

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。

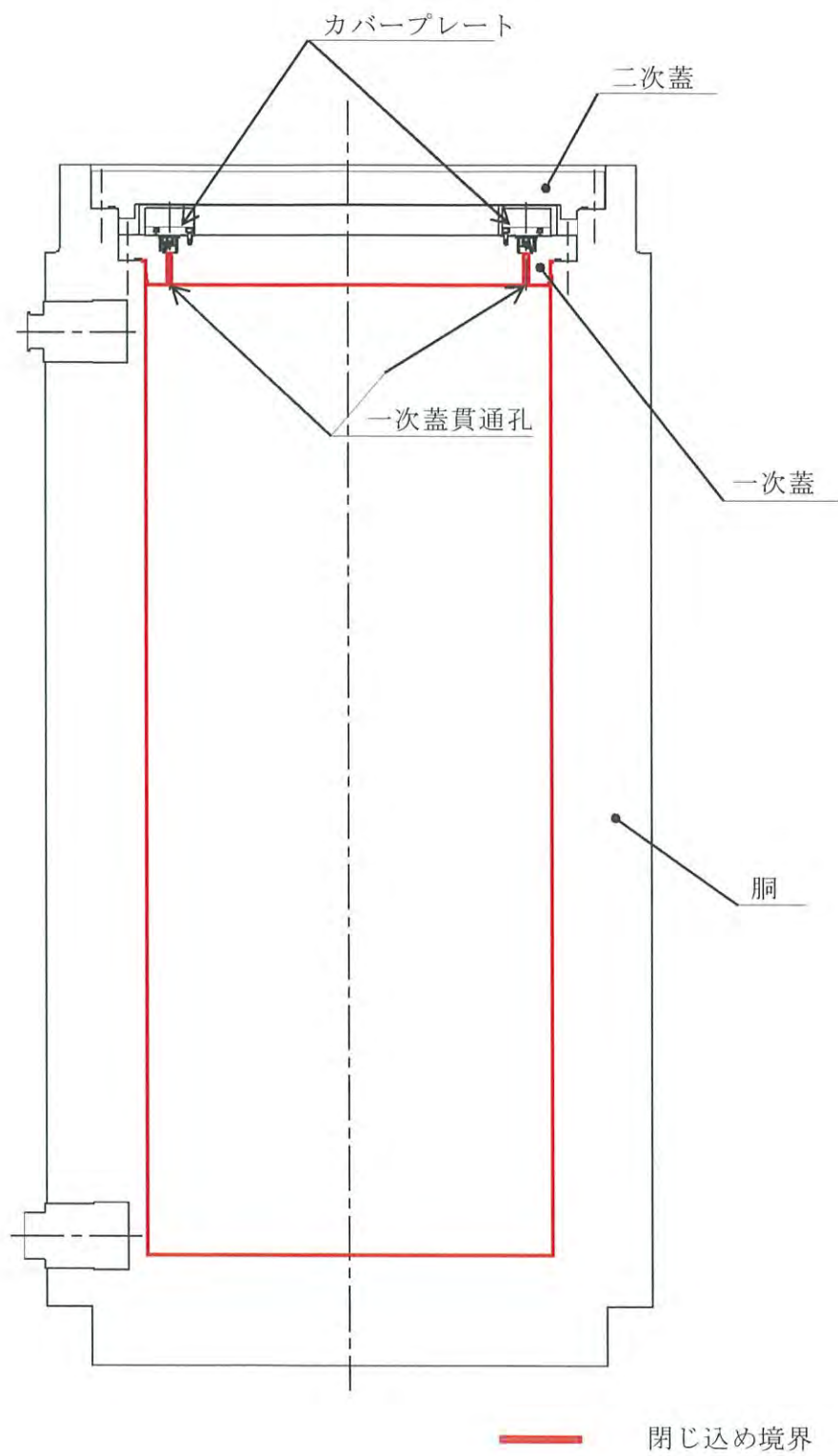
乾式キャスクの閉じ込め構造を第2.5.1-1図に、シール部詳細を第2.5.1-2図に示す。

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。

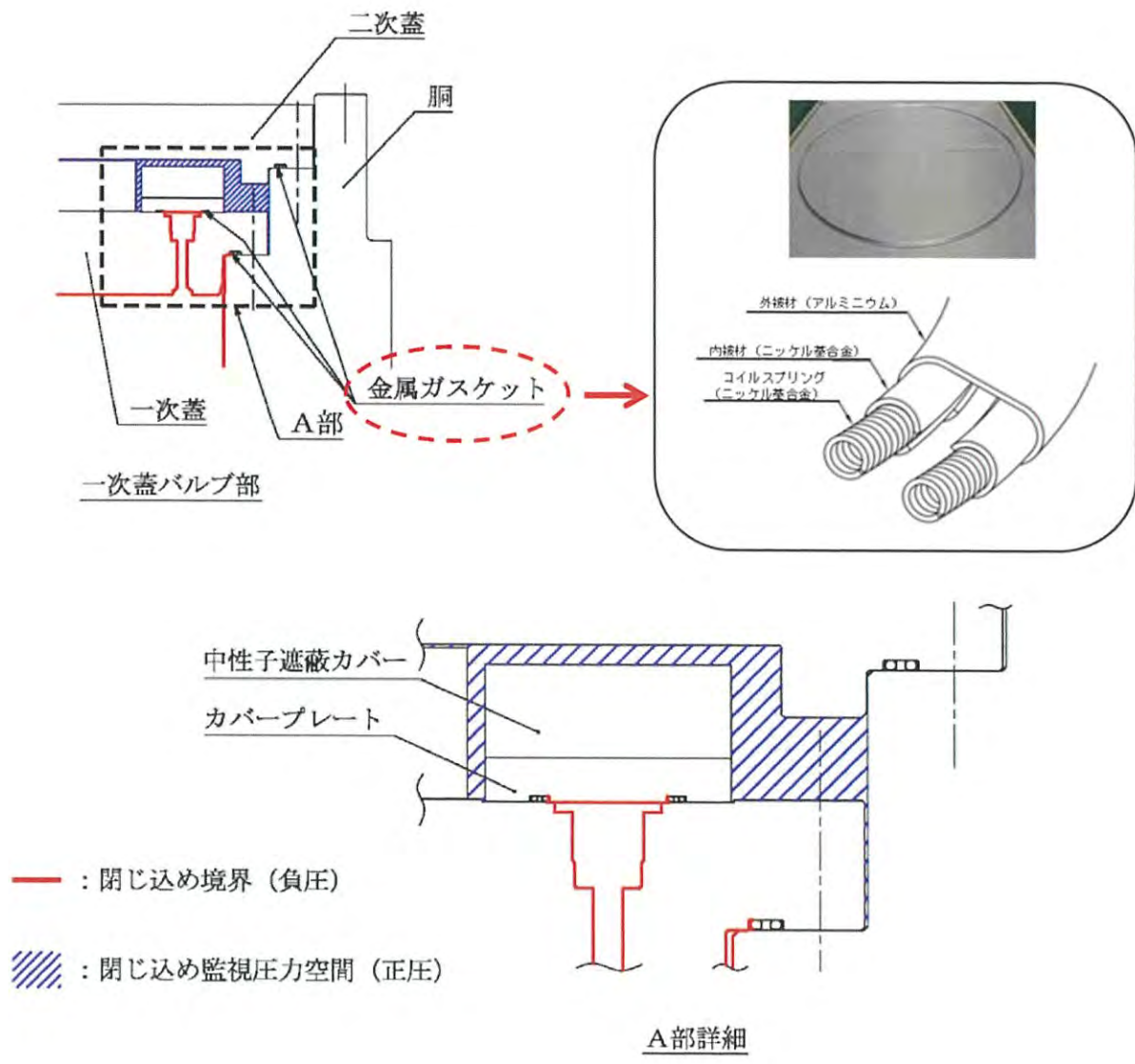
一次蓋と二次蓋との蓋間圧力を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できる設計とする。

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



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
(Pa・m³/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 (m³)
(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 (Pa・m³/s)
- L : 圧力 P_a における体積漏えい率 (m³/s)
- F_c : 連続流のコンダクタンス係数 (m³/(Pa・s))
- F_m : 自由分子流のコンダクタンス係数 (m³/(Pa・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 (Pa・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 (J/(mol・K))

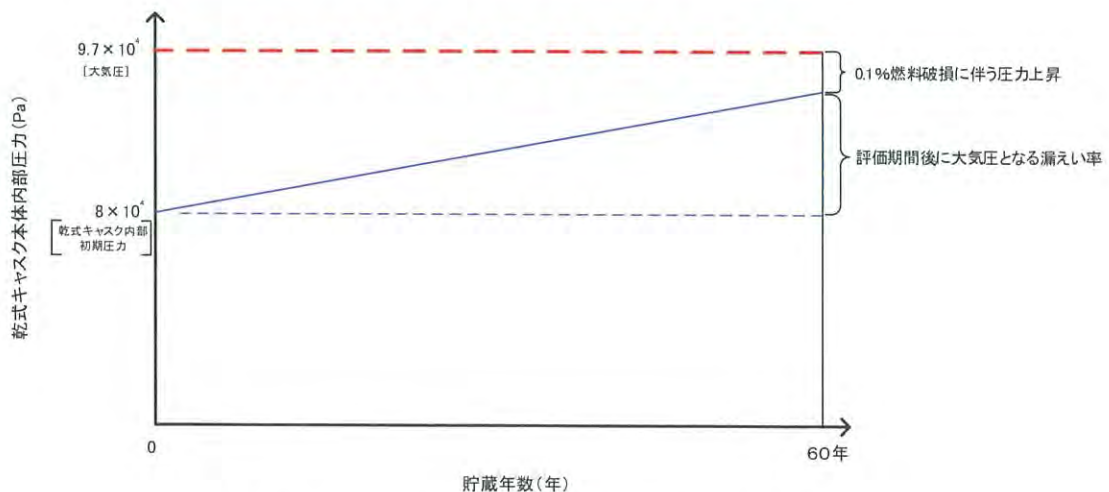
- b) 漏えい孔径 D_0 を設定し (3.2) の式により漏えい率 Q を求める。Q を (3.1) の式に入力し、時間 t で積分することにより、設計貯蔵期間経過後の乾式キ

ヤスク本体内部圧力 P_d を求める。

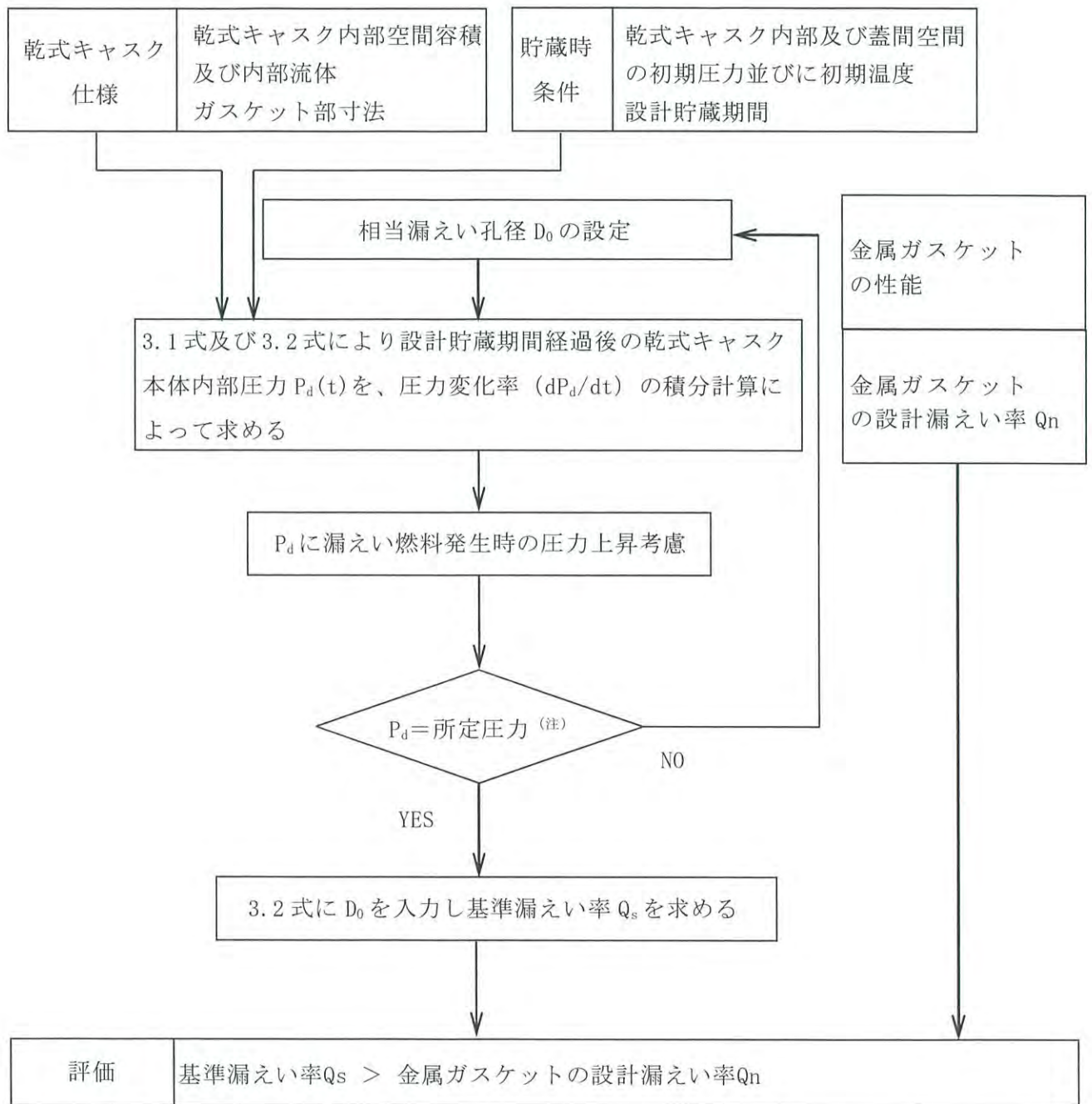
- c) b)により求めた P_d が正圧の場合はより小さな漏えい孔径 D_0 を、負圧の場合はより大きい漏えい孔径 D_0 を設定して、a)～b)を繰り返し、 P_d が大気圧 (9.7×10^4 Pa) となる漏えい孔径 D_0 を求める。
- d) 判定基準である金属ガスケットの漏えい率と比較するため、c)により求めた D_0 を固定し、(3.2) の式に金属ガスケットの漏えい率を求めた試験条件 ($P_u = 1.01 \times 10^5$ Pa、 $P_d = 0$ Pa、 $T = 298.15$ K) を入力し、基準漏えい率 Q_s を求める。

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。

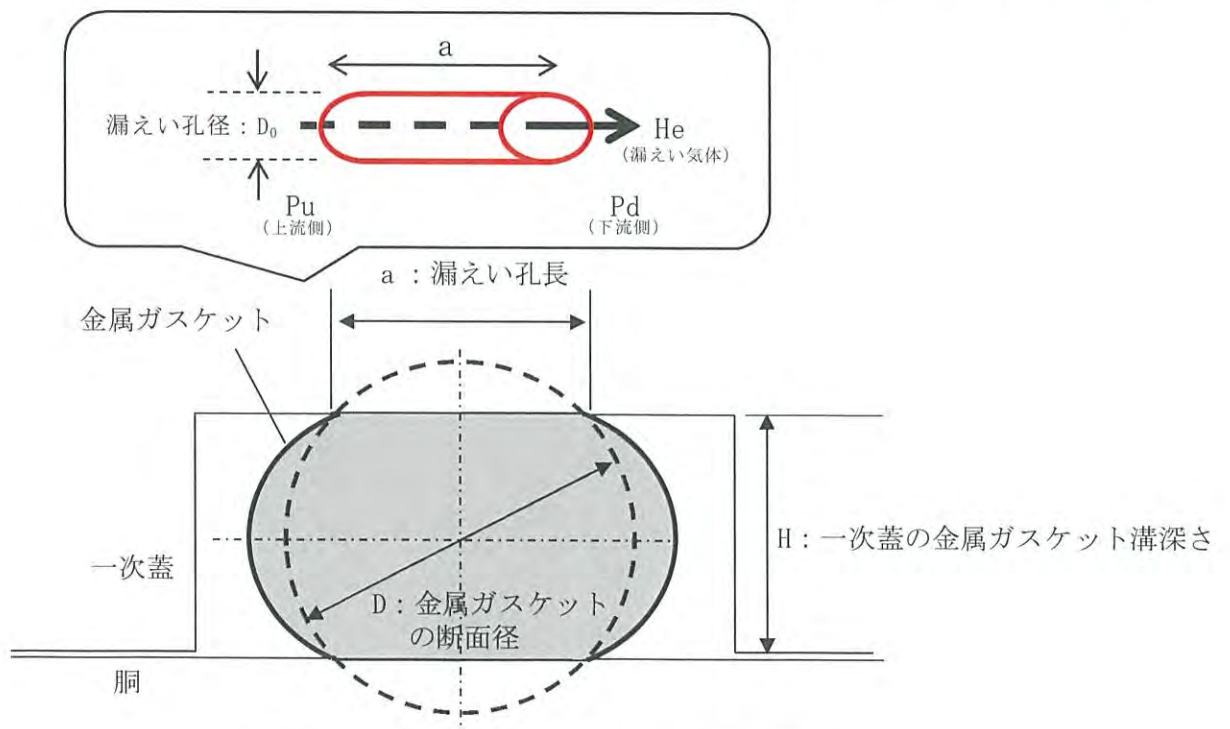
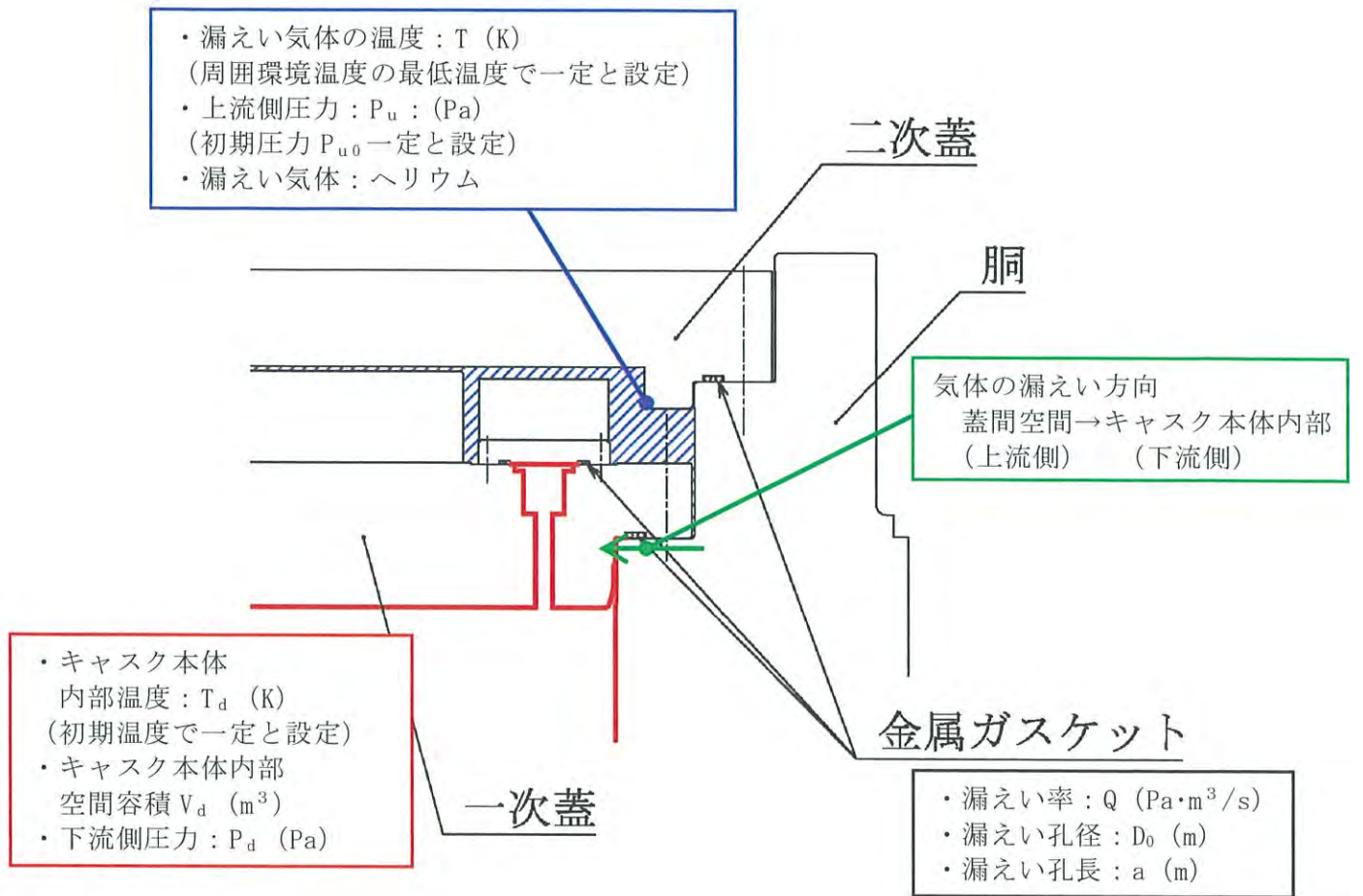


第 2.5.1-3 図 乾式キャスク漏えい率の考え方



(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

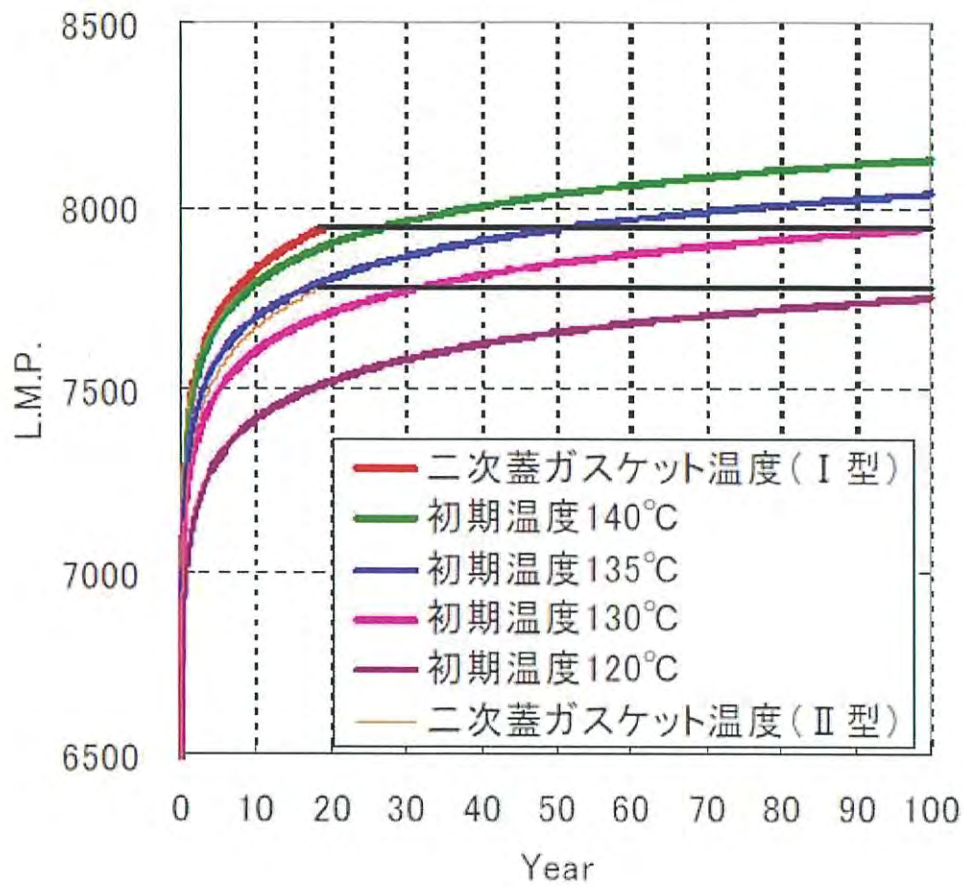
閉じ込め設計の評価条件及び評価結果を第 2.5.1-1 表に示す。使用する金属ガスケットの漏えい率が基準漏えい率より小さいことを確認した。

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。

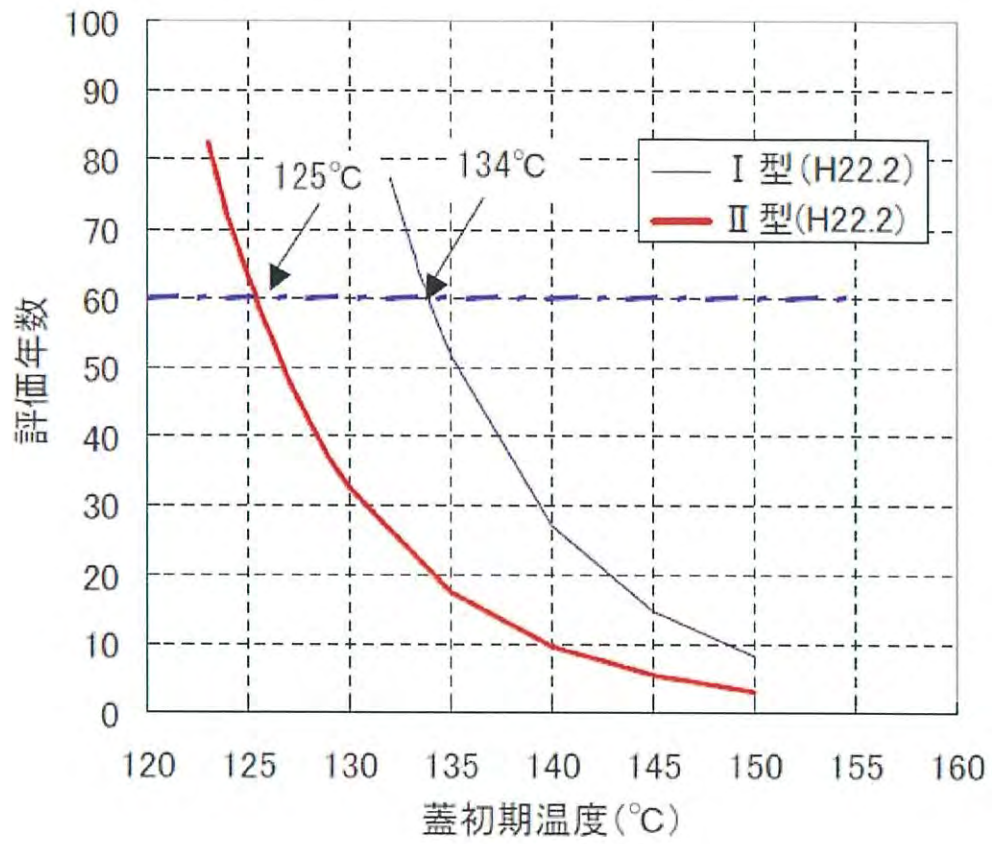


$$LMP = T \cdot (14 + \log t)$$

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 LMP⁴⁾



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。

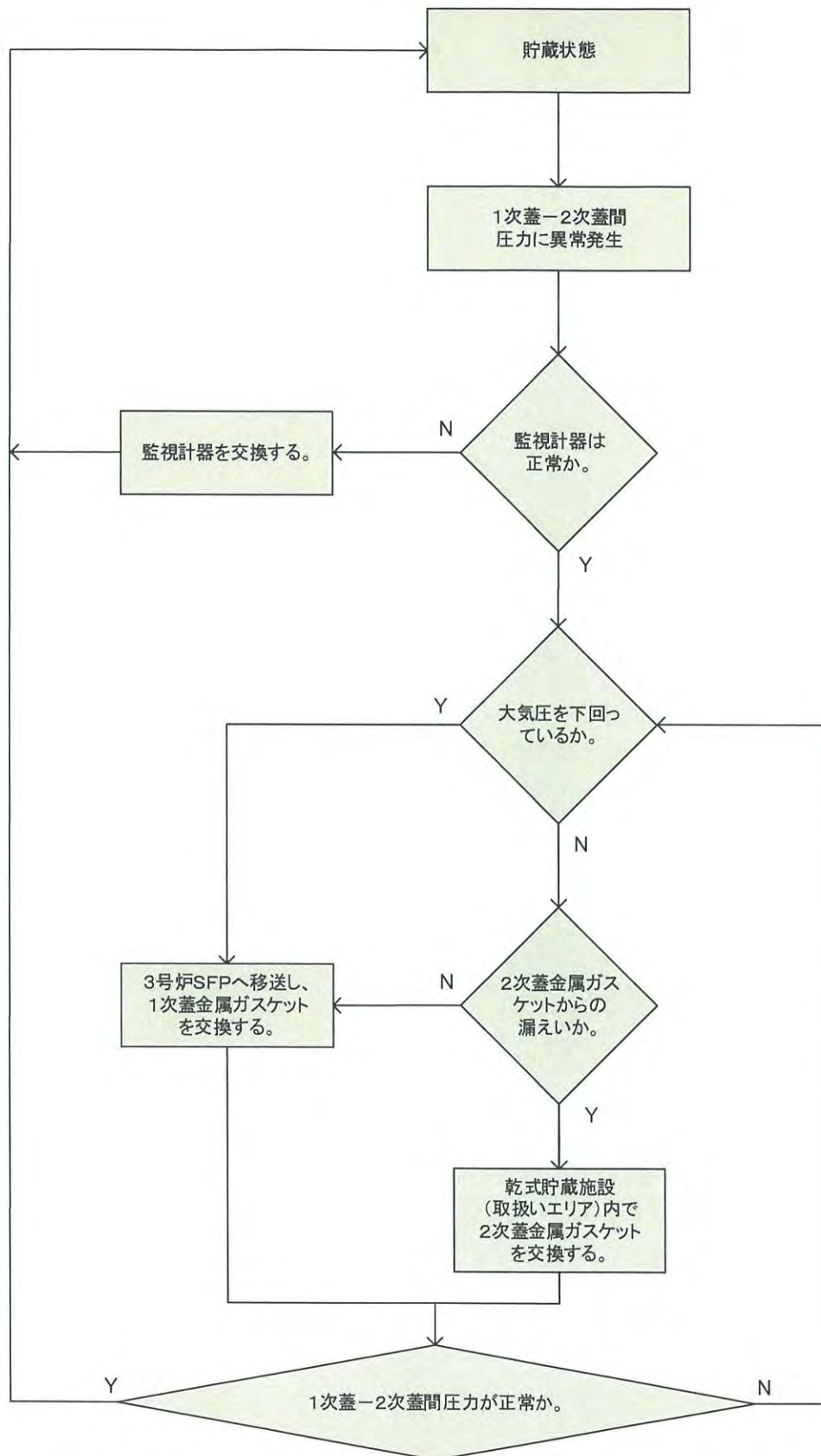
蓋間圧力が管理値を下回っている場合、まず、監視計器の確認を行い、監視計器異常の場合には監視計器を交換し、貯蔵を再開する。

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。

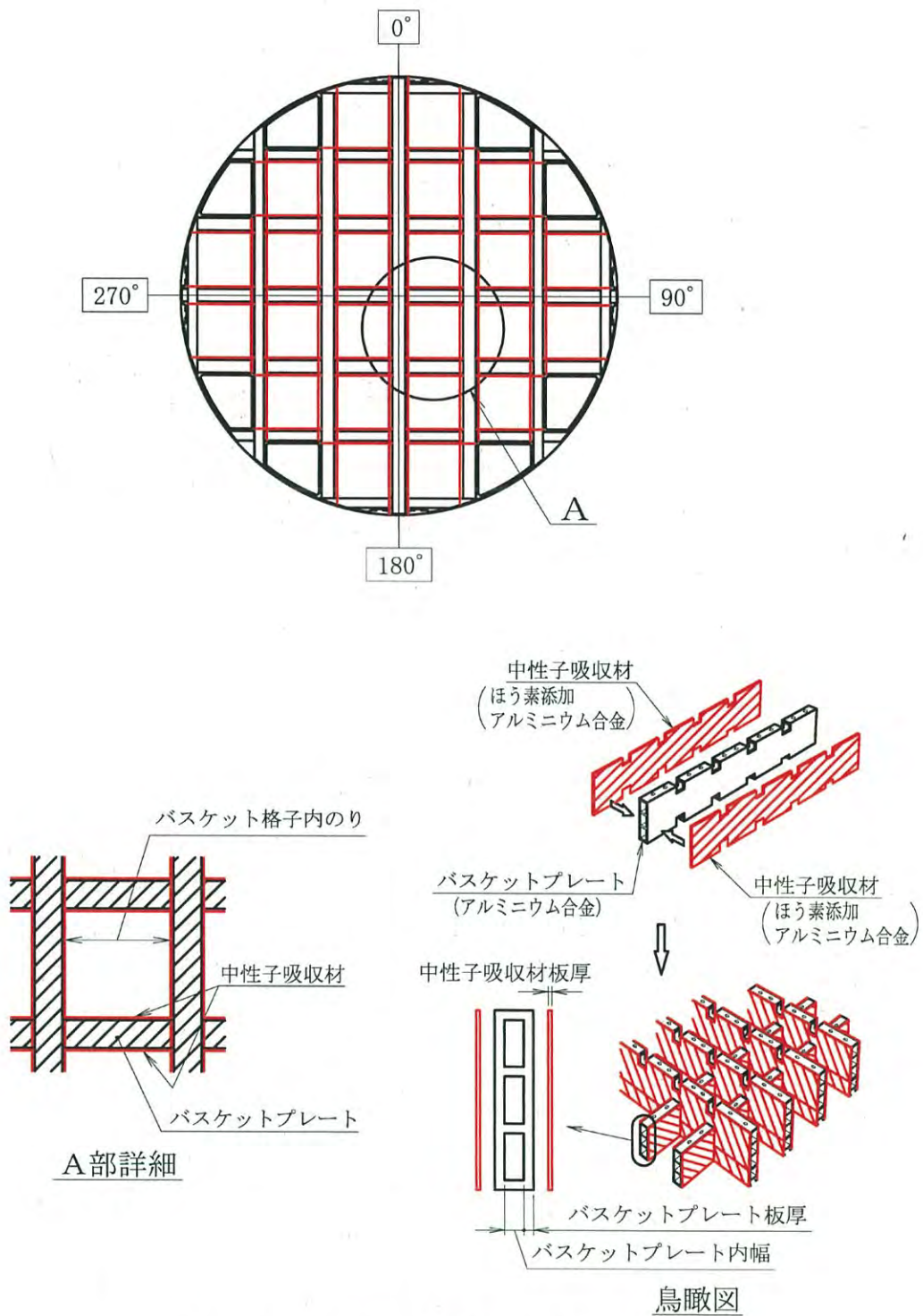
兼用キャスクが滑動する可能性がある場合は、滑動等による兼用キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮すること。

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。

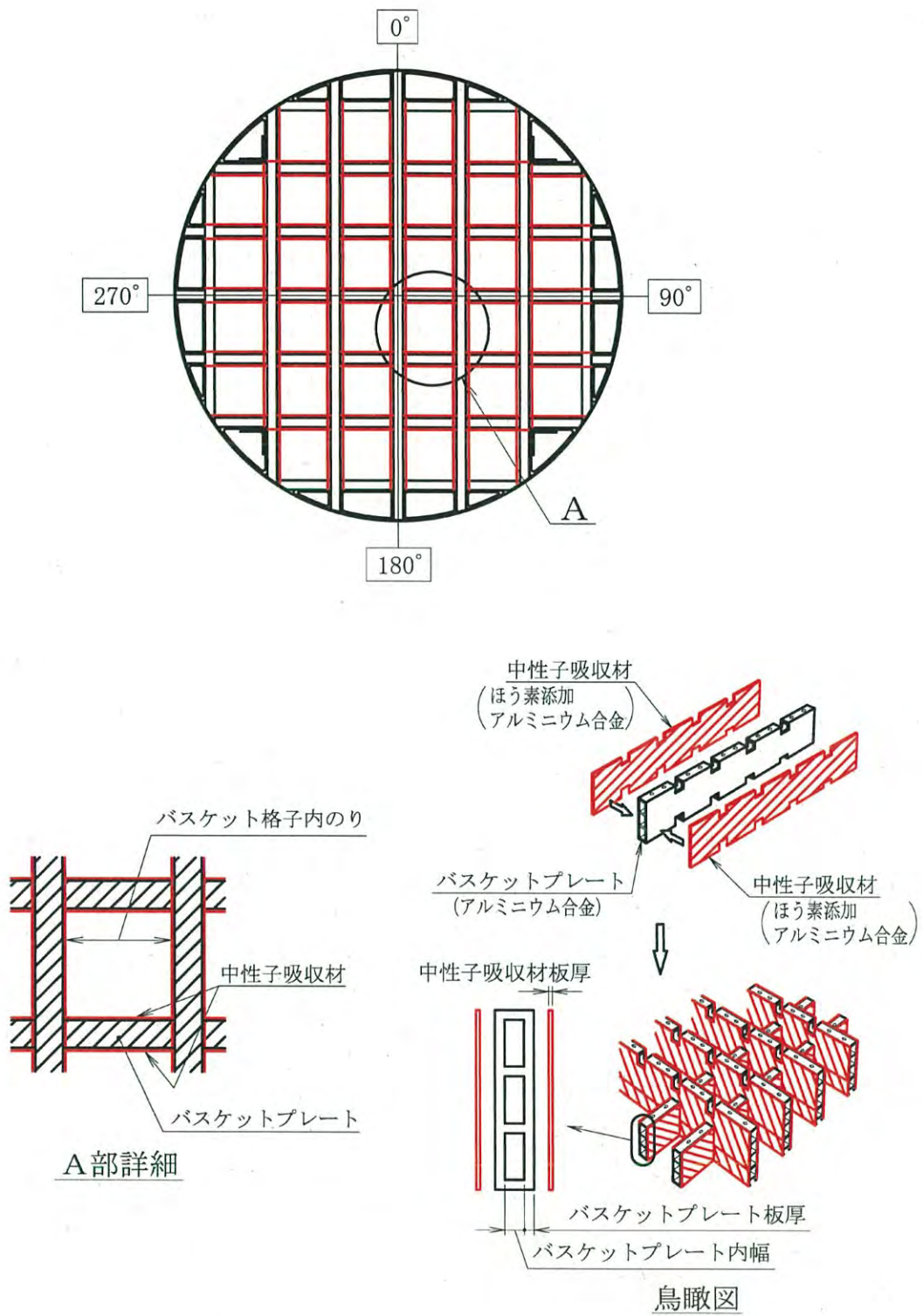
乾式キャスクのバスケットは、断面形状が中空状であるアルミニウム合金製のバスケットプレートで構成された格子構造であり、個々の使用済燃料を乾式キャスク本体内部の所定の位置に収納する。また、バスケットプレートと中性子吸収材を併せて配置することで臨界を防止する構造とする。（第2.5.2-1図、第2.5.2-2図参照）

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、水密度範囲 0.0～1.0 g/cm³ 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 g/cm³ 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

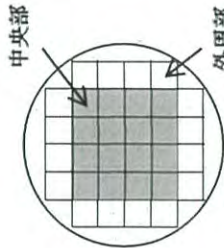
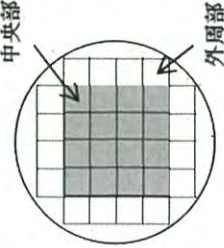
- － 乾式キャスクに収納する使用済燃料のウラン濃縮度は照射により減損しているが、燃焼度 0Gwd/t の減損していない新燃料のウラン濃縮度 4.1±wt% 及び 3.4±wt% を保守的にwt% 及びwt% とする。
- － 収納する使用済燃料には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれる場合があるが、中性子吸収効果のあるガドリニウムの存在を無視し、すべて通常のウラン新燃料とする。
- － MSF-24P 型については、使用済燃料とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、中性子吸収効果のあるバーナブルポイズン集合体を無視する。

・ モデル化の保守性

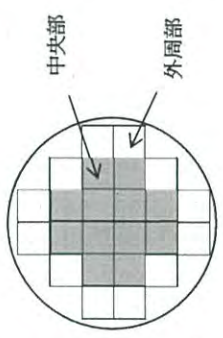
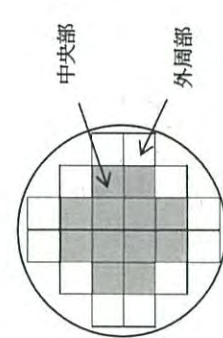
- － 乾式キャスクが無限に配列した体系（完全反射）とする。これにより、建屋内の乾式キャスクの配置制限は必要なく、乾式キャスク相互の中性子干渉も包絡する評価となる。

- 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
の下限值とする。
- 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

収納物仕様	燃料集合体 1体の仕様	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペース		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	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2	≤3.5	14×14型 (A/B型)	14×14型 (A/B型)	14×14型 (A型)		
	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	
配置								

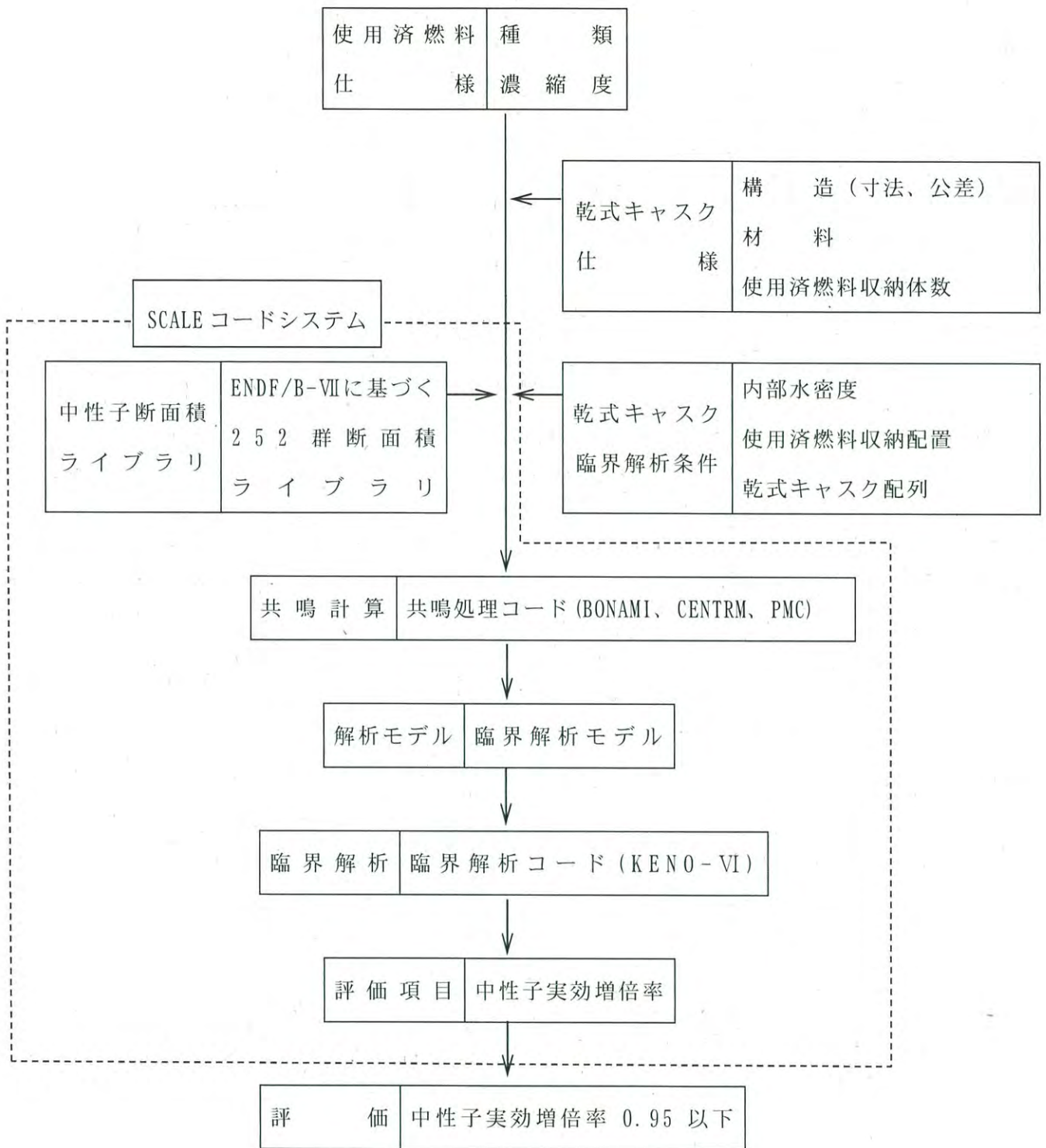
第2.5.2-2表 3号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

燃料タイプ	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペース	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 ^{※1} 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			—		

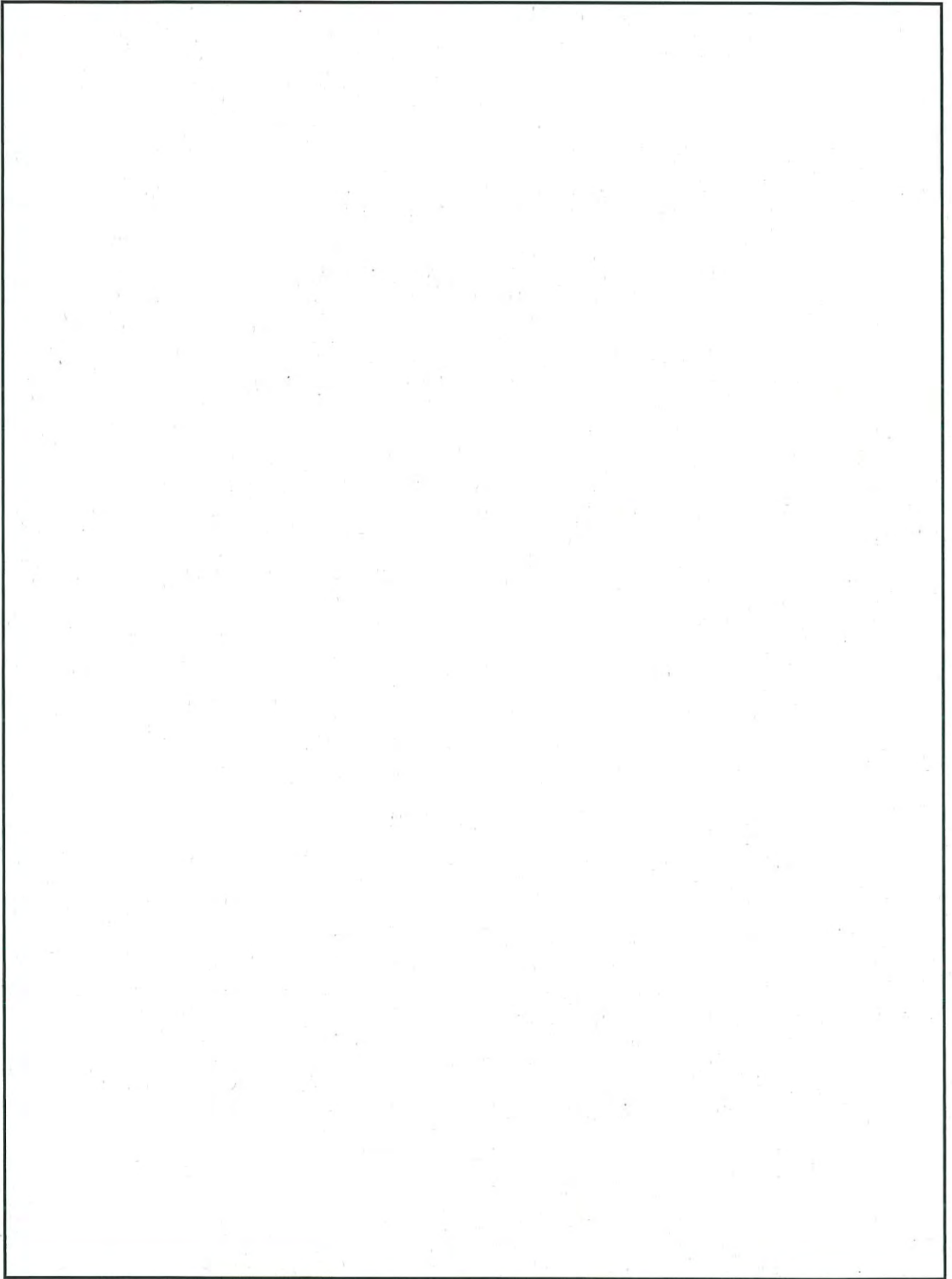
※1: 回収ウラン燃料については、15年冷却した通常ウラン燃料と放射エネルギー及び発熱量が同程度以下となるよう20年以上冷却した後、収納する。

第 2.5.2-3 表 乾式キャスク臨界解析モデル寸法条件

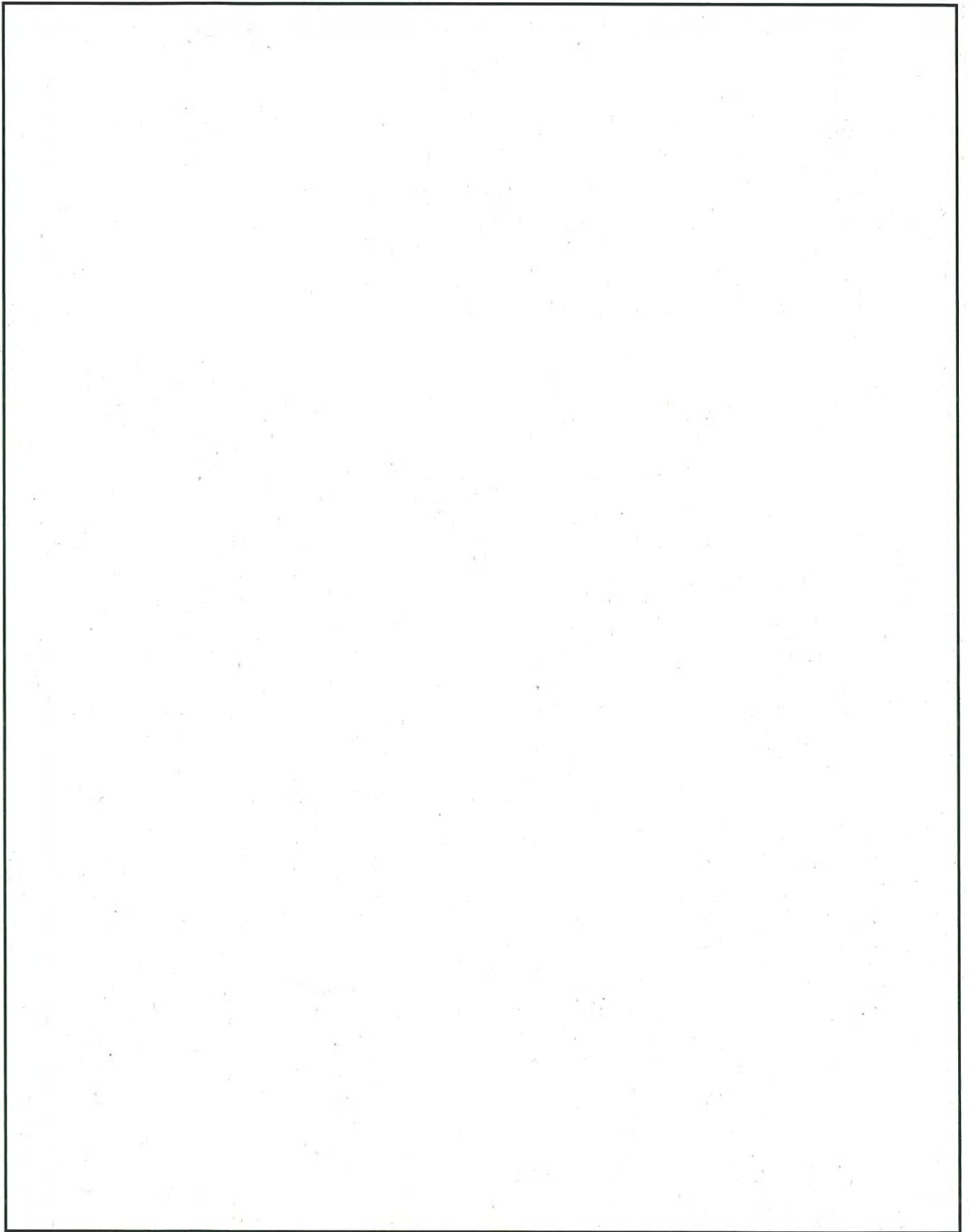
	寸法条件		条件設定根拠
	乾燥状態	冠水状態	
バスケットプレート幅 (アルミニウム合金)	最小	最小	・隣接する燃料との距離が短くなるように乾燥状態、冠水状態共に最小としている。
バスケットプレート内幅 (アルミニウム合金)	最大	最小	・乾燥状態ではバスケットプレートでの中性子吸収効果が小さくなるように最大としている (バスケットプレート幅を固定して内幅を最大とすることでバスケットプレート板厚が最小となる)。 ・冠水状態ではバスケットプレート内幅領域での中性子の減速効果を小さくし、中性子吸収材での中性子吸収効果が小さくなるように、バスケットプレート内幅を最小としている。
バスケット格子内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



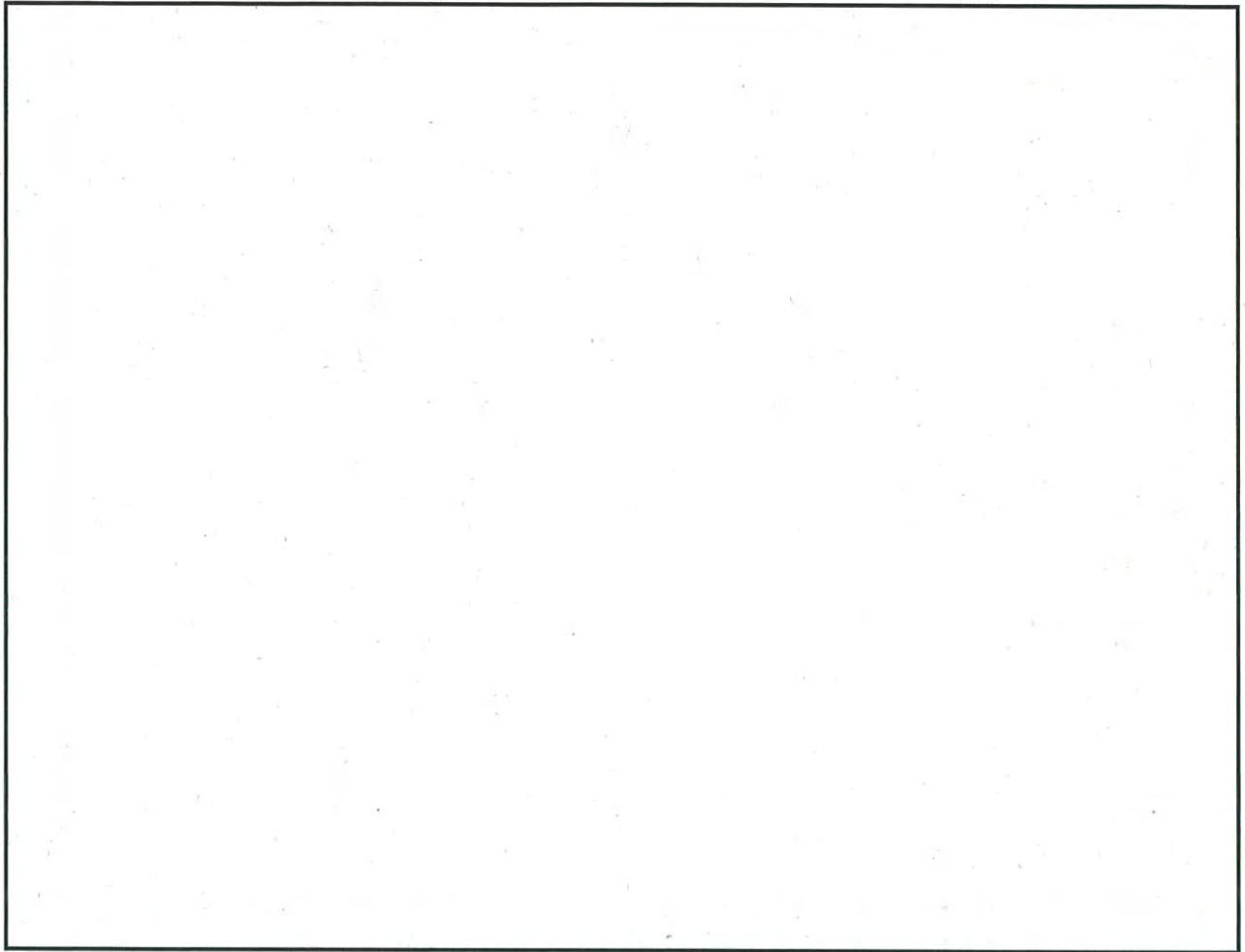
第 2.5.2-3 図 乾式キャスクの臨界解析フロー図



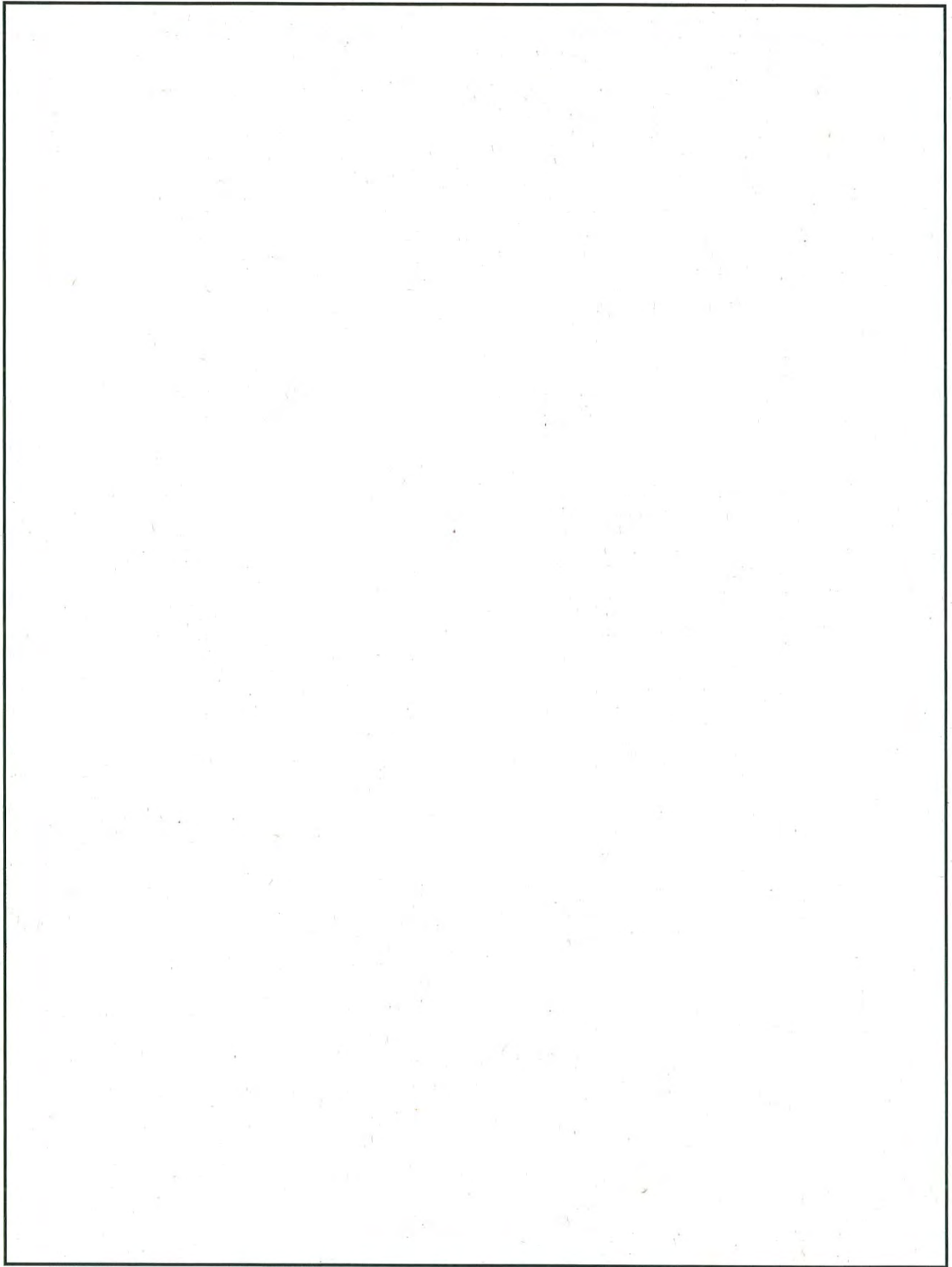
第 2.5.2-4 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-24P 型）（冠水状態）



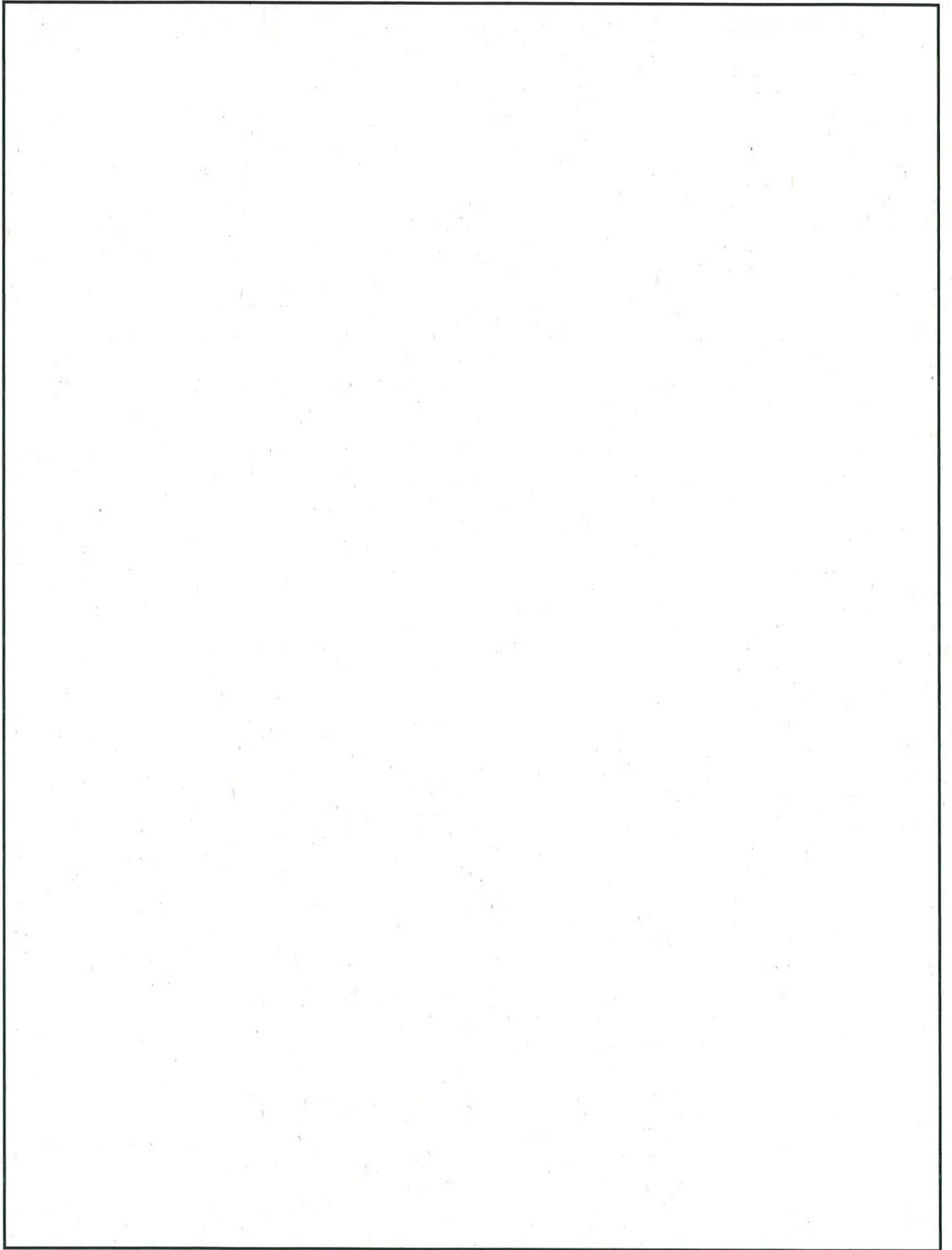
第 2.5.2-5 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-24P 型）（冠水状態）



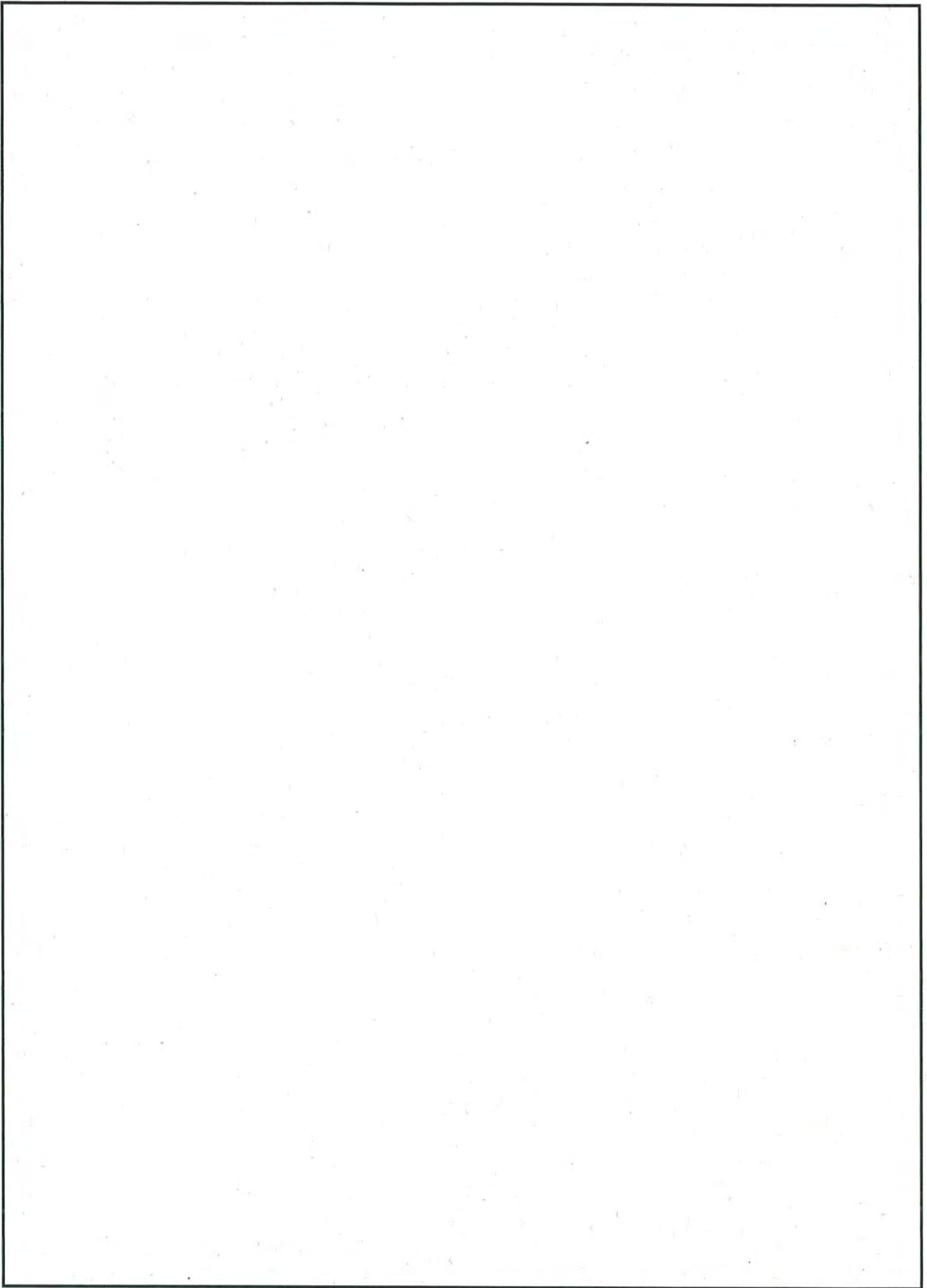
第 2.5.2-6 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-24P 型）（冠水状態）



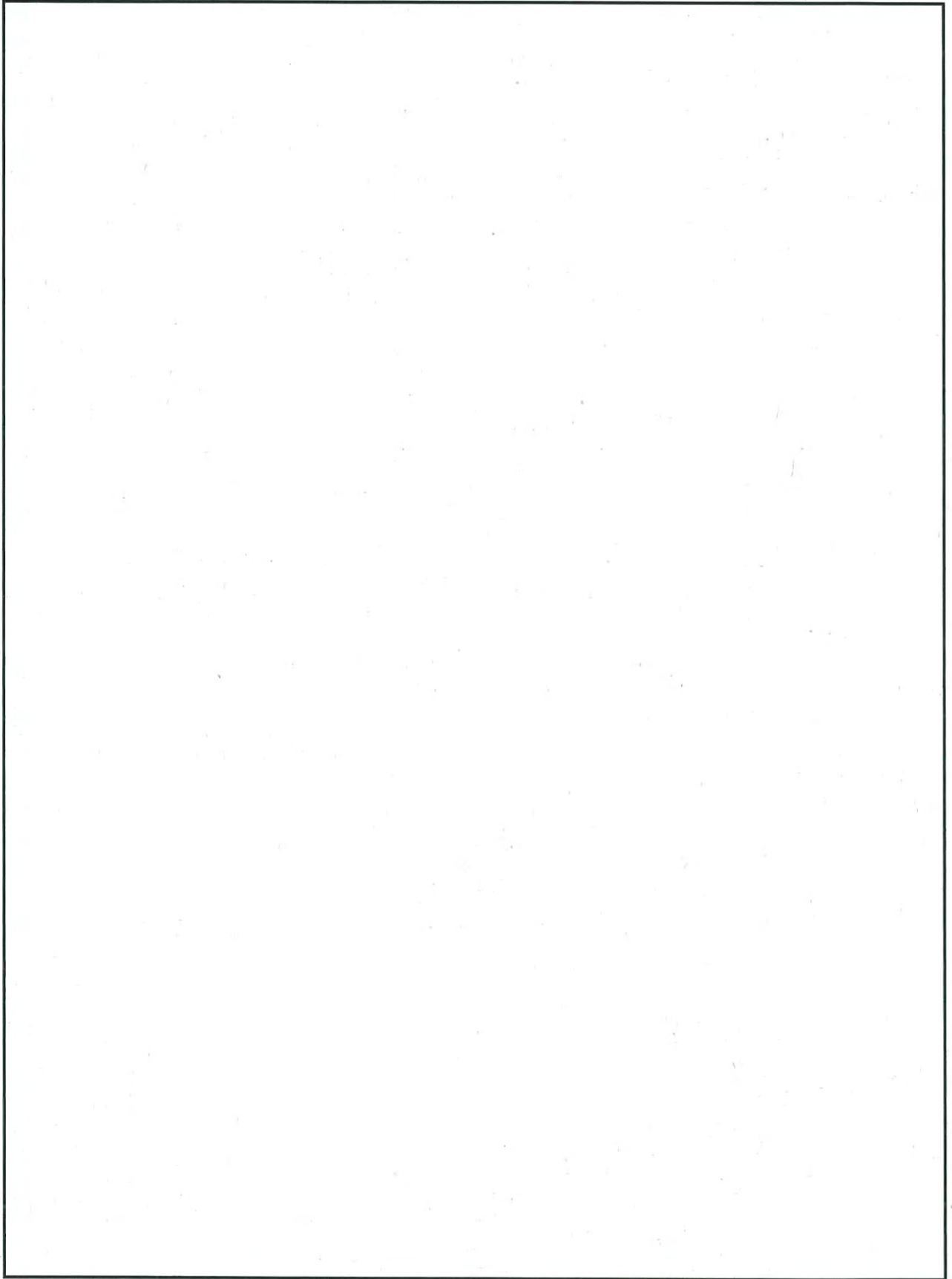
第 2. 5. 2-7 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-32P 型）（冠水状態）



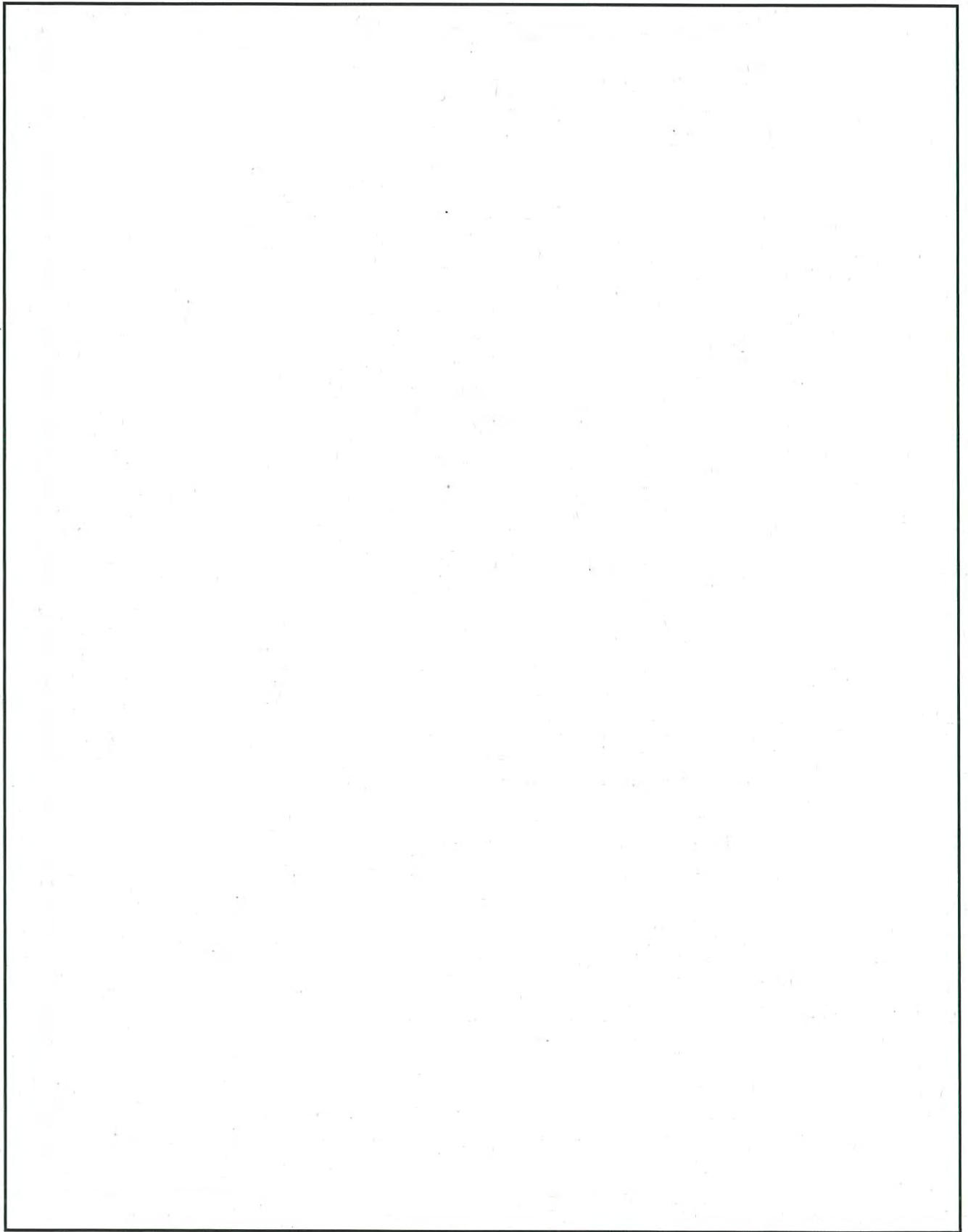
第 2.5.2-8 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-32P 型）（冠水状態）



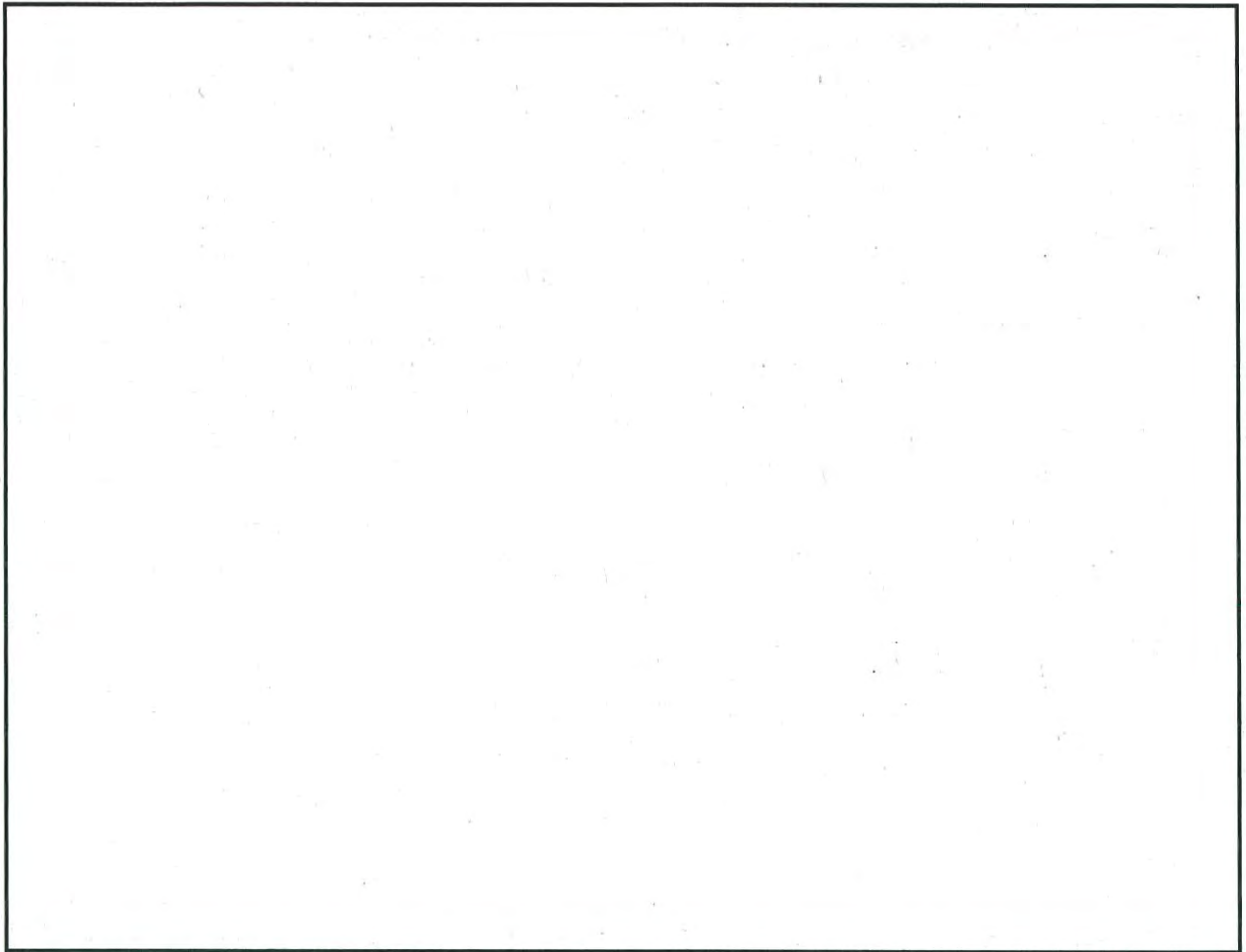
第 2.5.2-9 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-32P 型）（冠水状態）



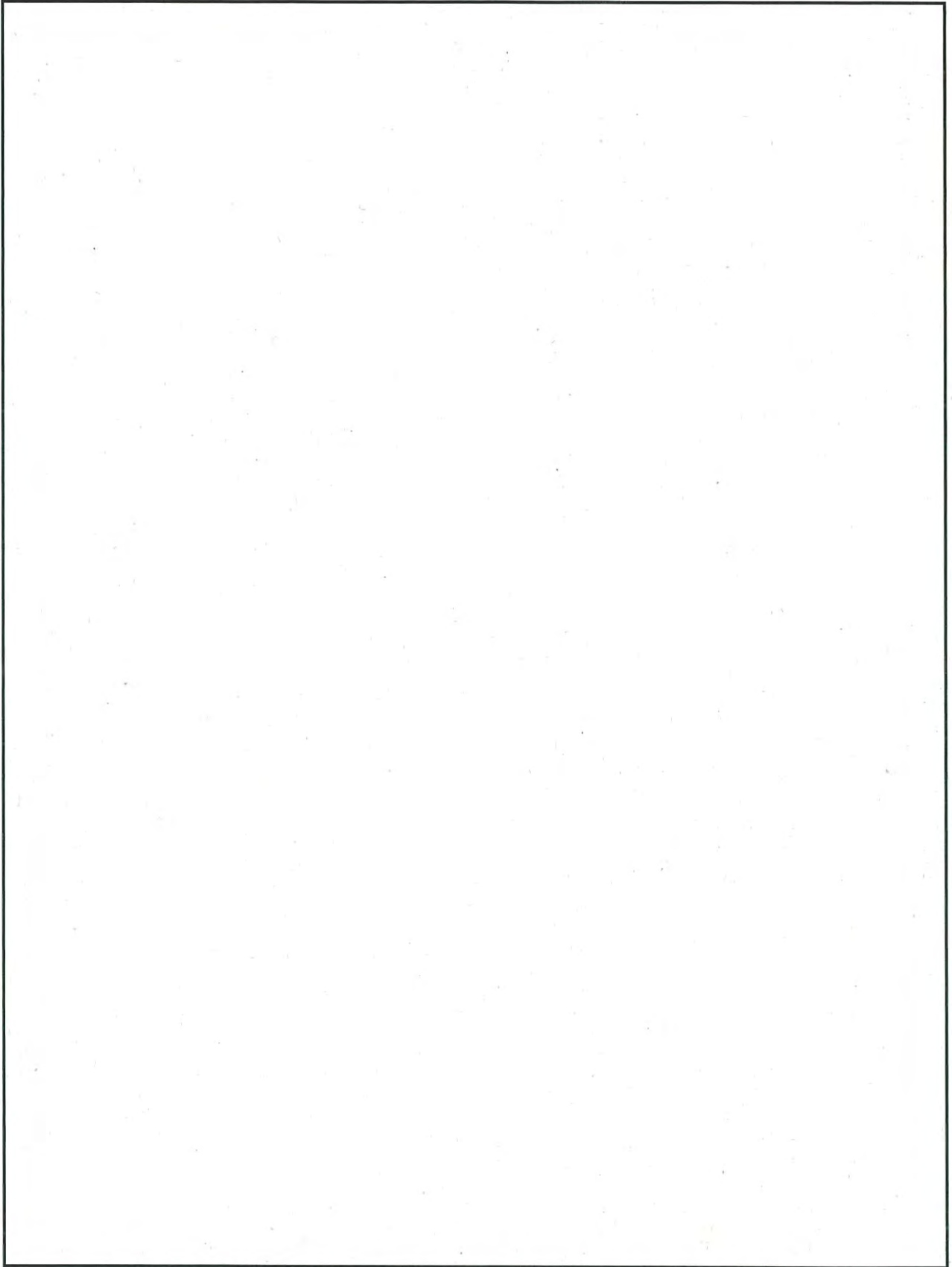
第 2. 5. 2-10 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）



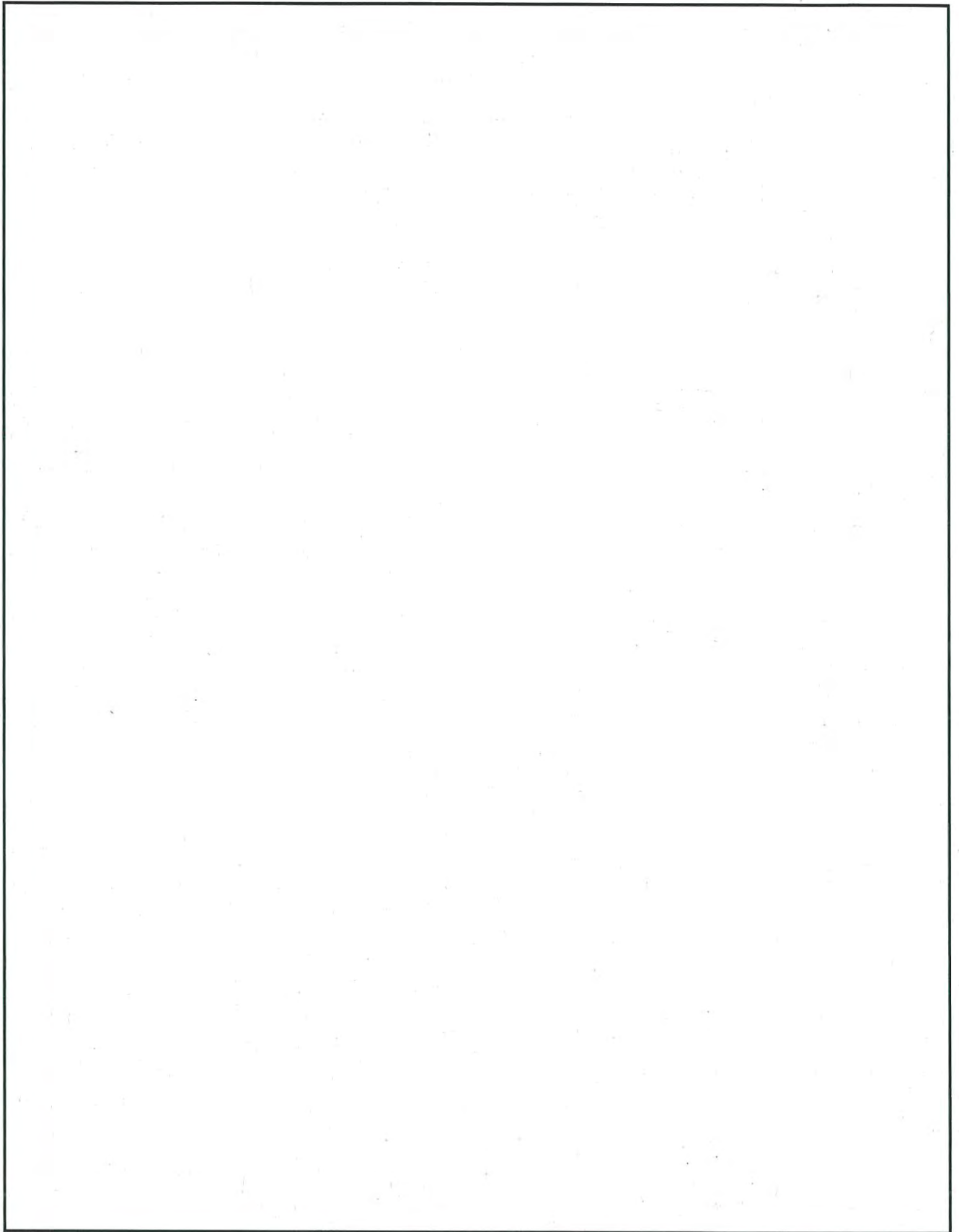
第 2.5.2-11 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）



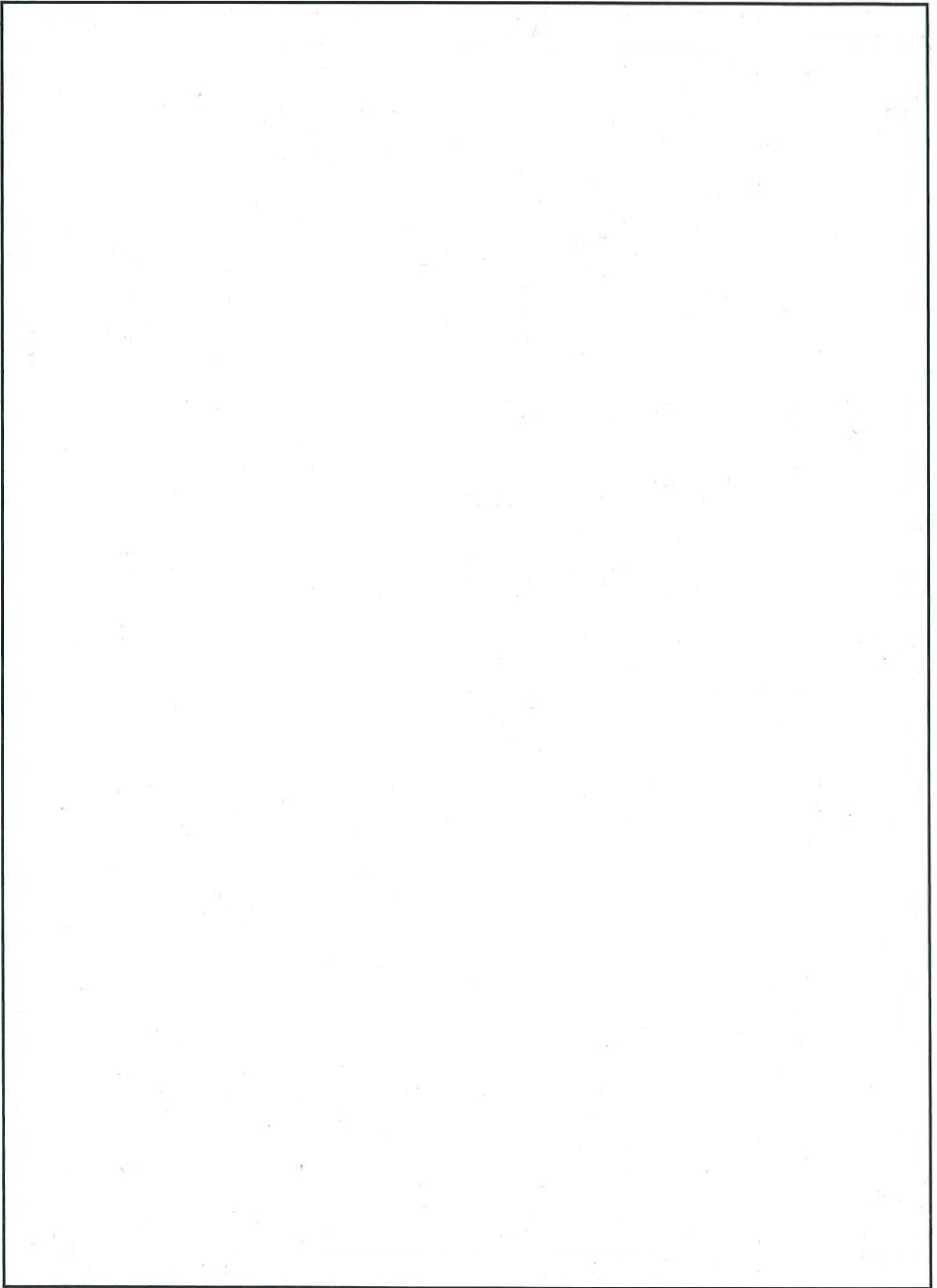
第 2.5.2-12 図 臨界解析モデル（燃料領域拡大図）（MSF-24P 型）（乾燥状態）



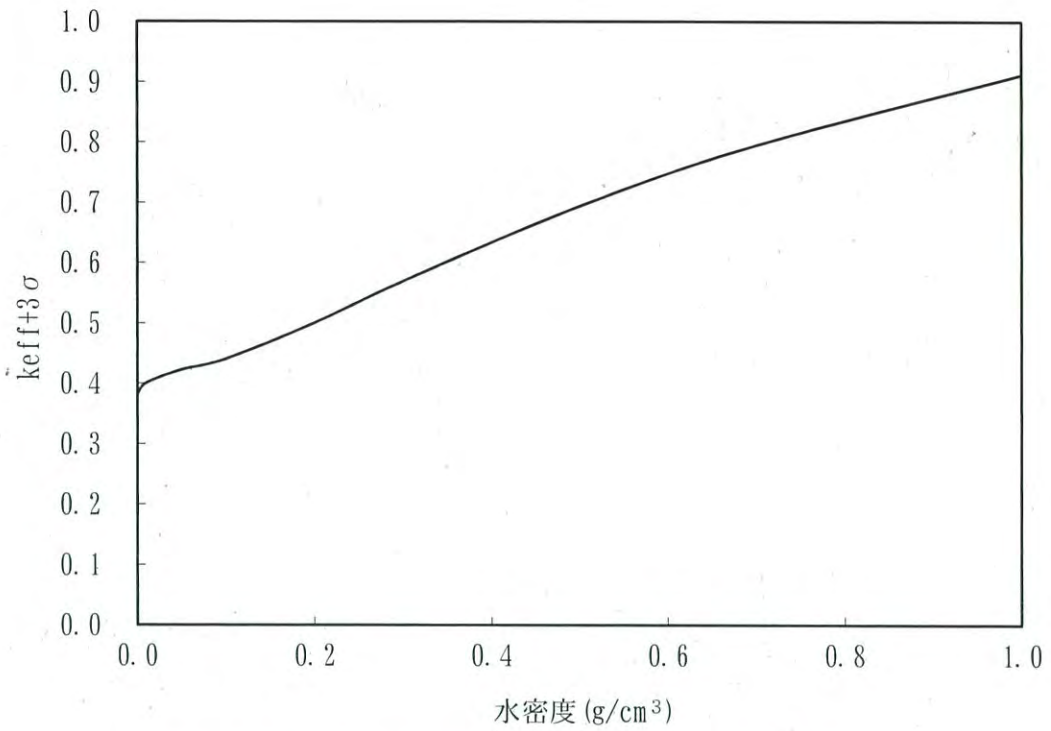
第 2. 5. 2-13 図 臨界解析モデル（縦断面図）（MSF-32P 型）（乾燥状態）



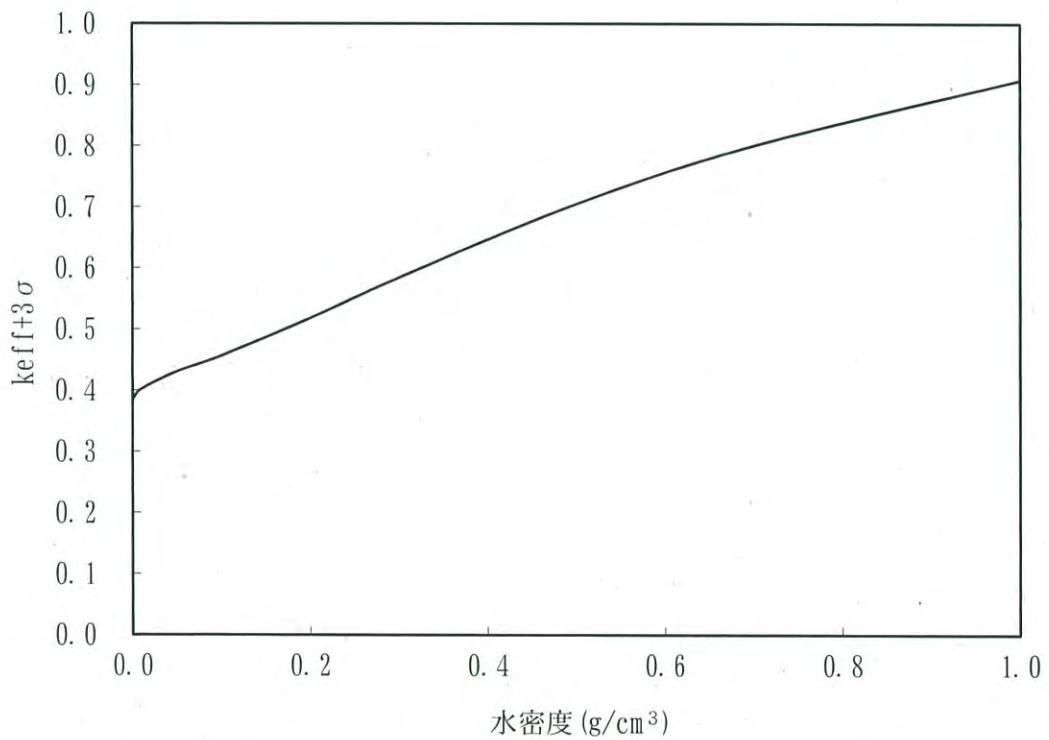
第 2.5.2-14 図 臨界解析モデル（燃料領域横断面図）（MSF-32P 型）（乾燥状態）



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 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

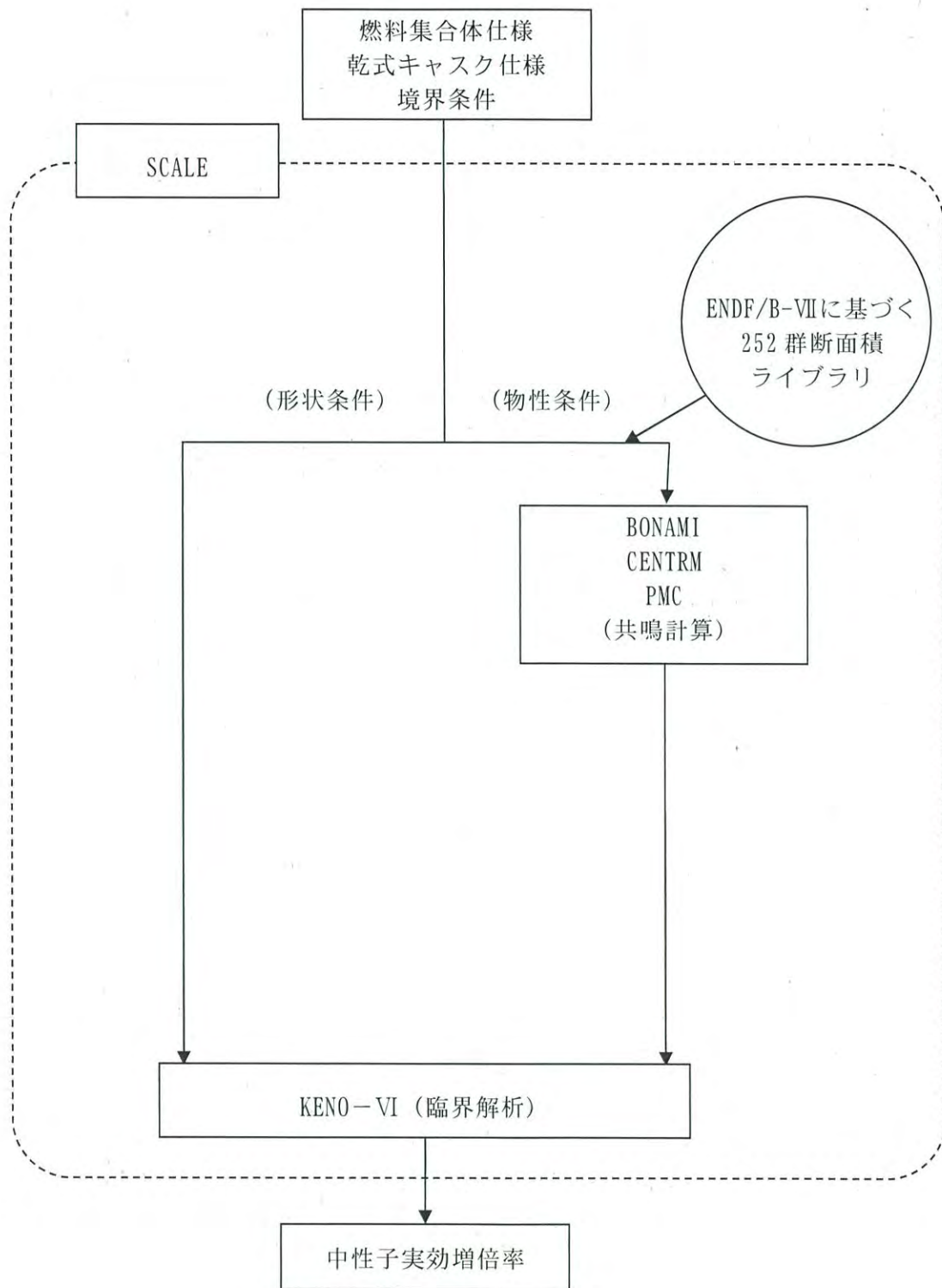
臨界解析で使用した SCALE コードシステムに対しては、乾式キャスクを模擬した多数の臨界実験のベンチマーク試験解析が実施され、その妥当性が示されている。

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 $100\mu\text{Sv/h}$ 以下とすること。
- (3) 通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で $50\mu\text{Sv/y}$ 以下となることを目標に、線量限度 (1mSv/y) を十分下回る水準とすること。
- (4) 貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、工場等周辺の実効線量が線量限度 (1mSv/y) を超えないこと。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ遮蔽設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

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

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

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

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

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

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

② ソースターム

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

③ 遮蔽解析コード等

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

④ 通常貯蔵時の線量

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

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

4) 応急復旧

貯蔵建屋等を設置する場合は、貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、必要に応じて土嚢による遮蔽の追加等の適切な手段による応急復旧を行うことにより、工場等周辺の実効線量が敷地全体で線量限度

(1mSv/y) を超えないこと。この場合において、応急復旧による遮蔽機能の回復を期待する場合には、その実施に係る体制を適切に整備すること。

』

2. 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの遮蔽機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

1) 使用済燃料の放射線源強度評価

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

2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価

- a. 兼用キャスクからの線量当量率は、兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、及び1) で求めた放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリ（以下「遮蔽解析コード等」と総称する。）を使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の兼用キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。
- b. 兼用キャスク表面の線量当量率を 2mSv/h 以下とし、かつ、兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率を $100\mu\text{Sv/h}$ 以下とすること。

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

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

乾式キャスクは、使用済燃料からの放射線を乾式キャスク本体及び蓋部により遮蔽する。ガンマ線遮蔽材には、鋼製の材料を用い、中性子遮蔽材には、水素を多く含有するレジンを用いる。

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

a. 使用済燃料の線源強度評価方法

使用済燃料の型式、燃焼度（集合体平均）、濃縮度及び冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して核種の生成、崩壊及びそれに基づく放射線源強度（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 $4.1 \pm \square \text{ wt\%}$ 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。

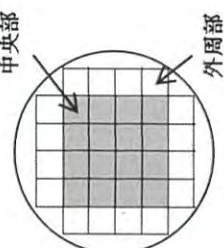
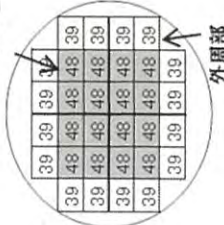
・ モデル化の保守性

－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。

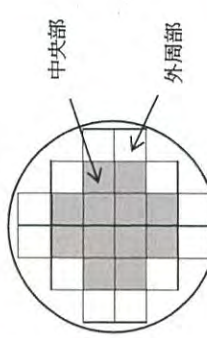
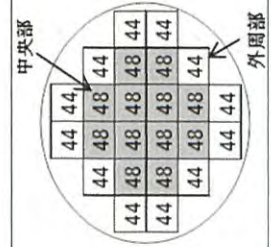
－バーナブルポイズン集合体は、放射化による線源強度については考慮するが、構造材としての遮蔽効果は無視する。

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

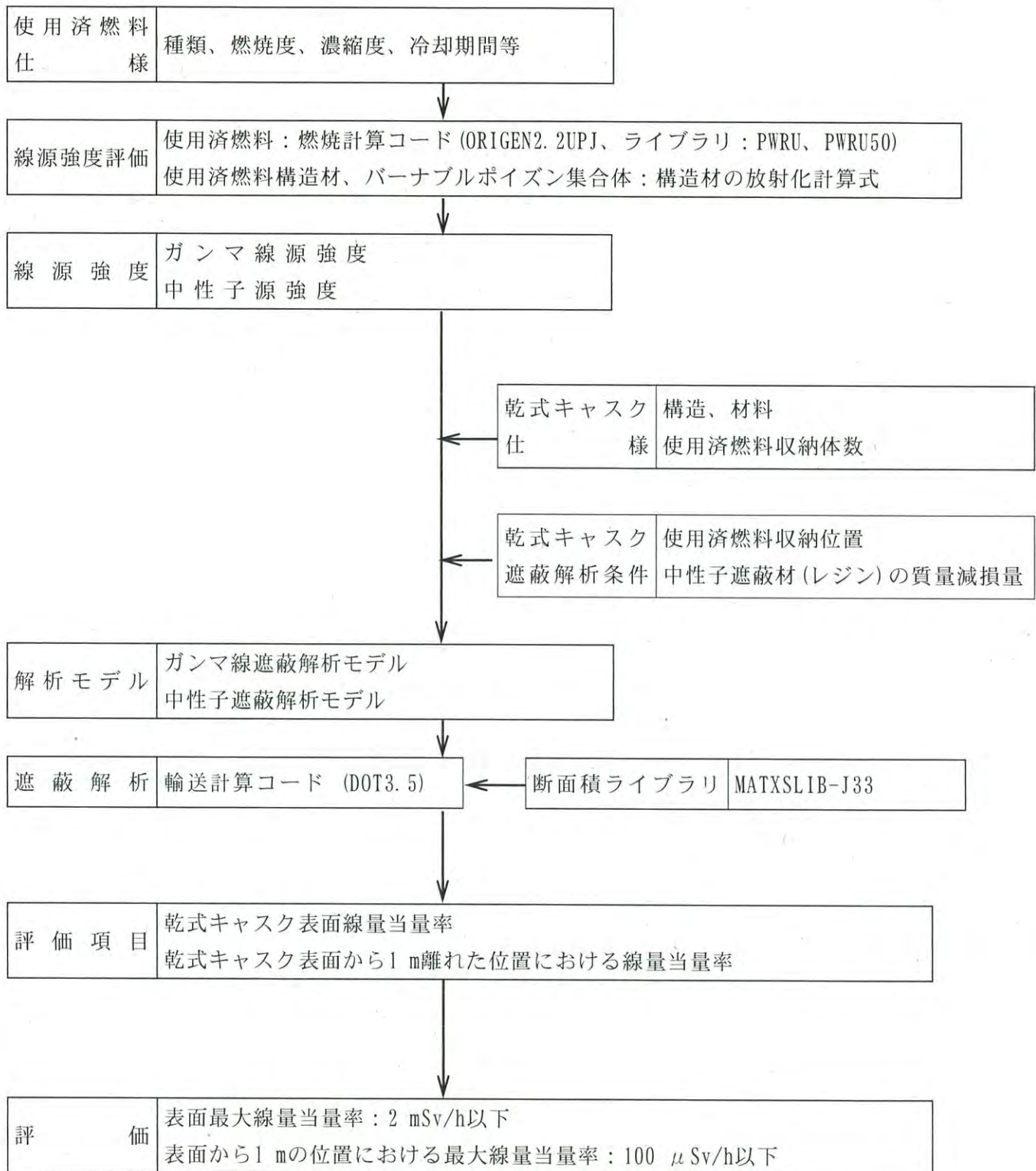
燃料 集合体 1体の 仕様	燃料タイプ	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック	解析条件		
		中央部	外周部		中央部	外周部	
収納物仕様	燃料濃縮度 (wt%)	14×14型 (A/B型)		14×14型 (A/B型)	14×14型 (B型)		
	初期ウラン重量 (kg)	≤4.2	≤3.5	4.1	[]		
	ウラン重量 (kg)	[]					
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48	≤39	≤48	≤39	48	39
	SPPでの冷却期間 (年)	≥15	≥25	-	-	15	25
キャスク 1基あたり	平均燃焼度 (GWd/t)	≤45	≤33	-	-	-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

※1：数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

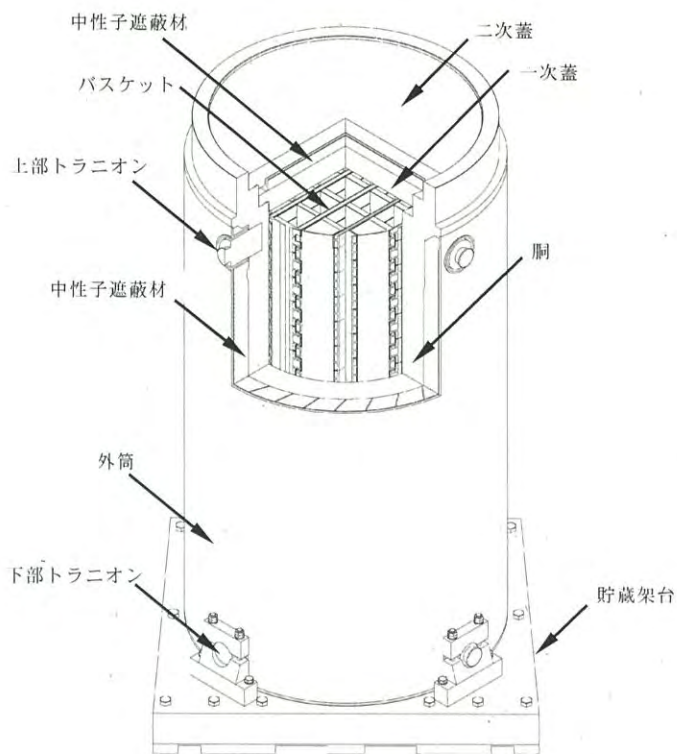
第 2.5.3-2 表 3 号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

	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			—		
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エネルギー及び発熱量が同程度以下となるよう 20 年以上冷却した後、収納する。
 ※2: 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

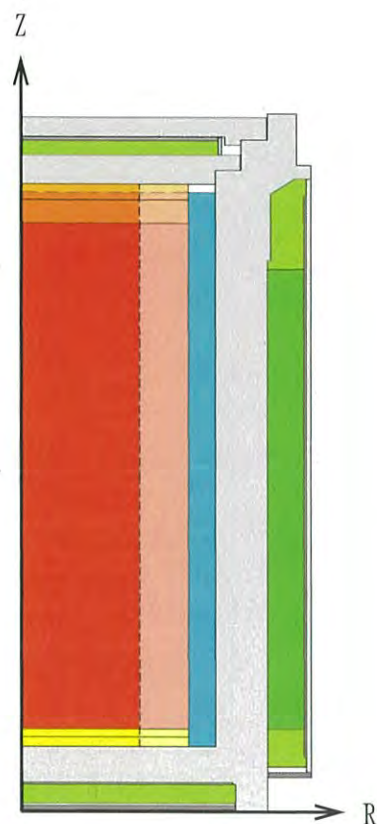
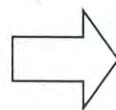


第 2.5.3-1 図 乾式キャスクの遮蔽解析フロー図



[実形状]

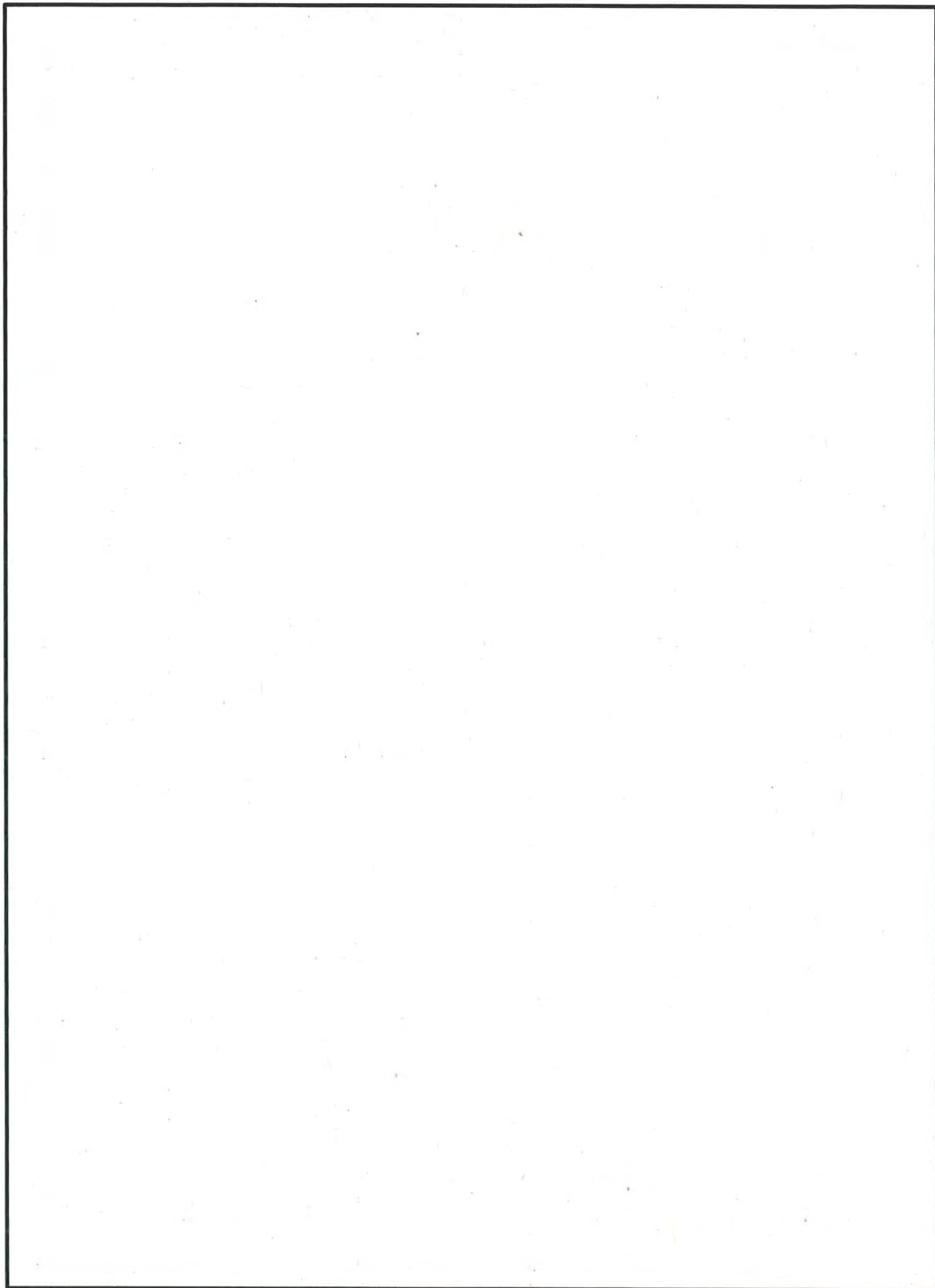
モデル化



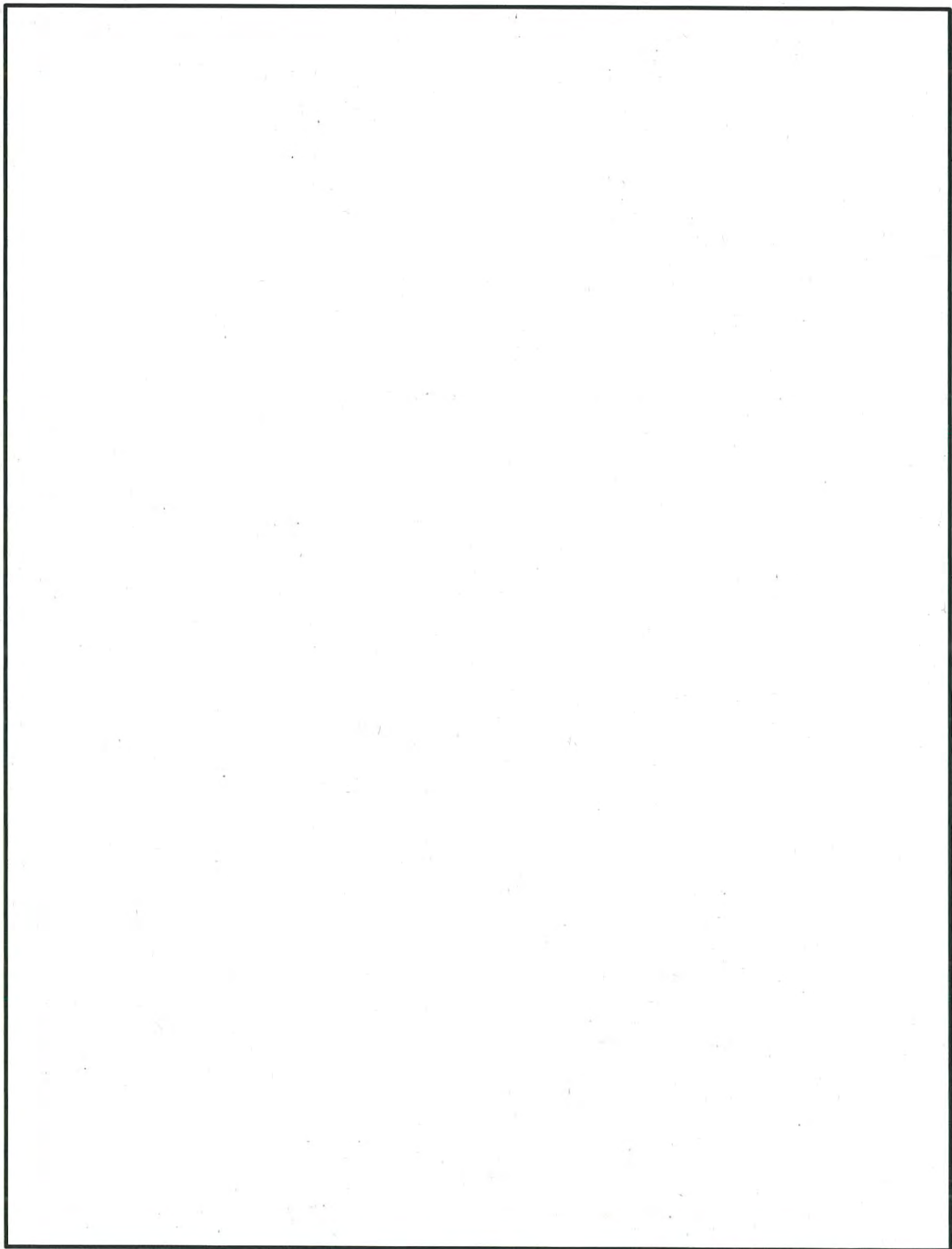
[二次元モデル化 (R-Z 体系)]

	燃料有効部中央+バスケット均質化領域		燃料有効部外周+バスケット均質化領域
	燃料上部構造材中央+バスケット均質化領域		燃料上部構造材外周+バスケット均質化領域
	燃料上部構造材中央		燃料上部構造材外周
	燃料下部構造材中央+バスケット均質化領域		燃料下部構造材外周+バスケット均質化領域
	バスケット外周部		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

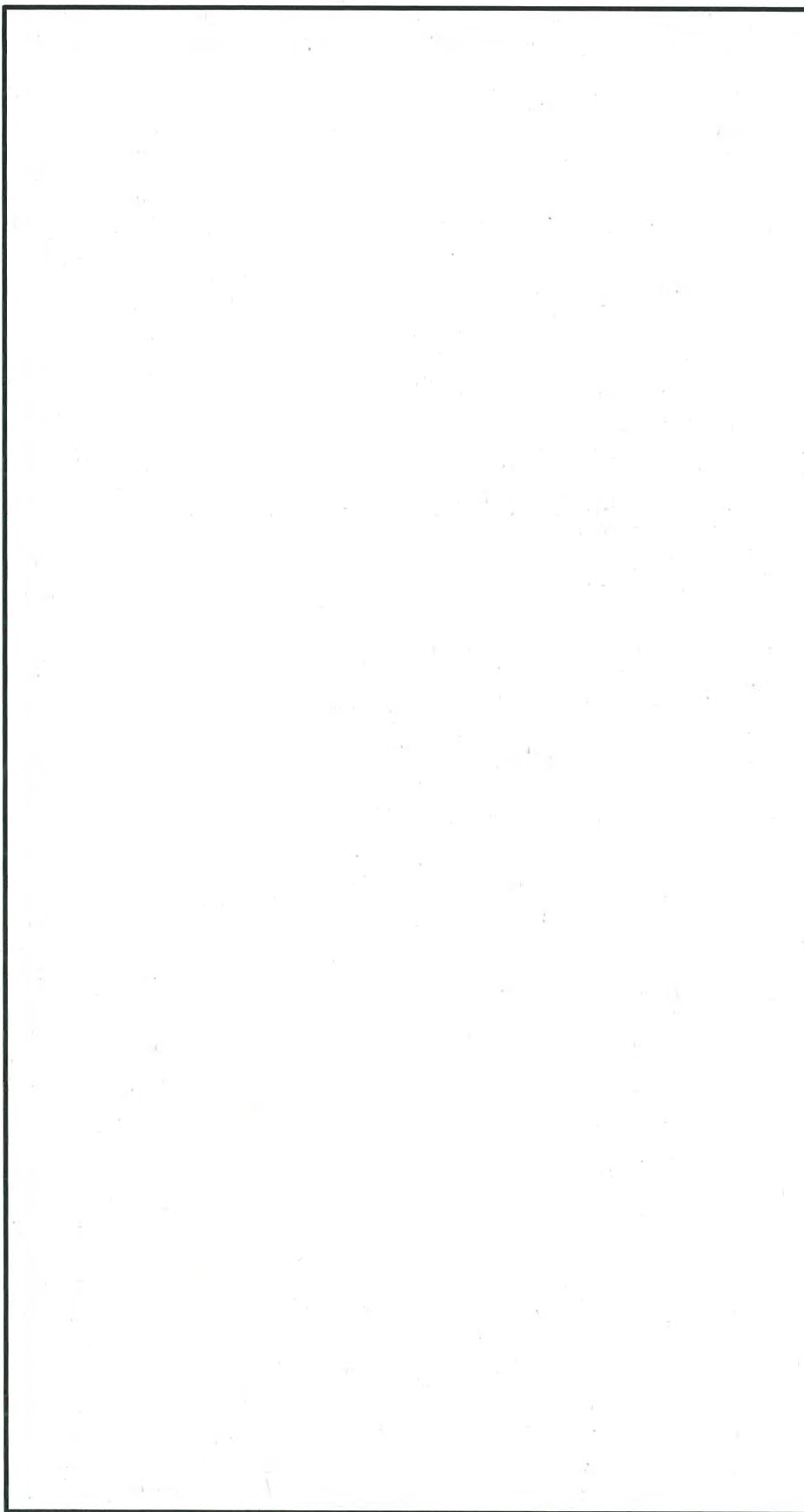
第 2.5.3-2 図 遮蔽解析モデル化の概要 (MSF-24P 型の例)



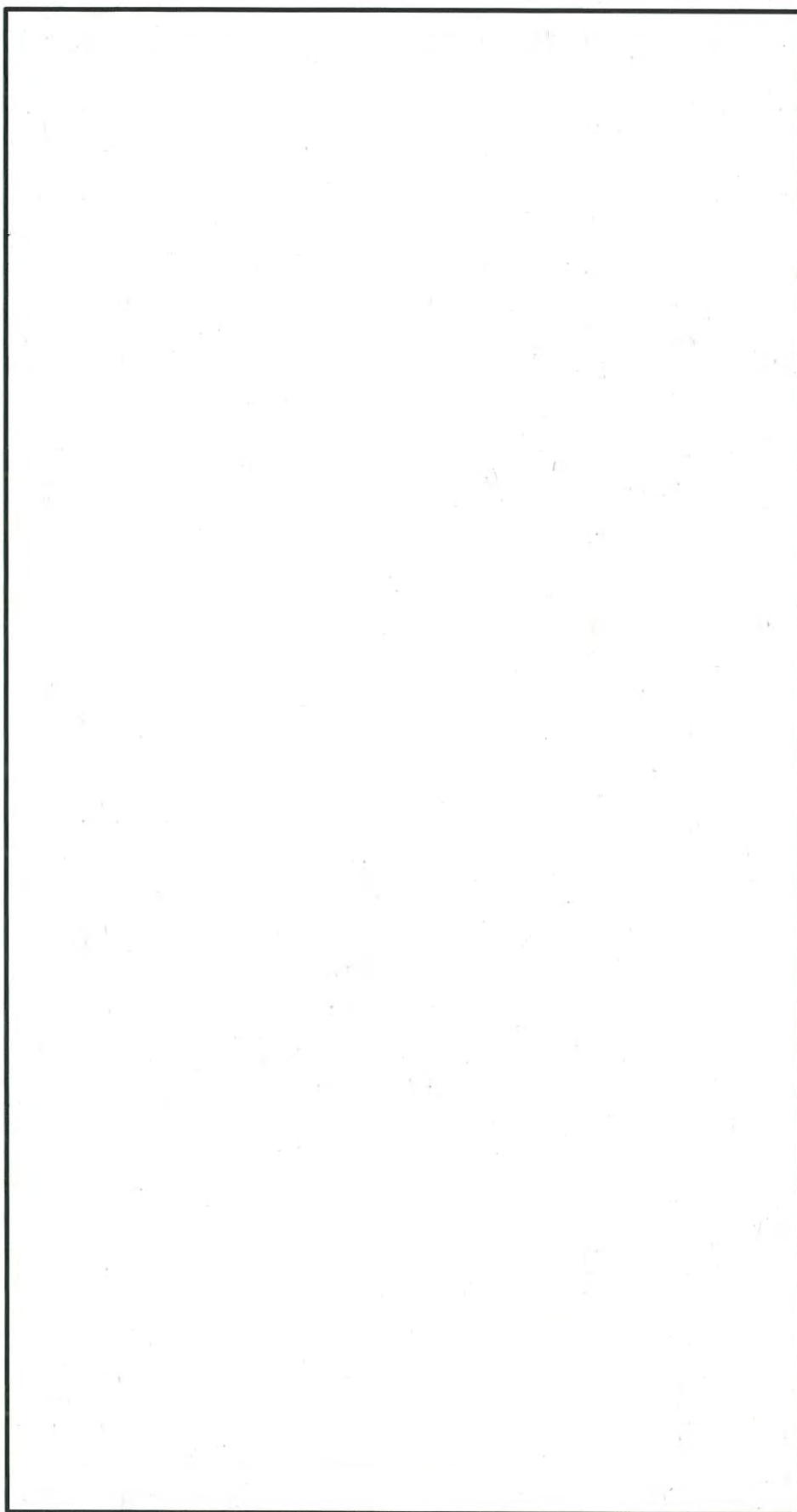
第 2. 5. 3-3 図 貯蔵時の解析モデル (頭部) (MSF-24P 型)



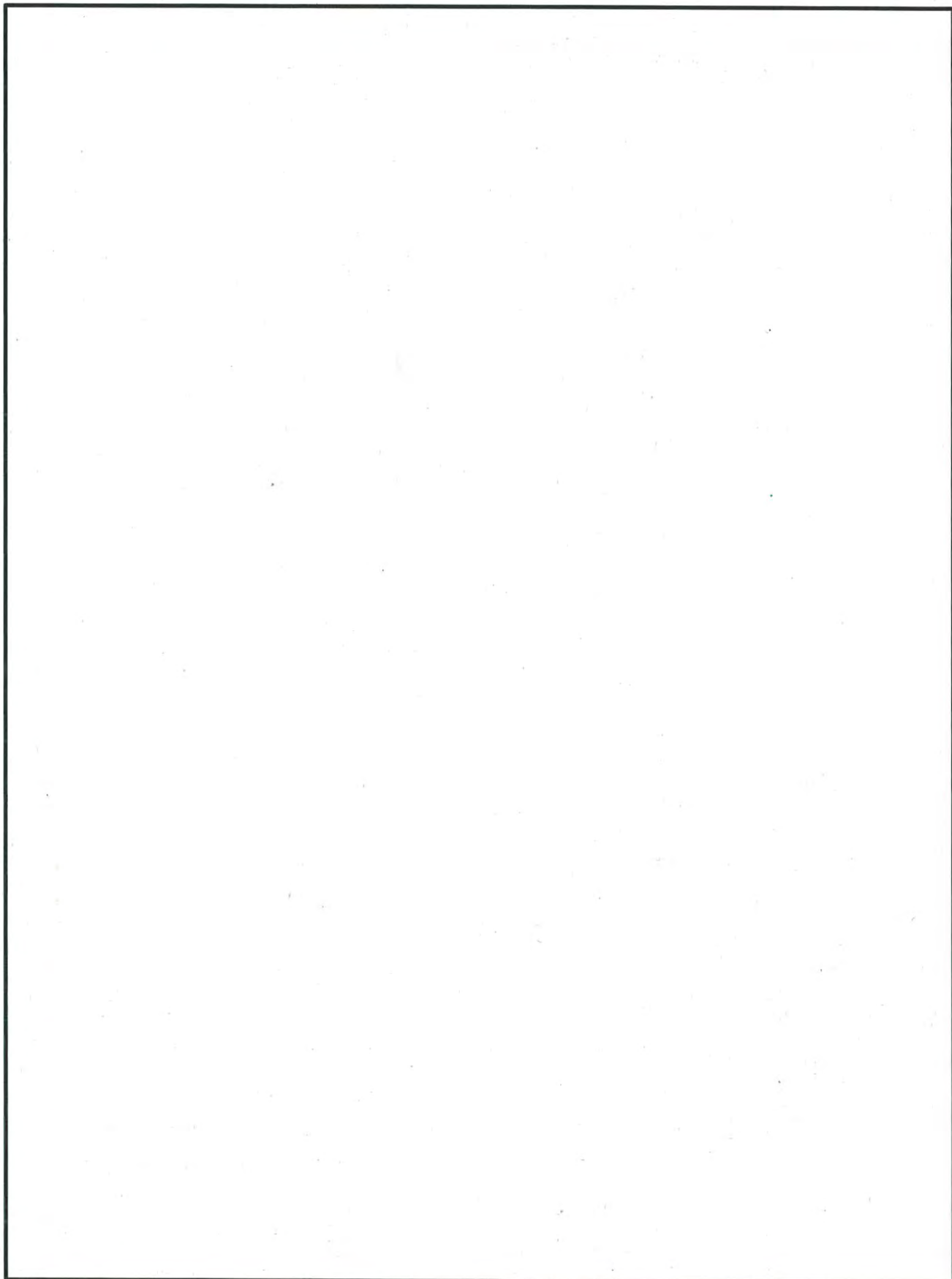
第 2.5.3-4 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（MSF-24P 型）



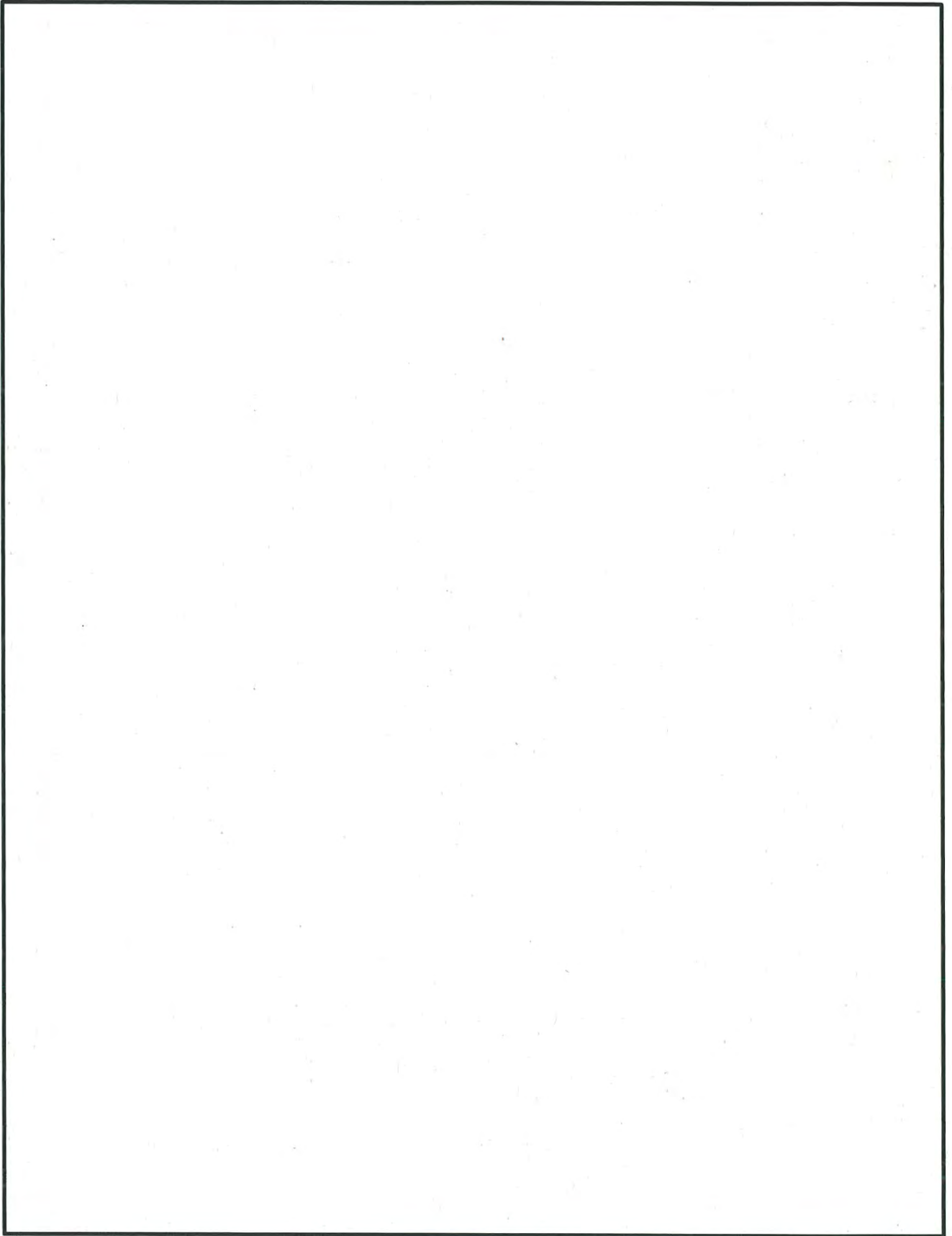
第2.5.3-5 図 貯蔵時の解析モデル（上部トラニオン部）（MSF-24P 型）



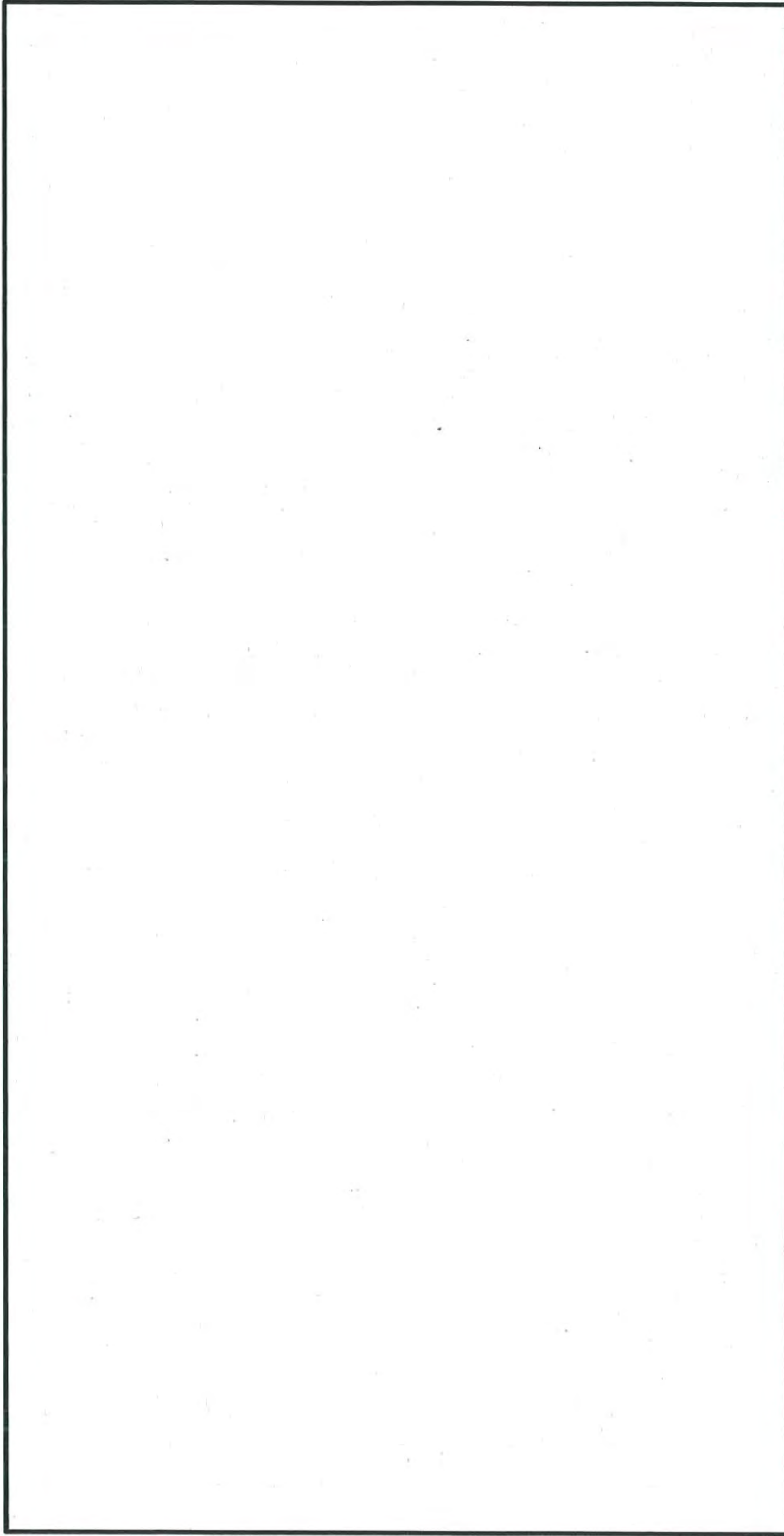
第 2. 5. 3-6 図 貯蔵時の解析モデル (下部トランニオン部) (MSF-24P 型)



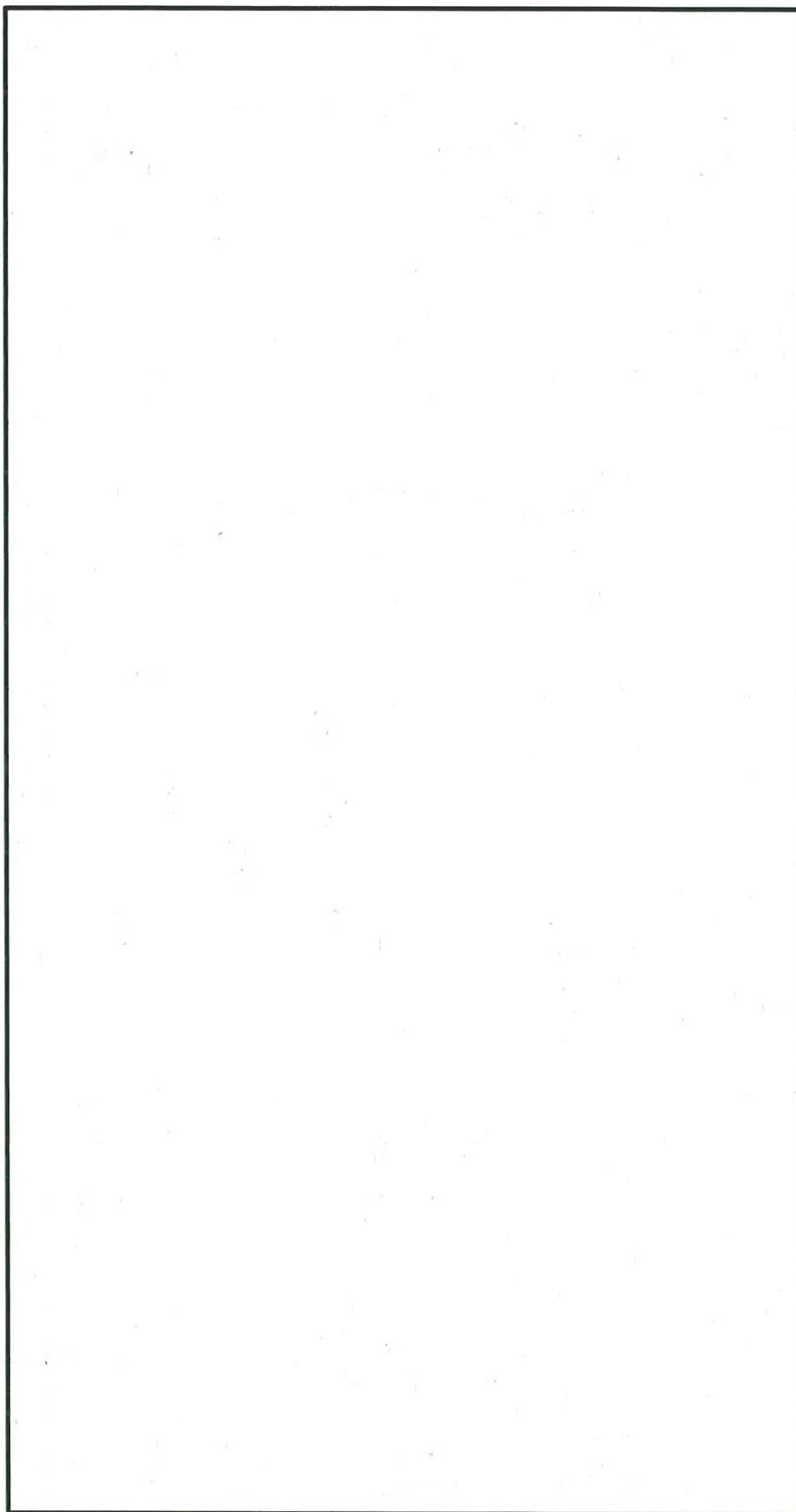
第 2.5.3-7 図 貯蔵時の解析モデル（頭部）（MSF-32P 型）



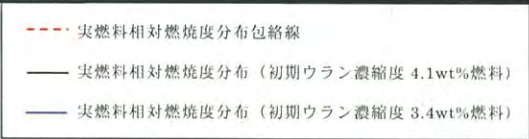
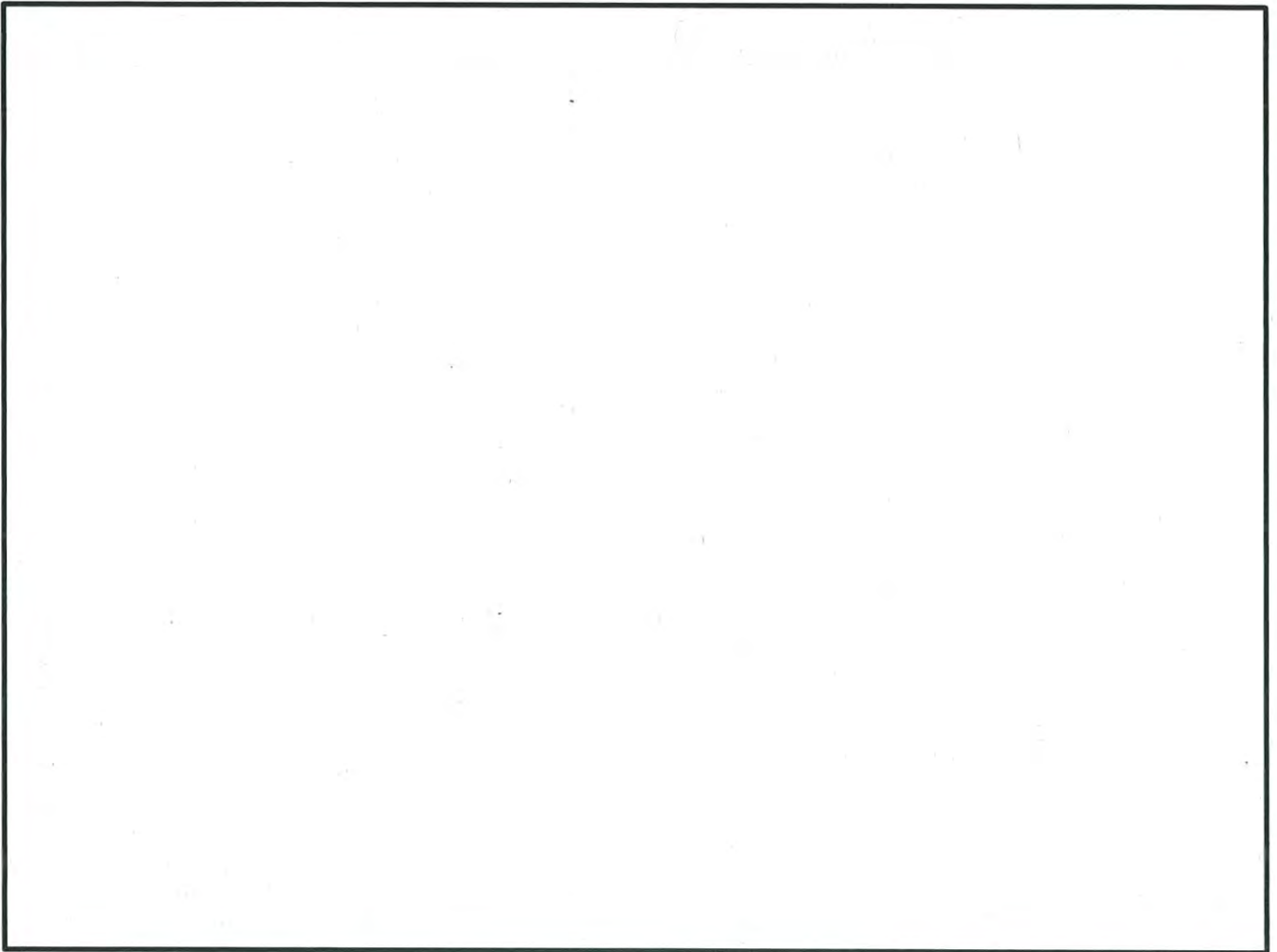
第 2. 5. 3-8 図 貯蔵時の解析モデル（底部）（MSF-32P 型）



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）

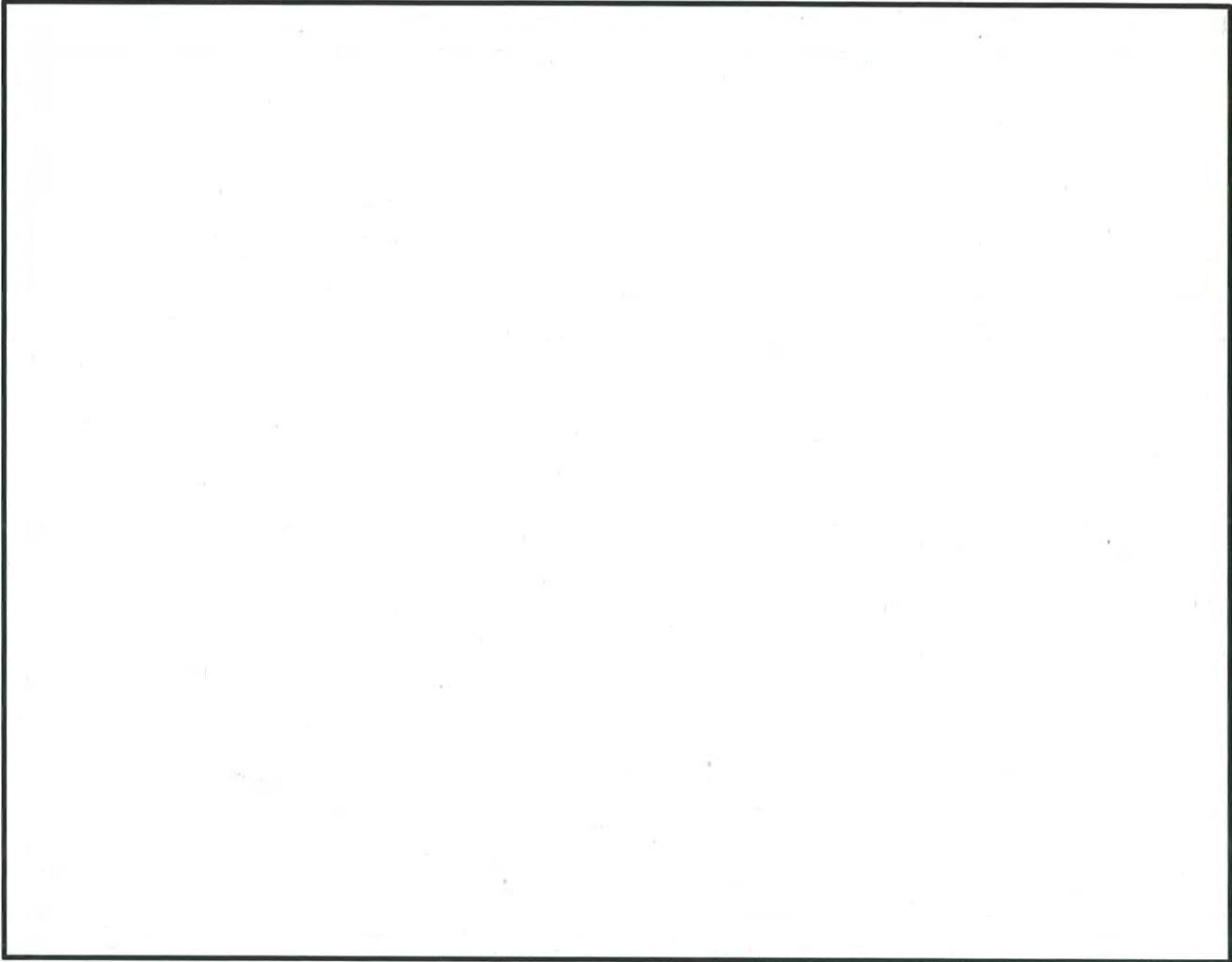


第2.5.3-10 図 貯蔵時の解析モデル（下部トランニオン部）（MSF-32P 型）



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。

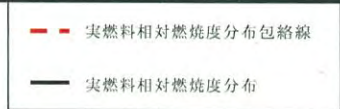
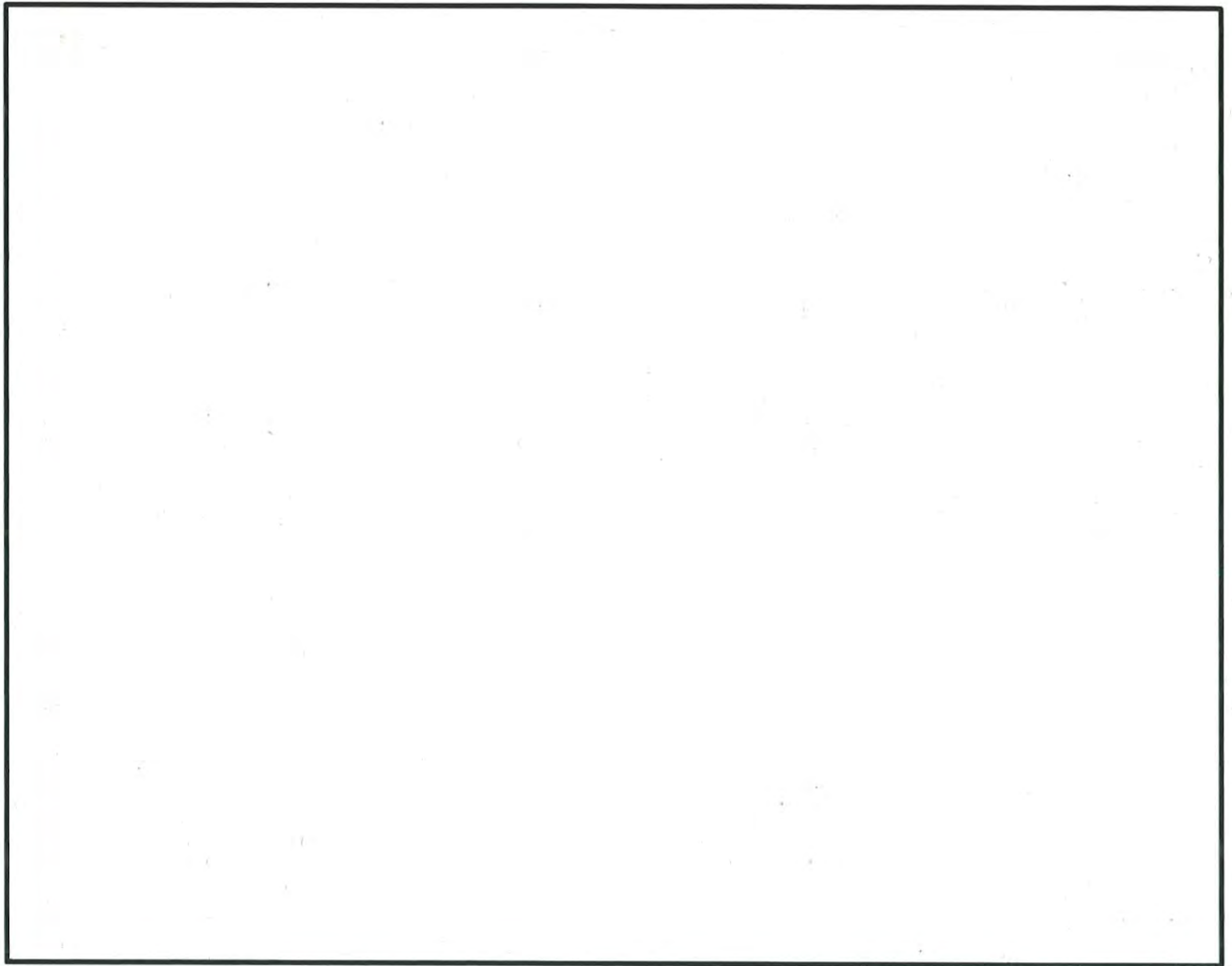
第 2.5.3-11 図 1 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定



--- 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 μ Sv/h	84 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	

第 2.5.3-4 表 線量当量率評価結果 (MSF-24P 型)

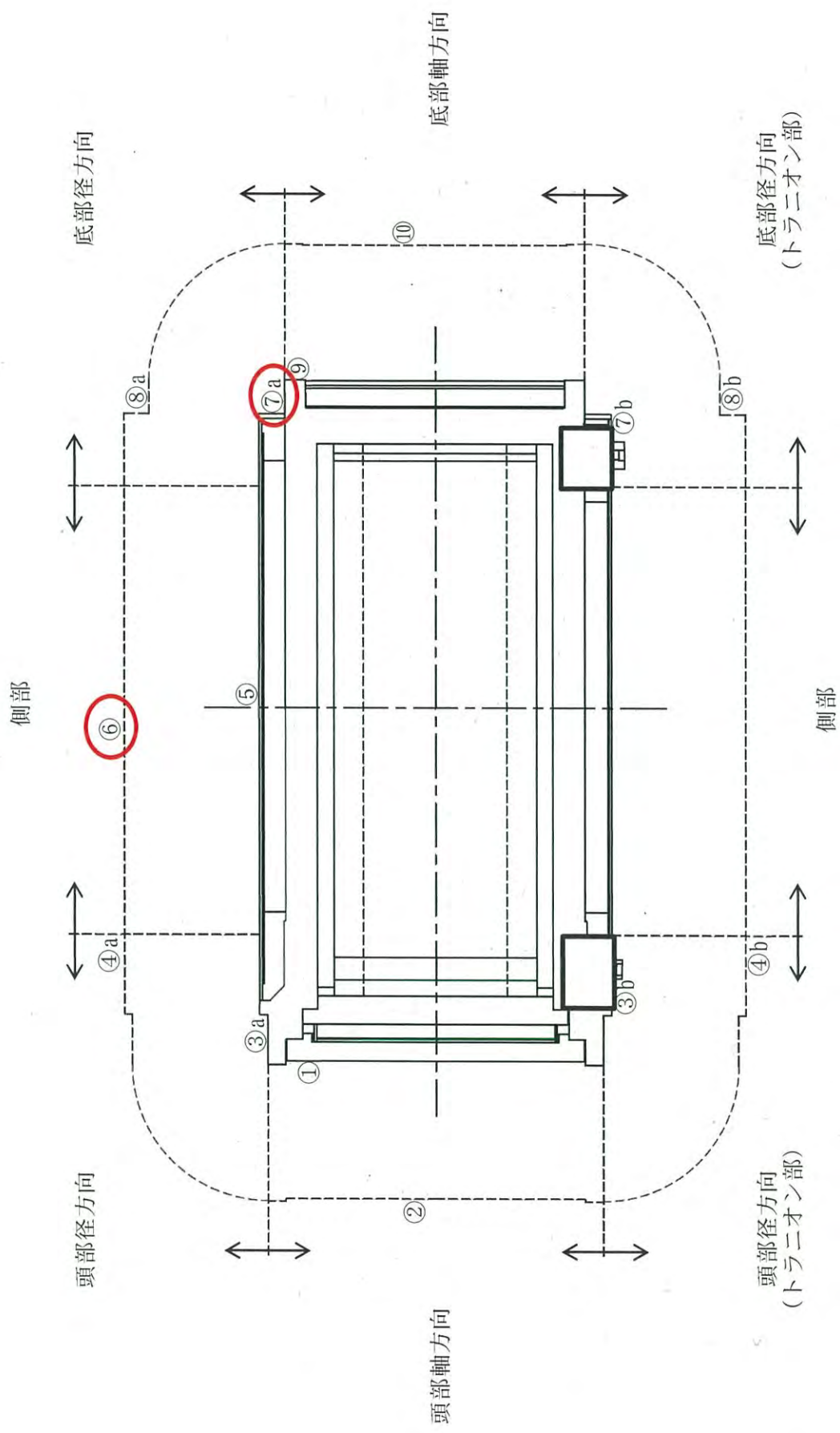
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評価点	頭部			側部	底部				
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		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	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	
表面から 1 m	ガンマ線	評価点	②	④a	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
		燃料有効部	0.3	22.5	22.6	44.8	9.0	7.9	4.9
		構造材放射化	3.5	20.1	20.9	12.5	7.4	6.1	28.8
	二次ガンマ線	0.4	5.4	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)

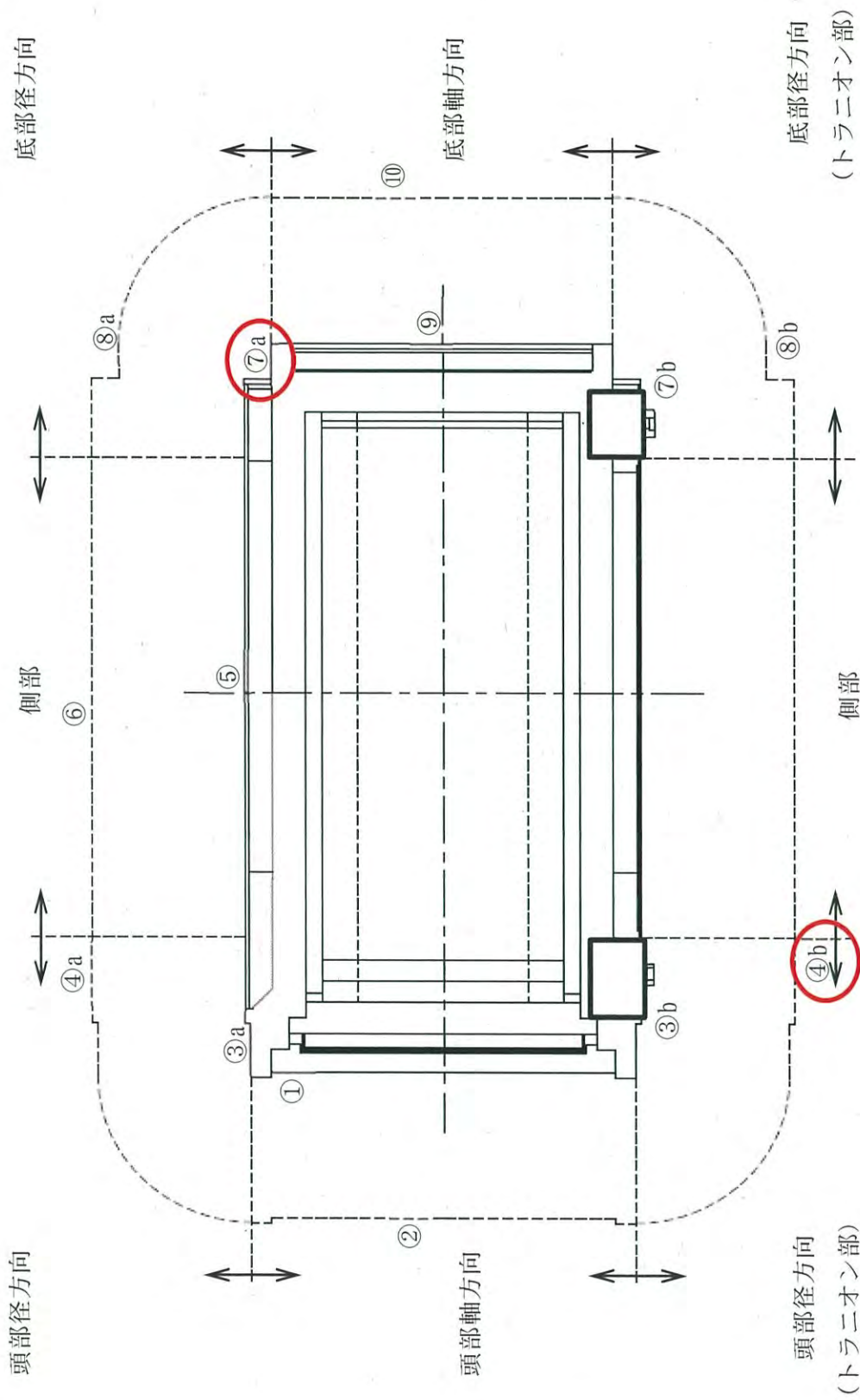
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

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	中性子		262.8	1022.9	55.1	1548.1	925.5	44.7	
		合計	264.0	594.7	1118.6	184.0	<u>1564.4</u>	945.7	178.0
表面から 1 m	ガンマ線	燃料有効部	②	④a	⑥	⑧a	⑧b	⑩	
		構造材放射化	0.2	22.3	21.7	41.4	8.8	7.3	2.9
		二次ガンマ線	3.7	28.1	22.7	6.7	6.5	4.8	34.5
表面から 1 m	中性子		0.4	5.0	9.7	2.8	2.6	3.4	
		合計	50.6	23.8	34.4	22.1	51.1	60.9	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、貯蔵建屋等の損壊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。

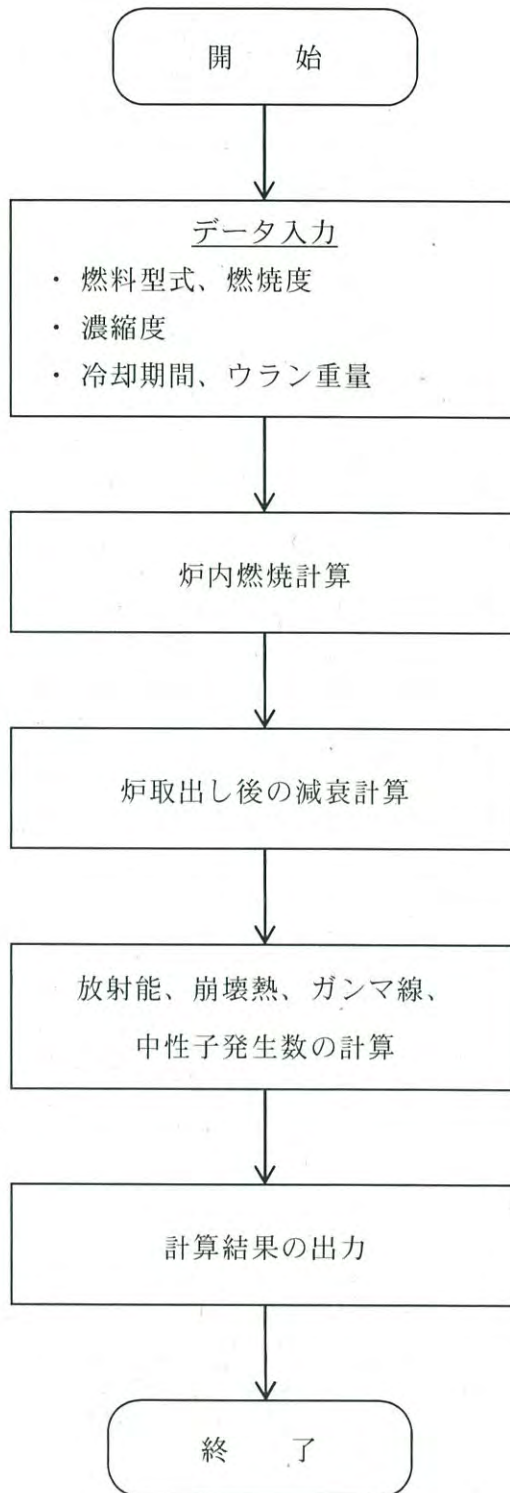
iii 計算フロー

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

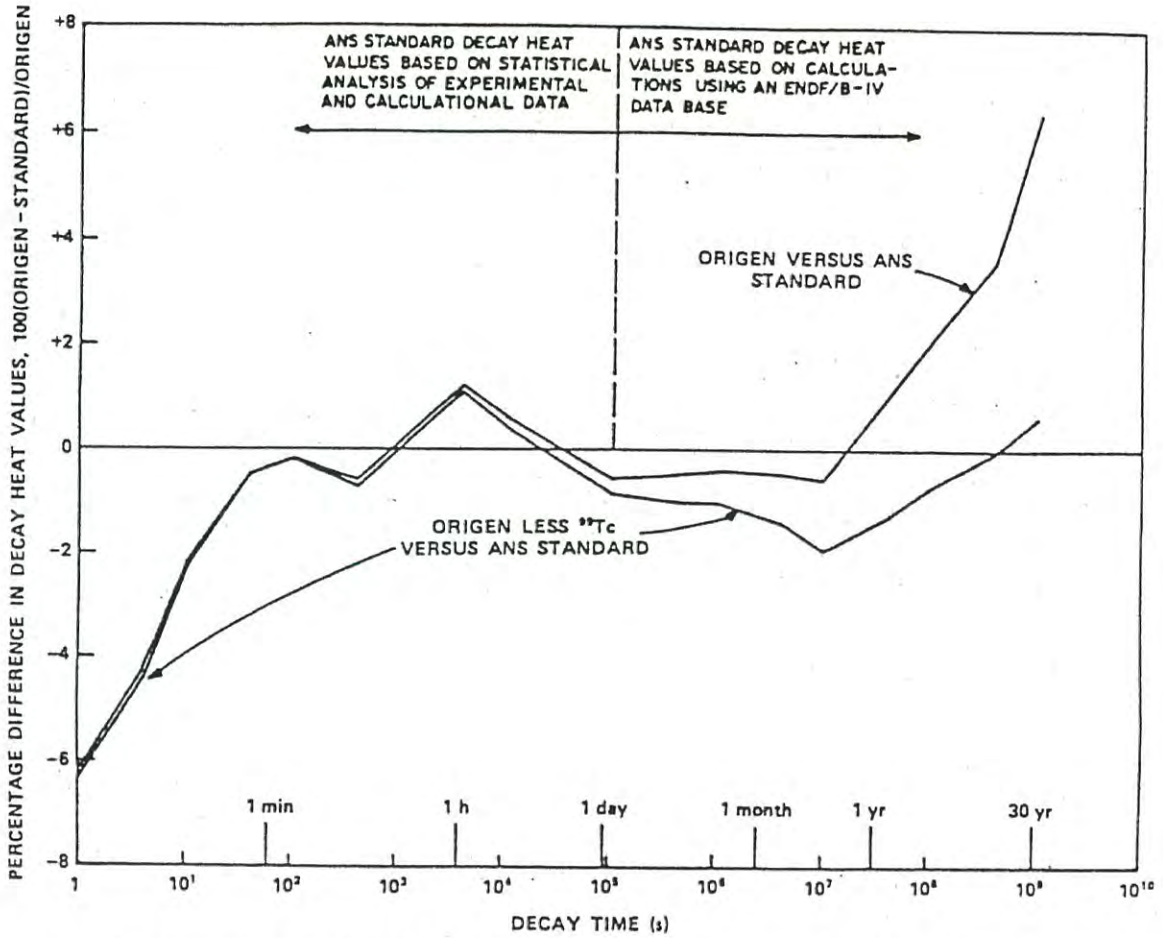


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10¹³-s irradiation of ²³⁵U.

(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 ⁹⁹Tc を考慮していないためである。ORIGEN2 コードの解析結果より ⁹⁹Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

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。

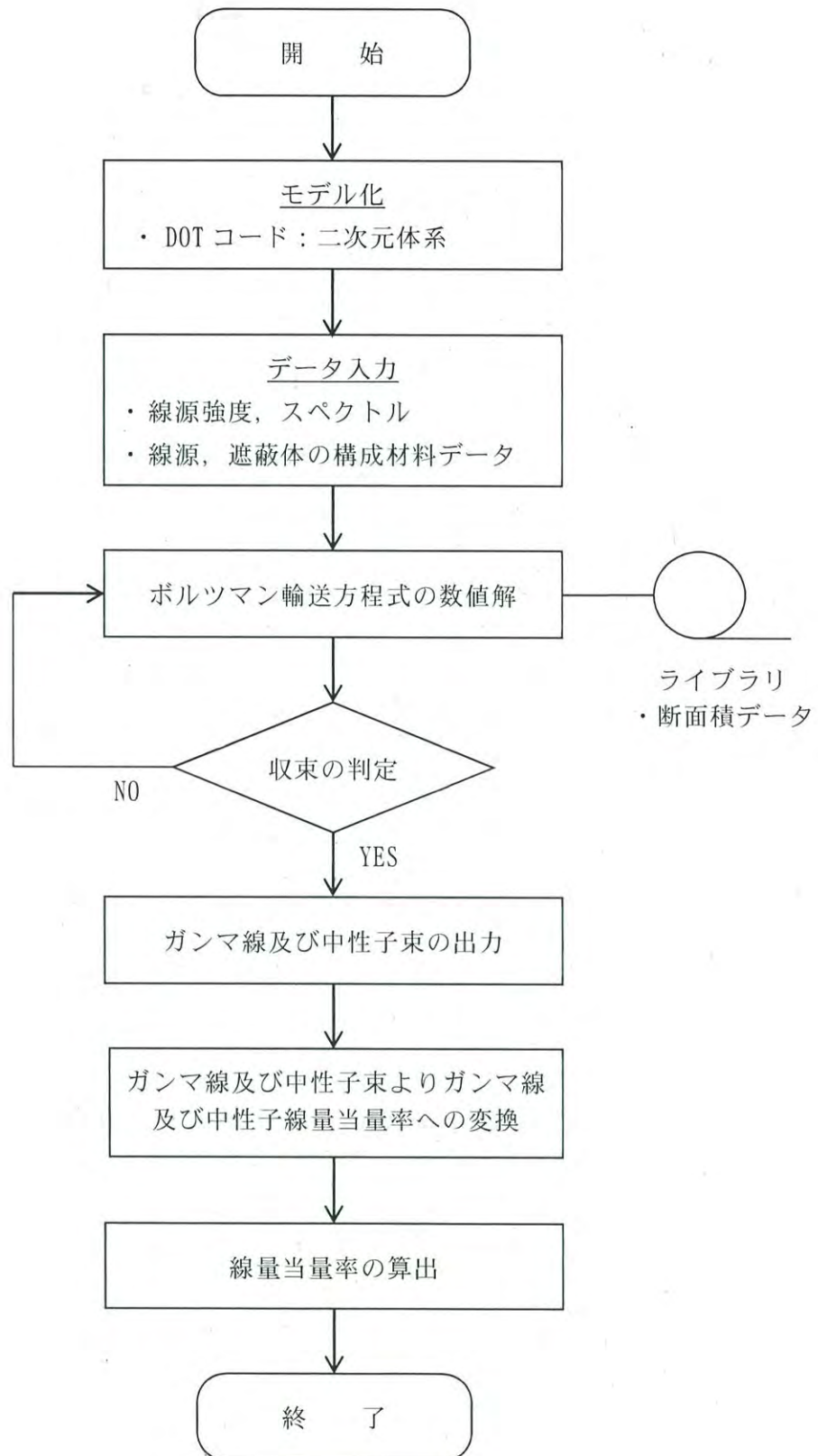
b) DOT コードは、二次元の体系を扱うことができる。

iii. 解析フロー

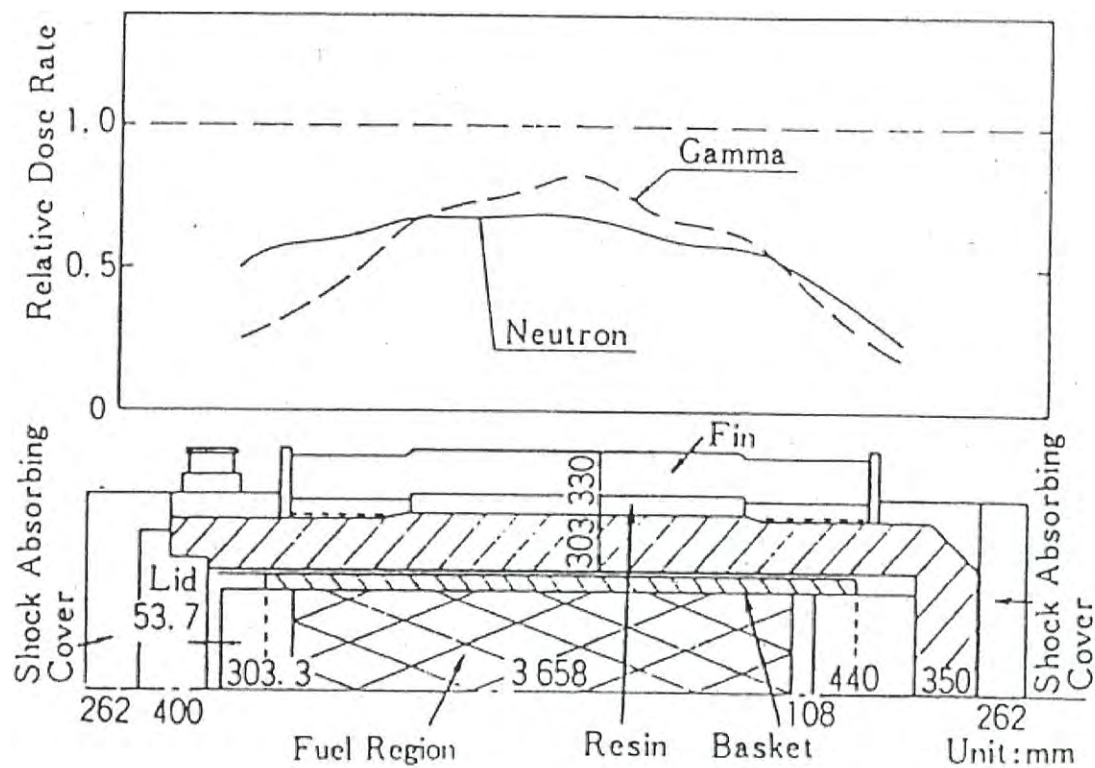
DOT コードの解析フローを第 2.5.3-18 図に示す。

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 巻 第 3 号 研究報告, (2007).

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

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの除熱機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第16条第4項二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

②設置許可基準規則解釈別記4第16条3項

第16条第4項第2号に規定する「崩壊熱を適切に除去することができる」とは、第5項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈第6条並びに第17条第1項第2号（貯蔵建屋を設置する場合に限る。）及び第3号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。

・貯蔵事業許可基準規則解釈第6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

- 一 使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損及び被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- 二 金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- 三 貯蔵建屋（使用済燃料貯蔵施設において金属キャスク等を収納する建物をいう。以下同じ。）は、金属キャスクの除熱機能を阻害しない設計であること。また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しない設計であること。
- 四 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、除熱機能に関する評価で考慮した使用済燃料の燃焼度に応じた配置の条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。

③設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

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

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

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

「2.安全機能の確保 2.3 除熱機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができること。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ除熱設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

使用済燃料の崩壊熱は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。

2) 兼用キャスク各部の温度評価

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

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

3) 燃料被覆管の温度評価

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

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

4) 貯蔵建屋の除熱評価

① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。

また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しないこと。

- ② 貯蔵建屋を設置する場合であって、放水による冷却等応急復旧による除熱機能の回復を期待するときには、その実施に係る体制を適切に整備すること。

』

2. 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、乾式キャスクの除熱機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

使用済燃料の崩壊熱は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。

2) 兼用キャスク各部の温度評価

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

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

3) 燃料被覆管の温度評価

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

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

4) 貯蔵建屋の除熱評価

① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。

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

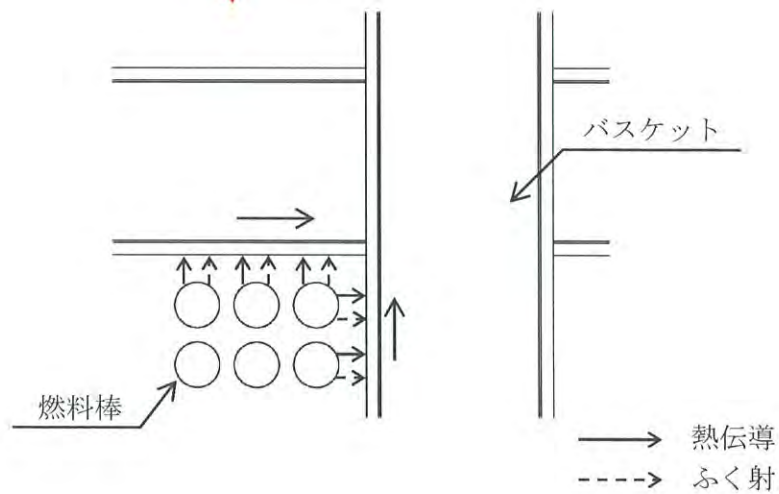
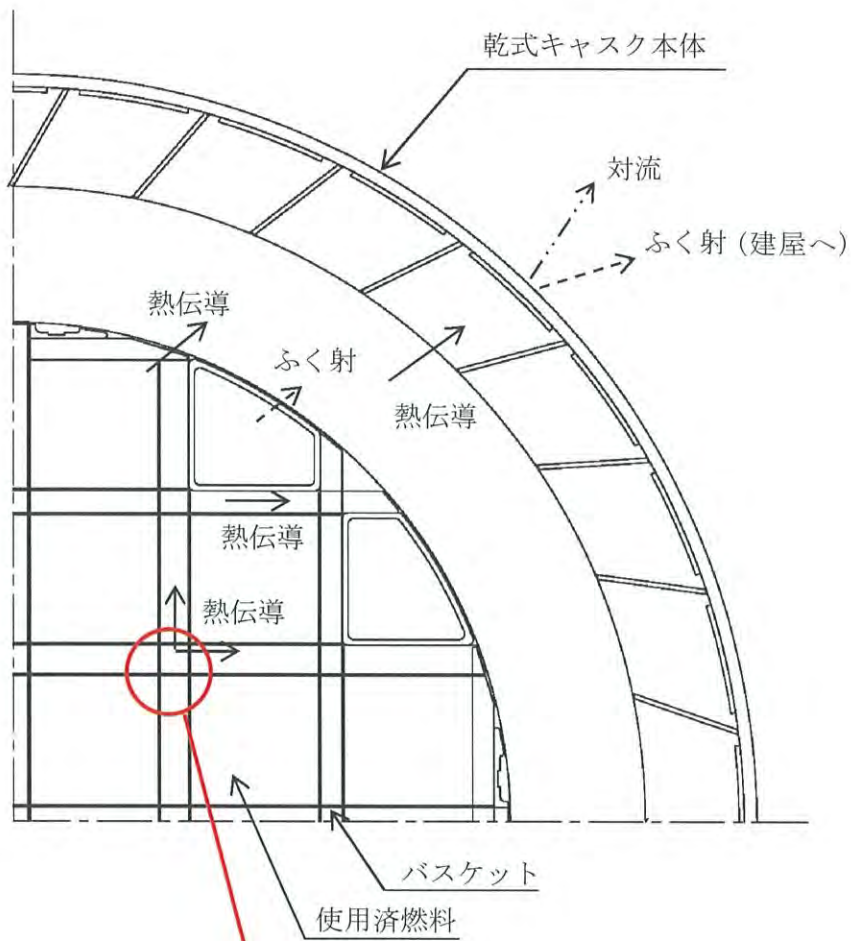
乾式キャスクは、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及びふく射により乾式キャスクの外表面に伝え、対流及びふく射により周囲の空気等に伝達する。乾式キャスク本体側部の中性子遮蔽材には熱伝導率の低いレジンを用いるため、伝熱フィンを設けることにより必要な伝熱性能を確保する。

乾式貯蔵施設における使用済燃料の崩壊熱の主要な伝熱形態は次のとおりである。

(第 2.5.4-1 図参照)

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

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



第 2.5.4-1 図 乾式キャスクの伝熱形態 (MSF-24P 型の例)

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

解析条件は第 2.5.4-1 表及び第 2.5.4-2 表のとおり。

a. 使用済燃料の崩壊熱評価方法

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

b. 乾式キャスク構成部材及び燃料被覆管の温度評価方法

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

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

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・ 収納制限に対する解析条件の保守性

－ウラン濃縮度 $4.1 \pm \square$ 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。

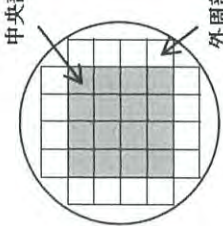
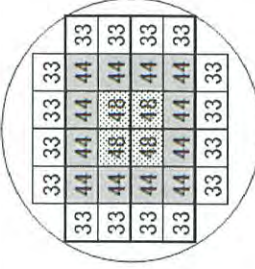
・ モデル化の保守性

－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。

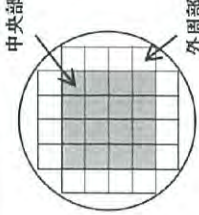
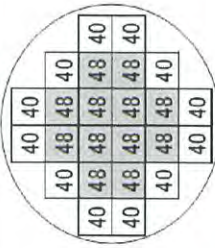
—MSF-24P 型については、使用済燃料とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、無視する方が熱伝導性が低下し保守側の評価となるため、モデル化しない。

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

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	中心	外周
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 (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)						
キャスク 1 基あたり	SFP での冷却期間 (年)	≥ 15	≥ 25			15	25
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤ 45	≤ 33	—		45	33
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

燃料 集合体 1 体の 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)		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	40
	SFP での冷却期間 (年)	A 型 : ≥ 15 ^{※1} B 型 : ≥ 17		—	15	
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤ 90	—	—	—	
パナプ ル ホ イ ス ン キャスク 1 基あたり	SFP での冷却期間 (年)	≥ 15	—	—	—	
収納物仕様	平均燃焼度 (GWd/t)	≤ 44		—	44	
	配置 ^{※2}			—		

※1: 回収ウラン燃料については、15 年冷却した通常ウラン燃料と放射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℃	冷暖房設計用乾球温度・露点温度における TAC2.5%温度 [※] の最高温度 (空気調和・衛生工学便覧[第 14 版])
目標排気温度 (T_{out})	50℃以下	乾式キャスクの除熱機能に関する評価条件

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

a) 駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) の計算

駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) は、以下の式で表される。

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

ここで、

H_{th} : 熱ドラフト (Pa)

ρ_{in} : 外気の密度 (1.112) (kg/m³)

ρ_{out} : 排気の密度 (kg/m³)

g : 重力加速度 (9.81) (m/s²)

h : ドラフト高さ (18.1) (m)

b) 圧力損失 ΔP の計算

圧力損失 ΔP は、以下の式で表される。

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

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

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)

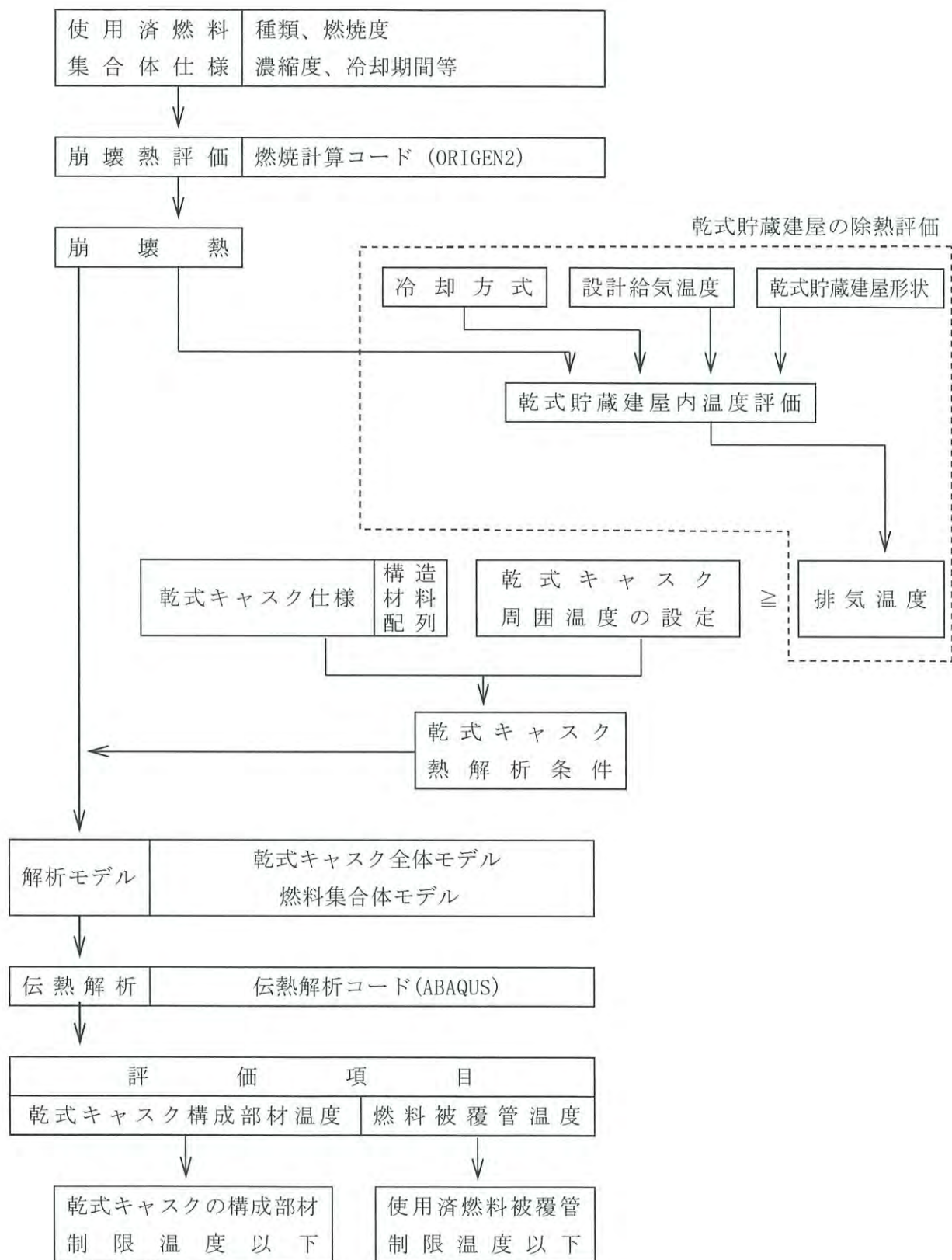
貯蔵建屋の一次元除熱評価で得られた結果を第2.5.4-4表に示す。貯蔵建屋の排気温度 T_{out} は45°Cとなり、目標排気温度 (50°C) 以下となる。

第 2.5.4-4 表 貯蔵建屋除熱評価の結果

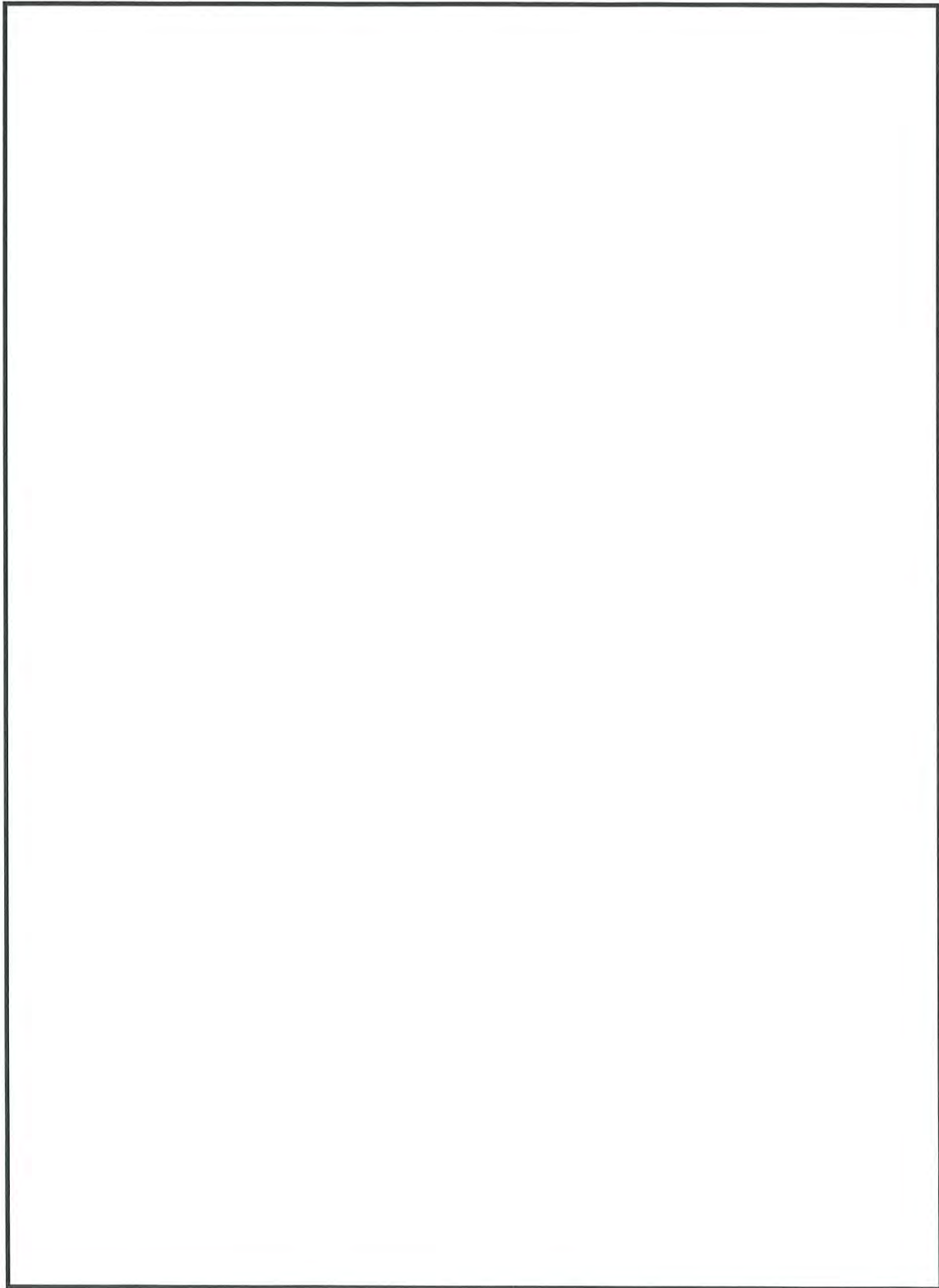
排気温度 T_{out} (°C)	熱ドラフト H_{th} (Pa)	圧力損失 ΔP (Pa)
約 45	約 7.1	約 7.1

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。

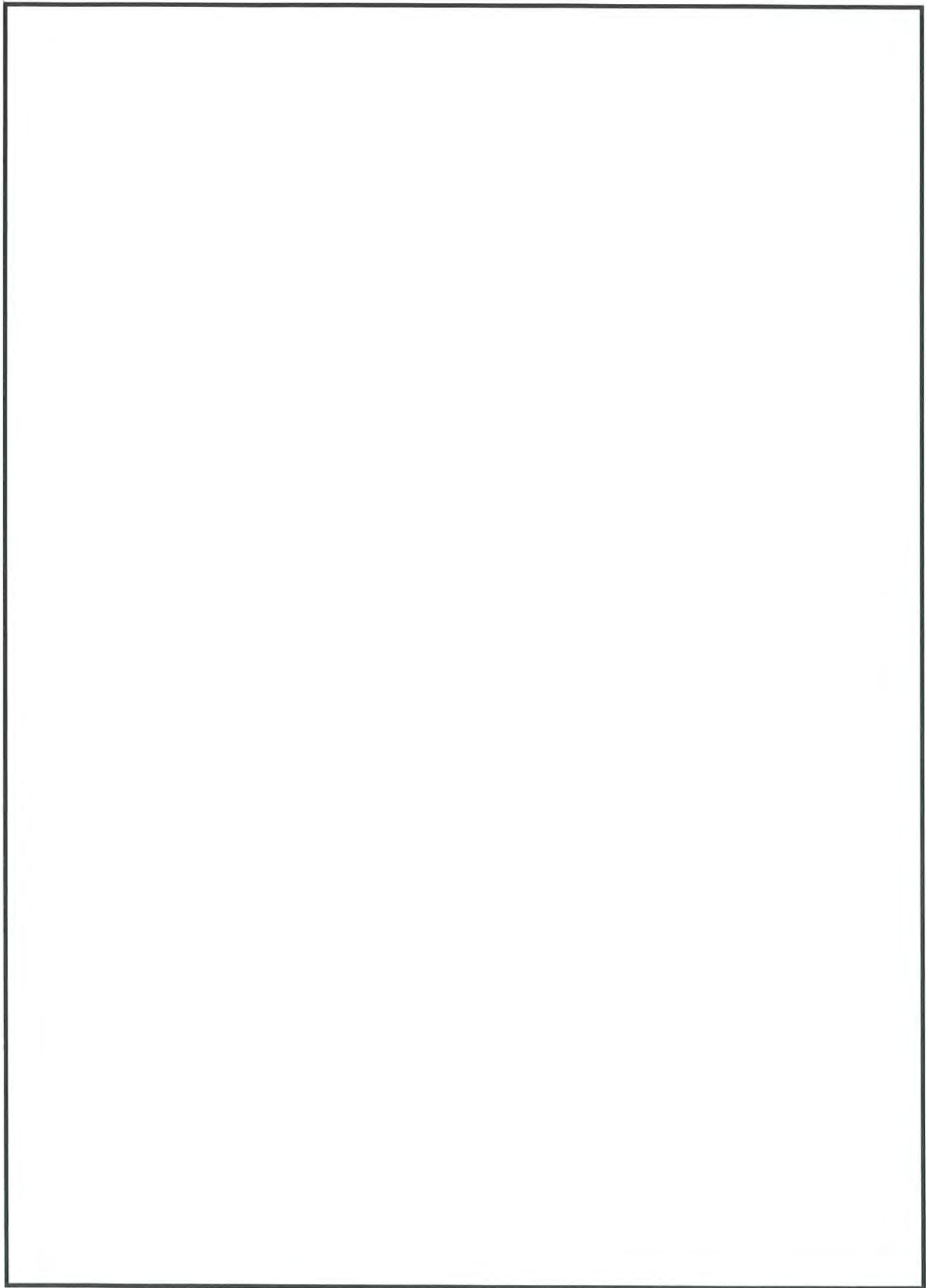
- ・ 設定条件の保守性
 - 乾式キャスクの発熱量は、MSF-24P 型及び MSF-32P 型の発熱量を包絡する発熱量を使用している。
 - 乾式キャスクの発熱量は、すべて空気によって除熱されると考え、建屋コンクリート等を通して大気や地中に逃げる熱は考慮しない。また、通風路各部の圧力損失を計算する際に、圧力損失係数が高くなる様に設定する。
- なお、太陽輻射熱により貯蔵建屋の外壁面温度に変動が生じるが、貯蔵建屋の壁は 1m 以上のコンクリートであり、太陽輻射熱により貯蔵建屋の壁内面 (貯蔵建屋内表面) の温度が上昇することはないため、貯蔵建屋内表面を断熱条件として、排気温度を評価することが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



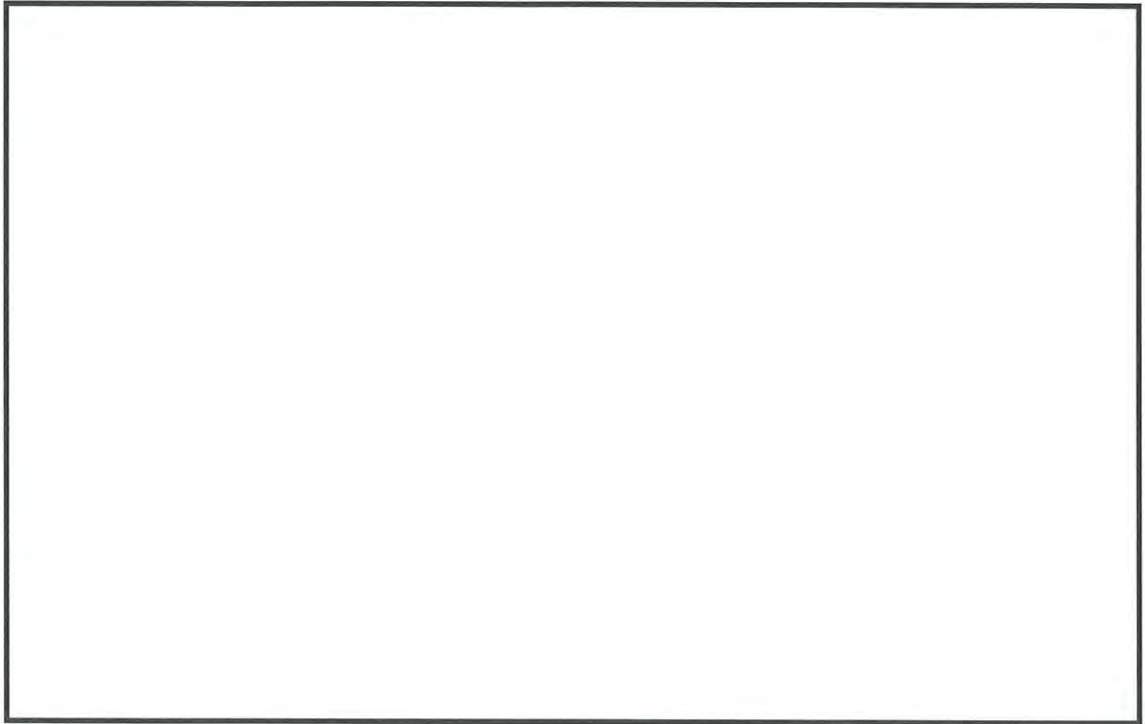
第 2.5.4-2 図 乾式キャスクの除熱解析フロー



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）

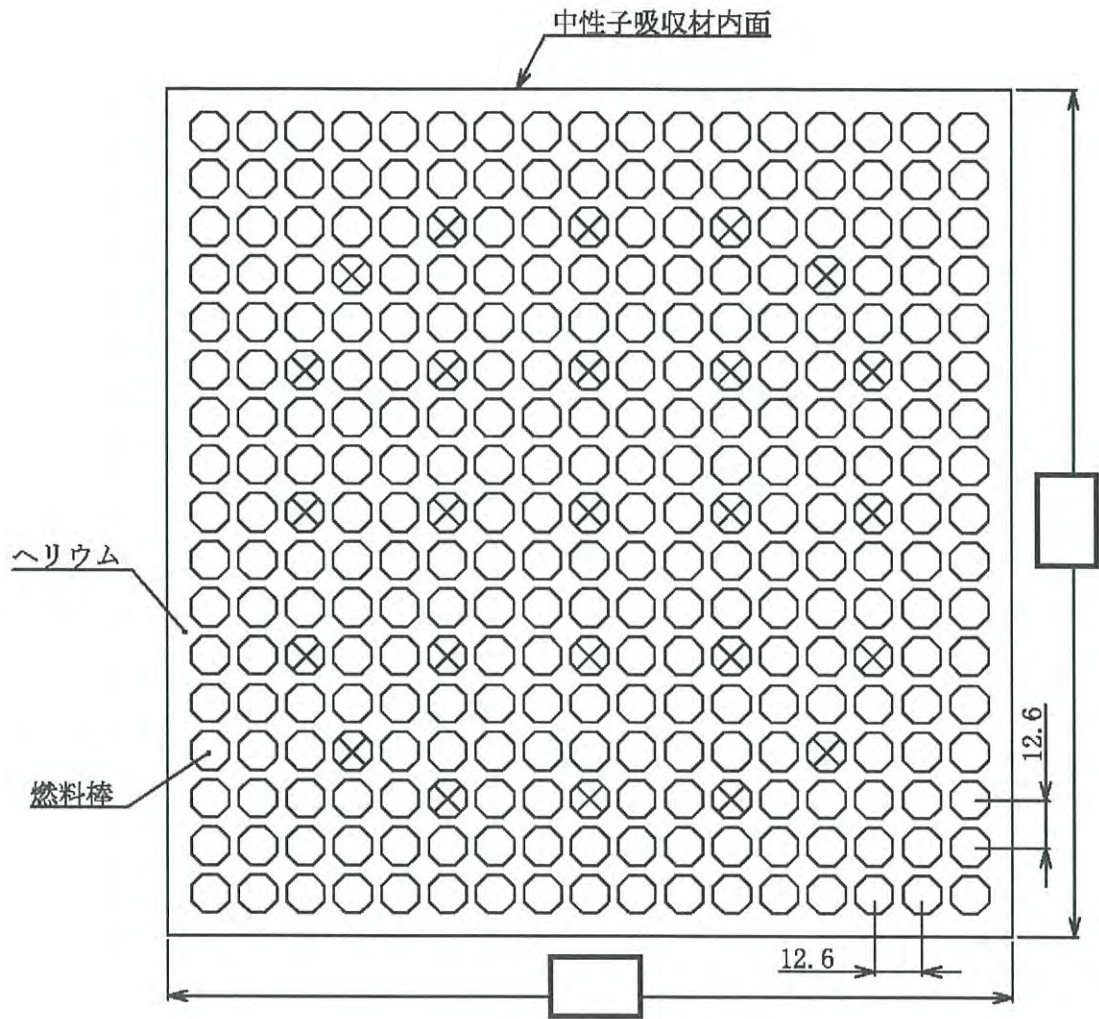


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

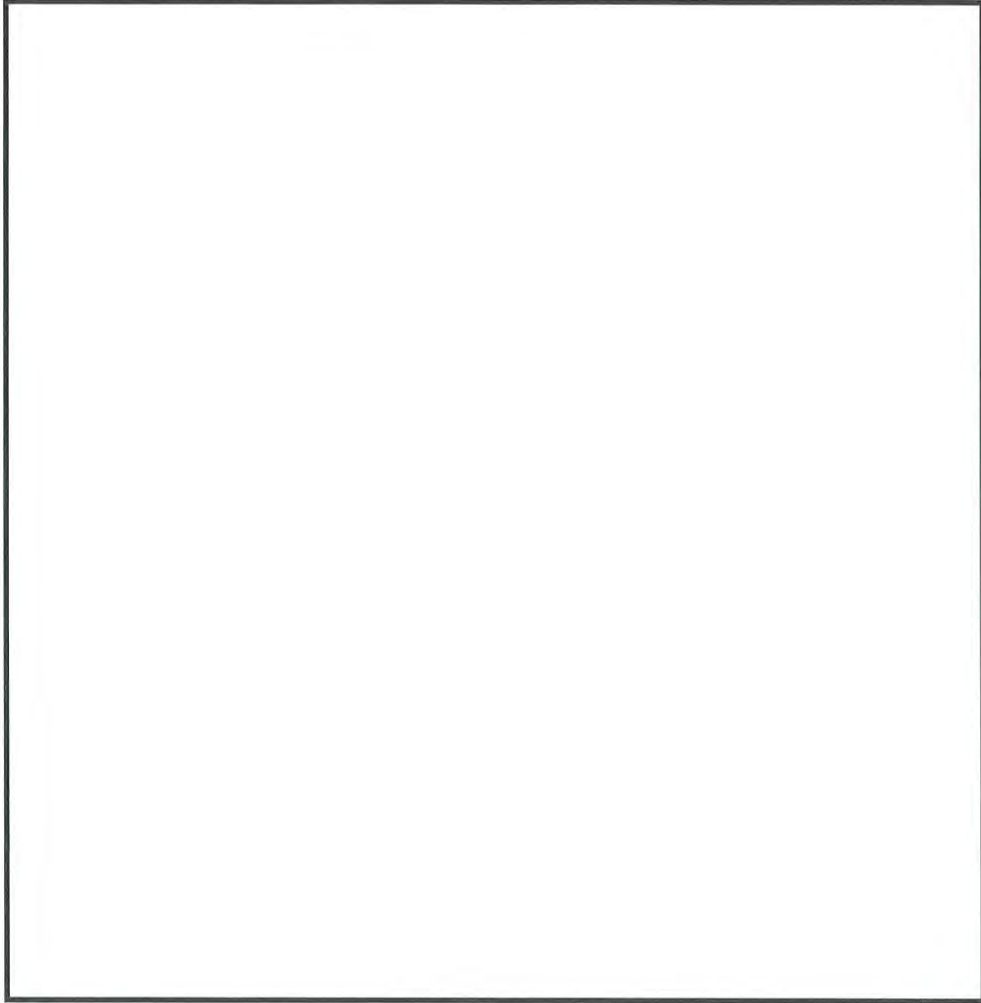
第 2.5.4-5 図 MSF-24P 型全体モデル要素分割図



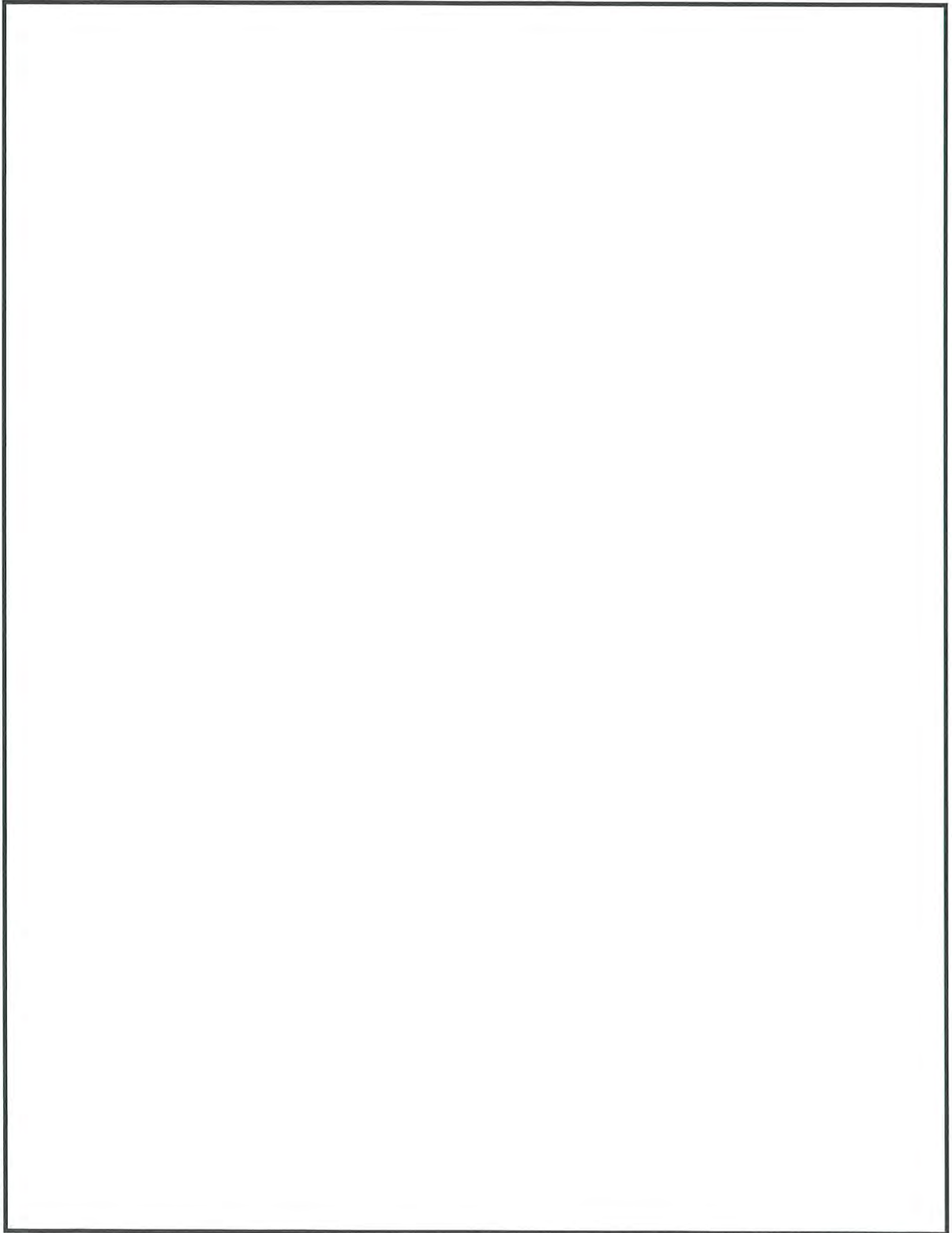
(単位：mm)

(注) ⊗ は制御棒案内シブル等であり、発熱はない。

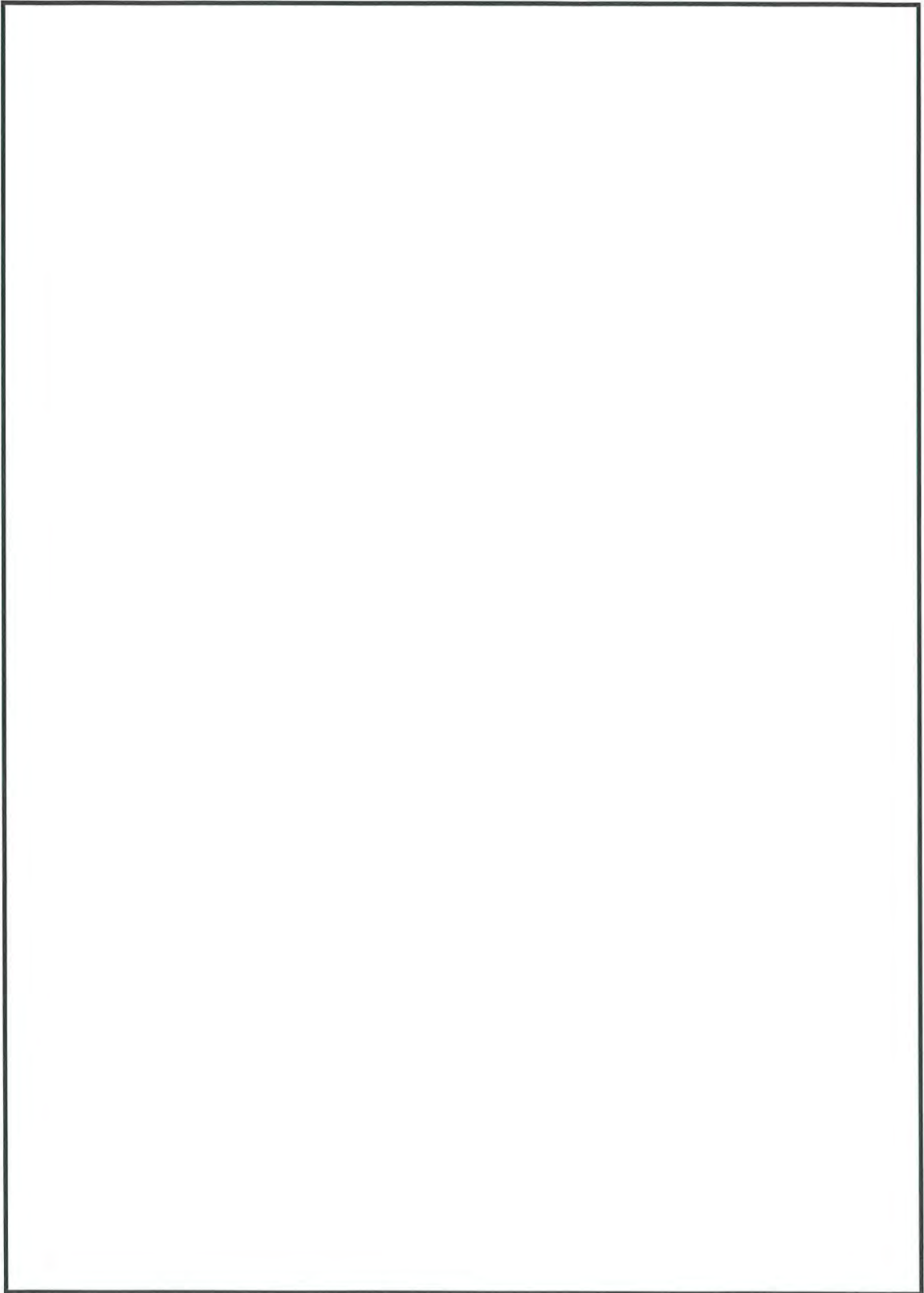
第 2.5.4-6 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル形状図



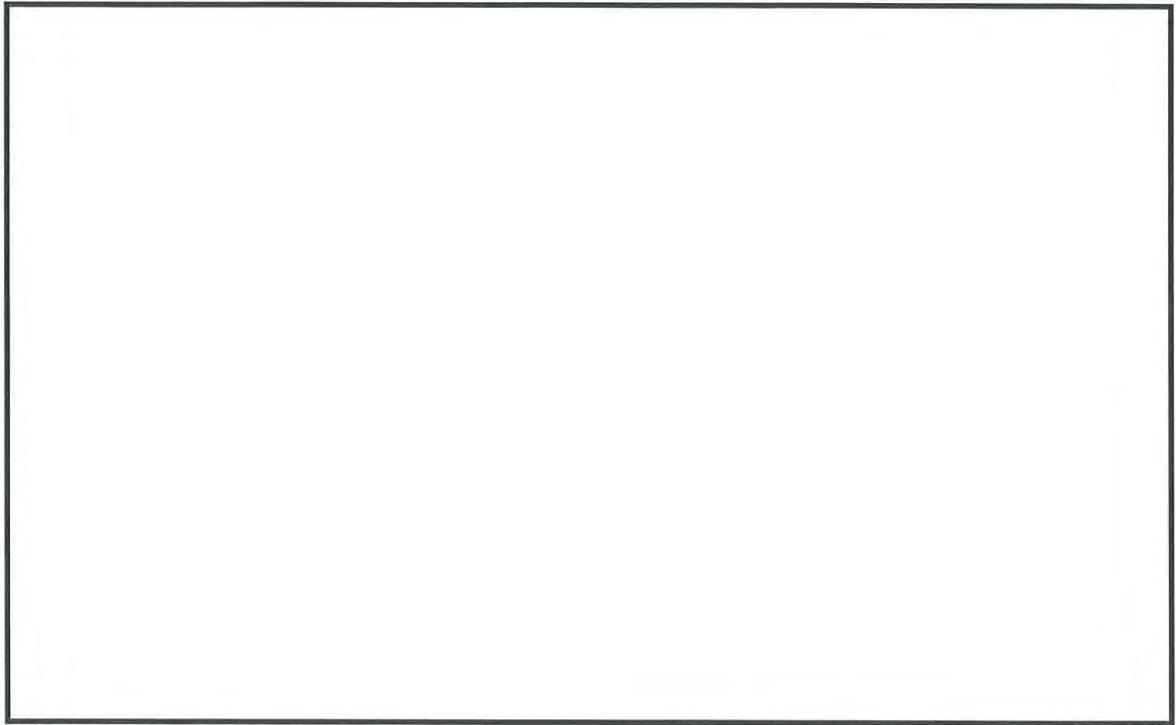
第 2.5.4-7 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル要素分割図



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）

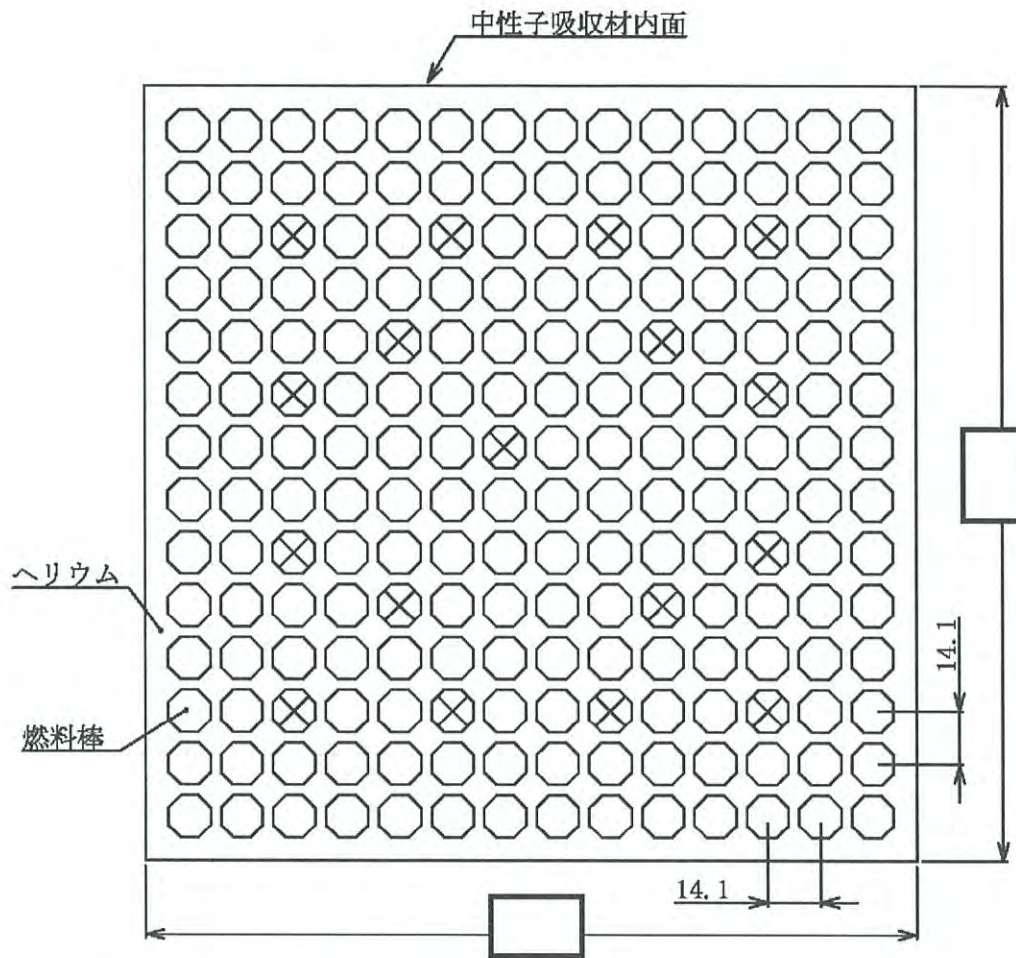


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

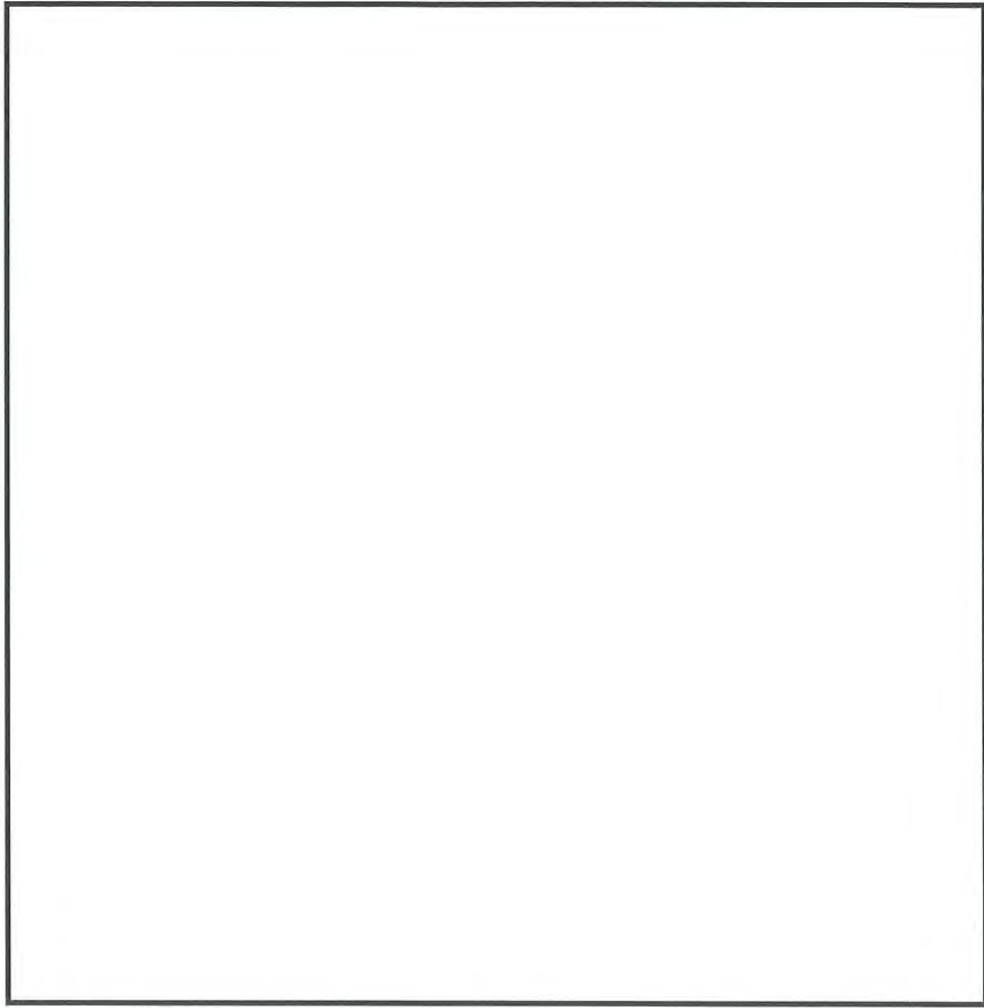
第 2.5.4-10 図 MSF-32P 型全体モデル要素分割図



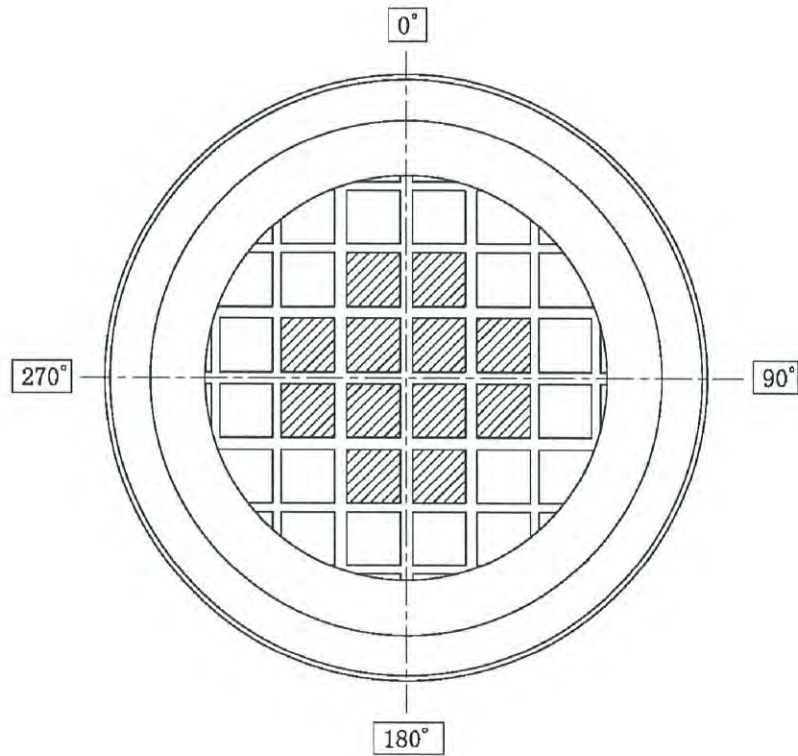
(単位：mm)


(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



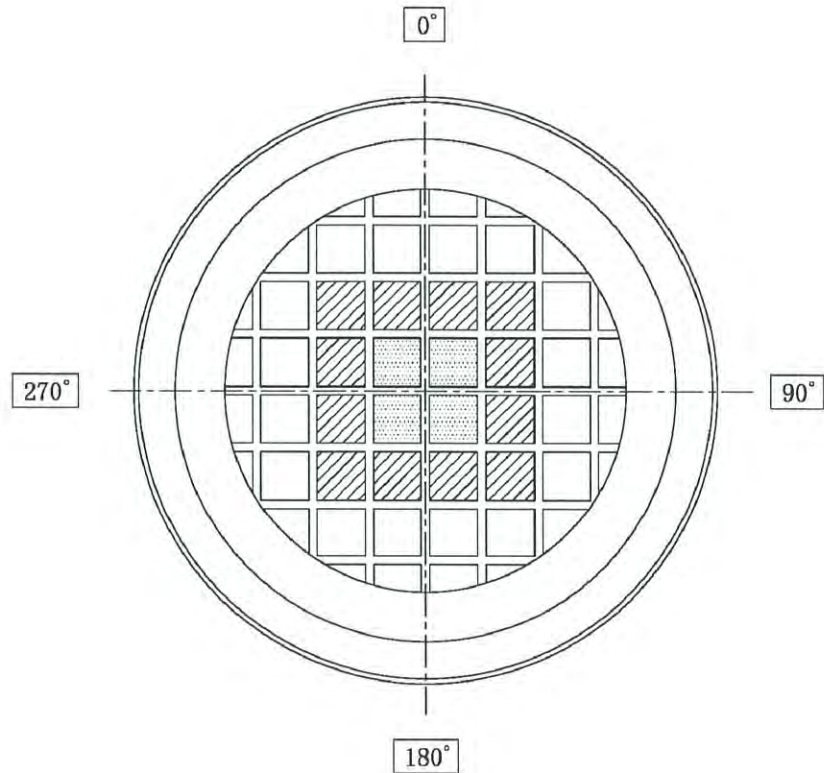
第 2.5.4-12 図 MSF-32P 型燃料集合体モデル要素分割図






 : 最高燃焼度の崩壊熱量(中央部 12 体)

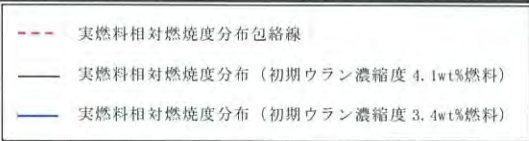
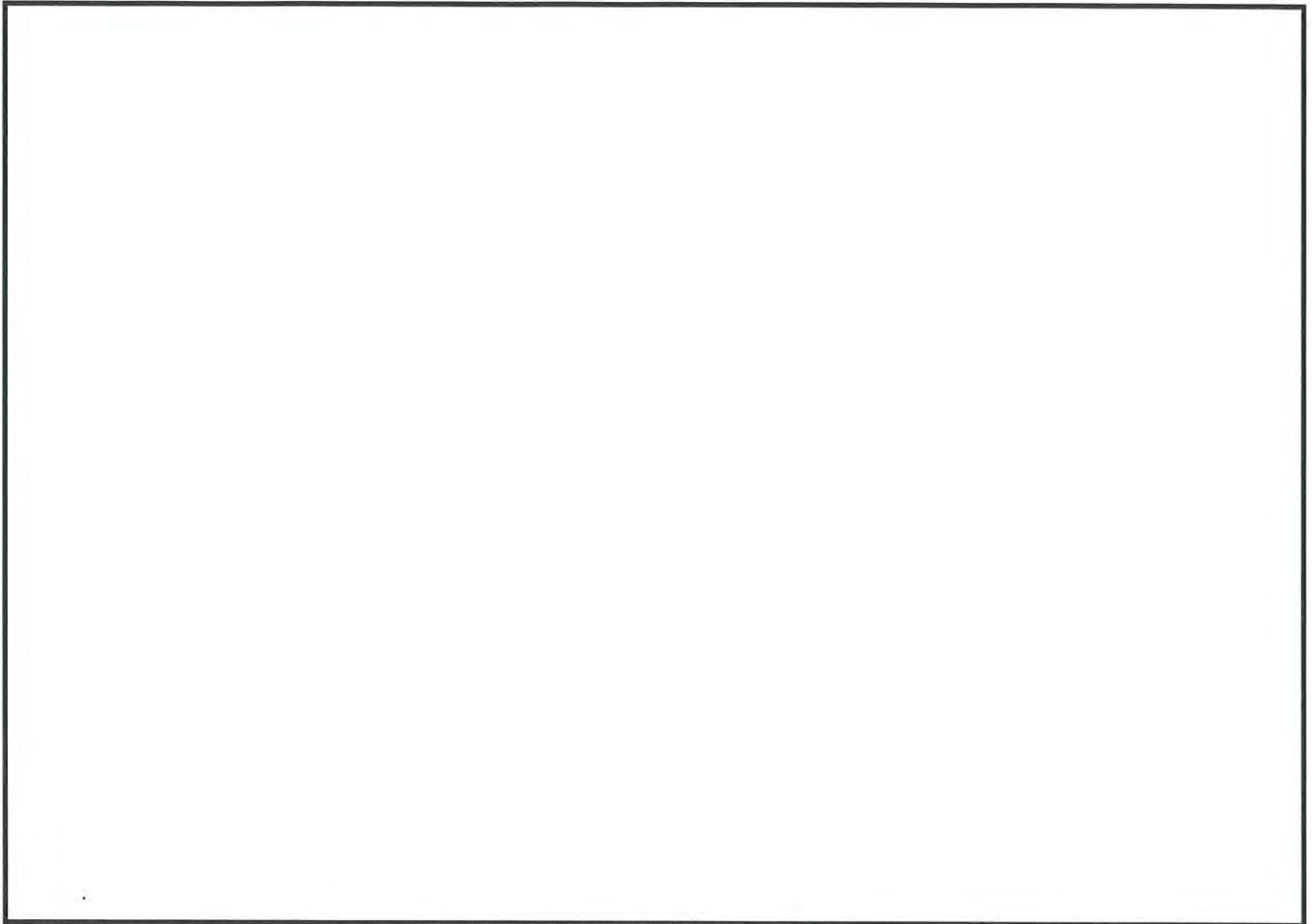
 : 平均燃焼度の崩壊熱量 (24 体分) から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量 (12 体分) を差し引き、外周部の収納体数 (12 体) で平均化した崩壊熱量

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



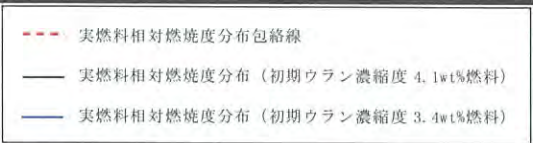
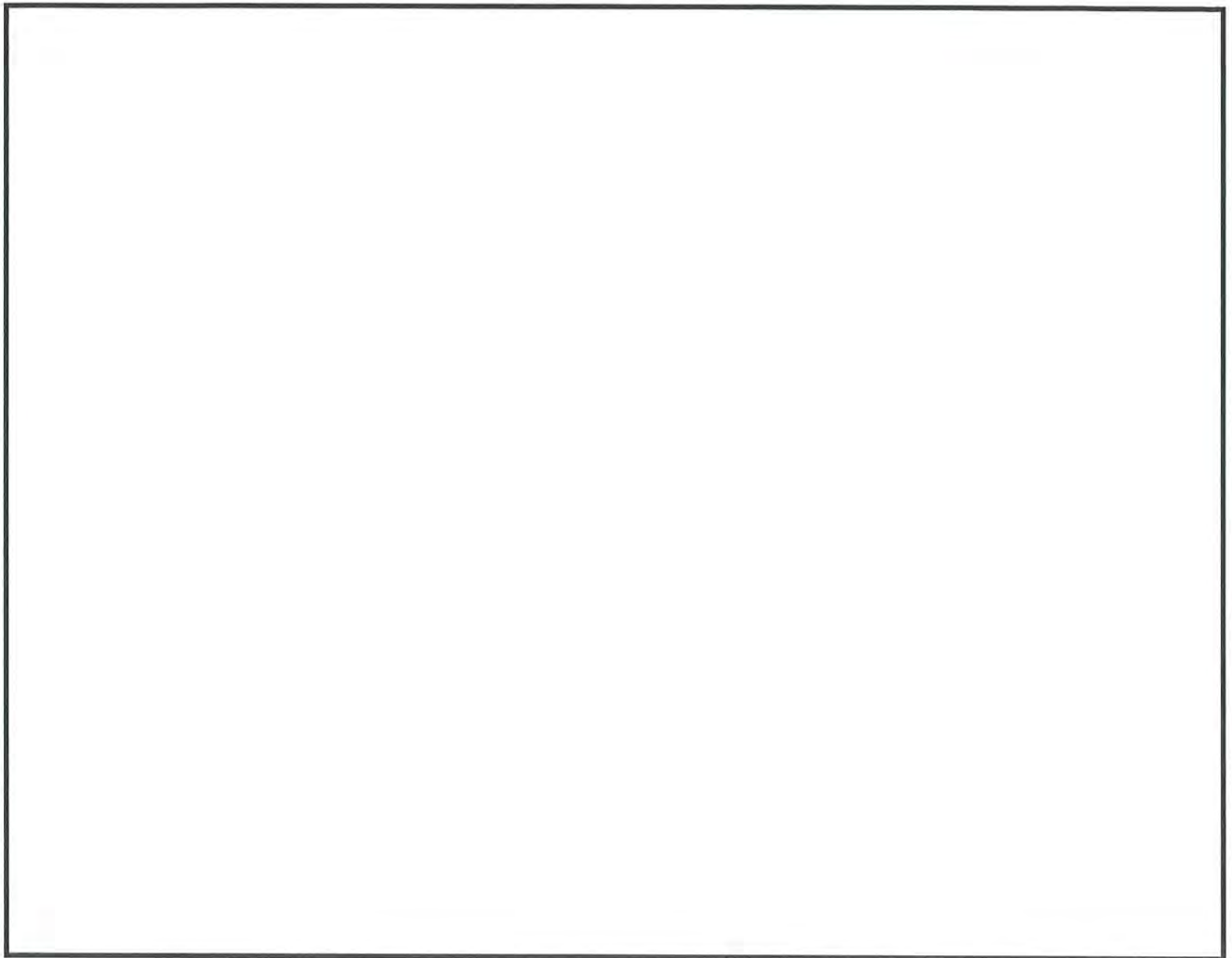
- 
 : 14×14 型 48GWd/t 燃料における最高燃焼度の崩壊熱量
 (中央部 16 体のうち中心 4 体)
- 
 : 中央部 16 体の崩壊熱量が 14×14 型 48GWd/t 燃料における
 平均燃焼度の崩壊熱量 16 体分となるように調整した崩壊熱量
 (中央部 16 体のうち中心 4 体を除く 12 体)
- 
 : 14×14 型 39GWd/t 燃料における平均燃焼度の崩壊熱量
 (外周部 16 体)

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



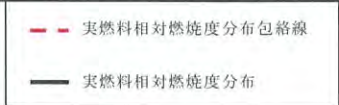
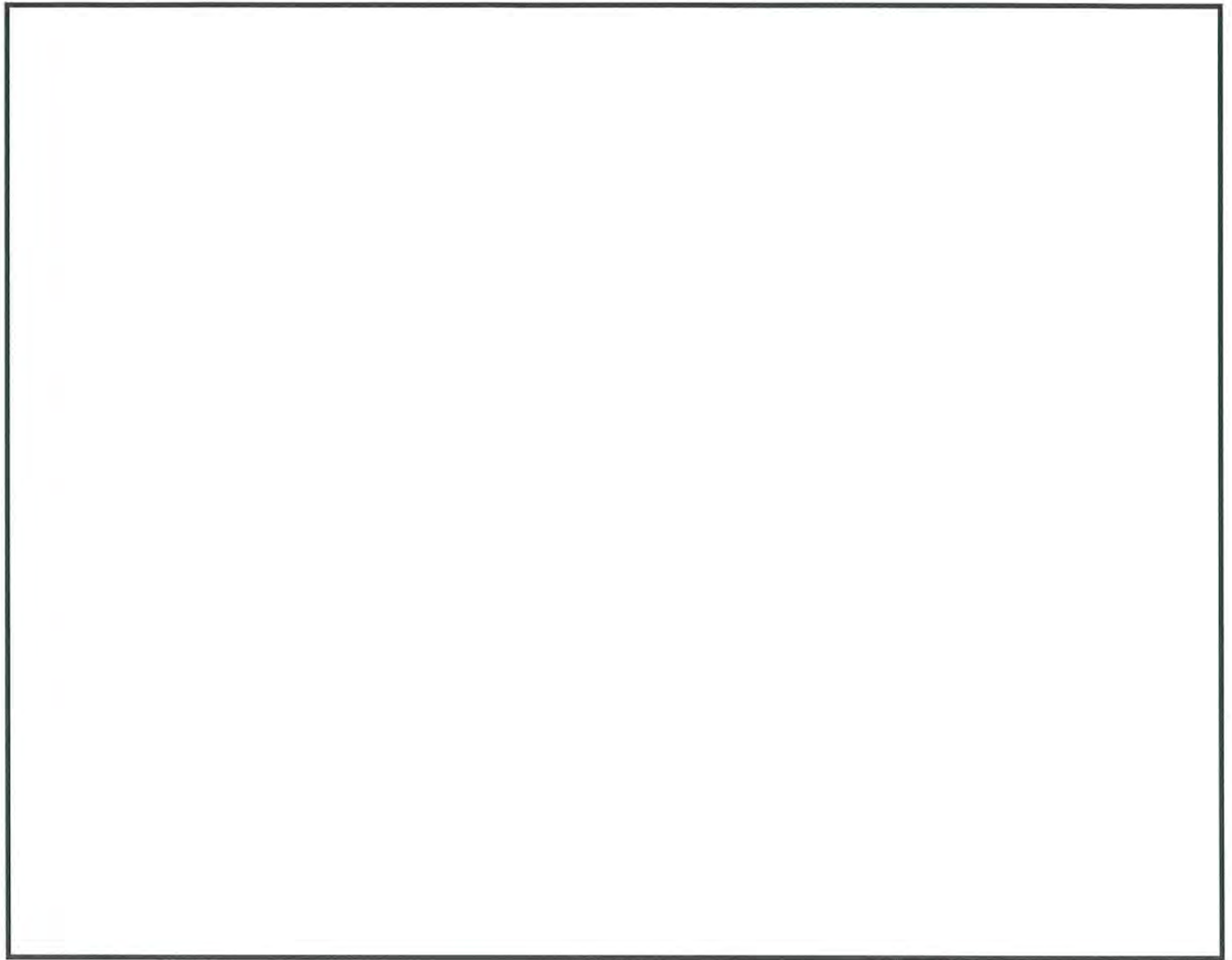
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

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。

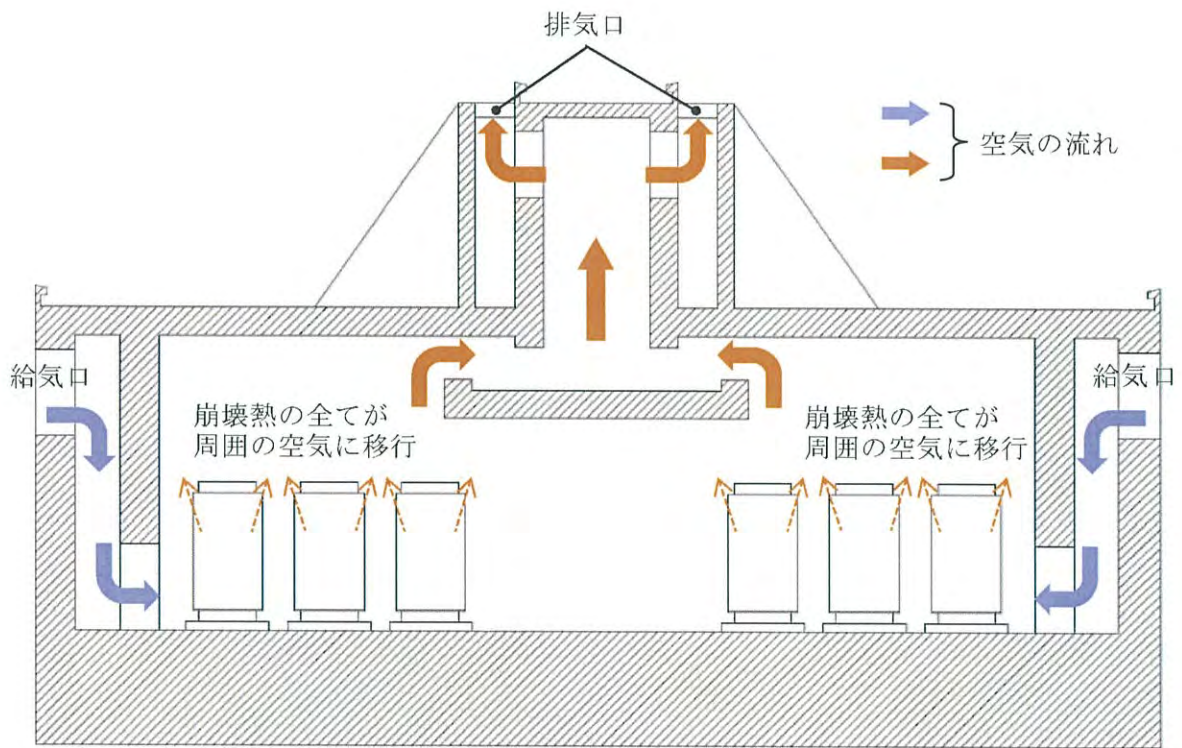
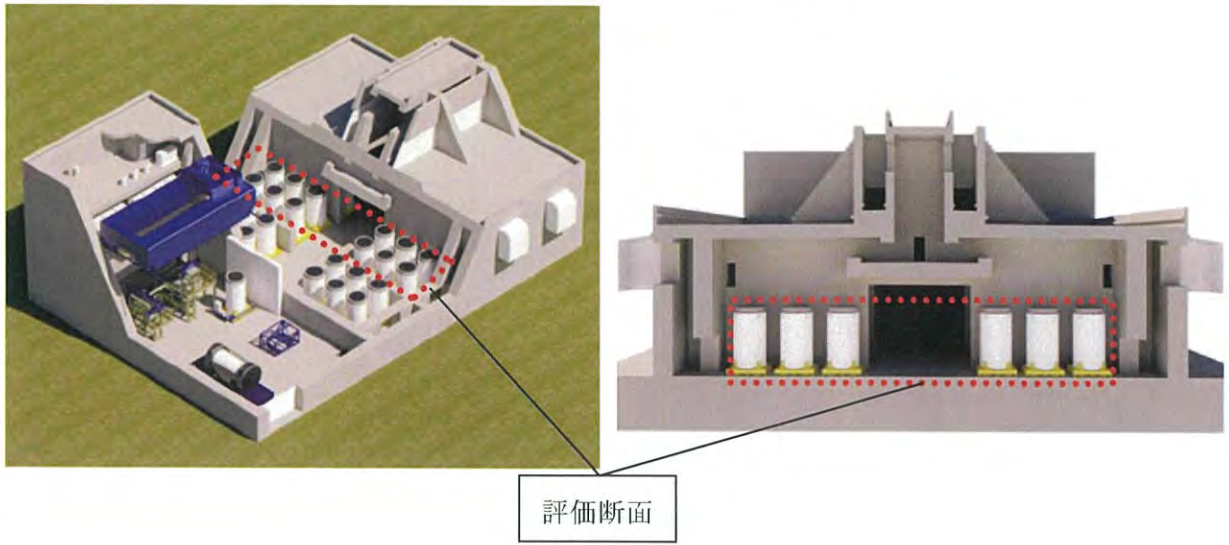
第 2.5.4-15 図 2 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (2/3)



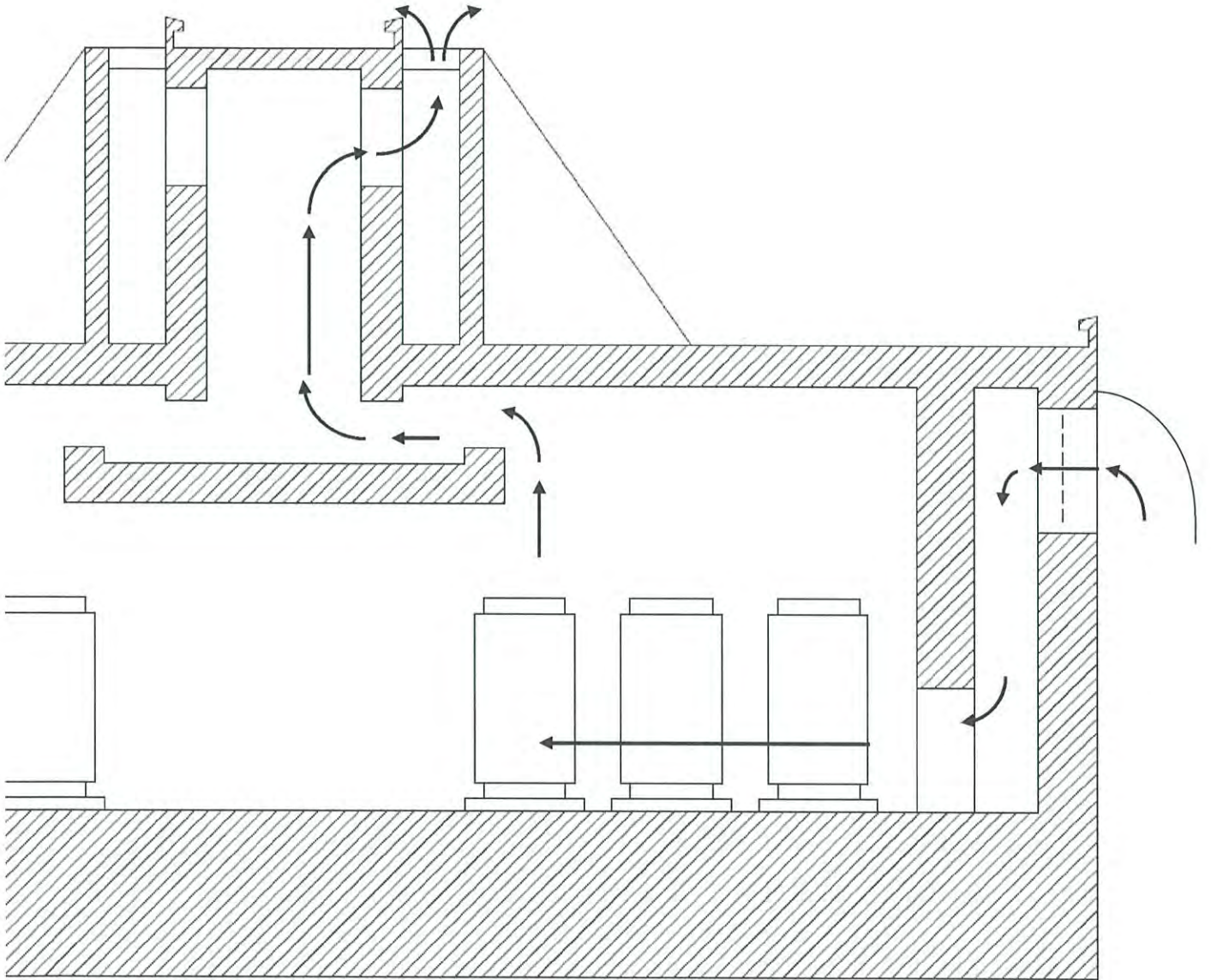
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

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。

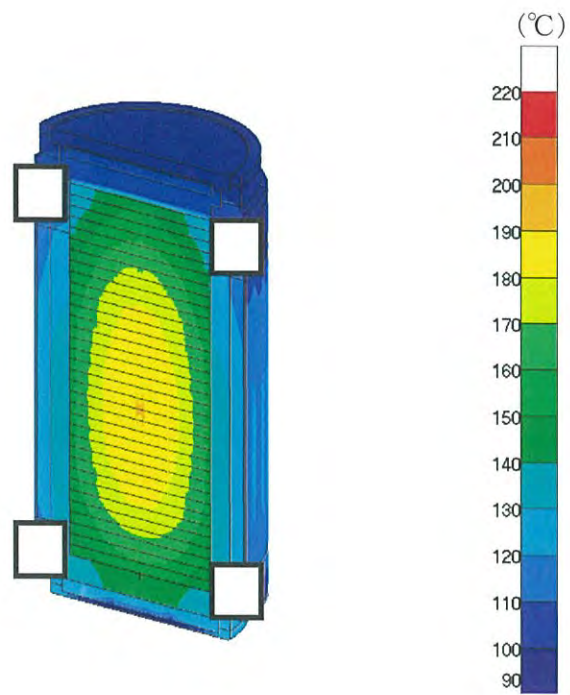
c. 乾式貯蔵建屋

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。

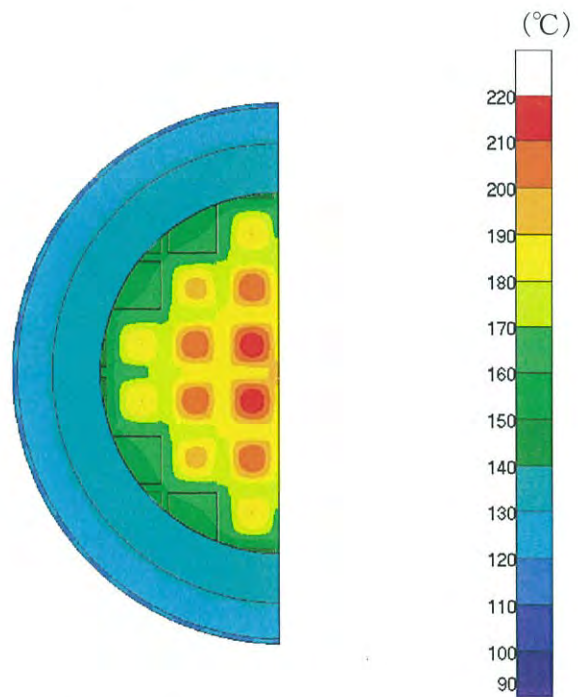
第 2.5.4-13 図及び第 2.5.4-14 図に示すように、最も厳しい評価となる燃料仕様を収納した場合において、第 2.5.4-5 表に示すとおり乾式キャスク各部及び使用済燃料被覆管温度は評価基準を満足している。また、乾式貯蔵建屋の除熱評価で算出した結果（排気温度）が、乾式キャスクの除熱評価で設定している周囲温度（50℃）以下であり、乾式貯蔵建屋は乾式キャスクの除熱機能を阻害しない。なお、乾式貯蔵建屋の除熱評価にあたっては、MSF-24P 型及び MSF-32P 型の 2 型式の乾式キャスクの収納制限における最大発熱量（MSF-24P 型：15.8kw、MSF-32P 型：14.8kw）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 ℃	約 150 ℃	350 ℃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 ℃	約 140 ℃	149 ℃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 ℃	約 110 ℃	130 ℃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 ℃	約 190 ℃	250 ℃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 ℃	約 210 ℃	275 ℃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℃		50℃以下 乾式キャスクの除熱評価で設定している温度

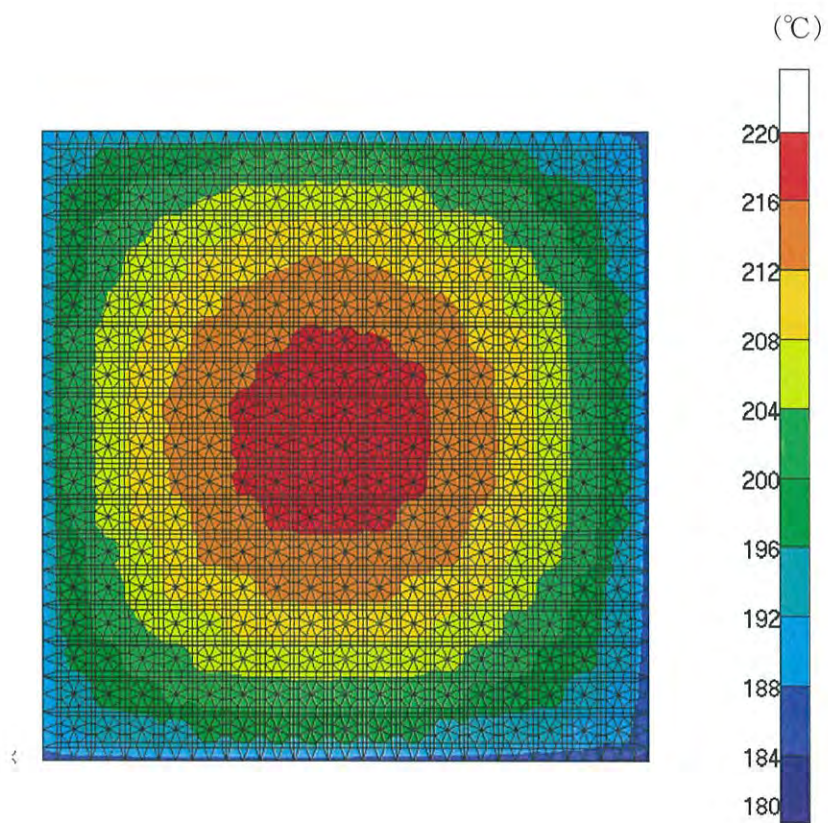


(全体)

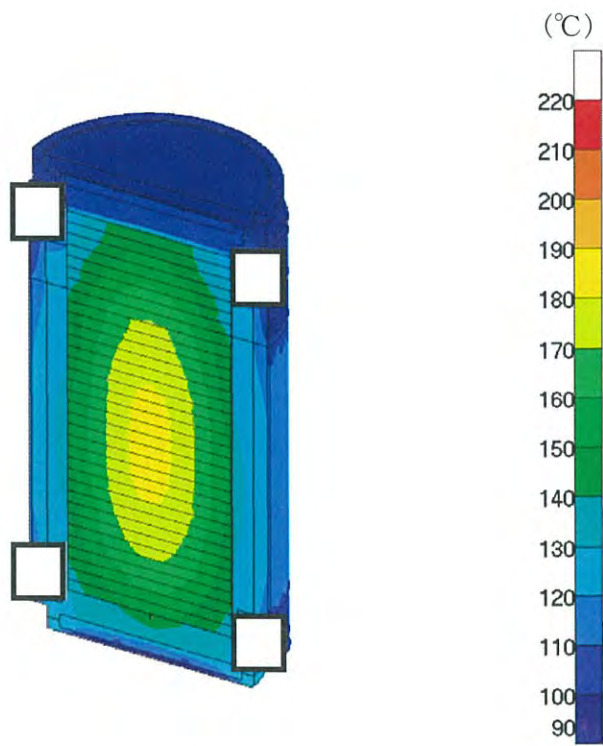


(燃料集合体最高温度位置断面)

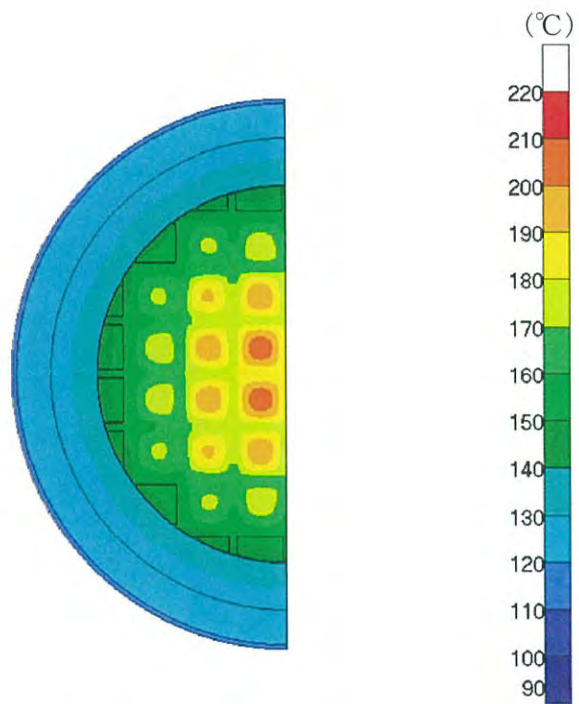
第 2.5.4-18 図 MSF-24P 型除熱解析結果(全体モデル)



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

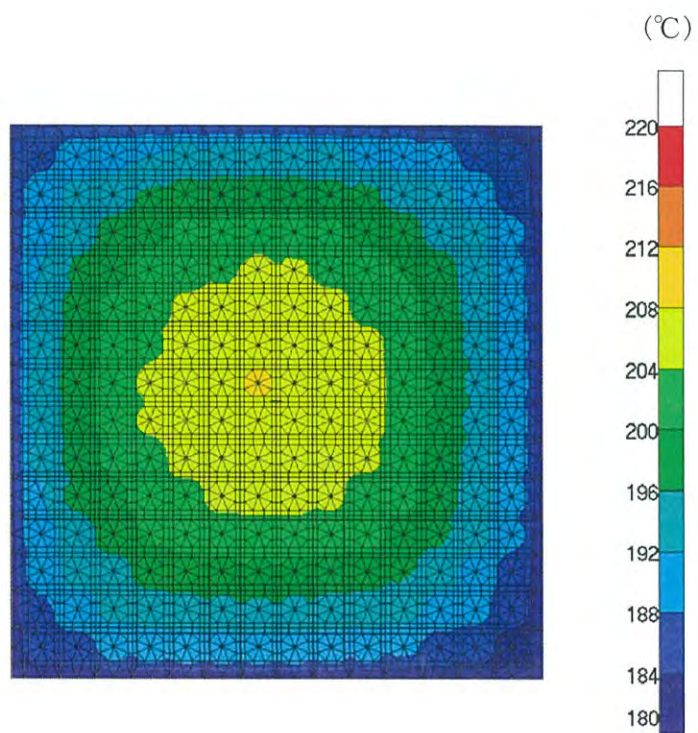


(全体)



(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。

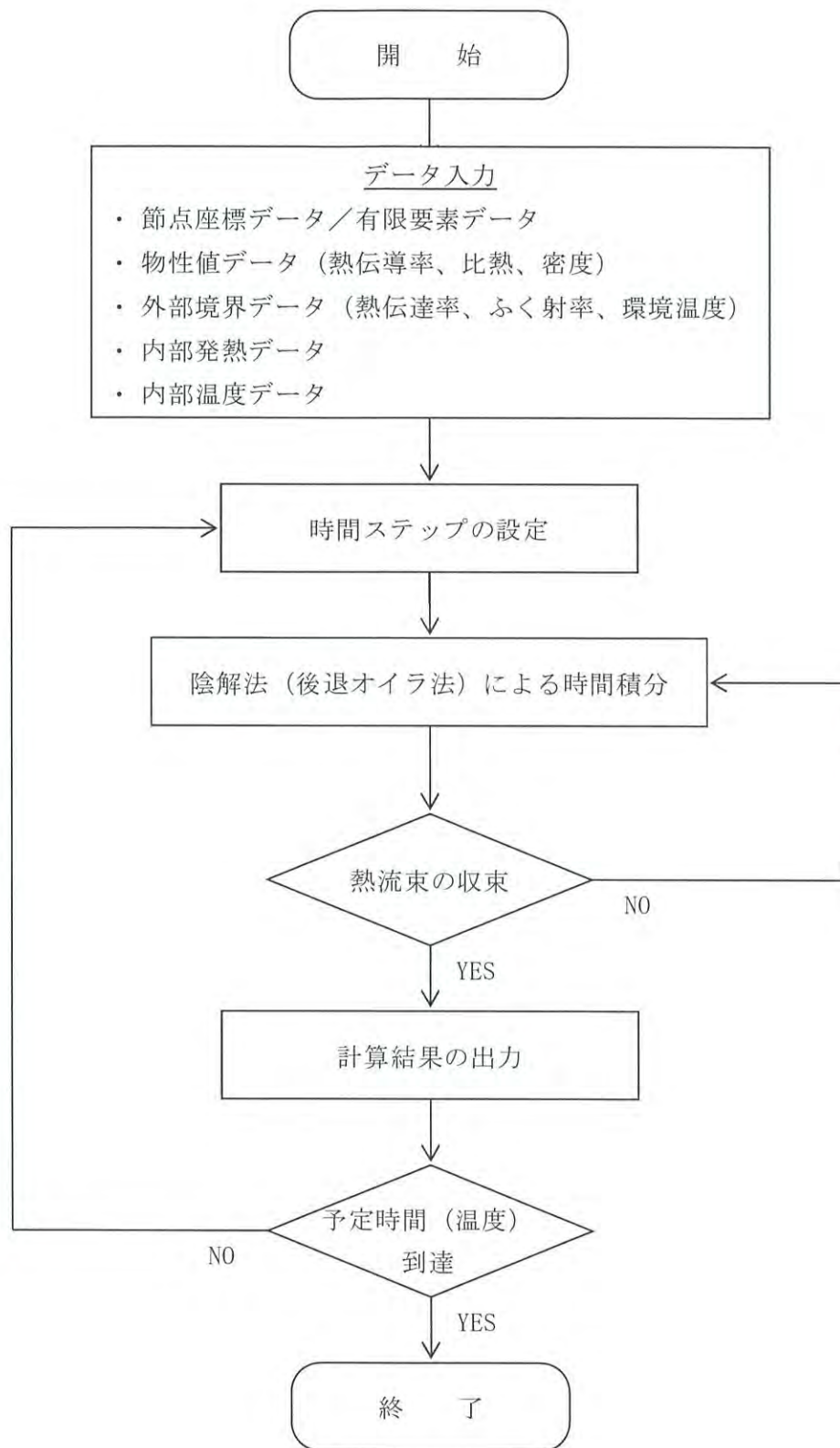
iii 解析フロー

代表的な解析フローを第 2.5.4-22 図に示す。

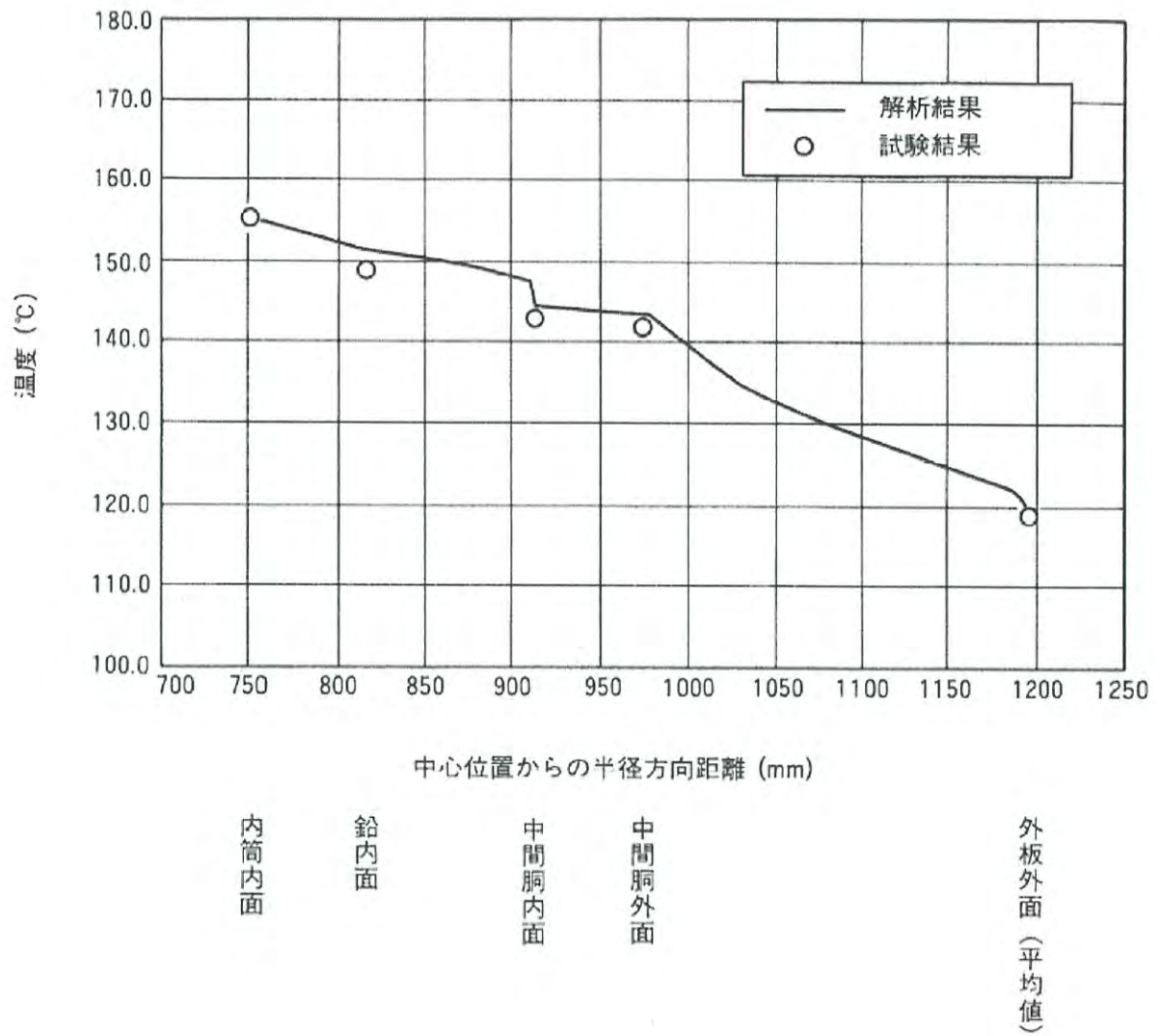
iv 使用実績及び検証

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).

参 考

参考 1

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で
引用している文献の記載内容について

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《別添1：閉じ込め》

安全審査資料		参考文献	
記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要
1 別添1 2.適合性について a. 基準漏えい率の計算	<16条-別添1(閉じ込め)-7ページ> 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%)を考慮し、保守的な値として0.1%を想定する。	(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: 20101, (2014).	米国の使用済燃料乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率(約0.01%)と国内の軽水炉における漏えい燃料発生率(約0.01%)を考慮し、漏えい率を0.1%と想定する。
2 別添1 2.適合性について a. 基準漏えい率の計算	<16条-別添1(閉じ込め)-8ページ> また、ここで漏えい率 Q は、以下のクマツゼンの式 ³⁾ で求められる。	International Organization for Standardization, "Safe Transport of Radioactive Materials - Leakage Testing on Packages", ISO 12807, (1996).	本文献は放射性物質輸送容器の密封機能評価方法(気体の漏えい率から放射性物質の放出率を評価)を示すISO規格である。気体の漏えい率は、リーク孔として円管を仮定し、流路モデルとして粘性流(漏えい率 Q の式の第2項)が適用される。
3 別添1 2.適合性について 第2.5.1-1表 閉じ込め評価条件及び評価結果	<16条-別添1(閉じ込め)-12ページ> 金属ガスケットの漏えい率 ^{3), 4)} $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下	"METAL SEALS TECHNOLOGICAL CATALOG", Technetics Group, (2017).	金属ガスケットのシール性能(カテゴリー)は、ヘリウムガスを用いた場合、 $1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度を達成可能である。
4 別添1 2.適合性について 第2.5.1-1表 閉じ込め評価条件及び評価結果	<16条-別添1(閉じ込め)-12.13.14ページ> ・金属ガスケットの漏えい率 ^{3), 4)} ・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フーン・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。第26回(当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27回には、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℃以下にすればよいことが示されている 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)	・金属ガスケット(外被材: アルミニウム、内被材及びブイコイルスプリング; ニッケル合金)の性能について、ガスケット部の温度を約130℃から140℃の範囲で一定とし、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から19年以上が経過(フーン・ミラー・パラメータ(LMP)=7942)しても密封性能の漏えい率の変化は小さく、良好な密封性能を保持していることが確認された。 ・本試験結果では LMP=7942 まで健全性が示されており、貯蔵期間を60年とした場合に LMP=7942 となる金属ガスケットの初期温度は134℃となり、この温度以下にすれば密封性能が維持される。

参考文献としての妥当性
(以下の観点から、適用することが妥当であると考
えている。)

本文献に示される米国の漏えい燃料発生率は、乾式キャスクと同じ貯蔵方式の燃料発生率は、乾式キャスクの蓋シール部における漏えい状態として想定される流れの状態(粘性流、分子流)が考慮されている。また、クマツゼンの式を用いた漏えい評価は乾式キャスクの閉じ込め機能評価に多くの実績を有しており、妥当である。

本文献は、MSF-24P型及びMSF-25P型に用いる金属ガスケットのメーカーカタログであり、参考文献として妥当である。なお、参考文献4の電中研報告を考慮し、メーカーカタログ値($1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)から保守的に金属ガスケットの性能を $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と設定している。

本文献での試験は、乾式キャスクで使用する金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面外径(φ6.1mm)は、乾式キャスクの一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径(φ10mm)よりも小さい。さらに、試験におけるガスケット部の温度(約130℃～140℃)は、乾式キャスクの貯蔵時の熱解析結果で得られた金属ガスケット部温度(約110℃)より高い。したがって、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットにおいて、乾式キャスク貯蔵時の条件に比べて、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットに対してより厳しい条件下で得られた結果である。以上より、参考文献として妥当である。

なお、電中研試験結果を踏まえ、金属ガスケットの性能としては、参考文献3のカタログ値より保守的な $1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と設定している。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

安全審査資料		記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
番号	1	別添2 2.適合性について 第2.5.2-4表 評価結果	<16条・別添2(臨界防止) - 24ページ> 評価基準 0.95以下)	「臨界安全ハンドブック第2版」・日 本原子力研究所 JAERI 1340, (1999)		十分に検証されたコードシステムを用いる場合には、そのコードシステムによつて算出された中性子増倍率 keff が次式を満足することにより未臨界であると判定できると記載されている。 keff ≤ 0.95	参考文献として、適用することが妥当であると考えている。
	2	別添2 3.使用する解析コード a.解析コード (a)SCALEコードシステム	<16条・別添2(臨界防止) - 25ページ> 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 コードシステムリを用い、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 Code System. ORNL/TM- 2005/39 Version 6.2.1 (2016).		OECD/NEA にて評価・収集された臨界実験に関する国際ベンチマークデータベース (International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03 (2006)) は、下記①～⑥の条件を満たす臨界実験が記載されている。 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 (銅板、鉛) を配置している場合 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	参考文献として、適用することが妥当であると考えている。
	3	別添2 3.使用する解析コード a.解析コード (a)SCALEコードシステム	<16条・別添2(臨界防止) - 25ページ> 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 2) 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3-1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 (銅板、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	International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, (2006)		OECD/NEA にて評価・収集された臨界実験に関する国際ベンチマークデータベース (International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03 (2006)) は、下記①～⑥の条件を満たす臨界実験が記載されている。 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 (銅板、鉛) を配置している場合 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	参考文献として、適用することが妥当であると考えている。

使用済燃料乾式貯蔵容器的設計及び評価で引用している文献の記載内容について

記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
1 別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (a)ORIGEN2コード	安全審査資料	<16条-別添(3)遮蔽)-28ページ> i 概要 ORIGEN2コードは、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 送容器的燃焼熱計算等に広く用いられている。	・ "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).	－ (使用マニュアルのため、省略)	本解析に使用する ORIGEN2 コードが適切に検証さ れていること、参考文献として妥当 である。	参考文献として妥当であること (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
2 別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (a)ORIGEN2コード	安全審査資料	<16条-別添(3)遮蔽)-28.30ページ> 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 設の燃焼熱計算に広く使用されている。また、 ORNL では ORIGEN2 コードの燃焼熱計算結果 を ANS 標準燃焼熱の値と比較し、ORIGEN2 コ ードの妥当性を検証している ⁹⁾ 。	・ "ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Technology, Vol.62, (1983).	－ (使用マニュアルのため、省略)	本解析に使用する ORIGEN2 コードが適切に検証さ れていること、参考文献として妥当 である。	参考文献として妥当であること (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
3 別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	安全審査資料	<16条-別添(3)遮蔽)-31ページ> 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。	・ Oak Ridge National Laboratory, "DOT3.5:Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code", CCC-276, (1977).	－ (使用マニュアルのため、省略)	本解析に使用する DOT コードが適切に検証されてい ること、参考文献として妥当であ る。	参考文献として妥当であること (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
4 別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	安全審査資料	<16条-別添(3)遮蔽)-31.33ページ> 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的解析事例と測定 値を第3-4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 ⁹⁾ 。	・ "TN-12 型輸送容器的放射線遮蔽 特性(1)線量率」(一社)日本原子 力学会「昭和56年秋の分科会」, C17, (1981).	－ (使用マニュアルのため、省略)	本解析に使用する DOT コードが適切に検証されてい ること、参考文献として妥当であ る。	参考文献として妥当であること (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
5 別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	安全審査資料	<16条-別添(3)遮蔽)-33ページ> v. 断面積ライブラリ MATXSLLIB-J33 MATXSLLIB-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。MATXSLLIB-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 ⁹⁾ 。	・ "2D-CF 核分裂中性子源を用いた遮 蔽透過率及び二次元離散化標 準コードによる輸送容器適用 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巻 第3号 研究報告, (2007).	－ (使用マニュアルのため、省略)	本解析は、JENDL-3.3の各データを基に作成した断 面積ライブラリ SFCX-J33を用いた DOT3.5 コード による解析のベンチマークを示した文献である。断 面積ライブラリ SFCX-J33は、JENDL-3.3の各データ を基に作成されており、JENDL-3.3の各データを基に作成された断面積 ライブラリを使用した解析の妥当性が示されており、 参考文献として妥当である。	参考文献として妥当であること (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
1	別添4 2.適合性について 第2.5.4.5表 評価結果	安全審査資料 <16条-別添4(除熱)-31ページ> 第2.5.4.5表 評価結果	項 目 評価基準 胴、外筒、一次蓋及び二次蓋 350 °C以下 ¹⁾ 中性子遮蔽材 (レジン) 149 °C以下 ²⁾ 金属ガスケット 130 °C以下 ³⁾ バスケット 250 °C以下 ⁴⁾ 使用済燃料被覆管 275 °C以下 ⁵⁾	(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). ・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー) ・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバー) ・SUS630 (トラニオン) ・GLF1 (胴、一次蓋、二次蓋) ・SNB23-3 (蓋ボルト) ・BISCO PRODUCTS, Inc. 「NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material」, (1986). ・(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).平成21年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査報告書	炭素鋼は30°C~375°Cの温度範囲において、ステンレス鋼は、-30°C~425°Cの温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は、-30°C~350°Cの温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。 ・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー) ・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバー) ・SUS630 (トラニオン) ・GLF1 (胴、一次蓋、二次蓋) ・SNB23-3 (蓋ボルト) エポキシ系レジンの使用可能温度が示された文献である。	○本文献は、乾式バスケットで使用される中性子遮蔽材と同等の組成であるエポキシ系レジンの使用可能温度であり、参考文献として妥当である。	○本文献は、乾式バスケットで使用される金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面積の外径(φ6.1mm)は、乾式バスケットの一次蓋及び二次蓋のガスケット断面積(φ10mm)よりも小さい。さらに、試験におけるガスケット部の温度(約130°C~140°C)は、乾式バスケットの設計貯蔵期間中の熱解析結果で得られた金属ガスケット部温度(約110°C)より高い。したがって、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットにおいて、乾式バスケットの設計貯蔵期間中の環境より厳しい条件で得られた結果であり、参考文献として妥当である。
2				三菱重工(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).	三菱重工製の乾式バスケット(MSF-21P型)のバスケットに用いるアルミニウム合金(MB-A3004-H112)の設計用強度及び物性値、並びに強度設計における設計基準値の認定根拠がまとめられている。アルミニウム合金は設計貯蔵期間中の強度低下を考慮する必要があるが、設計貯蔵期間中の熱はごく露条件を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡し、設計貯蔵期間中の熱ばく露を適切に考慮した設計用強度を規定している。	○本文献には、乾式バスケットのバスケットに用いるアルミニウム合金と同じ材料であり、同じ設計貯蔵期間が考慮された設計用強度及び物性値が示されている。アルミニウム合金の温度範囲は乾式バスケットの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。	
3				総合新エネルギー調査会 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「金属製乾式バスケットを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式バスケットとその収納物の長期健全性について」, (2009).	貯蔵期間中の中性子照射量は $10^{15} \sim 10^{16} \text{cm}^{-2}$ 程度と評価されており、炉内照射に伴う中性子照射量 $10^{13} \sim 10^{14} \text{cm}^{-2}$ に比べて無視できるものであり、貯蔵中の中性子照射は機械特性に影響しないと評価する。 ・クリープ 国内で照射された照射済燃料4被覆管を用いたクリープ試験が実施され、1%以上の変形能力を有することが確認されている。設計貯蔵期間中には温度を制限することによりクリープひずみが1%以下に制限でき、クリープ破損を防止することができる。 ・照射硬化 被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下するが、高温条件に長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。約300°Cでは照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている。 ・水素化物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生している。照射被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械特性試験を行い、被覆管温度を275°C以下、周方向応力を100MPa以下に制限することにより、機械特性の劣化を防止することができる。 ・応力腐食割れ 腐食性雰囲気を持った条件におけるジルカロイ4のSCC発生のおよび応力は200MPa程度であり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて低いことから、SCCは発生しない。	○本文献には、乾式バスケットに収納するPWR39GWdHおよび48GWdH燃料を対象とし、実燃料と同じ材料を用いた試験結果に基づく評価結果である。また、本文献結果に示す中性子照射量及び燃焼度等の試験条件は、乾式バスケットの設計貯蔵期間中の環境を包絡して得られた結果であるため、参考文献として妥当である。	
4				・Dassault Systemes, "ABAQUS Analysis User's Manual(6.12)", (2012).	ABAQUSコード ¹⁾ は、米国Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在はDassault-Systemes	○(使用マニエールのため、省略)	
5				別添4 3.使用する解析コード (b)ABAQUSコード	別添4 3.使用する解析コード (b)ABAQUSコード	○(使用マニエールのため、省略)	

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

7	別添 4 3.使用する解析コード (b)ABAQUS コード	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。 <16条-別添 4(除熱)-37,39 ページ> 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。	・「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立-キャスクの伝熱特性評価-」(一財)電力中央研究所(1993)。	使用済燃料の模擬物を取納した寸大キャスクの伝熱試験(貯蔵時)に対して、ABAQUS コードを用いた計算結果(キャスク各部温度及び燃料貯蔵管温度)が測定結果とよく一致した。	本解析に使用する ABAQUS コードが適切に検証されていることを示す文献であり、参考文献として妥当である。
---	--------------------------------------	---	--	---	--

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
1	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器的長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<p><16条-38~40ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【照射影響】 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼については、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない。設計貯蔵期間中の中性子照射量は 5.9×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。 (2) バスケット 【照射影響】 バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポータに使用する炭素鋼 (MSP-32P 型) は、中性子照射量が 10^{16} n/cm² まで顕著な機械的特性変化は見られない。設計貯蔵期間中の中性子照射量は 3.3×10^{15} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。 (4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー 【照射影響】 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、中性子照射量が 10^{16} n/cm² までは、顕著な機械的特性変化は見られない。設計貯蔵期間中の中性子照射量は、外筒では 3.3×10^{15} n/cm²、蓋部中性子遮蔽材カバーでは 5.9×10^{14} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。</p>	<p>"An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys", Journal of Nuclear Materials, Vol. 210. (1994).</p>	<p>炭素鋼は、$-30^{\circ}\text{C} \sim 375^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、ステンレス鋼は、$-30^{\circ}\text{C} \sim 425^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は、$-30^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。 ・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー) ・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバー) ・GLFI (胴、一次蓋、二次蓋) ・SNB23-3 (蓋ボルト)</p>	<p>炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼と同等の組成の鋼への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献結果には、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (10^{16} n/cm²) を上回る中性子照射量 (10^{16} n/cm²) と遷移温度変化の関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。</p>	
2	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器的長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<p><16条-38~41ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【熱的影響】 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、設計用強度・物性値が規定されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。 (2) バスケット 【熱的影響】 バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金、並びにバスケットサポータに使用する炭素鋼 (MSP-32P 型) は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。 (3) トラニオン 【熱的影響】 トラニオンに使用するステンレス鋼は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。 (4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー 【熱的影響】 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、設計用強度・物性値が規定されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。 (5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー 【熱的影響】 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、設計用強度・物性値が規定されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。</p>	<p>(一) 社日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 材料規格 (JSME S.NJ-2012)」, (2012).</p>	<p>炭素鋼は、$-30^{\circ}\text{C} \sim 375^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、ステンレス鋼は、$-30^{\circ}\text{C} \sim 425^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は、$-30^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。 ・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー) ・SUS304 (下部端板、底部遮蔽材カバー) ・GLFI (胴、一次蓋、二次蓋) ・SNB23-3 (蓋ボルト)</p>	<p>○本文献は、乾式キャスク各部位の設計用強度及び物性値の規格値、文献概要欄に示す各材料の温度範囲は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。</p>	

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料 記載箇所	記載内容	参考文献 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
3	2.6 使用済燃料乾式貯蔵 容器の長期健全性 について 2.6.2 適合性について	<16 条-39 ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【化学的影響】 乾式キヤスク内部の使用済燃料を閉じ込める空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾 燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入し、貯蔵する設計としている。したがって、 不活性雰囲気維持されるため、残留水分 (10 wt%) を考慮しても腐食の影響はない。 ⁽⁹⁾	(国際規格/研究機関論文等) 日本アルミニウム協会「アルミニウムハンドブック第 7 版」, (2007).	炭素鋼の試験片を淡水に完全に浸漬した条件において 16 年間の浸漬試験の結果、腐食速度は 18 μm/年である。	参考文献として妥当である ○本文献結果は、炭素鋼の試験片を淡水の湖に完全に 浸漬した条件のもと得られた結果である。乾式キヤ スクの設計貯蔵期間中の環境は、残留水分が限られ ていることに加え、酸素が連続的に供給されないこ とから、より厳しい条件下で得られた結果であるた め、参考文献として妥当である。
4	2.6 使用済燃料乾式貯蔵 容器の長期健全性 について 2.6.2 適合性について	<16 条-39,40 ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【化学的影響】 また、胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用済燃料を収納する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン 鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件において、仮に燃料破損率 1 % 相当の燃料棒内ガスの存 在を考慮しても、腐食の影響はない。 ⁽⁹⁾ (2) パスケット 【化学的影響】 また、MSF-32P 型のパスケットサポートに使用する炭素鋼は、設計貯蔵期間中の温度条 件において、仮に燃料破損率 1 % 相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、腐食の影響は ない。 ⁽⁹⁾	(独)原子力安全基盤機構、 「平成 15 年度 金属キヤ スク貯蔵技術検証試験 報告書 最終報告」, (2004).	アルミニウム (A1100) の性能について、10 年間海浜条 件で最大 0.13 μm/年程度であり、問題となる腐食 速度は最大 2.3 μm/年程度であり、この腐食速度が 60 年間維持されたとしても 138 μm 程度であり、問題となる腐食 速度ではない。容器底部の高濃度条件下 (20.5g/m ³) で も 8 μm 程度であり、60 年間の腐食量は 500 μm 程度 であり、問題となる腐食量ではない。 ・鉄系材料 (A305LF5) の腐食速度は、6 ヶ月間の腐食試 験 (ヨウ素ガス濃度 3g/m ³ ; 1% の燃料破損率相当) で は最大 2.3 μm/年程度であり、この腐食速度が 60 年間維持 されたとしても 138 μm 程度であり、問題となる腐食 速度ではない。容器底部の高濃度条件下 (20.5g/m ³) で も 8 μm 程度であり、60 年間の腐食量は 500 μm 程度 であり、問題となる腐食量ではない。 ・ステンレス鋼 (SUS304) は、腐食速度は 6 ヶ月ばく 腐食試験では最大 0.13 μm/年程度であり、この腐食速度が 60 年間維持されたとしても 7.8 μm 程度であり、問題とな る腐食量ではない。 ・アルミ系材料は、キヤスク内に残留する酸素が全てパス ケットの腐食に使用されたとしても、平均被膜厚さは 1 μm 以下である。	○本文献の試験は、金属ガスケットの外被材 (A1050P) と同等の材料で実施されている。また、 乾式キヤスクの金属ガスケットは、蓋と胴フランジ に囲まれた環境に設置され、二次蓋ガスケットの外 周に大気供給されにくいものに対して、本試験は大 気供給条件下で行われており、実機よりも保守的と いえる。以上のことから、参考文献として妥当であ る。 ○60 年間の平均浸食深さ (δ) は以下のとおり。 $\delta = \frac{d}{t} = \frac{4.052 \times 10^{-3} \times (60 \times 365.25 \times 24)^{\frac{1}{3}}}{10} = 0.33(\text{mm})$ ここで、 t: 浸漬時間 (Hr) K: 材料種や液温度などの環境条件により決まる 定数 (mm/Hr ^{1/3}) K は、10 年間の試験をもとに以下のとおり算出。 $K = \frac{d}{t^{\frac{1}{3}}} = \frac{0.18}{(10 \times 365.25 \times 24)^{\frac{1}{3}}} = 4.052 \times 10^{-3}$
5	2.6 使用済燃料乾式貯蔵 容器の長期健全性 について 2.6.2 適合性について	<16 条-39,40 ページ> (2) パスケット 【照射影響】 パスケットプレート及びびバスケットサポートに使用するアルミニウム合金、並びにバスケ ットサポートに使用する炭素鋼 (MSF-32P 型) は、中性子照射量が 10 ¹⁶ n/cm ² まで顕著 な機械的特性変化は見られない ⁽¹⁰⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる 箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.5 × 10 ¹⁵ n/cm ² であることから照射 脆化の影響はない。 【熱的影響】 パスケットプレート及びびバスケットサポートに使用するアルミニウム合金、並びにバスケ ットサポートに使用する炭素鋼 (MSF-32P 型) は、貯蔵状態における温度において、設	三菱重工(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).	アルミニウム合金は、中性子照射量が 10 ¹⁶ n/cm ² までは 未照射材との機械的特性変化の有意な差は見られな い。 ・アルミニウム合金は、-40℃~250℃の温度範囲におい て、設計用強度と物性値が規定されている。	○パスケットプレート及びびバスケットサポートに使 用するアルミニウム合金への中性子照射による機 械的特性への影響を示した文献であり、本文献に は、乾式キヤスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (10 ¹⁶ n/cm ²) を上回る中性子照射量と機械的特性 の関係が示されており、機械的特性への影響がない 中性子照射量の範囲を示すための参考文献として 妥当である。 ○本文献は、バスケットプレート及びびバスケットサポ ートに使用するアルミニウム合金の設計用強度及 び物性の規定値、設計用強度は、設計貯蔵期間中の

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

6	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	計用強度・物性値が規定 ²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温度性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。 なお、バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件 (250℃) を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するように設定しており、クリープによる設計貯蔵期間中の熱ばく露による強度低下を適切に考慮している ^{3), 4)} 。 (2) バスケット 【照射影響】 また、中性子吸収材に使用するほう素添加アルミニウム合金については、中性子吸収材中のほう素の設計貯蔵期間中の減損割合は 10 ⁻⁶ 程度※であり無視し得るほど小さいため、磁界防止機能への影響はない。 ※：以下のとおり算出。 B-10 減損割合 = $\phi \times \phi \times t$ (n) ここで、 σ : B-10 の熱中性子吸収断面積 (3840barn = 3.840 × 10 ⁻²¹ (cm ²)) ⁵⁾ B-10 の反応断面積(熱中性子領域 (0.025eV))。 ϕ : 全中性子束 7.977 × 10 ⁵ [MSF-24P 型](n/cm ² /s) 7.613 × 10 ⁵ [MSF-32P 型](n/cm ² /s) 遊離解析結果(燃料集合体領域の最大値)。保守的に貯蔵初期の値を 60 年一定とする。 t : 照射期間 (60 年間 = 1.9 × 10 ⁹ (s))	"Curves and Tables of Neutron Cross Sections in JENDL-3.3", JAERI-2002-020.(2002).	B-10 (ほう素 10) の熱中性子領域 (0.025eV) における全断面積が示された文献。	熱ばく露条件 (250℃) を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するように設定しており、設計貯蔵期間中の熱ばく露による強度低下を適切に考慮している。また、温度範囲 (-40℃ ~ 250℃) は乾式キャスク設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。 ○本文献は、中性子吸収材に含まれる B-10 の全断面積であり、吸収に加え散乱を含むものであり、保守的な断面積を選定しており、参考文献として妥当である。
7	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 40 ページ> (2) バスケット 【熱的影響】 なお、バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件 (250℃) を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するように設定しており、クリープによる設計貯蔵期間中の熱ばく露による強度低下を適切に考慮している ^{3), 7)} 。	「A3004-H112 合金の機械的性質に及ぼす長時間加熱および焼きなましの影響」、軽金属、第 68 巻 第 12 号、(2018)。	アルミニウム合金の強度は高温保持によつて低下する。設計強度は、この低下の影響を適切に反映する必要がある。キャスクのバスケット用構造材料である A3004-H112 材合金の引張特性に及ぼす熱処理条件の影響、各強化因子の引張特性への寄与を確認し、設計強度の設定に必要な長時間加熱と焼きなまし条件を見出した。	○本文献は、バスケットプレート及びバスケットサポータに使用するアルミニウム合金の設計用強度及び物性の規定するための適切な試験条件を示している。本文献で対象とした材料は乾式キャスクと同じ材料であり、また、温度条件は乾式キャスクの温度を包絡しており、参考文献として妥当である。
8	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 40 ページ> (2) バスケット 【化学的影響】 バスケットが置かれた空間は、使用済燃料取納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入する設計としている。したがって、不活性雰囲気は維持されるため、残留水分 (10 wt%) を考慮しても腐食の影響はない ^{8), 9)} 。 (9) 使用済燃料被覆管 【化学的影響】 残留水分が 10 wt% 以下の不活性雰囲気にある燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量は無視し得るほど小さい ⁸⁾ 。ため、健全性に影響はない。	(一社)日本原子力学会標準委員会「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 (AFSJ-SC-F002：2010)」、(2010)。	・残留水分が 10% (質量) 以下の不活性ガス雰囲気にあるアルミニウム合金、ホウ素添加アルミニウム合金は、腐食を考慮する必要はない。 ・金属キャスク内部の残留水分を 10% (質量) 以下に制限すれば、燃料被覆管の酸化量や水素吸収量はわずかなとなり、被覆管の健全性に影響を与えない。	○本文献結果は、乾式キャスクと同じ真空乾燥後の状態を基にした結果であるため、参考文献として妥当である。
9	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 40.41 ページ> (3) トラニオン 【照射影響】 トラニオンに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10 ¹⁷ n/cm ² までは、顕著な機械的特性変化は見られない ¹⁰⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 5.9 × 10 ¹⁴ n/cm ² であることから照射脆化の影響はない。 (5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー 【照射影響】 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10 ¹⁷ n/cm ² までは、顕著な機械的特性変化は見られない ¹⁰⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 8.2 × 10 ¹³ n/cm ² であることから照射脆化の影響はない。	「304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果 (その 2) - 熱劣化材の SCC 感受性及び中性子照射影響-1、(-1) 電力中央研究所、(1997)。	ステンレス鋼の照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10 ¹⁷ n/cm ² 以下では未照射材に対する機械的特性 (0.2%耐力及び一様伸び) の有意な差はみられない。	○本文献結果は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて金属キャスク内部体積及び燃料有効部の被覆管表面積が同等の条件で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。 ○ステンレス鋼への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献結果には、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (10 ¹⁶ n/cm ²) を上回る中性子照射量 (10 ¹⁸ n/cm ²) と 0.2% 耐力及び一様伸びの関係が示されており、機械的特性への影響がない中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

10	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<p><16 条 - 40.41 ページ> (3) トラニオン 【化学的影響】 トラニオンの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熟劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。¹⁰⁾ (4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー 【化学的影響】 外筒の内面及び蓋部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熟劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。¹⁰⁾ (5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー 【化学的影響】 下部端板の内面及び底部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材（レジン）に接しており、中性子遮蔽材の熟劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。¹⁰⁾</p>	<p>(公社)腐食防食協会編、「腐食・防食ハンドブック CD-ROM 版 第2版」、丸善（株）、(2005).</p>	<p>淡水中における炭素鋼の腐食における酸化剤における炭素鋼の腐食は水中に溶解した酸素である。水中の炭素鋼の腐食速度は溶解酸素濃度に比例して増大する。ステンレス鋼については、全面腐食のほか、局部腐食（孔食他）がある。局部腐食が通常問題となるのは特に塩化物を含む環境である。淡水中ではステンレス鋼は不働態膜を形成するため炭素鋼に比べ全面腐食の程度は小さい。</p>	<p>○炭素鋼及びステンレスの淡水環境での腐食影響を示した文献である。中性子遮蔽材の熟劣化で生じる水分と同じ淡水環境での腐食影響を示すものであり、参考文献として妥当である。</p>
----	--	---	---	---	--

使用済燃料乾式貯蔵容器的設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)
1.1	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器的長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<p><16条-41ページ> (6) 中性子遮蔽材 【照射影響、熱的影響、化学的影響】 中性子遮蔽材(レジン)は、中性子照射量が10^{15} n/cm^2までは、顕著な質量減損は見られないことが示されており^{10, 13, 14}、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は$1.6 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$であることから照射脆化の影響はない。 【熱的影響、化学的影響】 中性子遮蔽材は、設計貯蔵期間中の熱的(化学的)影響により質量減損(2%程度)が発生¹⁰するため、遮蔽評価上、保守的に2.5%の質量減損を考慮する。</p>	(財)原子力発電技術機構、平成14年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キヤスタ貯蔵技術検証試験)報告書、(2003)。	閉鎖系環境でのエボキシ系レジンの加熱試験及び照射試験により、エボキシ系レジンの質量減損量は温度及び加熱時間を基に劣化パラメータを用いた整理による以下の式で評価ができる。 $\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2$ Δw : 中性子遮蔽材の質量減損率 (%) E_p : 劣化パラメータ $T \times (77.6 + \ln(t))$ T : 中性子遮蔽材加熱時間 (h)	○本文献での試験は、乾式キヤスタの中性子照射材と同じエボキシ系レジンを用い、乾式キヤスタと同じ閉鎖系条件で行われた。また、本文献の結果に示される質量減損の式に含まれる劣化パラメータの範囲(約38000)は、乾式キヤスタの設計貯蔵期間における劣化パラメータ(24P:37140-32P:36777)を包絡しており、参考文献として妥当である。 ○評価式による計算結果は以下の通りとなる。 24P : $5.69 \times 10^{-4} \times (136+273) \times (77.6 + \ln(24 \times 365 \times 60)) - 19.2 \approx 2.0 \%$ 32P : $5.69 \times 10^{-4} \times (132+273) \times (77.6 + \ln(24 \times 365 \times 60)) - 19.2 \approx 1.8 \%$ これを踏まえ、レジンは保守的に2.5%減損することとして遮蔽評価を実施している。	
1.2	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器的長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<p><16条-41.42ページ> (7) 金属ガスケット 【照射影響】 金属ガスケットに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、中性子照射量がそれぞれ10^{16} n/cm^2又は10^{14} n/cm^2までは、顕著な機械的特性変化は見られない^{10, 14}ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は$2.0 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$であることから照射脆化の影響はない。</p>	"Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment". Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).	閉鎖系環境でのエボキシ系レジンの照射材(中性子照射量 10^{16} n/cm^2)及び未照射材の加熱試験の結果、照射材と未照射材で質量減損率に有意な差は認められなかった。以上ことから、照射による劣化は有意でなく、熱的劣化が支配的である。	○本文献での試験は、乾式キヤスタの中性子照射材と同じエボキシ系レジンを用い、乾式キヤスタと同じ閉鎖系条件で行われている。中性子照射量は、乾式キヤスタの貯蔵中と同等であり、参考文献として妥当である。	
1.3	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器的長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<p><16条-41.42ページ> (7) 金属ガスケット 【照射影響】 金属ガスケットに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、中性子照射量がそれぞれ10^{16} n/cm^2又は10^{14} n/cm^2までは、顕著な機械的特性変化は見られない^{10, 14}ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は$2.0 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$であることから照射脆化の影響はない。</p>	"Reactor Irradiation Effects on Al 1100". Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol. 24, (1981).	金属ガスケットに使用するアルミニウムの照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10^{16} n/cm^2 以下では未照射材に対する機械的特性(引張強さ及び伸び)の有意な差はみられない。	○金属ガスケットに使用されているアルミニウムに対する、中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献には、乾式キヤスタの設計貯蔵期間中の中性子照射量(10^{16} n/cm^2)を上回る中性子照射量(10^{16} n/cm^2)と機械的特性の関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。	
1.4	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器的長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<p><16条-41.42ページ> (7) 金属ガスケット 【照射影響】 金属ガスケットに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、中性子照射量がそれぞれ10^{16} n/cm^2又は10^{14} n/cm^2までは、顕著な機械的特性変化は見られない^{10, 14}ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は$2.0 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$であることから照射脆化の影響はない。</p>	"Cladding and Structural Materials Semi-Annual Progress Report", HEDL-TME 75-77, (1975).	金属ガスケットに使用するニッケル基合金の照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10^{21} n/cm^2 以下では未照射材に対する機械的特性(引張強さ及び降伏応力)の有意な差はみられない。	○金属ガスケットに使用されているニッケル基合金に対する、中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献には、乾式キヤスタの設計貯蔵期間中の中性子照射量(10^{16} n/cm^2)を上回る中性子照射量(10^{21} n/cm^2)と機械的特性の関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。	

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献	文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)
1 5	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 42 ページ> (7) 金属ガスケット 【熱的影響】 また、高温時の健全性についてラーション・ミラー・パラメータ (LMP) で評価すると、150℃では100年以上閉じ込め機能を維持できる ¹⁰⁾ 。	<16 条 - 42 ページ> (7) 金属ガスケット 【熱的影響】 さらに、設計貯蔵期間中の温度条件において長期密封性能試験 (19 年以上) が実施され、閉じ込め機能が維持されることが確認されている ¹⁰⁾ 。	「使用済燃料貯蔵キヤスクの長期密封性能評価手法の開発」, 日本原子力学会誌, Vol.38, No.6, (1996).	・金属ガスケット (外被材: アルミニウム、内被材及びコイルスプリング: ニッケル基合金) の応力緩和による漏えい率の影響について、金属ガスケットの LMP が約 11.0×10^3 を超えなければ貯蔵初期の漏えい率が維持される。 ・LMP は以下の式のとおり示され、LMP = 11.0×10^3 、温度 150℃ (273.15 + 150K) とすると、時間 t は約 190 年となる。 LMP = $\pi (20 \times \log(t))$ T: 温度 (K) t: 時間 (h)	○本文献での試験は、乾式キヤスクで使用される金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、試験に用いた金属ガスケット断面の外径 (φ 5.5mm) は、乾式キヤスクの一次蓋のカバープレート用金属ガスケットの断面外径 (φ 5.6mm) と同等である。方、次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径 (φ 10mm) よりも小さい。したがって、乾式キヤスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて、バルブカバー用金属ガスケットに対しては同等の条件下で得られた結果であり、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットに対してはより厳しい条件下で得られた結果である。さらに、乾式キヤスクの設計貯蔵期間を上回る金属ガスケットの LMP と漏えい量の関係が示されており、参考文献として妥当である。	
1 6	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 42 ページ> (7) 金属ガスケット 【熱的影響】	<16 条 - 42 ページ> (7) 金属ガスケット 【熱的影響】	「一助」電力中央研究所, 「平成 21 年度 リサイクル燃成 21 年度 燃料貯蔵技術調査報告書」, (2010).	金属ガスケット (外被材: アルミニウム、コイルスプリング: ニッケル基合金) の性能について、ガスケット部の温度を約 160℃で一定とし、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から 19 年以上が経過しても密封部の漏えい率の変化は小さく、良好な密封性能を保持していることが確認された。	○本文献での試験は、乾式キヤスクで使用される金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面の外径 (φ 6.1mm) は、乾式キヤスクの一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径 (φ 10mm) よりも小さい。さらに、試験におけるガスケット部の温度 (約 130℃ ~ 140℃) は、乾式キヤスクの設計貯蔵期間中の熱解析結果で得られた金属ガスケット部温度 (約 110℃) より高い。したがって、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットにおいて、乾式キヤスクの設計貯蔵期間中の環境より厳しい条件下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。	
1 7	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 42 ページ> (7) 金属ガスケット 【化学的影響】	<16 条 - 42 ページ> (7) 金属ガスケット 【化学的影響】	小崎明朗, 「使用済燃料貯蔵中の腐食性に関する海外動向」, (株) 日本原子力情報センター主催セミナー「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (1998).	金属ガスケット (外被材: アルミニウム、コイルスプリング: ニッケル基合金) の性能について、実機より厳しい環境である塩水噴霧環境において 3 年間漏えい率に変化がないことを確認している。	○本文献での試験は、乾式キヤスクで使用される金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、乾式キヤスクの設計貯蔵期間中の環境より厳しい塩水噴霧環境下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。	
1 8	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 42 ページ> (8) 伝熱フィン 【照射影響】	<16 条 - 42 ページ> (8) 伝熱フィン 【照射影響】	"Low-Lead Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys", ASTM STP888, (1986).	鋼の照射材を用いた硬さ試験の結果、中性子照射量が 10^{16} n/m ² 以下では未照射材に対する機械的特性 (ビッカース硬さ) の有意な差はみられない。	○本文献は、伝熱フィンに使用している鋼への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献は、乾式キヤスクの設計貯蔵期間中の中性子線量 (10^{15} n/cm ²) を上回る中性子線量 (10^{16} n/cm ²) とビッカース硬さの関係を明示しており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。	
1 9	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 42 ページ> (8) 伝熱フィン 【熱的影響】	<16 条 - 42 ページ> (8) 伝熱フィン 【熱的影響】	「一助」日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267: 2015)」, (2015).	(一助) 日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267: 2015)」, (2015).	○本文献は、鋼の設計用強度及び物性値の規格値。この温度範囲 (-40℃ ~ 200℃) は乾式キヤスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。	
2 0	2.6 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について 2.6.2 適合性について	<16 条 - 42 ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】	<16 条 - 42 ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】	(公社) 腐食防食協会編, 「材料探査学入門」, 丸善 (株), (1993).	鋼の電極電位は炭素鋼 (鉄) に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である ²⁰⁾ ことから、鋼は腐食することなく、炭素鋼が選択的に腐食される。	○本文献は、金属の熱力学的基準を示す基礎データであり、参考文献として妥当である。	

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	参考文献として (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)
2.1	使用済燃料乾式貯蔵容器 の長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<16条-43ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】 伝熱フィンと鋼及び外筒の接合部において異種金属接触による腐食促進の可能性があるが、密閉静止した淡水環境における鋼が接続した鋼の腐食試験において鋼単独の場合の腐食速度と同程度になることが確認されている ²¹⁾ 。	(国際規格/研究機関論文等) 能登谷武紀、密閉系淡水における鋼-銅系のガルバニック腐食、伸縮技術研究会誌 33巻、(1994)。	密閉した水道水において鋼を接続した鋼の腐食試験の結果、鋼の腐食速度は1週間以内に約2桁減少した。鋼を接続した鋼の腐食速度は、比液量、表面積比、溶液の電気伝導率などに依存するが、腐食反応に伴う溶存酸素の消費により、鋼の腐食速度は短時間に大幅に減少する。	参考文献として(以下の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)
2.2	使用済燃料乾式貯蔵容器 の長期健全性について 2.6.2 適合性について	安全審査資料	<16条-43ページ> (9) 使用済燃料被覆管 【照射影響】 燃料被覆管に使用するジルカロイは、設計貯蔵期間中の中性子照射量が $1.5 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ であり、炉内の中性子照射量 $(10^{21} \sim 10^{22} \text{ n/cm}^2)$ に対して十分低いことから、照射の影響は無視し得る ²²⁾ 。 【熱的影響】 熱による経年変化としては、クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損、照射硬化の回復による燃料被覆管の低下、燃料被覆管中の水蒸気物再配向による燃料被覆管の脆化、及び応力腐食割れについて評価する必要がある ²³⁾ 。 クリープひずみの進行については、予測式に基づき累積クリープひずみが1%以下となるよう制限することで防止できる ²⁴⁾ 。ことが示されており、燃料被覆管中の水蒸気物再配向に係る制限以内では、クリープひずみが1%を超えない。 照射硬化の回復については、国内軽水炉で照射されたPWR照射済被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果では、硬化の回復のしきい値は300℃近傍 ²⁵⁾ であり、しきい値以下であれば照射硬化の回復の可能性は小さいため、使用済燃料被覆管の温度を制限することにより防止する。 燃料被覆管中の水蒸気物再配向については、国内の軽水炉で照射されたPWR燃料の燃料被覆管を用いた水蒸気物再配向試験及び機械的特性試験の結果、被覆管の周方向応力が100MPa以下 ²⁶⁾ と求められており、燃料被覆管温度と周方向応力を制限することによって、機械的特性の劣化を防止する。 応力腐食割れについては、燃料棒ベレットの温度上昇による腐食性核分裂生成物の放出はなく、また、原子炉運転中に燃料棒ベレットから放出されたヨウ素はヨウ化セシウムとして安定に存在することから応力腐食割れが発生する化学的雰囲気となっていない ²⁷⁾ 。なお、腐食性雰囲気での応力腐食割れ試験でジルカロイ-4の応力腐食割れのしきい応力は200MPaであり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて十分低い ²⁸⁾ 。	総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部 核燃料サイクル開発機構中間貯蔵施設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)。	・照射劣化 貯蔵期間中の中性子照射量は $10^{21} \sim 10^{22} \text{ cm}^2$ 程度と評価されており、炉内照射に伴う中性子照射量 $10^{21} \sim 10^{22} \text{ cm}^2$ に比べて無視できるものであり、貯蔵中の中性子照射は機械特性に影響しない ²⁹⁾ と評価する。 ・クリープ 国内で照射された照射済ジルカロイ4被覆管を用いたクリープ試験が実施され、1%以上の変形能力を有することによりクリープひずみが設計貯蔵期間中には温度を制限することによりクリープひずみが1%以下に制限でき、クリープ破損を防止することができる。 ・照射硬化 被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下するが、高温条件に長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。約300℃では照射硬化の可能性は小さいことが確認されている。 ・水蒸気物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生している。照射被覆管を用いた水蒸気物再配向試験及び機械特性試験を行い、被覆管温度を275℃以下、周方向応力を100MPa以下に制限することにより、機械特性の劣化を防止することができると評価されている。 ・応力腐食割れ 腐食性雰囲気がある条件下におけるジルカロイ4のSCC発生のしきい応力は200MPa程度であり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて低いことから、SCCは発生しない。	○本文献には、乾式キャスクに収納するPWR39GWd/tおよび48GWd/t燃料を対象とし、実燃料と同じ材料を用いた試験結果に基づき詳細な結果である。また、本文献結果に示す中性子照射量及び燃焼度等の試験条件は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境を包絡する条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《想定事象》

番号	記載箇所	安全審査資料	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	参考文献 文献概要	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当である と考えている。)																																										
1	2.7 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 2.7.3 通常取扱いは想定するべき事象の評価	安全審査資料 第 2.7-17 表 使用済燃料集合体の応力評価結果	<p><16 条 - 99 ページ> 第 2.7-17 表 使用済燃料集合体の応力評価結果</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>想定事象 における 衝撃加速度</th> <th>0.3g 落下 における 衝撃加速度</th> <th>0.3g 帯 下 における 発生応力</th> <th>解析基準</th> <th>解析基準値 (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a. 検査架台への衝突</td> <td>3.1g^{max}</td> <td>21.4g (水平落下)</td> <td>200 MPa</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>b. 貯蔵架台への衝突</td> <td>3.1g^{max}</td> <td>28.6g (頭部垂直 落下)</td> <td>118 MPa</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>d. 横倒し時の衝突</td> <td>1.1g^{max}</td> <td>21.4g (水平落下)</td> <td>200 MPa</td> <td>Sy</td> <td>595 MPa¹⁾ ($\sigma_{90}(-4, 205^{\circ}\text{C})$)</td> </tr> <tr> <td>e. 二次落下の衝突</td> <td>1g^{max}</td> <td>28.6g (頭部垂直 落下)</td> <td>118 MPa</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>f. 緩衝体 (上部) の衝突</td> <td>1g^{max}</td> <td>21.4g (水平落下)</td> <td>200 MPa</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>f. 緩衝体 (下部) の衝突</td> <td>1g^{max}</td> <td>21.4g (水平落下)</td> <td>200 MPa</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	項目	想定事象 における 衝撃加速度	0.3g 落下 における 衝撃加速度	0.3g 帯 下 における 発生応力	解析基準	解析基準値 (MPa)	a. 検査架台への衝突	3.1g ^{max}	21.4g (水平落下)	200 MPa			b. 貯蔵架台への衝突	3.1g ^{max}	28.6g (頭部垂直 落下)	118 MPa			d. 横倒し時の衝突	1.1g ^{max}	21.4g (水平落下)	200 MPa	Sy	595 MPa ¹⁾ ($\sigma_{90}(-4, 205^{\circ}\text{C})$)	e. 二次落下の衝突	1g ^{max}	28.6g (頭部垂直 落下)	118 MPa			f. 緩衝体 (上部) の衝突	1g ^{max}	21.4g (水平落下)	200 MPa			f. 緩衝体 (下部) の衝突	1g ^{max}	21.4g (水平落下)	200 MPa			<p>「Proving Test on the Reliability of PWR 15×15 Fuel Assemblies Through Three Reactor Cycles in Japan」, Proceeding of the International Topical Meeting on LWR Fuel Performance April 17-20, (1998).</p>	<p>国内高燃焼度 PWR 燃料被覆管のバンクチャーター試験やペレットのガス放出率、酸化膜厚等の各種照射後試験結果を記載している。その中で、照射後の燃料被覆管の機械特性について、中性子照射量と温度をパラメータとして、引張強度、0.2%耐力及び伸びのグラフが示されている。</p>	<p>参考文献として妥当性(以下の観点から、適用することが妥当である)と考えている。 ○国内の照射後の PWR 燃料の被覆管に対して取得された 0.2%耐力を含む機械特性データであり、左記の値を用いることは妥当である。</p>
項目	想定事象 における 衝撃加速度	0.3g 落下 における 衝撃加速度	0.3g 帯 下 における 発生応力	解析基準	解析基準値 (MPa)																																											
a. 検査架台への衝突	3.1g ^{max}	21.4g (水平落下)	200 MPa																																													
b. 貯蔵架台への衝突	3.1g ^{max}	28.6g (頭部垂直 落下)	118 MPa																																													
d. 横倒し時の衝突	1.1g ^{max}	21.4g (水平落下)	200 MPa	Sy	595 MPa ¹⁾ ($\sigma_{90}(-4, 205^{\circ}\text{C})$)																																											
e. 二次落下の衝突	1g ^{max}	28.6g (頭部垂直 落下)	118 MPa																																													
f. 緩衝体 (上部) の衝突	1g ^{max}	21.4g (水平落下)	200 MPa																																													
f. 緩衝体 (下部) の衝突	1g ^{max}	21.4g (水平落下)	200 MPa																																													
1	2.7 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 2.7.3 通常取扱いは想定するべき事象の評価	安全審査資料 第 100-103 ページ>	<p><16 条 - 100,103 ページ> (1) 検査架台への衝突 検査架台への衝突時には、第 2.7-23 図に示す 2 枚の足場板の梁が圧縮変形するとして検査架台衝突部のばね剛性 K₁ は次式²⁾より算出する。 (3) 横倒し時の衝突 横倒し時の衝突時には、第 2.7-25 図に示すたて起こし架台の脚受け部が圧縮変形するとして輸送架台衝突部のばね剛性 K₃ は次式²⁾より算出する。</p>	<p>(株)府風航、材料力学の基礎、(1991)</p> <p>断面が一樣な棒の両端に力 W が作用した際の変形量 λ は、以下の関係である。 $\lambda = \frac{\beta}{EA} W$ ここで、λ: 変形量、β: 棒の長さ、E: 縦弾性係数、A: 断面積</p>	<p>○左記の式は、一樣断面の構造物に力が作用した時の場合の式である。ここで、ばね剛性 K₁, K₃ の算出においては、検査架台又はたて起こし架台の一部を一樣断面な構造物とみなして計算を行っているっており、左記の式を用いることは妥当である。 ここで、左記の式を変形すると、 $W = \frac{EA}{\beta} \lambda$ また、$W = K\lambda$ であることから、 $K = \frac{EA}{\beta}$ で求められる。</p>																																											

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《監視》

番号	安全審査資料		文献名 (国際規格研究機関論文等)	参考文献	参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えられている。)
	記載箇所	記載内容			
1	2.8 使用済燃料乾式貯蔵容器 蓋間圧力等の監視について 2.8.2 適合性について	<16条-117ページ> (3) 海外事例及び文献を踏まえた考察 a. サリー発電所における密封異常 (アメリカ) ¹⁾	(国際規格研究機関論文等) 資源エネルギー庁、「使用済燃料乾式貯蔵施設 (中間貯蔵施設) に係る技術検討報告書」, (2000).	サリー発電所 (アメリカ) で貯蔵中の TN-32 キャスクにおいて、2000年5月31日に、加圧している2重の金属ガスケット間の圧力が低下したため、Heリークテストを実施した結果、2次側の金属ガスケットがリークしていた。1次側の金属ガスケットにはリークはなかった。原因は、防護カバーを貫通している電気ケーブル周囲の金属シール部分から雨水が防護カバー内に入り、蓋部の金属ガスケット外側が腐食したためである。	○TN-32に用いられている金属ガスケットは同じ材料キャスクで使用される金属ガスケットと同じ材料である。また、金属ガスケットの温度や周囲気体 (大気) は同等と考えられることから、本文献を参考とすることは妥当である。
2	2.8 使用済燃料乾式貯蔵容器 蓋間圧力等の監視について 2.8.2 適合性について	<16条-118ページ> (3) 海外事例及び文献を踏まえた考察 b. 航空機エンジンの衝突における評価 (電力中央研究所) ²⁾	(一財) 電力中央研究所、 「航空機エンジンの水平衝突荷重に対する金属キャスクの密封性能評価」, (2010)	使用済燃料貯蔵施設に民間航空機エンジンが買入した場合を想定し、水平方向から衝撃荷重を受ける金属キャスクの密封性能の検証を目的に水平衝突試験を実施した。215 縮尺キャスクに、高速飛来物を 57.3m/s で水平衝突させ、キャスク内部からの He 漏洩率を測定した。漏洩率は衝突直後に 4.0×10 ⁻⁶ Pa・m ³ /s まで上昇したが、試験後 20 時間経過時点で約 1×10 ⁻⁶ Pa・m ³ /s に収束した。本結果を用いて実物大キャスクの漏洩率を評価すると 3.5×10 ⁻⁶ Pa・m ³ /s となり、衝突後、直ちに密封性能に影響を与えることはないものと推察される。	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用される金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、率は我々機大 (φ10mm) の値に換算されている。さらに、試験に用いられた金属キャスク蓋及び閉フランジの形状は乾式キャスクと同様の構造及び材料であることから、本文献の試験結果を参考とすることは妥当である。
3	2.8 使用済燃料乾式貯蔵容器 蓋間圧力等の監視について 2.8.2 適合性について	<16条-118.40ページ> (3) 海外事例及び文献を踏まえた考察 c. 乾式キャスク落下時の漏えい評価 (電力中央研究所) ³⁾	(一財) 電力中央研究所、 「金属キャスク落下時瞬時漏えい評価」, (2006)	貯蔵施設内での事故を想定して、コンクリート床板上への高さ 1m から水平落下試験及び後部トランプオンを回転中心とした水平状態高さ 1m からの回転衝突試験を実施した。落下試験時の最大漏洩率 (試験前: 一次蓋・二次蓋との約 10 ⁻⁶ Pa・m ³ /s) は、水平落下試験の一次蓋で 2.4×10 ⁻⁶ Pa・m ³ /s、二次蓋で 2.9×10 ⁻⁶ Pa・m ³ /s、回転衝突試験の一次蓋で 3.9×10 ⁻⁶ Pa・m ³ /s、二次蓋で 8.4×10 ⁻⁶ Pa・m ³ /s であり、いずれも貯蔵時の基準漏洩率 10 ⁻⁶ Pa・m ³ /s を上回るものではない。また、漏洩率は、24 時間以内に初期値に回復することを確認した。	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用される金属ガスケットと同じ材料、断面外径 (φ10mm) で行われている。さらに、試験に用いられた金属キャスクの重量、構造及び材質は乾式キャスクと同等であることから、本文献の試験結果を参考とすることは妥当である。

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密または防護上の機密に属しますので公開できません。

参考2

伊方発電所 乾式貯蔵施設に係る
原子力規制委員会の審査方針を踏まえた
影響評価

伊方発電所 乾式貯蔵施設に係る原子力規制委員会の審査方針を踏まえた影響評価

第8回原子力規制委員会で示された以下の審査方針

- ① キャスクのみで地震や竜巻等の外力に対して、安全機能が維持可能であることを確認する。
 - ② 敷地境界における実効線量評価について、建屋が無い状態で過度の保守性を排した現実的な評価により、建屋としての遮へい機能の必要性を確認する。
 - ③ キャスクのみで、安全機能が維持可能であり、また、建屋としての遮へい機能が必要ないことが確認できれば、審査上、建屋の安全上の機能、性能は考慮せず、建屋が損壊したとしても、キャスクの安全機能への波及的影響を及ぼさないことのみを確認する。
- を踏まえ、以下の図1に示すフローに従い、乾式キャスクに対する影響評価を示す。

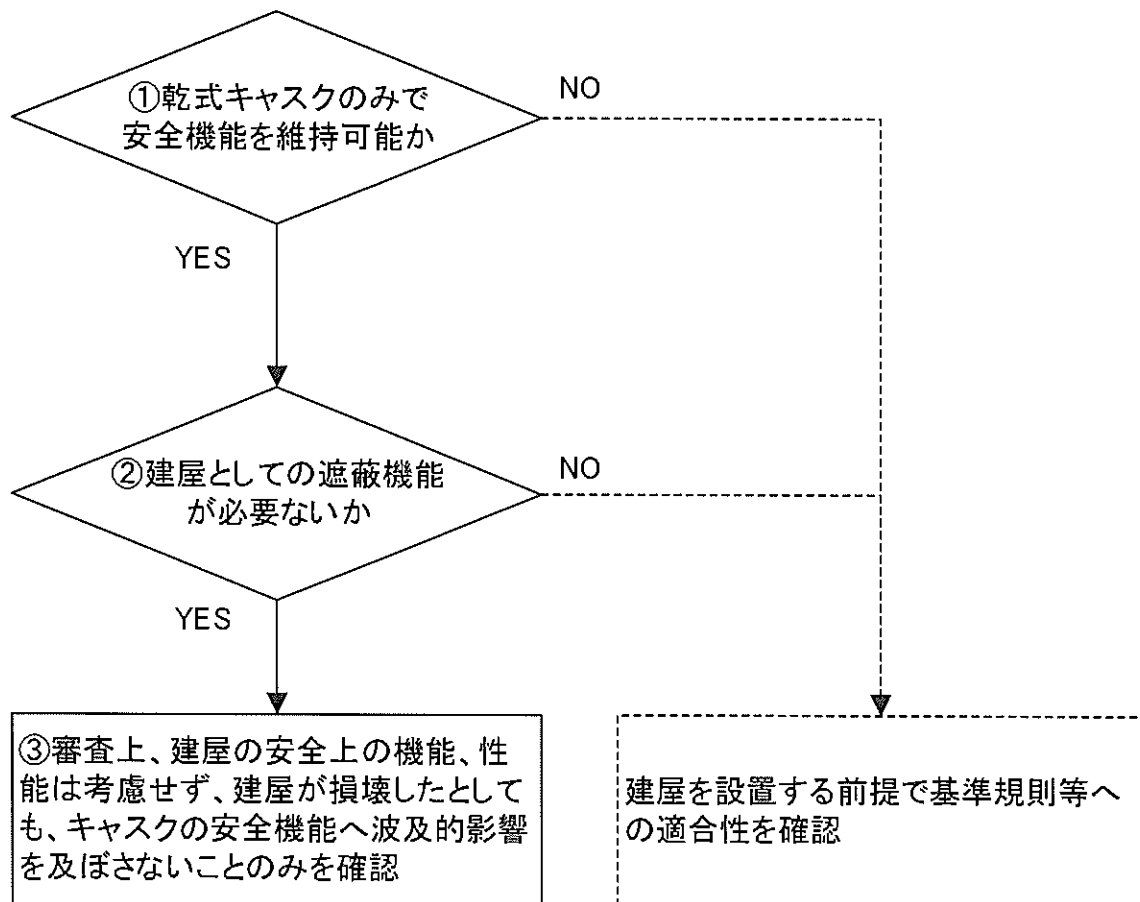


図1. 第8回 原子力規制委員会の審査方針で示された内容のフロー

1. 乾式キャスクのみでの外力に対する安全機能維持について

乾式キャスクのみで地震や竜巻等の外力に対して、安全機能が維持可能であることを確認するため、建屋のない状態で乾式キャスクを貯蔵架台に設置した状態を仮定[※]し、地震・竜巻・外部火災による乾式キャスクに対する影響評価を行う。（詳細は、地震は4条まとめ資料、竜巻、外部火災は別紙1-1～1-3参照。）この評価結果を表1にまとめる。

※竜巻の影響評価は、乾式キャスクに作用する荷重を保守的に評価するよう乾式キャスクと貯蔵架台は剛結合と仮定して行う。

表1. 地震・竜巻・外部火災による乾式キャスクに対する影響評価結果

	評価結果
地震	地震時に乾式キャスクに生じる荷重が、核燃料輸送物設計承認申請書における0.3m落下評価時の衝撃荷重を下回るため、安全機能に係る乾式キャスク内部の部材が弾性範囲内であり、乾式キャスクの安全機能が維持されることを確認した。
竜巻	竜巻による設計飛来物衝突時に乾式キャスクに生じる衝撃荷重が、核燃料輸送物設計承認申請書における0.3m落下評価時の衝撃荷重を下回るため、安全機能に係る乾式キャスク内部の部材が弾性範囲内であり、乾式キャスクの安全機能が維持されることを確認した。 なお、乾式キャスクに設計飛来物が直接衝突するため、衝突箇所（外部）は局所的に変形する可能性があるが、直ちに安全機能に影響を与えない。
外部火災	外部火災時の乾式キャスクへの入熱が、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件の火災の入熱量の1/2以下であるため、乾式キャスク各部の安全機能が確保され、直ちに安全機能に影響を与えない。

以上より、乾式キャスクのみで地震や竜巻等の外力に対して、安全機能が維持可能である（直ちに安全機能に影響を与えない）。他の外部事象に対しては、想定される事象を選定したうえで影響評価を行い、安全機能が維持可能であることを確認する。（詳細は、別紙1-4参照。）

2. 建屋としての遮蔽機能の必要性について

建屋としての遮蔽機能の必要性を確認するために、建屋のない状態を仮定し、保守性を排除した現実的な評価で、敷地境界線量において年間50 μ Svを満足するかどうかを確認する。（詳細は、別紙2参照。）この評価結果を表2にまとめる。

表2. 伊方発電所敷地境界の年間線量試算結果（乾式貯蔵建屋なし）

評価地点 (乾式貯蔵施設からの距離)	年間線量[μ Sv]（現実的な評価）		
	乾式貯蔵施設	既設建屋	合算
B点 ^(注1) (420 m)	約180 ^(注2)	3.9	約190

(注1) 伊方発電所敷地境界での評価地点のうち、乾式貯蔵施設からの最短地点

(注2) ガンマ線43 μ Sv+中性子線135 μ Sv=約180 μ Sv

表2のとおり、建屋なしで評価条件を現実的に見直した場合の敷地境界線量（試算）は、年間約 $190\mu\text{Sv}$ となることから、目標値である年間 $50\mu\text{Sv}$ を満足するためには遮蔽機能を有する建屋が必要である。

3. まとめ

以上の結果から、乾式キャスク単体での外力に対する安全機能維持は確認できたものの、敷地境界線量が年間 $50\mu\text{Sv}$ を満足するためには貯蔵建屋が必要となることから、貯蔵建屋を設置する前提で、基準規則等への適合性を示す。

以 上

乾式キャスク単体の安全機能 (原子力規制委員会での審査方針を踏まえた対応) 【影響評価】

【電巻】 影響評価として、乾式キャスク単体の安全機能を確認するため、以下のとおり、電巻による設計飛来物衝突時に乾式キャスクに負荷される荷重と、核燃料輸送物設計承認申請書における一般の試験条件 (乾式キャスクの0.3m落下) の荷重を比較した。

MSP-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書

乾式キャスクは頑丈な構造の金属製の静的機器であることから剛体とし、乾式キャスクを1質点とみなして、0.3m落下時に重心位置に生じる衝撃荷重 (加速度) を計算し、有限要素法及び工学式により乾式キャスク各部 (容器本体、バスケケット及び燃料集合体) の応力計算を行い、弾性範囲内であることを確認した。

落下速度 V
落下距離 H
衝撃荷重 F
1質点モデル

【衝撃荷重の計算方法】

落下時の衝撃荷重 (F) は、CRUSH コードを用いて算出する。なお、乾式キャスクを1質点とみなして落下時に重心位置に生じる衝撃荷重 (加速度) を計算する。また、緩衝体内部の木材の弾塑性変形によって輸送物の落下エネルギー (E_R) が全て吸収されるものとした。(緩衝体を除いた輸送物及び落下試験石 (床面) を剛体とし、落下エネルギーの振動及び熱等への消費を無視する。)

落下時の運動エネルギー (J)
落下距離 (m)
落下速度 (m/s)
落下時の運動エネルギー (J)
落下試験石 (床面) のエネルギー吸収率 (%)

輸送物質量	135500	重力加速度	9.80665	落下高さ	0.3

【衝撃荷重の計算結果】

0.3m落下時の衝撃算定 (F) の計算結果は右表のとおり。なお、加速度は衝撃荷重 F を輸送物質量で除して算出。

落下姿勢	衝撃荷重	加速度
0.3m 頭部垂直	$F_V=3.672 \times 10^6$	27.6
0.3m 水平	$F_H=2.830 \times 10^6$	21.3

【応力計算方法】

(1) 容器本体
上記の加速度に一定の余裕をみた加速度 (設計加速度) による慣性力が作用する場合の容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。

(2) バスケケット及び燃料集合体
設計加速度をもとに工学式を用いた応力評価を行う。

【応力計算結果】

項目	解析結果 (MPa)		解析基準	解析値
	0.3m 頭部垂直	0.3m 水平		
遮蔽・除熱	44	68	1.5S _m	183
遮蔽室	50	86	f _b	156
閉じ込め	54	58	S _y	185
臨界	7	11	S _m	36
臨界	118	200	σ _y	595

【衝撃荷重の計算方法】

設計飛来物衝突時に乾式キャスクを1質点とみなして、0.3m落下時に重心位置に生じる衝撃荷重 (加速度) を計算し、有限要素法及び工学式により乾式キャスク各部 (容器本体、バスケケット及び燃料集合体) の応力計算を行い、弾性範囲内であることを確認した。

落下速度 V
落下距離 H
衝撃荷重 F
1質点モデル

【衝撃荷重の計算結果】

0.3m落下時の衝撃算定 (F) の計算結果は以下のとおり。なお、加速度は衝撃荷重 W_m を乾式キャスクの貯蔵時質量 (17.0ton) で除して算出。

飛来物質量	135	衝突速度	57	飛来物の最も短い辺の全長	0.2

【応力計算方法】

(1) 容器本体
上記の加速度に一定の余裕をみた加速度 (設計加速度) による慣性力が作用する場合の容器本体の解析を有限要素法による ABAQUS コードにより行う。

(2) バスケケット及び燃料集合体
設計加速度をもとに工学式を用いた応力評価を行う。

【応力計算結果】

項目	解析結果 (MPa)		解析基準	解析値
	0.3m 頭部垂直	0.3m 水平		
遮蔽・除熱	44	68	1.5S _m	183
遮蔽室	50	86	f _b	156
閉じ込め	54	58	S _y	185
臨界	7	11	S _m	36
臨界	118	200	σ _y	595

【結論】

以上のとおり、電巻による設計飛来物衝突時に乾式キャスクに生じる衝撃荷重が、核燃料輸送物設計承認申請書における 0.3m 落下評価時の衝撃荷重を下回るため、安全機能に係る乾式キャスク内部の部品が弾性範囲内であり、乾式キャスクの安全機能が維持されることを確認した。

なお、乾式キャスクに設計飛来物が直接衝突するため、衝突箇所 (外部) は局所的に変形する可能性があるが、直ちに安全機能に影響を与えない。

容器本体

【外部火災】 影響評価として、乾式キャスク単体の安全機能を確認するため、以下のとおり、外部火災時の乾式キャスクへの入熱と、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件 (800℃で30分の火災) による入熱を比較した。

評価概要	MSP-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書	発電用原子炉設置変更許可申請書 (影響評価)																																										
<p>特別の試験条件における構造評価で緩衝体に損傷を受けた乾式キャスクが 800℃で 30 分の火災に包囲されることを想定し、伝熱解析を行った。</p> <p>乾式キャスクの各部温度が特別の試験条件 (供用状態 D 相当) の温度基準以内であることにより、各部位材の安全機能が確保されることを確認した。(短期健全性)</p>	<p>MSP-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書</p> <p>特別の試験条件における構造評価で緩衝体に損傷を受けた乾式キャスクが 800℃で 30 分の火災に包囲されることを想定し、伝熱解析を行った。</p> <p>乾式キャスクの各部温度が特別の試験条件 (供用状態 D 相当) の温度基準以内であることにより、各部位材の安全機能が確保されることを確認した。(短期健全性)</p>	<p>発電用原子炉設置変更許可申請書 (影響評価)</p> <p>貯蔵状態 (緩衝体なし、統置き) の乾式キャスクが、遠隔の外部火災に対して、放射による入熱に建屋等の遮蔽物が無い状態で曝されることを想定し、最大の入熱量を計算した。</p> <p>この入熱量が、左記の評価条件 (800℃で 30 分の火災) における入熱量を下回ることにより、同様に各部位の安全機能が確保されることを確認した。(短期健全性)</p>																																										
<p>【計算方法】</p> <p>伊方発電所における外部火災事象としては、森林火災、近隣産業施設の火災爆発、船舶火災、航空機落下及び重量火災等が考えられる。</p> <p>既許可の評価において、これらの外部火災事象のうち、最も厳しい条件となるのは、航空機落下と重油タンクの重量火災時であり、離隔距離の関係から入熱量が最大となる原子炉補助建屋に対する値を以下の通り計算する。</p> <p>【計算結果】</p> <p>入熱量は、受熱面放射強度と時間の積で計算される。受熱面放射強度は「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」に基づき計算を実施する。計算式は以下の通り。</p>	<p>【計算方法】</p> <p>ABAQUS コードを用いた有限要素法により伝熱解析 (時刻歴解析) を行った。解析モデル及び解析条件は以下。</p> <ul style="list-style-type: none"> 解析モデル: 乾式キャスク各部と使用済燃料の温度算出のため、2 種類の解析モデルを使用。 <ul style="list-style-type: none"> 全体モデル (三次元) ・燃料集合体モデル (二次元) 解析条件: 熱解析条件は以下の通り。 <table border="1" data-bbox="510 1388 606 1568"> <tr> <td>項目</td> <td>火災前</td> <td>火災時</td> <td>火災後</td> </tr> <tr> <td>設計所装熱量</td> <td></td> <td>16.9 kW</td> <td></td> </tr> <tr> <td>環境条件</td> <td>周囲温度 38 °C</td> <td>800 °C (30 分間)</td> <td>38 °C</td> </tr> </table> <p>【計算結果】</p> <p>火災事象発生時を基準とした最高温度算出時間を下表に示す。また、燃料集合体温度が最も高くなる火災事象発生から 24.8 時間後における温度分布を右図に示す。</p> <table border="1" data-bbox="718 1344 877 1568"> <thead> <tr> <th>安全機能</th> <th>部位</th> <th>最高温度算出時間(h)</th> <th>温度(°C)</th> <th>基準値(°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>遮蔽・除熱</td> <td>胴</td> <td>0.508</td> <td>249</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>遮蔽</td> <td>中性子遮蔽材</td> <td>0.502</td> <td>687</td> <td>180</td> </tr> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>一次蓋金属ガスケット</td> <td>20.8</td> <td>136</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td>境界</td> <td>バスケット</td> <td>22.8</td> <td>209</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>臨界</td> <td>燃料集合体</td> <td>24.8</td> <td>241</td> <td>275[※]</td> </tr> </tbody> </table> <p>※ 一般の試験条件基準</p>	項目	火災前	火災時	火災後	設計所装熱量		16.9 kW		環境条件	周囲温度 38 °C	800 °C (30 分間)	38 °C	安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度(°C)	基準値(°C)	遮蔽・除熱	胴	0.508	249	350	遮蔽	中性子遮蔽材	0.502	687	180	閉じ込め	一次蓋金属ガスケット	20.8	136	190	境界	バスケット	22.8	209	250	臨界	燃料集合体	24.8	241	275 [※]	<p>【計算方法】</p> <p>伊方発電所における外部火災事象としては、森林火災、近隣産業施設の火災爆発、船舶火災、航空機落下及び重量火災等が考えられる。</p> <p>既許可の評価において、これらの外部火災事象のうち、最も厳しい条件となるのは、航空機落下と重油タンクの重量火災時であり、離隔距離の関係から入熱量が最大となる原子炉補助建屋に対する値を以下の通り計算する。</p> <p>【計算結果】</p> <p>入熱量は、受熱面放射強度と時間の積で計算される。計算式は以下の通り。</p>
項目	火災前	火災時	火災後																																									
設計所装熱量		16.9 kW																																										
環境条件	周囲温度 38 °C	800 °C (30 分間)	38 °C																																									
安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度(°C)	基準値(°C)																																								
遮蔽・除熱	胴	0.508	249	350																																								
遮蔽	中性子遮蔽材	0.502	687	180																																								
閉じ込め	一次蓋金属ガスケット	20.8	136	190																																								
境界	バスケット	22.8	209	250																																								
臨界	燃料集合体	24.8	241	275 [※]																																								
<p>【計算式】</p> $\phi = \frac{1}{4\pi r^2} \left(\frac{A}{r^2} + \frac{A}{r} \right) \left(\frac{A-D}{4\pi r^2} + \frac{A-D}{4\pi r} \right) \left(\frac{A-D}{4\pi r^2} + \frac{A-D}{4\pi r} \right)$ $m = \frac{m}{R} \cdot A \cdot \frac{1}{R} \cdot A = (1 + \frac{1}{R})^2 \cdot m^2 \cdot R = (1 + \frac{1}{R})^2 \cdot m^2 \cdot R$ $E = R \cdot \phi$ <p>単位: R: 燃料密着度 [W/m²]、φ: 円筒火災モデルの形係数 [1]、L: 火災と受熱面までの距離[m]、R: 燃焼半径 [m]、H: 火災の高さ [m] (H=3R、評価ガイド)、E: 受熱面放射強度 [W/m²]</p>	<p>【計算式】</p> $\phi = \frac{1}{4\pi r^2} \left(\frac{A}{r^2} + \frac{A}{r} \right) \left(\frac{A-D}{4\pi r^2} + \frac{A-D}{4\pi r} \right) \left(\frac{A-D}{4\pi r^2} + \frac{A-D}{4\pi r} \right)$ $m = \frac{m}{R} \cdot A \cdot \frac{1}{R} \cdot A = (1 + \frac{1}{R})^2 \cdot m^2 \cdot R = (1 + \frac{1}{R})^2 \cdot m^2 \cdot R$ $E = R \cdot \phi$ <p>単位: R: 燃料密着度 [W/m²]、φ: 円筒火災モデルの形係数 [1]、L: 火災と受熱面までの距離[m]、R: 燃焼半径 [m]、H: 火災の高さ [m] (H=3R、評価ガイド)、E: 受熱面放射強度 [W/m²]</p>	<p>【計算式】</p> $Q = \frac{1}{4\pi r^2} \left(\frac{A}{r^2} + \frac{A}{r} \right) \left(\frac{A-D}{4\pi r^2} + \frac{A-D}{4\pi r} \right) \left(\frac{A-D}{4\pi r^2} + \frac{A-D}{4\pi r} \right)$ $m = \frac{m}{R} \cdot A \cdot \frac{1}{R} \cdot A = (1 + \frac{1}{R})^2 \cdot m^2 \cdot R = (1 + \frac{1}{R})^2 \cdot m^2 \cdot R$ $E = R \cdot \phi$ <p>単位: R: 燃料密着度 [W/m²]、φ: 円筒火災モデルの形係数 [1]、L: 火災と受熱面までの距離[m]、R: 燃焼半径 [m]、H: 火災の高さ [m] (H=3R、評価ガイド)、E: 受熱面放射強度 [W/m²]</p>																																										
<p>【計算結果】</p> <p>航空機落下と重油タンクの重量火災時の原子炉補助建屋への放射による受熱面放射強度は右図の通り変化し、これによる入熱量は 29.9MJ/m² (=2900(W/m²) × 1.67(h) + 460(W/m²) × 7.58(h)) となる。</p> <p>木評価では、保守的に上記入熱量 (29.9MJ/m²) で、仮に遮蔽物が無い状態で乾式キャスク表面が曝されると想定する。</p>	<p>【計算結果】</p> <p>航空機落下と重油タンクの重量火災時の原子炉補助建屋への放射による受熱面放射強度は右図の通り変化し、これによる入熱量は 29.9MJ/m² (=2900(W/m²) × 1.67(h) + 460(W/m²) × 7.58(h)) となる。</p> <p>木評価では、保守的に上記入熱量 (29.9MJ/m²) で、仮に遮蔽物が無い状態で乾式キャスク表面が曝されると想定する。</p>	<p>【計算結果】</p> <p>航空機落下と重油タンクの重量火災時の原子炉補助建屋への放射による受熱面放射強度は右図の通り変化し、これによる入熱量は 29.9MJ/m² (=2900(W/m²) × 1.67(h) + 460(W/m²) × 7.58(h)) となる。</p> <p>木評価では、保守的に上記入熱量 (29.9MJ/m²) で、仮に遮蔽物が無い状態で乾式キャスク表面が曝されると想定する。</p>																																										
<p>【結論】</p> <p>以上の通り、外部火災時の乾式キャスクへの入熱が、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件の火災の入熱量の 1/2 以下 (29.9MJ/m² < 62.9MJ/m²) であるため、乾式キャスク各部の安全機能が確保され、直ちに安全機能に影響を与えない。</p> <p>なお、乾式キャスク貯蔵時の熱影響については、設計貯蔵期間中の熱的影響により中性子遮蔽材が MSP-32P 型は 1.8%、MSF-24P 型は約 2.0% 質量減損するため、保守的に中性子遮蔽材が 2.5% 質量減損することとして評価している。これに対し、乾式キャスクが上記の外部火災による入熱を受けたのち、継続して設計貯蔵期間貯蔵した場合の中性子遮蔽材の質量減損を概略評価した結果、MSP-32P 型は約 2.31%、MSF-24P 型は約 2.46% であり、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価で考慮している質量減損より小さく、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価結果に包絡される。</p>	<p>【結論】</p> <p>以上の通り、外部火災時の乾式キャスクへの入熱が、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件の火災の入熱量の 1/2 以下 (29.9MJ/m² < 62.9MJ/m²) であるため、乾式キャスク各部の安全機能が確保され、直ちに安全機能に影響を与えない。</p> <p>なお、乾式キャスク貯蔵時の熱影響については、設計貯蔵期間中の熱的影響により中性子遮蔽材が MSP-32P 型は 1.8%、MSF-24P 型は約 2.0% 質量減損するため、保守的に中性子遮蔽材が 2.5% 質量減損することとして評価している。これに対し、乾式キャスクが上記の外部火災による入熱を受けたのち、継続して設計貯蔵期間貯蔵した場合の中性子遮蔽材の質量減損を概略評価した結果、MSP-32P 型は約 2.31%、MSF-24P 型は約 2.46% であり、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価で考慮している質量減損より小さく、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価結果に包絡される。</p>	<p>【結論】</p> <p>以上の通り、外部火災時の乾式キャスクへの入熱が、核燃料輸送物設計承認申請書における特別の試験条件の火災の入熱量の 1/2 以下 (29.9MJ/m² < 62.9MJ/m²) であるため、乾式キャスク各部の安全機能が確保され、直ちに安全機能に影響を与えない。</p> <p>なお、乾式キャスク貯蔵時の熱影響については、設計貯蔵期間中の熱的影響により中性子遮蔽材が MSP-32P 型は 1.8%、MSF-24P 型は約 2.0% 質量減損するため、保守的に中性子遮蔽材が 2.5% 質量減損することとして評価している。これに対し、乾式キャスクが上記の外部火災による入熱を受けたのち、継続して設計貯蔵期間貯蔵した場合の中性子遮蔽材の質量減損を概略評価した結果、MSP-32P 型は約 2.31%、MSF-24P 型は約 2.46% であり、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価で考慮している質量減損より小さく、乾式キャスク貯蔵時の遮蔽評価結果に包絡される。</p>																																										
<p>【計算式】</p> $Q = (q_1 + q_2) / 2 \cdot t$ $q_1 = A \cdot F \cdot \sigma \cdot (273 + T_0)^4 - (273 + T_1)^4$ $q_2 = A \cdot F \cdot \sigma \cdot (273 + T_0)^4 - (273 + T_1)^4$ <p>単位: Q: 火災による入熱量 (単位面積) [J/m²]、q: 火災による熱流束 (単位面積) (初期 n=1、終期 n=2) [W/m²]、t: 火災時間 (30 分 = 1800s)、A: 容器表面積 (単位面積) [m²/m²]、F: 表面放射率(総合放射率) F=1/(1/ε + 1/ε' - 1) = 0.735 (ε1: キャスク表面 (0.8)、ε2: 火炎面 (0.9))、σ: ステファン-ボルツマン定数 = 5.66961 × 10⁻⁸ [W/m²·K⁴]、T0: 雰囲気温度(周囲空気: 800°C)、T1: 容器表面温度(初期 n=1: 113°C、終期 n=2: 715°C)</p>	<p>【計算式】</p> $Q = (q_1 + q_2) / 2 \cdot t$ $q_1 = A \cdot F \cdot \sigma \cdot (273 + T_0)^4 - (273 + T_1)^4$ $q_2 = A \cdot F \cdot \sigma \cdot (273 + T_0)^4 - (273 + T_1)^4$ <p>単位: Q: 火災による入熱量 (単位面積) [J/m²]、q: 火災による熱流束 (単位面積) (初期 n=1、終期 n=2) [W/m²]、t: 火災時間 (30 分 = 1800s)、A: 容器表面積 (単位面積) [m²/m²]、F: 表面放射率(総合放射率) F=1/(1/ε + 1/ε' - 1) = 0.735 (ε1: キャスク表面 (0.8)、ε2: 火炎面 (0.9))、σ: ステファン-ボルツマン定数 = 5.66961 × 10⁻⁸ [W/m²·K⁴]、T0: 雰囲気温度(周囲空気: 800°C)、T1: 容器表面温度(初期 n=1: 113°C、終期 n=2: 715°C)</p>	<p>【計算式】</p> $Q = (q_1 + q_2) / 2 \cdot t$ $q_1 = A \cdot F \cdot \sigma \cdot (273 + T_0)^4 - (273 + T_1)^4$ $q_2 = A \cdot F \cdot \sigma \cdot (273 + T_0)^4 - (273 + T_1)^4$ <p>単位: Q: 火災による入熱量 (単位面積) [J/m²]、q: 火災による熱流束 (単位面積) (初期 n=1、終期 n=2) [W/m²]、t: 火災時間 (30 分 = 1800s)、A: 容器表面積 (単位面積) [m²/m²]、F: 表面放射率(総合放射率) F=1/(1/ε + 1/ε' - 1) = 0.735 (ε1: キャスク表面 (0.8)、ε2: 火炎面 (0.9))、σ: ステファン-ボルツマン定数 = 5.66961 × 10⁻⁸ [W/m²·K⁴]、T0: 雰囲気温度(周囲空気: 800°C)、T1: 容器表面温度(初期 n=1: 113°C、終期 n=2: 715°C)</p>																																										

核燃料輸送物設計承認申請書における解析結果一覧 (キヤスタクタイプによる差異)

MSF-32P 型 核燃料輸送物設計承認申請書	MSF-24P 型 核燃料輸送物設計承認申請書																																																																																																																																		
<table border="1"> <tr> <td>輸送物質量 m(kg)</td> <td>135500</td> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>輸送物質量 m(kg)</td> <td>134400</td> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> </tr> </table>	輸送物質量 m(kg)	135500	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3	輸送物質量 m(kg)	134400	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3	<table border="1"> <tr> <td>輸送物質量 m(kg)</td> <td>134400</td> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> </tr> </table>	輸送物質量 m(kg)	134400	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3																																																																																																																
輸送物質量 m(kg)	135500	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3																																																																																																																														
輸送物質量 m(kg)	134400	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3																																																																																																																														
輸送物質量 m(kg)	134400	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3																																																																																																																														
<table border="1"> <tr> <td>落下姿勢</td> <td>衝撃荷重 F(N)</td> <td>加速度 (G)</td> </tr> <tr> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>3.672×10⁷</td> <td>27.6</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>3.439×10⁷</td> <td>25.9</td> </tr> <tr> <td>0.3m 水平</td> <td>2.830×10⁷</td> <td>21.3</td> </tr> </table>	落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)	0.3m 頭部垂直	3.672×10 ⁷	27.6	0.3m 底部垂直	3.439×10 ⁷	25.9	0.3m 水平	2.830×10 ⁷	21.3	<table border="1"> <tr> <td>落下姿勢</td> <td>衝撃荷重 F(N)</td> <td>加速度 (G)</td> </tr> <tr> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>3.555×10⁷</td> <td>27.0</td> </tr> <tr> <td>0.3m 底部垂直</td> <td>3.417×10⁷</td> <td>25.9</td> </tr> <tr> <td>0.3m 水平</td> <td>2.686×10⁷</td> <td>20.4</td> </tr> </table>	落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)	0.3m 頭部垂直	3.555×10 ⁷	27.0	0.3m 底部垂直	3.417×10 ⁷	25.9	0.3m 水平	2.686×10 ⁷	20.4																																																																																																										
落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)																																																																																																																																	
0.3m 頭部垂直	3.672×10 ⁷	27.6																																																																																																																																	
0.3m 底部垂直	3.439×10 ⁷	25.9																																																																																																																																	
0.3m 水平	2.830×10 ⁷	21.3																																																																																																																																	
落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)																																																																																																																																	
0.3m 頭部垂直	3.555×10 ⁷	27.0																																																																																																																																	
0.3m 底部垂直	3.417×10 ⁷	25.9																																																																																																																																	
0.3m 水平	2.686×10 ⁷	20.4																																																																																																																																	
<table border="1"> <tr> <th rowspan="2">安全機能</th> <th rowspan="2">項目</th> <th rowspan="2">解析基準</th> <th rowspan="2">解析基準値 (MPa)</th> <th rowspan="2">設計温度 (°C)*1</th> <th colspan="2">解析結果(MPa)</th> </tr> <tr> <th>0.3m 頭部垂直</th> <th>0.3m 水平</th> </tr> <tr> <td>遮蔽・除熱</td> <td>容器本体 胴</td> <td>1.5S_m</td> <td>186 (183)*2</td> <td>120 (140)*2</td> <td>44</td> <td>32</td> </tr> <tr> <td>遮蔽</td> <td>容器本体 外筒</td> <td>f_b</td> <td>156</td> <td>120</td> <td>50</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>容器本体 一次蓋シェル部</td> <td>S_y</td> <td>185</td> <td>120</td> <td>54</td> <td>37</td> </tr> <tr> <td>臨界</td> <td>バスケット</td> <td>S_m</td> <td>36</td> <td>180</td> <td>7</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>臨界</td> <td>燃料集合体</td> <td>σ_y</td> <td>595</td> <td>205</td> <td>118</td> <td>118</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>7</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>11</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>200</td> </tr> </table> <p>*1 : SAR ロ章 B 一般熱的試験の除熱解析結果から設定した値 *2 : 頭部垂直及び水平は胴側部の値。底部垂直は胴底板の値(()内の値) *3 : 0.3m 頭部垂直落下の結果に包絡される</p>	安全機能	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	設計温度 (°C)*1	解析結果(MPa)		0.3m 頭部垂直	0.3m 水平	遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	44	32	遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	120	50	36	閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	120	54	37	臨界	バスケット	S _m	36	180	7	7	臨界	燃料集合体	σ _y	595	205	118	118							7							11							200	<table border="1"> <tr> <th rowspan="2">安全機能</th> <th rowspan="2">項目</th> <th rowspan="2">解析基準</th> <th rowspan="2">解析基準値 (MPa)</th> <th rowspan="2">設計温度 (°C)*1</th> <th colspan="2">解析結果(MPa)</th> </tr> <tr> <th>0.3m 頭部垂直</th> <th>0.3m 水平</th> </tr> <tr> <td>遮蔽・除熱</td> <td>容器本体 胴</td> <td>1.5S_m</td> <td>186 (183)*2</td> <td>120 (140)*2</td> <td>43</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>遮蔽</td> <td>容器本体 外筒</td> <td>f_b</td> <td>156</td> <td>120</td> <td>45</td> <td>39</td> </tr> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>容器本体 一次蓋シェル部</td> <td>S_y</td> <td>185</td> <td>115</td> <td>48</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td>臨界</td> <td>バスケット</td> <td>S_m</td> <td>36</td> <td>185</td> <td>7</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>臨界</td> <td>燃料集合体</td> <td>σ_y</td> <td>589</td> <td>215</td> <td>105</td> <td>105</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>7</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>12</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>141</td> </tr> </table> <p>*1 : SAR ロ章 B 一般熱的試験の除熱解析結果から設定した値 *2 : 頭部垂直及び水平は胴側部の値。底部垂直は胴底板の値(()内の値) *3 : 0.3m 頭部垂直落下の結果に包絡される</p>	安全機能	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	設計温度 (°C)*1	解析結果(MPa)		0.3m 頭部垂直	0.3m 水平	遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	43	30	遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	120	45	39	閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	115	48	36	臨界	バスケット	S _m	36	185	7	7	臨界	燃料集合体	σ _y	589	215	105	105							7							12							141
安全機能						項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	設計温度 (°C)*1	解析結果(MPa)																																																																																																																									
	0.3m 頭部垂直	0.3m 水平																																																																																																																																	
遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	44	32																																																																																																																													
遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	120	50	36																																																																																																																													
閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	120	54	37																																																																																																																													
臨界	バスケット	S _m	36	180	7	7																																																																																																																													
臨界	燃料集合体	σ _y	595	205	118	118																																																																																																																													
						7																																																																																																																													
						11																																																																																																																													
						200																																																																																																																													
安全機能	項目	解析基準	解析基準値 (MPa)	設計温度 (°C)*1	解析結果(MPa)																																																																																																																														
					0.3m 頭部垂直	0.3m 水平																																																																																																																													
遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	43	30																																																																																																																													
遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	120	45	39																																																																																																																													
閉じ込め	容器本体 一次蓋シェル部	S _y	185	115	48	36																																																																																																																													
臨界	バスケット	S _m	36	185	7	7																																																																																																																													
臨界	燃料集合体	σ _y	589	215	105	105																																																																																																																													
						7																																																																																																																													
						12																																																																																																																													
						141																																																																																																																													
<table border="1"> <tr> <th>安全機能</th> <th>部位</th> <th>最高温度算出時間(h)</th> <th>温度 (°C)</th> <th>基準値 (°C)</th> </tr> <tr> <td>遮蔽・除熱</td> <td>胴</td> <td>0.524</td> <td>224</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>遮蔽</td> <td>中性子遮蔽材</td> <td>0.502</td> <td>701</td> <td>180</td> </tr> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>一次蓋金属バスケット</td> <td>19.1</td> <td>137</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td>臨界</td> <td>バスケット</td> <td>22.1</td> <td>218</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>臨界</td> <td>燃料集合体</td> <td>25.1</td> <td>254</td> <td>275**</td> </tr> </table> <p>*一般の試験条件基準</p>	安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度 (°C)	基準値 (°C)	遮蔽・除熱	胴	0.524	224	350	遮蔽	中性子遮蔽材	0.502	701	180	閉じ込め	一次蓋金属バスケット	19.1	137	190	臨界	バスケット	22.1	218	250	臨界	燃料集合体	25.1	254	275**	<table border="1"> <tr> <th>安全機能</th> <th>部位</th> <th>最高温度算出時間(h)</th> <th>温度 (°C)</th> <th>基準値 (°C)</th> </tr> <tr> <td>遮蔽・除熱</td> <td>胴</td> <td>0.524</td> <td>224</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>遮蔽</td> <td>中性子遮蔽材</td> <td>0.502</td> <td>701</td> <td>180</td> </tr> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>一次蓋金属バスケット</td> <td>19.1</td> <td>137</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td>臨界</td> <td>バスケット</td> <td>22.1</td> <td>218</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>臨界</td> <td>燃料集合体</td> <td>25.1</td> <td>254</td> <td>275**</td> </tr> </table> <p>*一般の試験条件基準</p>	安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度 (°C)	基準値 (°C)	遮蔽・除熱	胴	0.524	224	350	遮蔽	中性子遮蔽材	0.502	701	180	閉じ込め	一次蓋金属バスケット	19.1	137	190	臨界	バスケット	22.1	218	250	臨界	燃料集合体	25.1	254	275**																																																																						
安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度 (°C)	基準値 (°C)																																																																																																																															
遮蔽・除熱	胴	0.524	224	350																																																																																																																															
遮蔽	中性子遮蔽材	0.502	701	180																																																																																																																															
閉じ込め	一次蓋金属バスケット	19.1	137	190																																																																																																																															
臨界	バスケット	22.1	218	250																																																																																																																															
臨界	燃料集合体	25.1	254	275**																																																																																																																															
安全機能	部位	最高温度算出時間(h)	温度 (°C)	基準値 (°C)																																																																																																																															
遮蔽・除熱	胴	0.524	224	350																																																																																																																															
遮蔽	中性子遮蔽材	0.502	701	180																																																																																																																															
閉じ込め	一次蓋金属バスケット	19.1	137	190																																																																																																																															
臨界	バスケット	22.1	218	250																																																																																																																															
臨界	燃料集合体	25.1	254	275**																																																																																																																															
構造解析 (一般の試験条件)	熱解析 (特別の試験条件)																																																																																																																																		

貯蔵建屋なしの場合の外部事象による乾式キャスクの安全機能への影響

1. 伊方発電所において想定される自然現象及び人為事象の選定結果

設置許可基準規則 第6条に該当する「設計基準において想定される自然現象」及び「設計基準において想定される人為事象」については、伊方発電所の敷地及び敷地周辺の自然環境等を基に以下のとおり選定[※]している。

(自然現象：12 事象)

- ・洪水
- ・風（台風）
- ・竜巻
- ・凍結
- ・降水
- ・積雪
- ・落雷
- ・地滑り
- ・火山
- ・生物学的事象
- ・森林火災
- ・高潮

(人為事象：7 事象)

- ・飛来物
- ・ダムの崩壊
- ・爆発
- ・近隣工場等の火災
- ・有毒ガス
- ・船舶の衝突
- ・電磁的障害

※ 平成 27 年 7 月 15 日付け原規規発第 1507151 号をもって設置変更許可を受けた設置変更許可申請に係る安全審査資料「伊方発電所 3 号炉 設置許可基準規則等への適合性について（設計基準対象施設）」(DB-8-22 改 38) を参照。

2. 外部事象による乾式キャスクに対する影響評価について

乾式キャスクのみで 1. の外部事象に対して、安全機能が維持可能であるかを確認するため、建屋のない状態で乾式キャスクを貯蔵架台に設置した状態を仮定し、想定される自然現象及び人為事象による乾式キャスクに対する影響評価を行った。評価結果を第 1 表にまとめる。なお、乾式キャスクは建屋内に貯蔵し、外部事象に対して外郭にて防護することから、第 1 表に示す長期的な安全機能維持のための運用は不要である。

第1表 外部事象による乾式キヤスクに対する影響評価結果

		影響	評価結果
竜巻	別紙1-1参照。		
	堆積荷重		乾式キヤスクは輸送容器としての強化浸漬試験（水深200m相当の荷重 $2.1 \times 10^6 \text{N/m}^2$ ）に対して耐えられるように設計されており、降下火砕物（湿潤状態）の堆積荷重 $2,205 \text{N/m}^2$ （積雪を含む場合 $2,345 \text{N/m}^2$ ）を考慮しても、乾式キヤスクの構造健全性を損なうおそれはない。
火山	除熱機能への影響		乾式キヤスクの高さ5.2mに対して降下火砕物の層厚は0.15mと小さいため、乾式キヤスクの短期的な安全機能を損なうおそれはない。なお、除灰を行うことも可能である。
	腐食		乾式キヤスクに降下火砕物が付着した際に懸念される腐食については、金属腐食研究の結果より、降下火砕物に含まれる腐食性ガスによって直ちに金属腐食を生じないが、外装の塗装等によって短期での腐食により乾式キヤスクの安全機能を損なうおそれはない。なお、長期的な腐食の影響については、日常保守管理等により、状況に応じて補修等で対応可能である。
外部火災*	別紙1-2参照。		
洪水	浸水		敷地付近は、地形及び表流水の状況から判断して、洪水による被害は考えられない。
風（台風）	風圧力による転倒 飛来物の衝突		敷地付近で観測された最大瞬間風速は、宇和島特別地域気象観測所（2005年9月まで宇和島測候所）での観測記録（1951～2012年）によれば、 72.3m/s （1964年9月25日）である。風（台風）の風圧力による荷重 51.7kN は、竜巻の影響評価（別紙1-1参照）で示す飛来物による衝撃荷重（鋼製材： $2,200 \text{kN}$ 、乗用車 $3,160 \text{kN}$ ）より小さいため、乾式キヤスクの安全機能を損なうおそれはない。
凍結	低温脆性		宇和島特別地域気象観測所での観測記録（1951～2012年）によれば、最低気温は -6.2°C （1977年2月19日）である。これに対し、十分低い温度においても鋼製部材のき裂、破損等を生じることのない材料選定を含めた乾式キヤスク設計を行うことから、低気温により乾式キヤスクの安全機能を損なうおそれはない。
降水	浸水		宇和島特別地域気象観測所での観測記録（1951～2012年）によれば、日最大1時間降水量は 76.5mm （2011年6月20日）である。これに対し、観測記録を上回る降雨強度の排水能力を有する構内排水路で集水し海域へ排出を行うことから、降水により乾式キヤスクの安全機能を損なうおそれはない。

評価結果	
積雪	<p>敷地付近の積雪記録（1857～1963年）及び宇和島特別地域気象観測所での観測記録（1951～2005年9月）によれば、最大積雪量は52cm（1960年12月29日～1961年1月4日）である。火山の影響評価では、この堆積荷重を上回る降下火砕物と積雪の組み合わせ荷重を想定しているため、火山の影響評価に含まれる。</p>
落雷	<p>金属製の静的機器である乾式キャスクは、落雷による電氣的影響を受けない。</p>
地滑り	<p>乾式キャスクは、地滑りが発生するおそれのない位置に設置するため、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。</p>
生物学的 事象	<p>乾式キャスクは金属製の静的機器であるため、小動物による損傷の影響を受けず、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。</p>
高潮	<p>発電所周辺海域の潮位については、発電所から北東約20km地点に位置する長浜港における潮位を設計潮位とする。本地点の潮位は、既往最高潮位(H.H.W.L.)EL.+2.88m（昭和29年9月13日台風12号時に観測）、湖望平均満潮位(H.W.L.)EL.+1.62mである。これに対し、敷地の整地レベルをEL.+10mとしているため、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。</p>
飛来物	<p>使用済燃料乾式貯蔵施設に対する航空機落下確率は約5.4×10^{-8}回/炉・年であり、防護設計の要否判断の基準である10^{-7}回/炉・年を超えない。乾式キャスクの場合、その標的面積は使用済燃料乾式貯蔵施設全体の標的面積を下回り、実際の航空機落下確率はさらに低くなるため、航空機落下による防護については設計上考慮する必要はない。また、本発電所敷地周辺の社会環境からみて、発電所周辺での爆発等に起因する飛来物により、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。</p>
ダムの 崩壊	<p>発電所前面海域へ流入する河川はないことから、ダムの崩壊による影響を考慮する必要はない。</p>
有毒ガス	<p>乾式キャスクに対して人員を常駐させる必要はないため、有毒ガスによる影響を受けない。</p>
船舶の 衝突	<p>乾式キャスクは、船舶の衝突による影響を受けないEL.+25mの位置に設置するため、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。</p>
電氣的 障害	<p>乾式キャスクは動力を用いずに自然換気により除熱を行い静的に貯蔵する設備であることから、電氣的障害による電氣的影響を受けず、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。</p>

※ 森林火災、爆発及び近隣工場等の火災をまとめて「外部火災」とする。

伊方発電所 3 号炉
使用済燃料乾式貯蔵施設設置に伴う
敷地境界線量の影響評価について

1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵施設（以下「乾式貯蔵施設」という。）の設置に伴う、伊方発電所敷地境界における通常貯蔵時の線量については、「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」（以下「審査ガイド」という。）に基づき、乾式キャスク表面から1 m離れた位置における線量当量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ となるよう線源強度を規格化したソースタームを用いて評価を行っている。

現在、使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「乾式貯蔵建屋」という。）による遮蔽により、年間 $50 \mu\text{Sv}$ 以下を満足する設計としているが、今回、乾式貯蔵建屋がない条件で、線源強度等の評価条件を現実的に見直した場合の敷地境界線量を評価した。

なお、評価にあたって、乾式貯蔵建屋なしの条件下では、既設建屋に比べて乾式貯蔵施設からの寄与が大きいため、伊方発電所敷地境界での評価地点のうち、乾式貯蔵施設からの最短地点（B点）を評価対象とした。

2. 評価方法

敷地境界線量は、乾式キャスク表面から1 m離れた位置における線量当量率をもとに、遮蔽解析コードを用いて評価地点での線量を評価している。

具体的には、乾式キャスク表面から1 m離れた位置における線量当量率について、申請評価においては、審査ガイドに基づき、 $100 \mu\text{Sv/h}$ となるよう規格化しているが、現実的な評価（影響評価）では、燃料収納条件をもとに、燃料の線源強度を計算後、乾式キャスク内部から、表面から1 m離れた位置の線量当量率を計算した。また、乾式キャスク基数は45基として評価を行った。

評価地点までの遮蔽計算については、乾式キャスク1基分による線量を算定後、評価地点に寄与する乾式キャスクの数量を乗じることにより評価した。影響評価にあたっては、寄与する乾式キャスクの数量を最大配置可能な数量にした。

遮蔽計算に使用した評価モデルを図1～図3に示す。

3. 評価条件

ガンマ線及び中性子線各々に対する、評価パラメータの条件設定と申請評価ベースに対する影響比を表1、2に示す。

ここで、影響評価として実施する現実的な評価の評価条件設定の考え方を示す。

(1) 乾式キャスク型式

乾式キャスク型式は、申請している MSF-24P と MSF-32P のうち、外面の線量率が大きい MSF-24P を代表とし選定する。

なお、線源として MSF-24P を代表として評価するため、今後別型式の乾式キャスクを採用する場合には、外面の線量率が異なることで、影響評価結果を超える可能性がある。

(2) 線源強度・スペクトル・自己遮蔽

乾式キャスク外面の線量率は、乾式キャスクの外面部位ごとに中性子線及びガンマ線の内訳が異なることから、乾式キャスク全体に占める割合が最も大きい部位であり、中性子線とガンマ線の合計値が最も大きくなる側部中央の値を代表とするとともに、当該部位のスペクトルを用いる。ここで、乾式キャスク外面の線量当量率やスペクトルについては、乾式キャスクの自己遮蔽を考慮して得られた評価値であるため、これらを設定することで自己遮蔽効果は現実的な効果として考慮済みである。

(3) 相互遮蔽

相互遮蔽効果（他の乾式キャスクが遮蔽体として寄与する効果）を次のように設定する。

a. ガンマ線

ガンマ線については、直進性が強く、散乱減衰が大きい特徴を有することから他の乾式キャスクが遮蔽体として寄与することによる相互遮蔽が敷地境界線量に与える影響が大きい。

よって、相互遮蔽効果が最大限見込まれる条件として、評価点Bから見た最外周乾式キャスクより内側列の乾式キャスク線量が全て最外周乾式キャスクで遮蔽されるとした場合を仮定し評価（乾式キャスク6基を評価対象）する。（図5参照）

なお、現実的には内側列乾式キャスクを直視可能な評価点の相互位置関係となる場合は相互遮蔽効果が小さくなること、上方等の隣接する乾式キャスクとの相互遮蔽が期待できない方向への線量については、相互遮蔽効果は期待できないことを考慮すると、実際の敷地境界評価点の評価値が影響評価結果を超える可能性がある。

b. 中性子線

中性子線については、ガンマ線に比べ、直進性が低く回り込みやすい性状のため、他の乾式キャスクによって十分に遮蔽されず、評価点Bに到達しやすいことから、隣接する他の乾式キャスクによる相互遮蔽による低減効果は小さい。

表1 主要な評価条件とその影響比（ガンマ線）

項目	申請評価ベース	現実的な評価	影響比	
	乾式貯蔵建屋なし	乾式貯蔵建屋なし		
① 線源強度	乾式キャスク表面 1 m 地点の線量率をガンマ線 100 μ Sv/h で規格化	乾式キャスク表面 1 m 地点の線量率をガンマ線 67.7 μ Sv/h で評価 ○算定条件 型式：MSF-24P 濃縮度： <input type="text"/> 燃焼度 48 GWd/t（中央） 44 GWd/t（外周） 冷却期間 15 年 線量率：側部中央を代表（別紙 1， 2 参照）	0.68	
② スペクトル	包絡スペクトル	固有スペクトル （MSF-24P 乾式キャスクの側部中央の解析値）	0.78	
③ 自己遮蔽	考慮	考慮	-	
④ 相互遮蔽	未考慮 （キャスク 48 基分の寄与を試算） ^(注1)	最外周乾式キャスクで考慮しうる最大効果を見込んだ 6 基による寄与割合を算出（別紙 3 参照）	0.14	
⑤ 線源配置	未考慮 （建屋中心に点線源を設定）	45 基分の線源位置を個別に設定しても、平均すれば建屋中心となるため、影響は小さい。	影響小	
⑥ 周辺環境（地形）	考慮 線源から評価点までに遮蔽物となる建屋や山等は存在しない。EL.差による距離増加の影響は小さい。	考慮 線源から評価点までに遮蔽物となる建屋や山等は存在しない。EL.差による距離増加の影響は小さい。	-	
⑦ 評価コード	燃料の線源強度評価	-	ORIGEN2 コード	-
	乾式キャスク表面 1 m までの輸送評価	-	DOT コード	-
	評価点までの遮蔽評価	QAD コード	ANISN コード	②の影響比含まれる
合計	583 μ Sv/y	43 μ Sv/y	0.073	

(注1) 建屋ありの評価に合わせて 48 基とした

表2 主要な評価条件とその影響比（中性子線）

項目	申請評価ベース	現実的な評価	影響比	
	乾式貯蔵建屋なし	乾式貯蔵建屋なし		
① 線源強度	乾式キャスク表面 1 m 地点の線量率を中性子線 100 μ Sv/h で規格化	乾式キャスク表面 1 m 地点の線量率を中性子 18.3 μ Sv/h で評価 ○算定条件 型式：MSF-24P 濃縮度： <input type="text"/> 燃焼度 48 GWd/t (中央) 44 GWd/t (外周) 冷却期間 15 年 線量率：側部中央を代表 (別紙 1, 2 参照)	0.18	
② スペクトル	包絡スペクトル	固有スペクトル (MSF-24P 乾式キャスクの側部中央の解析値)	0.71	
③ 自己遮蔽	考慮	考慮	-	
④ 相互遮蔽	未考慮 (乾式キャスク 48 基分の寄与を試算) (注1)	計算手法上、考慮できないものの、上方に放射される中性子が支配的となるため、影響は小さい。 評価対象を 45 基とする影響はあり。	0.94	
⑤ 線源配置	未考慮 (建屋中心に点線源を設定)	45 基分の線源位置を個別に設定しても、平均すれば建屋中心となるため、影響は小さい。	影響小	
⑥ 周辺環境 (地形)	考慮 線源から評価点までに遮蔽物となる建屋や山等は存在しない。EL.差による距離増加の影響は小さい。	考慮 線源から評価点までに遮蔽物となる建屋や山等は存在しない。EL.差による距離増加の影響は小さい。	-	
⑦ 評価コード	燃料の線源強度評価	-	ORIGEN2 コード	-
	乾式キャスク表面 1 m までの輸送評価	-	DOT コード	-
	評価点までの遮蔽評価	ANISN コード	ANISN コード	-
合計	1,100 μ Sv/y	135 μ Sv/y	0.12	

(注1) 建屋ありの評価に合わせて 48 基とした

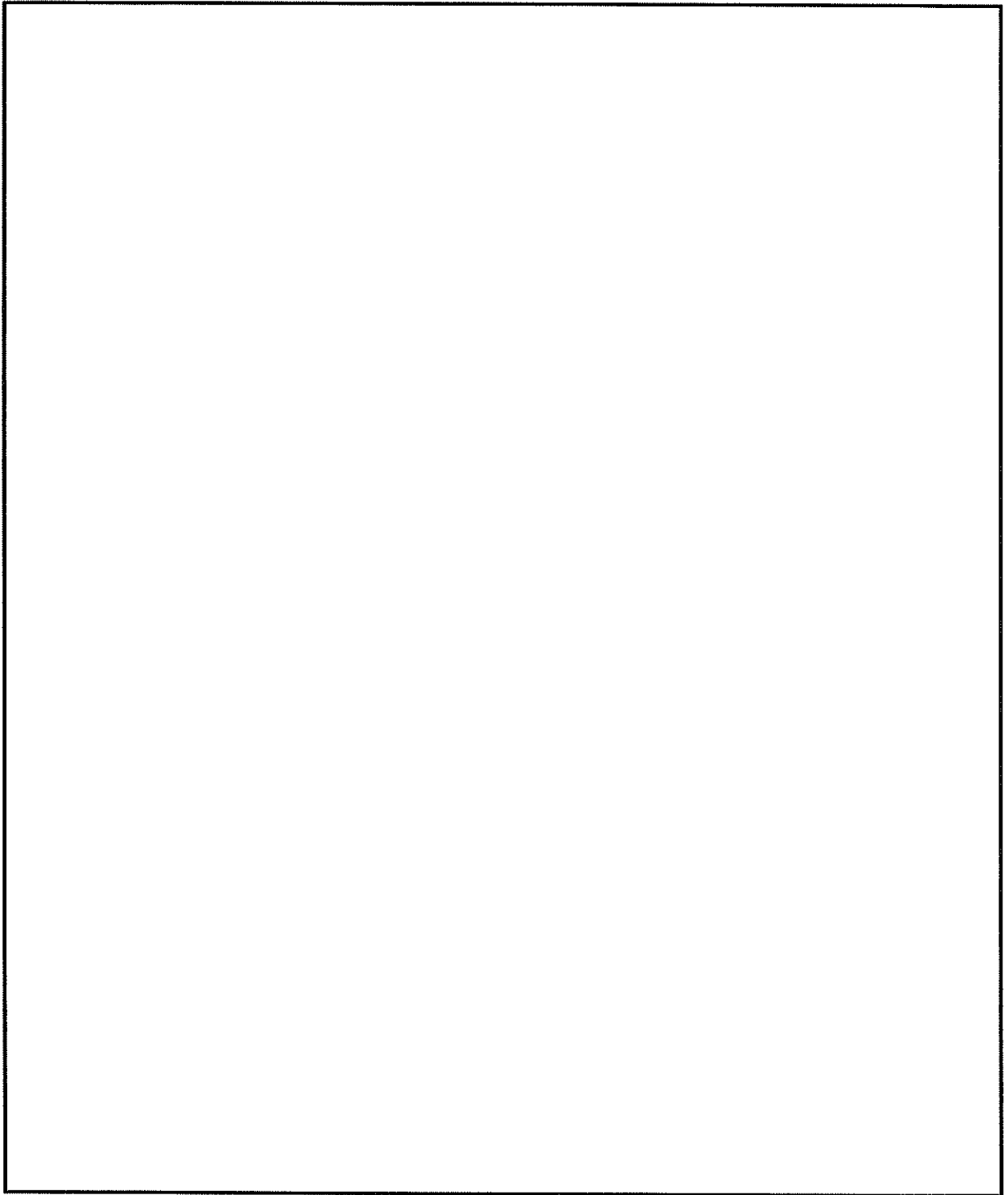
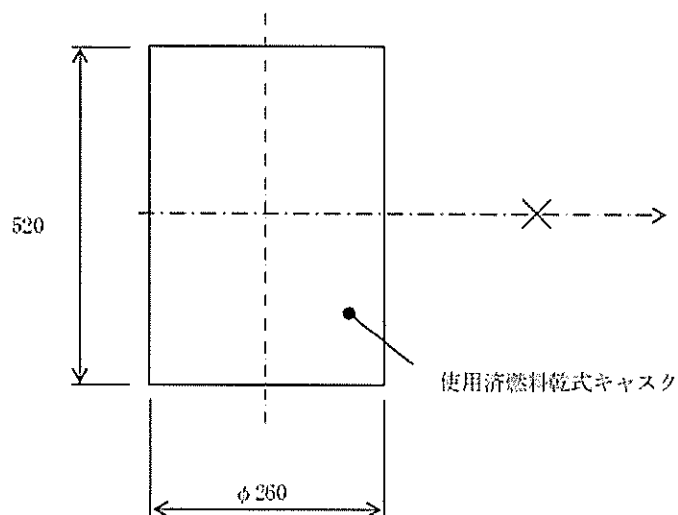


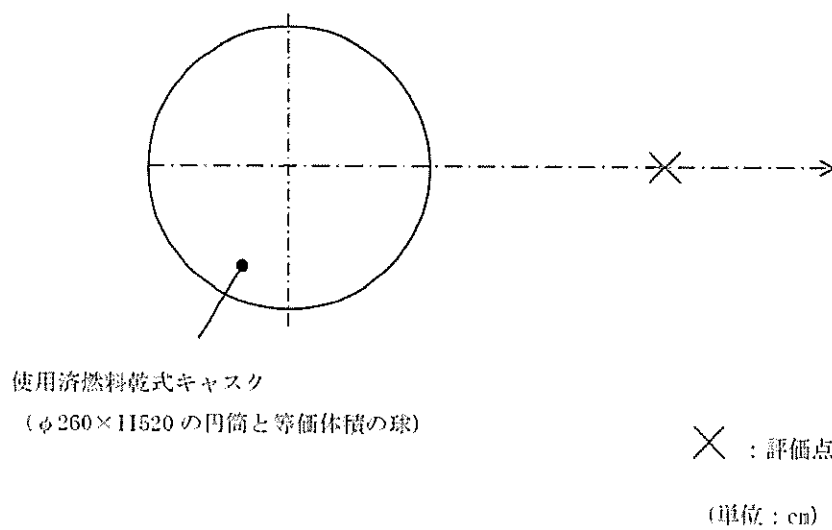
図1 乾式キャスク遮蔽評価モデル (MSF-24P)



× : 評価点

(単位: cm)

図2 敷地境界におけるガンマ線評価 (申請評価ベース)



× : 評価点

(単位: cm)

図3 敷地境界におけるガンマ線評価 (現実的な評価) および中性子評価 (申請評価ベース・現実的な評価)

4. 評価結果

3. の評価条件をもとに敷地境界線量を試算した結果を表3に示す。

表3のとおり、乾式貯蔵建屋なしで評価条件を現実的に見直した場合の敷地境界線量(試算)は、年間約190 μ Svとなり、1mSvを下回るものの、目標値となる50 μ Svを上回る結果となった。

表3 伊方発電所敷地境界の年間線量試算結果(乾式貯蔵建屋なし)

評価地点 (乾式貯蔵施設 からの距離)	年間線量 (μ Sv)					
	申請評価ベース			現実的な評価 ^(注1)		
	乾式貯蔵 施設 ^(注2)	既設建屋	合算	乾式貯蔵 施設 ^(注3)	既設建屋	合算
B点 ^(注4) (420 m)	約 1,100	3.9	約 1,110	約 180	3.9	約 190

(注1) 概算値のため有効数字2桁に切上げた値

(注2) 評価値の大きい中性子100%の評価結果で代表

(注3) ガンマ線43 μ Sv+中性子線135 μ Sv=約180 μ Sv

(注4) 伊方発電所敷地境界での評価地点のうち、乾式貯蔵施設からの最短地点

(参考)

表4 伊方発電所敷地境界の年間線量(乾式貯蔵建屋ありの場合)

評価地点	年間線量 (μ Sv)			
	乾式貯蔵建屋 ^(注1)	既設建屋	合算	目標値
A点 ^(注2)	0.16	5.1	5.2	≤50
B点	0.27	3.9	4.2	

(注1) 評価値の大きいガンマ線100%の評価結果で代表

(注2) 申請評価地点

4. まとめ

敷地境界線量の目標値である年間50 μ Svを満足するためには、乾式貯蔵建屋を設置することにより、放射線量を低減する必要がある。

また、乾式貯蔵建屋なしの場合は、図4に示すように、発電所構内で広範囲(乾式貯蔵施設から半径約80m)にわたり管理区域を設定する必要があり、作業員の被ばく線量の増加や発電所の運用に支障が生じる。

そのため、伊方発電所乾式貯蔵施設では、建屋としての遮蔽機能が必要であり、当社は乾式貯蔵建屋を設置する設計としている。

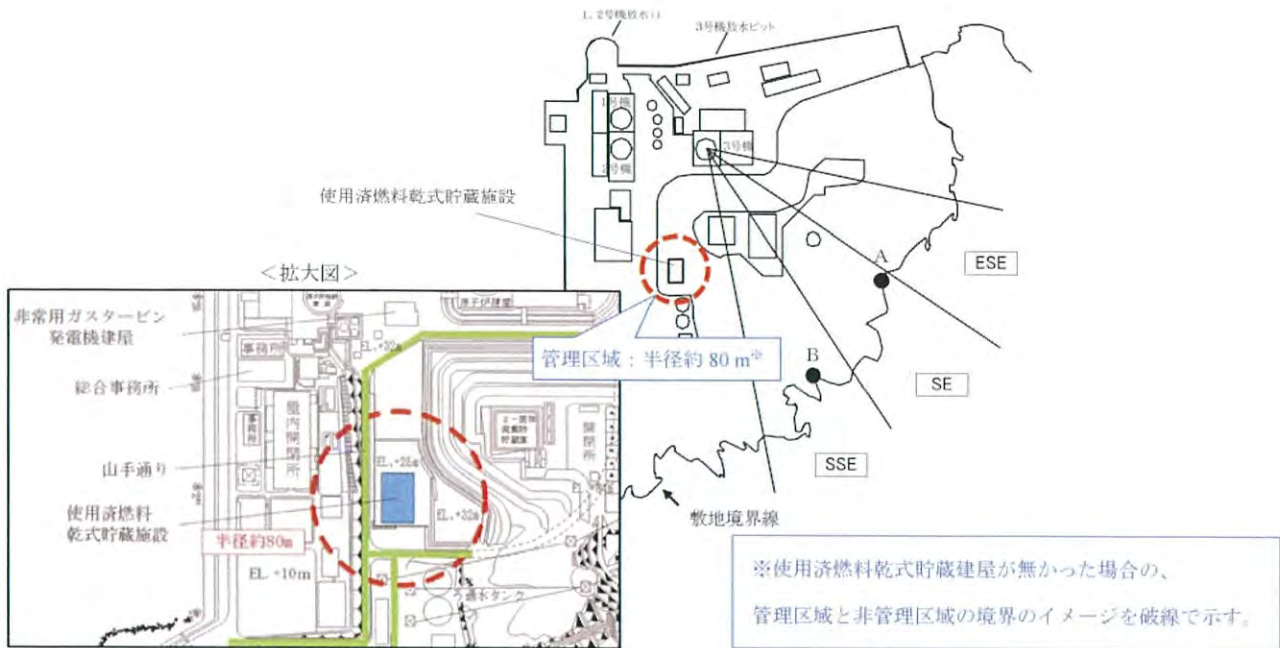


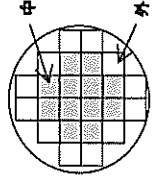
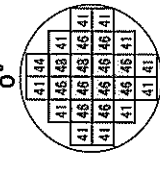
図4 乾式貯蔵施設と評価地点

以上

伊方3号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

下表のとおり、各収納制限に対する解析条件の保守性にについて整理した結果、前述の「現実的な評価」結果に与える影響は小さい（以下すべてを考慮した場合でも、影響程度は約40%程度である）ことを確認した。

- ①：解析条件の簡素化のために考慮している保守性
- ②：運用上必要な保守性
- ③：設計上必要な保守性

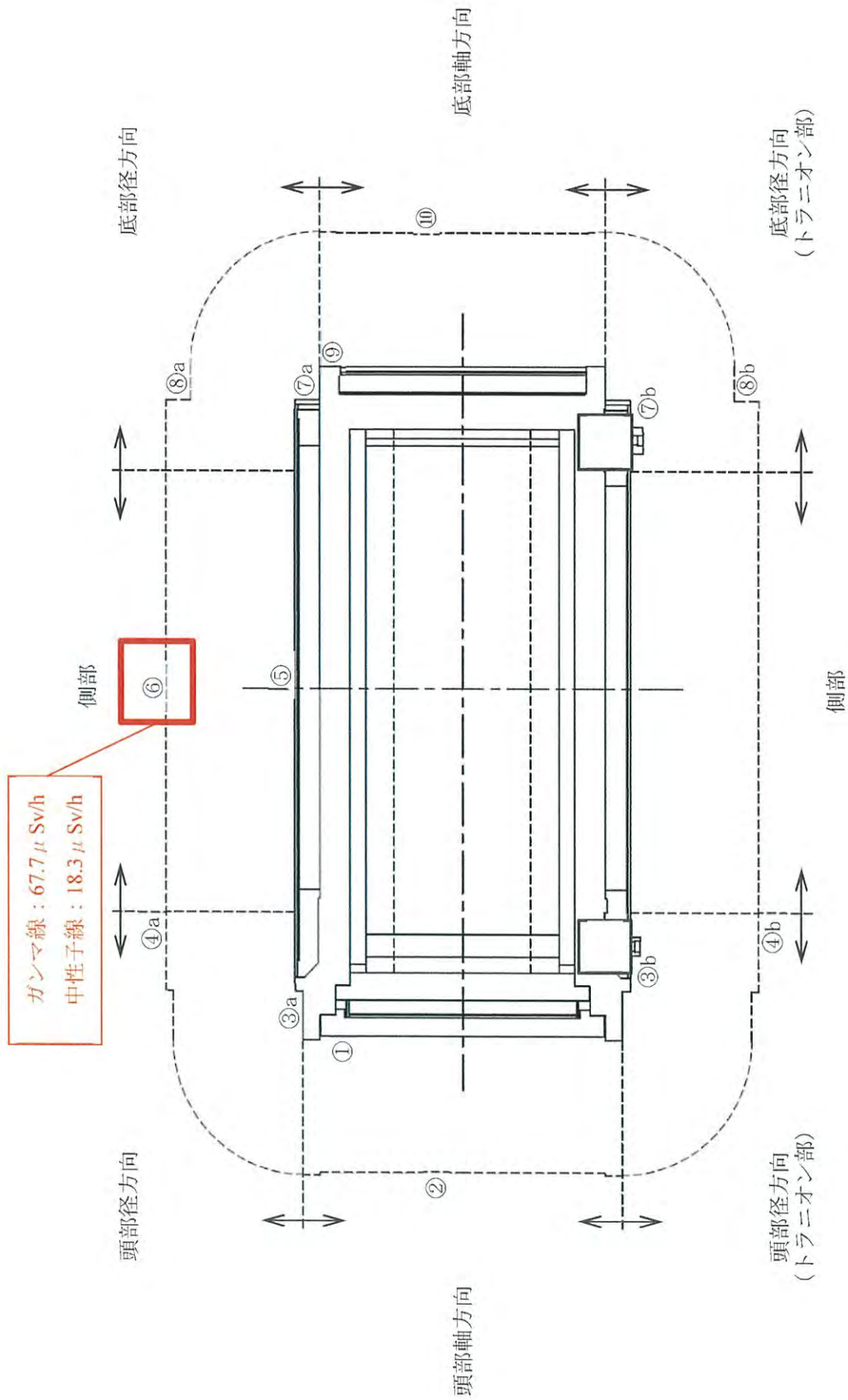
取納物仕様	燃料タイプ	キャスク収納条件 配置条件		燃料スペース		解析条件		影響程度
		中央部	外周部	中央部	外周部	中央部	外周部	
燃料 集合体 1体の 仕様	初期ウラン濃縮度 (wt%)	17×17型		17×17型		17×17型		濃縮度が0.05%の差異がなく、純濃縮度への影響は軽微(1%未満) ① 純濃縮度は重量に比例するため、影響は軽微(2%程度) ① 配置欄に記載のとおり 配置欄に記載のとおり 配置欄に記載のとおり 純濃縮度として考慮しており、装荷しない場合の構造材放射化ガンマ線による乾式キャスク内部への影響は軽微(5%程度) ② 濃縮材として考慮していないが、遮蔽効果を考慮した場合でも影響は軽微(1%未満) ② 配置欄に記載のとおり、局所的に高くなる場合があるため、遮蔽解析では考慮していない。
	ウラン重量(kg)	≤4.2		17×17型		17×17型		
	最高燃焼度(GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48 ^{*1}	≤44 ^{*1}	≤48	48	44		
	SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17	A型: ≥15 B型: ≥17	-	15	-		
	最高燃焼度(GWd/t) SFPでの冷却期間 (年)	≤90	-	-	90	-		
パーナブル ホース	最高燃焼度(GWd/t)	≤90	-	-	90	-		
	SFPでの冷却期間 (年)	≥15	-	-	15	-		
キャスク 1基あたり	平均燃焼度(GWd/t)	≤44 ^{*1}	-	-	-	-		
	配置(例)		-	-		-	実運用として乾式キャスク全体では44GWd/t以下となるよう取納するが、乾式キャスクのある方向(0°方向など)において中央部48GWd/t/外周部44GWd/t、冷却期間15年 ^{*2} の配置となる可能性があるため、解析モデル(RZ体系の二次元モデル)において中央部48GWd/t/外周部44GWd/t、冷却期間15年と設定している。③	
解析結果 ^{*3}		-	-		線 面: 1.83 mSv/h 表面から 1m: 86 μSv/h			
判定基準		-	-		線 面: 2 mSv/h以下 表面から 1m: 100 μSv/h以下			

※1：使用済燃料ヒット貯蔵中燃料のうち、乾式キャスク貯蔵対象燃料を効率的に収納できるような設定

※2：キャスク1基あたりの平均燃焼度を踏まえ、仮に収納燃料の燃焼度を全数44GWd/tとした場合、影響は約10%程度 ③

※3：使用済燃料貯蔵量推移イメージ(3基貯蔵/年)では貯蔵開始から15年間で45基貯蔵となるため、収納燃料の冷却期間を仮に15～30年の平均22.5年とした場合、影響は約25%程度 ②

※4：設計上必要となる公差(材料密度や部材厚さ)等に係る保守性は考慮している ③



(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おり、その結果が表1と対応する。

図1. 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (MSF-24P)

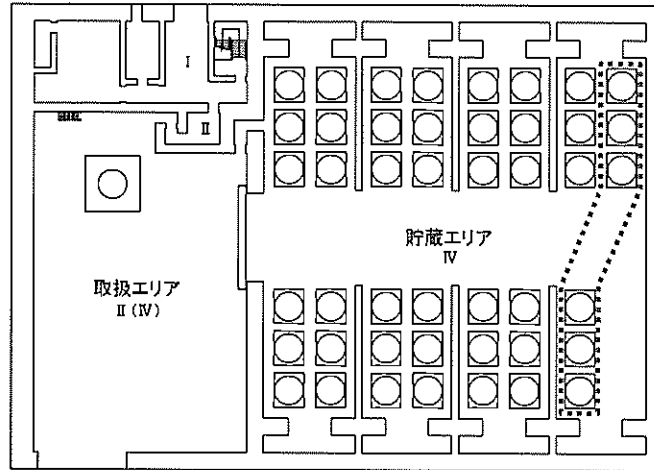
表 1. 線量当量率評価結果 (MSF-24P)

(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	③b		⑦a	⑦b	⑨
表面	ガンマ線	<0.1	8.0	100.7	4.0	5.4	<0.1
	燃料有効部	0.4	1.1	25.9	6.6	13.4	0.3
	構造材放射化	0.8	2.3	25.7	7.4	4.8	0.9
二次ガンマ線	333.7	804.2	741.4	45.1	1807.3	1108.3	222.6
中性子線	335.0	807.7	858.1	197.4	1825.3	1131.9	223.9
合計	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
評価点	0.3	22.5	22.6	44.8	9.0	7.9	4.9
表面から 1 m	3.5	20.1	20.9	12.5	7.4	6.1	28.8
ガンマ線	0.4	5.4	5.4	10.4	3.0	2.8	3.6
燃料有効部	64.8	23.2	32.7	18.3	56.6	66.3	23.1
構造材放射化	69.0	71.2	81.6	86.0	76.0	83.1	60.4
二次ガンマ線							
中性子線							
合計							

(注)0.1未満の値は0.1として合計に考慮した。

相互遮蔽を見込む乾式キャスクについて



×
評価点

図 5 相互遮蔽を見込む乾式キャスクについて

使用済燃料乾式貯蔵施設の設置変更許可
に係る詳細な確認範囲について

使用済燃料乾式貯蔵施設の設置変更許可に係る詳細な確認範囲について

使用済燃料乾式貯蔵施設の設置変更許可に係る詳細な確認範囲を明確にするため、既設建屋（燃料取扱棟）において、使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、「乾式キャスク」という。）へ使用済燃料集合体を装荷する作業から、乾式キャスクを使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下、「乾式貯蔵建屋」という。）内に貯蔵し、貯蔵後に構外輸送するまでの全体プロセスを整理した結果を表1に示す。このうち、既設建屋における使用済燃料ピットクレーン（以下、「SFP クレーン」という。）および燃料取扱棟クレーン（以下、「FH/B クレーン」という。）での新燃料（輸送容器含む）、使用済燃料、使用済燃料輸送容器および乾式キャスクの取扱いについて、下表に示す。

表 SFP クレーンおよびFH/B クレーンの取扱い設備

	SFP クレーン	FH/B クレーン
新燃料（輸送容器含む）	×	○
使用済燃料	○	×
使用済燃料輸送容器	×	○
乾式キャスク	×	○

○：取扱う、×：取扱わない

1. SFP クレーンでの取扱いについて

SFP クレーンでの使用済燃料の取扱いについては、燃料取扱設備として許可を受けている。ここで、SFP クレーンについては、今回取扱う使用済燃料が、既許可と同一であることから、既許可に包絡される。詳細は添付資料参照。

2. FH/B クレーンでの取扱いについて

FH/B クレーンについては、新燃料（輸送容器含む）を取扱うことから燃料取扱設備として許可を受けているとともに、使用済燃料輸送容器を取扱う設備としても許可を受けている。ここで、FH/B クレーンにより今回新たな乾式キャスクを取扱うこととなるが、表2に示すとおり、FH/B クレーンの容量（吊荷重）以下であることから、当該クレーンの既設設備の改造は伴わず使用することができ、既許可に包絡される。

3. 運搬モードについて

乾式キャスクの運搬モードについては、既に許可を受けている発電所内の構内輸送に用いる使用済燃料輸送容器と同様であり、乾式キャスクについては「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」で要求される事項を満足することを核燃料輸送物設計承認申請において説明している。なお、核燃料輸送物設計承認申請では、乾式キャスクへの燃料装荷作業中において、乾式キャスクが冠水する際の未臨界性についても説明している。

以上のとおり、運搬モード（既設建屋における乾式キャスクの取扱いを含む）については、既許可または別途審査に包絡されることから、乾式貯蔵施設の設置変更許可に係る審査においては、乾式キャスクの通常貯蔵様態（乾式貯蔵建屋内での取扱モードおよび貯蔵モード）を審査頂きたいと考えている。

以 上


表1. 乾式キャスクのモード、運用管理及び確認範囲に関する整理表 (1/2) (参考)

場所	既設建屋		構内	乾式貯蔵建屋										
	SFP キャスクビット	除染場 ビット		トレーラ エリア	取扱区域			貯蔵区域						
項目	燃料 キャスクビット 燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業
状態	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業
モード	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業
設計	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業

乾式貯蔵建屋へのルート

※：真空乾燥作業は、収納する使用済燃料の崩壊熱による温度上昇を踏まえ、作業時間等を管理することにより、使用済燃料の温度制限範囲内で実施する。

表1. 乾式キヤスクのモード、運用管理及び確認範囲に関する整理表 (2/2)。(参考)

場所	乾式貯蔵建屋							
	構外	構内	取扱区域			貯蔵区域		
項目	構外輸送 (岸壁→輸送先)	構内輸送 (乾式貯蔵→岸壁)	乾式キヤスク発送	発送仕立て② (緩衝体取付・車両積付け)	取扱区域内搬送 (天井クレーン搬送)	取扱区域内搬送 (搬送台車搬送)	貯蔵区域内搬送 (搬送台車搬送)	貯蔵指定位置解除 (アンカ解除)
状態	輸送状態 (緩衝体、三次蓋取付)		緩衝体		通常貯蔵状態			
モード	運搬モード (外運搬)		取扱モード		貯蔵モード			
設計	運搬モード (外運搬)		乾式貯蔵に係る詳細な確認範囲		貯蔵中の兼用キヤスクへの波及的影響 確認範囲			

↓ 構外搬出ルート

表2. 既設設備、使用済燃料輸送容器および乾式キャスクの仕様

既設設備		使用済燃料輸送容器 重量 (NFT-14P 型)	乾式キャスク重量		備考
名称	仕様		MSF-24P 型	MSF-32P 型	
FH/B クレーン	容量 (吊荷重) 125 (t)	約 114 (t)	約 123 (t)	約 124 (t)	乾式キャスク重量は、FH/B クレーンの容量 (吊荷重) の範囲内

乾式キャスクへの燃料装荷時想定事象と設計基準事故（燃料集合体の落下）との比較について

乾式キャスクへ使用済燃料集合体を装荷する作業時に想定される事象が、既許可の設計基準事故（燃料集合体の落下）に包絡されていることを示す。

乾式キャスクは、既設建屋において、使用済燃料ピット（以下、「SFP」という。）およびキャスクピットで使用済燃料集合体の装荷作業を行う。なお、当該作業には既設設備を用い、新たに追加、仕様変更等を伴う設備はない。

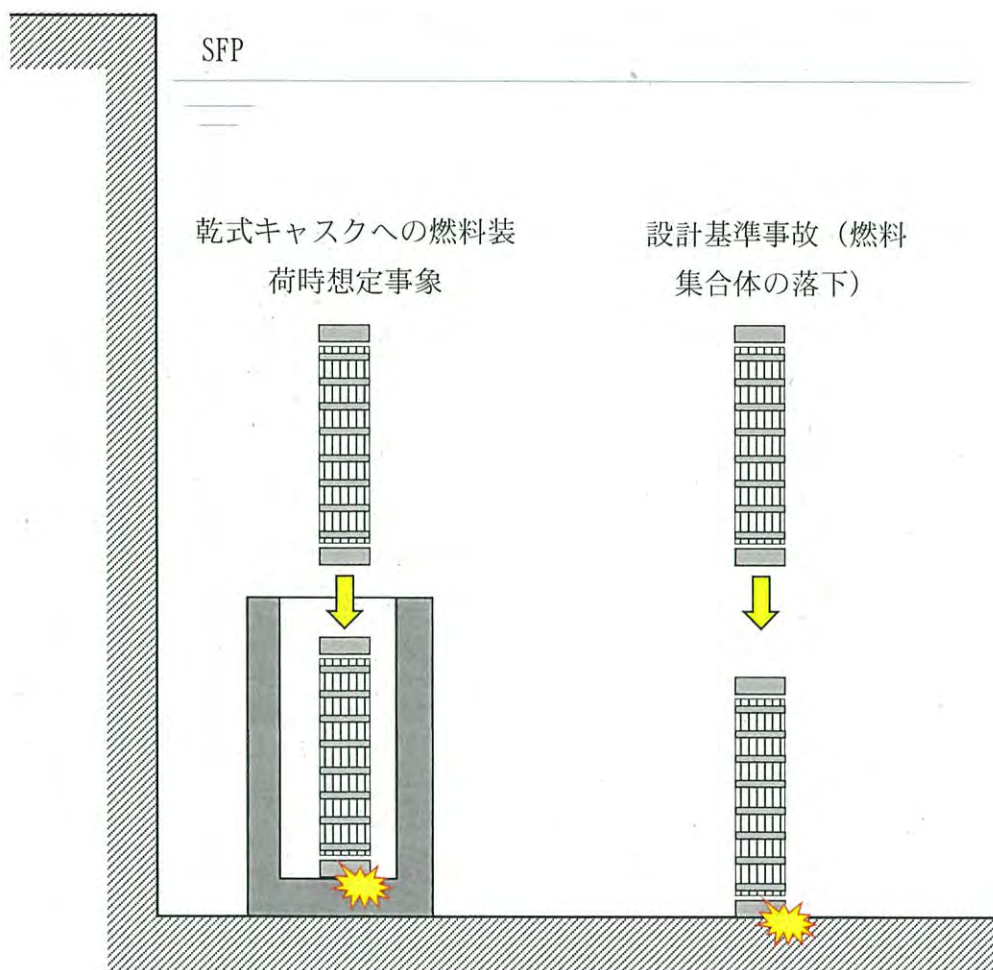
ここで、キャスクピットに据付けられた乾式キャスクに使用済燃料集合体を装荷する作業において想定される事象と、既許可において想定している事象を比較整理した結果を表1に示す。また、これらの事象について、SFPにおける燃料取扱時の高さ関係を図1に示す。

表1に示すとおり、燃料仕様、燃焼度、冷却時間（年数）および落下想定高さが、既許可の設計基準事故（燃料集合体の落下）に包絡されており、乾式キャスクを運用する上で既許可への影響はなく、新たに審査される項目はないことを確認した。

表1 乾式キャスクへの燃料装荷時想定事象と設計基準事故（燃料集合体の落下）との比較

			乾式キャスクへの 燃料装荷時想定事 象	設計基準事故（燃 料集合体の落下）	比較
評価条件	燃料仕様	型	17×17 型 48GWd/t	17×17 型 55GWd/t	燃料に係る評価条件は、設計基準事故（燃料集合体の落下）に包絡される。
		燃焼度	48GWd/t	55GWd/t	同上
		冷却時間	131,496 時間 (15 年)	100 時間	同上
	評価場所		SFP [※]	SFP [※]	—
	落下場所		乾式キャスク底部	SFP 床 [※]	落下高さは、設計基準事故（燃料集合体の落下）に包絡される。

※ 伊方3号炉 SFP における比較



(注) 比較のため SFP とキャスクピットの区画等は省略

図1 SFP における燃料取扱時の高さ関係

搬送中の使用済燃料乾式貯蔵容器の転倒及び
衝突防止について

1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵施設（以下、「乾式貯蔵施設」という。）において、使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、「乾式キャスク」という。）を乾式貯蔵容器搬送台車（以下、「搬送台車」という。）で搬送中に転倒しないこと及び貯蔵中の乾式キャスクに衝突しないことを示す。

2. 乾式キャスクの貯蔵架台での固定条件

乾式キャスクは、図1及び図2に示すように、貯蔵架台に設置し、4つの下部トラニオンを固定する方式とする。このため、搬送中であっても、乾式キャスクが貯蔵架台から浮き上がることはない。

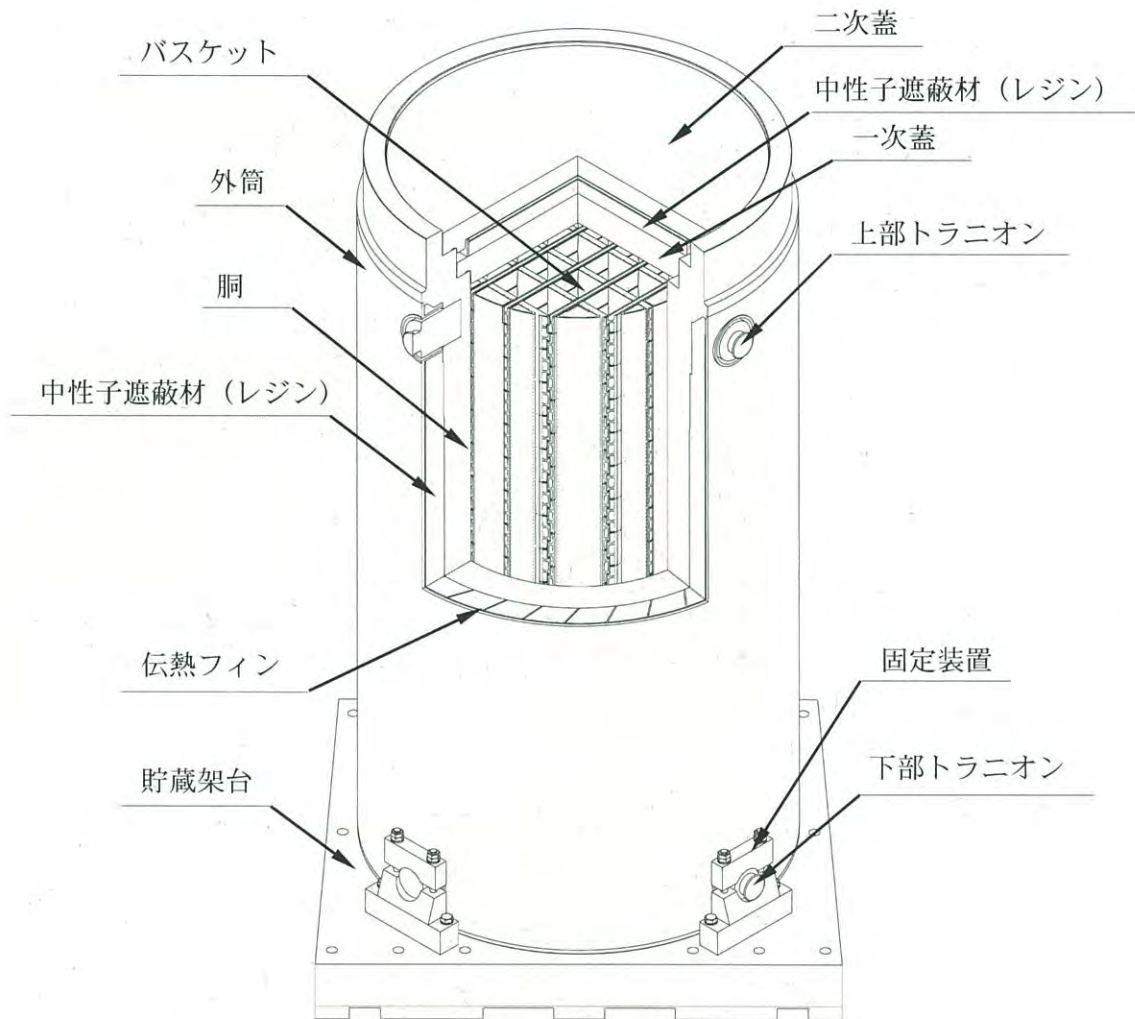


図1 貯蔵架台設置時の乾式キャスク

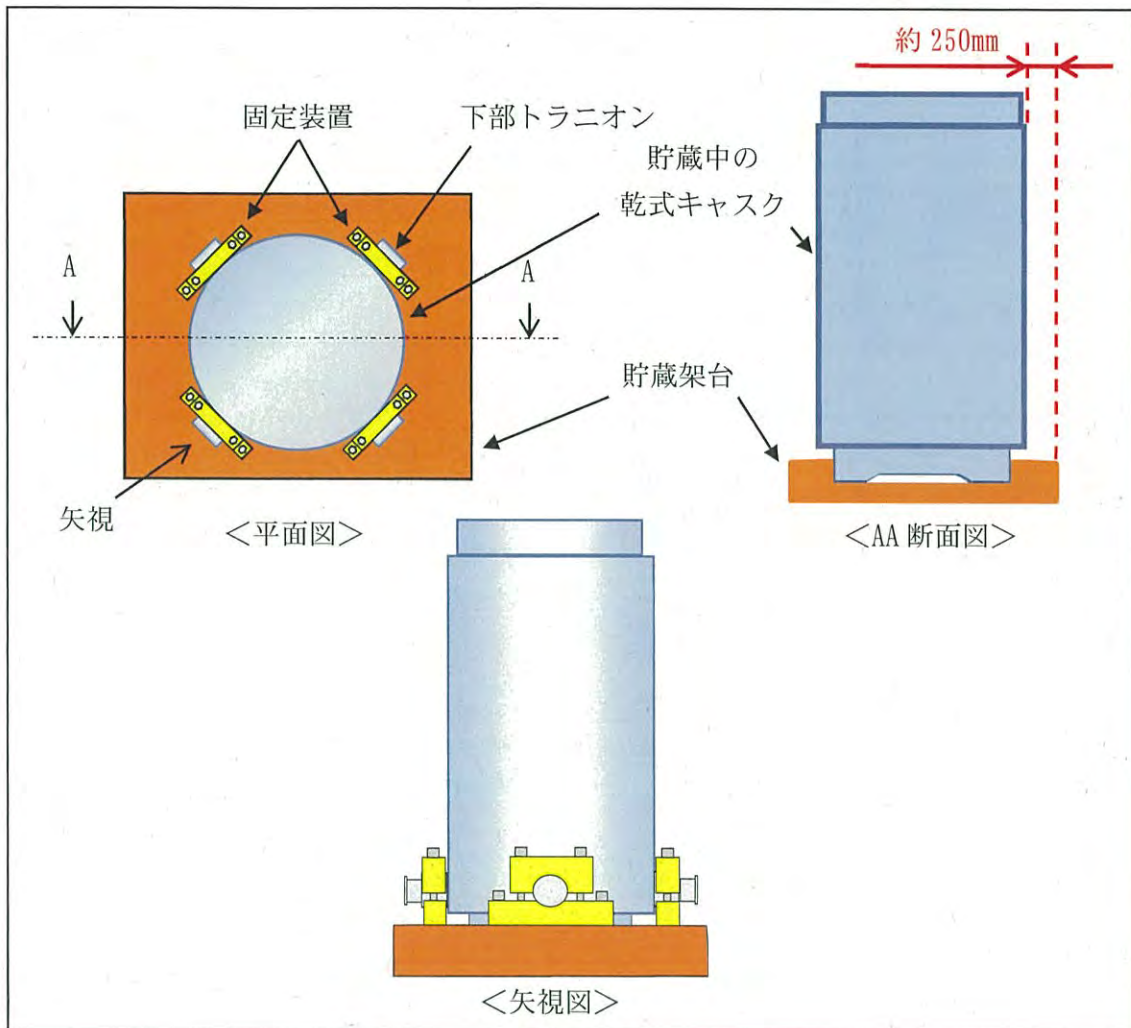


図2 貯蔵架台により支持された乾式キャスクの状態

3. 乾式キャスクの転倒に対するクライテリア

乾式キャスクを貯蔵架台に設置せずに、乾式キャスク単体で床面に貯蔵した場合の乾式キャスクの転倒に対するクライテリアを以下に示す。なお、貯蔵状態から転倒に至るまでの各状態を図3及び以下の①～④に示す。

- ① 貯蔵状態
- ② 乾式キャスクの重心位置が回転中心を超えない場合、自重が自身の姿勢を復元する方向に作用するため、乾式キャスクは転倒せず、貯蔵状態に戻る状態
- ③ 貯蔵中の乾式キャスクの重心が、回転中心の直上に位置する状態（クライテリア）
- ④ 乾式キャスクの重心位置が回転中心を超える場合、自重が自身を転倒させる方向に作用し、乾式キャスクが転倒する状態

ここで、乾式キャスクが転倒する場合、乾式キャスク転倒のクライテリアは、幾何学的に図3に示すとおりとなる。

- ・MSF-24P 型 :
- ・MSF-32P 型 :

ここで、実際の乾式キャスクの転倒に対するクライテリアは、2. に示すように乾式キャスクが貯蔵架台及び搬送台車に固定されており、乾式キャスク単体より重心が低く、回転中心と重心との水平距離が長くなるため、乾式キャスク単体の転倒に対するクライテリアより大きくなるが、保守的に乾式キャスク（MSF-24P 型及びMSF-32P 型）単体の転倒のクライテリア（）を用い、評価する。

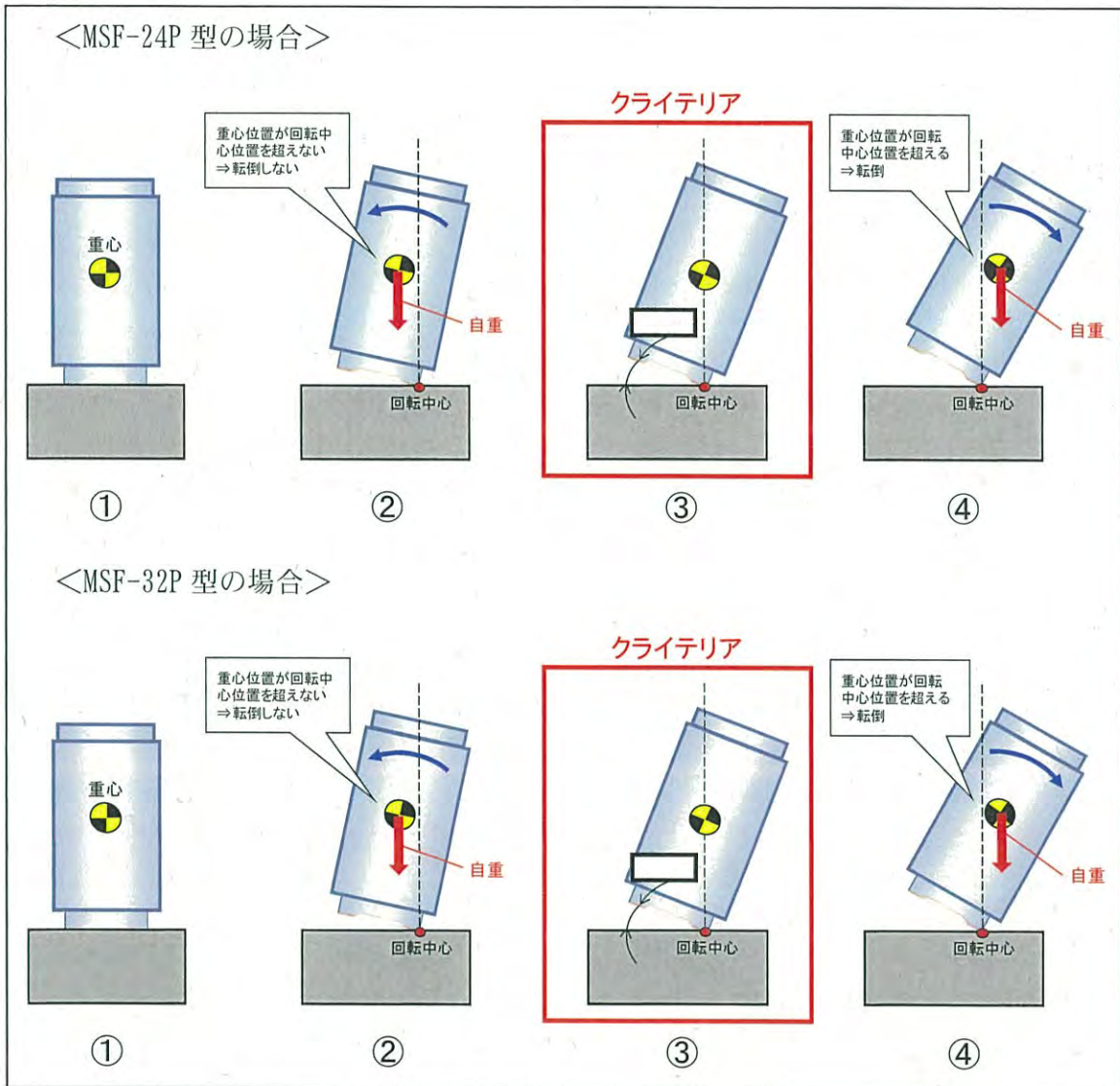


図3 乾式キャスクが貯蔵状態から転倒に至るまでの各状態

4. 乾式キャスクの転倒及び乾式キャスク同士の衝突の防止

乾式キャスク搬送中に搬送台車が仮に逸走し、搬送中の乾式キャスクの貯蔵架台と貯蔵中の乾式キャスクの貯蔵架台同士が衝突した場合を想定し、搬送中の乾式キャスクが転倒しないこと及び貯蔵中の乾式キャスクへ衝突しないことを評価する。

ここで、衝突速度を 0.0334 (m/s) ※1 とし、搬送台車及び乾式キャスク（貯蔵架台含む）が一体で傾く場合を想定する。ただし、搬送台車及び乾式キャスク（貯蔵架台含む）が一体となった場合の重心位置及び重量においては、保守的に搬送台車を考慮しない。

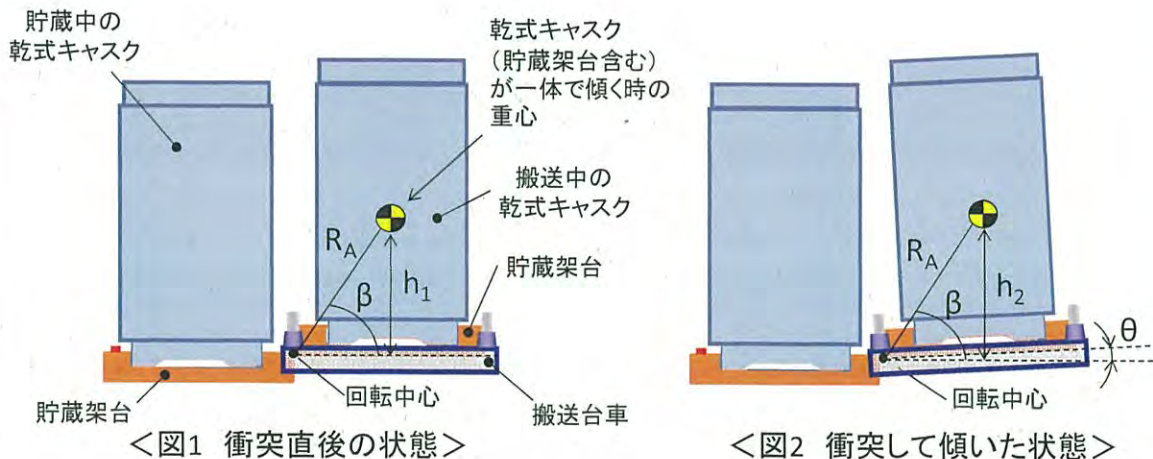
※1： 搬送台車の最大走行速度（2m/分）

このとき、衝突速度での運動エネルギーが、全て転倒エネルギー（乾式キャスク（貯蔵架台含む）の位置エネルギー）に使われたと仮定し、次式から傾き角を求めると、約 \square となり、乾式キャスク単体の転倒のクライテリア（約 \square ）より十分小さいため、搬送中の乾式キャスクは転倒しない。

$$\frac{1}{2}m(v)^2 = mgh_2 - mgh_1 \quad , \quad \theta = \sin^{-1}\left(\frac{h_2}{R_A}\right) - \beta \approx \square$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

- m : 乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重量 (kg)
- v : 衝突速度 (m/s)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- h_1 : 衝突直後の状態における、回転中心を基準高さとした乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重心高さ (m)
- h_2 : 衝突して傾いた状態における、回転中心を基準高さとした乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重心高さ (m)
- θ : 乾式キャスク（貯蔵架台含む）の傾き角 ($^\circ$)
- R_A : 回転中心から乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重心までの距離 (m)
- β : 回転中心を通る水平面及び直線 R_A で構成される角度 ($^\circ$)



また、図 4 の平面図及び断面図に示すように、搬送中に搬送台車及び乾式キャスク（貯蔵架台含む）が傾いても、搬送中の乾式キャスクの端部と貯蔵架台端部までの水平距離は約 250mm^{※2} となり、乾式キャスクの端部が貯蔵架台の端部より外側に出ることはなく、貯蔵中の乾式キャスクとの水平距離が約 500mm 確保されることから、貯蔵中の乾式キャスクは搬送中の乾式キャスクと衝突しない。

※2： 貯蔵架台が乾式キャスクと一体となって傾くため、厳密には貯蔵架台端部の位置も変化するが、傾き角が非常に軽微のため、ここでは貯蔵架台の位置が変化していないと仮定する。

以上より、乾式キャスク搬送中に搬送台車が逸走し、貯蔵中の乾式キャスクの貯蔵架台と衝突しても、搬送中の乾式キャスクは転倒せず、貯蔵中の乾式キャスクにも衝突しない。

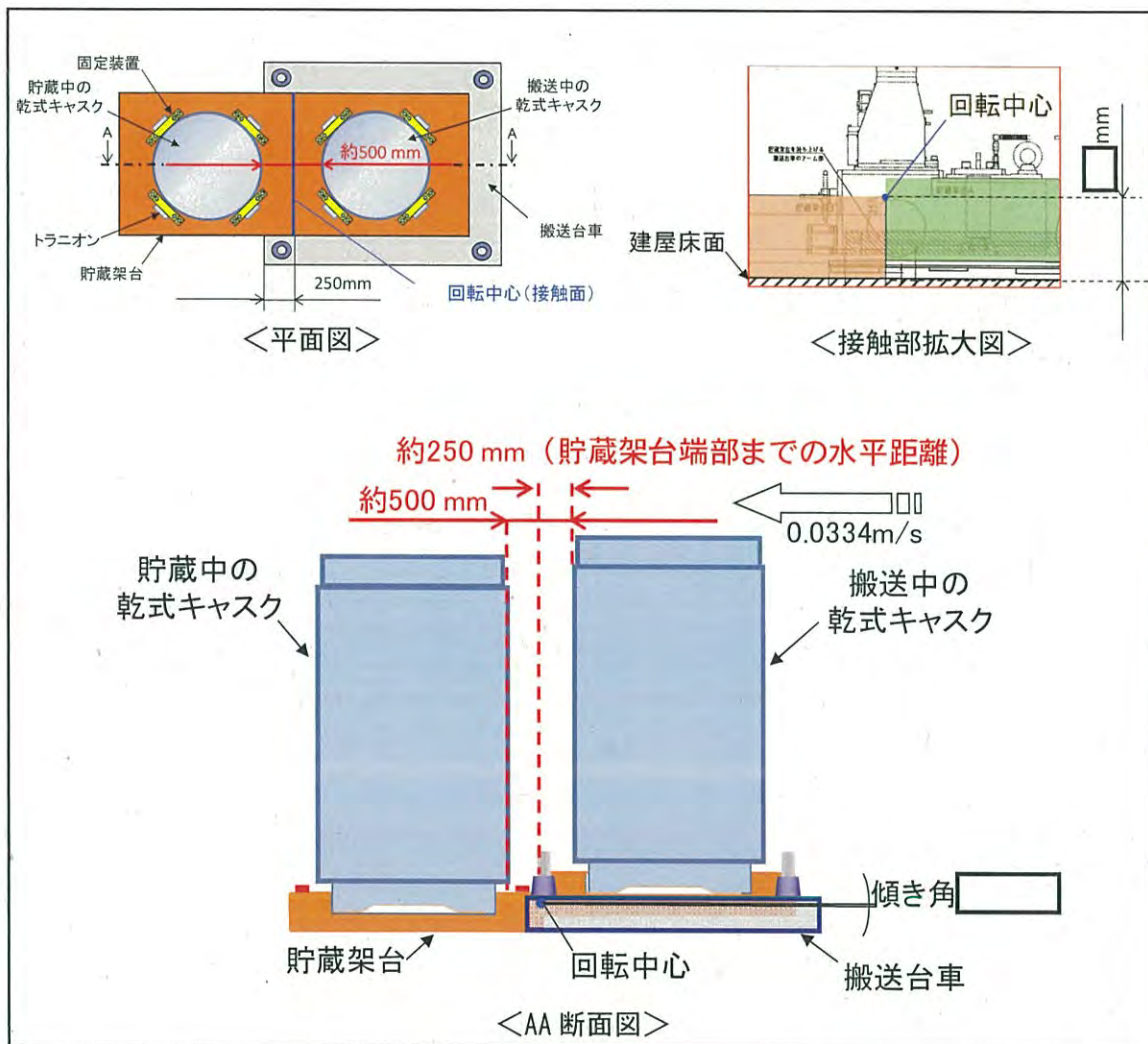


図 4 搬送台車及び乾式キャスクが一体で傾く場合の状態

解析条件等の比較

(核燃料輸送物設計承認申請／設置変更許可申請)

16 条における乾式キャスクの安全評価（遮蔽、臨界、除熱、閉じ込め）と核燃料輸送物設計承認申請における安全評価での解析条件の違いについて、MSF-24P 型の例を表 1～5 および図 1～4 に示す。

表 1 線源強度計算及び崩壊熱量計算における解析条件の相違

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	一般の試験条件	特別の試験条件		
解析コード	ORIGEN2.2UPJ	同左	同左	同じ
燃焼度	48,000 MWd/t (中央部) 44,000 MWd/t (外周部)	同左	同左	同じ
平均比出力	38.4 MW/t	同左	同左	同じ
照射日数	1,250 日 (中央部) 1,146 日 (外周部) 2,344 日 (BP)	同左	同左	同じ
初期濃縮度		同左	同左	同じ
冷却日数	5,479 日	同左	同左	同じ
ウラン重量		同左	同左	同じ
PF	考慮	同左	同左	同じ

※：MSF-24P 型の例で記載

表 2 遮蔽評価における解析条件の相違

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	通常輸送時及び一般の試験条件	特別の試験条件		
解析コード	DOT3.5	同左	同左	同じ
解析モデル	横置き想定 ・緩衝体：考慮（ただし、一般の試験条件下では、0.3 m 落下時の変形を考慮） ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮	横置き想定 ・緩衝体：無視 ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮 ・外筒、側部レジンの 1m 貫通試験による貫通孔をモデル化	縦置き想定 ・緩衝体：なし ・三次蓋：なし ・その他部位：考慮	貯蔵時は、三次蓋と緩衝体がない。
寸法公差	解析モデルの各種寸法は公称寸法でモデル化するが、各構成部材の寸法公差については最小厚さを密度係数（＝最小寸法／公称寸法）で考慮	同左	同左	同じ
密度	レジン以外：最低保証密度を使用し 使用して原子個数密度を設定 レジン：2.5%の減損を考慮 （60年間の経年変化を考慮）	レジン以外：最低保証密度を使用して原子個数密度を設定 レジン：50%の減損を考慮 （火災後の損耗を考慮）	同左（通常輸送時及び一般の試験条件）	同じ
判定基準	通常輸送時 表面： ≤ 2000 ($\mu\text{Sv/h}$) 表面から 1 m： ≤ 100 ($\mu\text{Sv/h}$) 一般の試験条件 表面： ≤ 2000 ($\mu\text{Sv/h}$)	表面から 1 m： ≤ 10 (mSv/h)	同左（通常輸送時及び一般の試験条件）	同じ

表 3 臨界評価における解析条件の相違

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	取扱い時	一般/特別の試験条件		
解析コード	SCALE	同左	同左	同じ
収納燃料	17×17 型 (48GWd/t)	同左	同左	同じ
燃料材質	二酸化ウラン	同左	同左	同じ
被覆管材質	ジルコニウム	同左	同左	同じ
燃料密度	95 %	同左	同左	同じ
ペレット直径	0.819 cm	同左	同左	同じ
燃料有効長	364.8 cm	同左	同左	同じ
被覆管肉厚	0.057 cm	同左	同左	同じ
燃料棒数	264 本	同左	同左	同じ
初期濃縮度	□ wt%	同左	同左	同じ
燃料棒ピッチ	通常 (1.26 cm)	通常、1 スパン拡大/縮小を考慮	同左 (取扱い時)	同じ
燃料集合体の幅	通常 (21.42 cm)	通常、1 スパン拡大/縮小を考慮	同左 (取扱い時)	同じ
キヤスクの配列	無限配列	同左	同左	同じ
解析モデル	BP 無視 中性子遮蔽材無視 緩衝体なし 三次蓋なし その他部位：考慮	BP 無視 中性子遮蔽材無視 緩衝体無視 (なしと同じ) 三次蓋無視 (なしと同じ) その他部位：考慮	同左 (取扱い時)	同じ
寸法公差	バスケットセルは公差考慮	同左	同左	同じ
キャビティ内条件	冠水状態：100%純水	乾燥状態：真空中に5リットルの水蒸気考慮 (浸漬時の水流入)	冠水状態：同左 (取扱い時) 乾燥状態：真空	貯蔵時は浸漬未考慮のため、乾燥状態を真空として評価
キャビティ外条件	真空	同左	同左	同じ
判定基準	実効増倍率 (+3σ 考慮) < 0.95	同左	同左	同じ

※：MSF-24P 型の例で記載

表 4 除熱評価における解析条件の相違

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	通常時／一般の試験条件	特別の試験条件		
解析コード	ABAQUS	同左	同左	同じ
解析モデル	全体モデル ・緩衝体：考慮 ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮 燃料集合体モデル ・燃料被覆管：考慮 ・燃料棒同士の隙間：He	全体モデル ・緩衝体：考慮（ただし、9m 落下時の変形考慮） ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮 同左	全体モデル ・緩衝体：なし ・三次蓋：なし ・その他部位：考慮 同左	貯蔵時は、三次蓋と緩衝体がない 同左
寸法公差	ノミナル寸法でモデル化	同左	同左	同じ
収納燃料の設計崩壊熱量	18.1 kW (17×17 型) 表 1 の条件にて計算した結果から保守側に設定	同左	同左	同じ
周囲温度	38°C (大気温度)	火災中：800°C-30 分間 火災前後：38°C (大気温度)	50°C (建屋内周囲温度)	貯蔵時は、建屋内の条件で解析。
自然対流	横置き状態	同左	縦置き状態	貯蔵時は、縦置き状態の条件で評価。
ふく射	全表面を考慮 基準温度：38°C	全表面を考慮 基準温度：800°C (火災中) ：38°C (火災前後)	建屋の天井と床面へのふく射を考慮	貯蔵時は、建屋内の条件で解析。
太陽熱	通常時：考慮しない 一般：考慮	考慮	同左 (通常時)	同じ
判定基準	バスケット：250°C 燃料集合体：275°C レジン：149°C 金属ガスケット：130°C 近接表面：85°C (通常時) 要求なし (一般)	バスケット：同左 燃料集合体：－ レジン：180°C 金属ガスケット：190°C 近接表面：要求なし	同左 (一般)	同じ

※：MSF-24P 型の例で記載

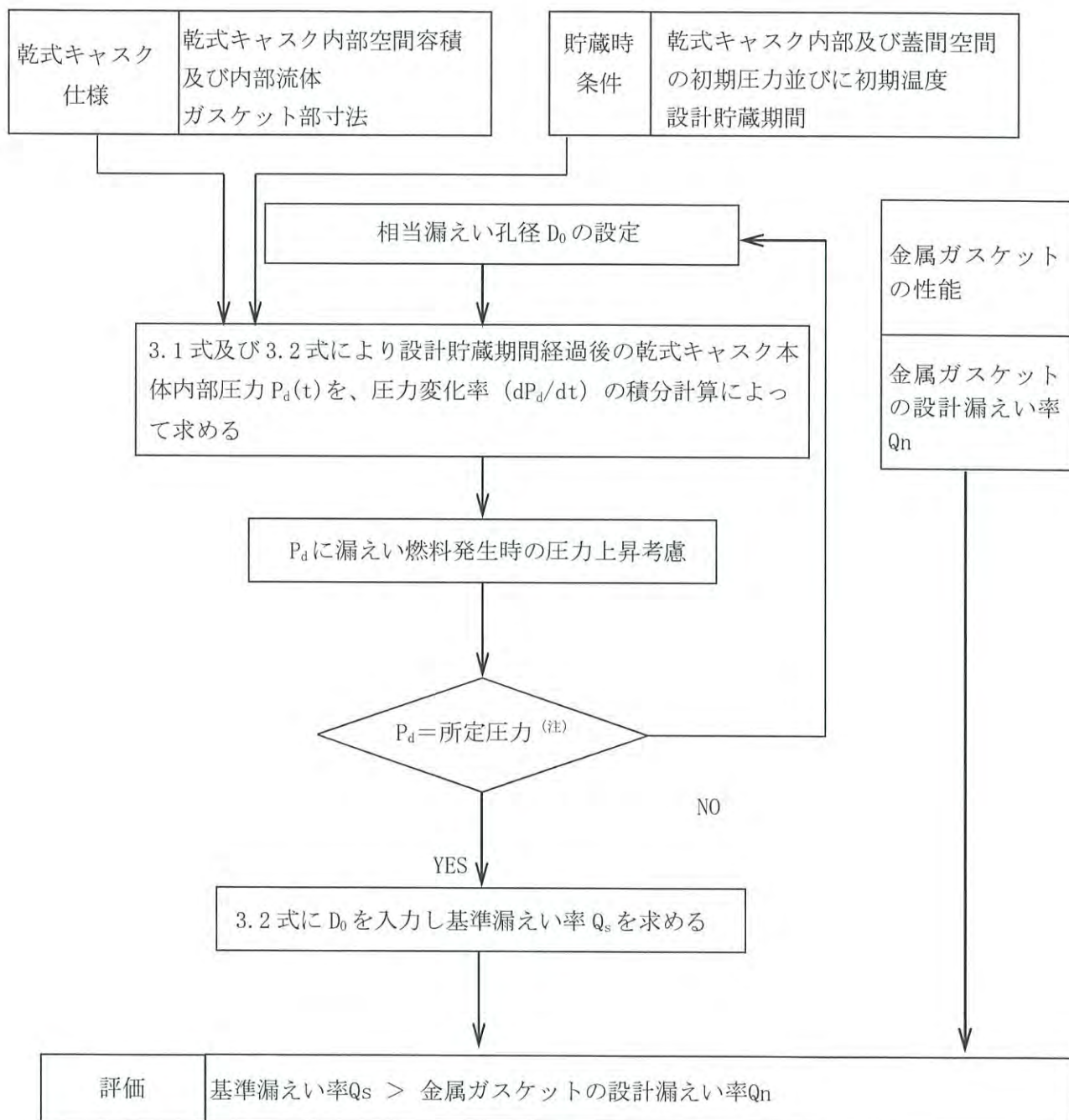
表 5 閉じ込め評価における解析条件の相違 (1/2)

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	一般の試験条件	特別の試験条件		
評価方法	キャビティ内の核分裂性ガス (^3H , ^{85}KR) が大気に漏えいする計算を行い、放射性物質の漏えい率が判定基準以下であることを確認。(一次蓋-二次蓋間は正圧、キャビティ内は負圧であり、キャビティ内ガスが大気に漏えいすることはないが、仮に、一次蓋及び二次蓋を無視し、キャビティ内圧が正圧になると想定し評価を実施)	同左	一次蓋-二次蓋間に充填された He ガスがキャビティ内に漏えいする計算を行い、キャビティ内圧が負圧 (0.097 MPa 以下) を維持できる基準漏えい率を計算。また、使用する金属ガスケットの性能が上記漏えい率以下であることを確認。	貯蔵時の閉じ込め境界は一次蓋の金属ガスケット、輸送時の閉じ込め境界は三次蓋のゴム O リングとしている。
評価フロー	図 3 及び図 4 参照			
評価式	クヌッセンの式 ボイル・シャルルの式	同左	同左	同じ
閉じ込め境界	三次蓋 (ゴム O リング)	同左	一次蓋 (金属ガスケット)	評価方法の欄参照。

表5 閉じ込め評価における解析条件の相違 (2/2)

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	一般の試験条件	特別の試験条件		
燃料破損率	0.1 %	100 %	同左 (一般の試験条件)	同じ
圧力 条件	0.105 MPa (キャビティ内圧)	0.330 MPa (キャビティ内圧)	0.41 MPa (一次蓋-二次蓋間圧力)	評価方法の欄参照。
	0.097 MPa (大気圧)	同左	0.08 MPa (キャビティ内圧)	評価方法の欄参照。
漏えい気体	He ガス 分子量 : 4.002602 g/mol	同左	同左	同じ
気体定数	8.3144598 J/(mol・K)	同左	同左	同じ
漏えい気体 の温度	100°C (三次蓋0リング部温度)	195°C (三次蓋0リング部温度)	-25°C (外気の最低温度)	貯蔵時の周囲温度を考慮。
判定基準	放射性物質の漏えい率 <A2値×10 ⁻⁶ /h	放射性物質の漏えい率 <A2値/week	金属ガスケットの設計漏えい率 <基準漏えい率	貯蔵時は基準漏えい率と金属ガスケットの性能(設計漏えい率)を比較。 (評価方法の欄参照)

※：MSF-24P 型の例で記載



(注)所定圧力は、大気圧の変動を考慮し、 9.7×10^4 Pa とする。

図1 基準漏えい率の計算フロー図（貯蔵時の閉じ込め計算）

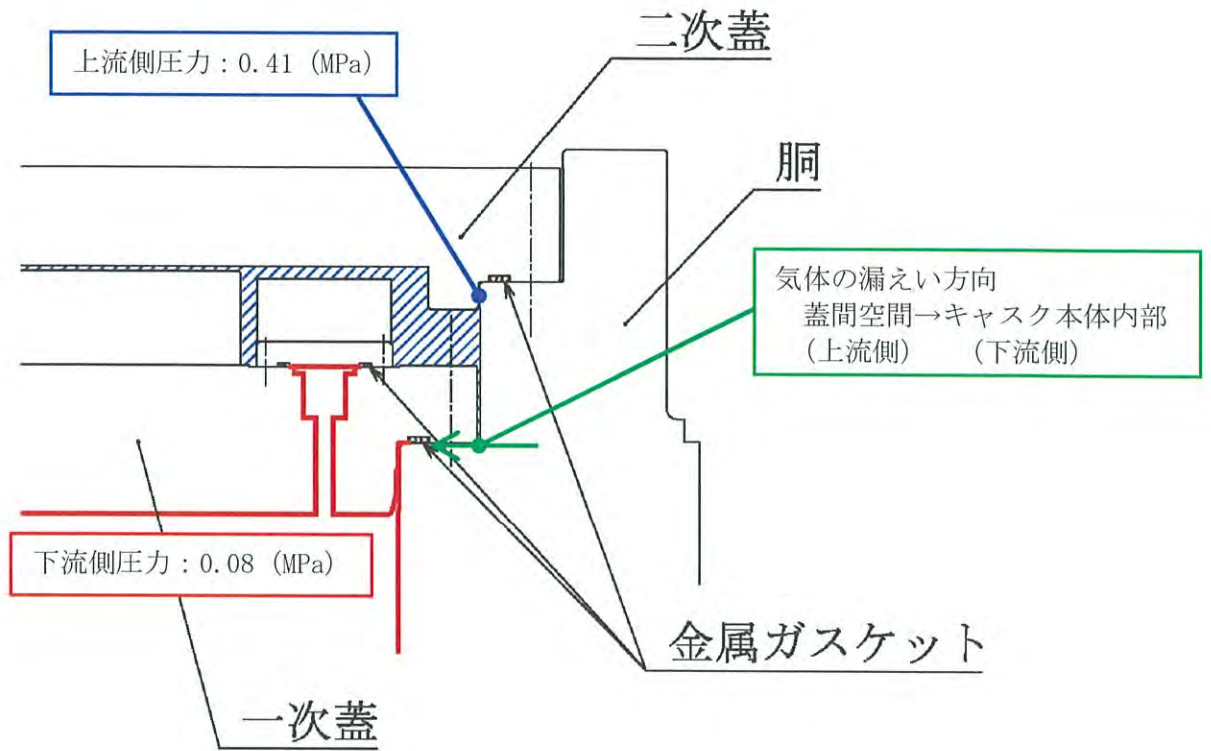


図2 閉じ込め評価に係る構造図 (貯蔵時の閉じ込め計算)

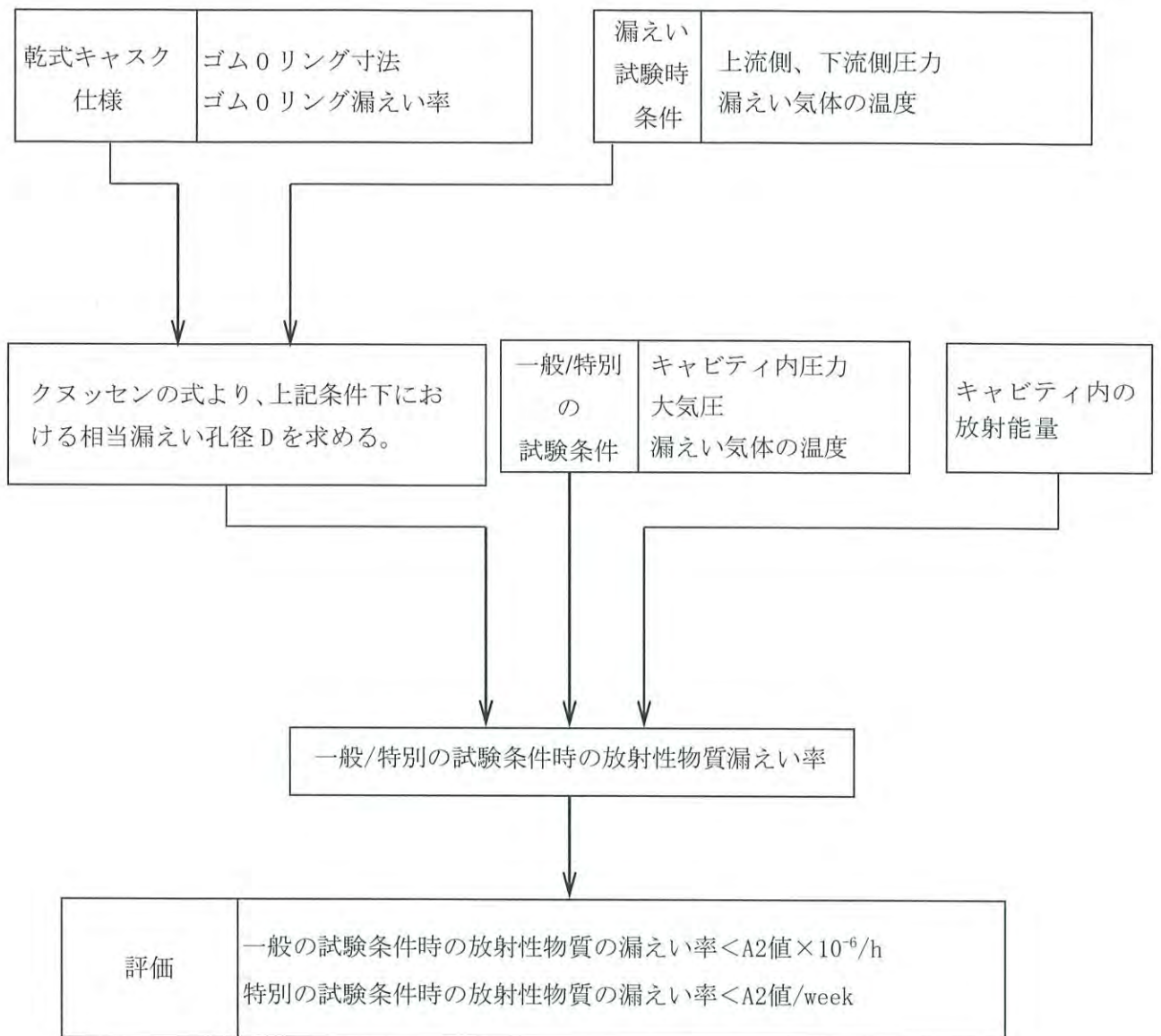
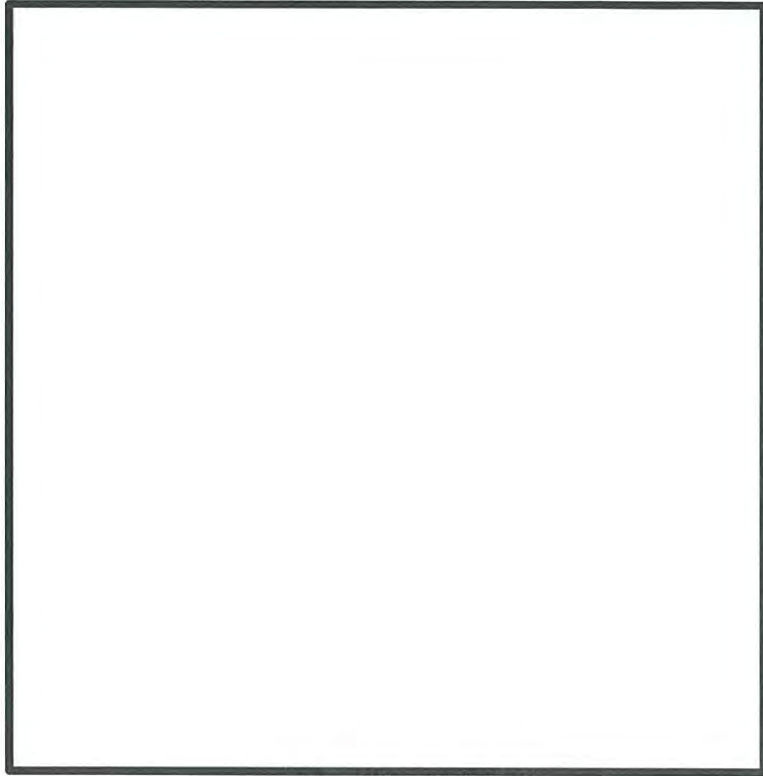
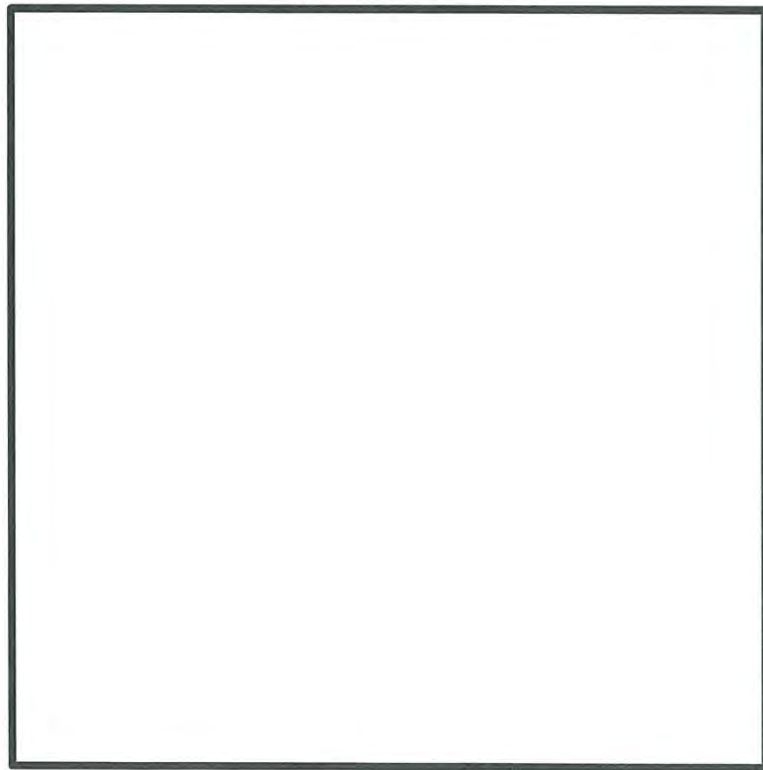


図3 放射性物質の漏えい率の計算フロー図（輸送時の閉じ込め計算）



(a) 一般の試験条件



(b) 特別の試験条件

図 4 閉じ込め評価に係る構造図（輸送時の閉じ込め計算）

乾式貯蔵建屋取扱エリアにおける乾式貯蔵建屋
天井クレーンによる乾式キャスクに対する
波及的影響について

1. 乾式貯蔵建屋天井クレーンについて

乾式貯蔵建屋天井クレーンの配置および構造イメージ図を図1、2に示す。

図1に示す様に乾式貯蔵建屋天井クレーンは、レールによりその移動範囲が制限されているため、取扱エリア内しか移動できない構造になっており、主な役割として、以下を担っている。

- ・乾式キャスクの移動（トレーラ⇔検査架台）
- ・乾式キャスクの縦起し・横倒し
- ・乾式キャスクへの緩衝体等の取付け・取外し

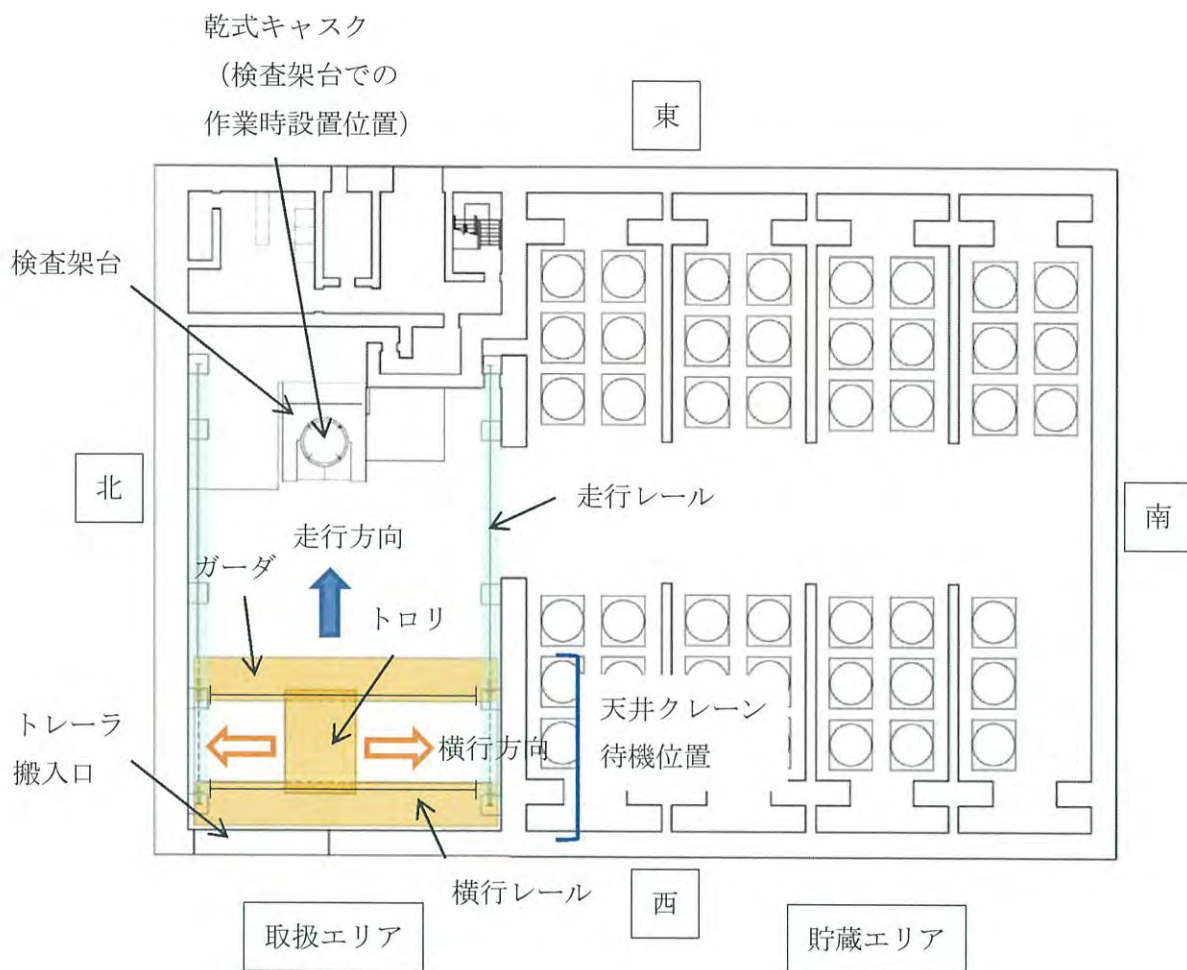
また、図2に示す様に乾式貯蔵建屋天井クレーンは、乾式貯蔵建屋の壁に設置された走行レール上をガーダが東西方向に移動（走行）し、ガーダ上の横行レール上を南北方向にトロリが移動（横行）する。横行レール上の移動及びクレーンワイヤの巻上・巻下は、ガーダ上にあるトロリにより行う。

ここで、設置許可基準規則の解釈第16条第9項「第2項第1号ハ及び第4項において、兼用キャスクの設計については、別記4のとおりとする。」への適合性の観点から、乾式キャスクは、設計上想定される状態において、安全機能が損なわれないように設計するため、乾式貯蔵建屋天井クレーンについては、審査ガイド「3. 自然現象等に対する兼用キャスク貯蔵施設の設計の基本方針」の確認事項にあるように、

- ・周辺施設は一般産業施設や公衆施設と同等の安全性が要求される施設として区分されていること。
- ・兼用キャスク及び周辺施設は、兼用キャスクの安全機能を維持するためにこれらが担保すべき機能に応じた設計が行われていること。

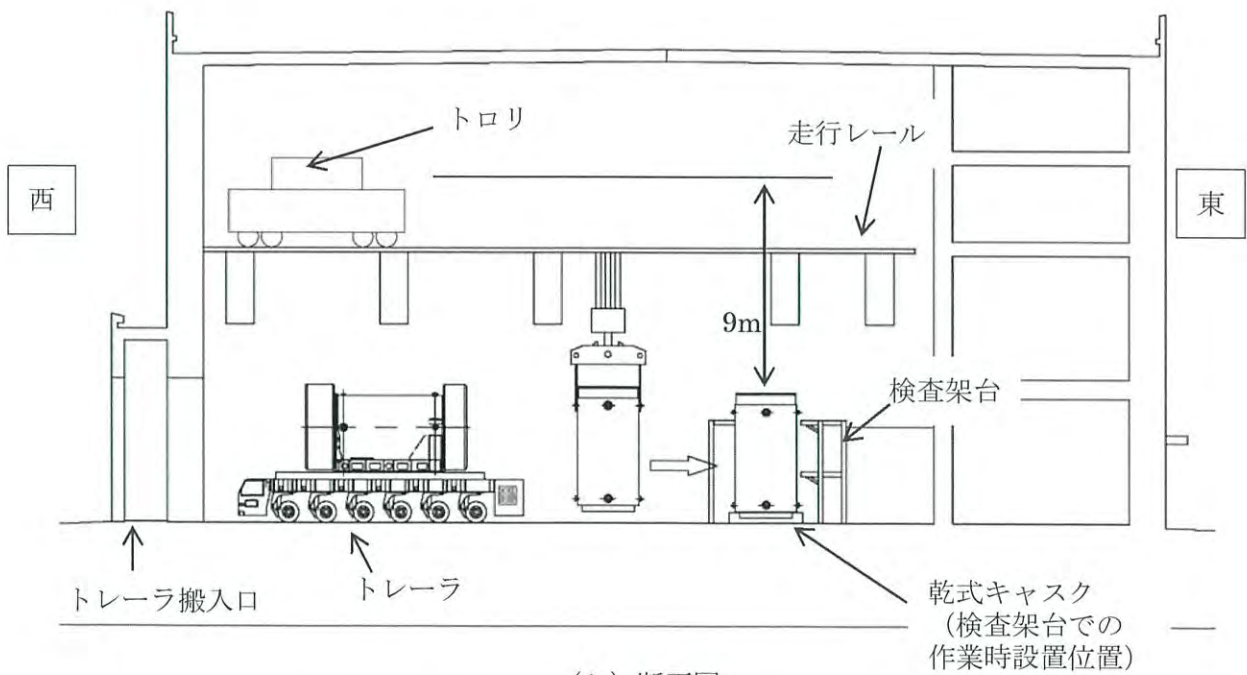
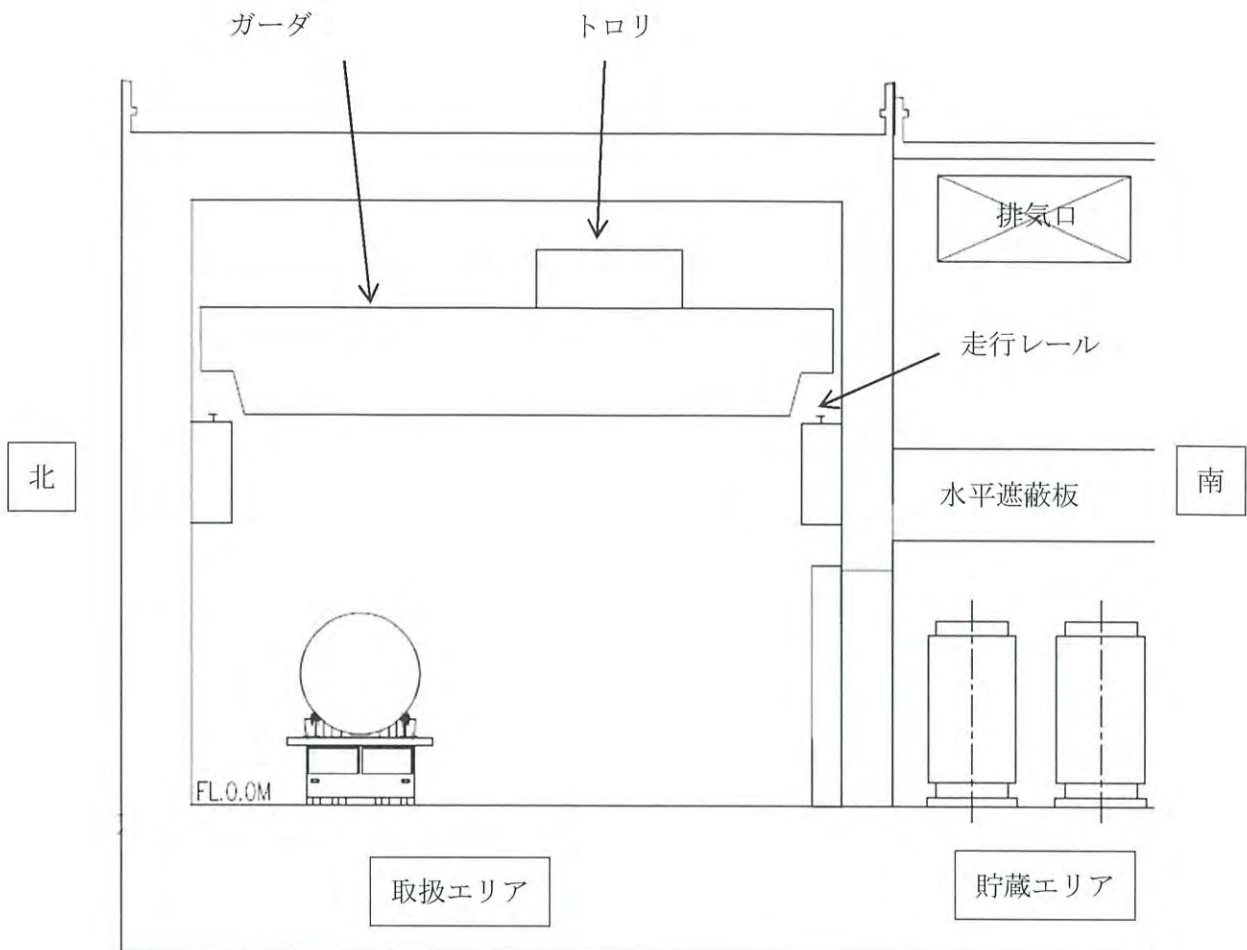
との要求に対し、一般産業施設として設計し、乾式キャスクの安全機能を維持するため、落下防止対策として以下の対策を講じている。

- ・乾式貯蔵建屋天井クレーンの走行及び横行レールには、浮き上がり防止機能を設ける設計としており、走行及び横行レールからガーダ及びトロリが浮き上がることがないように、落下防止対策を講じる。
- ・乾式貯蔵建屋は自然現象等に対し頑健な建屋であり、建屋崩落に伴う乾式貯蔵建屋天井クレーンの落下は生じない設計とする。また、乾式貯蔵乾式貯蔵建屋は、頑健な建屋であり、地震等が生じても乾式貯蔵建屋の構造は維持されることで、走行レール間距離は維持されるため、約50°ガーダが折れ曲がらない限り、ガーダは落下しない構造であり、同じく横行レール上に設置されるトロリも横行レール間距離は維持されるため、トロリも落下しない構造である。



(a) 平面図 (全体図)

図1. 乾式貯蔵建屋天井クレーンの配置 (1/2)



(b) 断面図

図1. 乾式貯蔵建屋天井クレーンの配置 (2/2)

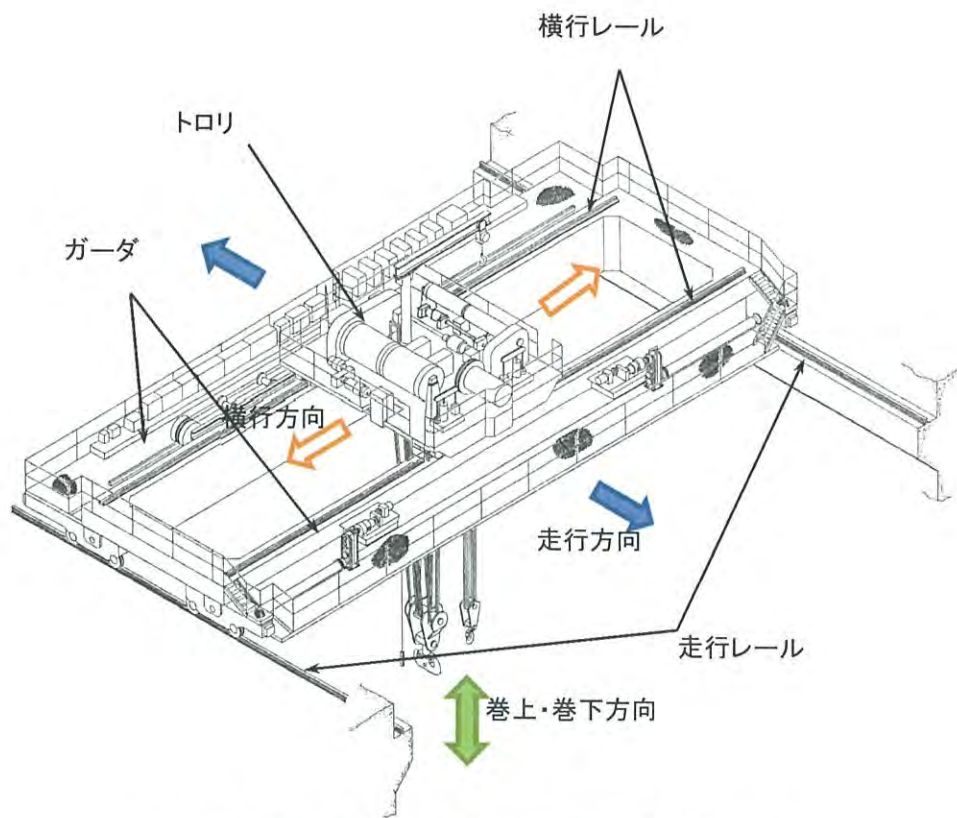


図2. 乾式貯蔵建屋天井クレーンの構造イメージ図

2. 取扱エリアでの乾式キャスクの貯蔵仕立て作業について

伊方発電所で乾式キャスクを取扱う頻度は、年間3基程度を想定しており、乾式キャスク1基あたり1日程度の取扱エリア内での取扱いが想定される。このうち、取扱エリア内での作業において、検査架台上での作業が支配的な作業であるが、検査架台上での作業としては、漏えい率検査や監視計器（圧力計）の取付作業となり、重量物を扱わないため、乾式貯蔵建屋天井クレーンを用いての作業とはならない。

また、図3に示すとおり、当該天井クレーンを使わない検査架台上での作業時には、当該天井クレーンは乾式キャスクから離れた待機位置に移動させる運用とする。

よって、取扱エリアでの支配的な作業となる検査架台上での作業時において、乾式貯蔵建屋天井クレーンが乾式キャスク上に落下することは考え難い。

ここで、設置許可基準規則第4条第6項の解釈別記4第4条第2項三号^{※1}への適合の観点から、JEAG4601の地震と組み合わせるべき事象に対する発生頻度及びその状態の継続時間の考え方を準用し、天井クレーンが乾式キャスクの上方に位置する時間及び地震動の超過確率を考慮し、検討した結果、乾式貯蔵建屋天井クレーンは基準地震動 S_s と組合すべき事象として選定されないことを確認した。検討にあたっての具体的な考え方は以下のとおり。

<評価条件>

- ・乾式貯蔵建屋天井クレーンは、取扱エリアにおいて乾式キャスクを取り扱うものであり、乾式キャスクを取り扱うために乾式キャスクの上方に移動するが、天井クレーンが乾式キャスクの上方に位置するのは年間1.5時間程度（約3基程度）と想定する。
- ・基準地震動 S_s の発生確率は、図4及び図5に示す伊方発電所の地震ハザード解析から得られる超過確率を参照し、JEAG4601・補-1984で記載されている S_2 の発生確率 ($5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ / サイト・年) を S_s の超過確率に読み替え、最大値である 5×10^{-4} / 年を適用する。

<評価結果>

- ・天井クレーンが乾式キャスク上方に位置する時に S_s が発生する確率は 5×10^{-4} / 年 \times 1.5 時間 \div (365日 \times 24時間) で算出され、 10^{-7} / 年を下回る。

また、貯蔵時の乾式キャスクに対しては波及的影響を及ぼさないように、貯蔵エリアには走行レールを敷設せず、貯蔵エリア上を走行することができない構造としている。

※1：「兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。

この波及的影響の評価に当たっては、敷地全体を俯瞰した調査・検討の内容等を含めて、事象選定及び影響評価の結果の妥当性を示すとともに、第6項地震力を適用すること。また、上記の「兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわない」を満たすために、少なくとも次に示す事項について、兼用キャスクがその安全機能を損なわないことを確認すること。

- ・設置地盤、地震応答性状の相違等に起因する相対変位又は不等沈下による影響
- ・兼用キャスク間の相互影響
- ・兼用キャスクと周辺施設との相互影響（周辺施設の損傷、転倒、落下等による兼用キャスクへの影響を含む。）

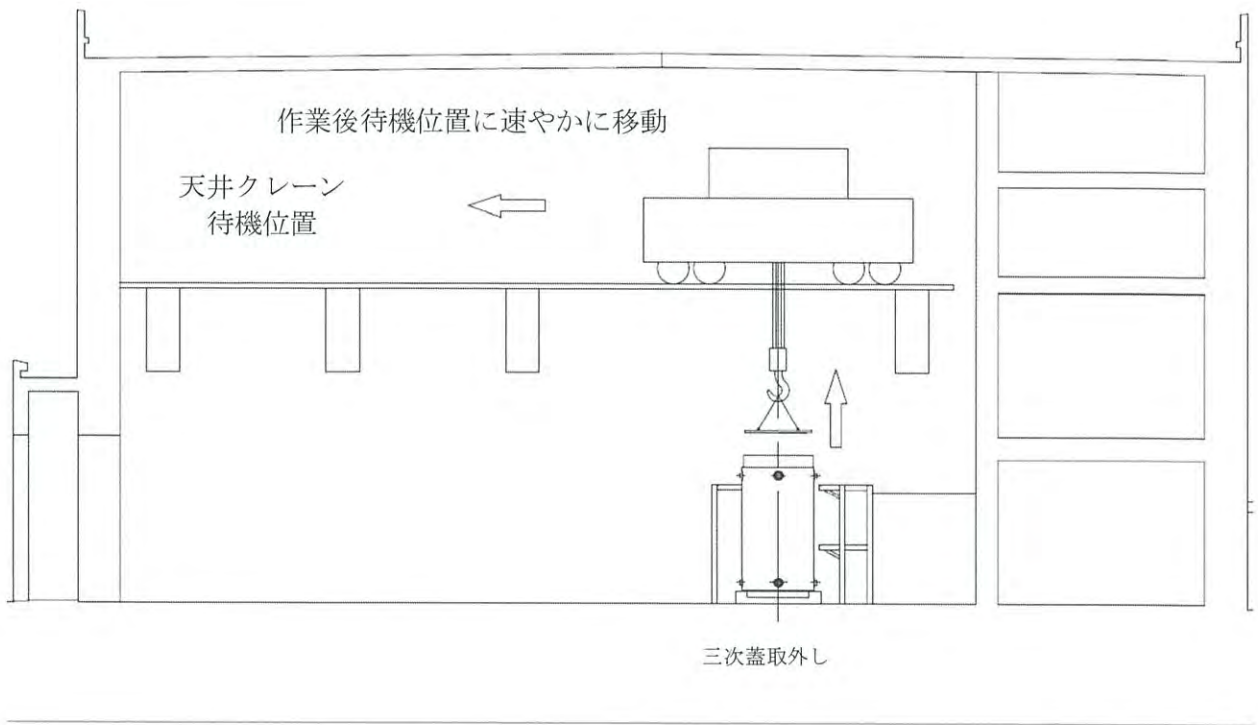


図3. 乾式キャスクの取扱い図

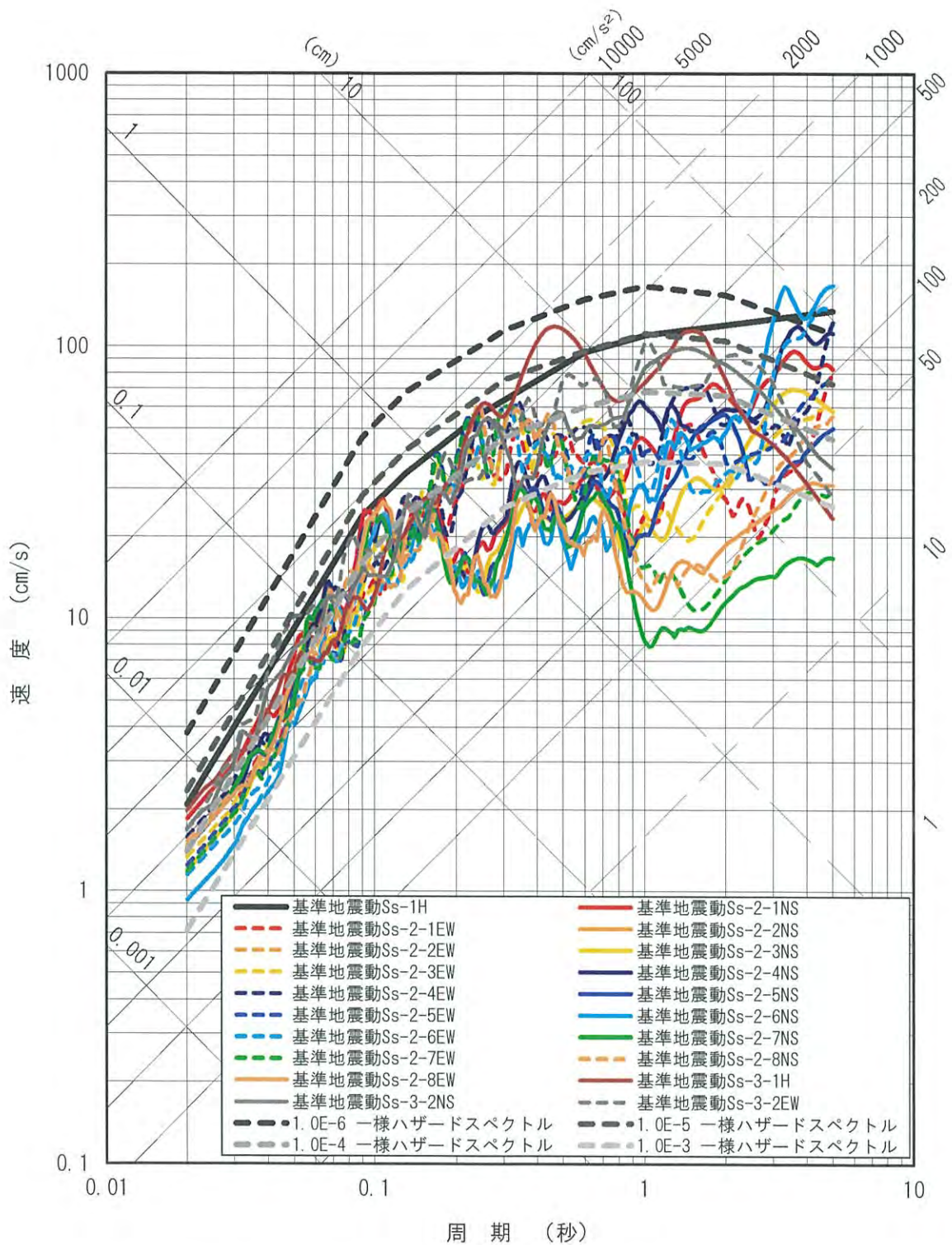


図4 基準地震動の応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一様ハザードスペクトル（水平方向）

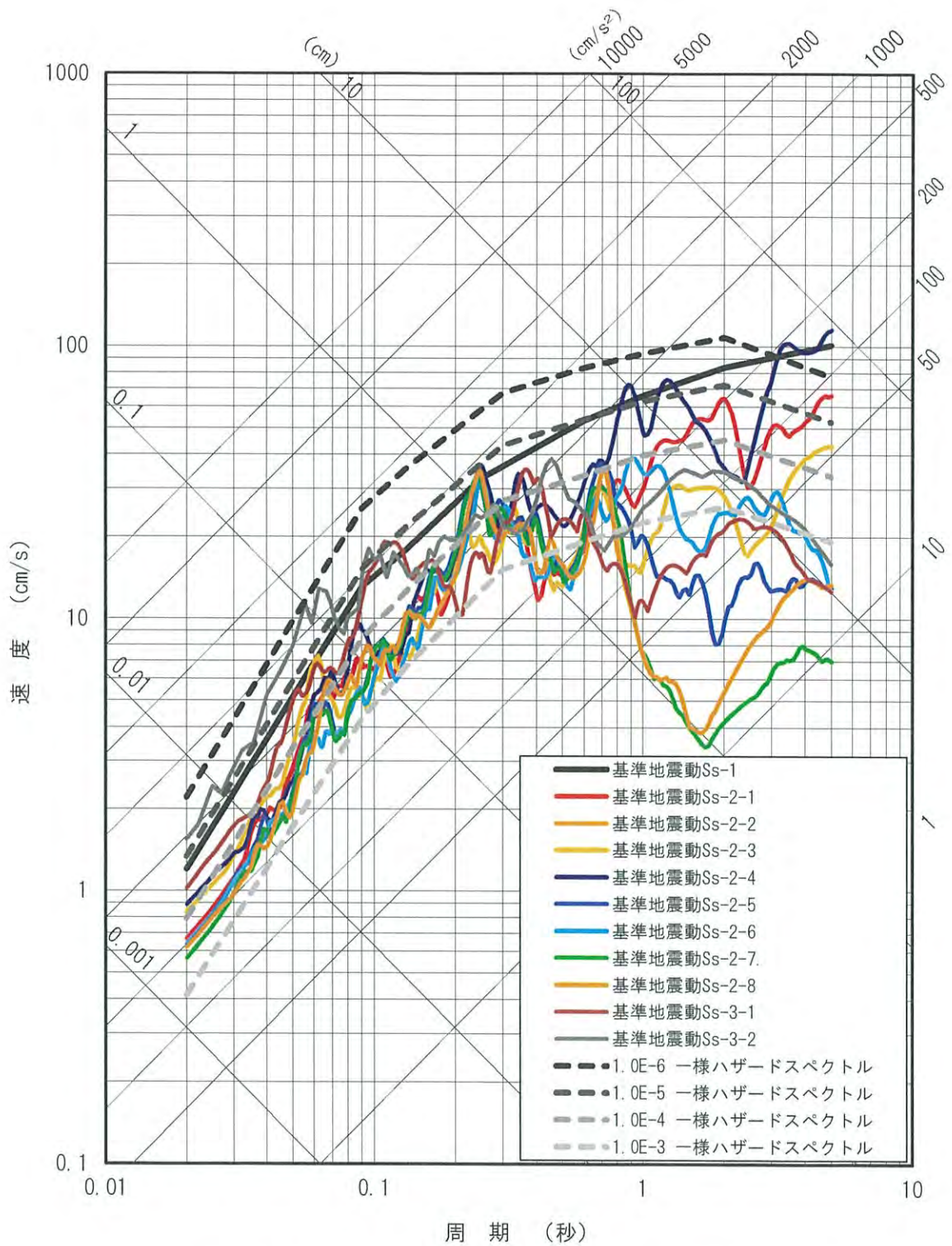


図5 基準地震動の応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一様ハザードスペクトル (鉛直方向)

3. 乾式貯蔵建屋天井クレーンの落下による影響について

1、2より、構造上および運用上においても、取扱エリアで乾式キャスク上に乾式貯蔵建屋天井クレーンが落下することは無いと考えているが、仮に、落下した際の影響を以下の観点から評価した。

- ・乾式キャスクの頑健性を確認する観点から、乾式キャスクを検査架台に設置した状態で、乾式貯蔵建屋天井クレーンの主要部分であるトロリ^{※2}を落下させた場合の閉じ込め機能維持評価
- ・乾式キャスク内の燃料集合体が全数破損（被覆管 100%破損、ペレットからの放出率 100%）し、且つ、乾式キャスクの閉じ込め機能が喪失した場合の敷地境界線量への影響評価

※2：乾式貯蔵建屋天井クレーンの主要部分であるトロリは、クレーンフック等と比べて、重量が大きいこと、及び落下高さが高いことから、評価対象とした。

(1) 乾式キャスクの閉じ込め機能維持評価（天井クレーンのトロリ落下）

乾式キャスクを検査架台に設置した状態で、乾式貯蔵建屋天井クレーンの主要部分であるトロリを落下させた場合に、乾式キャスクの閉じ込め機能維持について、図4及び表2に示すモデル及び緒元を用いてLS-DYNAにより衝突解析を行い、表3に示すとおり各部材について基準値を満足することを確認した。LS-DYNAでの解析の妥当性については別紙2に示す。

ここで、閉じ込め機能を維持する部材である一次蓋シール部（胴側）、一次蓋シール部（蓋側）及び一次蓋ボルトについては、閉じ込め機能維持のため、密封境界部がおおむね弾性範囲内^{※3}であることが要求事項であり、おおむね弾性範囲である0.2%ひずみ以内であることを基準とした。

※3：「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」の以下の【確認内容】を参考に、0.2%ひずみ以内であることを基準とした。

【確認内容】

“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。”

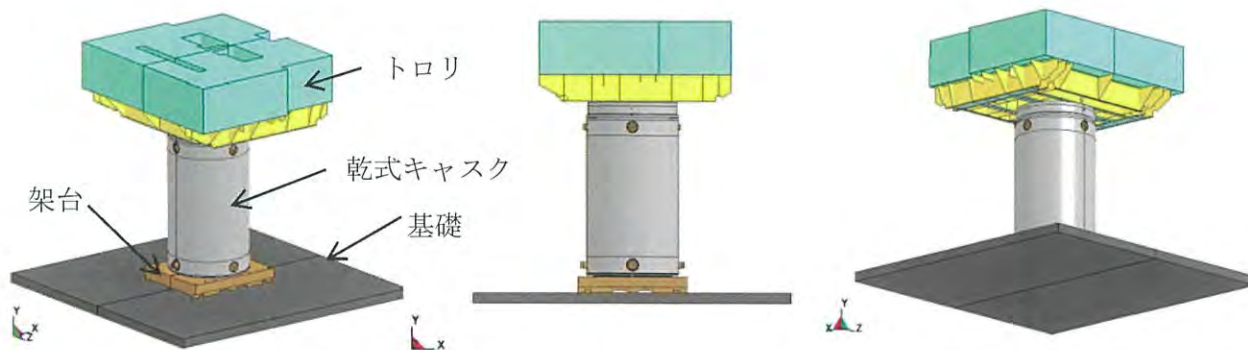


図4. トロリ落下衝突解析に係るモデル

表2. 解析緒元

部材	質量	材質	落下高さ
トロリ (落下物)	57 ton	SS400	9 m
乾式キャスク	117 ton	GLF1 (本体胴、蓋)	—
貯蔵架台	18 ton	SF490	—
基礎	—	コンクリート	—

表3. 評価結果

機能	対象部位	評価指標・基準		評価結果 ^(注1)
閉じ込め	一次蓋シール部 (胴側)	相当塑性 ひずみ	おおむね弾性 範囲内 (ひずみ0.2%以下)	○ (ひずみ0.00%)
	一次蓋シール部 (蓋側)			○ (ひずみ0.00%)
	一次蓋ボルト			○ (ひずみ0.01% ^(注2))

(注1)：小数点以下第3位を切り上げ

(注2)：一次蓋ボルトに残留する塑性ひずみは0.2%以下であること、かつ、残留した塑性ひずみは局所的であることから、閉じ込め機能に影響はない。

(2) 敷地境界線量への影響評価

仮に、乾式キャスク内の燃料集合体が全数破損し、乾式キャスクの閉じ込め機能が喪失した場合を想定し、敷地境界線量に与える影響評価を行った。評価条件は別紙1に示す。

評価の結果、当該事象における敷地境界線量は、表4のとおり線量限度(1mSv)未満[※]であり、敷地境界線量の線量限度を十分下回る水準である。

よって、仮に当該事象が生じても、敷地内にある使用済燃料貯蔵槽へ搬送し、閉じ込め機能を修復することにより、閉じ込め機能の異常に対して対応することが可能である。

※ 「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」の以下の【確認内容】を参考に、判断基準を1mSv/yとした。

【確認内容】

“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。”“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。”

表4. 敷地境界線量の評価結果

評価項目	評価結果 (mSv)
外部被ばくによる実効線量	約 0.015
内部被ばくによる実効線量	約 0.37
合計	約 0.39

4. まとめ

乾式貯蔵建屋取扱エリアにおける乾式貯蔵建屋天井クレーンによる乾式キャスクに対する波及的影響についての基準適合性について上述の内容を表5にまとめる。

表5. 乾式貯蔵建屋天井クレーンによる乾式キャスクへの波及的影響に係る基準適合性

設置許可基準規則	解釈	主たる要件	具体的な設計方針	備考
第4条第6項	別記4第4条第2項	兼用キャスクは、周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。	使用済燃料乾式貯蔵容器は、周辺施設等の波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計する。 影響評価には、使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力を適用して評価を行うこととし、地震動又は地震力の選定に当たっては、施設の配置状況、使用時間等を踏まえて適切に設定する。	乾式貯蔵建屋天井クレーンは、耐震重要度分類Cクラス施設と同様の設計とする。
第16条第2項1号ハ第4項	第16条第9項	兼用キャスクは、設計上想定される状態において、安全機能が損なわれないように設計すること。 <審査ガイド> ・周辺施設は一般産業施設や公衆施設と同等の安全性が要求される施設として区分されていること。 ・兼用キャスク及び周辺施設は、兼用キャスクの安全機能を維持するためにこれらが担保すべき機能に応じた設計が行われていること。	周辺施設である天井クレーンは、一般産業施設として設計し、乾式キャスクの安全機能を維持するため、落下防止対策として以下の対策を講じる。 ・天井クレーンの走行及び横行レールには、浮き上がり防止機能を設ける設計としており、走行及び横行レールからガード及びトロリが浮き上がることがないように、落下防止対策を講じる。 ・乾式貯蔵建屋は自然現象等に対し頑健な建屋であり、建屋崩落に伴う天井クレーンの落下は生じない設計とする。また、乾式貯蔵乾式貯蔵建屋は、頑健な建屋であり、地震等が生じても乾式貯蔵建屋の構造は維持されることで、走行レール間距離は維持されるため、約50°ガードが折れ曲がらない限り、ガードは落下しない構造であり、同じく横行レール上に設置されるトロリも横行レール間距離は維持されるため、トロリも落下しない構造である。 〔一般産業施設である周辺施設（乾式貯蔵建屋天井クレーン）からの波及的影響の有無については、設置許可基準規則第4条第6項にて、確認を実施する。〕	乾式貯蔵建屋天井クレーンは、一般産業施設と同等の設計とする。

また、仮に乾式貯蔵建屋天井クレーンの落下を想定しても、乾式キャスクの閉じ込め機能は確保できていることから、乾式キャスクに波及的影響を与えないとともに、万一、取扱中の乾式キャスク1基の燃料集合体が全数破損し、乾式キャスクの閉じ込め機能が喪失した場合でも敷地境界線量は線量限度1mSv/y以下となることから、重大な災害には至らない。

以上のことから、乾式貯蔵建屋取扱エリアにおける乾式貯蔵建屋天井クレーンによる乾式キャスクに対する波及的影響はないことを確認した。

以上

敷地境界線量への影響評価に係る評価条件について

乾式キャスク内の燃料集合体が全数破損し、乾式キャスクの閉じ込め機能が喪失した場合を想定し、以下のとおり敷地境界に与える影響を評価した。

1. 評価方法

評価対象核種は、核燃料輸送物設計承認申請（以下、「設計承認」という）の密封評価において対象としている H-3 及び Kr-85 とする。なお、設計承認の密封評価において、外周領域にも中央領域と同じ 48GWd/t 燃料装荷されているとして、保守的にインベントリを大きく設定し評価している MSF-32P を代表として評価する。被ばく経路は、それぞれ呼吸摂取による内部被ばく及び放射性雲からの外部被ばくとし、以下の式を用いて計算した。

（呼吸摂取による内部被ばく）

$$D_B = B_\gamma \cdot K_R \cdot (\chi/Q) \cdot Q_H$$

D_B	：呼吸摂取による実効線量	(mSv)
B_γ	：成人の呼吸率	(m^3/s)
K_R	：呼吸摂取によるH-3の実効線量換算係数	(mSv/Bq)
Q_H	：H-3の大气放出量	(Bq)
χ/Q	：相対濃度	(s/m^3)

（放射性雲からの外部被ばく）

$$E_\gamma = K_1 \cdot Q_N \cdot (D/Q)$$

E_γ	：外部 γ 線による実効線量	(Sv)
K_1	：空気カーマから実効線量への換算係数	(= 1 Sv/Gy)
Q_N	：Kr-85の大气放出量(γ 線エネルギー0.5MeV換算)	(Bq)
D/Q	： γ 線エネルギー0.5MeVにおける相対線量	(Gy/Bq)

2. 評価条件

各評価条件及びその選定理由を表1に示す。

表 1. 評価条件

項目	評価条件	選定理由
キャスク型式	MSF-32P 型キャスク	インベントリの大きい MSF-32P 型キャスクからの漏えいを想定する
燃料仕様	14×14 型 平均燃焼度 45GWd/t	許認可解析条件と同じ
冷却期間	15 年	同上
燃料被覆管破損の想定	100%	キャスク 1 基分の全数燃料被覆管破損を想定する
放出放射エネルギー	H-3 : 1.54×10^{14} Bq (gross 値) Kr-85 : 2.25×10^{15} Bq (gross 値) Kr-85 : 9.90×10^{12} Bq (ガンマ線 0.5MeV 換算値)	ペレットからの FP ガス放出率を 100%とする (設計承認における密封評価のインベントリ条件を引用)
実効放出継続時間	1 時間	大気拡散条件として、保守的に最も短い実効放出継続時間を設定
放出箇所	地上	
評価点	図 1 のとおり	敷地境界において実効線量が最大となる点を選定
大気拡散条件 相対濃度 χ/Q (s/m ³) 相対線量 D/Q (Gy/Bq)	2.7×10^{-4} 1.5×10^{-18}	「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に基づき算出
呼吸率	3.33×10^{-4} m ³ /s (成人・活動時)	「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」による
実効線量換算係数	H-3 : 2.7×10^{-8} (成人)	「(財) 電力中央研究所 廃止措置工事環境影響評価ハンドブック (第 3 次版)」による

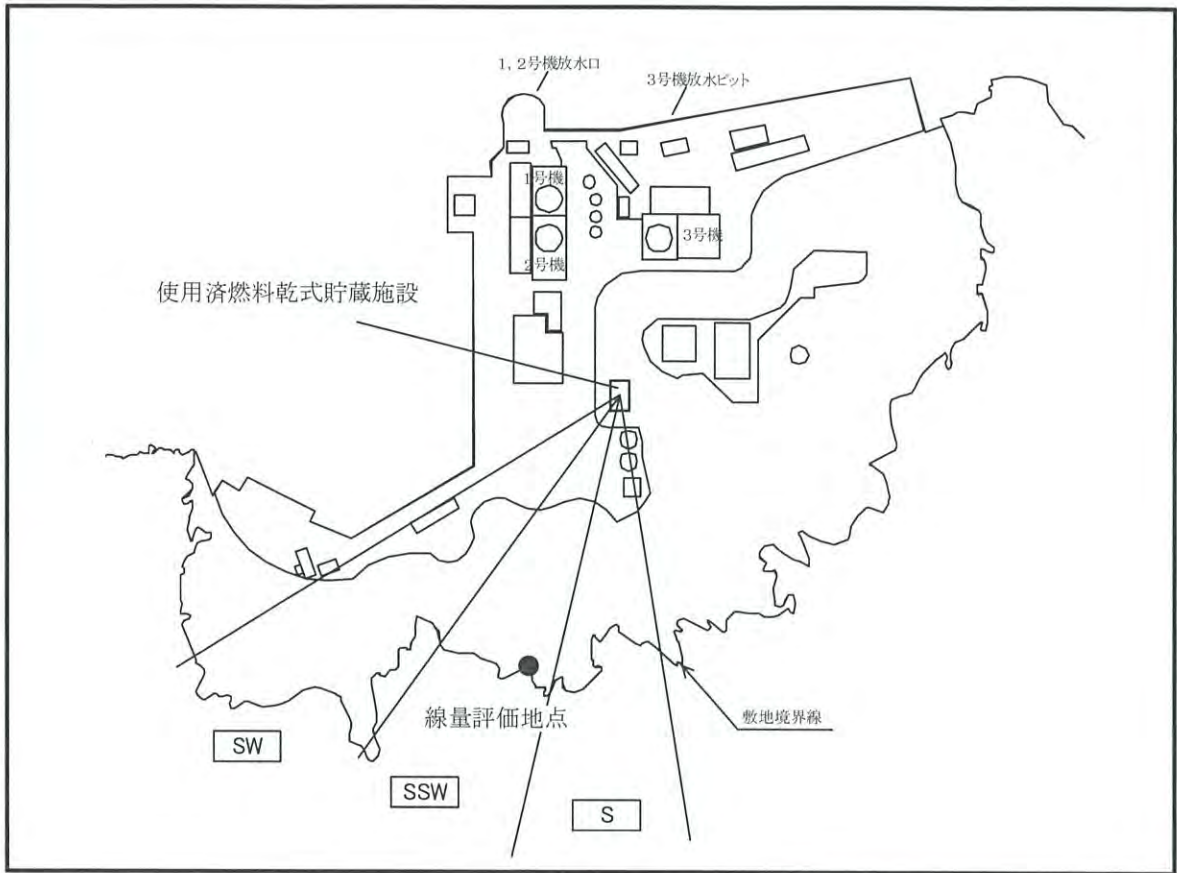


図1 評価地点

動的解析手法(LS-DYNA)の検証

1. 検証方針

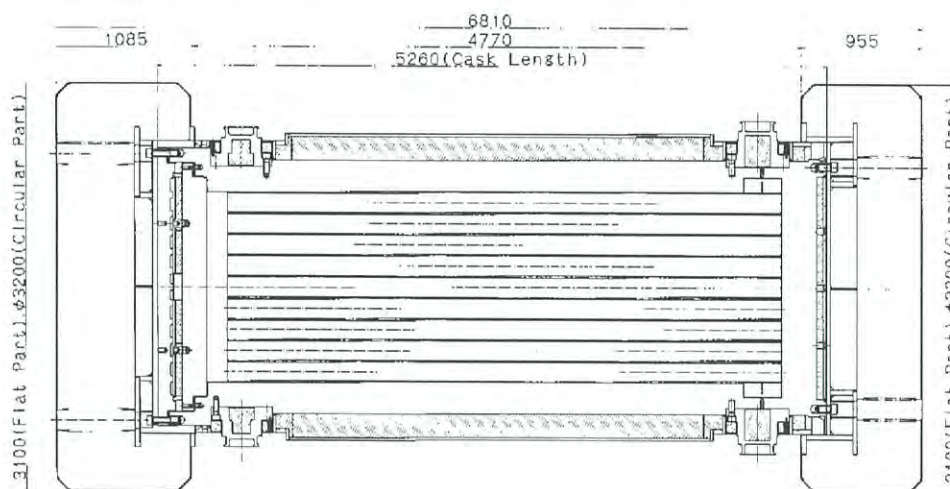
MSF 型キャスクの動的解析手法は、実規模スケールモデルを用いた落下試験で計測された蓋密封部のひずみを基に動的解析による落下試験再現解析を実施し、その結果と比較することで評価手法の妥当性を検証している。以下に検証内容を記載する。

2. 落下試験

2.1. 落下試験モデル

落下試験モデルとして、MSF 型キャスク（プロトタイプ）を実規模スケールで模擬した実規模スケールモデルを用いた。落下試験モデルの外形図を図 1 に示す。

本体は、胴（鍛造材）－レジン層－外筒（炭素鋼）から構成され、胴と外筒の間には銅製の伝熱フィンが溶接されている。蓋密封部は、一次蓋と二次蓋の二重構造とし、本体胴フランジに、金属ガスケットを取り付けた一次蓋及び二次蓋をボルトにより締結することで密封性を維持する構造としている。



(総重量：127.3ton)

図 1 落下試験モデルの外形図

2.2. 落下試験条件

IAEA 輸送規則に従い、9.3m からの落下試験を実施した。落下試験状態図を図 2 に示す。

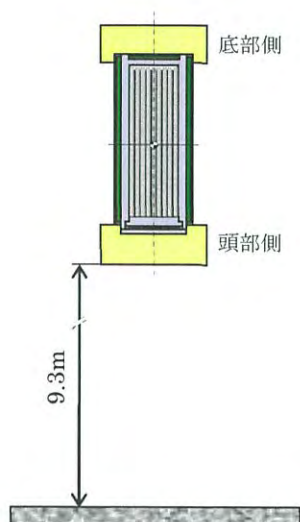


図 2 落下試験状態図

2.3. 落下試験結果

9.3m 頭部垂直落下の試験時の試験体写真を図 3 に示す。試験結果は 3 項の解析結果と併せて記載する。



図 3 9.3m 頭部垂直落下試験時の試験体写真

3. 落下解析

(1) 解析モデル

蓋、ボルト、胴本体、内部収納物(バスケット及び模擬重量体)、外筒、レジン、上部緩衝体内鋼板、木材及び緩衝体外鋼板をモデル化した。下部緩衝体については、内鋼板のみをモデル化した。下部緩衝体解析モデルの重量が、設計重量と等価になるように、内鋼板の密度を調整した。図4に解析モデルを示す。

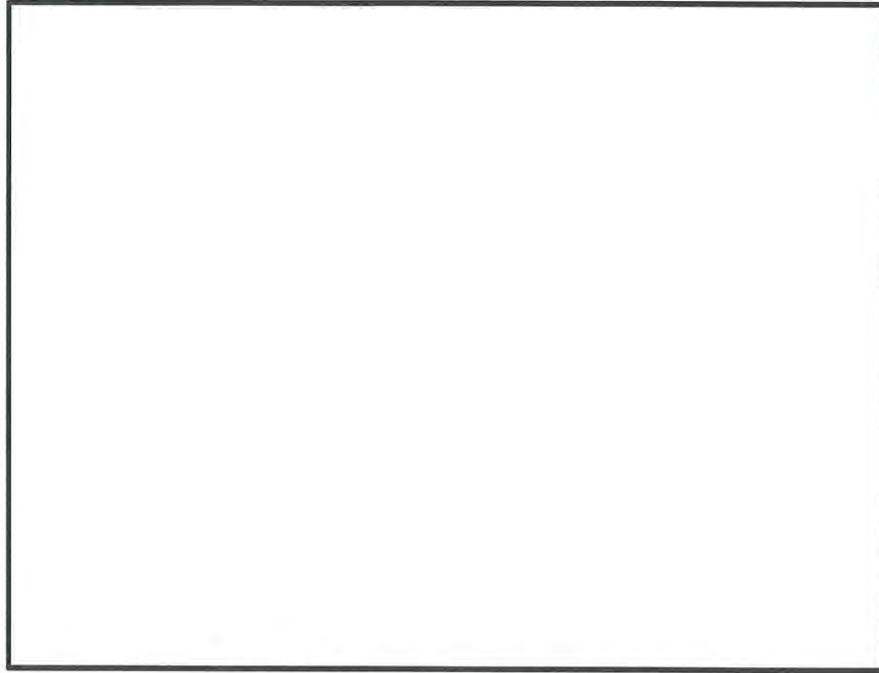


図4 9.3m 頭部垂直落下の解析モデル

(2) 初速度条件

9.3m 落下高さの位置エネルギーがすべて運動エネルギーに変換されたと考え、13.5m/s の初期速度を与える。

(3) 寸法及び材料

製作時の寸法を用いてモデル化した。材料の応力-ひずみ関係は、実際の引張試験の結果に基づいて設定した。

(4) 検証結果

a. 加速度

図5に加速度時刻歴の試験結果と解析結果の比較を示す。内部収納物が蓋に衝突する前のキャスク胴体中央の落下方向の加速度は、試験と解析で得られた最大加速度で10%の精度で再現できている。つまり、上部緩衝体から蓋への荷重が、解析で精度良く評価できていることを示している。一方、内部収納物の蓋への衝突の影響については、内部収納物が蓋に衝突するタイミングは一致しているものの、加速度応答に差がある。この原因は以下の通りと推定される。解析では燃料の全数とバスケットセルの全数が同時に一次蓋へ衝突しているため、加速度が急激に大きくな

っている。一方、試験では、燃料とバスケットセルが個別に一次蓋へ衝突し、ややなだらかな加速度応答になっているものと考えられる。このため、加速度の最大値に差異が生じたと考えられる。

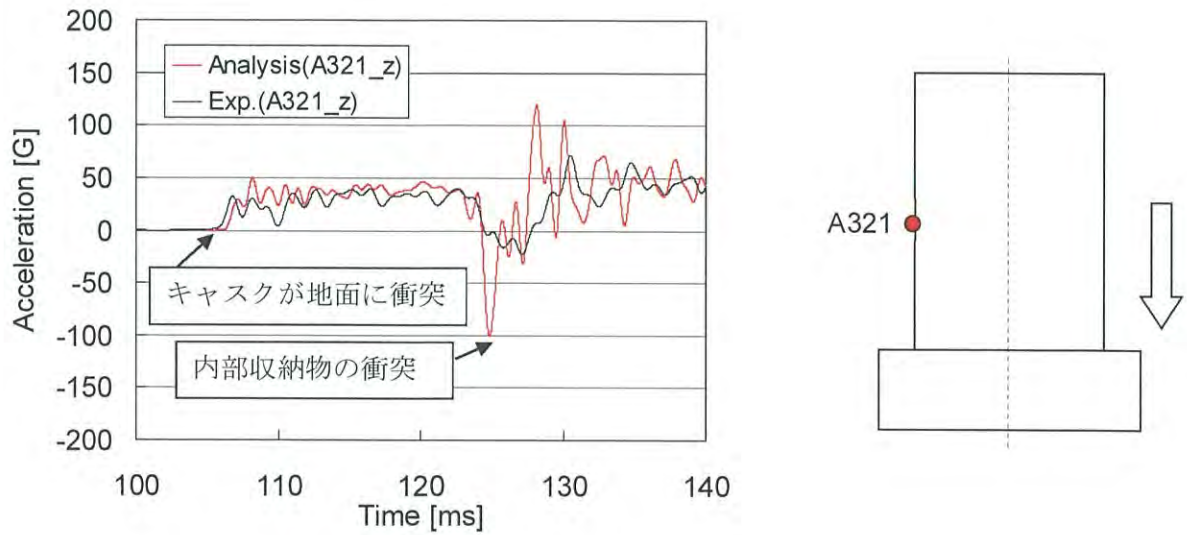


図5 9.3m 垂直落下加速度時刻歴の比較

b. ひずみ

フランジ根元及び蓋等の代表的なひずみに関する解析結果と試験結果の比較を以降に示す。

一次蓋中央のひずみの解析結果と試験結果の比較を図 6 に示す。一次蓋の最大ひずみは、試験と解析で±10%で一致している。ただし、試験で得られた E121 の X 方向のひずみのみが、解析結果のひずみに比べて大きい結果となっている。この原因は以下の通りと推定される。

解析では燃料の全数とバスケットセルの全数が同時に蓋に衝突する条件としている。一方、試験では、燃料とバスケットセルが個別に衝突したため、蓋が一様に変形せず E121 の X 方向と Y 方向のひずみ量に差異が生じたと推定される。

また、解析では E121 の X 方向のひずみが 2000 μ 以下であり弾性範囲内であるが、試験ではひずみが 2000 μ を超過しており最大約 3500 μ のひずみが発生している。E121 の X 方向以外の 3 データの最大ひずみは±10%の範囲内に入っていることから、X 方向と Y 方向の変形に大きな差はなかったものと推定される。E121 の X 方向については、ひずみが塑性域に入ったためにより大きなひずみが発生し、試験と解析で誤差が大きくなったと推定される。

二次蓋中央のひずみの解析結果と試験結果の比較を図 7 に示す。試験で得られた二次蓋のひずみは一次蓋のひずみと同じ時刻及び同じ方向に生じており、一次蓋の変形により一次蓋と二次蓋が衝突し同じ方向に変形が生じていることが読み取れる。解析で得られた二次蓋のひずみも同様に、一次蓋のひずみと同じ時刻及び同じ方向に生じており、一次蓋の変形に伴う二次蓋の衝突挙動が再現できている。

ただし、解析では燃料の全数とバスケットセルの全数が同時に一次蓋に衝突しているが、試験では燃料とバスケットセルが個別に衝突していると推定されるため、解析で得られた最大ひずみの方が試験よりも大きく、かつ、その発生時刻が早くなっている。

フランジ根元のひずみの解析結果と試験結果の比較を図 8 に示す。落下方向(Z 方向)及び周方向(θ 方向)のひずみが、試験と解析で±10%で一致しており、解析でよく再現されている。

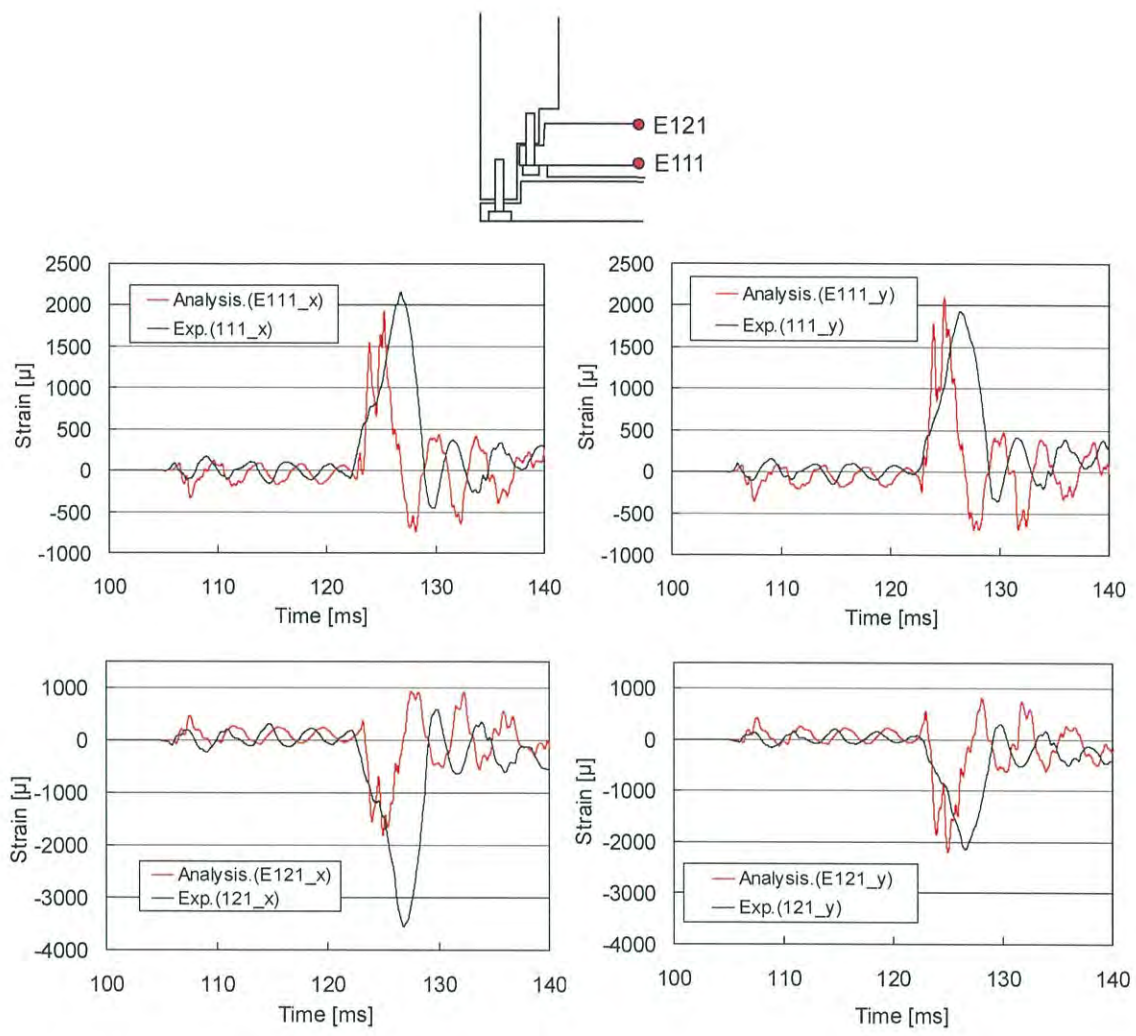


図6 9.3m 垂直落下時の一次蓋ひずみ時刻歴の比較

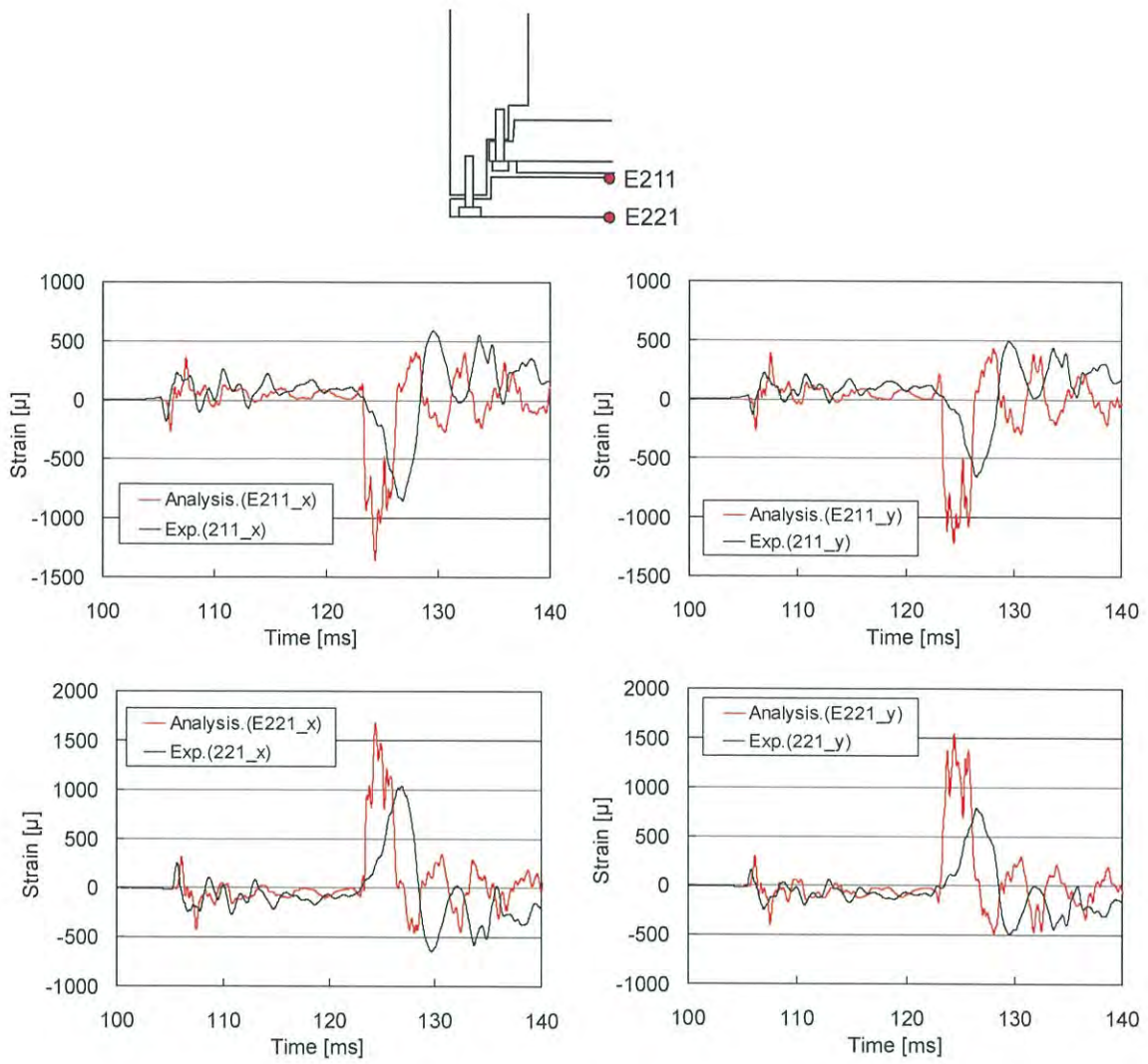


図7 9.3m 垂直落下時の二次蓋ひずみ時刻歴の比較

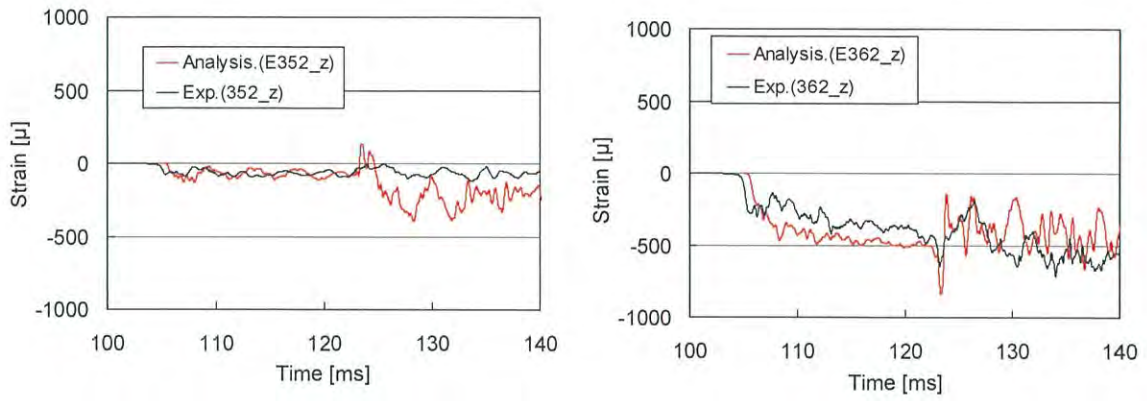
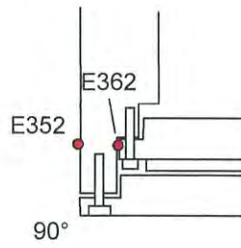


図8 9.3m 垂直落下時の胴フランジひずみ時刻歴の比較

4. 落下解析に対する動的解析の検証

落下試験において、密封境界部周辺（胴フランジや蓋）のひずみを測定し、解析結果と比較することで動的解析手法の検証を行った。また、キャスク全体の挙動を検証する観点で加速度の比較を行った。

上述のとおり、落下試験の計測結果と解析結果を比較した結果、落下挙動としては内部収納物の衝突時の挙動に差異はあるものの、緩衝体からの荷重による加速度応答を再現できることを確認した。また、密封境界である胴フランジ及び蓋の変形挙動を再現できることを確認した。これらの結果により、蓋密封部の閉じ込め性能に関する評価手法として本動的落下解析手法を適用できることを検証した。

5. 天井クレーンに対する動的解析の適用性

天井クレーン落下事象は、静止している乾式キャスクの胴フランジ部へ荷重が作用する事象であるが、胴フランジに入力される荷重方向や負荷範囲は図9に示すとおり頭部垂直落下と同様であるため、落下試験により検証した動的落下解析手法は、天井クレーン落下事象にも適用可能である。

また、天井クレーン落下事象は使用済燃料集合体及びバスケットが一次蓋へ衝突する事象ではないため、使用済燃料集合体及びバスケットの挙動の違いによる影響を、本評価で考慮する必要はない。

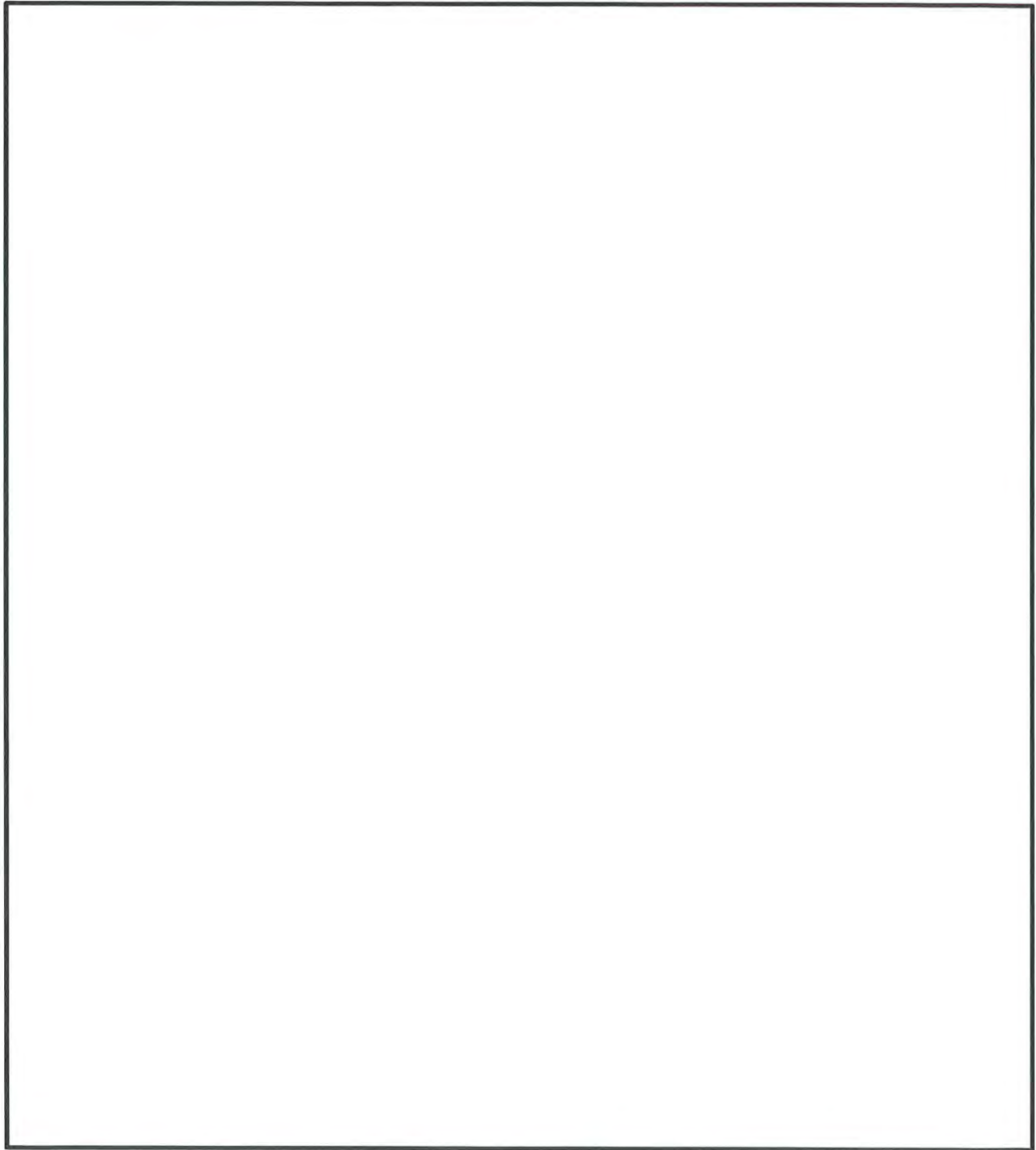


図9 荷重作用方向及び負荷範囲
(天井クレーン落下解析時と頭部垂直落下時の比較)

設置許可基準規則 第16条 第1項
の取扱いについて

1. 既許可における燃料取扱設備について

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下、「設置許可基準規則」という）第 16 条第 1 項に定める燃料取扱設備については、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下、「技術基準規則」という）第 26 条の解釈において、「燃料体又は使用済燃料を取り扱う設備」とは、新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備をいう。」と定義されている。これは、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」（以下、「省令」という）でも同じ定義がなされており、従来から変更されていない。

(添付資料参照)

これを踏まえ、当社既設設備については表 1 のとおり整理している。

また、図 1 に、当社既設設備の配置概要図と取扱様態との関係性を示す。

表 1. 燃料取扱設備の例

設備名称	燃料取扱設備として取扱うもの	取扱様態	左記以外で取扱うもの
燃料取扱棟クレーン	新燃料	装荷	新燃料輸送容器 使用済燃料輸送容器 使用済燃料乾式貯蔵容器
新燃料エレベータ	新燃料	装荷	—
使用済燃料ピットクレーン	新燃料、使用済燃料	装荷・取出	—
燃料移送装置	新燃料、使用済燃料	装荷・取出	—
燃料仮置ラック	新燃料、使用済燃料	装荷・取出・保管	—
燃料取替クレーン	新燃料、使用済燃料	装荷・取出	—
使用済燃料輸送容器	使用済燃料	保管	—

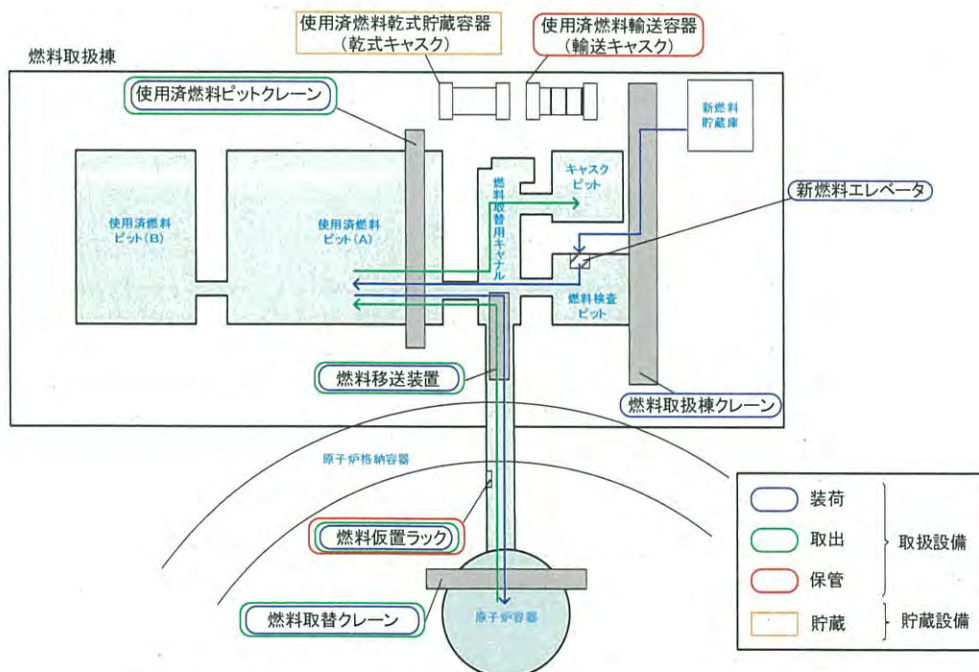


図 1 当社既設設備の配置概要図と取扱様態との関係性

既許可の範囲としては、燃料取扱様態として

- ・原子炉容器への燃料の「装荷」に使用する燃料取扱棟クレーン、新燃料エレベータ、使用済燃料ピットクレーン、燃料移送装置および燃料取替クレーン
- ・原子炉容器からの燃料の「取出」に使用する使用済燃料ピットクレーン、燃料移送装置および燃料取替クレーン

について、燃料取扱設備として認可頂いている。

また、使用済燃料構内輸送容器 (NFT-14P 型) は、使用済燃料を貯蔵するものではなく、伊方 1 号炉または 2 号炉の貯蔵設備である使用済燃料ピットから 3 号炉の貯蔵設備である使用済燃料ピットへの構内輸送に専ら使用することから、貯蔵設備間の一時的な「保管」と整理し、燃料取扱設備として認可頂いている。

2. 既許可における設置許可基準規則第 16 条第 1 項でのキャスク等の取扱設備の取扱い

新規制基準施行前及び新規制基準施行後において、燃料取扱設備に対する要求事項は特段変更されず (添付資料参照)、既許可における当社の設計方針は以下のとおり、燃料体等 (通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料) の取り扱いについて記載しており、キャスク等を取り扱う設備については記載していない。よって、従来からキャスク等の取扱設備については、設置許可基準規則第 16 条第 1 項 (燃料取扱設備) としての基準適合性は求められていない。

【当社設計方針】

＜新規制基準施行前 (発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針 4 9.) ＞

- ・ 3 号炉燃料取扱棟内の使用済燃料の取扱設備は、インターロックや二重ワイヤを設けて移送操作中の燃料集合体の落下を防止できるように設計する。
- ・ 燃料取扱設備は、燃料集合体を 1 体ずつ取り扱うこととし、臨界を防止する設計とする。

＜新規制基準施行後 (設置許可基準規則第 16 条第 1 項) ＞

1 について

燃料体等の取扱設備は、下記事項を考慮した設計とする。

- 一 燃料取扱設備は、新燃料の搬入から使用済燃料の搬出までの取扱いにおいて、燃料取替クレーン、燃料移送装置、使用済燃料ピットクレーン等を連携し、当該燃料を搬入、搬出又は保管できる設計とする。
- 二 燃料取扱設備は、燃料体等を一体ずつ取扱う構造とし、臨界を防止する設計とする。
- 三 燃料体等 (新燃料を除く。) の移送は、全て水中で行い、崩壊熱により溶融しない設計とする。
- 四 使用済燃料及びウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料の取扱設備は、取扱時において、十分な水遮蔽深さが確保される設計とするなど、放射線業務従事者の線量を合理的に達成できる限り低くするような設計とする。
- 五 燃料取扱設備は、移送操作中の燃料体等の落下を防止するため十分な考慮を払った設計とする。

また、クレーン類は、「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」において周辺施設に分類され、一般産業施設や公衆施設と同等の安全性が要求されていることから、一般産業施設や公衆施設以上の安全性を有する燃料取扱設備に位置付けることは適切ではないと考えられる。

3. 他プラントとの比較（キャスク取扱関係）

他プラント及び当社における乾式キャスクまたは湿式キャスクを取扱う設備について、燃料取扱設備への該非を整理した結果を以下に示す。

貯蔵専用キャスクを採用しているプラントでは、天井クレーンを燃料取扱設備に位置付けている一方、搬送台車は燃料取扱設備に位置付けていない。

輸送・貯蔵兼用キャスク又は輸送専用キャスクを採用しているプラントでは、天井クレーン及び搬送台車は燃料取扱設備に位置付けていない。

以上のとおり、キャスクを取り扱う設備については、「新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備」との燃料取扱設備の定義に該当しないことから、燃料取扱設備には基本的には位置付けていないが、貯蔵専用キャスクを取扱う天井クレーンについては、燃料取扱設備に位置付け、貯蔵専用容器として構造健全性を確認している。

なお、外運搬規則に基づき安全機能維持に係る構造健全性（頑健性）を確認している輸送・貯蔵兼用キャスク及び輸送専用キャスクを取扱う天井クレーンは、輸送・貯蔵兼用キャスク及び輸送専用キャスクの衝撃への耐性が高いことから、燃料取扱設備に位置付けないことは妥当と考える。

プラント	既設建屋	乾式貯蔵施設				キャスク保管庫 ^{※2}	
		（貯蔵専用）		（輸送・貯蔵兼用）		（輸送キャスク）	
	天井クレーン ^{※1}	天井クレーン	搬送台車	天井クレーン	搬送台車	天井クレーン	搬送台車
A	○	○					
B	○	○	×				
C	○					×	
D	○					×	×
E	○			×	×	×	×
四国電力(株) 伊方	○			×	×		
				車両運搬規則に基づく耐性を有する。 (上下 3G、前後 2G、左右 1G)		外運搬規則に基づく 9m 落下試験での耐性を有する。	

※1 新燃料及びキャスクを取扱う設備

※2 輸送キャスクを仕立後、搬出するまでの間、一時的に保管するための施設

<凡例>

○；燃料取扱設備と位置付けている設備

×；燃料取扱設備と位置付けていない設備

■；該当設備なし

□；申請中

4. 今後の説明方針

上記内容を踏まえ、今回の申請において、表2の様に新設設備を分類すると共に、16条第2項へ適合性として説明を実施する。

表2. 設備分類および説明方針

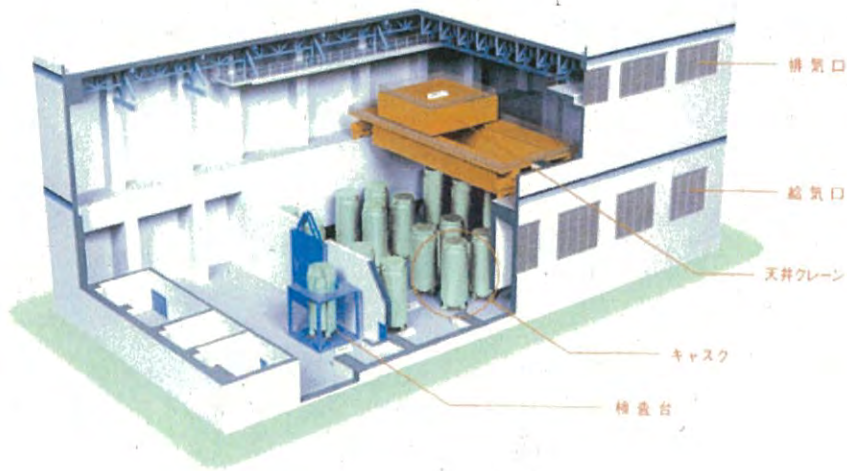
設備名称	分類	既許可上の分類	説明方針	16条 まとめ資料
乾式貯蔵建屋天井 クレーン	周辺施設		<ul style="list-style-type: none"> ・16条まとめ資料にて、想定事象を想定しても使用済燃料乾式貯蔵容器の安全機能に影響ないことを説明する。 ・設備については、一般産業施設を用い、クレーン等安全規則、クレーン構造規格等に基づき、落下防止措置等^{※1}を講じることを説明済。 ・貯蔵エリアに移動できない構造となっており、取扱いエリアでの乾式キャスク取扱い作業中は、乾式キャスク上部から隔離して作業を行うこと。また、クレーンが乾式キャスクへ悪影響を及ぼさないことを説明する。 	2.7項 3項 参考6
乾式貯蔵容器 搬送台車	周辺施設		<ul style="list-style-type: none"> ・16条まとめ資料にて、想定事象を想定しても使用済燃料乾式貯蔵容器の安全機能に影響ないことを説明する。 ・設備については、一般産業施設として、日本産業規格等の国内規則・規格類に基づいた部材、部品で構成し、構造上、搬送中の乾式キャスクが他のキャスクと衝突しないことを説明済。 	2.7項 3項 参考4

※1：主な吊荷の落下防止措置は次のとおり。

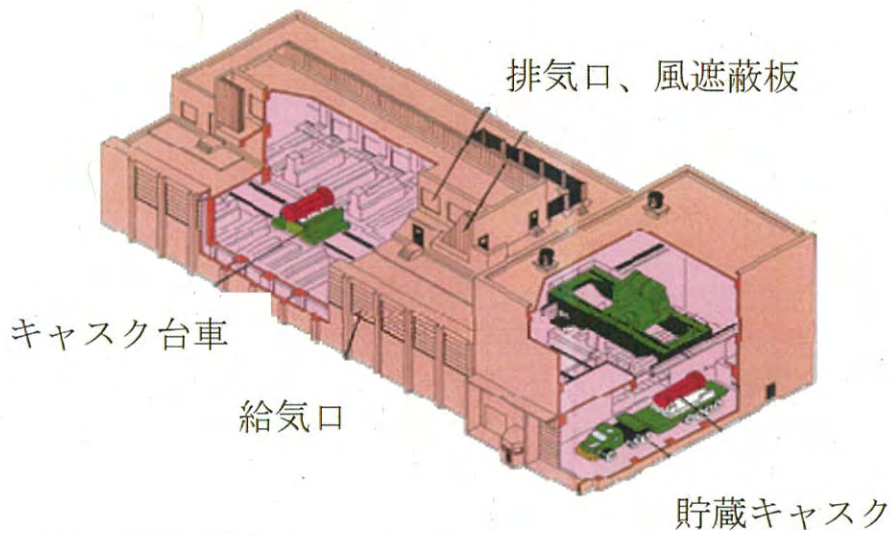
- ・電源遮断時に自動的にブレーキが作動することでワイヤが巻き下げられることを防止し吊荷を保持する。
- ・ワイヤがフックから外れることを防止するための外れ止めを設ける。
- ・巻過ぎによるワイヤの切断を防止する巻過防止装置を設ける。
- ・吊荷の安定化のためワイヤを二重化する。

(参考)

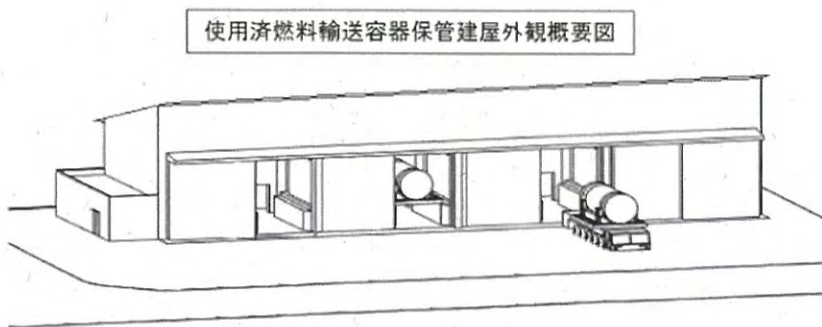
○日本原電(株)東海第二



○東京電力 旧(株)福島第一 (旧キャスク保管庫)



○関西電力(株) (キャスク保管庫)



使用済燃料乾式貯蔵容器蓋間圧力の監視頻度の 妥当性について

(乾式キャスクの落下試験等の文献を考慮した監視頻度の妥当性)

1. 監視頻度の評価条件

以下のとおり、監視頻度の妥当性を確認した。

- ① 金属ガスケットの漏えい率は、設計漏えい率程度で推移すると想定しているが、保守的に、基準漏えい率の 1000 倍の漏えい率*¹ ($2.58 \times 10^{-6} \times 1000 = 2.58 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) を設定する。

*1：文献（航空機衝突試験、キャスク転倒試験、9 m 落下試験）を基に設定。（表 1 参照）

- ② 乾式キャスクの蓋間空間のヘリウムガスが、一次蓋側（キャスク内部）および二次蓋側（キャスク外部）の二方向から漏えいする。
- ③ 想定される全ての発熱量条件での圧力変動幅を包絡するよう、蓋間圧力は崩壊熱量を考慮する場合*²と崩壊熱量を考慮しない場合（崩壊熱量 0 kW の場合）を想定する。
- ④ 貯蔵開始後は、周囲環境温度が $-7 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲で変動すると想定する。
- ⑤ 圧力計の計器誤差を $\pm 1.6\%$ とする。

*2：MSF-32P 型キャスクの収納制限最大の発熱量となる場合

2. 監視頻度の評価結果

図 1 及び図 2 に示すように、仮に、貯蔵開始直後に、基準漏えい率の 1000 倍の漏えいが 2 方向で生じた場合、蓋間圧力は急激に低下し、最早で約 9 日経過後に大気圧に到達する可能性がある。また、蓋間圧力が大気圧に到達した後は、蓋間空間内のガスは乾式キャスク内部へ大気圧一定条件下で 1 方向に漏えいする。（乾式キャスク外（大気圧）→蓋間空間（大気圧）→乾式キャスク内部、の方向で 1 方向に漏えいする。）

一方、乾式キャスク内部は蓋間空間と比べて容積が大きいため、乾式キャスク内部は大気圧に到達するまでに比較的時間を要する。具体的には、乾式キャスク内部は、基準漏えい率の 1000 倍の漏えいが生じた場合、約 4 年間が経過しても、乾式キャスク内部は大気圧（大気圧の気象変動を考慮した下限値である 0.097MPa）に到達することはなく、大気圧に到達しない。

従って、蓋間空間が大気圧で一定となっている一方で、乾式キャスク内部は、約 4 年間は乾式キャスク内部が負圧に維持されているため、約 4 年間は FP ガスが外部へ放出されることはない。

以上のことから、監視頻度の設定にあたって、設計貯蔵期間中の乾式キャスクの発熱量の低下、周囲環境の温度変化、蓋間圧力の変化に加え、基準漏えい率の 1000 倍の漏えい率を考慮しても、3 カ月に 1 回の頻度で監視することにより、閉じ込め機能が低下しても FP ガス等の放出に至る前に、密封シール部の異常を検知できるため、監視頻度を 3 カ月に 1 回と設定することは適切である。

表1 各種試験前後の漏えい率

試験	部位	漏えい率 (測定値) : Pa・m ³ /s		増加率	
		試験前	試験後		
キャスク転倒試験 (トラニオンを回転中心とする回転高さ1mでの蓋部衝突試験)	一次蓋	3.7×10^{-12}	3.9×10^{-9}	1000	
	二次蓋	1.2×10^{-12}	8.4×10^{-9}	1000	
航空機衝突試験 (縦置き状態のキャスク蓋部周辺への航空機エンジンの衝突試験)	一次蓋	8.2×10^{-11}	4.0×10^{-6}	100000	
9m落下試験 (MSF型キャスクのプロトタイプを用いた輸送荷姿(緩衝体付き)での落下試験※)	0.3m 傾斜落下	一次蓋	2.5×10^{-11}	1.0×10^{-11}	1
		二次蓋	1.5×10^{-11}	$< 1 \times 10^{-11}$	1
	9m 傾斜落下	一次蓋	1.0×10^{-11}	$< 1 \times 10^{-11}$	1
		二次蓋	$< 1 \times 10^{-11}$	3.0×10^{-7}	10000
	9.3m 傾斜落下	一次蓋	$< 1 \times 10^{-11}$	$< 1 \times 10^{-11}$	1
		二次蓋	7.4×10^{-9}	1.6×10^{-6}	1000

以上の知見を踏まえ、監視頻度の設定における金属ガスケットの漏えい率として、基準漏えい率の1000倍の漏えい率を設定。

※ 金属ガスケットを用いた二重の蓋構造であり、三次蓋(ゴムOリング)を設けない構造

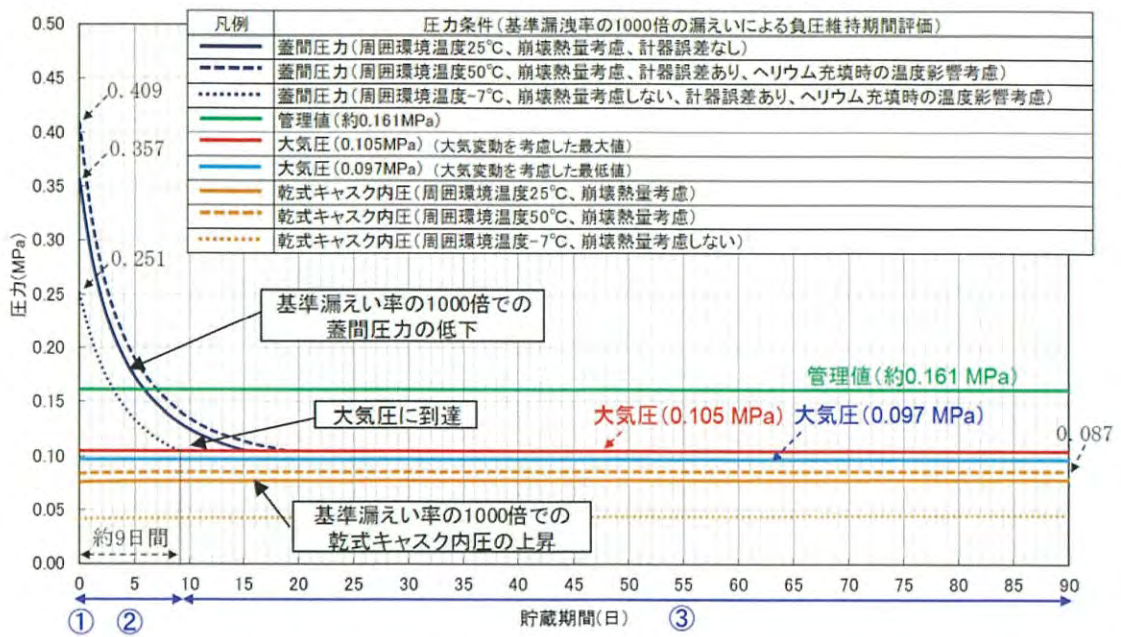


図1 貯蔵期間中における蓋間圧力等の経時変化 (1 / 2)

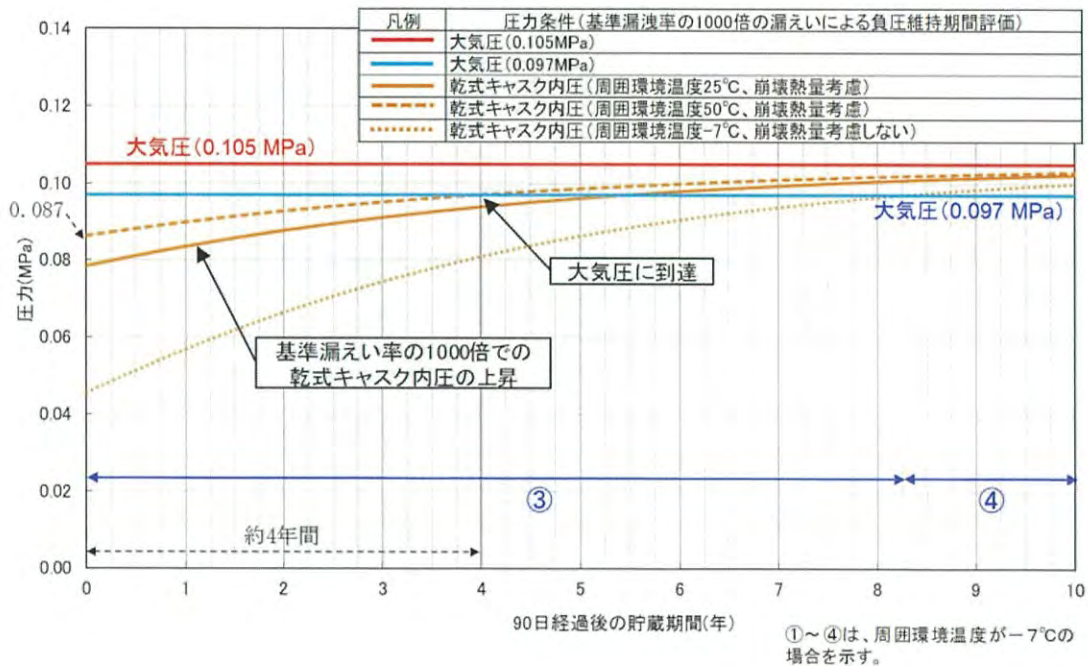


図1 貯蔵期間中における蓋間圧力等の経時変化 (拡大図) (2 / 2)

29 条

工場等周辺における直接線等からの防護

<目 次>

1. 基本方針

1.1 要求事項に対する適合性

(1) 位置, 構造及び設備

(2) 安全設計方針

(3) 適合性説明

1.2 気象等

1.3 設備等

2. 工場等周辺における直接線等からの防護

(別添資料)

工場等周辺における直接線等からの防護について

(使用済燃料乾式貯蔵施設)

1. 基本方針

1.1 要求事項に対する適合性

(1) 位置、構造及び設備

ロ 発電用原子炉施設の一般構造

(3) その他の主要な構造

(i) 本発電用原子炉施設は、「(1)耐震構造」,「(2)耐津波構造」に加え、以下の基本的方針のもとに安全設計を行う。

a. 設計基準対象施設

(x) 発電所周辺における直接線等からの防護

設計基準対象施設は、通常運転時において発電用原子炉施設からの直接線及びスカイシャイン線による敷地周辺の空間線量率が、十分に低減(発電所内の使用済燃料乾式貯蔵施設を除く他の施設からのガンマ線と使用済燃料乾式貯蔵施設からの中性子及びガンマ線とを合算し、実効線量で1年間当たり50マイクロシーベルト以下となるように)できる設計とする。

イ 核燃料物質及び核燃料物質によって汚染された物による放射線被ばくの管理の方法

(1) 放射線防護に関する基本方針・具体的方法

放射線の被ばく管理及び放射性廃棄物の廃棄に当たっては、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(以下「原子炉等規制法」という。)及び「労働安全衛生法」を遵守し、本発電所に起因する放射線被ばくから発電所周辺の一般公衆並びに放射線業務従事者及び一時立入者(以下「放射線業務従事者等」という。)を防護するため十分な放射線防護対策を講じる。

さらに、発電所周辺の一般公衆に対する線量については、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」(以下「線量目標値に関する指針」という。)に基づき、合理的に達成できる限り低くすることとする。

具体的方法については、以下のとおりとする。

(i) 本発電所に係る放射線被ばくを合理的に達成できる限り低減する方針で、遮蔽設備、換気空調設備、放射線管理設備及び放射性廃棄物廃棄施設を設計し、運用する。

(ii) 放射線被ばくを合理的に達成できる限り低くするために、管理区域を設定して立ち入りの制限を行い、外部放射線に係る線量当量、空气中若しくは水中の放射性物質の濃度及び床等の表面の放射性物質の密度を監視する。

(iii) 放射線業務従事者に対しては、線量を測定評価し線量の低減に努める。

(iv) 管理区域の外側には、周辺監視区域を設定して、人の立ち入りを制限する。

(v) 気体及び液体廃棄物の放出については、放出管理目標値を定め、これを超えないように努める。

なお、発電用原子炉施設は、通常運転時において原子炉施設からの直接線及

びスカイシャイン線による敷地境界外の空間線量率が十分に低減できるものとする。

ハ 周辺監視区域の外における実効線量の算定の条件及び結果

「線量目標値に関する指針」に基づき、気体廃棄物中の希ガスの γ 線、液体廃棄物中に含まれる放射性物質（よう素を除く。）並びに気体廃棄物中及び液体廃棄物中に含まれるよう素に起因する実効線量を、「線量目標値に対する評価指針」及び「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に従って評価する。

(2) 線量の評価結果

敷地境界外における1号炉、2号炉及び3号炉からの気体廃棄物中の希ガスの γ 線に起因する実効線量、液体廃棄物中（よう素を除く。）に含まれる放射性物質に起因する実効線量及びよう素に起因する実効線量は、それぞれ年間約 $4.7\mu\text{Sv}$ 、年間約 $2.8\mu\text{Sv}$ 及び年間約 $3.5\mu\text{Sv}$ となり、合計は年間約 $11.0\mu\text{Sv}$ である。

この値は、「線量目標値に関する指針」に示される線量目標値の年間 $50\mu\text{Sv}$ を下回る。

なお、発電用原子炉施設の設計及び管理によって、通常運転時において原子炉施設からの直接線及びスカイシャイン線による実効線量が、人の居住の可能性のある敷地境界外において年間 $50\mu\text{Sv}$ を下回るようにする。

(2) 安全設計方針

1.1 安全設計の方針

1.1.1 安全設計の基本方針

1.1.1.1 放射線被ばく

平常運転時、発電所周辺の一般公衆及び放射線業務従事者等に対し、「原子炉等規制法」に基づき定められている線量限度を超える放射線被ばくを与えないように設計する。さらに、設計にあたっては発電所周辺の一般公衆に対し、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」に定められている線量目標値を超える放射線被ばくを与えないように努める。

(3) 適合性説明

(工場等周辺における直接線等からの防護)

第二十九条 設計基準対象施設は、通常運転時において発電用原子炉施設からの直接線及びスカイシャイン線による工場等周辺の空間線量率が十分に低減できるものでなければならない。

設計基準対象施設である使用済燃料乾式貯蔵施設は、既設を含めた原子炉施設からの直接線及びスカイシャイン線による敷地周辺の空間線量率を合理的に達成できる限り小さい値となるように設計する。具体的には、年間 50 マイクロシ

シーベルトを超えない設計とする。

1.2 気象等

該当なし

1.3 設備等

8.3 遮蔽設備

8.3.1 概要

遮蔽設備は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び事故時において、発電所周辺の一般公衆、従事者等の被ばく線量を低減するもので、次のものから構成される。

- (1) 原子炉1次遮へい
- (2) 原子炉2次遮へい
- (3) 外部遮へい
- (4) 補助遮へい
- (5) 燃料取扱遮へい
- (6) 中央制御室遮へい
- (7) 一時的遮へい
- (8) 緊急時対策所遮へい

8.3.2 設計方針

(1) 発電所周辺の一般公衆が受ける被ばく線量については、「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」（以下「線量限度等を定める告示」という。）に定められた周辺監視区域外の値より十分小さくなるようにするとともに、通常運転時における直接線量及びスカイシャイン線量については、人の居住の可能性のある敷地境界外において、発電所内の使用済燃料乾式貯蔵施設を除く他の施設からのガンマ線と使用済燃料乾式貯蔵施設からの中性子及びガンマ線とを合算し、実効線量で年間50マイクロシーベルトを超えないような遮蔽設計とする。

(2) 燃料取替え時、補修時等を含む通常運転時において、従事者等が受ける被ばく線量が、「線量限度等を定める告示」に定められた限度を超えないようにするのはもちろん、不必要な放射線被ばくを防止するような遮蔽設計とする。

遮蔽設計に関しては、関係各場所への立入頻度、滞在時間等を考慮した上で、従事者等の放射線被ばく線量が十分安全に管理できるように、放射線量率が下記の遮蔽設計基準（1）を満足するように設計する。

遮蔽設計基準（1）

区分		外部放射線に係る 設計基準線量率	代表箇所
管理区域外	第Ⅰ区分	≤ 0.00625 mSv/h	
管理区域内* ¹	第Ⅱ区分	≤ 0.01 mSv/h	一般通路等
	第Ⅲ区分	≤ 0.15 mSv/h	操作用通路等
	第Ⅳ区分	> 0.15 mSv/h	機器室等

*1 「線量限度等を定める告示」に基づき、1.3mSv/3月を超えるか又は超えるおそれのある区域を管理区域に設定する。

機器の配置に当たっては、高放射性物質を内蔵する機器は原則として独立した区画内に配置し、操作又は監視頻度の高い制御盤等は管理区域内の低放射線区域又は管理区域外に配置する。

なお、雑固体処理建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋については、下記の遮蔽設計基準（2）を満足するように設計する。

遮蔽設計基準（2）

区分		外部放射線に係る 設計基準線量率	代表箇所
管理区域外	第Ⅰ区分	≤ 1.3 mSv/3月	
管理区域内	第Ⅱ区分	≤ 0.01 mSv/h	一般通路等
	第Ⅲ区分	≤ 0.15 mSv/h	操作用通路等
	第Ⅳ区分	> 0.15 mSv/h	機器室等

これら区分概略を、第8.3.1図～第8.3.10図に示す。

- (3) 発電所周辺の一般公衆の受ける被ばく線量が、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」及び「原子炉立地審査指針」を十分満足する遮蔽設計とする。

また、事故時に中央制御室内の従事者等に対し、過度の放射線被ばくがないように考慮し、運転員が中央制御室内にとどまり事故対策に必要な各種の操作を行うことができるような遮蔽設計とする。

8.3.4 主要設備

8.3.4.1 原子炉1次遮へい

原子炉1次遮へいは、原子炉容器を直接取り囲む厚さ約2.8mの鉄筋コンクリート造の構造物で、通常運転時の原子炉からの放射線を減衰させる。

原子炉1次遮へいは、原子炉容器からの熱伝達及びコンクリート内部で吸収される放射線による過熱脱水を防止するため、原子炉容器冷却ファンにより空気で冷却する。

8.3.4.2 2次遮へい

2次遮へいは、原子炉格納容器内の1次冷却系機器配管を取り囲む構造物で、内部コンクリート及び原子炉格納容器で構成する。

1次冷却系機器配管を取り囲む構造物のうち、主要なものは厚さ約1.1mの鉄筋コンクリート造の蒸気発生器側壁と円筒部厚さ約45mm、ドーム部厚さ約23mmの原子炉格納容器鋼板である。

2次遮へいは、1次遮へいと外部遮へいとの組合せにより、通常運転時に原子炉格納施設外側での外部放射線に係る線量当量率を第Ⅰ区分に減衰させる。

8.3.4.3 外部遮へい

外部遮へいは、円筒部厚さ約1.4m～約1.1m、ドーム部厚さ約1.0～約0.3mの鉄筋コンクリート造で、原子炉1次遮へいと原子炉2次遮へいとの組合せにより、通常運転時に原子炉格納施設外側での放射線量率を第Ⅰ区分に減衰させる。

また、外部遮へい及び原子炉格納容器鋼板は、その組合せにより、発電所周辺的一般公衆が受ける被ばく線量が、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」及び「原子炉立地審査指針」を十分満足する厚さである。

8.3.4.4 補助遮蔽

補助遮蔽は、原子炉建屋及び原子炉補助建屋内の放射性廃棄物廃棄施設、化学体積制御設備、試料採取設備等の放射性物質を内蔵する機器及び配管、並びに使用済燃料乾式貯蔵建屋に貯蔵する使用済燃料乾式貯蔵容器を取り囲む構造物である。

補助遮蔽は、建屋内の通路の線量当量率を第Ⅱ区分に減衰させるとともに、原則として隣接した機器室からの線量当量率を第Ⅲ区分に減衰させ、隣接設備の停止あるいは除染を行わずに、各機器室における補修を可能にする。

ただし、バルブエリアにおいては、隣接した機器室からの線量当量率が1mSv/h以下になるように遮蔽する。

8.3.4.5 燃料取扱遮へい

燃料取扱遮へいは、燃料取替え時に原子炉キャビティ、チャンネル及び使用済燃料ピットに張る水等からなり、燃料取替え時、燃料移送時、使用済燃料貯蔵時及びウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料貯蔵時に放射線業務従事者等が安全に作業できるようにする。

燃料取替え時の原子炉キャビティに張る水は、ほう酸水で、燃料集合体の頂部までの水深は約11m、また、使用済燃料ピットに張る水もほう

酸水で、燃料集合体の頂部までの水深は約 8 m である。

さらに、原子炉キャビティ、チャンネル及び使用済燃料ピットにおいて燃料集合体を取り扱う場合でも、燃料集合体の頂部までの水深を 3 m 以上確保する。

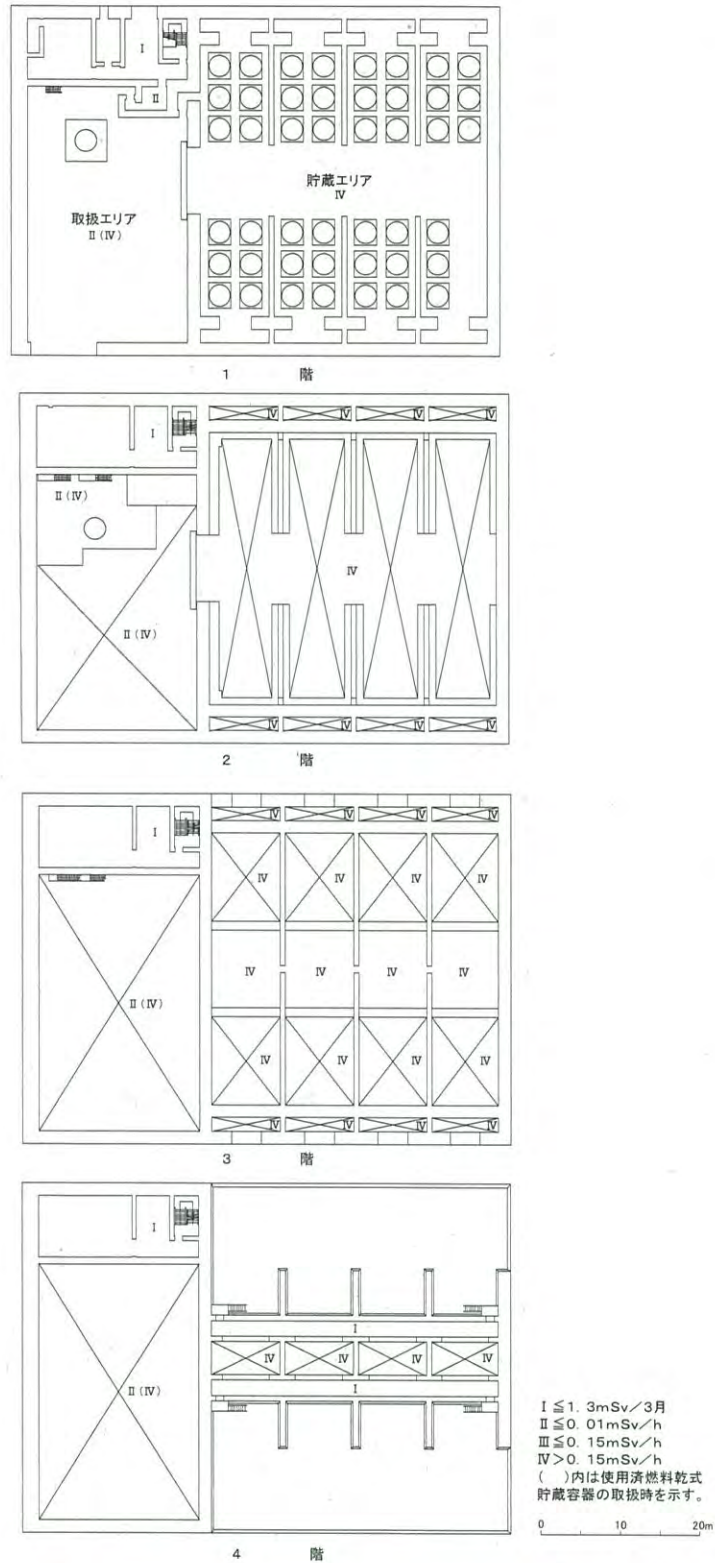
8.3.4.6 中央制御室遮へい

(1) 通常運転時等

中央制御室遮へいは、原子炉補助建屋内に設置し、原子炉冷却材喪失等の設計基準事故時に、中央制御室内にとどまり必要な操作、措置を行う運転員が過度の被ばくを受けないよう施設する。また、運転員の勤務形態を考慮し、事故後 30 日間において、運転員が中央制御室に入り、とどまっても、中央制御室遮へいを透過する放射線による線量、中央制御室に侵入した外気による線量及び入退域時の線量が、中央制御室換気空調設備等の機能とあいまって、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」に示される 100mSv を下回る遮蔽とする。

8.3.4.7 一時的遮へい

一時的遮へいは、放射性物質を内蔵する機器及び設備の補修時あるいは事故時の保守等のために一時的に使用するもので、コンクリートブロック、鉛、鉄板等でできた可搬式遮へい構造物であり、必要に応じて設置する。



第8.3.10図 使用済燃料乾式貯蔵建屋遮蔽設計区分図

2. 工場等周辺における直接線等からの防護

(別添資料)

工場等周辺における直接線等からの防護について
(使用済燃料乾式貯蔵施設)

別 添

工場等周辺における
直接線等からの防護について
(使用済燃料乾式貯蔵施設)

目 次

1. 遮蔽設計

2. 評価条件

3. 評価結果

添付1：工場等周辺における直接線等からの防護について（使用済燃料乾式貯蔵施設）補足説明資料

1. 遮蔽設計

使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽設計については、管理区域境界（外壁）において1.3mSv/3月を超えないように設計する必要がある、周辺での作業等者の滞在時間（3月で500時間）を考慮し管理区域外の設計基準線量率を2.6 μ Sv/h以下とすることとしている。さらに、工場等周辺（以下、敷地境界外という）における直接線及びスカイシャイン線量が、使用済燃料乾式貯蔵建屋からの寄与を加えても発電所として年間50 μ Svを超えないよう設計することとしている。

以下に、使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽機能について評価条件、方法及び結果を示す。

2. 評価条件

2.1 使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽厚^{※1}

(1) 貯蔵エリア

壁厚：
天井厚：

(2) 取扱エリア

壁厚：
天井厚：

※1：遮蔽計算に用いる遮蔽厚は、公称値からマイナス側許容誤差（5mm）を引いた値とする。

2.2 線源

使用済燃料乾式貯蔵容器の線源は、第2-1表のとおりとする。使用済燃料貯蔵容器の線源強度は、管理区域境界や敷地境界外における線量が保守的な評価結果となるように、コンクリートの透過率を考慮してエネルギースペクトルを保守側に設定するとともに、容器表面から1mの位置における線量率が100 μ Sv/hとなるように規格化している。また、使用済燃料乾式貯蔵容器からの放射線の線質を全て中性子または全てガンマ線とした条件においてそれぞれ線量評価し、保守的な評価結果を求める。

第2-1表 線源条件

線源	基数	線源強度	スペクトル
使用済燃料乾式貯蔵容器	貯蔵エリア：48基 取扱エリア：2基	容器表面1mの線量率が100 μ Sv/hとなるように規格化	包絡スペクトル ^(注)

(注)「使用済燃料中間貯蔵施設の直接・スカイシャイン線量の評価手法について〔金属キャスク方式〕（平成12年3月）」

2.3 評価モデル

ガンマ線と中性子線の両方について線量評価を行い、最終的な評価値としては、両者のうちより保守的な線量評価を採用する。

管理区域境界におけるガンマ線評価及び敷地境界外における直接ガンマ線評価では、使用済燃料乾式貯蔵容器を円筒形の線源で模擬して評価する。貯蔵エリアにおける線量評価では、キャスクの配置を考慮し 48 基のキャスクを考慮する。取扱エリアにおける線量評価では、キャスク 1 基の線量率を算出し、結果を 2 倍することでキャスク 2 基分の線量率を計算する。(第 2-1 図及び第 2-2 図参照)

敷地境界外におけるスカイシャインガンマ線評価では、容器の最大高さに 48 基分の線源強度の点線源があるものとして評価する。(第 2-3 図参照)

管理区域境界における中性子線評価では、使用済燃料乾式貯蔵容器を球形の線源で模擬して評価する。キャスク 1 基の線量率を算出し、貯蔵エリアにおける線量評価では 48 倍、取扱エリアにおける線量評価では 2 倍し、それぞれ 48 基及び 2 基分の線量率を計算する。(第 2-4 図及び第 2-5 図参照)

敷地境界外における直接・スカイシャイン中性子線評価では、容器の最大高さに 48 基分の線源強度の点線源があるものとして評価する。(第 2-6 図参照)

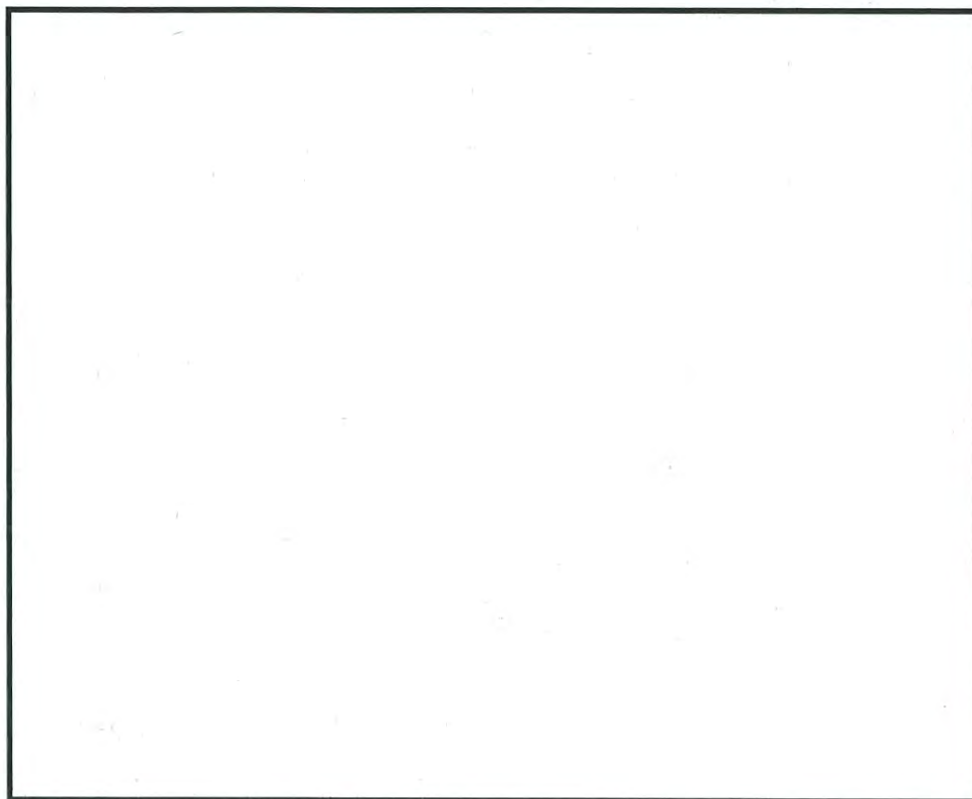
2.4 評価地点

2.4.1 管理区域境界線量評価地点

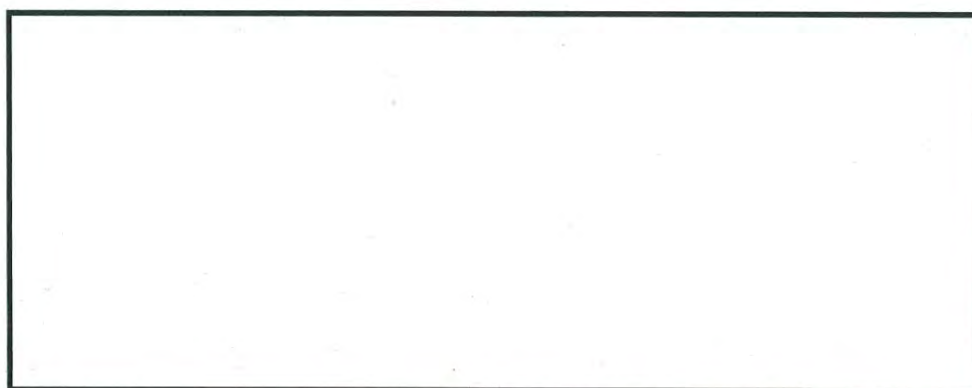
評価地点は、貯蔵エリアの管理区域境界と、取扱エリアの管理区域境界とする。それぞれの代表点を第 2-7 図に示す。

2.4.2 敷地境界外線量評価地点

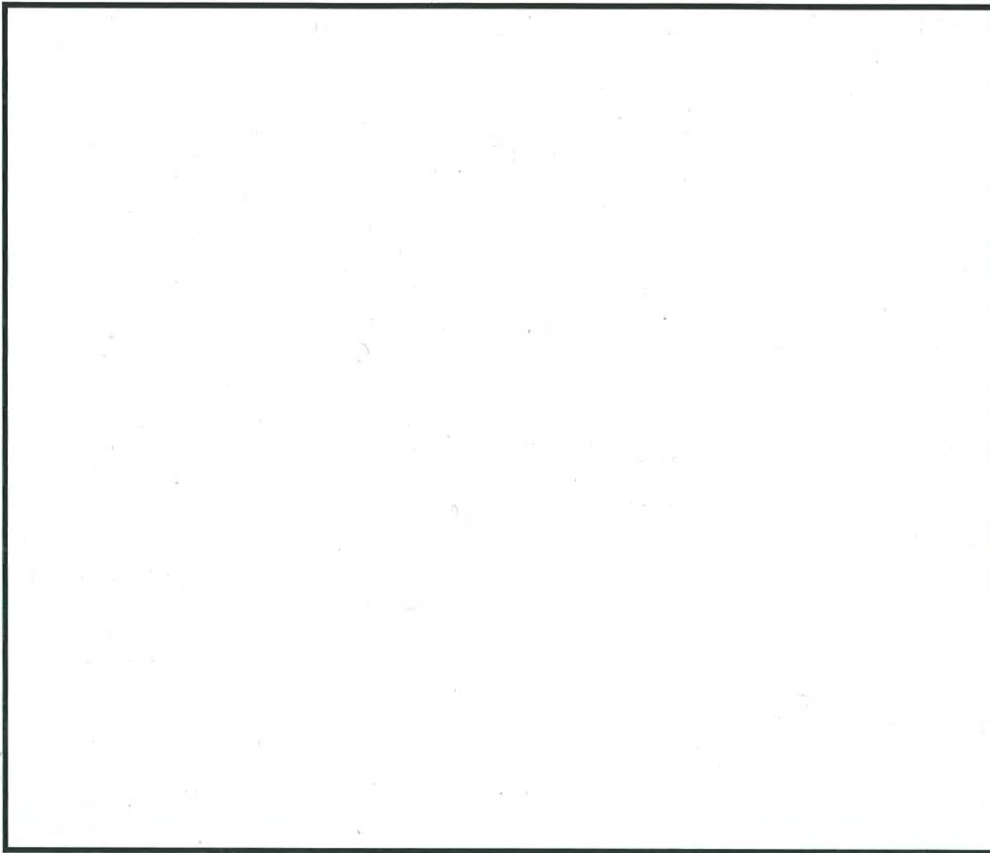
評価地点は、3号原子炉を中心として 16 方位に分割したうちの陸側 9 方位の敷地境界地点のうち、既設建屋からの寄与を含めた直接線及びスカイシャイン線量が最大となる地点とする。(第 2-8 図参照)



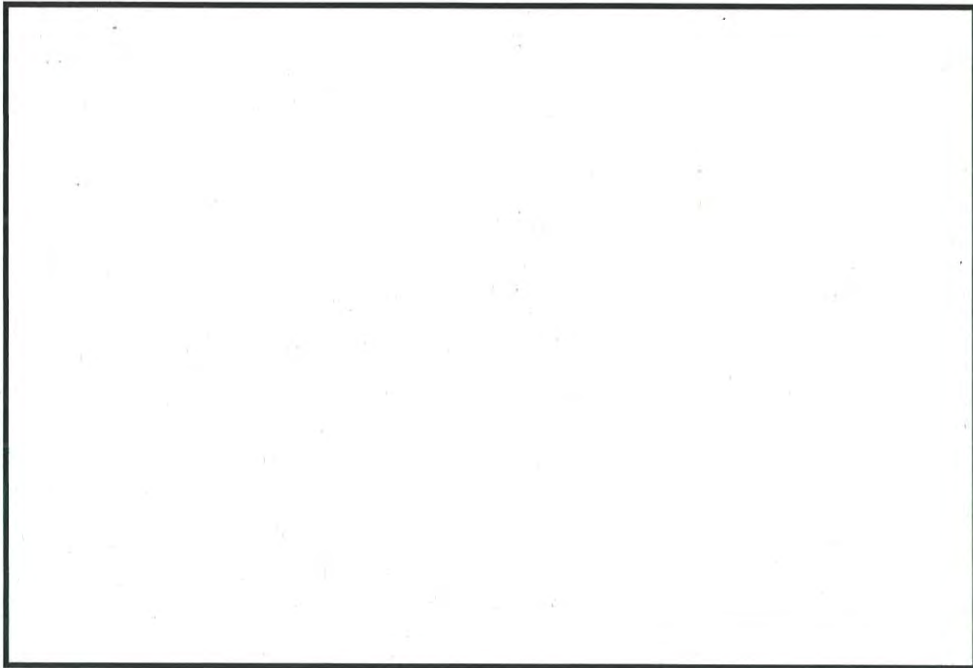
第2-1図 貯蔵エリア周辺の管理区域境界および
敷地境界外における直接ガンマ線評価モデル



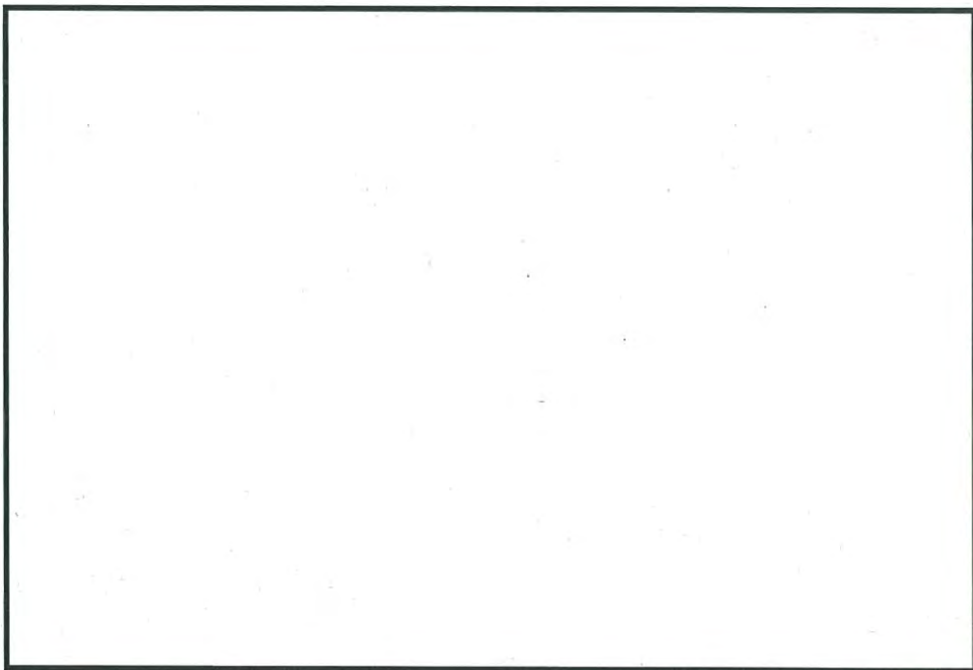
第2-2図 取扱エリア周辺の管理区域境界における直接ガンマ線評価モデル



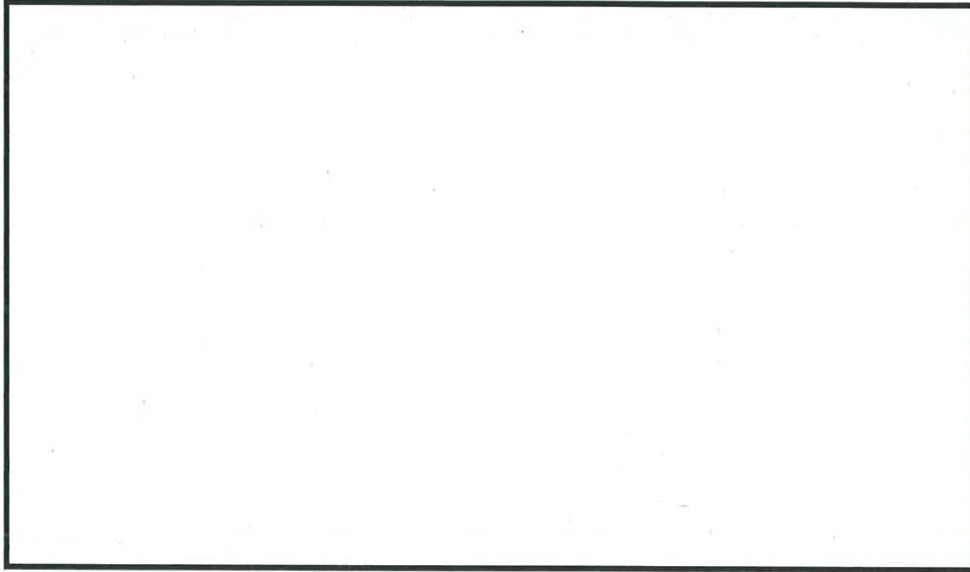
第2-3図 敷地境界外におけるスカイシャインガンマ線評価



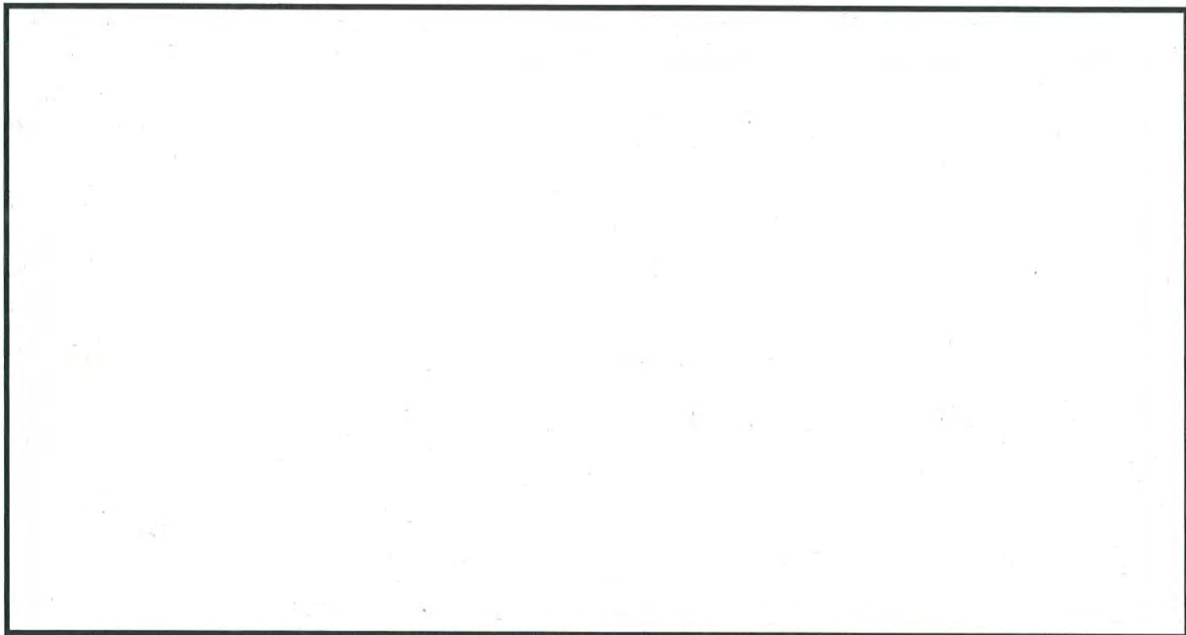
第2-4図 貯蔵エリア周辺の管理区域境界における中性子線評価



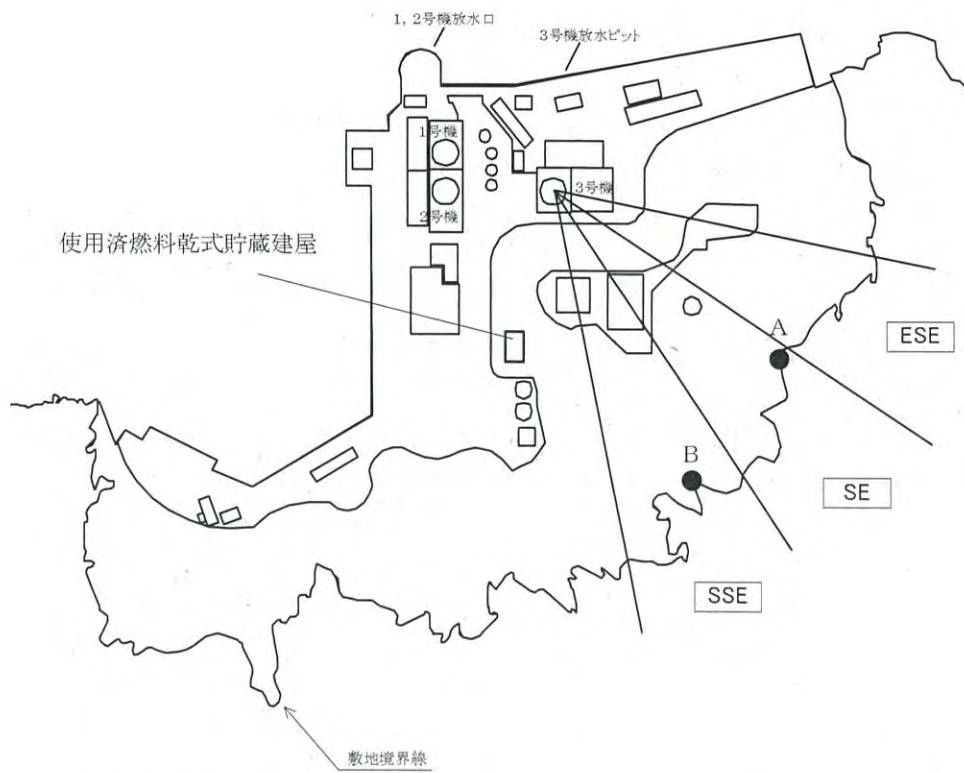
第2-5図 取扱エリア周辺の管理区域境界における中性子線評価



第2-6図 敷地境界外における直接・スカイシャイン中性子線評価



第2-7図 管理区域境界評価地点



評価地点	使用済燃料乾式貯蔵建屋からの距離(m)	標高(m)	備考
A	500	170	伊方発電所敷地境界での最大評価地点
B	420	90	伊方発電所敷地境界での評価地点のうち、使用済燃料乾式貯蔵建屋からの最短地点

第2-8図 使用済燃料乾式貯蔵建屋と評価地点

3. 評価結果

3.1 管理区域境界

前記条件を用いて、使用済燃料乾式貯蔵容器からのガンマ線はQAD-CGGP2Rコード、中性子線はANISNコードにより評価した。

評価の結果、第3-1表に示すとおり、管理区域境界における線量率は基準値である $2.6\mu\text{Sv/h}$ 以下を満足することができる結果となった。

第3-1表 管理区域境界における線量率

評価点	壁外線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)		基準値
	全てガンマ線 とした場合	全て中性子線 とした場合	
a (貯蔵エリア)	0.044	0.17	$\leq 2.6\mu\text{Sv/h}$
b (取扱エリア)	1.7	1.2	

3.2 敷地境界外

前記条件を用いて、使用済燃料乾式貯蔵容器からのガンマ線はQAD-CGGP2Rコード（直接線）およびSCATTERINGコード（スカイシャイン線）、中性子線はDORTコードにより評価した。

評価結果を第3-2表に示す。また、既設建屋を含めた敷地境界外における年間線量は第3-3表に示すとおり、最大線量地点に変更無く、年間 $50\mu\text{Sv}$ 以下を満足できることが分かった。

第3-2表 敷地境界外における年間線量

評価地点	EL (m)	使用済燃料 乾式貯蔵建屋 からの距離 (m)	年間線量 (μSv)	
			全てガンマ線 とした場合 ^(注1)	全て中性子線 とした場合 ^(注2)
A	170	500	0.16	0.058
B	90	420	0.27	0.11

(注1) 空気カーマから実効線量への換算は保守的に $1\text{Gy}=1\text{Sv}$ とした。

(注2) フルエンスから実効線量への換算はICRP Publication 74「外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数」表A.41の換算係数を使用した。

第3-3表 既設建屋を含めた敷地境界外における年間線量

評価地点	年間線量 (μSv)			線量目標
	既設建屋	使用済燃料乾式貯蔵建屋 ^(注)	合算	
A	5.1	0.16	5.2	≤ 50
B	3.9	0.27	4.2	

(注) 第3-2表のとおり線量の大きいガンマ線による線量で代表した。

なお、評価地点Aにおける各建屋からの線量寄与は第3-4表のとおり。

第3-4表 評価地点Aにおける各建屋からの線量寄与

建屋名		線量寄与	
既設建屋	原子炉格納容器	2号炉	$1.1 \times 10^0 \mu\text{Sv}/\text{y}$
		3号炉	$4.0 \times 10^{-1} \mu\text{Sv}/\text{y}$
	原子炉補助建屋	1,2号炉	$8.4 \times 10^{-1} \mu\text{Sv}/\text{y}$
		3号炉	$2.0 \times 10^0 \mu\text{Sv}/\text{y}$
	1-固体廃棄物貯蔵庫		$9.1 \times 10^{-4} \mu\text{Sv}/\text{y}$
	2-固体廃棄物貯蔵庫		$6.3 \times 10^{-1} \mu\text{Sv}/\text{y}$
	雑固体処理建屋		$6.4 \times 10^{-5} \mu\text{Sv}/\text{y}$
	蒸気発生器保管庫		$6.4 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}/\text{y}$
使用済燃料乾式貯蔵施設		$1.6 \times 10^{-1} \mu\text{Sv}/\text{y}$	
合計		$5.2 \mu\text{Sv}/\text{y}$	

以上の結果より、2. 評価条件に示した使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽厚を満足することで、敷地境界外における直接線及びスカイシャイン線量が、使用済燃料乾式貯蔵建屋からの寄与を加えても発電所として年間 $50 \mu\text{Sv}$ 以下を満足することができる結果となる。

(添付1)

工場等周辺における
直接線等からの防護について
(使用済燃料乾式貯蔵施設)
補足説明資料

目 次

1. 開口部に関する遮蔽設計について
2. 評価コードの概要
3. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽設計で使用するスペクトルの保守性について
4. 敷地境界外における線量の実効線量への換算について
5. ストリーミングの影響について

1. 開口部に関する遮蔽設計について

管理区域境界における設計基準線量率 $2.6 \mu\text{Sv/h}$ 以下を満足するため、第 1 - 1 図中の D 地点の開口部、区画 B-C 間、および第 1 - 2 図中の給排気口については、以下の壁厚等を満足することで、局所的な最短透過距離部においても必要遮蔽厚さを確保できる。なお、給排気口については、高所設置とし、人が容易に接近しない設計とする。

(1) 貯蔵エリア

壁厚：

天井厚：

(2) 取扱エリア

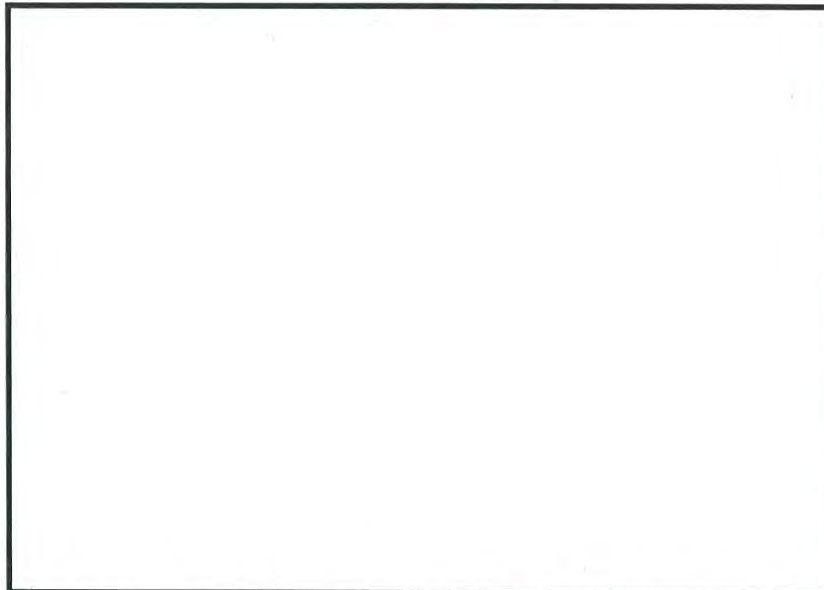
壁厚：

天井厚：

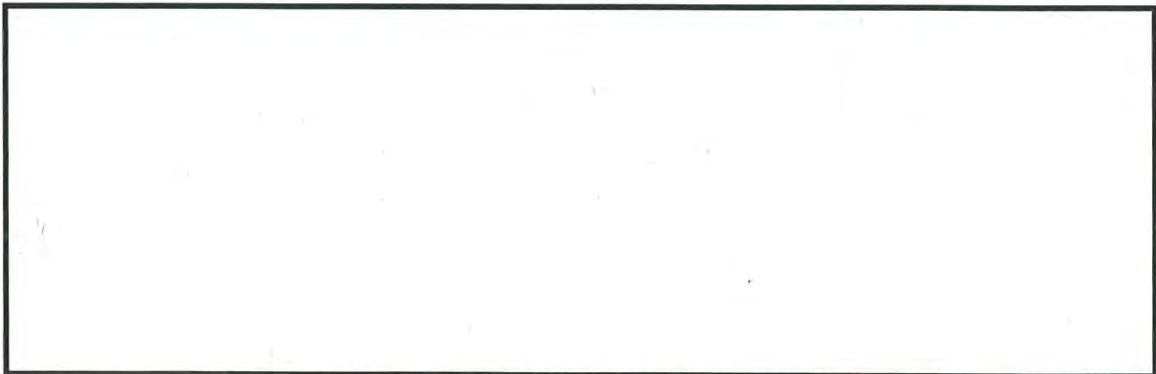
(3) その他

水平遮蔽板厚：

遮蔽扉厚：



第 1 - 1 図 管理区域境界の開口部に対する遮蔽設計概要図



第 1 - 2 図 給排気口部に対する遮蔽設計概要図

2. 評価コードの概要

今回の変更申請においては、直接ガンマ線の評価にはQAD-CGGP2Rコード、スカイシャインガンマ線の評価にはSCATTERINGコード、中性子線の評価にはANISNコードおよびDORTコードを用いている。

これら評価コードの概要を第2-1～2-4表に示す。なお、いずれも許認可での使用実績があるコードである。

第2-1表 QAD-CGGP2Rコードの概要

コード名 項目	QAD-CGGP2R
開発機関	米国ロスアラモス国立研究所及び日本原子力研究開発機構
開発時期	1967年
バージョン	Ver. 1.04
使用目的	遮蔽計算（使用済燃料乾式貯蔵建屋内のキャスクからの直接ガンマ線計算）
コードの概要	<p>本解析コードは、米国ロスアラモス国立研究所で開発されたガンマ線の物質透過を計算するための点減衰核積分法解析コード「QAD」をベースとし、旧日本原子力研究所がICRP1990年勧告の国内関連法令・規則への取り入れに合わせて、実効線量率等を計算できるように改良したバージョンである。</p> <p>本解析コードは、線源及び遮蔽体を直方体、円筒、球などの三次元形状で模擬した計算体系でガンマ線の実効線量率及び空気カーマ率等を点減衰核積分法により計算することができる。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからの直接ガンマ線計算について、QAD-CGGP2Rコードを使用して実施している。</p> <p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ QAD-CGGP2Rコードは、線量率計算を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら計算条件が与えられれば線量率計算は可能であり、QAD-CGGP2Rコードは直接ガンマ線量計算に適用可能である。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ JRR-4 散乱実験室でのコンクリート透過実験の実験値（「原子力第1船遮蔽効果確認実験報告書」JNS-4（日本原子力船開発事業団、1967））と計算値を比較した。 ・ 実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 ・ 上記妥当性確認では、実験孔からのガンマ線を遮蔽体に入射させ、遮蔽体透過後のガンマ線の線量率の実験値と QAD-CGGP2Rコードによる計算値を比較している。 ・ 今回の使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからの直接ガンマ線量計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、ガンマ線の補助遮蔽の遮蔽体透過後の線量率を計算する。 ・ 今回の直接ガンマ線量計算は、上記妥当性確認内容と合致している。 <p>また、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」(JEAC4615-2008)では、キャスク保管建屋等の補助遮蔽のための点減衰核積分コード/散乱線計算コードとして、SPANコード、SCATTERINGコード、QADコードが、燃料移送遮蔽のための点減衰核積分コードとしてSPAN-SLABが挙げられている。</p>

第2-2表 SCATTERINGコードの概要

コード名 項目	SCATTERING
開発機関	米国ロスアラモス国立研究所及び三菱重工業（株）
開発時期	1974年
バージョン	Ver. 90m
使用目的	遮蔽計算（使用済燃料乾式貯蔵建屋内のキャスクからのスカイシャインガンマ線計算）
コードの概要	点減衰核積分法を使用した1回散乱近似法によるスカイシャインガンマ線量の解析コードであり、ガンマ線が空気中で散乱を受けた後、観測点に到達する散乱線量（スカイシャインガンマ線量）を計算する。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからのスカイシャインガンマ線計算について、SCATTERINGコードを使用して実施している。</p> <p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ SCATTERINGコードは、線量率計算を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら計算条件が与えられれば線量率計算は可能であり、SCATTERINGコードはスカイシャインガンマ線量計算に適用可能である。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は次のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 米国Radiation Research Associates (RRA) が1977年に米国カンザス州立大学において⁶⁰Co線源を用いたスカイシャインガンマ線のベンチマーク試験の実験値と計算値を比較した。 ・ 実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 ・ 上記妥当性確認では、横壁よりも天井が薄い形状で、スカイシャインガンマ線量が比較的多い体系での実験による実験値と、SCATTERINGコードによる計算値を比較している。 ・ 今回の使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからのスカイシャインガンマ線量計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、遮蔽が側壁より薄い天井を透過した後のスカイシャインガンマ線の線量率を計算する。 ・ 今回のスカイシャインガンマ線量計算は、上記妥当性確認内容と合致している。 <p>また、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」(JEAC4615-2008)では、キャスク保管建屋等の補助遮蔽のための点減衰核積分コード/散乱線計算コードとして、SPANコード、SCATTERINGコード、QADコードが、燃料移送遮蔽のための点減衰核積分コードとしてSPAN-SLABが挙げられている。</p>

第2-3表 ANISNコードの概要

コード名 項目	ANISN
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	1967年
バージョン	ANISN-W
使用目的	遮蔽計算 (使用済燃料乾式貯蔵建屋内のキャスクからの中性子線計算)
コードの概要	<p>本解析コードは、米国オークリッジ国立研究所にて中性子の遮蔽計算を目的として開発されたコードであり、1次元ボルツマン輸送計算式による中性子及びガンマ線の放射線束分布の算出が可能である。</p> <p>今回の評価では、JENDL-3.3をもとに作成された断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 (日本原子力研究所にて整備されたもの) を用いている。本ライブラリは許認可での使用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからの中性子線計算について、ANISNコードを使用して実施している。</p> <p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ ANISN コードは、中性子の放射線束分布解析を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら解析条件が与えられれば中性子の放射線束分布解析は可能であり、線量換算係数を乗じることでANISNコードは中性子線量計算に適用可能である。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ OKTAVIAN 透過実験の実測値 (Yamamoto, J., et al.: "Numerical Tables and Graphs of Leakage Neutron Spectra from Slabs of Typical Shielding Materials with D-T Neutron Source," OKTAVIAN Report A-8 3-05, Osaka Univ. (1983)) と計算値を比較した。 ・ 実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 ・ 上記妥当性確認では、コンクリートを通じた中性子スペクトルの実測値とANISNコードによる計算値を比較している。 ・ 今回の使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからの中性子線量計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、コンクリートの深層透過による放射線束分布を解析し、線量率を計算する。 ・ 今回の中性子線量計算は、上記妥当性確認内容と合致している。 ・ また、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」(JEAC4615-2008) では、キャスク保管建屋等の補助遮蔽のための輸送計算コードとして、ANISN コード及びDOTコードが挙げられている。 ・ 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 については、TRANSX コード (ver.2.15、修正パッチ(International Atomic Energy Agency Nuclear Data Services, "TRANSX patches", https://www.nds.iaea.org/fendl20/transx-patches.htm)) 適用により、計算コード入力用に処理して用いている。 ・ MATXSLIB-J33 については、海上技術安全研究所による実験値 (大西世紀ほか、「²⁵²Cf 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巻 第3号 研究報告, (2007)) と MATXSLIB-J33 による計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 <p>上記妥当性確認では、放射線エネルギーがキャスクのエネルギースペクトルと同等となっており、今回の使用目的と合致している。</p>

第2-4表 DORTコードの概要

コード名 項目	DORT
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	1987年
バージョン	Ver. 3.2
使用目的	遮蔽計算 (使用済燃料乾式貯蔵建屋内のキャスクからの中性子線計算)
コードの概要	<p>本解析コードは、米国オークリッジ国立研究所にて中性子の遮蔽計算を目的として開発されたコードであり、2次元ボルツマン輸送計算式による中性子及びガンマ線の放射線束分布の算出が可能であり、DOTコードの後継コードである。</p> <p>今回の評価では、JENDL-3.3をもとに作成された断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 (日本原子力研究所にて整備されたもの) を用いている。本ライブラリは許認可での使用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからの中性子線計算について、DORTコードを使用して実施している。</p> <p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ DORTコードは、中性子の放射線束分布解析を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら解析条件が与えられれば中性子の放射線束分布解析は可能であり、線量換算係数を乗じることでDORTコードは中性子線量計算に適用可能である。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ OKTAVIAN 施設からの中性子スカイシャイン測定値 (T. Nakamura, et al, "Neutron Skyshine from Intense 14-MeV Neutron Source Facility," Nucl. Sci. Eng., 90, 281-297 (1985)) と計算値を比較した。 ・ 実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 ・ 上記妥当性確認では、天井の薄い実験施設からの中性子スカイシャインの測定値と DOTコードによる計算値を比較している。 ・ DOTコードは、DORTコードのバージョンアップ前の計算コードであり、バージョン変更において解析機能に有意な差がないことを確認している。 ・ 今回の使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからの中性子線量計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、天井の薄い体系での中性子スカイシャインによる線量率を計算する。 ・ 今回の中性子線量計算は、上記妥当性確認内容と合致している。 ・ また、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」(JEAC4615-2008) では、キャスク保管建屋等の補助遮蔽のための輸送計算コードとして、ANISNコード及びDORTコードの前身である DOTコードが挙げられている。 ・ 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 については、TRANSXコード(ver.2.15、修正パッチ (International Atomic Energy Agency Nuclear Data Services, "TRANSX patches", https://www-nds.iaea.org/fendl20/transx-patches.htm))適用により、計算コード入力用に処理して用いている。 ・ MATXSLIB-J33 については、海上技術安全研究所による実験値 (大西世紀ほか、「252Cf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巻 第3号 研究報告, (2007)) と MATXSLIB-J33 による計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 <p>上記妥当性確認では、放射線エネルギーがキャスクのエネルギースペクトルと同等となっており、今回の使用目的と合致している。</p>

3. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽設計で使用するスペクトルの保守性について

3.1 基本的考え方

使用済燃料乾式貯蔵施設では、専用の使用済燃料乾式貯蔵容器を使用し、鉄筋コンクリート造の貯蔵建屋内で貯蔵することから、それぞれの使用済燃料乾式貯蔵容器表面のエネルギースペクトルによるコンクリートの透過率を考慮する必要がある。

このため、使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽設計で使用する使用済燃料乾式貯蔵容器表面のエネルギースペクトルは、使用済燃料乾式貯蔵容器の設計から得られた使用済燃料乾式貯蔵容器表面でのエネルギースペクトル（以下、「設計スペクトル」という。）と比べて、コンクリート透過率が高くなるように設定する。

3.2 設定した線源スペクトル

本評価では、原子力安全研究協会「使用済燃料中間貯蔵施設の直接線・スカイシャイン線量の評価手法について [金属キャスク方式]」¹⁾における線量評価用の表面エネルギースペクトル（以下、「包絡スペクトル」という。）を採用した。設定結果は以下のとおりである。

- ・ガンマ線の包絡スペクトル

使用済燃料乾式貯蔵容器表面での線量当量率が、事業所外運搬に係る法令要求を満足するように、使用済燃料乾式貯蔵容器形状を仮想的に設定して得られたエネルギースペクトル

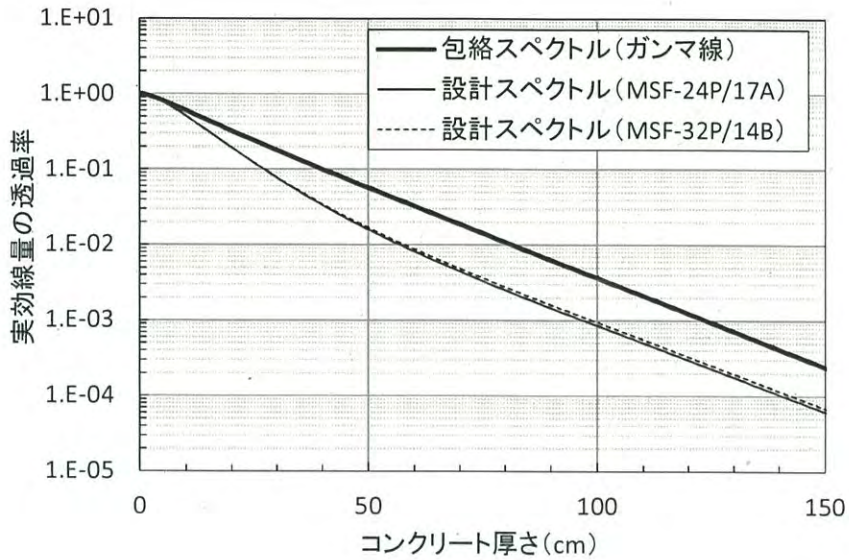
- ・中性子の包絡スペクトル

使用済燃料の中性子源として支配的な $^{242}\text{Cm}(\alpha, n)$ 反応のエネルギースペクトル

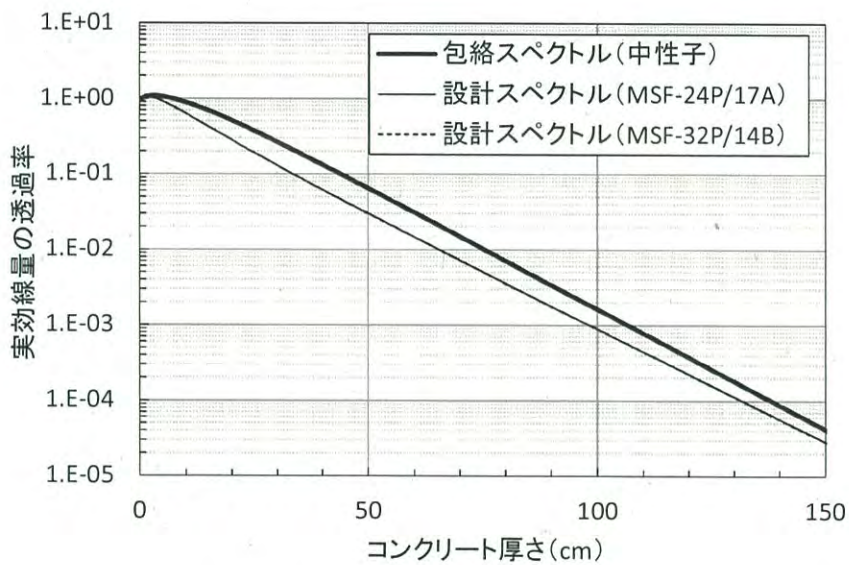
3.3 線源スペクトルの保守性

保守性の確認のため、包絡スペクトルと設計スペクトルに対するコンクリート中での実効線量率の減衰率を比較した。1次元輸送計算コードANISNで計算した結果を第3-1図（ガンマ線）及び第3-2図（中性子線）に示す。

包絡スペクトルは、設計スペクトルに比べ、コンクリートの透過性が高く、保守的であることがわかる。



第3-1図 コンクリート中での実効線量の減衰率（ガンマ線）



第3-2図 コンクリート中での実効線量の減衰率（中性子線）

1) 財団法人 原子力安全研究協会, 「使用済燃料中間貯蔵施設の直接線・スカイシャイン線量の評価手法について」 [金属キャスク方式], 平成12年3月

4. 敷地境界外における線量の実効線量への換算について

敷地境界外のガンマ線評価については、空気カーマを評価し、敷地境界外における公衆の照射形態を考慮して、保守側に事故時評価と同様、換算係数 1 Sv/Gy として実効線量を計算している。

敷地境界外の中性子線評価については、同様に敷地境界外における公衆の照射形態を考慮し、ICRP Publication 74「外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数」に示される ROT ジオメトリーとして実効線量を計算している。

表 A.41. 成人人体形状計算モデルにいろいろなジオメトリーで入射する単一エネルギー中性子に対する、単位中性子フルエンスあたりの実効線量 E/Φ (単位 pSv cm²)。これらのデータは図 22 と図 A.35 (付属書 1) に図示されている。

エネルギー (MeV)	AP	PA	RLAT	LLAT	ROT	ISO
1.0 × 10 ⁻⁹	5.24	3.52	1.36	1.68	2.99	2.40
1.0 × 10 ⁻⁸	6.55	4.39	1.70	2.04	3.72	2.89
2.5 × 10 ⁻⁸	7.60	5.16	1.99	2.31	4.40	3.30
1.0 × 10 ⁻⁷	9.95	6.77	2.58	2.86	5.75	4.13
2.0 × 10 ⁻⁷	11.2	7.63	2.92	3.21	6.43	4.59
5.0 × 10 ⁻⁷	12.8	8.76	3.35	3.72	7.27	5.20
1.0 × 10 ⁻⁶	13.8	9.55	3.67	4.12	7.84	5.63
2.0 × 10 ⁻⁶	14.5	10.2	3.89	4.39	8.31	5.96
5.0 × 10 ⁻⁶	15.0	10.7	4.08	4.66	8.72	6.28
1.0 × 10 ⁻⁵	15.1	11.0	4.16	4.80	8.90	6.44
2.0 × 10 ⁻⁵	15.1	11.1	4.20	4.89	8.92	6.51
5.0 × 10 ⁻⁵	14.8	11.1	4.19	4.95	8.82	6.51
1.0 × 10 ⁻⁴	14.6	11.0	4.15	4.95	8.69	6.45
2.0 × 10 ⁻⁴	14.4	10.9	4.10	4.92	8.56	6.32
5.0 × 10 ⁻⁴	14.2	10.7	4.03	4.86	8.40	6.14
1.0 × 10 ⁻³	14.2	10.7	4.00	4.84	8.34	6.04
2.0 × 10 ⁻³	14.4	10.8	4.00	4.87	8.39	6.05
5.0 × 10 ⁻³	15.7	11.6	4.29	5.25	9.06	6.52
1.0 × 10 ⁻²	18.3	13.5	5.02	6.14	10.6	7.70
2.0 × 10 ⁻²	23.8	17.3	6.48	7.95	13.8	10.2
3.0 × 10 ⁻²	29.0	21.0	7.93	9.74	16.9	12.7
5.0 × 10 ⁻²	38.5	27.6	10.6	13.1	22.7	17.3
7.0 × 10 ⁻²	47.2	33.5	13.1	16.1	27.8	21.5
1.0 × 10 ⁻¹	59.8	41.3	16.4	20.1	34.8	27.2
1.5 × 10 ⁻¹	80.2	52.2	21.2	25.5	45.4	35.2
2.0 × 10 ⁻¹	99.0	61.5	25.6	30.3	54.8	42.4
3.0 × 10 ⁻¹	133	77.1	33.4	38.6	71.6	54.7
5.0 × 10 ⁻¹	188	103	46.8	53.2	99.4	75.0
7.0 × 10 ⁻¹	231	124	58.3	66.6	123	92.8
9.0 × 10 ⁻¹	267	144	69.1	79.6	144	108
1.0 × 10 ⁰	282	154	74.5	86.0	154	116
1.2 × 10 ⁰	310	175	85.8	99.8	173	130
2.0 × 10 ⁰	383	247	129	153	234	178
3.0 × 10 ⁰	432	308	171	195	283	220
4.0 × 10 ⁰	458	345	198	224	315	250
5.0 × 10 ⁰	474	366	217	244	335	272
6.0 × 10 ⁰	483	380	232	261	348	282
7.0 × 10 ⁰	490	391	244	274	358	290
8.0 × 10 ⁰	494	399	253	285	366	297
9.0 × 10 ⁰	497	406	261	294	373	303
1.0 × 10 ¹	499	412	268	302	378	309
1.2 × 10 ¹	499	422	278	315	385	322
1.4 × 10 ¹	496	429	286	324	390	333
1.5 × 10 ¹	494	431	290	328	391	338
1.6 × 10 ¹	491	433	293	331	393	342
1.8 × 10 ¹	486	435	299	335	394	345
2.0 × 10 ¹	480	436	305	338	395	343
3.0 × 10 ¹	458	437	324	na ^{a)}	395	na ^{a)}
5.0 × 10 ¹	437	444	358	na	404	na
7.5 × 10 ¹	429	459	397	na	422	na
1.0 × 10 ²	429	477	433	na	443	na
1.3 × 10 ²	432	495	467	na	465	na
1.5 × 10 ²	438	514	501	na	489	na
1.8 × 10 ²	445	535	542	na	517	na

^{a)} データなし。

5. ストリーミングの影響について

5.1 概要

使用済燃料乾式貯蔵施設（以下「乾式貯蔵施設」という。）の設置に伴う、伊方発電所敷地境界外における通常貯蔵時の線量については、「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」（以下「審査ガイド」という。）に基づき評価を行っている。

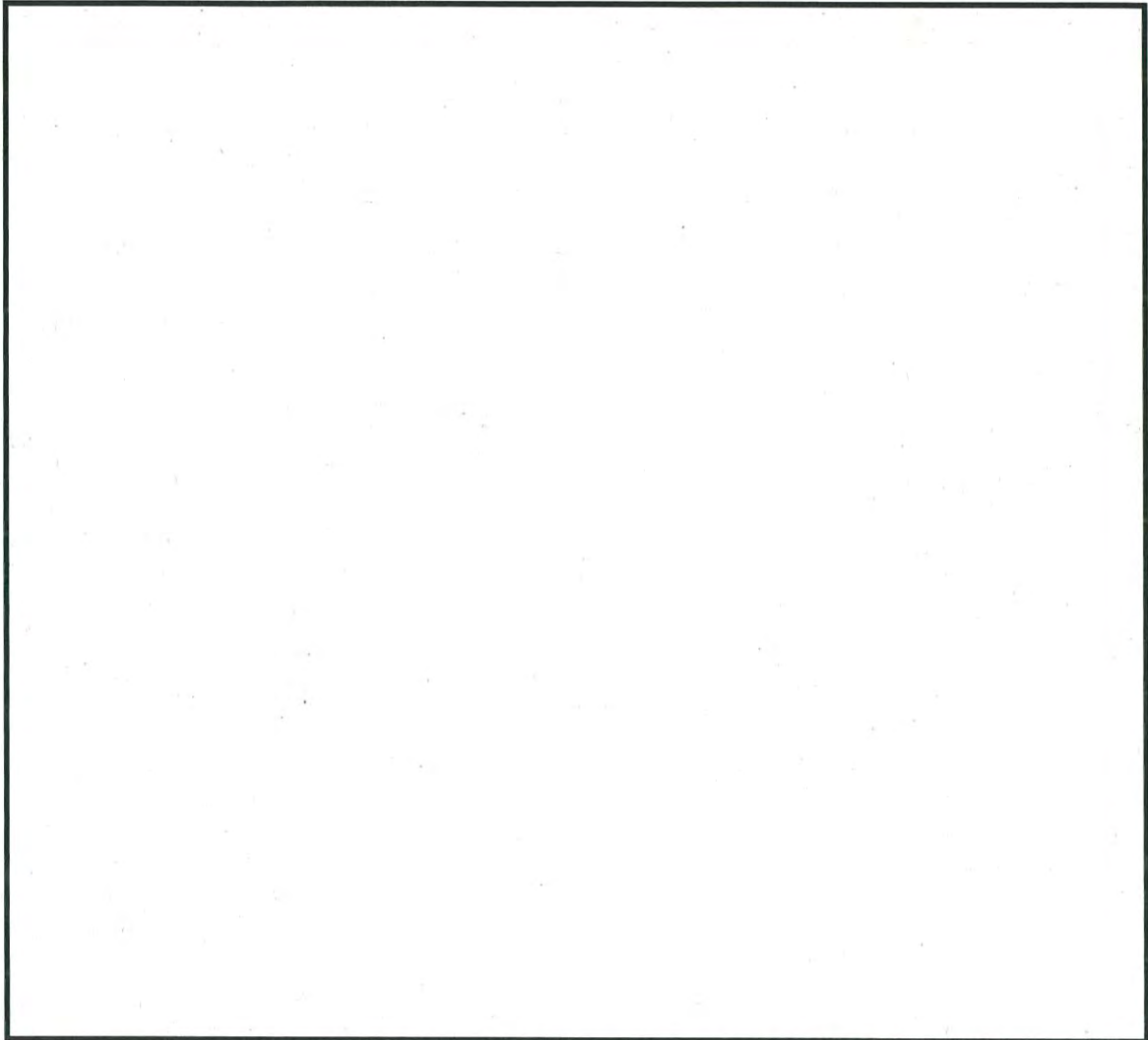
使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「乾式貯蔵建屋」という。）については、給排気口からのストリーミングを低減する設計とし、建屋による遮蔽により伊方発電所の敷地境界外における線量が年間 $50 \mu\text{Sv}$ 以下を満足しているが、ここでは乾式貯蔵建屋の給排気口からのストリーミングによる影響について説明する。

なお、給排気口の開口部は人高さには設置されないため、管理区域境界と比較して、よりストリーミングの影響が大きいと考えられる敷地境界外の線量評価に対して、その影響を説明する。

5.2 評価方法

乾式貯蔵建屋の給排気口の部分をピックアップし、ストリーミングの影響評価を行った。

具体的には、第5-1図に示す評価モデルにて、評価点①～④における線量率を計算し、その割合から迷路構造によるストリーミングの低減効果を評価する。評価はMCNP5コードを用い、断面積ライブラリはガンマ線評価ではMCPLIB84、中性子評価ではFSXLIB-J33をそれぞれ用いた。主な評価条件及び評価コードの概要をそれぞれ第5-1表及び第5-2表に示す。



第5-1図 給排気口からのストリーミングの影響評価モデル

第5-1表 主な評価条件

項目	評価条件	備考
計算コード	MCNP5 コード	-
断面積ライブラリ	ガンマ線：MCPLIB84 中性子：FSXLIB-J33	-
線源強度	ガンマ線、中性子それぞれ キャスク表面から 1m 点で 100 μ Sv/h となるように規 格化	-
線源スペクトル	包絡スペクトル	-
線源形状	ϕ 260cm \times H520cm	等方線源 キャスク同士の相互遮蔽 は無視する
評価モデル	第5-1図参照	影響評価として乾式貯蔵 建屋の給排気口の部分を ピックアップして解析
モデル境界条件	反 射	-
評価点 (タリー)	Mesh Tally (トラック・レ ングス・エスティメータ) 約 15cm 幅	Mesh Tally の計算結果よ り、開口部分の平均線量 率を概略評価
分散低減	ウェイト・ウィンドウ	-

第5-2表 MCNP5 コードの概要

コード名 項目	MCNP5
開発機関	米国ロスアラモス国立研究所
開発時期	2010年 (初版開発時期 2003年)
バージョン	1.60
使用目的	遮蔽計算(使用済燃料乾式貯蔵建屋内のキャスクからのガンマ線及び中性子線計算)
コードの 概要	<p>三次元連続エネルギーモンテカルロコードMCNP5コードは、米国ロスアラモス国立研究所で開発された、中性子、光子及び電子輸送問題を解くための汎用モンテカルロコードである。</p> <p>このコードは二次曲面の論理演算によって表現された任意の三次元領域を取扱うことができ、形状モデルや断面積データを正確に取り扱うことができる。</p> <p>幾何形状の設定の自由度が大きいことや、断面積の取り扱いに連続エネルギーを採用していること等の利点がある。</p> <p>今回の評価では、ガンマ線評価ではEPDL97をもとに作成された断面積ライブラリMCPLIB84(ロスアラモス国立研究所にて整備されたもの)を、中性子評価ではJENDL-3.3をもとに作成された断面積ライブラリFSXLIB-J33(日本原子力研究所にて整備されたもの)を用いている。</p>

第5-2表 MCNP5コードの概要 (続き)

コード名 項目	MCNP5
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからのガンマ線及び中性子線計算について、MCNPコードを使用して実施している。</p> <p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ MCNPコードは、ガンマ線及び中性子の放射線束分布解析を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら解析条件が与えられればガンマ線及び中性子の放射線束分布解析は可能であり、線量換算係数を乗じることでMCNPコードはガンマ線及び中性子線量計算に適用可能である。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 米国カンザス州立大学ガンマ線スカイシャインベンチマーク実験の実測値(MCNP-ラインビームレスポンス接続によるBWRタービンスカイシャイン線量評価手法の適用、日本原子力学会和文論文誌 Vol.4 No.2 (2005))及び露国モスクワ物理工科大学 研究用原子炉 IRT 炉実験の実測値(MCNPコードの金属キャスク貯蔵方式中間貯蔵施設線量評価への適用、日本原子力学会和文論文誌 Vol.6 No.3 (2007))と計算値を比較した。 ・ 実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 ・ 上記妥当性確認では、コンクリートを通過あるいは散乱によりストリーミングしたガンマ線あるいは中性子の線量率の実測値とMCNPコードによる計算値を比較している。 ・ 今回の使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからのガンマ線及び中性子線量計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、コンクリートの深層透過あるいはストリーミングによる放射線束分布を解析し、線量率を計算する。 ・ 今回のガンマ線及び中性子線量計算は、上記妥当性確認内容と合致している。 ・ また、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」(JEAC4615-2008)では、キャスク保管建屋等の補助遮蔽のための輸送計算コードとして、モンテカルロ法を用いた計算手法の適用が可能とされており、さらに米国では使用済燃料貯蔵施設の審査指針である「Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities」(NUREG-1567)においては遮蔽解析ツールとしてMCNPコードが記載されており、遮蔽設計、線量評価等で使用されている。 ・ 断面積ライブラリMCPLIB84及びFSXLIB-J33については、海上技術安全研究所による実験値(大西世紀ほか、「²⁵²Cf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巻 第3号 研究報告, (2007))とMCPLIB84及びFSXLIB-J33による計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 <p>上記妥当性確認では、放射線のエネルギーがキャスクのエネルギースペクトルと同等となっており、今回の使用目的と合致している。</p>

5.3 評価結果

4.2 の評価条件をもとに影響評価を行った結果を第5-2表に示す。

第4-3表のとおり、給気口迷路構造による減衰率(②/①)及び排気口迷路構造による減衰率(④/③)は、天井スラブによる減衰率^(注)(第3-1図及び第3-2図)と比較して同程度以下であり、ストリーミングを低減できる設計であることを確認している。

(注) 給排気口は線源の上方に設置されているため、両者とも天井方向の計算と同列であるものとして、天井スラブの減衰率と比較した。

参考として建屋内の線量率分布を第5-2図に示す。線量率が連続的に変化していることが確認でき、ウェイト・ウィンドウの設定が妥当であると判断できる。また、第5-2図がどの断面位置の線量分布を示しているかを、第5-1図に青破線で示す。

第5-3表(1/2) 給排気口からのストリーミングの影響評価結果(中性子)

評価点	線量率 (μ Sv/h) () 内は統計誤差 ^(注)	減衰率
①	3.7×10^2 (0.25 %)	1.3×10^{-3}
②	4.8×10^{-1} (0.50 %)	
③	1.6×10^2 (0.54 %)	7.0×10^{-4}
④	1.1×10^{-1} (3.1 %)	
(参考) 深層透過の減衰率 遮蔽厚さ 105cm		1.2×10^{-3}

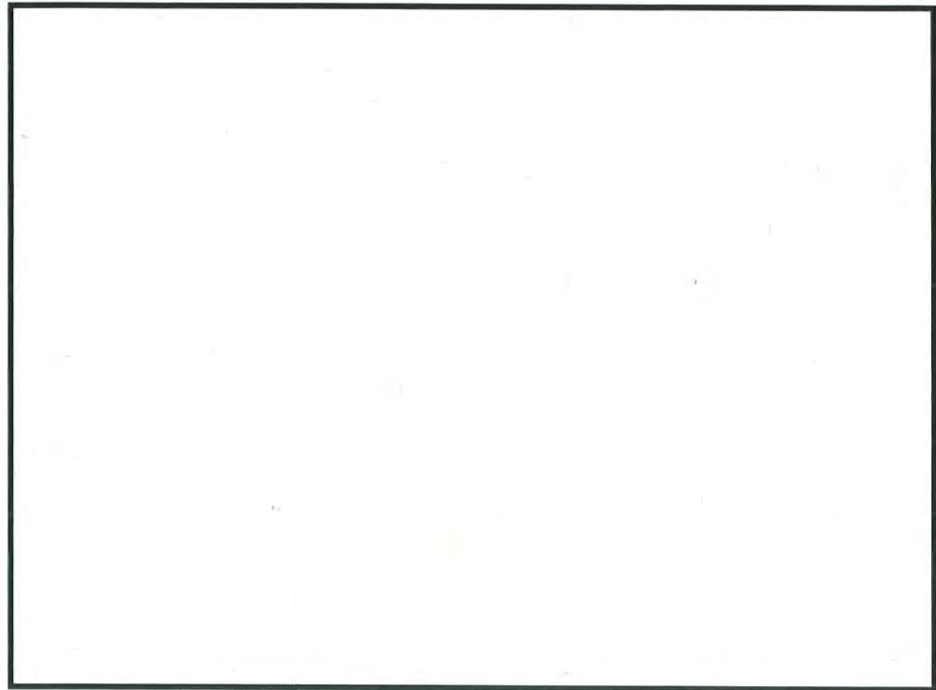
(注) 開口部の最大線量率となるメッシュの値

第5-3表(2/2) 給排気口からのストリーミングの影響評価結果(ガンマ線)

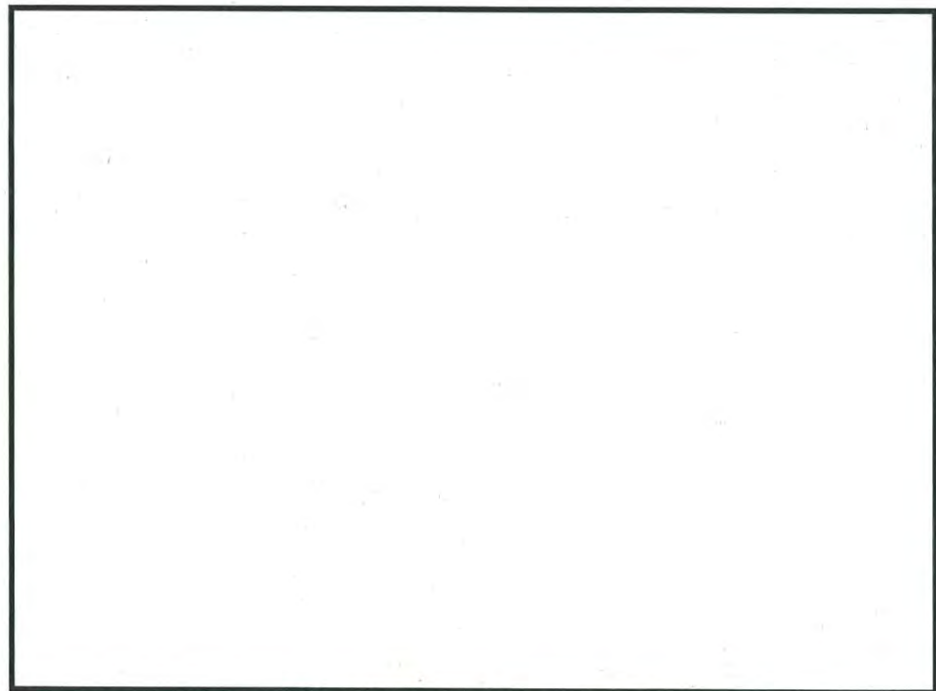
評価点	線量率 (μ Sv/h) () 内は統計誤差 ^(注1)	減衰率
①	2.1×10^2 (0.64 %)	9.0×10^{-5}
②	1.9×10^{-2} (2.5 %)	
③	6.1×10^1 (1.7 %)	(参 考) 6.8×10^{-5}
④	(参 考) 4.1×10^{-3} (19 %) ^(注2)	
(参 考) 深層透過の減衰率 遮蔽厚さ 105cm		2.9×10^{-3}

(注1) 開口部の最大線量率となるメッシュの値

(注2) 統計誤差が大きいため、参考値とする。ただし、放射線が十分減衰されているため、ストリーミングを低減できる設計であることは確認できる。



第5-2図(1/2) 建屋内の線量率分布(中性子)



第5-2図(2/2) 建屋内の線量率分布(ガンマ線)

5.4 まとめ

給排気口からのストリーミングによる影響は天井による遮蔽効果と同等であることから、ストリーミングの影響は申請値の算出に使用している天井透過の評価モデルで代表できるため、評価の保守性と相まって申請評価値に包含される。

30 条

放射線からの放射線業務従事者の防護

<目 次>

1. 基本方針

1.1 要求事項に対する適合性

(1) 位置, 構造及び設備

(2) 安全設計方針

(3) 適合性説明

1.2 気象等

1.3 設備等

2. 放射線からの放射線業務従事者の防護

(別添資料)

放射線からの放射線業務従事者の防護について

(使用済燃料乾式貯蔵施設)

1. 基本方針

1.1 要求事項に対する適合性

(1) 位置、構造及び設備

ロ 発電用原子炉施設の一般構造

(3) その他の主要な構造

(i) 本発電用原子炉施設は、「(1)耐震構造」、「(2)耐津波構造」に加え、以下の基本方針のもとに安全設計を行う。

a. 設計基準対象施設

(y) 放射線からの放射線業務従事者の防護

設計基準対象施設は、外部放射線による放射線障害を防止する必要がある場合には、放射線業務従事者が業務に従事する場所における放射線量を低減でき、放射線業務従事者が運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、迅速な対応をするために必要な操作ができる設計とする。

発電用原子炉施設には、放射線から放射線業務従事者を防護するため放射線管理施設を設け、放射線管理に必要な情報を中央制御室及びその他当該情報を伝達する必要がある場所に表示できる設備（安全施設に係るものに限る。）を設ける設計とする。

イ 核燃料物質及び核燃料物質によって汚染された物による放射線被ばくの管理の方法

(2) 管理区域及び周辺監視区域の設定

(i) 管理区域

炉室、使用済燃料の貯蔵施設、放射性廃棄物の廃棄施設等の場所であって、その場所における外部放射線に係る線量、空気中の放射性物質の濃度又は放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度が、「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」（以下「線量限度等を定める告示」という。）に定められた値を超えるか又は超えるおそれのある区域は、すべて管理区域とする。

実際には部屋、建物その他の施設の配置及び管理上の便宜をも考慮して、原子炉建屋の大部分、原子炉補助建屋の大部分、固体廃棄物貯蔵庫、焼却炉建屋の一部、雑固体処理建屋の一部、蒸気発生器保管庫、使用済燃料乾式貯蔵建屋の大部分等を管理区域とする。

なお、管理区域外において一時的に上記管理区域に係る値を超えるか又は超えるおそれのある区域が生じた場合は、一時的な管理区域とする。

(2) 安全設計方針

1.1 安全設計の方針

1.1.1 安全設計の基本方針

1.1.1.1 放射線被ばく

平常運転時、発電所周辺の一般公衆および放射線業務従事者等に対し、「原子炉等規制法」に基づき定められている線量限度を超える放射線被ばくを与えないように設計する。さらに、設計にあたっては発電所周辺の一般公衆に対し、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」に定められている線量目標値を超える放射線被ばくを与えないように努める。

(3) 適合性説明

(放射線からの放射線業務従事者の防護)

第三十条 設計基準対象施設は、外部放射線による放射線障害を防止する必要がある場合には、次に掲げるものでなければならない。

- 一 放射線業務従事者（実用炉規則第二条第二項第七号に規定する放射線業務従事者をいう。以下同じ。）が業務に従事する場所における放射線量を低減できるものとする。
- 2 工場等には、放射線から放射線業務従事者を防護するため、放射線管理施設を設けなければならない。
- 3 放射線管理施設には、放射線管理に必要な情報を原子炉制御室その他当該情報を伝達する必要がある場所に表示できる設備（安全施設に属するものに限る。）を設けなければならない。

1 について

- 一 設計基準対象施設である使用済燃料乾式貯蔵施設は、放射線業務従事者の受ける放射線量を低減できるよう、遮蔽、使用済燃料乾式貯蔵容器の配置等放射線防護上の措置を講じた設計とする。

2 について

使用済燃料乾式貯蔵施設は、放射線管理区域を設定し、使用済燃料乾式貯蔵施設への放射線業務従事者等の出入管理には、既設の出入管理設備を使用する設計とする。また、放射線業務従事者等の個人被ばく管理のため、個人管理関係設備（蛍光ガラス線量計、警報付ポケット線量計等）を設ける。

3 について

使用済燃料乾式貯蔵施設は、放射線管理区域を設定し、放射線業務従事者が立ち入る場所については、定期的及び必要の都度、サーベイメータによる外部放射線に係る線量当量率の測定を行うとともに、作業場所の入口付近等に線量当量率を表示する。

1.2 気象等 該当なし

1.3 設備等

8.1 放射線管理設備

8.1.1 通常運転時等

8.1.1.1 概要

放射線管理設備は、発電所周辺の一般公衆、従事者等の安全管理を確実に行うためのもので、放射線管理関係設備、放射線監視設備及び放射線防護設備からなる。

8.1.1.2 設計方針

通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、敷地周辺の一般公衆、従事者等の放射線被ばくを实用可能な限り低くすることとし、次の設計方針に基づき、放射線管理設備を設ける。

(1) 従事者等の出入管理、個人被ばく管理及び汚染管理ができる設計とする。

また、物品の搬出に対しても線量率管理及び汚染管理ができる設計とする。

(2) 通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、放射性物質の放出、発電所内外の外部放射線量率、放射性物質の濃度等を測定及び監視できる設計とする。

(3) 万一の事故に備えて、必要な放射線計測器及び防護作業器材を備える。

(4) 中央制御室及び緊急時対策所 (EL. 32m) に必要な情報の通報が可能である設計とする。

(5) 放射線監視設備は、測定対象核種、測定下限濃度、測定頻度、試料採取方法等を適切に定め管理すること等で、通常運転時、発電所外へ放出される放射性物質の放射エネルギーを監視できる設計とする。

なお、放射線監視設備は、「発電用軽水型原子炉施設における放出放射性物質の測定に関する指針」に適合する設計とする。

(6) 設計基準事故時に監視が必要な放射線監視設備は、「発電用軽水型原子炉施設における事故時の放射線計測に関する審査指針」に適合する設計とする。

(7) モニタリングステーション及びモニタリングポストは、非常用所内電源に接続し、電源復旧までの期間、電源を供給できる設計とする。さらに、モニタリングステーション及びモニタリングポストは、専用の無停電電源装置を有し、電源切替時の短時間の停電時に電源を供給できる設計とする。また、モニタリングステーション及びモニタリングポストから中央制御室及び緊急時対策所 (EL. 32m) までのデータの伝送系は、有線及び無線により多様性を有し、指示値は中央制御室及び緊急時対策所 (EL. 32m) で監視できる設計とする。モニタリングステーション及びモニタリングポストは、その測定値が設定値以上に上

昇した場合、直ちに中央制御室に警報を発信する設計とする。

- (8) 放射性気体廃棄物の放出管理及び発電所周辺の被ばく線量評価並びに一般気象データ収集のため、発電所敷地内で気象観測設備により風向、風速その他の気象条件を測定及び記録できる設計とする。

8.1.1.4 主要設備

(1) 放射線管理関係設備

出入管理、個人被ばく管理、汚染管理、化学分析、放射性物質の濃度の測定等のために、次の設備を設ける。

a. 出入管理設備

原子炉建屋、原子炉補助建屋等の管理区域への人の入退域を管理するために出入管理設備を設ける。この設備には、チェッカールーム、放射線管理室等がある。

焼却炉建家内及び雑固体処理建屋内管理区域への立入りは、専用の出入管理室（1号、2号及び3号炉共用）を通る設計とし、ここで出入管理を行う。

b. 個人管理関係設備（1号、2号及び3号炉共用）

放射線業務従事者等の外部被ばくによる線量管理のために、蛍光ガラス線量計及び警報付ポケット線量計等を備える。また、内部被ばくによる線量管理のため、体内の放射能を測定するホールボディカウンタを設ける。

c. 汚染管理設備

人の退出及び物品の搬出に伴う汚染の管理を行うために、汚染管理設備を設ける。この設備には更衣室、シャワー室、手洗い場、モニタリングエリア、汚染衣類の洗たく室、機器除染室及び退出モニタ等の機器がある。

また、焼却炉建家内管理区域の汚染管理設備（1号、2号及び3号炉共用）には、雑固体処理建屋と共用の更衣室、シャワー室及び退出モニタを備える。

ただし、燃料及び大型機器の搬出に際しては、原子炉建屋、原子炉補助建屋等の機器搬入口に臨時のモニタリングエリアを設けて汚染管理に必要な各種サーベイメータ等を備える。

d. 試料分析関係設備

1次冷却設備、放射性廃棄物廃棄施設等からの試料及び環境試料の一般化学分析、放射化学分析、放射能測定等を行うために、次のようなものを設ける。

(a) 原子炉系試料採取室

各種系統からの試料を採取するために、原子炉系試料採取室を設ける。

(b) 放射化学室

管理区域内の液体及び気体試料の分析を行うために、放射化学室を設ける。

また、この室には放射能測定器を校正するための非密封放射性同位元素の貯蔵庫を備える。

(c) 一般化学室

管理区域外の液体及び気体試料の分析を行うために、一般化学室を設ける。

(d) 放射能測定室

各種系統及び作業環境試料中の放射性物質の濃度を測定するために、放射能測定室を設ける。

また、焼却炉建家内には、雑固体処理建屋と共用の放射能測定室（1号、2号及び3号炉共用）を設け、放射性試料の放射能を測定する。

(e) 環境放射能測定室（1，2，3号炉共用，既設）

海水，海底土，海洋生物，陸土，陸上生物等の環境試料中の放射性物質の濃度を測定するために、環境放射能測定室を設けている。

(f) 校正線源室

サーベイメータ等の放射線量（率）計の校正，校正用密封線源の保管，放射線測定器の点検等を行うために，校正線源室を設ける。

(2) 放射線監視設備

放射線監視設備は，プロセスモニタリング設備，エリアモニタリング設備，周辺モニタリング設備及び放射線サーベイ設備から構成する。

また，事故時に必要な放射線監視設備は，非常用電源に接続するとともに，事故時の圧力，温度等の環境条件によってその機能を損なうことのないように設計する。更に，格納容器エリアモニタについては，多重性を有するとともにその系を構成するチャンネル間の独立性を有する設計とする。

b. エリアモニタリング設備

中央制御室及び管理区域内の主要箇所的外部放射線に係る線量当量率を連続的に測定するために，エリアモニタを設ける。

この設備は，中央制御室で指示又は記録を行い，放射線レベルが設定値以上になると，現場及び中央制御室に警報を発する。焼却炉建家内のエリアモニタは，焼却炉建家内制御室で指示又は記録を行い，放射線レベルが設定値以上になると，現場及び中央制御室に警報を発する。

エリアモニタを設ける区域は，次のとおりである。

(a) 中央制御室

(b) 放射化学室

- (c) 充てんポンプ室
- (d) 燃料取扱棟内（使用済燃料ピット付近）
- (e) 原子炉系試料採取室
- (f) 原子炉格納容器内（エアロック付近）
- (g) 原子炉格納容器内（炉内核計装付近）
- (h) 廃棄物処理室
- (i) 焼却炉建家内（1号、2号及び3号炉共用）

また、燃料取扱い中の原子炉格納容器内（運転操作床面付近）及び
 保守中の機械室の付近には、可搬式エリアモニタ装置を必要に応じて
 設ける。

さらに、設計基準事故時において十分な測定範囲を有する格納容
 器エリアモニタ及び補助建屋エリアモニタを設ける。

d. 放射線サーベイ設備（1号、2号及び3号炉共用）

発電所内外の必要箇所、特に管理区域内で従事者等が頻繁に立ち
 入る箇所及び原子炉の安全運転上必要な箇所の外部放射線量率、空
 気中及び水中の放射性物質の濃度並びに表面汚染密度を測定監視す
 るために、放射線サーベイ設備を備える。

放射線サーベイは、外部放射線量率については携帯用の各種サー
 ベイメータにより、空気中及び水中の放射性物質の濃度については
 サンプルングによる放射能測定により、また、表面汚染密度につい
 てはサーベイメータ又はスミヤ法による放射能測定により行う。

(3) 放射線防護設備（1号、2号及び3号炉共用）

放射線防護並びに救助活動に必要な資材として、防護衣、呼吸器、
 防護マスク、無線通話装置等の防護用機器を備える。

8.2 換気空調設備

8.2.1 概要

換気空調設備は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、設計基準事
 故時及び重大事故等時に従業員等に新鮮な空気を送るとともに、空気中の
 放射性物質を除去低減するもので、格納容器換気空調設備、補助建屋換気
 空調設備等で構成する。アニュラス空気再循環設備及び安全補機室空気浄
 化設備は、工学的安全施設の一部として、「9.3 アニュラス空気再循環設
 備」及び「9.4 安全補機室空気浄化設備」の節に述べているので、ここ
 では省略する。

8.2.2 設計方針

- (1) 換気空調設備は、管理区域内と管理区域外の別により、また、それぞ
 れの区域内でも機能の別により系統を分ける。
- (2) 換気は清浄区域に新鮮な空気を供給して、放射能レベルの高い区域に

- 向かって流れるようにし、排気は適切なフィルタを通して行う。
- (3) 各換気系統は、その容量が区域及び室の換気並びに除熱を十分に行えるようにする。換気回数は、原子炉格納容器は 1.5 回/h、原子炉補助建屋等は 2 回/h 以上とする。
 - (4) 各換気空調設備のフィルタは、点検及び交換ができるように設計する。
また、よう素用フィルタには、温度感知設備を設ける。
 - (5) 中央制御室換気空調設備は、事故時には外気との連絡口を遮断し、よう素用フィルタを通る閉回路循環方式とし、運転員等を放射線被ばくから防護するように設計する。
 - (6) 重要度が特に高い安全機能を有する換気空調設備においては、単一故障を仮定しても、その安全機能を失うことのないよう原則として多重性を備える設計とする。また、中央制御室換気空調設備のうち単一設計とする中央制御室非常用給気系統のフィルタユニット及びダクトの一部については、劣化モードに対する適切な保守、管理を実施し、故障の発生を低く抑えるとともに、想定される故障の除去又は修復のためのアクセスが可能であり、かつ、補修作業が容易となる設計とする。
 - (7) 火災の延焼防止が必要な換気ダクトには防火ダンパを設置する。

8.2.4 主要設備

(1) 格納容器換気空調設備

格納容器換気空調設備は、格納容器空調装置、格納容器再循環装置、格納容器空気浄化装置、制御棒クラスタ駆動装置冷却装置、原子炉容器冷却装置、格納容器減圧装置等で構成する。

格納容器換気空調設備の系統構成を第 8.2.1 図に、主要設備の仕様を第 8.2.1 表に示す。

a. 格納容器空調装置

原子炉停止中、従事者等が原子炉格納容器内に立ち入る場合の換気を行うために、格納容器空調装置を設ける。

格納容器空調装置は、格納容器給気系統及び格納容器排気系統で構成する。

また、格納容器空調装置は、アニュラス部の換気にも使用する。

(a) 格納容器給気系統

原子炉格納容器内及びアニュラス部に新鮮な外気を供給するために、格納容器給気ユニット及び格納容器給気ファンを設ける。

格納容器給気ユニットには、冬季の原子炉停止時に原子炉格納容器内の平均温度を 10℃以上に保つために、給気を暖める蒸気加熱コイルを内蔵し、補助蒸気で加熱する。

空気供給ダクトの格納容器貫通部には、無漏えい型のバタフライ弁（隔離弁）を直列に 2 個設ける。原子炉運転中、この弁は全閉し

て原子炉格納容器内空気の外部への漏出を防ぐ。

(b) 格納容器排気系統

原子炉格納容器内及びアニュラス部の空気の排出のために、格納容器排気ファンと粒子用フィルタを内蔵した格納容器排気フィルタユニットを設ける。

排気ダクトの格納容器貫通部には、無漏えい型のバタフライ弁（隔離弁）を直列に2個設ける。原子炉運転中、この弁は全閉して原子炉格納容器内空気の外部への漏出を防ぐ。

格納容器排気ファンを出た排気は、格納容器排気筒へ導く。

b. 格納容器再循環装置

原子炉運転中、原子炉格納容器内の機器及び配管類からの放散熱を除去し、原子炉格納容器内の平均温度を50℃以下に保つための装置であり、粗フィルタ及び冷却コイルを内蔵した格納容器再循環ユニットと格納容器再循環ファンを設ける。

c. 格納容器空気浄化装置

原子炉運転中、従事者等が原子炉格納容器内に立ち入る場合、原子炉格納容器内の空気を浄化し、放射性物質を除去低減させる設備であり、粒子用フィルタ及びよう素用フィルタを内蔵した格納容器空気浄化フィルタユニットと格納容器空気浄化ファンを設ける。

d. 制御棒クラスタ駆動装置冷却装置

制御棒クラスタ駆動装置から発生する熱を除去するために、制御棒クラスタ駆動装置冷却ユニット及び制御棒クラスタ駆動装置冷却ファンを設ける。吸引した空気は粗フィルタを通し冷却コイルで冷却する。

e. 原子炉容器冷却装置

原子炉容器冷却装置は、原子炉容器からの放散熱を除去するとともに、原子炉容器支持構造物を冷却して原子炉容器の熱がコンクリート部に伝わるのを制限する。また、炉外核計装装置も冷却する。

原子炉容器冷却ファンは、格納容器再循環装置を通過した冷却空気を原子炉容器下部に給気する。

f. 格納容器減圧装置

格納容器減圧装置は、配管、弁及び排気フィルタユニットで構成し、原子炉格納容器圧力が一定圧に上昇した際に弁を開き、粒子用フィルタ及びよう素用フィルタを通して補助建屋排気筒に導くことにより、原子炉格納容器圧力を下げる。

(2) 補助建屋換気空調設備

補助建屋換気空調設備は、補助建屋空調装置、放射線管理室空調装置、廃棄物処理室空調装置等で構成する。

補助建屋換気空調設備の系統構成を第8.2.2図～第8.2.4図に、主要設備の仕様を第8.2.2表に示す。

a. 補助建屋空調装置

補助建屋空調装置は、補助建屋給気系統、補助建屋排気系統及び補助建屋非管理区域排気系統で構成する。

(a) 補助建屋給気系統

原子炉補助建屋内、原子炉周辺補機棟内等に外気を供給するために、補助建屋給気ユニット及び補助建屋給気ファンを設ける。

補助建屋給気ユニットは、冬季に原子炉補助建屋内、原子炉周辺補機棟内等の平均温度を 10℃以上に保つために、給気を暖める蒸気加熱コイルを内蔵し、補助蒸気で加熱する。

(b) 補助建屋排気系統

非管理区域を除く一般補機室、安全補機室等からの排気を集合して、補助建屋排気筒へ導くため補助建屋排気ファンを設ける。排気系統には粒子用フィルタを内蔵した補助建屋排気フィルタユニットを設け、排気中の微粒子を除去する。

安全補機室の排気系統は、事故時に安全補機室空気浄化設備に自動的に切り替える。

また、燃料取扱棟の排気系統は、燃料取扱事故時にアニュラス空気再循環設備に自動的に切り替える。

(c) 補助建屋非管理区域排気系統

非管理区域からの排気を大気へ排出するために非管理区域排気ファンを設ける。

b. 放射線管理室空調装置

放射線管理室空調装置は、放射線管理室給気系統及び放射線管理室排気系統で構成する。

(a) 放射線管理室給気系統

放射線管理室、原子炉系試料採取室等の換気及び冷暖房のために、冷却コイル及び蒸気加熱コイルを内蔵した放射線管理室給気ユニットと放射線管理室給気ファンを設ける。

(b) 放射線管理室排気系統

放射線管理室、原子炉系試料採取室等からの排気中の微粒子又は放射性物質を除去低減するために、粒子用フィルタを内蔵した放射線管理室排気フィルタユニットA並びに粒子用フィルタ及びよう素用フィルタを内蔵した放射線管理室排気フィルタユニットBと放射線管理室排気ファンを設ける。

また、復水器真空ポンプの排気は、放射能レベルが設定値に達した場合、放射線管理室排気系統に導く。

c. 廃棄物処理室空調装置

廃棄物処理室空調装置は、廃棄物処理室給気系統及び廃棄物処理室排気系統で構成する。

(a) 廃棄物処理室給気系統

廃棄物処理室内の換気及び暖房のために、廃棄物処理室給気ユニット及び廃棄物処理室給気ファンを設ける。

(b) 廃棄物処理室排気系統

廃棄物処理室内の排気を集合して、廃棄物処理室排気ファンにより、補助建屋排気筒から排出する。排気系統には、粒子用フィルタを内蔵した廃棄物処理室排気フィルタユニットを設け、排気中の微粒子を除去する。

d. 空調用冷水設備

中央制御室空調ユニット、放射線管理室給気ユニット等の冷却コイルに冷水を供給するために空調用冷凍機、空調用冷水ポンプ等を設ける。

(3) 中央制御室換気空調設備

a. 通常運転時等

中央制御室等の換気及び冷暖房は、冷却コイルを内蔵した中央制御室空調ユニット、中央制御室空調ファン、中央制御室再循環ファン、中央制御室非常用給気フィルタユニット、中央制御室非常用給気ファン等から構成する中央制御室換気空調設備により行う。

中央制御室換気空調設備には、通常のラインの他、粒子用フィルタ及びよう素用フィルタを内蔵した中央制御室非常用給気フィルタユニット並びに中央制御室非常用給気ファンからなる非常用ラインを設け、事故時には外部との連絡口を遮断し、中央制御室非常用給気フィルタユニットを通る閉回路循環方式とし、運転員を過度の放射線被ばくから防護する設計とする。外部との遮断が長期にわたり、室内の雰囲気が悪くなった場合には、外気を中央制御室非常用給気フィルタユニットで浄化しながら取り入れることも可能な設計とする。

中央制御室外の火災等により発生する燃焼ガスやばい煙、有毒ガス及び降下火災物に対し、中央制御室換気空調設備の外気取入れを手動で遮断し、閉回路循環方式に切り換えることが可能な設計とする。

中央制御室換気空調設備の設備仕様の概略を第 8.2.3 表に示す。

(4) 排気筒

排気筒は、格納容器排気筒と補助建屋排気筒に区分し、外周コンクリート壁に沿わせて設け、格納容器排気筒には格納容器排気系統、アニュラス空気再循環設備及び安全補機室空気浄化設備からの排気を、また、補助建屋排気筒には補助建屋排気系統、放射線管理室排気系統、廃棄物処理室排気系統及び格納容器減圧装置からの排気を導き、地上高さ約 73 m の排気口から大気に排出する。

排気中の放射能レベルは、格納容器排気筒モニタ及び補助建屋排気筒モニタで連続監視する。

格納容器排気筒及び補助建屋排気筒の設備仕様を第 8.2.5 表に示す。

(5) 焼却炉建家換気空調設備（1号、2号及び3号炉共用）

焼却炉建家換気空調設備は、給気系統及び排気系統で構成する。焼却炉建家換気空調設備の系統構成を第 8.2.6 図に、主要設備の仕様を第 8.2.6 表に示す。

a. 焼却炉建家給気系統

焼却炉建家に外気を供給するために、焼却炉建家給気ファン及び焼却炉建家給気フィルタユニットを設ける。

焼却炉建家給気フィルタユニットは、ラフフィルタを備え、取り入れた空気のろ過を行う。

b. 焼却炉建家排気系統

焼却炉建家の排気は、ラフフィルタ及び粒子用フィルタからなる焼却炉建家排気フィルタユニットを経て、焼却炉建家排気ファンにより建家上部の排気口から排出する。

(6) 雑固体処理建屋換気空調設備（1号、2号及び3号炉共用）

雑固体処理建屋換気空調設備は、給気系統及び排気系統で構成する。雑固体処理建屋換気空調設備の系統構成を第 8.2.6 図に、主要設備の仕様を第 8.2.7 表に示す。

a. 雑固体処理建屋給気系統

雑固体処理建屋に外気を供給するために、雑固体処理建屋給気ファン及び雑固体処理建屋給気フィルタユニットを設ける。

雑固体処理建屋給気フィルタユニットは、ラフフィルタを備え、取り入れた空気のろ過を行う。

b. 雑固体処理建屋排気系統

雑固体処理建屋の排気は、ラフフィルタ及び粒子用フィルタからなる雑固体処理建屋排気フィルタユニットを経て、雑固体処理建屋排気ファンにより、焼却炉建家排気口から排出する。

8.3 遮蔽設備

8.3.1 概要

遮蔽設備は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び事故時において、発電所周辺の一般公衆、従事者等の被ばく線量を低減するもので、次のものから構成される。

- (1) 原子炉 1 次遮へい
- (2) 原子炉 2 次遮へい
- (3) 外部遮へい
- (4) 補助遮へい
- (5) 燃料取扱遮へい
- (6) 中央制御室遮へい

- (7) 一時的遮へい
- (8) 緊急時対策所遮へい

8.3.2 設計方針

- (1) 発電所周辺の一般公衆が受ける被ばく線量については、「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」（以下「線量限度等を定める告示」という。）に定められた周辺監視区域外の値より十分小さくなるようにするとともに、通常運転時における直接線量及びスカイシャイン線量については、人の居住の可能性のある敷地境界外において、**発電所内の使用済燃料乾式貯蔵施設を除く他の施設からのガンマ線と使用済燃料乾式貯蔵施設からの中性子及びガンマ線とを合算し、実効線量で年間50マイクロシーベルトを超えないような遮蔽設計とする。**
- (2) 燃料取替え時、補修時等を含む通常運転時において、**従事者等が受ける被ばく線量が、「線量限度等を定める告示」に定められた限度を超えないようにするのはもちろん、不必要な放射線被ばくを防止するような遮蔽設計とする。**

遮蔽設計に関しては、関係各場所への立入頻度、滞在時間等を考慮した上で、従事者等の放射線被ばく線量が十分に安全に管理できるように、放射線量率が下記の遮蔽設計基準（1）を満足するように設計する。

遮蔽設計基準（1）

区分		外部放射線に係る 設計基準線量率	代表箇所
管理区域外	第Ⅰ区分	≤0.00625 mSv/h	
	第Ⅱ区分	≤0.01 mSv/h	一般通路等
管理区域内*1	第Ⅲ区分	≤0.15 mSv/h	操作用通路等
	第Ⅳ区分	>0.15 mSv/h	機器室等

*1 「線量限度等を定める告示」に基づき、1.3mSv/3月を超えるか又は超えるおそれのある区域を管理区域に設定する。

機器の配置に当たっては、高放射性物質を内蔵する機器は原則として独立した区画内に配置し、操作又は監視頻度の高い制御盤等は管理区域内の低放射線区域又は管理区域外に配置する。

なお、雑固体処理建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋については、下記の遮蔽設計基準（2）を満足するように設計する。

遮蔽設計基準（2）

区分		外部放射線に係る 設計基準線量率	代表箇所
管理区域外	第Ⅰ区分	≤ 1.3 mSv/3月	
管理区域内	第Ⅱ区分	≤ 0.01 mSv/h	一般通路等
	第Ⅲ区分	≤ 0.15 mSv/h	操作用通路等
	第Ⅳ区分	> 0.15 mSv/h	機器室等

これら区分概略を、第8.3.1図～第8.3.10図に示す。

(3) 発電所周辺の一般公衆の受ける被ばく線量が、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」及び「原子炉立地審査指針」を十分満足する遮蔽設計とする。

また、事故時に中央制御室内の従事者等に対し、過度の放射線被ばくがないように考慮し、運転員が中央制御室内にとどまり事故対策に必要な各種の操作を行うことができるような遮蔽設計とする。

8.3.4 主要設備

8.3.4.1 原子炉1次遮へい

原子炉1次遮へいは、原子炉容器を直接取り囲む厚さ約2.8mの鉄筋コンクリート造の構造物で、通常運転時の原子炉からの放射線を減衰させる。

原子炉1次遮へいは、原子炉容器からの熱伝達及びコンクリート内部で吸収される放射線による過熱脱水を防止するため、原子炉容器冷却ファンにより空気で冷却する。

8.3.4.2 2次遮へい

2次遮へいは、原子炉格納容器内の1次冷却系機器配管を取り囲む構造物で、内部コンクリート及び原子炉格納容器で構成する。

1次冷却系機器配管を取り囲む構造物のうち、主要なものは厚さ約1.1mの鉄筋コンクリート造の蒸気発生器側壁と円筒部厚さ約45mm、ドーム部厚さ約23mmの原子炉格納容器鋼板である。

2次遮へいは、1次遮へいと外部遮へいとの組合せにより、通常運転時に原子炉格納施設外側での外部放射線に係る線量当量率を第Ⅰ区分に減衰させる。

8.3.4.3 外部遮へい

外部遮へいは、円筒部厚さ約1.4m～約1.1m、ドーム部厚さ約1.0～約0.3mの鉄筋コンクリート造で、原子炉1次遮へいと原子炉2次遮へいとの組合せにより、通常運転時に原子炉格納施設外側での放射線量率を第Ⅰ区分に減衰させる。

また、外部遮へい及び原子炉格納容器鋼板は、その組合せにより、発

電所周辺の一般公衆が受ける被ばく線量が、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」及び「原子炉立地審査指針」を十分満足する厚さである。

8.3.4.4 補助遮蔽

補助遮蔽は、原子炉建屋及び原子炉補助建屋内の放射性廃棄物廃棄施設、化学体積制御設備、試料採取設備等の放射性物質を内蔵する機器及び配管、並びに使用済燃料乾式貯蔵建屋に貯蔵する使用済燃料乾式貯蔵容器を取り囲む構造物である。

補助遮蔽は、建屋内の通路の線量当量率を第Ⅱ区分に減衰させるとともに、原則として隣接した機器室からの線量当量率を第Ⅲ区分に減衰させ、隣接設備の停止あるいは除染を行わずに、各機器室における補修を可能にする。

ただし、バルブエリアにおいては、隣接した機器室からの線量当量率が1 mSv/h以下になるように遮蔽する。

8.3.4.5 燃料取扱遮へい

燃料取扱遮へいは、燃料取替え時に原子炉キャビティ、チャンネル及び使用済燃料ピットに張る水等からなり、燃料取替え時、燃料移送時、使用済燃料貯蔵時及びウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料貯蔵時に放射線業務従事者等が安全に作業できるようにする。

燃料取替え時の原子炉キャビティに張る水は、ほう酸水で、燃料集合体の頂部までの水深は約11m、また、使用済燃料ピットに張る水もほう酸水で、燃料集合体の頂部までの水深は約8mである。

さらに、原子炉キャビティ、チャンネル及び使用済燃料ピットにおいて燃料集合体を取り扱う場合でも、燃料集合体の頂部までの水深を3m以上確保する。

8.3.4.6 中央制御室遮へい

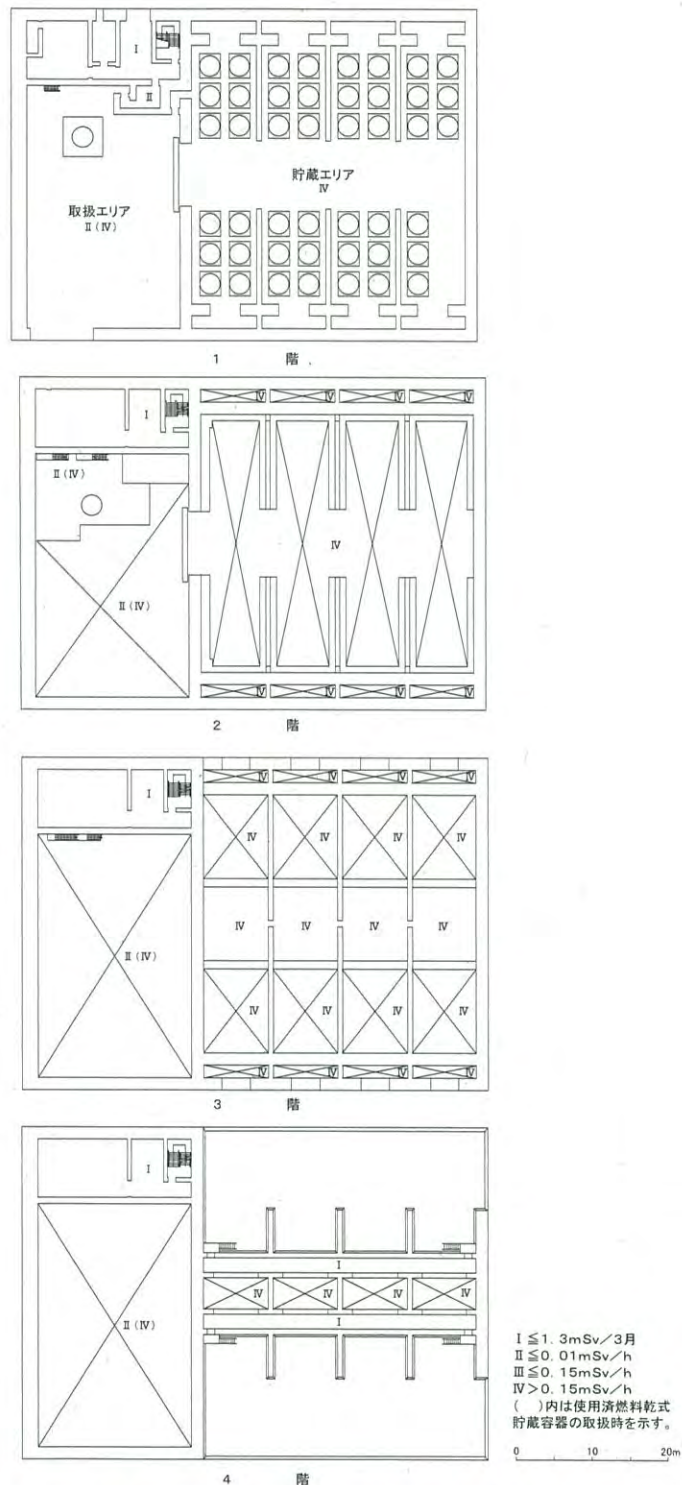
(1) 通常運転時等

中央制御室遮へいは、原子炉補助建屋内に設置し、原子炉冷却材喪失等の設計基準事故時に、中央制御室内にとどまり必要な操作、措置を行う運転員が過度の被ばくを受けないように施設する。また、運転員の勤務形態を考慮し、事故後30日間において、運転員が中央制御室に入り、とどまっても、中央制御室遮へいを透過する放射線による線量、中央制御室に侵入した外気による線量及び入退域時の線量が、中央制御室換気空調設備等の機能とあいまって、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」に示される100mSvを下回

る遮蔽とする。

8.3.4.7 一時的遮へい

一時的遮へいは、放射性物質を内蔵する機器及び設備の補修時あるいは事故時の保守等のために一時的に使用するもので、コンクリートブロック、鉛、鉄板等でできた可搬式遮へい構造物であり、必要に応じて設置する。



第8.3.10図 使用済燃料乾式貯蔵建屋遮蔽設計区分図

2. 放射線からの放射線業務従事者の防護

(別添資料)

放射線からの放射線業務従事者の防護について

(使用済燃料乾式貯蔵施設)

別添

放射線からの放射線業務従事者の防護について
(使用済燃料乾式貯蔵施設)

目 次

1. 放射線防護上の措置

2. 放射線管理施設

添付1：放射線からの放射線業務従事者の防護について（使用済燃料乾式貯蔵施設）
補足説明資料

1. 放射線防護上の措置

1.1 遮蔽

使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽設計については、関係区域への立入りの頻度、滞在時間等を考慮して管理区域を3区分に分け、各区分毎に設計基準線量率を設けてこれらの基準に適合するよう維持管理する。具体的な基準は第1-1表に示すとおりである。また、この設計区分に基づく管理区域内の概略を第1-1図に示す。

第1-1表 遮蔽設計基準

区分		外部放射線に係る 設計基準線量率	代表箇所
管理区域外	第I区分	≤ 1.3 mSv/3月	
管理区域内	第II区分	≤ 0.01 mSv/h	取扱エリア※
	第III区分	≤ 0.15 mSv/h	
	第IV区分	> 0.15 mSv/h	貯蔵エリア 取扱エリア※

※通常時は線源がないため区分II, 使用済燃料乾式貯蔵容器取扱時は区分IVとする。

貯蔵エリアは使用済燃料乾式貯蔵容器を貯蔵することで線量率が上昇する可能性があるが、当該エリアに隣接している取扱エリアは、立ち入り頻度等を考慮して第II区分とするため、遮蔽壁（100cm以上で計画）および遮蔽扉（80cm以上で計画）を設け、第II区分の設計基準線量率である0.01mSv/h以下を満足させることで設計する。

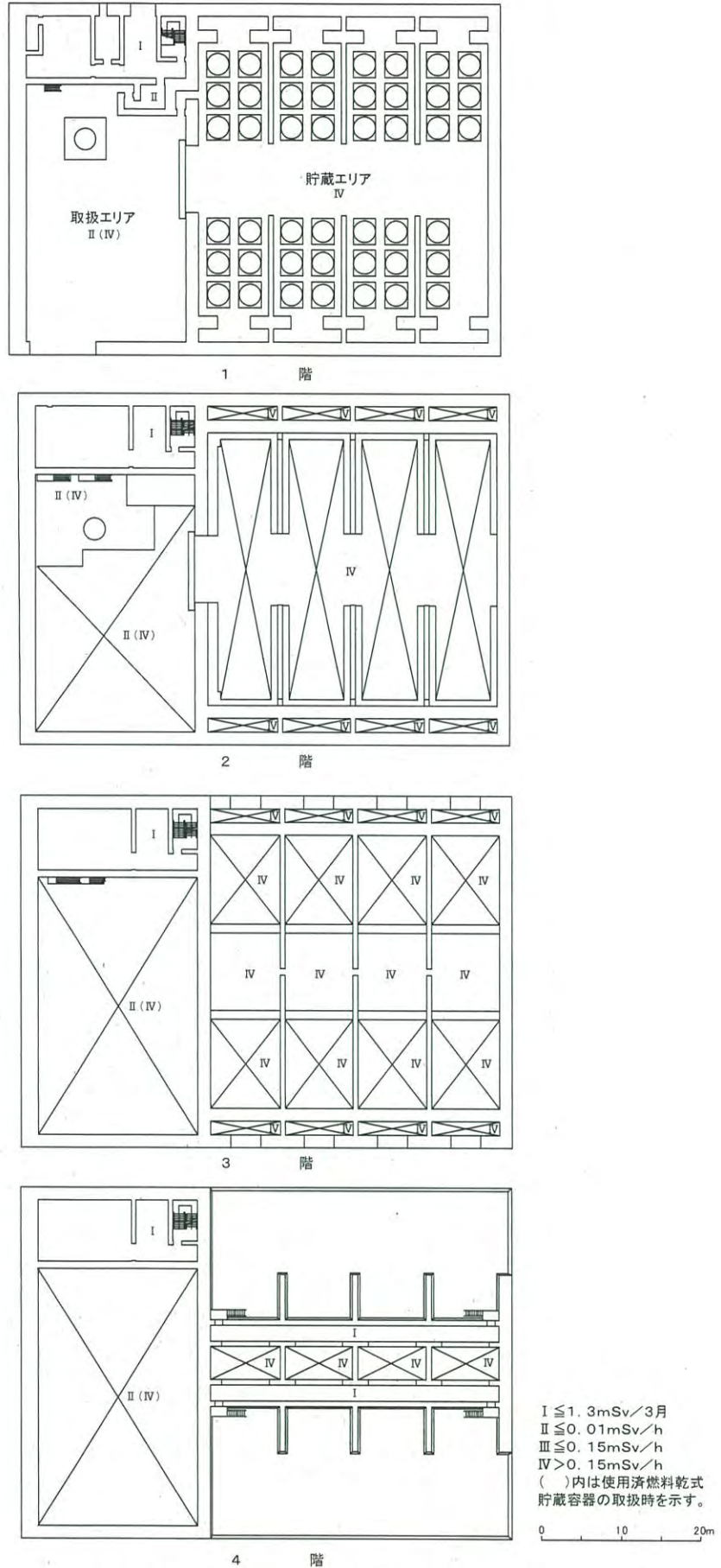
1.2 使用済燃料乾式貯蔵容器等の配置

線源からの離隔のため、取扱エリアと貯蔵エリアを設け、使用済燃料乾式貯蔵容器は全て貯蔵エリアに貯蔵する設計とする。また、制御盤等は管理区域外に配置する設計とする。

1.3 その他

作業の開始前後、また作業環境が著しく変動するおそれがある場合は、放射線管理員が作業に立ち会い、作業場所の線量当量率等の作業環境を把握するとともに、被ばく低減のための作業方法を指導する。

なお、使用済燃料乾式貯蔵建屋は汚染のおそれのない管理区域であり、また液体状の廃棄物を持ち込むことはなく、日常的に発生する排水（液体廃棄物）はない。



第1-1図 使用済燃料乾式貯蔵建屋遮蔽設計区分図

2. 放射線管理施設

2.1 出入管理

放射線業務従事者、一時立入者の出入管理には、既設の出入管理設備を使用する設計とする。

2.2 線量管理

放射線業務従事者、一時立入者の個人被ばく管理のため、蛍光ガラス線量計、警報付ポケット線量計等を備える。

2.3 線量当量率の測定・表示

放射線業務従事者が立ち入る場所については、定期的及び必要の都度、サーベイメータによる外部放射線に係る線量当量率の測定を行い、出入口付近にそれら必要な情報を表示する。

(1) 定期的測定

管理区域内は、人の立ち入り頻度等を考慮して、被ばく管理上重要な項目について測定することが保安規定において定められている。使用済燃料乾式貯蔵建屋では、1週間に1回、外部放射線に係る線量当量を測定する。

また、労働安全衛生法に基づき、作業環境測定のため、一ヶ月に1回、外部放射線に係る線量当量率を測定する。

エリアモニタについては、以下の理由から設置しない。

- ・使用済燃料乾式貯蔵容器は、線量当量率をあらかじめ測定しており、変動は前もって把握できること
- ・制御室等のように常時作業する場所はないこと

(2) 必要の都度測定

貯蔵エリア、取扱エリアにおいては、使用済燃料乾式貯蔵容器取扱作業等の開始前後及び作業環境が著しく変動するおそれがある場合、線量当量率を測定する。

(添付1)

放射線からの放射線業務従事者の防護について
(使用済燃料乾式貯蔵施設)
補足説明資料

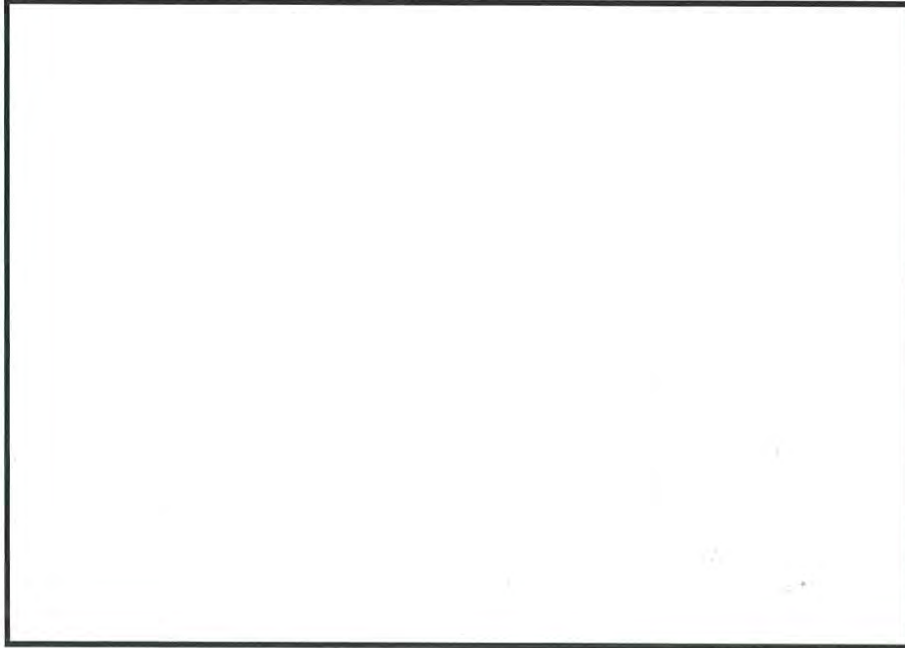
目 次

1. 遮蔽設計について
2. 開口部に関する遮蔽設計について
3. 管理区域の設定について
4. 評価コードの概要
5. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽設計で使用するスペクトルの保守性について

1. 遮蔽設計について

1.1 遮蔽設計

遮蔽設計区分は、第1-1図に示すとおり、キャスク貯蔵時には貯蔵エリアが第IV区分、取扱エリアが第II区分とする。



第1-1図 使用済燃料乾式貯蔵建屋遮蔽設計区分図

1.2 評価条件

1.2.1 遮蔽厚^{※1}

(1) 貯蔵エリア～取扱エリア間の遮蔽厚 :

(2) 遮蔽扉の遮蔽厚 :

※1 : 遮蔽計算に用いる遮蔽厚は、公称値からマイナス側許容誤差 (5 mm) を引いた値とする。

1.2.2 評価点

評価点は、の遮蔽壁表面 (評価点 A) および の遮蔽扉表面 (評価点 B) とする。(第1-1図参照)

1.2.3 線源

使用済燃料乾式貯蔵容器の線源は、第1-1表のとおりとする。使用済燃料貯蔵容器の線源強度は、遮蔽設計区分境界における線量が保守的な評価結果となるように、コンクリートの透過率を考慮してエネルギースペクトルを保守側に設定するとともに、容器表面から1 mの位置における線量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ となるように規格化している。また、使用済燃料貯蔵容器からの放射線の線質を

全て中性子または全てガンマ線とした条件においてそれぞれ線量評価し、保守的な評価結果を求める。

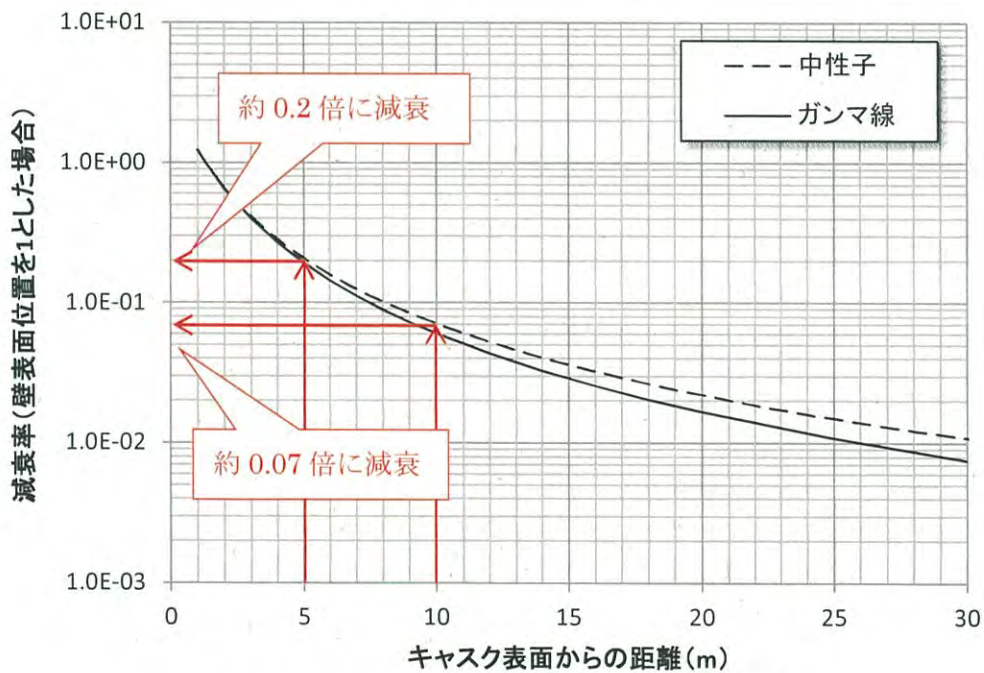
第1-1表 線源条件

線源	基数	線源強度	スペクトル
使用済燃料 乾式容器	A : 48 基 B : 4 基 <small>(注2)</small>	容器表面 1 m の 線量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ となるように規格化	包絡スペクトル <small>(注1)</small>

(注1) 「使用済燃料中間貯蔵施設の直接・スカイシャイン線量の評価手法について〔金属キャスク方式〕(平成12年3月)」

(注2) 評価点Bは、貯蔵エリアのキャスクのうち、遮蔽扉近傍の4基分を考慮する(第1-1図参照)。キャスク表面からの距離を考慮すると、線量の減衰率は5mで約0.2倍、10mで約0.07倍となる(第1-2図参照)。

貯蔵エリアのキャスクの配置(第1-1図参照)から、5mの減衰率が見込めるキャスクが2基、残り46基を10mの減衰率とした場合も、合計で4基以下($2 \text{基} \times 0.2 + 46 \text{基} \times 0.07 = 3.62$)となり、4基分の評価で妥当である。



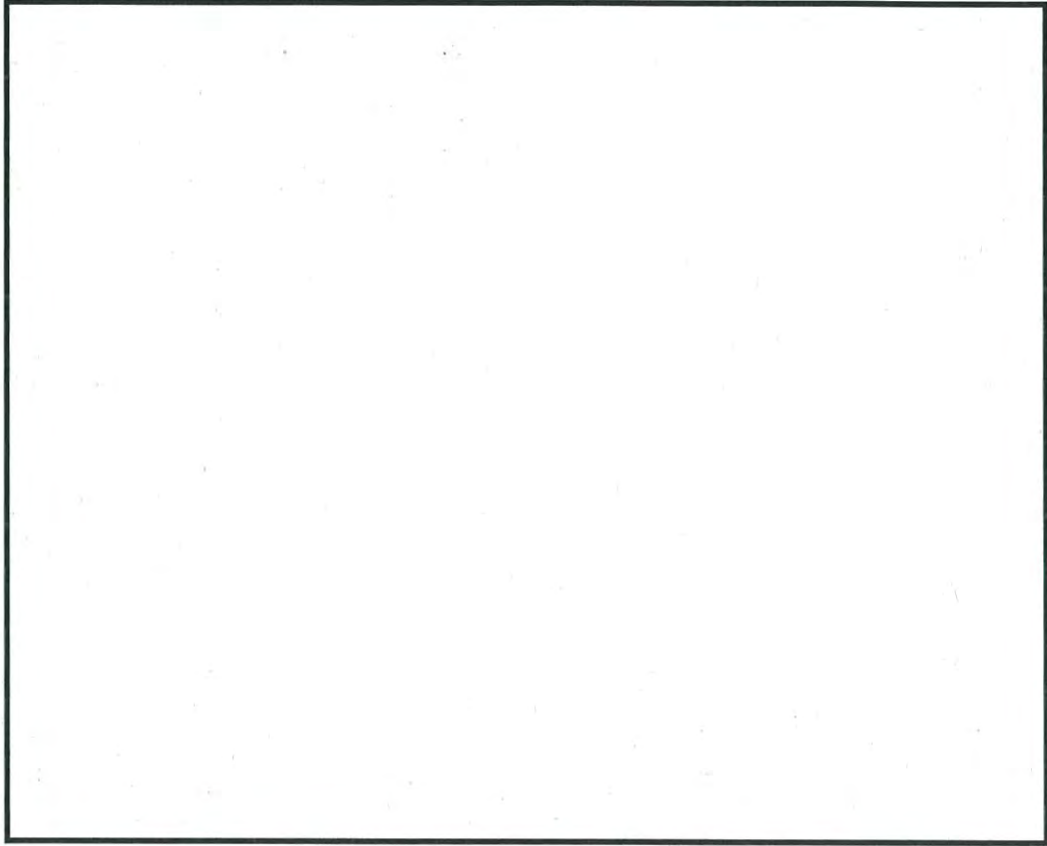
第1-2図 キャスク表面からの減衰率

1.2.4 評価モデル

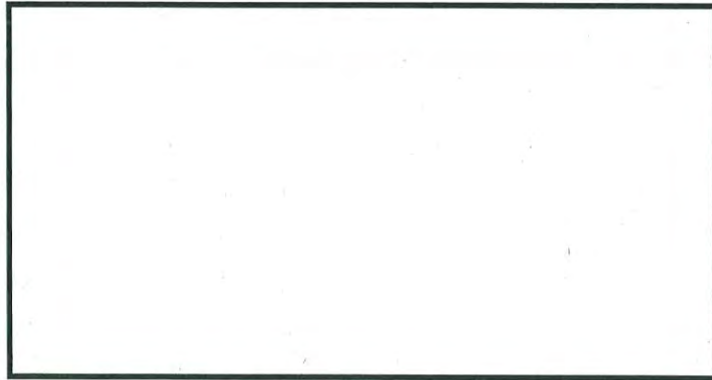
ガンマ線と中性子線の両方について線量評価を行い、最終的な評価値としては、両者のうちより保守的な線量評価を採用する。

遮蔽設計区分境界におけるガンマ線評価では、使用済燃料乾式貯蔵容器を円筒形の線源で模擬して評価する。評価点 A における線量評価では、遮蔽厚を また 48 基のキャスクを考慮する。評価点 B における線量評価では、遮蔽厚を 、またキャスク 1 基の線量率を算出し、結果を 4 倍することで、評価点 B において寄与を考慮すべきキャスク 4 基分の線量率を計算する。(第 1-3 図及び第 1-4 図参照)

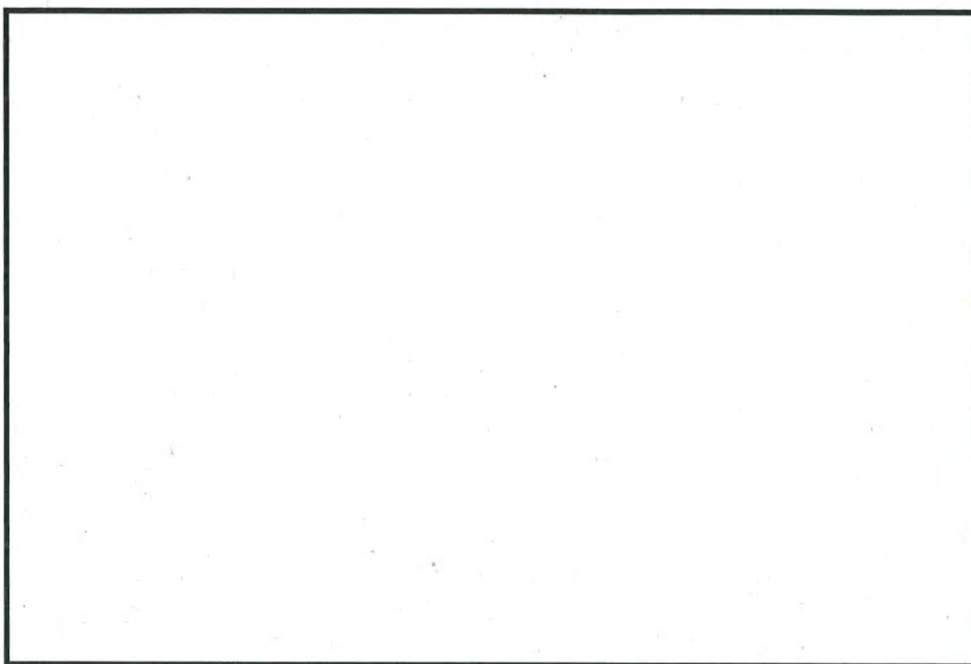
中性子線評価では、使用済燃料乾式貯蔵容器を球形の線源で模擬して評価する。キャスク 1 基の線量率を算出し、評価点 A における線量評価では 48 倍、評価点 B における線量評価では 4 倍し、それぞれ 48 基及び 4 基分の線量率を計算する。(第 1-5 図及び第 1-6 図参照)



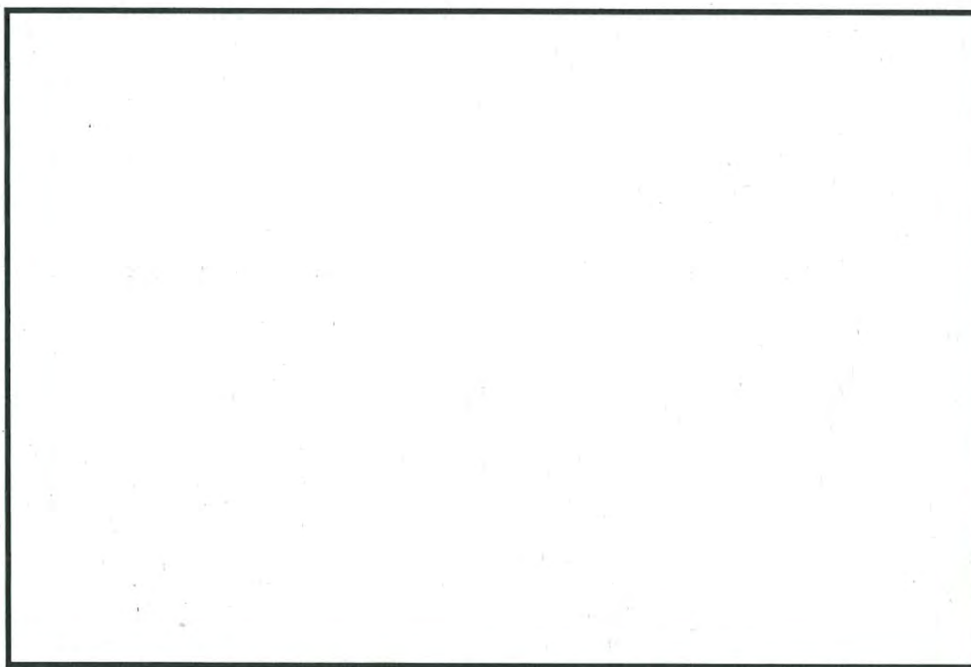
第1-3図 評価点Aにおけるガンマ線評価モデル



第1-4図 評価点Bにおけるガンマ線評価モデル



第1-5図 評価点Aにおける中性子線評価モデル



第1-6図 評価点Bにおける中性子線評価モデル

1.3 評価結果

評価点 A および評価点 B での実効線量率の評価結果を第 1 - 2 表に示す。評価の結果、第 II 区分の設計基準線量率である 0.01mSv/h を十分満たしている。

第 1 - 2 表 評価結果

評価点	壁外線量率 (μ Sv/h)		基準値
	全てガンマ線 とした場合	全て中性子線 とした場合	
A	0.044	0.17	$\leq 0.01\text{mSv/h}$
B	3.3	2.4	(10μ Sv/h)

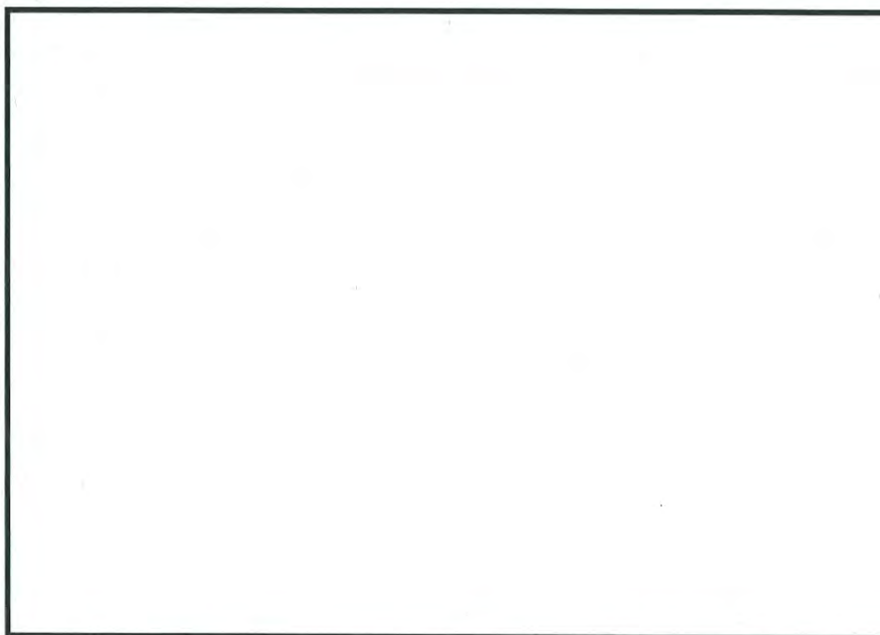
2. 開口部に関する遮蔽設計について

遮蔽設計区分について、貯蔵エリアの第Ⅳ区分、取扱エリアの第Ⅱ区分を満足するため、開口部は迷路構造とし、建屋内部の放射線源に対して、放射線作業従事者への被ばく低減を目的として、以下の壁厚等を満足することで、局所的な最短透過距離部においても必要遮蔽厚さを確保できる（第2-1図）。

- ・貯蔵エリア～取扱エリア間

壁 厚：

遮蔽扉厚：



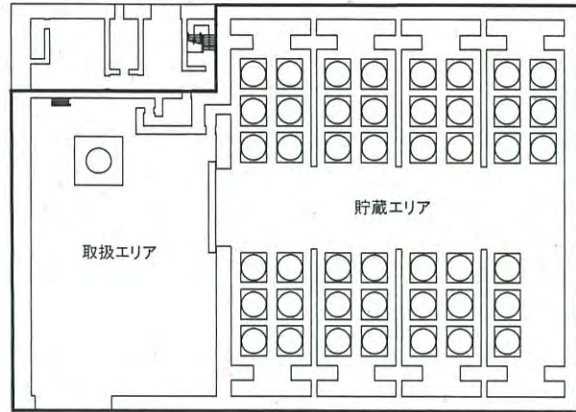
第2-1図 管理区域内の開口部に対する遮蔽設計概要図

3. 管理区域の設定について

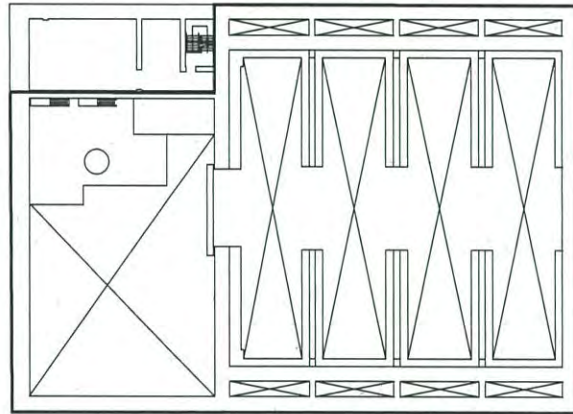
外部放射線に係る線量等が「線量限度等を定める告示」に定められた値を超えるか又は超えるおそれのある区域は、すべて管理区域とする。

使用済燃料乾式貯蔵建屋は、容器に閉じ込め機能を有していることから、汚染のおそれのない管理区域とする。使用済燃料乾式貯蔵建屋の管理区域の範囲を第3-1図に示す。

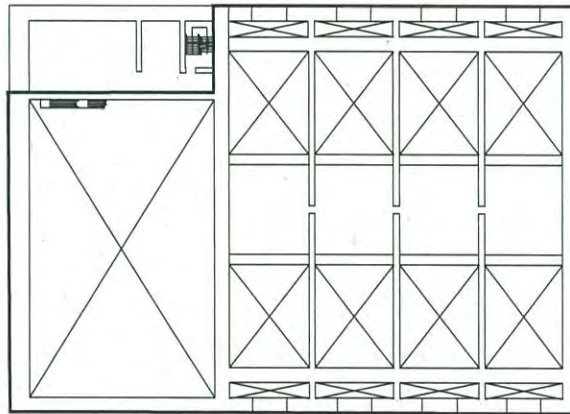
また、運用段階で、一時的に上記管理区域に係る値を超えるか又は超えるおそれのある区域が生じた場合は、一時的な管理区域を設定する。



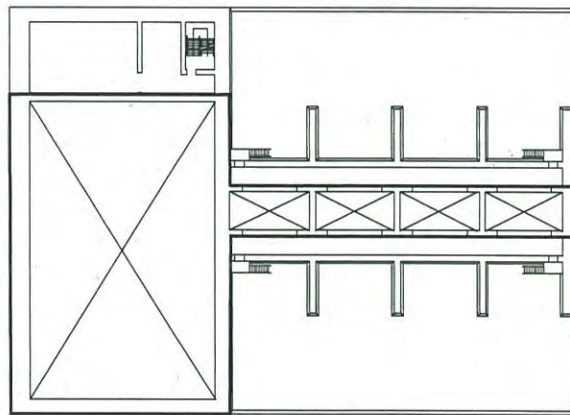
1 階



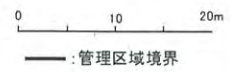
2 階



3 階



4 階



第3-1図 使用済燃料乾式貯蔵建屋管理区域図

4. 評価コードの概要

今回の変更申請においては、ガンマ線の評価にはQAD-CGGP2Rコード、中性子線の評価にはANISNコードを用いている。

これら評価コードの概要を第4-1～4-2表に示す。なお、いずれも許認可での使用実績があるコードである。

第4-1表 QAD-CGGP2Rコードの概要

コード名 項目	QAD-CGGP2R
開発機関	米国ロスアラモス国立研究所及び日本原子力研究開発機構
開発時期	1967年
バージョン	Ver. 1.04
使用目的	遮蔽計算（使用済燃料乾式貯蔵建屋内のキャスクからの直接ガンマ線計算）
コードの概要	<p>本解析コードは、米国ロスアラモス国立研究所で開発されたガンマ線の物質透過を計算するための点減衰核積分法解析コード「QAD」をベースとし、旧日本原子力研究所がICRP1990年勧告の国内関連法令・規則への取り入れに合わせて、実効線量率等を計算できるように改良したバージョンである。</p> <p>本解析コードは、線源及び遮蔽体を直方体、円筒、球などの三次元形状で模擬した計算体系でガンマ線の実効線量率及び空気カーマ率等を点減衰核積分法により計算することができる。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからの直接ガンマ線計算について、QAD-CGGP2Rコードを使用して実施している。</p> <p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ QAD-CGGP2Rコードは、線量率計算を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら計算条件が与えられれば線量率計算は可能であり、QAD-CGGP2Rコードは直接ガンマ線量計算に適用可能である。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ JRR-4 散乱実験室でのコンクリート透過実験の実験値（「原子力第1船遮蔽効果確認実験報告書」JNS-4（日本原子力船開発事業団、1967））と計算値を比較した。 ・ 実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 ・ 上記妥当性確認では、実験孔からのガンマ線を遮蔽体に入射させ、遮蔽体透過後のガンマ線の線量率の実験値と QAD-CGGP2Rコードによる計算値を比較している。 ・ 今回の使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからの直接ガンマ線量計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、ガンマ線の補助遮蔽の遮蔽体透過後の線量率を計算する。 ・ 今回の直接ガンマ線量計算は、上記妥当性確認内容と合致している。 <p>また、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」(JEAC4615-2008)では、キャスク保管建屋等の補助遮蔽のための点減衰核積分コード/散乱線計算コードとして、SPANコード、SCATTERINGコード、QADコードが、燃料移送遮蔽のための点減衰核積分コードとしてSPAN-SLABが挙げられている。</p>

第4-2表 ANISNコードの概要

コード名 項目	ANISN
開発機関	米国オークリッジ国立研究所 (ORNL)
開発時期	1967年
バージョン	ANISN-W
使用目的	遮蔽計算 (使用済燃料乾式貯蔵建屋内のキャスクからの中性子線計算)
コードの概要	<p>本解析コードは、米国オークリッジ国立研究所にて中性子の遮蔽計算を目的として開発されたコードであり、1次元ボルツマン輸送計算式による中性子及びガンマ線の放射線束分布の算出が可能である。</p> <p>今回の評価では、JENDL-3.3をもとに作成された断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 (日本原子力研究所にて整備されたもの) を用いている。本ライブラリは許認可での使用実績がある。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからの中性子線計算について、ANISNコードを使用して実施している。</p> <p>【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・ 本コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・ ANISN コードは、中性子の放射線束分布解析を実施するコードであり、計算に必要な主な条件は線源条件、遮蔽体条件である。これら解析条件が与えられれば中性子の放射線束分布解析は可能であり、線量換算係数を乗じることでANISNコードは中性子線量計算に適用可能である。 <p>【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ OKTAVIAN 透過実験の実測値 (Yamamoto, J., et al.: "Numerical Tables and Graphs of Leakage Neutron Spectra from Slabs of Typical Shielding Materials with D-T Neutron Source," OKATAVIAN Report A-8 3-05, Osaka Univ. (1983)) と計算値を比較した。 ・ 実験値と計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 ・ 上記妥当性確認では、コンクリートを通じた中性子スペクトルの実測値とANISNコードによる計算値を比較している。 ・ 今回の使用済燃料乾式貯蔵施設内のキャスクからの中性子線量計算では、上記妥当性確認における実験体系と同様に、コンクリートの深層透過による放射線束分布を解析し、線量率を計算する。 ・ 今回の中性子線量計算は、上記妥当性確認内容と合致している。 ・ また、「原子力発電所放射線遮へい設計規程」(JEAC4615-2008) では、キャスク保管建屋等の補助遮蔽のための輸送計算コードとして、ANISN コード及びDOTコードが挙げられている。 ・ 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 については、TRANSXコード(ver.2.15、修正パッチ(International Atomic Energy Agency Nuclear Data Services, "TRANSX patches", https://www.nds.iaea.org/fendl20/transx-patches.htm))適用により、計算コード入力用に処理して用いている。 ・ MATXSLIB-J33 については、海上技術安全研究所による実験値 (大西世紀ほか、「²⁵²Cf 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巻 第3号 研究報告, (2007)) と MATXSLIB-J33 による計算値を比較した結果、概ね一致していることを確認している。 <p>上記妥当性確認では、放射線エネルギーがキャスクのエネルギースペクトルと同等となっており、今回の使用目的と合致している。</p>

5. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽設計で使用するスペクトルの保守性について

5.1 基本的考え方

使用済燃料乾式貯蔵施設では、専用の使用済燃料乾式貯蔵容器を使用し、鉄筋コンクリート造の貯蔵建屋内で貯蔵することから、それぞれの使用済燃料乾式貯蔵容器表面のエネルギースペクトルによるコンクリートの透過率を考慮する必要がある。

このため、使用済燃料乾式貯蔵建屋の遮蔽設計で使用する使用済燃料乾式貯蔵容器表面のエネルギースペクトルは、使用済燃料乾式貯蔵容器の設計から得られた使用済燃料乾式貯蔵容器表面でのエネルギースペクトル（以下、「設計スペクトル」という。）と比べて、コンクリート透過率が高くなるように設定する。

5.2 設定した線源スペクトル

本評価では、原子力安全研究協会「使用済燃料中間貯蔵施設の直接線・スカイシャイン線量の評価手法について〔金属キャスク方式〕」¹⁾における線量評価用の表面エネルギースペクトル（以下、「包絡スペクトル」という。）を採用した。設定結果は以下のとおりである。

・ガンマ線の包絡スペクトル

使用済燃料乾式貯蔵容器表面での線量当量率が、事業所外運搬に係る法令要求を満足するように、使用済燃料乾式貯蔵容器形状を仮想的に設定して得られたエネルギースペクトル

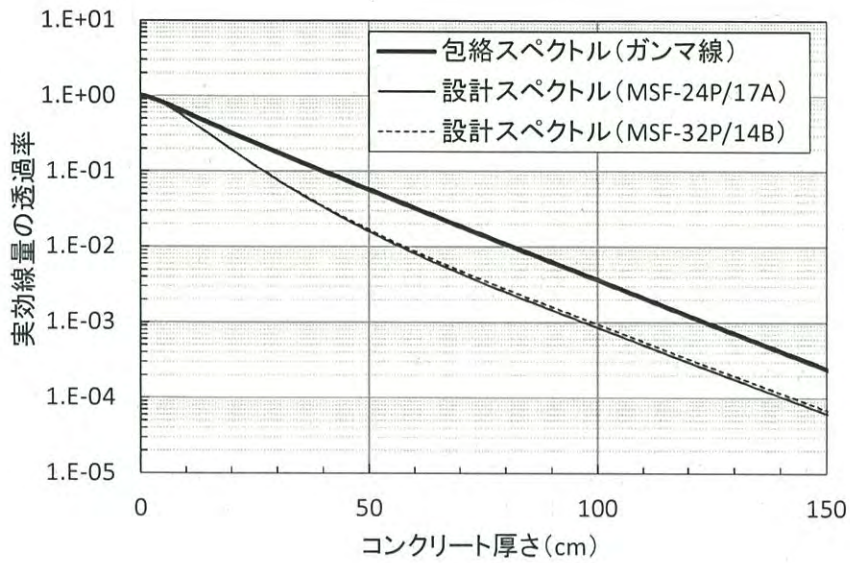
・中性子の包絡スペクトル

使用済燃料の中性子源として支配的な²⁴²Cm(α , n)反応のエネルギースペクトル

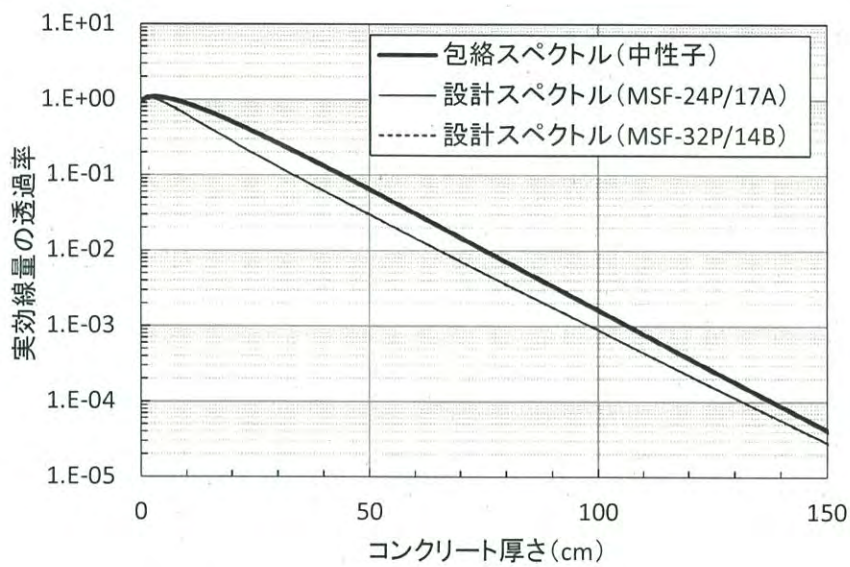
5.3 線源スペクトルの保守性

保守性の確認のため、包絡スペクトルと設計スペクトルに対するコンクリート中での実効線量率の減衰率を比較した。1次元輸送計算コードANISNで計算した結果を第5-1図（ガンマ線）及び第5-2図（中性子線）に示す。

包絡スペクトルは、設計スペクトルに比べ、コンクリートの透過性が高く、保守的であることがわかる。



第5-1図 コンクリート中での実効線量の減衰率（ガンマ線）



第5-2図 コンクリート中での実効線量の減衰率（中性子線）

1) 財団法人 原子力安全研究協会, 「使用済燃料中間貯蔵施設の直接線・スカイシャイン線量の評価手法について」 [金属キャスク方式], 平成12年3月