

## 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	32
別紙 1:	使用する解析コード	33
別紙 2:	遮蔽解析の検証	37

## 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  $100 \mu\text{Sv/h}$  以下とすること。
- (3) 通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で  $50 \mu\text{Sv/y}$  以下となることを目標に、線量限度(1mSv/y)を十分下回る水準とすること。
- (4) 貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、工場等周辺の実効線量が線量限度(1mSv/y)を超えないこと。

』

**【確認内容】**

『

以下を踏まえ遮蔽設計が妥当であること。

**1) 使用済燃料の放射線源強度評価**

使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件とし、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  $100 \mu\text{Sv/h}$  以下とすること。

**3) 敷地境界における実効線量評価****① 直接線及びスカイシャイン線の評価**

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

**② ソースターム**

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

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

### ③ 遮蔽解析コード等

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

### ④ 通常貯蔵時の線量

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

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

## 4) 応急復旧

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

』

## 2 要求事項への適合性

### (1) 設置許可基準規則への適合性

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、ボアホール内に遮蔽棒（炭素鋼）を用いる。

なお、バスケットのほう素添加アルミニウム合金製の熱伝導及び中性子吸収材は、キャスクの遮蔽機能への寄与を目的としていないが、使用済燃料周りの中性子スペクトルをある程度、やわらげる効果がある。

CASTOR<sup>®</sup> geo26JP 型は、評価基準として、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  $\mu$  Sv/h 以下とする。

遮蔽解析では、使用済燃料集合体を含む CASTOR<sup>®</sup> geo26JP 型の 3 次元形状モデル化する。輸送計算には MCNP6 コード(ENDF/B-VII.0)[1]を使用し、放射線強度は ORIGEN-2.2 コード(PWR U50)[2]を使用して求める。(詳細は別紙1参照)遮蔽解析に用いる解析モデルの詳細については後述する。

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棟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<sup>®</sup> geo26JP 型の設計貯蔵期間は 60 年間とする。

補足説明資料「長期健全性評価に係る説明資料」(1024-TR-00011)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<sup>®</sup> 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  $\mu$ Sv/h 以下とすること。

CASTOR<sup>®</sup> geo26JP 型の遮蔽評価フローを図 1 に示す。



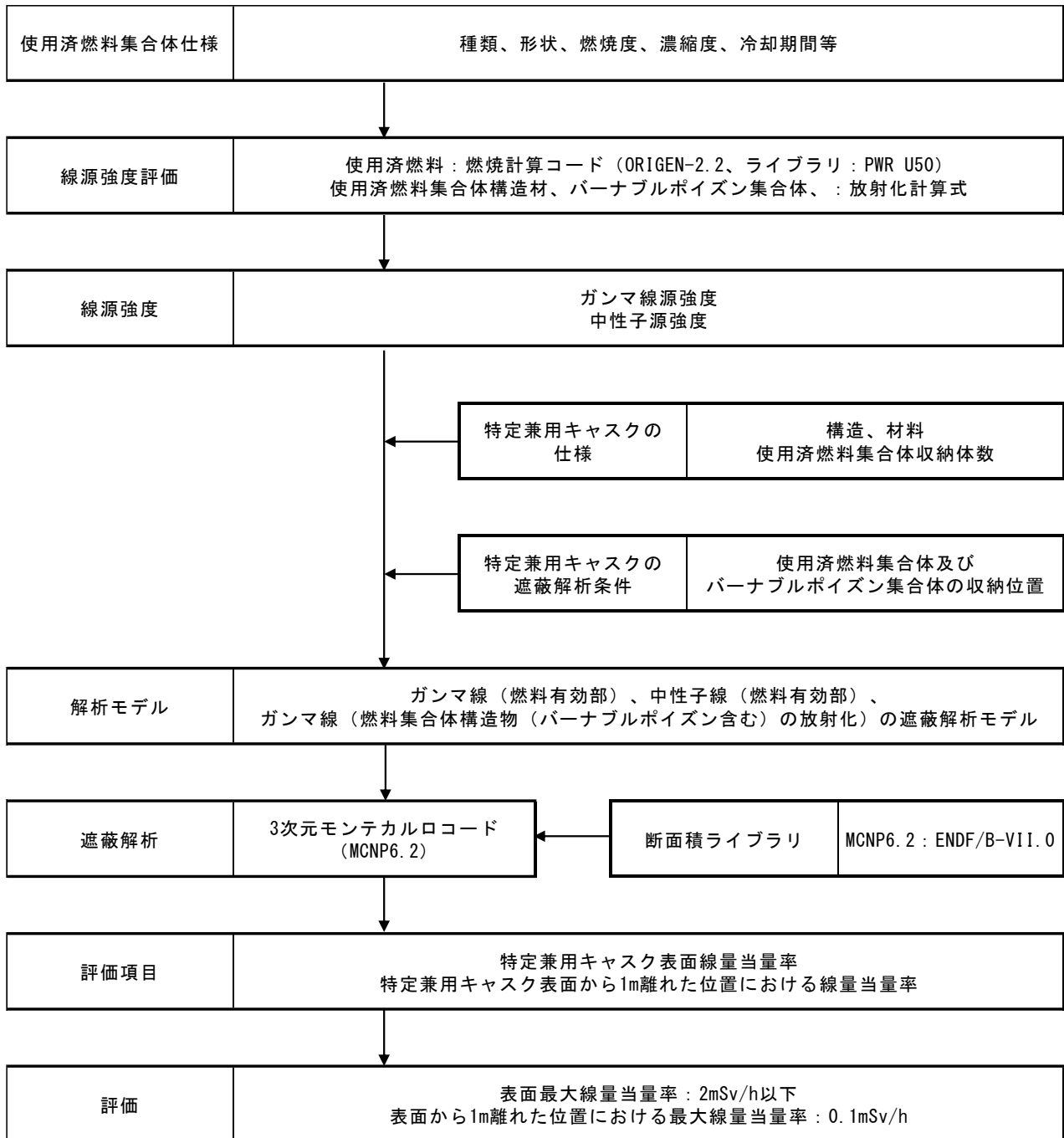


図1 遮蔽評価フロー

## (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、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	燃焼計算モデル
種類	-	-	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	264
最高燃焼度	MWd/t	48,000	48,000	48,000
濃縮度	wt-%	<4.1	<4.2	4.2
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	ppm	250		

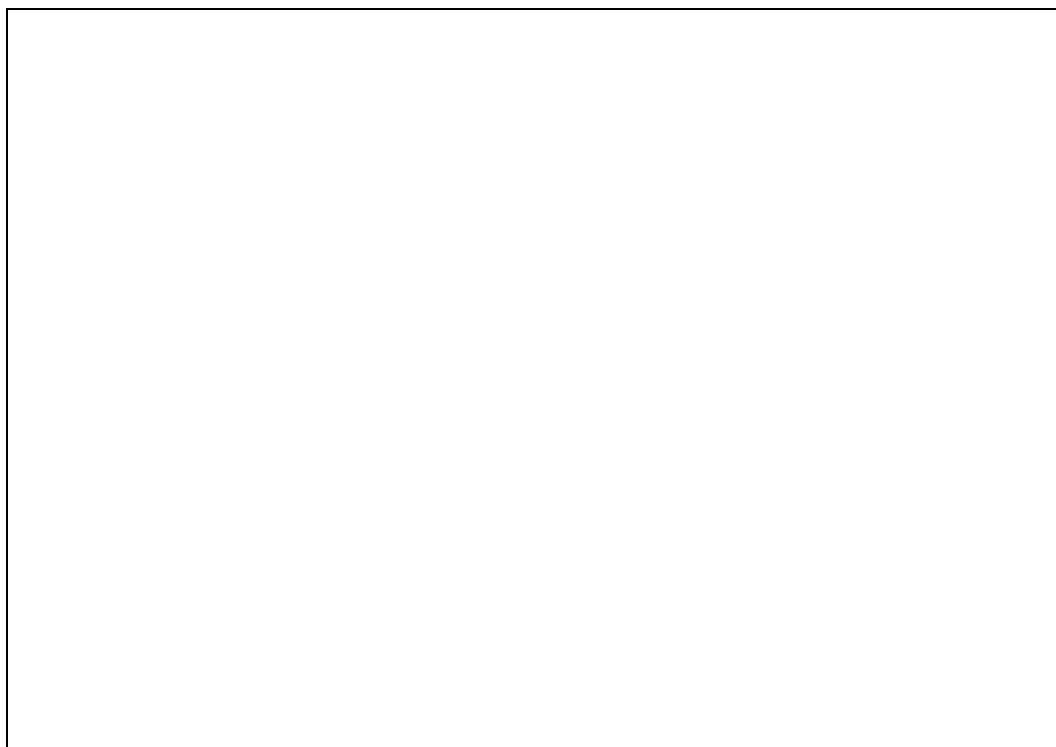
CASTOR® geo26JP 型では 15x15 と 17x17 の 2 種類の使用済燃料集合体を収納物として考慮する。

後述(遮蔽解析結果)の理由により、放射線源は 17x17 燃料集合体で代表させる。

ORIGEN コードの計算から得られる使用済燃料のガンマ線のソースターム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。これらの線源評価の妥当性は、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 3 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( $\alpha, n$ )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。

後で述べるように、遮蔽解析は保守的に 17×17 燃料で代表して評価することから、CASTOR® geo26JP 型では 15×15 燃料と 17×17 燃料は任意の位置で混合して収納可能である。

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おり(図 2 参照)、遮蔽計算はグループ別に独立して実施する。



	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	13	48,000	13
B	44,000	22	48,000	24
C	44,000	28	48,000	29
D	44,000	12	48,000	24
E	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 $(\alpha, n)$ 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 $(\alpha, n)$ 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  を仮定している。（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（18～26 番格子）において考慮している。Co-60 含有量は 、燃焼度 46 GWd/t と仮定して計算し、放射化ガンマ線核種として Co-60 で代表させる。

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。ただし、計算結果は、外側の位置が配置されたままであれば、任意の部分配置に適用される。

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、それぞれの遮蔽性能は無視する。

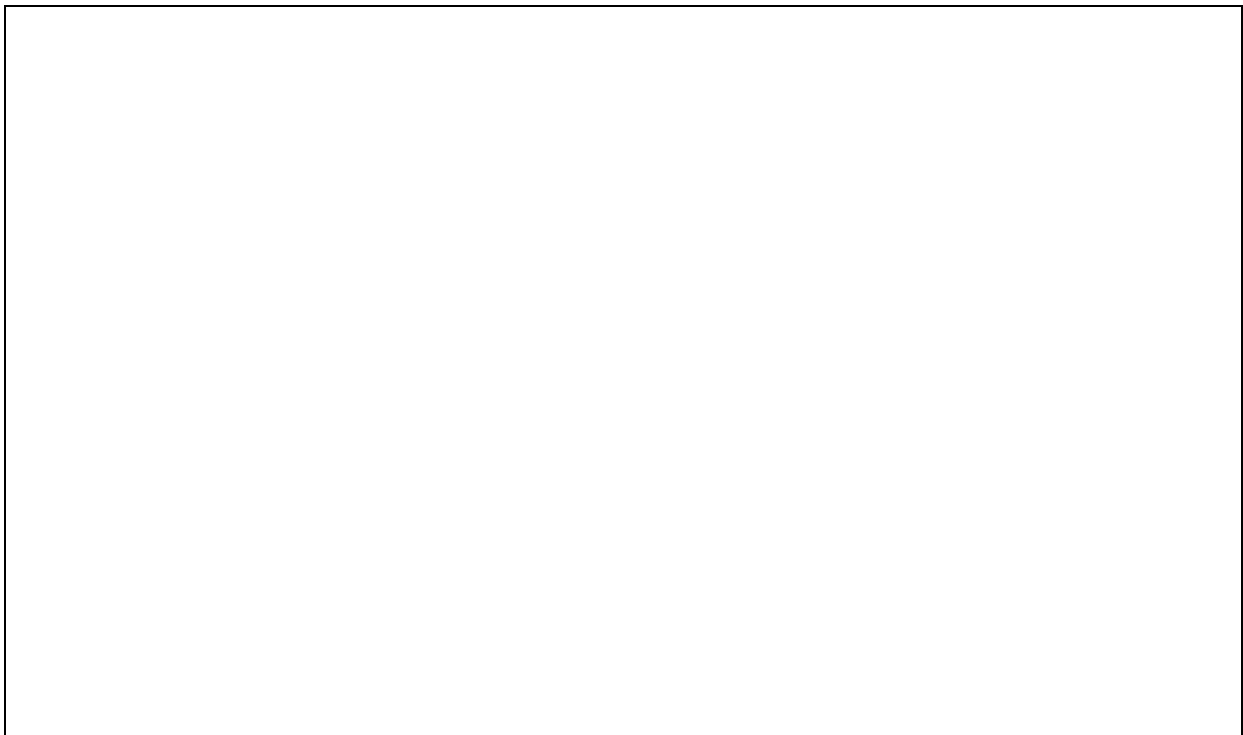


図 3 軸方向燃焼度分布

表 2 燃焼度 44,000 MWd/t の燃焼計算結果(17x17 燃料)\_(1/2)

--

表 3 燃焼度 48,000 MWd/t の燃焼計算結果(17x17 燃料)\_(2/2)

--

## (2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

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率値を得るために、異なる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手動で設定される。試行錯誤的繰り返し計算作業を通して、重要度は、すべてのセルにおいて制御され、線源から検出器へのいかなるジャンプもなしに、ゆっくりと単調に減少し続ける(または可能な場合には一定に保たれる)ようにする。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。

中性子及びガンマ線の線量率は、3次元空間におけるキャスクを囲むメッシュごとの仮想的な検出器によって与えられる(図 4 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。メッシュは、幾何学的形状に依存しない多層構造として、干渉することなく、キャスクモデルの表面などどの場所にも配置できる。体積検出器はその多層構造の一部であり、他の層と重複することはない。

主要な円筒メッシュに与えられる仮想的な検出器は、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的不確実性が 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率が一致することが確認される。



図 4 遮蔽解析モデルにおける円筒形メッシュ

メッシュタリーはキャスク表面及び表面から 1m の位置での線量率を示す。そのうち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「材料・構造健全性(長期健全性)に関する説明書」(1024-TR-00011)に示す通り、CASTOR<sup>®</sup> geo26JP 型の設計温度では水素は減少しないため、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。

体積検出器が適用される評価点を適切に設定するための考え方は、「①CASTOR<sup>®</sup> geo26JP 型の遮蔽解析モデル」の表 5 に続くパラグラフに記載されている。適用される線量率計算の方法論は、体積検出器が使用されるかメッシュからのセルが使用されるかに依存しない。違いは、体積検出器については、結果の統計的挙動を確認するため、10 個の統計的チェックなどの高度な統計的手段が利用可能であることである。体積検出器は、例えば、積み重なった燃料ペレットの中央、トランニオンの周り、蓋の上などの、

キャスク周りの重要な位置で、線量率分布の特殊性が予想される場所に配置される。通常、10 個の統計チェックが体積検出器に対して満たされることが必要とされる。チェックに關与する統計量は、推定平均、推定相対誤差、分散の度合い、性能指数、および履歴的に高確率密度関数である。

線量率に対する特定の位置/エネルギーグループの寄与が無視できる場合にのみ、10 個の統計的チェック全てを満たすという要件を弱めることができる。メッシュについては、不確実性の変動が滑らかであることが確認される(図 5 参照)。



図 5 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)における相対的な不確実性分布

① CASTOR® geo26JP 型の遮蔽解析モデル

表 4 に遮蔽解析条件を示す。評価結果は、表 4 に示す全ての燃料についても同様に対象としている。燃料有効長は最大であり、燃料密度は最小であるので、自己遮蔽効果を減少させる。燃料被覆管の厚さが同じならば、被覆管の直径は何の影響もない。

表 4 遮蔽解析条件

項目	単位	15x15 燃料	17x17 燃料		遮蔽解析モデル
種類	＝	＝	A	B	＝
燃料材質	＝	二酸化ウラン			
燃料密度	g/cm <sup>3</sup>				
ペレット直径	mm				
燃料棒外径	mm				



項目	単位	15x15 燃料	17x17 燃料	遮蔽解析モデル
燃料有効長 <sup>(注1)</sup>	mm			
燃料集合体当たり の燃料棒数	—			
軸方向燃焼度分布	—			
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。

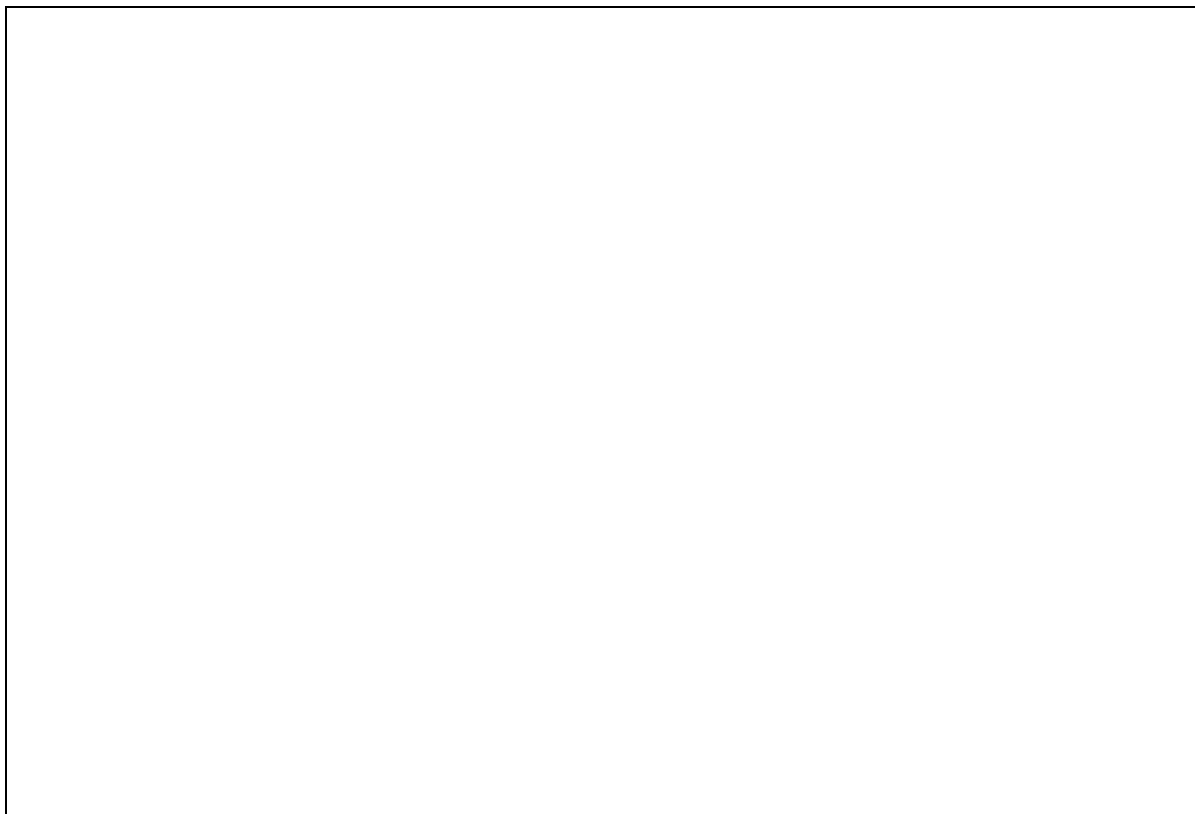


図 6 キヤスク遮蔽解析モデルの縦断面図

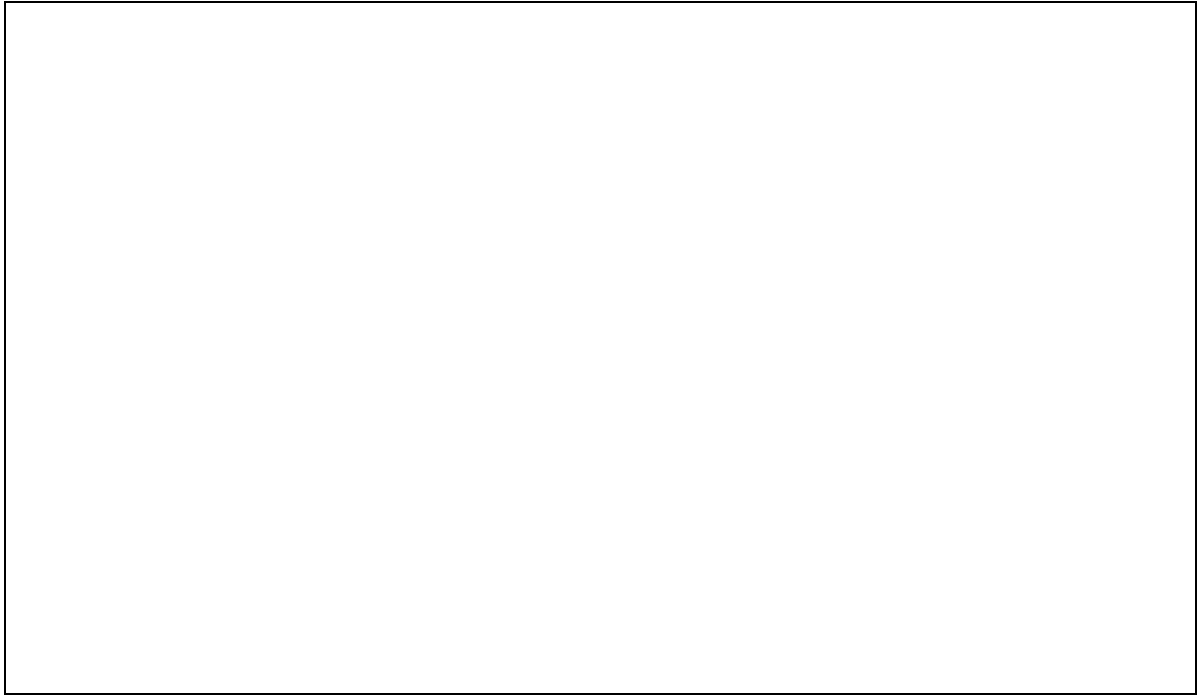


図 7            キャスク下部の縦断面図

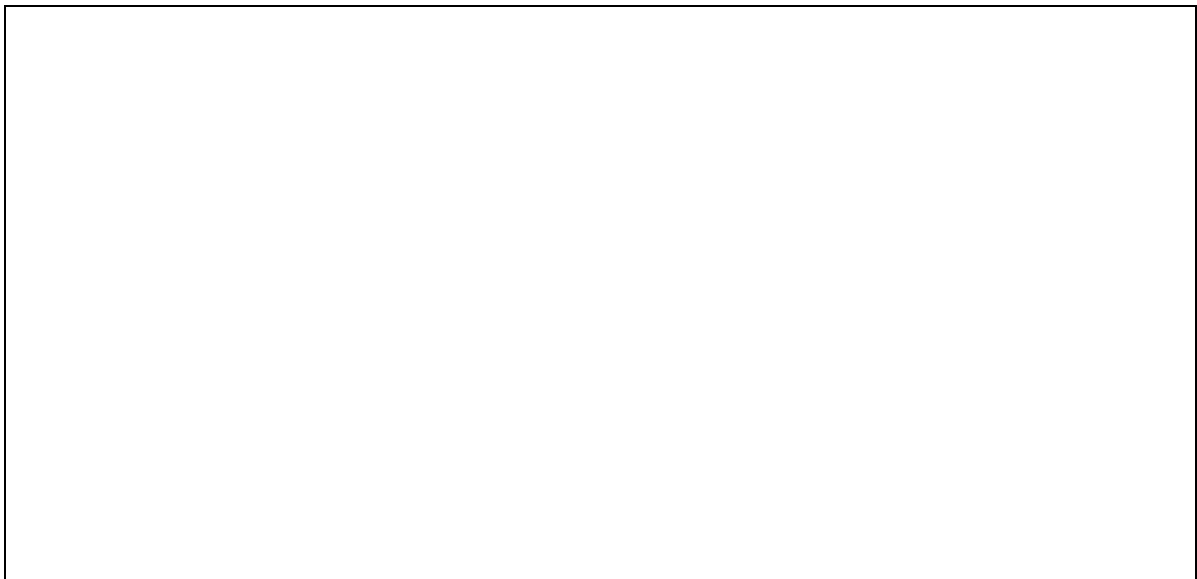


図 8            キャスク遮蔽解析モデルの横断面(1/4 カット)

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、部材のみで表されるが、これは保守的である。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。

キャスク胴内部に鉛直に配置されている中性子遮蔽棒の間の中性子のストリーミングは、本評価によって線量当量率の分布に有意な影響を与えるほどは存在しないことがわかる。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 12～図 15 の線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、線量率結果として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配置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、鋳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「構造及び材料に関する説明資料」(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 型が許容線量率要件を満たしていることを示している(図 12～図 15 及び表 6～表 8 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、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 [ ] 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。

一般に、外部線量率に対する未臨界中性子増倍の影響は無視できない。CASTOR® geo26JP の遮蔽解析では、この影響は燃料材料中の粒子輸送によって考慮される。保守的には、この影響は、 [ ] MWd/t の燃焼度に対応する燃料の化学組成を仮定することによって最大化されるが、これは代表的な燃焼度よりもはるかに低い。

この影響は、中性子実効増倍率の観点から定量化することができ、使用済燃料の化学組成によって効果的に定義され、その化学組成は、初期濃縮度と燃焼度によって特徴付けられる。同一の燃焼度については、濃縮度の高い燃料の方が増倍の影響が大きい。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、中性子実効増倍率が約 0.3 の場合、影響はかなり小さい。

遮蔽モデルでは、未臨界中性子増倍の影響は保守的な方法で考慮される。第一に、燃料の化学組成は、核分裂生成物の形での中性子毒を考慮していない。第二に、燃料組成を記述するために、 MWd/t の比較的小さい燃焼度が選択される。もちろん、増倍自体は新燃料を考慮する場合のほうが大きい。線源強度は局所的な燃焼とともに増加する。ガンマ線に対しては比例的に、中性子に対してはむしろ局所的な燃焼の 4 乗に比例する。したがって、中性子源強度が 1/30 以下の場合、(約  $(48,000 / \text{input})^4$ )、低燃焼度燃料は有意な線量率に寄与しない。したがって、新燃料を含むすべての種類の燃料集合体は、最大燃焼度 <48,000 MWd/t 以外の制限なしに、本遮蔽解析によって代表される。

設計上の公差は、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 5 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。(電気事業者へ燃料データを再確認したところ、わずかに大きな燃料密度(10.63 g/cm<sup>3</sup>)が確認されたが、本遮蔽解析モデルに使われる燃料密度はより小さく、保守的である。)

中性子減速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の確認は、補足説明資料(1024-TR-00005)により詳細に示されている。

表 5 遮蔽解析モデルにおける材料密度

部品	材料	密度、g/cm <sup>3</sup>	遮蔽解析用密度、g/cm <sup>3</sup>
キャスク本体	球状黒鉛鋳鉄	7.20	<input type="text"/>
燃料	酸化ウラン	10.62	
蓋、トラニオン	ステンレス鋼	7.78	
中性子遮蔽材	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。

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（②遮蔽解析結果の詳細参照）。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。

図 5 から分かるように、MCNP 解析は、キャスク表面及び表面から 1m において許容可能な結果を示す。また、絶対線量率が高いほど、不確か性が小さくなることが明確に分かる。最大値が見出される領域では、不確か性は、1%のオーダーである。不確か性の変動は、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と組み合わせられた 3次元不確か性分析は、高い信頼度で最大線量率の導出を可能にする。

詳細評価結果および線量当量率を網羅的に確認した結果を②遮蔽解析結果に示す。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。

## ② 遮蔽解析結果

燃料集合体冷却期間は、配置(i)(図 9 参照)と配置(ii)(図 10 参照)の条件において、キャスクの表面から 1m の位置における線量基準に対して最大線量当量率が 85%となるように設定した。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 12～図 17 に図示する。ここで、比較的高い線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。図 16 及び図 17 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率を示す。

これらの図から、比較的高い線量率の高い場所、例えば、キャスク下部や中央部が分かる。さらに、バスケットは非対称的な設計であり、90° 及び 270° 方向で低線量となり、0° 及び 180° 方向で比較的高線量となっていることが分かる。

線量当量率に関する要求事項の一つは、キャスクの表面線量当量率が 2mSv/h を超えないことである。図 12 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。ここでは、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。表 6 に示すように、合計値の最大線量当量率は  $331 \mu\text{Sv/h}$  となる。図 13 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 7 に示すように、合計値の最大線量当量率は  $297 \mu\text{Sv/h}$  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、CASTOR<sup>®</sup> geo26JP 型の表面線量当量率は、基準値( $2\text{mSv/h}$ )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 16 には、配置 (i) と (ii) の両方について、総線量当量率のみ示す。

線量当量率に関する要求事項の一つは、キャスクの表面から  $1\text{m}$  の距離で  $100 \mu\text{Sv/h}$  を超えないことである。図 14 に配置 (i) におけるキャスク表面から  $1\text{m}$  の位置の線量当量率の分布を示す。ここでは、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。前述のとおり、キャスク表面から  $1\text{m}$  の位置の線量当量率は  $85 \mu\text{Sv/h}$  となるように冷却期間を調整している。表 6 に示すように、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 15 に配置 (ii) におけるキャスク表面から  $1\text{m}$  の位置の線量当量率の分布を示す。この場合も、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。

蓋表面から  $1\text{m}$  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 17 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  $25 \mu\text{Sv/h}$  程度である。

比較のために、配置 (i) はまた、同じ線源強度を仮定して  $15 \times 15$  燃料で解析を行った。 $17 \times 17$  燃料が遮蔽計算において保守的であることが明確に分かる(表 8 参照)。

CASTOR<sup>®</sup> 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漏れ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、両方の機能で漏れない。CASTOR<sup>®</sup> geo26JP 型の遮蔽設計の妥当性は、図 12~図 17 及び表 6~表 8 に示す通りで、キャスク表面及び表面から  $1\text{m}$  の線量値は基準値を下回っている。

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)	$\geq 13$	$\geq 22$	$\geq 28$	$\geq 12$	$\geq 16$

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)	≥13	≥24	≥29	≥24	≥29

図 10 配置(ii)の収納条件

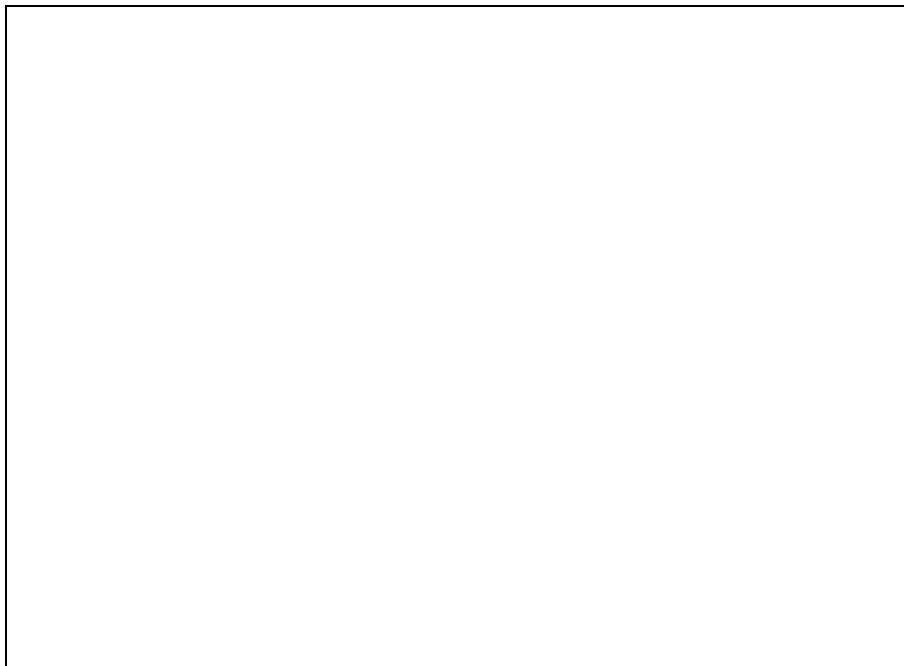


図 11 図 12～図 17 における縦軸(キャスク底部からの高さ、h)及び横軸(周方向の角度)の測り方

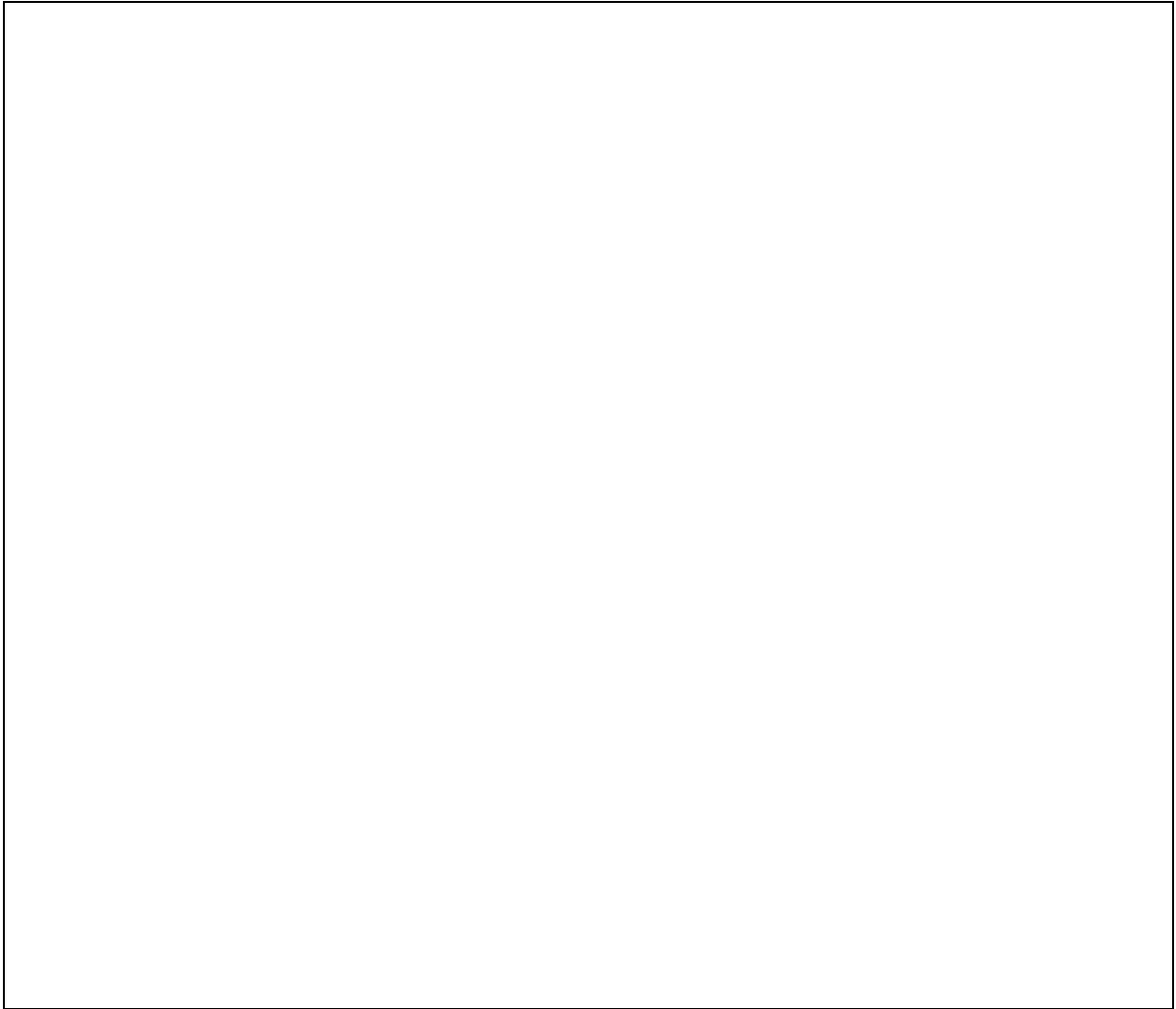


図 12 配置(i)でのキャスク表面線量当量率 (mSv/h):  
燃料有効部からのガンマ線(左上)、中性子(右上)、  
燃料集合体構造物の放射化ガンマ線(左下)、合計(右下)。





図 13 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)。

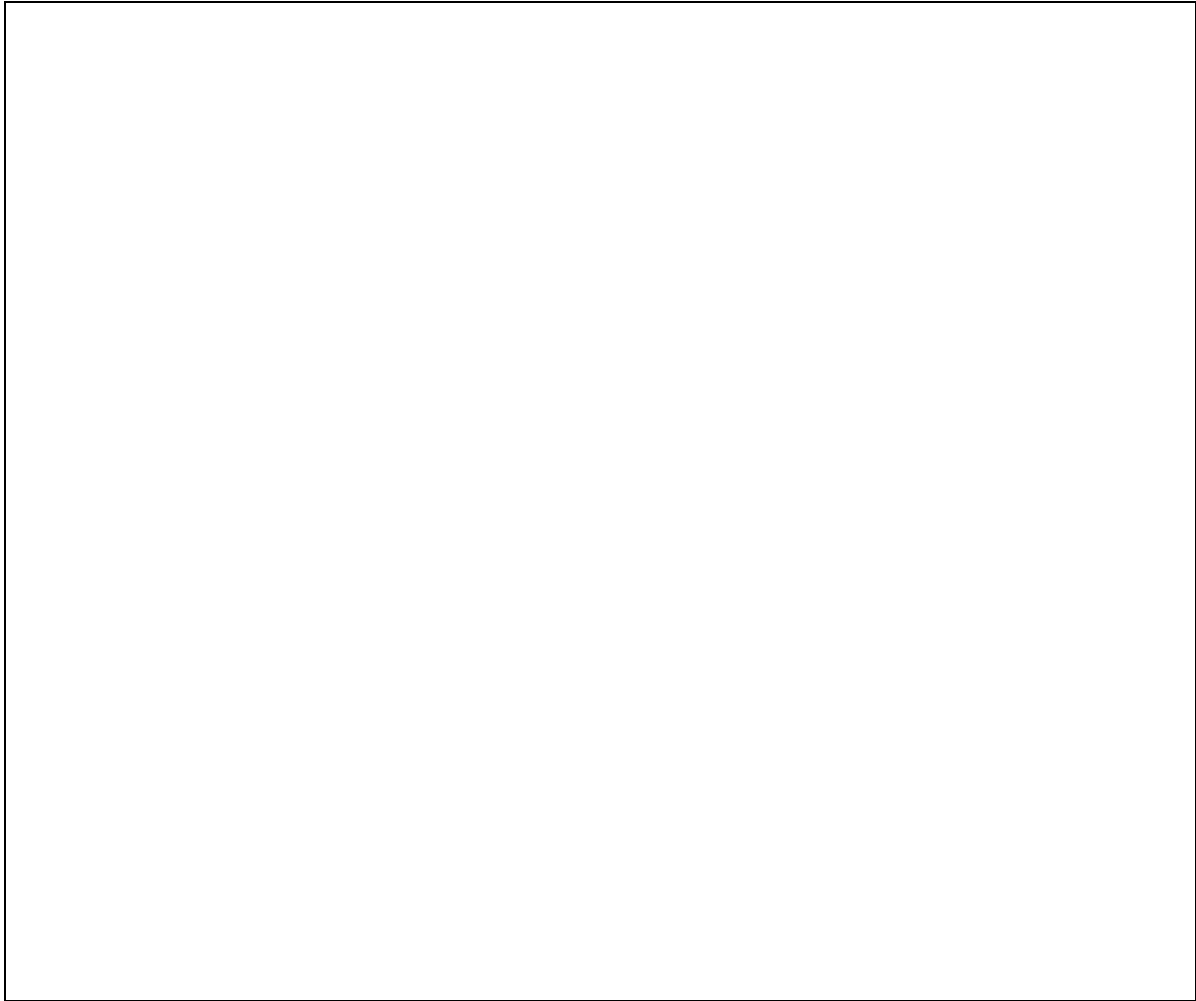


図 14 配置(i)でのキャスク表面から1mの位置における線量当量率 (mSv/h):  
燃料有効部からのガンマ線(左上)、中性子(右上)、  
燃料集合体構造物の放射化ガンマ線(左下)、合計(右下)。



図 15 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)。

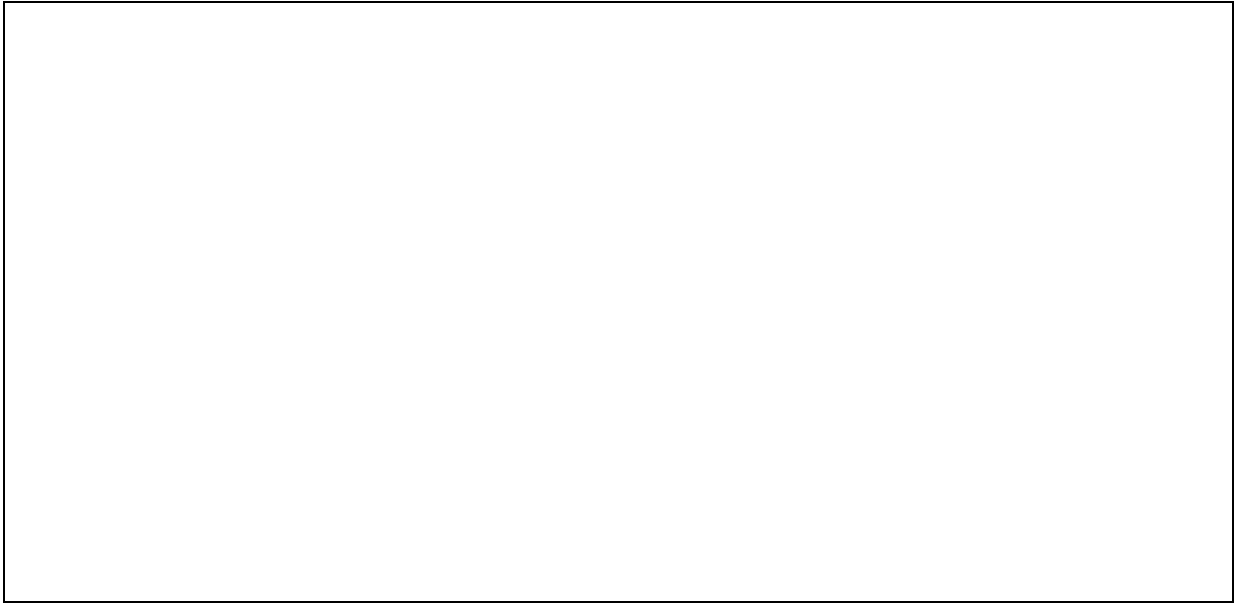


図 16 配置(i)(左)及び配置(ii)(右)でのキャスク蓋表面における合計線量当量率 (mSv/h)  
(縦軸、横軸: 中心からの距離)

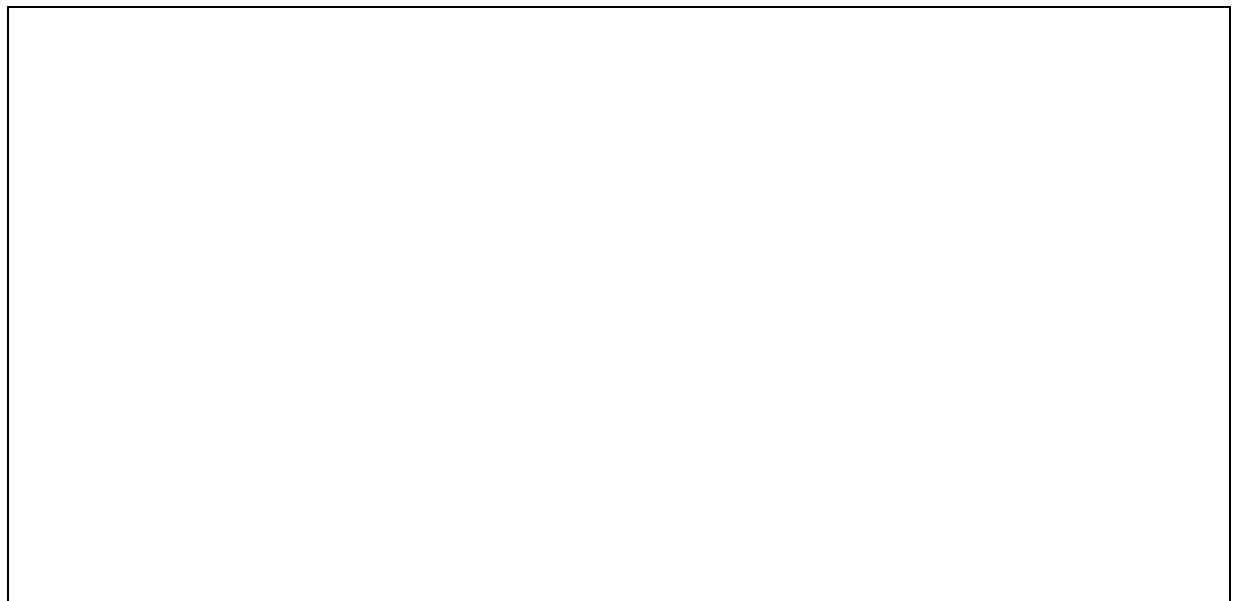


図 17 配置(i)(左)及び配置(ii)(右)でのキャスク表面から1mの位置における合計線量当量  
率 (mSv/h) (縦軸、横軸: 中心からの距離)

表 6 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
表面	79	214	86 (1.4%)	232 (1.2%)	13 (1.7%)	331 (0.9%)
1 m の位置	97	39	40 (1%)	43 (1.1%)	2 (1.7%)	85 (0.9%)

表 7 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
表面	24	24	275 (1%)	7 (1.1%)	15 (2.7%)	297 (1%)
1 m の位置	229	169	44 (0.8%)	41 (0.4%)	< 1 (3.8%)	85 (0.5%)

上述したように、キャスク外部の線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率は異なる場所で最大値を示すことが明らかにわかる。2つの線量率の寄与の相対的な強さに応じて、全体的な最大値は異なる場所に現れる。配置パターン(i)と(ii)はそれらの放射性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。図2に示すように、配置パターン(i)は、配置パターン(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率を示す。配置パターン(ii)の場合、より長い冷却期間を有する燃料集合体を収納しているので、総線量率に対する主な寄与は、ゆっくりと減衰する中性子によって与えられ、したがって、最大値は、中性子最大の位置で観察される。配置パターン(ii)の場合、総線量率の最大値は、中性子の最大値に近い。

表6及び表7のカッコ内数字は統計誤差を示す。表7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3.8%で比較的大きいが、合計線量率における放射化ガンマ線が占める寄与は小さいので、問題ない。

**表 8 比較のために示す 15x15 燃料による配置(i)の最大線量当量率**

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
表面	79	325	81 (1.4 %)	226 (1.2 %)	14 (1.8 %)	320 (0.9 %)
1 m の位置	191	335	39 (0.9 %)	42 (0.4 %)	< 1 (3.1 %)	82 (0.5 %)

**表 9 比較のために示す 15x15 燃料による配置(ii)の最大線量当量率**

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
表面	24	335	265 (1 %)	6 (1 %)	16 (3.8 %)	287 (1 %)
1 m の位置	229	190	43 (0.9 %)	40 (0.4 %)	< 1 (4.2 %)	83 (0.5 %)

**【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( $1\text{mSv/y}$ )を十分下回る水準とすること。

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

## 4) 応急復旧

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

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<sup>®</sup>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 $\alpha, n$ )反応により発生する中性子源強度等)は、ライブラリデータとしてコードに内蔵されている。

#### 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。

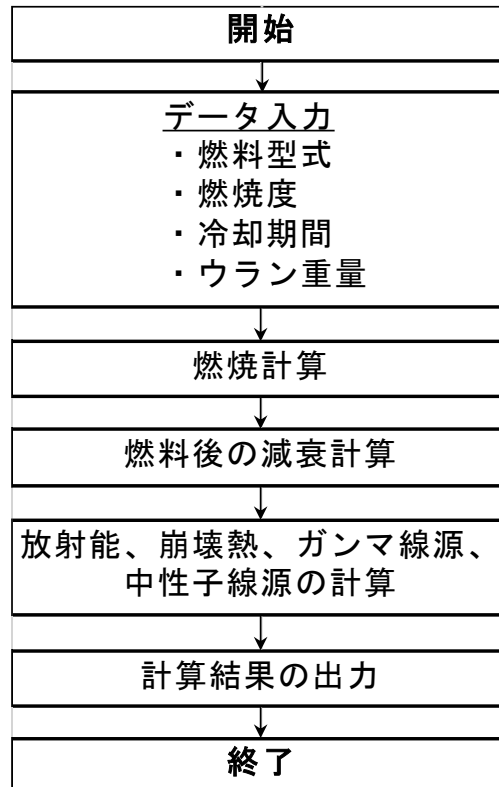


図 A1-1 ORIGEN2 コードの計算フロー

#### 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。

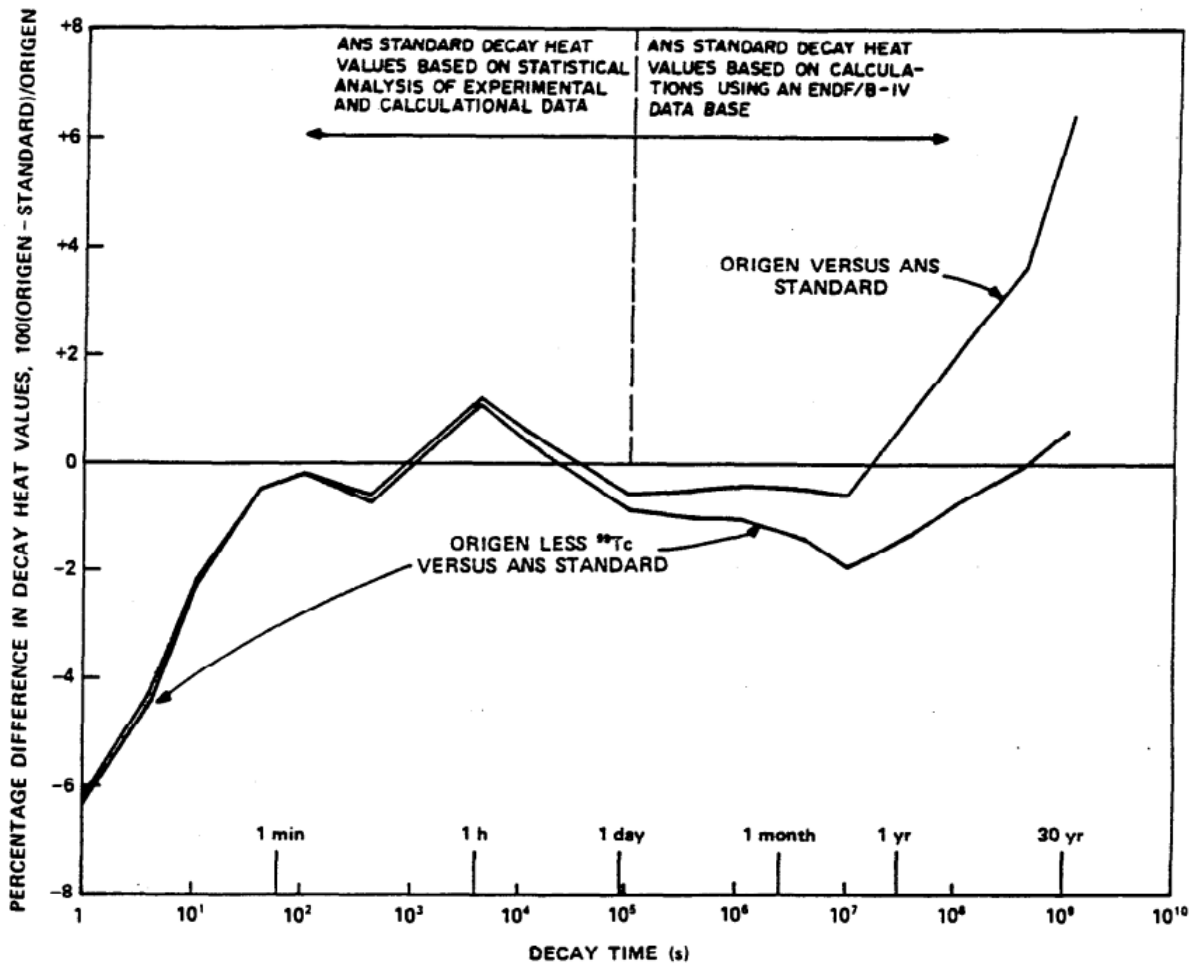


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for  $10^{13}$ -s irradiation of  $^{235}\text{U}$ .

#### 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。

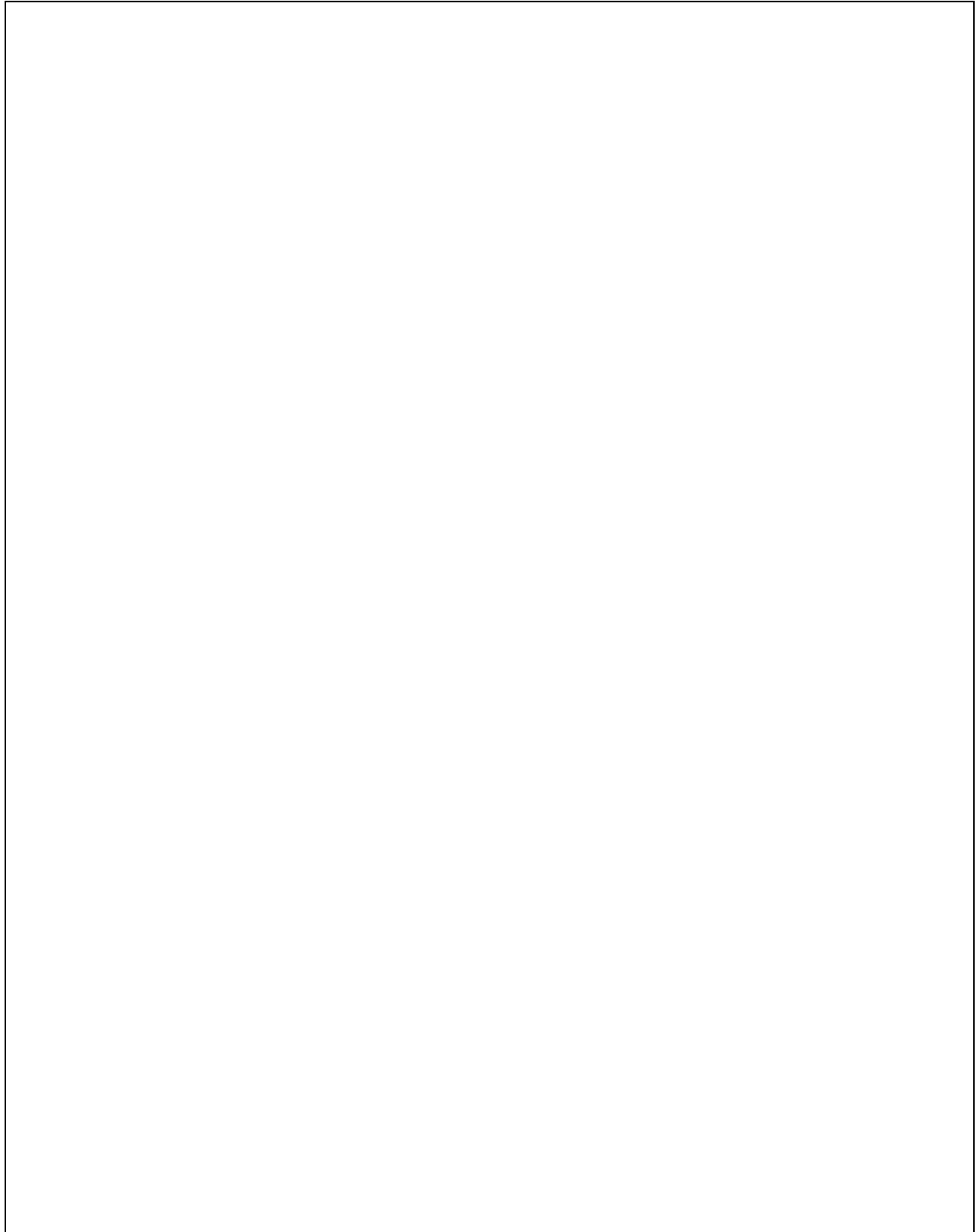
MCNP6 コードの解析フローを図 1 に示す。

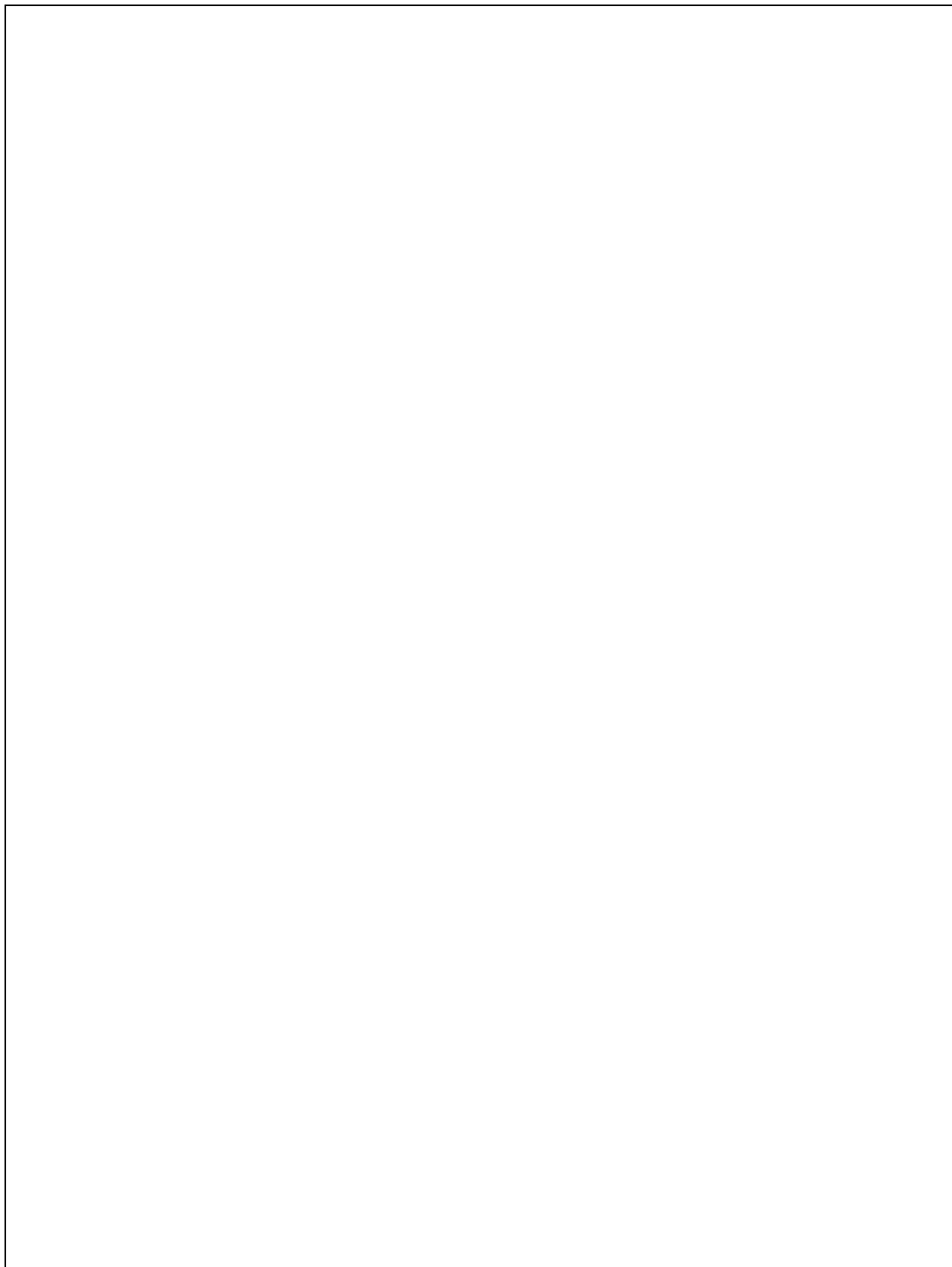
MCNP6 コードの検証は、  
実施した(別紙2参照)。

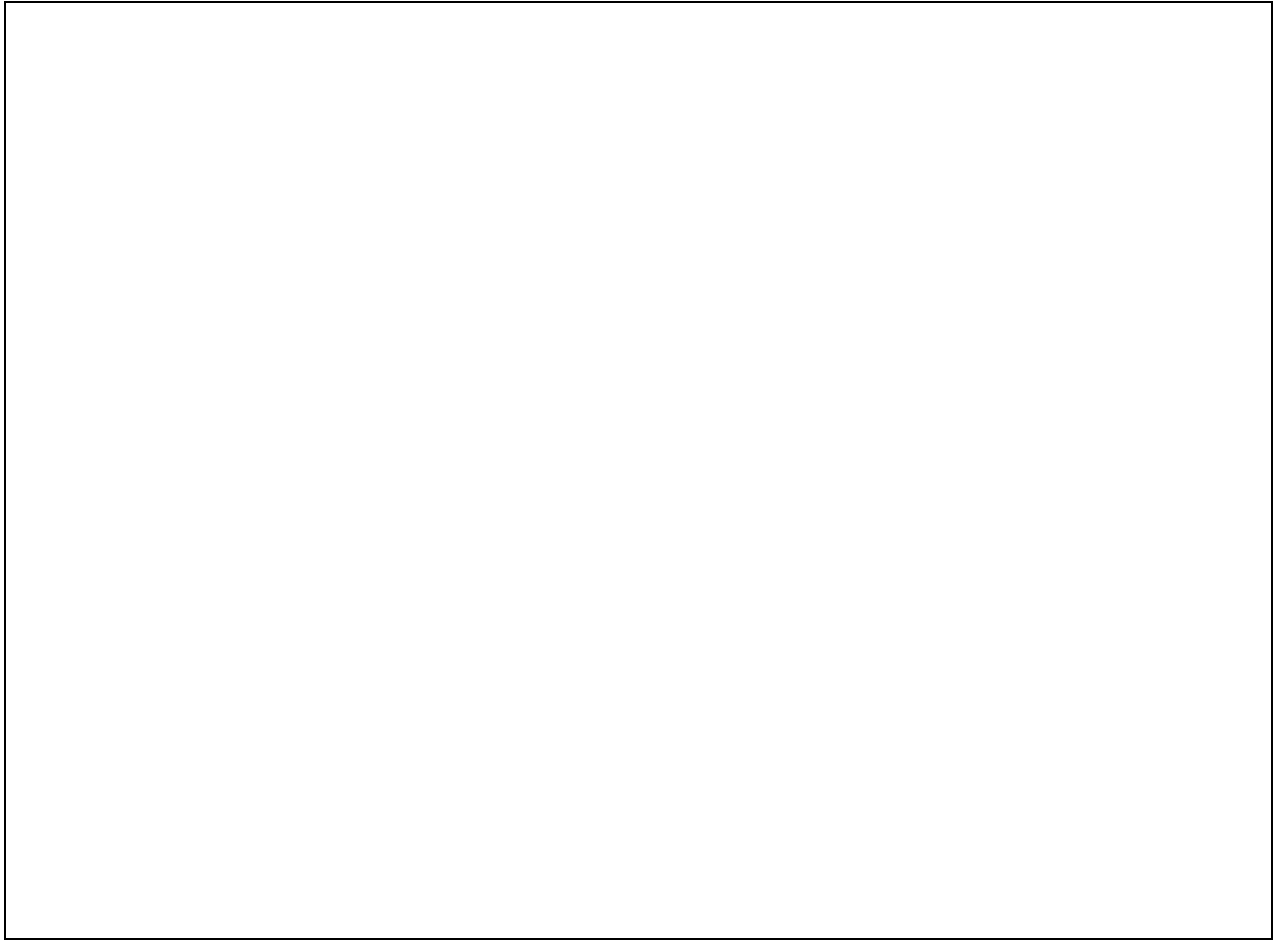
## A1.3 参考文献

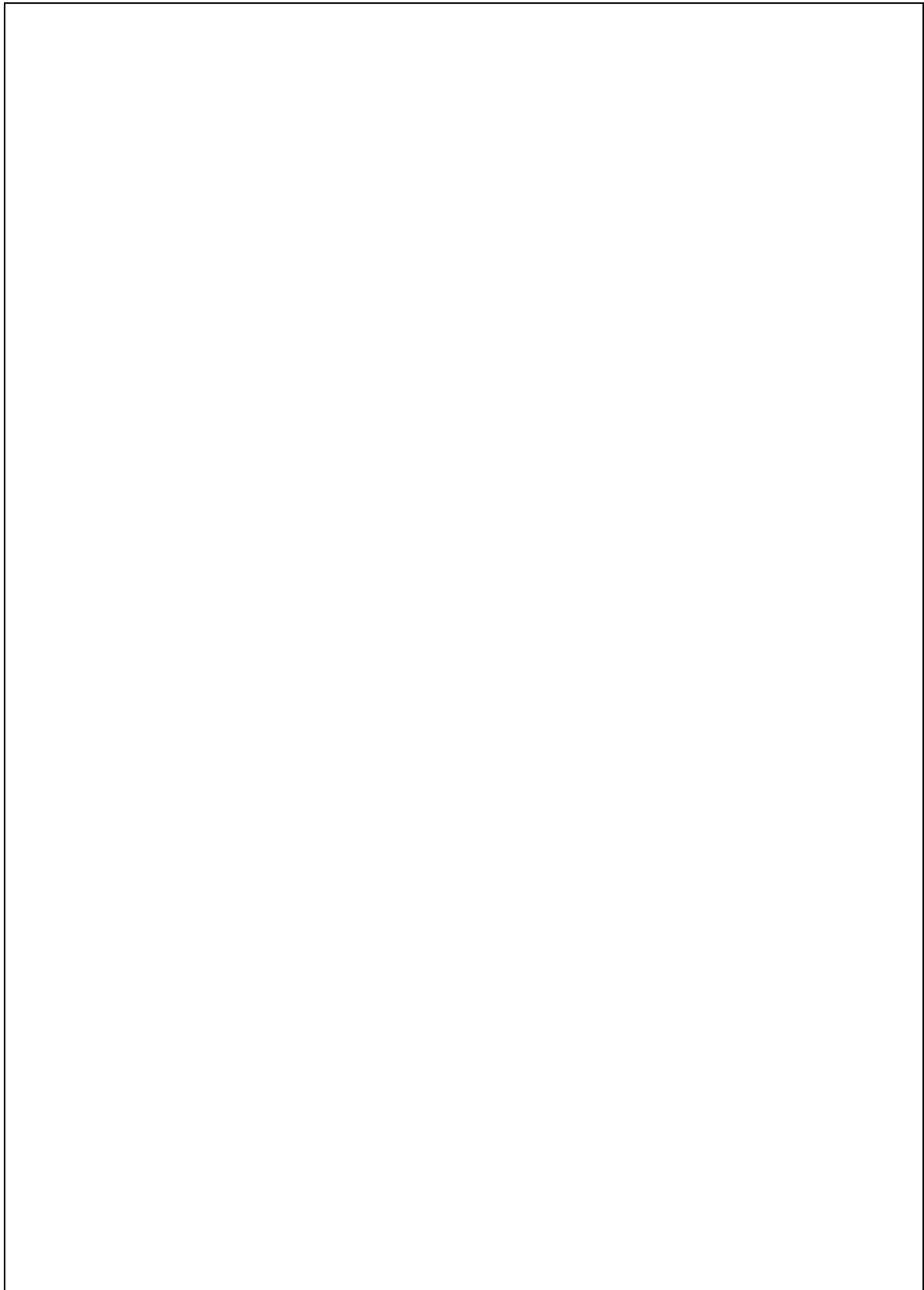
- [3] ORIGEN 2.2, RSICC Computer Code CCC-371, 06.2002
- [4] A. G. Croff, ORIGEN2: A Versatile Computer Code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials, Nuclear Technology, Vol. 62 (1983)
- [5] C. J. Werner et al., MCNP® USER'S MANUAL Code Version 6.2, 27.10.2017
- [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

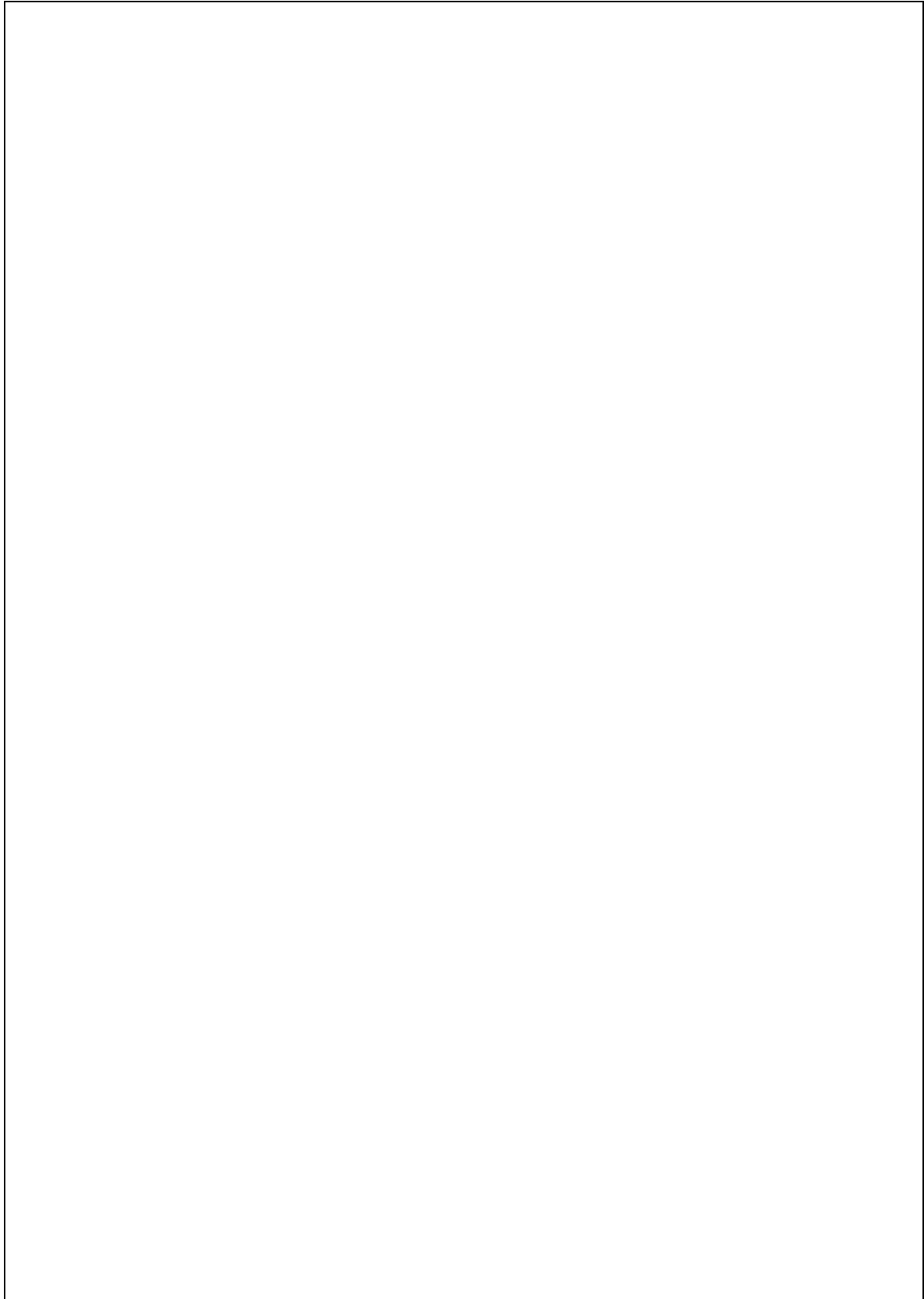












## 参考文献

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