

資料 1-2

Doc No. GK03-SC-D01 Rev.0

2023 年 1 月 20 日

日立造船株式会社

補足説明資料 16-3

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

遮蔽機能に関する説明資料

目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	4
3. Hitz-B69 型の遮蔽機能に関する構造及び評価	8

別紙 1 線源強度計算条件

別紙 2 遮蔽解析条件

別紙 3 中性子実効増倍率の設定について

別紙 4 中性子源スペクトルを ^{239}Pu 核分裂スペクトルで代表させる設定の妥当性

別紙 5 遮蔽解析に使用する解析コードについて

別紙 6 遮蔽解析に用いる断面積ライブラリについて

1. 要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、特定兼用キャスク（以下「キャスク」という。）の遮蔽機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則第16条第4項第一号

使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。

b. 設置許可基準規則解釈別記4第16条第2項

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

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

▶ 貯蔵事業許可基準規則解釈第4条第1項第三号

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

- ・兼用キャスク表面の線量当量率が1時間当たり2ミリシーベルト以下であり、かつ、兼用キャスク表面から1メートル離れた位置における線量当量率が1時間当たり100マイクロシーベルト以下であること。
- ・貯蔵建屋（工場等内において兼用キャスクを収納する建物をいう。以下この条において同じ。）を設置する場合には、当該貯蔵建屋の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下したときにおいても、工場等周辺の実効線量は周辺監視区域外における線量限度を超えないこと。

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

c. 設置許可基準規則解釈別記4第16条第5項

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

- ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
- ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造

であること。

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

「2.安全機能の確保 2.2 遮蔽機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

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

』

【確認内容】

『

以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 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 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。

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

Hitz-B69 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。

- | |
|--|
| <p>a. 設置許可基準規則第 16 条第 4 項第一号
使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none">・貯蔵事業許可基準規則解釈第 4 条第 1 項第 3 号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすこと。▶ 貯蔵事業許可基準規則解釈第 4 条第 1 項第三号
使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、遮蔽機能に関する評価で考慮した使用済燃料の燃焼度に応じた当該使用済燃料の配置の条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。 <ul style="list-style-type: none">・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。 <p>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。</p> |
|--|

Hitz-B69 型は以下に示す設計方針により、収納する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設計としている。

Hitz-B69 型は、使用済燃料集合体から放出される放射線をキャスクの本体胴及び蓋部により遮蔽する設計とし、ガンマ線遮蔽材には十分な厚みを有する鋼製の材料を用い、中性子遮蔽材には樹脂（レジン）を用いる。設計貯蔵期間 60 年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、キャスク表面及びキャスク表面から 1m の位置における線量当量率は、それぞれ 2mSv/h 以下及び 100 μ Sv/h 以下となる設計とする。

Hitz-B69 型の遮蔽機能に関する評価は、収納する使用済燃料集合体の種類、燃焼度、冷却期間等の条件から、遮蔽評価の結果が厳しくなる入力条件を設定したうえで、線源強度を求める。キャスクの実形状を二次元でモデル化し、キャスク表面及びキャスク表面から 1m の位置における線量当量率を求め、上記に示す線量当量率の基準を満足すること

を確認する。

なお、Hitz-B69型に使用済燃料集合体を収納するに当たっては、キャスクの遮蔽機能に関する評価で考慮した使用済燃料集合体の種類、燃焼度及び冷却期間に応じた使用済燃料集合体の配置の条件又は範囲を逸脱しないような措置が講じられること、及び貯蔵建屋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は周辺監視区域外における線量限度を超えないことについては、設置（変更）許可申請時に別途確認されるものとする。

以上の設計方針に基づく Hitz-B69 型の遮蔽機能に関する構造及び評価を 3.項に示す。

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。

Hitz-B69 型の設計貯蔵期間は 60 年と明確にしている。

Hitz-B69 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 60 年間における温度、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することにより、必要とされる強度及び性能を維持し、使用済燃料の健全性を確保する設計としている。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等の経年変化に対して信頼性を有する材料を選定していることについては、申請書 添付書類一 4.7 に示すとおりである。

また、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、Hitz-B69 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が考慮されている。

[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。

Hitz-B69 型の放射線源強度評価に用いる燃焼計算コードは、別紙 5 に示すとおり検証され、適用性が確認されている。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として核種の生成及び崩壊を計算して求めていることは 3.項及び別紙 1 に示す通りである。

[確認内容]

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。

Hitz-B69 型の線量当量率は、キャスクの実形状を二次元で適切にモデル化し、及び上記の燃焼計算コードを用いて求めた放射線源強度に基づき、別紙 5 に示すとおり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を使用して、3.項及び別紙 2 に示す通り求めている。その際、設計貯蔵期間 60 年間の中性子遮蔽材（樹脂（レジン））の熱劣化による遮蔽機能の低下を別紙 2 に示す通り考慮している。

3.項に示す通り、キャスク表面の線量当量率は 2mSv/h 以下であり、かつ、キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率は 100µSv/h 以下である。

[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 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 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。

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については型式証明申請の範囲外とし、設置（変更）許可申請時に別途確認されるものとする。

3. Hitz-B69 型の遮蔽機能に関する構造及び評価

(1) 遮蔽機能に関する構造

Hitz-B69型は、使用済燃料集合体からの放射線をキャスク本体及び蓋部により遮蔽する。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樹脂（レジン）を用いる。

Hitz-B69型の遮蔽機能に関する構造を図3-1に示す。

(2) 遮蔽機能に関する評価

遮蔽解析フローを図3-2に示す。

遮蔽解析では、二次元輸送計算コードDOT3.5（DLC-23/CASKライブラリ）を用いて線量当量率を評価する。線量当量率評価に用いる線源強度は、収納する使用済燃料集合体の種類、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件に、燃焼計算コードORIGEN2を用いて求める。

図3-3に示されるHitz-B69型の使用済燃料集合体の燃料収納位置の条件（配置(1)から配置(4)）及び図3-4に示される軸方向燃焼度の条件を考慮し、配置(1)から配置(4)それぞれについて、使用済燃料集合体の線源強度計算条件を表3-1に示す。線源強度の計算には、使用済燃料集合体の平均燃焼度に対する軸方向の燃焼度の比を包含する燃焼度分布（以下「ピーキングファクタ」という。）を考慮する。遮蔽解析では、配置(1)から配置(4)のうち、収納する使用済燃料集合体の燃焼度が大きく、また、冷却期間が短い配置(4)の条件を代表として評価する。線源強度の計算結果を表3-2に示す。

線源強度計算条件の詳細及び配置(4)を代表とする妥当性について別紙1に示す。

線量当量率の評価に当たっては、配置(4)の使用済燃料集合体の燃焼度に応じた収納位置条件を考慮し、図3-5に示す使用済燃料集合体の収納位置条件とする。また、設計貯蔵期間中におけるHitz-B69型の中性子遮蔽材の熱による遮蔽性能の低下を考慮する。

遮蔽解析条件及び解析モデルの詳細を別紙2に示す。

上記条件に基づく解析の結果、表3-3に示すように、表面及び表面から1m離れた位置における線量当量率は、それぞれ2mSv/h及び100µSv/h以下を満足している。

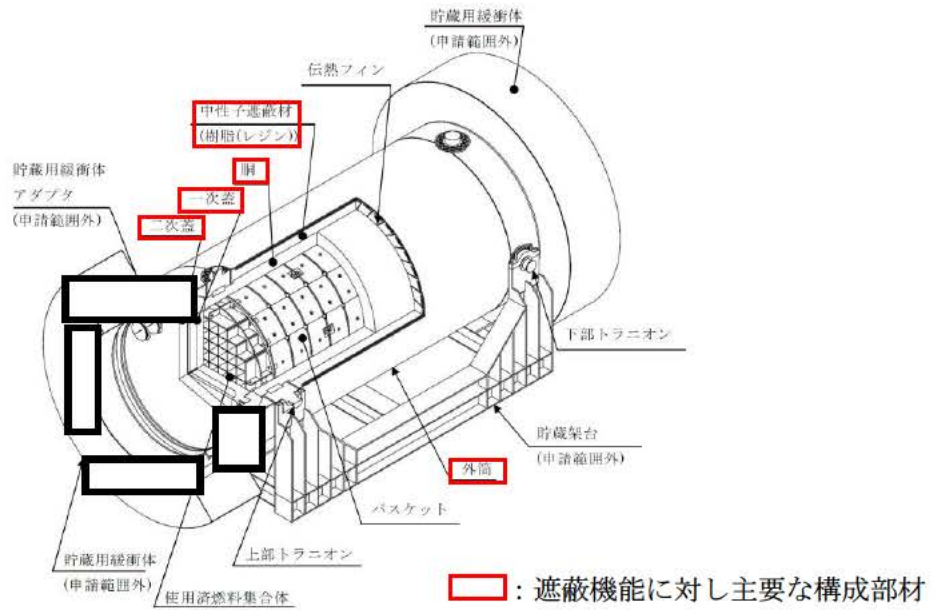
表面及び表面から1m離れた位置における線量当量率の評価位置及び評価結果の詳細を表3-4及び図3-6に示す。

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
 - 収納制限（配置(1)から配置(4)）の中で、中央部及び外周部ともに最も線源強度が高くなる配置(4)（中央部：高燃焼度 8×8 燃料、外周部：新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料）を代表として評価している。
 - 線源強度の計算において、初期濃縮度は評価条件とする燃焼度程度に到達する燃

料集合体の初期濃縮度の最小値として、高燃焼度 8×8 燃料は 3.35wt%、及び新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料は 2.88wt%としている。

- 収納制限では、高燃焼度 8×8 燃料のキャスク 1 基当たりの平均燃焼度は 44,000 MWd/t に、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料のキャスク 1 基当たりの平均燃焼度は 33,000 MWd/t にそれぞれ制限されるが、収納位置によって制限される最高燃焼度の燃料が全数収納された条件（中央部（高燃焼度 8×8 燃料）は全て 48,000 MWd/t、外周部（新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料）は全て 35,000 MWd/t）としている。これにより、キャスク 1 基当たりの平均燃焼度を上回る燃焼度の燃料が偏って収納された場合でも、局所的な線量当量率が評価結果を上回ることはない。
- ・モデル化の保守性
 - 中性子遮蔽材は設計貯蔵期間中の熱的影響により質量減損するため、設計貯蔵期間経過後の質量減損率を計算し、遮蔽評価上は貯蔵初期において質量減損したものとする。（別紙 2「3.中性子遮蔽材の質量減損について」参照）
 - 使用済燃料は、蓋方向、底部方向に移動したモデルとしており、線源である使用済燃料が評価点により近くなる設定とする。
 - 申請範囲外である貯蔵用緩衝体及び貯蔵用緩衝体アダプターは無視する。
 - チャンネルボックスは、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。



貯蔵時（蓋部が金属部へ衝突しない設置方法）

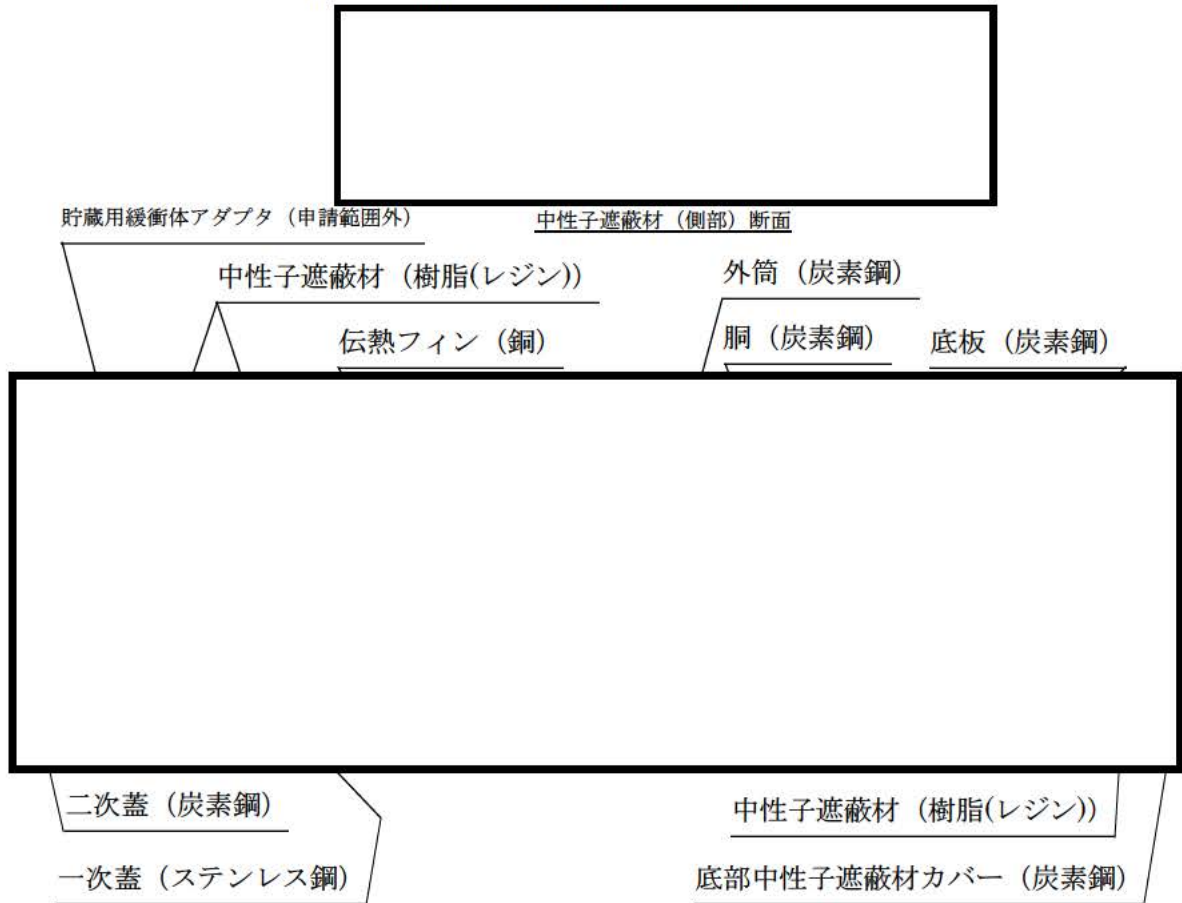
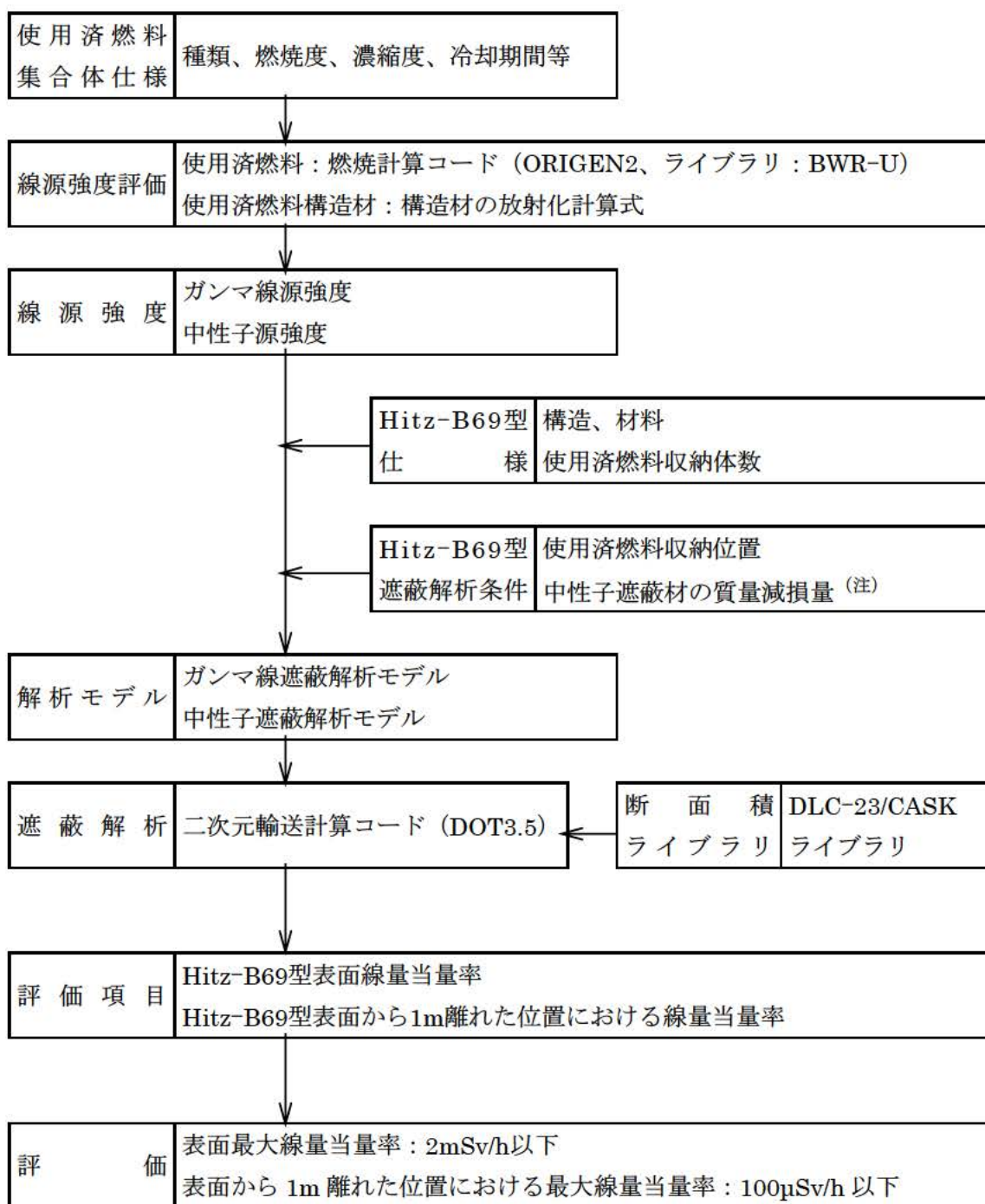
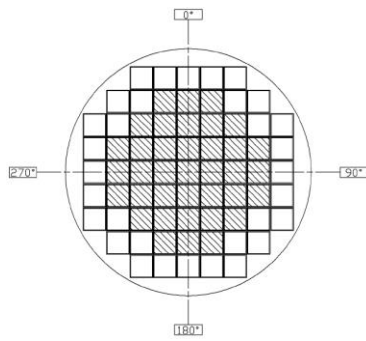


図 3-1 Hit-B69 型の遮蔽構造



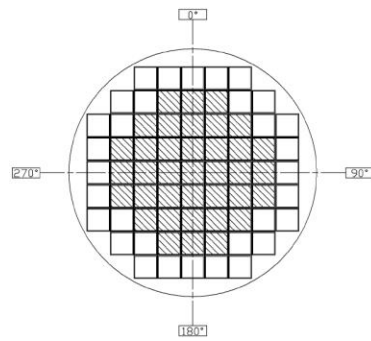
（注）Hit-B69型の主要な構成材料のうち、中性子遮蔽材（樹脂（レジン））は熱による質量減損が生じる。遮蔽解析では、設計貯蔵期間（60年）経過後の中性子遮蔽材の質量減損を考慮する。

図 3-2 遮蔽解析フロー図



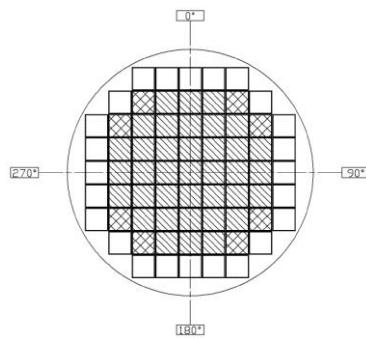
- ▨ : 新型 8×8 燃料
(38,000MWd/t 以下、冷却 34 年以上)
- : 8×8 燃料
(30,000MWd/t 以下、冷却 34 年以上) 又は
新型 8×8 燃料
(30,000MWd/t 以下、冷却 34 年以上)

配置(1)



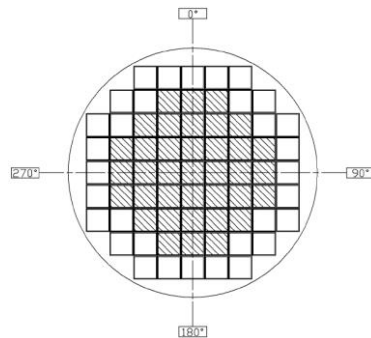
- ▨ : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
(40,000MWd/t 以下、冷却 28 年以上)
- : 新型 8×8 燃料
(35,000MWd/t 以下、冷却 34 年以上) 又は
新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
(35,000MWd/t 以下、冷却 30 年以上)

配置(2)



- ▨ : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
(40,000MWd/t 以下、冷却 28 年以上) 又は
高燃焼度 8×8 燃料
(48,000MWd/t 以下、冷却 20 年以上)
- ▨ : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
(35,000MWd/t 以下、冷却 30 年以上)
- : 新型 8×8 燃料
(30,000MWd/t 以下、冷却 34 年以上)

配置(3)

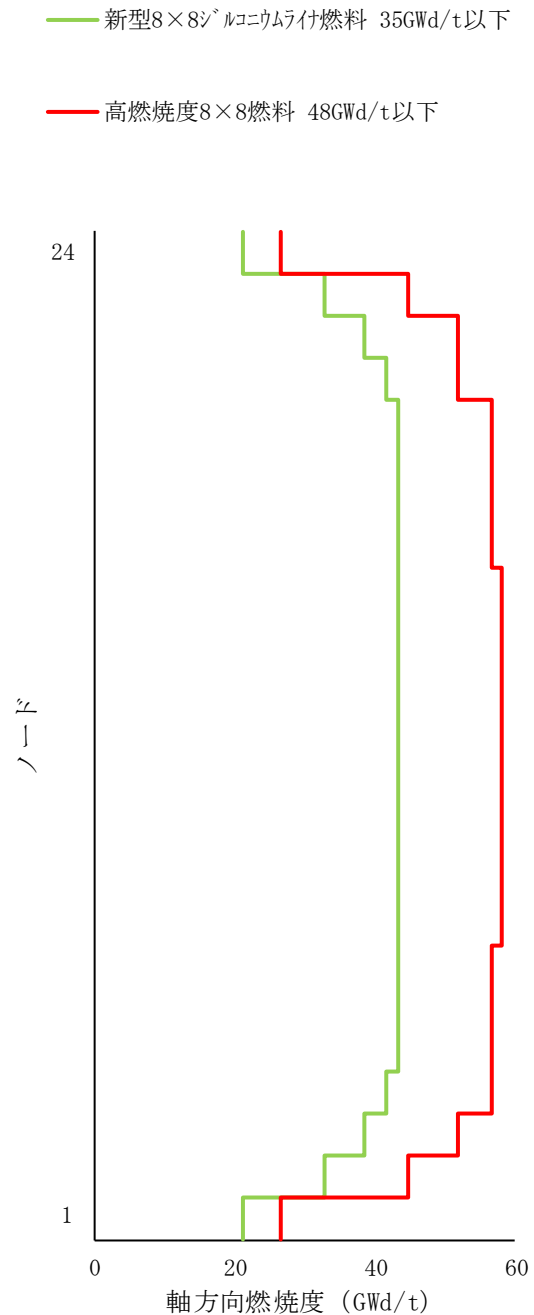


- ▨ : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
(40,000MWd/t 以下、冷却 28 年以上) 又は
高燃焼度 8×8 燃料
(48,000MWd/t 以下、冷却 20 年以上)
- : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
(35,000MWd/t 以下、冷却 30 年以上)

配置(4)

図 3-3 使用済燃料集合体の燃料収納位置の条件の概要

燃料種類	新型 8×8 ジルコニウムライ ナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料	
燃焼度	35GWd/t 以下	48GWd/t 以下	
ノード	軸方向燃焼度※ (GWd/t)		
(上部)	24	21.00	26.40
	23	32.90	44.64
	22	38.50	51.84
	21	41.65	51.84
	20	43.40	56.64
	19	43.40	56.64
	18	43.40	56.64
	17	43.40	56.64
	16	43.40	58.08
	15	43.40	58.08
	14	43.40	58.08
	13	43.40	58.08
	12	43.40	58.08
	11	43.40	58.08
	10	43.40	58.08
	9	43.40	58.08
	8	43.40	58.08
7	43.40	56.64	
6	43.40	56.64	
5	43.40	56.64	
4	41.65	56.64	
3	38.50	51.84	
2	32.90	44.64	
(下部)	1	21.00	26.40



※：配置(2)又は配置(4)の条件で外周部 32 体の位置に収納する新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び配置(4)の条件で中央部 37 体の位置に収納する高燃焼度 8×8 燃料は、軸方向燃焼度が本図の条件に包含される。

図 3-4 使用済燃料集合体の軸方向燃焼度の条件 (配置(2)又は配置(4)の条件で、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料又は高燃焼度 8×8 燃料を収納する場合)

表 3-1 (1/4) 使用済燃料集合体の線源強度計算条件 (配置(1))

項 目		8×8 燃料		新型 8×8 燃料	
燃 焼 度 (MWd/t)		30,000		38,000	
比 出 力 (MW/t)		23.7		25.3	
照射 期間 (日)	使用済燃料集合体	1,266		1,502	
	チャンネルボックス				
濃 縮 度 (wt%)		2.14		2.88	
冷 却 期 間 (年)		34 (12,418 日)		34 (12,418 日)	
ウ ラ ン 重 量 (kg)		188		177	
(上部)		ノード	PF	ノード	PF
(下部)					
ピーキングファクタ (注1)					

(注 1) ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

表 3-1 (2/4) 使用済燃料集合体の線源強度計算条件 (配置(2))

項 目		新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料			
燃 焼 度 (MWd/t)		35,000		40,000	
比 出 力 (MW/t)		25.3		25.3	
照射 期間 (日)	使用済燃料集合体	1,384		1,582	
	チャンネルボックス				
濃 縮 度 (wt%)		2.88		2.88	
冷 却 期 間 (年)		30 (10,957 日)		28 (10,227 日)	
ウ ラ ン 重 量 (kg)		177		177	
(上部)		ノード	PF	ノード	PF
ピーキングファクタ (注1)					
(下部)					

(注 1) ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

表 3-1 (3/4) 使用済燃料集合体の線源強度計算条件 (配置(3))

項 目		新型 8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料	
燃 焼 度 (MWd/t)		30,000	35,000	48,000	
比 出 力 (MW/t)		25.3	25.3	26.2	
照射 期間 (日)	使用済燃料集合体	1,186	1,384	1,833	
	チャンネルボックス				
濃 縮 度 (wt%)		2.88	2.88	3.35	
冷 却 期 間 (年)		34 (12,418 日)	30 (10,957 日)	20 (7,305 日)	
ウ ラ ン 重 量 (kg)		177	177	174	
(上部)		ノード	PF	ノード	PF
ピーキングファクタ (注1)					
(下部)					

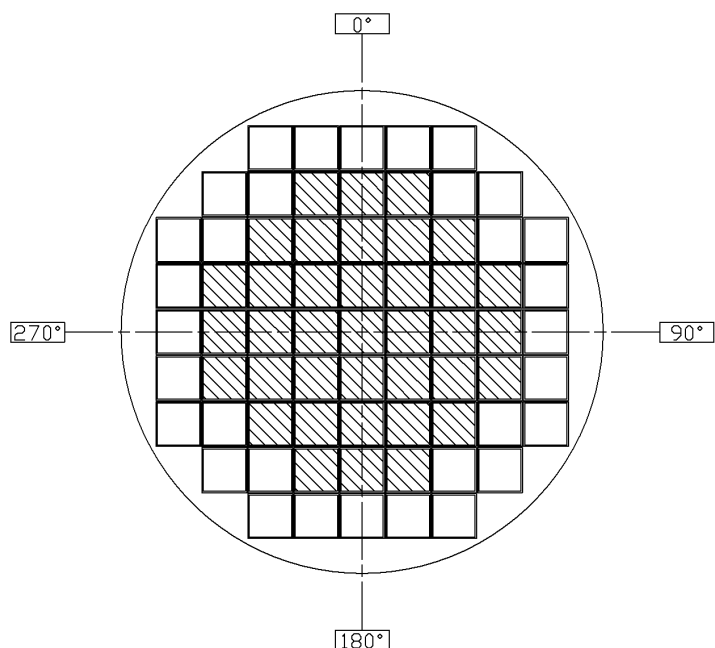
(注 1) ノードは燃料有効部を軸方向に したものである。

表 3-1 (4/4) 使用済燃料集合体の線源強度計算条件 (配置(4))

項 目		新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料		
燃 焼 度 (MWd/t)		35,000	48,000		
比 出 力 (MW/t)		25.3	26.2		
照射 期間 (日)	使用済燃料集合体	1,384	1,833		
	チャンネルボックス				
濃 縮 度 (wt%)		2.88	3.35		
冷 却 期 間 (年)		30 (10,957 日)	20 (7,305 日)		
ウ ラ ン 重 量 (kg)		177	174		
(上部)		ノード	PF	ノード	PF
(下部)					
ピーキングファクタ (注1)					

(注 1) ノードは燃料有効部を軸方向に [] したものである。





- 燃料種類 : 高燃焼度 8×8 燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 48,000MWd/t※
 冷却期間 : 20 年
- 燃料種類 : 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 35,000MWd/t※
 冷却期間 : 30 年

※ : 表 3-1 に示すピーキングファクタを考慮

図 3-5 遮蔽解析における使用済燃料集合体の収納位置条件 (配置(4))
 (新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料を収納する場合)

表 3-2 ガンマ線及び中性子の線源強度

項 目			新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料
燃焼度 (MWd/t)			35,000	48,000
冷却期間 (年)			30	20
1 体 当 た り 使 用 済 燃 料 集 合 体	ガンマ線	燃料有効部 (注1) (photons/s)	7.353×10^{14}	1.211×10^{15}
		構造材放射化 (^{60}Co : Bq)	3.671×10^{11}	1.676×10^{12}
	中性子	燃料有効部 (n/s)	6.317×10^7	2.184×10^8
収納体数			32 体 (外周部)	37 体 (中央部)
1 基 当 た り キ ャ ス ク	ガンマ線	燃料有効部 (注1) (photons/s)	6.833×10^{16}	
		構造材放射化 (^{60}Co : Bq)	7.378×10^{13}	
	中性子	燃料有効部 (注2) (n/s)	1.443×10^{10}	

(注 1) ORIGEN2 コードのエネルギー群構造を、DLC-23/CASK ライブラリのエネルギー群構造に換算した線源強度を示す。

(注 2) 中性子増倍の効果を考慮した値である。

表 3-3 線量当量率評価結果

項 目	評価結果	評価基準	備 考
表面線量当量率	0.30mSv/h	2mSv/h 以下	線量当量率の詳細 は表 3-4 に示す。
表面から 1m 離れた位 置における線量当量率	83 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	線量当量率の評価 位置は図 3-5 に示 す。

表 3-4 各評価位置の線量当量率

(単位：μSv/h)

評 価 点		頭 部			側 部	底 部			
		軸 方 向	径 方 向	径 方 向 (トラニオン部)		径 方 向	径 方 向 (トラニオン部)	軸 方 向	
		①	③a	③b		⑤	⑦a	⑦b	⑨
表 面	ガンマ線	燃料有効部	< 0.1※ ¹	15.5	1.8	137.6	0.1	6.7	1.1
		構造材放射化	0.8	164.6	23.0	< 0.1※ ¹	0.4	3.1	89.4
		二次ガンマ線	0.6	5.0	3.2	29.8	1.9	5.0	4.2
	中 性 子	162.9	3.4	165.6	41.4	285.9	281.1	41.9	
	合 計	164.4	188.5	193.6	208.9	288.3	<u>295.9</u>	136.6	
評 価 点		②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
表 面 か ら 1 m	ガンマ線	燃料有効部	< 0.1※ ¹	21.3	20.1	56.8	28.1	23.4	0.4
		構造材放射化	5.1	23.9	11.7	0.2	2.0	0.9	30.5
		二次ガンマ線	0.1	4.3	4.1	11.1	5.1	4.8	1.1
	中 性 子	24.6	6.7	9.4	14.6	6.5	10.5	17.1	
	合 計	29.9	56.1	45.3	<u>82.7</u>	41.7	39.6	49.1	

注：合計欄に下線で示す値は、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。

※1：“< 0.1”の値は、“0.1”として合計値に含めた。

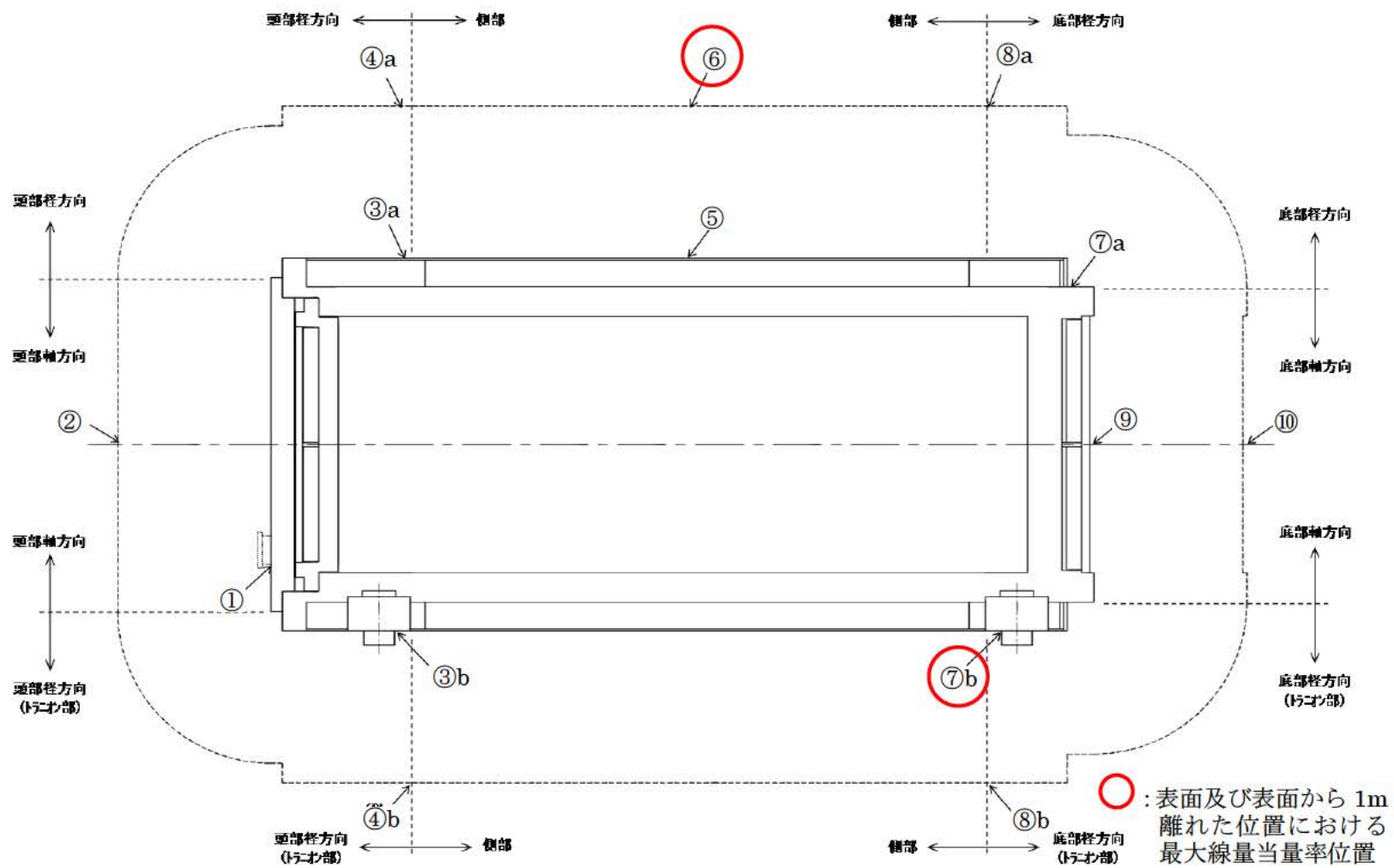


図 3-6 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置

線源強度計算条件

1. 使用済燃料集合体の放射線源強度について

使用済燃料集合体の放射線源強度（以下「線源強度」という。）は、「燃料有効部からのガンマ線及び中性子」、「使用済燃料集合体構造材からの放射化ガンマ線」に分けて計算する。

使用済燃料集合体の線源強度計算方法及び条件を別紙 1-1 表に示す。

別紙 1-2 表に Hitz-B69 型の配置(1)から配置(4)の収納制限に応じた線源強度評価条件及び結果の概要を示す。配置(4)において、中央部及び外周部に配置される使用済燃料集合体の線源強度並びにキャスク 1 基当たりの線源強度がいずれも最大となるため、遮蔽機能の評価では配置(4)を代表とする。

別紙 1-3 表に燃料集合体構造材からの放射化ガンマ線源強度、別紙 1-4 表に中性子源強度、別紙 1-5 表に燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線源強度並びに別紙 1-6 表に中性子のエネルギーごとの中性子スペクトルを示す。なお、使用済燃料集合体構造材の放射化ガンマ線源 (^{60}Co) は 1 崩壊で 1.17MeV 及び 1.33MeV のガンマ線を 1 個ずつ放出する。

別紙 1-1 表 使用済燃料集合体の線源強度計算方法及び条件

項目	計算方法	計算条件
燃料有効部からのガンマ線及び中性子	燃 焼 計 算 コ ー ド ORIGEN2を用い、ガンマ線及び中性子源強度を計算。使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布を考慮。また、中性子については実効増倍率を考慮。	燃焼条件：表 3-1 参照 解析コード：ORIGEN2.2UPJ ライブラリ：BWR-U ライブラリ 軸方向燃焼度分布：表 3-1 参照 実効増倍率：0.3（別紙 3 参照）
燃料集合体構造物からの放射化ガンマ線	使用済燃料集合体構造物の ^{59}Co 含有量に従い、放射化計算式に基づいて ^{59}Co から ^{60}Co への放射化量を計算。	放射化計算式 $A = N_0 \sigma \phi \{1 - \exp(-\lambda T_1)\} \times \exp(-\lambda T_2)$ A : 放射化核種 (^{60}Co) の放射能 (Bq) N_0 : ターゲット核種 (^{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 ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$) λ : ^{60}Co の崩壊定数 ($3.6001 \times 10^{-4}/\text{日}$) T_1 : 照射期間 (日) (表 3-1 参照) T_2 : 冷却期間 (日) (表 3-1 参照)
中性子源スペクトル	-	^{239}Pu の核分裂スペクトル (別紙 1-6 表参照 (注 1))

(注 1) 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別紙 4 に示す。

別紙 1-2 表 遮蔽解析における収納物条件及び線源強度の概要

項目			配置(1)		配置(2)		配置(3)			配置(4)		
			中央部 (37体)	外周部 (32体)	中央部 (37体)	外周部 (32体)	中央部 (37体)	中間部 (8体)	外周部 (24体)	中央部 (37体)	外周部 (32体)	
(注1) 収納物仕様	燃料集合体 1体の仕様	燃料タイプ	新型8×8 燃料	8×8燃料	新型8×8 ジルコニウムライ 燃料	新型8×8 ジルコニウムライ 燃料	高燃焼度 8×8燃料	新型8×8 ジルコニウムライ 燃料	新型8×8 燃料	高燃焼度 8×8燃料	新型8×8 ジルコニウムライ 燃料	
		初期濃縮度 (wt%以下)	3.19	2.80	3.19	3.19	3.66	3.19	3.19	3.66	3.19	
		ウラン重量 (kg)										
		燃焼度(集合体平均) (GWd/t以下)	38	30	40	35	48	35	30	48	35	
		冷却期間 (年以上)	34	34	28	30	20	30	34	20	30	
	Hitz-B69型 1基当たりの仕様	平均燃焼度 (GWd/t以下)	35		35		44	—	—	44	33	
線源強度 評価条件	燃料集合体 1体の仕様	燃料タイプ	新型8×8 燃料	8×8燃料	新型8×8 ジルコニウムライ 燃料	新型8×8 ジルコニウムライ 燃料	高燃焼度 8×8燃料	新型8×8 ジルコニウムライ 燃料	新型8×8 燃料	高燃焼度 8×8燃料	新型8×8 ジルコニウムライ 燃料	
		初期濃縮度 (wt%)	2.88	2.14	2.88	2.88	3.35	2.88	2.88	3.35	2.88	
		ウラン重量 (kg)	177	188	177	177	174	177	177	174	177	
		燃焼度(集合体平均) (GWd/t)	38	30	40	35	48	35	30	48	35	
		冷却期間(年)	34	34	28	30	20	30	34	20	30	
線源強度	燃料集合体 1体当たり	ガンマ線	燃料有効部 (ph./s) ^(注2)	6.7×10^{14}	6.3×10^{14}	8.5×10^{14}	7.4×10^{14}	1.2×10^{15}	7.4×10^{14}	5.8×10^{14}	1.2×10^{15}	7.4×10^{14}
			構造材放射化(Bq)	2.3×10^{11}	2.5×10^{11}	5.3×10^{11}	3.7×10^{11}	1.7×10^{12}	3.7×10^{11}	1.9×10^{11}	1.7×10^{12}	3.7×10^{11}
		中性子 (n/s)	5.5×10^7	6.3×10^7	1.1×10^8	6.3×10^7	2.2×10^8	6.3×10^7	2.6×10^7	2.2×10^8	6.3×10^7	
	キャスク 1基当たり	ガンマ線	燃料有効部 (ph./s) ^(注2)	4.5×10^{16}		5.5×10^{16}		5.1×10^{16}			6.8×10^{16}	
			構造材放射化(Bq)	1.7×10^{13}		3.1×10^{13}		7.0×10^{13}			7.4×10^{13}	
		中性子 (n/s) ^(注3)	5.8×10^9		8.5×10^9		1.3×10^{10}			1.4×10^{10}		

(注1) 各配置条件・位置において想定される収納物仕様のうち、最も線源強度が大きくなるものを記載。

(注2) ORIGEN2 コードのエネルギー群構造から DLC-23/CASK ライブラリのエネルギー群構造に換算した値。

(注3) 中性子増倍の効果を考慮した値。

内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 1-3 表 燃料集合体構造材の放射化ガンマ線源強度 (配置(4))

(Hitz-B69 型 1 基当たり)

モデル化領域		燃料集合体構造材の線源強度 (^{60}Co TBq)		
		中央部	外周部	合計
上部タイプレート部	ハンドル部	7.053×10^{-1}	1.331×10^{-1}	8.384×10^{-1}
	グリッド部	8.865×10^0	1.717×10^0	1.058×10^1
上部プレナム部		3.262×10^1	6.153×10^0	3.878×10^1
下部タイプレート部		1.984×10^1	3.742×10^0	2.358×10^1

注: にチャンネルボックスの放射化ガンマ線源強度を含む。

別紙 1-4 表 中性子源強度 (配置(4))

(Hitz-B69 型 1 基当たり)

		燃料有効部		
		中央部	外周部	合 計
一次中性子源強度 N_0 (n/s)	(α , n) 反応	1.310×10^8	5.994×10^7	1.909×10^8
	自発核分裂	7.949×10^9	1.962×10^9	9.910×10^9
	合 計	8.080×10^9	2.021×10^9	1.010×10^{10}
Hitz-B69 型の実効増倍率 k_{eff} (注)		0.3		
全中性子源強度 N_S (n/s)		1.154×10^{10}	2.888×10^9	1.443×10^{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-V.a コード) により評価して得られる結果に対して保守的な設定としている。(別紙 4 参照)

別紙 1-5 表 燃料有効部のエネルギーごとのガンマ線の線源強度 (配置(4))

(Hitz-B69 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)		
		中央部	外周部	合計
1	9.00	4.876×10^6	1.206×10^6	6.083×10^6
2	7.25	2.912×10^7	7.205×10^6	3.632×10^7
3	5.75	1.638×10^8	4.055×10^7	2.044×10^8
4	4.50	1.937×10^8	4.795×10^7	2.417×10^8
5	3.50	8.207×10^8	2.018×10^8	1.023×10^9
6	2.75	5.523×10^9	2.353×10^9	7.876×10^9
7	2.25	2.107×10^9	5.086×10^8	2.616×10^9
8	1.83	1.231×10^{13}	3.768×10^{12}	1.608×10^{13}
9	1.50	1.766×10^{14}	5.075×10^{13}	2.273×10^{14}
10	1.17	4.221×10^{14}	1.210×10^{14}	5.431×10^{14}
11	0.90	4.214×10^{14}	1.172×10^{14}	5.386×10^{14}
12	0.70	8.277×10^{15}	4.331×10^{15}	1.261×10^{16}
13	0.50	1.694×10^{16}	9.006×10^{15}	2.595×10^{16}
14	0.35	3.675×10^{14}	1.955×10^{14}	5.630×10^{14}
15	0.25	7.549×10^{14}	3.986×10^{14}	1.154×10^{15}
16	0.15	1.779×10^{15}	8.511×10^{14}	2.630×10^{15}
17	0.08	3.405×10^{15}	1.896×10^{15}	5.300×10^{15}
18	0.03	1.225×10^{16}	6.558×10^{15}	1.880×10^{16}
合計		4.480×10^{16}	2.353×10^{16}	6.833×10^{16}

注：ORIGEN2 コードのエネルギー群構造から DLC-23/CASK ライブラリのエネルギー群構造に換算した線源強度を示す。

別紙 1-6 表 中性子線源スペクトル

エネルギー 群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル※1
1	1.492×10^7	5.72×10^{-4}
2	1.220×10^7	2.02×10^{-3}
3	1.000×10^7	6.07×10^{-3}
4	8.180×10^6	2.00×10^{-2}
5	6.360×10^6	4.12×10^{-2}
6	4.960×10^6	5.27×10^{-2}
7	4.060×10^6	1.10×10^{-1}
8	3.010×10^6	8.74×10^{-2}
9	2.460×10^6	2.28×10^{-2}
10	2.350×10^6	1.15×10^{-1}
11	1.830×10^6	2.07×10^{-1}
12	1.110×10^6	1.89×10^{-1}
13	5.500×10^5	1.31×10^{-1}
14	1.110×10^5	1.59×10^{-2}
15	3.350×10^3	8.12×10^{-5}
16	5.830×10^2	5.89×10^{-6}
17	1.010×10^2	3.89×10^{-7}
18	2.900×10^1	5.53×10^{-8}
19	1.070×10^1	1.33×10^{-8}
20	3.060×10^0	1.88×10^{-9}
21	1.120×10^0	4.19×10^{-10}
22	4.140×10^{-1}	1.20×10^{-10}

注記※1： ^{239}Pu の核分裂スペクトルを DLC-23/CASK ライブラリの中性子 22 群構造に振り分けたものである。

遮蔽解析条件

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

二次元輸送計算コード DOT3.5 では、Hitz-B69 型を R-Z 体系の有限円筒モデル（以下「二次元モデル」という。）でモデル化している。ただし、有限円筒モデルで直接モデル化できない使用済燃料集合体、バスケット、トラニオン等は、構造上の特徴を考慮して、均質化あるいは線束接続によって評価している。なお、二次元モデルは、キャスク中心付近で二分割しており、頭部評価モデルは、使用済燃料集合体が一次蓋に接した状態とし、底部評価モデルは、使用済燃料集合体が胴（底板）に接した状態として、線源である使用済燃料集合体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。

(1) 燃料領域

別紙 2-3 図に示すとおり、使用済燃料集合体とバスケットを均質化してモデル化している。燃料領域は、均質化する範囲として設定する領域の断面積と等価な面積となる円（円筒）にモデル化している。

均質化する使用済燃料集合体は、燃料領域が低密度となるよう、高燃焼度 8×8 燃料と新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の構成材料質量を比較し、質量の小さいもので構成される仮想的な燃料集合体を仮定する。

線源強度の入力としては、中央部に収納する 37 体分及び外周部に配置する 32 体分の線源強度を分けて入力するため、燃料領域の断面積（体積）を燃料集合体の体数比（37：32）に分割するように中央部線源領域及び外周部線源領域を設定する。

(2) バスケット外周部

別紙 2-4 図に示すとおり、燃料有効部領域より外側からバスケット外径までの領域を均質化した円筒としてモデル化している。実形状は円周方向に不均一な厚さとなっている構造であることから、保守的な評価となるようバスケット外周部の密度を密度係数で調整している。密度係数は、別紙 2-5 図に示すとおり、水平断面 X-Y 体系のモデルにて円周方向のキャスク表面から 1m 離れた位置の最大線量当量率を算出し、この値と同等以上になるようなバスケット外周部の密度係数を無限円筒モデルより求め、本体モデルに反映している。したがって、本体モデルにおける線量当量率は、実形状における最大線量当量率を包絡する設定となる。

(3) 胴、側部中性子遮蔽材及び外筒

別紙 2-3 図に示すとおり、円筒としてモデル化している。なお、側部中性子遮蔽材内部に伝熱フィン及びスペーサがある領域では、伝熱フィン及びスペーサー（空隙）は側部中性子遮蔽材と均質化している。

(4) トラニオン部

トラニオン部については、実形状を模擬して別途モデル化し、評価している。なお、Hitz-B69 型のトラニオンは位置により複数存在するが、別紙 2-5 図のように遮蔽解析モデルの形状を保守的に設定している。

別紙 2-6 図に示すとおり、トラニオンを無視した本体モデルにて得られたトラニオン底面及び側面付近の線束を、別途モデル化した R-Z 体系のトラニオン部モデルに接続している。接続する線束は保守的に燃料有効部に近い側の線束としている。

トラニオン部の線量当量率は、トラニオン有りモデルとトラニオン無しモデルの線量当量率結果より、線種ごとの線量当量率結果の差を補正值として求め、本体モデルの線量当量率にその補正值を加減算して評価している。

(5) モニタリングポート部

モニタリングポート部（二次蓋の窪み部）については、実形状を模擬して別途モデル化し、評価している。なお、貯蔵時に設置されるモニタリングポートカバーは遮蔽体としては無視しているが、表面における線量当量率の評価においては形状を考慮し、評価位置をモニタリングポートカバーの表面となる位置としている。

別紙 2-7 図に示すように、Hitz-B69 型のモニタリングポート部の線束接続位置付近は、燃料領域及び蓋部中性子遮蔽材との位置関係により、キャスク内径側で放射化ガンマ線束が大きく、キャスク外径側で中性子線束が大きい傾向があるため、両者をそれぞれ接続している。

モニタリングポートカバーの表面を含む二次蓋表面から離れた位置におけるモニタリングポート部の線量当量率は、モニタリングポート有りモデルとモニタリングポート無しモデルの線量当量率結果より、線種ごとの線量当量率結果の差を補正值として求め、本体モデルの線量当量率にその補正值を加減算して評価している。補正の方法はトラニオン部の評価と同様としているが、モニタリングポートは 2 か所あるため、表面から 1m 離れた位置における線量当量率については補正值を 2 倍している。

2. 解析モデルの入力条件への不確かさの考慮について

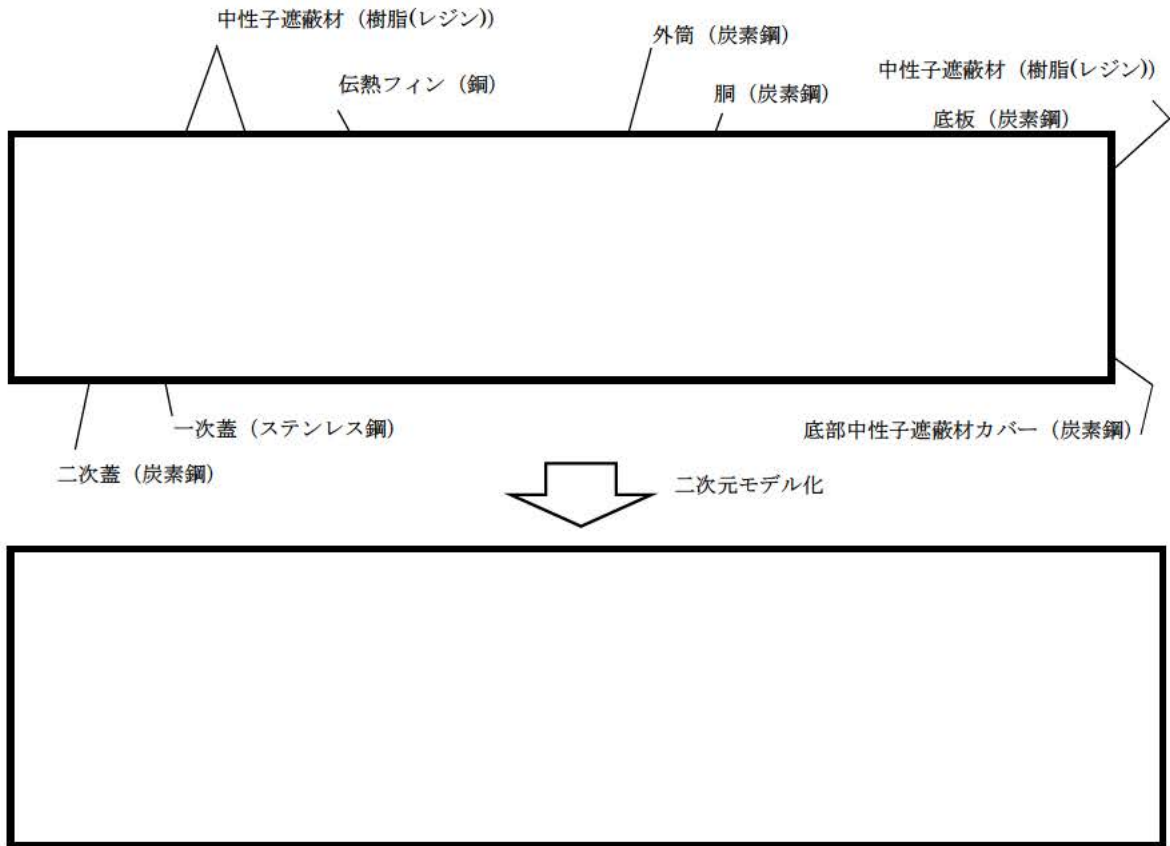
解析モデルの入力条件への不確かさとして以下を考慮している。















① 構成部材密度

最低保証密度を使用して原子個数密度を設定している。

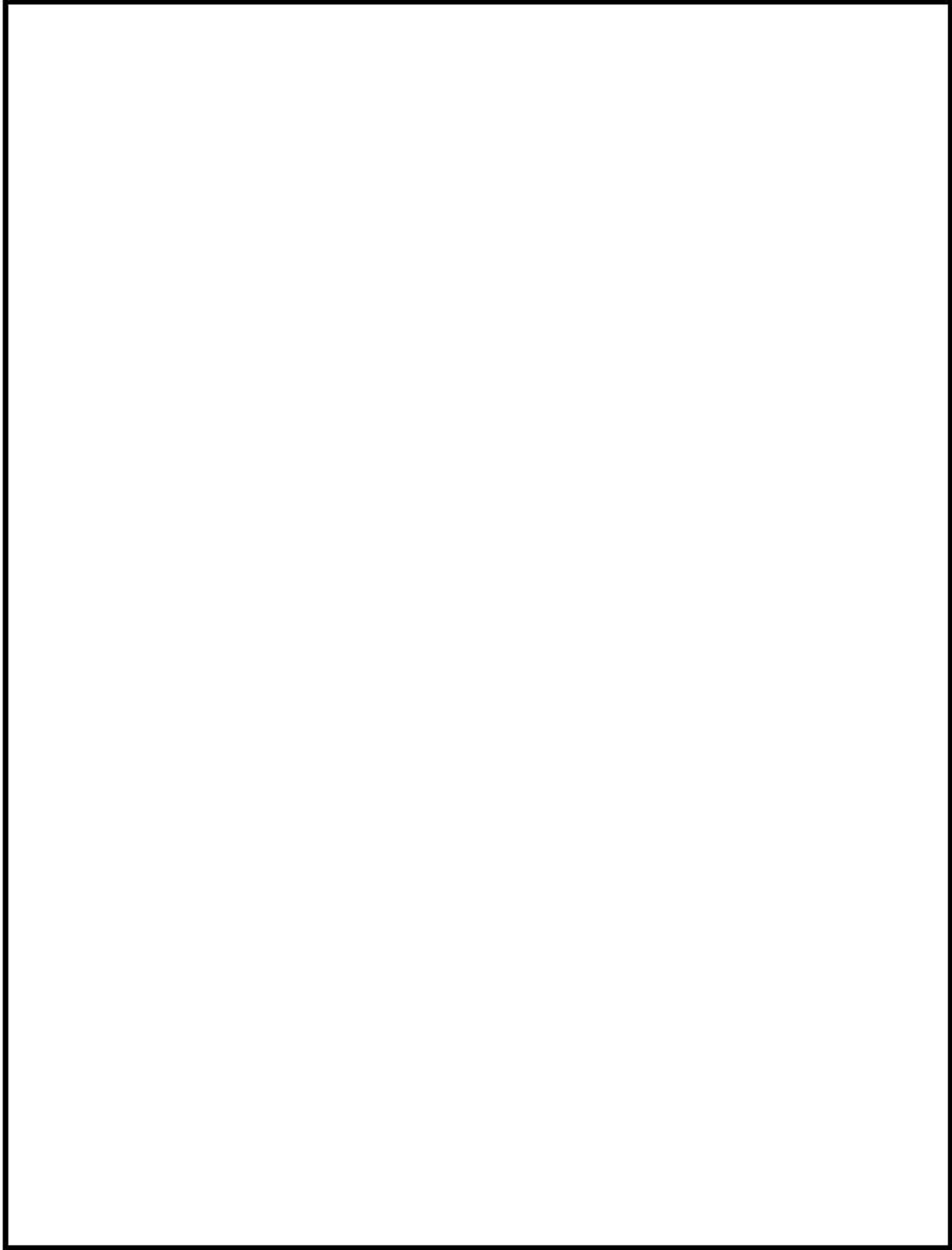
② 寸法公差

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。



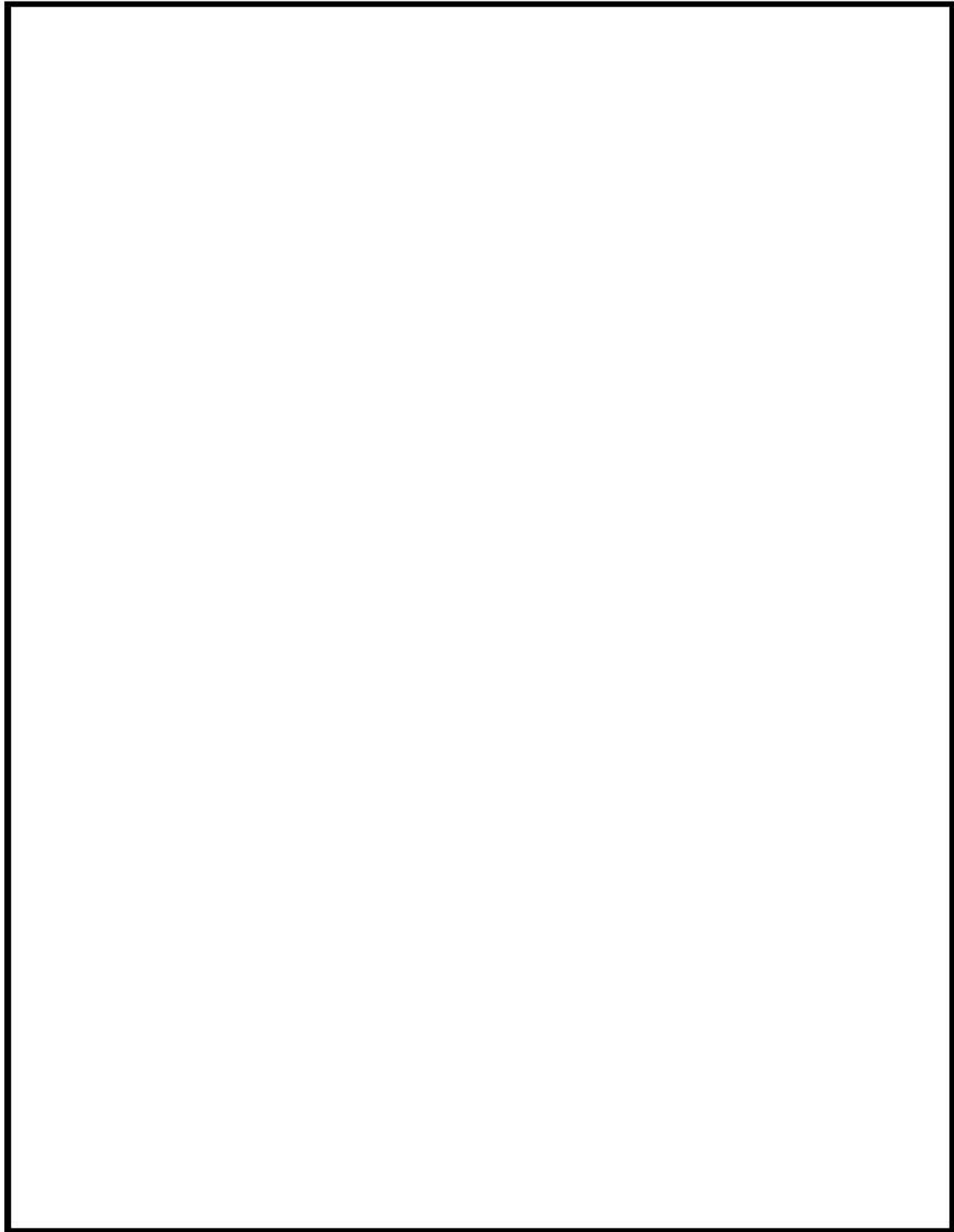
- | | |
|---|---|
|  : 燃料有効部領域 |  : 側部中性子遮蔽材[中央部]
(中性子遮蔽材+伝熱フィン+スペーサー) |
|  : 燃料上部構造材領域 |  : 側部中性子遮蔽材[上部]
(中性子遮蔽材+スペーサー) |
|  : 燃料下部構造材領域 |  : 側部中性子遮蔽材[下部]
(中性子遮蔽材+スペーサー) |
|  : バスケット外周部(伝熱ブロック+サポートプレート) |  : 蓋部中性子遮蔽材 |
|  : バスケット外周部(上部プレート部) |  : 底部中性子遮蔽材 |
|  : バスケット外周部(上部格子枠部) |  : 炭素鋼
(胴、底板、二次蓋、外筒、底部中性子遮蔽材カバー) |
|  : バスケット外周部(底部プレート部) |  : ステンレス鋼
(一次蓋) |
| |  : 空気又はボイド |

別紙 2-1 図 遮蔽解析モデル化概要



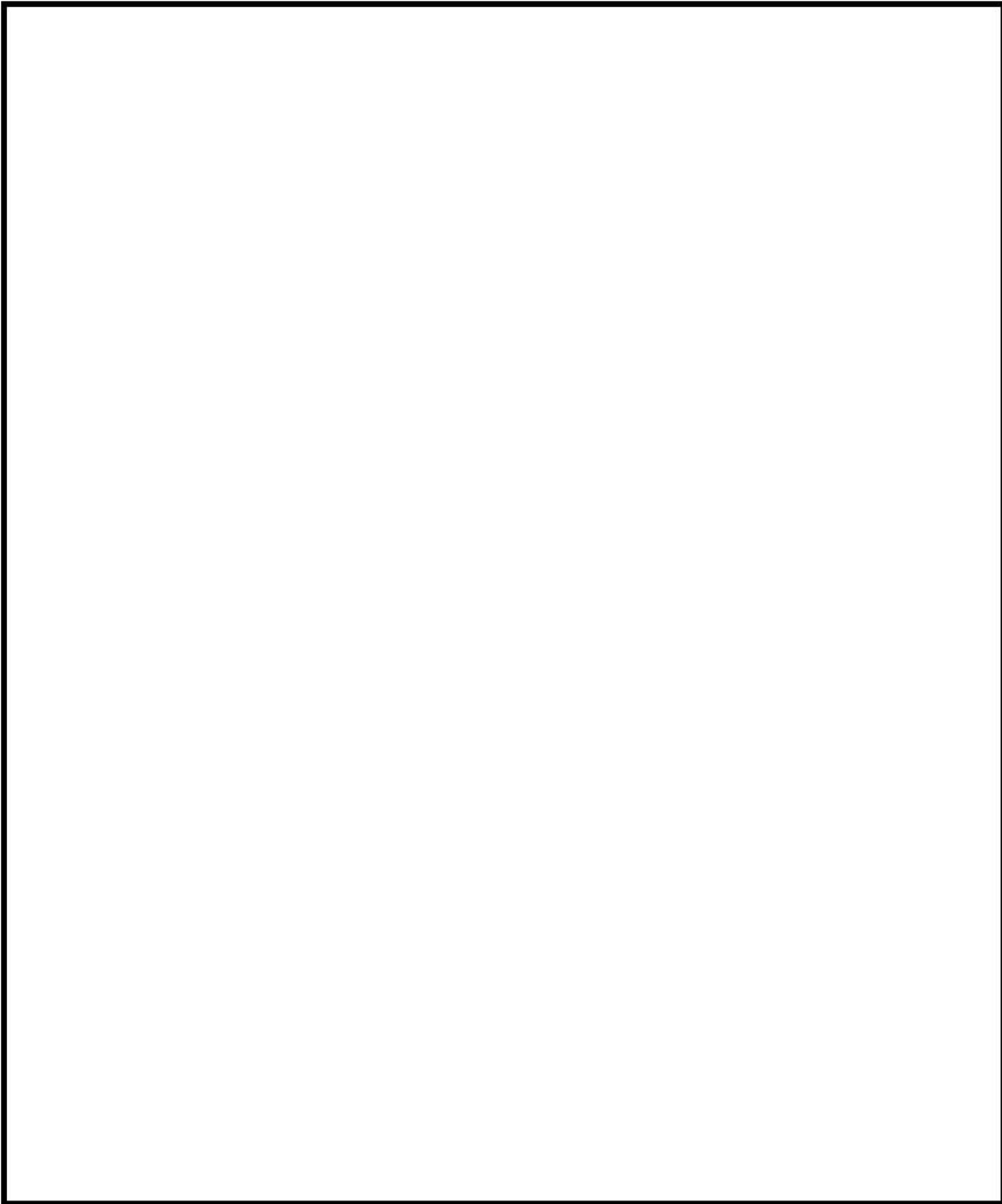
(単位 : mm)

別紙 2-2 図 (1/4) 遮蔽解析モデル (頭部)



(単位 : mm)

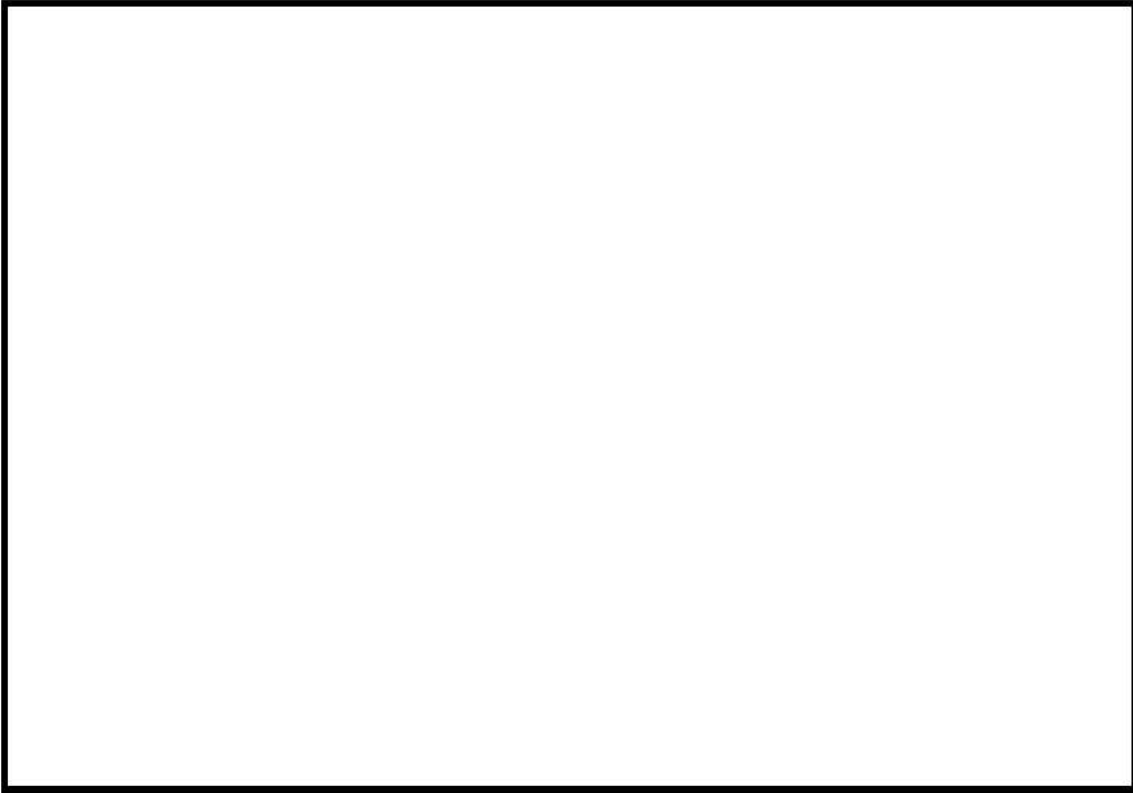
別紙 2-2 図 (2/4) 遮蔽解析モデル (底部)



(単位 : mm)

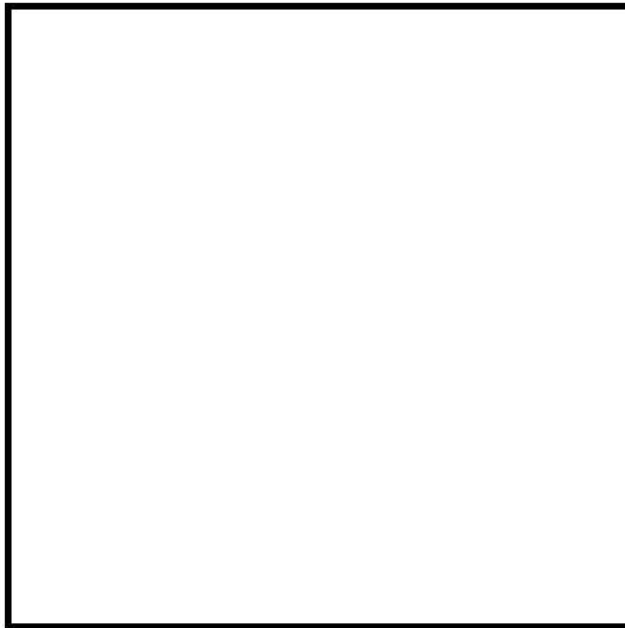
別紙 2-2 図 (3/4) 遮蔽解析モデル (トラニオン部)



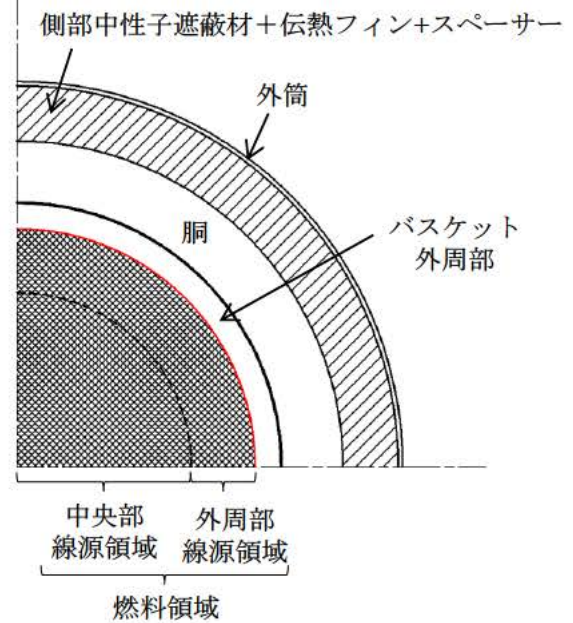


(単位 : mm)

別紙 2-2 図 (4/4) 遮蔽解析モデル (モニタリングポート部)



[実形状]



[二次元モデル (円筒モデル)]

遮蔽解析モデルへの入力

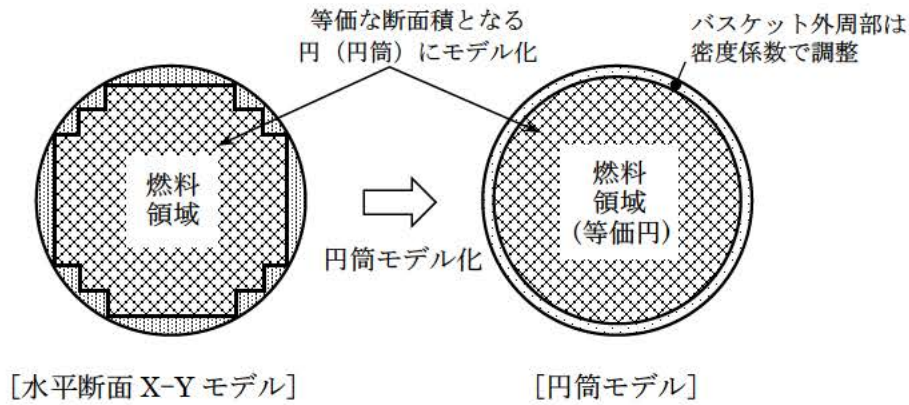
二次元モデルの解析では円筒形状での入力となるため、燃料領域（燃料集合体が装荷される領域）として設定した断面積と等価な面積となる円（円筒）としてモデル化している。その際、燃料領域には使用済燃料集合体とバスケットを均質化した物性値を設定する。なお、均質化した燃料領域が低密度となるよう、使用済燃料集合体は、高燃焼度 8×8 燃料と新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の構成材料質量を比較し、質量の小さいもので構成される仮想的な燃料集合体を仮定する。

線源強度の入力としては、中央部に収納する 37 体分及び外周部に配置する 32 体分の線源強度を分けて入力するため、燃料領域の断面積を燃料集合体の体数比（37：32）に分割するように中央部線源領域及び外周部線源領域を設定する。

また、側部中性子遮蔽材領域は、当該領域の中性子遮蔽材（樹脂（レジン））、伝熱フィン、スペーサー（空隙）の断面積比を用いて均質化した原子個数密度を入力する。

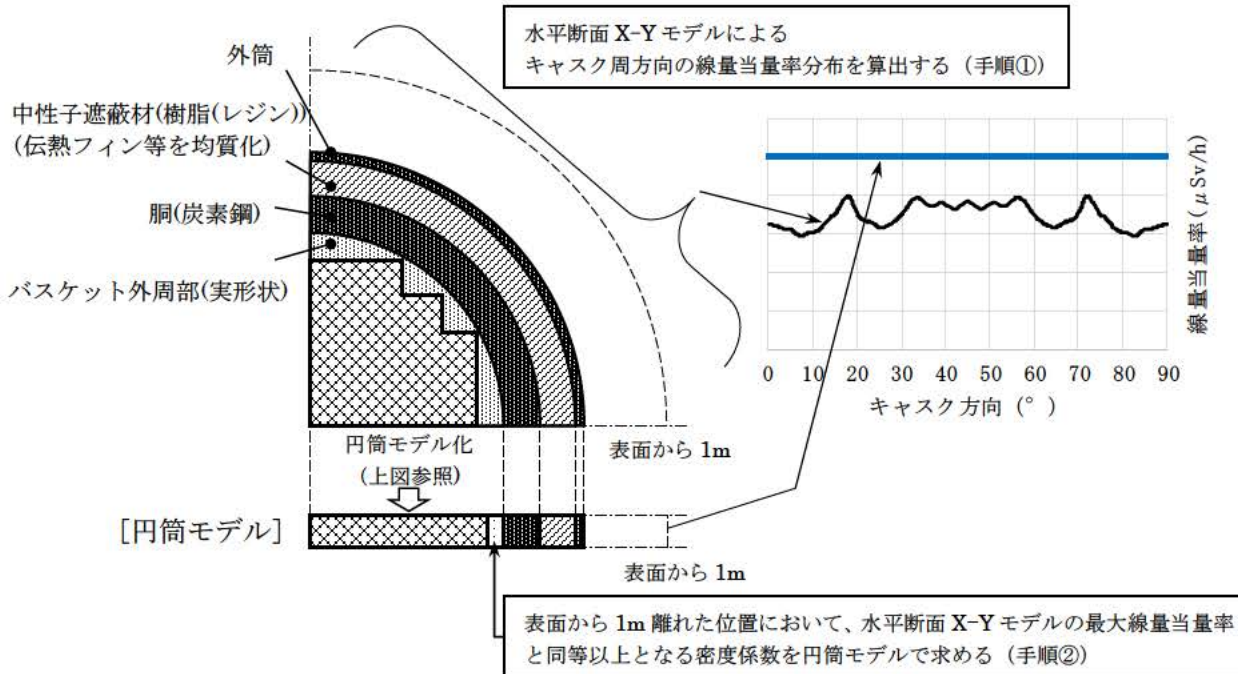
別紙 2-3 図 キャスク本体中央断面の実形状と解析モデル





[水平断面 X-Y モデル]

[円筒モデル]



バスケット外周部の密度

バスケット外周部は円周方向に不均一な厚さとなっている構造であることから、二次元モデルでは以下に示す手法により、バスケット外周部の密度を設定している。

手順① 水平断面 X-Y モデル遮蔽解析

水平断面 X-Y モデルによる表面から 1m 離れた位置での最大線量当量率を算出する。

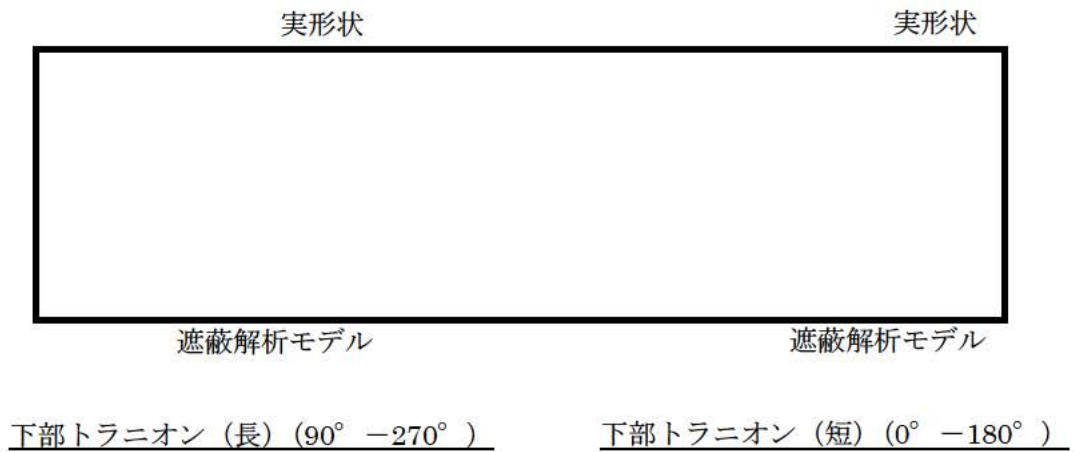
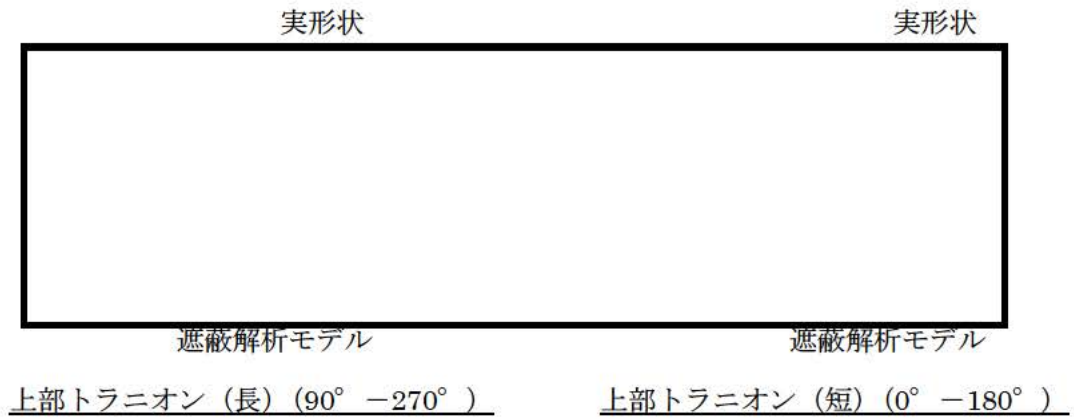
※ 算出位置を表面位置ではなく表面から 1m 離れた位置としているのは、表面位置に比べ評価基準に対する裕度が小さいためである。

手順② 円筒モデル

設定した円筒モデルにて、表面から 1m 離れた位置の線量当量率が、①で求めた最大線量当量率と同等以上となるバスケット外周部の密度係数を求める。

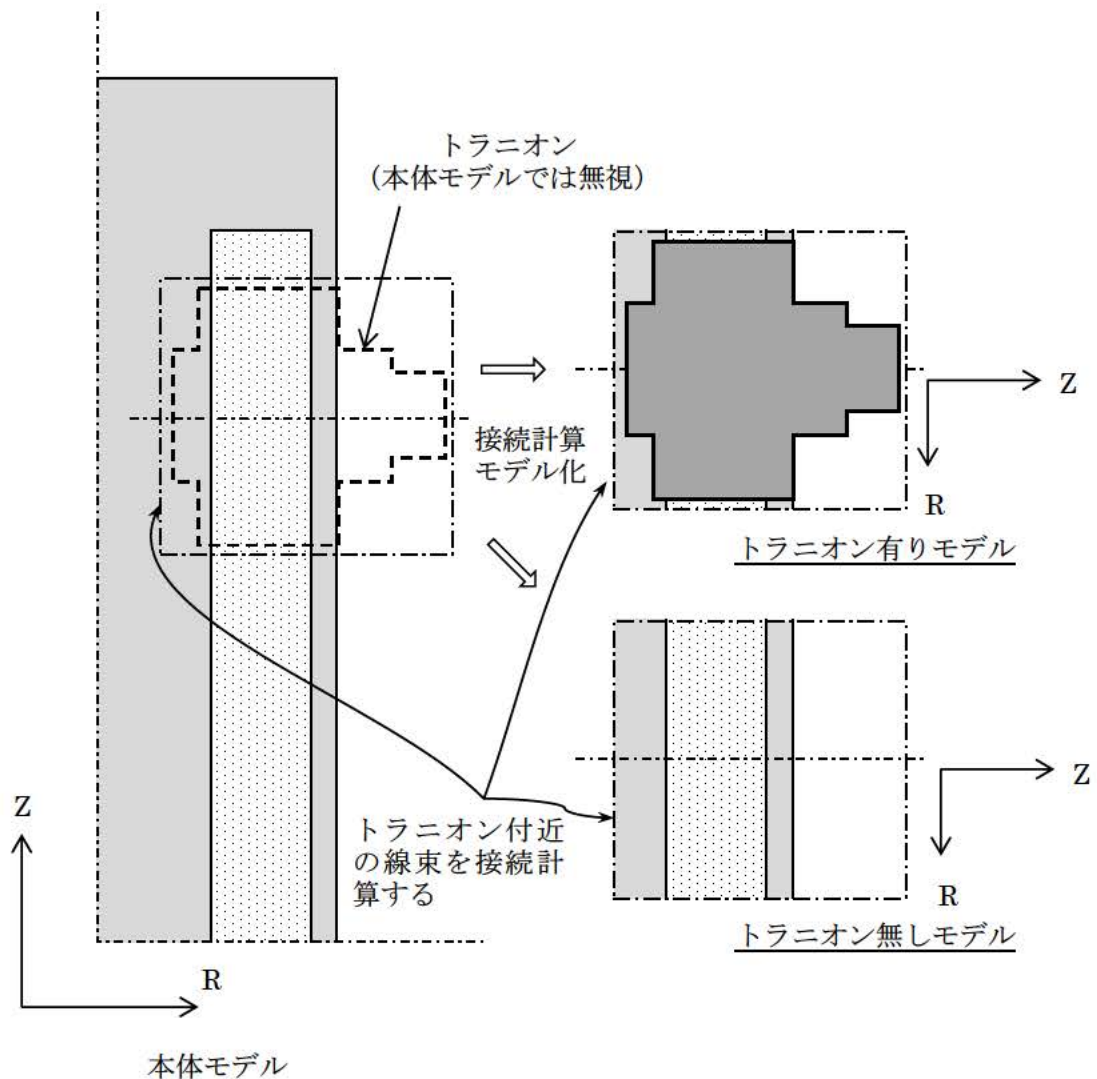
手順②にて求めた密度係数を二次元モデルに用いることで、実形状の最大線量当量率を包絡する結果を得ることができる。

別紙 2-4 図 二次元モデルのバスケット外周部のモデル化について



注：下部トラニオン（長）及び下部トラニオン（短）は、両者に対して保守的な評価結果が得られる同一のモデルを適用し、上部トラニオン（長）も同じモデルを適用する。

別紙 2-5 図 トラニオンのモデル化



トラニオン部の評価方法

手順① トラニオンを無視した本体の二次元 (R-Z 体系) モデル (本体モデル) によるトラニオン部の線量当量率を計算する。

手順② ①の計算で得られた、トラニオン底面及び側面付近の線束を、別途モデル化した R-Z 体系のトラニオン部モデル (トラニオン有りモデル/トラニオン無しモデル) に接続し、表面及び表面から 1m 離れた位置の線量当量率を計算する。

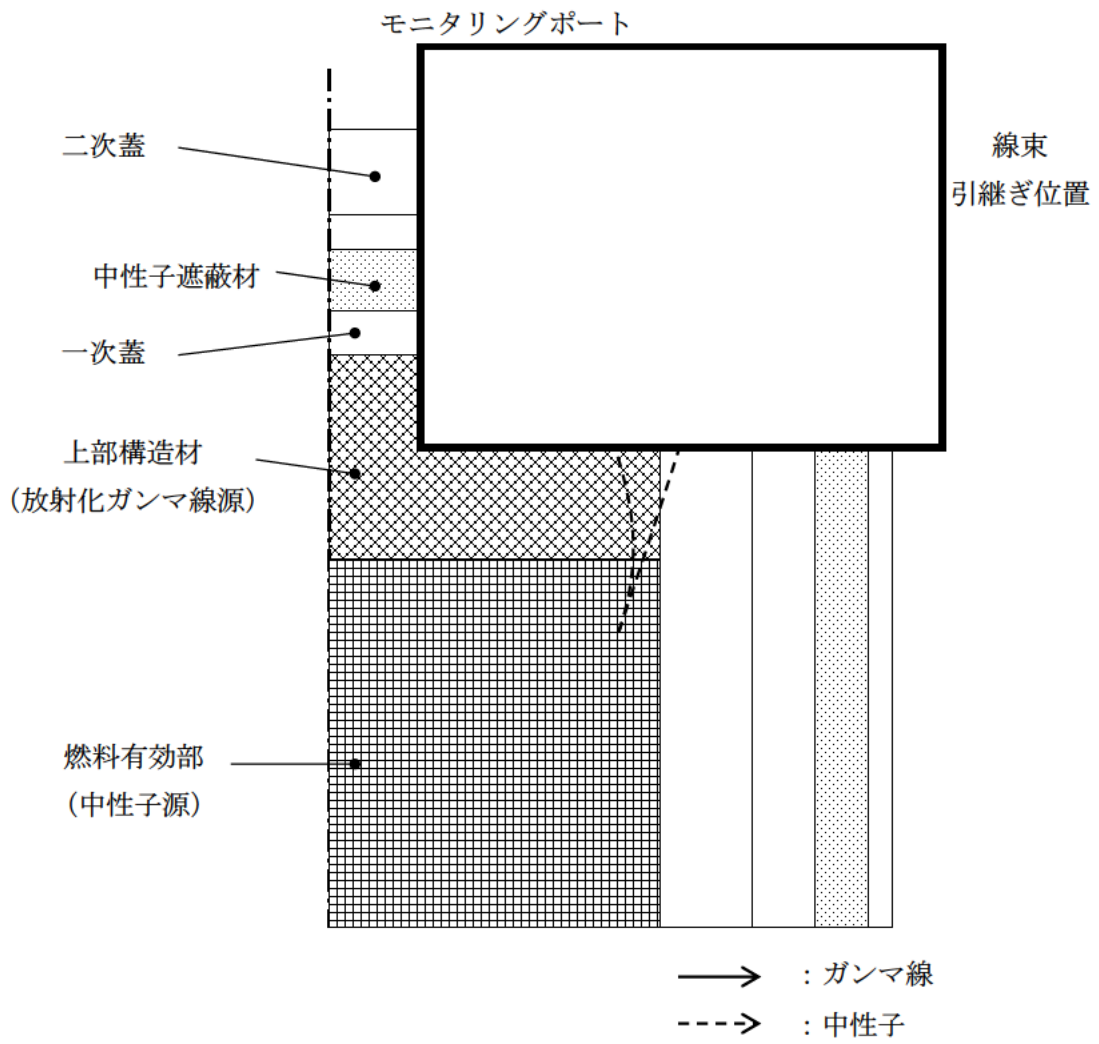
手順③ ①、②の結果から下式により頭部径方向 (トラニオン部) 及び底部径方向 (トラニオン部) の線量当量率を算出する。

表面位置における線量当量率 = トラニオン有りモデルの線量当量率

表面から 1m 離れた位置における線量当量率 = (本体モデルの線量当量率)

+ {(トラニオン有りモデルの線量当量率) - (トラニオン無しモデルの線量当量率)}

別紙 2-6 図 二次元モデルのトラニオン部の線束接続計算の概略図



別紙 2-7 図 モニタリングポート部線束接続位置の概略図

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。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 18.7^{*1}$$

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)

※1 : NUPEC 報告書⁽¹⁾ の評価式を 95%信頼性確度で再評価している。

Hitz-B69 型の燃料集合体の収納制限において、中性子遮蔽材温度が最高となる配置(4)の条件における設計貯蔵期間中の発熱量を ORIGEN2 コードを用いて計算し、除熱機能評価における解析手法を用いて求めた貯蔵期間中の中性子遮蔽材の最高温度を別紙 2-1 表に示す。

別紙 2-1 表に基づき、貯蔵期間中の温度低下を時間区分して階段状に温度低下するものとして考慮し、上記の劣化パラメータの式を用いて中性子遮蔽材の質量減損率を計算する。質量減損率の計算結果及び設計に用いる質量減損率を別紙 2-2 表に示す。

なお、中性子遮蔽材から放出される成分は水が支配的であり、水よりも水素含有率が高いガス成分はわずかである⁽²⁾。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仮定する。

4. 参考文献

- (1) (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)
- (2) 原燃輸送株式会社、「使用済燃料等の輸送容器に用いられる中性子しゃへい材（NS-4-FR）の連続加熱評価試験」、(1997)

別紙 2-1 表 設計貯蔵期間中の中性子遮蔽材の最高温度

貯蔵期間 (年)	側部中性子遮蔽材※1			蓋部中性子 遮蔽材	底部中性子 遮蔽材
	上部	中央部	下部		
0	117	131	126	117	132
5	112	125	121	113	126
20	101	111	108	101	112
40	91	98	96	91	99
60	85	90	89	85	91

※1：伝熱フィンが存在する領域を中央部、蓋部側の伝熱フィンが存在しない領域を上部、底部側の伝熱フィンが存在しない領域を下部とする。

別紙 2-2 表 設計貯蔵期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率

	側部中性子遮蔽材※1			蓋部中性子 遮蔽材	底部中性子 遮蔽材
	上部	中央部	下部		
質量減損率 計算結果	0.91%	1.57%	1.36%	0.94%	1.62%
遮蔽解析に 適用する 質量減損率	1.0%	1.6%	1.6%	1.0%	1.7%

※1：伝熱フィンが存在する領域を中央部、蓋部側の伝熱フィンが存在しない領域を上部、底部側の伝熱フィンが存在しない領域を下部とする。

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 Hitz-B69 型の実効増倍率を求め、中性子源強度に考慮した。

$$N_S = N_O / (1 - keff)$$

ここで、

N_O : Hitz-B69 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 Hitz-B69 型の実効増倍率

実効増倍率の評価に用いた使用済燃料集合体の条件、評価結果及び線源強度設定に用いた実効増倍率を別紙 2-1 表に示す。線源強度が高くなる収納条件配置(4)において収納される高燃焼度 8×8 燃料と新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料それぞれについて、全 69 体収納した場合の実効増倍率を評価し、それらを上回る遮蔽解析用実効増倍率を設定した。

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

アクチノイド : ^{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 実効増倍率評価条件及び評価結果

項目	高燃焼度 8×8 燃料収納時	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料
ウラン重量 (kg/体)	□	□
初期濃縮度 (wt%)	3.66	□
燃焼度 (MWd/t)	44,000	33,000
比出力 (MW/t)	□	□
冷却期間 (年)	20	30
実効増倍率 (注)	□	□
遮蔽解析用実効増倍率	0.3	

(注) 実効増倍率評価結果に統計誤差の 3 倍を加えた値。

(参考文献)

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

中性子源スペクトルを ^{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 4-1 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。また、Hitz-B69 型に収納する使用済燃料集合体の中性子源強度は、別紙 4-1 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。

別紙 4-1 表 中性子源強度 (配置(4))

(Hitz-B69 型 1 基当たり)

		燃料有効部		
		中央部	外周部	合 計
一次中性子源強度 N_0 (n/s)	(α, n) 反応	1.310×10^8	5.994×10^7	1.909×10^8
	自発核分裂	7.949×10^9	1.962×10^9	9.910×10^9
	合 計	8.080×10^9	2.021×10^9	1.010×10^{10}

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、 ^{239}Pu の核分裂、及び Cm の自発核分裂による中性子源スペクトルの比較を別紙 4-2 図に、 ^{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 4-3 図に示す。

別紙 4-2 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 4-3 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。

(参考文献)

- (1) L. B. Shappert, et al., “The Radioactive Materials Packaging Handbook”, ORNL/M-5003, Oak Ridge National Laboratory, 9-9, (1998)
- (2) H. S. Bailey, R. N. Evatt, G. L. Gyorey, et al., “Neutron Shielding Problems in the Shielding of High Burnup Thermal Reactor Fuel”, Nuclear Technology, ANS, 17, 222, (1973)
- (3) E. D. Arnold, R. G. Jaeger, et al., “Engineering Compendium on Radiation Shielding”, Volume I Shielding Fundamentals and Methods, Springer-Verlag, Germany, 69, (1968)

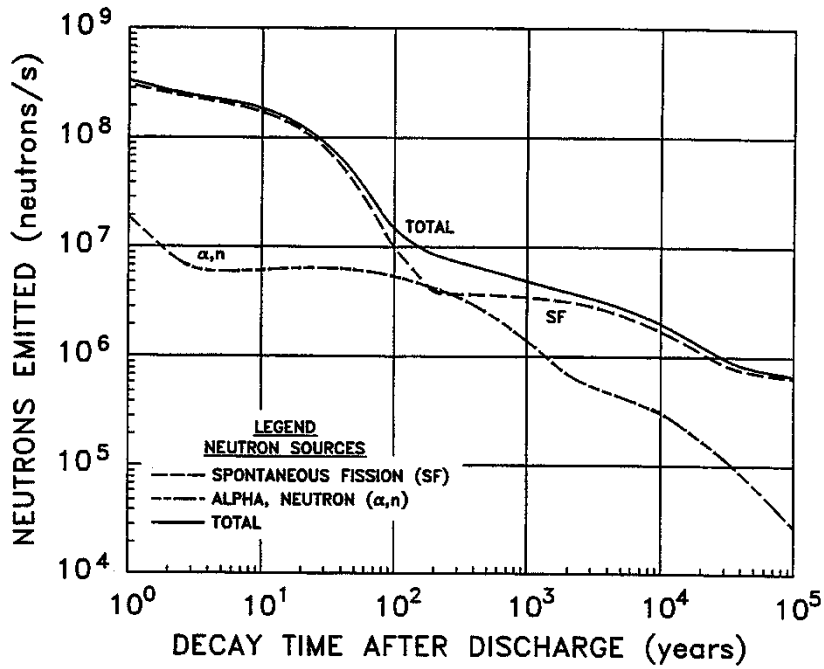


Fig. 9.2. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTIHM): PWR/33,000 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

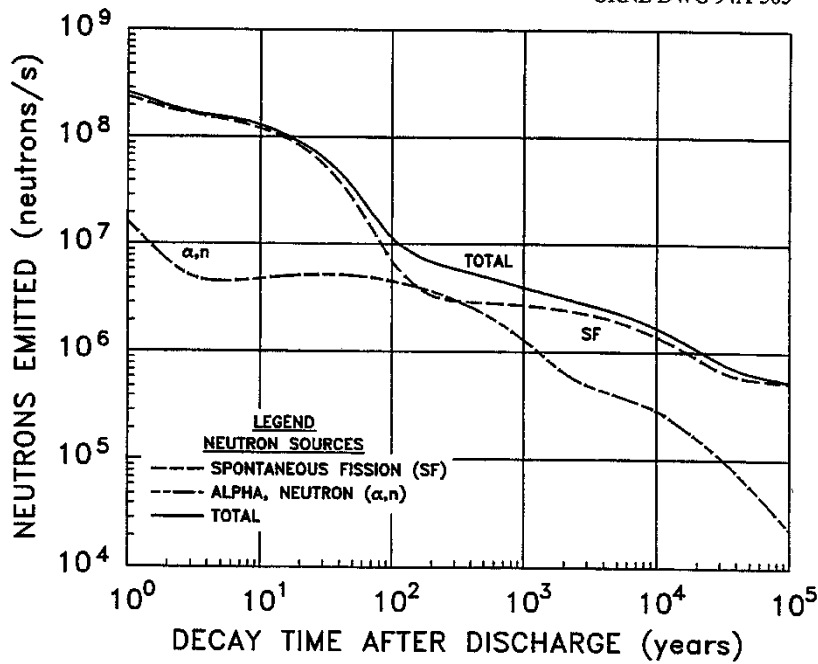
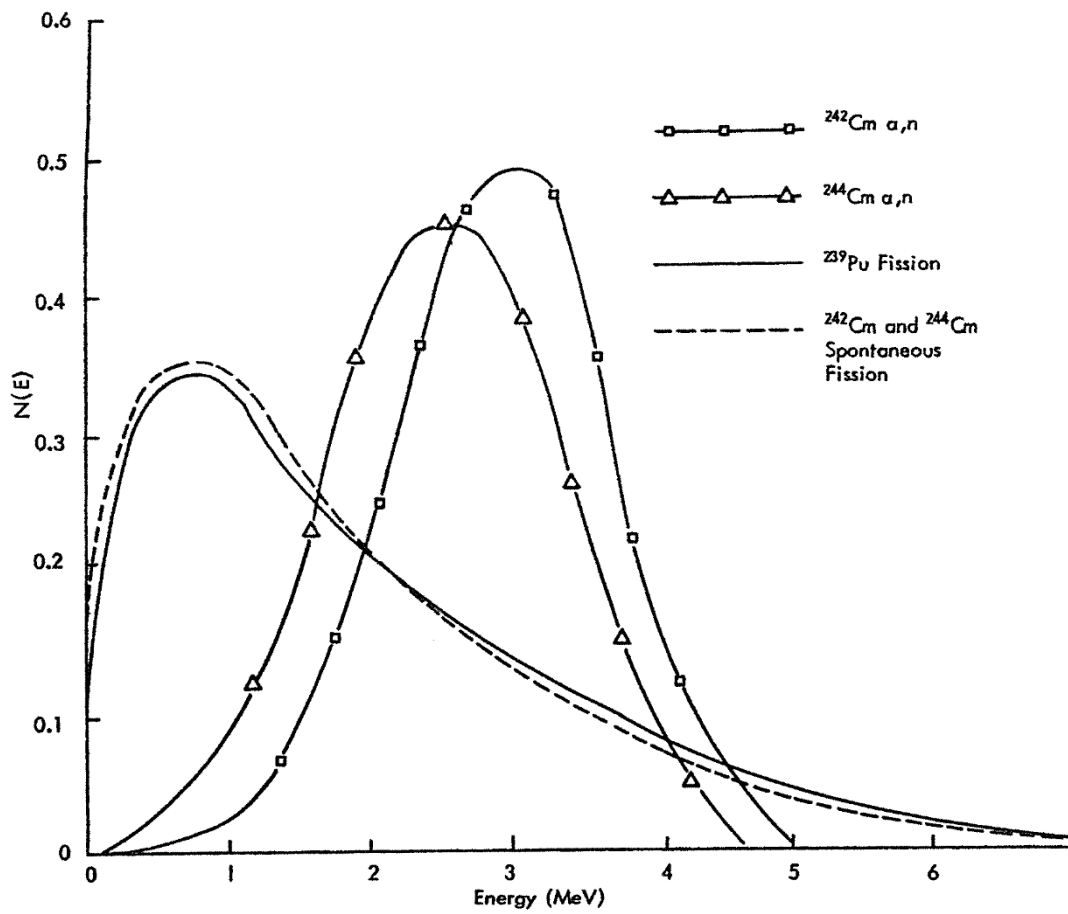


Fig. 9.3. Neutrons emitted by 1 metric ton of initial heavy metal (MTIHM): BWR/27,500 MWd/MTU.
Source: ref. 24.

別紙 4-1 図 使用済燃料の自発核分裂及び (α, n) 反応に伴う
中性子源強度と冷却期間との関係 (1)



Neutron emission spectra for several sources.

別紙 4-2 図 ^{239}Pu の核分裂、及び ^{242}Cm 、 ^{244}Cm の自発核分裂中性子源スペクトルの比較 (2)

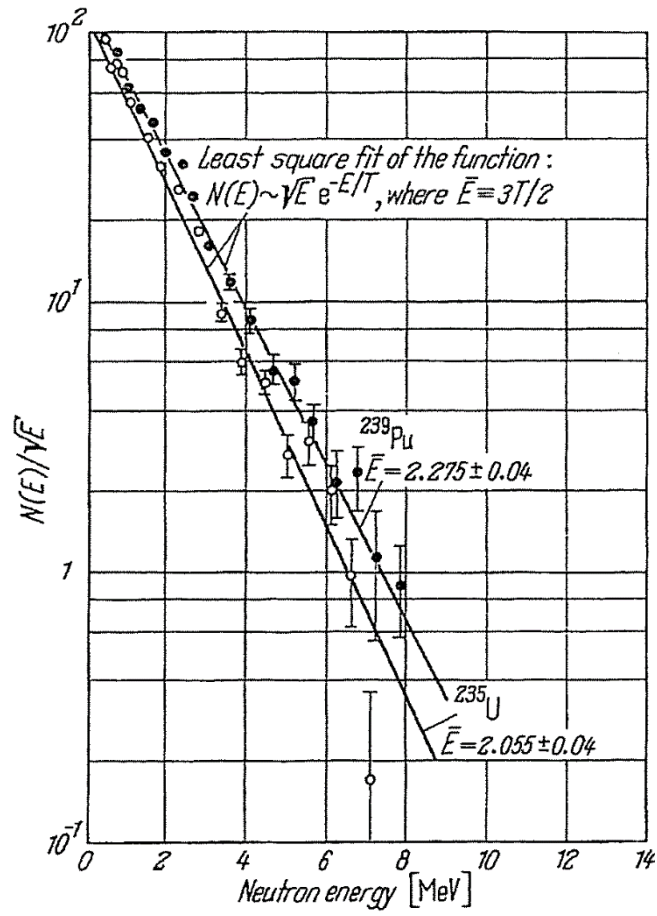


Fig. 2.3.-2. Typical measured fission neutron spectra of $^{235}\text{U} + n_{th}$ and $^{239}\text{Pu} + n_{th}$.

別紙 4-3 図 ^{235}U 及び ^{239}Pu の核分裂中性子源スペクトルの比較 (3)

遮蔽解析に使用する解析コードについて

Hitz-B69 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、輸送容器の崩壊熱計算等に広く用いられている。

(2) 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼計算に際して以下の機能を有している。

- a. 燃料の炉内での燃焼計算、炉取出後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線源の強度、各核種の放射エネルギー等が求められる。
- b. 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリデータが内蔵されており、任意に選択できる。
- c. 計算結果は、放射化生成物、アクチニド、核分裂生成物に分類して出力される。
- d. 燃焼計算に必要な放射性核種のデータ (崩壊熱、ガンマ線のエネルギー分布、自発核分裂と (α, n) 反応により発生する中性子源強度等) は、ライブラリデータとしてコードに内蔵されている。

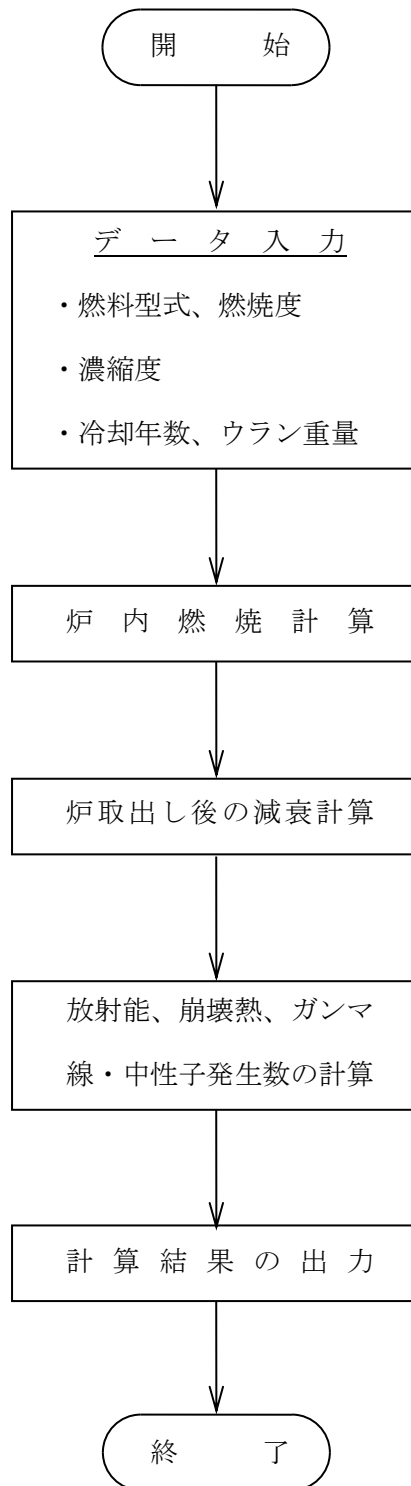
(3) 解析フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを別紙 5-1 図に示す。

(4) 使用実績及び検証

ORIGEN2 コードは、輸送キャスク、原子燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている。また、ORNL では ORIGEN2 コードの崩壊熱計算結果を ANS 標準崩壊熱の値と比較し、ORIGEN2 コードの妥当性を検証している⁽²⁾。

ORIGEN2 コードの検証例を別紙 5-2 図に示す。



別紙 5-1 図 ORIGEN2 コードの計算フロー図

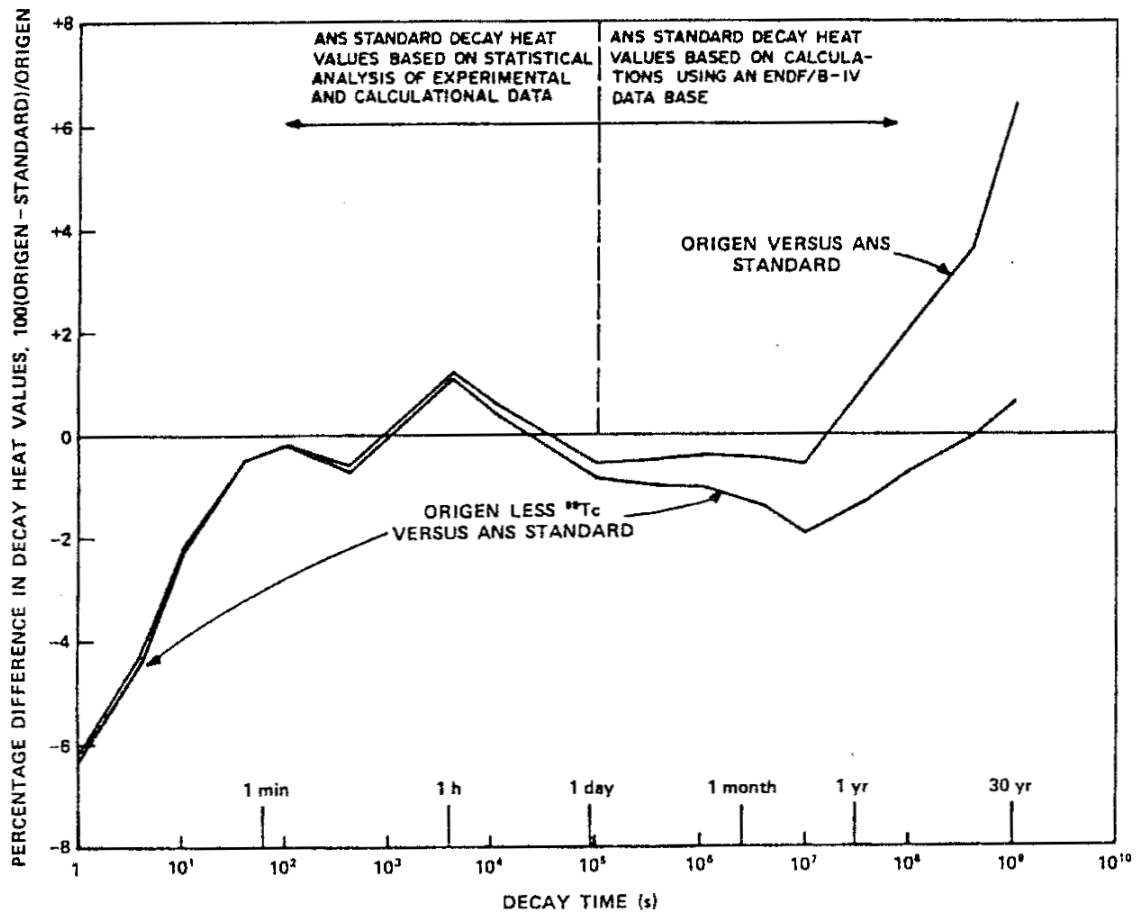


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10¹³-s irradiation of ²³⁵U.

(注) ORIGEN2 の崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上(Hitz-B69 型に収納される燃料の冷却期間以上)の冷却年数に対して高めの値を示している。この理由は、ANS 標準崩壊熱は ⁹⁹Tc を考慮していないためである。したがって、ORIGEN2 の解析結果より ⁹⁹Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

別紙 5-2 図 ORIGEN2 コードの検証例 (2)

2. DOT3.5 コード

(1) 概要

二次元輸送計算コード DOT3.5 コード⁽³⁾ (以下「DOT3.5 コード」という。) は、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された二次元輸送計算コードである。

(2) 機能

DOT3.5 コードは、遮蔽解析に際して以下の機能を有している。

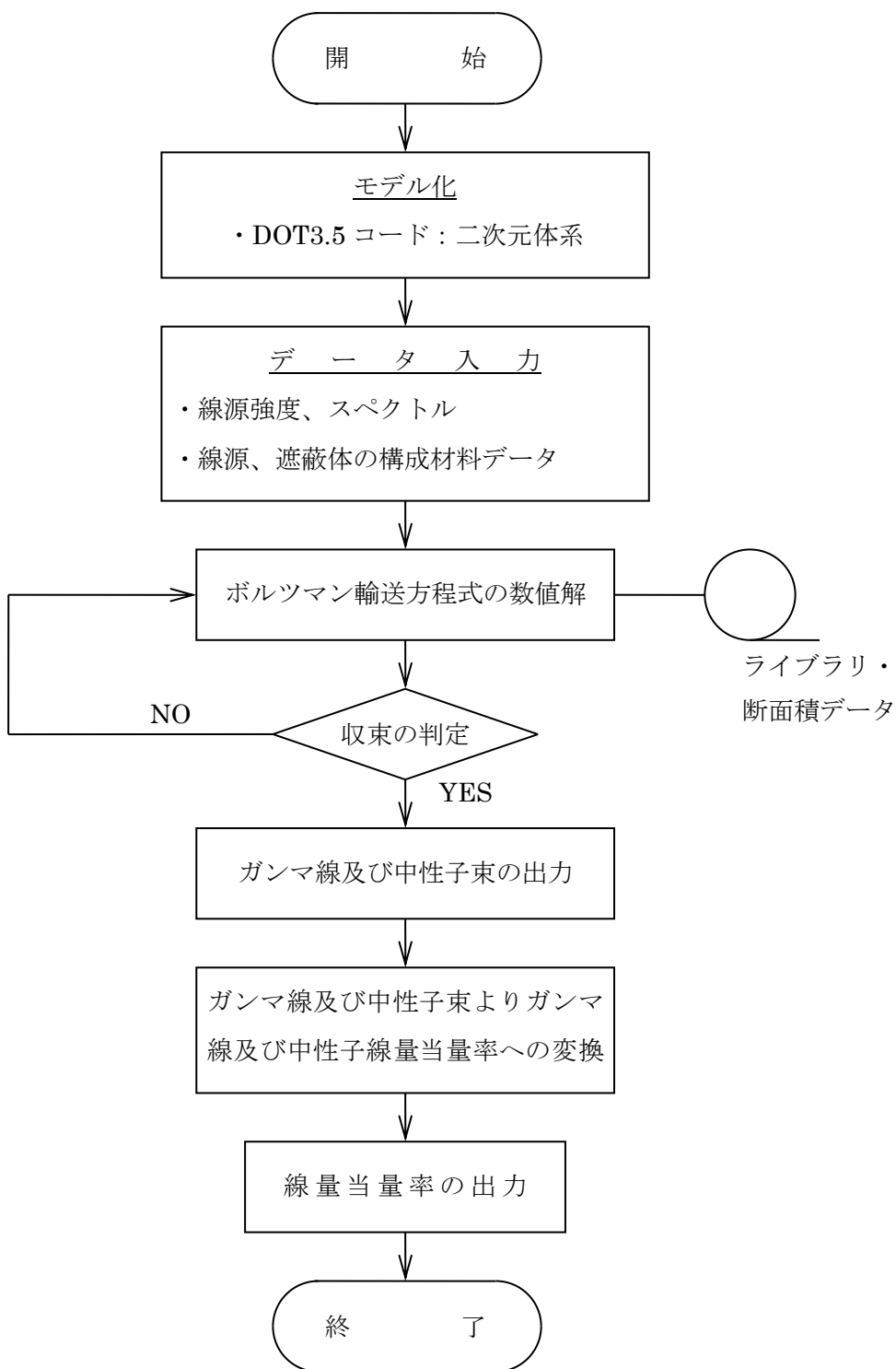
- a. ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を Sn 法により解く解析コードであり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- b. DOT3.5 コードは、二次元の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

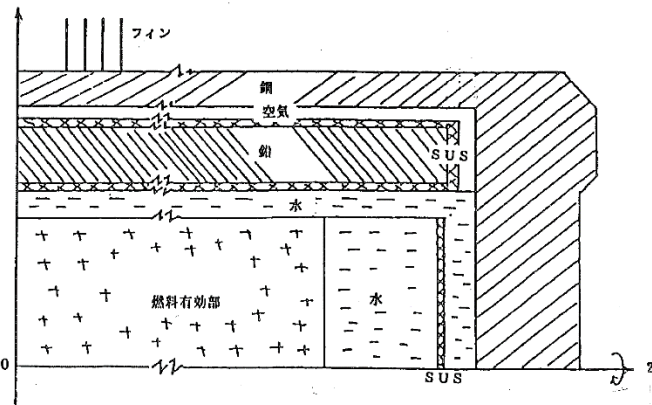
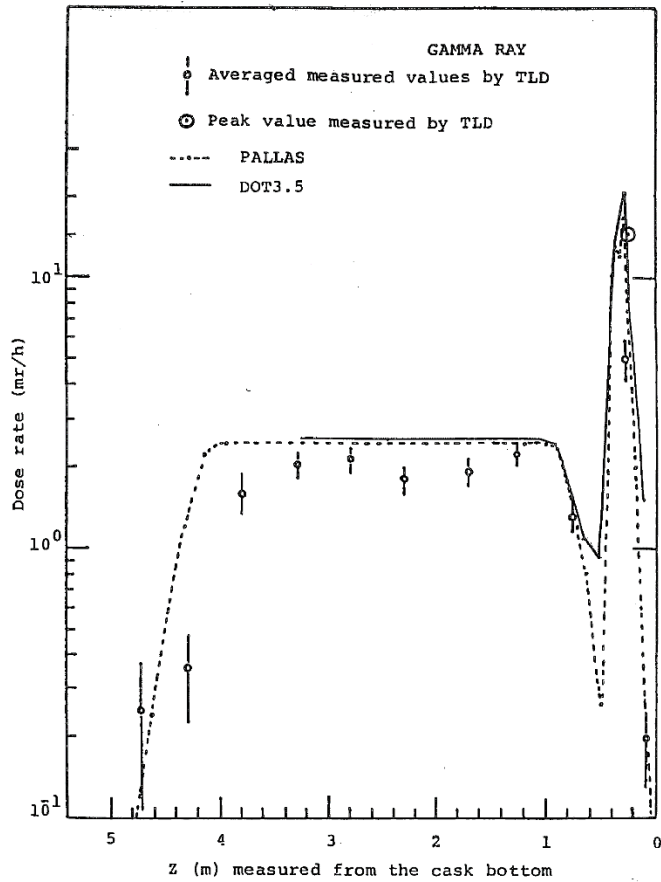
DOT3.5 コードの解析フローを別紙 5-3 図に示す。

(4) 使用実績及び検証

DOT3.5 コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、輸送キャスクの遮蔽解析の豊富な実績がある。使用済燃料輸送容器の解析事例と測定値⁽⁴⁾ を別紙 5-4 図及び別紙 5-5 図に示す。測定値はすべて解析値よりも低い値を示しており、解析コードが信頼できることを示している⁽⁴⁾。



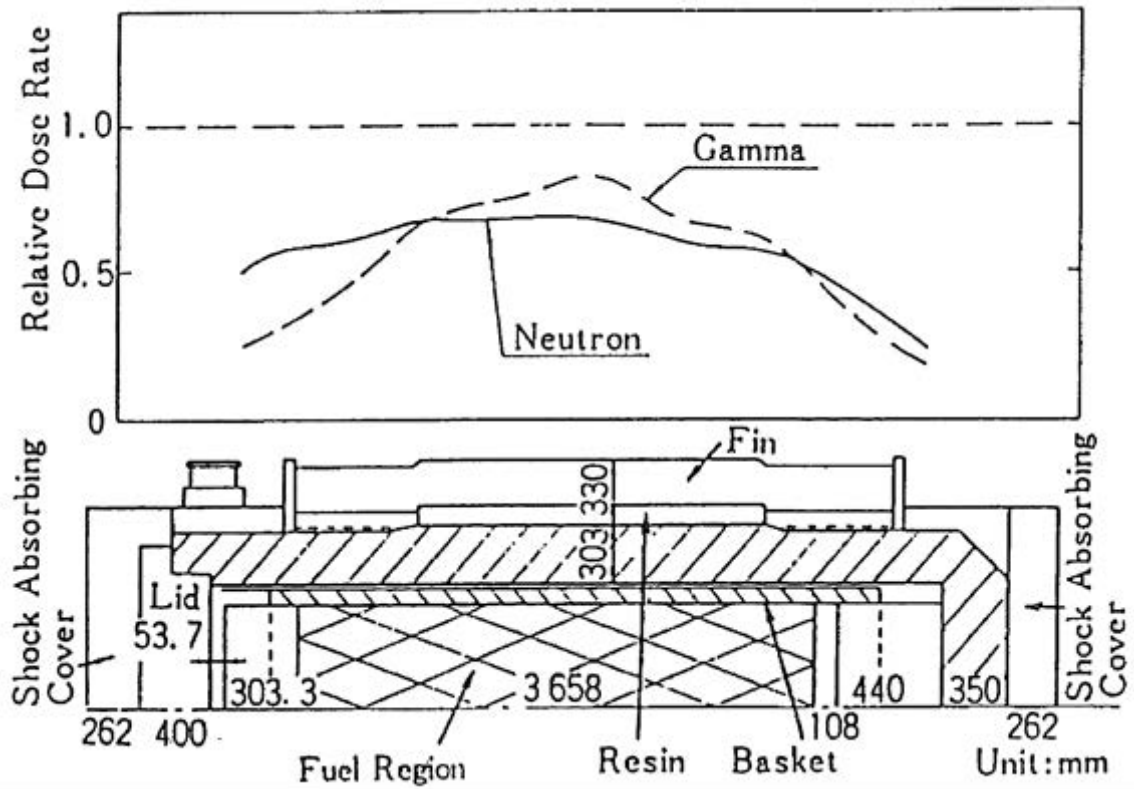
別紙 5-3 図 DOT3.5 コードの解析フロー図



EXCELLOX 型輸送物の容器表面でのガンマ線量当量率

(第 13 基準研究部会「使用済燃料の安全輸送に関する調査研究報告書」昭和 54 年 3 月、日本造船研究協会⁽⁷⁾の PALLAS コード検証例に DOT コード解析結果を追記したものである。)

別紙 5-4 図 DOT3.5 コードによるガンマ線の線量当量率の検証例⁽⁴⁾



(注) 中性子を DOT3.5 コード、二次ガンマ線を ANISN (一次元輸送コードで計算法上の差はない)、燃料有効部のガンマ線を QAD (点減衰核積分法によるもので、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、建屋の遮蔽解析の豊富な実績がある。) の各コードで解析した結果である。

別紙 5-5 図 DOT3.5 コードによる中性子の線量当量率の検証例 (5)

3. 参考文献

- (1) M. Ishikawa, T. JIN, J. Kataoka, H. Matsumoto, Y. Ohkawachi, S. Ohki, A. Onoue, A. Sasahara, K. Yanagisawa, “ZZ-ORIGEN2.2-UPJ, A complete package of ORIGEN2 libraries based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3”, Computer Programs NEA-1642, OECD/NEA Databank, (2006)
- (2) A. G. Croff, “ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials”, Nuclear Technology, Vol.62, p335, (1983)
- (3) Oak Ridge National Laboratory, “DOT3.5-Two-Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code”, CCC-276, (1976)
- (4) 日立造船株式会社, 「使用済燃料乾式貯蔵設備の安全解析で使用する解析コードについて」, HZTR-02, (1997)
- (5) (社) 日本原子力学会, 「中性子遮蔽設計ハンドブック」, (1993)

遮蔽解析に用いる断面積ライブラリについて

Hitz-B69 型の遮蔽設計では、二次元輸送計算コード DOT3.5 を用いて実施しており、断面積ライブラリとして DLC-23/CASK ライブラリを用いている。

DLC-23/CASK ライブラリは、輸送容器等の許認可申請において多くの使用実績があり、別紙 5 で引用している解析事例において断面積ライブラリとして DLC-23/CASK ライブラリを用いていることから、妥当性は確認されている。一方で、DLC-23/CASK ライブラリを用いた場合、鉄の単層透過時に中性子線量当量率を過小評価することが報告されていることから、共鳴領域の自己遮蔽因子が用意されている断面積ライブラリとして、JENDL-3.3 に基づく MATXSLIB-J33 ライブラリを使用して遮蔽解析を実施し、ライブラリの違いによる影響確認をおこなった。

1.遮蔽解析条件

DLC-23/CASK ライブラリを使用した場合の評価（以下「評価 A」という。）条件と MATXSLIB-J33 ライブラリを使用した場合の評価（以下「評価 B」という。）条件の比較を別紙 6-1 表に示す。ライブラリ以外の計算条件は同一とした。

2.遮蔽解析結果

両ライブラリをそれぞれ用いた場合の線量当量率評価結果を別紙 6-2 表に、評価方向毎の最大線量当量率を与える位置を別紙 6-1 図に示す。評価 B において、評価 A の値（表 3-4 記載値）を上回る箇所が存在するものの、金属キャスク表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率は、それぞれ 2mSv/h (2,000 μ Sv/h) 以下及び 100 μ Sv/h 以下である。

別紙 6-1 表 ライブラリの評価条件比較

断面積ライブラリ		DLC-23/CASK	MATXSLIB-J33
エネルギー 群構造	中性子	22 群	175 群
	ガンマ線	18 群	42 群
中性子スペクトル		^{239}Pu の核分裂スペクトルを DLC-23/CASK の 22 群構造に振り分けたものを使用。	^{239}Pu の核分裂スペクトルを VITAMIN-J 形式の 175 群構造に振り分けたものを使用。
ガンマ線線源強度		ORIGEN2 のエネルギースペクトルを DLC-23/CASK の 18 群構造に振り分けたものを使用。	ORIGEN2 のエネルギースペクトルを VITAMIN-J 形式の 42 群構造に振り分けたものを使用。
1cm 線量当量率への換算係数		AESJ-SC-F006:2013 ^{※1} に記載する値を使用。	ICRP Pub.74 の換算係数を中性子 175 群構造、ガンマ線 42 群構造に振り分けて使用。

※1：「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準：2013」

別紙 6-2 表 線量当量率評価結果の比較

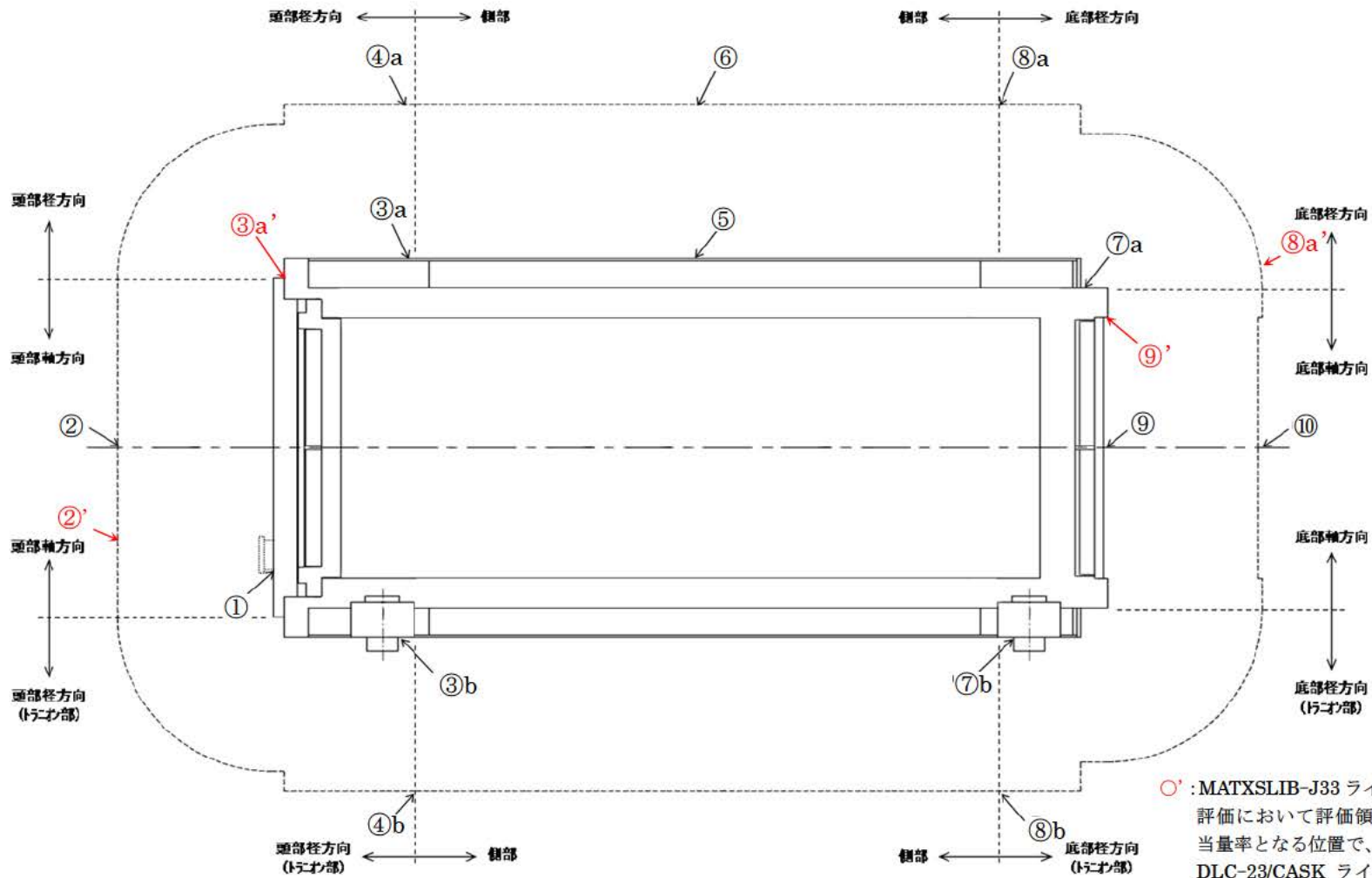
(単位：μSv/h)

評価点		頭部						側部		底部						
		軸方向		径方向		径方向 (トランニオン部)				軸方向		径方向		径方向 (トランニオン部)		
		①		③a※3		③b		⑤		⑨※3		⑦a		⑦b		
ライブラリ※2		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
表面	ガンマ線	燃料有効部	< 0.1※1	< 0.1※1	15.5	9.3 (< 0.1※1)	1.8	1.2	137.6	103.1	1.1	0.8 (< 0.1※1)	0.1	0.1	6.7	4.9
		構造材放射化	0.8	0.7	164.6	131.2 (< 0.1※1)	23.0	17.2	< 0.1※1	< 0.1※1	89.4	62.7 (4.6)	0.4	0.3	3.1	2.3
		二次ガンマ	0.6	0.7	5.0	6.9 (0.6)	3.2	5.0	29.8	38.8	4.2	6.2 (2.5)	1.9	3.9	5.0	7.7
	中性子	162.9	219.4	3.4	3.3 (172.1)	165.6	267.6	41.4	45.6	41.9	63.8 (262.7)	285.9	636.5	281.1	460.1	
	合計	164.4	220.9	188.5	150.7 (172.9)	193.6	291.0	208.9	187.6	136.6	133.5 (269.9)	288.3	640.8	295.9	475.0	
評価点		②※3		④a		④b		⑥		⑩		⑧a		⑧b		
ライブラリ※2		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
表面から 1m	ガンマ線	燃料有効部	< 0.1※1	< 0.1※1 (< 0.1)	21.3	16.4	20.1	15.5	56.8	45.5	0.4	0.3	28.1	22.2 (< 0.1※1)	23.4	18.5
		構造材放射化	5.1	3.5 (4.1)	23.9	20.3	11.7	10.5	0.2	0.2	30.5	23.2	2.0	1.8 (4.2)	0.9	0.9
		二次ガンマ	0.1	0.2 (0.2)	4.3	5.8	4.1	5.6	11.1	14.8	1.1	1.6	5.1	6.8 (0.7)	4.8	6.5
	中性子	24.6	36.1 (36.1)	6.7	7.9	9.4	13.9	14.6	16.8	17.1	35.0	6.5	7.8 (34.8)	10.5	16.9	
	合計	29.9	39.9 (40.5)	56.1	50.4	45.3	45.5	82.7	77.3	49.1	60.1	41.7	38.6 (39.8)	39.6	42.8	

※1：“< 0.1”の値は、“0.1”として合計値に含めた。

※2：ライブラリ A を DLC-23/CASK ライブラリ、ライブラリ B を MATXSLIB-J33 ライブラリとする。

※3：A と B で最大値を与える位置が顕著に異なるため、括弧内に B での最大値を与える評価位置（別紙 6-1 図参照）における値を示す。



別紙 6-1 図 線量当量率評価点