

## 補足説明資料 6 - 3

特殊加工認可申請書との整合性に関する

補足説明資料

## 目 次

補足説明資料 6 - 3 - 1 特殊加工認可申請書との整合性に関する補足説明資料（美浜発電所第 3 号機）

補足説明資料 6 - 3 - 2 特殊加工認可申請書との整合性に関する補足説明資料（高浜発電所第 1 , 2 号機）

## 補足説明資料 6－3－1

特殊加工認可申請書との整合性に関する補足説明資料  
(美浜発電所第3号機)

# 目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 整理結果 .....	1



## 1. 概 要

本資料は、令和 2 年 4 月の「原子力利用における安全対策の強化のための核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等の一部を改正する法律」及び関連規則等（以下「改正法等」という。）の施行を踏まえ、本設工認申請対象の燃料被覆材について、特殊加工認可申請書（平成 17 年 8 月 26 日付け平成 17・08・04 原第 17 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

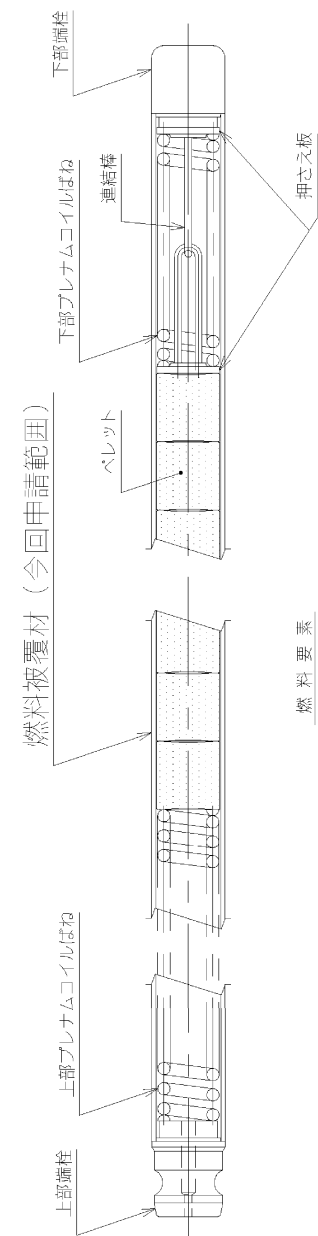
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3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="483 1581 1089 1661" style="border: 1px solid black; 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 1</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 2px;">美浜発電所 第3号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料 1	美浜発電所 第3号機		—	
特殊加工認可申請書	資料 1					
美浜発電所 第3号機						

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

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>1. 特殊加工認可申請範囲            特殊加工認可申請範囲は、美浜発電所第3号機の取替燃料体(最高燃焼率 55,000MWd/t)のうち燃料被覆材の部分である。</p> <p 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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
 <p>下部罐栓</p> <p>下部プレナムコイルばね</p> <p>連結棒</p> <p>押さえ板</p> <p>燃料被覆材（今回申請範囲）</p> <p>ペレット</p> <p>燃料要素</p> <p>上部プレナムコイルばね</p> <p>上部罐栓</p> <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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考				
<p data-bbox="281 594 931 625">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 data-bbox="477 1530 1092 1617" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 20px auto; width: fit-content;"> <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="text-align: center; padding: 2px;">美浜発電所 第3号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料 2	美浜発電所 第3号機		<p data-bbox="1822 1119 1852 1140">—</p>	
特殊加工認可申請書	資料 2					
美浜発電所 第3号機						

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

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

表 1

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>1. NDA被覆管の概要</p> <p>①ジルコニウムは、ステンレス鋼等に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 H 4751 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*1。</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*2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。<sup>[1]</sup> NDAの化学成分と不純物に関する仕様をジルカロイ-4と比較して、表1.1-1及び表1.1-2に示す。</p> <p>*1 一般的に、前者を従来Snジルカロイ-4被覆管、後者を低Snジルカロイ-4被覆管と称している。</p> <p>*2 燃料要素（以下、燃料棒と称する）最高燃焼度は61,000MWd/t、ペレット最高燃焼度は71,000MWd/tとなる。</p>	<p>（添付資料8）</p> <p>2. 構成材料の概要</p> <p>燃料集合体の材料は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を含むプラントの使用条件の下で、燃料寿命中その健全性が維持されるよう選定している。主な構成部品の材料及び各材料の化学成分を表 2-1 に示す。また、燃料集合体主材料の機械的性質を表 2-2 に示す。</p> <p style="text-align: center;">表 2-1 燃料集合体主材料の化学成分</p> <p style="text-align: center;">（表省略）</p> <p>（注1）不純物の総中性子吸収をBoron量で換算したもの。</p> <p>（注2）ガドリニア濃度10wt%を示す。</p> <p>（注3）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」と称する。</p> <p>（注4）以下、「ジルカロイ-4」と称する。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5）以下、「718合金」と称する。</p> <p>（注6）以下、<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px;"></span>と称する。</p> <p>（注7）以下、<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px;"></span>と称する。</p>	<p>①ジルカロイ-4に対する一般論であるため、設工認申請書には記載していない。（ジルカロイ-4は本申請対象の燃料被覆材には使用されていない）</p>

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

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2. NDA被覆管の特性  <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℃であり、約800℃で<math>\alpha</math>相から<math>(\alpha + \beta)</math>相へ、また、約940℃で<math>(\alpha + \beta)</math>相から<math>\beta</math>相に変態し、その温度前後で腐食速度や機械的強度が変化する。融点及び相変態温度の測定結果を表2.1-1及び表2.1-2に示す。NDA被覆管の融点及び相変態温度はジルカロイ-4被覆管と同等である。<sup>[1]</sup> 異常な過渡変化時のNDA被覆管の最高温度は約 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">  </span>℃以下であり、いずれの相変態温度よりも低いので、溶融あるいは相変態は生じない。</u></p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5. ジルコニウム基合金  NDA被覆管は「実用発電用原子炉に使用する燃料体の技術基準に関する規則（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第7号）」（以下、「原子力規制委員会規則第7号」と称する。）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23・02・08原第28号）。</p> <p><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></p> <p>なお、資料8中に示すジルコニウム基合金被覆管の照射挙動データには、ジルコニウム基合金とジルコニウム基合金-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> <p>5.1 耐熱性  ジルカロイ-4の溶融点は1,782℃であり、結晶構造が820℃で<math>\alpha</math>相から<math>(\alpha + \beta)</math>相へ、また、958℃で<math>(\alpha + \beta)</math>相から<math>\beta</math>相に変態する<sup>(20)</sup>。</p> <p><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></p> <p><u>NDAの溶融点及び相変態温度の測定結果を表5-1及び表5-2に示すように、NDAの溶融点は1,796℃、<math>\alpha</math>相から<math>(\alpha + \beta)</math>相及び<math>(\alpha + \beta)</math>相から<math>\beta</math>相への相変態温度はそれぞれ802℃及び937℃であり、いずれも被覆管の異常な過渡変化時の最高温度（約 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">  </span>℃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。従って、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。</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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2 耐放射線性</p> <p><u>被覆管は、燃料材（以下、ペレットと称する）と接触して炉内に置かれるので、中性子、<math>\alpha</math>線、<math>\beta</math>線、<math>\gamma</math>線及び核分裂片の影響を受ける。<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。</u></p> <p><u>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、及び<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。</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 8)</p> <p>5.2 耐放射線性</p> <p><u>NDA被覆管は、二酸化ウラン燃料と接触して原子炉内に置かれるので、<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。</u></p> <p><u><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。</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等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>従って、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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2.1 機械的性質</p> <p>①NDA被覆管の照射による機械的性質の変化を図2.2-1に示す。<sup>[1]</sup>ジルカロイ-4被覆管と同様、高速中性子の照射とともに比較的早い時期にNDA被覆管の引張強さ及び耐力は増加し、その後は照射量の増加に伴う大きな変化は見られない。</p> <p>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。<sup>[2]</sup></p>	<p>(添付資料 8)</p> <p>5.2.1 機械的性質</p> <p>機械特性への影響因子としては、照射脆化と水素脆化が考えられる。①照射脆化は照射欠陥の蓄積（濃度）によるが、これは高速中性子束、被覆管温度及び時間に依存する。実機炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を図 5-1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>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<sup>(29)</sup>。</p> <p>(省略)</p> <p>(添付資料 7-1)</p> <p>3.3.5 被覆管の応力評価結果 (省略)</p> <p>(2) 応力評価結果 (省略)</p> <p>被覆管の材料であるジルコニウム基合金の耐力は、高速中性子照射によって増加するが、比較的短時間の照射で飽和する（資料 8「燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書」の5.2.1項参照）。</p> <p>②従って、燃料寿命初期は未照射材の耐力と、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。許容基準の求め方を図3-20に示す。</p> <p>(省略)</p>	<p>添付資料8「5.2.1 機械的性質」において、NDA被覆管の破断伸びについて照射量による著しい変化がないことを説明している。</p>

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

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2.2 照射成長</p> <p><u>約98%のジルコニウムを主成分とするNDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管と同様、燃焼と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。<sup>[1]</sup></u></p>	<p>(添付資料 8)</p> <p>5.2.4 照射成長<sup>(注2)</sup></p> <p><u>照射成長の支配要因は、ジルカロイ中の稠密六方晶（<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。図 5-6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>従って、ジルカロイ-4被覆管と比較してNDA被覆管の照射成長は、本申請の燃料集合体の使用範囲まで照射成長量が小さくなると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（資料7-1「燃料体の強度に関する説明書」の3.2.2(3)項d.に示す。）設計評価に反映している。</p> <p>燃料棒の設計に当たっては、これらの耐放射線性に関する事項を考慮した上で、被覆管応力等が設計基準を満足するようにする。</p>	

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

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2.3 クリープ特性</p> <p><u>Halden炉において照射された燃料棒の外径測定結果を図2.2-3に示す。燃料棒の外径変化は、ペレットと被覆管が接触するまでは被覆管のクリープ変形により、接触後は燃料棒のスエリングにより支配される。そのため、低燃焼度域における燃料棒外径変化から、被覆管のクリープ特性を確認することができる。NDA被覆管を採用した燃料棒の照射による外径変化は、低Snジルカロイ-4被覆管を採用した燃料棒のそれと同等となっている。被覆管クリープは、転位（材料中の結晶格子のずれ）の移動によるものであるが、ジルコニウム中に固溶しているSn、Nbは転位を捕獲し、その動きを抑制する。NDA被覆管と低Snジルカロイ-4被覆管のクリープ特性が同等であることは、NDA被覆管中の固溶Sn及び固溶Nbによるクリープを抑制する効果が、低Snジルカロイ-4被覆管の固溶Snによるそれと同程度の効果であることを示している。<sup>[1]</sup></u></p> <p>2.2.4 疲労特性</p> <p><u>未照射及び照射されたNDA被覆管の疲労試験結果を図2.2-4に示す。NDA被覆管の疲労特性は、ジルカロイ-4被覆管のそれと同等であり、これまでジルカロイ-4被覆管での疲労設計曲線として使用されているLanger-0' Donnellの疲労曲線と良く一致している。<sup>[1]</sup> 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-0' Donnellのそれと同等であると考えられる。</u></p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5.2.3 クリープ特性<sup>(注1)</sup></p> <p><u>燃料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図 5-5に示すが、約20,000MWd/t程度までの低燃焼度域の外径減少より、NDA被覆管を採用した燃料棒の照射による外径変化は、低Snジルカロイ-4被覆管を採用した燃料棒のそれと同等となっている。被覆管クリープは、転位（材料に元々ある結晶格子のずれ）の移動によるものであるが、ジルコニウム中に固溶しているSn、Nbは転位を捕獲し、その動きを抑制する。NDA被覆管と低Snジルカロイ-4被覆管のクリープ特性が同等であることは、NDA被覆管中の固溶Sn及び固溶Nbによるクリープを抑制する効果が、低Snジルカロイ-4被覆管の固溶Snによるそれと同程度の効果であることを示している<sup>(20)</sup>。以上より、NDA被覆管のクリープ特性は低Snジルカロイ-4被覆管と同じとして計算モデルに組み込んで（資料7-1「燃料体の強度に関する説明書」の3.2.2(3)項d.に示す。）設計評価に反映している。</u></p> <p>5.2.2 疲労特性</p> <p><u>NDA被覆管の疲労試験結果と、ジルカロイに対するLanger and O' Donnellの疲労試験結果を図 5-4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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.3 耐腐食性</p> <p>2.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>NDA被覆管は、原子炉運転中高温の一次冷却水と接していることから、以下の反応により酸化腐食が進行する。</p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p>一般に、高温高圧水とジルカロイ-4被覆管の反応による腐食は、保持時間が短い間は、時間の経過とともに腐食速度が徐々に小さくなっていき、黒色で緻密な酸化物を生じる。</p> <p>その後ある時間保持すると、腐食速度が比較的大きく一定になる現象が見られる。この腐食速度の変化は遷移と呼ばれ、腐食増量が約30mg/dm<sup>2</sup>（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。<sup>[3]</sup></p> <p>炉内で照射されたNDA被覆管の最大酸化膜厚さ測定結果を図2.3-1に示す。被覆管の酸化膜厚さは冷却材条件や出力履歴により影響を受けることから、全データを直接比較することはできないが、従来Snジルカロイ-4被覆管では燃料棒平均燃焼度約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。<sup>[1]</sup></p>	<p>(添付資料 8)</p> <p>5.3 耐食性</p> <p>NDA被覆管が1次冷却材と接触すると、ジルカロイ-4被覆管と同様に、</p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p>の反応により酸化腐食が進むとともに、発生した水素の一部を吸収する。</p> <p>実機では放射線照射下で1次冷却材の放射線分解により発生する酸素により、ジルカロイの腐食が放射線照射のない環境に比べて加速される可能性があるが、PWRでは1次冷却材に水素注入を行い酸素の発生を抑制している。実機の腐食は以下に示すとおりである。</p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>ジルカロイ被覆管外面には、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）の時間変化を図5-7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。炉内での被覆管酸化膜厚さを図5-8に示す。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>図5-8から分かるように、ジルカロイ-4被覆管の炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されている。また、NDA被覆管については、腐食速度の低減が認められる。</p> <p>従って、NDA被覆管の腐食挙動はジルカロイ-4被覆管と同様であり、腐食が急激に増加する領域でも耐食性の向上が維持されることから、本申請の燃料集合体の使用範囲までNDA被覆管の耐食性の向上が維持されると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（資料7-1「燃料体の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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.3.2 水素吸収による影響</p> <p>2.3.1に示したジルコニウムと水との酸化腐食反応により発生した水素の一部は、被覆管に吸収される。炉内で照射された被覆管の水素吸収量の酸化膜厚さ依存性を図2.3-2に示す。NDA被覆管の水素吸収特性は、ジルカロイ-4被覆管のそれと同等である。<sup>[1]</sup></p> <p>水素吸収が過度に大きくなり固溶限以上に吸収された水素は、水素化物として析出し被覆管の延性の低下をもたらす。NDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、NDA被覆管の水素固溶限は、ジルカロイ-4被覆管と同等であると考えられる。</p> <p>NDA被覆管の耐食性は、2.3.1に示したとおり、ジルカロイ-4被覆管と比較して向上している。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。<sup>[4]</sup></p>	<p>(添付資料 8)</p> <p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>ジルコニウムと水との反応で発生した水素の一部は、被覆管に吸収される。被覆管の炉内での水素吸収量と酸化膜厚さの関係を図 5-9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）の関係を図 5-10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。</p> <p>従って、NDA被覆管の水素吸収率は腐食により発生した水素の一部が酸化膜厚さに応じてある割合で被覆管に取り込まれること、及びその割合はNDA被覆管とジルカロイ-4被覆管で同等であることから、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（資料7-1「燃料体の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> <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。実機炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を図 5-1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<math>27\sim 32 \times 10^{25}n/m^2</math> (<math>E&gt;1MeV</math>)まで十分な延性が確保されているとの報告例もある<sup>(29)</sup>。</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を図 5-2に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、図 5-3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被覆管の応力及び歪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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.4 その他の性能</p> <p>2.4.1 耐PCI性*</p> <p><u>ジルカロイ-4被覆管のPCI損傷は、腐食性FPガス（よう素、セシウム）雰囲気下で過大な応力が作用したときに生じる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。<sup>[1]</sup></u></p> <p><u>SCC破損しきい応力は耐力に依存するが、<sup>[5]</sup> 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性は維持されると考えられる。</u></p> <p>2.4.2 耐摩耗性（フレットング摩耗）</p> <p><u>フレットング摩耗は、接触面の周期的相対振動により起こる損傷である。燃料棒及び支持格子の材料特性のうち、フレットング摩耗に最も影響するのは材料の硬度であるが、表2.4-1に示すようにジルカロイ-4被覆管とNDA被覆管の硬度は同等であり、NDA被覆管のフレットング摩耗はジルカロイ-4被覆管と同程度と考えられる。</u></p> <p>* PCI : Pellet Cladding Interaction（ペレットと被覆管の相互作用）</p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5.4 その他の性能</p> <p>5.4.1 耐PCI性</p> <p><u>被覆管は、腐食性FPガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用(PCMI)を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ(SCC)による破損(PCI破損)を起こす。このPCI破損におけるSCCは、ジルカロイ中の稠密六方晶（<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性を図 5-11に破損しきい値とともに示す。NDA被覆管の耐PCI性、すなわちSCC破損特性はジルカロイ-4被覆管と同等以上であり、ジルカロイ-4被覆管で使用されている現行のPCI破損しきい値が適用できる<sup>(20)</sup>。以上より、NDA被覆管のPCI破損しきい値はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</u></p> <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表 5-3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8図5-11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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.4.3 内面酸化 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。<sup>[6]</sup> 燃料棒平均燃焼度約69,000MWd/tまで照射されたジルカロイ-4被覆管内面酸化は小さく、特に燃料棒の健全性に影響を及ぼしていないことから、<sup>[7]</sup> 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。</p> <p>2.4.4 ペレットとのボンディング 核分裂により生じた余剰酸素が被覆管と化学反応することにより、被覆管内面酸化膜が生成する。高燃焼度時では、ペレットと被覆管が強固に接触するようになる。その結果、被覆管内面酸化膜（ZrO<sub>2</sub>）とUO<sub>2</sub>との拡散層が形成され、ボンディングを生じることが報告されている。<sup>[8]</sup> NDA被覆管はジルカロイ-4被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、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。燃料棒平均燃焼度約69,000MWd/tまで照射されたジルカロイ-4被覆管のボンディングは特に燃料棒の健全性に影響を及ぼしていないことから、<sup>[7]</sup> 想定する照射量の範囲において、NDA被覆管のボンディングの健全性への影響は小さいと考えられる。</p>	<p>(添付資料 8)</p> <p>3.3.1 二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応 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カロイ中に拡散し、被覆管内面酸化膜（ZrO<sub>2</sub>）が形成される。さらに、両者が強く接触するようになるとジルコニウム酸化層へのウランの拡散により、ジルコニウム酸化層は（Zr, U）O<sub>2</sub>固溶体となり、これがボンディング層を形成して、強固なペレット-被覆管の固着の原因となる<sup>(10)</sup>。これらは、被覆管の腐食及びPCI<sup>(注1)</sup>へ影響を及ぼす可能性が考えられる。 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>(2)</sup>。通常運転中においてペレットと被覆管及び燃料被覆材端栓の接触面の温度が長期間にわたって500℃を超えないことから、反応は小さいと考えられる。 また、Halden炉において燃料棒平均燃焼度55,000MWd/tまで照射された燃料棒の被覆管内面観察によれば、低Snジルカロイ-4被覆管<sup>(注2)</sup>とNDA被覆管とで、被覆管内面酸化膜の状態に差は認められていない<sup>(11)</sup>。また、燃料棒平均燃焼度約69,000MWd/tまで照射されたジルカロイ-4被覆管において、過度の内面酸化膜は観察されていない<sup>(12)</sup>。このことから、想定する照射量の範囲において、NDA被覆管の内面酸化は燃料棒の健全性を確保する上で影響は小さい。 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。 以上のことから、二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応は設計評価では考慮していない。</p> <p>4.3.1 ガドリニア混合二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応 ガドリニア混合二酸化ウランは、4.1 項で述べたように置換型固溶体を形成して安定である。ガドリニア混合二酸化ウラン燃料棒について、原子燃料工業製燃料に対して実施した照射試験結果では、二酸化ウラン燃料棒に比べて被覆管内面酸化の増加は観察されていない<sup>(26)</sup>。従って、ガドリニア混合二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応は、二酸化ウランペレットとNDA被覆管が安定に共存する場合と大差はない。従って、当該の反応を設計評価では考慮していない。 なお、3.3.1 項で述べたとおり、ペレット密度が増加した場合の共存性への影響はない。</p>	<p>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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.4.5 高温時の特性</p> <p><u>冷却材喪失事故（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。<sup>[1]</sup></u></p>	<p>(添付資料 8)</p> <p>5.4.3 高温特性</p> <p><u>被覆管の相変態（<math>\alpha</math>相から<math>\beta</math>相に変化）が生じるような高温時には、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。冷却材喪失事故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と水反応の試験結果をそれぞれ図 5-12及び図 5-13に示す。図 5-12及び図 5-13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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>3. NDA 被覆管の品質及び検査方法等</p> <p>NDA 被覆管の品質及び検査方法等は、以下に示すとおり、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 H 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: 40px; 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、きず等で有害なものがないこと。</li> <li>c) 被覆管の表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</li> <li>d) 被覆管の表面粗さの程度は、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、3.4b) 又はこれと同等の方法によって引張試験を行った場合、機械的性質が設計上要求する値を満足していること。</li> <li>g) 被覆管は、3.4c) 又はこれと同等の方法によって 336 時間で 38mg/dm<sup>2</sup> 以下腐食質量増加でなければならない。ただし、72 時間を経過した時点で腐食質量増加が 22mg/dm<sup>2</sup> 以下であった場合には、それ以降の試験は行わない。また、腐食試験後の試験片表面には、著しい白色又は褐色の酸化物の付着があってはならない。</li> <li>h) 被覆管は、3.4d) 又はこれと同等の方法によって水素化物方位試験を行った場合、水素化物方位係数 Fn 値は 0.45 を超えてはならない。</li> <li>i) 被覆管は、3.4e) 又はこれと同等の方法によって超音波探傷試験を行った場合、対比試験片の人工傷からの信号と同等、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附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項の記載事項と同じ内容であり、本設工認においては基本設計方針にて、それら要求事項に従う旨を記載している。また、検査方法等については、本設工認における工事の方法にて、全施設を網羅するように工事の手順、使用前事業者検査の方法等を記載している。以上のことから、当該記載については比較対象外。</p>

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

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3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>	<p style="text-align: center;">—</p>	<p>前頁と同じ。</p>

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

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<p>4. 参考文献</p> <p>[1] 原子燃料工業株式会社、”原燃工製 PWR ステップ 2 燃料の改良因子について”NFK-8116 改 4、平成 15 年</p> <p>[2] S.T.Mahmood,et al., ”Post-Irradiation characterization of Ultra-High-Fluence Zircaloy-2 Plate”, ASTM 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 Zircaloys”, 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.NOJITA,K.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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）

設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）

備考

表 1.1-1 NDA 被覆管の化学成分規定値

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

1) JIS H4751 Zr TN804D SR(1998)では規定されていない。

単位:wt%

表 1.1-2 NDA 被覆管の不純物規定値

被覆管	Al	B	C	Co	Cu	Hf	Mg	Mn	Mo	Ni	Nb	N	Si	Ti	U	W	Zr
NDA 被覆管	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
(参考)ジルカロイ-4 被覆管 <sup>2)</sup>	0.0075 以下	0.00005 以下	0.0030 以下	0.00005 以下	0.027 以下	0.0020 以下	0.0050 以下	0.010 以下	0.0025 以下	—	—	—	—	—	—	—	—

2) JIS H4751 Zr TN804D SR(1998)

単位:wt%

(添付資料8)

表 2-1 燃料集合体主材料の化学成分（続き）

構成部品	材料の種類	主成分 (wt%)		不純物 (ppm)																																					
		Sn	Fe	Al	B	C	Co	Cu	Hf	Mg	Mn	Mo	N	Ni	Nb	N	Si	Ti	U	W	Zr																				
・燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム基合 金 <sup>(注3)</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	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□																		
・燃料被覆材 端栓	Sn-Fe-Cr 系 ジルコニウム合金 <sup>(注4)</sup> ASTM B351 Grade R60804 (JIS H4751 ZrTN 804D 相当)	Sn	1.20/1.70	Al	≤ 75	B	≤ 0.5	C	≤ 270	Co	≤ 20	Cu	≤ 100	Hf	≤ 25	Mg	≤ 50	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り		
		Fe	0.18/0.24	W	≤ 100	Cd	≤ 0.5	Co	≤ 20	Cu	≤ 50	Hf	≤ 100	Mg	≤ 20	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り				
		Cr	0.07/0.13	Cu	≤ 50	H	≤ 25	Hf	≤ 100	Mg	≤ 20	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り								
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mg	≤ 20	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□				
		O	□	N	≤ 80	Ti	≤ 50	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□			
		Zr	残り	Si	≤ 120	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□			
・制御棒案内 シンプル	Sn-Fe-Cr 系 ジルコニウム合金 <sup>(注4)</sup> ASTM B353 Grade R60804	Sn	1.20/1.70	Al	≤ 75	B	≤ 0.5	C	≤ 270	Co	≤ 20	Cu	≤ 100	Hf	≤ 25	Mg	≤ 50	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り		
		Fe	0.18/0.24	Cd	≤ 0.5	Co	≤ 20	Cu	≤ 50	Hf	≤ 100	Mg	≤ 20	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り						
		Cr	0.07/0.13	H	≤ 25	Hf	≤ 100	Mg	≤ 20	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□		
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		
		O	□	Ni	≤ 70	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		
		Zr	残り	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		
・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4)</sup> ASTM B351 Grade R60804	Sn	1.20/1.70	Al	≤ 75	B	≤ 0.5	C	≤ 270	Co	≤ 20	Cu	≤ 100	Hf	≤ 25	Mg	≤ 50	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り		
		Fe	0.18/0.24	W	≤ 100	Cd	≤ 0.5	Co	≤ 20	Cu	≤ 50	Hf	≤ 100	Mg	≤ 20	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り				
		Cr	0.07/0.13	Cu	≤ 50	H	≤ 25	Hf	≤ 100	Mg	≤ 20	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mg	≤ 20	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	
		O	□	N	≤ 80	Ti	≤ 50	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	
		Zr	残り	Si	≤ 120	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		
・カラー	Sn-Fe-Cr 系 ジルコニウム合金 <sup>(注4)</sup> ASTM B351 Grade R60804	Sn	1.20/1.70	Al	≤ 75	B	≤ 0.5	C	≤ 270	Co	≤ 20	Cu	≤ 100	Hf	≤ 25	Mg	≤ 50	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り		
		Fe	0.18/0.24	W	≤ 100	Cd	≤ 0.5	Co	≤ 20	Cu	≤ 50	Hf	≤ 100	Mg	≤ 20	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り				
		Cr	0.07/0.13	Cu	≤ 50	H	≤ 25	Hf	≤ 100	Mg	≤ 20	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mg	≤ 20	Mn	≤ 50	Mo	≤ 50	N	≤ 80	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
		O	□	N	≤ 80	Ti	≤ 50	Ni	≤ 70	Nb	≤ 50	N	≤ 80	Si	≤ 120	Ti	≤ 50	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	
		Zr	残り	Si	≤ 120	U	≤ 3.5	W	≤ 100	Zr	残り	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		

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。

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考																																										
<p style="text-align: center;">表 2.1-1 NDA 被覆管の融点<sup>[1]</sup></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>被 覆 管</th> <th>融 点</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4 被覆管</td> <td>1782</td> </tr> <tr> <td>NDA 被覆管</td> <td>1796</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位:℃</p> <p style="text-align: center;">表 2.1-2 NDA 被覆管の相変態温度<sup>[1]</sup></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>被 覆 管</th> <th>相変態開始温度</th> <th>相変態終了温度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4 被覆管</td> <td>820</td> <td>958</td> </tr> <tr> <td>NDA 被覆管</td> <td>802</td> <td>937</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位:℃</p> <p style="text-align: center;">表 2.4-1 NDA 被覆管の硬度<sup>[1]</sup></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>被 覆 管</th> <th>マイクロピッカース硬さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4 被覆管</td> <td>212~224</td> </tr> <tr> <td>NDA 被覆管</td> <td>211~217</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位:Hv(0.2)*</p> <p style="margin-top: 20px;">* 試験荷重 0.2kgf</p> <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	マイクロピッカース硬さ	ジルカロイ-4 被覆管	212~224	NDA 被覆管	211~217	<p style="text-align: center;">(添付資料8)</p> <p style="text-align: center;">表 5-1 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;">表 5-2 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;">表 5-3 NDA 被覆管の硬さの測定結果<sup>(20)</sup></p> <p style="text-align: right;">(単位:HV (ピッカース硬さ値))</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HV0.2<sup>(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: ピッカース硬さ試験力0.2kgf</p>	種類	溶融点測定結果	NDA	1,796	ジルカロイ-4 (参考)	1,782	種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$	NDA	802	937	ジルカロイ-4 (参考)	820	958	種類	平均値 (HV0.2 <sup>(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	マイクロピッカース硬さ																																											
ジルカロイ-4 被覆管	212~224																																											
NDA 被覆管	211~217																																											
種類	溶融点測定結果																																											
NDA	1,796																																											
ジルカロイ-4 (参考)	1,782																																											
種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$																																										
NDA	802	937																																										
ジルカロイ-4 (参考)	820	958																																										
種類	平均値 (HV0.2 <sup>(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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="222 367 1083 1711"> <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> <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>	<div data-bbox="1350 367 2329 1753"> <p>(添付資料8)</p> <p>図 5-1 NDA 被覆管の機械特性<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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）

設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）

備考

(添付資料8)

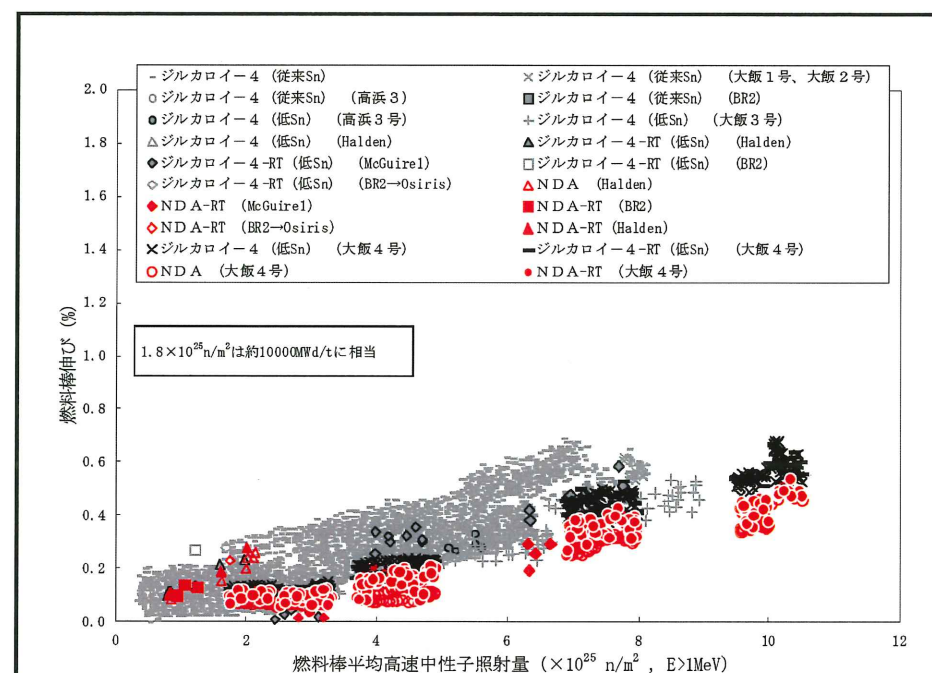


図 2.2-2 NDA 被覆管の照射成長と高速中性子積算照射量の関係<sup>[1]</sup>

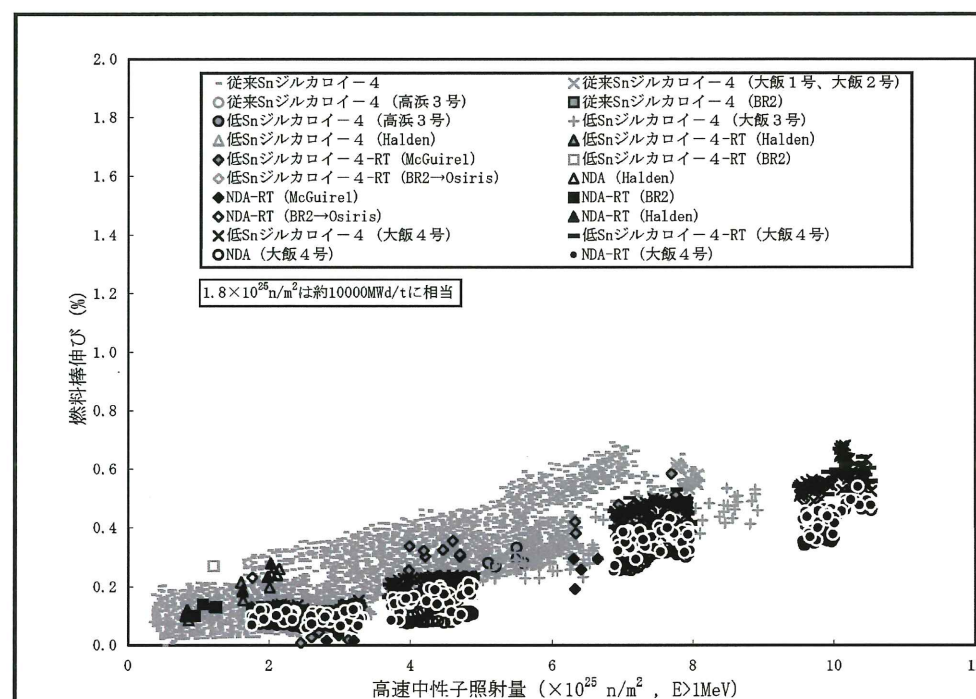


図 5-6 NDA 被覆管の照射成長<sup>(20)</sup>

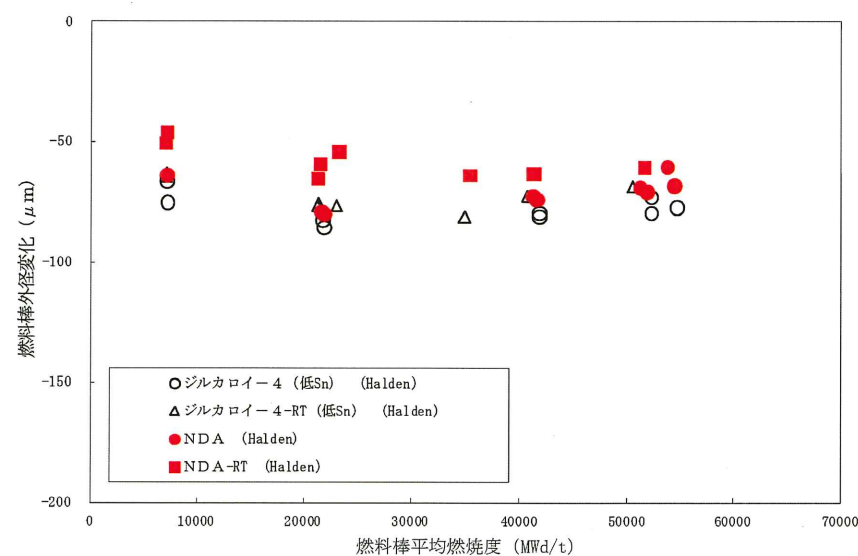


図 2.2-3 NDA 被覆管の燃料棒外径の照射による変化(Halden 炉照射)<sup>[1]</sup>

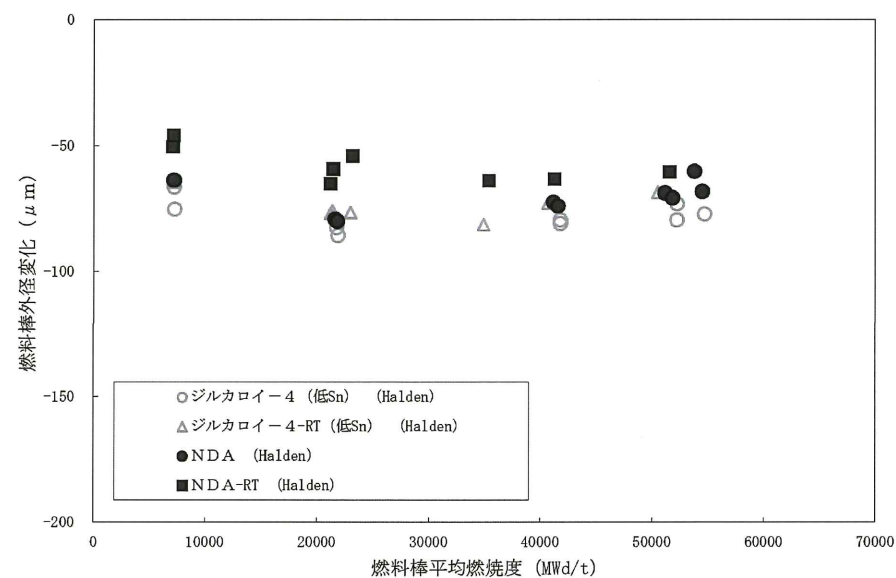


図 5-5 燃料棒外径変化（実機照射セグメント燃料棒）<sup>(20)</sup>

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

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）

設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）

備考

(添付資料8)

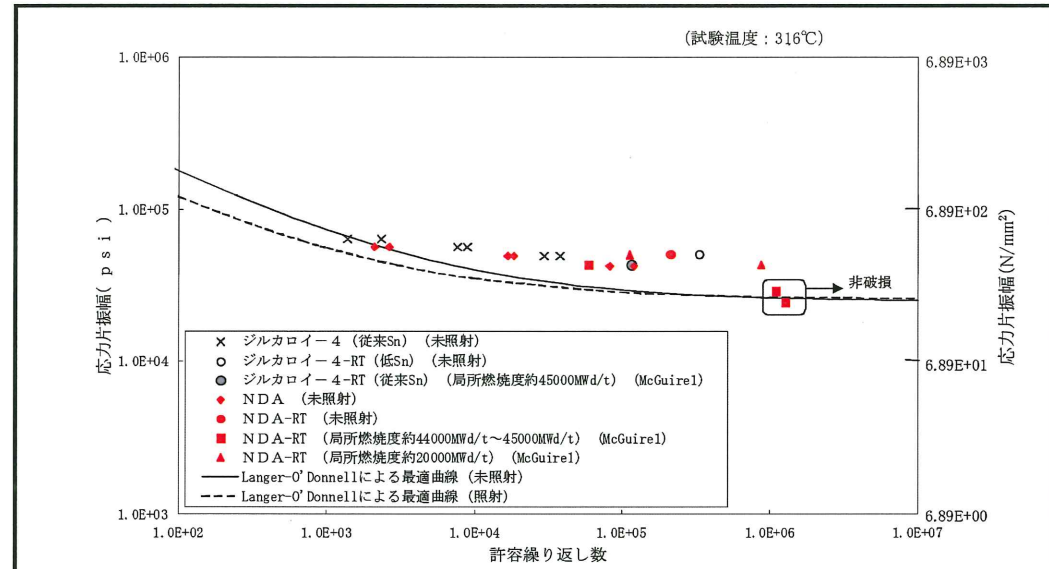


図 2.2-4 NDA 被覆管の疲労特性<sup>[1]</sup>

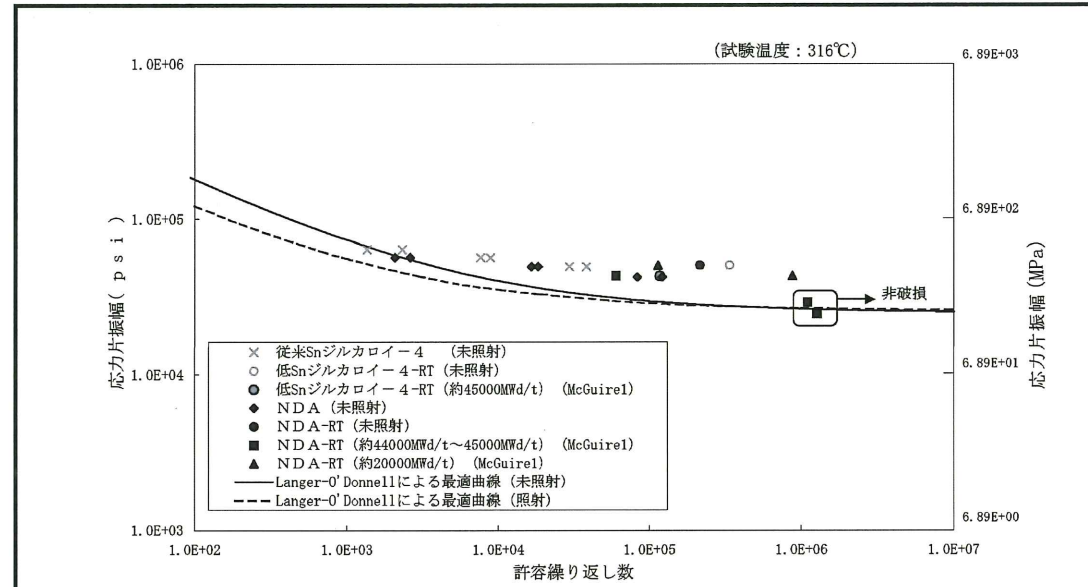


図 5-4 NDA 被覆管の疲労強度<sup>[20]</sup>

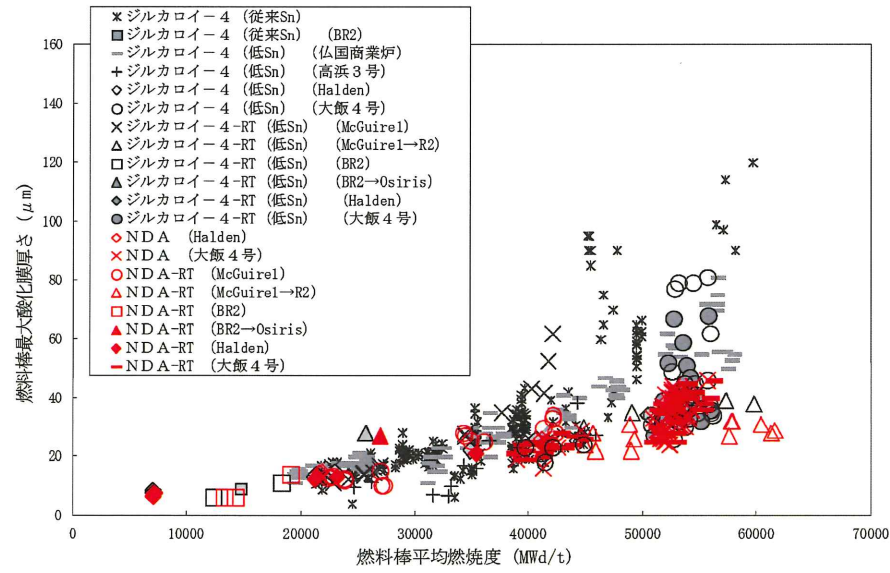


図 2.3-1 NDA 被覆管の炉内照射後の最大酸化膜厚さ<sup>[1]</sup>

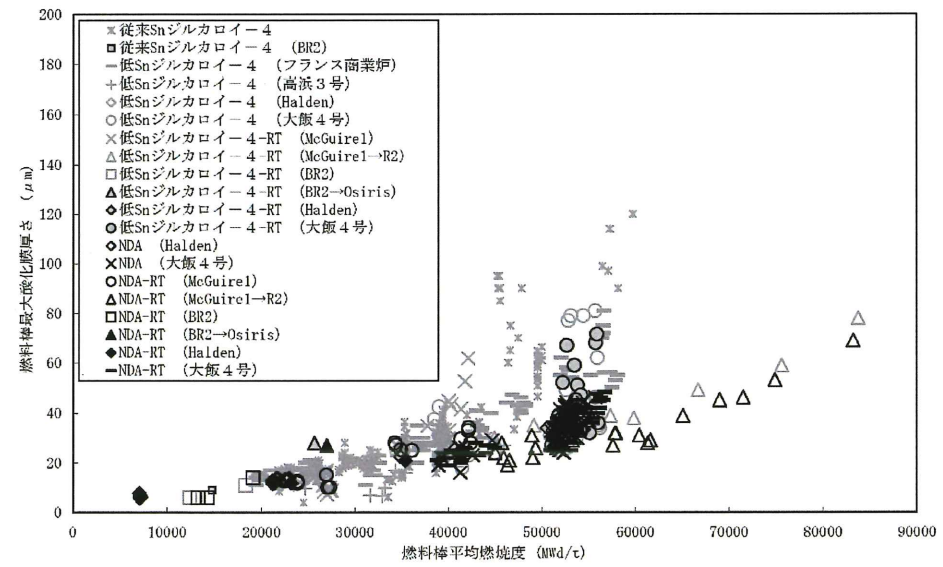


図 5-8 NDA 被覆管の炉内酸化膜厚さ<sup>[20]</sup>

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

表 1

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="181 380 1101 1104" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">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>	<p style="text-align: center;">(添付資料8)</p> <div data-bbox="1397 432 2190 1272" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">図 5-9 NDA 被覆管の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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="222 367 1098 1701" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>図 2.3-3 NDA 被覆管の機械的性質の水素吸収量依存性(未照射被覆管)<sup>[1]</sup></p> </div>	<div data-bbox="1409 388 2270 1785" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>(添付資料8)</p> <p>図 5-2 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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="184 367 1160 972" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">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>	<div data-bbox="1299 304 2270 972" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>(添付資料8)</p> <p style="text-align: center;">図 5-3 被覆管水素濃度と破断伸びの関係<sup>(9) (20)</sup></p> </div>	

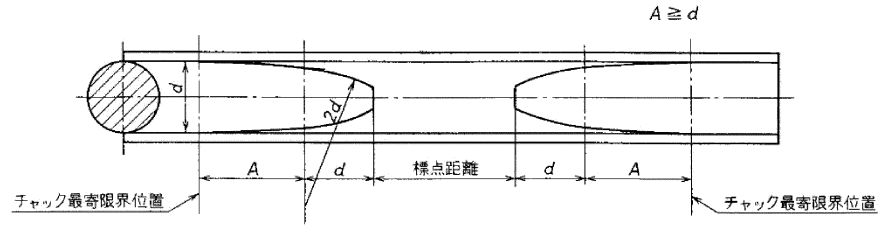
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="201 331 1133 1688"> <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="1270 302 1430 338">(添付資料8)</div> <div data-bbox="1329 373 2291 1738"> <p>図 5-11 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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="201 386 1101 976"> </div> <p data-bbox="409 982 893 1014">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> <div data-bbox="201 1073 1101 1606"> </div> <p data-bbox="368 1612 934 1644">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 data-bbox="1270 302 1427 333">(添付資料8)</p> <div data-bbox="1329 407 2249 976"> </div> <p data-bbox="1442 982 2125 1014">図 5-13 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> <div data-bbox="1329 1073 2249 1606"> </div> <p data-bbox="1478 1633 2080 1665">図 5-12 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（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機 B型燃料集合体）	備考
 <p>図 3.4-1 引張試験における心金の形状</p>	<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>



## 補足説明資料 6－3－2

特殊加工認可申請書との整合性に関する補足説明資料  
(高浜発電所第1，2号機)

# 目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 整理結果 .....	1

## 1. 概 要

本資料は、令和 2 年 4 月の「原子力利用における安全対策の強化のための核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等の一部を改正する法律」及び関連規則等（以下「改正法等」という。）の施行を踏まえ、本設工認申請対象の燃料被覆材について、特殊加工認可申請書（平成 23 年 5 月 19 日付け平成 23・02・08 原第 28 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

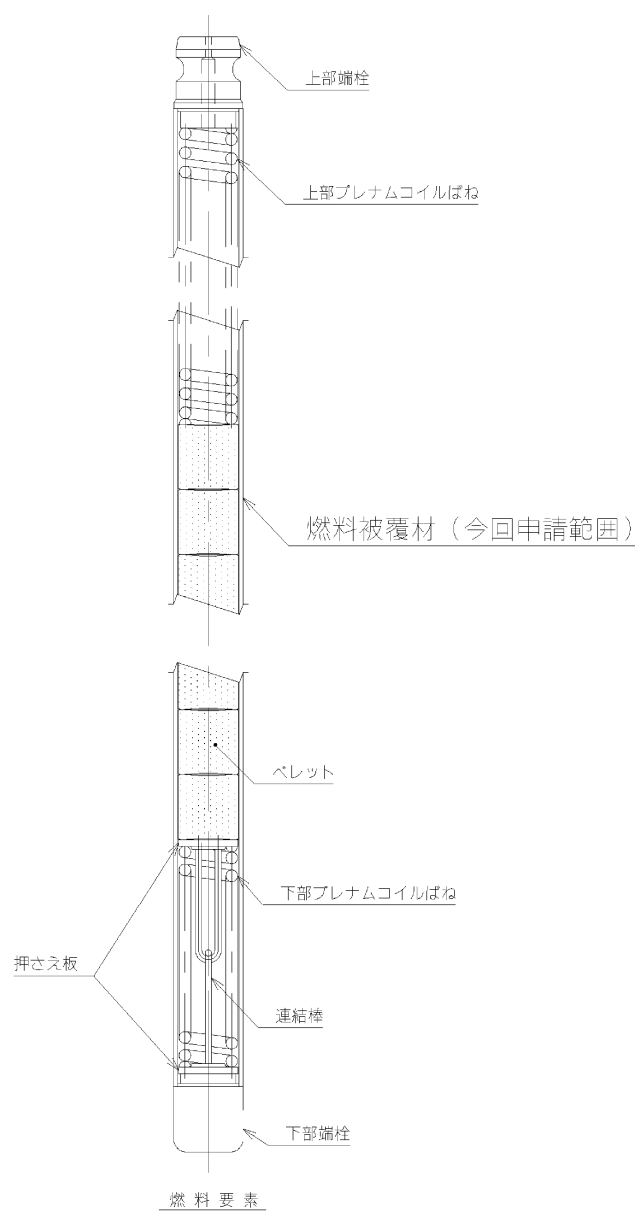
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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="498 1591 1130 1671" 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="text-align: center; padding: 2px;">高浜発電所 第1、2号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料 1	高浜発電所 第1、2号機		—	
特殊加工認可申請書	資料 1					
高浜発電所 第1、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（高浜発電所第 1， 2 号機 B 型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第 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、高浜発電所第 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（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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（高浜発電所第 1， 2 号機 B 型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第 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 data-bbox="501 1497 1145 1587" style="border: 1px solid black; 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;">高浜発電所 第 1、2 号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料 2	高浜発電所 第 1、2 号機		—	
特殊加工認可申請書	資料 2					
高浜発電所 第 1、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（高浜発電所第 1， 2 号機 B 型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第 1， 2 号機 B 型燃料集合体）	備考
目 次		
1. NDA 被覆管の概要 ..... 2-1 2. NDA 被覆管の特性 ..... 2-2 2.1 耐熱性 ..... 2-2 2.2 耐放射線性 ..... 2-2 2.2.1 機械的性質 ..... 2-2 2.2.2 照射成長 ..... 2-3 2.2.3 クリーブ特性 ..... 2-3 2.2.4 疲労特性 ..... 2-3 2.3 耐腐食性 ..... 2-4 2.3.1 酸化腐食による影響 ..... 2-4 2.3.2 水素吸収による影響 ..... 2-4 2.4 その他の性能 ..... 2-5 2.4.1 耐 PCI 性 ..... 2-5 2.4.2 耐摩耗性(フレッティング摩耗) ..... 2-5 2.4.3 内面酸化 ..... 2-5 2.4.4 ペレットとのボンディング ..... 2-5 2.4.5 高温時の特性 ..... 2-6 3. NDA 被覆管の品質及び検査方法等 ..... 2-7 3.1 品質 ..... 2-7 3.2 寸法許容差 ..... 2-7 3.3 製造方法 ..... 2-7 3.4 試験 ..... 2-7 3.5 検査 ..... 2-8 3.6 表示 ..... 2-8 4. 参考文献 ..... 2-9	—	



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

表 1

特認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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、ステンレス鋼等に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、機械的強度や耐腐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 H 4751 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、優れた耐腐食性を有しており、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%を中心にばらついていたが、耐腐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きている*1。</p> <p>しかし、燃料体最高燃焼率（以下、燃焼度と称する）を48,000MWd/tから55,000MWd/tへ引き上げた燃料体（ステップ2燃料と称する）を開発するために、さらに被覆管の耐腐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腐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。<sup>[1]</sup> NDAの化学成分と不純物に関する仕様をジルカロイ-4と比較して、表1.1-1及び表1.1-2に示す。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>*1 一般的に、前者を従来Snジルカロイ-4被覆管、後者を低Snジルカロイ-4被覆管と称している。</p>	<p>（添付資料8）</p> <p>2. 構成材料の概要</p> <p>燃料集合体の材料は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を含むプラントの使用条件の下で、燃料寿命中その健全性が維持されるよう選定している。主な構成部品の材料及び各材料の化学成分を表 2-1 に示す。また、燃料集合体主材料の機械的性質を表 2-2 に示す。</p> <p style="text-align: center;">表 2-1 燃料集合体主材料の化学成分</p> <p style="text-align: center;">（表省略）</p> <p>（注1）不純物の総中性子吸収をBoron量で換算したもの。  （注2）ガドリニア濃度10wt%を示す。  （注3）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」と称する。  （注4）以下、「ジルカロイ-4」と称する。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。  （注5）以下、「718合金」と称する。  （注6）以下、<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 40px; height: 15px;"></span> と称する。  （注7）以下、<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 40px; height: 15px;"></span> と称する。</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8「5. ジルコニウム基合金」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（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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℃であり、約800℃で<math>\alpha</math>相から<math>(\alpha + \beta)</math>相へ、また、約940℃で<math>(\alpha + \beta)</math>相から<math>\beta</math>相に変態し、その温度前後で腐食速度や機械的強度が変化する。融点及び相変態温度の測定結果を表2.1-1及び表2.1-2に示す。NDA被覆管の融点及び相変態温度はジルカロイ-4被覆管と同等である。<sup>[1]</sup> 異常な過渡変化時のNDA被覆管の最高温度は約 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 2px;">  </span>℃以下であり、いずれの相変態温度よりも低いので、溶融あるいは相変態は生じない。</u></p>	<p>(添付資料8)                      5. ジルコニウム基合金                      NDA被覆管は「実用発電用原子炉に使用する燃料体の技術基準に関する規則（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第7号）」（以下、「原子力規制委員会規則第7号」と称する。）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23・02・08原第28号）。  <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>                      なお、資料8中に示すジルコニウム基合金被覆管の照射挙動データには、ジルコニウム基合金とジルコニウム基合金-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> <p>5.1 耐熱性                      ジルカロイ-4の溶融点は1,782℃であり、結晶構造が820℃で<math>\alpha</math>相から<math>(\alpha + \beta)</math>相へ、また、958℃で<math>(\alpha + \beta)</math>相から<math>\beta</math>相に変態する<sup>(20)</sup>。  <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表5-1及び表5-2に示すように、NDAの溶融点は1,796℃、<math>\alpha</math>相から<math>(\alpha + \beta)</math>相及び<math>(\alpha + \beta)</math>相から<math>\beta</math>相への相変態温度はそれぞれ802℃及び937℃であり、いずれも被覆管の異常な過渡変化時の最高温度（約 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 2px;">  </span>℃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。従って、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。</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（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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、<math>\alpha</math>線、<math>\beta</math>線、<math>\gamma</math>線及び核分裂片の影響を受ける。<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。</u></p> <p><u>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、及び<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。</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片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 8)</p> <p>5.2 耐放射線性</p> <p><u>NDA被覆管は、二酸化ウラン燃料と接触して原子炉内に置かれるので、<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。</u></p> <p><u><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。</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等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>従って、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（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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。<sup>[1]</sup>ジルカロイ-4被覆管と同様、高速中性子の照射とともに比較的早い時期にNDA被覆管の引張強さ及び耐力は増加し、その後は照射量の増加に伴う大きな変化は見られない。</p> <p>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。</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。<sup>[2]</sup></p>	<p>(添付資料 8)</p> <p>5.2.1 機械的性質</p> <p>機械特性への影響因子としては、照射脆化と水素脆化が考えられる。①照射脆化は照射欠陥の蓄積（濃度）によるが、これは高速中性子束、被覆管温度及び時間に依存する。実機炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を図 5-1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>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<sup>(29)</sup>。</p> <p>(省略)</p> <p>(添付資料 7-1)</p> <p>3.3.5 被覆管の応力評価結果 (省略)</p> <p>(2) 応力評価結果 (省略)</p> <p>被覆管の材料であるジルコニウム基合金の耐力は、高速中性子照射によって増加するが、比較的短時間の照射で飽和する（資料 8「燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書」の5.2.1項参照）。</p> <p>②従って、燃料寿命初期は未照射材の耐力と、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。許容基準の求め方を図3-20に示す。</p> <p>(省略)</p>	<p>添付資料8「5.2.1 機械的性質」において、NDA被覆管の破断伸びについて照射量による著しい変化がないことを説明している。</p>

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

特認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2.2 照射成長</p> <p>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。</p> <p>海外試験炉及び国内外商業炉で照射された被覆管の照射成長測定結果を図2.2-2に示す。NDA被覆管の照射成長は、想定する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。<sup>[1]</sup></p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5.2.4 照射成長<sup>(注2)</sup></p> <p>照射成長の支配要因は、ジルカロイ中の稠密六方晶(<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。図5-6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>従って、ジルカロイ-4被覆管と比較してNDA被覆管の照射成長は、本申請の燃料集合体の使用範囲まで照射成長量が小さくなると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで(資料7-1「燃料体の強度に関する説明書」の3.2.2(3)項d.に示す。)設計評価に反映している。</p> <p>燃料棒の設計に当たっては、これらの耐放射線性に関する事項を考慮した上で、被覆管応力等が設計基準を満足するようにする。</p>	

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

特認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2.3 クリープ特性</p> <p>Halden炉において照射された燃料棒の外径測定結果を図2.2-3に示す。燃料棒の外径変化は、ペレットと被覆管が接触するまでは被覆管のクリープ変形により、接触後は燃料棒のスエリングにより支配される。そのため、低燃焼度域における燃料棒外径変化から、被覆管のクリープ特性を確認することができる。NDA被覆管を採用した燃料棒の照射による外径変化は、低Snジルカロイ-4被覆管を採用した燃料棒のそれと同等となっている。被覆管クリープは、転位（材料中の結晶格子のずれ）の移動によるものであるが、ジルコニウム中に固溶しているSn、Nbは転位を捕獲し、その動きを抑制する。NDA被覆管と低Snジルカロイ-4被覆管のクリープ特性が同等であることは、NDA被覆管中の固溶Sn及び固溶Nbによるクリープを抑制する効果が、低Snジルカロイ-4被覆管の固溶Snによるそれと同程度の効果であることを示している。<sup>[1]</sup></p> <p>2.2.4 疲労特性</p> <p>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-0' Donnellの疲労曲線と良く一致している。<sup>[1]</sup> 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-0' Donnellのそれと同等であると考えられる。</p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5.2.3 クリープ特性<sup>(注1)</sup></p> <p>燃料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図5-5に示すが、約20,000MWd/t程度までの低燃焼度域の外径減少より、NDA被覆管を採用した燃料棒の照射による外径変化は、低Snジルカロイ-4被覆管を採用した燃料棒のそれと同等となっている。被覆管クリープは、転位（材料に元々ある結晶格子のずれ）の移動によるものであるが、ジルコニウム中に固溶しているSn、Nbは転位を捕獲し、その動きを抑制する。NDA被覆管と低Snジルカロイ-4被覆管のクリープ特性が同等であることは、NDA被覆管中の固溶Sn及び固溶Nbによるクリープを抑制する効果が、低Snジルカロイ-4被覆管の固溶Snによるそれと同程度の効果であることを示している<sup>(20)</sup>。以上より、NDA被覆管のクリープ特性は低Snジルカロイ-4被覆管と同じとして計算モデルに組み込んで（資料7-1「燃料体の強度に関する説明書」の3.2.2(3)項d.に示す。）設計評価に反映している。</p> <p>5.2.2 疲労特性</p> <p>NDA被覆管の疲労試験結果と、ジルカロイに対するLanger and O' Donnellの疲労試験結果を図5-4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>	



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（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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>NDA被覆管は、原子炉運転中高温の一次冷却水と接していることから、以下の反応により酸化腐食が進行する。</p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p>一般に、高温高圧水とジルカロイ-4被覆管の反応による腐食は、保持時間が短い間は、時間の経過とともに腐食速度が徐々に小さくなっていき、黒色で緻密な酸化物を生じる。</p> <p>その後ある時間保持すると、腐食速度が比較的大きく一定になる現象が見られる。この腐食速度の変化は遷移と呼ばれ、腐食増量が約30mg/dm<sup>2</sup>（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。<sup>[3]</sup></p> <p>炉内で照射されたNDA被覆管の最大酸化膜厚さ測定結果を図2.3-1に示す。被覆管の酸化膜厚さは冷却材条件や出力履歴により影響を受けることから、全データを直接比較することはできないが、従来Snジルカロイ-4被覆管では燃料棒平均燃焼度約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腐食性が改善されている。<sup>[1]</sup></p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5.3 耐食性</p> <p>NDA被覆管が1次冷却材と接触すると、ジルカロイ-4被覆管と同様に、</p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p>の反応により酸化腐食が進むとともに、発生した水素の一部を吸収する。</p> <p>実機では放射線照射下で1次冷却材の放射線分解により発生する酸素により、ジルカロイの腐食が放射線照射のない環境に比べて加速される可能性があるが、PWRでは1次冷却材に水素注入を行い酸素の発生を抑制している。実機の腐食は以下に示すとおりである。</p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>ジルカロイ被覆管外面には、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）の時間変化を図5-7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。炉内での被覆管酸化膜厚さを図5-8に示す。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>図5-8から分かるように、ジルカロイ-4被覆管の炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されている。また、NDA被覆管については、腐食速度の低減が認められる。</p> <p>従って、NDA被覆管の腐食挙動はジルカロイ-4被覆管と同様であり、腐食が急激に増加する領域でも耐食性の向上が維持されることから、本申請の燃料集合体の使用範囲までNDA被覆管の耐食性の向上が維持されると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（資料7-1「燃料体の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>

表 1

特認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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。<sup>[1]</sup></p> <p>水素吸収が過度に大きくなり固溶限以上に吸収された水素は、水素化物として析出し被覆管の延性の低下をもたらす。NDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、NDA被覆管の水素固溶限は、ジルカロイ-4被覆管と同等であると考えられる。</p> <p>NDA被覆管の耐腐食性は、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。<sup>[4]</sup></p>	<p>(添付資料 8)</p> <p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>ジルコニウムと水との反応で発生した水素の一部は、被覆管に吸収される。被覆管の炉内での水素吸収量と酸化膜厚さの関係を図 5-9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）の関係を図 5-10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。</p> <p>従って、NDA被覆管の水素吸収率は腐食により発生した水素の一部が酸化膜厚さに応じてある割合で被覆管に取り込まれること、及びその割合はNDA被覆管とジルカロイ-4被覆管で同等であることから、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（資料7-1「燃料体の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。実機炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を図 5-1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に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<math>27\sim 32 \times 10^{25}n/m^2</math> (<math>E&gt;1MeV</math>)まで十分な延性が確保されているとの報告例もある<sup>(29)</sup>。</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を図 5-2に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、図 5-3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被覆管の応力及び歪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（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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。<sup>[1]</sup></u></p> <p><u>SCC破損しきい応力は耐力に依存するが、<sup>[5]</sup> 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性は維持されると考えられる。</u></p> <p>2.4.2 耐摩耗性（フレットング摩耗）</p> <p><u>フレットング摩耗は、接触面の周期的相対振動により起こる損傷である。燃料棒及び支持格子の材料特性のうち、フレットング摩耗に最も影響するのは材料の硬度であるが、表2.4-1に示すようにジルカロイ-4被覆管とNDA被覆管の硬度は同等であり、NDA被覆管のフレットング摩耗はジルカロイ-4被覆管と同程度と考えられる。</u></p> <p>* PCI : Pellet Cladding Interaction（ペレットと被覆管の相互作用）</p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5.4 その他の性能</p> <p>5.4.1 耐PCI性</p> <p><u>被覆管は、腐食性FPガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用(PCMI)を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ(SCC)による破損(PCI破損)を起こす。このPCI破損におけるSCCは、ジルカロイ中の稠密六方晶（<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性を図 5-11に破損しきい値とともに示す。NDA被覆管の耐PCI性、すなわちSCC破損特性はジルカロイ-4被覆管と同等以上であり、ジルカロイ-4被覆管で使用されている現行のPCI破損しきい値が適用できる<sup>(20)</sup>。以上より、NDA被覆管のPCI破損しきい値はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</u></p> <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表 5-3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8図5-11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（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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。<sup>[6]</sup> 燃料棒平均燃焼度約69,000Mwd/tまで照射されたジルカロイ-4被覆管内面酸化は小さく、特に燃料棒の健全性に影響を及ぼしていないことから、<sup>[7]</sup> 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。<sup>[8]</sup> NDA被覆管はジルカロイ-4被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、NDA被覆管のペレットとのボンディングはジルカロイ-4被覆管のそれと同等となる。燃料棒平均燃焼度約69,000Mwd/tまで照射されたジルカロイ-4被覆管のボンディングは特に燃料棒の健全性に影響を及ぼしていないことから、<sup>[7]</sup> 想定する照射量の範囲において、NDA被覆管のボンディングの健全性への影響は小さいと考えられる。</u></p>	<p>(添付資料 8)</p> <p>3.3.1 二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応  <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カロイ中に拡散し、被覆管内面酸化膜（ZrO<sub>2</sub>）が形成される。さらに、両者が強く接触するようになるとジルコニウム酸化層へのウランの拡散により、ジルコニウム酸化層は（Zr，U）O<sub>2</sub>固溶体となり、これがボンディング層を形成して、強固なペレット-被覆管の固着の原因となる<sup>(10)</sup>。これらは、被覆管の腐食及びPCI<sup>(注1)</sup>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℃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>(2)</sup>。通常運転中においてペレットと被覆管及び燃料被覆材端栓の接触面の温度が長期間にわたって500℃を超えないことから、反応は小さいと考えられる。</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<sup>(注2)</sup>とNDA被覆管とで、被覆管内面酸化膜の状態に差は認められていない<sup>(11)</sup>。また、燃料棒平均燃焼度約69,000Mwd/tまで照射されたジルカロイ-4被覆管において、過度の内面酸化膜は観察されていない<sup>(12)</sup>。このことから、想定する照射量の範囲において、NDA被覆管の内面酸化は燃料棒の健全性を確保する上で影響は小さい。</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 ガドリニア混合二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応  <u>ガドリニア混合二酸化ウランは、4.1項で述べたように置換型固溶体を形成して安定である。ガドリニア混合二酸化ウラン燃料棒について、原子燃料工業製燃料に対して実施した照射試験結果では、二酸化ウラン燃料棒に比べて被覆管内面酸化の増加は観察されていない<sup>(26)</sup>。従って、ガドリニア混合二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応は、二酸化ウランペレットとNDA被覆管が安定に共存する場合と大差はない。従って、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（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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。<sup>[1]</sup></u></p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5.4.3 高温特性</p> <p><u>被覆管の相変態（<math>\alpha</math>相から<math>\beta</math>相に変化）が生じるような高温時においては、NDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管同様、約98wt%のジルコニウムを主成分としているため、それらの主要な特性はジルカロイ-4と同等である。冷却材喪失事故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と水反応の試験結果をそれぞれ図 5-12及び図 5-13に示す。図 5-12及び図 5-13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（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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 H 4751 ZrTN804D SR(1998)に従うこととしている。</p> <p>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、著しくわん曲していないこと。</li> <li>b) 被覆管の表面に割れ、きず等で有害なものがないこと。</li> <li>c) 被覆管の表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</li> <li>d) 被覆管の表面粗さの程度は、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、3.4b)又はこれと同等の方法によって引張試験を行った場合、耐力が設計上要求する以下の値を満足していること。引張強さと伸びが以下の値を満足していること。</li> </ul> <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>引張強さ</td><td>380MPa</td></tr> <tr><td>耐力</td><td>310MPa</td></tr> <tr><td>伸び</td><td>13 %</td></tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> <li>g) 被覆管は、3.4c)又はこれと同等の方法によって 336 時間で 38mg/dm<sup>2</sup>以下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、3.4d)又はこれと同等の方法によって水素化物方位試験を行った場合、水素化物方位係数 Fn 値は 0.45 を超えてはならない。</li> <li>i) 被覆管は、3.4e)又はこれと同等の方法によって超音波探傷試験を行った場合、対比試験片の人工傷からの信号と同等、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> <p style="text-align: center;">2-7</p>	引張強さ	380MPa	耐力	310MPa	伸び	13 %	—	<p>左記記載のうち品質については、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項の記載事項と同じ内容であり、本設工認においては基本設計方針にて、それら要求事項に従う旨を記載している。また、検査方法等については、本設工認における工事の方法にて、全施設を網羅するように工事の手順、使用前事業者検査の方法等を記載している。以上のことから、当該記載については比較対象外。</p>
引張強さ	380MPa							
耐力	310MPa							
伸び	13 %							

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（高浜発電所第 1， 2 号機 B 型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第 1， 2 号機 B 型燃料集合体）	備考
<p>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。</p> <p>b) 引張試験は、JIS Z 2241(1998)による。この場合の試験片は、JIS Z 2201(1998)の 11 号試験片とする。ただし、荷重を加える速度は、耐力までは歪増加率 0.003～0.007mm/mm・min、耐力以降破断まではクロスヘッド速度で約 0.05mm/mm・min まで増加することができる。引張試験に使用する心金の形状は図 3.4-1 とする。</p> <p>c) 腐食試験は、JIS H 4751(1998)の附属書 2 による。</p> <p>d) 水素化物方位試験は、JIS H 4751(1998)の附属書 3 による。</p> <p>e) 超音波探傷試験は、JIS H 4751(1998)の附属書 4 による。</p> <p>3.5 検査</p> <p>検査は、次による。</p> <p>a) 被覆管は、外観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。</p> <p>酸素、水素及び窒素以外の元素については、同一インゴット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>—</p>	<p>前頁と同じ。</p>

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

特認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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 7、平成 21 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.NOGITA,K.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（高浜発電所第 1， 2 号機 B 型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第 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" data-bbox="231 464 1160 726"> <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 rowspan="3">NDA 被覆管</td> <td>0.90</td> <td>0.24</td> <td>0.13</td> <td>—</td> <td>0.08</td> <td>0.007</td> <td rowspan="3">[ ]</td> <td rowspan="3">残 部</td> </tr> <tr> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>—</td> <td>~</td> <td>~</td> </tr> <tr> <td>1.15</td> <td>0.30</td> <td>0.19</td> <td>—</td> <td>0.14</td> <td>0.014</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">(参考)ジルカロイ-4 被覆管<sup>1)</sup></td> <td>1.20</td> <td>0.18</td> <td>0.07</td> <td>0.28</td> <td>—</td> <td>—</td> <td rowspan="3">[ ]</td> <td rowspan="3">残 部</td> </tr> <tr> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>~</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>1.70</td> <td>0.24</td> <td>0.13</td> <td>0.37</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> </tbody> </table> <p>1) JIS H4751 Zr TN804D SR(1998) <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" data-bbox="231 947 1160 1136"> <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>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</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> <tr> <td></td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" data-bbox="231 1171 1160 1398"> <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>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</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> <tr> <td></td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> <td>以下</td> </tr> </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	0.24	0.13	—	0.08	0.007	[ ]	残 部	~	~	~	—	~	~	1.15	0.30	0.19	—	0.14	0.014	(参考)ジルカロイ-4 被覆管 <sup>1)</sup>	1.20	0.18	0.07	0.28	—	—	[ ]	残 部	~	~	~	~	—	—	1.70	0.24	0.13	0.37	—	—	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		以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	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		以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	<p style="text-align: center;">(添付資料8)</p> <p style="text-align: center;">表 2-1 燃料集合体主材料の化学成分（続き）</p> <table border="1" data-bbox="1332 464 2347 1371"> <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>Co</th> <th>Cu</th> <th>Hf</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Mo</th> <th>Ni</th> <th>Ti</th> <th>Zr</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 (注1)</td> <td>Sn</td> <td>0.90/1.15</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.24/0.30</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.13/0.19</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.08/0.14</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>0.007/0.014</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残り</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> <td>≦</td> <td>[ ]</td> <td>[ ]</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">・燃料被覆材 端栓</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr 系ジルコニウム合金 (注4) ASTM B351 Grade R60804 (JIS H4751 ZrTN 804D 相当)</td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al</td> <td>≦</td> <td>75</td> <td>B</td> <td>≦</td> <td>0.5</td> <td>C</td> <td>≦</td> <td>270</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>W</td> <td>≦</td> <td>100</td> <td>Cd</td> <td>≦</td> <td>0.5</td> <td>Co</td> <td>≦</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>Cu</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>H</td> <td>≦</td> <td>25</td> <td>Hf</td> <td>≦</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mg</td> <td>≦</td> <td>20</td> <td>Mn</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>Mo</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>[ ]</td> <td>N</td> <td>≦</td> <td>80</td> <td>Ti</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>Ni</td> <td>≦</td> <td>70</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残り</td> <td>Si</td> <td>≦</td> <td>120</td> <td>U</td> <td>≦</td> <td>3.5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="6">・制御棒案内 シンプル</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr 系ジルコニウム合金 (注4)</td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al</td> <td>≦</td> <td>75</td> <td>B</td> <td>≦</td> <td>0.5</td> <td>C</td> <td>≦</td> <td>270</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>Cd</td> <td>≦</td> <td>0.5</td> <td>Co</td> <td>≦</td> <td>20</td> <td>Cu</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>H</td> <td>≦</td> <td>25</td> <td>Hf</td> <td>≦</td> <td>100</td> <td>Mg</td> <td>≦</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mn</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>Mo</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>N</td> <td>≦</td> <td>80</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>[ ]</td> <td>Ni</td> <td>≦</td> <td>70</td> <td>Si</td> <td>≦</td> <td>120</td> <td>Ti</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残り</td> <td>U</td> <td>≦</td> <td>3.5</td> <td>W</td> <td>≦</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="6">・炉内計装用 案内シンプル</td> <td rowspan="6">ASTM B353 Grade R60804</td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al</td> <td>≦</td> <td>75</td> <td>B</td> <td>≦</td> <td>0.5</td> <td>C</td> <td>≦</td> <td>270</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>W</td> <td>≦</td> <td>100</td> <td>Cd</td> <td>≦</td> <td>0.5</td> <td>Co</td> <td>≦</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>Cu</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>H</td> <td>≦</td> <td>25</td> <td>Hf</td> <td>≦</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mn</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>Mo</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>N</td> <td>≦</td> <td>80</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>[ ]</td> <td>Ni</td> <td>≦</td> <td>70</td> <td>Si</td> <td>≦</td> <td>120</td> <td>Ti</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残り</td> <td>U</td> <td>≦</td> <td>3.5</td> <td>W</td> <td>≦</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="6">・制御棒案内 シンプル用 下部端栓</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr 系ジルコニウム合金 (注4)</td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al</td> <td>≦</td> <td>75</td> <td>B</td> <td>≦</td> <td>0.5</td> <td>C</td> <td>≦</td> <td>270</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>W</td> <td>≦</td> <td>100</td> <td>Cd</td> <td>≦</td> <td>0.5</td> <td>Co</td> <td>≦</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>Cu</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>H</td> <td>≦</td> <td>25</td> <td>Hf</td> <td>≦</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mg</td> <td>≦</td> <td>20</td> <td>Mn</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>Mo</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>[ ]</td> <td>N</td> <td>≦</td> <td>80</td> <td>Ti</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>Ni</td> <td>≦</td> <td>70</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残り</td> <td>Si</td> <td>≦</td> <td>120</td> <td>U</td> <td>≦</td> <td>3.5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="6">・カラー</td> <td rowspan="6">ASTM B351 Grade R60804</td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al</td> <td>≦</td> <td>75</td> <td>B</td> <td>≦</td> <td>0.5</td> <td>C</td> <td>≦</td> <td>270</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>W</td> <td>≦</td> <td>100</td> <td>Cd</td> <td>≦</td> <td>0.5</td> <td>Co</td> <td>≦</td> <td>20</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>Cu</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>H</td> <td>≦</td> <td>25</td> <td>Hf</td> <td>≦</td> <td>100</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mg</td> <td>≦</td> <td>20</td> <td>Mn</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>Mo</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>[ ]</td> <td>N</td> <td>≦</td> <td>80</td> <td>Ti</td> <td>≦</td> <td>50</td> <td>Ni</td> <td>≦</td> <td>70</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残り</td> <td>Si</td> <td>≦</td> <td>120</td> <td>U</td> <td>≦</td> <td>3.5</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	Co	Cu	Hf	Mg	Mn	Mo	Ni	Ti	Zr	・燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム合金 (注1)	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	残り	[ ]	≦	[ ]	[ ]	≦	[ ]	[ ]	≦	[ ]	[ ]	≦	[ ]	[ ]	・燃料被覆材 端栓	Sn-Fe-Cr 系ジルコニウム合金 (注4) ASTM B351 Grade R60804 (JIS H4751 ZrTN 804D 相当)	Sn	1.20/1.70	Al	≦	75	B	≦	0.5	C	≦	270				Fe	0.18/0.24	W	≦	100	Cd	≦	0.5	Co	≦	20				Cr	0.07/0.13	Cu	≦	50	H	≦	25	Hf	≦	100				Fe+Cr	0.28/0.37	Mg	≦	20	Mn	≦	50	Mo	≦	50				O	[ ]	N	≦	80	Ti	≦	50	Ni	≦	70				Zr	残り	Si	≦	120	U	≦	3.5							・制御棒案内 シンプル	Sn-Fe-Cr 系ジルコニウム合金 (注4)	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	残り	U	≦	3.5	W	≦	100							・炉内計装用 案内シンプル	ASTM B353 Grade R60804	Sn	1.20/1.70	Al	≦	75	B	≦	0.5	C	≦	270				Fe	0.18/0.24	W	≦	100	Cd	≦	0.5	Co	≦	20				Cr	0.07/0.13	Cu	≦	50	H	≦	25	Hf	≦	100				Fe+Cr	0.28/0.37	Mn	≦	50	Mo	≦	50	N	≦	80				O	[ ]	Ni	≦	70	Si	≦	120	Ti	≦	50				Zr	残り	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 (注4)	Sn	1.20/1.70	Al	≦	75	B	≦	0.5	C	≦	270				Fe	0.18/0.24	W	≦	100	Cd	≦	0.5	Co	≦	20				Cr	0.07/0.13	Cu	≦	50	H	≦	25	Hf	≦	100				Fe+Cr	0.28/0.37	Mg	≦	20	Mn	≦	50	Mo	≦	50				O	[ ]	N	≦	80	Ti	≦	50	Ni	≦	70				Zr	残り	Si	≦	120	U	≦	3.5							・カラー	ASTM B351 Grade R60804	Sn	1.20/1.70	Al	≦	75	B	≦	0.5	C	≦	270				Fe	0.18/0.24	W	≦	100	Cd	≦	0.5	Co	≦	20				Cr	0.07/0.13	Cu	≦	50	H	≦	25	Hf	≦	100				Fe+Cr	0.28/0.37	Mg	≦	20	Mn	≦	50	Mo	≦	50				O	[ ]	N	≦	80	Ti	≦	50	Ni	≦	70				Zr	残り	Si	≦	120	U	≦	3.5							<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	0.24	0.13	—	0.08	0.007	[ ]	残 部																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	~	~	~	—	~	~																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	1.15	0.30	0.19	—	0.14	0.014																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
(参考)ジルカロイ-4 被覆管 <sup>1)</sup>	1.20	0.18	0.07	0.28	—	—	[ ]	残 部																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	~	~	~	~	—	—																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
	1.70	0.24	0.13	0.37	—	—																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
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																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
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																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
構成部品	材料の種類	主成分 (wt%)		不 純 物 (ppm)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
		Sn	Fe	Al	B	C	Co	Cu	Hf	Mg	Mn	Mo	Ni	Ti	Zr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
・燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム合金 (注1)	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	残り	[ ]	≦	[ ]	[ ]	≦	[ ]	[ ]	≦	[ ]	[ ]	≦	[ ]	[ ]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
・燃料被覆材 端栓	Sn-Fe-Cr 系ジルコニウム合金 (注4) ASTM B351 Grade R60804 (JIS H4751 ZrTN 804D 相当)	Sn	1.20/1.70	Al	≦	75	B	≦	0.5	C	≦	270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Fe	0.18/0.24	W	≦	100	Cd	≦	0.5	Co	≦	20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Cr	0.07/0.13	Cu	≦	50	H	≦	25	Hf	≦	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mg	≦	20	Mn	≦	50	Mo	≦	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		O	[ ]	N	≦	80	Ti	≦	50	Ni	≦	70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Zr	残り	Si	≦	120	U	≦	3.5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
・制御棒案内 シンプル	Sn-Fe-Cr 系ジルコニウム合金 (注4)	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	残り	U	≦	3.5	W	≦	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
・炉内計装用 案内シンプル	ASTM B353 Grade R60804	Sn	1.20/1.70	Al	≦	75	B	≦	0.5	C	≦	270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Fe	0.18/0.24	W	≦	100	Cd	≦	0.5	Co	≦	20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Cr	0.07/0.13	Cu	≦	50	H	≦	25	Hf	≦	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mn	≦	50	Mo	≦	50	N	≦	80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		O	[ ]	Ni	≦	70	Si	≦	120	Ti	≦	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Zr	残り	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 (注4)	Sn	1.20/1.70	Al	≦	75	B	≦	0.5	C	≦	270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Fe	0.18/0.24	W	≦	100	Cd	≦	0.5	Co	≦	20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Cr	0.07/0.13	Cu	≦	50	H	≦	25	Hf	≦	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mg	≦	20	Mn	≦	50	Mo	≦	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		O	[ ]	N	≦	80	Ti	≦	50	Ni	≦	70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Zr	残り	Si	≦	120	U	≦	3.5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
・カラー	ASTM B351 Grade R60804	Sn	1.20/1.70	Al	≦	75	B	≦	0.5	C	≦	270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Fe	0.18/0.24	W	≦	100	Cd	≦	0.5	Co	≦	20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Cr	0.07/0.13	Cu	≦	50	H	≦	25	Hf	≦	100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mg	≦	20	Mn	≦	50	Mo	≦	50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		O	[ ]	N	≦	80	Ti	≦	50	Ni	≦	70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Zr	残り	Si	≦	120	U	≦	3.5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

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（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第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>マイクロピッカース硬さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4 被覆管</td> <td>212～224</td> </tr> <tr> <td>NDA 被覆管</td> <td>211～217</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位:Hv(0.2)*</p> <p>* 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	マイクロピッカース硬さ	ジルカロイ-4 被覆管	212～224	NDA 被覆管	211～217	<p style="text-align: center;">(添付資料8)</p> <p style="text-align: center;">表 5-1 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;">表 5-2 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;">表 5-3 NDA 被覆管の硬さの測定結果<sup>(20)</sup></p> <p style="text-align: right;">(単位:HV (ピッカース硬さ値))</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HV0.2<sup>(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 : ピッカース硬さ試験力0.2kgf</p>	種類	溶融点測定結果	NDA	1,796	ジルカロイ-4 (参考)	1,782	種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$	NDA	802	937	ジルカロイ-4 (参考)	820	958	種類	平均値 (HV0.2 <sup>(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	マイクロピッカース硬さ																																											
ジルカロイ-4 被覆管	212～224																																											
NDA 被覆管	211～217																																											
種類	溶融点測定結果																																											
NDA	1,796																																											
ジルカロイ-4 (参考)	1,782																																											
種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$																																										
NDA	802	937																																										
ジルカロイ-4 (参考)	820	958																																										
種類	平均値 (HV0.2 <sup>(注1)</sup> )																																											
NDA	215																																											
ジルカロイ-4 (参考)	218																																											





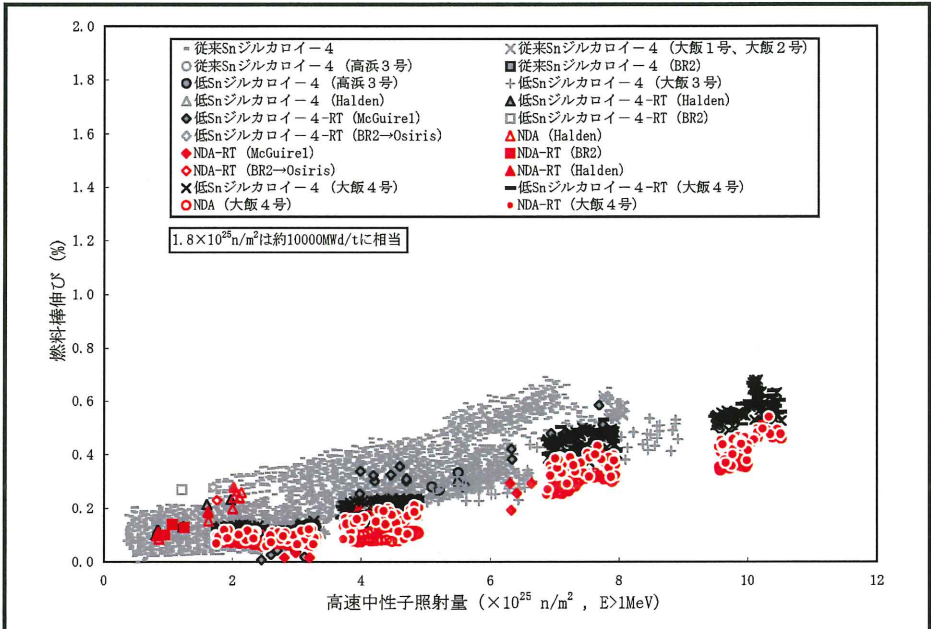
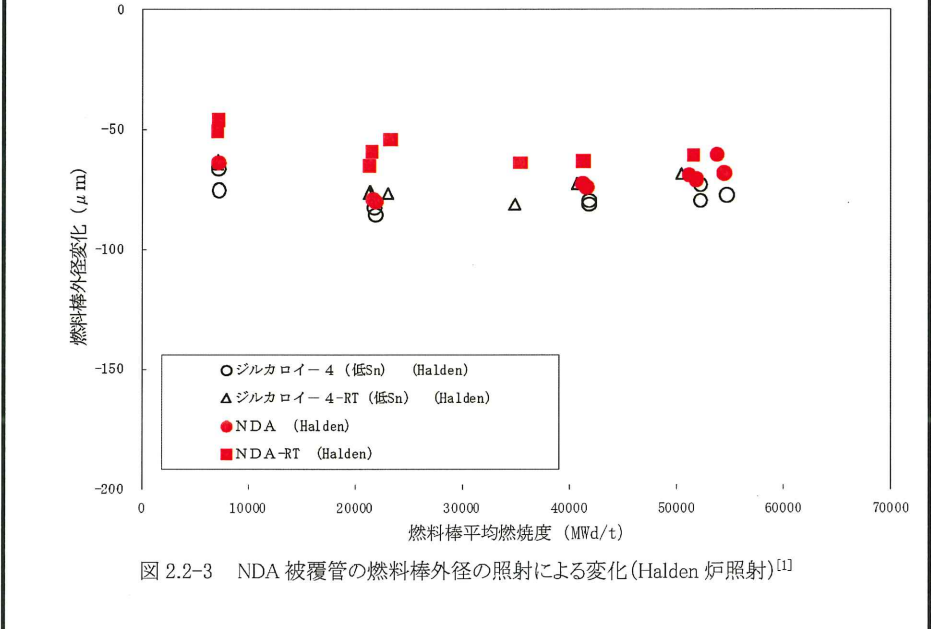
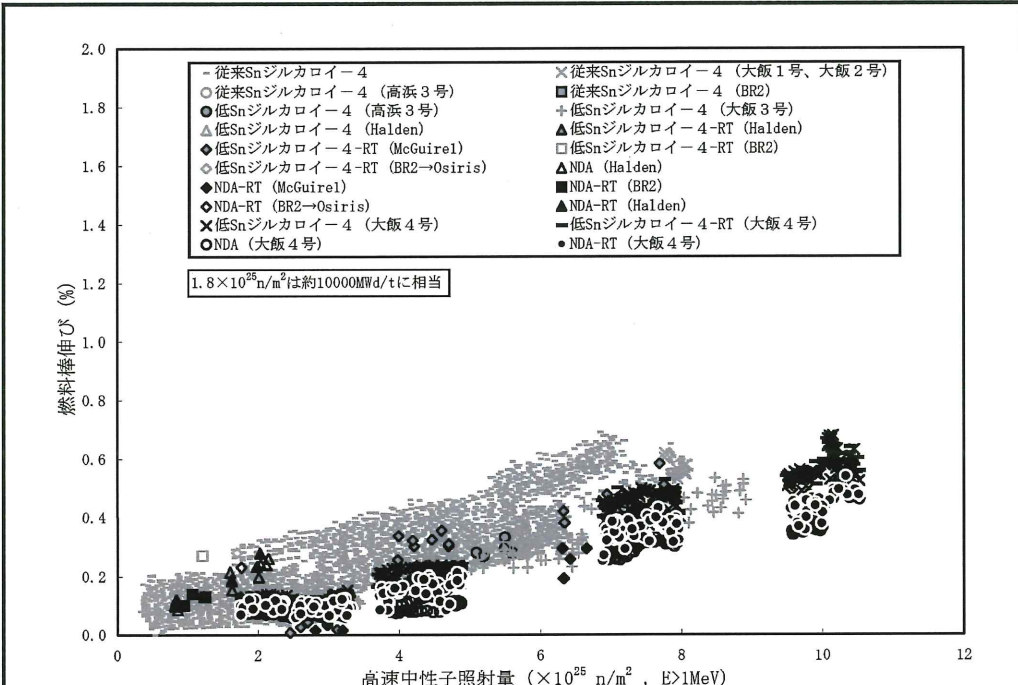
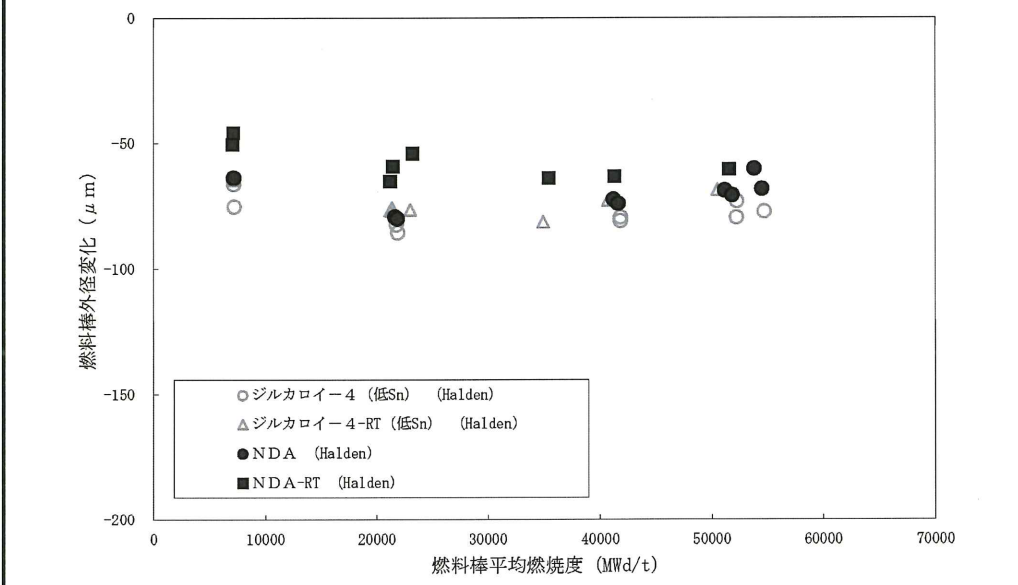
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所

表 1

特認（高浜発電所第1, 2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第1, 2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="281 378 1083 1648"> <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> <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>	<div data-bbox="1276 304 1439 346">(添付資料8)</div> <div data-bbox="1365 378 2329 1753"> <p>図 5-1 NDA 被覆管の機械特性<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（高浜発電所第1, 2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第1, 2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>(添付資料8)</p>  <p>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>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>図 5-6 NDA 被覆管の照射成長<sup>[20]</sup></p>  <p>図 5-5 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

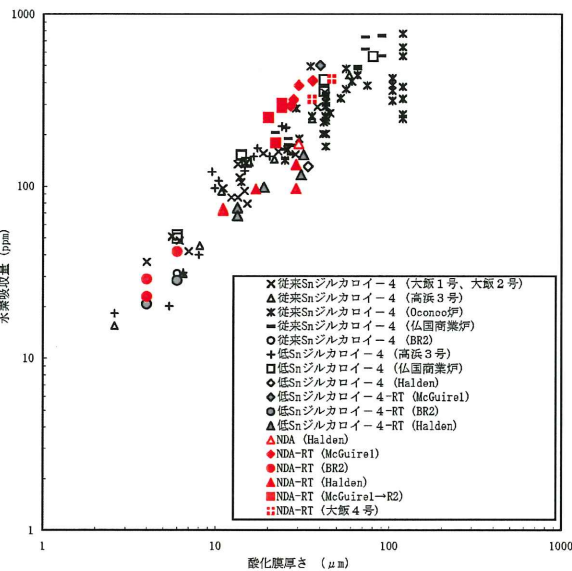
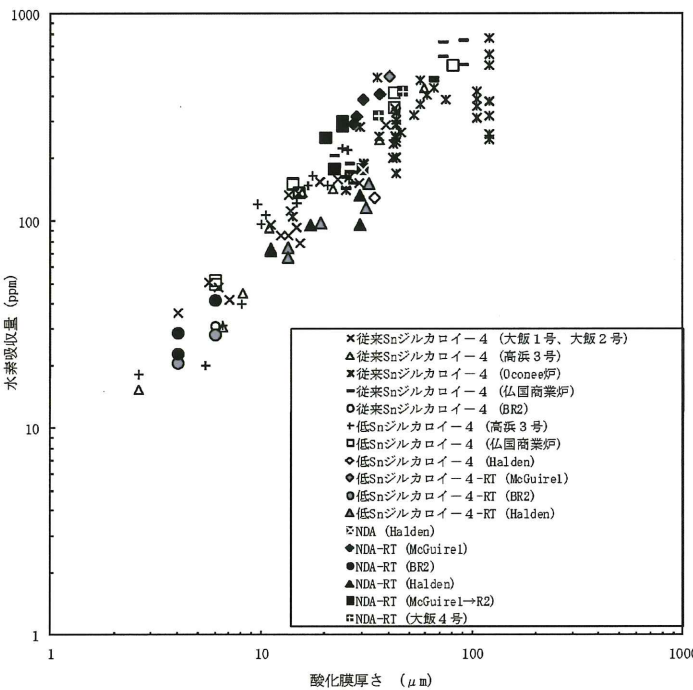
表 1

特認 (高浜発電所第 1, 2 号機 B 型燃料集合体)	設工認 (高浜発電所第 1, 2 号機 B 型燃料集合体)	備考
<div data-bbox="231 352 1151 913" data-label="Figure"> <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="231 1024 1151 1522" data-label="Figure"> <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="1279 304 1439 340" data-label="Text"> <p>(添付資料8)</p> </div> <div data-bbox="1320 388 2329 934" data-label="Figure"> <p>(試験温度: 316°C)</p> <p>図 5-4 NDA 被覆管の疲労強度<sup>[20]</sup></p> </div> <div data-bbox="1320 1018 2329 1585" data-label="Figure"> <p>図 5-8 NDA 被覆管の炉内酸化膜厚さ<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（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="210 317 1130 1041" style="border: 1px solid black; padding: 10px;">  <p data-bbox="365 926 982 951">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>	<p data-bbox="1270 300 1433 331">(添付資料8)</p> <div data-bbox="1397 428 2193 1272" style="border: 1px solid black; padding: 10px;">  <p data-bbox="1472 1171 2119 1197">図 5-9 NDA 被覆管の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

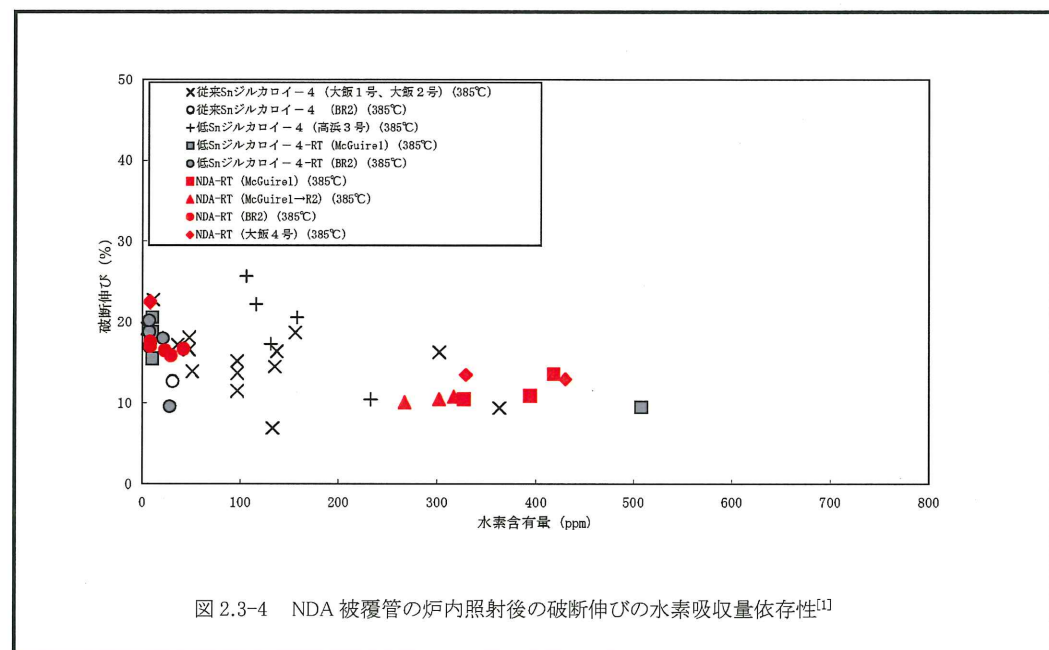
特認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="249 365 1121 1705" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">図 2.3-3 NDA 被覆管の機械的性質の水素吸収量依存性(未照射被覆管)<sup>[1]</sup></p> </div>	<div data-bbox="1279 296 1439 331" style="text-align: center;">(添付資料8)</div> <div data-bbox="1418 386 2273 1789" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">図 5-2 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

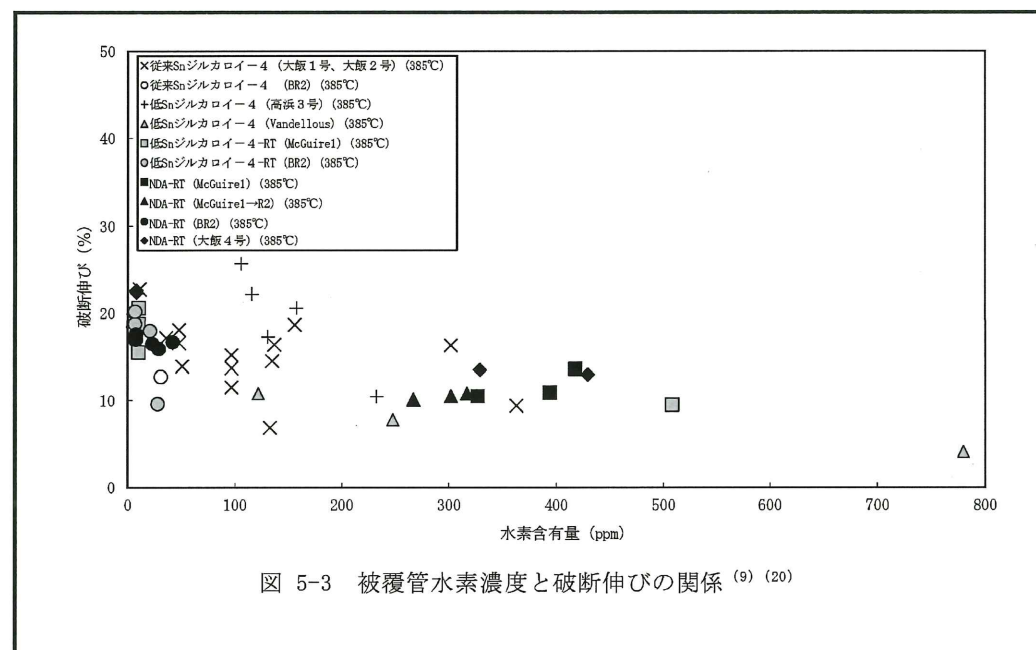
特認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）

設工認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）

備考



(添付資料8)



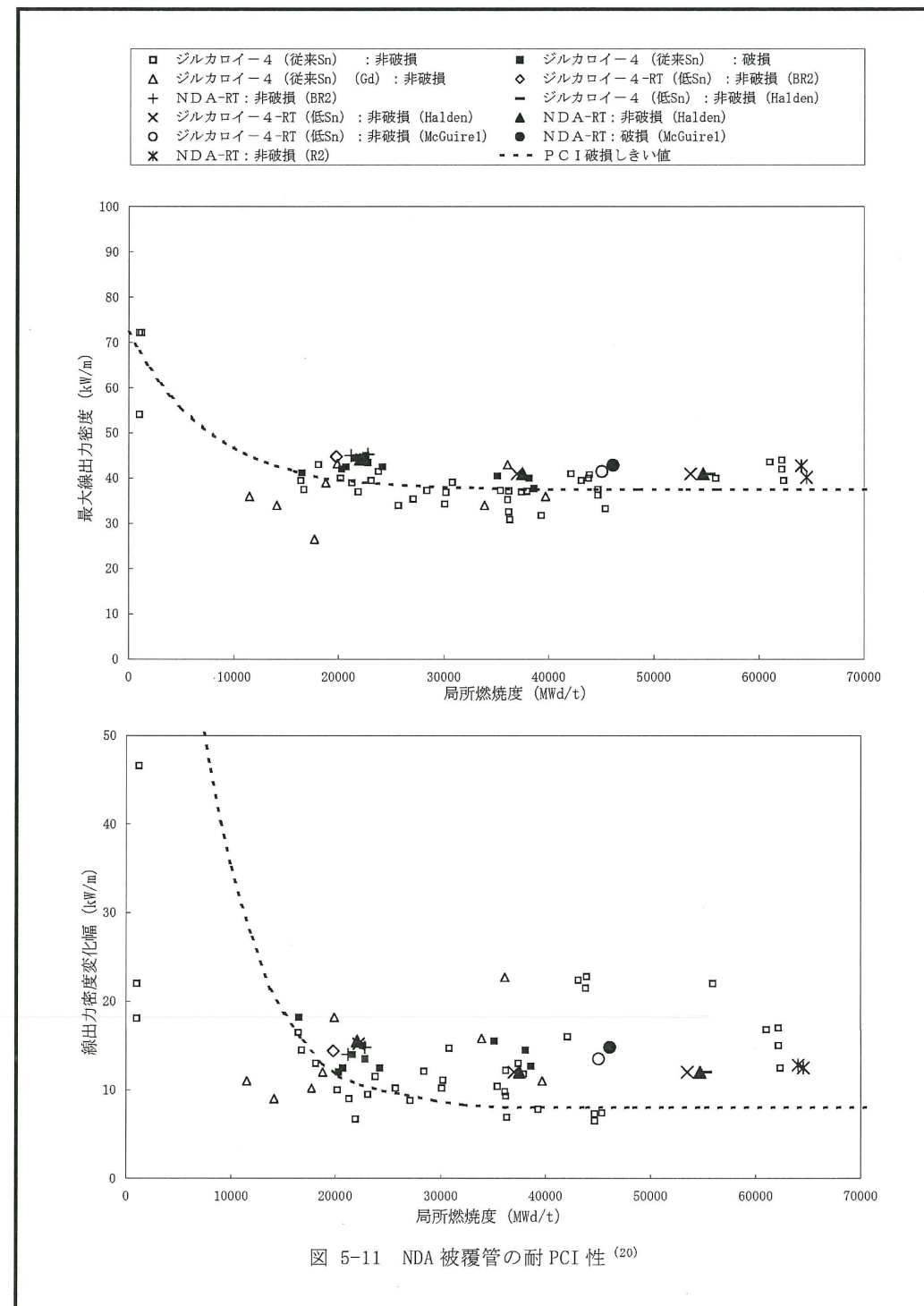
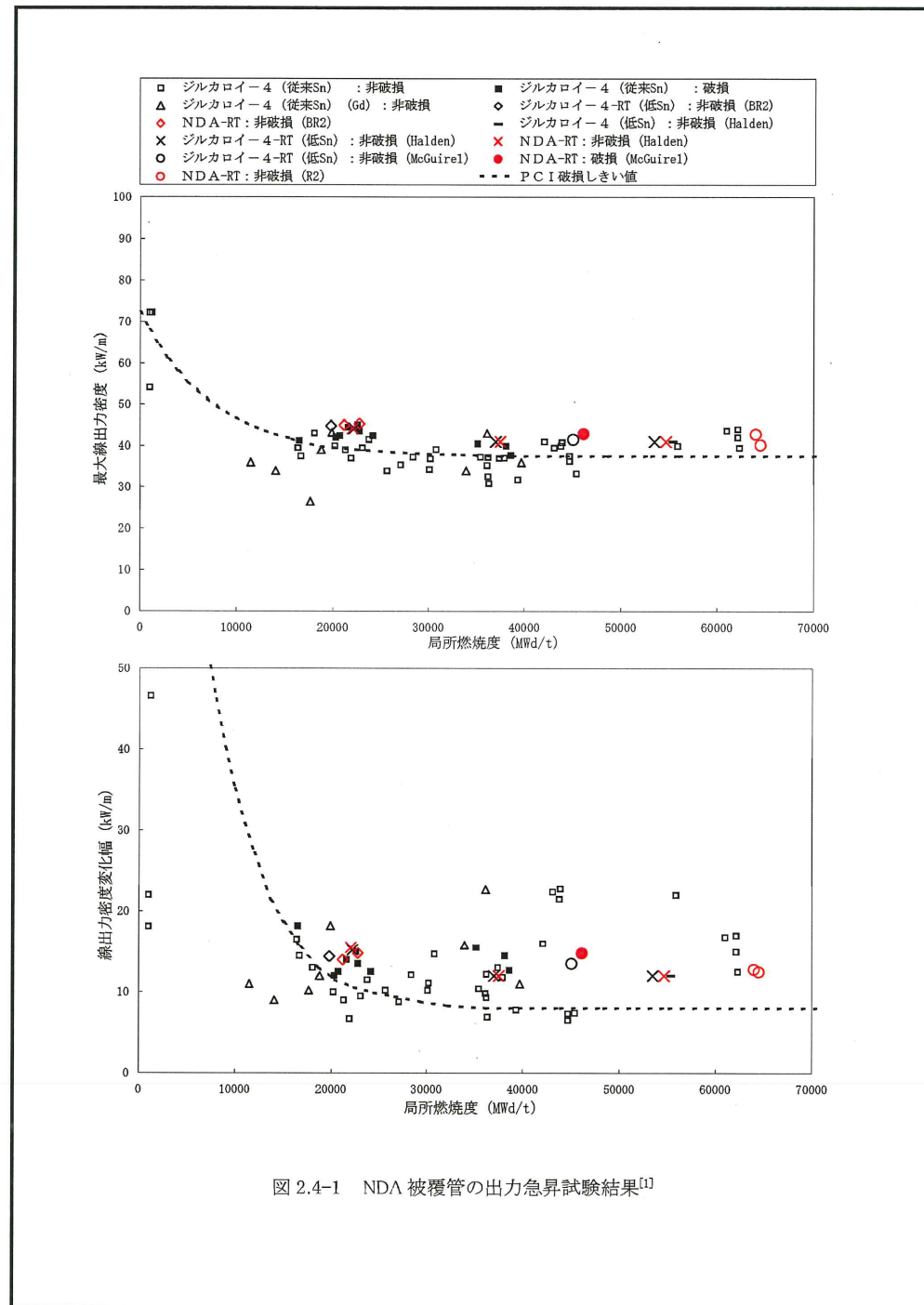
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（高浜発電所第1, 2号機 B型燃料集合体）

設工認（高浜発電所第1, 2号機 B型燃料集合体）

備考

(添付資料8)





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

特認（高浜発電所第 1，2 号機 B 型燃料集合体）

設工認（高浜発電所第 1，2 号機 B 型燃料集合体）

備考

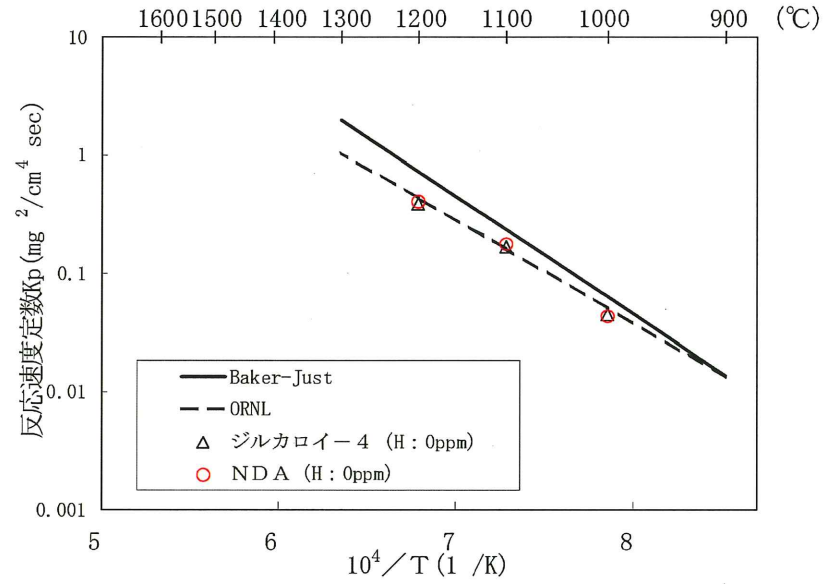


図 2.4-2 NDA 被覆管のジルコニウム-水反応速度定数<sup>[1]</sup>

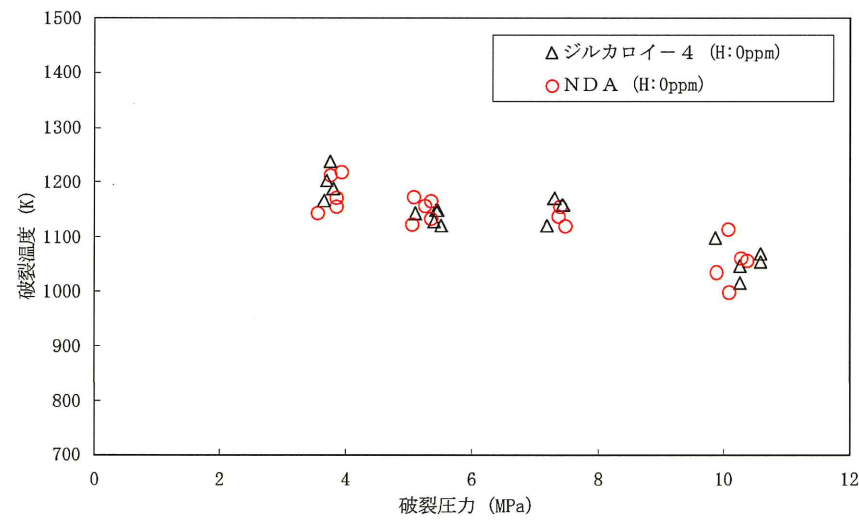


図 2.4-3 NDA 被覆管の LOCA 想定時被覆管破裂挙動試験結果<sup>[1]</sup>

2-20

(添付資料8)

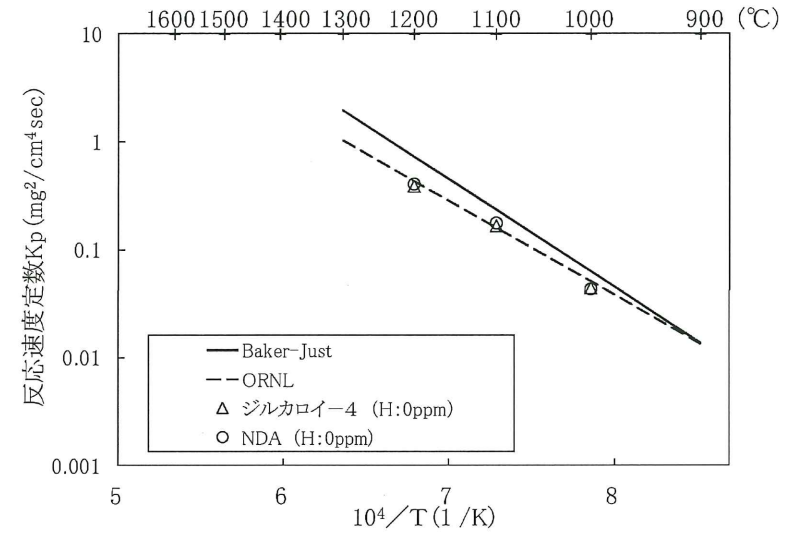


図 5-13 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数（受取管）<sup>[20]</sup>

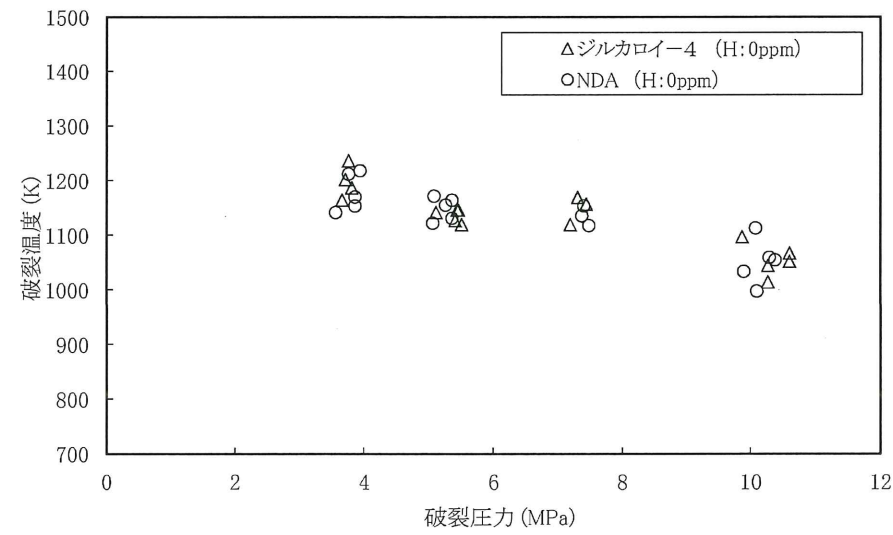


図 5-12 未照射管の LOCA 時破裂挙動試験結果（受取管）<sup>[20]</sup>

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

特認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	設工認（高浜発電所第1，2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="270 415 1092 630" data-label="Diagram"> </div> <div data-bbox="516 667 854 695" 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>

## 補足説明資料 7

耐震性に関する説明書に関する補足説明資料

## 目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 詳細説明 .....	2

## 1. 概要

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

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

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

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

第1表 燃料集合体の耐震性に係る評価内容の概要

	耐震性に係る評価内容		
	工事計画認可		燃料体設計認可・ 輸入燃料体検査申請
	評価対象部位	評価項目	
新規制基準施行前	燃料被覆管	一次応力評価 ・平均引張応力	(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) 再稼働工認	(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)	再稼働工認＋被覆管BF工認を呼び込み		—

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

(注2) 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. 詳細説明

### 2.1. 再稼働工認

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

具体的には、燃料集合体は耐震 S クラスに分類していることから、当該申請における「燃料集合体の耐震計算書」の資料にて、燃料被覆管、制御棒案内シンプル、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。

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

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

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

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

### 2.3 本申請

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

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

第2表 再稼働工認の認可実績

プラント	工事計画認可
美浜3号機	平成28年10月26日付け原規規発第1610261号にて認可
高浜1号機	平成28年6月10日付け原規規発第1606104号にて認可
高浜2号機	平成28年6月10日付け原規規発第1606105号にて認可
高浜3号機	平成27年8月4日付け原規規発第1508041号にて認可
高浜4号機	平成27年10月9日付け原規規発第1510091号にて認可
大飯3号機	平成29年8月25日付け原規規発第1708254号にて認可
大飯4号機	平成29年8月25日付け原規規発第1708255号にて認可

第3表 燃料被覆管閉じ込め機能維持バックフィット工認の認可実績

プラント	工事計画認可
美浜3号機	令和元年7月19日付け原規規発第1907197号にて認可
高浜1号機	令和元年8月19日付け原規規発第1908191号にて認可
高浜2号機	令和元年8月19日付け原規規発第1908192号にて認可
高浜3号機	令和元年8月19日付け原規規発第19081911号にて認可
高浜4号機	令和元年8月19日付け原規規発第19081912号にて認可
大飯3号機	令和元年7月29日付け原規規発第1907291号にて認可
大飯4号機	令和元年7月29日付け原規規発第1907292号にて認可

以上