

川内原子力発電所 1, 2号機
燃料体（17行17列 A型燃料集合体（ウラン燃料））
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
2020年12月22日

1. 燃料体に係る法令等改正内容について 2
2. 燃料体に係る設計及び工事計画認可申請の概要 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 7
5. 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能 19
6. まとめ 23

1. 燃料体に係る法令等改正内容について

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、「「实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「「实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) 实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) <u>燃料体</u> [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 <u>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]</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) 实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 <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>	<p>第23条 (炉心等) 1・2 (略) (新設)</p>

2. 燃料体に係る設計及び工事計画認可申請の概要

2. 設計及び工事計画認可申請の概要 (1/2)

【申請概要】

今回の設計及び工事計画認可申請においては、今後加工を予定している燃料体（17行17列A型燃料集合体（ウラン燃料））（以下「A型ウラン燃料集合体」という。）について、改正原子炉等規制法を踏まえて、A型ウラン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】

川内原子力発電所 1, 2号機 A型ウラン燃料集合体に係る設計及び工事計画認可申請
 （2020年12月15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	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	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	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 3	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 4	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 5	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管理の計画、実績
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

2. 設計及び工事計画認可申請の概要(2/2)

今回申請した燃料体は、既工認及び燃料メーカーの既燃料体設計認可（以下「設認」という。）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係る説明等の内容については、従前の設認から変更はなく、技術的新規性はない。また、燃料体の耐震性に関しても既工認から変更はない。

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

【 新検査制度見直し後 】

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 (燃料体)
 - ・ 基本設計方針 (燃料体)
 - ・ 適用基準及び適用規格 (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

实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) 耐震性に関する説明書
 - ・ (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

实用炉規則別表第二の下欄に追加

添付図面 (原子炉本体の構造図 (燃料体))

【 旧法下 】

燃料体設計認可申請

<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

3. 基本設計方針及び構造

3. 1 基本設計方針【本文】

1. 項に示す法令等改正内容を踏まえ、「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を以下のとおり追加及び変更する。また、原子炉本体の主要設備リストにA型ウラン燃料集合体を記載する。

原子炉本体 (1) 基本設計方針

第2章 個別項目

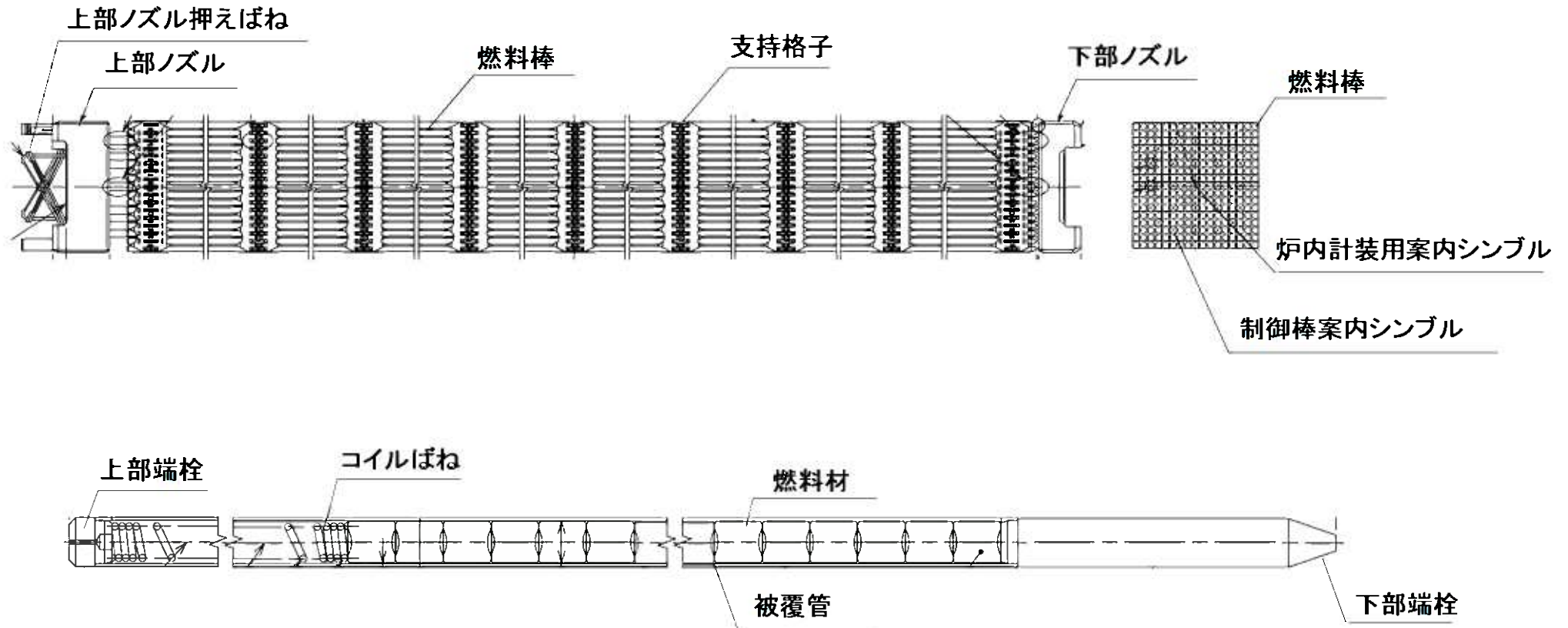
1. 炉心等

炉心等の設計については以下のとおりとし、その際、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「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）」若しくは、これらと同等で「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」の要求を満たすことが確認された方法に従い設計する。

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。

3. 2 燃料体の構造について【添付図面】

A型ウラン燃料集合体は、主に以下に示すとおり、燃料被覆材（以下「被覆管」という。）
燃料材（二酸化ウラン焼結ペレット又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結ペレット）、コイルばね、燃料被覆材端栓からなる燃料要素（以下「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

4. 強度に係る評価

【強度に関する説明書】

3. 1項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、評価結果を設計及び工事計画認可申請書の添付資料3「強度に関する説明書」に示す。

なお、今回のA型ウラン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、燃料棒及び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、以下の規則等に記載されている考え方に基づいている。

- ・「実用発電用原子炉及びその附属施設的位置、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）」
- ・「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）」

4. 1 燃料棒の設計基準 (1/2)

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。

- (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。

4. 1 燃料棒の設計基準(2/2)

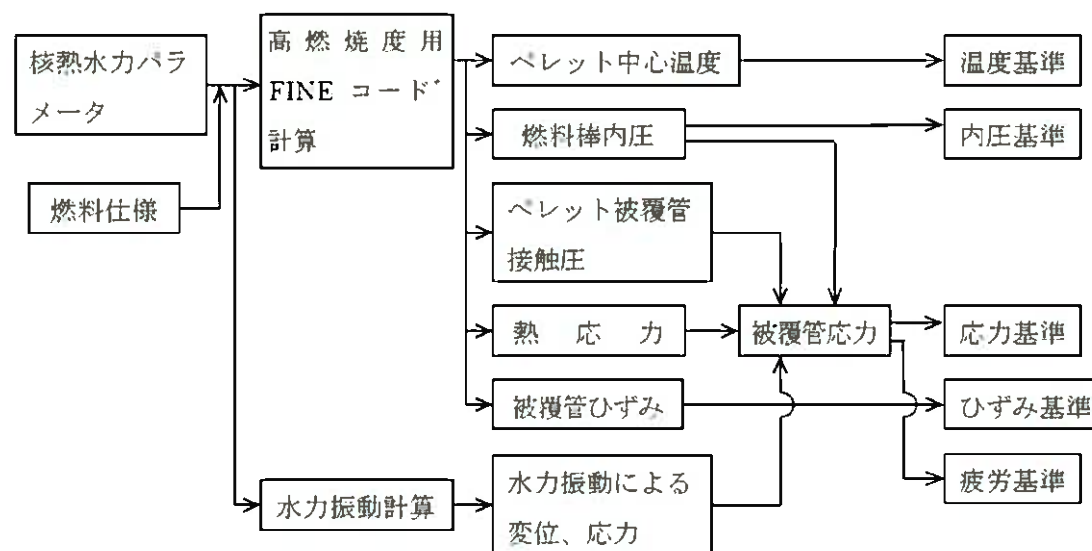
以上の設計基準に基づき、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、以下に示す基準を満足するように燃料棒を設計する。

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。
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		円周方向引張り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。

4. 2 燃料棒の強度評価方法

強度評価は、4. 1項で述べた燃料棒の設計基準に従って行う。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の照射挙動、並びにSn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金(MDA)及びSn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金(ZIRLO)被覆管の照射挙動をモデル化した高燃焼度用FINEコードを用いて行う。
- 高燃焼度用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、ペレットと被覆管の相互作用等）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る。



燃料棒強度評価フロー図

4. 3 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、被覆管外面腐食及び水素吸収量、PCI、クリープコラプス及びフレットング摩耗について評価し、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)
二酸化ウラン燃料棒	通常運転時 (41.1kW/m)	0	約1,740	<	2,580
	運転時の異常な 過渡変化時 (59.1kW/m)		約2,220		
ガドリニア入り 二酸化ウラン燃料棒	通常運転時 (31.9kW/m)	10,000	約1,630	<	2,440
	運転時の異常な 過渡変化時 (44.3kW/m)		約2,040		

(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 (**)
二酸化ウラン燃料棒	通常運転時	15.4	≤19.7	0.78
ガドリニア入り 二酸化ウラン燃料棒	通常運転時	12.5	≤19.7	0.64

(*) 不確定性を含む (**) 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 (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 (**) (MPa)	設計基準 (被覆管耐力) (MPa)	設計比 (*)
二酸化ウラン燃料棒	運転時の異常な過渡変化時	□	□	0.92
ガドリニア入り 二酸化ウラン燃料棒	運転時の異常な過渡変化時	□	□	0.80

(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 (*)
二酸化ウラン燃料棒	運転時の異常な過渡変化時	0.46	≤1	0.46
ガドリニア入り 二酸化ウラン燃料棒	運転時の異常な過渡変化時	0.43	≤1	0.43

(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 (*)
二酸化ウラン燃料棒	38	≤100	0.38
ガドリニア入り 二酸化ウラン燃料棒	30	≤100	0.30

(*) 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

4. 4 燃料集合体の設計基準(1/3)

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6 G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。

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 (2/3)

燃料輸送及び取扱い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	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)

4. 4 燃料集合体の設計基準 (3/3)

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	$P_m + P_b$	$1.5S_m$
制御棒案内シンブル	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。

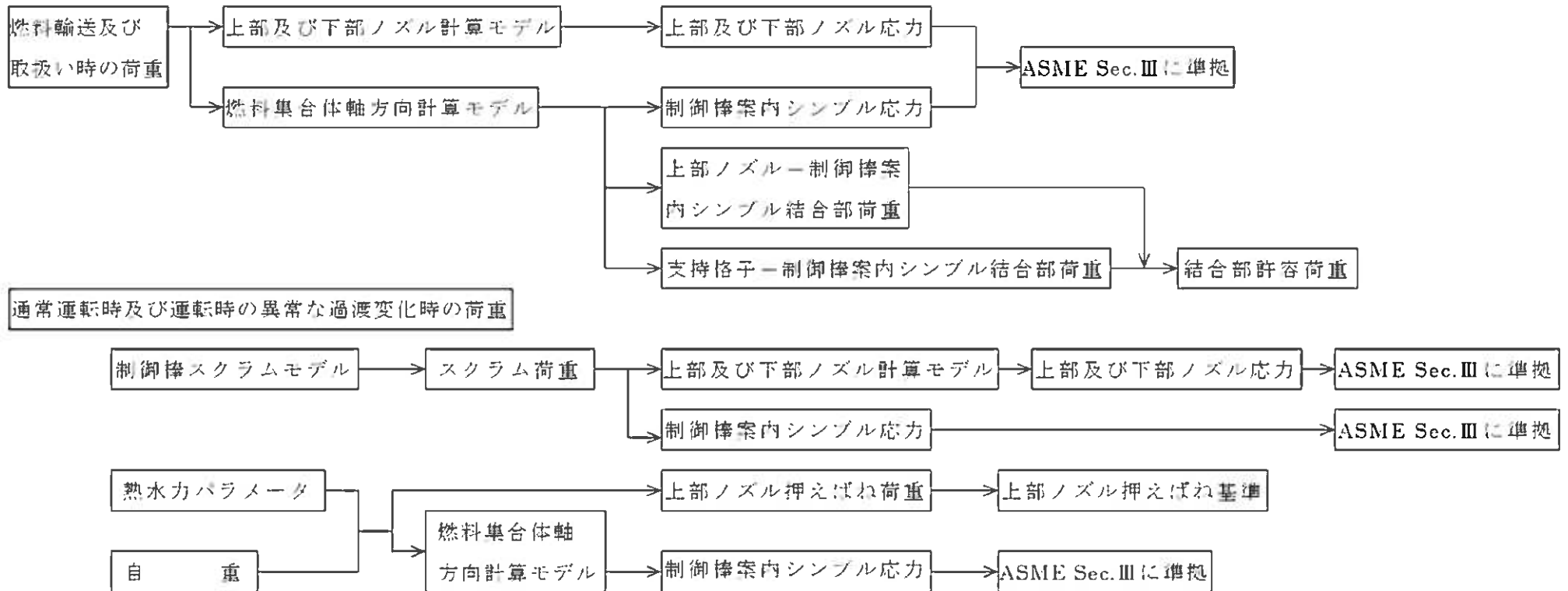
 P_m : 一次一般膜応力 P_b : 一次曲げ応力 S_m : 設計応力強さ

(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)

4. 5 燃料集合体の強度評価方法

強度評価は、4. 4項で述べた燃料集合体の設計基準に従って行う。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中に加わる6G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する。



燃料集合体強度評価フロー図

4. 6 燃料集合体の強度評価結果(1/2)

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

燃料輸送及び取扱い時の荷重における評価結果

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"/>	0.89
下部ノズル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.90
上部ノズルー制御棒案内シングル結合部	<input type="text"/> ^{*1}	<input type="text"/> ^{*2}	0.76 ^{*4}
支持格子ー制御棒案内シングル結合部	<input type="text"/> ^{*1} (ジルカロイ製) <input type="text"/> ^{*1} (インコネル製)	<input type="text"/> ^{*2} (ジルカロイ製) <input type="text"/> ^{*2} (インコネル製)	0.48 ^{*4} 0.45 ^{*4}
制御棒案内シングル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.85

*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

4. 6 燃料集合体の強度評価結果(2/2)

(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"/>	0.45
下部ノズル	スクラム時の衝撃力	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.40
制御棒案内シンブル 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

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*2
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	0.69
	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	0.30
	ポンプオーバー スピード時 (高温)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	浮き上がらない	0.98

*1: 許容応力値に対する最大応力値の比

*2: 「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

5. 耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能

【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】

燃料集合体には、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金(MDA)、Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金(ZIRLO)、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 二酸化ウラン

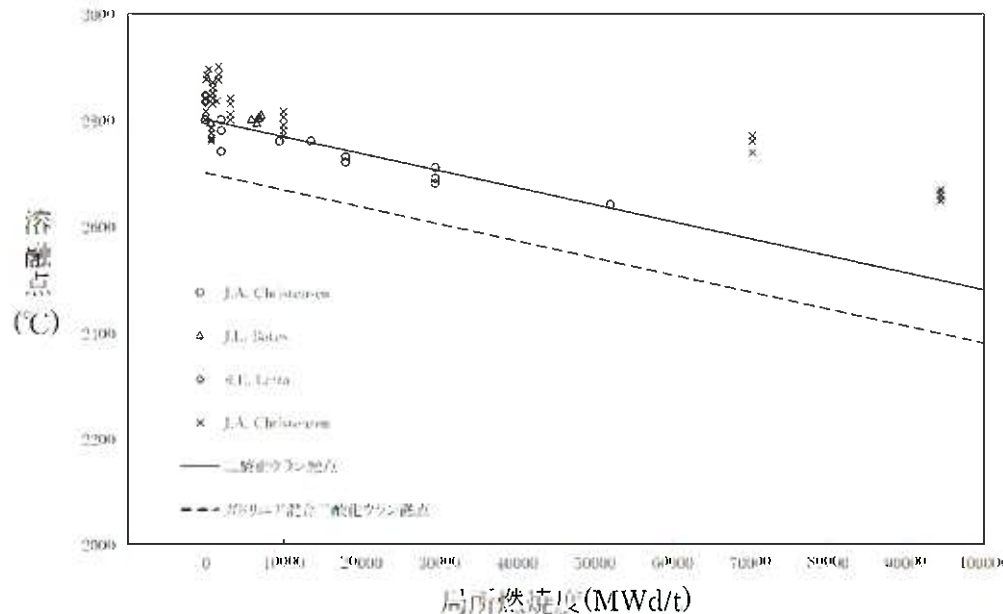
(使用部品) 二酸化ウラン焼結ペレット

耐熱性について、試験データにより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。

5. 2 ガドリニア入り二酸化ウラン

(使用部品) ガドリニア入り二酸化ウラン焼結ペレット

耐熱性について、試験データによりガドリニア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。

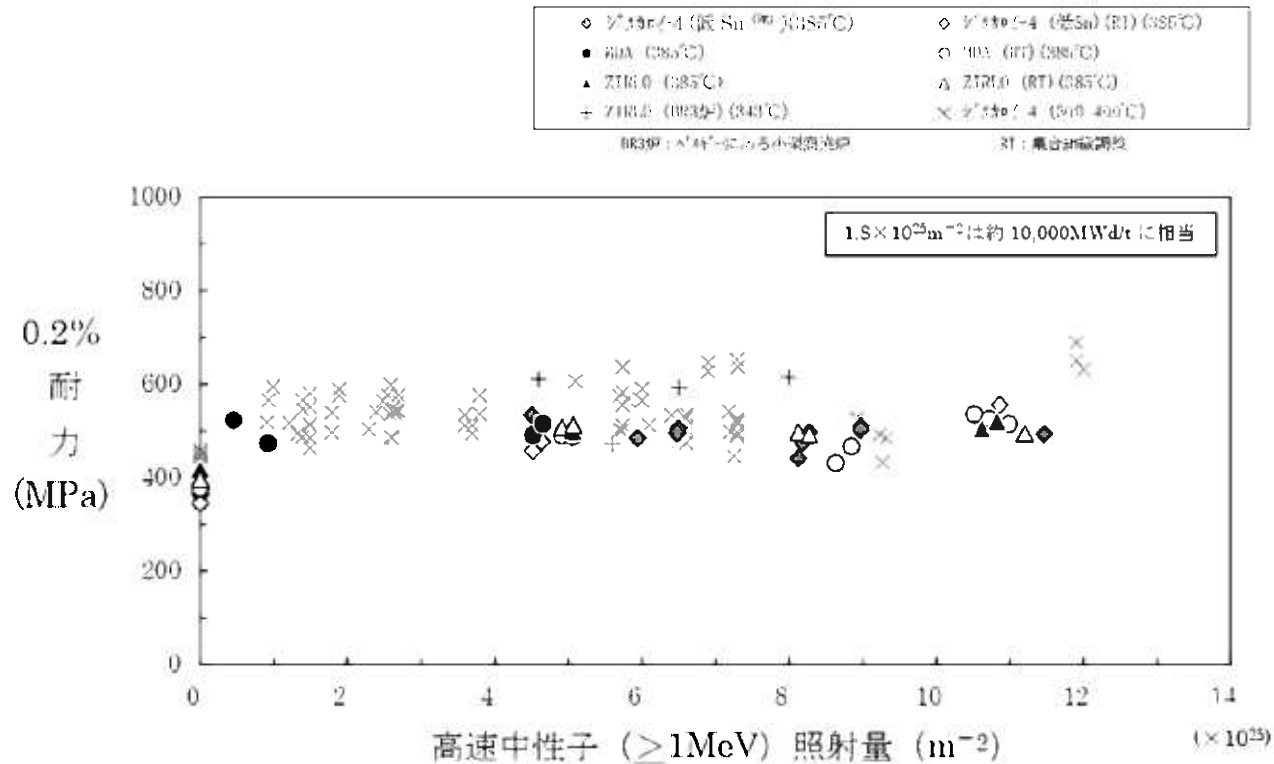


二酸化ウラン及びガドリニア入り二酸化ウランの溶融点図

5. 3 Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金(MDA)、Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金(ZIRLO) (使用部品) 被覆管

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。



MDA及びZIRLO被覆管の機械特性

5. 4 Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金（ジルカロイ-4）

（使用部品）制御棒案内シンブル、炉内計装用案内シンブル、中間部スリーブ、燃料被覆材端栓、制御棒案内シンブル端栓、中間部支持格子

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. 5 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）上部支持格子、下部支持格子、上部ノズル押えばね、ブレード

（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、シンブルスクリュウ、スプリングスクリュウ、インサート端栓、インサート管、上部スリーブ、コイルばね

6. まとめ

川内原子力発電所 1, 2号機において、A型ウラン燃料集合体に対し、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及び変更、関連する要目表の追加を行うとともに、燃料メーカーの既設認と同一の内容である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。