

玄海原子力発電所第3号機  
燃料体(17行17列A型燃料集合体(ウラン・プルトニウム  
混合酸化物燃料))に係る設計及び工事計画認可申請について

九州電力株式会社  
2023年 4月4日

枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません

1. 燃料体に係る法令等改正内容について . . . . .	2
2. 燃料体に係る技術基準規則への適合性について . . . . .	3
3. 燃料体に係る基本設計方針及び構造 . . . . .	5
4. 燃料体の強度に係る評価 . . . . .	10
5. 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能 . . . . .	14
6. スケジュールについて . . . . .	18
7. まとめ . . . . .	19

## 1. 法令等改正内容

2020年4月1日の改正原子炉等規制法の施行に伴い燃料体に係る制度が見直され、設計及び工事計画認可に設備として燃料体が追加された。また、「実用発電用原子炉に使用する燃料体の技術基準に関する規則」が廃止され、その内容が「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」に移行された。

当社では、玄海原子力発電所3号機のウラン・プルトニウム混合酸化物燃料体（以下「A型MOX燃料体」という。）の加工を2023年度下期より計画しており、改正原子炉等規制法を踏まえて、設計及び工事の計画に係る手続きを実施する。

### (1) 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則

改正後	改正前
<p>別表第一（上欄：工事の種類 1 原子炉本体）                      中欄 2 加圧水型発電用原子炉施設に係るものの改造であって、次に掲げるもの                      （1～2）[略]                      （3）燃料体 [以下、略]</p> <p>別表第二                      上欄 発電用原子炉施設の種類 原子炉本体                      中欄 加圧水型発電用原子炉施設に係るものにあつては、次の事項                      1～2 [略]                      3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料 [以下、略]                      下欄 [略]                      燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書                      [以下、略]</p>	<p>別表第一（上欄：工事の種類 1 原子炉本体）                      中欄 2 加圧水型発電用原子炉施設に係るものの改造であって、次に掲げるもの                      （1～2）[略]                      （号を加える。） [以下、略]</p> <p>別表第二                      上欄 発電用原子炉施設の種類 原子炉本体                      中欄 加圧水型発電用原子炉施設に係るものにあつては、次の事項                      1～2 [略]                      （号を加える。） [以下、略]                      下欄 [略]                      （新設）                      [以下、略]</p>

### (2) 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈

改正後	改正前
<p>第23条（炉心等）                      1・2（略）                      3 第1項及び第2項の燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和63年5月12日原子力安全委員会了承）」及び「燃料体に関する要求事項（別記-10）」によること。</p>	<p>第23条（炉心等）                      1・2（略）                      （新設）</p>

### 2. 1 燃料体に係る技術基準規則について

本申請にて適合性を確認する必要がある技術基準規則の条文、選定理由及び確認状況を以下に示す。

技術基準規則		選定理由	確認状況
第5条	地震による損傷の防止	地震による損傷の防止については、新たに要目表対象設備とする申請対象の燃料体の適合性を確認する必要があることから対象とする。	既設工認にて適合性を確認済み
第6条	津波による損傷の防止	津波による損傷の防止については、新たに要目表対象設備とする申請対象の燃料体の適合性を確認する必要があることから対象とする。	既設工認にて適合性を確認済み
第7条	外部からの衝撃による損傷の防止	外部からの衝撃による損傷の防止については、新たに要目表対象設備とする申請対象の燃料体の適合性を確認する必要があることから対象とする。	既設工認にて適合性を確認済み
第11条	火災による損傷の防止	火災による損傷の防止については、新たに要目表対象設備とする申請対象の燃料体は、防護対象施設に該当しないものの、燃料体が発火源等となる可能性の観点において、火災の発生防止対策に対する適合性を確認する必要があることから対象とする。	既設工認にて適合性を確認済み
第14条	安全設備	安全設備については、新たに要目表対象設備とする申請対象の燃料体について、第2項への適合性を確認する必要があることから対象とする。 なお、第1項の適用を受けるものではない。	既設工認にて適合性を確認済み
第15条	設計基準対象施設の機能	設計基準対象施設の機能については、新たに要目表対象設備とする申請対象の燃料体について、第1項及び第2項への適合性を確認する必要があることから対象とする。 第4項については、申請対象の燃料体は防護対象設備に該当せず、既工事計画にて適合性が確認された本条文に係る設計に影響を与えるものではない。 また、第3項、第5項及び第6項の適用を受けるものではない。	既設工認にて適合性を確認済み
第19条	流体振動等による損傷の防止	流体振動等による損傷の防止については、新たに要目表対象設備とする申請対象の燃料体の適合性を確認する必要があることから対象とする。	既設工認にて適合性を確認済み
第23条	炉心等	改正された「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」に対して、新たに要目表対象設備とする申請対象の燃料体の適合性を確認する必要があることから対象とする。	本設工認にて適合性を確認



### 2. 2 技術基準規則第23条への適合性について

本申請にて適合性を確認する必要がある技術基準規則の条文のうち、「解釈」が改正された第23条（炉心等）への適合性については「4. 燃料体の強度に係る評価」、「5. 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能」にて確認している。

今回申請したA型MOX燃料体は、玄海3号機で使用している現行のA型MOX燃料体（以下「現行A型MOX燃料体」という。）と主要な構造、材料は同一であり、燃料体の強度に係る評価方法及び評価結果、燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能については、現行A型MOX燃料体と同様である。

実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則	実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈
<p>（炉心等） 第二十三条 燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、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。</p> <p>2 燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物は、最高使用圧力、自重、附加荷重その他の燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物に加わる負荷に耐えるものでなければならない。</p>	<p>第23条（炉心等）</p> <p>1 第1項に規定する「最も厳しい条件」とは、原子炉運転状態に対応した圧力及び温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量等の組み合わせのうち想定される最も厳しい条件をいう。また、「必要な物理的及び化学的性質」とは、物理的性質については耐放射線性、寸法安定性、耐熱性及び核性質等をいい、化学的性質については耐食性及び化学的安定性等をいう。</p> <p>2 第2項における「その他の燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物に加わる負荷」には、燃料体における核分裂生成物質の蓄積による燃料被覆管の内圧上昇及び熱応力等の荷重を含むものとする。</p> <p>3 <u>第1項及び第2項の燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承）」及び「燃料体に関する要求事項（別記-10）」によること。</u></p>

#### 3. 基本設計方針及び構造

##### 3. 1 基本設計方針【本文】

原子炉本体の基本設計方針のうち、本申請に係る箇所について以下に示す。なお、今回の申請にて追加した部分を下線にて示す。

#### 原子炉本体 (1) 基本設計方針

##### 第2章 個別項目

##### 1. 炉心等

燃料体（燃料材、燃料要素その他の部品を含む。）は、設置（変更）許可を受けた仕様となる構造及び設計とする。

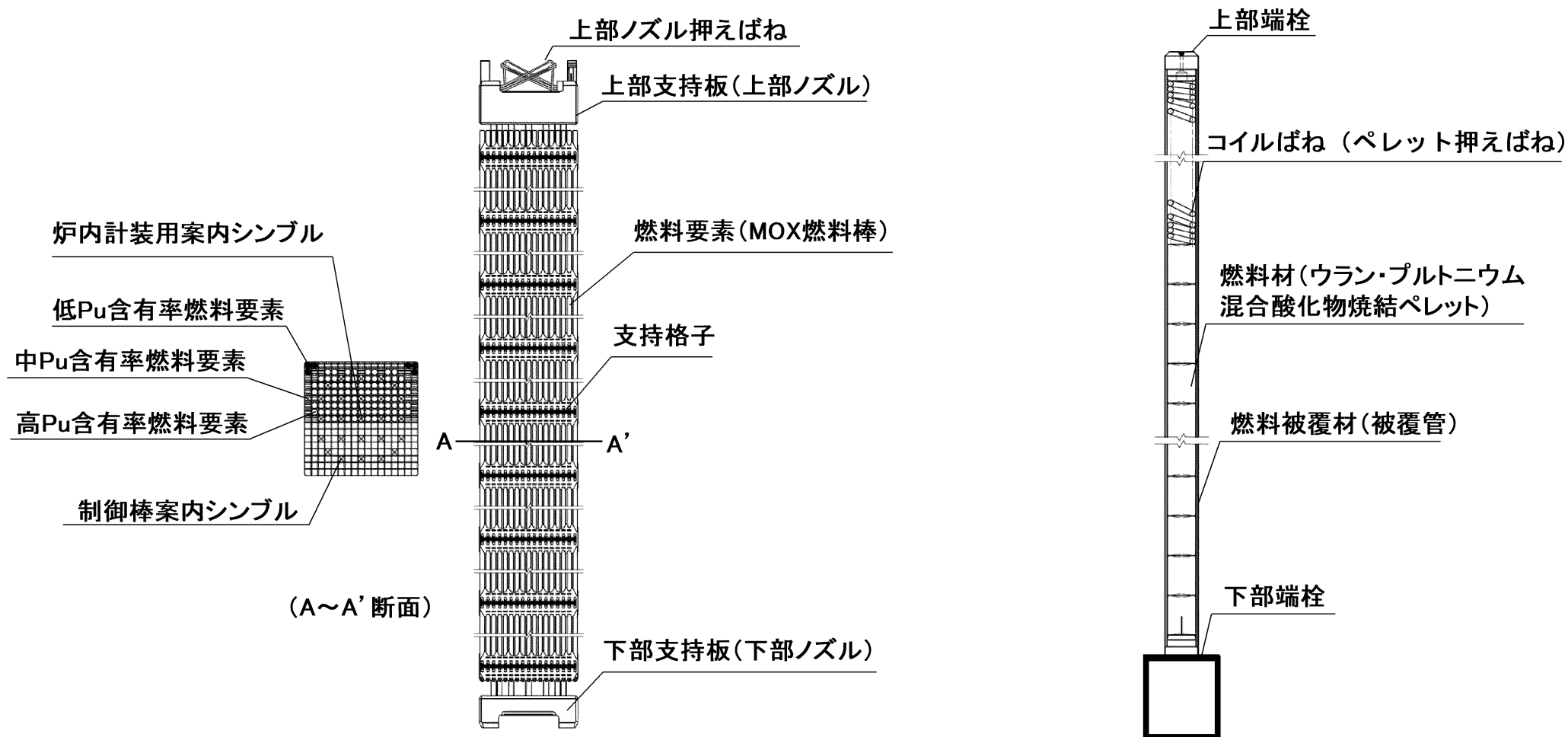
燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における原子炉運転状態に対応した圧力、温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量及び水質の組合せのうち想定される最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法安定性、耐熱性、核性質等のうち必要な物理的性質並びに耐食性、化学的安定性等のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。燃料体の物理的性質及び化学的性質について、具体的には「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項（別記-10）」に基づき設計する。

燃料体は下部炉心板の上に配列され、その荷重を下部炉心支持板及び炉心槽により原子炉容器のフランジで支持する設計とする。

燃料体は、「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について」（昭和51年原子炉安全専門委員会）及び「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について」（昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承）に基づき、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、附加荷重に加え、核分裂生成物の蓄積による燃料被覆材の内圧上昇及び熱応力の荷重に耐える設計とする。また、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料体については、上記に加え、「発電用軽水型原子炉施設に用いられる混合酸化物燃料について」（平成7年6月19日 原子力安全委員会了承）に基づく設計とする。

#### 3. 2 燃料体の構造について【添付図面】

今回申請したA型MOX燃料体は、以下に示すとおり、燃料被覆材（以下「被覆管」という。）  
燃料材（ウラン・プルトニウム混合酸化物焼結ペレット）、コイルばね（ペレット押えばね）、燃料被覆材  
端栓からなる燃料要素（以下「MOX燃料棒」という。）  
上部支持板（上部ノズル）、下部支持板（下部ノズル）、制御棒案内シンプル、炉内計装用案内シンプル及び支持格子等から構成されている。



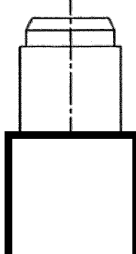
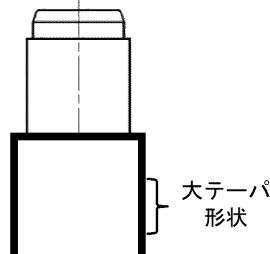
燃料体の構造概要図

※枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

#### 3. 3 A型MOX燃料体の変更点について

現行A型MOX燃料体からの変更点及び影響確認結果は以下のとおり。いずれの変更も、「4. 燃料体の強度に係る評価」「5. 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能」の内容に影響はない。

##### 3. 3. 1 下部端栓の形状の変更(大テーパ化)

項目		変更前	変更後	概要
燃料要素	下部端栓			燃料棒の振動抑制（フレットング摩耗低減）を図るため、大テーパ形状へ変更。

実機の流速を模擬した流水試験により、燃料棒の振動及び冷却材の流況に関連するパラメータとして励振力及び圧力損失係数を実測し、いずれのパラメータも大テーパ化が適用されている既認可済の48GWd/tウラン燃料と同等であり、期待される効果が得られ、機械的特性等に影響がないことを確認している。

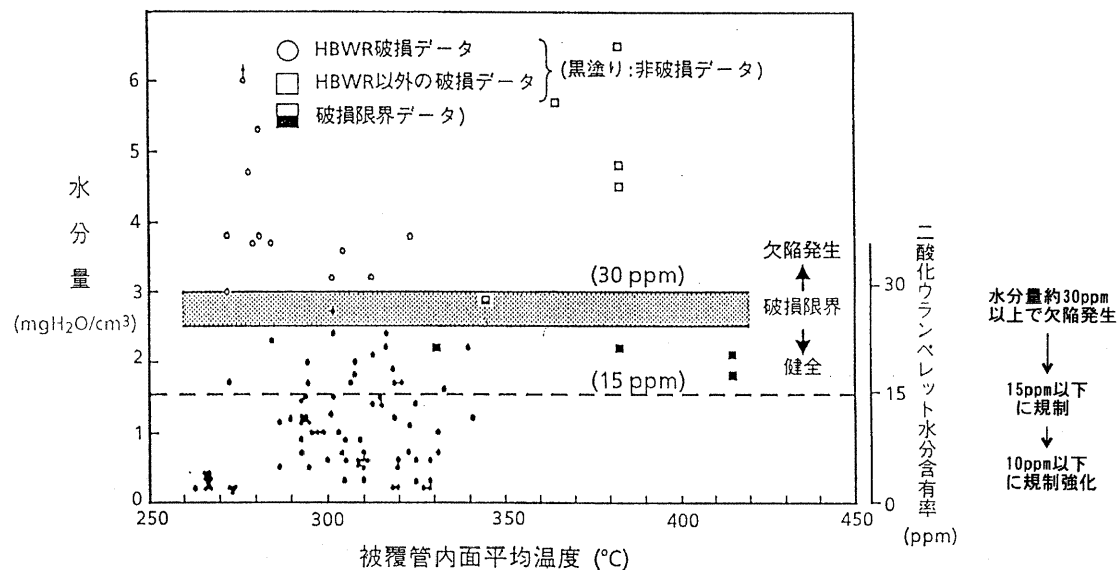
測定項目	関連する項目
励振力	流水振動
	フレットング摩耗
圧力損失係数	上部ノズル押さえばね機能
	スクラム時の健全性
	DNB特性
	水力振動特性

※枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

## 3. 3. 2 水素含有量規定値の変更

項目		変更前	変更後	概要
燃料材	組成 水素	$\leq$ <input type="text"/> ppm	$\leq$ <input type="text"/> ppm	MOX燃料体加工に用いる <input type="text"/> <input type="text"/> 規定値の緩和。

ペレットに含まれる水素は燃料健全性（被覆管の機械特性）に影響を及ぼす可能性はあるが、以下に示すとおり、ウランペレットにおいては水分含有量 $\leq$ ppm（水素含有量：約ppm）では被覆管内面平均温度にかかわらず、ペレットに含まれる水素に起因した破損には至らない。MOX燃料体においても被覆管内面平均温度はウラン燃料体と同等であるため、ウラン燃料体と同様に、水素含有量規定値を $\leq$ ppmとしている。



PWR燃料不具合対策（初期水分濃度と水素脆化欠陥発生の限界）\*

\* 出典：（財）原子力安全研究協会“軽水炉燃料のふるまい 実務テキストシリーズNo.3”，平成25年3月）

※枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

#### 3. 3. 3 不純物含有量規定値の変更

項目			変更前	変更後	概要
燃料材	不純物	[ ]	≦ [ ] ppm (合計)	≦ [ ] ppm	MOX燃料体加工に用いる [ ] [ ] 規定値の緩和。
		[ ]		≦ [ ] ppm	
		[ ]		≦ [ ] ppm	
		[ ]		≦ [ ] ppm	

[ ] は、熱中性子吸収断面積が大きく、中性子経済に影響を及ぼす可能性はあるが、その影響については、その他の不純物による影響も含めて別途ボロン当量として管理しており、ボロン当量は従来仕様（≦ [ ] ppm）から変更しないことから、中性子経済に影響はない。



### 4. 1 燃料棒の設計方針

燃料棒の構造設計基準については、「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について」（昭和63年5月12日）、「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について」（昭和51年2月16日）にて次のように定められている。

今回申請したA型MOX燃料体においては、燃料設計及び設計手法について現行A型MOX燃料体から変更はない。

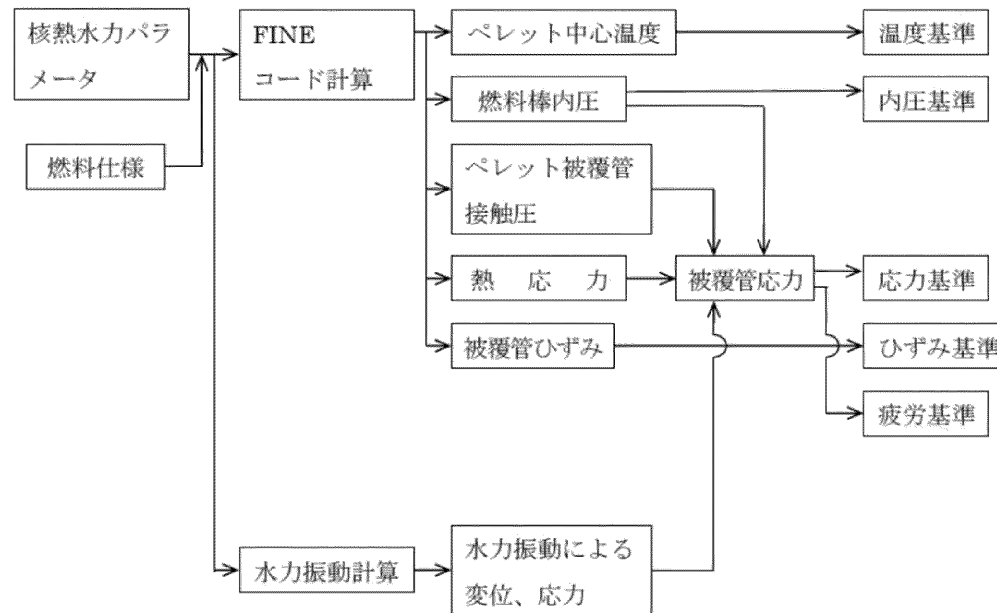
- (1) 燃料最高温度は二酸化ウランの溶融点未満であること。
- (2) 燃料棒の内圧は、通常運転時において被覆管の外向きのクリープ変形によりペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えないこと。
- (3) 被覆管にかかる応力はジルカロイ-4の耐力以下であること。
- (4) 被覆管に生ずる円周方向引張ひずみの変化量は各過渡変化に際して1%を超えないこと。
- (5) 被覆管の累積疲労サイクル数は設計疲労寿命を超えないこと。

なお、原子力安全基準専門部会報告書「発電用軽水型原子炉施設に用いられる混合酸化物燃料について」（平成7年6月19日）にて、MOX燃料体に関する設計の考え方、判断基準等については、「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について」、「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について」等に示されるものを適用することは妥当であると判断されている。

## 4. 2 燃料棒の強度評価

以下に燃料棒強度評価フロー図を示す。

- 燃料棒の強度評価は、二酸化ウラン焼結ペレット及びガドリニア入り二酸化ウラン焼結ペレット及びウラン・プルトニウム混合酸化物焼結ペレットの照射挙動、並びにSn-Fe-Cr系ジルコニウム合金(ジルカロイ-4)被覆管の照射挙動をモデル化したFINEコードを用いて行う。
- FINEコードは、燃料棒が原子炉内で示す挙動（核分裂生成物ガスの生成及び放出、ペレットの熱膨張、焼きしまり及びスエリング、被覆管の熱膨張、クリープ、照射成長、弾性変形等）をモデル化して、燃料温度、燃料棒内圧、被覆管の応力、ひずみ及び疲労等を計算することができ、これらの評価結果について、問題がないことを確認している。



燃料棒強度評価フロー図

### 4. 3 燃料集合体の設計方針

燃料集合体の構造設計基準については、「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について」にて次のように定められている。

- ・ 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において生じる荷重に対する応力は、原則として ASME Sec. III に基づいて評価されること。
- ・ 輸送及び取扱い時の 6 G の荷重で著しい変形を生じないこと。

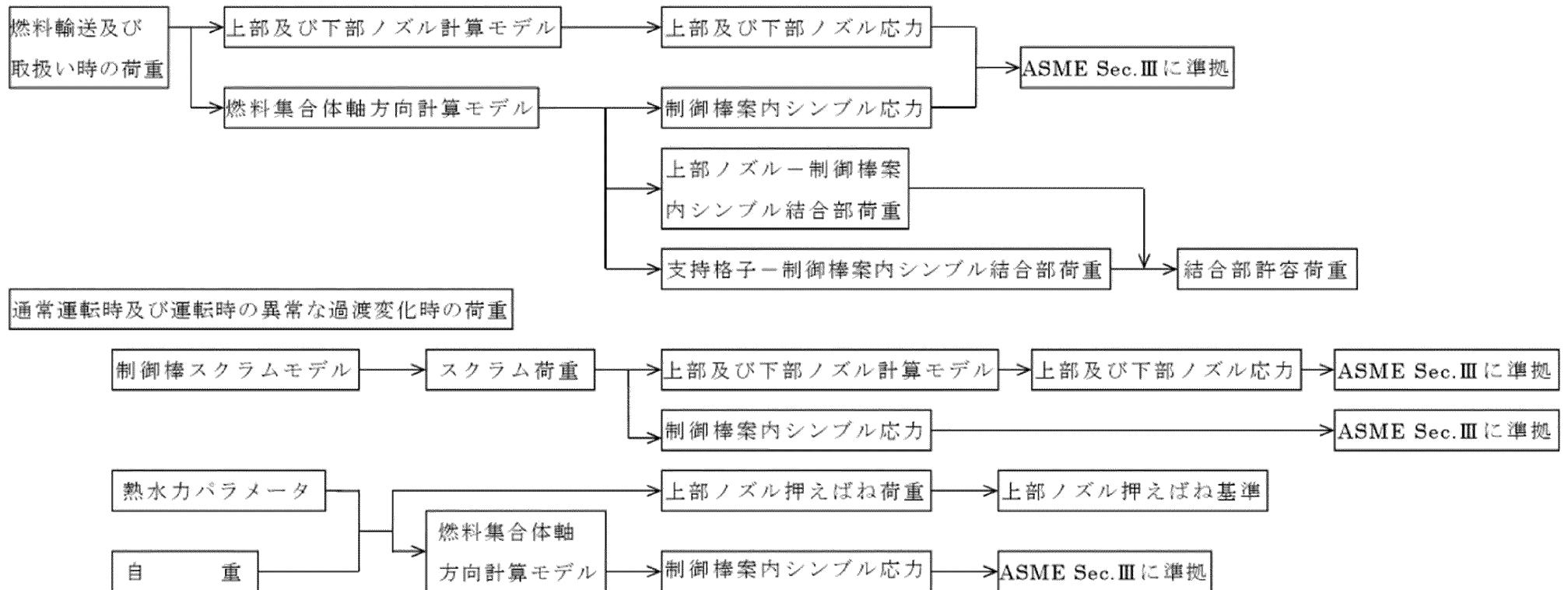
なお、原子炉安全基準専門部会報告書「発電用軽水型原子炉施設に用いられる混合酸化物燃料について」にて、MOX 燃料体に関する設計の考え方、判断基準等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について」、「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について」等に示されるものを適用することは妥当であると判断されている。

ただし、燃料輸送及び取扱い時の強度評価においては、MOX 新燃料集合体は、輸送中に高温となり、強度が低下することから、燃料輸送及び取扱い時の荷重を 4 G と制限し、構成部品がこの荷重に対して、十分な強度を有し、燃料集合体としての機能が保持できることを確認する。

## 4. 4 燃料集合体の強度評価方法

以下に燃料集合体強度評価フロー図を示す。

燃料集合体の強度評価においては、燃料輸送及び取扱い時に加わる4 G（常温時は6 G）の設計荷重並びに通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において加わる荷重に対して、各構成要素が著しい変形を生じないための強度を有しており、その機能を保持していることを確認している。



燃料集合体強度評価フロー図

### 5. 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能

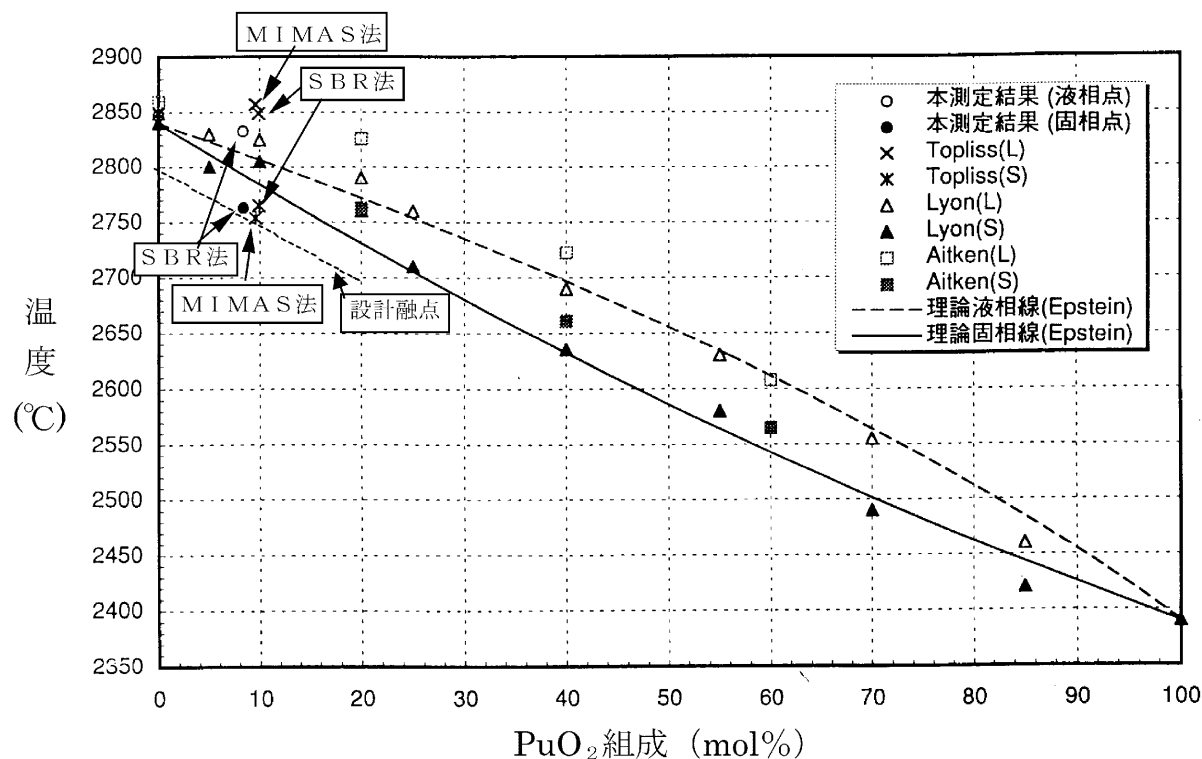
燃料体には、ウラン・プルトニウム混合酸化物、Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金（ジルカロイ-4）、析出硬化型ニッケル基合金（718合金）、オーステナイト系ステンレス鋼を使用しており、これらの材料はそれぞれの使用条件における耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能について問題ないことを確認している。

以降、各材料について説明する。

## 5. 1 ウラン・プルトニウム混合酸化物

(使用部品) ウラン・プルトニウム混合酸化物焼結ペレット

耐熱性について、二酸化プルトニウムの添加及び燃焼に伴う溶融点の低下を考慮したうえで、計算モデルの不確定性及び燃料の製造公差を考慮して燃料中心最高温度を評価し、燃料溶融に至らない性能であることを確認している。その他、耐放射線性、耐食性についても試験データ等により問題がないことを確認している。



二酸化ウラン-二酸化プルトニウムの溶融点図\*

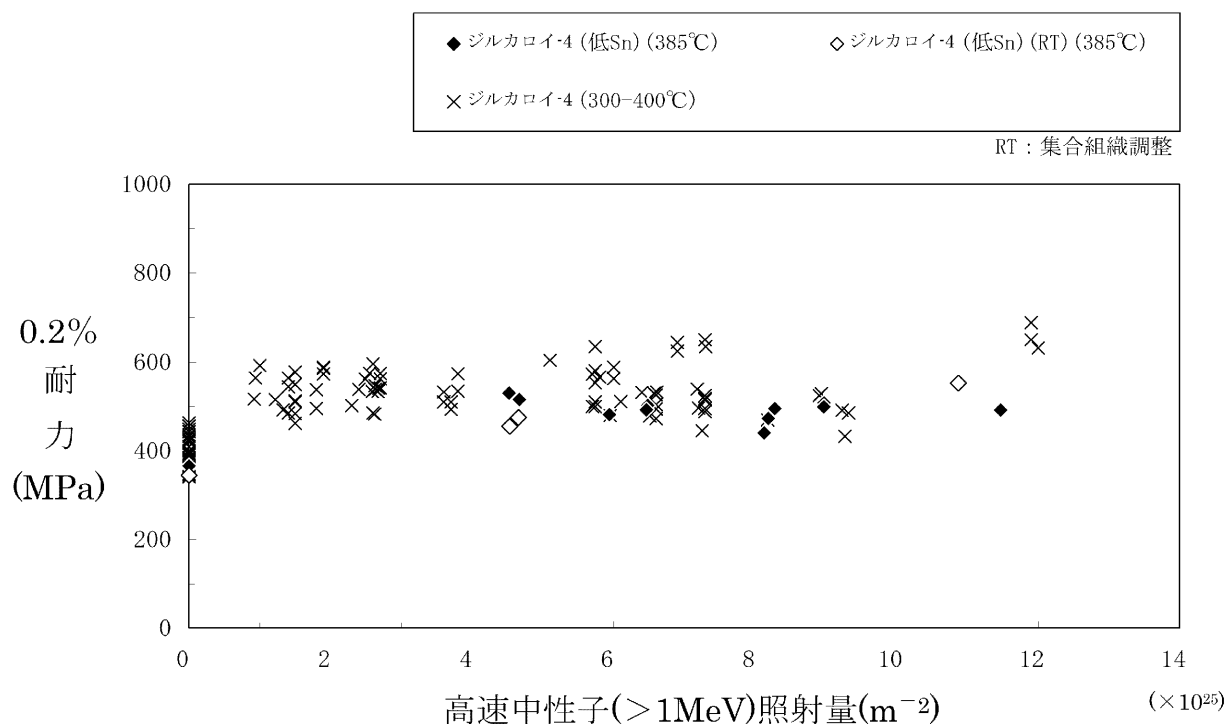
\* 出典：(財)原子力発電技術機構，平成7年度 燃料集合体信頼性実証試験に関する報告書(混合酸化物燃料照射試験編)調査報告書，平成8年3月



## 5. 2 Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金（ジルカロイ-4）

（使用部品）被覆管、制御棒案内シムブル、炉内計装用案内シムブル、燃料被覆材端栓、  
制御棒案内シムブル端栓

機械的性質について、試験データにより照射等の使用環境による機械特性への影響を確認しており、これらを考慮した上で強度評価を行い、健全性を確認している。その他、耐熱性、耐食性等についても試験データ等により問題がないことを確認している。



ジルカロイ-4被覆管の機械特性図\*

\* 出典：三菱重工業株式会社，“三菱PWR高燃焼度化ステップ2燃料の機械設計”，MHI-NES-1021 改10，平成19年5月

### 5. 3 その他の部品

耐熱性についてはプラントの使用条件下で溶融や材質変化が生じることはなく、耐放射線性及び耐食性については試験データにより問題がないことを確認している。

#### (1) 析出硬化型ニッケル基合金（718合金）

（使用部品）支持格子、上部ノズル押えばね

#### (2) オーステナイト系ステンレス鋼

（使用部品）上部ノズル、下部ノズル、シングルスクリュウ、スプリングスクリュウ、インサート管、インサート端栓、スリーブ、コイルばね

6. スケジュール

年 度	2022	2023	2024	2025
主 要 工 程	<p>1月13日 申請</p> <p>▼</p>	<p>12月認可希望</p> <p>▽</p> <p>審 査</p>	<p>使用前確認申請（予定）</p> <p>▽</p>	<p>使用前事業者検査</p> <p>←————→</p>

## 7. まとめ

玄海原子力発電所3号機において、A型MOX燃料体に対し、法令等改正内容を踏まえ、燃料体に係る基本設計方針の追加、関連する要目表の追加を行うとともに、燃料体の強度に係る説明及び燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に係る説明により、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」に適合するものであることを確認した。

# 参考

## 1. 設計及び工事計画認可申請書の構成 (1/2)

項目		記載内容
本文	原子炉本体（燃料体）の要目表、基本設計方針、適用基準及び適用規格	燃料体に係る基本設計方針の追加、本設工認における適合性を説明するために必要な適用基準と関連する要目表の追加
	原子炉本体（燃料体）に係る工事の方法	本設工認に係る工事の方法
	設計及び工事に係る品質マネジメントシステムに関する事項	本設工認に係る品質管理の方法等
添付 1	熱出力計算書	燃料体の原子炉熱出力等に係る適合性
添付 2	発電用原子炉の設置の許可との整合性に関する説明書	本設工認で追加した基本設計方針と発電用原子炉設置変更許可申請書記載との整合性
添付 3	発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書	燃料体の自然現象等による損傷の防止に係る適合性
添付 4	安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書	燃料体が使用される条件の下における健全性
添付 5	発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書	燃料体の火災防護に係る適合性
添付 6	耐震性に関する説明書	燃料体の耐震性に係る適合性
添付 7	強度に関する説明書	燃料体の強度に係る評価方法、評価結果
添付 8	燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書	燃料体の各材料の耐熱性、耐放射線性、耐食性及びその他の性能の説明
添付 9	設計及び工事に係る品質マネジメントシステムに関する説明書	本設工認に係る品質マネジメントシステムの説明
添付図面	原子炉本体の構造図（燃料体）	本設工認に係る構造図



## 1. 設計及び工事計画認可申請書の構成 (2/2)

### 【 検査制度見直し後 】

設工認

- <本文>
- 一 氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、その代表者の氏名
  - 二 工事計画
    - ・ 要目表
    - ・ 基本設計方針
    - ・ 適用基準及び適用規格
    - ・ 工事の方法
  - 三 工事工程表
  - 四 設計及び工事に係る品質マネジメントシステム
  - 五 変更の工事又は設計及び工事の計画の変更の場合にあっては、変更の理由

- 添付資料
- ・ 熱出力計算書
  - ・ 発電用原子炉の設置の許可との整合性に関する説明書
  - ・ 発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書
  - ・ 安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書
  - ・ 発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書
  - ・ 耐震性に関する説明書
  - ・ 強度に関する説明書
  - ・ 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書
  - ・ 設計及び工事に係る品質マネジメントシステムに関する説明書

添付図面（原子炉本体の構造図（燃料体））

### 【 旧法下 】

輸入燃料体検査申請

- <本文>
- 三 燃料材及び燃料被覆材の種類、組成及び組織並びに燃料材及び燃料被覆材以外の部品の種類及び組成
  - 四 燃料体の構造及び重量

- 添付資料
- 一 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐腐食性その他の性能に関する説明書
  - 二 燃料体の強度計算書
  - 三 燃料体の構造図

## 2. 1 燃料棒の設計基準

設計方針に基づき、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、以下に示す基準を満足するように燃料棒を設計する。

項目	基本的考慮事項	設計基準
燃料温度	1) ペレット溶融に伴う過大な膨張を防ぐ。 2) 燃料スタックの不安定化を防ぐ。 3) 核分裂生成ガスの過度の放出あるいは移動を防ぐ。 4) ペレットと被覆管の有害な化学反応を防ぐ。	燃料中心最高温度はウラン・プルトニウム混合酸化物の溶融点未満であること。
燃料棒内圧	サーマルフィードバック効果による燃料温度の過度な上昇を防ぐ。	通常運転時において、被覆管の外向きのクリープ変形により、ペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えないこと。
被覆管応力	通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を通じて被覆管の健全性を確保する。	被覆管の耐力以下であること。
被覆管ひずみ		円周方向引張ひずみの変化量は各過渡変化に対し1%以下であること。
周期的な被覆管ひずみ (累積損傷係数)	日間負荷変動を含む種々の設計過渡条件に対して被覆管の健全性を確保する。	ASME Sec.IIIの概念による設計疲労寿命以下であること。

## 2. 2 燃料棒の強度評価結果 (1/2)

燃料棒の強度評価結果は以下のとおり。いずれも設計基準を満足していることを確認した。  
 なお、その他の考慮事項として、燃料棒曲がり、トータルギャップ、クリープコラプス及びフレット  
 イング摩耗等について評価し、問題ないことを確認している。

## (1) 燃料棒の温度評価結果

種 類	条 件	燃焼度 (MWd/t)	燃料中心温度 (°C)	判定	設計基準 (°C)
MOX燃料棒	通常運転時 (43.1kW/m)	1,200	約1,820	<	2,500
	運転時の異常な 過渡変化時 (59.1kW/m)		約2,240		

## (2) 燃料棒の内圧評価結果

種 類	条 件	内圧 (*) (MPa[abs])	設計基準 (MPa[abs])	設計比 (**)
MOX燃料棒	通常運転時	19.5	≤19.7	0.99

(\*) 不確定性を含む (\*\*) 設計基準値に対する評価値の比

### 2. 2 燃料棒の強度評価結果 (2/2)

#### (3) 被覆管の応力評価結果

種 類	条 件	体積平均相当応力 <sup>(**)</sup> (MPa)	設計基準 (被覆管耐力) (MPa)	設計比 <sup>(*)</sup>
MOX燃料棒	運転時の異常な過渡変化時	□	□	0.93

#### (4) 被覆管のひずみ評価結果

種 類	条 件	ひずみ (%)	設計基準 (%)	設計比 <sup>(*)</sup>
MOX燃料棒	運転時の異常な過渡変化時	0.62	≤1	0.62

#### (5) 被覆管の疲労評価結果

種 類	累積疲労損傷係数 (%)	設計基準 (%)	設計比 <sup>(*)</sup>
MOX燃料棒	64.5	≤100	0.65

(\*) 設計基準値に対する評価値の比

(\*\*) 被覆管にかかる合応力に体積の重みを付けて平均したもの

※枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

## 2. 3 燃料集合体の設計基準 (1/2)

燃料輸送及び取扱い時における燃料集合体の評価項目  
(軸方向荷重に対する評価、設計荷重 = 4 G (高温)、6 G (常温))

構成部品	考慮点	応力 (*)	許容値 (*)
上部ノズル、 下部ノズル	上部及び下部ノズルの応力評価を行う。	$P_m + P_b$	$1.5S_m$
上部ノズル-制御棒 案内シングル結合部	荷重分布を考慮し、拡管部、溶接部及びスリーブの強度評価を行う。	—	結合部の強度試験に基づく荷重変位曲線の弾性限界荷重
支持格子-制御棒 案内シングル結合部	荷重分布を考慮し、拡管部の強度評価を行う。	—	結合部の強度試験に基づく荷重変位曲線の弾性限界荷重
制御棒案内シングル	荷重分布を考慮し、応力評価を行う。	$P_m$	$S_m$

(\*) 応力は以下に示すASME Sec.IIIの炉心支持構造物の分類に従った。

$P_m$  : 一次一般膜応力

$P_b$  : 一次曲げ応力

$S_m$  : 設計応力強さ

(ASMEに従う。ただし、ジルカロイ-4については、0.2%耐力の2/3あるいは引張強さの1/3のいずれか小さい方)

## 2. 3 燃料集合体の設計基準 (2/2)

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における燃料集合体の評価項目

構成部品	考慮点	応力 (*)	許容値 (*)
上部ノズル、 下部ノズル	スクラム時の衝撃力	$P_m + P_b$	$1.5S_m$
上部ノズルー制御棒 案内シングル結合部	スクラム時の衝撃力	—	結合部の強度試験に基づく荷重 変位曲線の弾性限界荷重
支持格子ー制御棒 案内シングル結合部	スクラム時の衝撃力	—	結合部の強度試験に基づく荷重 変位曲線の弾性限界荷重
制御棒案内シングル	スクラム時の衝撃力	$P_m$	$S_m$
	運転時荷重		
上部ノズル 押えばね	機械設計流量時	—	燃料集合体の浮き上がり防止の ための必要ばね力
	ポンプオーバー スピード時	—	上部ノズル押えばねの塑性変形 が進行しないたわみ量

(\*) 応力は以下に示すASME Sec.IIIの炉心支持構造物の分類に従った。

$P_m$  : 一次一般膜応力

$P_b$  : 一次曲げ応力

$S_m$  : 設計応力強さ

(ASMEに従う。ただし、ジルカロイ-4については、0.2%耐力の2/3あるいは引張強さの1/3のいずれか小さい方)



## 2. 4 燃料集合体の強度評価結果(1/4)

燃料集合体の強度評価結果は以下のとおり。燃料輸送及び取扱い時並びに通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料集合体としての機能が保持できることを確認した。

(1) 燃料輸送及び取扱い時における評価結果 (4 G : 高温)

燃料輸送及び取扱い時の荷重における評価結果 (4 G : 高温)

構成部品	最大応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	設計比 <sup>*3</sup>
上部ノズル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.62
下部ノズル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.59
上部ノズルー制御棒 案内シンブル結合部	<input type="text"/> *1	<input type="text"/> *2	0.74*4
支持格子ー制御棒 案内シンブル結合部	<input type="text"/> *1	<input type="text"/> *2	0.40*4
制御棒案内シンブル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.97

\*1 : 最大荷重 (N)

\*2 : 許容荷重 (N)

\*3 : 許容応力値に対する最大応力値の比

\*4 : 許容荷重値に対する最大荷重値の比

※枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

## 2. 4 燃料集合体の強度評価結果(2/4)

(2) 燃料輸送及び取扱い時における評価結果 (6 G : 常温)

燃料輸送及び取扱い時の荷重における評価結果 (6 G : 常温)

構成部品	最大応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	設計比 <sup>*3</sup>
上部ノズル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.79
下部ノズル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.75
上部ノズルー制御棒案内シンブル結合部	<input type="text"/> *1	<input type="text"/> *2	0.74 <sup>*4</sup>
支持格子ー制御棒案内シンブル結合部	<input type="text"/> *1	<input type="text"/> *2	0.45 <sup>*4</sup>
制御棒案内シンブル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.83

\*1 : 最大荷重 (N)

\*2 : 許容荷重 (N)

\*3 : 許容応力値に対する最大応力値の比

\*4 : 許容荷重値に対する最大荷重値の比

※枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

## 2. 4 燃料集合体の強度評価結果(3/4)

## (3) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における評価結果

## 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の評価結果

構成部品	考慮点	最大応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	設計比 <sup>*1</sup>
上部ノズル	スクラム時の衝撃力	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.21
下部ノズル	スクラム時の衝撃力	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.34
上部ノズルー制御棒案内シングル結合部	スクラム時の衝撃力	<input type="text"/> <sup>*2</sup>	<input type="text"/> <sup>*3</sup>	0.28 <sup>*4</sup>
支持格子ー制御棒案内シングル結合部	スクラム時の衝撃力	<input type="text"/> <sup>*2</sup>	<input type="text"/> <sup>*3</sup>	0.35 <sup>*4</sup>
制御棒案内シングルダッシュポット部	スクラム時の衝撃力	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.46
	運転時荷重	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.05

\*1 : 許容応力値に対する最大応力値の比

\*2 : 最大荷重 (N)

\*3 : 許容荷重 (N)

\*4 : 許容荷重値に対する最大荷重値の比

※枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

## 2. 4 燃料集合体の強度評価結果(4/4)

## (4) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における評価結果

## 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の評価結果

構成部品	考慮点	上部ノズル押えばねに要求される力 (N)	上部ノズル押えばね力 (N)	評価	設計比*1
上部ノズル押えばね	機械設計流量時 (低温起動時)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	浮き上がらない	0.93
	機械設計流量時 (高温全出力時)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	浮き上がらない	0.53
	ポンプオーバースピード時 (高温)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	浮き上がるがばねの塑性変形は進行しない	(0.78)*2

\*1 : 「上部ノズル押えばね力」に対する「上部ノズル押えばねに要求される力」の比

\*2 : ( ) 内の設計比はポンプオーバースピード時に塑性変形が進行しない荷重 (  N) に対して上部ノズル押えばねに要求される荷重の比

※枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。