

第26回 特定兼用キャスクの設計の型式証明等に係る審査会合(2023年6月22日)

資料1-2-1

Doc. No. L5-95LD203 R5

発電用原子炉施設に係る特定機器の 設計の型式証明申請[MSF-76B型]

設置許可基準規則への適合性について

2023.6.22

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. 収納物の収納条件	…2
2. 設置許可基準規則への適合性(概要)	…4
3. 設置許可基準規則への適合性(第16条)	…6
4. 今後のご説明スケジュール	…48

1. 収納物の収納条件

● 燃料収納配置

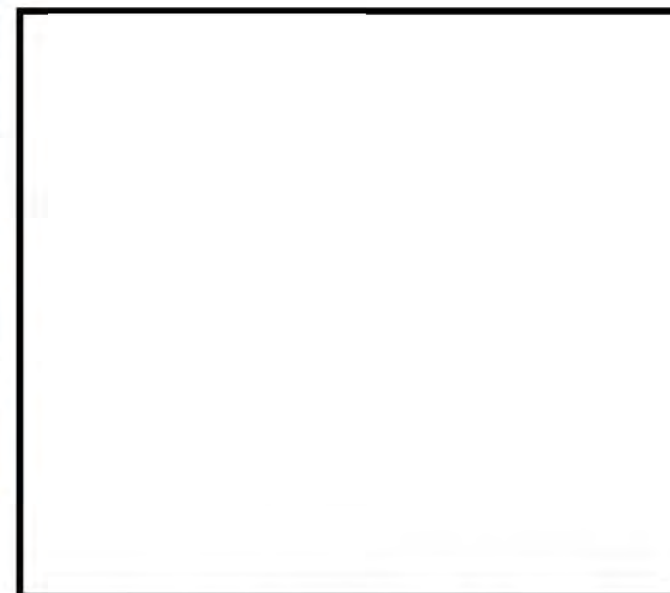
- MSF-76B型は、特定兼用キャスク表面及び1m地点の線量当量率を基準値以下に維持しつつ、長期間冷却された使用済燃料を効率良く収納できるよう領域を分けて燃料収納条件を設定している。
- 燃料収納配置は、新型8×8ジルコニウムライナ燃料と高燃焼度8×8燃料を収納する場合(配置(1))と新型8×8燃料と8×8燃料を収納する場合(配置(2))の2ケースがあり、下表及び次頁に示す制限を満足する燃料を収納可能である。

● 収納条件 配置(1)

種類	BWR使用済燃料	
型式	新型8×8ジルコニウムライナ燃料	高燃焼度8×8燃料
初期濃縮度(wt%以下)	3.09	3.66
最高燃焼度(MWd/t以下)	40,000	50,000

項目	特定兼用キャスク1基当たりの仕様
崩壊熱量(kW以下)	14.2

領域	燃料集合体の型式		高燃焼度8×8燃料	
	新型8×8 ジルコニウムライナ燃料		最高燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)
	最高燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)	最高燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)



[燃料の収納配置図: 配置(1)]



1. 収納物の収納条件

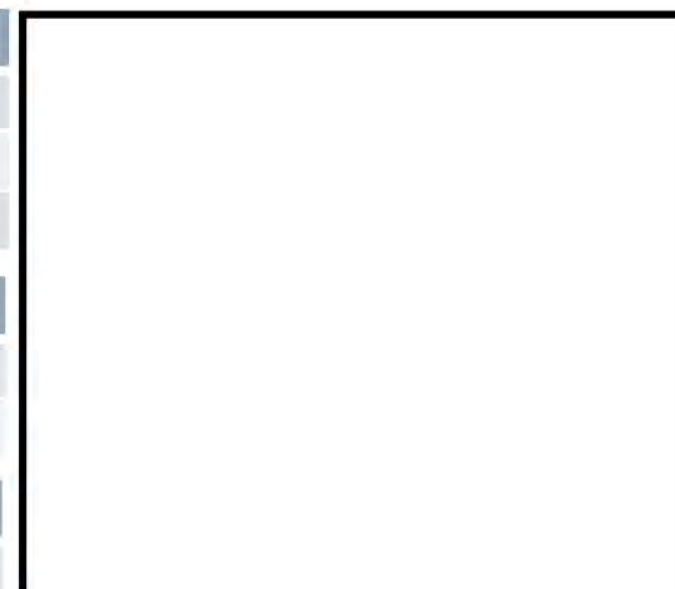
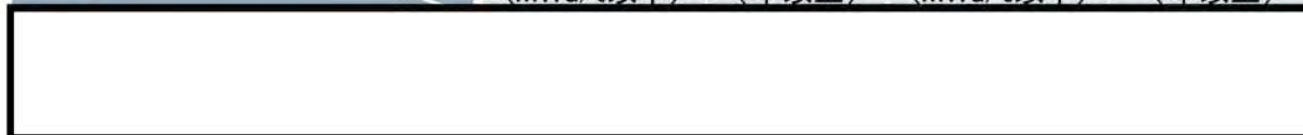
● 収納条件 配置(2)

➤ 配置(2)は、使用済燃料の制限温度を満足するために、キャスク1基当たりの平均燃焼度制限を設定している。

種類	BWR使用済燃料	
型式	8×8燃料	新型8×8燃料
初期濃縮度 (wt%以下)	2.80	3.09
最高燃焼度 (MWd/t以下)	30,000	38,000

項目	特定兼用キャスク1基当たりの仕様
平均燃焼度 (MWd/t以下)	□
崩壊熱量 (kW以下)	8.4

領域 \ 燃料集合体の型式	8×8燃料		新型8×8燃料	
	最高燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)	最高燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)
□				



[燃料の収納配置図: 配置(2)]

2. 設置許可基準規則への適合性(概要)

● 設置許可基準規則での要求事項に対する評価項目概要

設置許可基準規則第四条～第六条、第十六条への適合性を示す。

設置許可基準規則		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		
第四条	地震による損傷の防止	—	—	—	—	◎	—
第五条	津波による損傷の防止	—	—	—	—	◎	—
第六条	外部からの衝撃による損傷の防止(竜巻)	—	—	—	—	◎	—
第七条～十五条							
第十六条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	◎	◎	◎	◎	—	◎
第十七条～三十六条							

(注)◎: 審査説明事項、: 申請の範囲外

2. 設置許可基準規則への適合性(概要)

● 設置許可基準規則適合性説明に係る安全評価方法

- MSF-76B型と先行キャスク(MSF-24P(S)型)における規則適合性説明の安全評価方法の差異は下表のとおり。
- 本申請の地震、津波、竜巻、臨界防止、遮蔽、除熱、閉じ込め、長期健全性に係る安全評価方法及び解析コードは、先行キャスク(MSF-24P(S)型)と同じである。

設置許可基準規則	項目	MSF-76B型		先行キャスク(MSF-24P(S)型)
		安全評価説明事項(摘要)	安全評価方法・解析コード	
4条	地震	告示地震力によ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ことを、構造強度評価(応力評価)により示す。	応力評価式 ^(注1)	左記と同じ
5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。		
6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。		
16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	・線源強度:左記と同じ ・線量当量率:MCNP5 DOT3.5
	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asket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

(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。

3. 設置許可基準規則への適合性(第16条)

● 設置許可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	設計方針(摘要)	設計方針の妥当性 (安全評価結果摘要)
条・項	安全機能			
第2項 一号 ハ	臨界防止	燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。	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4項 一号	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ものとする。	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4項 二号	除熱	使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。	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崩壊熱を適切に除去できる。
第4項 三号	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することができるものとする。	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。
解釈 別記4 第16条 第5項	長期健全性 (経年変化の考慮)	兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。	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、型式証明申請の範囲外である。

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:臨界)

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設(第十六条第2項一号ハ) (臨界防止機能)

《設計方針》

[安全設計に関する方針]

MSF-76B型は、燃料体等が臨界に達するおそれがない設計とする。

[発電用原子炉施設に及ぼす影響に関する方針]

MSF-76B型は、燃料体等が臨界に達するおそれがない設計とするため、発電用原子炉施設の安全性に影響を及ぼさない。

具体的な設計方針

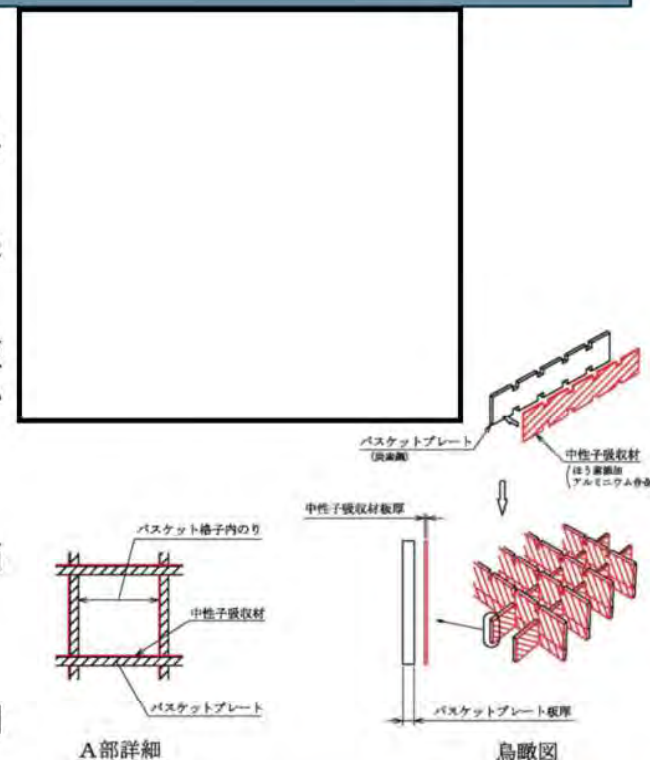
- 使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するためのバスケットプレート、及び中性子吸収能力を有するほう素を偏在することなく添加した中性子吸収材を適切な位置に配置することにより、臨界を防止する。
- バスケットプレートは、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するために必要な構造健全性を維持する。
- MSF-76B型の貯蔵施設への搬入から搬出までの乾燥状態、及びMSF-76B型に使用済燃料集合体を収納する際に冠水状態になること等、技術的に想定されるいかなる場合でも、中性子実効増倍率が0.95以下となるように設計する。

設計方針の妥当性確認(安全評価)

- MSF-76B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。

後段審査(設置(変更)許可)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。



3. 設置許可基準規則への適合性(16条:臨界)

● 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-76B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.9～12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。 > MSF-76B型が無限に配列した体系(完全反射)(*) > バスケットプレート板厚、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 (*) 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。
	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	
	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	
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。 > 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^{-5} 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 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$)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-76B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」

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:臨界)

● 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高燃焼度8×8燃料とし、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0MWd/t)とする。
- ・初期濃縮度は、乾燥時は収納する使用済燃料の平均初期濃縮度最大値とし、冠水時は炉心装荷冷温状態での燃料集合体の無限増倍率が1.3となる燃料モデル(モデルバンドル:次頁参照)とする。
- ・収納する使用済燃料にはガドリニアを添加した燃料棒が含まれる場合があるが、乾燥状態の中性子実効増倍率の評価に当たっては、ガドリニアの存在を無視する。

項目		キャスク収納位置制限(配置(1))(注2)			臨界解析条件		
		領域A	領域B	領域C	領域A	領域B	領域C
燃料集合体 1体の仕様	種類	高燃焼度8×8燃料 新型8×8ジルコニウムライナ燃料			高燃焼度8×8燃料		
	初期濃縮度(注1)	≤3.66wt%			乾燥時:3.66wt% 冠水時:4.9及び2.1wt%		
	最高燃焼度(注1)				0MWd/t		
	冷却期間(注1)				—		
配置							

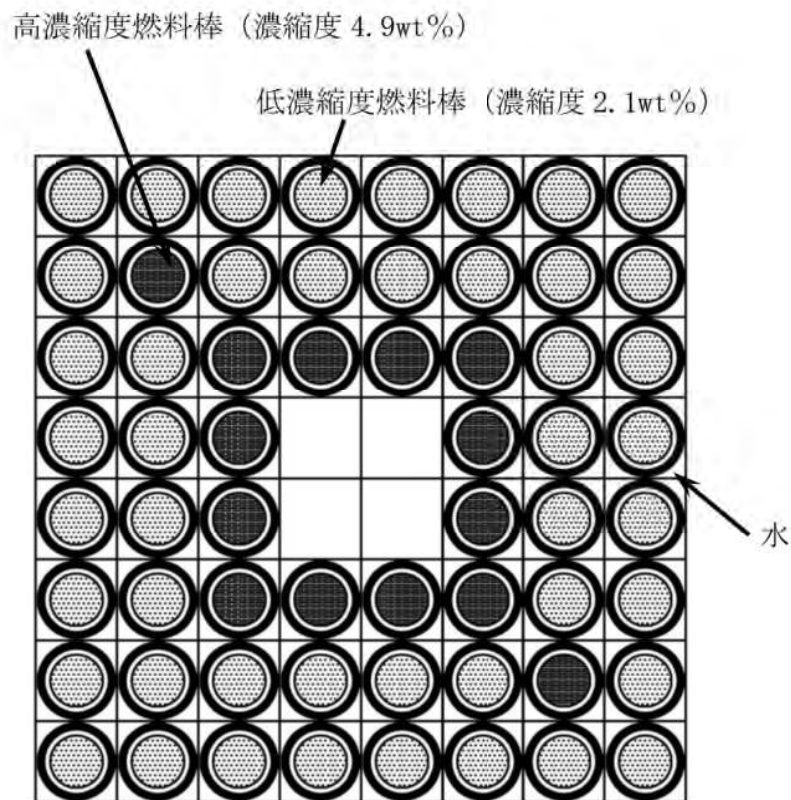
(注1)キャスク収納位置制限に示す燃料集合体1体の仕様は、高燃焼度8×8燃料の仕様を代表として記載する。

(注2)配置(2)の8×8燃料及び新型8×8燃料は、高燃焼度8×8燃料より濃縮度が低く反応度は小さい。

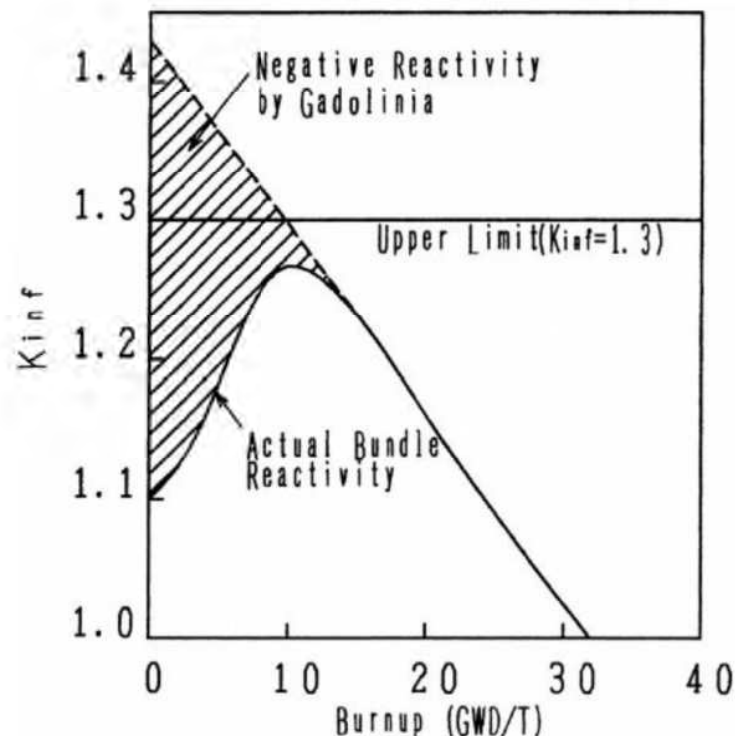
● 臨界防止機能の安全評価について

(1) 臨界解析評価条件(収納物仕様)の補足

- 冠水時の臨界解析では、ガドリニアによる燃焼初期の反応度抑制効果を考慮して、濃縮度の異なる2種類の燃料棒(左下図参照)を用い、炉心装荷冷温状態での燃料集合体の無限増倍率が1.3となる燃料モデル(モデルバンドル)を仮定。
- 一般的なBWR燃料集合体では、ガドリニアは1サイクル照射で燃え尽きるように設計されており、燃料集合体としての反応度のピークは、10,000MWd/t程度の燃焼度で現れるが、MSF-76B型は、炉心装荷冷温状態で無限増倍率が1.3を超えることがない使用済燃料を収納することを前提としている(右下図参照)。



冠水時臨界解析における燃料棒配置



BWR燃料集合体の反応度特性

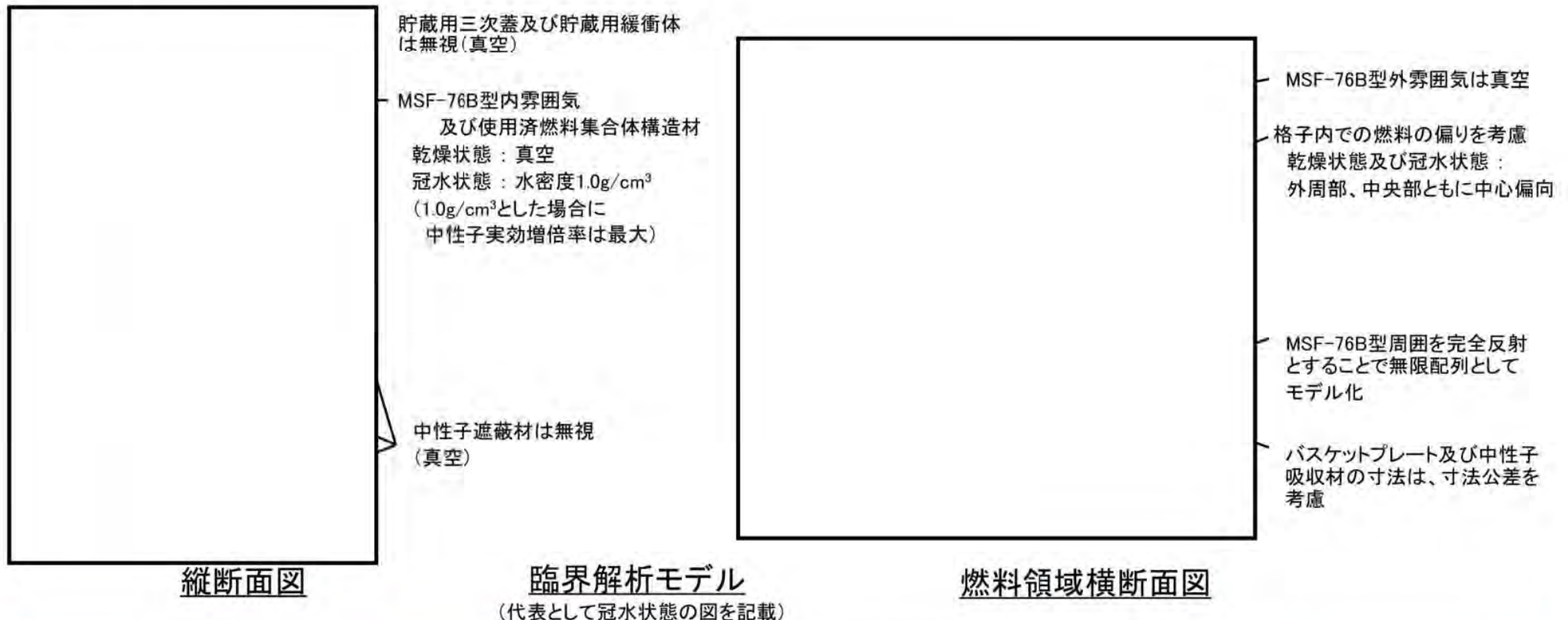
3. 設置許可基準規則への適合性(16条:臨界)

● 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-76B型が無限に配列した体系(完全反射)とする。(これによりMSF-76B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)
- ・側部、蓋部、底部中性子遮蔽材は無視する。



3. 設置許可基準規則への適合性(16条:臨界)

● 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NRCにより認証された標準解析コードであり、国内外の臨界解析の分野で幅広く使用されている。SCALEコードシステムに対しては、MSF-76B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-76B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		高燃焼度 8×8燃料収納時	評価基準
中性子実効増倍率※	冠水状態	0.816	0.95以下
	乾燥状態	0.372	

※統計誤差(σ)の3倍(3σ)を加味した値である。

● 設計方針の妥当性

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-76B型の臨界防止機能に係る設計方針は妥当である。

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設(第十六条第4項一号)(遮蔽機能)

《設計方針》

[安全設計に関する方針]

MSF-76B型は、使用済燃料からの放射線を適切に遮蔽する設計とする。

[発電用原子炉施設に及ぼす影響に関する方針]

MSF-76B型は、使用済燃料からの放射線を適切に遮蔽する設計とするため、発電用原子炉施設の安全性に影響を及ぼさない。

具体的な設計方針

- 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。
- 設計貯蔵期間中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。

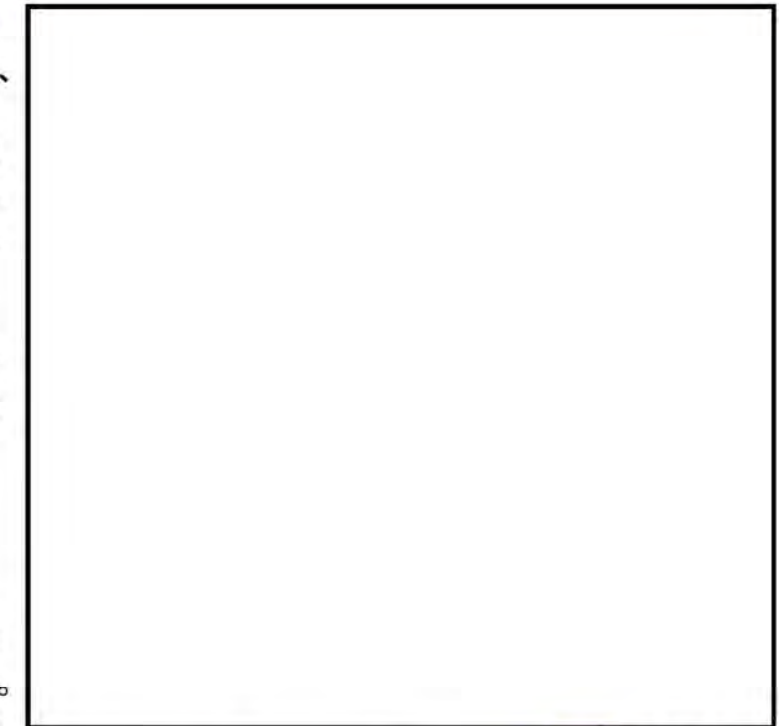
設計方針の妥当性確認(安全評価)

- 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(設置(変更)許可)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及び冷却期間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

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

● 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-76B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.15～20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 μSv/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 μSv/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-76B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-76B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」

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

● 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)

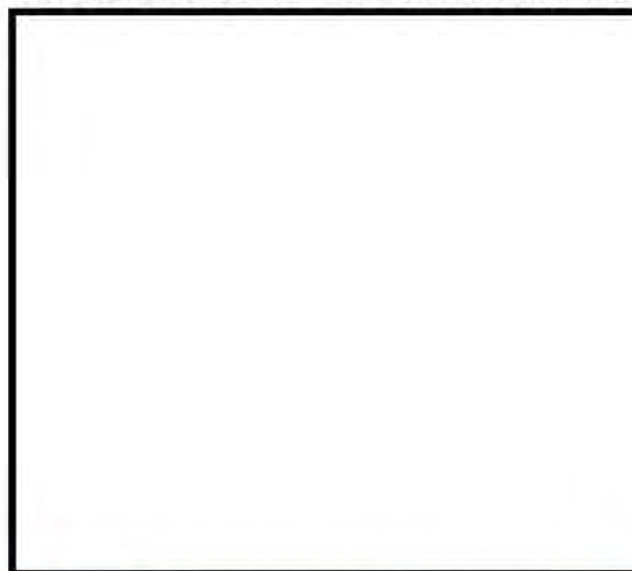
➤ 遮蔽解析へ入力する使用済燃料の放射線源強度は、線量当量率の評価基準値に対して余裕が小さくなる放射線源強度の燃料の値(下表)とする。代表燃料の選定詳細をP.16~17に示す。

収納領域			A	B	C
			線源強度の 計算条件	燃焼度(MWd/t)	
冷却期間(年)					
燃料集合体 1体当たりの 線源強度	ガンマ線	燃料有効部(photons/s)	1.293×10^{15}	1.092×10^{15}	7.111×10^{14}
		構造材放射化(^{60}Co :TBq)	1.325×10^0	1.165×10^0	7.164×10^{-1}
	中性子	燃料有効部(n/s) ^(注1)	2.585×10^8	1.573×10^8	2.097×10^7

(注1) 中性子増倍の効果を考慮した値である。

(注2) 配置(2)は配置(1)の線源強度より低くなるよう燃料仕様を設定しており、線量当量率基準値に対して厳しい線量当量率を与える配置(1)を代表とする。

(遮蔽解析の燃料配置)^(注2)



3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

● 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、濃縮度、燃焼度及び冷却期間等を基に、以下の保守性を考慮しORIGEN2コードにより算出。
 - ・ 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。
 - ・ 使用済燃料の軸方向燃焼度分布を考慮する。
- 線量当量率の評価基準値に対して余裕が小さくなる放射線源強度の燃料を線量当量率に寄与する線種の観点から選定(P.17参照)。

収納領域	領域A		領域B		領域C			
燃料の種類	高燃焼度 8×8燃料	新型8×8 ジルコウムライナ 燃料	高燃焼度 8×8燃料	新型8×8 ジルコウムライナ 燃料	高燃焼度 8×8燃料		新型8×8 ジルコウムライナ燃料	
No.	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	C-3	C-4
燃焼度(MWd/t)								
冷却期間(年)								
燃料有効部ガンマ線 (photons/s)	1.293 × 10¹⁵	1.092 × 10 ¹⁵	1.074 × 10 ¹⁵	1.092 × 10¹⁵	6.956 × 10 ¹⁴	7.525 × 10 ¹⁴	7.111 × 10¹⁴	7.654 × 10 ¹⁴
構造材放射化ガンマ線 (⁶⁰ Co TBq)	1.325 × 10⁰	1.165 × 10 ⁰	1.133 × 10 ⁰	1.165 × 10⁰	6.944 × 10 ⁻¹	1.976 × 10 ⁻¹	7.164 × 10⁻¹	2.031 × 10 ⁻¹
燃料有効部中性子(注1) (n/s)	2.585 × 10⁸	1.573 × 10 ⁸	1.074 × 10 ⁸	1.573 × 10⁸	1.339 × 10 ⁷	5.420 × 10 ⁷	2.097 × 10⁷	8.050 × 10 ⁷
代表燃料の選定	遮蔽解析へ 入力			遮蔽解析へ 入力			遮蔽解析へ 入力	

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

● 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)の補足

- 各線源の線量当量率分布に対する影響
 - MSF-76B型キャスクの線量当量率分布から、表面は底部径方向(⑦)、表面から1m位置では底部軸方向(⑩)の線量当量率が最も高い。
 - 表面線量当量率最大値: 底部径方向(⑦)は中性子遮蔽材が無い領域であるため、中性子の影響が大きい。
 - 表面から1m位置の線量当量率最大値: 底部軸方向(⑩)は中性子遮蔽材があるため、ガンマ線の影響が大きくなり、評価点に近い構造材放射化ガンマ線の影響が大きい。
- 代表燃料の選定
 - 領域A: 中性子及び構造材放射化ガンマ線の線源強度が高いA-1を代表燃料とする。
 - 領域B: 中性子及び構造材放射化ガンマ線の線源強度が高いB-2を代表燃料とする。
 - 領域C: 表面から1m位置の最大線量当量率が評価基準値に対する余裕が最も小さいため、表面から1m位置の線量当量率を保守的に評価する燃料を代表燃料として選定する。具体的には、底部軸方向(⑩)に線源位置が近く寄与の大きい構造材放射化ガンマ線の線源強度が大きいC-3を代表燃料とする。

MSF-76B型の線量当量率の線源毎の内訳(μSv/h)

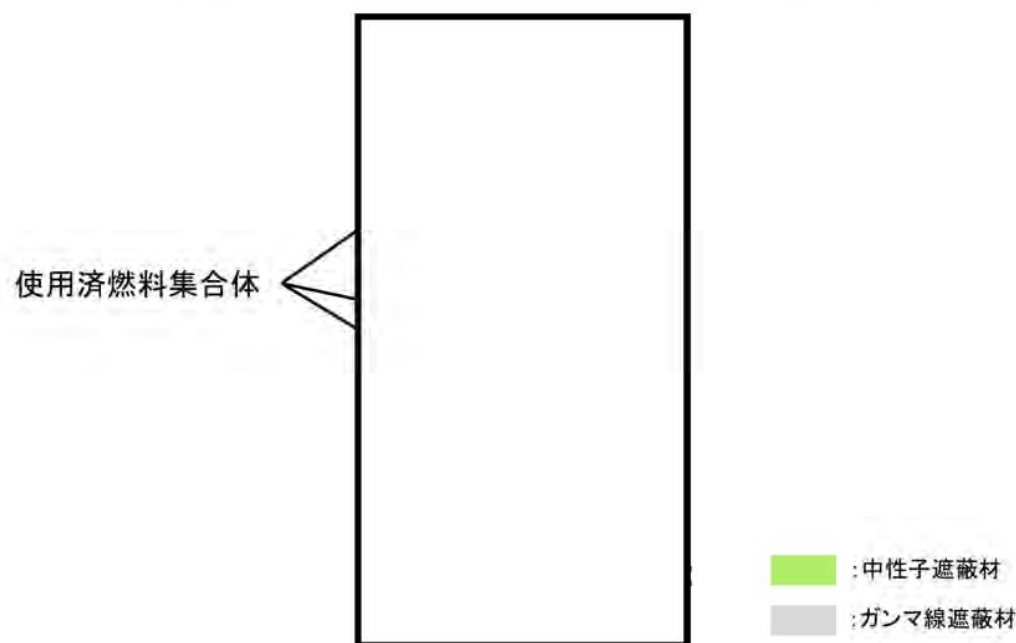
評価点		頭部		側部	底部		
		軸方向	径方向		径方向	軸方向	
		①	③	⑤	⑦	⑨	
表面	ガンマ線	燃料有効部	<0.1	2.5	23.9	1.7	5.0
		構造材放射化	0.8	170.5	251.6	34.4	136.4
		二次ガンマ線	0.6	4.1	5.8	4.4	9.0
	中性子		142.8	209.8	10.0	1190.3	36.5
	合計		144.3	386.9	291.3	1230.8	186.9
評価点		②	④	⑥	⑧	⑩	
表面から1m	ガンマ線	燃料有効部	0.1	18.3	34.8	11.9	2.3
		構造材放射化	0.7	35.6	28.8	19.8	62.9
		二次ガンマ線	0.2	3.4	5.1	2.5	2.7
	中性子		22.4	15.2	12.3	32.6	18.3
	合計		23.4	72.5	81.0	66.8	86.2

● 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

● 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JAEAが整備したORLIBJ40のうち、BS140J40及びBS240J40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、安全評価で使用されている。

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。詳細をP.21~31に示す。

一本型式証明と類似の評価条件を用いた使用済燃料輸送・貯蔵容器体系での遮蔽ベンチマーク解析^(注1)による線量当量率の評価値が測定値の分布の傾向に対してよい一致を示すことの確認、及びMCNP5コードによる線量当量率評価値が、豊富な許認可実績を有するDOT3.5コードによる保守的な手法に基づく線量当量率評価値^{(注2)(注3)}と同等の結果となることの確認。

(注1) 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).

(注2) 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3) 三菱重工業株式会社、「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書(特定兼用キャスク)」,L5-95KV100, (2022).

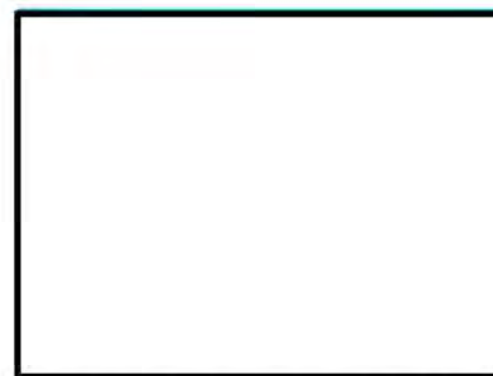
● 遮蔽機能の安全評価について

(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。
- トラニオン周りの線量当量率分布は変化は大きいが連続的であり、ストリーミングを適切に計算が行われていることを確認した。

線量当量率評価結果(注)

項目	評価結果	評価基準
表面線量当量率	1.24 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	86.2 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(左図赤点)。
 ・表面： 底部トラ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1 m離れた位置： 底部中心の中性子遮蔽材でカバーされている領域

● 設置許可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-76B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-76B型の遮蔽機能に係る設計方針は妥当である。

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

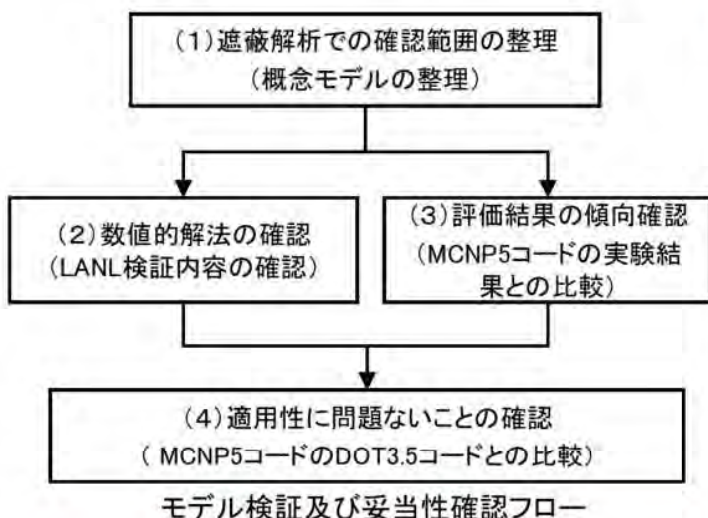
● MCNPコードの適用妥当性確認について

MCNP5コードの適用妥当性について、特定兼用キャスクに対するMCNP5コードの適用性について、MCNP5コードによる線量当量率分布の評価値は測定値の分布の傾向に対して良い一致を示し、許認可で認められたDOT3.5コードを用いた保守的な手法に基づく線量当量率評価値と同等の結果となることを示すことで説明する。なお、MCNP5コードを用いた遮蔽解析結果の妥当性については、統計指標の確認結果を示すとともに、正確性についてはMSF-76B型に対するMCNP5コードでの遮蔽解析において放射線の挙動が物理的に正しいことを説明する方針とする。

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)遮蔽解析での確認範囲の整理、(2)数値的解法が検証されていることの確認、(3)MCNP5コードを用いた線量当量率評価値と測定値の比較による評価傾向の確認、(4)既認可で認められたDOT3.5コードを用いた保守的な評価手法に基づく特定兼用キャスクでの線量当量率の評価値との比較による同等性の確認を行った。

(1)から(3)の確認結果に加え、型式証明での遮蔽解析条件は、(4)で確認したMCNP5コードの保守的な条件設定を踏襲しており、保守性を有する解を得ることができる。以上より、本申請の遮蔽解析にMCNP5コードを適用することは妥当であると判断した。

- (1)本申請の遮蔽解析での確認範囲を考慮すべき概念モデル要素として整理。
- (2)MCNP5は、LANLでのソフトウェア品質保証計画に従って開発されており、LANLで実施したリグレッションテスト、実験値との比較、三次元輸送計算コードの精度確認のためのベンチマーク問題に対する解析解及び参照解との比較結果を基に、数値的解法が精度よく実施できていることを確認。
- (3)MSF-76B型の遮蔽解析と(1)で整理した概念モデル要素が類似した使用済燃料輸送・貯蔵容器体系でのベンチマーク解析により線量当量率分布の傾向を確認し、MCNP5コードによる評価値と測定値の分布の傾向が良い一致を示すことを確認。
- (4)MSF-76B型と同様の体系のMSF-24P型におけるDOT3.5コードによる保守的な手法に基づく既認可評価値と、DOT3.5コードと同様の条件で実施したMCNP5コードによる評価値を比較した結果、同等の結果であり、DOT3.5コードと同様の条件とすればMCNP5コードで保守性を有する解が得られることを確認。



No.	確認結果	備考
(1)	MSF-76B型の遮蔽解析での確認範囲を考慮すべき概念モデル要素として整理。(P.22~25)	考慮すべき概念モデル要素としてミクロ的な物理現象(散乱、吸収等)、マクロ的物理現象(構造材透過、ストリーミング効果、線源の相互遮蔽)を整理。
(2)	解析コード開発機関(LANL)で実施したリグレッションテスト、実験値との比較や三次元輸送計算コード精度確認のためのベンチマーク(解析解及び参照解)との比較により、数理モデルへの変換及び数値モデルへの変換は精度良く実施できていることを確認済み。(P.26)	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)での比較で良く一致していると検証されていることを確認。
(3)	使用済燃料輸送・貯蔵容器体系におけるベンチマーク解析より、評価値の傾向が良い一致を示すことを確認。(P.27~29)	使用済燃料輸送・貯蔵容器体系におけるベンチマーク解析は、(1)で整理した概念モデル要素の内容がMSF-76B型と類似したものを選定。
(4)	MSF-76B型と類似の体系であるMSF-24P型を対象とした認可済のDOT3.5コードを用いた解析結果との比較により、同等の結果が得られることを確認。(P.30~31)	DOT3.5コードを用いた解析は実形状を二次元でモデル化したものとして認可されたものである。なお、MSF-76B型の評価条件は、使用済燃料の収納条件や評価モデルの不確かさを保守的に設定。

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

(1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(1/4)

- MSF-76B型の線量当量率の評価結果に影響を与える要素として、確認が必要な項目を整理した
- 収納される使用済燃料のミクロ的な物理現象(散乱・吸収)に基づく遮蔽材の透過、遮蔽材欠損部でのストリーミング効果及び使用済燃料が複数収納されることによる相互遮蔽といったマクロ的な物理現象の考慮が必要。これら物理現象を考慮するにあたり、使用済燃料の線源条件、線源形状、遮蔽材質及び形状が必要。
- (3)(P.27~29)のMCNP5コードによる評価値と線量率測定値を比較するベンチマーク解析の選定では、各要素が類似のものを選定した。

MSF-76B型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				備考
		MSF-76B型遮蔽解析	MSF-24P(S)型先行キャスク	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系)	ベンチマーク (乾式貯蔵容器体系)	
【物理現象】 ミクロ ・散乱・吸収 マクロ ・遮蔽材の透過 ・遮蔽材欠損部でのストリーミング ・相互遮蔽	計算コード	MCNP5 ver.1.60コードを用いて評価	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	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じコードを採用。
	断面積ライブラリ	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	中性子 ・FSXLIB-J33	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じ断面積ライブラリを採用
		ガンマ線 ・MCPLIB84	ガンマ線 ・MCPLIB84	ガンマ線 ・MCPLIB02	ガンマ線 ・MCPLIB84	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じ断面積ライブラリを採用
【線源】 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 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	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じ ²³⁹ Pu核分裂スペクトルを採用。
		線源強度 ・ORIGEN2出力 (2.2UPJ)	線源強度 ・ORIGEN2出力 (2.2UPJ)	線源強度 ・ORIGEN2出力 (2.2UPJ)	線源強度 ・ORIGEN2出力 (2.2UPJ)	・MSF-76B型及び24P(S)型はウラン初期濃縮度を保守的に設定。 ・MSF-76B型及び24P(S)型に収納する燃料型式は異なるが、同じ手法で線源強度を設定。
		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 ・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	・MSF-76B型及び24P(S)型は収納燃料を包含する燃焼度を設定。
		冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・実績考慮	冷却期間 ・実績考慮	・MSF-76B型及び24P(S)型は収納燃料を包含する冷却期間を設定。

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

(1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(2/4)

MSF-76B型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				備考
		MSF-76B型遮蔽解析	MSF-24P(S)型先行キャスク	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系)	ベンチマーク (乾式貯蔵容器体系)	
【線源】 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(2.2UPJ) ・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(2.2UPJ) ・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(2.2UPJ) ・放射化ガンマ:-	スペクトル ・燃料有効部:ORIGEN2 出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: 1.17MeV-50% 1.33MeV-50%	・MSF-76B型及び24P(S)型に収納する燃料型式は異なるが、同じ手法で線源強度を設定。
		線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2 出力(2.2UPJ) ・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(2.2UPJ) ・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(2.2UPJ) ・放射化ガンマ:未考慮	線源強度 ・燃料有効部:ORIGEN2出力(2.2UPJ) ・放射化ガンマ: ⁵⁹ Co含有量からの計算値	・MSF-76B型及び24P(S)型はウラン初期濃縮度を保守的に設定。 ・MSF-76B型及び24P(S)型に収納する燃料型式は異なるが、同じ手法で線源強度を設定。
		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 ・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	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じ手法で設定。
		冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・最短冷却期間	冷却期間 ・実績考慮	冷却期間 ・実績考慮	・MSF-76B型及び24P(S)型は同じ手法で設定。

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

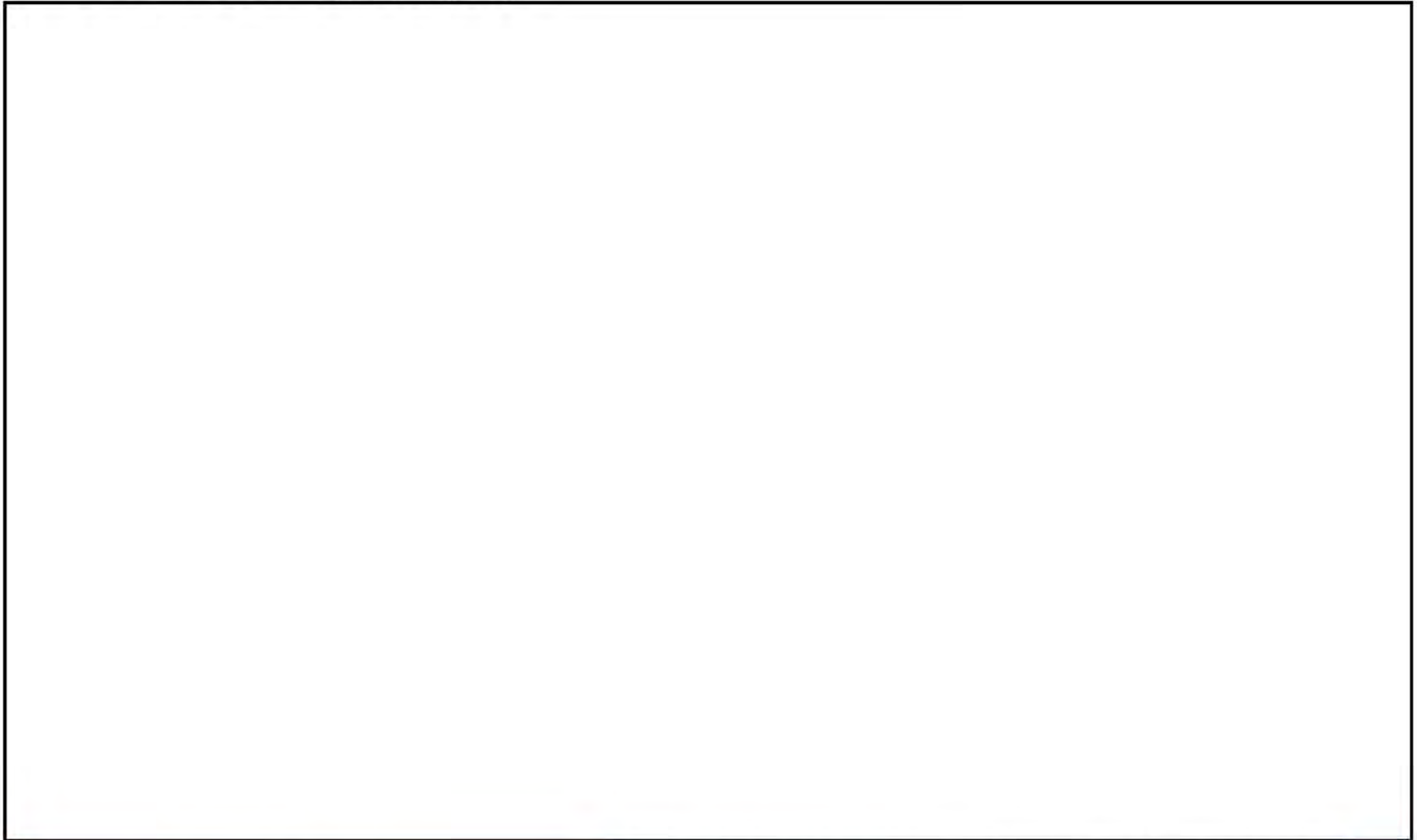
(1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(3/4)

MSF-76B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				備考
		MSF-76B型 遮蔽解析	MSF-24P(S)型 先行キャスク	ベンチマーク (使用済燃料輸送容器体系)	ベンチマーク (乾式貯蔵容器体系)	
【線源形状】 使用済燃料	燃料集合 体(線源 領域)の 設定	<ul style="list-style-type: none"> 使用済BWR燃料76体 1体ごとに均質化 上部ハンドル部、上部グリッド部、上部プレナム部、燃料有効部、下部燃料有効部、下部端栓部に分割 バスケット内均質化 燃料集合体は一次蓋及び胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置 燃料配置:1/4対称 	<ul style="list-style-type: none"> 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 燃料集合体は一次蓋及び胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置 燃料配置:1/4対称 	<ul style="list-style-type: none"> 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 燃料集合体は胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置 燃料配置:1/2対称 	<ul style="list-style-type: none"> 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 燃料集合体は胴(底板)に接し、バスケットセル内中央に配置 燃料配置:1/2対称 	<ul style="list-style-type: none"> 各燃料仕様に基づき、MCNP5コードの条件として設定。 MSF-76B型及び24P(S)型は軸方向での燃料集合体の移動を考慮し、一次蓋及び胴(底板)に接した状態となるよう設定。 MSF-76B型及び24P(S)型は使用済燃料を燃料集合体1体毎に均質化したモデルを採用。 燃料配置はMCNP5コードで実際の配置通りに設定。
【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	<ul style="list-style-type: none"> 構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、レジン、銅等 緩衝体:なし 	<ul style="list-style-type: none"> 構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、レジン、銅等 緩衝体:なし 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 構造材:炭素鋼、ステンレス鋼、レジン等 緩衝体:なし 	<ul style="list-style-type: none"> MSF-76B型及び24P(S)型の遮蔽材は同等。(P.25参照)
	形状	<ul style="list-style-type: none"> 実形状 外径約2.6m 長さ約5.5m 	<ul style="list-style-type: none"> 実形状 外径約2.6m 長さ約5.2m 	<ul style="list-style-type: none"> 実形状 外径約2.6m(緩衝体含む) 長さ約6.3m(緩衝体含む) 	<ul style="list-style-type: none"> 実形状 外径約1.7m 長さ約5.2m 	<ul style="list-style-type: none"> MSF-76B型及び24P(S)型の形状や構造は同等。(P.25参照)
	組成/密度	<ul style="list-style-type: none"> 最小密度 レジン組成カタログ値 設計貯蔵期間のレジン質量減損考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 最小密度 レジン組成カタログ値 設計貯蔵期間のレジン質量減損考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 最小密度 レジン組成カタログ値 水組成:発熱量より概算 	<ul style="list-style-type: none"> 最小密度 レジン組成カタログ値 	<ul style="list-style-type: none"> MSF-76B型及び24P(S)型ではレジン減損を考慮。 MSF-76B型ではチャンネルボックスの遮蔽効果を無視。
	寸法公差	<ul style="list-style-type: none"> 密度に考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 密度に考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 考慮しない 	<ul style="list-style-type: none"> 考慮しない 	<ul style="list-style-type: none"> MSF-76B型及び24P(S)型では寸法公差を密度係数として考慮。

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

(1) 遮蔽解析での確認範囲の整理(4/4)

➤ MSF-76B型とMSF-24P(S)型の構造比較



(2) 数値的解法の確認

- MCNP5コードは、LANLのソフトウェア品質保証計画^(注1)に従って開発されており、計算コードの検証と妥当性確認がなされたものである。
- LANLでMCNP5コードに対して実施された検証内容^(注2)を確認した。
- LANLの検証では、リグレッションテスト、中性子及びガンマ線遮蔽に関する遮蔽実験値との比較、3次元輸送計算コードの精度確認のためのベンチマーク問題(Kobayashiベンチマーク)での解析解とMVPコードによる参照解との比較を実施している。
- 以下のLANLでの検証結果より、MCNP5コードの数値的解法に問題無いことを確認した。

① リグレッションテスト

- リグレッションテストで今回のバージョン(ver1.60)での変更以外に影響がないことを確認。
- なお、リグレッションテストで用いられている計算は、ガンマ線や中性子のベンチマーク問題として整理されたものが含まれており、キャスクの評価に必要なガンマ線や中性子の輸送計算に必要な散乱・吸収といった現象が考慮された実験値や解析値に対して、MCNPコードを用いて精度よく予測できることが確認されている^(注3)^(注4)。

② 遮蔽実験値との比較

- 中性子スペクトル測定、中性子・ガンマ線遮蔽及びガンマ線スカイシャイン実験値とMCNP5コードでの解析値の比較で良い一致を得ている。

③ Kobayashiベンチマーク

- 3次元輸送ベンチマーク問題として、吸収の強い体系中にボイド領域があるような、ストリーミングのベンチマークとの比較を実施。
- 散乱がない場合は解析解との比較、散乱がある場合はMVPコードを用いた参照解との比較を実施し、良い一致を得ている。

(注1) Hilary. M. Abhold, John. S. Hendricks, “MCNP™ Software Quality Assurance Plan”, LA-13138, (1996).

(注2) Forrest Brown, Brain Kiedrowski, Jeffery Bull, Matthew Gonzales, Nathan Gibson, “Verification of MCNP5-1.60”, LA-UR-10-05611, (2010).

(注3) Daniel J. Whalen, David E. Hollowell and John S. Hendricks, “MCNP: Photon Benchmark Problems”, LA-12196, (1991).

(注4) Daniel J. Whalen, David. A. Cardon, Jennifer L. Uhle and John S. Hendricks, “MCNP: Neutron Benchmark Problems”, LA-12212, (1991).

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

(3) 評価結果の傾向確認(MCNP5コードの実験結果との比較) (1/3)

<評価条件(使用済燃料輸送容器体系及び乾式貯蔵容器体系)>

- ベンチマーク解析に用いる評価条件は下表に示すとおり、現実的な設定としているが、遮蔽材の密度を最小密度とする等、保守的な条件設定も存在する。

項目		使用済燃料輸送容器体系(P.28)	乾式貯蔵容器体系(P.29)
容器名称		NFT-14P型輸送容器(PWR使用済燃料14体収納)	乾式貯蔵試験容器(PWR使用済燃料1体収納)
線源	線源スペクトル	<ul style="list-style-type: none"> 中性子スペクトル: 239Pu核分裂スペクトル 燃料有効部ガンマ線スペクトル: ORIGEN2(2.2UPJ)出力 構造材ガンマ線スペクトル: - (注1) 	<ul style="list-style-type: none"> 中性子スペクトル: 244Cm核分裂スペクトル 燃料有効部ガンマ線スペクトル: ORIGEN2出力(2.2UPJ) 構造材ガンマ線スペクトル: 1.17MeV-50%、1.33MeV-50%
	燃焼度	<ul style="list-style-type: none"> 集合体燃焼度:実績燃焼度 軸方向分布:実績燃焼度を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> 集合体燃焼度:実績燃焼度 軸方向分布:実績燃焼度を考慮
線源形状	燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> 燃料集合体を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 軸方向の燃料位置は底部側寄せ配置 バスケット内の左右方向は中央配置 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料集合体を均質化 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 軸方向の燃料位置は底部側寄せ配置 バスケット内の燃料集合体は均質化
材質及び形状	バスケット	基本的に形状どおりモデル化 (バスケットガイド部及び吊り具は無視)	基本的に形状どおりモデル化
	本体	基本的に形状どおりモデル化 (内部水位は水膨張無視)	基本的に形状どおりモデル化
	蓋	基本的に形状どおりモデル化 (蓋ボルト部は簡略化)	基本的に形状どおりモデル化 (蓋ボルトは簡略化)
	緩衝体	基本的に形状どおりモデル化 (カバープレート、内部リブは無視(木材に置き換え))	(緩衝体は未装着)
	架台、地面	無視	簡略化してモデル化
	周囲構造物	無視	無視
	組成・密度	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材、鉛:最小密度 レジン組成:カタログ値(密度は公称値に初期収縮1%を考慮) 水密度:水温を発熱量より換算して設定 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材:最小密度 レジン組成:カタログ値(密度は公称値に初期収縮1%を考慮)
寸法公差	考慮しない	考慮しない	

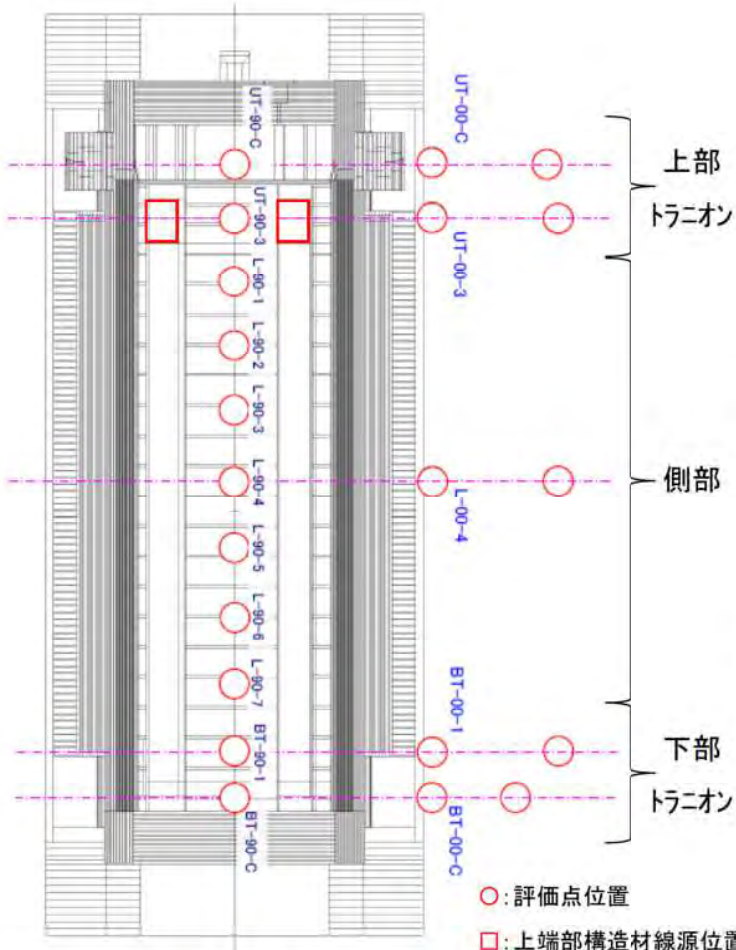
(注1) 使用済燃料輸送容器体系ではベンチマーク解析において構造材ガンマ線を考慮していない。

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

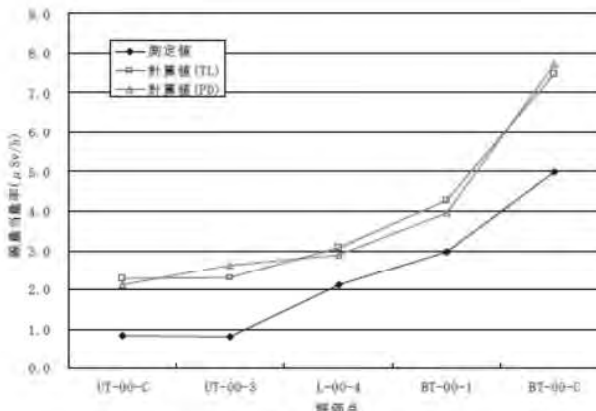
(3) 評価結果の傾向確認(MCNP5コードの実験結果との比較) (2/3)

<評価モデル及び評価結果(使用済燃料輸送容器体系)>

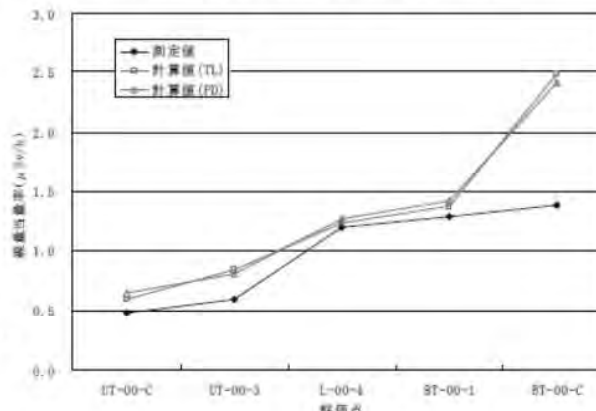
線量当量率の計算値と測定値の比較では、遮蔽材の密度を最小密度としており基本的に測定値を上回るが、分布としては同様の傾向を示していることが確認されている。計算値が測定値を下回る点について、中性子についてはベンチマーク解析では考慮されていない使用済燃料輸送容器近傍の壁による反射の影響により解析結果に対して測定値が高くなったとされている。また、ガンマ線についてはベンチマーク解析において端部線源強度の高い構造材放射化ガンマ線源を考慮していないことが原因と考えられる。



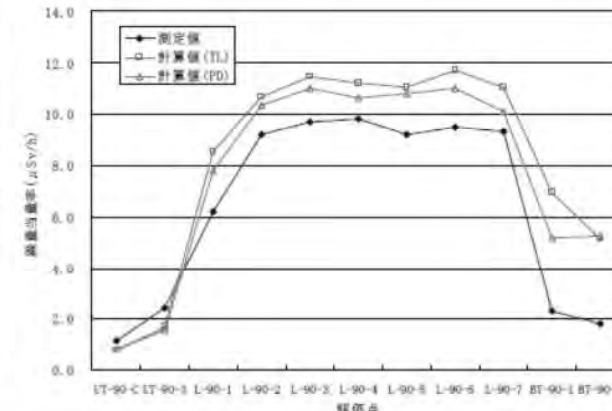
(解析モデル)



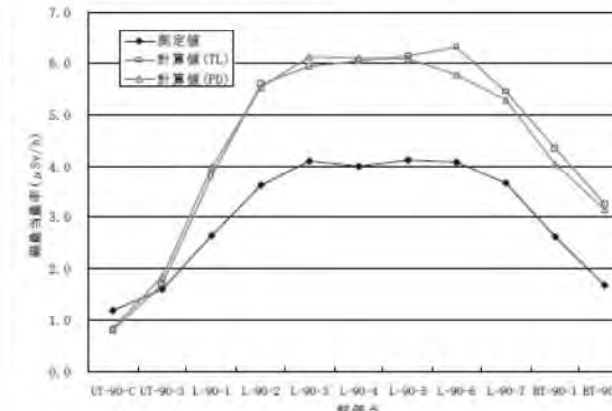
(中性子線量当量率、表面位置 0° 方向)



(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、表面位置 90° 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)

(評価結果例)

NFT-14P型輸送容器によるMCNP5コードの検証

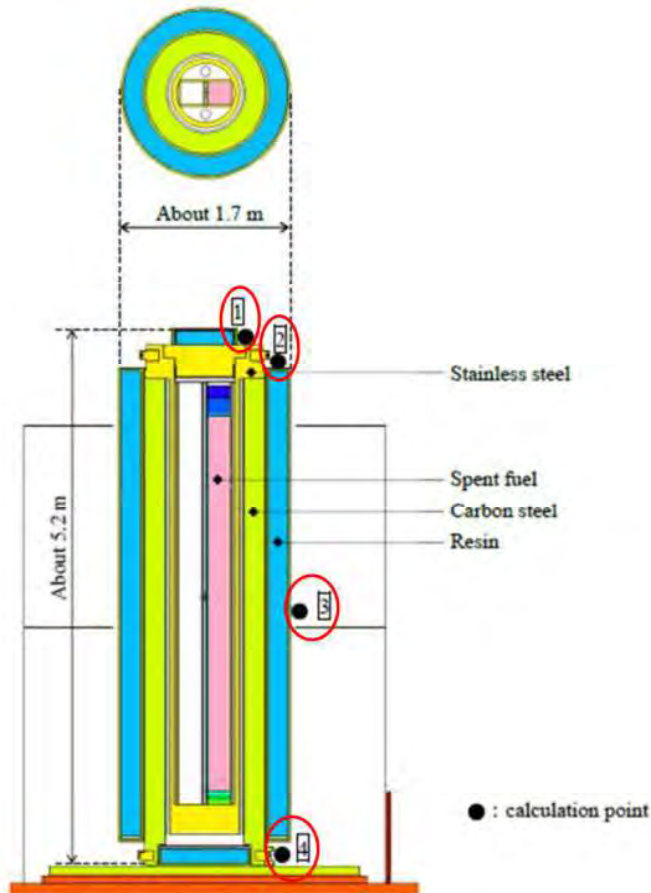
(出典) 一般社団法人日本原子力学会「モンテカルロ法による放射性物質輸送容器の遮蔽安全評価手法の高度化 平成23年度報告書」, (2012).

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

(3) 評価結果の傾向確認(MCNP5コードの実験結果との比較) (3/3)

<評価モデル及び評価結果(乾式貯蔵容器体系)>

線量当量率の計算値と測定値の比較では、良い一致を示している。なお、測定は建屋内部で実施されたが、ベンチマーク解析では乾式貯蔵容器周辺の周囲構造物はモデル化されておらず、周囲構造物による中性子やガンマ線の反射が考慮されていないため、一部の計算値が測定値を下回っているものと考えられる。



(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

(出典) 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).

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

(4) DOT3.5による既認可評価値(MSF-24P型)との同等性の確認(1/2)

- MCNP5コードを用いた先行キャスクの解析結果について、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との比較を確認した。
- 比較対象は、MSF-76B型の輸送様態と同じ仕様・構造であるMSF-24P型での既認可の核燃料輸送物質設計変更承認申請(原規規発第22061412号により令和4年6月14日承認)^(注1)のうち17×17燃料 48,000MWd/t型(A型)収納時とした。各解析コードでの計算方法及び条件設定概要を下表に示す。
- DOT3.5コードを用いた評価手法は既認可申請において文献^(注2)を基に保守性があるものとして妥当であると判断されている。
- 先行キャスクにおけるMCNP5コードによる評価は、DOT3.5コードと同様の条件で実施している。
- MCNP5コード及びDOT3.5コードによるMSF-24P型表面及び表面から1m離れた位置における線量当量率をP.31に示す。DOT3.5コードの特性上の要因により、頭部及び底部の径方向の一部(トラニオン部近傍)において線量当量率評価値に差異が生じる^(注3)ものの、その他の領域では同様の線量当量率及び傾向であり、MCNP5コードを使用済燃料輸送・貯蔵容器体系に適用した場合において、DOT3.5コードと比較して同等の結果が得られている。したがって、MCNP5コードにより、DOT3.5コードと同様に妥当な解が得られることを確認した。

(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) 一般社団法人 日本原子力学会,「中性子遮蔽設計ハンドブック」, (1993).

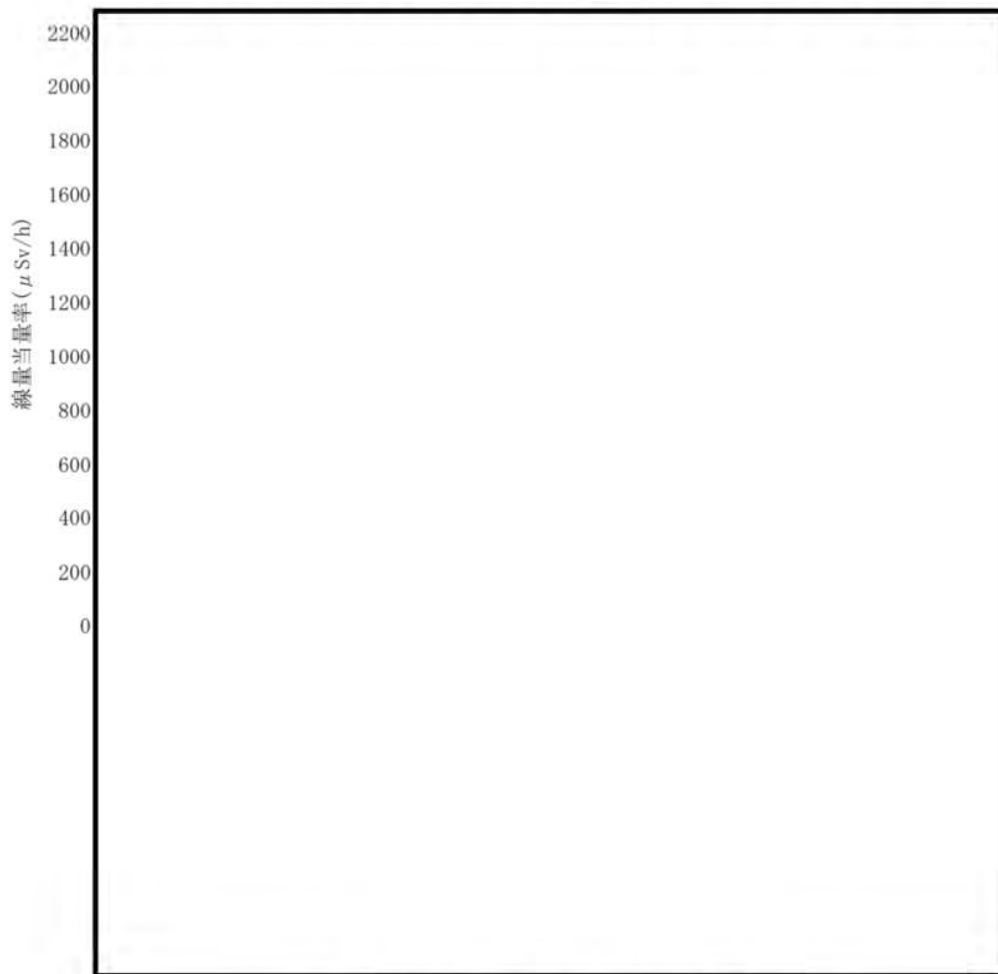
(注3) DOT3.5コードでは取り扱えるモデル形状が二次元円筒形状であるため保守的なモデルを設定して計算しており、DOT3.5コード計算値はMCNP5コード計算値より高い。MSF-24P型と同等の体系である使用済燃料輸送・貯蔵容器体系のベンチマーク解析でトラニオン近傍のMCNP評価結果と測定値の傾向がよく一致することを確認している。したがって、DOT3.5の解析結果は保守的なものであり、MCNP5コードによる評価結果は妥当である。

各解析コードの計算方法及び条件設定概要

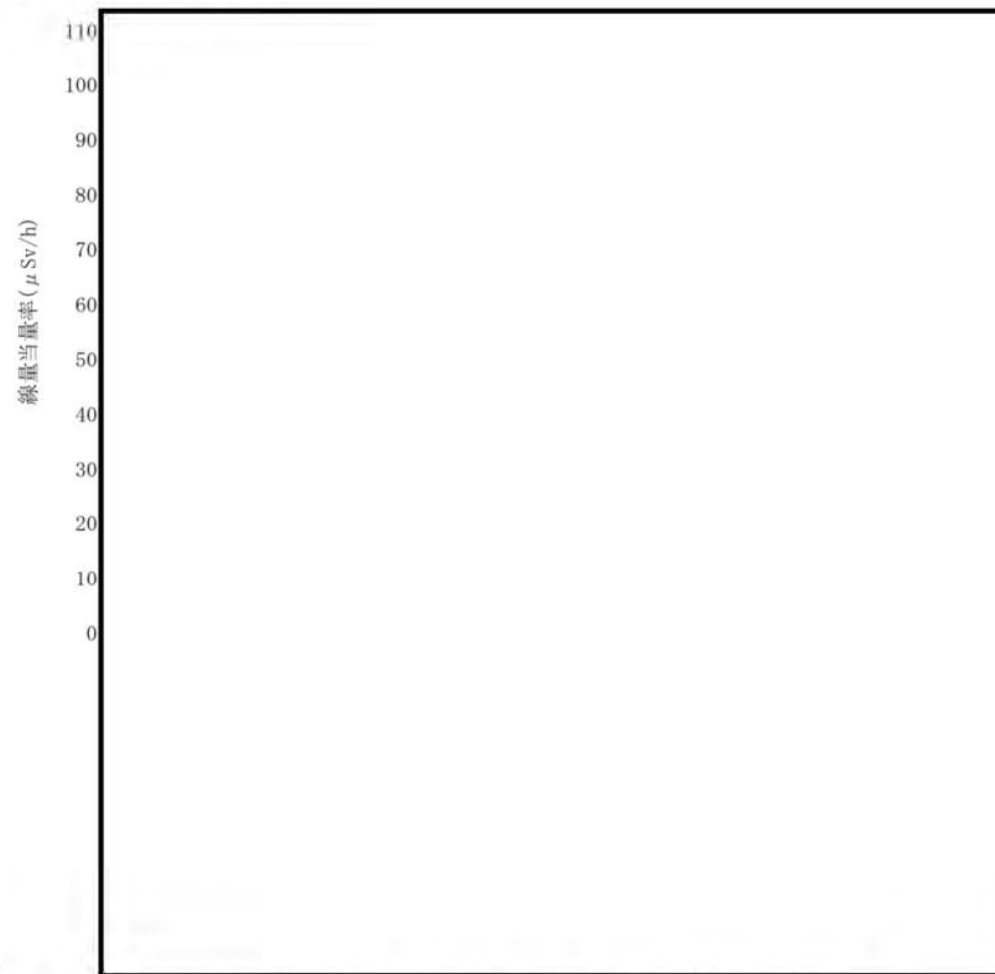
項目	MCNP5コード	DOT3.5コード	備考
計算方法	放射線の衝突や散乱等を再現。評価位置に対する放射線情報を統計的に処理するため、計算値に対して統計誤差を持つ。	ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式をSn法により解く。放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性を表現。	—
線源強度設定	ORIGEN2.2UPJコードにより評価した線源強度(17×17燃料 48,000MWd/t型(A型)収納時)を設定	左記と同じ	線源強度は同一
モデル化設定	MSF-24P型全体を三次元でモデル化。バスケットプレートは中性子吸収材及びポイド層を含めた格子形状を均質化	二次元円筒体系でモデル化。本体部は有限円筒形状(燃料部等は均質化)でモデル化。トラニオン部は本体モデルと別にモデル化。(異なる中心軸のモデルを同一計算することができない。)	両方で解析コードの特性上モデル化方法が異なる。DOT3.5コードでのトラニオン部評価は線束引継ぎ計算を実施。

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:遮蔽)

(4)DOT3.5による既認可評価値(MSF-24P型)との同等性の確認(2/2)



側部方向線量当量率評価結果(表面)



側部方向線量当量率評価結果(表面から1 m離れた位置)

(結果差異の要因)

- ①: DOT3.5のトランニオン部の評価点は、本体モデルとは別に保守的な条件でモデル化するため、MCNP5に比べて線量当量率が高くなる。
なお、MCNP5による評価は、(3)で使用済燃料輸送・貯蔵容器体系のベンチマーク解析でトランニオン近傍の領域も測定値と傾向がよく一致することを確認している。
したがって、DOT3.5の評価結果は保守的なものであり、MCNP5による評価結果は妥当である。
- ②: ①と同様の設定で評価を行うが、表面から1m離れた位置ではキャスク全体からの線量当量率の寄与が支配的であり、MCNP5とDOT3.5で概ね一致する。
- ③: DOT3.5解析は、燃料領域を均質円筒モデル化するにあたり線量当量率への影響を保守的に考慮できるモデル設定としており、MCNP5に比べ線量当量率が高くなる。

3. 設置許可基準規則への適合性(第16条:除熱)

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設(第十六条第4項二号)(除熱機能)

《設計方針》

[安全設計に関する方針]

MSF-76B型は、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計とする。

[発電用原子炉施設に及ぼす影響に関する方針]

MSF-76B型は、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計とするため、発電用原子炉施設の安全性に影響を及ぼさない。

具体的な設計方針

- 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。
- 使用済燃料及び特定兼用キャスクの温度が制限される値以下に維持されていることを評価するために、特定兼用キャスク外表面の温度を測定できる設計とする。

設計方針の妥当性確認(安全評価)

- 使用済燃料を熱源とした貯蔵状態の伝熱評価を実施し、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。

後段審査(設置(変更)許可)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及び冷却期間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、50℃以下であること。また、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。

伝熱経路図

熱解析モデル図

3. 設置許可基準規則への適合性(第16条:除熱)

● 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-76B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.34～38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核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-76B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-76B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-76B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」

3. 設置許可基準規則への適合性(第16条:除熱)

● 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): 配置(1)

- 温度解析へ入力する崩壊熱量は、収納領域毎に崩壊熱量が最も大きくなる燃料とする(下表参照)。
- 温度解析への入力時には、以下の保守性を考慮する。
 - 温度解析では、使用済燃料の崩壊熱量に、軸方向燃焼度分布を考慮する。また、使用済燃料の崩壊熱量に、仕様上の最大崩壊熱量(14.2kW)を上回る設計崩壊熱量(16.1kW)を適用する。

収納領域	種類	崩壊熱量の計算条件		燃料集合体 1体当たりの 崩壊熱量(W)	領域毎の 収納体数 (体)	特定兼用 キャスク 1基当たりの 設計崩壊熱量 (kW)
		燃焼度 (MWd/t)	冷却期間 (年)			
						16.1

(注1) 温度解析へ入力する燃料の選定詳細をP.36に示す。



3. 設置許可基準規則への適合性(第16条:除熱)

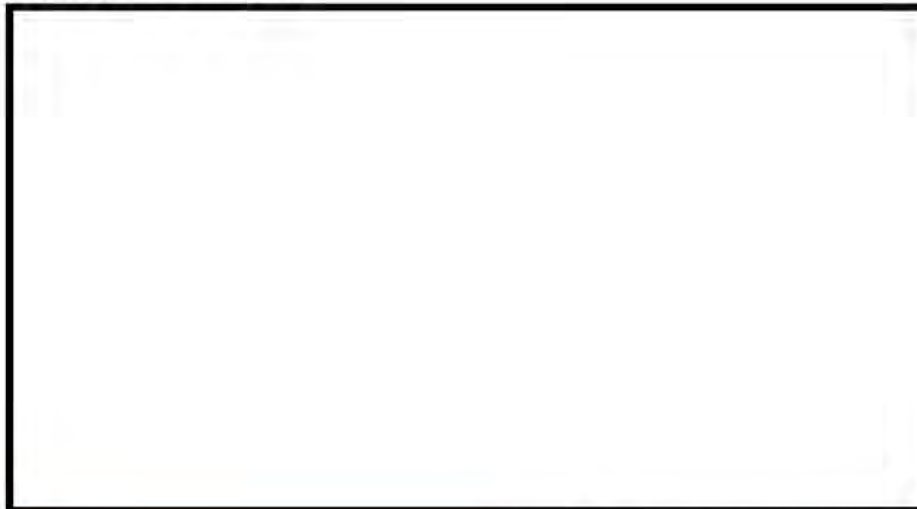
● 除熱機能の安全評価について

(1) 除熱解析評価条件(収納物仕様): 配置(2)

- 温度解析へ入力する崩壊熱量は、収納領域毎に崩壊熱量が最も大きくなる燃料とする(下表参照)。
- 温度解析への入力時には、以下の保守性を考慮する。
 - 温度解析では、使用済燃料の崩壊熱量に、軸方向燃焼度分布を考慮する。また、使用済燃料の崩壊熱量に、仕様上の最大崩壊熱量(8.4kW)を上回る設計崩壊熱量(10.3kW)を適用する。
 - 温度解析では、燃料集合体温度を高めに出算するために、領域Bの赤枠以外のセルに下表に示す崩壊熱量 を設定し、領域Bの赤枠セルの崩壊熱量は、キャスク1基の総崩壊熱量が(10.3kW)となるように計算^(注1)した崩壊熱量を設定する。

収納領域	種類	崩壊熱量の計算条件		燃料集合体1体当たりの崩壊熱量(W)	領域毎の収納体数(体)	特定兼用キャスク1基当たりの設計崩壊熱量(kW)
		燃焼度(MWd/t)	冷却期間(年)			
						10.3

(注2) 温度解析へ入力する燃料の選定詳細をP.36に示す。



3. 設置許可基準規則への適合性(第16条:除熱)

● 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、濃縮度、燃焼度及び冷却期間等を基に、以下保守性を考慮しORIGEN2コードにより算出。

- 崩壊熱量の計算では、濃縮度は、収納する使用済燃料の下限値

▶ 収納領域毎に設計崩壊熱量が最大となる崩壊熱量の計算条件を選定。

・配置(1)

収納領域	種類	崩壊熱量の計算条件				No.	崩壊熱(W) 燃料集合体 1体当たり	備考
		燃焼度 (MWd/t)	冷却期間 (年)	濃縮度 (%)	ウラン 質量 (kg)			

・配置(2)

収納領域	種類	崩壊熱量の計算条件				No.	崩壊熱(W) 燃料集合体 1体当たり	備考
		燃焼度 (MWd/t)	冷却期間 (年)	濃縮度 (%)	ウラン 質量 (kg)			

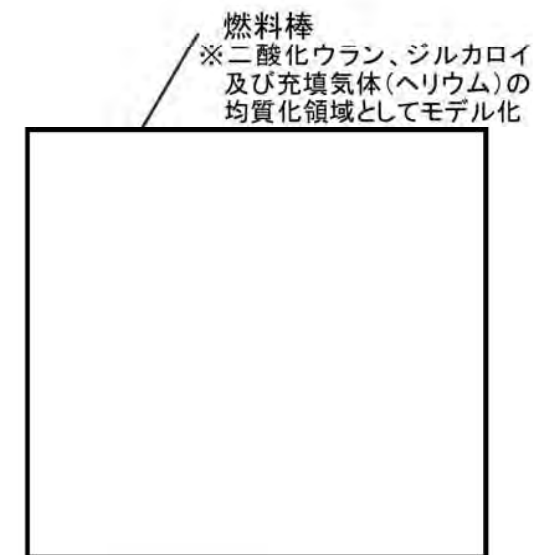
● 除熱機能の安全評価について

(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-76B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。
 - 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。



全体モデル(三次元モデル)



燃料棒
※二酸化ウラン、ジルカロイ
及び充填気体(ヘリウム)の
均質化領域としてモデル化

燃料集合体モデル
(二次元モデル)
(配置(1)の例)

3. 設置許可基準規則への適合性(第16条:除熱)

● 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-76B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-76B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)	
	配置(1)	配置(2)		
燃料被覆管	249	177	300 (配置(1)) 200 (配置(2))	
特定兼用 キャスク	胴	137	111	350
	一次蓋	108	90	350
	一次蓋ボルト	108	90	350
	中性子遮蔽材	133	109	149
	金属ガスケット	108	90	130
	バスケット	240	171	350
	伝熱フィン	124	103	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

温度分布(配置(1)の例)

● 設計方針の妥当性

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-76B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-76B型の除熱機能に係る設計方針は妥当である。

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:閉じ込め)

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設(第十六条第4項三号)(閉じ込め機能)

《設計方針》

[安全設計に関する方針]

MSF-76B型は、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することができる設計とする。

[発電用原子炉施設に及ぼす影響に関する方針]

MSF-76B型は、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することができる設計とするため、発電用原子炉施設の安全性に影響を及ぼさない。

具体的な設計方針

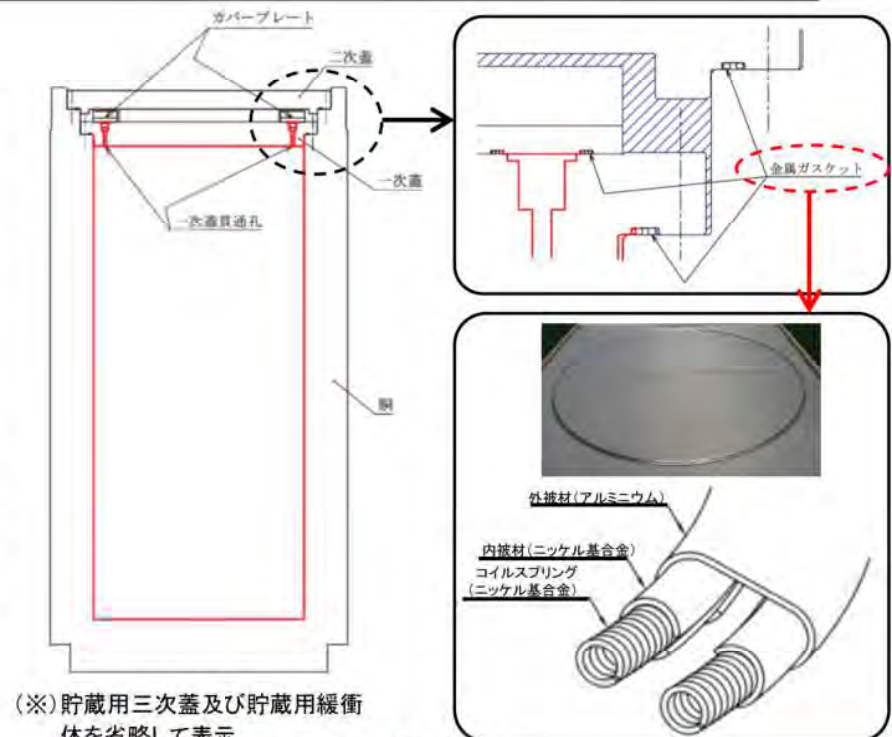
- 使用済燃料を限定された区域に閉じ込めるため、特定兼用キャスクの蓋及び蓋貫通孔のシール部に金属ガスケットを用いることにより、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料集合体を内封する空間を負圧に維持する設計とする。
- 一次蓋及び二次蓋による二重の閉じ込め構造とし、蓋間を正圧に維持することにより圧力障壁を形成し、使用済燃料集合体を内封する空間を特定兼用キャスク外部から隔離する設計とする。
- 蓋間空間の圧力を測定することで閉じ込め機能を監視できる設計とする。

設計方針の妥当性確認(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。MSF-76B型に用い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(設置(変更)許可)で別途確認される事項

- 万一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

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:閉じ込め)

● 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-76B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.41～44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。	(型式証明申請の範囲外)
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。	(型式証明申請の範囲外)

(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」

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:閉じ込め)

● 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)

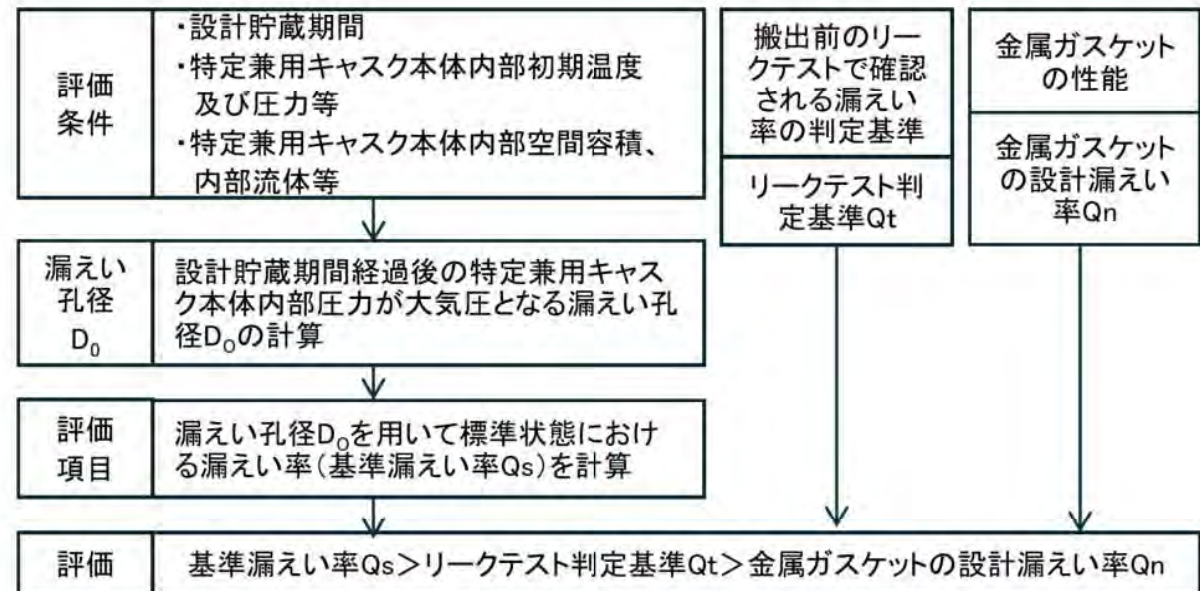
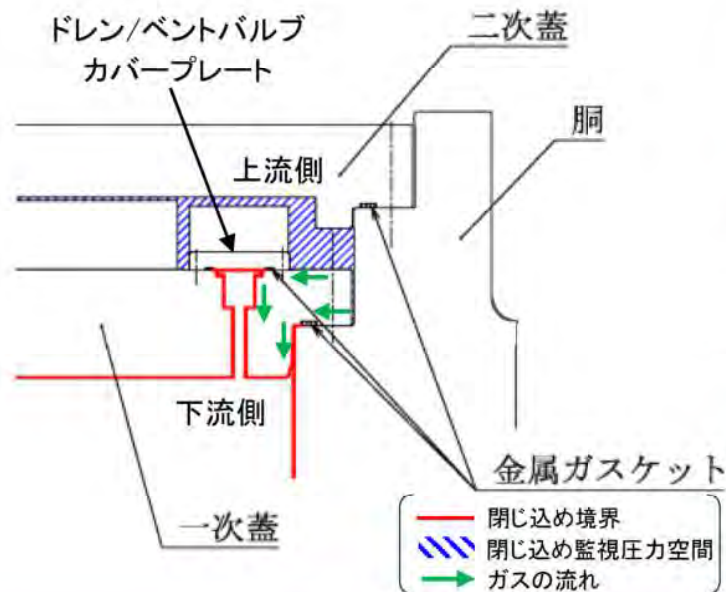
評価に用いる収納物仕様は、燃料棒の温度が最も高く、燃料棒内圧が大きくなり、基準漏えい率を算出する上で安全側となる、配置(1)とし、以下のとおりとする。

- ・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。

(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。



(閉じ込め機能評価フロー)

3. 設置許可基準規則への適合性(16条:閉じ込め)

● 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)

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

$$Q = L \cdot P_a$$

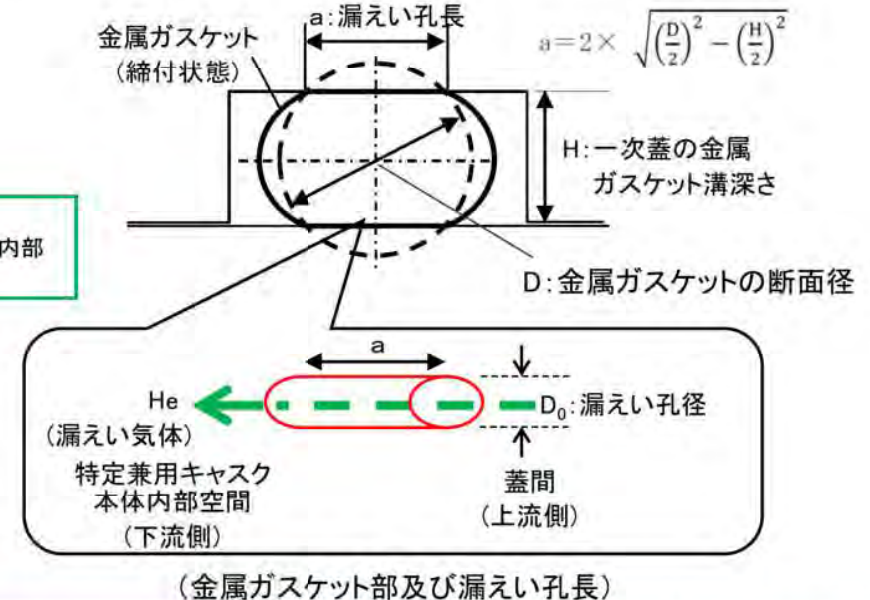
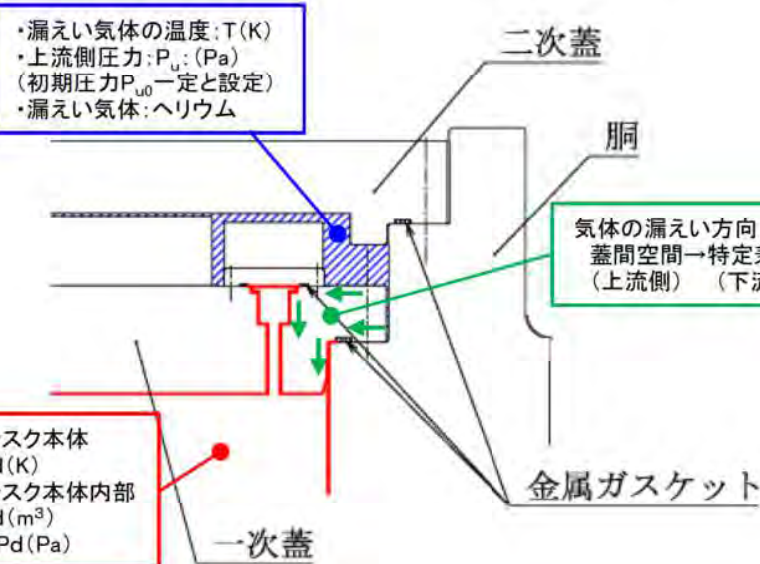
$$L = (F_c + F_m) \cdot (P_u - P_d)$$

$$F_m = \frac{\sqrt{2} \pi \cdot R_o}{6} \times \frac{D_o^3 \sqrt{T}}{a \cdot P_a}$$

$$F_c = \frac{\pi}{128} \times \frac{D_o^4}{a \cdot \mu}$$

dPd : 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)
 Td : 特定兼用キャスク本体内部温度 (K)
 Vd : 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)
 Pa : 流れの平均圧力 (Pa)【Pa = (Pu+Pd)/2】
 Fc : 連続流のコンダクタンス係数 (m³/(Pa・s))
 Fm : 自由分子流のコンダクタンス係数 (m³/(Pa・s))

Pu : 上流側(蓋間)の圧力 (Pa)
 Pd : 下流側(特定兼用キャスク本体内部)の圧力 (Pa)
 Do : 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)
 Ro : ガス定数 (J/(mol・K))



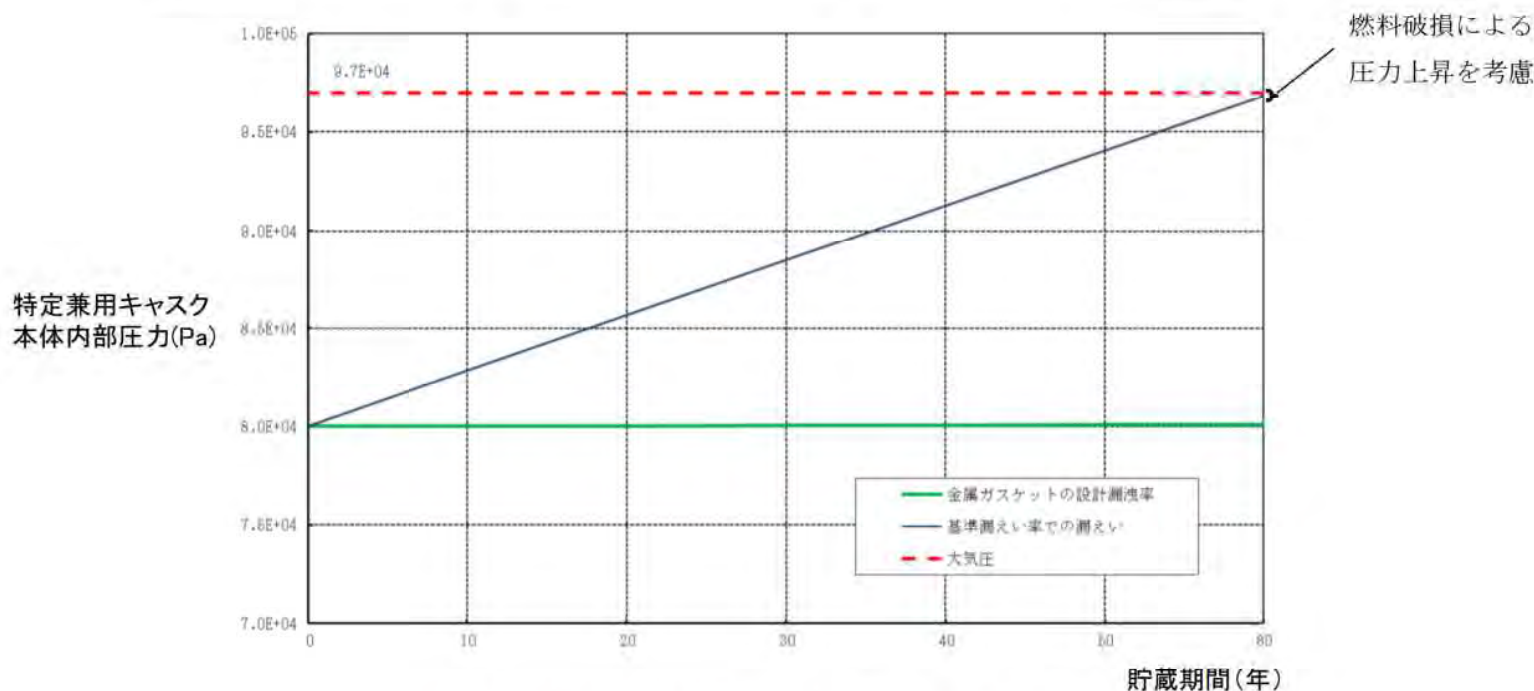
3. 設置許可基準規則への適合性(16条:閉じ込め)

● 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-76B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。

基準漏えい率 (Pa・m ³ /s)	リークテスト判定基準 (Pa・m ³ /s)	金属ガスケットの性能 (Pa・m ³ /s)
2.61×10^{-6}	1.86×10^{-6}	1.0×10^{-8} 以下



特定兼用キャスク本体内部圧力の経時変化

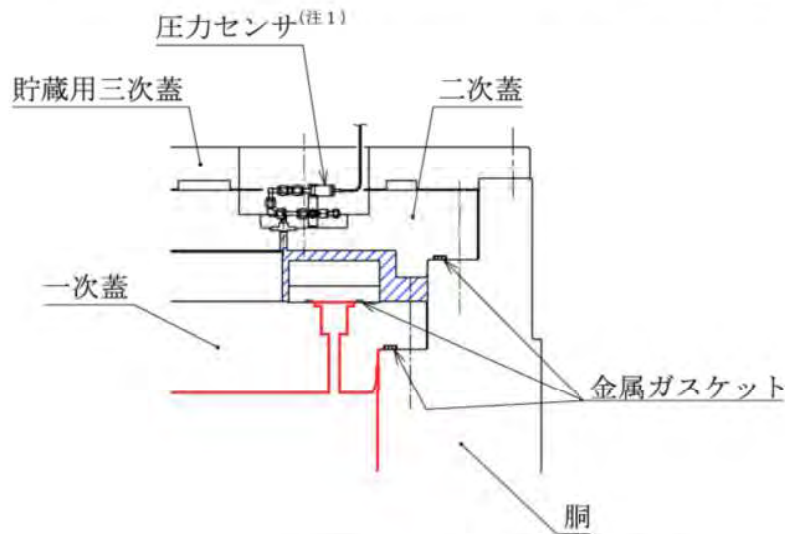
3. 設置許可基準規則への適合性(16条:閉じ込め)

● 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

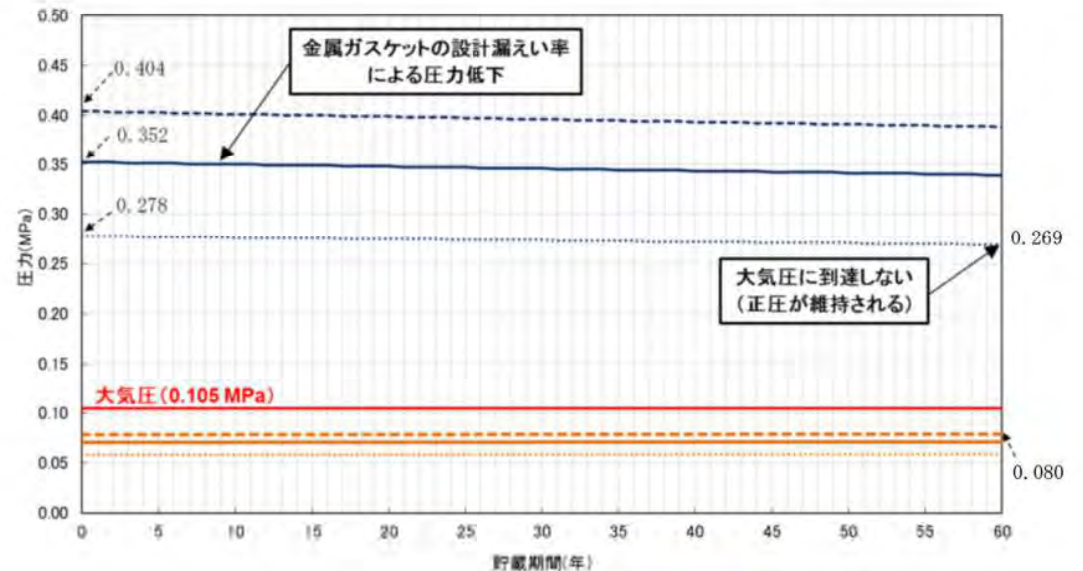
- 二次蓋に貫通部を設け、圧力センサ(圧力計)を設置する構造とし、蓋間空間の圧力を測定することにより閉じ込め機能を監視できる構造とする。
- 蓋間空間の圧力が金属ガスケットの設計漏えい率により低下^(注)しても、蓋間圧力は、設計貯蔵期間中に有意な圧力低下は生じず、正圧(大気圧)以上が維持される。

(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。



(注1)圧力センサの取付位置は限定しない。

閉じ込め機能の監視構造



— : 蓋間圧力
— : 本体内部圧力
(破線は周囲環境温度等を考慮した変動幅)

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の例

● 設計方針の妥当性

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-76B型の閉じ込め機能に係る設計方針は妥当である。

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設(解釈別記4第16条第5項) (長期健全性)

《設計方針》

[安全設計に関する方針]

MSF-76B型は、特定兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とする。

基本具体的な設計方針

- MSF-76B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-76B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等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。

設計方針の妥当性確認(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

● 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-76B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次頁に示す。

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-76B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等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-76B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」

3. 設置許可基準規則への適合性(第16条:長期健全性)

● 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	137	350
	バスケット(バスケットプレート)	240	350
	トランニオン、下部端板、底部中性子遮蔽材カバー	137	425
	中性子遮蔽材 ^(注2)	133	149
	金属ガスケット	108	130
	伝熱フィン	124	200
使用済燃料(燃料被覆管) ^(注3)		249(ライナ有燃料) 177(ライナ無燃料)	300(ライナ有燃料) 200(ライナ無燃料)

(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。

(注3) ライナ有燃料は、高燃焼度8×8燃料及び新型8×8ジルコニウムライナ燃料が該当。ライナ無燃料は、新型8×8燃料及び8×8燃料が該当。

(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	5.3×10^{14}	10^{16}
	バスケット(バスケットプレート)	1.8×10^{15}	10^{16}
	トランニオン、下部端板、底部中性子遮蔽材カバー	5.3×10^{14}	10^{17}
	中性子遮蔽材	1.4×10^{14}	10^{16}
	金属ガスケット	8.9×10^{13}	10^{17}
	伝熱フィン	1.4×10^{14}	10^{16}
使用済燃料(燃料被覆管)		1.8×10^{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等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。

● 設置許可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-76B型の長期健全性に係る設計方針は妥当である。

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