

資料1-1

Doc. No. L5-95KV253 R2

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

2022.9.26

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(26条)	…3
3. 指摘事項リスト	…30
4. 指摘事項への回答	…31
5. 説明スケジュール	…37

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及び応力評価式
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(JSME設計・建設規格)
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 μ Sv/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及び応力評価式

2. 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)

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。

(注) 上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。

2. 技術基準規則への適合性(26条)

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直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。

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	
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

2. 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。

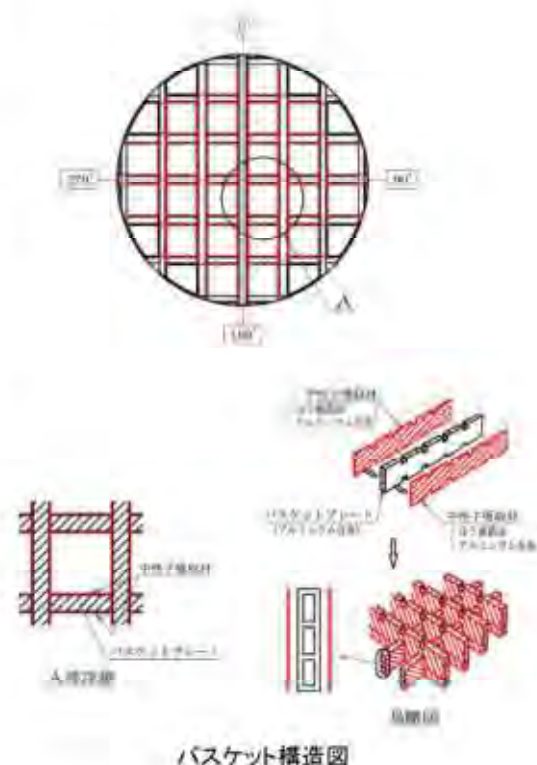
安全評価

- 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。



2. 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.7～9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」

2. 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。

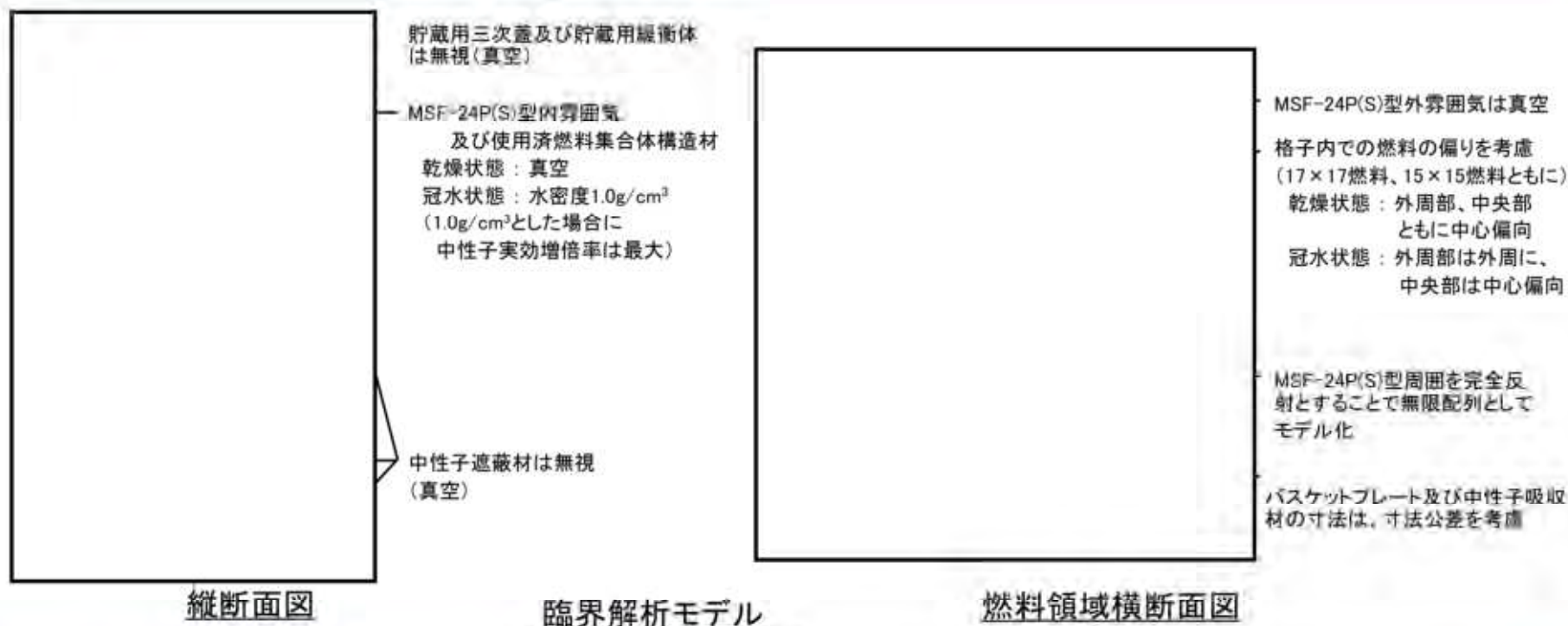
2. 技術基準規則への適合性(26条)

● 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。



2. 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。

2. 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。

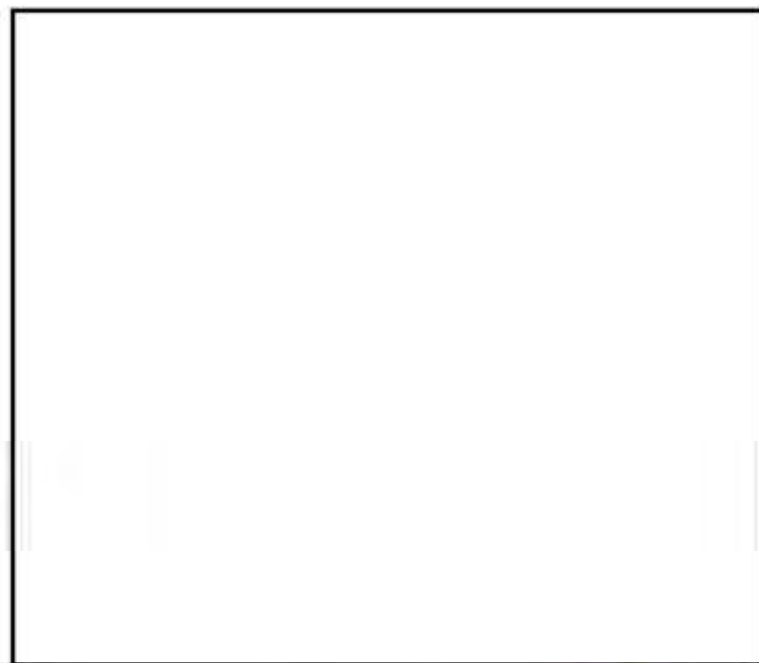
安全評価

- 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

2. 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.12～15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	放射線源強度は、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、計算した放射線源強度に基づき求めること。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燃焼計算コード／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	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、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。

(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(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。

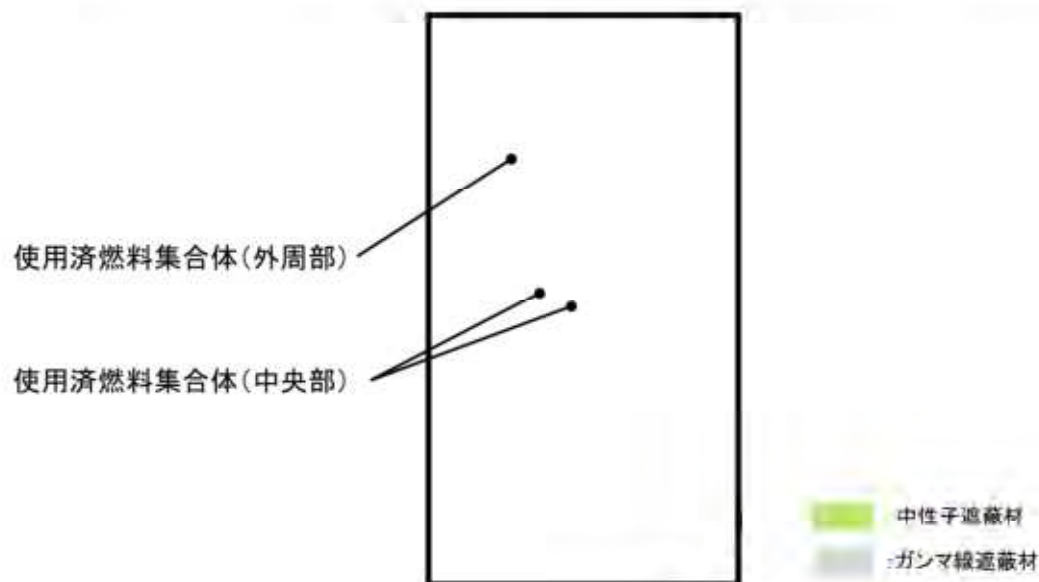
2. 技術基準規則への適合性(26条)

● 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

2. 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)。

2. 技術基準規則への適合性(26条)

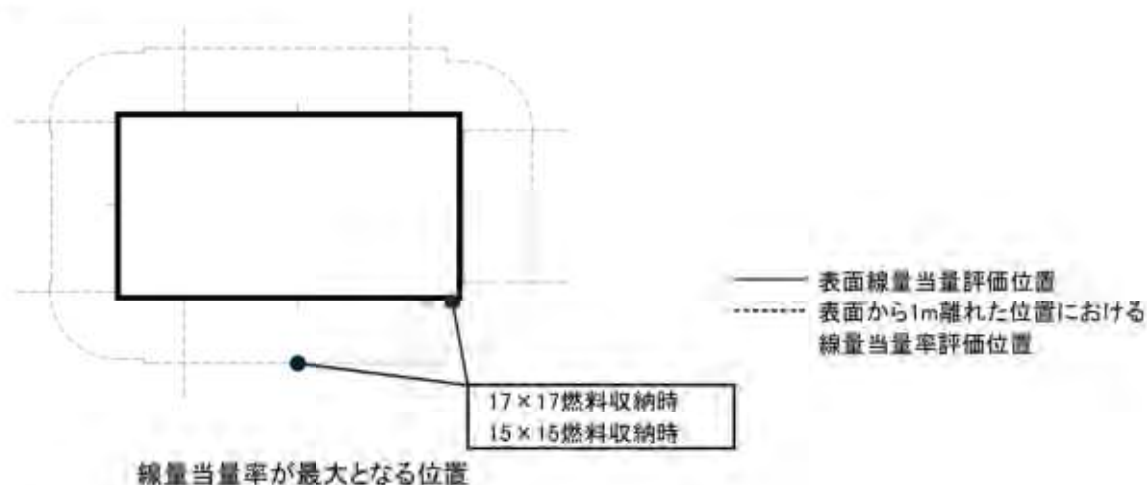
● 遮蔽機能の安全評価について

(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

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



● 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。

2. 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

2. 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.18～20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」

2. 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。

2. 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)

2. 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)

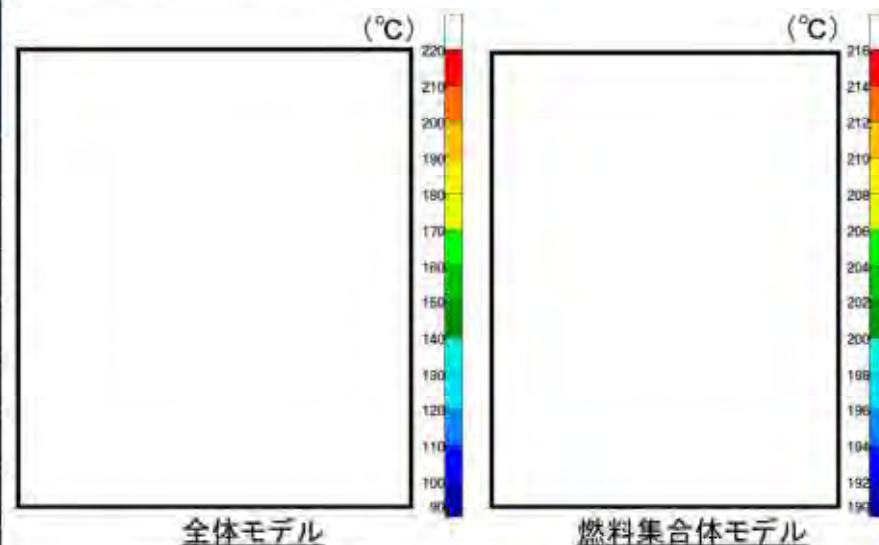
使用済燃料の崩壊熱計算に用いる燃焼計算コードORIGEN2は、MSF-24P(S)型に収納する使用済燃料と同等の冷却条件のANS標準崩壊熱データにより、また、特定兼用キャスクの構成部材及び燃料被覆管の温度解析に用いる伝熱計算コードABAQUSは、MSF-24P(S)型と同等の伝熱形態を有する兼用キャスクの伝熱試験により検証され適用性を確認している。また、これらのコードは技術的な特殊性、新規性は無く、許認可で使用実績があるコードである。

(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。

2. 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

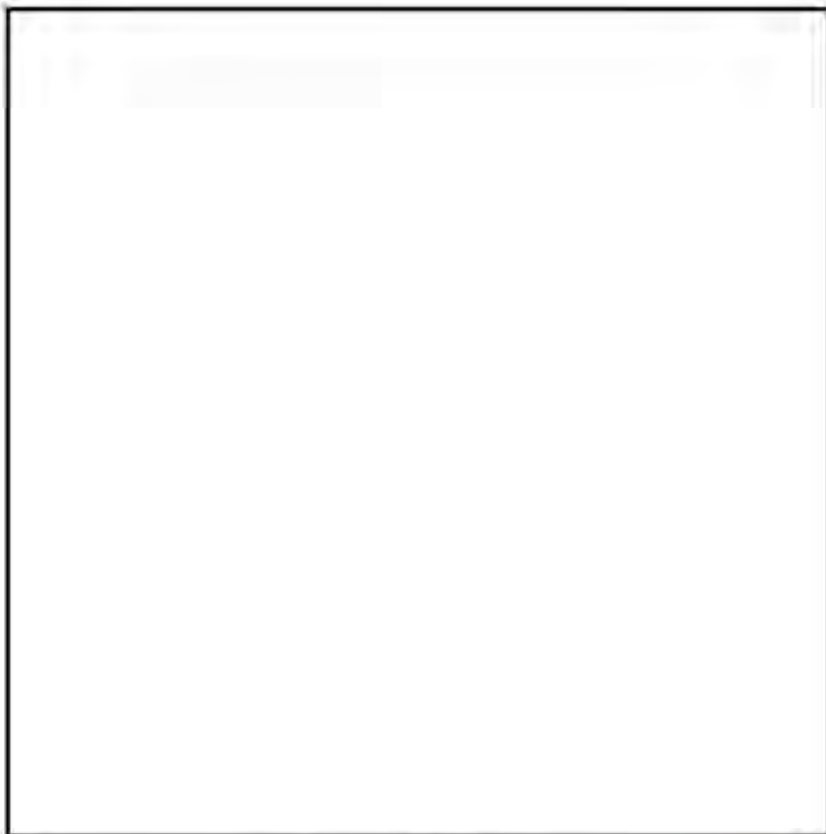
- 長期にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、蓋及び蓋貫通孔のシール部に金属ガスケットを用いることにより、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料集合体を内封する空間を不活性雰囲気と保つとともに負圧に維持する設計とする。
- 使用済燃料集合体を内封する空間を特定兼用キャスク外部から隔離する設計として、蓋部を一次蓋及び二次蓋による二重の閉じ込め構造とし、一次蓋と二次蓋との空間部を正圧に維持することにより圧力障壁を形成し、使用済燃料集合体を内封する空間を外部から隔離する設計とする。蓋間の圧力を測定することにより、閉じ込め機能を監視できる設計とする。

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

2. 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.23～26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、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」

2. 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)

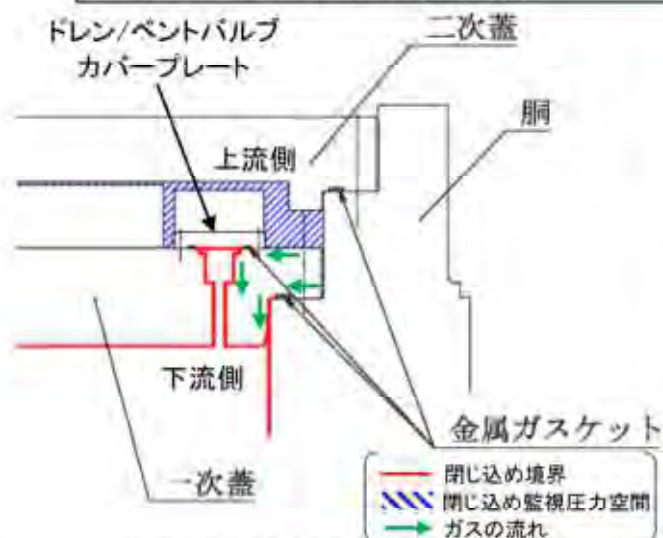
評価に用いる収納物仕様は、燃料棒の温度が最も高く、燃料棒内圧が大きくなり、基準漏えい率を算出する上で安全側となる、 17×17 燃料 48,000MWd/t型(A型)及び 15×15 燃料 48,000MWd/t型(A型)とし、以下のとおりとする。

- ・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。

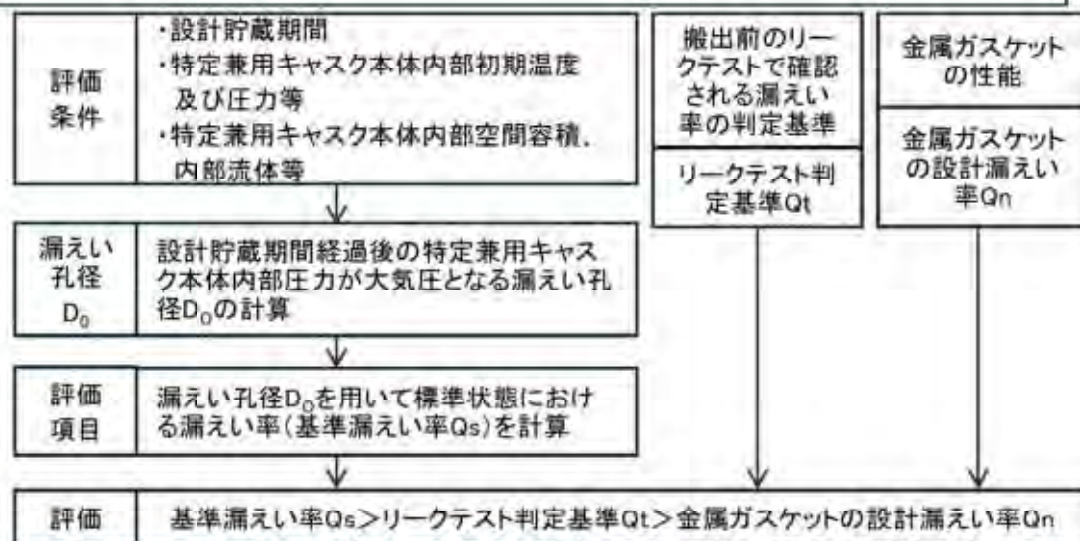
(2) 閉じ込め評価概要

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)

2. 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)

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

$$Q = L \cdot P_a$$

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

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

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

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)

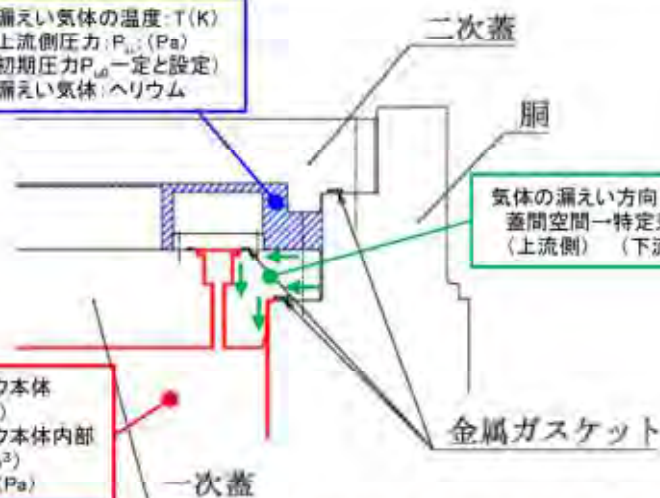
a : 漏えい孔長 (m)

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))

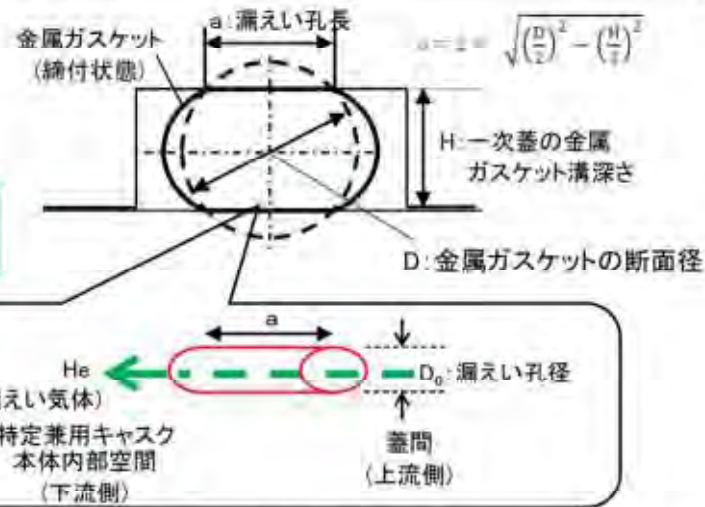
- ・漏えい気体の温度: T (K)
- ・上流側圧力: P_u (Pa)
- ・初期圧力 P_{d0} 一定と設定
- ・漏えい気体: ヘリウム



気体の漏えい方向
蓋間空間→特定兼用キャスク本体内部
(上流側) (下流側)

- ・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)

2. 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

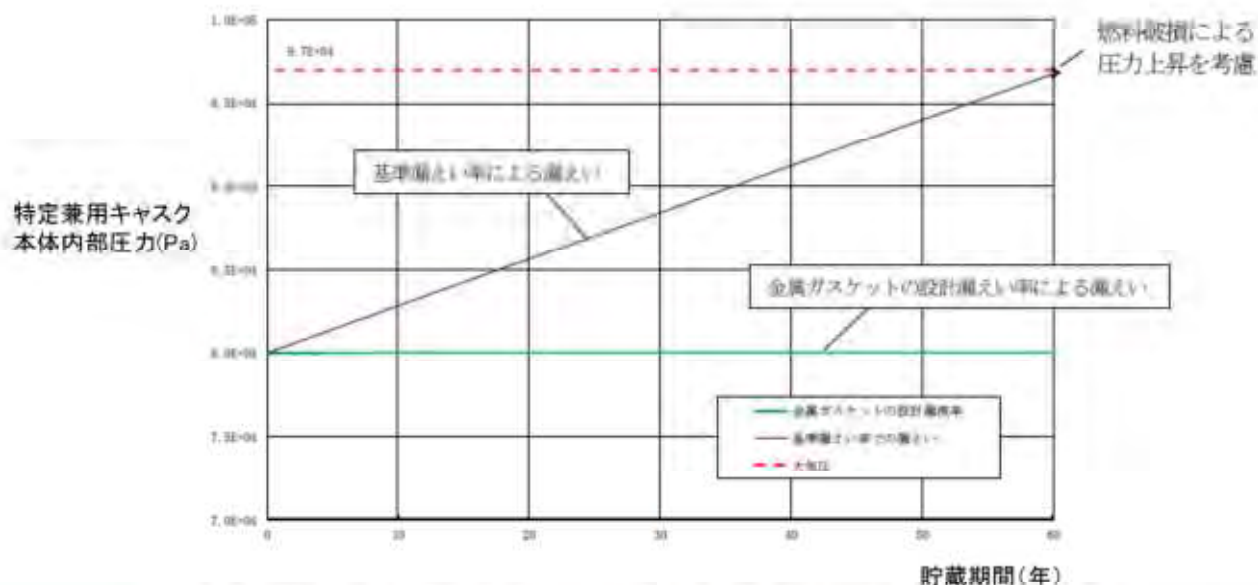
(4) 閉じ込め評価結果

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)

2. 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

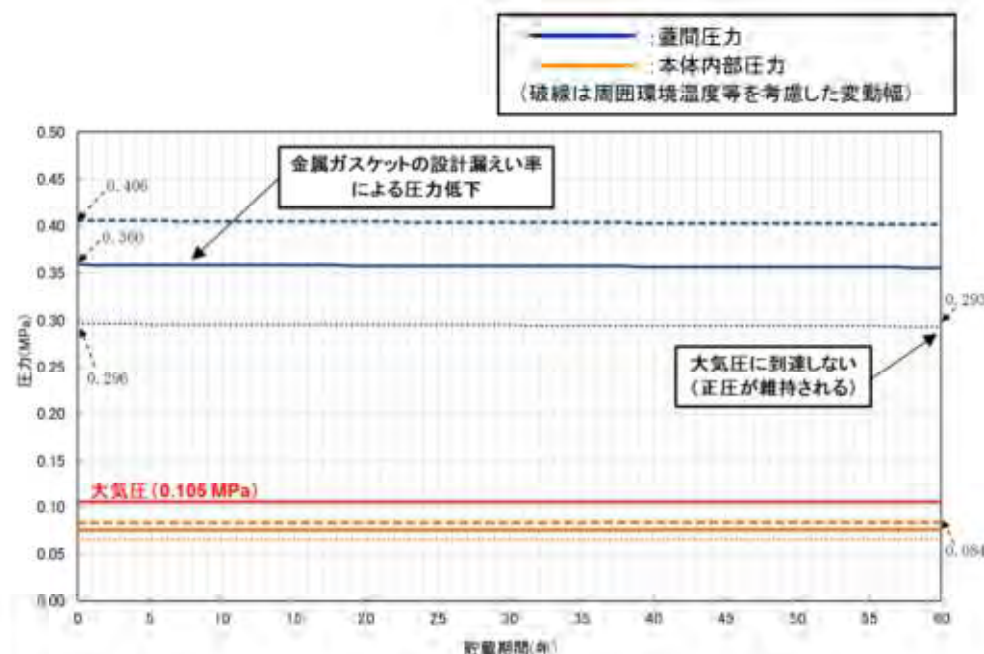
(5) 閉じ込め機能の監視構造

- 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。

2. 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部、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

2. 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.29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」

2. 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。

3. 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.31参照】	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)	(今後回答予定)	未
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

4. 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.32)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.33参照)
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.34～35参照)
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.36参照)
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.36参照)

4. 指摘事項への回答

● 貯蔵用三次蓋の構造差異

型式指定申請	型式証明申請

4. 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

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、線量当量率は増加する。

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)

項目		表面			表面から1m離れた位置		
		側部	蓋部	底部	側部	蓋部	底部
線量 当量率	型式指定	1528.9	395.6	207.1	84.6	64.8	60.1
	型式証明	206.5	41.9	71.0	84.2	20.8	34.4
評価基準		2,000以下			100以下		

(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下図参照。



線量当量率評価位置

4. 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	350
	一次蓋	118	110	350
	一次蓋ボルト	118	109	350
	中性子遮蔽材	135	127	149
	金属ガスケット	118	110	130
	バスケット	187	177	250
	伝熱フィン	126	115	200

(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)

4. 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)

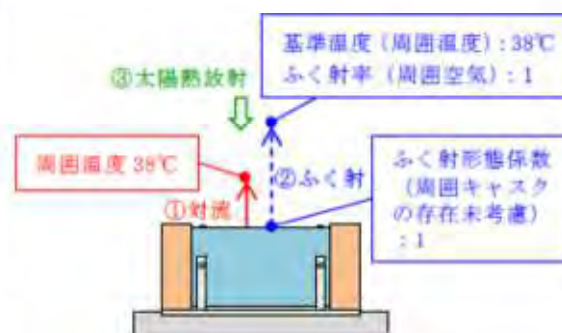
(2) 境界条件の差異

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])

4. 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。

5. 説明スケジュール

● 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(概要)	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 線量当量率:MCNP5 ^(注2)	MCNP5コードの適用を除き、左記と同じ
	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	左記と同じ
	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