

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

乾式キャスクの臨界防止設計に用い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。

(a) SCALE コードシステム

i 概要

臨界解析には、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された公開の SCALE コードシステム²⁾を用い、実効増倍率の計算には同コードシステムに含まれる KENO-VIコードを用いる。

SCALE コードシステムは、米国 NRC により認証された標準解析コードであり、国内外の臨界解析の分野で幅広く使用されている。

ii 機能

SCALE コードシステムは、臨界解析に際して以下の特徴を有している。

- a) 燃料及び構造材の材質組成と幾何形状を与えることにより、断面積作成から実効増倍率評価まで一連の解析を実行できる。
- b) 三次元輸送計算コードであり、複雑な幾何形状における臨界計算が可能である。

iii 解析フロー

SCALE コードシステムの解析フローを第 2.5.2-16 図に示す。

iv 使用実績及び検証

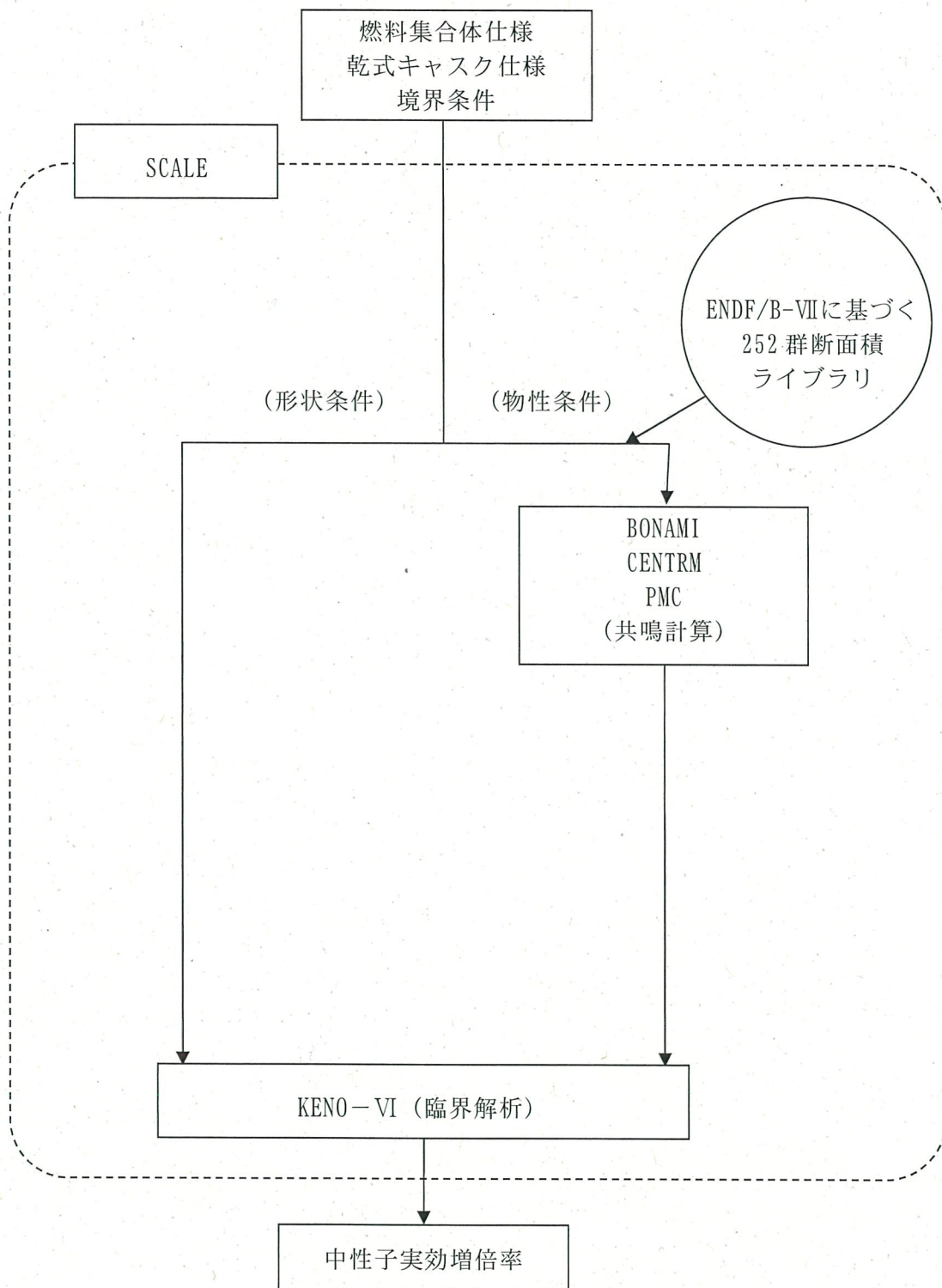
臨界解析で使用した SCALE コードシステムに対しては、乾式キャスクを模擬した多数の臨界実験のベンチマーク試験解析が実施され、その妥当性が示されている。

文献 3) に示す実験について、収納物である使用済燃料の仕様並びに下記①～⑥の条件を考慮し、ベンチマーク試験解析を実施する臨界実験を選定した。第 2.5.2-5 表に示すとおりベンチマーク試験解析は実験を良く再現しており、妥当な結果が得られている。

- ①燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合
- ②複数の集合体が近接して配列する場合
- ③この集合体の配列の間に鋼板、中性子吸収材（ほう素）を含む板が存在する場合
- ④集合体に近接して反射体（鋼板、鉛）を配置した場合
- ⑤水中に中性子吸収材（ほう素）が溶解している場合
- ⑥乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いない場合

第 2. 5. 2-5 表 ベンチマーク試験解析結果

	ケース数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
臨界実験(1)		0.99961	0.00304	1.01172	0.99651
臨界実験(2)		0.99776	0.00264	1.00055	0.99363
臨界実験(3)		1.00279	0.00259	1.00452	0.99981
合計		0.99940	0.00309	1.01172	0.99363



第 2.5.2-16 図 SCALE コードシステムの解析フロー図

4. 参考文献

- 1) 日本原子力研究所, 「臨界安全ハンドブック第2版」, JAERI 1340, (1999).
- 2) B. T. Rearden and M. A. Jessee, Eds., “SCALE Code System”, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2016).
- 3) Organisation for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency, “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”, NEA/NSC/DOC (95) 03, (2006).

伊方発電所 3 号炉

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

(使用済用済燃料乾式貯蔵容器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. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの遮蔽機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①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。

②設置許可基準規則解釈別記4第16条2項

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

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

③設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

- ・第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。
 - ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
 - ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

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

「2.安全機能の確保 2.2 遮蔽機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽機能を有すること。
- (2) 通常貯蔵時の兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を $100\mu\text{Sv/h}$ 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 $100\mu\text{Sv/h}$ 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 (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

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、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確認することが定められており、乾式キャスクの遮蔽機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

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

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

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

b. 兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を $100\mu\text{Sv/h}$ 以下とすること。

使用済燃料からの放射線をガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により遮蔽する設計とする。

また、乾式キャスクは、事業所外運搬に使用する輸送容器の機能を持つため、「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」（以下「外運搬規則」という。）に示される要求事項を満足する設計とする。

乾式キャスクは、使用済燃料からの放射線を乾式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レジンを用いる。

乾式キャスクの遮蔽解析フローを第 2.5.3-1 図に示す。解析条件は第 2.5.3-1 表及び第 2.5.3-2 表のとおりとし、遮蔽解析モデル化の概要を第 2.5.3-2 図、解析モデル図を第 2.5.3-3～第 2.5.3-10 図に示す。

a. 使用済燃料の線源強度評価方法

使用済燃料の型式、燃焼度（集合体平均）、濃縮度及び冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して核種の生成、崩壊及びそれに基づく線源強度を計算する。

b. 乾式キャスクの線量当量率評価方法

乾式キャスクの線量当量率は、乾式キャスクの実形状を適切にモデル化し、使用済燃料の線源強度を条件として、遮蔽解析コード DOT3.5 を使用して求める。線量当量率の算定

にあたっては、設計貯蔵期間（60 年）中における熱による中性子遮蔽材の遮蔽性能の低下を考慮する。

なお、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

－ウラン濃縮度 $4.1 \pm \square$ t% 及び $3.4 \pm \square$ t% を保守的に \square wt% 及び \square wt% とする。

－遮蔽評価においては、局所的な表面線量を評価する必要があるため、使用済燃料の燃焼度（集合体平均）は中央部、外周部共に当該配置の収納制限の最高燃焼度を設定している。

－使用済燃料は、使用済燃料ごとに軸方向の燃焼度分布に基づく線源強度分布を有するが、線源強度計算にあたっては、軸方向燃焼度分布を第 2.5.3-11 図～第 2.5.3-13 図のとおりとし、実際の燃焼度分布より保守的に計算している。

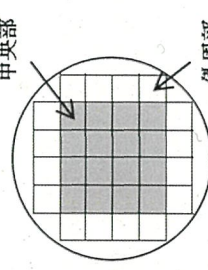
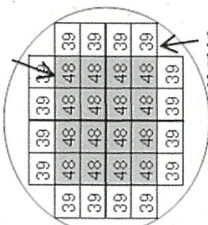
・ モデル化の保守性

－中性子遮蔽材は、評価期間中の熱的影響により質量減損（2%程度）が発生するため、遮蔽評価上、保守的に 2.5 % の質量減損を考慮（原子個数密度で考慮）する。

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

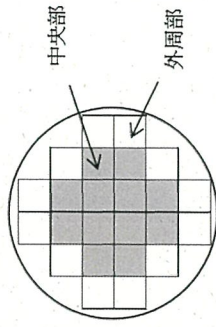
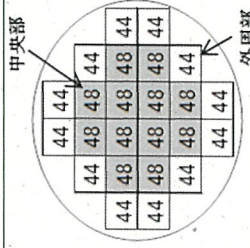
－バーナブルポイズン集合体は、放射化による線源強度については考慮するが、構造材としての遮蔽効果は無視する。

第2.5.3-1表 1,2号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

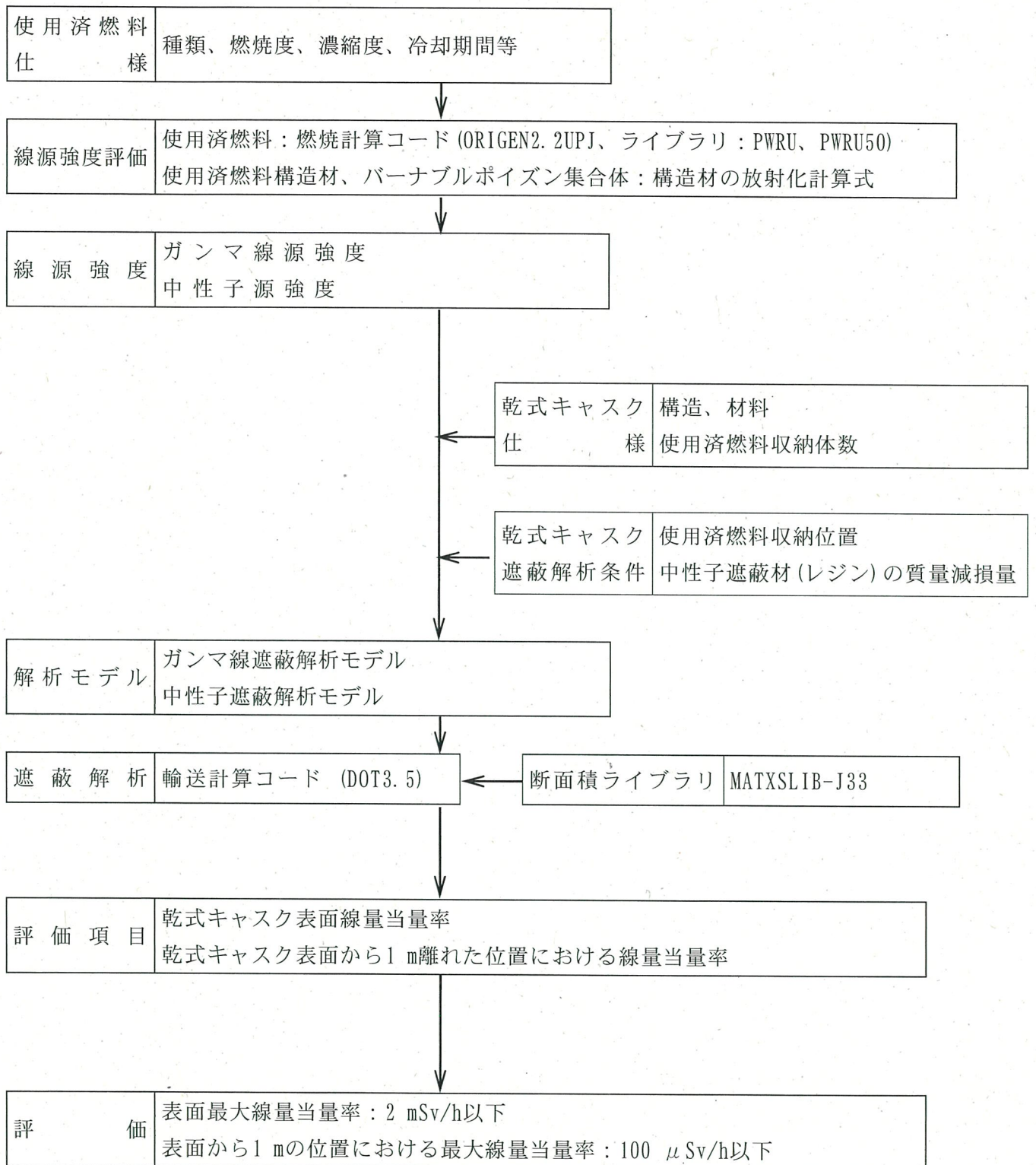
	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック		解析条件		
	中央部	外周部	中央部	外周部	中央部	外周部	
燃料 集合体 1体の 仕様	燃料タイプ		14×14型 (A/B型)		14×14型 (B型)		
	初期ウラン濃縮度 (wt%)		≤4.2	≤3.5	4.1	3.4	
	ウラン重量 (kg)		[Redacted]				
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)		≤48	≤39	≤48	≤39	
	SFPでの冷却期間 (年)		≥15	≥25	15	25	
キャスク 1基あたり	平均燃焼度 (GWd/t)		≤45	≤33	—	—	
収納物仕様	配置※1						

※1: 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

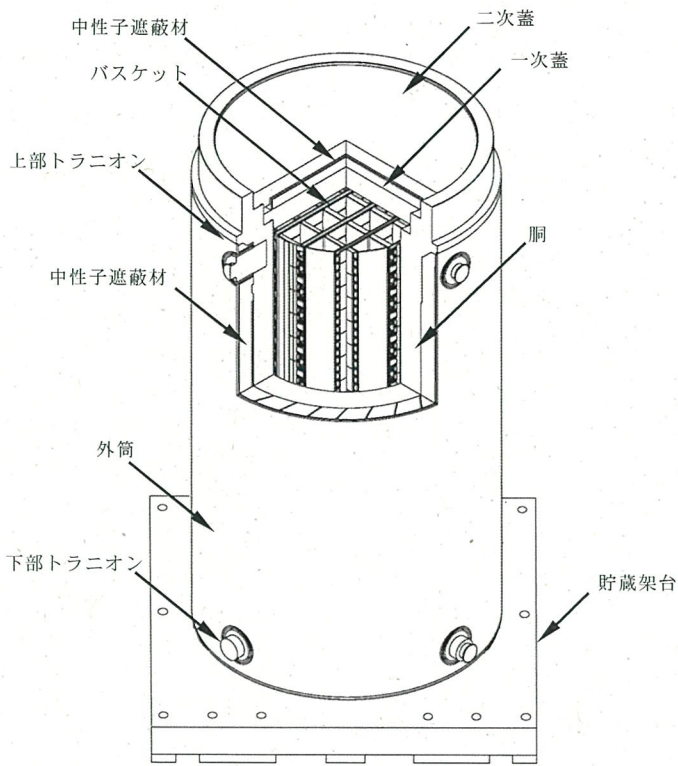
第2.5.3-2表 3号炉用燃料 乾式キャスク収納条件の概要

収納物仕様	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック	解析条件	
	中央部	外周部		中央部	外周部
燃料タイプ	17×17型(A/B型)		17×17型(A/B型)	17×17型(A型)	
初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2		4.1		
ウラン重量(kg)					
最高燃焼度(GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	≤48	48	44
SFPでの冷却期間(年)	A型: ≥15 ^{※1} B型: ≥17		—	15	
最高燃焼度(GWd/t)	≤90	—	—	90	—
SFPでの冷却期間(年)	≥15	—	—	15	—
平均燃焼度(GWd/t)	≤44		—	—	
配置 ^{※2}			—		

※1: 回収ウラン燃料については、15年冷却した通常ウラン燃料と放射エネルギー及び発熱量が同程度以下となるよう20年以上冷却した後、収納する。
 ※2: 数値は燃焼度(GWd/t)を示す。

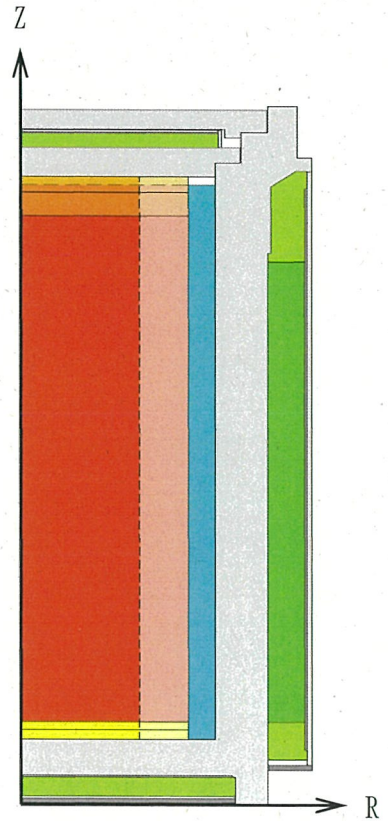
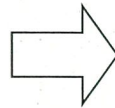


第 2.5.3-1 図 乾式キャスクの遮蔽解析フロー図

















[実形状]

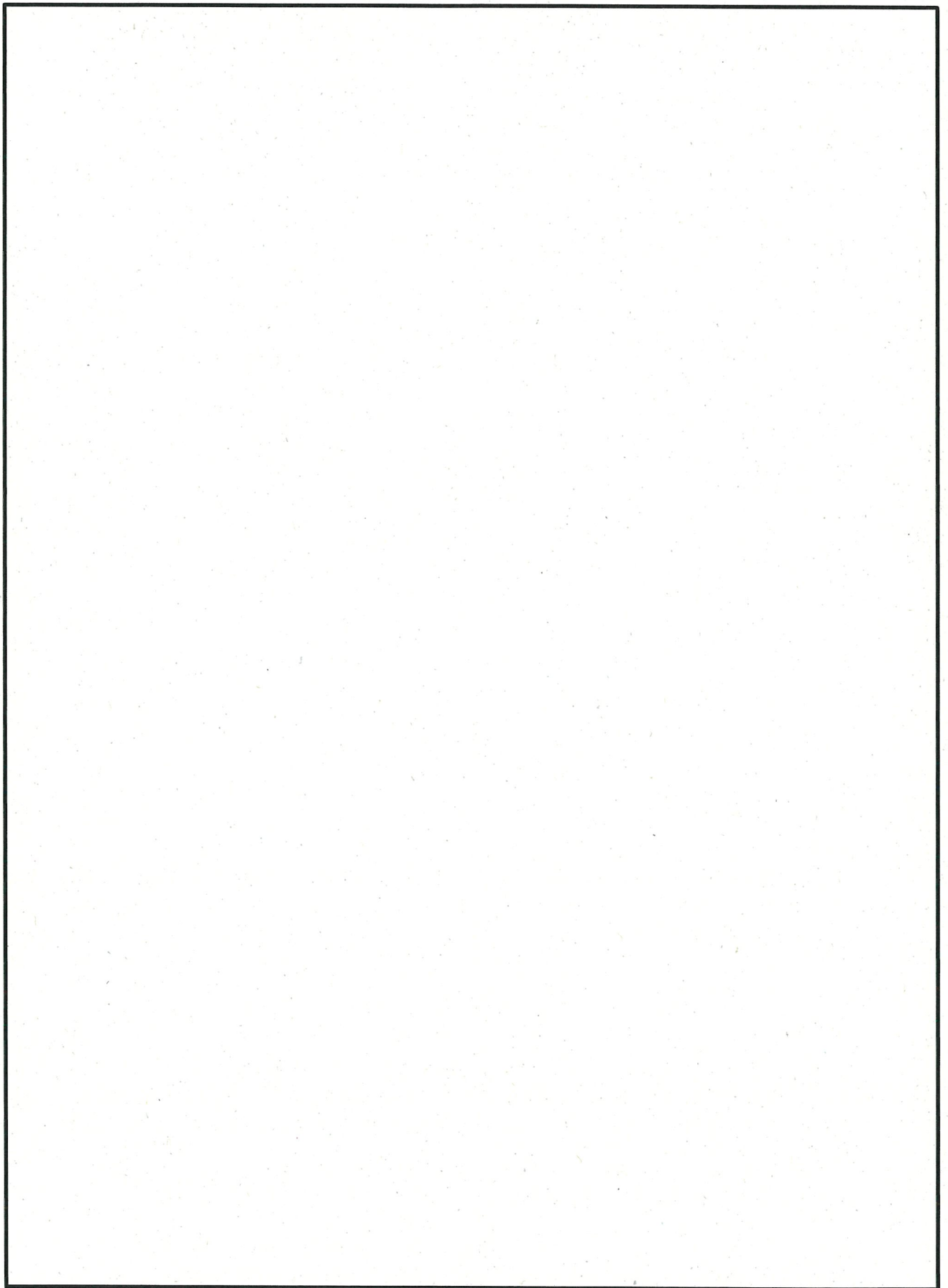
モデル化



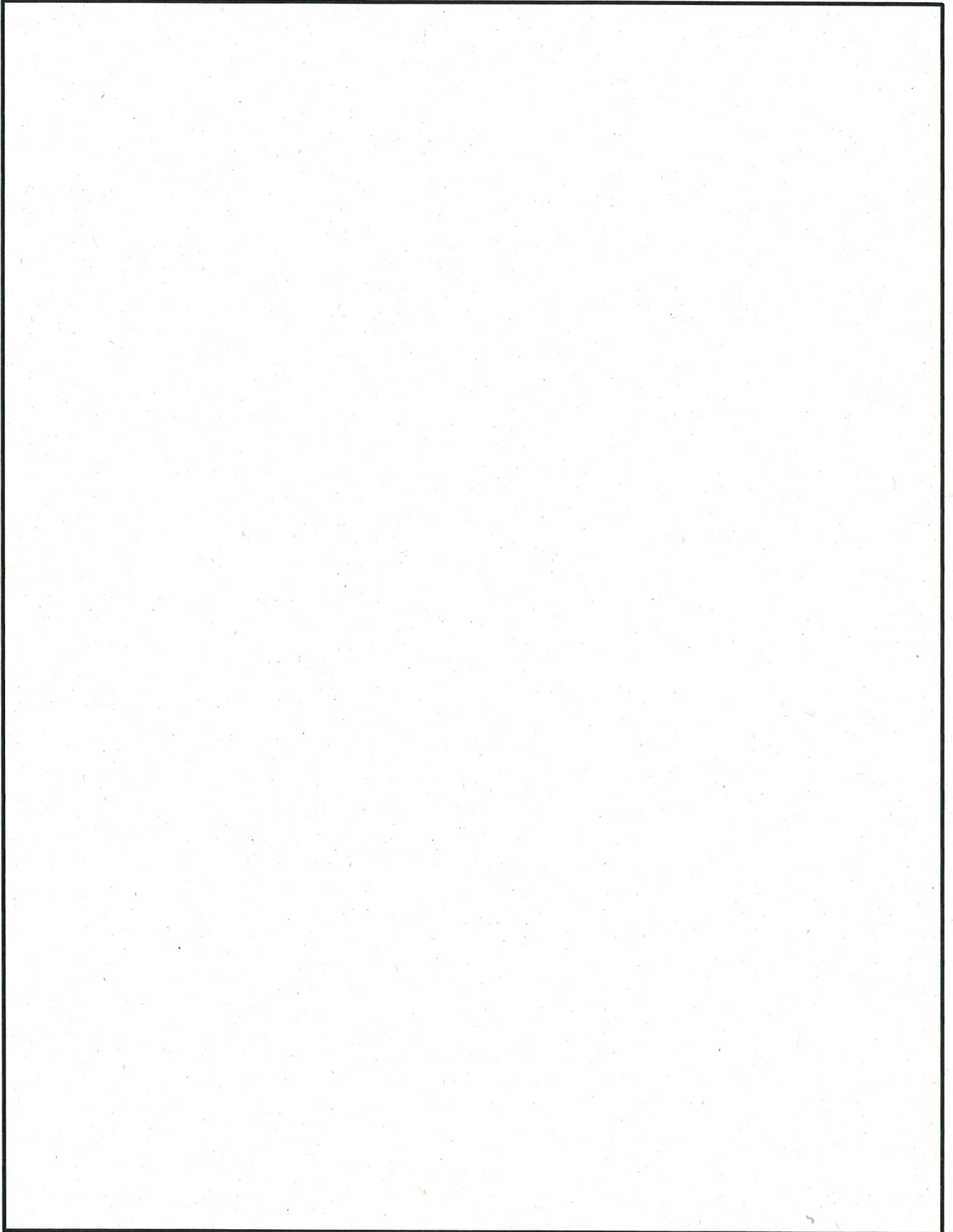
[二次元モデル化 (R-Z 体系)]

	燃料有効部中央+バスケット均質化領域		燃料有効部外周+バスケット均質化領域
	燃料上部構造材中央+バスケット均質化領域		燃料上部構造材外周+バスケット均質化領域
	燃料上部構造材中央		燃料上部構造材外周
	燃料下部構造材中央+バスケット均質化領域		燃料下部構造材外周+バスケット均質化領域
	バスケット外周部		胴、外筒、一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー領域
	中性子遮蔽材領域		底部中性子遮蔽材カバー、下部端板領域
	中性子遮蔽材+伝熱フィン均質化領域		真空

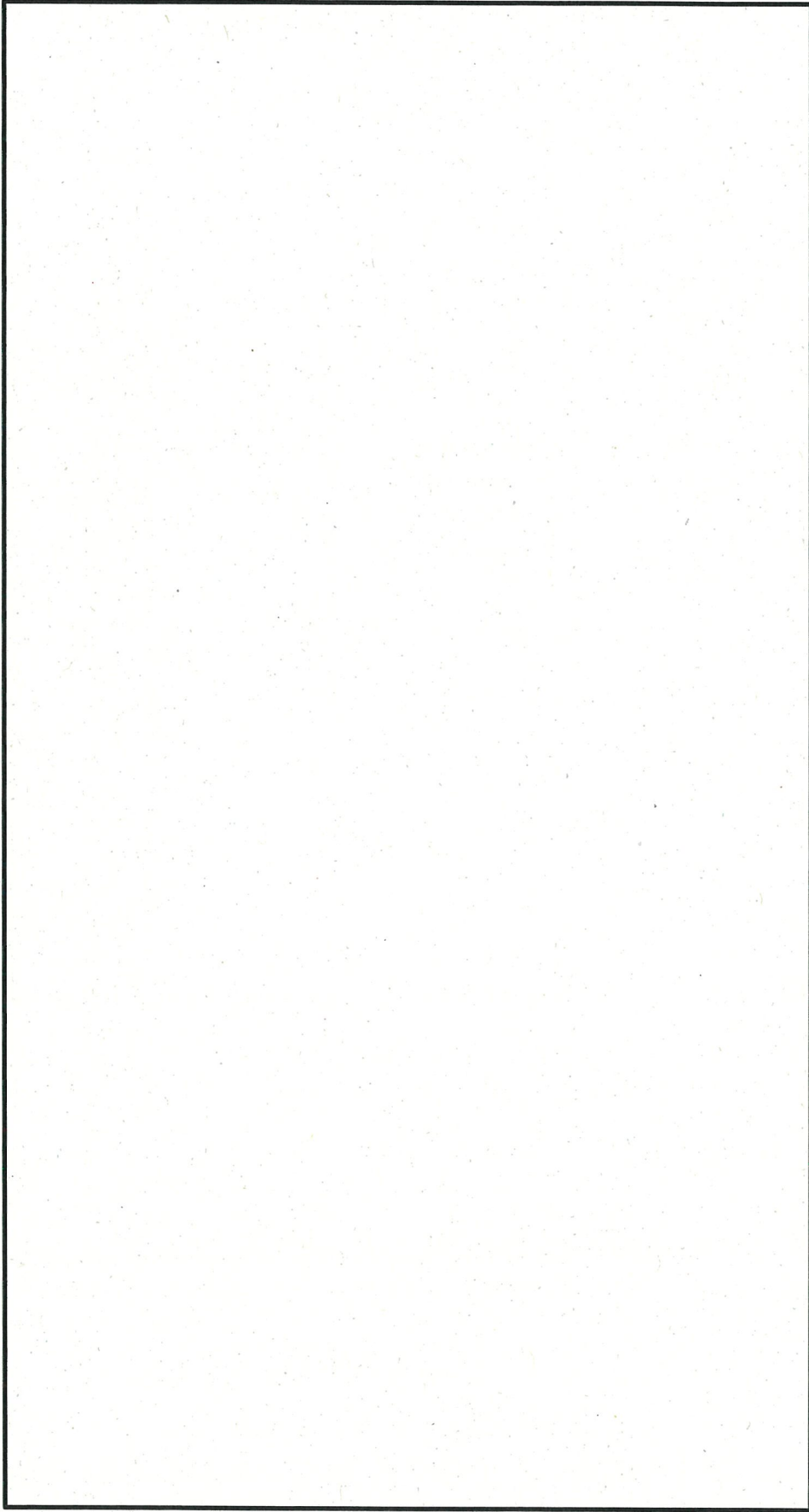
第 2. 5. 3-2 図 遮蔽解析モデル化の概要 (MSF-24P 型の例)



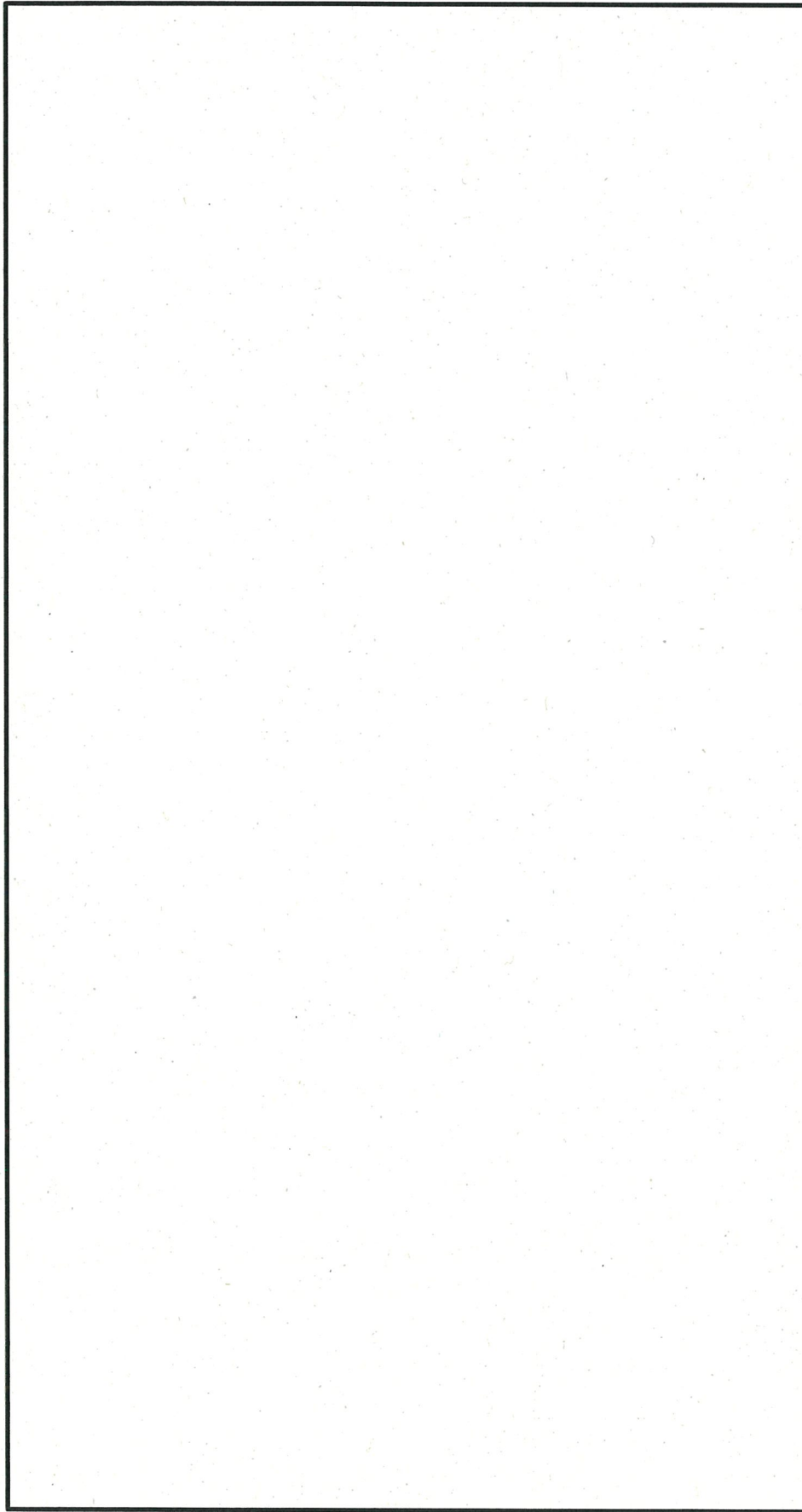
第 2.5.3-3 図 貯蔵時の解析モデル（頭部）（MSF-24P 型）



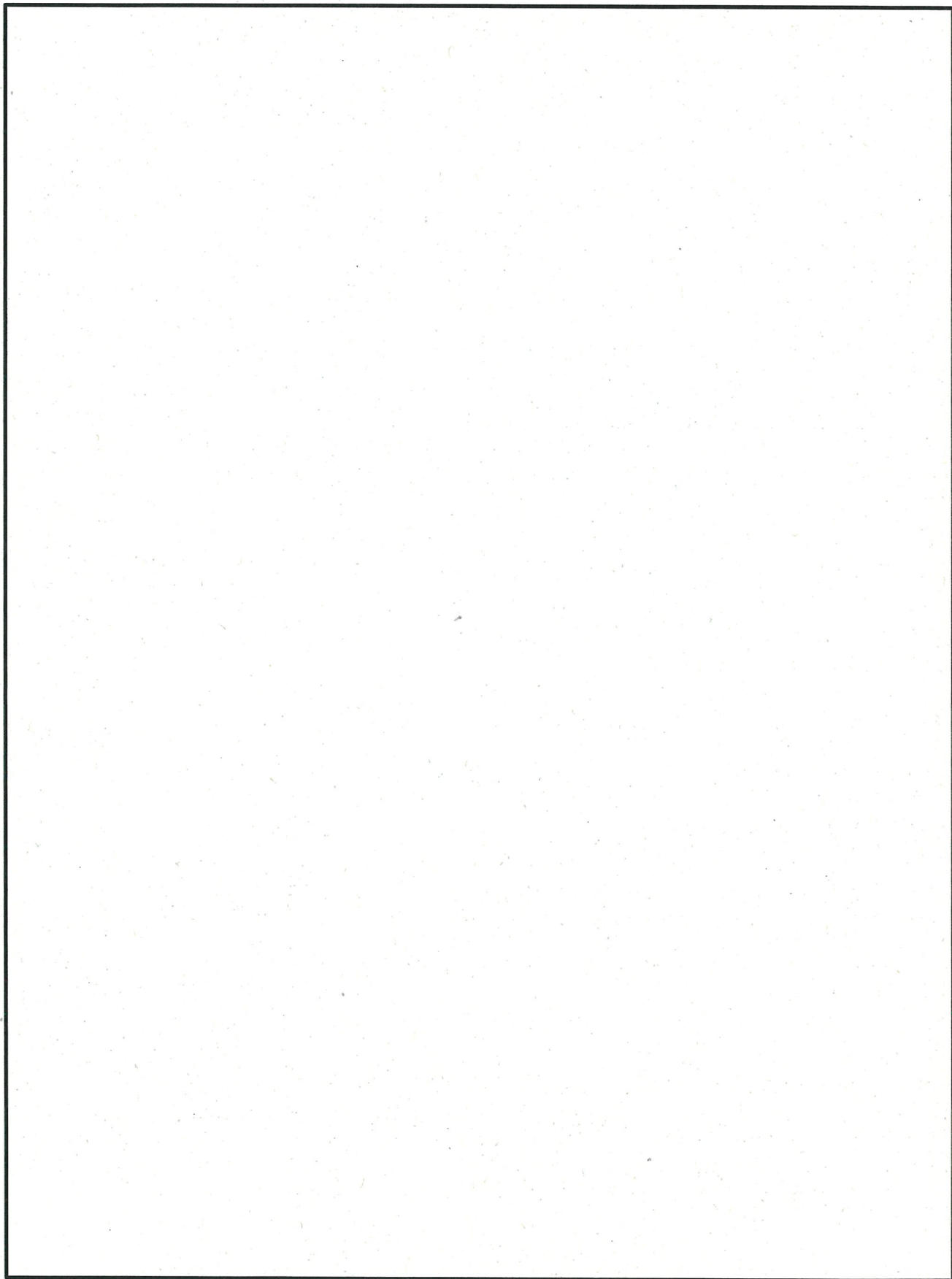
第 2.5.3-4 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（MSF-24P 型）



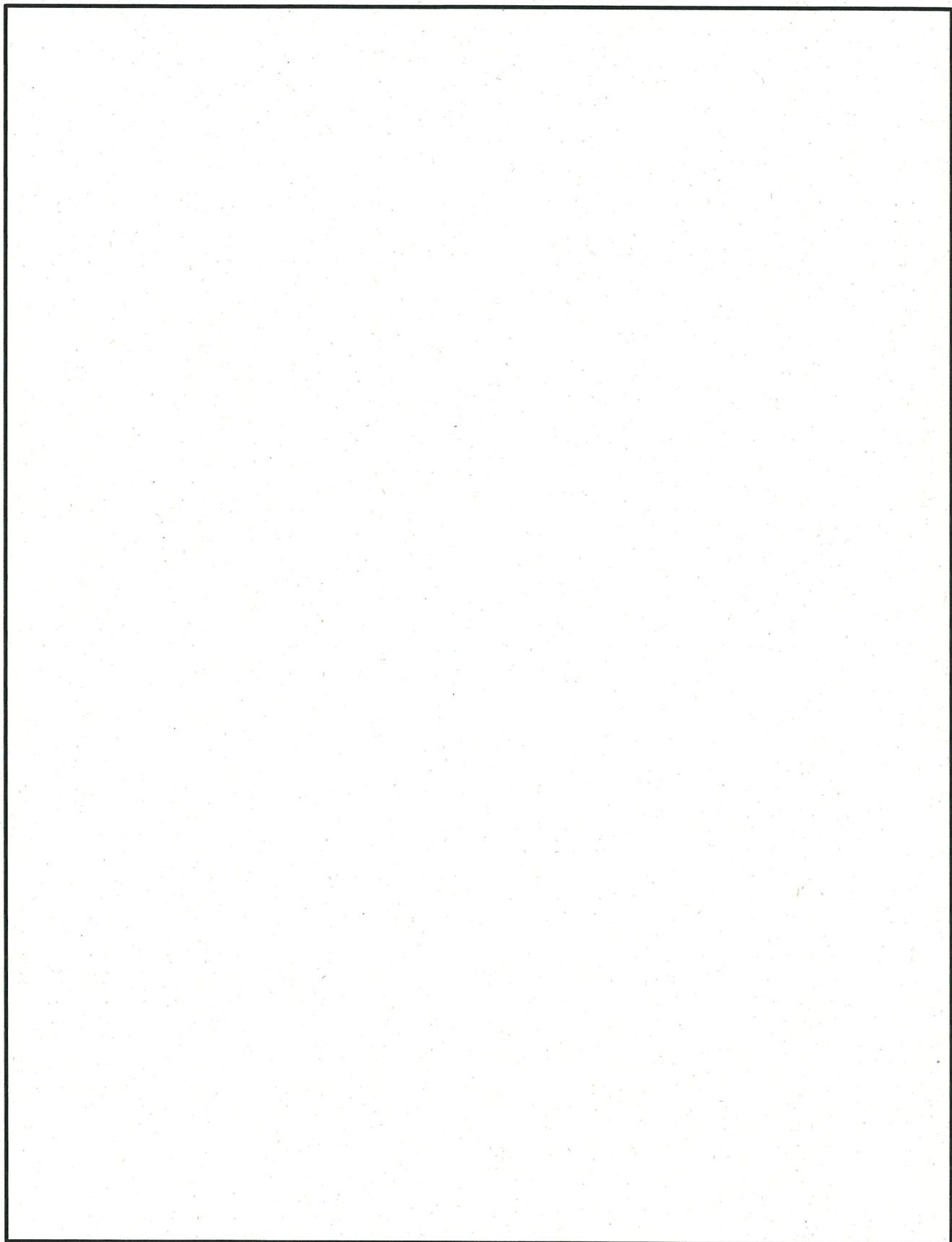
第2.5.3-5図 貯蔵時の解析モデル（上部トラニオン部）（MSF-24P型）



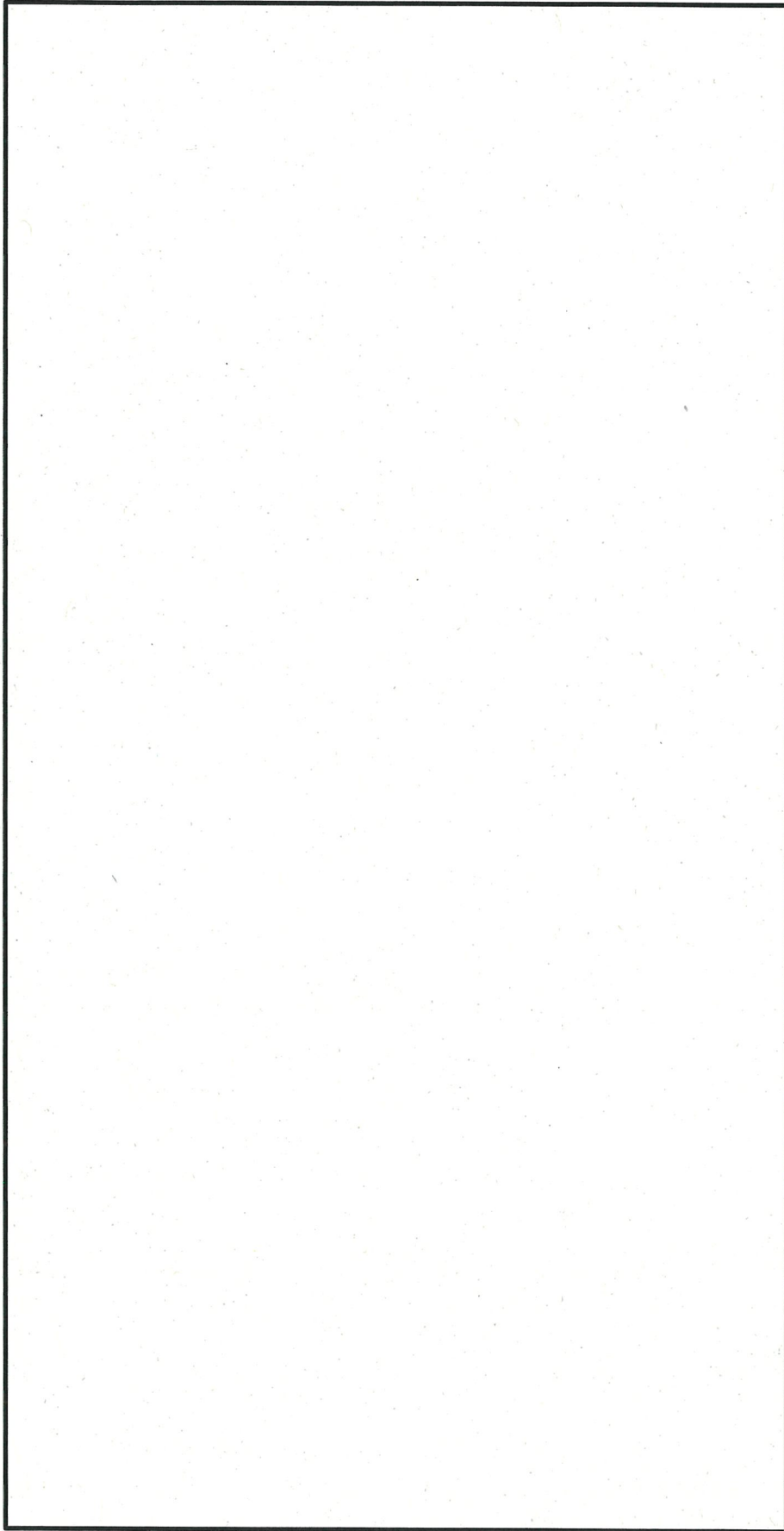
第2.5.3-6 図 貯蔵時の解析モデル（下部トラニオン部）（MSF-24P型）



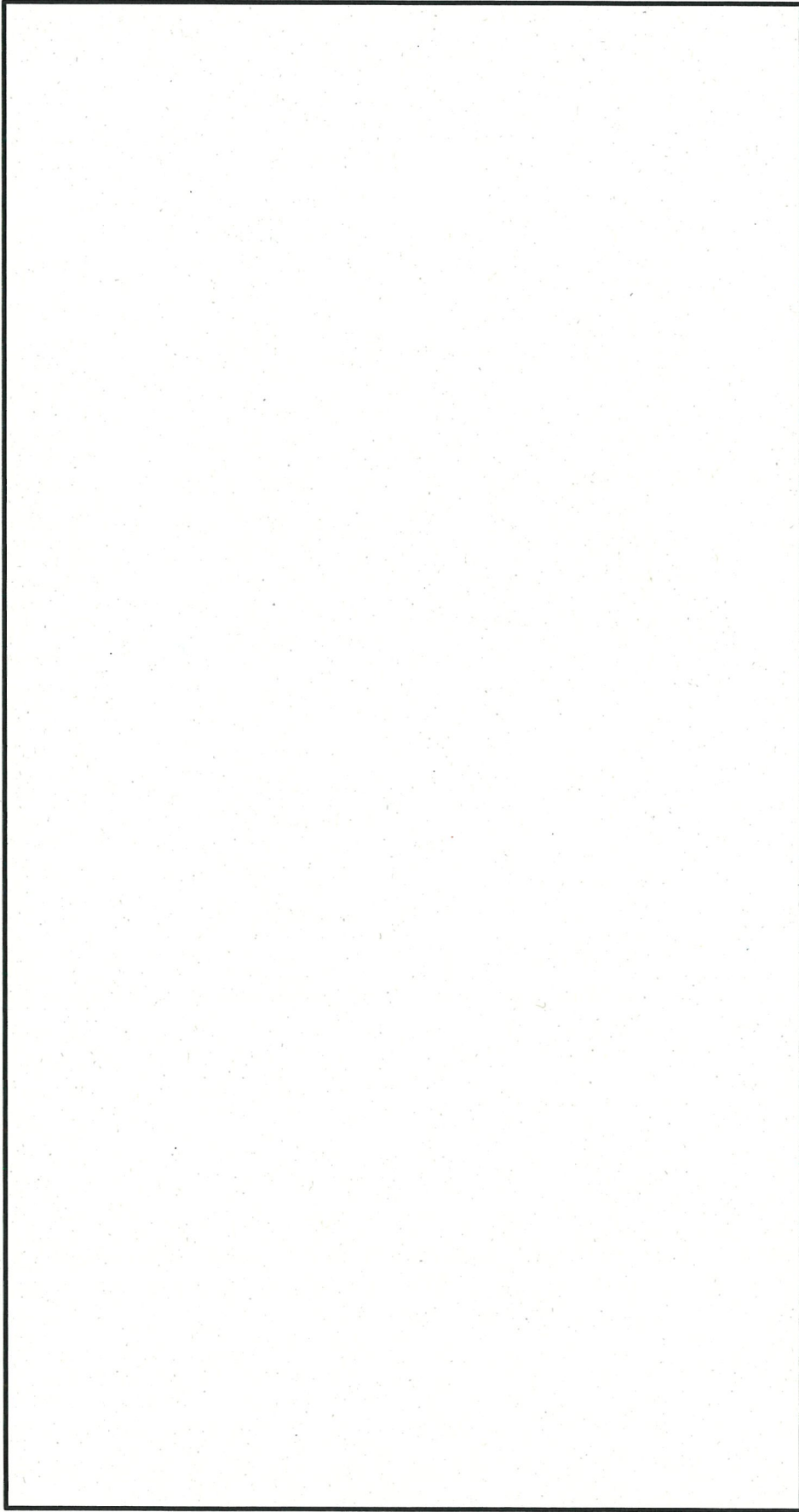
第 2.5.3-7 図 貯蔵時の解析モデル（頭部）（MSF-32P 型）



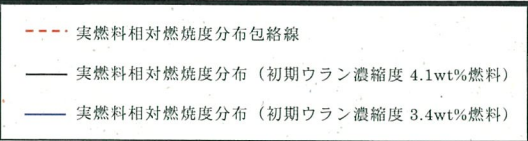
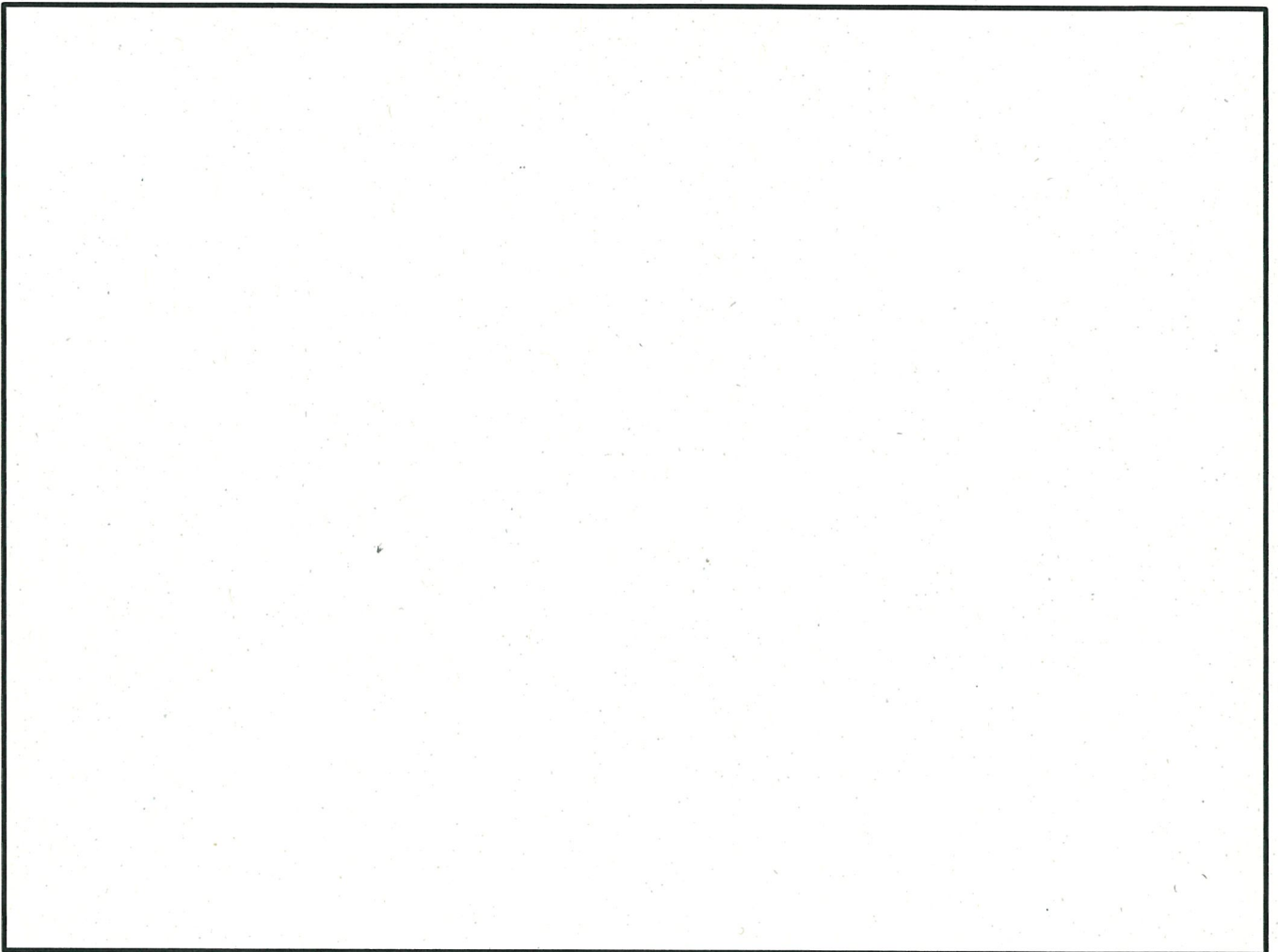
第 2.5.3-8 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（MSF-32P 型）



第2.5.3-9 図 貯蔵時の解析モデル（上部トラニオン部）（MSF-32P 型）

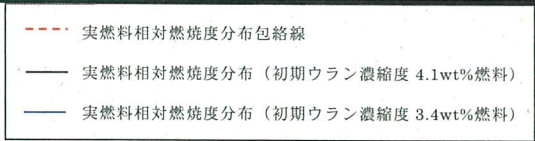
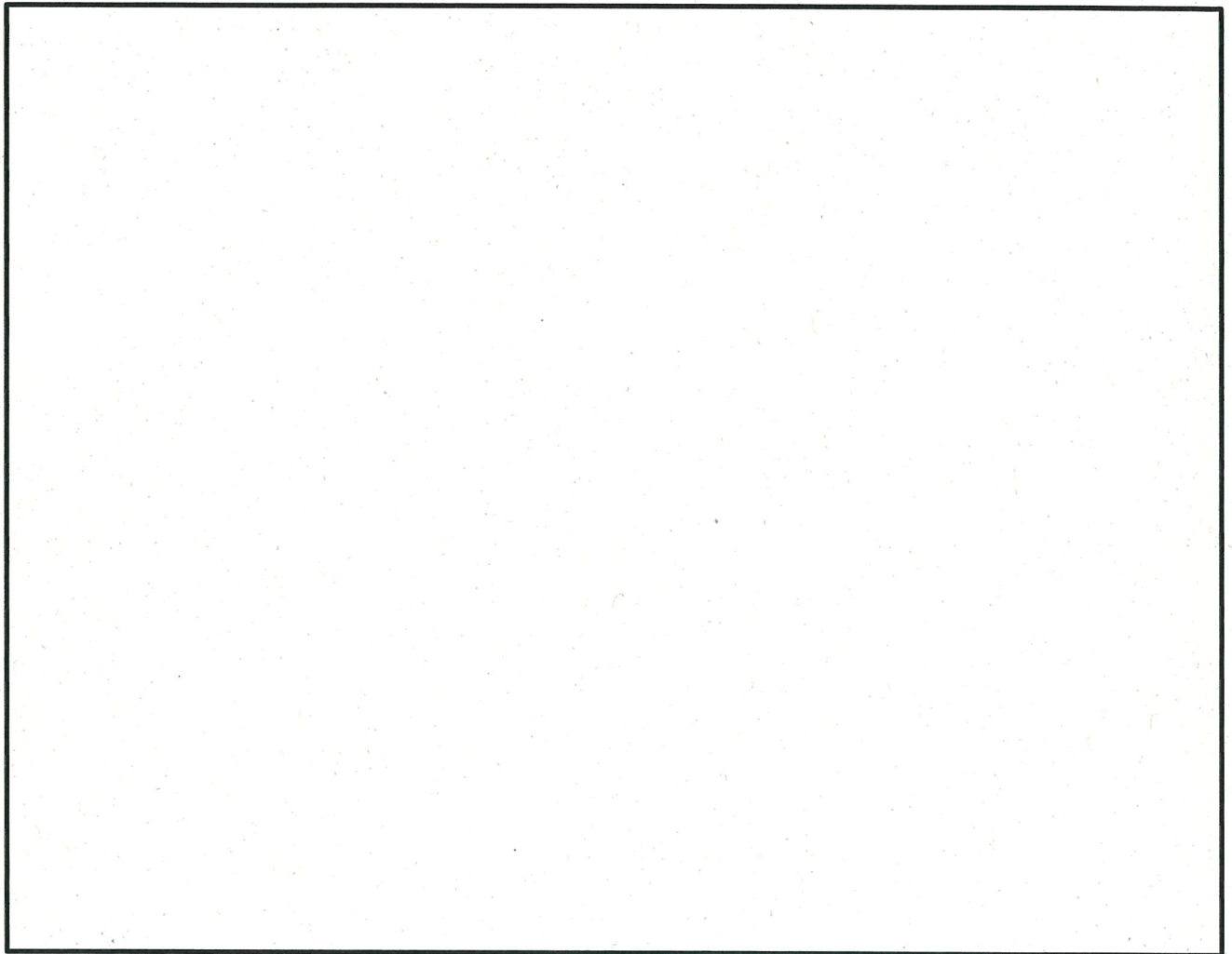


第2.5.3-10 図 貯蔵時の解析モデル（下部トラニオン部）（MSF-32P 型）



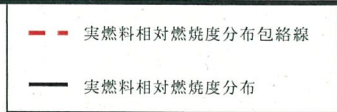
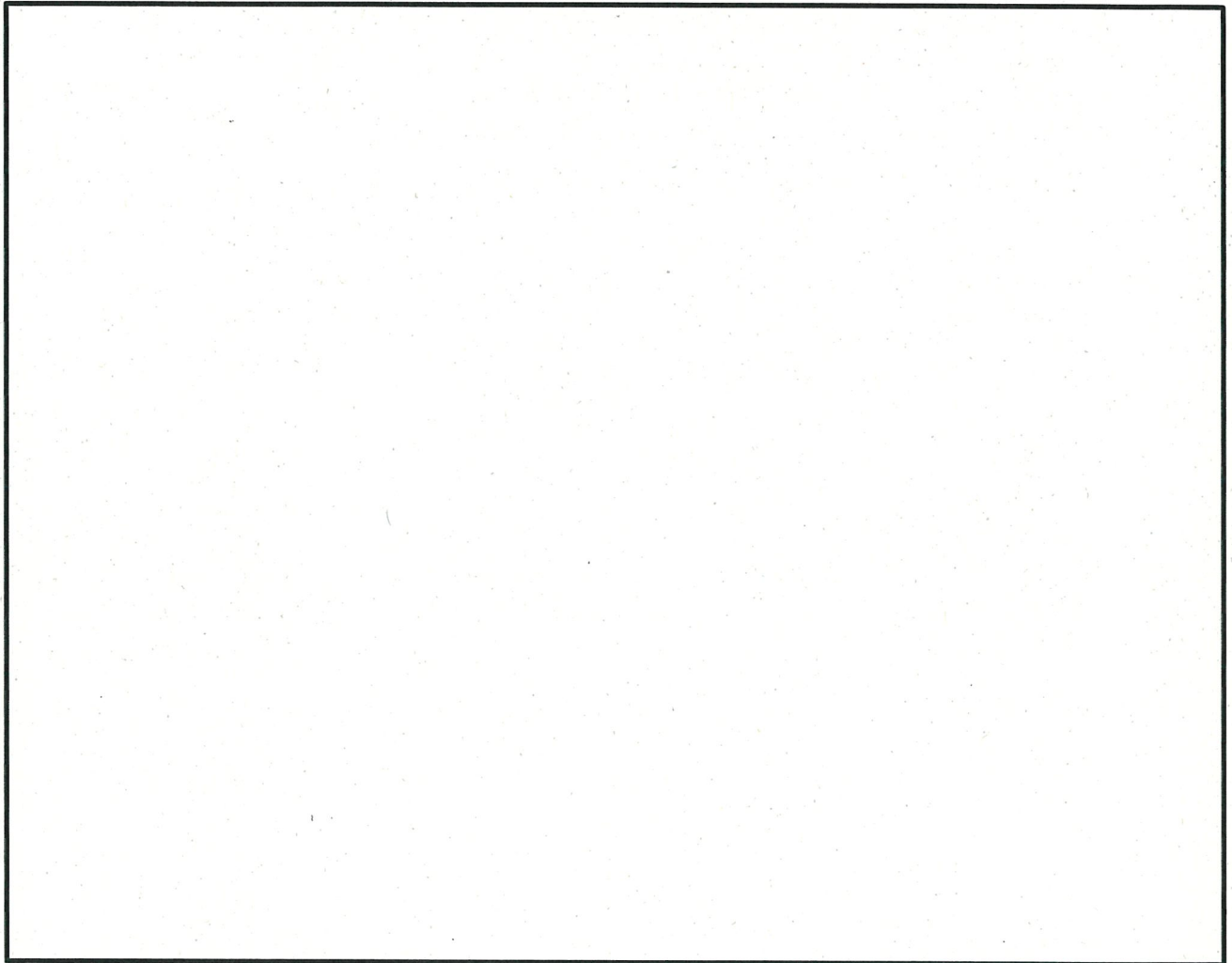
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.3-11 図 1 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定



補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.3-12 図 2 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定



補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.3-13 図 3 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定

最も厳しい評価となる燃料仕様を収納した場合において、第 2.5.3-3 表に示すとおり評価基準を満たしている。

第 2.5.3-3 表 評価結果

項目	評価結果		評価基準	備考
	MSF-24P 型	MSF-32P 型		
表面線量当量率	1.83 mSv/h	1.57 mSv/h	2 mSv/h 以下	各部位の評価結果は、 第 2.5.3-4 表及び 第 2.5.3-5 表に示す。 出力位置は、 第 2.5.3-14 図及び 第 2.5.3-15 図に示す。
表面から 1 m の 位置における 線量当量率	86 μ Sv/h	84 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	

第 2.5.3-4 表 線量当量率評価結果 (MSF-24P 型)

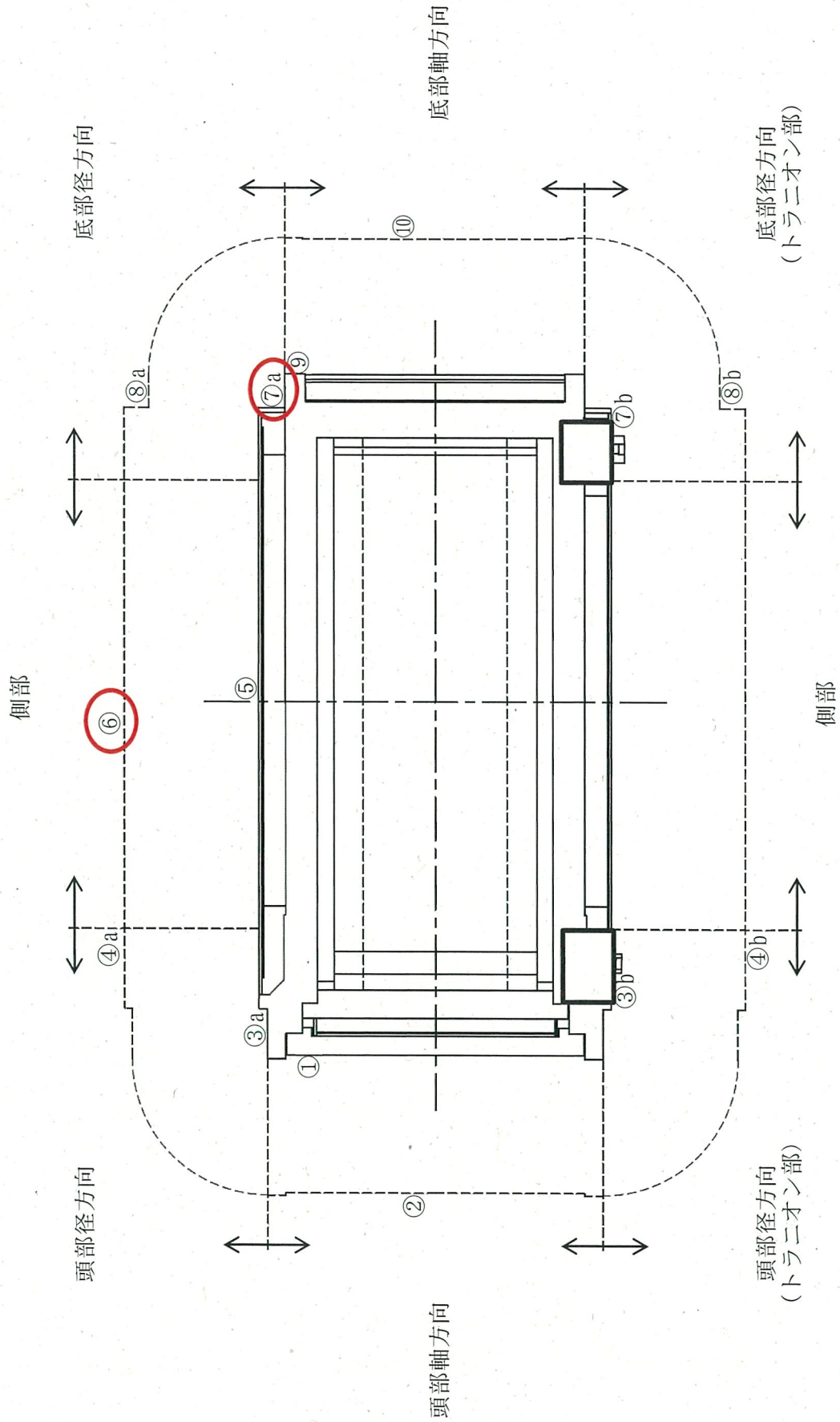
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

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		⑦a	⑦b	⑨		
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	8.0	100.7	4.0	5.4	<0.1	
		構造材放射化	0.4	1.1	103.0	25.9	6.6	13.4	0.3
		二次ガンマ線	0.8	2.3	5.7	25.7	7.4	4.8	0.9
表面	ガンマ線	中性子	333.7	804.2	741.4	1807.3	1108.3	222.6	
		合計	335.0	807.7	858.1	197.4	<u>1825.3</u>	1131.9	223.9
表面から 1 m	ガンマ線	燃料有効部	②	④a	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
		構造材放射化	0.3	22.5	22.6	44.8	9.0	7.9	4.9
		二次ガンマ線	3.5	20.1	20.9	12.5	7.4	6.1	28.8
表面から 1 m	ガンマ線	中性子	0.4	5.4	5.4	10.4	3.0	2.8	3.6
		合計	64.8	23.2	32.7	18.3	56.6	66.3	23.1
合計		69.0	71.2	81.6	<u>86.0</u>	76.0	83.1	60.4	

第 2.5.3-5 表 線量当量率評価結果 (MSF-32P 型)

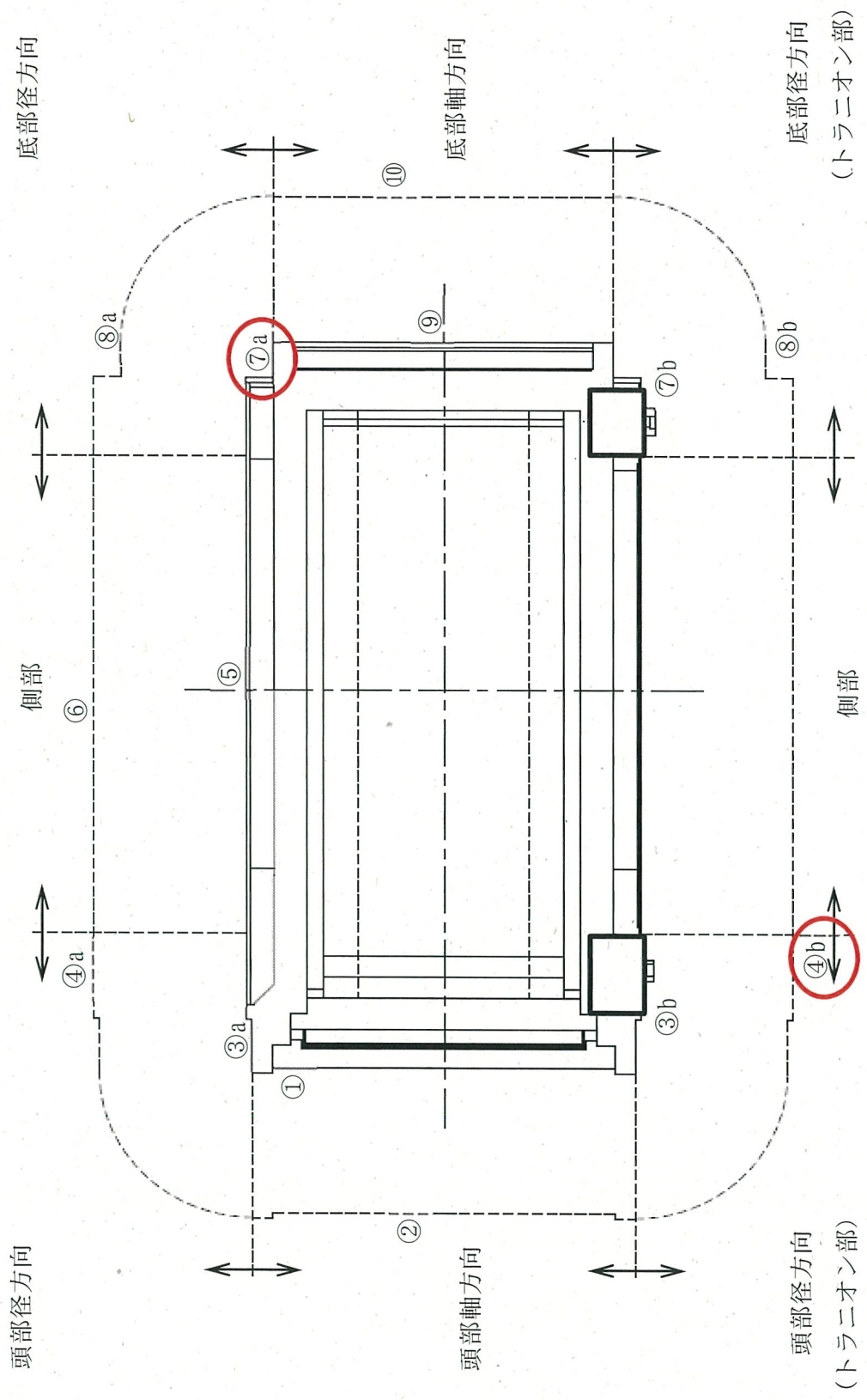
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

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		⑦a	⑦b	⑨	
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	4.8	93.0	3.0	4.0	8.2
		構造材放射化	0.4	0.7	85.2	6.2	11.7	112.7
		二次ガンマ線	0.7	1.6	5.7	7.1	4.5	12.4
表面から 1 m	ガンマ線	中性子	262.8	1022.9	55.1	1548.1	925.5	44.7
		合計	264.0	594.7	1118.6	<u>1564.4</u>	945.7	178.0
表面から 1 m	ガンマ線	燃料有効部	②	④a	⑥	⑧a	⑧b	⑩
		構造材放射化	0.2	22.3	21.7	8.8	7.3	2.9
		二次ガンマ線	3.7	28.1	22.7	6.5	4.8	34.5
表面から 1 m	ガンマ線	中性子	0.4	5.0	5.0	2.8	2.6	3.4
		合計	50.6	23.8	34.4	51.1	60.9	20.2
合計			79.2	<u>83.8</u>	79.9	69.2	75.6	61.0



(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第 2.5.3-14 図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (MSF-24P 型)



(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第 2.5.3-15 図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (MSF-32P 型)

〔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。

敷地境界における実効線量評価については、設置許可基準第 29 条まとめ資料において説明する。

〔確認内容〕

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。

設計上考慮すべき自然現象において、貯蔵建屋等の損傷が生じない設計であることについて、地盤審査及び4条、5条、6条まとめ資料で説明することとし、遮蔽機能が著しく低下しない設計とする。

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

乾式キャスク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。

(a) ORIGEN2 コード

i 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。

ii 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。

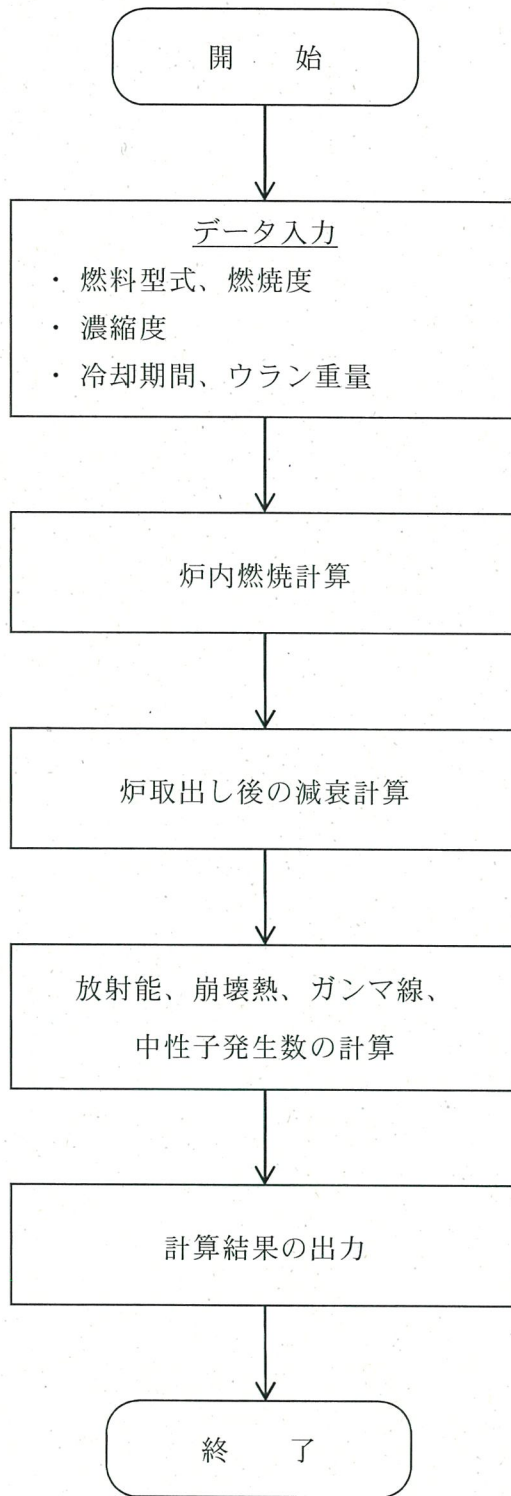
iii 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを第 2.5.3-16 図に示す。

iv 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 コードの検証例を第 2.5.3-17 図に示す。



第 2. 5. 3-16 図 ORIGEN2 コードの計算フロー図

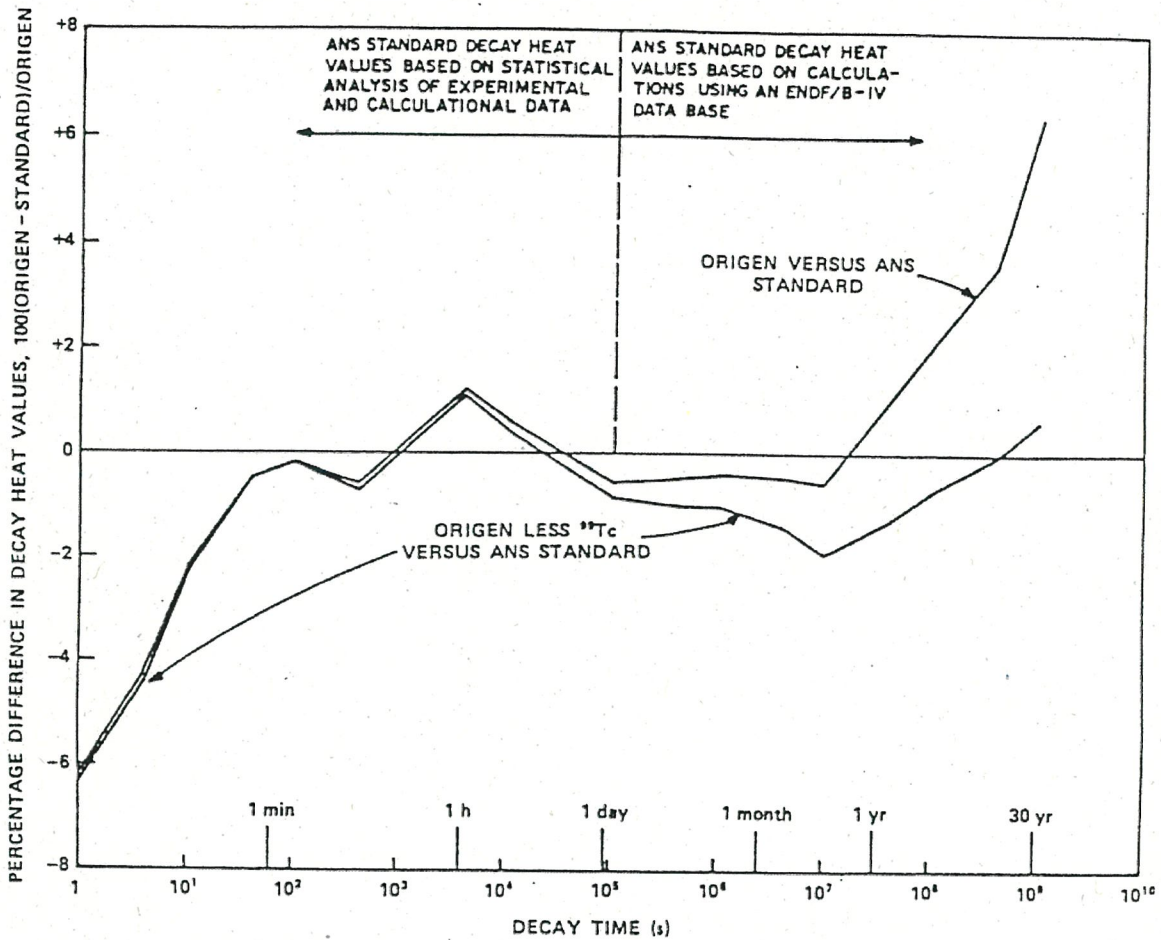


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

(注) ORIGEN2 コードの崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上（乾式キャスクに収納される燃料の冷却期間）の年数に対して高めの値となっている。この理由は、ANS 標準崩壊熱は ^{99}Tc を考慮していないためである。ORIGEN2 コードの解析結果より ^{99}Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

第 2. 5. 3-17 図 ORIGEN2 コードの検証例 ²⁾

(b) DOT3.5 コード

i. 概要

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

ii. 機能

DOT コードは、遮蔽解析に関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 S_n 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。

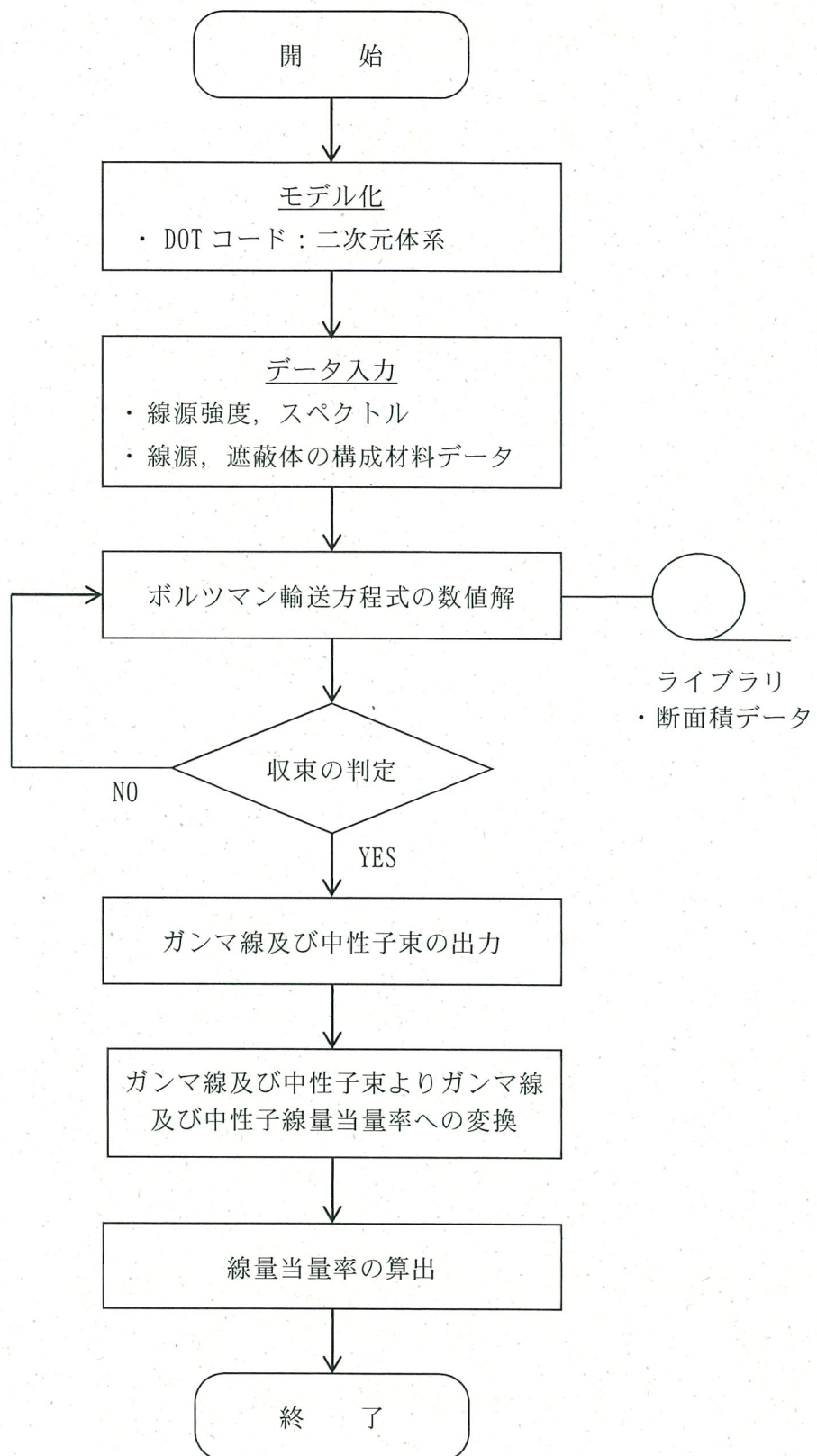
b) DOT コードは、二次元の体系を扱うことができる。

iii. 解析フロー

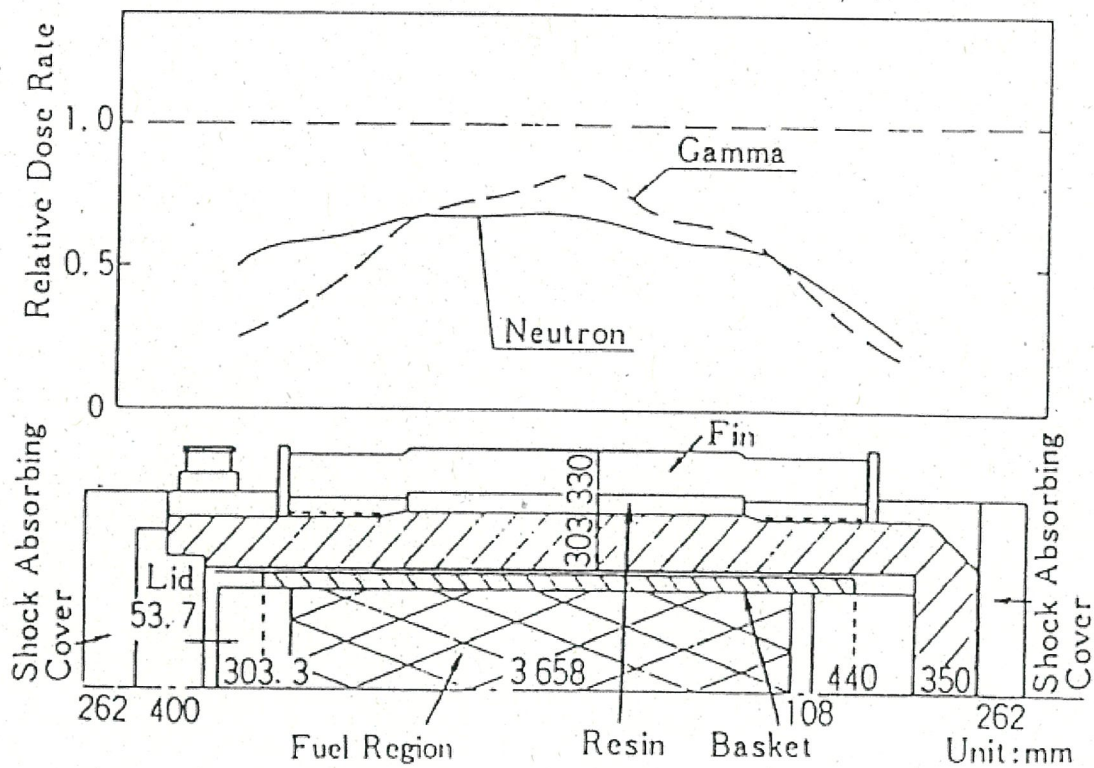
DOT コードの解析フローを第 2.5.3-18 図に示す。

iv. 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第 2.45.3-19 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⁾。



第 2.5.3-18 図 DOT コードの解析フロー図



(注) 中性子および二次ガンマ線を DOT および 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。

第 2.5.3-19 図 DOT コードの検証例⁴⁾

v. 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33

MATXSLIB-J33 は、DOT3.5 等の輸送計算コード用に、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリとして、日本原子力研究所にて整備されたものである。MATXSLIB-J33 を用いた断面積ライブラリは、多群ライブラリ処理コード TRANSX-2.15 を用いて、輸送計算コード用に中性子 175 群、ガンマ線 42 群のエネルギー群構造に変換し作成している。

JENDL-3.3 の信頼性は遮蔽性能に関するベンチマーク解析で確認されている⁵⁾。

4. 参考文献

- 1) M. Ishikawa, T. Jin, J. Katakura, M. Kataoka, H. Matsumoto, Y. Ohkawachi, S. Ohki, A. Onoue, A. Sasahara, K. Suyama, H. Yanagisawa, “ZZ-ORIGEN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3”, Computer Programs NEA-1642, OECD/NEA Databank, (2006).
- 2) A. G. Croff, “ORIGEN2: A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials”, Nuclear Technology, Vol. 62, (1983).
- 3) Oak Ridge National Laboratory, “DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code”, CCC-276, (1977).
- 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」, (一社) 日本原子力学会「昭和 56 年秋の分科会」, C17, (1981).
- 5) 大西世紀 ほか, 「 ^{252}Cf 核分裂中性子源を用いた遮へい透過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J33 の適用性に関する研究」, 海上技術安全研究所報告 第 7 卷 第 3 号 研究報告, (2007).

伊方発電所 3号炉
燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
(使用済燃料乾式貯蔵容器の除熱機能について)

〈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. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの除熱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

①設置許可基準規則第16条第4項二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

②設置許可基準規則解釈別記4第16条3項

第16条第4項第2号に規定する「崩壊熱を適切に除去することができる」とは、第5項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈第6条並びに第17条第1項第2号（貯蔵建屋を設置する場合に限る。）及び第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をいう。

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

- 一 使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損及び被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- 二 金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- 三 貯蔵建屋（使用済燃料貯蔵施設において金属キャスク等を収納する建物をいう。以下同じ。）は、金属キャスクの除熱機能を阻害しない設計であること。また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しない設計であること。
- 四 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、除熱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。

③設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

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

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

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

「2. 安全機能の確保 2.3 除熱機能」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、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができること。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ除熱設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

使用済燃料の崩壊熱は、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、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。

2) 兼用キャスク各部の温度評価

a. 兼用キャスクの各部の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び兼用キャスク周囲の温度を条件とし、及び兼用キャスクの実形状を適切にモデル化すること。

b. 安全機能及び兼用キャスクの構造強度を維持する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、兼用キャスクの構成部材が健全性を保つ範囲に収まること。ここで、「健全性を保つ範囲」とは、兼用キャスクの各部の安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度の範囲をいう。

3) 燃料被覆管の温度評価

a. 燃料被覆管の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、1) で求めた使用済燃料の崩壊熱と 2) で求めた兼用キャスクの各部の温度を条件とし、使用済燃料集合体、バスケット等の実形状を適切にモデル化すること。

b. 燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、制限される範囲に収まること。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。

4) 貯蔵建屋の除熱評価

① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。

また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しないこと。

- ② 貯蔵建屋を設置する場合であって、放水による冷却等応急復旧による除熱機能の回復を期待するときには、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

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、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確認することが定められており、乾式キャスクの除熱機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

使用済燃料の崩壊熱は、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、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。

2) 兼用キャスク各部の温度評価

a. 兼用キャスクの各部の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び兼用キャスク周囲の温度を条件とし、及び兼用キャスクの実形状を適切にモデル化すること。

b. 安全機能及び兼用キャスクの構造強度を維持する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、兼用キャスクの構成部材が健全性を保つ範囲に収まること。ここで、「健全性を保つ範囲」とは、兼用キャスクの各部の安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度の範囲をいう。

3) 燃料被覆管の温度評価

a. 燃料被覆管の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、1) で求めた使用済燃料の崩壊熱と 2) で求めた兼用キャスクの各部の温度を条件とし、使用済燃料集合体、バスケット等の実形状を適切にモデル化すること。

b. 燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、制限される範囲に収まること。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。

4) 貯蔵建屋の除熱評価

① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。

貯蔵時の使用済燃料及び乾式キャスクの基本的安全機能を有する構成部材の健全性を維持するために、乾式キャスクは使用済燃料の崩壊熱を除去する設計とする。

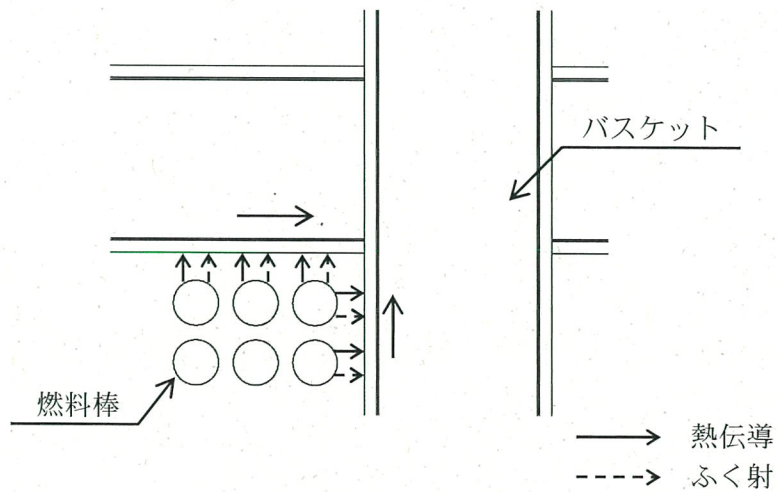
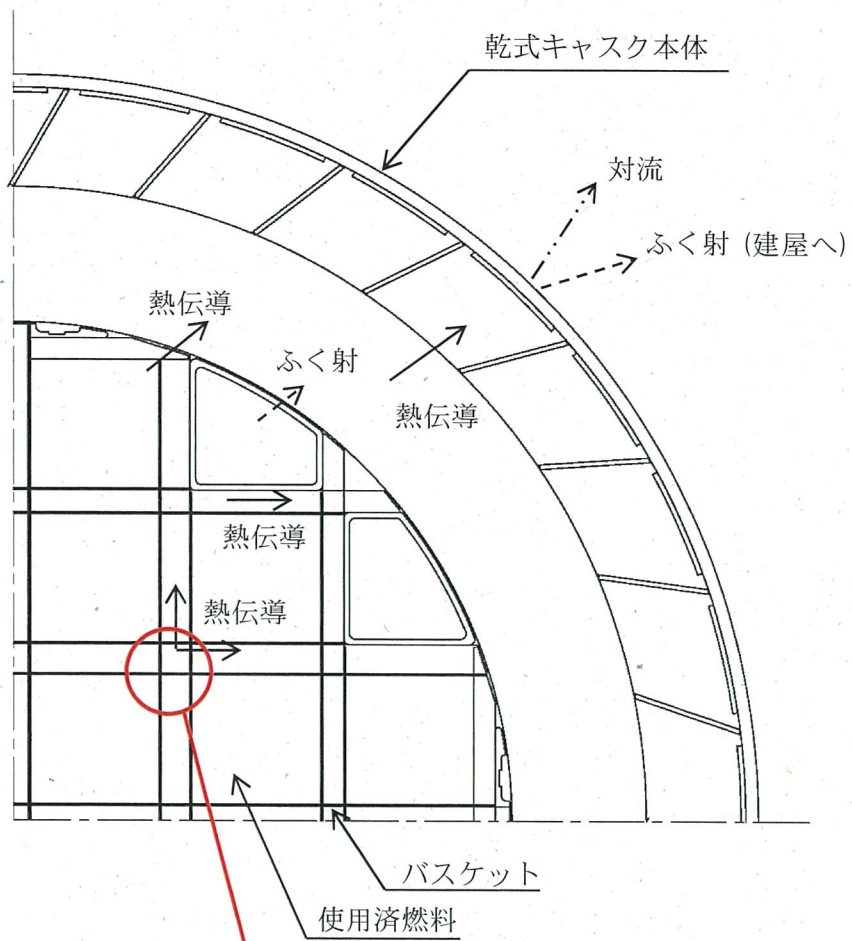
乾式キャスクは、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及びふく射により乾式キャスクの外表面に伝え、対流及びふく射により周囲の空気等に伝達する。乾式キャスク本体側部の中性子遮蔽材には熱伝導率の低いレジンを用いるため、伝熱フィンを設けることにより必要な伝熱性能を確保する。

乾式貯蔵施設における使用済燃料の崩壊熱の主要な伝熱形態は次のとおりである。

(第 2.5.4-1 図参照)

- a) 崩壊熱は、使用済燃料の被覆管表面からヘリウムガスを介した熱伝導及びふく射によりバスケットへ伝えられる。
- b) バスケットに伝えられた熱は、バスケット内の熱伝導によりバスケット外周部へ伝えられる。
- c) バスケット外周部に伝えられた熱は、バスケット外表面からヘリウムガスを介した熱伝導及びふく射により乾式キャスク本体内面へ伝えられる。
- d) 乾式キャスク本体内面に伝えられた熱は、熱伝導により乾式キャスク本体外面へ伝えられる。
- e) 乾式キャスク本体外面へ伝えられた熱は、乾式キャスク本体外面の対流により乾式キャスク周囲の空気へ伝えられる。また、乾式キャスク本体外面のふく射により建屋に伝えられる。

使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下、「乾式貯蔵建屋」という）は、乾式キャスクを配置するとともに、給気口と排気口を有する構造とし、自然対流冷却により、乾式キャスクの除熱機能を阻害しない設計とする。



第 2. 5. 4-1 図 乾式キャスクの伝熱形態 (MSF-24P 型の例)

乾式キャスク及び乾式貯蔵建屋の除熱解析フローを第 2.5.4-2 図に示す。

解析条件は第 2.5.4-1 表及び第 2.5.4-2 表のとおり。

a. 使用済燃料の崩壊熱評価方法

使用済燃料の型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して核種の生成、崩壊及びそれに基づく崩壊熱を計算する。

b. 乾式キャスク構成部材及び燃料被覆管の温度評価方法

乾式キャスク構成部材の各部温度は、使用済燃料の崩壊熱、周囲の乾式キャスクからの輻射熱及び乾式キャスク周囲温度等を条件として、乾式キャスクの実形状を三次元でモデル化し、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。(第 2.5.4-3 図～第 2.5.4-5 図及び第 2.5.4-8 図～第 2.5.4-10 図参照)

使用済燃料被覆管の温度は、使用済燃料の崩壊熱とバスケットの温度を条件として、燃料集合体の径方向断面の二次元モデルを用い、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。(第 2.5.4-6 図、第 2.5.4-7 図、第 2.5.4-11 図及び第 2.5.4-12 図参照)

なお、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

－ウラン濃縮度 $4.1 \pm \square$ t% 及び $3.4 \pm \square$ t% を保守的に \square wt% 及び \square wt% とする。

－使用済燃料の最高温度を保守的に高めに算出するために、MSF-24P 型では、第 2.5.4-13 図のとおり中央部 12 体に燃焼度が 48GWd/t の使用済燃料を配置し、外周部 12 体は、乾式キャスク全体の崩壊熱が平均燃焼度 44GWd/t に相当するよう中央部の崩壊熱量を差し引いて外周部の 12 体で平均化した崩壊熱量を設定する。MSF-32P 型では、第 2.5.4-15 図のとおり中央 16 体の燃料集合体のうち中心 4 体には 48GWd/t の使用済燃料を配置し、中心 4 体を除く 12 体には、中央部 16 体の崩壊熱が平均燃焼度 45GWd/t に相当するよう中心 4 体の崩壊熱量を差し引いて残りの 12 体で平均化した崩壊熱量を設定する。さらに、外周 16 体には 33GWd/t の使用済燃料を配置する。

－使用済燃料は、使用済燃料ごとに軸方向の燃焼度分布に基づく発熱量分布を有するが、発熱量計算にあたっては、軸方向燃焼度分布を第 2.5.4-15 図のとおりとし、実際の燃焼度分布より保守的に計算しており、その結果、発熱量は、収納制限における最大崩壊熱量 (MSF-24P 型 : 15.8kW、MSF-32P 型 : 14.8kW) を 14% 程度上回る崩壊熱量となる。

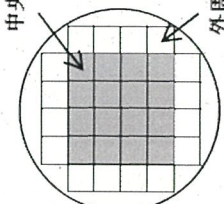
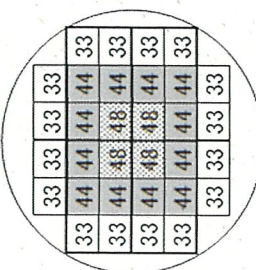
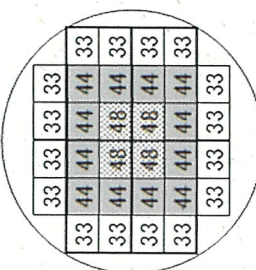
・ モデル化の保守性

－乾式キャスク本体内のバスケット及びバスケット内の使用済燃料は、温度を高めに評価するよう、空間の中央に配置する。

－燃料集合体モデルは、軸方向への熱移動を考慮しない二次元モデルとする。



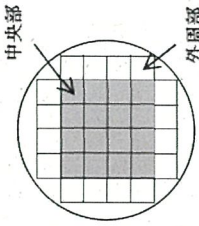
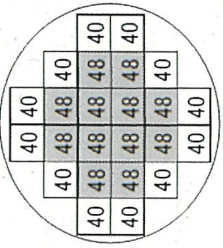
—MSF-24P 型については、使用済燃料とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、無視する方が熱伝導性が低下し保守側の評価となるため、モデル化しない。

第2.5.4-1表 1,2号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

	キャスク収納制限		燃料スベック		解析条件		
	中央部	外周部	中央部	外周部	中央部	外周部	
燃料タイプ	14×14型 (A/B型)		14×14型 (A/B型)		14×14型 (A型)		
燃料 集合体 1体の 仕様	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≦4.2	≦3.5	4.1	3.4		
	ウラン重量 (kg)						
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≦48	≦39	≦48	≦39	44	33
	SFPでの冷却期間 (年)	≧15	≧25			15	25
キャスク 1基あたり	平均燃焼度 (GWd/t)	≦45	≦33			45	33
収納物仕様							
	配置※1		—		—		

※：数値は燃焼度 (GWd/t) を示す

第 2.5.4-2 表 3 号炉用燃料 乾式キャスク収納条件の概要

収納物仕様	燃料タイプ	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック	解析条件	
		中央部	外周部		中央部	外周部
燃料 集合体 1 体の 仕様	燃料タイプ	17×17 型 (A/B 型)		17×17 型 (A/B 型)	17×17 型 (A 型)	
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2		4.1		
	ウラン重量 (kg)					
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤44	≤48	48	40
収納物仕様	SFP での冷却期間 (年)	A 型 : ≥15 ^{※1} B 型 : ≥17		-	15	
	最高燃焼度 ((GWd/t))	≤90		-	-	
	SFP での冷却期間 (年)	≥15		-	-	
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44		-	44	
キャスク 1 基あたり	配置 ^{※2}			-		

※1: 回収ウラン燃料については、15 年冷却した通常ウラン燃料と放射線量及び発熱量が同程度以下となるよう 20 年以上冷却した後、収納する。

※2: 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

乾式貯蔵建屋の流路を一次元でモデル化し、第 2.5.4-3 表のとおり、給気温度、乾式キャスクの発熱量等を評価条件として、乾式貯蔵建屋内の空気と外気との密度差により生じる駆動力 H_{th} と、乾式貯蔵建屋内を空気が流れることによって生じる圧力損失 ΔP がバランスする点を算出し、乾式キャスクの周囲温度を評価する。なお、乾式キャスクの周囲温度は、乾式貯蔵建屋内で最も温度が高くなる排気温度で評価する。(第 2.5.4-16 図及び第 2.5.4-17 図参照)

第 2.5.4-3 表 除熱評価の代表的な評価条件

項目	条件	備考
乾式キャスクの発熱量 (q)	16kW/基	
給気温度 (T_{in})	33℃	冷暖房設計用乾球温度・露点温度における TAC2.5%温度*の最高温度 (空気調和・衛生工学便覧 [第 14 版])
目標排気温度 (T_{out})	50℃以下	乾式キャスクの除熱機能に関する評価条件

* TAC2.5%温度とは、夏季 (6~9 月) のうち高温側 2.5% (約 73 時間) は、その温度を超過することを許容する温度である。

a) 駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) の計算

駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) は、以下の式で表される。

$$H_{th} = (\rho_{in} - \rho_{out}) \times g \times h$$

ここで、

H_{th} : 熱ドラフト (Pa)

ρ_{in} : 外気の密度 (1.112) (kg/m³)

ρ_{out} : 排気の密度 (kg/m³)

g : 重力加速度 (9.81) (m/s²)

h : ドラフト高さ (18.1) (m)

b) 圧力損失 ΔP の計算

圧力損失 ΔP は、以下の式で表される。

$$\Delta P = \sum_i \frac{\zeta_i \cdot W_i^2}{2\rho_i \cdot A_i^2}$$

$$W_i = \frac{q \cdot n}{C_p \cdot (T_{out} - T_{in})}$$

ここで、

ΔP : 圧力損失 (Pa)

- ζ_i : 圧力損失係数 (-)
- W_i : 通過風量 (質量流量) (kg/s)
- ρ_i : 通風路の空気密度 (kg/m³)
- A_i : 通風路の断面積 (m²)
- q : キャスク発熱量(16) (kW/基)
- n : 評価領域のキャスク基数 (基)
- C_p : 空気の比熱(1.007) (kJ/kg・℃)
- T_{out} : 排気温度 (℃)
- T_{in} : 給気温度(33) (℃)

貯蔵建屋の一次元除熱評価で得られた結果を第2.5.4-4表に示す。貯蔵建屋の排気温度 T_{out} は45℃となり、目標排気温度(50℃)以下となる。

第 2.5.4-4 表 貯蔵建屋除熱評価の結果

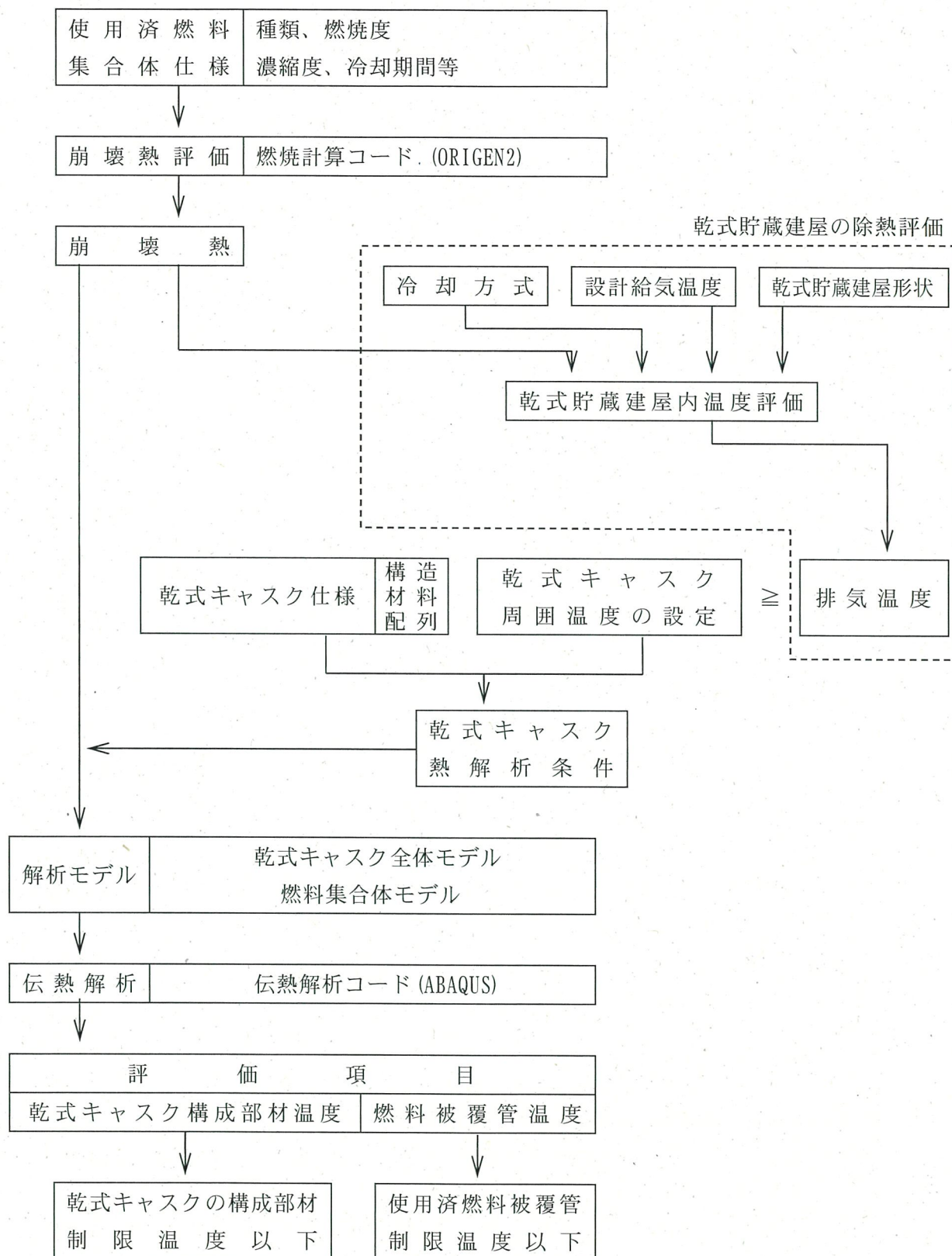
排気温度 T_{out} (℃)	熱ドラフト H_{th} (Pa)	圧力損失 ΔP (Pa)
約 45	約 7.1	約 7.1

なお、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。

- ・ 設定条件の保守性

- 乾式キャスクの発熱量は、MSF-24P 型及び MSF-32P 型の発熱量を包絡する発熱量を使用している。
- 乾式キャスクの発熱量は、すべて空気によって除熱されると考え、建屋コンクリート等を通して大気や地中に逃げる熱は考慮しない。また、通風路各部の圧力損失を計算する際に、圧力損失係数が高くなる様に設定する。

なお、太陽輻射熱により貯蔵建屋の外壁面温度に変動が生じるが、貯蔵建屋の壁は 1m 以上のコンクリートであり、太陽輻射熱により貯蔵建屋の壁内面 (貯蔵建屋内表面) の温度が上昇することはないため、貯蔵建屋内表面を断熱条件として、排気温度を評価することが保守的な評価となる。



第 2.5.4-2 図 乾式キャスクの除熱解析フロー