

別 添

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閉じ込め機能について)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの閉じ込め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項一号イ

- ・燃料体等の落下により燃料体等が破損して放射性物質の放出により公衆に放射線障害を及ぼすおそれがある場合において、放射性物質の放出による公衆への影響を低減するため、燃料貯蔵設備を格納するもの及び放射性物質の放出を低減するものとする。

②設置許可基準規則第16条第4項三号

- ・使用済燃料が内包する放射性物質を閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができるものとする。

③設置許可基準規則解釈別記4第16条第4項

- ・第16条第4項第3号に規定する「放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができる」とは、次項に規定するもののほか、使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（以下「貯蔵事業許可基準規則解釈」という）第5条第1項第1号及び第2号並びに第17条第1項第1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5条第1項
第5条に規定する「限定された区域に適切に閉じ込めることができるもの」とは、以下の設計をいう。
 - 一 金属キャスクは、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料等を内封する空間を負圧に維持できる設計であること。
 - 二 金属キャスクは、多重の閉じ込め構造を有する蓋部により、使用済燃料等を内封する空間を容器外部から隔離できる設計であること。
- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第17条第1項
第1項に規定する「適切に監視することができる」とは、以下の設計をいう。
 - 一 蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。

④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 2.4 閉じ込め機能」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、兼用キャスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができること。
- (2) 密封境界部は、設計上想定される衝撃力に対して、おおむね弾性範囲内にとどまること。
- (3) 閉じ込め機能の異常に対して、その修復性が考慮されていること。

』

【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。
- (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、(2)を満たすものであること。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。

(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。

(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。

』

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。

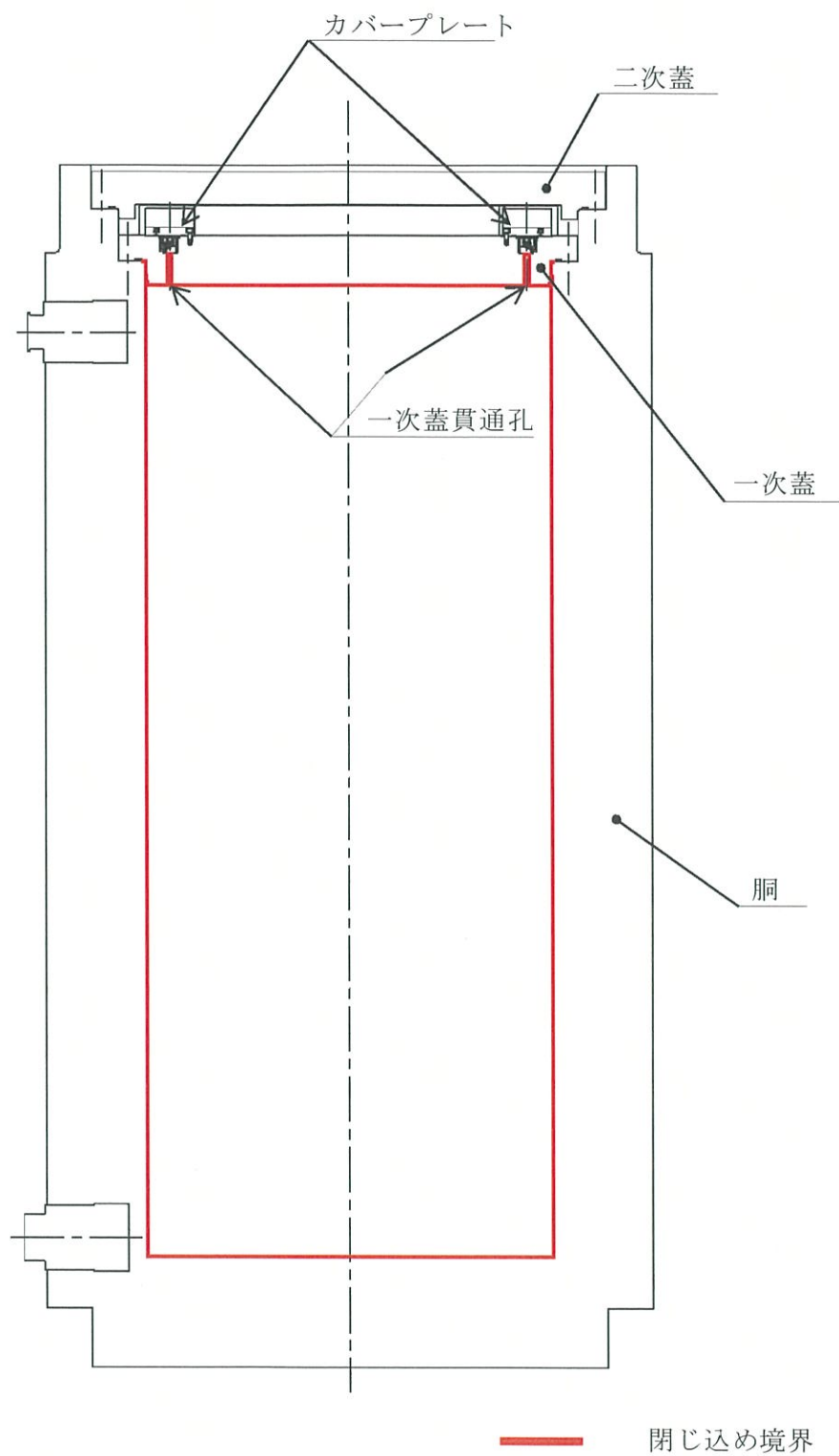
乾式キャスクの閉じ込め構造を第2.5.1-1図に、シール部詳細を第2.5.1-2図に示す。

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。

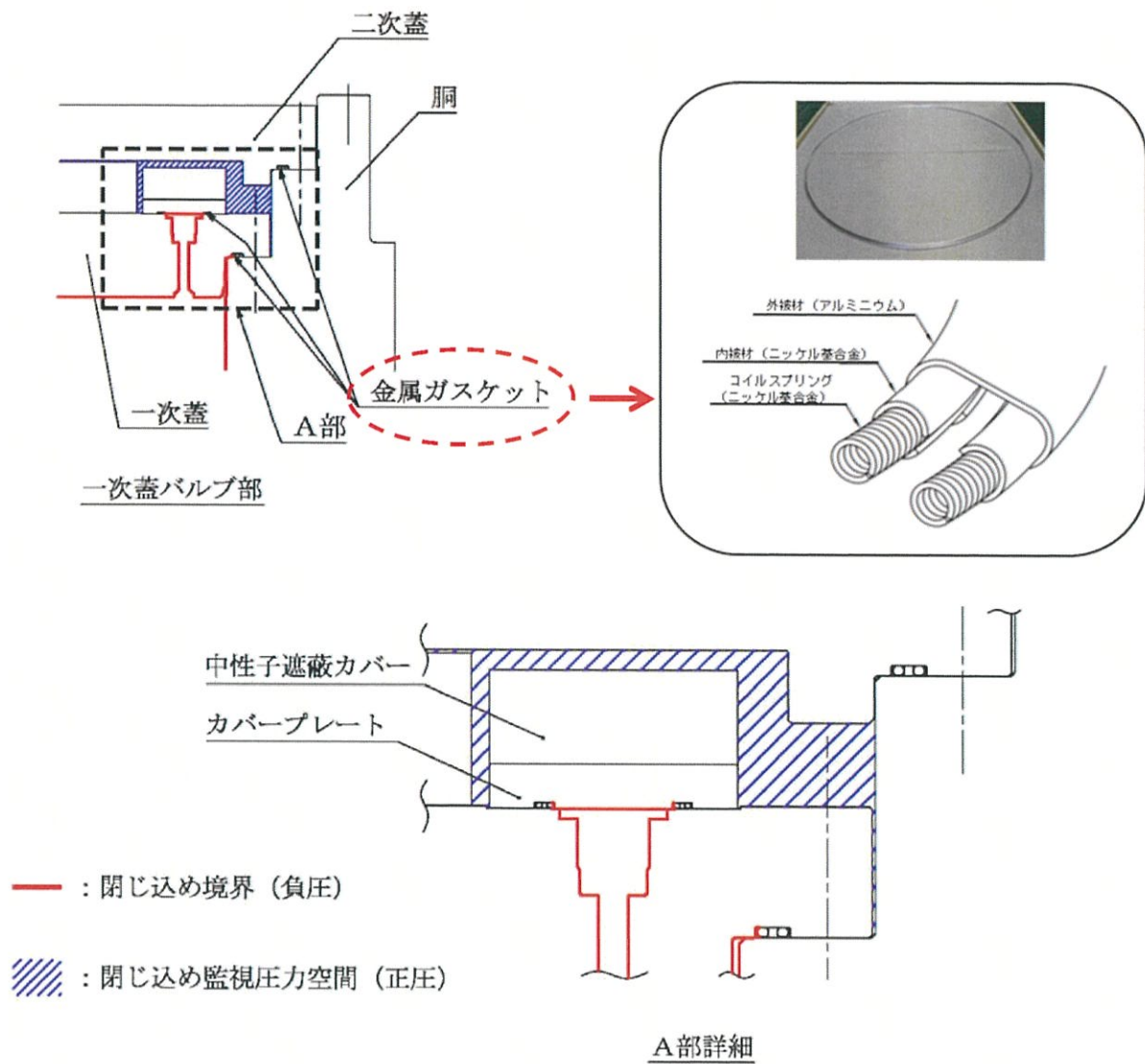
乾式貯蔵施設内では、乾式キャスクの閉じ込め境界を有する一次蓋は開放せず、内包する放射性物質の閉じ込めを乾式キャスクのみで担保する設計とする。

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（ 9.7×10^4 Pa）に維持する設計とする。



第 2.5.1-1 図 乾式キャ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 9.7×10^4 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 %¹⁾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。

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

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 (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²⁾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 (m^3/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)
- $$P_a = \frac{P_u + P_d}{2}$$
- μ : 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 ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

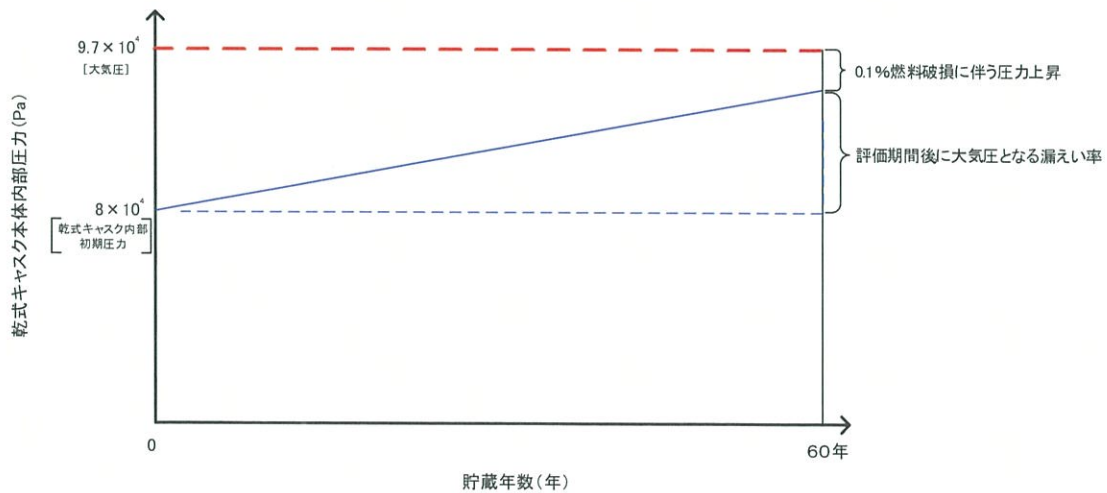
- b) 漏えい孔径 D_0 を設定し (3.2) の式により漏えい率 Q を求める。Q を (3.1) の式に入力し、時間 t で積分することにより、設計貯蔵期間経過後の乾式キ

ヤスク本体内部圧力 P_d を求める。

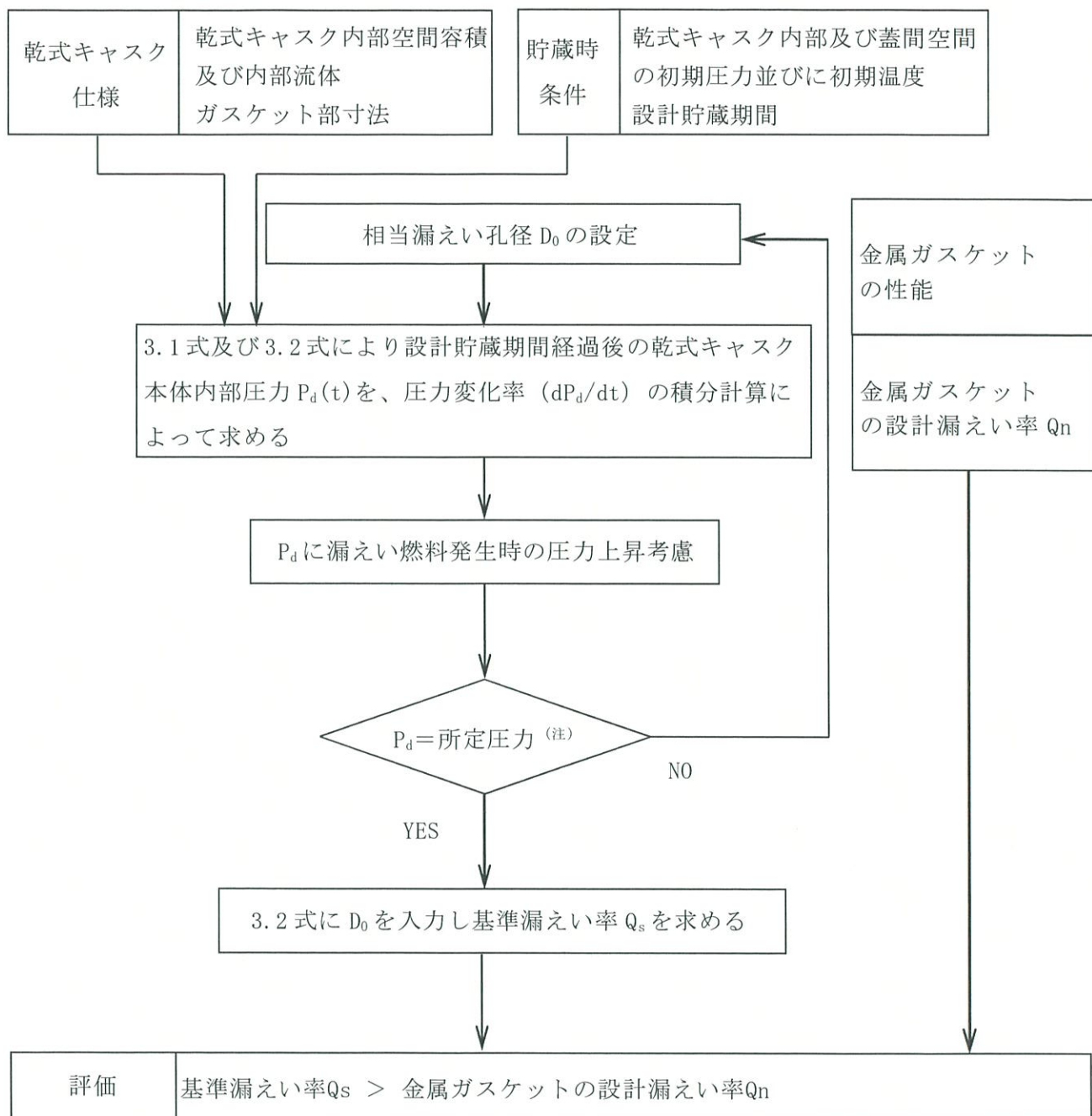
- c) b)により求めた P_d が正圧の場合はより小さな漏えい孔径 D_0 を、負圧の場合はより大きい漏えい孔径 D_0 を設定して、a)～b)を繰り返し、 P_d が大気圧 (9.7×10^4 Pa) となる漏えい孔径 D_0 を求める。
- d) 判定基準である金属ガスケットの漏えい率と比較するため、c)により求めた D_0 を固定し、(3.2) の式に金属ガスケットの漏えい率を求めた試験条件 ($P_u = 1.01 \times 10^5$ Pa、 $P_d = 0$ Pa、 $T = 298.15$ K) を入力し、基準漏えい率 Q_s を求める。

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。

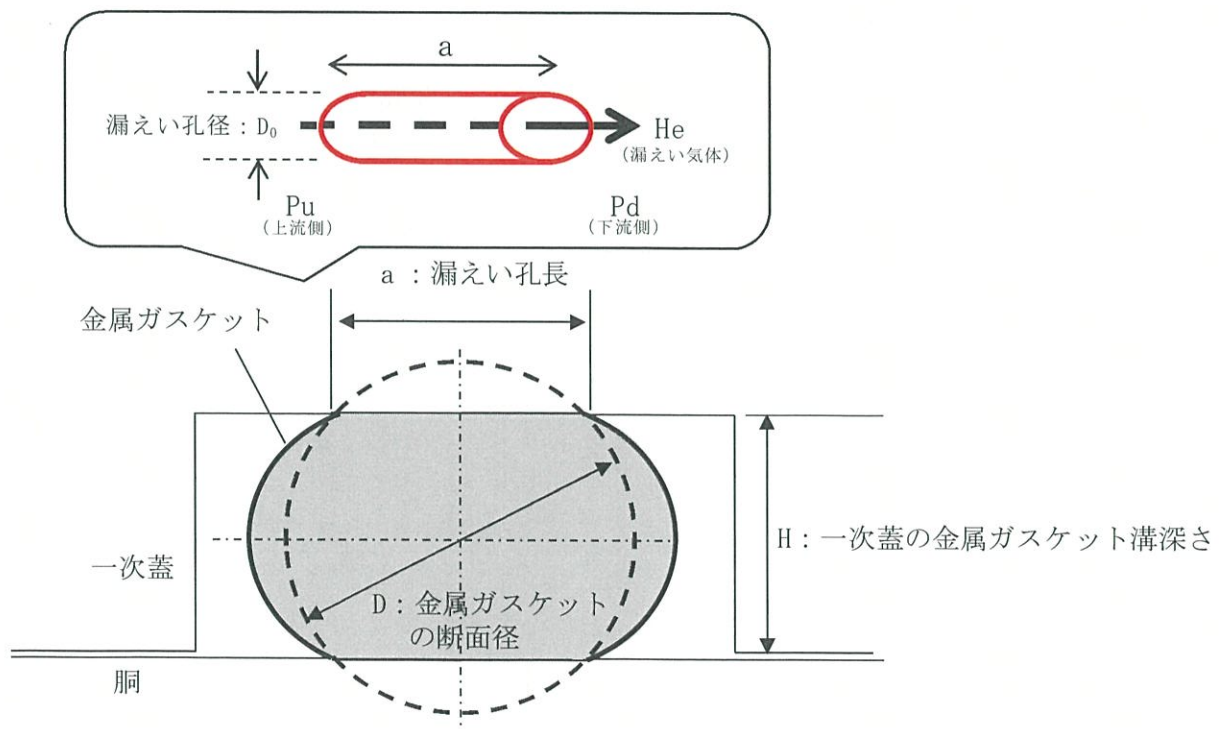
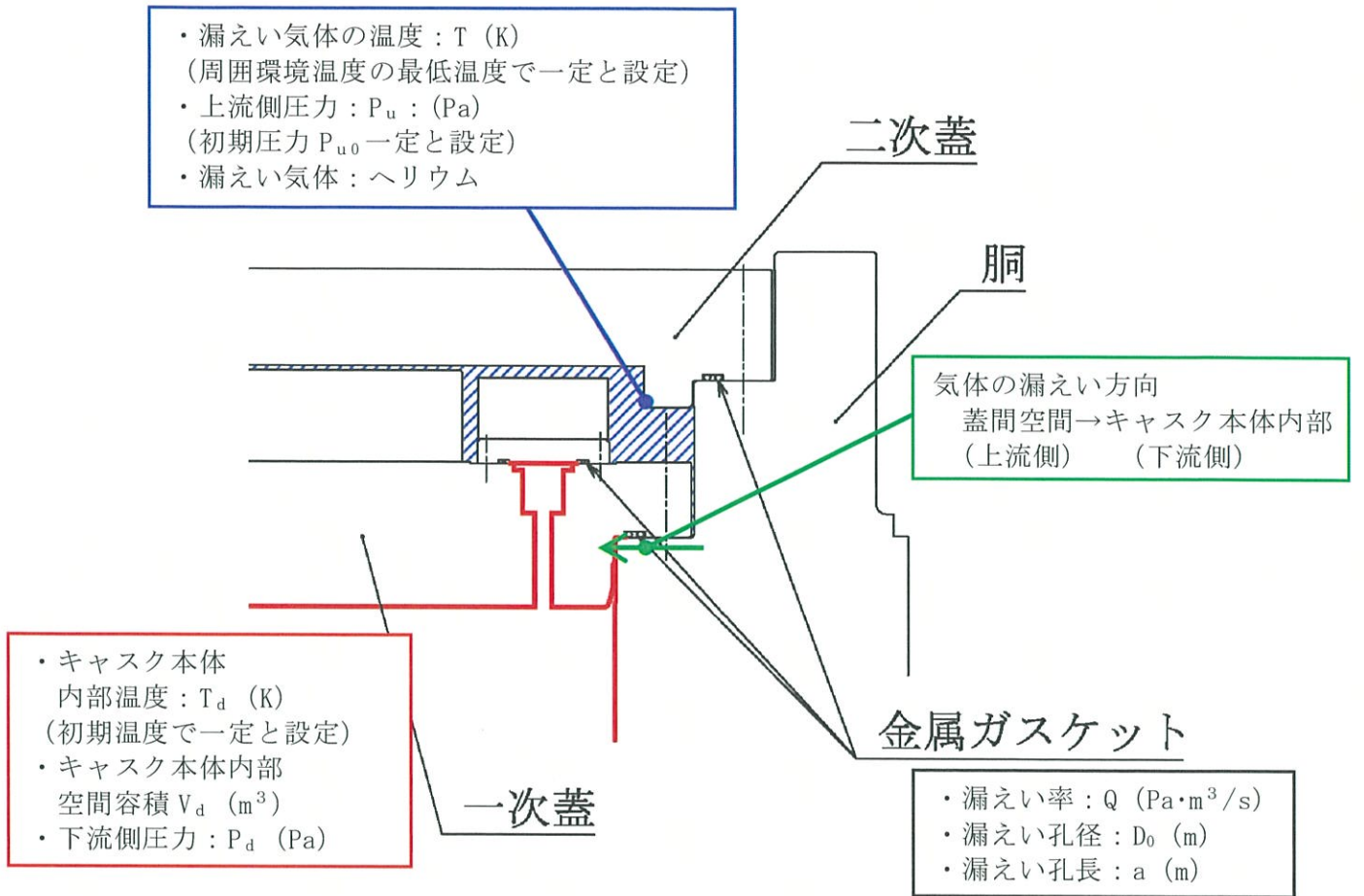


第 2.5.1-3 図 乾式キャスク漏えい率の考え方



(注)所定圧力は、大気圧の変動を考慮し、 9.7×10^4 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

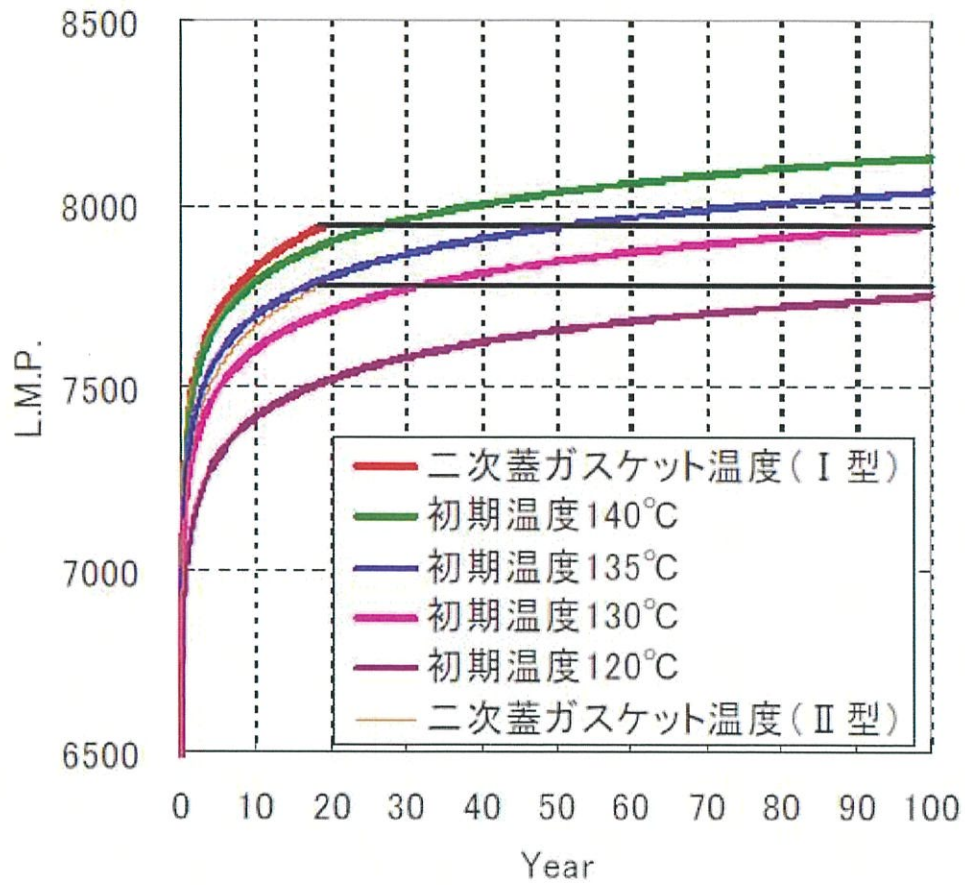
閉じ込め設計の評価条件及び評価結果を第 2.5.1-1 表に示す。使用する金属ガスケットの漏えい率が基準漏えい率より小さいことを確認した。

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)	5.51×10^{-6}	5.57×10^{-6}
a : 漏えい孔長 (m)	4.56×10^{-3}	
μ : 漏えい気体 (ヘリウム) の粘性係数 (Pa·s)	1.985×10^{-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)	5.05×10^4	
P_{u0} : 上流側の初期圧力 (Pa)	1.01×10^5 (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 ³ /s)	2.49×10^{-6}	2.58×10^{-6}
金属ガスケットの漏えい率 ^{3), 4)}	1×10^{-8} Pa·m ³ /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⁴⁾。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⁴⁾。

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。

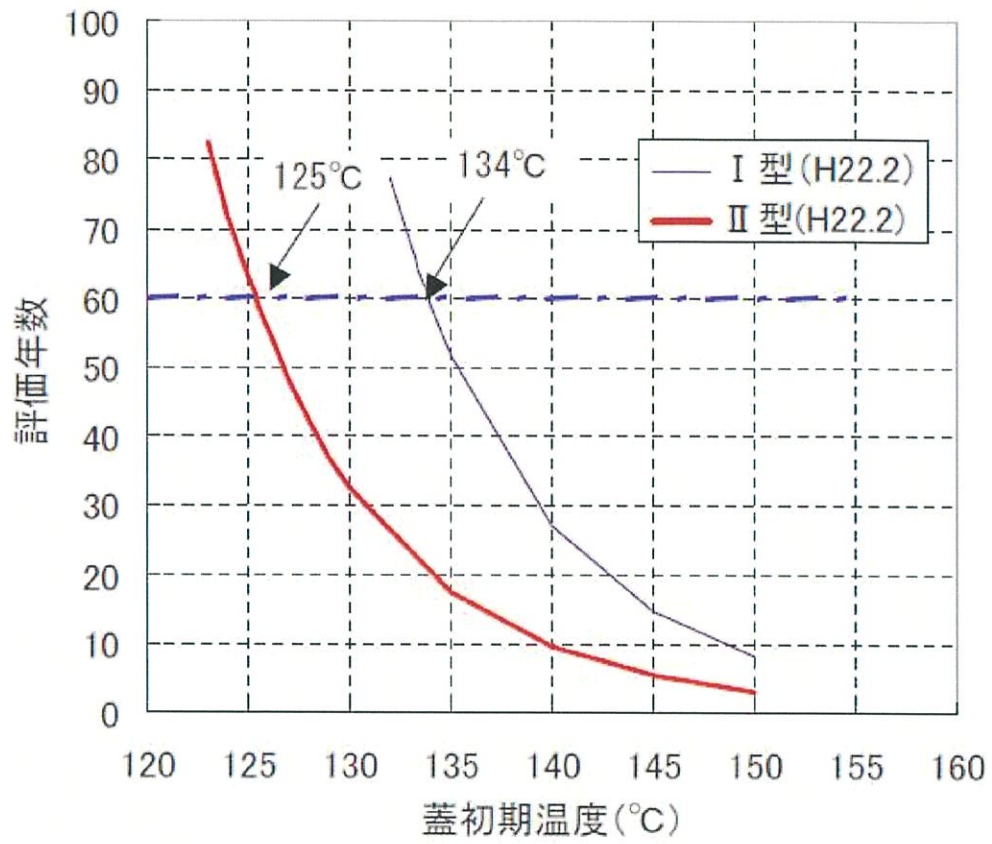


$$LMP = T \cdot (14 + \log t)$$

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 ⁴⁾



第 2.5.1-7 図 蓋初期温度と評価年数の関係 ⁴⁾

〔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の対応フローを第 2.5.1-8 図に示す。

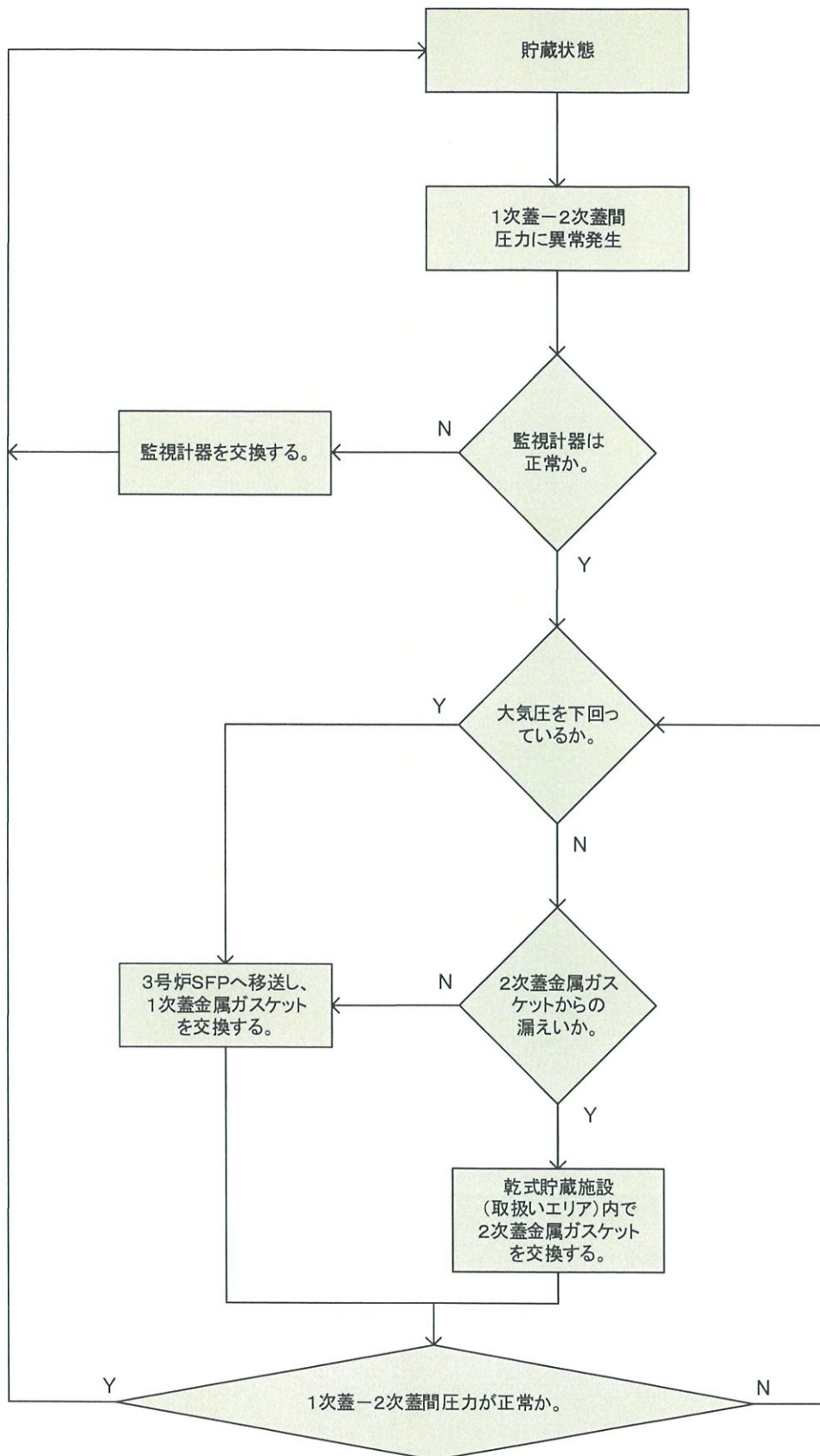
蓋間圧力が管理値を下回っている場合、まず、監視計器の確認を行い、監視計器異常の場合には監視計器を交換し、貯蔵を再開する。

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。

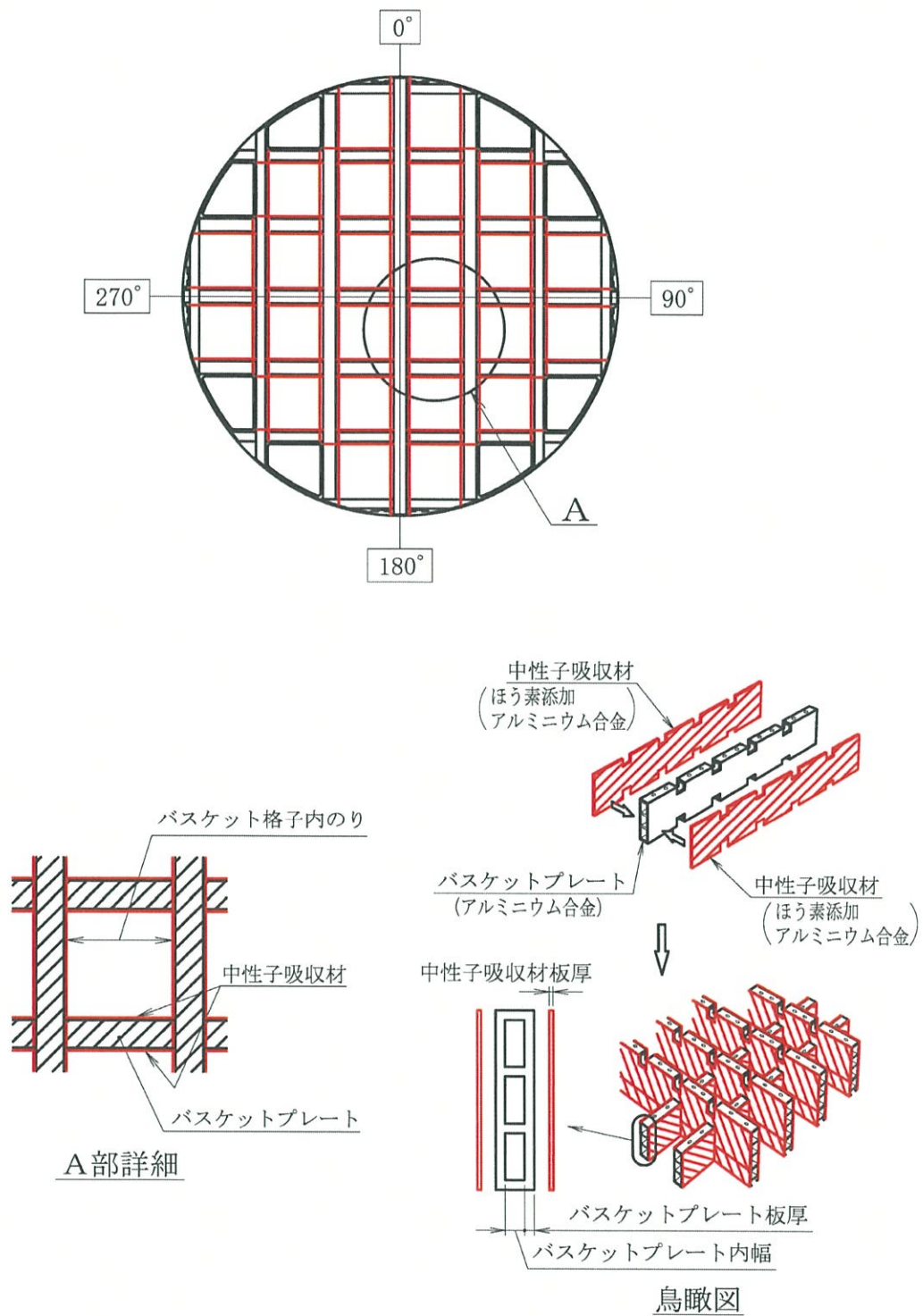
兼用キャスクが滑動する可能性がある場合は、滑動等による兼用キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮すること。

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。

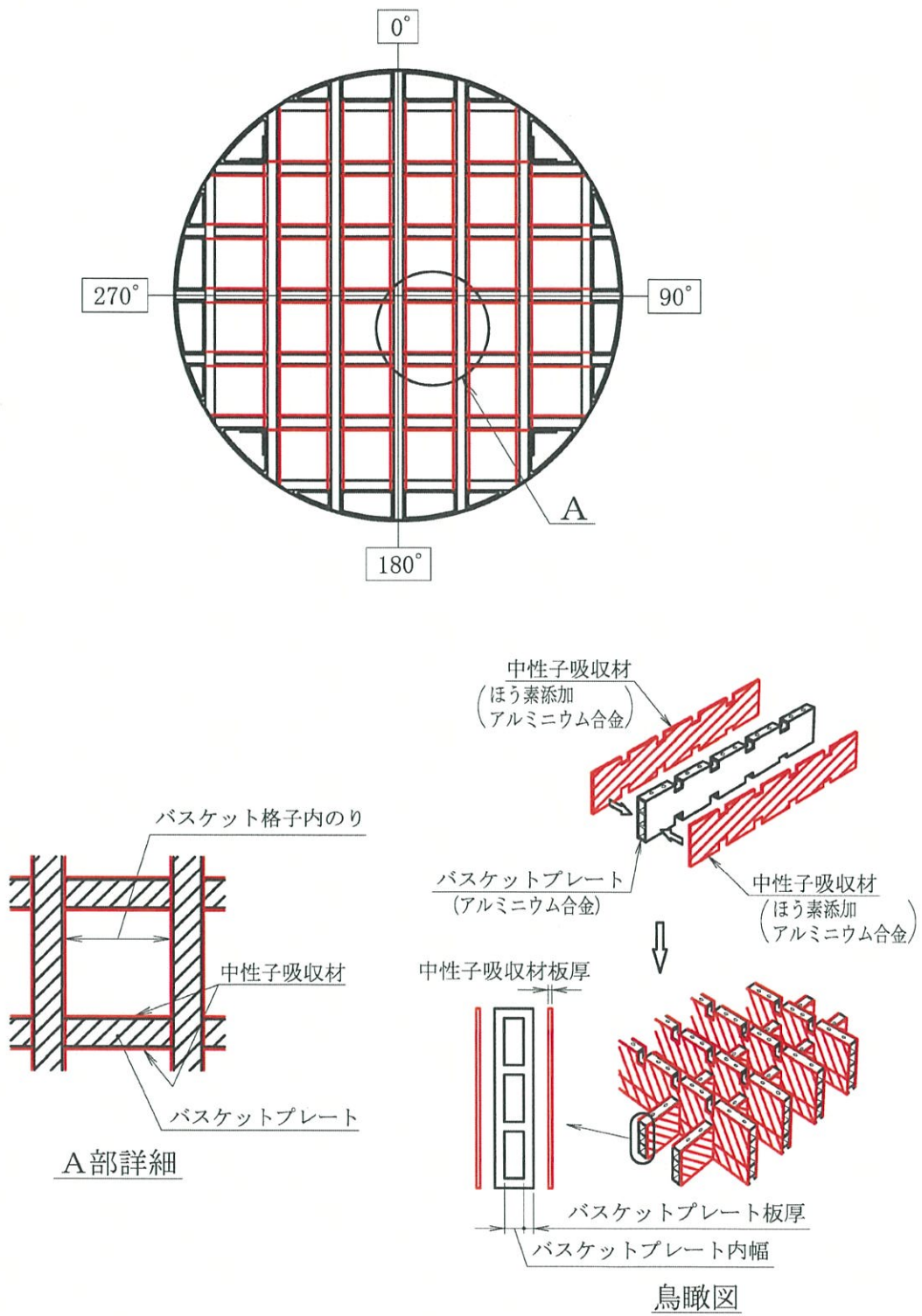
乾式キャスクのバスケットは、断面形状が中空状であるアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成された格子構造であり、個々の使用済燃料を乾式キャスク本体内部の所定の位置に収納する。また、バスケットプレートと中性子吸収材を併せて配置することで臨界を防止する構造とする。（第2.5.2-1図, 第2.5.2-2図参照）

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」に示す。

なお、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、実効増倍率が最も大きくなる水密度を 1.0 g/cm^3 とした解析を行う。

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 0GWd/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。

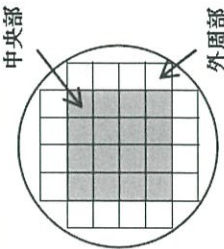
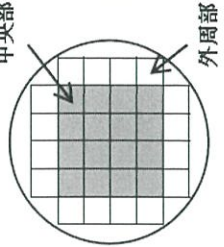
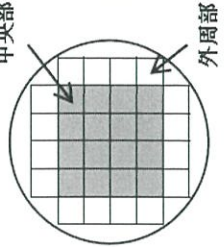
－ バスケット格子内で使用済燃料が偏ることにより実効増倍率が変化するため、バス

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。

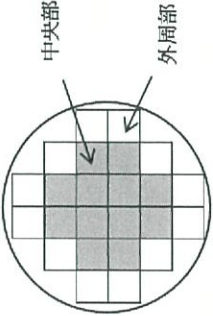
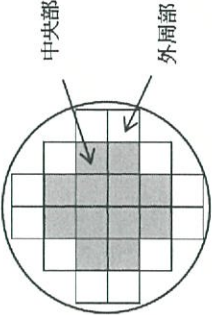
具体的には、MSF-24P 型は、乾燥状態では、外周部及び中心部の使用済燃料ともに、中心偏向配置とし、冠水状態で、外周部の使用済燃料は外周、中央部の使用済燃料は中心偏向配置とする。MSF-32P 型は、乾燥状態及び冠水状態いずれの場合においても外周部及び中心部の使用済燃料ともに、中心偏向配置とする。

- －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
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)		
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	0	0
	SFPでの冷却期間 (年)	≥15	≥25	—	—	—	—
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤45	≤33	—	—	0	0
収納物仕様	配置		配置		配置		
キャスク 1基あたり							

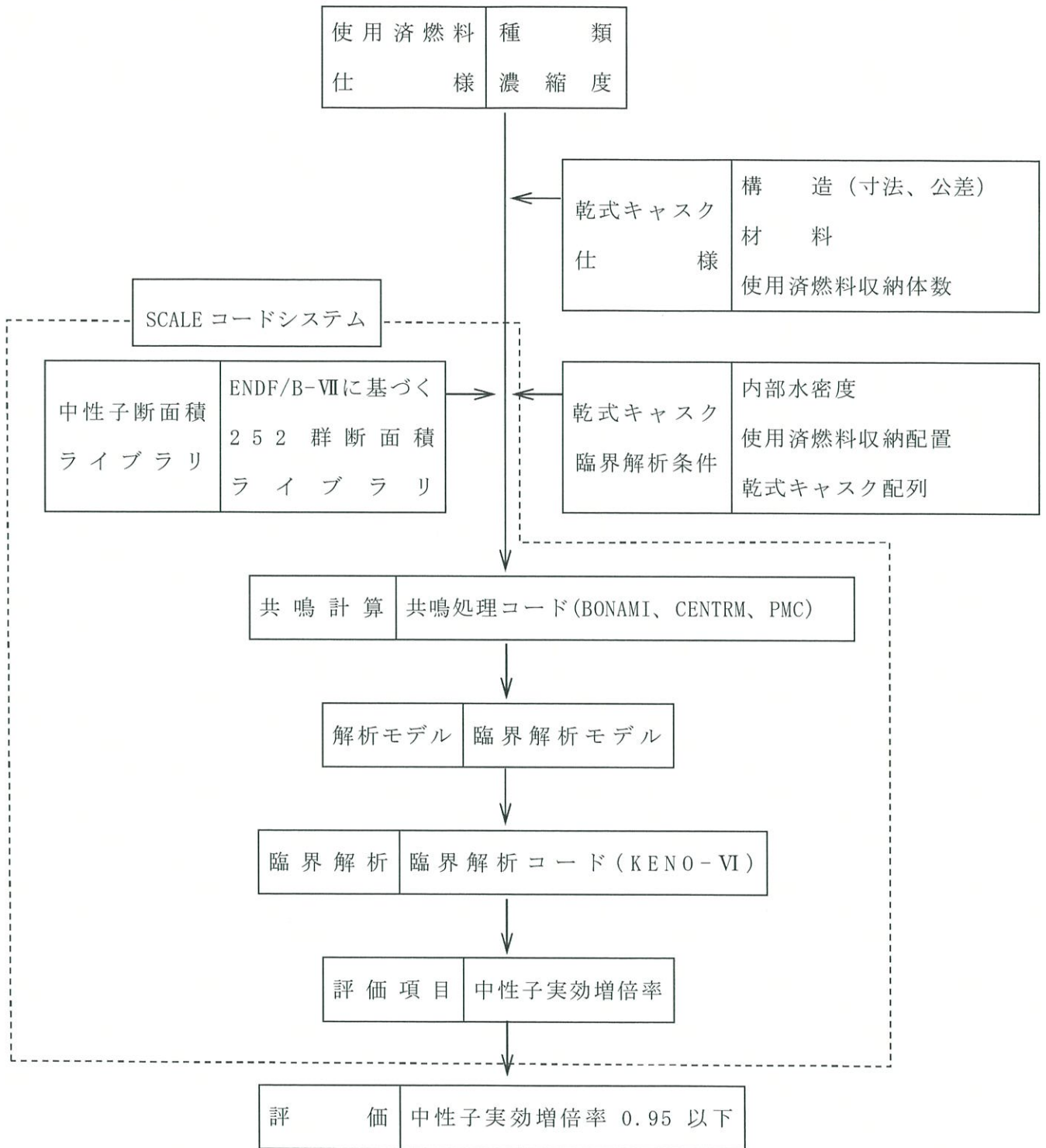
第 2.5.2-2 表 3 号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

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
初期ウラン濃縮度 (wt%)	17×17 型 (A/B 型)		17×17 型 (A/B 型)	17×17 型 (A 型)	
ウラン重量 (kg)	≤ 4.2		4.1		
燃料集合体 1 体の 仕様	≤ 48	≤ 44	≤ 48	0	
最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	A 型 : ≥ 15 ^{※1} B 型 : ≥ 17		—	—	
SFP での冷却期間 (年)	≤ 90	—	—	—	
パーアブル ポイズン	≥ 15	—	—	—	
キャスク 1 基あたり	≤ 44		—	0	
平均燃焼度 (GWd/t)			—		
配置			—		

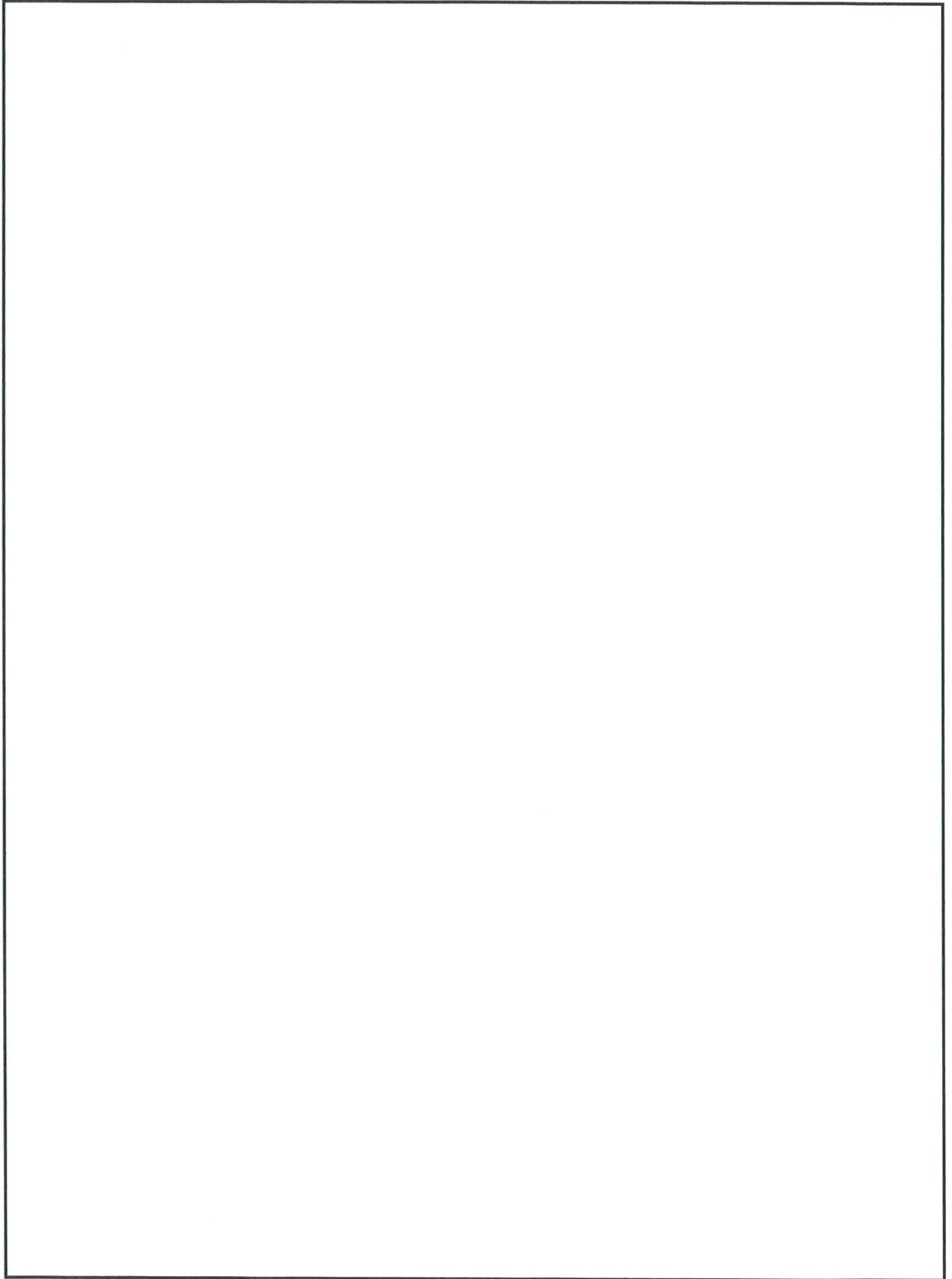
※1: 回収ウラン燃料については、15 年冷却した通常ウラン燃料と放射能量及び発熱量が同程度以下となるよう 20 年以上冷却した後、収納する。

第 2.5.2-3 表 乾式キャスク臨界解析モデル寸法条件

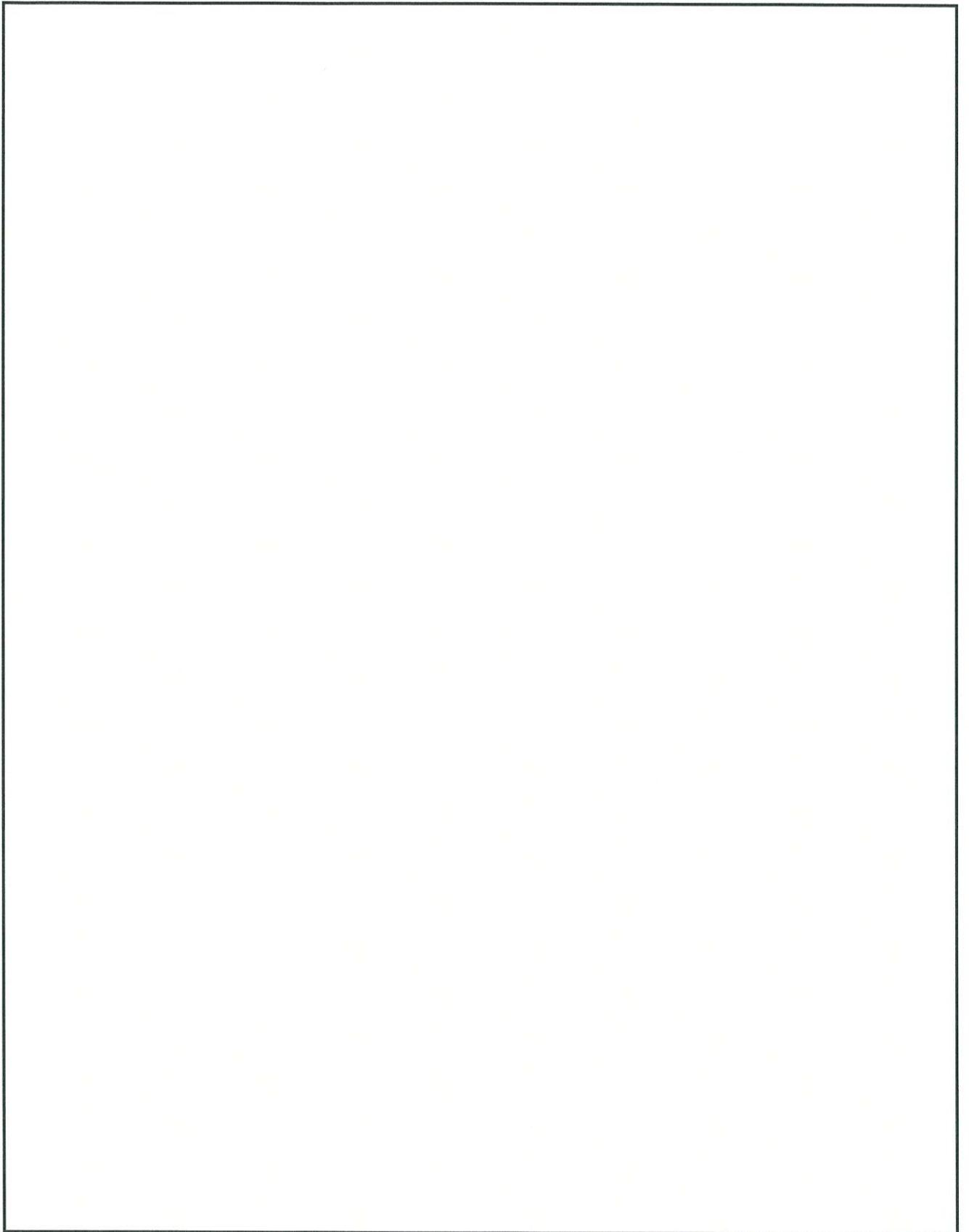
	寸法条件		条件設定根拠
	乾燥状態	冠水状態	
バスケットプレート幅 (アルミニウム合金)	最小	最小	・隣接する燃料との距離が短くなるように乾燥状態、冠水状態共に最小としている。
バスケットプレート内幅 (アルミニウム合金)	最大	最小	・乾燥状態ではバスケットプレートでの中性子吸収効果が小さくなるように最大としている（バスケットプレート幅を固定して内幅を最大とすることでバスケットプレート板厚が最小となる）。 ・冠水状態ではバスケットプレート内幅領域での中性子の減速効果を小さくし、中性子吸収材での中性子吸収効果が小さくなるように、バスケットプレート内幅を最小としている。
バスケット格子内のり	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。



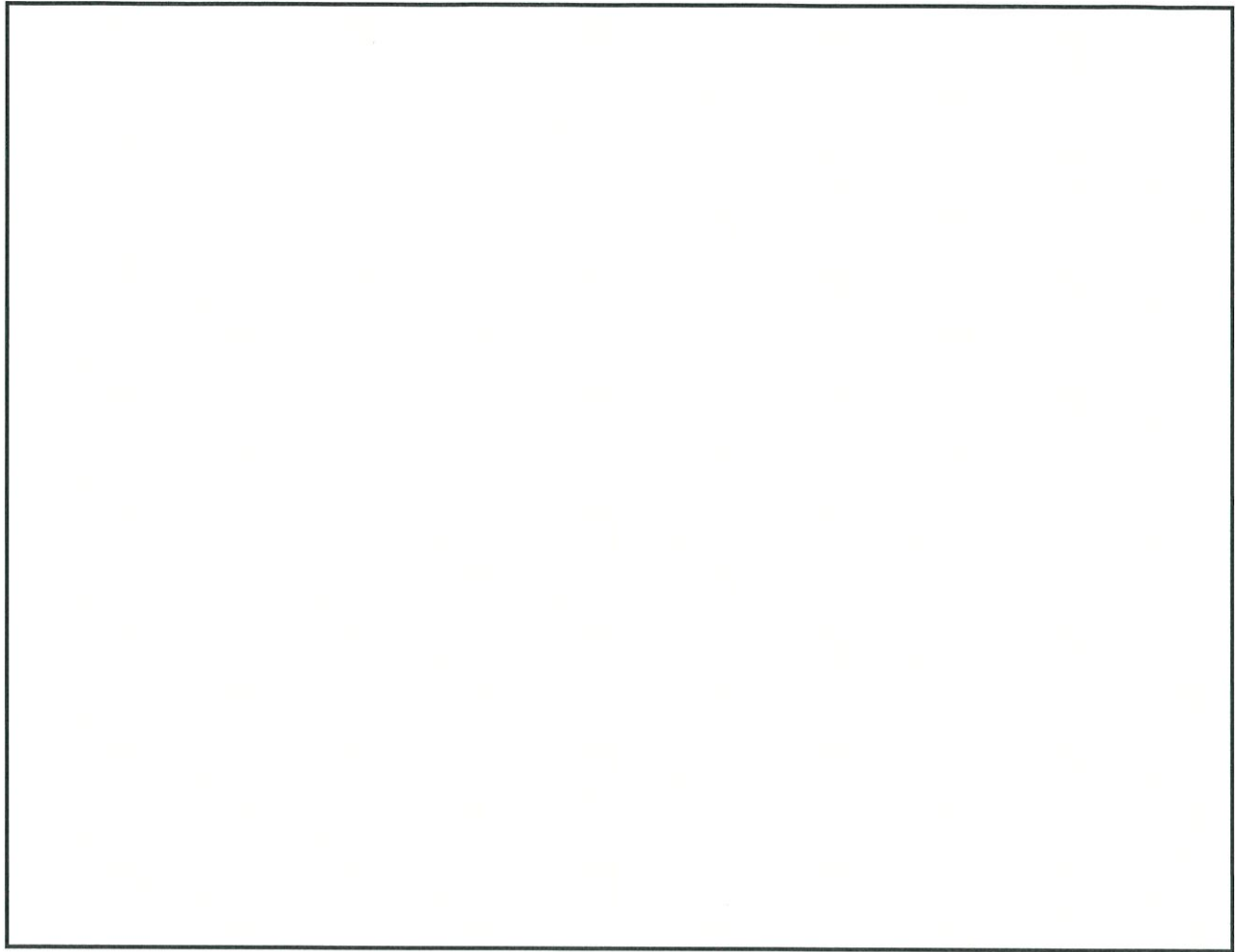
第 2.5.2-3 図 乾式キャスクの臨界解析フロー図



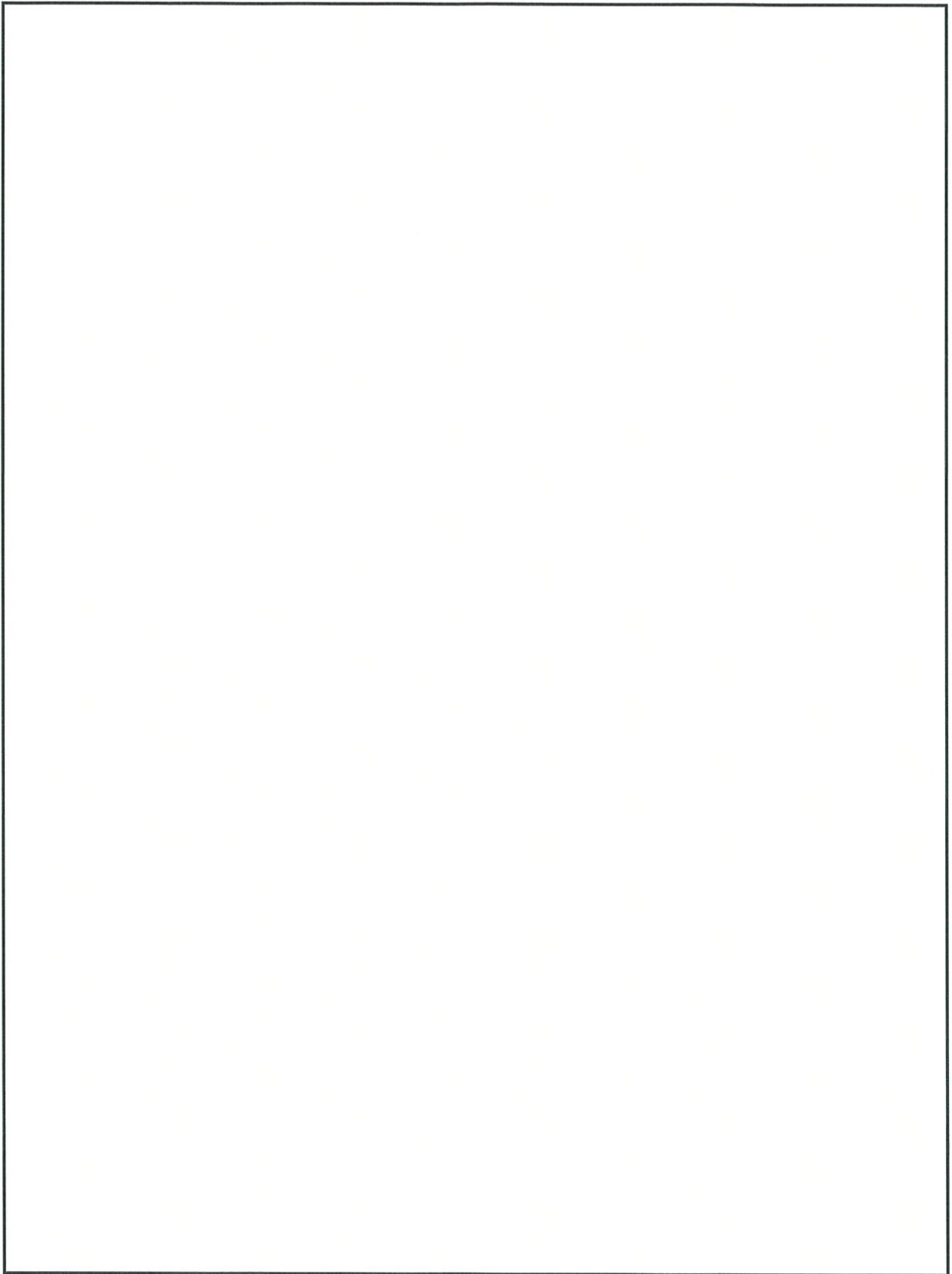
第 2.5.2-4 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-24P 型）（冠水状態）



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）



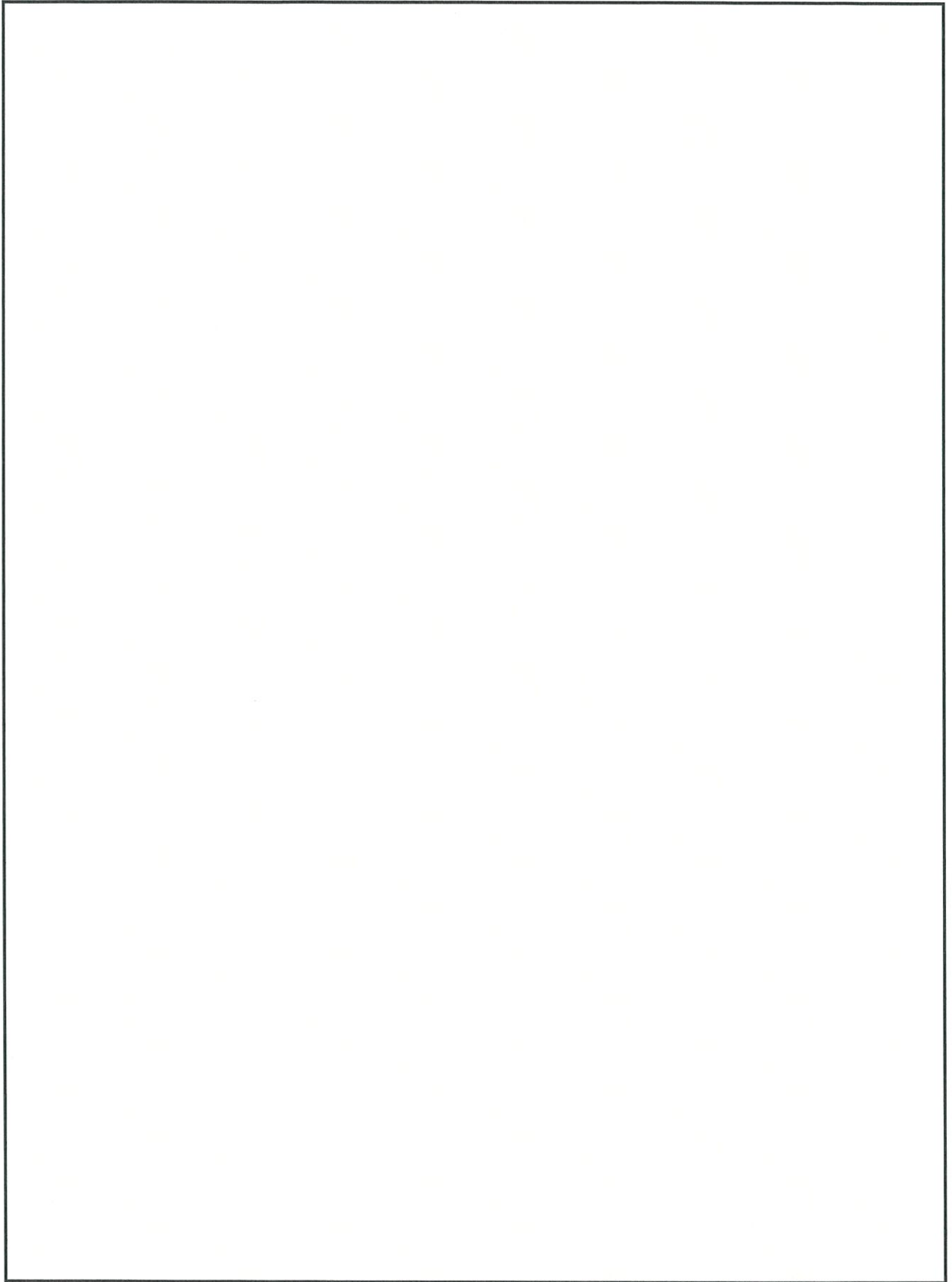
第 2.5.2-7 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-32P 型）（冠水状態）



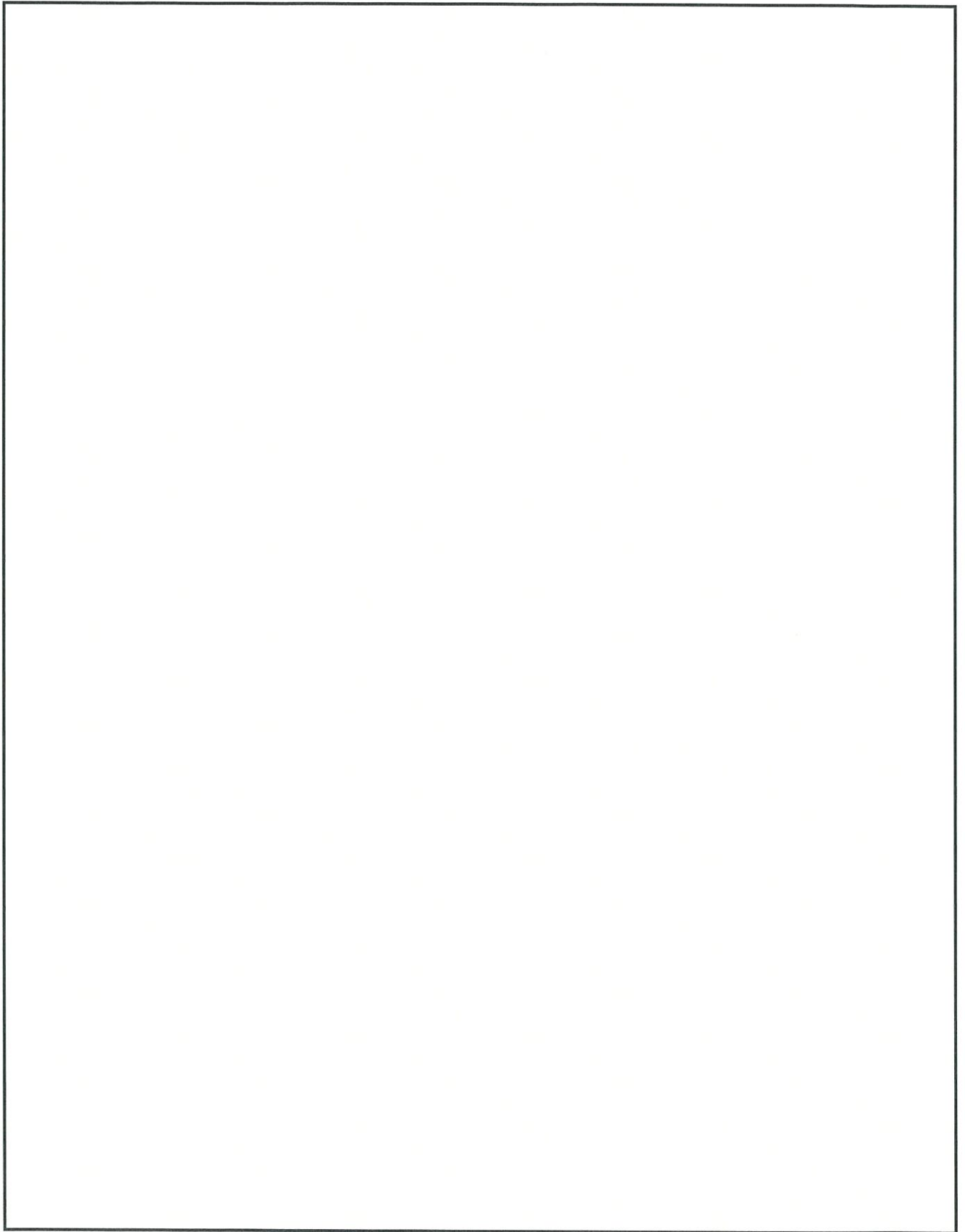
第 2.5.2-8 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-32P 型）（冠水状態）



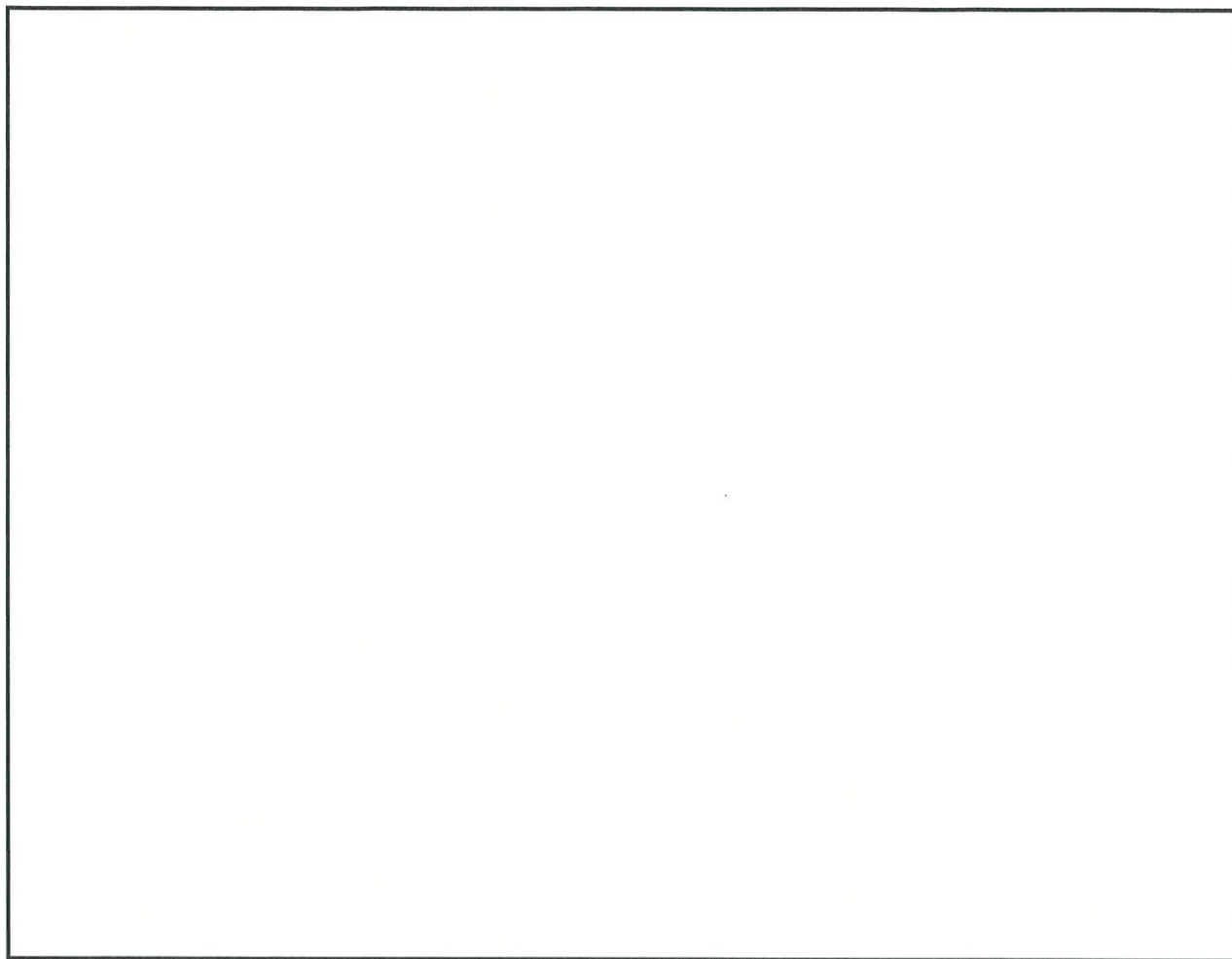
第 2.5.2-9 図 臨界解析モデル (燃料領域拡大図) (MSF-32P 型) (冠水状態)



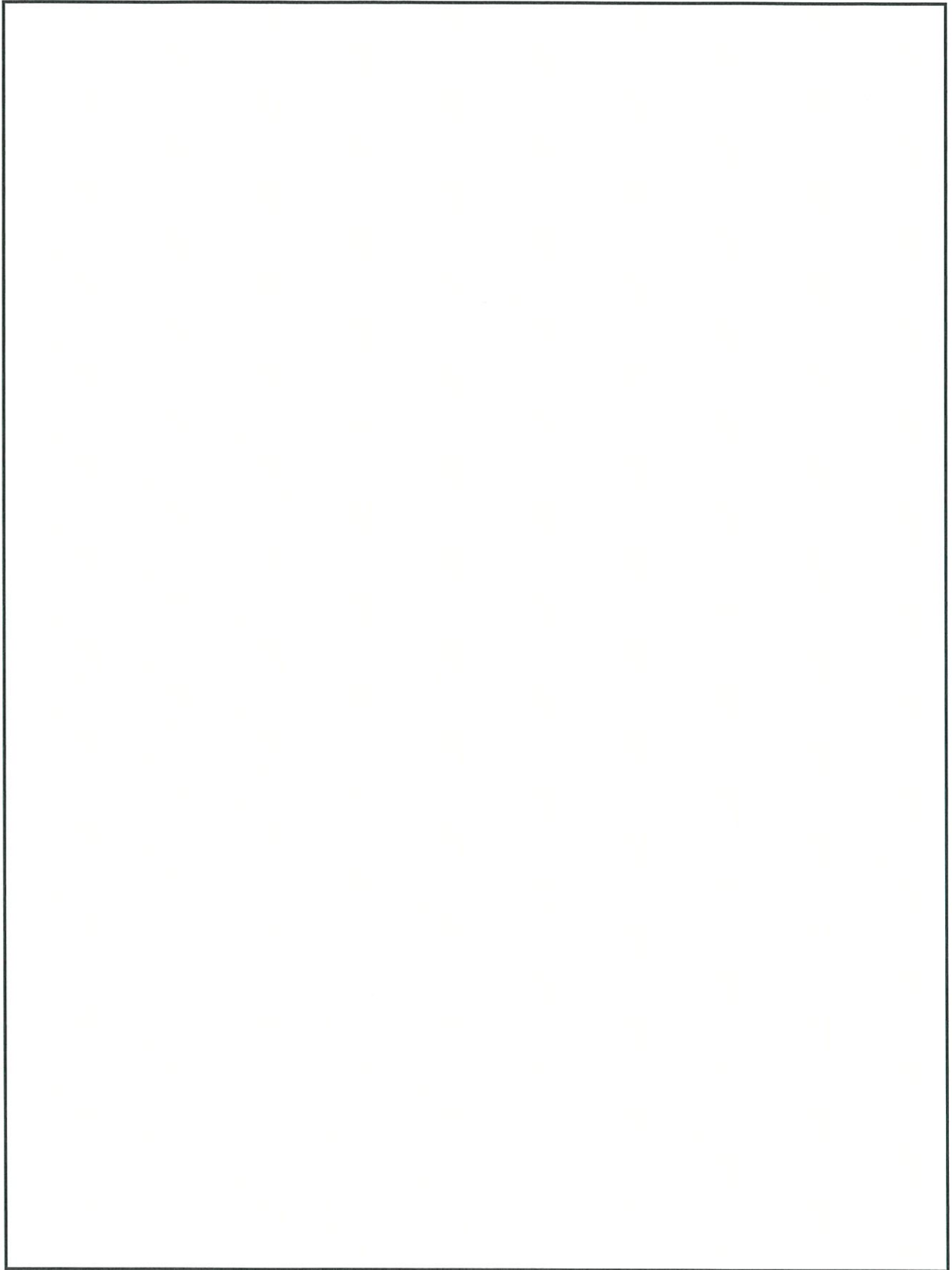
第 2.5.2-10 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）



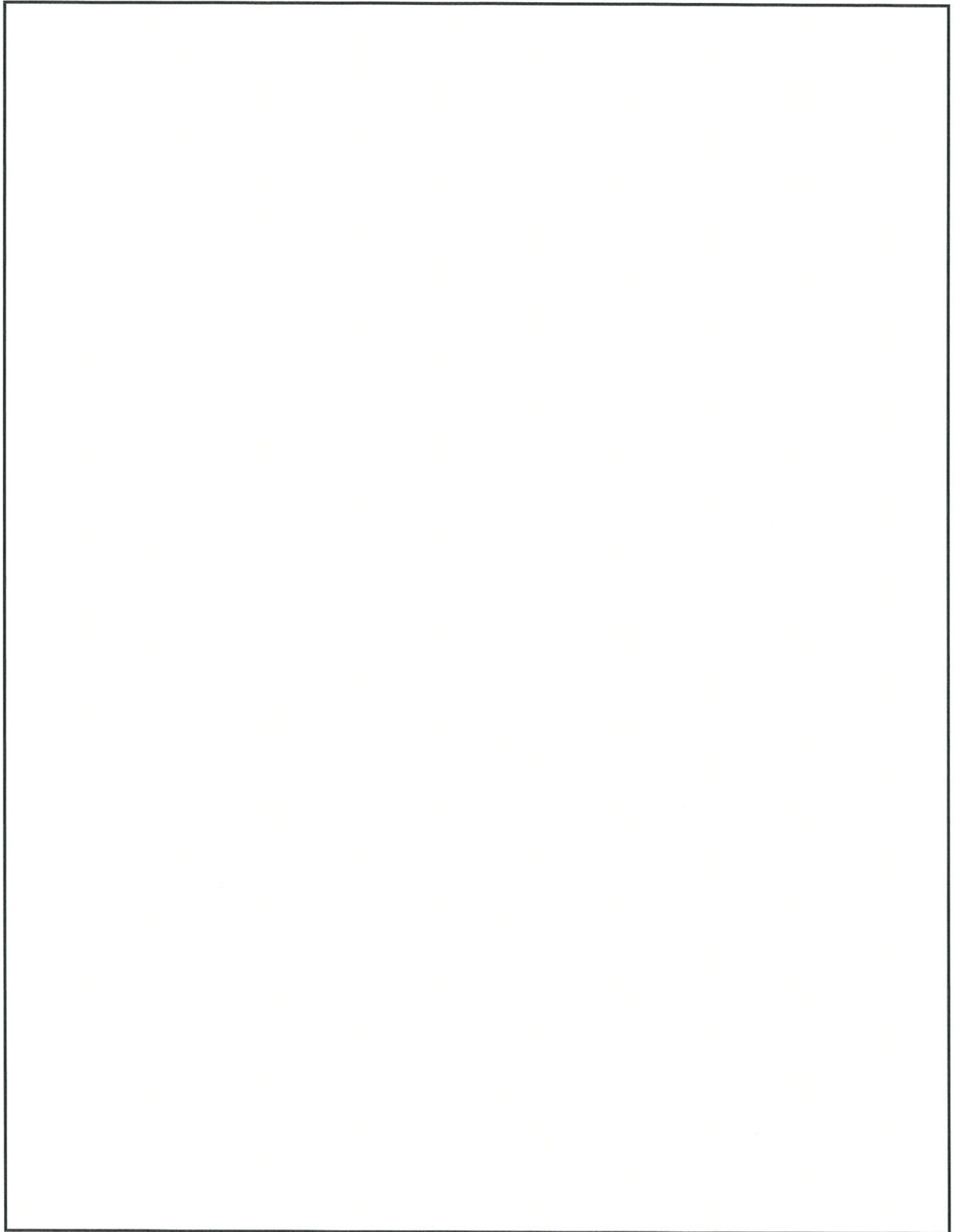
第 2.5.2-11 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）



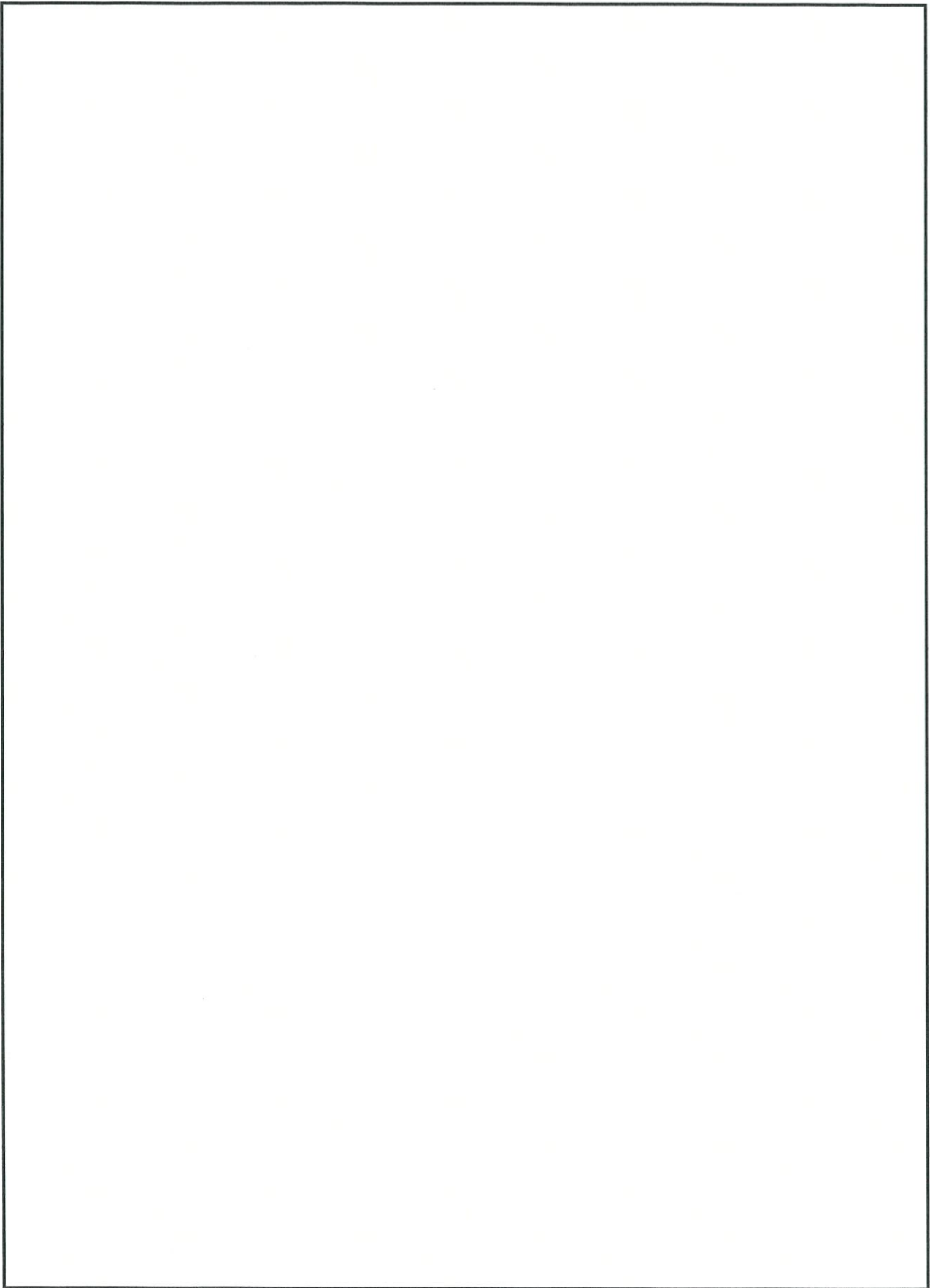
第 2.5.2-12 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）



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）

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 ¹⁾	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傷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

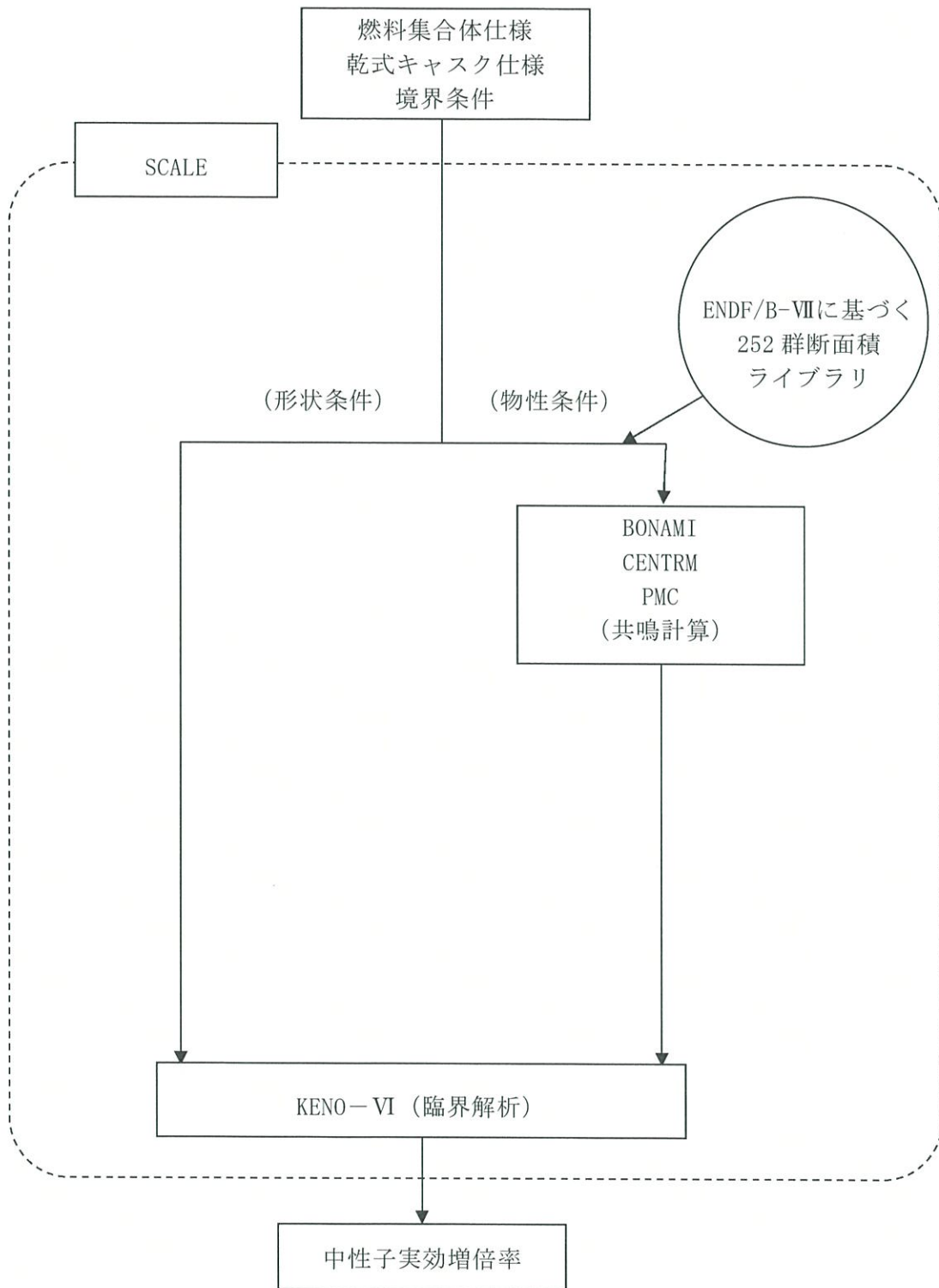
臨界解析で使用した SCALE コードシステムに対しては、乾式キャスクを模擬した多数の臨界実験のベンチマーク試験解析が実施され、その妥当性が示されている。

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 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 $100 \mu\text{Sv/h}$ 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 $4.1 \pm \square \text{wt}\%$ 及び $3.4 \pm \square \text{wt}\%$ を保守的に $\square \text{wt}\%$ 及び $\square \text{wt}\%$ とする。

－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。

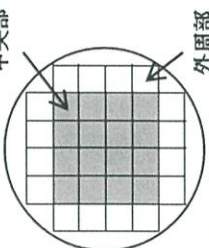
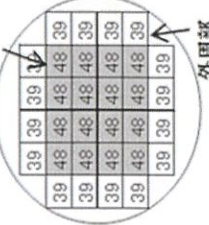
・ モデル化の保守性

－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

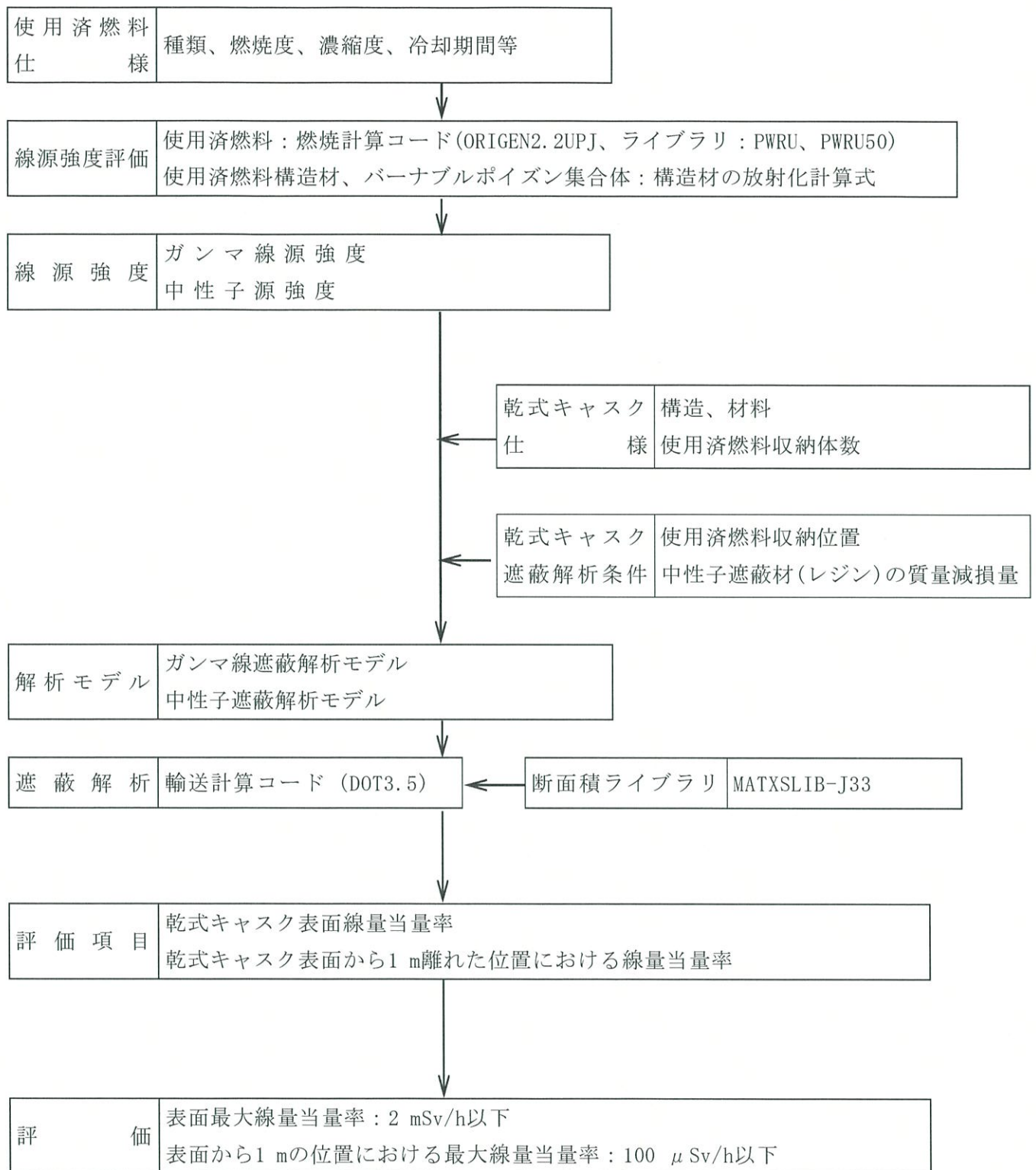
収納物仕様	燃料タイプ	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック	解析条件		
		中央部	外周部		中央部	外周部	
燃料 集合体 1体の 仕様	燃料タイプ	14×14型(A/B型)		14×14型(A/B型)	14×14型(B型)		
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2	≤3.5	4.1	3.4		
	ウラン重量(kg)	[Redacted]					
	最高燃焼度(GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤39	≤48	≤39	48	39
	SFPでの冷却期間(年)	≥15	≥25	—	—	15	25
キャスク 1基あたり	平均燃焼度(GWd/t)	≤45	≤33	—	—	—	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

※1: 数値は燃焼度(GWd/t)を示す。

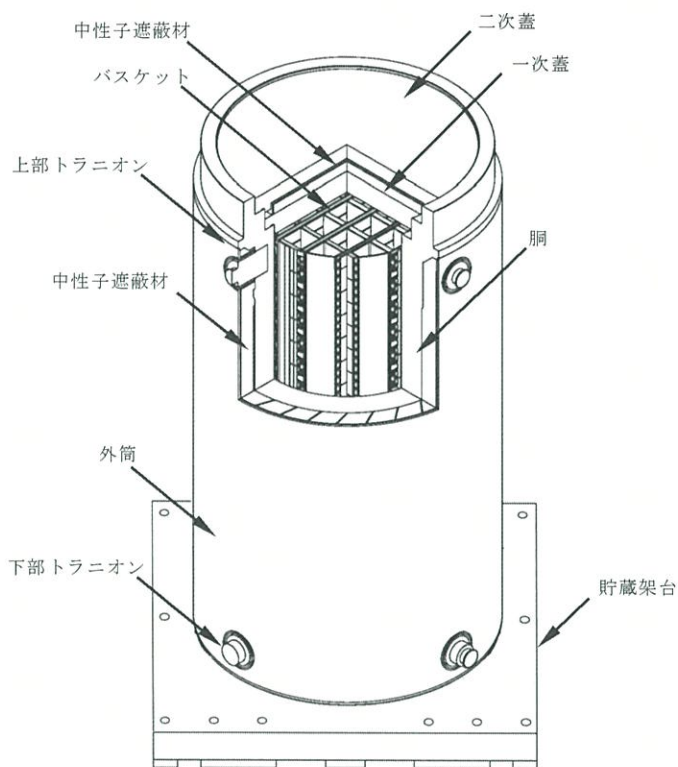
第2.5.3-2表 3号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

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		—	—					
燃料集合体1体の仕様			—						
バーナブル ホイスン						配置※2	—	—	
キャスク 1基あたり						—	—	—	

※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。

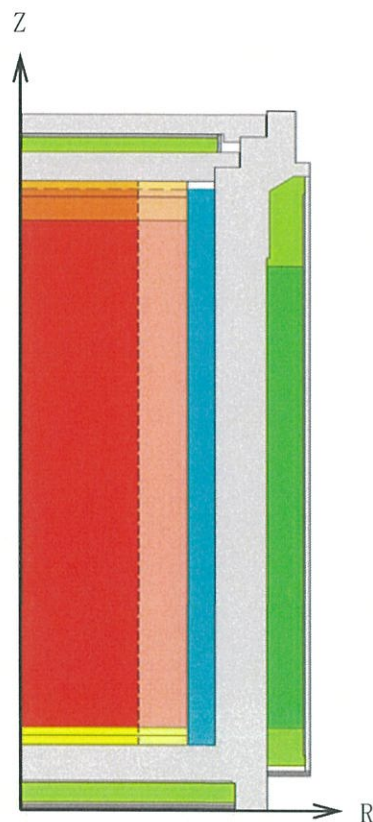
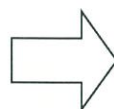


第 2.5.3-1 図 乾式キャスクの遮蔽解析フロー図

















[実形状]

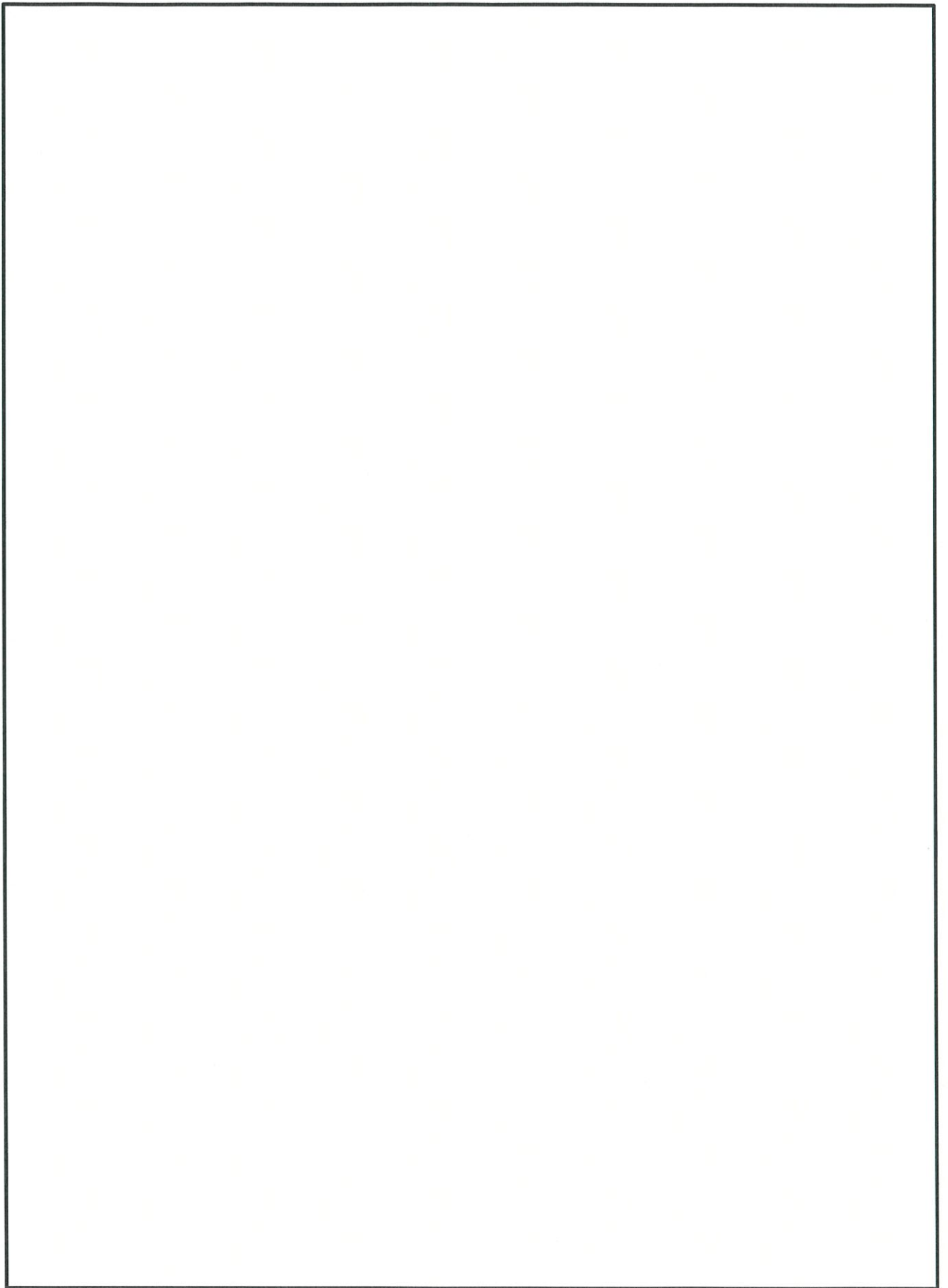
モデル化



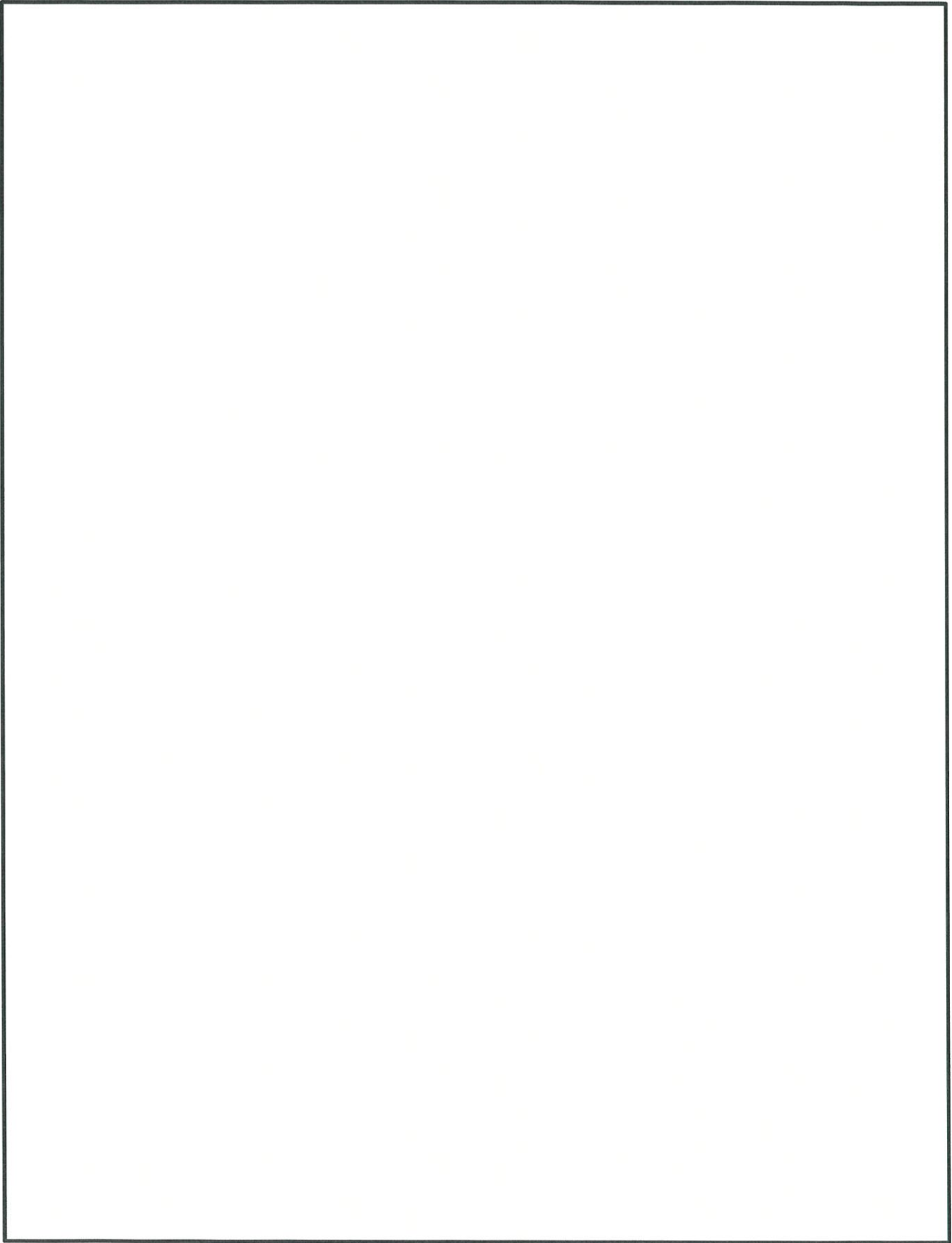
[二次元モデル化 (R-Z 体系)]

 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）



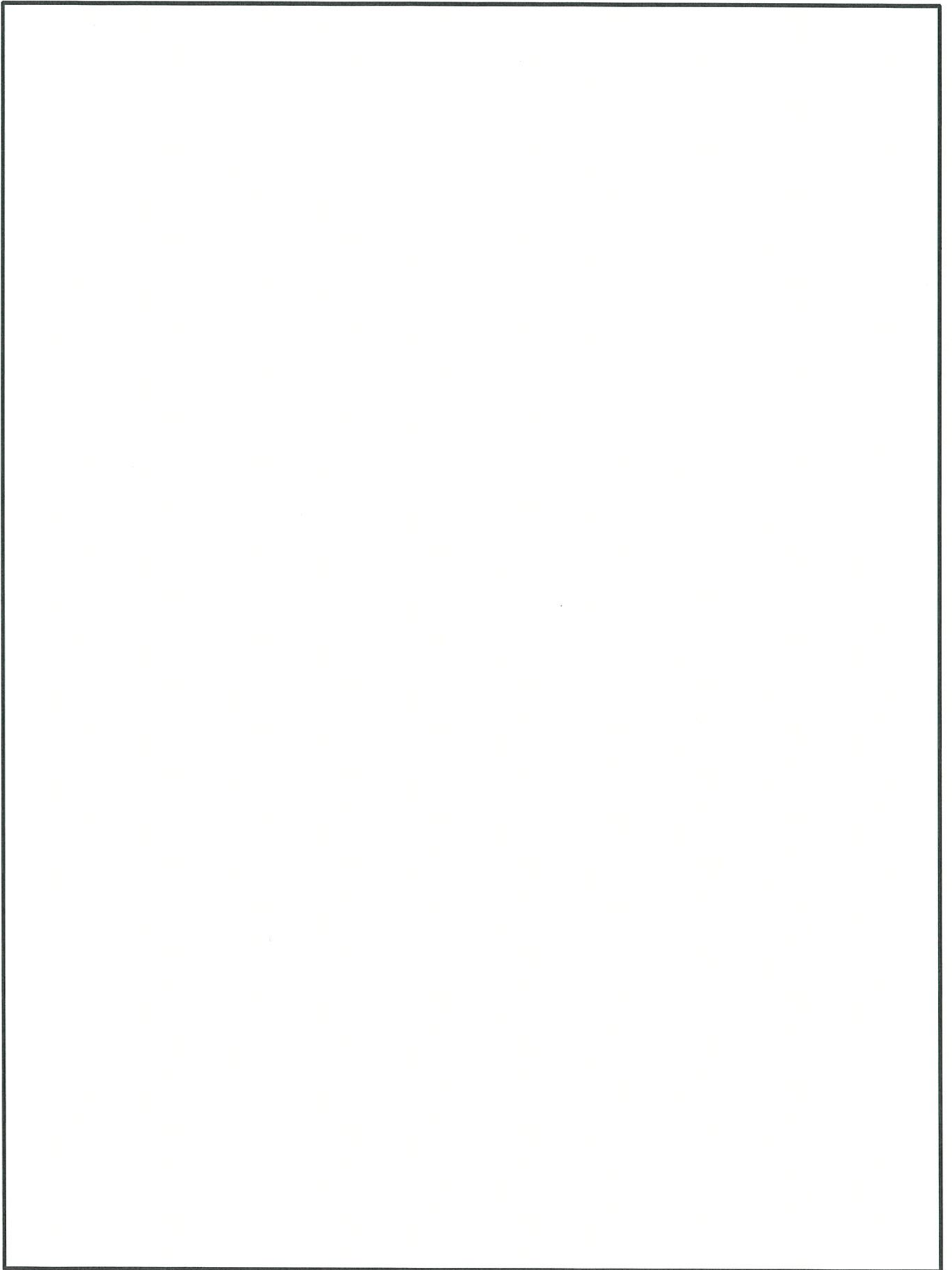
第 2.5.3-4 図 貯蔵時の解析モデル (底部) (MSF-24P 型)



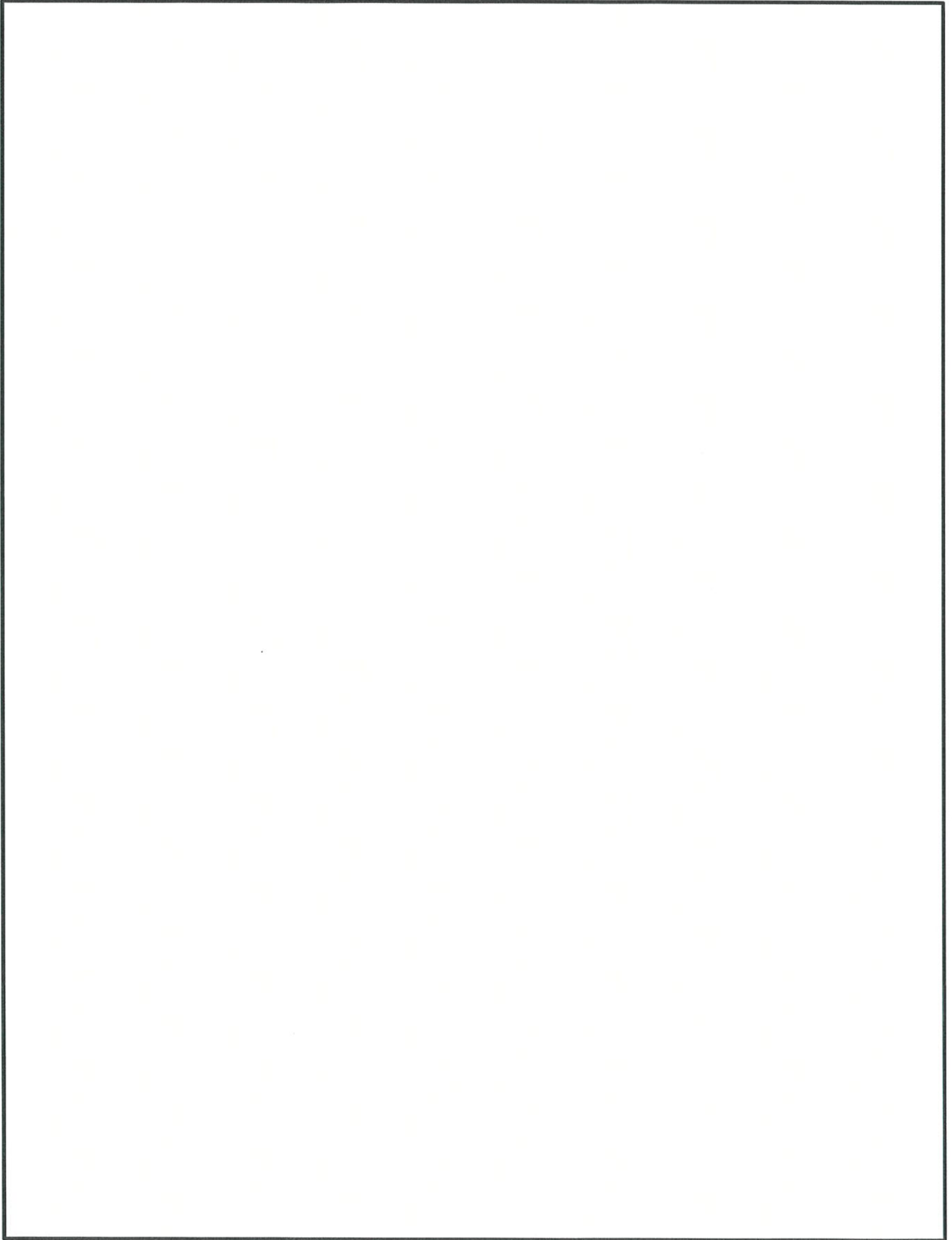
第2.5.3-5 図 貯蔵時の解析モデル（上部トラニオン部）（MSF-24P 型）



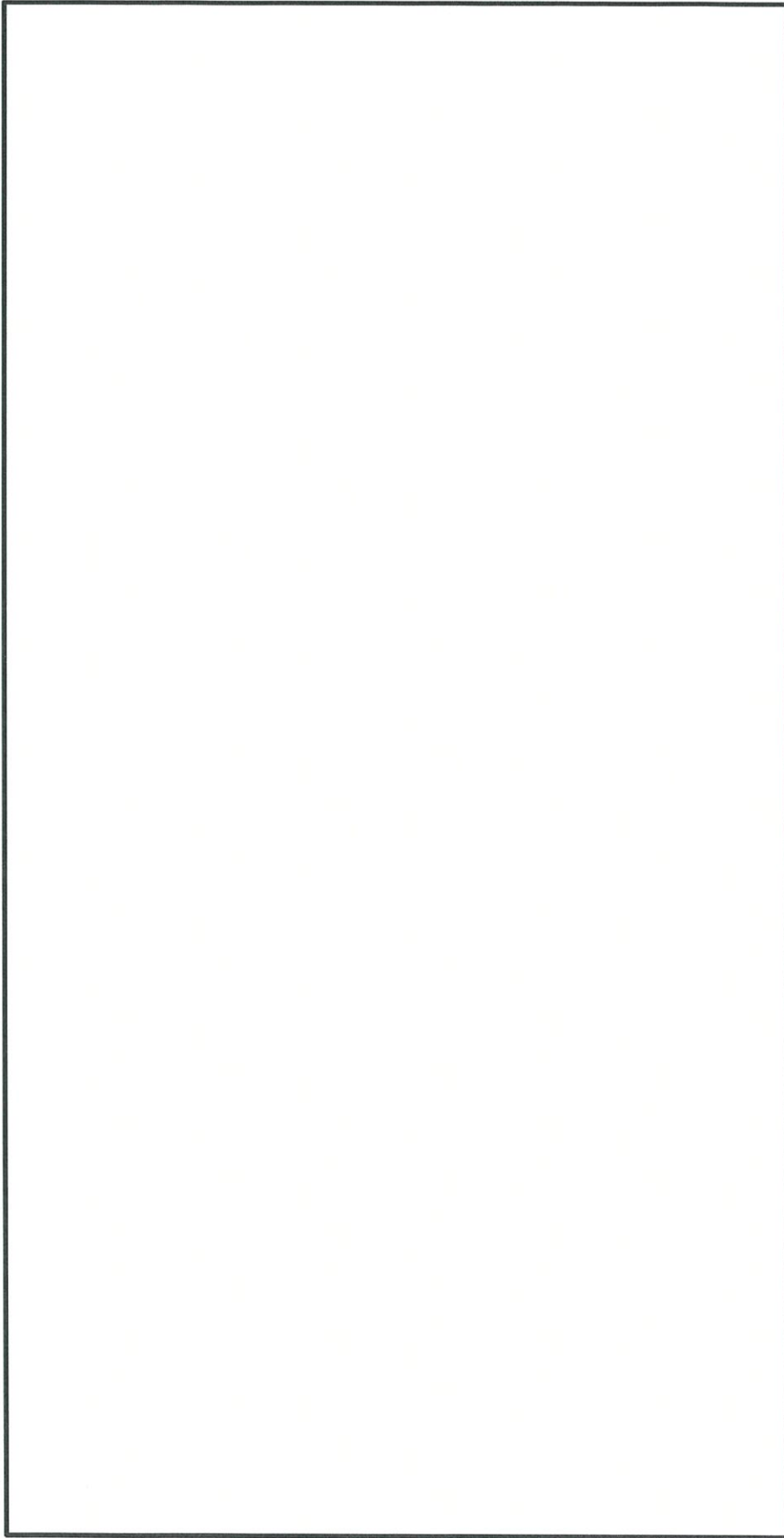
第2.5.3-6図 貯蔵時の解析モデル（下部トランニオン部）（MSF-24P型）



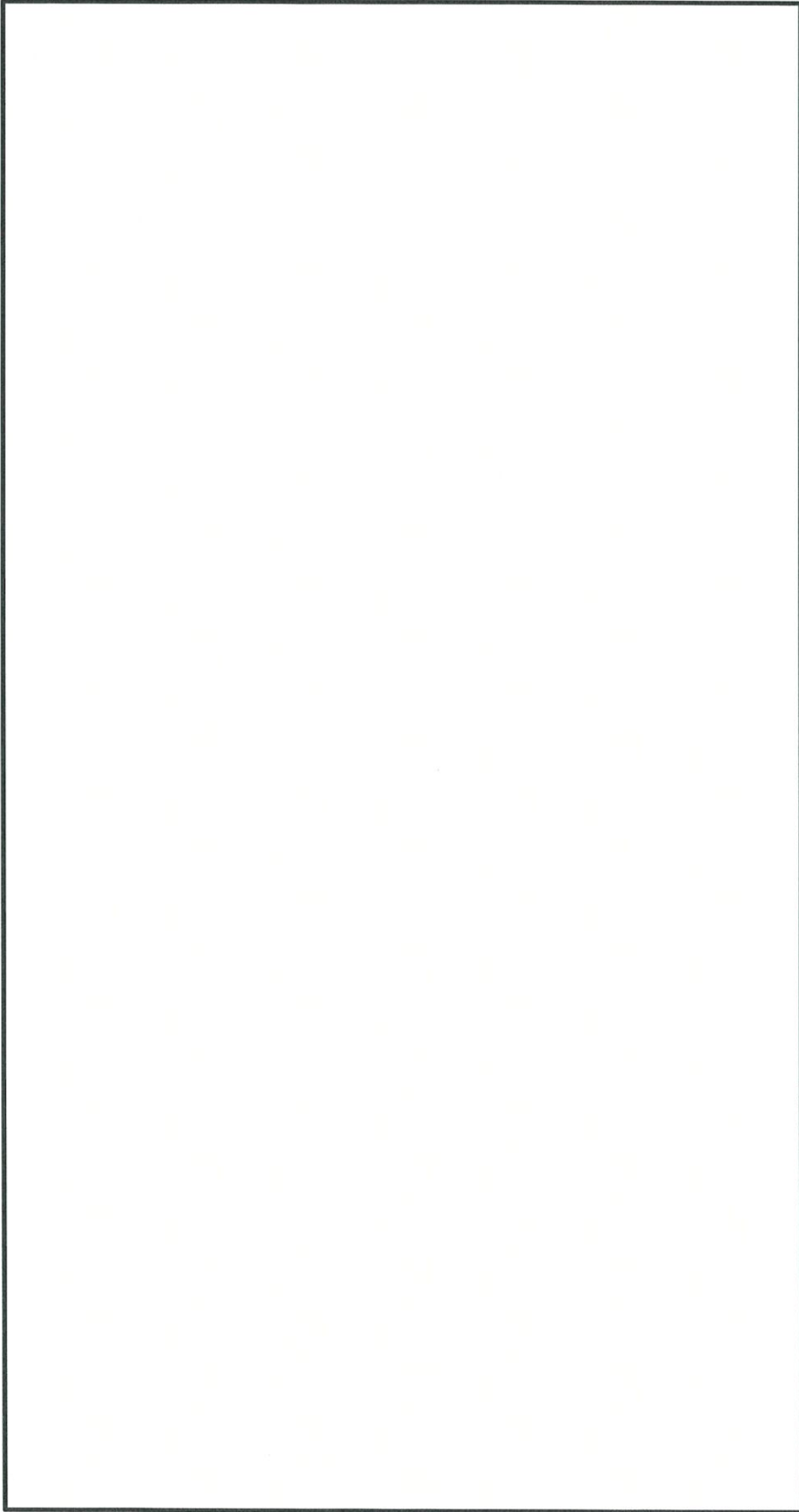
第 2.5.3-7 図 貯蔵時の解析モデル（頭部）（MSF-32P 型）



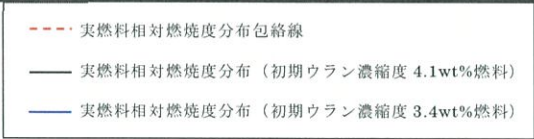
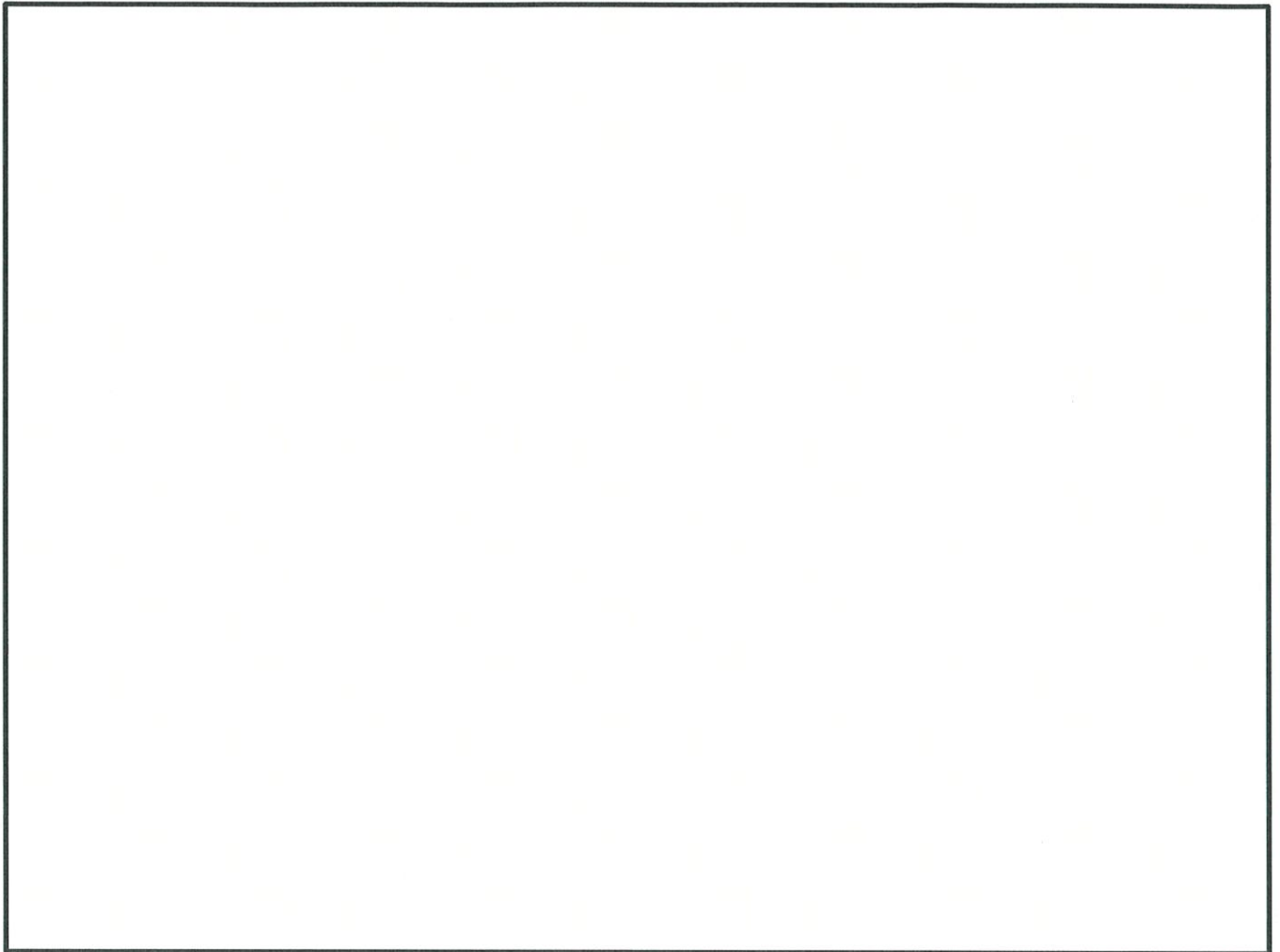
第 2.5.3-8 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（MSF-32P 型）



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)

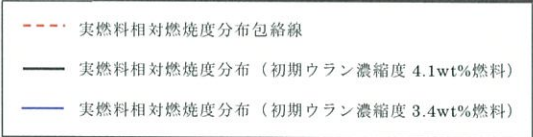
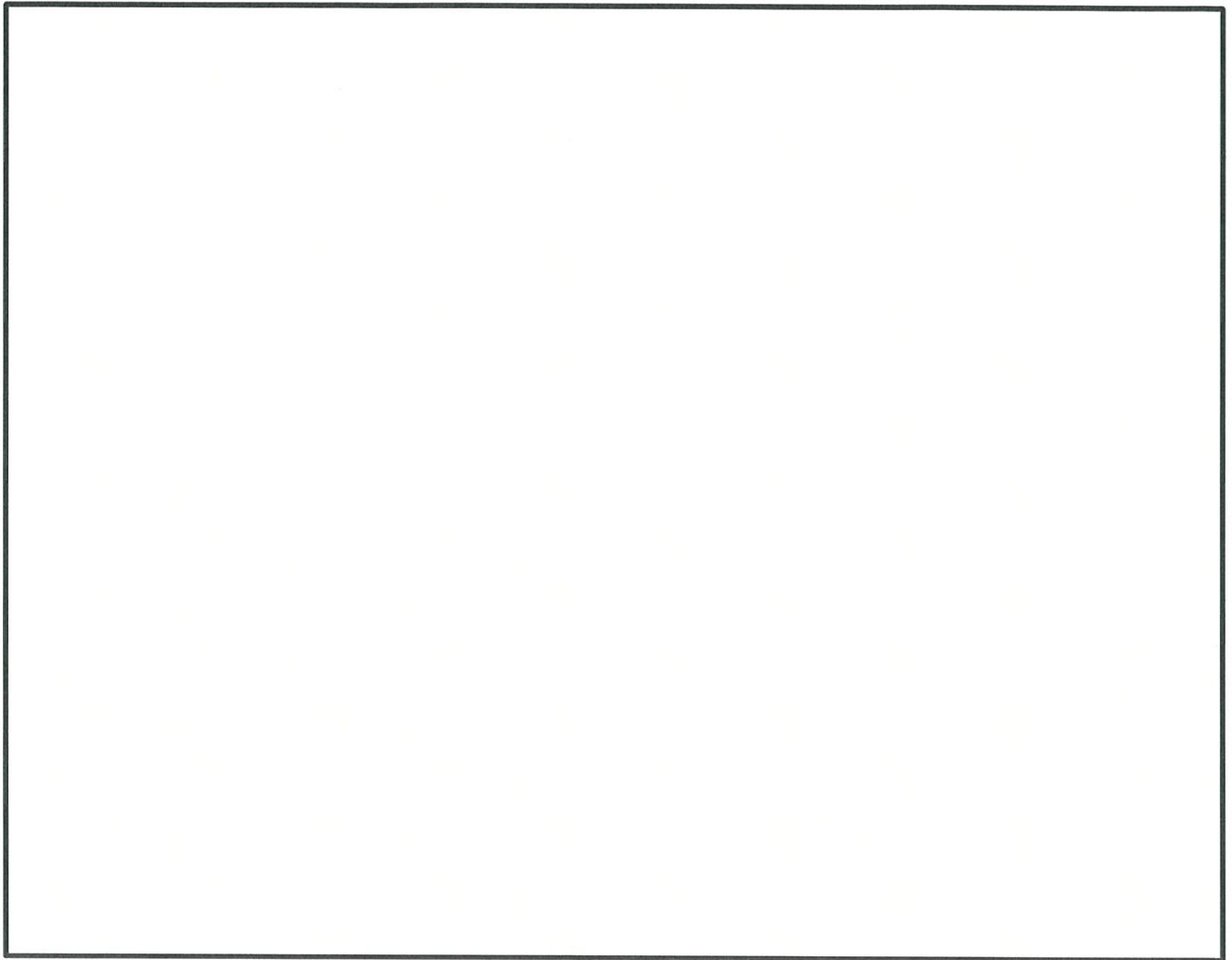


第2.5.3-10 図 貯蔵時の解析モデル（下部トランニオン部）（MSF-32P型）



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)

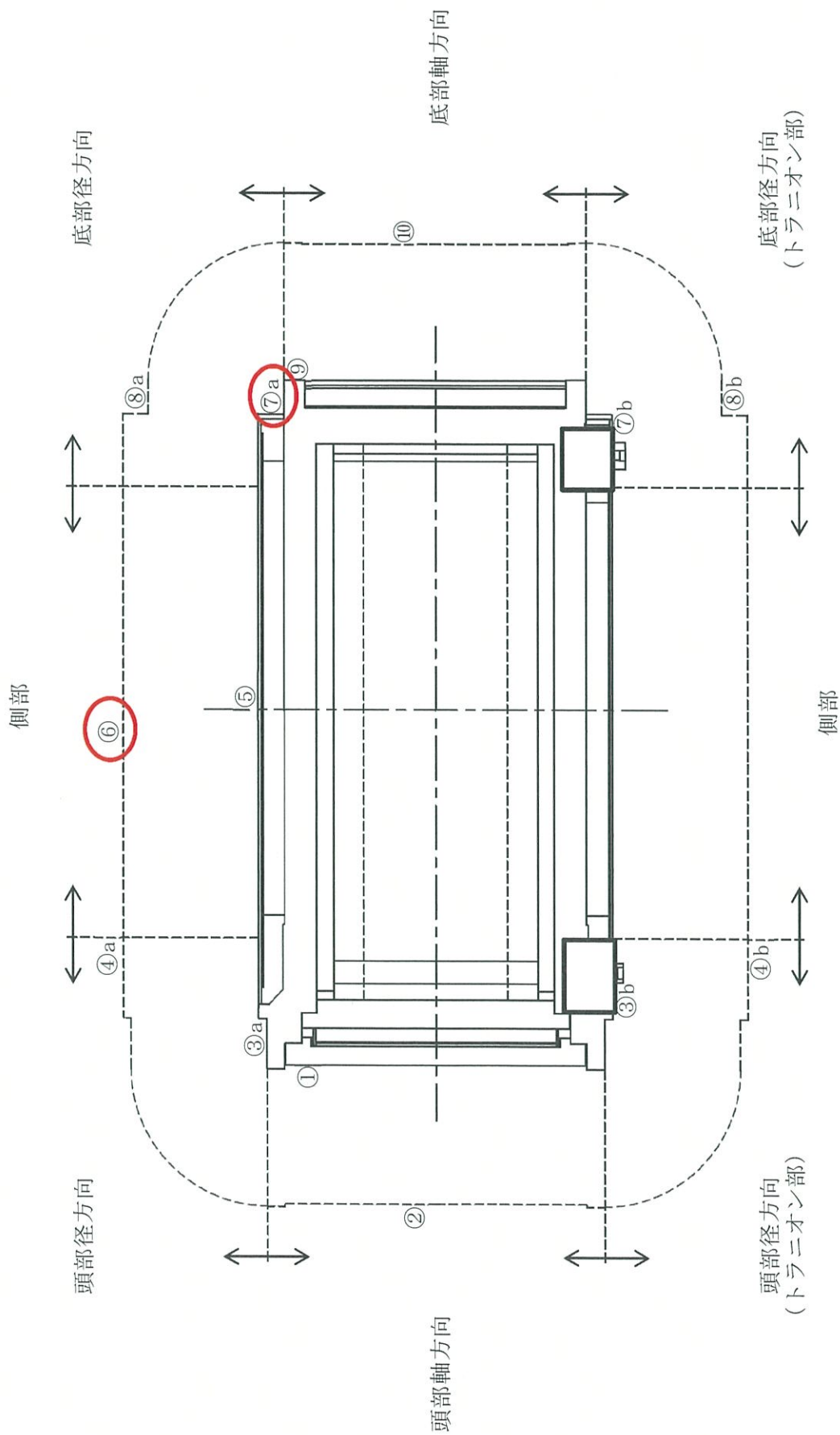
(単位：μSv/h)

評価点	頭部			側部	底部				
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向		
								①	③a
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	<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	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
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	②	④a	④b	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1m	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)

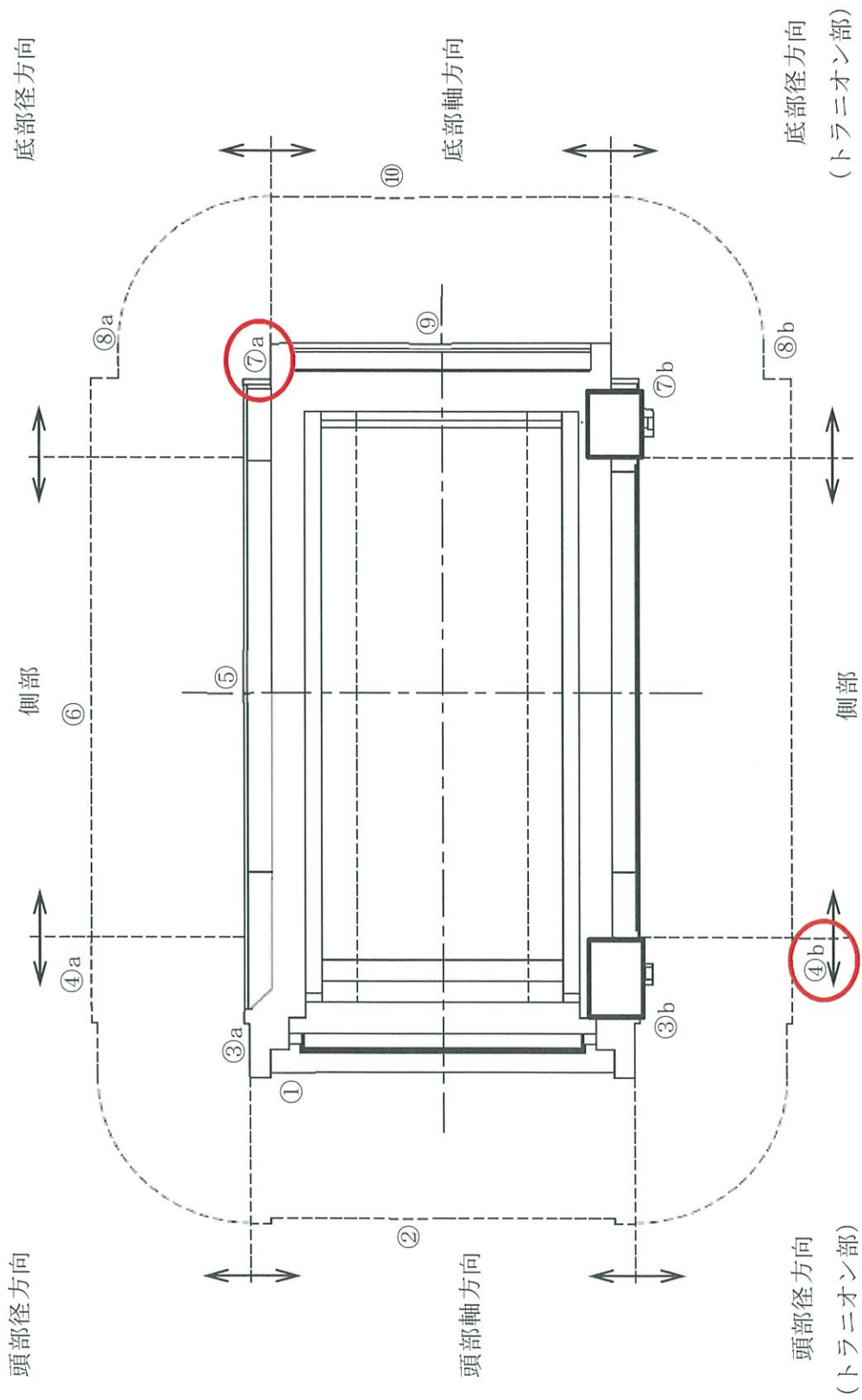
(単位：μSv/h)

評価点	頭部			側部	底部			
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向	
								①
ガンマ線	燃料有効部	<0.1	<0.1	4.8	93.0	3.0	4.0	8.2
	構造材放射化	0.4	0.7	85.2	11.5	6.2	11.7	112.7
	二次ガンマ線	0.7	1.6	5.7	24.4	7.1	4.5	12.4
中性子	262.8	592.3	1022.9	55.1	1548.1	44.7		
合計	264.0	594.7	1118.6	184.0	<u>1564.4</u>	178.0		
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
ガンマ線	燃料有効部	0.2	22.3	21.7	41.4	8.8	7.3	2.9
	構造材放射化	3.7	28.1	22.7	6.7	6.5	4.8	34.5
	二次ガンマ線	0.4	5.0	5.0	9.7	2.8	2.6	3.4
中性子	50.6	23.8	34.4	22.1	51.1	20.2		
合計	54.9	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。

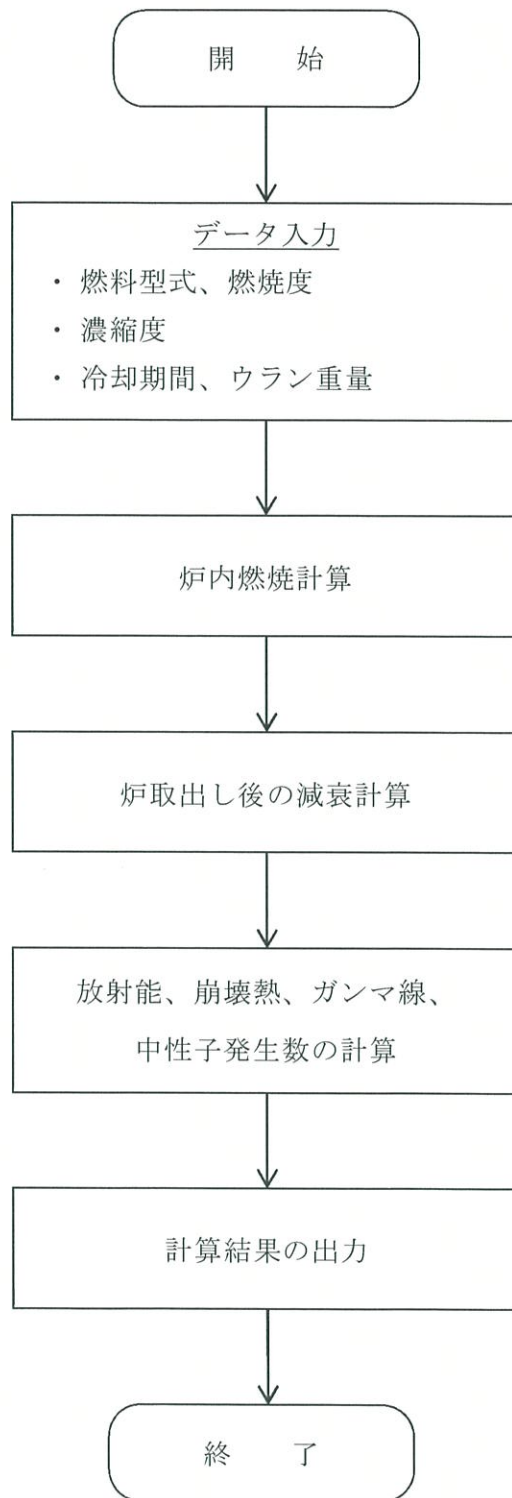
iii 計算フロー

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

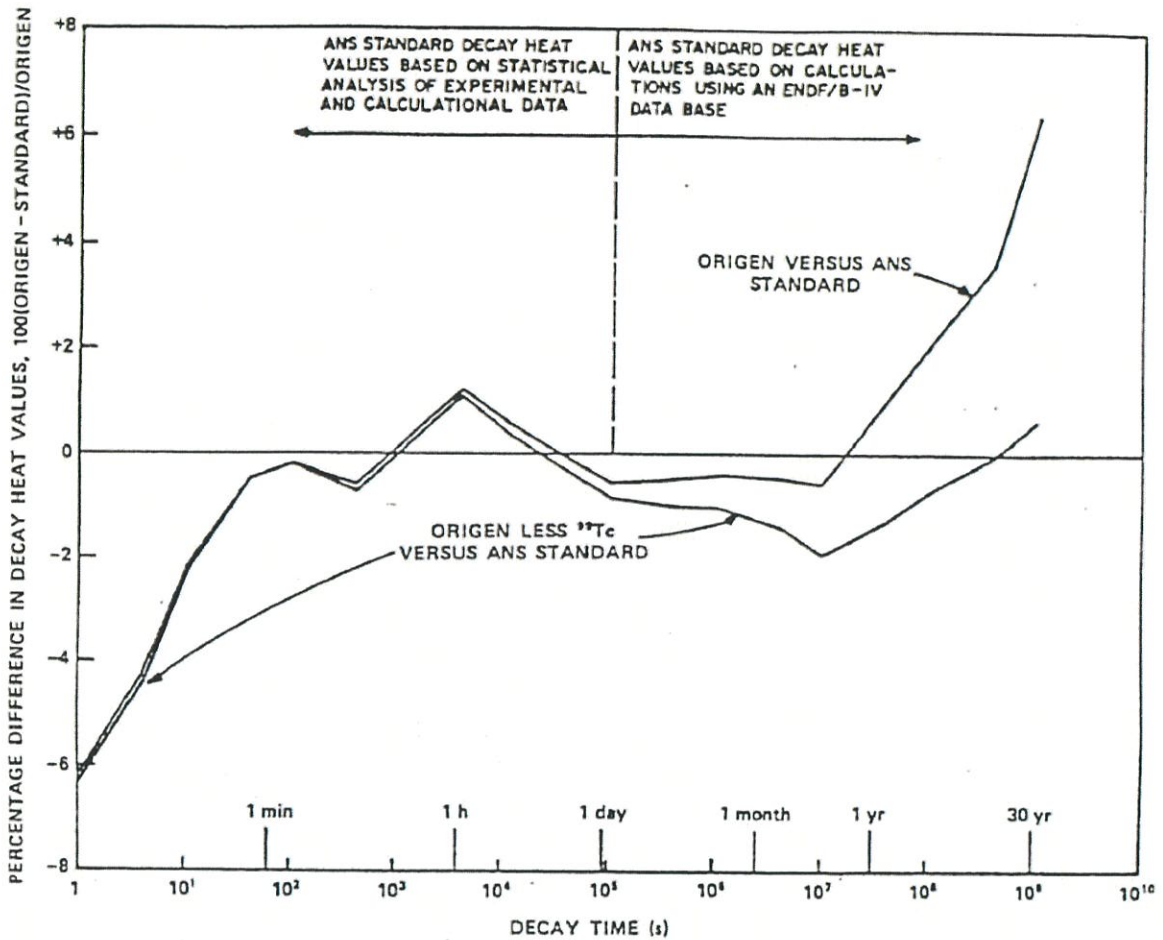


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

(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 Sn 法により解く解析コードであり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。

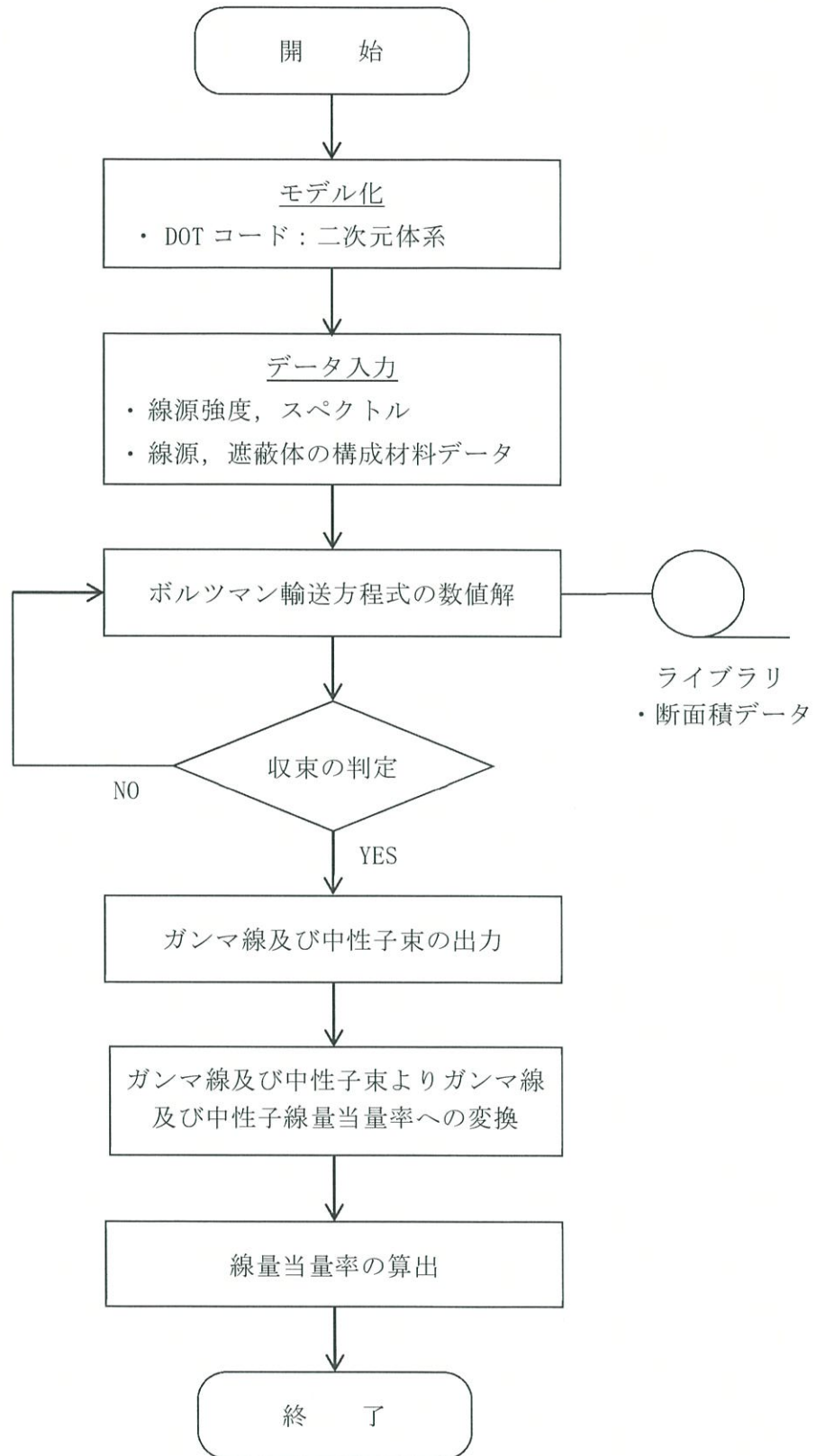
b) DOT コードは、二次元の体系を扱うことができる。

iii. 解析フロー

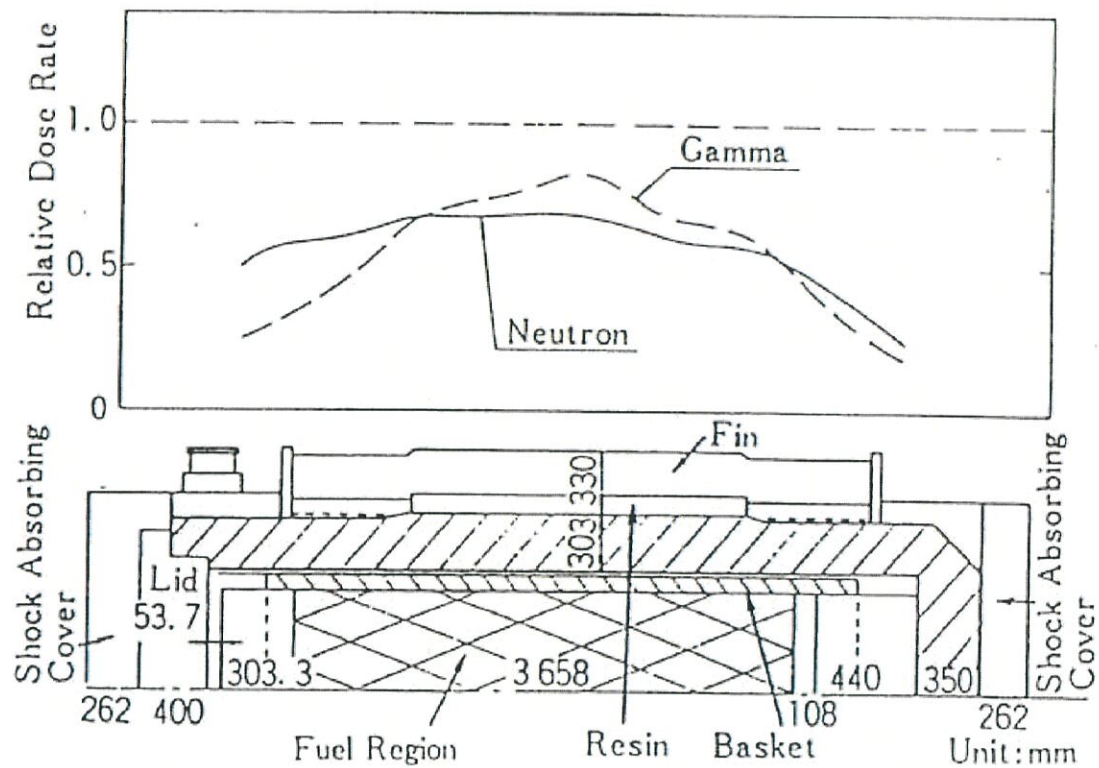
DOT コードの解析フローを第 2.5.3-18 図に示す。

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。

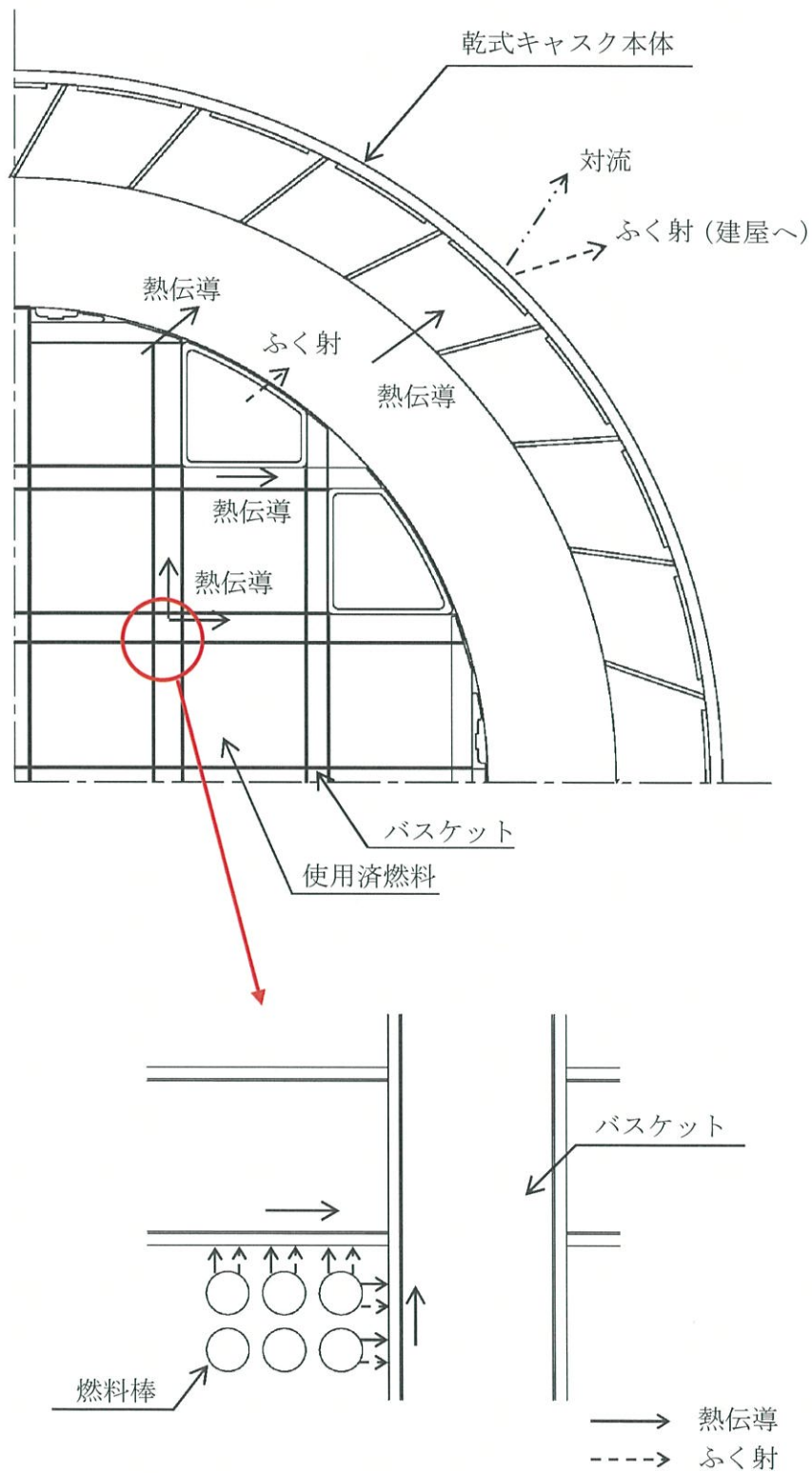
乾式キャスクは、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及びふく射により乾式キャスクの外表面に伝え、対流及びふく射により周囲の空気等に伝達する。乾式キャスク本体側部の中性子遮蔽材には熱伝導率の低いレジンをを用いるため、伝熱フィンを設けることにより必要な伝熱性能を確保する。

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 $4.1 \pm \square$ wt% 及び $3.4 \pm \square$ wt% 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。

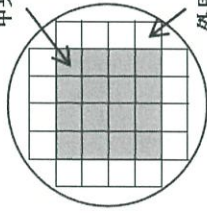
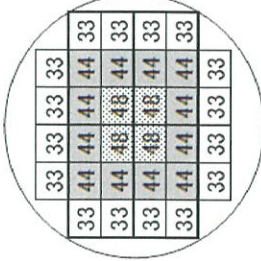
・ モデル化の保守性

－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。




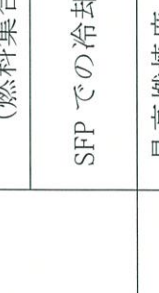
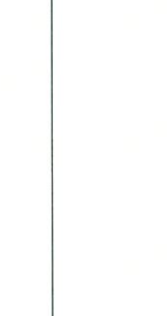
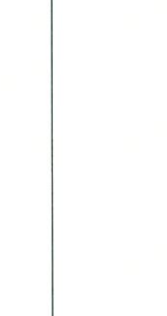
—MSF-24P 型については、使用済燃料とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、無視する方が熱伝導性が低下し保守側の評価となるため、モデル化しない。

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

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	中心	外周	
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)	[Redacted]					
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤ 48	≤ 39	≤ 48	≤ 39	48	44
	SFP での冷却期間 (年)	≥ 15	≥ 25			15	25
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤ 45	≤ 33		—	45	33
収納物仕様	燃料タイプ		燃料スペック		解析条件		
キャスク 1 基あたり	14×14 型 (A/B 型)		14×14 型 (A/B 型)		14×14 型 (A 型)		
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 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	
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	
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		
燃料集合体 1 体の 仕様			—			
バーナブル ホイスン キャスク 1 基あたり						
収納物仕様	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。

※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°C	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°C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・°C)
- T_{out} : 排気温度 (°C)
- T_{in} : 給気温度(33) (°C)

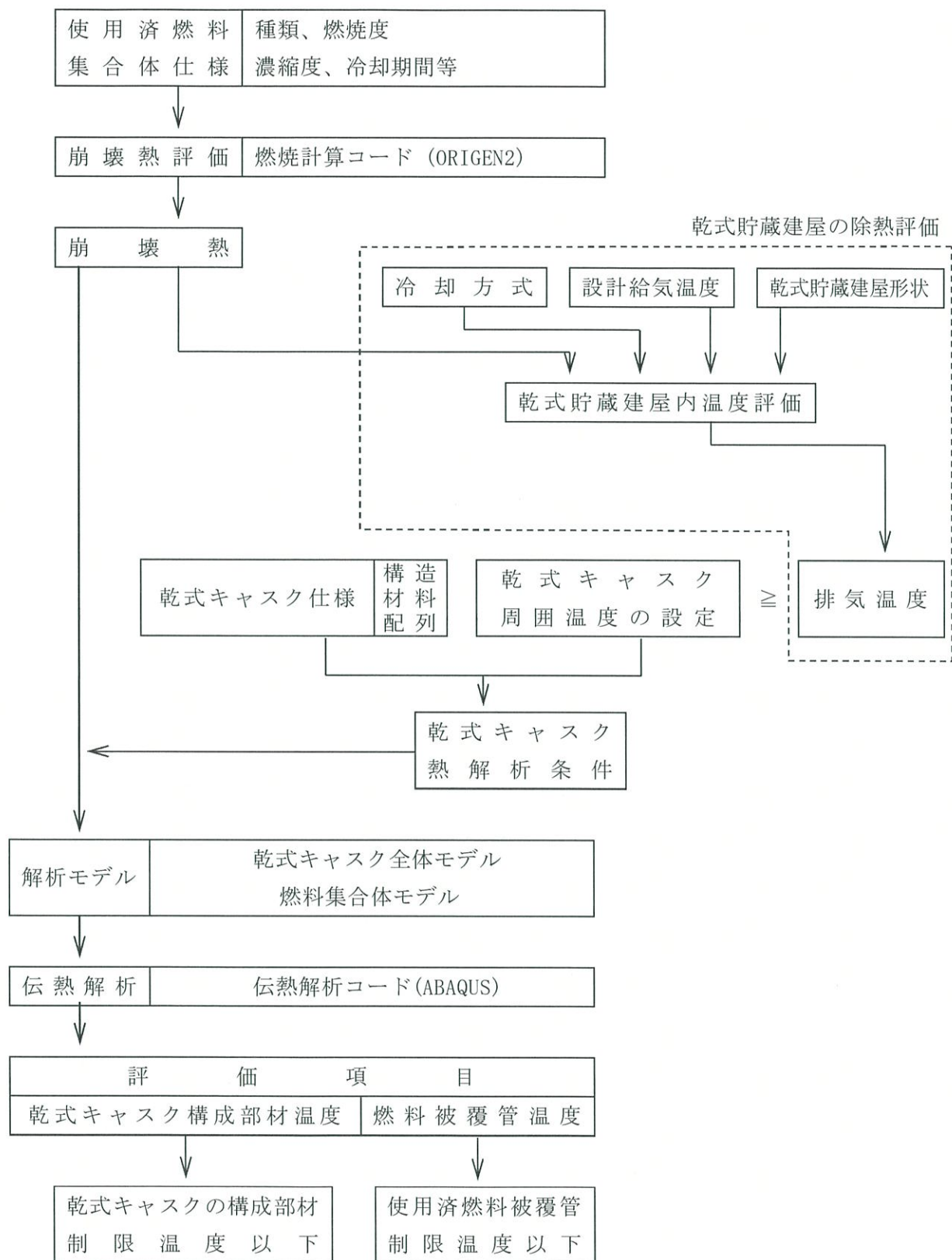
貯蔵建屋の一次元除熱評価で得られた結果を第2.5.4-4表に示す。貯蔵建屋の排気温度 T_{out} は45°Cとなり、目標排気温度 (50°C) 以下となる。

第 2.5.4-4 表 貯蔵建屋除熱評価の結果

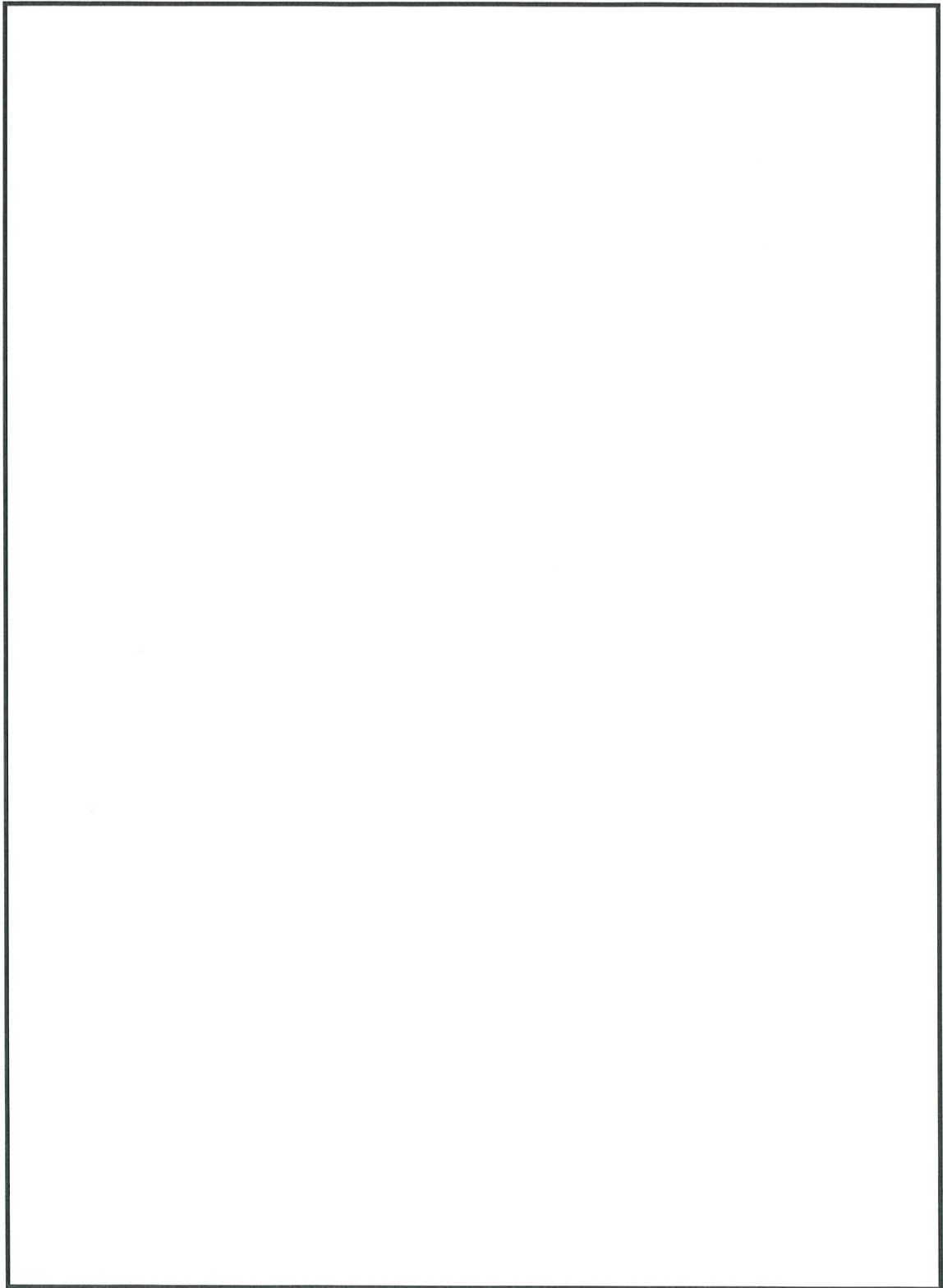
排気温度 T_{out} (°C)	熱ドラフト H_{th} (Pa)	圧力損失 ΔP (Pa)
約 45	約 7.1	約 7.1

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。

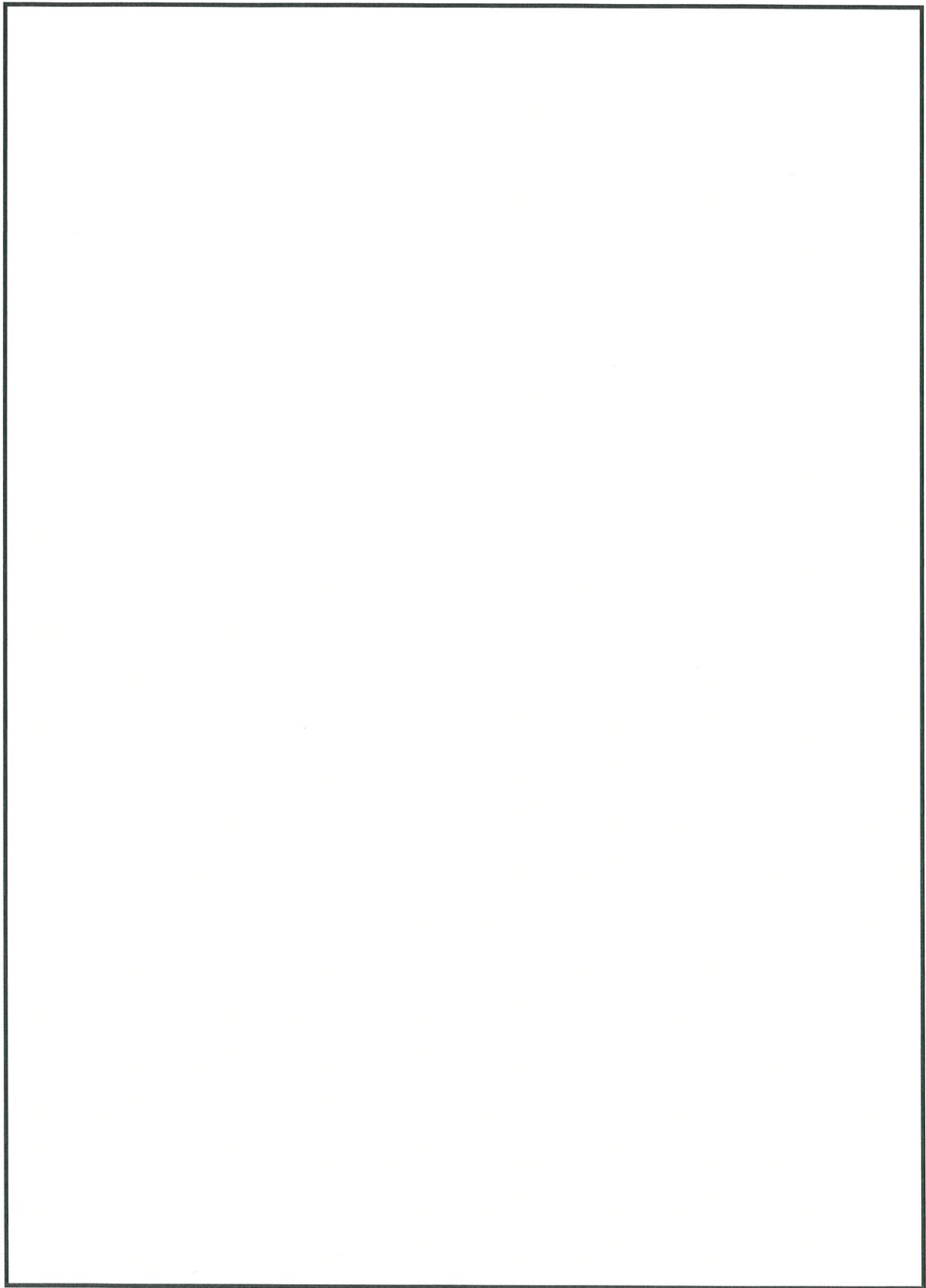
- ・ 設定条件の保守性
 - 乾式キャスクの発熱量は、MSF-24P 型及び MSF-32P 型の発熱量を包絡する発熱量を使用している。
 - 乾式キャスクの発熱量は、すべて空気によって除熱されると考え、建屋コンクリート等を通して大気や地中に逃げる熱は考慮しない。また、通風路各部の圧力損失を計算する際に、圧力損失係数が高くなる様に設定する。
- なお、太陽輻射熱により貯蔵建屋の外壁面温度に変動が生じるが、貯蔵建屋の壁は 1m 以上のコンクリートであり、太陽輻射熱により貯蔵建屋の壁内面 (貯蔵建屋内表面) の温度が上昇することはないため、貯蔵建屋内表面を断熱条件として、排気温度を評価することが保守的な評価となる。



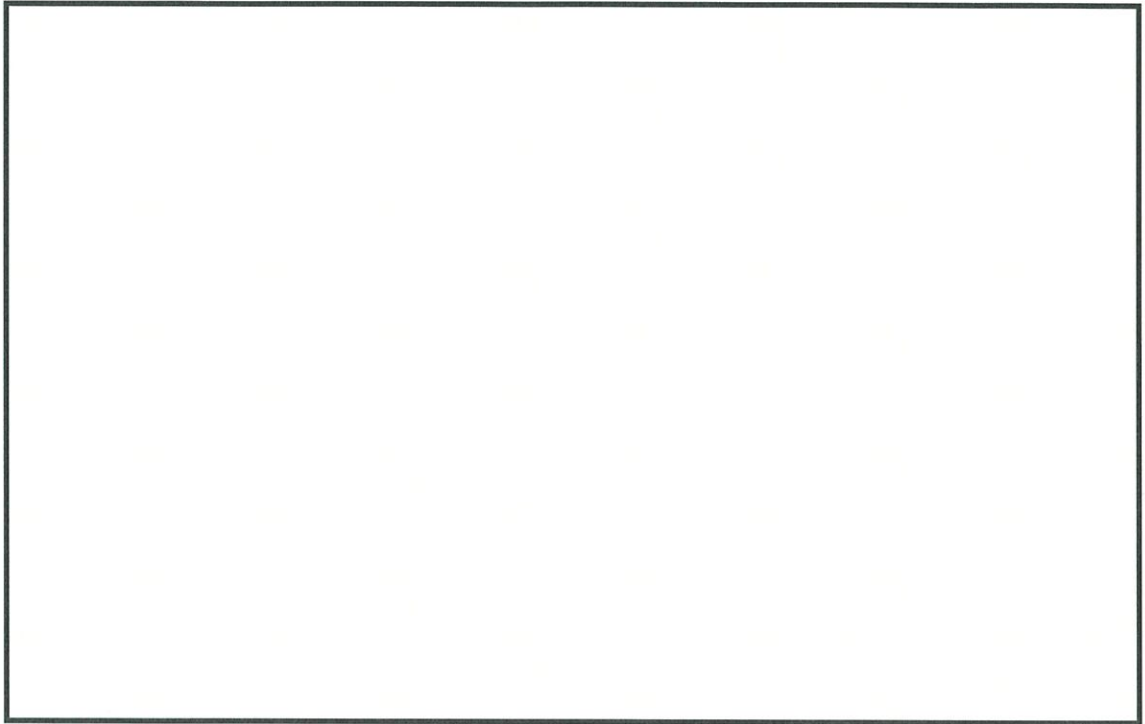
第 2.5.4-2 図 乾式キャスクの除熱解析フロー



第 2.5.4-3 図 MSF-24P 型全体モデル形状図 (縦断面図)



第 2.5.4-4 図 MSF-24P 型全体モデル形状図 (横断面図)

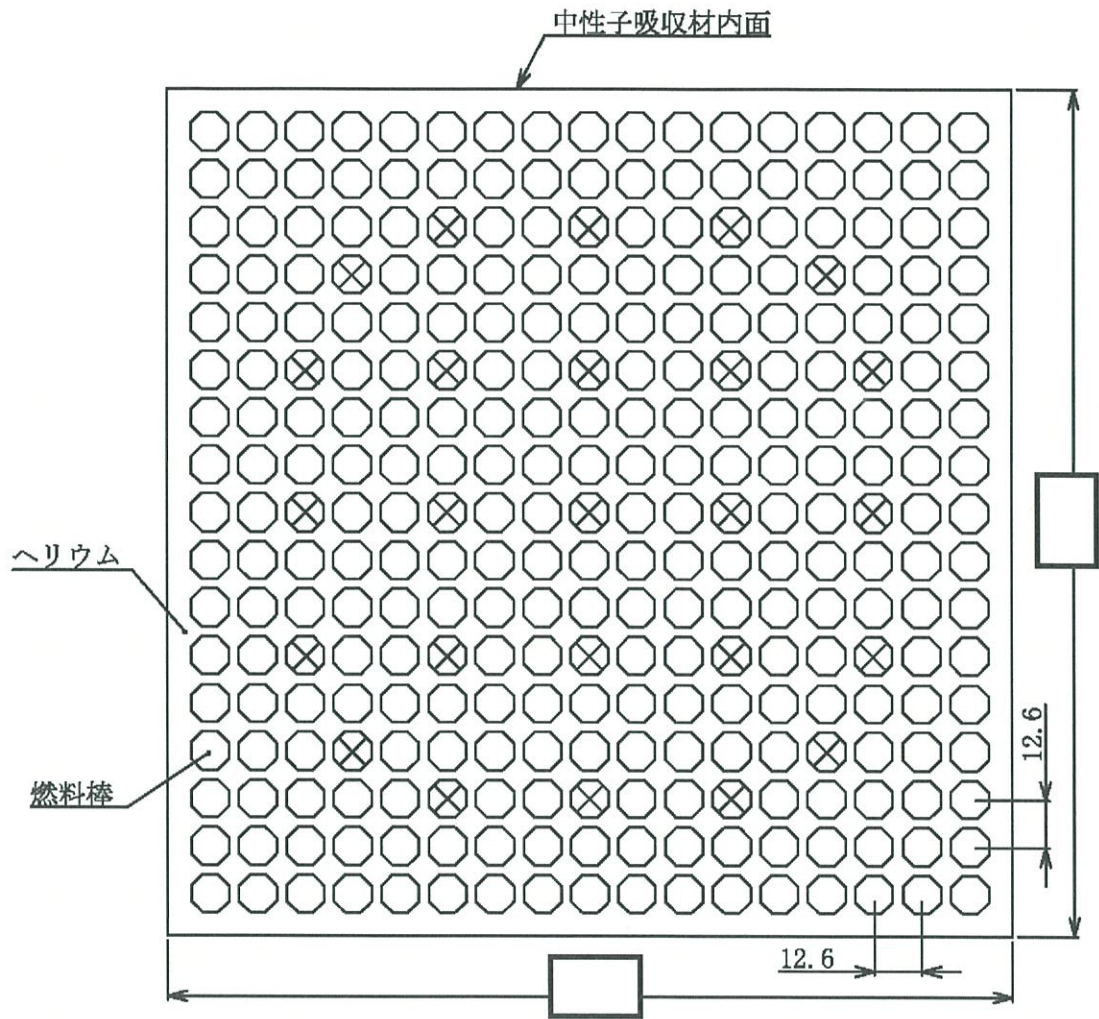


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

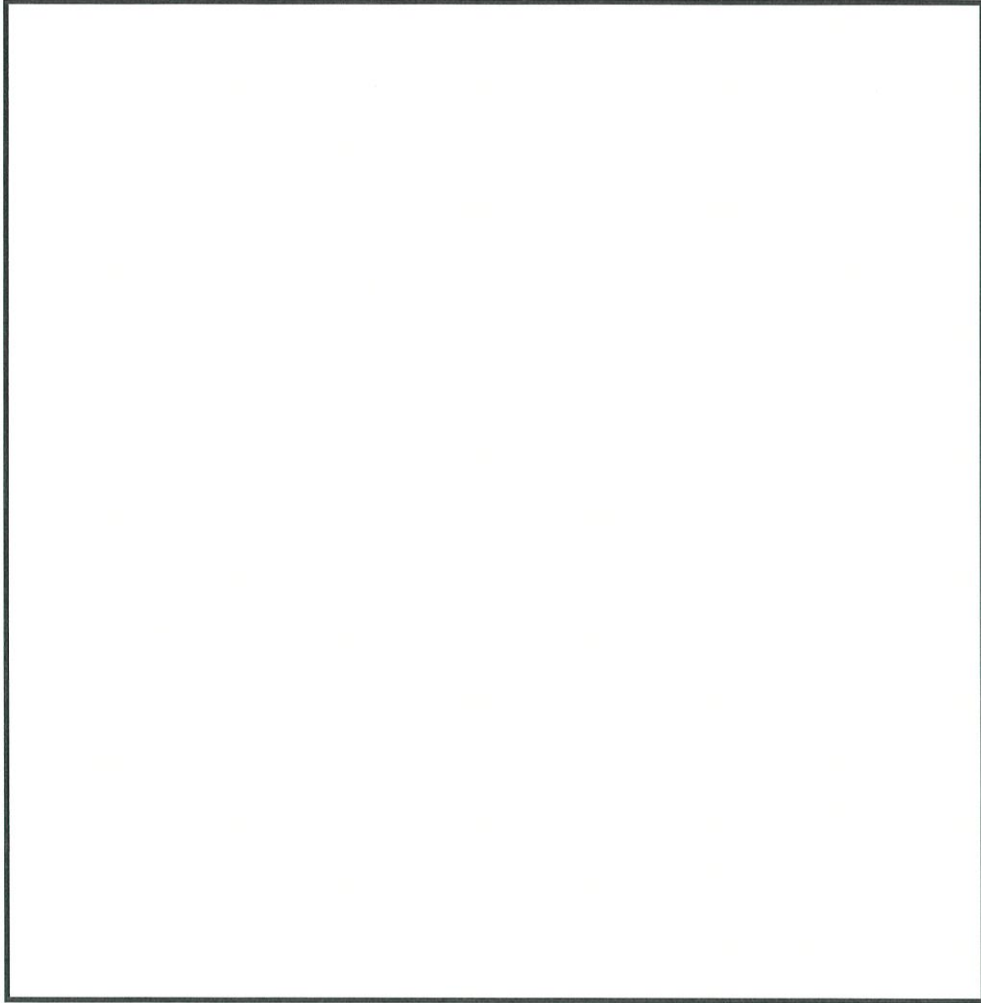
第 2.5.4-5 図 MSF-24P 型全体モデル要素分割図



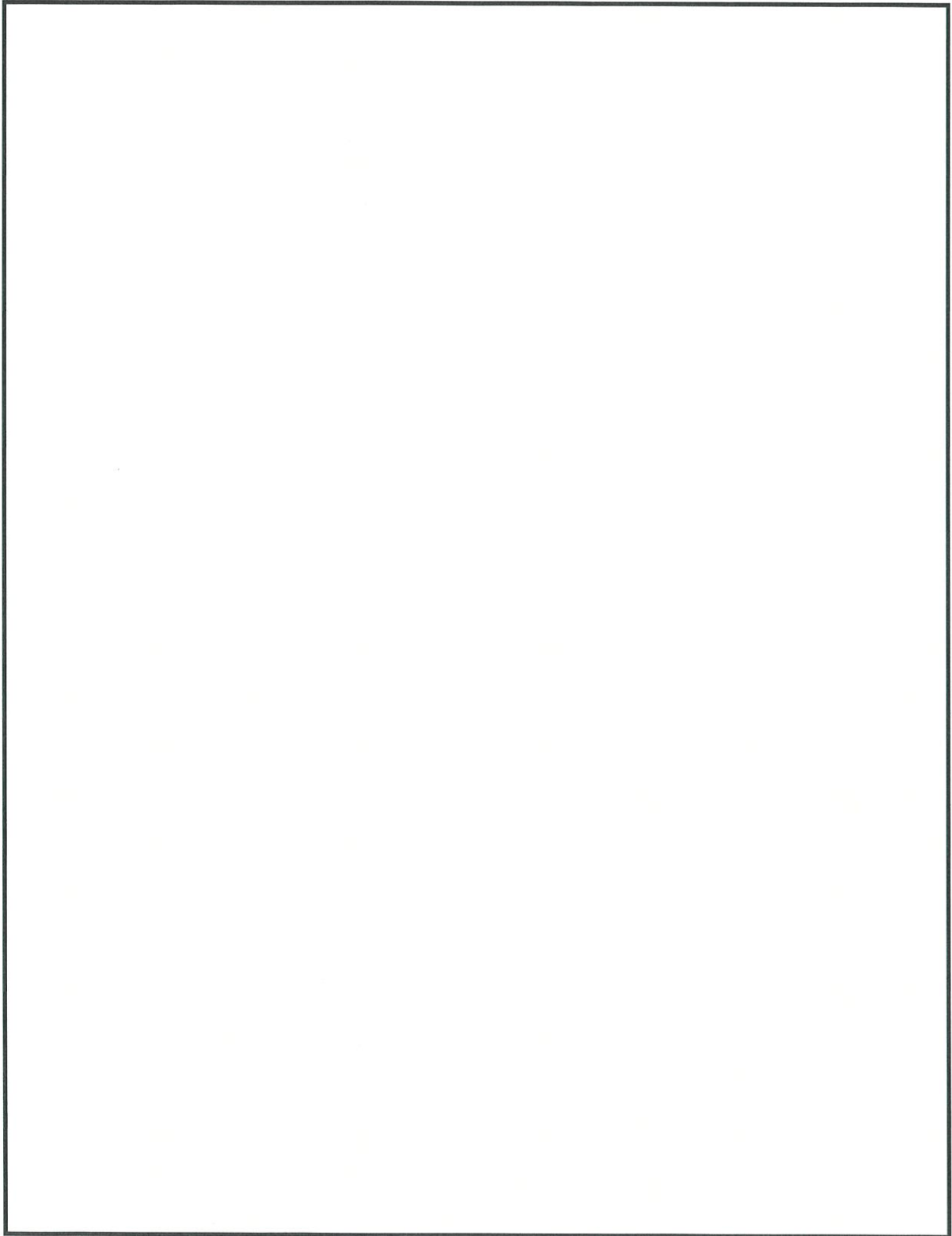
(単位 : mm)

(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

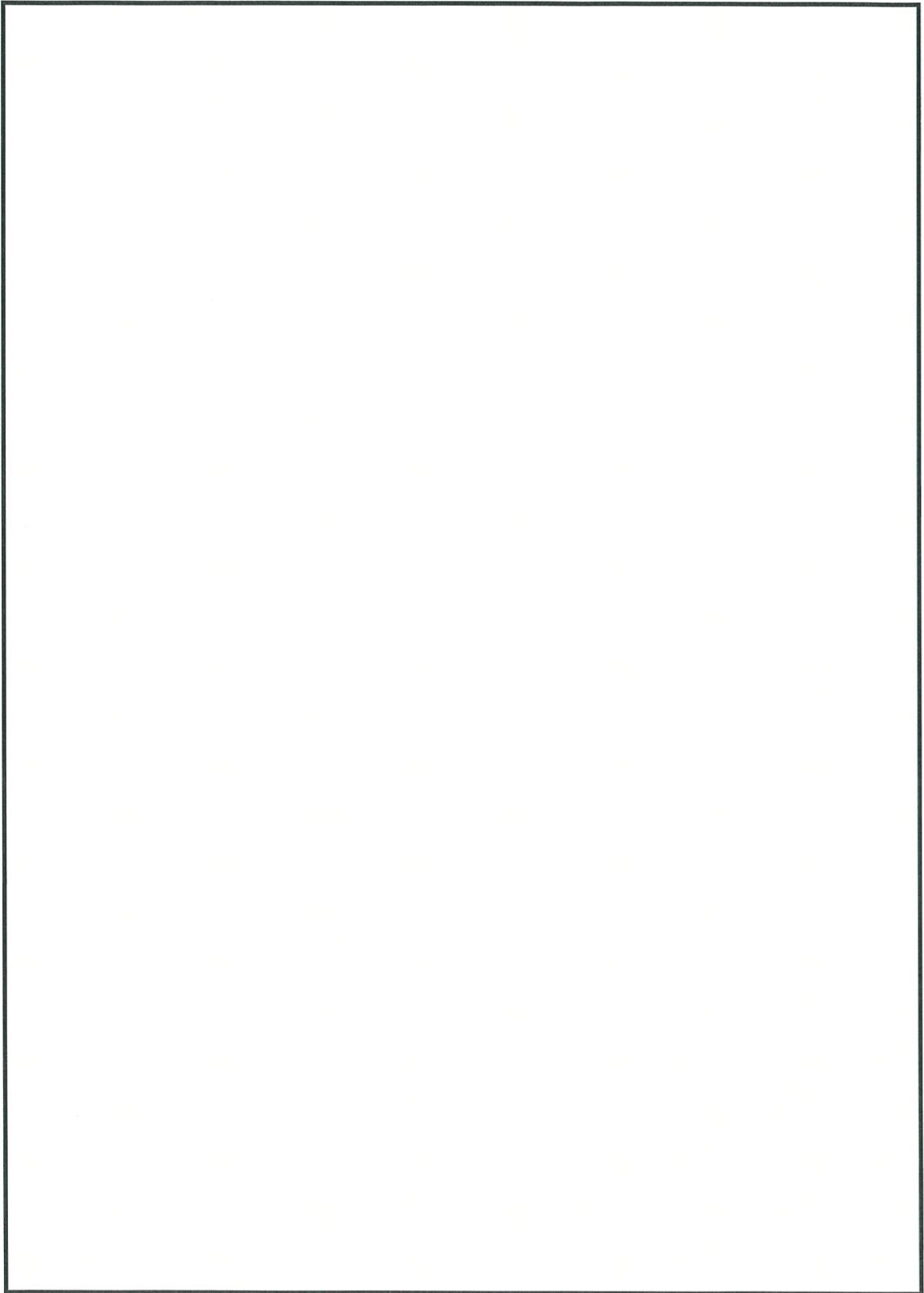
第 2.5.4-6 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル形状図



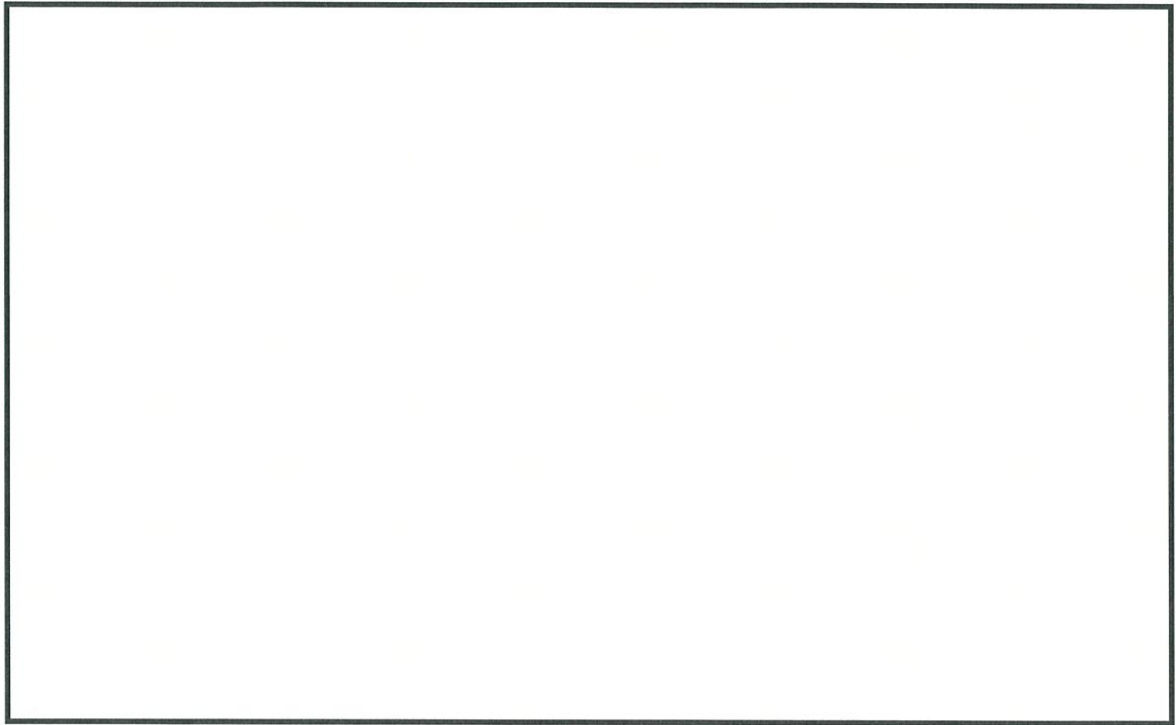
第 2.5.4-7 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル要素分割図



第 2.5.4-8 図 MSF-32P 型全体モデル形状図（縦断面図）



第 2.5.4-9 図 MSF-32P 型全体モデル形状図（横断面図）

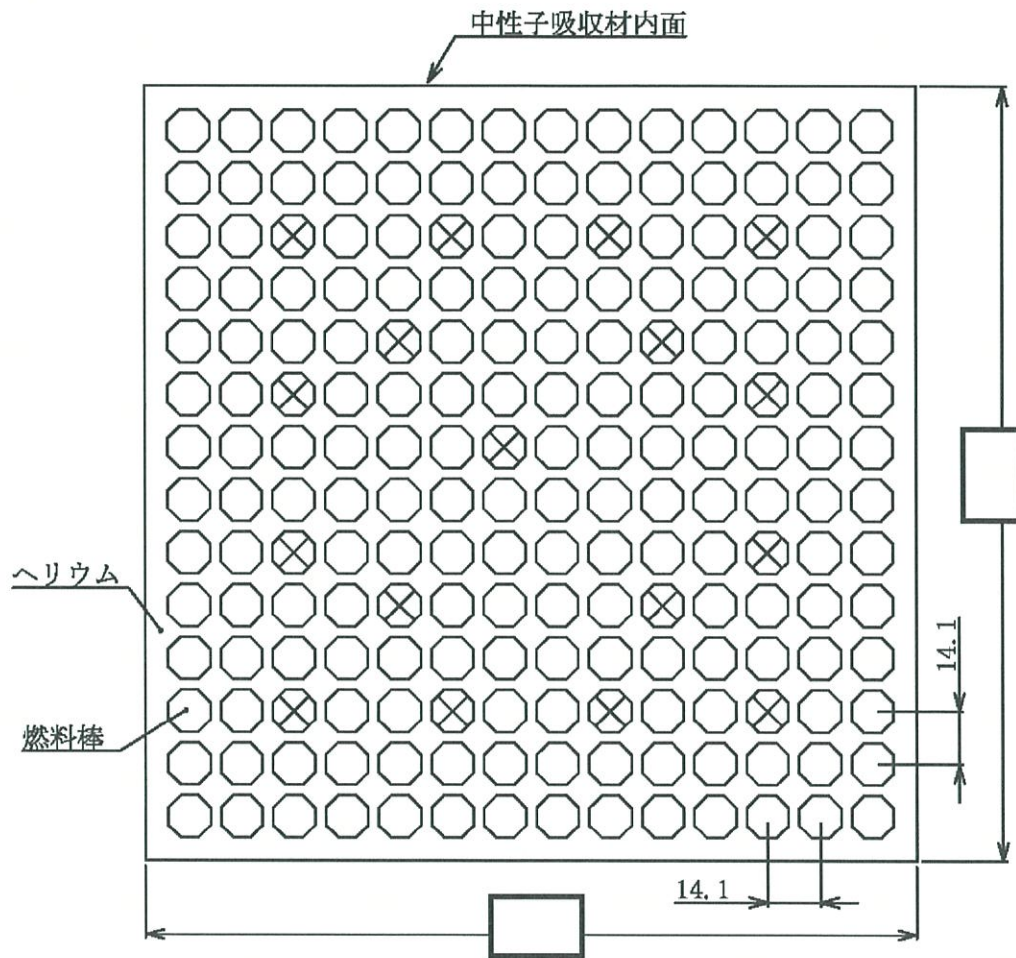


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

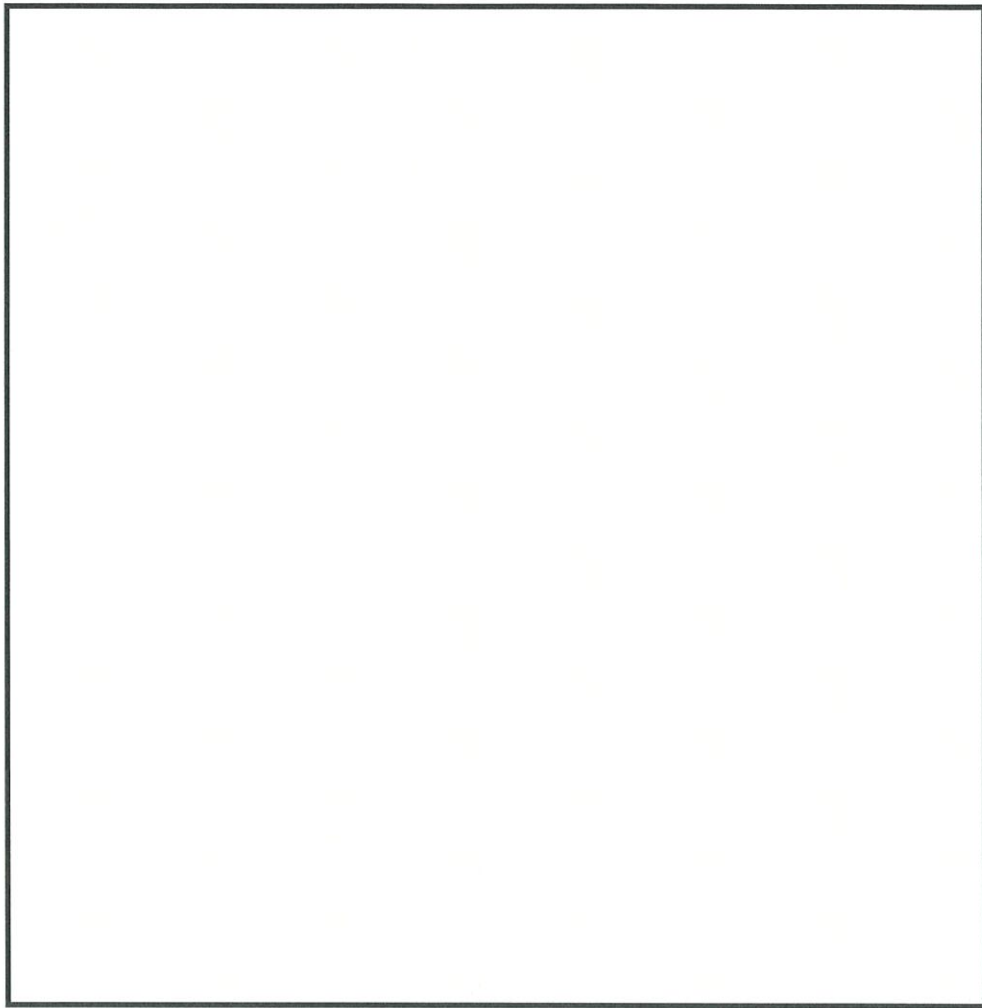
第 2.5.4-10 図 MSF-32P 型全体モデル要素分割図



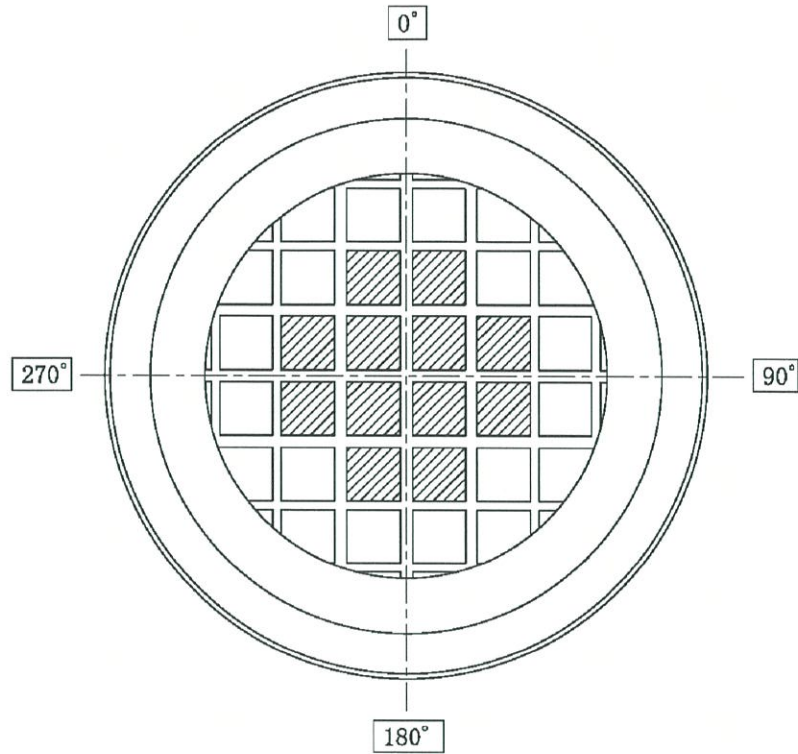
(単位 : mm)


(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。


第 2.5.4-11 図 MSF-32P 型燃料集合体モデル形状図



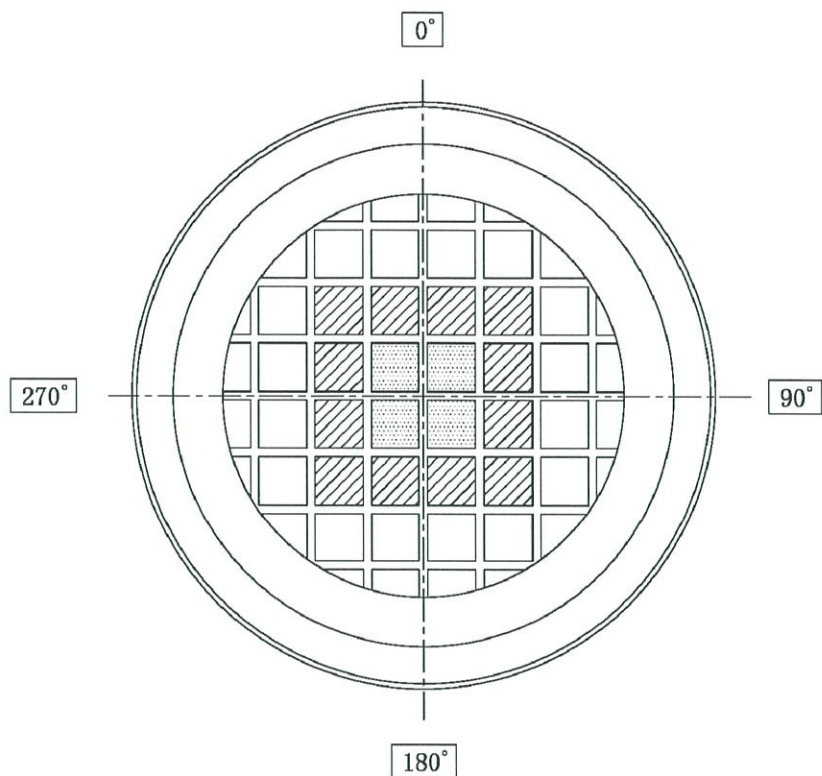
第 2.5.4-12 図 MSF-32P 型燃料集合体モデル要素分割図






-  : 最高燃焼度の崩壊熱量(中央部 12 体)

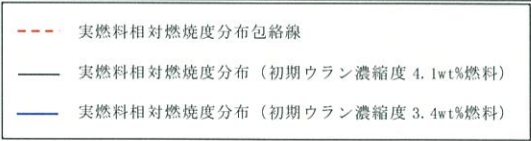
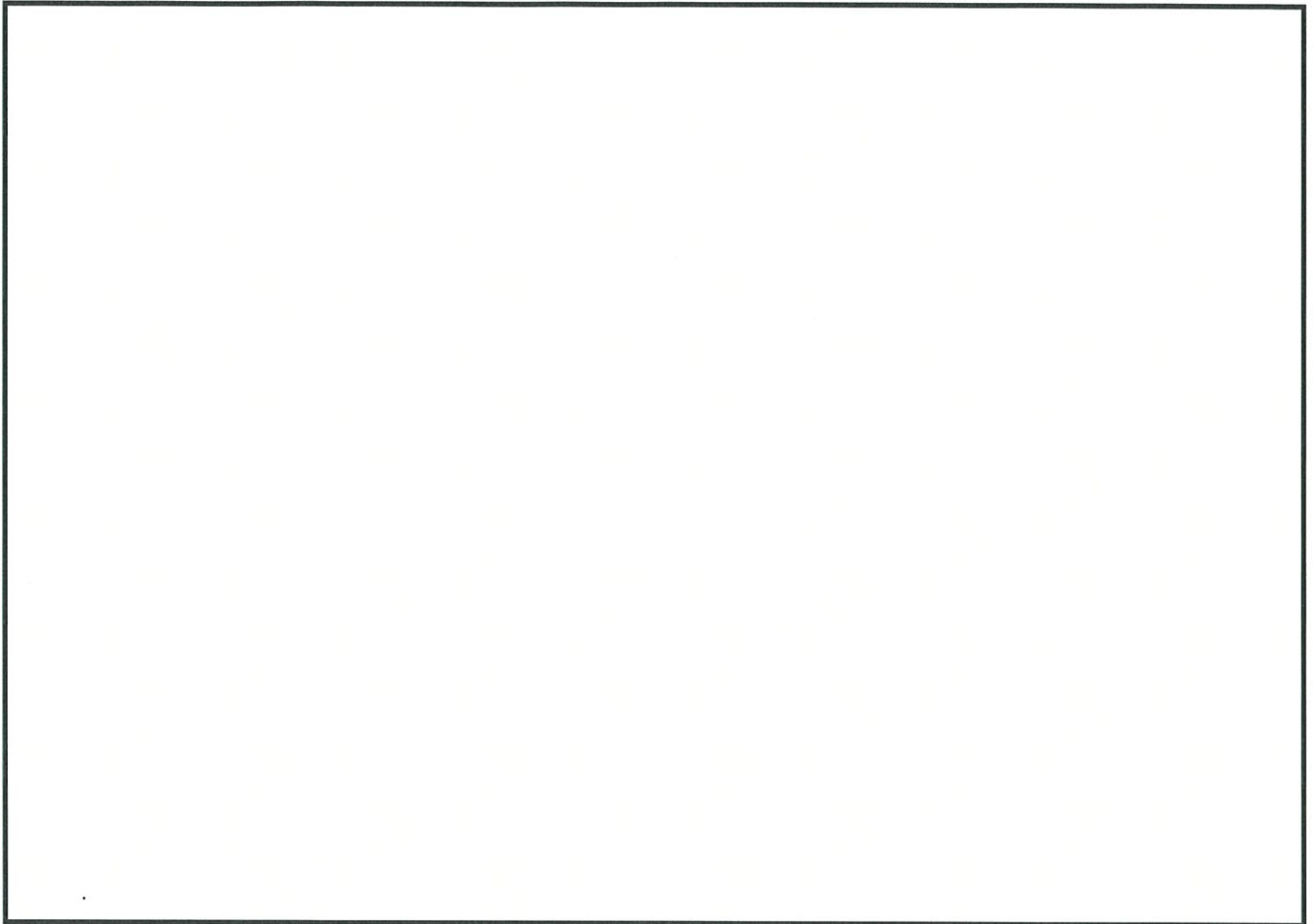
-  : 平均燃焼度の崩壊熱量 (24 体分) から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量 (12 体分) を差し引き、外周部の収納体数 (12 体) で平均化した崩壊熱量

第 2.5.4-13 図 MSF-24P 型の除熱解析における使用済燃料集合体の収納条件



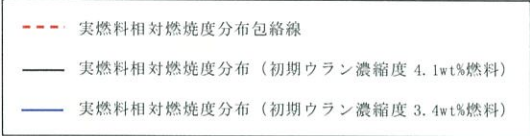
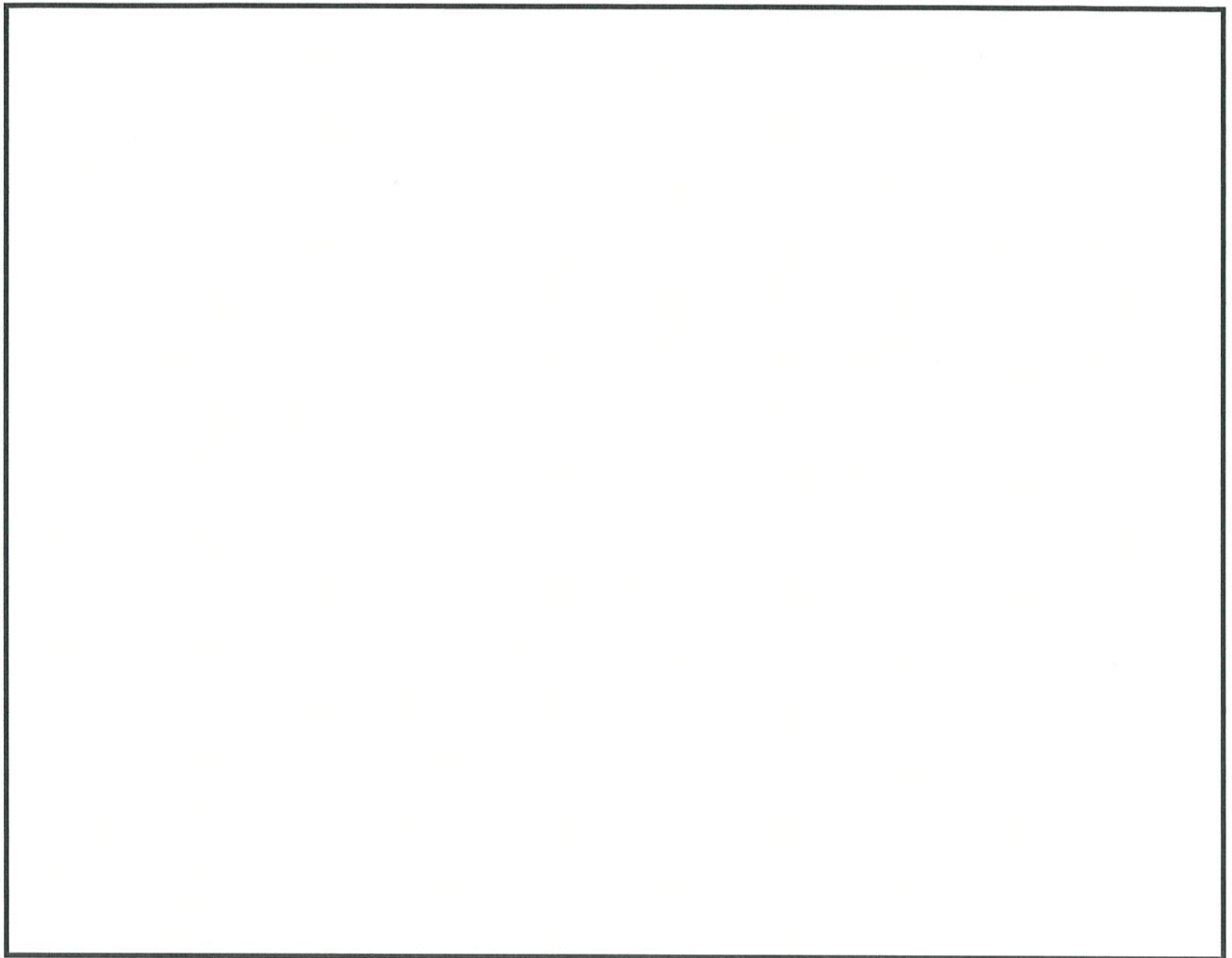
-  : 14×14 型 48GWd/t 燃料における最高燃焼度の崩壊熱量
 (中央部 16 体のうち中心 4 体)
-  : 中央部 16 体の崩壊熱量が 14×14 型 48GWd/t 燃料における
 平均燃焼度の崩壊熱量 16 体分となるように調整した崩壊熱量
 (中央部 16 体のうち中心 4 体を除く 12 体)
-  : 14×14 型 39GWd/t 燃料における平均燃焼度の崩壊熱量
 (外周部 16 体)

第 2.5.4-14 図 MSF-32P 型の除熱解析における使用済燃料集合体の収納条件



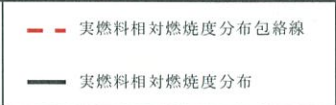
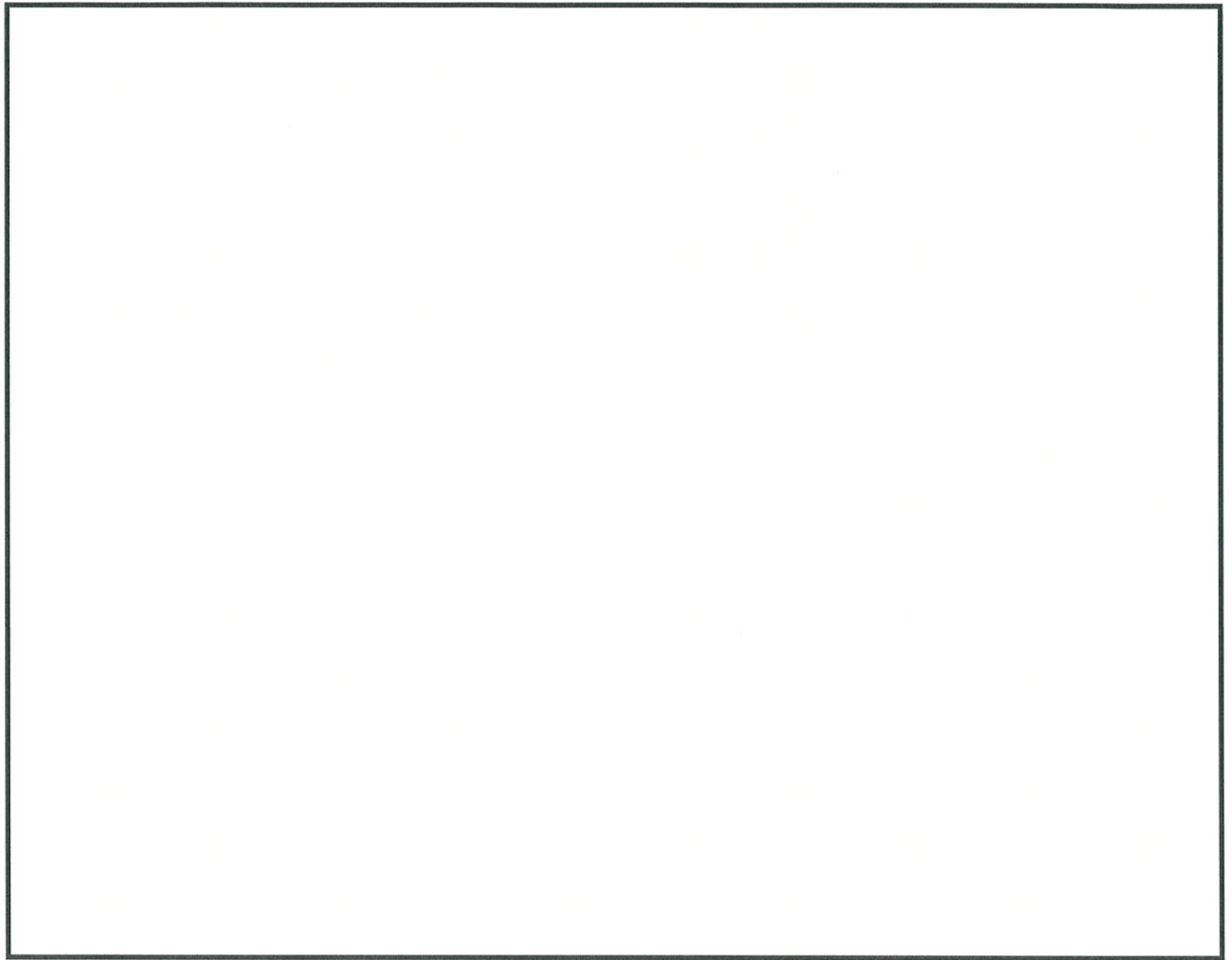
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.4-15 図 1 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (1/3)



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。

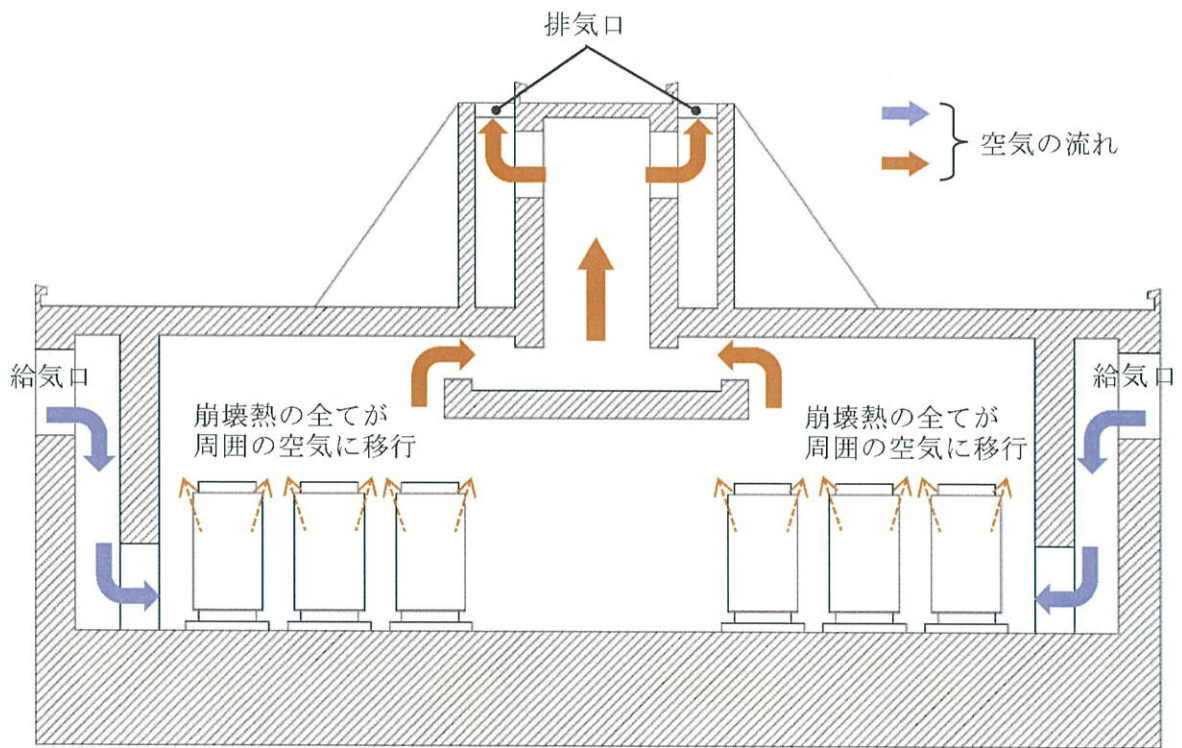
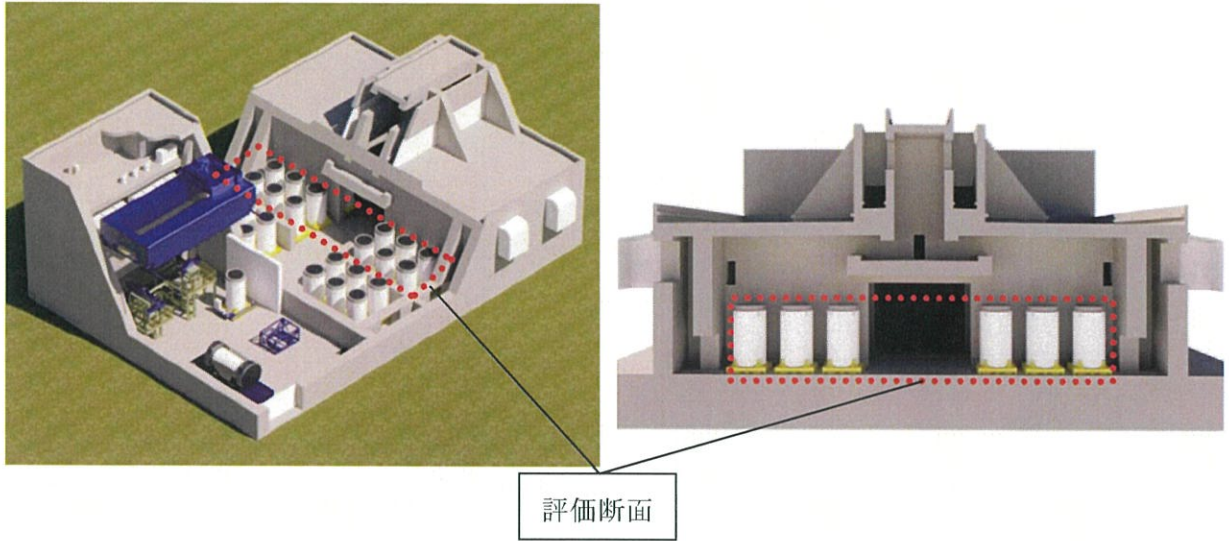
第 2.5.4-15 図 2号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (2/3)



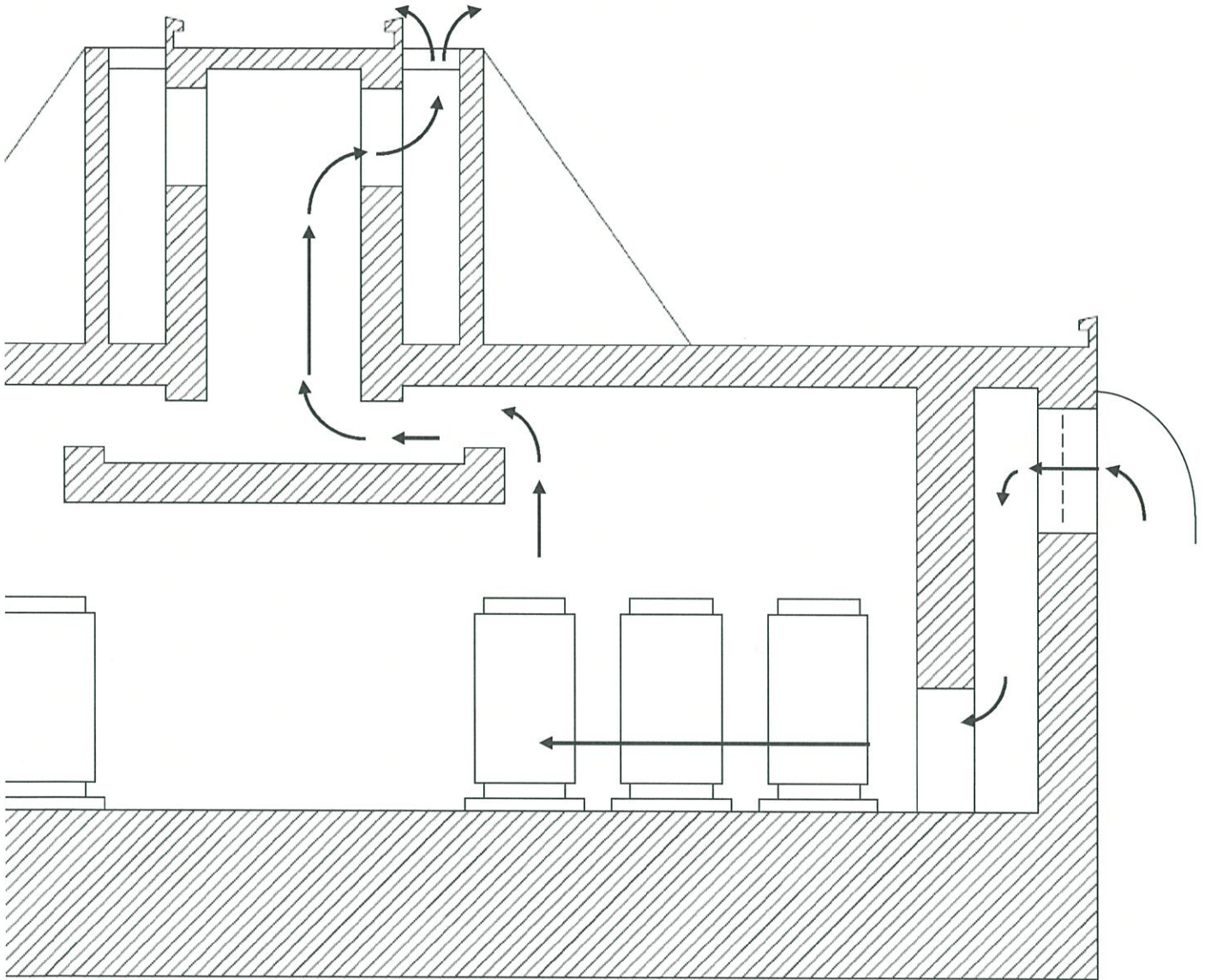
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.4-15 図 3 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (3/3)

乾式貯蔵建屋のイメージ図



第 2.5.4-16 図 乾式貯蔵建屋内の空気の流れイメージ図（評価断面図）



第 2.5.4-17 図 乾式貯蔵建屋の除熱評価で想定する流路（モデル範囲）

乾式キャスクの除熱機能の評価基準は、以下のとおりとする。

a. 使用済燃料被覆管

使用済燃料被覆管の温度は、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、制限される値以下に維持できること。

b. 乾式キャスク構成部材

基本的安全機能及び構造強度の維持が必要な部材は、健全性を保つ温度範囲に収まること。

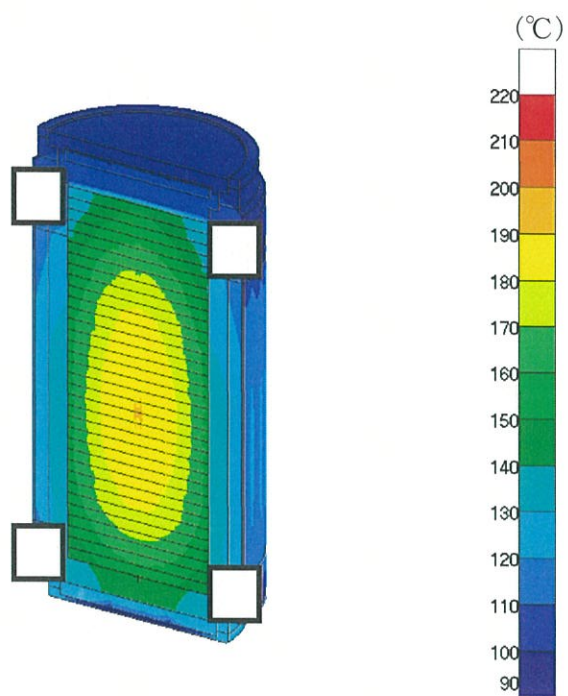
c. 乾式貯蔵建屋

乾式貯蔵建屋の除熱評価で算出した結果（排気温度）が、乾式キャスクの除熱評価で設定している周囲温度以下であること。

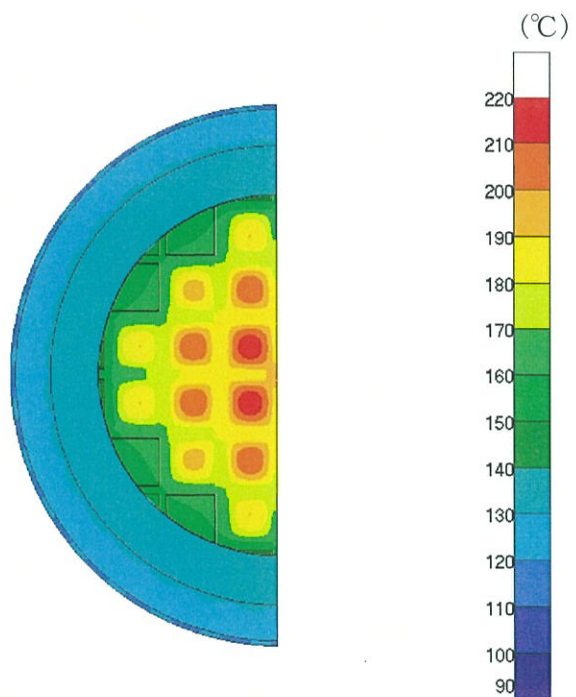
第 2.5.4-13 図及び第 2.5.4-14 図に示すように、最も厳しい評価となる燃料仕様を収納した場合において、第 2.5.4-5 表に示すとおり乾式キャスク各部及び使用済燃料被覆管温度は評価基準を満足している。また、乾式貯蔵建屋の除熱評価で算出した結果（排気温度）が、乾式キャスクの除熱評価で設定している周囲温度（50℃）以下であり、乾式貯蔵建屋は乾式キャスクの除熱機能を阻害しない。なお、乾式貯蔵建屋の除熱評価にあたっては、MSF-24P 型及び MSF-32P 型の 2 型式の乾式キャスクの収納制限における最大発熱量（MSF-24P 型：15.8kw、MSF-32P 型：14.8kw）を包絡する 16kw の条件で評価していることから、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 2.5.4-5 表 評価結果

項 目	評 価 結 果		評価基準	備 考
	MSF-24P 型	MSF-32P 型		
乾式キャスク各部	胴、外筒、一次蓋及び二次蓋	約 150 °C	約 150 °C	350 °C以下 ¹⁾ 構造強度が確保される制限温度 (第 2.5.4-18 図及び第 2.5.4-20 図)
	中性子遮蔽材 (レジン)	約 140 °C	約 140 °C	149 °C以下 ²⁾ 中性子遮蔽材の性能が維持される制限温度 (第 2.5.4-18 図及び第 2.5.4-20 図)
	金属ガスケット	約 110 °C	約 110 °C	130 °C以下 ³⁾ 閉じ込め機能が維持される制限温度 (第 2.5.4-18 図及び第 2.5.4-20 図)
	バスケット	約 200 °C	約 190 °C	250 °C以下 ⁴⁾ 構造強度が確保される制限温度 (第 2.5.4-18 図及び第 2.5.4-20 図)
使用済燃料被覆管		約 220 °C	約 210 °C	275 °C以下 ⁵⁾ 燃料被覆管健全性が維持される制限温度 (第 2.5.4-19 図及び第 2.5.4-21 図)
乾式貯蔵建屋	乾式キャスクの周囲温度	約 45°C		50°C以下 乾式キャスクの除熱評価で設定している温度

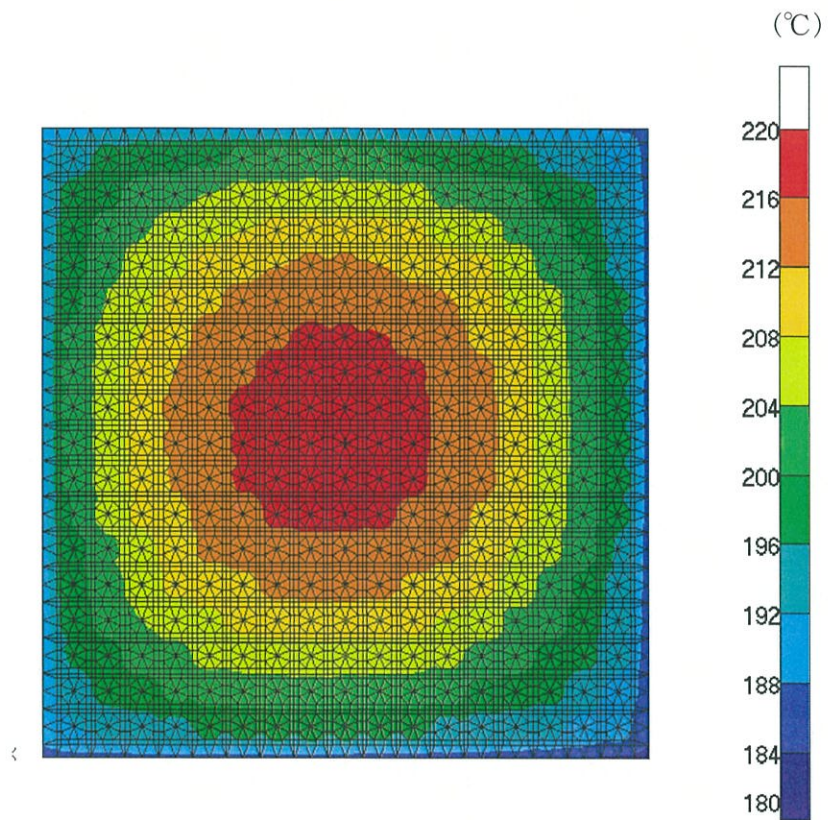


(全体)

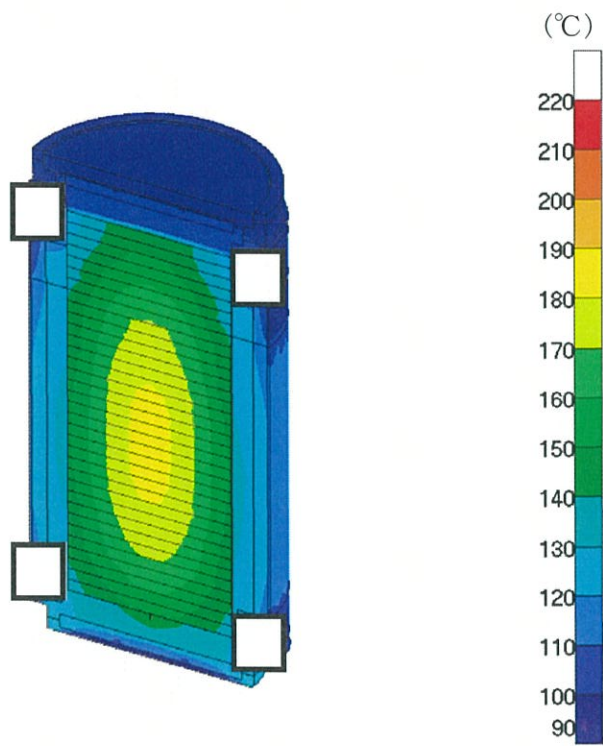


(燃料集合体最高温度位置断面)

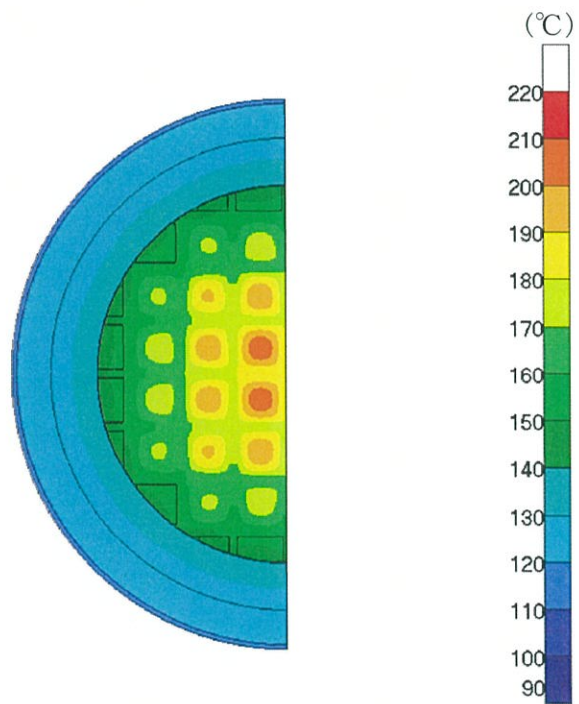
第 2.5.4-18 図 MSF-24P 型除熱解析結果(全体モデル)



第 2.5.4-19 図 MSF-24P 型除熱解析結果(燃料集合体モデル)

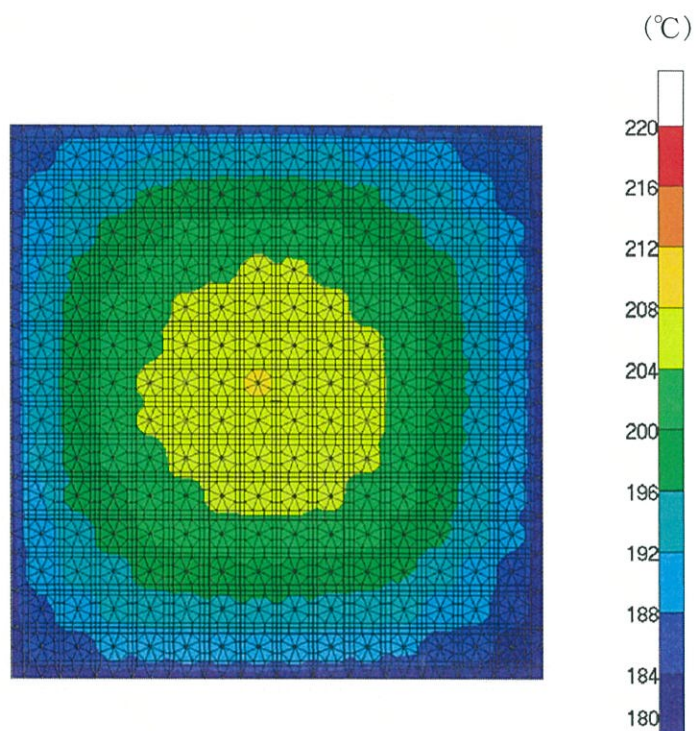


(全体)



(燃料集合体最高温度位置断面)

第 2.5.4-20 図 MSF-32P 型除熱解析結果(全体モデル)



第 2.5.4-21 図 MSF-32P 型除熱解析結果(燃料集合体モデル)

[確認内容]

4) 貯蔵建屋の除熱評価

- ① 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。

貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しない設計とする。(詳細は、6条で説明する。)

また、設計上考慮すべき自然現象に対しては、貯蔵建屋等の損壊が生じず、除熱機能は損なわれない設計とし、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しない設計とする。

(詳細は4,5,6条で説明する。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。)

特に、以下の貯蔵建屋等の損壊モードについても、想定されない設計とする。

<兼用キャスクの埋没状態>

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)及び遮蔽壁)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、損壊しないため、兼用キャスクは埋没しない。また、地盤(3条)及び周辺斜面(4条)も基準地震動に対して、安定であるため、兼用キャスクは埋没しない。

<貯蔵建屋給排気口の損傷状態>

貯蔵建屋給排気口は、貯蔵建屋の一部からなり、地震(4条)、津波(5条)、外部から衝撃(6条)による損傷の防止が図られるため、損壊しない。

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

乾式キャスクの除熱安全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

別添 3 の「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）」6. (a) で説明した内容と同じ。

(b) ABAQUS コード

i 概要

ABAQUS コード⁶⁾ は、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.（現在は Dassault Systèmes 社）で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送キャスクの伝熱解析などに広く利用されている。

ii 機能

ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。

- a) 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- b) 一次元から三次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- c) 初期条件（温度）は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- d) 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、熱伝導、対流及びふく射が考慮できる。熱伝導率の温度依存が可能で、また、伝熱解析と応力解析（構造強度解析）を同時に行うことが可能なため、ギャップ間の変化による伝熱条件を変化させることができる。
- e) 構成物質の相変態が考慮できる。

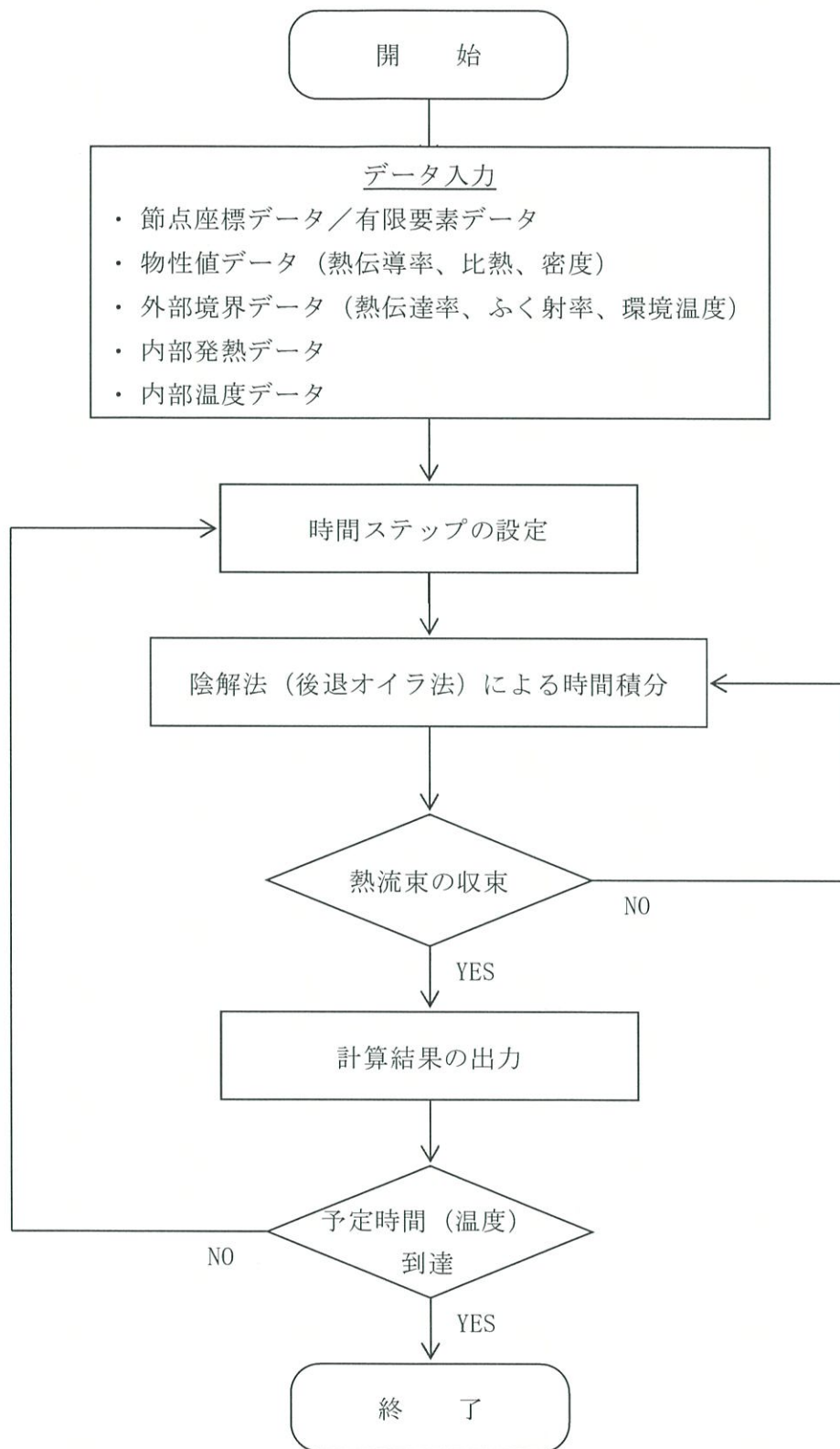
iii 解析フロー

代表的な解析フローを第 2.5.4-22 図に示す。

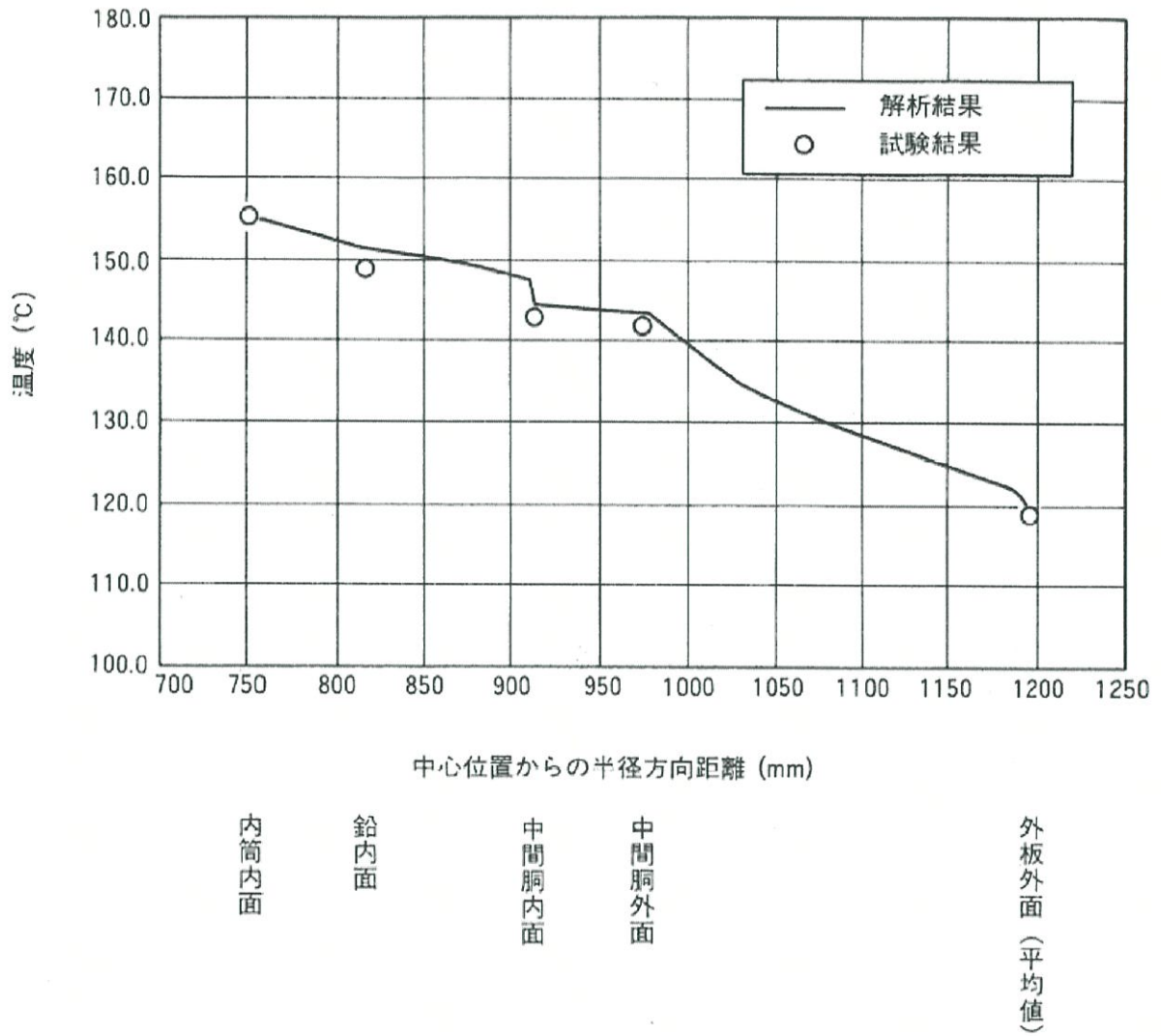
iv 使用実績及び検証

ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。また、乾式キャスクの定常伝熱試験に対して ABAQUS による解析結果と試験結果を比較・検討し、ABAQUS コードの妥当性が検証されている⁷⁾。

ABAQUS コードの検証例を第 2.5.4-23 図に示す。



第 2.5.4-22 図 ABAQUS コードの解析フロー図



第 2.5.4-23 図 ABAQUS コードの検証例⁷⁾

4. 参考文献

- 1) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012 年版) (JSME S NJ1-2012)」, (2012).
- 2) BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).
- 3) (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).
- 4) 三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).
- 5) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ, 「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」, (2009).
- 6) Dassault Systèmes, “ABAQUS Analysis User’s Manual (6.12)”, (2012).
- 7) 山川秀次, 五味義雄, 尾崎幸男, 小崎明朗, 「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立ーキャスクの伝熱特性評価ー」, (一財)電力中央研究所, (1993).