

## 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、乾式キャスクの閉じ込め機能については、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) 長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、一次蓋と二次蓋との間の圧力（以下「蓋間圧力」という。）を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。

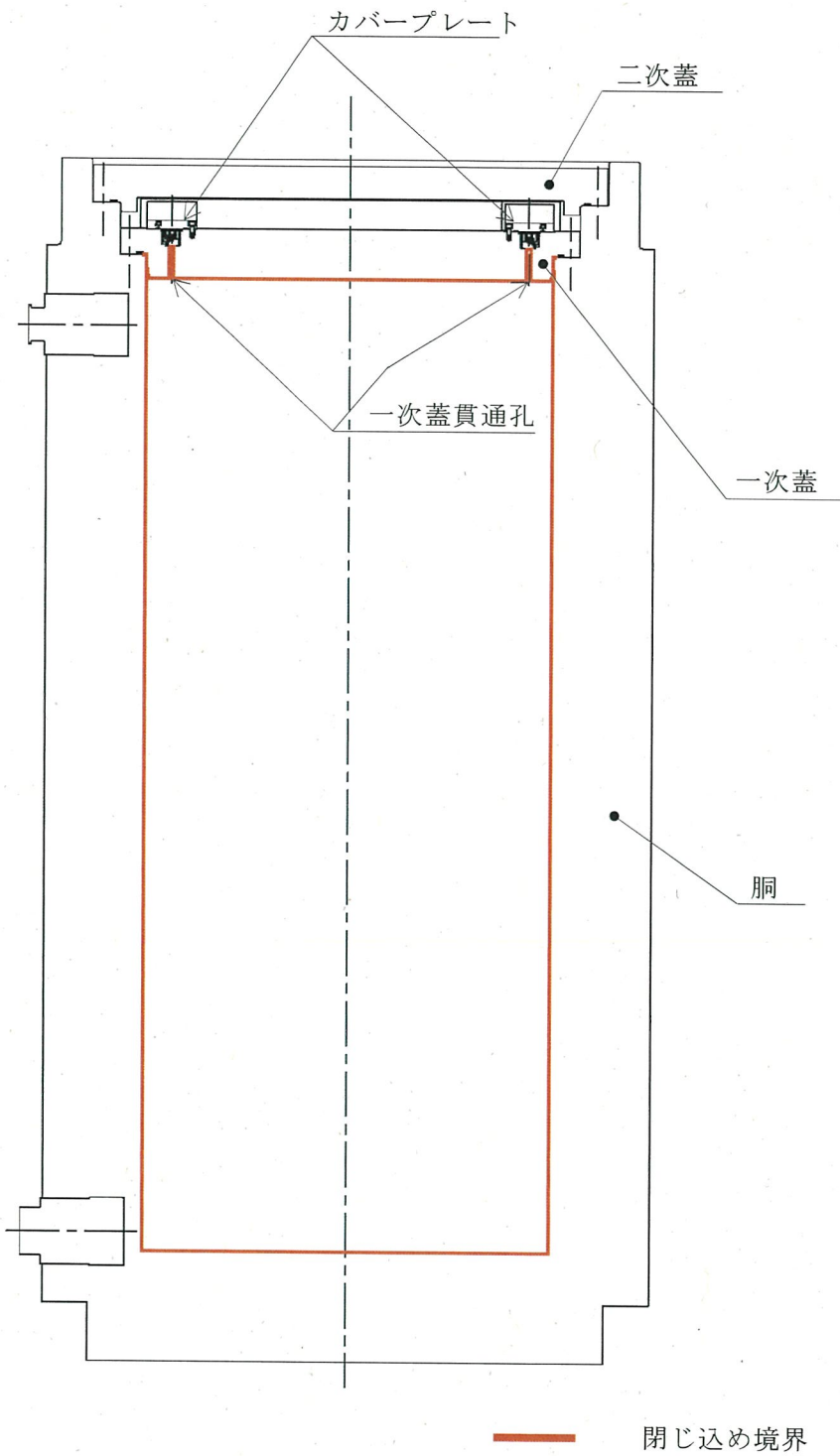
乾式キャスクの閉じ込め構造を第2.5.1-1図に、シール部詳細を第2.5.1-2図に示す。

乾式キャスクは、乾式キャスク本体及び一次蓋により使用済燃料を封入する空間を設計貯蔵期間（60年）を通じて負圧に維持する。乾式キャスクは、一次蓋と二次蓋の蓋間をあらかじめ正圧とし圧力障壁を形成することにより、放射性物質を乾式キャスク内部に閉じ込める。蓋及び蓋貫通孔のシール部には、長期にわたって閉じ込め機能を維持する観点から金属ガスケットを使用し、金属ガスケットは、設計貯蔵期間中に乾式キャスク内部を負圧に維持できる漏えい率（以下、「基準漏えい率」という）を満足するものを使用する。

一次蓋と二次蓋との蓋間圧力を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できる設計とする。

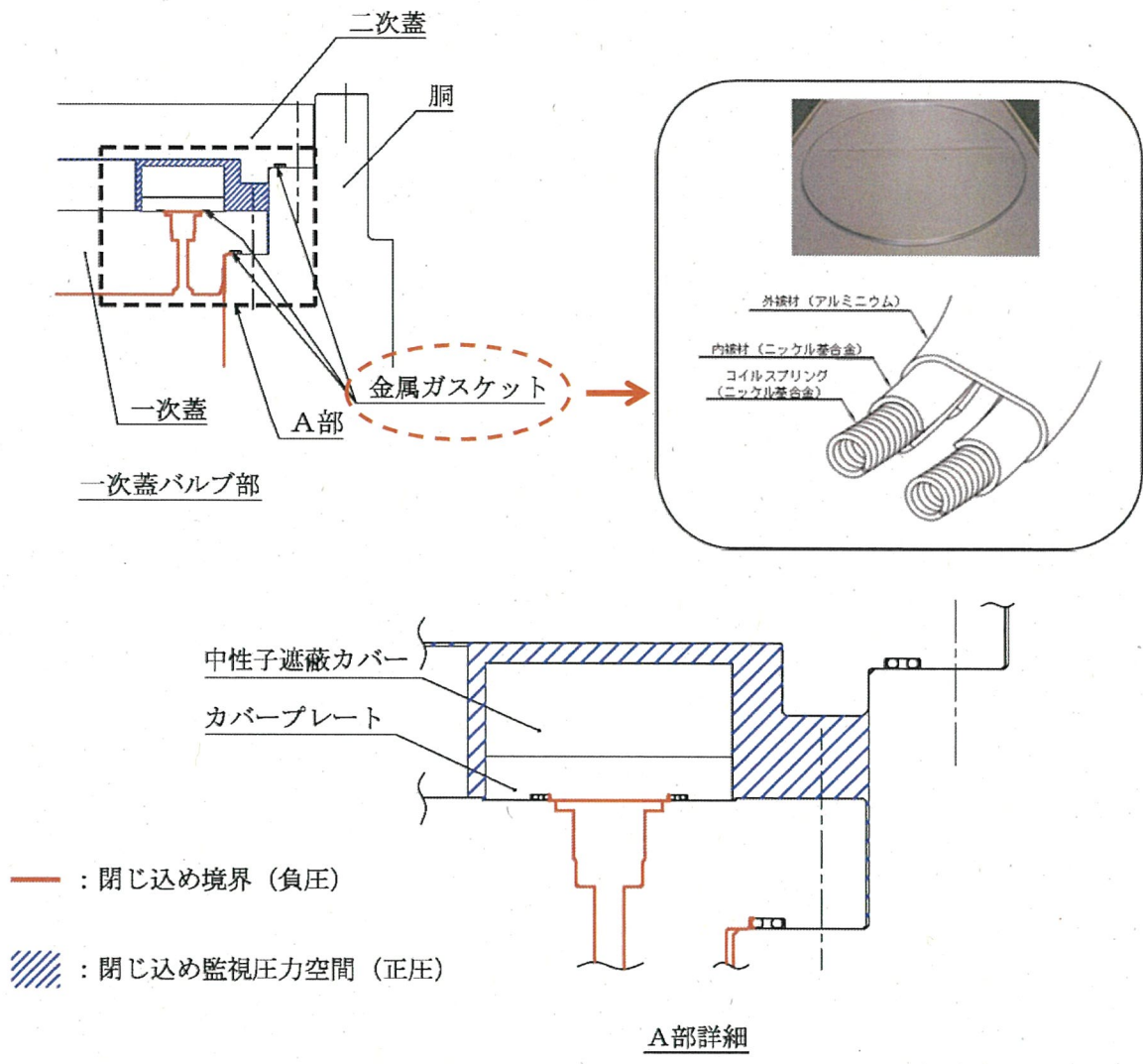
乾式貯蔵施設内では、乾式キャスクの閉じ込め境界を有する一次蓋は開放せず、内包する放射性物質の閉じ込めを乾式キャスクのみで担保する設計とする。

使用済燃料を限定された区域に閉じ込めるため、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料を封入する空間を負圧（ $9.7 \times 10^4$  Pa）に維持する設計とする。



第 2.5.1-1 図 乾式カスクの閉じ込め構造

16 条-別添 1 (閉じ込め)-5



第 2.5.1-2 図 乾式キャスクのシール部詳細

[確認内容]

- (2) 兼用キャスクの内部の放射性物質が外部へ漏えいしないよう、設計貯蔵期間中、兼用キャスク内部の負圧を維持できること。
- (3) 密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間中、兼用キャスク内部の負圧を維持できるものであること。また、使用する金属ガスケット等のシールの性能は、当該漏えい率以下であること。
- (4) 閉じ込め機能評価では、密封境界部の漏えい率が、設計貯蔵期間、内部初期圧力及び自由空間容積（兼用キャスク内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積をいう。）、初期の蓋間圧力及び蓋間の容積、温度等を条件として、適切な評価式を用いて求められていること。

乾式キャスク漏えい率の考え方を第 2.5.1-3 図、閉じ込め評価フローを第 2.5.1-4 図、閉じ込め評価に係る構造図を第 2.5.1-5 図に示す。

閉じ込め評価では、基準漏えい率を求め、基準漏えい率よりも漏えい率の小さい金属ガスケットを使用することを説明する。

基準漏えい率は、設計貯蔵期間中に乾式キャスク内部を負圧に維持できる漏えい率である。また、基準漏えい率は、蓋間圧力と乾式キャスク内部圧力の圧力差のもとで、シール部を通して乾式キャスク内部へ流入する気体の漏えい量を積分することによって、乾式キャスク内部圧力が大気圧となるまでの圧力変化を求めた際の漏えい率として計算する。

なお、基準漏えい率を求めるにあたっては、蓋間圧力は保守的に初期圧力で一定とし、蓋間空間のガスは乾式キャスク内部側にのみ漏えいするものとして漏えい計算を行う。また、大気圧は、気象変化による圧力変動を保守的に考慮した値として  $9.7 \times 10^4$  Pa とする。乾式キャスク本体内部空間の圧力の算定にあたっては、使用済燃料の破損率として、米国の使用済燃料の乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率（約 0.01 %）、及び日本の軽水炉における漏えい燃料発生率（約 0.01 %以下）を考慮し、保守的な値として 0.1 %<sup>1)</sup>を想定する。

a. 基準漏えい率の計算

- a) 乾式キャスク本体内部圧力の変化は、ボイル・シャルルの法則に基づき、以下のように求める。

$$\frac{dP_d}{dt} = \frac{Q}{V_d} \times \frac{T_d}{T} \dots \dots \dots (3.1)$$

ここで、

$P_d$  : 乾式キャスク本体内部圧力 (Pa)

$T_d$  : 乾式キャスク本体内部温度 (K)



- Q : 乾式キャスク本体内部圧力  $P_d$  のときのシール部の漏えい率  
( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ )
- T : 漏えい気体の温度 (K)
- $V_d$  : 乾式キャスク本体内部の空間容積 ( $\text{m}^3$ )  
(乾式キャスク内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積)
- t : 時間 (s)

また、ここで漏えい率 Q は、以下のクヌッセンの式<sup>2)</sup>で求められる。

$$\left. \begin{aligned} Q &= L \cdot P_a \\ L &= (F_c + F_m) \cdot (P_u - P_d) \\ F_c &= \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu} \\ F_m &= \frac{\sqrt{2 \pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{\frac{T}{M}}}{a \cdot P_a} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3.2)$$

ここで、

- Q : 漏えい率 ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ )
- L : 圧力  $P_a$  における体積漏えい率 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $F_c$  : 連続流のコンダクタンス係数 ( $\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ )
- $F_m$  : 自由分子流のコンダクタンス係数 ( $\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ )
- $P_u$  : 上流側 (蓋間) の圧力 (Pa)
- $P_d$  : 下流側 (乾式キャスク本体内部) の圧力 (Pa)
- $D_0$  : 相当漏えい孔径 (m)
- a : 漏えい孔長 (m)
- $P_a$  : 流れの平均圧力 (Pa)

$$P_a = \frac{P_u + P_d}{2}$$

- $\mu$  : 漏えい気体の粘性係数 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )
- T : 漏えい気体の温度 (K)
- M : 漏えい気体の分子量 (kg/mol)
- $R_0$  : ガス定数 ( $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ )

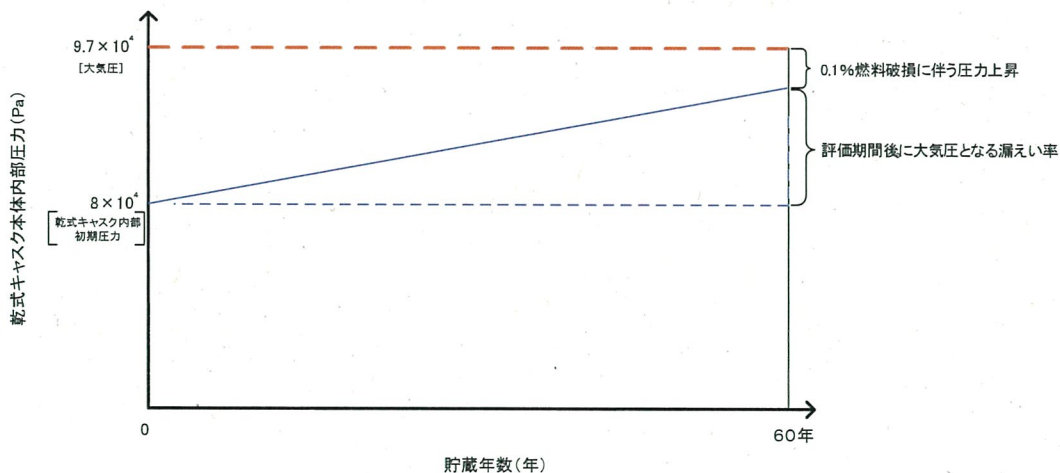
- b) 漏えい孔径  $D_0$  を設定し (3.2) の式により漏えい率 Q を求める。Q を (3.1) の式に入力し、時間 t で積分することにより、設計貯蔵期間経過後の乾式キ

ヤスク本体内部圧力  $P_d$  を求める。

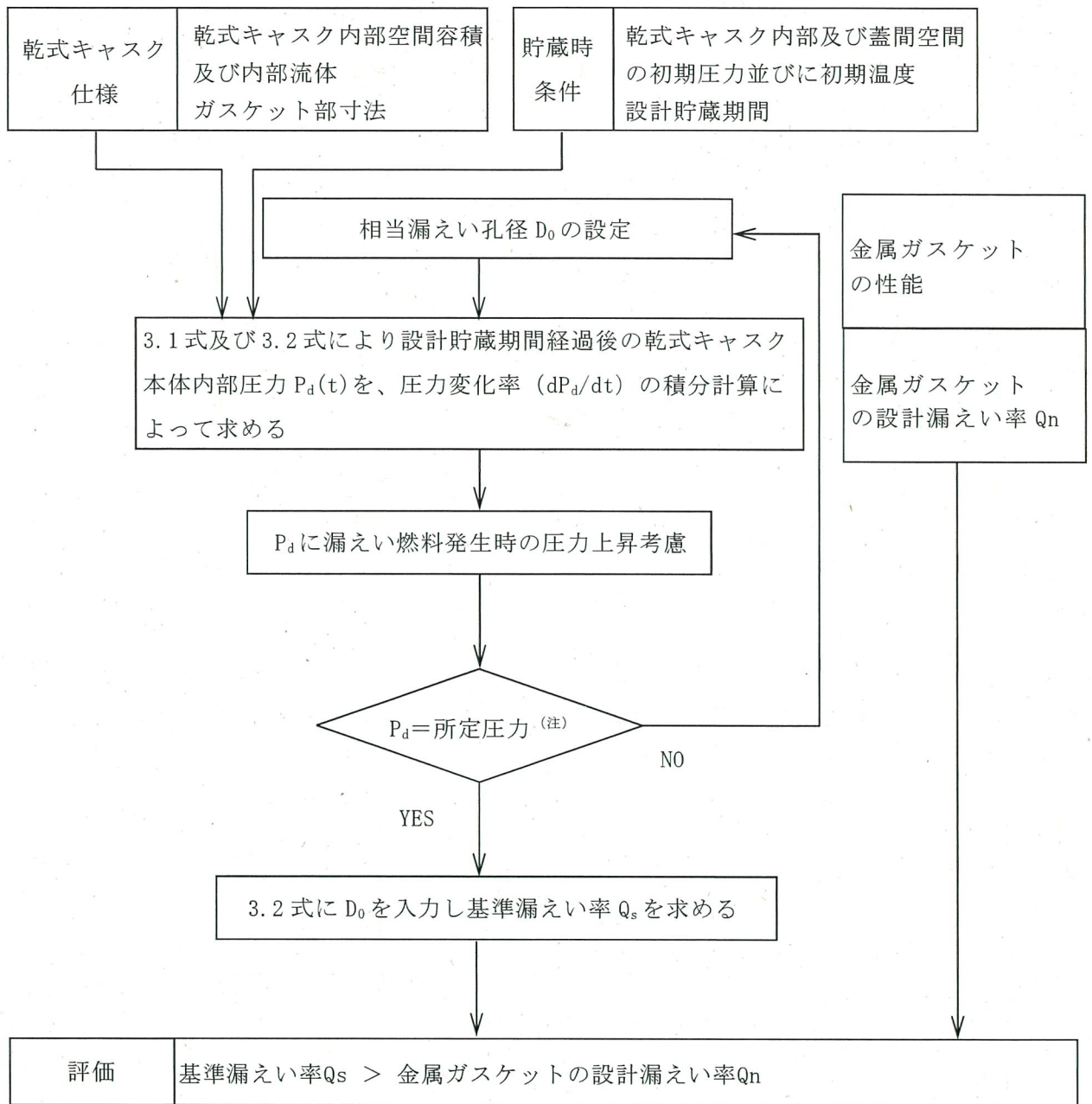
- c) b)により求めた  $P_d$  が正圧の場合はより小さな漏えい孔径  $D_0$  を、負圧の場合はより大きい漏えい孔径  $D_0$  を設定して、a)～b)を繰り返して、 $P_d$  が大気圧 ( $9.7 \times 10^4$  Pa) となる漏えい孔径  $D_0$  を求める。
- d) 判定基準である金属ガスケットの漏えい率と比較するため、c)により求めた  $D_0$  を固定し、(3.2) の式に金属ガスケットの漏えい率を求めた試験条件 ( $P_u = 1.01 \times 10^5$  Pa、 $P_d = 0$  Pa、 $T = 298.15$  K) を入力し、基準漏えい率  $Q_s$  を求める。

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。

- ・設計貯蔵期間中において使用済燃料の崩壊熱は低下していくが、使用済燃料の崩壊熱低下による乾式キャスク本体内部温度の温度低下を考慮せず、乾式キャスク本体内部温度は初期温度で一定とする。
- ・設計貯蔵期間中において上流側（蓋間）の圧力は漏えいにより低下していくが、漏えいによる圧力低下を考慮せず、初期圧力で一定とする。

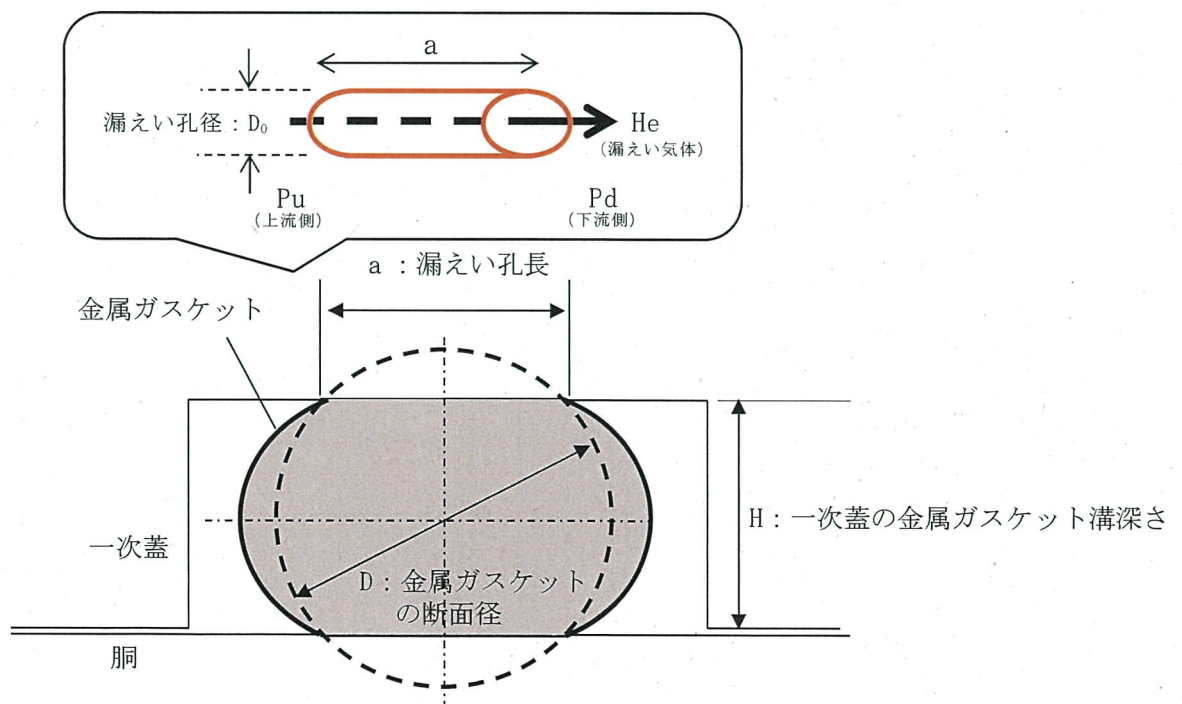
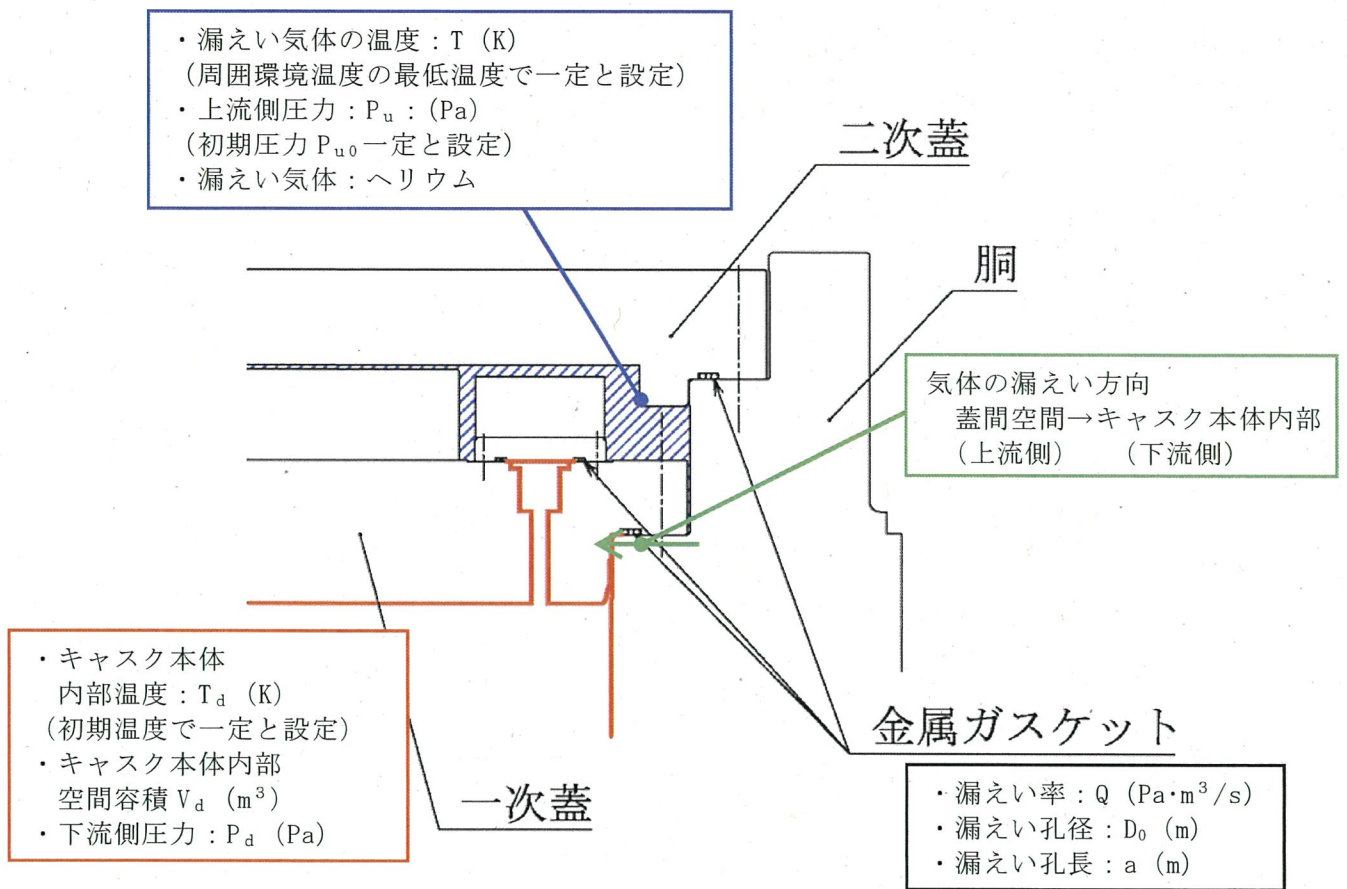


第 2.5.1-3 図 乾式キャスク漏えい率の考え方



(注)所定圧力は、大気圧の変動を考慮し、 $9.7 \times 10^4$  Pa とする。

第 2.5.1-4 図 基準漏えい率の計算フロー図



第 2.5.1-5 図 閉じ込め評価に係る構造図



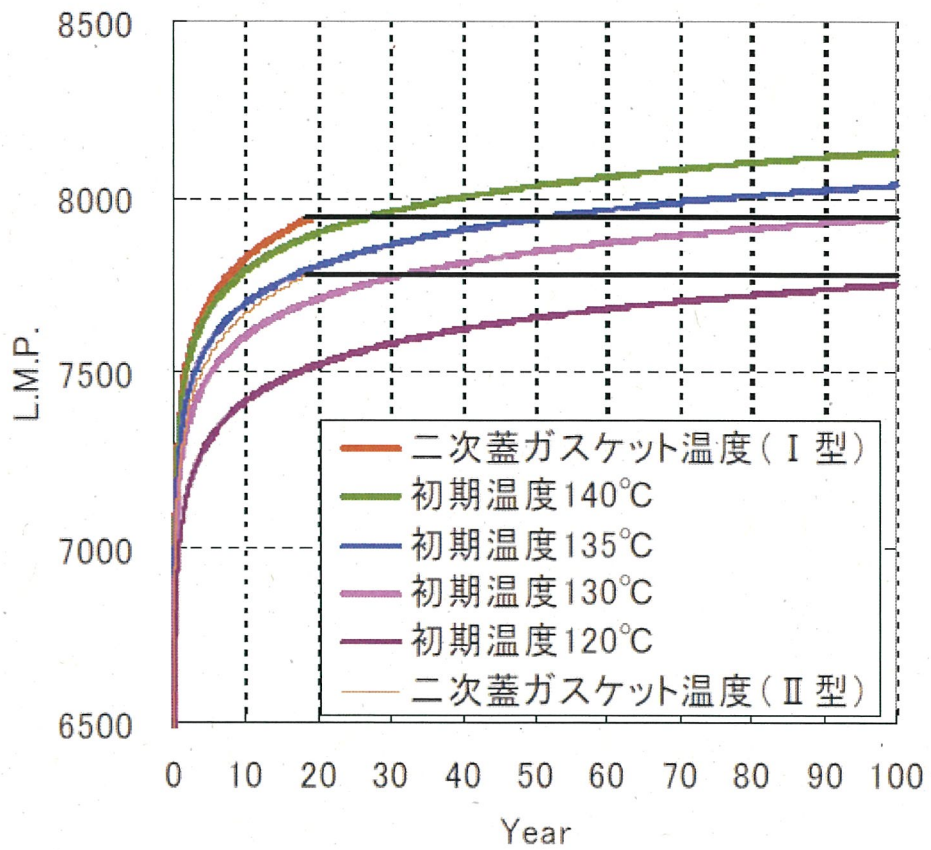
閉じ込め設計の評価条件及び評価結果を第 2.5.1-1 表に示す。使用する金属ガスケットの漏えい率が基準漏えい率より小さいことを確認した。

第 2.5.1-1 表 閉じ込め評価条件及び評価結果

	MSF-24P 型	MSF-32P 型
$D_0$ : 漏えい孔径 (m)	$5.51 \times 10^{-6}$	$5.57 \times 10^{-6}$
$a$ : 漏えい孔長 (m)	$4.56 \times 10^{-3}$	
$\mu$ : 漏えい気体 (ヘリウム) の粘性係数 (Pa·s)	$1.985 \times 10^{-5}$ (25°C)	
$R_0$ : ガス定数 (J/(mol·K))	8.3144598	
$T$ : 漏えい気体の温度 (K)	298.15	
$M$ : 漏えい気体 (ヘリウム) の分子量 (kg/mol)	0.004002602	
$P_a$ : 流れの平均圧力 (Pa)	$5.05 \times 10^4$	
$P_{u0}$ : 上流側の初期圧力 (Pa)	$1.01 \times 10^5$ (大気圧)	
$P_{d0}$ : 下流側の初期圧力 (Pa)	0 (真空)	
$Q_s$ : 基準漏えい率 (Pa·m <sup>3</sup> /s)	$2.49 \times 10^{-6}$	$2.58 \times 10^{-6}$
金属ガスケットの漏えい率 <sup>3), 4)</sup>	$1 \times 10^{-8}$ Pa·m <sup>3</sup> /s 以下	

平成 21 年度の (一財) 電力中央研究所研究において、金属ガスケットの長期密封機能について試験を実施し、試験と解析で得られた乾式キャスクの温度と時間をラーソン・ミラー・パラメータ (以下「LMP」という。) により長期密封性能について検討を行っている<sup>4)</sup>。第 2.5.1-6 図は当該試験結果の二次蓋ガスケット温度から得られた LMP を示しており、LMP が 7942 以下であれば密封性は健全であることが示されている。また、第 2.5.1-7 図には、LMP = 7942 となる場合の、蓋初期温度と評価年数の関係が示されており、評価年数 (貯蔵期間) を 60 年とすると、その期間健全性を担保するためには、初期温度を 134°C 以下にすればよいことが示されている<sup>4)</sup>。

MSF-24P 型及び MSF-32P 型の除熱評価の結果から、金属ガスケット部の温度はそれぞれ約 110°C であるため、金属ガスケットは設計貯蔵期間を通じて初期の漏えい率を維持できると判断される。

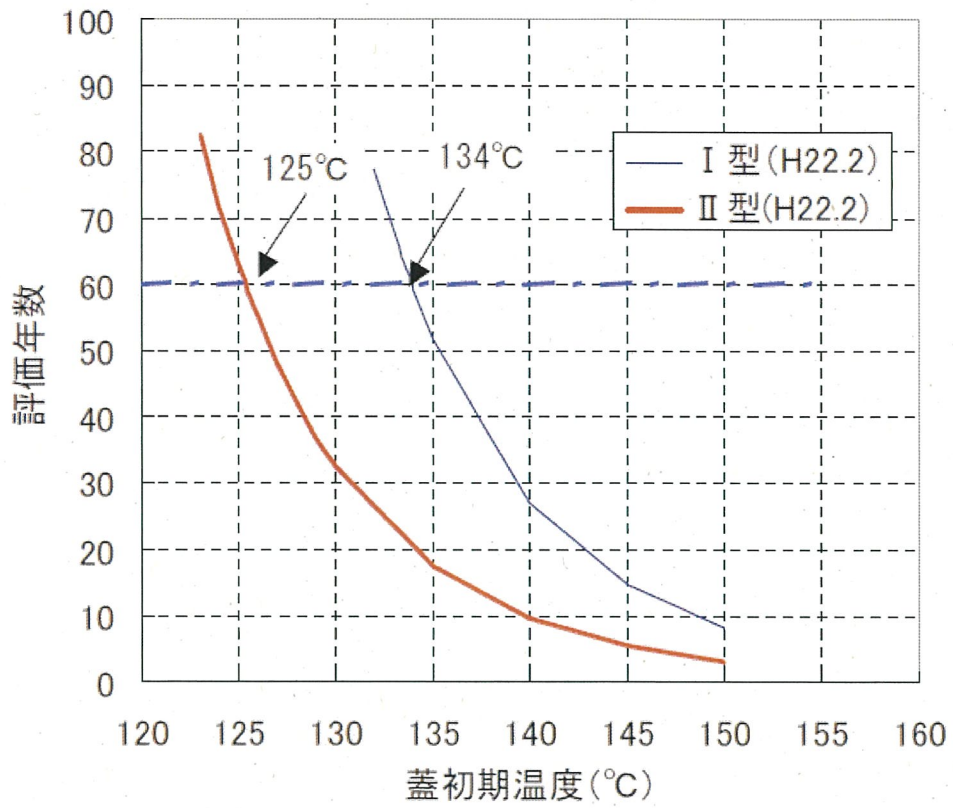


$$LMP = T \cdot (14 + \log t)$$

T : 温度 (K)

t : 時間 (h)

第 2.5.1-6 図 蓋部温度をもとに計算した LMP <sup>4)</sup>



第 2.5.1-7 図 蓋初期温度と評価年数の関係 <sup>4)</sup>

〔確認内容〕

(5) 兼用キャスクの衝突評価

1) 兼用キャスクを床等に固定せず設置するとき

① 転倒モードの設定

兼用キャスクを縦置き又は横置きにした貯蔵状態で第6項地震力（設置許可基準規則第4条第6項に規定する地震力をいう。以下同じ。）を入力し、兼用キャスクの転倒、兼用キャスク同士の衝突及び兼用キャスクと周辺施設との衝突のうち、設計上想定するものを設定すること。

② 兼用キャスクの衝突評価

①で抽出した転倒等による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。この際「4.3.1 地震に対する設計方針」を参考にしていること。

2) 貯蔵建屋等を設置するとき

① 貯蔵建屋等の損壊モードの設定

損壊モードに応じた衝突物又は落下物を抽出し、そのうち兼用キャスクの閉じ込め機能に及ぼす影響が最大であるものを設定すること。

② 兼用キャスクの衝突評価

①で抽出した衝突物又は落下物による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。

3) 使用済燃料の再取出性の評価

a. 兼用キャスクに収納される使用済燃料を取り出すために、一次蓋及び二次蓋が開放できること。

b. 使用済燃料の燃料ペレットが燃料被覆管から脱落せず、かつ、使用済燃料集合体の過度な変形を生じないこと。

乾式キャスクは床等に固定して設置する設計とする。

貯蔵建屋等（貯蔵建屋（兼用キャスク、兼用キャスク取扱設備等を収納する建物）又は遮蔽壁）は、地震（4条）、津波（5条）、外部からの衝撃（6条）による損傷の防止が図られ、損壊しない設計とする。詳細は、4条、5条、6条まとめ資料で説明する。

また、地盤（3条）及び周辺斜面（4条）も基準地震動に対して、安定性が確保されることから、貯蔵建屋等は損壊しない。なお、地盤及び周辺斜面の安定性に関しては地盤審査において確認されている。



〔確認内容〕

(6) 閉じ込め機能の異常に対し、適切な期間内で使用済燃料の取出しや詰替え及び使用済燃料貯蔵槽への移送を行うこと、これらの実施に係る体制を適切に整備すること等、閉じ込め機能の修復性に関して考慮がなされていること。

閉じ込め機能の異常に対し、適切な期間内で使用済燃料の取出しや詰替え及び使用済燃料ピットへの移送を行うこと、これらの実施に係る体制を適切に整備すること等、閉じ込め機能の修復性に関して考慮する設計とする。

なお、貯蔵中の乾式キャスク閉じ込め機能異常時は、体制を整備の上、第 2.5.1-8 図のフローにより対応する。

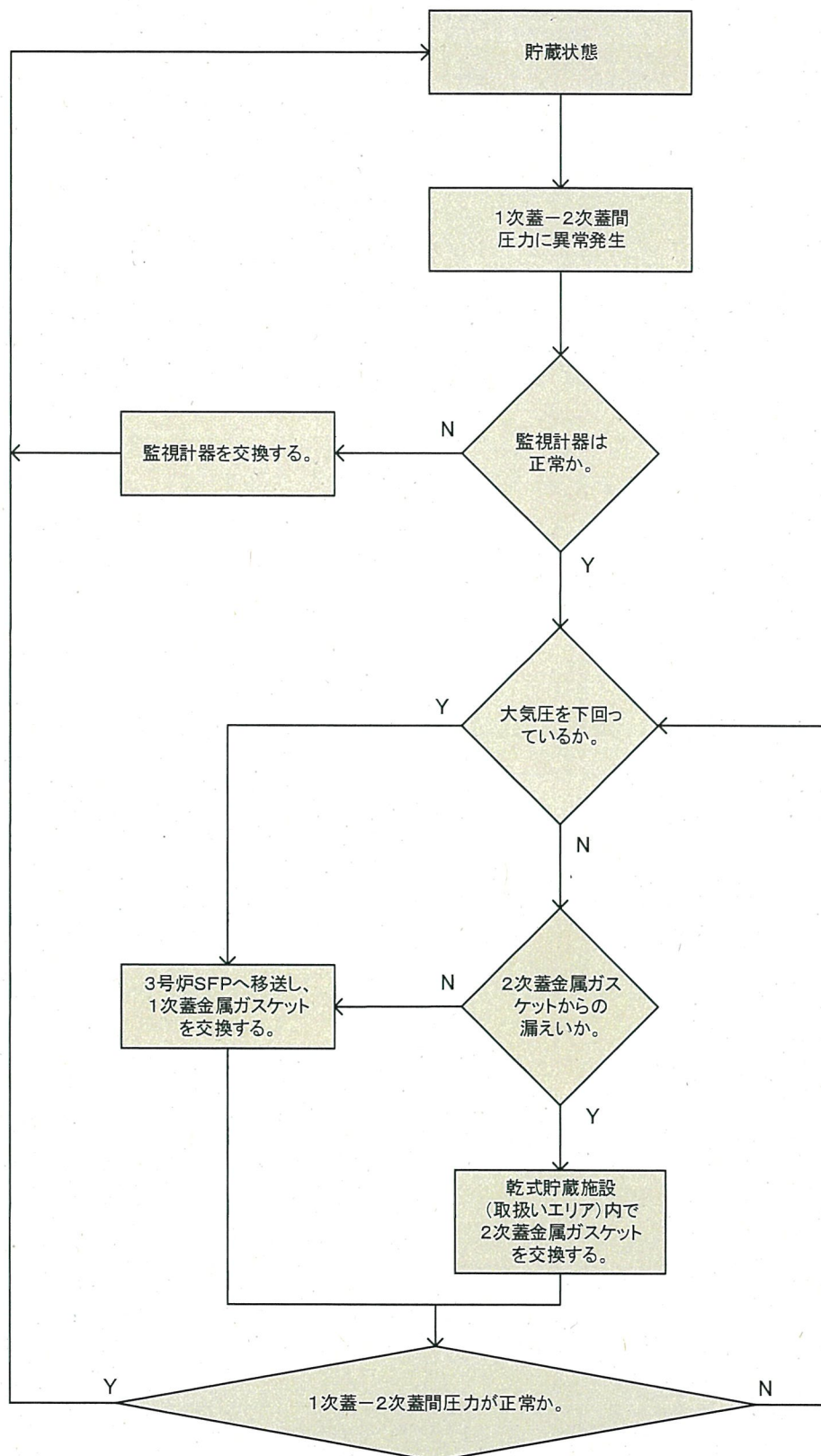
蓋間圧力が管理値を下回っている場合、まず、監視計器の確認を行い、監視計器異常の場合には監視計器を交換し、貯蔵を再開する。

監視計器異常ではない場合、一次蓋金属ガスケットの漏えいの場合は、乾式キャスク内部を負圧管理しているため、蓋間圧力は負圧まで低下する可能性がある。二次蓋金属ガスケットの漏えいの場合は、蓋間のヘリウムガスが大気へ放出され、大気圧までしか低下しない。このため、蓋間圧力が大気圧を下回っているかの確認を行うことにより、一次蓋金属ガスケット又は二次蓋金属ガスケットの漏えいであるかの判断を行う。

蓋間圧力が大気圧を下回っていない場合は、二次蓋金属ガスケットの漏えい確認を実施し、二次蓋金属ガスケットからの漏えいが認められた場合は、取扱エリアにて二次蓋を開放して二次蓋金属ガスケットを交換し、蓋間圧力に異常がないことを確認したうえで貯蔵を再開する。このとき、仮に一次蓋金属ガスケットが漏えいしていた場合でも、乾式キャスク内部を負圧管理していることから、乾式キャスク内部へインリークするため、放射性物質が外部へ漏えいする恐れはない。二次蓋金属ガスケットからの漏えいが認められない場合は、乾式キャスクを 3 号炉使用済燃料ピットエリアのキャスクローディングピットへ移送し、一次蓋を開放して一次蓋金属ガスケットを交換し、蓋間圧力に異常がないことを確認したうえで、乾式貯蔵建屋へ移送し、貯蔵を再開する。

蓋間圧力が大気圧を下回っている場合は、乾式キャスクを 3 号炉使用済燃料ピットエリアのキャスクローディングピットへ移送し、一次蓋を開放して一次蓋金属ガスケットを交換し、蓋間圧力に異常がないことを確認したうえで、乾式貯蔵建屋へ移送し、貯蔵を再開する。

なお、3 号炉使用済燃料ピットにおける乾式キャスクの取扱い時には、既存の設備を使用して乾式キャスクを取扱う。



第 2. 5. 1-8 図 乾式キャスク閉じ込め機能異常時の対応フロー

### 3. 参考文献

- 1) (一社)日本原子力学会, 「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010」, (2014).
- 2) International Organization for Standardization, “Safe Transport of Radioactive Materials - Leakage Testing on Packages”, ISO 12807, (1996).
- 3) “METAL SEALS TECHNICAL CATALOG”, Technetics Group. , (2017).
- 4) (一財)電力中央研究所, 平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書 , (2010) .

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臨界防止機能について)



<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

乾式キャスクの臨界防止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2項一号ハ

- ・燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。

#### ②設置許可基準規則解釈別記4第16条1項

- ・第16条第2項第1号ハに規定する「臨界に達するおそれがない」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3条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3条第1項四号

臨界評価において、以下の事項を含め、未臨界性に有意な影響を与える因子が考慮されていること。

#### ④ 燃焼度クレジット

燃焼度クレジット（臨界評価において、使用済燃料の燃焼に伴う反応度低下を考慮することをいう。）を採用する場合には、以下の事項を含め、適切な安全裕度を有する設計であることが確認されていること。

a) 燃料集合体の燃焼度及び同位体組成並びにそれらの分布の計算精度

b) 貯蔵する燃料集合体の燃焼度等の管理

#### ・貯蔵事業許可基準規則解釈第3条第1項五号

使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、臨界評価で考慮した因子について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 2.1 臨界防止機能」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、使用済燃料が臨界に達するおそれがないこと。
- (2) 兼用キャスクの臨界防止機能をバスケットで担保している場合は、設計上想定される状態において、バスケットが臨界防止上有意な変形を起こさないこと。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ臨界防止設計が妥当であること。

1) 配置・形状

兼用キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において、適切な安全裕度を考慮するとともに、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が維持されること。

兼用キャスクが滑動する可能性がある場合は、滑動等による兼用キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮すること。

2) 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下について適切な安全裕度を考慮すること。

- a. 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）
- b. 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

3) 減速材（水）の影響

使用済燃料を兼用キャスクに収納する際、当該使用済燃料が冠水することを、設計上適切に考慮すること。

4) 検証され適用性が確認された臨界解析コード及びデータライブラリを使用すること。

5) 設計上、バスケットの塑性変形が想定される場合は、塑性変形したバスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。

』

## 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、乾式キャスクの臨界防止機能については、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) 配置・形状

兼用キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において、適切な安全裕度を考慮するとともに、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が維持されること。

兼用キャスクが滑動する可能性がある場合は、滑動等による兼用キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮すること。

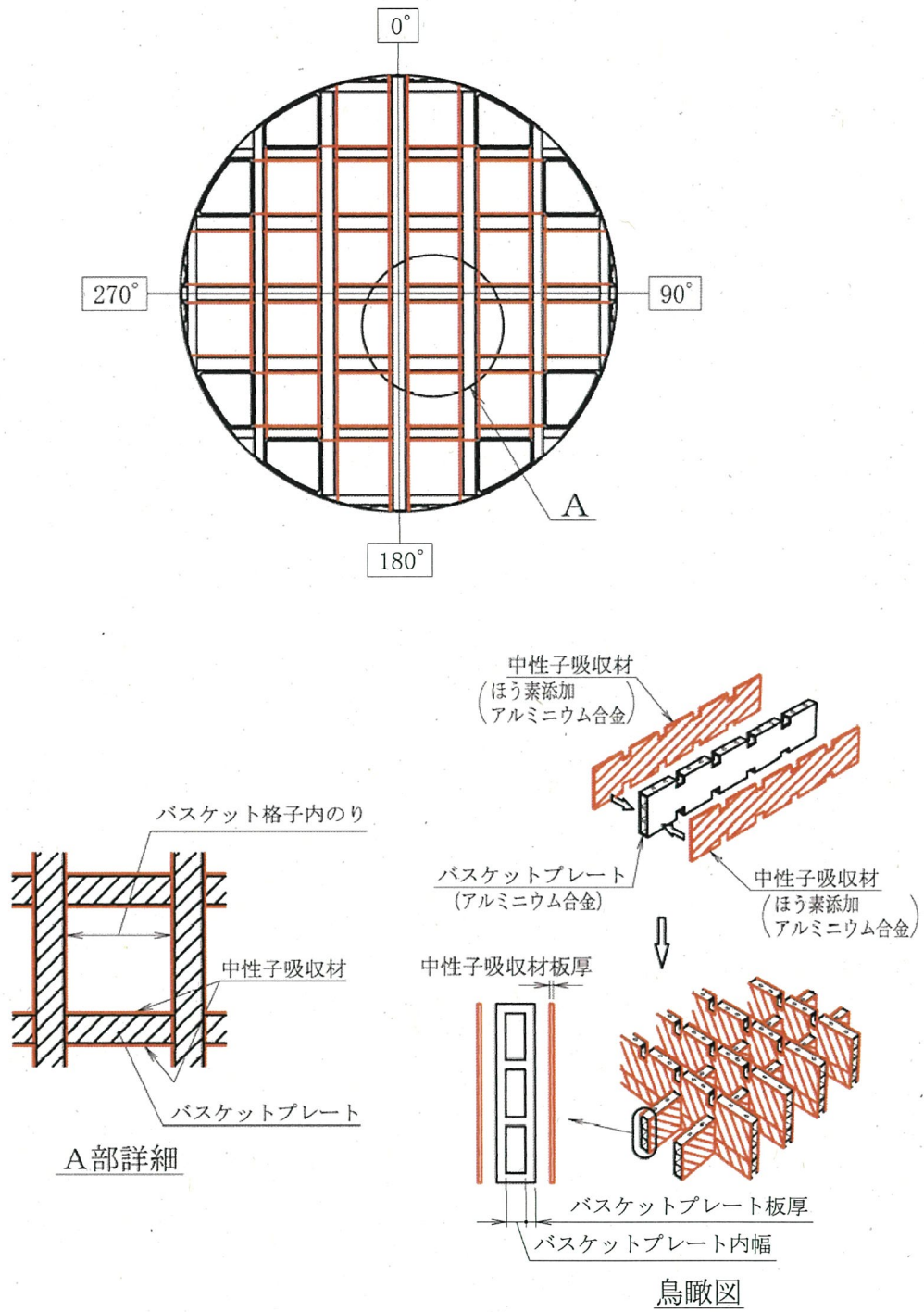
乾式キャスクの乾式貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及び乾式キャスクに使用済燃料を収納する際の冠水状態において、技術的に想定されるいかなる場合でも、臨界を防止する設計とする。

乾式キャスクのバスケットは、断面形状が中空状であるアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成された格子構造であり、個々の使用済燃料を乾式キャスク本体内部の所定の位置に収納する。また、バスケットプレートと中性子吸収材を併せて配置することで臨界を防止する構造とする。（第2.5.2-1図, 第2.5.2-2図参照）

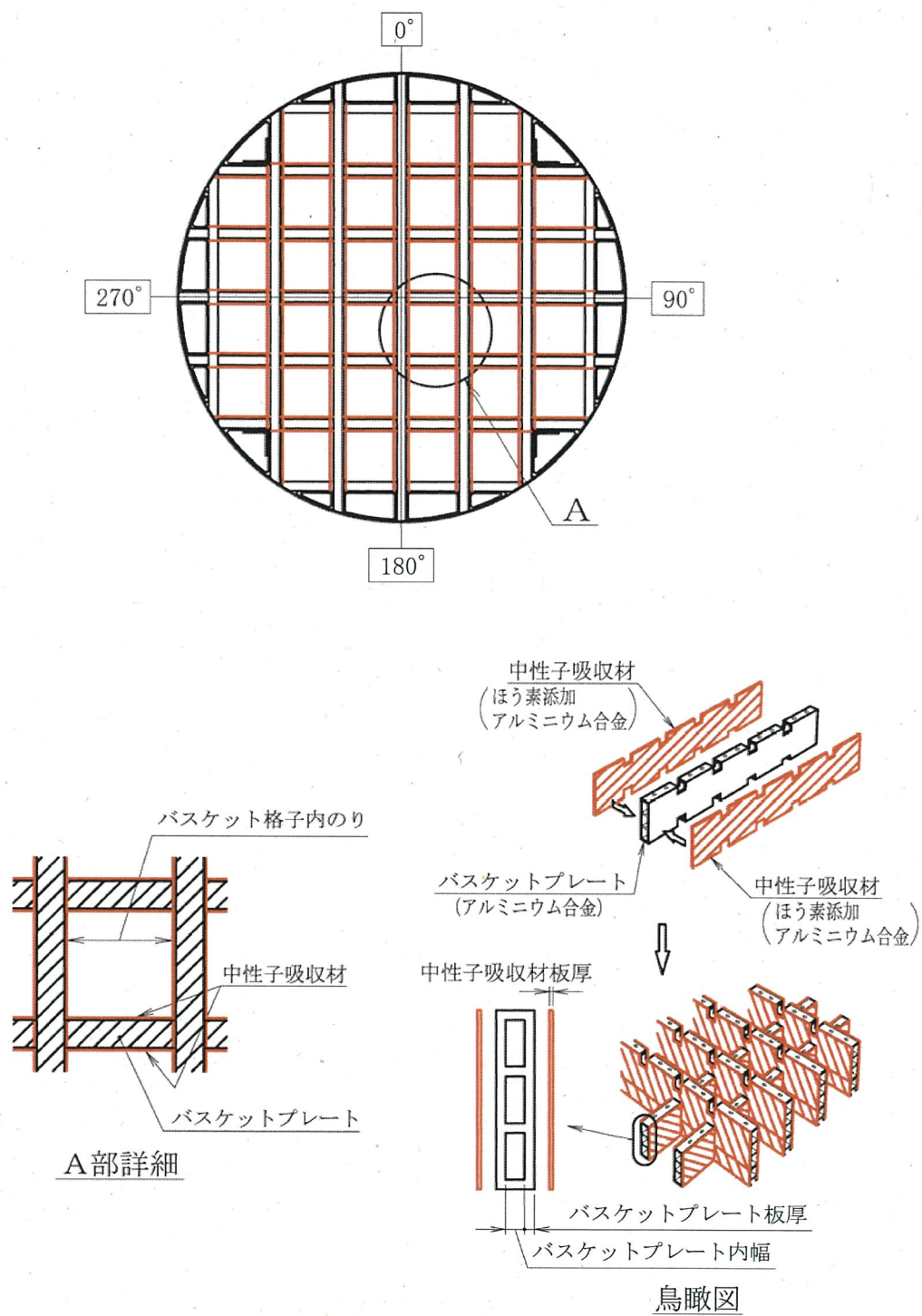
また、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性を維持する設計とする。詳細は本文2.6項の「使用済燃料乾式貯蔵容器長期健全性について」及び2.7項の「使用済燃料乾式貯蔵容器を通常に取り扱う場合の設計上想定される事象について」に示す。

なお、後述のとおり、臨界評価においては、乾式キャスクが無限に配列した体系（完全反射）をモデル化しているため、建屋内の乾式キャスクの配置制限は必要ないが、乾式キャスクは床等に固定するため、滑動等しない設計としており、乾式キャスクの配置の変化はない。





第 2.5.2-1 図 MSF-24P 型のバスケット構造図



第 2.5.2-2 図 MSF-32P 型のバスケット構造図

[確認内容]

2) 中性子吸収材の効果

中性子吸収材の効果に関して、以下について適切な安全裕度を考慮すること。

- a. 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）
- b. 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

3) 減速材（水）の影響

使用済燃料を兼用キャスクに収納する際、当該使用済燃料が冠水することを、設計上適切に考慮すること。

4) 検証され適用性が確認された臨界解析コード及びデータライブラリを使用すること。

解析条件は第 2.5.2-1 表及び第 2.5.2-2 表のとおりとする。

乾式キャスクの臨界解析フローを第 2.5.2-3 図に示す。

臨界解析では、乾式キャスク及び燃料集合体の実形状を三次元でモデル化し（第 2.5.2-4 図～第 2.5.2-15 図参照）、解析コードとして SCALE コードシステムを用いる。

なお、乾燥状態での臨界解析に加え、乾式キャスク内は使用済燃料を収納する際の冠水状態を考慮し、水密度範囲  $0.0 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$  で解析した結果（第 2.5.2-16, 17 図）、実効増倍率は水密度  $1.0 \text{ g/cm}^3$  で最も大きくなる。

また、本文 2.3 項の使用済燃料乾式貯蔵容器の収納条件に記載しているとおり、臨界評価では、収納する使用済燃料は濃縮度 4.1wt% の燃料の濃縮度上限値を用いて臨界評価を実施しており、燃焼度クレジットは採用しない。

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

— 乾式キャスクに収納する使用済燃料のウラン濃縮度は照射により減損しているが、燃焼度  $0\text{Gwd/t}$  の減損していない新燃料のウラン濃縮度  $4.1 \pm \square \text{ wt\%}$  及び  $3.4 \pm \square \text{ wt\%}$  を保守的に  $\square \text{ wt\%}$  及び  $\square \text{ wt\%}$  とする。

— 収納する使用済燃料には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれる場合があるが、中性子吸収効果のあるガドリニウムの存在を無視し、すべて通常のウラン新燃料とする。

— 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、中性子吸収効果のあるバーナブルポイズン集合体を無視する。

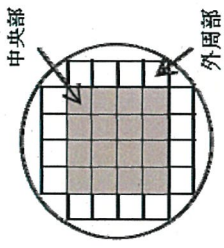
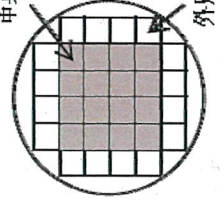
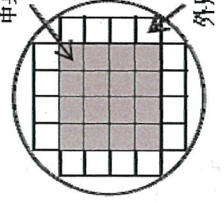
・ モデル化の保守性

— 乾式キャスクが無限に配列した体系（完全反射）とする。これにより、建屋内の乾式キャスクの配置制限は必要なく、乾式キャスク相互の中性子干渉も包絡する評価となる。

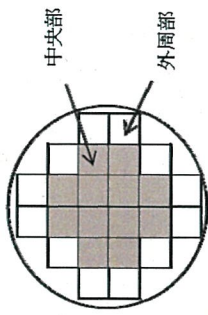
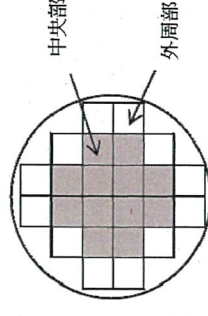
- －バスケット格子内で使用済燃料が偏ることにより実効増倍率が変化するため、バスケット内の使用済燃料の配置は実効増倍率が最も大きくなる配置とする。  
具体的には、MSF-24P 型は、乾燥状態では、外周部及び中心部の使用済燃料ともに、中心偏向配置とし、冠水状態で、外周部の使用済燃料は外周、中央部の使用済燃料は中心偏向配置とする。MSF-32P 型は、乾燥状態及び冠水状態いずれの場合においても外周部及び中心部の使用済燃料ともに、中心偏向配置とする。
- －バスケットプレート及び中性子吸収材は第 2.5.2-3 表に示す通り、製作公差を考慮し、実効増倍率が最も大きくなる寸法とする。
- －中性子吸収材中のほう素の均質性は製造管理により担保し、ほう素添加量は仕様上  
の下限値とする。
- －中性子遮蔽材は無視する。
- －バスケットプレート及び中性子吸収材は、中性子の吸収が小さくなるように、燃料有効部に相当する部分のみモデル化することとし、それ以外の部分は水または真空中に置換する。



第 2.5.2-1 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
燃料タイプ	14×14 型 (A/B 型)		14×14 型 (A/B 型)		14×14 型 (A 型)	
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	0	0
SFP での冷却期間 (年)	≥ 15	≥ 25	—	—	—	—
平均燃焼度 (GWd/t)	≤ 45	≤ 33	—	—	0	
燃料集合体 1 体の 仕様						
キャスク 1 基あたり						
収納物仕様						
配置						

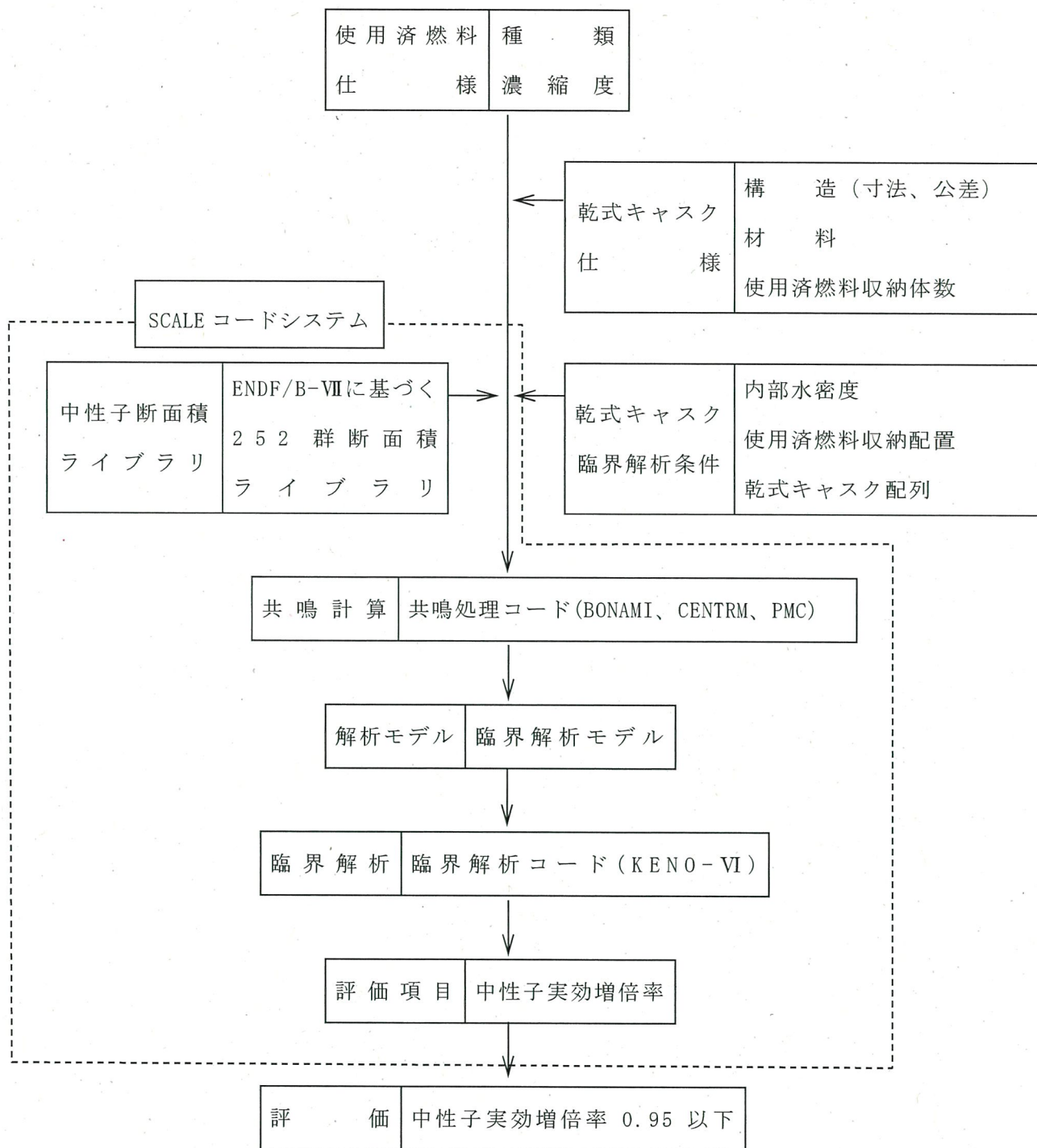
第 2.5.2-2 表 3号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

燃料 集合体 1体の 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	0	
SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥15 <sup>*1</sup> B型: ≥17		—	—	
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		—	0	
配置			—		

※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能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。

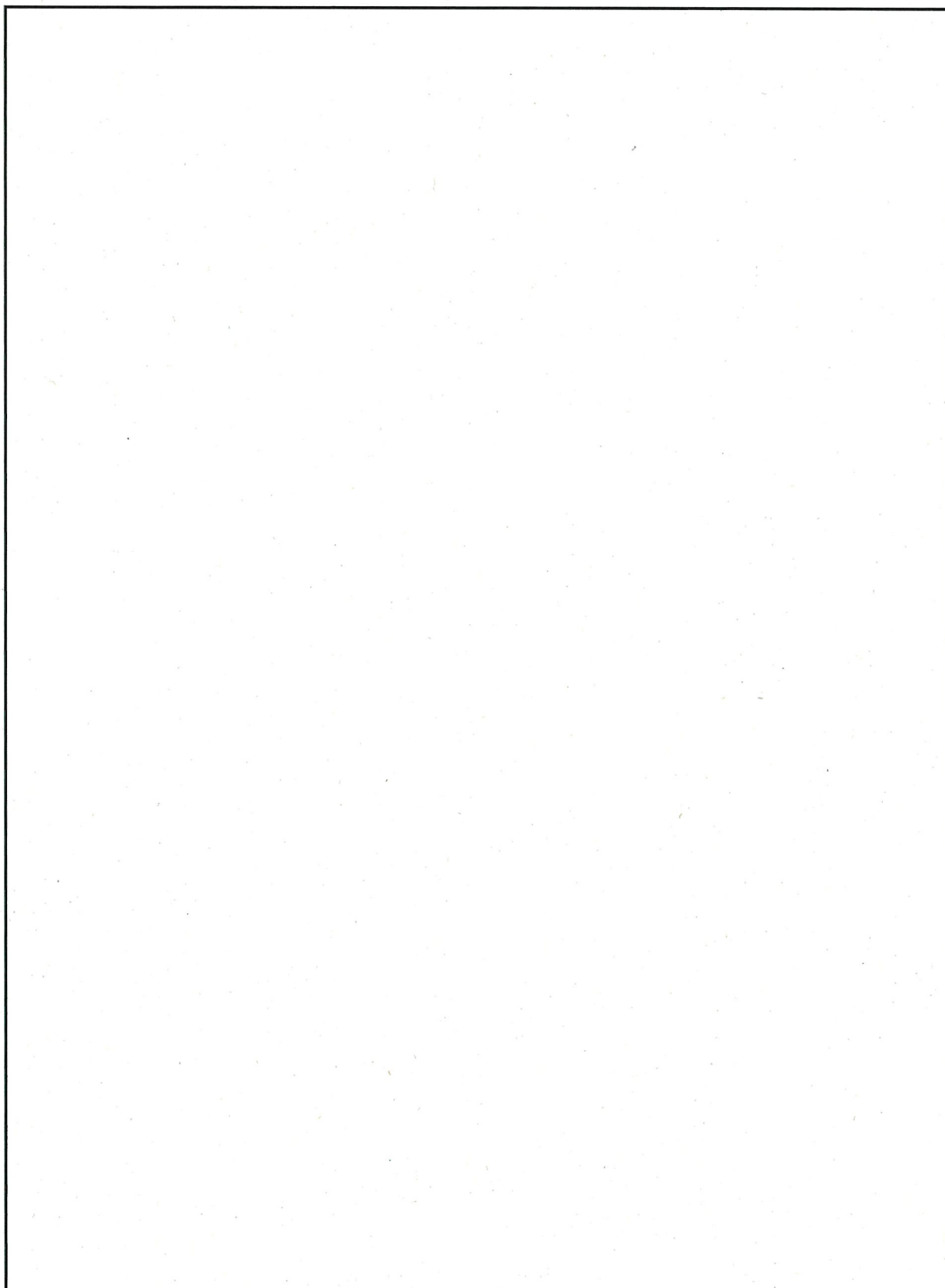
第 2.5.2-3 表 乾式キャスク臨界解析モデル寸法条件

	寸法条件		条件設定根拠
	乾燥状態	冠水状態	
バスケットプレート幅 (アルミニウム合金)	最小	最小	・隣接する燃料との距離が短くなるように乾燥状態、冠水状態共に最小としている。
バスケットプレート内幅 (アルミニウム合金)	最大	最小	・乾燥状態ではバスケットプレートでの中性子吸収効果が小さくなるように最大としている（バスケットプレート幅を固定して内幅を最大とすることでバスケットプレート板厚が最小となる）。 ・冠水状態ではバスケットプレート内幅領域での中性子の減速効果を小さくし、中性子吸収材での中性子吸収効果が小さくなるように、バスケットプレート内幅を最小としている。
バスケット格子内のり	最小	最大	・乾燥状態では隣接燃料との距離が短くなるように最小としている。 ・冠水状態では燃料領域での熱中性子が増加するように最大としている。
中性子吸収材板厚 (ほう素添加アルミニウム合金)	最小	最小	・隣接する燃料との距離が短くなるように乾燥状態、冠水状態共に中性子吸収材板厚を最小としている。なお、中性子吸収材のほう素添加量は板厚に係わらず仕様上の下限値で一定としている。

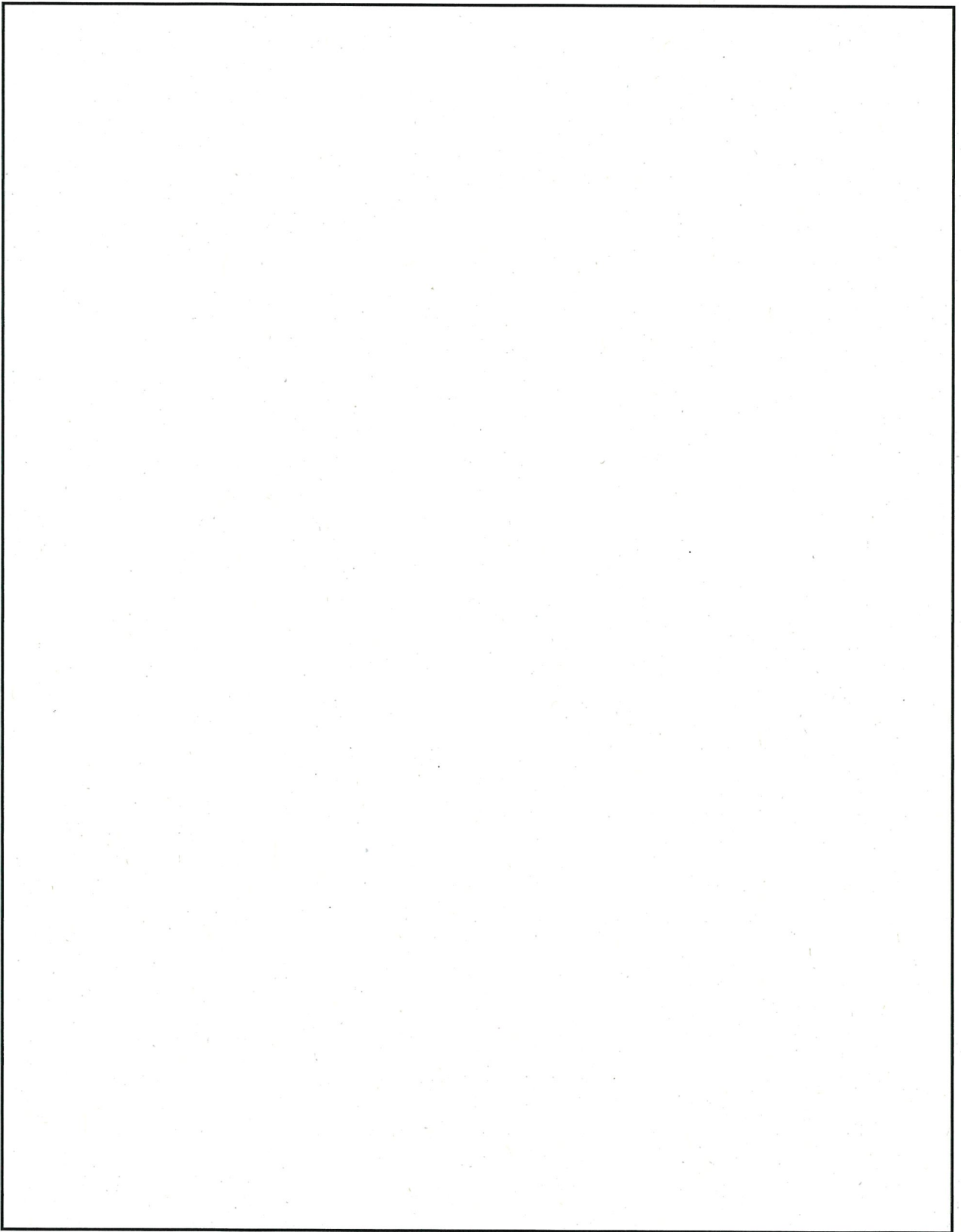


第 2.5.2-3 図 乾式キャスクの臨界解析フロー図

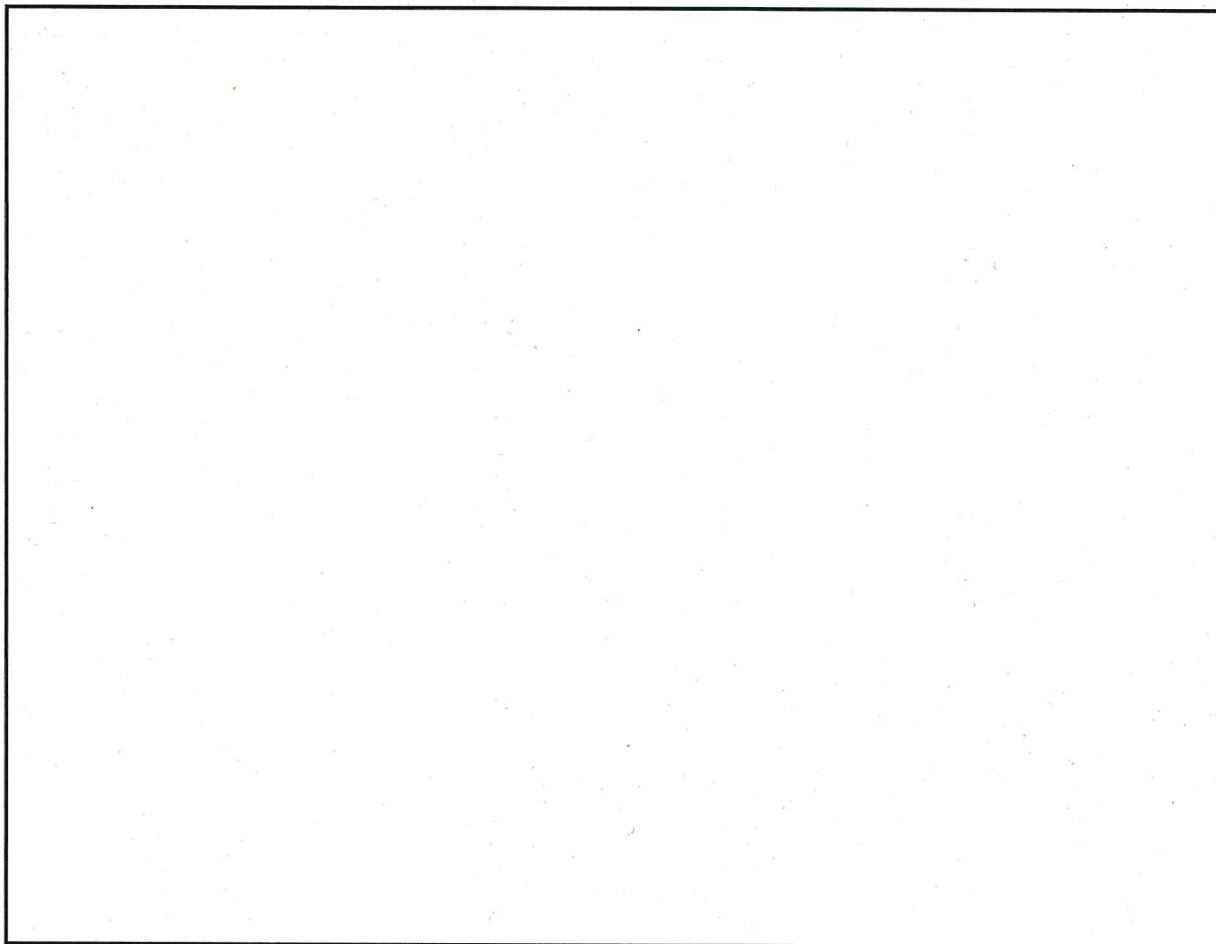




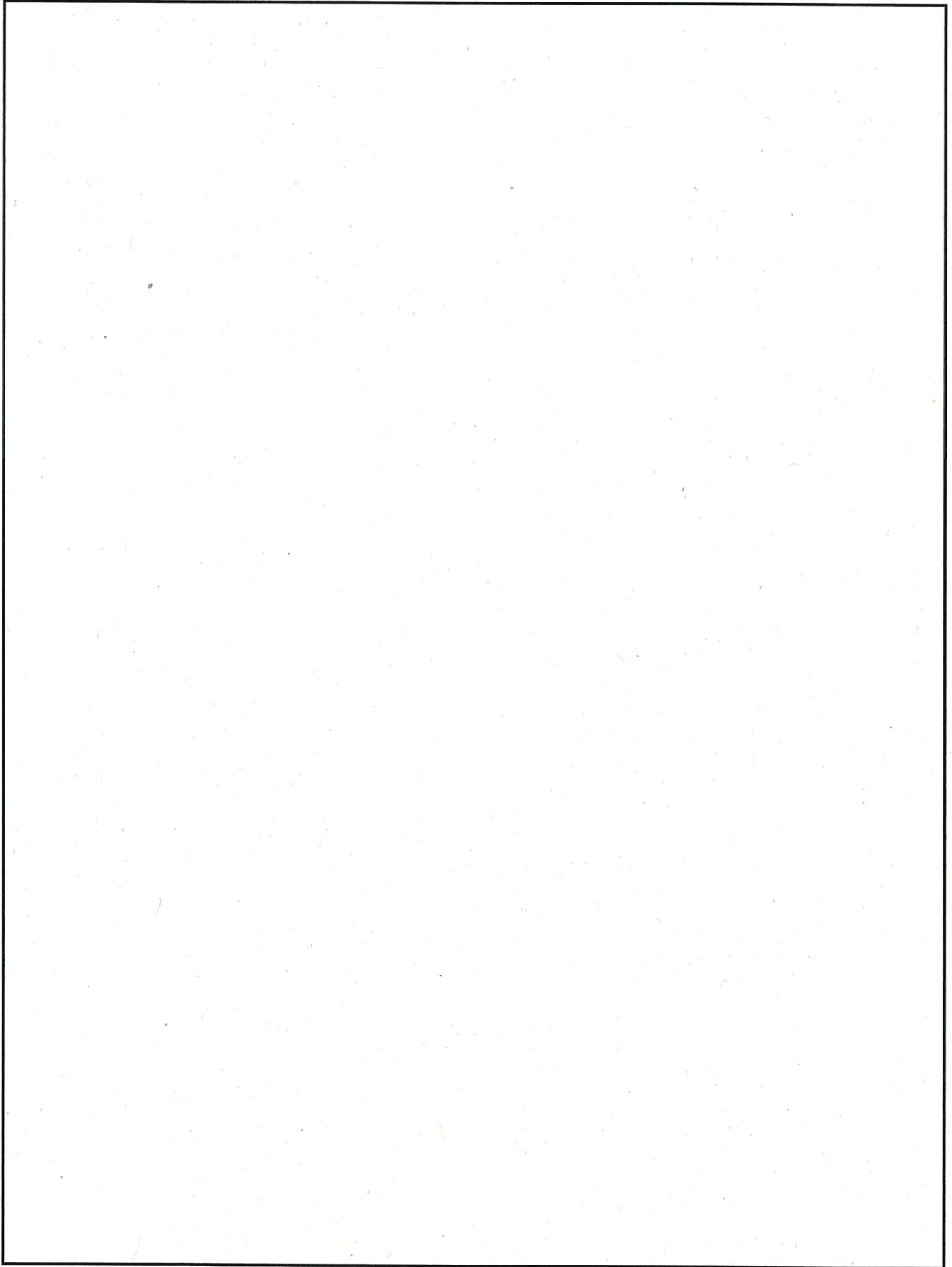
第 2.5.2-4 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-24P 型）（冠水状態）



第 2.5.2-5 図 臨界解析モデル (燃料領域横断面図) (MSF-24P 型) (冠水状態)

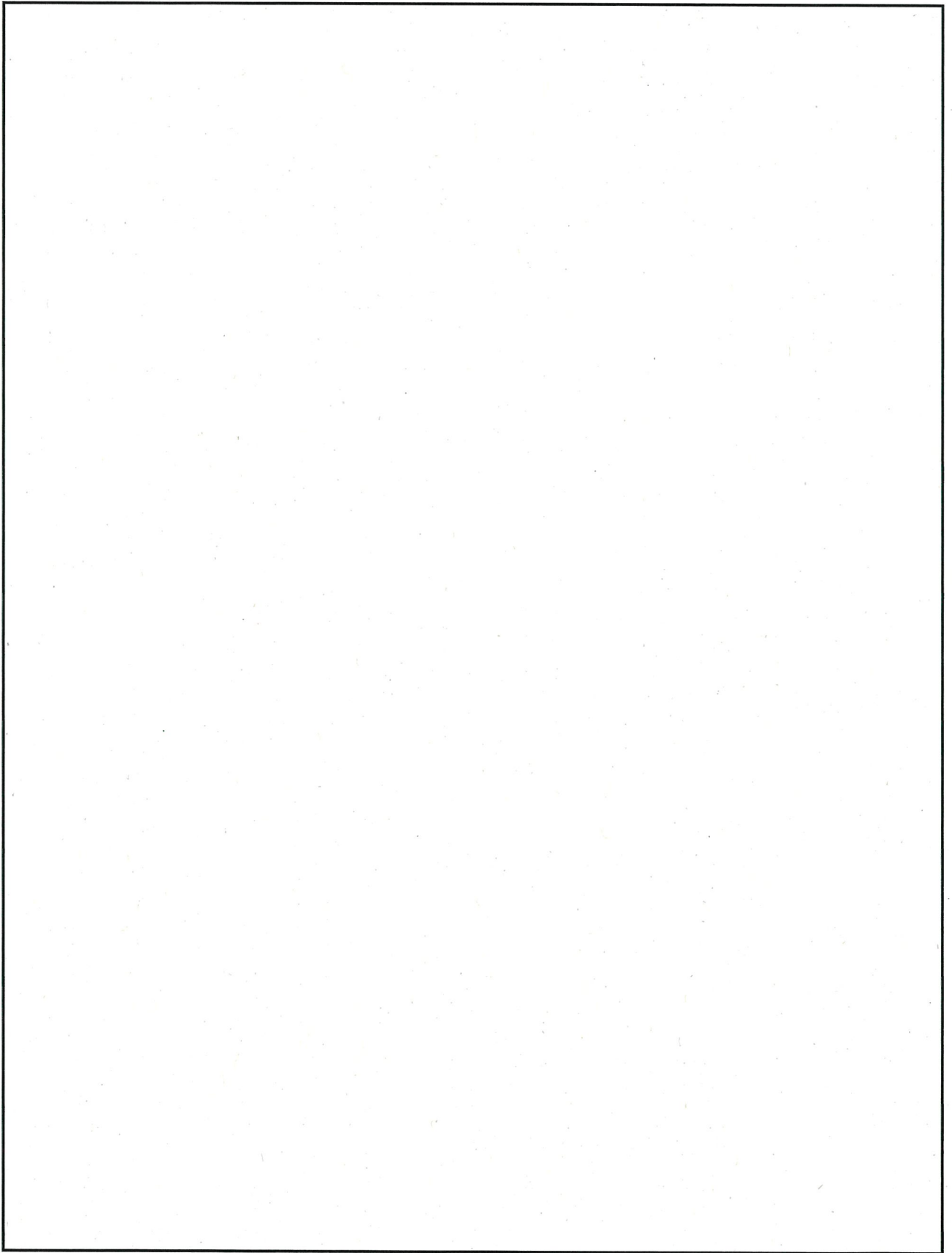


第 2.5.2-6 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-24P 型）（冠水状態）

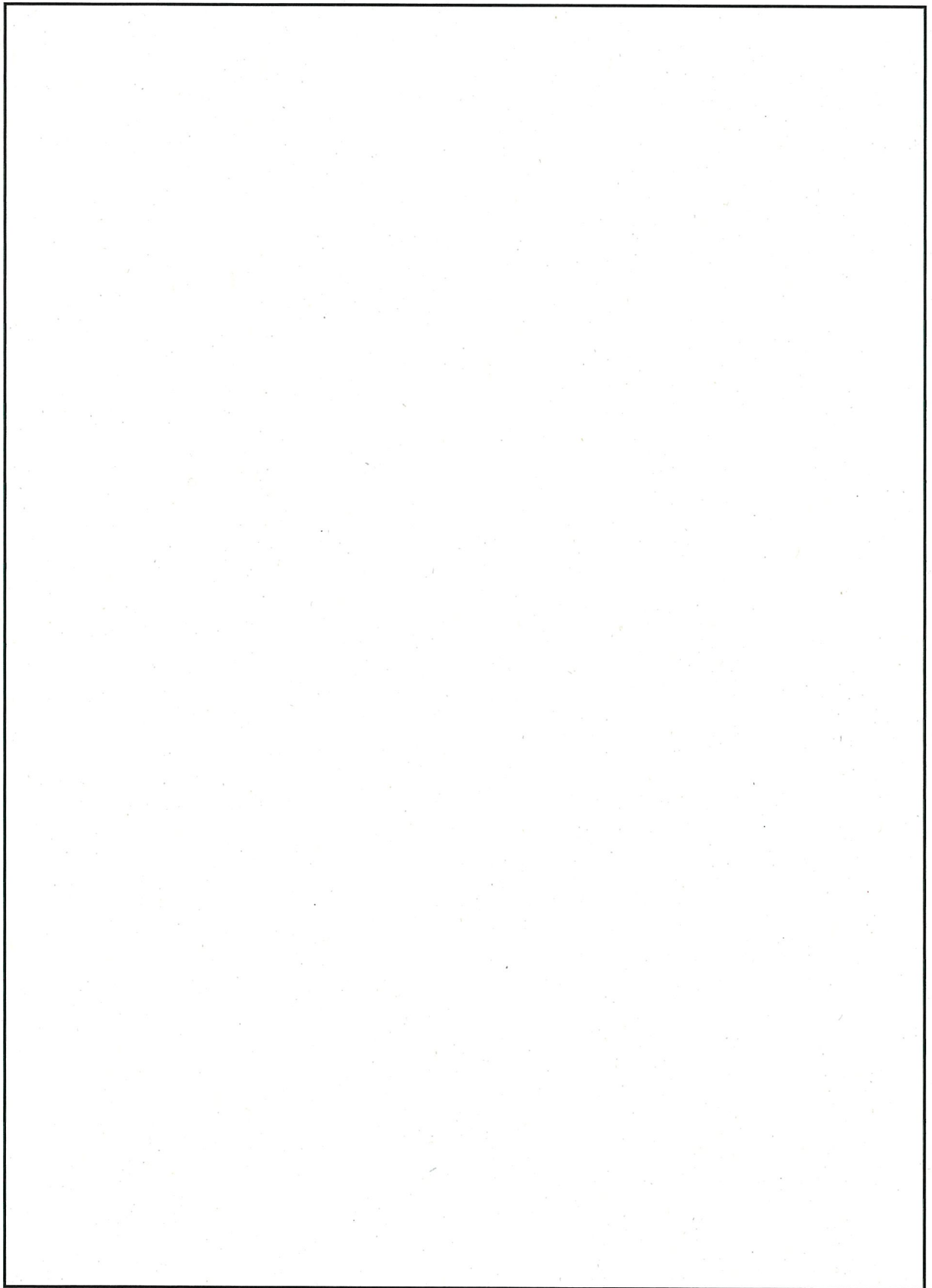


第 2.5.2-7 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-32P 型）（冠水状態）

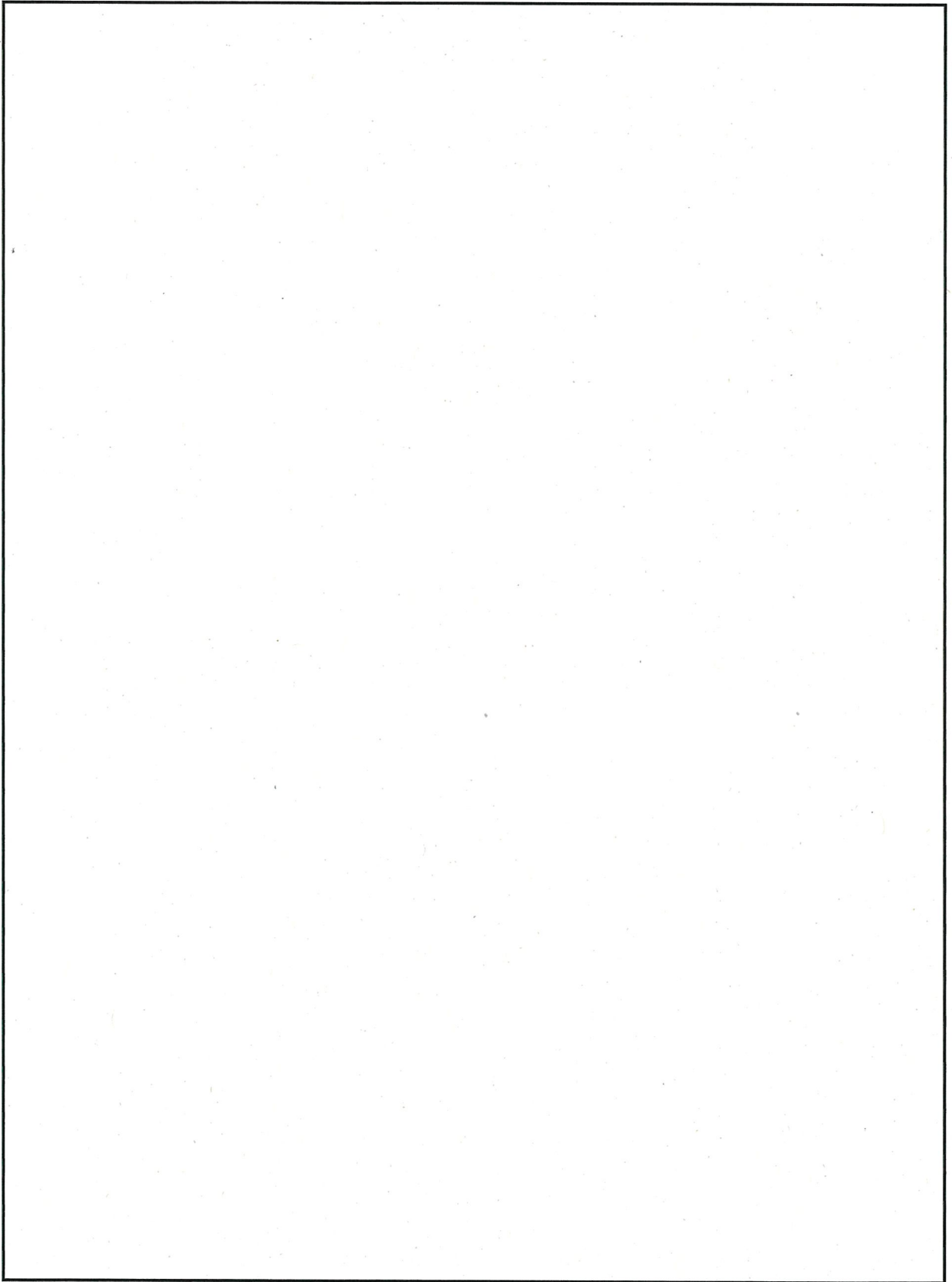




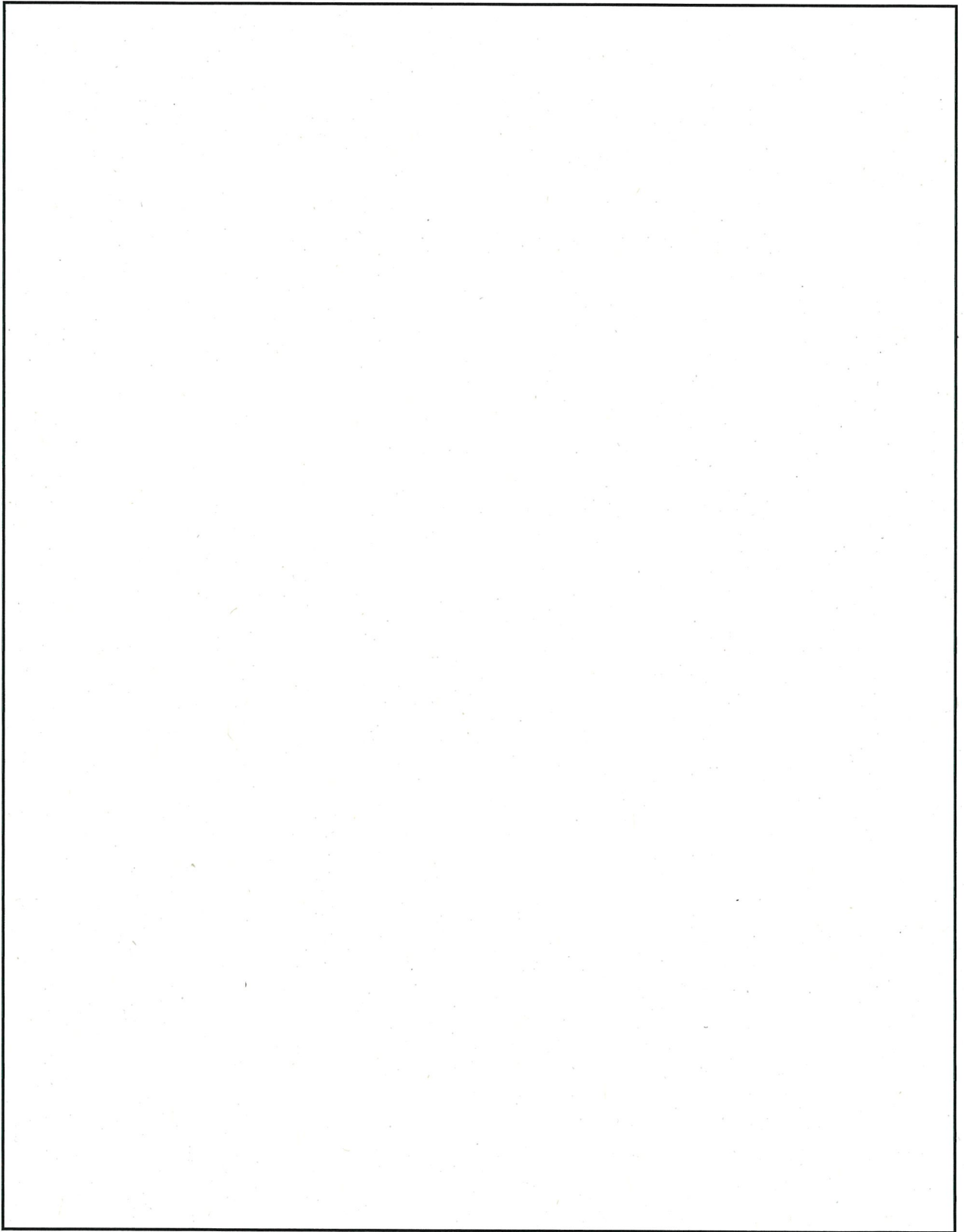
第 2.5.2-8 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-32P 型）（冠水状態）



第 2.5.2-9 図 臨界解析モデル (燃料領域拡大図) (MSF-32P 型) (冠水状態)

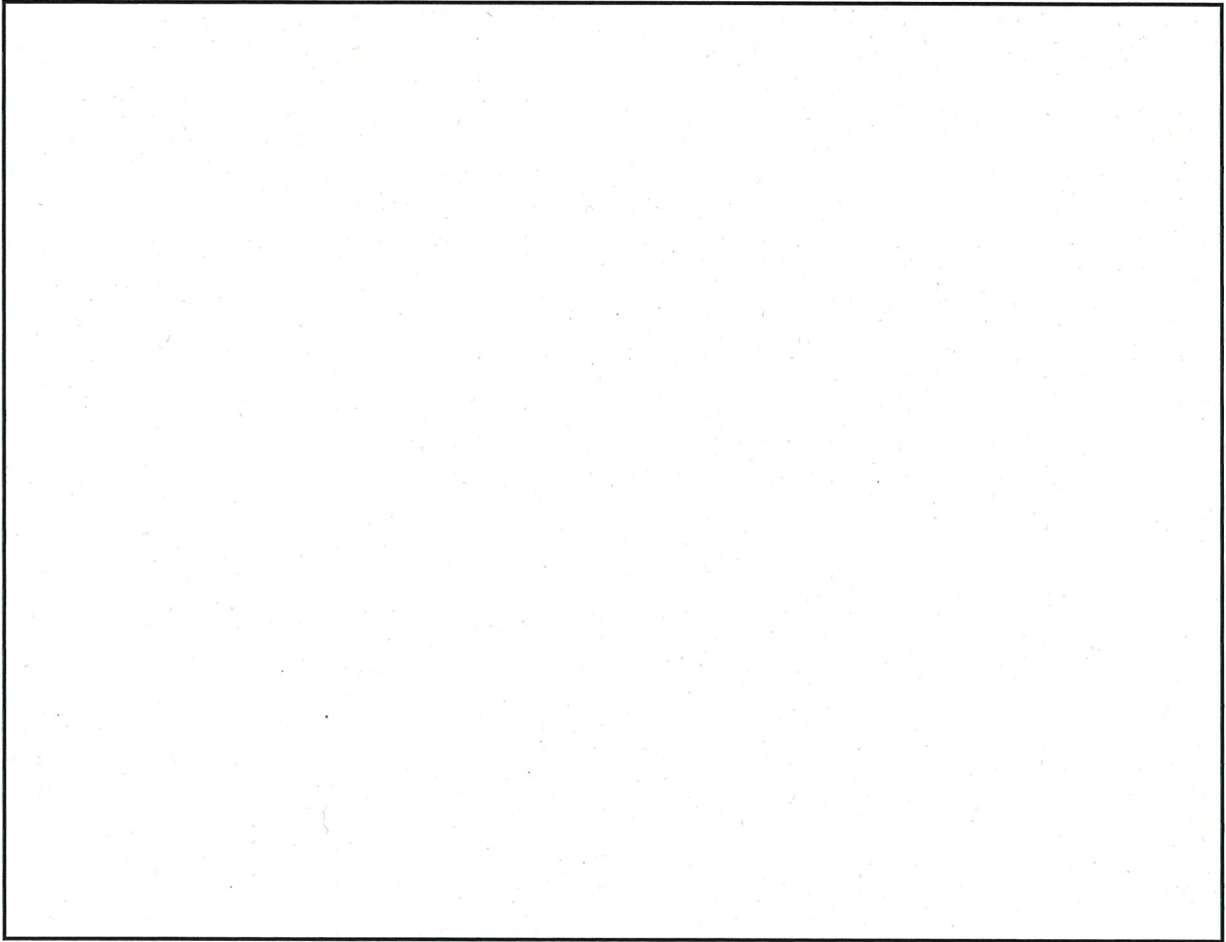


第 2.5.2-10 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）

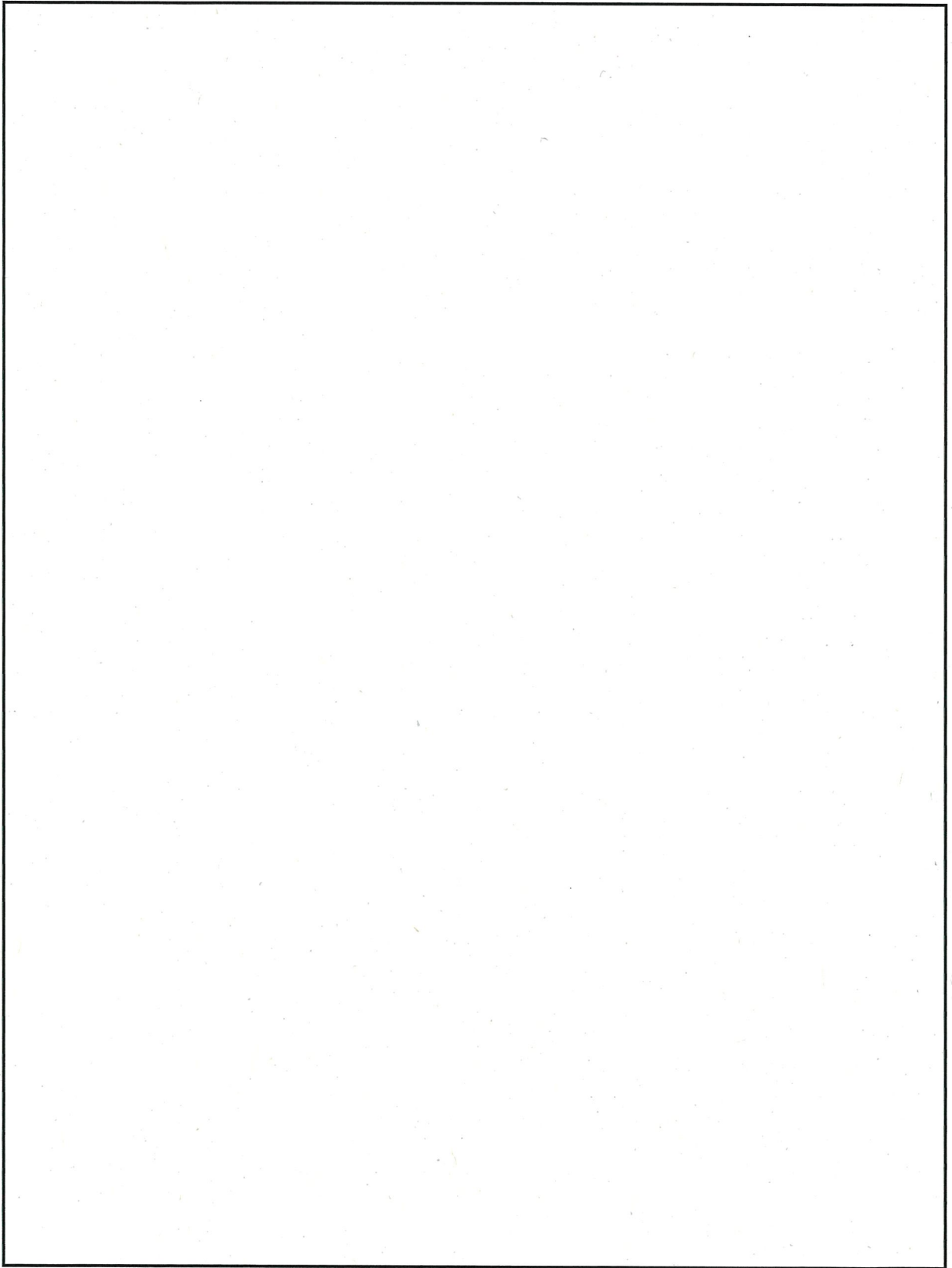


第 2.5.2-11 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）

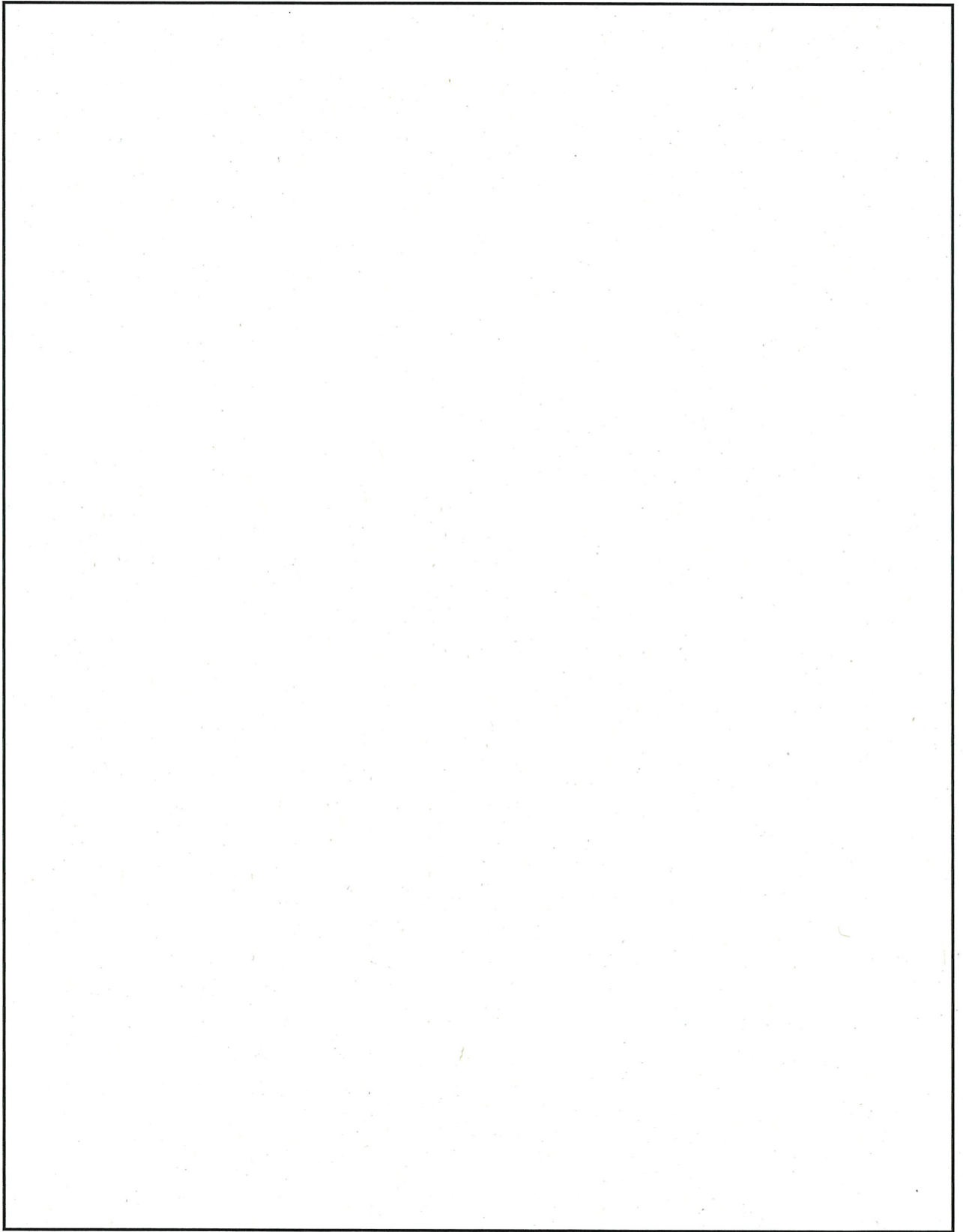




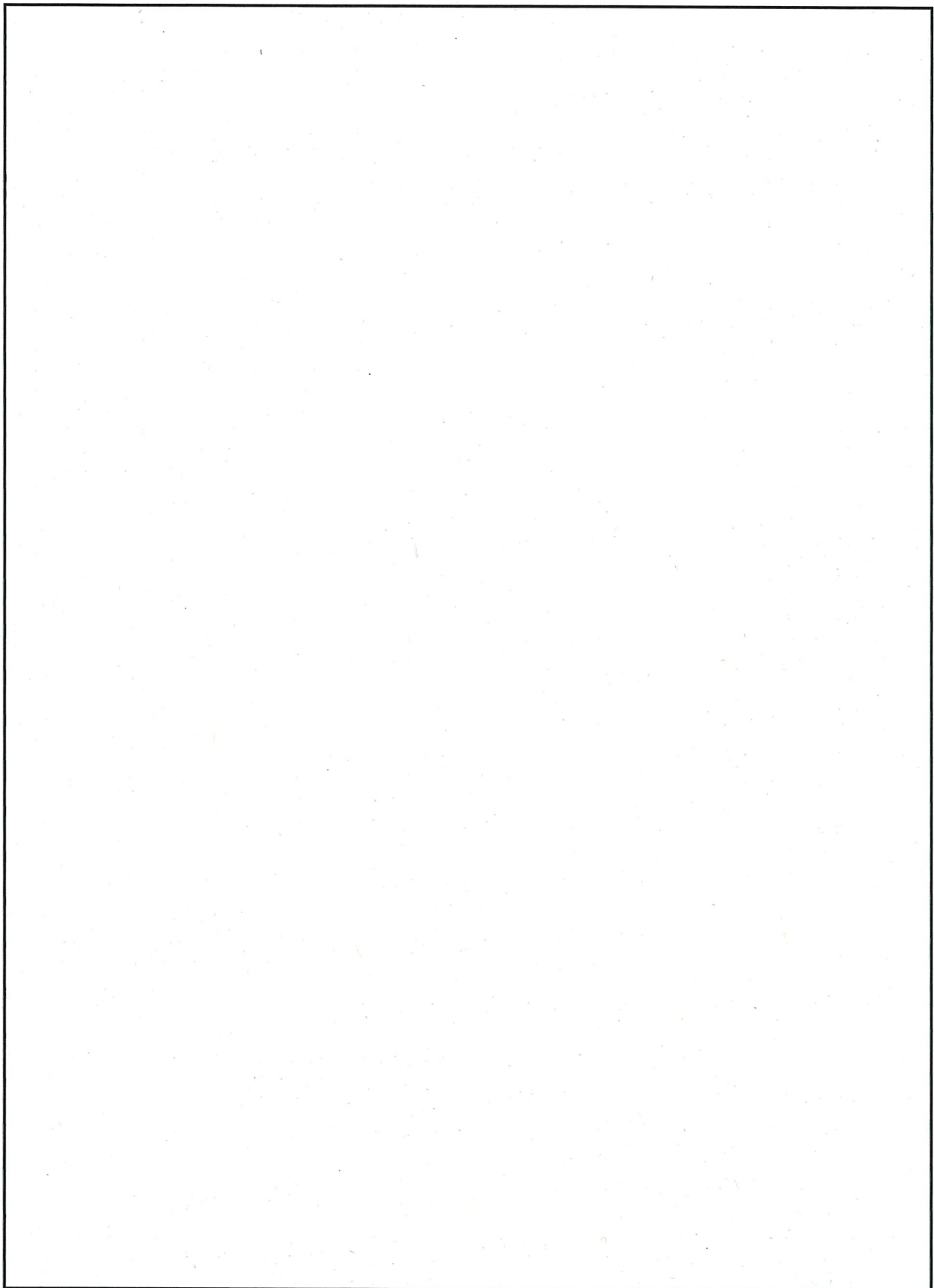
第 2.5.2-12 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）



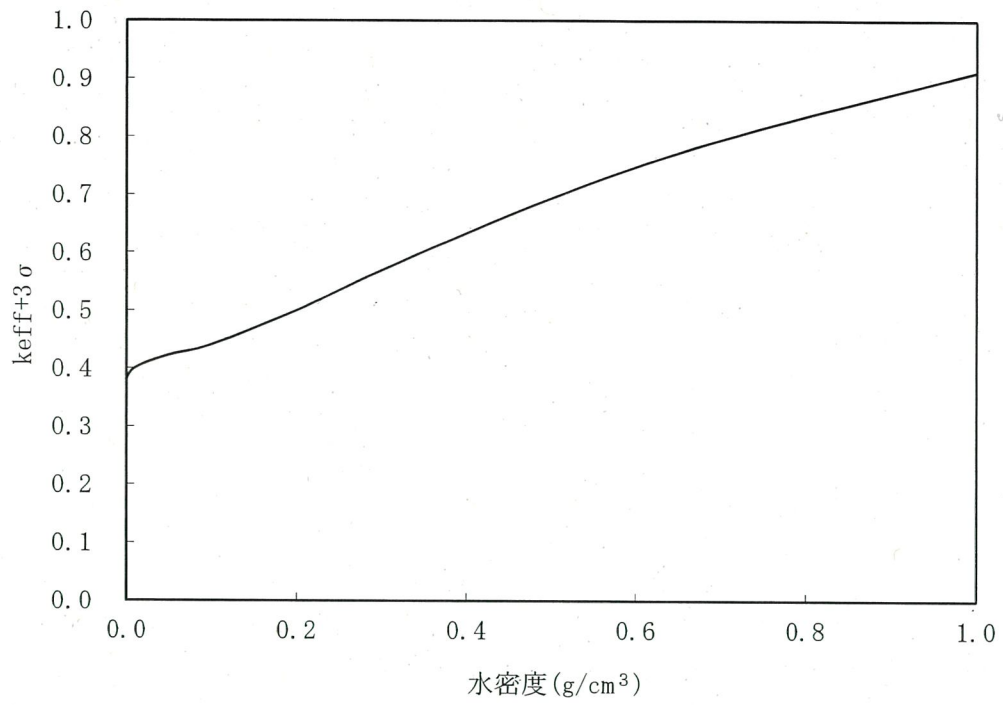
第 2.5.2-13 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-32P 型）（乾燥状態）



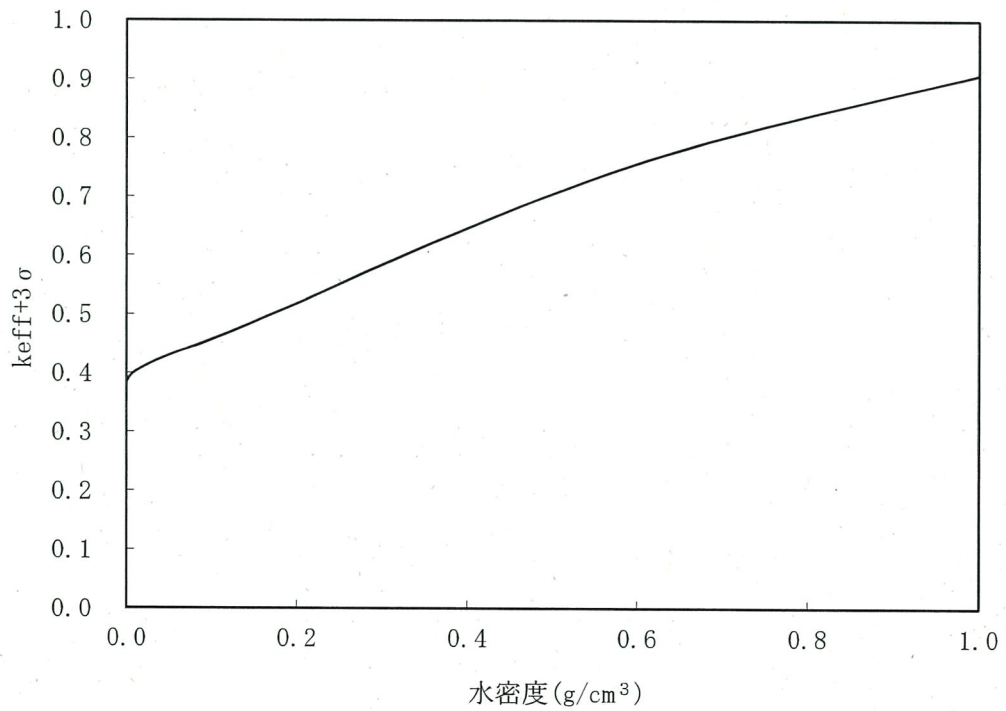
第 2.5.2-14 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-32P 型）（乾燥状態）



第 2.5.2-15 図 臨界解析モデル (燃料領域拡大図) (MSF-32P 型) (乾燥状態)



第 2.5.2-16 図 MSF-24P 型内雰囲気による臨界解析結果



第 2.5.2-17 図 MSF-32P 型内雰囲気による臨界解析結果



技術的に想定されるいかなる場合においても、第 2.5.2-4 表に示すとおり、評価基準を満たしている。

評価結果は、MSF-24P 型と MSF-32P 型の乾式キャスクそれぞれを無限に配列した体系（完全反射）で解析した結果であり、MSF-24P 型と MSF-32P 型の乾式キャスクが乾式貯蔵建屋内で混在した場合でも、MSF-24P 型の評価結果に包絡されるため、乾式貯蔵建屋内での乾式キャスクの配置制限は不要である。

第 2.5.2-4 表 評価結果

項	目	評 価 結 果		評価基準	備 考
		MSF-24P 型	MSF-32P 型		
中性子 実効増倍率	冠水状態	0.92 (3σ:0.00135)	0.91 (3σ:0.00129)	0.95 以下 <sup>1)</sup>	なお、SCALE コードシステムはモンテカルロ法であり統計誤差を伴うため、本評価結果は解析コードの精度等を考慮して、統計誤差(σ)の3倍(3σ)を加味した値である。
	乾燥状態	0.39 (3σ:0.00039)	0.39 (3σ:0.00045)		

〔確認内容〕

- 5) 設計上、バスケットの塑性変形が想定される場合は、塑性変形したバスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。

本文 2.7 項「使用済燃料乾式貯蔵容器を通常に取り扱う場合に設計上想定される事象について」に示すとおり、乾式キャスク通常貯蔵時において、バスケットの塑性変形が想定されない設計とする。

また、設計上考慮すべき自然現象において、乾式貯蔵建屋等の損壊及び兼用キャスクの転倒が生じない設計とし、バスケットの塑性変形が想定されない設計とする。詳細は設置許可基準第 4 条及び 6 条まとめ資料で説明する。

### 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<sup>2)</sup>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

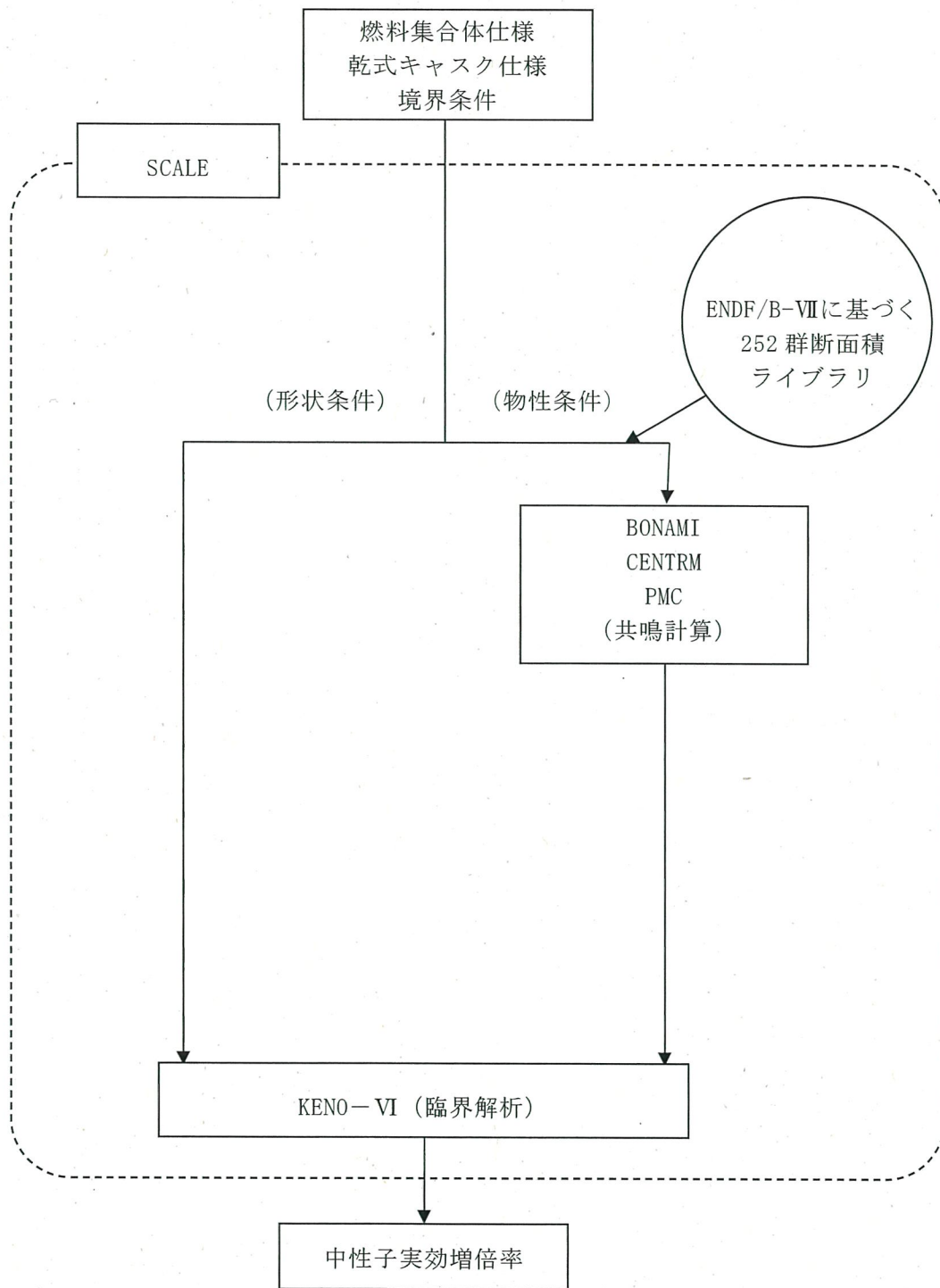
臨界解析で使用した SCALE コードシステムに対しては、乾式キャスクを模擬した多数の臨界実験のベンチマーク試験解析が実施され、その妥当性が示されている。

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

### 3) 敷地境界における実効線量評価

#### ① 直接線及びスカイシャイン線の評価



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

② ソースターム

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

③ 遮蔽解析コード等

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

④ 通常貯蔵時の線量

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

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

4) 応急復旧

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

』



## 2. 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  $2\text{mSv/h}$  以下とし、かつ、兼用キャスク表面から  $1\text{m}$  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放射線源強度（以下、「線源強度」という。）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  $4.1 \pm \square$  wt% 及び  $3.4 \pm \square$  wt% 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。

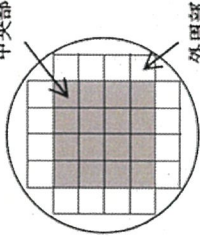
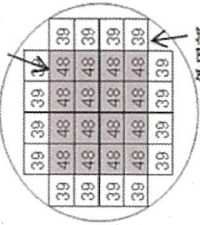
・ モデル化の保守性

－ 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。

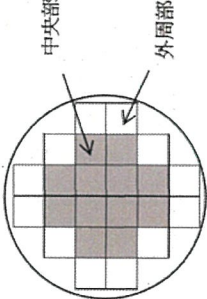
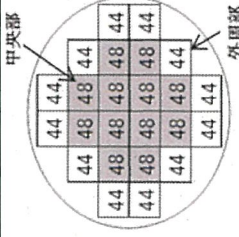
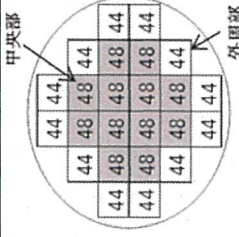
第 2.5.3-1 表 1,2 号炉用燃料 乾式キャスク燃料 乾式キャスク解析条件の概要

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	14×14 型 (A/B 型)		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	[ ]	
	ウラン重量 (kg)	[ ]				
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤ 48	≤ 39	≤ 48	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	—	—	—
	配置※1			—		

※1：数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

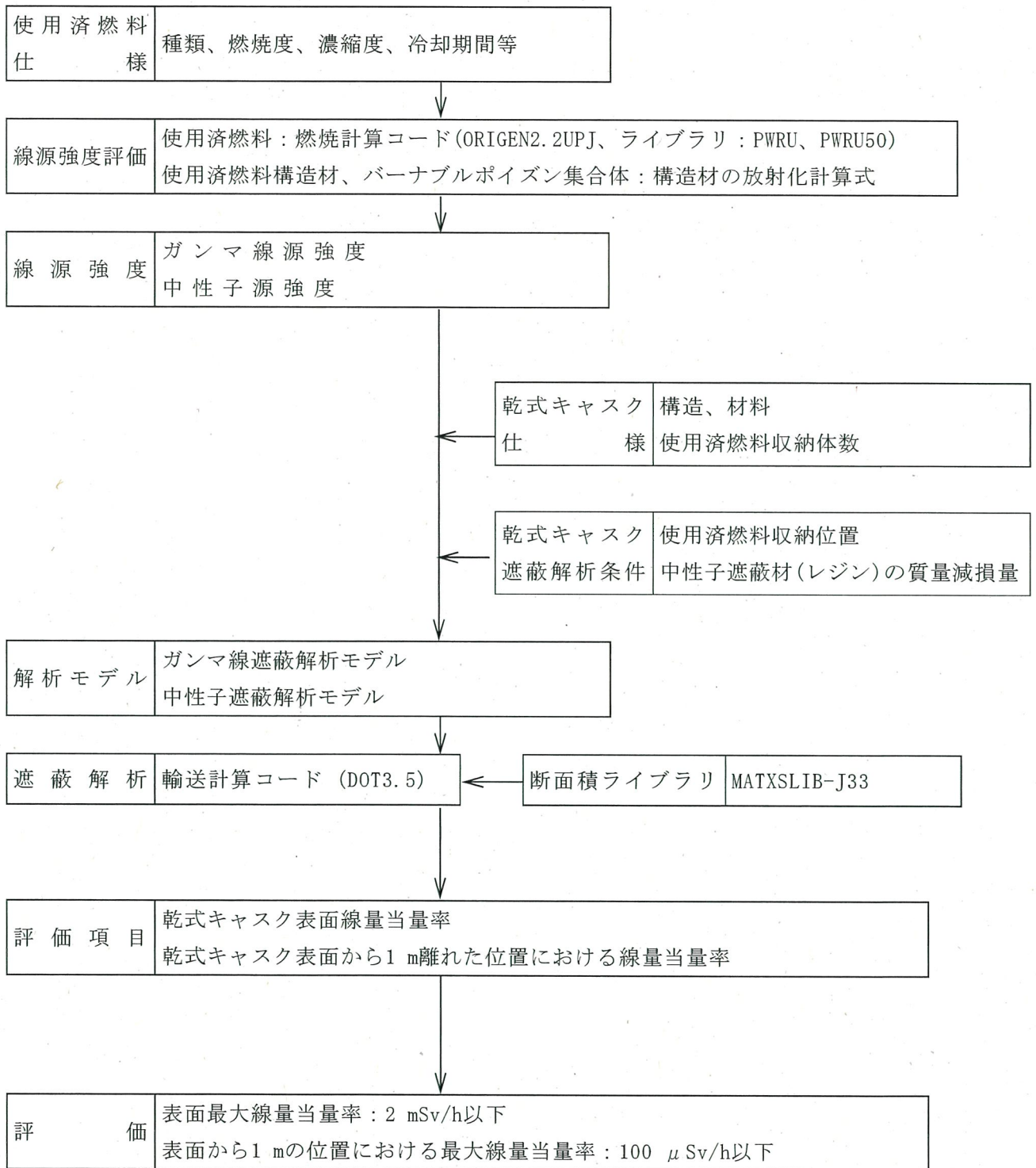


第 2.5.3-2 表 3号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

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	初期ウラン濃縮度 (wt%)	17×17型(A/B型) ≤4.2		17×17型(A/B型)	17×17型(A型)	
	ウラン重量(kg)	≤4.2		4.1		
	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 <sup>※1</sup> B型: ≥17		—	15	
バーナブル ポイゾン キャスク 1基あたり	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 <sup>※2</sup>						

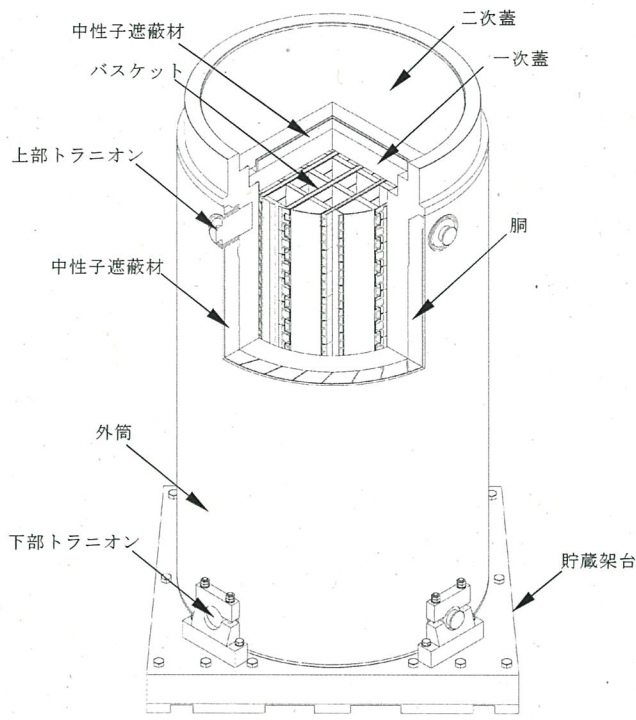
※1: 回収ウラン燃料については、15年冷却した通常ウラン燃料と放射能量及び発熱量が同程度以下となるよう20年以上冷却した後、収納する。

※2: 数値は燃焼度(GWd/t)を示す。



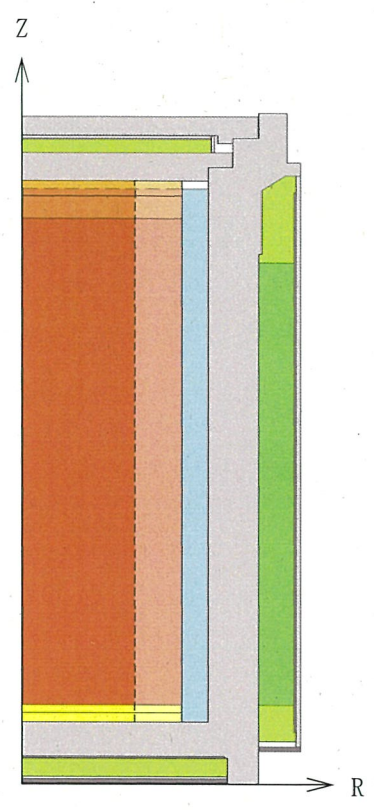
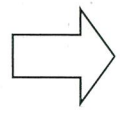
第 2.5.3-1 図 乾式キャスクの遮蔽解析フロー図





[実形状]

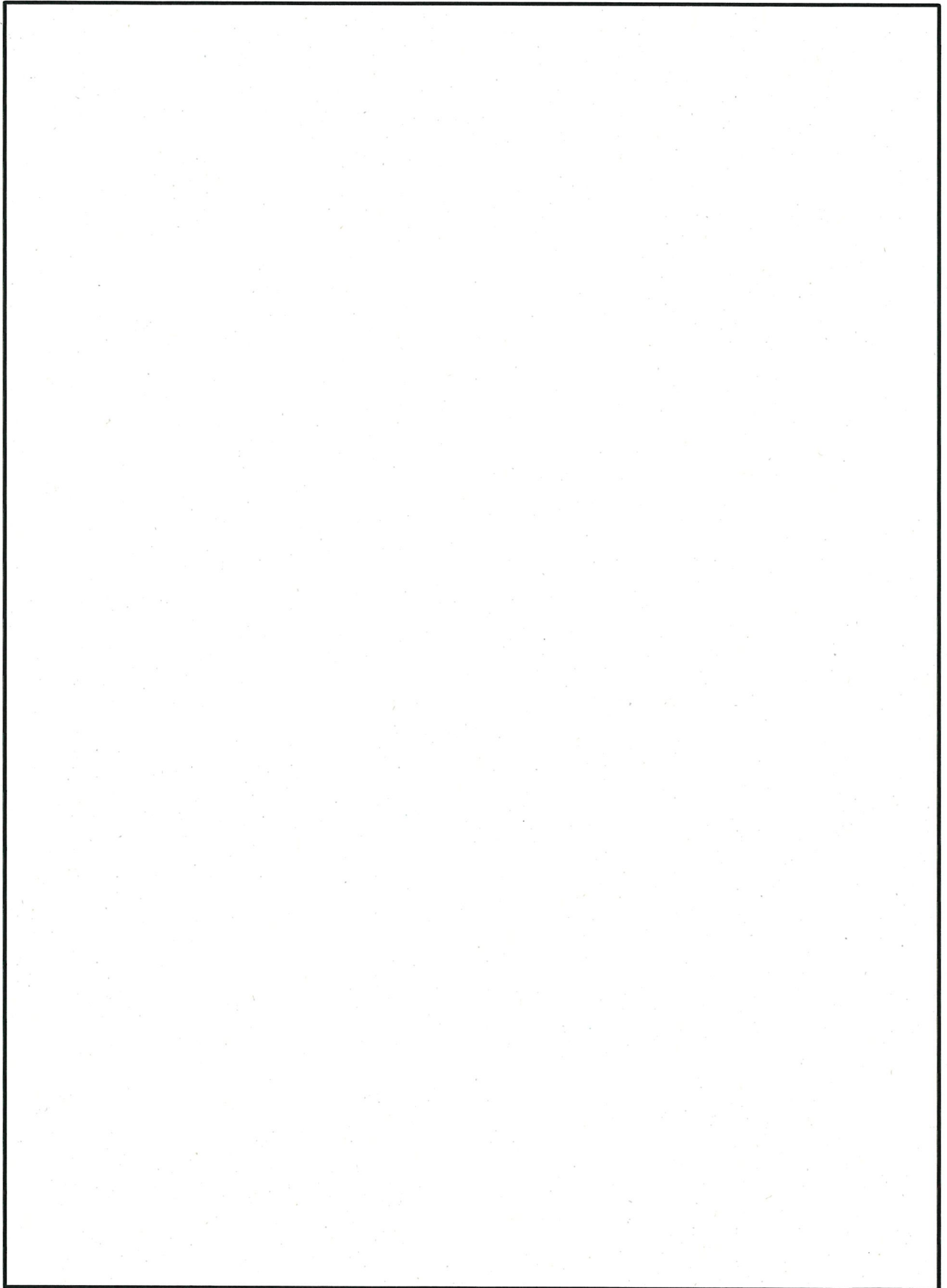
モデル化



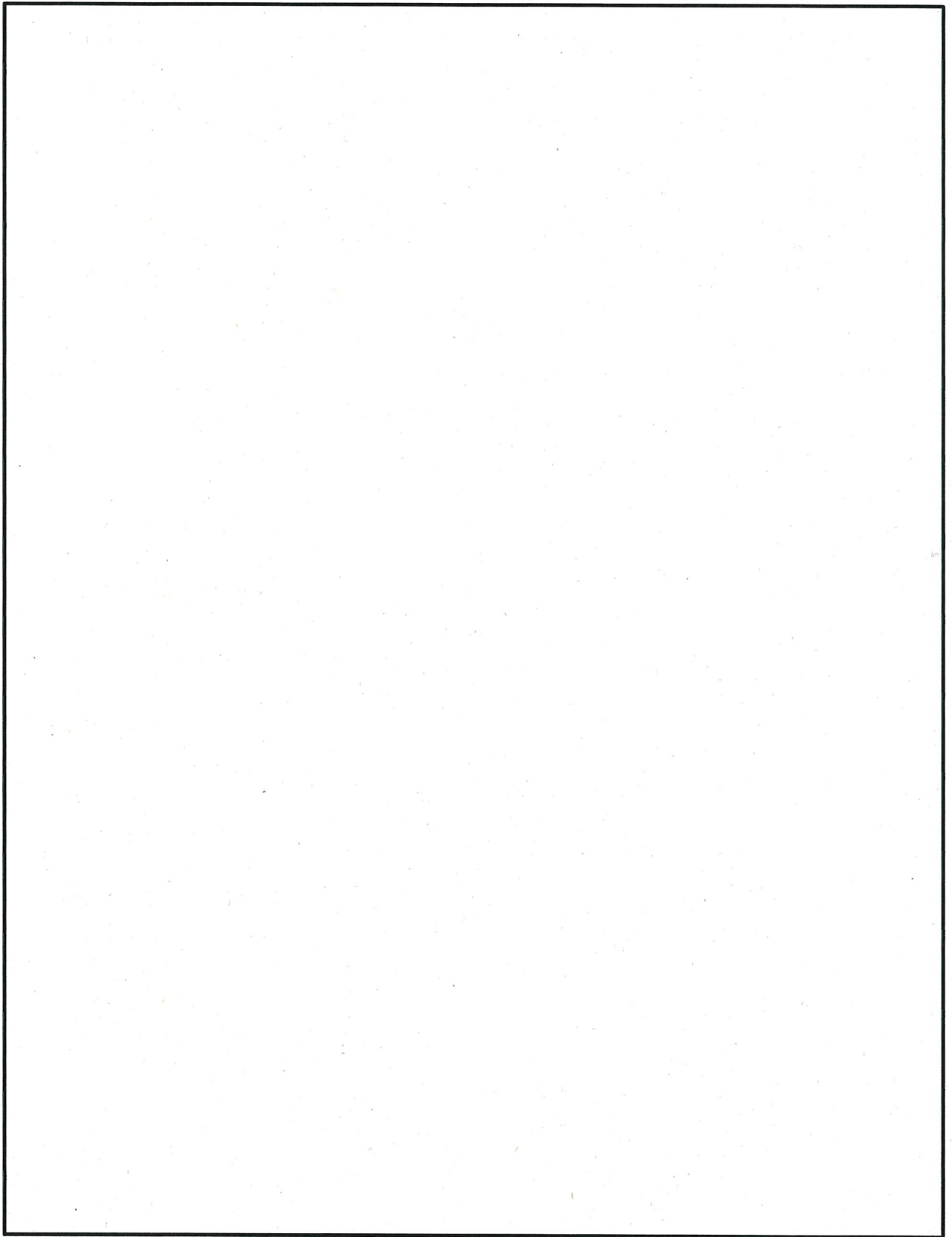
[二次元モデル化 (R-Z 体系)]

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	銅、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

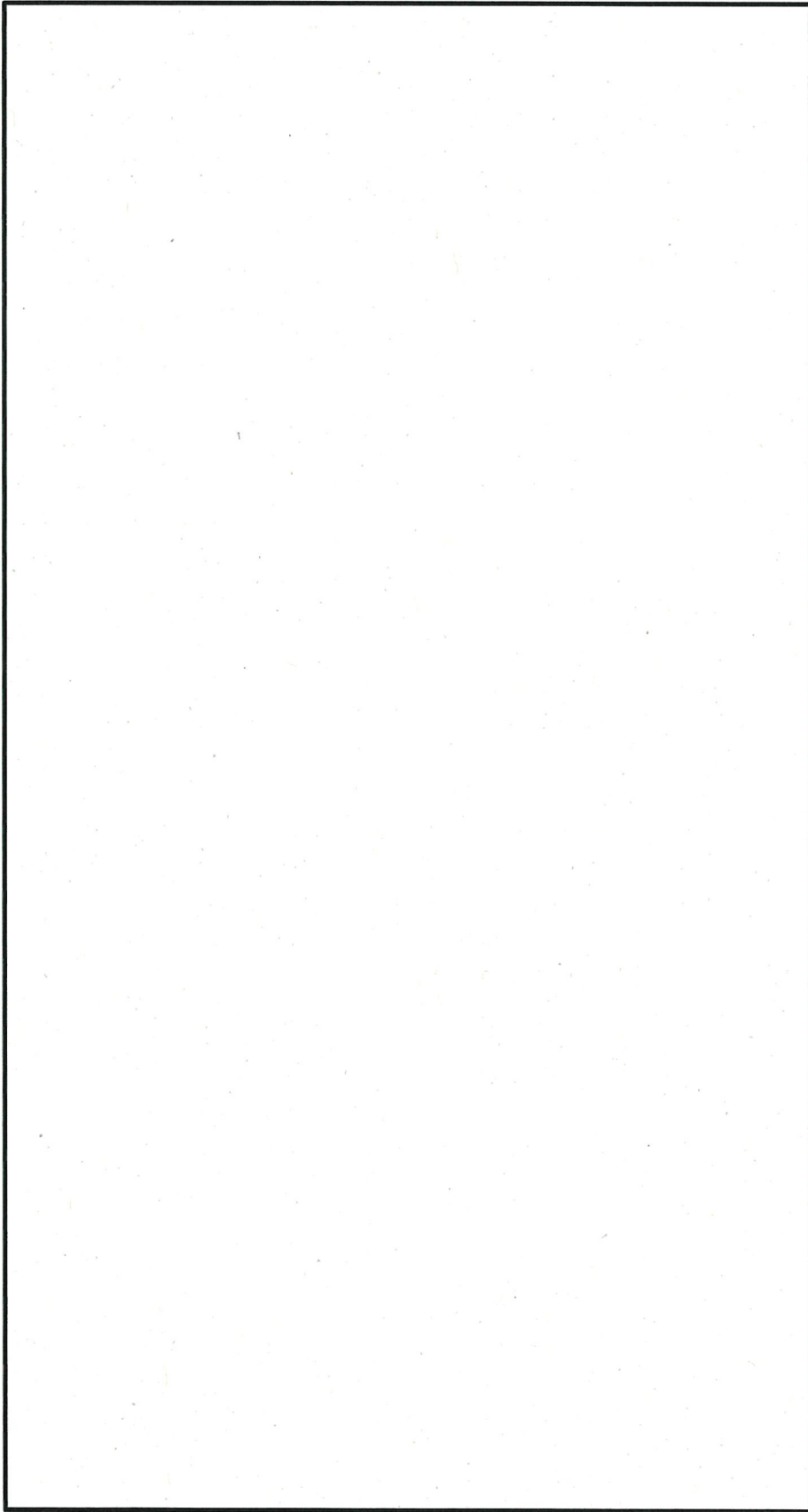
第 2.5.3-2 図 遮蔽解析モデル化の概要 (MSF-24P 型の例)



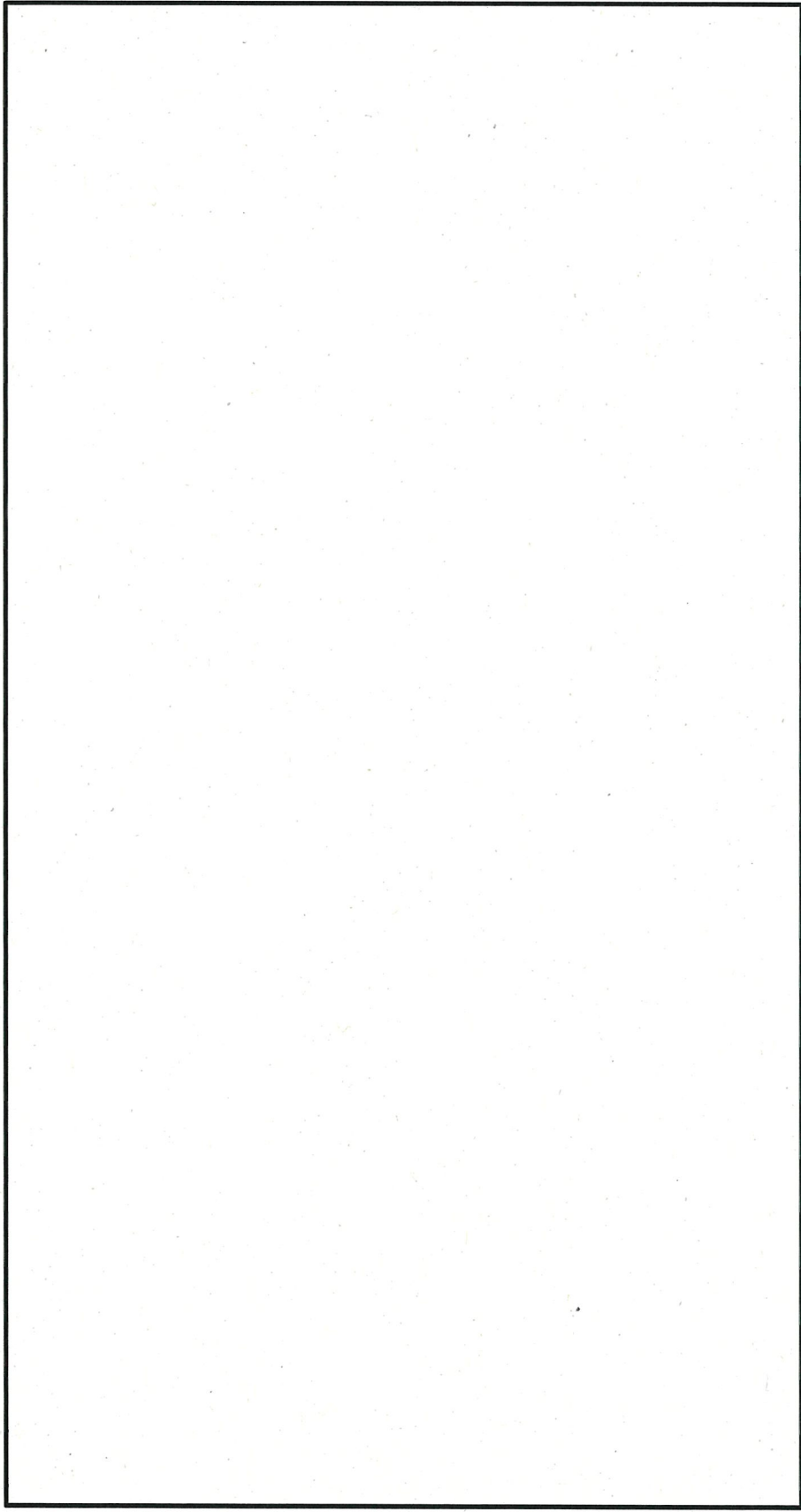
第 2.5.3-3 図 貯蔵時の解析モデル（頭部）（MSF-24P 型）



第 2.5.3-4 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（MSF-24P 型）

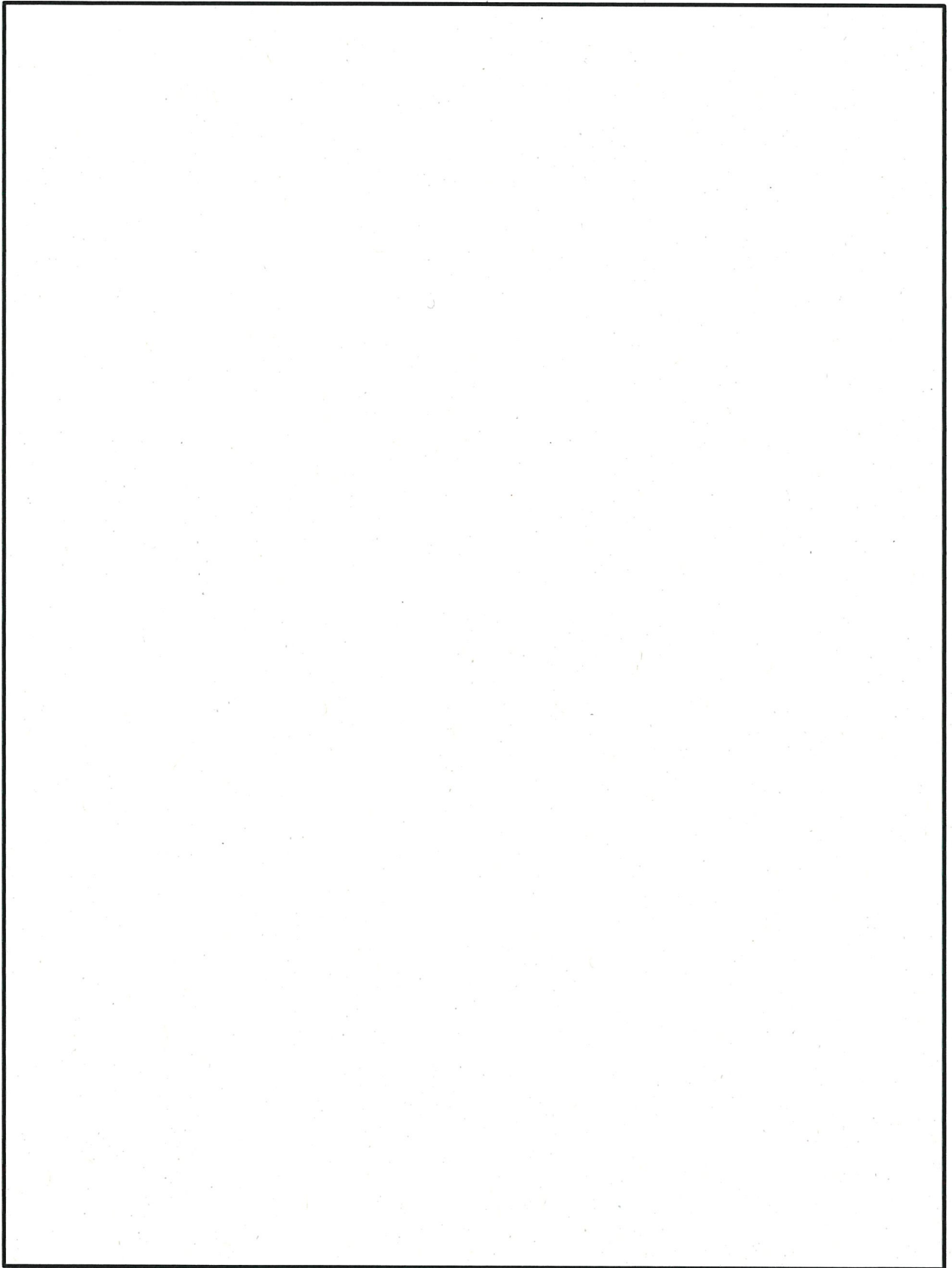


第2.5.3-5 図 貯蔵時の解析モデル（上部トラニオン部）（MSF-24P 型）

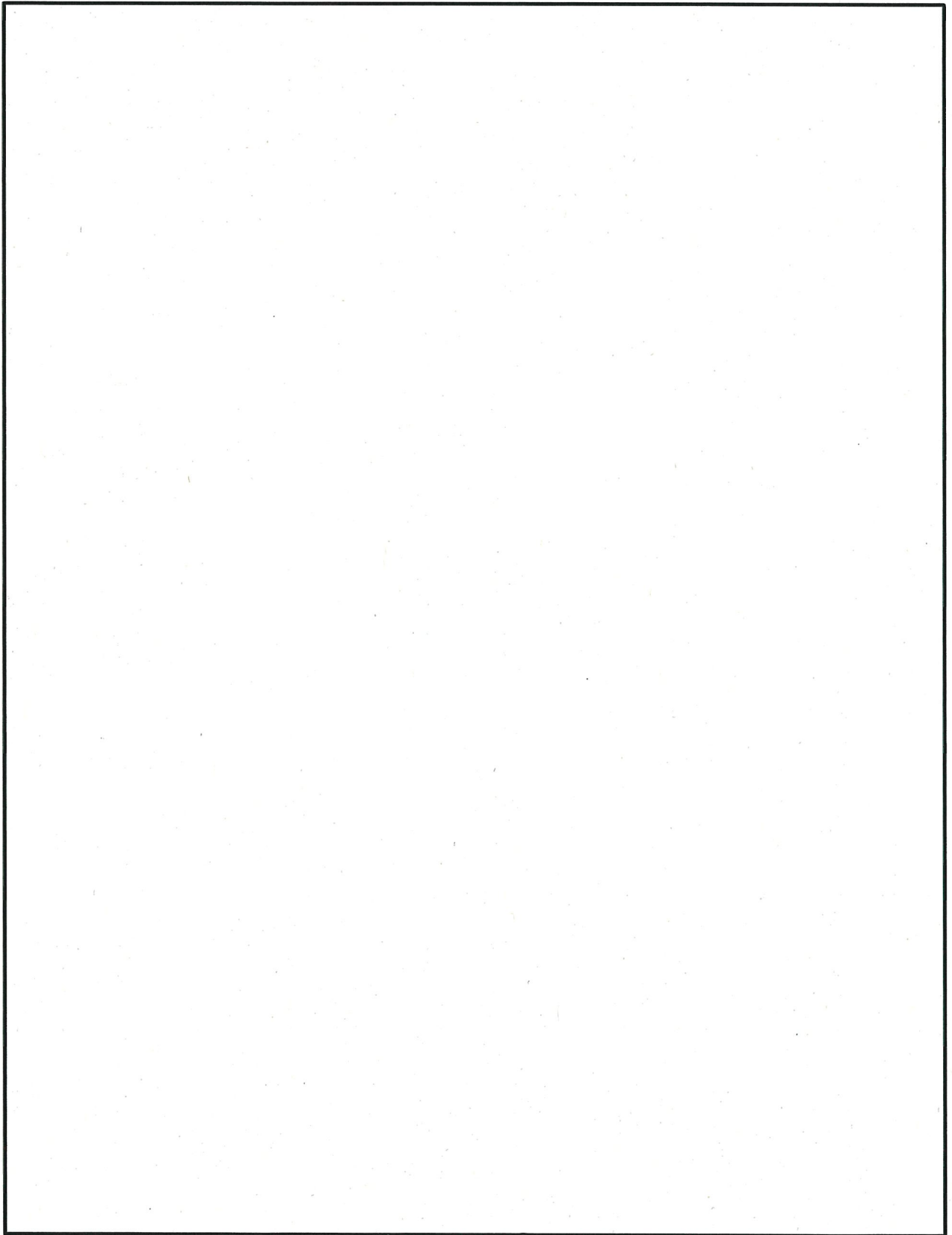


第 2.5.3-6 図 貯蔵時の解析モデル (下部トランプラニオン部) (MSF-24P 型)

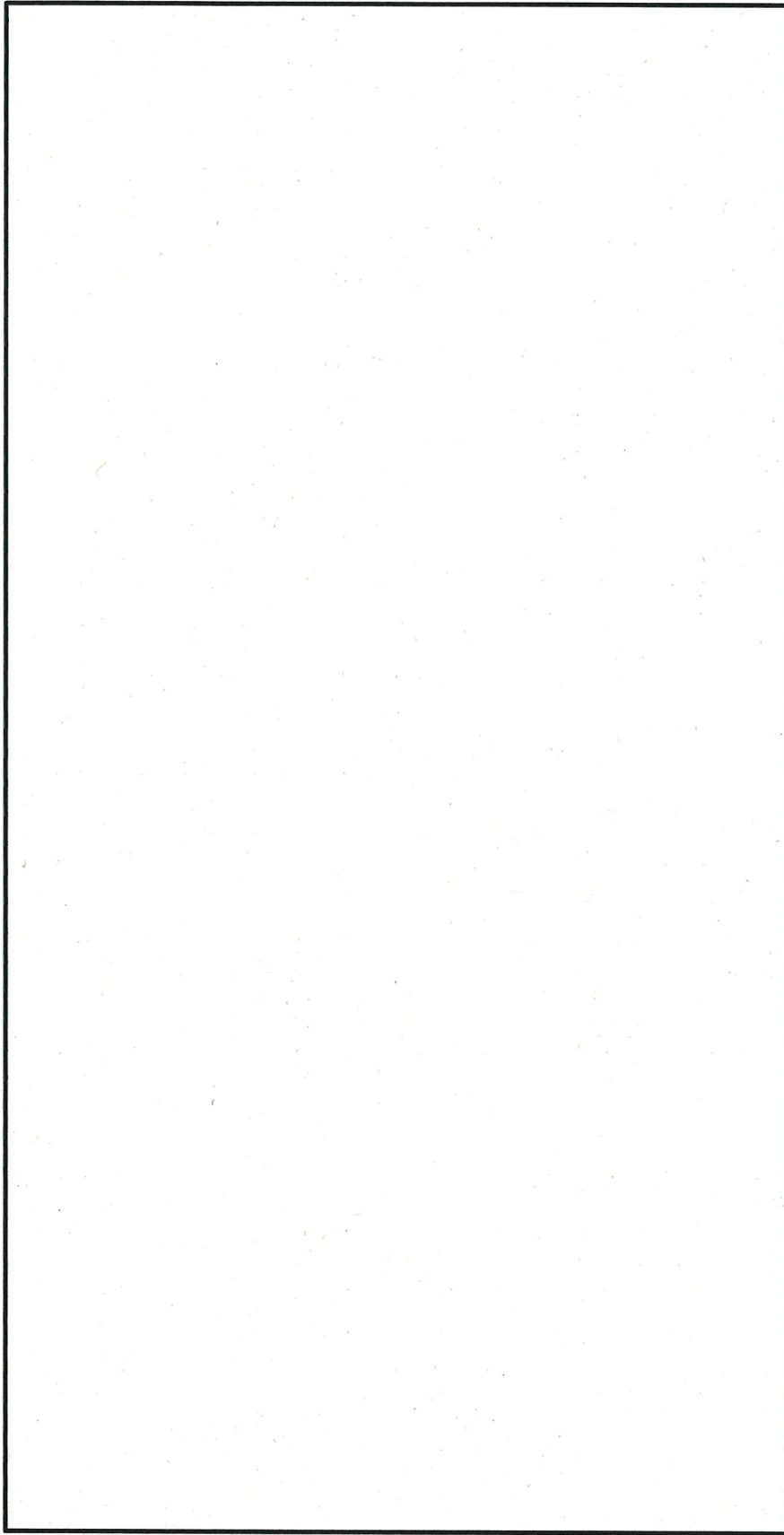




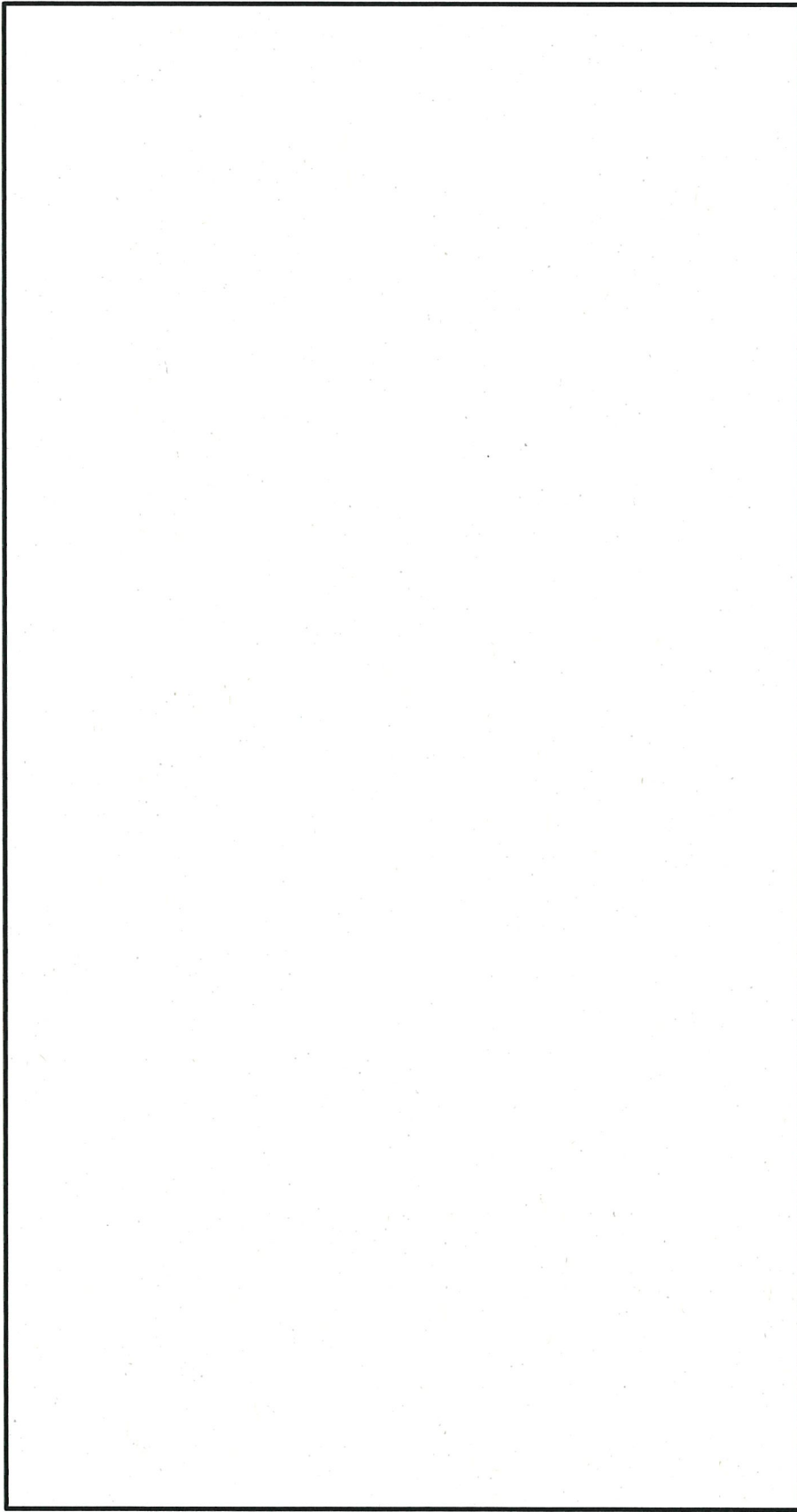
第 2.5.3-7 図 貯蔵時の解析モデル（頭部）（MSF-32P 型）



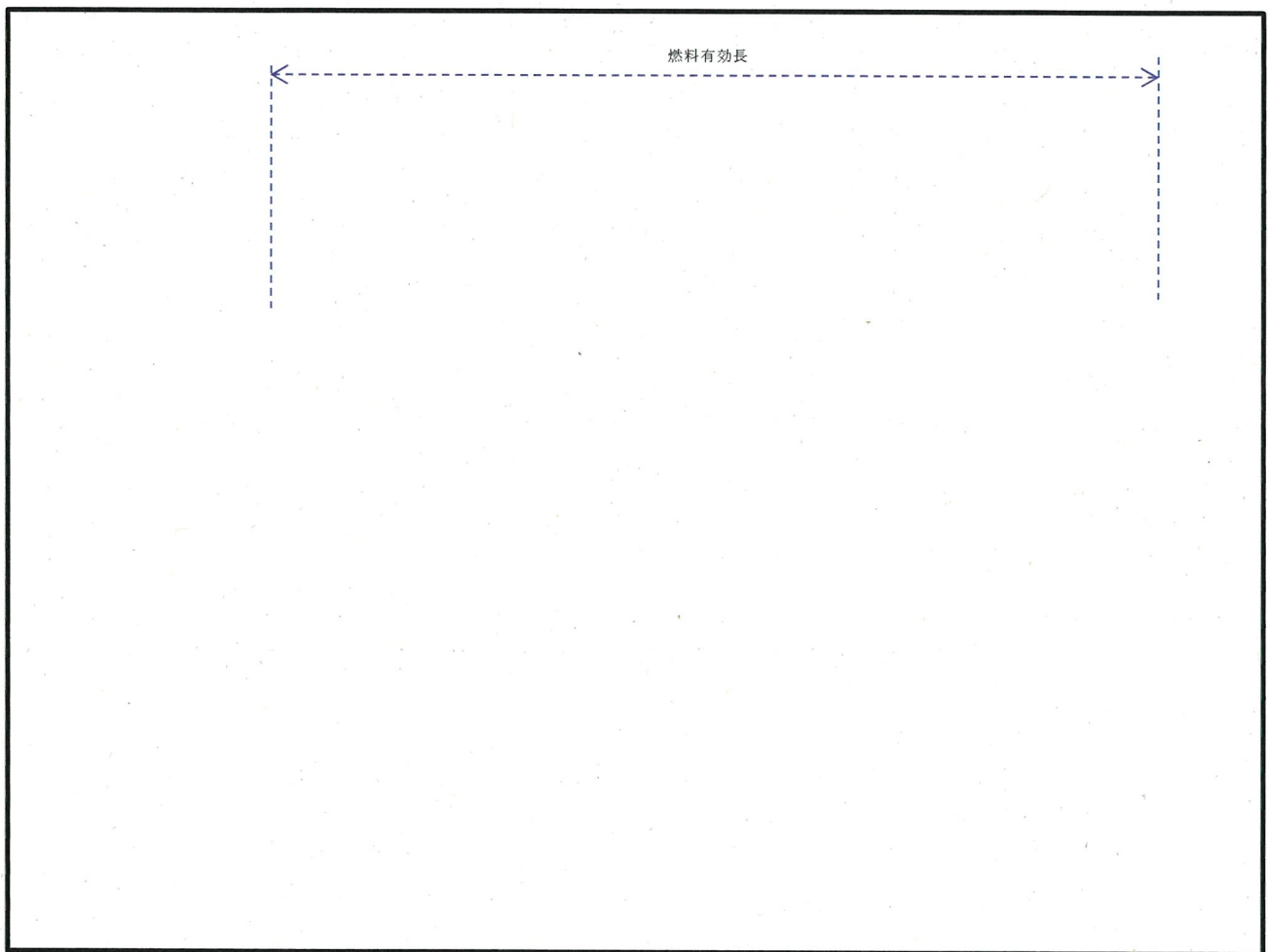
第 2.5.3-8 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（MSF-32P 型）



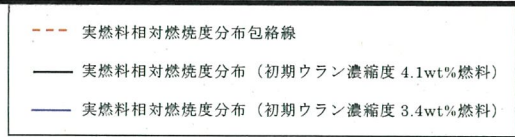
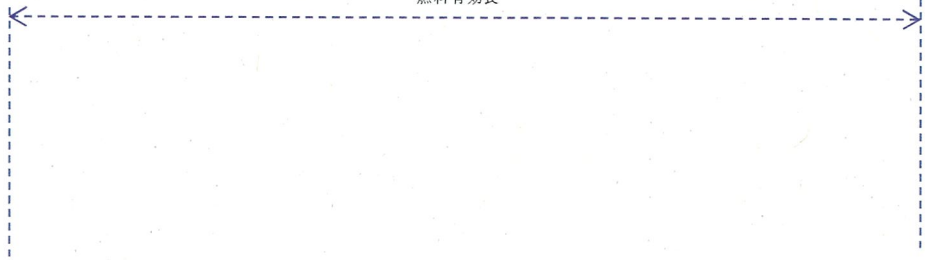
第2.5.3-9 図 貯蔵時の解析モデル（上部トランジオン部）（MSF-32P型）



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



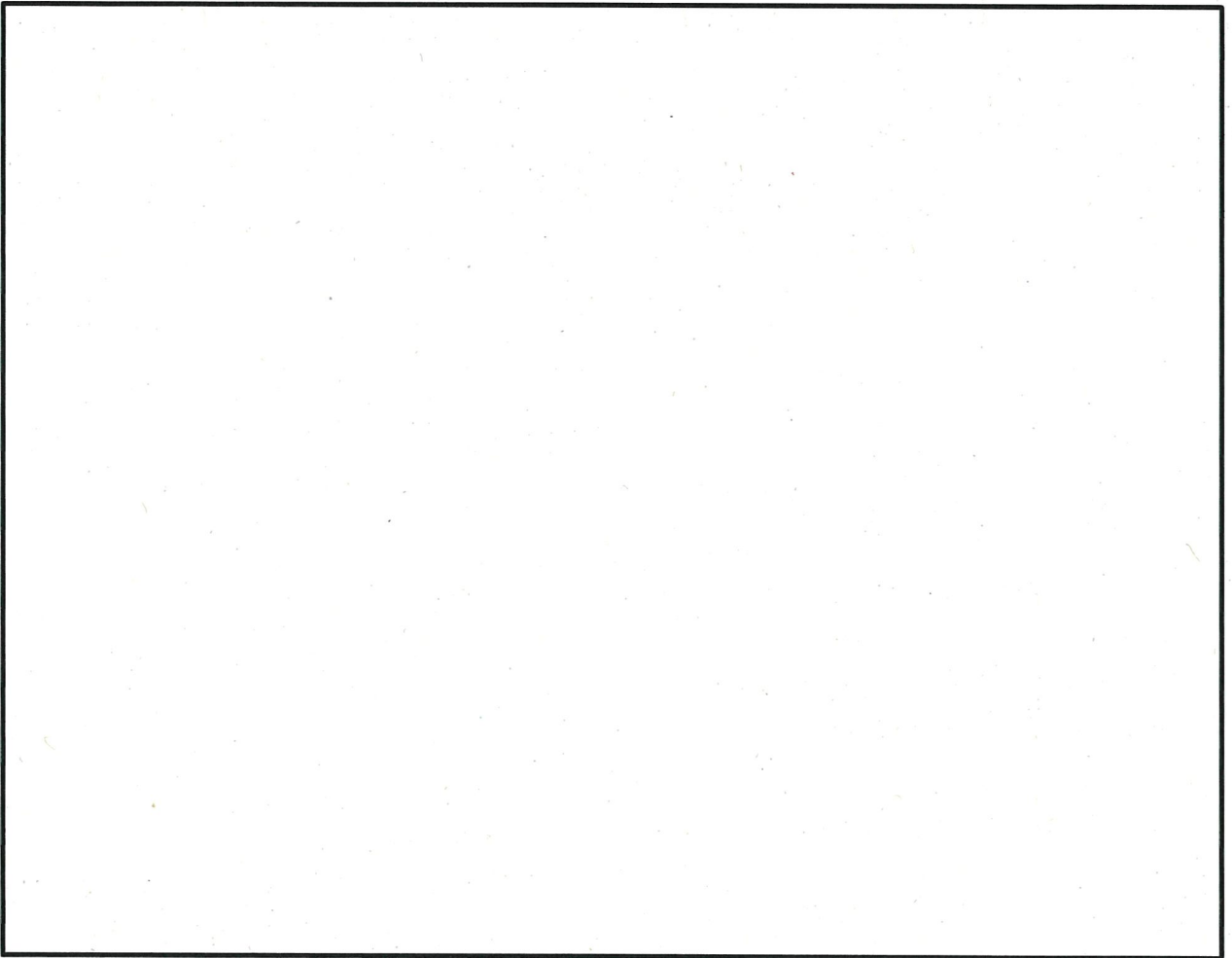
燃料有効長



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

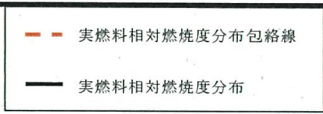
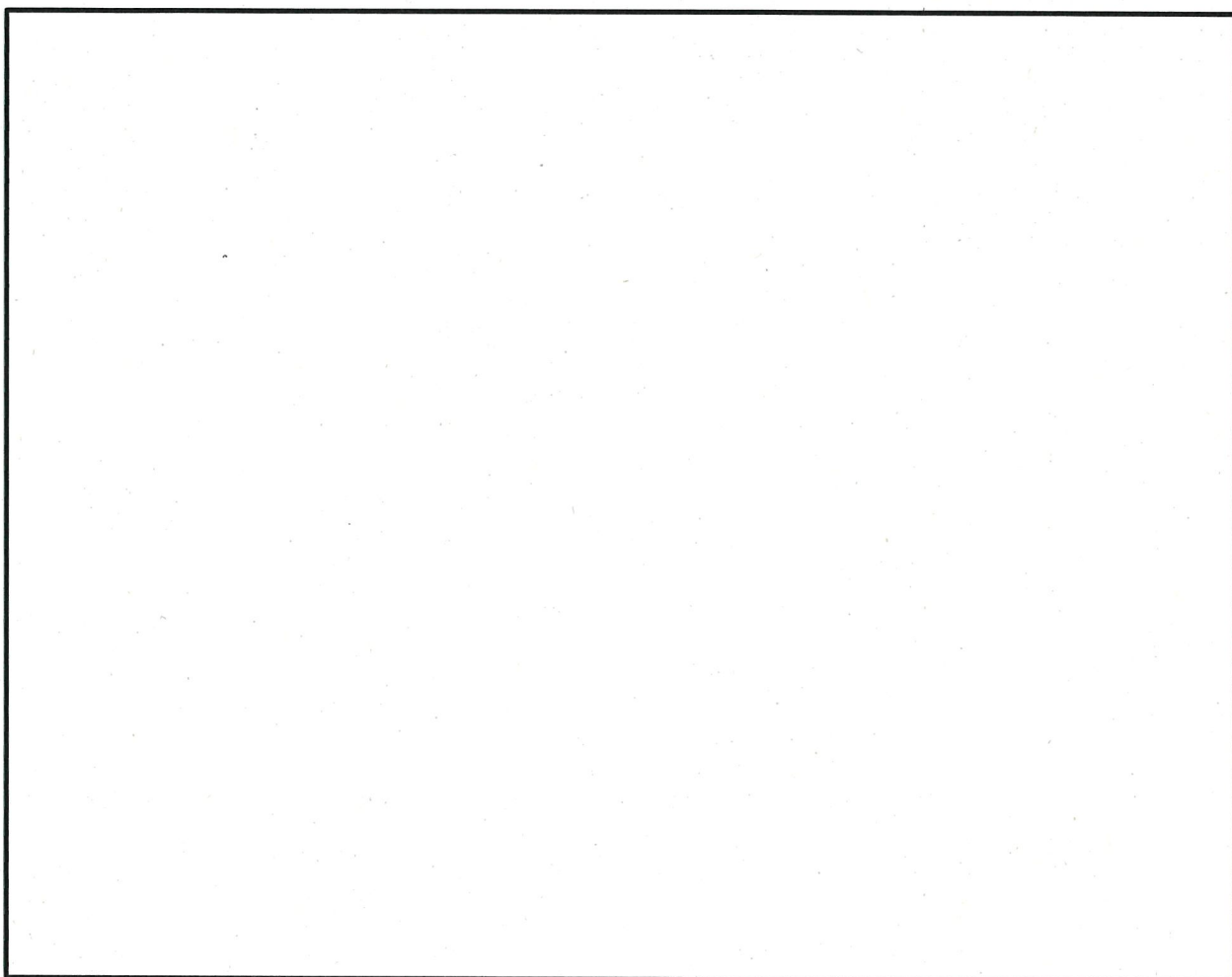




- - - 実燃料相対燃焼度分布包絡線  
 — 実燃料相対燃焼度分布 (初期ウラン濃縮度 4.1wt%燃料)  
 — 実燃料相対燃焼度分布 (初期ウラン濃縮度 3.4wt%燃料)

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 $\mu$ Sv/h	84 $\mu$ Sv/h	100 $\mu$ Sv/h 以下	

第 2.5.3-4 表 線量当量率評価結果 (MSF-24P 型)

(単位:  $\mu$  Sv/h)

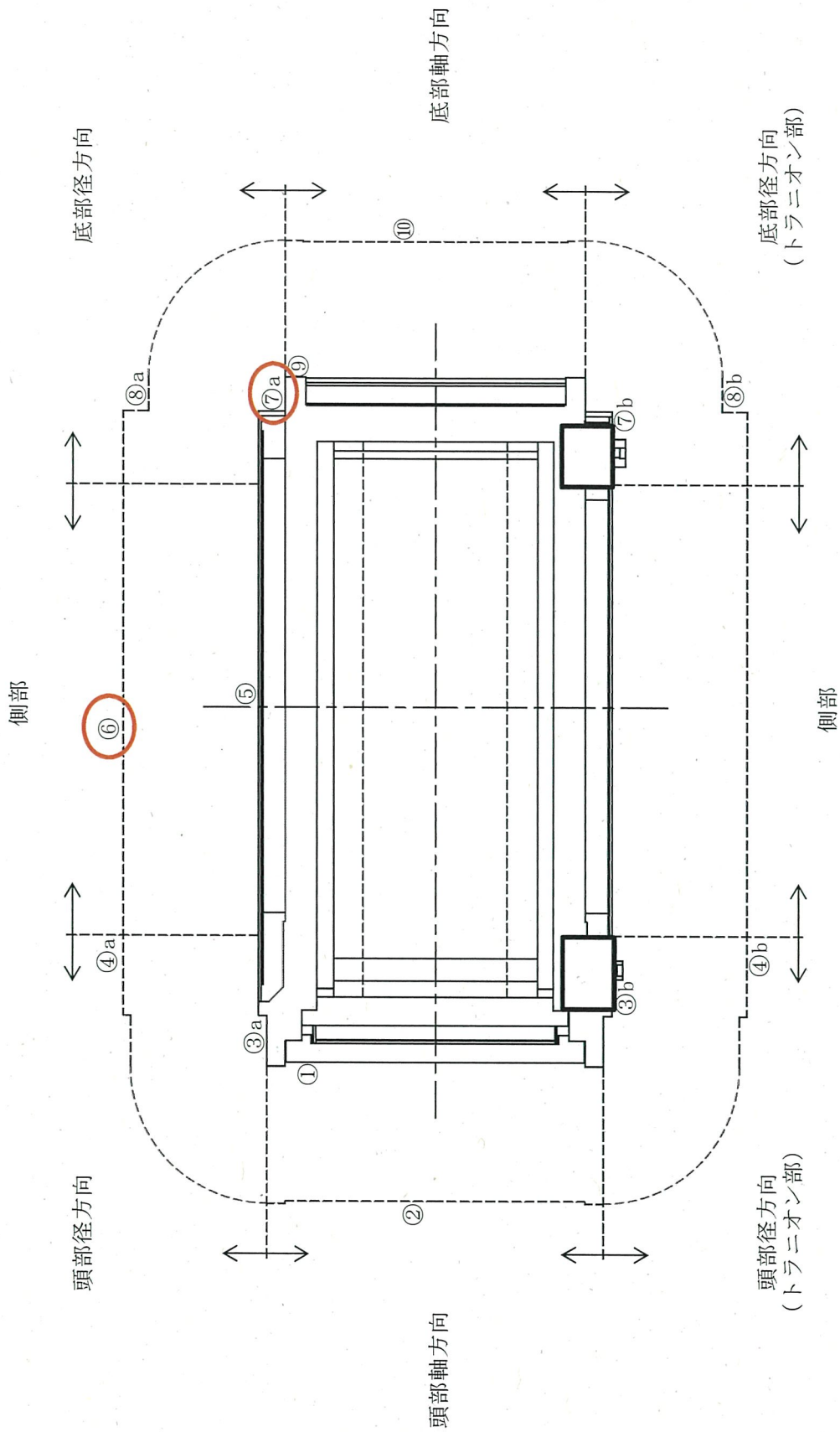
評価点	頭部			側部	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨
ガンマ線	燃料有効部	<0.1	8.0	100.7	4.0	5.4	<0.1
	構造材放射化	0.4	103.0	25.9	6.6	13.4	0.3
	二次ガンマ線	0.8	2.3	25.7	7.4	4.8	0.9
中性子	333.7	804.2	741.4	45.1	1807.3	1108.3	222.6
合計	335.0	807.7	858.1	197.4	<u>1825.3</u>	1131.9	223.9
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
ガンマ線	燃料有効部	0.3	22.5	44.8	9.0	7.9	4.9
	構造材放射化	3.5	20.1	12.5	7.4	6.1	28.8
	二次ガンマ線	0.4	5.4	10.4	3.0	2.8	3.6
中性子	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:  $\mu$  Sv/h)

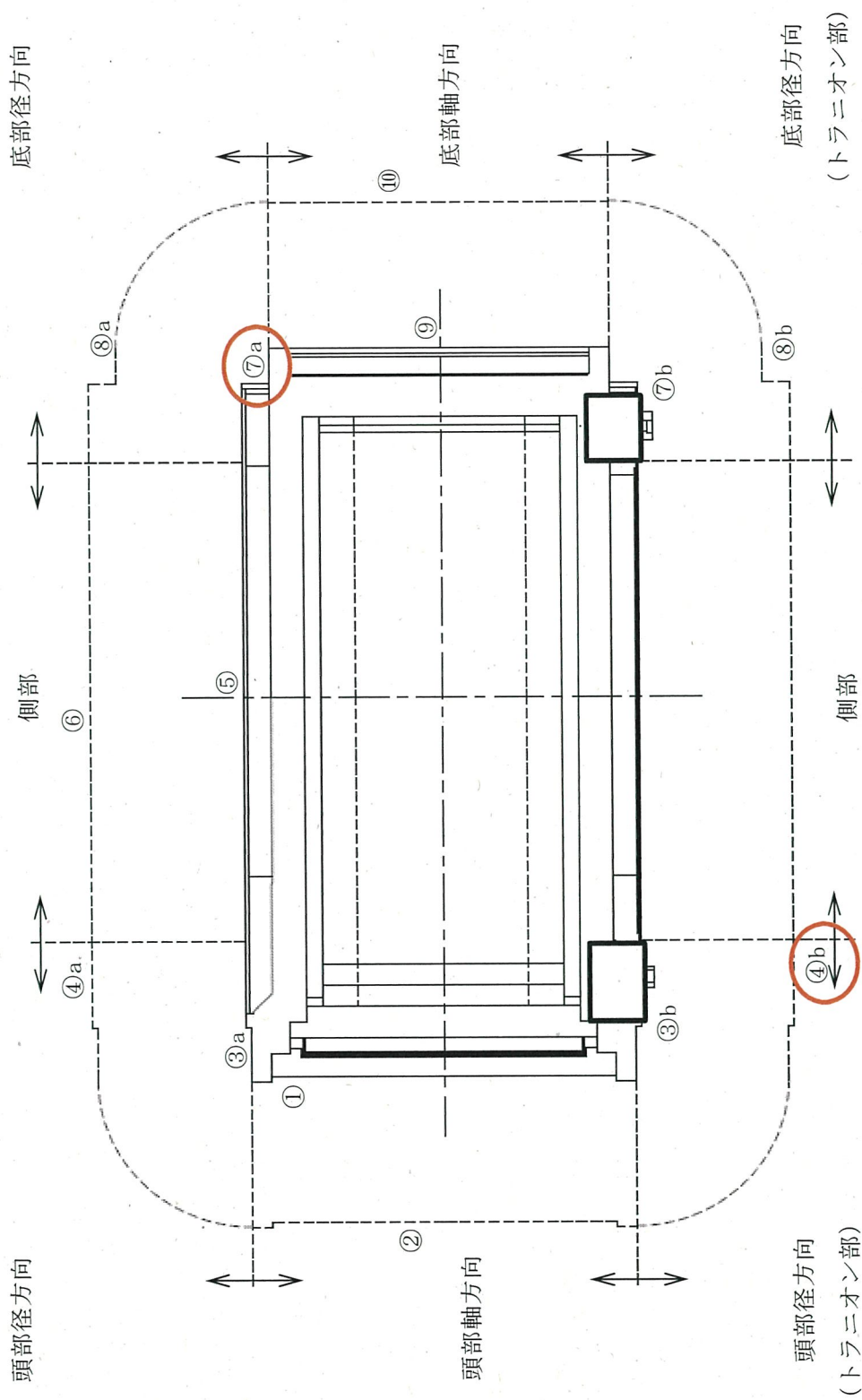
評価点	頭部			側部	底部			
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向	
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨	
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	4.8	93.0	3.0	4.0	8.2
		構造材放射化	0.4	85.2	11.5	6.2	11.7	112.7
		二次ガンマ線	0.7	5.7	24.4	7.1	4.5	12.4
表面から1m	ガンマ線	中性子	262.8	1022.9	55.1	1548.1	925.5	44.7
		合計	264.0	1118.6	184.0	<u>1564.4</u>	945.7	178.0
表面から1m	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	41.4	8.8	7.3	2.9
		二次ガンマ線	3.7	28.1	6.7	6.5	4.8	34.5
表面から1m	ガンマ線	中性子	0.4	5.0	9.7	2.8	2.6	3.4
		合計	50.6	23.8	22.1	51.1	60.9	20.2
合計		54.9	79.2	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)