

# 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 4 月14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)

## 2. 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」の臨界防止について、本資料で説明する。(青枠部分)

### 3. 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内、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)<br>第十六条第2項<br>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<br>解釈(注2)<br>別記4第十六条第<br>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<br>規則解釈(注3)<br>第3条<br>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。<br><br>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」

### 3. 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内、臨界防止機能に係る要求事項に対するCASTOR<sup>®</sup> 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。<br>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  |
| (続き)<br>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。<br><br>① 配置・形状<br>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。<br>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。<br>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。<br>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。<br>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  |

### 3. 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内、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)<br>第四号 | ② 中性子吸収材の効果<br>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。<br>a) 製造公差(濃度、非均質性、寸法等)<br>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  |
|             | ④ 燃焼度クレジット<br>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。<br>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<br>b) 貯蔵する燃料集合体の燃焼度等の管理 | 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。 | 先行例と同様  |
| 第五号         | 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。  | 申請範囲外   |         |

### 3. 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内、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<br>解釈 別記4 第16<br>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。<br>・設計貯蔵期間を明確にしていること。<br>・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。<br>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  |

### 3. 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に設計する。
- 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必要な措置については別途確認を受ける。



### 3. 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<br>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。<br>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。<br>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。<br>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<br>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。<br>a. 製造公差(濃度、不均質性、寸法等)<br>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<br>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、部分的な浸水状態も評価する。水平姿勢における浸水は、取扱い及び貯蔵中には想定されないが、評価を行う。 | 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」

### 3. 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。

#### [収納物仕様と解析条件]

臨界解析では、収納物について以下の保守的な条件を設定する。

- 使用済燃料集合体は濃縮度上限の新燃料とする(燃焼度クレジットは考慮しない)
- ガドリニウム等の可燃性毒物は考慮しない
- パーナブルポイズン集合体は考慮しない。
- ほう素水は考慮しない。
- 冠水時は、燃料棒は全て浸水している仮定とする。
- 燃料組成に同位体U-234及びU-236は考慮しない。
- 収納物を含む寸法条件は、感度解析により設定する。

#### 臨界解析条件の概要

| 項目     |                           | 収納物仕様         |       | 解析条件  |       |   |
|--------|---------------------------|---------------|-------|-------|-------|---|
|        |                           | 15x15         | 17x17 | 15x15 | 17x17 |   |
| 貯蔵時の仕様 | 燃料集合体<br>1体当たり            | 種類            |       |       |       |   |
|        |                           | 初期濃縮度 (wt%)   |       |       |       |   |
|        |                           | ウラン質量 (kg)    |       |       |       |   |
|        |                           | 最高燃焼度 (GWd/t) |       |       |       |   |
|        | パーナブルポ<br>イズン集合体<br>1体当たり | 冷却期間 (年)      |       |       | -     | - |
|        |                           | 最高燃焼度 (GWd/t) |       |       | -     | - |
|        |                           | 冷却期間 (年)      |       |       | -     | - |
|        | キャスク<br>1基当たり             | 平均燃焼度 (GWd/t) |       |       | 0     |   |

#### 臨界解析における燃料集合体の仕様

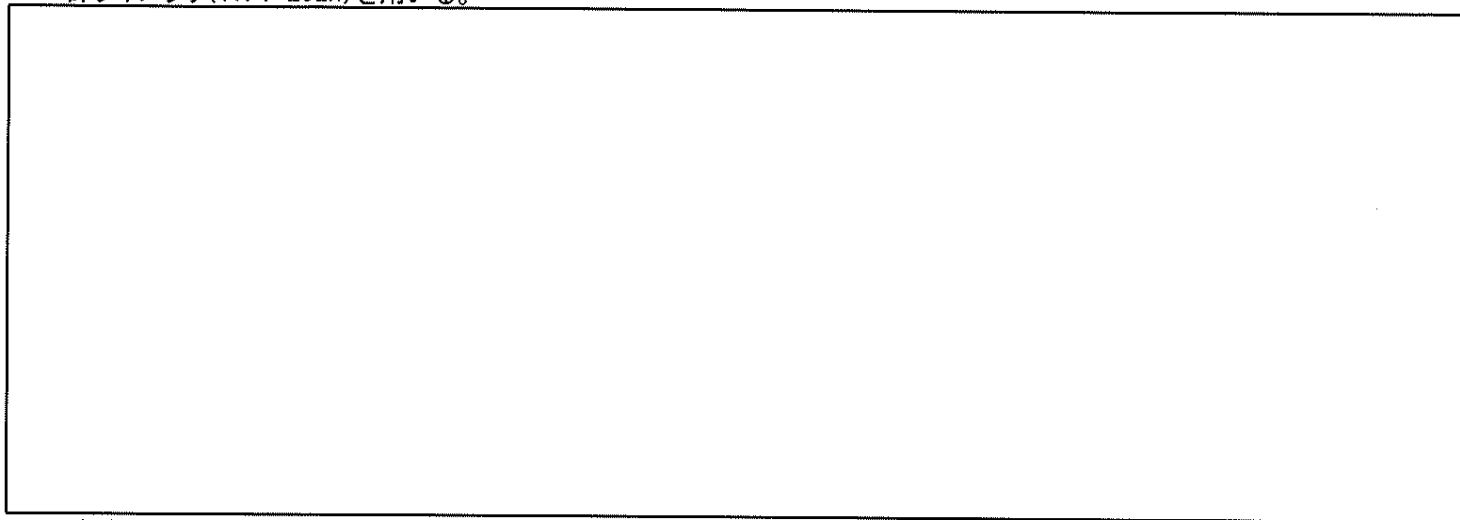
| 項目                    | 単位     | 15x15 燃料 | 17x17 燃料 |    |
|-----------------------|--------|----------|----------|----|
| 種類                    | -      | -        | A型       | B型 |
| 燃料材質                  | -      |          |          |    |
| 被覆管材質                 | -      |          |          |    |
| 燃料密度                  | % 理論密度 |          |          |    |
| ペレット直径                | mm     |          |          |    |
| 燃料棒直径                 | mm     |          |          |    |
| 被覆管厚さ                 | mm     |          |          |    |
| 燃料有効長                 | mm     |          |          |    |
| 制御棒案内管<br>の内径         | mm     |          |          |    |
| 制御棒案内管<br>の外径         | mm     |          |          |    |
| 燃料棒配列                 | -      |          |          |    |
| 燃料集合体<br>当たりの燃料<br>棒数 | 本      |          |          |    |
| 燃料棒ピッチ                | mm     |          |          |    |
| 初期濃縮度                 | wt%    |          |          |    |

(注)17×17燃料Type Bはペレット径が小さく被覆管厚さが大きい。そのためType B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Type Aに比べ低くなる。臨界解析では、反応度が高いType Aを用いる。

### 3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(臨界防止機能)

#### [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ENDF/B-VII.1の252群ライブラリ(v7.1-252n)を用いる。



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)

### 3. 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CASTOR® geo26JP型に収納する際の冠水状態を考慮した解析を行う。なお、部分的な浸水状態、水平姿勢における浸水についても評価を行う。
- 臨界解析用の境界条件は、CASTOR® geo26JP型の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、水の代わりに真空中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。)

#### その他臨界解析条件

| 臨界解析条件の項目      | 説明   |   |
|----------------|--|---|
| 収納体数           | 26   |   |
| 寸法条件           | 水ギャップ、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。(感度解析結果より設定)                                    |   |
| 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: 水による部分浸水( $\rho = 1.0\text{g/cm}^3$ ) |
| 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 $^{10}\text{B}$ 最低保証値: 面密度 <input type="text"/> |   |
| 中性子遮へい材        | キャスク本体の中性子遮蔽材をキャスク胴の材質(球状黒鉛鋳鉄)に変更。蓋部及び底部の中性子遮蔽材は考慮しない。                               |   |
| 蓋部             | 一次蓋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。                                 |   |

### 3. 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                          | □ | 全体に渡ってのバスケット位置の平均値<br>感度解析結果に基づき設定 |
| 水ギャップ厚さ                | 最小                          |   | 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                          |   | 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                          |   | 被覆管外径と同様の原理と判断                     |
| 燃料集合体の軸方向変位            | 公称(バスケット内での軸方向中心)           |   | 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                       |
| エッジセグメントの厚さ            | 公称                          | □ | 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※       | 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                       |
| キャスクキャビティの水平方向の部分浸水    | 最上段は浸水せず                    |   | 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、蓋部はステンレスに置き換え |   | 燃料有効長 から遠いため、影響なし                  |

※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。

### 3. 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、ENDF/B-VII.1(V7.1-252n, T = 293 K)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 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行った。

#### 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<br>0.92751<br>(3σ: 0.00063) | 0.93312<br>(3σ: 0.00075) | ≤ 0.95 | 未臨界を維持 |
|          | 乾燥状態<br>0.38812<br>(3σ: 0.00032) | 0.39403<br>(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。以上より、CASTOR® geo26JP型は、十分に保守的な安全評価手法にて評価を実施した結果、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定に適合していると考えられる。

---

ご清聴ありがとうございました！

