

川内原子力発電所第 2 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 4 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>特殊加工認可申請書との整合性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11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。	ー								
	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。	ー								
	(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="596 792 975 943"> <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。 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。</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※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 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査
	<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	

※：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、機械的性質、物理的性質等が同等である Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム基合金を使用する設計としており、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。なお、Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム基合金の技術基準規則第 23 条第 1 項への適合性を別紙に示す。

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>	4. ジルコニウム合金端栓	—																				
	<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> <table border="1" data-bbox="576 860 1189 1189"> <thead> <tr> <th data-bbox="576 860 687 898">温度</th> <th colspan="3" data-bbox="694 860 1189 898">引張試験</th> </tr> <tr> <td data-bbox="576 907 687 1115"></td> <th data-bbox="694 907 858 945">引張強さ</th> <th data-bbox="865 907 1029 945">耐力</th> <th data-bbox="1035 907 1189 945">伸び</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="576 976 687 1115"></td> <td data-bbox="694 976 858 1115">ニュートン 毎平方 ミリメー トル</td> <td data-bbox="865 976 1029 1115">ニュートン 毎平方 ミリメー トル</td> <td data-bbox="1035 976 1189 1115">パーセン ト</td> </tr> <tr> <td data-bbox="576 1124 687 1162">室温</td> <td data-bbox="694 1124 858 1162">415 以上</td> <td data-bbox="865 1124 1029 1162">240 以上</td> <td data-bbox="1035 1124 1189 1162">14 以上</td> </tr> <tr> <td data-bbox="576 1171 687 1187">316 度</td> <td data-bbox="694 1171 858 1187">215 以上</td> <td data-bbox="865 1171 1029 1187">105 以上</td> <td data-bbox="1035 1171 1189 1187">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	<p>申請書 ・添付資料 4</p> <p>検査</p>
	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>	申請対象外																					
<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</p> <p>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>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。</p>	<p>申請書 ・要目表 ・添付図面</p> <p>検査</p>
	<p>(2)表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p>	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>	検査
	<p>(4)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。 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>	<p>申請書 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面</p> <p>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>6. 燃料要素 燃料要素は、次の(1)～(8)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)燃料要素の軸は、著しく湾曲していないこと。</p>	<p>申請書 ・添付図面  検査</p>
	<p>(3)表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p>	<p>検査</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>検査</p>
	<p>(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。</p>	<p>申請書 ・添付図面  検査</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>申請書 ・添付図面  検査</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>検査</p>
<p>(8)部品の欠如がないこと。</p>	<p>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。	7. 燃料体 燃料体は、次の(1)～(4)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)表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	検査
	(3)表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	検査
(4)部品の欠如がないこと。	検査	

## 燃料被覆材の技術基準規則第 23 条第 1 項への適合性について

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被覆材には別記－10 の「3.ジルコニウム合金燃料被覆材」に規定されていない 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ことから、この燃料被覆材に関する技術基準規則第 23 条第 1 項への適合性について、以下に示す。

本設工認申請書添付資料 4 において、ジルコニウム基合金は、別記－10 「3.ジルコニウム合金燃料被覆材」に規定されている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。）と類似の材料であり、同等の物理的性質、化学的性質を有することを説明している。表 1 に添付資料 4 におけるジルコニウム基合金とジルカロイ－4 との同等性確認内容の概要を当該資料の説明項目毎に示す。本内容は平成 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と同様のものである。

なお、本設工認申請対象の燃料被覆材は、別記－10 「3.ジルコニウム合金燃料被覆材」のうち、(3)以外の要求事項については当該要求に従った設計としており、(3)の要求事項については当該要求によらないものの、ジルコニウム基合金の化学成分値を添付資料 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」（以下「第 2-1 表」という。）に規定し、各元素の含有量の全重量に対する百分率の値が第 2-1 表を満足する設計としている。

したがって、本設工認申請における燃料被覆材であるジルコニウム基合金は別記－10 によらないものの、物理的性質、化学的性質がジルカロイ－4 と同等であり、技術基準規則第 23 条第 1 項において要求される必要な物理的及び化学的性質を保持しているものであり、当該要求を満足していることを確認している。

表1 添付資料4のうちジルコニウム基合金の性質を説明している項目及び確認内容

項目	確認内容
5. Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系 ジルコニウム基合金	
5.1 耐熱性	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。
5.2 耐放射線性	
5.2.1 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。
5.2.2 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。
5.2.3 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。
5.2.4 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。
5.3 耐食性	
5.3.1 酸化腐食による影響	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。
5.3.2 水素吸収による影響	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。
5.4 その他性能	
5.4.1 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。
5.4.2 耐摩耗性	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。
5.4.3 高温特性	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。

以上



## 補足説明資料 7

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、特殊加工認可申請書（平成18年7月24日付け平成18・05・12原第20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

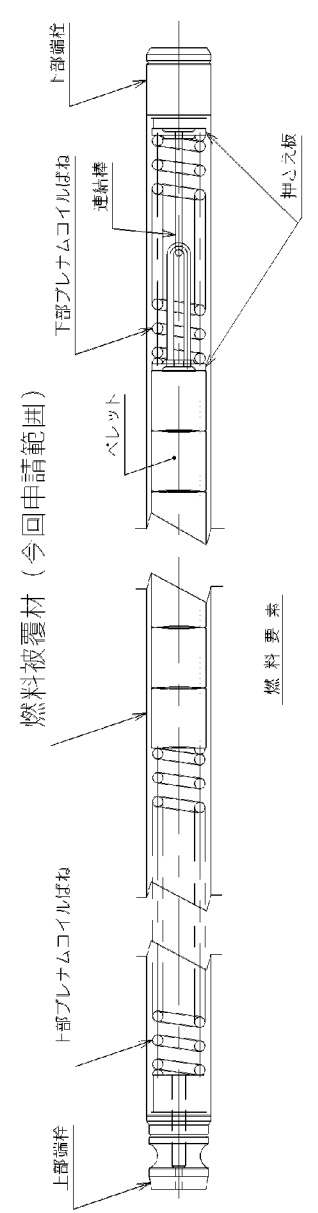
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考				
<p style="text-align: center;">特殊加工認可申請範囲</p> <div data-bbox="540 1564 1110 1638" style="border: 1px solid black; margin: 20px auto; padding: 5px;"> <table border="1"> <tr> <td style="padding: 2px;">特殊加工認可申請書</td> <td style="padding: 2px;">資料 1</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 2px;">川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料 1	川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 号機		—	
特殊加工認可申請書	資料 1					
川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>1. 特殊加工認可申請範囲 特殊加工認可申請範囲は、川内原子力発電所第1号機及び第2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 style="text-align: center;">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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
 <p>特殊加工認可申請範囲</p> <p>1-2</p>	<p style="text-align: center;">—</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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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="border: 1px solid black; width: fit-content; margin: 20px auto; padding: 5px;"> <table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <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;">川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料 2	川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 号機		—	
特殊加工認可申請書	資料 2					
川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p style="text-align: center;">目 次</p> <p>1. NDA 被覆管の概要 ..... 2-1</p> <p>2. NDA 被覆管の特性 ..... 2-2</p> <p>  2.1 耐熱性 ..... 2-2</p> <p>  2.2 耐放射線性 ..... 2-2</p> <p>    2.2.1 機械的性質 ..... 2-2</p> <p>    2.2.2 照射成長 ..... 2-3</p> <p>    2.2.3 クリープ特性 ..... 2-3</p> <p>    2.2.4 疲労特性 ..... 2-3</p> <p>  2.3 耐腐食性 ..... 2-4</p> <p>    2.3.1 酸化腐食による影響 ..... 2-4</p> <p>    2.3.2 水素吸収による影響 ..... 2-1</p> <p>  2.4 その他の性能 ..... 2-5</p> <p>    2.4.1 耐 PCI 性 ..... 2-5</p> <p>    2.4.2 耐摩耗性(フレッティング摩耗) ..... 2-5</p> <p>    2.4.3 内面酸化 ..... 2-5</p> <p>    2.4.4 ベレットとのボンディング ..... 2-5</p> <p>    2.4.5 高温時の特性 ..... 2-6</p> <p>3. NDA 被覆管の品質及び検査方法等 ..... 2-7</p> <p>  3.1 品質 ..... 2-7</p> <p>  3.2 寸法許容差 ..... 2-7</p> <p>  3.3 製造方法 ..... 2-7</p> <p>  3.4 試験 ..... 2-7</p> <p>  3.5 検査 ..... 2-8</p> <p>  3.6 表示 ..... 2-8</p> <p>4. 参考文献 ..... 2-9</p>	—	



特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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ると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。ただし、機械的強度や耐食性等が劣ることから、添加元素によってそれらの点を補うべく、ジルコニウム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合金の研究の中で、加圧水型軽水炉（以下、PWRと称する）用燃料被覆材（以下、被覆管と称する）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合金（JIS H4751 ZrTN804D。以下、ジルカロイ-4と称する）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、耐食性向上をねらって、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。</p> <p>しかし、燃料体最高燃焼率（以下、燃焼度と称する）を48,000MWd/tから55,000MWd/t（以下、ステップ2燃料と称する）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る。</p> <p>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と称する）を開発している。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。②なお、NDA被覆管には集合組織調整を施す。（集合組織調整管と称する。）</p>	<p>（添付資料 4）</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(1/5)</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）以下「ガドリニア入り二酸化ウランペレット」という。</p> <p>（注3）タイプⅠはガドリニア濃度10wt%を示す。 タイプⅡはガドリニア濃度6wt%を示す。</p> <p>（注4）不純物の総中性子吸収をボロン量で換算したもの。</p> <p>（注5）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6）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 ZrTN 804Dの規定からNb及びCaの化学成分を除外して、JIS H4751 ZrTN 804D相当と記載している。</p> <p>（注7）以下「718合金」という。</p> <p>（注8）以下「<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 40px; height: 15px;"></span>」という。</p> <p>（注9）以下「<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 40px; height: 15px;"></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> <p>②集合組織調整管については、添付資料4「5. Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金(NDA)」に記載している。</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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2. NDA 被覆管の特性  <u>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。</u></p> <p>2.1 耐熱性  <u>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。</u>  <u>NDA 被覆管の融点は約1,800°Cであり、約800°Cでα相から (α+β) 相へ、また、約940°C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。</u>  <u>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。異常な過渡変化時のNDA 被覆管の最高温度は約□°C以下であり、いずれの相変態温度よりも低いので、熔融あるいは相変態は生じない。</u></p>	<p>(添付資料4)  <b>5. Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 (NDA)</b>  <u>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）。</u>  <u>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。</u>  <u>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。</u></p> <p>5.1 耐熱性  <u>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。</u>  <u>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。</u>  <u>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熔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熔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。</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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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、ペレットと称する）と接触して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、及び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>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けき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、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。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は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>したがって、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>(添付資料4)</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。</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>	

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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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的性質の変化を図2.2-1 に示す。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したがって、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。①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。この程度の伸びの減少であれば、被覆管歪に関する設計基準1%に対し十分な余裕があるため、被覆管の延性を確保する上で影響は小さい。</p> <p>①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。③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}\text{n/m}^2</math> (<math>E&gt;1\text{MeV}</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。</p>	<p>(添付資料4)</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}\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。</p> <p>(省略)</p> <p>(添付資料3)</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（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」の5.2.1項参照）。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>添付資料4「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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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、燃焼とともに軸方向に伸びる。ジルカロイ-4被覆管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そろ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。</u></p> <p><u>NDA被覆管の照射成長は、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、ジルカロイ-4被覆管と比較して小さくなる傾向にある。</u></p>	<p>(添付資料4)</p> <p>5.2.4 照射成長</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（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。</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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p><b>2.2.3 クリープ特性</b>  <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。</u></p> <p><b>2.2.4 疲労特性</b>  <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。照射による疲労特性の変化についても、2.2.1で示した機械的性質同様、高速中性子照射による照射欠陥の蓄積によるものであり、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被覆管の疲労特性の大きな変化はないと考えられる。したがって、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>(添付資料4)</p> <p><b>5.2.3 クリープ特性</b>  <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。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> <p><b>5.2.2 疲労特性</b>  <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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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><u>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。</u></p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p>一般に、高温高压水とジルカロイ-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、<u>黒色で緻密な酸化物を生じる。</u></p> <p><u>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>（酸化膜厚さ約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>（酸化膜厚さ約100μm）の腐食増量で生じると言われている。</u></p> <p><u>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被覆管では燃料棒平均燃焼度約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。</u></p>	<p>(添付資料4)</p> <p>5.3 耐食性</p> <p><u>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、</u></p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p><u>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。</u></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、<u>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。</u></p> <p><u>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。</u></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>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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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。</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。したがって、同条件で使用された場合、NDA 被覆管の水素吸収量はジルカロイ-4被覆管より小さくなる。図2.3-3及び図2.3-4に示すように、水素吸収量が約800ppm までの未照射及び照射済ジルカロイ-4被覆管及びNDA 被覆管について、機械的性質を測定した結果、未照射NDA 被覆管では水素吸収量約800ppm まで著しい延性の低下はなく、照射済被覆管でも同様に水素吸収量約500ppm まで著しい延性の低下が見られない。したがって、未照射及び照射済被覆管の試験結果から照射済NDA 被覆管は設計基準1%に対し十分な延性を確保していると考えられる。</p>	<p>(添付資料4)</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。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（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被覆管に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第5-1図に示す。引張強さ及び耐力は、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}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。</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>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>



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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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ときに生じる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、すなわち周方向に配向（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、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、集合組織調整を施したNDA被覆管に対しても、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。</u></p> <p><u>SCC破損しきい応力は耐力に依存するが、2.2.1で述べたとお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（フレッティング摩耗）</p> <p><u>フレッティング摩耗は、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、フレッティ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被覆管のフレッティ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>(添付資料4)</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、Zr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。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> <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添付資料4第5-11図で説明している。</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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.4.3 内面酸化  <u>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被覆管の内面酸化はジルカロイ-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。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、想定する照射量の範囲においてNDA被覆管の内面酸化の健全性への影響は小さいと考えられる。</u></p> <p>2.4.4 ペレットとのボンディング  <u>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。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、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健全性への影響は小さいと考えられる。</u></p>	<p>(添付資料4)</p> <p>3.3.1 二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応  <u>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。これらは、被覆管の腐食及びPCIへ影響を及ぼす可能性が考えられる。</u>  <u>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°C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。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°Cを超えないことから、反応は小さいと考えられる。</u>  <u>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。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。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。</u>  <u>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。</u>  <u>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。</u></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  <u>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。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。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。</u>  <u>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。</u></p>	<p>ハルデン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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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（LOCA）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。したがって、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。</u></p>	<p>(添付資料4)</p> <p>5.4.3 高温特性</p> <p><u>被覆管の相変態（α相からβ相に変化）が生じるような高温時には、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。</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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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、以下に示すとおり、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 II 4751 ZrTN804D 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; display: inline-block; width: 50px; height: 15px; vertical-align: middle;"></span>に従うこととしている。</p> <p>3.1 品質</p> <p>品質は、以下のとおりとしている。</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、さ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) 被覆管の表面粗さの程度は、実用上差し支えが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、3.1b)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、3.1c)又はこれと同等の方法によって 336 時間で 38mg/dm<sup>2</sup> 以下の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、3.1d)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 <math>F_n</math> 値は 0.45 を超えてはならない。</li> <li>i) 被覆管は、3.1e)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、又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継ぎ目な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> <li>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、耐力までは歪増加率 0.003～0.007mm/mm・</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付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）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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>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、外観及び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。 酸素、水素及び窒素以外の元素については、同一インゴット又は中間製品からそのイン ゴットの上部、中央部、下部又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 0321(1973)による。</p> <p>3.6 表示</p> <p>被覆管は、1 束ごと又は 1 包装ごとに適切な方法によって識別を行い、管理されることとしている。</p> <p style="text-align: center;">2-8</p>	—	前頁と同じ。

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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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"NFK-8116 改 5、平成 17 年</p> <p>[2] S.T.Mahmood,et al., "Post-Irradiation characterization of Ultra-High-Fluence Zircaloy-2 Plate", ASTM STP1354, 2000</p> <p>[3] P.GUEDENEY et al., "FRAGEMA FUEL ROD BEHAVIOUR CHARACTERIZATION AT HIGH BURNUP ", International Topical Meeting on LWR Fuel Performance,1991</p> <p>[4] (財)原子力発電技術機構、"平成 11 年度軽水炉改良技術確証試験(高燃焼度等燃料に関するもの)に関する報告書"</p> <p>[5] K.Une, "Threshold values characterizing Iodine-induced SCC of Zircalloys", IAEA Specialists Meeting on Pellet-Cladding Interaction in Water Reactors, Roskilde,Denmark,1980</p> <p>[6] (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>[7] J.O.Barner, et al., "High Burnup Effects Program – Final Report", HBEP-61, 1990"</p> <p>[8] K.NOGITAK,UNE, "Formation of Pellet-cladding Bonding Layer in High Burnup BWR Fuels" J.Nucl.Sci.Tech.34,1997</p> <p>[9] 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>—</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



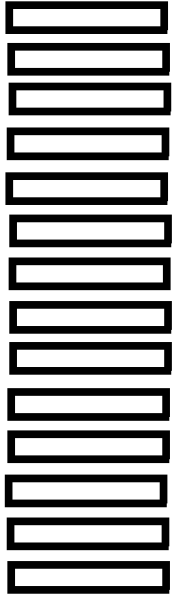


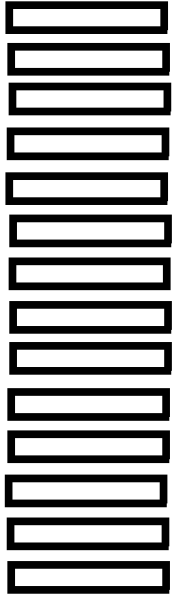


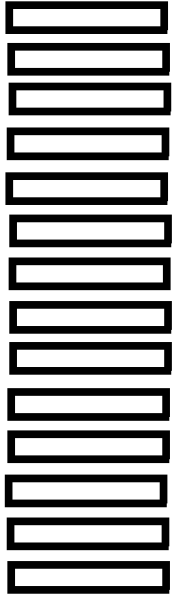
特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
<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" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <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 style="border: 2px solid black;">□</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 style="border: 2px solid black;">□</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。 <span style="float: right;">単位: wt%</span></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" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <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 style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</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> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <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 style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> <td style="border: 2px solid black;">□</td> </tr> <tr> <td>(参考)ジルカロイ-4 被覆管<sup>2)</sup></td> <td>0.0020</td> <td>0.0050</td> <td>0.0050</td> <td>0.0070</td> <td>0.0080</td> <td>0.0100</td> <td>0.0120</td> <td>0.0050</td> </tr> </tbody> </table> <p>2) JIS H4751 Zr TN804D SR(1998) <span style="float: right;">単位: wt%</span></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	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr	NDA 被覆管	□	□	□	□	□	□	□	□	(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	被覆管	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr	NDA 被覆管	□	□	□	□	□	□	□	□	(参考)ジルカロイ-4 被覆管 <sup>2)</sup>	0.0020	0.0050	0.0050	0.0070	0.0080	0.0100	0.0120	0.0050	<p style="text-align: center;">(添付資料4)</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(2/5)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <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>Fe</th> <th>Al</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>Ni</th> <th>Si</th> <th>Ti</th> <th>Zr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="7">燃料被覆材</td> <td rowspan="7">Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金<sup>(注5)</sup></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> </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> </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> </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> </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> </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> </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> </tr> <tr> <td rowspan="7">燃料被覆材 端栓</td> <td rowspan="7">Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金<sup>(注6)</sup></td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al</td> <td>≤ 75</td> <td>B</td> <td>≤ 0.5</td> <td>C</td> <td>≤ 270</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>Cd</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> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>H</td> <td>≤ 25</td> <td>Hf</td> <td>≤ 100</td> <td>Mg</td> <td>≤ 20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mn</td> <td>≤ 50</td> <td>Mo</td> <td>≤ 50</td> <td>N</td> <td>≤ 80</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>□</td> <td>Ni</td> <td>≤ 70</td> <td>Si</td> <td>≤ 120</td> <td>Ti</td> <td>≤ 50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <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> </tr> <tr> <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="7">制御棒案内 シンプル</td> <td rowspan="7">Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金<sup>(注6)</sup></td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al</td> <td>≤ 75</td> <td>B</td> <td>≤ 0.5</td> <td>C</td> <td>≤ 270</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>Cd</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> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>H</td> <td>≤ 25</td> <td>Hf</td> <td>≤ 100</td> <td>Mg</td> <td>≤ 20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mn</td> <td>≤ 50</td> <td>Mo</td> <td>≤ 50</td> <td>N</td> <td>≤ 80</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>□</td> <td>Ni</td> <td>≤ 70</td> <td>Si</td> <td>≤ 120</td> <td>Ti</td> <td>≤ 50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <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> </tr> <tr> <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="7">制御棒案内 シンプル用 下部端栓</td> <td rowspan="7">Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金<sup>(注6)</sup></td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al</td> <td>≤ 75</td> <td>B</td> <td>≤ 0.5</td> <td>C</td> <td>≤ 270</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>Cd</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> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>H</td> <td>≤ 25</td> <td>Hf</td> <td>≤ 100</td> <td>Mg</td> <td>≤ 20</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mn</td> <td>≤ 50</td> <td>Mo</td> <td>≤ 50</td> <td>N</td> <td>≤ 80</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>□</td> <td>Ni</td> <td>≤ 70</td> <td>Si</td> <td>≤ 120</td> <td>Ti</td> <td>≤ 50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <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> </tr> <tr> <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="3">カラー</td> <td rowspan="3">ASTM B351 Grade R60804</td> <td>O</td> <td>□</td> <td>Ni</td> <td>≤ 70</td> <td>Si</td> <td>≤ 120</td> <td>Ti</td> <td>≤ 50</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <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> </tr> <tr> <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> </tbody> </table>	構成部品	材料の種類	主成分(wt%)		不純物(ppm)								Sn	Fe	Al	B	C	Ni	Si	Ti	Zr	燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金 <sup>(注5)</sup>	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 <sup>(注6)</sup>	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 シンプル	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 <sup>(注6)</sup>	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 シンプル用 下部端栓	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 <sup>(注6)</sup>	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																			<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>
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	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
NDA 被覆管	□	□	□	□	□	□	□	□																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
(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																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
被覆管	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
NDA 被覆管	□	□	□	□	□	□	□	□																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
(参考)ジルカロイ-4 被覆管 <sup>2)</sup>	0.0020	0.0050	0.0050	0.0070	0.0080	0.0100	0.0120	0.0050																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
構成部品	材料の種類	主成分(wt%)		不純物(ppm)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Sn	Fe	Al	B	C	Ni	Si	Ti	Zr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金 <sup>(注5)</sup>	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 <sup>(注6)</sup>	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 シンプル	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 <sup>(注6)</sup>	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 シンプル用 下部端栓	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 <sup>(注6)</sup>	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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2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>マイクロビッカース硬さ</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> <p style="text-align: center;">2-11</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	マイクロビッカース硬さ	ジルカロイ-4 被覆管	212~224	NDA 被覆管	211~217	<p style="text-align: center;">(添付資料4)</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 (ビッカース硬さ値))</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HV0.2<sup>(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: right;">(注 1) HV0.2: ビ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>(注1)</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	マイクロビッカース硬さ																																											
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>(注1)</sup> )																																											
NDA	215																																											
ジルカロイ-4 (参考)	218																																											



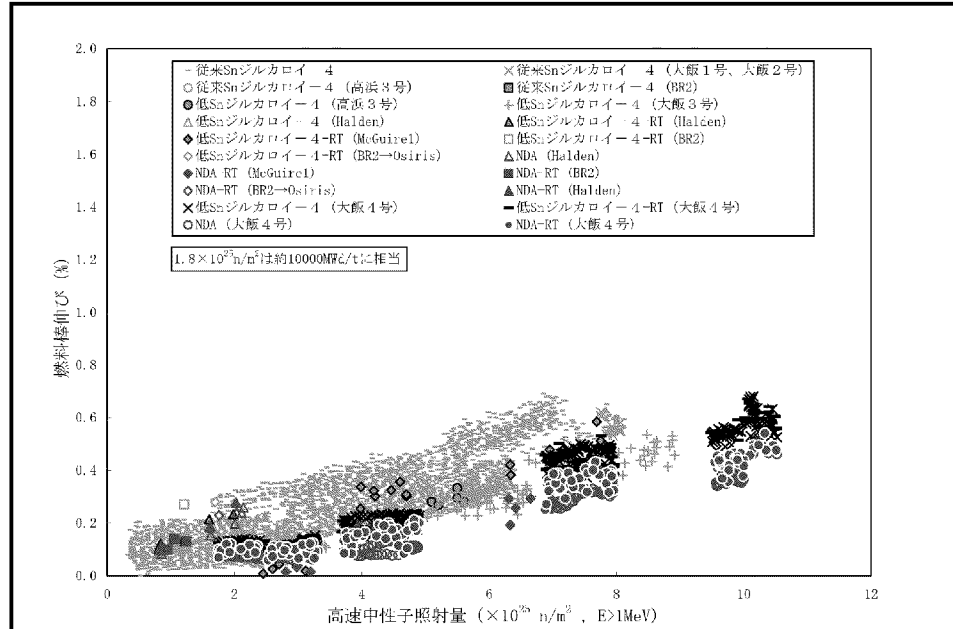
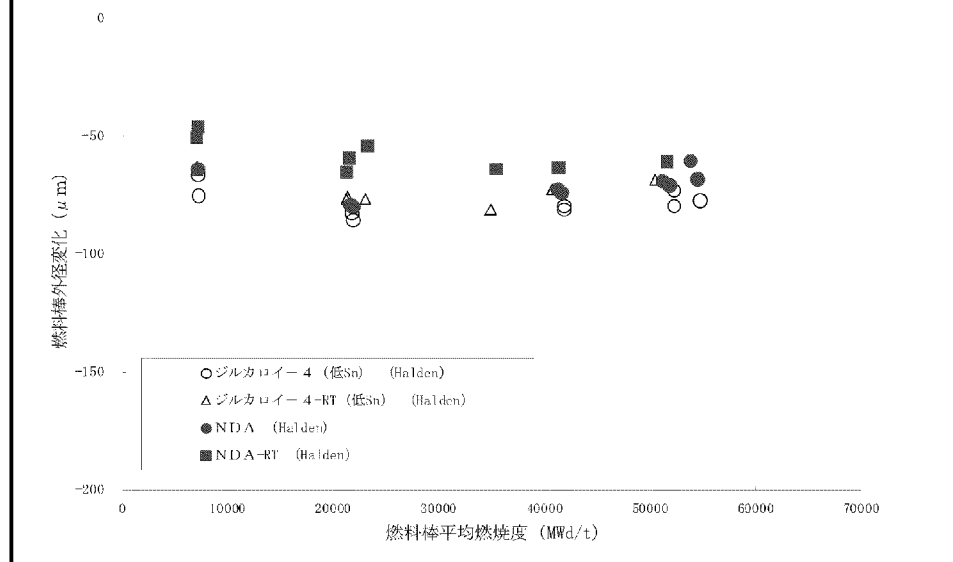
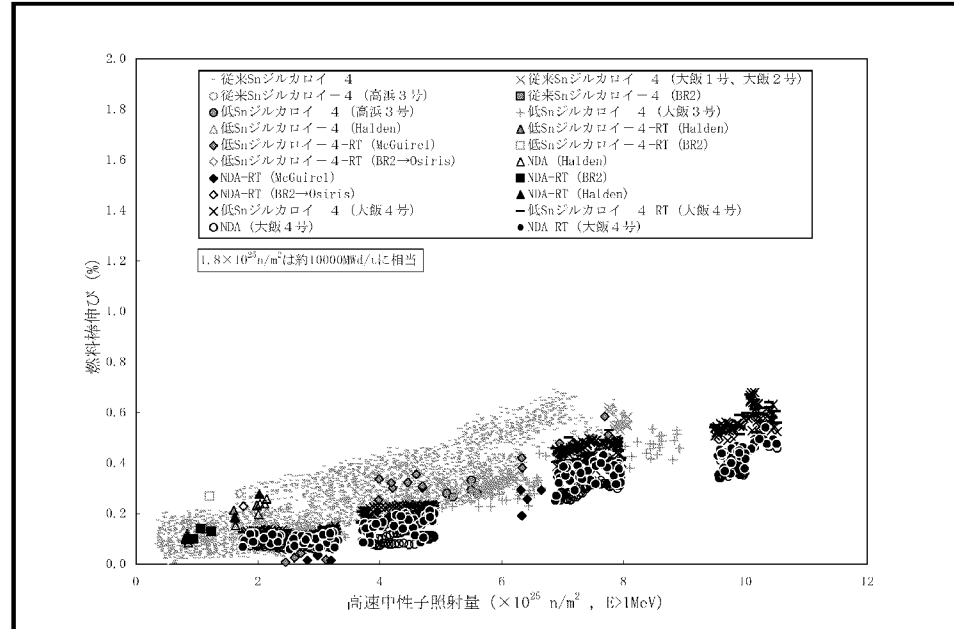
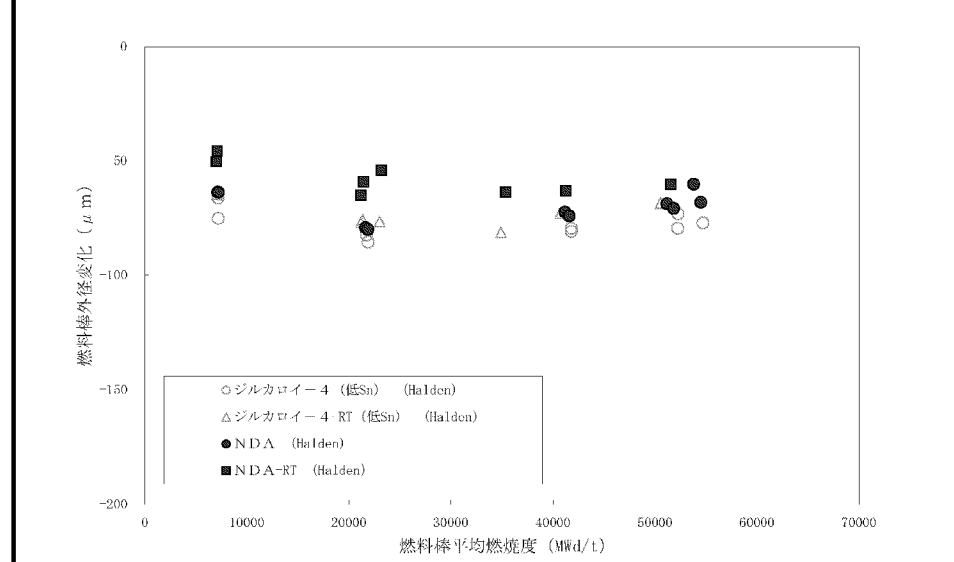
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考																								
<p>表 3.4-1 NDA 被覆管の化学成分及び不純物の分析方法並びに許容変動値</p> <table border="1" data-bbox="305 527 1065 1446"> <thead> <tr> <th>化学成分不純物</th> <th>検査方法</th> <th>許容変動差</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sn</td> <td>JIS H 1659(1989)又は JIS H 1669(1990)</td> <td>0.050</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>JIS H 1654(1989)又は JIS H 1669(1990)</td> <td>0.020</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>JIS H 1656(1989)又は JIS H 1669(1990)</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>JIS H 1668(1971)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>JIS H 1655(1989)又は JIS H 1669(1990)</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>JIS H 1665(1988)</td> <td>0.020</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>0.0020 又は規格値の 20% のいずれかの小さい 方の値</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位:wt%</p> <p>備考 1. 許容変動値とは、注文者側が被覆管の受入れ分析試験を行った場合、規格値の上限又は下限を超えて許容される値をいう。</p> <p>備考 2. 日本工業規格以外の分析試験方法を適用する場合は、上記許容変動値を満足する方法を適用する。</p>	化学成分不純物	検査方法	許容変動差	Sn	JIS H 1659(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.050	Fe	JIS H 1654(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.020	Cr	JIS H 1656(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.010	Nb	JIS H 1668(1971)		Ni	JIS H 1655(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.010	O	JIS H 1665(1988)	0.020			0.0020 又は規格値の 20% のいずれかの小さい 方の値	—	<p>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>
化学成分不純物	検査方法	許容変動差																								
Sn	JIS H 1659(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.050																								
Fe	JIS H 1654(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.020																								
Cr	JIS H 1656(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.010																								
Nb	JIS H 1668(1971)																									
Ni	JIS H 1655(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.010																								
O	JIS H 1665(1988)	0.020																								
		0.0020 又は規格値の 20% のいずれかの小さい 方の値																								

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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="252 451 1053 1711" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <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> <p>RT(Radial Texture):集合組織調整を施した被覆管を表す。以降、同様。</p>	<div data-bbox="1439 451 2240 1711" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>第 5-1 図 NDA 被覆管の機械特性<sup>(20)</sup></p> </div>	<p>(添付資料4)</p>

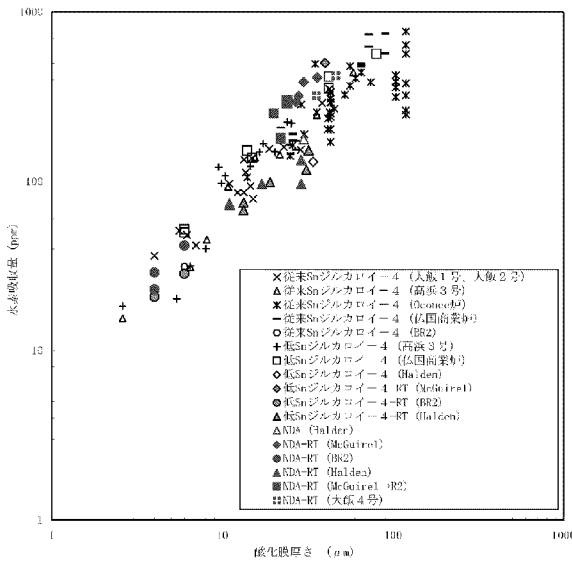
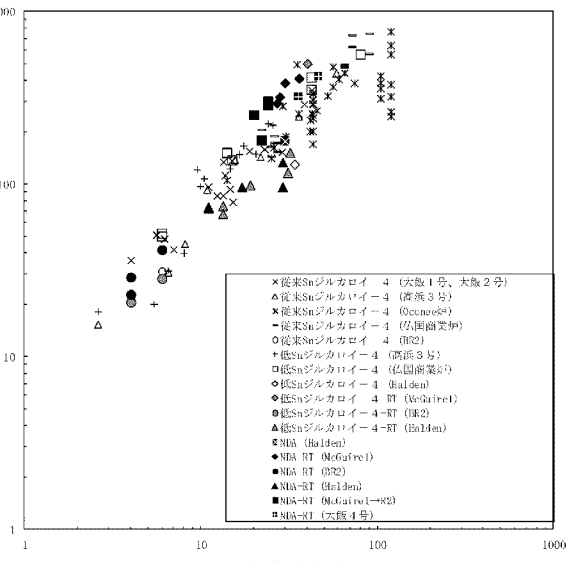
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p style="text-align: center;">(添付資料4)</p>  <p style="text-align: center;">図 2.2-2 NDA 被覆管の照射成長と高速中性子積算照射量の関係<sup>[1]</sup></p>  <p style="text-align: center;">図 2.2-3 NDA 被覆管の燃料棒外径の照射による変化(Halden 炉照射)<sup>[1]</sup></p>	 <p style="text-align: center;">第 5-6 図 NDA 被覆管の照射成長<sup>(20)</sup></p>  <p style="text-align: center;">第 5-5 図 燃料棒外径変化（実機照射セグメント燃料棒）<sup>(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 (川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体)	設工認 (川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体)	備考
<div data-bbox="252 451 1172 1018"> <p>(試験温度: 316°C)</p> <p>図 2.2-4 NDA 被覆管の疲労特性<sup>[1]</sup></p> </div> <div data-bbox="252 1113 1172 1648"> <p>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></p> </div>	<div data-bbox="1276 294 1439 336">(添付資料4)</div> <div data-bbox="1409 451 2270 1018"> <p>(試験温度: 316°C)</p> <p>第 5-4 図 NDA 被覆管の疲労強度<sup>[20]</sup></p> </div> <div data-bbox="1409 1113 2270 1648"> <p>第 5-8 図 NDA 被覆管の原子炉内酸化膜厚さ<sup>[20]</sup></p> </div>	

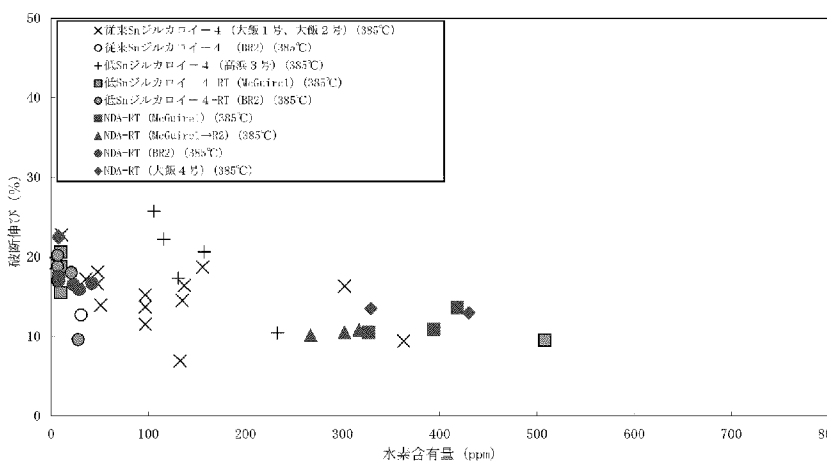
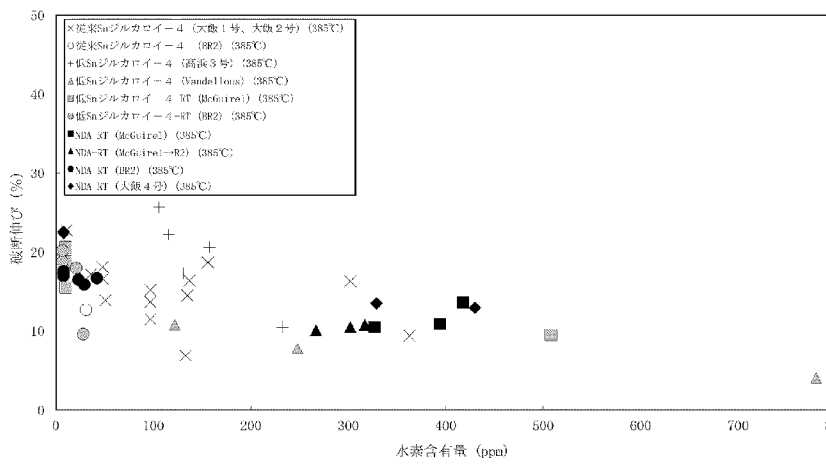
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="284 445 1062 1129" style="border: 1px solid black; padding: 10px;">  <p data-bbox="371 1039 964 1071">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="1472 445 2249 1129" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p data-bbox="1276 294 1439 325">(添付資料4)</p>  <p data-bbox="1543 1050 2166 1081">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> </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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="264 411 1184 1753" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">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>[1]</sup></p> </div>	<p style="text-align: center;">(添付資料4)</p> <div data-bbox="1433 411 2353 1753" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">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

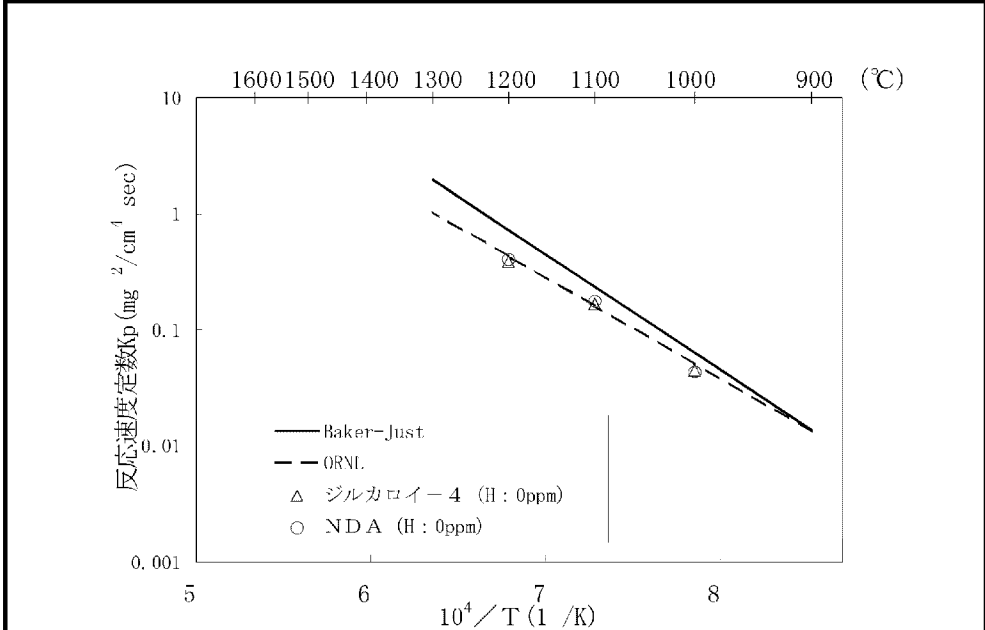
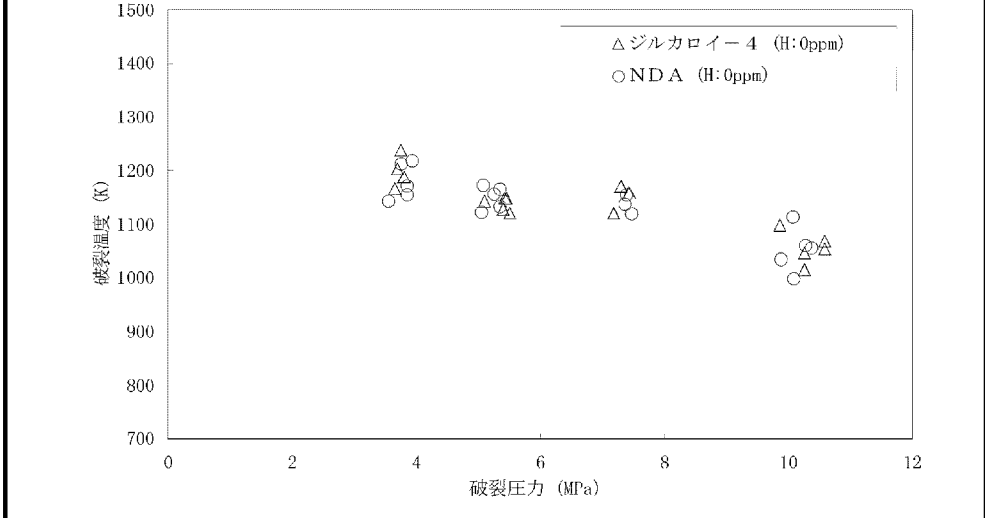
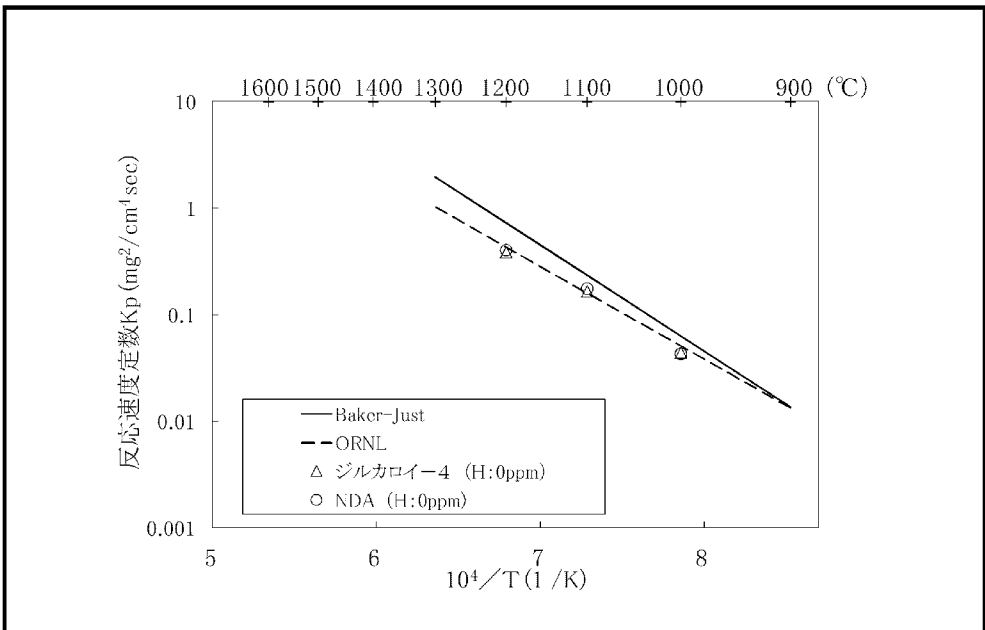
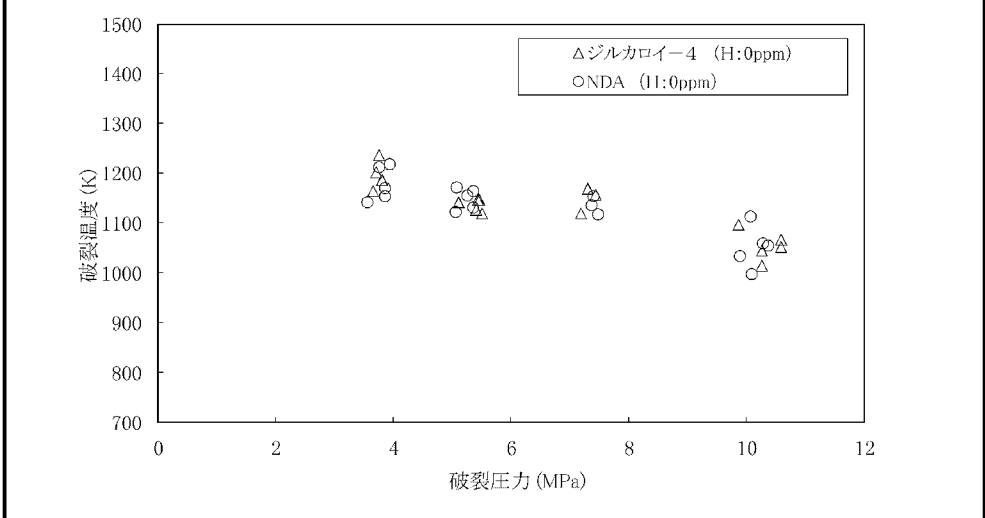
特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="252 451 1172 1102" style="border: 1px solid black; padding: 10px;">  <p data-bbox="371 997 964 1029">図 2.3-4 NDA 被覆管の炉内照射後の破断伸びの水素吸収量依存性<sup>1)</sup></p> </div>	<p data-bbox="1276 294 1439 325">(添付資料4)</p> <div data-bbox="1424 451 2344 1102" style="border: 1px solid black; padding: 10px;">  <p data-bbox="1587 966 2107 997">第 5-3 図 被覆管水素濃度と破断伸びの関係<sup>(9)(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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="201 436 1121 1659" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>図 2.4-1 NDA 被覆管の出力急昇試験結果<sup>1)</sup></p> </div>	<div data-bbox="1350 436 2270 1659" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>(添付資料4)</p> <p>第 5-11 図 NDA 被覆管の耐 PCI 性<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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p style="text-align: center;">(添付資料4)</p>  <p style="text-align: center;">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></p>  <p style="text-align: center;">図 2.4-3 NDA 被覆管の LOCA 想定時被覆管破裂挙動試験結果<sup>[1]</sup></p>	 <p style="text-align: center;">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>  <p style="text-align: center;">第 5-12 図 未照射管の LOCA 時破裂挙動試験結果 (受取管) <sup>(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（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="338 583 1145 793" data-label="Diagram"> </div> <div data-bbox="537 825 872 852" data-label="Caption"> <p>図 3.4-1 引張試験における心金の形状</p> </div>	<p style="text-align: center;">—</p>	<p>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>