

**伊方発電所 3号機
燃料体（17行17列ウラン燃料集合体（A型、B型））
に係る設計及び工事計画認可申請について**

令和4年9月16日
四国電力株式会社

枠囲みの範囲は商業機密のため
公開できません。



四国電力株式会社

目次

1. 燃料体に係る法令等改正内容について
2. 燃料体設工認申請書の概要、構成
3. スケジュール
4. 燃料体設工認申請書の内容

1. 燃料体に係る法令等改正内容について

○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を要する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]</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] <u>3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料</u> [以下、略] 下欄 添付書類 <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 添付書類 （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. 燃料体設工認申請書の概要、構成

○今回の燃料体に係る設計及び工事計画認可申請（以下「燃料体設工認申請」という。）においては、加工を予定している以下の燃料体について、改正原子炉等規制法を踏まえた基本設計方針の変更等を行うこととしている。

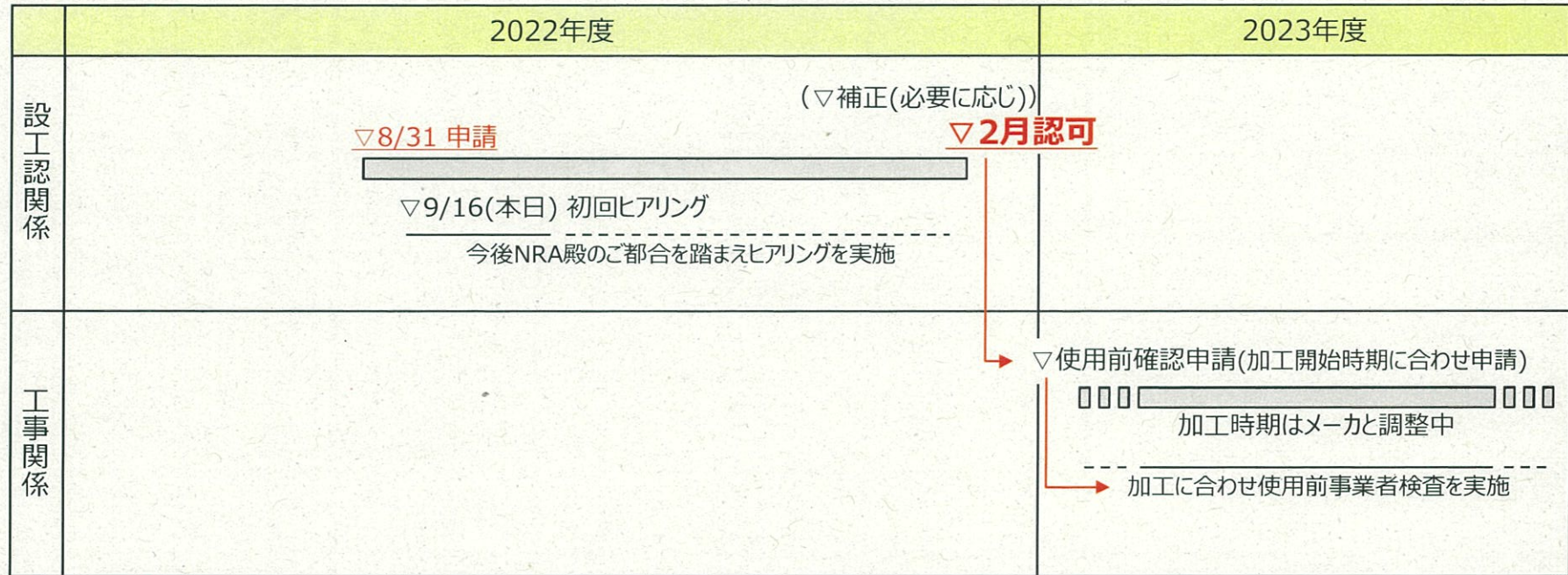
- ・17行17列A型ウラン燃料集合体（ウラン235濃縮度：4.8%及び4.1%、最高燃焼度：55,000MWd/t）
- ・17行17列B型ウラン燃料集合体（ウラン235濃縮度：4.8%及び4.1%、最高燃焼度：55,000MWd/t）

○上記燃料体は、既工事計画認可（以下「既工認」という。）及び既燃料体設計認可（以下「既設認」という。）を受けている、現在使用中の燃料体と同一設計であり、**技術的新規性はない。**

燃料体設工認申請の項目		記載内容	該当ページ
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（※一部追加）	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	5～8頁
	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	設工認に係る品質管理の方法等	—
添付1	熱出力計算書	既工認で適合性を確認した旨を記載	—
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	既工認で適合性を確認した旨を記載	—
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	既工認で適合性を確認した旨を記載	—
添付5	発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書	既工認で適合性を確認した旨を記載	—
添付6	耐震性に関する説明書	既工認で適合性を確認した旨を記載	—
添付7	強度に関する説明書	既設認の添付書類二「燃料体の強度計算書」と同様の内容を記載	9～19頁
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	既設認の添付書類一「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」と同様の内容を記載	20～22頁
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	設計及び工事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）	既設認の添付書類三「燃料体の構造図」と同様の内容を記載	23,24頁

3. スケジュール

○当社が想定する燃料体設工認申請に係る審査等のスケジュールは以下のとおり。当社としては、遅くとも2023年2月認可を希望。



(参考：先行プラントによるウラン燃料体設工認の申請日と認可日)

先行プラント		申請日	認可日
九州電力	川内 1、2号機、玄海 3、4号機	2020年12月15日	2021年6月30日
関西電力	美浜 3号機、高浜 1、2号機 高浜 3、4号機 大飯 3、4号機	2021年11月26日	2022年5月30日 2022年5月27日 2022年5月23日

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 基本設計方針 (1/4) ~

○17行17列A型ウラン燃料集合体の基本設計方針(1/2)

17行17列A型ウラン燃料集合体の基本設計方針は以下のとおり。

<p>1.1 燃料体</p> <p>1.1.1 17行17列 A 型燃料集合体 (ウラン燃料)</p> <p>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。</p> <p>(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。</p> <p>炭素 0.010以下 ぶっ素 0.0015以下 水素 0.0002以下 窒素 0.0075以下</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>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。</p> <p>(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。</p> <p>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。</p> <p>(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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>(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、主成分について以下に掲げる値であること。また、不純物は日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表3に規定する値 (主成分とするものは除く。) であること。</p>	<p>・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金</p> <p>スズ 0.70~0.90 鉄 0.18~0.24 クロム 0.07~0.13 鉄+クロム 0.28~0.37 ニオブ 0.45~0.55 酸素 <input type="text"/> ジルコニウム 残り</p> <p>・Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金</p> <p>スズ 0.90~1.30 鉄 0.08~0.12 ニオブ 0.80~1.20 酸素 <input type="text"/> ジルコニウム 残り</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p>
--	---

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 基本設計方針 (2/4) ~

○17行17列A型ウラン燃料集合体の基本設計方針(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に掲げるニオブ及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 $22\text{mg}/\text{dm}^2$ 以下又は14日間で $38\text{mg}/\text{dm}^2$ 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こと。
 - a. 試験温度 室温
引張強さ： $415\text{N}/\text{mm}^2$ 以上
耐力： $240\text{N}/\text{mm}^2$ 以上
伸び：14%以上
 - b. 試験温度 316°C
引張強さ： $215\text{N}/\text{mm}^2$ 以上
耐力： $105\text{N}/\text{mm}^2$ 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、制御棒案内シムルにあっては、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。
- (5) コイルばねにあっては、ばね定数が N/cm 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)「放射性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 $0.00004\text{Bq}/\text{mm}^2$ 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 $304\text{MPa}\cdot\text{mm}^3/\text{s}$ 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。
- (9) ヘリウム加圧量は、次のとおりであること。
二酸化ウラン燃料要素： MPa[gauge]
ガドリニア入り二酸化ウラン燃料要素： MPa[gauge]

燃料要素の集合体である燃料体は、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) 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。

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 基本設計方針 (3/4) ~

○17行17列B型ウラン燃料集合体の基本設計方針(1/2)

17行17列B型ウラン燃料集合体の基本設計方針は以下のとおり。

<p>1.1 燃料体</p> <p>1.1.1 17行17列B型燃料集合体 (ウラン燃料)</p> <p>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。</p> <p>(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。</p> <p>炭素 0.010以下 ぶっ素 0.0015以下 水素 0.0002以下 窒素 0.0075以下</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>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。</p> <p>(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。</p> <p>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。</p> <p>(5) ガドリニウムを添加したものにあっては、次に適合する設計とする。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>(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、主成分について以下に掲げる値であること。また、不純物は日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表3に規定する値 (主成分とするものは除く。) であること。</p>	<p>・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金</p> <p>スズ 0.90~1.15 鉄 0.24~0.30 クロム 0.13~0.19 ニオブ 0.08~0.14 ニッケル 0.007~0.014 酸素 ジルコニウム 残り</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p>
--	--

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 基本設計方針 (4/4) ~

○17行17列B型ウラン燃料集合体の基本設計方針(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に掲げるニオブ及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 $22\text{mg}/\text{dm}^2$ 以下又は14日間で $38\text{mg}/\text{dm}^2$ 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： $415\text{N}/\text{mm}^2$ 以上
耐力： $240\text{N}/\text{mm}^2$ 以上
伸び：14%以上

b. 試験温度 316°C
引張強さ： $215\text{N}/\text{mm}^2$ 以上
耐力： $105\text{N}/\text{mm}^2$ 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、制御棒案内シムルにあつては、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。
- (5) 上部プレナムコイルばね、下部プレナムコイルばねにあつては、ばね定数が次のとおりであること。
 - a. 上部プレナムコイルばね N/cm
 - b. 下部プレナムコイルばね N/cm

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)「放射性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 $0.00004\text{Bq}/\text{mm}^2$ 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 $304\text{MPa}\cdot\text{mm}^3/\text{s}$ 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。
- (9) ヘリウム加圧量は、 MPa[gauge]であること。

燃料要素の集合体である燃料体は、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) 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。

4. 燃料体設工認申請書の内容 ～ 強度に関する説明書 (1/11) ～

○燃料棒の設計基準

燃料棒の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」及び「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」に基づき、表1のとおりとする。燃料棒の設計においては、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時（以下「過渡変化時」という。）において、表1の基準を満足するようにする。

表1 燃料棒の設計基準

項目	基本的事項	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混合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。

4. 燃料体設工認申請書の内容 ～ 強度に関する説明書 (2/11) ～

○燃料棒の強度評価方法

燃料棒の強度評価は、前頁で述べた燃料棒設計基準に従って行う。評価の概要及び評価フローは図1のとおり。

- 燃料棒の性能評価を、二酸化ウランペレット及びガドリニア混合二酸化ウランペレットの照射挙動並びに被覆管の照射挙動をモデル化した高燃焼度用FINEコード (Fuel Rod Integrity Evaluation Code) または高燃焼度用FPACコード (Fuel Performance Analysis Code) を用いて行う。
- 燃料棒計算コードは、燃料棒が炉内で示す挙動 (核分裂生成物の生成及び放出、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、弾性変形及び腐食、ペレットと被覆管の相互作用など) をモデル化して、燃料中心温度、燃料棒内圧、被覆管の応力、歪及び疲労等を計算する。

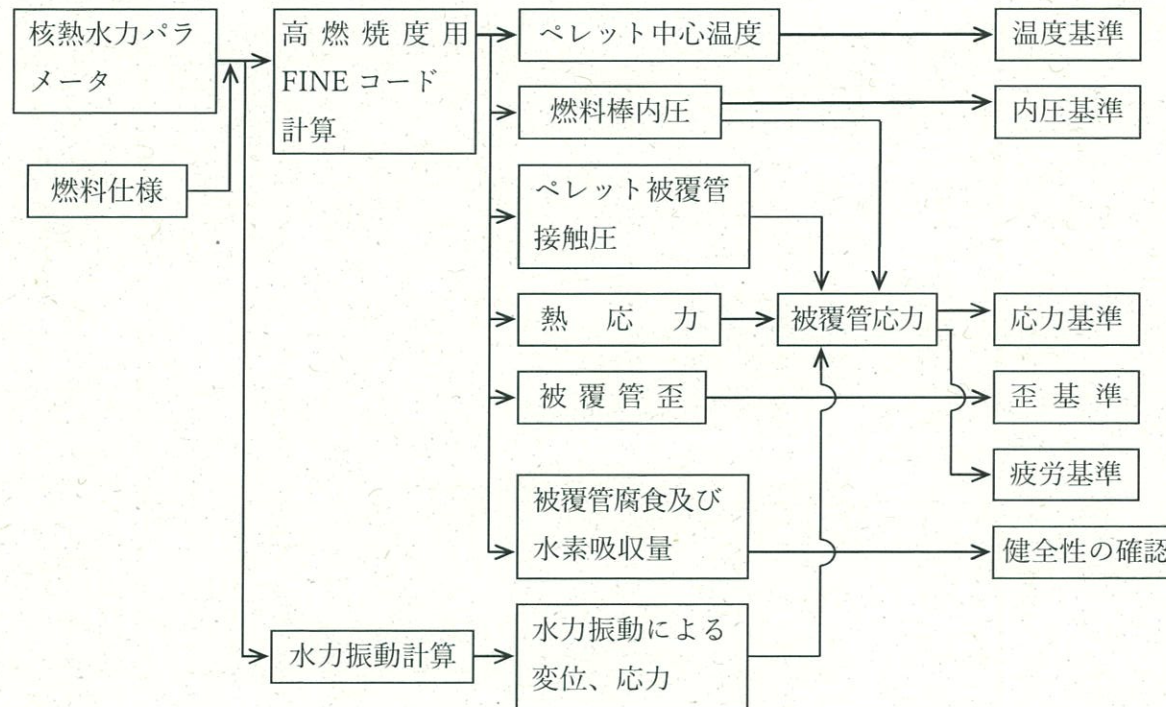


図1 燃料棒強度評価フロー図 (高燃焼度用FINEコードの例)

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 強度に関する説明書 (3/11) ~

○燃料棒の強度評価結果 (1/3)

燃料中心温度評価について、表2のとおり、二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒（以下「ガドリニア入り燃料棒」という。）それぞれにおいて、設計基準を満足していることを確認した。

表2 燃料中心温度評価結果

評価対象		条件	燃焼度(MWd/t)	燃料中心温度(°C)	判定	設計基準(°C)
A型	二酸化ウラン燃料棒*1	通常運転時(41.1kW/m)	0	約1,740	<	2,580
		過渡変化時(59.1kW/m)		約2,220		
	ガドリニア入り燃料棒	通常運転時(31.9kW/m)	10,000	約1,630	<	2,440
		過渡変化時(44.3kW/m)		約2,040		
B型	二酸化ウラン燃料棒*1	通常運転時(41.1kW/m)	0	約1,690	<	2,580
		過渡変化時(59.1kW/m)		約2,170		
	ガドリニア入り燃料棒	通常運転時(31.9kW/m)	25,000	約1,470	<	2,400
		過渡変化時(44.3kW/m)	15,000	約1,900		2,430

*1：濃縮度の低い方が厳しくなる方向であるため、濃縮度4.10wt%の二酸化ウラン燃料棒の評価値を記載

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 強度に関する説明書 (4/11) ~

○燃料棒の強度評価結果 (2/3)

燃料棒の内圧評価及び応力評価について、表3, 4のとおり、二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア入り燃料棒それぞれにおいて、設計基準を満足していることを確認した。

表3 燃料棒の内圧評価結果

評価対象		条件	内圧(MPa[abs])	設計基準(MPa[abs])	設計比*1
A型	二酸化ウラン燃料棒*2	通常運転時	15.4	≤19.7	0.78
	ガドリニア入り燃料棒	通常運転時	12.5	≤19.7	0.64
B型	二酸化ウラン燃料棒*2	通常運転時	13.2	≤18.6	0.71
	ガドリニア入り燃料棒	通常運転時	10.9	≤18.6	0.59

*1 : 設計基準値に対する評価値の比

*2 : 濃縮度4.10wt%の二酸化ウラン燃料棒の評価値と同等又はより厳しくなる、濃縮度4.80wt%の二酸化ウラン燃料棒の評価値を記載

表4 燃料棒の応力評価結果

評価対象		条件	体積平均相当応力*1 (MPa)	設計基準(被覆材耐力) (MPa)	設計比*2
A型	二酸化ウラン燃料棒*3	過渡変化時			0.92
	ガドリニア入り燃料棒	過渡変化時			0.80
B型	二酸化ウラン燃料棒*3	過渡変化時			0.57
	ガドリニア入り燃料棒	過渡変化時			0.49

*1 : 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

*2 : 設計基準値に対する評価値の比

*3 : 濃縮度4.10wt%の二酸化ウラン燃料棒の評価値と同等又はより厳しくなる、濃縮度4.80wt%の二酸化ウラン燃料棒の評価値を記載

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 強度に関する説明書 (5/11) ~

○燃料棒の強度評価結果 (3/3)

燃料棒の歪評価及び疲労評価について、表5, 6のとおり、二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア入り燃料棒それぞれにおいて、設計基準を満足していることを確認した。

表5 燃料棒の歪評価結果

評価対象		条件	歪(%)	設計基準(%)	設計比*1
A型	二酸化ウラン燃料棒*2	過渡変化時	0.46	≤1	0.46
	ガドリニア入り燃料棒	過渡変化時	0.43	≤1	0.43
B型	二酸化ウラン燃料棒*2	過渡変化時	0.26	≤1	0.26
	ガドリニア入り燃料棒	過渡変化時	0.23	≤1	0.23

*1 : 設計基準値に対する評価値の比

*2 : 濃縮度4.10wt%の二酸化ウラン燃料棒の評価値と同等又はより厳しくなる、濃縮度4.80wt%の二酸化ウラン燃料棒の評価値を記載

表6 燃料棒の疲労評価結果

評価対象		累積損傷係数*1	設計基準	設計比*2
A型	二酸化ウラン燃料棒*3	38	≤100	0.38
	ガドリニア入り燃料棒	30	≤100	0.30
B型	二酸化ウラン燃料棒*3	8.2	≤100	0.09
	ガドリニア入り燃料棒	3.0	≤100	0.03

*1 : B型は、より厳しい被覆管内面の評価値を記載

*2 : 設計基準値に対する評価値の比

*3 : 濃縮度4.10wt%の二酸化ウラン燃料棒の評価値と同等又はより厳しくなる、濃縮度4.80wt%の二酸化ウラン燃料棒の評価値を記載

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 強度に関する説明書 (6/11) ~

○燃料集合体の設計基準 (1/2)

燃料集合体の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。

燃料輸送及び取扱い時における評価項目及び設計基準は、表7のとおり。

表7 燃料輸送及び取扱い時における燃料集合体の評価項目及び設計基準 (設計荷重 : 6 G)

構成部品	応力*1	許容値*1
上部ノズル、下部ノズル	A型 : $P_m + P_b$ B型 : $P_L + P_b$	1.5Sm
上部ノズル-制御棒 案内シンプル結合部	—	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 案内シンプル結合部	—	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
制御棒案内シンプル	P_m	Sm

*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を適用する。)

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 強度に関する説明書 (7/11) ~

○燃料集合体の設計基準 (2/2)

通常運転時及び過渡変化時における評価項目及び設計基準は表 8 のとおり。

表 8 通常運転時及び過渡変化時における燃料集合体の評価項目及び設計基準

構成部品	考慮点	応力*1	許容値*1
上部ノズル、下部ノズル	スクラム時の衝撃力	A型 : $P_m + P_b$ B型 : $P_L + P_b$	1.5Sm
制御棒案内シングル	スクラム時の衝撃力	A型 : P_m^{*2} B型 : P_L	A型 : Sm B型 : 1.5Sm
	運転時荷重	P_m^{*2}	Sm
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

*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を適用する。)

*2 : ASME Sec. IIIでは2次応力まで考慮している。しかし、燃料集合体では以下の理由により考慮していない。

- ・支持格子と燃料棒がすべることにより、燃料棒と制御棒案内シングルの熱膨張差、照射成長差を吸収し、しかも燃料棒拘束力は照射により緩和していくこと。
- ・制御棒案内シングルはジルカロイ-4材であり、一般原子炉機器で採用されているステンレス鋼に比べクリープしやすく応力緩和すること。

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 強度に関する説明書 (8/11) ~

○燃料集合体の強度評価方法

燃料集合体の強度評価は、前頁までで述べた燃料集合体設計基準に従って行う。評価フローは図2のとおり。

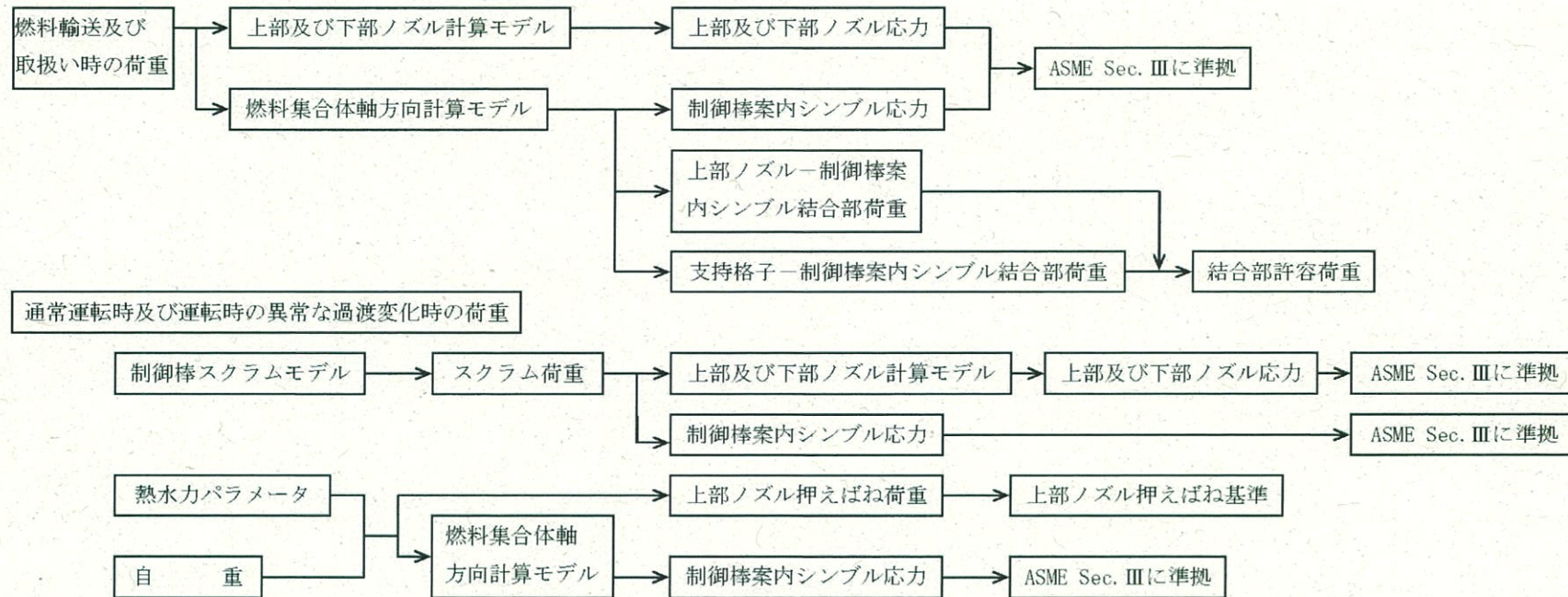


図2 燃料集合体強度評価フロー図

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 強度に関する説明書 (9/11) ~

○燃料集合体の強度評価結果 (1/3)

燃料輸送及び取扱い時の荷重における評価について、表9のとおり、許容応力を満足していることを確認した。

表9 燃料輸送及び取扱い時の荷重における評価結果

評価対象 (構成部品)		最大応力(MPa)	許容応力(MPa)	設計比 ^{*3}
A型	上部ノズル	[]	[]	0.89
	下部ノズル	[]	[]	0.90
	上部ノズル-制御棒案内シンプル結合部	[] ^{*1}	[] ^{*2}	0.76 ^{*4}
	支持格子-制御棒案内シンプル結合部	[](ジルカ01製) ^{*1}	[](ジルカ01製) ^{*2}	0.48 ^{*4}
		[](インコ礼製) ^{*1}	[](インコ礼製) ^{*2}	0.45 ^{*4}
制御棒案内シンプル	[]	[]	0.85	
B型	上部ノズル	[]	[]	0.87
	下部ノズル	[]	[]	0.83
	上部ノズル-制御棒案内シンプル結合部	— ^{*5}	— ^{*5}	— ^{*5}
	支持格子-制御棒案内シンプル結合部	[] ^{*1}	[] ^{*2}	0.67 ^{*4}
	制御棒案内シンプル	[]	[]	0.89

*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

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

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 強度に関する説明書 (10/11) ~

○燃料集合体の強度評価結果 (2/3)

通常運転時及び過渡変化時の燃料集合体応力評価について、表10のとおり、許容応力を満足していることを確認した。

表10 通常運転時及び過渡変化時の燃料集合体応力評価結果

評価対象 (構成部品)		考慮点	最大応力(MPa)	許容応力(MPa)	設計比*1
A型	上部ノズル	スクラム時の衝撃力	[Blank]	[Blank]	0.45
	下部ノズル	スクラム時の衝撃力			0.40
	制御棒案内シンプル	スクラム時の衝撃力			0.46
		運転時荷重			0.05
B型	上部ノズル	スクラム時の衝撃力			0.31
	下部ノズル	スクラム時の衝撃力			0.15
	制御棒案内シンプル	スクラム時の衝撃力			0.48
		運転時荷重			0.14

*1 : 許容応力値に対する最大応力値の比

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 強度に関する説明書 (11/11) ~

○燃料集合体の強度評価結果 (3/3)

通常運転時及び過渡変化時の上部ノズル押えばねの機能評価について、表11のとおり、許容応力を満足していることを確認した。

表11 通常運転時及び過渡変化時の上部ノズル押えばね評価結果

評価対象 (構成部品)		考慮点	上部ノズル押えばねに 要求される力(N) *1	上部ノズル押え ばね力(N)	評価	設計比*2
A型	上部ノズル 押えばね	機械設計流量時 (低温起動時)			浮き上がらない	0.69
		機械設計流量時 (高温全出力時)			浮き上がらない	0.30
		ポンプオーバ- スピード時(高温)			浮き上がらない	0.98
B型		機械設計流量時 (低温起動時)			浮き上がらない	0.58
		機械設計流量時 (高温全出力時)			浮き上がらない	0.43
		ポンプオーバ- スピード時(高温)			—	浮き上がるがばね の塑性変形は進 行しない

*1：水力的揚力+浮力-自重

*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

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 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 (1/3) ~

○評価の概要

A型ウラン燃料集合体またはB型ウラン燃料集合体には、二酸化ウラン、ガドリニア混合二酸化ウラン、Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金(MDA)、Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金(NDA)、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、)、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。

○二酸化ウラン、ガドリニア混合二酸化ウランの確認結果

耐熱性について、図3のとおり試験データによりガドリニア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。

(使用部品) 二酸化ウラン焼結ペレット、ガドリニア混合二酸化ウラン焼結ペレット

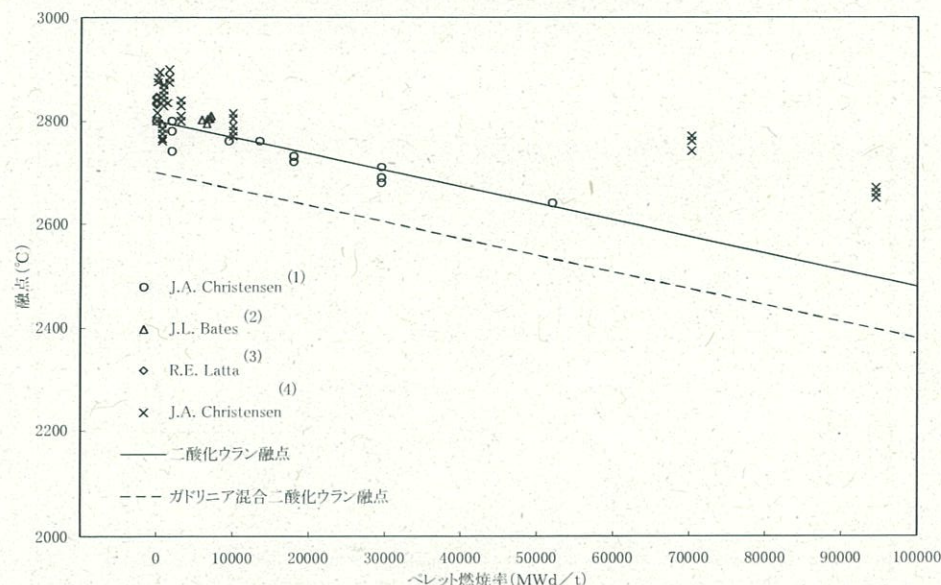


図3 二酸化ウラン及びガドリニア混合二酸化ウランの溶融点

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 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 (2/3) ~

○Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金(MDA)、Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金(NDA)、Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金(ZIRLO) の確認結果

機械的性質について、図4, 5のとおり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。

(使用部品) 燃料被覆材

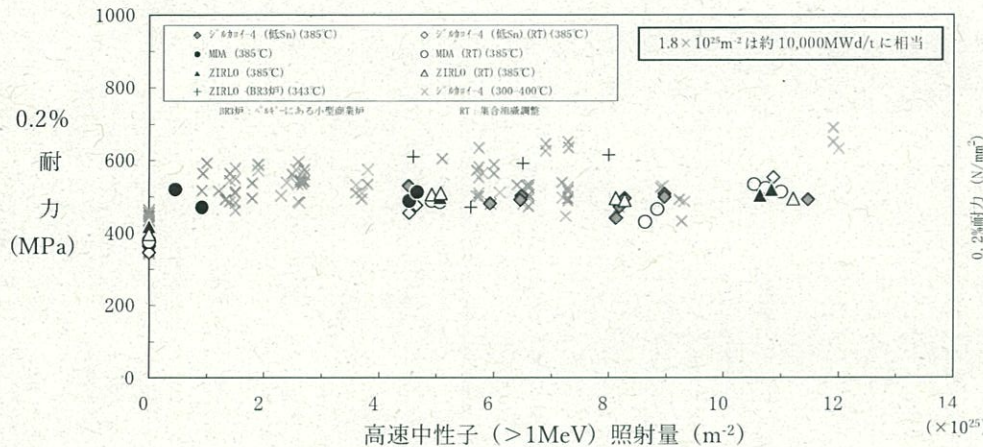


図4 燃料被覆材(MDA,ZIRLO)の耐力特性

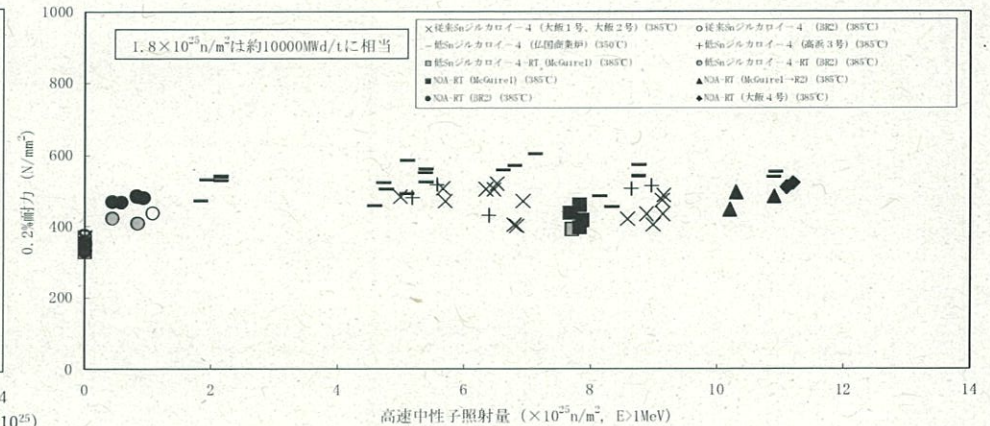


図5 燃料被覆材(NDA)の耐力特性

4. 燃料体設工認申請書の内容 ～ 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 (3/3) ～

○Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金(ジルカロイ-4)の確認結果

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。

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

B型：制御棒案内シムル、炉内計装用案内シムル、燃料被覆材端栓、制御棒案内シムル用下部端栓、中間部支持格子、カラー、ストッパー

○その他の部品の確認結果

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) A型：上部・下部支持格子、上部ノズル押えばね、ブレード

B型：最上部・最下部支持格子、上部ノズル押さえばね、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) B型：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) A型：上部・下部ノズル、シムルスクリュー、スプリングスクリュー、インサート端栓、インサート管、上部スリーブ、コイルばね(ペレット押えばね)

B型：上部・下部ノズル、シムルスクリュー、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、ロッキングカップ

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 添付図面 (1/2) ~

○17行17列A型ウラン燃料集合体の添付図面

17行17列A型ウラン燃料集合体は、図6, 7に示すとおり、燃料被覆材、燃料材（ペレット）、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、下部ノズル、制御棒案内シムル、炉内計装用案内シムル及び支持格子から構成されている。17行17列A型ウラン燃料集合体の構造について添付図面に示している。

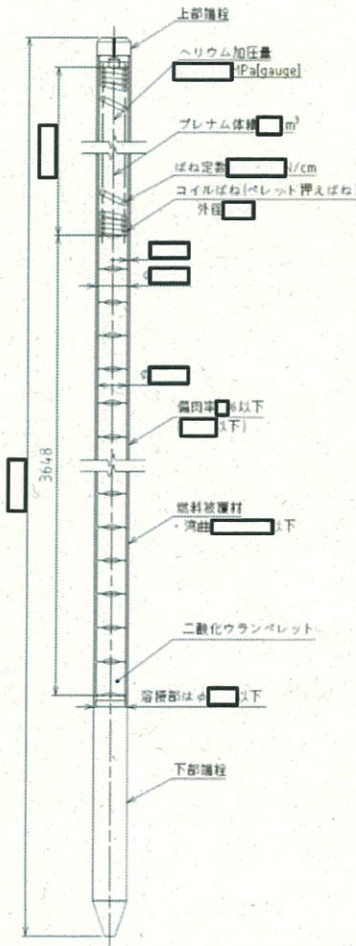


図6 燃料要素の構造概要図 (A型)

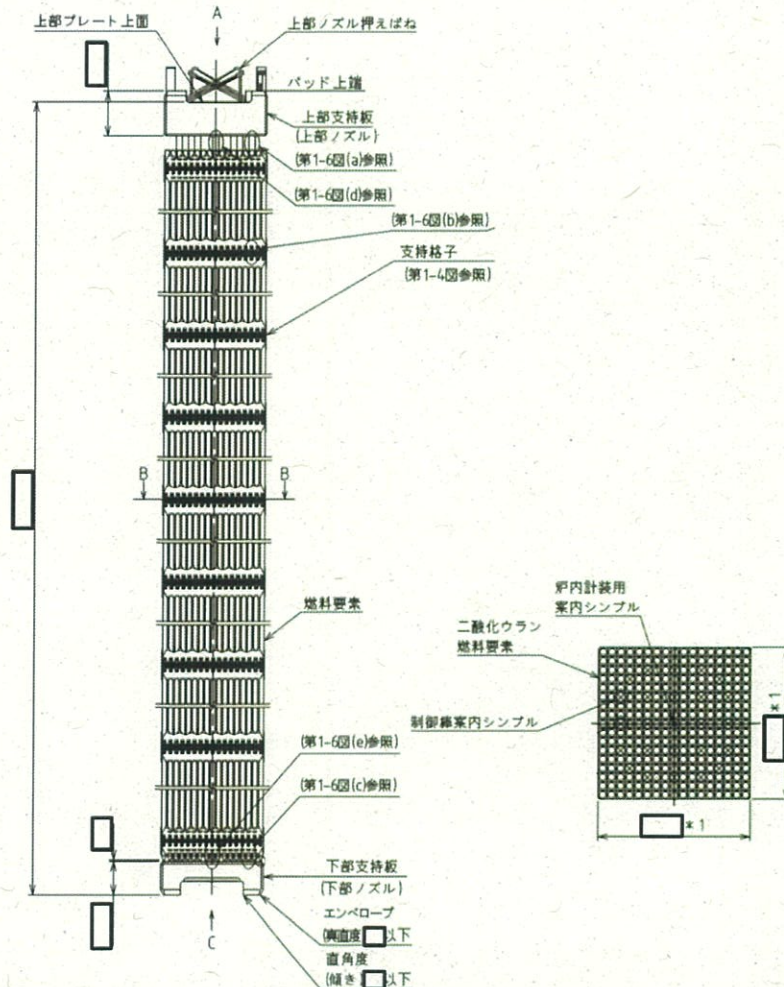


図7 燃料体の構造概要図 (A型)

4. 燃料体設工認申請書の内容 ~ 添付図面 (2/2) ~

○17行17列B型ウラン燃料集合体の添付図面

17行17列B型ウラン燃料集合体は、図8, 9に示すとおり、燃料被覆材、燃料材（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、下部ノズル、制御棒案内シムル、炉内計装用案内シムル及び支持格子から構成されている。17行17列B型ウラン燃料集合体の構造について添付図面に示している。

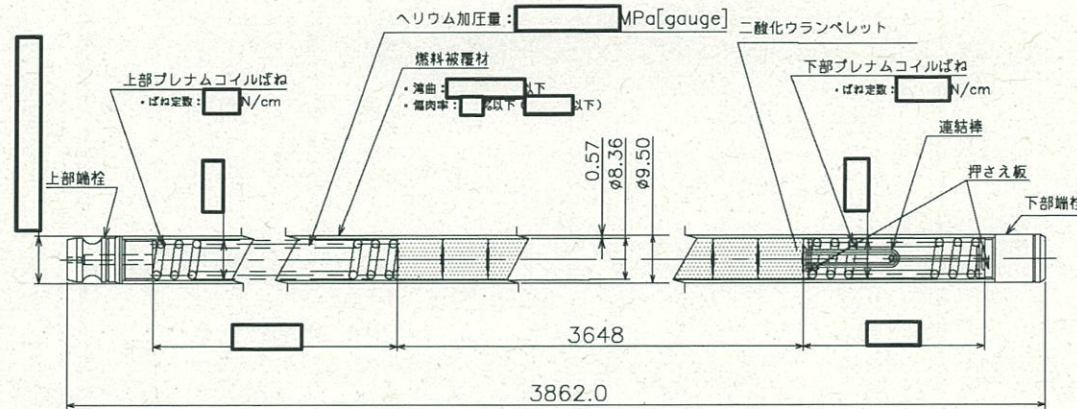


図8 燃料要素の構造概要図 (B型)

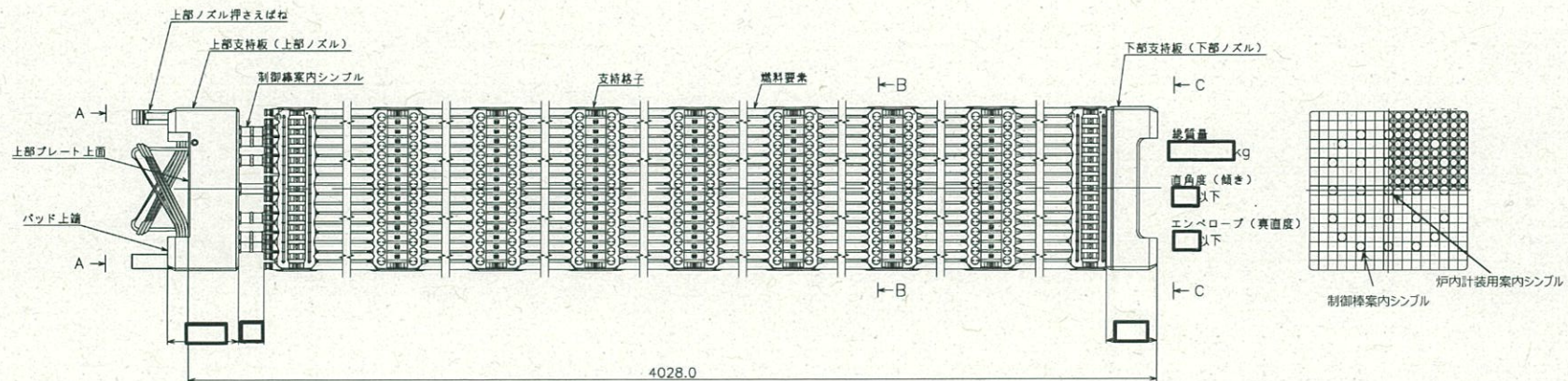


図9 燃料体の構造概要図 (B型)