

玄海原子力発電所 3 号炉及び 4 号炉
設置許可基準規則への適合性について
(高燃焼度燃料の使用)

< 補足説明資料 > 抜粋版

本資料においては、高燃焼度燃料の使用について、「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」（以下「設置許可基準規則」という。）への適合方針を説明する。

< 目 次 >

- 第 4 条 地震による損傷の防止
- 第 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止
- 第 12 条 安全施設
- 第 13 条 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止
- 第 15 条 炉心等
- 第 16 条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
- 第 25 条 反応度制御系統及び原子炉停止系統
- 第 27 条 放射性廃棄物の処理施設
- 第 37 条 重大事故等の拡大の防止等

15 条
炉心等

反応度係数について

1. 反応度係数の原子炉設置許可申請における記載

反応度係数については、設置許可基準規則の解釈においてはドップラ係数、減速材温度係数、減速材ボイド係数及び圧力係数の記載がある。これに対して、原子炉設置許可申請書においては、本文五号に減速材温度係数及びドップラ係数を、添付書類八に減速材温度係数、ドップラ係数、ボイド係数、圧力係数、減速材密度係数を記載している。

これらの反応度係数のうち、減速材温度係数及びドップラ係数については原子炉固有の出力抑制特性を有する設計として、本文五号「ハ. 原子炉本体の構造及び設備」「(iii) 主要な核的制限値」に「減速材温度係数は高温出力運転状態で負になるよう」、また、「ドップラ係数は負になるよう」設計することを記載し、これらにより、設置許可基準規則第 15 条第 1 項に規定する「原子炉固有の出力抑制特性を有する」設計としている。一方、添付書類八においては想定する具体的な範囲を記載し、安全解析に使用している。

ボイド係数及び圧力係数については、PWR における設計、評価において直接使用しておらず、核設計ではボイド率や圧力の変化に対する反応度の感度を一般的に表すものとして、添付書類八に想定する具体的な範囲を記載している。

減速材密度係数については、減速材温度係数と同様に減速材の体積変化による反応度係数であり同義と言えるため、本文に制限値としての記載はなく添付書類八に想定する具体的な範囲^{*}を記載し、安全解析に使用している。

また、ボイド係数及び減速材密度係数については、圧力一定下において減速材温度変化に起因する反応度変化と考えることができることから減速材温度係数から換算している。圧力係数は圧力一定下で制御する PWR では意味をなさない反応度係数となることから、便宜上、減速材温度係数から換算している。

※減速材密度係数の下限値【 $0((\Delta K/K)/(g/cm^3))$ 】は、減速材温度が負であることに対応するためのものであり、減速材温度係数から換算したものではない。減速材密度係数の最小値を使用する安全解析においては、いずれも出力運転時からの事象発生を想定したものであり、炉物理検査で減速材温度係数が負であることが確認された後であるため、下限値としては $0((\Delta K/K)/(g/cm^3))$ を用いて問題ない。

2. 減速材温度係数及びドップラ係数の算出方法

減速材温度係数及びドップラ係数は、減速材温度または燃料温度を変動させた際の反応度差から求める。

これらの各反応度係数の算出方法について、以下に示す。

- (1) 炉心の各条件から減速材温度または燃料温度を変動 ($T_1 \sim T_2$) させた場合の実効増倍率を核設計計算コードにより求める。

減速材温度係数及びドップラ係数解析の条件

反応度係数	絶対値最小時	絶対値最大時
減速材温度係数	サイクル初期 高温零出力	サイクル末期 高温全出力
ドップラ係数	サイクル初期 高温全出力	サイクル末期 高温零出力

- (2) (1)で求めた実効増倍率から減速材温度係数及びドップラ係数を算出する。
反応度係数 (減速材温度係数及びドップラ係数)

$$= \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\ln \left(\frac{keff_2}{keff_1} \right)}{T_2 - T_1}$$

ここで、 ρ : 炉心反応度
 $keff_i$: 温度変動時の実効増倍率 (コードにより算出)
 x : 減速材温度、燃料温度

このように算出された減速材温度係数及びドップラ係数は、現行および今回申請のいずれの炉心においても安全解析使用値を満足する。

なお、減速材温度係数について、現行燃料よりも ^{235}U 濃縮度を高めた高燃焼度燃料装荷炉心では、熱中性子核分裂断面積が大きいいため、下記①の効果が大きくなる一方、中性子スペクトルが硬化しているため、下記②の効果は小さくなる。このため、減速材温度係数は、わずかながらより負側となる方向である。

- ① 減速材温度が上昇し、減速材密度が低下した際に、減速材による中性子減速効果の低下により熱中性子による核分裂が減少し炉心の反応度が低下する。
(減速材温度係数を負側にする効果)
- ② 減速材温度が上昇し、減速材密度が低下した際に、減速材及び減速材中のほう素の原子個数密度の減少により、核燃料以外の物質による熱中性子吸収が減少し、炉心の反応度が増加する。(減速材温度係数を正側にする効果)

また、ドップラ係数について、高燃焼度燃料装荷炉心では、 ^{235}U 濃縮度の上昇によって共鳴吸収断面積の大きな ^{238}U の量が相対的に減っているが、炉心の平均燃焼度の上昇によって同じく共鳴吸収断面積の大きな ^{240}Pu の量は増加している。これらはドップラ係数に対して競合する関係であるが、前者の効果が優勢であり、わ

ずかながら正側となる方向である。

なお、ドップラ係数は、1，2次元合成核設計手法と3次元核設計手法で解析条件に以下の通りの違いがある。

	1，2次元合成核設計手法	3次元核設計手法
①制御棒条件	全引抜	バイト位置
②ほう素濃度条件 (絶対値最大時)	0ppm	臨界ほう素濃度



3. ボイド係数、圧力係数、減速材密度係数の算出方法

これらの各反応度係数の算出方法について、以下に示す。

反応度係数 (ボイド係数、圧力係数、減速材密度係数)

$$= \frac{1}{k_{eff}} \cdot \frac{\partial k_{eff}}{\partial x} = \frac{1}{k_{eff}} \cdot \frac{\partial k_{eff}}{\partial T_m} \times \frac{\partial T_m}{\partial x} = \text{減速材温度係数} \times \frac{\partial T_m}{\partial x}$$

ここで、 k_{eff} : 実効増倍率

T_m : 減速材温度

x : ボイド率、炉心圧力、減速材密度

4. 本申請における変更内容

1. ～ 3. で述べた添付書類八に記載の減速材温度係数及びドップラ係数の範囲については、今回申請している高燃焼度燃料を使用しても現行の範囲内で運転可能であることを核設計計算で確認していることから変更はなく、また、減速材温度係数から換算されるボイド係数、圧力係数、減速材密度係数も同様に変更はない。

ただし、圧力係数については、発電用原子炉施設の設置 (変更) 許可申請に係る運用ガイドに倣い、単位を現行の「 $(\Delta K/K)/(kg/cm^2)$ 」から、SI 単位である「 $(\Delta K/K)/(MPa)$ 」に見直している。

なお、単位変換には、 $1(kg/cm^2) = 0.0980665(MPa)$ を用いている。

□□□□: 商業機密に係る事項のため、公開できません。

出力振動のうち水平方向の振動について

出力振動のうち水平方向の振動については、減速材温度係数（減速材温度に依存）及びドップラ係数（燃料温度に依存）に固有の負の反応度フィードバック特性を持たせることで、十分な減衰特性を有している。

具体的には、水平方向の左半炉心で出力（燃料温度）が増加した場合、左半炉心の減速材温度が上昇するが、ドップラ係数及び減速材温度係数による反応度フィードバック効果が出力を抑制する方向に働く。一方で、出力が減少する右半炉心で減速材温度が降下し、ドップラ係数及び減速材温度係数による反応度フィードバック効果が出力を上げる方向に働く。従って、減速材温度係数及びドップラ係数に固有の負の反応度フィードバック特性を持たせることで、炉心全体として十分な減衰特性を持ち、容易に制御できる設計としている。

上記内容を踏まえ、本文五号及び添付書類八においては下表のように記載している。

本文五号	添付書類八
<p>ハ、原子炉本体の構造及び設備 (1) 発電用原子炉の炉心 (iii) 主要な核的制限値 <u>発電用原子炉を安全かつ安定に制御することを目的として、次のような核的制限値を設定する。</u> なお、発電用原子炉は高温状態以外で臨界としない設計とする。 <u>d. 減速材温度係数及びドップラ係数</u> <u>減速材温度係数は、高温出力運転状態では負になるように設計する。また、ドップラ係数は負になるように設計する。</u></p>	<p>3. 発電用原子炉及び炉心 3.3 核設計 3.3.1 概要 <u>ドップラ係数は常に負であり、減速材温度係数は高温出力運転状態では負に保たれているため、発電用原子炉に固有の安全性を与えている。また、キセノンによる出力振動のうち、径方向振動は収束性であり、軸方向振動も炉心寿命中の大部分において収束性である。</u> 3.3.2 設計方針 (2) これらを基本とし、濃縮度、ガドリニア濃度等を考慮した上で、以下の方針に基づき具体的設計を行う。 c. 反応度係数 <u>炉心が負の反応度フィードバック特性を有するように、ドップラ係数は常に負であり、かつ、高温出力運転状態で減速材温度係数は負となる設計とし、これらを総合した反応度出力係数が運転時の異常な過渡変化時においても出力抑制効果を有する設計とする。</u> e. 安定性 <u>出力分布の振動が生じないように、炉心に十分な減衰特性を持たせた設計とするか、又はたとえ振動が生じてもそれを検出し、容易に抑制できる設計とする。</u> 3.3.5 核設計の内容 (2) 反応度係数 (中略) このように、反応度変化を補償する主な2つの効果、<u>ドップラ係数及び減速材温度係数は、高温出力運転中常に負に保たれており、発電用原子炉に固有の安全性を与えている。</u> (4) 安定性 キセノンによる出力分布の空間振動で問題となるのは、軸方向振動のみであり、<u>水平方向振動は、炉心寿命中十分な減衰性を有する。</u></p>

軸方向の出力振動に関する適合性について

1. 設置許可基準規則第 15 条第 1 項と第 2 項の整理

設置許可基準規則第 15 条第 1 項においては「原子炉固有の出力抑制特性を有するとともに、発電用原子炉の反応度を制御することにより核分裂の連鎖反応を制御できる能力を有するものでなければならない」、また、解釈において、「反応度を制御することにより核分裂の連鎖反応を制御できる能力を有する」とは出力振動が発生した場合にあってもそれを容易に制御できることを含む。ここで、「容易に制御できる」とは、燃料の許容損傷限界を超える状態に至らないよう十分な減衰特性を持ち、又は出力振動を制御し得ることを意味する。」と記載されている。

一方、第 2 項においては「燃料要素の許容損傷限界を超えないものでなければならない」、また、解釈において「燃料の許容損傷限界の設定は、燃料ペレットの最高温度、燃料被覆管の最高温度、最大熱流束、最小限界熱流束比、最小限界出力比、燃料ペレットの最大エンタルピー、燃料被覆管の最大変形量及び最大線出力密度（BWR）等が判断の基礎となる。」と記載されている。

従って、第 1 項に対する適合方針としては、間接的には燃料の許容損傷限界を超える状態に至らないことを目的とし、炉心が十分な減衰特性を持ち、出力振動を制御し得る設計としている。

また、第 2 項に対する適合方針としては、直接的に炉心が燃料要素の許容損傷限界を超えない設計としている。

2. 出力振動のうち軸方向の振動について

出力振動のうち、水平方向振動については、ドップラ係数及び減速材温度係数による反応度フィードバック効果により炉心寿命中十分な減衰性を有している。

また、出力振動のうち軸方向の振動についても、固有の負のフィードバック特性のうち、ドップラ係数が軸方向の振動抑制に大きな効果を有しており、炉心寿命中の大部分において減衰特性を有しているが、燃焼が進むにつれて軸方向出力分布がより平坦化されることから、サイクル末期では軸方向の出力振動が起こる可能性がある。

ただし、この軸方向の出力振動はアキシヤルオフセットを適正な範囲に維持することにより容易に避けることができるとともに、炉外核計装で軸方向中性子束偏差を計測することにより確実かつ容易に検出でき、制御棒クラスタの操作によって容易に制御可能である。

従って、設置許可基準規則第 15 条第 1 項の要求として想定する軸方向の出力振動については、十分な減衰特性を持つこととして「ドップラ係数は負になるように設計する」こと及び軸方向の出力振動が制御可能であることとして、「制御棒クラスタの反応度制御能力」で適合すると考える。

上記内容を踏まえ、本文五号及び添付書類八においては次表の通り記載している。

本文五号	添付書類八
<p>ハ、原子炉本体の構造及び設備</p> <p>(1) 発電用原子炉の炉心</p> <p>(iii) 主要な核的制限値</p> <p><u>発電用原子炉を安全かつ安定に制御すること*</u>を目的として、次のような核的制限値を設定する。</p> <p>なお、発電用原子炉は高温状態以外で臨界としない設計とする。</p> <p>d. 減速材温度係数及びドップラ係数</p> <p>減速材温度係数は、高温出力運転状態では負になるように設計する。また、<u>ドップラ係数は負になるように設計</u>する。</p> <p>ヘ、計測制御系統施設の構造及び設備</p> <p>(3) 制御設備</p> <p>(iii) <u>反応度制御能力</u></p> <p>a. <u>制御棒クラスタ</u></p> <p><u>制御する最大過剰反応度は、約 $0.03\Delta K/K$ とし、その場合の反応度制御能力は約 $0.05\Delta K/K$ とする。</u></p> <p>(最大反応度価値を有する制御棒クラスタ1本が、全引抜位置のまま挿入できない場合)</p> <p>※「発電用原子炉を安全かつ安定に制御すること」には、設置許可基準規則の解釈に倣い「出力振動が発生した場合にあってもそれを容易に制御できることを含む」と考えられる。</p>	<p>3. 発電用原子炉及び炉心</p> <p>3.3 核設計</p> <p>3.3.1 概要</p> <p><u>ドップラ係数は常に負</u>であり、減速材温度係数は高温出力運転状態では負に保たれているため、発電用原子炉に固有の安全性を与えている。また、<u>キセノンによる出力振動のうち、径方向振動は収束性であり、軸方向振動も炉心寿命中の大部分において収束性である。サイクル末期では軸方向振動が起こる可能性があるが、たとえ振動が生じて制御棒クラスタの操作によって容易に抑制可能である。</u></p> <p>3.3.2 設計方針</p> <p>(2) これらを基本とし、濃縮度、ガドリニア濃度等を考慮した上で、以下の方針に基づき具体的設計を行う。</p> <p>c. 反応度係数</p> <p><u>炉心が負の反応度フィードバック特性を有するように、ドップラ係数は常に負</u>であり、かつ、高温出力運転状態で減速材温度係数は負となる設計とし、これらを総合した反応度出力係数が運転時の異常な過渡変化時においても出力抑制効果を有する設計とする。</p> <p>e. 安定性</p> <p><u>出力分布の振動が生じないように、炉心に十分な減衰特性を持たせた設計とするか、又はたとえ振動が生じてそれを検出し、容易に抑制できる設計とする。</u></p> <p>3.3.5 核設計の内容</p> <p>(1) <u>反応度制御</u></p> <p>炉心の反応度制御は、<u>制御棒クラスタの操作及び1次冷却材中のほう素濃度調整の原理の異なる2つの方法によって行う。</u></p> <p>(2) 反応度係数</p> <p>(中略) このように、反応度変化を補償する主な2つの効果、<u>ドップラ係数及び減速材温度係数は、高温出力運転中常に負に保たれており、発電用原子炉に固有の安全性を与えている。</u></p> <p>(4) 安定性</p> <p><u>キセノンによる出力分布の空間振動で問題となるのは、軸方向振動のみであり、水平方向振動は、炉心寿命中十分な減衰性を有する。軸方向振動に対しては、減速材温度係数による効果は小さいが、ドップラ係数が振動の抑制に大きな効果を有している。サイクル末期では軸方向振動が起こる可能性があるが、この軸方向振動は、制御グループの制御棒クラスタを操作して、アキシヤルオフセットを適正な範囲に維持することにより、容易に避けることができるとともに、たとえ振動が生じてそれを検出し、制御グループの制御棒クラスタの操作によって容易に抑制可能である。</u></p> <p>第 3.3.1 表 核設計値 (4号炉)</p> <p>(5)<u>反応度制御能力 (取替炉心)</u></p> <p><u>制御棒クラスタ 約 $0.05\Delta K/K$</u></p> <p>〔最大反応度価値を有する制御棒クラスタ 1本挿入不能時〕</p>

設置許可基準規則第 15 条第 1 項適合性説明における反応度制御能力について

1. 制御棒クラスタ及びほう素濃度調整の役割

反応度制御系統である制御棒クラスタ（制御棒制御系）及びほう素濃度調整（化学体積制御設備）の設計上の役割は以下の通りである。

○制御棒クラスタ

起動、停止、負荷変化等に伴う比較的急速な反応度変化を制御

○ほう素濃度調整

燃料の燃焼に伴う反応度変化、キセノン、サマリウム等の変化に伴う反応度変化、常温から運転温度までの温度変化に伴う反応度変化等の比較的緩やかな反応度変化を制御

設置許可基準規則第 15 条第 1 項については、その解釈において出力振動が生じた場合にあっては出力振動が制御可能であることも求められている。この要求への適合性に対しては、軸方向振動の抑制並びに原子炉出力の設計負荷変化及び外乱に起因する反応度変化を想定する動特性解析において、比較的急速な反応度変化を制御することを目的として制御棒クラスタの動作を考慮している。

一方、ほう素濃度調整による反応度制御能力は比較的緩やかな反応度変化を制御するものであるため、第 15 条第 1 項への適合性に対しては期待していない。

2. 本申請における変更内容

本申請においては、高燃焼度燃料使用に伴う中性子スペクトル硬化による制御棒価値低下及び核設計手法の変更（添付参照）により実態に即した計算が可能となったことから、制御棒クラスタの反応度制御能力を以下のように変更している。なお、先行プラントの記載に合わせて、有効数字を小数点以下 2 桁に統一している。

単位： $\Delta K/K$

	変更前	変更後
本文五号	約 0.054 ^{※1}	約 0.05 ^{※3}
添付書類八	約 0.06 ^{※2}	約 0.05 ^{※3}
核設計手法	1, 2 次元合成核設計手法	3 次元核設計手法 ^{※4}

※ 1：保守的に燃料集合体最高燃焼度 39GWd/t 燃料の値（0.0539）を四捨五入

※ 2：燃料集合体最高燃焼度 48GWd/t 燃料の値（0.0557）を四捨五入

※ 3：燃料集合体最高燃焼度 55GWd/t 燃料の値（0.0460）を四捨五入

※ 4：「三菱 PWR の新核設計手法と信頼性」MAPI-1087 改 6、三菱重工業、平成 16 年

「PWR 核設計手法と信頼性（改良 NULIF システム）」NFK-8102、原子燃料工業、平成 7 年

制御棒クラスタの反応度制御能力算出における 3次元核設計手法採用に伴う変更点について

制御棒クラスタの反応度制御能力算出においては、3次元核設計手法の採用に伴い、以下の項目の取扱いを変更している。

- ・制御棒クラスタ位置
- ・ほう素濃度
- ・所要制御反応度

【制御棒クラスタ位置】

1, 2次元合成核設計手法では制御棒クラスタバンク D 挿入限界位置を直接模擬できないため、制御棒クラスタ全引抜状態から最大反応度価値を有する制御棒クラスタ 1 本が全引抜位置のまま挿入できず、他の制御棒クラスタは全挿入されるものとして制御棒クラスタの反応度を求め、制御棒クラスタバンク D の全引抜位置から挿入限界までの反応度については別途評価することにより求め、所要制御反応度の方に加えることで考慮している。

一方、3次元核設計手法では制御棒クラスタバンク D 挿入限界位置を直接模擬できるため、挿入限界位置を考慮している。

また、キセノン状態についても同様にこれらの制御棒クラスタ位置をそれぞれ考慮している。

【ほう素濃度】

1, 2次元合成核設計手法では、次項に示す所要制御反応度のうち減速材温度効果を求める際、この効果を大きく見積もるために保守的にほう素濃度を 0ppm としており、その条件とあわせてほう素濃度 0ppm として制御棒クラスタ反応度を求めている。

一方、3次元核設計手法では、実態に即した計算が可能となったことを踏まえ、高温全出力状態から高温停止状態に至る反応度変化を解析することとし、ほう素濃度を平衡キセノン、高温全出力状態の臨界ほう素濃度に設定して制御棒クラスタ反応度を求めている。

【所要制御反応度】

1, 2次元合成核設計手法では所要制御反応度のうち、出力欠損をドップラ効果、減速材温度効果及び中性子束再分布効果に分けて、それぞれ個別に求めている。

一方、3次元核設計手法ではこれらの物理現象を一括して取り扱うことが可能となり、一括した出力欠損として求めている。

これらの関係を整理した表を次頁に示す。

	既許可平衡炉心	本申請平衡炉心	既許可平衡炉心
核設計手法	1, 2次元合成 核設計手法	3次元 核設計手法	3次元 核設計手法 (参考)
制御棒クラスタの 反応度制御能力 ($\Delta K/K$)	0.0557 ^{※1}	0.0460 ^{※2}	0.0506 ^{※2}
核設計手法	1, 2次元合成 核設計手法	3次元 核設計手法	3次元 核設計手法
制御棒クラスタ位置 ^{※3}	全引抜位置から 制御棒全挿入	挿入限界位置から 制御棒全挿入	挿入限界位置から 制御棒全挿入
ほう素濃度	Oppm	高温全出力、 制御棒全引抜位置 における 臨界ほう素濃度	高温全出力、 制御棒全引抜位置 における 臨界ほう素濃度
所要制御反応度	ドップラ効果、 減速材温度変 化、ボイド減 少、中性子束再 分布効果、挿入 限界	出力欠損（ドップ ラ効果、減速材温 度変化、中性子束 再分布効果を一括 して評価）、ボイド 減少	出力欠損（ドップ ラ効果、減速材温 度変化、中性子束 再分布効果を一括 して評価）、ボイド 減少

※1：制御棒クラスタ全引抜状態から、最大反応度値を有する制御棒クラスタ 1 本が全引抜位置のまま挿入できないものとし、他の制御棒クラスタを全挿入させて反応度を求め、さらに、設計裕度 10%を差し引いた値

※2：制御棒クラスタのバンク D が挿入限界まで挿入されている状態から、最大反応度値を有する制御棒クラスタ 1 本が全引抜位置のまま挿入できないものとし、他の制御棒クラスタを全挿入させて反応度を求め、さらに、設計裕度 10%を差し引いた値

※3：キセノン状態はそれぞれの制御棒位置を考慮した状態

初装荷炉心に係る記載の取扱いについて

添付書類八「3. 発電用原子炉及び炉心」では、基本的には申請する典型的な炉心の設計値等を示すこととしている。

初装荷炉心に係る添付書類八の記載については、既許可の申請書には記載しているものの、本申請以降の炉心運用においては初装荷炉心のように全て新燃料で構成するような炉心運用は想定されない。また、本申請においては、本申請以降の炉心運用の観点で安全解析使用値への影響を確認しており、初装荷炉心のような炉心を運用することは想定していないため、安全解析への影響を確認する必要はない。

これらの本申請以降の炉心運用との相違及び本申請における安全評価との関係性の観点から、初装荷炉心に係る記載を削除することとした。

なお、当社の先行プラントにおいても同様に削除している。

初装荷炉心に係る既許可の申請書記載のうち、本申請に伴い削除した該当箇所を以下に示す。

【添付書類八】

- ・ 第 3.2.1(1)表 燃料の設備仕様（4号炉）
 (1)燃料のうち燃焼度
- ・ 第 3.3.1(1)表 核設計値（4号炉）
 (1)炉心のうち平均燃焼度
 (4)実効増倍率（サイクル初期）
 (5)制御装置の反応度制御能力
- ・ 第 3.3.2(1)表 反応度停止余裕（4号炉）
- ・ 第 3.3.3(1)表 炉心の主要パラメータ(1)（4号炉）
- ・ 第 3.3.4(1)表 炉心の安全性確認項目(1)（4号炉）

25 条

反応度制御系統及び原子炉停止系統

設置許可基準規則第 25 条第 2 項第二号から第四号における
炉心状態及び反応度制御系統について

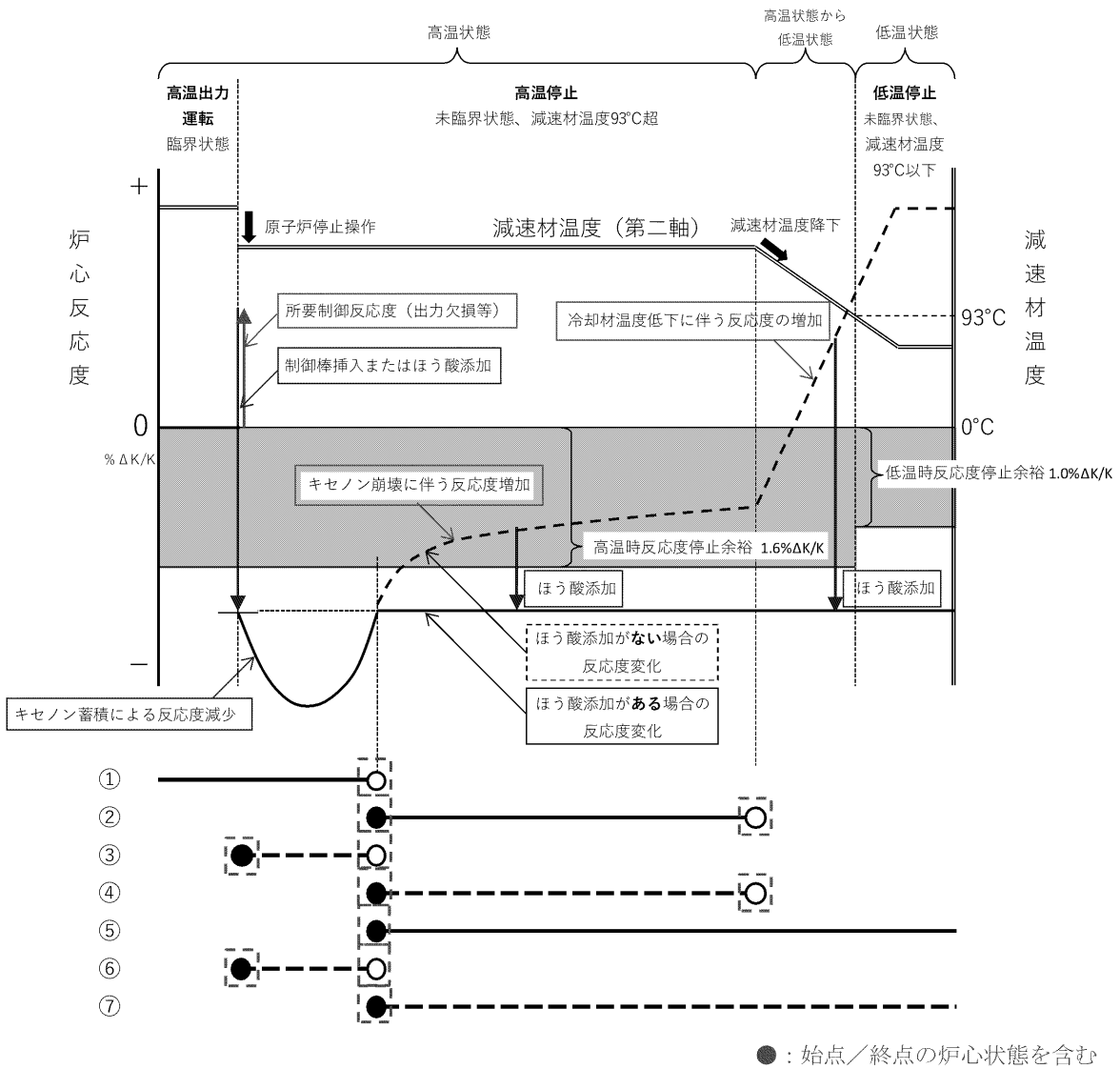
設置許可基準規則第 25 条第 2 項第二号から第四号における炉心状態及び炉心状態の移行・維持に使用する反応度制御系統を下表に示すとともに、高温状態から低温状態への移行時に生じ得る炉心反応度について、制御する反応度と反応度制御系統の制御能力との関係にて整理した一例を図に示す。

表 炉心状態及び炉心状態の移行・維持に使用する反応度制御系統

第 25 条 第 2 項	炉心状態	移行・維持	反応度制御系統		状態 番号
第二号	通常運転時の 高温状態	未臨界に移行、 未臨界を維持	制御棒クラスタまたは ほう素濃度調整		①
		長期の臨界未 満の維持	ほう素濃度調整		②
	運転時の異常 な過渡変化時 の高温状態	未臨界に移行、 未臨界を維持	制御棒 クラスタ	左記に加え、非常 用炉心冷却設備に よる 1 次冷却材中 へのほう酸注入 ^{※1}	③
		長期の臨界未 満の維持	ほう素濃度調整		④
第三号	通常運転時及 び運転時の異 常な過渡変化 時における低 温状態	未臨界に移行、 未臨界を維持	ほう素濃度調整		⑤
第四号	設計基準事故 時	未臨界へ移行、 未臨界を維持	制御棒 クラスタ	左記に加え、非常 用炉心冷却設備に よる 1 次冷却材中 へのほう酸注入 ^{※2}	⑥
		未臨界を維持 (長期の臨界 未満の維持、低 温未臨界状態 の達成)	ほう素濃度調整		⑦

※1 「2 次冷却系の異常な減圧」のように炉心が冷却されるような運転時の異常な過渡変化時

※2 「主蒸気管破断」のように炉心が冷却されるような設計基準事故時



○：始点／終点の炉心状態を含まない

図 設置許可基準規則第 25 条第 2 項で規定している炉心状態並びに反応度制御の目的及び制御時に期待する反応度制御系統

設置許可基準規則第 25 条第 2 項第二号から第四号における対象設備について

設置許可基準規則第 25 条第 2 項第二号から第四号における対象設備及び要求事項を示すとともに、それに対する設備設計及び仕様を表に示す。なお、本資料の表中にある状態番号は、別紙 3 「設置許可基準規則第 25 条第 2 項第二号から第四号における炉心状態及び反応度制御系統について」の図表における状態番号に対応するものである。

表 第 25 条第 2 項第二号から第四号の対象設備及び要求事項等

第 25 条 第 2 項	要求事項	設備	設備設計及び仕様	状態 番号
第二号	通常運転時の高温状態において、二以上の独立した系統がそれぞれ高温出力運転状態から未臨界への移行、及びキセノン崩壊により反応度が添加されるまでの期間の未臨界の維持に必要な反応度制御能力を有すること。	制御棒クラスタ	<p>【設備設計】 高温出力運転状態から未臨界へ移行し、キセノン崩壊により反応度が添加されるまでの期間において、所定の反応度停止余裕（1.6% ΔK/K 以上）をもって未臨界に維持できる設計としている。</p> <p>【設備仕様】 高燃焼度燃料導入等に伴う影響を考慮しても、制御する反応度 2.81% ΔK/K に対して、制御棒クラスタの反応度制御能力は 4.60% ΔK/K であり、未臨界へ移行でき、キセノン崩壊により反応度が添加されるまでの期間において、反応度停止余裕 1.79% ΔK/K をもって未臨界に維持できる。</p> <p>なお、高燃焼度燃料導入等に伴う影響の詳細については、添付 1 のとおり。</p>	①
		ほう酸	<p>【設備設計】 制御棒クラスタ挿入による高温臨界未満の状態から、キセノン崩壊により反応度が添加されるような反応度変化がある場合にも、化学体積制御設備であるほう酸タンクからのほう酸添加により未臨界に維持でき、高温状態から低温状態まで移行させ、低温状態において所定の反応度停止余裕（1.0% ΔK/K 以上）をもって未臨界に維持できる設計としている。</p> <p>ここでほう酸に要求される反応度制御能力は、上記に比べ、その炉心の状態変化から小さいものである。そのため、上記を満足する設計とすることで、化学体積制御設備であるほう酸タンクからのほう酸添加により、高温出力運転状態から未臨界へ移行し、キセノン崩壊により反応度が添加されるまでの期間において、未臨界を維持できる設計となっている。</p> <p>【設備仕様】 高燃焼度燃料導入等に伴う影響を考慮しても、必要ほう酸水量 [] m³ に対して、ほう酸タンクの有効容量約 225m³ であり、未臨界へ移行でき、キセノン崩壊により反応度が添加され</p>	①

[] : 商業機密に係る事項のため、公開できません。

		<p>るまでの期間において、未臨界に維持できる。</p> <p>なお、高燃焼度燃料導入等に伴う影響の詳細については、添付 2 のとおり。</p>	
<p>通常運転時の高温状態において、高温出力運転状態からの未臨界への移行後、キセノン濃度変化による反応度変化がある場合にも高温状態での臨界未満の維持に必要な反応度制御能力を有すること。</p>	ほう酸	<p>【設備設計】</p> <p>制御棒クラスタ挿入による高温臨界未満の状態からキセノン崩壊により反応度が添加されるような反応度変化がある場合にも、化学体積制御設備であるほう酸タンクからのほう酸添加により未臨界に維持でき、高温状態から低温状態まで移行させ、低温状態において所定の反応度停止余裕（1.0% ΔK/K 以上）をもって未臨界に維持できる設計としている。</p> <p>【設備仕様】</p> <p>高燃焼度燃料導入に伴う影響を考慮しても、必要ほう酸水量 [] m³ に対して、ほう酸タンクの有効容量約 225m³ であり、未臨界へ移行でき、キセノン濃度変化による反応度変化がある場合にも、未臨界に維持できる。</p> <p>なお、高燃焼度燃料導入等に伴う影響の詳細については、添付 2 のとおり。</p>	②
<p>運転時の異常な過渡変化時の高温状態においても、燃料要素の許容損傷限界を超えることなく、高温出力運転状態から未臨界への移行、及びキセノン崩壊により反応度が添加されるまでの期間の未臨界の維持に必要な反応度制御能力を有すること。</p>	制御棒クラスタ	<p>【設備設計】</p> <p>高温出力運転状態から未臨界へ移行し、キセノン崩壊により反応度が添加されるまでの期間において、所定の反応度停止余裕（1.6% ΔK/K 以上）をもって未臨界に維持できる設計としている。</p> <p>【設備仕様】</p> <p>高燃焼度燃料導入等に伴う影響を考慮しても、制御する反応度 2.81% ΔK/K に対して、制御棒クラスタの反応度制御能力は 4.60% ΔK/K であり、未臨界へ移行でき、キセノン崩壊により反応度が添加されるまでの期間において、反応度停止余裕 1.79% ΔK/K をもって未臨界に維持できる。</p> <p>なお、高燃焼度燃料導入等に伴う影響の詳細については、添付 1 のとおり。</p>	③
<p>「2次冷却系の異常な減圧」のように炉心が冷却</p>	ほう酸	<p>【設備設計】</p> <p>制御棒クラスタの炉心への挿入に加え、非常用炉心冷却設備である燃料取替用水ピットか</p>	③



：商業機密に係る事項のため、公開できません。

	されるような運転時の異常な過渡変化時において、制御棒クラスタの炉心への挿入に加えて作動することにより、未臨界への移行及び高温状態での臨界未満の維持に必要な反応度制御能力を有すること。		<p>らのほう酸添加によって、炉心が冷却されるような運転時の異常な過渡変化時において高温状態で臨界未満に移行し、維持できる設計としている。</p> <p>【設備仕様】</p> <p>高燃焼度燃料導入に伴う影響により必要な燃料取替用水ピットのほう素濃度が 2500ppm から 2700ppm に増加するため、3号炉との共用設備（燃料取替用水補助タンク）の運用を考慮して、非常用炉心冷却設備である燃料取替用水ピットのほう素濃度を 2500ppm 以上から 3100ppm 以上に変更する。</p> <p>添付書類十に示す「2次冷却系の異常な減圧」の安全評価においては、一時的に臨界となるが非常用炉心冷却設備が作動することにより、高温状態で臨界未満への移行、維持ができる。なお、高燃焼度燃料導入等に伴う影響の詳細については、添付 3 のとおり。</p>	
	運転時の異常な過渡変化時の高温状態において、高温出力運転状態からの未臨界への移行後、キセノン濃度変化による反応度変化がある場合にも高温状態での臨界未満の維持に必要な反応度制御能力を有すること。	ほう酸	<p>【設備設計】</p> <p>制御棒クラスタ挿入による高温臨界未満の状態からキセノン崩壊により反応度が添加されるような反応度変化がある場合にも、化学体積制御設備であるほう酸タンクからのほう酸添加により未臨界に維持でき、高温状態から低温状態まで移行させ、低温状態において所定の反応度停止余裕（1.0% ΔK/K 以上）をもって未臨界に維持できる設計としている。</p> <p>【設備仕様】</p> <p>高燃焼度燃料導入に伴う影響を考慮しても、必要ほう酸水量、\square m³ に対して、ほう酸タンクの有効容量約 225m³ であり、未臨界へ移行でき、キセノン濃度変化による反応度変化がある場合にも、未臨界に維持できる。</p> <p>なお、高燃焼度燃料導入等に伴う影響の詳細については、添付 2 のとおり。</p>	④
第三号	通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における低温状態において、高温臨界未満の状態からキセノン崩壊及び原子炉冷	ほう酸	<p>【設備設計】</p> <p>制御棒クラスタ挿入による高温臨界未満の状態から、化学体積制御設備であるほう酸タンク及びほう酸ポンプによるほう酸添加により、キセノン崩壊及び原子炉冷却材温度変化による反応度添加を補償しつつ、低温未臨界状態へ移行でき、低温状態において所定の反応度停止余裕（1.0% ΔK/K 以上）をもって未臨界に維持できる設計としている。</p>	⑤

\square : 商業機密に係る事項のため、公開できません。

	却材温度変化による反応度添加を補償し、低温未臨界状態へ移行、及び維持するために必要な反応度制御能力を有すること。		<p>【設備仕様】</p> <p>高燃焼度燃料導入等に伴う影響を考慮しても、必要ほう酸水量 $□$ m³ に対して、ほう酸タンクの有効容量約 225m³ であり、高温臨界未満の状態から低温未臨界状態へ移行でき、所定の反応度停止余裕 (1.0% ΔK/K 以上) をもって低温未臨界状態に維持できる。</p> <p>また、高燃焼度燃料導入等に伴う影響を考慮しても、ほう酸ポンプ 1 台使用時において 0.18×10^{-3} (ΔK/K) /min 以上の負の反応度添加が可能であり、キセノン崩壊及び原子炉冷却材温度変化による反応度添加を十分に補償できる。</p> <p>なお、高燃焼度燃料導入等に伴う影響の詳細については、添付 2、添付 4 及び添付 5 のとおり。</p>	
第四号	一次冷却材喪失その他の設計基準事故時の高温状態において、高温出力運転状態から未臨界への移行、及びキセノン崩壊により反応度が添加されるまでの期間の未臨界の維持に必要な反応度制御能力を有すること。	制御棒クラスタ	<p>【設備設計】</p> <p>高温出力運転状態から未臨界へ移行し、キセノン崩壊により反応度が添加されるまでの期間において、所定の反応度停止余裕 (1.6% ΔK/K 以上) をもって未臨界に維持できる設計としている。</p> <p>【設備仕様】</p> <p>高燃焼度燃料導入等に伴う影響を考慮しても、制御する反応度 2.81% ΔK/K に対して、制御棒クラスタの反応度制御能力は 4.60% ΔK/K であり、未臨界へ移行でき、キセノン崩壊により反応度が添加されるまでの期間において、反応度停止余裕 1.79% ΔK/K をもって未臨界に維持できる。</p> <p>なお、高燃焼度燃料導入等に伴う影響の詳細については、添付 1 のとおり。</p>	⑥
	「主蒸気管破断」のように炉心が冷却されるような設計基準事故時において、制御棒クラスタの炉心への挿入に加えて作動することにより、未臨界	ほう酸	<p>【設備設計】</p> <p>制御棒クラスタの炉心への挿入に加え、非常用炉心冷却設備である燃料取替用水ピットからのほう酸添加によって、炉心が冷却されるような設計基準事故時において高温状態で臨界未満に移行し、維持できる設計としている。</p> <p>【設備仕様】</p> <p>高燃焼度燃料導入に伴う影響により必要な燃料取替用水ピットのほう素濃度が 2500ppm</p>	⑥

□□□□ : 商業機密に係る事項のため、公開できません。

<p>への移行及び高温状態での臨界未満の維持に必要な反応度制御能力を有すること。</p>		<p>から 2700ppm に増加するため、3号炉との共用設備（燃料取替用水補助タンク）の運用を考慮して、非常用炉心冷却設備である燃料取替用水ピットのほう素濃度を 2500ppm 以上から 3100ppm 以上に変更する。</p> <p>添付書類十に示す「主蒸気管破断」の安全評価においては、一時的に臨界となるが非常用炉心冷却設備が作動することにより、高温状態での臨界未満への移行、維持ができる。</p> <p>なお、高燃焼度燃料導入等に伴う影響の詳細については、添付 3 のとおり。</p>	
<p>一次冷却材喪失その他の設計基準事故時において、高温臨界未満の状態からキセノン崩壊及び原子炉冷却材温度変化による反応度添加を補償し、低温未臨界状態へ移行及び維持するために必要な反応度制御能力を有すること。</p>	<p>ほう酸</p>	<p>【設備設計】</p> <p>制御棒クラスタ挿入による高温臨界未満の状態から、化学体積制御設備であるほう酸タンク及びほう酸ポンプによるほう酸添加により、キセノン崩壊及び原子炉冷却材温度変化による反応度添加を補償しつつ、低温未臨界状態へ移行でき、低温状態において所定の反応度停止余裕（1.0% ΔK/K 以上）をもって未臨界に維持できる設計としている。</p> <p>【設備仕様】</p> <p>高燃焼度燃料導入等に伴う影響を考慮しても、必要ほう酸水量 [] m³ に対して、ほう酸タンクの有効容量約 225m³ であり、高温臨界未満の状態から低温未臨界状態へ移行でき、所定の反応度停止余裕（1.0% ΔK/K 以上）をもって低温未臨界状態に維持できる。</p> <p>また、高燃焼度燃料導入等に伴う影響を考慮しても、ほう酸ポンプ 1 台使用時において 0.18 × 10⁻³ (ΔK/K) /min 以上の負の反応度添加が可能であり、キセノン崩壊及び原子炉冷却材温度変化による反応度添加を十分に補償できる。</p> <p>なお、高燃焼度燃料導入等に伴う影響の詳細については、添付 2、添付 4 及び添付 5 のとおり。</p>	<p>⑦</p>

[] : 商業機密に係る事項のため、公開できません。

制御棒クラスタの反応度制御能力への影響

高燃焼度燃料導入に伴う中性子スペクトル硬化により、制御棒クラスタの反応度価値（反応度制御能力）は低下するものの、表 1 に示すとおり最大反応度価値を有する制御棒クラスタ 1 本が全引抜位置のまま挿入できない場合でも、高温停止状態では $1.6\% \Delta K/K$ 以上の反応度停止余裕が確保でき、炉心を未臨界に維持できる。

なお、現行は 1,2 次元核設計手法を用いていたが、今回は 3 次元核設計手法を適用している。

表 1 反応度停止余裕の評価結果

	今回*1)	現行*2)
所要制御反応度 ($\% \Delta K/K$)	約 2.81	約 3.68
制御棒クラスタの反応度*3) ($\% \Delta K/K$)	約 4.60	約 5.57
反応度停止余裕 ($\% \Delta K/K$)	約 1.79	約 1.89

*1) 3 次元核設計手法

*2) 1, 2 次元核設計手法

*3) 制御棒クラスタのバンク D が挿入限界まで挿入されている状態から、最大反応度価値を有する制御棒クラスタ 1 本が全引抜位置のまま挿入できないものとし、他の制御棒クラスタを全挿入させて反応度を求め、さらに、設計裕度 10% を差し引いた値

高温停止から低温停止に必要なほう酸水量への影響について

高燃焼度燃料の導入に伴う中性子スペクトル硬化によりほう酸の反応度価値（反応度制御能力）は低下し、表 1 及び表 2 に示すとおり高温停止から低温停止に必要なほう素濃度及びほう酸水量は増加するものの、原子炉停止系であるほう酸タンクの有効容量が上回るため、低温停止状態で $1.0\% \Delta K/K$ 以上の反応度停止余裕が確保でき、炉心を未臨界に維持できる。

表 1 必要ほう酸水量評価に用いるほう素濃度

	ほう素濃度 (ppm)	
	今回	現行
高温全出力時のほう素濃度と、最大反応度価値を有する制御棒 1 本が全引抜状態で残りの制御棒が全挿入での低温停止時のほう素濃度との濃度差	1,400	1,300

表 2 低温停止に必要なほう酸水量

ほう酸タンク有効容量 (m ³)	必要ほう酸水量 (m ³)	
	今回	現行
約 225		

[- - -]: 商業機密に係る事項のため、公開できません。

燃料取替用水ピットのほう素濃度の根拠について

高燃焼度燃料導入に伴う、非常用炉心冷却設備である燃料取替用水ピットのほう素濃度の設定に際しては、安全評価の観点からは、主に以下の事象評価を設計要求とする他、玄海 3 号炉との設備共有の観点を考慮して、ほう素濃度を変更している。

- ①燃料取替停止時の未臨界性確保
- ②原子炉冷却材喪失（LOCA）時の未臨界性確保
- ③ほう素の異常な希釈（プラント起動時）時の対応操作時間の余裕の確保

1. 各設計要求に基づくほう素濃度設定の考え方

- ①燃料取替停止時の未臨界性確保

サイクル初期、低温停止、制御棒全挿入、Xe なしの状態で 5%未臨界を確保できるようにする。

また、対象炉心としては、ステップ 2 燃料を装荷した平衡炉心の他、移行炉心、予定外炉心も考慮する。

- ②原子炉冷却材喪失（LOCA）時の未臨界性確保

LOCA 後の長期冷却において、1 次冷却系、燃料取替用水ピット及び蓄圧タンクのほう酸水が均一に混合するとして、そのほう素濃度が臨界ほう素濃度を上回るようにする。

- ③ほう素の異常な希釈（プラント起動時）時の対応操作時間の余裕の確保

起動時に燃料取替用水ピットのほう素濃度と同一の状態から希釈が始まるとするが、その場合に事象の検知から希釈停止操作開始までの時間を 10 分、さらに、機器の停止に要する時間分を 20 秒（=0.33 分）として、安全評価指針に適合するように 10.33 分以上を満足する初期ほう素濃度にする。

上述の評価から各設計要求に基づくほう素濃度は、表 1 のとおり。

表 1 各設計要求に基づくほう素濃度*4)

項目	要素	ほう素濃度 (ppm)	
		今回	現行
①燃料取替停止時の未臨界性確保	燃料取替停止ほう素濃度計算値 (BOC,CSD,ARI,keff=0.95)	2,163	1,944
	RWSP 必要ほう素濃度算出に用いる 燃料取替停止ほう素濃度*1)	2,600	2,350
	RWSP 必要ほう素濃度	2,600	2,350
②原子炉冷却材喪失 (LOCA) 時の未臨界性確保	臨界ほう素濃度計算値 (BOC,CZP,ARO,keff=1.00)	1,963	1,914
	RWSP 必要ほう素濃度算出に用いる 臨界ほう素濃度*1)	2,400	2,300
	RWSP 必要ほう素濃度*2)	2,650	2,450
③ほう素の異常な希釈 (プラント起動時) 時の対応操作時間の余裕の確保	臨界ほう素濃度計算値 (BOC,CZP,ARI,keff=1.00)	1,568	1,409
	RWSP 必要ほう素濃度算出に用いる 臨界ほう素濃度*1)	2,000	1,800
	RWSP 必要ほう素濃度*3)	2,700	2,400

*1) 各ほう素濃度計算値に核的不確定性及び取替炉心の変動分を含んだ余裕を考慮したほう素濃度

*2) LOCA 発生後に 1 次冷却材及び蓄圧タンクのほう酸水と混合された際に、未臨界を達成するために必要な RWSP ほう素濃度

*3) プラント起動時 (初期ほう素濃度 : RWSP ほう素濃度) にほう素を誤って希釈した際に、原子炉が臨界になるまでに、運転員が異常状態を検知し、これを終結させるのに十分な時間を確保するために必要な RWSP ほう素濃度

*4) 略語の定義

BOC : サイクル初期

CSD/CZP : 低温停止状態 / 低温零出力状態

ARI/ARO : 制御棒全挿入 / 制御棒全引抜

RWSP : 燃料取替用水ピット

2. 燃料取替用水ピットほう素濃度の決定

燃料取替用水ピットのほう素濃度は、1. で評価した要求値に対して余裕を確保しつつ、玄海3号炉との設備共用の観点から表2のとおり決定している。

表2 燃料取替用水ピットほう素濃度

	ほう素濃度 (ppm)	
	今回※1	現行※2
燃料取替用水ピット	3,100 以上	2,500 以上

※1 1. の評価値の最大値は2,700ppmであるが、玄海3号炉との設備共用の観点から3,100ppmとしている。

※2 1. の評価値の最大値2,450ppmに対し、運用管理の観点から100ppm単位に切り上げて2,500ppmとしている。

ほう素濃縮速度とキセノン消滅・冷却材温度変化速度の関係

1. キセノン濃度変化に対するほう素濃度調整の反応度制御能力

1-1. ほう素濃縮速度

以下に示すとおり、低温停止に必要なほう素濃度までの濃縮にかかる時間は、平衡キセノン状態から停止した場合に、正の反応度が添加されるまでの時間に比べて十分短い。

平衡キセノン状態から正の反応度が添加される時間

原子炉停止後のキセノン生成・消滅時の反応度変化を図 1 に示す。これより、平衡キセノン状態から停止した場合に、正の反応度が添加されるのは停止から 15 時間以上経過してからである。

低温停止に必要なほう素濃度まで濃縮するのにかかる時間

高温停止状態から低温停止状態に移行する際に必要なほう素濃度変化量は添付 2 に示した通り 1400ppm であり、このほう素濃度までの濃縮にかかる時間は、添付 5 に示すほう素濃縮速度を使用して評価すると約 7.3 時間である。

1-2. ほう素濃縮による反応度添加速度

以下に示すとおり、原子炉停止後のキセノン消滅による正の反応度添加率は、保守的に評価したほう素濃縮による負の反応度添加率に比べて十分小さい。

原子炉停止後のキセノン消滅による正の反応度添加率

キセノン反応度がピーク状態以降に最大となり、図 1 よりその反応度添加率は大きく見積もっても $2 \times 10^{-5} (\Delta K / K) / \text{min}$ である。

ほう素濃縮速度に対応する負の反応度添加速度

1-1 のほう素濃縮速度に対応する負の反応度添加速度は $0.18 \times 10^{-3} (\Delta K / K) / \text{min}$ である。

以上より、原子炉停止後のキセノン消滅による正の反応度添加率は、保守的に評価したほう素濃縮による負の反応度添加率に比べて十分小さいことから、化学体積制御設備はキセノン濃度変化に対して十分な反応度制御能力を有しているといえる。

2. 冷却材温度降下に対するほう素濃度調整の反応度制御能力

高温停止状態から低温停止状態へ移行する際の冷却材温度降下率を $27.8^\circ\text{C} / \text{hr}$ とした場合、約 10 時間で低温停止状態の温度になる。これに対して、上記の低温停止に必要なほう素濃度にするために必要な時間は約 7.3 時間と短いことから、化学体積

制御設備は冷却材温度降下に伴う反応度変化を十分に制御できる能力を有している¹といえる。

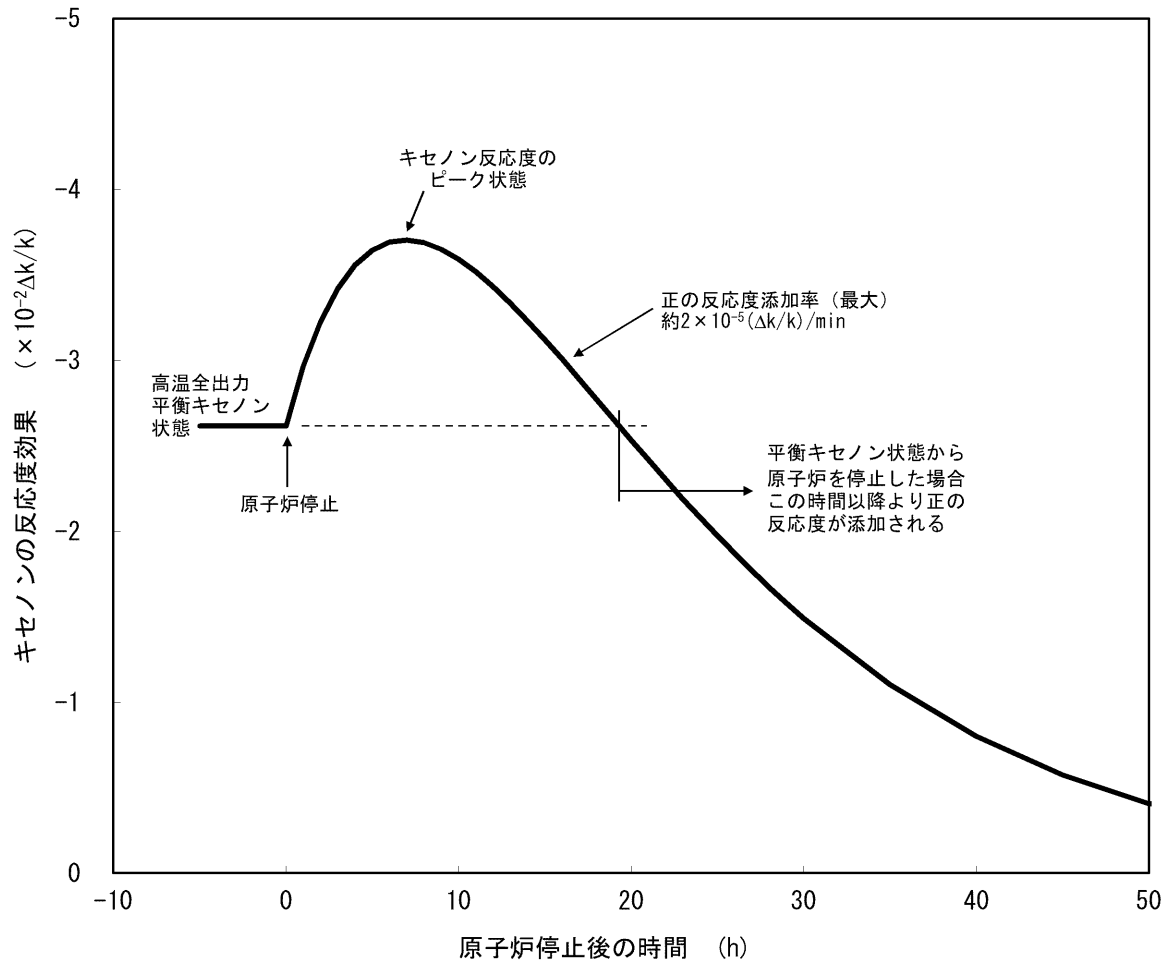


図1 原子炉停止後のキセノン反応度変化
(高燃焼度燃料装荷炉心、平衡炉心、サイクル末期)

¹ 通常は高温停止状態で低温停止状態に必要なほう素濃度まで濃縮してから温度を降下させる。

ほう素添加速度及びほう素添加による負の反応度添加速度について

1. 添付書類八記載数値の算出根拠

<ほう素添加速度； $\partial C(t)/\partial t$ (ppm/min)>

$$\partial C(t)/\partial t = (Q/V) \times (C_{BAT} - C(t)) / 60$$

<反応度添加速度； $\partial \rho/\partial t$ (($\Delta K/K$)/min)>

$$\partial \rho/\partial t = (Q/V) \times (C_{BAT} - C(t)) / 60 \times BW$$

ここで、 $C(t)$; 時刻 t での RCS ほう素濃度(ppm)

C_{BAT} ; ほう酸タンクほう素濃度(ppm)

Q ; 濃縮流量(t/h)

V ; 1次冷却材重量 (添加速度を小さく見積もるため体積を重量と見なして使用 : t)

BW ; ほう素価値(($\Delta K/K$)/ppm)

評価に使用した各パラメータ入力値を下表に示す。

	Q^* (t/h)	V^* (t)	C_{BAT} (ppm)	初期ほう素濃度 (ppm)	BW^* (($\Delta K/K$)/ppm)
現行	17.0	341	7000	2100	6.0×10^{-5}
今回	13.6	351	7000	2100	6.0×10^{-5}

これらの入力値を用いて計算したほう素添加速度及び反応度添加速度の計算結果と、その結果の端数処理の考え方について、次に示す。

(1)ほう素濃度添加速度

	計算結果 (ppm/min)	端数処理 の考え方	端数処理結果 (ppm/min)	添付書類八記載値 (ppm/min)
現行	4.07...	小数点以下 第2位四捨五入	4.1	4.1
今回	3.16...	小数点以下 第2位四捨五入	3.2	約 3.2

(2)負の反応度添加速度

	計算結果 (($\Delta K/K$)/min)	端数処理 の考え方	端数処理結果 (($\Delta K/K$)/min)	添付書類八記載値 (($\Delta K/K$)/min)
現行	$0.244 \dots \times 10^{-3}$	小数点以下 第3位切り捨て	0.24×10^{-3}	0.24×10^{-3}
今回	$0.189 \dots \times 10^{-3}$	小数点以下 第3位切り捨て	0.18×10^{-3}	0.18×10^{-3}

(*)濃縮速度と1次冷却材重量及びほう素価値の取り扱い

	現行	今回	変更理由と数値の根拠
濃縮速度(t/h)	17	13.6	<p>先行プラントと考え方を統一</p> <p>現行： ほう酸ポンプの定格流量 17m³/h をそのまま 17t/h として使用</p> <p>今回： 評価が保守的となるよう、ほう酸ポンプの定格流量 17m³/h に対して、有効流量 13.6t/h を使用</p>
1次冷却材重量(t)	341	351	<p>先行プラントと考え方を統一</p> <p>現行： 高温全出力時の1次冷却材体積 351m³ から熱膨張を考慮し算出した低温時の1次冷却材体積 341m³ を重量として 341t を使用</p> <p>今回： 評価が保守的となるよう、高温全出力時の1次冷却材体積 351m³ をそのまま重量として 351t を使用</p>
ほう素価値 ($(\Delta K/K)/\text{ppm}$)	6.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}	<p>先行プラントと考え方を統一</p> <p>現行： ステップ 1 燃料装荷平衡炉心評価値 $6.9 \times 10^{-5}((\Delta K/K)/\text{ppm})$ を小さめに包絡した $6.0 \times 10^{-5}((\Delta K/K)/\text{ppm})$ を使用</p> <p>今回： 高燃焼度燃料装荷平衡炉心評価値 $6.0 \times 10^{-5}((\Delta K/K)/\text{ppm})$ をそのまま使用**</p>

(**)現行及び今回の平衡炉心のほう素価値は、いずれも通常運転中で最もほう素価値が小さくなるサイクル初期高温全出力時の評価値を使用することで保守性を有していることを鑑み、今回の評価においては、平衡炉心の評価値をそのまま使用している。

ほう素濃度調整による反応度制御能力について

1. 反応度制御能力の値について

本申請におけるほう素濃度調整による反応度制御能力は、高燃焼度燃料の使用に伴う中性子スペクトル硬化によりほう素の反応度価値は低下するものの、燃料取替時のほう素濃度変更及び反応度制御能力の算出方法変更に伴い、結果としてほう素濃度調整による反応度制御能力（ $0.18 \Delta K/K$ 以上）に変更はない。

2. 反応度制御能力の導出方法について

本申請におけるほう素濃度調整による反応度制御能力の導出方法は、ほう素による負の反応度添加速度導出時と同様にほう素価値を用いた導出方法に統一し、以下のとおり変更した。なお、本導出方法は先行プラントと整合している。

既許可の導出方法（ $0.189 \Delta K/K$ を切り捨て）

反応度制御能力 = \ln （純水条件（0ppm）における実効増倍率（1.13755）／燃料取替時のほう素濃度（2500ppm）における実効増倍率（0.94157））から求まる反応度差

本申請の導出方法（ $0.186 \Delta K/K$ を切り捨て）

反応度制御能力 = 純水条件（0ppm）から燃料取替時のほう素濃度（3100ppm）まで濃縮するときのほう素濃度増分 × ほう素価値（ $6.0 \times 10^{-5}(\Delta K/K)/\text{ppm}$ ）

いずれの方法も、最もほう素価値が小さくなるサイクル初期高温全出力時を仮定しており、実際の炉心で高温無負荷温度の状態から燃料取替停止時のほう素濃度まで高める場合よりも小さいほう素価値による評価となっている。

また、本反応度制御能力は安全解析に使用されておらず、何らかの運転状態を担保するためにも使用していないパラメータであり、単に設備の性能を示すものであるが、炉心状態による変動が大きいことから、最も小さい反応度制御能力を示す状態での評価値に「以上」を付けて記載しているものである。