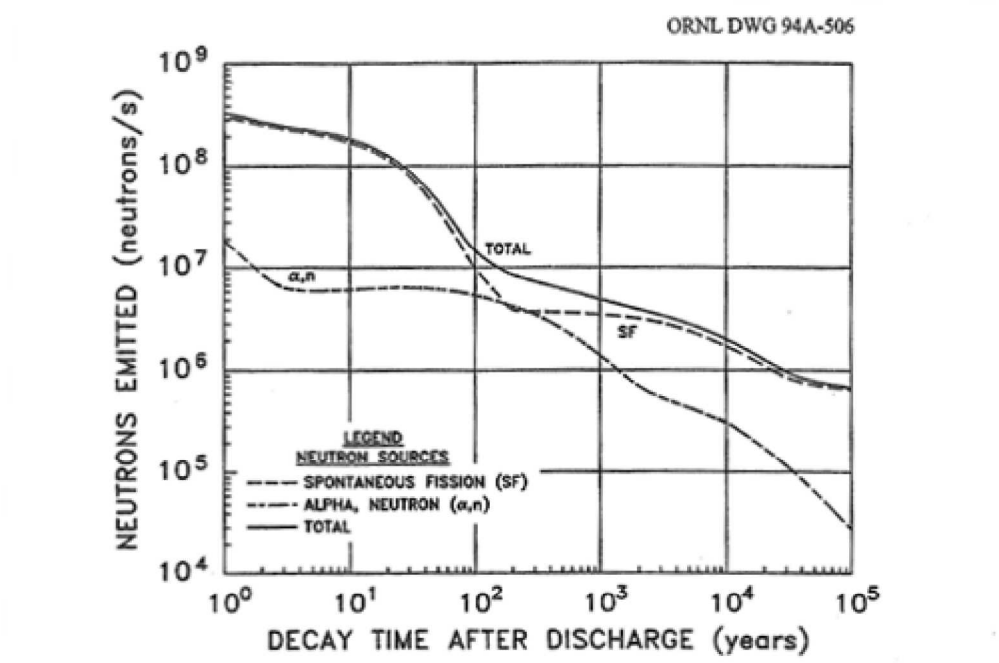


Fig. 9.2. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTIHM): PWR/33,000 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

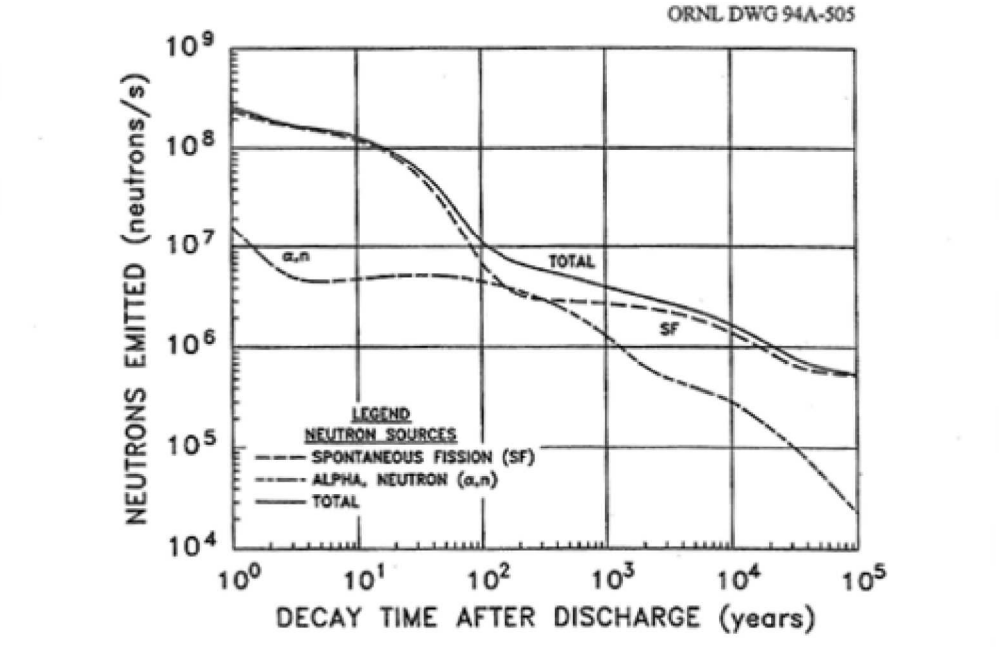
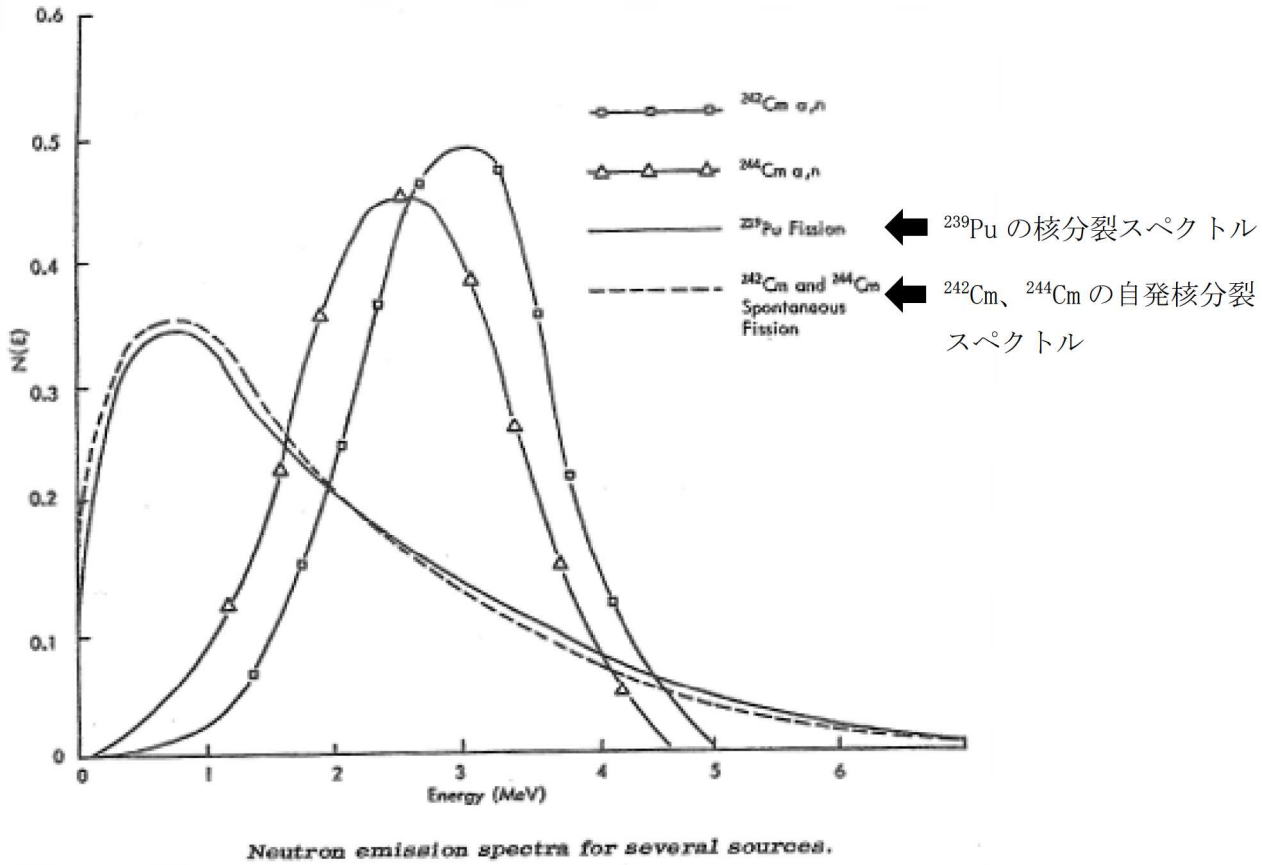


Fig. 9.3. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTIHM): BWR/27,500 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

別紙３－１図　自発核分裂及び（α，n）反応に伴う中性子源強度と冷却期間との関係(1)



別紙３－２図　^{239}Pu の核分裂、Cm の自発核分裂中性子源スペクトルの比較(2)

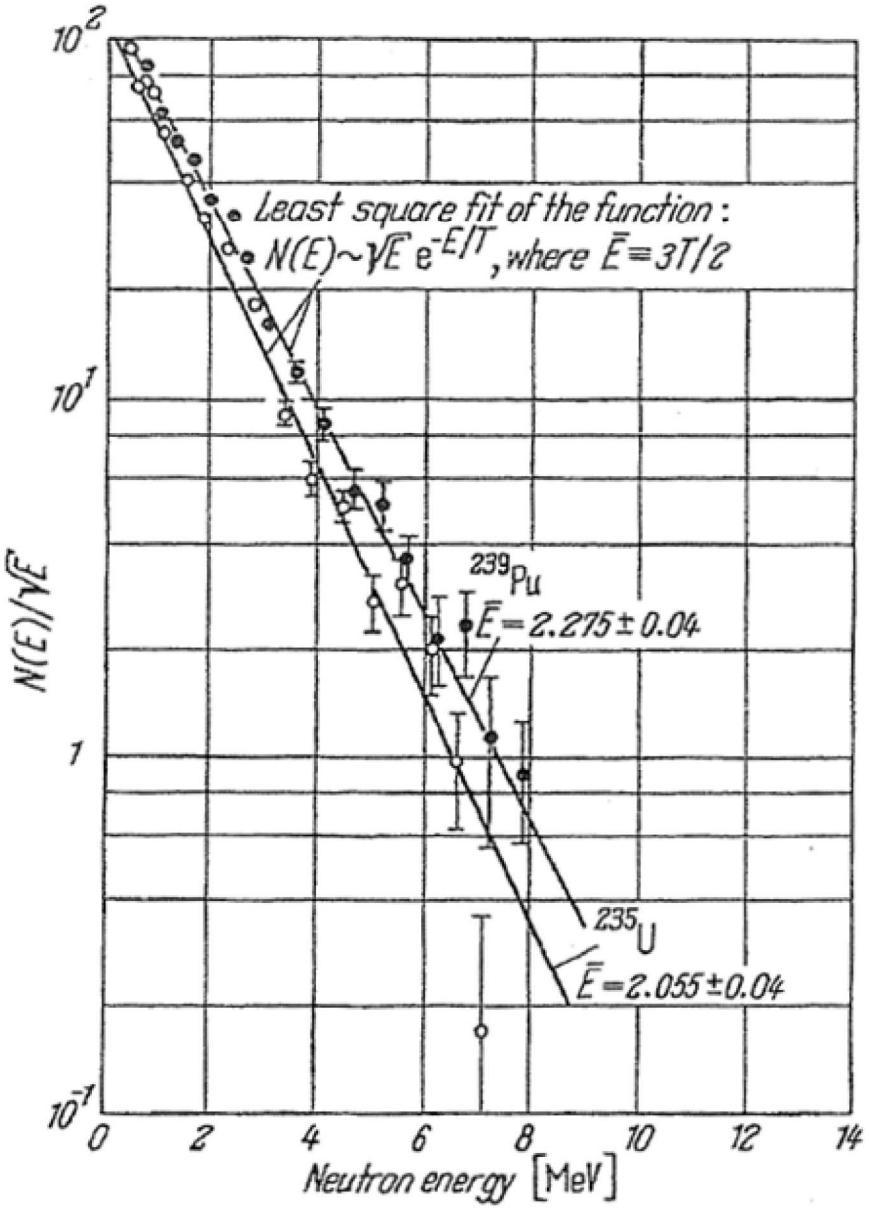


Fig. 2.3.–2. Typical measured fission neutron spectra of $^{235}U + n_{th}$ and $^{239}Pu + n_{th}$.

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)

別紙４

遮蔽解析結果の詳細

1. 線量当量率評価結果

三次元モンテカルロコード MCNP5 による遮蔽解析（以下「MCNP5 解析」という。）の結果については本文第２表及び第３表に示しているが、MCNP5 コードを用いた解析結果の「正確性」及び「計算精度」を確認する。「正確性」とは、MCNP5 解析が真の物理量にどれだけ近いかの尺度であるが、本文第 11 図及び第 12 図に示すベンチマーク文献により MCNP5 コードは MSF-28P 型と同様の体系での遮蔽解析は信頼性があることを確認している。「計算精度」とは、モンテカルロ計算結果に伴う統計の不確定性であり、「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」(1)（以下「モンテカルロガイドライン原案」という。）を参考に、別紙４－１表に示す 10 個の統計指標を用いて確認する。MSF-28P 型の MCNP5 解析の本統計指標項目に対する確認結果を別紙４－２表に示す。表中の「yes」は統計指標を満足すること、「no」は統計指標を満足しないことを意味し、統計指標の判定は、別紙４－１図の計算フローに従って MCNP5 解析が適切に行われていることの確認を行う。まず、10 個の統計指標のうち、統計的な精度を直接的に表わす指標である相対誤差（relative error(value)）を確認し、「no」がある場合は計算条件を再検討する。次いでその他の統計指標を確認し、満足していない項目がある場合、モンテカルロガイドライン原案において挙げられている計算精度が十分信頼できるものと判断するための確認方法より線量当量率分布が連続であることの確認、及び[redacted]を行う。また、[redacted]を行い、総合的な遮蔽解析結果の妥当性確認を行う。MSF-28P 型の MCNP5 解析では、相対誤差は全て「yes」、その他の統計指標において一部「no」となる項目があったことから別紙４－２図及び別紙４－３図より線量当量率分布の確認例を示す。線量当量率分布は連続的であり、MCNP5 コードによる計算が適切に行われていることが確認できる。ここで、線量当量率分布のいずれの評価点においても別紙４－１表の相対誤差の指標（10%以下）を満足しており、評価点周辺においても相対誤差の指標を満足していることを確認している。一部の線量当量率が低い部位（遮蔽材透過距離が長くキャスク外に放射線が到達しない部位）については相対誤差が他部位より若干高いが線量当量率は低く、相対誤差が高い点を勘案しても基準適合性には問題ない。

2. 参考文献

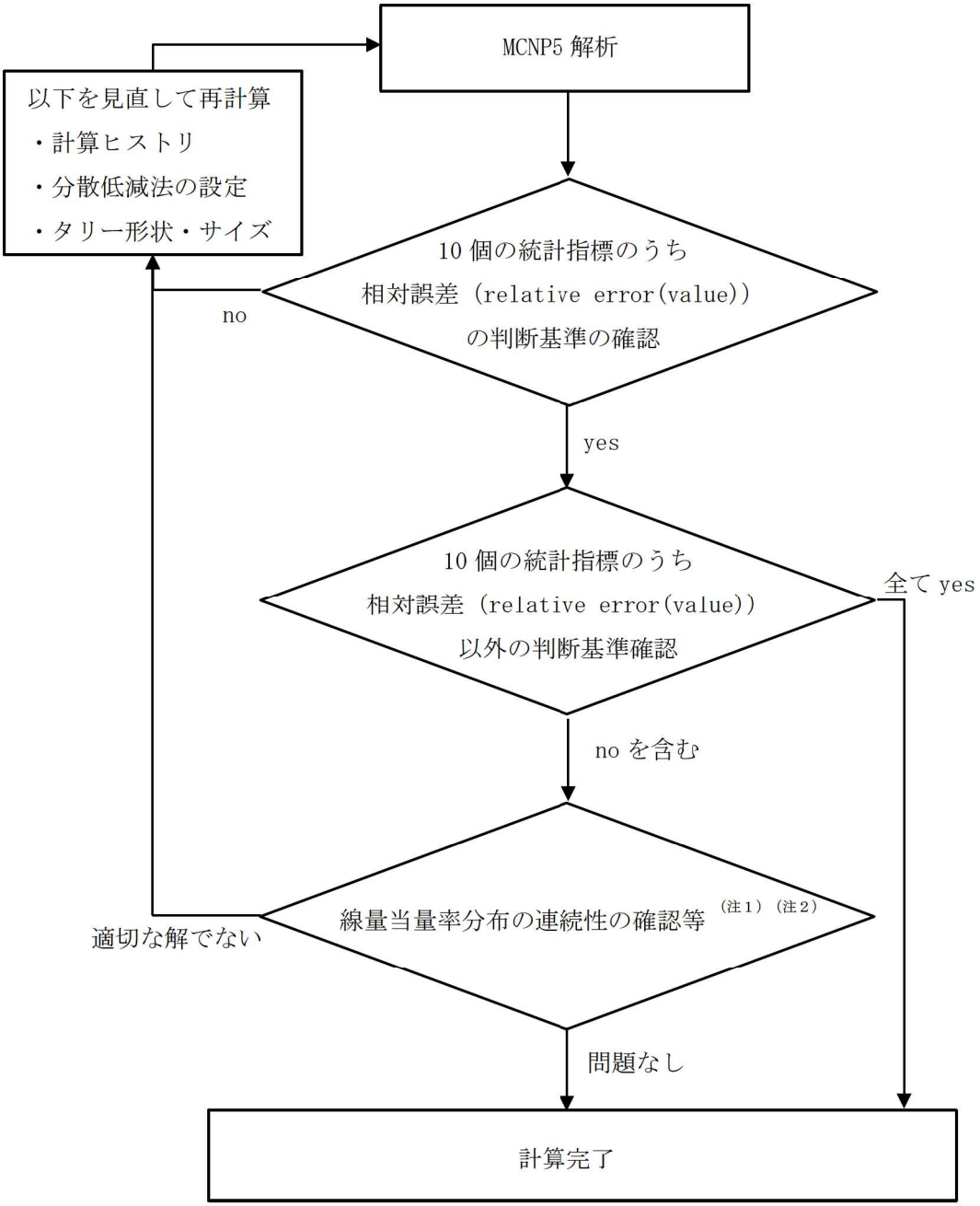
(1) 浅見光史, 平尾好弘, 澤田健一, 大西世紀, 近内亜紀子, 小田野直光, 「放射性物質輸送容器のモンテカルロ法による遮蔽安全評価手法ガイドライン原案の策定」, 海上技術安全研究所報告　第 13 巻　第 1 号（平成 25 年度）　研究調査資料, (2013).

別紙４－１表　統計指標項目(1)

統計指標の項目		統計指標の確認目的	統計指標
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	統計的な精度を表わす指標。	0.1より小さいこと。(＜ 0.10)
	decrease		計算収束判定段階において、発生粒子数Ｎの増加に伴い、valueが単調に減少すること。(yes)
	decrease rate		計算収束判定段階において、valueが$1/\sqrt{N}$で減少すること。(1/sqrt(nps))
variance of the variance	value	相対誤差の確度を表わす指標。	0.1より小さいこと。(＜ 0.10)
	decrease		計算収束判定段階において、valueが単調に減少すること。(yes)
	decrease rate		計算収束判定段階において、valueが1/Nで減少すること。(1/nps)
figure of merit	value	タリーの信頼性を表わす指標。	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より大きいこと。(＞ 3.00)

別紙４－２表　解析結果の信頼性を示す 10 個の統計指標結果

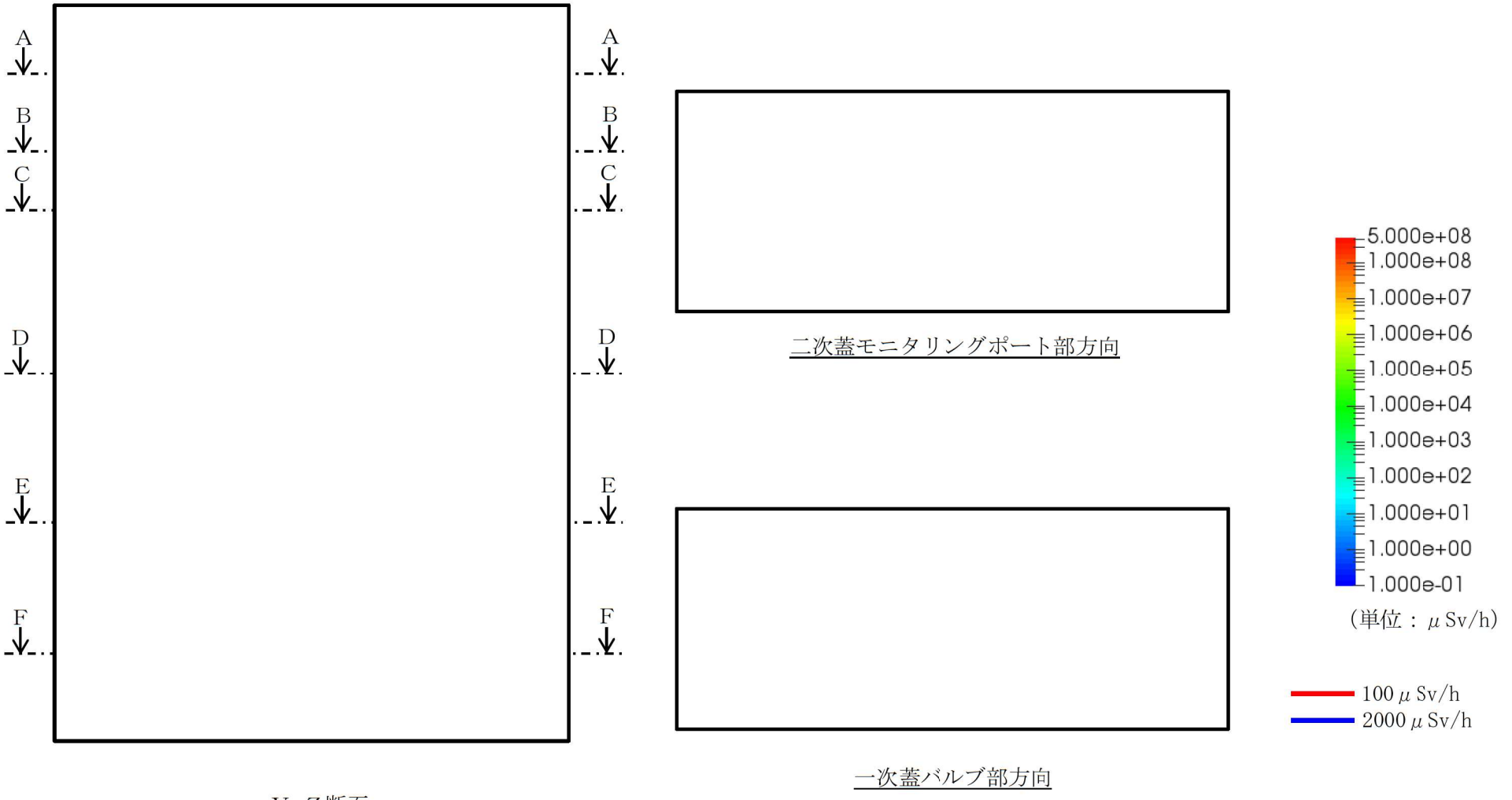
統計指標の項目		表面で最大となる評価点⑦				表面から１ｍ離れた位置で最大となる評価点⑥				desired
		燃料 有効部 ガンマ線	構造材 放射化 ガンマ線	二次 ガンマ線	中性子	燃料 有効部 ガンマ線	構造材 放射化 ガンマ線	二次 ガンマ線	中性子	
mean										random
relative error	value									＜ 0.10
	decrease									yes
	decrease rate									1/sqrt(nps)
variance of the variance	value									＜ 0.10
	decrease									yes
	decrease rate									1/nps
figure of merit	value									constant
	behavior									random
pdf										＞ 3.00



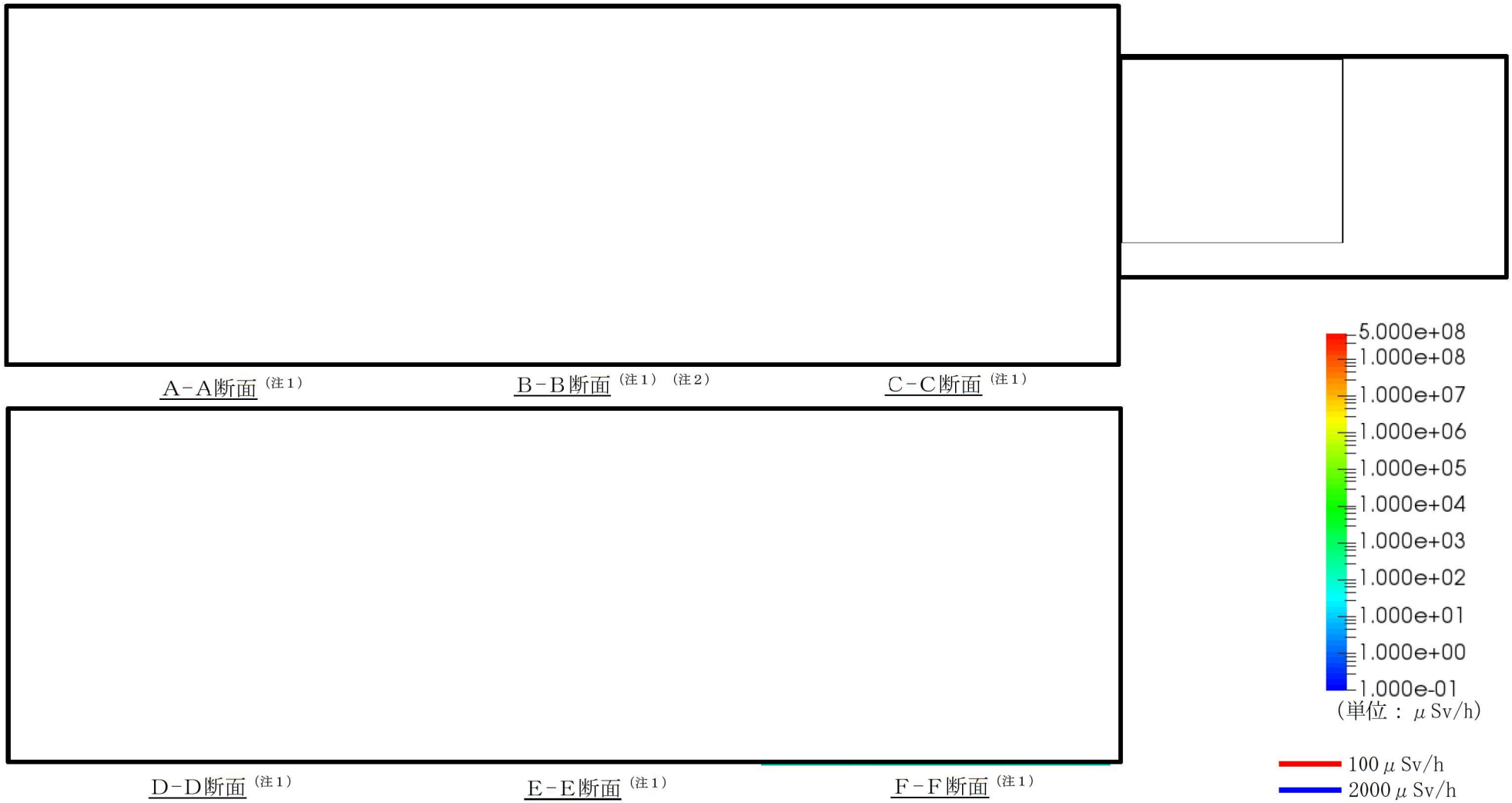
（注１）　モンテカルロガイドライン原案において挙げられている確認方法より線量当量率分布が連続であることの確認を行う。

（注２）　線量当量率分布の連続性の確認の他に、[redacted]を行う。

別紙４－１図　MCNP5 解析フロー



別紙４－２図　線量当量率分布（全線源）



（注３）　断面位置は別紙４－２図参照

（注４）　バルブの遮蔽材欠損により非対称分布を示す。別紙４－２図のとおりＢ－Ｂ断面は、中性子遮蔽材のない外周部および燃料中心部鉛直方向の線量が高い。

別紙４－３図　線量当量率分布（全線源）

別紙５

遮蔽機能データの適用確認方法

設置許可基準規則第 29 条及び第 30 条の遮蔽評価に用いるソースターム条件として、MSF-28P 型の遮蔽機能データを用いる場合は、型式証明申請第 16 条の適合性評価と同じ手法で求めた線束を用いるものとする（※ MSF-28P 型の遮蔽機能データの作成方法については、本型式証明申請第 16 条で妥当性確認済）。

設置（変更）許可申請時に実施する第 29 条及び第 30 条の遮蔽評価では、MSF-28P 型の遮蔽機能データを用いた場合、特定兼用キャスク表面での遮蔽機能データに基づく線量当量率が表面以外でも適切に設定されていることの確認方法の一例として、別紙５－１図に示す特定兼用キャスク表面から１ m 離れた位置の代表評価点（５点）における遮蔽機能データを用いて計算した線量当量率が、第 16 条の遮蔽評価結果（別紙５－１表）と同等＊となることを確認する方法が挙げられる。別紙５－２図に遮蔽機能データの確認例のイメージを示す。

＊

この場合、遮蔽機能データとの差異（線量当量率比）を設置（変更）許可申請における線量解析値に加味する（解析値に線量当量率比を考慮する）等で妥当な引き継ぎとする。

□内は商業機密のため、非公開とします。

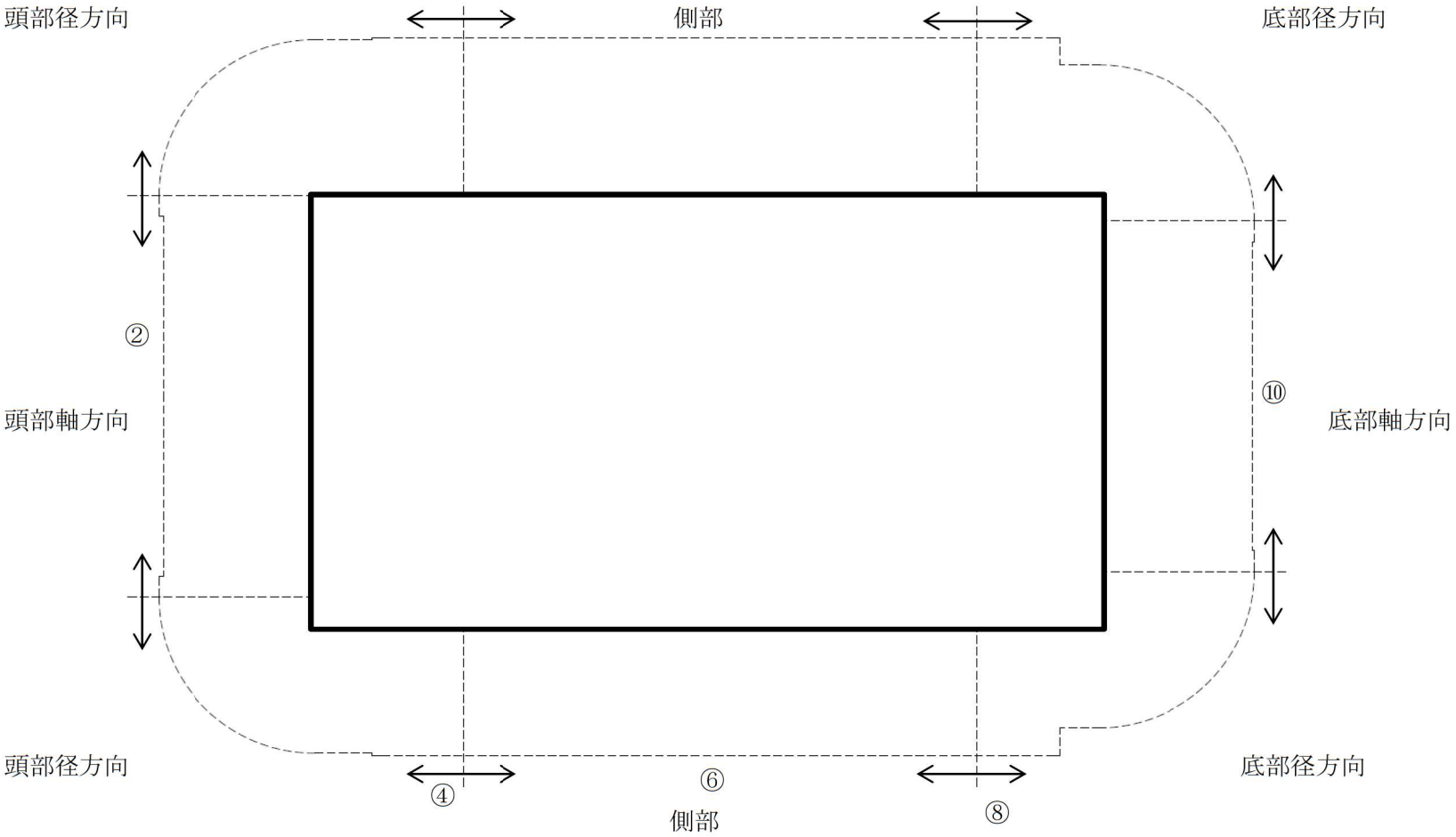
別紙５－１表　特定兼用キャスクの表面から１ ｍ離れた位置における代表評価点の線量当量率

（単位：μSv/h）

評価点			頭部		側部	底部	
			軸方向	径方向		径方向	軸方向
			②	④	⑥	⑧	⑩
表面から１ｍ	ガンマ線	燃料有効部	0.2 (0.6)	19.0 (0.2)	45.8 (0.2)	20.7 (0.2)	2.5 (0.3)
		構造材放射化	0.7 (0.2)	9.5 (0.3)	8.8 (0.2)	6.3 (0.3)	16.0 (0.1)
		二次ガンマ線	0.4 (1.0)	5.4 (0.5)	8.9 (0.4)	5.4 (0.5)	2.9 (0.5)
	中性子		51.2 (0.5)	39.8 (0.6)	22.6 (0.2)	38.6 (0.7)	12.7 (0.3)
	合計		52.5	73.7	86.1	71.0	34.1

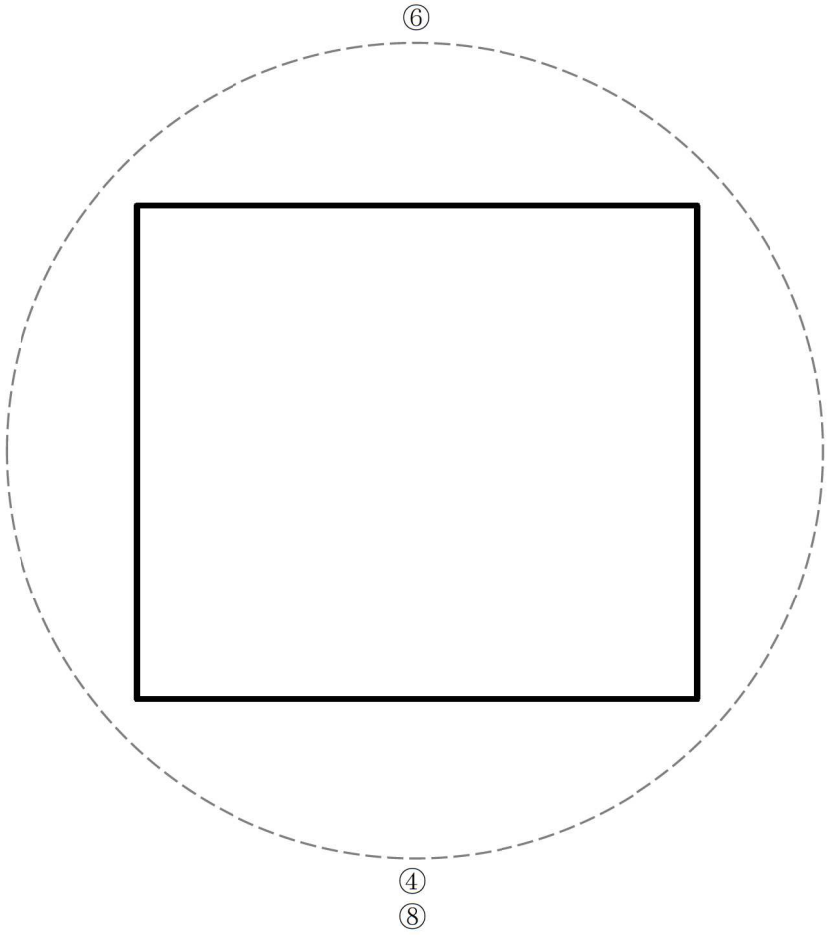
※（　　）内は統計誤差（単位：%）を示す。

本文第３表に示す表面から１ ｍ離れた位置における線量当量率の評価結果と同じ



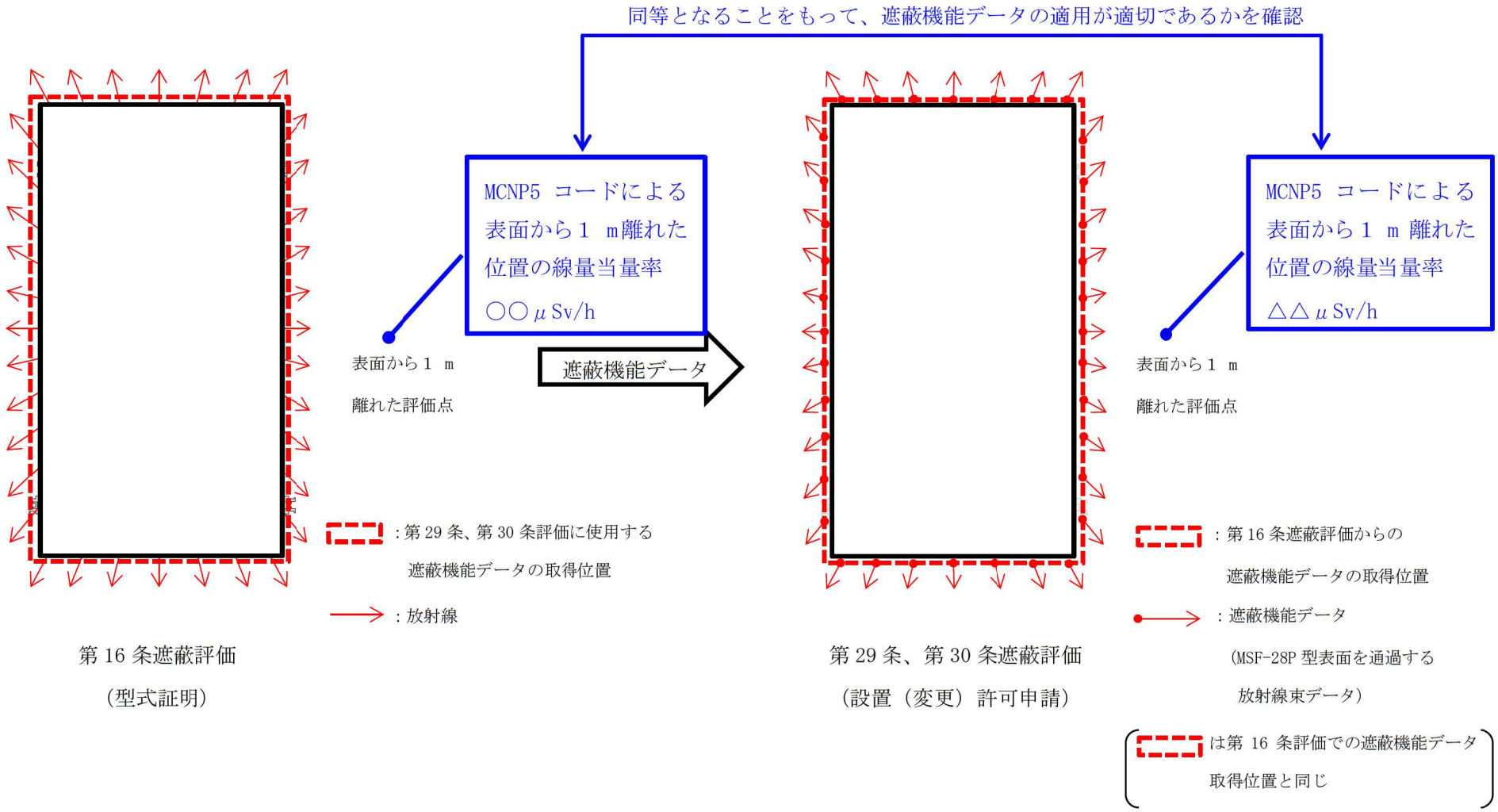
（注）②、④、⑥、⑧、⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。
モニタリングポート部、バルブ部、トラニオン部を同一断面に図示している。

別紙５－１図（１／２）　特定兼用キャスクの表面から１ ｍ離れた位置における代表評価点（たて断面）



（注）④、⑥、⑧の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

別紙５－１図（２／２）　特定兼用キャスクの表面から１ ｍ離れた位置における代表評価点（水平断面）



別紙５－２図　遮蔽機能データ確認イメージ