

玄海原子力発電所 審査資料	
資料番号	HB-1-1-3
提出年月日	2023年12月26日

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 >

2023年12月

九州電力株式会社

枠囲みの範囲は、防護上の観点又は商業機密に係る事項のため、公開できません。

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

- ・ 添付資料 1 玄海 3、4 号炉「4 号炉 高燃焼度燃料の使用」
の申請に伴う条文の整理表
- ・ 添付資料 2 高燃焼度燃料の使用に伴うその他設備の影響確認に
ついて
- ・ 添付資料 3 高燃焼度燃料の使用に伴うその他設備の影響確認に
ついて（特定重大事故等対処施設）
- ・ 添付資料 4 玄海原子力発電所 3 / 4 号炉の使用済燃料ピットの
共用状況について

「添付資料 3」については、防護上の観点から公開できないため、
資料番号「HB-1-2-0」に記載します。

15 条
炉心等

<目 次>

1. 基本方針

1.1 要求事項に対する適合性

(1) 適合性説明

2. 炉心等

(別添1) 高燃焼度燃料の機械設計について

(別添2) 高燃焼度燃料装荷炉心の核設計について (動特性含む)

(別添3) 高燃焼度燃料の熱水力設計について

1. 基本方針

1.1 要求事項に対する適合性説明

(1) 適合性説明

(炉心等)

第十五条 設計基準対象施設は、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。

2 炉心は、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時に発電用原子炉の運転に支障が生ずる場合において、原子炉冷却系統、原子炉停止系統、反応度制御系統、計測制御系統及び安全保護回路の機能と併せて機能することにより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。

3 燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、発電用原子炉を安全に停止し、かつ、停止後に炉心の冷却機能を維持できるものでなければならない。

4 燃料体及び反射材並びに炉心支持構造物、熱遮蔽材並びに一次冷却系統に係る容器、管、ポンプ及び弁は、一次冷却材又は二次冷却材の循環、沸騰その他の一次冷却材又は二次冷却材の挙動により生ずる流体振動又は温度差のある流体の混合その他の一次冷却材又は二次冷却材の挙動により生ずる温度変動により損傷を受けないものでなければならない。

5 燃料体は、通常運転時における圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない。

6 燃料体は、次に掲げるものでなければならない。

一 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の燃料体に加わる負荷に耐えるものとする。

二 輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じないものとする。

1 について

濃縮ウラン燃料、軽水減速、軽水冷却、加圧水型の本発電用原子炉は、低濃縮二酸化ウラン燃料及びガドリニア入り低濃縮二酸化ウラン燃料を使用し、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を総合した固有の負の反応度フィードバック特性を持たせることにより、固有の出力抑制特性を有する設計とする。

具体的には、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。ドップラ係数は、急激な反応度増加があった場合でも十分な出力抑制効果を有するように、常に負になる設計とする。減速材温度係数は、高温出力運転状態で負になる設計とする。減速材ボイド係数及び圧力係数は、減速材温度係数と同様、減速材密度の変化に基づく反応度係数であるが、これらによる反応度が炉心に与える効果は、通常、温度の効果に比べ小さい。

これらにより、設計負荷変化及び外乱に起因する反応度変化に対しては、固有の出力抑制特性と原子炉制御設備により原子炉出力の振動が十分な減衰特性を有する設計とするとともに、急激な反応度増加に対しても、固有の出力抑制特性により十分な出力抑制効果を有する設計とする。

発電用原子炉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により、キセノンによる原子炉出力分布の空間振動のうち水平方向振動は減衰特性を有する設計とする。軸方向振動は、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って出力振動を抑制できる設計とする。

また、アキシヤルオフセットが運転目標値から大きく逸脱した場合には、原子炉制御設備又は原子炉保護設備が作動し、出力低下あるいは原子炉トリップを行うことにより、燃料要素の許容損傷限界を超えない設計とする。

2 について

(1) 炉心は、それに関連する1次冷却系統、反応度制御系統、原子炉停止系統、計測制御系統、安全保護回路の機能とあいまって、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において燃料要素の許容損傷限界を超えないように以下の基準を満足する設計とする。

- a. 最小DNBRは、許容限界値以上であること。
- b. 燃料中心最高温度は、二酸化ウラン及びガドリニア入り二酸化ウランそれぞれの溶融点未満であること。

すなわち、炉心設計においては、炉内出力分布が平坦になるような燃料取替方式を採用するほか、必要に応じてバーナブルポイズン又はガドリニア入り二酸化ウラン燃料を使用する。

また、計測制御系統により、原子炉運転中の炉内出力分布を監視できる設計とする。

さらに、燃料中心最高温度が二酸化ウラン及びガドリニア入り二酸化ウランそれぞれの溶融点を超えるか又は最小DNBRが許容限界値を下回るおそれがある場合には、安全保護回路の作動により発電用原子炉を自動的に停止できる設計とする。

(2) 想定される反応度投入過渡事象（原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き）時においては「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針」に定める燃料材のエンタルピに関する燃料要素の許容損傷限界及び「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取扱いについて」に定めるPCMI破損しきい値のめやすを超えることのない設計とする。

3 について

炉心を構成する燃料要素以外の燃料体の構成要素及び原子炉容器内で炉心近辺に位置する燃料体以外の構成要素は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において想定される荷重の組合せに対し、発電用原子炉の安全停止及び炉心の冷却を確保するために必要な構造及び強度を維持し得る設計とする。

4 について

燃料体は、1次冷却材の挙動により生じる流体振動により損傷を受けない設計とする。

炉心支持構造物、熱遮へい材並びに1次冷却系統に係る容器、管、ポンプ及び弁は、1次冷却材又は2次冷却材の循環、沸騰等により生じる流体振動又は温度差のある流体の混合等により生じる温度変動により損傷を受けない設計とする。

5及び6の一 について

燃料体は、通常運転時における燃料要素の内外圧差、燃料要素及び他の材料の照射、負荷の変化により起こる圧力及び温度の変化、化学的効果、静的及び動的荷重、燃料材の変形並びに燃料要素内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が十分な強度を有し、その機能を保持できる設計とし、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重、核分裂生成物の蓄積による燃料被覆材の内圧上昇、熱応力等の荷重に耐える設計とする。

このため、燃料要素は所要の運転期間において、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に、以下の基準を満足できる設計とする。

- (1) 燃料中心最高温度は、二酸化ウラン及びガドリニア入り二酸化ウランそれぞれの溶融点未満であること。
- (2) 燃料要素内圧は、通常運転時において、燃料被覆材の外向きのクリープ変形

により燃料材と燃料被覆材のギャップが増加する圧力を超えないこと。

- (3) 燃料被覆材応力は、燃料被覆材の耐力以下であること。
- (4) 燃料被覆材に生じる円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に対して1%以下であること。
- (5) 累積疲労サイクルは、設計疲労寿命以下であること。

6の二 について

燃料体は、輸送及び取扱中に燃料体に加わる荷重に対して構成部品が十分な強度を有し、燃料体としての機能を阻害することのない設計とする。

また、輸送及び取扱いに当たっては、過度な外力がかからないよう十分な配慮をするとともに、発電所へ搬入後、健全性を確認する。

2. 炉心等

(別添 1) 高燃焼度燃料の機械設計について

(別添 2) 高燃焼度燃料装荷炉心の核設計について (動特性含む)

(別添 3) 高燃焼度燃料の熱水力設計について

高燃焼度燃料装荷炉心の
核設計について
(動特性含む)

目 次

1. 概 要	15 条-別添 2-1
2. 核設計方針	15 条-別添 2-2
3. ステップ 2 燃料の核設計	15 条-別添 2-3
3.1 ウラン 235 濃縮度	15 条-別添 2-3
3.2 ガドリニア入り二酸化ウラン燃料の仕様	15 条-別添 2-3
4. 炉心特性	15 条-別添 2-8
4.1 高燃焼度化に伴う炉心特性への影響	15 条-別添 2-8
4.2 ステップ 2 燃料装荷炉心の核設計条件	15 条-別添 2-9
4.3 ステップ 2 燃料装荷炉心の炉心特性評価結果	15 条-別添 2-9
4.4 ステップ 2 燃料装荷炉心の動特性評価結果	15 条-別添 2-12
5. まとめ	15 条-別添 2-32

別紙 1	反応度係数について
別紙 2	出力振動のうち水平方向の振動について
別紙 3	軸方向の出力振動に関する適合性について
別紙 4	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
別紙 5	初装荷炉心に係る記載の取扱いについて

1. 概 要

玄海原子力発電所4号炉では、使用済燃料発生量低減の観点から、燃料集合体最高燃焼度が48,000MWd/tである現行の高燃焼度燃料（以下「ステップ1燃料」という。）に代わり、燃料集合体最高燃焼度を55,000MWd/tへ引き上げた高燃焼度燃料（以下「ステップ2燃料」という。）を取替燃料として採用することとしている。

ステップ2燃料では、ウラン235濃縮度の上昇、ペレット密度の上昇及び燃焼度の上昇に伴う照射燃料の組成変化により、中性子スペクトルの硬化や燃料間の反応度差の拡大等が生じる。

ステップ2燃料を装荷したサイクル以降の炉心（以下「ステップ2燃料装荷炉心」という。）の核設計では、これらの影響を考慮して、ステップ2燃料を使用した代表的な取替炉心について炉心特性を評価し、ステップ2燃料装荷炉心の成立性を確認する。

本資料は、玄海原子力発電所4号炉ステップ2燃料装荷炉心の核設計についてまとめたものである。

2. 核設計方針

原子炉を安全かつ安定に制御することを目的として、以下の方針に基づき設計を行う。

- (1) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、原子炉施設の各設備の保護動作とあいまって燃料の健全性を確保できる炉心特性を有すること。(出力分布)
- (2) 原子炉制御設備により炉心を連続的に、かつ、安定に制御できるとともに、最大反応度価値を有する制御棒クラスタ 1 本が全引抜状態であっても、常に炉心を臨界未満にすることができること。
(反応度制御)
- (3) 通常の運転制御を行うのに十分な負の反応度効果を有すること。
(反応度フィードバック特性)

また、原子炉の動特性においては、定格出力の15%以上での設計上考慮する外乱(設計負荷変化)に対し十分な減衰性を持って安定性を維持できる設計を行う。

3. ステップ 2 燃料の核設計

3.1 ウラン 235 濃縮度

ステップ2燃料のウラン235濃縮度は、燃料集合体最高燃焼度を55,000MWd/tに引き上げることを考慮して、約4.8wt%以下とする。

これにより、燃料取替体数は現行の約68体から約60体に約1割低減される。

3.2 ガドリニア入り二酸化ウラン燃料の仕様

ステップ2燃料装荷炉心では、新燃料と照射燃料の反応度差が拡大し、水平方向出力分布を平坦化しにくくなることから、以下のとおり現行のガドリニア入り二酸化ウラン燃料*1より反応度抑制効果を大きくしたガドリニア入り二酸化ウラン燃料を採用する。

3.2.1 ガドリニア濃度及びガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒本数

ガドリニア濃度及びガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒本数については、サイクル初期において照射燃料と未照射のガドリニア入り二酸化ウラン燃料の反応度差を小さくすること、またサイクルを通じて安定した反応度抑制効果を得ることを考慮している。

ガドリニア濃度及びガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒本数の組合せによる、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料の中性子増倍係数の燃焼度による変化を評価した結果を図3-1に示すが、ガドリニア濃度及びガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒本数により反応度抑制効果が変わることがわかる。

以上のこと及び炉心運用の柔軟性を高める観点から、ステップ2燃料のガドリニア入り二酸化ウラン燃料のガドリニア濃度を約10wt%以下、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒本

*1 ガドリニア濃度約6wt%、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒本数16本、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒のウラン235濃縮度約2.6wt%

数を24本又は16本とする。

3.2.2 ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒の配置

ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒は、燃料集合体内の出力分布をできるだけ平坦化するように、燃料集合体内の出力ピーキングが生じやすい位置に分散させて配置する。

ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒の配置を図3-2に示す。

3.2.3 ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒のウラン235濃縮度

ガドリニアをウラン燃料に添加すると、ペレット熱伝導率及び溶融点が低下する。また、その低下度合いは、ガドリニア濃度が高いほど大きい。そのため、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒の燃料中心温度を二酸化ウラン燃料棒より低くすることを目的として、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒のウラン235濃縮度を二酸化ウラン燃料棒より低下させ最大線出力密度を低くする設計とする。

ガドリニア濃度約10wt%のガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒のウラン235濃縮度を1.6wt%低下させて約3.2wt%とした場合の燃料中心温度と線出力密度の関係を図3-3に示す。これより、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒の最大線出力密度は二酸化ウラン燃料棒よりも低く抑えられ、その結果、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒の燃料中心温度は二酸化ウラン燃料棒よりも低くなる。

以上のことから、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒のウラン235濃縮度は、二酸化ウラン燃料棒より1.6wt%低下させて約3.2wt%以下とする。

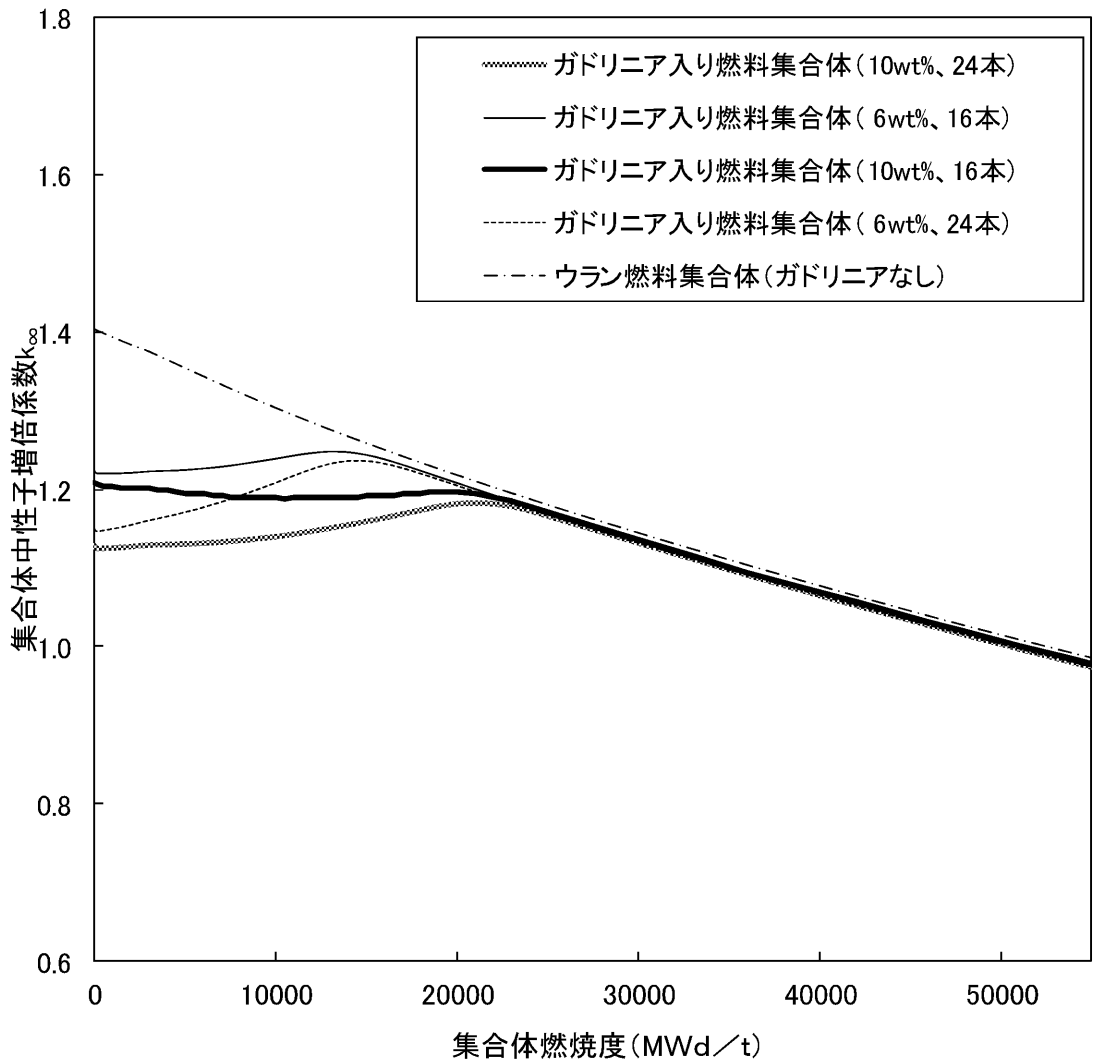
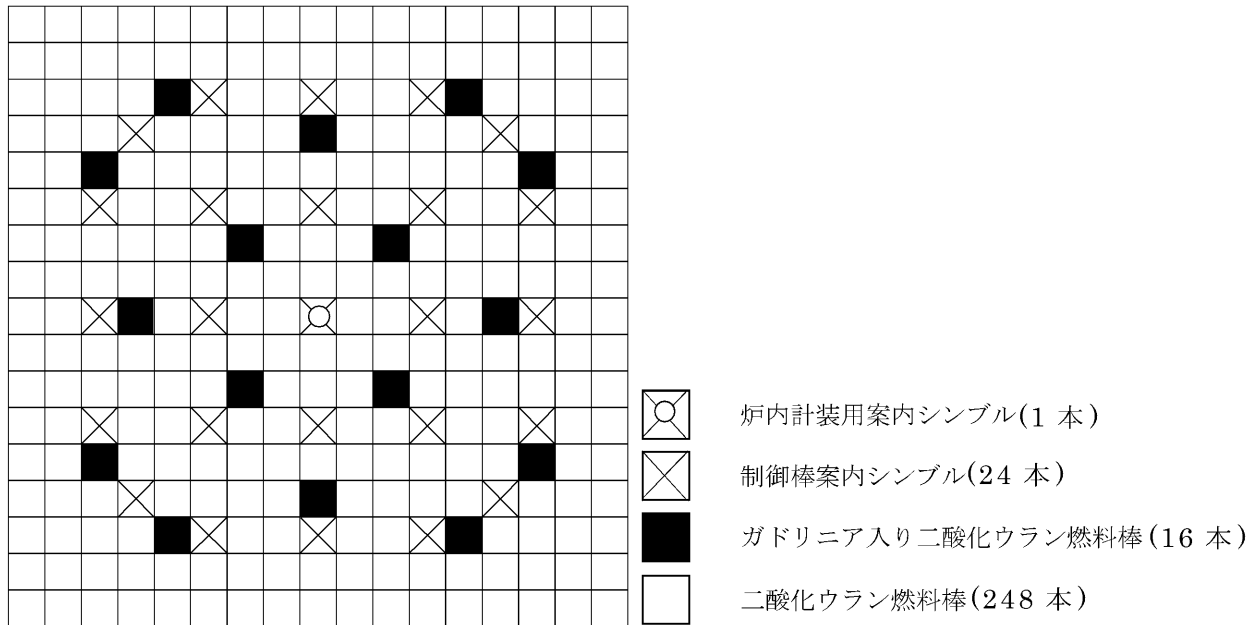


図3-1 燃焼に伴う集合体中性子増倍係数の変化

二酸化ウラン燃料棒ウラン濃縮度4.8wt%
 ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒ウラン濃縮度3.2wt%

ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒：16本



ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒：24本

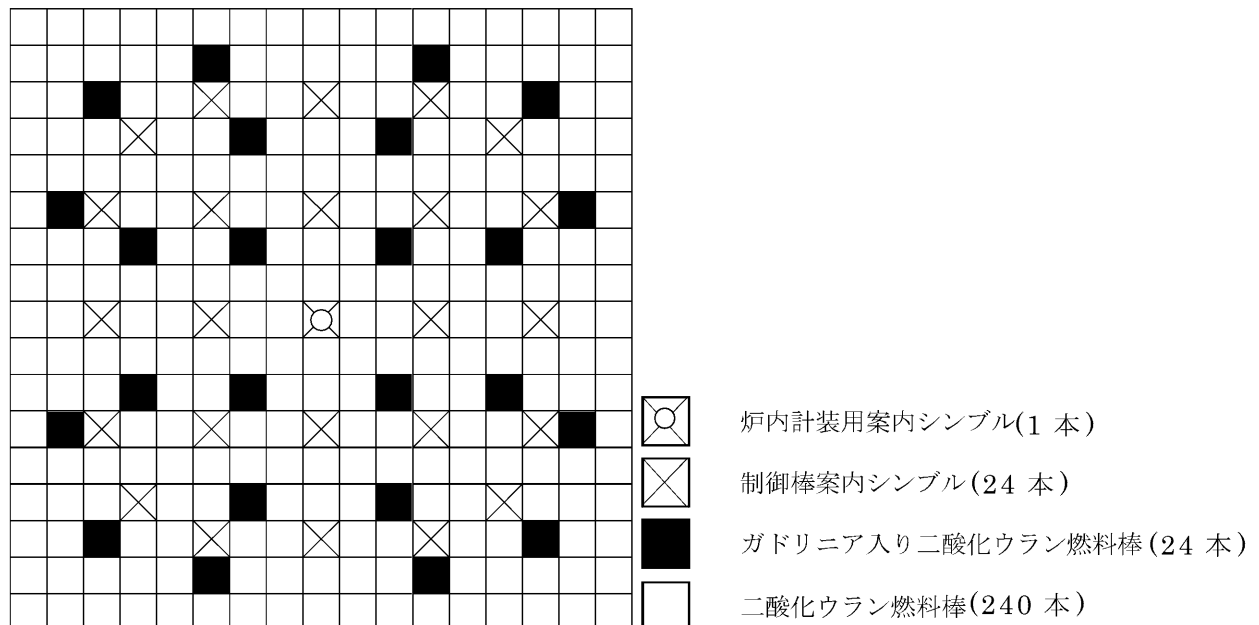


図3-2 燃料集合体内ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒の配置

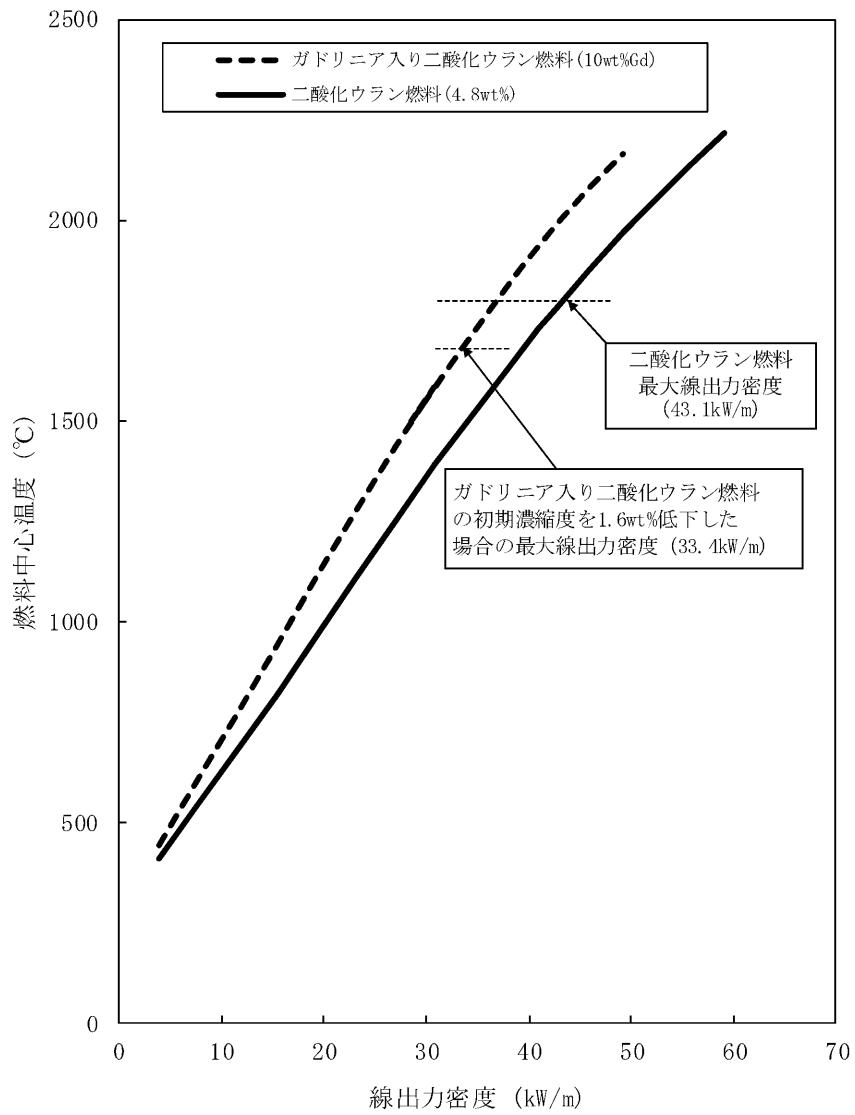


図3-3 線出力密度と燃料中心温度の関係

4. 炉心特性

4.1 高燃焼度化に伴う炉心特性への影響

ステップ2燃料装荷炉心では、ウラン235濃縮度をステップ1燃料の約4.1wt%～約3.4wt%から約4.8wt%以下に変更すること、ペレット密度を二酸化ウラン燃料については理論密度の約95%から約97%に、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料については理論密度の約95%から約96%に変更すること、及び燃焼度の上昇に伴い照射燃料の組成が変化することにより、図4-1に示すとおり

- ・ 中性子スペクトルの硬化
- ・ 燃料間の反応度差の拡大

等の現象が炉心特性に影響を与える。

4.1.1 出力分布への影響

ステップ2燃料装荷炉心では、照射燃料と新燃料の反応度差が拡大することにより、水平方向出力分布が平坦化しにくくなる。

4.1.2 反応度制御への影響

ステップ2燃料装荷炉心では、中性子スペクトルの硬化に伴い、制御棒クラスタ及びほう素の反応度値が低下する。

4.1.3 反応度フィードバック特性への影響

ステップ2燃料装荷炉心では、中性子スペクトルの硬化等に伴い、減速材温度係数及びドップラ係数が影響を受けるが、その影響は小さい。

一方、ほう素値の低下により、サイクル初期の余剰反応度を抑制するためのほう素濃度が上昇した場合には、減速材温度係数を正側にする効果がある。

4.2 ステップ 2 燃料装荷炉心の核設計条件

ステップ2燃料装荷炉心においては、上記の影響を考慮して核設計を行う。ステップ2燃料装荷炉心の核設計値をステップ1燃料装荷炉心と比較して表4-1に示す。

ステップ2燃料装荷炉心の核設計には、従来の1、2次元核設計手法に代わり、3次元核設計手法に基づくPHOENIX-P/ANCコードシステム*2又は改良NULIFシステム*3を使用する。

4.3 ステップ 2 燃料装荷炉心の炉心特性評価結果

ステップ2燃料装荷炉心における出力分布、反応度制御、反応度フィードバック特性及び取替炉心の安全性確認項目*4についての評価結果は以下のとおりである。

評価は、平衡炉心及び標準的な取出燃料の他に1サイクル照射燃料を8体余分に取り出す事態を想定した予定外取出炉心を対象に行っている。これらの炉心の燃料取替方式及び各炉心の燃料装荷パターンを表4-2並びに図4-2及び図4-3に示す。

なお、ステップ2燃料装荷炉心においては、表4-3に示すとおり取替炉心の安全性確認項目の内、一部の安全解析使用値を変更し、その妥当性は安全解析により確認する。

4.3.1 出力分布

通常運転時の水平方向出力分布（水平方向ピーキング係数 F_{XY}^N ）は、燃料装荷パターンの工夫、又は必要に応じてガドリニア入り二酸化ウラン燃料あるいはバーナブルポイズンを使用することにより、平坦化を図る。ステップ2燃料装荷炉心では、反応度抑制効果を高めたガドリニア入り二酸化ウラン燃

*2 「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

*3 「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

*4 取替炉心の安全性を示す重要なパラメータとして、「取替炉心検討会報告書」（原子炉安全専門審査会 昭和 52 年 5 月）において選定された 11 項目

料を使用することにより、表4-4に示すとおり F_{XY}^N 及び最大線出力密度を安全解析使用値の範囲内にできる。

通常運転時の軸方向出力分布は、従来どおりアキシャルオフセット*5を適正な範囲に保つ運転法（アキシャルオフセット一定値制御運転）を採用することにより大きく歪むことはない。これにより、水平方向出力ピーキング係数を制限することとあいまって、通常運転時の二酸化ウラン燃料棒の最大線出力密度は、表4-4に示すとおり、 $41.5\text{kW}/\text{m}$ 以下（ペレット焼きしまり効果を含まない。）に保たれる。なお、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒の最大線出力密度は、ウラン235濃縮度を二酸化ウラン燃料棒より1.6wt%下げていることから、 $32.2\text{kW}/\text{m}$ 以下（ペレット焼きしまり効果を含まない。）に保たれる。

なお、運転時の異常な過渡変化時には、プラント各系統の機能とあいまって、燃料の許容設計限界を超えることがないことを、安全解析により確認する。

4.3.2 反応度制御

ステップ2燃料装荷炉心の制御棒クラスタ及びほう素濃度調整による反応度制御能力はそれぞれ約 $0.05\Delta K/K$ 、 $0.18\Delta K/K$ 以上有している。

中性子スペクトルの硬化により制御棒価値が低下するが、表4-5に示すとおり、現状の制御棒クラスタにより、 $0.016\Delta K/K$ 以上の反応度停止余裕を確保している。

同様に、ほう素価値も低下するが、現状の化学体積制御設備によるほう酸注入により、原子炉停止時のほう素濃度をステップ1燃料装荷炉心より上昇させることで低温状態でも炉

*5 アキシャルオフセットは、炉外中性子束検出器信号の上半分(ϕ_t)及び下半分(ϕ_b)を用いて、次式で定義する。アキシャルオフセット $=(\phi_t - \phi_b)/(\phi_t + \phi_b)$

心を臨界未満に維持しており、反応度停止余裕は $0.010\Delta K/K$ 以上確保している。

定格出力運転中、全引抜位置から制御棒クラスタ1本が落下した場合の負の最大添加反応度及び出力分布の歪み、制御棒クラスタ飛出し時の添加反応度及び出力分布の歪み、並びに制御棒クラスタ引抜きによる最大反応度添加率については、表4-6、表4-7及び表4-8に示すとおり、いずれも安全解析使用値の範囲内である。

4.3.3 反応度フィードバック特性

ステップ2燃料装荷炉心では、反応度抑制効果を大きくしたガドリニア入り二酸化ウラン燃料を採用することにより、サイクル初期のほう素濃度を抑制でき、減速材温度係数を負に保つことができる。表4-9に示すとおり、減速材温度係数及びドップラ係数は負となっていることから、ステップ1燃料装荷炉心と同様に負の反応度効果を有している。

4.3.4 取替炉心の安全性確認項目

上記で確認した項目を含め、平衡炉心及び予定外取出炉心について取替炉心の安全性確認項目の評価結果を表4-10に示す。いずれの炉心についても、取替炉心の安全性確認項目の評価結果は、安全解析使用値の範囲内にある。

4.3.5 その他（移行炉心の炉心特性）

ステップ1燃料装荷炉心からの移行炉心においては、ウラン235濃縮度が低いステップ1燃料との混在となり、炉心平均ウラン235濃縮度が平衡炉心よりわずかに低くなる。炉心平均ウラン235濃縮度が低くなると、中性子スペクトルが軟らかくなり、炉心の平均的な特性であるほう素や制御棒の中性子吸収

効果は大きくなる傾向にあるとともに、減速材温度係数等の反応度係数も影響を受ける。

一方、出力ピーキング係数のような炉心の局所的な特性については、燃料装荷パターンに大きく依存する。移行炉心に対する取替炉心の安全性確認項目を評価した結果は、いずれも安全解析使用値の範囲内にあることを確認している。

以上より、ステップ1燃料装荷炉心からの移行炉心も含めて、ステップ2燃料装荷炉心の成立性を確認した。

4.4 ステップ2燃料装荷炉心の動特性評価結果

ステップ2燃料の導入に伴い、動特性に影響を及ぼす炉心特性の変化には、減速材温度係数、ドップラ出力係数などの変化がある。これらの炉心特性の変化が動特性に与える影響を確認するため、原子炉出力、1次冷却材平均温度及び原子炉圧力の挙動について、±10%ステップ状負荷変化、±5%/min ランプ状負荷変化及び急激な負荷減少の各設計負荷変化に対する動特性解析を実施した。

4.4.1 設計条件

原子炉がトリップすることなく、十分な減衰性を持って安定性を維持する負荷変化可能な範囲として、以下の設計負荷変化を設計条件としている。

- (1) ±10%ステップ状負荷変化
(定格出力の15%から100%の範囲内)
- (2) ±5%/minのランプ状負荷変化
(定格出力の15%から100%の範囲内)
- (3) 急激な負荷減少
(タービンバイパス (約40%容量) 制御系併用)

これを受けて、以下の条件にて動特性解析を行っている。

- (1) 10%ステップ状負荷減少 (100%→90%)
- (2) 10%ステップ状負荷増加 (90%→100%)
- (3) 5%/minランプ状負荷増加 (15%→100%)
- (4) 5%/minランプ状負荷減少 (100%→15%)
- (5) 50%ステップ状負荷減少 (100%→50%)

4.4.2 解析条件

原子炉の固有の自己制御性については、炉心が急速な固有の出力抑制効果をもたらす反応度フィードバック特性を持つように、ドップラ係数は負であり、かつ、高温出力運転状態で減速材温度係数は負となるように設計される。

代表的な炉物理定数の変動範囲は、表 4-11 のとおりとなる。

負荷増加については、原子炉トリップ点までの余裕をみるという点で原子炉出力のオーバーシュートが生じやすい減速材温度係数の絶対値が最小(サイクル初期に相当)の条件を選び、負荷減少については、減速材温度係数の絶対値が最大(サイクル末期に相当)の条件を選び、反応度フィードバック特性の広い変動範囲でのプラント挙動を示すことにより、運転期間を通じた動特性を評価することとしている。

以上から各負荷変化時の解析条件は表 4-12 のとおりとしている。

また、プラント動特性の応答解析は、加圧水型原子力プラントの動特性を模擬した計算コード MARVEL により解析を行っている。

4.4.3 解析結果

玄海 4 号炉の原子炉出力、1次冷却材温度、原子炉圧力の動特性解析結果を図4-4～図4-8に示す。

この結果から、設計負荷変化に対して、原子炉制御設備を含めた原子炉系の応答は安定であり、十分な減衰性を持って新たな平衡負荷に相当した値に制御されることを確認している。

表4-1 核設計値比較表

	ステップ1燃料 装荷炉心	ステップ2燃料 装荷炉心
炉心		
有効高さ	約3.66m	同 左
等価直径	約3.37m	同 左
減速材/ウラン体積比 (低温時)	約3.4~約3.6	同 左
燃料集合体数	193	同 左
燃料集合体中の燃料棒配列	17×17	同 左
燃料集合体中の燃料棒本数	264	同 左
濃縮度		
二酸化ウラン燃料棒	約4.1wt%~ 約3.4wt%	約4.8wt%以下
ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒	約2.6wt%~ 約1.9wt%	約3.2wt%以下
ガドリニア濃度	約6wt%	約10wt%以下
取替燃料集合体平均燃焼度 (平衡炉心)	約44,000MWd/t	約50,000MWd/t
熱水路係数 (定格出力時)		
$F_Q (Z)$	2.32×K(Z)以下 (ペレット焼きしまり効果を含まない。)	同 左
$F_{\Delta H}^N$	1.60以下	1.64以下
線出力密度		
定格出力時平均	約17.9kW/m	同 左
定格出力時最大	41.5kW/m (ペレット焼きしまり効果を含まない。)	同 左
ガドリニア入り二酸化ウラン燃料	33.2kW/m	32.2kW/m (ペレット焼きしまり効果を含まない。)

	ステップ1燃料 装荷炉心	ステップ2燃料 装荷炉心
実効増倍率（取替炉心サイクル初期）		
燃料取替停止（全制御棒クラスタ挿入）	0.95（約2,000ppm）	同左（約2,200ppm）
低温停止（全制御棒クラスタ引抜き）	0.99（約2,100ppm）	同左（約2,100ppm）
高温停止（全制御棒クラスタ引抜き）	0.98（約2,100ppm）	同左（約2,200ppm）
高温全出力（全制御棒クラスタ引抜き）	1.00（約1,700ppm）	同左（約1,700ppm）
高温全出力（全制御棒クラスタ引抜き） （キセノン、サマリウム平衡）	1.00（約1,300ppm）	同左（約1,300ppm）

反応度制御能力

制御棒クラスタ （最大反応度値を有する制御） 棒クラスタ1本挿入不能時	約0.06 $\Delta K/K$	約0.05 $\Delta K/K$
ほう素濃度調整	0.18 $\Delta K/K$ 以上 （約2,500ppm）	同左 （約3,100ppm）
バーナブルポイズン（サイクル初期）	約0.08 $\Delta K/K$ 以下	同左

反応度係数

減速材温度係数（ $10^{-4}(\Delta K/K)/^{\circ}C$ ） （減速材温度係数は、高温出力運転状態では負である。）	+0.8 \sim -9.4	同左
ドップラ係数（ $10^{-5}(\Delta K/K)/^{\circ}C$ ）	-1.8 \sim -5.2	同左
ボイド係数（ $10^{-3}(\Delta K/K)/\%$ ボイド）	+0.7 \sim -3.1	同左
圧力係数（ $10^{-4}(\Delta K/K)/(MPa)$ ）	+8.2 \sim -0.5	同左
減速材密度係数（ $(\Delta K/K)/(g/cm^3)$ ）	+0.51 \sim 0	同左

実効遅発中性子割合と即発中性子寿命

実効遅発中性子割合（%）	0.75 \sim 0.44	同左
即発中性子寿命（ μsec ）	20 \sim 11	20 \sim 9

表4-2 燃料取替方式

領域		サイクル	第Nサイクル (平衡炉心)	第(N+1)サイクル (予定外取出炉心)	
燃料 集 合 体 装 荷 体 数	第(M-3)領域	A 4.8wt%(Gd 入り) (注)			
		B 4.8wt%	13		
	第(M-2)領域	A 4.8wt%(Gd 入り) (注)	32		
		B 4.8wt%	28	13	
	第(M-1)領域	A 4.8wt%(Gd 入り) (注)	32	32	
		B 4.8wt%	28	28	
	第 M 領域	A 4.8wt%(Gd 入り) (注)	32	32	
		B 4.8wt%	28	20	
	第(M+1)領域	A 4.8wt%(Gd 入り) (注)		40	
		B 4.8wt%		28	
	サイクル燃焼度 (MWd/t)			15,500	15,500

(注) 3.2wt% ^{235}U - 10wt% Gd_2O_3 入り UO_2 燃料棒を 24 本含む。

表4-3 取替炉心の安全性確認項目で安全解析使用値を変更した項目

安全性確認項目			安全解析使用値		
			単位	ステップ1 燃料装荷炉心	ステップ2 燃料装荷炉心
燃料集合体最高燃焼度			MWd/t	48,000	55,000
F_{XY}^N			—	1.48	1.52
制御棒飛出し時	F_Q	BOC, HFP	—	7.0	5.0
		EOC, HFP	—	6.8	5.0
	飛出し 制御棒価値	EOC, HFP	% $\Delta K/K$	0.18	0.12

(注) BOC：サイクル初期、EOC：サイクル末期

HFP：高温全出力

表4-4 F_{XY}^N 及び最大線出力密度評価結果

炉心	F_{XY}^N	最大線出力密度
平衡炉心	1.43	35.3kW/m
予定外取出炉心	1.43	36.7kW/m
安全解析使用値	$\leq 1.52^*$	$\leq 41.5kW/m$

※安全解析使用値変更 (1.48→1.52)

表4-5 反応度停止余裕評価結果

反応度停止余裕安全解析使用値： $\geq 1.60\% \Delta K/K$

	平 衡 炉 心	予 定 外 取 出 炉 心
	<u>サイクル末期</u>	<u>サイクル末期</u>
1. 所要制御反応度	約 2.81% $\Delta K/K$	約 2.77% $\Delta K/K$
出力欠損	約 2.76% $\Delta K/K$	約 2.72% $\Delta K/K$
ボイド減少	約 0.05% $\Delta K/K$	約 0.05% $\Delta K/K$
2. 制御棒クラスタの反応度 ^(注)	約 4.60% $\Delta K/K$	約 4.42% $\Delta K/K$
3. 反応度停止余裕	約 1.79% $\Delta K/K$	約 1.65% $\Delta K/K$

(注) 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。

表4-6 制御棒クラスタ落下時の落下制御棒値及び $F_{\Delta H}^N$ 評価結果

炉 心	落下制御棒値	$F_{\Delta H}^N$
平衡炉心	0.15% $\Delta K/K$	1.65
予定外取出炉心	0.14% $\Delta K/K$	1.67
安全解析使用値	$\leq 0.25\% \Delta K/K$	≤ 1.87

表4-7 制御棒飛出し時の飛出し制御棒価値及びF_Q評価結果

(1) サイクル初期高温零出力

炉 心	飛出し制御棒価値	F _Q
平衡炉心	0.32%△K/K	7.5
予定外取出炉心	0.51%△K/K	9.6
安全解析使用値	≦0.66%△K/K	≦15

(2) サイクル初期高温全出力

炉 心	飛出し制御棒価値	F _Q
平衡炉心	0.02%△K/K	2.1
予定外取出炉心	0.02%△K/K	2.2
安全解析使用値	≦0.12%△K/K	≦5.0 ^{※1}

※1安全解析使用値変更（7.0→5.0）

(3) サイクル末期高温零出力

炉 心	飛出し制御棒価値	F _Q
平衡炉心	0.66%△K/K	17
予定外取出炉心	0.65%△K/K	18
安全解析使用値	≦0.87%△K/K	≦25

(4) サイクル末期高温全出力

炉 心	飛出し制御棒価値	F _Q
平衡炉心	0.03%△K/K	2.2
予定外取出炉心	0.03%△K/K	2.3
安全解析使用値	≦0.12%△K/K ^{※2}	≦5.0 ^{※3}

※2安全解析使用値変更（0.18→0.12） ※3安全解析使用値変更（6.8→5.0）

表4-8 最大反応度添加率評価結果

単位： $10^{-5}(\Delta K/K)/s$

炉心	最大反応度添加率
平衡炉心	34
予定外取出炉心	31
安全解析使用値	≤ 75

表4-9 減速材温度係数及びドップラ係数評価結果

単位： $10^{-5}(\Delta K/K)/^{\circ}C$

炉心	減速材温度係数	ドップラ係数
平衡炉心	-68~-6.8	-3.4~-2.5
予定外取出炉心	-67~-9.6	-3.4~-2.5
安全解析使用値	-94~+8	-5.2~-1.8

表4-10 取替炉心の安全性確認項目評価結果

項 目		単 位	安全解析使用値	第 N サイクル (平衡炉心)	第(N+1)サイクル (予定外取出炉心)	
反応度停止余裕 (サイクル末期)		% $\Delta K/K$	≥ 1.6	1.79	1.65	
最大線出力密度 ^(注1)		kW/m	≤ 41.5	35.3	36.7	
燃料集合体最高燃焼度		MWd/t	$\leq 55,000$ ^(注4)	54,700	54,800	
F_{XY}^N		—	≤ 1.52 ^(注4)	1.43	1.43	
減速材温度係数 $\frac{\delta \rho}{\delta T_m}$		$10^{-5}(\Delta K/K)/^{\circ}C$	-94 ~ +8	-68 ~ -6.8	-67 ~ -9.6	
ドップラ係数 $\frac{\delta \rho}{\delta T_f}$		$10^{-5}(\Delta K/K)/^{\circ}C$	-5.2 ~ -1.8	-3.4 ~ -2.5	-3.4 ~ -2.5	
制 御 棒 落 下 時	落下制御棒価値	% $\Delta K/K$	≤ 0.25	0.15	0.14	
	$F_{\Delta H}^N$	—	≤ 1.87	1.65	1.67	
制 御 棒 飛 出 し 時 F_Q	サイクル 初 期	HZP ^(注2)	—	≤ 15	7.5	9.6
		HFP ^(注3)	—	≤ 5.0 ^(注4)	2.1	2.2
	サイクル 末 期	HZP	—	≤ 25	17	18
		HFP	—	≤ 5.0 ^(注4)	2.2	2.3
飛 出 し 制 御 棒 価 値	サイクル 初 期	HZP	% $\Delta K/K$	≤ 0.66	0.32	0.51
		HFP	% $\Delta K/K$	≤ 0.12	0.02	0.02
	サイクル 末 期	HZP	% $\Delta K/K$	≤ 0.87	0.66	0.65
		HFP	% $\Delta K/K$	≤ 0.12 ^(注4)	0.03	0.03
最大反応度添加率		$10^{-5}(\Delta K/K)/s$	≤ 75	34	31	

(注1) ペレット焼きしまり効果を含まない。

(注2) HZP : 高温零出力時

(注3) HFP : 高温全出力時

(注4) 安全解析使用値変更

表4-11 炉物理定数の変動範囲

	ステップ2燃料 装荷炉心	ステップ1燃料 装荷炉心
減速材温度係数 ($\times 10^{-5} \Delta K / K / ^\circ C$)	-68~-6.8	-68~-3.2
ドップラ出力係数 ($\times 10^{-5} \Delta K / K / \%出力$)	-9.9~-9.6	-9.9~-9.5

表4-12 主要動特性解析条件

ケース	減速材温度係数 ($\times 10^{-5} \Delta K / K / ^\circ C$)	ドップラ出力係数 ($\times 10^{-5} \Delta K / K / \%出力$)
10%ステップ状 負荷減少	可変(-68~-65)	-9.6
10%ステップ状 負荷増加	可変(-3~0)	-9.9
5%/minランプ状 負荷増加	可変(-3~0)	-9.9
5%/minランプ状 負荷減少	可変(-68~-65)	-9.6
50%ステップ状 負荷減少	可変(-68~-65)	-9.6

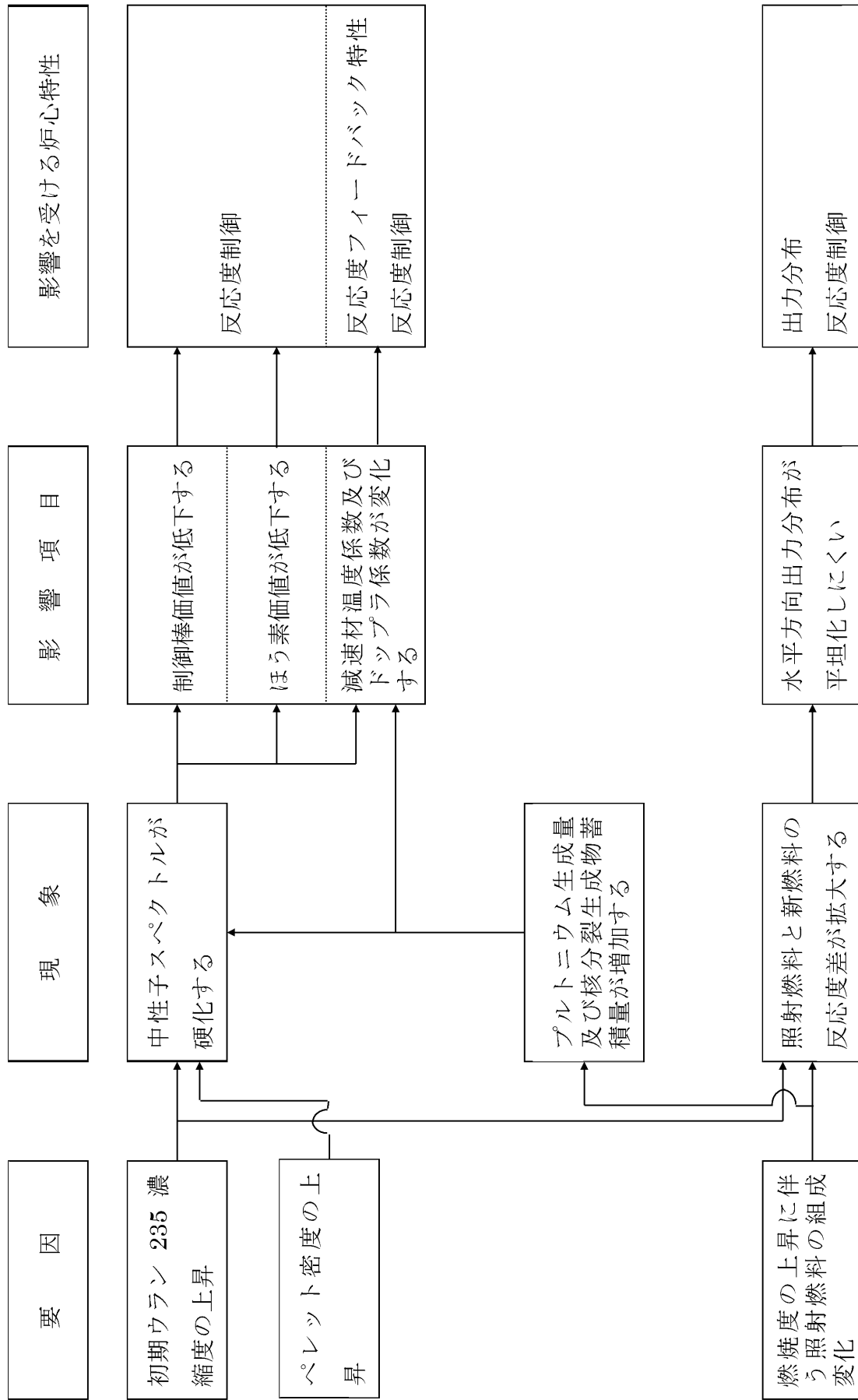
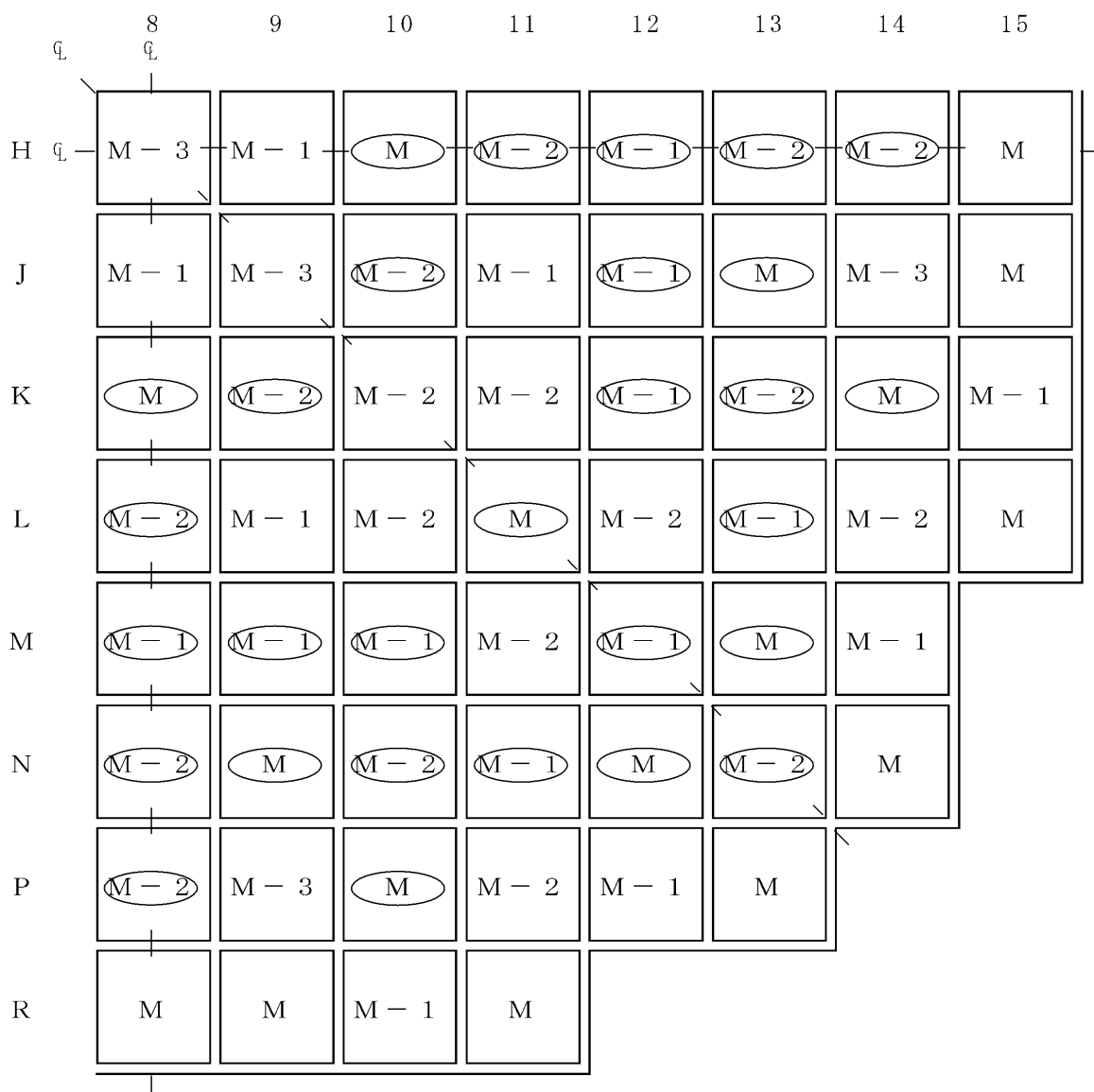


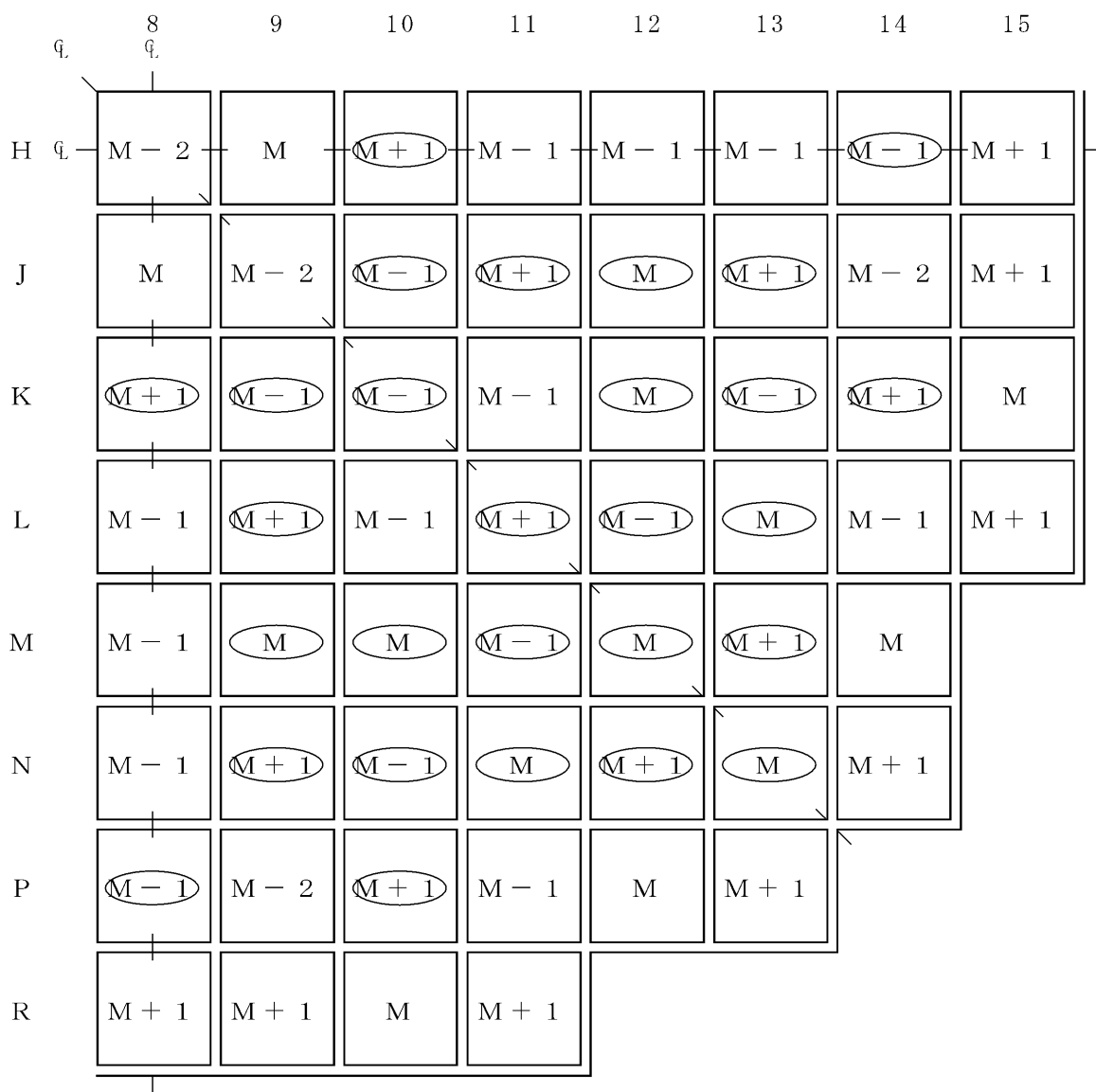
図4-1 高燃焼度化による影響



- | | | | |
|-----|---|---------------------------------|---------|
| M-3 | : | 第 (M-3) B 領域燃料 (4.8wt%) | 13 体) |
| M-2 | : | 第 (M-2) A 領域燃料 (4.8wt% (Gd 入り)) | 32 体) * |
| M-2 | : | 第 (M-2) B 領域燃料 (4.8wt%) | 28 体) |
| M-1 | : | 第 (M-1) A 領域燃料 (4.8wt% (Gd 入り)) | 32 体) * |
| M-1 | : | 第 (M-1) B 領域燃料 (4.8wt%) | 28 体) |
| M | : | 第 M A 領域燃料 (4.8wt% (Gd 入り)) | 32 体) * |
| M | : | 第 M B 領域燃料 (4.8wt%) | 28 体) |
- 注) M、M は新燃料

*) 3.2wt% ²³⁵U-10wt% Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料棒 24 本を含む

図4-2 燃料装荷パターン (平衡炉心)



- M - 2 : 第 (M - 2) B 領域燃料 (4.8wt% 13 体)
 - M - 1 : 第 (M - 1) A 領域燃料 (4.8wt% (Gd 入り) 32 体) *
 - M - 1 : 第 (M - 1) B 領域燃料 (4.8wt% 28 体)
 - M : 第 M A 領域燃料 (4.8wt% (Gd 入り) 32 体) *
 - M : 第 M B 領域燃料 (4.8wt% 20 体)
 - M + 1 : 第 (M + 1) A 領域燃料 (4.8wt% (Gd 入り) 40 体) *
 - M + 1 : 第 (M + 1) B 領域燃料 (4.8wt% 28 体)
- 注) M + 1、M + 1 は新燃料

*) 3.2wt% ²³⁵U - 10wt% Gd₂O₃ 入り UO₂ 燃料棒 24 本を含む

図4-3 燃料装荷パターン (予定外取出炉心)

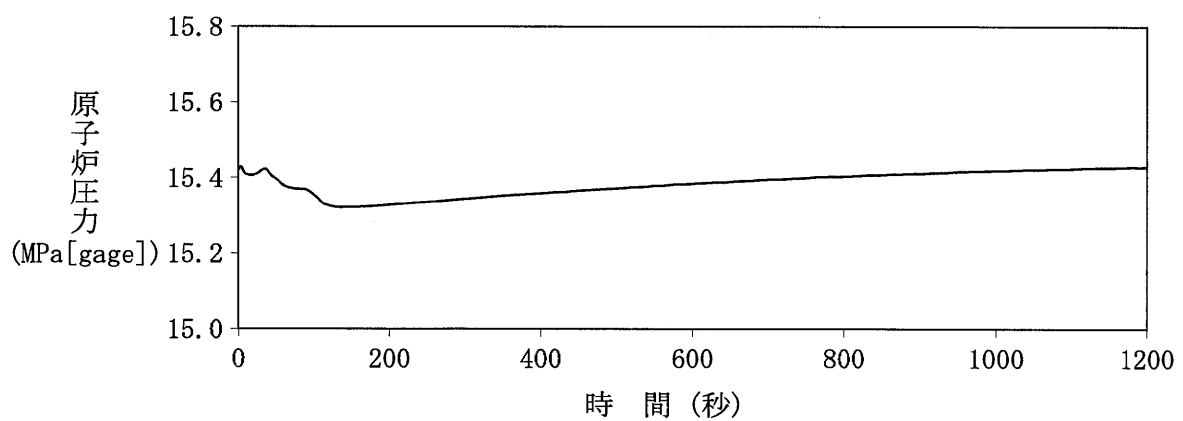
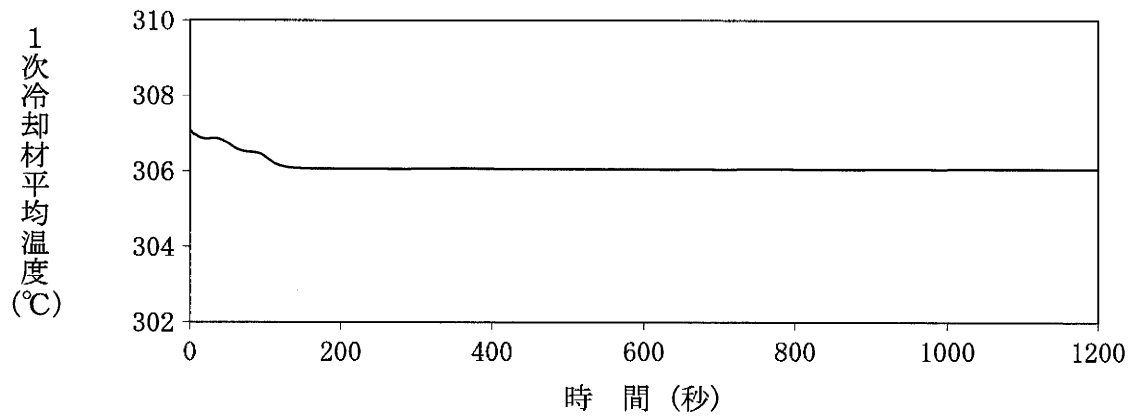
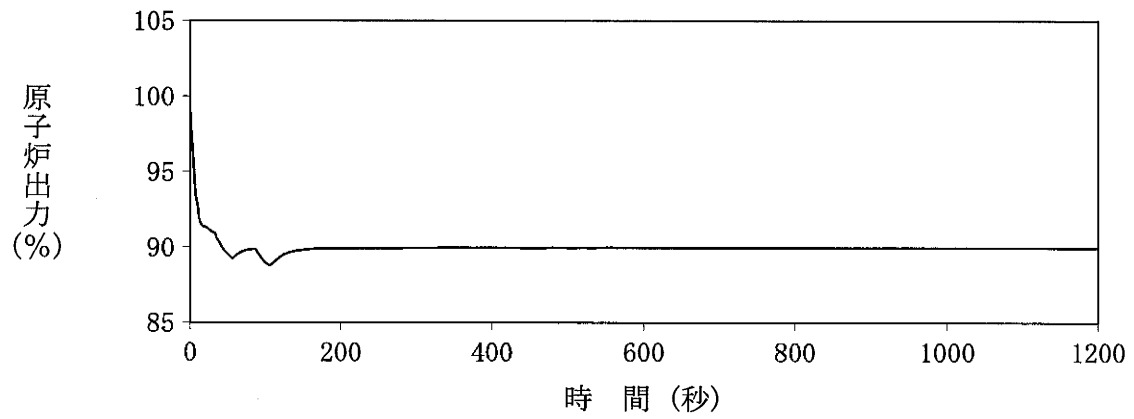


図4-4 10%ステップ状負荷減少の場合 (100%→90%)

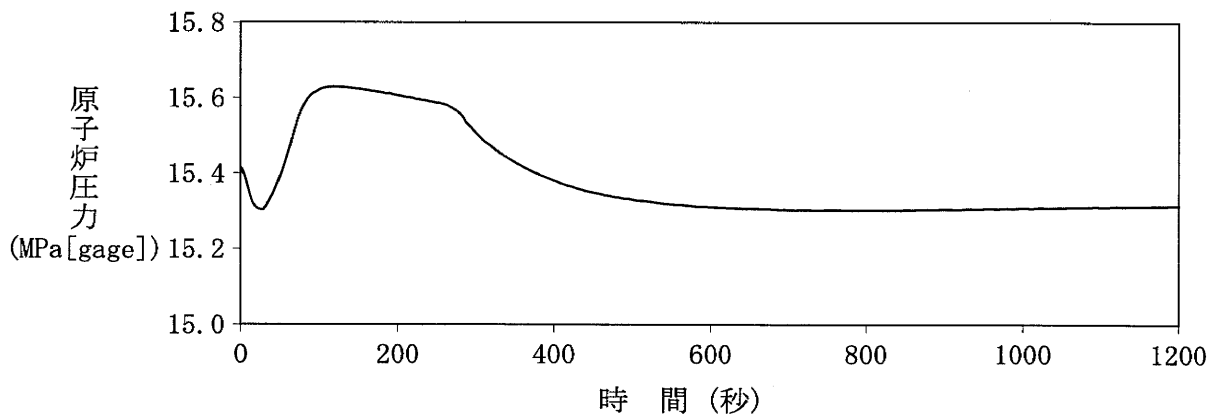
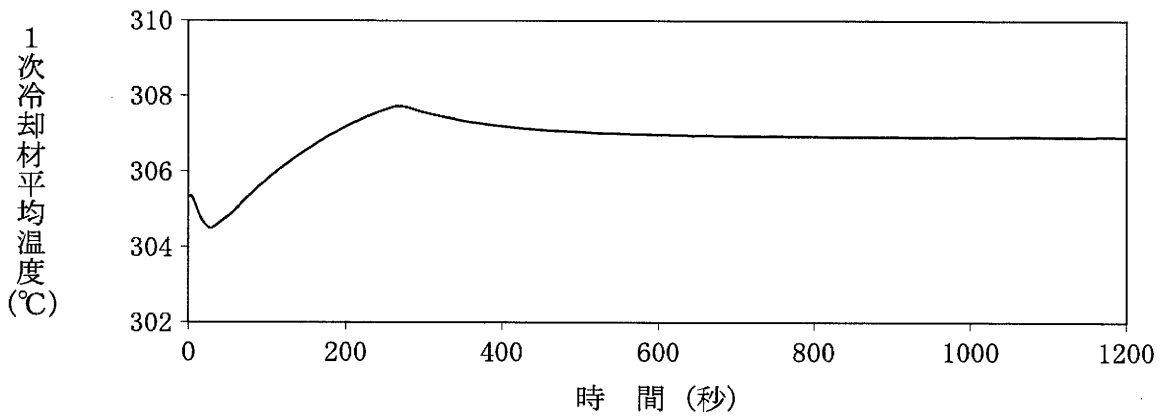
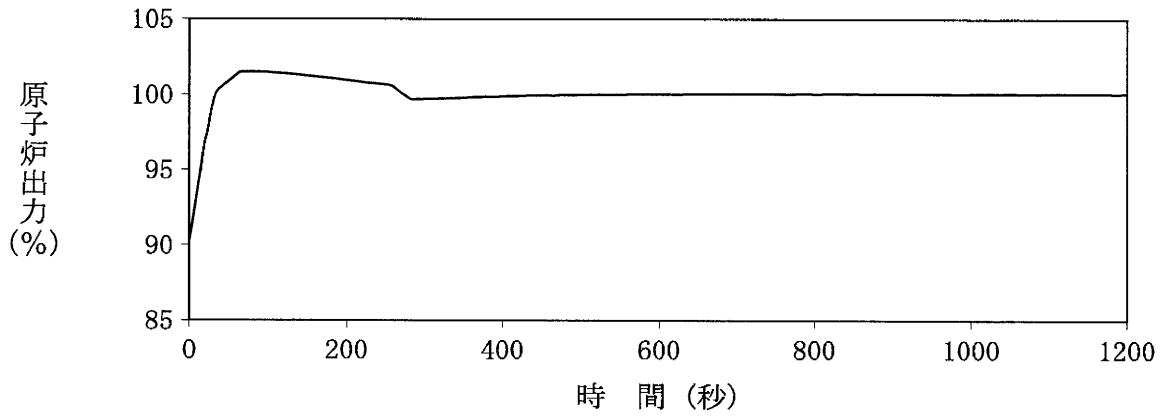


図4-5 10%ステップ状負荷増加の場合 (90%→100%)

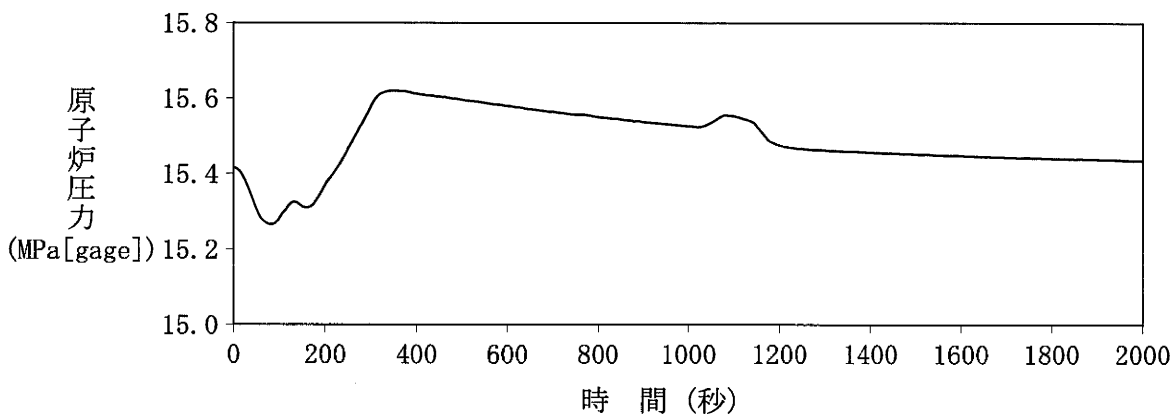
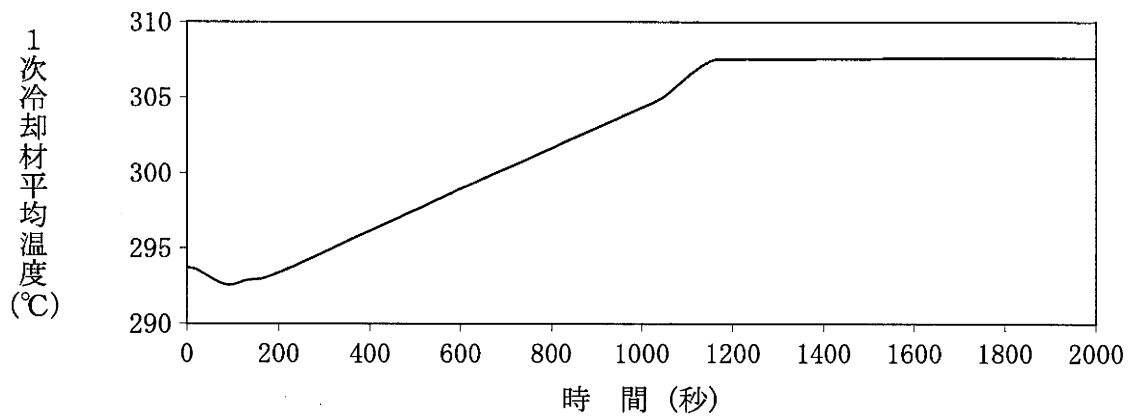
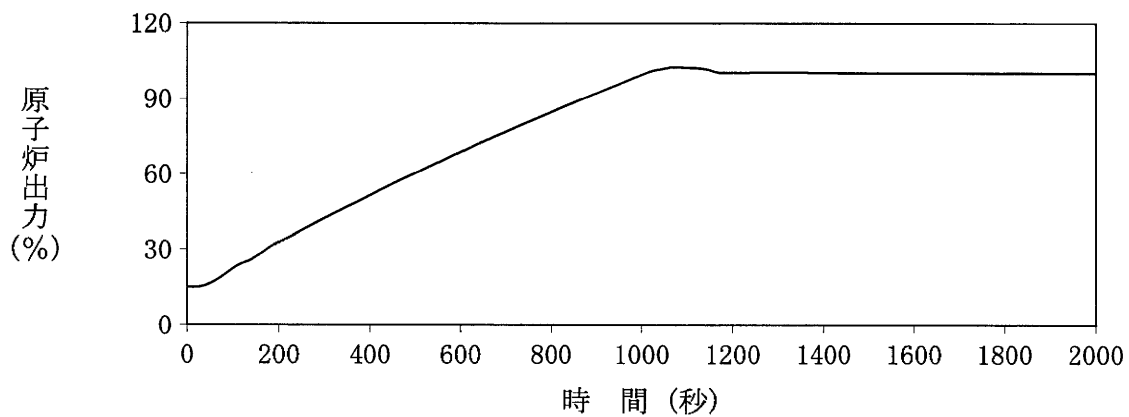


図4-6 5%/minランプ状負荷増加の場合 (15%→100%)

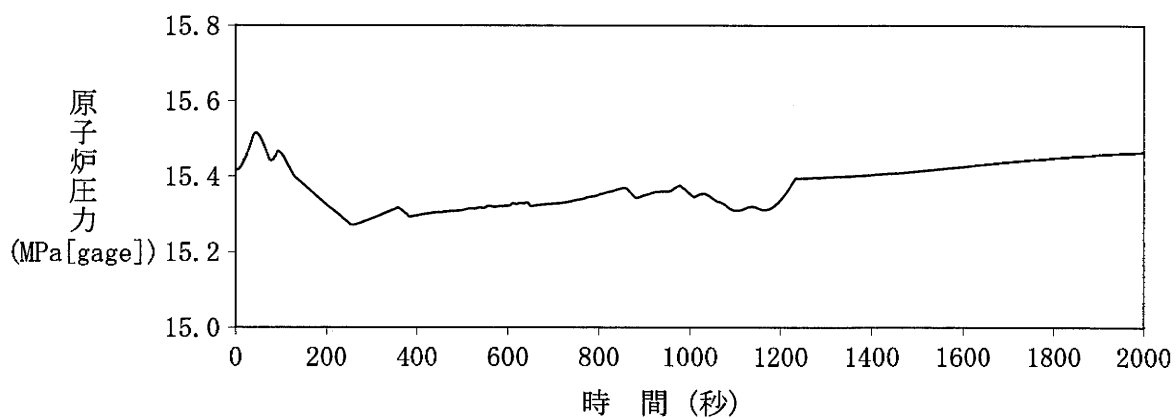
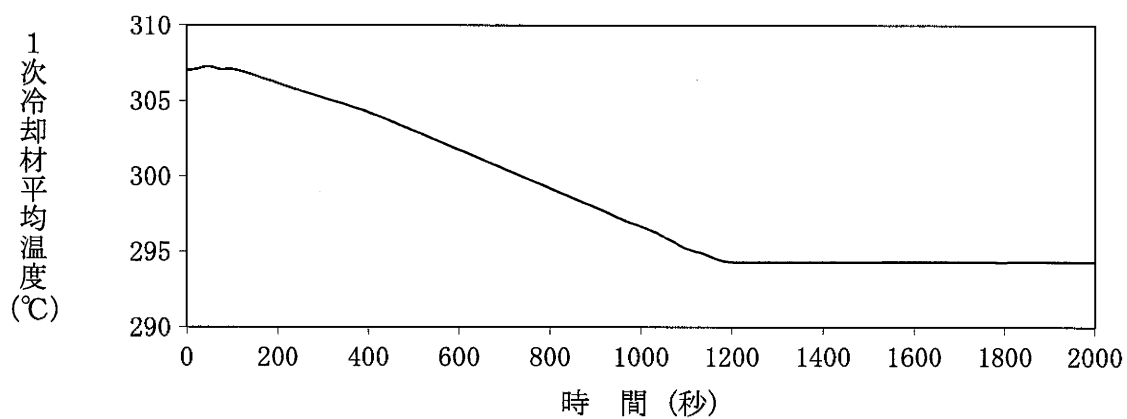
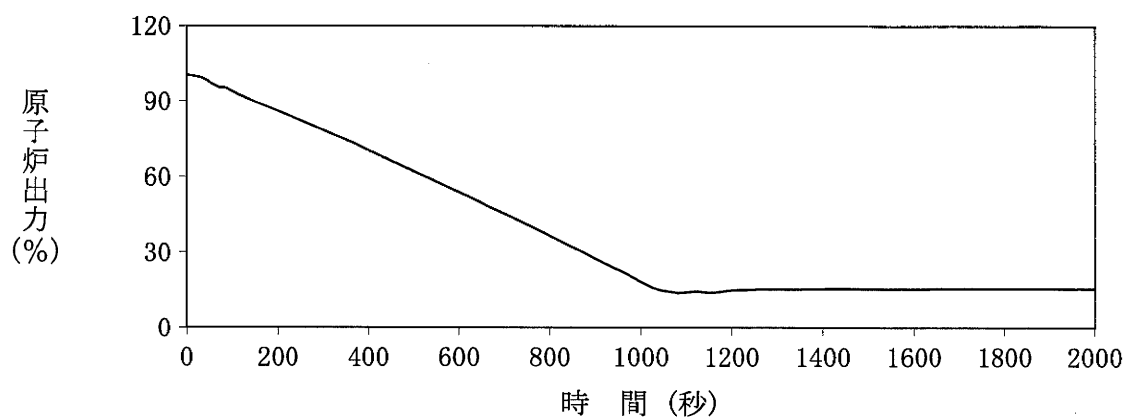


図4-7 5%/minランプ状負荷減少の場合 (100%→15%)

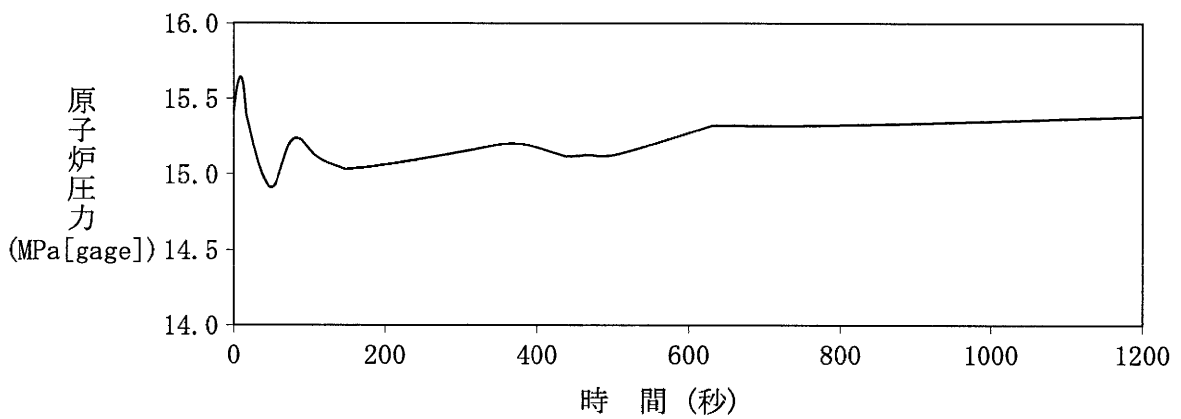
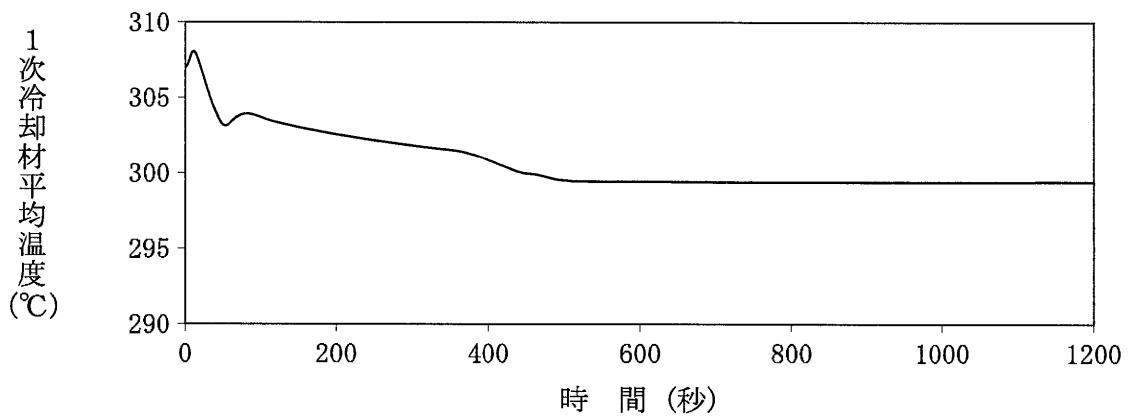
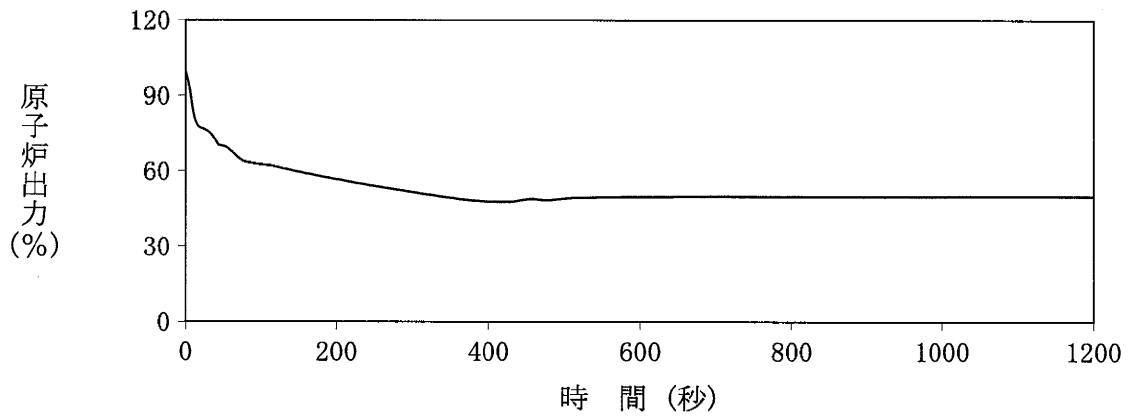


図4-8 50%ステップ状負荷減少の場合 (100%→50%)

5. まとめ

玄海原子力発電所4号炉で採用を計画しているステップ2燃料装荷炉心について、出力分布、反応度制御、反応度フィードバック等の炉心特性評価結果から、ステップ2燃料装荷炉心の核設計が要求事項を満足するものであることを確認した。

また、ステップ2燃料装荷炉心の動特性評価結果から、設計負荷変化に対して、原子炉制御設備を含めた原子炉系の応答は安定であり、十分な減衰性を持って安定性を維持できることを確認した。

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. 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

3. 本申請における変更内容

1. 及び2. 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。

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低下し、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。</p> <p><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></p> <p>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</u>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 <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</u>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。</p> <p>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></p> <p>(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はある。

ただし、この軸方向の出力振動はアキシャ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。

<p>本文五号</p>	<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 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。 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。 d. 減速材温度係数及びドップラ係数 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。 計測制御系統施設の構造及び設備 (3) 制御設備 (iii) 反応度制御能力 a. 制御棒クラスタ 制御する最大過剰反応度は、約 0.03ΔK/Kとし、その場合の反応度制御能力は約 0.05ΔK/Kとする。 (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場合) ※「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はそれを容易に制御できることを含む」と考えられる。</p>
<p>添付書類八</p>	<p>3. 発電用原子炉及び炉心 3.3 核設計 3.3.1 概要 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。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も制御棒クラスタの操作によって容易に抑制可能である。 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 炉心が負の反応度フリ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。 e. 安定性 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。 3.3.5 核設計の内容 (1) 反応度制御 炉心の反応度制御は、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。 (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、ドップラ係数及び減速材温度係数は、高温出力運転中に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。 (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、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もそれを検出し、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。 第3.3.1表 核設計値 (4号炉) (5) 反応度制御能力 (取替炉心) 制御棒クラスタ 約 0.05ΔK/K 最大反応度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。

従って、ほう素濃度調整による反応度制御能力を関連する本文記載箇所としていない。

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により、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

※ 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

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。初装荷炉心に係る記載については、本変更申請以前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削除することとしたものである。なお、当社の先行プラントにおいても同様である。

25 条

反応度制御系統及び原子炉停止系統

<目 次>

1. 基本方針

1.1 要求事項に対する適合性

(1) 適合性説明

2. 反応度制御系統及び原子炉停止系統

(別添1) 高燃焼度燃料の使用に伴う反応度停止系統及び原子炉停止系統への影響について

1. 基本方針

1.1 要求事項に対する適合性説明

(1) 適合性説明

(反応度制御系統及び原子炉停止系統)

第二十五条 発電用原子炉施設には、反応度制御系統（原子炉停止系統を含み、安全施設に係るものに限る。次項において同じ。）を設けなければならない。

2 反応度制御系統は、計画的な出力変化に伴う反応度変化を燃料要素の許容損傷限界を超えることなく制御できる能力を有し、かつ、次に掲げるものでなければならない。

一 制御棒、液体制御材その他反応度を制御するものによる二以上の独立した系統を有するものとする。

二 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発電用原子炉を未臨界に移行し、及び未臨界を維持できるものであり、かつ、運転時の異常な過渡変化時の高温状態においても反応度制御系統のうち少なくとも一つは、燃料要素の許容損傷限界を超えることなく発電用原子炉を未臨界に移行し、及び未臨界を維持できること。この場合において、非常用炉心冷却設備その他の発電用原子炉施設の安全性を損なうおそれがある場合に作動する設備の作動に伴って注入される液体制御材による反応度値を加えることができる。

三 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、反応度制御系統のうち少なくとも一つは、発電用原子炉を未臨界に移行し、及び未臨界を維持できること。

四 一次冷却材喪失その他の設計基準事故時において、反応度制御系統のうち少なくとも一つは、発電用原子炉を未臨界へ移行することができ、かつ、少なくとも一つは、発電用原子炉を未臨界に維持できること。この場合において、非常用炉心冷却設備その他の発電用原子炉施設の安全性を損なうおそれがある場合に作動する設備の作動に伴って注入される液体制御材による反応度値を加えることができる。

五 制御棒を用いる場合にあっては、反応度値の最も大きな制御棒一本が固着した場合においても前三号の規定に適合すること。

3 制御棒の最大反応度値及び反応度添加率は、想定される反応度投入事象（発電

用原子炉に反応度が異常に投入される事象をいう。) に対して原子炉冷却材圧力バウンダリを破損せず、かつ、炉心の冷却機能を損なうような炉心、炉心支持構造物及び原子炉圧力容器内部構造物の損壊を起こさないものでなければならない。

適合のための設計方針

1 について

反応度制御系統としては、制御棒クラスタの位置を制御することによって反応度を制御する制御棒制御系と、1次冷却材中のほう素濃度を調整することによって反応度を制御する化学体積制御設備の原理の異なる2つの系統を設け、通常運転時に生じることが予想される反応度変化を制御するのに十分な反応度制御能力を有する設計とする。

2 について

反応度制御系統のうち、制御棒制御系は主として負荷変動及び零出力から全出力までの反応度変化を制御し、化学体積制御設備はキセノン濃度変化、高温状態から低温状態までの1次冷却材温度変化及び燃料の燃焼に伴う反応度変化を制御する設計とし、両者の組合せによって所要の運転状態に維持できる設計とする。

制御棒制御系は、制御棒クラスタの炉心への挿入により、高温運転状態から速やかに炉心を高温状態で未臨界にすることができる設計とする。

化学体積制御設備は、燃料の燃焼、キセノン濃度変化、高温状態から低温状態までの温度変化等による比較的緩やかな反応度変化の制御に使用するが、全制御棒クラスタが挿入不能の場合でも、炉心を高温運転状態から高温状態で未臨界にし、その状態を維持できる設計とする。

反応度制御系統は、計画的な出力変化に伴う反応度変化を燃料要素の許容損傷限界を超えることなく制御できる能力を有する設計とする。さらに、反応度制御系統は以下の能力を有する設計とする。

一 反応度制御系統は、制御棒制御系による制御棒クラスタの炉心への挿入と、化学体積制御設備による1次冷却材中へのほう酸注入の原理の異なる2つの独立した系統を設ける。

二 反応度制御系統に含まれる独立した系統の1つである制御棒制御系による反応度制御は、制御棒クラスタの炉心への挿入により、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において燃料要素の許容損傷限界を超えることなく、高温状態で炉心を未臨界にできる設計とする。

また、化学体積制御設備による反応度制御は、1次冷却材中へのほう酸注入により、キセノン濃度変化に対しても高温状態で十分未臨界を維持できる設計とする。

原子炉運転中は、所要の反応度停止余裕を確保するため、制御棒クラスタの位置が挿入限界を超えないことを監視する。

なお、「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には、原子炉トリップ信号による制御棒クラスタの炉心への挿入に加えて、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により炉心を未臨界にでき、かつ、運転時の異常な過渡変化後において未臨界を維持できる設計とする。

三 反応度制御系統に含まれる独立した系統の1つである化学体積制御設備による反応度制御は、1次冷却材中へのほう酸注入により、キセノン濃度変化に伴う反応度変化及び高温状態から低温状態までの反応度変化を制御し、低温状態で炉心を未臨界に維持できる設計とする。

四 反応度制御系統に含まれる独立した系統の1つである制御棒制御系は、1次冷却材の喪失その他の設計基準事故時において、原子炉トリップ信号により制御棒クラスタを炉心に挿入することにより、高温状態において炉心を未臨界にできる設計とする。

また、反応度制御系統に含まれる独立した系統の1つである化学体積制御設備は、キセノン濃度変化及び1次冷却材温度変化による反応度変化がある場合には、1次冷却材中へのほう酸注入により炉心を未臨界に維持できる設計とする。

なお、「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は、原子炉トリップ信号による制御棒クラスタの炉心への挿入に加えて、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により炉心を未臨界にでき、かつ、設計基準事故後において未臨界を維持できる設計とする。

五 制御棒クラスタは、最も反応度価値の大きい制御棒クラスタ1本が、全引抜位置のまま挿入できないときでも、高温状態で十分な反応度停止余裕を有して炉心を未臨界にできる設計とする。さらに、低温状態でも化学体積制御設備によるほう酸注入により、十分な反応度停止余裕を有して炉心を未臨界に維持できる設計とする。

3 について

反応度が大きく、かつ、急激に投入される事象として「制御棒飛び出し」があるが、零出力から全出力間の制御棒クラスタの挿入限界を設定することにより、制御棒クラスタの位置を制限し、制御棒クラスタ1本が飛び出した場合でも過大な反応度が添加されない設計とする。

また、反応度が急激に投入される事象として「原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き」があるが、この場合には制御棒クラスタの引抜最大速度を制限することにより、過度の反応度添加率とならない設計とする。

さらに、これら反応度投入事象に対しては「出力領域中性子束高」等による原子炉トリップ信号を設け、燃料材の最大エンタルピや原子炉圧力が顕著に上昇する前に、発電用原子炉を自動的に停止し、過渡状態を早く終結させることにより、原子炉冷却材圧力バウンダリを破損せず、また、炉心冷却を損なうような炉心及び炉

内構造物の破壊を生じない設計とする。

2. 反応度制御系統及び原子炉停止系統

別添 1 高燃焼度燃料の使用に伴う反応度停止系統及び原子炉停止系統への影響について

高燃焼度燃料の使用に伴う
反応度制御系統及び原子炉停止系統への
影響について

目 次

1. はじめに	25 条-別添 1-1
2. ステップ 2 燃料使用に伴う反応度制御系統及び原子炉停止系統の設備影響について	25 条-別添 1-2
3. ステップ 2 燃料使用に伴う反応度制御系統及び原子炉停止系統の設備対応について	25 条-別添 1-4
(1) 制御棒クラスタの反応度制御能力について	25 条-別添 1-4
(2) ほう素の反応度制御能力について	25 条-別添 1-4
別紙 1 反応度制御系統の役割について	
別紙 2 1 次冷却材中のほう素濃度上昇に伴う設備への影響について	
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	
別紙 4 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	
別紙 5 ほう素濃度調整による反応度制御能力について	

1. はじめに

玄海原子力発電所 4 号炉では使用済燃料の発生量を低減するため、燃料集合体最高燃焼度を 48,000MWd/t とする現行の高燃焼度燃料（以下「ステップ 1 燃料」という。）に代わり、燃料集合体最高燃焼度を 55,000MWd/t に引き上げた高燃焼度燃料（以下「ステップ 2 燃料」という。）を使用することとしている。

本資料は、ステップ 2 燃料の使用に伴い、反応度制御系統及び原子炉停止系統の設備に対する影響評価を行ったものである。

なお、反応度制御系統及び原子炉停止系統の反応度制御に対する影響評価は、「15 条 炉心等」において説明する。

2. ステップ 2 燃料使用に伴う反応度制御系統及び原子炉停止系統の設備影響について

ステップ 2 燃料装荷炉心では、燃料の初期ウラン 235 濃縮度を約 4.1wt% から約 4.8wt% まで上昇させること（濃縮度の上昇）及び燃料集合体最高燃焼度を 48,000MWd/t から 55,000MWd/t まで上昇させること（燃焼度の上昇）等に伴い、以下の観点から反応度制御系統及び原子炉停止系統の設備に与える影響を評価する必要がある。

- ・制御棒クラスタの反応度制御能力
- ・ほう素の反応度制御能力

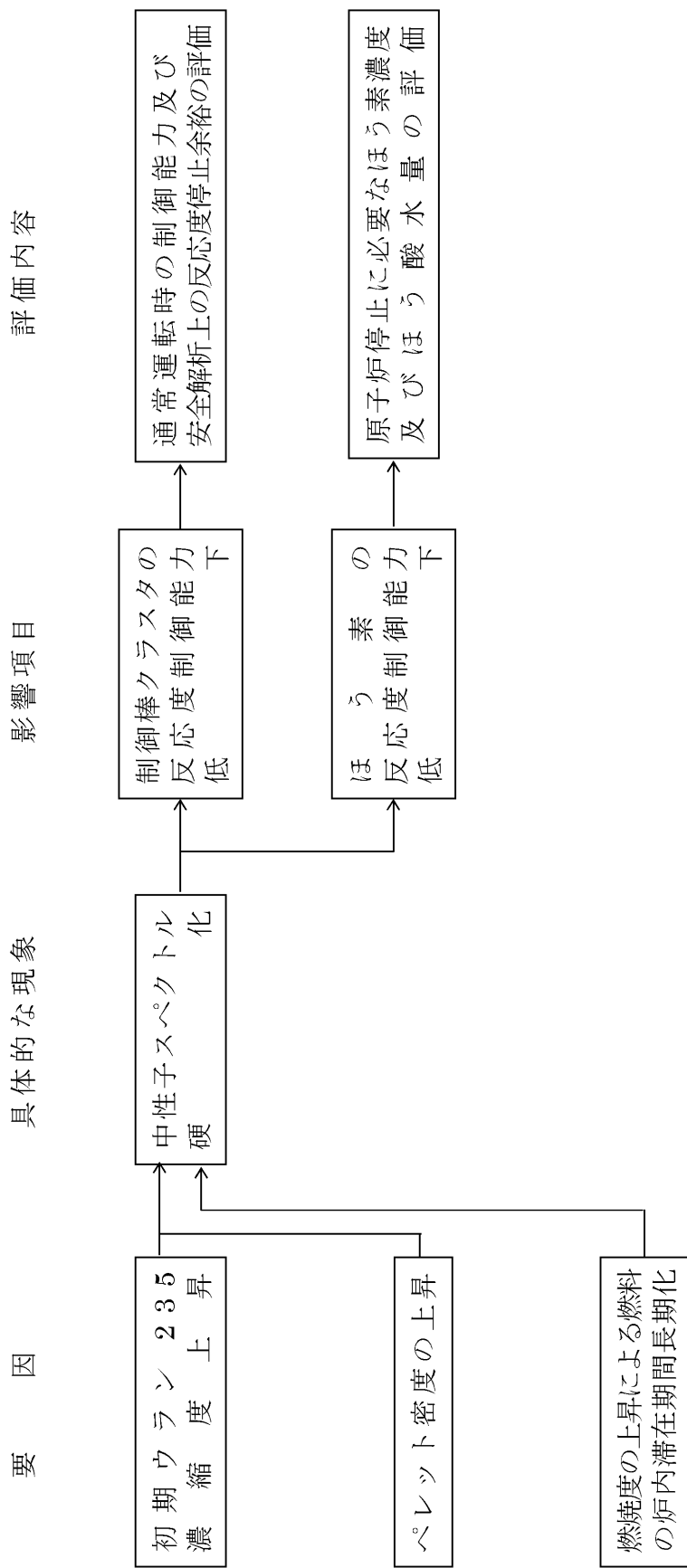
具体的には、濃縮度及びペレット密度の上昇に伴い、ウラン 235 量が増加するとともに、燃料の高燃焼度化によりプルトニウムや核分裂生成物といった熱中性子吸収物質が増加するため、原子炉内の熱中性子束が低下する（中性子スペクトルの硬化）。この結果、制御棒クラスタや 1 次冷却材中のほう素が吸収する熱中性子量が減少し、制御棒クラスタ及びほう素の制御能力が低下する。

このため、ステップ 2 燃料の使用に際しては、

- ・通常運転時の制御能力及び安全解析上の反応度停止余裕
- ・原子炉停止に必要なほう素濃度及びほう酸水量

に対する評価を実施し設備影響を検討する。

ステップ 2 燃料の使用に伴う反応度制御系統及び原子炉停止系統の設備影響検討フローを第 2-1 図に示す。



第 2-1 図 ステップ 2 燃料使用に伴う反応度制御系統及び原子炉停止系統の設備影響

3. ステップ 2 燃料使用に伴う反応度制御系統及び原子炉停止系統の設備対応について

(1) 制御棒クラスタの反応度制御能力について

ステップ 2 燃料の使用に伴う中性子スペクトルの硬化の結果、制御棒クラスタが吸収する熱中性子量が減少し、制御棒クラスタの反応度値が低下する。

ステップ 2 燃料を使用しても、現状の設備で所定の反応度停止余裕（1.6% $\Delta K/K$ 以上）を確保でき問題ない。

反応度停止余裕の評価結果を第 3-1 表に示す。

(2) ほう素の反応度制御能力について

ステップ 2 燃料の使用に伴う中性子スペクトル硬化の結果、1 次冷却材中のほう素が吸収する熱中性子量が減少し、ほう素の反応度値が低下する。

a. 出力運転時

安全上必要なほう酸水量は、現行のほう酸タンク容量で確保可能であり問題ない。

安全上必要なほう酸水量の評価結果及びほう酸タンクの容量を第 3-2 表に示す。

b. 異常な過渡変化及び事故時

異常な過渡変化及び事故時については、燃料取替用水ピットのほう素濃度を高める（2,500→3,100ppm）ことで対応する。

なお、ほう素濃度の設定においては、主に以下の事象

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

を設計要求として決定した。

c. 燃料取替時

燃料取替時においては、1 次冷却材中のほう素濃度を燃料取

替用水タンクのほう酸水と同じほう素濃度まで高めた上で燃料取替作業を行う。ステップ 2 燃料使用により、燃料取替用水タンクのほう素濃度を高める(2,500→3,100ppm)ため、燃料取替時に必要となるほう酸水量が増加する。

この燃料取替時に必要なほう酸水量については、現状のほう酸タンクの貯蔵量では不足するが、ほう酸回収系の運用を効率的に行うことにより、不足する貯蔵容量は、運用管理において十分対応可能である。なお、安全上要求されるほう酸水量は、現行のほう酸タンクで確保可能であることから、現状の設備で問題ない。

燃料取替時に必要なほう酸水量の評価結果を第 3-3 表に示す。

第 3-1 表 反応度停止余裕の評価結果（平衡炉心）

	評価結果	安全解析上の 反応度停止余裕
反応度停止余裕 (% $\Delta K/K$)	1.79	≥ 1.60

第 3-2 表 安全上必要なほう酸水量の評価結果*1)

ほう酸タンク 有効容量 (m^3)	安全上必要な ほう酸水量*2) (m^3)	全制御棒クラスタ 挿入不能時に必要な ほう酸水量 (m^3) [参考]
約 225		

*1) ほう素濃度は 7,000ppm

*2) 「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つつ、低温臨界未満状態を達成し、かつ、維持する」のに必要なほう酸水量。

第 3-3 表 燃料取替時に必要なほう酸水量の評価結果*1)

ほう酸タンク有効容量 (m^3)	燃料取替時に必要な ほう酸水量*2) (m^3)
約 225	

*1) ほう素濃度は 7,000ppm

*2) 安全上必要なほう酸水量 + 燃料取替停止に必要なほう酸水量

┌───┐: 商業機密に係る事項のため、公開できません。

反応度制御系統の役割について

炉心の反応度制御は、制御棒制御系による制御棒クラスタ（以下、「制御棒」という）の挿入／引き抜き操作と化学体積制御設備による 1 次冷却材中のほう素濃度調整（以下ほう素濃度調整という）の原理の異なる二つの方法により行う。

制御棒の役割は、通常運転時の出力変化、ほう素濃度変化、1 次冷却材温度変化及びキセノン濃度変化にともなう反応度変化を制御し、さらに原子炉を十分速く高温全出力から高温状態にする際の反応度変化を制御することである。

一方、ほう素濃度調整の役割は、高温状態から低温状態までの 1 次冷却材温度変化による反応度変化、キセノン濃度の変化による反応度変化及び燃料の燃焼による反応度変化など、比較的緩やかな反応度変化を制御することである。

原子炉の起動から停止、さらに運転時の異常な過渡変化や事故時の停止において、二つの反応度制御系統がどのように使い分けられるかを表 1 に示す。

これらの反応度制御系統のうち、ほう素濃度調整能力を確保するための安全上必要なほう酸水量（以下、「安全上必要なほう酸水量」という）は、以下の設置許可基準に適合するように決めている。

第二十五条 反応度制御系統及び原子炉停止系統

第 2 項第二号

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発電用原子炉を未臨界に移行し、及び未臨界を維持できるものであり、かつ、運転時の異常な過渡変化時の高温状態においても反応度制御系統のうち少なくとも一つは、燃料要素の許容損傷限界を超えることなく発電用原子炉を未臨界に移行し、及び未臨界を維持できること。この場合において、非常用炉心冷却設備その他の発電用原子炉施設の安全性を損なうおそれがある場合に作動する設備の作動に伴って注入される液体制御材による反応度価値を加えることができる。

【設計の対応】

高温全出力からの高温状態は、制御棒で制御することを基本としている。そのため、最も反応度価値の大きい制御棒 1 本が全引抜位置のまま挿入できないときでも、その他の制御棒を全て挿入することにより高温状態で未臨界に移行でき、キセノン崩壊により反応度が添加されるまでの期間、高温状態で臨界未満を維持できるように設計している。

第 2 項第三号

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、反応度制御系統のうち少なくとも一つは、発電用原子炉を未臨界に移行し、

及び未臨界を維持できること。

【設計の対応】

高温状態から低温状態及び低温状態の維持は、ほう素濃度調整による。高温状態までは制御棒で移行するとして、キセノン崩壊による反応度が添加され始める高温状態から低温状態までの反応度変化を制御し、未臨界を維持するのに必要なほう酸水量を、安全上必要なほう酸水量として設定している。

さらに、全制御棒が挿入不能の場合でも、ほう素濃度調整だけで高温全出力から低温状態で未臨界にし、その状態を維持するのに必要なほう酸水量を確保することとしている。

運転状態毎の反応度制御系統の役割を表 1 に整理した。

表 1 の 部分が、安全上必要なほう酸水量設定の条件であり、備考欄に必要なほう酸水量算定の条件を記載している。

表 1 反応度制御システムの役割について

運転状態		炉心状態		反応度制御設備		備考
		自	至	化学体積制御設備	制御棒	
通常運転時	起動時	高温停止	高温停止	—	高温零出力時挿入限界以上まで引き抜く	
		高温停止	臨界近傍	希釈	—	・通常の抽出流量の範囲で希釈
		臨界近傍	臨界 高温零出力	—	臨界になるまで引き抜く	
		高温零出力	定格出力	希釈／濃縮	引抜き／挿入	・CAOC 運転適用し、両者併用
	出力運転時 燃焼度補償	定格出力	定格出力	希釈	—	・通常の抽出流量の範囲で希釈可能（希釈率はおおよそ下記） BOC EOC 0.3m ³ /d 35 m ³ /d
	出力運転時 負荷変化時	負荷変化前	負荷変化後	希釈／濃縮	引抜き／挿入	・CAOC 運転適用し、両者併用
	停止時	定格出力	高温停止	—	挿入（通常の停止は制御バンクのみ挿入）	・通常運転の停止時には、全制御棒挿入（1本固着）を考慮する必要はない
		高温停止（維持）	高温停止（維持）	濃縮	挿入したまま	・濃縮速度 > Xe 消滅速度
		高温停止	低温停止	濃縮	挿入したまま	・濃縮速度 > Xe 消滅・冷却速度 ・通常の停止であり、必要ほう酸水量は安全上必要なほう酸水量に包絡される
		低温停止	燃料取替停止	濃縮	全制御棒挿入状態とする	・ほう酸水量確保 1400→3100ppm
異常な過渡変化及び事故	原子炉トリップ（過冷却事象以外）	事象発生前	未臨界状態	—	全制御棒挿入*	* 最大効果制御棒 1本全引き抜き固着を仮定
	原子炉トリップ（過冷却事象）	事象発生前	未臨界状態	濃縮*	同上	* ほう素添加は ECCS のほう素添加機能に期待
	事象終結後	高温停止	低温停止	濃縮	同上	・ほう酸水量確保 0→1400ppm (81.6m ³) ・濃縮速度 > Xe 消滅・冷却速度
停止時 （制御棒の挿入が期待できない場合）	定格出力	低温停止	濃縮	— （全制御棒引抜き状態を仮定）	・ほう酸水量確保 0→1800ppm (107.6m ³)	

- (注) 1. 表中 は、安全上必要なほう酸水量設定の条件である。
 2. 備考欄中 () 内の体積は、必要ほう酸水量を表す。

1 次冷却材中のほう素濃度上昇に伴う設備への影響について

ほう素濃度の上昇に伴い、1 サイクル中に使用されるほう酸水量が増加するため、ほう酸水の貯蔵設備、処理設備等の容量について影響評価を行い、問題がないことを確認した。表 1 にほう酸関連機器の設備仕様及び影響評価結果を示す。

表 1(1/2) ほう酸関連機器の設備仕様及び影響評価結果

名称	仕様	仕様根拠	ほう素濃度上昇に伴う影響及び対応	評価
ほう酸タンク	<u>120 m³×2 基</u>	低温停止に必要なほう酸水及び燃料取替停止操作に必要なほう酸水を貯蔵できる容量とする。	低温停止に必要な安全上要求されるほう酸水量（設置許可基準第二十五条に示される、未臨界への移行、及び未臨界の維持に必要なほう酸水量）は <u>120</u> m ³ であり、このほう酸水量は、化学体積制御設備のほう酸注入系（原子炉停止系）に属するほう酸タンクの現状設備で対応可能である。	○
冷却材貯蔵タンク	<u>390 m³×3 基</u> (2 ユニット)	炉心サイクルの約 80%の状態から低温停止及び再起動に伴う抽出水が受け入れられる容量とする。	炉心サイクルの約 80%における低温停止及び再起動に伴う抽出量は約 <u>390</u> m ³ であり、現状設備で対応可能である。	○
ほう酸回収装置	<u>6.8 m³/hr×2 基</u> (2 ユニット)	通常運転中の抽出水を処理する。	燃焼度補償に伴う 1 日当たりの抽出水量への影響は小さく、現状設備で対応可能である。	○
1 次系純水タンク	<u>400 m³×2 基</u> (2 ユニット)	炉心サイクルの約 80%の状態から、低温停止及び再起動に必要な 1 次系純水を 1 次系純水タンクに確保できる容量とする。	炉心サイクルの約 80%における低温停止及び再起動に伴う補給水は <u>400</u> m ³ であり、現状設備で対応可能である。	○

設備仕様のうち、 部は本文、添付書類八記載事項。

 部は、添付書類八記載事項。

 : 商業機密に係る事項のため、公開できません。

表 1(2/2) ほう酸関連機器の設備仕様及び影響評価結果

名称	仕様	仕様根拠	ほう素濃度上昇に伴う影響及び対応	評価
ほう酸回収装置脱塩塔	<u>2 m³×2 基</u> (2 ユニット)	1 炉心サイクルの処理水中のリチウム除去及びイオン状の放射性物質を浄化する。	基底負荷運転及びプラント起動停止操作に伴う抽出水は現状に比べ若干増加するが必要樹脂量は <u> </u> m ³ であり、現状設備で対応可能である。	○
冷却材混床式脱塩塔	<u>0.85 m³×2 基</u>	1 炉心サイクルを通じて抽出ラインを流れる 1 次冷却材中の I を浄化できる容量とする。	必要樹脂量は約 <u> </u> m ³ であり、現状設備で対応可能である。	○
冷却材陽イオン脱塩塔	<u>0.57 m³×1 基</u>	1 炉心サイクルを通じて 1 次冷却材中の pH 調整のためのリチウム除去運転ができる容量とする。	必要樹脂量は約 <u> </u> m ³ であり、現状設備で対応可能である。	○
よう素除去薬品タンク	<u>15.2 m³×1 基</u>	事故時の再循環サンプルでの pH を 8.5 以上とするのに必要となる 30wt% の NaOH を貯蔵できる容量とする。	本タンクの水位設定値を変更することで、現状設備で対応可能である。	○
燃料取替用水ピット	<u>ほう素濃度</u> <u>3100ppm 以上</u>	安全注入用水及び燃料取替用水を貯蔵する。	燃料取替停止時のほう素濃度は 3100ppm であるが、建屋内配置であり、0℃でのほう酸溶解度は 4700ppm であることからほう酸析出の問題はない。	○
燃料取替用水補助タンク	ほう素濃度 3100ppm 以上	燃料取替用水キャナル等への補給ならびに水抜き時の受け入れ。	同上	○
蓄圧タンク	<u>ほう素濃度</u> <u>3100ppm 以上</u>	安全注入用水を貯蔵する。	同上	○

設備仕様のうち、 部は本文、添付書類八記載事項。

 部は、添付書類八記載事項。

 : 商業機密に係る事項のため、公開できません。

ほう素濃度上昇に伴うほう酸析出について

ステップ 2 燃料導入により、燃料取替停止時のほう素濃度が 3,100ppm となる。

図 1 に示すほう酸濃度溶解度曲線から、0℃で析出するほう素濃度は約 4,700ppm であり、燃料取替用水ピット（設定温度：20℃）、蓄圧タンク（設定温度 21℃から 49℃）においては、ほう酸析出は生じない。

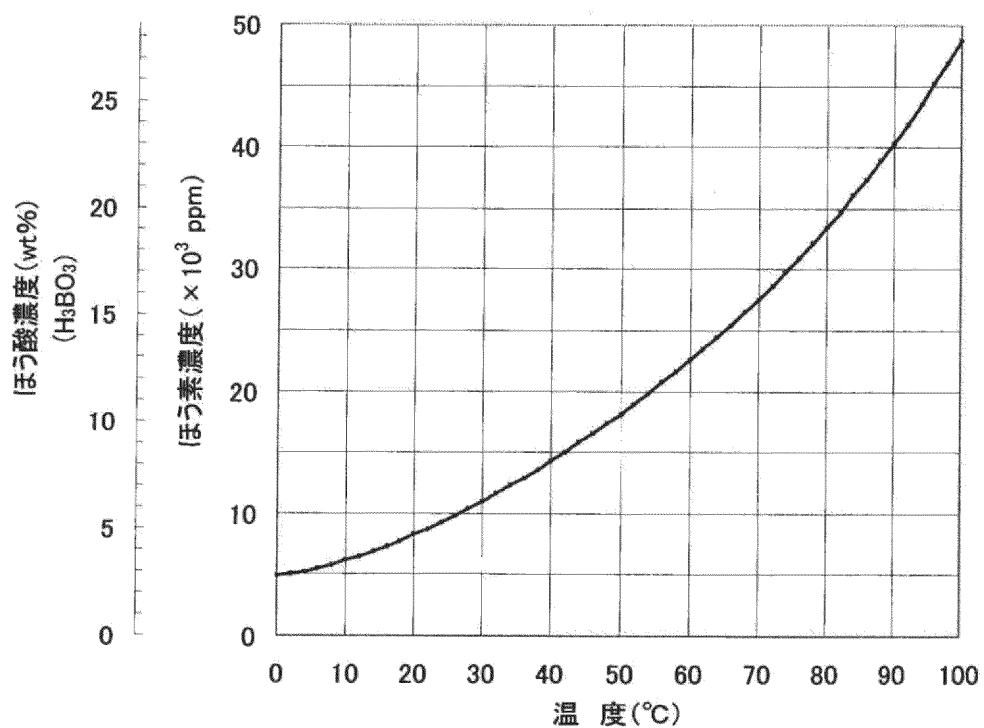


図 1 ほう酸溶解度曲線

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

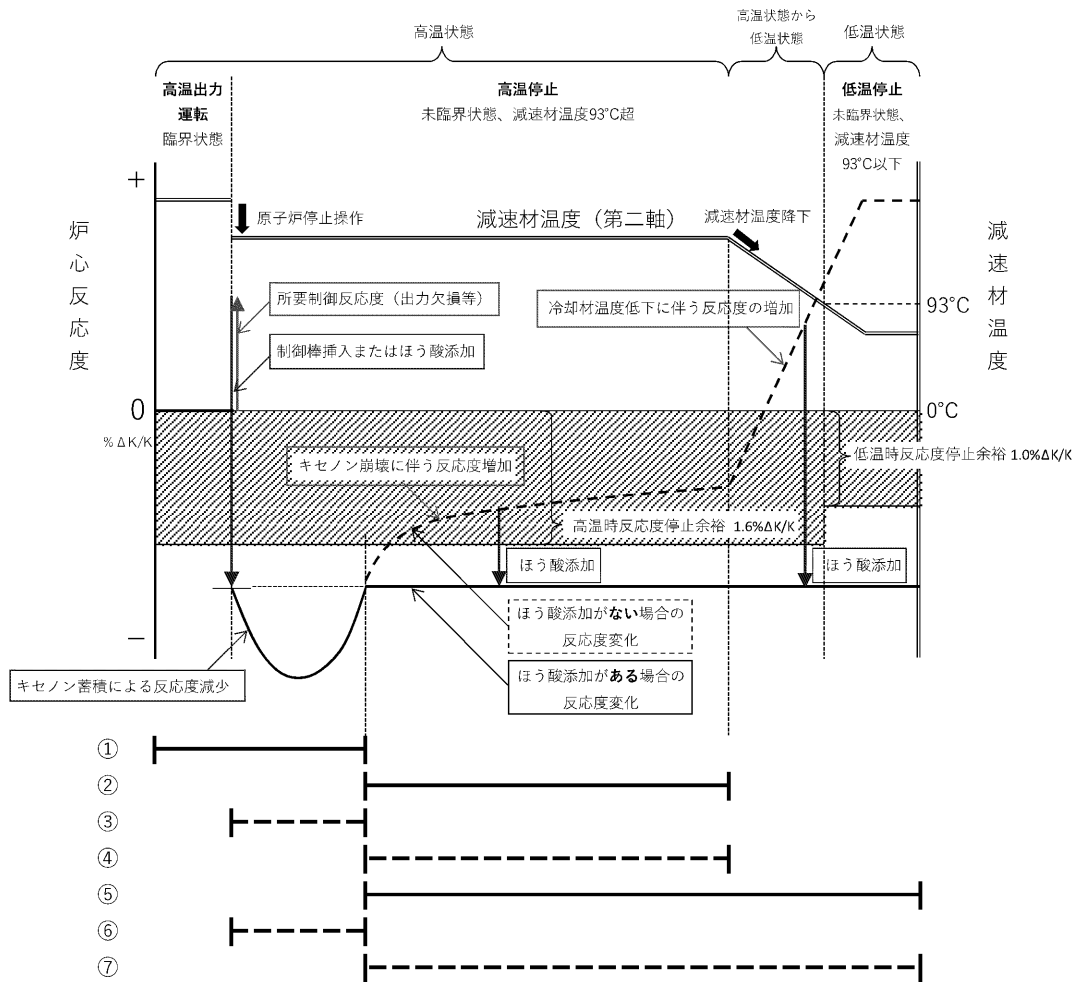


図 設置許可基準規則第 25 条第 2 項で規定している炉心状態並びに反応度制御の目的及び制御時に期待する反応度制御系統

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、それに対する設備設計及び仕様を表に示す。

表 第 25 条第 2 項第 2 号から第 4 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
第 2 号	<p>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。</p>	<p>制御棒 クラスト</p>	<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、制御棒クラスト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> <p>【設備設計】 制御棒クラスト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</p>

[] : 商業機密に係る事項のため、公開できません。

			<p>されるまでの期間において、未臨界に維持できる。 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>	<p>ほう酸</p>	<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>【設備仕様】 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。 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>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>	<p>制御棒 クラスタ</p>	<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。 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>	
<p>「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</p>	<p>ほう酸</p>	<p>【設備設計】 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運転時の異常な過渡変化時において高</p>	

[] : 商業機密に係る事項のため、公開できません。

<p>過渡変化時において、制御棒クランプ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>		<p>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】 高燃焼度燃料導入等に伴う影響を考慮して、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。 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。</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>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。</p>	<p>ほう酸</p>	<p>【設備設計】 制御棒クランプ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】 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>



：商業機密に係る事項のため、公開できません。

第三号	<p>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】 制御棒クラスト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】 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 0.18×10³（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 4 及び添付 5 のとおり。</p>
第四号	<p>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。</p>	<p>制御棒クラスト</p>	<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、制御棒クラスト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>

[]

：商業機密に係る事項のため、公開できません。

<p>「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>ほう酸</p>	<p>【設備設計】 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】 高燃焼度燃料導入等に伴う影響を考慮して、非常用炉心冷却設備である燃料取替用水ピットのほう酸濃度を 2500ppm 以上から 3100ppm 以上に変更する。</p> <p>添付書類中に示す「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。 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】 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】 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>



： 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

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

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。

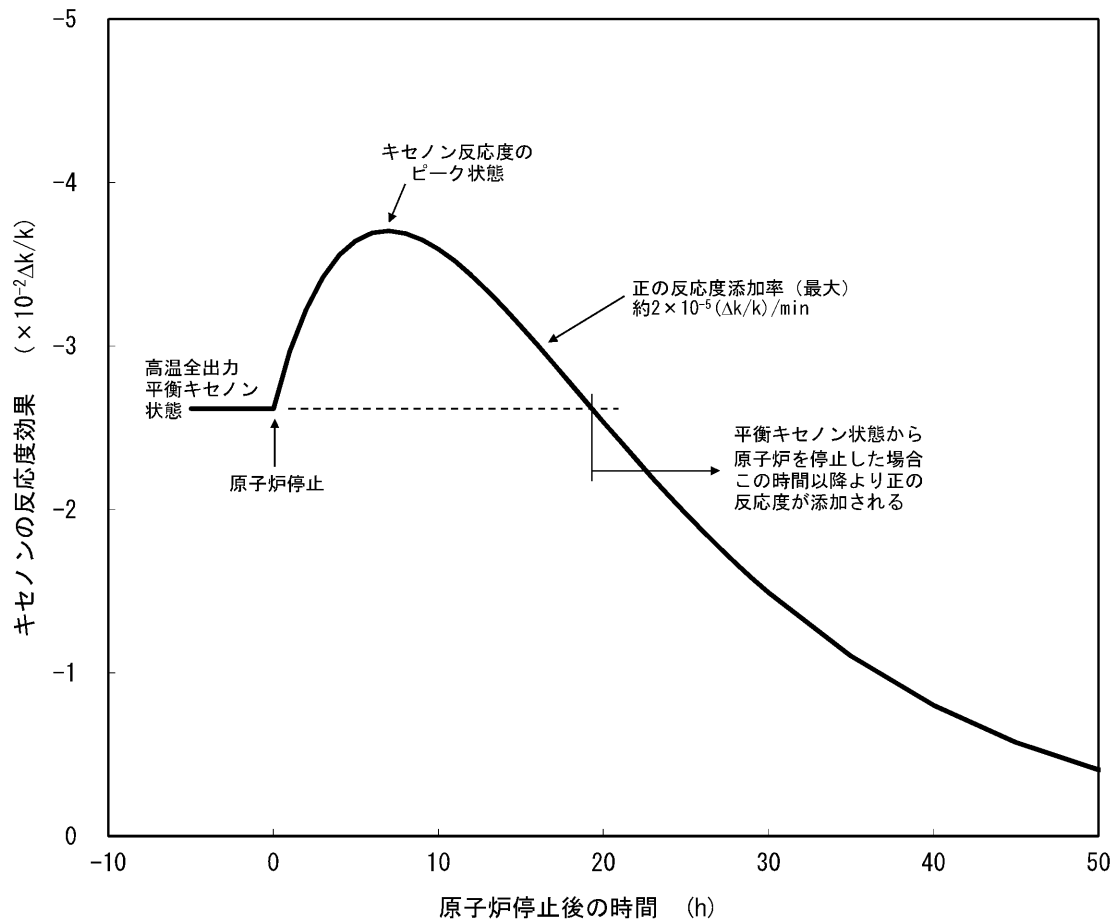


図1 原子炉停止後のキセノン反応度変化
(高燃焼度燃料装荷炉心、平衡炉心、サイクル末期)

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： 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： 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 ($\Delta K/K$)/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>

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、先行プラントの導出方法と整合するよう、以下のとおり変更した。

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 = $\text{LN}(\text{純水条件}(0\text{ppm})\text{における実効増倍率}(1.13755) / \text{燃料取替時のほう素濃度}(2500\text{ppm})\text{における実効増倍率}(0.94157))$
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 = $\text{純水条件}(0\text{ppm})\text{から燃料取替時のほう素濃度}(3100\text{ppm})\text{まで濃縮するときのほう素濃度増分} \times \text{ほう素値}(6.0 \times 10^{-3}(\Delta K/K)/\text{ppm})$

いずれの方法も、最もほう素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。

上述のとおり、実際の炉心でこの本文記載値を下回ることはないため、いずれの導出過程でも問題とならない。