

補足説明資料 16-3

第十六条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

遮蔽機能に関する説明資料

目 次

1	要求事項	3
2	要求事項への適合性	6
3	参考文献	46
別紙 1	使用する解析コード	47
別紙 2	遮蔽解析の検証	51
別紙 3	統計指標による高度な統計的手段	56

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、以下の通りである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則 第十六条第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3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、以下の様に記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽機能を有すること。
- (2) 通常貯蔵時の兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を 100 μ Sv/h 以下とすること。
- (3) 通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で 50 μ Sv/y 以下となることを目標に、線量限度(1mSv/y)を十分下回る水準とすること。
- (4) 貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、工場等周辺の実効線量が線量限度(1mSv/y)を超えないこと。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ遮蔽設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

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

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

- a. 兼用キャスクからの線量当量率は、兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、及び1)で求めた放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリ(以下「遮蔽解析コード等」と総称する。)を使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の兼用キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。
- b. 兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を 100 μ Sv/h 以下とすること。

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

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

② ソースターム

兼用キャスクの遮蔽機能データ又は兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率が 100 μ Sv/h となるよう放射線源強度を規格化したものを用いること。ここで、放射線源強度を規格化して用いる場合は、中性子 100%又はガンマ線 100%のいずれか保守

的な線量評価とすること。また、中性子及びガンマ線の表面エネルギースペクトルは、保守的な線量評価となるものを使用すること。

③ 遮蔽解析コード等

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

④ 通常貯蔵時の線量

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

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

4) 応急復旧

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

』

2 要求事項への適合性

(1) 設置許可基準規則への適合性

CASTOR® geo26JP 型の遮蔽機能については、以下の通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 第十六条第 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 3 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。

CASTOR® geo26JP 型は、使用済燃料集合体からの放射線を効果的に遮蔽するため、特定兼用キャスク本体及び蓋部に、ガンマ線遮蔽材として球状黒鉛鋳鉄及びステンレス鋼を、主な中性子遮蔽材としてポリエチレンを用いた設計である。燃料集合体の放射化部分からのガンマ線遮蔽のためにバスケットの一部にステンレス鋼を、ボアホール(中性子遮蔽棒が挿入されるキャスク胴内に空けられた穴の中)の下部に遮蔽棒(炭素鋼)を用いる。

CASTOR[®] geo26JP 型は、特定兼用キャスク表面線量当量率が 2 mSv/h 以下、かつ表面から 1 m 離れた位置における線量当量率が 100 μSv/h 以下とする。

遮蔽解析では、使用済燃料集合体を含む CASTOR[®] geo26JP 型の 3 次元形状をモデル化する。解析コードには三次元モンテカルロコードである MCNP6 [1] を用いる。放射線源強度は ORIGEN-2.2 コード (PWR U50) [2] を使用して求める。

なお、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、当該貯蔵建屋の損壊による工場等周辺の実効線量当量率への影響、及び貯蔵事業許可基準解釈第 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)とする。

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。

CASTOR[®] geo26JP 型の設計貯蔵期間は 60 年間とする。

補足説明資料「第 4～6 条及び 16 条に関する説明資料 (1024-TR-00005)」に示すとおり、キャスクの構成部材は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および構造とする。

(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、CASTOR[®] geo26JP 型の遮蔽機能については、以下の通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 mSv/h 以下とし、かつ、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を 100 μ Sv/h 以下とすること。

CASTOR[®] geo26JP 型の遮蔽評価フローを図 1 に示す。

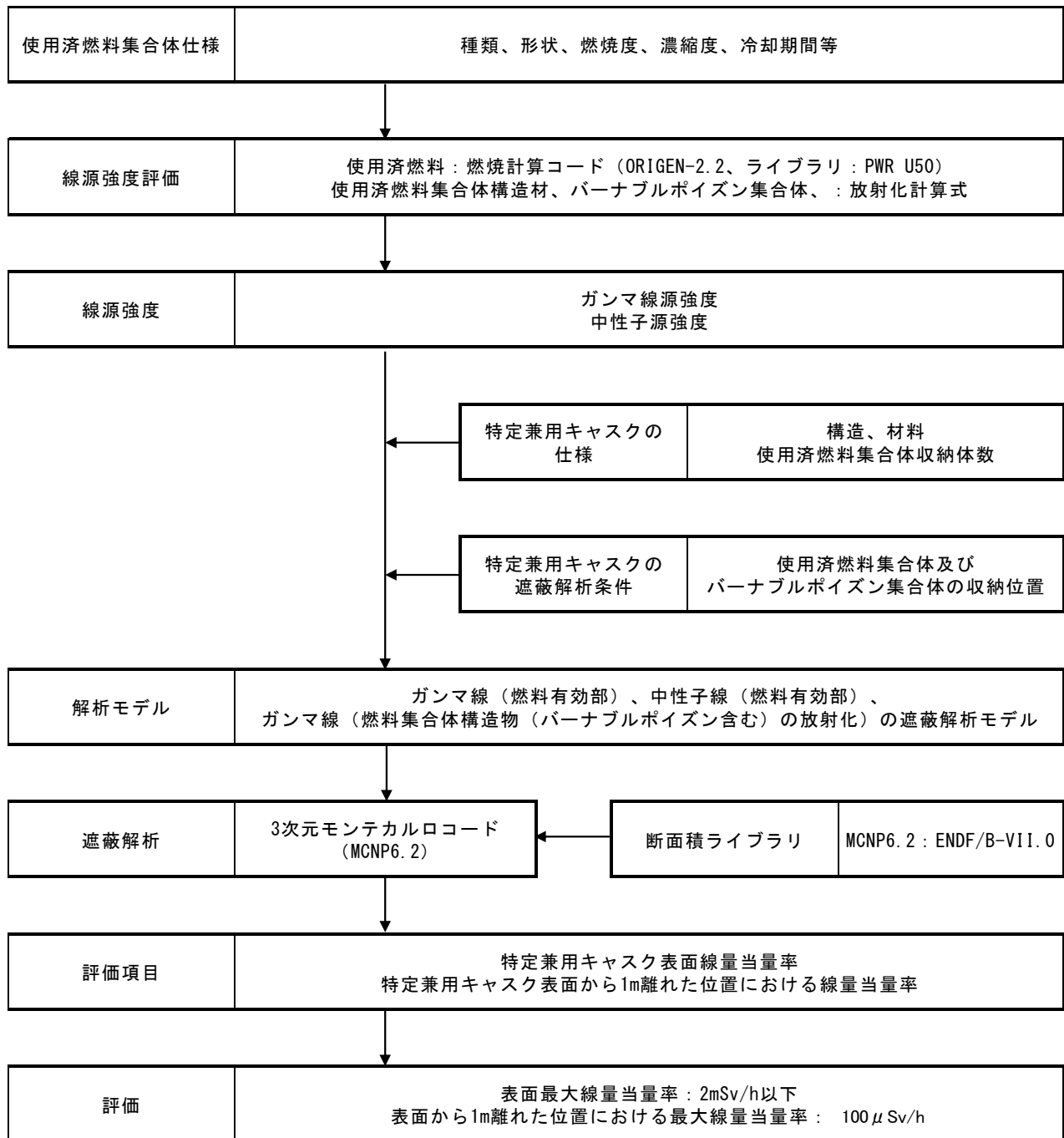


図1 遮蔽評価フロー

(3) 使用済燃料の放射線源強度評価方法

使用済燃料の放射線源強度は、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間から燃焼計算コード ORIGEN-2.2 (PWR U50) を使用して求める。放射化計算は Co-59 の一般的な放射化計算式によって計算する。なお、このコードは別紙1に示すとおり検証され、適用性が確認されている。表 1 に燃焼計算及び放射化計算の条件を示す。

表 1 放射線源強度評価条件

項目	単位	15x15 燃料			17x17 燃料	
		A	A	B	A	B
種類	-	A	A	B	A	B
燃料材質	-	二酸化ウラン				
燃料集合体当たりの燃料棒数	-	204			264	
最高燃焼度	MWd/t	39,000	48,000		48,000	
濃縮度	wt-%					
冷却期間	-	図 2 に示す通り				
軸方向燃焼度分布	-	図 3 に示す通り				
Co-59 含有量(上部ノズル)	g					
Co-59 含有量(プレナム)	g					
Co-59 含有量(燃料有効部)	g					
Co-59 含有量(下部ノズル+下部プレナム)	g					

燃料濃縮度は濃縮度の下限値である。これらの 5 つの燃料は、全体として最大の線源強度をもたらす。15x15 燃料タイプ B 型燃料には %未満、17x17 燃料には %未満の濃縮度の燃料は存在するが、これらの濃縮度の低い燃料は 39,000 MWd/t 以下の燃焼度であるため線源強度は低い。また、15x15 タイプ A 型燃料は、%の最小濃縮度を有し、これは比較的高い線源強度をもたらすので、これを考慮した。提示した燃料集合体以外で、初期濃縮度が低い燃料集合体は、炉心への初期装荷分で、より長い冷却期間を有するため線源強度は低く、本検討評価においては考慮されない。

表 1 に示す使用済燃料集合体について、燃焼状態の計算を行い、計算結果を表 2～表 10 に示す。

表 2 燃焼度 44,000 MWd/t の放射線源強度評価結果(17x17 燃料集合体タイプ A 型) (1/4)

--

表 3 燃焼度 48,000 MWd/t の放射線源強度評価結果(17x17 燃料集合体タイプ A 型) (2/4)

--

表 4 燃焼度 44,000 MWd/t の放射線源強度評価結果(17x17 燃料集合体タイプB型) (3/4)

--

表 5 燃焼度 48,000 MWd/t の放射線源強度評価結果(17x17 燃料集合体タイプB型) (4/4)

--

表 6 燃焼度 39,000 MWd/t の放射線源強度評価結果(15x15 燃料集合体タイプ A 型) (1/5)

--

表 7 燃焼度 44,000 MWd/t の放射線源強度評価結果(15x15 燃料集合体タイプ A 型) (2/5)

--

表 8 燃焼度 48,000 MWd/t の放射線源強度評価結果(15x15 燃料集合体タイプ A 型) (3/5)

--

表 9 燃焼度 44,000 MWd/t の放射線源強度評価結果(15x15 燃料集合体タイプB型) (4/5)

--

表 10 燃焼度 48,000 MWd/t の放射線源強度評価結果(15x15 燃料集合体タイプB型) (5/5)

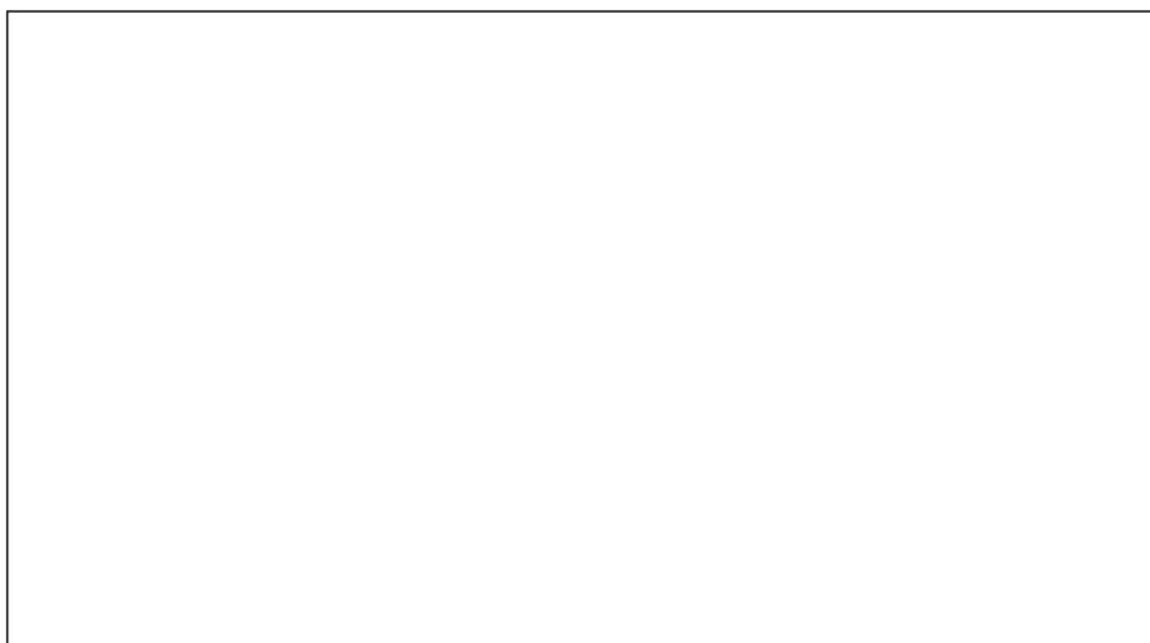
--

(4) 特定兼用キャスクの線量当量率評価方法

ORIGEN コードの計算から得られるこれらの使用済燃料のガンマ線源は幅広いスペクトルを有している。大部分は低エネルギー範囲であり、本特定兼用キャスクのようにガンマ線遮蔽体が厚い場合は外部の線量当量率に寄与せず、また、高エネルギー側は線源強度が小さいため線量当量率への寄与は小さい。このため、低エネルギー側及び高エネルギー側を除外した 7 つのエネルギー群を MCNP コードに与える。これらの線量当量評価の妥当性は、別紙 2 に示すように CASTOR 型キャスクの実測値との比較により検証されている。各グループのエネルギー範囲は表 2～表 10 に示す。なお、中性子線については、自発核分裂の中性子及び(α, n)反応の中性子に対し、それぞれ連続スペクトルを与えている。

CASTOR[®] geo26JP 型では型式証明申請書に記載の通り配置 (i) 及び (ii) を設定するとともに、その燃料配置について、仕様別に 5 つのグループ分けを行っている(図 2 参照)。

なお、17×17 燃料と 15×15 燃料は混載されないが、48,000MWd/t 型及び 44,000MWd/t 型、並びに A 型及び B 型は混載可能である。



	配置 (i)		配置 (ii)	
	17×17 燃料 15×15 燃料		17×17 燃料 15×15 燃料	
	燃焼度 (MWd/t 以下)	冷却期間 (年以上)	燃焼度 (MWd/t 以下)	冷却期間 (年以上)
A	48,000	16	48,000	16
B	39,000/44,000	22	48,000	30
C	39,000/44,000	39	48,000	30
D	39,000/44,000	12	48,000	24
E	39,000/44,000	16	48,000	29

※ 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できる。

図 2 使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の収納位置条件

ここで、評価する使用済燃料集合体からの主要な放射線源を以下に示す。

- 中性子：燃料中の自発核分裂中性子及び(α, n)反応による中性子、実効増倍率によるこれらの増倍、並びに(γ, n)反応から発生する二次中性子
- ガンマ線：
、並びに中性子捕獲による二次ガンマ線
- 構造物放射化ガンマ線：燃料集合体の端部構造物(上部ノズル、下部ノズル、プレナムスプリング)の放射化に伴うガンマ線。なお、構造物中のCo-59濃度は表1のとおりである。(放射化で生成する核種はいくつかあるが、Co-59の放射化によるCo-60で代表させる。)
- バーナブルポイズン集合体の放射化ガンマ線：バスケットの中央部(図2の赤い枠内)において考慮している。

これらの放射線源について、燃料集合体の軸方向燃焼度分布として図3に示す分布を考慮する。

遮蔽計算では、他の燃料集合体による放射線の自己遮蔽を考慮している。なお、遮蔽性能は、外側に装荷された燃料集合体で規定される。

バーナブルポイズン集合体は線源としてのみ統合し、その形状はモデル化せず、その遮蔽性能は考慮しない。

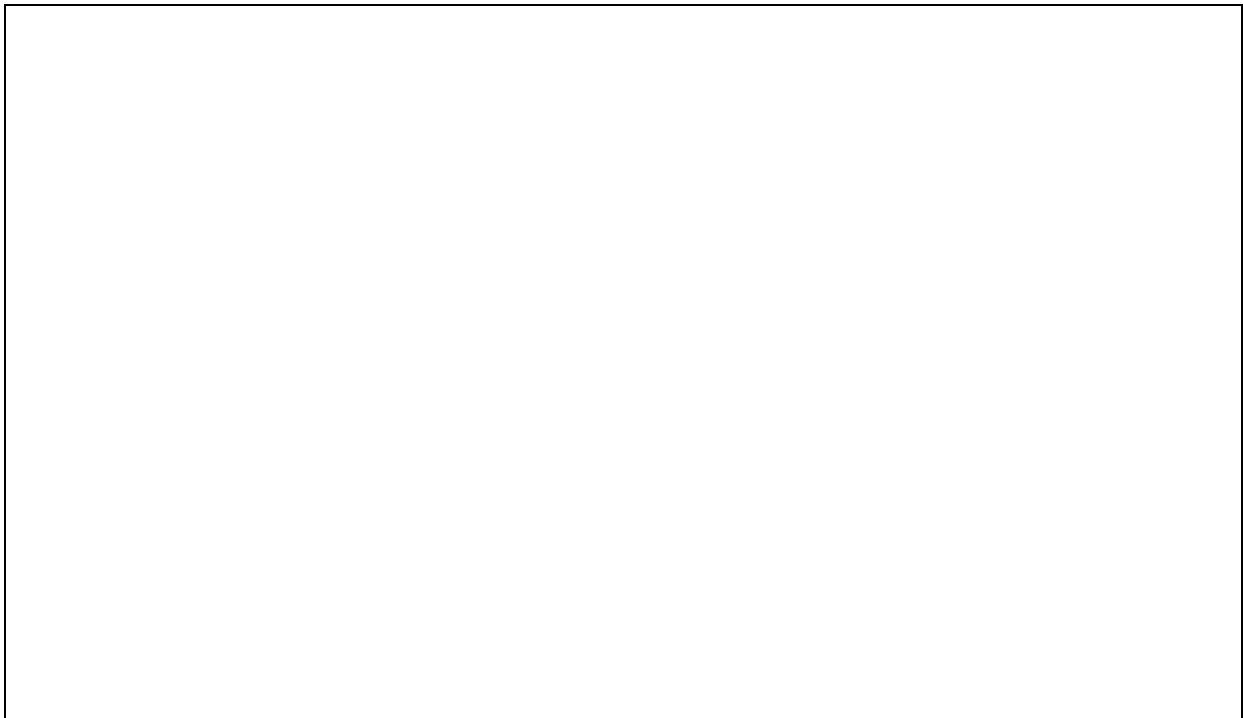


図 3 軸方向燃焼度分布

(5) 遮蔽解析モデル

特定兼用キャスクの遮蔽機能の評価では、キャスク形状を詳細にモデル化し、遮蔽解析は MCNP6 コードと適切な断面積ライブラリ (ENDF/B-VII.0) を用いて実施する。

MCNP は、妥当な計算時間で中性子及びガンマ線の線量当量率値を得るために、種々の分散低減技術を用いる。ここに示す解析は、ロシアンルーレットとセル(空間)ごとのインポートランス(重要度)を有するジオメトリ分割方法を組み合わせて実行される。セルごとの重要度は、そのセルを通過する中性子及びガンマ線の密度に基づいて、評価するセルの粒子の衝突数がほぼ一定に維持されるように設定される。この方法は、最もわかりやすく、そのセルを通過する中性子及びガンマ線の密度に応じたセルの重要度を与えることができるので、問題がゆがめられることはない。

図 4(a)は中性子遮蔽体(棒状)付近の中性子束分布を示しており、赤色は中性子束分布が高いこと、青色は低いことを表している。

図 4 (a)に示すように 1 列目の個々の中性子遮蔽体の間を通る中性子は、2 列目の **中性子遮蔽体(棒状)** によって効果的に減速されることが減少することが分かる。キャスク壁胴部の外側境界に向かって、2種類の直径を備えた中性子遮蔽体の 2 列の組み合わせから生じる中性子束の滑らかな分布の変化が観察され、中性子束分布の計算方法は妥当である。

図 4 (b)は図 4 (a)の中性子束分布の統計誤差であり、中性子遮蔽体内部およびその外側の球状黒鉛鋳鉄部分を含めて統計誤差は 5%以下である。中性子束分布と統計誤差分布から低減技術でのセルごとの重要度の設定は妥当であることが確認されたである。

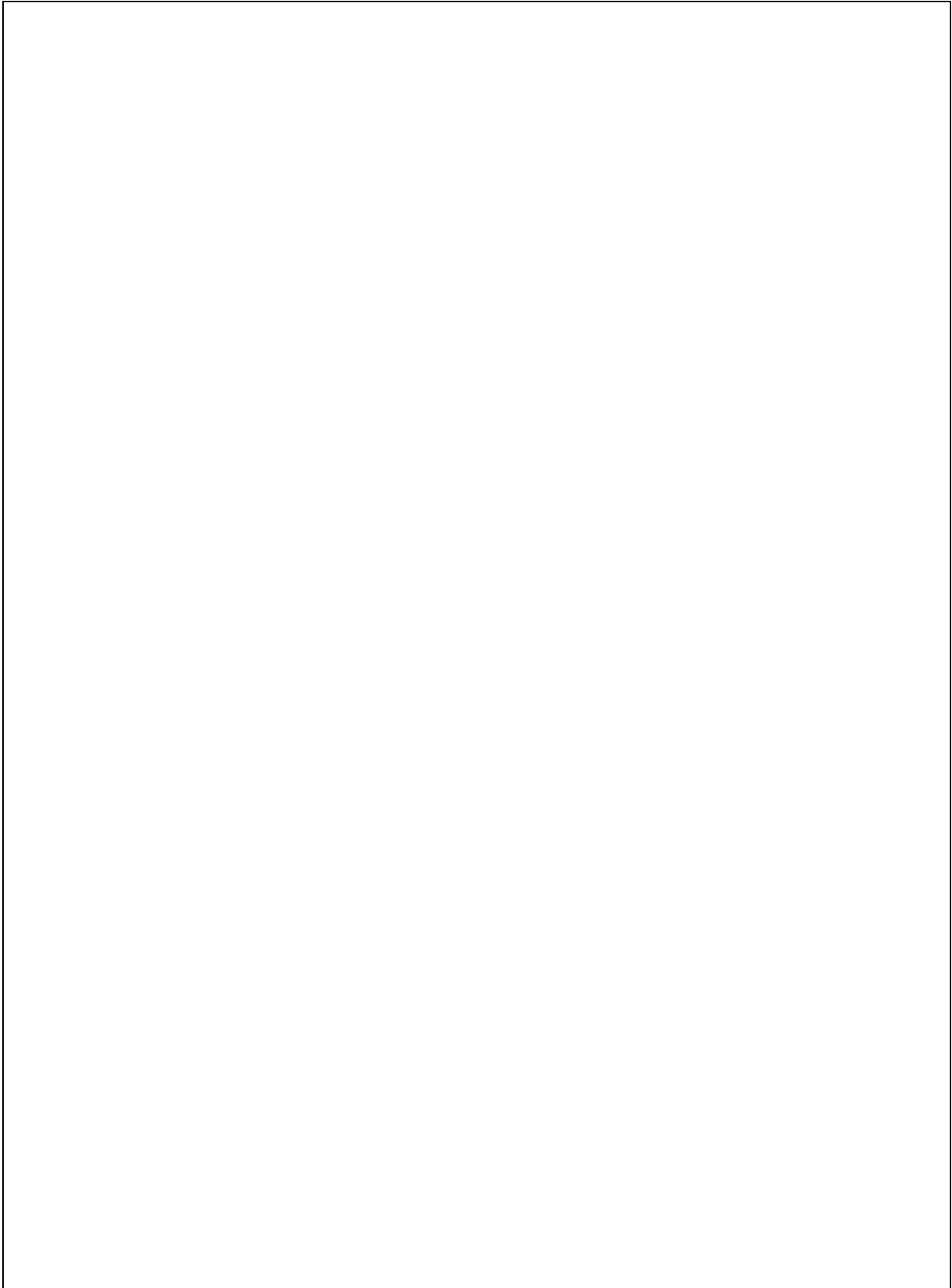


図 4 中性子遮蔽体(棒状)付近の中性子束分布と統計誤差分布

中性子及びガンマ線の線量当量率は、3次元空間におけるキャスクを囲む各メッシュごとの検出器によって与えられる(図5参照)。したがって、放射線を見逃すことはなく、認識されずに通過することはない。メッシュの内、幾つかについて、**計算結果の信頼度を確認するため**、体積検出器を設定する。体積検出器は、例えば、燃料ペレットの中央、トラニオンの周り、蓋の上などの、キャスク周りの重要な位置で、線量当量率分布の特殊性が予想される場所に配置される。体積検出器は、**結果計算結果の統計的挙動を確認するため、不確実性など10個の統計的チェックなどの統計指標による**高度な統計的手段が利用可能である。**統計指標の詳細を別紙3に示す**。主要な円筒メッシュに与えられる検出器は、自由な形状と大きさのセルで構成される。セルの大きさは、統計的変動と最大値を十分な精度で特定するために必要な大きさを与える。キャスクの胴体側には、10 cm x 5° (高さ x 周辺角度)のセルが設定されている。これらのセルの厚さはキャスクの近傍では、1 cm で、離れると 2 cm まで大きくなる。計算時間は、すべてのメッシュセルの統計誤差が 2%未満になるように調整される。また、体積検出器およびこの位置における対応するメッシュセルでの線量当量率が一致することが確認される。



図5 遮蔽解析モデルにおける円筒形メッシュ

特定兼用キャスク表面及び表面から 1m の位置での線量当量率を示す。そのうちの最大値を示す場所での体積検出器により、10 個の統計指標が、確認される。なお、このコードは別紙 2 に示すとおり検証され、適用性が確認されている。なお、補足説明資料「長期健全性に係る説明書(1024-TR-00011)」に示す通り、CASTOR[®] geo26JP 型の設計温度では水素は**の設計貯蔵期間中の減少しないため**は 1×10^{-3} 以下であることを考慮すると、設計貯蔵期間中の遮蔽材料の劣化による遮蔽機能の低下はない遮蔽性能は維持される。

表 11 に遮蔽解析条件を示す。保守的に、燃料有効長は最大でありとし、自己遮蔽効果を小さくするよう燃料密度を最小に設定した。

表 11 遮蔽解析条件 ^(注1)

項目	単位	15x15 燃料		17x17 燃料	
		A	B	A	B
種類	-	A	B	A	B
燃料材質	-	二酸化ウラン			
燃料密度	g/cm ³	[]			
ペレット直径	mm				
燃料棒外径	mm				
燃料有効長 ^(注1)	mm				
燃料集合体当たりの燃料棒数	-	204		264	
軸方向燃焼度分布	-	図 3 に示す通り			
燃料棒ピッチ	mm	[]		[]	
最高燃焼度	MWd/t	[]		[]	

(注1) 「燃料有効長」とは、燃料ペレットの領域長さ又は燃焼領域の長さ、を意味する。

(注2) 最高燃焼度 48,000 MWd/t は、線源決定に使われ、[] MWd/t は、最大の中性子実効増倍係数となる核種組成決定に使われる。

図 6、図 7 に遮蔽解析モデルの縦断面図を、図 8 に遮蔽解析モデルの横断面図(1/4 カット)を示す。

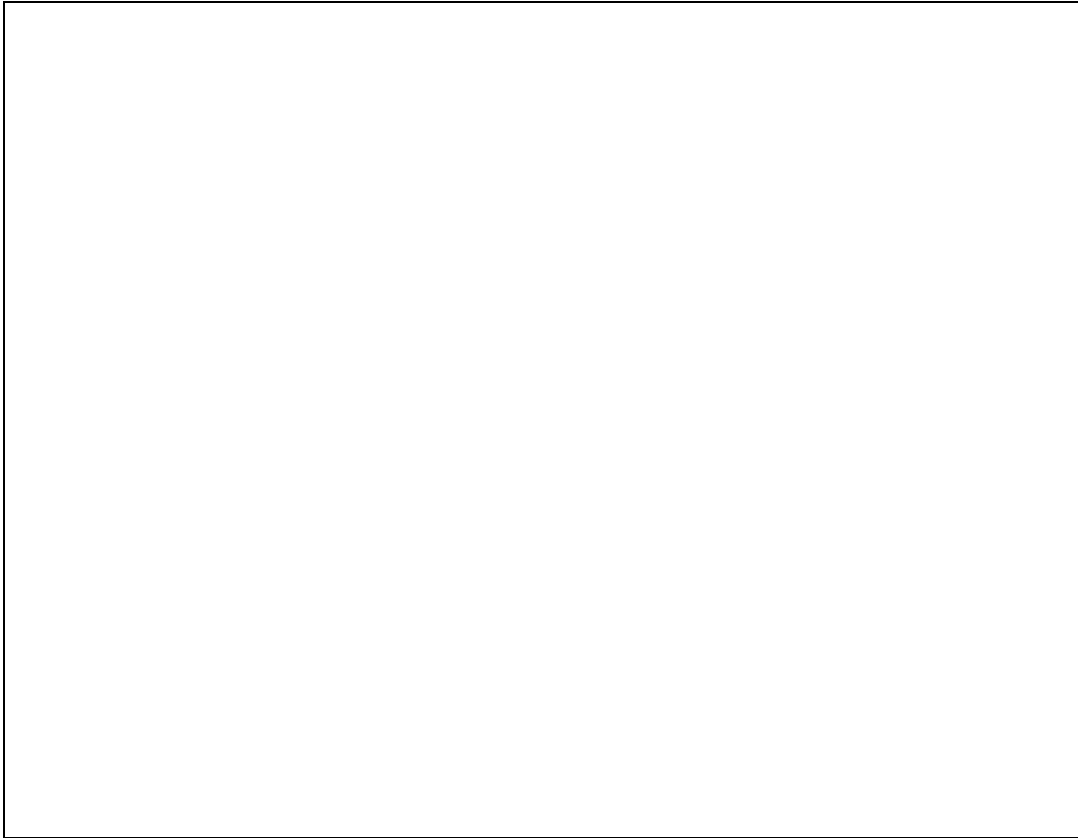


図 6 キヤスク遮蔽解析モデルの縦断面図

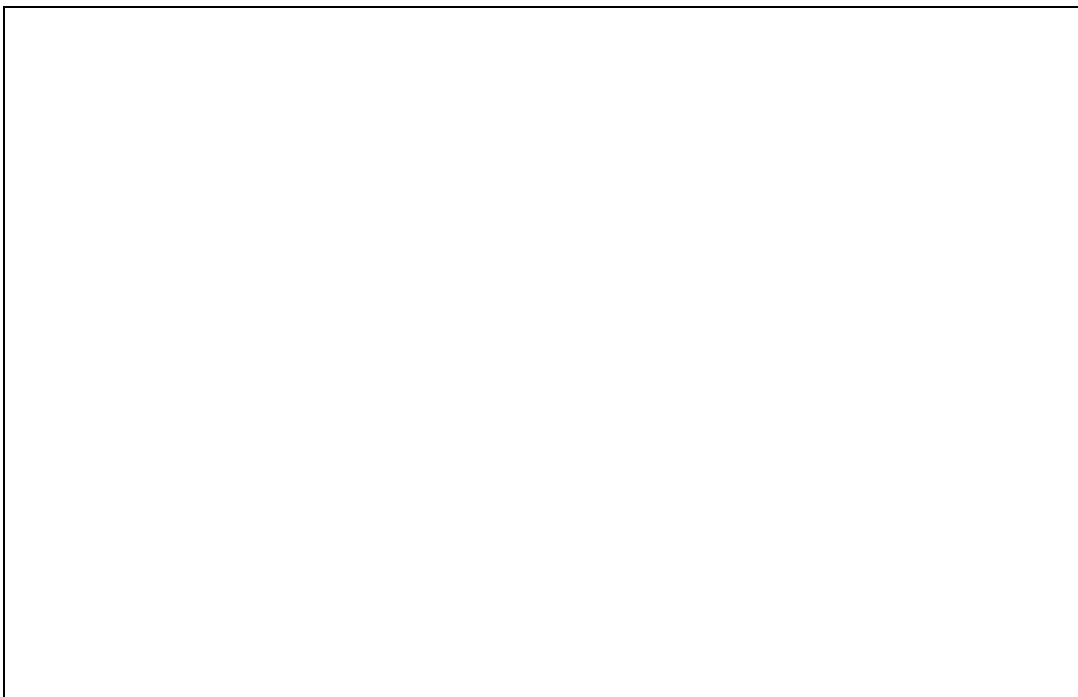


図 7 キヤスク下部の縦断面図

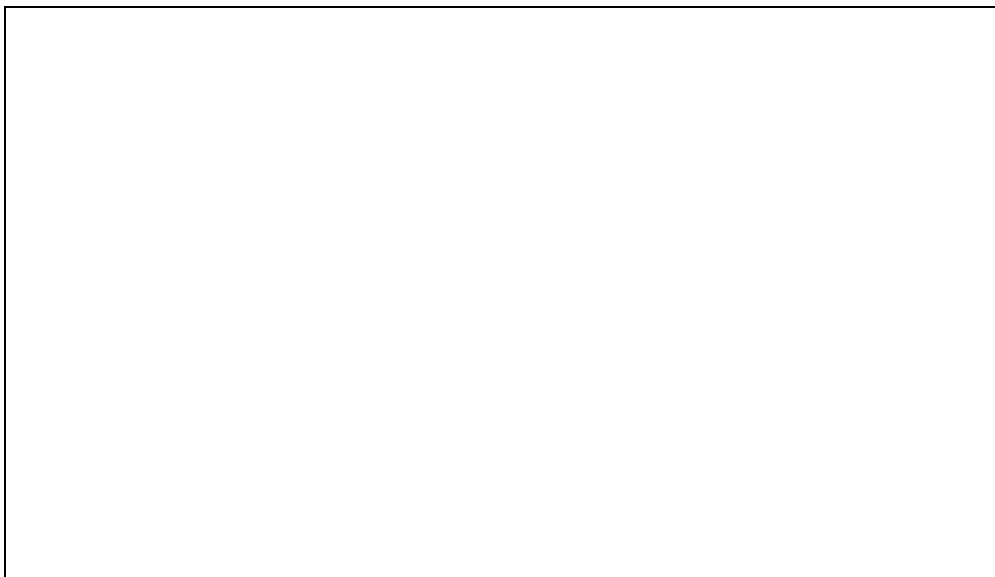


図 8 キャスク遮蔽解析モデルの横断面(1/4 カット)

(6) 遮蔽解析の保守性

解析に使用する解析コードの検証および適用性については、別紙1に記載する。

CASTOR® geo26JP 型の遮蔽解析モデルでは、キャスク構成要素の大部分を詳細にモデル化している。ただし、ねじ継手やその他の取り付け部品などは保守的に省略しており、取り付け部品は空気に置き換えている。

キャスクの構造全体とその構成部品は、正確に3次元の遮蔽モデル化されるが、特定の(より小さい)部品は無視される。たとえば、キャスクの貯蔵中に、ネジとボルトは対応するネジ穴やボルト穴に完全に締められている。ネジとボルトの密度は周囲の材料の密度よりも高いため、開口部該当箇所は明示的にモデル化されない。バスケットの固定具である、ナット、ワッシャーなどの継手は空気に置き換えられ、バスケットモデルは、保守的に部材のみで表される。単純化(3D→2D→1D)のためにストリーミングに関する特別な仮定を必要とした多くの以前の遮蔽計算とは対照的に、CASTOR® geo26JP 型の 3次元遮蔽次元遮蔽解析モデルは非常に現実的である。MCNP6によって提供される粒子輸送も完全に3次元である。

図 4 (a)に示すように1列目の個々の中性子遮蔽体(棒状)の間を通る中性子遮蔽棒体(棒状)の間を通る中性子は、2列目によって効果的に減速されるため減少するため、キャスク表面の線量当量分布に有意な影響を及ぼさない程度であることが分かる保守性がある。ストリーミングがあっても、それは輸送計算によって考慮され、図 10～図 13 の線量当量率結果に示される。ここでは、個々のメッシュの大きさを十分小さくしており、線量当量率結果に観察される模様構造は、主に遮蔽へのバスケットの寄与と燃料集合体の不規則な装荷パターンによるものである。キャスク胴内部の中性子遮蔽棒体の配置設計は、全体的な遮蔽性能を十分に保証するように、数十年にわたって調整されてきた。中性子は一般にポリエチレンにより、減速され、中性子の捕獲は鋳鉄で行われる。このため、中性子遮蔽棒体はキャスク胴の中心に配置されるのではなく、中心より内側にずらして配置している。中性子の減速に寄与するもう一つ

の重要な要因は、鑄鉄中の高い炭素含有量(>3 重量%)である。CASTOR® geo26JP 型の構造と材料に関する詳細は、補足説明資料「第 4～6 条及び 16 条に関する説明資料(1024-TR-00005)」に記載される。一般に、放射線は完全に遮蔽することができないが、この遮蔽解析評価により、CASTOR® geo26JP 型が許容線量当量率要件を満たしていることを示している(図 10～図 13 及び表 13～表 15 参照)。また、燃料の自己遮蔽効果と中性子増倍効果を正しく表すために現わすために、燃料は燃料棒ごとにモデル化した。貯蔵する使用済燃料には、ガドリニウムを可燃性毒物として添加した燃料棒が含まれている可能性があるが、遮蔽解析ではガドリニウムを保守的に無視した。中性子増倍効果の影響を最大限考慮するために、中性子実効増倍率の算出には燃焼度 20,000 MWd/t に対応する燃料の核種成分を用いた。軸方向燃焼度分布には図 3 に示す値を考慮する。最高燃焼度の使用済燃料を収納したキャスクの中性子実効増倍率を保守的に算出するために、収納された使用済燃料の燃焼度より十分低い MWd/t を設定した。

臨界安全とは対照的に、遮蔽計算が実行される乾式システムでは、MCNP6 で求まる中性子実効増倍率が約 0.3 となり、影響はかなり小さい。

設計上の公差は、特定兼用キャスクの遮蔽能力が最小化されるように考慮する。この公差には、キャスクの胴、バスケット板厚および中性子遮蔽材の最低厚さ等を含む。表 12 に示すように、材料密度には製造時の最低保証密度を用いる。設計貯蔵期間中の金属の密度変化は考えにくく、下表の値は設計貯蔵期間中の影響を含めて保守的な設定である。

中性子遮蔽材材料ポリエチレンの性能能力、すなわち、この評価で考慮された特性材料密度には製造時の確認は、最低保証密度を用いる。補足説明資料「第 4～6 条及び 16 条に関する説明資料(1024-TR-00005)」により詳細に示されているように設計貯蔵期間中のポリエチレンの質量減損は 1×10^{-3} 以下であることを考慮すると、下表の値は設計貯蔵期間中の影響を含めて保守的な設定である。

表 12 遮蔽解析モデルにおける材料密度

部品	材料	密度、g/cm ³	遮蔽解析用密度、g/cm ³
キャスク本体	球状黒鉛鑄鉄	7.20	<input type="text"/>
燃料	酸化ウラン	10.63	
蓋、トラニオン	ステンレス鋼	7.78	
中性子遮へい材	ポリエチレン	0.94 / 0.96	
エッジセグメント	ステンレス鋼	2.70	
燃料被覆管	ジルカロイ	6.52	
床	コンクリート	2.30	
H-ビームのフランジ	ステンレス鋼	8.00	
遮蔽棒	鋼	7.83	
コーナーエレメント	ステンレス鋼	7.92	
バスケット側板	ステンレス鋼	7.82	
熱伝導及び中性子吸収材	アルミ合金	2.58 以上	

CASTOR® geo26JP 型では、キャスクの底部の直径が小さくなっており、遮蔽機能遮蔽性能が他の部分と比較して低い特徴がある。このため、燃料要素の軸方向位置を保守的に底部側に置く設定する。

遮蔽解析モデル上は貯蔵架台と固定装置を無視する。また、散乱の影響を考慮するために、キャスクの周辺雰囲気は空気とする。

CASTOR® geo26JP 型の遮蔽評価基準については、特定兼用キャスク表面の任意の点における線量当量率を 2mSv/h 以下、キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を 100 μSv/h 以下とする。

CASTOR® geo26JP 型の遮蔽解析では、キャスク表面およびキャスク表面から 1m の位置での線量当量率を網羅的に評価した（(7)評価結果の詳細参照）。これにより、ホットスポット又はストリーミングを見落とさずに評価できる。メッシュタリーによる網羅的な計算により線量当量率が高い点を判断し、その点について体積検出器を用いて、統計指標を全て満足するか評価する。なお、型式証明では網羅的な評価を、不確かさの詳細分析は、型式指定の申請時に示す。

詳細評価結果評価結果および線量当量率を網羅的に確認した結果を(7)評価結果に示す。この結果から、いずれの技術的に想定される場合においても評価基準を満たすことをたす事を確認した。なお、4条、5条、6条の補足説明資料に示すように、自然現象(地震、津波、竜巻)によるバスケットの塑性変形は発生していないことから、遮蔽評価では変形は考慮していない。

(7) 評価結果

キャスクの蓋表面の線量当量率は、キャスクの側面の線量当量率よりも少なくとも 3 分の 1 程度低いため、以降の説明は側面に焦点をあてて説明する。なお、遮蔽解析が全体的に保守的であることから、外部線量当量率について統計誤差による修正は行わない。

遮蔽解析結果を図 10～図 15 に図示する。各図には、燃料有効部からのガンマ線及び中性子、並びに燃料集合体構造材のガンマ線に起因する線量当量率、また、これらを合計した線量当量率をそれぞれ示す。比較的高い線量当量率を示す位置は明るい黄色または白色で示される。定量的な線量当量率の値は、各図の右側のスケールに示される。左側のスケールはキャスクの高さ方向の位置、下側のスケールはキャスクの周方向の角度を示す(表 11 参照)。キャスクの蓋表面に対する図 14 及び図 15 では、左側及び下側のスケールはキャスク中心からの径方向の距離を示し、右側のスケールは線量当量率を示す。

これらの図から、比較的線量当量率の高い場所が、キャスク下部や中央部などであることが分かる。さらに更に、バスケットは非対称的な設計であり、90° 及び 270° 方向で低線量当量低線量当量率となり、0° 及び 180° 方向で比較的高線量当量比較的高線量当量率となっていることが分かる。

図 10 に配置 (i) におけるキャスク表面の線量当量率の分布を示す。表 13 に示すように、合計値の最大線量当量率は 345-348 μSv となる。図 11 に配置 (ii) におけるキャスク表面の線量当量率の分布を示す。表 16 に示すように、合計値の最大線量当量率は 322-331 μSv となる。なお、最大線量当量率はキャスクの底部で確認され、線量当量率に対する影響は、中性子の寄与が最も大きい。

図から分かるように図 16 に示されるように、CASTOR® geo26JP 型の表面線量当量率は、基準値 (2mSv/h) に対して十分に小さい。なお、キャスクの蓋表面における線量当量率は、キャスクの壁側にお

ける線量当量率よりもはるかに小さく、殆どが中性子の寄与分となる。このため、図 14 には、配置 (i) と (ii) の両方について、総線量当量率のみ合計線量当量率のみを示す。

図 12 および図 13 に配置 (i) および配置 (ii) におけるおけるキャスク表面から 1m の位置の線量当量率の分布を示す。表 13～表 16 に示すようにに示されるように、配置 (i) および配置 (ii) におけるキャスク表面から 1 m の位置の最大線量当量率は 87-89 $\mu\text{Sv/h}$ であり、キャスクの表面から 1m の距離で $100 \mu\text{Sv/h}$ を超えない線量当量率に関する要求事項の一つを十分な安全裕度を持って満たしている。ガンマ線と中性子線はほぼ等しく最大線量当量率に寄与している。

図 13 にキャスクの蓋表面におけるキャスク表面から 1m の位置の線量当量率の分布を示す。蓋表面から 1m 離れた位置の線量当量率に対しては中性子が優勢であり、図 15 の左右に示すとおり配置 (i) と配置 (ii) の分布に違いはほぼ無く、最大線量当量率も約 $30 \mu\text{Sv/h}$ 程度である。

図 18 に示すように 図 16 に示されるように、MCNP 解析は、キャスク表面及び表面から 1 m において、最大値が見出される領域での統計誤差は、1% のオーダーである。統計誤差の変動は、十分に調整された MCNP 解析について予想されるように、非常に小さく滑らかである。選択された場所における追加の統計的チェック 10 個の統計指標と組み合わされた 3 次元統計誤差分析は、高い信頼度で最大線量当量率の導出を可能にする。

配置(i)	A	B	C	D	E
最高燃焼度 (MWd/t)	48,000	44,000	44,000	44,000	44,000
冷却期間 (年)	≥ 16	≥ 22	≥ 30	≥ 12	≥ 16

図 9 ———— 配置 (i) の収納条件

配置(ii)	A	B	C	D	E
最高燃焼度 (MWd/t)	48,000	48,000	48,000	48,000	48,000
冷却期間 (年)	≥ 16	≥ 30	≥ 30	≥ 24	≥ 29

図 10 ———— 配置 (ii) の収納条件

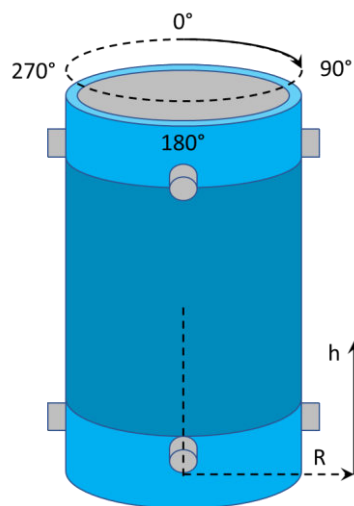


図 9 図 10～図 15 および図 16 における縦軸(キャスク底部からの高さ、h)及び横軸(周方向の角度)の測り方

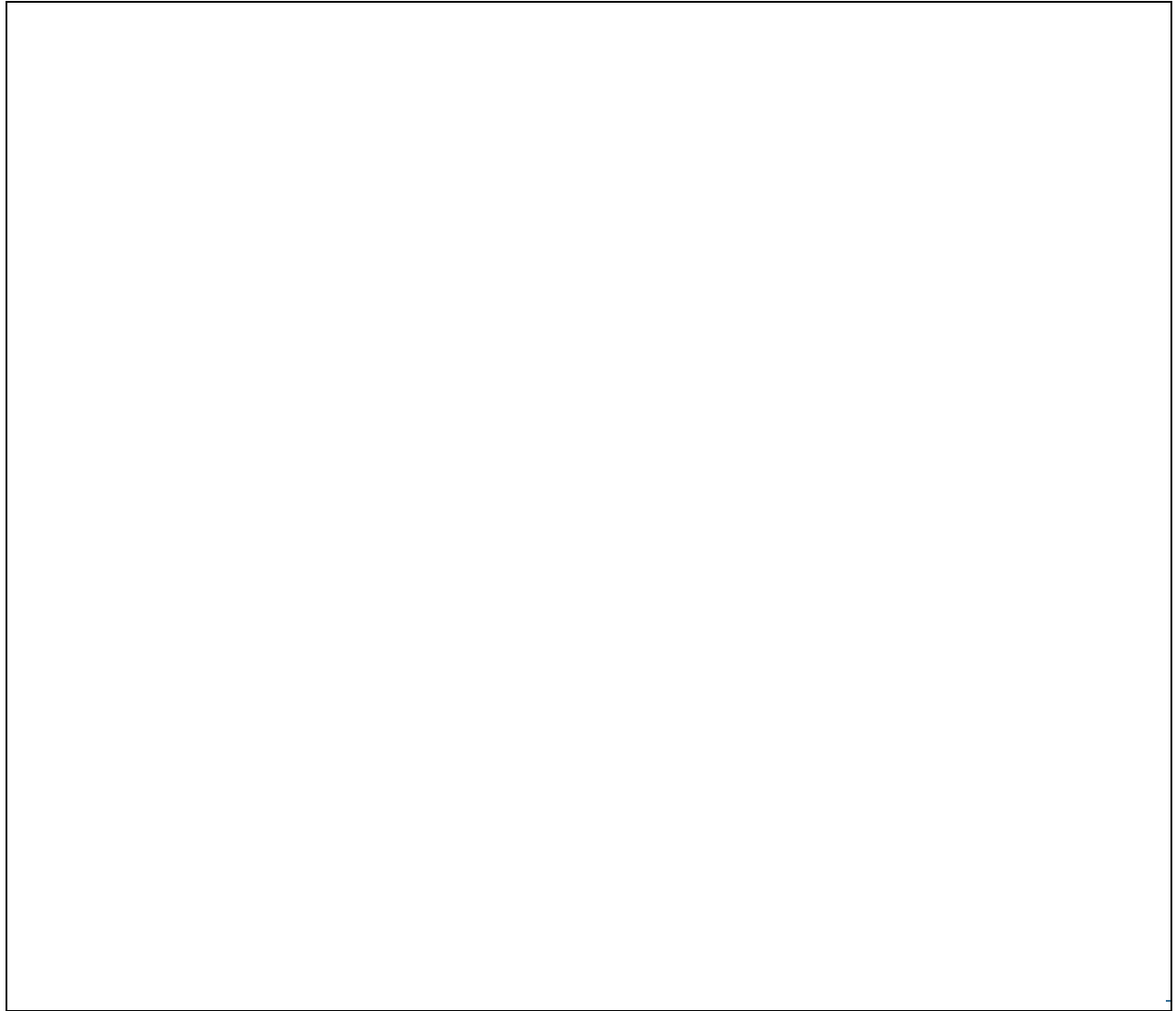
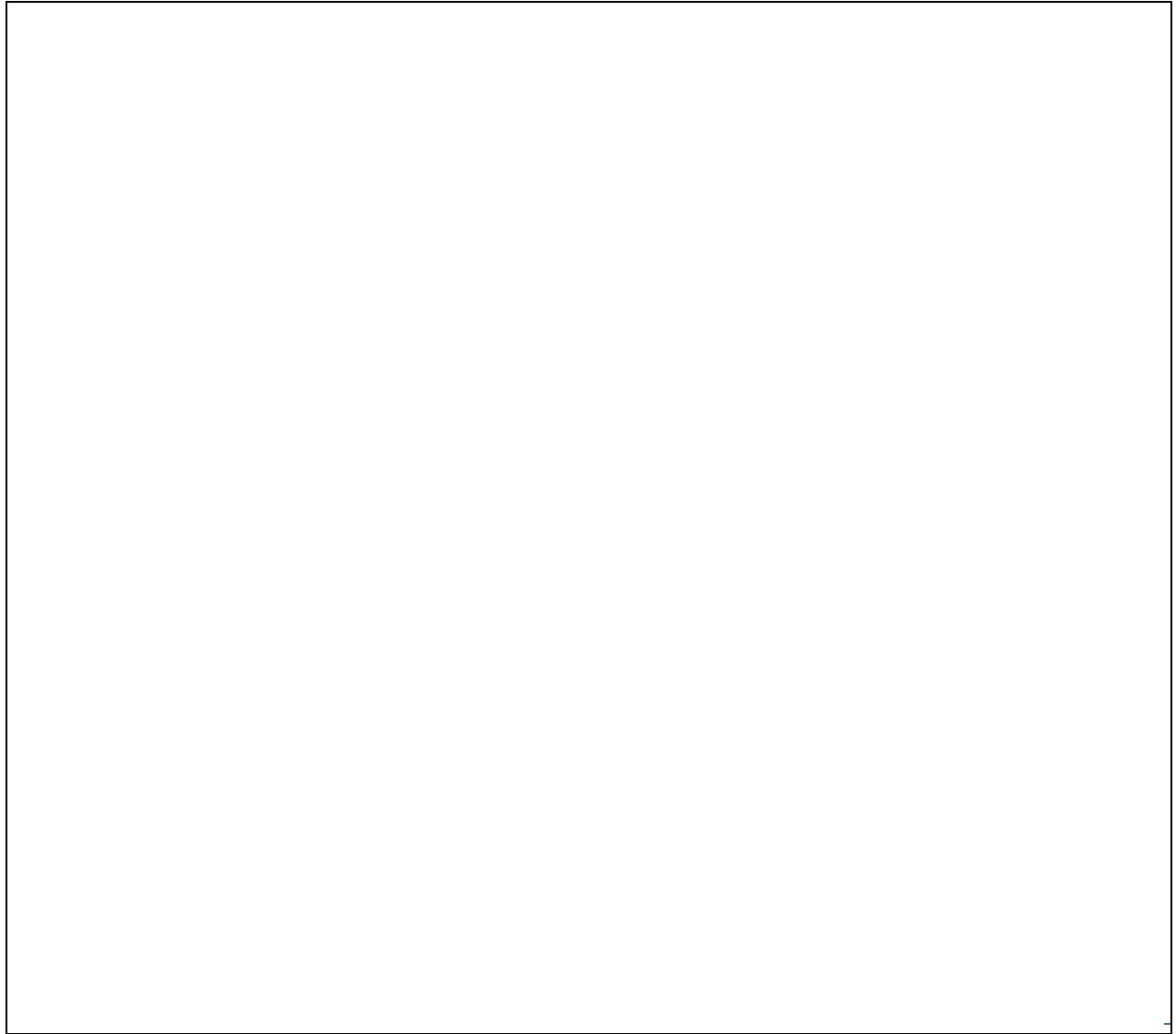




図 10 配置(i)でのキャスク表面線量当量率 (mSv/h):
燃料有効部からのガンマ線(左上)、中性子(右上)、
燃料集合体構造物の放射化ガンマ線(左下)、合計(右下)。

図 10 及び表 13 に示すように、配置(i)での、キャスク表面の最大線量当量率には、ガンマ線が支配的である。その位置は、下部トランニオンの上方で、ガンマ線遮蔽厚さが比較的小さい。



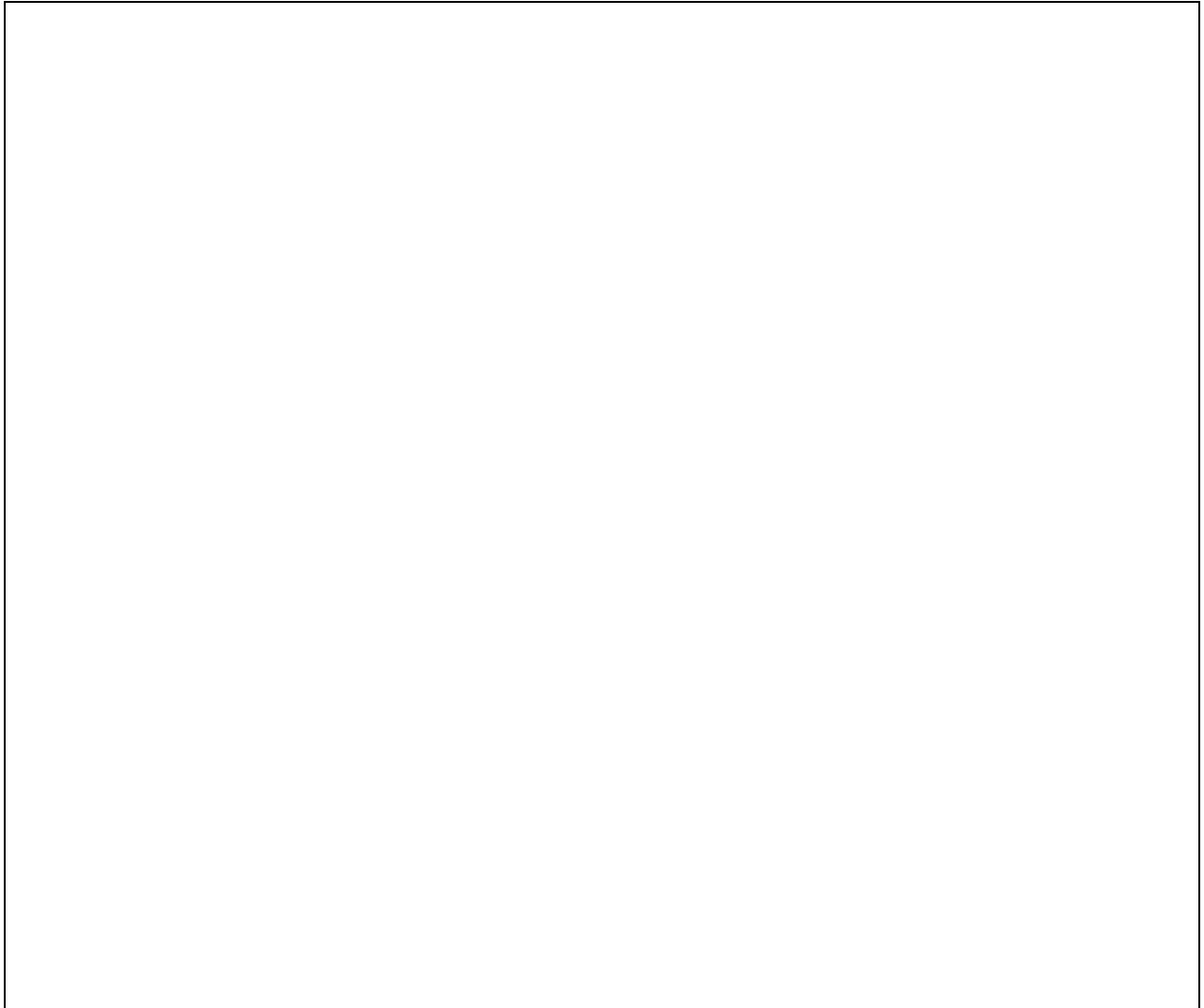


図 11 配置(ii)でのキャスク表面線量当量率 (mSv/h):
燃料有効部からのガンマ線(左上)、中性子(右上)、
燃料集合体構造物の放射化ガンマ線(左下)、合計(右下)。

図 11 及び表 14 に示すように、配置(ii)での、キャスク表面の最大線量当量率には、中性子が支配的である。その位置は、下部トランニオンの下方で、中性子遮蔽棒体による減速効果減少効果が比較的小さい。



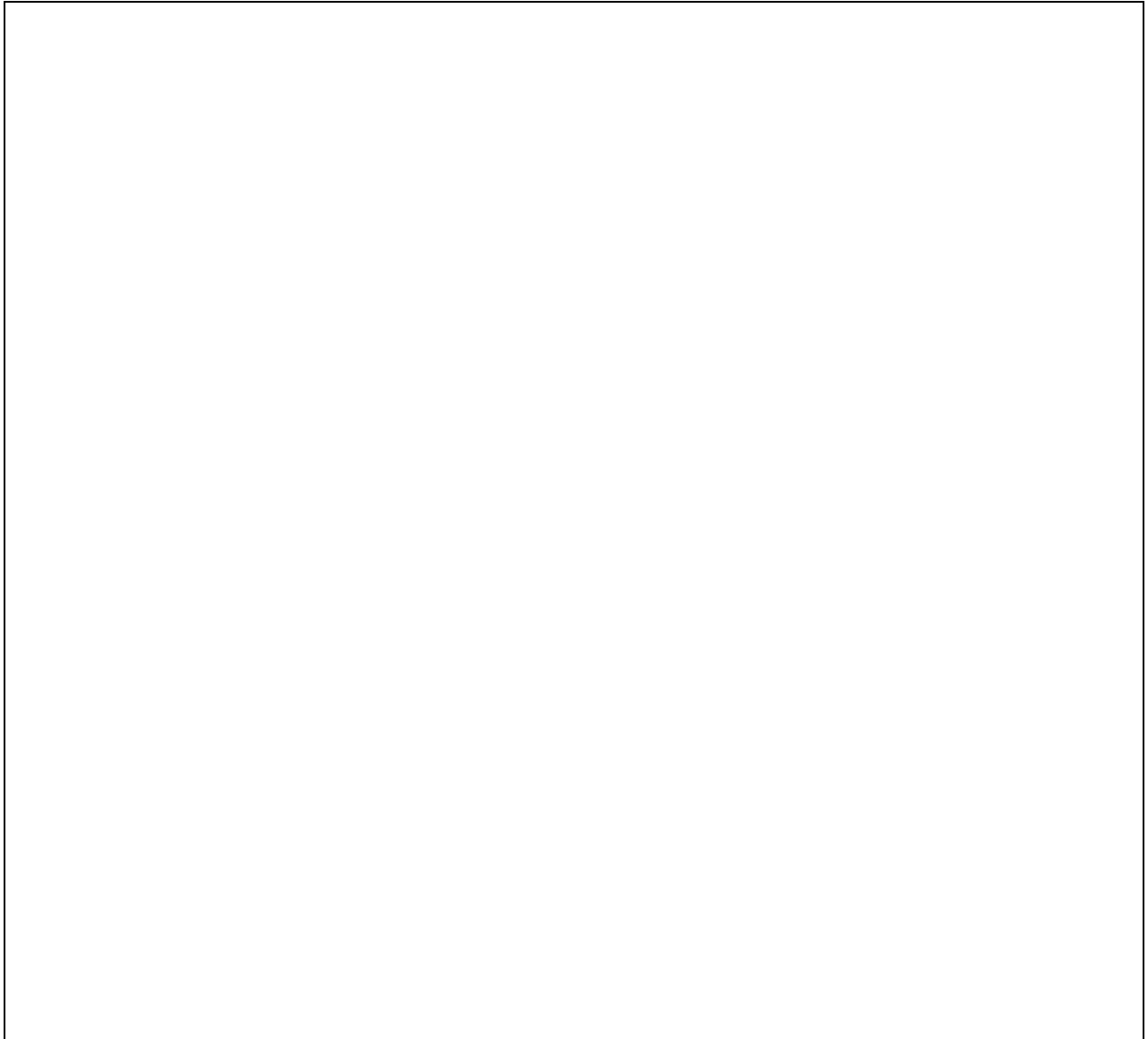


図 12 配置(i)でのキャスク表面から1mの位置における線量当量率 (mSv/h):
燃料有効部からのガンマ線(左上)、中性子(右上)、
燃料集合体構造物の放射化ガンマ線(左下)、合計(右下)。

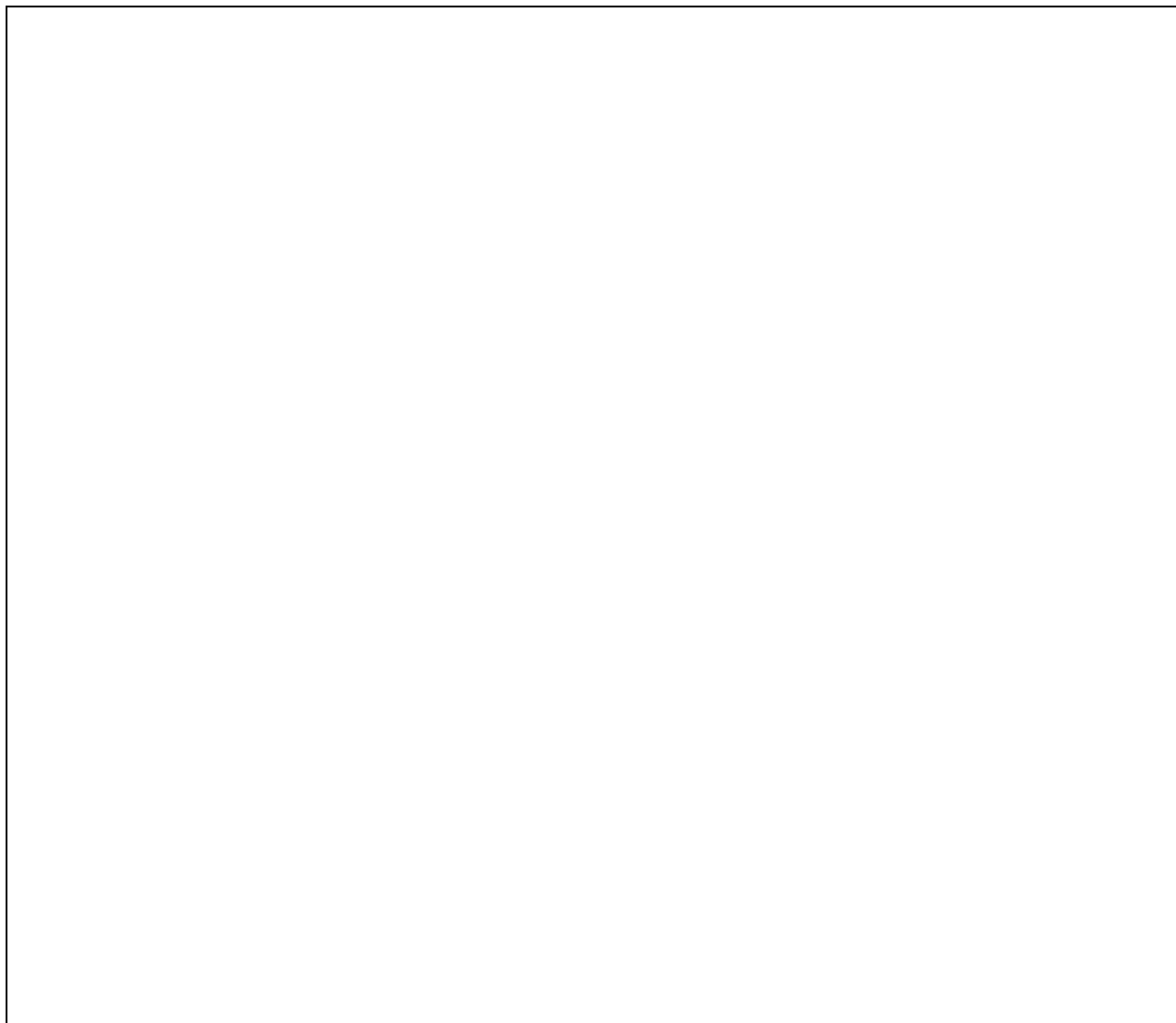




図 13 配置(ii)でのキャスク表面から1mの位置における線量当量率 (mSv/h):
燃料有効部からのガンマ線(左上)、中性子(右上)、
燃料集合体構造物の放射化ガンマ線(左下)、合計(右下)。



図 14 配置(i)(左)及び配置(ii)(右)でのキャスク蓋表面における合計線量当量率 (mSv/h)
(縦軸、横軸: 中心からの距離)

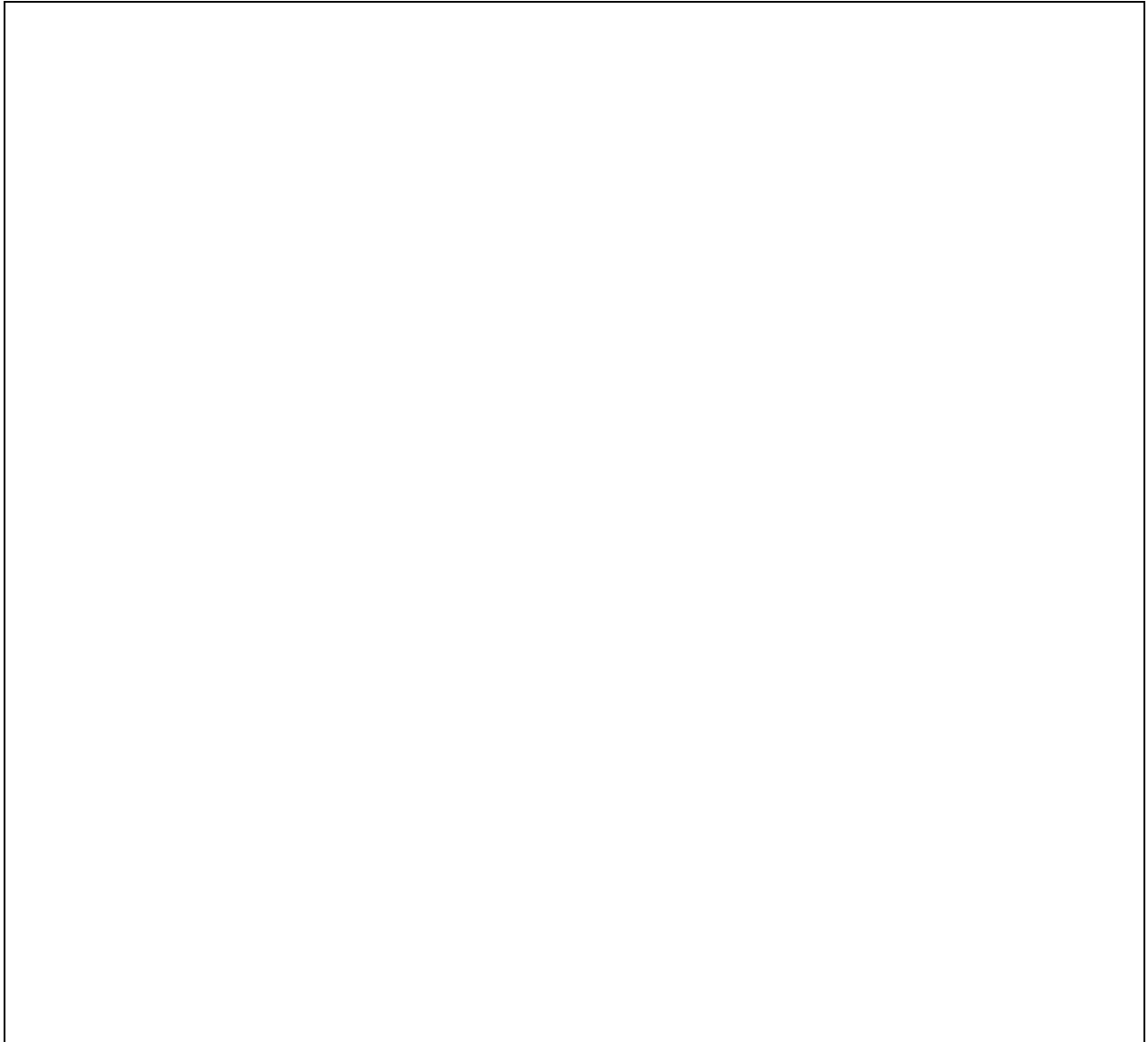


図 15 配置(i) (左)及び配置(ii)(右)でのキャスク表面から1mの位置における合計線量当量率 (mSv/h) (縦軸、横軸:中心からの距離)



図 16 配置(i)におけるキャスク表面(左)およびキャスクから 1 m(右)における統計誤差分布

表 13 17x17 燃料による配置(i)の最大線量当量率(カッコ内数字は統計誤差)

17x17 燃料の配置(i)		位置		最大線量当量率 [μSv/h]			
		高さ [cm]	角度 [°]	中性子	ガンマ線	放射化ガンマ線	合計
A 型	表面	79	50	73 (1.5%) 76 (1.5%)	229 (1.7%) 231 (1.7%)	24 (1.9%)	326 (1.2%) 331 (1.2%)
	1 m の位置	97	39	39 (1.0%) 40 (1.0%)	42 (1.3%) 43 (1.3%)	3 (1.8%)	84 (0.8%) 86 (0.8%)
B 型	表面	79	50	73 (1.5%) 76 (1.5%)	225 (1.7%)	47 (2.0%)	345 (1.2%) 348 (1.2%)
	1 m の位置	97	39	39 (1.0%) 40 (1.0%)	42 (1.3%)	5 (1.8%)	86 (0.8%) 87 (0.8%)

表 14 17x17 燃料による配置(ii)の最大線量当量率(カッコ内数字は統計誤差)

17x17 燃料の配置(ii)		位置		最大線量当量率 [μSv/h]			
		高さ [cm]	角度 [°]	中性子	ガンマ線	放射化ガンマ線	合計
A 型	表面	24	24	270 (1.0%) 279 (1.0%)	6 (4.9%) 7 (4.8%)	21 (3.5%)	297 (1.0%) 307 (1.0%)
	1 m の位置	238	195	44 (0.8%) 45 (0.8%)	39 (0.4%) 40 (0.4%)	< 1	83 (0.5%) 85 (0.5%)
B 型	表面	24	335	267 (1.0%) 276 (1.0%)	7 (5.9%)	44 (3.8%)	318 (1.0%) 327 (1.0%)
	1 m の位置	238	195	44 (0.8%) 45 (0.8%)	39 (0.4%)	< 1 1 (6.8%)	83 (0.5%) 85 (0.5%)

上述したように、キャスク外部の線量当量率の完全な三次元情報が示される。ガンマ線と中性子の線量当量率は異なる場所で最大値を示す。2つの線量当量率の寄与の相対的な強さに依存して、全体的な最大値は他の違った場所に現れる。配置(i)及び配置(ii)はそれらの放射性物質の含有量がかなり異なるために、最大値もまた異なる場所に現れる。配置(i)は、配置(ii)と比較して、より短い冷却時間を有する燃料集合体を収納しているので、より強いガンマ線量当量率を示す。後者の場合、総線量当量率合計線量当量率に対する主な寄与は、ゆっくりと冷却する中性子によって与えられ、最大値は、中性子最大の位置で観察される。配置(i)の場合、総線量当量率合計線量当量率の最大値は、ガンマ線の最大値に近い。

表 15 15x15 燃料による配置(i)の最大線量当量率(カッコ内数字は統計誤差)

15x15 燃料の配置(i)		位置		最大線量当量率(μSv/h)			
		高さ [cm]	角度 [°]	中性子	ガンマ線	放射化ガンマ線	合計
A 型 (39/48 GWd/t _{HM})	表面	79 ²⁴	50 ²¹⁴	85 (1.3%) 292 (0.9%)	211 (1.6%) 7 (5.0%)	37 (1.9%) 42 (0.9%)	333 (1.1%) 341 (1.1%)
	1 m の位置	97	219	44 (0.9%) 46 (0.9%)	39 (1.0%)	4 (1.7%)	87 (0.6%) 89 (0.6%)
A 型 (44/48 GWd/t _{HM})	表面	79	45	82 (1.4%) 84 (1.4%)	218 (1.6%) 220 (1.6%)	20 (2.0%) 20 (2.1%)	320 (1.2%) 324 (1.2%)
	1 m の位置	97	219	42 (1.0%) 43 (1.0%)	41 (1.0%) 42 (1.0%)	2 (1.8%)	85 (0.7%) 87 (0.7%)
B 型	表面	79	45	82 (1.4%) 84 (1.4%)	215 (1.6%) 216 (1.6%)	32 (2.1%)	328 (1.1%) 332 (1.1%)
	1 m の位置	97	219	42 (1.0%) 43 (1.0%)	40 (1.0%) 41 (1.0%)	4 (1.9%)	86 (0.7%) 88 (0.7%)

表 16 15x15 燃料による配置(ii)の最大線量当量率(カッコ内数字は統計誤差)

15x15 燃料の配置(ii)		位置		最大線量当量率(μSv/h)			
		高さ [cm]	角度 [°]	中性子	ガンマ線	放射化ガンマ線	合計
A 型	表面	24	335	286 (1.0%) 295 (1.0%)	6 (5.0%)	19 (3.8%)	311 (0.9%) 320 (0.9%)
	1 m の位置	229	15	47 (0.8%) 48 (0.8%)	39 (0.4%)	< 1	86 (0.5%) 87 (0.5%)
B 型	表面	24	335	286 (1.0%) 295 (1.0%)	6 (4.9%)	30 (3.8%)	322 (1.0%) 331 (0.9%)
	1 m の位置	229	15	47 (0.8%) 48 (0.8%)	38 (0.4%)	1 (7.8%)	86 (0.5%) 87 (0.5%)

表 13～表 16 のカッコ内数字は統計誤差を示す。表 16 において、キャスク表面から 1m の位置における放射化ガンマ線の統計誤差が 7.8%で比較的大きいが、合計線量当量率における放射化ガンマ線が占める寄与は小さい。

CASTOR® geo26JP 型ではポリエチレン中性子遮蔽材が用いられており、外側と内側のポリエチレン棒は中性子ストリーミングが極力少なくなるように配置されている。また、本体の球状黒鉛鋳鉄も中性子遮蔽として機能しており、両方の機能で中性子ストリーミングがない。CASTOR® geo26JP 型の遮蔽設計の妥当性は、図 10～図 15 及び表 13～表 16 に示す通りで、キャスク表面及び表面から 1m の線量当量値は基準値を下回っている。

【確認内容】

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

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

② ソースターム

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

③ 遮蔽解析コード等

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

④ 通常貯蔵時の線量

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

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

4) 応急復旧

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

敷地境界における 3)実効線量評価及び 4)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)とする。

3 参考文献

- [1] C. J. Werner et al., MCNP[®]ユーザーズマニュアルコードバージョン 6.2, 27.10.2017
- [2] ORIGEN 2.2, RSICC Computer Code CCC-371, 06.2002

別紙 1 使用する解析コード

ここでは、CASTOR[®] geo26JP 型の遮蔽性能評価に使用した解析コードについて説明する。

A1.1 ORIGIN 2 コード

A1.1.1 概要

ORIGIN 2 コードは、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。ORIGIN 2 コードは公開コードであり輸送貯蔵兼用キャスクの崩壊熱計算等に広く用いられている。

A1.1.2 機能

使用済燃料の放射線源強度は、PWRU50 ライブラリ[3]を有する燃焼計算コード ORIGIN-2.2 コードを使用して、燃焼計算及び減衰計算を実施して算出する。ORIGIN-2.2 では、使用済燃料の形状、物理データ、原子炉運転パラメータを考慮した上で、炉内照射後の値を計算している。

ORIGIN-2.2 コードの主な特徴を以下に示す。

- (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放射線源強度(ガンマ線と中性子の両方を含む)、崩壊熱、各核種の放射エネルギー等が求められる。
- (2) 原子炉の炉型と燃料の組み合わせに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みを付けた断面積ライブラリデータが内蔵されており、任意に選択できる。
- (3) 計算に必要な入力データは、燃料の種類、その幾何学的形状、初濃縮度、核種構成、並びに最終燃焼度や比出力のような燃焼履歴のパラメータ、冷却期間である。
- (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、自発各分裂と(α, n)反応により発生する中性子源強度等)は、ライブラリデータとしてコードに内蔵されている。

A1.1.3 計算フロー

ORIGIN2 コードの計算フローを図 A1- 1 に示す。

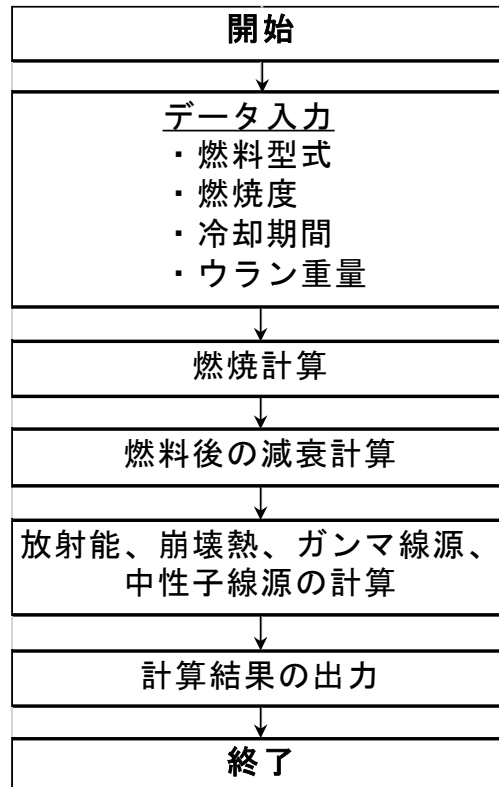


図 A1-1 ORIGEN2 コードの計算フロー

A1.1.4 使用実績及び検証

ORIGEN2 コードは、核燃料の崩壊熱を計算するため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 基準崩壊熱と比較し、ORIGEN2 コードの正当性を検証している。ORIGEN2 コードの検証例を図 A1-2 [4] に示す。

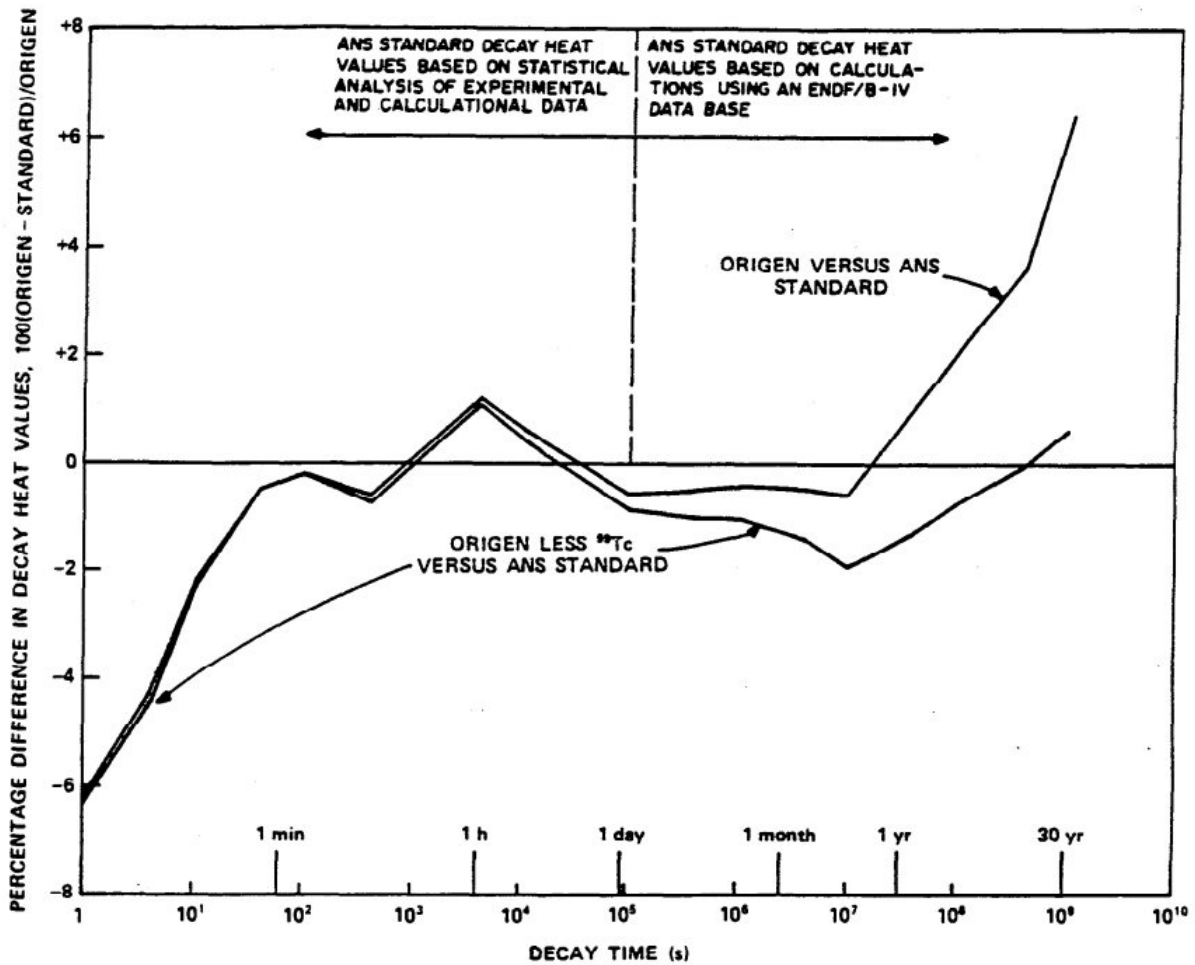


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

図 A1-2 ORIGEN2 コードの検証例 [4]

A1.2 MCNP6 コード

A1.2.1 概要

遮蔽計算はモンテカルロ法による粒子輸送計算コード MCNP6[5](以下「MCNP6 コード」という。)を用いている。MCNP6 コードは国際的に認知された原子力設備用の計算コードであり、中性子やガンマ線等の粒子輸送計算に用いる。

A1.2.2 機能

MCNP6 コードでは、個々の粒子が発生してから吸収されるまで、あるいは目的の体積から離れるまでの履歴をモンテカルロ法によってシミュレーションし、十分な数の粒子履歴を与えることで、複雑な形状の配置であっても、場所やエネルギーに依存した粒子密度やその他の物理量を得ることができる。

MCNP6 コードの主な特徴を以下に示す。

- (1) 物理現象の忠実なシミュレーションができる
- (2) 実形状を正確にモデル化しての 3 次元解析ができる。
- (3) 断面積の取扱いには連続エネルギーを採用することができる。
(なお、本解析で利用した断面積ライブラリは NLIB70c 及び PLIB84p である)
- (4) 多くの機関や企業で検証され、米国(NRC)の使用済燃料乾式貯蔵キャスクの評価に用いられている。また、日本では JEAC4615“原子力発電所放射線遮蔽設計規程” [6]において、遮蔽体の輸送計算コードとしてモンテカルロ計算法の適用が認められている。

モンテカルロ法によるシミュレーションの結果では、物理量に対して確率論に基づき期待値を得る。MCNP で計算された中性子及びガンマ線のスペクトル束密度の期待値から放射線量当量率への変換は、AESJ-SC-R002 日本原子力学会標準“放射線遮蔽計算のための線量換算係数” [7]に基づき実施した。

MCNP6 コードの解析フローを図 1 に示す。

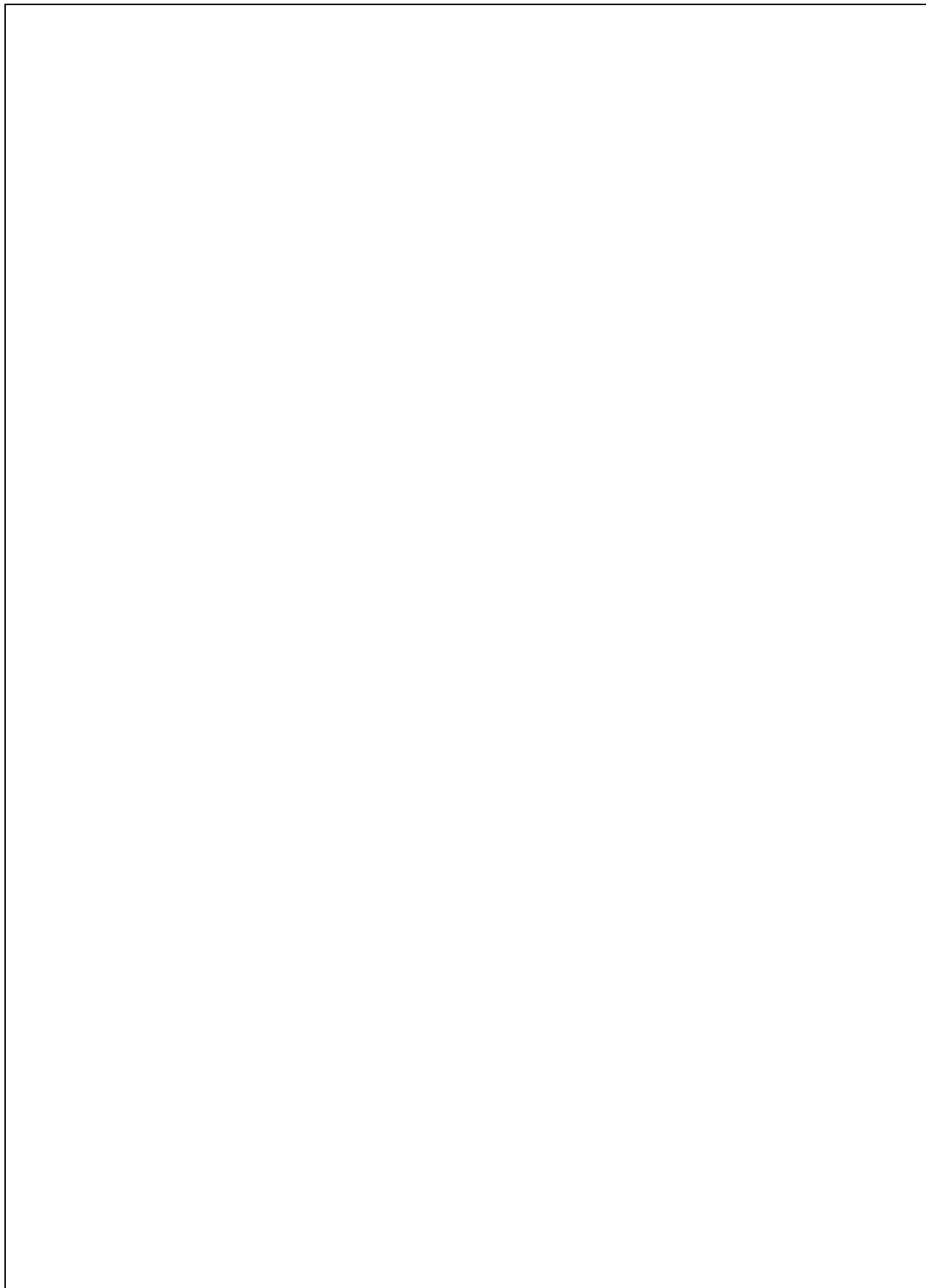
MCNP6 コードの検証は、
実施した(別紙2参照)。

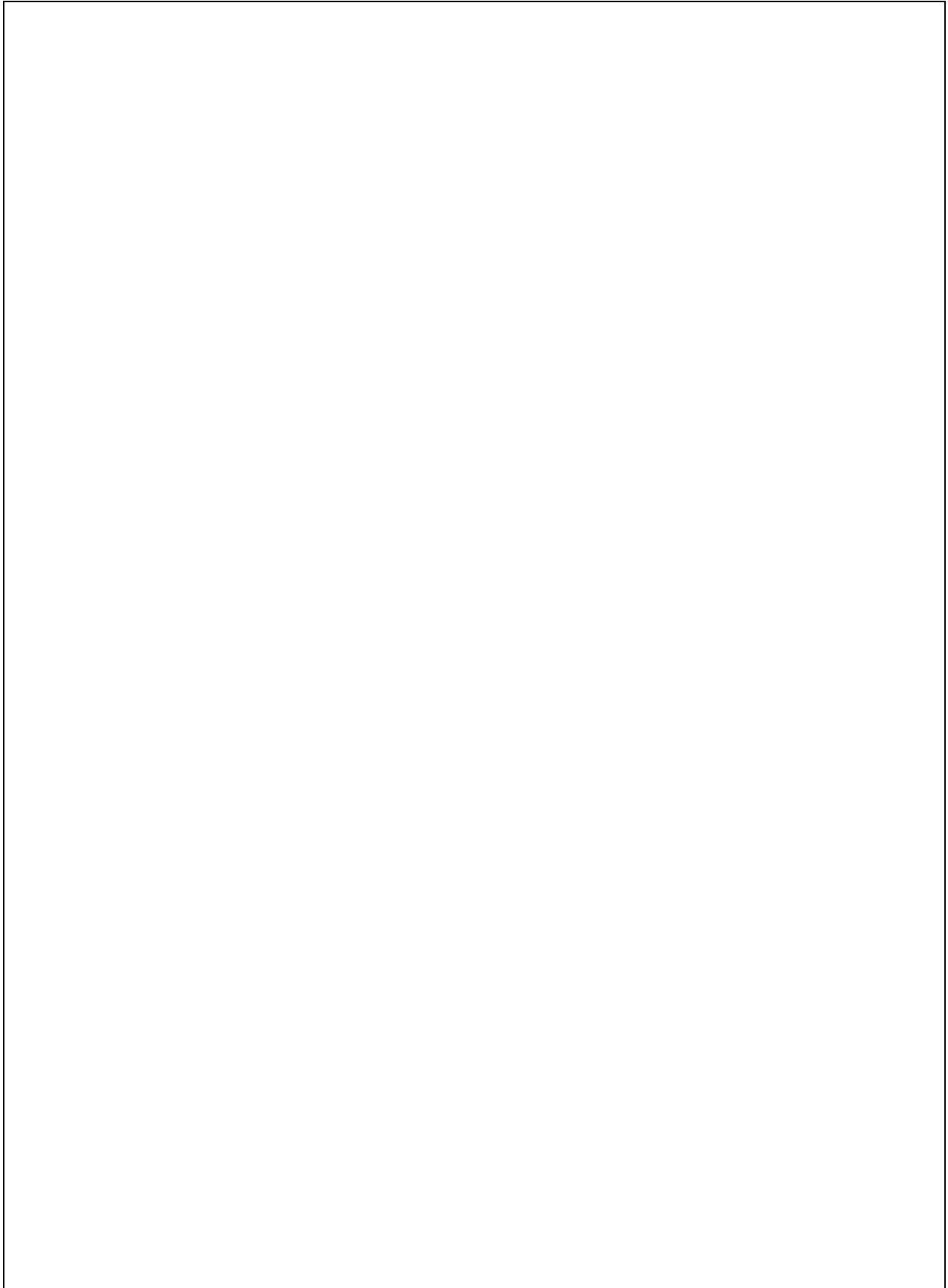
MCNP6 コードは MCNP5 コードと比較して、低エネルギー(外部の線量当量率に寄与しない 0.45 MeV 以下)の光子輸送の改善や計算速度パフォーマンスの向上など点で改良されているが、特定兼用キャスクの遮蔽機能におけるガンマ線や中性子の計算結果には差異はない。

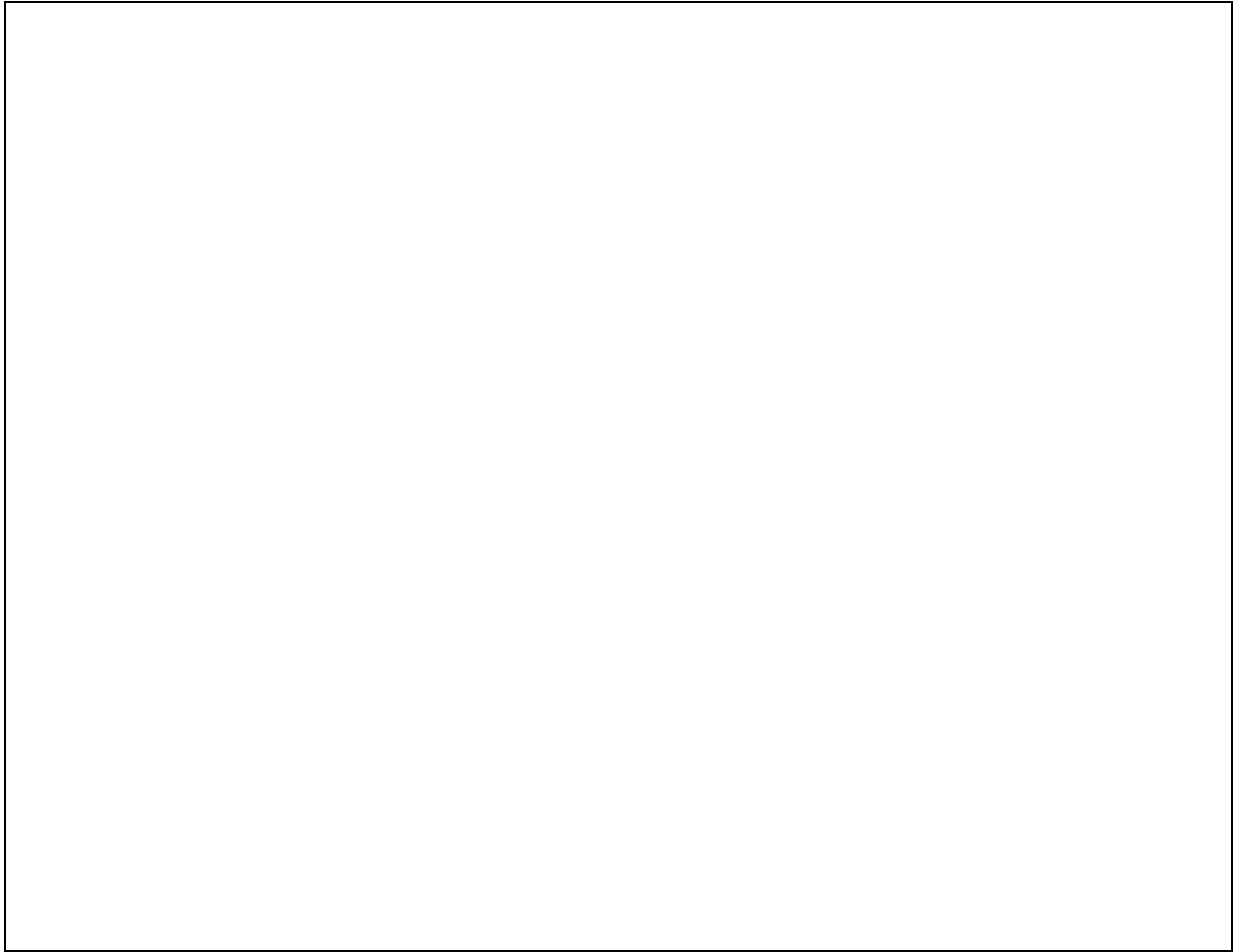
参考文献

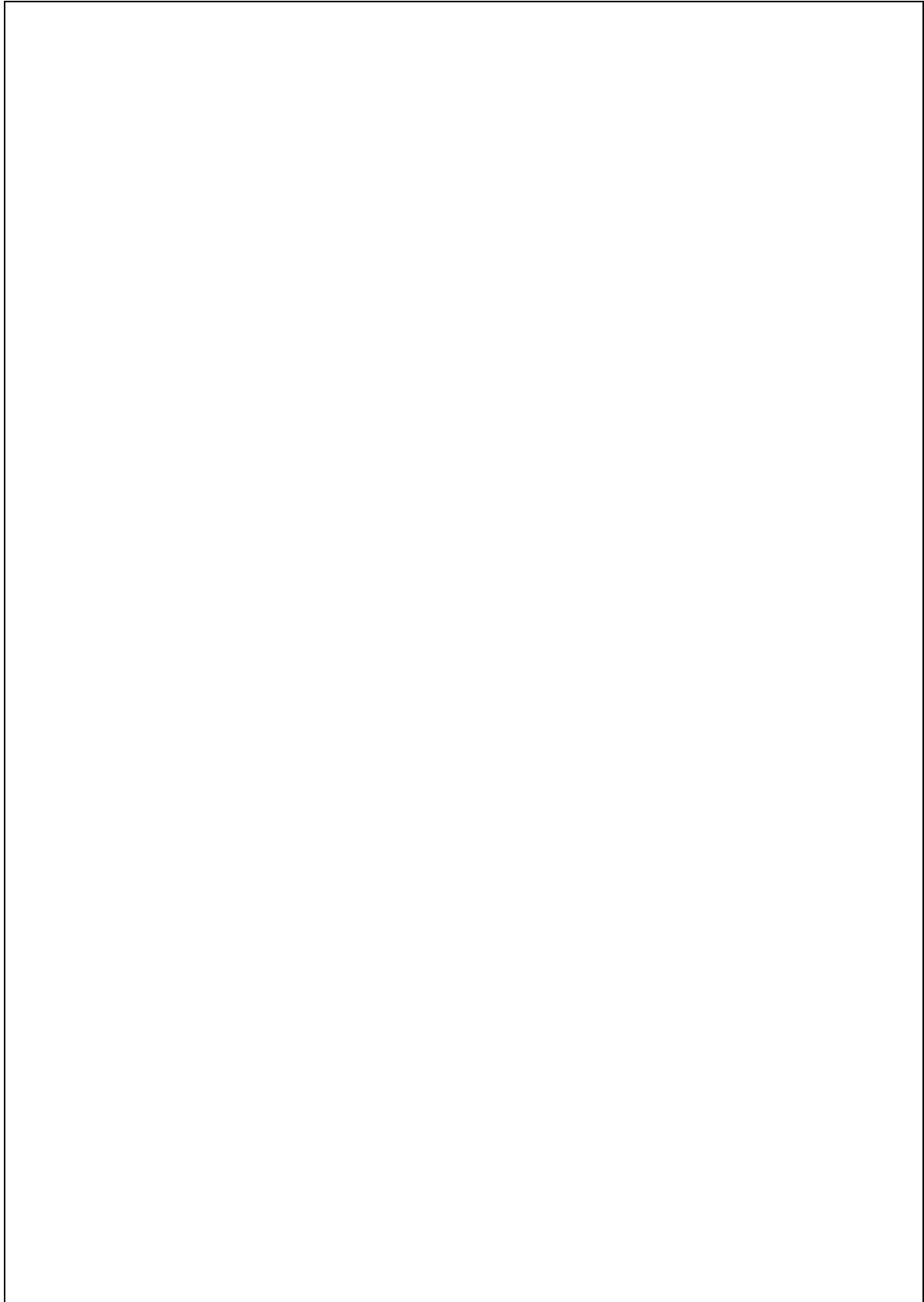
- [3] ORIGEN 2.2, RSICC Computer Code CCC-371, 06.2002
- [4] A. G. Croff, ORIGEN2: A Versatile Computer Code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials, Nuclear Technology, Vol. 62 (1983)
- [5] C. J. Werner et al., MCNP® USER'S MANUAL Code Version 6.2, 27.10.2017
- [6] (社)日本電気協会 原子力規格委員会、原子力発電所の放射線遮蔽設計過程、JEAC 4615-2020(2020)
- [7] AESJ-SC-R002: 2010, 日本原子力学会規格, 放射線遮蔽計算用線量換算係数: 2010 年

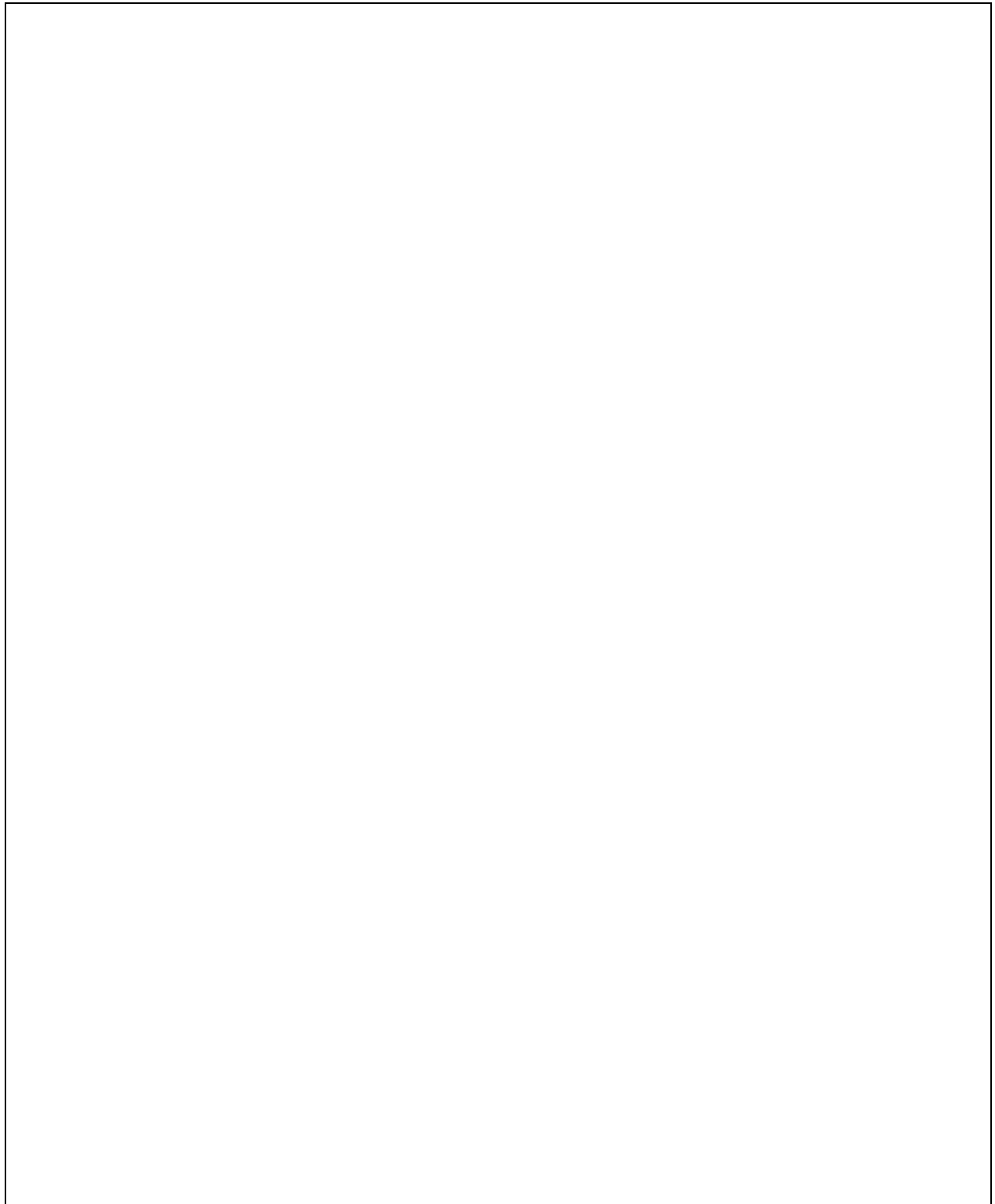
別紙 2 遮蔽解析の検証











参考文献

- [8] Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Standards for protecting people and the environment, Specific Safety Requirements N° SSR-6

別紙 3 統計指標による高度な統計的手段

MCNP の解析結果の信頼度を確認するため、解析上重要な箇所に体積検出器を設置し、表 A3-1 に示す 10 個の統計指標の算出が可能である。10 個の統計指標では、検出結果(タリー)の分散の相対誤差 (R)が 0.1 以下であることに加え、発生粒子数 N に対し単調に減少することなどの統計的な確認が可能である[9]。

相対誤差(R) の推定がどの程度正確であるかを評価するために、MCNP は分散の分散 (VOV) に関する情報を提供する。この量は R よりも検出結果の変動に敏感であり、信頼性の高い結果にとって重要な指標である。FOMは $1 / (R^2 \cdot T)$ として定義される性能指数である。ここで、T は解析実行時間である。また、MCNP は、検出結果の信頼区間推定の品質を調べるために確率分布関数 (PDF) も構築し、PDF の最終的スロープが検査される。傾きは 3 以上であることが要求される。

17x17 燃料集合体 B 型 の配置(i) の線量当量率最大の位置の体積検出器でのガンマ線と中性子について、10 個の統計指標の結果を表 A3-1 に示す。表に示されるように、10 個の統計指標の要求を全て満たしている。

表 A3-1 統計指標の概要

番号	分類	統計指標の内容	統計指標の例 (表面から1mにおける 最大線量当量率位置)	
			ガンマ線	中性子
1	平均値	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 であること)		
2		0.1 より小さいこと(<0.10)		
3	相 対 誤 差 (R)	計算収束判定段階において、発生粒子数 N の増加に伴い、R が単調に減少すること		
4		計算収束判定段階において、R が $1/\sqrt{N}$ で減少すること		
5	VOV (分散 の分散)	0.1 より小さいこと(<0.10)		
6		計算収束判定段階において、VOV が単調に減少すること		
7		計算収束判定段階において、VOV が $1/N$ で減少すること		
8	FOM (タリー の性能 指数)	計算収束判定段階において、FOM が一定 (constant) であること		
9		計算収束判定段階において、FOM が N の関数として単調増加あるいは単調減少しないこと(random であること)		
10	PDF (確率 分布関数)	タリーに記録された検出量の確率分布関数 f(x)の最終的スロープが 3 より大きいこと(>3.00)		

参考文献

- [9] 浅見光史、平尾好弘、澤田健一、大西世紀、近内亜紀子、小野田直光、「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).