

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

(HDP-69BCH(B)型の遮蔽機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法(よこ置き)の場合
5. 緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法(よこ置き)の場合
6. 参考文献

【参考資料】

参考1 燃焼度分布の設定について

参考2 二次元輸送計算コードで使用する断面積ライブラリについて

参考3 遮蔽解析用実効増倍率について

1. 要求事項

HDP-69BCH(B)型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。

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ていること。
- ・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「通常運転等」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・貯蔵兼用兼用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 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. 適合性について

設置（変更）許可に係る審査で確認される兼用キャスクの有する4つの安全機能（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本型式証明申請で確認する。HDP-69BCH(B)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及び審査ガイドの確認内容に適合している。

〔設置許可基準規則〕

- ・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ていること。

〔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

- 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。
- 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。

HDP-69BCH(B)型の遮蔽解析フローを図2.4.2-1に示す。

a. 使用済燃料の放射線源強度評価

使用済燃料の線源強度計算条件を表2.4.2-1に、収納配置条件を図2.4.2-2に示す。

図2.4.2-2に示すように、HDP-69BCH(B)型には3つの収納配置条件があり、兼用キャスク中央部と外周部に使用済燃料1体当たりの燃焼度の上限を設定している。また、それぞれの収納位置条件には、兼用キャスク1基当たりの平均燃焼度が設定されており、その平均燃焼度を上回らないように使用済燃料を収納する。

使用済燃料の線源強度は、収納する使用済燃料の種類、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コードORIGEN2を使用して求める。また、貯蔵対象とする使用済燃料の平均燃焼度に対する軸方向の燃焼度の比（以下「ピーキングファクター」という。参考1参照）を調査し、貯蔵対象の使用済燃料のピーキングファクターを包絡するような

ピーキングファクターを別途設定した上で、当該ピーキングファクターに平均燃焼度を乗じることで算出される軸方向の燃焼度分布を、使用済燃料の収納条件として線源強度の計算条件とする。

使用済燃料の構造材については、照射期間、中性子束、冷却期間等を条件に放射化計算式を用いて線源強度を求める。

使用済燃料の線源強度計算方法を表 2.4.2-2 に、評価した兼用キャスク 1 基当たりの線源強度を表 2.4.2-3 に示す。

なお、後述の「b. 兼用キャスクの遮蔽機能評価方法」では、線源強度評価の結果(表 2.4.2-3)より、線源強度の大きい新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料を混載した収納配置(i)、(ii)を対象として評価を実施する。

b. 兼用キャスクの遮蔽機能評価方法

HDP-69BCH(B)型の線量当量率は、HDP-69BCH(B)型の実形状を軸方向断面で二次元でモデル化し、表 2.4.2-3 に示した線源強度に基づき、二次元輸送計算コード DOT3.5 (DLC-23/CASK ライブラリ)を使用して求める。

兼用キャスク表面から線量当量率の評価位置である1mの位置までの評価にはレイエフェクトを平準化するためDOT3.5の補助コードであるSPACETRAN-IIIを用いる。

HDP-69BCH(B)型のモデル化の概要を図 2.4.2-3 に、解析モデル図を図 2.4.2-4～図 2.4.2-7 に示す。遮蔽機能評価においては以下の要求事項を満足する設計とする。

- ・表面における最大線量当量率が 2mSv/h を超えないこと。
- ・表面から 1m 離れた位置における最大線量当量率が 100 μ Sv/h を超えないこと。

なお、本評価においては、以下の保守性を有している(表 2.4.2-4 参照)。

・モデル化の保守性

- 図 2.4.2-4～図 2.4.2-7 に示す解析モデルの各部材の寸法は公称値でモデル化する。製造公差は、公差を考慮した最小寸法と公称寸法の比を構成部材の密度に乗じることで考慮している。密度は、購入仕様上の最小値を用いている。
- 燃料領域より外側のバスケットは、バスケット最外周の最小板厚の円環としてモデル化した。燃料領域より外側のバスケットの物量よりも円環としてモデル化したバスケットの物量は少ない設定とした。
- 伝熱フィンのような小さいものが比較的多く配置されている中性子遮蔽体領域では、レジンと伝熱フィンを均質化したモデルとしている。この均質化において、伝熱フィンが占有する面積については、伝熱フィンの密度をゼロとして、中性子遮蔽体としてのレジンの均質化密度を安全側に低下させている。これによって、ガンマ線遮蔽体としての寄与を無視している。
- トラニオン有りのモデルとトラニオン無しのモデルで線種ごとに線量当量率を求

め、トランニオン有りのモデルが大きい場合は、本体モデルの計算結果にその差分を加算するが、トランニオン有りのモデルが小さい場合は、その低下は無視している。

- 貯蔵時は使用済燃料が底に接し、蓋と燃料の間は接していないが、頭部評価モデルにおいては使用済燃料が蓋に接した位置でモデル化することで頭部の評価を保守的に実施する。これにより、兼用キャスク軸方向の使用済燃料の配置状態に影響する兼用キャスクの設置姿勢（たて置き又はよこ置き）に遮蔽機能上の制限はない。
- 貯蔵時に緩衝体及び三次蓋を装着しない場合の方が、緩衝体及び三次蓋の遮蔽体としての寄与が無いいため線量等量率が大きくなることから、緩衝体及び三次蓋を無視する。これにより、兼用キャスクの設置方法における緩衝体及び三次蓋の装着に対して、遮蔽機能上の制限は必要ない。
- チャンネルボックスは、放射化線源強度のみ考慮し、構造材としての遮蔽効果を無視する保守的な組合せを仮定する。

c. 遮蔽機能評価結果

兼用キャスクの遮蔽機能評価結果を表 2.4.2-5 に示す。兼用キャスク表面での線量当量率及び表面から 1m の位置における線量当量率は全て評価基準を満たしている。

表 2.4.2-1(1/2) 使用済燃料の線源強度計算条件

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		新型 8×8 燃料		
	配置(i)				配置(iii)		
使用済燃料の 収納配置条件*1	配置(i)				配置(iii)		
燃焼度(MWd/t)	34000	40000	34000	40000	29000	34000	
比出力(MW/t)	25.3	同左	26.2	同左	25.3	同左	
照射 期間 (日)	燃料集合体	1344	1582	1298	1527	1147	1344
	チャンネル ボックス						
濃縮度(wt%)	2.88	同左	3.35	同左	2.88	同左	
冷却期間(年)	18	同左	18	同左	28	同左	
ウラン重量(kg)	177	同左	174	同左	177	同左	

注記*1：図 2.4.2-2 参照

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.2-1(2/2) 使用済燃料の線源強度計算条件

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	
使用済燃料の 収納配置条件*1		配置(ii)		
燃焼度(MWd/t)		40000	40000	48000
比出力(MW/t)		25.3	26.2	同左
照射 期間(日)	燃料集合体	1582	1527	1833
	チャンネルボックス			
濃縮度(wt%)		2.88	3.35	同左
冷却期間(年)		22	22	20
ウラン重量(kg)		177	174	同左

注記*1 : 図 2.4.2-2 参照

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.2-2 使用済燃料の線源強度計算方法

項目	計算方法	計算条件
燃料有効部のガンマ線及び中性子	燃料計算コードORIGEN2を用い、ガンマ線及び中性子源強度を計算。使用済燃料のピーキングファクターを考慮。また、中性子については実効増倍率を考慮。	燃料条件：表 2.4.2-1 参照 ライブラリ：BWR-U ライブラリ 中性子実効増倍率の考慮 $N_S = N_0 / (1 - k_{eff})$ N_S ：全中性子線源強度 N_0 ：一次中性子線源強度 k_{eff} ：使用済燃料貯蔵時における実効増倍率
使用済燃料構造材及びチャンネルボックス構造材の放射化によるガンマ線	構造材の ^{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 $A = N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \{1 - \exp(-\lambda \cdot T_1)\} \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$ 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 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 (1/日) T_1 ：照射期間 (日) (表 2.4.2-1 参照) T_2 ：冷却期間 (日) (表 2.4.2-1 参照)

表 2.4.2-3 兼用キャスク 1 基当たりのガンマ線及び中性子の線源強度

使用済燃料の種類		新型 8×8 ジェロニウムライ付燃料 及び 高燃焼度 8×8 燃料		新型 8×8 燃料
		配置 (i)	配置 (ii)	
使用済燃料の 収納配置条件		配置 (i)	配置 (ii)	配置 (iii)
濃縮度 (wt%)		2.88 (新型 8×8 ジェロニウムライ付燃料) 3.35 (高燃焼度 8×8 燃料)		2.88
燃焼度 (MWd/t)	外周部	34,000	40,000	29,000
	中央部	40,000	48,000	34,000
冷却年数 (年)		18	22 (外周) 20 (中央)	28
使用済燃料の燃料有効部の ガンマ線の線源強度 (photons/s)		8.9×10^{16}	8.9×10^{16}	6.0×10^{16}
使用済燃料構造材の放射化 によるガンマ線の線源強度 (^{60}Co :Bq)		1.3×10^{14}	1.1×10^{14}	3.1×10^{13}
使用済燃料の燃料有効部の 中性子の線源強度 (n/s)*1		1.4×10^{10}	1.5×10^{10}	5.0×10^9

注記*1：中性子実効増倍率の効果を考慮した値である。

表 2.4.2-4 遮蔽解析の保守性

項目	内容
キャスクのモデル化	<ul style="list-style-type: none"> ・バスケット外周領域：燃料領域より外側のバスケットは、バスケット最外周の最小板厚の円環としてモデル化。燃料領域より外側のバスケットの物量よりも円環としてモデル化したバスケットの物量は少ない設定とした。 ・側部中性子遮蔽体領域：伝熱フィンのような小さいものが比較的多く配置されている中性子遮蔽体領域では、レジンと伝熱フィンを均質化したモデルとしている。伝熱フィンが占有する面積については伝熱フィンの密度をゼロとして、中性子遮蔽体としてのレジンの均質化密度を安全側に低下させている。これによって、ガンマ線遮蔽体としての寄与を無視している。 ・トラニオン部：トラニオン有りのモデルとトラニオン無しのモデルで線種ごとに線量当量率を求め、トラニオン有りのモデルが大きい場合は、本体モデルの計算結果にその差分を加算するが、トラニオン有りのモデルが小さい場合は、その低下は無視している。 ・貯蔵時に緩衝体及び三次蓋を装着しない場合の方が、緩衝体及び三次蓋の遮蔽体としての寄与が無いため線量当量率が大きくなることから、緩衝体及び三次蓋を無視する。
燃料集合体のモデル化	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵時は燃料が底に接し、蓋と燃料との間は接していないが、頭部評価モデルにおいて燃料が蓋に接した位置でモデル化することで頭部の評価を保守的に実施。 ・チャンネルボックスは、放射化線源強度のみ考慮し、構造材としての遮蔽効果を無視する保守的な組合せを仮定。
線源強度	<ul style="list-style-type: none"> ・中央部に最高燃焼度^{*1}の燃料、外周部に平均燃焼度^{*2}の燃料を配置している。 ・収納燃料全数の冷却期間は、最短冷却期間^{*3}と仮定。
劣化評価	<ul style="list-style-type: none"> ・レジン系中性子遮蔽材の経年劣化評価試験結果等の知見を踏まえて、加熱に伴う熱分解によるレジンの質量減損分を遮蔽体として考慮しないこととしており、中性子遮蔽材について減損分を含まない原子個数密度を線量当量率計算に用いている。

注記*1：HDP-69BCH(B)型に収納可能な使用済燃料の燃焼度の上限。

*2：HDP-69BCH(B)型に収納する使用済燃料の燃焼度の平均値の上限。

*3：HDP-69BCH(B)型に収納する使用済燃料の最短の冷却期間。

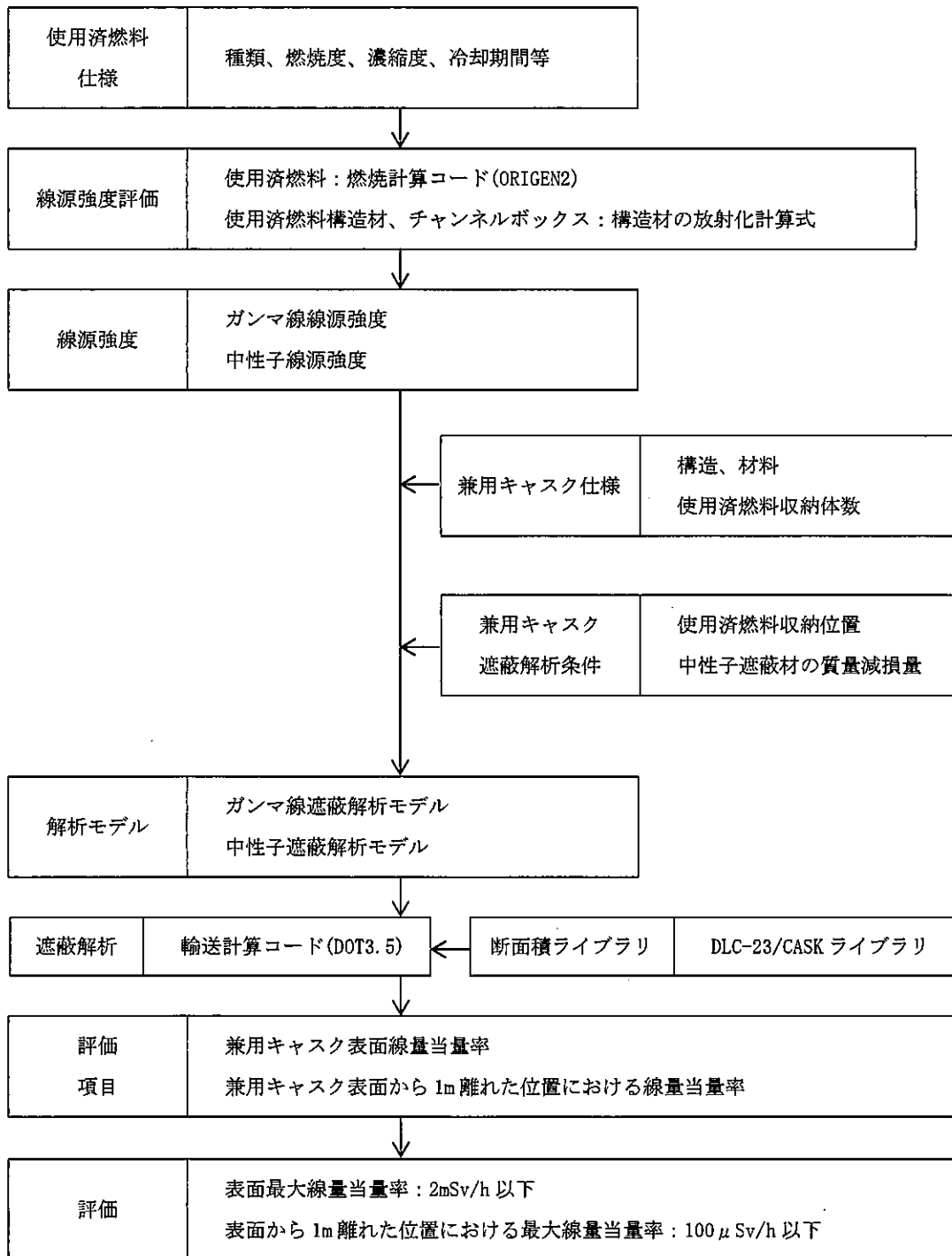
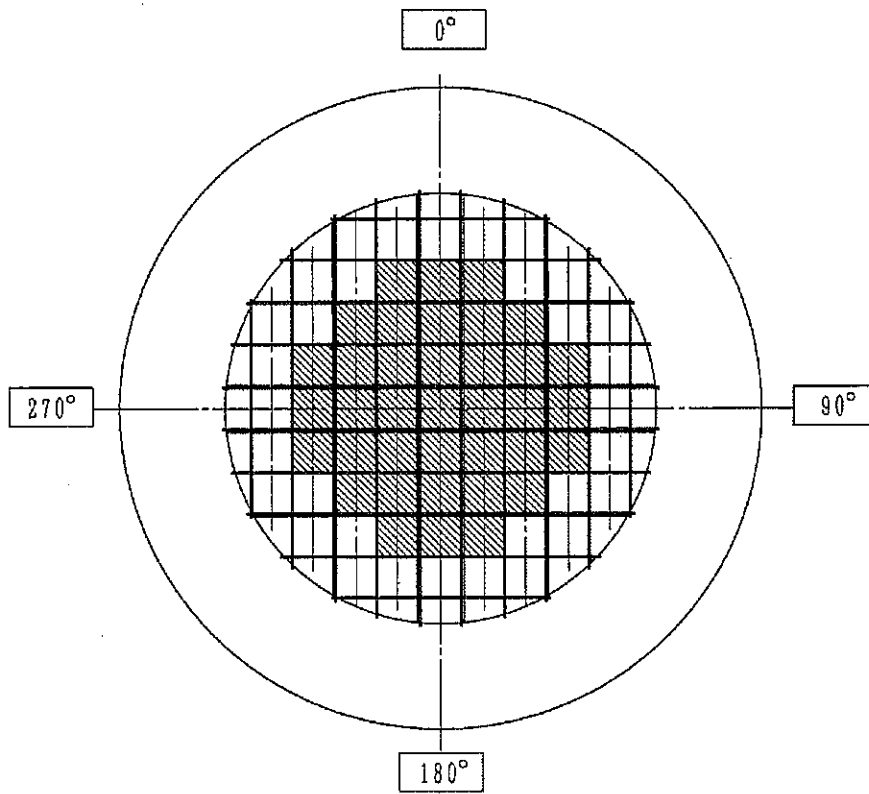


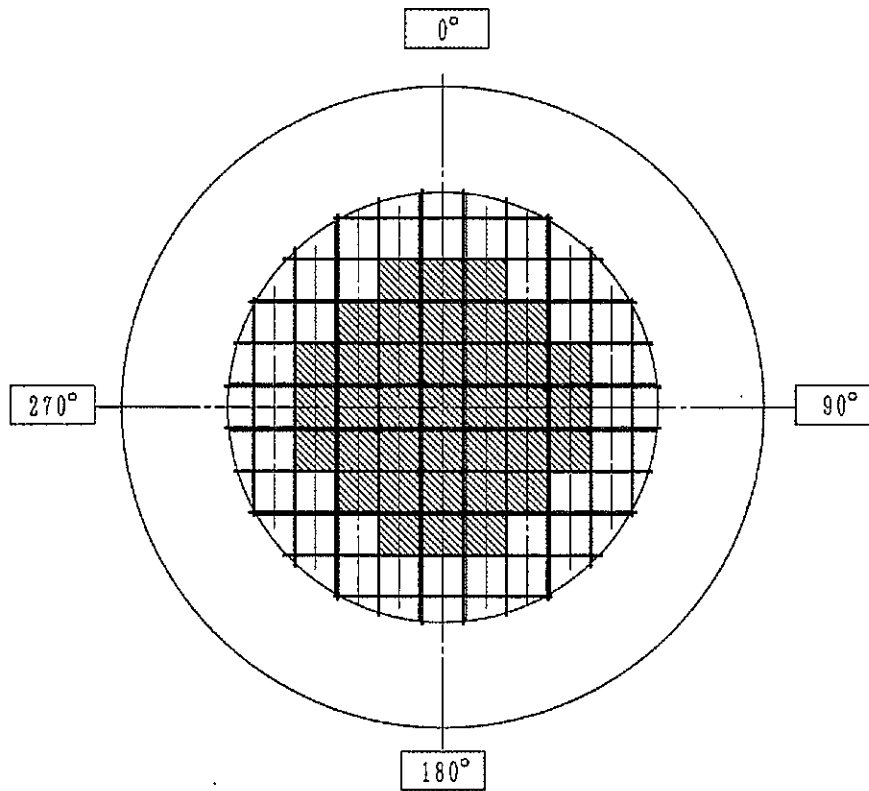
図 2.4.2-1 遮蔽解析フロー図



- | | |
|---|---|
| <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; margin-bottom: 5px; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px);"></div> | <p>燃料種類 : 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
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 18 年以上</p> <p>燃料種類 : 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
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 18 年以上</p> |
|---|---|

兼用キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下
 兼用キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 12.1 kW 以下

図 2.4.2-2(1/3) 使用済燃料の収納配置条件(配置(i))
 (新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料を混載収納する場合)

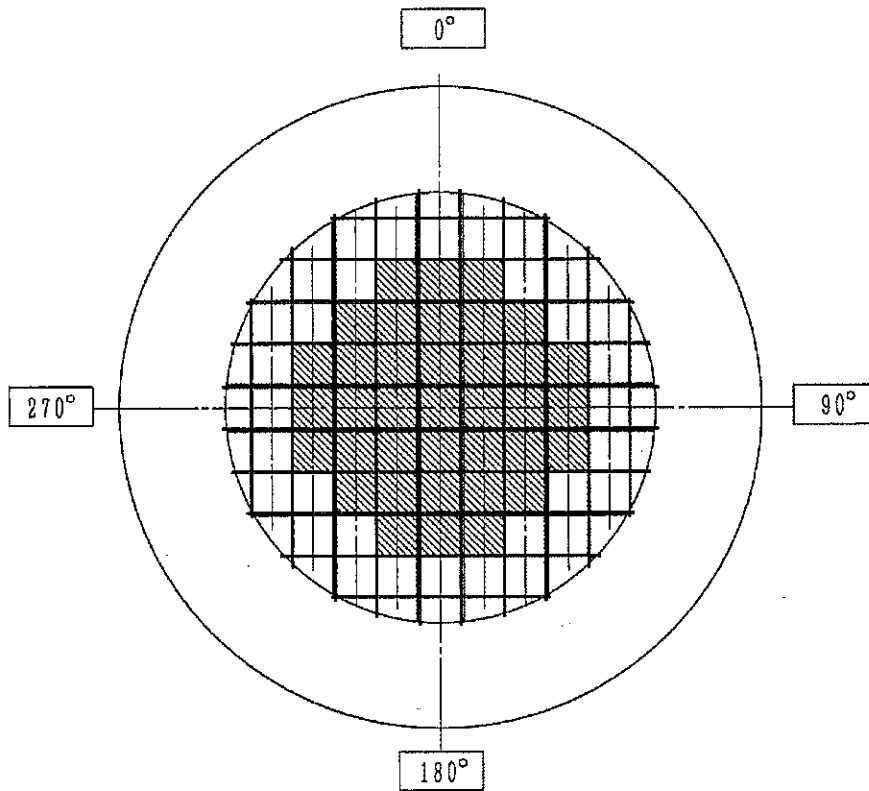


- | | |
|---|--|
| <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 20px; height: 15px; background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px); margin-bottom: 5px;"></div> | <p>燃料種類 : 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</p> <p>収納体数 : 32 体</p> <p>燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下</p> <p>冷却期間 : 22 年以上</p>
<p>燃料種類 : 高燃焼度 8×8 燃料</p> <p>収納体数 : 37 体</p> <p>燃焼度 : 48,000 MWd/t 以下</p> <p>冷却期間 : 20 年以上</p> |
|---|--|

兼用キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下

兼用キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 13.8 kW 以下

図 2.4.2-2(2/3) 使用済燃料の収納配置条件(配置(ii))
 (新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料を混載収納する場合)



燃料種類 : 新型 8×8 燃料
 収納体数 : 32 体
 燃焼度 : 29,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 28 年以上

燃料種類 : 新型 8×8 燃料
 収納体数 : 37 体
 燃焼度 : 34,000 MWd/t 以下
 冷却期間 : 28 年以上

兼用キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 29,000 MWd/t 以下

兼用キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 8.4 kW 以下

図 2.4.2-2(3/3) 使用済燃料の収納配置条件(配置(iii))
 (新型 8×8 燃料のみを収納する場合)

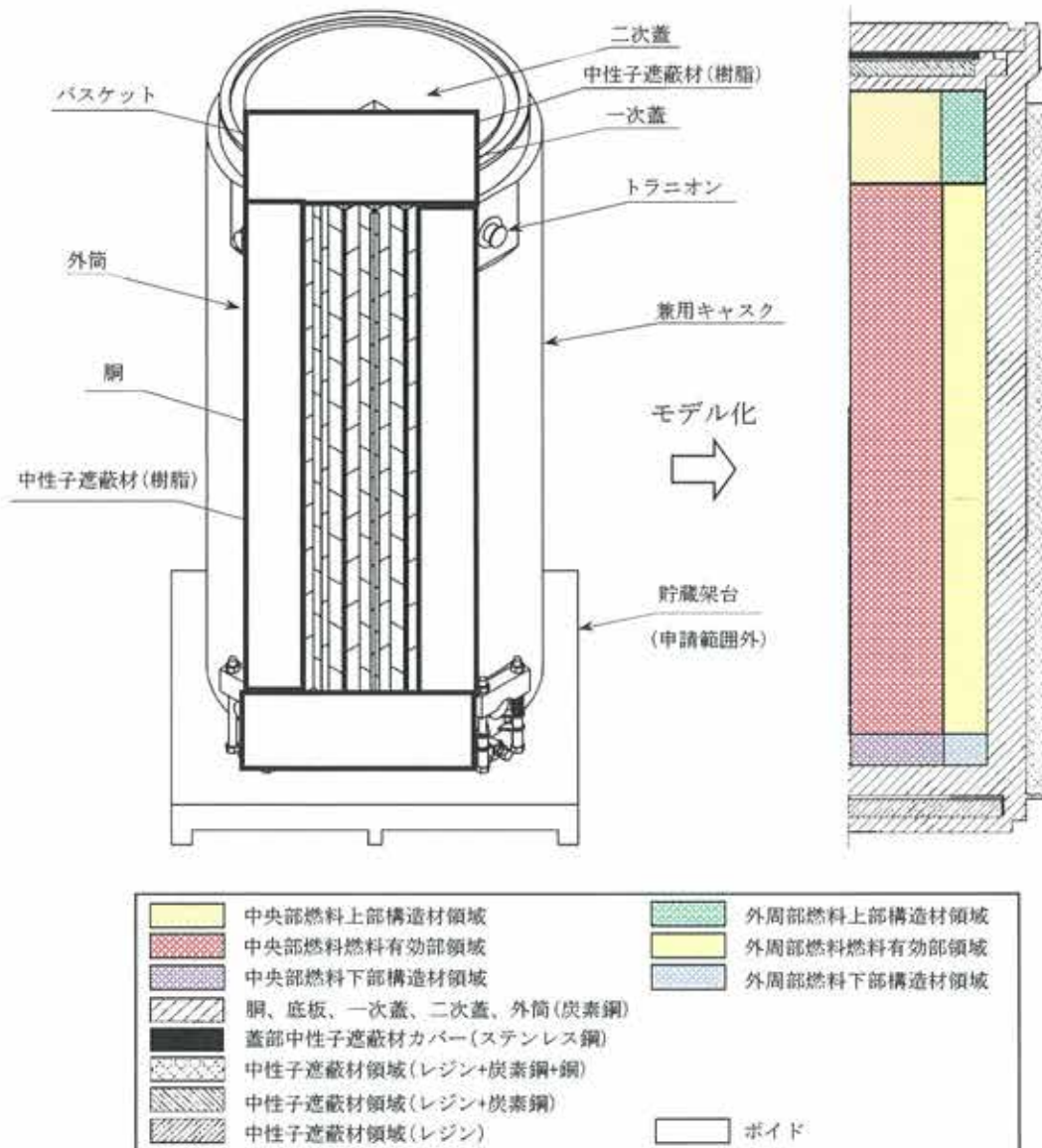
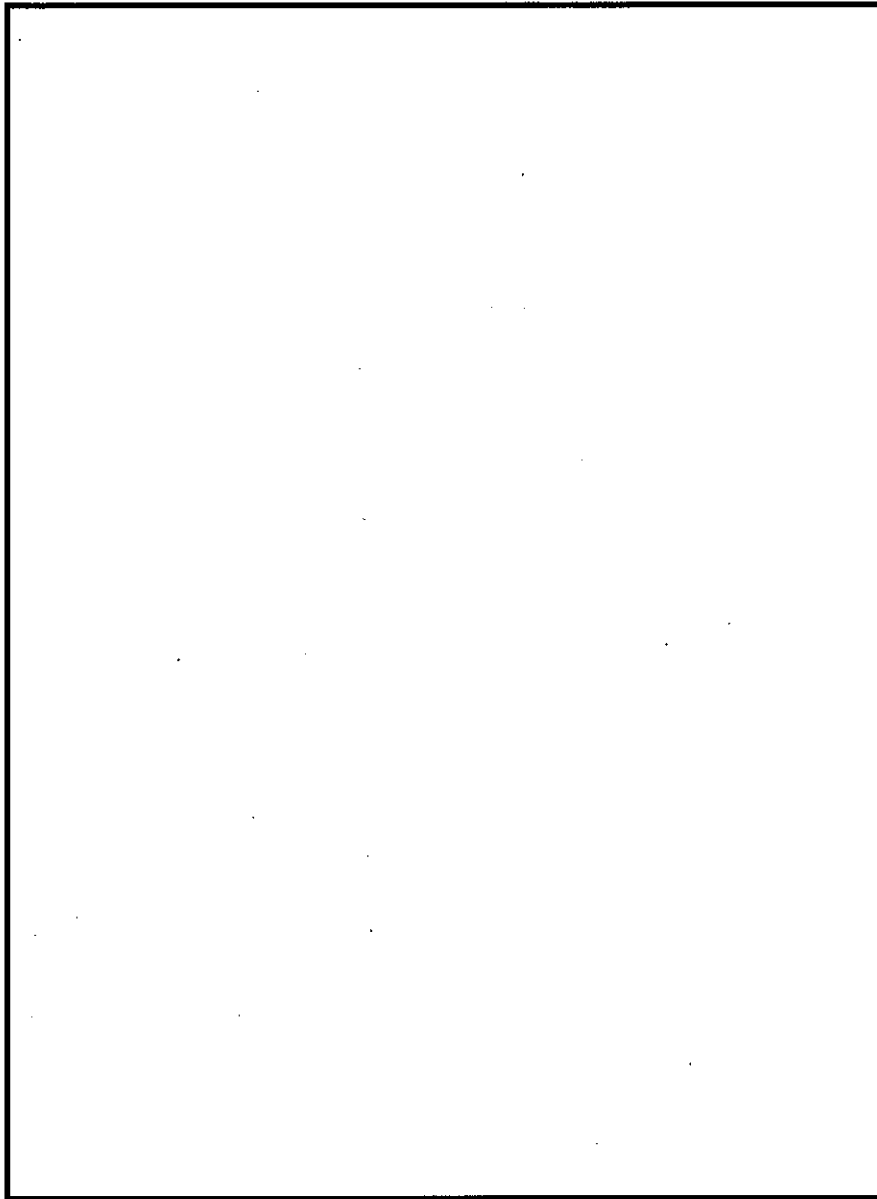



図 2.4.2-3 HDP-69BCH(B)型の遮蔽解析モデル化の概要

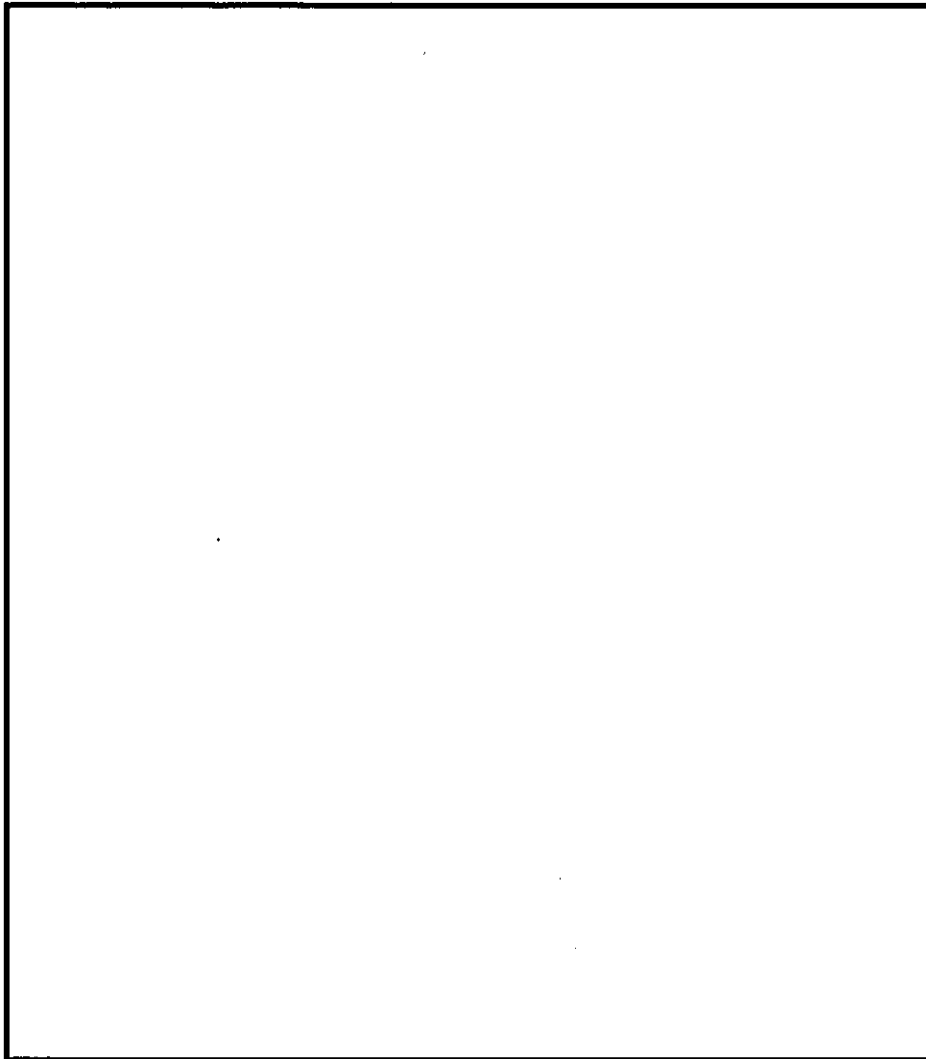
内は商業機密のため、非公開とします。



(単位：mm)


図 2.4.2-4 貯蔵時の解析モデル (頭部)

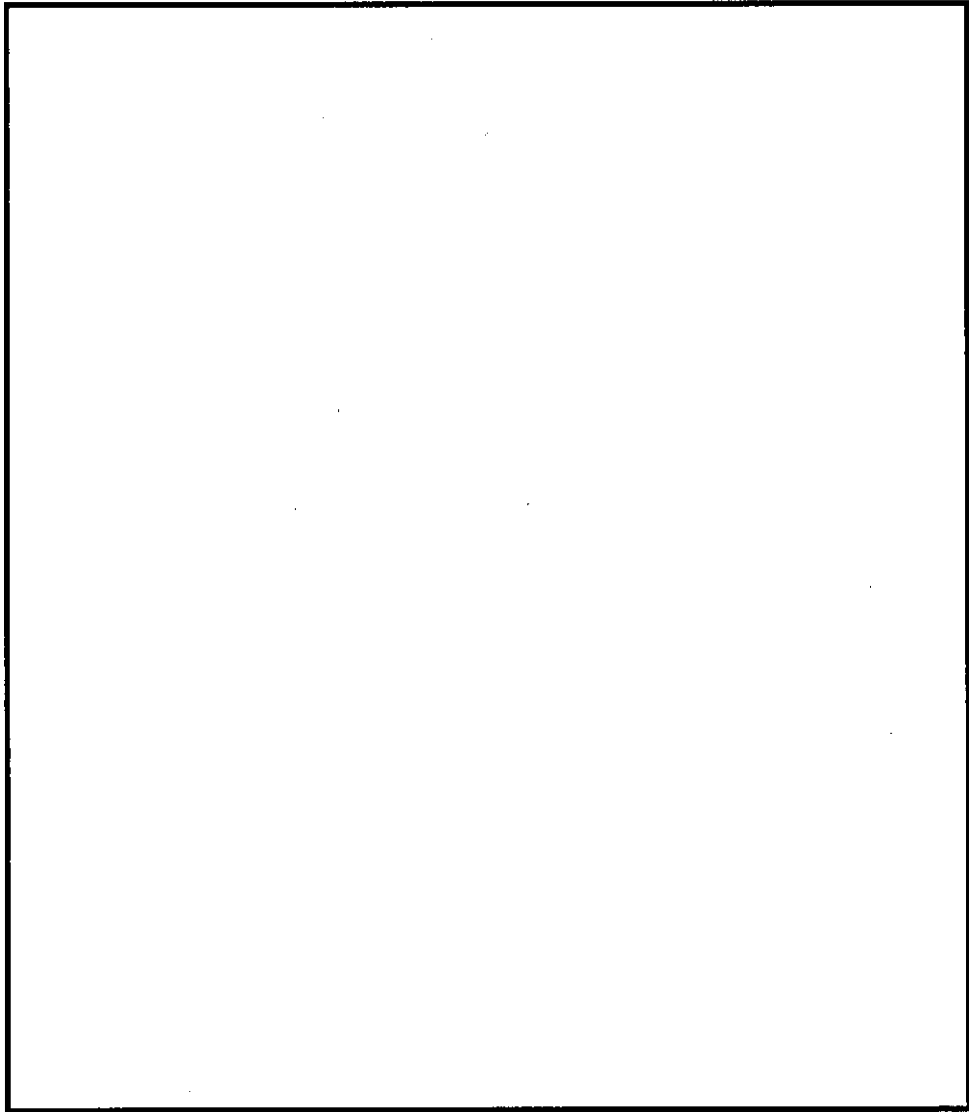
 内は商業機密のため、非公開とします。



(単位：mm)


図 2.4.2-5 貯蔵時の解析モデル (底部)

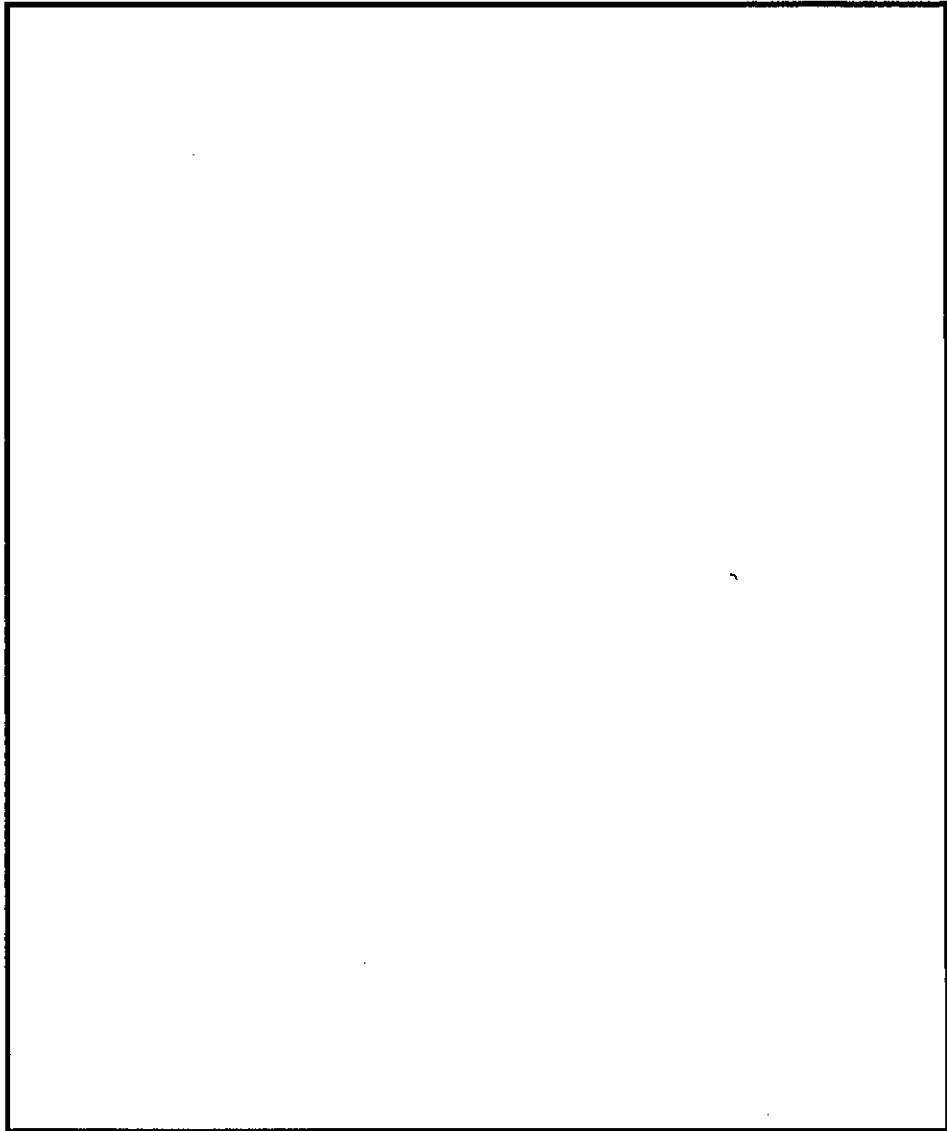
 内は商業機密のため、非公開とします。



(単位：mm)

図 2.4.2-6 貯蔵時の解析モデル（上部トラニオン）

 内は商業機密のため、非公開とします。



(単位：mm)

図 2.4.2-7 貯蔵時の解析モデル (下部トラニオン)

内は商業機密のため、非公開とします。

表 2.4.2-5 評価結果

項目	評価結果		評価基準	備考
	配置(i)	配置(ii)		
表面線量当量率	1.1 mSv/h	0.90 mSv/h	2mSv/h 以下	各部位の評価結果は、 表 2.4.2-6 に示す。 出力位置は、 図 2.4.2-8 に示す。
表面から 1 m の位置におけ る線量当量率	81 μ Sv/h	75 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	

表 2.4.2-6(1/2) 線量当量率評価結果(配置(i))

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側中央部	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨
表面 ガンマ線	燃料有効部	0.5	0.5	95.8	1.3	26.8	3.0
	構造材放射化	4.9	132.5	< 0.1*1	12.8	61.7	19.1
	二次ガンマ線	0.7	2.0	26.9	4.6	8.2	2.3
中性子	188.2	253.9	522.0	72.7	706.9	974.8	265.9
合計	193.9	388.9	635.0	195.5	725.6	1071.5*2	290.3
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から 1 m	燃料有効部	0.5	13.3	40.5	21.6	21.6	3.9
	構造材放射化	45.6	24.1	24.1	8.2	8.2	59.3
	二次ガンマ線	0.2	3.2	3.2	5.3	5.4	0.9
中性子	28.7	17.0	20.8	26.2	13.6	26.9	16.2
合計	75.0	57.6	61.4	77.9	48.8	62.1	80.3*2

注記*1: “<0.1”の値は、“0.1”として合計値に合算した。

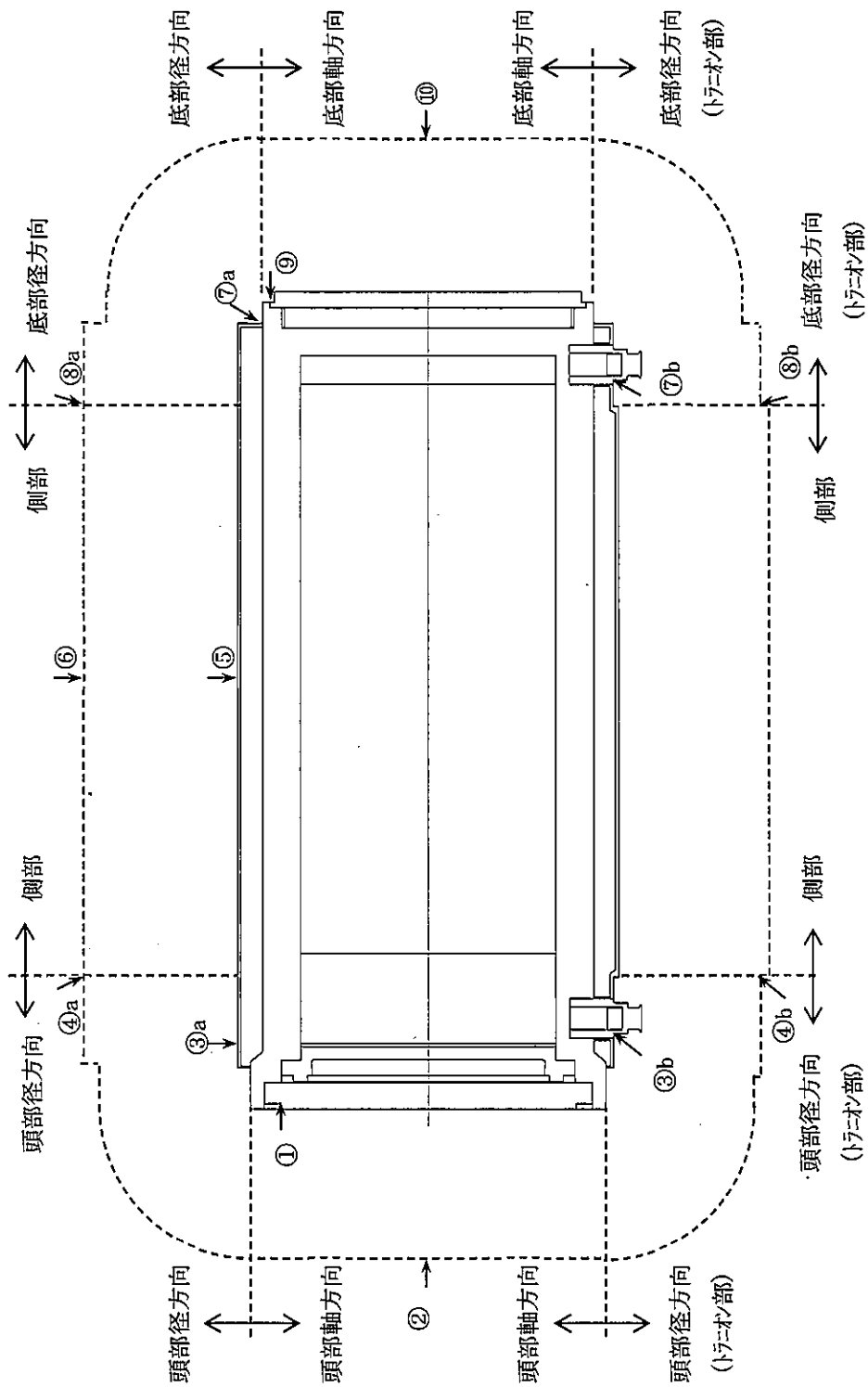
*2: 下線で示す値は、表面及び表面から1m離れた位置における線量当量率の最大値である。

表 2.4.2-6(2/2) 線量当量率評価結果(配置(ii))

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部				側部 中	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)			径方向 (トランニオン部)	軸方向	
			③a	③b				⑦a
①				⑤			⑨	
表面	燃料有効部	0.1	0.4	80.9	0.7	16.4	1.7	
	構造材放射化	3.7	100.1	< 0.1 ^{*1}	8.7	42.4	13.0	
	二次ガンマ線	0.8	2.5	29.4	3.9	7.1	1.9	
中性子	230.2	313.2	645.5	81.7	587.3	829.9	221.0	
合計	234.8	416.2	732.0	192.1	600.6	895.8	237.6	
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
表面から 1 m	燃料有効部	0.3	11.8	33.1	16.8	16.8	2.1	
	構造材放射化	38.4	18.6	1.5	5.7	5.7	48.1	
	二次ガンマ線	0.2	4.0	10.9	5.2	5.2	0.7	
中性子	34.6	20.8	25.6	28.7	12.8	24.1	13.0	
合計	73.5	55.2	60.0	74.2	40.5	51.8	63.9	

注記*1: “<0.1” の値は、“0.1” として合計値に合算した。



注記*1: ①~⑩は評価方向ごとの最大線量当量率位置を示しており、評価結果を第2.4.2-6表に示す。

第2.4.2-8図 線量当量率評価位置(配置(i)、(ii))

なお、以下の内容は、本型式証明の申請範囲外とする。

〔設置許可基準規則〕

- ・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。

〔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。

〔確認内容〕（続き）

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。

3. 使用する解析コード

(a) ORIGEN2 コード

(1) 概要

ORIGEN2 コード⁽¹⁾は、米国のオーク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 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、炉取り出し後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線の強度、各核種の放射エネルギー等が求められる。
- b. 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリデータが内蔵されており、任意に選択できる。
- c. 計算結果は、放射化生成物、アクチニド、核分裂生成物に分類して出力される。
- d. 燃料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) 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図 2.4.2-9 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 コードの検証例を図 2.4.2-10 に示す。

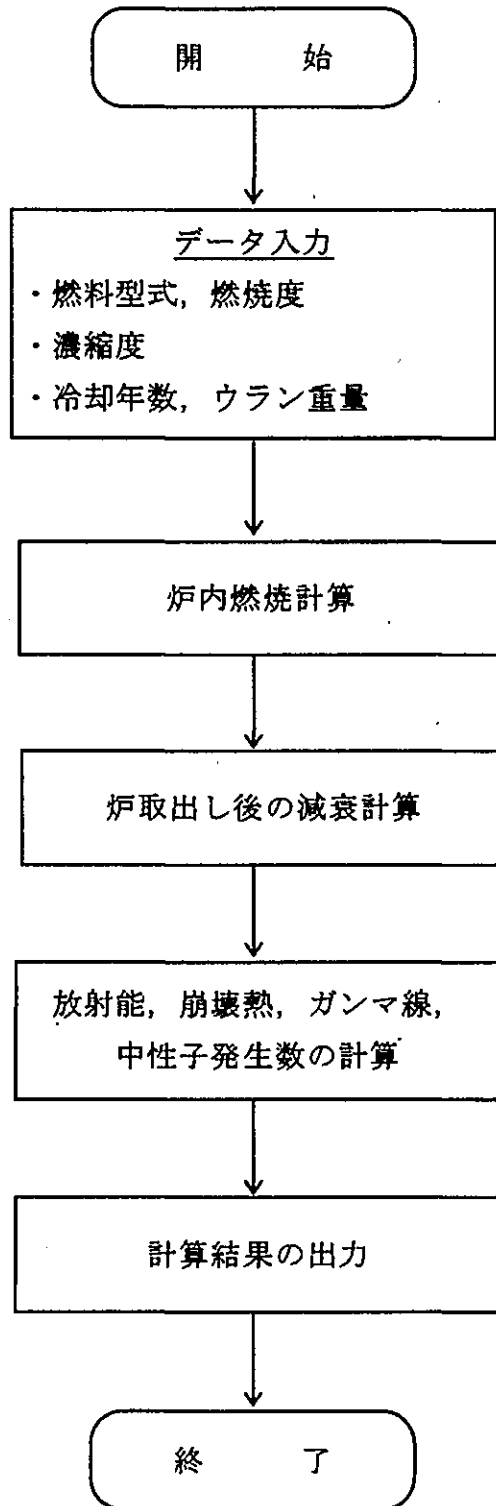


図 2.4.2-9 ORIGEN2 コードの計算フロー図

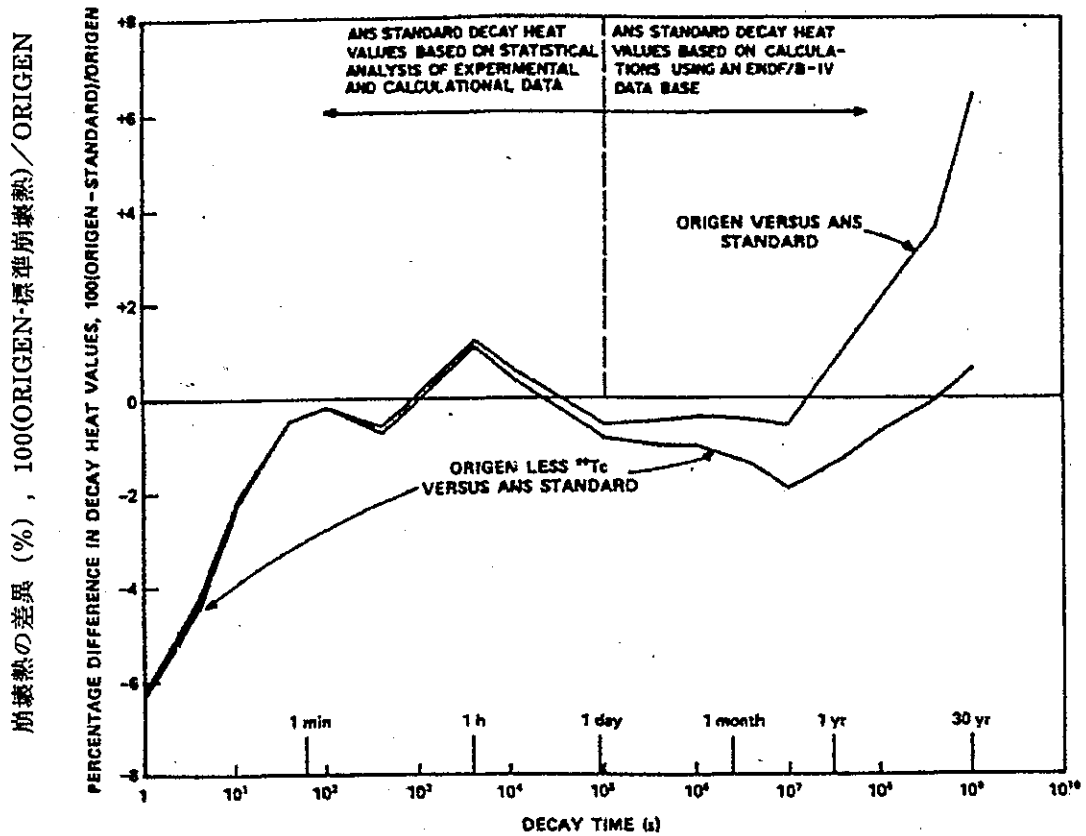


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

注) ORIGEN2 の崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、7 年以上（貯蔵容器に収納される燃料の冷却期間）の年数に対して高めの値をしている。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。したがって、ORIGEN2 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。

図 2.4.2-10 ORIGEN2 コードの検証例

出典：A. G. Croff, "ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Nuclear Technology, Vol.62 p335, (1983)

(b) DOT3.5 コード

(1) 概要

DOT 3.5 コード⁽³⁾ (以下「DOT コード」という。) は二次元輸送コードであり、米国オークリッジ国立研究所(ORNL)で開発された輸送コードである。

(2) 機能

DOT コードは、遮蔽解析に際して以下の機能を有する。

- a. ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解法であり、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. DOT コードは、2次元の体系を扱うことができる。

(3) 計算フロー

DOT コードの解析フローを図 2.4.2-11 に示す。

(4) 使用実績及び検証

DOT 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を図 2.4.2-12 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⁾。また、三次元モンテカルロ計算コードである MCNP5 コードで、類似の兼用キャスクで同一部位の評価を行い、DOT コードの評価で妥当な結果が得られることを確認している⁽⁵⁾。使用した三次元モデルを図 2.4.2-13 に、表面の線量当量率分布を図 2.4.2-14 に示す。

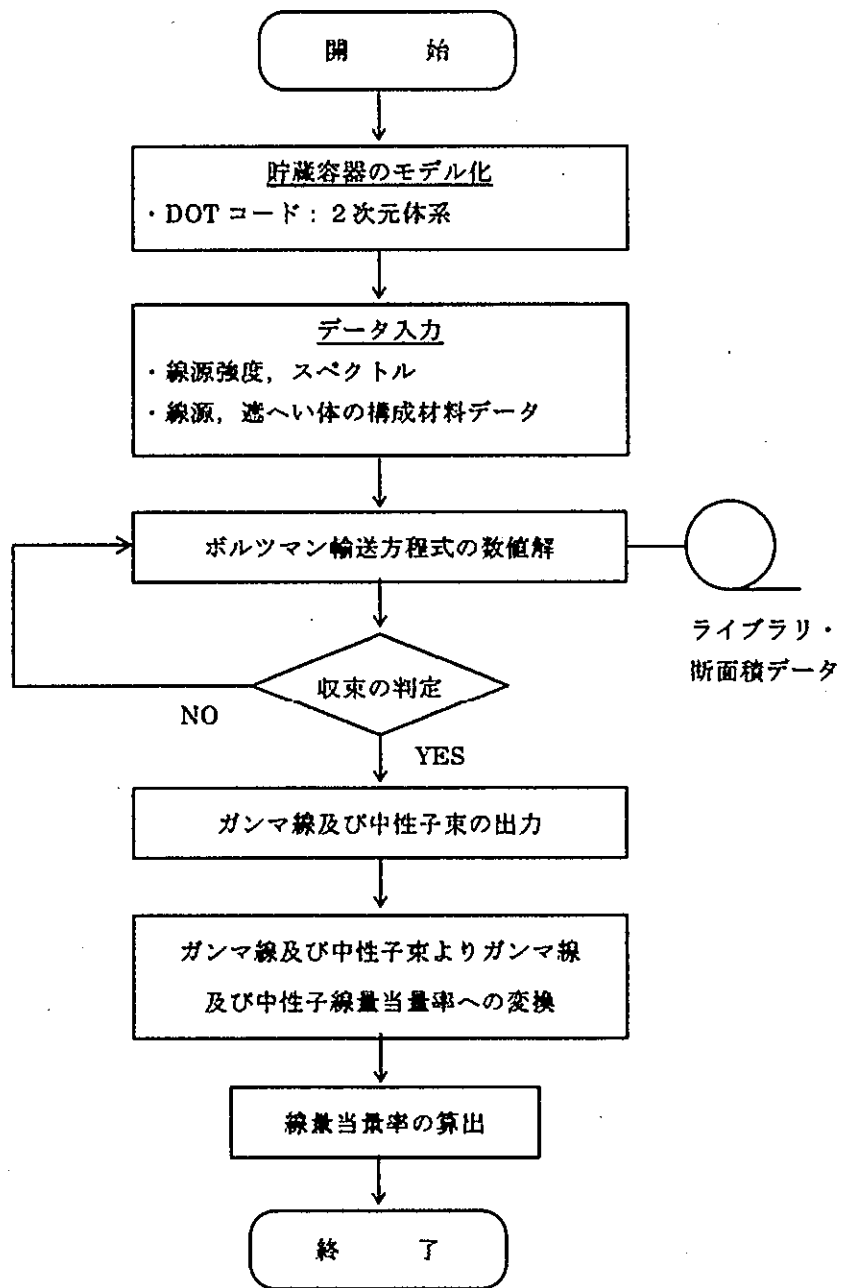
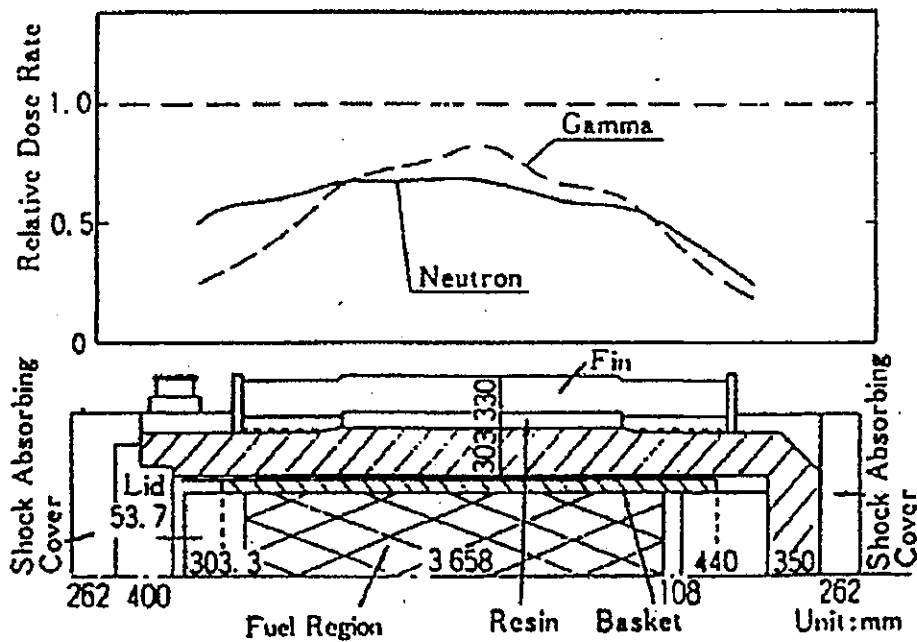


図 2.4.2-11 DOT コードの解析フロー図



注) 中性子を DOT、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。

図 2.4.2-12 DOT コードの検証例

出典：松田文夫、他、"TN-12 型輸送容器の放射性遮蔽特性 (I) 線量率" 日本原子力学会「昭和 56 年秋の分科会」, C17 (1981)

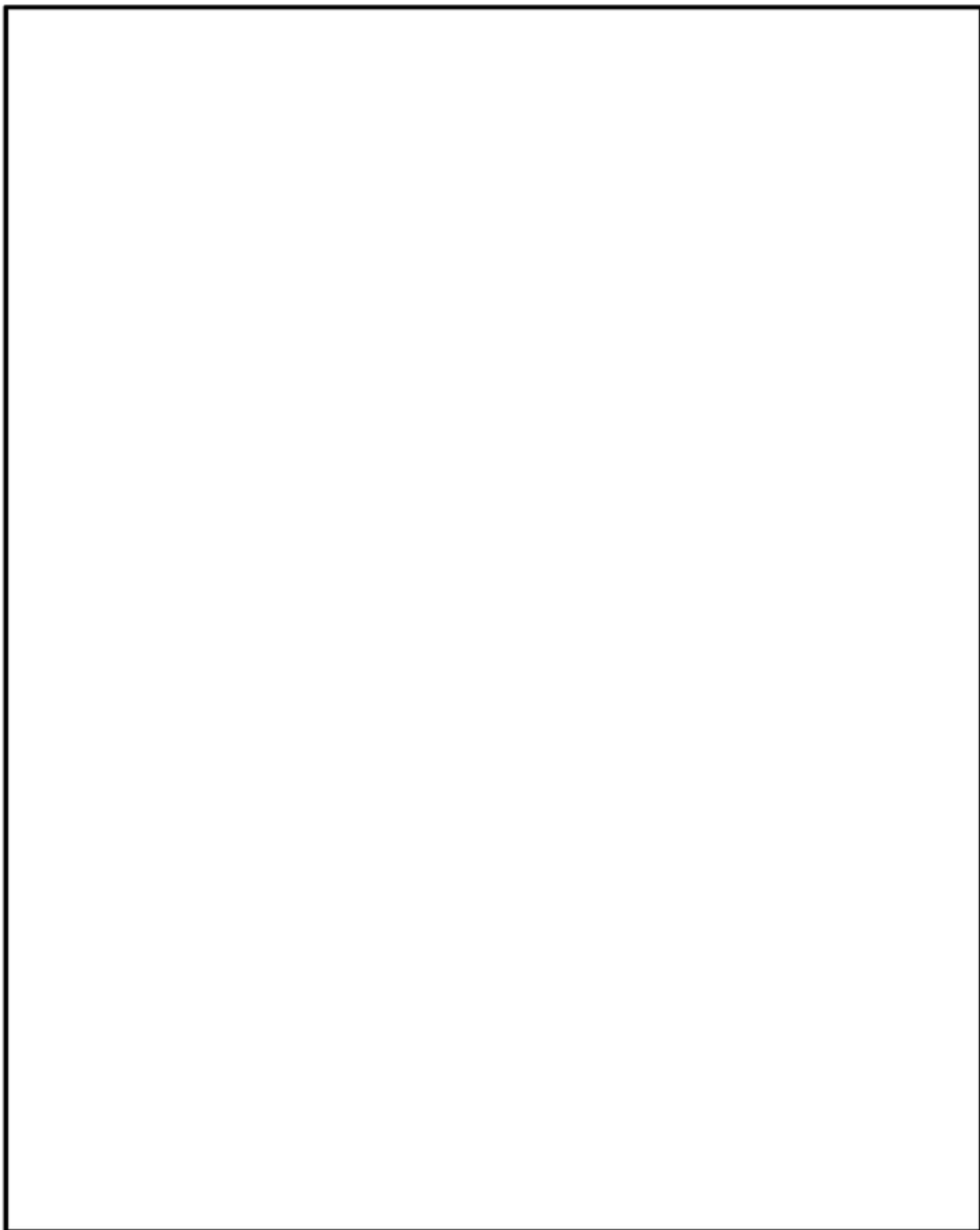



図 2.4.2-13 MCNP5 コードの三次元計算モデル

 内は商業機密のため、非公開とします。

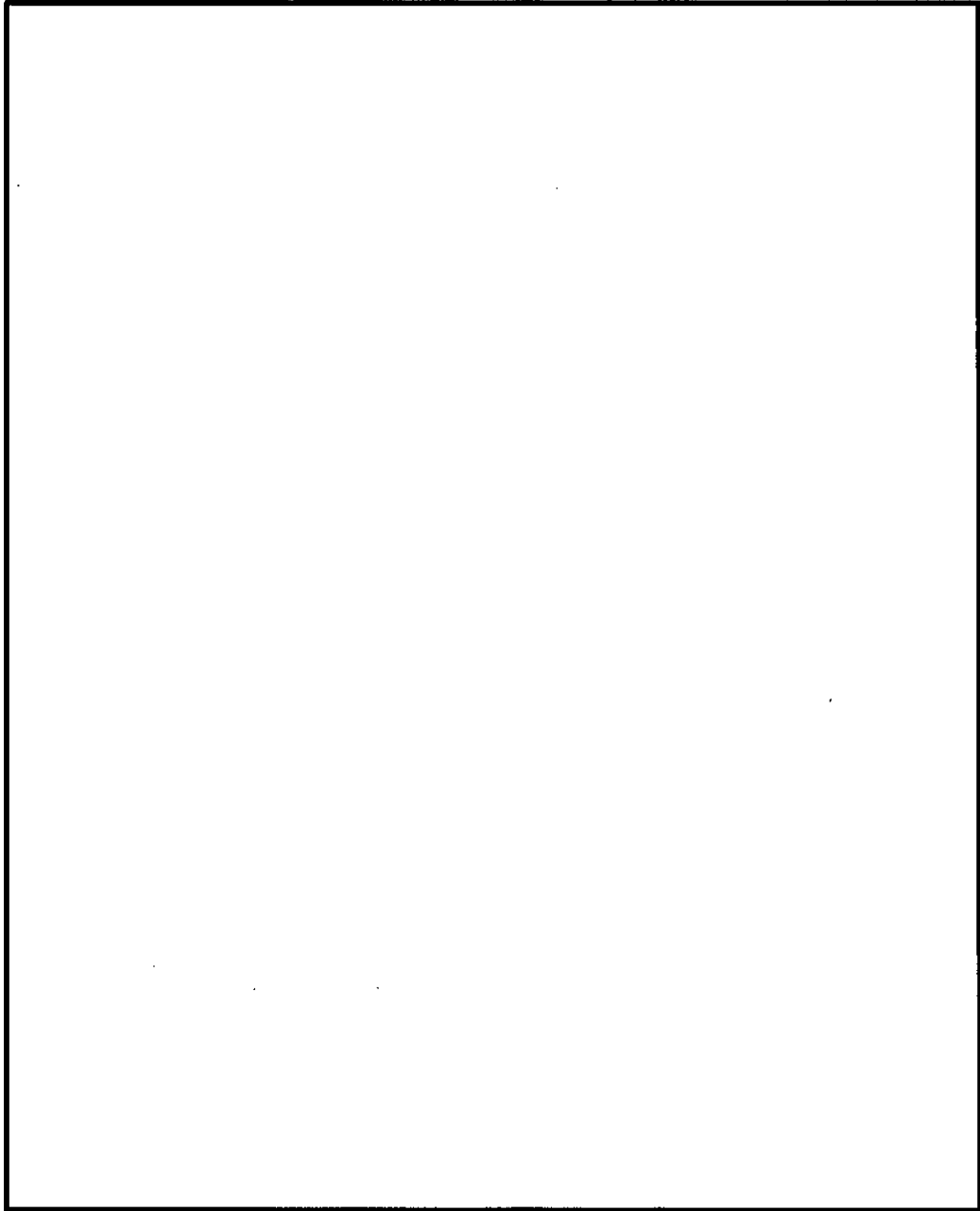


図 2.4.2-14 表面の線量当量率分布

内は商業機密のため、非公開とします。

4. 兼用キャスクを基礎等に固定する方法(よこ置き)の場合

緩衝体等を装着しないよこ置きの場合、図 2.4.2-4～図 2.4.2-7 の解析モデルと同じ条件であることから、表 2.4.2-5 に示す評価結果を上回ることではなく、よこ置きの評価はたて置きの評価で代表可能である。

5. 緩衝体等の装着により蓋部が金属部に衝突しない方法(よこ置き)の場合

緩衝体等を見捨てる、緩衝体等による遮蔽効果を考慮しないモデル化とすることで、図 2.4.2-4～図 2.4.2-7 の解析モデルと同じとなるため、表 2.4.2-5 に示す評価結果を上回ることはない。したがって、緩衝体等を装着したよこ置きの評価は緩衝体を見捨てるたて置きの評価で代表可能である。

6. 参考文献

- (1) A. G. Croff, "A User's Manual for the ORIGEN2 Computer code", ORNL/TM-7175, Oak Ridge National Laboratory, (1980)
- (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) ORNL-RSIC, "DOT3.5- Two Dimensional Discrete Ordinates Transport Code ", CCC-276, (1976)
- (4) 松田文夫、他, "TN-12 型輸送容器の放射性遮蔽特性(I)線量率", 日本原子力学会「昭和 56 年秋の分科会」、C17(1981)
- (5) 日立GEニュークリア・エナジー株式会社, 使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の型式の設計に係る型式証明申請, 「補足説明資料 1-2 HDP-69B(B)型の遮蔽設計に関する説明資料(FRO-TA-0003/REV.1)」, 平成 30 年 4 月 25 日

燃烧度分布の設定について

燃焼度分布の設定について

1. 燃焼度分布の設定について

HDP-69BCH(B)型に収納する使用済燃料の線源強度を算出する際に用いるピーキングファクター(以下「PF」という。)は、HDP-69BCH(B)型が収納対象とする使用済燃料の軸方向の燃焼度を想定して設定したものである。表1及び図1に配置(i)、(iii)及び(ii)で、収納対象とする使用済燃料ごとに設定したPFを示す。

表1及び図1に示すPFは、HDP-69BCH(B)型に使用済燃料を収納するための条件であり、収納する使用済燃料の軸方向燃焼度分布が本PFに包含されることは、設置(変更)許可申請において確認されるものとする。なお、包含されない使用済燃料については、HDP-69BCH(B)型の収納対象外とする。

2. 配置(i)及び(ii)のPFについて

(1) 配置(i)のPFについて

PFは使用済燃料の平均燃焼度に対する軸方向の燃焼度の比であり、次式で表される。

$$(\text{各ノードのPF}) = (\text{各ノードの燃焼度}) \div (\text{燃料の平均燃焼度})$$

配置(i)のPFは、貯蔵対象となる燃料が装荷された国内プラントについて、炉型毎に代表プラントを選定し、各プラントの燃焼度の高い燃料上位10体及びPFの高い燃料上位10体のPFを包含できるように設定したものである。図2に新型8×8ジルコニウムライナ燃料のPF設定例を示す。

図2に示す一部のノードでPFが高い燃料は、図3に示すように全体的に燃焼度が低いが、PFが比較的フラットな燃料は、軸方向にフラットに燃焼しているため、全体的に燃焼度が高くなる傾向にある。配置(i)のPFは、一部のノードでPFが高い燃料も、PFが比較的フラットな燃料も、全て包含できるように設定したことから、図3に示すように、配置(i)の収納対象とする燃料の軸方向燃焼度分布に対して、配置(i)のPFに平均燃焼度を乗じて算出した軸方向燃焼度分布(以下「PF相当の軸方向燃焼度分布」という。)は十分な余裕がある。

(2) 配置(ii)のPFについて

a. 設定の考え方

配置(ii)のPFは、貯蔵対象とする燃料の軸方向の燃焼度分布を包含できるように設定したものである。

b. 貯蔵対象燃料の調査

貯蔵対象となる燃料が装荷された国内プラントについて、代表プラント(前記2.(1)項のプラントを含む)を選定し、プラント毎に、各ノードの燃焼度が最も高い燃料を

調査した。対象プラントには、燃料の平均燃焼度が 48 GWd/t を超える高燃焼度 8×8 燃料が少数存在するが、HDP-69BCH(B)型の貯蔵対象外であるため、調査対象から除いた。

c. PF の設定

図 4～図 6 に示すように、貯蔵対象とする燃料の軸方向燃焼度分布を包含するような軸方向燃焼度分布を求め、収納条件としている平均燃焼度(40 及び 48 GWd/t)で除することによって PF を設定した。なお、HDP-69BCH(B)型の設計崩壊熱量 15.34 kW/基を超えないように PF を設定するために、一部の燃料は収納対象から除外している。したがって、配置(ii)に燃料を収納する際には、燃料毎に軸方向燃焼度が配置(ii)の条件を満たしていることを確認する必要がある。

(3) 配置(i)と(ii)で PF を変えることについて

HDP-69BCH(B)型は、設計崩壊熱量 15.34kW で設計されており、同一の設計崩壊熱量に対して、燃焼度と冷却期間の組合せが複数存在する。

配置(i)は、平均燃焼度が低く、冷却期間が比較的短い使用済燃料が貯蔵されているプラントで、配置(ii)は、平均燃焼度が高く、冷却期間が比較的長い使用済燃料が貯蔵されているプラントで使用される場合を想定している。

配置(i)の PF は、収納対象とする使用済燃料に対して、PF の高い燃料及び軸方向燃焼度の高い燃料のどちらも包含するように PF を設定している。これにより、実際の燃料の軸方向燃焼度分布を余裕を持って上回るような設定となっており、収納時に使用済燃料の軸方向燃焼度分布の確認を必要としない。一方、配置(ii)の PF は、収納対象とする燃料の軸方向燃焼度分布を包含するように設定しているため、収納時に軸方向燃焼度分布を確認する必要があるものの、設計崩壊熱量の制限内でより広い範囲の燃料を収納することができる。

以上のように、HDP-69BCH(B)型では事業者の利便性の拡大のため、配置(i)と(ii)で異なる PF を設定することで、配置(i)と(ii)を適宜選択できるようにしている。

(4) ノード分割の違いについて

配置(i)の PF のノード分割は□分割、配置(ii)の PF のノード分割は□分割としている。燃料の燃焼度は□ノードで計算されるが、配置(i)では、軸方向燃焼度の変化が大きい端部の PF をより細かく設定するために、□分割としている。

3. 配置(ii)の場合に事業者が確認すべき事項について

配置(ii)の使用済燃料の収納位置条件を図 7 を示す。また、確認のフローを図 8 に示す。型式証明申請書における配置(ii)に対しては、事業者が確認する軸方向燃焼度を記載して

□内は商業機密のため、非公開とします。

いる。

4. 軸方向燃焼度の算出過程における計算誤差について

燃焼度の算出に用いられる SIMULATE-3 コードの計算誤差について、参考文献⁽¹⁾に、コード開発元の Studsvik 社より SIMULATE-3 コードの解析値とガンマスキャンデータの比較が示されている。SIMULATE-3 コードは、世界各国の多数の電力会社において、取替炉心設計(熱的制限値、原子炉停止余裕、炉心安定性)及び運転中炉心管理(起動、制御棒パターン調整、運転計画)等に適用されている。例えば、東京電力 HD 殿⁽²⁾では、BWR の 13 プラントで、累計 140 サイクル以上での使用実績がある。参考文献⁽¹⁾では、ガンマスキャンデータとの比較から計算誤差(RMS 誤差)は 4.5 %と評価されており、燃焼度の誤差についても同程度と推定される。また、本文献には、TIP による測定値との比較も示されており、計算誤差(RMS 誤差)は 3.0 %とされている。よって、ガンマスキャンデータとの比較の方が誤差が大きいため、燃焼度の算出過程における計算誤差として 4.5 %を考慮する。

配置(ii)において、燃焼度の算出過程における計算誤差を 4.5 %とした場合の影響を以下に示す。

除熱機能については、収納条件として設定している崩壊熱量(最大崩壊熱量)ではなく、収納対象燃料の軸方向燃焼度分布を包含するように保守的に設定した配置(ii)の PF を考慮した設計崩壊熱量を用いて除熱評価を行っているため、実際に収納される燃料よりも燃料 1 体当たりの平均燃焼度が高い燃料が収納される条件で評価を行っている。配置(ii)の評価では、燃料 1 体当たりの崩壊熱量が大きい高燃焼度 8×8 燃料の値を用いて設計崩壊熱量を設定している。表 2 に配置(ii)の各燃料の PF の平均値を示す。表 2 に示すように燃焼度が 40GWd/t の高燃焼度 8×8 燃料の PF の平均値は であり、燃焼度で約 %の保守性を持った条件で発熱量を評価している。また、表 1 に示す配置(i)の新型 8×8 ジルコニウライナ燃料、高燃焼度 8×8 燃料の PF の平均値は、 であり、燃焼度で約 %の保守性を有しており、配置(ii)の燃焼度に対して保守性を持つ。

遮蔽機能については、キャスク中央部に最高燃焼度(48 GWd/t)の燃料 37 体、外周部に平均燃焼度(40 GWd/t)の燃料 32 体を配置する条件で遮蔽解析を行っており、以下に示すように、キャスク 1 基当たりの燃焼度で約 %の保守性を持った条件で線源強度を評価している。

$$\frac{(48\text{GWd/t} \times 37 \text{体} + 40\text{GWd/t} \times 32 \text{体})}{40\text{GWd/t} \times 69 \text{体}} = 1.107$$

また、軸方向燃焼度分布については、配置(ii)の PF を考慮して線源強度を評価しているため、表 2 に示すように、燃料 1 体当たりの平均燃焼度で約 %の保守性をもった条件で線源強度を評価している。

以上のように、燃焼度の計算誤差は、評価上の保守性に包含されると考えられる。

内は商業機密のため、非公開とします。

局所的な影響を確認するために、2. (2)で調査した配置(ii)の貯蔵対象となる燃料に関して、ノード毎の最大燃焼度(図4～図6参照)に計算誤差4.5%を考慮して線源強度を計算し、線量当量率の評価を行った。表3に誤差を考慮した線源強度計算条件を、表4に線量当量率の評価結果を示す。キャスク表面及びキャスク表面から1 mにおける設計基準値を超えず、参考2に示すMATXS LIB-J33を用いた評価結果も下回ることを確認した。

なお、参考文献⁽¹⁾の他に、SIMULATE-3コードの計算誤差について示した文献として、参考文献⁽³⁾がある。本文献では、(独)原子力安全基盤機構が事業者と独立して実施したTIP分布のSIMULATE-3コードによる解析値と実測値との比較が示されており、計算誤差(RMS誤差)は最大で8.5%とされている。燃焼度の算出過程における計算誤差を8.5%とした場合の線量当量率については、表3の線源強度計算条件のうち、高燃焼度8×8燃料の軸方向燃焼度の各ノードを4.5%から8.5%に変更した時の影響評価を一部実施した。ライブラリの変更により、中性子の線量当量率が増加し、頭部軸方向の線量当量率が73.5 μSv/hから76.0 μSv/hとなるが、キャスク表面及びキャスク表面から1 mにおける設計基準値を上回らない。

5. 参考文献

- (1) Sten-Örjan Lindahl, Tamer Bahadir, “EVALUATION OF GAMMA SCANNING IN OSKARSHAMN2 WITH SIMULATE-5”, PHYSOR 2010, (2010)
- (2) 東電ソフトウェア株式会社、「BWR 定常炉心解析手法について」、TCMO-96001、(平成8年9月)
- (3) (独)原子力安全基盤機構、「CASMO-4/SIMULATE-3コードシステムによるBWR実機炉心解析に関する報告書」、(独)原子力安全基盤機構、(2005年12月)

表 1(1/2) 使用済燃料のピーキングファクター

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				新型 8×8 燃料			
	配置 (i)								配置 (iii)			
使用済燃料の 収納配置条件	配置 (i)								配置 (iii)			
燃焼度 (Mwd/t)	34,000		40,000		34,000		40,000		29,000		34,000	
冷却期間 (年)	18		同左		18		同左		28		同左	
ピーキング ファクター *1	ノード	PF	ノード	PF	ノード	PF	ノード	PF	ノード	PF	ノード	PF
(下部)												

注記*1: 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。

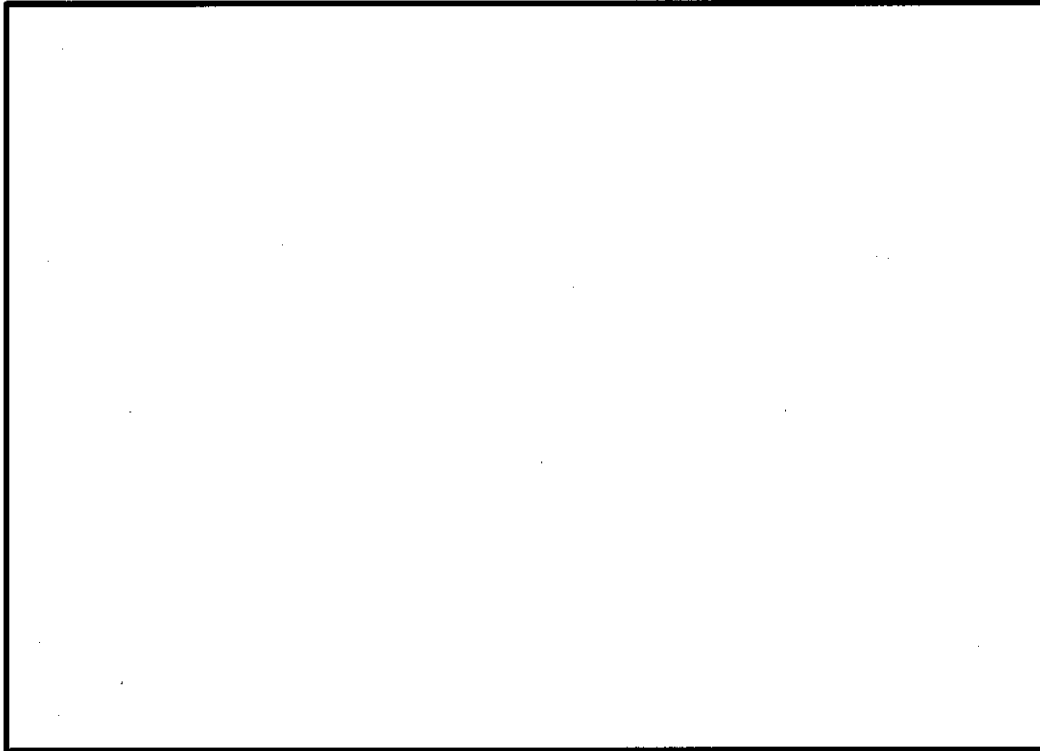


図 1(1/2) 使用済燃料のピーキングファクター(配置(i)、(iii))

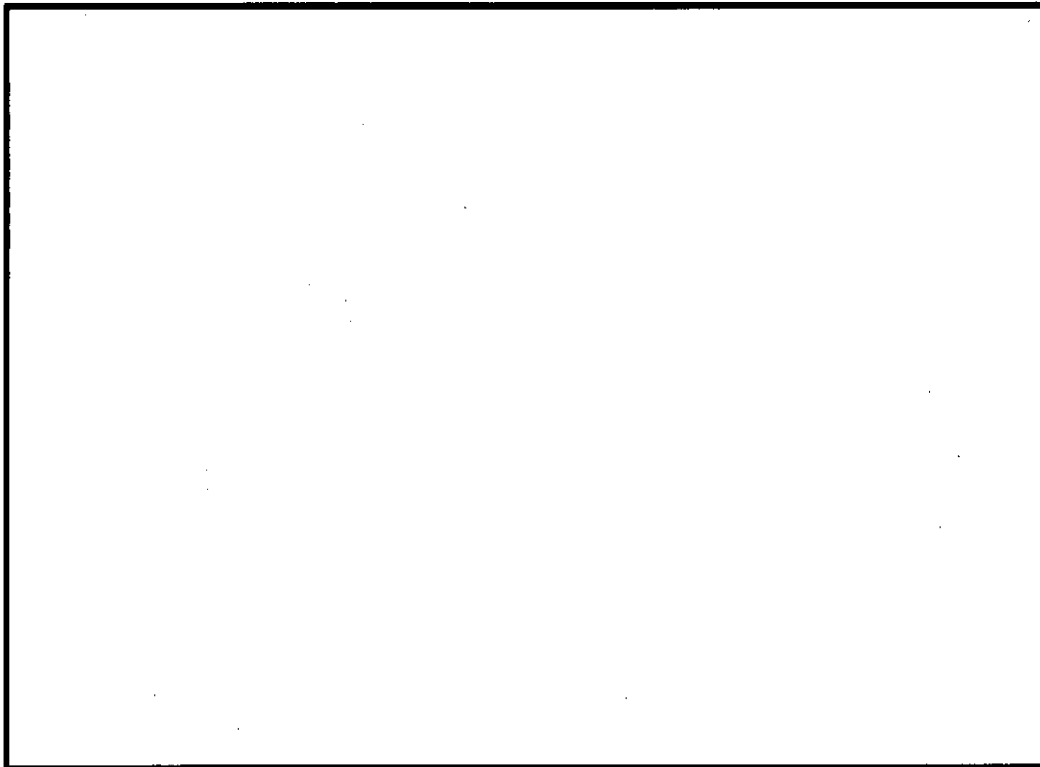



図 1(2/2) 使用済燃料のピーキングファクター(配置(ii))

 内は商業機密のため、非公開とします。

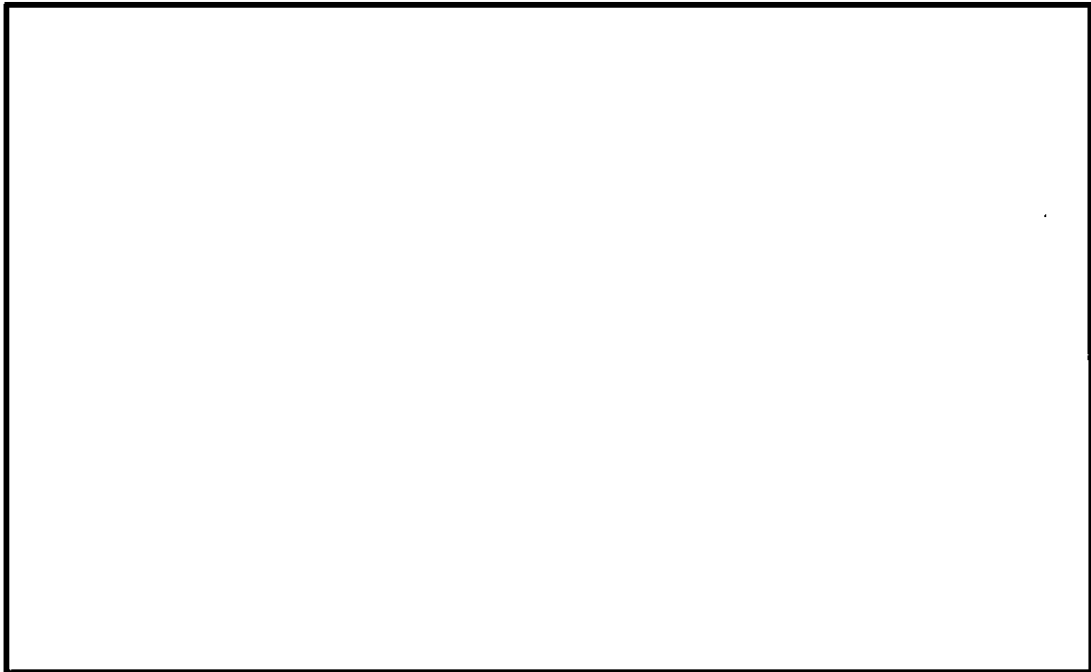


図2 新型8×8ジルコニウムライナ燃料のPF分布

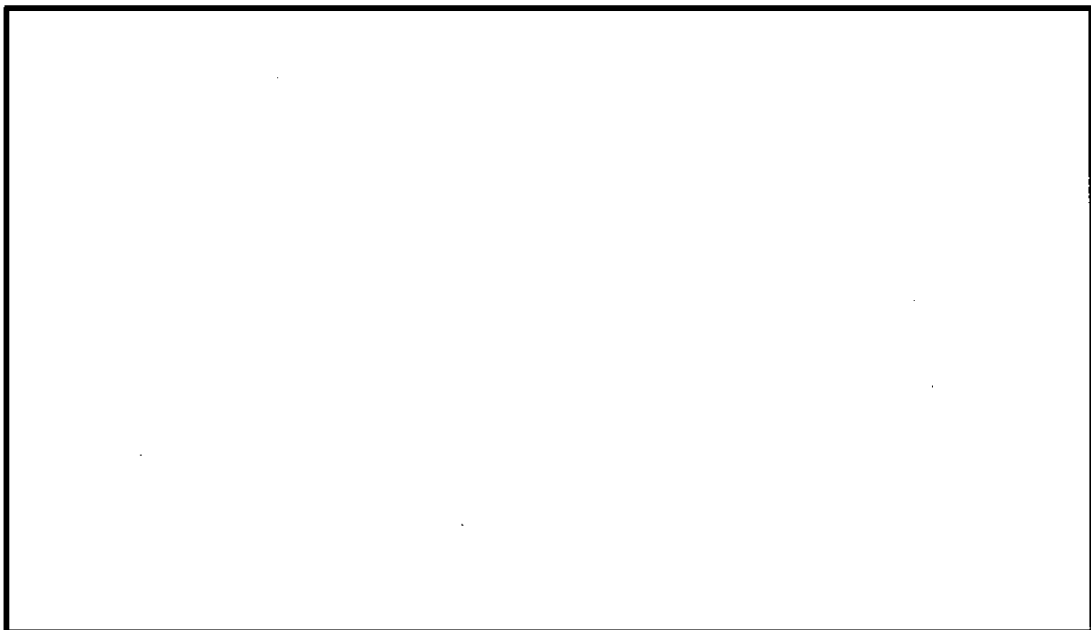



図3 新型8×8ジルコニウムライナ燃料の軸方向燃焼度分布

 内は商業機密のため、非公開とします。

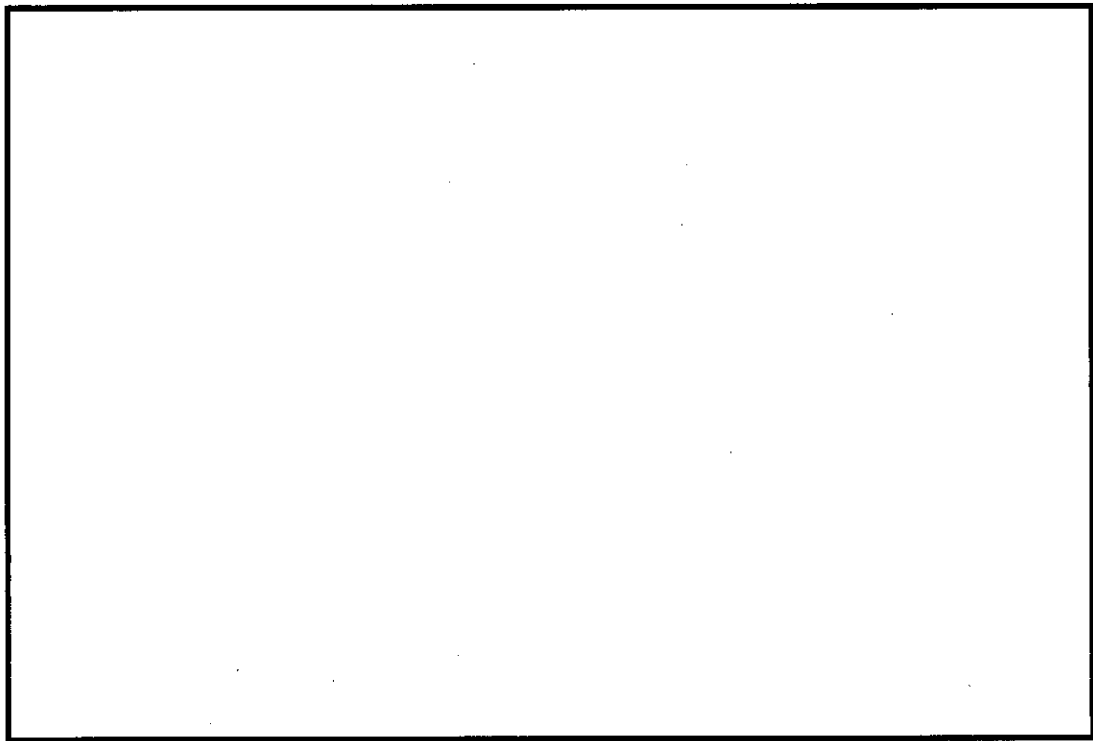



図4 新型8×8ジルコニウムライナ燃料(平均燃焼度 0~40 GWd/t)の軸方向燃焼度分布

 内は商業機密のため、非公開とします。

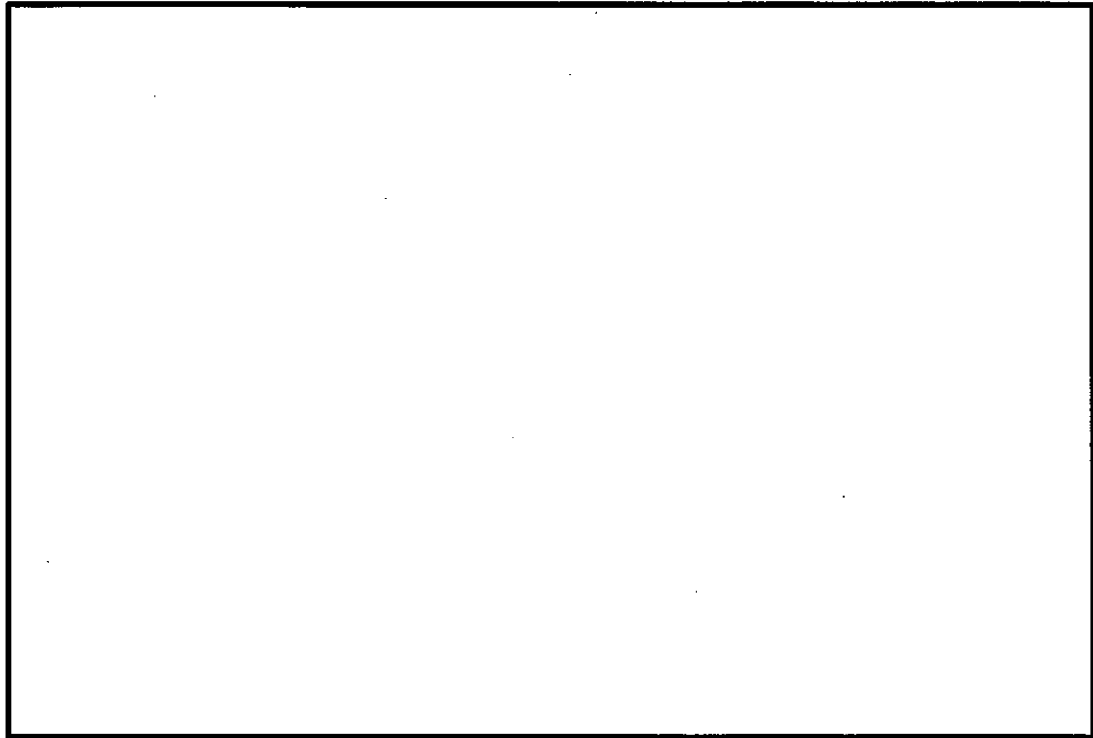


図 5 高燃焼度 8×8 燃料(平均燃焼度 0~40 GWd/t)の軸方向燃焼度分布

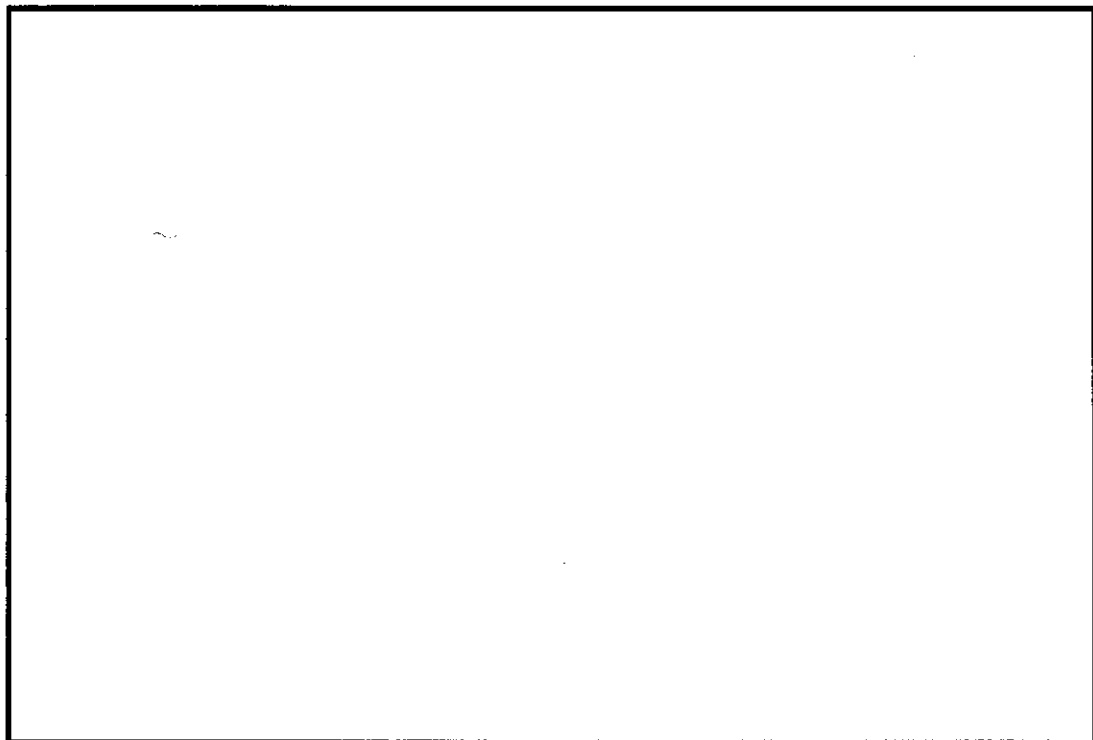

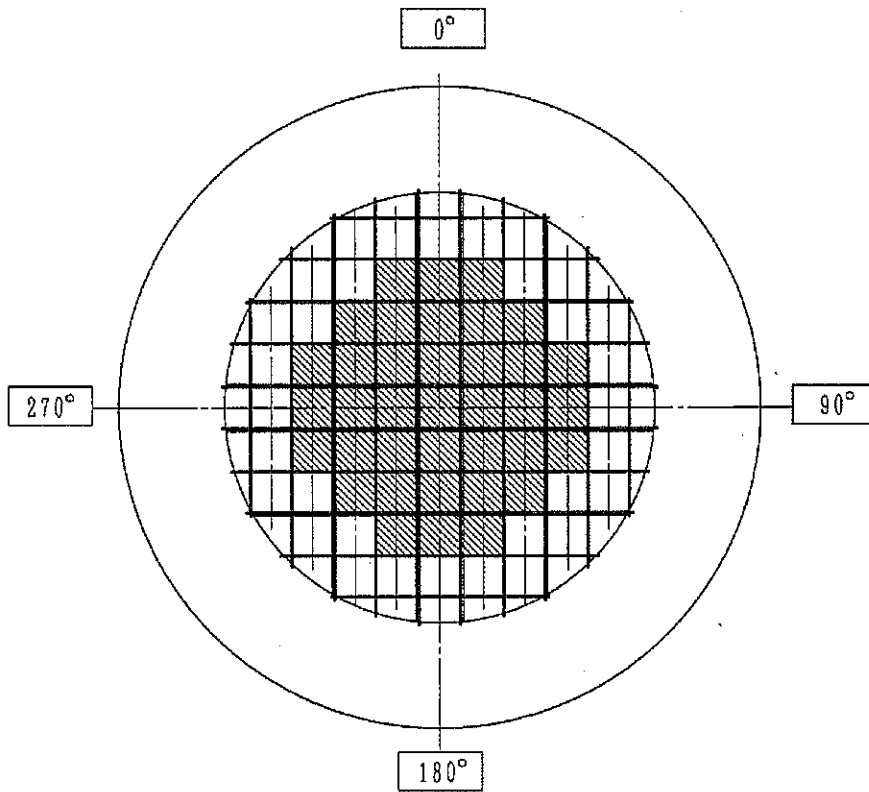


図 6 高燃焼度 8×8 燃料(平均燃焼度 0~48 GWd/t)の軸方向燃焼度分布

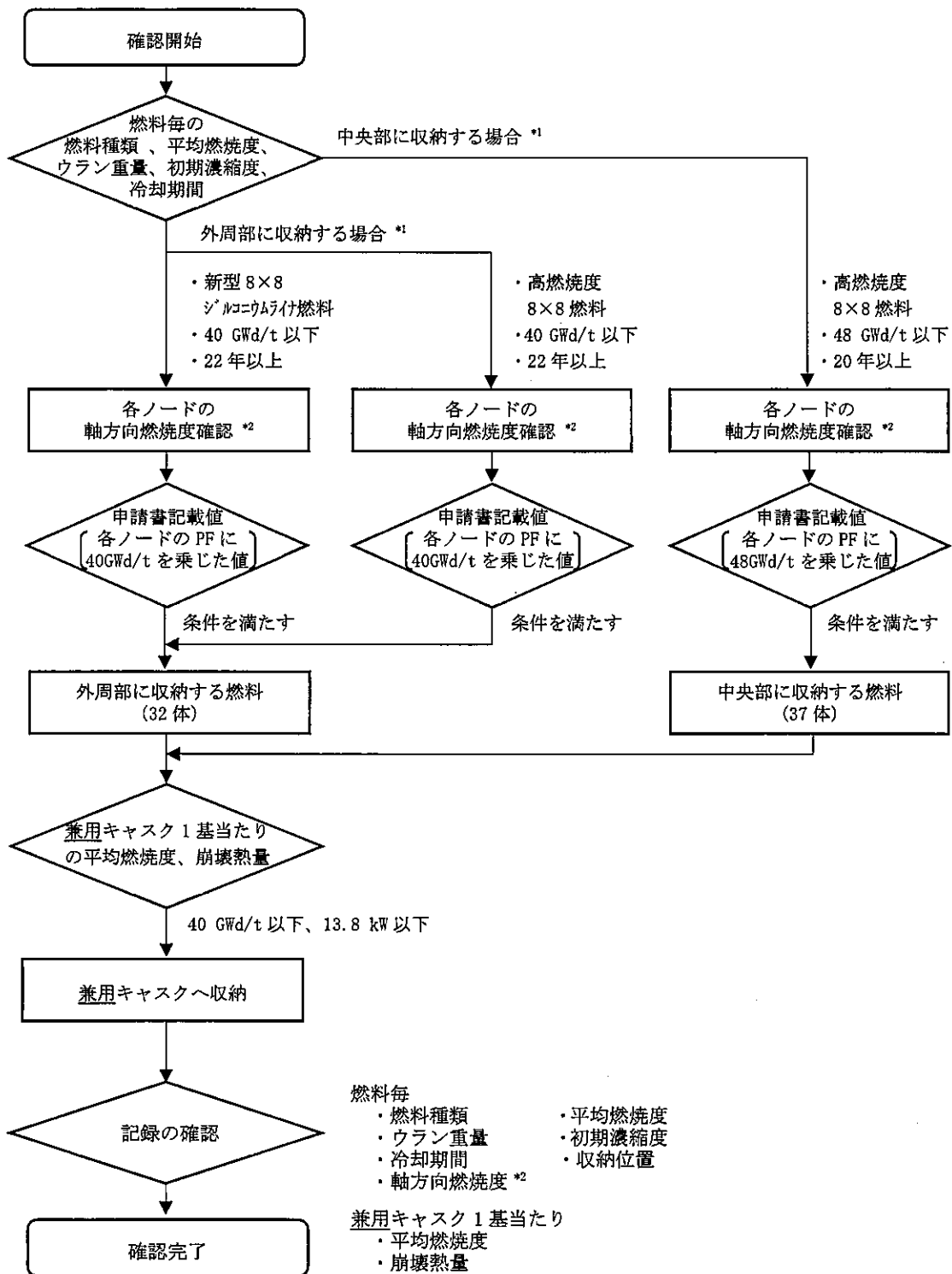
 内は商業機密のため、非公開とします。



- | | |
|---|--|
| □ | 燃料種類 : 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 |
| | 収納体数 : 32 体 |
| | 燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 : 22 年以上 |
| | |
| ▨ | 燃料種類 : 高燃焼度 8×8 燃料 |
| | 収納体数 : 37 体 |
| | 燃焼度 : 48,000 MWd/t 以下 |
| | 冷却期間 : 20 年以上 |

兼用キャスク 1 基当たりの平均燃焼度 : 40,000 MWd/t 以下
 兼用キャスク 1 基当たりの崩壊熱量 : 13.8 kW 以下

図 7 使用済燃料の収納位置条件(配置(ii))
 (新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度 8×8 燃料を混載収納する場合)



注記*1：平均燃焼度が 40 GWd/t 以下の高燃焼度 8×8 燃料は、外周部及び中央部どちらにも収納可能。

*2：配置(i)では軸方向燃焼度の確認を必要としない。

*3：上記フローにおいて、いずれの収納位置条件も満たせない燃料は配置(ii)の収納対象外とする。

図 8 配置(ii)に使用済燃料を収納する場合の事業者の確認フロー

表2 配置(ii)のPFの平均値

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		
使用済燃料の 収納配置条件	配置(ii)			
燃焼度(MWd/t)	40,000	40,000	48,000	
冷却期間(年)	22	22	20	
ピーキングファクター*1 (上部)				
(下部)				
PFの平均値*1		1.05	1.11	1.08

注記*1: 小数第3位を切り捨て

内は商業機密のため、非公開とします。

表 3 線源強度計算条件

燃料種類	誤差	軸方向燃焼度	初期濃縮度 (wt%)	ライブラリ
新型 8×8 シルコニウムライナ燃料 (40GWd/t 以下)	±	申請書記載値 [各ノードの PF に 平均燃焼度を乗じた値]	2.88	BWR-U
	考慮	ノード毎の最大燃焼度を 4.5 %増加した値	<input type="checkbox"/> *1	BS170J40 *2
高燃焼度 8×8 燃料 (40GWd/t 以下)	±	申請書記載値 [各ノードの PF に 平均燃焼度を乗じた値]	3.35	BWR-U
	考慮	ノード毎の最大燃焼度を 4.5 %増加した値	<input type="checkbox"/> *1	BS270J40 *2
高燃焼度 8×8 燃料 (48GWd/t 以下)	±	申請書記載値 [各ノードの PF に 平均燃焼度を乗じた値]	3.35	BWR-U
	考慮	ノード毎の最大燃焼度を 4.5 %増加した値	<input type="checkbox"/> *1	BS270J40 *2

注記*1:

*2: JENDL4.0 に基づく燃料種類毎のライブラリを用いた。

BS170J40 は新型 8×8 シルコニウムライナ燃料、BS270J40 は高燃焼度 8×8 燃料用のライブラリであり、ボイド率は線源強度の評価として安全側となる 70 %を用いた。

内は商業機密のため、非公開とします。

表4 軸方向燃焼度の算出誤差を考慮した線量当量率評価結果 *1

評価点			側部中央			
			⑥			
ライブラリ及び影響評価 *2			A	A'	B	B'
単位			(μSv/h)			
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	33.1		24.0	
		構造材放射化	1.5		1.1	
		二次ガンマ線	10.9		14.7	
	中性子	28.7	35.1			
	合計	74.2	74.9			
評価点			頭部			
			軸方向			
ライブラリ及び影響評価 *2			②			
			A	A'	B	B'
単位			(μSv/h)			
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	0.3		0.2	
		構造材放射化	38.4		28.4	
		二次ガンマ線	0.2		0.2	
	中性子	34.6	63.7			
	合計	73.5	92.5			

注記*1: キャスク表面の線量当量率は、表面から1mの線量当量率に比べ基準値に対する裕度が大きいため、表面から1mの線量当量率で確認した。表面から1mの線量当量率評価位置のうち、DLC-23/CASK を用いた評価値が最大となった側部中央と、MATXSLIB-J33 を用いた評価値が最大となった頭部軸方向で確認した。

*2: DLC-23/CASK を用いた評価をA、MATXSLIB-J33 を用いた評価をBとする。また、評価A、Bについて、軸方向燃焼度の計算誤差の影響を考慮した評価をA'、B'とする。ただし、B'はAとA'の比から推測した値である。

☐ 内は商業機密のため、非公開とします。

二次元輸送計算コードで使用する
断面積ライブラリについて

1. 二次元輸送計算コードで使用する断面積ライブラリについて

HDP-69BCH(B)型の線量当量率評価は、最も実績のある手法である二次元輸送計算コード DOT3.5 と断面積ライブラリ DLC-23/CASK の組合せを採用している。しかし、このライブラリは鉄等の共鳴領域の反応を補正する自己遮蔽因子を考慮していないことから、鉄透過の際に中性子線量率を過小評価することが知られている。このため、共鳴領域の自己遮蔽因子を考慮できる新しいライブラリ MATXSLIB-J33 を用いた評価も実施した。

2. 遮蔽解析条件

ライブラリ以外の計算条件は DLC-23/CASK を使った計算と同一とした。

炭素鋼の組成については DLC-23/CASK を使った計算と同様に微量元素を無視したが、DLC-23/CASK ではデータがなかったため無視していたほう素の同位体 (B-11) については、MATXSLIB-J33 ではデータが存在するため考慮した。

3. 遮蔽解析結果

新しいライブラリ MATXSLIB-J33 を用いた場合と、DLC-23/CASK を用いた場合の線量当量率評価結果を表 1 に、評価方向ごとの最大線量当量率を与える位置を図 1 に示す。評価方向ごとの最大線量当量率を与える位置は、配置 (i)、(ii) とともに同じ位置である。

以上より、MATXSLIB-J33 を使用した場合でも表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率が、それぞれ 2mSv/h 及び 100 μ Sv/h 以下となることを確認した。

4. 減衰分布の比較

ライブラリが線量当量率へ与える影響について、配置 (i) の胴部中央を代表として、DLC-23/CASK を使った場合と MATXSLIB-J33 を使った場合の線量当量率減衰分布を比較した。

(1) 中性子の比較

中性子の胴部中央における半径方向線量当量率分布を図 2 に示す。燃料領域、胴部炭素鋼領域、中性子遮蔽体領域で別の傾向がみられることから下記に考察を示す。

1) 燃料領域

線源部である燃料領域で違いが現われ、胴部に入射する前の MATXSLIB-J33 の線量当量率は DLC-23/CASK の線量当量率の となる。

違いの原因を確認するために、線源スペクトルを図 3 に、燃料領域中心のフラックスを図 4 に示す。線源スペクトル (図 3) ではピークとなる の値に目立った違いはないが、燃料領域中心のフラックス (図 4) を見ると、最も高くなる の形に違いが見られ、 の MATXSLIB-J33 の中性子束は DLC-

23/CASK の中性子束の [] である。DLC-23/CASK ではこの範囲を 1 つのエネルギー群として扱っているので、MATXSLIB-J33 で見られる [] の凹みが表現できないため線量率に換算したときに違いが顕著になったものである。この [] の凹みは [] によるものと考えられる。また [] の違いについては、線量率換算係数が小さくなる (図 5) ことから影響は小さい。

2) 胴部(炭素鋼)領域

胴部の炭素鋼透過では DLC-23/CASK の減衰が大きく、入射時の MATXSLIB-J33 の線量当量率は DLC-23/CASK の線量当量率の [] であったものが、透過後の MATXSLIB-J33 の線量当量率は DLC-23/CASK の線量当量率の [] と逆転する。胴部の炭素鋼透過だけでみると MATXSLIB-J33 の結果は DLC-23/CASK の結果の [] となることが確認できる。

鉄透過計算では、共鳴領域の自己遮蔽因子を考慮しない断面積で計算すると過小評価になることが知られており、違いの原因と考えられる。

3) 中性子遮蔽体(レジン)領域

中性子遮蔽体(レジン)の透過では MATXSLIB-J33 の減衰が大きく、レジン入射時の MATXSLIB-J33 の線量当量率は DLC-23/CASK の線量当量率の [] であったものが、透過後の MATXSLIB-J33 の線量当量率は DLC-23/CASK の線量当量率の [] となる。中性子遮蔽体(レジン)透過だけでみると MATXSLIB-J33 の結果は DLC-23/CASK の結果の [] となる。

違いの原因を確認するために、レジン領域でのスペクトルを図 6 に示す。レジン領域での減衰は、[] の減衰による寄与が主であるが、DLC-23/CASK と MATXSLIB-J33 の違いの原因はこのエネルギー範囲の群構造の違いに起因すると考えられる。

(2) 燃料有効部ガンマ線の比較

燃料有効部ガンマ線の胴部中央における半径方向線量当量率分布を図 7 に示す。胴部の炭素鋼透過で [] の減衰するときに違いが現われ、透過後の MATXSLIB-J33 の結果は DLC-23/CASK の結果の [] となる。

違いの原因を確認するために、炭素鋼領域でのフラックスを図 8 に示す。DLC-23/CASK と MATXSLIB-J33 の違いは [] で現れており、違いの原因はこのエネルギー範囲の群構造の違いに起因すると考えられる。

[] 内は商業機密のため、非公開とします。

表 1(1/2) 線量当量率評価結果の比較(配置(i))

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部						側中央		底部						
	軸方向		径方向		径方向 (トランニオン部)		径方向		径方向		径方向 (トランニオン部)		径方向		
	①	③a	③b	④a	④b	⑤	⑥	⑧a	⑧b	⑨a	⑨b	⑩	⑩		
表面 から1m	ライブラリ ^a	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
	燃料有効部	0.1	0.1	0.5	0.3	0.5	0.3	95.8	70.6	0.9	24.2	17.5	3.0	2.0	
	構造材放射化	4.9	3.9	132.5	169.7	110.4	118.2	< 0.1 ^b	< 0.1 ^b	12.8	63.2	47.6	19.1	13.3	
	二次ガンマ線	0.7	0.6	2.0	2.6	2.1	2.7	26.9	36.9	4.6	7.8	10.8	2.3	3.2	
	中性子	188.2	296.3	253.9	347.2	505.2	770.1	72.7	87.8	1445.7	1012.5	1735.1	265.9	598.4	
合計	193.9	300.9	388.9	519.8	618.2	891.3	195.5	195.4	725.6	1464.2	1811.0 ^c	290.3	616.9		
評価点	②		④a		④b		⑥		⑧a		⑧b		⑩		
表面 から1m	ライブラリ ^a	A	B	A	B ^b	A	B ^b	A	B	A	B ^b	A	B	A	B
	燃料有効部	0.5	0.3	12.9	9.9 (2.6)	12.9	8.9 (3.2)	40.5	29.6	21.2	15.4 (0.8)	21.2	15.4	3.9	2.9
	構造材放射化	45.6	45.4	24.0	20.4 (27.1)	24.0	20.4 (26.2)	0.7	0.5	8.1	6.3 (8.8)	8.1	6.3	59.3	44.9
	二次ガンマ線	0.2	0.2	3.1	4.3 (2.0)	3.1	4.3 (2.2)	10.5	14.3	5.3	7.3 (0.6)	5.3	7.3	0.9	1.0
	中性子	28.7	52.7	17.3	23.0 (38.4)	20.9	30.5 (39.1)	26.2	32.2	13.4	16.7 (53.8)	24.5	40.8	16.2	31.4
合計	75.0	98.6 ^c	57.3	56.6 (70.1)	60.9	64.1 (70.7)	77.9	76.6	48.0	45.7 (64.0)	59.1	69.8	80.3 ^c	80.2	

注記*1: “<0.1”の値は、“0.1”として合計値に合算した。

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

*3: DLG-23/CASKを用いた評価をA、MATSLIB-T33を用いた評価をBとする。

*4: AとBで評価方向ごとの最大値を与える位置が異なる(図1参照)。Aと同じ評価位置における結果を示し、()内にはBの評価位置における結果を示す。

表 1(2/2) 線量当量率評価結果の比較(配置(ii))

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部				側中央	底部									
	軸方向	径方向		径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)		軸方向						
		①	③a				③b	⑦a		⑦b	⑩				
ライブラリ ^{*2}	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B			
ガンマ線	燃料有効部	0.1	< 0.1 ^{*1}	0.4	0.2	0.4	0.2	80.9	59.1	0.7	0.5	14.4	10.1	1.7	1.1
	構造材放射化	3.7	2.3	100.1	73.8	83.5	62.5	< 0.1 ^{*1}	< 0.1 ^{*1}	8.7	6.6	43.4	32.6	13.0	9.1
	二次ガンマ線	0.8	0.8	2.5	3.1	2.6	3.4	29.4	39.8	3.9	6.6	6.7	9.4	1.9	2.7
中性子	230.2	362.6	313.2	430.1	626.2	954.1	81.7	98.8	587.3	1189.5	859.4	1469.0	221.0	491.9	
合計	234.8	365.8	416.2	507.2	712.7	1020.2	192.1	197.8	600.6	1203.2	923.9	1521.1	237.6	504.8	
評価点	②		④a		④b		⑥		⑧a		⑧b		⑩		
ライブラリ ^{*2}	A	B	A	B ^{*3}	A	B ^{*3}	A	B	A	B ^{*3}	A	B	A	B	
ガンマ線	燃料有効部	0.3	0.2	11.4	8.1 (2.3)	11.4	8.1 (2.9)	33.1	24.0	16.5	11.8 (0.4)	16.5	11.8	2.1	1.5
	構造材放射化	38.4	28.4	18.5	13.4 (15.4)	18.5	13.4 (15.5)	1.5	1.1	5.6	4.3 (6.6)	5.6	4.3	48.1	36.5
	二次ガンマ線	0.2	0.2	3.9	5.3 (2.5)	3.9	5.3 (2.7)	10.9	14.7	5.1	6.9 (0.5)	5.1	6.9	0.7	0.9
中性子	34.6	63.7	21.2	28.4 (47.0)	25.7	37.7 (48.1)	28.7	35.1	12.5	15.6 (44.2)	22.0	35.8	13.0	24.9	
合計	73.5	92.5	55.0	55.2 (67.2)	59.5	64.5 (69.2)	74.2	74.9	39.7	38.6 (51.7)	49.2	58.8	63.9	63.8	

注記*1: “<0.1”の値は、“0.1”として合計値に合算した。

*2: D/C-23/CASKを用いた評価をA、MATXSLIB-J33を用いた評価をBとする。

*3: AとBで評価方向ごとの最大値を与える位置が異なる(図1参照)。Aと同じ評価位置における結果を示し、()内にはBの評価位置における結果を示す。

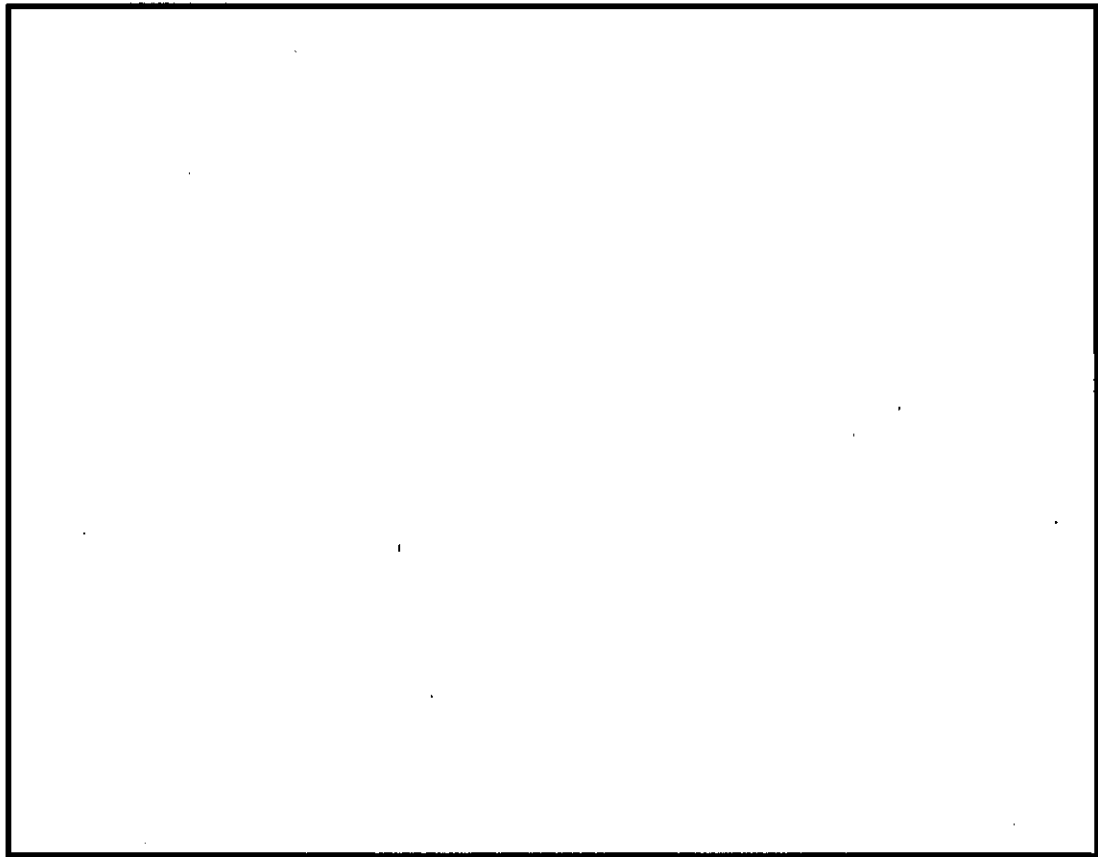



図 2 中性子の胸部中央における半径方向線量当量率分布

 内は商業機密のため、非公開とします。

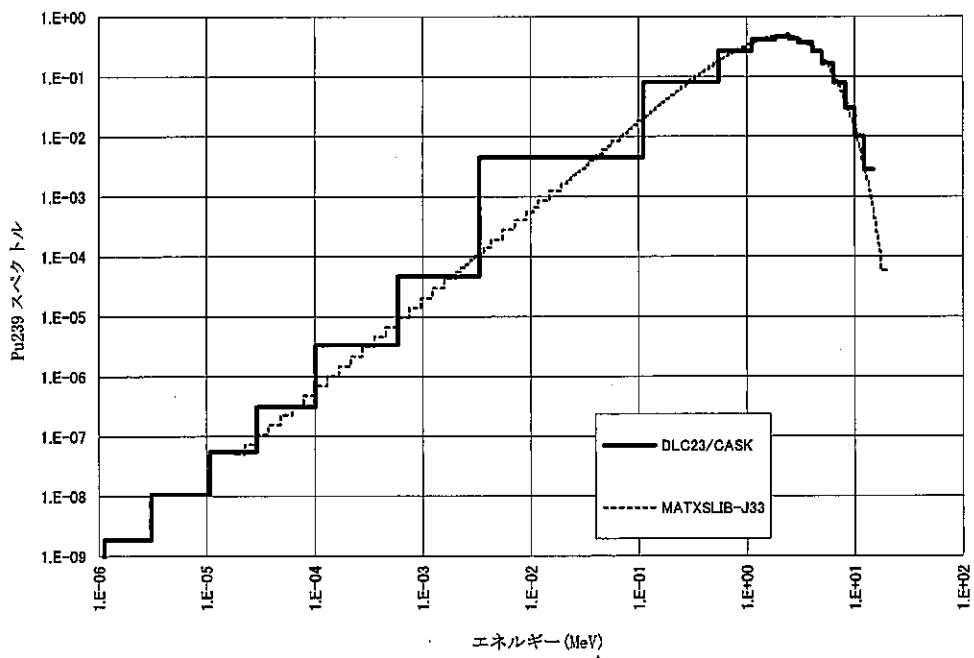


図3 中性子の線源スペクトル

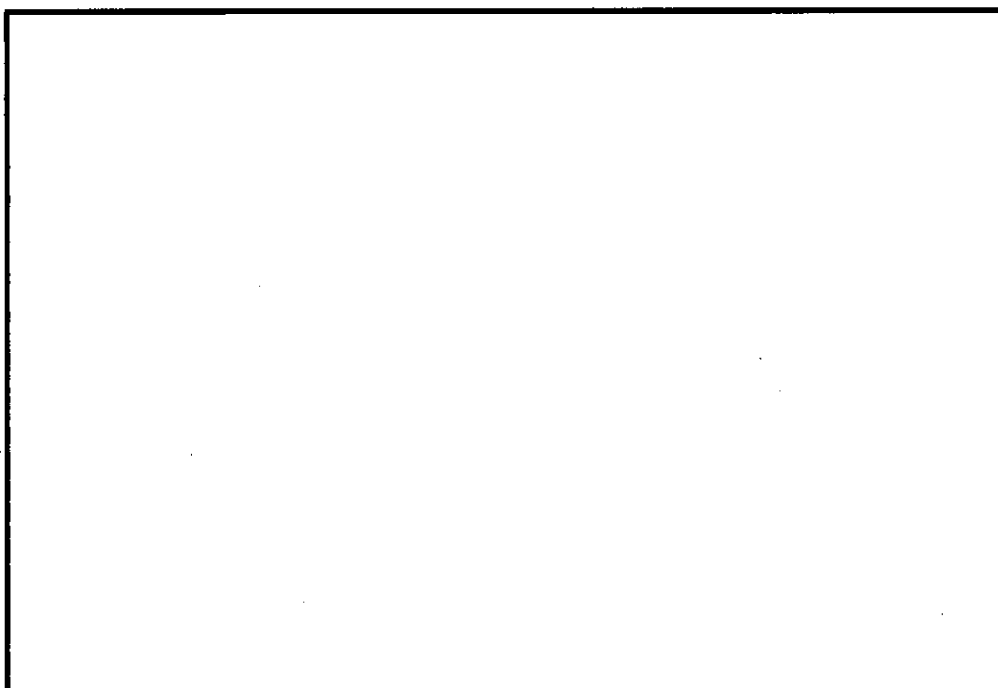


図4 燃料領域中心位置の中性子フラックス

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

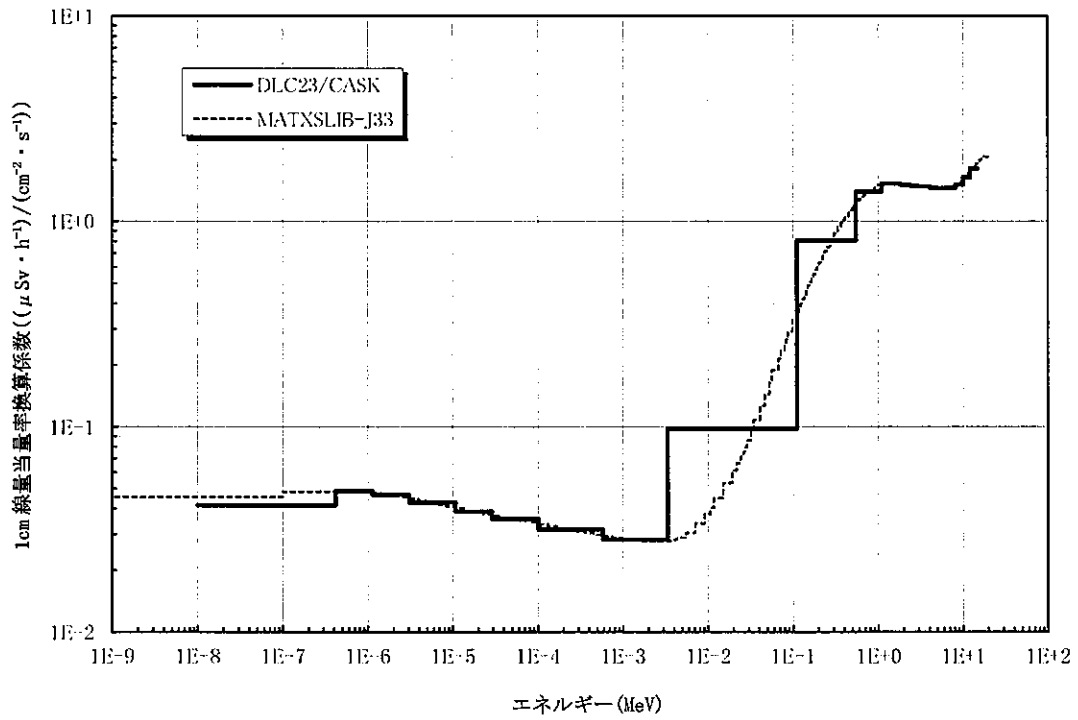


図5 中性子の1cm線量当量換算係数

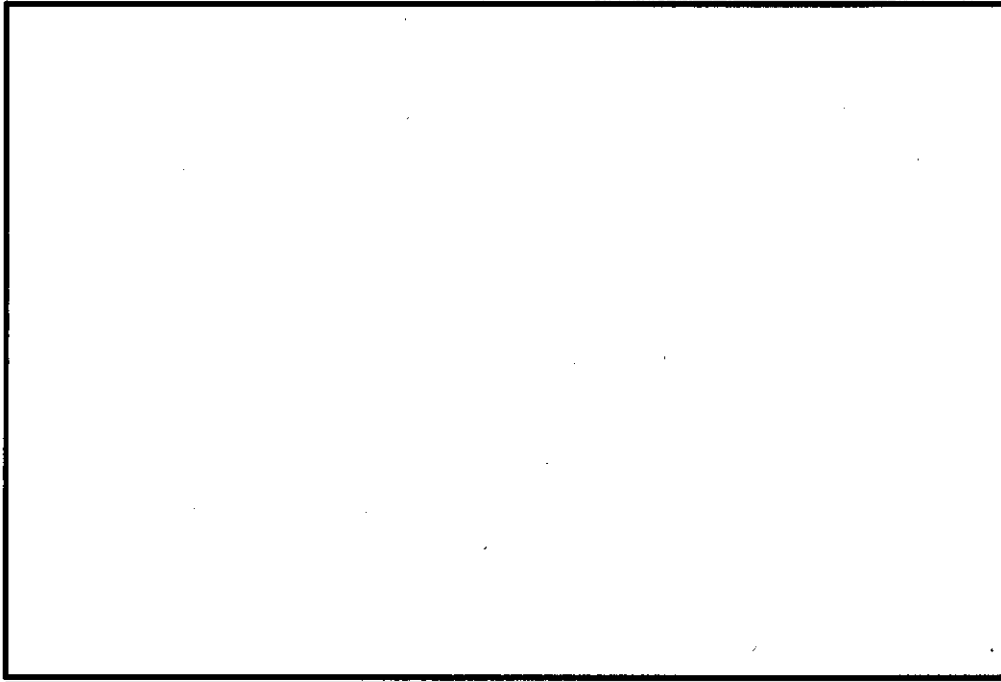


図6 レジン位置の中性子フラックス

内は商業機密のため、非公開とします。

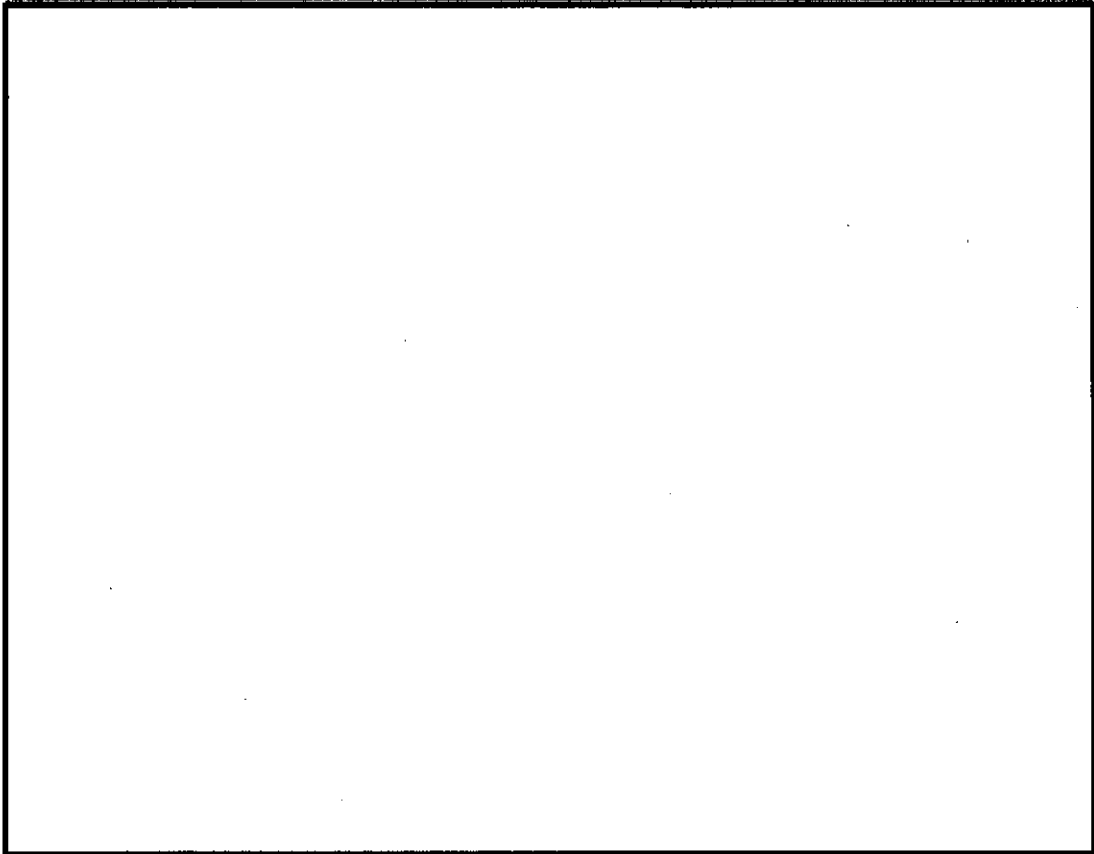


図7 燃料有効部ガンマ線の胴部中央における半径方向線量当量率分布

□ 内は商業機密のため、非公開とします。

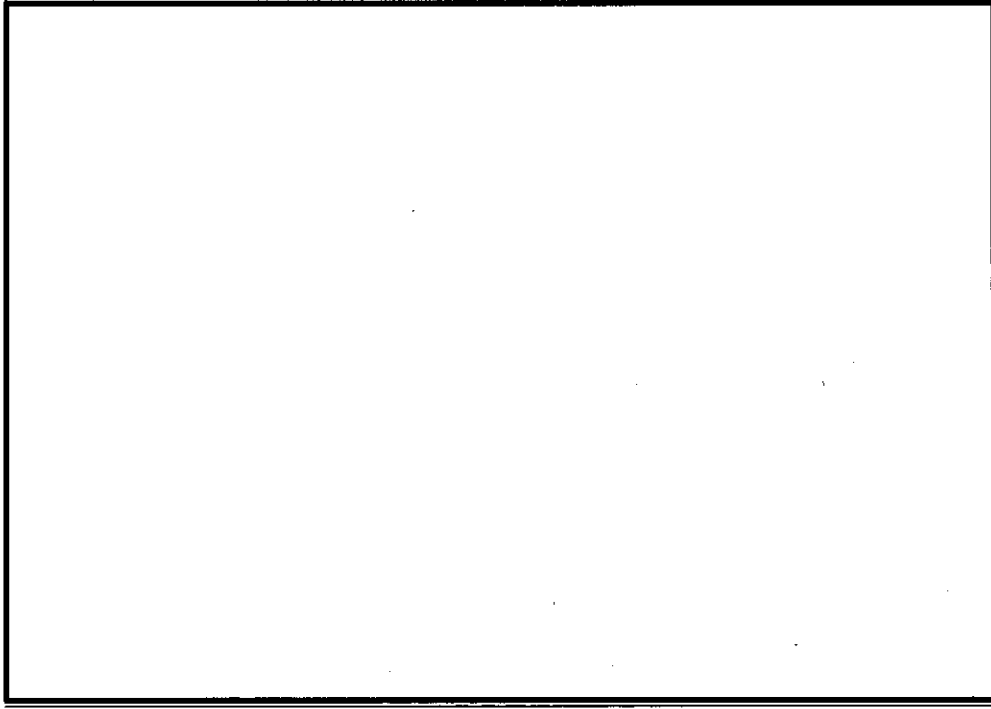



図8 炭素鋼位置のガンマ線フラックス

 内は商業機密のため、非公開とします。

遮蔽解析用実効増倍率の設定について

1. 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兼用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。

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

ここで、

N_0 : HDP-69BCH(B)型 1 基当たりの一次中性子源強度

k_{eff} : 使用済燃料集合体を収納した場合の HDP-69BCH(B) 型の一次中性子源強度

中性子実効増倍率の評価に用いた使用済燃料照合体の条件、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表 1 に示す。

なお、中性子実効増倍率は、ORIGEN2 コードにより、燃焼度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現象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、臨界評価で用いる 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

表 1 中性子実効増倍率の評価条件及び評価結果

項目	高燃焼度 8×8 燃料
ウラン重量(kg/体)	174
初期濃縮度(wt %)	3.66
燃焼度(MWd/t)	34000
比出力(MW/t)	26.2
冷却日数(年)	18
中性子実効増倍率*1	0.272
遮蔽解析用実効増倍率	0.280

注記*1：標準偏差の 3 倍を加えた値