

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7月10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、臨界防止機能)
3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条のうち、遮蔽機能)
4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条のうち、閉じ込め機能)

# 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」の臨界防止機能、遮蔽機能、閉じ込め機能について、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)(臨界防止機能)

設置許可基準規則第十六条のうち、臨界防止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。	中性子実効増倍率が0.95未満であるように設計する。	先行例と同様
設置許可基準規則解釈(注2) 別記4第十六条第1項	第16条第2項第1号ハに規定する「臨界に達するおそれがない」とは、第5項に規定するもののほか、使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈(平成25年11月27日原子力規制委員会決定。以下「貯蔵事業許可基準規則解釈」という。)第3条に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。		
貯蔵事業許可基準規則解釈(注3) 第3条 第一号	第3条に規定する「臨界に達するおそれがないもの」とは、以下の設計をいう。  使用済燃料貯蔵施設における金属キャスクは単体として、使用済燃料を収納した条件下で、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であること。	貯蔵施設における使用済燃料集合体の搬入から搬出までの乾燥状態及び貯蔵中、並びに使用済燃料プールにおける燃料装荷及び取り出し中の冠水状態を含む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。	先行例と同様

(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」

(注3)「使用済燃料貯蔵施設の位置、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)(臨界防止機能)

設置許可基準規則第十六条のうち、臨界防止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
第二号	金属キャスク内部のバスケット(金属キャスク内に収納される使用済燃料を所定の幾何学的配置に維持するための構造物をいう。以下同じ。)が臨界防止機能の一部を構成する場合には、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が保たれる設計であること。	バスケットは臨界防止機能の一部を構成する。バスケットには設計貯蔵期間中に温度、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信頼性のある材料を選択し、また、要求される強度及び性能を維持することにより、設計貯蔵期間を通して使用済燃料集合体の幾何学的配置を維持するために、必要な構造健全性を保つよう設計する。	先行例と同様
第三号	使用済燃料貯蔵施設は、当該施設内における金属キャスク相互の中性子干渉を考慮し、技術的に想定されるいかなる場合でも臨界を防止する対策が講じられていること。	貯蔵施設内における金属キャスク相互の中性子干渉を考慮するため、臨界防止機能の評価条件は無限配列とする。	先行例と同様
第四号	臨界評価において、以下の事項を含め、未臨界性に有意な影響を与える因子が考慮されていること。 ① 配置・形状 貯蔵エリア内の金属キャスクの配置、バスケットの形状、バスケット格子内の燃料集合体の配置等において適切な安全裕度を考慮すること。 金属キャスクが滑動する可能性がある場合には、滑動等による金属キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮されていること。 事故時にバスケット及び使用済燃料集合体の変形(損傷)する可能性がある場合には、臨界解析においてもこの変形(損傷)が適切に考慮されていること。	中性子実効増倍率が最大になるように、バスケット内の使用済燃料集合体の配置を設定する。バスケットについては、製造上の公差を考慮して寸法及び位置を中性子実効増倍率が最大となるように設定する。 本キャスクは、基礎等に固定する設計としており、滑動しない。貯蔵中の地震、津波及び竜巻発生時にバスケット及び使用済燃料集合体の変形(損傷)することはない。	先行例と同様

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(臨界防止機能)

設置許可基準規則第十六条のうち、臨界防止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
(続き) 第四号	<p>② 中性子吸収材の効果 中性子吸収材の効果に関して、以下の事項等が適切な安全裕度をもって考慮されていること。 a) 製造公差(濃度、非均質性、寸法等) b) 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少</p>	<p>中性子吸収材中のほう素量については製造工程により均質性が確保され、設計上の添加ほう素量は製造仕様の下限に設定する。なお、中性子吸収による中性子吸収材の原子個数密度の減少は無視し得る程度であり考慮しない。</p>	先行例と同様
	<p>④ 燃焼度クレジット 燃焼度クレジット(臨界評価において、使用済燃料の燃焼に伴う反応度低下を考慮することをいう。)を採用する場合には、以下の事項を含め、適切な安全裕度を有する設計であることが確認されていること。 a) 燃料集合体の燃焼度及び同位体組成並びにそれらの分布の計算精度 b) 貯蔵する燃料集合体の燃焼度等の管理</p>	<p>臨界解析では使用済燃料集合体は保守的に濃縮度上限の新燃料集合体とし(燃焼度クレジットは考慮しない)、また、貯蔵する使用済燃料集合体にはガドリニウムを可燃性毒物として添加した燃料棒が含まれている場合があるが、ガドリニウムの存在は保守的に無視する。パーナブルポイズン集合体は、本臨界解析では考慮しない。</p>	先行例と同様
第五号	<p>五 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、臨界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。</p>	申請範囲外	

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(臨界防止機能)

設置許可基準規則第十六条のうち、臨界防止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。 本キャスクを構成する部材は、設計貯蔵期間中の温度、放射線などの環境条件に対して、また、その環境条件下での腐食、クリープ、応力腐食割れなどの経年変化に対して信頼性のある材料を選定し、その必要な強度及び性能を確保することで、使用済燃料の健全性を確保する設計とする。	先行例と同様



## 2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(臨界防止機能)

CASTOR® geo26JP型の臨界防止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]

- 使用済燃料の未臨界性を維持するために、2枚のステンレス鋼板(以下「フランジ」という。)をステンレス鋼製のウェブで構成されたH形鋼状のステンレス製の構造材(以下「H-ビーム」という。)で区切られた格子構造であるバスケットの所定の位置に使用済燃料を収納することで幾何学的配置を維持し、また、H-ビームを中性子吸収材であるほう素添加アルミニウム板で挟む構造とすることにより、臨界を防止するよう設計する。
- バスケットには設計貯蔵期間中に温度、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信頼性のある材料を選択し、また、必要とされる強度及び性能を維持することにより、設計貯蔵期間を通して使用済燃料集合体の幾何学的配置を維持するために、必要な構造健全性を保つよう設計する。
- 貯蔵施設における使用済燃料集合体の搬入から搬出までの乾燥状態及び貯蔵中、並びに使用済燃料プールにおける燃料装荷及び取り出し中の冠水状態を含む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未満であるように設計する。

### [安全評価方針]

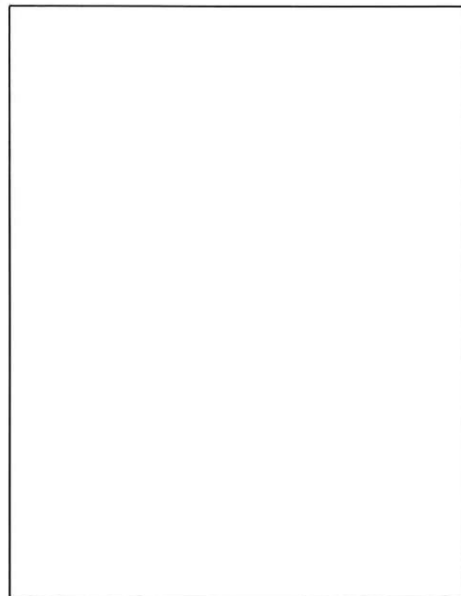
- 後述する。(審査ガイドの確認内容に対する説明)

### [設計の妥当性(成立性見通し)]

- 本設計の妥当性を確認するために臨界解析を実施し、中性子実効増倍率が乾燥状態と冠水状態の両方で、3 $\sigma$ を考慮した上で基準値0.95未満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]

- 使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっての臨界評価で考慮した因子(使用済燃料の初期濃縮度、寸法等)についての条件又は範囲を逸脱しないよう必要な措置を講じること。



バスケット構造



## 2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(臨界防止機能)

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

確認内容	臨界防止機能に関する設計方針	先行例との比較
1) 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いて、適切な安全裕度を考慮するとともに、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が維持されること。 兼用キャスクが滑動する可能性がある場合は、滑動等による兼用キャスクの配置の変化に伴う中性子実効増倍率の増加についても適切に考慮すること。	中性子実効増倍率が最大になるように、バスケット内の使用済燃料集合体の配置を設定する。バスケットについては、製造上の公差を考慮して寸法及び位置を中性子実効増倍率が最大となるように設定する。 本キャスクは、基礎等に固定する設計としており、滑動しない。	配置・形状については、先行例と同様。 滑動については先行例の縦置きと同様。
2) 中性子吸収材の効果 中性子吸収材の効果に関して、以下について適切な安全裕度を考慮すること。 a. 製造公差(濃度、非均質性、寸法等) b. 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少	中性子吸収材中のほう素量については製造工程により均質性が確保され、設計上の添加ほう素量は製造仕様の下限に設定する。なお、中性子吸収による中性子吸収材の原子個数密度の減少は無視し得る程度であり考慮しない。	先行例と同様
3) 減速材(水)の影響 使用済燃料を兼用キャスクに収納する際、当該使用済燃料が冠水することを、設計上適切に考慮すること。	乾燥状態での解析に加え、使用済燃料を収納する際の冠水状態を考慮した解析を行う(中性子実効増倍率が最大となる水密度 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ を用いる)。また、冠水状態については、部分的な浸水状態も考慮する。	先行例と同様
4) 検証され適用性が確認された臨界解析コード及びデータライブラリを使用すること。	解析コードとしてSCALEコードシステムを用い、臨界解析コードとしてKENO-VIを用い、その断面積ライブラリとしてENDF/B-VII.1の252群ライブラリ(v7. 1-252n)を用いる。	先行例と同様
5) 設計上、バスケットの塑性変形が想定される場合は、塑性変形したバスケットの形状及び使用済燃料の状態を考慮しても未臨界が維持されること。	貯蔵中の地震、津波及び竜巻発生時にバスケット及び使用済燃料集合体の変形(損傷)することはない。	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)(臨界防止機能)

CASTOR® geo26JP型の臨界防止機能に係る安全評価方針について具体的には以下の通り。

[解析コード及びモデル化]

- 臨界解析では、CASTOR® geo26JP型と使用済燃料集合体の実形状を三次元でモデル化する。解析コードとしてSCALEコードシステムを用い、臨界解析コードとしてKENO-VIを用い、その断面積ライブラリとして

臨界解析モデル(燃料領域横断面図)

臨界解析モデル(横断面図)

臨界解析モデル(縦断面図)

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(臨界防止機能)

### [臨界解析条件]

乾燥状態での解析に加え、使用済燃料を収納する際の冠水状態を考慮した解析を行う。(冠水状態については部分的な浸水状態も考慮する。)

臨界解析では、収納物について以下の条件を設定する。

- ほう酸水は保守的に純水とする。
- ガドリニウム等の可燃性毒物は保守的に無視し、全てウラン燃料とする。
- バーナブルポイズン集合体は保守的に無視する。
- 使用済燃料集合体は保守的に濃縮度上限の新燃料とする(燃焼度クレジットは採用しない)。
- 冠水時は、水密度  $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$  による保守的に最適減速を仮定する。
- 冠水時は、燃料棒は保守的に全て浸水していると仮定する。
- 燃料組成に同位体  $^{234}\text{U}$  及び  $^{236}\text{U}$  は保守的に  $^{238}\text{U}$  に置き換える ( $^{234}\text{U}$  及び  $^{236}\text{U}$  は中性子吸収断面積が大きい。 $^{238}\text{U}$  も中性子を吸収するが  $^{239}\text{Pu}$  となって反応度の増加に寄与するため。)
- 密度、材料組成及び幾何学的形状に関する公差範囲内における最も保守的な組合せとする。
- 熱伝導及び中性子吸収材へのほう素添加量は保証可能な最低値を設定する。

臨界解析用の境界条件は、全ての取扱い工程における中性子実効増倍率を包絡するものとして、冠水条件での中性子実効増倍率の感度解析の結果を踏まえて設定する。乾燥状態では、水の代わりに真空でモデル化することにより、同じ幾何形状のモデルを用いる。(冠水状態と同様の感度解析は実施しない。)

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(臨界防止機能)

臨界解析条件(収納物条件)

臨界解析における燃料集合体の仕様

項目		収納物仕様		解析条件		項目	単位	15x15 燃料	17x17 燃料		
貯蔵時の仕様	燃料集合体 1体当たり	種類	15x15	17x17	15x15	17x17	種類	-	-	A型	B型
		初期濃縮度 (wt%)	≤ 4.1	≤ 4.2			燃料材質	-	二酸化ウラン		
		ウラン質量 (kg)					被覆管材質	-			
		最高燃焼度 (GWd/t)	≤ 47	≤ 48			燃料密度	% 理論密度			
		冷却期間 (年)	≥ 12				ペレット直径	mm			
	バーナブル ポイズン集 合体 1体当たり	最高燃焼度 (GWd/t)					燃料棒直径	mm			
		冷却期間 (年)					被覆管厚さ	mm			
	キャスク 1基当たり	平均燃焼度 (GWd/t)					燃料有効長	mm			
							制御棒案内管の 内径	mm			
							制御棒案内管の 外径	mm			
						燃料棒配列	-				
						燃料集合体当た りの燃料棒数	本				
						燃料棒ピッチ	mm				
						初期濃縮度	wt%				

(注)17×17燃料B型はペレット径が小さく被覆管厚さが大きい。そのためB型の反応度は、燃料棒格子内の水による中性子減速がより大きいA型に比べ低くなる。臨界解析では、反応度が高いA型を用いる。



## 2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(臨界防止機能)

臨界解析条件

項目	目次	
臨界解析の方法	モンテカルロ臨界解析コードを用い、CASTOR® geo26JP型中性子突効増倍率を決定する。	
解析コード	SCALEコードシステム(6.2.2) 共鳴計算: XSPROC (BONAMI, CENTRM, PCM) 臨界解析: 臨界解析コードKENO-VI (統計誤差 $\sigma \leq 50$ pcm) <div style="border: 1px solid black; width: 200px; height: 20px; margin: 5px 0;"></div> (解析条件を決めるための) 感度解析: TSUNAMIプログラム	
解析条件	燃料の種類	15x15 及び 17x17
	濃縮度	15 × 15燃料:4.1wt%、17 × 17燃料:4.2wt%
	収納体数	26
	燃料配置	モデル図(Page.10)参照
	寸法条件	水ギャップ <sup>(注1)</sup> 、ステンレス鋼板、並びに熱伝導及び中性子吸収材は最小厚さとする。
	熱伝導及び中性子吸収材の配置	熱伝導及び中性子吸収材と燃料間は最大距離とする。
	キャスク内部雰囲気	乾燥状態:真空 冠水状態:水 ( $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ )
	キャスク外部雰囲気	真空
	キャスク境界条件	無限配列(完全反射)
	燃料集合体構造物	乾燥状態:真空(ポイド) 冠水状態:水 ( $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ )
	ほう素含有量	熱伝導及び中性子吸収材へのほう素添加量は、最低保証値で設定し、解析に使用する。 <sup>10</sup> B 最低保証値: 面密度 <input type="checkbox"/> mg/cm <sup>2</sup>
	バーナブルポイズン集合体	バーナブルポイズン集合体は考慮しない
中性子遮へい材	キャスク本体の中性子遮蔽材(ポリエチレン)をキャスク本体材質(球状黒鉛鑄鉄)に置き換え。 蓋部及び底部の中性子遮蔽材は考慮しない。	
蓋部	一次及び二次蓋を考慮する。貯蔵施設への搬入及び貯蔵施設からの搬出時に用いる三次蓋については考慮しない。	

(注1) 燃料が収納されるバスケットの格子は、H-ビームによって距離が確保され、冠水状態において水で満たされる空間(以下「水ギャップ」という)を構築する。

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(臨界防止機能)

臨界解析における寸法条件

項目	寸法条件	設定根拠
バスケット格子内のり寸法	最大 □	公差を考慮した設計上の最大寸法 感度解析結果に基づき設定
水ギャップ厚さ	最小 □	公差を考慮した設計上の最小寸法 感度解析結果に基づき設定
ステンレス鋼板(H-ビームフランジ)の厚さ	最小 □	公差を考慮した設計上の最小寸法 感度解析結果に基づき設定
熱伝導及び中性子吸収材の厚さ	最小 □	感度解析結果に基づき設定
バスケット側板の厚さ	公称 □	感度解析結果に基づき設定
水ギャップ中のH-ビームのウェブ厚さ	最大 □	水ギャップの効果が最小となるように設定
燃料ペレット径	公称	感度解析結果に基づき設定
燃料有効長	公称	感度解析結果に基づき設定
被覆管外径	最小	感度解析結果に基づき設定
被覆管厚さ	最小	感度解析結果に基づき設定
制御棒案内管の内径	最大	被覆管外径及び厚さより判断
制御棒案内管の外径	最小	
燃料集合体の軸方向変位	公称(バスケット内での軸方向の中心)	感度解析結果に基づき設定
燃料集合体の径方向変位	公称(バスケット位置内の半径方向の中心)	感度解析結果に基づき設定
コーナー要素の厚さ	□	感度解析結果に基づき設定
水ギャップ中のバスケットクロス <sup>(注1)</sup>	解析モデルに考慮	水ギャップ中の水の減少を考慮 感度解析結果に基づき設定
キャスクキャビティの鉛直方向の部分浸水	冠水条件	感度解析結果に基づき設定
キャスク本体中の中性子遮蔽材(ポリエチレン)	球状黒鉛鋳鉄に置き換え	感度解析結果に基づき設定
キャスク底部及び蓋部の中性子遮蔽材	キャスク底部は球状黒鉛鋳鉄、蓋部はステンレス鋼に置き換え	感度解析結果に基づき設定

<sup>(注1)</sup> 垂直に配向したH-ビームの交差領域(つまり隣接する格子の角と角の間の領域)の構造を「バスケットクロス」と呼ぶ。

## 2. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(臨界防止機能)

### 臨界防止機能の安全評価に係る解析コード及び検証

CASTOR® geo26JP型の臨界解析には、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コードシステムのうち、SCALE 6.2コードの3次元モンテカルロプログラムKENO-VIを使用した。

また、中性子増倍率の計算には「」に基づく252群中性子断面積を用いて計算した。

SCALEコードシステムの検証では、ベンチマーク用臨界実験と解析結果との比較している。

ベンチマーク用臨界実験にはInternational Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments (ICSBEP) から引用し、SCALEコードパッケージに含まれるTSUNAMI感度・不確かさ解析ツール(TSUNAMI-3Dシーケンス、TSUNAMI-IPモジュール)を用いて、臨界実験と臨界解析モデルとの相関係数の比較をおこなった。

### 臨界防止機能に係る評価結果のまとめ

評価項目	計算結果		評価基準※	評価結果
	15×15燃料	17×17燃料		
中性子実効増倍率	冠水状態 0.92421 (3σ: 0.00059)	0.92956 (3σ: 0.00057)	≤ 0.95	未臨界を維持
	乾燥状態 0.38829 (3σ: 0.00032)	0.39403 (3σ: 0.00035)		未臨界を維持

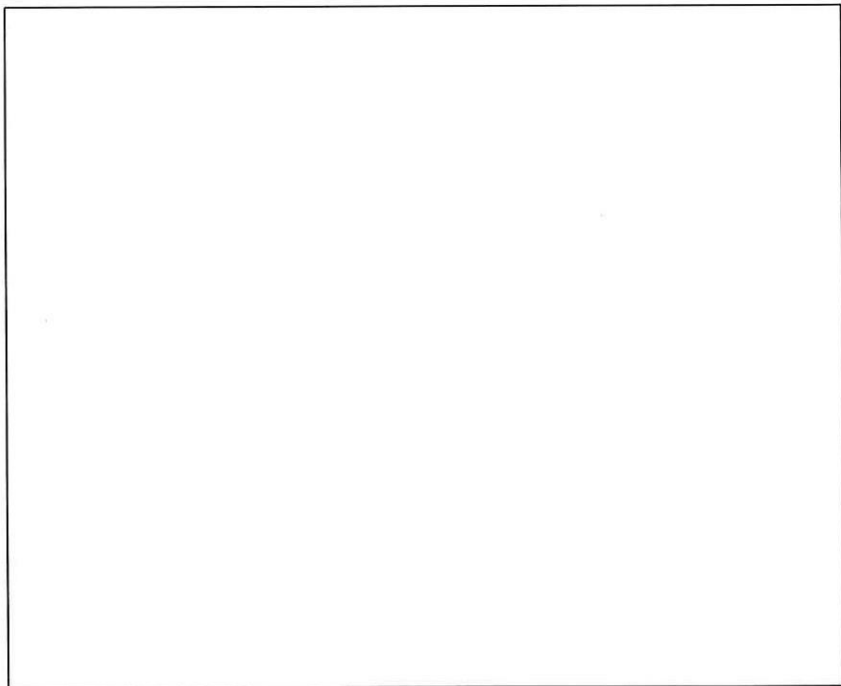
※SCALEコードシステムは、統計誤差に関連するモンテカルロ法を使用するので、評価結果は、統計誤差σの3倍を考慮する。

臨界解析の結果、中性子実効増倍率が乾燥状態と冠水状態の両方で3σを考慮した上で基準値0.95未満であり、本設計の妥当性を確認した。以上の結果から、CASTOR® geo26JP型は、第十六条:燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設」の臨界防止についての規則に十分保守的に適合する。

## バスケット構造について(1024-TR-00005参照)

バスケット底板付近の詳細図を右図(右上)に、H-ビーム/熱伝導及び中性子吸収材部分の詳細図を右図(右下)に示す(バスケット底板にH-ビームを3段積み上げた状態を側面から見た図)。

注水時には、バスケット底板部分の穴及びH-ビーム/熱伝導及び中性子吸収材部分の穴を経由して、すべての水ギャップに水が満たされる設計としている。





## 感度解析(臨界解析における条件設定根拠について)

臨界解析モデルに用いた臨界解析条件については関連するパラメータによる感度解析を実施し、その結果を利用して設定した。臨界安全性解析のための臨界解析モデルを開発するための感度解析は、初期値パラメータから反復計算プロセスにより、物理的特性による比較可能な解析または期待値が求められ、公称値、最大値や最小値等の代表値に対応する。感度解析の主な目的は、評価されたパラメータによる傾向を特定することであり、得られた傾向は、実データを考慮した臨界解析モデルに利用される。したがって、感度解析のパラメータと臨界解析モデルのパラメータとの間の偏差は、感度解析の性質を反映している。

感度解析の正確さは、結果として得られる臨界解析モデルに適用される感度解析によってコントロールできるが、感度解析の結果として得られるパラメータの変化は臨界安全性の観点からは重要ではなく、観察される傾向が物理的特性と合致するため、得られた臨界解析モデルに基づく感度解析は必要ない。

感度解析の結果は次のように要約できる。

- 燃料ペレット径、燃料有効長、燃料集合体の軸方向変位、バスケット側板の厚さ、コーナーエレメントの厚さ、外側の境界条件、及びH-ビームウェブ下部の微小の真空部のパラメータは、体系の反応度に対して大きな影響はない。
- 被覆管外径の変化は、燃料集合体が減速不足にならないように設計されていることを確認する。
- 燃料集合体の径方向変位とバスケット格子内のり寸法の変化は、ホウ素添加熱伝導及び中性子吸収材と燃料棒の間の距離が小さくなると反応度が低下することを示している。
- 水ギャップの厚さ、ステンレス鋼プレート(H-ビーム)の厚さ、熱伝導及び中性子吸収材の厚さのパラメータ、およびバスケットクロスは、隣接する燃料集合体の中性子の影響がないようにしており、臨界解析モデルで対応を考慮する必要がある。
- 鉛直方向の部分冠水評価は、完全に冠水したキャスク条件を臨界解析モデルに適用する必要があることを示している。
- キャスク胴内の中性子吸収材の評価により、臨界解析モデルにおける中性子吸収材の黒鉛鋳鉄への置き換えが正当化される。
- 感度解析の結果(傾向)は、物理的特性の観点からよく理解でき、臨界安全性解析のモデル開発をサポートしている。

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

設置許可基準規則第十六条の内、遮蔽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 第一号	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。	使用済燃料集合体からの放射線を特定兼用キャスクの本体及び蓋部のガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により遮蔽する設計とし、設計貯蔵期間における中性子遮蔽材の熱による遮蔽能力への影響はなく、特定兼用キャスク表面の最大線量当量率を2mSv/h以下とし、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を100μSv/h以下とする設計とする。	基本的考え方については先行例と同様。 先行例と異なり、中性子遮蔽材の熱による遮蔽能力への影響はない設計となっている。
設置許可基準規則解釈(注2) 別記4第十六条第2項	第16条第4項第1号に規定する「適切な遮蔽能力を有する」とは、第5項に規定するもののほか、以下をいう。 ・貯蔵事業許可基準規則解釈第4条第1項第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。		
貯蔵事業許可基準規則解釈(注3) 第4条第1項第3号	使用済燃料を金属キャスクに収納するに当たっては、遮蔽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当該使用済燃料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。	型式証明申請の範囲外とする。	

(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」

(注3)「使用済燃料貯蔵施設の位置、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)(遮蔽機能)

設置許可基準規則第十六条の内、遮蔽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第十六条 第2項(続き)	兼用キャスク表面の線量当量率が1時間当たり2ミリシーベルト以下であり、かつ、兼用キャスク表面から1メートル離れた位置における線量当量率が1時間当たり100マイクロシーベルト以下であること。	特定兼用キャスク表面の最大線量当量率を2mSv/h以下とし、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を100 $\mu$ Sv/h以下とする設計とする。	先行例と同様
	貯蔵建屋(工場等内において兼用キャスクを収納する建物をいう。以下この条において同じ。)を設置する場合には、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ときにおいても、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。なお、当該貯蔵建屋が損傷したときからその遮蔽機能の応急の復旧が完了するまでの間は、第29条に規定する「通常運転時」には当たらない。	型式証明申請の範囲外とする。	
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。	設計貯蔵期間は60年間とする。	先行例と同様
	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。	構成部材は、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および構造とする。	先行例と同様 なお、構成部材は異なる。(例:中性子遮蔽材)

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

CASTOR® geo26JP型の遮蔽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]

- 使用済燃料集合体からの放射線を特定兼用キャスクの本体及び蓋部のガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により遮蔽する設計とする。
- 設計貯蔵期間における中性子遮蔽材の熱による遮蔽能力への影響はなく、特定兼用キャスク表面の最大線量当量率を2mSv/h以下とし、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を100 $\mu$ Sv/h以下とする設計とする。

#### [安全評価方針]

- 後述する。(審査ガイドの確認内容に対する説明)

#### [設計の妥当性(成立性見通し)]

- 本設計の妥当性を確認するために遮蔽解析を実施し、特定兼用キャスク表面の最大線量当量率が2mSv/h以下、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が100 $\mu$ Sv/h以下となることを確認した。

#### [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遮蔽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。
- 当該貯蔵施設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が周辺監視区域外における線量限度を超えないこと。



### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

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

確認内容	遮蔽機能に関する設計方針	先行例との比較
以下を踏まえ遮蔽設計が妥当であること。		
1) 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、冷却期間等を条件とし、核種の生成及び崩壊を計算して求めること。	使用済燃料の放射線源強度は、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等から燃焼計算コードORIGEN-2.2 (ライブラリ:PWR U50)を使用して求める。	先行例と同様
2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価		
a. 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、及び1)で求めた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(以下「遮蔽解析コード等」と総称する。)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。	CASTOR® geo26JP型における遮蔽機能の評価では、遮蔽解析はMCNP6コードと適切な断面積ライブラリ [ ] を用い、キャスク形状を詳細にモデル化して実施する。 なお、設計貯蔵期間中の遮蔽材の劣化による遮蔽機能の低下はない。	遮蔽解析コードにはMCNP6コードを使用。 中性子遮蔽材は、設計貯蔵期間中に熱影響による中性子遮蔽能力の低下(例:質量減損)はない。
b. 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。	CASTOR® geo26JP型は、特定兼用キャスク表面の最大線量当量率を2mSv/h以下とし、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を100 μ Sv/h以下とする設計とする。	先行例と同様
3) 敷地境界における実効線量評価(以下略)	型式証明申請の範囲外とする。	
4) 応急復旧(以下略)	型式証明申請の範囲外とする。	

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

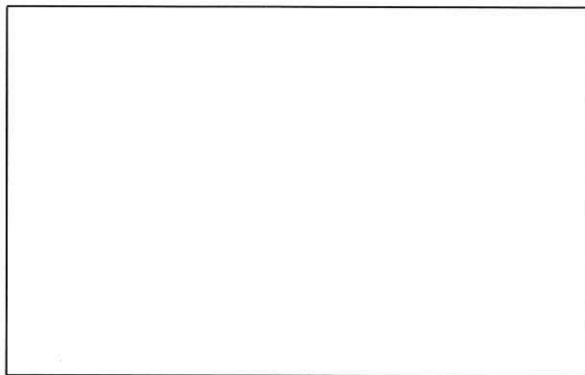
#### [安全評価方針] (1) 使用済燃料の放射線源強度評価

使用済燃料の放射線源強度は、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間から燃焼計算コードORIGEN-2.2 (ライブラリ:PWR U50)を使用して求める。ここで、燃料集合体の軸方向燃焼度分布を考慮する。(燃料仕様別に求める)

また、燃料集合体の端部構造物(上部ノズル、下部ノズル、プレナムスプリング)及びバーナブルポイズン集合体の放射化に伴うガンマ線を放射化計算により求める。(核種はCo-60で代表させる。)

項目	単位	15x15 燃料	17x17 燃料	燃焼計算モデル
種類	-	-	A B	-
燃料材質	-	二酸化ウラン		
燃料集合体当たりの燃料棒数	-	204	264	264
最高燃焼度	MWd/t	48,000	48,000	48,000
濃縮度	wt-%	<4.1	<4.2	4.2
冷却期間	-	収納位置条件に示す通り		
軸方向燃焼度分布	-	軸方向燃焼度分布に示す通り		
Co-59含有量	ppm			

放射線源強度評価条件



燃料集合体の軸方向燃焼度分布

ガンマ線源:ORIGEN コードの計算から得られる使用済燃料のソースタームは幅広いスペクトルを有している。大部分は低エネルギー範囲であり、本キャスクのようにガンマ線遮蔽体が厚い場合は外部の線量当量率に寄与せず、また、高エネルギー側は線源強度が小さいため線量当量率への寄与は小さいため、低エネルギー側及び高エネルギー側を除外した7つのエネルギー群とする。

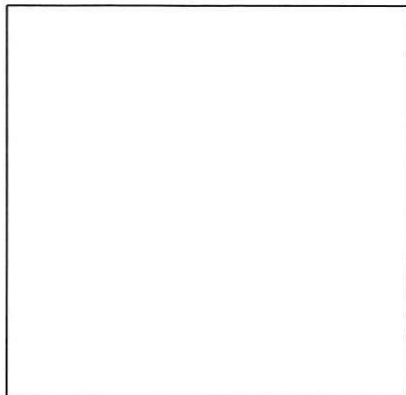
中性子線源:自発核分裂の中性子及び( $\alpha, n$ )反応の中性子に対し、それぞれ連続スペクトルを与える。

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

放射線源は以下の理由により17x17燃料集合体で代表させる。

- 燃料集合体の形状の違いによる自己遮蔽、相互遮蔽の影響を評価するため、両方の燃料集合体タイプに数値的に同一の放射線源の条件で遮蔽解析結果を比較した結果、15×15タイプのほうが、自己遮蔽効果を含む遮蔽効果がより高いことを示しており、17×17タイプのほうがより保守的であるため。

CASTOR® geo26JP型では、型式証明申請書に記載の通り、配置(i)及び(ii)を設定するとともに、その燃料配置について、仕様別に5つのグループ分けて行っており(下図参照)、遮蔽計算はグループ別に独立して実施する。



	配置(i) (熱的に均一)		配置(ii) (熱的に不均一)	
	17×17燃料		17×17燃料	
	15×15燃料		15×15燃料	
	燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)	燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)
A	48,000	13	48,000	13
B	44,000	22	48,000	24
C	44,000	28	48,000	29
D	44,000	12	48,000	24
E	44,000	16	48,000	29

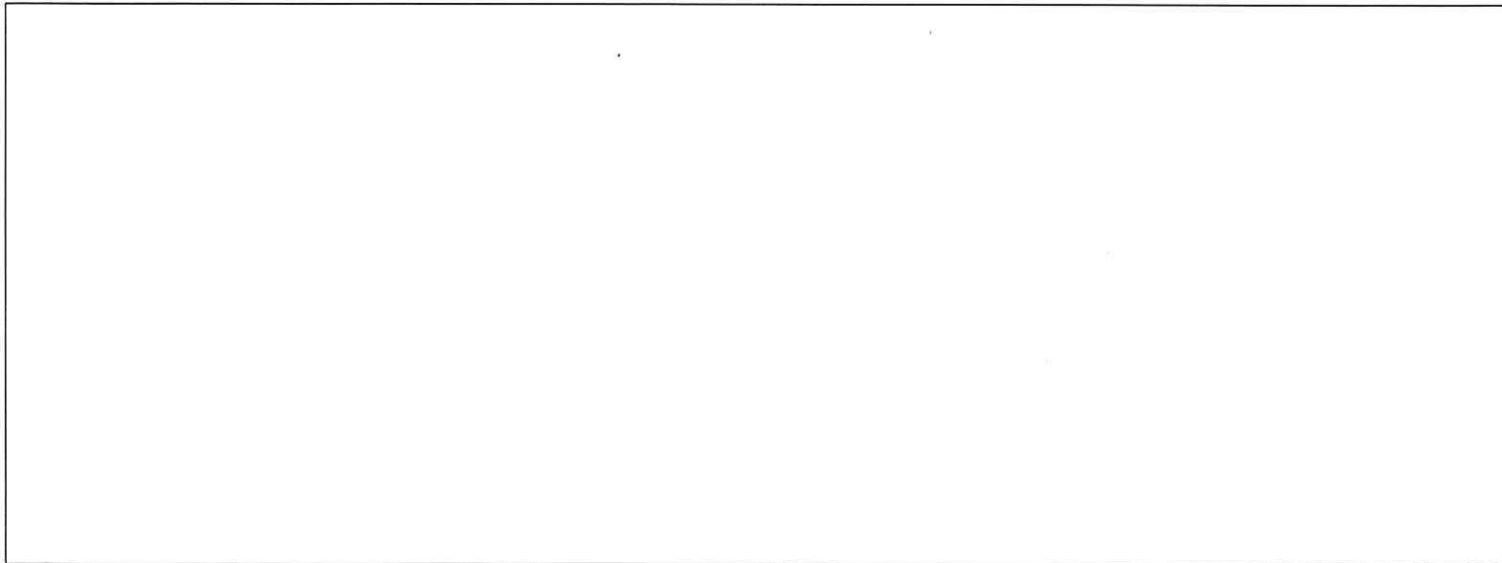
赤枠内の格子には、バーナブルポイズン集合体を挿入した燃料集合体を収納できる。

使用済燃料集合体及びバーナブルポイズン集合体の収納位置条件

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

---

放射線源強度算出結果



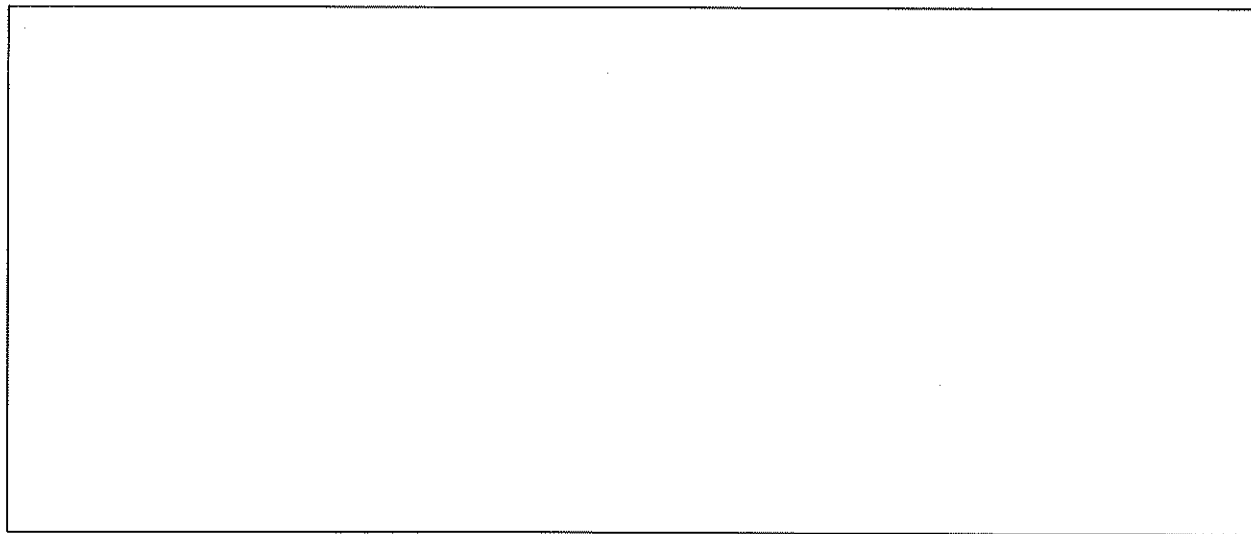


### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

#### (2) 兼用キャスクの遮蔽機能評価 ①CASTOR® geo26JP型の遮蔽解析モデル

- 遮蔽解析はMCNP6コードと適切な断面積ライブラリ[ ]を用いて実施する。
- 分散低減法として、ジオメトリ分割法とロシアンルーレットを組み合わせて用いる。
- 中性子及びガンマ線の線量当量率は、3次元空間におけるキャスクを囲むメッシュごとの仮想的な検出器(タリー)によって与えられる。メッシュセルの統計的不確実性が2%未満となるように計算時間を調整する。メッシュタリーにより最大値を示す場所に体積検出器を設定し、10個の統計指標により、計算結果の統計的信頼性を確認する。
- 遮蔽解析モデルでは、キャスク構成要素の大部分を詳細にモデル化する。ただし、ねじ継手やその他の取り付け部品などは保守的に省略しており、取り付け部品は空気に置き換える。
- 燃料の自己遮蔽効果と中性子増倍効果を正しく表すために、燃料は燃料棒ごとにモデル化する。貯蔵する使用済燃料には、ガドリニウムを可燃性毒物として添加した燃料棒が含まれている可能性があるが、遮蔽解析ではガドリニウムを保守的に無視する。
- 中性子増倍効果の影響を最大限考慮するために、中性子実効増倍率の算出には燃焼度[ ]GWd/tに対応する燃料の核種成分を用いる。その際は軸方向燃焼度分布を考慮する。
- 設計上の公差は遮蔽能力が最小化されるように考慮する。材料密度には製造時の最低保証密度を用いる。
- キャスクの底部の直径が小さくなっており、遮蔽機能が他の部分と比較して低い特徴があるため、燃料要素の軸方向位置を保守的に底部側に置く。
- 中性子遮蔽棒はキャスク胴の中心に配置されるのではなく、中心より内側にずらして配置する。
- 遮蔽解析モデル上は貯蔵架台と固定装置を無視する。また、散乱の影響を考慮するために、キャスクの周辺雰囲気は空気とする。
- 自然現象(地震、津波、竜巻)によるバスケットの塑性変形は発生していないことから、遮蔽評価では変形は考慮しない。
- 設計貯蔵期間中の遮蔽材料の劣化による遮蔽能力の低下はない。
- 遮蔽評価基準については、特定兼用キャスク表面の任意の点における線量当量率を2mSv/h以下、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。

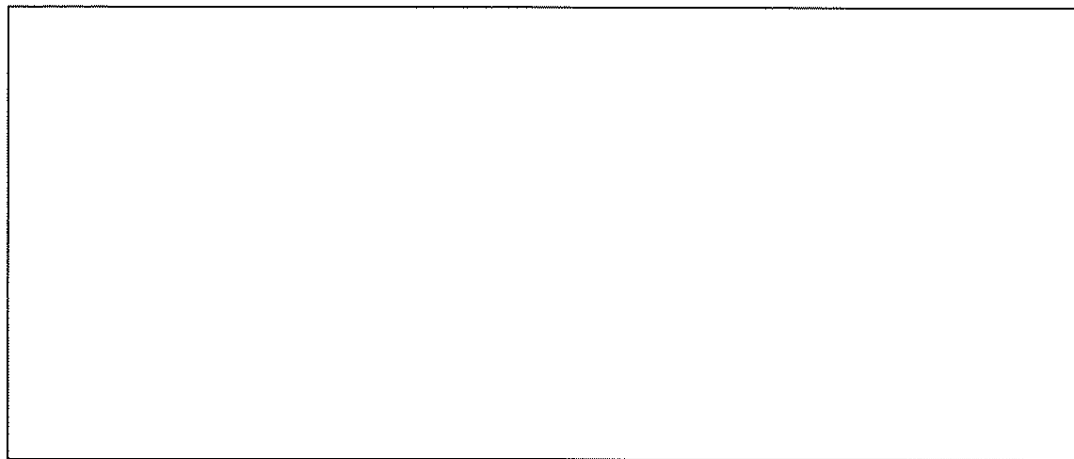
### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)



遮蔽モデルにおける円筒形メッシュ

キャスク遮蔽解析モデルの縦断面図

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)



キャスク下部の縦断面図

キャスク遮蔽解析モデルの横断面(1/4カット)

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

遮蔽解析条件

項目	単位	15x15 燃料		17x17 燃料		遮蔽解析モデル
				A	B	
種類	-	-	-	A	B	-
燃料材質	-	二酸化ウラン				
燃料密度	g/cm <sup>3</sup>					
ペレット直径	mm					
燃料棒外径	mm					
燃料有効長 <sup>(注1)</sup>	mm					
燃料集合体当たりの燃料棒数	-					
軸方向燃焼度分布	-					
燃料棒ピッチ	mm					
最高燃焼度	MWd/t					

(注1) 「燃料有効長」とは、燃料ペレットの領域長さ又は燃焼領域の長さ、を意味する。

(注2) 最高燃焼度 48,000 MWd/t は、線源決定に使われ、 MWd/t は、最大の中性子実効増倍数となる核種組成決定に使われる。

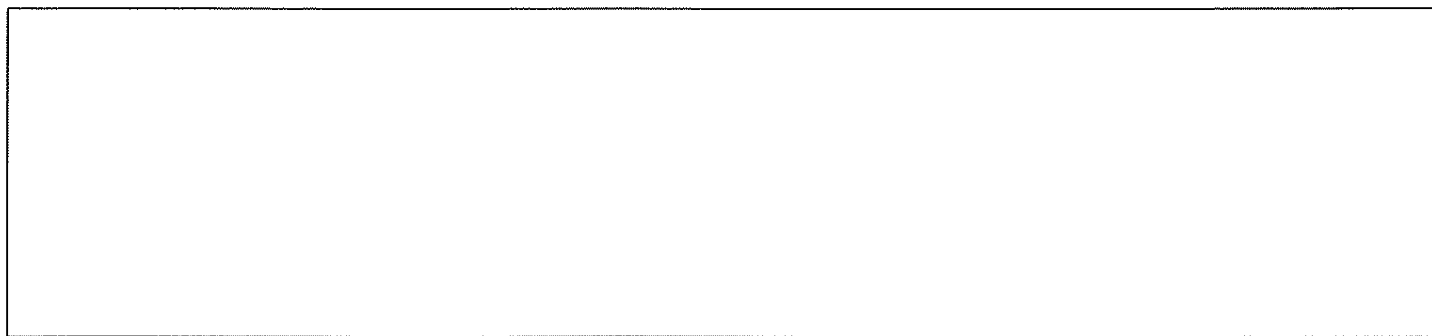
解析モデルに用いた材料密度

部品	材料	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	遮蔽解析用密度 [g/cm <sup>3</sup> ]
キャスク本体	球状黒鉛錆鉄	7.20	<input type="text"/>
燃料	酸化ウラン	10.62	
蓋、トラニオン	ステンレス鋼	7.78	
中性子遮へい材	ポリエチレン	0.94 / 0.96	
エッジセグメント	ステンレス鋼	2.70	
燃料被覆管	ジルカロイ	6.52	
床	コンクリート	2.30	
H-ビームのフランジ	ステンレス鋼	8.00	
遮蔽棒	鋼	7.83	
コーナーエレメント	ステンレス鋼	7.92	
バスケット側板	ステンレス鋼	7.82	
熱伝導及び中性子吸収材	アルミニウム合金	2.58以上	

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

[設計の妥当性(成立性見通し)]

遮蔽機能に係る評価結果(網羅的な評価結果)



燃料有効部からのガンマ線

中性子線

燃料集合体構造物の放射化ガンマ線

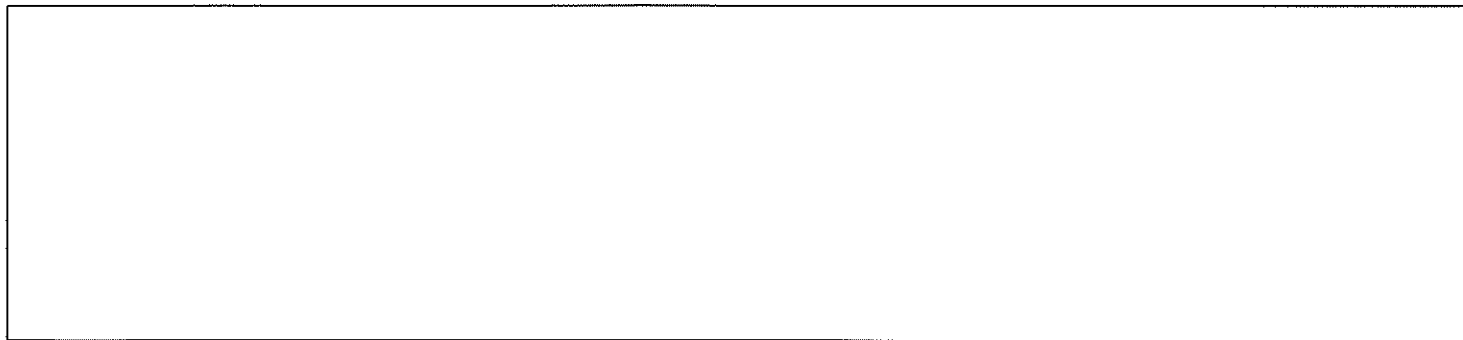
合計

配置(i)でのキャスク表面線量当量率 (mSv/h)

- 配置パターン(i)の場合、最大値は、ガンマ線最大の位置で観察される。
- 配置パターン(i)の場合、総線量率の最大値は、ガンマ線の最大値に近い。



### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)



燃料有効部からのガンマ線(左上)

中性子線

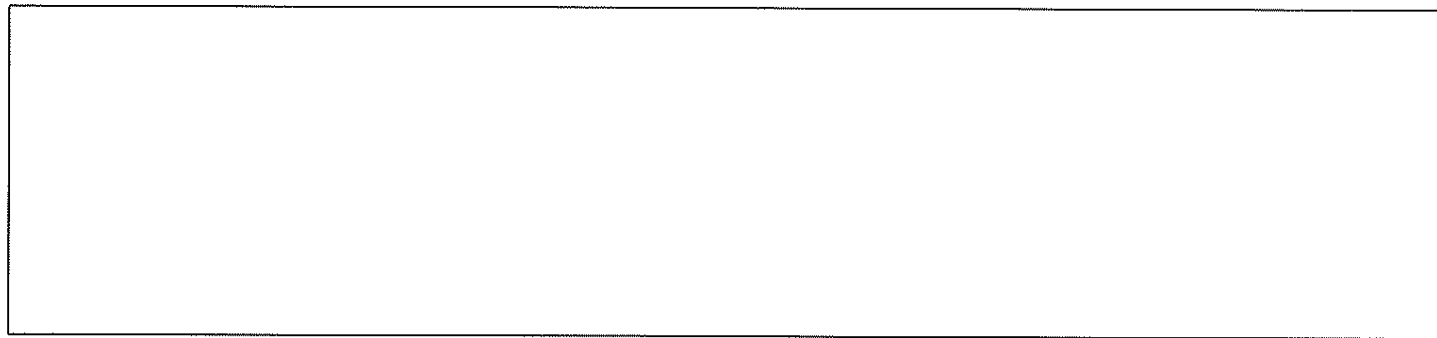
燃料集合体構造物の放射化ガンマ線

合計

配置(ii)でのキャスク表面線量当量率 (mSv/h)

- 配置パターン(ii)の場合、最大値は、中性子最大の位置で観察される。
- 配置パターン(ii)の場合、総線量率の最大値は、中性子の最大値に近い。

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)



燃料有効部からのガンマ線

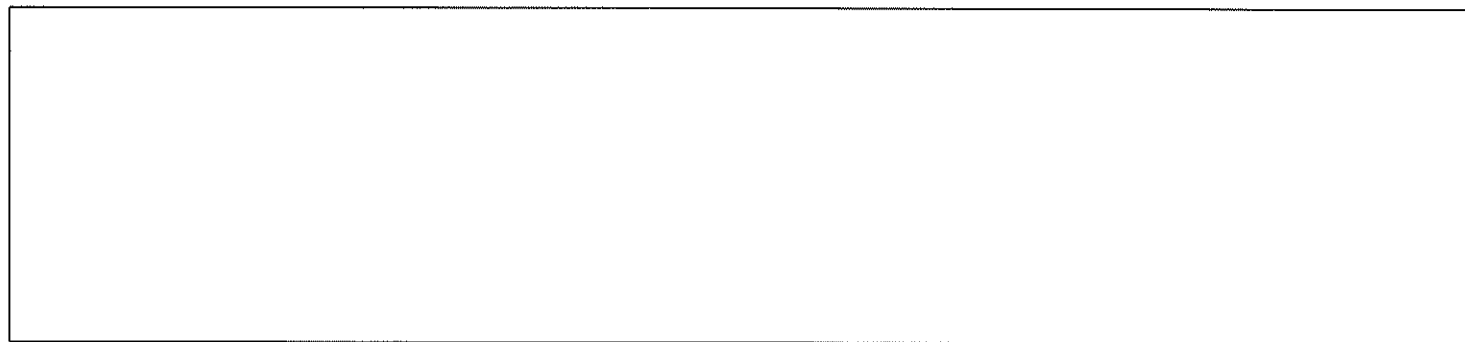
中性子線

燃料集合体構造物の放射化ガンマ線

合計

配置(i)でのキャスク表面から1mの位置における線量当量率 (mSv/h)

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)



燃料有効部からのガンマ線

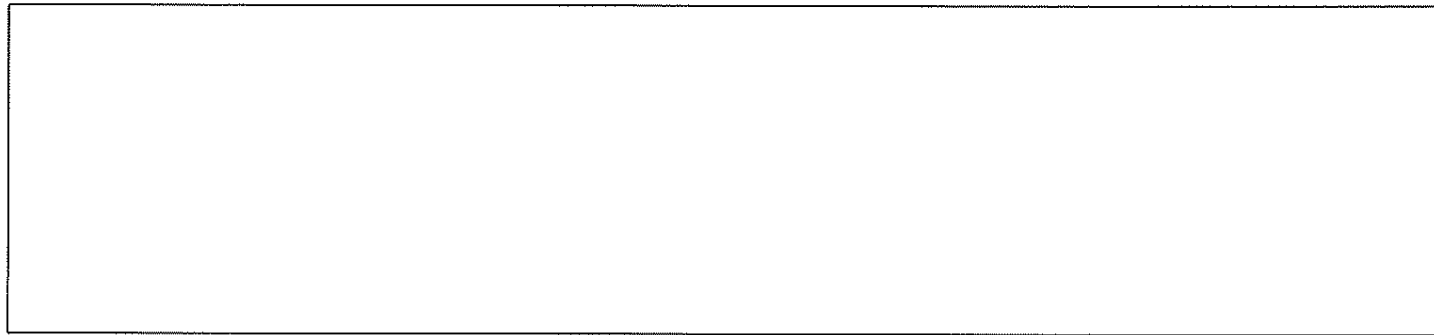
中性子線

燃料集合体構造物の放射化ガンマ線

合計

配置(ii)でのキャスク表面から1mの位置における線量当量率 (mSv/h)

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)



配置(i)のキャスク蓋表面における  
線量当量率 (mSv/h)

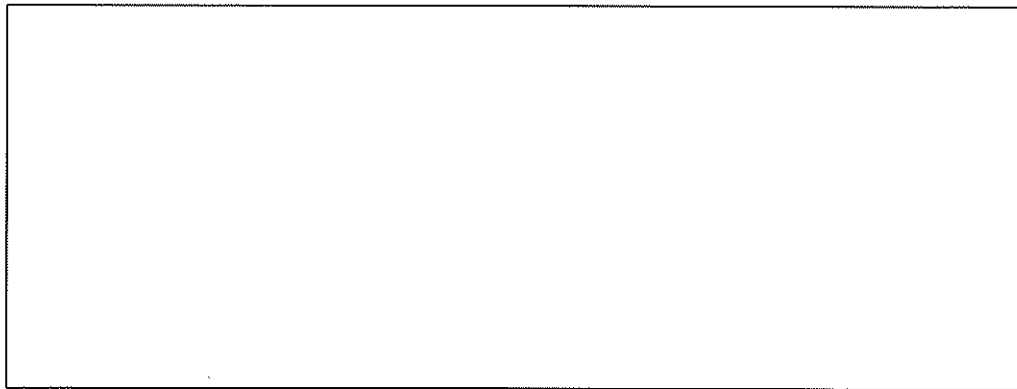
配置(ii)のキャスク蓋表面における  
線量当量率 (mSv/h)

配置(i)のキャスク蓋表面から1mの位置に  
おける線量当量率 (mSv/h)

配置(ii)のキャスク蓋表面から1mの位置に  
おける線量当量率 (mSv/h)

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

参考:統計的不確実性評価結果例



配置(i)におけるキャスク表面(左)およびキャスクから1 m(右)における相対的な不確実性分布



### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

遮蔽機能に係る解析結果(最大線量当量率)のまとめ(1/2)

17x17燃料による配置(i)の最大線量当量率

17x17燃料 の配置(i)	位置		最大線量当量率 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]※1			
	高さ [cm]	角度 [°]	中性子	ガンマ線	放射化 ガンマ線	合計
表面	79	214	86 (1.4%)	232 (1.2%)	13 (1.7%)	331 (0.9%)
1 m の位置	97	39	40 (1%)	43 (1.1%)	2 (1.7%)	85 (0.9%)

比較のために示す15x15燃料による配置(i)の最大線量当量率

15x15燃料 の配置(i)	位置		最大線量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )※1			
	高さ [cm]	角度 [°]	中性子	ガンマ線	放射化 ガンマ線	合計
表面	79	325	81 (1.4)	226 (1.2%)	14 (1.8%)	320 (0.9%)
at 1m	191	335	39 (0.9%)	42 (0.4%)	< 1 (3.1%)	82 (0.5%)

17x17燃料による配置(ii)の最大線量当量率

17x17燃料 の配置(ii)	位置		最大線量当量率 [ $\mu\text{Sv/h}$ ]※1			
	高さ [cm]	角度 [°]	中性子	ガンマ線	放射化 ガンマ線	合計
表面	24	24	275 (1%)	7 (1.1%)	15 (2.7%)	297 (1%)
1 m の位置	229	169	44 (0.8%)	41 (0.4%)	< 1 (3.8%)	85 (0.5%)

比較のために示す15x15燃料による配置(ii)の最大線量当量率

15x15燃料 の配置(ii)	位置		最大線量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )※1			
	高さ [cm]	角度 [°]	中性子	ガンマ線	放射化 ガンマ線	合計
表面	24	335	265 (1%)	6 (1%)	16 (3.8%)	287 (1%)
1 m の位置	229	190	43 (0.9%)	40 (0.4%)	< 1 (4.2%)	83 (0.5%)

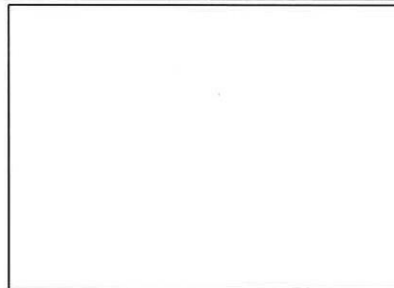
※1: カッコ内数字は統計誤差を示す。いずれの場合も統計誤差は十分小さく、解析の信頼性は高い。

遮蔽解析の結果、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値2mSv/h及び100 $\mu\text{Sv/h}$ 未満であり、本設計の妥当性を確認した。以上の結果から、CASTOR® geo26JP型は、「第十六条:燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設」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(第十六条)(遮蔽機能)

遮蔽機能に係る解析結果(最大線量当量率)のまとめ(2/2)

- ガンマ線と中性子の線量率は異なる場所で最大値を示した。
- 配置パターン(i)は、より短い冷却時間を有する燃料集合体を収納しているため、より強いガンマ線量率を示す。また、総線量率の最大値は、ガンマ線の最大値に近い。
- 配置パターン(ii)の場合、より長い冷却期間を有する燃料集合体を収納しているため、総線量率に対する主な寄与は、ゆっくりと減衰する中性子によって与えられるため、最大値は、中性子最大の位置で観察される。また、総線量率の最大値は、中性子の最大値に近い。



	配置(i) (熱的に均一)		配置(ii) (熱的に不均一)	
	17×17燃料		17×17燃料	
	15×15燃料		15×15燃料	
	燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)	燃焼度 (MWd/t以下)	冷却期間 (年以上)
A	48,000	13	48,000	13
B	44,000	22	48,000	24
C	44,000	28	48,000	29
D	44,000	12	48,000	24
E	44,000	16	48,000	29

[設置(変更)許可申請において別途確認を要する条件]

- ・ 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遮蔽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。
- ・ 当該貯蔵施設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が周辺監視区域外における線量限度を超えないこと。

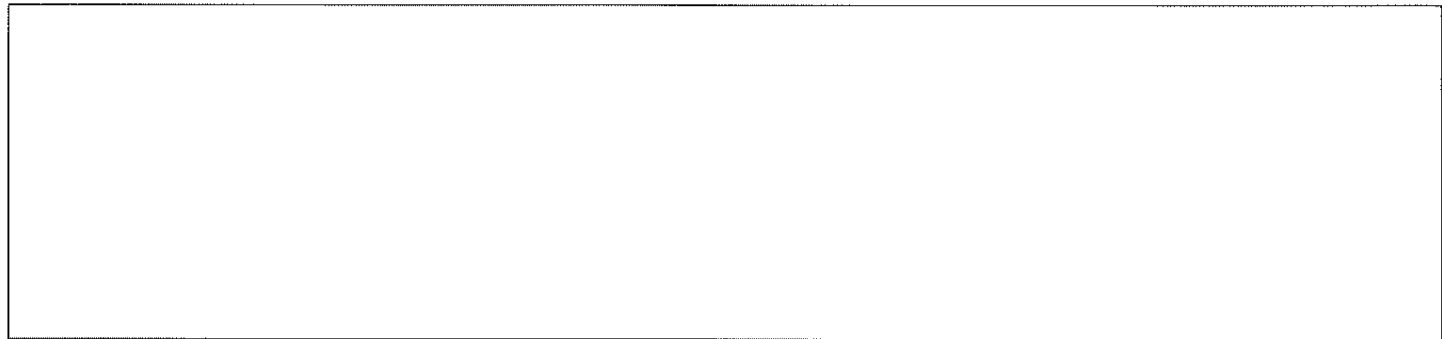
### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)

#### [解析コードの検証]

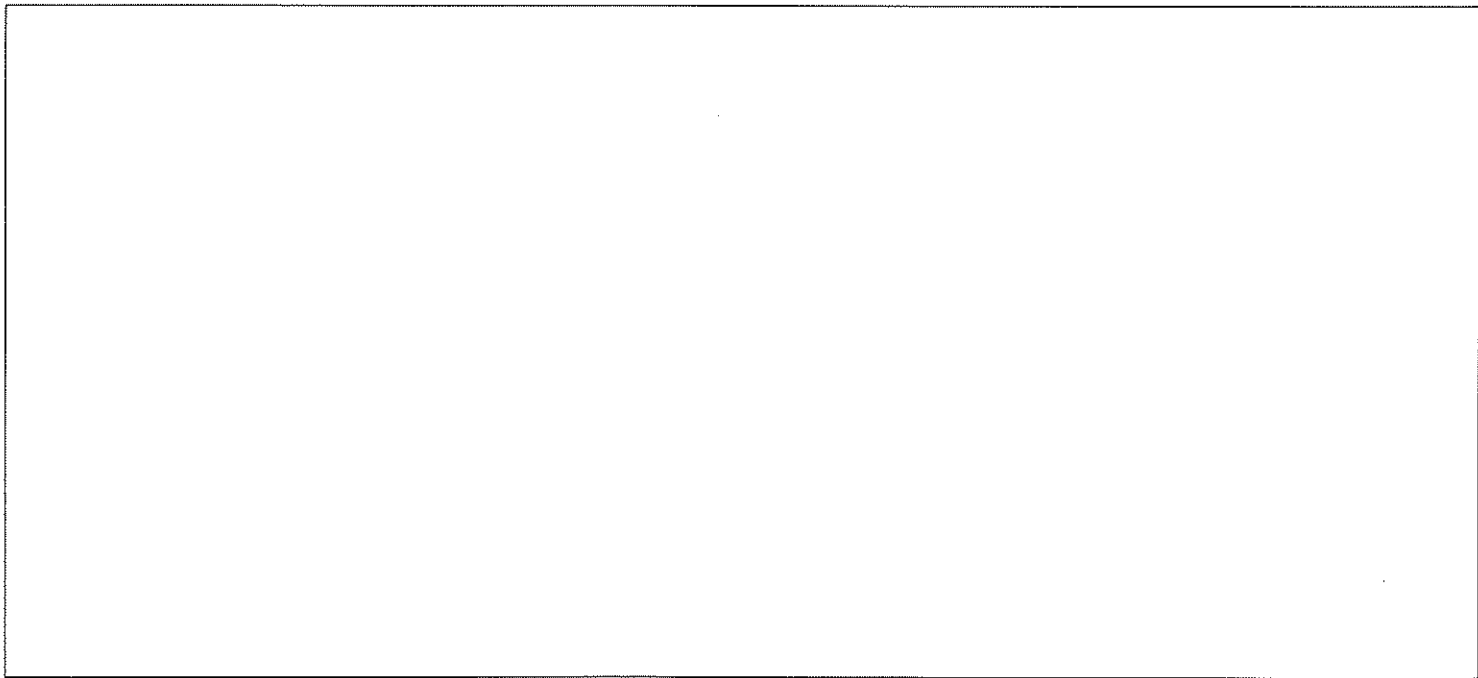
#### ①放射線源強度評価に用いる解析コード

ORIGEN 2コードは、米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)で開発された燃焼計算コードである。ORIGEN 2コードは公開コードであり輸送貯蔵兼用キャスクの崩壊熱計算等に広く用いられている。ORNLでは、ORIGEN2コードの崩壊熱計算結果をANS基準崩壊熱と比較し、ORIGEN2コードの正当性を検証している。

#### ②遮蔽解析に用いる解析コード



### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(遮蔽機能)





## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

設置許可基準規則第十六条の内、閉じ込め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 第三号	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。	CASTOR® geo26JP型は、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。また、CASTOR® geo26JP型は、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。さらに、CASTOR® geo26JP型は、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。なお、CASTOR® geo26JP型の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については、設置(変更)許可時に別途確認されるものとする。	先行例と同様
設置許可基準規則解釈(注2) 別記4 第十六条 第4項	第16条第4項第3号に規定する「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」とは、次項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈(注3) 第5条第1項第1号及び第2号並びに第17条第1項第1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」

(注3)「使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

設置許可基準規則第十六条の内、閉じ込め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5条第1項	第5条に規定する「限定された区域に適切に閉じ込めることができるもの」とは、以下の設計をいう。		
第一号	金属キャスクは、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料等を内封する空間を負圧に維持できる設計であること。	CASTOR® geo26JP型は、使用済燃料集合体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asketを用いることにより、設計貯蔵期間(60年)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を保つとともに、負圧に維持する設計とする。	用いる金属ガasketは、一重の銀被覆ガasketを用いており、他社と異なる。
第二号	金属キャスクは、多重の閉じ込め構造を有する蓋部により、使用済燃料等を内封する空間を容器外部から隔離できる設計であること。	CASTOR® geo26JP型は、一次蓋及び二次蓋による二重の閉じ込め構造とし、一次蓋と二次蓋の間の空間(以下「蓋間空間」)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の外部から隔離する設計とする。	先行例と同様
第三号	金属キャスクは、貯蔵期間中及び貯蔵終了後において、収納された使用済燃料の検査等のために金属製の乾式キャスクの蓋等を開放しないことを前提としているため、万一の蓋部の閉じ込め機能の異常に対して、蓋を追加装着できる構造を有する設計とすること等、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。	申請範囲外とする。	

## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

設置許可基準規則第十六条の内、閉じ込め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17条 第1項 第一号	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。  蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。	CASTOR® geo26JP型は、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。	先行例と同様
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。 CASTOR® geo26JP型を構成する部材は、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、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。	用いる金属ガスケットは、一重の銀被覆ガスケットを用いており、他社と異なる。



## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

CASTOR® geo26JP型の閉じ込め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]

- 使用済燃料集合体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(60年)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につつとともに、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、蓋間空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の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。

### [安全評価方針]

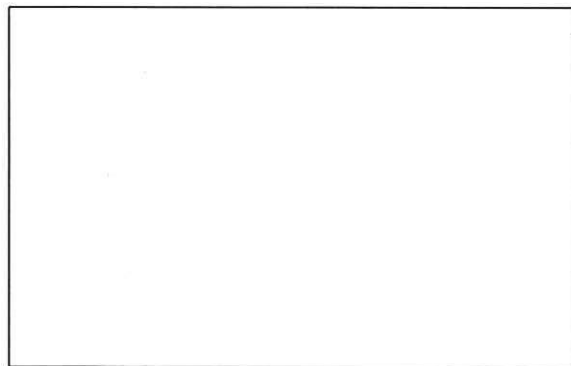
- 特定兼用キャスクの内部の負圧を設計貯蔵期間中維持できる漏えい率を基準漏えい率として設定する。
- 閉じ込め境界部の漏えい率の判定基準として、基準漏えい率よりも小さいリークテスト判定基準を設定する。
- 使用する金属ガスケットの性能が、リークテスト判定基準の漏えい率以下であることを確認する。

### [設計の妥当性(成立性見通し)]

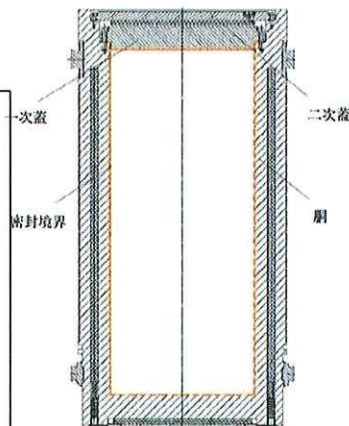
- 金属ガスケットの性能が、基準漏えい率よりも小さく設定されたリークテスト判定基準に対し、小さい漏えい率であり、設計貯蔵期間を通じて確認した。

### [原子炉設置(変更)許可申請時の確認事項]

- 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。



蓋及び蓋貫通孔のシール部詳細図



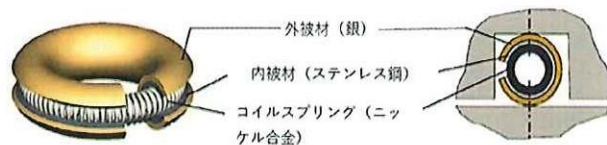
閉じ込め構造図



## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

### 金属ガスケット

金属ガスケットは、耐熱性、耐食性、耐久性に優れたニッケル合金製のコイルスプリングをステンレス鋼製の内被材と銀製の外被材で覆い、囲んだものを用いる。※

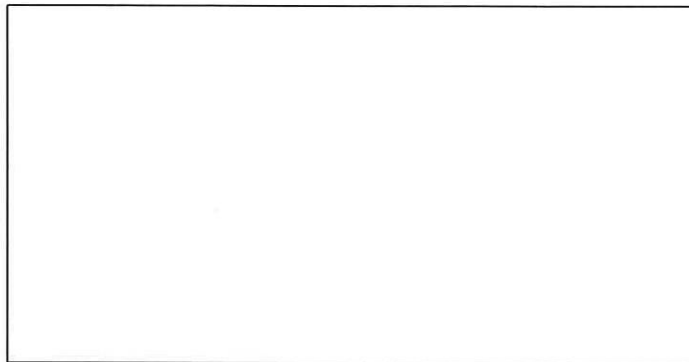


金属ガスケット構造

※本ガスケットは、ドイツ及びチェコ等で許認可を取得し、貯蔵が開始している輸送・貯蔵兼用キャスクに使用されている。(CASTOR® V/19 (D/4372/B(U)F-96, Rev. 3, 2015年)及びCASTOR® 1000/19 (CZ/070/B(U)F-96, Rev. 0, 2010年)

### 閉じ込め機能の監視

CASTOR® geo26JP型は、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



圧力監視装置を設置した二次蓋の構造

## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

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

確認内容	閉じ込め機能に関する設計方針	先行例との比較
(1) 長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い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、一次蓋と二次蓋との間の圧力(以下「蓋間圧力」という。)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。	CASTOR® geo26JP型は、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、蓋間空間を正圧とし、圧力障壁を形成することにより、使用済燃料を封入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。一次蓋及び二次蓋の蓋貫通孔のシール部には、耐熱性、耐食性、耐久性に優れたニッケル合金製のコイルスプリングをステンレス鋼製の内被材と銀製の外被材で覆い、囲んだ金属ガスケットを用いる。また、CASTOR® geo26JP型は、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。	用いる金属ガスケットは、一重の銀被覆ガスケットを用いており、他社と異なる。
(2) 兼用キャスクの内部の放射性物質が外部へ漏えいしないよう、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。	金属ガスケットの設計漏えい率は、設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク本体内部の負圧が維持できる漏えい率(基準漏えい率)を下回るように設定されるリークテスト判定基準を満足することから、使用済燃料を封入する空間は、設計貯蔵期間を通じて負圧に維持される。	リークテスト判定基準については、気密漏えい検査に用いる装置の性能等から申請者で決めた数値を用いる。
(3) 密封境界部の漏えい率は、(2)を満たすものであること。また、使用する金属ガスケット等のシールの性能は、当該漏えい率以下であること。		
(4) 閉じ込め機能評価では、密封境界部の漏えい率が、設計貯蔵期間、内部初期圧力及び自由空間容積(兼用キャスク内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積をいう。)、初期の蓋間圧力及び蓋間の容積、温度等を条件として、適切な評価式を用いて求められていること。	閉じ込め機能評価においては、設計貯蔵期間、充填ガスの種類、内部初期圧力、蓋間圧力、大気圧、キャスク内部空間体積、蓋間空間体積、内部気体温度、漏えい気体温度等を条件として、適切な評価式を用いる。	同上

(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」

## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

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

確認内容	閉じ込め機能に関する設計方針	先行例との比較
<p>(5) 兼用キャスクの衝突評価</p> <p>1) 兼用キャスクを床等に固定せず設置するとき (略)</p> <p>2) 貯蔵建屋等を設置するとき</p> <p>① 貯蔵建屋等の損壊モードの設定 損壊モードに応じた衝突物又は落下物を抽出し、そのうち兼用キャスクの閉じ込め機能に及ぼす影響が最大であるものを設定すること。</p> <p>② 兼用キャスクの衝突評価</p> <p>①で抽出した衝突物又は落下物による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。</p> <p>3) 使用済燃料の再取出性の評価</p> <p>a. 兼用キャスクに収納される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ること。</p> <p>b. 使用済燃料の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。</p>	<p>CASTOR® geo26JP型は貯蔵施設の基礎に固定するため、転倒モードの設定及び兼用キャスクの衝突評価は実施しない。また、貯蔵建屋等を設置するときの損壊モードの設定および兼用キャスクの衝突評価については、申請範囲外とし、別途設置(変更)許可申請にて審査を受ける事項とする。</p> <p>使用済燃料の再取出性に関しては、CASTOR® geo26JP型は一次蓋及び二次蓋を開放して使用済燃料集合体を取り出すことができる設計とする。</p>	<p>先行例では申請範囲外。</p>
<p>(6) 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。</p>	<p>申請範囲外とする。</p>	<p></p>



## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

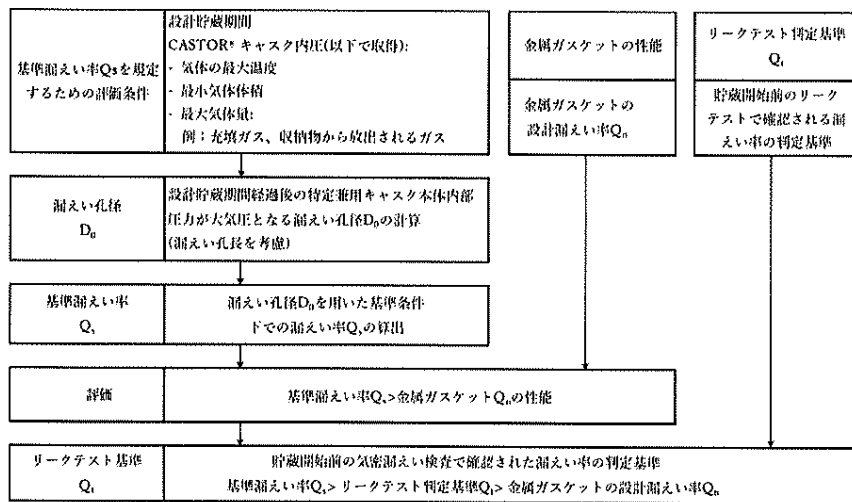
審査ガイド(注1)の確認内容に対するCASTOR® geo26JP型の閉じ込め機能に係る設計方針を下表に示す。

確認内容	閉じ込め機能に関する設計方針	先行例との比較
(7) 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ガス当の放出に至る前に、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の発熱量の低下、周囲環境の温度変化及び蓋間圧力の変化を考慮する。	申請範囲外とする。	
(8) 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。	除熱機能の監視に係る確認事項である。	先行例と同様

## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

CASTOR® geo26JP型の閉じ込め機能に係る安全評価方針について具体的には以下の通り。

基準漏えい率 > リークテスト判定基準 > 金属ガスケットの設計漏えい率 であることをフローに基づき評価する。



閉じ込め機能評価フロー

## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

### 閉じ込め機能評価条件

- 基準漏えい率は、設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク内の負圧を維持するための漏えい率(標準状態)を示す。
- 大気圧は気象変化による圧力変動を保守的に考慮した値として、 $9.7 \times 10^4 \text{Pa}$ とする。
- 特定兼用キャスク本体内部空間の圧力の算定にあたっては、使用済燃料の破損によるガス放出による圧力上昇を考慮する。
- 使用済燃料の破損率は、米国の使用済燃料乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率(約0.01%)、及び日本の軽水炉における漏えい燃料発生率(約0.01%以下)を考慮し、保守的な値として、0.1%とする。

漏えい孔中の流体の流れの形態としては、自由分子流と連続流とを考慮して、漏えい率は次式で求める。

$$L(p_a) = L_c(p_a) + L_m(p_a)$$

$$L_m = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot R \cdot T}{M}} \cdot \frac{D^3}{a \cdot p_a} \cdot (p_u - p_d)$$

$$L(p_u) = L(p_a) \cdot p_a / p_u$$

$$L_c = \frac{\pi}{128} \cdot \frac{D^4}{\mu \cdot a} \cdot (p_u - p_d)$$

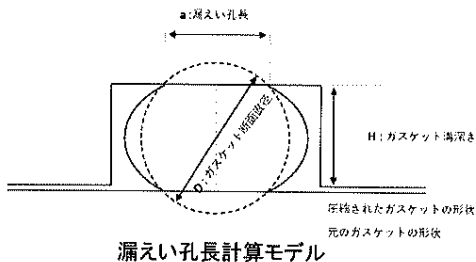
流体である層流粘性流  $L_c(p_a)$  と分子流  $L_m(p_a)$  は、平均圧力  $p_a$  で流れるものとする。  
ただし、流体の体積漏えい速度は上流側圧力で決定されるとし、ガス漏えい量を求める。

$L_c$	層流粘性(連続流)体積漏えい率 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$L_m$	分子体積漏えい速度 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$\mu$	気体の動粘度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
$M$	気体分子のモル質量 ( $\text{kg}/\text{mol}$ )
$p_u$	上流圧力 ( $\text{Pa}$ )
$p_d$	下流圧力 ( $\text{Pa}$ )
$p_a$	平均圧力 ( $p_a = (p_u + p_d)/2$ ) ( $\text{Pa}$ )
$a$	漏えい孔長 ( $\text{m}$ )
$D$	漏えい孔径 ( $\text{m}$ )
$T$	密封境界の温度(それぞれの蓋ガスケットの温度) ( $\text{K}$ )
$R$	気体定数( $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )



## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

### 閉じ込め機能評価条件(続き)



漏えい孔長計算モデル

溝で圧縮されたガスケットの外形を示す。ガスケット溝の高さ( $H$ )と金属ガスケットの直径( $D$ )を用いて、漏えい孔長を計算する。

$$a = \sqrt{D^2 - H^2} = \text{[ ]}$$

標準条件およびこの漏えい孔長を用いて、クヌッセンの方程式を解くと、漏えい孔径は $D_0=6.06 \times 10^{-6}$  mとなる。

### 閉じ込め評価条件

記号	単位	説明	定数	初期	値(範囲)
$Q_{GL}$	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	一次蓋設計漏洩率	x		0 ~ QS
$Q_{SL}$	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	二次蓋設計漏洩率	x		0 ~ QS
T	K	ガスケット温度及び漏洩ガス温度	x		250.6 ~ 375
$T_{IL}$	K	蓋間温度 <sup>(注1)</sup>	x		250.6 ~ 365
$T_a$	K	内部ガス温度(概数) <sup>(注1)(注2)</sup>	x		250.6 ~ 450
$p_u = p_{IL}$	Pa	蓋間圧力		x	計算される
$p_a = p_a$	Pa	キャスクキャビティガス圧力 <sup>(注2)</sup>		x	計算される
$p_{atm}$	Pa	外気圧	x		97,000 ~ 103,000
$V_{IL}$	$\text{m}^3$	蓋間空間内自由ガス量	x		[ ]
$V_G$	$\text{m}^3$	キャスク内自由ガス量 <sup>(注4)</sup>	x		[ ]
$n_{IL}$	mol	蓋間空間内のガス量		x	計算される
$n_G$	mol	キャスク内ガス量		x	[ ]
$M_{He}$	kg/mol	モル質量 <sup>(注5)</sup>	x		$4.0 \times 10^{-3}$
$\mu(T)$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	動粘度(最小) <sup>(注5)</sup>	x		$1.77 \times 10^{-3} \sim 2.31 \times 10^{-3}$
A	m	漏えい孔長	x		$4.5 \times 10^{-3}$
$D_0$	m	漏えい孔径	x		$0 \sim 6.06 \times 10^{-6}$

<sup>(注1)</sup>貯蔵建屋内のキャスク周辺温度として $-22.4^\circ\text{C}$ を最低温度として考慮

<sup>(注2)</sup>ガス媒体の最大容積平均温度( )を考慮

<sup>(注3)</sup>燃料棒の破損による圧力上昇を含む

<sup>(注4)</sup>キャスクキャビティの全容積を示すが、使用済燃料集合体及びバスケットの容積を除く

<sup>(注5)</sup>ヘリウムガスを考慮

## 4. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

### 閉じ込め機能評価結果

算出及び設定した基準漏えい率、リークテスト判定基準及び金属ガスケットの設計漏えい率は下表のとおり。

項目	基準漏えい率 $Q_s$	リークテスト判定基準 $Q_t$	設計漏えい率 $Q_n$
金属ガスケットの漏えい率	$3.5 \times 10^{-6}$ Pa · m <sup>3</sup> /s 注1	$1.0 \times 10^{-8}$ Pa · m <sup>3</sup> /s	$1.7 \times 10^{-9}$ Pa · m <sup>3</sup> /s

注1 設計貯蔵期間中にキャスク内の負圧を維持するための漏えい率(標準状態)を示す。

内は商業機密のため、非公開とします。

リークテスト判定基準は、気密漏えい検査に用いる装置の性能より、 $1.0 \times 10^{-8}$  Pa · m<sup>3</sup>/sと設定した。

金属ガスケットの設計漏えい率は、(一財)電力中央研究所で実施された長期密封性能試験の約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( $6.50 \times 10^{-10}$  Pa m<sup>3</sup>/s)に標準偏差( $3.40 \times 10^{-10}$  Pa m<sup>3</sup>/s)の3倍を加算した値を切り上げた設定値( $1.7 \times 10^{-9}$  Pa m<sup>3</sup>/s)とした。

以上より、CASTOR® geo26JP型の金属ガスケットの設計漏えい率は、基準漏えい率を下回るように設定されるリークテスト判定基準を満足することから、使用済燃料を封入する空間は、設計貯蔵期間を通じて負圧に維持されることを確認した。

---

ご清聴ありがとうございました！

