

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

<目 次>

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

1. 要求事項

乾式キャスクの除熱機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第16条第4項二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

②設置許可基準規則解釈別記4第16条3項

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

- ・貯蔵事業許可基準規則解釈第6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

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

③設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

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

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

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

「2. 安全機能の確保 2.3 除熱機能」には、以下のように記載されている。

【審査における確認事項】

『

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

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ除熱設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

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

2) 兼用キャスク各部の温度評価

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

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

3) 燃料被覆管の温度評価

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

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

4) 貯蔵建屋の除熱評価

① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。

また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しないこと。

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

』

2. 適合性について

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

〔確認内容〕

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

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

2) 兼用キャスク各部の温度評価

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

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

3) 燃料被覆管の温度評価

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

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

4) 貯蔵建屋の除熱評価

① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。

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

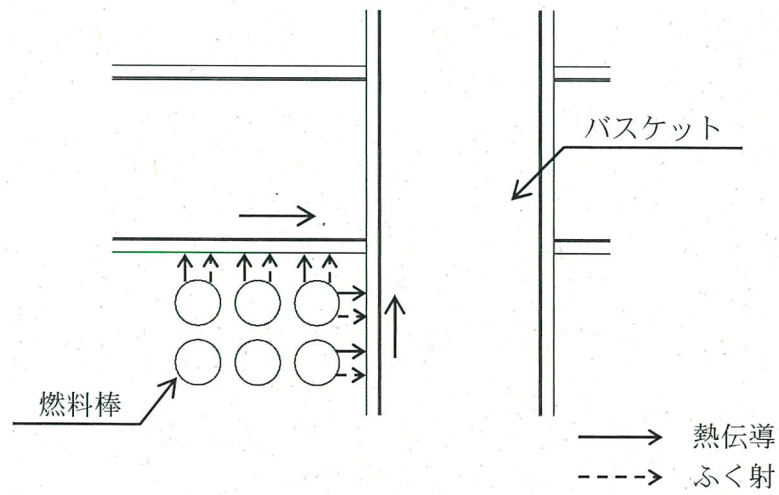
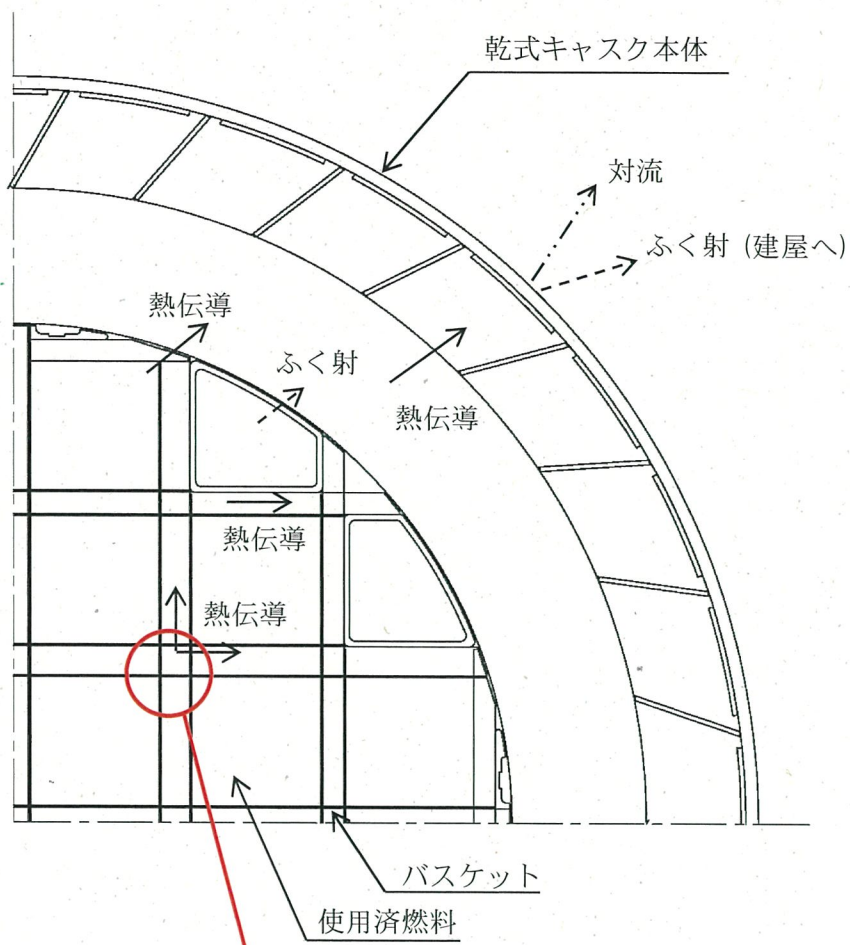
乾式キャスクは、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及びふく射により乾式キャスクの外表面に伝え、対流及びふく射により周囲の空気等に伝達する。乾式キャスク本体側部の中性子遮蔽材には熱伝導率の低いレジンを用いるため、伝熱フィンを設けることにより必要な伝熱性能を確保する。

乾式貯蔵施設における使用済燃料の崩壊熱の主要な伝熱形態は次のとおりである。

（第 2.5.4-1 図参照）

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

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



第 2.5.4-1 図 乾式キャスクの伝熱形態 (MSF-24P 型の例)

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

解析条件は第 2.5.4-1 表及び第 2.5.4-2 表のとおり。

a. 使用済燃料の崩壊熱評価方法

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

b. 乾式キャスク構成部材及び燃料被覆管の温度評価方法

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

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

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・ 収納制限に対する解析条件の保守性

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

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

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

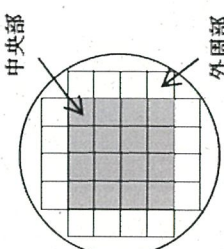
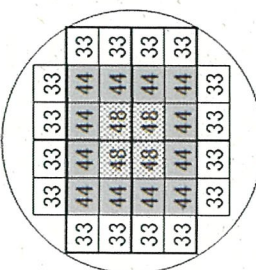
・ モデル化の保守性

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

－燃料集合体モデルは、軸方向への熱移動を考慮しない二次元モデルとする。



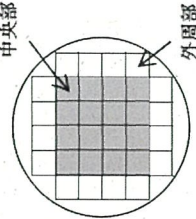
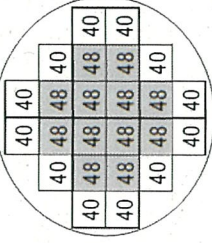
—MSF-24P 型については、使用済燃料とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、無視する方が熱伝導性が低下し保守側の評価となるため、モデル化しない。

第2.5.4-1表 1,2号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

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

※：数値は燃焼度 (GWd/t) を示す

第 2.5.4-2 表 3 号炉用燃料 乾式キャスク解析条件の概要

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

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

※2: 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

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

第 2.5.4-3 表 除熱評価の代表的な評価条件

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

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

a) 駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) の計算

駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) は、以下の式で表される。

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

ここで、

H_{th} : 熱ドラフト (Pa)

ρ_{in} : 外気の密度 (1.112) (kg/m³)

ρ_{out} : 排気の密度 (kg/m³)

g : 重力加速度 (9.81) (m/s²)

h : ドラフト高さ (18.1) (m)

b) 圧力損失 ΔP の計算

圧力損失 ΔP は、以下の式で表される。

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

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

ここで、

ΔP : 圧力損失 (Pa)

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

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

第2.5.4-4表 貯蔵建屋除熱評価の結果

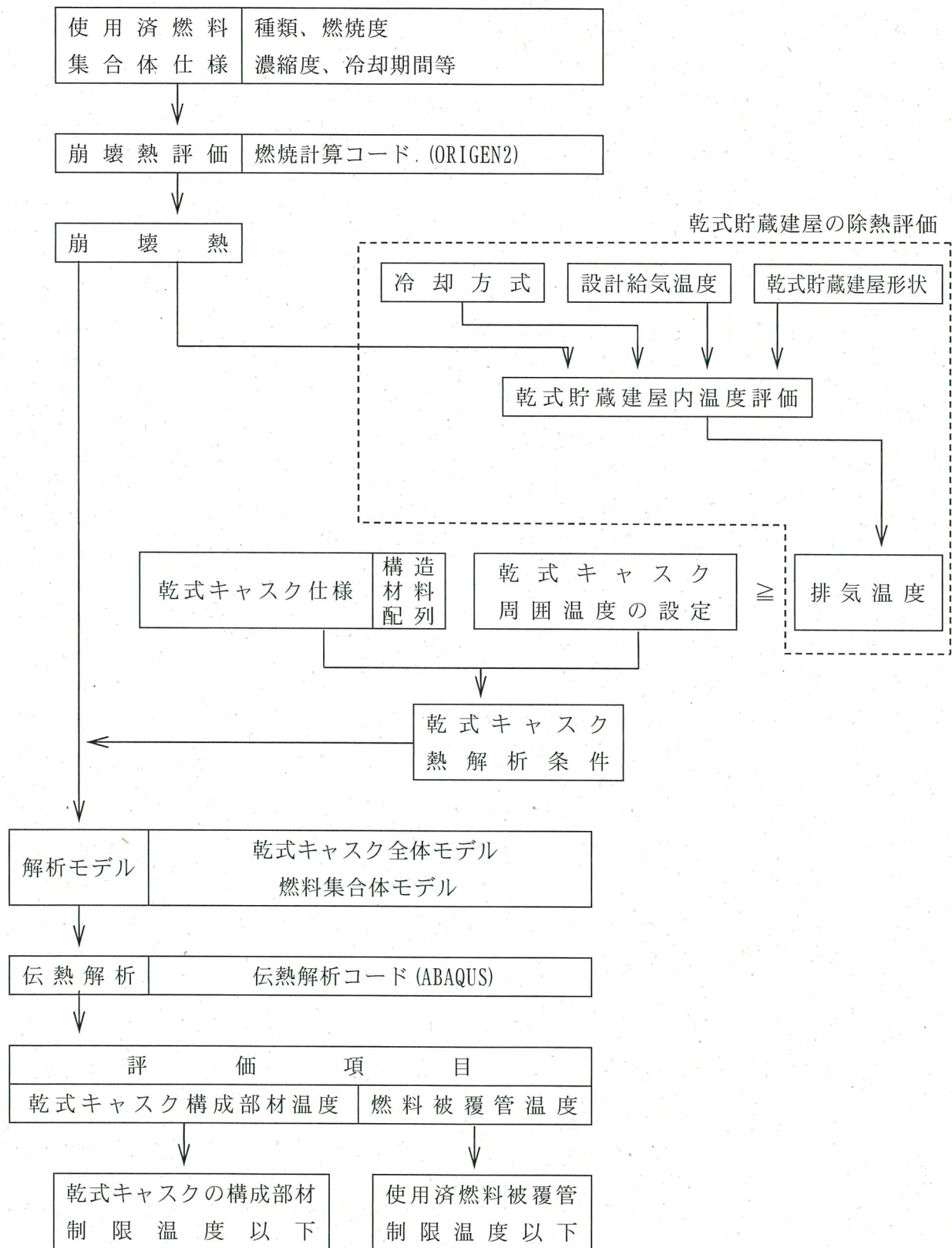
排気温度 T_{out} (℃)	熱ドラフト H_{th} (Pa)	圧力損失 ΔP (Pa)
約 45	約 7.1	約 7.1

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

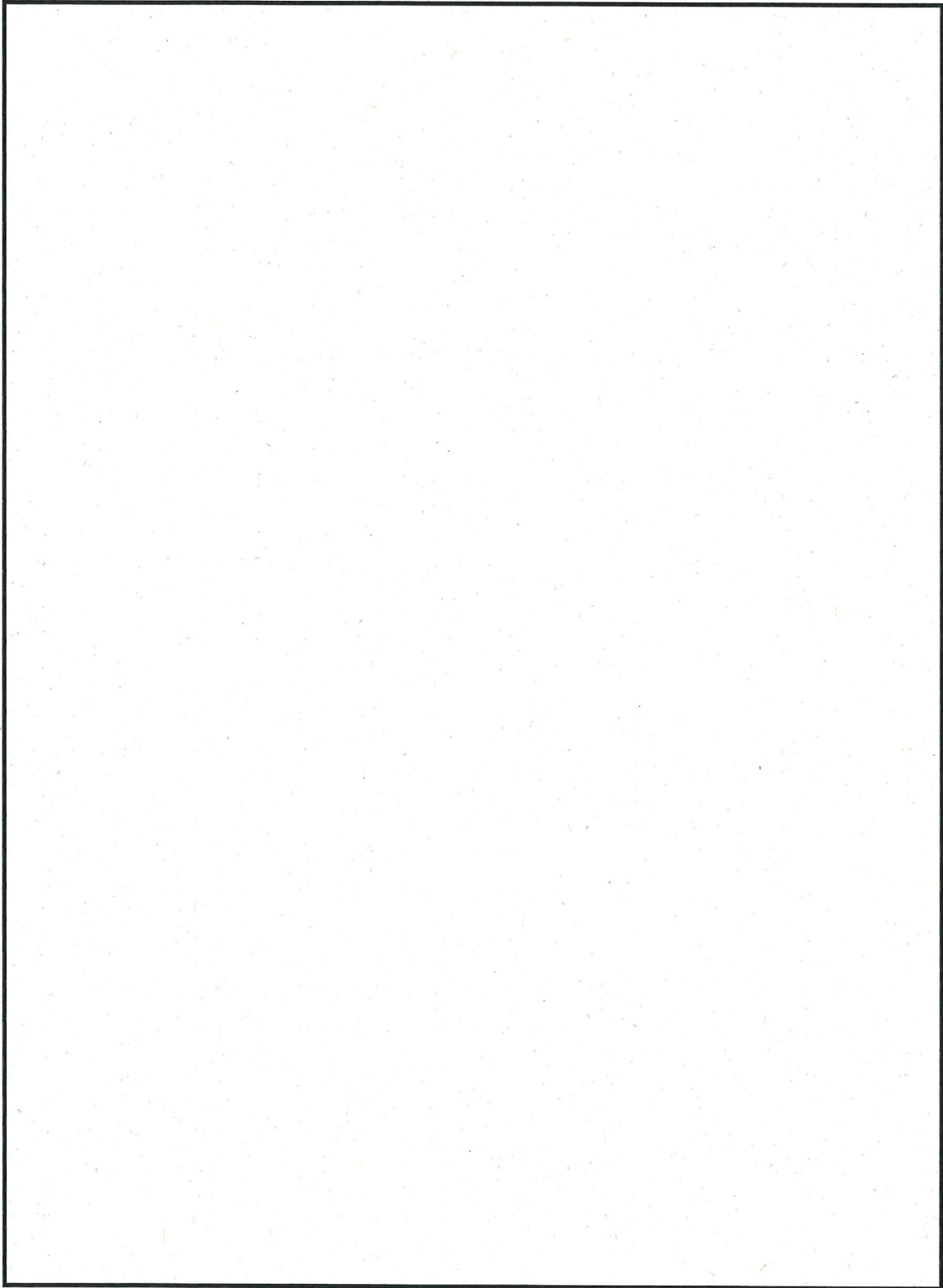
- ・ 設定条件の保守性

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

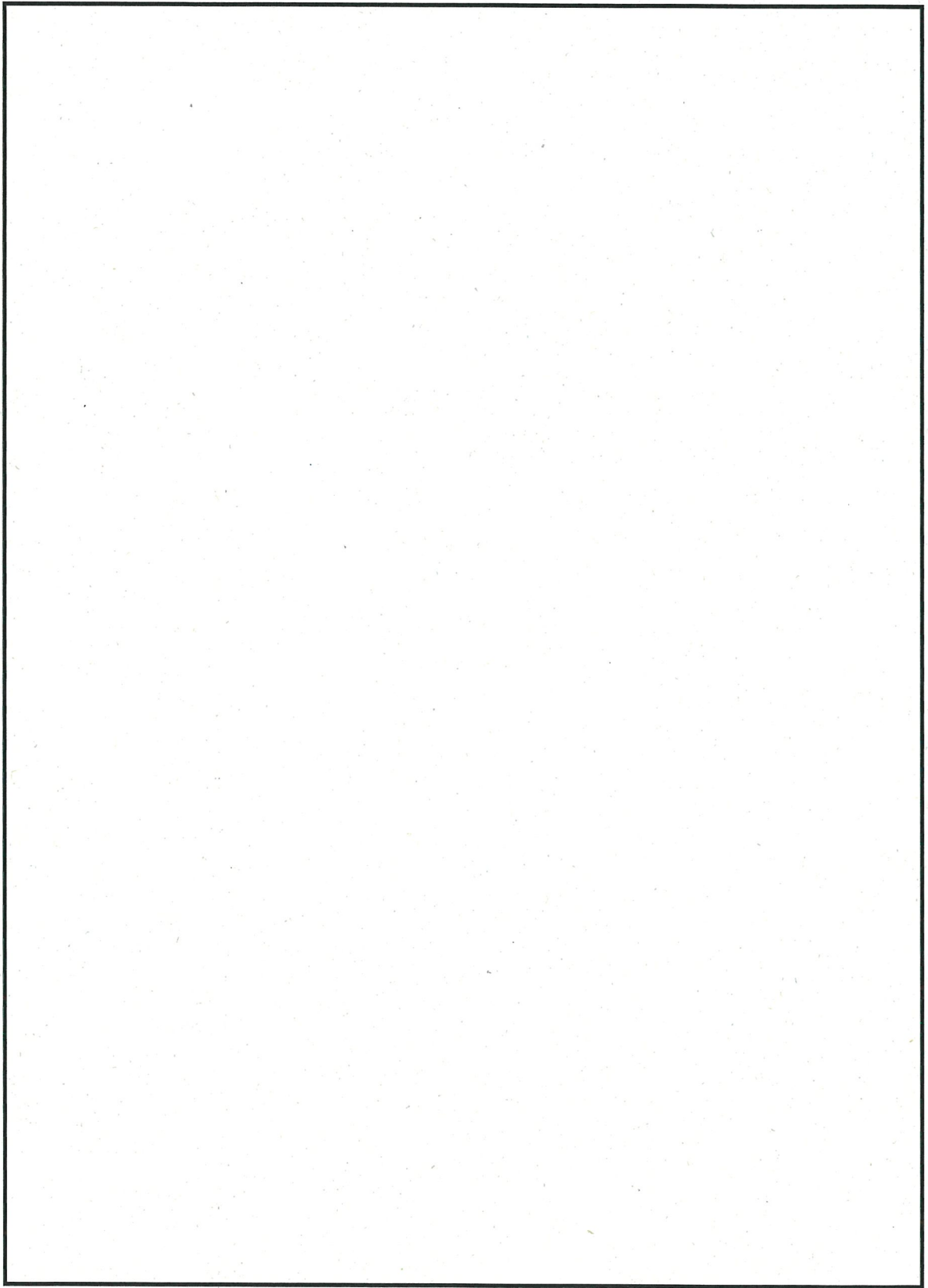
なお、太陽輻射熱により貯蔵建屋の外壁面温度に変動が生じるが、貯蔵建屋の壁は1m以上のコンクリートであり、太陽輻射熱により貯蔵建屋の壁内面(貯蔵建屋内表面)の温度が上昇することはないため、貯蔵建屋内表面を断熱条件として、排気温度を評価することが保守的な評価となる。



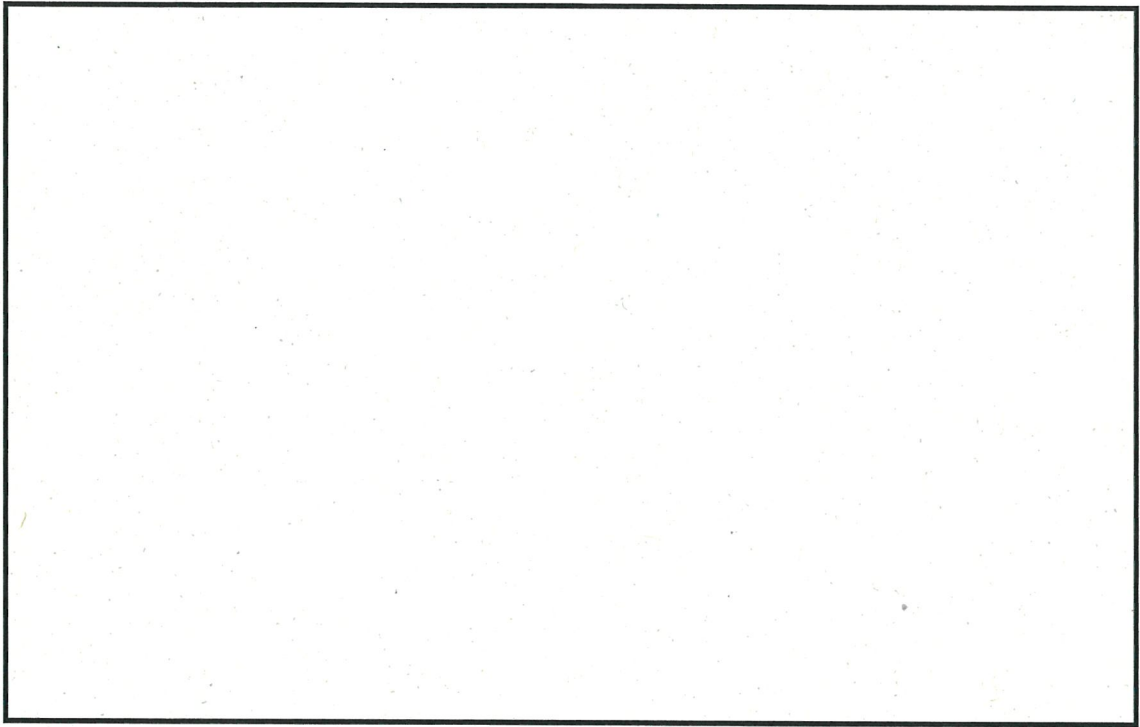
第 2.5.4-2 図 乾式キャスクの除熱解析フロー



第 2. 5. 4-3 図 MSF-24P 型全体モデル形状図（縦断面図）



第 2.5.4-4 図 MSF-24P 型全体モデル形状図 (横断面図)

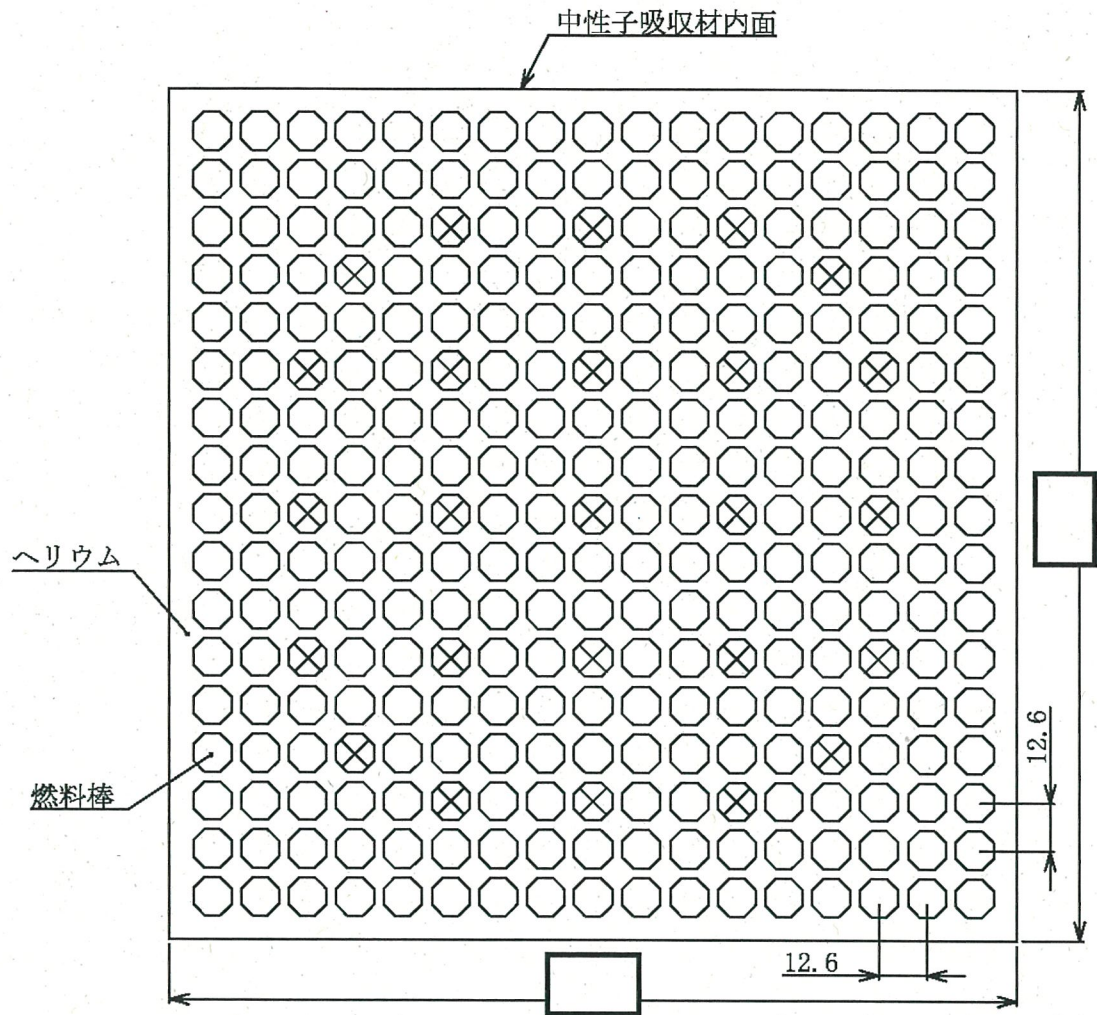


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

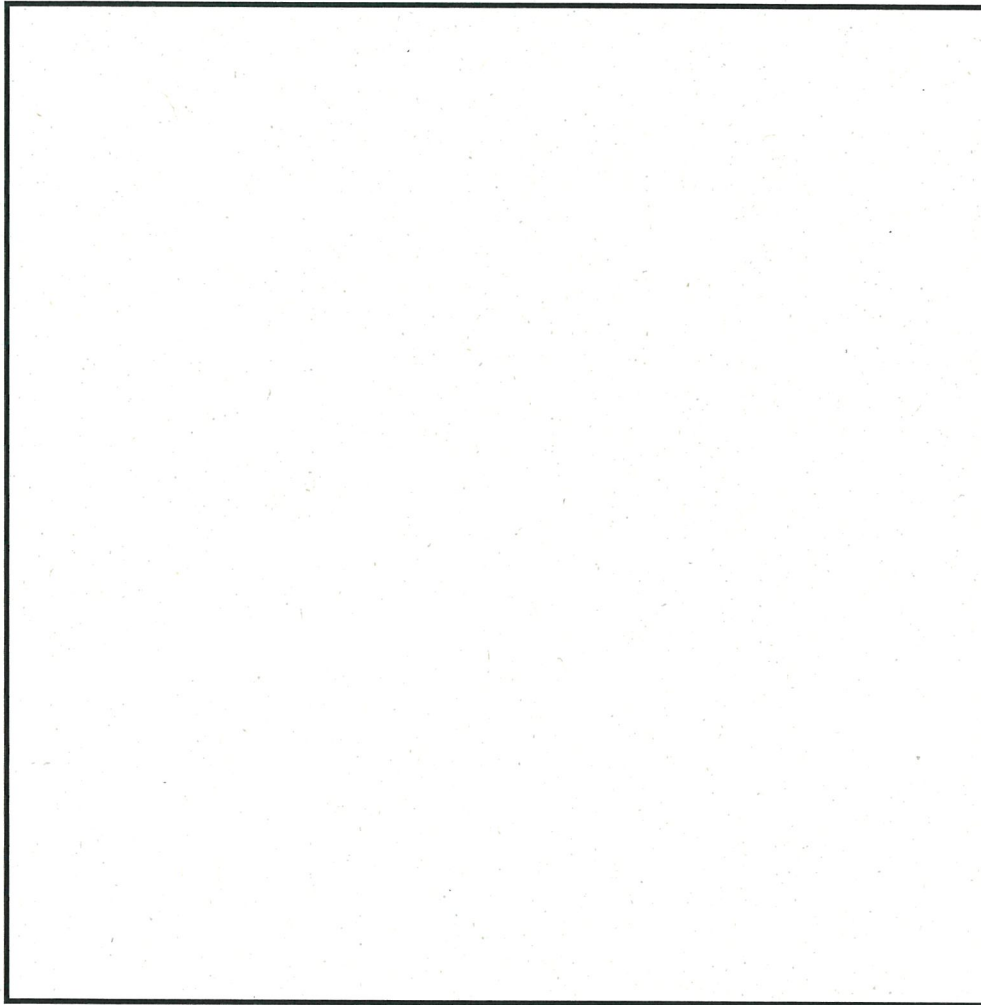
第 2.5.4-5 図 MSF-24P 型全体モデル要素分割図



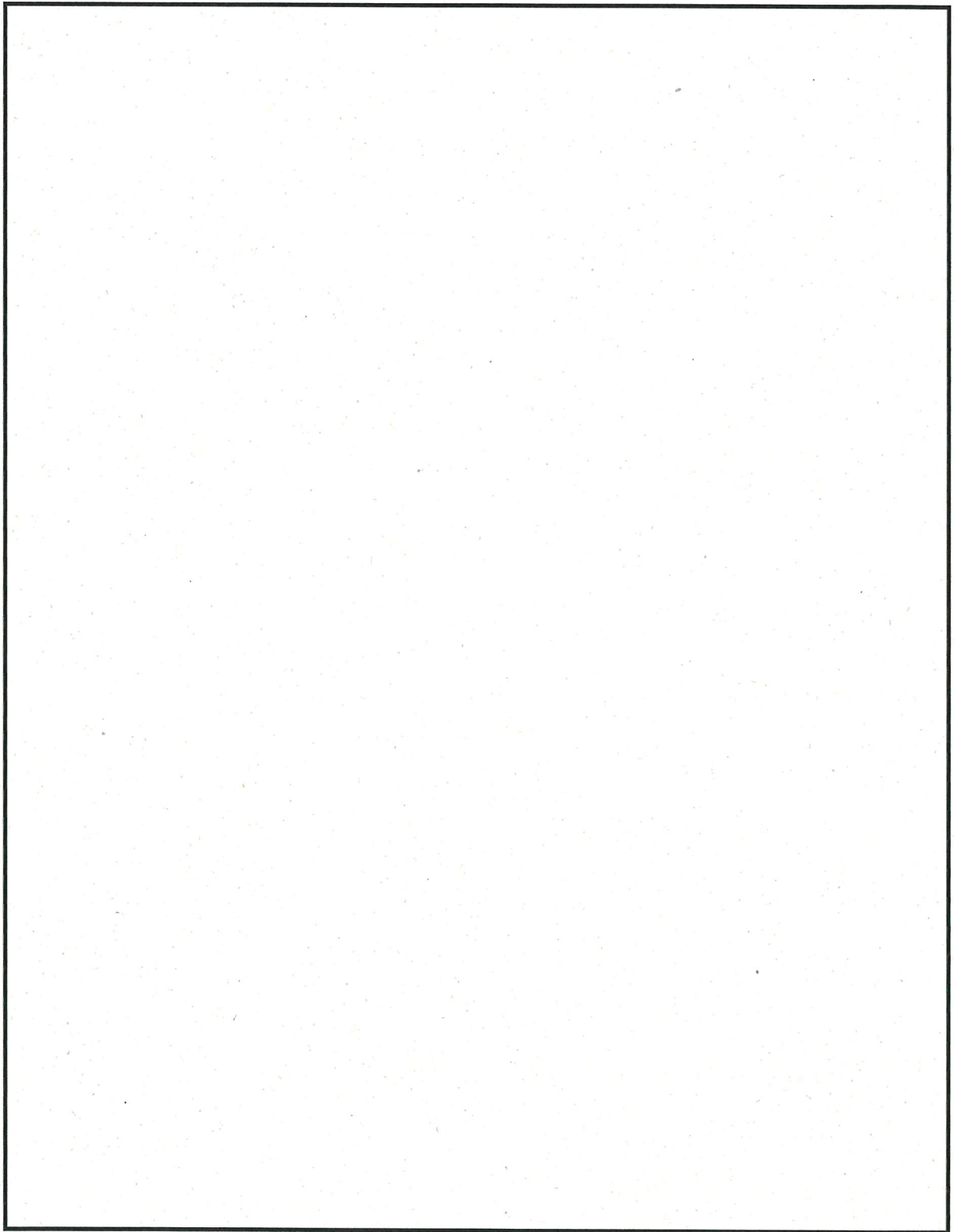
(単位：mm)

(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

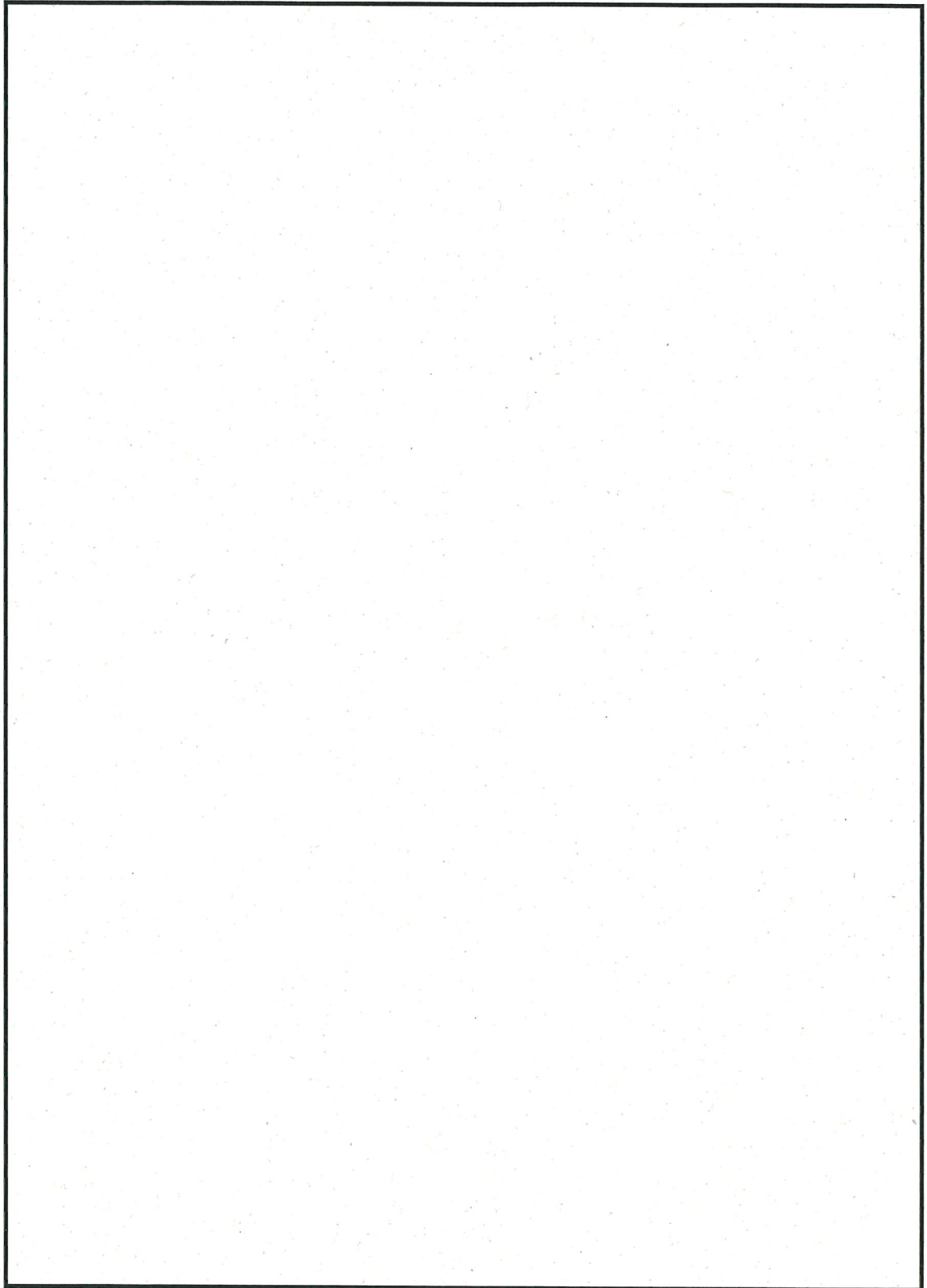
第 2.5.4-6 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル形状図



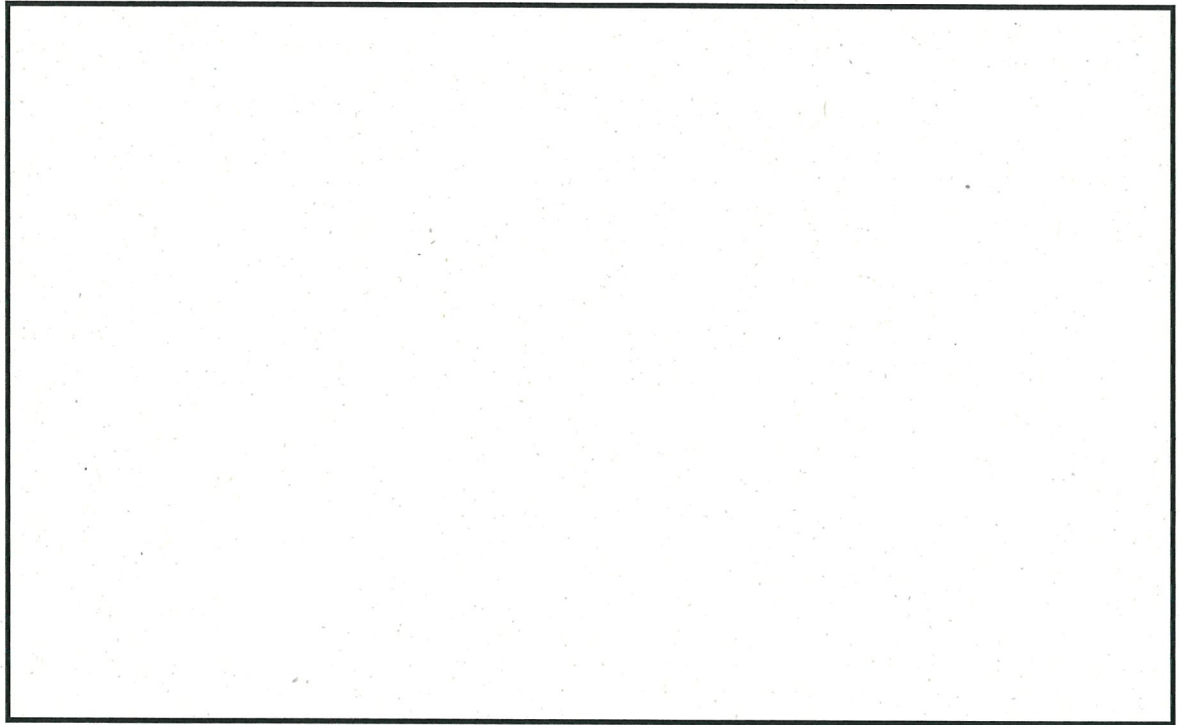
第 2.5.4-7 図 MSF-24P 型燃料集合体モデル要素分割図



第 2. 5. 4-8 図 MSF-32P 型全体モデル形状図 (縦断面図)



第 2.5.4-9 図 MSF-32P 型全体モデル形状図（横断面図）

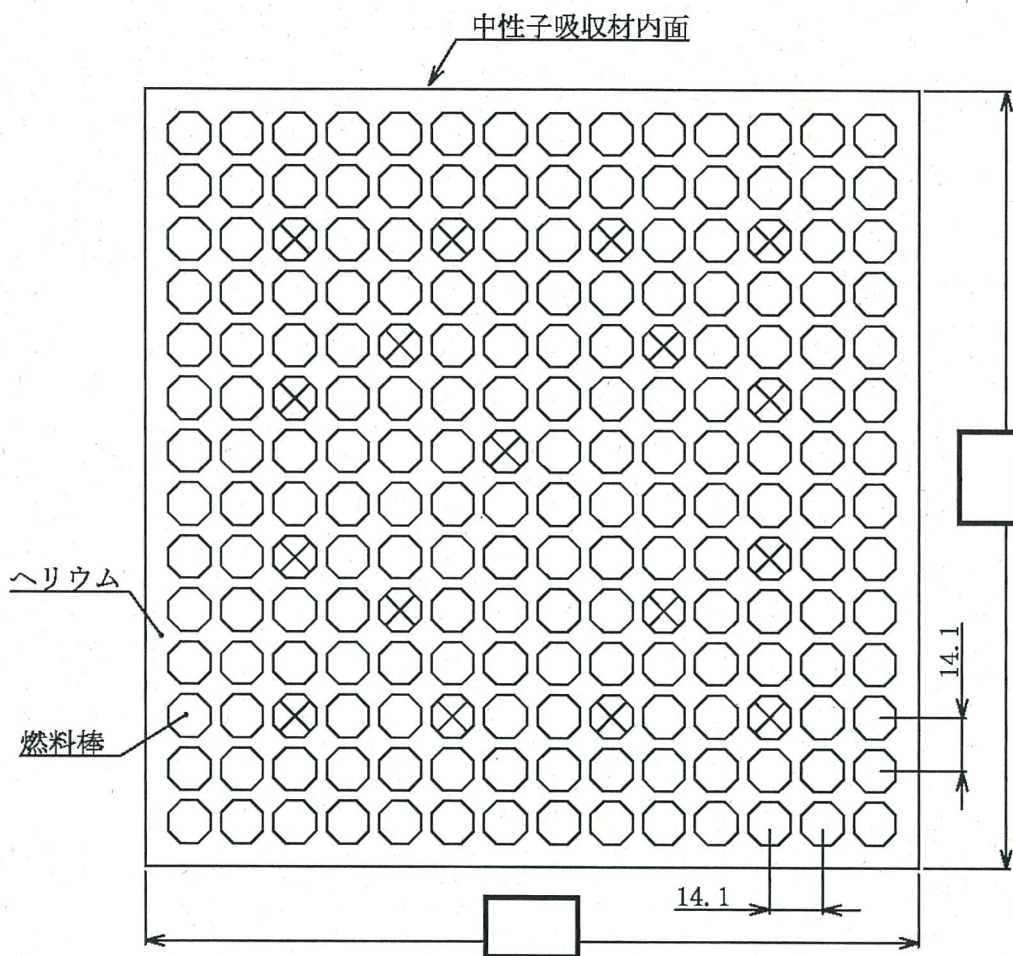


(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

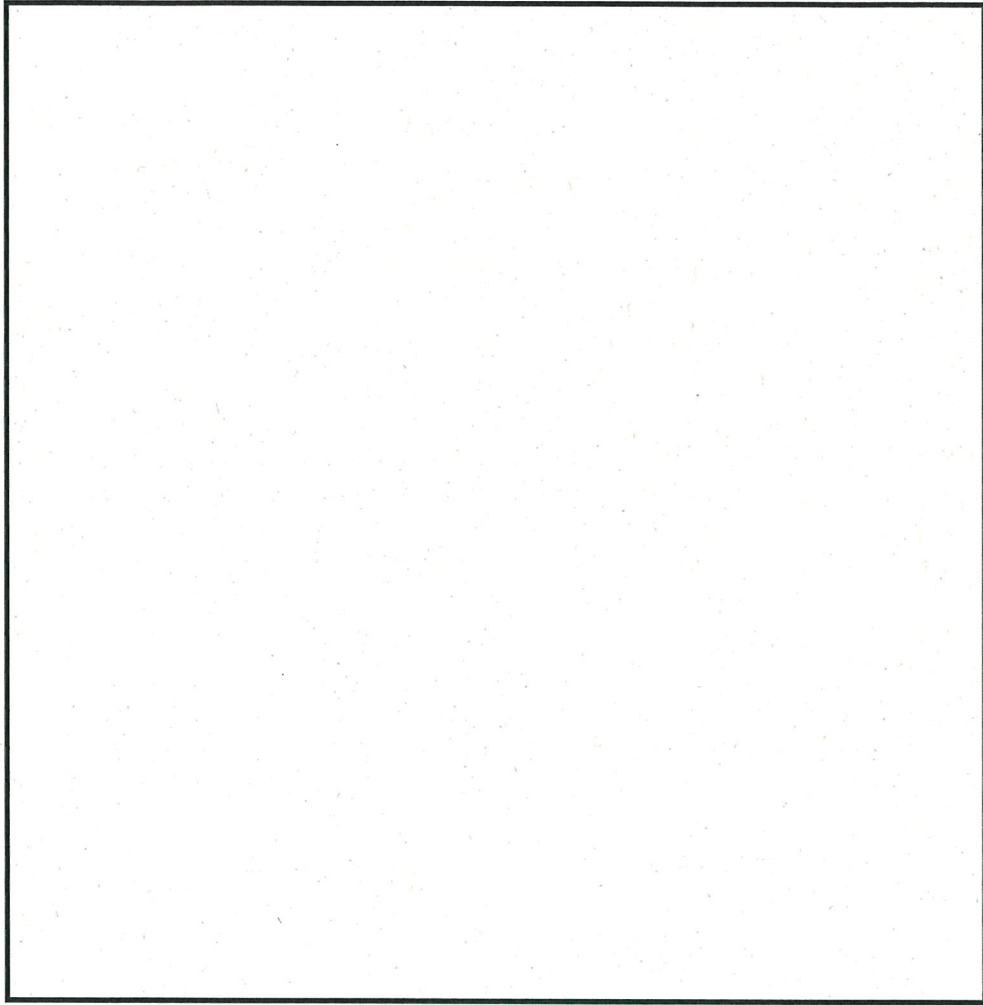
第 2.5.4-10 図 MSF-32P 型全体モデル要素分割図



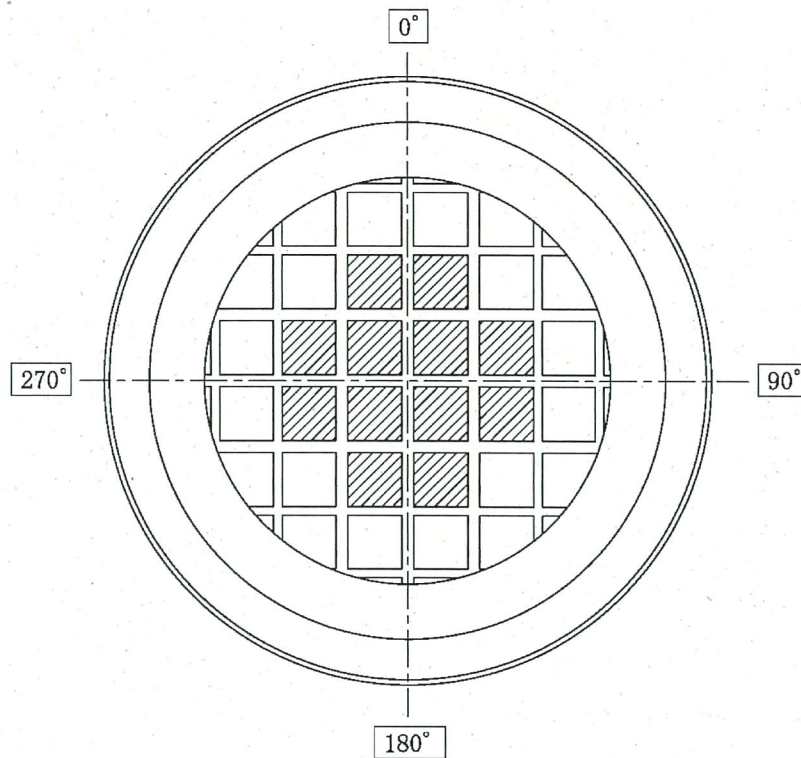
(単位：mm)



(注) ⊗ は制御棒案内シンプル等であり、発熱はない。

第 2.5.4-11 図 MSF-32P 型燃料集合体モデル形状図

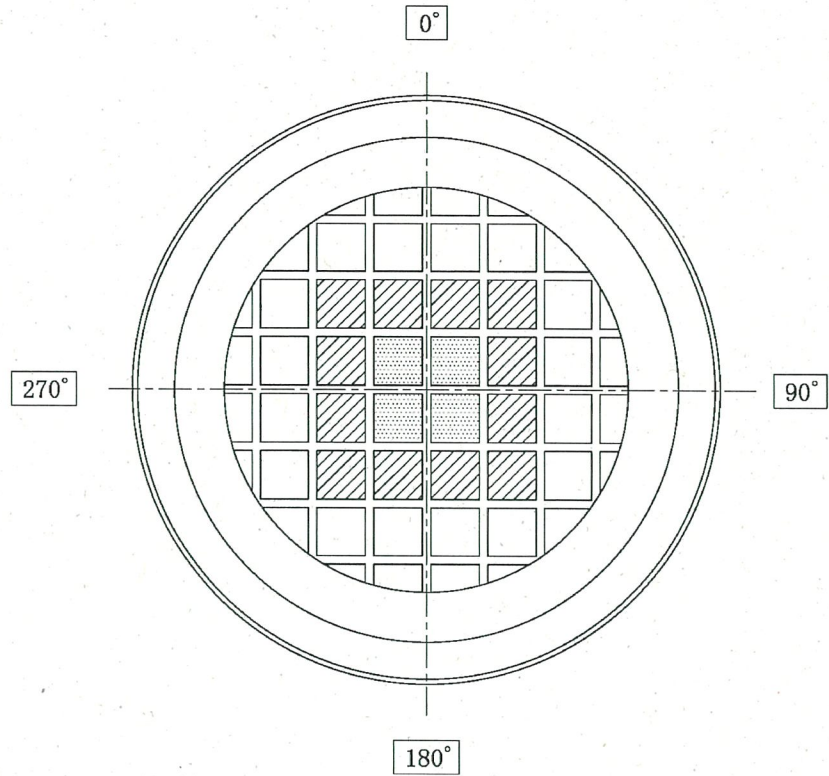





第 2. 5. 4-12 図 MSF-32P 型燃料集合体モデル要素分割図



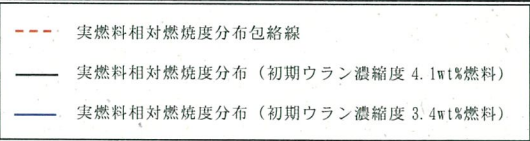
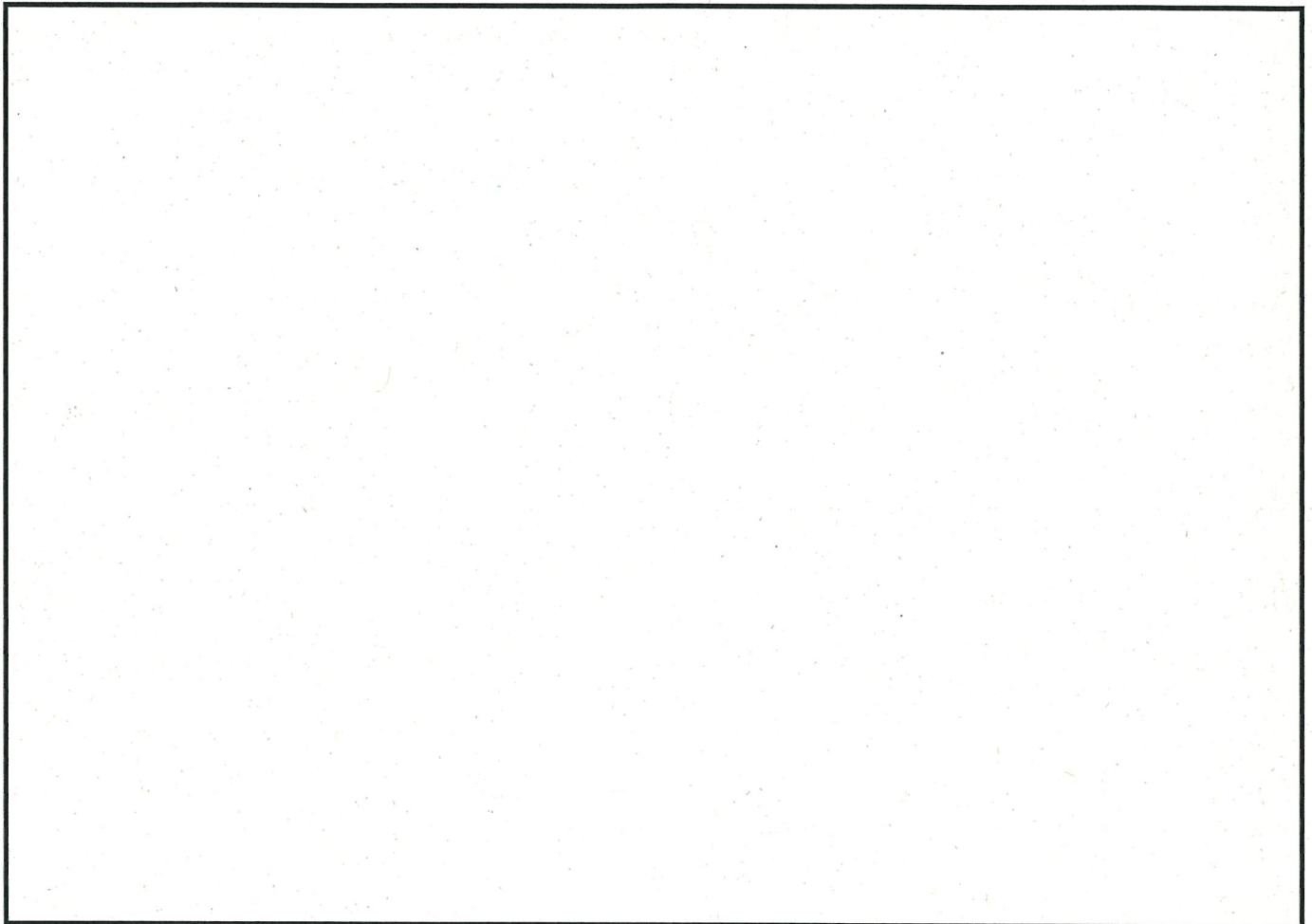
-  : 最高燃焼度の崩壊熱量(中央部 12 体)
-  : 平均燃焼度の崩壊熱量 (24 体分) から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量 (12 体分) を差し引き、外周部の収納体数 (12 体) で平均化した崩壊熱量

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



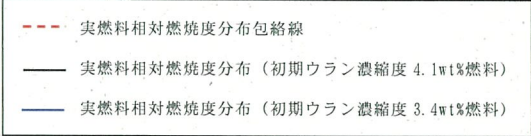
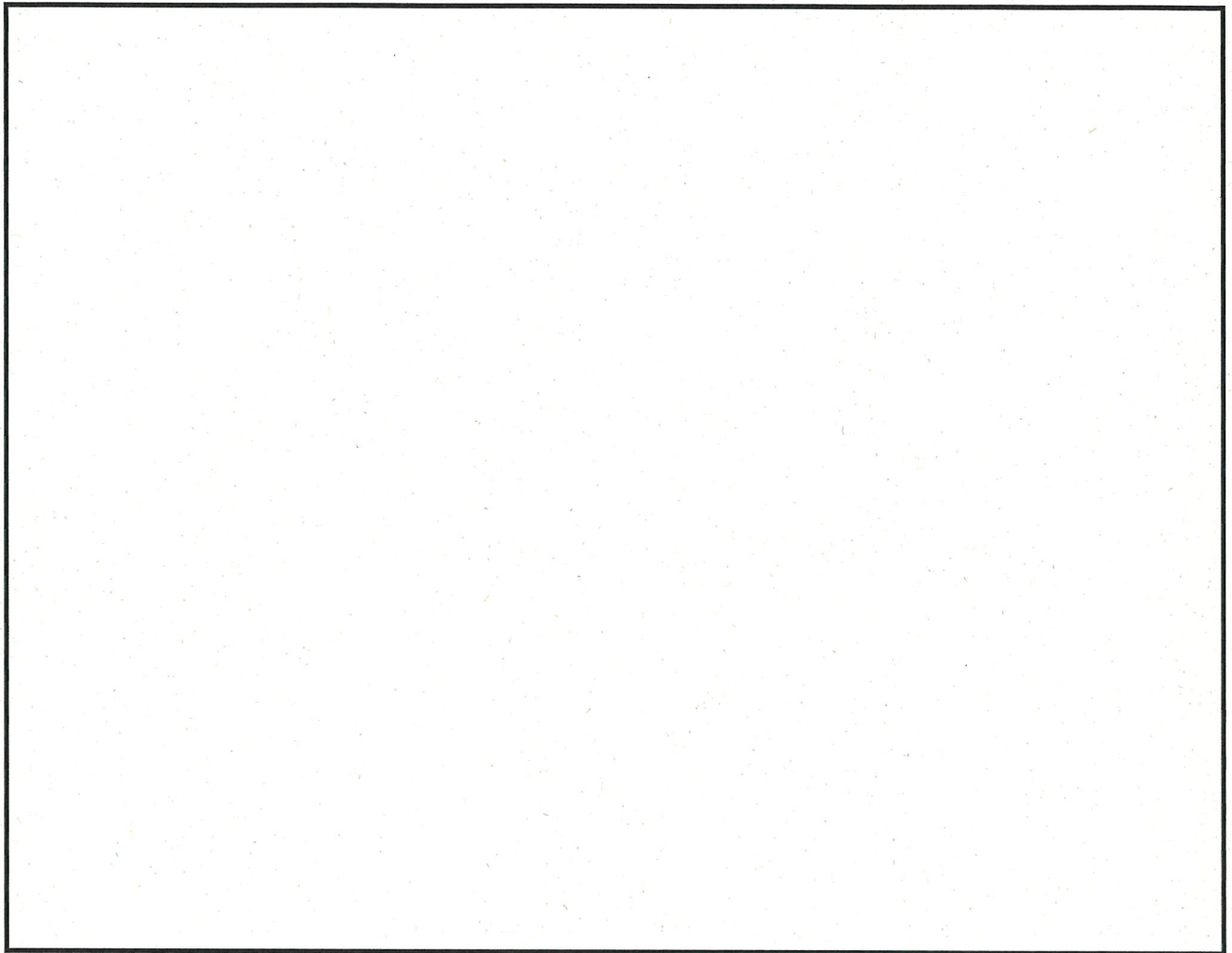
-  : 14×14 型 48GWd/t 燃料における最高燃焼度の崩壊熱量
(中央部 16 体のうち中心 4 体)
-  : 中央部 16 体の崩壊熱量が 14×14 型 48GWd/t 燃料における
平均燃焼度の崩壊熱量 16 体分となるように調整した崩壊熱量
(中央部 16 体のうち中心 4 体を除く 12 体)
-  : 14×14 型 39GWd/t 燃料における平均燃焼度の崩壊熱量
(外周部 16 体)

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



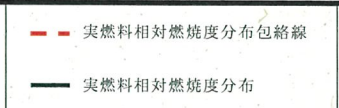
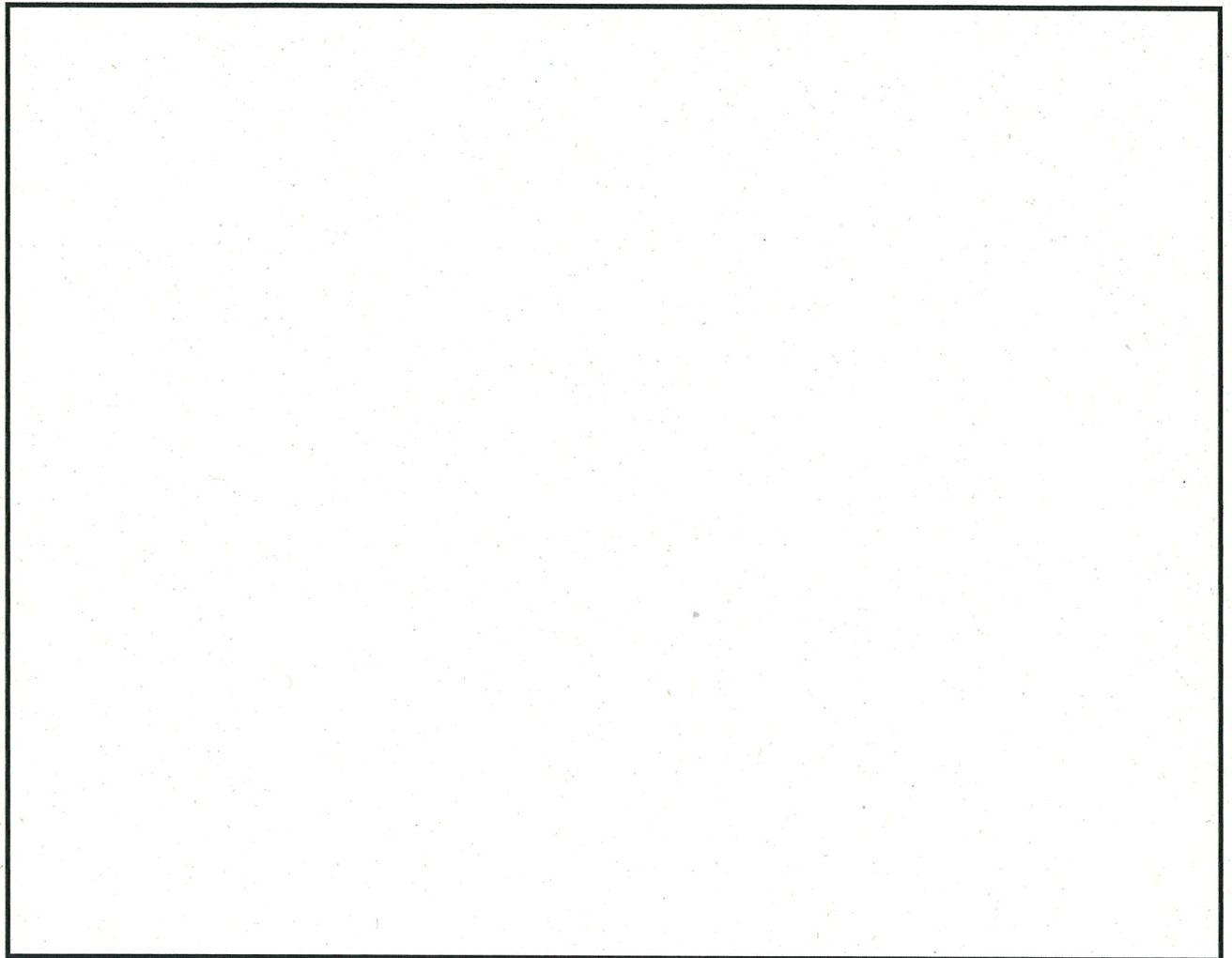
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.4-15 図 1 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定（1/3）



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

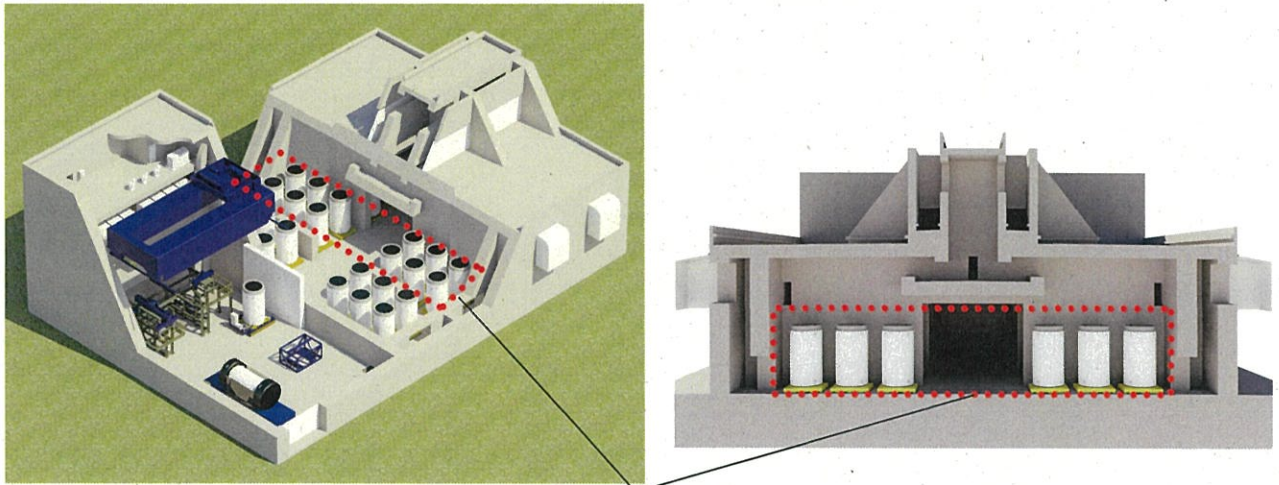
第 2.5.4.-15 図 2号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (2/3)



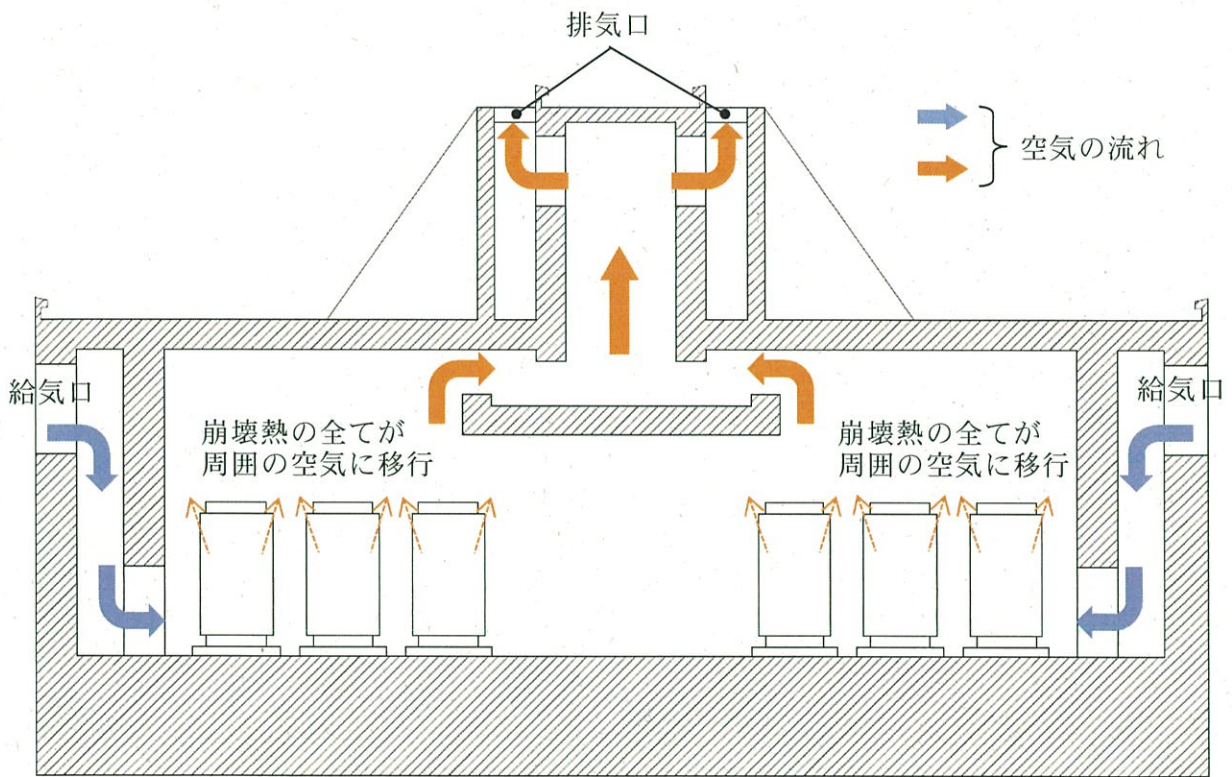
補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2.5.4-15 図 3 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定 (3/3)

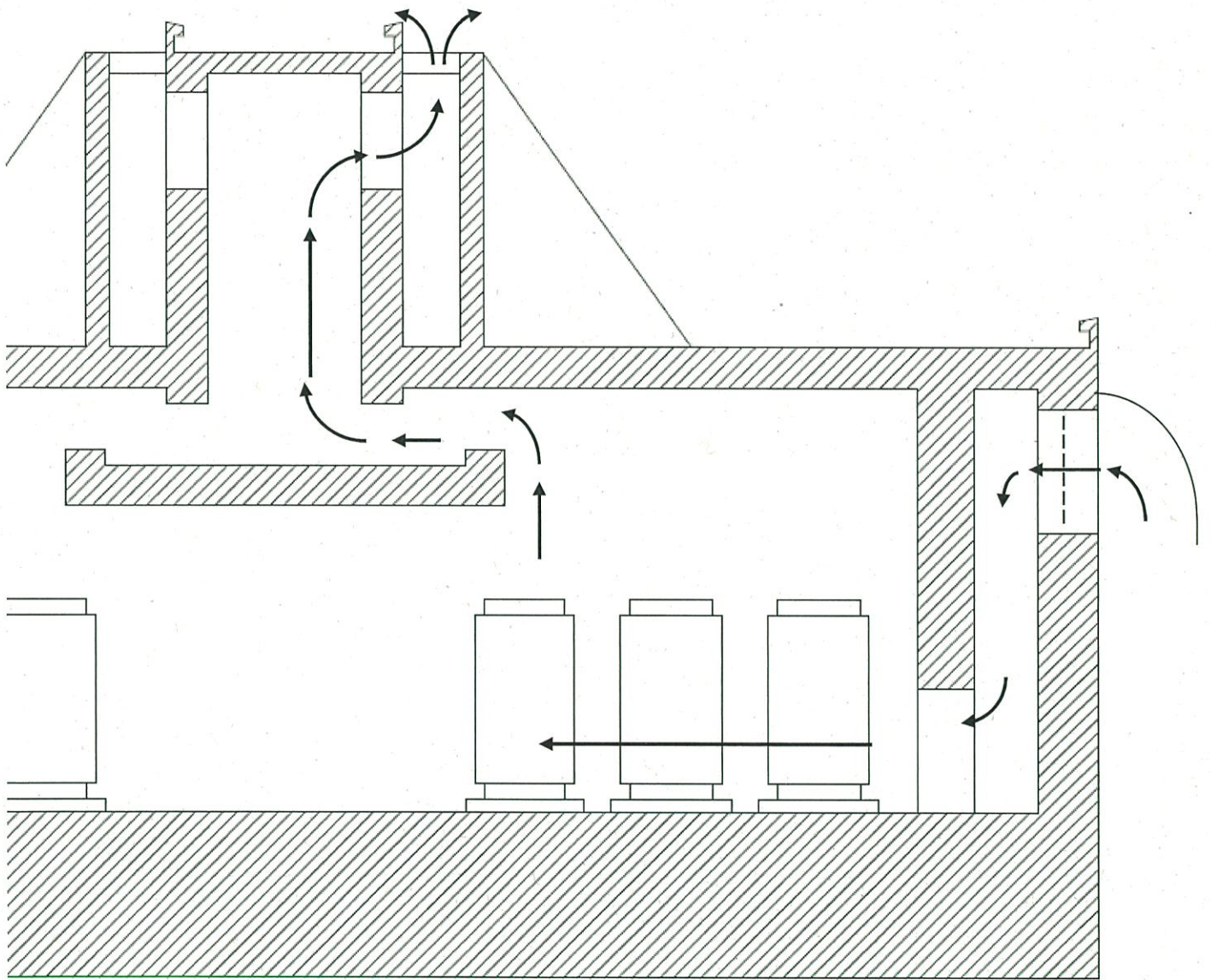
乾式貯蔵建屋のイメージ図



評価断面



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。

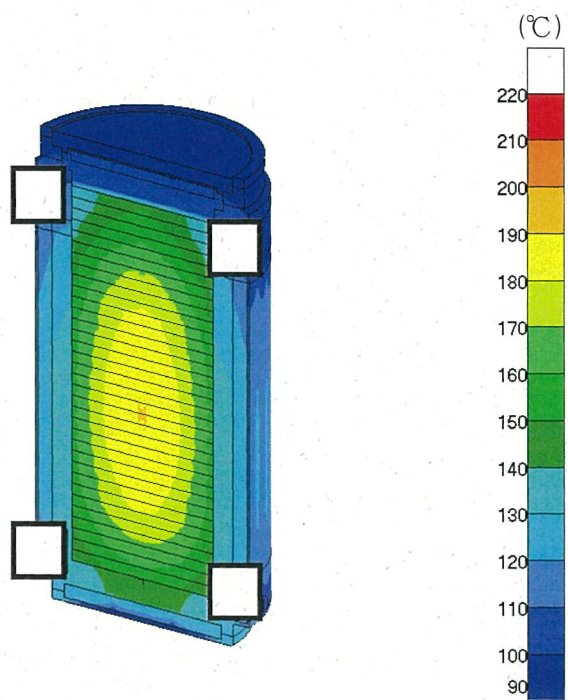
c. 乾式貯蔵建屋

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。

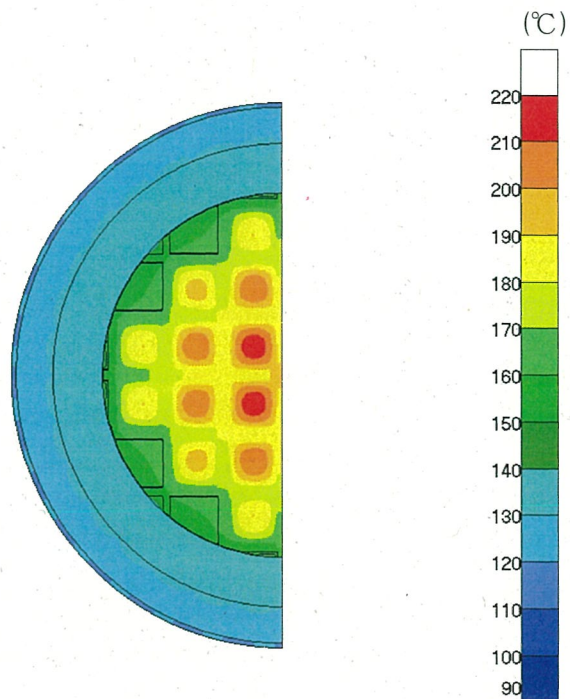
第 2.5.4-13 図及び第 2.5.4-14 図に示すように、最も厳しい評価となる燃料仕様を収納した場合において、第 2.5.4-5 表に示すとおり乾式キャスク各部及び使用済燃料被覆管温度は評価基準を満足している。また、乾式貯蔵建屋の除熱評価で算出した結果（排気温度）が、乾式キャスクの除熱評価で設定している周囲温度（50℃）以下であり、乾式貯蔵建屋は乾式キャスクの除熱機能を阻害しない。なお、乾式貯蔵建屋の除熱評価にあたっては、MSF-24P 型及び MSF-32P 型の 2 型式の乾式キャスクの収納制限における最大発熱量（MSF-24P 型：15.8kw、MSF-32P 型：14.8kw）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

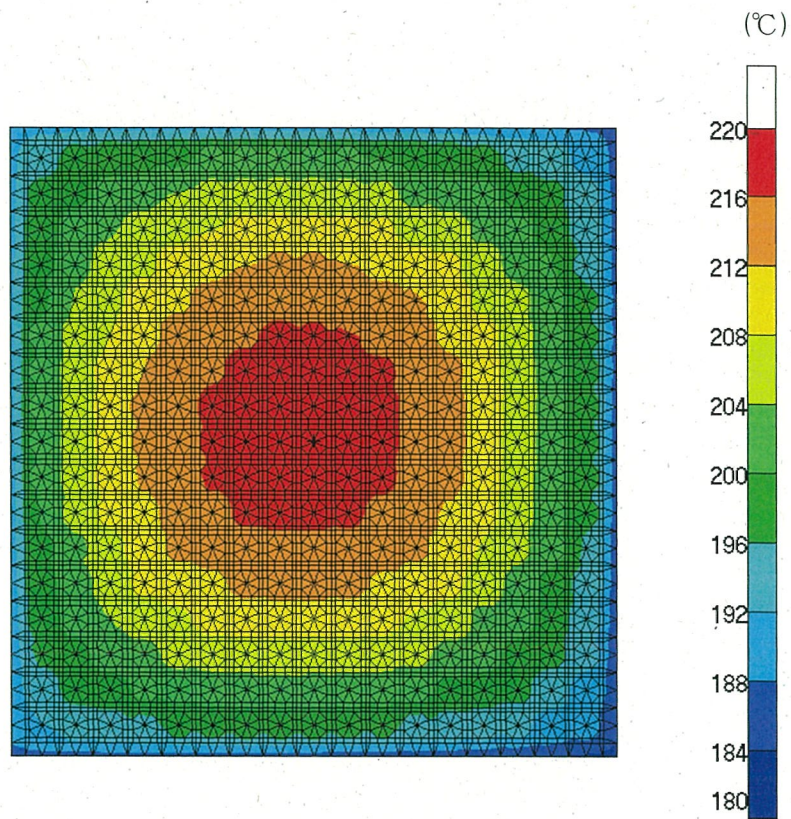


(全体)

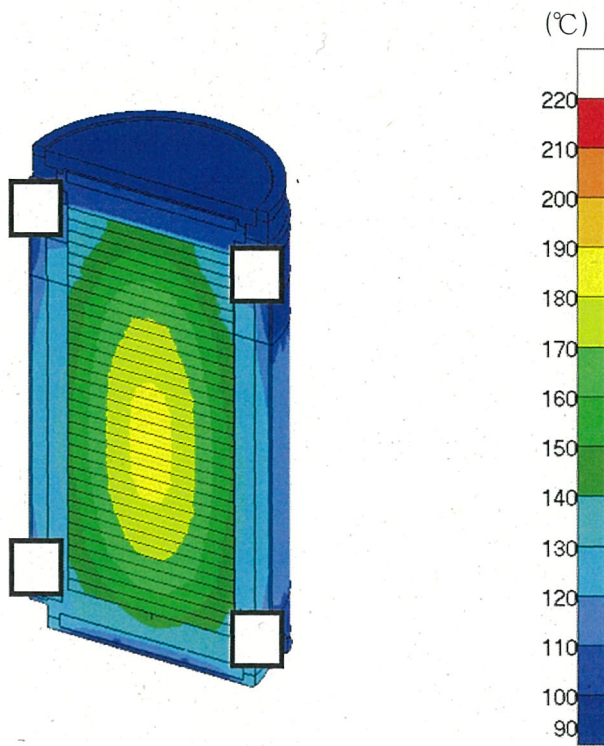


(燃料集合体最高温度位置断面)

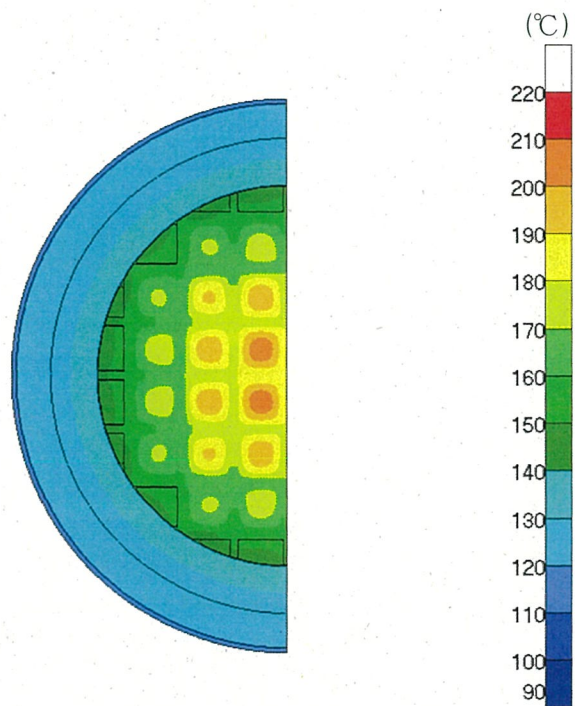
第 2. 5. 4-18 図 MSF-24P 型除熱解析結果 (全体モデル)



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

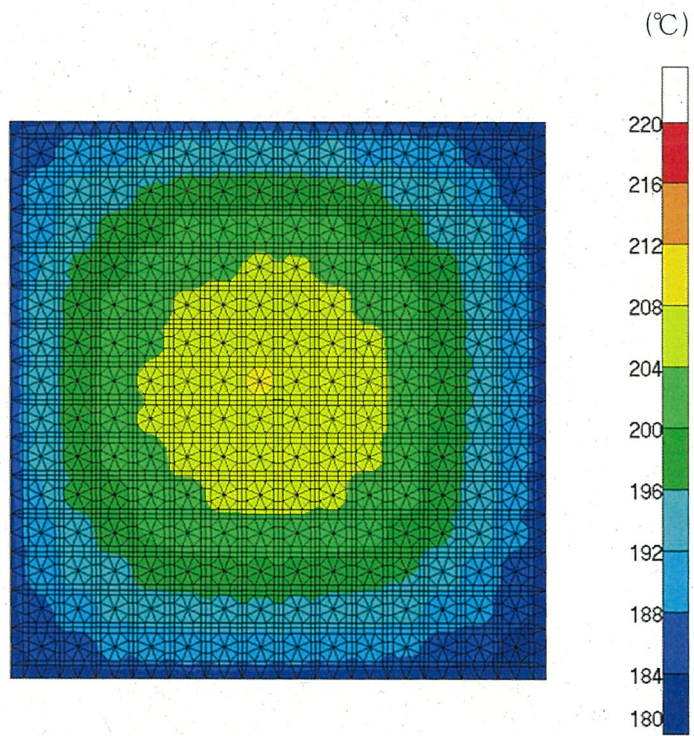


(全体)



(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。

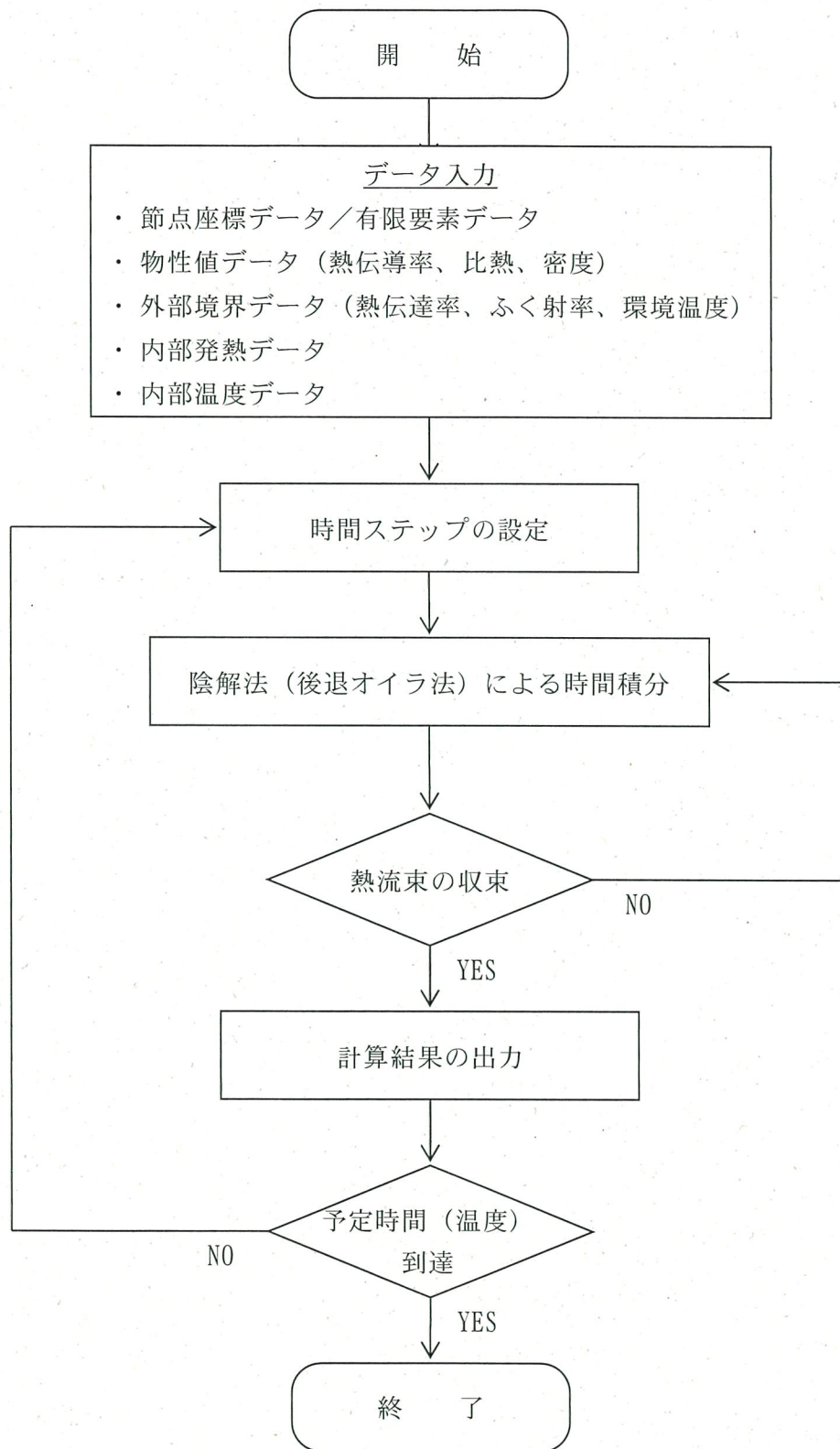
iii 解析フロー

代表的な解析フローを第 2.5.4-22 図に示す。

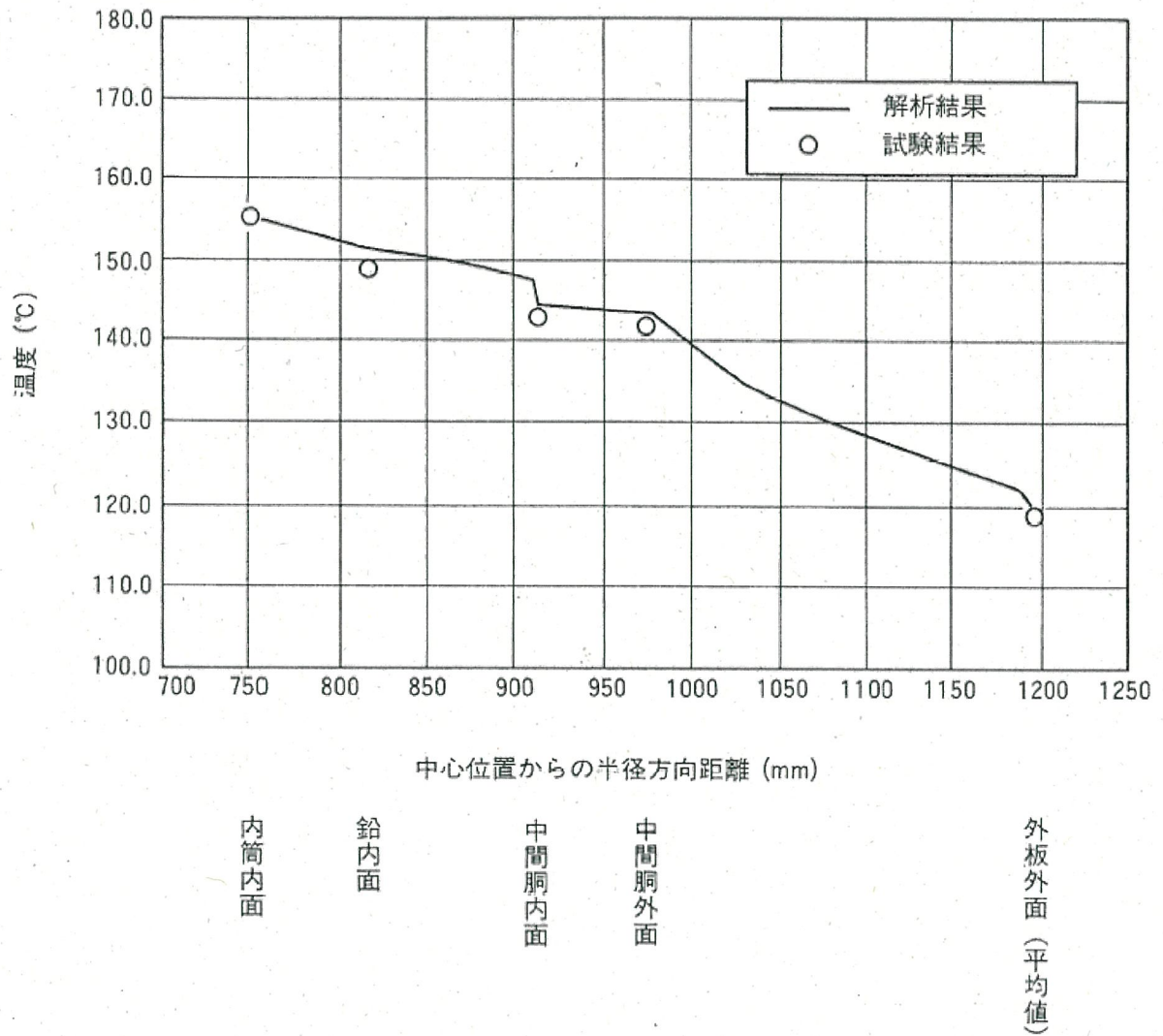
iv 使用実績及び検証

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

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》

番号	安全審査資料		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。)
	記載箇所	記載内容			
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%以下)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。	本文献に示される米国の漏えい燃料発生率は、乾式キャスクと同様貯蔵での実績、及び乾式貯蔵に比べ厳しい条件下にある軽水炉(国内)における漏えい燃料発生率を考慮した上で保守的に設定しており、参考文献として妥当である。
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、以下のクマツセンの式 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性能評価方法を、放射性物質の放出率を評価する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。	乾式キャスクの蓋閉空間にはヘリウムが充填される。本文献に示されるクマツセンの式は、乾式キャスクの蓋シール部の気体の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、クマツセンの式を用いた漏えい評価は乾式キャスクの閉じ込め性能評価に多くの実績を有しており、妥当である。
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 TECHNICAL CATALOG", Technetics Group, (2017)。	金属ガスケットのシール性能(カログ値)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。	本文献は、MSF-24P型及びMSF-32P型に用いる金属ガスケットのメーカーカATALOGであり、参考文献としてある。 なお、参考文献4の電中研報告を考慮し、メーカーカATALOG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。
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性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ウン・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27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、内被材及びニコル合金)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、定期的な密封性能を測定した結果、試験開始から19年以上が経過(ラウン・ミラー・パラメータ(LMP)=7942)しても密封性能の劣化は無く、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。	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、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ATALOG値より保守的な $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 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

《臨界防止》

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 えていいる。)
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) 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向コー ドシステムに含まれる KENO-VIコードを用い る。	「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> 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 (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	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 (鋼板、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 (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	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 (鋼板、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

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3 3.使用する解析コード a.解析コード (a)ORIGEN2コード	<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 送容器的燃焼計算等に広く用いられている。	(国際規格/研究機関論文等) ・ "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).	ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials", Nuclear Technology, Vol.62, (1983).	ORIGEN2コードにより計算した燃焼熱と、ANS標準値を比 較した結果は、よく一致している。	PWR燃料を対象にORIGEN2コードにより計算した燃焼熱と、ANS標準値を比 較した結果は、よく一致している。	参考文献として妥当である。 - (使用マニュアルのため、省略)
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	<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", Nuclear Technology, Vol.62, (1983).	ORIGEN2コードにより計算した燃焼熱と、ANS標準値を比 較した結果は、よく一致している。	PWR燃料を対象にORIGEN2コードにより計算した燃焼熱と、ANS標準値を比 較した結果は、よく一致している。	参考文献として妥当である。 - (使用マニュアルのため、省略)	
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	<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).	DOT3.5コードについて、DOT3.5コードを使用し た計算結果と計算値は比較的単純形状部である胴中央(モデル化の影響が少ない) では良く一致している。複雑形状部(端部)は計算値が数十%高い値となっている。 全体的に計算値と測定値は良く一致している。	DOT3.5コードを使用し た計算結果と計算値は比較的単純形状部である胴中央(モデル化の影響が少ない) では良く一致している。複雑形状部(端部)は計算値が数十%高い値となっている。 全体的に計算値と測定値は良く一致している。	参考文献として妥当である。 - (使用マニュアルのため、省略)	
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	<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 型輸送容器的放射性遮蔽 特性(1)概量率」(一社)日本原子 力学会「昭和56年秋の分科会」, C17, (1981).	TN-12型輸送容器(PWR燃料を12体収納)について、DOT3.5コードを使用し た計算結果と計算値は比較的単純形状部である胴中央(モデル化の影響が少ない) では良く一致している。複雑形状部(端部)は計算値が数十%高い値となっている。 全体的に計算値と測定値は良く一致している。	DOT3.5コードを使用し た計算結果と計算値は比較的単純形状部である胴中央(モデル化の影響が少ない) では良く一致している。複雑形状部(端部)は計算値が数十%高い値となっている。 全体的に計算値と測定値は良く一致している。	参考文献として妥当である。 - (使用マニュアルのため、省略)	
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	<16条-別添(3)遮蔽-33ページ> v. 断面積ライブラリ MATXS-LIB-J33 MATXS-LIB-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。MATXS-LIB-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⁾ 。	・ JENDL-3.3 核分裂中性子源を用いた遮 へい透過率及び二次元遮蔽係 計算コードによる輸送容器適用 断面積セットSFCX-J33の評価性 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).	輸送容器体系内部に ²³⁵ Cf線源設置したモデルについて、JENDL-3.3に基づく断 面積ライブラリ SFCX-J33 を使用した DOT3.5 コードによる解析結果と、ガンマ 線及び中性子線量当量率を測定した結果はよく一致している。	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。乾式 キャスク評価に用いる断面積ライブラリ MATXS-LIB- 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。 - (使用マニュアルのため、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

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	(国際規格/研究機関論文等) ・(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 SNJ1-2012)」, (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 (トラネオン) ・GLF1 (銅、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℃~375℃の温度範囲において、ステンレス鋼は、-30℃~425℃の温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は、-30℃~350℃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 (トラネオン) ・GLF1 (銅、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、乾式キャスク各部分材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。	
2			項 目 評価基準 間、外筒、一次蓋及び二次蓋 350℃以下 ¹⁾ 中性子遮蔽材 (レジン) 149℃以下 ²⁾ 金属ガスケット 130℃以下 ³⁾				○本文献は、乾式キャスクで使用す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。
3			バスケット 250℃以下 ⁴⁾ 使用済燃料被覆管 275℃以下 ⁵⁾			金属ガスケット (外被材: アルミニウム、ニッケルスプリング; 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130℃~140℃で保持し、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は変化はなく、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積の外径(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℃~140℃)は、乾式キャ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、乾式キャ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。
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).	三菱重工業製の乾式キャスク(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の設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ばく露条件を模倣した条件下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、乾式キャスク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。	
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).	・照射劣化 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 $10^{14}\sim 10^{15}\text{cm}^{-2}$ 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、高温条件下に長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。約300℃では照射硬化の回復の可能性がある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℃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下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、乾式キャスクに収納する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。		
6	別添4 3.使用する解析コード (b)ABAQUSコード		<16条-別添4(除熱)-37ページ> i 概要 ABAQUSコード ¹⁾ は、米国Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在はDassault-Systemes	・Dassault Systemes, "ABAQUS Analysis User's Manual(6.12)", (2012).	一 (使用マニエールのため、省略)	一 (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収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。
---	------------------------------------	---	--	--	--

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

《長期健全性》 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	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こと考 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。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/cm² であることから照射脆化の影響はない。</p> <p>(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 (MSF-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。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^{16} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。</p> <p>(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。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、外筒では 3.3×10^{12} 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>様々な組成の鋼及び合金鋼の照射脆化を引いたシヤルビー衝撃試験の結果、中性子照射量が 10^{16} n/cm² 以下までは、未照射材の機械的特性 (遷移温度) との有意な差はみられない。</p>	<p>参考文献としてこの妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であること考えている。)</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²⁾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>(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 (MSF-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²⁾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>(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²⁾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>(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²⁾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>(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²⁾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 N J 1-2012)」, (2012).</p>	<p>炭素鋼は -30℃ ~ 375℃ の温度範囲において、ステンレス鋼は -30℃ ~ 425℃ の温度範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は -30℃ ~ 350℃ 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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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) 	<p>○本文献は、乾式キャスク各部分材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	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】 乾式キャ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。 ⁹⁾ <16 条-42 ページ> (7) 金属ガスケット 【化学的影響】 また、10 年間海浜条件下で大気ばく露させた際の平均浸食深さ及び最大孔食深さ 3) を用い、設 計貯蔵期間中の浸食深さと孔食深さを評価した結果、それぞれ約 0.025mm 及び約 0.33mm であり、外被材の製造公差差を含めても、板厚 0.5mm より小さいため、閉じ込め機能に影 響はない。	(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。乾式キャ 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する炭素鋼及びニッケルクロモリブデン 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タ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 金属キャ スク貯蔵技術検証試験 報告書 最終報告」, (2004)。	アルミニウム (Al100) の性能について、10 年間海浜条 件で大気ばく露させた試験における平均浸食深さ及び最 大孔食深さの計測結果が記載されている。 ・平均浸食深さ: 0.0041mm/10 年 ・最大孔食深さ: 0.18mm/10 年	○各材料において、6 ヶ月間の腐食試験により腐食量 を評価し、60 年間 (キャスク安全評価期間) で の腐食量を算出し、設計寸法に対して影響がないこ とを示しており、参考文献として妥当である。 ○本文献結果は、設計上の燃料破損率 0.1% に対し て 1% 破損の条件、キャスク内部の最高温度 (燃料集 合体最高温度、MSF-24P 型約 220°C、MSF-32P 型約 210°C) に対して試験温度が 270°C の条件の 期間中での環境に比べて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。 ○参考文献におけるキャスクと、今回の MSF-24P 及 び 32P 型で、空間容積が同等であるため、適用す ることは妥当である。
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 (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 (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°C~250°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。	○バスケットプレート及びびバスケットサポータに使 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、低温度性を含ま、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、クリーブ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)} 。 <16 条-39 ページ> (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 ⁻⁵ 程度であり無視し得るほど小さいため、臨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 = $t \times \phi \times t$ (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) 遮断解析結果(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-Data/Code 2002-020.(2002).	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、クリーブ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)。	○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)} 。 <16 条-44 ページ> (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 (AESJ-SC-F002：2010)」、(2010)。	○本文献の結果は、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、顕著な機械的性質変化は見られない 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ナー 【照射影響】 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバナ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、顕著な機械的性質変化は見られない 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) 貯電中央研究所, (1997)。	○本文献の結果は、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。本文献の結果は、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⁾</p> <p>(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⁾</p> <p>(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>	(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>淡水中における炭素鋼の腐食における酸化剤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。)
1.1	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	安全審査資料	<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、中性子照射量が質量減損は見られないことが示されており ^{10, 12)} 、最も中性子照射量が低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。	(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確証試験)報告書 ¹⁾ 、(2003)。	閉鎖系環境でのエポキシ系レジンの加熱試験及び照射試験により、エポ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 : 中性子遮蔽材加熱温度(K) 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ポ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-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低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。	"Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment", Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).	閉鎖系環境でのエポ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はなく、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ポ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-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低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。	"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-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低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。	"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^{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^{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。	

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	記述箇所	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 考えられている。)
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ウンソン・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 ¹⁹⁾ 。	<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 ¹⁹⁾ 。	「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、 $LMP = 11.0 \times 10^3 + 150K$ 、温度 150°C $LMP = T (20 \times \log(t))$ 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 ($\phi 5.5\text{mm}$) 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 ($\phi 5.6\text{mm}$) と同等である。方、次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径 ($\phi 10\text{mm}$) 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】 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 ¹⁹⁾ 。	<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 ¹⁹⁾ 。	(一) 財団法人中央研究所, 「平素 (合金) の性能について、ガスケット部の温度を約 160°C で一定とし、定期的な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。	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°C で一定とし、定期的な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 ($\phi 6.1\text{mm}$) 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 ($\phi 10\text{mm}$) 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、乾式キヤスクの設計貯蔵期間中の熱分解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】 大気と接触する二次蓋金属ガスケットの外側については、約3年間の塩水噴霧試験を実施し、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが確認されている ¹⁷⁾ 。	<16条-42ページ> (7) 金属ガスケット 【化学的影響】 大気と接触する二次蓋金属ガスケットの外側については、約3年間の塩水噴霧試験を実施し、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが確認されている ¹⁷⁾ 。	小崎明朗, 「使用済燃料貯蔵中の腐食性に関する海外動向他」, (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】 伝熱フィンに使用する銅は、中性子照射量が 10^{16} n/cm^2 までは、顕著な機械的特性変化は見られない ¹⁸⁾ 。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 $1.6 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ であることから照射脆化の影響はない。	<16条-42ページ> (8) 伝熱フィン 【照射影響】 伝熱フィンに使用する銅は、中性子照射量が 10^{16} n/cm^2 までは、顕著な機械的特性変化は見られない ¹⁸⁾ 。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 $1.6 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ であることから照射脆化の影響はない。	"Low-Lead Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys", ASTM STP888, (1986).	銅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/cm^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銅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照射量 (10^{14} n/cm^2) を上回る中性子照射量 (10^{16} n/cm^2) とビッカース硬さの関係を示されており、機械的特性への影響が低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】 銅は、設計貯蔵期間中の温度条件において、設計用強度・物性値が規定 ¹⁹⁾ 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。	<16条-42ページ> (8) 伝熱フィン 【熱的影響】 銅は、設計貯蔵期間中の温度条件において、設計用強度・物性値が規定 ¹⁹⁾ 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。	(一) 財団法人規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267: 2015)」, (2015).	- 40°C ~ 200°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。	○本文献は、銅の設計用強度及び物性値の規格値、この温度範囲 (-40°C ~ 200°C) 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】 銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である ²⁰⁾ 。ことから、銅は腐食することはなく、炭素鋼が選択的に腐食される。	<16条-42ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】 銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である ²⁰⁾ 。ことから、銅は腐食することはなく、炭素鋼が選択的に腐食される。	(公) 株式会社防衛協会編, 「材料探査学入門」, 丸善 (株), (1993).	銅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。	○本文献は、金属の熱力学的データを示すデータベースであり、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	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	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⁾ 。	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	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	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 $1.5 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ であり、炉内の中性子照射量 $(10^{17} \sim 10^{22} \text{ n/cm}^2)$ 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強度の低下、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 ²³⁾ 。ことが示されており、燃料被覆管中の水蒸気物再配向に依る制限以内では、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 ²³⁾ 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 ²²⁾ 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よう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 ²³⁾ 。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 ²²⁾ 。	総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 核燃料サイクル開発委員会 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)。	・照射劣化 貯蔵期間中の中性子照射量は $10^{18} \sim 10^{22} \text{ cm}^2$ 程度と評価されており、炉内照射に伴う中性子照射量 $10^{17} \sim 10^{22} \text{ cm}^2$ 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。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℃では照射硬化の回復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。 ・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、乾式キャスクの伝熱フィン及び外筒又は外筒と同じ材料である鋼及び炭素鋼を用いた腐食試験の結果が示されている。本試験は、貯蔵期間中の伝熱フィンと同じ淡水条件下(中性子遮蔽材により生じる水分に相当)・密閉環境であるため、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 通常取扱いは時に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>0.3m 落下 における 衝撃加速度</th> <th>0.3m 落下 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>3.3g^(a)</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^(a)</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^(a)</td> <td>21.4g (水平落下)</td> <td>200 MPa</td> <td>Sy</td> <td>595 MPa⁽¹⁾ (7.99e+4, 205°C)</td> </tr> <tr> <td>e. 二次落下の衝突</td> <td>1g^(a)</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^(a)</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^(a)</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	0.3m 落下 における 衝撃加速度	0.3m 落下 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	3.3g ^(a)	21.4g (水平落下)	200 MPa			b. 貯蔵架台への衝突	3.1g ^(a)	28.6g (頭部垂直 落下)	118 MPa			d. 横倒し時の衝突	1.1g ^(a)	21.4g (水平落下)	200 MPa	Sy	595 MPa ⁽¹⁾ (7.99e+4, 205°C)	e. 二次落下の衝突	1g ^(a)	28.6g (頭部垂直 落下)	118 MPa			f. 緩衝体 (上部) の衝突	1g ^(a)	21.4g (水平落下)	200 MPa			f. 緩衝体 (下部) の衝突	1g ^(a)	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ンク試験後のガス放出率、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。)</p> <p>○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	0.3m 落下 における 衝撃加速度	0.3m 落下 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	3.3g ^(a)	21.4g (水平落下)	200 MPa																																													
b. 貯蔵架台への衝突	3.1g ^(a)	28.6g (頭部垂直 落下)	118 MPa																																													
d. 横倒し時の衝突	1.1g ^(a)	21.4g (水平落下)	200 MPa	Sy	595 MPa ⁽¹⁾ (7.99e+4, 205°C)																																											
e. 二次落下の衝突	1g ^(a)	28.6g (頭部垂直 落下)	118 MPa																																													
f. 緩衝体 (上部) の衝突	1g ^(a)	21.4g (水平落下)	200 MPa																																													
f. 緩衝体 (下部) の衝突	1g ^(a)	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 通常取扱いは時に想定するべき事象の評価	安全審査資料 第 2.7-23 図 検査架台への衝撃変形	<p><16 条 - 100,103 ページ> (1) 検査架台への衝撃 検査架台への衝撃時には、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) 横倒し時の衝撃 横倒し時の衝撃時には、第 2.7-25 図に示すたて起し架台の剛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>断面が一様な棒の両端に力 W が作用した際の変形量 λ は、以下の関係である。 $\lambda = \frac{\beta W}{EA}$ 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、一様断面の構造物に力が作用した場合の式である。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し架台の一部を一様断面な構造物とみなして計算を行っている。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、 $W = \frac{EA}{\beta} \lambda$ と表される。 また、W=Kλ 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) 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).	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⁾	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重の金属ガスク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次側の金属ガスクケットがリークしていた。1次側の金属ガスク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、蓋部の金属ガスクケット外側が腐食したためである。	○本文献での試験は、乾式キャスクで行われている。また、金属ガスクケット断面外径(φ4mm)だが、漏洩率は其機大(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。	
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貫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。2.5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クケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスクケット断面外径(φ4mm)だが、漏洩率は其機大(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からの水平落下試験及び後部トラン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かった。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クケットと同じ材料、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。

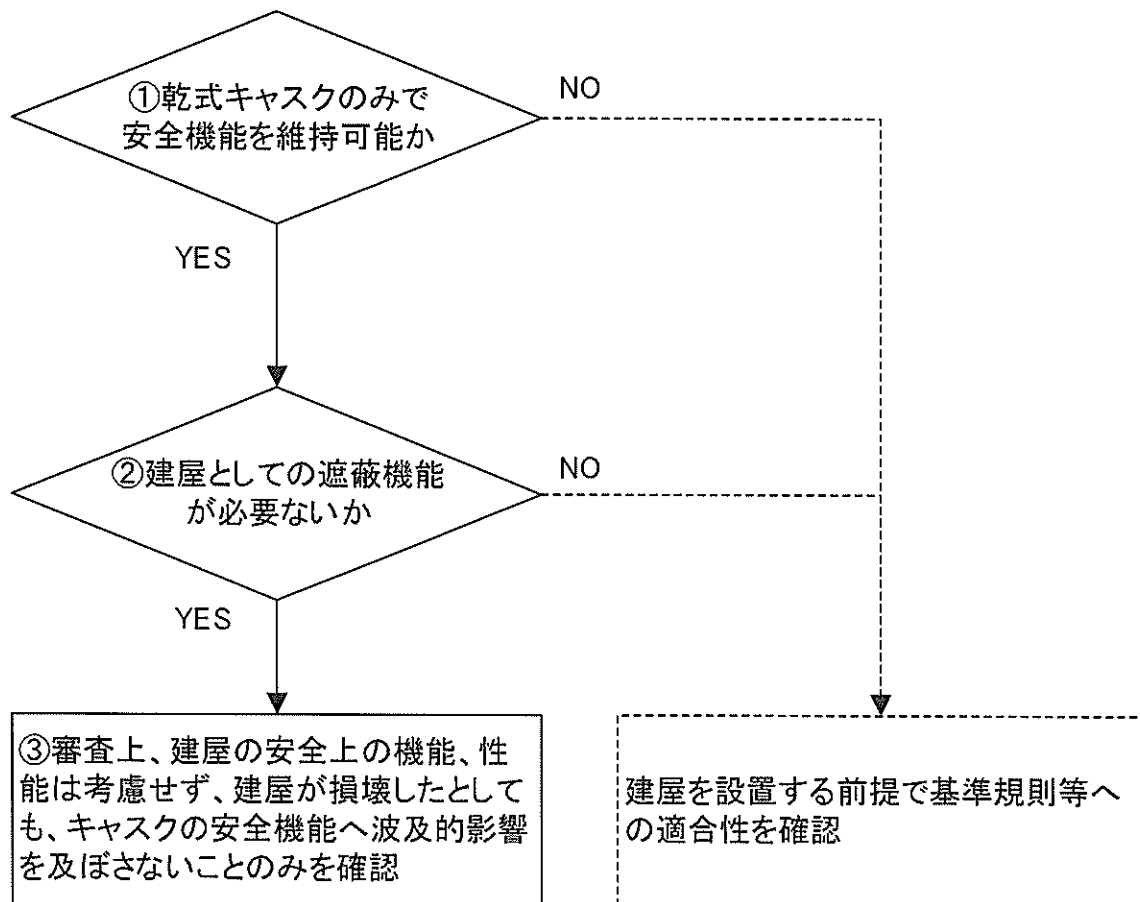


図1. 第8回 原子力規制委員会の審査方針で示された内容のフロー

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 $50\mu\text{Sv}$ 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[μSv](現実的な評価)		
	乾式貯蔵施設	既設建屋	合算
B点 ^(注1) (420m)	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 $43\mu\text{Sv}$ +中性子線 $135\mu\text{Sv}$ =約 $180\mu\text{Sv}$

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。

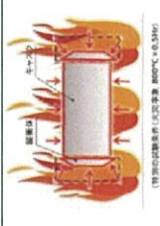
以 上

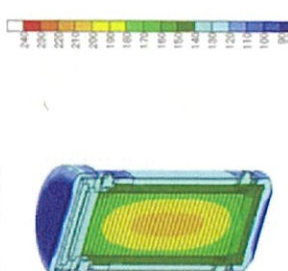
乾式キャスク単体の安全機能 (原子力規制委員会での審査方針を踏まえた対応) 【影響評価】

【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。

<p>評価概要</p>	<p>MSP-32P 型核燃料輸送物設計承認申請書</p> <p>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、パ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。</p>	<p>発電用原子炉設置変更許可申請書 (影響評価)</p> <p>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、電巻による設計飛来物衝突時に重心位置に生じる衝撃荷重 (加速度) を計算した。その衝撃荷重 (乗用車 3.16×10⁶N) が、0.3m落下評価時に生じる衝撃荷重 (0.3m頭部垂直 3.672×10⁷N、水平落下 2.830×10⁷N) を下回るため、乾式キャスクの安全機能が維持されることを確認した。</p>																																																														
<p>評価内容</p>	<p>【衝撃荷重の計算方法】</p> <p>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台 (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。)</p> <p>落下時の衝撃荷重 (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。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>落下姿勢</th> <th>衝撃荷重 F(N)</th> <th>加速度 (G)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.3m 頭部垂直</td> <td>$F_v: 3.672 \times 10^7$</td> <td>27.6</td> </tr> <tr> <td>0.3m 水平</td> <td>$F_H: 2.830 \times 10^7$</td> <td>21.3</td> </tr> </tbody> </table> <p>【応力計算方法】</p> <p>(1) 容器本体</p> <p>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。</p> <p>(2) パケット及び燃料集合体</p> <p>設計加速度をもとに工学式を用いた応力評価を行う。</p> <p>【応力計算結果】</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">項目</th> <th colspan="2">解析結果(MPa)</th> <th rowspan="2">解析基準</th> <th rowspan="2">解析値 (MPa)</th> </tr> <tr> <th>0.3m 頭部垂直</th> <th>0.3m 水平</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>遮蔽・除熱</td> <td>44</td> <td>68</td> <td>1.5S_m</td> <td>183</td> </tr> <tr> <td>遮蔽*</td> <td>50</td> <td>86</td> <td>f_b</td> <td>156</td> </tr> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>54</td> <td>58</td> <td>S_y</td> <td>185</td> </tr> <tr> <td>閉果</td> <td>7</td> <td>11</td> <td>S_m</td> <td>36</td> </tr> <tr> <td>閉果</td> <td>118</td> <td>200</td> <td>σ_y</td> <td>595</td> </tr> </tbody> </table> <p>(参考) S_y=設計降伏応力 (規格値)、S_m=設計応力強さ (規格値) (S_m=S_y/1.5)、f_b=S_y/1.5、σ_y=降伏応力 (文獻値)</p> <p>*構造解析上は、外筒の健全性をもって中性子遮蔽材が保持されることを確認している。</p>	落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)	0.3m 頭部垂直	$F_v: 3.672 \times 10^7$	27.6	0.3m 水平	$F_H: 2.830 \times 10^7$	21.3	項目	解析結果(MPa)		解析基準	解析値 (MPa)	0.3m 頭部垂直	0.3m 水平	遮蔽・除熱	44	68	1.5S _m	183	遮蔽*	50	86	f _b	156	閉じ込め	54	58	S _y	185	閉果	7	11	S _m	36	閉果	118	200	σ _y	595	<p>【衝撃荷重の計算方法】</p> <p>設計飛来物 (鋼製材、乗用車) による衝撃荷重 (W_M) 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際しての審査ガイド」で例示されている飛来物の圧潰挙動を無視した Riera の式⁽¹⁾を適用する。なお、乾式キャスクを1質点とみなして、電巻による設計飛来物衝突時に重心位置に生じる衝撃荷重 (加速度) を計算する。</p> $W_M = F_m = m \cdot V/t = m \cdot V^2/L$ <p>ここで、</p> <ul style="list-style-type: none"> F_m: 静的な値として計算した飛来物による衝撃荷重 (N) m: 飛来物の質量 (kg) V: 衝突速度 (m/s) t: t=L/V (飛来物と被衝突体の接触時間) (s) L: 飛来物の最も短い辺の全長 (m) <table border="1"> <thead> <tr> <th>飛来物</th> <th>飛来物の質量 m (kg)</th> <th>衝突速度 V (m/s)</th> <th>飛来物の最も短い辺の全長 L (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>鋼製材</td> <td>135</td> <td>57</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>乗用車</td> <td>2,000</td> <td>47</td> <td>1.4</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注) 飛来物と被衝突体の接触時間を設定し、飛来物の衝突前の運動量と衝撃荷重を等しいとして衝撃荷重を計算する。飛来物による衝撃荷重を大きく見積もるため乾式キャスクを床に閉結した剛体とする。</p> <p>【衝撃荷重の計算結果】</p> <p>衝撃荷重 (W_M) 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。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>飛来物</th> <th>衝撃荷重 W_M (N)</th> <th>加速度 (G)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>鋼製材</td> <td>2.20×10^6</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>乗用車</td> <td>3.16×10^6</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	飛来物	飛来物の質量 m (kg)	衝突速度 V (m/s)	飛来物の最も短い辺の全長 L (m)	鋼製材	135	57	0.2	乗用車	2,000	47	1.4	飛来物	衝撃荷重 W _M (N)	加速度 (G)	鋼製材	2.20×10^6	2	乗用車	3.16×10^6	3
落下姿勢	衝撃荷重 F(N)	加速度 (G)																																																														
0.3m 頭部垂直	$F_v: 3.672 \times 10^7$	27.6																																																														
0.3m 水平	$F_H: 2.830 \times 10^7$	21.3																																																														
項目	解析結果(MPa)		解析基準	解析値 (MPa)																																																												
	0.3m 頭部垂直	0.3m 水平																																																														
遮蔽・除熱	44	68	1.5S _m	183																																																												
遮蔽*	50	86	f _b	156																																																												
閉じ込め	54	58	S _y	185																																																												
閉果	7	11	S _m	36																																																												
閉果	118	200	σ _y	595																																																												
飛来物	飛来物の質量 m (kg)	衝突速度 V (m/s)	飛来物の最も短い辺の全長 L (m)																																																													
鋼製材	135	57	0.2																																																													
乗用車	2,000	47	1.4																																																													
飛来物	衝撃荷重 W _M (N)	加速度 (G)																																																														
鋼製材	2.20×10^6	2																																																														
乗用車	3.16×10^6	3																																																														
<p>安全機能</p>	<p>容器本体</p>	<p>【結論】</p> <p>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。</p> <p>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。</p>																																																														

【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。

<p>MSF-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、各部位の安全機能が確保されることが確認された。(短期健全性)</p>	 <p>MSF-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、各部位の安全機能が確保されることが確認された。(短期健全性)</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。 ・全体モデル (三次元) ・燃料集合体モデル (二次元) <p>解析条件: 熱解析条件は以下の通り。</p> <table border="1"> <tr> <td>項目</td> <td>火災前</td> <td>火災時</td> <td>火災後</td> </tr> <tr> <td>設計座熱熱量</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>	項目	火災前	火災時	火災後	設計座熱熱量		16.9 kW		環境条件	周囲温度 38 °C	800°C (30 分間)	38 °C	 <p>温度分布 (°C)</p> <p>240, 220, 200, 180, 160, 140, 120, 100, 80, 60, 40, 20, 0</p>
項目	火災前	火災時	火災後										
設計座熱熱量		16.9 kW											
環境条件	周囲温度 38 °C	800°C (30 分間)	38 °C										

【計算結果】
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。

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	一次遮蔽ガスケット	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°

※一般の試験条件基準

各温度評価結果から、各部位の安全機能が確保されることを確認した。なお、側部中性子遮蔽材は基準値 (使用可能温度) を超えるが、別途実施した燃焼試験結果をもとに特別の試験条件下における遮蔽評価 (燃焼試験の結果より中性子遮蔽材が 2 割減損するため、保守的に 5 割減損として評価) を行い、事業所外運搬規則に定める BM 型核分裂性輸送物に対する基準 (表面から 1m の位置における線量当量率: 10mSv/h 以下) を満たすことを確認した。

※特別の試験条件のうち 9m 落下、丸柱上への落下、800°C30 分火災時の取囲から 1m の位置における線量当量率は、MSF-32P 型は 781.4 μSv/h、MSF-24P 型では 876.6 μSv/h である。

<p>【計算結果】</p> <p>入熱量は、受熱面照射強度と時間の積で計算される。受熱面照射強度は「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」に基づく計算を実施する。計算式は以下の通り。</p> $\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{m^2 - n^2}} \right) + \frac{1}{\pi} \left(\frac{A(n-D)}{m\sqrt{A^2 - n^2}} \tan^{-1} \left(\frac{A(n-D)}{B(n+D)} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\frac{D(n-1)}{B(n+1)} \right) \right)$ $m = \frac{H}{R} \sin \theta, \quad n = \frac{L}{R}, \quad A = (L+D)^2 + m^2, \quad B = (L-D)^2 + m^2$ $E = R \cdot \phi$ <p>RF: 燃料発熱量 [W/m²] D: 円筒火災モデルの形態係数 [—] 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: 受熱面照射強度 [W/m²]</p>	<p>航空機落下と重油タンクの重油火災時の原子力補助建屋への照射による受熱面照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、仮に遮蔽物がない状態で乾式キャスク表面が曝されると想定する。</p> <table border="1"> <tr> <td>項目</td> <td>航空機</td> <td>重油タンク</td> </tr> <tr> <td>燃焼継続時間 (t)</td> <td>1.67h</td> <td>7.58h</td> </tr> <tr> <td>受熱面照射強度 (E)</td> <td>2900 W/m²</td> <td>460 W/m²</td> </tr> </table>	項目	航空機	重油タンク	燃焼継続時間 (t)	1.67h	7.58h	受熱面照射強度 (E)	2900 W/m ²	460 W/m ²
項目	航空機	重油タンク								
燃焼継続時間 (t)	1.67h	7.58h								
受熱面照射強度 (E)	2900 W/m ²	460 W/m ²								

<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遮蔽評価では、設計貯蔵期間中の熱的影響により中性子遮蔽材が MSF-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、MSF-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囲される。</p>	<p>【計算式】</p> <p>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: 表面燃料率 (総合燃料率) F=1/(1/ε + 1/ε_g + 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) T_n: 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>輸送物質量 m(kg)</td> <td>134400</td> </tr> <tr> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> </tr> <tr> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> </tr> </table>	輸送物質量 m(kg)	135500	輸送物質量 m(kg)	134400	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3	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>輸送物質量 m(kg)</td> <td>134400</td> </tr> <tr> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> <td>重力加速度 g(m/s²)</td> <td>9.80665</td> </tr> <tr> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> <td>落下高さ H(m)</td> <td>0.3</td> </tr> </table>	輸送物質量 m(kg)	134400	輸送物質量 m(kg)	134400	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	落下高さ H(m)	0.3	落下高さ H(m)	0.3																																																																														
輸送物質量 m(kg)	135500	輸送物質量 m(kg)	134400																																																																																																				
重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665																																																																																																				
落下高さ H(m)	0.3	落下高さ H(m)	0.3																																																																																																				
輸送物質量 m(kg)	134400	輸送物質量 m(kg)	134400																																																																																																				
重力加速度 g(m/s ²)	9.80665	重力加速度 g(m/s ²)	9.80665																																																																																																				
落下高さ H(m)	0.3	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="3">解析結果(MPa)</th> </tr> <tr> <th>0.3m 頭部垂直</th> <th>0.3m 底部垂直</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> <td>68</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> <td>86</td> </tr> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>容器本体 一次蓋シールド部</td> <td>S_y</td> <td>185</td> <td>120</td> <td>54</td> <td>37</td> <td>58</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>-*3</td> <td>11</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>-*3</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 底部垂直	0.3m 水平	遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	44	32	68	遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	120	50	36	86	閉じ込め	容器本体 一次蓋シールド部	S _y	185	120	54	37	58	臨界	バスケット	S _m	36	180	7	-*3	11	臨界	燃料集合体	σ _y	595	205	118	-*3	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="3">解析結果(MPa)</th> </tr> <tr> <th>0.3m 頭部垂直</th> <th>0.3m 底部垂直</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> <td>68</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> <td>86</td> </tr> <tr> <td>閉じ込め</td> <td>容器本体 一次蓋シールド部</td> <td>S_y</td> <td>185</td> <td>120</td> <td>54</td> <td>37</td> <td>58</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>-*3</td> <td>12</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>-*3</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 底部垂直	0.3m 水平	遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	44	32	68	遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	120	50	36	86	閉じ込め	容器本体 一次蓋シールド部	S _y	185	120	54	37	58	臨界	バスケット	S _m	36	185	7	-*3	12	臨界	燃料集合体	σ _y	589	215	105	-*3	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 底部垂直	0.3m 水平																																																																																																				
遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	44	32	68																																																																																																
遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	120	50	36	86																																																																																																
閉じ込め	容器本体 一次蓋シールド部	S _y	185	120	54	37	58																																																																																																
臨界	バスケット	S _m	36	180	7	-*3	11																																																																																																
臨界	燃料集合体	σ _y	595	205	118	-*3	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 底部垂直	0.3m 水平																																																																																																
遮蔽・除熱	容器本体 胴	1.5S _m	186 (183)*2	120 (140)*2	44	32	68																																																																																																
遮蔽	容器本体 外筒	f _b	156	120	50	36	86																																																																																																
閉じ込め	容器本体 一次蓋シールド部	S _y	185	120	54	37	58																																																																																																
臨界	バスケット	S _m	36	185	7	-*3	12																																																																																																
臨界	燃料集合体	σ _y	589	215	105	-*3	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>一次蓋金属カセット</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	一次蓋金属カセット	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>一次蓋金属カセット</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	一次蓋金属カセット	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	一次蓋金属カセット	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	一次蓋金属カセット	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。

影響		評価結果
積雪	堆積荷重	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、火山の影響評価に包含される。
落雷	電気的影響	金属製の静的機器である乾式キャスクは、落雷による電気的影響を受けない。
地滑り	土砂による転倒 除熱機能への影響	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。
生物学的 事象	小動物による損傷	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。
高潮	浸水	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）、朔望平均満潮位(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。
飛来物	飛来物の衝突	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。
ダムの 崩壊	浸水 水圧による転倒	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。
有毒ガス	人員への影響	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。
船舶の 衝突	船舶の衝突	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。
電磁的 障害	電気的影響	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、電磁的障害による電気的影響を受けず、乾式キャスクの安全機能を損なうおそれはない。

※ 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た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

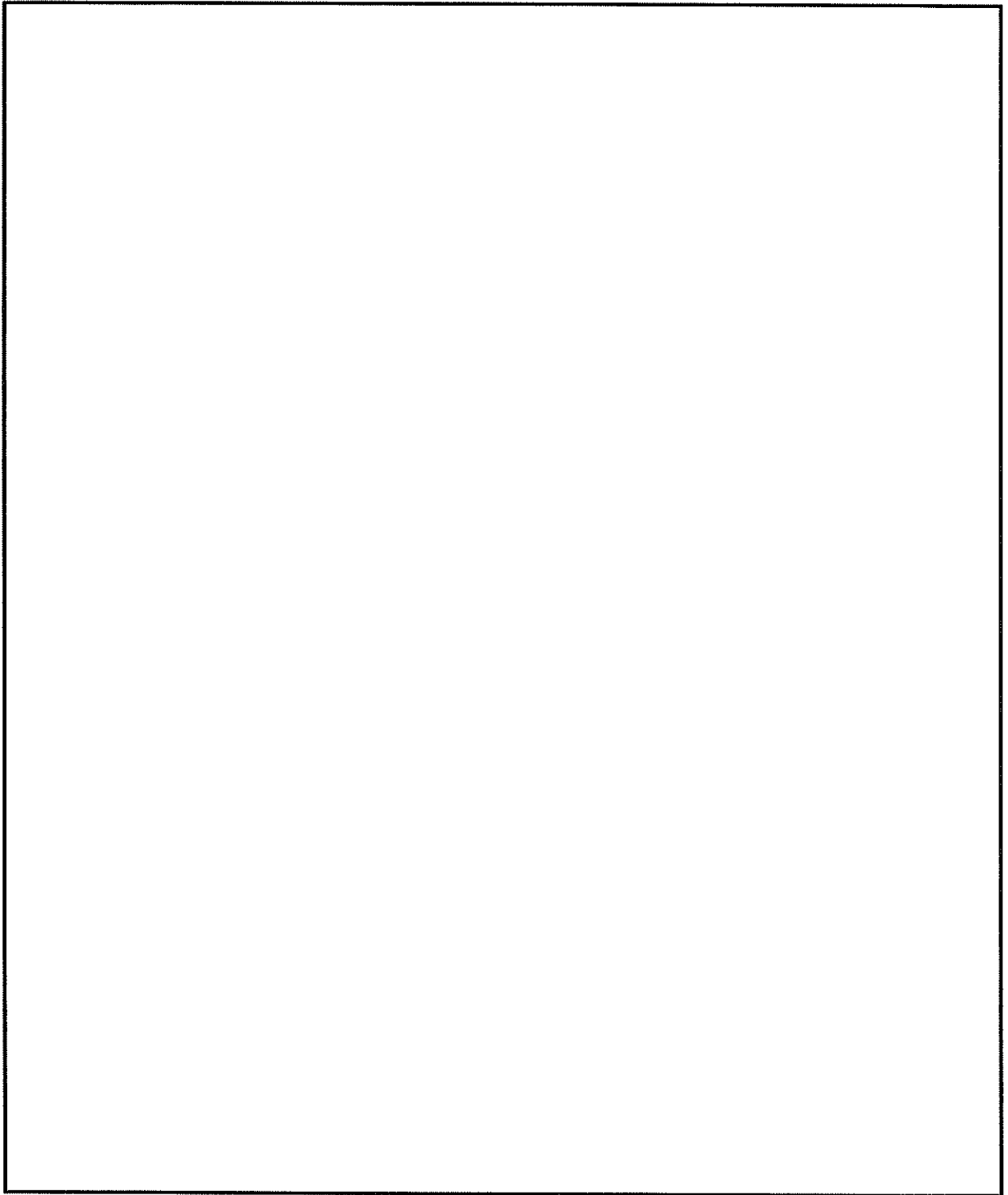
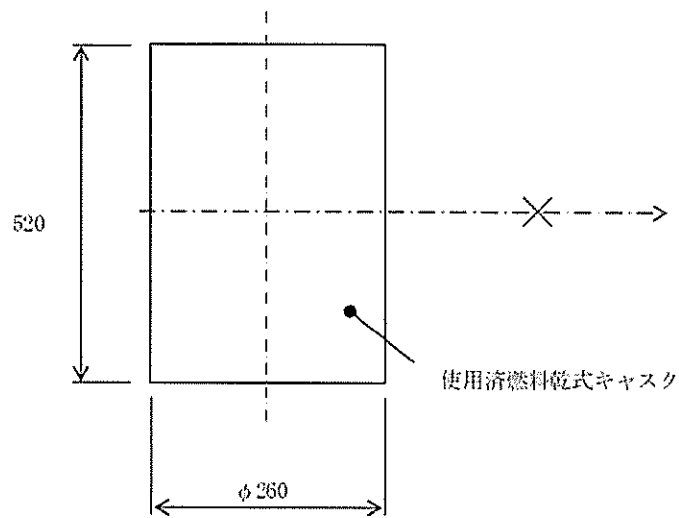


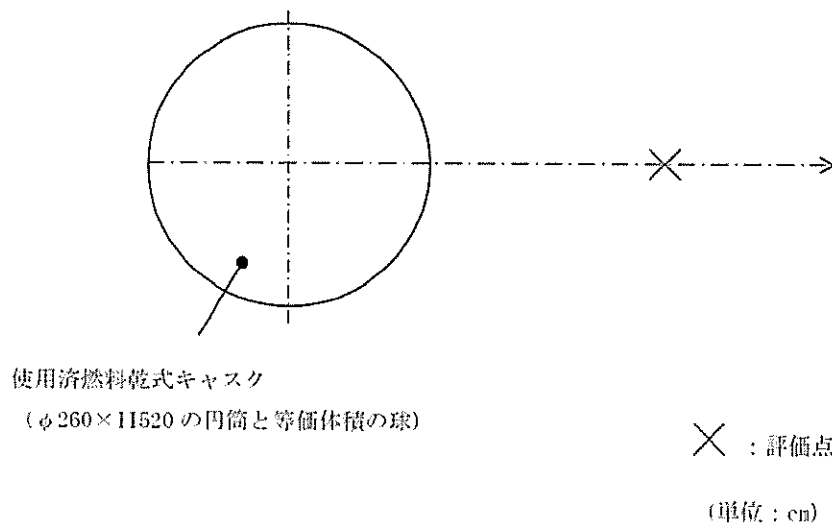
図1 乾式キャスク遮蔽評価モデル (MSF-24P)



× : 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) (420m)	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。

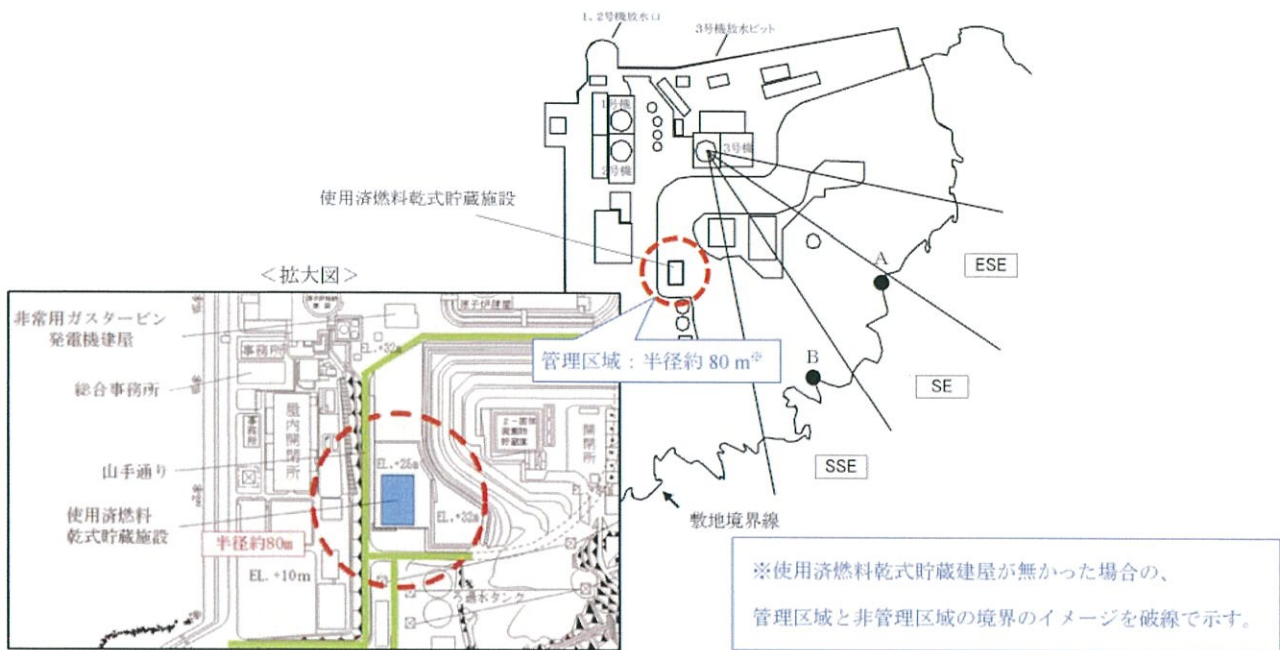


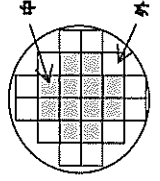
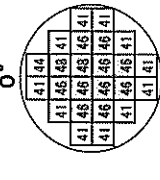
図4 乾式貯蔵施設と評価地点

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の結果、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：運用に必要な保守性
- ③：設計上必要な保守性

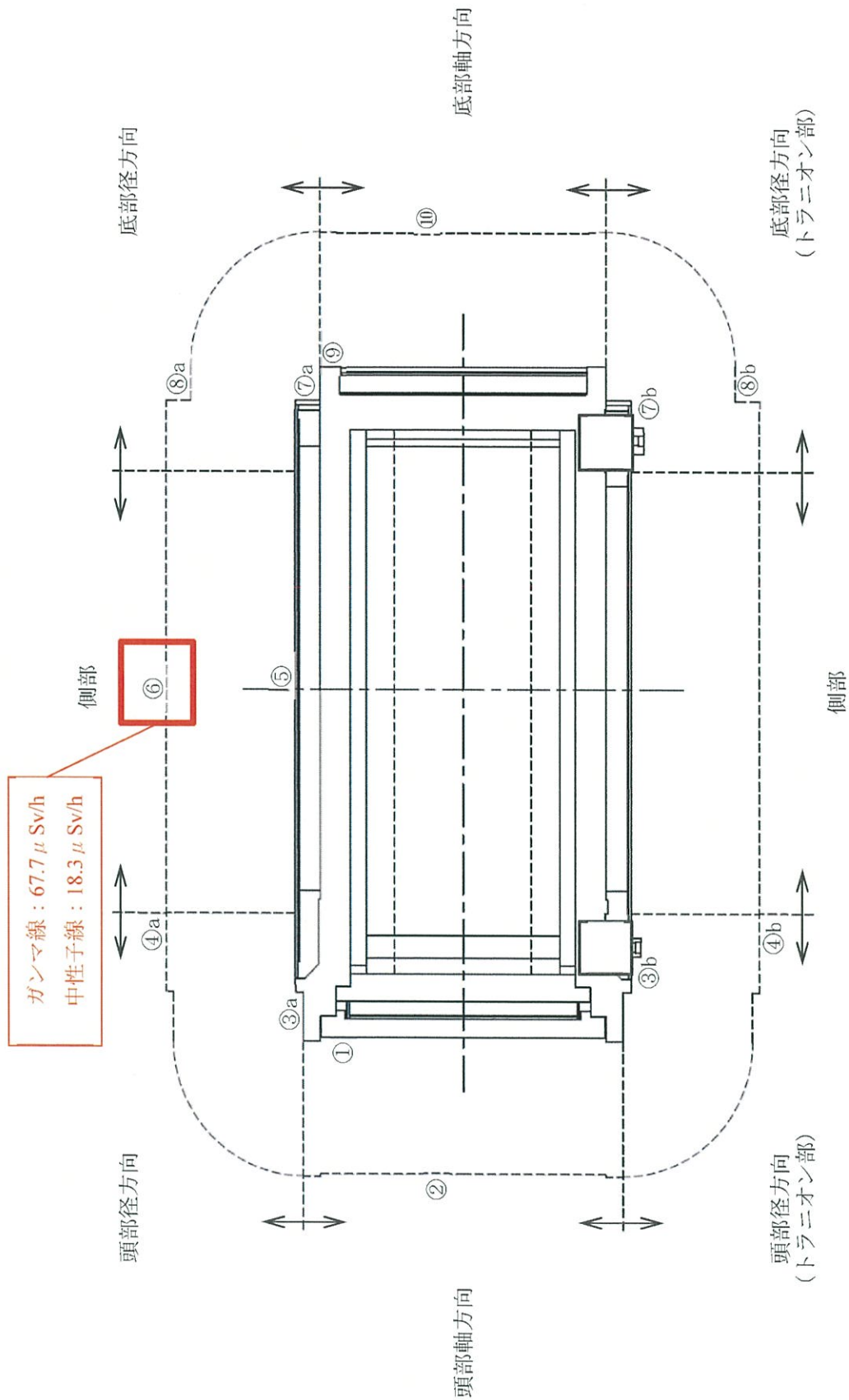
	燃料タイプ	キャスク収納条件 配置条件		燃料スペース		解析条件		影響程度
		中央部	外周部	中央部	外周部	中央部	外周部	
収納物仕様	燃料集合体1体の仕様	17×17型		17×17型		17×17型		-
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2		-		-		濃縮度が0.05%の差異がなく、純度濃縮度への影響は軽微(1%未満) ①
	ウラン重量(kg)	-		-		-		純度濃縮度は重量に比例するため、影響は軽微(2%程度) ①
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	≤48*1	≤44*1	≤48	44	-		配置欄に記載のとおり
	SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥15 B型: ≥17	A型: ≥15 B型: ≥17	-	15	-		配置欄に記載のとおり
パーナブルキャスク	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90	-	-	90	-	-	純度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ガンマ線による乾式キャスク周部への影響は軽微(5%程度) ②
	SFPでの冷却期間 (年)	≥15	-	-	15	-	-	遠蔽材として考慮していないが、遠蔽効果を考慮した場合でも影響は軽微(1%未満) ②
キャスク1基あたり	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44*1	-	-	-	-	-	配置欄に記載のとおり、周所的に高くなる場合があるため、遠蔽解析では考慮していない。
配置(例)								実運用として乾式キャスク全体では44GWd/t以下となるよう取替するが、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						表面から1m: 1.83 mSv/h 表面から1m: 86 μSv/h		
判定基準						表面から1m: 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

※：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)

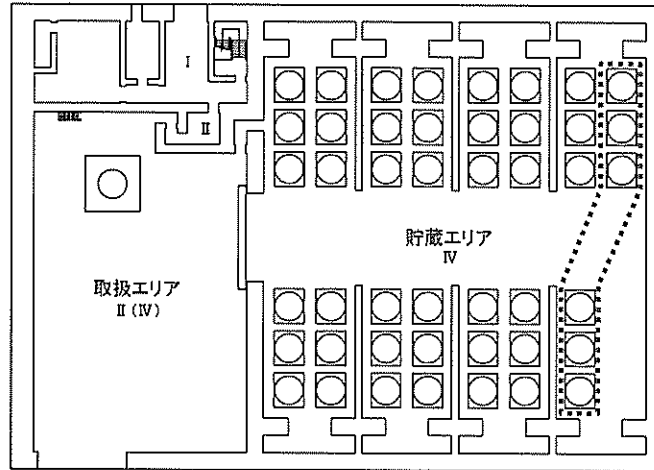
表 1. 線量当量率評価結果 (MSF-24P)

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

(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 キャスクヒット	除染場 ビット	トレーラ エリア	構内 輸送 (SFP/FH/B ↓ 乾式貯蔵)	取扱区域		貯蔵区域						
項目	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	燃料 装荷 作業	乾式キャスク受入	緩衝体 取外し	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)	貯蔵仕立て作業 (三次蓋取外し・監視設 備取付)	貯蔵区域内搬送 (搬送台車搬送)	貯蔵指定位置据付 (アンカ固定)	貯蔵中の監視	
状態	燃料取扱	燃料取扱	燃料取扱	燃料取扱	輸送状態 (緩衝体、三次蓋取付)	輸送状態 (緩衝体、三次蓋)	輸送状態 (緩衝体、三次蓋)	輸送状態 (緩衝体、三次蓋)	輸送状態 (緩衝体、三次蓋)	輸送状態 (緩衝体、三次蓋)	輸送状態 (緩衝体、三次蓋)	輸送状態 (緩衝体、三次蓋)	輸送状態 (緩衝体、三次蓋)
モード					運搬モード (外運搬相当)	運搬モード (外運搬相当)	取扱モード	取扱モード	取扱モード	取扱モード	取扱モード	貯蔵モード	貯蔵モード
設計					<運搬モード (外運搬相当)、既認可設備範囲>	<運搬モード (外運搬相当)、既認可設備範囲>	貯蔵中の兼用キャスクへの波及的影響なし	貯蔵中の兼用キャスクへの波及的影響なし	貯蔵中の兼用キャスクへの波及的影響なし	貯蔵中の兼用キャスクへの波及的影響なし	貯蔵中の兼用キャスクへの波及的影響なし	貯蔵中の兼用キャスクへの波及的影響なし	貯蔵中の兼用キャスクへの波及的影響なし

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。

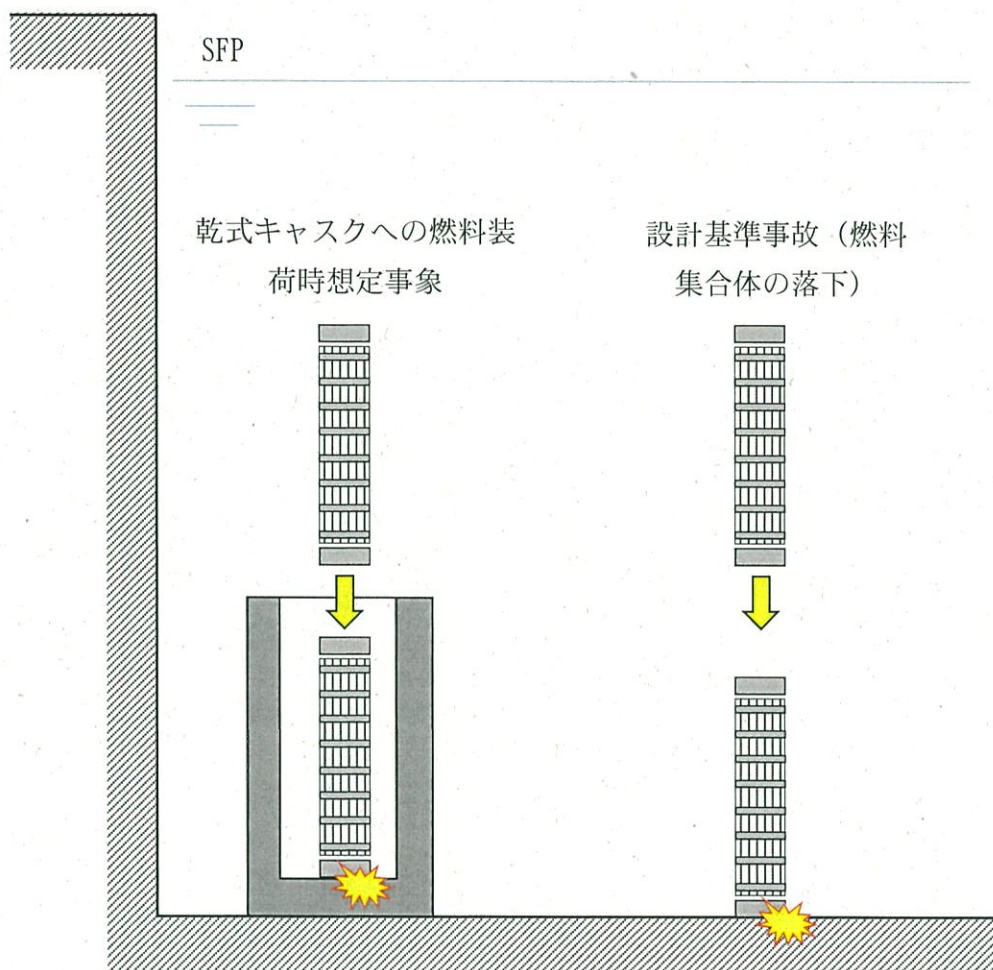
ここで、キャスクピットに据付けられた乾式キャスクに使用済燃料集合体を装荷する作業において想定される事象と、既許可において想定している事象を比較整理した結果を表1に示す。また、これらの事象について、SFPにおける燃料取扱時の高さ関係を図1に示す。

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衝突 防止について

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、搬送中の使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、「乾式キャスク」という。）が、貯蔵中の乾式キャスク等に衝突しないことを示す。

1. 乾式キャスクの貯蔵架台による拘束条件

乾式キャスクは、乾式キャスクをカップホルダ式貯蔵架台に設置することで、幾何構造的に3点支持した状態となることから、乾式キャスク底面の片側浮き上がり量を制限できる設計としている。貯蔵架台により乾式キャスクを3点支持している状態を図2に示す。

乾式キャスクを貯蔵架台に設置している状態では、図2に示すように幾何学的に乾式キャスク底面の片側浮き上がり量を約50mm^{*}（傾き角：）に制限し、その時の乾式キャスク端部から貯蔵架台端部までの水平距離が、約150mmあるため、乾式キャスク端部は貯蔵架台端部より外側に出ない。

※：乾式キャスク底面の片側浮き上がり量 = (mm)^註 × sin() ≒ 約 50 (mm)

（注：MSF-32P型の乾式キャスク底面外径）

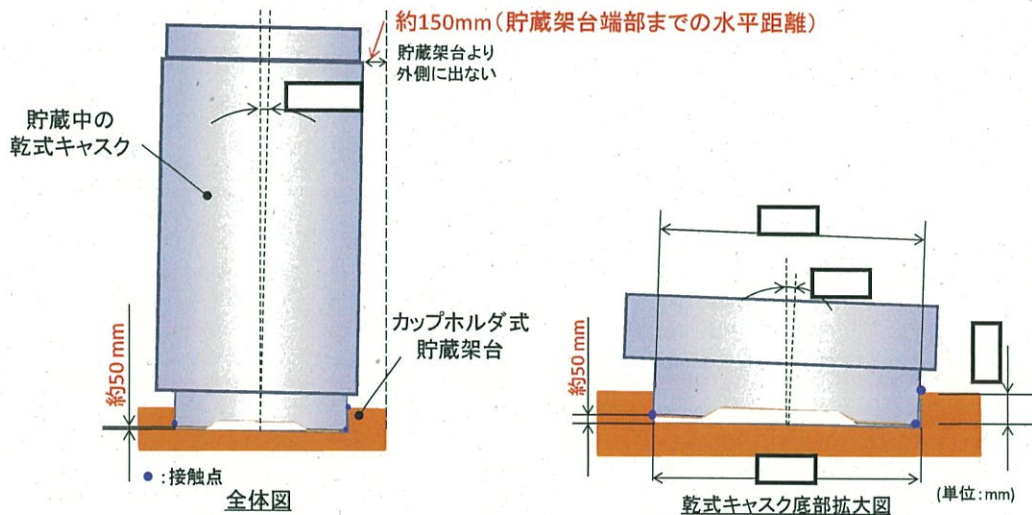


図2 貯蔵架台により支持された乾式キャスクの状態

ここで、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する。このとき、以下に示すように、搬送中に貯蔵架上の乾式キャスクのみが傾く場合と、搬送台車及び乾式キャスクが一体で傾く場合を想定する。

(1) 搬送中の乾式キャスクのみ傾く場合

搬送台車により速度 0.0334 (m/s) で乾式キャスクを搬送している時に、貯蔵架台同士が衝突し、搬送中の乾式キャスクのみが傾く場合を想定する。その状態を図3に示す。

図3の接触部拡大図に示すように、搬送台車及び貯蔵架台を一体とした重心位置が、回転中心より下方にあるため、搬送中の貯蔵架上にある乾式キャスクのみが、貯蔵中の乾式キャスクの方向に傾く（傾き角：）。このとき、図3の正面図及び平面図に示すように、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225mm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、搬送中の乾式キャスクと貯蔵中の乾式キャスクとの水平距離が、約475mm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。

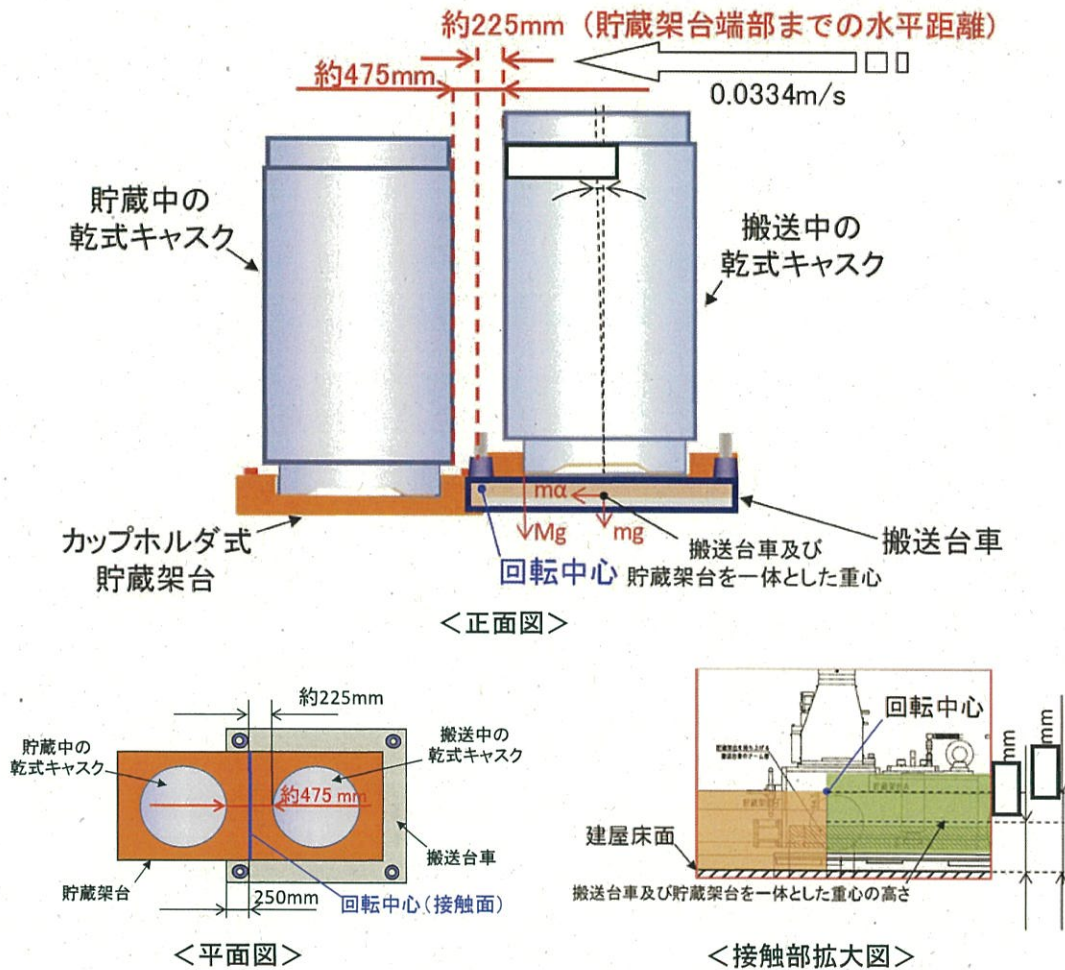


図3 搬送中の乾式キャスクのみ傾く場合の状態

(2) 搬送台車及び乾式キャスクが一体で傾く場合

搬送台車により乾式キャスクを速度0.0334 (m/s) で搬送している時に、貯蔵架台同士が衝突し、搬送台車及び乾式キャスクが一体で傾く場合を想定する。その状態を図4に示す。

このとき、搬送中の乾式キャスクが、搬送台車ごと貯蔵中の乾式キャスクの方向に傾くこととなるが、搬送中の搬送台車及び乾式キャスクの傾きは、非常に軽微*（傾き角：）である。図4の正面図及び平面図に示すように、搬送中の搬送台車及び乾式キャスクが傾いても、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 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。

※： 乾式キャスクと搬送台車を一体で評価することで重心が下がり、乾式キャスク単体よりも傾きにくくなるため。

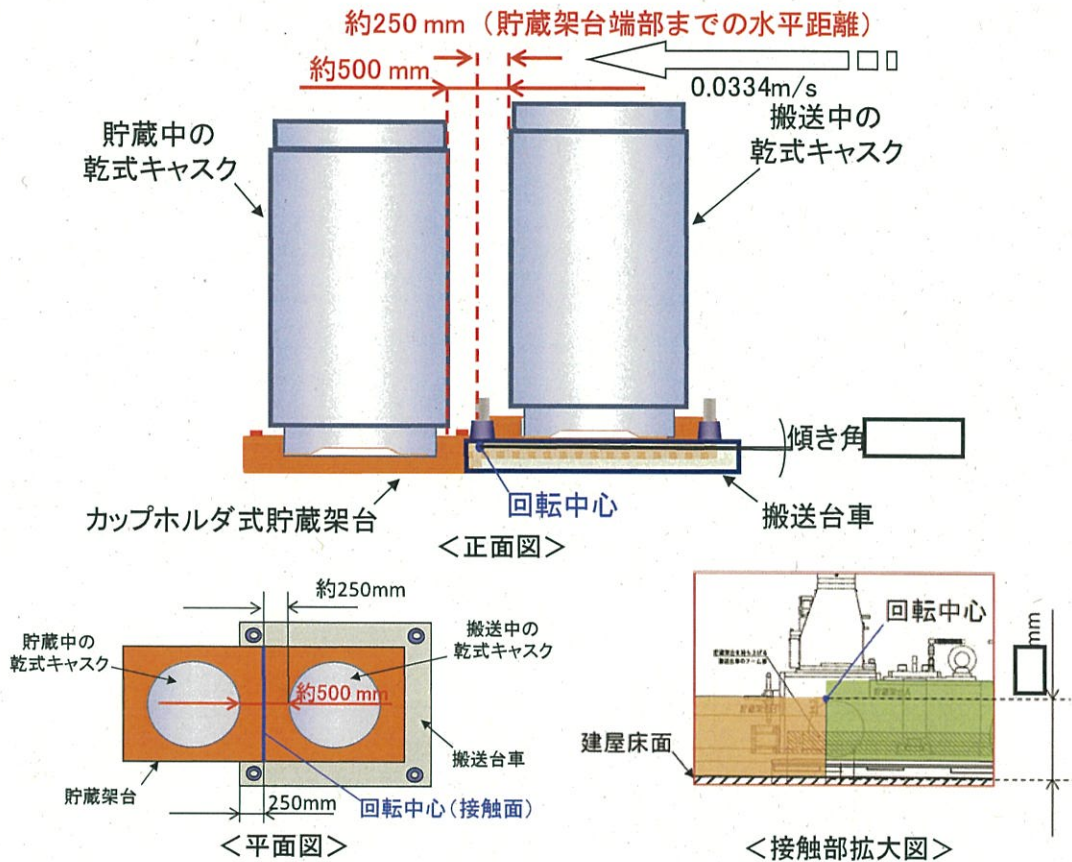


図4 搬送台車及び乾式キャスクが一体で傾く場合の状態

(3) まとめ

上記(1)及び(2)で示したように、搬送中の乾式キャスクのみ傾く場合と、搬送台車及び乾式キャスクが一体で傾く場合の乾式キャスク (MSF-32P 型及び MSF-24P 型) の傾き角、傾き量等を整理した結果を表1に示す。

ここで、表1の保守的な評価とは、搬送中の乾式キャスクが、貯蔵架台において幾何学的に制限される角度まで傾いた場合の評価を示す。

表1に示すとおり、搬送中の乾式キャスクのみ傾く場合と、搬送台車及び乾式キャスクが一体で傾く場合は、いずれも乾式キャスク端部が貯蔵架台端部より外側に出ないため、壁及び他の乾式キャスク等へ衝突しない。

また、保守的な評価の場合においても、貯蔵架台で搬送中の乾式キャスクは、貯蔵架台により幾何学的に傾き角度を制限しており、乾式キャスク端部が貯蔵架台端部から外側に出ないため、壁及び他の乾式キャスク等へ衝突しない。

表 1 MSF-32P 型及び MSF-24P 型乾式キヤスクの傾き角等の整理表

	項目	搬送中の乾式キヤスクのみ傾く場合	乾式キヤスク台車が一体で傾く場合	保守的な評価		結果
				傾き角	傾き量	
MSF-32P	傾き角	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>		乾式キヤスク搬送中に搬送台車が仮に逸走し、貯蔵架台同士が衝突した場合においても、搬送中の乾式キヤスクは、幾何学的に傾き角度を制限しており、保守的に傾いたと評価しても、乾式キヤスク端部が、貯蔵架台端部から外側に出ない。
	傾き量 ^{※1}	約 25mm	約 1mm	約 100mm		
	片側浮き上がり量	約 20mm	約 1mm	約 50mm		
MSF-24P	貯蔵架台端部までの水平距離 ^{※2}	約 225mm	約 250mm ^{※3}	約 150mm		乾式キヤスク端部が、貯蔵架台端部から外側に出ない。
	傾き角	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>		
	傾き量 ^{※1}	約 30mm	約 1mm	約 100mm		
MSF-24P	片側浮き上がり量	約 20mm	約 1mm	約 50mm		乾式キヤスク端部が、貯蔵架台端部から外側に出ない。
	貯蔵架台端部までの水平距離 ^{※2}	約 220mm	約 250mm ^{※3}	約 150mm		

※ 1 : 傾き量は、直立で貯蔵状態の乾式キヤスク端部から傾いた後の乾式キヤスク端部までの水平距離を表す。

※ 2 : 貯蔵架台端部までの水平距離は、乾式キヤスクの外筒端から貯蔵架台端部までの水平距離を示す。(乾式キヤスク直立時の貯蔵架台端部までの水平距離約 250mm から、傾き量を減じた値であり、この値が正であれば、貯蔵架台端部から乾式キヤスクは外側に出ない。)

※ 3 : 貯蔵架台が乾式キヤ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したが、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ないと仮定する。

乾式キャスクの転倒に対するクライテリアについて

乾式キャスク (MSF-32P 型) 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における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下図及び以下の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、乾式キャスク底面の床面からの片側浮き上がり量のクライテリアは、以下のように求められる。

乾式キャスク底面の外径×sin(乾式キャスク傾き角^{*1})
 = (mm) ^{*2} × sin() ≒ 約 860 (mm)

※ 1 : キャスク傾き角は、回転中心より床面から乾式キャスク底面までの角度。

※ 2 : MSF-32P 型の乾式キャスク底面外径。

以上より、貯蔵架台に設置せずに床面に貯蔵している乾式キャスクは、床面からの片側浮き上がり量が約 860 mm となるまで転倒しない。

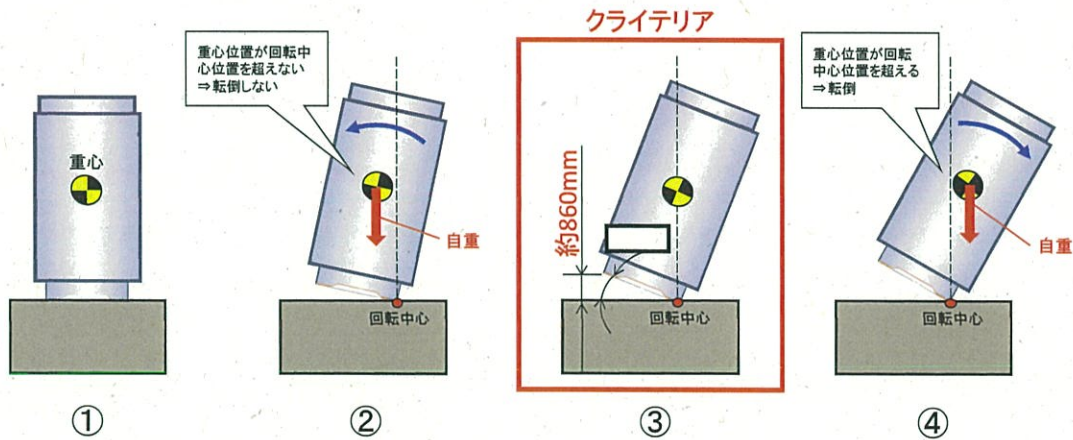


図 乾式キャスクが貯蔵状態から転倒に至るまでの各状態

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、0.3m 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
キャスクの配列	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 (+3 α 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	輸送時		
解析コード	ABAQUS	同左	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	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	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
寸法公差	燃料集合体モデル ・燃料被覆管：考慮 ・燃料棒同士の隙間：He	同左	同左	同左	
収納燃料の設計崩壊熱量	ノミナル寸法でモデル化	同左	同左	同左	同じ
周囲温度	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	同左	
自然対流	38℃ (大気温度)	火災中：800℃-30分間 火災前後：38℃ (大気温度)	50℃ (建屋内周囲温度)	50℃ (建屋内周囲温度)	貯蔵時は、建屋内の条件で解析。
ふく射	横置き状態	同左	縦置き状態	縦置き状態	貯蔵時は、縦置き状態の条件で評価。
太陽熱	全表面を考慮 基準温度：38℃	全表面を考慮 基準温度：800℃ (火災中) ：38℃ (火災前後)	建屋の天井と床面へのふく射を考慮	同左 (通常時)	貯蔵時は、建屋内の条件で解析。
判定基準	通常時：考慮しない 一般：考慮 バスケット：250℃ 燃料集合体：275℃ レジン：149℃ 金属ガスケット：130℃ 近接表面：85℃ (通常時) 要求なし (一般)	考慮 バスケット：同左 燃料集合体：- レジン：180℃ 金属ガスケット：190℃ 近接表面：要求なし	同左 (一般)	同左 (通常時)	同じ

※：MSF-24P型の例で記載

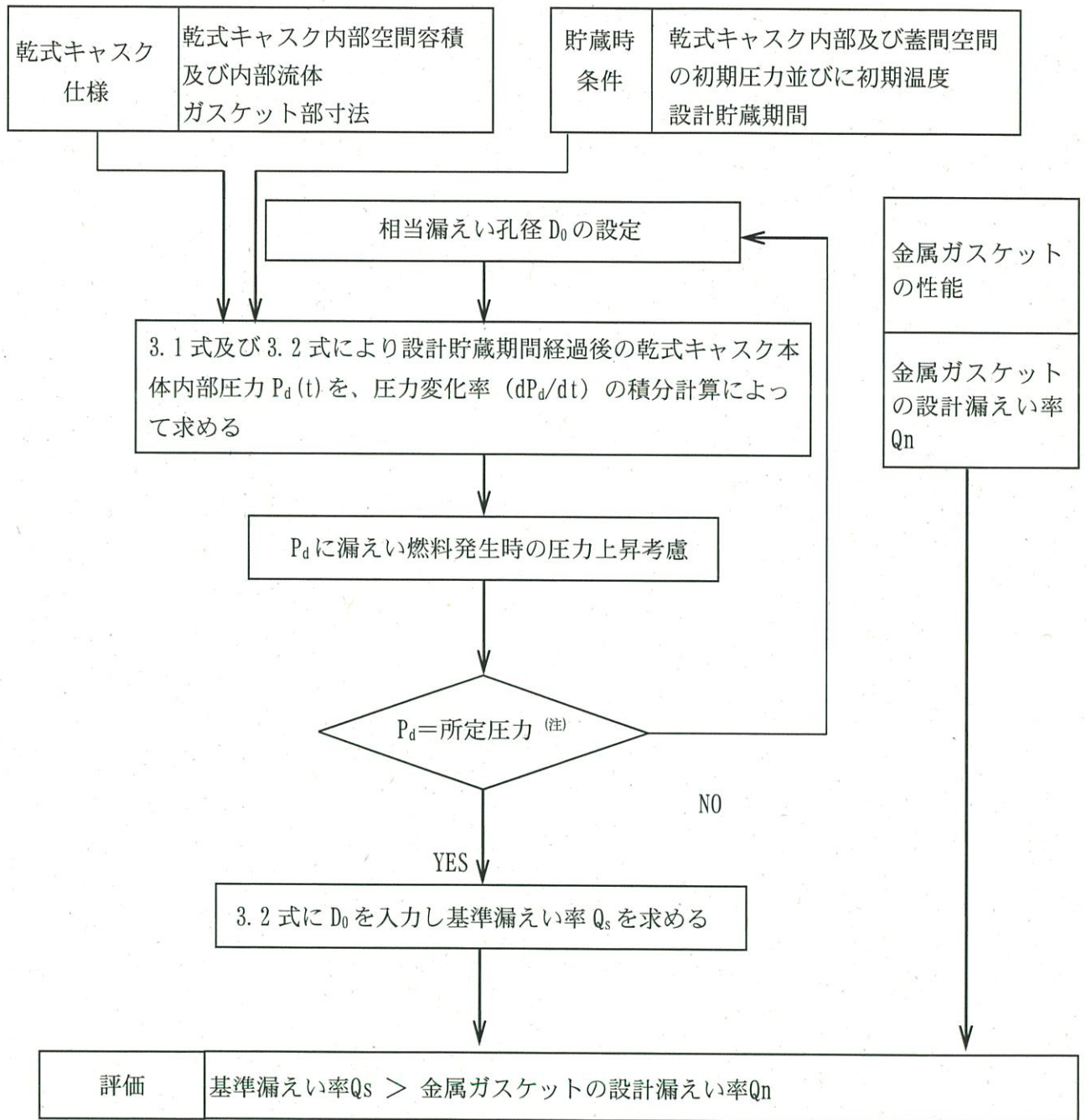
表 5 閉じ込め評価における解析条件の相違 (1/2)

評価方法	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 5-3 及び図 5-4 参照		図 5-1 及び図 5-2 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 上流側	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。
下流側	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℃ (三次蓋0リング部温度)	195℃ (三次蓋0リング部温度)	-25℃ (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 5-1 基準漏えい率の計算フロー図 (貯蔵時の閉じ込め計算)

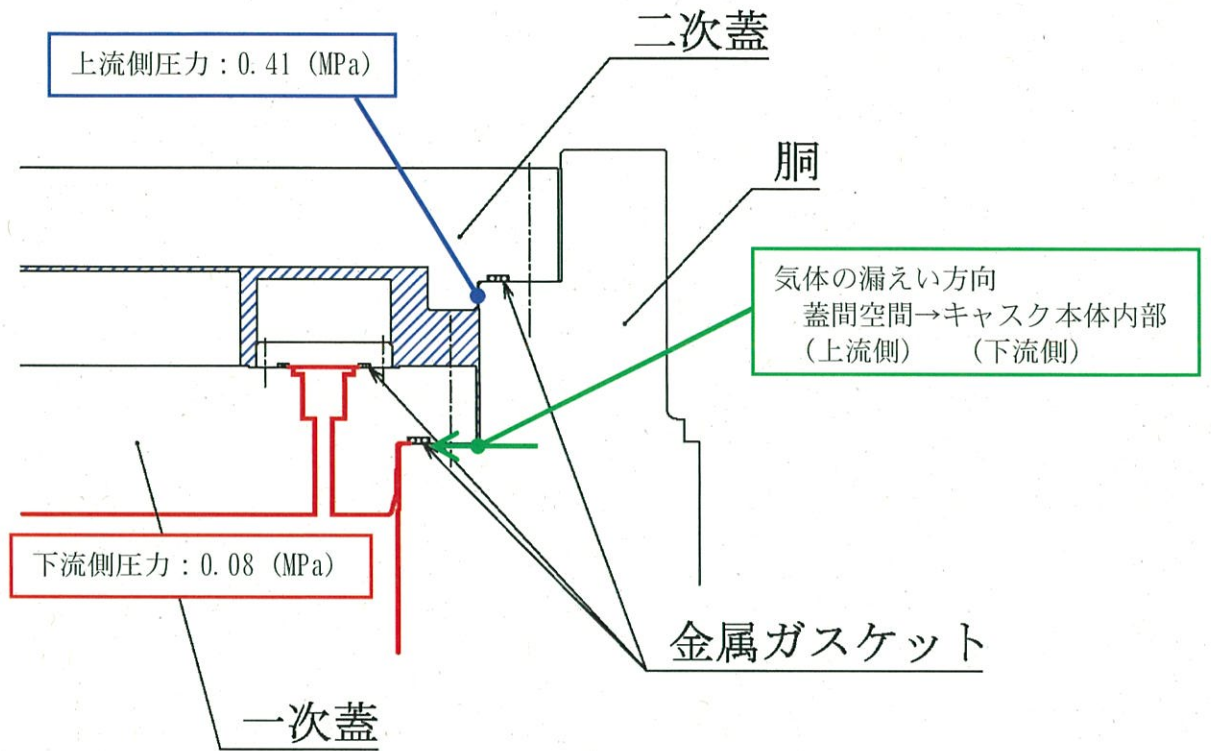


図 5-2 閉じ込め評価に係る構造図 (貯蔵時の閉じ込め計算)

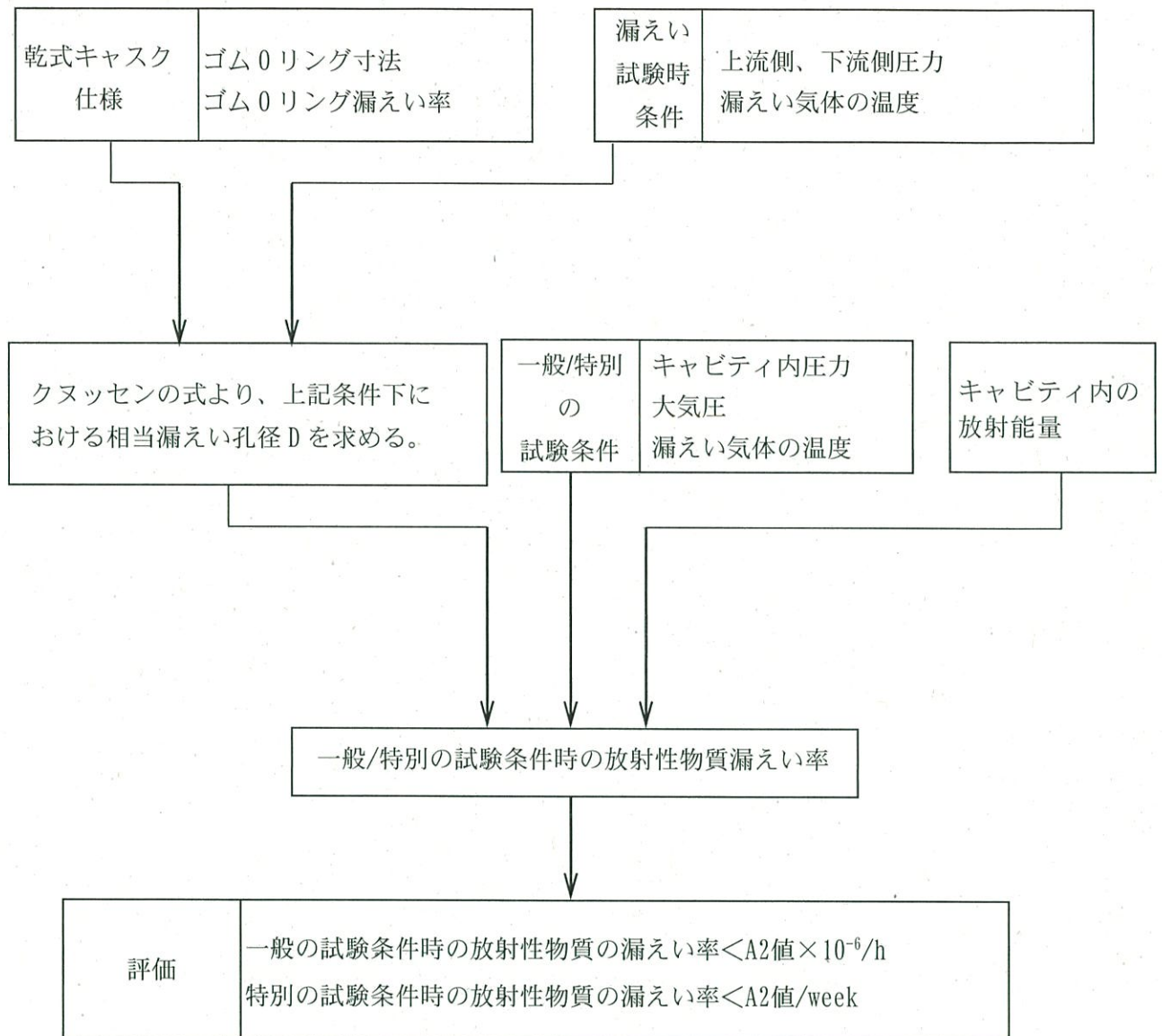
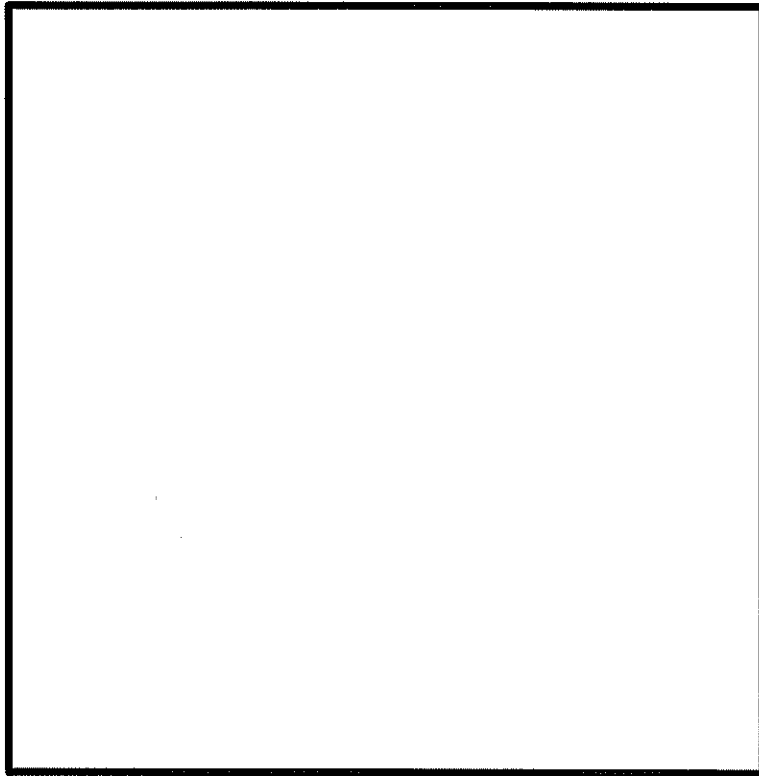
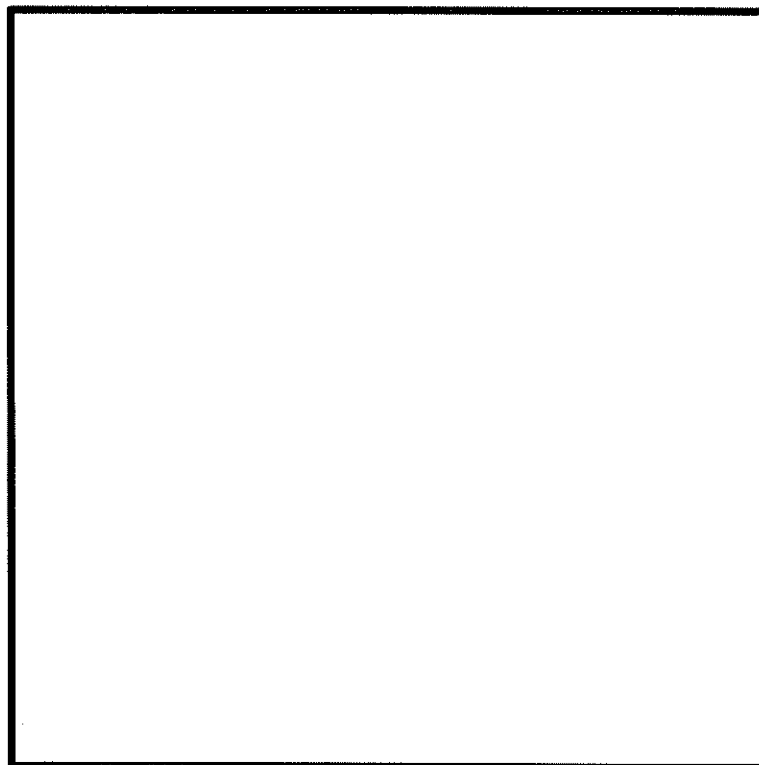


図 5-3 放射性物質の漏えい率の計算フロー図（輸送時の閉じ込め計算）



(a) 一般の試験条件



(b) 特別の試験条件

図 5-4 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

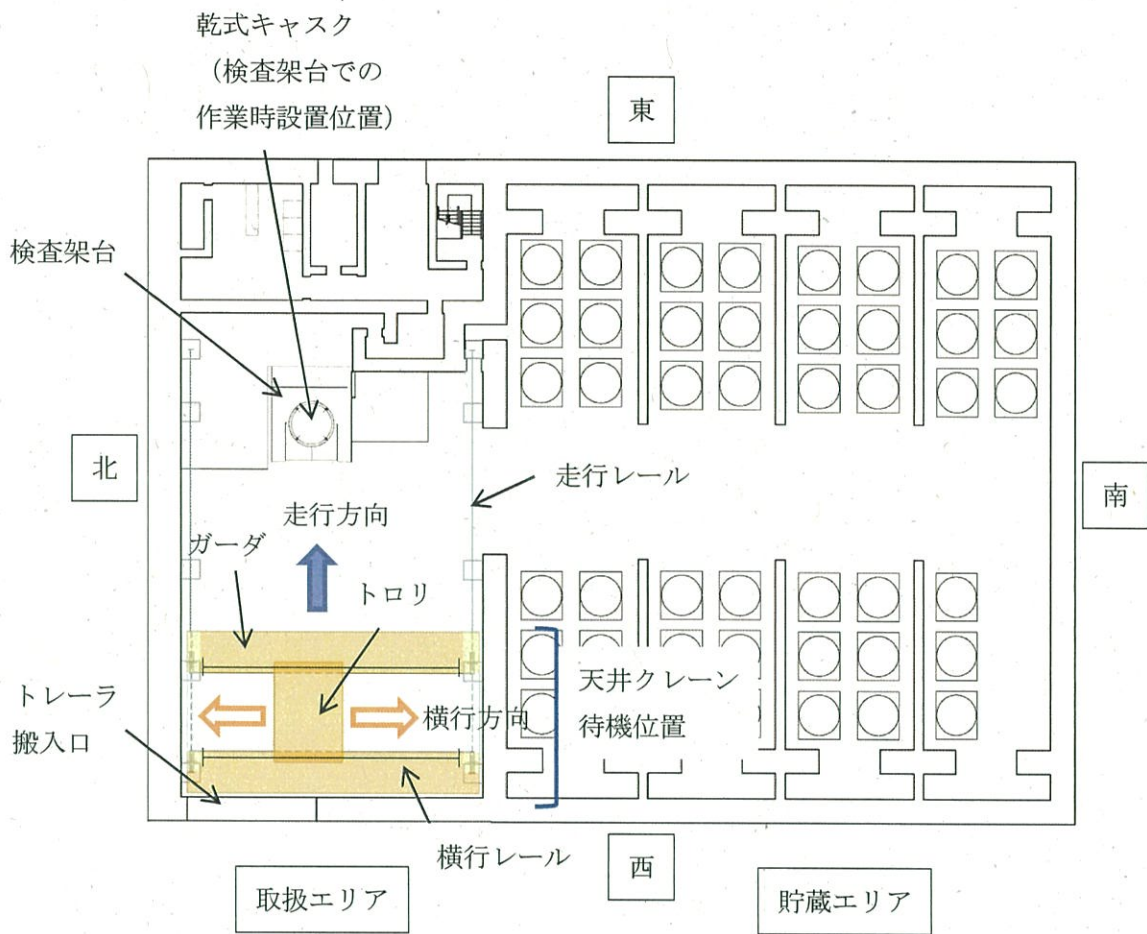
乾式貯蔵建屋天井クレーンの配置および構造イメージ図を図1、2に示す。

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

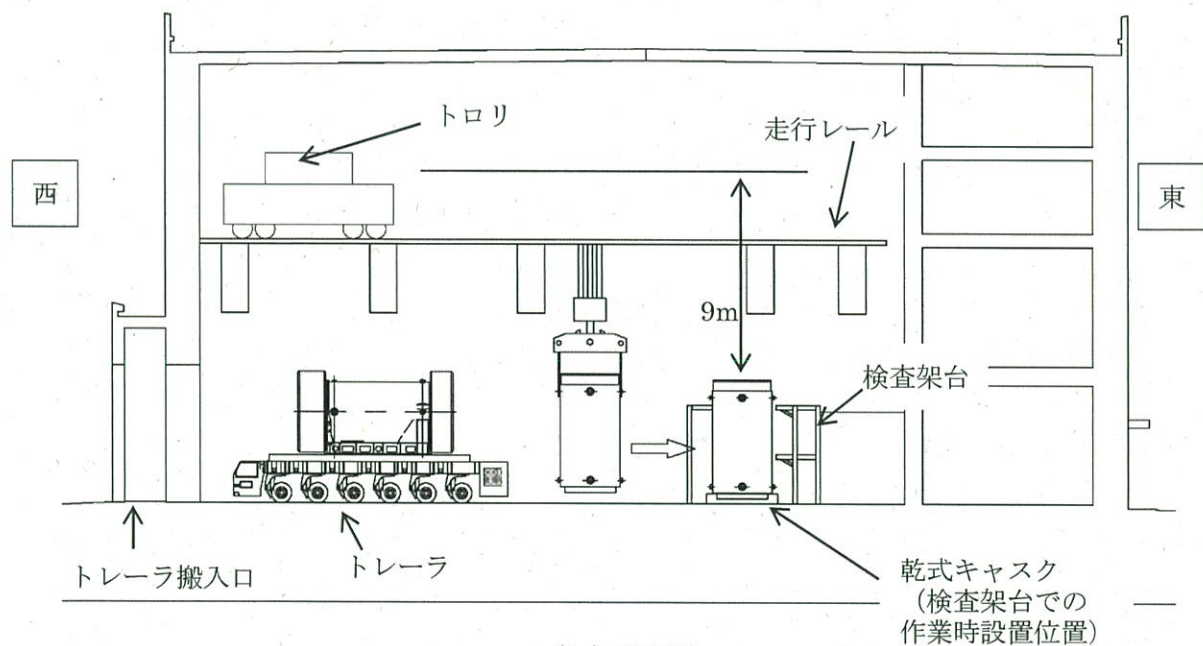
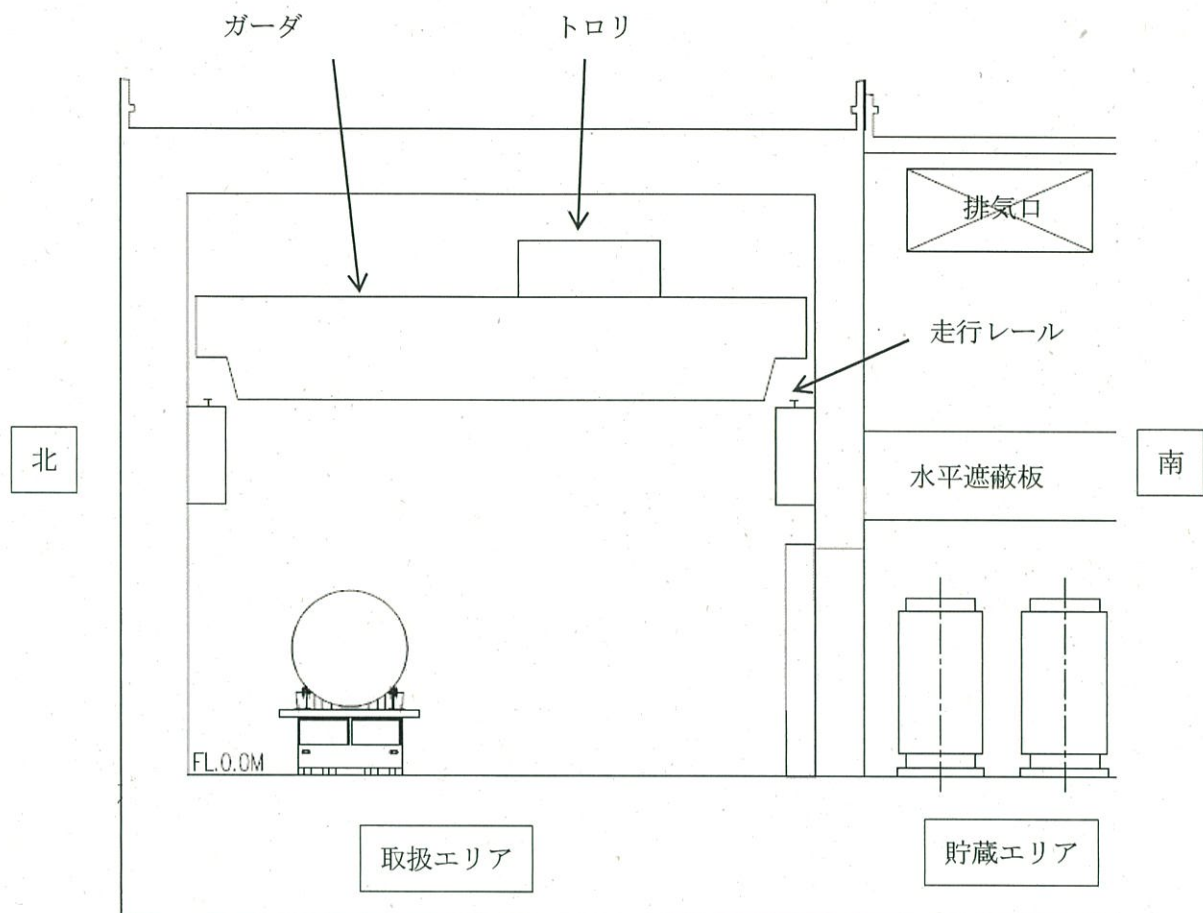
また、図2に示す様に乾式貯蔵建屋天井クレーンは、乾式貯蔵建屋の壁に設置された走行レール上をガーダが東西方向に移動（走行）し、ガーダ上の横行レール上を南北方向にトロリが移動（横行）する。横行レール上の移動及びクレーンワイヤの巻上・巻下は、ガーダ上にあるトロリにより行う。

ここで、乾式貯蔵建屋は、自然現象等に対し頑健な建屋であり、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、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となっている。



(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)

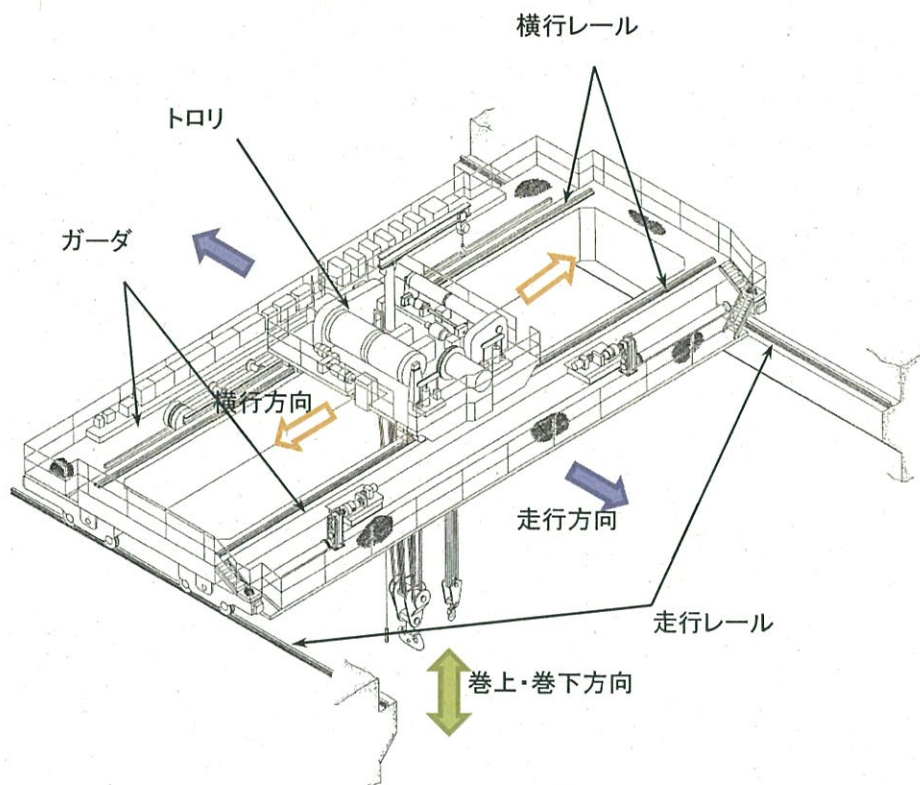


図 2. 乾式貯蔵建屋天井クレーンの構造イメージ図

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、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西側の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、天井クレーンが乾式キャスクの上方に位置するのは図3に示す通り、年間1.5時間程度（約3基程度）と想定される。基準地震動 S_s の年超過確率と年間時間率との組合せを 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、検討した結果 10^{-7} /年を下回ることから、基準地震動 S_s と組合すべき事象としても選定されない。

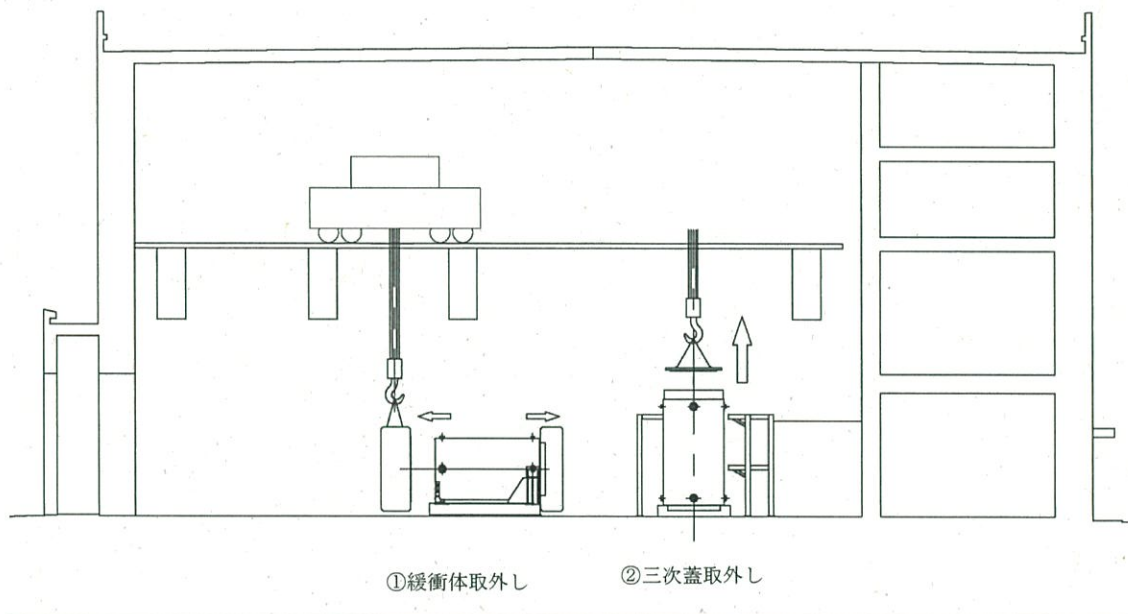


図3. 乾式キャスクの取扱い図

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^{※1}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

※1：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^{※2}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。

※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」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。”

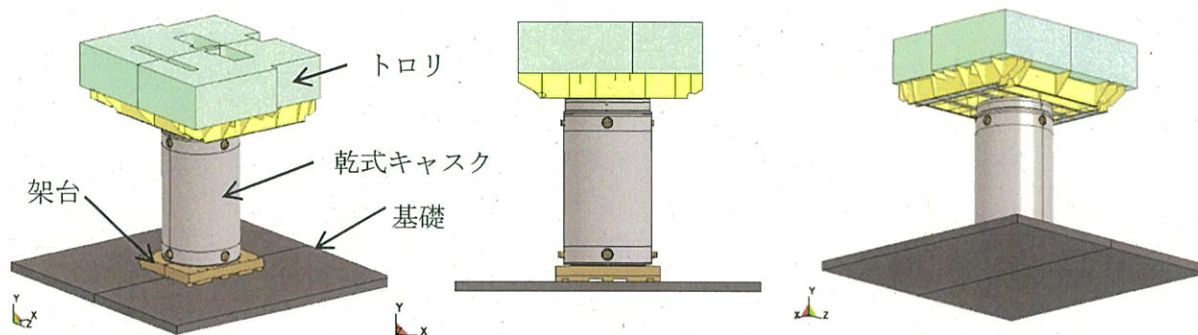


図4. トロリ落下衝突解析に係るモデル

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※
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%)

※：小数点以下第3位を切り上げ

(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、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

以上のとおり、乾式貯蔵建屋天井クレーンの構造および運用を考慮した結果、当該天井クレーンの乾式キャスクへ落下することは無いことを確認した。

また、仮に当該クレーンの落下を想定しても、以下の通り乾式キャスクに悪影響を与えないことを確認した。

- ・ 乾式キャスクの閉じ込め機能維持は確保できていること
- ・ 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でも敷地境界線量は線量限度 1mSv/y 以下となること

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 の大気放出量	(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 の大気放出量 (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

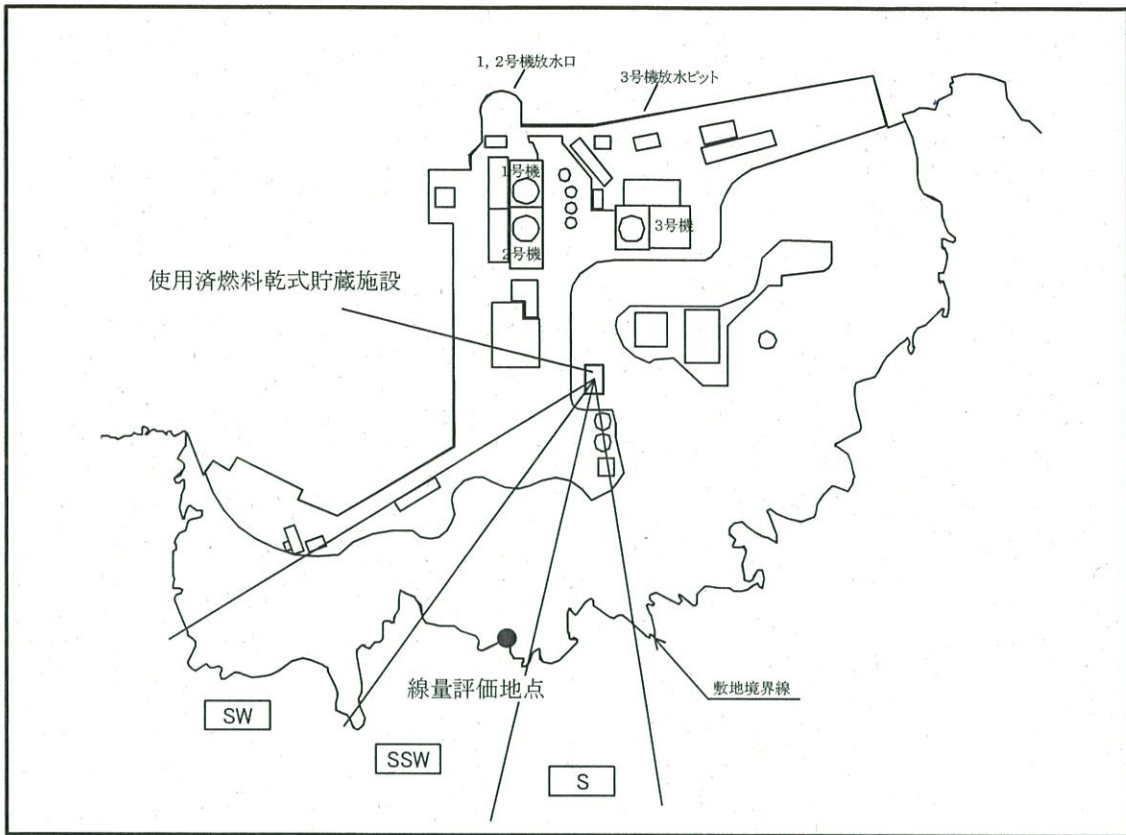


図1 評価地点

動的解析手法 (LS-DYNA) の検証

1. 検証方針

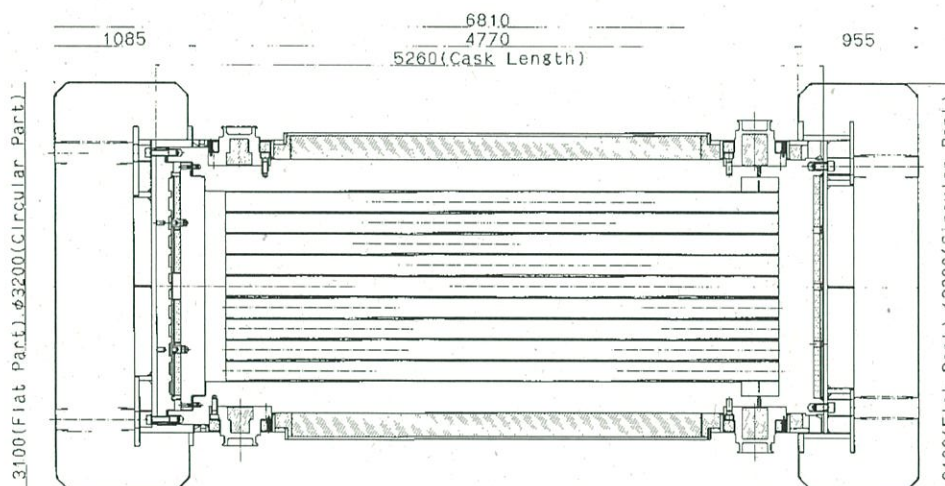
MSF 型キャスクの動的解析手法は、実規模スケールモデルを用いた落下試験で計測された蓋密封部のひずみを基に動的解析による落下試験再現解析を実施し、その結果と比較することで評価手法の妥当性を検証している。以下に検証内容を記載する。

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。

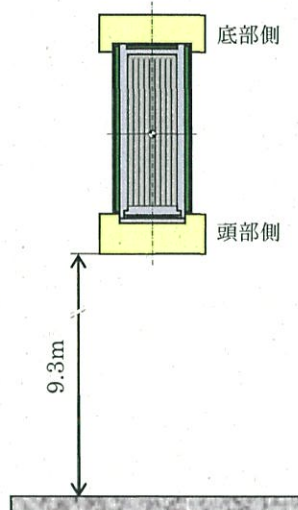


図2 落下試験状態図

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。

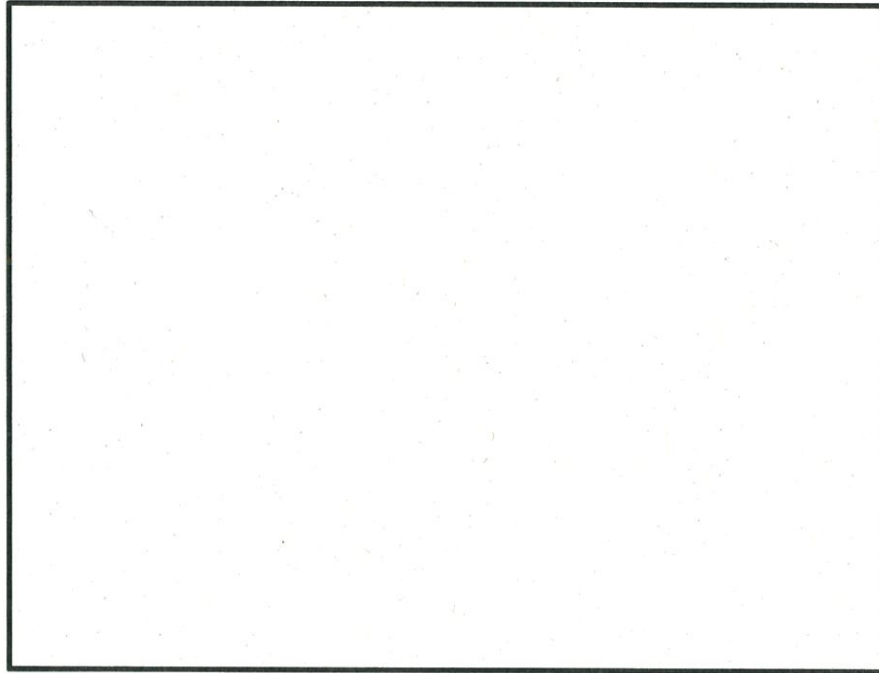


図4 9.3m 頭部垂直落下の解析モデル

(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。

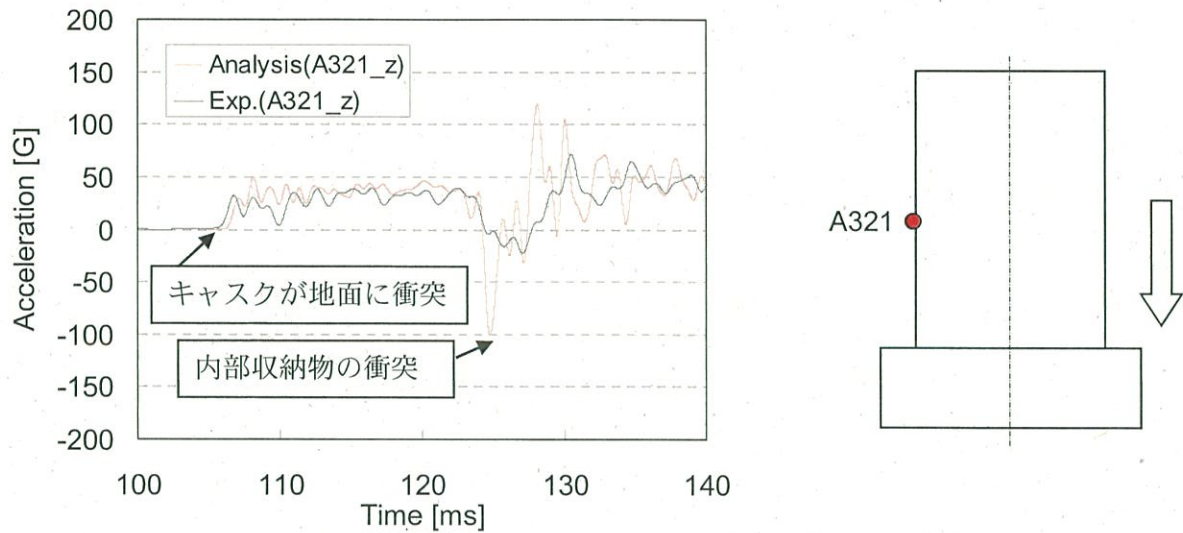


図5 9.3m 垂直落下加速度時刻歴の比較

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 $\pm 10\%$ 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 $2000\ \mu$ 以下であり弾性範囲内であるが、試験ではひずみが $2000\ \mu$ を超過しており最大約 $3500\ \mu$ 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 $\pm 10\%$ 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 $\pm 10\%$ で一致しており、解析でよく再現されている。

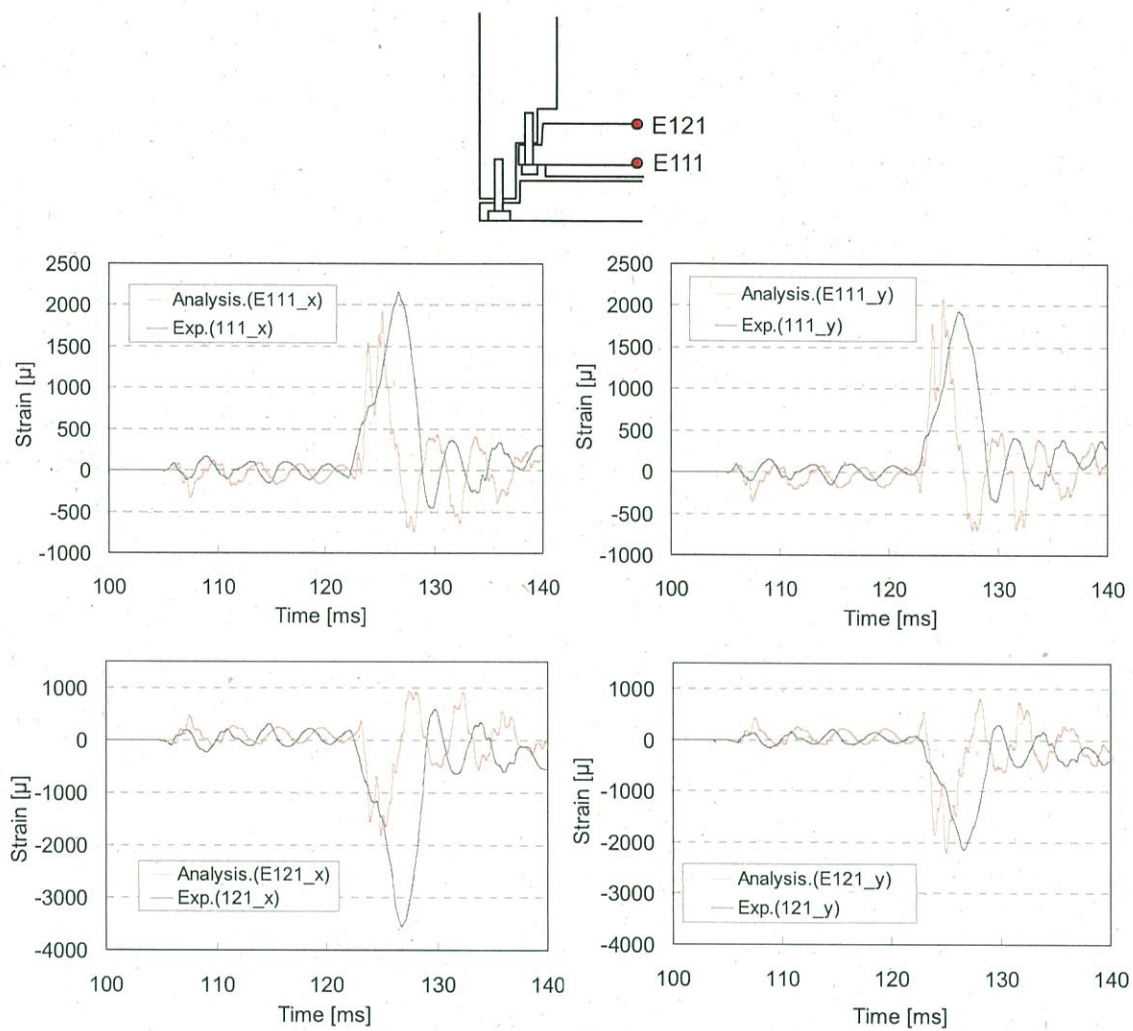


図6 9.3m垂直落下時の一次蓋ひずみ時刻歴の比較

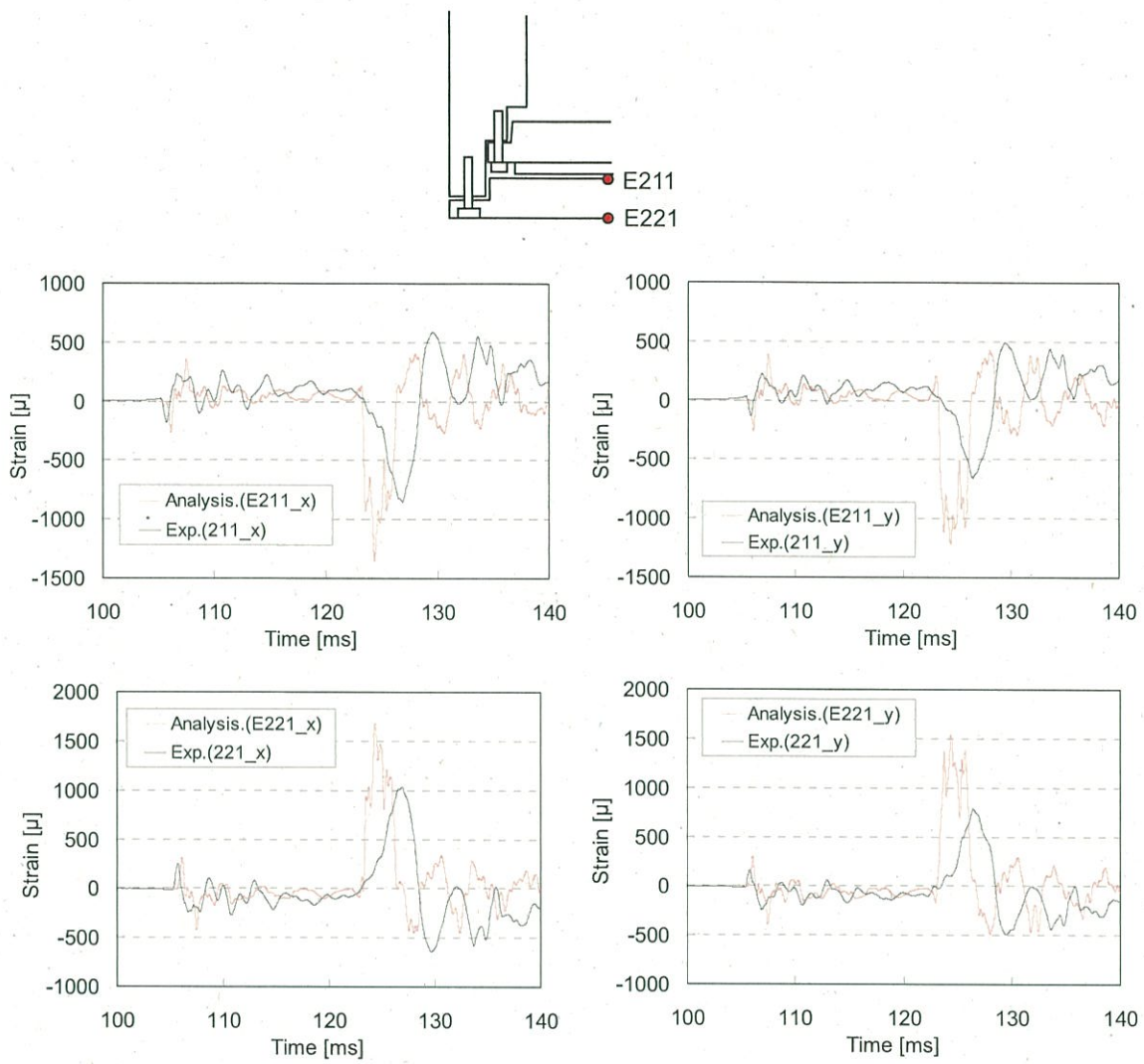


図7 9.3m 垂直落下時の二次蓋ひずみ時刻歴の比較

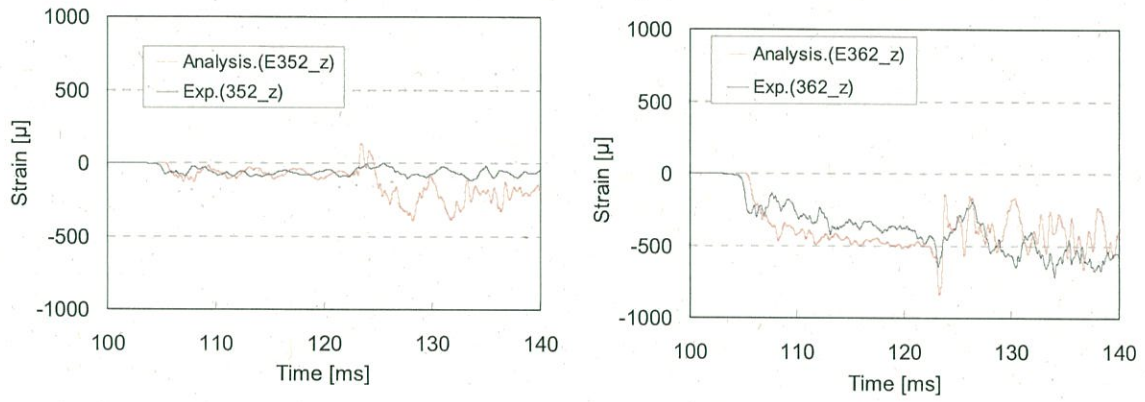
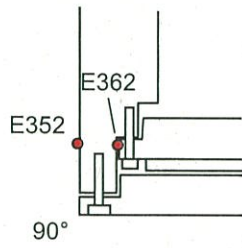


図8 9.3m 垂直落下時の胴フランジひずみ時刻歴の比較

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。

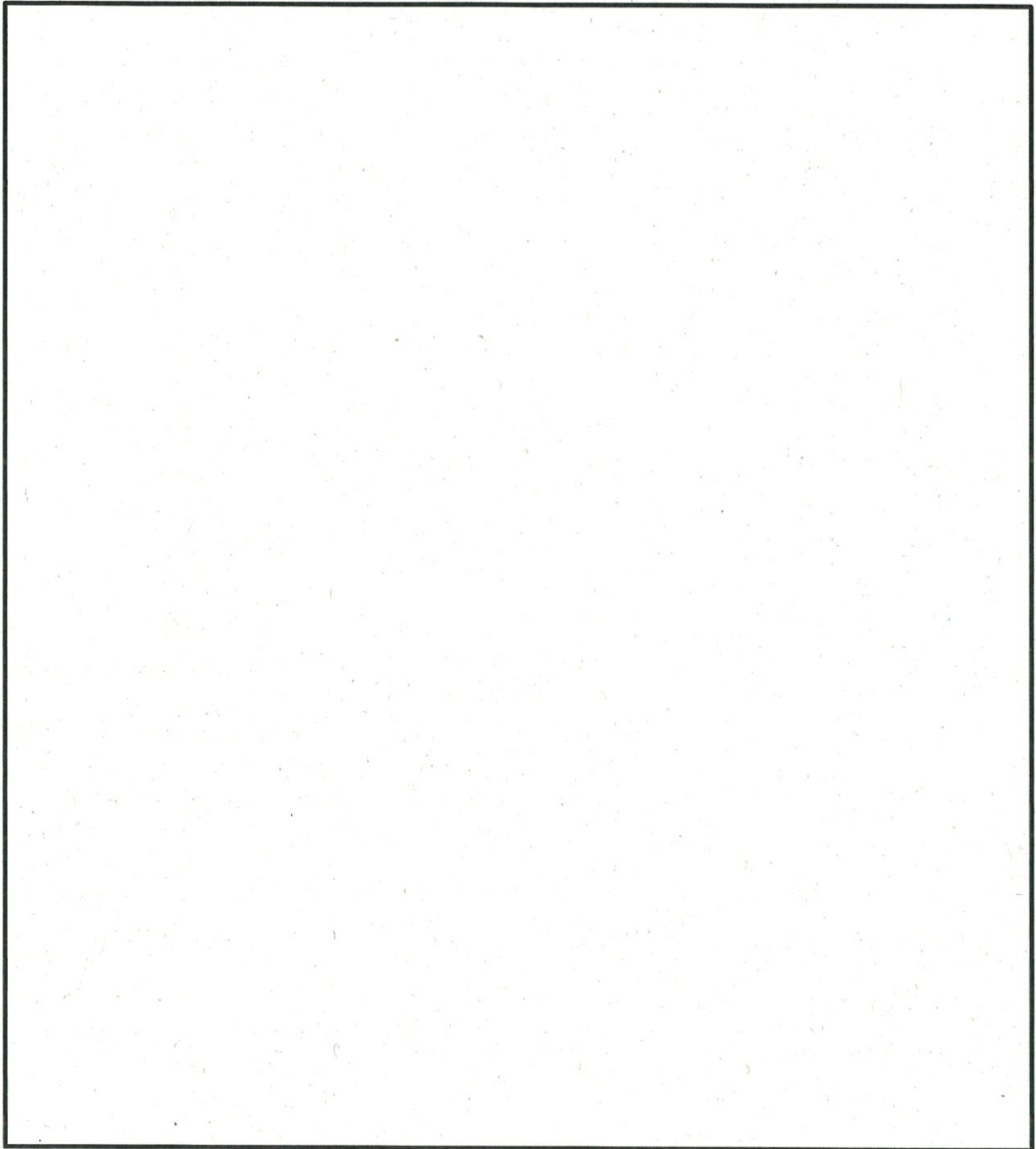


図9 荷重作用方向及び負荷範囲
(天井クレーン落下解析時と頭部垂直落下時の比較)

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	—

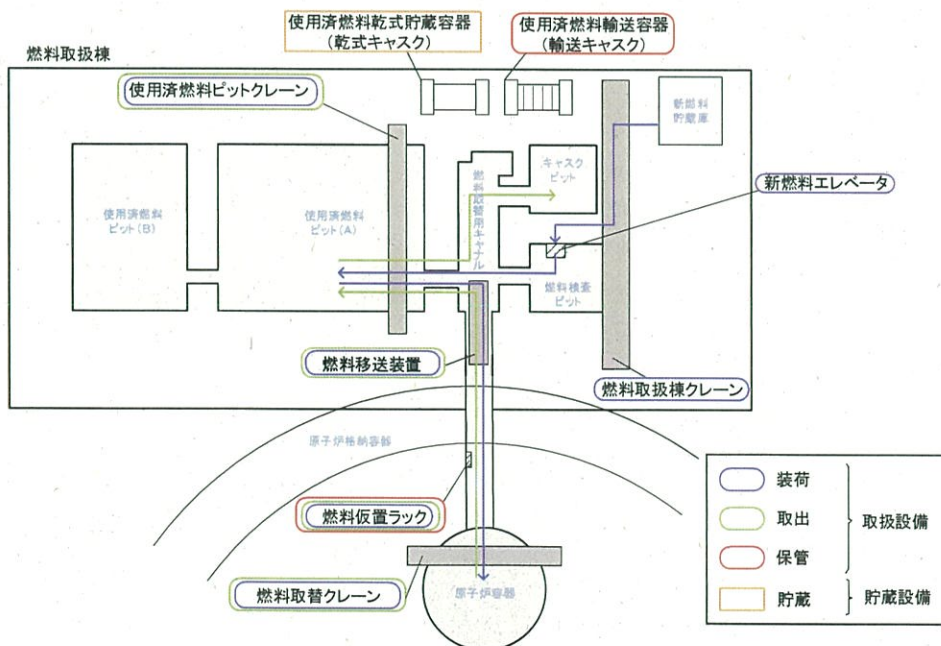


図 1 当社既設設備の配置概要図と取扱様態との関係性

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49.)>

- ・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 9 m 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. 説明方針

上記内容を踏まえ、今回の申請において、表2の様に設備を分類すると共に、16条第2項の周辺施設として、乾式キャスクの移動を安全かつ確実に行える設計であることを説明する。

表2. 設備分類および説明方針

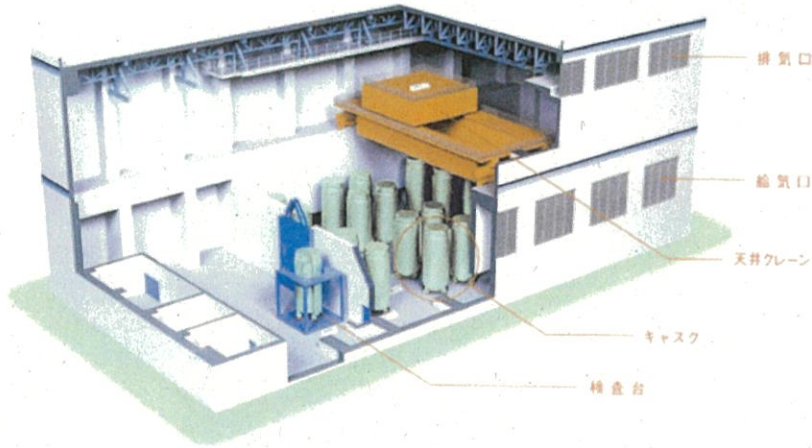
設備名称	分類	既許可上の分類	説明方針	16条まとめ資料
燃料取扱棟 クレーン	周辺施設	燃料取扱 設備	<ul style="list-style-type: none"> ・16条まとめ資料にて、想定事象を想定しても使用済燃料乾式貯蔵容器の安全機能に影響ないことを説明済。 ・設備については、燃料取扱設備であり、乾式キャスクはクレーン容量（吊荷重）以下であり、安全に取り扱えることを説明済。 	2.7項 2.7項
乾式貯蔵建屋天井 クレーン	周辺施設		<ul style="list-style-type: none"> ・16条まとめ資料にて、想定事象を想定しても使用済燃料乾式貯蔵容器の安全機能に影響ないことを説明済。 ・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済。 	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済。 ・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。

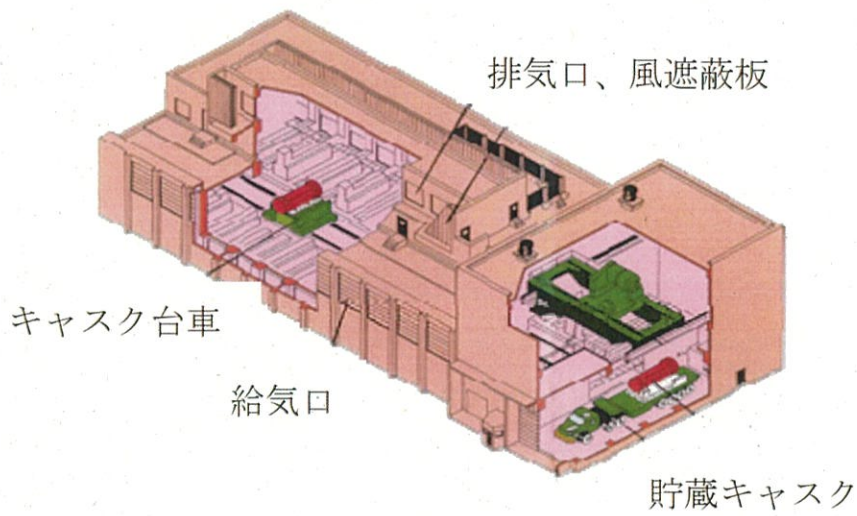
- ・電源遮断時に自動的にブレーキが作動することでワイヤが巻き下げられることを防止し吊荷を保持する。
- ・ワイヤがフックから外れることを防止するための外れ止めを設ける。
- ・巻過ぎによるワイヤの切断を防止する巻過防止装置を設ける。
- ・吊荷の安定化のためワイヤを二重化する。

(参考)

○日本原電(株)東海第二

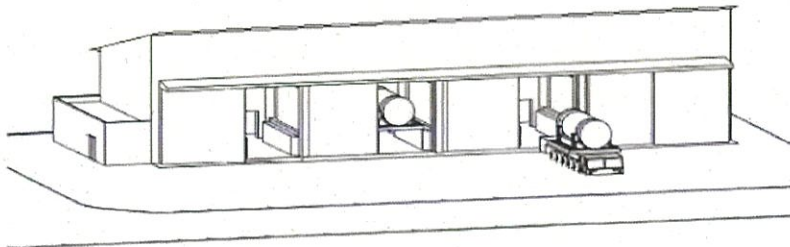


○東京電力HD(株)福島第一 (旧キャスク保管庫)



○関西電力(株) (キャスク保管庫)

使用済燃料輸送容器保管建屋外観概要図



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 0.097 MPa)に到達することはない。

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

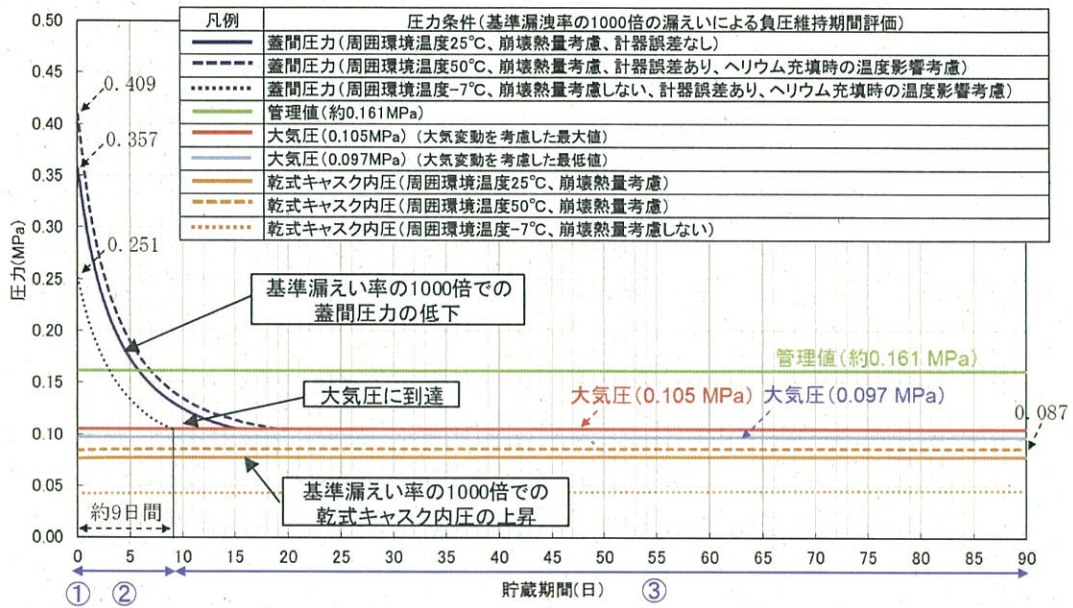


図1 貯蔵期間中における蓋間圧力等の経時変化(1/2)

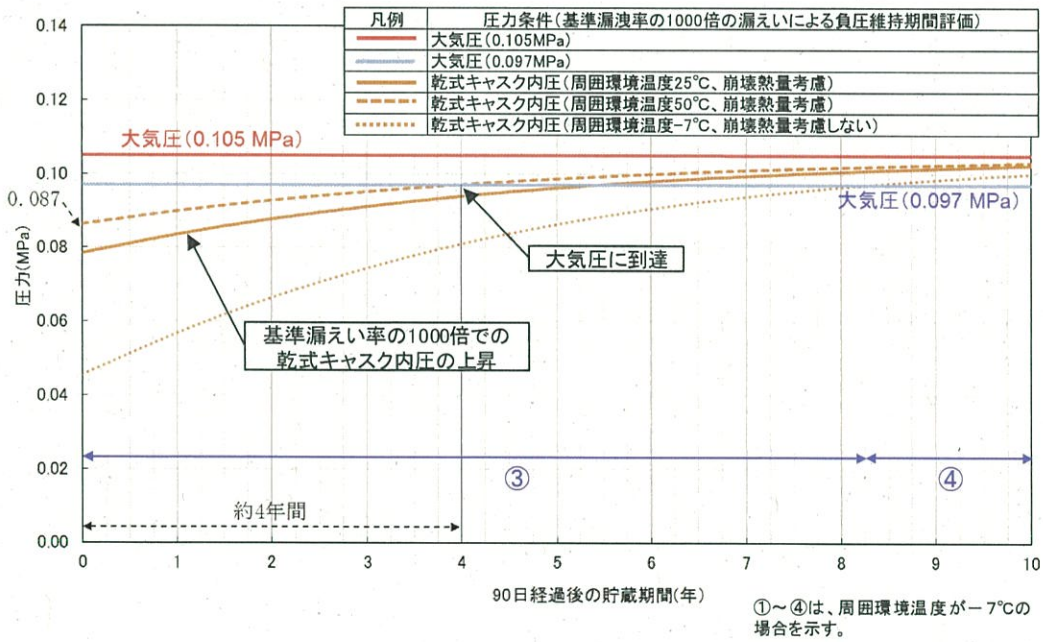


図1 貯蔵期間中における蓋間圧力等の経時変化(拡大図)(2/2)

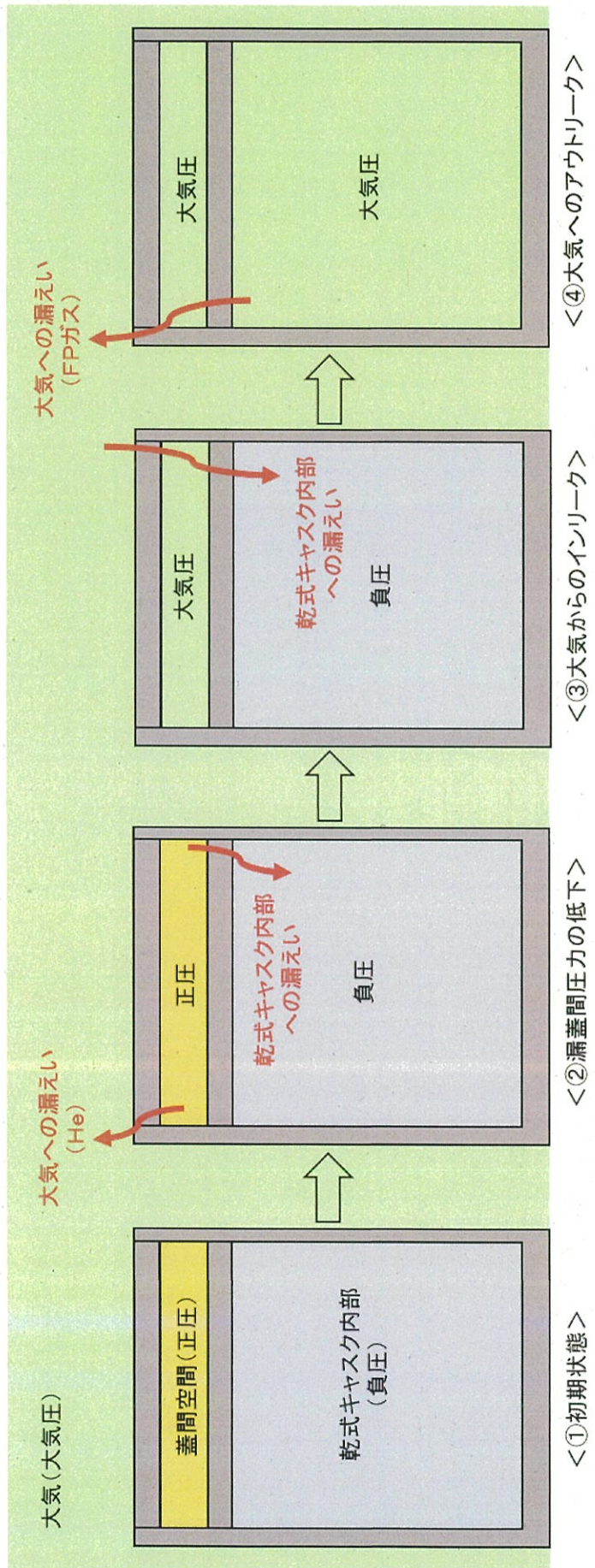


図2 漏えいのイメージ図