

高浜発電所第3, 4号機
燃料体(17行17列B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

2020年 月 日
関西電力株式会社

目次

- | | | |
|----------------------------|---|----|
| 1. 燃料体に係る法令等改正内容について | ⇒ | 3 |
| 2. 燃料体に係る設計及び工事計画認可申請の概要 | ⇒ | 4 |
| 3. 燃料体に係る基本設計方針及び構造 | ⇒ | 6 |
| 4. 燃料体の強度に係る評価 | ⇒ | 9 |
| 5. 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能 | ⇒ | 22 |
| 6. まとめ | ⇒ | 25 |

1. 法令等改正内容

2020年4月1日に炉規法等の施行により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。

(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] <u>(3)燃料体</u> [以下、略] 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] <u>3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料</u> [以下、略] 下欄 [略] <u>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</u> [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] 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) <u>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</u> <u>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</u> <u>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</u> <u>(別記-10)」によること。</u></p>	<p>第23条(炉心等) 1・2 (略) (新設)</p>

2. 設計及び工事計画認可申請の概要

【申請概要】

今回の設計及び工事計画認可申請においては、2020年1月31日に輸入燃料体検査申請を行った燃料体（17行17列B型燃料集合体（ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料））（以下、「B型MOX燃料集合体」と称する。）について、炉規法等の改正を踏まえて、B型MOX燃料集合体に係る基本設計方針の変更等を行う。

【設計及び工事計画認可申請の内容】

高浜3, 4号機 B型MOX燃料集合体に係る設計及び工事計画認可申請（2020年4月1日申請）

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	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	設工認に係る品質管理の方法等
添付1	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との整合性
添付2	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3	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4	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	設計及び工事に係る品質管理の計画、実績
添付図面	構造図	本申請に係る構造図

2. 設計及び工事計画認可申請の概要(つづき)

今回申請した燃料体は、既工認および輸入燃料体検査合格により現在も継続して使用可能な燃料体と同一設計であり、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、燃料体の強度に係る評価方法、評価結果等の内容については、前回の輸入燃料体検査申請書から変更はなく、技術的新規性はない。

基本設計方針に反映した内容について、具体的には燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書、および燃料体の強度に関する説明書にて説明している。

【 新検査制度見直し後 】

【 旧法下 】

設工認

輸入燃料体検査申請

<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(燃料体)
 - ・基本設計方針(燃料体)
 - ・適用基準、規格(燃料体)
 - ・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

実用炉規則別表第二の中欄に「燃料体」が追加

添付資料

- ・設置の許可との整合性に関する説明書(燃料体)
- ・(燃料体の)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

実用炉規則別表第二の下欄に追加

添付図面(構造図)

<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、耐食性その他の性能に関する説明書
- 二 燃料体(燃料要素の集合体である燃料体にあつては、燃料要素)の強度計算書
- 三 燃料体の構造図

※高浜3,4号機向け燃料体(B型MOX燃料)について
輸入燃料体検査申請済(2020年1月31日)

3. 基本設計方針及び構造

3.1 基本設計方針【本文】

1. に示す法令等の改正内容を踏まえ、「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」の燃料体に対する要求事項について、燃料体に係る基本設計方針に以下を追加する。また、原子炉本体の主要設備リストに燃料体を追加する。

原子炉本体 (1)基本設計方針(1/2)

1. 1 燃料体(17行17列A型燃料集合体(国産)(ウラン燃料)、17行17列A型燃料集合体(輸入)(ウラン燃料)、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)、17行17列B型燃料集合体(ウラン燃料)は除く)

二酸化ウラン燃料材は、次のいずれにも適合する設計とする。

(1) 以下に掲げる元素を含有する場合における当該元素の含有量のウランの含有量に対する百分率の値は、それぞれ以下に掲げる値であること。

炭素 0.010以下
 ふっ素 0.0015以下
 水素 0.0002以下
 窒素 0.0075以下

(2) ウラン235の含有量のウラン含有量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。

(3) ペレット型燃料材にあつては、ペレットが次に適合する設計とする。

a. 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。
 b. 密度の偏差は、著しく大きくないこと。
 c. 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。
 d. 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。

(4) ガドリニウムを添加していないものにあつては、次に適合する設計とする。

a. ウランの含有量の全重量に対する百分率の値は、87.7以上であること。
 b. 酸素の原子数のウランの原子数に対する比率の値は、1.99以上2.02以下であること。

(5) ガドリニウムを添加したものにあつては、次に適合する設計とする。

a. ウランの含有量の全重量に対する百分率の値は、実用上差し支えがないものであること。
 b. 酸素の原子数のウランの原子数に対する比率の値は、実用上差し支えがないものであること。
 c. ガドリニウムの含有量の全重量に対する百分率の偏差は、著しく大きくないこと。
 d. ガドリニウムの均一度は、実用上差し支えがないものであること。

ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料材は、次のいずれにも適合する設計とする。

- (1) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。
- (2) 酸素の原子数のウラン及びプルトニウムの原子数の合計に対する比率の値は、実用上差し支えがないものであること。
- (3) ウラン235、プルトニウム239及びプルトニウム241の含有量の合計のウラン及びプルトニウムの含有量の合計に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。
- (4) プルトニウムの均一度は、実用上差し支えがないものであること。
- (5) ペレット型燃料材にあつては、ペレットが次に適合する設計とする。
 - a. 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。
 - b. 密度の偏差は、著しく大きくないこと。
 - c. 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。
 - d. 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。

ジルコニウム合金燃料被覆材は、次のいずれにも適合する設計とする。

- (1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。
- (2) 被覆材の軸は、著しく湾曲していないこと。
- (3) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値は、日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表2及び表3に規定する値であること。
- (4) 日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書C 水素化物方位試験方法」又はこれと同等の方法によって水素化物方位試験を行ったとき、水素化物方向性係数が0.45を超えないこと。
- (5) 日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書D超音波探傷試験方法」又はこれと同等の方法によって超音波探傷試験を行ったとき、対比試験片の人工傷からの欠陥信号と同等以上の欠陥信号がないこと。
- (6) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。
- (7) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。
- (8) 表面の粗さの程度は、実用上差し支えがないものであること。
- (9) 日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書B 腐食試験方法」又はこれと同等の方法によって腐食試験を行ったとき、表面に著しい白色又は褐色の酸化物が付着せず、かつ、腐食質量増加が3日間で22mg/dm²以下又は14日間で38mg/dm²以下であること。
- (10) 応力除去焼きなましを行ったものにあつては、日本産業規格Z2241(2011)「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。

3. 1 基本設計方針【本文】(つづき)

1. に示す法令等の改正内容を踏まえ、「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」の燃料体に対する要求事項について、燃料体に係る基本設計方針に以下を追加する。また、原子炉本体の主要設備リストに燃料体を追加する。

原子炉本体 (1)基本設計方針(2/2)

ジルコニウム合金端栓は、次のいずれにも適合する設計とする。

- (1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。
- (2) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値は、日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「4品質」の表2及び表3に規定する値であること。ただし、表3に掲げるニオブおよびカルシウムを除く。
- (3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。
- (4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。
- (5) 日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書B 腐食試験方法」又はこれと同等の方法によって腐食試験を行ったとき、表面に著しい白色又は褐色の酸化物が付着せず、かつ、腐食質量増加が3日間で22mg/dm²以下又は14日間で38mg/dm²以下であること。
- (6) 再結晶焼きなましを行ったジルコニウム合金端栓は、日本産業規格Z2241(2011)「金属材料引張試験方法」、ASTM International規格ASTM B 351「Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Zirconium and Zirconium Alloy Bars, Rod, and Wire for Nuclear Application」又はこれと同等の方法によって以下に掲げるいずれかの試験温度において引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが同欄に掲げる試験温度の区分に応じ、それぞれ以下に掲げる値であるものであること。
 - a. 試験温度 室温
 - 引張強さ: 415N/mm²以上
 - 耐力: 240 N/mm²以上
 - 伸び: 14%以上
 - b. 試験温度316°C
 - 引張強さ: 215N/mm²以上
 - 耐力: 105N/mm²以上
 - 伸び: 24%以上

燃料材、燃料被覆材及び端栓以外の燃料体の部品は、次の各号のいずれにも適合する設計とする。

- (1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。
- (2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。
- (3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。
- (4) 支持格子、上部支持板、下部支持板、制御棒案内シンプルにあつては、次に適合する設計とする。
 - a. 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。
 - b. 日本産業規格Z2241(2011)「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。

燃料要素は、次のいずれにも適合する設計とする。

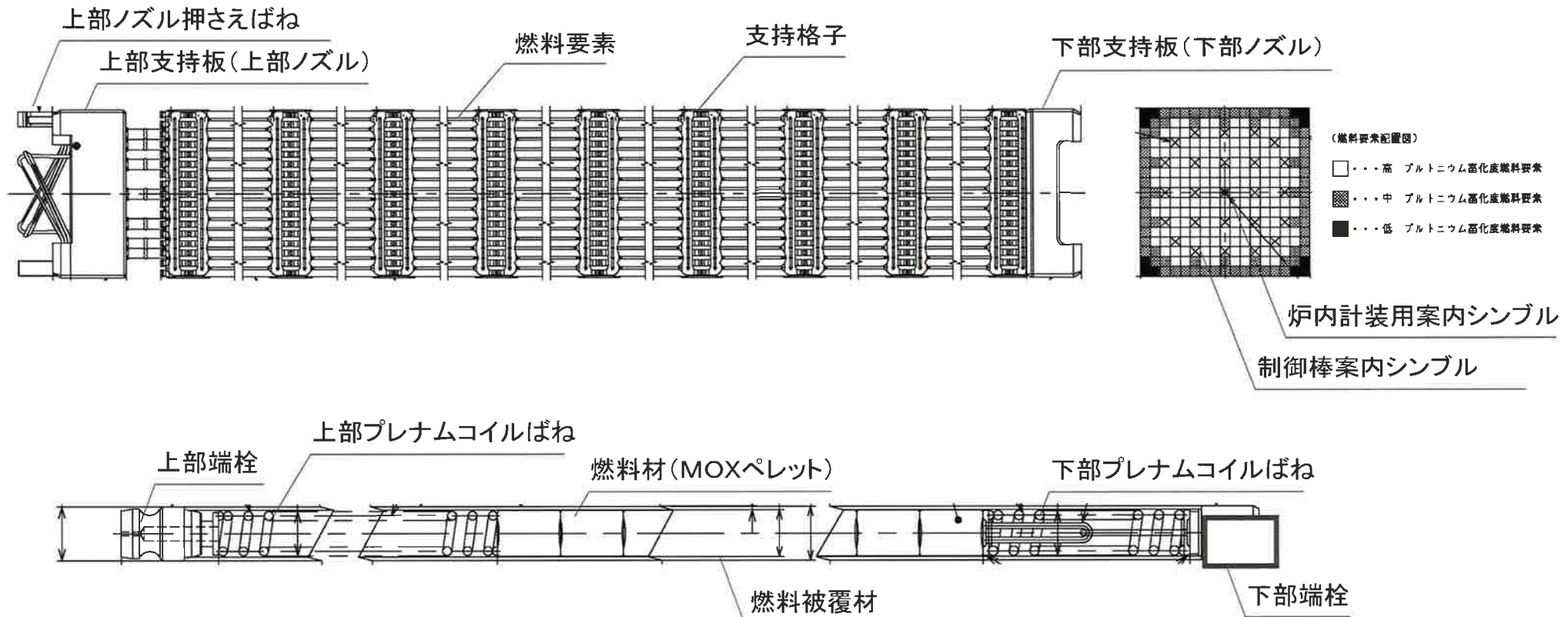
- (1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。
- (2) 燃料要素の軸は、著しく湾曲していないこと。
- (3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。
- (4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。
- (5) 日本産業規格Z4504(2008)「放射線表面汚染の測定方法—β線放出核種(最大エネルギー0.15MeV以上)及びα線放出核種」における間接測定法又はこれと同等の方法によって測定したとき、表面に付着している核燃料物質の量が0.00004Bq/mm²を超えないこと。
- (6) ヘリウム漏えい試験を行ったとき、漏えい量が1億分の304MPa・mm³/sを超えないこと。
- (7) 溶接部にブローホール、アンダーカット等で有害なものがないこと。
- (8) 部品の欠如がないこと。

燃料要素の集合体である燃料体は、次の各号のいずれにも適合する設計とする。

- (1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。
- (2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。
- (3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。
- (4) 部品の欠如がないこと。

3.2 燃料体の構造について【添付図面】

B型MOX燃料集合体(以下、「燃料集合体」と称する。)は、以下に示すとおり、燃料被覆材、MOXペレット、上下部プレナムコイルばね、燃料被覆材端栓からなる燃料要素、上部ノズル組立体、下部ノズル、制御棒案内シンブル、炉内計装用案内シンブル及び支持格子から構成されている。



燃料体の構造概要図

4. 強度に係る評価【強度に関する説明書】

3. に示した基本設計方針に基づく具体的な強度に係る評価方法、評価結果を添付資料2「強度に関する説明書」に示す。

なお、今回の燃料集合体においては、燃料設計及び設計手法について変更はないことから、燃料体の強度評価について技術的新規性はない。

以降に、燃料要素(以下、「燃料棒」と称する。)の設計、燃料集合体の設計の概要を説明する。

4. 1 燃料棒の設計基準
4. 2 燃料棒の強度評価方法
4. 3 燃料棒の強度評価結果
4. 4 燃料集合体の設計基準
4. 5 燃料集合体の強度評価方法
4. 6 燃料集合体の強度評価結果

また、これらの設計は、

- ・「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(平成25年6月28日原子力規制委員会規則第5号)」
- ・「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(平成25年6月28日原子力規制委員会規則第6号)」
- ・「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)」
- ・「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)」
- ・「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)」

に記載されている考え方に基づいている。

4.1 燃料棒の設計基準

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」、「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。

- (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) 被覆に生ずる円周方向引張歪の変化量は各過渡変化に際して1%を超えないこと。
- (5) 被覆管の異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（平成7年6月19日）」にて、MOX燃料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. 1 燃料棒の設計基準(つづき)

以上の設計基準に基づき、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。

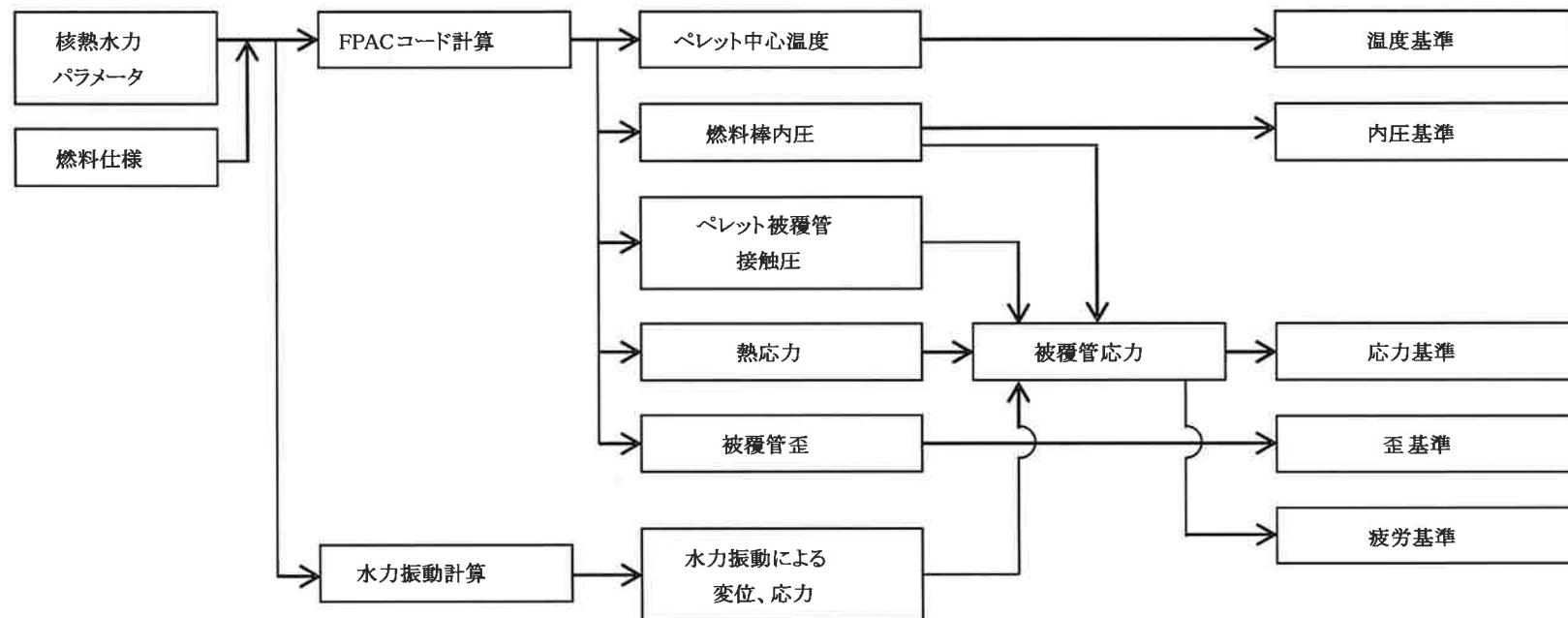
項目	基本的考慮事項	設計基準
燃料温度	1) ペレット溶融に伴う過大な膨張を防ぐ 2) 燃料スタックの不安定化を防ぐ 3) 核分裂生成ガスの過度の放出あるいは移動を防ぐ 4) ペレットと被覆管の有害な化学反応を防ぐ	燃料中心最高温度はMOXの溶融点未満であること
燃料棒内圧	サーマルフィードバック効果による燃料温度の過度な上昇を防ぐ	通常運転時において、被覆管の外向きのクリープ変形により、ペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えないこと
被覆管応力	通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を通じて被覆管の健全性を確保する	被覆材の耐力以下であること
被覆管歪		円周方向引張歪の変化量は各過渡変化に対し1%以下であること
周期的な被覆管歪 (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

燃料体の強度に係る評価

4. 2 燃料棒の強度評価方法

強度評価は、4. 1項で述べた燃料棒設計基準に従って行う。評価の流れ及び評価の概要は以下のとおり。

- 燃料棒の性能評価を、二酸化ウランペレット、ガドリニア混合二酸化ウランペレット及びMOXペレットの照射挙動、並びにジルカロイ-4被覆管の照射挙動をモデル化したFPACコード(Fuel Performance Analysis Code)を用いて行う。
- FPACコードは、燃料棒が炉内で示す挙動(核分裂生成物の生成及び放出、ペレットの割れ、熱膨張、スエリング及び焼きしまり、被覆管の熱膨張、弾性変形、クリープ及び照射成長、ペレットと被覆管の相互作用など)をモデル化して、ペレット中心温度、燃料棒内圧、被覆管の応力、歪及び疲労等を計算することができる。



燃料棒強度評価流れ図

4.3 燃料棒の強度評価結果

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及び燃料集合体直角度について評価し、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 (41.1kW/m)	0	約1,770	<	2,510
	過渡変化時 (59.1kW/m)		約2,220		

(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	16.1	≤19.0	0.85

(*) 設計基準値に対する評価値の比

4.3 燃料棒の強度評価結果(つづき)

(3) 被覆管の応力評価結果

種類	条件	体積平均相当応力 ^(**) (MPa)	被覆材耐力 (MPa)	設計比 ^(*)
MOX燃料棒	過渡変化時	□	□	0.76

(4) 被覆管の歪評価結果

種類	条件	歪(%)	設計基準(%)	設計比 ^(*)
MOX燃料棒	過渡変化時	0.44	≤1	0.44

(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 ^(*)
MOX燃料棒	22.9	≤100	0.23

(*) 設計基準値に対する評価値の比
 (**) 被覆管にかかる合応力を体積の重み付けで平均したもの

4. 4 燃料集合体の設計基準

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。

- ・燃料輸送及び取扱い時の常温における6Gの設計荷重に対して、著しい変形を生じないこと。
- ・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。

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(平成7年6月19日)」にて、MOX燃料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4G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。

強度評価の対象となる燃料集合体の評価項目を以降に示す。

4.4 燃料集合体の設計基準(つづき)

燃料輸送及び取扱い時における燃料集合体の評価項目
設計荷重: 4G(高温)、6G(常温)

構成部品	応力(注1)	許容値(注1)
上部ノズル、 下部ノズル	$P_L + P_b$	$1.5S_m$
上部ノズルー制御棒 案内シングル結合部	—	結合部の強度試験に基づく弾性限界荷重
支持格子ー制御棒 案内シングル結合部	—	結合部の強度試験に基づく弾性限界荷重
制御棒案内シングル	P_m	S_m

(注1) 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_L : 一次局部膜応力
- 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)

4.4 燃料集合体の設計基準(つづき)

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における燃料集合体の評価項目

構成部品	考慮点	応力 ^(注1)	許容値 ^(注1)
上部ノズル、 下部ノズル	スクラム時の衝撃力	$P_L + P_b$	1.5Sm
制御棒案内シンブル	スクラム時の衝撃力	P_L	1.5Sm
	運転時荷重	P_m	Sm
上部ノズル押さえばね	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なばね力
	ポンプオーバー スピード時	—	上部ノズル押さえばねの塑性変形が進行しないたわみ量

(注1) 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。

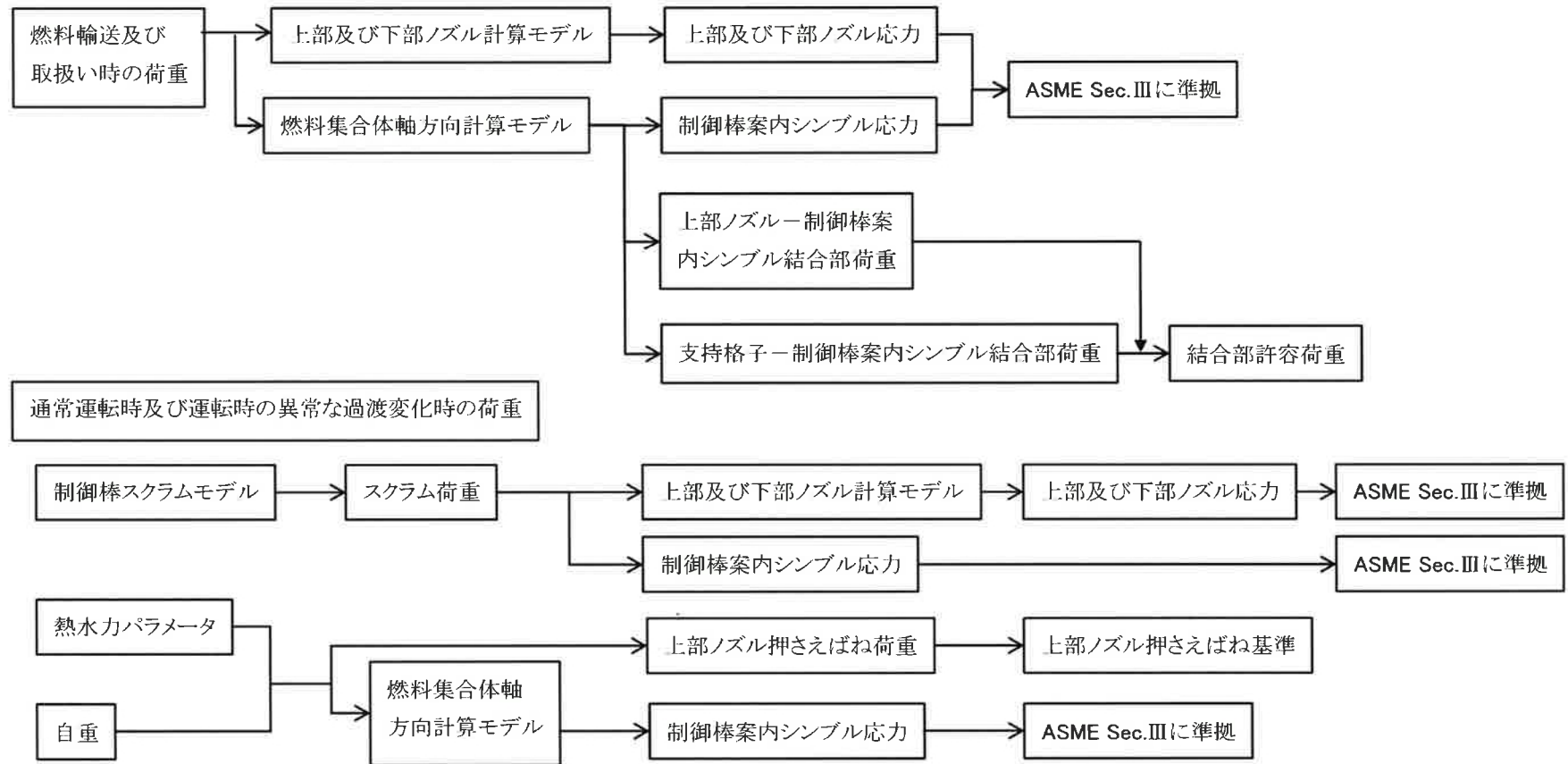
- P_m : 一次一般膜応力
- P_L : 一次局部膜応力
- P_b : 一次曲げ応力
- Sm : 設計応力強さ

(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)

4. 5 燃料集合体の強度評価方法

4. 4項で述べた設計基準に従って強度評価を行う。以下に燃料集合体強度評価流れ図を示す。

燃料集合体の強度評価においては、燃料輸送及び取扱い中に加わる4G(常温時は6G)の設計荷重及び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する。



燃料集合体強度評価流れ図

4. 6 燃料集合体の強度評価結果

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なら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(4G:高温)

燃料輸送及び取扱い時の荷重における評価結果(4G:高温)

構成部品	最大応力(MPa)	許容応力(MPa)	設計比 ^{*3}
上部ノズル			0.53
下部ノズル			0.62
上部ノズルー制御棒 案内シングル結合部	—*5	—*5	—*5
支持格子ー制御棒 案内シングル結合部	*1	*2	0.45 ^{*4}
制御棒案内シングル			0.94

*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である。

*4: 許容荷重値に対する最大荷重値の比である。

*5: 結合部における発生応力が制御棒案内シングル管より小さく応力評価の制限因子にならないことを確認。

4. 6 燃料集合体の強度評価結果(つづき)

(2) 燃料輸送及び取扱い時における評価結果(6G: 常温)

燃料輸送及び取扱い時の荷重における評価結果(6G: 常温)

構成部品	最大応力(MPa)	許容応力(MPa)	設計比 ^{*3}
上部ノズル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.80
下部ノズル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.80
上部ノズルー制御棒 案内シングル結合部	—*5	—*5	—*5
支持格子ー制御棒 案内シングル結合部	<input type="text"/> *1	<input type="text"/> *2	0.68*4
制御棒案内シングル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.86

*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である。

*4: 許容荷重値に対する最大荷重値の比である。

*5: 結合部における発生応力が制御棒案内シングル管より小さく応力評価の制限因子にならないことを確認。

4.6 燃料集合体の強度評価結果(つづき)

(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*1
上部ノズル	スクラム時の衝撃力	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.30
下部ノズル	スクラム時の衝撃力	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.15
制御棒案内 シムル	スクラム時の衝撃力	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.48
	運転時荷重	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.14

構成部品	考慮点	上部ノズル押さ えばねに要求 される力(N)	上部ノズル押 さえばね力 (N)	評価	設計比*2
上部ノズル 押さえばね	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	0.60
	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	0.49
	ポンプオーバー スピード時	<input type="text"/>	—	浮き上がるがば ねの塑性変形は 進行しない	—

*1: 許容応力値に対する最大応力値の比である。

*2: 「上部ノズル押さえばね力」に対する「上部ノズル押さえばねに要求される力」の比である。

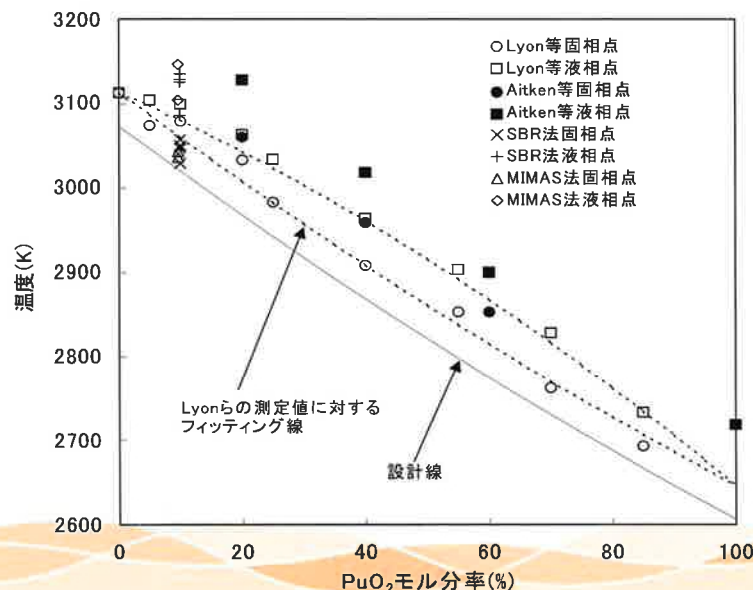
5. 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能について【燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書】

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、）、ニッケル・クロム・鉄合金（）、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使用条件における耐熱性、耐放射線性、耐食性について問題ないことを確認している。

以下、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)MOXペレット

耐熱性について、試験データにより二酸化プルトニウムの添加による溶融点を考慮したうえで、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。



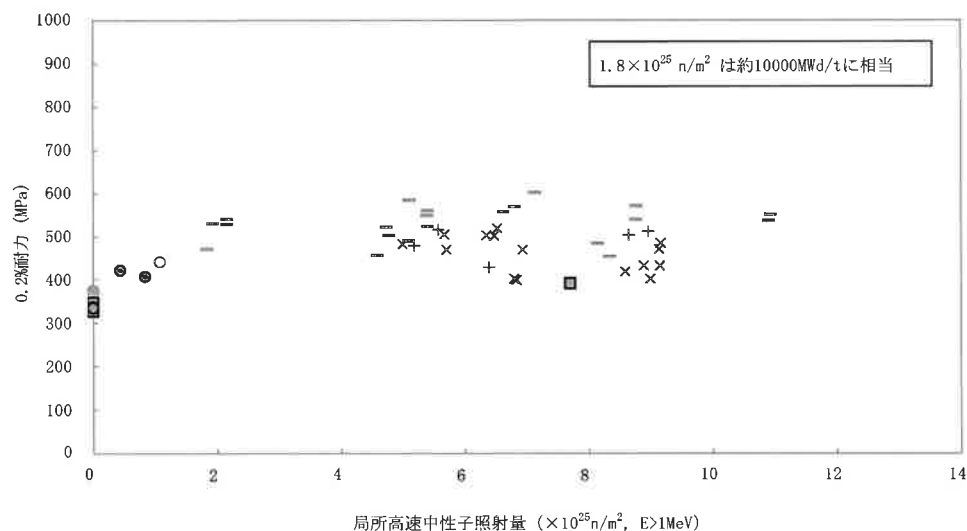
二酸化ウラン-二酸化プルトニウムの溶融点図

5. 2 Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金(ジルカロイ-4)

(1)ジルカロイ-4(冷間加工応力除去焼鈍材)

(使用部品)燃料被覆材

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、これら考慮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被覆管の耐力特性図

(2)ジルカロイ-4(再結晶焼鈍材)

(使用部品)燃料被覆材端栓、制御棒案内シンブル、炉内計装用案内シンブル、制御棒案内シンブル用下部端栓及びカラー

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、これら考慮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。

5.3 その他の部品

耐熱性について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、上部ノズル押さえばね及び下部プレナムコイルばね

(2)ニッケル・クロム・鉄合金()

(使用部品)クランプスクリュー

(3)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、上部プレナムコイルばね、押さえ板、連結棒、スリーブ、リベット、上部リングナット、シンブルスクリュー及びロッキングカップ

6. まとめ

高浜3, 4号機において、B型MOX燃料に対し、炉規法、実用炉規則及び技術基準規則の解釈の改正に伴い、燃料体(B型MOX燃料)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、過去の輸入燃料体検査申請書と同一の内容である燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に係る説明、燃料体の強度に係る説明により、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。