

資料1-1

Doc. No. L5-95KV253 R4

発電用原子炉施設に係る型式設計特定機器の 型式指定申請

技術基準規則への適合性について

2022.11.2

三菱重工業株式会社

枠囲いの内容は商業機密のため、非公開とします。

1. 技術基準規則への適合性概要	…2
2. 技術基準規則への適合性(5条)	…4
3. 技術基準規則への適合性(6条)	…9
4. 技術基準規則への適合性(7条)	…15
5. 技術基準規則への適合性(17条)	…21
6. 技術基準規則への適合性(26条)	…23
7. 指摘事項リスト	…58
8. 指摘事項への回答	…59
9. 説明スケジュール	…72

1. 技術基準規則への適合性概要

● 技術基準規則への適合性概要

技術基準規則		特定兼用キャスクの安全機能				構造強度	長期健全性
		臨界防止	遮蔽	除熱	閉じ込め		
第5条	地震による損傷の防止	—	—	—	—	○	—
第6条	津波による損傷の防止	—	—	—	—	○	—
第7条	外部からの衝撃による損傷の防止(竜巻)	—	—	—	—	○	—
第17条	材料及び構造	—	—	—	—	○	—
第26条	燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備	○	○	○	○	○	○

(注) ○ : 基本設計方針に基づき、規則適合性として安全評価結果等を説明する項目

条	項目	安全評価説明事項(摘要)	評価方法・解析コード
5条	地震	告示地震力に対してその安全性が損なわれるおそれがないことを、構造強度評価(応力評価等)により示す。	ABAQUS及び構造公式
6条	津波	告示津波による津波荷重に対してその安全性が損なわれるおそれがないことを、構造強度評価(応力評価)により示す。	
7条	竜巻	告示竜巻による竜巻荷重に対してその安全性が損なわれるおそれがないことを、構造強度評価(応力評価)により示す。	
17条	構造強度	クラス3容器として十分な構造及び強度を有することを示す。	構造公式
26条	臨界防止	乾燥状態及び冠水状態における臨界評価により、中性子実効増倍率は0.95を下回ることから臨界に達するおそれがないことを示す。	SCALE6.2.1(KENO-VI)
	遮蔽	使用済燃料を線源とした遮蔽評価により、通常貯蔵時の特定兼用キャスク表面の線量当量率が2 mSv/h以下、及び表面から1m離れた位置における線量当量率が100 μSv/h以下となることを示す。	線源強度: ORIGEN2 線量当量率: MCNP5
	除熱	使用済燃料を熱源とした除熱評価により、貯蔵状態の燃料被覆管及び特定兼用キャスクの構成部材の温度が健全性を維持できる温度以下となることから崩壊熱を適切に除去できることを示す。	崩壊熱量: ORIGEN2 温度: ABAQUS
	閉じ込め	金属ガスケットの漏えい率が設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク内部を負圧に維持できる性能(基準漏えい率)以上であることから放射性物質を適切に閉じ込めることを示す。	閉じ込め評価式
	長期健全性	使用環境における温度、放射線照射、腐食に係る長期健全性評価により、適切な材料・構造であること、及び使用済燃料被覆管の著しい腐食又は変形を防止できることを示す。	文献・試験データによる確認
	構造強度	安全機能を担保する強度部材が十分な構造強度を有することを示す。	ABAQUS及び構造公式

1. 技術基準規則への適合性概要

安全評価における型式証明での説明事項との差異

型式証明における設計方針の妥当性見通し説明において実施した安全評価方法及び評価条件との差異を下表に示す。

条	項目	評価方法・解析コード		安全評価における型式証明での評価条件からの差異
		型式指定	型式証明	
5条	地震	ABAQUS及び構造公式	構造公式 (簡易評価)	型式証明では詳細評価を行っておらず、型式指定申請において詳細評価結果を示す。
6条	津波			
7条	竜巻			
17条	構造強度	構造公式		(型式証明では未説明)
26条	臨界防止	SCALE6.2.1 (KENO-VI)	左記と同じ	評価条件に差異なし(同一の安全評価)
	遮蔽	線源強度: ORIGEN2	左記と同じ	評価条件に差異なし(同一の線源強度)
		線量当量率: MCNP5	MCNP5及びDOT3.5	以下の条件見直しにより遮蔽解析結果に差異あり。 ・解析モデルにおいて保守的に貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体を無視。
	除熱	崩壊熱量: ORIGEN2	左記と同じ	評価条件に差異なし(同一の崩壊熱量)
		温度: ABAQUS	左記と同じ	以下の条件見直しにより除熱解析結果に差異あり。 ・貯蔵用三次蓋の詳細設計構造を適用。 ・型式証明では、屋外貯蔵時を代表条件としていたが、型式指定の条件である貯蔵建屋内貯蔵時の条件とする。
	閉じ込め	閉じ込め評価式	左記と同じ	特定兼用キャスク本体内部温度について、上記除熱解析結果を反映
	長期健全性	文献・試験データによる確認	左記と同じ	特定兼用キャスク構成部材及び使用済燃料の温度について、上記除熱解析結果を反映
構造強度	ABAQUS及び構造公式	構造公式 (簡易評価)	型式証明では詳細評価を行っておらず、型式指定申請において詳細評価結果を示す。	

2. 技術基準規則への適合性(5条)

地震による損傷の防止(第5条第5項)

《規則要求》

兼用キャスクは、設置許可基準規則第4条第6項に規定する地震力に対してその安全性が損なわれるおそれがないように施設しなければならない。

基本設計方針

- MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスクを基礎等に固定せず、かつ、告示地震力による特定兼用キャスク蓋部の金属部への衝突に対して、その安全機能が損なわれるおそれがない、蓋部が金属部へ衝突しない方法で横置きに設置する設計とする。
- MSF-24P(S)型は、自重その他の貯蔵時に想定される荷重と上記の地震力を組み合わせた荷重条件に対して、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部位のうち、閉じ込め機能を担保する部位は、おおむね弾性状態に留まるようにし、臨界防止機能を担保するバスケットプレートは、弾性状態に留まるように設計する。その他の部位については、塑性ひずみが生じる場合であっても、破断延性限界に十分な余裕を有し、特定兼用キャスクの安全機能が維持される設計とする。

安全評価

- 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601)(以下「JEAG4601」という。)に基づき、設計用地震力による荷重(水平2300Gal及び鉛直1600Gal)と地震力以外の荷重の組合せを適切に考慮した荷重条件に対し、特定兼用キャスク(耐震Sクラス)の安全機能を担保する構成部位は十分な構造強度を有しており、地震時において安全機能が維持されることを確認した。

評価部位	適用規格等		備考
胴・一次蓋・カバープレート・一次蓋ボルト カバープレートボルト・二次蓋・二次蓋ボルト	金属キャスク 構造規格 (供用状態D)	密封容器	評価部位に対する適用規格等は、伊方発電所3号機 使用済燃料乾式貯蔵施設の設置工事に係る設計及び工事計画認可申請(原規規発第2107076号 令和3年7月7日認可)(以下「先行設工認」という。)における使用済燃料乾式貯蔵容器と同じである。
トランシオン		トランシオン	
外筒・下部端板・中性子遮蔽材カバー		中間胴	
バスケットプレート	使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号:T-DP C17001)を受けた評価方法(供用状態D) ^(注)		
伝熱フィン	—(破断しないこと)		

(注)バスケットプレートには、(一社)日本機械学会「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 JSME S FA1-2007」(以下「金属キャスク構造規格」という。)に規定される材料を用いておらず、型式設計特定容器等の型式の指定を受けた材料と同じ材料を使用する。

後段審査(設工認)で別途確認される事項

- 地震時に貯蔵施設における周辺施設等からの波及的影響によりMSF-24P(S)型の安全機能が損なわれないこと。

2. 技術基準規則への適合性(5条)

● 審査ガイドの要求事項(1/2)

審査ガイド^(注)の要求事項に対するMSF-24P(S)型の設計への考慮を下表に示す。
これらを考慮した設計及び安全評価結果をP.7～8に示す。

項目	要求事項(確認内容)		設計における考慮
考慮する自然現象の設定方針	地震力	第6項地震力として①兼用キャスク告示で定める地震力又は②基準地震動による地震力を適用していること。	兼用キャスク告示で定める加速度(水平2300Gal、鉛直1600Gal)による地震力に対して特定兼用キャスクの安全機能が維持される設計とする。
基本方針	安全機能維持	兼用キャスクを基礎等に固定しない場合、兼用キャスク告示で定める加速度による地震力に対して安全機能が維持される設計であること。	
	波及的影響及び周辺斜面の影響	周辺施設からの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること。また、設置位置周辺の斜面が安全機能に影響を及ぼす可能性について判断すること。	(型式指定申請の範囲外)
荷重及び荷重の組合せ	地震力以外の荷重	兼用キャスクに作用する地震力以外の荷重は安全上適切と認められる規格等に基づいて、貯蔵時に想定される荷重を考慮していること。	耐震性評価は、JEAG4601に基づき、設計用地震力による荷重と地震力以外の荷重として、貯蔵施設での特定兼用キャスクの貯蔵時の状態に作用する荷重を組合せて実施している。
	荷重の組み合わせ	耐震性評価を行う際、JEAG等の安全上適切と認められる規格等を参考に、兼用キャスクの設置方法に応じて、兼用キャスクに作用する地震力と地震力以外の荷重を適切に組み合わせていること。	
	転倒等	転倒等を想定する場合は、転倒等による荷重と同時に想定されるその他の荷重とを組み合わせた評価を行っている。	(型式指定申請の範囲外)

(注)「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」

2. 技術基準規則への適合性(5条)

● 審査ガイドの要求事項(2/2)

項目	要求事項(確認内容)		設計における考慮
許容限界	兼用キャスクの許容限界は、安全上適切と認められる規格等に基づき設定すること。また、密封境界部がおおむね弾性範囲となる許容限界としていること。臨界防止機能をバスケットで担保している場合、バスケットが臨界防止上有意な変形を起こさない許容限界としていること。		許容限界は、金属キャスク構造規格の適用部材の分類に応じた供用状態Dの許容基準を適用している。金属キャスク構造規格における密封境界部の供用状態Dの許容応力は弾性範囲内である。臨界防止機能を担保するバスケットプレートは、使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号:T-DPC17001)を受けたバスケットプレート材料における供用状態Dの設計基準を許容限界とするとともに、弾性範囲内に留まることを確認している。
静的解析及び地震応答解析	解析モデル及び解析手法	静的解析又は地震応答解析に用いる解析モデル及び解析手法は、JEAG4601の規定を参考に設定していること。	耐震性評価は、静的震度(兼用キャスク告示で定める加速度)に基づき算定した地震力を使用し、静的解析により実施している。地震力は、水平地震力及び鉛直地震力を同時に不利な方向の組合せで作用させている。
	地震力の組合せ	静的解析において、兼用キャスク告示で定める地震力を用いる場合の水平地震力及び鉛直地震力については同時に不利な方向の組合せで作用させること。	
耐震性評価	応力評価及び疲労評価	<ul style="list-style-type: none"> 兼用キャスクの耐震性を評価する上で必要な箇所を評価対象部位として選定し、安全上適切と認められる規格等の規定を参考に、当該評価対象部位の応力評価及び疲労評価を行っていること。 地震力とそれ以外の荷重を組み合わせ、その結果得られる応力等が前記許容限界を超えていないこと。 密封境界部以外の部位は、前記の荷重により塑性ひずみが生ずる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に対して十分な余裕を有すること。 兼用キャスクの臨界防止機能をバスケットで担保しており、兼用キャスクの転倒又は衝突、貯蔵建屋の天井の落下等によりバスケットに塑性変形が生ずる場合は、バスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。 	耐震性評価におけるMSF-24P(S)型の安全機能の維持は、設計用地震力及び地震力以外の荷重に対して、特定兼用キャスクの構造強度の確保を基本とし、特定兼用キャスクに上記の荷重が作用した場合に特定兼用キャスクの安全機能を担保する部位に生じる応力等を前述の許容限界以下とすることで構造強度を確保する。応力評価及び疲労評価は、金属キャスク構造規格の供用状態Dの規定に基づいている。上記に基づく耐震性評価の結果、MSF-24P(S)型の各部材が地震時に十分な構造強度を有しており、安全機能が維持されることを確認している。

(注)「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」

2. 技術基準規則への適合性(5条)

● 地震力に対する安全評価について

(1) 地震力に対する安全評価方法

MSF-24P(S)型の安全機能の維持は、設計用地震力及び地震力以外の荷重に対して、特定兼用キャスクの構造強度の確保を基本とし、特定兼用キャスクに上記荷重が作用した場合に安全機能を担保する部位に生じる応力等を許容限界以下とすることで構造強度を確保する。

評価部位	設計用地震力	地震力以外の荷重	適用規格等		評価方法	許容限界	
胴・一次蓋・カバープレート・一次蓋ボルト・カバープレートボルト・二次蓋・二次蓋ボルト	兼用キャスク告示で定める加速度による地震力 ^(注2) ・水平2300Gal ・鉛直1600Gal	貯蔵施設での特定兼用キャスクの貯蔵状態に作用する荷重(圧力荷重、機械的荷重、熱荷重)及び自重	金属キャスク構造規格	密封容器	ABAQUSコード及び構造公式	供用状態Dの許容基準 ^(注3)	
トランニオン ^(注1)				トランニオン	応力評価式		
外筒・下部端板・蓋部中性子遮蔽材カバー・底部中性子遮蔽材カバー				中間胴	ABAQUSコード		
バスケットプレート					使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号:T-DPC17001)を受けた評価方法	応力評価式	供用状態Dの許容基準及び弾性範囲内
伝熱フィン					—	応力評価式	破断しないこと

(注1) 地震力によりトランニオンの構造健全性が維持され、MSF-24P(S)型が貯蔵架台に設置された状態を維持することを示すために評価を行う。

(注2) 地震力は、静的震度(加速度)に基づき算定した地震力を使用する。また、地震力は、水平地震力及び鉛直地震力を同時に不利な方向の組合せで作用させる。

(注3) 金属キャスク構造規格の密封境界部(密封シール部及び密封蓋ボルト)の許容応力は弾性範囲内である。

2. 技術基準規則への適合性(5条)

● 地震力に対する安全評価について

(2) 応力解析に用いる解析コード

地震力に対する安全評価では、密封容器のうち、胴、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋及び二次蓋ボルト、並びに中間胴として評価する外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの応力解析にABAQUSを使用している。ABAQUSは、MSF-24P(S)型のプロトタイプであるMSFキャスクの落下試験モデルを用いた落下試験により検証され適用性を確認している。また、このコードは、技術的な特殊性、新規性はなく、許認可で実績があるコードである。

(3) 評価結果

各部位の応力等は、金属キャスク構造規格等に規定される許容基準を満足していることを確認した。

① 応力評価

(単位:MPa)

部位 ¹⁾	応力分類	計算値	許容基準値
一次蓋	一次+二次応力	23	372
二次蓋	膜+曲げ(一次)	30	377
胴(シール部)	一次+二次応力	82	185
胴	一次+二次応力	33	366
一次蓋(シール部)	一次+二次応力	81	185
一次蓋ボルト	引張+曲げ	400	842
二次蓋ボルト	引張+曲げ	460	844
カバープレート	膜+曲げ(一次)	4	431
カバープレートボルト	引張+曲げ	169	842
上部トランニオン	支圧(一次+二次)	105	377
下部トランニオン	支圧(一次+二次)	195	377
外筒	曲げ(一次)	65	280
下部端板	座屈(一次+二次)	42	205
蓋部中性子遮蔽材カバー	座屈(一次+二次)	17	235
底部中性子遮蔽材カバー	座屈(一次+二次)	47	205
バスケットプレート	圧縮	2	66
伝熱フィン	せん断	1	116

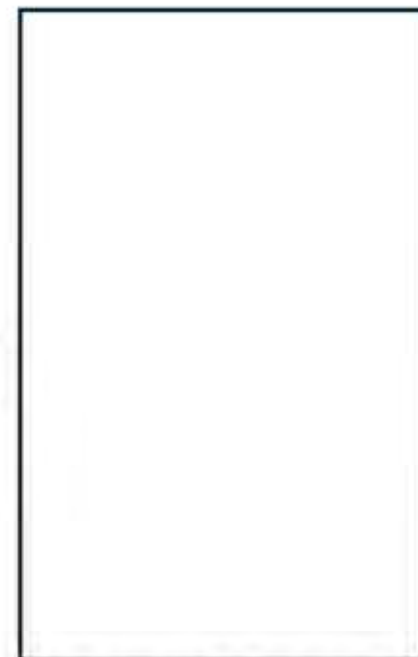
(注)各部位のうち許容応力に対し最も余裕が少ないものを示している。

② 疲労評価

(単位:—)

部位 ²⁾	疲労累積係数	許容基準値
一次蓋ボルト	0.0358	!
二次蓋ボルト	0.0467	!
カバープレートボルト	0.0134	!

(注)密封容器のうち、その他部位は疲労解析不要の条件を満足するため疲労評価不要である。



密封容器及び外筒等の
応力解析モデル

● 技術基準規則への適合性

以上のとおり、MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部位に生じる応力が金属キャスク構造規格等に規定される強度基準を満足しており、十分な構造強度を有していることから、安全機能が維持される。したがって、地震による損傷の防止に係る要求事項に適合している。

3. 技術基準規則への適合性(6条)

津波による損傷の防止(第6条第2項)

《規則要求》

兼用キャスク及びその周辺施設が設置許可基準規則第5条第2項に規定する津波によりその安全性が損なわれるおそれがないよう、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。

基本設計方針

- MSF-24P(S)型は、告示津波による遡上波の波力及び漂流物の衝突による荷重が同時に作用する荷重条件に対して、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部位のうち、閉じ込め機能を担保する部位は、おおむね弾性状態に留まるようにし、臨界防止機能を担保するバスケットプレートは、弾性状態に留まるように設計する。その他の部位については、塑性ひずみが生じる場合であっても、破断延性限界に十分な余裕を有し、特定兼用キャスクの安全機能が維持される設計とする。

安全評価

- 「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」に基づき、津波荷重とそれ以外の荷重の組合せを適切に考慮した荷重条件に対し、特定兼用キャスクの安全機能を担保する構成部位は十分な構造強度を有しており、津波荷重作用時に特定兼用キャスクの安全機能が維持されることを確認した。

評価部位	適用規格等		備考
胴・一次蓋・カバープレート・一次蓋ボルト カバープレートボルト・二次蓋・二次蓋ボルト	金属キャスク 構造規格 (供用状態D)	密封容器	評価部位に対する適用規格等は、地震による損傷の防止(第5条第5項)と同じである。津波荷重として衝撃荷重が作用すること、及び基本設計方針に示す許容限界を踏まえ、金属キャスク構造規格に規定される供用状態Dの許容基準を許容限界として設定。
外筒・下部端板・中性子遮蔽材カバー		中間胴	
バスケットプレート	使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号:T-DP C17001)を受けた評価方法(供用状態D) ^(注)		
伝熱フィン	—(破断しないこと)		

(注) バスケットプレートには、金属キャスク構造規格に規定される材料を用いておらず、型式設計特定容器等の型式の指定を受けた材料と同じ材料を使用する。

後段審査(設工認)で別途確認される事項

- なし

3. 技術基準規則への適合性(6条)

● 審査ガイドの要求事項

審査ガイド^(注)の要求事項に対するMSF-24P(S)型の設計への考慮を下表に示す。
これらを考慮した設計及び安全評価結果をP.11～14に示す。

項目	要求事項(確認事項又は確認内容)		設計における考慮
考慮する自然現象の設定方針	津波による作用力	津波として、①兼用キャスク告示で定める津波による作用力又は②基準津波による作用力を適用していること。	津波がMSF-24P(S)型の設置位置へ遡上することを前提として、兼用キャスク告示で定める津波による作用力(*)に対して特定兼用キャスクの安全機能が維持される設計とする。
基本方針	安全機能維持	兼用キャスクは、津波による作用力に対して安全機能が維持されること。兼用キャスク告示で定める津波を適用する場合は、津波が兼用キャスクの設置位置へ遡上することを前提とした評価が行われていること。	(*) 算出条件…浸水深:10m、流速:20m/s、漂流物質量:100t
設計・評価の方針	荷重の組合せ	兼用キャスクの評価において保守的な荷重の作用及び組合せを設定すること。	浸水深に基づく津波波力並びに流速及び漂流物質量に基づく衝突荷重が同時に作用することに加え、津波荷重以外の荷重として、常時作用する荷重(自重)及び運転時の状態で作用する荷重(供用中に作用する荷重)を組み合わせ、特定兼用キャスクの評価上最も厳しくなる位置へ作用させている。
	津波荷重の組合せ	考慮する荷重は、浸水深に基づく津波波力並びに流速及び漂流物質量に基づく衝突荷重を基本とし、それぞれの荷重については、兼用キャスクの評価上最も厳しくなる位置に作用させること。	
	津波波力及び漂流物衝突荷重	津波波力及び漂流物荷重は以下の指針等を参考に設定することができる。 ・津波波力(津波波圧) 東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針 ・漂流物衝突荷重 道路橋示方書・同解説(Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編)	
	評価方法	津波荷重に対する兼用キャスクの評価は、既往の研究事例や機能確認試験等の結果との対比、FEM解析に基づく応力評価等により行われていること。	津波荷重及びその他考慮すべき荷重の組合せに対する特定兼用キャスクの評価は、FEM解析及び応力評価式による応力評価により実施している。

(注)「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」

3. 技術基準規則への適合性(6条)

● 津波による作用力に対する安全評価について

(1) 津波による作用力に対する安全評価方法

MSF-24P(S)型の安全機能の維持は、津波荷重及びその他考慮すべき荷重の組合せを考慮し、特定兼用キャスクの構造強度の確保を基本とする。特定兼用キャスクに上記荷重が作用した場合に安全機能を担保する部位に生じる応力を許容限界以下とすることで構造強度を確保する。

評価部位	津波荷重	津波荷重以外の荷重	適用規格等		評価方法	許容限界
胴・一次蓋・カバープレート・一次蓋ボルト・カバープレートボルト・二次蓋・二次蓋ボルト	兼用キャスク告示で定める津波による作用力 ^(注1) ・浸水深: 10m ・流速: 20m/s ・漂流物質量: 100t	貯蔵施設での特定兼用キャスクの貯蔵状態に作用する荷重(圧力荷重、機械的荷重、熱荷重)及び自重	金属キャスク構造規格	密封容器	ABAQUSコード及び応力評価式	供用状態Dの許容基準 ^(注2)
外筒・下部端板・蓋部中性子遮蔽材カバー・底部中性子遮蔽材カバー				中間胴	ABAQUSコード	
バスケットプレート			使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号:T-DPC17001)を受けた評価方法	応力評価式	供用状態Dの許容基準及び弾性範囲内	
伝熱フィン			—	応力評価式	破断しないこと	

(注1) 浸水深に基づく津波波力並びに流速及び漂流物質量に基づく衝突荷重を同時に作用させる。津波荷重は、評価上最も厳しくなる位置へ作用させる。

(注2) 金属キャスク構造規格の密封境界部(密封シール部及び密封蓋ボルト)の許容応力は弾性範囲内である。



3. 技術基準規則への適合性(6条)

● 津波による作用力に対する安全評価について

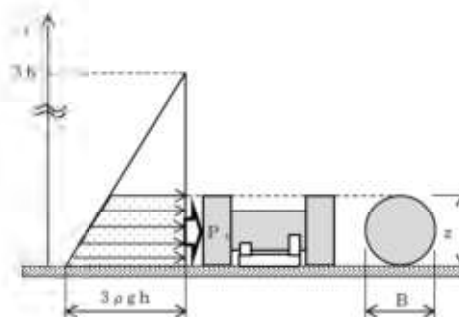
(2) 津波荷重の算定及び作用方向

① 津波波力 (P_t)

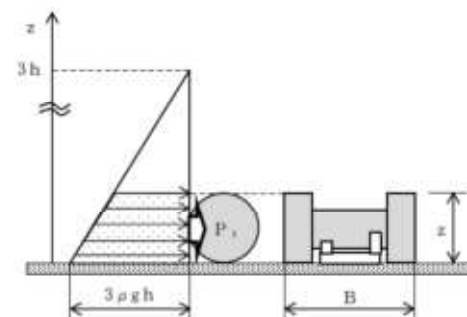
「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」の評価式により算定する。

$$P_t = \rho_w g B \left(ahz - \frac{1}{2} z^2 \right)$$

ρ_w	海水の密度 (kg/m^3)	a	水深係数 (=3)
g	重力加速度 (m/s^2)	h	津波深 (m)
B	構造物の幅 (m)	z	受圧面の最高高さ (m)



(1) MSF-24P(S)型の軸方向衝突時



(2) MSF-24P(S)型の径方向衝突時

② 漂流物衝突荷重 (P_c)

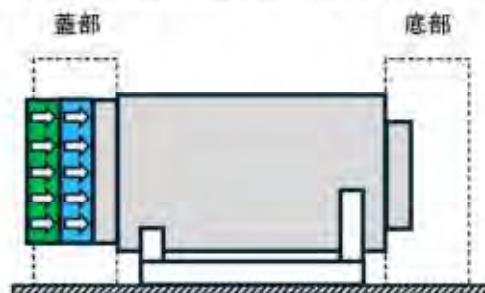
「道路橋示方書・同解説 (I 共通編)」の衝突荷重の評価式により算定する。

$$P_c = 0.1 W v$$

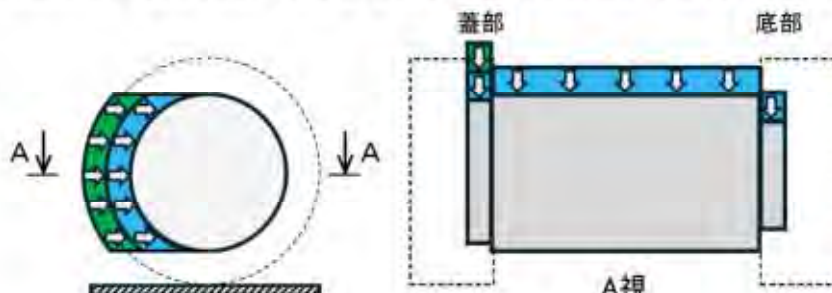
W	漂流物の重量 (N)
v	表面流速 (m/s)

③ 津波荷重 (P)

津波荷重は、津波波力と漂流物衝突荷重を組み合わせる。津波荷重に加え、常時作用する荷重(自重)、及び供用中に作用する荷重(圧力荷重、機械的荷重、熱荷重)を考慮する。漂流物衝突荷重の作用位置は、許容応力に対して余裕が小さく、最も厳しくなる蓋部とする。



(1) MSF-24P(S)型の軸方向衝突時



(2) MSF-24P(S)型の径方向衝突時

: 津波波力
 : 漂流物衝突荷重

津波荷重の作用位置

3. 技術基準規則への適合性(6条)

● 津波による作用力に対する安全評価について

(3) 応力解析に用いる解析コード

津波による作用力に対する安全評価では、密封容器のうち、胴、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋及び二次蓋ボルト、並びに中間胴として評価する外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの応力解析にABAQUSを使用している。ABAQUSは、MSF-24P(S)型のプロトタイプであるMSFキャスクの落下試験モデルを用いた落下試験により検証され適用性を確認している。また、このコードは、技術的な特殊性、新規性はなく、許認可で実績があるコードである。

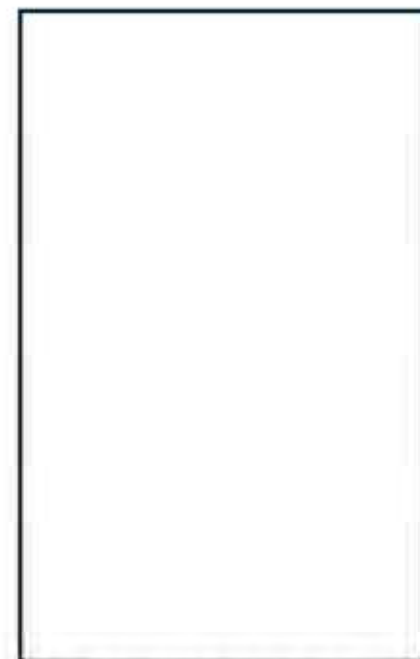
(4) 評価結果

各部位の応力は、金属キャスク構造規格等に規定される許容基準を満足していることを確認した。また、蓋部以外に津波荷重が作用する場合においても、MSF-24P(S)型の外殻を構成する部材が十分な強度を有していることを確認した(P.14参照)。

蓋部に津波荷重が作用する場合の強度評価結果

部位 ¹⁾	応力分類	計算値(MPa)	許容基準値(MPa)
一次蓋	胴+曲げ(一次)	9	377
二次蓋	胴+曲げ(一次)	29	377
胴(シール部)	一次+二次応力	63	185
胴	圧縮(一次)	11	135
一次蓋(シール部)	一次+二次応力	78	185
一次蓋ボルト	引張+曲げ	364	842
二次蓋ボルト	引張+曲げ	372	844
カバープレート	胴+曲げ(一次)	5	431
カバープレートボルト	引張+曲げ	172	842
外筒	曲げ(一次)	86	284
下部端板	曲げ(一次)	49	286
蓋部中性子遮蔽材カバー	圧縮(一次)	4	282
底部中性子遮蔽材カバー	曲げ(一次)	39	286
バスケットプレート	圧縮	4	66
伝熱フィン	せん断	1	116

(注)各部位のうち許容応力に対し最も余裕が少ないものを示している。



密封容器及び外筒等の
応力解析モデル

● 技術基準規則への適合性

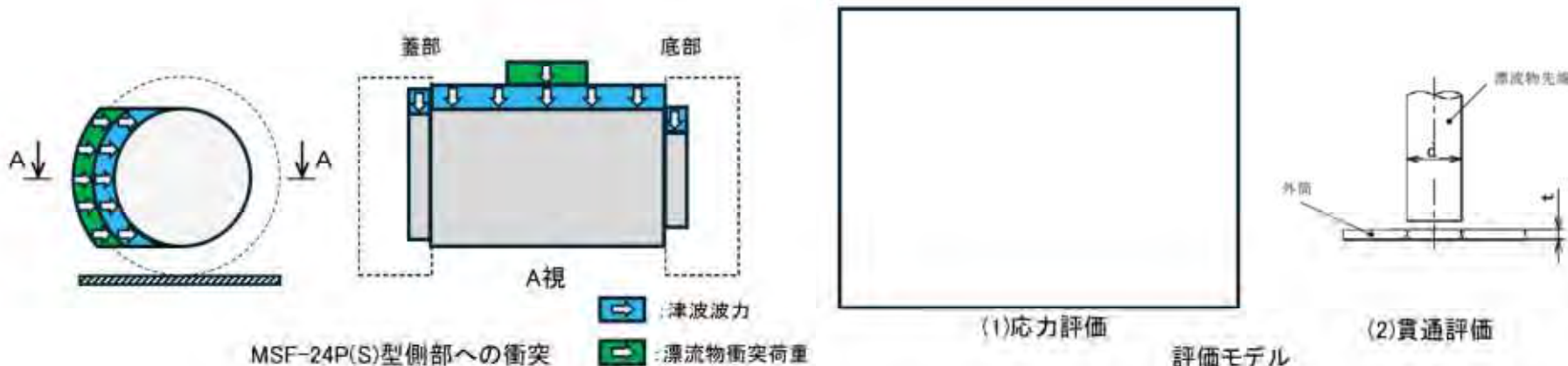
以上のとおり、MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部位に生じる応力が金属キャスク構造規格等に規定される強度基準を満足しており、十分な構造強度を有していることから、安全機能が維持される。したがって、津波による損傷の防止に係る要求事項に適合している。

3. 技術基準規則への適合性(6条)

● 津波による作用力に対する安全評価について

＜津波荷重がMSF-24P(S)の蓋部以外に作用する場合の構造強度評価＞

津波荷重が蓋部以外に作用する場合において、津波荷重はP.12の軸方向衝突又は径方向衝突と同じとなるため、衝突近傍以外の部位への影響は蓋部に作用する場合と同じとなるが、衝突近傍の部位への影響については個別の確認が必要である。津波荷重がMSF-24P(S)型の蓋部以外に衝突する場合として、MSF-24P(S)型の外殻を構成する部位のうち、板厚が最も薄い外筒への衝突(側部への径方向衝突)における応力評価及び貫通評価を行い、外筒が十分な強度を有することを確認した。



MSF-24P(S)型側部に津波荷重が作用する場合の外筒の強度評価結果

評価項目	計算結果		評価結果
	種類	計算値	
応力評価	組合せ応力 (一次) ^(注1)	52 MPa	外筒に発生する応力は評価基準値(284 MPa) ^(注2) を満足する。
貫通評価	せん断破壊により貫通するために必要な漂流物の外径	117 mm	衝突する漂流物の質量が100tであることを踏まえると衝突範囲は計算値よりも十分大きいと考えられるため、外筒は破断しない。

(注1) 計算結果のうち、許容応力に対し最も余裕が少ないものを示している。
 (注2) 応力評価の許容基準値は、金属キャスク構造規格の中間網(供用状態D)を適用。

4. 技術基準規則への適合性(7条)

竜巻による損傷の防止(第7条第4項)

《規則要求》

兼用キャスクが設置許可基準規則第6条第4項又は第5項の規定により定める自然現象によりその安全性を損なうおそれがある場合は、防護措置、基礎地盤の改良その他の適切な措置を講じなければならない。

基本設計方針

- MSF-24P(S)型は、告示竜巻による荷重及び設計飛来物の衝突による荷重を組み合わせた荷重条件に対して、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部位のうち、閉じ込め機能を担保する部位は、おおむね弾性状態に留まるようにし、臨界防止機能を担保するバスケットプレートは、弾性状態に留まるように設計する。その他の部位については、塑性ひずみが生じる場合であっても、破断延性限界に十分な余裕を有し、特定兼用キャスクの安全機能が維持される設計とする。

安全評価

- 「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」に基づき、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を参照して、設計竜巻荷重とそれ以外の荷重の組合せを適切に考慮した荷重条件に対し、特定兼用キャスクの安全機能を担保する構成部位は十分な構造強度を有しており、竜巻荷重作用時に特定兼用キャスクの安全機能が維持されることを確認した。

評価部位	適用規格等		備考
胴・一次蓋・カバープレート・一次蓋ボルト カバープレートボルト・二次蓋・二次蓋ボルト	金属キャスク 構造規格 (供用状態D)	密封容器	評価部位に対する適用規格等は、地震による損傷の防止(第5条第5項)と同じである。 竜巻荷重として衝撃荷重が作用すること、及び基本設計方針に示す許容限界を踏まえ、金属キャスク構造規格に規定される供用状態Dの許容応力を許容限界として設定。
外筒・下部端板・中性子遮蔽材カバー		中間胴	
バスケットプレート	使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号:T-DP C17001)を受けた評価方法(供用状態D) ^(注)		
伝熱フィン	—(破断しないこと)		

(注) バスケットプレートには、金属キャスク構造規格に規定される材料を用いておらず、型式設計特定容器等の型式の指定を受けた材料と同じ材料を使用する。

後段審査(設工認)で別途確認される事項

- 貯蔵施設における設計竜巻によりMSF-24P(S)型に衝突し得る設計飛来物の条件が、本申請の設計飛来物の条件に包絡されていること。

4. 技術基準規則への適合性(7条)

● 審査ガイドの要求事項

審査ガイド^(注)の要求事項に対するMSF-24P(S)型の設計への考慮を下表に示す。

これらを考慮した設計及び安全評価結果をP.17～20に示す。

項目	要求事項(確認事項又は確認内容)		設計における考慮
考慮する自然現象の設定方針	竜巻による作用力	兼用キャスク告示で定める竜巻による作用力を適用していること。最大風速を100m/sと定め、設計荷重を設定していること。設計飛来物は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド解説表4.1に基づき、兼用キャスクに与える影響が最大となるものを選定していること。	兼用キャスク告示で定める竜巻による作用力(*)に対して特定兼用キャスクの安全機能が維持される設計とする。 (*) 算出条件…最大風速:100m/s、設計飛来物:原子力発電所の竜巻影響評価ガイド解説表4.1に示される飛来物のうち特定兼用キャスクに与える影響が最大となるトラックを選定
設計方針	安全機能維持	兼用キャスクは、竜巻による作用力に対して安全機能が維持されること。	
	飛来物の衝突荷重及び衝突による評価	竜巻による飛来物の衝突荷重及び評価は、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」を参考にしていること。	設計竜巻に対する設計飛来物及び最大速度は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(以下、「竜巻影響評価ガイド」という)解説表4.1に記載の値を基に設定し、設計飛来物の衝突荷重は、Rieraの方法に基づき、飛来物の圧潰挙動を無視して算定している。竜巻に対する評価は、竜巻影響評価ガイドを参照して、設計竜巻荷重及びそれ以外の組合せを適切に考慮して実施している。
		設計竜巻に対する飛来物及び最大速度は、原子力発電所の竜巻影響評価ガイド解説表4.1に記載の値を参考に設定し、飛来物の衝突荷重を算定(例えば、建築物の耐衝撃設計の考え方((一社)日本建築学会 2015.1)を参考に飛来物の圧潰挙動を無視してRieraの式等で算定)していること。	
評価方法	竜巻荷重に対する兼用キャスクの評価は、既往の研究事例や機能確認試験等の結果との対比、FEM解析に基づく応力評価等により行われていること。	竜巻荷重及びそれ以外の荷重の組合せにに対する特定兼用キャスクの評価は、FEM解析及び応力評価式による応力評価により実施している。	

(注)「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」

4. 技術基準規則への適合性(7条)

● 竜巻による作用力に対する安全評価について

(1) 竜巻による作用力に対する安全評価方法

MSF-24P(S)型の安全機能の維持は、設計竜巻荷重及びそれ以外の荷重の組合せを考慮し、特定兼用キャスクの構造強度の確保を基本とする。特定兼用キャスクに上記荷重が作用した場合に安全機能を担保する部位に生じる応力を許容限界以下とすることで構造強度を確保する。

評価部位	設計竜巻荷重	設計竜巻荷重以外の荷重	適用規格等		評価方法	許容限界
胴・一次蓋・カバープレート・一次蓋ボルト・カバープレートボルト・二次蓋・二次蓋ボルト	兼用キャスク告示で定める竜巻による作用力 ^(注1) ・最大風速: 100m/s ・設計飛来物: 竜巻影響評価ガイド解説表4.1に基づく	貯蔵施設での特定兼用キャスクの貯蔵状態に作用する荷重(圧力荷重、機械的荷重、熱荷重)及び自重	金属キャスク構造規格	密封容器	ABAQUSコード及び応力評価式	供用状態Dの許容基準 ^(注2)
外筒・下部端板・蓋部中性子遮蔽材カバー・底部中性子遮蔽材カバー				中間胴	ABAQUSコード	
バスケットプレート			使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号:T-DPC17001)を受けた評価方法	応力評価式	供用状態Dの許容基準及び弾性範囲内	
伝熱フィン			—	応力評価式	破断しないこと	

(注1) 設計竜巻の風圧力による荷重、気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重を組み合わせる。竜巻荷重は、評価上最も厳しくなる位置へ作用させる。

(注2) 金属キャスク構造規格の密封境界部(密封シール部及び密封蓋ボルト)の許容応力は弾性範囲内である。



4. 技術基準規則への適合性(7条)

● 竜巻による作用力に対する安全評価について

(2) 設計竜巻荷重の算定及び作用方向

「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に基づき、次の①から③の荷重を組み合わせた複合荷重④を作用させる。

①風圧力による荷重(W_W)

②気圧差による荷重(W_P)

竜巻により生じる外気の気圧差による荷重は、応力評価における特定兼用キャスクの外部と特定兼用キャスク本体内部の差圧設定にて考慮する。

③設計飛来物による衝撃荷重(W_W)

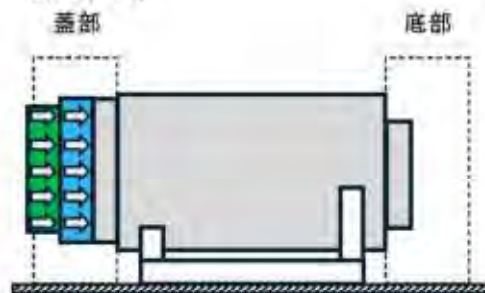
Rieraの方法に基づき、飛来物の圧潰挙動を無視するとともに、設計飛来物の衝突による減速を考慮せず、設計飛来物の衝突前の運動量と衝撃荷重(衝撃荷重時刻歴:三角波、衝突時間=衝突長さ/速度)による力積が等しいとして、算出する。設計飛来物として、飛来物のうち特定兼用キャスクに与える影響が最大となるトラックを選定。

飛来物の種類	棒状物		板状物	塊状物	
	鋼製パイプ	鋼製材	コンクリート板	コンテナ	トラック
寸法(m)	長さ×直径 2×0.05	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×厚さ 1.5×1×0.15	長さ×幅×奥行 2.4×2.6×6	長さ×幅×奥行 5×1.9×1.3
質量(kg)	8.4	135	540	2300	4750
最大水平速度(m/s)	49	57(注)	30	60	34
最大鉛直速度(m/s)	33	38(注)	20	40	23

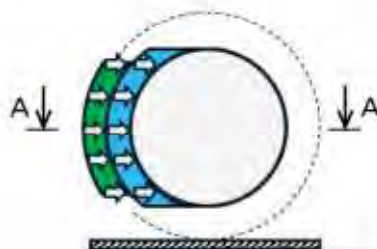
(注) 竜巻影響評価ガイド解説表4.11に記載の速度に対し保守的な設定とした。

④複合荷重(W_T)

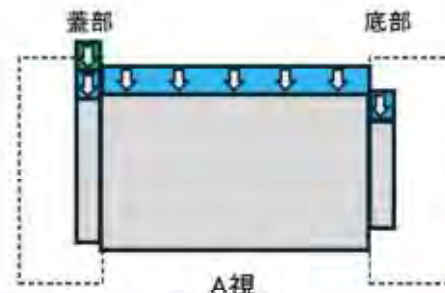
設計竜巻荷重として、①から③の荷重を組み合わせた複合荷重に加え、常時作用する荷重(自重)、及び供用中に作用する荷重(圧力荷重、機械的荷重、熱荷重)を考慮する。設計飛来物による衝撃荷重の作用位置は、許容応力に対して余裕が小さく、最も厳しくなる蓋部とする。



(1) MSF-24P(S)型の軸方向衝突時



竜巻荷重の作用位置



(2) MSF-24P(S)型の径方向衝突時

: 風圧力による荷重
 : 設計飛来物による衝撃荷重

4. 技術基準規則への適合性(7条)

● 竜巻による作用力に対する安全評価について

(3) 応力解析に用いる解析コード

竜巻による作用力に対する安全評価では、密封容器のうち、胴、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋及び二次蓋ボルト、並びに中間胴として評価する外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの応力解析にABAQUSを使用している。ABAQUSは、MSF-24P(S)型のプロトタイプであるMSFキャスクの落下試験モデルを用いた落下試験により検証され適用性を確認している。また、このコードは、技術的な特殊性、新規性はなく、許認可で実績があるコードである。

(4) 評価結果

各部位の応力は、金属キャスク構造規格等に規定される許容基準を満足していることを確認した。また、蓋部以外に設計竜巻荷重が作用する場合においても、MSF-24P(S)型の外殻を構成する部材が十分な強度を有していることを確認した(P.20参照)。

蓋部に設計竜巻荷重が作用する場合の強度評価結果

部位 ^注	応力分類	計算値(MPa)	許容基準値(MPa)
一次蓋	膜+曲げ(一次)	11	377
二次蓋	膜+曲げ(一次)	62	377
胴(シール部)	一次+二次応力	82	185
胴	圧縮(一次)	17	135
一次蓋(シール部)	一次+二次応力	76	185
一次蓋ボルト	引張+曲げ	506	842
二次蓋ボルト	引張+曲げ	586	844
カバープレート	膜+曲げ(一次)	5	431
カバープレートボルト	引張+曲げ	174	842
外筒	曲げ(一次)	97	284
下部端板	曲げ(一次)	24	286
蓋部中性子遮蔽材カバー	組合せ(一次)	9	284
底部中性子遮蔽材カバー	曲げ(一次)	39	286
バスケットプレート	圧縮	4	66
伝熱フィン	せん断	1	116

(注)各部位のうち許容応力に対し最も余裕が少ないものを示している。



密封容器及び外筒等の
応力解析モデル

● 技術基準規則への適合性

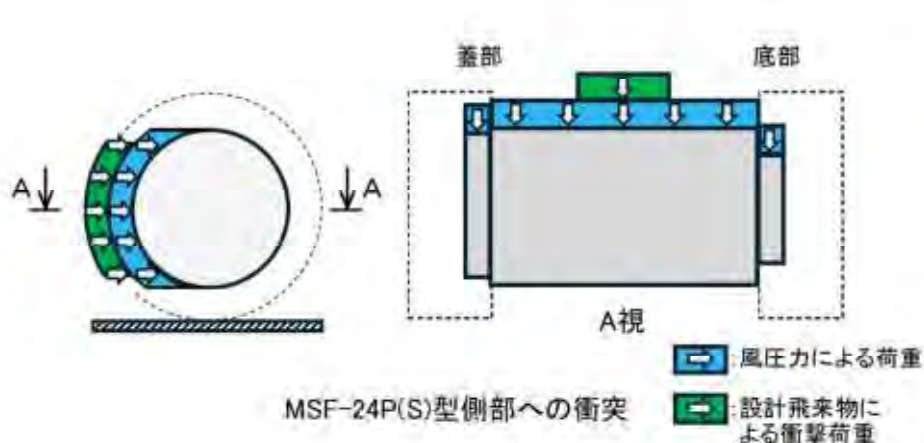
以上のとおり、MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスクの安全機能を担保する部位に生じる応力が金属キャスク構造規格等に規定される強度基準を満足しており、十分な構造強度を有していることから、安全機能が維持される。したがって、竜巻による損傷の防止に係る要求事項に適合している。

4. 技術基準規則への適合性(7条)

● 竜巻による作用力に対する安全評価について

＜設計竜巻荷重がMSF-24P(S)の蓋部以外に作用する場合の構造強度評価＞

設計竜巻荷重が蓋部以外に作用する場合において、設計竜巻荷重はP.18の軸方向衝突又は径方向衝突と同じとなるため、衝突近傍以外の部位への影響は蓋部に作用する場合と同じとなるが、衝突近傍の部位への影響については個別の確認が必要である。設計竜巻荷重がMSF-24P(S)型の蓋部以外に衝突する場合として、MSF-24P(S)型の外殻を構成する部位のうち、板厚が最も薄い外筒への衝突(側部への径方向衝突)における応力評価及び貫通評価を行い、外筒が十分な強度を有することを確認した。



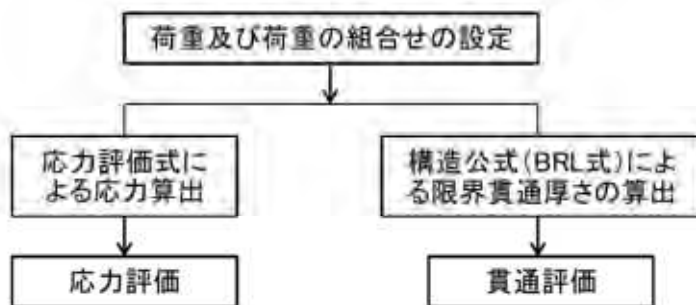
MSF-24P(S)型側部に設計竜巻荷重が作用する場合の外筒の強度評価結果

評価項目	計算結果		評価結果
	種類	計算値	
応力評価	組合せ応力(一次) ^(注1)	61 MPa	外筒に発生する応力は評価基準値(284 MPa) ^(注2) を満足する。
貫通評価	限界貫通厚さ	10.4 mm ^(注3)	外筒の板厚 <input type="text"/> は限界貫通厚さよりも厚く破断しない。

(注1) 計算結果のうち、許容応力に対し最も余裕が少ないものを示している。

(注2) 応力評価の許容基準値は、金属キャスク構造規格の中間胴(供用状態D)を適用。

(注3) P.18に示す飛来物のうち最も限界貫通厚さが大きい鋼製材の結果。



5. 技術基準規則への適合性(17条)

材料及び構造(第17条第1項3号、同10号、同15号)

《規則要求》^(注)

- (第1項3号)クラス3機器に使用する材料は、次に定めるところによること。
 - イ クラス3機器が、その使用される圧力、温度、荷重その他の使用条件に対して適切な機械的強度及び化学的成分を有すること。
- (第1項10号)クラス3機器の構造及び強度は、次に定めるところによること。
 - イ 設計上定める条件において、全体的な変形を弾性域に抑えること。
 - ハ 設計上定める条件において、座屈が生じないこと。
- (第1項15号)クラス3容器のうち主要な耐圧部の溶接部は、次に定めるところによること。
 - イ 不連続で特異な形状でないものであること。
 - ロ 溶接による割れが生ずるおそれがなく、かつ、健全な溶接部の確保に有害な溶込み不良その他の欠陥がないことを非破壊試験により確認したものであること。
 - ハ 適切な強度を有するものであること。
 - ニ 機械試験その他の評価方法により適切な溶接施工法、溶接設備及び技能を有する溶接士であることをあらかじめ確認したものにより溶接したものであること。

基本設計方針

(注)第1項3号ロ及び第1項10号ロは適合対象外である。

- MSF-24P(S)型の材料及び構造は、技術基準規則解釈^(注)及び日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 <第I編 軽水炉規格> JSME S NC1-2012」(以下「設計・建設規格」という。)に基づき設計する。

項目	設計方針
材料	容器に使用する材料は、その使用される圧力、温度、荷重その他の使用条件に対して適切な機械的強度及び化学成分を有する材料((一社)日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 材料規格 JSME S NJ1-2012」に規定される材料)を使用し、検査により設計・建設規格に適合していることを確認する。
構造及び強度	容器は、貯蔵時及び取扱時において、全体的な変形を弾性域に抑えるとともに、座屈が生じない設計(設計・建設規格のクラス3容器の構造規定を満足する設計)とする。
容器の主要な耐圧部の溶接部	容器の主要な耐圧部の溶接部は、第1項15号イ、ロ、ハ、ニを満足するものとし、各種検査により、適用基準及び適用規格((一社)日本機械学会「発電用原子力設備規格 溶接規格 JSME S NB-2012/2013」)(以下「溶接規格」という。)に適合していることを確認する。

(注)技術基準規則解釈には、技術基準規則第17条の規定と設計・建設規格又は溶接規格との対応関係が示されている。

安全評価

- クラス3容器となる以下部位が設計・建設規格のクラス3容器として必要な構造強度を有していることを確認した。

評価部位	適用規格等		備考
胴・一次蓋・カバープレート 一次蓋ボルト カバープレートボルト	設計・建設規格	クラス3容器	評価部位に対する適用規格等は、伊方発電所3号機 使用済燃料乾式貯蔵施設の設置工事に係る設計及び工事計画認可申請(原規規発第2107076号 令和3年7月7日認可)(以下「先行設工認」という。)における使用済燃料乾式貯蔵容器と同じである。

後段審査(設工認)で別途確認される事項

- なし

5. 技術基準規則への適合性(17条)

● クラス3容器の構造強度評価について

クラス3容器となる胴、一次蓋、一次蓋ボルト、カバープレート及びカバープレートボルトの構造及び強度が設計・建設規格のクラス3容器の規定を満足することを確認した。

構成部材 (クラス3容器)	設計・建設規格2012		適合確認結果		
	番号	区分			
胴	PVC-3111	胴 (外圧を受ける 円筒形)	容器の胴の形状はPVC-3111に適合する円筒形とする。		
	PVC-3112		容器の継手は溶接継手を使用する。		
	PVC-3121		胴の厚さ <input type="text"/> は、制限最小厚さ(3mm)以上であり、強度に対する要求に適合する。		
	PVC-3122		胴の厚さ <input type="text"/> は、計算上必要な厚さ(90mm)以上であり、強度に対する要求に適合する。		
胴(底板) 一次蓋 カバープレート	PVD-3310	平板	容器の平板の厚さは、計算上必要な厚さであり、強度に対する要求に適合する。		
			容器の厚さ	計算上必要な厚さ	
			胴(底板)	73mm	
	一次蓋		(PVD-3322の規定に包絡)		
	カバープレート		5mm		
	PVD-3321		一次蓋に設ける穴は、PVD-3321に適合する円形または円形とする。		
PVD-3322	容器の厚さ	計算上必要な厚さ			
	胴(底板)	65mm			
胴(フランジ) 一次蓋ボルト カバープレート ボルト	PVC-3710	フランジ (一体形 フランジ)	フランジは、応力計算により必要な強度を有することを確認しており、強度に対する要求に適合する。		
			応力	許容応力	
			胴(フランジ)	89MPa	118MPa
			使用するボルトの総有効断面積	ボルトの所要総有効断面積	
			一次蓋ボルト	<input type="text"/>	$2.662 \times 10^4 \text{mm}^2$
カバープレートボルト	<input type="text"/>	$8.781 \times 10^2 \text{mm}^2$			

(注) 全体的な変形を弾性域に抑えることは、表中の全規定番号に、座屈が生じないことは、上表のPVC-3122に対応。

● 技術基準規則への適合性

以上のとおり、MSF-24P(S)型は、クラス3容器に係る材料及び構造に係る要求事項に適合する設計としている。

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 技術基準規則の要件に対する適合性の概要(まとめ)

(注) 下表に記載していない要件は、型式指定申請の範囲外である。

要求項目		要件	基本設計方針(摘要)	安全評価結果摘要
条・項	安全機能			
第2項 1号	臨界防止	燃料体等が臨界に達するおそれがない構造であること。	臨界を防止する構造により、貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及び使用済燃料を収納する際に冠水状態になること等、技術的に想定されるいかなる場合でも、臨界を防止する設計とする。	乾燥状態及び冠水状態における臨界評価により、中性子実効増倍率は0.95を下回ることから臨界に達するおそれはない。
第2項 6号ロ	遮蔽	使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有すること。	ガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により、使用済燃料からの放射線を適切に遮蔽する設計とする。	使用済燃料を線源とした遮蔽評価により、通常貯蔵時の特定兼用キャスク表面の線量当量率が2mSv/h以下、及び表面から1m離れた位置における線量当量率が100μSv/h以下となることから適切な遮蔽能力を有している。
第2項 2号	除熱	崩壊熱により燃料体等が溶融しないものであること。	動力を用いずに使用済燃料の崩壊熱を適切に除去するため、使用済燃料の崩壊熱を特定兼用キャスクの外面に伝え、周囲空気等に伝達し除熱する設計とする。	使用済燃料を熱源とした除熱評価により、貯蔵状態の燃料被覆管及び特定兼用キャスクの構成部材の温度が健全性を維持できる温度以下となることから燃料が溶融しない冷却能力を有している。
第2項 6号イ	閉じ込め	使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視できること。	蓋シール部に金属ガスケットを用いることにより、使用済燃料を内封する空間を設計貯蔵期間を通じて負圧に維持するとともに、一次蓋及び二次蓋の二重の閉じ込め構造とし、蓋間を正圧に維持することにより、圧力障壁を形成し、使用済燃料を内封する空間を外部から隔離する設計とする。また、蓋間空間の圧力を測定することで閉じ込め機能を監視できる設計とする。	設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク内部を負圧に維持できる金属ガスケットを用いることから放射性物質を適切に閉じ込めることができる。また、蓋間空間の圧力を監視できる構造であり、閉じ込め機能を監視できる。
第2項 6号 ハ及びニ	長期健全性 (経年変化の考慮)	使用済燃料の被覆材の著しい腐食又は変形を防止できること。キャスク本体その他のキャスクを構成する部材は、使用される温度、放射線、荷重その他の条件に対し、適切な材料及び構造であること。	設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して十分な信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計とする。	使用環境における温度、放射線照射、腐食に係る長期健全性評価により、経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を維持できる。
第2項 6号 ニ	構造強度	キャスク本体その他のキャスクを構成する部材は、使用される温度、放射線、荷重その他の条件に対し、適切な材料及び構造であること。	MSF-24P(S)型の材料及び構造は、(一社)日本機械学会「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 JSME S FA1-2007」(以下「金属キャスク構造規格」という。)等に基づき設計する。	特定兼用キャスクの安全機能を担保する構造強度部材が金属キャスク構造規格等に準じた評価により構造強度を有している。

6. 技術基準規則への適合性(26条)

燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備(第26条第2項1号) (臨界防止機能)

《規則要求》

燃料体等を貯蔵する設備は、次に定めるところにより施設しなければならない。

一 燃料体等が臨界に達するおそれがない構造であること。

基本設計方針

- 使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するための断面形状が中空状であるバスケットプレート、及び中性子吸収能力を有するほう素を偏在することなく添加した中性子吸収材を適切な位置に配置することにより、特定兼用キャスク単体として、使用済燃料集合体を収納した条件下で、臨界を防止する設計とする。
- バスケットプレートは、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して十分な信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するために必要な構造健全性を維持する設計とする。
- 特定兼用キャスク貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及びMSF-24P(S)型に使用済燃料集合体を収納する際に冠水状態となること等、技術的に想定されるいかなる場合でも、中性子実効増倍率が0.95以下となるように設計する。

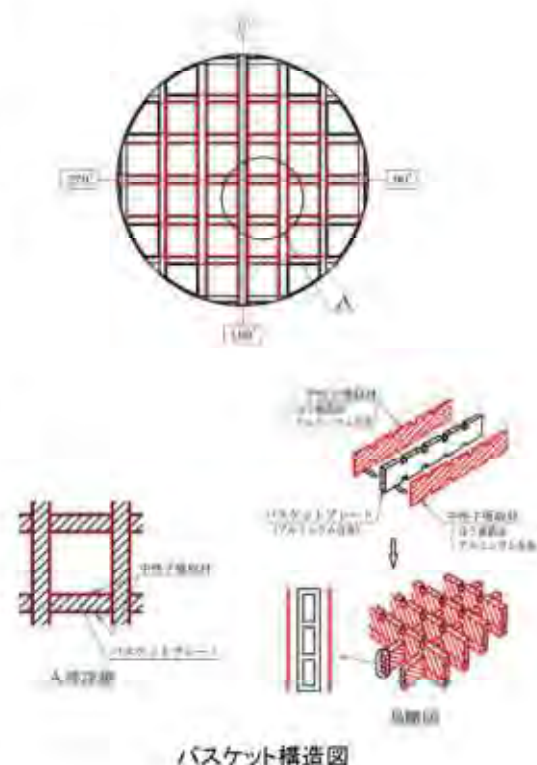
安全評価

- MSF-24P(S)型に使用済燃料を収納する際の冠水状態・乾燥状態における臨界評価^(注)を実施し、中性子実効増倍率が0.95を下回ることを確認した。

(注)未臨界性に有意な影響を与える因子について、臨界評価上厳しくなる条件を設定。

後段審査(設工認)で別途確認される事項

- 使用済燃料集合体を収納するに当たり、臨界防止機能に関する評価で考慮した因子についての条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。



6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 審査ガイドの要求事項

審査ガイド^(注)の要求事項に対するMSF-24P(S)型の臨界防止設計への考慮を下表に示す。
これらを考慮した設計及び安全評価結果をP.26～28に示す。

項目	要求事項(確認内容)	臨界防止設計における考慮
配置・形状	兼用キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等における適切な安全裕度の考慮	以下の項目について、中性子実効増倍率が最も大きくなる条件を適用。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ MSF-24P(S)型が無限に配列した体系(完全反射)(*) ➢ バスケットプレート幅、バスケット格子内のり等の寸法公差 ➢ バスケット格子内の使用済燃料の配置
	兼用キャスクが滑動する場合の兼用キャスク配置の変化の適切な考慮	(*) 完全反射の考慮により特定兼用キャスクの滑動を考慮しても配置制限は必要ない。
	設計貯蔵期間中を通じてのバスケットの構造健全性維持	設計貯蔵期間を通じてバスケットプレートは設計貯蔵期間を通じて使用済燃料集合体を所定の幾何学的位置に維持するために必要な構造健全性を維持する構造とする。
中性子吸収材の効果	以下についての適切な安全裕度の考慮 ・製造公差(濃度・非均質性・寸法等)	以下の項目について、中性子実効増倍率が最も大きくなる条件を適用。 ほう素の均質性は製造管理により担保。 <ul style="list-style-type: none"> ➢ 中性子吸収材の濃度(ほう素添加量) ➢ 中性子吸収材の寸法公差
	・中性子吸収に伴う原子個数密度の減少	設計貯蔵期間経過後の中性子吸収材に含まれるほう素の減損割合は、 10^{-6} 程度であり無視し得る。
減速材(水)の影響	使用済燃料を収納する際に冠水することの適切な考慮	冠水状態(水密度 1.0g/cm^3)を考慮
解析コード及びデータライブラリ	検証され適用性が確認されていること	臨界解析で使用するSCALEコードシステムは、MSF-24P(S)型を構成する燃料体及び構造物を模擬した多数の臨界実験のベンチマーク解析により検証され適用性を確認している。
バスケットの状態	バスケットの塑性変形が想定される場合に未臨界性が維持されること	貯蔵時、貯蔵施設内での取扱い時、及び設計上考慮すべき自然現象(地震、津波及び竜巻)に対してもバスケットに塑性変形が生じない。

(注)「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」

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 臨界防止機能の安全評価について

(1) 臨界解析評価条件(収納物仕様)

解析に用いる収納物仕様は、収納物のうち反応度の高い17×17燃料 48,000MWd/t型(A型)及び15×15燃料 48,000MWd/t型(A型)^(注)とし、以下のとおりとする。

- ・収納する使用済燃料のウラン濃縮度は照射により減損しているが、新燃料(燃焼度クレジット無し:燃焼度0GWd/t)とする。
- ・初期濃縮度は、収納する使用済燃料の濃縮度上限値とする。
- ・中性子吸収効果のあるバーナブルポイズン集合体を無視する。

項目		キャスク収納位置制限		臨界解析条件					
		中央部	外周部	中央部	外周部				
燃料集合体 1体の仕様	種類	48,000MWd/t型(A型・B型) 39,000MWd/t型(A型・B型)		48,000MWd/t型(A型) ^(注)					
	初期濃縮度	17×17燃料収納時	≦4.2wt%		4.2wt%				
		15×15燃料収納時	≦4.1wt%		4.1wt%				
	燃焼度	最高	[Redacted]						
特定兼用キャスク 1基あたり平均									
冷却期間		[Redacted]							
バーナブル ポイズン集合体 1体の仕様	最高燃焼度								
	冷却期間								
配置									

(注) 17×17燃料については、A型、B型ともに臨界解析で考慮する条件は同じである。
15×15燃料については、A型の方がB型よりもペレット直径が大きく反応度が高い。

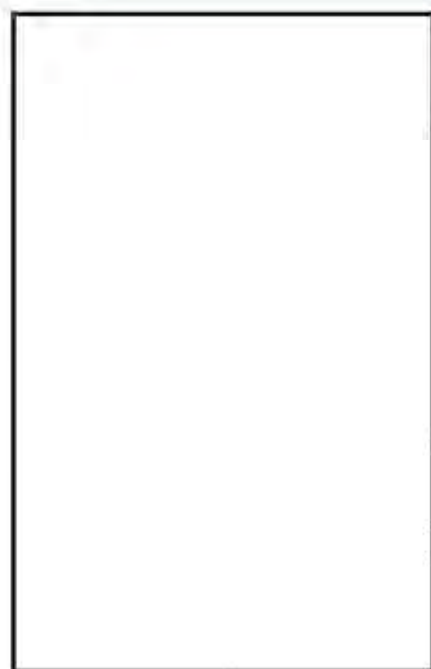
6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 臨界防止機能の安全評価について

(2) 臨界解析評価条件(解析モデル)

解析モデルは、以下のとおり配置・形状等を適切に考慮し、保守的な条件とする。

- ・特定兼用キャスク及び使用済燃料集合体の実形状を三次元でモデル化する(貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体は無視)。
- ・MSF-24P(S)型が無限に配列した体系(完全反射)とする。(これによりMSF-24P(S)型の滑動等による配置制限は不要。)
- ・バスケット格子内での燃料の偏りを考慮し、中性子実効増倍率が最も大きくなる配置とする。
- ・バスケットプレート及び中性子吸収材は寸法公差を考慮し中性子実効増倍率が最も大きくなる寸法とする。
- ・中性子吸収材のほう素添加量は仕様上の下限値とする。(設計貯蔵期間経過後のほう素の減損割合は 10^{-5} 程度であり、無視し得る)
- ・中性子遮蔽材(側部・蓋部・底部)は無視する。

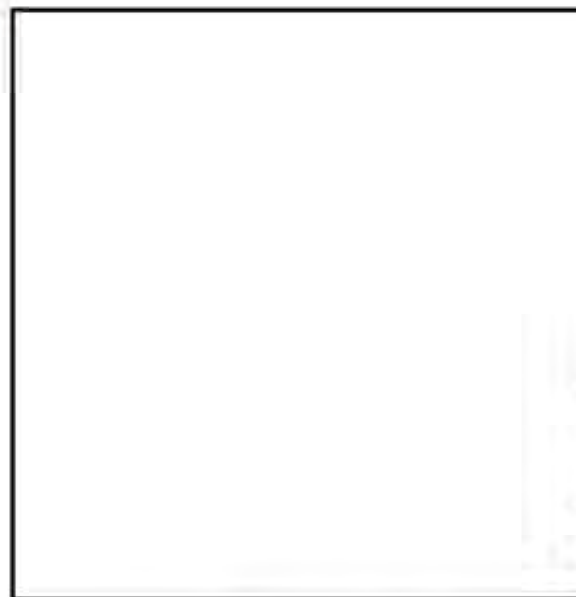


縦断面図

貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体は無視(真空)

MSF-24P(S)型内筒囲気及び使用済燃料集合体構造材
乾燥状態：真空
冠水状態：水密度 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$
($1.0\text{g}/\text{cm}^3$ とした場合に中性子実効増倍率は最大)

中性子遮蔽材は無視(真空)



燃料領域横断面図

MSF-24P(S)型外筒囲気は真空

格子内での燃料の偏りを考慮
(17×17 燃料、 15×15 燃料ともに)
乾燥状態：外周部、中央部ともに中心偏向
冠水状態：外周部は外周に、中央部は中心偏向

MSF-24P(S)型周囲を完全反射とすることで無限配列としてモデル化

バスケットプレート及び中性子吸収材の寸法は、寸法公差を考慮

臨界解析モデル

(代表として冠水状態の図を記載)

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 臨界防止機能の安全評価について

(3) 臨界解析評価条件(解析コード及び検証)

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コードシステムを用い、中性子実効増倍率の計算には同コードシステムに含まれるKENO-VIコードを用いる。

SCALEコードシステムは、米国NRGにより認証された標準解析コードであり、国内外の臨界解析の分野で幅広く使用されている。SCALEコードシステムに対しては、MSF-24P(S)型を構成する燃料体及び構造物を模擬した多数の臨界実験のベンチマーク解析を実施し、その妥当性を確認している。

また、本コードは技術的な特殊性、新規性は無く、許認可で使用実績があるコードである。

(4) 臨界解析評価結果

乾燥状態に加え、最も厳しい条件となるMSF-24P(S)型に使用済燃料を収納する際の冠水状態における臨界評価を実施し、中性子実効増倍率が0.95を下回ることを確認した。

項目		17×17燃料収納時	15×15燃料収納時	評価基準
中性子実効増倍率※	冠水状態	0.912	0.911	0.95以下
	乾燥状態	0.385	0.380	

※統計誤差(σ)の3倍(3σ)を加味した値である。

● 技術基準規則への適合性

以上のとおり、設計上想定される状態において、燃料体等が臨界に達するおそれはない。したがって、MSF-24P(S)型は、臨界防止に係る要求事項に適合している。

6. 技術基準規則への適合性(26条)

燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備(第26条第2項6号ロ) (遮蔽機能)

《規則要求》

六 使用済燃料を工場等内に貯蔵する乾式キャスクは、次に定めるところによること。

ロ 使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有すること。

基本設計方針

- 使用済燃料から放出される放射線を特定兼用キャスクの本体及び蓋部により遮蔽する設計とし、ガンマ線遮蔽材には十分な厚みを有する鋼製の材料を用い、中性子遮蔽材にはレジンを用いる。設計貯蔵期間における特定兼用キャスクの中性子遮蔽材の熱による遮蔽能力の低下を考慮しても、特定兼用キャスク表面及び特定兼用キャスク表面から1m離れた位置における線量当量率は、それぞれ2mSv/h以下、100 μ Sv/h以下となるように設計する。

安全評価

- 使用済燃料を線源^(注)として遮蔽評価を実施し、通常貯蔵時の特定兼用キャスク表面の線量当量率が2mSv/h以下及び表面から1m離れた位置における線量当量率が100 μ Sv/h以下となることを確認した。

(注) 収納する使用済燃料の種類、燃焼度、冷却期間等の条件を基に、遮蔽評価の結果が厳しくなる入力条件を設定したうえで、線源強度を求める。

後段審査(設工認)で別途確認される事項

- 遮蔽評価で考慮した使用済燃料集合体の燃焼度に応じた使用済燃料集合体の配置の条件又は範囲を逸脱しないような措置が講じられること。
- 貯蔵建屋内で貯蔵する場合において、当該貯蔵建屋の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、工場等周辺の実効線量は周辺監視区域外における線量限度を超えないこと。



遮蔽解析モデル

中性子遮蔽材
ガンマ線遮蔽材

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 審査ガイドの要求事項

審査ガイド^(注)の要求事項に対するMSF-24P(S)型の遮蔽設計への考慮を下表に示す。
これらを考慮した設計方針及び設計方針の妥当性確認結果をP.31～34に示す。

項目	要求事項(確認内容)	遮蔽設計における考慮
使用済燃料の放射線源強度評価	使用済燃料の放射線源強度は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。	放射線源強度は、収納する燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件とし、核種の生成及び崩壊に基づき燃焼計算コードORIGEN2により求める。
兼用キャスクの遮蔽機能評価	兼用キャスクからの線量当量率は、兼用キャスクの実形状を適切にモデル化し、放射線源強度に基づき、検証され適用性が確認された遮蔽解析コード及び断面積ライブラリを使用して求めること。その際、設計貯蔵期間中の兼用キャスクのガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材の熱劣化による遮蔽機能の低下を考慮すること。	線量当量率は、特定兼用キャスクの実形状を三次元でモデル化し、使用済燃料の放射線源強度等を条件として、遮蔽解析コードMCNP5により求める。その際、設計貯蔵期間中の熱影響による中性子遮蔽材(レジン)の質量減損(2.5%)を考慮する。
	兼用キャスク表面の線量当量率を2mSv/h以下とし、かつ、兼用キャスク表面から1m離れた位置における線量当量率を100 μ Sv/h以下とすること。	特定兼用キャスク表面の線量当量率は2mSv/h以下、かつ、特定兼用キャスク表面から1m離れた位置における線量当量率は100 μ Sv/h以下となるように設計する。
解析コード (放射線源強度 /線量当量率)	検証され適用性が確認された遮蔽解析コード等を使用すること。相互遮蔽効果、ストリーミング及びコンクリート深層透過の観点から検証され適用性が確認されたものであること。	燃焼計算コードORIGEN2は、MSF-24P(S)型に収納する使用済燃料と同等の冷却条件のANS標準崩壊熱データ等により、また、遮蔽解析コードMCNP5及び断面積ライブラリは、燃料同士の相互遮蔽及び容器でのストリーミングを考慮した使用済燃料輸送容器体系及び使用済燃料貯蔵容器体系での遮蔽ベンチマーク試験により検証され適用性を確認している。なお、MSF-24P(S)型ではコンクリートを使用しないため、コンクリートの深層透過の観点は考慮していない。

(注)「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」

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 遮蔽機能の安全評価について

(1) 遮蔽解析評価条件(収納物仕様)

使用済燃料の放射線源強度は、収納物のうち線量当量率への寄与の大きい中性子及び燃料有効部ガンマ線の放射線源強度の高い17×17燃料 48,000MWd/t型(A型)及び15×15燃料 48,000MWd/t型(A型)とし、下表の初期濃縮度、燃焼度及び冷却期間を基にORIGEN2コードにより算出する。

- ・初期濃縮度は、収納する使用済燃料の濃縮度下限値とする。
- ・遮蔽解析では、中央部、外周部ともに最高燃焼度を設定する。
- ・使用済燃料の軸方向燃焼度分布を考慮して、放射線源強度を計算する。
- ・バーナブルポイズン集合体は放射化による放射線源強度については考慮するが、構造材の遮蔽効果は無視する。

項目		キャスク収納位置制限		遮蔽解析条件					
		中央部	外周部	中央部	外周部				
燃料集合体 1体の仕様	種類	48,000MWd/t型(A型・B型) 39,000MWd/t型(A型・B型)		48,000MWd/t型 (A型)					
	初期濃縮度	17×17燃料収納時	≤4.2wt%						
		15×15燃料収納時	≤4.1wt%						
	燃焼度	最高							
特定兼用キャスク 1基あたり平均									
冷却期間									
バーナブル ポイズン集合体 1体の仕様	最高燃焼度								
	冷却期間								
配置									

(注) 本値は、中央部及び外周部に最高燃焼度を設定した場合における特定兼用キャスク1基あたり平均の相当値である。

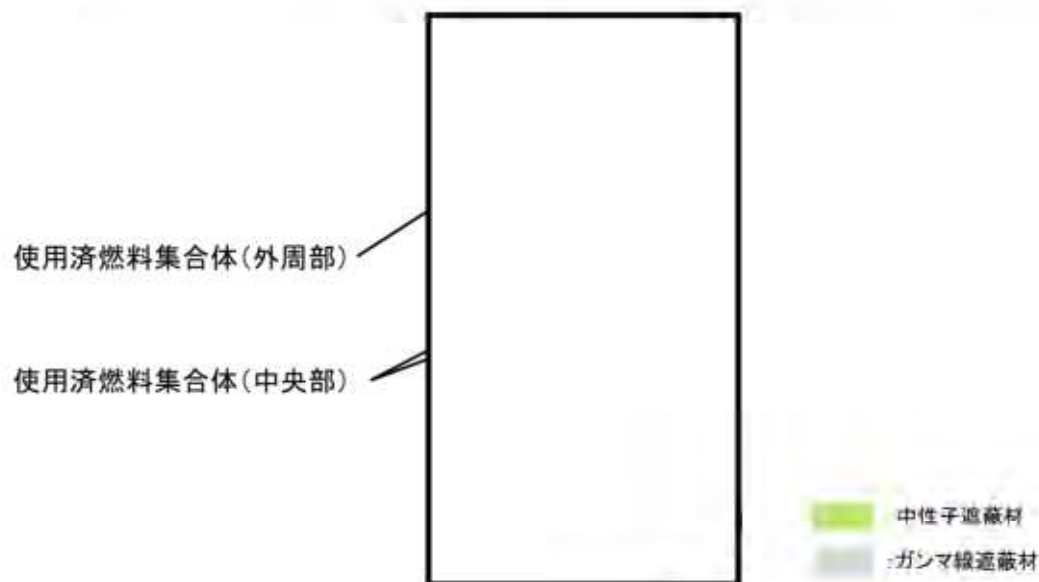
6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 遮蔽機能の安全評価について

(2) 遮蔽解析評価条件(解析モデル)

遮蔽解析は、MCNP5コードを用いる。解析モデルは、以下のとおり配置・形状等を適切に考慮し、保守的な条件とする。

- ・特定兼用キャスク及び使用済燃料集合体の実形状を三次元でモデル化する。
- ・貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体を無視する。
- ・燃料集合体の移動を考慮するため、軸方向については燃料各領域の高さ寸法は固定して一次蓋及び胴底部へ接した状態となるようキャスク全長を短縮し、径方向についてはバスケットセル内に均質化している。
- ・各部寸法はノミナル値とするが、各構成部材のマイナス側の寸法公差を原子個数密度の設定で考慮する。
- ・設計貯蔵期間中の熱影響による中性子遮蔽材(レジン)の質量減損(2.5%)を考慮する。



遮蔽解析モデル

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 遮蔽機能の安全評価について

(3) 遮蔽解析評価条件(解析コード及び検証)

① 線源強度評価に用いる解析コード

遮蔽解析評価のうち線源強度評価には、米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)で開発された公開のORIGEN2コード、ライブラリはORIGEN2コードに内蔵されるPWRU50及びPWRUを用いる。

ORIGEN2コードは、コード配布時に同梱されたサンプル問題の再現により計算機能が適正であることを確認している。また米国原子力学会(ANS)において、ANS標準崩壊熱との比較及び使用済燃料中のウラン、プルトニウム、アメリシウムなどの組成の実測値との比較により妥当性の確認を行っている。

本コードは技術的な特殊性、新規性は無く、許認可で使用実績があるコード、ライブラリである。

② 遮蔽解析に用いる解析コード

遮蔽解析評価のうち、線量当量率評価には、米国ロスアラモス国立研究所(LANL)で開発されたMCNP5コードを用いる。

MCNP5コードは、「原子力発電所放射線遮蔽設計規程(JEAC4615)」において、原子力発電所附属施設遮蔽のための輸送計算コードとしてモンテカルロ法を用いた計算手法の適用が可能とされ、放射性物質輸送・貯蔵容器などの遮蔽計算に用いられている。また、米国では乾式キャスク貯蔵システムの審査指針NUREG-1536及び乾式キャスク貯蔵施設の審査指針NUREG-1567において遮蔽計算ツールとしてMCNPコードが記載され、許認可で使用実績がある。

MCNP5コードは、以下により解析コードの適用妥当性確認を行っている。

- ① 許認可実績が豊富な二次元輸送計算コードDOT3.5による既認可評価値(MSF-24P型^(注1))との比較
- ② MCNPコードを適用した許認可実績を有する核燃料物質の輸送容器の遮蔽評価^(注2)との線源条件及び遮蔽構造の比較
- ③ 「原子力学会標準 シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン:2015」のモデル検証及び妥当性確認方法を参考とした使用済燃料輸送・貯蔵容器体系での遮蔽ベンチマーク解析^(注3)による検証

(注1) 四国電力株式会社「核燃料輸送物設計変更承認申請書」原子力発21329号。(2021)。

(注2) 国立大学法人東京工業大学「核燃料輸送物設計承認申請」東工大研 第4-3号。(2016)。

(注3) 一般社団法人日本原子力学会「モンテカルロ法による放射性物質輸送容器の遮蔽安全評価手法の高度化 平成23年度報告書」。(2012)。

及び、M. Ueyama M. Osaki, "Dose Equivalent Rate Benchmark Calculations of a Dry Storage Cask for Spent Fuel by 3D Monte Carlo Code", PATRAM 2019, (2019)。

6. 技術基準規則への適合性(26条)

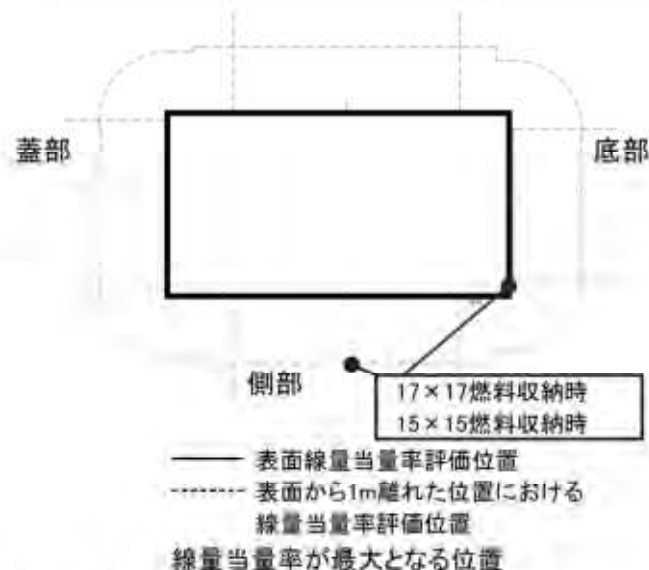
● 遮蔽機能の安全評価について

(4) 遮蔽解析評価結果

遮蔽評価により、特定兼用キャスク表面及び表面から1m離れた位置における線量当量率は、評価基準を下回ることを確認した。

線量当量率評価結果(注)

項目	17×17燃料収納時	15×15燃料収納時	評価基準
表面線量当量率	1.53 mSv/h	1.64 mSv/h	2 mSv/h以下
表面から1m離れた位置における線量当量率	84.6 μSv/h	83.0 μSv/h	100 μSv/h以下



(注) 線量当量率が最大となる評価点位置は次のとおりである(左図参照)。

- ・表面: 底部トランニオン付近コーナー部の中性子遮蔽材が少ない領域
- ・表面から1m離れた位置: 側部中心の中性子遮蔽材でカバーされている領域

評価点位置までの遮蔽構造の特徴から、線量当量率が最大となる表面は、中性子が支配的、線量当量率が最大となる表面から1m離れた位置はガンマ線が支配的となる。中性子線源強度は15×15燃料が高く、ガンマ線源強度は17×17燃料が高いため、各燃料収納時の線量当量率は、表面では15×15燃料、表面から1m離れた位置では17×17燃料が高くなっている。

● 技術基準規則への適合性

以上のとおり、特定兼用キャスク表面及び表面から1m離れた位置における線量当量率は、基準を満足することから、MSF-24P(S)型は使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有する設計である。したがって、MSF-24P(S)型は、遮蔽機能に係る要求事項に適合している。

6. 技術基準規則への適合性(26条)

燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備(第26条第2項2号) (除熱機能)

《規則要求》

燃料体等を貯蔵する設備は、次に定めるところにより施設しなければならない。

二 崩壊熱により燃料体等が溶融しないものであること。

基本設計方針

- 動力を用いずに使用済燃料の崩壊熱を適切に除去するため、使用済燃料の崩壊熱を特定兼用キャスクの外表面に伝え、周囲空気等に伝達することにより除熱する設計とし、使用済燃料の健全性及び特定兼用キャスクの安全機能を有する構成部材の健全性を維持するために、使用済燃料及び特定兼用キャスクの温度を制限される値以下に維持する方針とする。
- 燃料被覆管の温度は、設計貯蔵期間を通じて、燃料被覆管のクリープ破損及び燃料被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から、貯蔵する使用済燃料の種類ごとに制限を設ける。
- 特定兼用キャスクの安全機能を維持する観点から、特定兼用キャスクの温度を構成部材の健全性が維持される温度以下に制限する設計とし、MSF-24P(S)型の主要な構成部材の温度に制限を設ける。

安全評価

- 使用済燃料を熱源とした貯蔵状態の伝熱評価^(注)を実施し、燃料被覆管及び特定兼用キャスクを構成する部材の健全性を維持できる温度を超えないことを確認した。

(注) 収納する使用済燃料の種類、燃焼度、冷却期間等の条件を基に、除熱評価の結果が厳しくなる入力条件を設定したうえで求めた使用済燃料の崩壊熱量及び使用済燃料集合体の燃焼度に応じた収納配置を考慮する。

後段審査(設工認)で別途確認される事項

- 除熱評価で考慮した使用済燃料集合体の燃焼度に応じた使用済燃料集合体の配置の条件又は範囲を逸脱しないような措置が講じられること。
- 貯蔵建屋は、特定兼用キャスクの除熱機能を阻害しない設計であること。貯蔵建屋の給排気口は、積雪等により閉塞しない設計であること。
- 特定兼用キャスクの周囲温度が45℃以下であること。貯蔵建屋壁面温度が65℃以下であること。さらに、貯蔵建屋内の周囲温度が異常に上昇しないことを監視できること。

MSF-24P(S)型の伝熱経路図

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 審査ガイドの要求事項

審査ガイド^(注)の要求事項に対するMSF-24P(S)型の除熱設計への考慮を下表に示す。
これらを考慮した設計及び安全評価結果をP.37～39に示す。

項目	要求事項(確認内容)	除熱設計における考慮
使用済燃料の崩壊熱評価	崩壊熱は、燃料型式、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件として計算した各種の生成及び崩壊から求めること	崩壊熱量は、収納する燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件とし、核種の生成及び崩壊に基づき燃焼計算コードORIGEN2により求める。
兼用キャスク各部の温度評価	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、兼用キャスクの実形状を適切にモデル化すること	特定兼用キャスク各部の温度は、MSF-24P(S)型の実形状を三次元でモデル化し、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び周囲温度等を条件として、伝熱解析コードABAQUSにより求める。
	求めた温度は、兼用キャスクの構成部材が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に収まること	特定兼用キャスク各部の温度は、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以下とする。
燃料被覆管の温度評価	使用済燃料の崩壊熱と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	燃料被覆管の温度は、燃料集合体の径方向断面の実形状を二次元でモデル化し、使用済燃料の崩壊熱と特定兼用キャスク各部の温度評価で求めたバスケットの温度を境界条件として、伝熱解析コードABAQUSにより求める。
	求めた温度は、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲に収まること	燃料被覆管の温度は、燃料被覆管の健全性を維持できる温度以下とする。
解析コード (崩壊熱 ／温度評価)	検証され適用性が確認された燃焼計算コード／伝熱解析コードを使用して求めること	燃焼計算コードORIGEN2は、MSF-24P(S)型に収納する使用済燃料と同等の冷却条件のANS標準崩壊熱データにより、また、伝熱計算コードABAQUSは、MSF-24P(S)型と同等の伝熱形態を有する兼用キャスクの伝熱試験により検証され適用性を確認している。

(注)「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」

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 除熱機能の安全評価について

(1) 除熱解析評価条件(収納物仕様)

使用済燃料の崩壊熱量は、崩壊熱量が最も高い17×17燃料48,000MWd/t型(A型)及び15×15燃料48,000MWd/t型(A型)^(注1)とし、下表の初期濃縮度、燃焼度及び冷却期間を基にORIGEN2コードにより算出する。

- ・初期濃縮度は、収納する使用済燃料の濃縮度下限値とする。
- ・温度解析では、燃料集合体最高温度を高め算出するために、中央部(12体)に最高燃焼度 の崩壊熱量を設定し、外周部(12体)には、特定兼用キャスク1基の総崩壊熱量が平均燃焼度 の崩壊熱量24体分(18.1kW)^(注2)となるように調整した崩壊熱量 を設定する(下表配置図参照)。
- ・温度解析では、伝熱体となるバーナブルポイズン集合体を無視する。

項目		キャスク収納位置制限		除熱解析条件				
		中央部	外周部	中央部	外周部			
燃料集合体 1体の仕様	種類	48,000MWd/t型(A型・B型) 39,000MWd/t型(A型・B型)		48,000MWd/t型(A型) ^(注1)				
	初期濃縮度	17×17燃料収納時	≤4.2wt%	<input type="text"/>				
		15×15燃料収納時	≤4.1wt%					
	燃焼度	最高	<input type="text"/>					
特定兼用キャスク 1基あたり平均								
冷却期間	<input type="text"/>							
バーナブル ポイズン集合体 1体の仕様							最高燃焼度	
					冷却期間			
配置							<input type="text"/>	

(注1) A型の方がB型よりも冷却期間が短く崩壊熱量が大きい。

(注2) 使用済燃料の軸方向燃焼度分布を考慮して、仕様上の最大崩壊熱量(15.8kW)を上回る設計崩壊熱量(18.1kW)を適用する。

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 除熱機能の安全評価について

(2) 除熱解析評価条件(解析モデル)

温度解析は、ABAQUSコードにより実施する。解析モデルは、以下のとおり配置・形状等を適切に考慮し、保守的な条件とする。

- ・ 特定兼用キャスクの各部温度は、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び周囲温度等を条件として、MSF-24P(S)型の実形状を三次元でモデル化した全体モデルにより求める。
- ・ 燃料被覆管の温度は、使用済燃料の崩壊熱と特定兼用キャスク各部の温度評価で求めたバスケット温度を境界条件として、燃料集合体の径方向の実形状を二次元でモデル化した燃料集合体モデルにより求める。
- ・ 全体モデルにおける貯蔵建屋壁面へのふく射条件(形態係数)は、貯蔵建屋内に複数の特定兼用キャスクが設置されることを想定し、保守的に設置される特定兼用キャスク同士が最も接近するとして設定する。
- ・ 燃料集合体モデルでは、軸方向への伝熱を無視し断熱とする。



(モデル全体) (バスケット) (燃料集合体)

全体モデル(三次元モデル)



(17×17燃料) (15×15燃料)

燃料集合体モデル(二次元モデル)

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 除熱機能の安全評価について

(3) 除熱解析評価条件(解析コード及び検証)

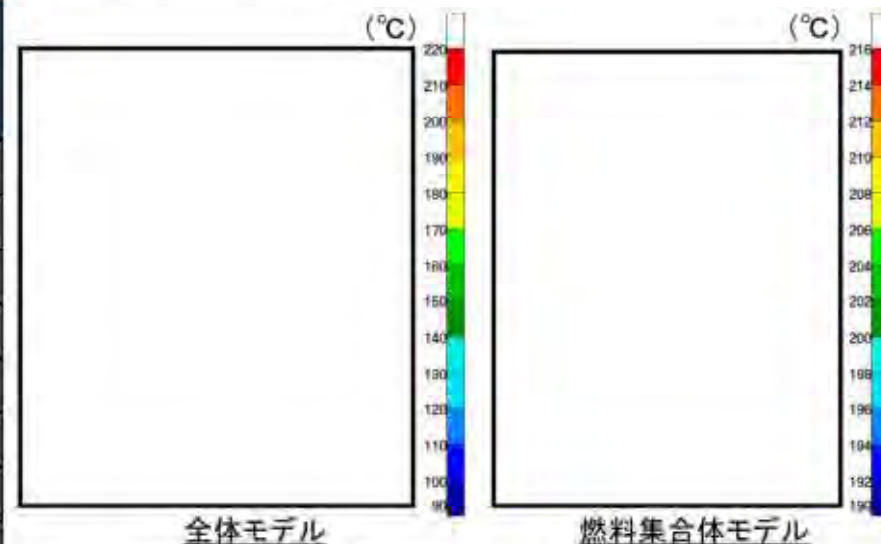
使用済燃料の崩壊熱計算に用いる燃焼計算コードORIGEN2は、MSF-24P(S)型に収納する使用済燃料と同等の冷却条件のANS標準崩壊熱データにより、また、特定兼用キャスクの構成部材及び燃料被覆管の温度解析に用いる伝熱計算コードABAQUSは、MSF-24P(S)型と同等の伝熱形態を有する兼用キャスクの伝熱試験により検証され適用性を確認している。また、これらのコードは技術的な特殊性、新規性は無く、許認可で使用実績があるコードである。

(4) 除熱解析評価結果

貯蔵時における除熱解析評価により、各評価部位の最高温度が設計基準値を下回ることを確認した。

評価部位		評価結果(°C)		設計基準値 (°C) ^(注)
		17×17燃料 収納時	15×15燃料 収納時	
燃料被覆管		215	215	275
特定 兼用 キャ スク	胴	142	142	350
	一次蓋	118	118	350
	一次蓋ボルト	118	118	350
	中性子遮蔽材	135	135	149
	金属ガスケット	118	118	130
	バスケット	187	188	250
	伝熱フィン	126	126	200

(注) 燃料被覆管の健全性及び特定兼用キャスクの安全機能を有する構成部材の健全性を維持できる温度



(※) 貯蔵用緩衝体を省略して表示

17×17燃料収納時の温度分布

● 技術基準規則への適合性

以上のとおり、燃料被覆管及び特定兼用キャスクを構成する部材の健全性を維持できる温度以下であり、MSF-24P(S)型は使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計である。したがって、MSF-24P(S)型は、除熱機能に係る要求事項に適合している。

6. 技術基準規則への適合性(26条)

燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備(第26条第2項6号イ) (閉じ込め機能)

《規則要求》

六 使用済燃料を工場等内に貯蔵する乾式キャスクは、次に定めるところによること。

イ 使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視できること。

基本設計方針

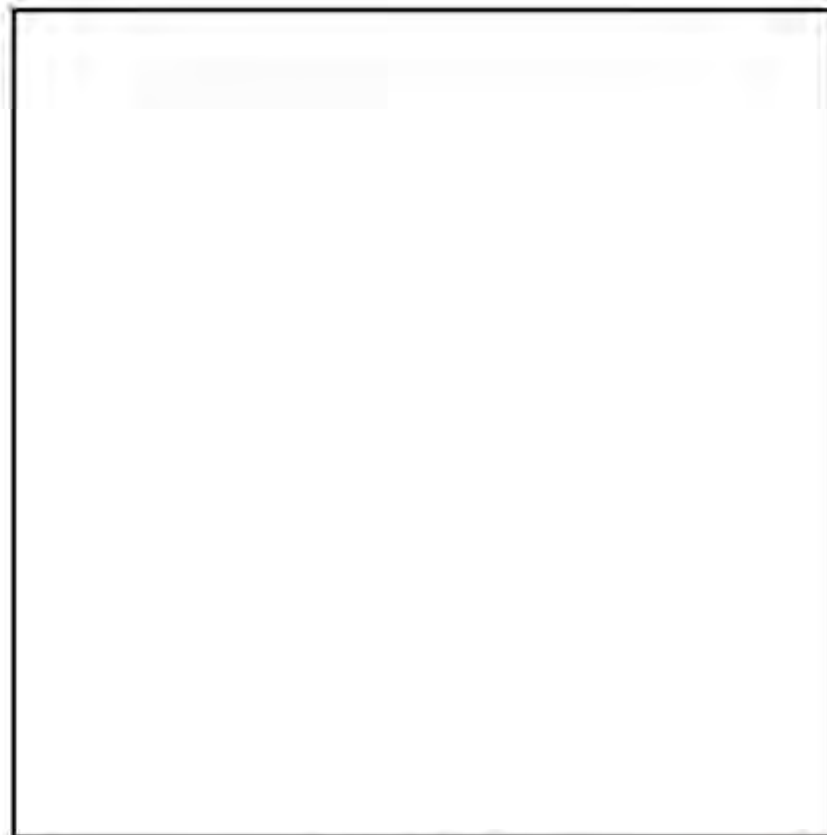
- 長期にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、蓋及び蓋貫通孔のシール部に金属ガスケットを用いることにより、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料集合体を内封する空間を不活性雰囲気と保つとともに負圧に維持する設計とする。
- 使用済燃料集合体を内封する空間を特定兼用キャスク外部から隔離する設計として、蓋部を一次蓋及び二次蓋による二重の閉じ込め構造とし、一次蓋と二次蓋との空間部を正圧に維持することにより圧力障壁を形成し、使用済燃料集合体を内封する空間を外部から隔離する設計とする。蓋間の圧力を測定することにより、閉じ込め機能を監視できる設計とする。

安全評価

- 蓋間空間に充填されるヘリウムガスが設計貯蔵期間を通じて圧力一定とした条件にて特定兼用キャスク内部に漏えいするとともに燃料棒からの核分裂性ガスの放出を仮定し、設計貯蔵期間経過後に大気圧となるように求めた基準漏えい率を算出する。金属ガスケットの性能は、基準漏えい率及び基準漏えい率を下回るように設定するリークテスト判定基準に対し小さい漏えい率であることを確認した。

後段審査(設工認)で別途確認される事項

- MSF-24P(S)型の方一の閉じ込め機能の異常に対する修復性の考慮がなされていること。



閉じ込め構造図

6. 技術基準規則への適合性(26条)

審査ガイドの要求事項

審査ガイド^(注)の要求事項に対するMSF-24P(S)型の閉じ込め設計への考慮を下表に示す。
これらを考慮した設計及び安全評価結果をP.42～45に示す。

項目	要求事項(確認内容)	閉じ込め設計における考慮
閉じ込め構造及び監視	金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、蓋間圧力を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。	一次蓋と二次蓋の二重構造とし、蓋及び蓋貫通孔のシール部には金属ガスケットを使用する。また、蓋間空間の圧力を測定することで閉じ込め機能を監視できる構造とする。
負圧維持	設計貯蔵期間中、兼用キャスク内部の負圧を維持できること。	使用済燃料を収納する空間を設計貯蔵期間を通じて負圧に維持する。
密封境界部の漏えい率	密封境界部の漏えい率は、兼用キャスク内部の負圧を維持できること。また、使用する金属ガスケット等のシール部は当該漏えい率以下であること。	密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク内部の負圧を維持できる漏えい率とし、金属ガスケットは、その漏えい率を満足するものを使用する。
閉じ込め機能評価	密封境界部の漏えい率が、設計貯蔵期間、内部初期圧力、自由空間容積、初期の蓋間圧力、蓋間の容積、温度等を条件として、適切な評価式を用いて求めること。	密封境界部の漏えい率は、設計貯蔵期間、内部初期圧力、自由空間容積、初期の蓋間圧力、蓋間の容積、温度等を条件として、漏えい孔中の流れの形態を考慮した適切な評価式を用いる。
兼用キャスクの衝突評価	転倒等による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。また、使用済燃料を取り出すために、一次蓋及び二次蓋が開放でき、使用済燃料ペレットが燃料被覆管から脱落せず、かつ、使用済燃料集合体の過度な変形を生じないこと。	(型式指定申請の範囲外)
閉じ込め機能の修復性	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。	(型式指定申請の範囲外)

(注)「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」

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 閉じ込め機能の安全評価について

(1) 閉じ込め機能評価条件(収納物仕様)

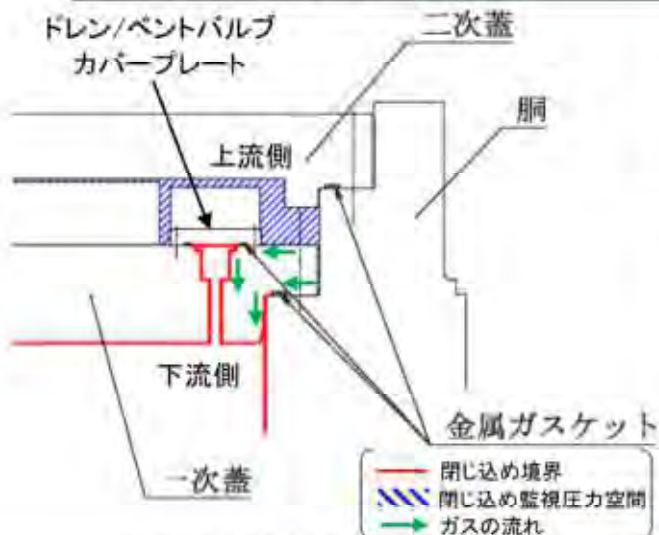
評価に用いる収納物仕様は、燃料棒の温度が最も高く、燃料棒内圧が大きくなり、基準漏えい率を算出する上で安全側となる、 17×17 燃料 48,000MWd/t型(A型)及び 15×15 燃料 48,000MWd/t型(A型)とし、以下のとおりとする。

- ・燃料棒からの核分裂生成ガスの放出(0.1%破損)を仮定する。
- ・特定兼用キャスク本体の内部体積が小さくなるようにパーナブルポイズン集合体の存在を考慮する。

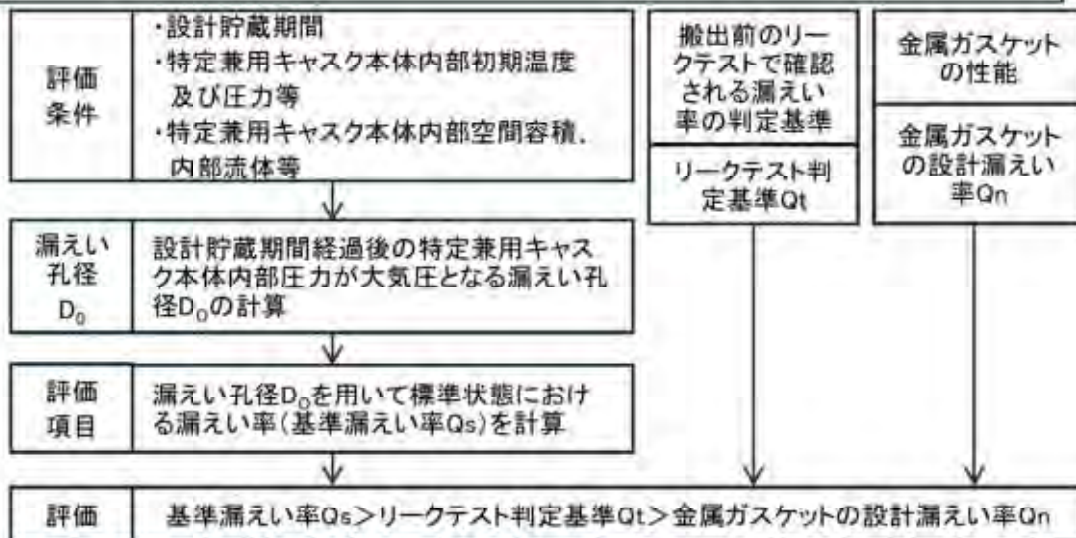
(2) 閉じ込め評価概要

設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク本体内部が大気圧となる基準漏えい率を算出(流体力学の基礎式による)し、基準漏えい率及び基準漏えい率を下回るように設定したリークテスト判定基準よりも漏えい率の小さい金属ガスケットを用いることを確認する。基準漏えい率の算出では、以下のとおり保守的な条件とする。

- ・設計貯蔵期間中に蓋間空間に充填されているヘリウムガス圧力は低下するが、設計貯蔵期間を通じて貯蔵開始時の圧力で一定とした条件で特定兼用キャスク本体内部側にのみに漏えいするものとする。
- ・設計貯蔵期間中に蓋間空間及び特定兼用キャスク本体内部の温度は低下するが、設計貯蔵期間を通じて貯蔵開始時の温度で一定とした条件とする。



(※)貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体を省略して表示



(閉じ込め機能評価フロー)

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 閉じ込め機能の安全評価について

(3) 閉じ込め評価条件(内部圧力の算出式)

基準漏えい率は、ボイル・シャルルの式で与えられる特定兼用キャスク本体内部圧力の時間変化を基に、設計貯蔵期間経過後の特定兼用キャスク本体内部圧力が大気圧となるためのシール部の標準状態(大気圧、25°C)での漏えい率として算出される。本手法は、技術的な特殊性及び新規性は無く、許認可で使用実績がある手法である。

(ボイル・シャルルの式)

$$\frac{dP_d}{dt} = \frac{Q}{V_d} \times \frac{T_d}{T}$$

$$Q = L \cdot P_a$$

$$L = (F_c + F_m) \cdot (P_u - P_d)$$

$$F_c = \frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot R_g}}{6} \times \frac{D_0^3}{a \cdot P_g} \sqrt{\frac{T}{M}}$$

$$F_m = \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu}$$

dP_d : 特定兼用キャスク本体内部圧力の変化 (Pa)

dt : 時間変化 (s)

Q : 漏えい率 (Pa·m³/s)

T_d : 特定兼用キャスク本体内部温度 (K)

V_d : 特定兼用キャスク本体内部の空間容積 (m³)

T : 漏えい気体の温度 (K)

L : 圧力Paにおける体積漏えい率 (m³/s)

P_a : 流れの平均圧力 (Pa) [$P_a = (P_u + P_d) / 2$]

F_c : 連続流のコンダクタンス係数 (m³/(Pa·s))

F_m : 自由分子流のコンダクタンス係数 (m³/(Pa·s))

P_u : 上流側(蓋間)の圧力 (Pa)

P_d : 下流側(特定兼用キャスク本体内部)の圧力 (Pa)

D_0 : 漏えい孔径 (m)

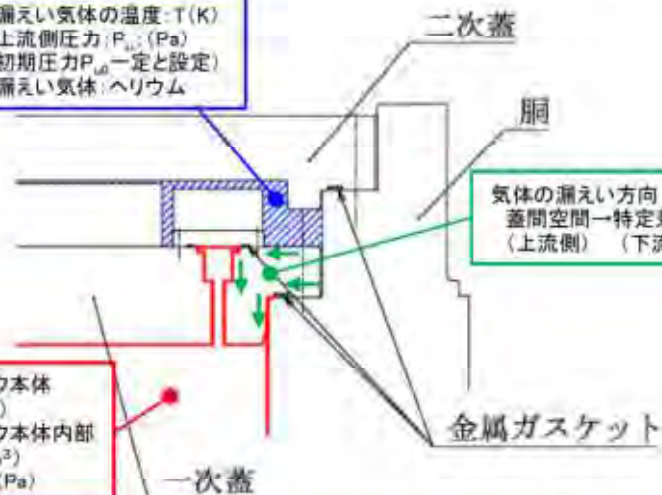
a : 漏えい孔長 (m)

μ : 漏えい気体の粘性係数 (Pa·s)

M : 漏えい気体の分子量 (kg/mol)

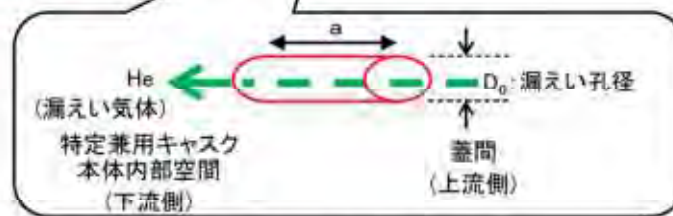
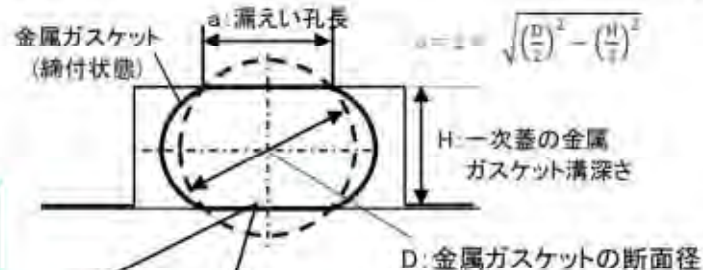
R_g : ガス定数 (J/(mol·K))

- ・漏えい気体の温度: T (K)
- ・上流側圧力: P_u (Pa)
- ・初期圧力 P_{u0} 一定と設定
- ・漏えい気体: ヘリウム



- ・特定兼用キャスク本体内部温度: T_d (K)
- ・特定兼用キャスク本体内部空間容積: V_d (m³)
- ・下流側圧力: P_d (Pa)

(※) 貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体を省略して表示



(金属ガスケット部及び漏えい孔長)

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 閉じ込め機能の安全評価について

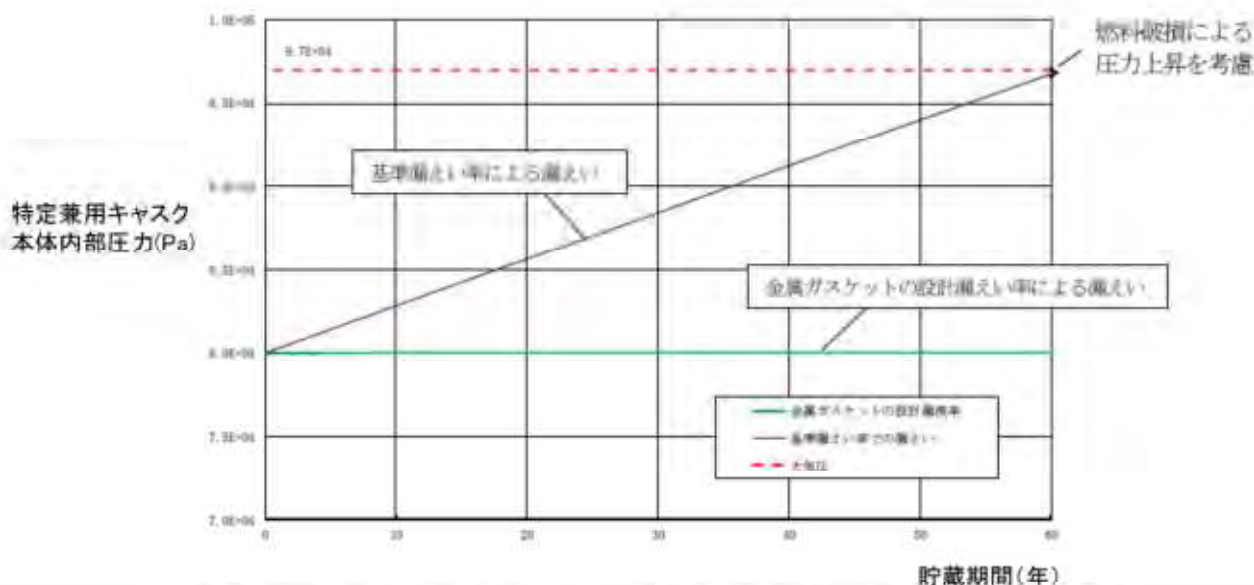
(4) 閉じ込め評価結果

MSF-24P(S)型に用いる金属ガスケットの漏えい率は基準漏えい率、及び基準漏洩率を下回るように設定したリークテスト判定基準に対し、小さいことを確認した。

収納状態	基準漏えい率 (Pa・m ³ /s)	リークテスト判定基準 (Pa・m ³ /s) ^(注1)	金属ガスケットの性能 (Pa・m ³ /s)
17×17燃料収納時	2.58 × 10 ⁻⁶	1.61 × 10 ⁻⁶	1.0 × 10 ⁻⁸ 以下 ^(注1)
15×15燃料収納時	2.57 × 10 ⁻⁶	1.60 × 10 ⁻⁶	

(注1) 金属ガスケットメーカーのカタログ記載値、及び(一財)電力中央研究所で実施された長期密封性能試験^(注2)の約19年間の金属ガスケットの漏えい率計測結果における金属ガスケットからの漏えい率平均(6.50 × 10⁻¹⁰ Pa・m³/s)に標準偏差(2.40 × 10⁻¹⁰ Pa・m³/s)の3倍を加算した値1.67 × 10⁻⁹ Pa・m³/sを切り上げた設定値。

(注2) (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(中間貯蔵設備等長期健全性等試験)報告書」(2010)。



特定兼用キャスク本体内部圧力の経時変化(17×17燃料収納時の例)

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 閉じ込め機能の安全評価について

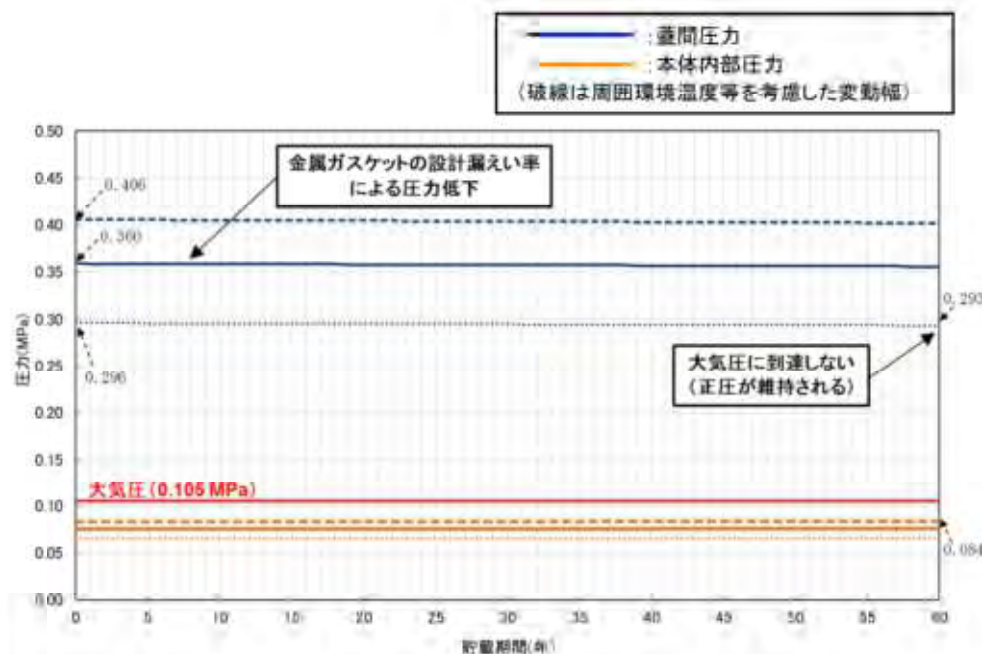
(5) 閉じ込め機能の監視構造

- 二次蓋に貫通部を設け、圧力センサ(圧力計)を設置する構造とし、蓋間空間の圧力を測定することにより閉じ込め機能を監視できる構造とする。
- 蓋間空間の圧力が金属ガスケットの設計漏えい率により低下(注)しても、蓋間圧力は、設計貯蔵期間中に有意な圧力低下は生じず、正圧(大気圧)以上が維持される。

(注)蓋間空間のガスが金属ガスケットの設計漏えい率で一次蓋側(兼用キャスク内部)及び二次蓋側(兼用キャスク外部)の二方向から同時に漏えいすることを想定。



閉じ込め機能の監視構造



金属ガスケットの設計漏えい率による蓋間圧力の経時変化

● 技術基準規則への適合性

以上のとおり、設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク本体内部を負圧に維持できる設計としている。また、一次蓋と二次蓋の間の圧力を監視できる構造している。したがって、MSF-24P(S)型は、閉じ込め機能に係る要求事項に適合している。

6. 技術基準規則への適合性(26条)

燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備(第26条第2項6号ハ及びニ) (長期健全性)

《規則要求》

六 使用済燃料を工場等内に貯蔵する乾式キャスクは、次に定めるところによること。

ハ 使用済燃料の被覆材の著しい腐食又は変形を防止できること。

ニ キャスク本体その他のキャスクを構成する部材は、使用される温度、放射線、荷重その他の条件に対し、適切な材料及び構造であること。

基本設計方針

- MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスクの構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して十分な信頼性を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計とする。
- MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスク本体内面、バスケット及び使用済燃料集合体の腐食等を防止するために、使用済燃料集合体を不活性ガスであるヘリウムガスとともに封入し、特定兼用キャスク本体及び蓋部表面の必要な箇所には、塗装等による防錆措置を施す設計とする。

安全評価

- 設計貯蔵期間における環境条件の影響(照射影響、熱的影響及び化学的影響)を考慮して、文献や試験データに基づき、経年変化の影響を評価した。特定兼用キャスクの主要な構成部材の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性が維持されることを確認した。

経年変化要因	特定兼用キャスク構成部材及び使用済燃料に対して考慮すべき項目
温度(熱)	低温又は高温での材料組成・材料組織の変化、強度・延性・脆性・クリープ・その他物性値の変化及び質量減少
放射線照射	ガンマ線及び中性子照射による材料組成・材料組織の変化及び強度・延性・脆性・その他物性値の変化
腐食	全面腐食、隙間腐食、応力腐食割れ、異種材料接触部の化学反応及びジルカロイにおける水素吸収・酸化

(注)(出典)(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:2021(AESJ-SC-F002:2021)」,(2022)

後段審査(設工認)で別途確認される事項

- なし

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 審査ガイドの要求事項

審査ガイド^(注)の要求事項に対するMSF-24P(S)型の長期健全性維持における考慮を下表に示す。
これらを考慮した設計及び安全評価結果をP.48に示す。

要求事項(確認内容)	長期健全性維持における考慮
安全機能を維持する上で重要な兼用キャスクの構成部材は最低使用温度における低温靱性を考慮したものであること。	安全機能を維持する上で重要な特定兼用キャスクの構成部材は、最低使用温度における低温靱性を考慮した上で、その必要とされる強度、性能を維持するように設計する。
設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化の影響を設計入力値又は設計基準値の算定に際し考慮すること。必要に応じて防食措置等が講じられていること。	MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスクの構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化の影響を設計入力値又は設計基準値に考慮する。また、特定兼用キャスク本体及び蓋部表面の必要な箇所には、塗装等による防錆処理を講ずる。
兼用キャスク内部の不活性環境を維持し、温度を制限される範囲に収めることにより、兼用キャスクに収納される使用済燃料の経年変化を低減又は防止する設計であること。	MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスク本体内部、バスケット及び使用済燃料の腐食等を防止するために、使用済燃料集合体を不活性ガスであるヘリウムとともに封入して貯蔵する。経年変化要因に対して、主要な構成部材の健全性を維持することで不活性環境を維持し、温度を制限される範囲に収めることにより、使用済燃料の健全性を維持する設計とする。

(注)「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」

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 特定兼用キャスク及び使用済燃料の健全性評価

(1) 温度影響

特定兼用キャスクの構成部材は、最低使用温度において低温脆化しない材料を用いるとともに、各部位の最高温度において文献等に規定される健全性を維持できる範囲内であるため、熱による経年変化の影響はない。

主要な評価部材		温度(°C) ^(注1)	基準値(°C)
特定兼用 キャスク 構成部材	胴、一次蓋、二次蓋、貯蔵用三次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、外筒	142	350
	バスケット(バスケットプレート)	188	250
	トランニオン、下部端板、底部中性子遮蔽材カバー	127	425
	中性子遮蔽材 ^(注2)	135	149
	金属ガスケット	118	130
	伝熱フィン	126	200
	使用済燃料(燃料被覆管)	215	275

(注1) 主要な評価部材のうち最大値を記載。

(注2) 設計貯蔵期間中の熱影響により質量減損が生じるため、遮蔽評価において中性子遮蔽材の質量減損(2.5%)を考慮し遮蔽機能が維持されることを確認している。

(2) 放射線の照射影響

設計貯蔵期間中の特定兼用キャスク構成部材及び使用済燃料の照射量は、文献等に規定される特性変化がみられない範囲内であるため、照射による経年変化の影響はない。

主要な評価部材		中性子照射量(n/cm ²) ^(注1)	基準値(n/cm ²)
特定兼用 キャスク 構成部材	胴、一次蓋、二次蓋、貯蔵用三次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、外筒	6.9×10^{14}	10^{16}
	バスケット(バスケットプレート)	1.5×10^{15}	10^{16}
	トランニオン、下部端板、底部中性子遮蔽材カバー	6.9×10^{14}	10^{17}
	中性子遮蔽材	1.6×10^{14}	10^{15}
	金属ガスケット	2.5×10^{14}	10^{17}
	伝熱フィン	1.6×10^{14}	10^{16}
	使用済燃料(燃料被覆管)	1.5×10^{15}	$10^{21 \sim 22}$

(注1) 貯蔵初期の中性子が減衰せず設計貯蔵期間中一定であると仮定して保守的に算出した設計貯蔵期間中の累積値。主要な評価部材のうち最大値を記載。

(3) 腐食による影響

特定兼用キャスク本体及び蓋部表面の必要な箇所には塗装等による防錆措置により腐食を防止する。また、特定兼用キャスク本体内部及び一次蓋と二次蓋の間には不活性ガスであるヘリウムを封入する設計としており、使用済燃料の腐食の影響はない。

● 技術基準規則への適合性

以上のとおり、特定兼用キャスクの構成部材の経年変化を考慮した上で、その必要とされる強度及び性能を維持することで、使用済燃料の健全性を確保する設計としている。したがって、MSF-24P(S)型は、長期健全性に係る要求事項に適合している。

6. 技術基準規則への適合性(26条)

燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備(第26条第2項6号二) (構造強度)

《規則要求》

六 使用済燃料を工場等内に貯蔵する乾式キャスクは、次に定めるところによること。

- 二 キャスク本体その他のキャスクを構成する部材は、使用される温度、放射線、荷重その他の条件に対し、適切な材料及び構造であること。

基本設計方針

- MSF-24P(S)型の材料及び構造は、金属キャスク構造規格等に基づき設計する。

安全評価

- 安全機能を確保するために必要な強度部材が金属キャスク構造規格等に規定される強度基準を満足する構造強度を有していることを確認した。

評価部位	適用規格等		備考
胴・一次蓋・カバープレート・一次蓋ボルト カバープレートボルト・二次蓋・二次蓋ボルト	金属キャスク 構造規格	密封容器	評価部位に対する適用規格等は、先行設工認における使用済燃料乾式貯蔵容器と同じである。
トラニオン		トラニオン	
外筒・下部端板・中性子遮蔽材カバー		中間胴	
バスケットプレート	使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号:T-DP C17001)を受けた評価方法 ^(注)		

(注) バスケットプレートには、金属キャスク構造規格に規定される材料を用いておらず、型式設計特定容器等の型式の指定を受けた材料と同じ材料を使用する。

後段審査(設工認)で別途確認される事項

- なし

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 安全機能を確保するために必要な強度部材の構造強度評価について

(1) 評価事象(代表事象)

MSF-24P(S)型の貯蔵施設内におけるハンドリングフロー(P.51)に基づき、貯蔵施設内において設計上考慮する事象(以下「選定事象」という。)を選定し、選定事象のうち、荷重条件等を考慮して評価対象とする事象(以下「代表事象」という。))を選定した。また、金属キャスク構造規格において、設計条件及び試験状態として要求される設計時及び試験時についても代表事象として評価を行う。

	設計条件 ^(注1)	供用状態A ^(注2)			試験状態 ^(注1)
	設計時 [代表事象] ^(注3)	吊上げ時 [代表事象] (P.51 No.1・2)	準備作業時 (P.51 No.3)	貯蔵時 [代表事象] (P.51 No.4)	試験時 [代表事象] ^(注3)
事象					
加速度	—	鉛直方向: 1.3g	鉛直方向: 1g	鉛直方向: 1g	鉛直方向: 1g
説明	最高使用圧力が負荷されている状態。	供用状態Aにおいて、加速度が最大であるため、代表事象とする。	荷重条件等は貯蔵時と同じである。	貯蔵施設内において大半の期間を占める事象であるため、代表事象とする。	耐圧試験圧力が負荷されている状態を代表事象とする。
評価対象 ^(注4)	密封容器	密封容器 バスケット トランニオン 中間胴	—	密封容器 バスケット トランニオン 中間胴	密封容器

(注1) 金属キャスク構造規格に基づき代表事象とする。(注2) 本表に包絡されない事象及び供用状態Bの事象については、貯蔵施設の設工認申請時に確認を受けるものとする。

(注3) 設計時及び試験時は、密封容器に対してのみ考慮する事象である。

(注4) 「密封容器」: 胴・一次蓋・カバープレート・一次蓋ボルト・カバープレートボルト・二次蓋・二次蓋ボルト、「バスケット」: バスケットプレート、「トランニオン」: 上部トランニオン・下部トランニオン、「中間胴」: 外筒・下部端板・蓋部中性子遮蔽材カバー・底部中性子遮蔽材カバーを示す。

 : 代表事象

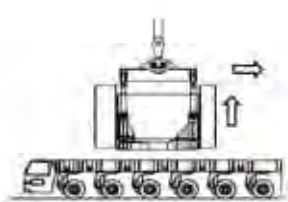
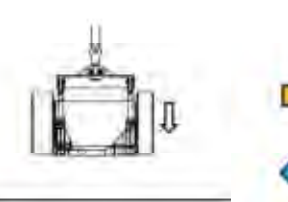


6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 安全機能を確保するために必要な強度部材の構造強度評価について

(1) 評価事象(代表事象)

MSF-24P(S)型の貯蔵施設内におけるハンドリングフロー

- ▶ トレーラ等により貯蔵施設に搬入されたMSF-24P(S)型は、貯蔵用緩衝体又は輸送用緩衝体を取り付けた状態で、貯蔵建屋内に設置され貯蔵される。
- ▶ 貯蔵施設から搬出される場合は、搬入から貯蔵までの工程と逆の手順にて取り扱うこととなる。

No.	1	2	3	4
取扱いモード	<ul style="list-style-type: none"> ・MSF-24P(S)型をトレーラ等で搬入 ・MSF-24P(S)型をクレーン等で吊上げ・移送 	<ul style="list-style-type: none"> ・MSF-24P(S)型をクレーン等で所定位置に吊下し 	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵前検査の実施・圧力センサ、表面温度センサの取付 	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵 
貯蔵施設における選定事象	<ul style="list-style-type: none"> ・MSF-24P(S)型の水平吊上げ ・MSF-24P(S)型の水平移動 	<ul style="list-style-type: none"> ・MSF-24P(S)型の水平吊下げ 	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵前作業及び搬出前作業 	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵時
備考	<ul style="list-style-type: none"> ・MSF-24P(S)型の搬入・吊上げ・移送時において、装着する緩衝体は貯蔵用緩衝体又は輸送用緩衝体である。 	—	<ul style="list-style-type: none"> ・MSF-24P(S)型の搬入・吊上げ・移送・吊下げ時において、輸送用緩衝体を装着している場合は輸送用緩衝体に代えて貯蔵用緩衝体を装着する。 	—

 : 搬入から貯蔵まで
  : 貯蔵後から搬出まで

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 安全機能を確保するために必要な強度部材の構造強度評価について

(2) 強度計算方法

① 胴・一次蓋・カバープレート・一次蓋ボルト・カバープレートボルト・二次蓋・二次蓋ボルト【ABAQUSコード・構造公式】
 金属キャスク構造規格の密封容器を適用し、設計上考慮すべき荷重の組合せを考慮して実施した。

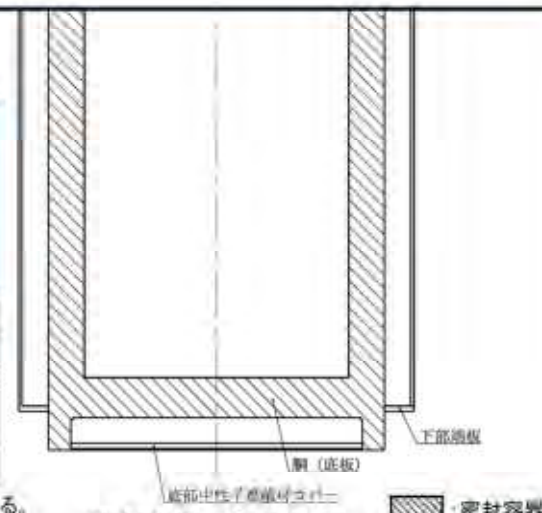


密封容器の評価フロー

密封容器の設計上考慮すべき荷重の組合せ

評価対象	圧力による荷重	自重による荷重	ボルト初期締付力	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重
設計時	○	—	○	—	—	—
貯蔵時	○	○	○	—	—	○
吊上げ時	○	(注1)	○	○	—	○
試験時	○	○	○	—	—	—

(注1) 自重による荷重は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。



密封容器の評価箇所

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 安全機能を確保するために必要な強度部材の構造強度評価について

(2) 強度計算方法

② バスケットプレート【構造公式】

金属キャスク構造規格のバスケットの評価を参考とし、設計上考慮すべき荷重の組合せを考慮して使用済燃料貯蔵施設に係る型式設計特定容器等の型式の指定(指定の番号:T-DPC17001)を受けた評価に準じた評価を実施した。

バスケットプレートの設計上考慮すべき荷重の組合せ

評価対象	自重による荷重	ボルト初期締付力	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重
貯蔵時	○	—(注1)	—	—	—(注3)
吊上げ時	—(注1)	—(注2)	○	—	—(注3)

(注1) 自重による荷重は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。
 (注2) バスケットの構造強度部材としてボルトを使用していない。
 (注3) バスケット同士又は胴により拘束されないため熱荷重は発生しない。



バスケットプレート
の応力評価フロー

バスケットプレートの応力評価箇所

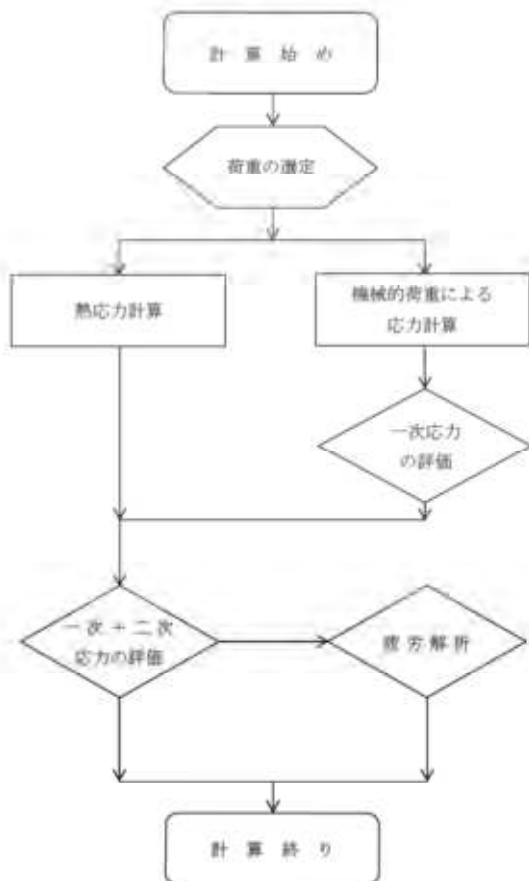
6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 安全機能を確保するために必要な強度部材の構造強度評価について

(2) 強度計算方法

③ トラニオン【構造公式】

金属キャスク構造規格のトラニオンを適用し、設計上考慮すべき荷重の組合せを考慮して実施した。



トラニオンの評価フロー

トラニオンの設計上考慮すべき荷重の組合せ

評価事象	自重による荷重	ボルト初期締付け力	吊上げ荷重	固縛荷重	熱応荷重
貯蔵時	○	—(注2)	—	○	—(注3)
吊上げ時	—(注1)	—(注2)	○	—	—(注3)

(注1) 自重による荷重は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

(注2) トラニオンの構造強度部材としてボルトを使用していない。

(注3) 密封容器の熱膨張により生じる応力に拠る。



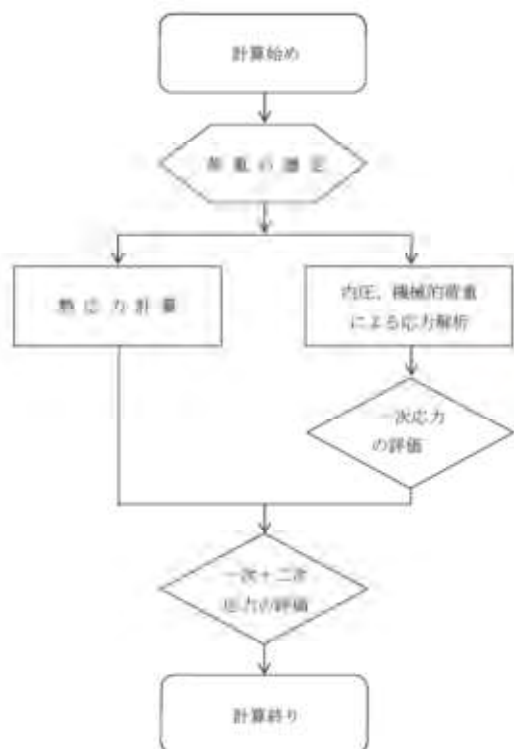
トラニオンの評価箇所

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 安全機能を確保するために必要な強度部材の構造強度評価について

(2) 強度計算方法

- ④ 外筒・下部端板・蓋部中性子遮蔽材カバー・底部中性子遮蔽材カバー【ABAQUSコード】
 金属キャスク構造規格の中間胴を適用し、設計上考慮すべき荷重の組合せを考慮して実施した。



外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び
底部中性子遮蔽材カバーの設計上考慮すべき荷重の組合せ

評価対象	自重による荷重	圧力による荷重	吊上げ荷重	慣性力荷重	熱荷重
貯蔵時	○	○	—	—	○
吊上げ時	— (注1)	○	○	—	○

〈注1〉自重による荷重は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び
底部中性子遮蔽材カバーの応力評価フロー

外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び
底部中性子遮蔽材カバーの応力評価箇所

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 安全機能を確保するために必要な強度部材の構造強度評価について

(3) 応力解析に用いる解析コード

構造強度評価では、密封容器のうち、胴、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋及び二次蓋ボルト、並びに中間胴として評価する外筒、下部端板、蓋部中性子遮蔽材カバー及び底部中性子遮蔽材カバーの応力解析にABAQUSを使用している。

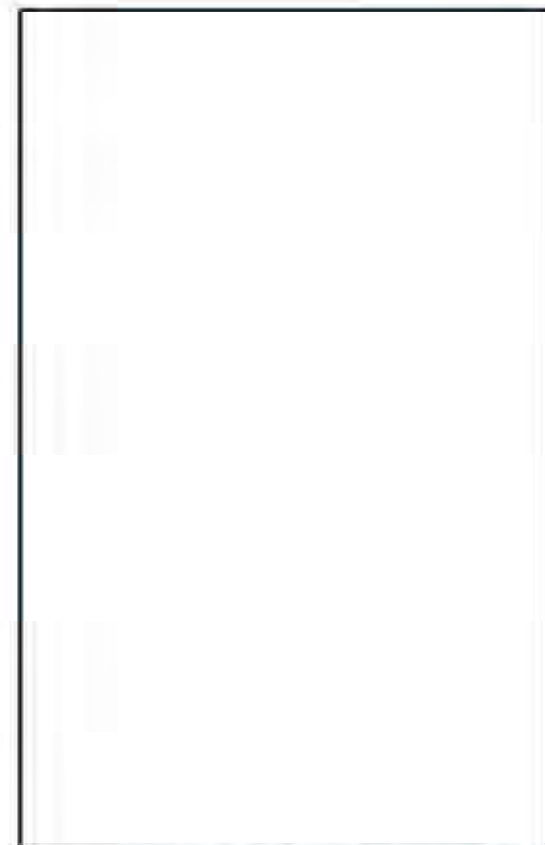
ABAQUSは、MSF-24P(S)型のプロトタイプであるMSFキャスクの落下試験モデルを用いた落下試験により検証され適用性を確認している。また、このコードは、技術的な特殊性、新規性はなく、許認可で実績があるコードである。

(4) 強度計算結果

各部位の適合性確認結果をP.57に示す。各部位は、金属キャスク構造規格等に規定される許容基準を満足していることを確認した。

● 技術基準規則への適合性

以上のとおり、MSF-24P(S)型は、安全機能を確保するために必要な強度部材が金属キャスク構造規格等に規定される強度基準を満足しており、十分な構造強度を有している。したがって、MSF-24P(S)型は、構造に係る要求事項に適合している。



密封容器及び外筒等の応力解析モデル
(貯蔵時の例)

6. 技術基準規則への適合性(26条)

● 安全機能を確保するために必要な強度部材の構造強度評価について

強度計算結果(金属キャスク構造規格等への適合性確認結果)

(1) 設計時 [応力評価]

(単位:MPa)

部位	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋	膜+曲げ(一次)	6	186
二次蓋	膜+曲げ(一次)	25	186
胴	膜(一次)	1	122
一次蓋ボルト	引張	248	280
二次蓋ボルト	引張	220	281
カバープレート	膜+曲げ(一次)	3	205
カバープレートボルト	引張	166	280

(2) 貯蔵時 [応力評価]

(単位:MPa)

部位	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋	膜+曲げ(一次+二次)	27	372
二次蓋	膜+曲げ(一次)	28	186
胴(シール部)	膜+曲げ(一次+二次)	75	185
胴	圧縮	35	90
一次蓋(シール部)	膜+曲げ(一次+二次)	80	185
二次蓋(シール部)	膜+曲げ(一次+二次)	25	185
一次蓋ボルト	引張+曲げ	380	840
二次蓋ボルト	引張+曲げ	431	843
カバープレート	膜+曲げ(一次)	3	205
カバープレートボルト	引張	166	560
バスケットプレート	せん断	1	9
上部トランニオン	支圧(一次+二次)	75	343
下部トランニオン	支圧(一次+二次)	100	343
外筒	曲げ(一次)	60	156
下部端板	曲げ(一次+二次)	117	410
蓋部中性子遮蔽材カバー	引張/圧縮(一次+二次)	20	470
底部中性子遮蔽材カバー	曲げ(一次)	39	136

(注)本頁に示す評価結果は、各部位のうち許容応力又は許容基準値に対し最も余裕が少ないものを示している。

(3) 吊上げ時 [応力評価]

(単位:MPa)

部位	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋	膜+曲げ(一次+二次)	21	372
二次蓋	膜+曲げ(一次)	28	186
胴(シール部)	膜+曲げ(一次+二次)	51	185
胴	圧縮	26	90
一次蓋(シール部)	膜+曲げ(一次+二次)	71	185
二次蓋(シール部)	膜+曲げ(一次+二次)	25	185
一次蓋ボルト	引張	250	560
二次蓋ボルト	引張+曲げ	339	843
カバープレート	膜+曲げ(一次)	3	205
カバープレートボルト	引張	166	560
バスケットプレート	せん断	1	21
上部トランニオン	組合せ(一次)	117	394
下部トランニオン	支圧(一次+二次)	84	343
外筒	曲げ(一次)	60	156
下部端板	曲げ(一次+二次)	119	410
蓋部中性子遮蔽材カバー	引張/圧縮(一次+二次)	14	470
底部中性子遮蔽材カバー	曲げ(一次)	39	136

(4) 試験時 [応力評価]

(単位:MPa)

部位	応力分類	計算値	許容応力値
一次蓋	膜+曲げ(一次)	14	279
胴(シール部)	膜+曲げ(一次+二次)	11	207
胴	膜+曲げ(一次)	5	279
一次蓋(シール部)	膜+曲げ(一次+二次)	61	207
カバープレート	膜+曲げ(一次)	4	276

(5) その他評価

		部位	計算値	許容基準値
密封容器	疲労評価	一次蓋ボルト	0.0258	1
		二次蓋ボルト	0.0367	1
		カバープレートボルト	0.0034	1
	外圧を受ける胴	0.41MPa	13.2MPa	
		補強要否の評価	蓋貫通部の応力強さは許容基準以下であり、補強は不要。	
トランニオン	疲労評価	トランニオン	0.0010	1

7. 指摘事項リスト

No.	受領日	コメント内容	該当条文	コメント回答	対応状況
1	2022/9/1 審査会合	型式証明からの変更点(貯蔵用三次蓋の材質・形状)による安全機能の評価への影響について説明すること。	技術基準規則26条(安全機能全般)	型式証明からの貯蔵用三次蓋の構造変更を踏まえ、貯蔵用三次蓋のモデル化の差異、及びその他評価条件の差異による型式証明の各安全機能評価結果への影響を整理した。評価モデル及び評価条件の差異により、遮蔽機能、除熱機能、閉じ込め機能及び長期健全性に係る評価結果への影響がある。除熱機能への影響については、貯蔵用三次蓋の構造変更による影響は僅かであるが、貯蔵場所の差異(型式指定:貯蔵建屋内、型式証明:屋外[代表ケース])に起因する境界条件の差異により、型式証明に対し温度が高くなっている。なお、閉じ込め及び長期健全性への影響は、いずれも除熱評価結果に差異が生じたことによるものである。 【P.59参照】	次回審査会合で説明予定。
2	2022/9/1 審査会合	MCNP5コードの適用妥当性を具体的に説明すること。	技術基準規則26条(遮蔽)	MCNP5コードの放射性物質輸送・貯蔵容器体系に対する適用妥当性は、原子力学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン:2015」のモデル検証及び妥当性確認方法を参考に、(1)概念モデルの整理、(2)数学的モデル化、(3)物理的モデル化及び(4)シミュレーションモデルの予測性能判断の各要素について検討し、MSF-24P(S)型の遮蔽解析へのMCNP5コードの適用妥当性を確認している。【P.66参照】	次回審査会合で説明予定。
3	2022/9/1 審査会合	申請書添付書類13に示す輸送用緩衝体を装着して輸送することが申請書本文に明記されていないため記載を検討のこと。また、貯蔵用緩衝体の性能に係る説明に際して、詳細設計ベースでの具体的な緩衝性能について説明すること。	— (緩衝体)	(今後回答予定)	未

8. 指摘事項への回答

指摘事項(No.1)

型式証明からの変更点(貯蔵用三次蓋の材質・形状)による安全機能の評価への影響について説明すること。

(回答)

型式証明からの貯蔵用三次蓋の構造変更(P.60)を踏まえ、貯蔵用三次蓋のモデル化の差異、及びその他評価条件の差異による型式証明の各安全機能評価結果への影響を整理した。評価モデル及び評価条件の差異により、遮蔽機能、除熱機能、閉じ込め機能及び長期健全性に係る評価結果への影響がある。

除熱機能への影響については、貯蔵用三次蓋の構造変更による影響は僅かであるが、貯蔵場所の差異(型式指定:貯蔵建屋内、型式証明:屋外[代表ケース])に起因する境界条件の差異により、型式証明に対し温度が高くなっている。なお、閉じ込め及び長期健全性への影響は、いずれも除熱評価結果に差異が生じたことによるものである。

安全機能	評価モデル・評価条件の差異			型式証明の評価結果に対する差異
	貯蔵用三次蓋のモデル化の差異①		①を除く評価条件の差異	
	型式指定	型式証明		
臨界防止	無視	無視	差異なし	評価結果は同一
遮蔽	無視	モデルに考慮 (型式証明構造)	評価位置における貯蔵用緩衝体の装着の有無に差異あり (型式指定:未装着/型式証明:装着)	貯蔵用三次蓋のモデル化及び貯蔵用緩衝体の装着有無の差異により、型式証明に対し、頭部/底部方向の線量当量率は増加する。(P.61~62参照)
除熱	モデルに考慮 (型式指定構造)	モデルに考慮 (型式証明構造)	貯蔵場所に差異あり (型式指定:貯蔵建屋内/型式証明:屋外)	貯蔵用三次蓋の構造変更による除熱性能への影響はわずかであるが、貯蔵場所の差異に起因する境界条件の差異により、型式証明に対し、温度は高くなる。(P.63~64参照)
閉じ込め	無視	無視	温度条件に差異あり (除熱解析により得られる特定兼用キャスク本体内部温度を使用)	特定兼用キャスク本体内部温度(除熱評価結果)が高くなることにより、基準漏えい率及びリークテスト判定基準値は僅かに小さくなる。(P.65参照)
長期健全性	評価モデルなし (温度、放射線等に基づき健全性を評価)		温度条件に差異あり (除熱解析により得られる特定兼用キャスク構成部材及び使用済燃料温度を使用)	特定兼用キャスク構成部材及び使用済燃料の温度(除熱評価結果)が高くなる。(P.65参照)

● 貯蔵用三次蓋の構造差異

型式指定申請	型式証明申請

8. 指摘事項への回答

● 遮蔽評価条件の差異が線量当量率に与える影響(1/2)

貯蔵用三次蓋のモデル化の差異(型式指定:無視、型式証明:モデルに考慮)、及び評価位置における貯蔵用緩衝体の装着の有無(型式指定:未装着/型式証明:装着)の差異により、型式証明に対し、線量当量率は増加^(注)する。

(注)型式指定では、中性子遮蔽材の少ない方向である底部コーナ一部が最大値位置であるが、型式証明では当該位置は緩衝体内部となるためキャスク表面位置ではなくなり、最大値位置はトランニオン近傍となる。型式指定と型式証明とでは線量当量率が最大となる評価点位置が異なるため、次頁に示すとおり、燃料集合体から放出された中性子及びガンマ線の構造材透過距離が異なる。

表面評価点に対しては中性子の線量当量率が支配的であり、中性子遮蔽材透過距離の差により型式証明に対して型式指定の線量当量率は増加する。ただし、型式証明での表面線量当量率最大位置はトランニオン近傍であるため、中性子遮蔽材欠損の影響により、構造材透過距離の差による線量当量率への影響度合いは小さくなる。

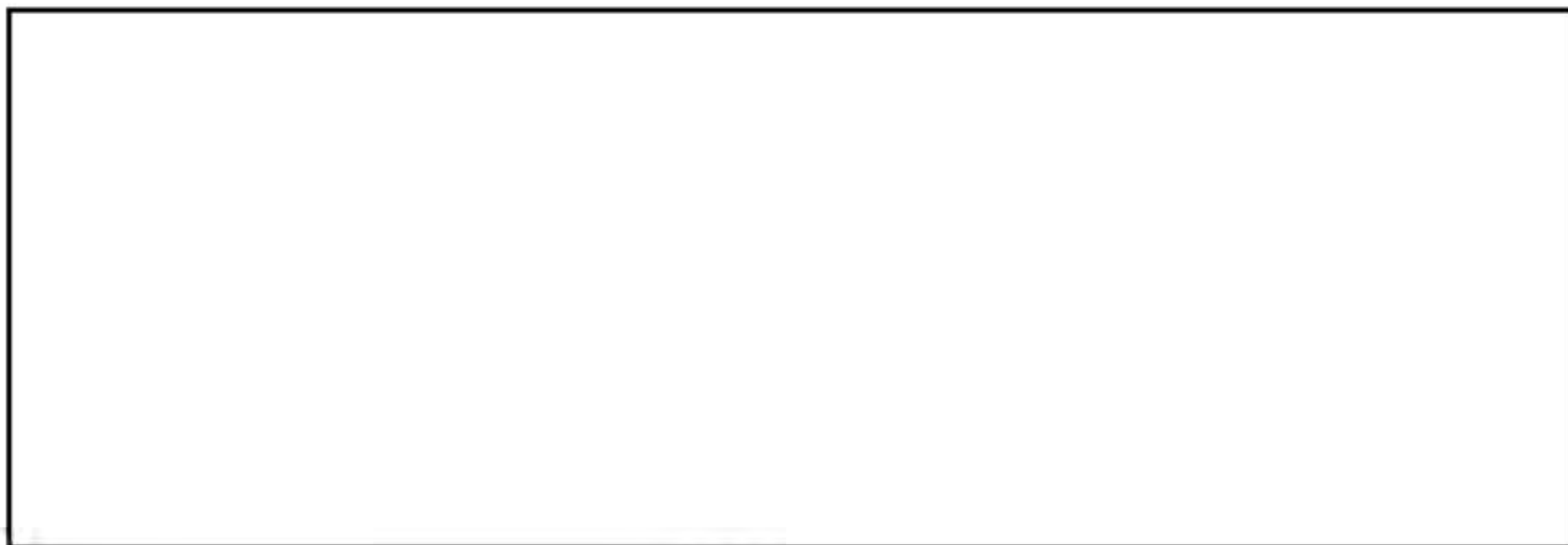
型式指定と型式証明の線量当量率比較(17×17燃料収納時、MCNP5コード)^(注) (単位: μ Sv/h)

評価ケース		頭部		側部	底部		評価基準
		軸方向	径方向		径方向	軸方向	
表面	型式指定	395.6	698.2	204.1	1528.9	207.1	2,000以下
	型式証明	41.9	665.5	206.5	788.7	71.0	
表面から1m 離れた位置	型式指定	64.8	82.8	84.6	73.6	60.1	100以下
	型式証明	20.8	83.5	84.2	74.7	34.4	

(注)朱書きは最大線量当量率を示す。線量当量率の評価位置は次頁図参照。

8. 指摘事項への回答

● 遮蔽評価条件の差異が線量当量率に与える影響(2/2)



線量当量率評価位置

型式指定と型式証明の構造材透過距離(表面最大値となる位置)

構造材 (材質)	距離(cm)		型式証明と型式指定の 距離の差(cm)
	型式証明	型式指定	
胴 (炭素鋼)	[]	[]	
中性子遮蔽材 (レジン)			
外筒 (炭素鋼)			

8. 指摘事項への回答

● 除熱評価条件の差異が温度に与える影響(1/2)

型式指定と型式証明の温度比較を下表に示す。解析条件の差異が温度に与える影響を以下に示す。

(1) 解析モデルの差異(貯蔵用三次蓋の構造差異)

蓋部に伝わる熱は、主に熱抵抗の大きい軸方向へは流れにくく、貯蔵用三次蓋へ伝わる熱量は少ない(下図)。熱量が少ない部材には温度差が生じにくく、貯蔵三次蓋の構造変更が温度に与える影響は小さい。

型式指定と型式証明の温度比較

主な評価部位	評価結果(°C)		設計基準値(°C)
	型式指定 (貯蔵棟屋内貯蔵)	型式証明 (屋外貯蔵) (注)	
燃料被覆管	215	206	275
特定兼用キャスク	胴	142	133
	一次蓋	118	110
	一次蓋ボルト	118	109
	中性子遮蔽材	135	127
	金属ガスケット	118	110
	バスケット	187	177
	伝熱フィン	126	115

(注)型式証明では、屋外貯蔵条件を代表例として除熱評価を実施。



蓋部の熱の流れ(概略図)

8. 指摘事項への回答

● 除熱評価条件の差異が温度に与える影響(2/2)

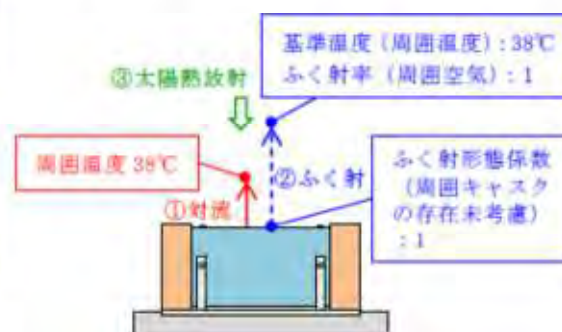
(2) 境界条件の差異

型式指定と型式証明では貯蔵場所(貯蔵建屋内又は屋外)が異なるため、境界条件(対流、ふく射及び太陽熱放射)が異なる。下表に示す対流、ふく射、太陽熱放射及び太陽熱放射の差異により、型式証明と比べて温度は上昇する傾向となる。

項目		型式指定 (貯蔵建屋内貯蔵)	型式証明 (屋外貯蔵)	境界条件の差異による温度への影響
① 対流	周囲温度	45℃	38℃	熱伝達率の計算式に差異はないが、型式指定では型式証明に対して周囲温度が高いため、 温度は上昇する傾向 となる。
	外表面の熱伝達率	計算式に差異なし		
② ふく射	基準温度	65℃ (貯蔵建屋壁面温度)	38℃ (周囲温度)	型式証明では、ふく射形態係数の設定において、周囲キャスクの存在を未考慮としていたが、型式指定では、周囲キャスクの存在を考慮し、ふく射形態係数を設定している。型式指定の方が、主要な放熱面となる外筒のふく射形態係数が小さく基準温度も高いため、 温度は上昇する傾向 となる。
	貯蔵建屋壁面ふく射率	0.8	1(周囲空気)	
	外表面ふく射率	差異なし		
	外表面からのふく射形態係数	外筒:0.692	1(全面)	
③太陽熱放射		考慮不要	考慮	型式指定では、太陽熱放射が無く、太陽熱放射が有る型式証明請の条件に比べて 温度は低下する傾向 となる。



型式指定(貯蔵建屋内貯蔵)



型式証明(屋外貯蔵[評価代表例])

8. 指摘事項への回答

● 閉じ込め評価条件及び長期健全性評価条件の差異の影響

閉じ込め及び長期健全性への影響は、いずれも除熱評価結果(温度)に差異が生じたことによるものである。型式指定と型式証明の評価条件の差異及び評価結果の比較を以下に示す。

(1) 閉じ込め評価

特定兼用キャスク本体内部温度が高くなることにより、基準漏えい率及びリークテスト判定基準値は僅かに小さくなる。

(2) 長期健全性評価

熱による影響として除熱評価結果を適用。特定兼用キャスク構成部材及び使用済燃料の温度が高くなる。

(1) 閉じ込め評価における評価条件及び評価結果の比較

収納 状態(例)	項目		基準漏えい率		リークテスト判定基準	
			型式指定	型式証明	型式指定	型式証明
17×17 燃料 収納時	評価条件 の差異	特定兼用キャスク 本体内部温度 ^(注1)	220°C	215°C	220°C	215°C
		評価結果 ^(注2)	2.58×10^{-6}	2.60×10^{-6}	1.61×10^{-6}	1.63×10^{-6}

(注1) 除熱評価結果(燃料被覆管温度)を保守的に切り上げて設定した値、(注2) 単位: Pa・m³/s

(2) 長期健全性評価における評価結果の比較

主要な評価部材		温度(°C) ^(注1)		基準値(°C)
		型式指定	型式証明	
特定兼用 キャスク 構成部材	胴、一次蓋、二次蓋、貯蔵用三次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、外筒	142	133	350
	バスケット(バスケットプレート)	188	177	250
	トランニオン、下部端板、底部中性子遮蔽材カバー	127	118	425
	中性子遮蔽材	135	127	149
	金属ガスケット	118	110	130
	伝熱フィン	126	115	200
使用済燃料(燃料被覆管)		215	206	275

(注1) 除熱評価結果。主要な評価部材のうち最大値を記載。

8. 指摘事項への回答

指摘事項(No.2)

MCNP5コードの適用妥当性を具体的に説明すること。

(回答)

- MCNP5コードの放射性物質輸送・貯蔵容器体系に対する適用妥当性は、原子力学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン:2015」のモデル検証及び妥当性確認方法を参考に、(1)概念モデルの整理、(2)数学的モデル化、(3)物理的モデル化及び(4)シミュレーションモデルの予測性能判断の各要素について検討し、MSF-24P(S)型の遮蔽解析へのMCNP5コードの適用妥当性を確認している。
- 数学的モデル化についてはLANLで解析解及び参照解との比較で良く一致することを確認している^(注1)。物理的モデル化については使用済燃料輸送・貯蔵容器体系でのベンチマーク解析で解析精度を確認し、計算値が実測値を上回ることを確認している(P.67～68)^(注2)。これらの確認結果を踏まえ、MSF-24P(S)型の遮蔽解析では、保守的な条件設定を行うことにより、シミュレーションモデルの予測性能として保守的な評価結果が得られると判断できる(P.69～71参照)。
- MSF-24P(S)型の遮蔽解析はベンチマーク解析と同様の体系であり、使用済燃料の収納条件(濃縮度、燃焼度)や評価モデル(中性子遮蔽材、線源位置)を保守的に設定しており、線量当量率基準への適合性確認にMCNP5コードを適用することは妥当である。

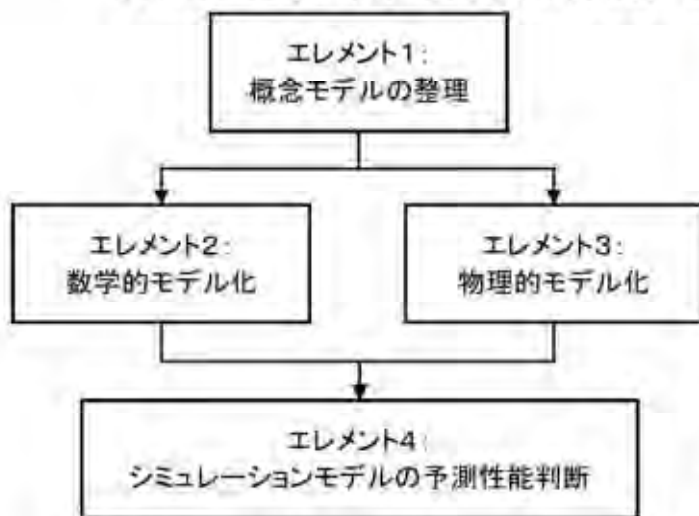


図: モデル検証及び妥当性確認

エレメント	確認結果	備考
1	MSF-24P(S)型の遮蔽解析で考慮すべき概念モデル要素を整理。	考慮すべき概念モデル要素として物理現象(散乱、吸収等)、線源(線種、形状)及び遮蔽体(材質、形状)を整理。
2	数理モデルへの変換及び数値モデルへの変換は解析コード開発機関(LANL)でリグレッションテストやベンチマーク(解析解及び参照解)との比較で確認済み ^(注1) 。	ベンチマークは散乱無し(解析解)と散乱有の条件(MVPコードによる参照解)での比較で良い一致を確認。
3	ベンチマーク解析 ^(注2) より、適切なモデル化により保守的な評価が可能であることを確認。	ベンチマーク解析条件はMSF-24P(S)型の遮蔽解析と同等。
4	MSF-24P(S)型の遮蔽解析として保守的な評価条件を設定可能であり、保守的な評価結果を得ることが可能であることを確認。	評価条件としては、使用済燃料の収納条件や評価モデルを保守的に設定可能。

(注1) Forrest Brown, Brain Kiedrowski, Jeffery Bull, Matthew Gonzales, Nathan Gibson, "Verification of MCNP5-1.60", LA-UR-10-05611, (2010).

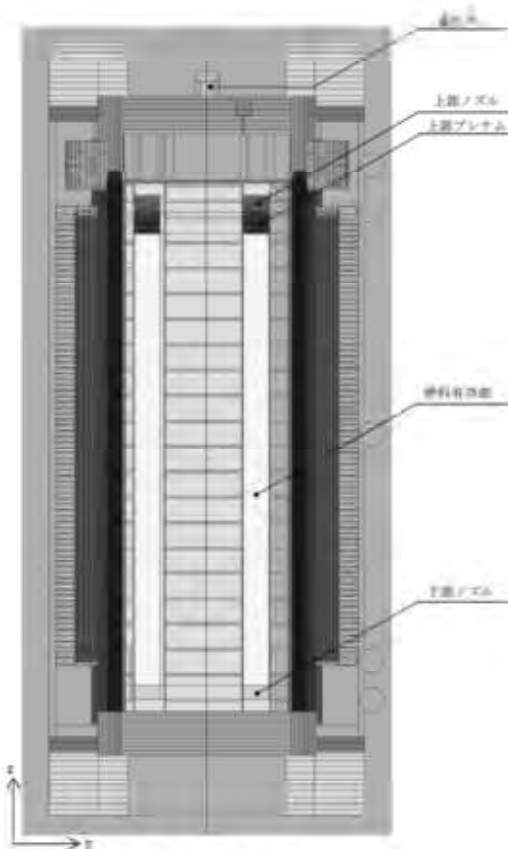
(注2) 一般社団法人日本原子力学会「モンテカルロ法による放射性物質輸送容器の遮蔽安全評価手法の高度化 平成23年度報告書」(2012).

及び、M. Ueyama M. Osaki, "Dose Equivalent Rate Benchmark Calculations of a Dry Storage Cask for Spent Fuel by 3D Monte Carlo Code", PATRAM 2019, (2019).

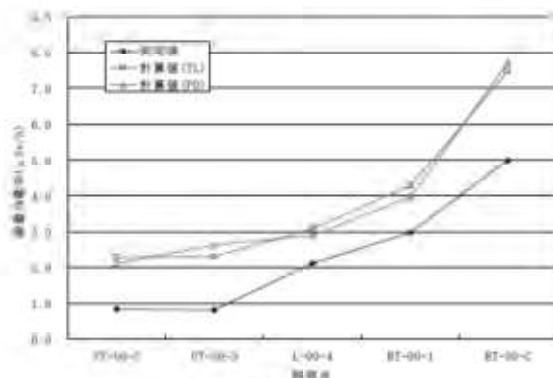
8. 指摘事項への回答

● 物理的モデル化の確認に用いたベンチマーク解析の評価モデル及び結果(使用済燃料輸送容器体系)

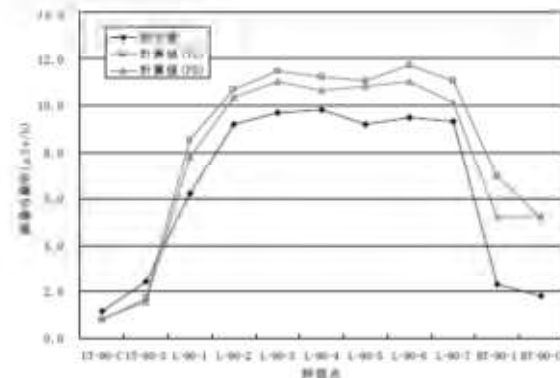
中性子線量当量率は、表面では計算値が測定値を大きく上回っているが軸方向分布の傾向は一致しており、表面から1 m離れた位置においては、計算値が測定値をやや上回っている。ガンマ線線量当量率は、表面では、中央部では計算値が測定値を2割程度上回っている。軸方向上部では計算値が測定値を下回っているが、計算値には端部構造材の放射化ガンマ線による影響が含まれていないためである。表面から1 m離れた位置においては、中央部では計算値が測定値を5割程度上回っているが傾向は一致している。



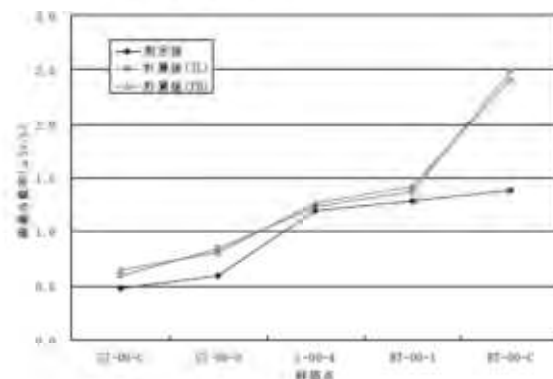
(解析モデル)



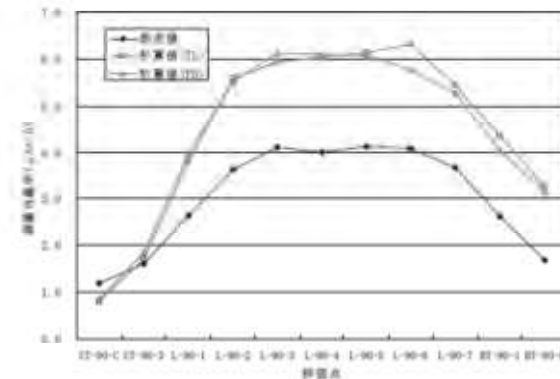
(中性子線量当量率、表面位置 0° 方向)



(ガンマ線線量当量率、表面位置 90° 方向)



(中性子線量当量率、表面から1 m離れた位置 0° 方向)



(ガンマ線線量当量率、表面から1 m離れた位置 90° 方向)

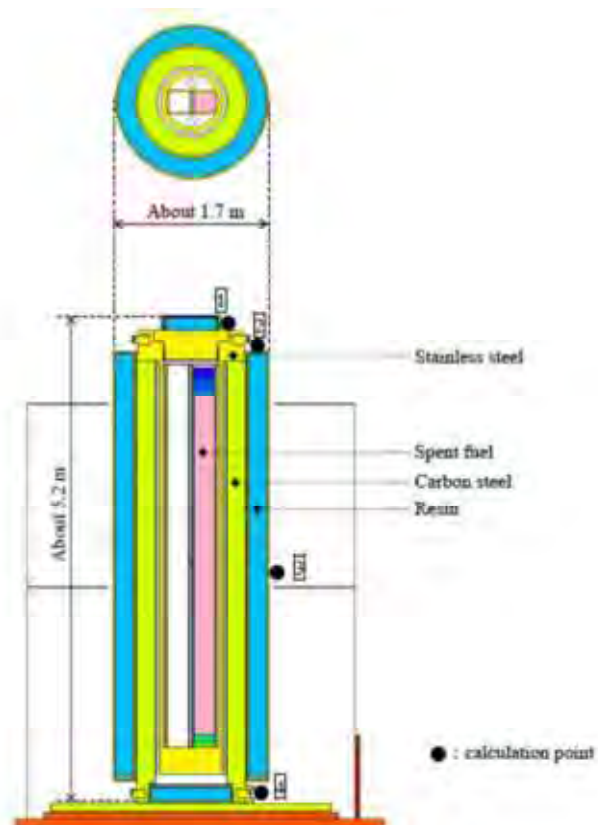
(評価結果)

NFT-14P型輸送容器によるMCNP5コードの検証

8. 指摘事項への回答

● 物理的モデル化の確認に用いたベンチマーク解析の評価モデル及び結果(乾式貯蔵容器体系)

表面において、測定値と計算値を比較するとよい一致を示している。なお、C/E<1の評価点については、モデル化していない周囲構造物による中性子及びガンマ線の散乱が考慮できていないため評価値が低くなっていると考えられる。



(解析モデル)

Table 3. Experimental and calculated results (neutron dose equivalent rate)

Measurement point	Experimental value (μSv/h)	Calculated value (μSv/h)	Calculated / Experimental
1	9.93±0.17	10.20±1.8E-02	1.03±0.02
2	9.71±0.13	9.01±3.2E-02	0.93±0.01
3	0.47±0.02	0.52±9.8E-03	1.11±0.04
4	9.66±0.18	11.33±3.7E-02	1.17±0.02

Table 4. Experimental and calculated results (gamma-ray dose equivalent rate)

Measurement point	Experimental value (μSv/h)	Calculated value (μSv/h)	Calculated / Experimental
1	N/D*	-	-
2	N/D*	-	-
3	2.5±0	2.25±0.04	0.90±0.02
4	N/D*	-	-

*below the detection limit 0.5 μSv/h

(評価結果)

乾式貯蔵容器によるMCNP5コードの検証

8. 指摘事項への回答

● MCNP5コード適用妥当性の確認内容詳細(1/3)

使用済燃料輸送・貯蔵容器体系でのベンチマーク解析で解析精度を確認し、計算値が実測値を上回ることを確認。
 また、型式指定はベンチマーク解析と同様の体系であり、条件については保守的設定となっているため、線量当量率基準への適合性確認にMCNP5コードを適用することは妥当である。

MSF-24P(S)型型式指定の遮蔽解析で考慮すべき概念モデル要素	評価に影響のある因子	評価条件			MSF-24P(S)型解析条件の保守性による線量当量率への影響
		MSF-24P(S)型型式指定の遮蔽解析	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系 P67)	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系 P68)	
【物理現象】 ミクロ ・散乱・吸収 マクロ ・遮蔽材欠損部でのストリーミング ・相互遮蔽 ・遮蔽材の透過	計算コード	MCNP5 ver.1.60コードを用いて評価	MCNP5コードを用いて評価	MCNP5 ver.1.60コードを用いて評価	-
	断面積ライブラリ	中性子 ・FSXLIB-J33	断面積 ・FSXLIB-J33	断面積 ・FSXLIB-J33	-
		ガンマ線 ・MCPLIB84	断面積 ・MCPLIB02	断面積 ・MCPLIB84	-
【線源】 PWR使用済燃料	中性子線源条件	スペクトル ・Watt型 ²³⁹ Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・Watt型 ²³⁹ Pu 核分裂スペクトル	スペクトル ・Watt型 ²⁴⁴ Cm 核分裂スペクトル	-
		線源強度 ・ORIGEN2出力	線源強度 ・ORIGEN2出力	線源強度 ・ORIGEN2出力	型式指定評価はウラン初期濃縮度の不確かさを保守的に設定。線量当量率への影響約0.5%程度。
		燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	型式指定評価は収納燃料燃焼度の不確かさを保守的に設定。燃料集合体平均燃焼度の線量当量率への影響約10%程度。
		冷却期間 ・代表期間を設定	冷却期間 ・実績考慮	冷却期間 ・実績考慮	-

8. 指摘事項への回答

● MCNP5コード適用妥当性の確認内容詳細(2/3)

MSF-24P(S)型型式指定の遮蔽解析で考慮すべき概念モデル要素	評価に影響のある因子	評価条件			MSF-24P(S)型解析条件の保守性による線量当量率への影響
		MSF-24P(S)型型式指定の遮蔽解析	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系 P67)	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系 P68)	
【線源】 PWR使用済燃料	ガンマ線線源条件	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2出力 ・放射化ガンマ: 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2出力 ・放射化ガンマ:-	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2出力 ・放射化ガンマ: 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	-
		線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力 ・放射化ガンマ: ⁵⁹ Co含有量からの計算値	線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力 ・放射化ガンマ:-	線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力 ・放射化ガンマ: ⁵⁹ Co含有量からの計算値	型式指定評価はウラン初期濃縮度の不確かさを保守的に設定。
		燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・燃焼度最大値	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	燃焼度 ・軸方向分布考慮 ・実績燃焼度	型式指定評価は収納燃料燃焼度の不確かさを保守的に設定。燃料集合体平均燃焼度の線量当量率への影響約10%程度。
		冷却期間 ・代表期間を設定	冷却期間 ・実績考慮	冷却期間 ・実績考慮	-
【線源形状】 PWR使用済燃料	燃料集合体(線源領域)の設定	・使用済PWR燃料24体 ・1体ごとに均質化 ・上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割 ・バスケット内均質化	・使用済PWR燃料14体 ・1体ごとに均質化 ・上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部に分割 ・下側/中央側に寄付き	・使用済PWR燃料1体 ・1体ごとに均質化 ・上部ノズル部、上部プレナム部、燃料有効部、下部ノズル部、下部プレナム部に分割 ・バスケット内均質化	型式指定評価は軸方向での燃料集合体の移動を考慮し、燃料集合体が一次蓋と接した状態に設定。頭部軸方向線量当量率への影響約7%程度。

8. 指摘事項への回答

● MCNP5コード適用妥当性の確認内容詳細(3/3)

MSF-24P(S)型型式指定の遮蔽解析で考慮すべき概念モデル要素	評価に影響のある因子	評価条件			MSF-24P(S)型解析条件の保守性による線量当量率への影響
		MSF-24P(S)型型式指定の遮蔽解析	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系 P67)	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系 P68)	
【遮蔽材質及び形状】 放射性物質輸送・貯蔵容器構造材の材料及び形状、組成、密度、公差	材質	・構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、レジン、銅等 ・緩衝体:なし	・構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、鉛、レジン、水等(湿式キャスク) ・緩衝体:木材	・構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、レジン等 ・緩衝体:なし	-
	形状	実形状 ・外径約2.6m ・長さ約5.2m	実形状 ・外径約2.6m(緩衝体含む) ・長さ約6.3m(緩衝体含む)	実形状 ・外径約1.7m ・長さ約5.2m	-
	組成/密度	・最小密度 ・レジン組成カロゲ値 ・設計貯蔵期間のレジン質量減損考慮	・最小密度 ・レジン組成カロゲ値 ・水組成:発熱量より概算	・最小密度 ・レジン組成カロゲ値	型式指定評価はレジン減損の不確かさを保守的に設定。線量当量率への影響約10%程度。 型式指定評価はバーナブルボイズン集合体収納の不確かさを保守的に設定。線量当量率への影響約1%程度。
	寸法公差	・密度に考慮	・考慮しない	・考慮しない	-
【評価結果】 (計算値/測定値)	中性子	-	0.9~2.89 (P67参照)	0.90~1.17 (P68参照)	C/E<1のものについては、モデル化していない周囲構造物による中性子反射が考慮できていないため評価値が低くなっている影響。
	ガンマ	-	0.71~3.10 (P67参照)	0.90 (P68参照)	C/E<1のものについては、端部構造材の放射化ガンマ線について評価していないこと、ガンマ線の散乱が一部考慮できていないことで評価値が低くなっている影響。

● 審査説明スケジュール

項目	2022年度		
	7-9月	10-12月	1-3月
型式指定審査 (MSF-24P(S)型横置き)	申請 ▼ 7/13	審査会合 ▼ 9/1	認可希望 ▼
概要	[Redacted]		
1. 技術基準規則適合性 ・安全機能・長期健全性(26条)	[Redacted]		
・構造強度評価(17条・26条)	[Redacted]		
・地震/津波/竜巻時評価(5・6・7条)	[Redacted]		
2. 外運搬規則適合性	[Redacted]		
3. 品質管理基準適合性	[Redacted]		
4. 貯蔵用緩衝体装着状態での安全性	[Redacted]		
コメント回答 他	[Redacted]		

(参考) 本申請での説明事項と先行審査との関係

● 主要仕様・構造の差異(貯蔵時)

伊方発電所3号機 使用済燃料乾式貯蔵施設の設置工事に係る設計及び工事計画認可申請(原規規発第2107076号 令和3年7月7日認可)(以下「先行設工認」という。)における使用済燃料乾式貯蔵容器(タイプ2:MSF-24P型)との差異は下表のとおり。

項目	仕様(貯蔵時)		差異の理由等				
	本申請(MSF-24P(S)型)	先行設工認(MSF-24P型)					
貯蔵姿勢	横置き	たて置き	本申請では貯蔵用三次蓋及び貯蔵用緩衝体を装着(貯蔵用緩衝体は審査範囲外)				
容量	24体	左記と同じ	—				
最高使用圧力	0.41MPa(差圧)						
最高使用温度	容器:150°C、バスケット:195°C	容器:155°C、バスケット:200°C	貯蔵姿勢による差異				
全質量	119.6t(使用済燃料集合体含む)	116.1t(使用済燃料集合体含む)	貯蔵用三次蓋有無による差異				
寸法	全長:5,194mm、外径:2,596mm	全長:5,119mm、外径:2,596mm					
最大崩壊熱量	15.8 kW/基	左記と同じ	—				
収納燃料	PWR使用済燃料(17×17燃料・15×15燃料)	PWR使用済燃料(17×17燃料)	本申請では15×15燃料を追加				
設計貯蔵期間	60年	左記と同じ	—				
主要材質	本体及び蓋部	胴、一次蓋、二次蓋	左記と同じ	—			
		貯蔵用三次蓋			—	本申請では貯蔵用三次蓋を装着	
		外筒			左記と同じ	—	
		トラニオン					
		中性子遮蔽材					レジン
		伝熱フィン					銅
		蓋ボルト					—
	バスケット	バスケットプレート	アルミニウム合金(MB-A3004-H112)	左記と同じ	—		
中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金						
内部充填ガス	ヘリウムガス	左記と同じ	—				
シール材	金属ガスケット						
閉じ込め監視	圧力センサによる蓋間(一次二次蓋間)圧力監視						

(参考) 本申請での説明事項と先行審査との関係

● 技術基準規則適合性

先行設工認における使用済燃料乾式貯蔵容器の規則適合性説明事項との差異は以下のとおり。

- 本申請の地震、臨界防止、遮蔽、除熱、閉じ込め、長期健全性及び構造強度に係る安全評価は、先行設工認における安全評価方法及び解析コードは同じである。竜巻、津波に係る安全評価は、地震と同様の評価手法を適用している。
- 遮蔽(線量当量率評価)に適用している解析コードMCNP5は、先行設工認では適用しておらず、本申請で適用妥当性を示す。

技術基準規則	項目	本申請(MSF-24P(S)型)		先行設工認(MSF-24P型)
		安全評価説明事項(簡要)	評価方法・解析コード	
5条	地震	告示地震力に対してその安全性が損なわれるおそれがないことを、構造強度評価(応力評価等)により示す。		左記と同じ
6条	津波	告示津波による津波荷重に対してその安全性が損なわれるおそれがないことを、構造強度評価(応力評価)により示す。	ABAQUS及び応力評価式 ^(注1)	— (涌上波が到達しない)
7条	竜巻	告示竜巻による竜巻荷重に対してその安全性が損なわれるおそれがないことを、構造強度評価(応力評価)により示す。		— (貯蔵建屋により防護)
17条	構造強度	クラス3容器として十分な構造及び強度を有することを示す。	構造公式(JSME設計・建設規格)	左記と同じ
26条	臨界防止	乾燥状態及び冠水状態における臨界評価により、中性子実効増倍率は0.95を下回ることから臨界に達するおそれがないことを示す。	SCALE6.2.1(KENO-VI)	左記と同じ
	遮蔽	使用済燃料を線源とした遮蔽評価により、通常貯蔵時の特定兼用キャスク表面の線量当量率が2mSv/h以下、及び表面から1m離れた位置における線量当量率が100μSv/h以下となることを示す。	線源強度:ORIGEN2	MCNP5コードの適用を除き、左記と同じ
			線量当量率:MCNP5 ^(注2)	
	除熱	使用済燃料を熱源とした除熱評価により、貯蔵状態の燃料被覆管及び特定兼用キャスクの構成部材の温度が健全性を維持できる温度以下となることから崩壊熱を適切に除去できることを示す。	崩壊熱量:ORIGEN2	左記と同じ
			温度:ABAQUS	
	閉じ込め	金属ガスケットの漏えい率が設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク内部を負圧に維持できる性能(基準漏えい率)以上であることから放射性物質を適切に閉じ込めることを示す。	閉じ込め評価式	左記と同じ
長期健全性	使用環境における温度、放射線照射、腐食に係る長期健全性評価により、適切な材料・構造であること、及び使用済燃料被覆管の著しい腐食又は変形を防止できることを示す。	文献・試験データによる確認	左記と同じ	
構造強度	安全機能を担保する強度部材が十分な構造強度を有することを示す。	ABAQUS及び応力評価式 ^(注1)	左記と同じ	

(注1) 構造強度評価における許容応力はJSME金属キャスク構造規格を準拠。(注2) MCNP5コードは、①MSF-24P型設計承認申請における既認可値(DOT3.5コード)との比較、②MCNPコードの輸送容器としての認可実績、及び③使用済燃料貯蔵容器体系での遮蔽ベンチマーク試験結果との比較により、適用妥当性を検証。

MOVE THE WORLD FORWARD

**MITSUBISHI
HEAVY
INDUSTRIES
GROUP**

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社