

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 臨界)

GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH

2024年2月2日

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)

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。		
第一号	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に設計する。	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。</p> <p>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。</p> <p>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。バ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)

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
<p>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。</p>	<p>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。</p>	<p>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。</p>
<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</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>	<p>先行例と同様</p>
<p>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。</p>	<p>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。</p>	<p>先行例と同様</p>
<p>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。</p>	<p>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。</p>	<p>先行例と同様</p>
<p>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。</p>	<p>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。</p>	<p>先行例と同様</p>

(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」

1. 臨界解析における寸法条件の設定の妥当性

概要資料P13申請書P1-64

解析条件を決めるための感度解析コードとしてTSUNAMIプログラムを使用しているが、解析コードの使用実績及び関連する文献等を用いて、解析コードの具体的な内容及び当該コードを使用することの妥当性を説明すること。

2. バスケット構造の特徴を踏まえた注水時における水位傾向

概要資料P16 (P8) 補足説明資料1-1 P7申請書P1-6

バスケット構造については、概要資料P16のとおり、注水時には、バスケット底板部分の穴及びHビーム/熱導及び中性子吸収材の穴を経由して、すべての水ギャップに水が満たされる設計としている。この注水時に全ての水ギャップに水が満たされて、水位が一様に上昇していくバスケット構造であることを、海外の許認可実績等を踏まえて説明すること。具体的には、「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。」について、穴を設けている箇所を示し、どのように流路及び空気抜きが確保されているかを説明のこと。また上記の設計がされていることで、いかなる場合においてもH-ビーム内部と燃料収納領域の水位に差の生じない設計であることについて、注水あるいは排水の際の水の流路の圧力損失の差異がないこと等を示し説明すること。

2023.10.11 指摘事項への回答

1. TSUNAMIプログラムの妥当性

解析条件を決めるための感度解析コードとしてTSUNAMIプログラムを使用しているが、解析コードの使用実績及び関連する文献等を用いて、解析コードの具体的な内容及び当該コードを使用することの妥当性を説明すること。

回答

感度・不確かさ解析ツールTSUNAMIは、検証の目的で2000年代初頭から国際的に使用されており、例えばIAEA-TECDOC-1547でOak Ridge National Laboratory(ORNL)による燃焼度クレジット検証へのTSUNAMIコードの適用が報告されている([D.E. Mueller, J.C. Wagner, Application of sensitivity/uncertainty methods to burnup credit validation, IAEA-TECDOC-1547, Vienna (2007)])。CASTOR[®]型輸送・貯蔵キャスクについては、TSUNAMIコードはドイツ、スイス、ベルギー、米国の臨界安全性解析に使用実績があり、感度解析や最適な臨界実験の選択などに広く使用されている。

2023.10.11 指摘事項への回答

2. 注水時の圧力損失の考え方

バスケット構造については、概要資料P16のとおり、注水時には、バスケット底板部分の穴及びHビーム/熱導及び中性子吸収材の穴を経由して、すべての水ギャップに水が満たされる設計としている。この注水時に全ての水ギャップに水が満たされて、水位が一様に上昇していくバスケット構造であることを、海外の許認可実績等を踏まえて説明すること。具体的には、「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。」について、穴を設けている箇所を示し、どのように流路及び空気抜きが確保されているかを説明のこと。また上記の設計がされていることで、いかなる場合においてもHビーム内部と燃料収納領域の水位に差の生じない設計であることについて、注水あるいは排水の際の水の流路の圧力損失の差異がないこと等を示し説明すること。

(回答)

Hビーム/中性子吸収材部分の詳細図を右上図に、燃料格子端部の隙間部分の詳細図を右中図に、バスケット底板付近の詳細図を右下図に示す。注水時には、これらの穴や隙間を経由して、すべての水ギャップに水が満たされる設計としている。

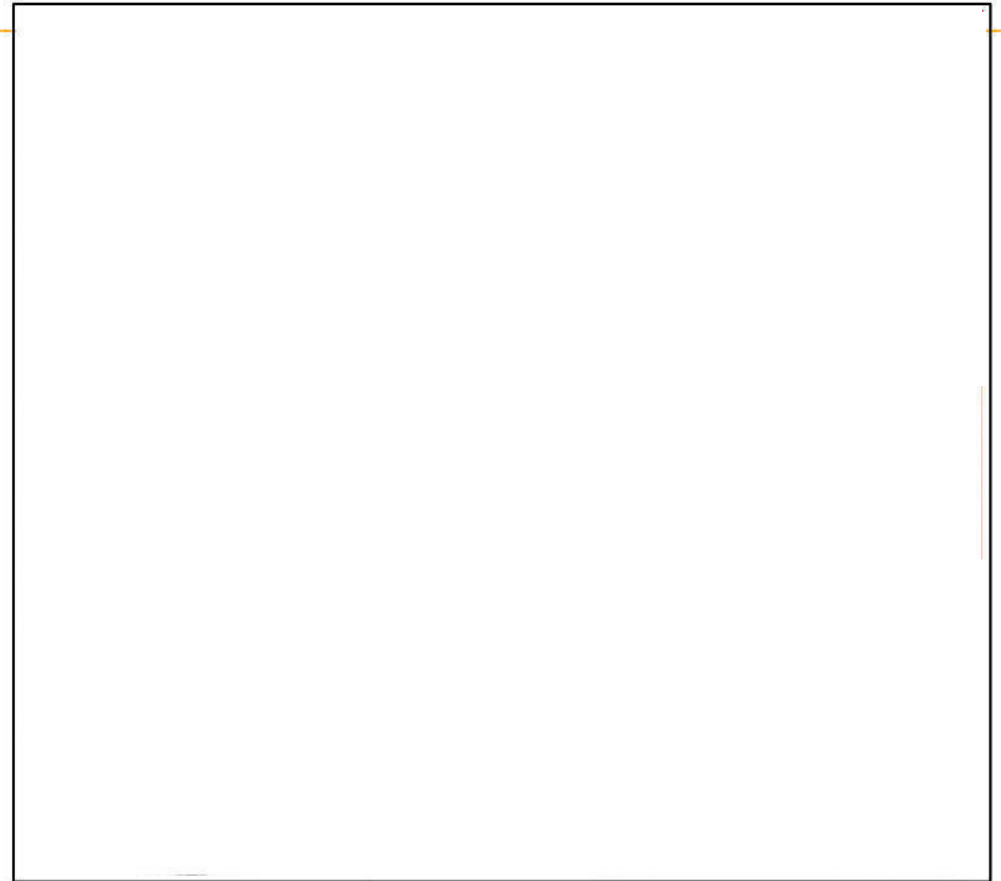
(1)注水時の流路及び流速

注水により満たされる容積は[]、高さは[]であり、満水までの注水時間を保守的に[]と仮定(典型的な手順の注水時間は約[])すると、高さ方向の流速 $V1$ は約[]となる。

水ギャップの総断面積 $A1$ は[]で、H形ステンレス鋼製ウェブの穴の断面積([]の穴の面積)及び水ギャップへの流入可能な全ての隙間の断面積を合計した面積 $A2$ は[]となる。この面積 $A2$ に対応する流速 $V2$ は、非圧縮流体(水)の定常流を仮定すると次の方程式が成り立つ。

$$V1 \times A1 = V2 \times A2$$

従って、流速 $V2$ は約[]となる。



2023.10.11 指摘事項への回答

2. 注水時の圧力損失の考え方(続き)

バスケット構造については、概要資料P16のとおり、注水時には、バスケット底板部分の穴及びHビーム/熱導及び中性子吸収材の穴を経由して、すべての水ギャップに水が満たされる設計としている。この注水時に全ての水ギャップに水が満たされて、水位が一様に上昇していくバスケット構造であることを、海外の許認可実績等を踏まえて説明すること。具体的には、「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。」について、穴を設けている箇所を示し、どのように流路及び空気抜きが確保されているかを説明のこと。また上記の設計がされていることで、いかなる場合においてもHビーム内部と燃料収納領域の水位に差の生じない設計であることについて、注水あるいは排水の際の水の流路の圧力損失の差異がないこと等を示し説明すること。

(回答の続き)

(2)圧力損失及び水面高さ差異の評価

損失係数(ζ)は、文献([I.E.Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, 3.Edition, Jaico Publishing House])から、円管内のオリフィスの損失係数及び層流に対する管摩擦による損失係数を求めると、約2.2(=1.7(管路抵抗)+0.5(管摩擦))となるが、流速[]の流路断面における損失係数は、保守的に[]と設定した。

総損失係数ζ total=[]×ζ及び圧力損失ΔPは次の式で計算される。

$$\Delta P = 1/2 \times \zeta_{\text{total}} \times \rho_{\text{water}} \times V^2 = 1/2 \times [] \times (1000 \text{ kg/m}^3) \times []^2 = []$$

従って、圧力損失ΔPは8.6 Paとなる。

求められた圧力損失から、水ギャップとキャスク内部の水面高さの差(Δh)は次の式で与えられる。

$$\Delta P = \rho_{\text{water}} \times g \times \Delta h$$

すなわち、 $\Delta h = \Delta P \div (\text{水密度}(\rho_{\text{water}}) \times \text{重力加速度}(g)) = [] \div (1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2) = []$ となり、最大高低差Δhは[]となる。

従って、最大高低差は[]であり、感度解析の結果(補足説明資料 別紙1 表 A1-3、図A1-5)より、臨界解析結果への影響は無視できる。

実際の注水時には製造公差によるHビーム各段の間の水平隙間を通じて水ギャップへの水の流入が発生するが、本評価ではこうした流路は保守性の観点から無視しており、現実には水面高低差はさらに小さくなる。また、注水速度は本評価の計算条件以下に管理できるため、実際のバスケット内の水面高低差はより小さく無視できる。

ご清聴ありがとうございました！

