

川内原子力発電所第 1 号機

設計及び工事計画認可申請書

【B 型燃料集合体】

補足説明資料

令和 3 年 5 月

九州電力株式会社

本資料のうち枠囲みの内容は、  
商業機密あるいは防護上の観点から  
公開できません。

【凡例】

**□**: 今回ご提示する資料

(赤字): 新規追加資料

## 目 次

補足説明資料 1	設計及び工事計画認可申請における適用条文等の整理について
補足説明資料 2	設計及び工事計画認可申請書に添付する書類の整理について
補足説明資料 3	燃料体設計認可申請書と設計及び工事計画認可申請書の記載に関する補足説明資料
<b>補足説明資料 4</b>	<b>基本設計方針の確認方法に関する補足説明資料</b>
補足説明資料 5	工事の方法に関する補足説明資料
補足説明資料 6	強度に関する補足説明資料
<b>補足説明資料 7</b>	<b>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</b>

## 補足説明資料 4

### 基本設計方針の確認方法に関する補足説明資料

## 目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 基本設計方針における燃料体に関する要求事項の確認方法の整理結果 .....	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、基本設計方針に燃料体に関する要求事項を追加したことから、当該事項の確認方法について整理する。

## 2. 基本設計方針における燃料体に関する要求事項の確認方法の整理結果

基本設計方針における燃料体に関する要求事項の確認方法の整理結果を下表に示す。

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法								
炉心等の設計については以下のとおりとし、その際、燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について(昭和63年5月12日原子力安全委員会了承)」及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」若しくは、これらと同等で「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」の要求を満たすことが確認された方法に従い設計する。	技術基準規則第23条第1項の規定に対応する燃料体に関する要求事項については、以下のとおりとする。この場合において、以下の規定は、法第43条の3の1第2項に定める使用前事業者検査の確認を行うまでの間適用する。	—								
	1. 二酸化ウラン燃料材 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。	—								
	(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。 <table border="1" data-bbox="596 790 976 943"> <tbody> <tr> <td>炭素</td> <td>0.010 以下</td> </tr> <tr> <td>ふっ素</td> <td>0.0015 以下</td> </tr> <tr> <td>水素</td> <td>0.0002 以下</td> </tr> <tr> <td>窒素</td> <td>0.0075 以下</td> </tr> </tbody> </table>	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	申請書 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査
	炭素	0.010 以下								
	ふっ素	0.0015 以下								
	水素	0.0002 以下								
窒素	0.0075 以下									
(2) ウラン 235 の含有量のウラン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。	申請書 ・要目表 ・添付図面  検査									
(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。 ①各部分の寸法の偏差は、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。 ③表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。 ④表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	申請書 ・要目表 ・添付図面  検査									
(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。 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。 ②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。	申請書 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査									
(5) ガドリニウムを添加したものにあつては、次に適合すること。 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。 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。 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。 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。	申請書 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査									

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
<p>炉心等の設計については以下のとおりとし、その際、燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について(昭和63年5月12日原子力安全委員会了承)」及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」若しくは、これらと同等で「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」の要求を満たすことが確認された方法に従い設計する。</p>	<p>2. ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料材 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、実用上差し支えないものであること。</p> <p>(5)ペレット型燃料材にあつては、ペレットが次に適合すること。</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>申請対象外</p>



川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
炉心等の設計については以下のとおりとし、その際、燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について(昭和63年5月12日原子力安全委員会了承)」及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」若しくは、これらと同等で「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」の要求を満たすことが確認された方法 <sup>※1</sup> に従い設計する。	<b>3. ジルコニウム合金燃料被覆材</b> ジルコニウム合金燃料被覆材は、次の(1)～(11)のいずれにも適合すること。	—
	<b>(1)</b> 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。	申請書 ・要目表 ・添付図面  検査
	<b>(2)</b> 被覆材の軸は、著しく湾曲していないこと。	申請書 ・添付図面  検査
	<b>(3)</b> 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。	申請書 <sup>※1</sup> ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査 <sup>※2</sup>
	<b>(4)</b> 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 ・添付図面  検査
	<b>(5)</b> 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。	検査
	<b>(6)</b> 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	検査
	<b>(7)</b> 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	検査
	<b>(8)</b> 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。	検査

※1：本設工認で申請している燃料体の燃料被覆材には、別記-10 に規定されているジルコニウム合金管（JIS H4751「ジルコニウム合金管」）と類似の材料で、物理的及び化学的性質が同等である 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おり、ジルコニウム基合金の化学成分値（添付資料 4 の第 2-1 表）は、別記-10 に規定されている値とは異なるが、同等の物理的及び化学的性質を有していることを確認している。確認内容の詳細は補足説明資料 7 において説明する。

※2：検査において、各元素の含有量の全重量に対する百分率の値については、添付資料 4 の第 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(2/5)」に規定する値であることを確認する。

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
<p>炉心等の設計については以下のとおりとし、その際、燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について(昭和63年5月12日原子力安全委員会了承)」及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」若しくは、これらと同等で「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」の要求を満たすことが確認された方法に従い設計する。</p>	<p>(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>申請書 ・添付資料4  検査</p>
	<p>(10)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。 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。 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>申請対象外</p>
	<p>(11)応力除去焼きなましを行ったものにあつては、日本産業規格 Z2241 (2011)「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。</p>	<p>申請書 ・添付資料4  検査</p>

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法																			
<p>炉心等の設計については以下のとおりとし、その際、燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について(昭和63年5月12日原子力安全委員会了承)」及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」若しくは、これらと同等で「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」の要求を満たすことが確認された方法に従い設計する。</p>	<p>4. ジルコニウム合金端栓</p>	<p>—</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、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>	<p>申請書 ・添付資料 4  検査</p>																			
	<table border="1" data-bbox="571 860 1193 1189"> <thead> <tr> <th data-bbox="577 869 689 898">温度</th> <th colspan="3" data-bbox="695 869 1187 898">引張試験</th> </tr> <tr> <td data-bbox="577 907 689 936"></td> <th data-bbox="695 907 855 936">引張強さ</th> <th data-bbox="861 907 1021 936">耐力</th> <th data-bbox="1027 907 1187 936">伸び</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="577 972 689 1115"></td> <td data-bbox="695 972 855 1115">ニュートン 毎平方 ミリメー トル</td> <td data-bbox="861 972 1021 1115">ニュートン 毎平方 ミリメー トル</td> <td data-bbox="1027 972 1187 1115">パーセン ト</td> </tr> <tr> <td data-bbox="577 1124 689 1153">室温</td> <td data-bbox="695 1124 855 1153">415 以上</td> <td data-bbox="861 1124 1021 1153">240 以上</td> <td data-bbox="1027 1124 1187 1153">14 以上</td> </tr> <tr> <td data-bbox="577 1162 689 1191">316 度</td> <td data-bbox="695 1162 855 1191">215 以上</td> <td data-bbox="861 1162 1021 1191">105 以上</td> <td data-bbox="1027 1162 1187 1191">24 以上</td> </tr> </tbody> </table>	温度	引張試験				引張強さ	耐力	伸び		ニュートン 毎平方 ミリメー トル	ニュートン 毎平方 ミリメー トル	パーセン ト	室温	415 以上	240 以上	14 以上	316 度	215 以上	105 以上	24 以上
温度	引張試験																				
	引張強さ	耐力	伸び																		
	ニュートン 毎平方 ミリメー トル	ニュートン 毎平方 ミリメー トル	パーセン ト																		
室温	415 以上	240 以上	14 以上																		
316 度	215 以上	105 以上	24 以上																		
<p>(2)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」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>申請対象外</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>申請書 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査</p>																				

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
炉心等の設計については以下のとおりとし、その際、燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について(昭和63年5月12日原子力安全委員会了承)」及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」若しくは、これらと同等で「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」の要求を満たすことが確認された方法に従い設計する。	<b>5. その他の部品</b> 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。	—
	<b>(1)</b> 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。	申請書 ・要目表 ・添付図面  検査
	<b>(2)</b> 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	検査
	<b>(3)</b> 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	検査
	<b>(4)</b> 支持格子、上部支持板、下部支持板、ウォータロッド、制御棒案内シンプルにあつては、次に適合すること。 <b>①</b> 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>②</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。	申請書 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
炉心等の設計については以下のとおりとし、その際、燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について(昭和63年5月12日原子力安全委員会了承)」及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」若しくは、これらと同等で「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」の要求を満たすことが確認された方法に従い設計する。	<b>6. 燃料要素</b> 燃料要素は、次の(1)～(8)のいずれにも適合すること。	—
	(1)各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。	申請書 ・要目表 ・添付図面  検査
	(2)燃料要素の軸は、著しく湾曲していないこと。	申請書 ・添付図面  検査
	(3)表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	検査
	(4)表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	検査
	(5)日本産業規格 Z4504 (2008)「放射線表面汚染の測定方法—β線放出核種(最大エネルギー0.15MeV以上)及びα線放出核種」における間接測定法又はこれと同等の方法によって測定したとき、表面に付着している核燃料物質の量が0.00004ベクレル毎平方ミリメートルを超えないこと。	申請書 ・添付図面  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304メガパスカル立方ミリメートル毎秒を超えないこと。	申請書 ・添付図面  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。	検査
(8)部品の欠如がないこと。	検査	

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
<p>炉心等の設計については以下のとおりとし、その際、燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について(昭和63年5月12日原子力安全委員会了承)」及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「<u>燃料体に関する要求事項(別記-10)</u>」若しくは、これらと同等で「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」の要求を満たすことが確認された方法に従い設計する。</p>	<p>7. 燃料体 燃料体は、次の(1)～(4)のいずれにも適合すること。</p>	<p>—</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>申請書 ・要目表 ・添付図面  検査</p>
	<p>(2)表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p>	<p>検査</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>検査</p>
<p>(4)部品の欠如がないこと。</p>	<p>検査</p>	

## 補足説明資料 7

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 7-1	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 7-2	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 7-3	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 7-1

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 .....	2
3. 高燃焼度燃料（55GWd/t）導入以降の照射実績反映について .....	6

## 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がジルカロイ-4 と同等の物理的及び化学的性質を有していることについては、設置許可段階から確認<sup>\*1、2</sup>しており、本設工認申請においてもその詳細な内容を確認している。

本資料では、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するものである。

- ※1 高燃焼度燃料(55GWd/t)導入時の設置変更許可申請（平成 17 年 12 月 21 日 平成 16・11・25・原第 4 号認可）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 P W R ステップ 2 燃料の改良因子について NFK-8116 改4 原子燃料工業 平成15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*	確認内容
物理的性質	耐放射線性	機械的性質	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	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	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	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	クリープ特性	上記クリープ特性と同様
		照射成長	上記照射成長と同様
	耐熱性	<u>耐熱性</u>	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。
核性質	—	燃料被覆材としては考慮不要。	

※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※	確認内容
物理的性質	その他考慮すべき性質	<u>耐摩耗性</u>	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、支持格子と被覆材の接触による摩耗は被覆材によらず同等であることを確認。
		耐PCI性	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。

※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 (3/3)

性質		確認項目※	確認内容
化学的性質	耐食性	酸化腐食	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	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	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	ハルデン炉での照射実績よりジルコニウム基合金被覆管の内面酸化は小さく、燃料棒の健全性への影響は小さいことを確認。
		ガドリニア入り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	ガドリニア入り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は、二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管が安定に共存する場合と大差はないことを確認。
	その他の考慮すべき性質	耐 PCI 性	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。
		<u>高温特性</u>	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。

※下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

## 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 18 年 7 月 24 日付け平成 18・05・12 原第 20 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 7-2 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 7-3 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 18 年 7 月 24 日付け平成 18・05・12 原第 21 号にて燃料体設計認可を取得している。

それ以降については、データ拡充、設計変更等はなく、今回の設工認申請書においては設認と同様の内容を記載している。



## 補足説明資料 7-2

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、「川内原子力発電所発電用原子炉設置変更許可申請書」（平成 17 年 12 月 21 日付け平成 16・11・25 原第 4 号にて許可された発電用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、原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備</p> <p>ハ、原子炉本体の構造及び設備</p> <p>(ロ) 燃料体</p> <p>(2) 燃料被覆材の種類</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-ニオブ合金にズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金</li> </ul> <p>ただし、第1～第21領域燃料については、ジルカロイ-4</p>	<p>【安全審査資料：川内原子力発電所1号及び2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に示すが、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保ち、制御棒案内シンプル、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 style="text-align: center;">表3-1 燃料の主要仕様 (1/2)</p> <table border="1" data-bbox="943 808 1608 1423"> <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>二酸化ウラン (一部ガドリニアを含む)</td> <td>同 左</td> </tr> <tr> <td>濃縮度</td> <td>約4.1wt%～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%～約1.9wt%)</td> <td>約4.8wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.2wt%以下)</td> </tr> <tr> <td>ガドリニア濃度</td> <td>約6wt%</td> <td>約10wt%以下</td> </tr> <tr> <td>初期密度</td> <td>理論密度の約95%</td> <td>理論密度の約97% (ガドリニア入り燃料については理論密度の約96%)</td> </tr> <tr> <td>ペレット直径</td> <td>約8.19mm又は約8.05mm</td> <td>約8.19mm</td> </tr> <tr> <td>ペレット長さ</td> <td>約11.5mm又は約9.0mm</td> <td>約11.5mm又は約9.2mm</td> </tr> <tr> <td>ペレット最高燃焼度</td> <td>約62,000MWd/t</td> <td>約71,000MWd/t</td> </tr> <tr> <td>被覆管材料</td> <td>ジルカロイ-4</td> <td>・Sn-Fe-Cr-Nb系<sup>※1</sup>ジルコニウム基合金<sup>※1</sup> ・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系<sup>※2</sup>ジルコニウム基合金<sup>※2</sup> ・Sn-Fe-Nb系<sup>※3</sup>ジルコニウム基合金<sup>※3</sup></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又は約0.64mm</td> <td>約0.57mm</td> </tr> <tr> <td>被覆管-ペレット間隙（直径）</td> <td>約0.17mm</td> <td>同 左</td> </tr> </tbody> </table> <p>※1 MDAを指す。                  ※2 NDAを指す。                  ※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	二酸化ウラン (一部ガドリニアを含む)	同 左	濃縮度	約4.1wt%～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%～約1.9wt%)	約4.8wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.2wt%以下)	ガドリニア濃度	約6wt%	約10wt%以下	初期密度	理論密度の約95%	理論密度の約97% (ガドリニア入り燃料については理論密度の約96%)	ペレット直径	約8.19mm又は約8.05mm	約8.19mm	ペレット長さ	約11.5mm又は約9.0mm	約11.5mm又は約9.2mm	ペレット最高燃焼度	約62,000MWd/t	約71,000MWd/t	被覆管材料	ジルカロイ-4	・Sn-Fe-Cr-Nb系 <sup>※1</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※1</sup> ・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系 <sup>※2</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※2</sup> ・Sn-Fe-Nb系 <sup>※3</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※3</sup>	外径	約9.50mm	同 左	厚さ	約0.57mm又は約0.64mm	約0.57mm	被覆管-ペレット間隙（直径）	約0.17mm	同 左	<p>【要目表】</p> <table border="1" data-bbox="1727 296 2576 856"> <thead> <tr> <th rowspan="2">材 質</th> <th colspan="2">要 目 表</th> </tr> <tr> <th>要 目 1</th> <th>要 目 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>燃料被覆材</td> <td>Sa-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金<sup>※1</sup></td> <td>同 左</td> </tr> <tr> <td>燃料被覆材</td> <td></td> <td>ASTM B351 Gr. R60804 (Zr7N 804D相当)</td> </tr> <tr> <td>最上層支持格子及び最下層支持格子</td> <td></td> <td>AMS 5596<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>中間層支持格子</td> <td></td> <td>ASTM B352 Gr. R60804<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>上部支持板（上部ノズル）及び下部支持板（下部ノズル）</td> <td></td> <td>ASTM<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>制御棒案内シンプル</td> <td></td> <td>ASTM H353 Gr. R60804<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>上部ノズルボスあね</td> <td></td> <td>AMS 5586<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>クラウンブスクリム</td> <td></td> <td>ASTM<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>上部リングナット・シングルスクリーン・リングナット</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>グベツ</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>炉内制御管案内シンプル</td> <td></td> <td>ASTM B353 Gr. R60804<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>スリ</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>上部プレナムコイルボス</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>下部プレナムコイルボス</td> <td></td> <td>AMS<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>押さえ板（下部プレナムコイルボス用部品）</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>連結棒（下部プレナムコイルボス用部品）</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>制御棒案内シンプル用下部ボルト及びワッシャー</td> <td></td> <td>ASTM H551 Gr. R60804<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>ストッパ</td> <td></td> <td>ASTM H352 Gr. R60804<sup>※2</sup></td> </tr> </tbody> </table> <p>【添付資料 4 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性、その他の性能に関する説明書】</p> <p>5. Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム基合金（NDA）</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 18・05・12 原第 20 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、本添付資料中に示す 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>	材 質	要 目 表		要 目 1	要 目 2	燃料被覆材	Sa-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 <sup>※1</sup>	同 左	燃料被覆材		ASTM B351 Gr. R60804 (Zr7N 804D相当)	最上層支持格子及び最下層支持格子		AMS 5596 <sup>※2</sup>	中間層支持格子		ASTM B352 Gr. R60804 <sup>※2</sup>	上部支持板（上部ノズル）及び下部支持板（下部ノズル）		ASTM <sup>※2</sup>	制御棒案内シンプル		ASTM H353 Gr. R60804 <sup>※2</sup>	上部ノズルボスあね		AMS 5586 <sup>※2</sup>	クラウンブスクリム		ASTM <sup>※2</sup>	上部リングナット・シングルスクリーン・リングナット			グベツ			炉内制御管案内シンプル		ASTM B353 Gr. R60804 <sup>※2</sup>	スリ			上部プレナムコイルボス			下部プレナムコイルボス		AMS <sup>※2</sup>	押さえ板（下部プレナムコイルボス用部品）			連結棒（下部プレナムコイルボス用部品）			制御棒案内シンプル用下部ボルト及びワッシャー		ASTM H551 Gr. R60804 <sup>※2</sup>	ストッパ		ASTM H352 Gr. R60804 <sup>※2</sup>	
項目	ステップ1燃料（現行）	ステップ2燃料																																																																																																
ペレット材料	二酸化ウラン (一部ガドリニアを含む)	同 左																																																																																																
濃縮度	約4.1wt%～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%～約1.9wt%)	約4.8wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.2wt%以下)																																																																																																
ガドリニア濃度	約6wt%	約10wt%以下																																																																																																
初期密度	理論密度の約95%	理論密度の約97% (ガドリニア入り燃料については理論密度の約96%)																																																																																																
ペレット直径	約8.19mm又は約8.05mm	約8.19mm																																																																																																
ペレット長さ	約11.5mm又は約9.0mm	約11.5mm又は約9.2mm																																																																																																
ペレット最高燃焼度	約62,000MWd/t	約71,000MWd/t																																																																																																
被覆管材料	ジルカロイ-4	・Sn-Fe-Cr-Nb系 <sup>※1</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※1</sup> ・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系 <sup>※2</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※2</sup> ・Sn-Fe-Nb系 <sup>※3</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※3</sup>																																																																																																
外径	約9.50mm	同 左																																																																																																
厚さ	約0.57mm又は約0.64mm	約0.57mm																																																																																																
被覆管-ペレット間隙（直径）	約0.17mm	同 左																																																																																																
材 質	要 目 表																																																																																																	
	要 目 1	要 目 2																																																																																																
燃料被覆材	Sa-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 <sup>※1</sup>	同 左																																																																																																
燃料被覆材		ASTM B351 Gr. R60804 (Zr7N 804D相当)																																																																																																
最上層支持格子及び最下層支持格子		AMS 5596 <sup>※2</sup>																																																																																																
中間層支持格子		ASTM B352 Gr. R60804 <sup>※2</sup>																																																																																																
上部支持板（上部ノズル）及び下部支持板（下部ノズル）		ASTM <sup>※2</sup>																																																																																																
制御棒案内シンプル		ASTM H353 Gr. R60804 <sup>※2</sup>																																																																																																
上部ノズルボスあね		AMS 5586 <sup>※2</sup>																																																																																																
クラウンブスクリム		ASTM <sup>※2</sup>																																																																																																
上部リングナット・シングルスクリーン・リングナット																																																																																																		
グベツ																																																																																																		
炉内制御管案内シンプル		ASTM B353 Gr. R60804 <sup>※2</sup>																																																																																																
スリ																																																																																																		
上部プレナムコイルボス																																																																																																		
下部プレナムコイルボス		AMS <sup>※2</sup>																																																																																																
押さえ板（下部プレナムコイルボス用部品）																																																																																																		
連結棒（下部プレナムコイルボス用部品）																																																																																																		
制御棒案内シンプル用下部ボルト及びワッシャー		ASTM H551 Gr. R60804 <sup>※2</sup>																																																																																																
ストッパ		ASTM H352 Gr. R60804 <sup>※2</sup>																																																																																																

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>【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又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結ペレットを「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基合金」若しくは「ジルコニウム-ニオブ合金にズズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金」又はジルカロイ-4で被覆した燃料棒、制御棒案内シンプル、炉内計装用案内シンプル、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五、原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備 ハ、原子炉本体の構造及び設備</p> <p>(ロ) 燃料体 (2)被覆材の種類に示す「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」若しくは「ジルコニウム-ニオブ合金にズズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金」（以下、3.2.1では「ジルコニウム基合金」という。）の主成分は第3.2.1表のとおりである。<sup>(1)</sup><sup>(2)</sup>燃料棒の配列は、17×17であり、そのうち264本が燃料棒、24本が制御棒案内シンプル、残り1本が炉内計装用案内シンプルである。制御棒案内シンプルは、制御棒クラスタ、バーナブルポイズン、中性子源又はブラギングデバイスの挿入に使用する。</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、被覆管材料をステップ1燃料のジルカロイ-4から表3-2に示すジルコニウム基合金に変更した改良被覆管（A型燃料はMDA及びZIRLO<sup>TM</sup>、B型燃料はNDA）を採用する。</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維持のためにNbを添加したSn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基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系ジルコニウム基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系ジルコニウム基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。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>	

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

(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>第3.2.1表 燃料の主要仕様</p> <p>(2) 被覆管</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合金</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム合金</p> <p>(Sn           : 0.7~0.9wt%、</p> <p>Fe           : 0.18~0.24wt%、</p> <p>Cr           : 0.07~0.13wt%、</p> <p>Fe+Cr       : 0.28~0.37wt%、</p> <p>Nb           : 0.45~0.55wt%、</p> <p>Zr           : 残り)</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金</p> <p>(Sn           : 0.90~1.15wt%、</p> <p>Fe           : 0.24~0.30wt%、</p> <p>Cr           : 0.13~0.19wt%、</p> <p>Nb           : 0.08~0.14wt%、</p> <p>Ni           : 0.007~0.014wt%、</p> <p>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合金</p> <p>・Sn-Fe-Nb系ジルコニウム合金</p> <p>(Sn           : 0.9~1.3wt%、</p> <p>Fe           : 0.08~0.12wt%、</p> <p>Nb           : 0.8~1.2wt%、</p> <p>Zr           : 残り)</p> <p>ただし、第1~第21領域      ジルカロイ-4</p>	<p>表3-2 被覆管の合金成分</p> <table border="1" data-bbox="890 357 1632 724"> <thead> <tr> <th rowspan="2">主成分<sup>1)</sup></th> <th colspan="3">ジルカロイ-4<sup>2)</sup></th> <th colspan="3">ジルコニウム合金</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。</p> <p>*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 <sup>1)</sup>	ジルカロイ-4 <sup>2)</sup>			ジルコニウム合金			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>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(2/5)</p> <table border="1" data-bbox="1765 367 2552 640"> <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="8">不 純 物(ppm)</th> </tr> <tr> <th>Sn</th> <th>0.90/1.15</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金<sup>(注5)</sup></td> <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> </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> </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> </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> </tr> <tr> <td>O</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> </tr> </tbody> </table> <p>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(1/2)</p> <table border="1" data-bbox="1780 766 2567 934"> <thead> <tr> <th>構成部品</th> <th>材料の種類</th> <th>項目</th> <th>規定値</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：385℃)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>引張強さ</td> <td>≧ □ MPa</td> </tr> <tr> <td>耐 力</td> <td>≧ 310 MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>伸 び</td> <td>≧ □ %</td> </tr> </tbody> </table>	構成部品	材料の種類	主成分(wt%)		不 純 物(ppm)								Sn	0.90/1.15	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金 <sup>(注5)</sup>	Fe	0.24/0.30	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Cr	0.13/0.19	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Nb	0.08/0.14	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Ni	0.007/0.014	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	O		≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Zr	残部									構成部品	材料の種類	項目	規定値	燃料被覆材	NDA	(高温引張試験：385℃)		引張強さ	≧ □ MPa	耐 力	≧ 310 MPa			伸 び	≧ □ %	<p>・設置変更許可申請書及び安全審査資料では、主成分として金属の含有量を記載している。一方、設計及び工事の計画では酸素を記載している。これは、ジルカロイ-4(JIS H 4751)で含有量は規定されていないもの、主成分の一つとして挙げられていることから、NDAにおいても主成分として記載している。</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条に適合するため、記載している。</p>
主成分 <sup>1)</sup>	ジルカロイ-4 <sup>2)</sup>			ジルコニウム合金																																																																																																																																																										
	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	—																																																																																																																																																								
構成部品	材料の種類	主成分(wt%)		不 純 物(ppm)																																																																																																																																																										
		Sn	0.90/1.15	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																			
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金 <sup>(注5)</sup>	Fe	0.24/0.30	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																			
		Cr	0.13/0.19	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																			
		Nb	0.08/0.14	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																			
		Ni	0.007/0.014	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																			
		O		≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																			
		Zr	残部																																																																																																																																																											
構成部品	材料の種類	項目	規定値																																																																																																																																																											
燃料被覆材	NDA	(高温引張試験：385℃)																																																																																																																																																												
		引張強さ	≧ □ MPa																																																																																																																																																											
		耐 力	≧ 310 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

(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>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<sup>(1)(2)</sup></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、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></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>(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、炉外試験データ及び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> <p>・<u>耐食性は向上</u> (図4-1及び図4-2参照)。</p> <p>なお、水素吸収率は同等 (図4-3及び図4-4参照)。</p> <p>・炉内クリープについて、<u>MDA及びZIRLOは減少</u>、NDAは同等 (図4-5及び図4-6参照)。</p> <p>・照射成長は減少 (図4-7及び図4-8参照)。</p> <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。(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、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。<u>原子炉内での被覆管酸化膜厚さを第5-8図に示す。</u>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(添付資料3「強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。)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)

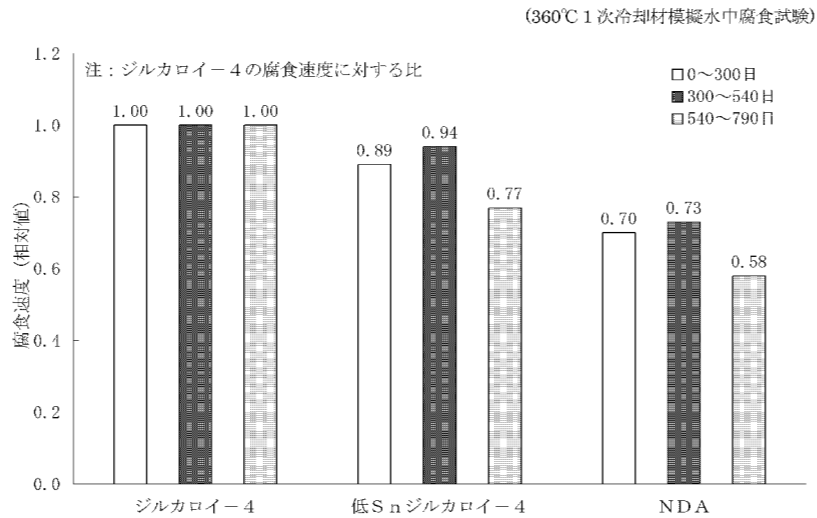
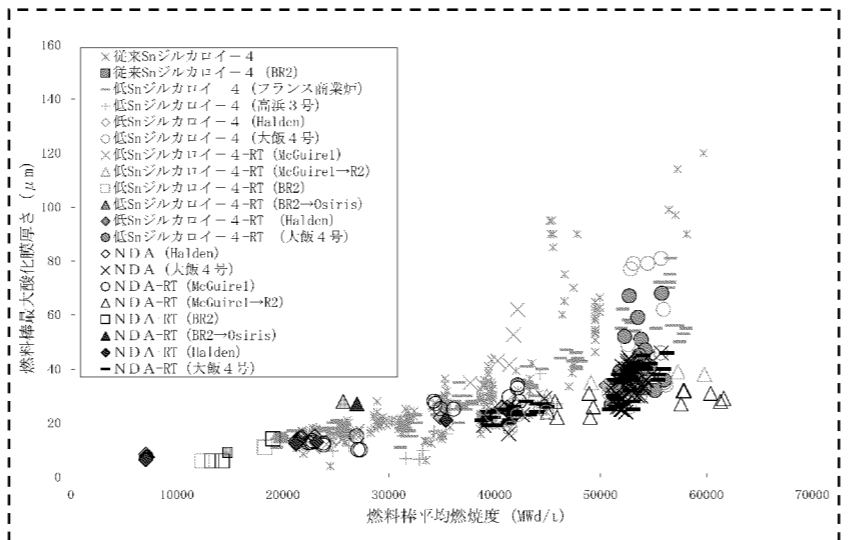
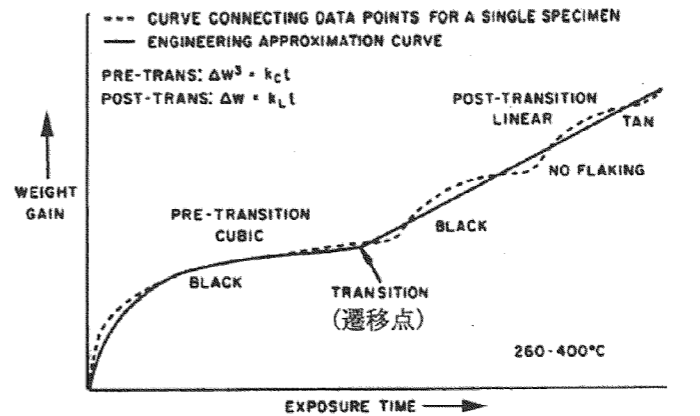
設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>(360°C 1 次冷却材模擬水中腐食試験)</p> <p>注：ジルカローイ-4の腐食速度に対する比</p>  <p>腐食速度 (相対値)</p> <p>0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2</p> <p>1.00 1.00 1.00 0.89 0.94 0.77 0.70 0.73 0.58</p> <p>ジルカローイ-4 低Snジルカローイ-4 NDA</p> <p>第5-7図 炉外腐食試験におけるジルカローイ-2とジルカローイ-4の典型的な腐食増量曲線(30)</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<sup>[1]</sup></p>  <p>燃料棒最大酸化膜厚さ (μm)</p> <p>燃料棒平均燃焼度 (MWd/t)</p> <p>第5-8図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さ<sup>(20)</sup></p> <p>図4-2(2) 改良被覆管 (NDA) の炉内酸化膜厚さ<sup>[2]</sup></p>	 <p>--- CURVE CONNECTING DATA POINTS FOR A SINGLE SPECIMEN — ENGINEERING APPROXIMATION CURVE</p> <p>PRE-TRANS: <math>\Delta W^3 = k_c t</math> POST-TRANS: <math>\Delta W = k_L t</math></p> <p>PRE-TRANS: CUBIC POST-TRANS: LINEAR TRANSITION (遷移点) BLACK TAN NO FLAKING</p> <p>260-400°C</p> <p>第5-7図 炉外腐食試験におけるジルカローイ-2とジルカローイ-4の典型的な腐食増量曲線(30)</p> <p>第5-8図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さ<sup>(20)</sup></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 (添付資料 3) 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、 ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載	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	(6/26) 備考
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八） 3. 原子炉及び炉心 3.2 機械設計 3.2.1 燃料 (5) 評価 a. 構成材料 <sup>(1)(2)</sup> (中略) 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、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>	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 (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 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。 改良被覆管の特性は、炉外試験データ及び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。 ・耐食性は向上(図4-1及び図4-2参照)。 なお、 <u>水素吸収率は同等(図4-3及び図4-4参照)。</u> ・炉内クリープについて、 <u>MDA及びZIRLOは減少</u> 、NDAは同等(図4-5及び図4-6参照)。 ・照射成長は減少(図4-7及び図4-8参照)。 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。(図4-9及び図4-10参照)。	5.3.2 水素吸収による影響 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。 <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。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、ジルカロイ-4被覆管のそれと同等である<sup>(20)</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。</u> 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(添付資料3「強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。)設計評価に反映している。</u> 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。	

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

(7/26)

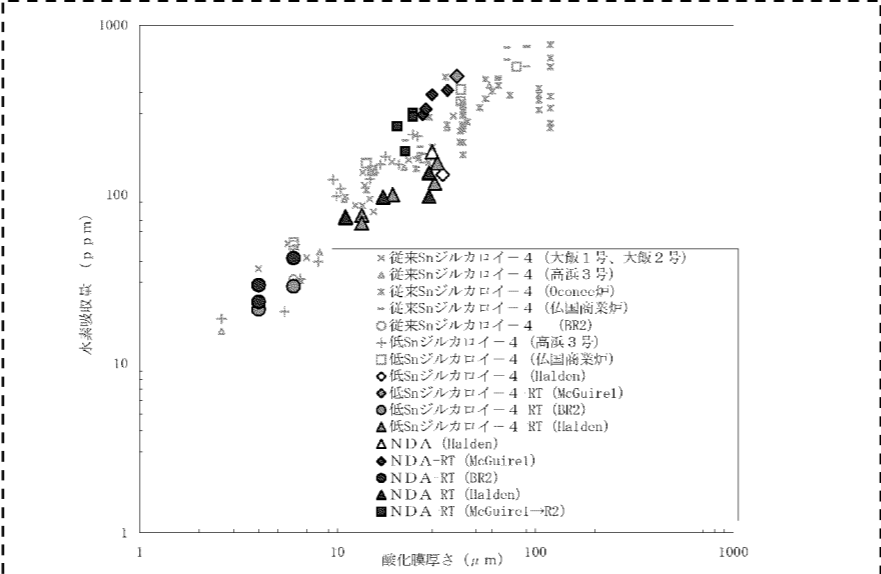
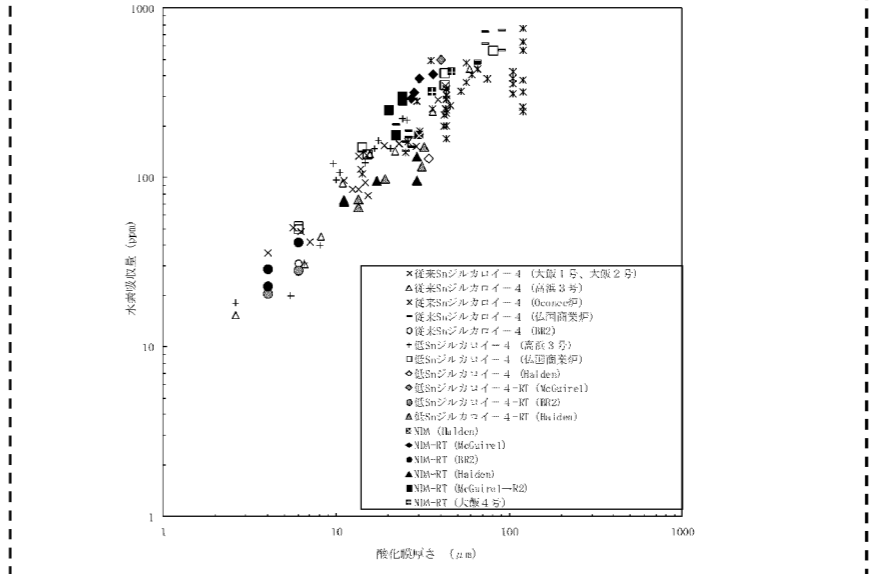
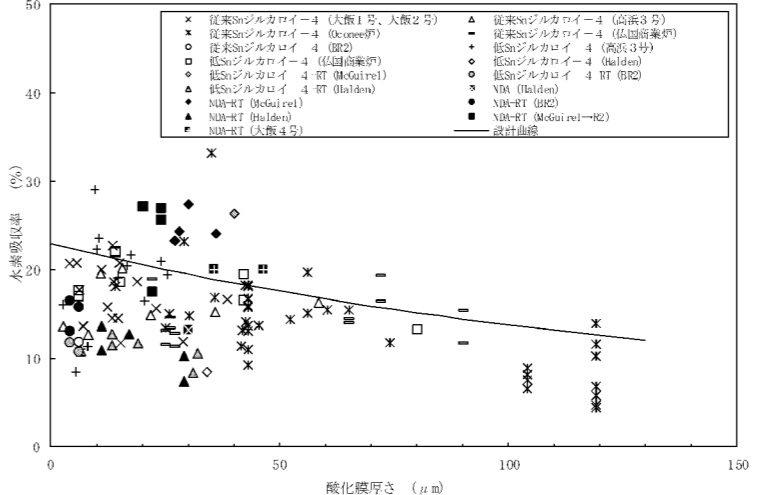
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図4-4 改良被覆管（NDA）の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係<sup>[2]</sup></p>	 <p>第5-9図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係<sup>[20]</sup></p>  <p>第5-10図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収率の関係<sup>[20]</sup></p>	<p>・設計及び工事の計画に第5-10図を記載しているのは、酸化膜厚さと水素吸収率の関係性がジルカロイ-4と同等であることを設計評価（添付資料3）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

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<sup>(1)(2)</sup></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、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。</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>(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、炉外試験データ及び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、<u>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。</u></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>・<u>炉内クリープについて、MDA及びZIRLOは減少、NDAは同等</u>(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。(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。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、<u>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。</u>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>。<u>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(添付資料3「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>	

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

(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4-6 改良被覆管（NDA）の外径変化[Halden炉] [3]</p>	<p>第5-5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>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>(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、炉外試験データ及び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。（図4-9及び図4-10参照）。</p>	<p>5.2.4 照射成長<sup>(注1)</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と考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（添付資料3「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、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4-8 改良被覆管（NDA）の照射成長<sup>12)</sup></p>	<p>第5-6図 NDA被覆管の照射成長<sup>20)</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

(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>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

(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>【安全審査資料：川内原子力発電所1号及び2号炉高燃焼度燃料の機械設計について】</p> <p>2. 燃料棒の健全性</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、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の耐力は、図2.1-4に示すように、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590N/mm<sup>2</sup>となる。被覆管応力基準値は、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。</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、図2.1-5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、各過渡変化に対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。</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>(注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>(28)</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>25</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>(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。</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

(14/26)

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
	<div data-bbox="863 279 1685 831" style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>図2.1-4(2) 改良被覆管（NDA）の耐力</p> </div> <div data-bbox="863 926 1685 1499" style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>図2.1-5(2) 改良被覆管（NDA）の延性</p> </div>	<div data-bbox="1745 302 2567 772" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> </div> <div data-bbox="1745 779 2567 1549" style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>第5-1図 NDA被覆管の機械特性(20)</p> </div>	<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

(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>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>炉内滞在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、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、A型で約520ppm、B型で約600ppmとなり、図2.2-3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2.2-4に示す照射被覆管の高温引張試験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>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（添付資料3「強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。）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（添付資料3「強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。）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)

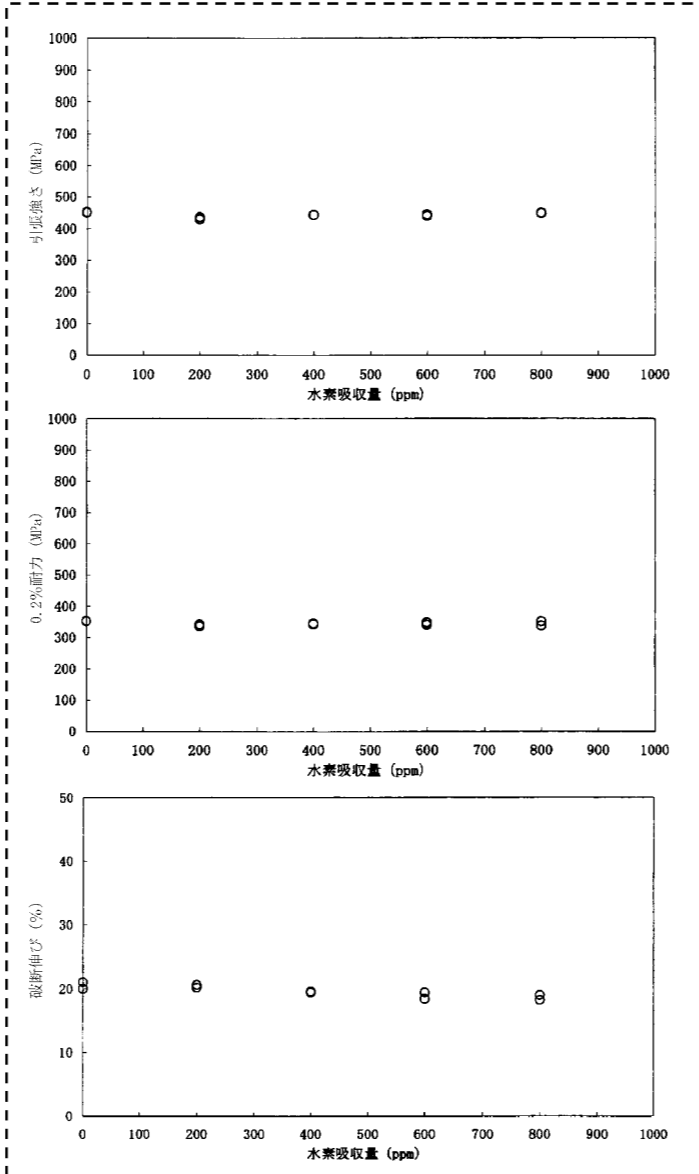
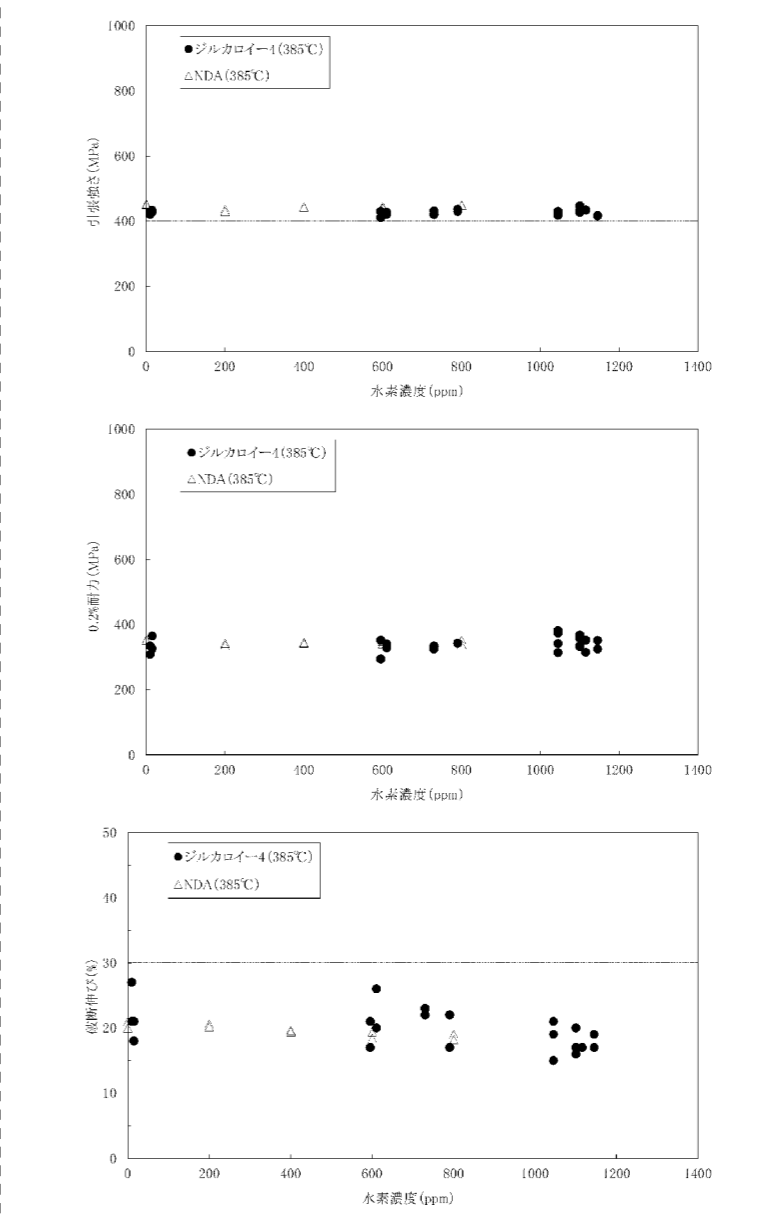
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図2.2-3(2) 未照射改良被覆管（NDA）の機械的特性と水素吸収量の関係</p>	 <p>第5-2図 未照射 NDA 被覆管の機械特性と水素濃度との関係<sup>(20)</sup></p>	

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

(17/26)

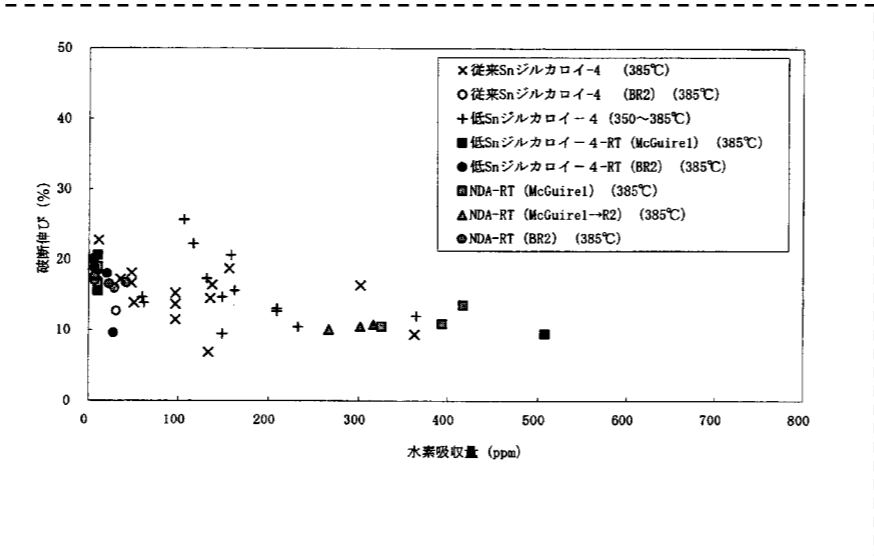
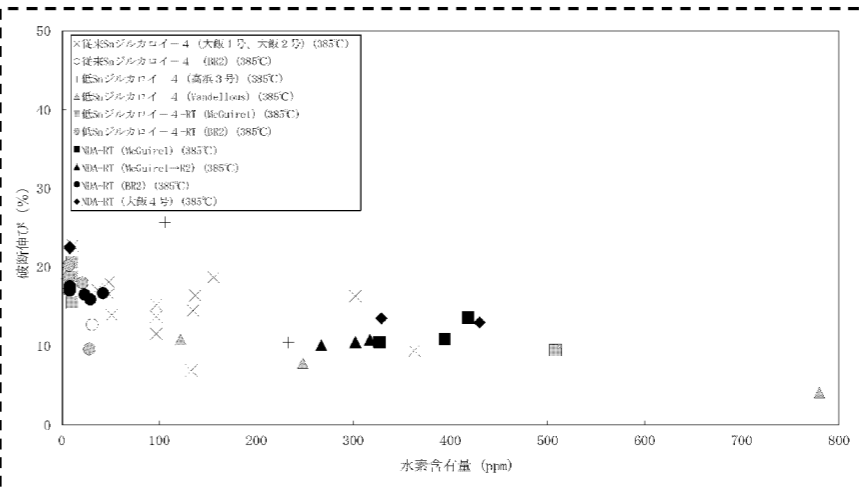
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図2.2-4(2) 改良被覆管（NDA）の破断伸びと水素吸収量の関係</p>	 <p>第5-3図 被覆管水素濃度と破断伸びの関係<sup>(9)(20)</sup></p>	

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

(18/26)

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、<u>図2.1-6</u>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> <div data-bbox="875 619 1647 1155" data-label="Figure"> <p>図 2.1-6(2) 改良被覆管 (NDA) の疲労強度</p> </div>	<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 被覆管と同じとする。</p> <div data-bbox="1736 619 2582 1155" data-label="Figure"> <p>第 5-4 図 NDA 被覆管の疲労強度<sup>(20)</sup></p> </div>	

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

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<sup>(1)(2)</sup></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、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。</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2.2-5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図2.2-6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>。</u>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>(19/26)</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)

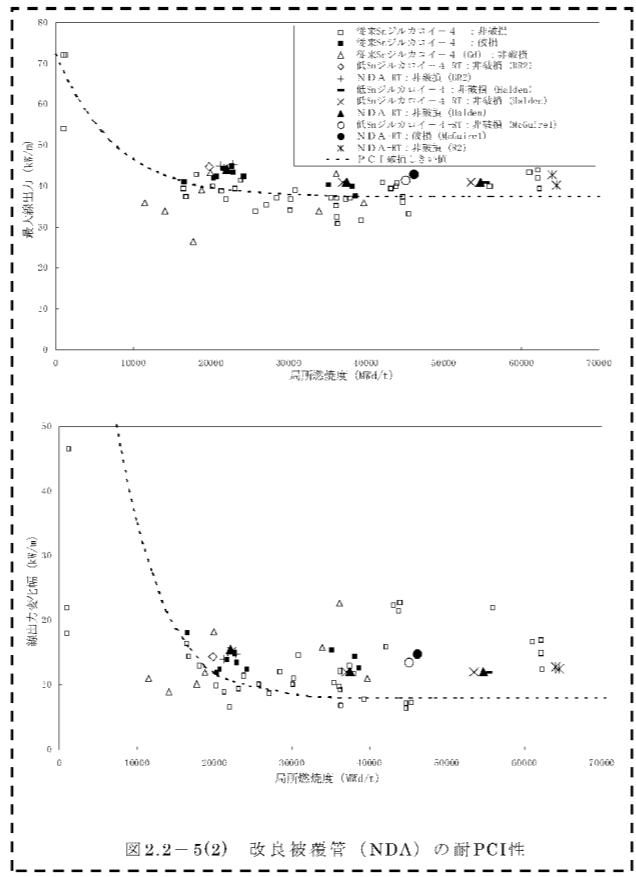
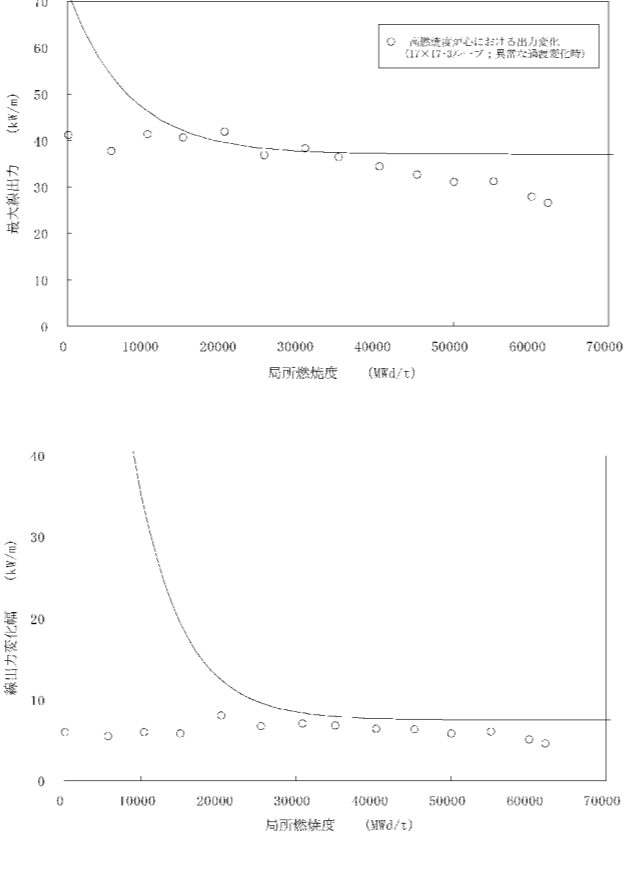
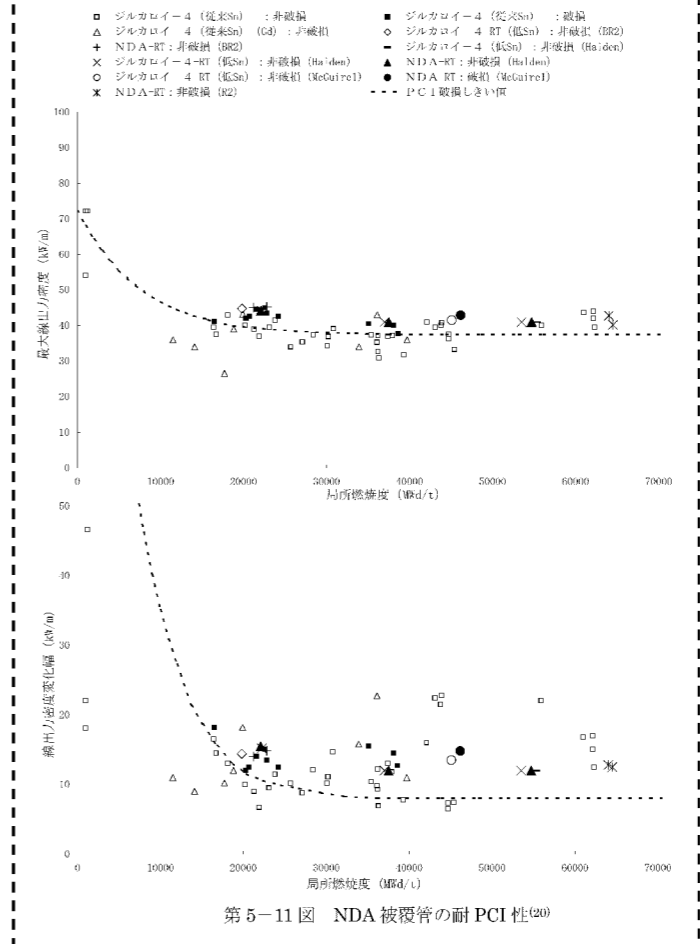
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図 2.2-5(2) 改良被覆管 (NDA) の耐 PCI 性</p>  <p>図 2.2-6 PCI 評価結果</p>	 <p>第 5-11 図 NDA 被覆管の耐 PCI 性<sup>(20)</sup></p>	<p>・安全審査資料の図 2.2-6 については、添付資料 3 に記載している。</p>

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

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<sup>(1)(2)</sup></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、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。</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2.2-5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図2.2-6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 NDA 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(<math>ZrO_2</math>)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<math>(Zr,U)O_2</math> 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>(注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>(12)</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、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>(注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>(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、<u>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。</u></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 ガドリニア入り二酸化ウランペレットと NDA 被覆管との反応</p> <p>ガドリニア入り二酸化ウランは、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。<u>ガドリニア入り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>。</u>したがって、ガドリニア入り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

(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>指針12. 燃料設計</p> <p>適合のための設計方針</p> <p>1 . について</p> <p>燃料集合体は、原子炉内における使用期間中を通じ、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化による起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が十分な強度を有し、その機能を保持できる設計とする。</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>( 5 ) 評価</p> <p>a . 構成材料<sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup></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、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。</p> <p>3 . 6 参考文献</p> <p>( 2 ) 「原燃工製P W R ステップ2 燃料の改良因子について」</p> <p>N F K - 8 1 1 6 改4</p> <p>原子燃料工業 平成15年</p> <p>【原燃工製P W R ステップ2 燃料の改良因子について】</p> <p>N F K - 8 1 1 6 改4 原子燃料工業 平成15年】</p> <table border="1" data-bbox="92 1438 801 1711"> <caption>表 3.2-4 被覆管の硬度</caption> <thead> <tr> <th>被覆管</th> <th>マイクロビッカース硬度</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: center;">単位：Hv (試験荷重 0.2kgf)</p>	被覆管	マイクロビッカース硬度	ジルカロイ-4被覆管	212~224	NDA被覆管	211~217		<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> <table border="1" data-bbox="1765 577 2546 940"> <caption>第 5-3 表 NDA 被覆管の硬さの測定結果<sup>(20)</sup></caption> <p style="text-align: center;">(単位：HV (ビッカース硬さ値))</p> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HV0.2<sup>(注1)</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：ビッカース硬さ試験力 0.2kgf</p>	種類	平均値 (HV0.2 <sup>(注1)</sup> )	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（添付資料 3）に反映しているため、記載している。</p>
被覆管	マイクロビッカース硬度														
ジルカロイ-4被覆管	212~224														
NDA被覆管	211~217														
種類	平均値 (HV0.2 <sup>(注1)</sup> )														
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

(23/26)

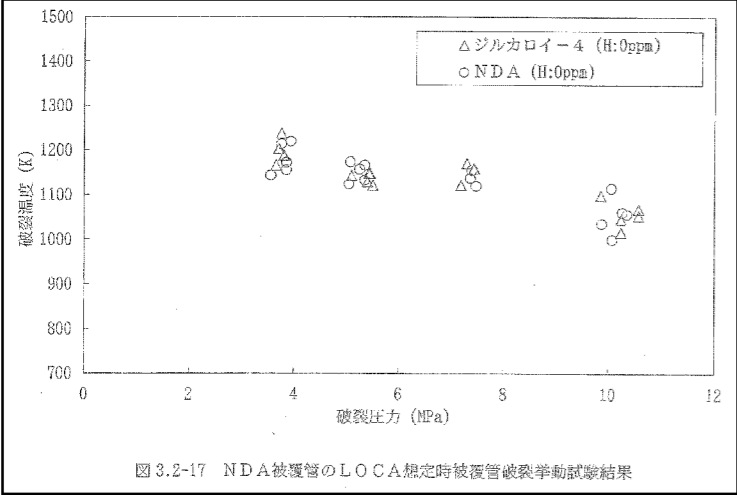
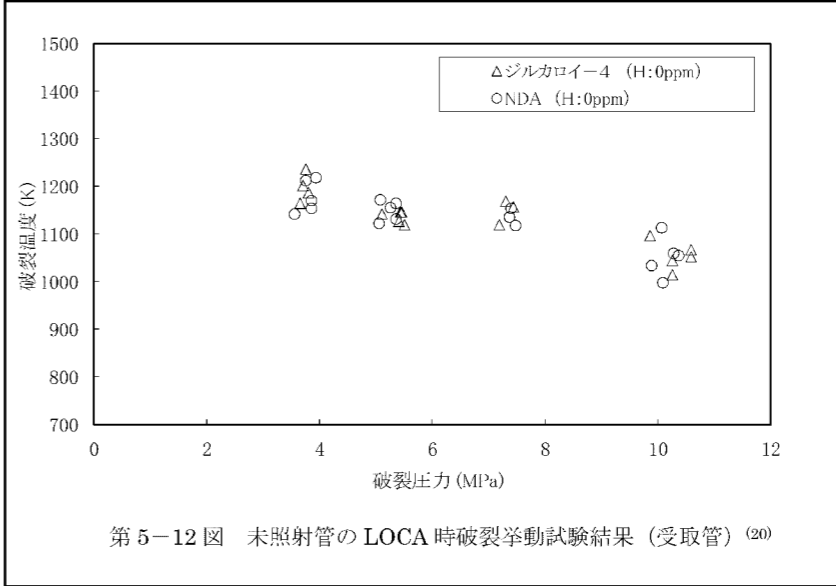
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p><b>【添付書類八】</b></p> <p>指針12. 燃料設計 適合のための設計方針</p> <p>1 . について</p> <p>燃料集合体は、原子炉内における使用期間中を通じ、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化による起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が十分な強度を有し、その機能を保持できる設計とする。</p> <p>3 . 原子炉及び炉心</p> <p>3 . 2 機械設計</p> <p>3 . 2 . 1 燃料</p> <p>( 5 ) 評価</p> <p>a . 構成材料<sup>(1)</sup><sup>(2)</sup></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、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。</p> <p>3 . 6 参考文献</p> <p>( 2 ) 「原燃工製P W R ステップ2 燃料の改良因子について」 N F K - 8 1 1 6 改4 原子燃料工業 平成15年</p> <p><b>【原燃工製P W R ステップ2 燃料の改良因子について】</b> N F K - 8 1 1 6 改4 原子燃料工業 平成15年】</p>  <p>図 3.2-17 NDA被覆管のLOCA想定時被覆管破裂挙動試験結果</p>		<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 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) (20)</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 条に適合するため、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

(24/26)

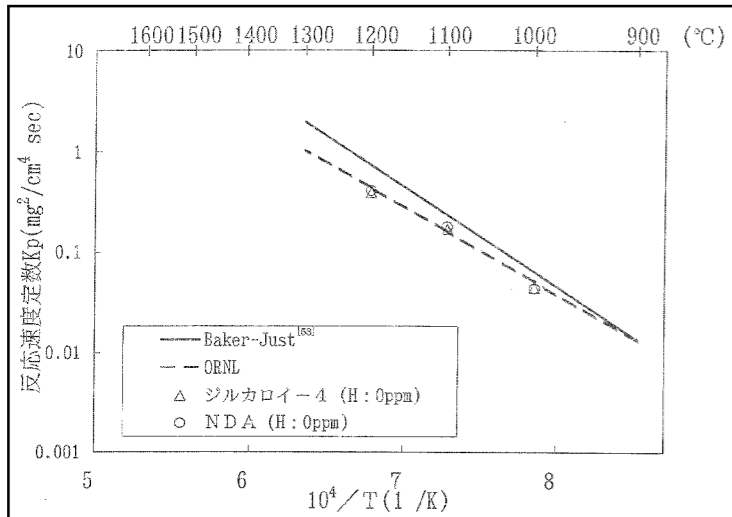
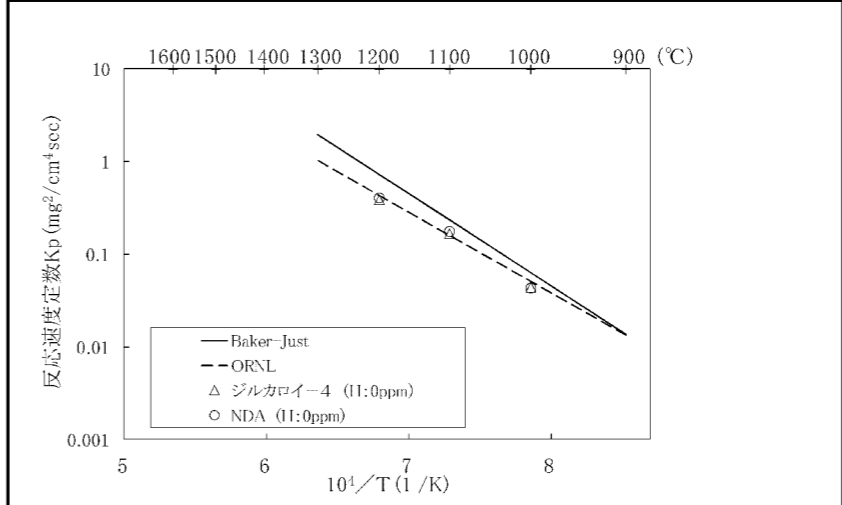
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
 <p>図 3.2-16 NDA被覆管のジルコニウム-水反応速度定数</p>		 <p>第 5-13 図 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数（受取管）<sup>(20)</sup></p>	

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

(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><b>【添付書類八】</b></p> <p>指針12. 燃料設計 適合のための設計方針</p> <p>1 . について</p> <p>燃料集合体は、原子炉内における使用期間中を通じ、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化による起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が十分な強度を有し、その機能を保持できる設計とする。</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>(5) 評価</p> <p>a . 構成材料<sup>(1)(2)</sup></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、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。</p> <p>3 . 6 参考文献</p> <p>(2) 「原燃工製PWR ステップ2 燃料の改良因子について」 NFK-8116改4 原子燃料工業 平成15年</p> <p><b>【原燃工製PWR ステップ2 燃料の改良因子について」 NFK-8116改4 原子燃料工業 平成15年】</b></p> <p>表 3.2-2 被覆管溶融点及び密度測定結果<sup>[1]</sup></p> <table border="1" data-bbox="103 1514 780 1654"> <thead> <tr> <th></th> <th>溶融点 (°C)</th> <th>密度(g/cm<sup>3</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>1796</td> <td>6.52</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4</td> <td>1782</td> <td>6.52</td> </tr> </tbody> </table>		溶融点 (°C)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	NDA	1796	6.52	ジルカロイ-4	1782	6.52		<p>5.1 耐熱性</p> <p>ジルカロイ-4の溶融点は1,782°Cであり、結晶構造が820°Cでα相から(α+β)相へ、また、958°Cで(α+β)相からβ相に変態する<sup>(20)</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°C、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°C及び937°C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□°C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> <div data-bbox="1783 753 2534 1178" style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <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: center;">(単位: °C)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">種類</th> <th style="width: 50%;">溶融点測定結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NDA</td> <td style="text-align: center;">1,796</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ジルカロイ-4 (参考)</td> <td style="text-align: center;">1,782</td> </tr> </tbody> </table> </div>	種類	溶融点測定結果	NDA	1,796	ジルカロイ-4 (参考)	1,782	<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の、設計及び工事の計画では、技術基準規則23条に適合するため、記載している。</p>
	溶融点 (°C)	密度(g/cm <sup>3</sup> )																
NDA	1796	6.52																
ジルカロイ-4	1782	6.52																
種類	溶融点測定結果																	
NDA	1,796																	
ジルカロイ-4 (参考)	1,782																	

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

(26/26)

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																		
<div data-bbox="106 317 795 489" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">表 3.2-3 被覆管の相変態温度</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">被覆管</th> <th style="width: 35%;">相変態開始温度</th> <th style="width: 35%;">相変態終了温度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4被覆管</td> <td style="text-align: center;">820</td> <td style="text-align: center;">958</td> </tr> <tr> <td>NDA被覆管</td> <td style="text-align: center;">802</td> <td style="text-align: center;">937</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right; margin-top: 5px;">単位：℃</p> </div>	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		<div data-bbox="1739 296 2558 657" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <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="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">種類</th> <th style="width: 35%;">α→α+β</th> <th style="width: 35%;">α+β→β</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NDA</td> <td style="text-align: center;">802</td> <td style="text-align: center;">937</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ジルカロイ-4 (参考)</td> <td style="text-align: center;">820</td> <td style="text-align: center;">958</td> </tr> </tbody> </table> </div>	種類	α→α+β	α+β→β	NDA	802	937	ジルカロイ-4 (参考)	820	958	
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																			
種類	α→α+β	α+β→β																			
NDA	802	937																			
ジルカロイ-4 (参考)	820	958																			

## 補足説明資料 8

耐震性に関する説明書に関する補足説明資料

## 目 次

補足説明資料 8-1	燃料集合体に係る技術基準規則第 5 条への適合性に関する 補足説明資料
------------	--

## 補足説明資料 8-1

燃料集合体に係る技術基準規則第5条への適合性  
に関する補足説明資料



## 1. 概要

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」及び関連規則等の施行（以下「検査制度見直し」という。）により、従前の燃料体設計認可と工事計画認可が統合され、設計及び工事計画認可として一元化されたことに伴い、本設工認申請を実施し燃料集合体の耐震性に係る説明についても実施している。

なお、燃料集合体の耐震性に係る説明について、検査制度見直し前においては、燃料体設計認可及び工事計画認可の両方で説明を実施していたものである。

本資料では、燃料体設計認可及び工事計画認可での燃料集合体の耐震性に係る評価内容を整理するとともに、本申請における説明内容を整理するものである。

## 2. 整理結果

### 2.1 検査制度見直し前までの評価内容

燃料集合体の耐震性に係る評価内容の概要を第1表に示す。

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／設計及び工事計画認可		燃料体設計認可
	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	(同左)
	制御棒案内シングル	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2) 新規制基準 適合性工認	(同上)	(同上)	—
(注3) 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)	新規制基準適合性工認＋被覆管BFを呼び込み		(設工認に統合)

(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) 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3) 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

### 2.1.1 新規制基準適合性工認時の説明内容

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、新規制基準適合性工認（平成 27 年 3 月 18 日付け原規規発第 1503181 号にて認可）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、当該工認における 3-17-1-2「燃料集合体の耐震計算書」にて、燃料被覆管、制御棒案内シンプル、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。

評価内容の概要については、第 1 表に示す。

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。

### 2.1.2 燃料被覆管 BF 工認時の説明内容

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、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とから、燃料被覆管 BF 工認（令和元年 7 月 24 日付け原規規発第 1907244 号にて認可）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。

具体的には、燃料被覆管 BF 工認における添付資料 2-2「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」について、被覆管の評価を実施し許容値を満足することを確認している。

評価内容の概要については、第 1 表に示す。

## 2.2 本申請における説明内容

令和 2 年 4 月の検査制度見直しに伴い、燃料体については加工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に設計変更等があるものではない。

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）、制御棒案内シンプル、支持格子に対する評価結果として、上記 2.1.1 項における新規制基準適合性工認及び 2.1.2 項における燃料被覆管 BF 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。

以上