

設認（伊方発電所第 3 号機 B 型燃料集合体） 添付書類二	設工認（伊方発電所第 3 号機 B 型燃料集合体） 資料 7	備考		
	<table border="1" style="width: 100%; border-style: dashed;"> <tr> <td data-bbox="958 277 1182 762" style="width: 50%; text-align: center;"> <p>検証(Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p> </td> <td data-bbox="1182 277 1738 762"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> <li>【妥当性確認(Validation)】</li> <li>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</li> <li>・ 本解析コードは、国内外の航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・ 開発機関が提示するマニュアルにより、今回の設工認申請で使用する 3 次元有限要素法（ソリッドモデル）及び 2 次元有限要素法（はり要素）に本解析コードが適用できることを確認している。</li> <li>・ 「燃料集合体機械特性試験」としてフルスケールの重量模擬体を用いて横剛性試験、縦剛性試験及び振動試験を行い、燃料集合体の固有振動数及び剛性値を取得した。また、燃料棒及び制御棒案内シムルに貼付したひずみゲージにより各部のひずみを測定した。取得した剛性値、振動数及びひずみの試験結果と解析結果の比較を行うことで適切に模擬できていることを確認している。</li> </ul> </td> </tr> </table>	<p>検証(Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> <li>【妥当性確認(Validation)】</li> <li>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</li> <li>・ 本解析コードは、国内外の航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・ 開発機関が提示するマニュアルにより、今回の設工認申請で使用する 3 次元有限要素法（ソリッドモデル）及び 2 次元有限要素法（はり要素）に本解析コードが適用できることを確認している。</li> <li>・ 「燃料集合体機械特性試験」としてフルスケールの重量模擬体を用いて横剛性試験、縦剛性試験及び振動試験を行い、燃料集合体の固有振動数及び剛性値を取得した。また、燃料棒及び制御棒案内シムルに貼付したひずみゲージにより各部のひずみを測定した。取得した剛性値、振動数及びひずみの試験結果と解析結果の比較を行うことで適切に模擬できていることを確認している。</li> </ul>	<p>設工認になったことに伴う、プログラム概要の追加であり、設工認の評価で用いた解析コード及びそのバージョンは、B 型設認の評価で用いたもの同一であることから、基準適合性に影響しない</p>
<p>検証(Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。</li> <li>【妥当性確認(Validation)】</li> <li>本解析コードの妥当性確認の内容は、以下のとおりである。</li> <li>・ 本解析コードは、国内外の航空宇宙、自動車、造船、機械、建築、土木などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li> <li>・ 開発機関が提示するマニュアルにより、今回の設工認申請で使用する 3 次元有限要素法（ソリッドモデル）及び 2 次元有限要素法（はり要素）に本解析コードが適用できることを確認している。</li> <li>・ 「燃料集合体機械特性試験」としてフルスケールの重量模擬体を用いて横剛性試験、縦剛性試験及び振動試験を行い、燃料集合体の固有振動数及び剛性値を取得した。また、燃料棒及び制御棒案内シムルに貼付したひずみゲージにより各部のひずみを測定した。取得した剛性値、振動数及びひずみの試験結果と解析結果の比較を行うことで適切に模擬できていることを確認している。</li> </ul>			

## 伊方発電所第3号機 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則 別表第二と既工認申請書における記載の整理

原子炉本体		既工認における記載
		伊方発電所第3号機
2 炉心に係る 次の事項	(1) 炉心形状、燃料集合体数、炉心有効高さ及び炉心等価直径	既工認②*1、2 炉心に係る次の事項(1)に記載
	(2) 燃料体最高燃焼度(初装荷及び取替えの別並びに燃料材、燃料要素及び燃料集合体の別に記載すること。)及び核燃料物質の最大装荷量	既工認①*2、2 炉心に係る次の事項(2)に記載*3
	(3) 燃料材の最高温度	既工認③*4、2 炉心に係る次の事項(3)に記載
	(4) 核的・熱的制限値(制御棒クラスタ落下時の制御棒価値及び核的エンタルピー上昇熱水路係数、制御棒クラスタ飛び出し時の制御棒価値及び熱流束熱水路係数、最大線出力密度、水平方向ピーキング係数、最大反応度添加率並びに通常運転時の最小限界熱流束比)	既工認④*5、2 炉心に係る次の事項(4)に記載
3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料(初装荷及び取替えの別に記載すること。)	(今回の申請にて記載)	

\*1：平成28年3月23日付け原規規発第1603231号にて認可を受けた工事計画(再稼働時)

\*2：平成29年9月29日付け原規規発第1709291号にて認可を受けた工事計画(4.1wt%ステップ2燃料の装荷時)

\*3：燃料集合体の最高燃焼度を記載しており、燃料材および燃料要素については炉心側の申請時に記載の適正化を行う。

\*4：平成21年7月15日付け平成21・05・12原第17号にて認可を受けた工事計画(ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の装荷時)

\*5：平成16年4月16日付け平成15・12・26原第7号にて認可を受けた工事計画(高燃焼度燃料の装荷時)

## 補足説明資料 4

### 基本設計方針の確認方法について

## 1. 概要

本資料は、法令等の改正内容を踏まえ、燃料体に係る要求事項を基本設計方針に追加したことから、当該事項の確認方法について別紙のとおり整理したものである。



B型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
1.1 燃料体 1.1.2 17行17列B型燃料集合体(ウラン燃料)	—	—	—
<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            ふっ素 0.0015以下            水素 0.0002以下            窒素 0.0075以下</p>	申請書 検査	<p>要目表 3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料</p> <p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>資料8 第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分</p> <p>添付図面 第1-1、1-2図</p>	材料検査
(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。	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>添付図面 第1-1、1-2図</p>	材料検査
<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>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>添付図面 第1-1、1-2図</p>	<p>a.寸法検査            b.材料検査            c.外観検査            d.外観検査</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>	申請書 検査	<p>要目表 3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料</p> <p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>資料8 第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分</p> <p>添付図面 第1-1図</p>	<p>a.材料検査            b.材料検査</p>

## B型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
(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。 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。	申請書 検査	要目表 3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料  9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  資料8 第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分  添付図面 第1-2図	a.材料検査 b.材料検査 c.材料検査 d.材料検査
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。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	寸法検査
(2) 被覆材の軸は、著しく湾曲していないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	寸法検査
(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。 ・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 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 <input type="text"/> ジルコニウム 残り	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  資料8 第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分	材料検査
(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。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	材料検査
(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。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	材料検査
(6) 表面に割れ、傷等で有害なものがいないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(7) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がいないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査



## B型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
(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。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(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/dm <sup>2</sup> 以下又は14日間で38mg/dm <sup>2</sup> 以下であること。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	材料検査
(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。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  資料8 第2-2表 燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質	材料検査
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。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	寸法検査
(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。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  資料8 第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分	材料検査
(3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(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/dm <sup>2</sup> 以下又は14日間で38mg/dm <sup>2</sup> 以下であること。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	材料検査

## B型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
<p>(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。</p> <p>a. 試験温度 室温 引張強さ:415N/mm<sup>2</sup>以上 耐力:240 N/mm<sup>2</sup>以上 伸び:14%以上</p> <p>b. 試験温度316°C 引張強さ:215N/mm<sup>2</sup>以上 耐力:105N/mm<sup>2</sup>以上 伸び:24%以上</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>資料8 第2-2表 燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質</p>	a.材料検査 b.材料検査
<p>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。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>添付図面 第1-3、1-4、1-8、1-9、1-10図</p>	寸法検査
<p>(2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p>	外観検査
<p>(3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p>	外観検査
<p>(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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>資料8 第2-2表 燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質</p>	a.材料検査 b.材料検査
<p>(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。</p> <p>a. 上部プレナムコイルばね <input type="text"/> N/cm</p> <p>b. 下部プレナムコイルばね <input type="text"/> N/cm</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>添付図面 第1-1、1-2図</p>	材料検査
<p>燃料要素は、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。</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>添付図面 第1-1、1-2図</p>	寸法検査



## B型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
(2) 燃料要素の軸は、著しく湾曲していないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	寸法検査
(3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(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0.00004Bq/mm <sup>2</sup> を超えないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	表面汚染密度検査
(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・mm <sup>3</sup> /sを超えないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	漏えい検査
(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。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	溶接部の非破壊検査
(8) 部品の欠如がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(9) ヘリウム加圧量は、 <input type="text"/> MPa[gauge]であること。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	圧力検査
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。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-3図	寸法検査
(2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査

## B型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
(4) 部品の欠如がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査

## 補足説明資料 5

### 強度に関する補足説明資料

## 目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 設計条件 .....	2
2.1 燃焼度 .....	2
2.2 線出力密度 .....	2
2.3 原子炉運転条件 .....	3
3. 燃料棒の強度計算 .....	4
3.1 燃料棒の設計基準 .....	4
3.2 燃料棒の強度評価方法 .....	6
3.3 強度評価結果 .....	8
3.4 その他の考慮事項 .....	39
4. 燃料集合体の強度計算 .....	52
4.1 燃料集合体の設計基準 .....	52
4.2 燃料集合体強度評価方法 .....	55
4.3 強度評価結果 .....	62
5. 参考文献 .....	67



## 1. 概 要

資料7「強度に関する説明書」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」（以下「技術基準規則」という。）第23条及び「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」に基づき、17行17列B型燃料集合体（ウラン燃料）（以下「燃料集合体」という。）が原子炉内における使用期間中に生じ得る種々の因子を考慮しても、その健全性を失うことがないように設計されていることを説明するものである。

なお、炉心は157体の燃料集合体で構成され、原子炉熱出力2,652MWを安全に出せるように設計されている。燃料集合体は所定の燃焼率（以下「燃焼度」という。）を達成できるように設計されている。

## 2. 設計条件

本申請の燃料集合体の通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における核・熱水力設計条件は以下のとおりである。

### 2.1 燃焼度

本申請の燃料集合体、燃料棒及びペレットに対する設計の燃焼度は次のとおりである。

燃料集合体最高	:	55,000	MWd/t
燃料棒最高	:	61,000	MWd/t
ペレット最高	:	71,000	MWd/t

### 2.2 線出力密度

炉心平均線出力密度は 17.1kW/m である。また、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における最大線出力密度は次のとおりである。

	<u>二酸化ウラン</u> 燃料棒	<u>ガドリニア入り</u> 二酸化ウラン燃料棒
通常運転時の		
最大線出力密度	: 41.1 kW/m	31.9 kW/m
運転時の異常な		
過渡変化時における		
最大線出力密度	: 59.1 kW/m	44.3 kW/m

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。）ではガドリニアを 6wt% 又は 10wt% 添加したことに対し、U-235 濃縮度を二酸化ウラン燃料棒の 4.80wt% より 1.60wt% 低下させ 3.20wt% としているので、ガドリニア入り燃料棒の最大線出力密度は二酸化ウラン燃料棒の場合より低くなる。

### 2.3 原子炉運転条件

本申請の燃料集合体を使用する原子炉における 1 次冷却材の運転条件の主なものは次のとおりである。

- ・原子炉熱出力 : 2,652 MW
- ・運転圧力 : 15.5 MPa[abs]
- ・炉心入口温度
  - 通常運転時 : 283.6 °C
  - 高温停止時 : 286.1 °C
- ・1次冷却材全流量 :  $45.7 \times 10^6$  kg/h

### 3. 燃料棒の強度計算

#### 3.1 燃料棒の設計基準

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、第 3-1 表に示す基準を満足するように燃料棒を設計する。

設計基準を設定するに当たっての基本的な考慮事項と設計基準を同表に示す。

なお、これらの基準は、原子力規制委員会規則「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)」、技術基準規則、原子炉安全基準専門部会報告書「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)」及び原子炉安全専門審査会内規「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。

このほか、その他の考慮事項として、燃料棒曲がり評価、トータルギャップ評価、被覆管外面腐食及び水素吸収量評価、ペレット-被覆管相互作用の評価(PCI 評価)、クリープコラプス評価、フレットィング摩耗評価及び混在炉心における共存性について記載する。

第3-1表 各評価項目と出力履歴との関係

規則など	評価項目	基本的考慮事項	設計基準	基準の考え方	強度評価の考え方
<p>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） 第15条6項</p> <p>1. 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荷重に耐えるものとする。</p> <p>原子炉安全基準専門部会「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） 3.2.1 燃料棒内圧基準</p> <p>PWR燃料棒の内圧基準については、従来の「燃料棒の内圧は、運転中冷却材圧力(157kg/cm<sup>2</sup>g)以下であること。」という基準を変更し、「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。」によることとしている。</p> <p>原子炉安全専門審査会「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） 2-1 構造設計基準</p> <p>構造設計基準は次のように設定されている。</p> <p>(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。</p> <p>(2)燃料棒内圧は運転中冷却材圧力(157kg/cm<sup>2</sup>g)以下であること。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p>	(1) 燃料温度	<p>1) ペレット溶融に伴う過大な膨張を防ぐ。</p> <p>2) 燃料スタックの不安定化を防ぐ。</p> <p>3) 核分裂生成ガス（以下、「FPガス」と称する。）の過度の放出あるいは移動を防ぐ。</p> <p>4) ペレットと被覆管の有害な化学反応を防ぐ。</p>	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。	物理的溶融点（実測値の下限側）に評価モデル等の不確定性を考慮した値を制限値としている。また、燃焼に伴う溶融点の低下は-32℃/10,000MWd/tを適用している。	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中心温度評価用線出力条件を保守的に設定している。
	(2) 燃料棒内圧	サーマルフィードバック効果 <sup>(注1)</sup> 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。	燃料棒設計計算コードによりペレットと被覆管のギャップが増加する時点の内圧（限界内圧）を求め、限界内圧の下限を包絡する内圧値を設定し、更に燃料製造公差及び計算モデルの不確定性と余裕を考慮して設定している。	燃料棒設計計算コードにより得られた評価値に対し、燃料製造公差及び計算モデルの不確定性を考慮している。
	(3) 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 <sup>(注2)</sup> 以下であること。	被覆管応力基準値は、耐力実測データに基づき、データのばらつきを保守的に考慮して定めている。 1次応力（内外圧差等による応力）+2次応力（熱応力、接触応力）が、耐力以下となるように制限しており、被覆材の破損に対して保守的な設定としている。	—
	(4) 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。	0'Donnellらの塑性不安定性の理論では、ジルカロイ材は塑性歪2%まで塑性不安定性を示さないとされているが、設計基準では保守的に1%としている。この1%は塑性歪に対応するものであるが、評価では、塑性歪と弾性歪の合計が1%以下であることとしており、保守的な評価となっている。 なお、応力評価基準に耐力を用いていることにより、実質的に0.2%塑性歪以下に制限される。	—	
	(5) 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。	疲労損傷評価にて適用する設計疲労曲線（Langer and 0'Donnellの曲線）は実測データより求まる最悪曲線に対し、さらに保守的に余裕（応力に対して1/2、許容繰返し回数に対して1/20）を見込んで設定されている。	疲労損傷評価では、設計上、起動/停止、負荷追従運転及び異常な過渡変化時の原子炉トリップの過渡条件（繰返し回数）を考慮しているが、実際の装荷燃料が受ける過渡条件は設計で考慮している繰返し回数以下であることから、実質上保守的な評価となっている。

(注1) 内圧支配に至った燃料棒では、被覆管は外向きのクリープ変形により外径が増加し、一旦接触したペレットと被覆管のギャップが再度生じる可能性がある。これにより、ギャップ部の熱伝達が低下し燃料温度が増加すると、更に

FPガスが放出されて内圧が上昇し、その結果、更にギャップが広がる。

(注2) 0.2%の塑性変形を起こす応力をいう。

### 3.2 燃料棒の強度評価方法

強度評価は、3.1項で述べた設計基準に従って行うが、以下にこれら評価方法及び解析コードの概要を述べる。

また第3-1図に燃料棒強度評価フロー図を示す。

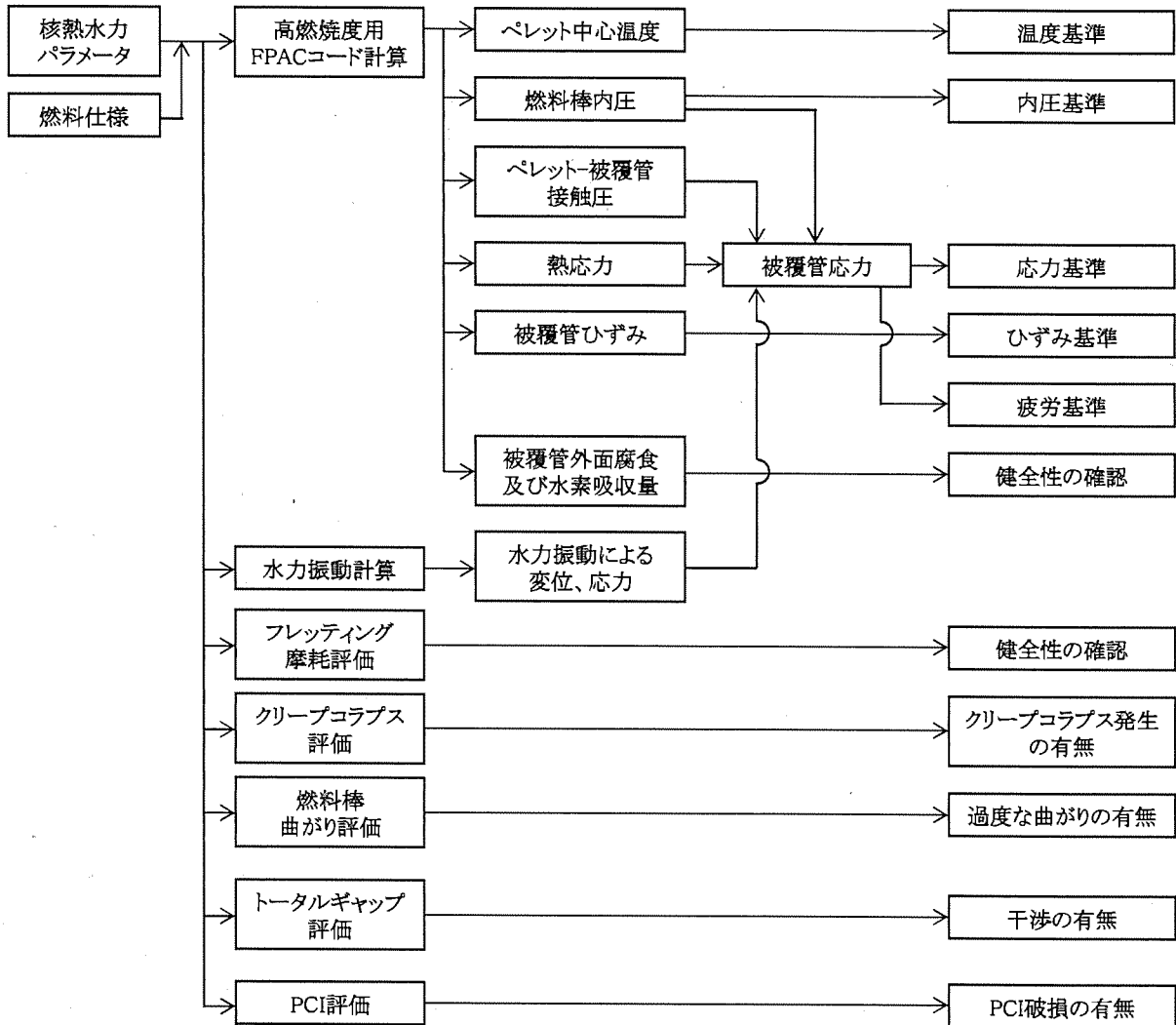
#### 3.2.1 燃料棒設計計算コードの概要

現在の発電用軽水炉においては、二酸化ウラン粉末を焼結したペレットあるいは二酸化ウラン粉末にガドリニア粉末を混合し焼結したペレットを、ジルコニウムを主成分とした合金被覆管の中に挿入した燃料棒が用いられている。

この燃料棒の強度評価を、二酸化ウランペレットやガドリニア混合二酸化ウランペレット（ガドリニア濃度 10wt%以下）の照射挙動をモデル化し、燃焼によるペレット熱伝導率の低下等の高燃焼度下での照射挙動、あるいは、Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム基合金（以下「NDA」という。）被覆管の照射挙動をモデル化した高燃焼度用 FPAC コード<sup>(1)</sup>（Fuel Performance Analysis Code）を用いて行う。

高燃焼度用 FPAC コードは、燃料棒が原子炉内で示す挙動（核分裂生成物（以下「FP」という。）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等）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、ひずみ及び疲労等を評価することができる。

燃料棒評価



第 3-1 図 燃料棒強度評価フロー図

### 3.3 強度評価結果

以下に燃料棒解析コードを用いて、燃料集合体の性能評価を行った結果を示す。

#### 3.3.1 計算条件

今回の燃料集合体の評価に使用した主要なインプットは次のとおりである。

ペレット	濃縮度	4.80wt% (二酸化ウラン燃料棒) 4.10wt% (二酸化ウラン燃料棒) 3.20wt% (ガドリニア入り燃料棒)	
	直径	8.190mm	
	長さ	9.2mm	
	形状	ディッシュ、チャンファ付き	
	密度	97.0% T.D. (二酸化ウラン燃料棒) 96.0% T.D. (ガドリニア入り燃料棒)	
	ガドリニア濃度	10.00wt% (タイプ 3 燃料集合体におけるガドリニア入り燃料棒)	
	ガドリニウム濃度	□ wt% (タイプ 3 燃料集合体におけるガドリニア入り燃料棒)	
	被覆管	材質	NDA
		内径	8.36mm
		肉厚	0.57mm
燃料棒	上部プレナム長さ	□ mm	
	下部プレナム長さ	□ mm	
	初期加圧量	□ MPa [abs]	
	封入ガス	ヘリウム	
	有効長さ	3,648mm	
1次冷却材 の条件	運転圧力	15.5MPa [abs]	
	入口温度	284°C	
	入口流量	0.28kg/s	
	熱水力等価直径	11.78mm	
出力分布	平均線出力密度	17.1kW/m	

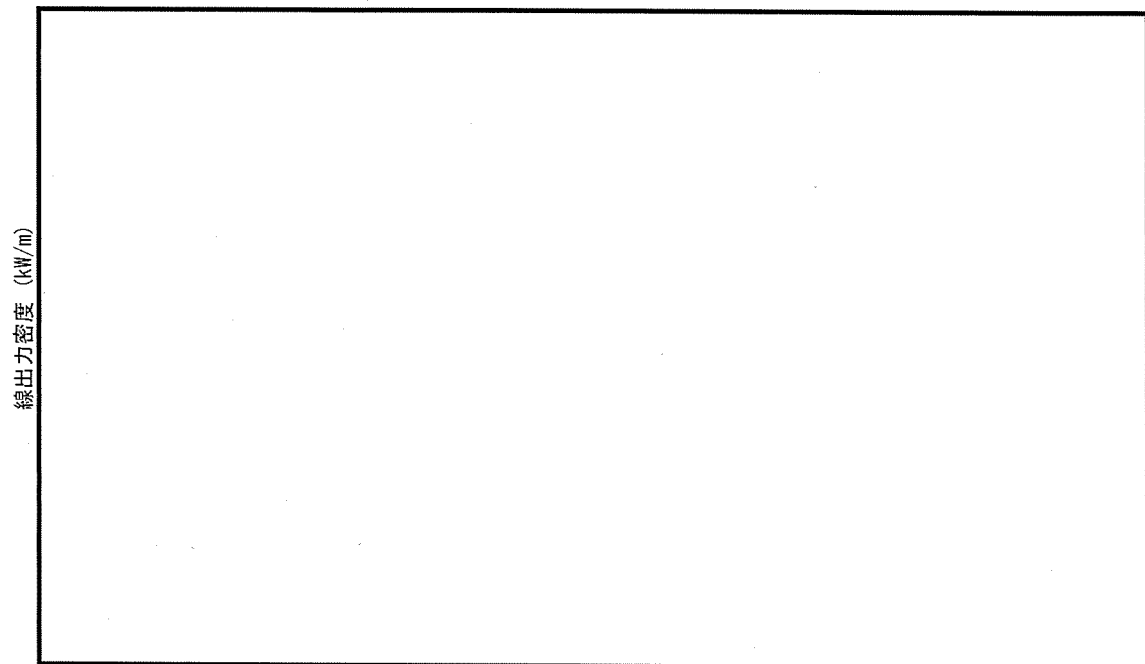


強度計算に用いる出力履歴は、実際の取替炉心における出力履歴の多様性を考慮して設定する。評価対象の燃料棒は、代表的な炉心の最大及び最小燃料棒燃焼度となる燃料棒並びに各サイクルで最大及び最小燃料棒平均線出力密度となる燃料棒を対象とする。出力履歴の多様性を考慮するため、対象燃料棒の燃料棒平均線出力密度を一律に嵩上げしたうえで、最大燃焼度となる燃料棒の燃料棒平均燃焼度が設計燃焼度(61,000MWd/t)に達するように照射時間を照射期間にわたって一律に延長する。炉心としては、二酸化ウラン燃料集合体(濃縮度4.8wt%)、二酸化ウラン燃料集合体(濃縮度4.1wt%)及びガドリニア入り二酸化ウラン燃料集合体(以下「ガドリニア入り燃料集合体」という。)が混在した炉心を考慮する。また、軸方向出力分布は、ペレット最高燃焼度が設計燃焼度(71,000MWd/t)に達するように設定する。

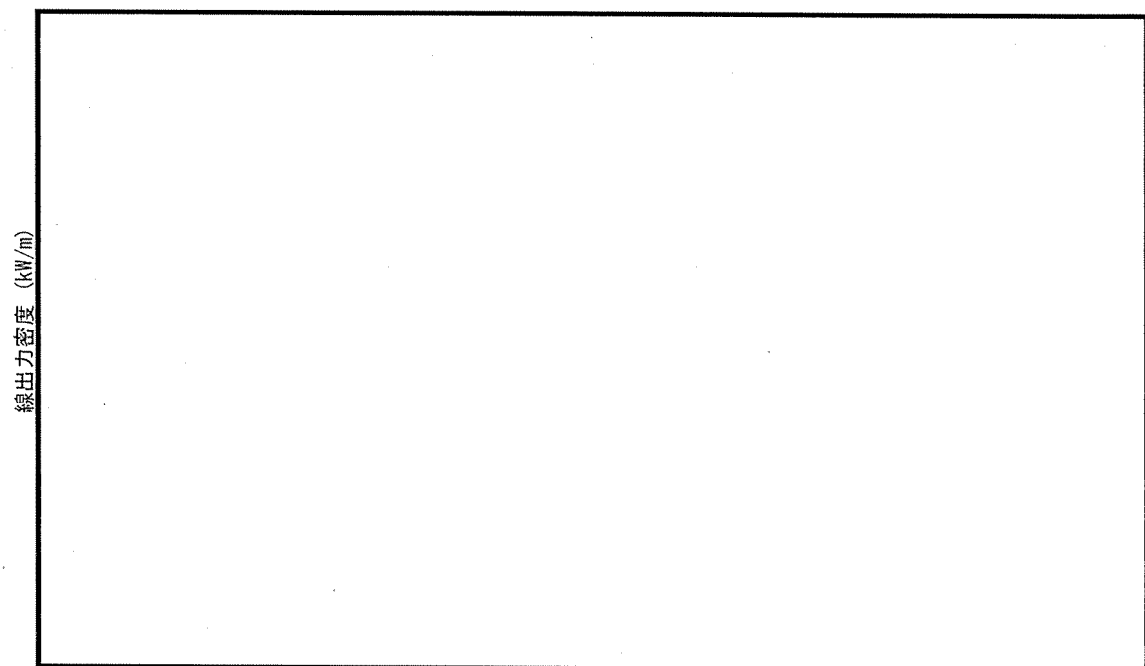
強度計算に用いた出力履歴を第3-2図に、軸方向出力分布を第3-3図に示す。また、出力履歴選定の考え方を第3-2表に示す。

第3-2表 各評価項目と出力履歴との関係

評価項目	関連する燃料挙動/特性	傾向	厳しくなりやすい出力履歴		本申請における設計線出力履歴の設定
燃料温度	(1)燃料温度	出力が大きいほど高くなる。	a. 最高温度はペレット-被覆管ギャップが大きい BOL で厳しくなり、評価線出力条件に依存し出力履歴によらない。	—	下記の最大燃焼度燃料棒の設計線出力履歴を用いる。
燃料棒内圧	(1) F P ガス放出	a. 燃焼度の伸長により増大する。 (リコイル・ノックoff) b. 燃料温度 (出力) が高いほど放出量は増大する。(拡散)	a. 高燃焼度燃料棒となる出力履歴で厳しくなる傾向がある。 b. 高出力燃料棒となる出力履歴で厳しくなる傾向がある。	最大燃焼度 各サイクル最大出力	安全審査の代表炉心における最大燃焼度/最小燃焼度/各サイクル最大出力/各サイクル最小出力となる燃料棒出力履歴をベースとして、取替炉心ごとの出力の違いを考慮し、出力のかさ上げを行い設定する。
	(2)燃料棒内自由体積	自由体積が小さいほど、内圧は大きくなる。	平均的に出力が高く、早期にペレット-被覆管ギャップが閉じ、燃料棒の熱膨張も大きくなる出力履歴で厳しくなる傾向がある。		
被覆管応力	(1)内外圧差	内外圧差が最大となる BOL 出力の低い燃料で厳しくなる	特に出力履歴設定には考慮していないが、以下の項目に対して設定した出力履歴でカバーされる。	最大燃焼度 各サイクル最大出力 (各サイクル最小出力*) * 最小出力となる燃料棒は当該サイクル以外のサイクルで高い出力となりやすいため選定している。	
	(2)ペレット-被覆管接触圧	ペレットと被覆管の接触により発生する応力であり、通常運転時の応力が大きく、かつ過渡時の出力が大きい(ペレット熱膨張量が大きく)なるほど厳しくなる。	ペレット-被覆管が早期に接触しやすく、かつ過渡変化時の出力が大きくなる出力履歴で厳しくなる傾向がある。具体的には、寿命前半に比較的出力が高く、接触後高出力となる燃料棒で厳しくなる傾向がある。		
	(3)熱応力	被覆管内外面温度差が大きいほど厳しくなる。	高出力(熱流束大)燃料棒ほど温度差は大きく熱応力は大きくなる傾向がある。		
	(4)水力振動応力	燃料棒質量に依存し、質量が大きいほど厳しくなる。	燃料仕様は各燃料棒で同じであることから、特に出力履歴とは関係しない。		
被覆管歪	(1)ペレット-被覆管接触圧	ペレットと被覆管の接触により発生する歪であり、過渡時の出力増分が大きいほど厳しくなる。	ペレット-被覆管が早期に接触しやすく、かつ過渡変化時の出力が大きくなる出力履歴で厳しくなる傾向がある。具体的には、寿命前半に比較的出力が高く、接触後高出力となる燃料棒で厳しくなる傾向がある。		
周期的な被覆管歪(被覆管疲労)	(1)被覆管応力変化 (2)応力発生期間	被覆管疲労は、被覆管に発生する応力片振幅が大きいほど非線形的に厳しくなる。また、応力が発生している期間が長いほど、厳しくなる。	出力が平均的に高く早期にペレットと被覆管が接触し、応力が発生するケースで厳しくなる。	最大燃焼度 (各サイクル最大出力**) **後半のサイクルで出力が高い場合、被覆管発生応力が大きくなるため、設計疲労曲線の非線形性により、評価が厳しくなるケースがあるため選定している。	

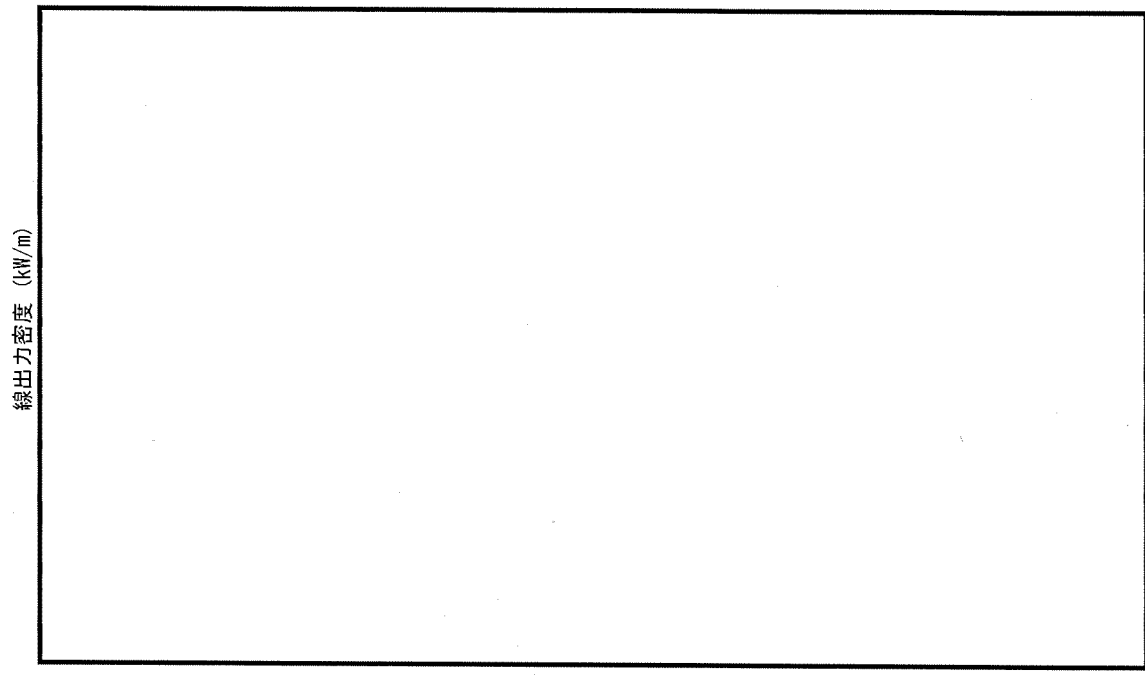


運転時間 (EFPH)

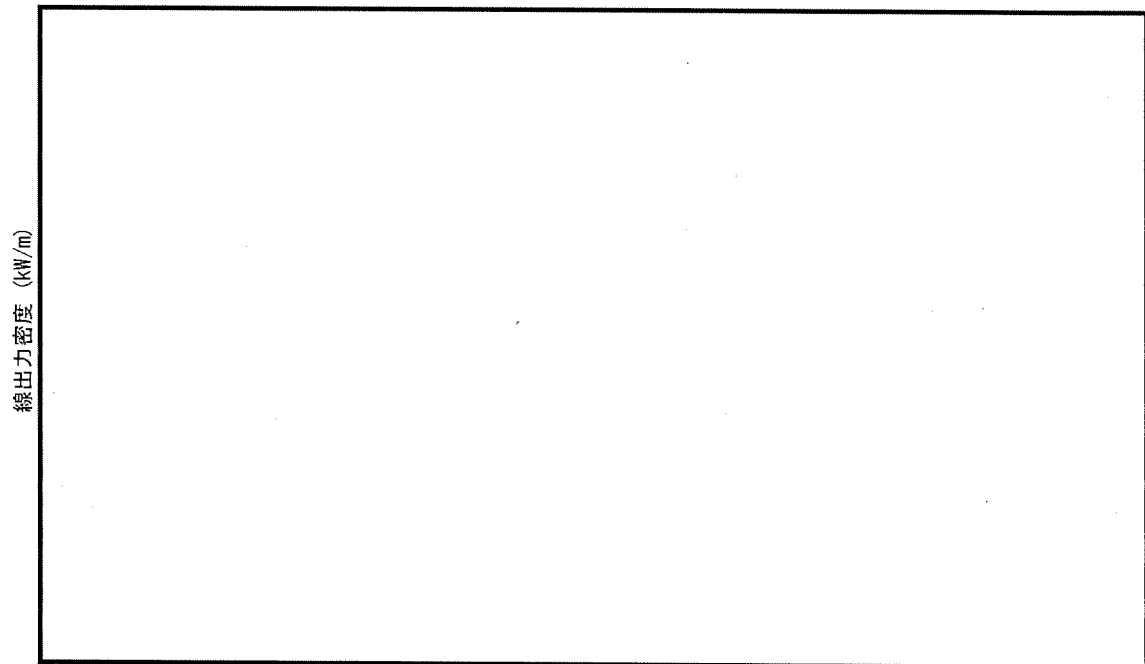


運転時間 (EFPH)

第3-2図 (1) 二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.8wt%) の出力履歴  
 (4 サイクル照射される二酸化ウラン燃料集合体中の燃料棒)

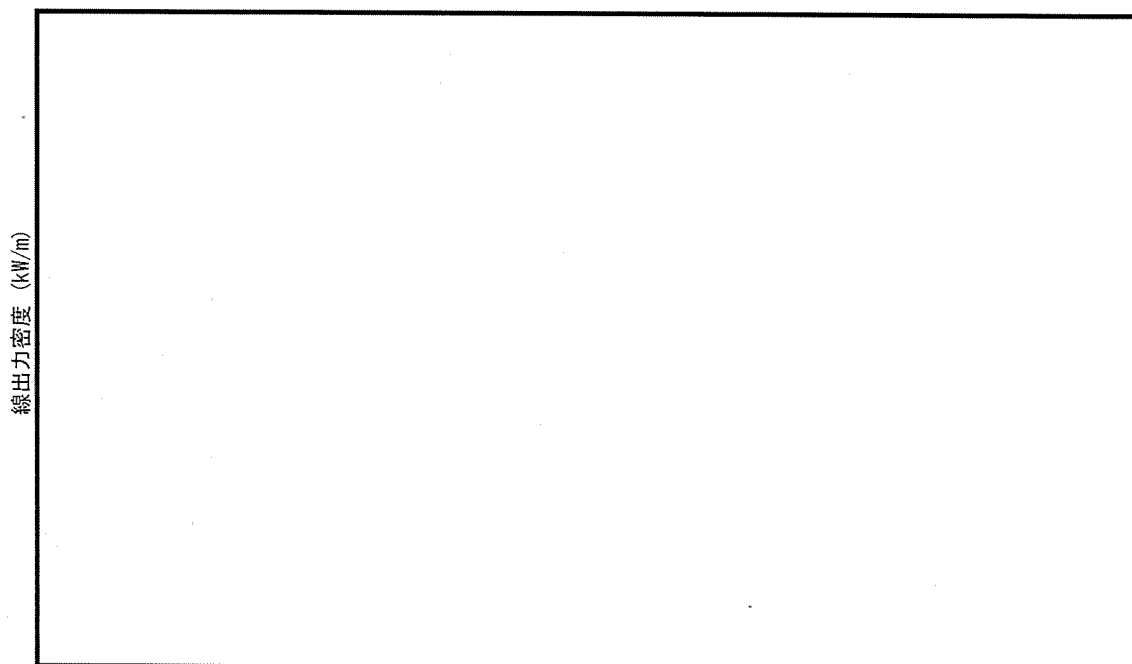


運転時間 (EFPH)

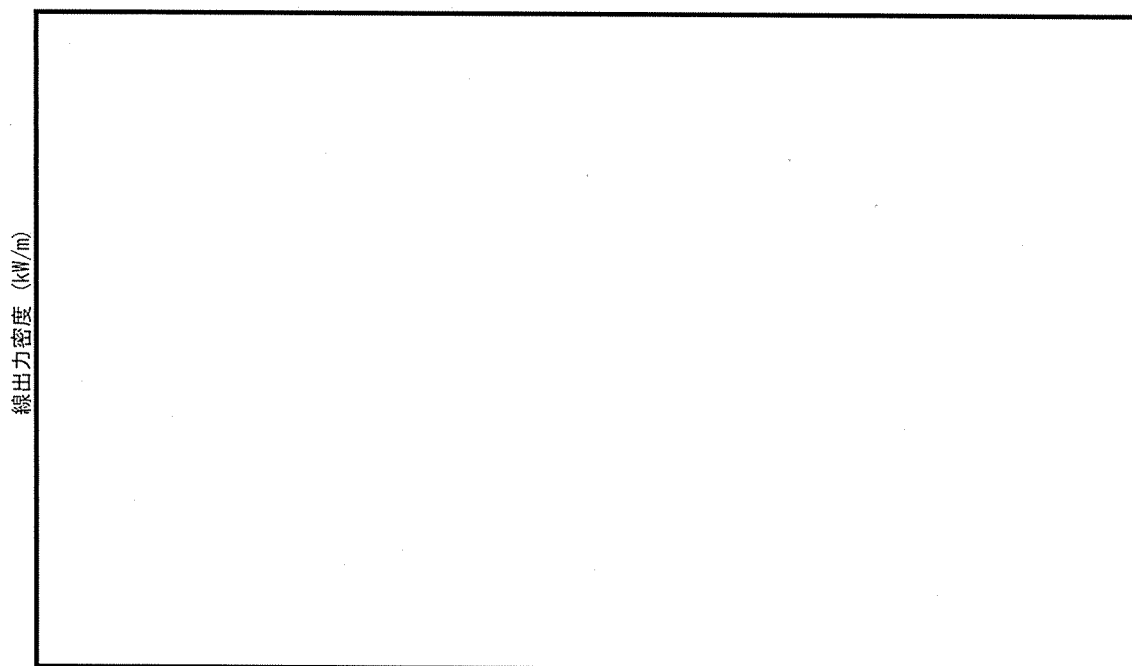


運転時間 (EFPH)

第 3-2 図 (2) 二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.8wt%) の出力履歴  
 (3 サイクル照射される二酸化ウラン燃料集合体中の燃料棒)

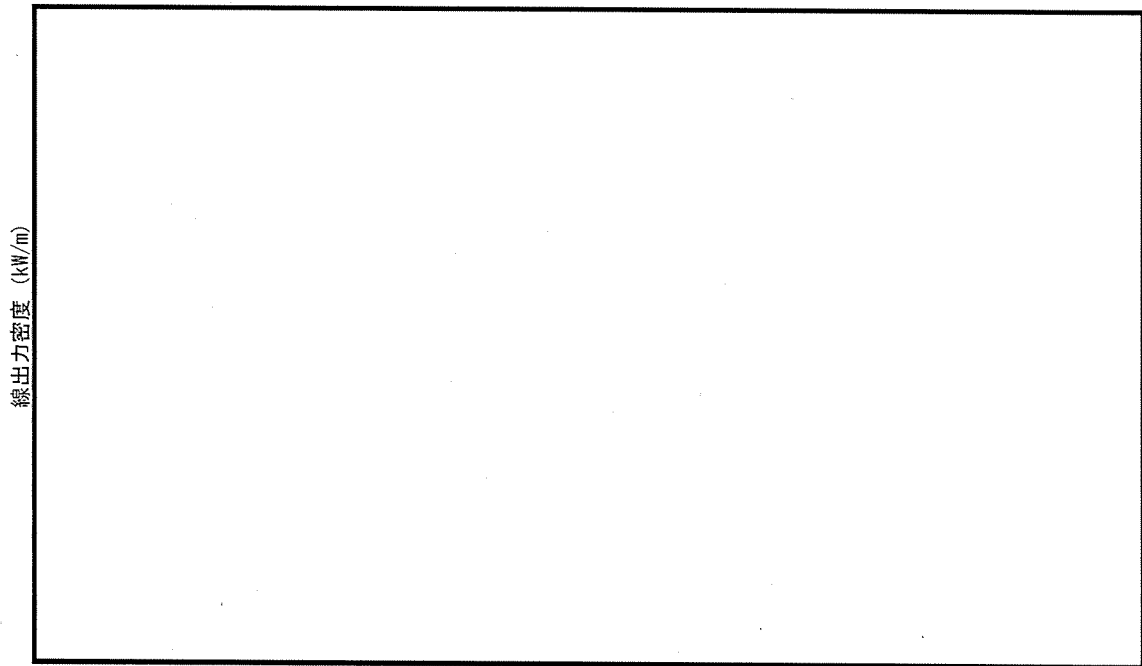


運転時間 (EFPH)

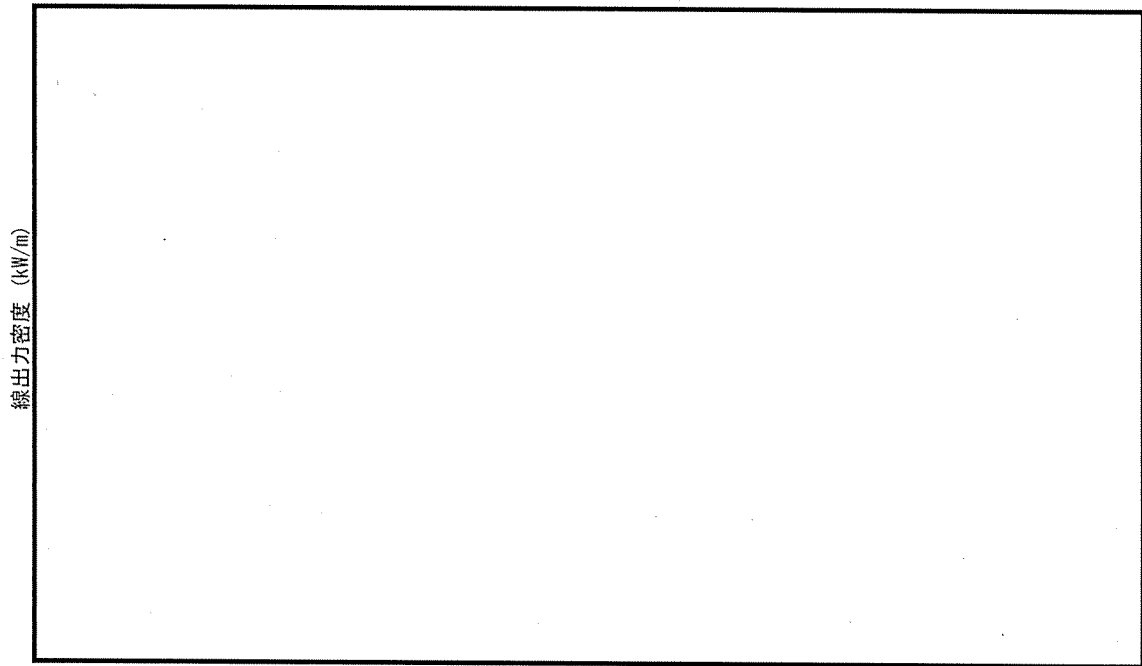


運転時間 (EFPH)

第3-2図 (3) 二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.8wt%) の出力履歴  
 (3 サイクル照射されるガドリニア入り燃料集合体中の燃料棒)

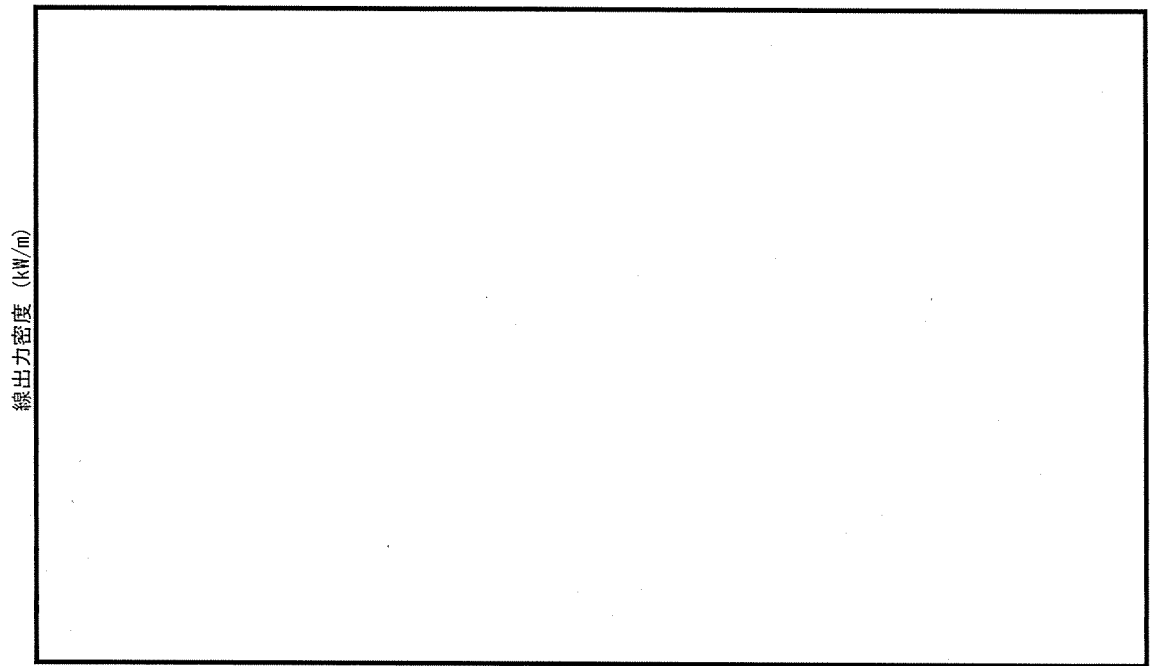


運転時間 (EFPH)

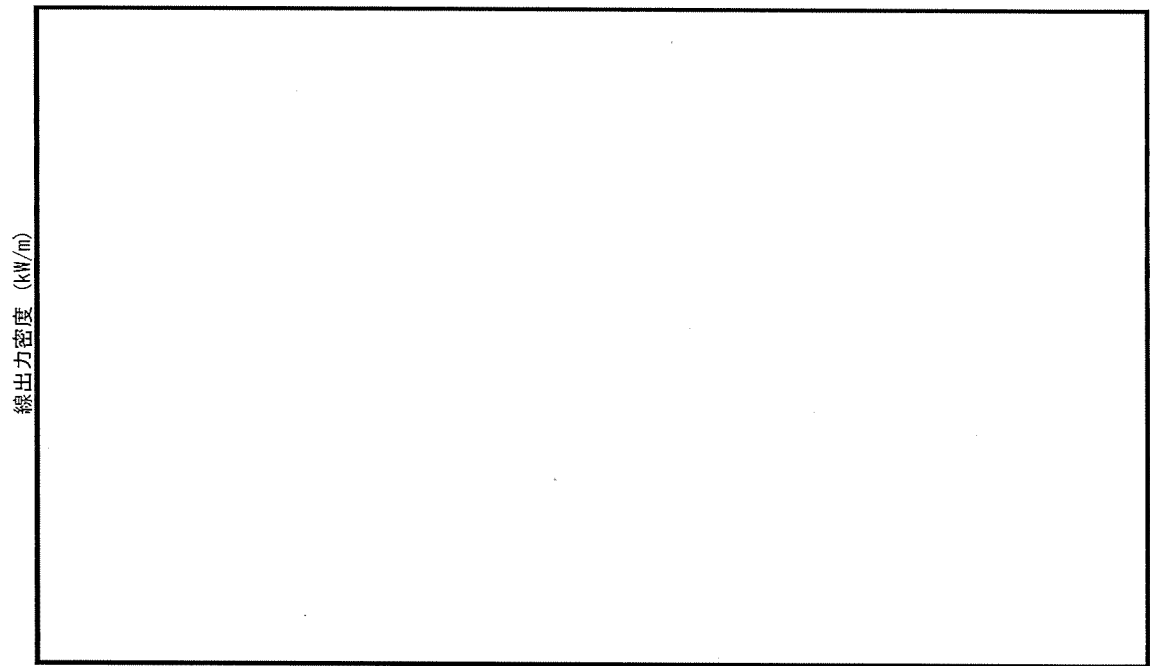


運転時間 (EFPH)

第 3-2 図 (4) 二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.1wt%) の出力履歴  
 (4 サイクル照射される二酸化ウラン燃料集合体中の燃料棒)

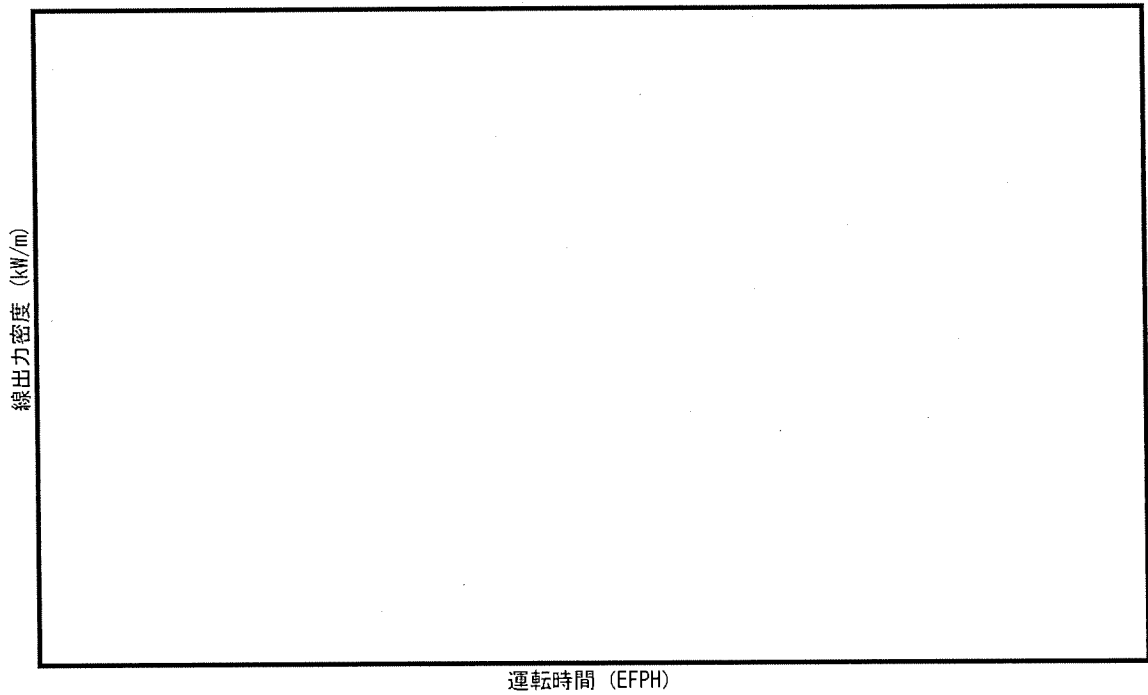
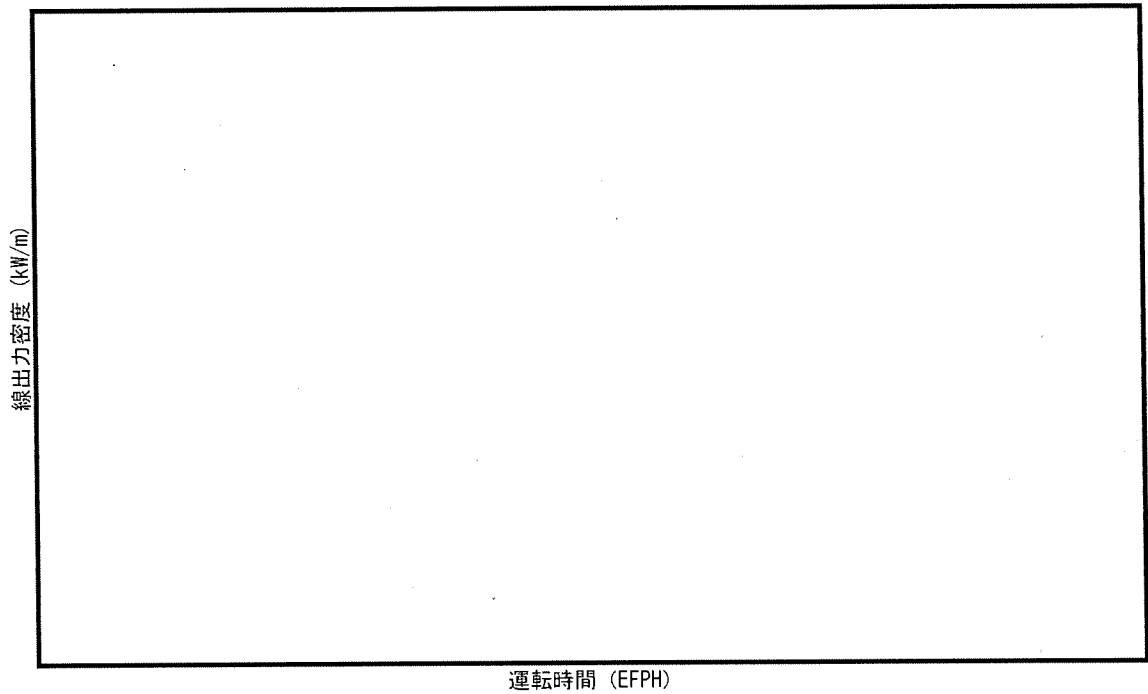


運転時間 (EFPH)



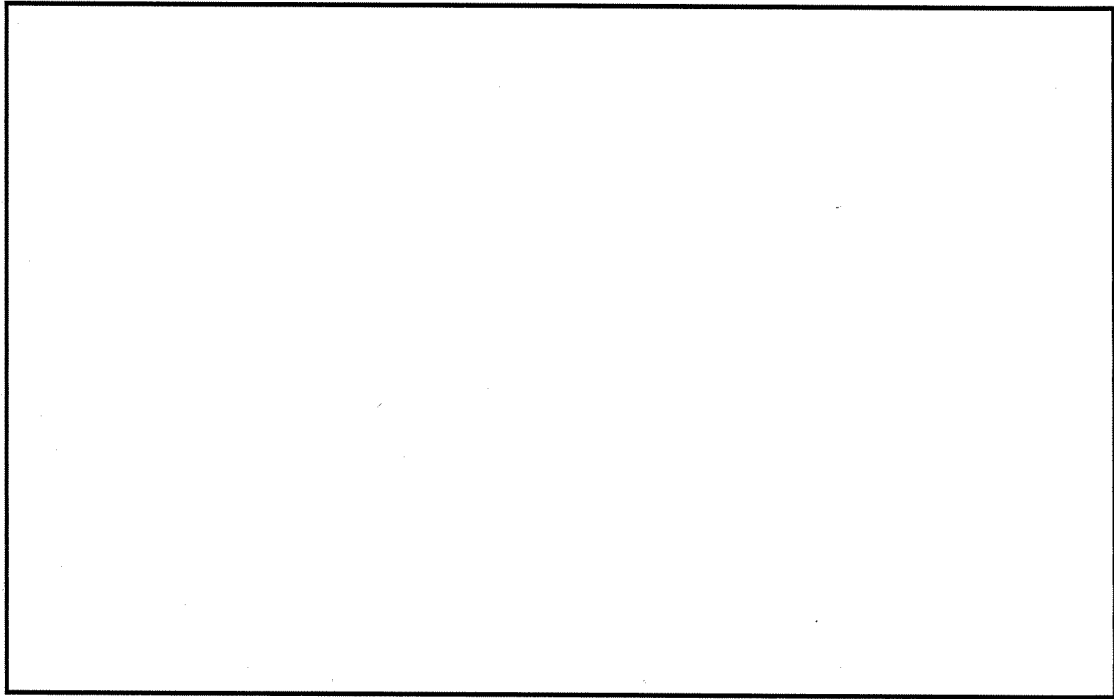
運転時間 (EFPH)

第 3-2 図 (5) 二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.1wt%) の出力履歴  
 (3 サイクル照射される二酸化ウラン燃料集合体中の燃料棒)



第 3-2 図 (6) ガドリニア入り燃料棒の出力履歴  
 (3 サイクル照射されるガドリニア入り燃料集合体中の燃料棒)





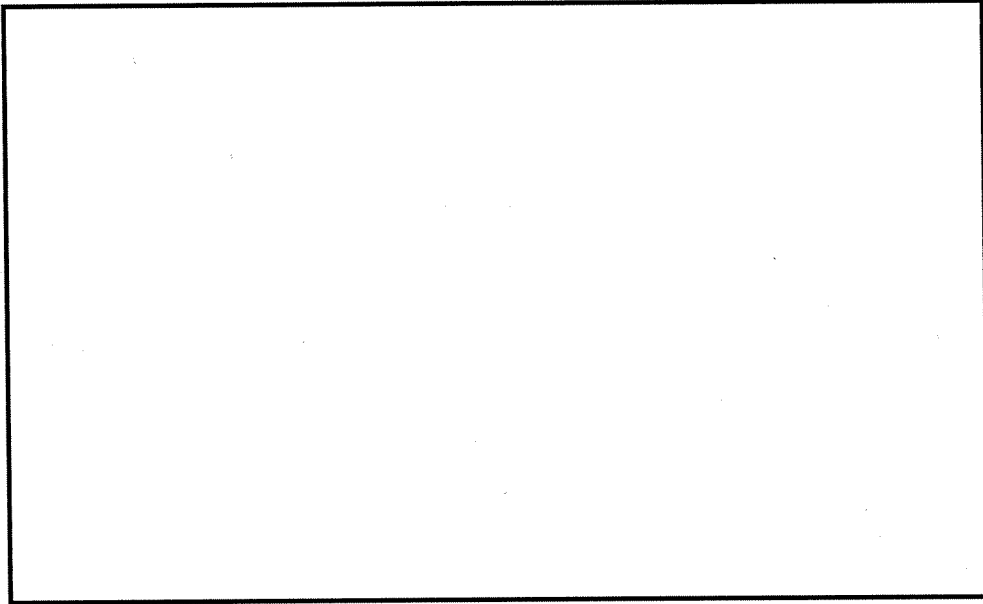
(注1) 燃料中心温度、被覆管ひずみ、被覆管応力及び被覆管疲労は、上図の局所的に出力を高く設定した箇所において評価する。

第 3-3 図 軸方向出力分布図

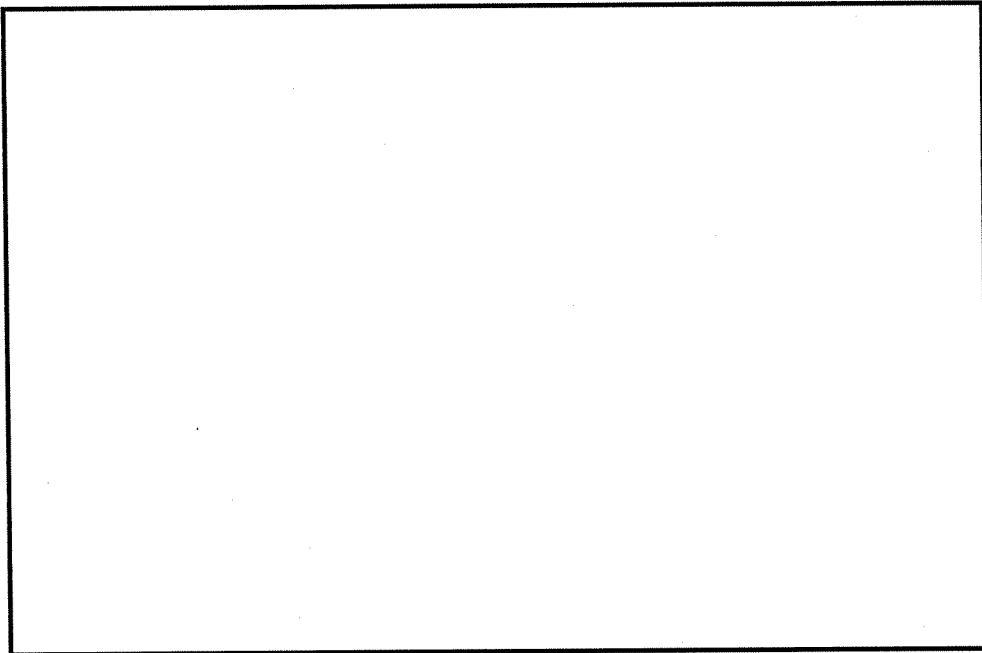
### 3.3.2 計算結果

各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴（比出力）と内圧履歴をまとめて、第 3-4 図及び第 3-5 図に示す。

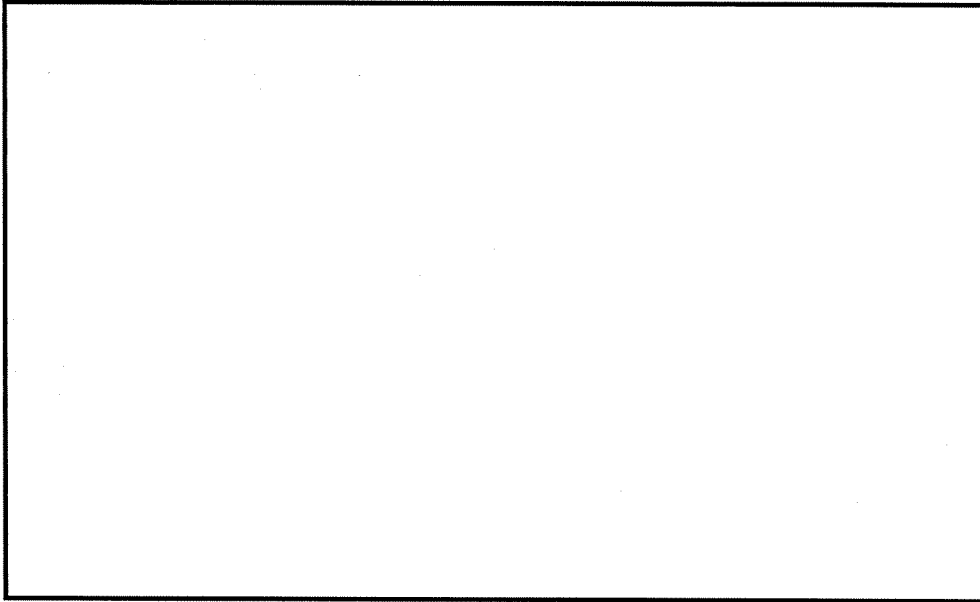
また、被覆管内径とペレット外径の変化について、第 3-6 図に示す。



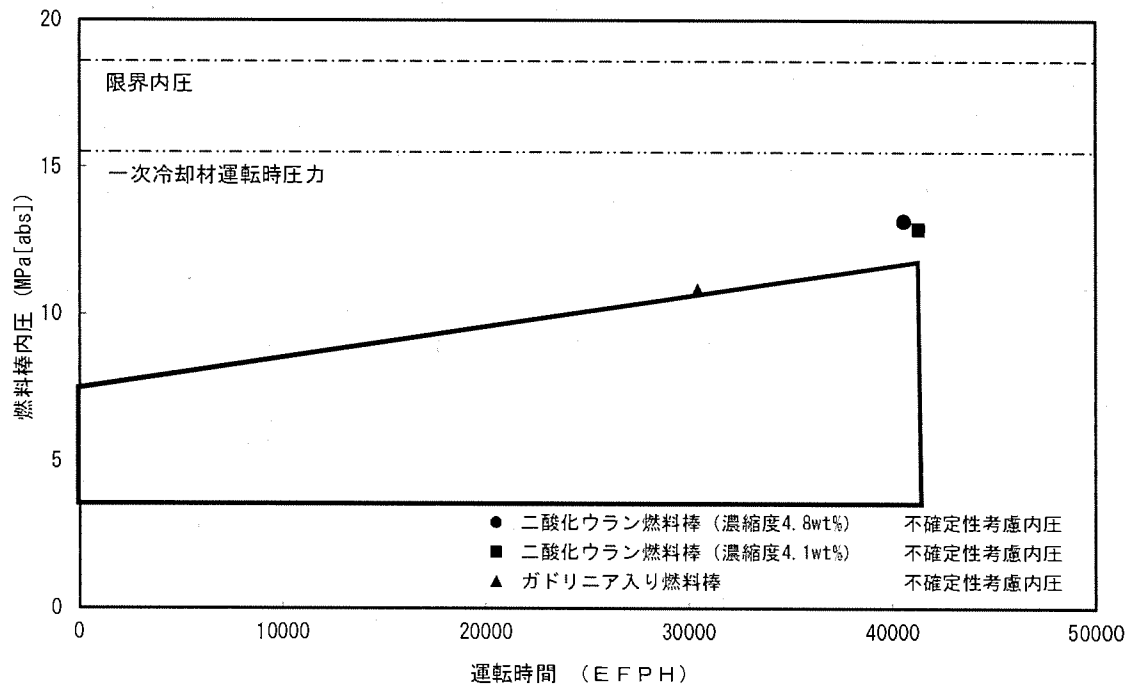
第3-4図 (1) 各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴 (通常運転時)  
(二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.8wt%))



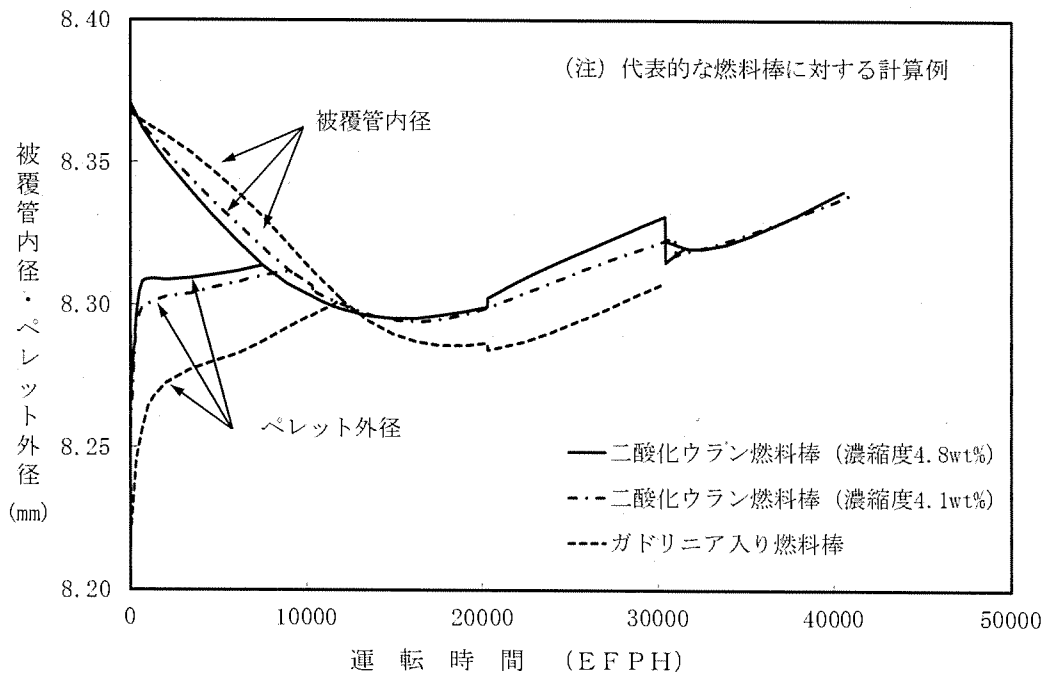
第3-4図 (2) 各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴 (通常運転時)  
(二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.1wt%))



第3-4図 (3) 各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴 (通常運転時)  
(ガドリニア入り燃料棒)



第 3-5 図 内圧評価上で最も厳しくなる燃料棒の内圧履歴 (通常運転時)



第3-6図 被覆管内径及びペレット外径変化

### 3.3.3 燃料棒の温度評価結果

ペレットが溶融すると体積が膨張し、被覆管に大きな応力が発生し、また、燃料スタックの不安定化あるいは、FP ガスの過度な放出・移動、更にはペレットと被覆管の有害な化学反応を引き起こす恐れがある。これらを防ぐため、燃料寿命中の燃料最高温度（燃料中心温度）を燃料の溶融点未満とする。

溶融点は、未照射状態における二酸化ウランペレットに対して 2,800°C、またガドリニア混合二酸化ウランペレットでは 2,700°C である。燃料中心温度の各燃焼度に対する計算上の制限値は、溶融点の燃焼に伴う低下、並びに計算モデルの不確定性及び燃料中心温度が高くなる方向に影響する主な燃料製造公差に基づく不確定性を基に燃料中心温度の不確定性 220°C を考慮し、以下のとおりとする。

#### (1) 二酸化ウランペレット

未照射燃料では不確定性 220°C を考慮し、2,580°C とする。以降燃焼に伴い 10,000MWd/t あたり 32°C の割合で低下するとする。

#### (2) ガドリニア混合二酸化ウランペレット

未照射燃料では不確定性 220°C を考慮し、2,480°C とする。以降燃焼に伴い 10,000MWd/t あたり 32°C の割合で低下するとする。

二酸化ウランペレット（濃縮度 4.8wt%、4.1wt%）については、燃料中心温度の評価が最も厳しくなるのは、燃料中心温度が最高となり、かつ、燃料中心温度と制限値との差が最も小さくなる燃料寿命初期である。この時点の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中心温度を第 3-3 表に示す。同表に示されるように、評価上最も厳しい燃料中心温度でも制限値を十分に下回っている。

ガドリニア混合二酸化ウランペレットについては、濃縮度を二酸化ウランペレットより低下させることにより最大線出力密度が二酸化ウラン燃料より低くなるような設計としている。ガドリニウム同位体の中性子吸収効果が減少する効果を考慮した線出力密度が最高となる時期において燃料中心温度が最大となり、かつ制限値に対する余裕が最小となるが第 3-3 表に示すように制限値を十分に下回っている。

第 3-3 表 燃料中心温度評価結果

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 (濃縮度 4.8wt%)	通常運転時 (41.1kW/m)	0	約 1,690	<	2,580
	運転時の異常 な過渡変化時 (59.1kW/m)		約 2,170		
二酸化ウラン 燃料棒 (濃縮度 4.1wt%)	通常運転時 (41.1kW/m)	0	約 1,690	<	2,580
	運転時の異常 な過渡変化時 (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
	運転時の異常 な過渡変化時 (44.3kW/m)	15,000	約 1,900	<	2,430



### 3.3.4 燃料棒の内圧評価結果

燃料棒の内圧評価は、各燃料棒の内圧評価結果を、実炉心において想定される照射条件を基に計算した、ギャップが増加しない限界内圧と比較することで行う。

#### (1) ギャップ増加限界内圧

ペレットと被覆管のギャップが増加しない限界内圧は、高燃焼度用 FPAC コードを用いてギャップ変化を計算することにより求める。すなわち、仮想的に初期ヘリウム圧力、FP ガス放出率及び燃料棒出力を順次高くすることにより、内圧を高くした場合の計算を行い、このときペレットと被覆管のギャップ変化を求める。そして、ギャップが最小となる、あるいは、一旦閉じたギャップが開き始める時点を求め、この時点での内圧を限界内圧とする。

限界内圧を一般化して求めるために、17 行 17 列型燃料と 14 行 14 列型（及び 15 行 15 列型）燃料の両タイプを包絡する限界内圧を求め、更に安全側に限界内圧が低くなる方向に影響する主な燃料製造公差に基づく不確定性及び評価モデルの不確定性を考慮して評価した結果、限界内圧は次のとおりとなった。

$$\text{限界内圧} = 18.6 \text{ MPa[abs]}$$

この値を判断基準として評価を行う。

#### (2) 内圧評価

製造時の燃料棒は、ヘリウムが加圧封入されているが、燃焼による FP ガスの放出等によって、燃料棒内圧は徐々に上昇する。

最大内圧を示す燃料棒内圧に、燃料棒内圧が高くなる方向に影響する主な燃料製造公差に基づく不確定性及び評価モデルの不確定性を考慮した結果を第 3-4 表に示す。同表より、種々の不確定因子を考慮しても、燃料棒の内圧は設計基準を満足している。

また、その燃料寿命中の内圧変化は第 3-5 図に示したとおりである。

第 3-4 表 燃料棒内圧評価結果 (通常運転時)

(単位 : MPa[abs])

種類	時期	内圧 <sup>(注1)</sup>			設計基準	設計比 <sup>(注2)</sup>
		最確値	不確定性	合計		
二酸化ウラン 燃料棒 (濃縮度 4.8wt%)				13.2	≤18.6	0.71
二酸化ウラン 燃料棒 (濃縮度 4.1wt%)				13.0	≤18.6	0.70
ガドリニア入り 燃料棒				10.9	≤18.6	0.59

(注 1) 最確値と不確定性を足し合わせ、小数点以下第 1 位に切り上げたものを合計としている。

(注 2) 設計基準値に対する評価値の比である。

### 3.3.5 被覆管の応力評価結果

被覆管の応力評価は、体積平均相当応力を被覆管の耐力と比較することで行う。

体積平均相当応力とは、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である。

被覆管の材料であるジルコニウム基合金の耐力は、高速中性子照射によって増加するが、比較的短時間の照射で飽和する。したがって、燃料寿命初期は未照射の耐力と、またそれ以外の時点では、照射材の耐力と比較する。ここで、未照射材及び照射材の耐力基準値は、それぞれ耐力実績データに基づき、データのばらつきを考慮して導いた値（また、耐力基準値は被覆管温度の関数としている）を用いる。照射材の設計基準の求め方を第3-7図に示す。

燃料寿命初期においては、被覆管とペレット間のギャップにより、被覆管には主に内外圧差による応力が発生するが、その値は小さい。燃焼が進むと被覆管は径方向内向きにクリープ変形（クリープダウン）し、ペレットはスエリングにより外径が増加し、ペレットと被覆管の接触が生じ被覆管応力が大きくなる。通常運転時におけるこのような被覆管とペレットの径変化を第3-6図に示す。

被覆管応力評価では、内外圧差及び接触圧（ペレット－被覆管相互作用）による応力、熱応力、水力振動による応力を考慮する。発生応力が厳しくなる運転時の異常な過渡変化時における評価結果を第3-5表及び第3-8図に示す。これより二酸化ウラン燃料棒（濃縮度4.8wt%、4.1wt%）及びガドリニア入り燃料棒での被覆管応力はいずれも設計基準を満足している。

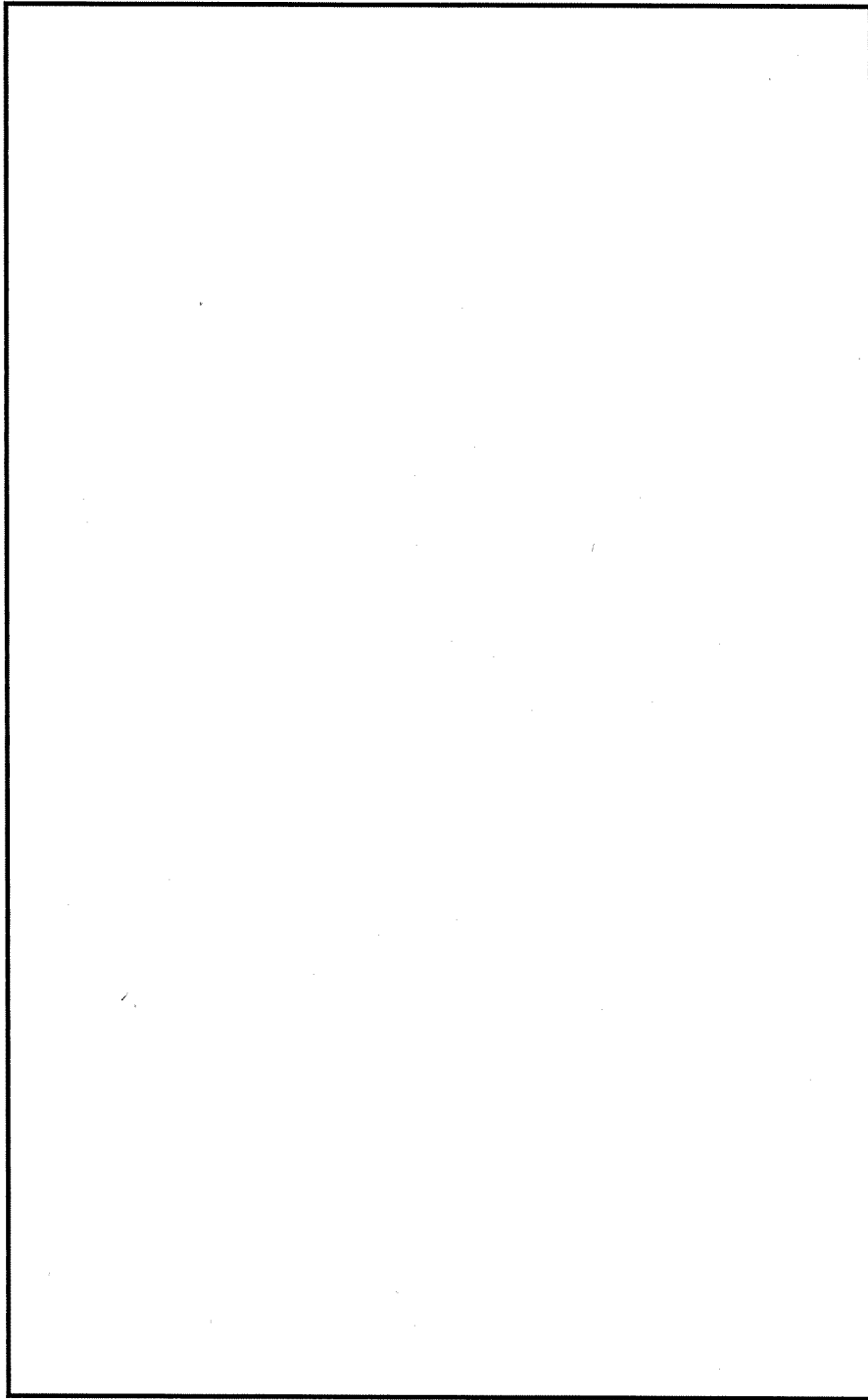
第3-5表 二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア入り燃料棒被覆管応力評価結果

(単位：MPa)

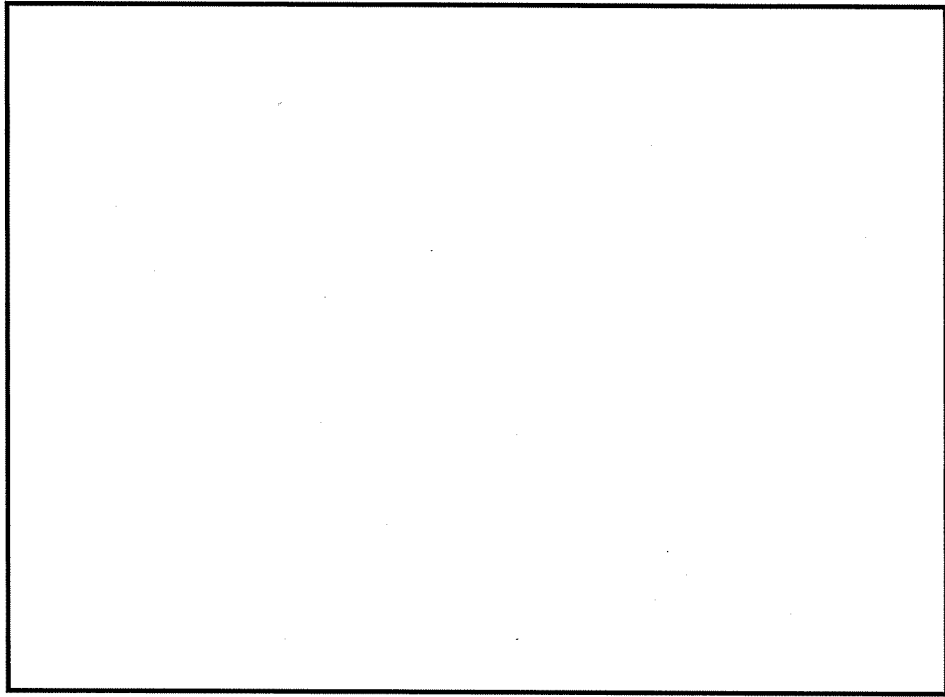
評価条件		運転時の異常な過渡変化時																	
		二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.8wt%)			二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.1wt%)			ガドリニア入り燃料棒											
項目	応力成分	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$	$\sigma_z$	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$	$\sigma_z$	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$	$\sigma_z$									
	1. 内外圧差及び接触 圧による応力	内面																	
外面																			
2. 熱応力	内面																		
	外面																		
3. 水力振動による応 力	内面																		
	外面																		
4. 合計応力 <sup>(注1)</sup> 1+2+3	内面																		
	外面																		
評価時点																			
体積平均相当応力 <sup>(注1)</sup>																			
設計基準 (被覆管耐力)																			
設計比 <sup>(注1)(注2)</sup>		0.57										0.49			0.49				
		0.57										0.49			0.49				

(注1) 上段は水力振動による応力を+方向に、下段は-方向にとったものである。

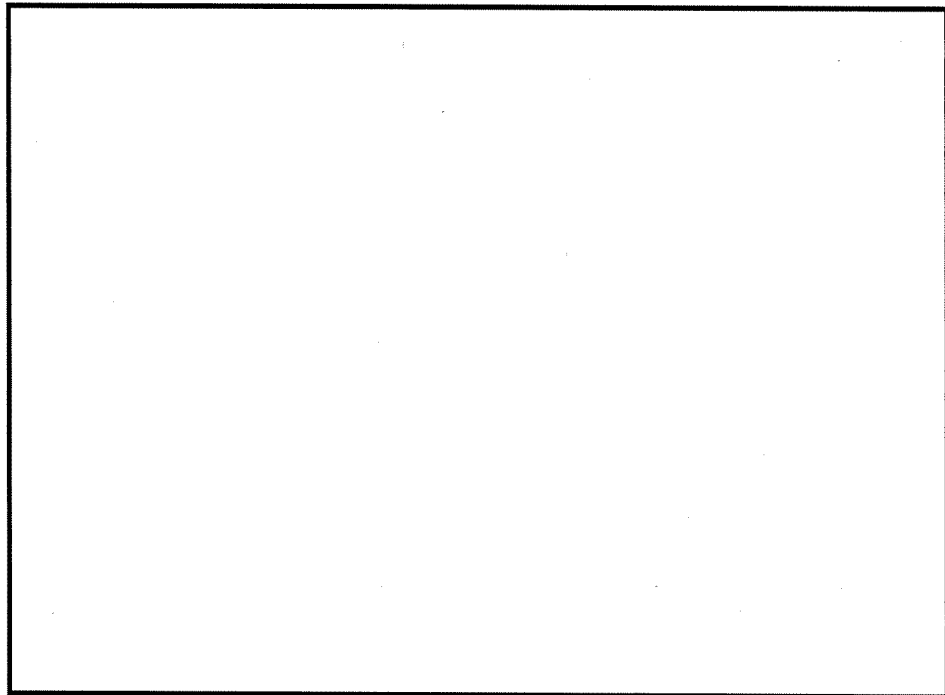
(注2) 設計基準 (被覆管耐力) に対する評価値との比である。



第 3-7 図 被覆管の応力評価における設計基準



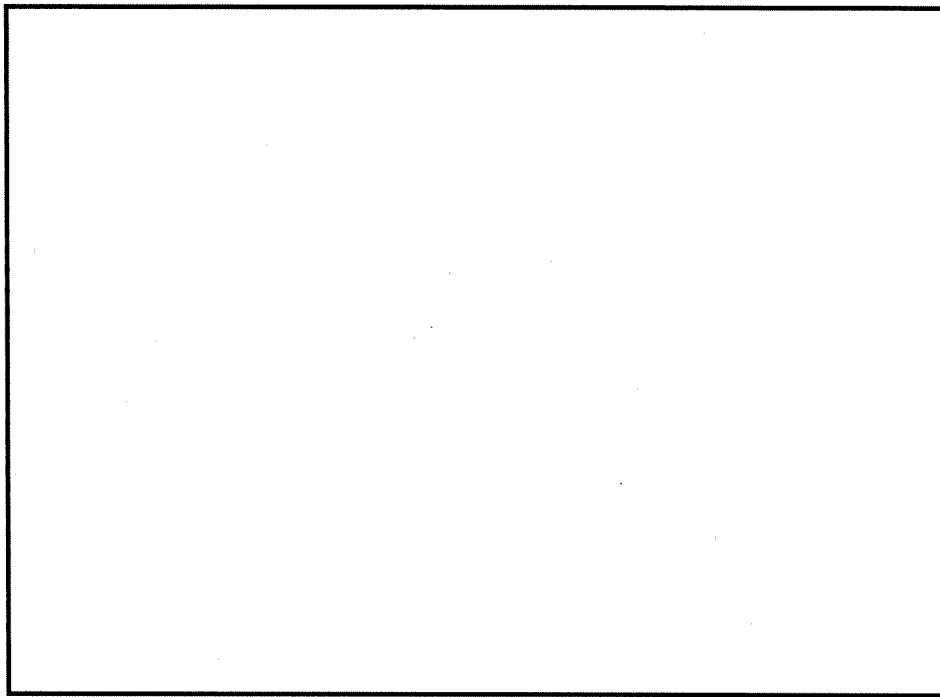
(濃縮度 4.8wt%)



(濃縮度 4.1wt%)

第 3-8 図 (1) 被覆管の応力履歴 (運転時の異常な過渡変化時)

(二酸化ウラン燃料棒)



第 3-8 図 (2) 被覆管の応力履歴 (運転時の異常な過渡変化時)  
(ガドリニア入り燃料棒)

### 3.3.6 被覆管のひずみ評価結果

被覆管の内圧は、燃料寿命初期においては 1 次冷却材運転圧力より低いので、被覆管は運転中、内外圧差による圧縮荷重を受け、ペレットに接触するまでクリープにより徐々に径が減少する。ペレットとの接触は照射の最も進んだ燃料棒の高出力部で生じ、それ以降はペレットのスエリングにより被覆管の径は増加をはじめ、最終的にはスエリングによる膨張速度と接触圧及び内圧によるクリープ速度が釣り合った状態で、径が徐々に増加する（第 3-6 図参照）。

通常運転時でのペレットのスエリングによる被覆管ひずみの増加は接触してから燃料寿命末期までのひずみ増加率が小さく、このような場合、被覆管は 10%以上のひずみに至るまで定常クリープ領域にあり、不安定化を生じない。

これに対して、運転時の異常な過渡変化時には、被覆管にはペレットと被覆管の接触後に引張ひずみが発生する。このため、応力評価と同様にペレットと被覆管の接触後引張ひずみは大きくなる。運転時の異常な過渡変化時における被覆管引張ひずみの変化量は、第 3-6 表及び第 3-9 図に示すとおり二酸化ウラン燃料棒（濃縮度 4.8wt%、4.1wt%）及びガドリニア入り燃料棒ともに設計基準 1%以下を満足している。

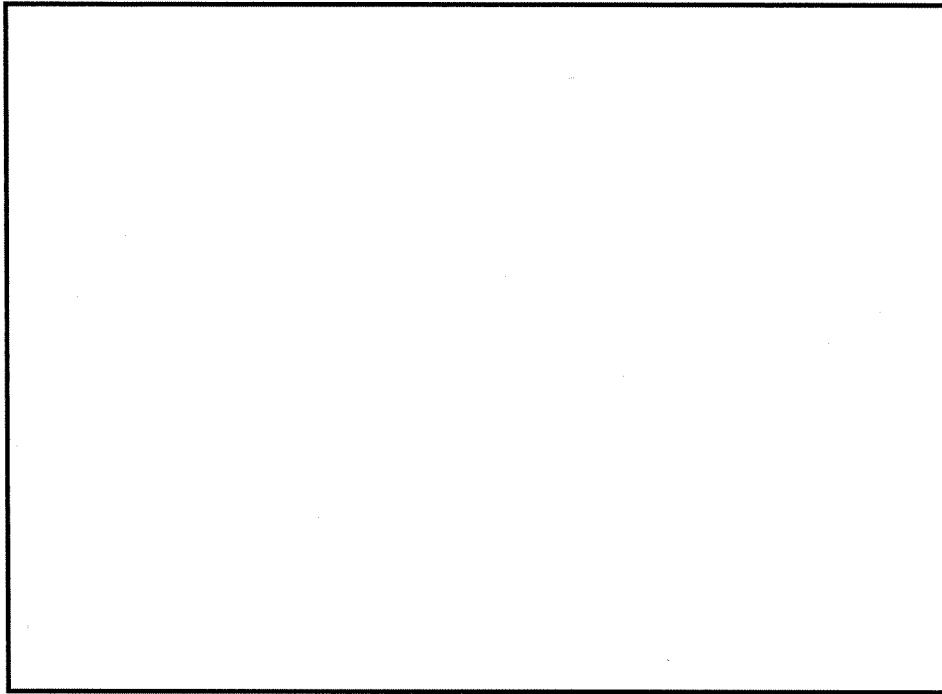


第 3-6 表 運転時の異常な過渡変化時の引張ひずみ評価結果

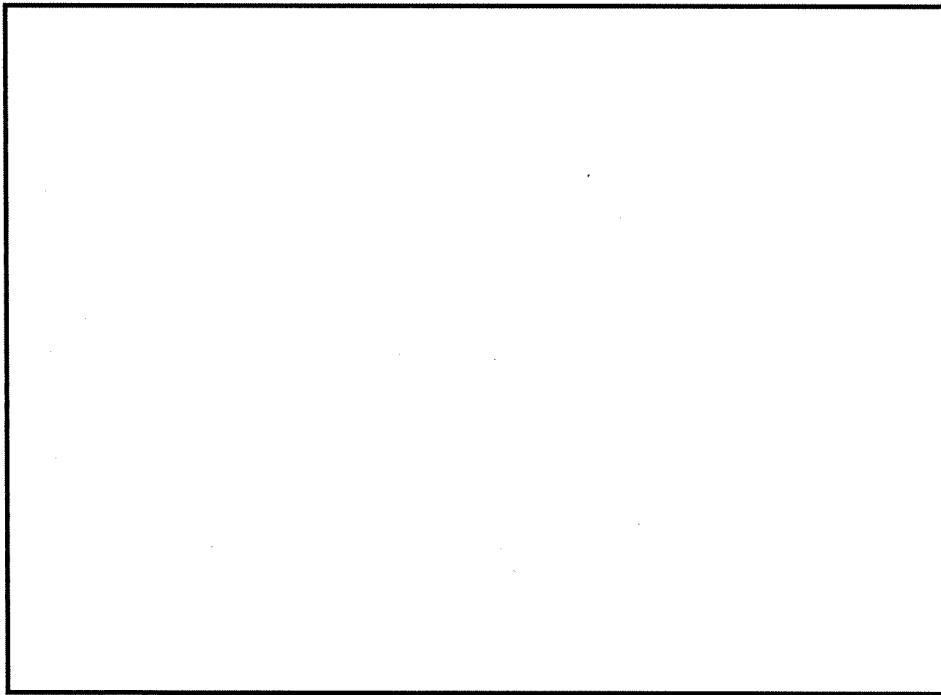
(単位：%)

種類	時期	ひずみ	設計基準	設計比 <sup>(注1)</sup>
二酸化ウラン 燃料棒（濃縮度 4.8wt%）		0.26	$\leq 1$	0.26
二酸化ウラン 燃料棒（濃縮度 4.1wt%）		0.23	$\leq 1$	0.23
ガドリニア入り 燃料棒		0.23	$\leq 1$	0.23

(注1) 設計基準値に対する評価値の比である。



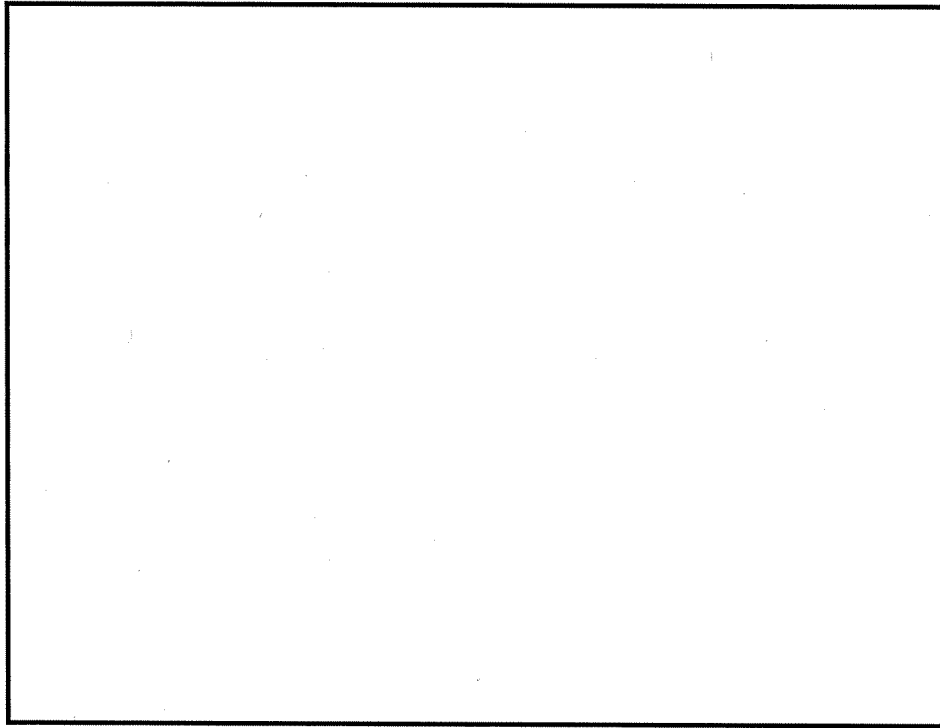
(濃縮度 4.8wt%)



(濃縮度 4.1wt%)

第3-9図 (1) 被覆管のひずみ履歴 (運転時の異常な過渡変化時)

(二酸化ウラン燃料棒)



第3-9図 (2) 被覆管のひずみ履歴 (運転時の異常な過渡変化時)  
(ガドリニア入り燃料棒)

### 3.3.7 被覆管の疲労評価結果

燃料棒は原子炉に装荷されてから取り出されるまでの間、出力変動及び圧力変動を受け、これにより繰返し応力が被覆管に加わる。この繰返し応力は、ASME Sec. IIIに準拠した方法により評価し、累積疲労サイクル数と設計疲労寿命との比として表される累積疲労損傷係数が1を超えないことを確認する。

#### (1) 疲労解析条件

疲労解析では、繰返し応力の発生原因となる条件の回数を燃料において14ヶ月4サイクル運転を仮定する（添付1参照）。

##### a. 起動・停止

起動・停止に応じて被覆管の応力は、低温停止状態から高温零出力時の値に変化する。

起動・停止は1サイクルあたり□回起こるとして評価する。応力の変動幅は燃料寿命初期が最も大きいので、燃料寿命中この値が繰り返されるものとして評価する。

##### b. 日間負荷変化サイクル

通常の日間負荷変化に安全側にすべての高温零出力時と高温全出力時との間の出力変動及び10%ステップ状変化と1ループにおける起動停止を安全側に考慮し、1サイクルあたり□回起こるとして評価する。

##### c. その他の過渡変化

その他の過渡変化として、高温全出力時からの原子炉トリップ、1次冷却材流量の部分喪失等をまとめて1サイクルあたり□回起こるとして評価する。

上記 a. から c. の過渡変件事象について、燃焼サイクル毎に繰返し応力の振幅を計算する。応力の振幅の算出には、a. 起動・停止については寿命初期における応力評価値を、b. 日間負荷変化サイクル及び c. その他の過渡変化については各サイクル末期の応力評価値を用いる。なお、このとき、被覆管に発生する応力としては、内外圧差及び接触圧による応力（ペレット-被覆管相互作用）及び熱応力を考慮している。過渡変化毎に応力の主応力成分（ $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ）より、それぞれの主応力の差 $|\sigma_r - \sigma_\theta|$ 、 $|\sigma_\theta - \sigma_z|$ 、 $|\sigma_z - \sigma_r|$ を求め、それぞれの主応力差について、最大値と最小値を求め、（最大値-最小値）/2より応力振幅 $S_{ait}$ を算出する。その上で、3つの応力振幅 $S_{ait}$ の中から最大となるものを $MAX S_{ait}$ とし、 $MAX S_{ait}$ に対応する許容繰返

し数  $N$  を、設計疲労曲線に基づき算出する。

各過渡変化のサイクル毎に求めた設計許容繰返し数  $N_1$ 、 $N_2$ 、……とそれに対応する応力の繰返し数  $n_1$ 、 $n_2$ 、……とから累積疲労損傷係数  $\sum n_i/N_i$  を求める。

設計疲労曲線としては、照射したジルカロイ-4 に関する第 3-10 図に示す Langer and O'Donnell のデータを使用する<sup>(2)</sup>。

この設計疲労曲線は、実測データに対して試料寸法、表面状況及び環境等の影響及びデータのばらつきを十分補償できるように交番応力値(時間の周期的な関数として変化する応力)についてはファクター2、繰返し数についてはファクター20の安全率をとって作成されたものである。なお、NDA 被覆管の設計疲労曲線としてもこの設計曲線が使用できることを確認している<sup>(3)</sup>。

## (2) 疲労解析結果

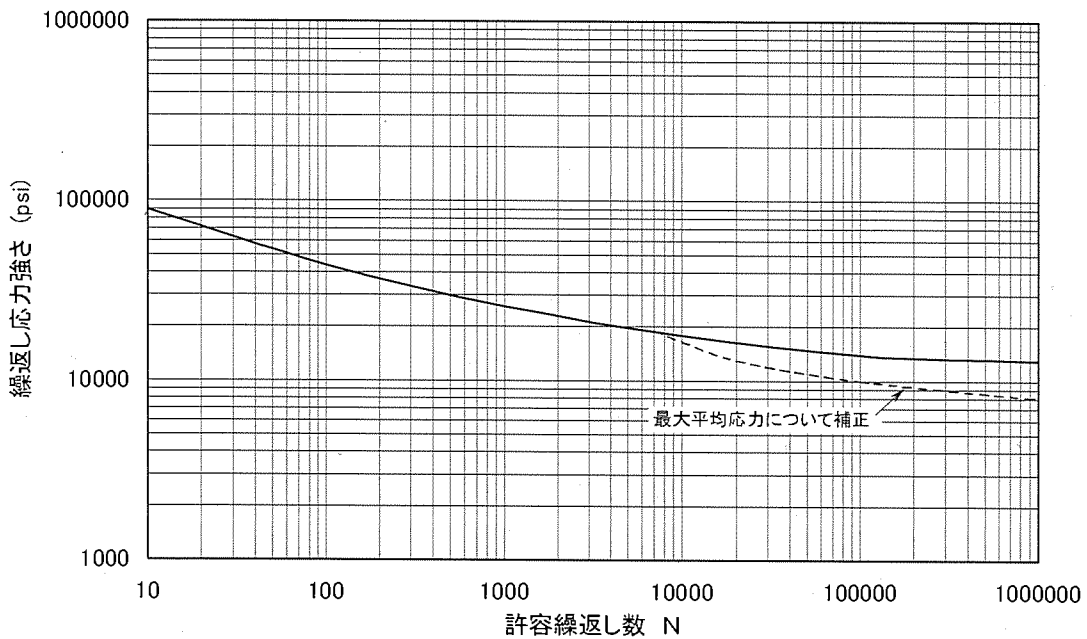
各事象に対する損傷係数を合計した結果を第 3-7 表に示すが、二酸化ウラン燃料棒(濃縮度 4.8wt%、4.1wt%)及びガドリニア入り燃料棒ともに設計基準 100%を満足している。

第 3-7 表 被覆管の疲労評価結果

(単位：%)

種類	位置	累積疲労損傷係数	設計基準	設計比 <sup>(注1)</sup>
二酸化ウラン 燃料棒 (濃縮度 4.8wt%)	内面	8.2	≦100	0.09
	外面	3.5		0.04
二酸化ウラン 燃料棒 (濃縮度 4.1wt%)	内面	4.4	≦100	0.05
	外面	2.1		0.03
ガドリニア入り 燃料棒	内面	3.0	≦100	0.03
	外面	1.4		0.02

(注 1) 設計基準値に対する評価値の比である。



第 3-10 図 NDA 被覆管の設計疲労曲線<sup>(2)</sup>

### 3.4 その他の考慮事項

#### (1) 燃料棒曲がり評価

燃料集合体の制御棒案内シンプルは再結晶焼鈍されており、冷間加工応力除去焼鈍された被覆管に比較して照射成長は小さいため、両者の照射成長差により支持格子の燃料棒拘束力が相互に作用し、基本的には燃料棒には圧縮力、制御棒案内シンプルには逆に引張力が作用する。

上記圧縮力により燃料棒には曲げモーメントが発生するが、燃料棒の曲がり、この曲げモーメントにより燃料棒に発生したクリープ変形が永久変形になったものと初期曲がりを加えたものである。

55,000MWd/t 先行照射燃料集合体の燃料棒曲がりを 48,000MWd/t 燃料集合体の実績と併せて第 3-11 図に示す。55,000MWd/t 先行照射燃料集合体の燃料棒曲がりは、NDA 被覆管を採用している燃料集合体とジルカロイ-4 被覆管を採用している燃料集合体とで同等である。また、燃料棒曲がりは、燃料寿命初期に進行するが、中性子照射に伴う支持格子拘束力の緩和により、燃料寿命末期では飽和傾向にある。

第 3-11 図に示すように、本燃料集合体は過度の燃料棒曲がりは発生しない。したがって、燃料棒曲がりの影響は評価不要である。

#### (2) トータルギャップ評価

##### a. 燃料集合体の伸び

燃料集合体は、制御棒案内シンプルの照射成長によって伸びる。それとともに、燃料棒と制御棒案内シンプルとの製造方法の違いによる照射成長の差が生じることから、制御棒案内シンプルには燃料棒から支持格子の拘束力に応じた軸方向の引張力が働く。この引張力により、制御棒案内シンプルに発生する照射クリープ伸びが永久変形となることによって、更に燃料集合体の伸びが増加する。したがって、燃料集合体の伸びは炉心板と燃料集合体が干渉しないように制限する必要がある。

燃料集合体の伸びについて、実績を第 3-12 図に示す。55,000MWd/t 先行照射燃料集合体の燃料集合体の伸びは、ジルカロイ-4 被覆管を採用している燃料集合体より NDA 被覆管を採用している燃料集合体が小さい。また、ジルカロイグリッド燃料集合体（ジルカロイ-4 被覆管）の燃料集合体の伸びは、48,000MWd/t 燃料集合体の実績と同等であり、中間部支持格子の差による燃料集合体の伸びへの影響は認められない。したがって、NDA 被覆管を採用する本燃料集合体の伸びは、48,000MWd/t 燃料集合体のそれよりも小さくなる。

設計においては、55,000MWd/t までの燃料集合体の伸びを考慮しても、上部及び下部炉心板と燃料集合体との軸方向ギャップが閉塞することのないように、製造時の燃

燃料集合体の全長を設定している。ここで、本燃料集合体の伸びは保守的に48,000MWd/t燃料集合体の設計線を用いて評価している。

b. 燃料棒と上部及び下部ノズルの間隔

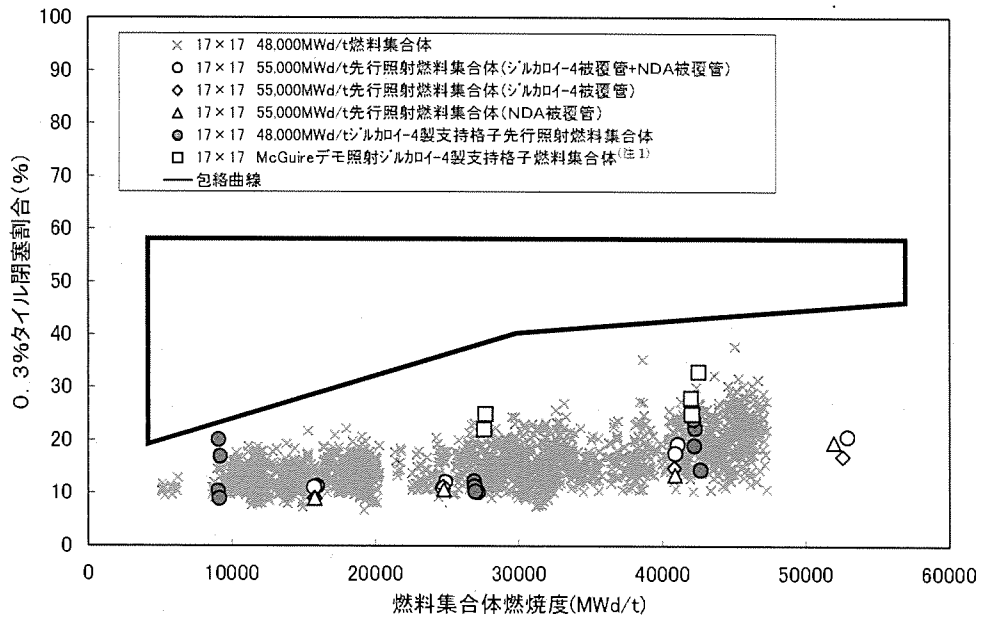
燃料棒と上部及び下部ノズルとの間隔の合計（以下「トータルギャップ」という。）は、燃料棒の照射成長による伸びが燃料集合体の伸びよりも大きいため、燃焼とともに減少する。したがって、トータルギャップ減少量は燃料棒とノズルが干渉しないように制限する必要がある。

トータルギャップの減少量について、実績を第3-13図に示す。照射成長がジルカロイ-4より小さいNDA被覆管を採用する燃料集合体はジルカロイ-4被覆管を採用する燃料集合体と比べ、トータルギャップの減少量が小さくなることが認められる。

設計においては、61,000MWd/t（燃料集合体で55,000MWd/tに相当）までの燃料棒の伸びを考慮してもトータルギャップが閉塞することのないように、製造時の燃料棒と上部ノズルとの軸方向ギャップを設定している。

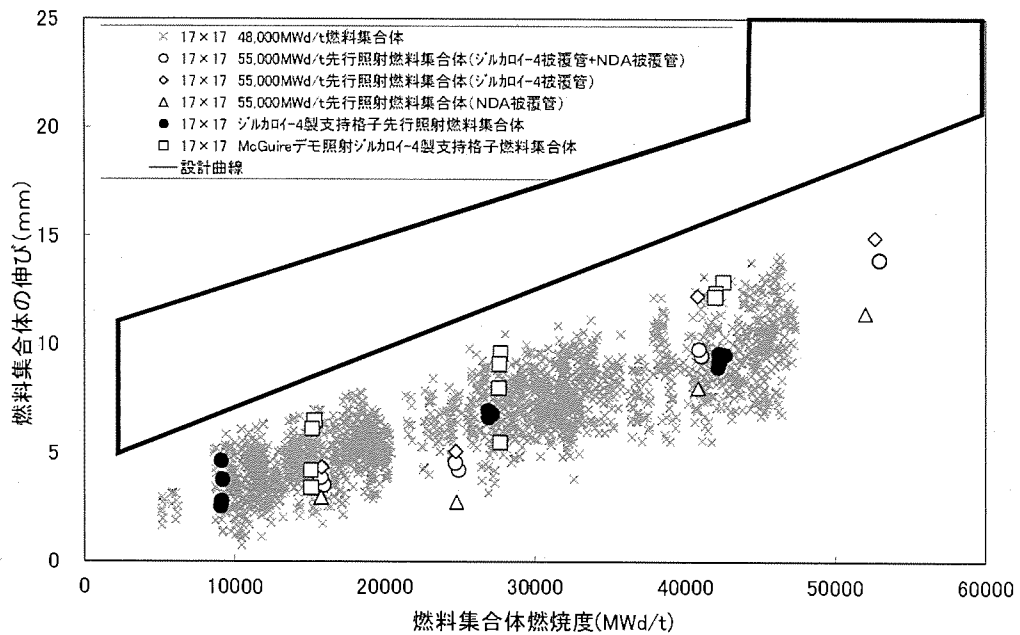
ここで61,000MWd/tまでの燃料棒の伸びは、保守的にジルカロイ-4被覆管の照射成長の実績データに基づき、ばらつきを考慮して設定している。



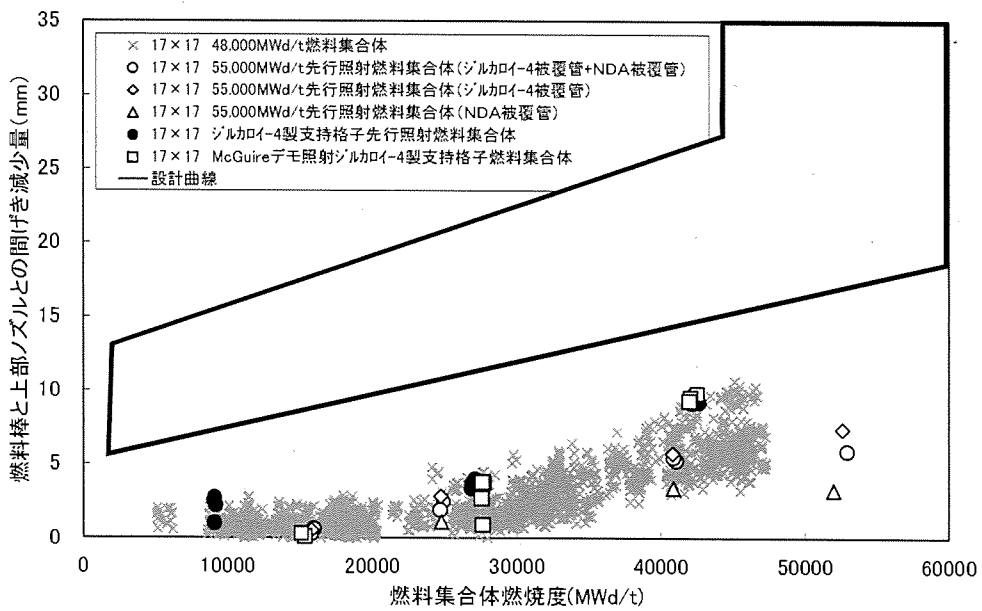


(注1) McGuire デモ照射ジルカロイ-4 製支持格子燃料の段数は 8 段であり、国内向け燃料よりも 1 段少ない。

第 3-11 図 燃料棒間隔の閉塞割合 <sup>(4)</sup>



第 3-12 図 燃料集合体の伸び <sup>(4)</sup>



第 3-13 図 トータルギャップ減少量<sup>(4)</sup>

(3) 被覆管外面腐食及び水素吸収量評価

燃料の高燃焼度化に伴って、機械的健全性の観点から、被覆管外面腐食及び被覆管水素吸収量について考慮する必要がある。NDA 被覆管の腐食メカニズムはジルカロイ-4 被覆管と同様であり、したがって、NDA 被覆管の腐食モデル式は第 3-8 表に示すジルカロイ-4 被覆管のモデル式と同様とする。ここで NDA 被覆管の腐食特性（原子炉外腐食試験、腐食速度比から低 Sn ジルカロイ-4 に対して改良効果約 20%）を考慮した。NDA 被覆管の原子炉内腐食量については、実測値と予測値を第 3-14 図に比較した。第 3-14 図に示すとおり、被覆管腐食モデルは実測値を適切に予測していることから、高燃焼度用 FPAC コードにより NDA 被覆管の腐食量を適切に評価できる。

また、NDA 被覆管の原子炉内水素吸収量の実測値と予測値を第 3-15 図に示す。ここでは腐食量の予測値に対し、被覆管の腐食により発生した水素の一部が酸化膜厚さに応じてある割合で被覆管に取り込まれるとして NDA 被覆管の水素吸収量を計算した。第 3-15 図に示すとおり、水素吸収モデルは実測値を適切に予測していることから、高燃焼度用 FPAC コードにより NDA 被覆管の水素吸収量を適切に評価できる。

以上より、原子炉内滞在中に生じる腐食による被覆管肉厚の最大減肉量を高燃焼度用 FPAC コードにより評価した結果、約 % となり、被覆管の機械的健全性の観点から目安としている 10% 減肉以下<sup>(注1)</sup>である。

また、被覆管の最大水素吸収量を高燃焼度用 FPAC コードにより評価した結果、約 ppm となり、原子炉外試験及び照射試験により延性が確保されていることが確認できる約 800ppm 以下である。

---

(注 1) V ノッチ疵を有するジルカロイ被覆管の機械特性試験結果に基づき、被覆管肉厚の 10% 深さ程度までは機械的特性への影響がわずかであることを参考に設定

第 3-8 表 腐食評価式

遷移領域前

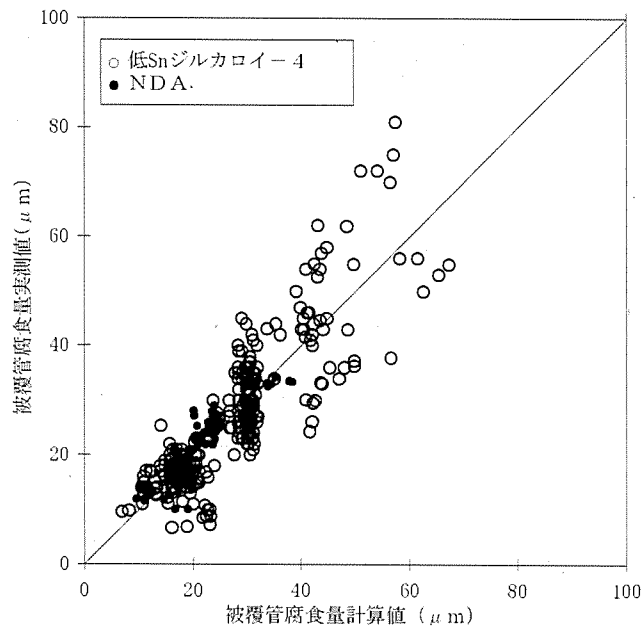
$$(dS^n / dt) = A \exp(-Q_1 / RT)$$

遷移領域後

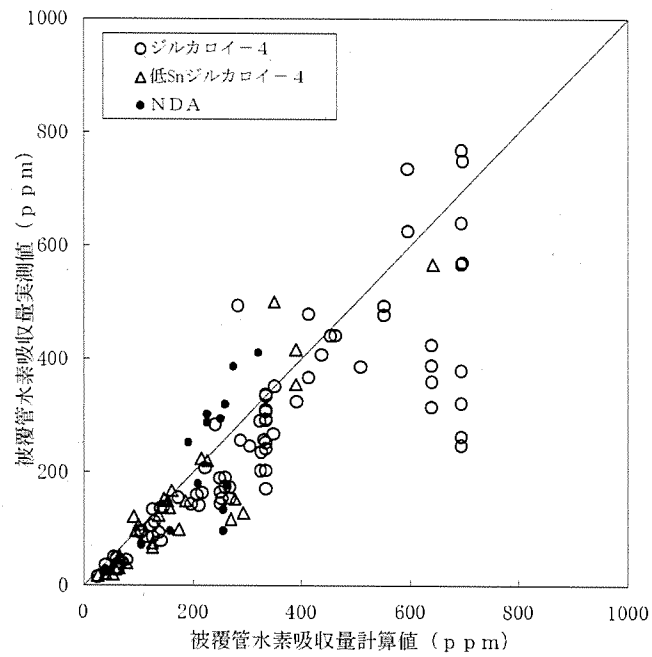
$$(dS / dt) = B \exp(-Q_2 / RT)$$

ここで、

- $S$  : 酸化膜厚さ
- $t$  : 時間
- $n$  : 定数
- $Q_1, Q_2$  : 活性化エネルギー
- $R$  : ガス定数
- $T$  : 被覆管と酸化膜との界面温度
- $A, B$  : 関数



第3-14図 被覆管腐食量（最大酸化膜厚）の実測値と予測値の比較



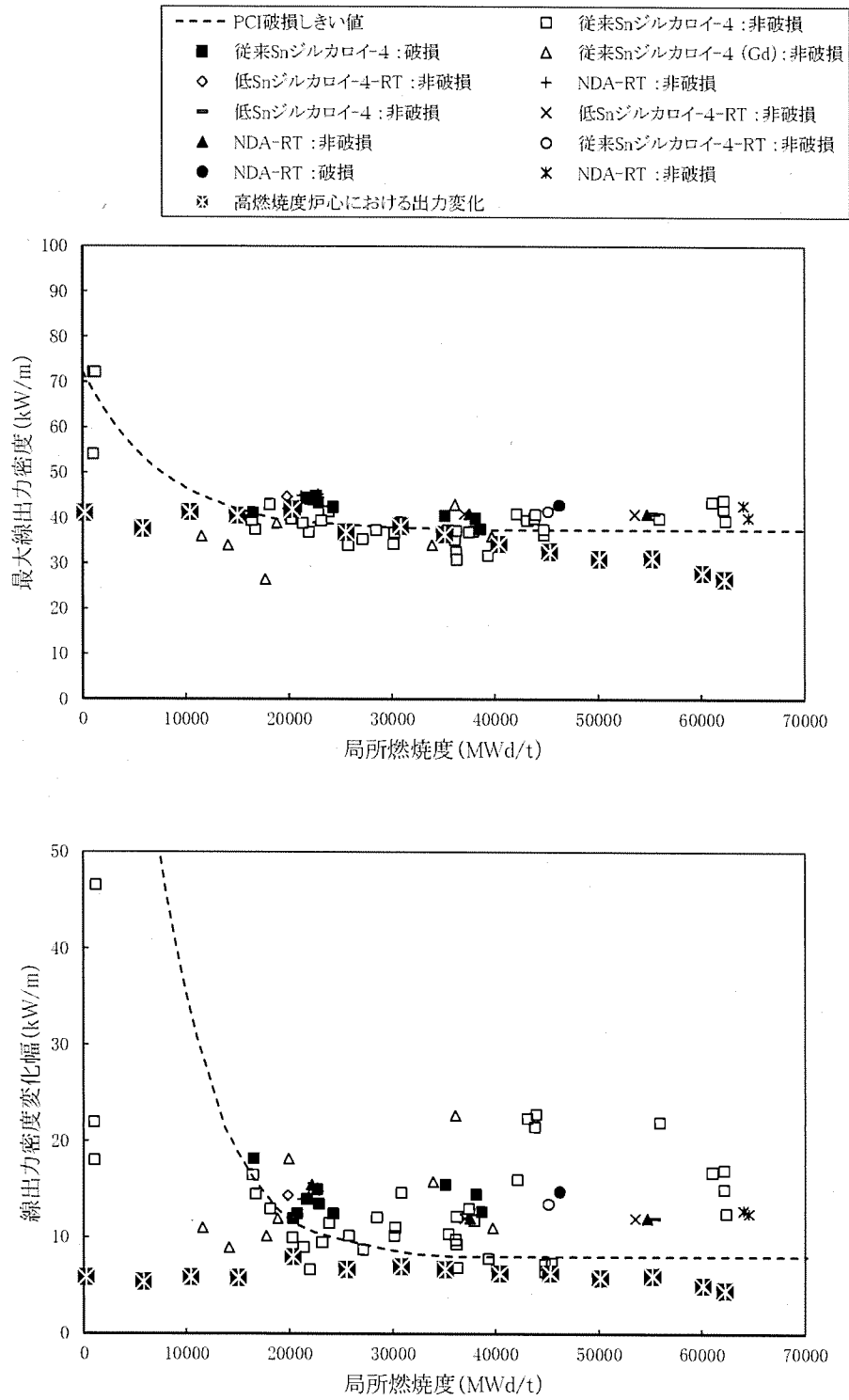
第3-15図 被覆管水素吸収量の実測値と予測値の比較

#### (4) PCI 評価

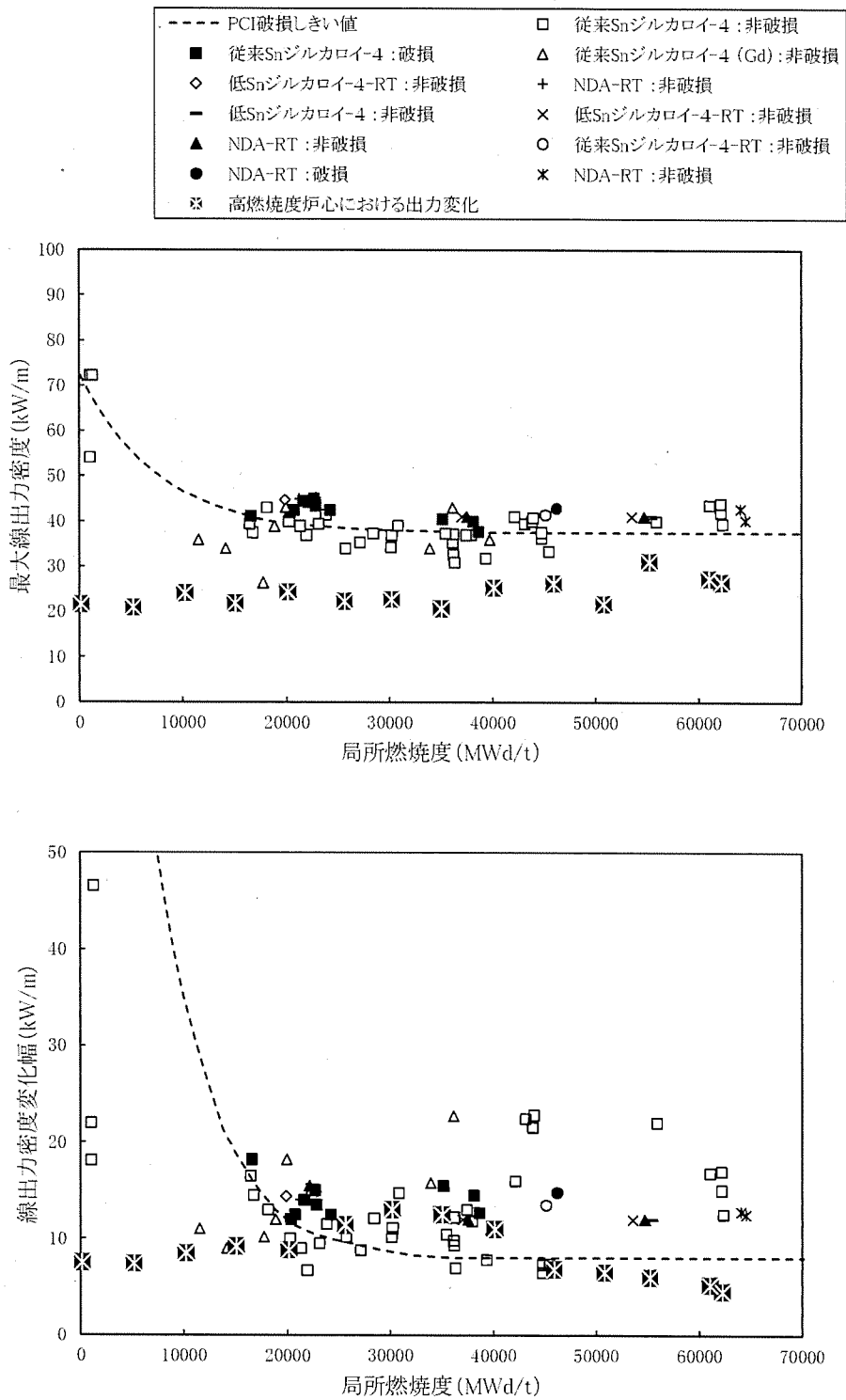
NDA 被覆管の出力ランプ試験データを第 3-16 図に示す。被覆管の PCI 破損限界は、高燃焼度領域まで PCI 破損しきい値以上であることが確認でき、NDA 被覆管に対して安全側に PCI 破損しきい値が適用できる。

PCI 破損は、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時に PCI 破損しきい値を超えた場合に起こることが経験的に知られている。

第 3-16 図に示したとおり、運転時の異常な過渡変化時の出力は、PCI 破損しきい値以下であり、PCI 破損は発生しない。また、ガドリニア入り燃料棒では出力が高くならないように、濃縮度を低下させているので PCI 破損は生じない。



第3-16 図 (1) 被覆管の出力ランプ試験結果  
 (最大線出力密度が最大の場合の出力変化)



第3-16図 (2) 被覆管の出力ランプ試験結果  
(線出力密度変化幅が最大の場合の出力変化)



(5) クリープコラプス評価

燃料棒が非加圧又は低加圧でペレットに大きな焼きしまりが生じると、ペレットスタックの一部に軸方向のギャップが生じる可能性がある。その位置で1次冷却材圧力による被覆管の外圧クリープで偏平化し、座屈して破損に至る現象をクリープコラプスという。

初期のPWR燃料で発生したクリープコラプスについては、ヘリウム加圧の採用、ペレットの焼きしまり特性の改善により、現在では発生していない。

高密度ペレットの照射中の焼きしまりは小さいこと、また、ヘリウム加圧を採用していることからクリープコラプスは発生しないと判断できる。

(6) フレッシング摩耗評価

フレッシング摩耗は、接触面の周期的相対振動により起こる損傷であるが、燃料集合体でこの現象が起こる可能性があるのは燃料棒と支持格子の接触部であり、摩耗の程度は、燃料棒と支持格子の材料の組み合わせや、支持格子のばね力に依存する。

a. 析出硬化型ニッケル基合金製の最上部及び最下部支持格子

析出硬化型ニッケル基合金（以下「718合金」という。）製の支持格子ばねは、中性子の照射により応力緩和するが、燃料棒と支持格子が接触していれば、フレッシング摩耗量を十分小さく保てること、実機条件を模擬した原子炉外の流水試験で分かっている。したがって、燃料寿命中燃料棒と支持格子が接触していれば良い。第3-17図<sup>(5)</sup><sup>(6)</sup>に支持格子拘束力緩和のデータを示す。これより、支持格子拘束力は燃焼初期に大きく緩和するものの、その後飽和傾向を示し、高燃焼度での支持格子拘束力緩和率は1を超える（非接触となる）ことはないと考えられる。

b. ジルカロイ-4の中間部支持格子

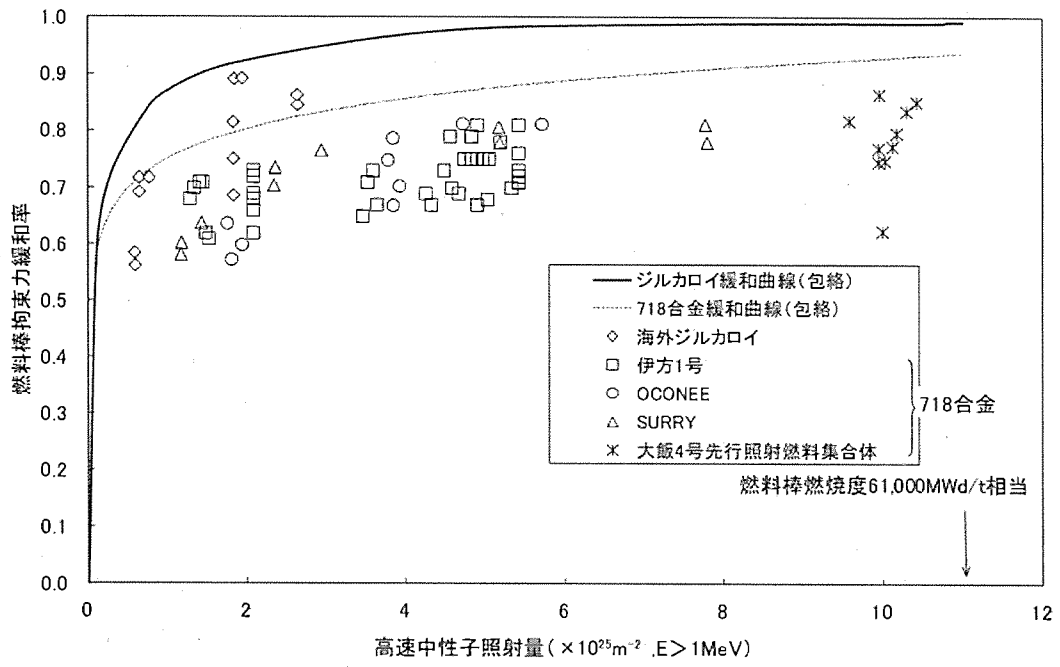
ジルカロイ-4製支持格子の拘束力緩和データを、718合金製支持格子データと併せて第3-17図に示す。同図から、ジルカロイ-4製支持格子の拘束力緩和が大きいことが確認できる。しかし、718合金製支持格子で確認したように、拘束力緩和は燃料寿命末期において飽和することを考えると、ジルカロイ-4製支持格子の場合でも、燃料寿命末期まで支持格子拘束力緩和率が1を超える（非接触となる）ことはないと考えられる。

ジルカロイ-4製支持格子についても、718合金製支持格子と同様、燃焼期間中において燃料棒と支持格子ばねの接触が保たれていればフレッシング摩耗が生じない。さらに、照射済み燃料に対する照射後燃料棒引抜きにおいて、支持格子拘束力が

残存していること、即ち、燃料寿命末期でも支持格子と燃料棒の接触が保たれることを確認している。また、燃料棒には、フレットング摩耗等の外観異常も認められていない。

以上述べたように、燃料集合体に用いている 718 合金製及びジルカロイ-4 製支持格子と燃料棒との接触は、燃料寿命末期においても保たれており、フレットング摩耗は十分小さく燃料棒の健全性が損なわれることはない。

なお、原子炉外の流水試験結果は、ジルカロイ-4 被覆管の結果である。燃料棒及び支持格子の材料特性のうち、フレットング摩耗に最も影響するのは材料の硬度であるが、ジルカロイ-4 被覆管と NDA 被覆管の硬度は同等であり<sup>(3)</sup>、NDA 被覆管のフレットング摩耗はジルカロイ-4 被覆管と同等である。



第 3-17 図 支持格子拘束力の緩和率実測データ<sup>(5) (6)</sup>

#### 4. 燃料集合体の強度計算

##### 4.1 燃料集合体の設計基準

燃料集合体は、燃料輸送及び取扱い時並びに運転時に次の基準を満たすように設計し、その構成部品の健全性を確保している。

- ・ 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 <sup>(注1)</sup> 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構成部品、荷重及び評価基準を第 4-1 表及び第 4-2 表に示す。

なお、これらの基準は、原子力規制委員会規則「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)」、技術基準規則及び原子炉安全専門審査会内規「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。

---

(注 1) ASME では、基本的に許容値の最小単位である設計応力強さ ( $S_m$ ) を 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としている(オーステナイト系ステンレスの場合、 $2/3S_y$  のかわりに  $0.9S_y$  を用いてもよい場合がある)。設計応力強さを 0.2%耐力の 2/3 にしているのは、膜応力による降伏条件に対して 1.5 倍の安全率を見るために定められたものである。引張強さの 1/3 という制限を設けているのは、引張強さが材料の破壊の観点から究極的な制限となるため、許容値を引張強さからの安全率を一定以上確保する考え方による。一般的な材料では 0.2%耐力に比べて引張強さは約 2 倍以上あるが、冷間加工などにより、耐力を増加させた材料についても、 $S_m$  値が引張強さに対して一定以上の余裕を確保する観点で定められたものである。

第 4-1 表 燃料輸送及び取扱い時の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=6G)

構成部品	考慮点	材料	応力 <sup>(注1)</sup>	許容値 <sup>(注1)</sup>
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。	ステンレス鋼 鋳鋼	$P_L + P_b$	1.5Sm
上部ノズル— 制御棒案内シ ンプル結合部	荷重分布を考慮し、結合部の強度評価を行う。	ステンレス鋼 ジルカロイ-4	—	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	荷重分布を考慮し、拡管部の強度評価を行う。 <sup>(注2)</sup>	ステンレス鋼 ジルカロイ-4 718 合金	—	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	荷重分布を考慮し、応力評価を行う。	ジルカロイ-4	$P_m$	Sm

(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。但し、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)

(注2) 上部支持格子—制御棒案内シンプル結合部は拡管結合であり、下部支持格子—制御棒案内シンプル結合部はかしめ結合である。ここで、拡管結合の強度が約  N に対して、かしめ結合の強度は約  N であり、拡管結合の方の強度が低いことから、上部支持格子—制御棒案内シンプル結合部を評価する (添付 2 参照)。

第 4-2 表 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	材料	応力 <sup>(注1)</sup>	許容値 <sup>(注1)</sup>
上部ノズル、 下部ノズル	スクラム時の衝 撃力	ステンレス鋼鋳鋼	$P_L + P_b$	1.5Sm
制御棒案内シン ブル	スクラム時の衝 撃力	ジルカロイ-4	$P_L$	1.5Sm
	運転時荷重		$P_m$ <sup>(注2)</sup>	Sm
上部ノズル押さ えばね	機械設計流量時	718 合金	—	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。但し、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)

(注 2) ASME Sec. III では二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ブルの熱膨張差、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。
- ・ 制御棒案内シンブルはジルカロイ-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。

## 4.2 燃料集合体強度評価方法

4.1 項で述べた設計基準に従って強度評価を行う。以下にこれら評価方法の概要を述べる。また第 4-1 図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 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。

燃料集合体の構成部品であるジルカロイ-4 及びステンレス鋼は高速中性子照射により強度は増加する。また、718 合金は高速中性子照射により耐力は増加し、引張強さはわずかに変化する。これらより燃料集合体の強度評価は、安全側に未照射材の強度を用いる。

また、燃料集合体は照射により全長が伸びるため、上部ノズル押さえばね力は照射に伴い増加する。このため、上部ノズル押さえばね機能の評価はばね力の最も小さい未照射状態における評価を実施する。

### 4.2.1 燃料輸送及び取扱い時における評価方法

燃料輸送及び取扱い時の燃料集合体各部に加わる荷重の概略図を第 4-2 図に示す。

燃料輸送時に急停止あるいは急加速により、上部ノズルあるいは下部ノズルを圧縮する方向に荷重が加わるが、荷重の大きさは輸送容器に装備されたショック指示計にて監視し、6G の設計荷重内にあることを確認している。

一方、燃料取扱い時、取扱クレーンによる荷重はクレーンが燃料集合体を吊り上げたときに上部ノズルに引張荷重が加わり、着底したときに下部ノズルに圧縮荷重が加わるが、荷重の大きさは使用されるクレーンの特性で決まり、3~4G 以下である。

以上を考慮して、設計荷重は 6G を設定し評価している。但し、6G 以上の荷重があった場合には再評価を行う。

#### (1) 上部及び下部ノズルの応力評価

上部ノズルは、燃料輸送及び取扱い時で、上述のように荷重の加わり方が異なるため、それぞれの荷重条件を考慮し、有限要素法にて最大応力を NASTRAN コードを用いて評価する。

一方、下部ノズルには、燃料輸送及び取扱い時ともに、圧縮荷重が加わるので、そのときの最大応力を NASTRAN コードを用いて有限要素法にて評価する。

#### (2) 上部ノズル-制御棒案内シンプル結合部強度評価

上部ノズル-制御棒案内シンプル結合部は、上部ノズル直下の制御棒案内シンプル部と同じように全荷重を受ける。ここで結合部であるネジ部の有効断面積は、制御棒

案内シンプルの管断面積より大きい<sup>(注1)</sup>ため、ネジ部の発生応力は制御棒案内シンプルに発生する応力より小さくなる。したがって、評価は制御棒案内シンプルと同じとする。

(3) 支持格子－制御棒案内シンプル結合部強度評価

支持格子－制御棒案内シンプル結合部は、制御棒案内シンプルと燃料棒に荷重が分担されるが、保守的に支持格子－制御棒案内シンプル結合部がすべての荷重を受けた際の、1本あたりに作用する荷重を NASTRAN コードを用いて評価する。支持格子－制御棒案内シンプル結合部は、応力強さで評価することは困難であるため、試験により1本あたりの許容荷重<sup>(注2)</sup>を求めており、この許容値と比較して弾性限界荷重を超えないことを確認する。

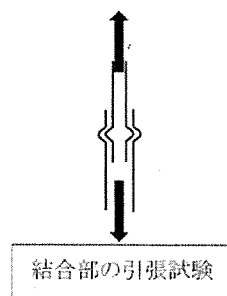
(4) 制御棒案内シンプル応力評価

制御棒案内シンプルは、制御棒案内シンプルと燃料棒に荷重が分担されるが、上部ノズル直下の部分については、燃料棒の分担がなく、全荷重を受ける。したがって、6G 荷重すべてを制御棒案内シンプルの断面積で割ったものが応力となる。このときに生じる制御棒案内シンプルの応力を NASTRAN コードを用いて評価する。

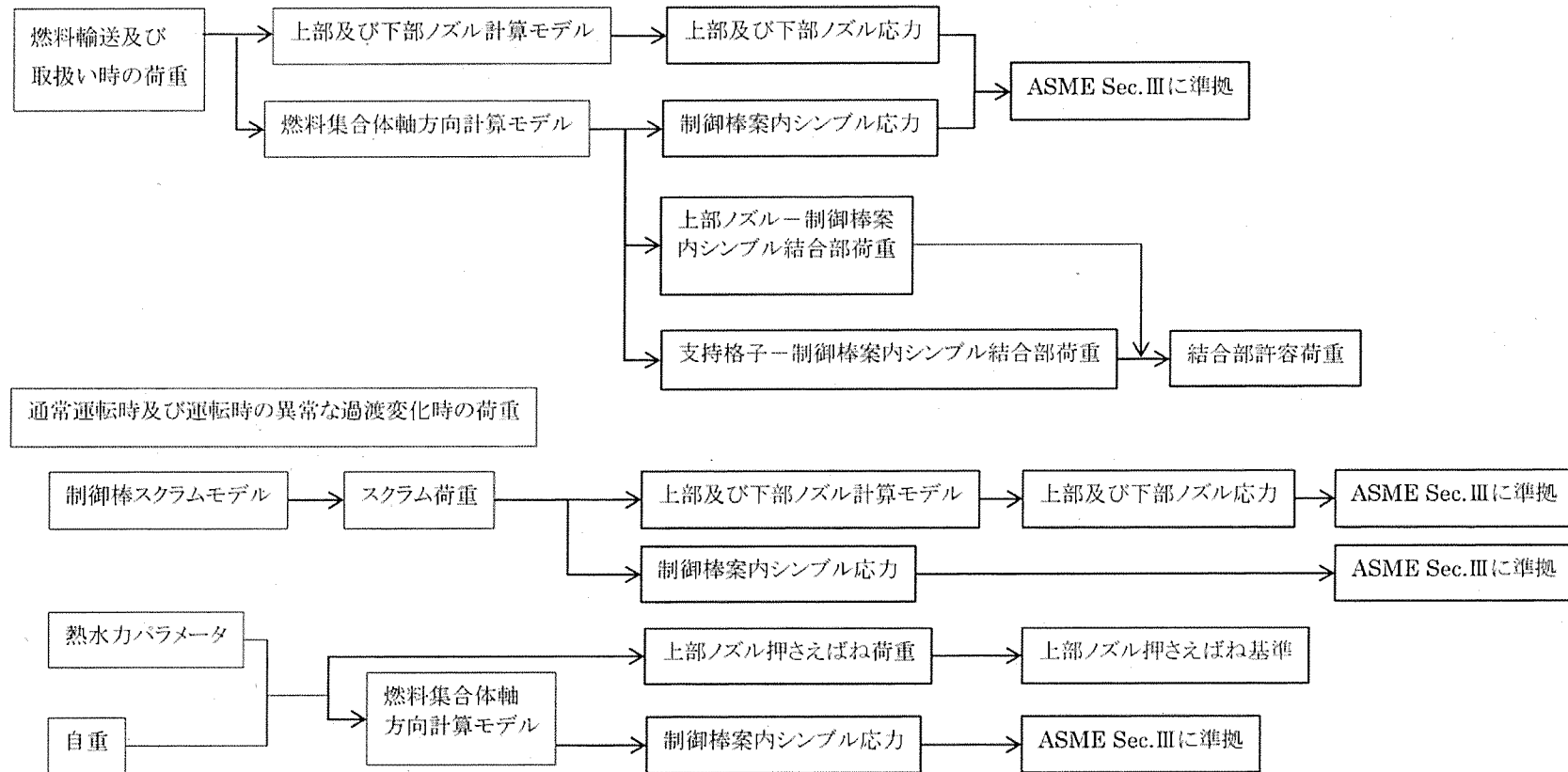
---

(注1) ネジ部の有効断面積は約  mm<sup>2</sup> であり、制御棒案内シンプルの管断面積は約  mm<sup>2</sup> より大きい(添付3参照)。

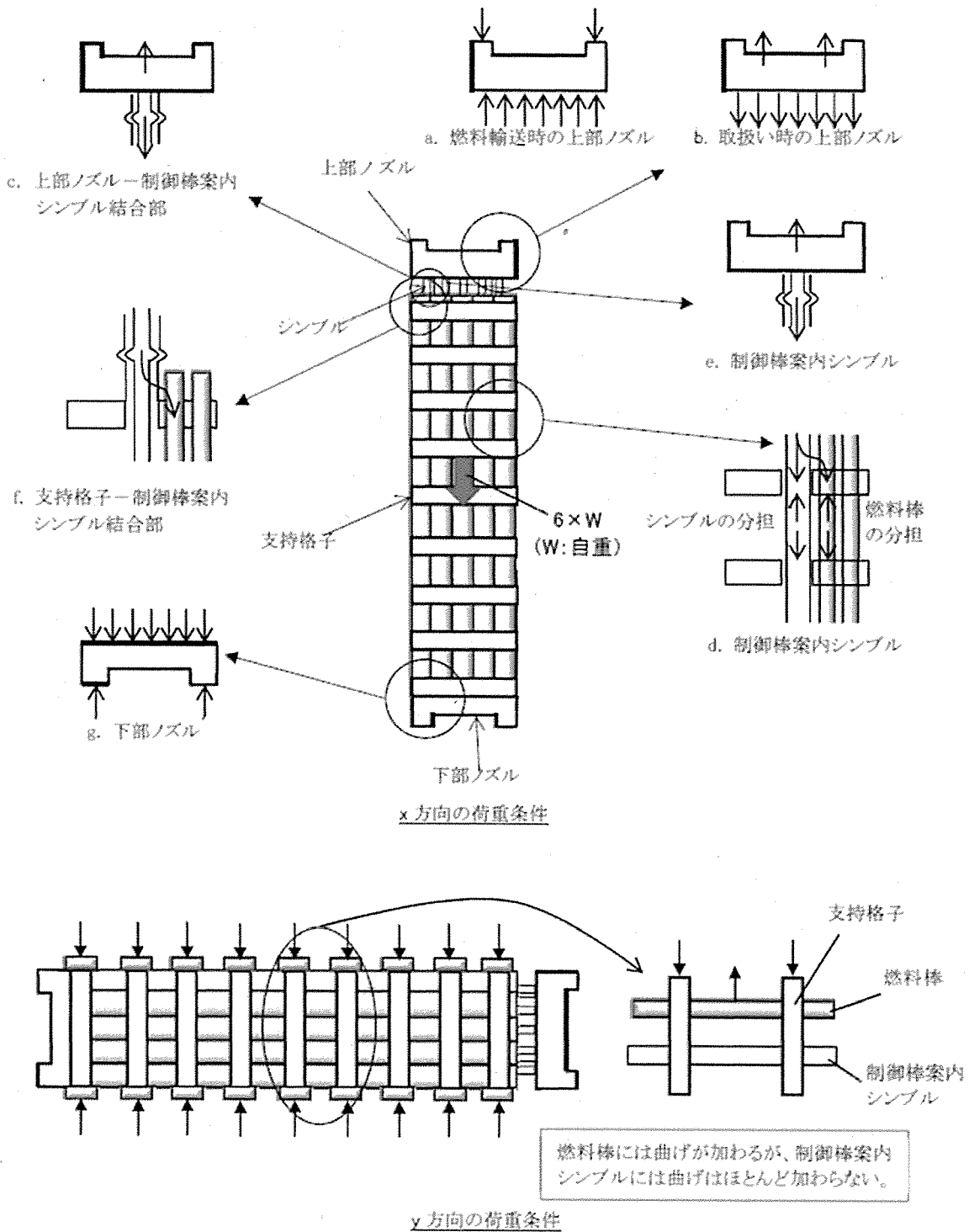
(注2) 結合部の許容荷重は、引張試験により結合部の変形が弾性変形内にとどまる範囲の荷重(弾性限界荷重)としている(下図参照)。







第 4-1 図 燃料集合体強度評価フロー図



第4-2図 燃料集合体にかかる荷重

#### 4.2.2 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方法

##### (1) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における応力評価

通常運転時においては、水力的揚力(L)、浮力(B)、ホールドダウン力(F)、自重(W)を考慮して応力評価を行う。第4-3図に通常運転時に作用する荷重を示す。また、運転時の異常な過渡変化時においては通常運転時荷重に加えて、スクラムによる荷重を考慮して応力評価を行う。

スクラム時の荷重としては、

a. ダッシュポット部<sup>(注1)</sup>に制御棒クラスタ<sup>(注2)</sup>が挿入され、落下速度が急激に減速する際の衝撃力(SF)

b. 上部ノズルに制御棒クラスタが着底する際の衝撃力(SC)

が挙げられる。a.はダッシュポット部よりも下部に対して、b.は上部ノズルより下部に対して荷重が作用する。また、これら2つの荷重は同時に発生しない。

したがって、上部ノズルに対してはb.を、ダッシュポット部及び下部ノズルに対してはa.又はb.の大きい方を考慮して応力評価をNASTRANコードを用いて行う。第4-4図に通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に作用する荷重を示す。

なお、燃料寿命中にスクラムが $\square$ 回<sup>(注3)</sup>と設定しても累積疲労損傷係数は上部ノズルで $\square$ %、下部ノズルで $\square$ %、制御棒案内シンプルで $\square$ %程度であり、疲労に与える影響は小さい。

---

(注1) 制御棒案内シンプルの下部の径を細くすることによって内部に保有する1次冷却材の抵抗により、制御棒クラスタ落下による燃料集合体への衝撃を減少させる部分

(注2) 1つの制御棒スパイダ及び24本の制御棒から構成された構造物

(注3) 繰り返し回数は、 $\square$ 回と設定している。

(2) 上部ノズル押さえばねの機能評価

上部ノズル押さえばねに要求される機能は次のとおりである。

- a. 機械設計流量に対して、燃料集合体の浮き上がりを防止する。
- b. 運転時の異常な過渡変化時の事象であるポンプオーバースピード<sup>(注1)</sup>条件で、上部ノズル押さえばねの塑性変形は進行しない。

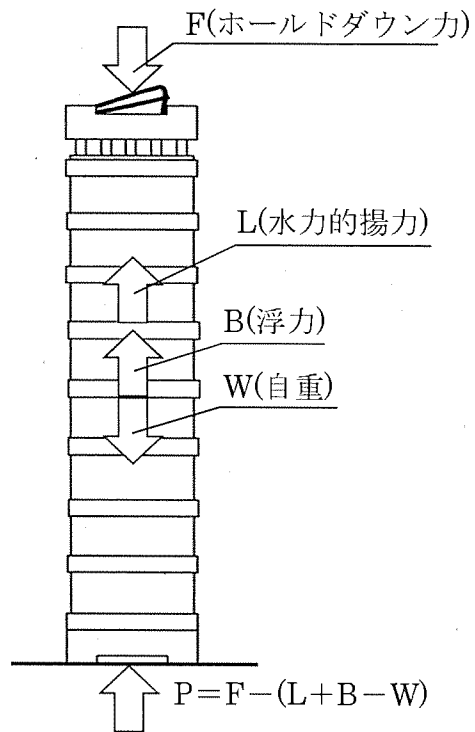
通常運転時の燃料集合体の評価は、最も条件が厳しい燃料寿命初期において行い、浮き上がり方向の荷重としては、水力的揚力及び浮力を、それと反対方向の荷重としては、燃料集合体自重及びばね力を考慮する。

運転時の異常な過渡変化時の事象であるポンプオーバースピード条件下では、

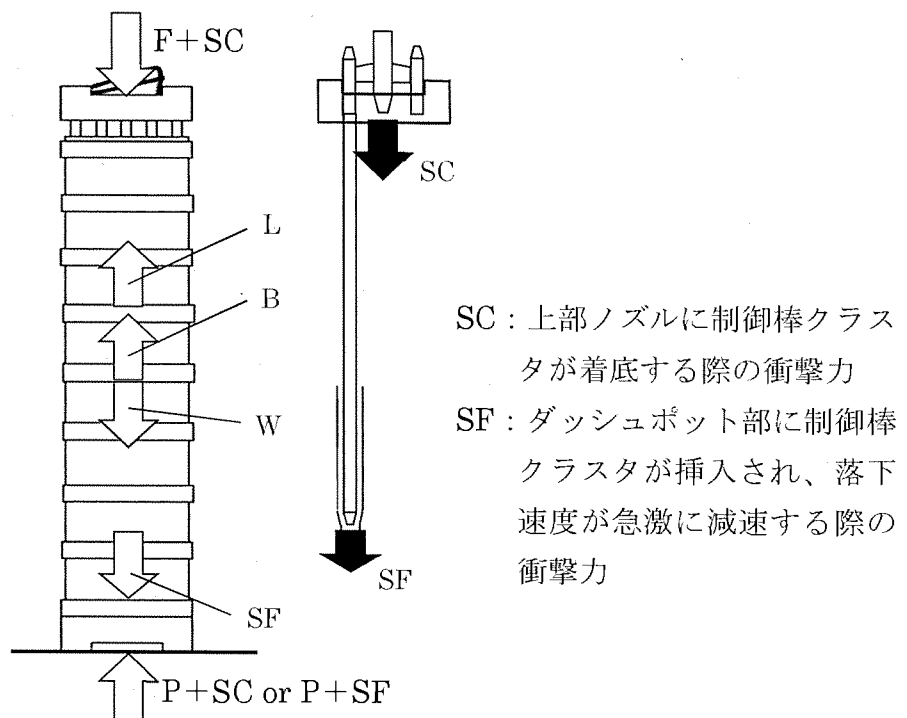
の流量に対し、上部ノズル押さえばねの健全性を評価する。

---

(注1) 運転中の異常な過渡変化として急激な負荷急減が発生した場合、タービン及び発電機の回転数が増加し、それに伴い1次冷却材ポンプの回転数が増加することにより、1次冷却材流量が増加する現象



第 4-3 図 通常運転時荷重



第 4-4 図 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時荷重

## 4.3 強度評価結果

### 4.3.1 燃料輸送及び取扱い時における評価結果

#### (1) 上部及び下部ノズルの応力評価

第 4-3 表に上部及び下部ノズルに生じる最大応力と許容応力を示す。上部ノズルの最大応力は上部ノズル外周部で発生し、下部ノズルの最大応力は下部ノズル外周部で発生するが、永久変形は生じない。

#### (2) 上部ノズルー制御棒案内シンプル結合部強度評価

上部ノズルと制御棒案内シンプルの結合は、ネジ構造により行われているため、制御棒案内シンプルと同じ設計荷重が作用する。

ここで結合部であるネジ部の有効断面積は、制御棒案内シンプルの管断面積より大きいので、ネジ部の発生応力は制御棒案内シンプルに発生する応力より小さくなる。

したがって、ノズルー制御棒案内シンプル結合部は、設計荷重に対する強度評価を行う上で制限因子とならず、健全性が損なわれることはない。

#### (3) 支持格子ー制御棒案内シンプル結合部強度評価

第 4-3 表に結合部に生じる最大荷重と許容荷重を示す。最大荷重は最上部支持格子の結合部で発生するが、永久変形は生じない。

#### (4) 制御棒案内シンプル応力評価

第 4-3 表に制御棒案内シンプルに生じる最大応力と許容応力を示す。最大応力は上部ノズルと最上部支持格子間の制御棒案内シンプルで発生するが、永久変形は生じない。

横方向に 6G 荷重が作用した場合、各支持格子部固定の条件で 6G の荷重に対して被覆管に発生する応力は、約  $\square$  MPa と耐力 (約 310MPa) に比べ十分に小さい。また、支持格子のばねに作用する荷重は約  $\square$  N であるのに対し、支持格子のばねの塑性変形が進行する荷重は約  $\square$  N であるので、支持格子のばねに永久変形が生じることはなく、保持機能は確保される。

第 4-3 表 燃料輸送及び取扱い時の荷重における評価結果

(単位 : MPa)

構成部品	最大応力	許容応力	設計比 <sup>(注3)</sup>
上部ノズル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.87
下部ノズル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.83
支持格子-制御棒案内 シンプル結合部	<input type="text"/> <sup>(注1)</sup>	<input type="text"/> <sup>(注2)</sup>	0.67 <sup>(注4)</sup>
制御棒案内シンプル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.89

(注 1) 最大荷重(N)

(注 2) 許容荷重(N)

(注 3) 許容応力値に対する最大応力値の比である。

(注 4) 許容荷重値に対する最大荷重値の比である。

#### 4.3.2 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

##### (1) 応力評価

###### a. 上部ノズル

運転中の荷重としてスクラム時の衝撃力を考慮し、上部ノズルに生じる最大応力を第 4-4 表に示す。ここから分かるとおり、最大応力は許容応力よりも小さい。

###### b. 下部ノズル

運転中の荷重としてスクラム時の衝撃力を考慮し、下部ノズルに生じる最大応力を第 4-4 表に示す。ここから分かるとおり、最大応力は許容応力よりも小さい。

###### c. 制御棒案内シムル

運転中の制御棒案内シムルに発生する最も厳しい荷重としてスクラム時の衝撃力を考慮し、ダッシュポット部に生じる最大応力を第 4-4 表に示す。ここから分かるとおり、最大応力は許容応力よりも小さい。

また、通常運転時の荷重に対する応力を評価した。ダッシュポット部の応力評価結果を第 4-4 表に示す。ここから分かるとおり、最大応力は許容応力よりも小さい。

なお、二次応力を考慮しても、制御棒案内シムルに生じる最大応力は許容応力よりも小さいことを確認している。

##### (2) 上部ノズル押さえばねの機能評価

燃料寿命初期の低温起動時及び高温全出力時の評価結果を第 4-5 表に示す。それぞれの場合に上部ノズル押さえばねに要求される力に比べ、ばね力はこれよりも大きく、通常運転時における燃料集合体の浮き上がりは防止できる。

また、運転時の異常な過渡変化時の事象であるポンプオーバースピード条件下 (  ) では、燃料集合体は浮き上がるものの、その際の上部ノズル押さえばねのたわみ量の増加は、ばねの塑性変形を増加させない範囲内であり、通常運転時に復帰した時には、表 4-5 に示すばね力を維持し、上部ノズル押さえばねの機能は損なわれない。

種々の条件下における上部ノズル押さえばねの挙動を添付 4 に示す。



第 4-4 表 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の応力評価結果

(単位 : MPa)

	最大応力	許容応力	設計比 <sup>(注1)</sup>
上部ノズル	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.31
下部ノズル <sup>(注2)</sup>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.15
制御棒案内シンプル <sup>(注2)</sup> ダッシュポット部	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.48
制御棒案内シンプル <sup>(注3)</sup> ダッシュポット部	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.14

(注 1) 許容応力値に対する最大応力値の比である。

(注 2) 制御棒案内シンプルダッシュポット部に制御棒クラスタが挿入され、落下速度が急激に減速する際の衝撃力。

(注 3) 制御棒案内シンプルに対する通常運転時の応力。

第 4-5 表 上部ノズル押さえばね評価結果

(単位：N)

	上部ノズル押さえばねに要求される力 <sup>(注1)</sup>	上部ノズル押さえばね力	評価	<sup>(注2)</sup> 設計比
低温起動時	<input type="text"/>	<input type="text"/>	浮き上がらない。	0.58
高温全出力時	<input type="text"/>	<input type="text"/>	浮き上がらない。	0.43
ポンプオーバー スピード時 (高温)	<input type="text"/>	—	浮き上がるがばねの 塑性変形は進行しな い。	—

(注 1) 水力的揚力+浮力-自重

(注 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. 参考文献

- (1) 原子燃料工業, “燃料棒性能解析コード (FPAC)”, NFK-8011 改11, (2009)
- (2) W. J. O'Donnell and B. F. Langer, “Fatigue Design Basis for Zircaloy Components”, Nucl. Sci. and Eng., 20 (1964)
- (3) 原子燃料工業, “原燃工製PWR ステップ2 燃料の改良因子について”, NFK-8116 改8, (2011)
- (4) 原子燃料工業, “原燃工製PWR ステップ2 燃料集合体の開発”, NFK-8114 改2 (2003)
- (5) W. Arbiter and J. A. Kuszyk, “Surry Unit 2 End of Cycle 5 Onsite Examination of 17×17 Demonstration Fuel Assembly RD-2 After Four Cycles of Exposure”, Volume 1, WCAP-10317 (1984)
- (6) P. H. Kreyms and M. W. Burkart, “Radiation-enhanced relaxation in Zircaloy-4 and Zr/2.5wt% Nb/0.5wt% Cu alloys”, J. Nucl. Mat., 26, pp.87-104 (1968)

(添付1)

被覆管の疲労評価における応力繰り返し回数について

被覆管の累積疲労は燃料寿命中に想定される過渡条件を以下の3つに分類し、表1に示す1次系機器の原子炉寿命中の設計過渡条件及び燃料の炉内滞在期間を考慮（原子炉寿命は40年を想定）して応力の繰り返し回数を設定し評価している。

- ① 起動・停止（0%冷態 ⇔ 0%温態）： (a), (b)

回/燃料寿命

- ② 日間負荷変動を含む運転時出力変化（0%温態 ⇔ 100%温態）： (c) ~ (i)  
[(e), (f)と(g), (h)を合わせて0% ⇔ 100% : 2000回とする。]

回/年

= 回/サイクル

- ③ 異常な過渡変化における原子炉トリップ： (j) ~ (r)

回/40年 ≒ 24回/年

回/サイクル

表1 原子炉寿命中の過渡条件及び繰り返し回数

過 渡 条 件	繰り返し回数
(a) 起 動	120
(b) 停 止	120
(c) 負荷上昇	13,200
(d) 負荷減少	13,200
(e) 100%から90%負荷へのステップ状の負荷減少	2,000
(f) 90%から100%負荷へのステップ状の負荷上昇	2,000
(g) 0%から15%への負荷上昇	1,400
(h) 15%から0%への負荷減少	1,400
(i) 1ループ停止/1ループ起動	
(I) 停 止	80
(II) 起 動	70
(j) 100%負荷からの大きいステップ状の負荷減少	200
(k) 100%負荷からの原子炉トリップ	400
(l) ポンプ1台停止による1次系の流量喪失	80
(m) 100%負荷からの負荷喪失	80
(n) 外部電源喪失	40
(o) 1次冷却材系の異常な減圧	20
(p) 制御棒クラスタ落下	80
(q) 出力運転中の非常用炉心冷却系の誤動作	40
(r) 1次冷却系停止ループの誤起動	10

(添付 2)

支持格子-制御棒案内シンプル結合部強度評価について

上部支持格子-制御棒案内シンプル結合部は図1のような拡管結合であり、下部支持格子-制御棒案内シンプル結合部は図2のようなかしめ結合である。ここで、拡管結合の強度が約  $\square$  N に対して、かしめ結合の強度は約  $\square$  N であり、拡管結合の方が強度が低いことから、上部支持格子-制御棒案内シンプル結合部を評価する。

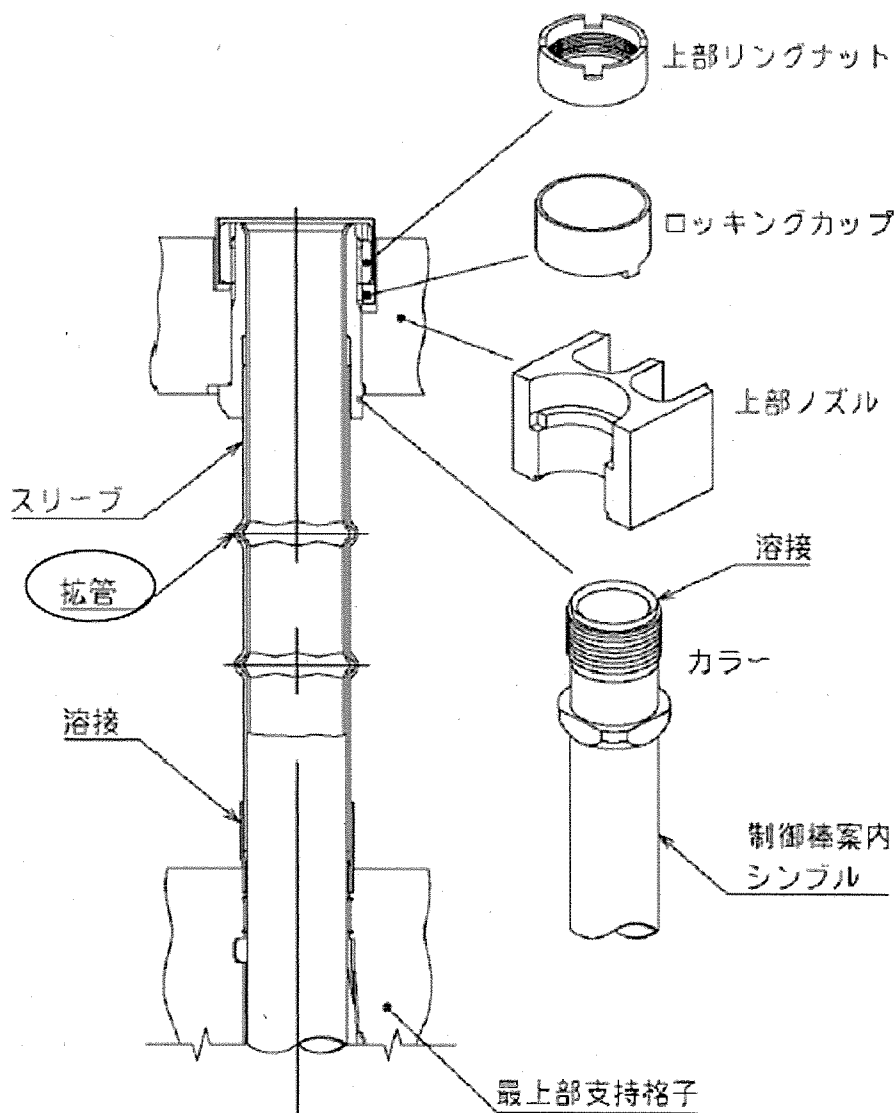


図1 上部支持格子-制御棒案内シンプル結合部の拡管結合

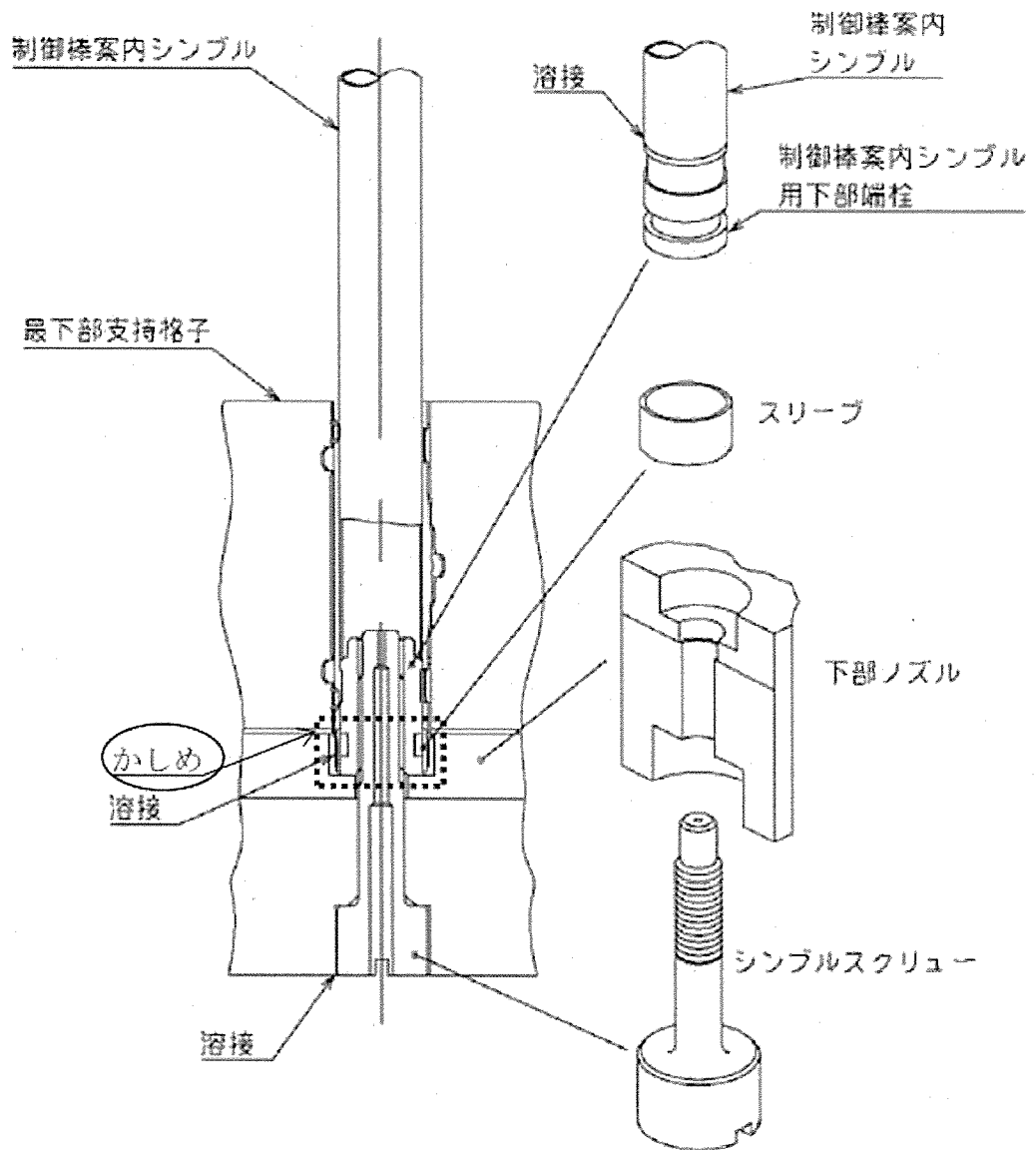


図2 下部支持格子ー制御棒案内シンプル結合部のスリーブを下部端栓の溝にかしめている

上部ノズル制御棒案内シンプル結合部強度評価について

上部ノズル制御棒案内シンプル結合部は、上部ノズル直下の制御棒案内シンプル部と同じように全荷重を受ける。

上部ノズル制御棒案内シンプル結合部のネジ部は図1であり、ネジ部の有効断面積はネジのピッチ（図2）を用いて算出され、約  $\square$  mm<sup>2</sup> である。また、制御棒案内シンプルの管断面積は約  $\square$  mm<sup>2</sup> であり、ネジ部の有効断面積の方が大きいことから、評価については、制御棒案内シンプルを評価している。

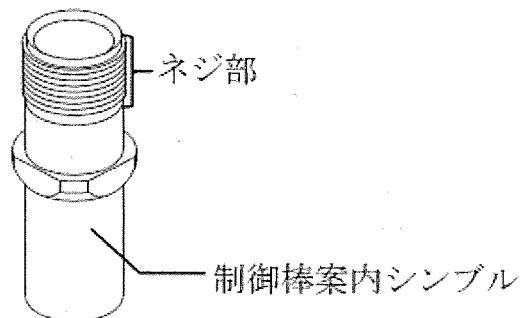


図1 上部ノズル制御棒案内シンプル結合部のネジ部

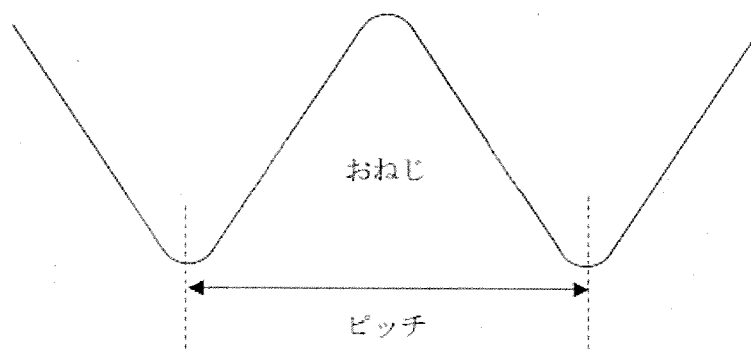


図2 ネジのピッチ



### 上部ノズル押さえばねの挙動について

装荷前、冷態装荷時、温態装荷時およびポンプオーバースピード時の各状態における、上部ノズル押さえばねの挙動を図1に示す。また、図1の各状態における、上部ノズル押さえばねに掛かる荷重とたわみ量の関係を図2に示す。

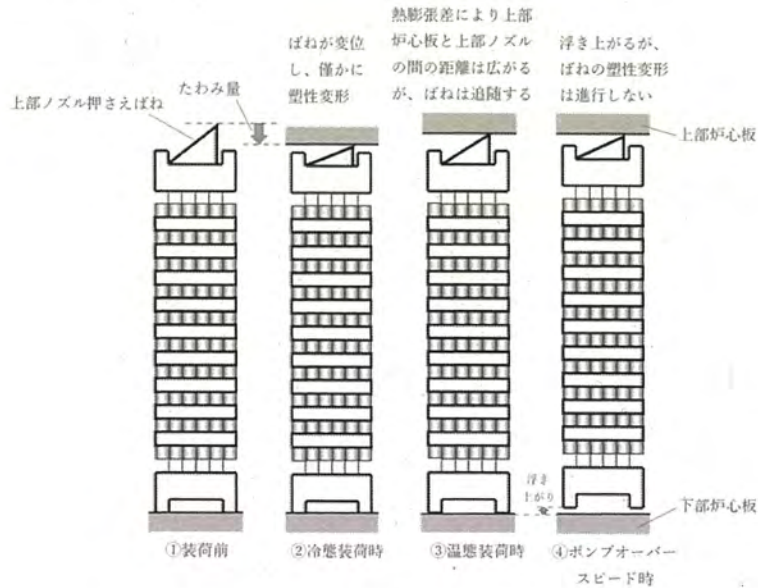


図1 各状態における上部ノズル押さえばねの挙動

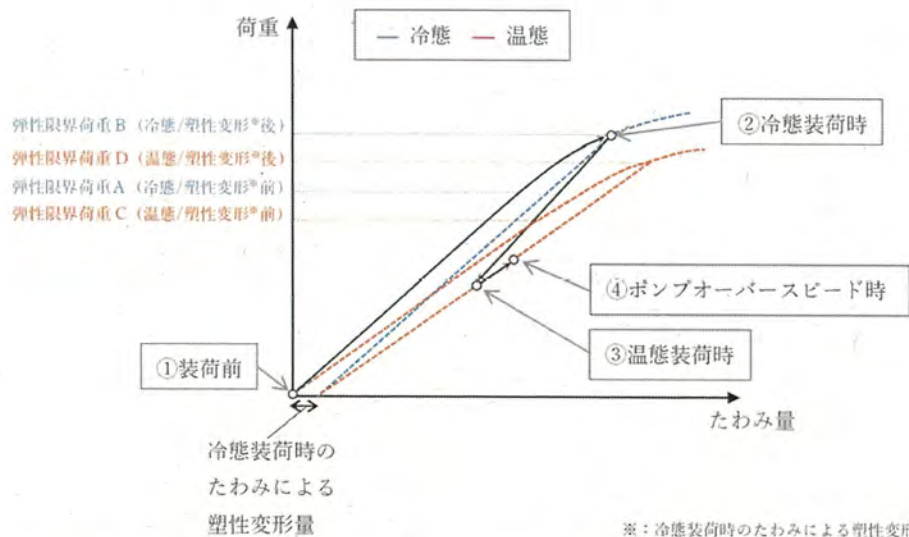


図2 各状態における上部ノズル押さえばねに掛かる荷重とたわみ量の関係

装荷前の燃料は上下部炉心板間距離よりも長いため、冷態装荷時には上部ノズル押さえばねが上部炉心板に押しつけられる。この状態で上部ノズル押さえばねに掛かる荷重は、図2の②のとおり弾性限界荷重Aを超えるため、上部ノズル押さえばねには僅かに塑性変形が生じる。このときの塑性変形量（塑性変形による上部ノズル押さえばねの高さの変化量）は、塑性変形前の上部ノズル押さえばね高さの約□%であり、仮に荷重が無くなると上部ノズル押さえばねは、弾性変形により塑性変形量を差し引いた高さに戻る（塑性変形が生じる具体的な箇所は図3参照）。

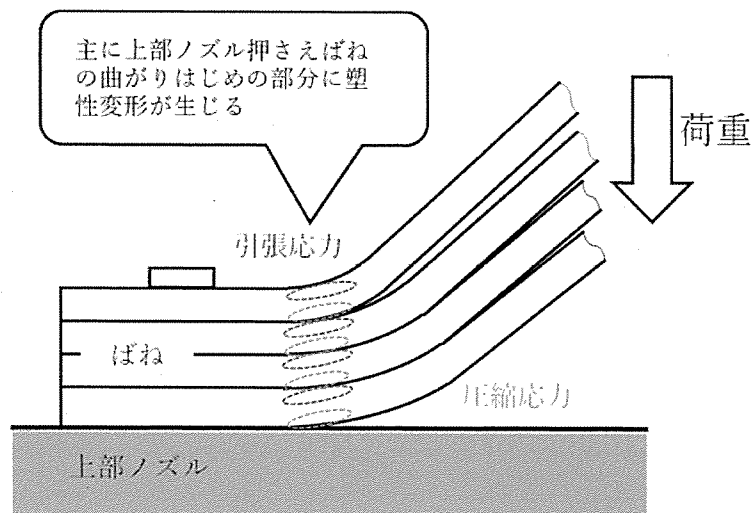


図3 上部ノズル押さえばねに生じる塑性変形

次に、冷態装荷時から温態装荷時に移行すると、温度変化により上部ノズル押さえばね部材の弾性率等の物性が変化したわみ易くなるため、図2に示すとおり、温態時の弾性限界荷重は冷態時に比べ、たわみ量は大きくなるが、荷重は小さくなる。

温態装荷時には熱膨張差により上部炉心板と上部ノズルの間の距離が広がる。この状態の上部ノズル押さえばねには冷態装荷時に生じた塑性変形が残っているものの、たわみ量が塑性変形量よりも大きいため、上部ノズル押さえばねは上部炉心板に追随し、上部ノズル押さえばねは上部炉心板に押しつけられたままとなる。また、上部ノズル押さえばねのたわみ量は冷態装荷時よりも小さく、図2の③のとおりばねに掛かる荷重は弾性限界荷重Dより小さい弾性限界荷重C以下となる。

ポンプオーバースピード時には燃料は浮き上がるが、図2の④のとおりばねに掛かる荷重は弾性限界荷重Dより小さい弾性限界荷重C以下であるため、冷態装荷時に生じた塑性変形は進行しないことを確認している<sup>1</sup>。また、燃料は浮き上がるものの、上下部炉心板に設けられた燃料集合体案内ピンが上下部ノズルに嵌合したままとなるため、横方向に大きく動くことはない。

---

<sup>1</sup> 既設認の「燃料体(燃料要素の集合体である燃料体にあたっては、燃料要素)の強度計算書」の4.3.2では「設計弾性限界ばね力以内であり、健全性は損なわれない」と記載している。これは、ばねに掛かる荷重が図2の弾性限界荷重Dより小さい弾性限界荷重C(「設計弾性限界ばね力」と同義)よりも小さいことから、健全性が損なわれないことを確認している。

本申請および既設認とも、ばねに掛かる荷重が弾性限界荷重Cよりも小さくなることで冷態装荷時に生じた塑性変形が進行しないことを確認しており、本申請の「塑性変形は進行しない」と既設認の「健全性が損なわれない」は同義となる。

## 補足説明資料 6

高燃焼度燃料における燃料被覆材に関する

補足説明資料

## 目 次

- 補足説明資料 6 - 1 高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性説明内容に関する補足説明資料
- 補足説明資料 6 - 2 設置許可との整合性に関する補足説明資料
- 補足説明資料 6 - 3 特殊加工認可申請書との整合性に関する補足説明資料

## 補足説明資料 6 - 1

高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る  
適合性説明内容に関する補足説明資料

## 目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 設置許可段階からの確認及び説明内容 .....	3
3. 高燃焼度燃料（55GWd/t）導入以降の照射実績反映について .....	7
4. まとめ .....	8

## 1. 概要

燃料体については、「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」（以下「設置許可基準規則」という。）第15条第5項及び「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」（以下「技術基準規則」という。）第23条（炉心等）第1項において、必要な物理的及び化学的性質を保持することが要求されており、技術基準規則の解釈における別記-10（以下「別記-10」という。）にその具体的な仕様が規定されている。

本設工認申請対象の燃料体は高燃焼度燃料(55GWd/t)であり、燃料被覆材には別記-10に規定されたジルコニウム合金管（日本産業規格 H4751（2016））（以下「ジルカロイ-4」という。）とは異なる Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム基合金（以下「ジルコニウム基合金」という。）を使用する設計としている。

ジルコニウム基合金の化学成分等はジルカロイ-4 と異なるものの、製法、品質管理、検査はジルカロイ-4 と変わるものではなく、さらにこれまでの製造実績、使用実績を踏まえれば、別記-10 3. (3)以外の仕様に対しては同等以上の性質を保持している。

別記-10 3. (3)はジルカロイ-4 の規定であるため、高燃焼度燃料用のジルコニウム基合金がそれに適合することはできないが、物理的及び化学的性質がジルカロイ-4 と同等以上を有していることは設置許可段階で確認<sup>※1、2</sup>しており、本資料では、その同等以上であることを説明する。また、ジルコニウム基合金の設置許可基準規則第15条第5項及び技術基準規則第23条第1項への適合性に係る設置許可段階からの確認内容を整理するとともに、あわせて高燃焼度燃料(55GWd/t)導入以降の照射実績反映状況についても整理している。

なお、設置許可基準規則第15条第6項及び技術基準規則第23条第2項への適合性については、設置許可基準規則の解釈及び技術基準規則の解釈における「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）」に基づいた評価条件及び評価手法にて、ジルコニウム基合金の材料物性を用いて強度評価を行い、その適合性を確認しており、ジルコニウム基合金による影響については、ジルカロイ-4 と比較しても強度評価の入力条件であるジルコニウム基合金の材料物性（熱膨張係数、ポアソン比、縦弾性係数等）は同等であり、評価条件及び評価手法も相違はないため、その評価結果に有意な差異はない。

※1 高燃焼度燃料(55GWd/t)導入時の設置変更許可申請（平成15年8月13日平成14・04・03原第27号許可）では設置許可基準規則に代わる前の「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」の要求に適合していることを確認している。



※2 公開文献「原燃工製PWRステップ2燃料の改良因子について NFK-8116  
改3 原子燃料工業、平成14年」を踏まえた設計としている。

## 2. 設置許可段階からの確認及び説明内容

### 2.1 確認項目及び確認内容

ジルコニウム基合金の設置許可基準規則第 15 条第 5 項及び技術基準規則第 23 条第 1 項への適合性に係る設置許可段階からの確認項目及び確認内容の概要を表 1 に示す。

表 1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (1/3)

性質	確認項目 <sup>※1</sup>	確認内容	
物理的性質 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 記載なし】	機械的性質 【本文 記載なし】 【資料 8 5.2.1】	照射材並びに水素吸収させた未照射材及び照射材での引張試験結果よりジルコニウム基合金の機械特性がジルカロイ-4 と同等であることを確認。	
	疲労特性 【本文 記載なし】 【資料 8 5.2.2】	未照射材及び照射材の疲労試験結果よりジルコニウム基合金の疲労特性がジルカロイ-4 と同等であることを確認。	
	クリープ特性 【本文 記載なし】 【資料 8 5.2.3】	実機で照射された燃料棒の外径変化より、ジルコニウム基合金のクリープ特性がジルカロイ-4 と同等以上であることを確認。	
	照射成長 【本文 記載なし】 【資料 8 5.2.4】	各材料の照射成長の結果より、ジルコニウム基合金の照射成長がジルカロイ-4 に比べて、小さくなることを確認。	
	寸法安定性 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 記載なし】	クリープ特性 【本文 記載なし】 【資料 8 5.2.3】	寸法安定性は、被覆材のクリープ特性と照射成長によって確認されるが、これらの確認項目は、耐放射線性（資料 8 5.2 章）において問題ないことを確認している。
		照射成長 【本文 記載なし】 【資料 8 5.2.4】	
	耐熱性 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 5.1】	耐熱性 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 5.1】	ジルコニウム基合金は、約 98wt%のジルコニウムを主成分としているため、材料物性がジルカロイ-4 と同等であること、及び溶融点及び相変態温度の測定結果より燃料被覆材の溶融点及び相変態温度が異常な過渡変化時の最高温度よりも高いことを確認。

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (2/3)

性質		確認項目 <sup>※1</sup>	確認内容
物理的性質 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 記載なし】	核性質 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 記載なし】	—	核分裂するウランを含むペレットにおいて考慮する事項 <sup>※2</sup> であるため、燃料被覆材としては考慮不要。
	その他の性能 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 5.4】	<u>耐摩耗性</u> 【本文 記載なし】 【資料 8 5.4.2】	燃料被覆材硬さの測定結果よりジルコニウム基合金の硬さはジルカロイ-4 と同等であり、支持格子と燃料被覆材の接触による摩耗は燃料被覆材によらず同等であることを確認。
		耐 PCI 性 <sup>※3</sup> 【本文 記載なし】 【資料 8 5.4.1】	試験炉における出力急昇試験結果よりジルコニウム基合金耐 PCI 性がジルカロイ-4 と同等以上であることを確認。

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

※2 核性質については、核分裂反応に係る影響を確認しており、具体的にはペレットに対して考慮すべき性質としている。

※3 PCI 破損はペレットと燃料被覆材の接触による物理的作用及び腐食性 FP による化学的作用が重畳して生じる。従って耐 PCI 性は物理的及び化学的性質の両方の性質によるものであり、単一の性質によるものではないことを踏まえ、「その他考慮すべき性質」に分類する。

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (3/3)

性質		確認項目 <sup>※1</sup>	確認内容
化学的性質 【本文 1. 炉心等】 【資料8 記載なし】	耐食性 【本文 1. 炉心等】 【資料8 5.3】	酸化腐食 【本文 記載なし】 【資料8 5.3.1】	原子炉内腐食データよりジルコニウム基合金の腐食速度がジルカロイ-4に比べ低減することを確認。
		水素吸収 【本文 記載なし】 【資料8 5.3.2】	燃料被覆材の原子炉内での酸化膜厚さと水素吸収量及び吸収率の関係からジルコニウム基合金の水素吸収量がジルカロイ-4に比べ低減することを確認。
	化学的安定性 【本文 1. 炉心等】 【資料8 記載なし】	二酸化ウランペレットと燃料被覆材との反応 <sup>※2</sup> 【本文 記載なし】 【資料8 3.3.1】	化学的安定性は、ペレットと被覆材の化学反応に関する性質であるため、資料8では被覆材の性質ではなくペレットの性質(資料8 3.3章、4.3章)として問題ないことを確認している。
		ガドリニア混合二酸化ウランペレットと燃料被覆材との反応 <sup>※2</sup> 【本文 記載なし】 【資料8 4.3.1】	
	その他の性能 【本文 1. 炉心等】 【資料8 5.4】	耐PCI性 <sup>※3</sup> 【本文 記載なし】 【資料8 5.4.1】	試験炉における出力急昇試験結果よりジルコニウム基合金耐PCI性がジルカロイ-4と同等以上であることを確認。
		高温特性 【本文 記載なし】 【資料8 5.4.3】	昇温内圧破裂試験結果及び高温時のジルコニウム-水反応の試験結果よりジルコニウム基合金の高温破裂特性及び高温酸化挙動はジルカロイ-4と同等であることを確認。

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

※2 (ガドリニア混合) 二酸化ウランペレットと燃料被覆材との反応は、燃料被覆材内面に生じる酸化層へのウランの拡散によるボンディング層形成が問題とならないことを確認しているため、化学的に安定して共存する性質として「化学的安定性」に分類する。

※3 PCI破損はペレットと燃料被覆材の接触による物理的作用及び腐食性FPによる化学的作用が重畳して生じる。従って耐PCI性は物理的及び化学的性質の両方の性質によるものであり、単一の性質によるものではないことを踏まえ、「その他考慮すべき性質」に分類する。

## 2.2 各段階における説明内容

設置変更許可申請書・本文において、ジルコニウム基合金を含めて、燃料体が必要な物理的及び化学的性質を保持する設計とすることを説明し、設置変更許可申請書・添付書類八において、具体的な仕様（化学成分値含む。）、物理的及び化学的性質に対する設計上の考慮事項を示している。また、ジルコニウム基合金を導入する際の設置変更許可申請における安全審査資料において、具体的な考慮内容を示している。

本設工認申請においては、設置許可段階での説明に加えて、以下のとおり、より具体的な設計内容を記載している。

- ・技術基準規則第 23 条第 1 項への適合性説明として「耐熱性」及び「高温特性」について詳細な説明を追記
- ・構造強度評価において考慮している事項として「耐摩耗性」について詳細な説明を追記
- ・化学成分値として、ジルカロイ-4(JIS H 4751)に含有量は規定されていないものの、主成分の1つとして酸素を追記 等

なお、本設計内容は、平成 15 年 12 月 16 日付け平成 15・10・20 原第 14 号にて特殊加工認可を受けた内容から変更はない。

設置変更許可申請書、安全審査資料、本設工認申請書の具体的な記載は、補足説明資料 6-2 のとおりである。また、本設工認申請書と特殊加工認可申請書の比較は、補足説明資料 6-3 のとおりである。

3. 高燃焼度燃料（55GWd/t）導入以降の照射実績反映について

55GWd/t 燃料導入にあたっては、平成 15 年 12 月 16 日付け平成 15・10・20 原第 14 号にて特殊加工認可、平成 16 年 2 月 27 日付け平成 15・10・20 原第 23 号にて燃料体設計認可を取得している。

その後、4.1wt%ステップ 2 燃料導入に伴い（燃料被覆材は設計変更なし）、平成 30 年 6 月 13 日付け原規規発第 18061310 号にて燃料体設計認可を取得している。

上記以降については、新たに公開された照射データはなく、設計評価へ影響を及ぼすような照射データも得られていない。また、国内外の事象を踏まえ設計評価へ反映すべき新たな知見もないため、今回の設工認申請書における照射データは、最新の平成 30 年 6 月 13 日付け原規規発第 18061310 号の燃料体設計認可における照射データと同じ内容となっている。

#### 4. まとめ

高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯を表2にまとめる。

表2 高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯

許認可手続き等 (【】:申請者)	申請又は 許可年月日等	適合性概要
設置変更許可申請 【四国電力】	平成15年8月13日 許可	ジルコニウム基合金がジルカロイ-4と同等以上の物理的及び化学的性質を有していることを確認。
燃料体設計認可申請 特殊加工認可申請 【原子燃料工業】	平成16年2月27日 平成15年12月16日 認可	設置許可(平成15年8月13日)に基づく燃料体設計認可及び特殊加工認可を取得。
燃料体設計認可申請 (最新) 【原子燃料工業】	平成30年6月13日 認可	4.1wt%ステップ2燃料導入のため、燃料被覆材に関しては設置許可(平成15年8月13日)に基づく燃料体設計認可を取得。

表に示すとおり、本設工認申請対象の燃料体に使用するジルコニウム基合金に係る設置許可基準規則第15条第5項及び技術基準規則第23条第1項への適合性については、平成15年の設置許可よりジルコニウム基合金がジルカロイ-4と同等以上の物理的及び化学的性質を有していることを確認しており、本設工認申請においても当該設置許可に基づく確認項目及び確認内容の説明を実施しているものである。

## 補足説明資料 6 - 2

設置許可との整合性に関する補足説明資料



## 目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 整理結果 .....	1

## 1. 概 要

本資料は、令和2年4月の「原子力利用における安全対策の強化のための核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等の一部を改正する法律」及び関連規則等（以下「改正法等」という。）の施行を踏まえ、本設工認申請対象の燃料被覆材について、「伊方発電所 原子炉設置変更許可申請書」（以下「設置変更許可申請書」という。）、「高燃焼度燃料導入時の安全審査資料」及び「設計及び工事計画認可申請書」（以下「設工認」という。）の記載事項の関連を整理したものである。

## 2. 整理結果

「設置変更許可申請書」、「高燃焼度燃料導入時の安全審査資料」及び「設工認」との比較を表1に示す。

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(1/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																																																																																																																																					
<p>【本文】</p> <p>五 発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備</p> <p>ハ 原子炉本体の構造及び設備</p> <p>(2)燃料体</p> <p>(ii)燃料被覆材の種類</p> <p>a. ウラン燃料</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金</li> <li>ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び銦を添加したジルコニウム基合金</li> </ul> <p>ただし、初装荷燃料及び取替燃料のうち第4～第11領域燃料はジルカロイ-4</p>	<p>【安全審査資料：伊方発電所1、2、3号炉 高燃焼度燃料の概要について】</p> <p>3. ステップ2燃料の主要仕様</p> <p>燃料棒及び燃料集合体の概要を図3-1及び図3-2に示すとおり、PWR燃料は、格子状に組み合わせた支持格子によって燃料棒を格子配列に係ち、制御棒案内シムル、支持格子、上部ノズル及び下部ノズルで骨格を形成することを基本構造としている。</p> <p>ステップ2燃料は、ステップ1燃料と同一な基本構造であるが、前述の高燃焼度化による影響等に対応するため、表3-1及び表3-2に示すとおり、ペレット、被覆管等の仕様の一部を変更する。</p> <p>表3-2 17×17型燃料の主要仕様 (伊方3号炉) (1/2)</p> <table border="1" data-bbox="638 678 1198 1125"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>ステップ1燃料(現行)</th> <th>ステップ2燃料</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ペレット材料</td> <td>三酸化ウラン (一部ガドリニウムを含む)</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>濃縮度</td> <td>約4.1wt% (ガドリニウム入り燃料については約2.6wt%)</td> <td>約4.8wt%以下 (約3.2wt%以下)</td> </tr> <tr> <td>ガドリニウム濃度</td> <td>約6wt%</td> <td>約10wt%以下</td> </tr> <tr> <td>初燃濃度</td> <td>約0.5%理論濃度</td> <td>約0.6%理論濃度 (ガドリニウム入り燃料については約0.6%理論濃度)</td> </tr> <tr> <td>ペレット直径</td> <td>約8.19mm</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>ペレット長さ</td> <td>約11.5mm又は約9.2mm</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>ペレット最高燃焼度</td> <td>約21.0566dwt</td> <td>約21.0566dwt</td> </tr> <tr> <td>被覆管材料</td> <td>Zr-Cr-Oi-4</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Ni-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi基合金</li> <li>・Ni-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi基合金</li> <li>・Ni-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi基合金</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td>外径</td> <td>約9.50mm</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>厚さ</td> <td>約0.57mm</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>被覆管一列ノズル間隔(φ17)</td> <td>約9.17mm</td> <td>同左</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1 MDAを指す。  <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">*2 NDAを指す。</span>          *3 ZIRLOを指す。</p>	項目	ステップ1燃料(現行)	ステップ2燃料	ペレット材料	三酸化ウラン (一部ガドリニウムを含む)	同左	濃縮度	約4.1wt% (ガドリニウム入り燃料については約2.6wt%)	約4.8wt%以下 (約3.2wt%以下)	ガドリニウム濃度	約6wt%	約10wt%以下	初燃濃度	約0.5%理論濃度	約0.6%理論濃度 (ガドリニウム入り燃料については約0.6%理論濃度)	ペレット直径	約8.19mm	同左	ペレット長さ	約11.5mm又は約9.2mm	同左	ペレット最高燃焼度	約21.0566dwt	約21.0566dwt	被覆管材料	Zr-Cr-Oi-4	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Ni-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi基合金</li> <li>・Ni-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi基合金</li> <li>・Ni-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi基合金</li> </ul>	外径	約9.50mm	同左	厚さ	約0.57mm	同左	被覆管一列ノズル間隔(φ17)	約9.17mm	同左	<p>【要目表】</p> <table border="1" data-bbox="1299 311 1736 893"> <thead> <tr> <th rowspan="2">燃料体</th> <th rowspan="2">項目</th> <th rowspan="2">仕様</th> <th colspan="2">実設計</th> </tr> <tr> <th>実設計</th> <th>変更後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="10">燃料体</td> <td>ウラン濃縮度</td> <td>wt%</td> <td>3.20 (NDA)</td> <td>変更なし</td> </tr> <tr> <td>濃度(理論濃度)</td> <td>%</td> <td>0.57 (NDA)</td> <td>0.60 (NDA)</td> </tr> <tr> <td>ウラン濃縮率</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>約1.5 (NDA)</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">燃料体</td> <td>燃料体</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>約1.5 (NDA)</td> </tr> <tr> <td>ウラン比</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>約1.5 (NDA)</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">燃料体</td> <td>ガドリニウム</td> <td>wt%</td> <td>約6 (NDA)</td> <td>6.00 (NDA)</td> </tr> <tr> <td>濃度</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>約1.5 (NDA)</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">燃料体</td> <td>燃料体</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>約1.5 (NDA)</td> </tr> <tr> <td>濃度</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>約1.5 (NDA)</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">燃料体</td> <td>燃料体</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>約1.5 (NDA)</td> </tr> <tr> <td>濃度</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>約1.5 (NDA)</td> </tr> <tr> <td rowspan="10">燃料体</td> <td>燃料体</td> <td>—</td> <td>50-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi系 ジルコニウム基 合金(NDA)</td> <td>変更なし</td> </tr> <tr> <td>燃料体</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>ASM B351 Gr. R50604 (NDA) (ZIRLO 9040 相当)</td> </tr> <tr> <td>燃料体</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>ASM 5595 (NDA)</td> </tr> <tr> <td>燃料体</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>ASM B352 Gr. R50604 (NDA)</td> </tr> <tr> <td>燃料体</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>ASM B353 Gr. R50604 (NDA)</td> </tr> <tr> <td>燃料体</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>ASM 5595 (NDA)</td> </tr> <tr> <td>燃料体</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>ASM (NDA)</td> </tr> <tr> <td>燃料体</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>ASM (NDA)</td> </tr> <tr> <td>燃料体</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>ASM (NDA)</td> </tr> <tr> <td>燃料体</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>ASM (NDA)</td> </tr> </tbody> </table>	燃料体	項目	仕様	実設計		実設計	変更後	燃料体	ウラン濃縮度	wt%	3.20 (NDA)	変更なし	濃度(理論濃度)	%	0.57 (NDA)	0.60 (NDA)	ウラン濃縮率	wt%	—	約1.5 (NDA)	燃料体	燃料体	—	—	約1.5 (NDA)	ウラン比	—	—	約1.5 (NDA)	燃料体	ガドリニウム	wt%	約6 (NDA)	6.00 (NDA)	濃度	wt%	—	約1.5 (NDA)	燃料体	燃料体	wt%	—	約1.5 (NDA)	濃度	wt%	—	約1.5 (NDA)	燃料体	燃料体	wt%	—	約1.5 (NDA)	濃度	wt%	—	約1.5 (NDA)	燃料体	燃料体	—	50-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi系 ジルコニウム基 合金(NDA)	変更なし	燃料体	—	—	ASM B351 Gr. R50604 (NDA) (ZIRLO 9040 相当)	燃料体	—	—	ASM 5595 (NDA)	燃料体	—	—	ASM B352 Gr. R50604 (NDA)	燃料体	—	—	ASM B353 Gr. R50604 (NDA)	燃料体	—	—	ASM 5595 (NDA)	燃料体	—	—	ASM (NDA)	燃料体	—	—	ASM (NDA)	燃料体	—	—	ASM (NDA)	燃料体	—	—	ASM (NDA)	
項目	ステップ1燃料(現行)	ステップ2燃料																																																																																																																																						
ペレット材料	三酸化ウラン (一部ガドリニウムを含む)	同左																																																																																																																																						
濃縮度	約4.1wt% (ガドリニウム入り燃料については約2.6wt%)	約4.8wt%以下 (約3.2wt%以下)																																																																																																																																						
ガドリニウム濃度	約6wt%	約10wt%以下																																																																																																																																						
初燃濃度	約0.5%理論濃度	約0.6%理論濃度 (ガドリニウム入り燃料については約0.6%理論濃度)																																																																																																																																						
ペレット直径	約8.19mm	同左																																																																																																																																						
ペレット長さ	約11.5mm又は約9.2mm	同左																																																																																																																																						
ペレット最高燃焼度	約21.0566dwt	約21.0566dwt																																																																																																																																						
被覆管材料	Zr-Cr-Oi-4	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Ni-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi基合金</li> <li>・Ni-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi基合金</li> <li>・Ni-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi基合金</li> </ul>																																																																																																																																						
外径	約9.50mm	同左																																																																																																																																						
厚さ	約0.57mm	同左																																																																																																																																						
被覆管一列ノズル間隔(φ17)	約9.17mm	同左																																																																																																																																						
燃料体	項目	仕様	実設計																																																																																																																																					
			実設計	変更後																																																																																																																																				
燃料体	ウラン濃縮度	wt%	3.20 (NDA)	変更なし																																																																																																																																				
	濃度(理論濃度)	%	0.57 (NDA)	0.60 (NDA)																																																																																																																																				
	ウラン濃縮率	wt%	—	約1.5 (NDA)																																																																																																																																				
	燃料体	燃料体	—	—	約1.5 (NDA)																																																																																																																																			
		ウラン比	—	—	約1.5 (NDA)																																																																																																																																			
	燃料体	ガドリニウム	wt%	約6 (NDA)	6.00 (NDA)																																																																																																																																			
		濃度	wt%	—	約1.5 (NDA)																																																																																																																																			
	燃料体	燃料体	wt%	—	約1.5 (NDA)																																																																																																																																			
		濃度	wt%	—	約1.5 (NDA)																																																																																																																																			
	燃料体	燃料体	wt%	—	約1.5 (NDA)																																																																																																																																			
濃度		wt%	—	約1.5 (NDA)																																																																																																																																				
燃料体	燃料体	—	50-Fe-Cr-Ni-Zr-Oi系 ジルコニウム基 合金(NDA)	変更なし																																																																																																																																				
	燃料体	—	—	ASM B351 Gr. R50604 (NDA) (ZIRLO 9040 相当)																																																																																																																																				
	燃料体	—	—	ASM 5595 (NDA)																																																																																																																																				
	燃料体	—	—	ASM B352 Gr. R50604 (NDA)																																																																																																																																				
	燃料体	—	—	ASM B353 Gr. R50604 (NDA)																																																																																																																																				
	燃料体	—	—	ASM 5595 (NDA)																																																																																																																																				
	燃料体	—	—	ASM (NDA)																																																																																																																																				
	燃料体	—	—	ASM (NDA)																																																																																																																																				
	燃料体	—	—	ASM (NDA)																																																																																																																																				
	燃料体	—	—	ASM (NDA)																																																																																																																																				

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(2/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考														
		<p>【基本設計方針】</p> <p>第2章 個別項目</p> <p>1. 炉心等</p> <p>1.1 燃料体</p> <p>1.1.2 17行17列B型燃料集合体（ウラン燃料）</p> <p>(3) 各元素の含有量の金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><u>・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金</u></p> <table border="1"> <tr> <td>スズ</td> <td>0.90～1.15</td> </tr> <tr> <td>鉄</td> <td>0.24～0.30</td> </tr> <tr> <td>クロム</td> <td>0.13～0.19</td> </tr> <tr> <td>ニオブ</td> <td>0.08～0.14</td> </tr> <tr> <td>ニッケル</td> <td>0.097～0.014</td> </tr> <tr> <td>酸素</td> <td style="border: 1px solid black;"> </td> </tr> <tr> <td>ジルコニウム</td> <td>残り</td> </tr> </table> <p>【資料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】</p> <p>5. ジルコニウム基合金</p> <p>NDA被覆管は「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（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第7号）」（以下「原子力規制委員会規則第7号」という。）第8条に規定されていない材料であったことから、原子力規制委員会規則第7号第3条の規定に基づき、特殊加工認可を取得している（平成15・10・20原第14号）。</p> <p>NDA被覆管を本申請の燃料集合体に使用する場合には、以下に示すこれらの特性を適切に反映して燃料集合体の設計を行う必要がある。</p> <p>なお、本資料中に示すNDA被覆管の照射挙動データには、NDAとNDA-RTの2種類のデータがあり、前者は通常組織管、後者は集合組織調整管を指している。集合組織調整管は、被覆管の圧延工程を調整することによって、ジルコニウムの稠密六方晶C軸<sup>(注1)</sup>の径方向への配向割合を、通常組織管よりも僅かに高めた被覆管であるが、本章で示す被覆管の各特性は同等である。そのため、本申請においては両者を区別しない。</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	0.097～0.014	酸素		ジルコニウム	残り	
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	0.097～0.014																
酸素																	
ジルコニウム	残り																

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒棒部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線棒部：安全審査資料と設工認の整合箇所、バツチング部：A型燃料集合体に係る記載

(3/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>【添付書類八】</p> <p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(1) 概要</p> <p>燃料集合体は、多数の二酸化ウラン焼結ペレット、ガドリニア入り二酸化ウラン焼結ペレット又はウラン・プルトニウム混合酸化物焼結ペレットを「ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム合金」若しくは「ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム合金」又は「ジルカロイ-4で被覆した燃料棒、制御棒案内シムル、炉内計装案内シムル、支持格子、上部ノズル、下部ノズル等で構成する。申請書本文における<u>五原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備</u>ハ、<u>原子炉本体の構造及び設備</u>（ロ）燃料体（2）被覆材の種類に示す「<u>ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム合金</u>」又は「<u>ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム合金</u>」（以下3.2.1では「<u>ジルコニウム合金</u>」という。）の主成分は第3.2.1表のとおりである。（1）（6）燃料棒の配列は、17×17であり、そのうち264本が燃料棒、24本が制御棒案内シムル、残り1本が炉内計装案内シムルである。制御棒案内シムルは、制御棒クラスタ、バーナブルポイズン、中性子源及びシムルプラグアセンブリの挿入に使用する。</p>	<p>3. ステップ2燃料の主要仕様</p> <p>(4) 被覆管材料</p> <p>炉内滞在期間の長期化に伴う被覆管の腐食及び水素吸収量増加を抑制するため、<u>被覆管材料をステップ1燃料のジルカロイ-4から表3-3に示すジルコニウム合金に変更し、これを用いた改良被覆管（A型燃料はMDA及びZIRLO™、B型燃料はNDA）を採用する。</u></p> <p>MDAは、三菱重工業(株)により開発されたものであり、豊富な照射実績を持つジルカロイ-4をベースとして、耐食性向上のためSn含有量を低下させ、さらに水素吸収率の低減と機械的強度の向上のためにNbを添加したSn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム合金製被覆管である。NDAは、原子燃料工業(株)により開発されたものであり、MDAと同様、ジルカロイ-4をベースとして、耐食性向上のためSn含有量を低下させるとともにNb及びNiを添加し、さらに機械的強度を維持するためFe及びCr含有量を若干増やしたSn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金製被覆管である。ZIRLOは、ウエスチングハウス社により開発されたものであり、耐食性が良好で水素吸収率も低いと考えられているZr-Nb二元合金をベースとして、機械的強度の向上のためSn及びFeを添加したSn-Fe-Nb系ジルコニウム合金製被覆管である。</p>	<p>2. 構成材料の概要</p> <p>燃料集合体の材料は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を含むプラントの使用条件の下で、燃料寿命中その健全性が維持されるよう選定している。<u>燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分を第2-1表に示す。</u>また、燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質を第2-2表に示す。</p>	

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(4/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																																																																			
<p>第3.2.1表 燃料の主要仕様</p> <p>(2) 被覆管</p> <p>a. ウラン燃料</p> <p>材 料 ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金 (Sn: 0.7~0.9wt%, Fe: 0.18~0.24wt%, Cr: 0.07~0.13wt%, Fe+Cr: 0.28~0.37wt%, Nb: 0.45~0.55wt%, Zr: 残り)</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 (Sn: 0.90~1.15wt%, Fe: 0.24~0.30wt%, Cr: 0.13~0.19wt%, Nb: 0.08~0.14wt%, Ni: 0.007~0.014wt%, Zr: 残り)</p> <p>ジルコニウムニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金</p> <p>・Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金 (Sn: 0.9~1.3wt%, Fe: 0.08~0.12wt%, Cr<sup>(*)</sup>: 0.8~1.2wt%, Zr: 残り)</p> <p>ただし、第1~第11領域 ジルカロイ-4 &lt; 中略 &gt;</p>	<p>表3-3 被覆管の合金成分</p> <table border="1" data-bbox="645 368 1191 632"> <thead> <tr> <th rowspan="2">主成分*</th> <th colspan="3">ジルカロイ-4*</th> <th colspan="3">ジルコニウム基合金</th> </tr> <tr> <th>規格</th> <th>従来Sn</th> <th>低Sn</th> <th>MDA</th> <th>NDA</th> <th>ZIRLO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sn</td> <td>1.2~1.7</td> <td>1.5</td> <td>1.3</td> <td>0.7~0.9</td> <td>-0.90~1.15</td> <td>0.9~1.3</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18~0.24</td> <td>0.2</td> <td>←</td> <td>0.18~0.24</td> <td>0.24~0.30</td> <td>0.08~0.12</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07~0.13</td> <td>0.1</td> <td>←</td> <td>0.07~0.13</td> <td>0.13~0.19</td> <td>←</td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28~0.37</td> <td>0.3</td> <td>←</td> <td>0.28~0.37</td> <td>←</td> <td>←</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>←</td> <td>←</td> <td>←</td> <td>0.45~0.55</td> <td>0.08~0.14</td> <td>0.8~1.2</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>←</td> <td>←</td> <td>←</td> <td>←</td> <td>0.007~0.014</td> <td>←</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1 数値の単位はwt%。また、上記以外の残りの成分はジルコニウム。 *2 ジルカロイ-4のうち、規格内でSn含有量を少なくしたものを低Snジルカロイ-4、それ以外を従来Snジルカロイ-4と呼ぶ。</p>	主成分*	ジルカロイ-4*			ジルコニウム基合金			規格	従来Sn	低Sn	MDA	NDA	ZIRLO	Sn	1.2~1.7	1.5	1.3	0.7~0.9	-0.90~1.15	0.9~1.3	Fe	0.18~0.24	0.2	←	0.18~0.24	0.24~0.30	0.08~0.12	Cr	0.07~0.13	0.1	←	0.07~0.13	0.13~0.19	←	Fe+Cr	0.28~0.37	0.3	←	0.28~0.37	←	←	Nb	←	←	←	0.45~0.55	0.08~0.14	0.8~1.2	Ni	←	←	←	←	0.007~0.014	←	<p>【基本設計方針】</p> <p>第2章 個別項目</p> <p>1. 炉心等</p> <p>1.1 燃料体</p> <p>1.1.2 17行17列B型燃料集合体（ウラン燃料）</p> <p>(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> <table border="1" data-bbox="1294 563 1525 740"> <tbody> <tr> <td>スズ</td> <td>0.90~1.15</td> </tr> <tr> <td>鉄</td> <td>0.24~0.30</td> </tr> <tr> <td>クロム</td> <td>0.13~0.19</td> </tr> <tr> <td>ニオブ</td> <td>0.08~0.14</td> </tr> <tr> <td>ニッケル</td> <td>0.007~0.014</td> </tr> <tr> <td>酸素</td> <td>←</td> </tr> </tbody> </table>	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	←	<p>・燃料被覆材の化学成分のうち酸素については、別記-10に定められているジルコニウム合金燃料被覆材の規格であるJIS H 4751において化学成分の一つとして挙げられているものの、「酸素含有量は、受渡当事者間の協定による。」とされていることを踏まえ、基本設計である設置許可では化学成分として酸素を記載しておらず、詳細設計である設計及び工事の計画においては酸素を記載している。（酸素含有量の設定については添付参照）</p> <p>(※) 添付書類八の誤記であり、正しくは「Nb」。</p>
主成分*	ジルカロイ-4*			ジルコニウム基合金																																																																		
	規格	従来Sn	低Sn	MDA	NDA	ZIRLO																																																																
Sn	1.2~1.7	1.5	1.3	0.7~0.9	-0.90~1.15	0.9~1.3																																																																
Fe	0.18~0.24	0.2	←	0.18~0.24	0.24~0.30	0.08~0.12																																																																
Cr	0.07~0.13	0.1	←	0.07~0.13	0.13~0.19	←																																																																
Fe+Cr	0.28~0.37	0.3	←	0.28~0.37	←	←																																																																
Nb	←	←	←	0.45~0.55	0.08~0.14	0.8~1.2																																																																
Ni	←	←	←	←	0.007~0.014	←																																																																
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	←																																																																					

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(5/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		<p>【資料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】</p>	<p>・設計及び工事の計画に機械的性質を記載しているのは、技術基準規則23条への適合を示すため、記載している。</p>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">構成部品</th> <th rowspan="2">材料の種類</th> <th colspan="2">主成分(wt%)</th> <th colspan="11">元素 (ppm)</th> </tr> <tr> <th>Sn</th> <th>Al</th> <th>Si</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>N</th> <th>O</th> <th>S</th> <th>Ca</th> <th>Mg</th> <th>Fe</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>Se</th> <th>Mo</th> <th>Zr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="5">燃料被覆材</td> <td rowspan="5">Sn-Fe-Cr-Ni ジルコニウム 合金</td> <td>Sn</td> <td>0.90115</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.24330</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.13019</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>0.66014</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>0.007014</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="5">燃料被覆材 線検</td> <td rowspan="5">ASTM B351 Grade R60604 (JIS H4751) ZrTN 604D 相当</td> <td>Sn</td> <td>1.20170</td> <td>Al</td> <td>75</td> <td>B</td> <td>0.6</td> <td>C</td> <td>270</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18024</td> <td>Ca</td> <td>0.5</td> <td>Co</td> <td>20</td> <td>Cu</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07013</td> <td>H</td> <td>25</td> <td>HI</td> <td>100</td> <td>Mg</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.25037</td> <td>Mn</td> <td>50</td> <td>Mo</td> <td>50</td> <td>N</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td>Ni</td> <td>70</td> <td>Sr</td> <td>120</td> <td>Ti</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>U</td> <td>3.5</td> <td>W</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="5">燃料被覆材内 シムプル</td> <td rowspan="5">Sn-Fe-Cr-Ni ジルコニウム 合金</td> <td>Sn</td> <td>1.20170</td> <td>Al</td> <td>75</td> <td>B</td> <td>0.6</td> <td>C</td> <td>270</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18024</td> <td>Ca</td> <td>0.5</td> <td>Co</td> <td>20</td> <td>Cu</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07013</td> <td>H</td> <td>25</td> <td>HI</td> <td>100</td> <td>Mg</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.25037</td> <td>Mn</td> <td>50</td> <td>Mo</td> <td>50</td> <td>N</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td>Ni</td> <td>70</td> <td>Sr</td> <td>120</td> <td>Ti</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>U</td> <td>3.5</td> <td>W</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="5">燃料被覆材内 シムプル 下部線検</td> <td rowspan="5">Sn-Fe-Cr-Ni ジルコニウム 合金</td> <td>Sn</td> <td>1.20170</td> <td>Al</td> <td>75</td> <td>B</td> <td>0.6</td> <td>C</td> <td>270</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18024</td> <td>Ca</td> <td>0.5</td> <td>Co</td> <td>20</td> <td>Cu</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07013</td> <td>H</td> <td>25</td> <td>HI</td> <td>100</td> <td>Mg</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.25037</td> <td>Mn</td> <td>50</td> <td>Mo</td> <td>50</td> <td>N</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td>Ni</td> <td>70</td> <td>Sr</td> <td>120</td> <td>Ti</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>U</td> <td>3.5</td> <td>W</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	構成部品	材料の種類	主成分(wt%)		元素 (ppm)											Sn	Al	Si	B	C	N	O	S	Ca	Mg	Fe	Mn	P	Se	Mo	Zr	燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Ni ジルコニウム 合金	Sn	0.90115																	Fe	0.24330																	Cr	0.13019																	Ni	0.66014																	O	0.007014																			Zr	残部																燃料被覆材 線検	ASTM B351 Grade R60604 (JIS H4751) ZrTN 604D 相当	Sn	1.20170	Al	75	B	0.6	C	270										Fe	0.18024	Ca	0.5	Co	20	Cu	50										Cr	0.07013	H	25	HI	100	Mg	20										Fe+Cr	0.25037	Mn	50	Mo	50	N	50										O		Ni	70	Sr	120	Ti	50												Zr	残部	U	3.5	W	100											燃料被覆材内 シムプル	Sn-Fe-Cr-Ni ジルコニウム 合金	Sn	1.20170	Al	75	B	0.6	C	270										Fe	0.18024	Ca	0.5	Co	20	Cu	50										Cr	0.07013	H	25	HI	100	Mg	20										Fe+Cr	0.25037	Mn	50	Mo	50	N	50										O		Ni	70	Sr	120	Ti	50												Zr	残部	U	3.5	W	100											燃料被覆材内 シムプル 下部線検	Sn-Fe-Cr-Ni ジルコニウム 合金	Sn	1.20170	Al	75	B	0.6	C	270										Fe	0.18024	Ca	0.5	Co	20	Cu	50										Cr	0.07013	H	25	HI	100	Mg	20										Fe+Cr	0.25037	Mn	50	Mo	50	N	50										O		Ni	70	Sr	120	Ti	50												Zr	残部	U	3.5	W	100											
構成部品	材料の種類	主成分(wt%)			元素 (ppm)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
		Sn	Al	Si	B	C	N	O	S	Ca	Mg	Fe	Mn	P	Se	Mo	Zr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Ni ジルコニウム 合金	Sn	0.90115																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		Fe	0.24330																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		Cr	0.13019																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		Ni	0.66014																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		O	0.007014																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		Zr	残部																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
燃料被覆材 線検	ASTM B351 Grade R60604 (JIS H4751) ZrTN 604D 相当	Sn	1.20170	Al	75	B	0.6	C	270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Fe	0.18024	Ca	0.5	Co	20	Cu	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Cr	0.07013	H	25	HI	100	Mg	20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Fe+Cr	0.25037	Mn	50	Mo	50	N	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		O		Ni	70	Sr	120	Ti	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Zr	残部	U	3.5	W	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
燃料被覆材内 シムプル	Sn-Fe-Cr-Ni ジルコニウム 合金	Sn	1.20170	Al	75	B	0.6	C	270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Fe	0.18024	Ca	0.5	Co	20	Cu	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Cr	0.07013	H	25	HI	100	Mg	20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Fe+Cr	0.25037	Mn	50	Mo	50	N	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		O		Ni	70	Sr	120	Ti	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Zr	残部	U	3.5	W	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
燃料被覆材内 シムプル 下部線検	Sn-Fe-Cr-Ni ジルコニウム 合金	Sn	1.20170	Al	75	B	0.6	C	270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Fe	0.18024	Ca	0.5	Co	20	Cu	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Cr	0.07013	H	25	HI	100	Mg	20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Fe+Cr	0.25037	Mn	50	Mo	50	N	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		O		Ni	70	Sr	120	Ti	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Zr	残部	U	3.5	W	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		<p>第2-2表 燃料集合体の上記構成部品材料の機械的性質</p>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>構成部品</th> <th>材料の種類</th> <th>項目</th> <th>値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">燃料被覆材</td> <td rowspan="3">NDA</td> <td>(高温引張試験：563℃)</td> <td>引張強さ</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>耐力</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>伸び</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">燃料被覆材線検</td> <td rowspan="3">ジルコイ-4</td> <td>(常温引張試験：室温<sup>(*)</sup>)</td> <td>引張強さ</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>耐力</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>伸び</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">燃料被覆材線検</td> <td rowspan="3">ジルコイ-4</td> <td>(高温引張試験：516℃)</td> <td>引張強さ</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>耐力</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>伸び</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">燃料被覆材内 シムプル</td> <td rowspan="3">ジルコイ-4</td> <td>(常温引張試験：室温<sup>(*)</sup>)</td> <td>引張強さ</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>耐力</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>伸び</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">中間部支持棒子</td> <td rowspan="3">ジルコイ-4</td> <td>(常温引張試験：室温<sup>(*)</sup>)</td> <td>引張強さ</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>耐力</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>伸び</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">燃料被覆材線検</td> <td rowspan="3">Zr合金</td> <td>(常温引張試験：室温<sup>(*)</sup>)</td> <td>引張強さ</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>耐力</td> <td>MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>伸び</td> <td>%</td> </tr> </tbody> </table>	構成部品	材料の種類	項目	値	燃料被覆材	NDA	(高温引張試験：563℃)	引張強さ	MPa		耐力	MPa		伸び	%	燃料被覆材線検	ジルコイ-4	(常温引張試験：室温 <sup>(*)</sup> )	引張強さ	MPa		耐力	MPa		伸び	%	燃料被覆材線検	ジルコイ-4	(高温引張試験：516℃)	引張強さ	MPa		耐力	MPa		伸び	%	燃料被覆材内 シムプル	ジルコイ-4	(常温引張試験：室温 <sup>(*)</sup> )	引張強さ	MPa		耐力	MPa		伸び	%	中間部支持棒子	ジルコイ-4	(常温引張試験：室温 <sup>(*)</sup> )	引張強さ	MPa		耐力	MPa		伸び	%	燃料被覆材線検	Zr合金	(常温引張試験：室温 <sup>(*)</sup> )	引張強さ	MPa		耐力	MPa		伸び	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
構成部品	材料の種類	項目	値																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
燃料被覆材	NDA	(高温引張試験：563℃)	引張強さ	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			耐力	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			伸び	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
燃料被覆材線検	ジルコイ-4	(常温引張試験：室温 <sup>(*)</sup> )	引張強さ	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			耐力	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			伸び	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
燃料被覆材線検	ジルコイ-4	(高温引張試験：516℃)	引張強さ	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			耐力	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			伸び	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
燃料被覆材内 シムプル	ジルコイ-4	(常温引張試験：室温 <sup>(*)</sup> )	引張強さ	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			耐力	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			伸び	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
中間部支持棒子	ジルコイ-4	(常温引張試験：室温 <sup>(*)</sup> )	引張強さ	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			耐力	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			伸び	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
燃料被覆材線検	Zr合金	(常温引張試験：室温 <sup>(*)</sup> )	引張強さ	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			耐力	MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
			伸び	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(6/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類A)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a. 構成材料</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、<u>1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、ウラン・プルトニウム混合酸化物、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</u> (1) (6)</p>	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>改良被覆管及びガドリニア濃度約10wt%の高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性並びに高燃焼度下におけるペレット照射挙動に関する最近の知見は、以下のとおりである。</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を検証し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大阪4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ並びに燃料棒平均燃焼度で約62,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・耐食性は向上(図4-1及び図4-2参照)。</li> <li>・なお、水素吸収率は同等(図4-3及び図4-4参照)。</li> <li>・炉内クリップについて、MDA及びZIRLOは減少、NDAは同等(図4-5及び図4-6参照)。</li> <li>・照射成長は減少(図4-7及び図4-8参照)。</li> </ul> <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶解点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いたデータに比べ高い値が得られている(図4-9及び図4-10参照)。</p>	<p>5.3 耐食性</p> <p>NDA被覆管が1次冷却材と接触すると、ジルカロイ-4被覆管と同様に、</p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p>の反応により酸化腐食が進むとともに、発生した水素の一部を吸収する。</p> <p>実機では放射線照射下で1次冷却材の放射線分解により発生する酸素により、ジルカロイの腐食が放射線照射のない環境に比べて加速される可能性があるが、PWKでは1次冷却材に水素注入を行い酸素の発生を抑制している。実機の腐食は以下に示すとおりである。</p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>ジルカロイ被覆管外面には、原子炉内使用条件下で高温の1次冷却材との反応により酸化膜が形成される。一般に、ジルカロイ被覆管の腐食速度は、酸化膜と被覆管金属母材の界面温度についてのアレニウス型温度依存性を示す。また、その腐食増量(酸素による質量増加)の時間変化を第5-7図に示すが、初期の段階では時間に対して立方則(時間の3乗根に比例)に従って増加し、酸化膜厚さが2~3μm(遷移点)を超えた後は時間に対して直線的に増加する。原子炉内での被覆管酸化膜厚さを第5-8図に示す。原子炉内では滞在期間が長くなり酸化膜が厚くなるに従って、形成された酸化膜と金属母材の境界温度が上昇するため、燃焼度の進行に伴って酸化膜厚さは増大する傾向になる。更に腐食が進行すると腐食量の急激な増加が見られるが、これは酸化により発生する水素のうち、被覆管に吸収された水素が被覆管外面に析出し、この析出物が腐食に起因すると考えられている。</p> <p>第5-8図から分かるように、被覆管の原子炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されており、NDA被覆管については、ジルカロイ-4被覆管と比較して腐食速度の低減が認められる。</p> <p>したがって、<u>NDA被覆管の腐食挙動はジルカロイ-4被覆管と同様であり、腐食が急激に増加する領域でも耐食性の向上が維持されることから、本申請の燃料集合体の使用範囲までNDA被覆管の耐食性の向上が維持されると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで(資料7「強度に関する説明書」の3.4項(3)に示す。)設計評価に反映している。</u></p>	



表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線部：安全審査資料と設工認の整合箇所、バツチング部：A型燃料集合体に係る記載

(7/26)

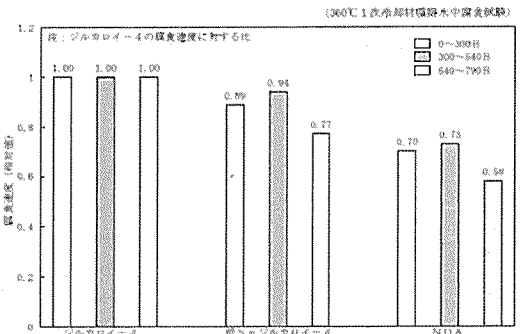
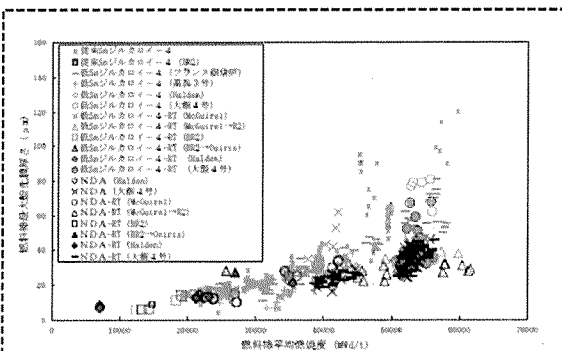
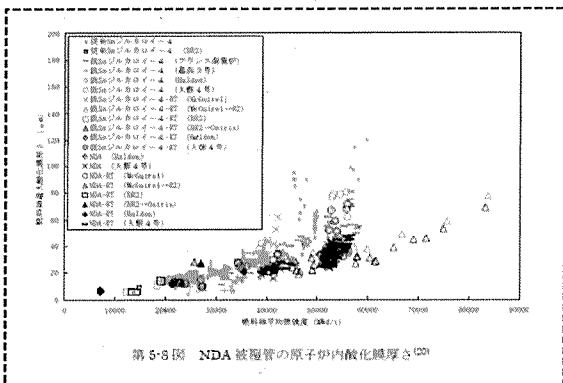
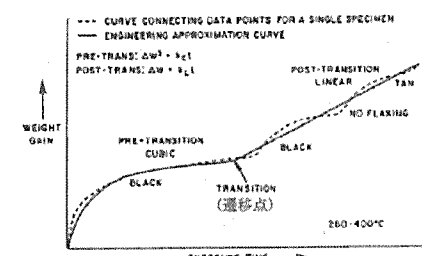
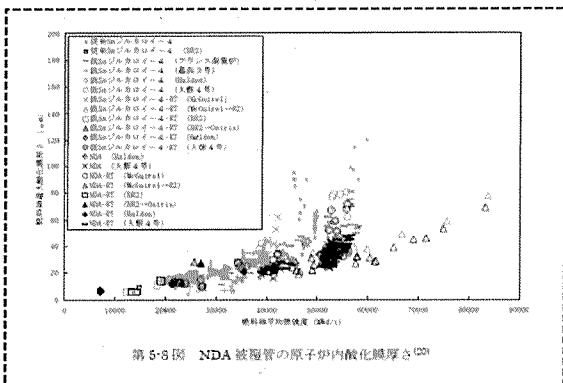
設置変更許可申請書 (本文及び添付書類)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>(360℃ 1夜冷却材循環水中腐食試験)</p> <p>注：ジルコロイ-4の腐食速度に対する比</p>  <p>図4-2(1) 炉外腐食試験における改良被覆管 (NDA) の腐食特性</p>  <p>図4-2(2) 改良被覆管 (NDA) の炉内酸化膜厚さ</p> 	<p>設計及び工事計画認可申請書 該当事項</p>  <p>第5-7図 炉外腐食試験におけるジルコロイ-2とジルコロイ-4の典型的な腐食増量曲線<sup>(2)</sup></p>  <p>第5-8図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さ<sup>(2)</sup></p>	<p>備考</p> <p>・安全審査資料に図4-2(1)を記載しているのは、参考として異なる被覆材における腐食速度の相対値を示しており、実際の腐食挙動は図4-2(2)を用いて設計評価(資料7)に反映しているため、設計及び工事の計画では記載不要である。</p>

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、バッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(8/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類A）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a. 構成材料</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、<u>1次冷却材</u>、<u>二酸化ウラン</u>、<u>ガドリニア入り二酸化ウラン</u>、<u>ウラン-プルトニウム混合酸化物</u>、<u>核分裂生成物等</u>に対して高い耐食性を示し、かつ、<u>高い信頼性を有する材料</u>である。(1)(6)</p>	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>改良被覆管及びガドリニア濃度約10wt%の高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性並びに高燃焼度下におけるペレット照射挙動に関する最近の知見は、以下のとおりである。</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ並びに燃料棒平均燃焼度で約62,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・耐食性は向上(図4-1及び図4-2参照)。</li> <li>・なお、水素吸収率は同算(図4-3及び図4-4参照)。</li> <li>・炉内クランプについて、MDA及びZIRLOは減少、NDAは同等(図4-5及び図4-6参照)。</li> <li>・照射成長は減少(図4-7及び図4-8参照)。</li> </ul> <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて融点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いたデータに比べ高い値が得られている(図4-9及び図4-10参照)。</p>	<p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>ジルコニウムと水との反応で発生した水素の一部は、<u>被覆管に吸収される</u>。<u>被覆管の原子炉内での水素吸収量と酸化膜厚さの関係を第5-9図に示すが、NDA被覆管の水素吸収量と酸化膜厚さとはジルカロイ-4被覆管と同様に良い相関がある</u>。酸化膜厚さと水素吸収率(酸化反応で生じた水素量に対する被覆管金属部に吸収された水素量の割合)の関係を第5-10図に示す。NDA被覆管の水素吸収特性は、<u>ジルカロイ-4被覆管のそれと同等である<sup>(20)</sup></u>。これは酸化膜を透過する水素量及び金属部に吸収される水素吸収量が被覆管の種類(ジルカロイ-4被覆管及びNDA被覆管)によらないためと考えられる。</p> <p>したがって、<u>NDA被覆管の水素吸収率は腐食により発生した水素の一部が酸化膜厚さに応じてある割合で被覆管に取り込まれること、及びその割合はNDA被覆管とジルカロイ-4被覆管で同等であることから、これらの挙動を計算モデルに組み込んで(資料7「強度に関する説明書」の3.4項(3)に示す。)設計評価に反映している</u>。</p> <p>また、NDA被覆管の水素吸収量は、本申請の燃料集合体の使用範囲までジルカロイ-4被覆管に比較して低減すると考えられる。</p>	

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、バッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(9/26)

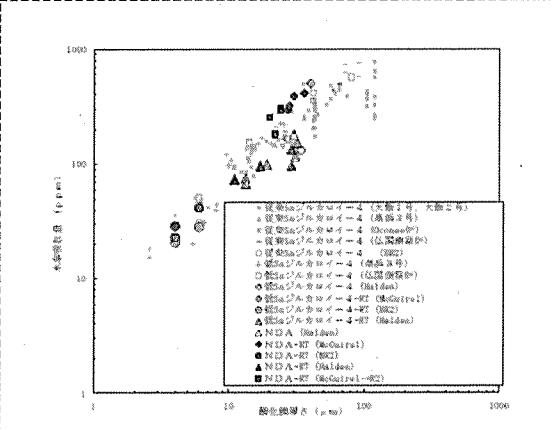
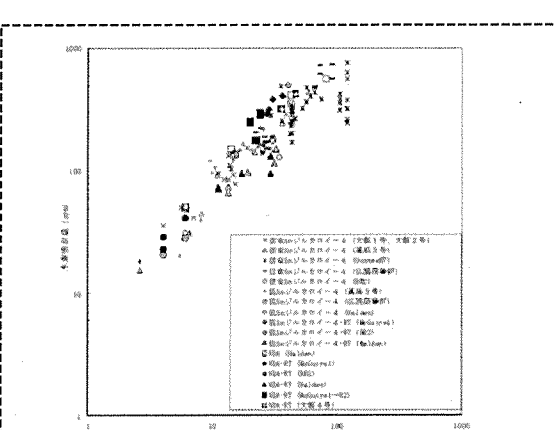
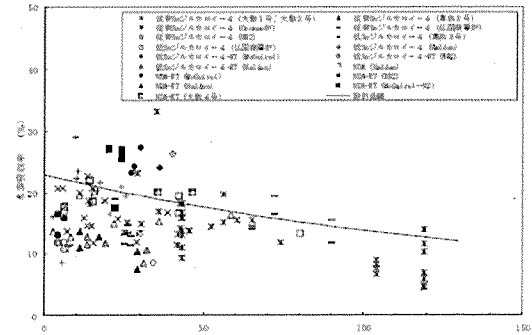
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図4-4 改良被覆管 (NDA) の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係</p>	 <p>第5-9図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係(20)</p>  <p>第5-10図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収率の関係(20)</p>	<p>設計及び工事の計画に第5-10図を記載しているのは、酸化膜厚さと水素吸収率の関係性がジルカロイ-4と同等であることを設計評価（資料7）に反映しているため、記載している。</p>

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(10/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a. 構成材料</p> <p>（中略）</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、ウラン・プルトニウム混合酸化物、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。(1)(6)</p>	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>改良被覆管及びガドリニア濃度約10wt%の高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性並びに高燃焼度下におけるペレット照射挙動に関する最近の知見は、以下のとおりである。</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ並びに燃料棒平均燃焼度で約62,000Mwd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・耐食性は向上（図4-1及び図4-2参照）。</li> <li>・なお、水素吸収率は同等（図4-3及び図4-4参照）。</li> <li>・炉内クリープについて、MDA及びZIRLOは減少、NDAは同等（図4-5及び図4-6参照）。</li> <li>・照射成長は減少（図4-7及び図4-8参照）。</li> </ul> <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000Mwd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いたデータに比べ高い値が得られている（図4-9及び図4-10参照）。</p>	<p>5.2.3 クリープ<sup>(注1)</sup>特性</p> <p>被覆管は内外圧差に基づくクリープによって外径が減少していくが、ペレットと被覆管が接触した後は、ペレットの外径変化に依存して被覆管外径が増加する。<u>実機PWR燃料棒の照射後の外径変化を第5-5図に示すが、約20,000Mwd/t程度までの低燃焼度域の外径減少より、NDA被覆管を採用した燃料棒の照射による外径変化は、低Snジルカロイ-4被覆管を採用した燃料棒のそれと同等となっている。被覆管クリープは、転位（材料に元々ある結晶格子のずれ）の移動によるものであるが、ジルコニウム中に固溶しているSn、Nbは転位を捕獲し、その動きを抑制する。NDA被覆管と低Snジルカロイ-4被覆管のクリープ特性が同等であることは、NDA被覆管中の固溶Sn及び固溶Nbによるクリープを抑制する効果が、低Snジルカロイ-4被覆管の固溶Snによるそれと同程度の効果であることを示している<sup>(20)</sup>。以上より、<u>NDA被覆管のクリープ特性は低Snジルカロイ-4被覆管と同じとして計算モデルに組み込んで（資料7「強度に関する説明書」の3.2.2項(3)d.に示す。）設計評価に反映している。</u></u></p>	

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(11/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>図4-6 改良被覆管 (NDA) の外径変化 [Halden 伊]</p>	<p>第5-6図 燃料棒外径変化 (実機照射セグメント燃料棒) (20)</p>	

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線部：安全審査資料と設工認の整合箇所、バツチング部：A型燃料集合体に係る記載

(12/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>改良被覆管及びガドリニア濃度約10wt%の高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性並びに高燃焼度下におけるペレット照射挙動に関する最近の知見は、以下のとおりである。</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ並びに燃料棒平均燃焼度で約62,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・耐食性は向上（図4-1及び図4-2参照）。</li> <li>なお、水素吸収率は同等（図4-3及び図4-4参照）。</li> <li>・炉内クリーブについて、MDA及びZIRLOは減少、NDAは同等（図4-5及び図4-6参照）。</li> <li>・照射成長は減少（図4-7及び図4-8参照）。</li> </ul> <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いたデータに比べ高い値が得られている（図4-9及び図4-10参照）。</p>	<p>5.2.4照射成長<sup>(E1)</sup></p> <p>照射成長の支配要因は、ジルコニウム中の稠密六方晶(α相)の向きが比較的揃った組織において中性子照射で生じる格子欠陥のうち、空孔は六方晶底面へ、格子間原子は柱面へ選択的に集まるためと言われている。第5-6図に示すように、NDA被覆管とジルカロイ-4被覆管の照射成長は、ともに高燃焼度域まで高速中性子照射量にほぼ比例している。また、NDA被覆管の照射成長はジルカロイ-4被覆管と比較して小さくなっており、この傾向は比較的高燃焼度領域まで認められる。NDA被覆管に含まれているNbは照射欠陥の動きを抑制するため、照射成長は小さくなる傾向にあると考えられる。</p> <p>したがって、<u>ジルカロイ-4被覆管と比較してNDA被覆管の照射成長は、本申請の燃料集合体の使用範囲まで照射成長量が小さくなる</u>と考えられ、<u>これらの差動を計算モデルに組み込んで、(資料7「強度に関する説明書」の3.2.2項(3)e.に示す。)設計評価に反映している。</u></p> <p>燃料棒の設計に当たっては、上記の耐放射線性に関する事項を考慮した上で、被覆管応力等が設計基準を満足するようにする。</p>	

表 1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、バッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(13/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>図 4-8 改良被覆管 (NDA) の照射成長</p>	<p>第 5-6 図 NDA 被覆管の照射成長<sup>(C)</sup></p>	

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(14/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類A）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>5.2 耐放射線性</p> <p>NDA被覆管は、二酸化ウラン燃料と接触して原子炉内に置かれるので、<math>\alpha</math>線、<math>\beta</math>線、<math>\gamma</math>線、核分裂片及び中性子の影響を受ける。</p> <p><math>\alpha</math>線及び<math>\beta</math>線のような荷電粒子は、金属中を通り抜けるとき、電気的な相互作用によって原子の軌道電子を引き離すイオン化作用を起こす。また、<math>\gamma</math>線も軌道電子を原子から引き離す作用を起こす。このように<math>\alpha</math>線、<math>\beta</math>線、<math>\gamma</math>線は、主に金属原子の軌道電子と作用してエネルギーを消失していくので、NDA被覆管の照射損傷に与える影響は軽微である。</p> <p>核分裂片は、その飛程が限定された近距離にしか及ばないため、二酸化ウラン燃料の表面で起こった核分裂だけが被覆管の内表面にしか作用せず、事実上の照射損傷を与えない。</p> <p>中性子は電荷を持たないので、金属中での電気的な相互作用によってエネルギーを失うことがなく、そのエネルギーは主として原子核との弾性衝突により多数の原子を格子位置からはじき出す作用によって消失される。この結果、金属の結晶格子内あるいは結晶粒界などに空孔あるいは格子間原子の存在が認められるようになり、この微視的欠陥が材料の巨視的な物性値に変化をもたらすことになる。中性子が金属中を通り抜けるときに形成される格子欠陥の濃度は、中性子のエネルギーに比例するため、NDA被覆管の照射損傷に最も大きな寄与をするのは高速中性子である。</p> <p>したがって、NDA被覆管の照射損傷の影響を受ける以下の特性においては、高速中性子の影響に着目すればよい。</p>	<p>・設計及び工事の計画には、耐放射線性に関する概要を記載している。</p>



表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(15/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>【安全審査資料：伊方発電所1、2、3号炉 燃料の機械設計について】</p> <p>2. 燃料橋の健全性</p> <p>2. 1 設計方針</p> <p>(3) 被覆管応力</p> <p>被覆管にかかる応力は、被覆材の耐力以下であること。</p> <p>ここで、<u>図2.1.1-4に示すように、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の耐力は、ジルカロイ-4製被覆管の耐力と同等であり、炉内での使用温度及び高速中性子照射の効果を考慮すると、約310N/mm<sup>2</sup>～約500N/mm<sup>2</sup>となる。被覆管耐力基準値は、未照射、照射のいずれの場合でも、被覆管耐力の最確値にその不確定性を考慮して保守的に定めた温度依存の被覆管耐力を使用する。</u></p> <p>(4) 被覆管引張歪</p> <p>被覆管に生じ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。</p> <p>ここで、<u>図2.1.1-5に示すように、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の延性は、ジルカロイ-4製被覆管の延性と同等であり、従来と同様、各過渡変化に際して円周方向引張歪の変化量が1%を超えないことを設計基準として使用する。</u></p>	<p>5.2.1 機械的性質</p> <p>機械特性への影響因子としては、照射脆化と水素脆化が考えられる。照射脆化は照射欠陥の蓄積（濃度）によるが、これは高速中性子束、被覆管温度及び時間に依存する。実機原子炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を第5-1図に示す。引張強さ及び耐力<sup>(48)</sup>は、照射初期において増加した後、照射量によらず著しい変化が見られず、<u>ジルカロイ-4被覆管と同等である。</u>また、破断伸びは、照射初期に低下した後は照射量によらず著しい変化がなく、<u>ジルカロイ-4被覆管と同等である。</u>その他の材料物性においても、原子炉安全小委員会においてジルカロイ-4被覆管と同等<sup>(49)</sup>であることが確認されている。</p> <p>なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量27～32×10<sup>20</sup>n/m<sup>2</sup>（E&gt;1MeV）まで十分な延性が確保されているとの報告例もある<sup>(50)</sup>。</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を第5-2図に示すが、<u>ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。</u>照射材については、第5-3図に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、NDA被覆管は上述のとおり、未照射材で水素吸収による機械特性への影響がジルカロイ-4被覆管と同等であることから、照射材についてもジルカロイ-4被覆管と同様に本申請の燃料集合体の使用範囲まで機械特性は変わらない。以上より、<u>NDA被覆管の応力及びびずみに対する設計基準や材料物性はジルカロイ-4被覆管と同じとして設計評価する。</u></p>	

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(16/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>図2.1-4(2) 改良被覆管(NDA)の耐力</p> <p>図2.1-5(2) 改良被覆管(NDA)の延性</p>	<p>第5-1図 NDA被覆管の機械特性①</p> <p>第5-1図 NDA被覆管の機械特性②</p> <p>第5-1図 NDA被覆管の機械特性③</p>	<p>設計及び工事の計画に引張強さを記載しているのは、第2-2表の機械的性質の項目との整合のため、記載している。</p>

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(17/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>2.2 設計評価</p> <p>(6) その他の評価事項</p> <p>ステップ2燃料棒の健全性評価に際し、上述の評価事項の他に高燃焼度化に伴う影響を確認した主要事項について以下に示す。</p> <p>a. 被覆管の腐食及び水素吸収</p> <p>炉内滞留中に生じる腐食による被覆管肉厚の最大減肉量を評価した結果、14×14型燃料の場合、A型で約9.5%、B型で約8.8%、17×17型燃料の場合、A型で約7.6%、B型で約6.4%となり、いずれも被覆管応力への影響が小さい(10%以下の減肉量である)。</p> <p>また、被覆管の最大水素吸収量を評価した結果、14×14型燃料の場合、A型で約670ppm、B型で約710ppm、17×17型燃料の場合、A型で約520ppm、B型で約600ppmとなり、図2.2-5に示す水素吸収させた未照射被覆管の高温引張試験結果及び図2.2-6に示す照射被覆管の高温引張試験により得られた破断伸びと水素吸収量の関係から、延性が確保されていることが確認できる約800ppmより小さい。</p>	<p>5.2.1 機械的性質</p> <p>(中略)</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を第5-2図に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、第5-3図に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、NDA被覆管は上述のとおり、未照射材で水素吸収による機械特性への影響がジルカロイ-4被覆管と同様であることから、照射材についてもジルカロイ-4被覆管と同様に本申請の燃料集合体の使用範囲まで機械特性は変わらない。以上より、NDA被覆管の応力及びひずみに対する設計基準や材料物性はジルカロイ-4被覆管と同じとして設計評価する。</p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>(中略)</p> <p>第5-8図から分かるように、被覆管の原子炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されており、NDA被覆管については、ジルカロイ-4被覆管と比較して腐食速度の低減が認められる。</p> <p>したがって、NDA被覆管の腐食挙動はジルカロイ-4被覆管と同様であり、腐食が急激に増加する領域でも耐食性の向上が維持されることから、本申請の燃料集合体の使用範囲までNDA被覆管の耐食性の向上が維持されると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで(資料7「強度に関する説明書」の3.4項(3)に示す。)設計評価に反映している。</p> <p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>(中略)</p> <p>したがって、NDA被覆管の水素吸収率は腐食により発生した水素の一部が酸化膜厚さに応じてある割合で被覆管に取り込まれること、及びその割合はNDA被覆管とジルカロイ-4被覆管で同等であることから、これらの挙動を計算モデルに組み込んで(資料7「強度に関する説明書」の3.4項(3)に示す。)設計評価に反映している。</p> <p>また、NDA被覆管の水素吸収量は、本申請の燃料集合体の使用範囲までジルカロイ-4被覆管と比較して低減すると考えられる。</p>	

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(18/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類A）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>第5-2図 未照射 NDA 被覆管の機械特性と水素濃度の関係<sup>(20)</sup></p>	<p>・設計及び工事の計画では、800ppm以下でNDAの機械特性が変わらないことを具体的に示している。</p>

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(19/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類A）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>第5-3図 被覆管水素濃度と破断伸びの関係(%)</p>	<p>・設計及び工事の計画では、800ppm以下でNDAの機械特性が変わらないことを具体的に示している。</p>

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(20/26)

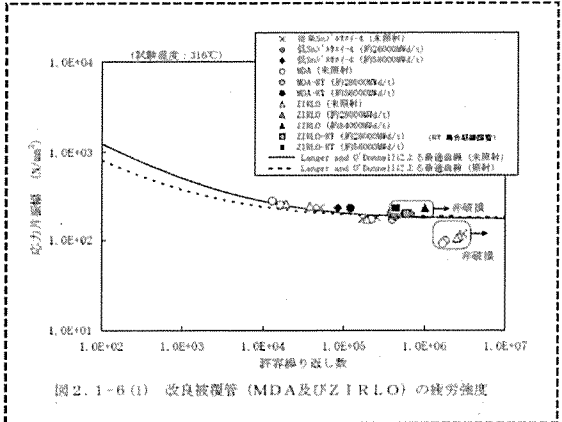
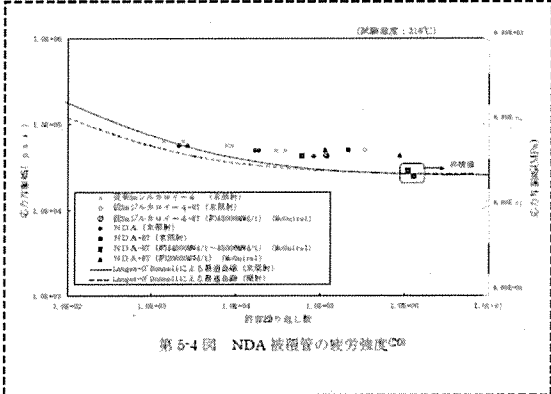
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>2. 1 設計方針</p> <p>(5) 被覆管累積疲労</p> <p>被覆管の累積疲労サイクル数は、設計疲労寿命を超えないこと。</p> <p>ここで、図2.1-6に示すように、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の疲労強度は、ジルカロイ-4製被覆管の疲労強度と同等であり、設計疲労曲線としては、従来と同様、Langer and O'Donnellの曲線を使用する。</p>  <p>図2.1-6 (1) 改良被覆管（MDA及びZIRLO）の疲労強度</p>	<p>5.2.2 疲労特性</p> <p>NDA被覆管の疲労試験結果と、ジルカロイに対するLanger and O'Donnellの疲労試験結果を第5-4図に示す。一般に疲労特性は機械特性に依存するが、5.2.1項で述べたとおり、NDA被覆管はジルカロイ-4被覆管と同等であるため、NDA被覆管の疲労特性は、ジルカロイ-4被覆管と同等となる。以上より、NDA被覆管の設計疲労曲線はジルカロイ-4被覆管と同一とする。</p>  <p>第5-4図 NDA被覆管の疲労強度</p>	<p>備考</p>

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(21/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類A）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a. 構成材料</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、<u>ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し</u>、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、ウラン・プルトニウム混合酸化物、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。(1)(6)</p>	<p>2. 2 設計評価</p> <p>(6) その他の評価事項</p> <p>b. PCI破損</p> <p>燃料のPCI（ペレット-被覆管相互作用）破損は、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にPCI破損しきい値を超えた場合に起こることが、種々の実験結果や実炉での経験から知られている。</p> <p><u>改良被覆管の耐PCI性は、図2.2-7に示すとおり、高燃焼度領域までジルカロイ-4製被覆管と同等以上であり、現行のPCI破損しきい値に対し十分余裕があることが確認でき、これをPCI破損評価に適用する。</u></p> <p>サイクル初期及びサイクル末期において想定した原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を、14×14型燃料については図2.2-8、17×17型燃料については図2.2-9にPCI破損しきい値とともに示す。これより、運転時の異常な過渡変化時における最大線出力密度及び線出力密度変化幅は、同時にPCI破損しきい値を超えることはなく、PCI破損は生じない。</p>	<p>5.4.1 耐PCI性</p> <p>被覆管は、腐食性FPガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用(PCMI)を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ(SCC)による破損(PCI破損)を起こす。このPCI破損におけるSCCは、Zr中の稠密六方晶(α相)の底面にほぼ平行な面上を伝播するが、現行の被覆管製法においては、この底面がPCMI時の発生応力方向、すなわち周方向に配向(C軸を径方向に配向)されており、PCI破損の抑制が図られている。</p> <p>被覆管の耐PCI性を把握するため、試験炉において出力急昇試験が実施されており、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にある値(PCI破損しきい値)を超えた場合にPCI破損が起こることが経験的に知られている。</p> <p><u>NDA被覆管の耐PCI性を第5-11図にPCI破損しきい値とともに示す。NDA被覆管の耐PCI性、すなわちSCC破損特性はジルカロイ-4被覆管と同等以上であり、ジルカロイ-4被覆管で使用されている現行のPCI破損しきい値が適用できる<sup>(20)</sup>。以上より、NDA被覆管のPCI破損しきい値はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</u></p>	

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(22/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>図 2.2-7(2) 改良被覆管 (NDA) の耐PCI性</p>	<p>第5-11図 NDA被覆管の耐PCI性<sup>(2)</sup></p>	



表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(23/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類A）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a. 構成材料</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、ウラン・プルトニウム混合酸化物、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。(1)(6)</p>	<p>(6) その他の評価事項</p> <p>b. PCI破損</p> <p>燃料のPCI（ペレット-被覆管相互作用）破損は、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にPCI破損しきい値を超えた場合に起こることが、種々の実験結果や実炉での経験から知られている。</p> <p>改良被覆管の耐PCI性は、図2.2-7に示すとおり、高燃焼度領域までジルカロイ-4製被覆管と同様以上であり、現行のPCI破損しきい値に対し十分余裕があることが確認でき、これをPCI破損評価に適用する。</p> <p>サイクル初期及びサイクル末期において想定した原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を、14×14型燃料については図2.2-8、17×17型燃料については図2.2-9にPCI破損しきい値とともに示す。これより、運転時の異常な過渡変化時における最大線出力密度及び線出力密度変化幅は、同時にPCI破損しきい値を超えることはなく、PCI破損は生じない。</p>	<p>3.3.1 二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応</p> <p>ジルコニウム基合金と二酸化ウランが接触した場合、照射により過剰になった二酸化ウラン中の酸素がジルコニウム中に拡散し、被覆管内面酸化膜(ZrO<sub>2</sub>)が形成される。さらに、両者が強く接触するようになるとジルコニウム酸化層へのウランの拡散により、ジルコニウム酸化層は(Zr,U)O<sub>2</sub>固溶体となり、これがボンディング層を形成して、強固なペレット-被覆管の固着の原因となる<sup>(10)</sup>。これらは、被覆管の腐食及びPCI<sup>(9)</sup>へ影響を及ぼす可能性が考えられる。</p> <p>しかしながら、二酸化ウランペレットとジルコニウムを密着させ510℃で約500日以上保持した場合においても反応は生じないことが報告されている<sup>(9)</sup>。通常運転中においてペレットと被覆管及び燃料被覆材端極の接触面の温度が長期間にわたって500℃を超えないことから、反応は小さいと考えられる。</p> <p>また、ハルデン炉において燃料棒平均燃焼度55,000MWD/tまで照射された燃料棒の被覆管内面観察によれば、低Snジルカロイ-4被覆管<sup>(9)(11)</sup>とNDA被覆管とで、被覆管内面酸化膜の状態に差は認められていない<sup>(11)</sup>。また、燃料棒平均燃焼度約69,000MWD/tまで照射されたジルカロイ-4被覆管において、過度の内面酸化膜は観察されていない<sup>(12)</sup>。このことから、想定する照射量の範囲において、NDA被覆管の内面酸化は燃料棒の健全性を確保する上で影響は小さい。</p> <p>なお、NDA被覆管と二酸化ウランペレットとの反応は、前記のとおりウラン原子及びジルコニウム原子の拡散によって生ずるものであるため、ペレット密度にはほとんど影響しない。</p> <p>以上のことから、二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応は設計評価では考慮していない。</p> <p>4.3.1 ガドリニア混合二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応</p> <p>ガドリニア混合二酸化ウランは、4.1項で述べたように置換型固溶体を形成して安定である。ガドリニア混合二酸化ウラン燃料棒について、原子燃料工業製燃料に対して実施した照射試験結果では、二酸化ウラン燃料棒に比べて被覆管内面酸化の増加は観察されていない<sup>(20)</sup>。したがって、ガドリニア混合二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応は、二酸化ウランペレットとNDA被覆管が安定に共存する場合と大差はない。したがって、当該の反応を設計評価では考慮していない。</p> <p>なお、3.3.1項で述べたとおり、ペレット密度が増加した場合の共存性への影響はない。</p>	

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(24/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類A）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考						
		<p>5.4.2 耐摩耗性</p> <p>原子炉内では、燃料棒の流動振動による支持格子との接触部で、被覆管の摩耗が発生する可能性がある。被覆管の硬さの測定結果を第5-3表に示す。この表から分かるようにNDA被覆管の硬さはジルカロイ-4被覆管の硬さと同じであり、支持格子と被覆管の接触による摩耗は被覆管材料（ジルカロイ-4被覆管及びNDA被覆管）によらず同等である。以上より、NDA被覆管の摩耗はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</p> <p style="text-align: center;">第5-3表 NDA被覆管の硬さの測定結果等</p> <p style="text-align: center;">(単位：HV (ピッカース硬さ値))</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HV0.2 (注1))</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>215</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>218</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(注1) HV0.2：ピッカース硬さ試験力0.2kgf</p>	種類	平均値 (HV0.2 (注1))	NDA	215	ジルカロイ-4 (参考)	218	<p>・設置変更許可申請書及び高燃焼度燃料導入時の安全審査資料では耐摩耗性について詳細な内容は説明していないもの、設計及び工事の計画では、摩耗特性が同等であることを設計評価（資料7）に反映しているため、記載している。</p>
種類	平均値 (HV0.2 (注1))								
NDA	215								
ジルカロイ-4 (参考)	218								

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載

(25/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>5.4.3 高温特性</p> <p>被覆管の相変態（<math>\alpha</math>相から<math>\beta</math>相に変化）が生じるような高温時においては、NDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管同様、約98wt%のジルコニウムを主成分としているため、それらの主要な特性はジルカロイ-4と同等である。1次冷却材喪失事故（LOCA）にて考慮する昇温内圧破裂試験結果、高温時のジルコニウム-水反応の試験結果をそれぞれ第5-12図及び第5-13図に示す。第5-12図及び第5-13図に示すとおり、NDA被覆管の高温破裂特性及び高温酸化挙動はジルカロイ-4被覆管と同等である。</p> <p>第5-12図 未照射管のLOCA時破裂挙動試験結果（受取管）<sup>29)</sup></p> <p>第5-13図 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数（受取管）<sup>29)</sup></p>	<p>・設置変更許可申請書及び高燃焼度燃料導入時の安全審査資料では高温特性について詳細な内容は説明していないものの、設計及び工事の計画では、技術基準規則23条への適合を示すため、記載している。</p>

表1 燃料被覆材に関する原子炉設置変更許可申請書と設計及び工事の計画との比較

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハンジチング部：A型燃料集合体に係る記載

(26/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類A）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考															
		<p>5.1 耐熱性</p> <p>ジルカロイ-4の融点は1,782℃であり、結晶構造が820℃でα相から(α+β)相へ、また、958℃で(α+β)相からβ相に変態する<sup>(2)</sup>。</p> <p>NDAは、ジルカロイ-4同様、約98wt%のジルコニウム(Zr)を主成分としているため、それらの材料物性はジルカロイ-4とほぼ同等である。</p> <p>NDAの融点及び相変態温度の測定結果を第5-1表及び第5-2表に示すように、NDAの融点は1,796℃、α相から(α+β)相及び(α+β)相からβ相への相変態温度はそれぞれ802℃及び937℃であり、いずれも被覆管の異常な過渡変化時の最高温度(黒<sup>2</sup>℃以下)よりもかなり高いので、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはない。したがって、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはないので、当該の挙動を設計評価では考慮していない。</p> <p>第5-1表 NDAの融点測定結果<sup>(2)</sup></p> <p>(単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1350 772 1684 909"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>融点測定結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>1,796</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>1,782</td> </tr> </tbody> </table> <p>第5-2表 NDAの相変態温度測定結果<sup>(2)</sup></p> <p>(単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1321 1023 1711 1125"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>α→α+β</th> <th>α+β→β</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>802</td> <td>937</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>820</td> <td>958</td> </tr> </tbody> </table>	種類	融点測定結果	NDA	1,796	ジルカロイ-4 (参考)	1,782	種類	α→α+β	α+β→β	NDA	802	937	ジルカロイ-4 (参考)	820	958	<p>・設置変更許可申請書及び高燃焼度燃料導入時の安全審査資料では耐熱性について詳細な内容は説明していないもの、設計及び工事の計画では、技術基準規則23条への適合を示すため、記載している。</p>
種類	融点測定結果																	
NDA	1,796																	
ジルカロイ-4 (参考)	1,782																	
種類	α→α+β	α+β→β																
NDA	802	937																
ジルカロイ-4 (参考)	820	958																

## ジルコニウム基合金における酸素含有量の設定について

燃料被覆材に用いられるジルコニウム基合金の酸素含有量については、詳細設計時に受渡当事者間で定めることとしている。以下に酸素含有量が燃料被覆材へ及ぼす影響及び詳細設計時の設定プロセスを示す。

## 1. 酸素含有量が燃料被覆材へ及ぼす影響

ジルコニウム基合金は、高燃焼度燃料導入にあたり、豊富な照射実績を持つジルカロイ-4をベースに耐食性を向上させた燃料被覆材であり、酸素含有量による影響はジルカロイ-4と同様である。

ジルカロイ-4における酸素含有量が燃料被覆材の性質に与える影響については、酸素含有量が増加すると耐力及び引張強さは増加し、耐食性は劣化するとされていることから、前者は燃料被覆材の強度（応力評価）、後者は燃料被覆材の外面腐食及び水素吸収量に影響を与え得るものである。

燃料被覆材の酸素含有量について、米国の原子炉で用いる燃料被覆材の標準仕様とされている ASTM B 811（以下「ASTM」という。）では、米国では受渡当事者間の契約が優先されていたことを考慮し、弾力的な運用として、受渡当事者間の協定による値を踏まえた酸素含有量（ wt%）が記載されている。この受渡当事者間の協定について、JIS H 4751（以下「JIS」という。）の解説にて、現在当事者間で定めている酸素含有量では、ジルカロイ-4の性質を著しく悪化させることもないとしている。

したがって、ジルコニウム基合金の酸素含有量については、JIS 及び ASTM を踏まえ、（ wt%）の範囲内とすることで、上述の燃料被覆材の性質への影響は問題ないものと判断している。また、本酸素含有量では設置許可における安全解析結果に影響はない。次項に、酸素含有量の設定プロセスを示す。

## 2. 設定プロセス

①燃料メーカーは、ジルコニウム基合金の酸素含有量を設定するにあたっては、上記1. で述べた酸素含有量の耐力、引張強さ及び耐食性への影響並びに燃料被覆材製造メーカーの製造能力を考慮する必要があることを踏まえ、豊富な製造及び使用実績を持つジルカロイ-4の酸素含有量と同等の値としている。その上

で、燃料被覆材製造メーカーに酸素含有量を提示している。

②その後、燃料メーカーは、燃料被覆材製造メーカーが製造したジルコニウム基合金を用いて、燃料被覆材としての耐力、引張強さ、耐食性及びその他の特性を確認するための試験及び評価を実施し、酸素含有量だけでなく、その他の合金成分も含めたジルコニウム基合金の特性に問題がないことを総合的に確認している。

③当社は燃料メーカーから燃料被覆材としてのジルコニウム基合金の特性を示した設計提案を受け、その中で耐力、引張強さ、耐食性及びその他の特性を確認し、ジルコニウム基合金の実機適用に問題ないことを判断する。

以 上

## 補足説明資料 6 - 3

特殊加工認可申請書との整合性に関する補足説明資料

目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 整理結果 .....	1



## 1. 概 要

本資料は、令和 2 年 4 月の「原子力利用における安全対策の強化のための核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等の一部を改正する法律」及び関連規則等（以下「改正法等」という。）の施行を踏まえ、本設工認申請対象の燃料被覆材について、特殊加工認可申請書（平成 15 年 12 月 16 日付け平成 15・10・20 原第 14 号にて認可）（以下「特認」という。）と設計及び工事計画認可申請書（以下「設工認」という。）の記載事項の関連を整理したものである。

## 2. 整理結果

以下に特認の構成を示す。このうち特認の具体的な申請内容である資料 1 及び資料 2 について設工認との比較を表 1 に示す。

### 特認の構成

1. 申請燃料体
2. 申請理由
3. 加工方法

資料 1 特殊加工認可申請範囲

資料 2 Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金燃料被覆材の説明書

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所

表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考				
<p data-bbox="369 502 660 526">特殊加工認可申請範囲</p> <table border="1" data-bbox="414 1157 810 1209"><tr><td data-bbox="414 1157 712 1184">特殊加工認可申請書</td><td data-bbox="712 1157 810 1184">資料 1</td></tr><tr><td colspan="2" data-bbox="414 1184 810 1209">伊方発電所第3号機</td></tr></table>	特殊加工認可申請書	資料 1	伊方発電所第3号機			
特殊加工認可申請書	資料 1					
伊方発電所第3号機						

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所

表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>1. 特殊加工認可申請範囲</p> <p>特殊加工認可申請範囲は、伊方発電所第3号機の取替燃料体（最高燃焼率55,000MWd/t）のうち燃料被覆材の部分である。</p> <p>1-1</p>		<p>特認の申請範囲を示しているものであり、比較対象外。</p>



下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所

表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考				
<p style="text-align: center;">Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金燃料被覆材の説明書</p> <div style="text-align: center; border: 1px solid black; width: fit-content; margin: 20px auto;"> <table border="1"> <tr> <td style="padding: 2px;">特殊加工認可申請書</td> <td style="padding: 2px;">資料 2</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 2px;">伊方発電所第3号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料 2	伊方発電所第3号機			
特殊加工認可申請書	資料 2					
伊方発電所第3号機						

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所

表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
目 次		
1. NDA被覆管の概要.....	2-1	
2. NDA被覆管の特性.....	2-2	
2.1 耐熱性.....	2-2	
2.2 耐放射線性.....	2-2	
2.2.1 機械的性質.....	2-2	
2.2.2 照射成長.....	2-3	
2.2.3 クリープ特性.....	2-3	
2.2.4 疲労特性.....	2-4	
2.3 耐腐食性.....	2-4	
2.3.1 酸化腐食による影響.....	2-4	
2.3.2 水素吸収による影響.....	2-5	
2.4 その他の性能.....	2-5	
2.4.1 耐PCI性.....	2-5	
2.4.2 耐摩耗性（フレッキング摩耗）.....	2-5	
2.4.3 内面酸化.....	2-6	
2.4.4 ペレットとのボンディング.....	2-6	
2.4.5 高温時の特性.....	2-6	
3. NDA被覆管の品質及び検査方法等.....	2-7	
3.1 品質.....	2-7	
3.2 寸法許容差.....	2-7	
3.3 製造方法.....	2-7	
3.4 試験.....	2-7	
3.5 検査.....	2-8	
3.6 表示.....	2-8	
4. 参 考 文 献.....	2-9	

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所

表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>1. NDA被覆管の概要</p> <p>①ジルコニウムは、ステンレス鋼等と比べて熱中性子吸収断面積が極めて小さく、ステンレス鋼を被覆管に使用する場合に比べて、はるかに中性子経済上有利である。但し、機械的強度や耐食性等が劣ることから、添加元素によってこれらの点を補うべく、ジルコニウム基合金の開発が行われた。このような1950年代に行われたジルコニウム基合金の研究の中で、加圧水型軽水炉（以下、PWRと称す）用燃料被覆材（以下、被覆管と称す）として、ジルコニウムにSn、Fe及びCrを加えたジルコニウム基合金（JIS H 4751 Zr-TN804D。以下、ジルカロイ-4と称す）が開発されてきた。</p> <p>ジルカロイ-4は、PWRの1次系水中の条件下において、優れた耐食性を有しており、PWR用被覆管として適した材料である。このジルカロイ-4被覆管のSn含有量については、従来の製品では1.5wt%を中心にとらっていたが、近年、耐食性向上を狙って、規格の範囲内（1.20wt%～1.70wt%）でSn含有量を低下させ、含有量が1.3wt%近傍の製品が採用されている*1。</p> <p>しかし、燃料体最高燃焼率（以下、燃焼度と称す）を48,000Mwd/tから55,000Mwd/t（以下、ステップ2燃料*2と称す）へ引き上げるためには、さらに被覆管の耐食性を向上させる必要があり、これまでの被覆管として採用されてきたジルカロイ-4の豊富な照射実績を基に、ジルカロイ-4の規格を大きく外れない範囲で耐食性を向上させるためにSn含有量を低下させるとともに、Nb及びNiを微量添加し、さらに、機械的強度を補償するためにFe及びCr含有量を若干増やしたSn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金（以下、NDAと称す）を開発している。<sup>[1]</sup> NDAの化学成分と不純物に関する仕様をジルカロイ-4と比較して、表1.1-1及び表1.1-2に示す。</p> <p>*1一般的に、前者を従来Snジルカロイ-4被覆管、後者を低Snジルカロイ-4被覆管と称している。</p> <p>*2燃料要素（以下、燃料棒と称す）最高燃焼度は61,000Mwd/t、ペレット最高燃焼度は71,000Mwd/tとなる</p>	<p>（資料8）</p> <p>2. 構成材料の概要</p> <p>燃料集合体の材料は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を含むプラントの使用条件の下で、燃料寿命中その健全性が維持されるよう選定している。燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分を第2-1表に示す。また、燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質を第2-2表に示す。</p> <p>第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分</p> <p>（表省略）</p> <p>（注1）以下「二酸化ウランペレット」という。</p> <p>（注2）タイプAはウラン235濃縮度4.8wt%を示す。タイプBはウラン235濃縮度4.1wt%を示す。</p> <p>（注3）以下「ガドリニア混合二酸化ウランペレット」という。</p> <p>（注4）タイプCはガドリニア濃度10wt%を示す。タイプDはガドリニア濃度6wt%を示す。</p> <p>（注5）不純物の総中性子吸収をBoron量で換算したもの。</p> <p>（注6）豊富な照射実績を持つジルカロイ-4をベースに、耐食性向上のためにSn含有量を低下させるとともにNb及びNiを微量添加し、さらに、機械的強度を補償するためにFe及びCr含有量を若干増やしたSn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金。以下「NDA」という。</p> <p>（注7）以下「ジルカロイ-4」という。なお、燃料被覆材端栓の材料は、JIS H4751 Zr-TN 804Dの規定からNb及びCaの化学成分を除外して、JIS H4751 Zr-TN 804D相当と記載している。</p> <p>（注8）以下「718合金」という。</p> <p>（注9）以下 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;"> </span> という。</p> <p>（注10）以下 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;"> </span> という。</p>	<p>①ジルカロイ-4に対する一般論であるため、設工認申請書には記載していない。（ジルカロイ-4は本申請対象の燃料被覆材には使用されていない）</p>

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2. NDA被覆管の特性 NDA被覆管を使用する燃料体においては、以下に述べる特性を踏まえた上で燃料設計を行う。</p> <p>2.1 耐熱性 NDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、融点及び相変態温度はジルカロイ-4被覆管と同等である。 NDA被覆管の融点は約1800℃であり、約800℃でα相から(α+β)相へ、また、約940℃で(α+β)相からβ相に変態し、その温度前後で腐食速度や機械的強度が変化する。融点及び相変態温度の測定結果を表2.1-1及び表2.1-2に示す。NDA被覆管の融点及び相変態温度はジルカロイ-4被覆管と同等である。<sup>[1]</sup> 異常な過渡変化時のNDA被覆管の最高温度は約□℃以下であり、いずれの相変態温度よりも低いので、溶融あるいは相変態は生じない。</p>	<p>(資料8)</p> <p>5. ジルコニウム基合金 NDA被覆管は「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（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第7号）」（以下「原子力規制委員会規則第7号」という。）第8条に規定されていない材料であったことから、原子力規制委員会規則第7号第3条の規定に基づき、特殊加工認可を取得している（平成15・10・20原第14号）。 NDA被覆管を本申請の燃料集合体に使用する場合には、以下に示すこれらの特性を適切に反映して燃料集合体の設計を行う必要がある。 なお、本資料中に示すNDA被覆管の照射挙動データには、NDAとNDA-RTの2種類のデータがあり、前者は通常組織管、後者は集合組織調整管を指している。集合組織調整管は、被覆管の圧延工程を調整することによって、ジルコニウムの稠密六方晶C軸<sup>(註1)</sup>の径方向への配向割合を、通常組織管よりも僅かに高めた被覆管であるが、本章で示す被覆管の各特性は同等である。そのため、本申請においては両者を区別しない。</p> <p>5.1 耐熱性 ジルカロイ-4の溶融点は1,782℃であり、結晶構造が820℃でα相から(α+β)相へ、また、958℃で(α+β)相からβ相に変態する<sup>(註)</sup>。 NDAは、ジルカロイ-4同様、約98wt%のジルコニウム(Zr)を主成分としているため、それらの材料物性はジルカロイ-4とほぼ同等である。 NDAの溶融点及び相変態温度の測定結果を第5-1表及び第5-2表に示すように、NDAの溶融点は1,796℃、α相から(α+β)相及び(α+β)相からβ相への相変態温度はそれぞれ802℃及び937℃であり、いずれも被覆管の異常な過渡変化時の最高温度（約□℃以下）よりもかなり高いので、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはない。したがって、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはないので、当該の挙動を設計評価では考慮していない。</p>	



下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2 耐放射線性</p> <p><u>被覆管は、燃料材（以下、ペレットと称す）と接触して原子炉内に置かれるので、中性子、α線、β線、γ線及び核分裂片の影響を受ける。α線及びβ線のような荷電粒子は、金属中を通り抜けるとき、電気的な相互作用によって原子の軌道電子を引き離すイオン化作用を起こす。</u></p> <p><u>また、γ線も軌道電子を原子から引き離す作用を起こす。このようにα線、β線、γ線は、主に金属原子の軌道電子と作用してエネルギーを消失していくので、ジルコニウム基合金被覆管の照射損傷に与える影響は軽微である。</u></p> <p><u>中性子は電荷を持たないので、金属中での電気的な相互作用によってエネルギーを失うことがなく、そのエネルギーは主として原子核との弾性衝突により多数の原子を格子位置からはじき出す作用によって消失される。この結果、金属の結晶粒界等に空隙あるいは介在原子の存在が認められるようになり、この微視的欠陥が材料の巨視的な物性値に変化をもたらすことになる。中性子が金属中を通り抜けるとき形成される格子欠陥の濃度は、中性子エネルギーに比例するため、ジルコニウム基合金被覆管の照射損傷に最も大きな寄与をするのは高速中性子である。核分裂片は、その飛程が限定された近距離にしか及ばないため、ペレットの表面で起こった核分裂だけが被覆管の内表面にしか作用せず、事実上の照射損傷を与えない。</u></p> <p><u>従って、NDA被覆管の耐放射線性については、照射損傷に最も大きく寄与する高速中性子についてその影響を考慮すればよい。</u></p>	<p>(資料8)</p> <p>5.2 耐放射線性</p> <p><u>NDA被覆管は、二酸化ウラン燃料と接触して原子炉内に置かれるので、α線、β線、γ線、核分裂片及び中性子の影響を受ける。</u></p> <p><u>α線及びβ線のような荷電粒子は、金属中を通り抜けるとき、電気的な相互作用によって原子の軌道電子を引き離すイオン化作用を起こす。また、γ線も軌道電子を原子から引き離す作用を起こす。このようにα線、β線、γ線は、主に金属原子の軌道電子と作用してエネルギーを消失していくので、NDA被覆管の照射損傷に与える影響は軽微である。</u></p> <p><u>核分裂片は、その飛程が限定された近距離にしか及ばないため、二酸化ウラン燃料の表面で起こった核分裂だけが被覆管の内表面にしか作用せず、事実上の照射損傷を与えない。</u></p> <p><u>中性子は電荷を持たないので、金属中での電気的な相互作用によってエネルギーを失うことがなく、そのエネルギーは主として原子核との弾性衝突により多数の原子を格子位置からはじき出す作用によって消失される。この結果、金属の結晶格子内あるいは結晶粒界などに空隙あるいは格子間原子の存在が認められるようになり、この微視的欠陥が材料の巨視的な物性値に変化をもたらすことになる。中性子が金属中を通り抜けるときに形成される格子欠陥の濃度は、中性子のエネルギーに比例するため、NDA被覆管の照射損傷に最も大きな寄与をするのは高速中性子である。</u></p> <p><u>したがって、NDA被覆管の照射損傷の影響を受ける以下の特性においては、高速中性子の影響に着目すればよい。</u></p>	

表1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2.1 機械的性質</p> <p>①NDA被覆管の照射による機械特性の変化を図2.2-1に示す。<sup>[1]</sup>ジルカロイ-4被覆管と同様、高速中性子の照射とともに比較的早い時期にNDA被覆管の引張強さ及び耐力は増加し、その後は照射量の増加に伴う大きな変化は見られない。②従って、燃料設計上の被覆管耐力は、未照射での耐力に対し照射による耐力増加を考慮する。③伸びについては、ジルカロイ-4被覆管と同様、高速中性子の照射とともに比較的早い時期に減少するが、その後は照射量の増加に伴う大きな変化は見られず、高照射量時においても炉内での使用温度における伸びの減少は小さい。従って、この程度の伸びの減少は被覆管の延性を確保する上で影響は小さい。</p> <p>④高速中性子照射による機械的性質の変化は照射欠陥の蓄積によるものであるが、照射欠陥の生成と、照射欠陥濃度及び温度に依存する照射欠陥の回復とが平衡状態となることから、想定する照射量の範囲においてNDA被覆管の機械的性質の大きな変化はないと考えられる。⑤これに関しては、PWRにおけるジルカロイ-2板材の材料照射試験（高速中性子照射量<math>27\sim 32 \times 10^{25}n/m^2</math>（<math>E &gt; 1MeV</math>））において、機械的性質が大きく変化しないとの報告がある。<sup>[2]</sup></p>	<p>(資料8)</p> <p>5.2.1 機械的性質</p> <p>機械特性への影響因子としては、照射脆化と水素脆化が考えられる。①照射脆化は照射欠陥の蓄積（濃度）によるが、これは高速中性子束、被覆管温度及び時間に依存する。実機原子炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を第5-1図に示す。引張強さ及び耐力<sup>(註1)</sup>は、照射初期において増加した後、照射量によらず著しい変化が見られず、ジルカロイ-4被覆管と同等である。また、破断伸びは、照射初期に低下した後は照射量によらず著しい変化がなく、ジルカロイ-4被覆管と同等である。その他の材料物性においても、原子炉安全小委員会においてジルカロイ-4被覆管と同等<sup>(註2)</sup>であることが確認されている。</p> <p>③なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量<math>27\sim 32 \times 10^{25}n/m^2</math>（<math>E &gt; 1MeV</math>）まで十分な延性が確保されているとの報告例もある<sup>(註3)</sup>。</p> <p>(省略)</p> <p>(資料7-1)</p> <p>3.3.5 被覆管の応力評価結果 (省略)</p> <p>(2) 応力評価結果 (省略)</p> <p>被覆管の材料であるジルコニウム基合金の耐力は、高速中性子照射によって増加するが、比較的短時間の照射で飽和する（資料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」の5.2.1項参照）。</p> <p>②したがって、燃料寿命初期は未照射の耐力と、またそれ以外の時点では、照射材の耐力と比較する。ここで、未照射材及び照射材の耐力基準値は、それぞれ耐力実績データに基づき、データのばらつきを考慮して導いた値（また、耐力基準値は被覆管温度の関数としている）を用いる。照射材の設計基準の求め方を第3-20図に示す。</p> <p>(省略)</p>	<p>備考</p> <p>資料8「5.2.1 機械的性質」において、NDA被覆管の破断伸びについて照射量による著しい変化がないことを説明している。</p>

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所

表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2.2 照射成長</p> <p><u>約98%のジルコニウムを主成分とするNDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管と同様、燃焼と共に軸方向に伸びる。ジルコニウム基合金で認められる照射成長の支配因子は、<math>\alpha</math>-ジルコニウム中の稠密六方晶の結晶方位が比較的揃った組織において中性子照射で生じる格子欠陥のうち、空孔は六方晶底面へ、格子間原子は柱面へ選択的に集まるためと言われている。NDA被覆管に含まれているNbは照射欠陥の動きを抑制するため、照射成長は小さくなる傾向にあると考えられる。</u></p> <p><u>海外試験炉及び国内外商業炉で照射された被覆管の照射成長測定結果を図2.2-2に示す。NDA被覆管の照射成長は、想定する範囲に相当するデータが得られており、ジルカロイ-4被覆管と比較して小さくなる傾向にある。<sup>(1)</sup></u></p>	<p>(資料8)</p> <p>5.2.4 照射成長<sup>(注1)</sup></p> <p><u>照射成長の支配要因は、ジルコニウム中の稠密六方晶(<math>\alpha</math>相)の向きが比較的揃った組織において中性子照射で生じる格子欠陥のうち、空孔は六方晶底面へ、格子間原子は柱面へ選択的に集まるためと言われている。第5-6図に示すように、NDA被覆管とジルカロイ-4被覆管の照射成長は、ともに高燃焼度域まで高速中性子照射量にほぼ比例している。また、NDA被覆管の照射成長はジルカロイ-4被覆管と比較して小さくなっており、この傾向は比較的高燃焼度領域まで認められる。NDA被覆管に含まれているNbは照射欠陥の動きを抑制するため、照射成長は小さくなる傾向にあると考えられる。</u></p> <p>したがって、ジルカロイ-4被覆管と比較してNDA被覆管の照射成長は、本申請の燃料集合体の使用範囲まで照射成長量が小さくなると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（資料7「強度に関する説明書」の3.2.2項(3)e.に示す。）設計評価に反映している。</p> <p>燃料棒の設計に当たっては、上記の耐放射線性に関する事項を考慮した上で、被覆管応力等が設計基準を満足するようにする。</p>	

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2.3 クリープ特性</p> <p><u>Halden炉において照射された燃料棒の外径測定結果を図2.2-3に示す。燃料棒の外径変化は、ペレットと被覆管が接触するまでは被覆管のクリープ変形により、接触後は燃料棒のスエリングにより支配される。そのため、低燃焼度域における燃料棒外径変化から、被覆管のクリープ特性を確認することができる。NDA被覆管を採用した燃料棒の照射による外径変化は、低Snジルカロイ-4被覆管を採用した燃料棒のそれと同等となっている。被覆管クリープは、転位（材料中の結晶格子のずれ）の移動によるものであるが、ジルコニウム中に固溶しているSn、Nbは転位を捕獲し、その動きを抑制する。NDA被覆管と低Snジルカロイ-4被覆管のクリープ特性が同等であることは、NDA被覆管中の固溶Sn及び固溶Nbによるクリープを抑制する効果が、低Snジルカロイ-4被覆管の固溶Snによるそれと同程度の効果であることを示している。<sup>(1)</sup></u></p> <p>2.2.4 疲労特性</p> <p><u>未照射及び照射されたNDA被覆管の疲労試験結果を図2.2-4に示す。NDA被覆管の疲労特性は、ジルカロイ-4被覆管のそれと同等であり、これまでジルカロイ-4被覆管での疲労設計曲線として使用されているLanger-O'Donnellの疲労曲線と良く一致している。<sup>(1)</sup> 2.2.1で述べたのと同一の理由により、想定する照射量の範囲において、NDA被覆管の疲労特性はLanger-O'Donnellのそれと同等であると考えられる。</u></p>	<p>(資料8)</p> <p>5.2.3 クリープ<sup>(8)</sup>特性</p> <p><u>被覆管は内外圧差に基づくクリープによって外径が減少していくが、ペレットと被覆管が接触した後は、ペレットの外径変化に依存して被覆管外径が増加する。実機PWR燃料棒の照射後の外径変化を第5-5図に示すが、約20,000MWd/t程度までの低燃焼度域の外径減少より、NDA被覆管を採用した燃料棒の照射による外径変化は、低Snジルカロイ-4被覆管を採用した燃料棒のそれと同等となっている。被覆管クリープは、転位（材料に元々ある結晶格子のずれ）の移動によるものであるが、ジルコニウム中に固溶しているSn、Nbは転位を捕獲し、その動きを抑制する。NDA被覆管と低Snジルカロイ-4被覆管のクリープ特性が同等であることは、NDA被覆管中の固溶Sn及び固溶Nbによるクリープを抑制する効果が、低Snジルカロイ-4被覆管の固溶Snによるそれと同程度の効果であることを示している<sup>(20)</sup>。以上より、NDA被覆管のクリープ特性は低Snジルカロイ-4被覆管と同じとして計算モデルに組み込んで（資料7「強度に関する説明書」の3.2.2項(3)d.に示す。）設計評価に反映している。</u></p> <p>5.2.2 疲労特性</p> <p><u>NDA被覆管の疲労試験結果と、ジルカロイに対するLanger and O'Donnellの疲労試験結果を第5-4図に示す。一般に疲労特性は機械特性に依存するが、5.2.1項で述べたとおり、NDA被覆管はジルカロイ-4被覆管と同等であるため、NDA被覆管の疲労特性は、ジルカロイ-4被覆管と同等となる。以上より、NDA被覆管の設計疲労曲線はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</u></p>	

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.3 耐腐食性</p> <p>2.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>NDA被覆管は、原子炉運転中高温の一次冷却水と接していることから、以下の反応により酸化腐食が進行する。</p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p>一般に、高温高圧水とジルカロイ-4被覆管の反応による腐食は、保持時間が短い間は、時間の経過とともに腐食速度が徐々に小さくなっていき、黒色で緻密な酸化物を生じる。</p> <p>その後ある時間保持すると、腐食速度が比較的大きく一定になる現象が見られる。この腐食速度の変化は遷移と呼ばれ、腐食増量が約30mg/dm<sup>2</sup>（約2μm）に達したところで現れると言われている。遷移の後、酸化物は徐々に褐色に変わっていく。このような腐食による変化は、NDA被覆管でも同様である。ジルカロイ-4被覆管では、かなり時間が経過すると酸化物に亀裂を生じ剥離を生じることがあり、この剥離は約1500mg/dm<sup>2</sup>（約100μm）の腐食増量で生じると言われている。</p> <p>炉内で照射されたNDA被覆管の最大酸化膜厚さ測定結果を図2.3-1に示す。被覆管の酸化膜厚さは冷却材条件や出力履歴により影響を受けることから、全データを直接比較することはできないが、従来Snジルカロイ-4被覆管では燃料棒燃焼度約60,000Mwd/tで約100～120μmに達する場合がある。これに対して、低Snジルカロイ-4被覆管では最大でも約80μmと従来Snジルカロイ-4被覆管と比較して耐腐食性が改善されている。一方、NDA被覆管については、想定する照射量の範囲に相当するデータが得られており、ほぼ同一の条件により照射している照射試験により酸化膜厚さを比較すると、低Snジルカロイ-4被覆管と比較して耐食性が改善されている。<sup>[1]</sup></p>	<p>(資料8)</p> <p>5.3 耐食性</p> <p>NDA被覆管が1次冷却材と接触すると、ジルカロイ-4被覆管と同様に、</p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p>の反応により酸化腐食が進むとともに、発生した水素の一部を吸収する。</p> <p>実機では放射線照射下で1次冷却材の放射線分解により発生する酸素により、ジルカロイの腐食が放射線照射のない環境に比べて加速される可能性があるが、PWRでは1次冷却材に水素注入を行い酸素の発生を抑制している。実機の腐食は以下に示すとおりである。</p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>ジルカロイ被覆管外面には、原子炉内使用条件下で高温の1次冷却材との反応により酸化膜が形成される。一般に、ジルカロイ被覆管の腐食速度は、酸化膜と被覆管金属母材の界面温度についてのアレニウス型温度依存性を示す。また、その腐食増量（酸素による質量増加）の時間変化を第5-7図に示すが、初期の段階では時間に対して立方則（時間の3乗根に比例）に従って増加し、酸化膜厚さが2～3μm（遷移点）を超えた後は時間に対して直線的に増加する。原子炉内での被覆管酸化膜厚さを第5-8図に示す。原子炉内では滞在期間が長くなり酸化膜が厚くなるに従って、形成された酸化膜と金属母材の境界温度が上昇するため、燃焼度の進行に伴って酸化膜厚さは増大する傾向になる。更に腐食が進行すると腐食量の急激な増加が見られるが、これは酸化により発生する水素のうち、被覆管に吸収された水素が被覆管外面に析出し、この析出物が腐食に起因すると考えられている。</p> <p>第5-8図から分かるように、被覆管の原子炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されており、NDA被覆管については、ジルカロイ-4被覆管と比較して腐食速度の低減が認められる。</p> <p>したがって、NDA被覆管の腐食挙動はジルカロイ-4被覆管と同様であり、腐食が急激に増加する領域でも耐食性の向上が維持されることから、本申請の燃料集合体の使用範囲までNDA被覆管の耐食性の向上が維持されると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（資料7「強度に関する説明書」の3.4項(3)に示す。）設計評価に反映している。</p>	<p>ジルカロイ-4被覆管に対する説明であるため、設工認申請書には記載していない。（ジルカロイ-4は本申請対象の燃料被覆材には使用されていない）</p>

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.3.2 水素吸収による影響</p> <p>2.3.1に示したジルコニウムと水との酸化腐食反応により発生した水素の一部は、被覆管に吸収される。炉内で照射された被覆管の水素吸収量の酸化膜厚さ依存性を図2.3-2に示す。NDA被覆管の水素吸収特性は、ジルカロイ-4被覆管のそれと同等である。<sup>(1)</sup></p> <p>水素吸収が過度に大きくなり固溶限以上に吸収された水素は、水素化物として析出し被覆管の延性の低下をもたらす。NDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、NDA被覆管の水素固溶限は、ジルカロイ-4被覆管と同等であると考えられる。</p> <p>NDA被覆管の耐食性は、2.3.1に示したとおり、ジルカロイ-4被覆管と比較して向上している。このことから、燃料寿命末期（燃料棒平均燃焼度～61,000Mwd/t）における水素吸収量は、図2.3-3及び図2.3-4に示すように想定する照射量の範囲で延性に影響を及ぼさない範囲（目安値約800ppm以下）であると考えられる。</p>	<p>(資料8)</p> <p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>ジルコニウムと水との反応で発生した水素の一部は、被覆管に吸収される。被覆管の原子炉内での水素吸収量と酸化膜厚さの関係を図5-9図に示すが、NDA被覆管の水素吸収量と酸化膜厚さはジルカロイ-4被覆管と同様に良い相関がある。酸化膜厚さと水素吸収率（酸化反応で生じた水素量に対する被覆管金属部に吸収された水素量の割合）の関係を図5-10図に示す。NDA被覆管の水素吸収特性は、ジルカロイ-4被覆管のそれと同等である<sup>(29)</sup>。これは酸化膜を透過する水素量及び金属部に吸収される水素吸収量が被覆管の種類（ジルカロイ-4被覆管及びNDA被覆管）によらないためと考えられる。</p> <p>したがって、NDA被覆管の水素吸収率は腐食により発生した水素の一部が酸化膜厚さに応じてある割合で被覆管に取り込まれること、及びその割合はNDA被覆管とジルカロイ-4被覆管で同等であることから、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（資料7「強度に関する説明書」の3.4項(3)に示す。）設計評価に反映している。</p> <p>また、NDA被覆管の水素吸収量は、本申請の燃料集合体の使用範囲までジルカロイ-4被覆管と比較して低減すると考えられる。</p> <p>5.2.1 機械的性質</p> <p>機械特性への影響因子としては、照射脆化と水素脆化が考えられる。照射脆化は照射欠陥の蓄積（濃度）によるが、これは高速中性子束、被覆管温度及び時間に依存する。実機原子炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を図5-1図に示す。引張強さ及び耐力<sup>(註1)</sup>は、照射初期において増加した後、照射量によらず著しい変化が見られず、ジルカロイ-4被覆管と同等である。また、破断伸びは、照射初期に低下した後照射量によらず著しい変化がなく、ジルカロイ-4被覆管と同等である。その他の材料物性においても、原子炉安全小委員会においてジルカロイ-4被覆管と同等<sup>(29)</sup>であることが確認されている。</p> <p>なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量<math>27\sim 32 \times 10^{25} \text{ n/m}^2</math> (<math>E &gt; 1 \text{ MeV}</math>)まで十分な延性が確保されているとの報告例もある<sup>(29)</sup>。</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を図5-2図に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、図5-3図に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、NDA被覆管は上述のとおり、未照射材で水素吸収による機械特性への影響がジルカロイ-4被覆管と同等であることから、照射材についてもジルカロイ-4被覆管と同様に本申請の燃料集合体の使用範囲まで機械特性は変わらない。以上より、NDA被覆管の応力及びひずみに対する設計基準や材料物性はジルカロイ-4被覆管と同じとして設計評価する。</p>	<p>水素脆化及びNDA被覆管に関する一般論であるため、設工認申請書には記載していない。</p>

表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.4 その他の性能</p> <p>2.4.1 耐PCI性*</p> <p><u>ジルカロイ-4被覆管のPCI損傷は、腐食性FPガス（よう素、セシウム）雰囲気下で過大な応力が作用した時に生じるSCC破損といわれている。このSCCは、<math>\alpha</math>-ジルコニウム中の稠密六方晶のほぼ底面に平行な面上を伝播するため、この底面をPCI時の発生応力方向、即ち周方向に配向（C軸を径方向に配向）するよう集合組織を調整すれば耐PCI性が向上することになる。</u></p> <p><u>出力急昇試験結果を図2.4-1に示す。NDA被覆管の耐PCI性、即ちSCC破損特性はジルカロイ-4被覆管と同等以上であり、集合組織調整を施したNDA被覆管に対しても、現行ジルカロイ-4被覆管で使用されているPCI破損しきい値が適用できる。<sup>(1)</sup></u></p> <p><u>SCC破損しきい応力は耐力に依存するが、<sup>(3)</sup> 2.2.1で述べた通り照射による耐力の大きな変化はないことから、想定する照射量の範囲においてNDA被覆管の耐PCI性は維持されと考えられる。</u></p> <p>2.4.2 耐摩耗性（フレットング摩耗）</p> <p><u>フレットング摩耗は、接触面の周期的相対振動により起こる損傷である。燃料棒及び支持格子の材料特性のうち、フレットング摩耗に最も影響するのは材料の硬度であるが、表2.4-1に示すようにジルカロイ-4被覆管とNDA被覆管の硬度は同等であり、NDA被覆管のフレットング摩耗はジルカロイ-4被覆管と同程度と考えられる。</u></p> <p>* PCI : Pellet Cladding Interaction（ペレットと被覆管の相互作用）</p>	<p>(資料8)</p> <p>5.4 その他の性能</p> <p>5.4.1 耐PCI性</p> <p><u>被覆管は、腐食性FPガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用(PCMI)を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ(SCC)による破損（PCI破損）を起こす。このPCI破損におけるSCCは、<math>\alpha</math>中の稠密六方晶（<math>\alpha</math>相）の底面にほぼ平行な面上を伝播するが、現行の被覆管製法においては、この底面がPCMI時の発生応力方向、すなわち周方向に配向（C軸を径方向に配向）されており、PCI破損の抑制が図られている。</u></p> <p><u>被覆管の耐PCI性を把握するため、試験炉において出力急昇試験が実施されており、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にある値（PCI破損しきい値）を超えた場合にPCI破損が起こることが経験的に知られている。</u></p> <p><u>NDA被覆管の耐PCI性を第5-11図にPCI破損しきい値とともに示す。NDA被覆管の耐PCI性、すなわちSCC破損特性はジルカロイ-4被覆管と同等以上であり、ジルカロイ-4被覆管で使用されている現行のPCI破損しきい値が適用できる<sup>(2)</sup>。</u></p> <p>以上より、NDA被覆管のPCI破損しきい値はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</p> <p>5.4.2 耐摩耗性</p> <p><u>原子炉内では、燃料棒の流動振動による支持格子との接触部で、被覆管の摩耗が発生する可能性がある。被覆管の硬さの測定結果を第5-3表に示す。この表から分かるようにNDA被覆管の硬さはジルカロイ-4被覆管の硬さと同じであり、支持格子と被覆管の接触による摩耗は被覆管材料（ジルカロイ-4被覆管及びNDA被覆管）によらず同等である。以上より、NDA被覆管の摩耗はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</u></p>	<p>SCC破損しきい値の一般論であり、照射量の範囲において耐PCI性が維持されることは資料8第5-11図で説明している。</p>

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.4.3 内面酸化</p> <p>NDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、その二酸化ウランとの反応は、ジルカロイ-4被覆管と同等となる。Halden炉において燃料棒燃焼度55,000MWd/tまで照射された燃料棒の被覆管内面観察によれば、低Snジルカロイ-4被覆管とNDA被覆管とで、被覆管内面酸化膜の状態に差は認められていない。<sup>[4]</sup> 燃料棒平均燃焼度約69,000MWd/tまで照射されたジルカロイ-4被覆管内面酸化は小さく、特に燃料棒の健全性に影響を及ぼしていないことから、<sup>[5]</sup> 想定する照射量の範囲においてNDA被覆管の内面酸化は燃料棒の健全性を確保する上で影響は小さいと考えられる。</p> <p>2.4.4 ペレットとのボンディング</p> <p>核分裂により生じた余剰酸素が被覆管と化学反応することにより、被覆管内面酸化膜が生成する。高燃焼度時では、ペレットと被覆管が強固に接触するようになる。その結果、被覆管内面酸化膜（ZrO<sub>2</sub>）とUO<sub>2</sub>との拡散層が形成され、ボンディングを生じることが報告されている。<sup>[6]</sup> NDA被覆管はジルカロイ-4被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、その二酸化ウランとの反応は、ジルカロイ-4被覆管と同等となる。燃料棒平均燃焼度約69,000MWd/tまで照射されたジルカロイ-4被覆管のボンディングは特に燃料棒の健全性に影響を及ぼしていないことから、<sup>[5]</sup> 想定する照射量の範囲において、NDA被覆管のボンディングの影響は小さいと考えられる。</p>	<p>(資料8)</p> <p>3.3.1 二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応</p> <p>ジルコニウム基合金と二酸化ウランが接触した場合、照射により過剰になった二酸化ウラン中の酸素がジルコニウム中に拡散し、被覆管内面酸化膜(ZrO<sub>2</sub>)が形成される。さらに、両者が強く接触するようになるとジルコニウム酸化層へのウランの拡散により、ジルコニウム酸化層は(Zr,U)O<sub>2</sub>固溶体となり、これがボンディング層を形成して、強固なペレット-被覆管の固着の原因となる<sup>[10]</sup>。これらは、被覆管の腐食及びPCI<sup>(註1)</sup>へ影響を及ぼす可能性が考えられる。</p> <p>しかしながら、二酸化ウランペレットとジルコニウムを密着させ510℃で約500日以上保持した場合においても反応は生じないことが報告されている<sup>(註2)</sup>。通常運転中においてペレットと被覆管及び燃料被覆材端栓の接触面の温度が長期間にわたって500℃を超えないことから、反応は小さいと考えられる。</p> <p>また、Halden炉において燃料棒平均燃焼度55,000MWd/tまで照射された燃料棒の被覆管内面観察によれば、低Snジルカロイ-4被覆管<sup>(註1)</sup>とNDA被覆管とで、被覆管内面酸化膜の状態に差は認められていない<sup>(註1)</sup>。また、燃料棒平均燃焼度約69,000MWd/tまで照射されたジルカロイ-4被覆管において、過度の内面酸化膜は観察されていない<sup>(註3)</sup>。このことから、想定する照射量の範囲において、NDA被覆管の内面酸化は燃料棒の健全性を確保する上で影響は小さい。</p> <p>なお、NDA被覆管と二酸化ウランペレットとの反応は、前記のとおりウラン原子及びジルコニウム原子の拡散によって生ずるものであるため、ペレット密度にはほとんど影響しない。</p> <p>以上のことから、二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応は設計評価では考慮していない。</p> <p>4.3.1 ガドリニア混合二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応</p> <p>ガドリニア混合二酸化ウランは、4.1項で述べたように置換型固溶体を形成して安定である。ガドリニア混合二酸化ウラン燃料棒について、原子燃料工業製燃料に対して実施した照射試験結果では、二酸化ウラン燃料棒に比べて被覆管内面酸化の増加は観察されていない<sup>(註6)</sup>。したがって、ガドリニア混合二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応は、二酸化ウランペレットとNDA被覆管が安定に共存する場合と大差はない。したがって、当該の反応を設計評価では考慮していない。</p> <p>なお、3.3.1項で述べたとおり、ペレット密度が増加した場合の共存性への影響はない。</p>	<p>Halden炉における被覆管内面観察結果において、NDA被覆管とジルカロイ-4被覆管の内面酸化が同等であることを説明している。</p>



下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.4.5 高温時の特性</p> <p><u>冷却材喪失事故が発生した場合、被覆管は通常運転時に比べて高温かつ水蒸気で酸化腐食が進行するとともにバーストし、その後炉心が再冠水される。</u></p> <p><u>このような冷却材喪失事故時におけるNDA被覆管の特性を図2.4-2、図2.4-3に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同等である。従って、NDA被覆管の高温時の特性はジルカロイ-4被覆管と同一として評価することができる。<sup>[1]</sup></u></p>	<p>(資料8)</p> <p>5.4.3 高温特性</p> <p><u>被覆管の相変態（<math>\alpha</math>相から<math>\beta</math>相に変化）が生じるような高温時においては、NDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管同様、約98wt%のジルコニウムを主成分としているため、それらの主要な特性はジルカロイ-4と同等である。1次冷却材喪失事故(LOCA)にて考慮する昇温内圧破裂試験結果、高温時のジルコニウム-水反応の試験結果をそれぞれ第5-12図及び第5-13図に示す。第5-12図及び第5-13図に示すとおり、NDA被覆管の高温破裂特性及び高温酸化挙動はジルカロイ-4被覆管と同等である。</u></p>	

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>3. NDA被覆管の品質及び検査方法等</p> <p>NDA被覆管の品質及び検査方法等は、以下に示す通り、Nbの化学成分分析時における許容変動差を除いて、ジルカローイ-4被覆管での規格である JIS H 4751 ZrTiNbO4D SR(1998)に従うこととしている。なお、NDA被覆管は、ジルカローイ-4被覆管と異なり主成分として Nb を 0.08~0.14wt%添加していることから、Nbの化学成分分析時における許容変動差は、<span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;"> </span>に従っている。</p> <p>3.1 品質</p> <p>品質は、以下の通りとしている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 被覆管の軸は、著しく湾曲していないこと。</li> <li>b) 被覆管の表面に割れ、きず等で有害なものがないこと。</li> <li>c) 被覆管の表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</li> <li>d) 被覆管の表面の粗さの程度は、実用上差し支えないものであること。</li> <li>e) 被覆管の化学成分は、表 1.1-1 による。また、不純物は、表 1.1-2 による。</li> <li>f) 被覆管は、3.4b) 又はこれと同等の方法によって引張試験を行った場合、機械的性質が設計上要求する値を満足していること。</li> <li>g) 被覆管は、3.4c) 又はこれと同等の方法によって 336 時間で 38mg/dm<sup>2</sup> 以下腐食質量増加でなければならない。ただし、72 時間を経過した時点で腐食質量増加が 22mg/dm<sup>2</sup> 以下であった場合には、それ以降の試験は行わない。また、腐食試験後の試験片表面には、著しい白色又は褐色の酸化物の付着があってはならない。</li> <li>h) 被覆管は、3.4d) 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場合、水素化物方位係数 Pn 値は 0.45 を超えてはならない。</li> <li>i) 被覆管は、3.4e) 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場合、対比試験片の人工傷からの信号と同等、またはそれより大きい欠陥信号があってはならない。</li> </ul> <p>3.2 寸法許容差</p> <p>被覆管の寸法許容差は、設計上要求する値を満足していること。</p> <p>3.3 製造方法</p> <p>被覆管は、消耗電極式アーク炉によって真空中で溶製したインゴットから雜音目無く製造した原管を用い、これを冷間加工した後、適当な熱処理及び矯正を行う。</p> <p>3.4 試験</p> <p>試験は、次による。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 化学成分及び不純物の分析方法並びに許容変動値は、表 3.4-1 による。</li> </ul>		<p>左記記載のうち品質については、「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」の記載事項と同じ内容であり、本設工認においては基本設計方針にて、それら要求事項に従う旨を記載している。また、検査方法等については、本設工認における工事の方法にて、全施設を網羅するように工事の手順、使用前事業者検査の方法等を記載している。以上のことから、当該記載については比較対象外。</p>

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>b) 引張試験は、JIS Z 2241(1998)による。この場合の試験片は、JIS Z 2201(1998)の11号試験片とする。ただし、荷重を加える速度は、耐力までは至増加率0.003～0.007mm/mm・min、耐力以降破断まではクロスヘッド速度で約0.05mm/mm・minまで増加することができる。引張試験に使用する心金の形状は図3.4-1とする。</p> <p>c) 腐食試験は、JIS H 4751(1998)の附属書2による。</p> <p>d) 水素化物方位試験は、JIS H 4751(1998)の附属書3による。</p> <p>e) 超音波探傷試験は、JIS H 4751(1998)の附属書4による。</p> <p>3.5 検査</p> <p>検査は、次による。</p> <p>a) 被覆管は、外観、寸法を検査するとともに、3.4によって試験を行い、3.1及び3.2の規定に適合しなければならない。</p> <p>b) 酸素、水素及び窒素については、同一インゴットを用い、同一加工条件で同時熱処理を施した一組の被覆管から任意に2本の供試管をとって、それぞれの被覆管から分析試験片をとる。</p> <p>酸素、水素及び窒素以外の元素については、同一インゴットまたは中間製品からそのインゴットの上部、中央部、下部またはこれに対応する位置から各々1個の分析試験片をとる。</p> <p>c) 引張試験及び腐食試験の試験片は、同一インゴットを用い、同一加工条件で同時熱処理を施した一組の被覆管から任意に2本の供試管をとって、それぞれの被覆管から引張試験及び腐食試験の試験片を各1個とる。</p> <p>d) 水素化物方位試験の試験片は、同一インゴットを用い、同一加工条件で同時熱処理を施した一組の被覆管から任意に1本の供試管をとって、その被覆管から水素化物方位試験の試験片を1個とる。</p> <p>e) 寸法試験及び超音波探傷試験は、全長にわたり行う。</p> <p>f) その他の一般事項は、JIS H 6321(1973)による。</p> <p>3.6 表示</p> <p>被覆管は、1束ごとまたは1包装ごとに適切な方法によって識別を行い、管理されていることとしている。</p>		<p>前頁と同じ。</p>

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所

表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>4. 参 考 文 献</p> <p>[1] 原子燃料工業株式会社, "原燃工製PWRステップ2燃料の改良因子について" NFX-S116 改4, 平成15年</p> <p>[2] S.T.Mahmood, et al., "Post-Irradiation characterization of Ultra-High-Fluence Zircaloy-2 Plate", ASTM SIP1354, 2000</p> <p>[3] K.Use, "Threshold values characterizing Iodine-induced SOC of Zircaloys", IAEA Specialists Meeting on Pellet-Cladding Interaction in Water Reactors, Roskilde, Denmark, 1980</p> <p>[4] (財)原子力発電技術機構, "平成13年度高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書"</p> <p>[5] J.O.Barber, et al., "High Burnup Effects Program - Final Report", HREP-61, 1990"</p> <p>[6] K.NOGITA, K.USE, "Formation of Pellet-cladding Bonding Layer in High Burnup BWR Fuels" J.Nucl.Sci.Tech.34, 1997</p> <p>[7] L.Baker, L.C.Just, "Studies of Metal Water Reactions at High Temperature. Experimental and Theoretical Studies of Zircaloy-Water Reaction", ANL-6548, 1962</p>		<p>特認の参考文献を示しているものであり、比較対象外。</p>



下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
<p style="text-align: center;">表 1.1-1 NDA被覆管の化学成分規定値</p> <table border="1" data-bbox="203 435 860 624"> <thead> <tr> <th>被覆管</th> <th>Sn</th> <th>Fe</th> <th>Cr</th> <th>Fe+Cr</th> <th>Nb</th> <th>Ni</th> <th>O</th> <th>Zr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA被覆管</td> <td>0.90 ~ 1.15</td> <td>0.24 ~ 0.30</td> <td>0.13 ~ 0.19</td> <td>~ ~</td> <td>0.08 ~ 0.14</td> <td>0.007 ~ 0.014</td> <td>~ ~</td> <td>残部</td> </tr> <tr> <td>(参考)ジルカロイ-4被覆管</td> <td>1.20 ~ 1.70</td> <td>0.18 ~ 0.24</td> <td>0.07 ~ 0.13</td> <td>0.28 ~ 0.37</td> <td>~ ~</td> <td>~ ~</td> <td>~ ~</td> <td>残部</td> </tr> </tbody> </table> <p>1) JIS H4751 Zr TN804D SR (1998) では規定されていない。 単位: wt%</p> <p style="text-align: center;">表 1.1-2 NDA被覆管の不純物規定値</p> <table border="1" data-bbox="203 754 860 890"> <thead> <tr> <th>被覆管</th> <th>Al</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>Cu</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>N</th> <th>Ni</th> <th>Si</th> <th>Ti</th> <th>U</th> <th>W</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA被覆管</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> </tr> <tr> <td>(参考)ジルカロイ-4被覆管<sup>2)</sup></td> <td>0.0075</td> <td>0.00005</td> <td>0.0030</td> <td>0.00005</td> <td>0.027</td> <td>0.0020</td> <td>0.0050</td> <td>0.010</td> <td>0.0035</td> <td>0.010</td> <td>0.0025</td> <td>0.010</td> </tr> </tbody> </table> <p>2) JIS H4751 Zr TN804D SR (1998) 単位: wt%</p>	被覆管	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr	NDA被覆管	0.90 ~ 1.15	0.24 ~ 0.30	0.13 ~ 0.19	~ ~	0.08 ~ 0.14	0.007 ~ 0.014	~ ~	残部	(参考)ジルカロイ-4被覆管	1.20 ~ 1.70	0.18 ~ 0.24	0.07 ~ 0.13	0.28 ~ 0.37	~ ~	~ ~	~ ~	残部	被覆管	Al	B	C	Cu	Mg	Mn	N	Ni	Si	Ti	U	W	NDA被覆管	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	(参考)ジルカロイ-4被覆管 <sup>2)</sup>	0.0075	0.00005	0.0030	0.00005	0.027	0.0020	0.0050	0.010	0.0035	0.010	0.0025	0.010	<p>(資料8)</p> <p style="text-align: center;">第 2-1 表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分 (続き)</p> <table border="1" data-bbox="987 349 1693 1224"> <thead> <tr> <th rowspan="2">構成部品</th> <th rowspan="2">材料の種類</th> <th colspan="2">主成分(wt%)</th> <th colspan="10">不純物(ppm)</th> </tr> <tr> <th>Sn</th> <th>Fe</th> <th>Al</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>Cu</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>N</th> <th>Ni</th> <th>Si</th> <th>Ti</th> <th>U</th> <th>W</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 (特6)</td> <td>Sn</td> <td>0.90/1.15</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.24/0.30</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.13/0.19</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.08/0.14</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>0.007/0.014</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材端栓</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 (特7) ASTM B351 Grade R60804 (JIS H4751 ZrTN 804D 相当)</td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al ≤ 75</td> <td>B ≤ 0.5</td> <td>C ≤ 270</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>Cd ≤ 0.5</td> <td>Co ≤ 20</td> <td>Cu ≤ 50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>H ≤ 25</td> <td>Hf ≤ 100</td> <td>Mg ≤ 20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mn ≤ 50</td> <td>Mo ≤ 50</td> <td>N ≤ 80</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>~</td> <td>Ni ≤ 70</td> <td>Si ≤ 120</td> <td>Ti ≤ 50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>U ≤ 3.5</td> <td>W ≤ 100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="6">制御棒案内シムプル</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 (特7) ASTM B353 Grade R60804</td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al ≤ 75</td> <td>B ≤ 0.5</td> <td>C ≤ 270</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>Cd ≤ 0.5</td> <td>Co ≤ 20</td> <td>Cu ≤ 50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>H ≤ 25</td> <td>Hf ≤ 100</td> <td>Mg ≤ 20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mn ≤ 50</td> <td>Mo ≤ 50</td> <td>N ≤ 80</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>~</td> <td>Ni ≤ 70</td> <td>Si ≤ 120</td> <td>Ti ≤ 50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>U ≤ 3.5</td> <td>W ≤ 100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="6">制御棒案内シムプル用下部端栓</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 (特7) ASTM B351 Grade R60804</td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al ≤ 75</td> <td>B ≤ 0.5</td> <td>C ≤ 270</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>Cd ≤ 0.5</td> <td>Co ≤ 20</td> <td>Cu ≤ 50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>H ≤ 25</td> <td>Hf ≤ 100</td> <td>Mg ≤ 20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mn ≤ 50</td> <td>Mo ≤ 50</td> <td>N ≤ 80</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>~</td> <td>Ni ≤ 70</td> <td>Si ≤ 120</td> <td>Ti ≤ 50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>U ≤ 3.5</td> <td>W ≤ 100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">カラー</td> <td rowspan="2">ASTM B351 Grade R60804</td> <td>O</td> <td>~</td> <td>Ni ≤ 70</td> <td>Si ≤ 120</td> <td>Ti ≤ 50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>U ≤ 3.5</td> <td>W ≤ 100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>ジルカロイ-4は本申請対象の燃料被覆材には使用されていないため、設工認申請書には記載していない。</p>	構成部品	材料の種類	主成分(wt%)		不純物(ppm)										Sn	Fe	Al	B	C	Cu	Mg	Mn	N	Ni	Si	Ti	U	W	燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 (特6)	Sn	0.90/1.15	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	Fe	0.24/0.30	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	Cr	0.13/0.19	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	Nb	0.08/0.14	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	Ni	0.007/0.014	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	O	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	Zr	残部	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	燃料被覆材端栓	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 (特7) ASTM B351 Grade R60804 (JIS H4751 ZrTN 804D 相当)	Sn	1.20/1.70	Al ≤ 75	B ≤ 0.5	C ≤ 270									Fe	0.18/0.24	Cd ≤ 0.5	Co ≤ 20	Cu ≤ 50									Cr	0.07/0.13	H ≤ 25	Hf ≤ 100	Mg ≤ 20									Fe+Cr	0.28/0.37	Mn ≤ 50	Mo ≤ 50	N ≤ 80									O	~	Ni ≤ 70	Si ≤ 120	Ti ≤ 50									Zr	残部	U ≤ 3.5	W ≤ 100										制御棒案内シムプル	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 (特7) ASTM B353 Grade R60804	Sn	1.20/1.70	Al ≤ 75	B ≤ 0.5	C ≤ 270								Fe	0.18/0.24	Cd ≤ 0.5	Co ≤ 20	Cu ≤ 50								Cr	0.07/0.13	H ≤ 25	Hf ≤ 100	Mg ≤ 20								Fe+Cr	0.28/0.37	Mn ≤ 50	Mo ≤ 50	N ≤ 80								O	~	Ni ≤ 70	Si ≤ 120	Ti ≤ 50								Zr	残部	U ≤ 3.5	W ≤ 100									制御棒案内シムプル用下部端栓	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 (特7) ASTM B351 Grade R60804	Sn	1.20/1.70	Al ≤ 75	B ≤ 0.5	C ≤ 270								Fe	0.18/0.24	Cd ≤ 0.5	Co ≤ 20	Cu ≤ 50								Cr	0.07/0.13	H ≤ 25	Hf ≤ 100	Mg ≤ 20								Fe+Cr	0.28/0.37	Mn ≤ 50	Mo ≤ 50	N ≤ 80								O	~	Ni ≤ 70	Si ≤ 120	Ti ≤ 50								Zr	残部	U ≤ 3.5	W ≤ 100									カラー	ASTM B351 Grade R60804	O	~	Ni ≤ 70	Si ≤ 120	Ti ≤ 50							Zr	残部	U ≤ 3.5	W ≤ 100								
被覆管	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
NDA被覆管	0.90 ~ 1.15	0.24 ~ 0.30	0.13 ~ 0.19	~ ~	0.08 ~ 0.14	0.007 ~ 0.014	~ ~	残部																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
(参考)ジルカロイ-4被覆管	1.20 ~ 1.70	0.18 ~ 0.24	0.07 ~ 0.13	0.28 ~ 0.37	~ ~	~ ~	~ ~	残部																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
被覆管	Al	B	C	Cu	Mg	Mn	N	Ni	Si	Ti	U	W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
NDA被覆管	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
(参考)ジルカロイ-4被覆管 <sup>2)</sup>	0.0075	0.00005	0.0030	0.00005	0.027	0.0020	0.0050	0.010	0.0035	0.010	0.0025	0.010																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
構成部品	材料の種類	主成分(wt%)		不純物(ppm)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
		Sn	Fe	Al	B	C	Cu	Mg	Mn	N	Ni	Si	Ti	U	W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 (特6)	Sn	0.90/1.15	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		Fe	0.24/0.30	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		Cr	0.13/0.19	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		Nb	0.08/0.14	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		Ni	0.007/0.014	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		O	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Zr	残部	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
燃料被覆材端栓	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 (特7) ASTM B351 Grade R60804 (JIS H4751 ZrTN 804D 相当)	Sn	1.20/1.70	Al ≤ 75	B ≤ 0.5	C ≤ 270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Fe	0.18/0.24	Cd ≤ 0.5	Co ≤ 20	Cu ≤ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Cr	0.07/0.13	H ≤ 25	Hf ≤ 100	Mg ≤ 20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mn ≤ 50	Mo ≤ 50	N ≤ 80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		O	~	Ni ≤ 70	Si ≤ 120	Ti ≤ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Zr	残部	U ≤ 3.5	W ≤ 100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
制御棒案内シムプル	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 (特7) ASTM B353 Grade R60804	Sn	1.20/1.70	Al ≤ 75	B ≤ 0.5	C ≤ 270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Fe	0.18/0.24	Cd ≤ 0.5	Co ≤ 20	Cu ≤ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Cr	0.07/0.13	H ≤ 25	Hf ≤ 100	Mg ≤ 20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mn ≤ 50	Mo ≤ 50	N ≤ 80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		O	~	Ni ≤ 70	Si ≤ 120	Ti ≤ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Zr	残部	U ≤ 3.5	W ≤ 100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
制御棒案内シムプル用下部端栓	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 (特7) ASTM B351 Grade R60804	Sn	1.20/1.70	Al ≤ 75	B ≤ 0.5	C ≤ 270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Fe	0.18/0.24	Cd ≤ 0.5	Co ≤ 20	Cu ≤ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Cr	0.07/0.13	H ≤ 25	Hf ≤ 100	Mg ≤ 20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mn ≤ 50	Mo ≤ 50	N ≤ 80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		O	~	Ni ≤ 70	Si ≤ 120	Ti ≤ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Zr	残部	U ≤ 3.5	W ≤ 100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
カラー	ASTM B351 Grade R60804	O	~	Ni ≤ 70	Si ≤ 120	Ti ≤ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Zr	残部	U ≤ 3.5	W ≤ 100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考																																										
<p style="text-align: center;">表 2.1-1 NDA被覆管の融点<sup>(1)</sup></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>被覆管</th> <th>融点</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4被覆管</td> <td>1782</td> </tr> <tr> <td>NDA被覆管</td> <td>1796</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位：℃</p> <p style="text-align: center;">表 2.1-2 NDA被覆管の相変態温度<sup>(1)</sup></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>被覆管</th> <th>相変態開始温度</th> <th>相変態終了温度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4被覆管</td> <td>820</td> <td>958</td> </tr> <tr> <td>NDA被覆管</td> <td>802</td> <td>937</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位：℃</p> <p style="text-align: center;">表 2.4-1 NDA被覆管の硬度<sup>(1)</sup></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>被覆管</th> <th>マイクロピッカース硬さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4被覆管</td> <td>212~224</td> </tr> <tr> <td>NDA被覆管</td> <td>211~217</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位：Hv (0.2) *</p> <p style="margin-top: 20px;">* 試験荷重 0.2kgf</p>	被覆管	融点	ジルカロイ-4被覆管	1782	NDA被覆管	1796	被覆管	相変態開始温度	相変態終了温度	ジルカロイ-4被覆管	820	958	NDA被覆管	802	937	被覆管	マイクロピッカース硬さ	ジルカロイ-4被覆管	212~224	NDA被覆管	211~217	<p style="text-align: center;">(資料8)</p> <p style="text-align: center;">第 5-1 表 NDA の溶融点測定結果<sup>(20)</sup></p> <p style="text-align: right;">(単位：℃)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>溶融点測定結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>1.796</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>1.782</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">第 5-2 表 NDA の相変態温度測定結果<sup>(20)</sup></p> <p style="text-align: right;">(単位：℃)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th><math>\alpha \rightarrow \alpha + \beta</math></th> <th><math>\alpha + \beta \rightarrow \beta</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>802</td> <td>937</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>820</td> <td>958</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">第 5-3 表 NDA 被覆管の硬さの測定結果<sup>(20)</sup></p> <p style="text-align: right;">(単位：HV (ピッカース硬さ値))</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HV0.2 <sup>(H1)</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>215</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>218</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(注 1) HV0.2：ピッカース硬さ試験力 0.2kgf</p>	種類	溶融点測定結果	NDA	1.796	ジルカロイ-4 (参考)	1.782	種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$	NDA	802	937	ジルカロイ-4 (参考)	820	958	種類	平均値 (HV0.2 <sup>(H1)</sup> )	NDA	215	ジルカロイ-4 (参考)	218	
被覆管	融点																																											
ジルカロイ-4被覆管	1782																																											
NDA被覆管	1796																																											
被覆管	相変態開始温度	相変態終了温度																																										
ジルカロイ-4被覆管	820	958																																										
NDA被覆管	802	937																																										
被覆管	マイクロピッカース硬さ																																											
ジルカロイ-4被覆管	212~224																																											
NDA被覆管	211~217																																											
種類	溶融点測定結果																																											
NDA	1.796																																											
ジルカロイ-4 (参考)	1.782																																											
種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$																																										
NDA	802	937																																										
ジルカロイ-4 (参考)	820	958																																										
種類	平均値 (HV0.2 <sup>(H1)</sup> )																																											
NDA	215																																											
ジルカロイ-4 (参考)	218																																											



下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="174 300 833 1284"> <p>図 2-2-1 NDA被覆管の機械的性質と高速中性子照射量の関係<sup>(1)</sup></p> </div> <div data-bbox="212 1305 683 1327"> <p>RT(Radial Texture)：集合組立過程を施した被覆管を表す。以降、同様。</p> </div> <div data-bbox="488 1348 537 1369"> <p>2-13</p> </div>	<div data-bbox="1019 311 1713 1300"> <p>(資料8)</p> <p>第 5-1 図 NDA 被覆管の機械特性<sup>(2)</sup></p> </div>	



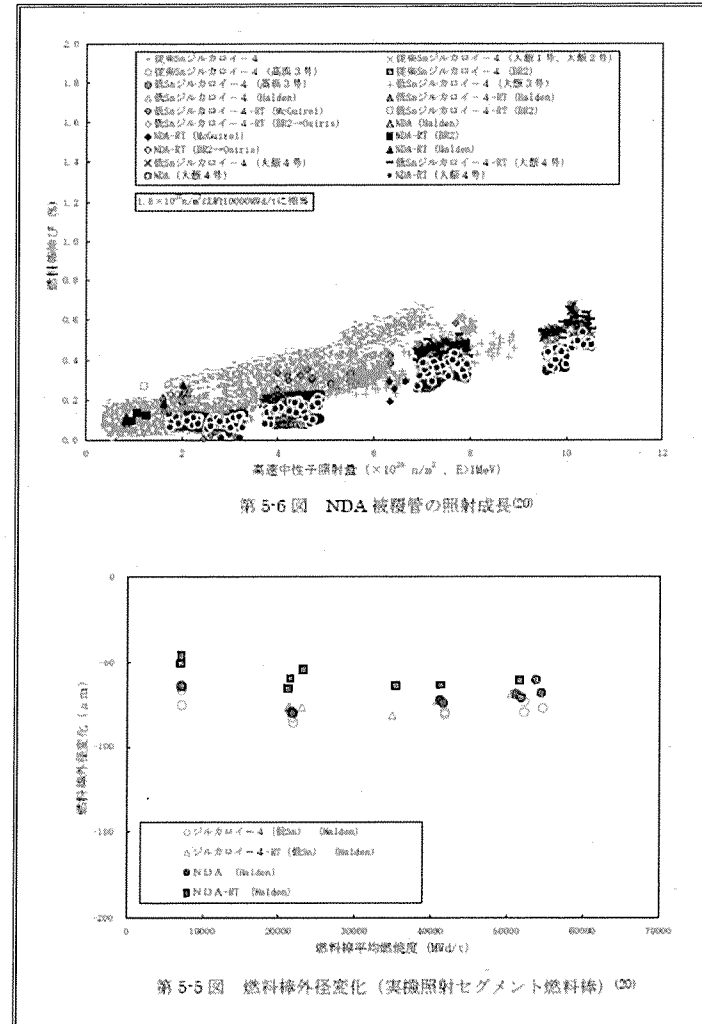
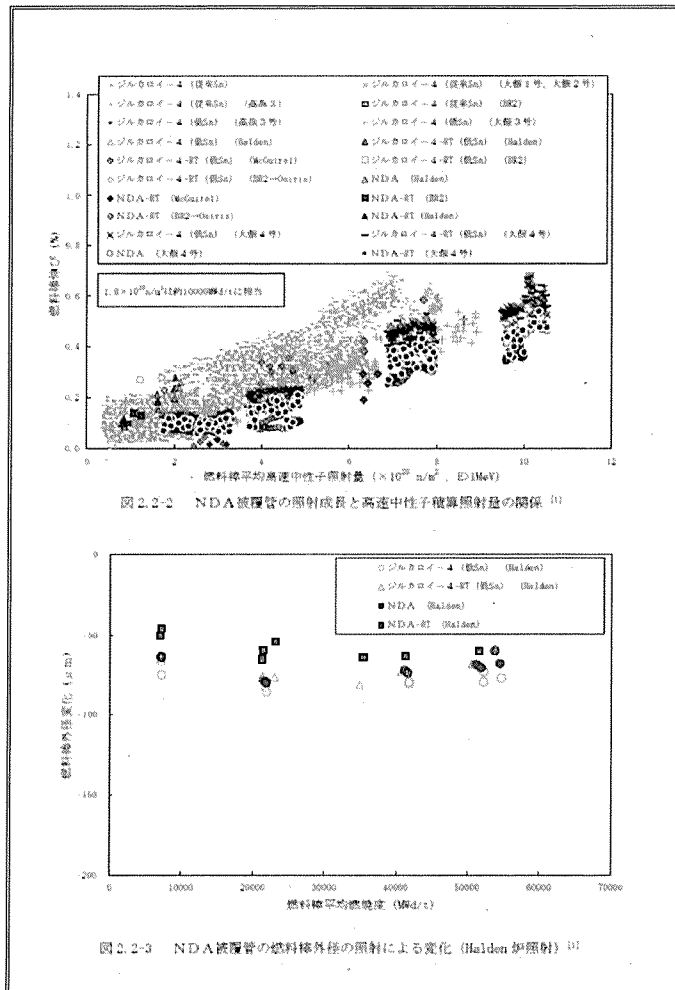
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）

設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）

備考

(資料8)



下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）

設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）

備考

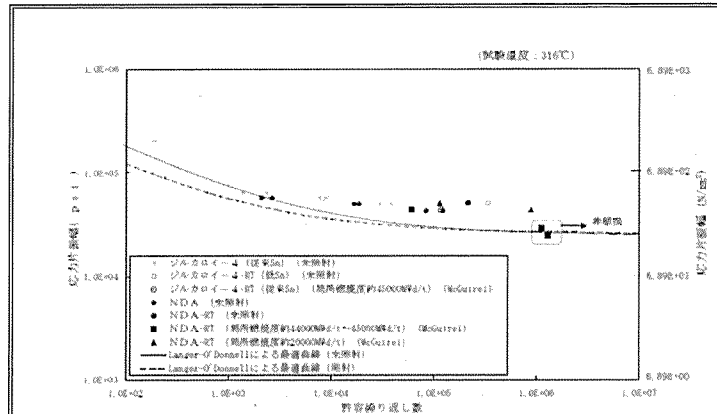
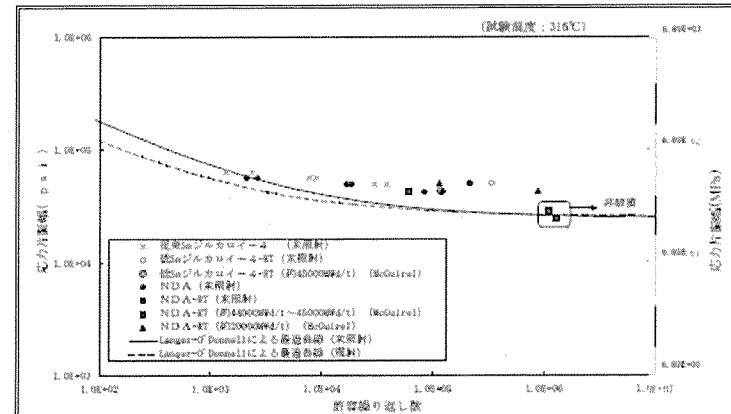


図 2-2-4 NDA被覆管の疲労特性<sup>(1)</sup>

(資料8)



第 5-4 図 NDA 被覆管の疲労強度<sup>(2)</sup>

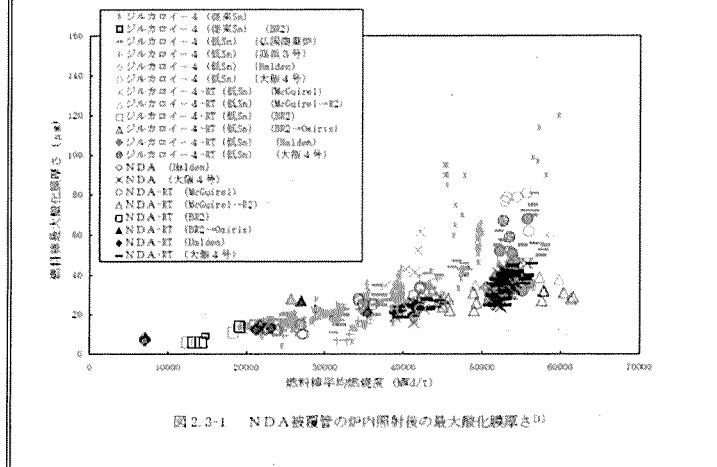
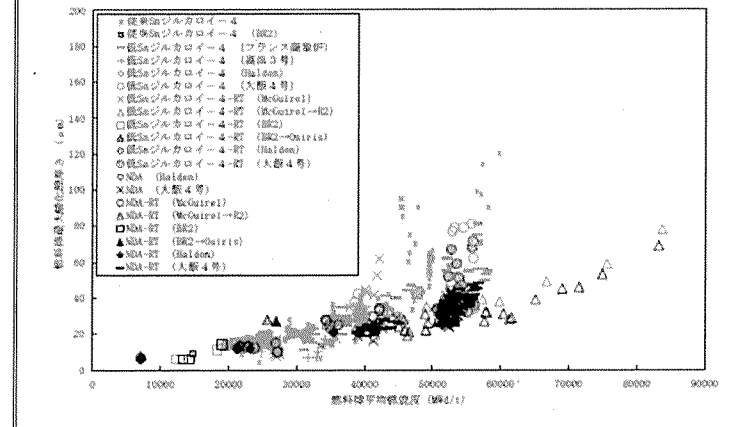


図 2-3-1 NDA被覆管の炉内照射後の最大酸化膜厚さ<sup>(1)</sup>



第 5-8 図 NDA 被覆管の原子炉内酸化膜厚さ<sup>(2)</sup>

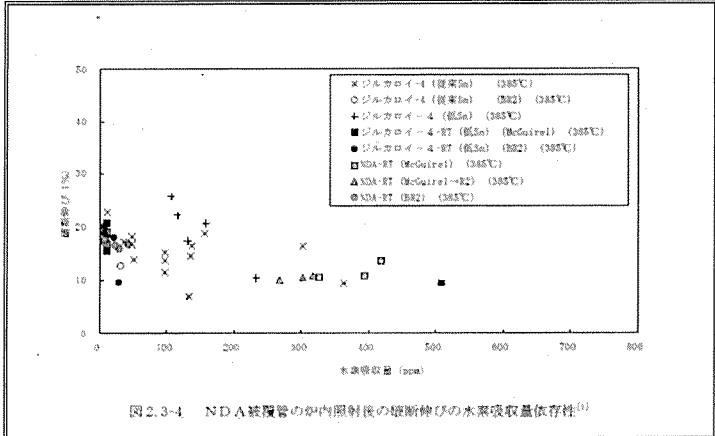
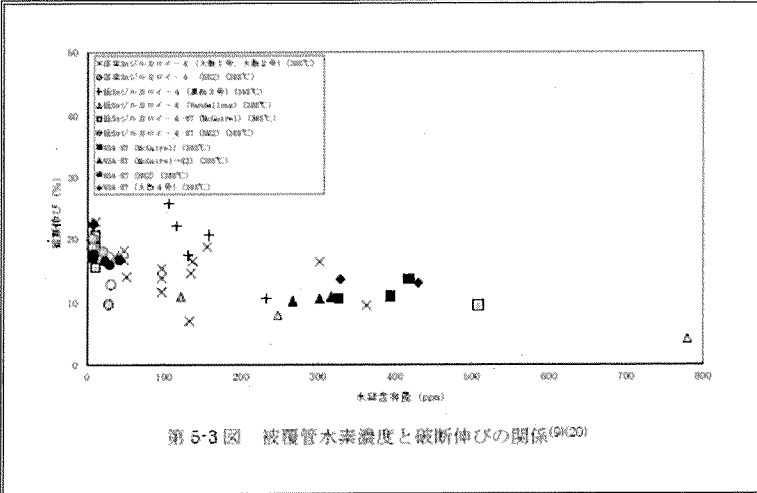
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="181 316 902 863"> <p>図 2-3-2 NDA被覆管の炉内照射後の水素吸収量の酸化膜厚さ依存性<sup>(1)</sup></p> </div>	<div data-bbox="943 240 1744 967"> <p>(資料8)</p> <p>第 5-9 図 NDA 被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係<sup>(2)</sup></p> </div>	

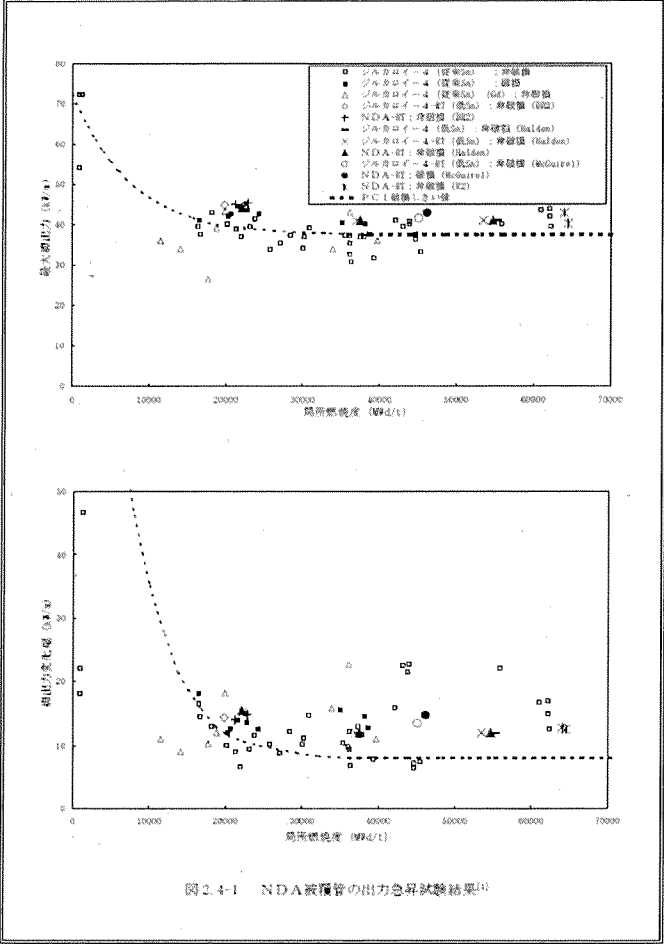
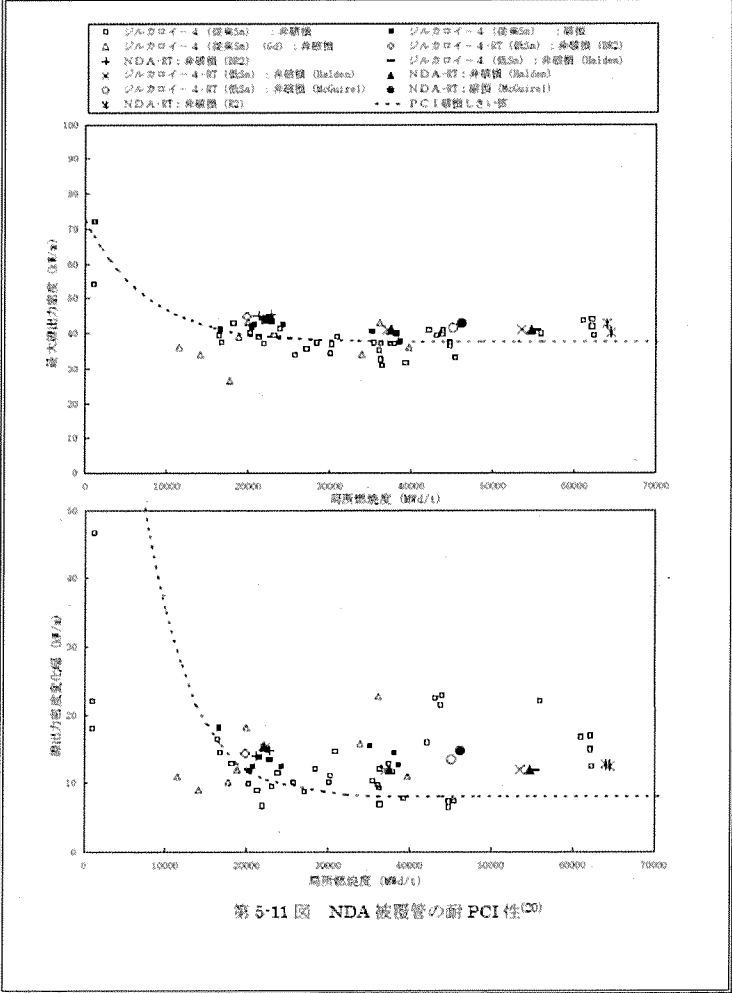
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="219 300 853 1300" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>図 2.3-3 NDA 被覆管の機械的性質の水素吸収量依存性（未照射被覆管）<sup>(4)</sup></p> </div> <p style="text-align: center;">2-17</p>	<p>(資料8)</p> <div data-bbox="1021 316 1688 1342" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>第 5-2 図 未照射 NDA 被覆管の機械特性と水素濃度の関係<sup>(20)</sup></p> </div>	

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
 <p>図 2.3-4 NDA被覆管の炉内照射後の破断伸びの水素濃度依存性<sup>(1)</sup></p>	<p>(資料8)</p>  <p>第 5-3 図 被覆管水素濃度と破断伸びの関係<sup>(9)(20)</sup></p>	

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>(資料8)</p>  <p>図 2.4-1 NDA被覆管の出力急昇試験結果<sup>(1)</sup></p>	 <p>第 5-11 図 NDA被覆管の耐 PCI 性<sup>(2)</sup></p>	

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）

設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）

備考

(資料8)

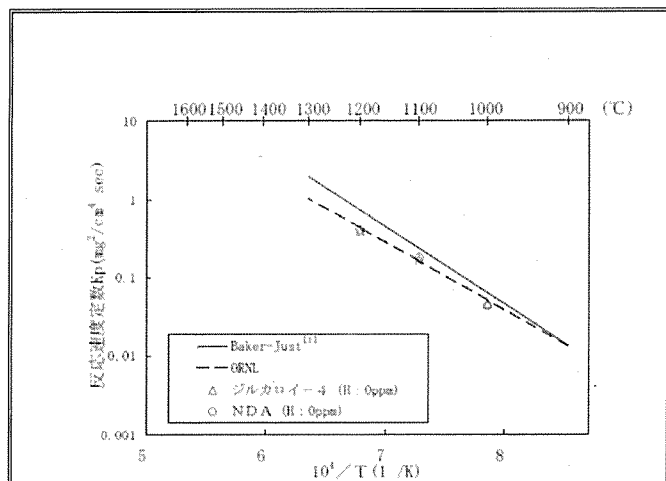
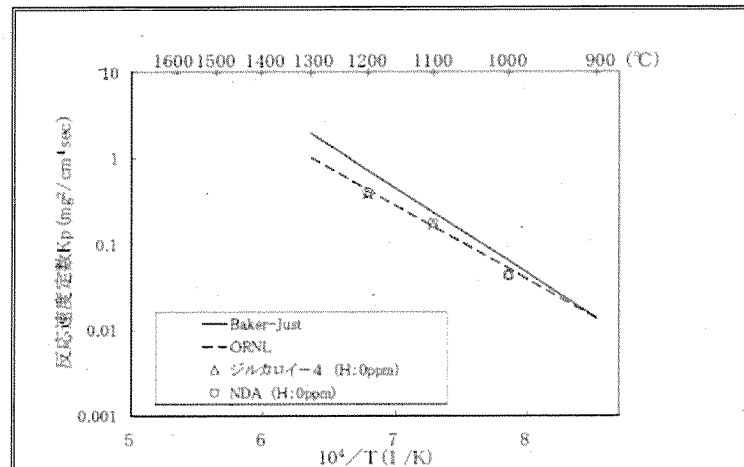


図 2-4-2 NDA被覆管のジルコニウム-水反応速度定数<sup>(1)</sup>



第 5-13 図 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数（受取管）<sup>(2)</sup>

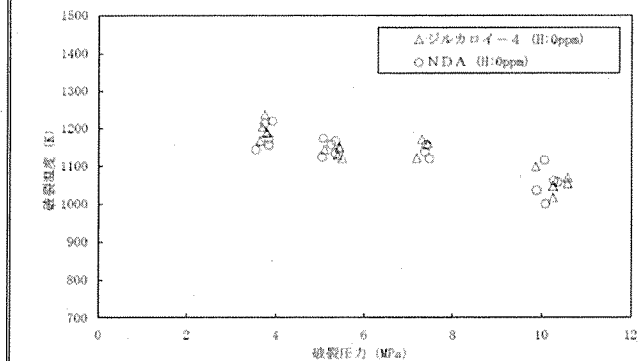
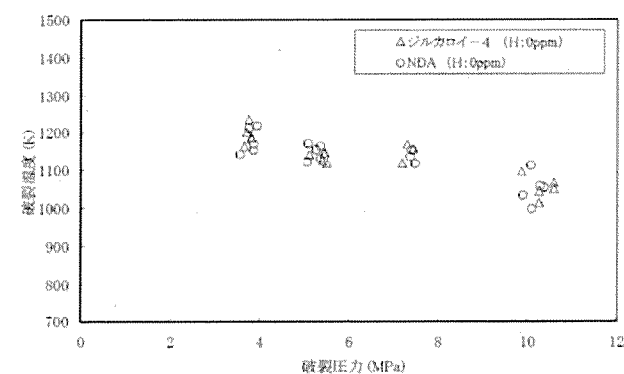
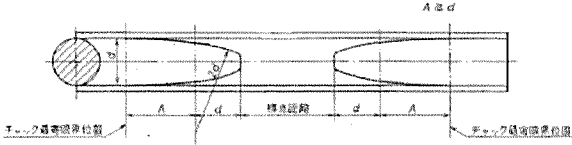


図 2-4-3 NDA被覆管のLOCA想定時被覆管破裂試験結果<sup>(1)</sup>



第 5-12 図 未照射管の LOCA 時破裂試験結果（受取管）<sup>(2)</sup>

下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
 <p data-bbox="432 639 680 659">図 3.4-1 引張試験における心金の形状</p>		<p data-bbox="1767 288 2074 485">検査方法等については、本設工認における工事の方法にて、全施設を網羅するように工事の手順、使用前事業者検査の方法等を記載している。以上のことから、当該記載については比較対象外。</p>



## 補足説明資料 7

耐震性に関する説明書に関する補足説明資料

## 目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 詳細説明 .....	2

1. 概要

本資料は、資料6「耐震性に関する説明書」について、本申請書とこれまでに処分済の申請書との関係を整理するものである。

2020年4月の「原子力利用における安全対策の強化のための核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等の一部を改正する法律」及び関連規則等の施行（以下「検査制度見直し」という。）により、燃料体設計認可および工事計画認可が、設計及び工事計画認可として一元化されるとともに、燃料体検査および輸入燃料体検査（輸入燃料を対象としたものであり、申請書には耐震性に係る説明も含む）が、使用前事業者検査として一元化された。

燃料の耐震性については、第1表に示すとおり、工事計画認可申請書、燃料体設計認可申請書、輸入燃料体検査申請書においてそれぞれ説明してきた。そして、工事計画認可のうちの再稼働工認および被覆管BF工認において現在の基準地震動に対する耐震評価を実施しており、これ以降に燃料体の設計変更は行っていない。

このため、本申請設備の耐震性は、再稼働工認および被覆管BF工認において示した耐震評価と相違ないことから、これらの認可処分を受けたものと同じであることを資料6で示している。

第1表 燃料集合体の耐震性に係る評価内容の概要

	耐震性に係る評価内容		
	工事計画認可		燃料体設計認可・ 輸入燃料体検査申請
	評価対象部位	評価項目	
新規制基準施行前	燃料被覆管	一次応力評価 ・平均引張応力	(注2) (同左)
	制御棒案内シンプル	一次応力評価 ・一次一般膜応力 ・一次膜応力+一次曲げ応力	
	支持格子	(注1) 強度評価	
(注3) 再稼働工認	(同上)	(同上)	—
(注4) 被覆管BF工認	燃料被覆管	一次+二次応力評価 ・平均引張応力 疲労評価	—
検査制度見直し後 (今回申請)	再稼働工認+被覆管BF工認を呼び込み		—

(注1) 地震によって支持格子に生じる最大衝撃力が弾性限界荷重を上回っており、支持格子の永久変形が制御棒クラスタ挿入性に支障のない範囲であることを確認

(注2) 燃料被覆管の評価については、燃料体設計認可において工事計画認可の評価項目を包含するより厳しい条件にて評価を実施

(注3) 平成25年7月の新規制基準施行に伴う基準地震動見直しにより評価を実施

(注4) 平成29年11月の技術基準規則及びその解釈等の改正に伴う燃料被覆管の閉じ込め機能維持が追加要求されたことにより評価を実施

## 2. 詳細説明

### 2.1. 再稼働工認

平成 25 年 7 月の新規制基準施行に伴い基準地震動が見直されたことから、再稼働工認（第 2 表にて整理。）において耐震 S クラスに分類される設備については、見直された地震動に対する耐震評価を実施し、技術基準規則第 5 条第 1 項及び第 2 項へ適合するものであることを確認している。

具体的には、燃料集合体は耐震 S クラスに分類していることから、当該申請における「燃料集合体の耐震計算書」の資料にて、燃料被覆管、制御棒案内シングル、支持格子について評価を実施し、許容値を満足することを確認している。

なお、技術基準規則第 23 条（炉心等）に係る要求事項については、新規制基準施行に伴う要求事項の変更はないことを確認している。

### 2.2 燃料被覆管閉じ込め機能維持バックフィット工認（被覆管 B F 工認）

平成 29 年 11 月の技術基準規則及びその解釈の改正に伴い、技術基準規則第 5 条第 4 項において地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能を維持することが要求された。

このため、被覆管 B F 工認（第 3 表にて整理。）における「地震時の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込め機能に係る耐震計算書」において燃料集合体のうち燃料被覆管については、追加要求された閉じ込め機能の維持に係る耐震評価を実施し、技術基準規則第 5 条第 4 項へ適合性するものであることを確認している。

### 2.3 本申請

検査制度見直しに伴い、燃料体については加工開始前までに設計及び工事計画認可を取得する必要があることから本申請を実施しているものであり、本申請対象である燃料集合体の耐震評価に変更はない。

したがって、燃料集合体の耐震性に関する説明については、燃料被覆管（一次応力評価に加えて、一次＋二次応力評価及び疲労評価）、制御棒案内シングル、支持格子に対する評価結果として、上記 2.1 項における再稼働工認及び 2.2 項における被覆管 B F 工認を呼び込むことで、技術基準規則第 5 条への適合性を確認している。

第2表 再稼働工認の認可実績

プラント	工事計画認可
伊方3号機	平成28年3月23日付け原規規発第1603231号にて認可

第3表 燃料被覆管閉じ込め機能維持バックフィット工認の認可実績

プラント	工事計画認可
伊方3号機	令和元年6月10日付け原規規発第1906103号にて認可

以上

## 補足説明資料 8

### 基本設計方針と技術基準規則等 の関係について

## 1. 概要

本資料は、法令等の改正内容を踏まえ、燃料体に係る要求事項を基本設計方針に追加したことから、基本設計方針と技術基準規則等の関係について別紙のとおり整理したものである。

基本設計方針と技術基準規則等の関係

伊方3号機 17行17列B型燃料集合体	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明
<p>第2章 個別項目</p> <p>1. 炉心等</p> <p>燃料体(燃料材、燃料要素及び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。</p> <p>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み合わ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、核性質及び強度のうち必要な物理的性質並びに耐食性、水素吸収特性及び化学的安定性のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。<u>燃料体の物理的性質及び化学的性質について、「1.1 燃料体」に基づき設計する。</u></p> <p>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。</p> <p>燃料体は、「<u>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</u>」(昭和51年2月16日 原子炉安全専門審査会)及び「<u>発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について</u>」(昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承)に基づき、設置(変更)許可を受けた、<u>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</u>、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。</p> <p>炉心支持構造物は、最高使用圧力、自重、附加荷重及び地震力に加え、熱応力の荷重に耐える設計とする。</p> <p>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</p>	<p>(炉心等)</p> <p>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、<u>最高使用圧力</u>、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荷重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>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「<u>発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について</u> (昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承)」及び「<u>燃料体に関する要求事項</u> (別記-10)」によること。</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荷重」には、燃料体における核分裂生成物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><u>【水質を記載することについて】</u></p> <p>燃料の健全性評価において水質を考慮する必要があることから、明確化のため記載している。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」の5.3耐食性に「<u>実機では放射線照射下で～酸素の発生を抑制している。</u>」に1次冷却材の環境について記載があり、5.3.1酸化腐食による影響、5.3.2水素吸収による影響にて水質含めた試験結果を踏まえ影響を確認している旨記載している。</p> <p><u>【基本設計方針の1.と1.1の関係性について】</u></p> <p>基本設計方針は、別記-10の仕様を満たした上で技術基準規則の本則を満たすことを説明している。</p> <p><u>【適用基準及び適用規格の記載について】</u></p> <p>下線部の指針類は適用基準及び適用規格に記載している。</p> <p><u>【最高使用圧力としないことについて】</u></p> <p>燃料体(燃料要素)では圧力について内外圧差の最大で評価しており、1次冷却材の圧力は保守的に通常運転時の圧力としている。そのため、基本設計方針には、「最高使用圧力」と記載していない。詳細は、添付1に示す。</p>



伊方3号機	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明
17行17列B型燃料集合体			
<p>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設計とする。</p>			
<p>燃料体(燃料要素以外の燃料体の構成要素)、減速材、反射材及び炉心支持構造物(原子炉容器内で炉心付近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、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設計とする。</p>			
1.1 燃料体		(別記-10)	
1.1.2 17行17列B型燃料集合体(ウラン燃料)		1. 二酸化ウラン燃料材	
<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>二酸化ウラン燃料材は、次の(1)～(5)のいずれにも適合すること。</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。		(1) 次の表の左欄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、それぞれ同表の右欄に掲げる値であること。	
炭素 0.010以下		炭素 0.010 以下	
ふっ素 0.0015以下		ふっ素 0.0015 以下	
水素 0.0002以下		水素 0.0002 以下	
窒素 0.0075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。		(2) ウラン235 の含有量のウランの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。		(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こと。	
a. 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。		①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。		②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。		③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。		(4) ガドリニウムを添加していないものにあつては、次に適合すること。	
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。		① 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、		② 酸素の原子数のウランの原子数に対する比率の値	

伊方3号機	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明
17行17列B型燃料集合体			
<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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>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、次に適合すること。</p> <p>① 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。</p> <p>② 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。</p> <p>③ ガドリニウム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。</p> <p>④ 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><b>2. ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料材</b></p> <p>ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料材は、次の(1)～(5)のいずれにも適合すること。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p> <p>(5) ペレット型燃料材にあっては、ペレットが次に適合すること。</p> <p>① 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>② 密度の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>③ 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p> <p>④ 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p><b>3. ジルコニウム合金燃料被覆材</b></p>	<p><b>【2. を記載しないことについて】</b></p> <p>ウラン燃料に係る申請のため、ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料材の要求事項は記載しない。</p>

伊方3号機	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明												
17行17列B型燃料集合体															
<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。</p> <p>(2) 被覆材の軸は、著しく湾曲していないこと。</p> <p>(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<u>日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表3</u>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> <table border="1" data-bbox="212 518 481 734"> <tr><td>スズ</td><td>0.90~1.15</td></tr> <tr><td>鉄</td><td>0.24~0.30</td></tr> <tr><td>クロム</td><td>0.13~0.19</td></tr> <tr><td>ニオブ</td><td>0.08~0.14</td></tr> <tr><td>ニッケル</td><td>0.007~0.014</td></tr> <tr><td>酸素</td><td></td></tr> </table> <p>ジルコニウム 残り</p> <p>(4) <u>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」</u>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) <u>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」</u>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。</p> <p>(7) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(8) 表面の粗さの程度は、実用上差し支えないものであること。</p> <p>(9) <u>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」</u>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/dm<sup>2</sup>以下又は14日間で38mg/dm<sup>2</sup>以下であること。</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			<p>ジルコニウム合金燃料被覆材は、次の(1)~(9)のいずれにも適合すること。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 被覆材の軸は、著しく湾曲していないこと。</p> <p>(3) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値は、<u>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</u>に規定する値であること。</p> <p>(4) <u>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」</u>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) <u>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」</u>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。</p> <p>(7) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(8) 表面の粗さの程度は、実用上差し支えないものであること。</p> <p>(9) <u>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」</u>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ミリグラム毎平方デシメートル以下又は14日間で38ミリグラム毎平方デシメートル以下であること。</p>	<p><u>【適用基準及び適用規格の記載について】</u> 下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</p> <p><u>【主成分を記載することについて】</u> 燃料被覆管の主成分は旧法下の燃料体設計認可申請書本文記載事項であり、設置許可添付書類八においても被覆管の材料として説明している。技術基準規則への適合性を示す観点から基本設計方針に記載している。詳細は添付2に示す。</p> <p><u>【適用基準及び適用規格の記載について】</u> 下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</p> <p><u>【適用基準及び適用規格の記載について】</u> 下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</p> <p><u>【適用基準及び適用規格の記載について】</u> 下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</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															

伊方3号機	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明											
17行17列B型燃料集合体														
<p>(10) 応力除去焼きなましを行ったものにあつては、<u>日本産業規格Z2241 (2011)「金属材料引張試験方法」</u>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> <p>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。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値は、<u>日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」</u>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。</p> <p>(3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p> <p>(4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(5) <u>日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」</u>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/dm<sup>2</sup>以下又は14日間で38mg/dm<sup>2</sup>以下であること。</p> <p>(6) 再結晶焼きなましを行ったジルコニウム合金端栓は、<u>日本</u></p>		<p>00 再結晶焼きなましを行ったものにあつては、次に適合すること。</p> <p>① 日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書A 結晶粒度試験方法」又はこれと同等の方法によって結晶粒度試験を行ったとき、結晶粒度が結晶粒度番号7と同等又はこれより細かいこと。</p> <p>② 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、耐力及び伸びが日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表4に規定する値であること。</p> <p>01 応力除去焼きなましを行ったものにあつては、<u>日本産業規格Z2241 (2011)「金属材料引張試験方法」</u>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> <p>4. ジルコニウム合金端栓</p> <p>(1) 再結晶焼きなましを行ったジルコニウム合金端栓は、<u>日本産業規格Z2241 (2011)「金属材料引張試験方法」</u>、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次の表の上欄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、それぞれ同表の下欄に掲げる値であること。端栓とは、燃料被覆材の両端を密封するために成形された金属部品をいう。</p> <table border="1" data-bbox="1144 1326 1644 1437"> <thead> <tr> <th rowspan="2">温度</th> <th colspan="3">引張試験</th> </tr> <tr> <th>引張強さ</th> <th>耐力</th> <th>伸び</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>ニュートン</td> <td>ニュートン</td> <td>パーセント</td> </tr> </tbody> </table>	温度	引張試験			引張強さ	耐力	伸び		ニュートン	ニュートン	パーセント	<p>【(10)を記載しないことについて】</p> <p>ジルコニウム合金燃料被覆材に再結晶焼きなましを行ったものは使用しないため、(10)は基本設計方針に記載しない。</p> <p>【適用基準及び適用規格の記載について】</p> <p>下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</p> <p>【適用基準及び適用規格の記載について】</p> <p>下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</p> <p>【適用基準及び適用規格の記載について】</p> <p>下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</p> <p>【適用基準及び適用規格の記載について】</p>
温度	引張試験													
	引張強さ	耐力	伸び											
	ニュートン	ニュートン	パーセント											

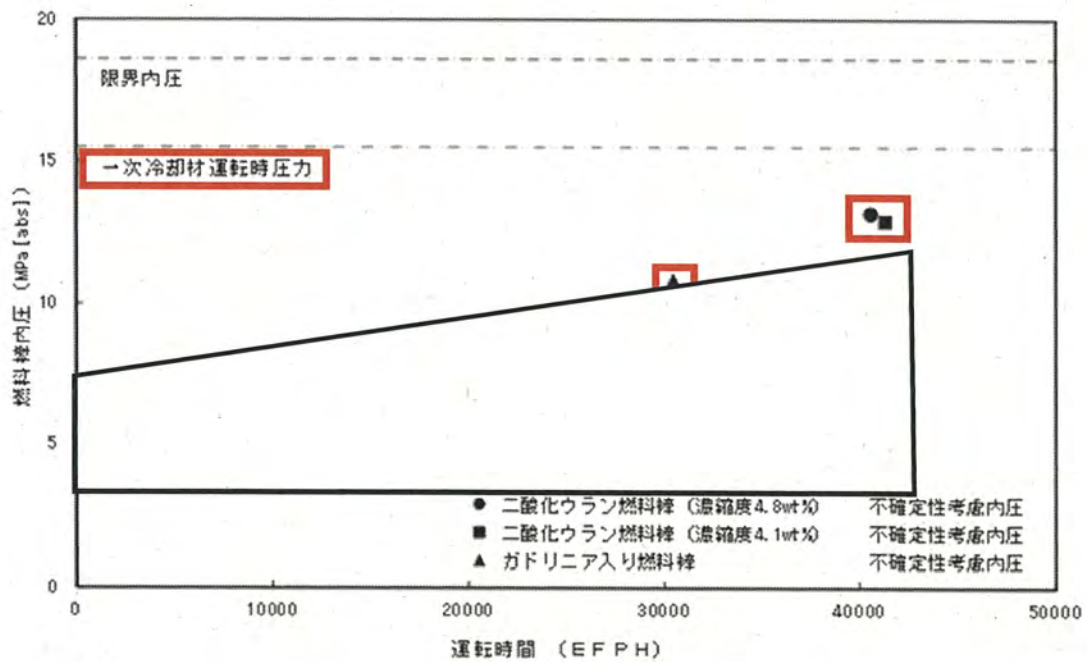
伊方3号機 17行17列B型燃料集合体	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明												
<p><u>産業規格Z2241 (2011) 「金属材料引張試験方法」、ASTM International規格ASTM B 351 「Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Zirconium and Zirconium Alloy Bars, Rod, and Wire for Nuclear Application」</u>又はこれと同等の方法によって以下に掲げるいずれかの試験温度において引張試験を行ったとき、引張強さ、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。</p> <p>a. 試験温度 室温 引張強さ：415N/mm<sup>2</sup>以上 耐力：240N/mm<sup>2</sup>以上 伸び：14%以上</p> <p>b. 試験温度316℃ 引張強さ：215N/mm<sup>2</sup>以上 耐力：105N/mm<sup>2</sup>以上 伸び：24%以上</p> <p>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。</p> <p>(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。</p> <p>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. <u>日本産業規格Z2241 (2011) 「金属材料引張試験方法」</u>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> <p><u>(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。</u></p>		<table border="1" data-bbox="1160 194 1648 338"> <thead> <tr> <th></th> <th>毎平方ミリメートル</th> <th>毎平方ミリメートル</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>室温</td> <td>415 以上</td> <td>240 以上</td> <td>14 以上</td> </tr> <tr> <td>316 度</td> <td>215 以上</td> <td>105 以上</td> <td>24 以上</td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) <u>応力除去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」</u>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> <p>(3) 前記「3. ジルコニウム合金燃料被覆材」(2)、(4)、(5)、(8)、(10)及び(11を除く。)の規定は、ジルコニウム合金端栓に準用する。ただし、(3)の日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表3に掲げるニオブ及びカルシウムを除く。</p> <p>5. その他の部品 燃料材、燃料被覆材及び端栓以外の燃料体の部品は、次の(1)～(4)のいずれにも適合すること。</p> <p>(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、<u>ウォータロッド</u>、制御棒案内シンプルにあつては、次に適合すること。</p> <p>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 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>		毎平方ミリメートル	毎平方ミリメートル		室温	415 以上	240 以上	14 以上	316 度	215 以上	105 以上	24 以上	<p>下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</p> <p><b>【(2)を記載しないことについて】</b> ジルコニウム合金端栓に応力除去焼きなましを行ったものは使用しないため、(2)は基本設計方針に記載しない。 なお、(3)を踏まえて、ジルコニウム合金端栓材の要求事項を記載している。</p> <p><b>【(4)の一部を記載しないことについて】</b> 本申請の燃料体構成部品にウォータロッドは使用しないため、(4)の一部は基本設計方針に記載しない。</p> <p><b>【適用基準及び適用規格の記載について】</b> 下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</p> <p><b>【(5)を記載することについて】</b> コイルばねのばね定数は旧法下の燃料体設</p>
	毎平方ミリメートル	毎平方ミリメートル													
室温	415 以上	240 以上	14 以上												
316 度	215 以上	105 以上	24 以上												

伊方3号機	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明
17行17列B型燃料集合体			
a. 上部プレナムコイルばね <input type="text"/> N/cm			
b. 下部プレナムコイルばね <input type="text"/> N/cm			
<p>燃料要素は、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。</p> <p>(2) 燃料要素の軸は、著しく湾曲していないこと。</p> <p>(3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p> <p>(4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(5) <u>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」</u>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/mm<sup>2</sup>を超えないこと。</p> <p>(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・mm<sup>3</sup>/sを超えないこと。</p> <p>(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。</p> <p>(8) 部品の欠如がないこと。</p> <p>(9) <u>ヘリウム加圧量は、<input type="text"/>MPa[gauge]であること。</u></p> <p>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。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p> <p>(3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(4) 部品の欠如がないこと。</p>		<p>6. 燃料要素</p> <p>燃料要素は、次の(1)～(8)のいずれにも適合すること。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 燃料要素の軸は、著しく湾曲していないこと。</p> <p>(3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p> <p>(4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(5) <u>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」</u>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ベクレル毎平方ミリメートルを超えないこと。</p> <p>(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メガパスカル立方ミリメートル毎秒を超えないこと。</p> <p>(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。</p> <p>(8) 部品の欠如がないこと。</p> <p>7. 燃料体</p> <p>燃料体は、次の(1)～(4)のいずれにも適合すること。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p> <p>(3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(4) 部品の欠如がないこと。</p>	<p>計認可申請書本文記載事項であり、設置許可添付書類八においても燃料棒の構造として説明している。技術基準規則への適合性を示す観点から基本設計方針に記載している。詳細は添付2に示す。</p> <p><u>【適用基準及び適用規格の記載について】</u></p> <p>下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</p> <p><u>【(9)を記載することについて】</u></p> <p>コイルばねのばね定数と同様。詳細は添付2に示す。</p>

内圧評価において保守的に冷却材に通常運転時の圧力を用いる理由

燃料棒内圧基準は、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であり、サーマルフィードバックにより燃料温度の過度な上昇を防ぐために、限界内圧以下であることを確認している。その場合、外圧が小さいほうが保守的であるため、1次冷却材圧力は、想定される運転条件のうち、通常運転時の圧力（15.5MPa[abs]）を用いて評価をしている。

なお、内圧が評価期間中で最大となるのは核分裂生成ガスが蓄積される燃料寿命末期である。

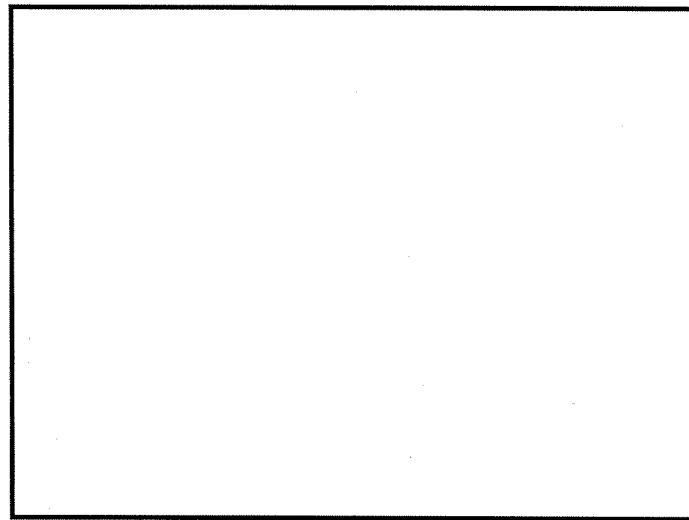


燃料棒の内圧履歴

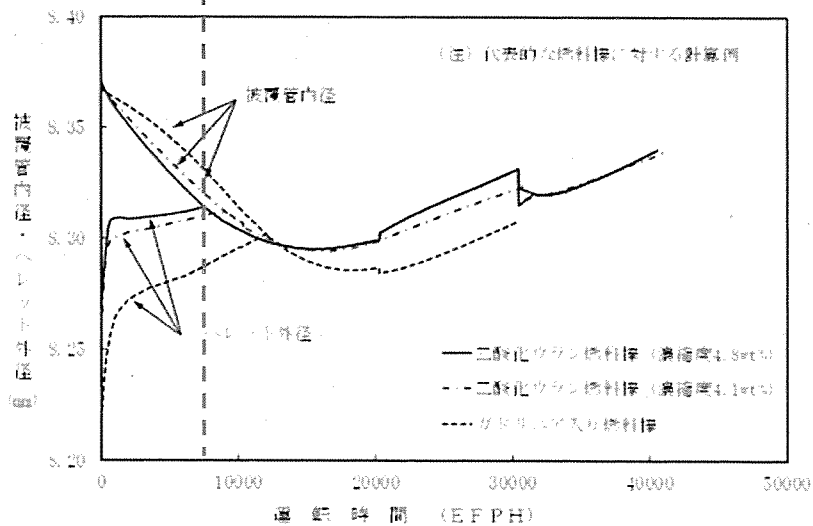
被覆管応力評価において保守的に冷却材に通常運転時の圧力を用いる理由

内圧評価とは直接関係しないが、被覆管の応力履歴（異常な過渡変化における応力スパイクをブロットした履歴）は、以下のとおり。

被覆管応力については、被覆管の耐力以下であることを確認することとしており、応力が評価期間中で最大となるのは、ペレットと被覆管が接触した後に異常な過渡変化が発生した場合となる。このとき外向きの力がかかることから、外圧が小さいほうが保守的であるため、1次冷却材圧力は、想定される運転条件のうち、通常運転時の圧力（15.5MPa[abs]）を用いて評価をしている。



被覆管の応力履歴



被覆管内径及びペレット外形変化



設工認申請書の基本設計方針の記載事項について  
(補足説明資料 3 の追加説明)

補足説明資料 3 のとおり、燃料体設計認可申請書（以下、「設認」）の本文記載事項と、今回申請した設計及び工事計画認可申請書（以下、「設工認申請書」）の記載事項の関係について整理している。

本資料は、基本設計方針の記載事項について追加説明するものである。

燃料体設計認可申請書（以下、「設認」）の本文で記載のあった仕様は、原則として、設工認申請書の本文に記載することとしている。

ただし、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の別表第二のとおり、工事計画書に記載すべき事項は「燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料」とされていることから、当社の設工認申請書の作成要領に従い、要目表にはこれら事項を記載している。

上記以外の事項については、設工認への記載要否を検討した上で、基本設計方針、添付書類に記載、もしくは記載不要と整理している。（補足説明資料 3 のとおり）

その中で、ジルコニウム合金燃料被覆材の主成分については、設置許可添付書類八において被覆管の材料として説明している。また、コイルばねと燃料要素のヘリウム加圧については、設置許可添付書類八において燃料棒の構造として説明している。このため、技術基準規則への適合性を示すにあたり、詳細設計値を記載するという観点から、基本設計方針に仕様値（燃料被覆材主成分、ばね定数、加圧量）を記載している。

なお、基本設計方針に記載することについては、当社作成要領にも抵触するものではない。基本設計方針の記載は、原則、設置許可本文をベースとし、技術基準規則及び解釈の要求事項は、基本的に網羅して記載することとしており、対応関係を別紙に示す。

設認本文記載	設工認記載箇所	設工認申請書本文における記載の考え方
各部材の主要寸法 及び材料	本文 (要目表)	作成要領に従い、要目表に別表第二の順に記載
燃料被覆材の 主成分	本文 (基本設計方針)	設置許可添付書類八にて説明していることから、技術基準規則への適合性を示す観点で、本文基本設計方針に仕様値を記載
コイルばねの ばね定数		
ヘリウム加圧量		
上記以外の事項	添付書類等に記載または記載不要と整理	補足説明資料 3 参照

以上

基本設計方針と技術基準規則との関係

基本設計方針 伊方3号機（17行17列B型燃料集合体）	技術基準規則	説明
<p>第2章 個別項目</p> <p>1. 炉心等</p> <p>燃料体(燃料材、燃料要素及び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。</p> <p>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み合わ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、核性質及び強度のうち必要な物理的性質並びに耐食性、水素吸収特性及び化学的安定性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、「1.1 燃料体」に基づき設計する。</p> <p>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。</p> <p>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2月16日 原子炉安全専門審査会）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、設置(変更)許可を受けた、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。</p> <p>炉心支持構造物は、最高使用圧力、自重、附加荷重及び地震力に加え、熱応力の荷重に耐える設計とする。</p> <p>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設計とする。</p> <p>燃料体(燃料要素以外の燃料体の構成要素)、減速材、反射材及び炉心支持構造物(原子炉容器内で炉心付近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、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設計とする。</p> <p>1.1 燃料体</p> <p>1.1.2 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>（中略）</p>	<p>技術基準規則第23条第1項                      技術基準規則の解釈第23条第1項                      技術基準規則の解釈第23条第3項</p> <p>技術基準規則第23条第2項                      技術基準規則の解釈第23条第2項                      技術基準規則の解釈第23条第3項</p> <p>技術基準規則第23条第2項</p> <p>技術基準規則第36条第2項</p> <p>技術基準規則第36条第3項                      技術基準規則の解釈第36条第2項</p> <p>技術基準規則第23条第1項                      技術基準規則第23条第2項                      技術基準規則の解釈第23条第3項                      同解釈別記-10</p>	<p>設置許可記載との整合の観点で記載</p> <p>技術基準規則第23条及び規則の解釈を網羅</p> <p>設置許可記載との整合の観点で記載</p> <p>技術基準規則第23条及び規則の解釈を網羅</p> <p>技術基準規則第23条を網羅</p> <p>技術基準規則第36条を網羅</p> <p>技術基準規則第36条及び規則の解釈を網羅</p> <p>技術基準規則第23条及び規則の解釈を網羅</p>

基本設計方針	技術基準規則	説明																		
<p style="text-align: center;">伊方3号機（17行17列B型燃料集合体）</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>（中略）</p> <p>(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 style="margin-left: 20px;">・ Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金</p> <table style="margin-left: 40px; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">スズ</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">0.90～1.15</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">鉄</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">0.24～0.30</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">クロム</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">0.13～0.19</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">ニオブ</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">0.08～0.14</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">ニッケル</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">0.007～0.014</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">酸素</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">□</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">ジルコニウム 残り</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">□</td></tr> </table> <p>（中略）</p> <p>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。</p> <p>（中略）</p> <p>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。</p> <p>（中略）</p> <p>(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っては、ばね定数が次のとおりであること。</p> <table style="margin-left: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">a. 上部プレナムコイルばね</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">□ N/cm</td></tr> <tr><td style="border-bottom: 1px solid black;">b. 下部プレナムコイルばね</td><td style="border-bottom: 1px solid black;">□ N/cm</td></tr> </table> <p>燃料要素は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>（中略）</p> <p>(9) ヘリウム加圧量は、□ MPa[ gauge]であること。</p> <p>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。</p> <p>（以下略）</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	□	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		<p>ジルコニウム合金燃料被覆材の主成分は、技術基準規則の解釈別記-10の(3)、「各元素の含有率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。」には依らない仕様としている。旧法下の燃料体設計認可申請書および設置許可添付書類八の記載を踏まえ、具体的な仕様値を基本設計方針に記載している。</p> <p>技術基準規則との関係性について、第23条第1項の観点において、燃料被覆材は必要な物理的性質および化学的性質を保持することを確認している。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」の第2-1表に記載している燃料被覆材の化学成分を元に、耐熱性等の確認を実施している。</p> <p>また、第23条第2項の観点において、燃料棒の強度評価上（燃料棒5基準評価）燃料被覆材は基本設計方針に記載した仕様を前提としている。具体的には、当該仕様を前提として、「強度に関する説明書」の3.2.2にて述べられている高燃焼度用FPACコードの被覆管挙動モデルを構築している。</p> <p>コイルばねのばね定数およびヘリウム加圧量は、技術基準規則の解釈別記-10に記載はないが、旧法下の燃料体設計認可申請書および設置許可添付書類八の記載を踏まえ、具体的な仕様値を基本設計方針に記載している。</p> <p>技術基準規則との関係性について、第23条第1項の観点において、コイルばねは必要な物理的性質および化学的性質を保持することを確認しており、また、ヘリウムは燃料材の耐食性に影響がないことを確認している。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」の3.3、4.3、7、および9にて確認している。</p> <p>また、第23条第2項の観点において、燃料棒の強度評価上（燃料棒5基準評価）燃料棒に挿入されたコイルばねと</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	□																			
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																			

基本設計方針	技術基準規則	説明
伊方3号機 (17行17列B型燃料集合体)		
		<p>ヘリウム加圧した設計を前提としている。具体的には、「強度に関する説明書」の1.1で述べられているとおり、コイルばねにより輸送及び取扱いにペレットが移動することを防止する機能を有する設計としている。また、ヘリウム加圧量については、「強度に関する説明書」の3.3.1に記載されている数値（絶対圧）を高燃焼度用FPACコードのインプットとしている。</p>

適用基準及び適用規格	技術基準規則	説明
伊方3号機（17行17列B型燃料集合体）		
<p>原子炉本体に適用する基準及び規格のうち、本設計及び工事計画において適用する基準及び規格は以下のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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（平成25年6月19日原規技発第1306194号）</li> <li>・ 「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 原子炉安全専門審査会）</li> <li>・ 「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）</li> <li>・ 日本産業規格H4751（2016）「ジルコニウム合金管」</li> <li>・ 日本産業規格Z2241（2011）「金属材料引張試験方法」</li> <li>・ 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」</li> <li>・ 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」</li> <li>・ ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III</li> </ul>	技術基準規則の解釈第23条第3項	技術基準規則第23条の規則の解釈を網羅

## 補足説明資料 9

設計及び工事計画認可申請書の記載事項  
に関連する設置変更許可について

## 1. 概要

本資料は、設工認申請書が引用している既工認に対応する設置変更許可について別紙のとおり整理したものである。



## 設工認申請書が引用している既工認に対応する設置変更許可について

本文事項	添付資料	引用している既工認	対応する設置変更許可				
II. 工事計画 (要目表) 3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料	資料2-1 (許可整合 本文五号)	再稼働	再稼働				
			申請	原子力発第13121号 平成25年7月8日			
				原子力発第15027号 平成27年4月14日			
			補正	原子力発第15048号 平成27年5月11日			
				原子力発第15091号 平成27年6月30日			
				原規規発第1507151号 平成27年7月15日			
			許可	原規規発第1507151号 平成27年7月15日			
4.1wt%ステップ2燃料	-※						
II. 工事計画 (基本設計方針) 1. 炉心等	資料2-1 (許可整合 本文五号) 資料1 (熱出力計算書)	4.1wt%ステップ2燃料	-※				
II. 工事計画 (基本設計方針) 2. 1 地震による損傷の防止	資料6 (耐震性に関する説明書)	再稼働	再稼働				
			申請	原子力発第13121号 平成25年7月8日			
				原子力発第15027号 平成27年4月14日			
			補正	原子力発第15048号 平成27年5月11日			
				原子力発第15091号 平成27年6月30日			
				原規規発第1507151号 平成27年7月15日			
			許可	原規規発第1507151号 平成27年7月15日			
			閉じ込めBF	閉じ込めBF			
				申請	原燃発第18-13号 平成30年1月26日		
					原燃発第18-101号 平成30年7月31日		
補正	原燃発第18-101号 平成30年7月31日						
許可	原規規発第1812123号 平成30年12月12日						
II. 工事計画 (基本設計方針) 2. 2 津波による損傷の防止 2. 3 外部からの衝撃による損傷の防止	資料3 (自然現象)	再稼働	再稼働				
			申請	原子力発第13121号 平成25年7月8日			
				原子力発第15027号 平成27年4月14日			
			補正	原子力発第15048号 平成27年5月11日			
				原子力発第15091号 平成27年6月30日			
				原規規発第1507151号 平成27年7月15日			
			許可	原規規発第1507151号 平成27年7月15日			
II. 工事計画 (基本設計方針) 3. 1 火災による損傷の防止	資料5 (火災防護)	再稼働	再稼働				
			申請	原子力発第13121号 平成25年7月8日			
				原子力発第15027号 平成27年4月14日			
			補正	原子力発第15048号 平成27年5月11日			
				原子力発第15091号 平成27年6月30日			
				原規規発第1507151号 平成27年7月15日			
			許可	原規規発第1507151号 平成27年7月15日			
			II. 工事計画 (基本設計方針) 5. 1 安全設備、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備	資料4 (健全性説明書)	再稼働	再稼働	
						申請	原子力発第13121号 平成25年7月8日
							原子力発第15027号 平成27年4月14日
補正	原子力発第15048号 平成27年5月11日						
	原子力発第15091号 平成27年6月30日						
	原規規発第1507151号 平成27年7月15日						
許可	原規規発第1507151号 平成27年7月15日						

※4.1wt%ステップ2燃料の使用にあたっては、法令適用事前確認手続(平成28年11月2日付け原規規発第16110215号にて回答)により既設置変更許可の範囲内であることを確認している。