

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 設置許可基準規則への適合性について (第十六条関連)

GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH

2023年8月29日

目次

1. 設置許可基準規則への適合性の概要
2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条のうち、除熱機能)
3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条のうち、長期健全性)

1. 設置許可基準規則への適合性の概要

設置許可基準規則適合性説明対象

設置許可基準規則	安全機能					構造健全性	設計条件	貯蔵施設に関する要件
	臨界防止	遮蔽	除熱	閉じ込め	長期健全性			
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	-	-	-	-	-	○	-	○
第十六条:燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	○	○	○	○	○	-	-	○

「第十六条:燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設」の除熱機能及び長期健全性について、本資料で説明する。(青枠部分)

2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

設置許可基準規則第十六条の内、除熱機能に係る要求事項に対するCASTOR® geo26JP型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	先行例との比較
設置許可基準規則(注1) 第十六条第4項 第二号	使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。	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。また、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。	
設置許可基準規則解釈(注2) 別記4 第16条第3項	第16条第4項第2号に規定する「崩壊熱を適切に除去することができる」とは、第5項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈第6条並びに第17条第1項第2号(貯蔵建屋を設置する場合に限る。)及び第3号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。		

(注1)「実用発電用原子炉及びその附属施設的位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2)「実用発電用原子炉及びその附属施設的位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

設置許可基準規則第十六条の内、除熱機能に係る要求事項に対するCASTOR® geo26JP型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	先行例との比較
貯蔵事業許可基準規則解釈(注3) 第6条	第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。		
	一 使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損及び被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。	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、燃料被覆管の累積クリープひずみが1%を超えない温度、照射硬化の回復により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度、及び水素化物の再配向により燃料被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下とするため、貯蔵する使用済燃料の種類ごとに以下の制限を設ける。 ・17×17 燃料 275 °C以下 ・15×15 燃料 275 °C以下	燃料被覆管制限温度は先行例と同じ
	二 金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。	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方針とし、主要な構成部材の温度は、以下の制限を設ける。 ・胴 350 °C以下 ・蓋部 425°C以下 ・中性子遮蔽材 130°C以下 (ポリエチレン) <input type="text"/> 135°C以下 (ポリエチレン) <input type="text"/> ・金属ガスケット 125 °C以下 ・H-ビーム、コーナーエレメント、バスケット側板 250 °C以下	基本的な考え方は同様。 構成部材が異なる。



2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

設置許可基準規則第十六条の内、除熱機能に係る要求事項に対するCASTOR® geo26JP型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	先行例との比較
貯蔵事業許可基準規則解釈 第6条(続き)	三 貯蔵建屋(使用済燃料貯蔵施設において金属キャスク等を収納する建物をいう。以下同じ。)は、金属キャスクの除熱機能を阻害しない設計であること。また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しない設計であること。	申請範囲外	
	四 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、除熱機能に関する評価で考慮した使用済燃料の燃焼度に応じた配置の条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置が講じられること。	申請範囲外	
貯蔵事業許可基準規則解釈第17条第1項	第1項に規定する「適切に監視することができる」とは、以下の設計をいう。		
	一 蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。	蓋部が有する閉じ込め機能を監視できる設計とする。 詳細は閉じ込め機能にて説明	先行例と同様。
	二 貯蔵建屋内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視できること。	申請範囲外	
	三 使用済燃料及び金属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必要なデータを測定等により取得できること。	申請範囲外であるが、使用済燃料及び特定兼用キャスクの温度が制限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。	先行例と同様。

2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

設置許可基準規則第十六条の内、除熱機能に係る要求事項に対するCASTOR® geo26JP型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	先行例との比較
設置許可基準規則 解釈 別記4 第16条第5項	第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。 ・設計貯蔵期間を明確にしていること。 ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。	設計貯蔵期間は60年とする。 安全 機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食等の経年変化に対して十分な信頼性のある材料を選定し、その必要とされる強度、性能を維持するように設計する。 詳細は長期健全性にて説明する。	基本的考え方は同様。 構成部材、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件が先行例と異なる。

2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

CASTOR® geo26JP型の除熱機能に係る設計方針について具体的には以下の通り。

[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。
- 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。

[安全評価方針]

- 燃料被覆管及び安全機能を維持するうえで重要な構成部材の温度を評価し、燃料被覆管の温度が制限温度以下となること、また、構成部材は、その健全性に影響を与えない温度となることを確認する。

[設計の妥当性(成立性見通し)]

- 燃料被覆管は制限温度を満足し、構成部材の温度はその健全性に影響を与えない温度であることを確認した。

[原子炉設置(変更)許可申請時の確認事項]

- 使用済燃料集合体を収納するに当たり、特定兼用キャスクの除熱機能に関する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必要な措置が講じられること。
- 貯蔵建屋に貯蔵する場合において、貯蔵建屋が特定兼用キャスクの除熱機能を阻害せず、貯蔵建屋の給排気口が積雪等により閉塞しない設計であること。
- 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。
- 特定兼用キャスクの除熱機能を阻害せず、特定兼用キャスク周囲温度が -22.4°C 以上かつ 50°C 以下であること、及び貯蔵建屋壁面温度が 65°C 以下であること。
- 特定兼用キャスク配列ピッチ寸法が 3.5m 以上であること。

2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

除熱構造及び伝熱形態

主な除熱構造は以下の通り。

- 使用済燃料集合体を熱伝導率が高いほう素添加アルミニウム合金製の板(熱伝導及び中性子吸収材)を配置したバスケットに収納する。
- 兼用キャスク内部に空気よりも熱伝導率が高いヘリウムガスを充填する。
- 兼用キャスクの外表面には対流熱伝達及びふく射による放熱のためにフィンを設ける。

主な伝熱形態は以下の通り。

- 使用済燃料の崩壊熱は、ヘリウムガスを介した熱伝導及び対流並びにふく射により、被覆管表面からバスケットに伝えられる(1)。
- バスケットに伝えられた熱は、バスケット内の熱伝導により、H-ビーム及びバスケット底板へ伝わり、次にバスケット側板、コーナーエレメント及びエッジセグメントへ伝わり、さらにバスケット外周部へ伝えられる(2)。
- バスケット外周部に伝えられた熱は、ヘリウムガスを介した熱伝導、対流及びふく射により、バスケット外表面から兼用キャスク本体内面へ伝えられる(3)。
- 兼用キャスク本体内面に伝えられた熱は、熱伝導により、兼用キャスク本体外面へ伝えられる(4)。
- 兼用キャスク本体外面に伝えられた熱は、兼用キャスク本体外面の対流及びふく射により、兼用キャスク周囲の空気及び貯蔵建屋の構造物に伝えられる(5)。

2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

設計基準値

対象	制限温度	設定理由
燃料被覆管	275℃	被覆管の累積クリープ量が1%を超えない温度以下であり、燃料棒被覆管の周方向応力が100MPaを超えないことにより、燃料棒被覆管の材料は水素化物の再配向による劣化が生じず、照射硬化の回復の可能性が小さい温度
キャスク胴部	350℃	金属キャスク構造規格に規定された温度
蓋部	425℃	金属キャスク構造規格に規定された温度
金属ガスケット	125℃	電力中央研究所で実施された実規模の金属キャスクの蓋モデルによる長期密封性能試験結果に基づく評価より設定
中性子遮蔽材	130℃/ 135℃	CASTOR® geo26JP型の半径方向及び軸方向の中性子遮蔽には、ポリエチレン [] とポリエチレン [] の2種類のポリエチレンが中性子遮蔽材として使用される。 径方向の中性子遮蔽体として用いる棒状の中性子遮蔽材は、内側の列が熱処理されたポリエチレン [] で、外側の列が熱処理の無いポリエチレン [] である。(後スライドにてより詳細説明) (1) ポリエチレン [] 高分子量ポリエチレンであるポリエチレン [] は、相転移が約130℃で始まり、約135℃で終了し、この時点で半結晶から液体へと状態が変化する。このことから、制限温度を130℃とした。 (2) ポリエチレン [] ポリエチレン [] は半結晶性材料で、約135℃で相転移が起こる。このことから、制限温度を135℃とした。
バスケット(H-ビーム、コーナーエレメント、バスケット側板)	250℃	自然事象に対する安全機能維持において、構造強度の維持が期待できる温度

2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

審査ガイド(注1)の確認内容に対するCASTOR® geo26JP型の除熱機能に係る設計方針を下表に示す。

確認内容	除熱機能に関する設計方針	先行例との比較
以下を踏まえ除熱設計が妥当であること。		
1) 使用済燃料の崩壊熱評価 使用済燃料の崩壊熱は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。	使用済燃料の崩壊熱量は、燃料集合体の型式、燃焼度、初期濃縮度、冷却期間等を条件に検証され適用性が確認された燃焼計算コードORIGEN2を用いて求める。	先行例と同じ燃焼計算コードを用いている。
2) 兼用キャスク各部の温度評価 a. 兼用キャスクの各部の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び兼用キャスク周囲の温度を条件とし、及び兼用キャスクの実形状を適切にモデル化すること。 b. 安全機能及び兼用キャスクの構造強度を維持する観点から、a.で求めた温度は、設計上想定される状態において、兼用キャスクの構成部材が健全性を保つ範囲に収まること。ここで、「健全性を保つ範囲」とは、兼用キャスクの各部の安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度の範囲をいう。	除熱解析は、実形状を3次元でモデル化し、検証され適用性が確認された有限要素解析コードANSYS®を用いて実施する。また、最大崩壊熱量を超える発熱量、特定兼用キャスクの周囲環境の温度を条件として設定する。 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の温度制限値を設計基準値として設定し、その範囲に収まることを確認する。	先行例と使用する熱解析コードが異なる。 基本的な考え方は先行例と同様。

(注1)「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. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

審査ガイド(注1)の確認内容に対するCASTOR® geo26JP型の除熱機能に係る設計方針を下表に示す。

確認内容	除熱機能に関する設計方針	先行例との比較
3) 燃料被覆管の温度評価 a. 燃料被覆管の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、1)で求めた使用済燃料の崩壊熱と2)で求めた兼用キャスクの各部の温度を条件とし、使用済燃料集合体、バスケット等の実形状を適切にモデル化すること。 b. 燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、a.で求めた温度は、設計上想定される状態において、制限される範囲に収まること。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。	2)と同じ	2)と同じ
4) 貯蔵建屋の除熱評価 ① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しないこと。 ② 貯蔵建屋を設置する場合であって、放水による冷却等応急復旧による除熱機能の回復を期待するときには、その実施に係る体制を適切に整備すること。	申請範囲外	

(注1)「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. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

審査ガイド(注1)の確認内容に対するCASTOR® geo26JP型の除熱機能に係る設計方針を下表に示す。

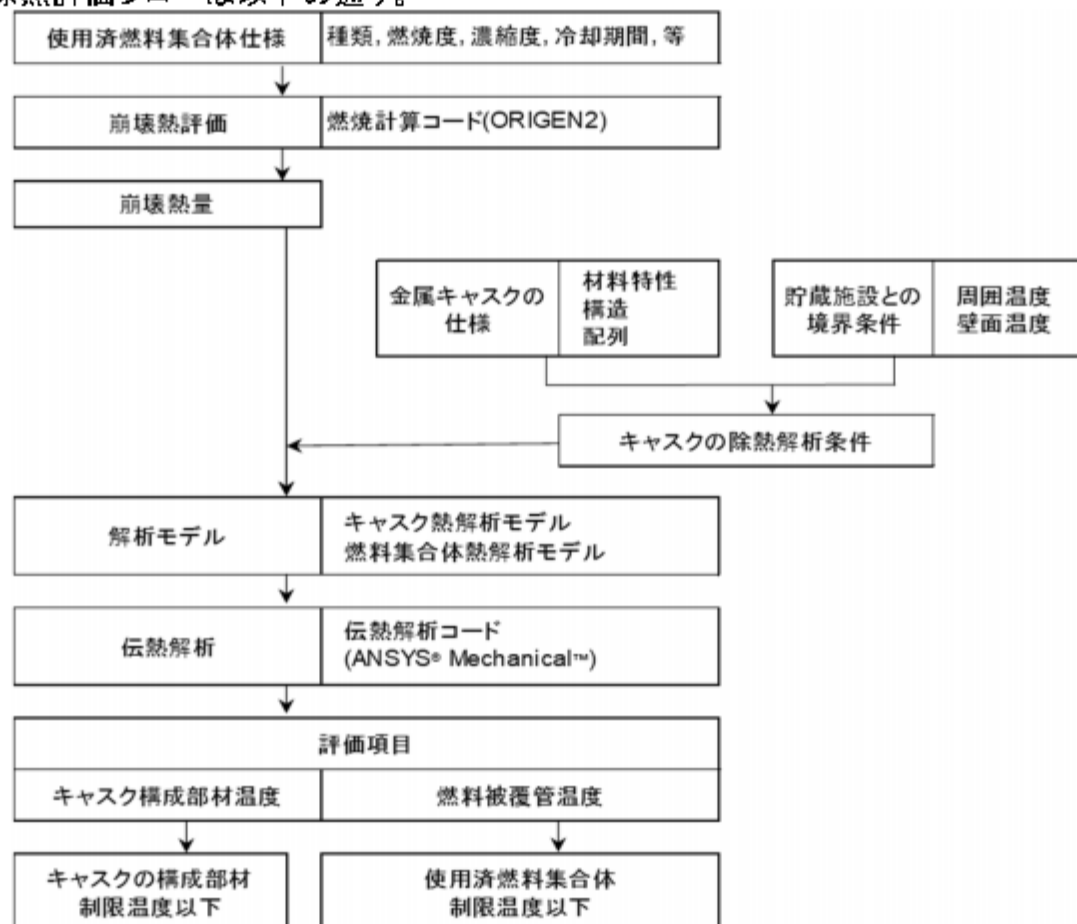
確認内容	除熱機能に関する設計方針	先行例との比較
5) 蓋間圧力を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、閉じ込め機能が低下しても、FP ガス等の放出に至る前に、密封シール部の異常を検知できる頻度をいう。頻度 の設定に当たっては、設計貯蔵期間中の兼用キャスク発熱量の低下、周囲環境の温度変化 及び蓋間圧力の変化を考慮する。	閉じ込め機能の監視に係る確認事項である。	
6) 兼用キャスク表面温度を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、除熱機能が低下しても、兼用キャスクや燃料被覆管が健全であるうちに異常を検知できる頻度をいう。	申請範囲外	

(注1)「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. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

CASTOR® geo26JP型の除熱機能に係る安全評価方針については以下の通り。

除熱評価フローは以下の通り。



2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

(1) 使用済燃料の崩壊熱評価方法

使用済燃料の崩壊熱量は、燃料集合体の型式、燃焼度、初期濃縮度、冷却期間等を条件に検証され適用性が確認された燃焼計算コードORIGEN2を用いて求める。ORIGEN2の計算結果に対しては、5%の不確かさを考慮する。評価条件及び結果は下表のとおり。

項目		仕様		
		17×17燃料		15×15燃料
使用済燃料集合体の種類		A型	B型	—
形状	集合体幅	約 214 mm		約 214 mm
	全長	約 4100 mm		約 4100 mm
質量		約 680 kg		約 670 kg
燃料集合体1体の仕様 ^(注)	初期濃縮度	4.2 wt%以下		4.1 wt%以下
	最高燃焼度	48,000 MWd/t 以下		48,000 MWd/t以下
	冷却期間	12年以上		12年以上
特定兼用キャスク1基当たりの仕様	収納体数	26体		
	最大崩壊熱量	18.0 kW以下		

注: バーナブルポイズン集合体を共に収納する場合もあるが、熱出力が小さいため無視する。

温度評価のための使用済核燃料集合体の配置には下図に示す2つの場合を考慮している。この除熱解析モデルをもとに、キャスク各部の温度評価を行う。

解析モデルA: 仮想的な最大発熱量を与え、各部の最高温度評価を目的としたモデル
 解析モデルB: 申請書の配置パターンを包絡し、現実的な温度評価を目的としたモデル



なお、使用済燃料集合体における高発熱部分の温度をより高く評価できるように設定した軸方向燃焼度分布(ピーキングファクター)を考慮し、最大崩壊熱量(18kW)を超える発熱量として以下の値を設定した。

A: 18.5kW = × 26体
 B: 17kW =



2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

(2) 特定兼用キャスク構成部材及び燃料被覆管の温度評価方法

除熱解析は、CASTOR[®] geo26JP型の実形状を3次元でモデル化し、検証され適用性が確認された有限要素解析コードANSYS[®]を用いて実施する。

解析モデルには、以下の2通りのモデルを用いる。

1. 燃料集合体の領域を均質化した、兼用キャスクの3次元90° 対称全体モデル(以下、「キャスクモデル」という。)。均質化した燃料集合体領域は、15×15型および17×17型の両方の型式を包絡する。
2. キャスクモデルにおける燃料集合体均質化領域の物理特性を評価するための15×15型および17×17型燃料集合体の2次元モデル(以下、「燃料集合体モデル」という。)。計算された熱物性値は、15×15型および17×17型燃料集合体を包絡する。

燃料集合体モデル

CASTOR[®] geo26JP型の貯蔵状態における周囲環境としては、以下の条件を使用する。

周囲温度:	50 °C
貯蔵建屋壁面温度:	65 °C
貯蔵姿勢:	たて置き
形態係数:	0.265

主な解析の保守性については以下の通り。

- 燃料集合体は格子の中心に配置し、バスケットはキャスクキャビティの中心に配置
- キャスク内部の対流熱伝達を無視
- キャスク底部は断熱
- フィン形状を考慮した係数(フィン係数)を算出し、その値を保守的に小さく設定。
(後スライドで説明)

2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

(3) 評価結果

除熱解析の結果、燃料被覆管の最高温度は265℃であり、設計基準である 275℃を下回っていること、設計貯蔵期間で評価しても燃料棒被覆管の周方向応力が100MPaを超えないことから、燃料被覆管の健全性が損なわれることはなく、使用済燃料の健全性が維持されることを確認した。また、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の範囲であることを確認した。

	部材	計算結果 [°C]		構造強度評価等に用いる温度 [°C]	設計基準 [°C]
		除熱解析モデル A	除熱解析モデル B		
キャスク本体	胴/底部				350
	中性子遮蔽材 (棒状) (内列/外列)				135 / 130
	中性子遮蔽材 (円盤状)(底部)			120	135
	遮蔽棒 (側部中性子体部 封止材) (内列/外列)				371
	トラニオンボルト				350
	キャスク本体溝部			105	350
	一次蓋、二次蓋				425
蓋部	中性子遮蔽材 (円盤状)(蓋部)			120	135
	一次蓋ボルト、二次蓋ボルト			110	350
	金属ガスケット				125
バスケット	底板				425
	H-ビーム				425 / 350
	熱伝導及び中性子吸収材				250
	鋼製エッジセグメント、コーナーエ				425
	レメント及びバスケット側板				425
	エッジセグメント				250
使用済燃料	燃料棒被覆管			265	275

キャスクモデルにおける温度分布 (除熱解析モデルA)

キャスクモデルにおける温度分布 (除熱解析モデルB)

設置許可基準規則への適合性について / 2023-08-25 / 17

2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(除熱機能)

(4) 解析コード及び検証

ORIGEN2コードは、核燃料の崩壊熱を計算するために広く使用されている。また、ORNLでは、ORIGEN2コードの崩壊熱計算結果をANS標準崩壊熱の値と比較し、ORIGEN2コードの妥当性を検証している。

ANSYS®コードは、国際的に輸送貯蔵兼用キャスクの除熱解析に多く用いられてきた。

(ドイツにおいては、CASTOR® V/19、CASTOR® V/52、CASTOR® 440/84、CASTOR® 440/84mvk、CASTOR® KRB-MOX、CASTOR® KNK、スイスにおいては、CASTOR® V/19(CH)、CASTOR® V/52(CH)、南アフリカにおいては、CASTOR® X/28Fの許認可実績がある。)

解析コードそのものは、品質保証プロセスの一環として、ANSYS® Inc.によって広範に渡って検証され、妥当性が確認されている。

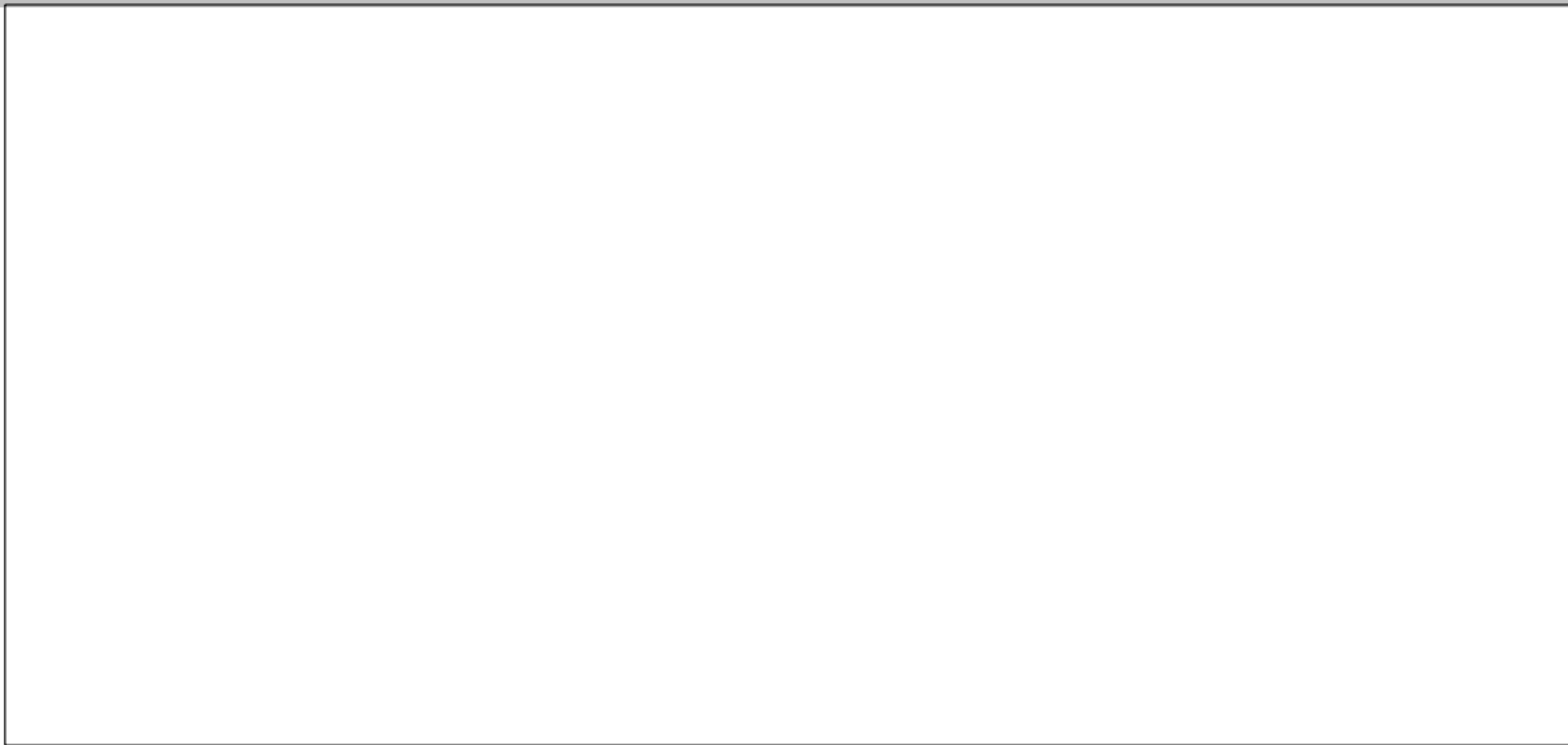
また、兼用キャスクの除熱解析のために、幾つかの例を用いて、GNSによって計算方法の妥当性を確認している。なお、この妥当性確認には、解析結果と測定結果との比較も含まれる。(以下、解析結果と測定結果の比較例。)

以上により、使用済燃料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以下であり、CASTOR® geo26JP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CASTOR® geo26JP型の除熱機能に係る設計方針は妥当である。

CASTOR® geo26JP型に用いる中性子遮蔽材の特性(1/2)

<p>ポリエチレン <input type="checkbox"/></p> <p>中性子遮蔽材 (棒状(外列))</p>	
<p>ポリエチレン <input type="checkbox"/></p> <p>中性子遮蔽材 (棒状(内列)、円 板状(蓋部、底 部))</p>	

CASTOR[®] geo26JP型に用いる中性子遮蔽材の特性(2/2)



フィン係数の設定根拠について

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(長期健全性)

設置許可基準規則第十六条の内、長期健全性に係る要求事項に対するCASTOR® geo26JP型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	先行例との比較
設置許可基準規則(注1) 第十六条第2項 第一号ハ	燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。	設計貯蔵期間は60年間とする。	設計貯蔵期間は先行例と同じ。
設置許可基準規則 第十六条第4項	一 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。 二 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。 三 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。	安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食等の経年変化に対して十分な信頼性のある材料を選定し、その必要とされる強度、性能を維持するように設計する。また、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装荷後に真空乾燥により残留水分を最小限にし、不活性ガスであるヘリウムガスとともに封入して貯蔵する設計とする。また、キャスク本体内面及び蓋部内面の必要な箇所にはめっきを施す。さらに、キャスク本体の必要な箇所には、塗装等による防錆処理を講ずる。	評価条件である環境の考え方は同様。
設置許可基準規則 解釈(注2) 別記4第十六条第 5項	第16条第2項第一号ハ及び同上第4項各号を満たすため、兼用キャスクは当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。 ・設計貯蔵期間を明確にしていること。 ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。		

(注1)「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2)「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(長期健全性)

CASTOR® geo26JP型の長期健全性に係る設計方針について具体的には以下の通り。

[設計方針]

- 設計貯蔵期間は60年間とする。
- 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のある材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持する設計とする。
- 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する設計とし、特定兼用キャスク本体の必要な箇所には、めっき及び塗装による防錆処理を施す設計とする。

[安全評価方針]

- 主要な構成部材及び使用済燃料(燃料被覆管)の設計貯蔵期間中の温度及び放射線等の環境条件下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化要因に対する影響について評価する。

[設計の妥当性(成立性見通し)]

- 経年変化要因に対して、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。

[原子炉設置(変更)許可申請時の確認事項]

- 本評価単体では特になし。(他の安全機能評価に係る確認事項の通り。)

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(長期健全性)

CASTOR® geo26JP型の経年変化要因及び評価項目は下表のとおり。

	経年変化要因	主な評価項目(注1)
(1) 腐食	ジルカロイの全面腐食,隙間腐食,応力腐食割れ,異種材料接触部の化学反応,水素吸収と酸化。	特定兼用キャスク構成部品及び使用済燃料(燃料被覆管)の腐食の外観及び腐食の程度は、材料特性と環境条件に基づいて決定される。 腐食が構造強度(構造強度構成要素)又は安全機能(安全機能構成要素)に及ぼす影響も評価する。メッキ、塗装、シールなどの対策を施す。
(2) 熱	低温または高温での材料組成および材料構造の変化、強度、延性、脆性、クリープ、及びその他の物理特性の変化、および質量の減少。	最小使用温度および最大使用温度が特定兼用キャスクの構成部品と使用済燃料(燃料被覆管)に及ぼす影響。特に低温脆性破壊と高温クリープの発生、主に構造強度や安全機能を担う構成部品を評価する。さらに、熱が物性、質量等に及ぼす影響についても評価する。
(3) 照射	ガンマ線及び中性子照射による材料組成及び材料構造並びに強度、延性、脆性及びその他の物理的特性の変化。	主に特定兼用キャスク及び使用済燃料(燃料被覆管)に対する構造強度と安全機能部品の機械的性質の変化に及ぼす照射の影響を評価するため、中性子照射量を考慮する(注2)。中性子遮蔽材に関しては、ガンマ線照射線量の影響も考慮する。

注1:安全機能(安全機能構成部品)および構造強度(構造強度構成部品および使用済燃料)に対して列挙された経年要因の影響は、文献、試験データ、および1500を超える使用済燃料キャスクCASTOR型の製造から得られた経験に基づいて決定される。

注2:金属材料では、以下の補足説明に示すように、ガンマ線の材料特性に対する照射の影響は中性子のそれよりも小さい。

中性子照射による金属材料の特性変化	中性子照射すると、金属材料の脆化に関連して材料が硬化する。中性子照射による金属の脆化は、ある一定量を超える中性子量に対してのみ考慮する必要がある。したがって、中性子による放射線損傷は、特定兼用キャスクのすべての金属部品に対して影響するわけではない。
金属材料の特性変化に及ぼすガンマ線の影響	ガンマ線は電磁波であり、励起またはイオン化によって原子と相互作用するが、一般的に、原子を格子サイトからたたき出すことができず、むしろ、主にイオン化及び励起を通じてそれらのエネルギーのほとんどを失う。したがって、ガンマ線は、原子核との弾性衝突をもたらさず、金属に対して損傷を及ぼさない。したがって、γ線照射が兼用キャスク及び使用済燃料(燃料被覆管)の金属部品の機械的特性に及ぼす影響はない。

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(長期健全性)

審査ガイド(注1)の確認内容に対するCASTOR® geo26JP型の長期健全性に係る設計方針を下表に示す。

確認内容	長期健全性に関する設計方針	先行例との比較
(1) 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、兼用キャスクの最低使用温度における低温脆性を考慮したものであること。また、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(例えば、寸法、形状、強度及び材料物性値)又は設計基準値の算定に際し考慮していること。さらに、必要に応じて防食措置等が講じられていること。	構成部材は、最低使用温度における低温脆性破壊のおそれがない材料を使用する。 構成部材の経年変化の影響については、安全機能評価における設計入力値又は設計基準値として考慮し、安全機能が維持されることを確認している。 特定兼用キャスク本体の必要な箇所には、めっき及び塗装による防錆処理を施す。	基本的な考え方は先行例と同様
(2) 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。	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、使用済燃料収納時にその内部空間を真空乾燥し、使用済燃料を不活性ガスであるヘリウムガスとともに封入し、温度を制限される範囲に収めることにより、特定兼用キャスクに収納する使用済燃料の健全性が維持される設計としている。	基本的な考え方は先行例と同様

(注1)「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(第十六条)(長期健全性)

CASTOR® geo26JP型の長期健全性に係る安全評価結果については以下の通り。

(1) 腐食による影響

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する設計とし、特定兼用キャスク本体の必要な箇所には、めっき及び塗装による防錆処理を施す設計とすることから、特定兼用キャスク及び使用済燃料の腐食の影響はない。

(2) 熱による影響

温度を制限される範囲に収めることにより、特定兼用キャスクに収納する使用済燃料の健全性が維持されるため、熱による経年変化の影響はない。

	部材	構造強度評価等に 用いる温度 ^{注1} [°C]	設計基準 ^{注2} [°C]
キャスク 本体	胴/底部	120	350
	中性子遮蔽材(棒状)(内列/外列)		135 / 130
	中性子遮蔽材(円盤状)(底部)		135
	遮蔽棒(側部中性子体部 封止材)(内列/ 外列)		371
	トラニオンボルト		350
蓋部	キャスク本体溝部	105	350
	一次蓋、二次蓋	120	425
	中性子遮蔽材(円盤状)(蓋部)		135
	一次蓋ボルト、二次蓋ボルト	110	350
金属ガスカート	125		
バスケット	底板	250	425
	H-ビーム		425 / 350 ^{注3}
	熱伝導及び中性子吸収材		250
	鋼製エッジセグメント、コーナーエレメント 及びバスケット側板		425
	エッジセグメント		250
使用済燃料	燃料棒被覆管	265	275

注1: 除熱解析で得られた温度(補足説明資料「除熱機能に関する説明資料」(1024-TR-00008)参照)

注2: 補足説明資料「燃料体等の取扱い施設及び貯蔵施設16-1」(1024-TR-00005)参照

注3: H-ビームの材料は表2に示すように、2種類あり、それぞれの制限温度を示す。

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(長期健全性)

(3) 照射による影響

遮蔽解析結果(第16条「遮蔽機能に関する説明資料」の補足説明資料(1024-TR-00007)参照)から得られる貯蔵初期の線量を保守的に設計貯蔵期間中減衰せずに一定であると仮定して算出した照射線量(下表)に対し、文献データにて、特定兼用キャスクの主要な構成部材及び使用済燃料(燃料被覆管)について、顕著な特性変化が認められる照射量ではないことを確認した。よって、照射による影響はない。

部材	中性子線量 ^{註1} [n/cm ²]	ガンマ線照射線量 [Gy]
銅		
中性子遮蔽材(棒状)(内側)の平均値		
中性子遮蔽材(棒状)(外側)の平均値		
中性子遮蔽材(円板状)(頭部)		
中性子遮蔽材(円板状)(底部)		
遮蔽棒(側部中性子遮蔽体部 封止材)		
トランニオン(ボルト含む)		
一次蓋ガasket		
二次蓋ガasket		
一次蓋の下端		
一次蓋の上端		
二次蓋の下端		
二次蓋の上端		

部材	中性子線量 [n/cm ²]	ガンマ線照射線量 [Gy]
熱伝導及び中性子吸収材		
H-ビーム		
コーナーエレメント		
バスケット側板		
エッジセグメント		
底板		
燃料棒被覆管		

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(長期健全性)

主要な構成部材に対する経年変化に対する評価(球状黒鉛鑄鉄)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
胴外面、内面 【材質】 球状黒鉛鑄鉄	腐食	構造強度： 腐食による構造強度低下	<ul style="list-style-type: none"> 胴外面については、防錆対策を考慮しない沿岸環境における鑄鉄の全面腐食を想定すると、腐食量は約4.2 mm (60年×腐食進展速度0.07 mm/年)となる。 ステンレス鋼や炭素鋼製のキャスク内面は、設計貯蔵期間中の燃料被覆管の破損を考慮する場合においても、20 g/m²程度のヨウ素ガス濃度となる燃料破損率(1%燃料破損相当)以下であれば、安定皮膜が形成され、腐食を考慮する必要はない。日本における長期乾式貯蔵後の燃料破損率はさらに保守的に0.1%が想定される。 胴内面にメッキされるニッケルは、高温の空気又は酸素雰囲気中でニッケル酸化物皮膜をつくるため、炭素鋼よりも耐食性が優れている。 	使用環境： <ul style="list-style-type: none"> ヘリウム雰囲気 中性子遮蔽材と接触 	<ul style="list-style-type: none"> 胴外面：防錆対策をしない場合、わずかに腐食するが、実際は、キャスクの胴(外面)の防錆対策により、腐食しない。(基本的な塗料として、欧米で実績のある3層構造のエポキシ樹脂及びアクリルを用いる。必要に応じて定期的な管理を行う) 胴内面、一次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー(外面)、二次蓋(内面)及び一次蓋ボルト：不活性雰囲気維持され、腐食しない。 日本における長期乾式貯蔵時の燃料破損率の保守的な想定は0.1%であり、ヨウ素ガスには、皮膜が形成されるので胴(内面)の腐食を考慮する必要はなく、構造強度への影響はない。加えて、キャスク本体胴内面は電解ニッケルメッキされており、その不動態酸化物層により、炭素鋼より、高い耐食性を示す。胴のポアホール部及び底部は、中性子遮蔽材(側部及び底部)と接触している。ポアホール部及び底部への水分及び湿気の侵入がなく、また、中性子遮蔽材の熱劣化による水の生成もないため、腐食による構造強度への影響はない。
	熱	構造強度： 熱による亀裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格(2007年版)[1]では、-30℃から350℃までの設計用強度・物性値が規定されている。 クリープによる変形を考慮すべき温度は、融点[絶対温度]の約1/3である。 破壊靱性について、金属キャスク構造規格(2007年版)に次の要件がある。 動的破壊靱性値 $K_{Id} > 50.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 	使用環境温度： -22.4℃～120℃	<ul style="list-style-type: none"> 球状黒鉛鑄鉄の設計用強度・物性値が規定されており、熱によりき裂、破損することはない温度範囲で使用するため、構造強度への影響はない。 DCIの低温脆性に関する多くの論文があり、実物大鑄鉄キャスクの-40℃での9m落下試験のビデオもある。これらに基づくJSME規格があり、これらをまとめて、別紙2に示す。 最低温度は、申請書の記載通りである。最高温度は除熱解析結果(TR-08)による。 使用済燃料貯蔵中のキャスク本体は、約120℃である。球状黒鉛鑄鉄のクリープ温度は、約190℃であり、熱によるクリープ変形は無視できる。
	照射	構造強度： 照射による機械的特性の変化	中性子照射量が 10^{16} n/cm^2 以下では未照射材の機械的特性に対して有意な差がなく、照射の影響を考慮する必要はない[2]。	中性子照射量： 10^{15} n/cm^2 以下	<ul style="list-style-type: none"> 鑄鉄は炭素鋼とともに鉄系材料で、その耐照射性が概ね同等と考えられる。乾式キャスク貯蔵では照射損傷の条件よりも低い条件で貯蔵され、鑄鉄キャスク本体の貯蔵中の照射損傷は無視できる。

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(長期健全性)

主要な構成部材に対する経年変化に対する評価(ポリエチレン)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
中性子遮蔽材 (ポリエチレン)	熱	遮蔽機能: 熱分解による質量低下	<ul style="list-style-type: none"> ポリエチレン()の非晶質化温度は、130°C及び135°Cである。 の相転移は約130°Cで始まり、約135°Cで終了し、この時点で半結晶から液体へと状態が変化する。このことから、制限温度を130°Cとした。 は半結晶性材料で、約135°Cで相転移が起こる。 熱分解は、340°Cを超える温度で起こる。 	使用環境温度: -20°C~120°C	使用温度範囲は非晶質化温度以下及び熱分解温度以下であり、水素分子の分解・損失もない。したがって、質量低下は生じず、遮蔽機能への影響はない。
	照射	遮蔽機能: 分解による質量減損	<ul style="list-style-type: none"> ガンマ線によりポリエチレンの分解や架橋が起こる。真空中や酸素を排除した状態では主に架橋が観察され、架橋により水素が放出される。架橋に起因する水素の損失率は約6.3×10^{-4}%である。 中性子線はポリエチレンの構造には影響を与えない。 	中性子照射量: 10 ¹⁵ n/cm ² 以下 ガンマ線照射量: 10 ⁴ Gy 以下	ガンマ線照射による質量低下は無視できる量であり、遮蔽機能への影響はない。 中性子線は影響を与えない。

中性子遮へい材の損失

中性子遮蔽材には2種類のポリエチレンが使用されているが、これらの材料の照射下での挙動は、製造者とGNSが調査・検討した。その結果、材料にガンマ線を照射すると、水素が分離して高分子構造内に架橋が形成されることがわかった。炭化水素やその他の分解生成物の形成は除外される。したがって、中性子遮蔽材の有意な分解は考慮する必要がない。中性子遮蔽材の水素放出率は、製造者が調査・決定した。その結果、水素放出率は1 g/(MGy・kg)未満であることが明らかになった。供用期間中の水素損失を計算する上で、保守的に1 g/(MGy・kg)を、2種類のポリエチレンに想定した。保守的な境界条件(水素放出率を伴う最大エネルギー量)を考慮すると、ガンマ線照射誘起架橋によって引き起こされる水素の損失は約231 gである(表A3- 1)。遮蔽材の全体質量2310 kgとの比較において、遮蔽材は約330 kgの水素原子量を含むので、60年の貯蔵期間中のこの損失率(約 7.0×10^{-4})は無視することができ、中性子遮蔽能力の喪失はないと言える。

材質	構成部品	密度 [g/cm ³]	質量 [kg]	水素放出率 [g]/(MGy・kg PE)	最大エネルギー線量/60年 [Gy]	Hの放出量 [g]
ポリエチレン	遮蔽材棒状-外側列	0.955	1200	1	2.99-x 10 ⁴	35.9
	遮蔽材棒状-内側列		900	1	2.17-x 10 ⁵	195.3
ポリエチレン	下端の遮蔽材円盤状	0.935	120	1	1.48-x 10 ²	0.02
	蓋間の遮蔽材円盤状		90	1	9.16-x 10 ¹	0.008
	計		2310			231.23

注: 遮蔽材の質量は代表的な推定値であり、最終的な製造上の確認ではない。

ご清聴ありがとうございました！

