

川内原子力発電所第 1 号機

設計及び工事計画認可申請書

【B 型燃料集合体】

補足説明資料

令和 3 年 6 月

九州電力株式会社

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

【凡例】

□: 今回ご提示する資料

(赤字): 新規追加資料

目 次

補足説明資料 1	設計及び工事計画認可申請における適用条文等の整理について
補足説明資料 2	設計及び工事計画認可申請書に添付する書類の整理について
補足説明資料 3	燃料体設計認可申請書と設計及び工事計画認可申請書の記載に関する補足説明資料
補足説明資料 4	基本設計方針の確認方法に関する補足説明資料
補足説明資料 5	工事の方法に関する補足説明資料
補足説明資料 6	強度に関する補足説明資料
補足説明資料 7	高燃焼度燃料における燃料被覆材に関する補足説明資料
補足説明資料 8	耐震性に関する説明書に関する補足説明資料

補足説明資料 7

高燃焼度燃料における燃料被覆材に関する補足説明資料

目 次

補足説明資料 7-1	高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性説明内容に関する補足説明資料
補足説明資料 7-2	設置許可との整合性に関する補足説明資料
補足説明資料 7-3	特殊加工認可申請書との整合性に関する補足説明資料

補足説明資料 7-1

高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る
適合性説明内容に関する補足説明資料

目 次

	頁
1. 概 要	1
2. 設置許可段階からの確認及び説明内容	2
3. 高燃焼度燃料（55GWd/t）導入以降の照射実績反映について	6
4. まとめ	7

1. 概要

燃料体については、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下「設置許可基準規則」という。）第 15 条第 5 項及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第 23 条（炉心等）第 1 項において、必要な物理的及び化学的性質を保持することが要求されており、技術基準規則の解釈における別記-10（以下「別記-10」という。）にその具体的な仕様が規定されている。

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

ジルコニウム基合金がジルカロイ-4 と同等以上の物理的及び化学的性質を有していることについては、設置許可段階から確認^{*1、2}しており、本設工認申請においてもその詳細な内容を確認している。

本資料では、ジルコニウム基合金の設置許可基準規則第 15 条第 5 項及び技術基準規則第 23 条第 1 項への適合性に係る設置許可段階からの確認内容を整理するとともに、あわせて高燃焼度燃料(55GWd/t)導入以降の照射実績反映状況についても整理するものである。

なお、設置許可基準規則第 15 条第 6 項及び技術基準規則第 23 条第 2 項への適合性については、設置許可基準規則の解釈及び技術基準規則の解釈における「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和 63 年 5 月 12 日原子力安全委員会了承）」に基づいた評価条件及び評価手法にて、ジルコニウム基合金の材料物性を用いて強度評価を行い、その適合性を確認しており、ジルコニウム基合金による影響については、ジルカロイ-4 と比較しても強度評価の入力条件であるジルコニウム基合金の材料物性（熱膨張係数、ポアソン比、縦弾性係数等）は同等であり、評価条件及び評価手法も相違はないため、その評価結果に有意な差異はない。

※1 高燃焼度燃料(55GWd/t)導入時の設置変更許可申請（平成 17 年 12 月 21 日平成 16・11・25・原第 4 号認可）では設置許可基準規則に代わる前の「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」の要求に適合していることを確認している。

※2 公開文献「原燃工製 PWR ステップ 2 燃料の改良因子について NFK - 8116改4 原子燃料工業 平成15年」を踏まえた設計としている。

2. 設置許可段階からの確認及び説明内容

2.1 確認項目及び確認内容

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

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (1/3)

性質		確認項目*	確認内容
物理的性質	耐放射線性	機械的性質	照射材並びに水素吸収させた未照射材及び照射材での引張試験結果よりジルコニウム基合金の機械特性がジルカロイ-4と同等であることを確認。
		疲労特性	未照射材及び照射材の疲労試験結果よりジルコニウム基合金の疲労特性がジルカロイ-4と同等であることを確認。
		クリープ特性	実機で照射された燃料棒の外径変化より、ジルコニウム基合金のクリープ特性がジルカロイ-4と同等以上であることを確認。
		照射成長	各材料の照射成長の結果より、ジルコニウム基合金の照射成長がジルカロイ-4に比べて、小さくなることを確認。
	寸法安定性	クリープ特性	上記クリープ特性と同様
		照射成長	上記照射成長と同様
	耐熱性	<u>耐熱性</u>	ジルコニウム基合金は、約98wt%のジルコニウムを主成分としているため、材料物性がジルカロイ-4と同等であること、及び溶融点及び相変態温度の測定結果より燃料被覆材の溶融点及び相変態温度が異常な過渡変化時の最高温度よりも高いことを確認。
	核性質	—	核性質は核分裂反応にかかる影響を確認するものであり、核分裂するウランを含むペレットにおいて考慮する事項であるため、燃料被覆材としては考慮不要。

※下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (2/3)

性質		確認項目 ^{※1}	確認内容
物理的性質	その他の考慮すべき性質	<u>耐摩耗性</u>	被覆材硬さの測定結果よりジルコニウム基合金の硬さはジルカロイ-4と同等であり、支持格子と被覆材の接触による摩耗は被覆材によらず同等であることを確認。
		耐 PCI 性 ^{※2}	試験炉における出力急昇試験結果よりジルコニウム基合金耐 PCI 性がジルカロイ-4 と同等以上であることを確認。

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

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

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (3/3)

性質		確認項目 ^{※1}	確認内容
化学的性質	耐食性	酸化腐食	原子炉内腐食データよりジルコニウム基合金の腐食速度がジルカロイ-4に比べ低減することを確認。
		水素吸収	燃料被覆材の原子炉内での酸化膜厚さと水素吸収量及び吸収率の関係からジルコニウム基合金の水素吸収量がジルカロイ-4に比べ低減することを確認。
	化学的安定性	二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応 ^{※2}	ハルデン炉での照射実績よりジルコニウム基合金被覆管の内面酸化は小さく、燃料棒の健全性への影響は小さいことを確認。
		ガドリニア入り二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応 ^{※2}	ガドリニア入り二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応は、二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管が安定に共存する場合と大差はないことを確認。
	その他の考慮すべき性質	耐 PCI 性 ^{※3}	試験炉における出力急昇試験結果よりジルコニウム基合金耐 PCI 性がジルカロイ-4と同等以上であることを確認。
		高温特性	昇温内圧破裂試験結果及び高温時のジルコニウム-水反応の試験結果よりジルコニウム基合金の高温破裂特性及び高温酸化挙動はジルカロイ-4と同等であることを確認。

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

※2 (ガドリニア入り) 二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応は、被覆管内面に生じる酸化層へのウランの拡散によるボンディング層形成が問題とならないことを確認しているため、化学的に安定して共存する性質として「化学的安定性」に分類する。

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

2.2 各段階における説明内容

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

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

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

なお、本設計内容は、平成 18 年 7 月 24 日付け平成 18・05・12 原第 20 号にて特殊加工認可を受けた内容から変更はない。

設置変更許可申請書、安全審査資料、本設工認申請書の具体的な記載は、補足説明資料 7-2 のとおりである。また、本設工認申請書と特殊加工認可申請書の比較は、補足説明資料 7-3 のとおりである。

3. 高燃焼度燃料（55GWd/t）導入以降の照射実績反映について

55GWd/t 燃料導入にあたっては、平成 18 年 7 月 24 日付け平成 18・05・12 原第 20 号にて特殊加工認可、同日付け平成 18・05・12 原第 21 号にて燃料体設計認可を取得している。

上記以降については、新たに公開された照射データはなく、設計評価へ影響を及ぼすような照射データも得られていないため、今回の設工認申請書における照射データは、平成 18 年 7 月 24 日付け平成 18・05・12 原第 21 号の燃料体設計認可における照射データと同じ内容となっている。

4. まとめ

高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯を表 2 にまとめる。

表 2 高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯

許認可手続き (【】：申請者)	申請又は 許可年月日	適合性概要
設置変更許可申請 【九州電力】	平成 17 年 12 月 21 日 許可	ジルコニウム基合金がジルカロイ-4 と同等以上の物理的及び化学的性質を有していることを確認。なお、ジルコニウム基合金での強度評価を実施し、十分な強度を有していることを確認。
燃料体設計認可申請 特殊加工認可申請 【原子燃料工業】	平成 18 年 7 月 24 日 認可	設置許可に基づく燃料体設計認可及び特殊加工認可を取得。
設計及び工事の計画 の認可申請 【九州電力】	令和 2 年 12 月 15 日 申請	検査制度見直しに伴い、既燃料体設計認可及び特殊加工認可の内容を設計及び工事の計画として申請。 設置許可に基づく詳細設計であり、ジルコニウム基合金がジルカロイ-4 と同等以上の物理的及び化学的性質を有していることを確認している。

表に示すとおり、本設工認申請対象の燃料体に使用するジルコニウム基合金に係る設置許可基準規則第 15 条第 5 項及び技術基準第 23 条第 1 項への適合性については、平成 17 年の設置許可よりジルコニウム基合金がジルカロイ-4 と同等以上の物理的及び化学的性質を有していることを確認しており、本設工認申請においても当該設置許可に基づく確認項目及び確認内容の説明を実施しているものである。

補足説明資料 7-2

設置許可との整合性に関する補足説明資料

目 次

	頁
1. 概 要	1
2. 整理結果	1

1. 概 要

本資料は、令和 2 年 4 月の「原子力利用における安全対策の強化のための核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等の一部を改正する法律」及び関連規則等（以下「改正法等」という。）の施行を踏まえ、本設工認申請対象の燃料被覆材について、「川内原子力発電所発電用原子炉設置変更許可申請書」（平成 17 年 12 月 21 日付け平成 16・11・25 原第 4 号にて許可された発電用原子炉設置変更許可申請書（以下「設置変更許可申請書」という。）、「高燃焼度燃料導入時の安全審査資料」及び「設計及び工事計画認可申請書」（以下「設工認」という。）の記載事項の関連を整理したものである。

2. 整理結果

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

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

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

(1/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																																																																																															
<p>【本文】</p> <p>五、原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備</p> <p>ハ、原子炉本体の構造及び設備</p> <p>(ロ) 燃料体</p> <p>(2) 燃料被覆材の種類</p> <ul style="list-style-type: none"> ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金 ジルコニウム-ニオブ合金にズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金 <p>ただし、第1～第21領域燃料については、ジルカロイ-4</p>	<p>【安全審査資料：川内原子力発電所1号及び2号炉高燃焼度燃料の概要について】</p> <p>3. ステップ2燃料の主要仕様</p> <p>燃料棒及び燃料集合体の概要を図3-1に示すが、PWR燃料は、格子状に組み合わせた支持格子によって燃料棒を格子配列に保ち、制御棒案内シンプル、支持格子、上部ノズル及び下部ノズルで骨格を形成することを基本構造としている。</p> <p>ステップ2燃料は、ステップ1燃料と同一な基本構造であるが、前述の高燃焼度化による影響等に対応するため、表3-1に示すとおり、ペレット、被覆管等の仕様の一部を変更する。</p> <p style="text-align: center;">表3-1 燃料の主要仕様 (1/2)</p> <table border="1" data-bbox="943 808 1608 1423"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>ステップ1燃料（現行）</th> <th>ステップ2燃料</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ペレット材料</td> <td>二酸化ウラン (一部ガドリニアを含む)</td> <td>同 左</td> </tr> <tr> <td>濃縮度</td> <td>約4.1wt%～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%～約1.9wt%)</td> <td>約4.8wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.2wt%以下)</td> </tr> <tr> <td>ガドリニア濃度</td> <td>約6wt%</td> <td>約10wt%以下</td> </tr> <tr> <td>初期密度</td> <td>理論密度の約95%</td> <td>理論密度の約97% (ガドリニア入り燃料については理論密度の約96%)</td> </tr> <tr> <td>ペレット直径</td> <td>約8.19mm又は約8.05mm</td> <td>約8.19mm</td> </tr> <tr> <td>ペレット長さ</td> <td>約11.5mm又は約9.0mm</td> <td>約11.5mm又は約9.2mm</td> </tr> <tr> <td>ペレット最高燃焼度</td> <td>約62,000MWd/t</td> <td>約71,000MWd/t</td> </tr> <tr> <td>被覆管材料</td> <td>ジルカロイ-4</td> <td>・Sn-Fe-Cr-Nb系^{※1}ジルコニウム基合金^{※1} ・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系^{※2}ジルコニウム基合金^{※2} ・Sn-Fe-Nb系^{※3}ジルコニウム基合金^{※3}</td> </tr> <tr> <td>外径</td> <td>約9.50mm</td> <td>同 左</td> </tr> <tr> <td>厚さ</td> <td>約0.57mm又は約0.64mm</td> <td>約0.57mm</td> </tr> <tr> <td>被覆管-ペレット間隙（直径）</td> <td>約0.17mm</td> <td>同 左</td> </tr> </tbody> </table> <p>※1 MDAを指す。 ※2 NDAを指す。 ※3 ZIRLOを指す。</p>	項目	ステップ1燃料（現行）	ステップ2燃料	ペレット材料	二酸化ウラン (一部ガドリニアを含む)	同 左	濃縮度	約4.1wt%～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%～約1.9wt%)	約4.8wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.2wt%以下)	ガドリニア濃度	約6wt%	約10wt%以下	初期密度	理論密度の約95%	理論密度の約97% (ガドリニア入り燃料については理論密度の約96%)	ペレット直径	約8.19mm又は約8.05mm	約8.19mm	ペレット長さ	約11.5mm又は約9.0mm	約11.5mm又は約9.2mm	ペレット最高燃焼度	約62,000MWd/t	約71,000MWd/t	被覆管材料	ジルカロイ-4	・Sn-Fe-Cr-Nb系 ^{※1} ジルコニウム基合金 ^{※1} ・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系 ^{※2} ジルコニウム基合金 ^{※2} ・Sn-Fe-Nb系 ^{※3} ジルコニウム基合金 ^{※3}	外径	約9.50mm	同 左	厚さ	約0.57mm又は約0.64mm	約0.57mm	被覆管-ペレット間隙（直径）	約0.17mm	同 左	<p>【要目表】</p> <table border="1" data-bbox="1727 296 2576 856"> <thead> <tr> <th rowspan="2">材 質</th> <th colspan="2">要 目 表</th> </tr> <tr> <th>要 目 1</th> <th>要 目 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>燃料被覆材</td> <td>Sa-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金^{※1}</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>燃料被覆材</td> <td></td> <td>ASTM B351 Gr. R60804 (Zr7N 804D相当)</td> </tr> <tr> <td>最上層支持格子及び最下層支持格子</td> <td></td> <td>AMS 5596^{※2}</td> </tr> <tr> <td>中間層支持格子</td> <td></td> <td>ASTM B352 Gr. R60804^{※1}</td> </tr> <tr> <td>上部支持板（上部ノズル）及び下部支持板（下部ノズル）</td> <td></td> <td>ASTM^{※3}</td> </tr> <tr> <td>制御棒案内シンプル</td> <td></td> <td>ASTM H353 Gr. R60804^{※1}</td> </tr> <tr> <td>上部ノズルボスあばね</td> <td></td> <td>AMS 5586^{※4}</td> </tr> <tr> <td>クラウンブスクリュー</td> <td></td> <td>ASTM^{※3}</td> </tr> <tr> <td>上部リングナット・シングルスクルー・リングナット</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>グベツ</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>炉内制御管案内シンプル</td> <td></td> <td>ASTM B353 Gr. R60804^{※1}</td> </tr> <tr> <td>スリ</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>上部プレナムコイルばね</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>下部プレナムコイルばね</td> <td></td> <td>AMS^{※4}</td> </tr> <tr> <td>押さえ板（下部プレナムコイルばね用部品）</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>連結棒（下部プレナムコイルばね用部品）</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>制御棒案内シンプル用下部ボルト及びワッシャー</td> <td></td> <td>ASTM H551 Gr. R60804^{※1}</td> </tr> <tr> <td>ストッパ</td> <td></td> <td>ASTM H352 Gr. R60804^{※1}</td> </tr> </tbody> </table> <p>【添付資料 4 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性、その他の性能に関する説明書】</p> <p>5. Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム基合金（NDA）</p> <p>NDA 被覆管は「実用発電用原子炉に使用する燃料体の技術基準に関する規則（平成 25 年 6 月 28 日原子力規制委員会規則第 7 号）」（以下「原子力規制委員会規則第 7 号」という。）第 8 条に規定されていない材料であったことから、原子力規制委員会規則第 7 号第 3 条の規定に基づき、特殊加工認可を取得している（平成 18・05・12 原第 20 号）。</p> <p>NDA 被覆管を本申請の燃料集合体に使用する場合には、以下に示すこれらの特性を適切に反映して燃料集合体の設計を行う必要がある。</p> <p>なお、本添付資料中に示す NDA 被覆管の照射挙動データには、NDA と NDA-RT の 2 種類のデータがあり、前者は通常組織管、後者は集合組織調整管を指している。集合組織調整管は、被覆管の圧延工程を調整することによって、ジルコニウムの稠密六方晶 C 軸^{（注1）}の径方向への配向割合を、通常組織管よりも僅かに高めた被覆管であるが、本章で示す被覆管の各特性は同等である。そのため、本申請においては両者を区別しない。</p>	材 質	要 目 表		要 目 1	要 目 2	燃料被覆材	Sa-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 ^{※1}	同左	燃料被覆材		ASTM B351 Gr. R60804 (Zr7N 804D相当)	最上層支持格子及び最下層支持格子		AMS 5596 ^{※2}	中間層支持格子		ASTM B352 Gr. R60804 ^{※1}	上部支持板（上部ノズル）及び下部支持板（下部ノズル）		ASTM ^{※3}	制御棒案内シンプル		ASTM H353 Gr. R60804 ^{※1}	上部ノズルボスあばね		AMS 5586 ^{※4}	クラウンブスクリュー		ASTM ^{※3}	上部リングナット・シングルスクルー・リングナット			グベツ			炉内制御管案内シンプル		ASTM B353 Gr. R60804 ^{※1}	スリ			上部プレナムコイルばね			下部プレナムコイルばね		AMS ^{※4}	押さえ板（下部プレナムコイルばね用部品）			連結棒（下部プレナムコイルばね用部品）			制御棒案内シンプル用下部ボルト及びワッシャー		ASTM H551 Gr. R60804 ^{※1}	ストッパ		ASTM H352 Gr. R60804 ^{※1}	
項目	ステップ1燃料（現行）	ステップ2燃料																																																																																																
ペレット材料	二酸化ウラン (一部ガドリニアを含む)	同 左																																																																																																
濃縮度	約4.1wt%～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%～約1.9wt%)	約4.8wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.2wt%以下)																																																																																																
ガドリニア濃度	約6wt%	約10wt%以下																																																																																																
初期密度	理論密度の約95%	理論密度の約97% (ガドリニア入り燃料については理論密度の約96%)																																																																																																
ペレット直径	約8.19mm又は約8.05mm	約8.19mm																																																																																																
ペレット長さ	約11.5mm又は約9.0mm	約11.5mm又は約9.2mm																																																																																																
ペレット最高燃焼度	約62,000MWd/t	約71,000MWd/t																																																																																																
被覆管材料	ジルカロイ-4	・Sn-Fe-Cr-Nb系 ^{※1} ジルコニウム基合金 ^{※1} ・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系 ^{※2} ジルコニウム基合金 ^{※2} ・Sn-Fe-Nb系 ^{※3} ジルコニウム基合金 ^{※3}																																																																																																
外径	約9.50mm	同 左																																																																																																
厚さ	約0.57mm又は約0.64mm	約0.57mm																																																																																																
被覆管-ペレット間隙（直径）	約0.17mm	同 左																																																																																																
材 質	要 目 表																																																																																																	
	要 目 1	要 目 2																																																																																																
燃料被覆材	Sa-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 ^{※1}	同左																																																																																																
燃料被覆材		ASTM B351 Gr. R60804 (Zr7N 804D相当)																																																																																																
最上層支持格子及び最下層支持格子		AMS 5596 ^{※2}																																																																																																
中間層支持格子		ASTM B352 Gr. R60804 ^{※1}																																																																																																
上部支持板（上部ノズル）及び下部支持板（下部ノズル）		ASTM ^{※3}																																																																																																
制御棒案内シンプル		ASTM H353 Gr. R60804 ^{※1}																																																																																																
上部ノズルボスあばね		AMS 5586 ^{※4}																																																																																																
クラウンブスクリュー		ASTM ^{※3}																																																																																																
上部リングナット・シングルスクルー・リングナット																																																																																																		
グベツ																																																																																																		
炉内制御管案内シンプル		ASTM B353 Gr. R60804 ^{※1}																																																																																																
スリ																																																																																																		
上部プレナムコイルばね																																																																																																		
下部プレナムコイルばね		AMS ^{※4}																																																																																																
押さえ板（下部プレナムコイルばね用部品）																																																																																																		
連結棒（下部プレナムコイルばね用部品）																																																																																																		
制御棒案内シンプル用下部ボルト及びワッシャー		ASTM H551 Gr. R60804 ^{※1}																																																																																																
ストッパ		ASTM H352 Gr. R60804 ^{※1}																																																																																																

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

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

(2/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>【添付書類八】</p> <p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(1) 概要</p> <p>燃料集合体は、多数の二酸化ウラン焼結ペレット又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結ペレットを「ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金」若しくは「ジルコニウム-ニオブ合金にズズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金」又はジルカロイ-4で被覆した燃料棒、制御棒案内シンプル、炉内計装用案内シンプル、支持格子、上部ノズル、下部ノズル等で構成する。申請書本文における五、原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備 ハ、原子炉本体の構造及び設備</p> <p>(ロ) 燃料体 (2)被覆材の種類に示す「ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金」若しくは「ジルコニウム-ニオブ合金にズズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金」（以下、3.2.1では「ジルコニウム基合金」という。）の主成分は第3.2.1表のとおりである。⁽¹⁾⁽²⁾燃料棒の配列は、17×17であり、そのうち264本が燃料棒、24本が制御棒案内シンプル、残り1本が炉内計装用案内シンプルである。制御棒案内シンプルは、制御棒クラスタ、バーナブルポイズン、中性子源又はブラギングデバイスの挿入に使用する。</p>	<p>3. ステップ2燃料の主要仕様</p> <p>(4) 被覆管材料</p> <p>炉内滞在期間の長期化に伴う被覆管の腐食及び水素吸収量増加を抑制するため、被覆管材料をステップ1燃料のジルカロイ-4から表3-2に示すジルコニウム基合金に変更した改良被覆管（A型燃料はMDA及びZIRLOTM、B型燃料はNDA）を採用する。</p> <p>MDAは、三菱重工業（株）により開発されたものであり、豊富な照射実績を持つジルカロイ-4をベースとして、耐食性向上のためSn含有量を低下させ、さらに水素吸収率の低減と機械的強度の維持のためにNbを添加したSn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金製被覆管である。NDAは、原子燃料工業（株）により開発されたものであり、MDAと同様、ジルカロイ-4をベースとして、耐食性向上のためSn含有量を低下させるとともにNb及びNiを添加し、さらに機械的強度を維持するためFe及びCr含有量を若干増やしたSn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金製被覆管である。ZIRLOは、ウエスチングハウス社により開発されたものであり、耐食性が良好で水素吸収率も低いと考えられているZr-Nb二元合金をベースとして、機械的強度の向上のためSn及びFeを添加したSn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金製被覆管である。</p>	<p>2. 構成材料の概要</p> <p>燃料集合体の材料は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を含むプラントの使用条件の下で、燃料寿命中その健全性が維持されるよう選定している。燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分を第2-1表に示す。また、燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質を第2-2表に示す。</p>	

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

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

(3/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																																																																																																																																																																									
<p>第3.2.1表 燃料の主要仕様</p> <p>(2) 被覆管</p> <p>材 料 ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム合金</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム合金</p> <p>(Sn : 0.7~0.9wt%、</p> <p>Fe : 0.18~0.24wt%、</p> <p>Cr : 0.07~0.13wt%、</p> <p>Fe+Cr : 0.28~0.37wt%、</p> <p>Nb : 0.45~0.55wt%、</p> <p>Zr : 残り)</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金</p> <p>(Sn : 0.90~1.15wt%、</p> <p>Fe : 0.24~0.30wt%、</p> <p>Cr : 0.13~0.19wt%、</p> <p>Nb : 0.08~0.14wt%、</p> <p>Ni : 0.007~0.014wt%、</p> <p>Zr : 残り)</p> <p>ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム合金</p> <p>・Sn-Fe-Nb系ジルコニウム合金</p> <p>(Sn : 0.9~1.3wt%、</p> <p>Fe : 0.08~0.12wt%、</p> <p>Nb : 0.8~1.2wt%、</p> <p>Zr : 残り)</p> <p>ただし、第1~第21領域 ジルカロイ-4</p>	<p>表3-2 被覆管の合金成分</p> <table border="1" data-bbox="890 346 1632 724"> <thead> <tr> <th rowspan="2">主成分¹⁾</th> <th colspan="3">ジルカロイ-4²⁾</th> <th colspan="3">ジルコニウム合金</th> </tr> <tr> <th>規 格</th> <th>従来Sn</th> <th>低Sn</th> <th>MDA</th> <th>NDA</th> <th>ZIRLO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sn</td> <td>1.2~1.7</td> <td>1.5</td> <td>1.3</td> <td>0.7~0.9</td> <td>0.90~1.15</td> <td>0.9~1.3</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18~0.24</td> <td>0.2</td> <td>←</td> <td>0.18~0.24</td> <td>0.24~0.30</td> <td>0.08~0.12</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07~0.13</td> <td>0.1</td> <td>←</td> <td>0.07~0.13</td> <td>0.13~0.19</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28~0.37</td> <td>0.3</td> <td>←</td> <td>0.28~0.37</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>0.45~0.55</td> <td>0.08~0.14</td> <td>0.8~1.2</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>0.007~0.014</td> <td>—</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1 数値の単位はwt%。また、上記以外の残りの成分はジルコニウム。</p> <p>*2 ジルカロイ-4のうち、規格内でSn含有量を少なくしたものを低Snジルカロイ-4、それ以外を従来Snジルカロイ-4と呼ぶ。</p>	主成分 ¹⁾	ジルカロイ-4 ²⁾			ジルコニウム合金			規 格	従来Sn	低Sn	MDA	NDA	ZIRLO	Sn	1.2~1.7	1.5	1.3	0.7~0.9	0.90~1.15	0.9~1.3	Fe	0.18~0.24	0.2	←	0.18~0.24	0.24~0.30	0.08~0.12	Cr	0.07~0.13	0.1	←	0.07~0.13	0.13~0.19	—	Fe+Cr	0.28~0.37	0.3	←	0.28~0.37	—	—	Nb	—	—	—	0.45~0.55	0.08~0.14	0.8~1.2	Ni	—	—	—	—	0.007~0.014	—	<p>第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分(2/5)</p> <table border="1" data-bbox="1765 357 2552 640"> <thead> <tr> <th rowspan="2">構成部品</th> <th rowspan="2">材料の種類</th> <th colspan="2">主成分(wt%)</th> <th colspan="8">不 純 物(ppm)</th> </tr> <tr> <th>Sn</th> <th>0.90/1.15</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金^(注5)</td> <td>Fe</td> <td>0.24/0.30</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.13/0.19</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.08/0.14</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>0.007/0.014</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>第2-2表 燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質(1/2)</p> <table border="1" data-bbox="1780 756 2567 934"> <thead> <tr> <th>構成部品</th> <th>材料の種類</th> <th>項目</th> <th>規定値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">燃料被覆材</td> <td rowspan="3">NDA</td> <td>(高温引張試験：385℃)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>引張強さ</td> <td>≧ MPa</td> </tr> <tr> <td>耐 力</td> <td>≧ 310 MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>伸 び</td> <td>≧ %</td> </tr> </tbody> </table>	構成部品	材料の種類	主成分(wt%)		不 純 物(ppm)								Sn	0.90/1.15	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金 ^(注5)	Fe	0.24/0.30	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Cr	0.13/0.19	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Nb	0.08/0.14	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Ni	0.007/0.014	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	O		≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Zr	残部												構成部品	材料の種類	項目	規定値	燃料被覆材	NDA	(高温引張試験：385℃)		引張強さ	≧ MPa	耐 力	≧ 310 MPa			伸 び	≧ %	<p>・燃料被覆材の化学成分のうち酸素については、別記-10に定められているジルコニウム合金燃料被覆材の規格であるJIS H 4751において化学成分の一つとして挙げられているものの、「酸素含有量は、受渡当事者間の協定による。」とされていることを踏まえ、基本設計である設置許可では化学成分として酸素を記載しておらず、詳細設計である設計及び工事の計画においては酸素を記載している。</p> <p>・設計及び工事の計画に機械的性質を記載しているのは、技術基準規則23条に適合するため、記載している。</p>
主成分 ¹⁾	ジルカロイ-4 ²⁾			ジルコニウム合金																																																																																																																																																																								
	規 格	従来Sn	低Sn	MDA	NDA	ZIRLO																																																																																																																																																																						
Sn	1.2~1.7	1.5	1.3	0.7~0.9	0.90~1.15	0.9~1.3																																																																																																																																																																						
Fe	0.18~0.24	0.2	←	0.18~0.24	0.24~0.30	0.08~0.12																																																																																																																																																																						
Cr	0.07~0.13	0.1	←	0.07~0.13	0.13~0.19	—																																																																																																																																																																						
Fe+Cr	0.28~0.37	0.3	←	0.28~0.37	—	—																																																																																																																																																																						
Nb	—	—	—	0.45~0.55	0.08~0.14	0.8~1.2																																																																																																																																																																						
Ni	—	—	—	—	0.007~0.014	—																																																																																																																																																																						
構成部品	材料の種類	主成分(wt%)		不 純 物(ppm)																																																																																																																																																																								
		Sn	0.90/1.15	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																																
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金 ^(注5)	Fe	0.24/0.30	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																															
		Cr	0.13/0.19	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																															
		Nb	0.08/0.14	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																															
		Ni	0.007/0.014	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																															
		O		≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																															
		Zr	残部																																																																																																																																																																									
構成部品	材料の種類	項目	規定値																																																																																																																																																																									
燃料被覆材	NDA	(高温引張試験：385℃)																																																																																																																																																																										
		引張強さ	≧ MPa																																																																																																																																																																									
		耐 力	≧ 310 MPa																																																																																																																																																																									
		伸 び	≧ %																																																																																																																																																																									

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

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3 . 原子炉及び炉心</p> <p>3 . 2 機械設計</p> <p>3 . 2 . 1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a . 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、<u>1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</u></p>	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ及び燃料棒平均燃焼度で約62,000Mwd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・<u>耐食性は向上</u> (図4-1及び図4-2参照)。 なお、水素吸収率は同等 (図4-3及び図4-4参照)。 ・炉内クリープについて、<u>MDA及びZIRLOは減少</u>、NDAは同等 (図4-5及び図4-6参照)。 ・照射成長は減少 (図4-7及び図4-8参照)。 <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000Mwd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶解点及び熱伝導率が低下する。(図4-9及び図4-10参照)。</p>	<p>5.3 耐食性</p> <p>NDA被覆管が1次冷却材と接触すると、ジルカロイ-4被覆管と同様に、</p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p>の反応により酸化腐食が進むとともに、発生した水素の一部を吸収する。</p> <p>実機では放射線照射下で1次冷却材の放射線分解により発生する酸素により、ジルカロイの腐食が放射線照射のない環境に比べて加速される可能性があるが、PWRでは1次冷却材に水素注入を行い酸素の発生を抑制している。実機の腐食は以下に示すとおりである。</p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>ジルカロイ被覆管外面には、原子炉内使用条件下で高温の1次冷却材との反応により酸化膜が形成される。一般に、ジルカロイ被覆管の腐食速度は、酸化膜と被覆管金属母材の界面温度についてのアレニウス型温度依存性を示す。また、その腐食増量(酸素による質量増加)の時間変化を第5-7図に示すが、初期の段階では時間に対して立方則(時間の3乗根に比例)に従って増加し、酸化膜厚さが2~3μm(遷移点)を超えた後は時間に対して直線的に増加する。<u>原子炉内での被覆管酸化膜厚さを第5-8図に示す。</u>原子炉内では滞在期間が長くなり酸化膜が厚くなるに従って、形成された酸化膜と金属母材の境界温度が上昇するため、燃焼度の進行に伴って酸化膜厚さは増大する傾向になる。更に腐食が進行すると腐食量の急激な増加が見られるが、これは酸化により発生する水素のうち、被覆管に吸収された水素が被覆管外面に析出し、この析出物が腐食に起因すると考えられている。</p> <p>第5-8図から分かるように、被覆管の原子炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されており、NDA被覆管については、ジルカロイ-4被覆管と比較して腐食速度の低減が認められる。</p> <p>したがって、<u>NDA被覆管の腐食挙動はジルカロイ-4被覆管と同様であり、腐食が急激に増加する領域でも耐食性の向上が維持されることから、本申請の燃料集合体の使用範囲までNDA被覆管の耐食性の向上が維持されると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで(添付資料3「強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。)設計評価に反映している。</u></p>	<p>(4/26)</p>

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

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

(5/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>(360°C 1 次冷却材模擬水中腐食試験)</p> <p>注：ジルカローイ-4の腐食速度に対する比</p> <p>腐食速度 (相対値)</p> <p>0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2</p> <p>0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000</p> <p>ジルカローイ-4 低Snジルカローイ-4 NDA</p> <p>図4-2(1) 炉外腐食試験における改良被覆管 (NDA) の腐食特性^[1]</p> <p>燃料棒最大酸化膜厚さ (μm)</p> <p>0 20 40 60 80 100 120 140 160</p> <p>0 10000 20000 30000 40000 50000 60000 70000</p> <p>燃料棒平均燃焼度 (MWd/t)</p> <p>図4-2(2) 改良被覆管 (NDA) の炉内酸化膜厚さ^[2]</p>	<p>設計及び工事計画認可申請書 該当事項</p> <p>第5-7図 炉外腐食試験におけるジルカローイ-2とジルカローイ-4の典型的な腐食増量曲線⁽³⁰⁾</p> <p>第5-8図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さ⁽²⁰⁾</p>	<p>備考</p> <p>・安全審査資料に図 4-2(1)を記載しているのは、参考として異なる被覆材における腐食速度の相対値を示しており、実際の腐食挙動は図 4-2(2)を用いて設計評価 (添付資料 3) に反映しているため、設計及び工事の計画では記載不要である。</p>

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

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3 . 原子炉及び炉心</p> <p>3 . 2 機械設計</p> <p>3 . 2 . 1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a . 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、<u>1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</u></p>	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ及び燃料棒平均燃焼度で約62,000Mwd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・耐食性は向上(図4-1及び図4-2参照)。 ・なお、<u>水素吸収率は同等</u>(図4-3及び図4-4参照)。 ・炉内クリープについて、<u>MDA及びZIRLOは減少</u>、NDAは同等(図4-5及び図4-6参照)。 ・照射成長は減少(図4-7及び図4-8参照)。 <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000Mwd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶解点及び熱伝導率が低下する。(図4-9及び図4-10参照)。</p>	<p>5.3.2 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。<u>被覆管の原子炉内での水素吸収量と酸化膜厚さの関係を第5-9図に示すが、NDA被覆管の水素吸収量と酸化膜厚さとはジルカロイ-4被覆管と同様に良い相関がある。酸化膜厚さと水素吸収率(酸化反応で生じた水素量に対する被覆管金属部に吸収された水素量の割合)の関係を第5-10図に示す。NDA被覆管の水素吸収特性は、ジルカロイ-4被覆管のそれと同等である⁽²⁰⁾。これは酸化膜を透過する水素量及び金属部に吸収される水素吸収量が被覆管の種類(ジルカロイ-4被覆管及びNDA被覆管)によらないためと考えられる。</u></p> <p>したがって、<u>NDA被覆管の水素吸収率は腐食により発生した水素の一部が酸化膜厚さに応じてある割合で被覆管に取り込まれること、及びその割合はNDA被覆管とジルカロイ-4被覆管で同等であることから、これらの挙動を計算モデルに組み込んで(添付資料3「強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。)設計評価に反映している。</u></p> <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>(6/26)</p>

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

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

(7/26)

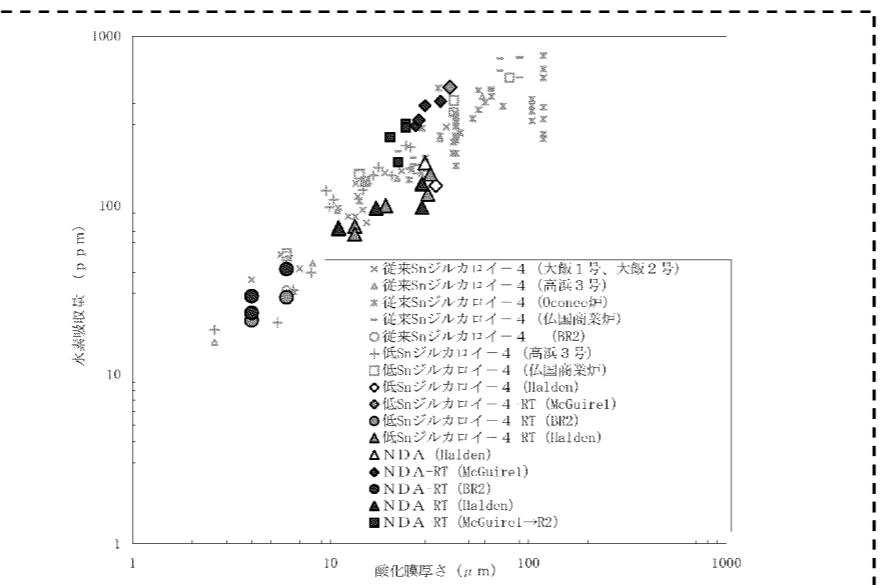
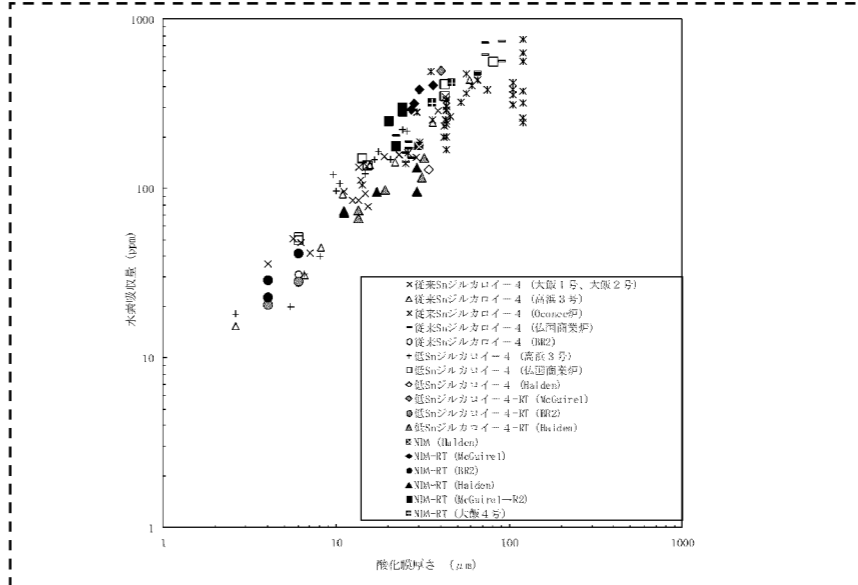
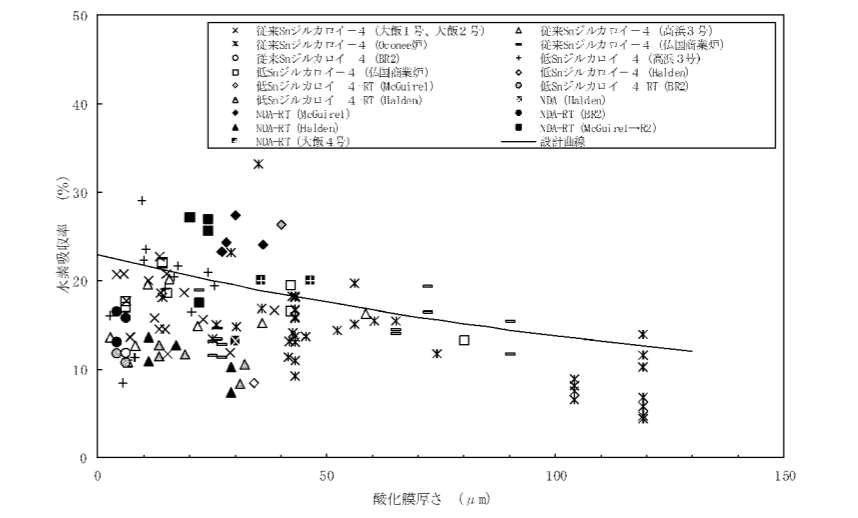
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図4-4 改良被覆管（NDA）の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係^[2]</p>	 <p>第5-9図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係^[20]</p>  <p>第5-10図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収率の関係^[20]</p>	<p>・設計及び工事の計画に第5-10図を記載しているのは、酸化膜厚さと水素吸収率の関係性がジルカロイ-4と同等であることを設計評価（添付資料3）に反映しているため、記載している。</p>

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

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、 下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、 ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	(8/26) 備考
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八） 3. 原子炉及び炉心 3.2 機械設計 3.2.1 燃料 (5) 評価 a. 構成材料 ⁽¹⁾⁽²⁾ (中略) ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。	4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見 (1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性 ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。 改良被覆管の特性は、炉外試験データ及び燃料棒平均燃焼度で約62,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、 <u>ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</u> ・耐食性は向上(図4-1及び図4-2参照)。 なお、水素吸収率は同等(図4-3及び図4-4参照)。 ・ <u>炉内クリープについて、MDA及びZIRLOは減少、NDAは同等</u> (図4-5及び図4-6参照)。 ・照射成長は減少(図4-7及び図4-8参照)。 また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。(図4-9及び図4-10参照)。	5.2.3 クリープ ^(注1) 特性 被覆管は内外圧差に基づくクリープによって外径が減少していくが、ペレットと被覆管が接触した後は、ペレットの外径変化に依存して被覆管外径が増加する。実機PWR燃料棒の照射後の外径変化を第5-5図に示すが、約20,000MWd/t程度までの低燃焼度域の外径減少より、 <u>NDA被覆管を採用した燃料棒の照射による外径変化は、低Snジルカロイ-4被覆管を採用した燃料棒のそれと同等となっている。</u> 被覆管クリープは、転位(材料に元々ある結晶格子のずれ)の移動によるものであるが、ジルコニウム中に固溶しているSn,Nbは転位を捕獲し、その動きを抑制する。NDA被覆管と低Snジルカロイ-4被覆管のクリープ特性が同等であることは、NDA被覆管中の固溶Sn及び固溶Nbによるクリープを抑制する効果が、低Snジルカロイ-4被覆管の固溶Snによるそれと同程度の効果であることを示している ⁽²⁰⁾ 。 <u>以上より、NDA被覆管のクリープ特性は低Snジルカロイ-4被覆管と同じとして計算モデルに組み込んで(添付資料3「強度に関する説明書」の3.2.2項(3)d.に示す)設計評価に反映している。</u>	

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

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

(9/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>図4-6 改良被覆管（NDA）の外径変化[Halden炉] [3]</p>	<p>第5-5図 燃料棒外径変化（実機照射セグメント燃料棒）(20)</p>	

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

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

(10/26)

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

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

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

(11/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>図4-8 改良被覆管（NDA）の照射成長¹²⁾</p>	<p>第5-6図 NDA被覆管の照射成長²⁰⁾</p>	

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

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

(12/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>5.2 耐放射線性</p> <p>NDA 被覆管は、二酸化ウラン燃料と接触して原子炉内に置かれるので、α線、β線、γ線、核分裂片及び中性子の影響を受ける。</p> <p>α線及びβ線のような荷電粒子は、金属中を通り抜けるとき、電氣的な相互作用によって原子の軌道電子を引き離すイオン化作用を起こす。また、γ線も軌道電子を原子から引き離す作用を起こす。このようにα線、β線、γ線は、主に金属原子の軌道電子と作用してエネルギーを消失していくので、NDA 被覆管の照射損傷に与える影響は軽微である。</p> <p>核分裂片は、その飛程が限定された近距離にしか及ばないため、二酸化ウラン燃料の表面で起こった核分裂だけが被覆管の内表面にしか作用せず、事実上の照射損傷を与えない。</p> <p>中性子は電荷を持たないので、金属中での電氣的な相互作用によってエネルギーを失うことがなく、そのエネルギーは主として原子核との弾性衝突により多数の原子を格子位置からはじき出す作用によって消失される。この結果、金属の結晶格子内あるいは結晶粒界などに空孔あるいは格子間原子の存在が認められるようになり、この微視的欠陥が材料の巨視的な物性値に変化をもたらすことになる。中性子が金属中を通り抜けるときに形成される格子欠陥の濃度は、中性子のエネルギーに比例するため、NDA 被覆管の照射損傷に最も大きな寄与をするのは高速中性子である。</p> <p>したがって、NDA 被覆管の照射損傷の影響を受ける以下の特性においては、高速中性子の影響に着目すればよい。</p>	<p>・設計及び工事の計画には、耐放射線性に関する概要を記載している。</p>

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

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

(13/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>【安全審査資料：川内原子力発電所1号及び2号炉高燃焼度燃料の機械設計について】</p> <p>2. 燃料棒の健全性</p> <p>2.1 設計方針</p> <p>(3) 被覆管応力</p> <p>被覆管にかかる応力は、被覆材の耐力以下であること。</p> <p>ここで、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の耐力は、図2.1-4に示すように、ジルカロイ-4製被覆管の耐力と同等であり、炉内での使用温度及び高速中性子照射の効果を考慮すると、約310N/mm²～約590N/mm²となる。被覆管応力基準値は、未照射、照射のいずれの場合でも、被覆管耐力の最確値にその不確定性を考慮して保守的に定めた温度依存の被覆管耐力を使用する。</p> <p>(4) 被覆管引張歪</p> <p>被覆管に生じる円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に際して1%を超えないこと。</p> <p>ここで、図2.1-5に示すように、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の延性は、ジルカロイ-4製被覆管の延性と同等であり、従来と同様、各過渡変化に対して円周方向引張歪の変化量が1%を超えないことを設計基準として使用する。</p>	<p>5.2.1 機械的性質</p> <p>機械特性への影響因子としては、照射脆化と水素脆化が考えられる。照射脆化は照射欠陥の蓄積（濃度）によるが、これは高速中性子束、被覆管温度及び時間に依存する。実機原子炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を第5-1図に示す。引張強さ及び耐力^(注1)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⁽²⁸⁾であることが確認されている。</p> <p>なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量 27～32×10²⁵n/m² (E>1MeV)まで十分な延性が確保されているとの報告例もある⁽²⁹⁾。</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を第5-2図に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、第5-3図に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、NDA被覆管は上述のとおり、未照射材で水素吸収による機械特性への影響がジルカロイ-4被覆管と同等であることから、照射材についてもジルカロイ-4被覆管と同様に本申請の燃料集合体の使用範囲まで機械特性は変わらない。以上より、NDA被覆管の応力及びびずみに対する設計基準や材料物性はジルカロイ-4被覆管と同じとして設計評価する。</p>	

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

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

(14/26)

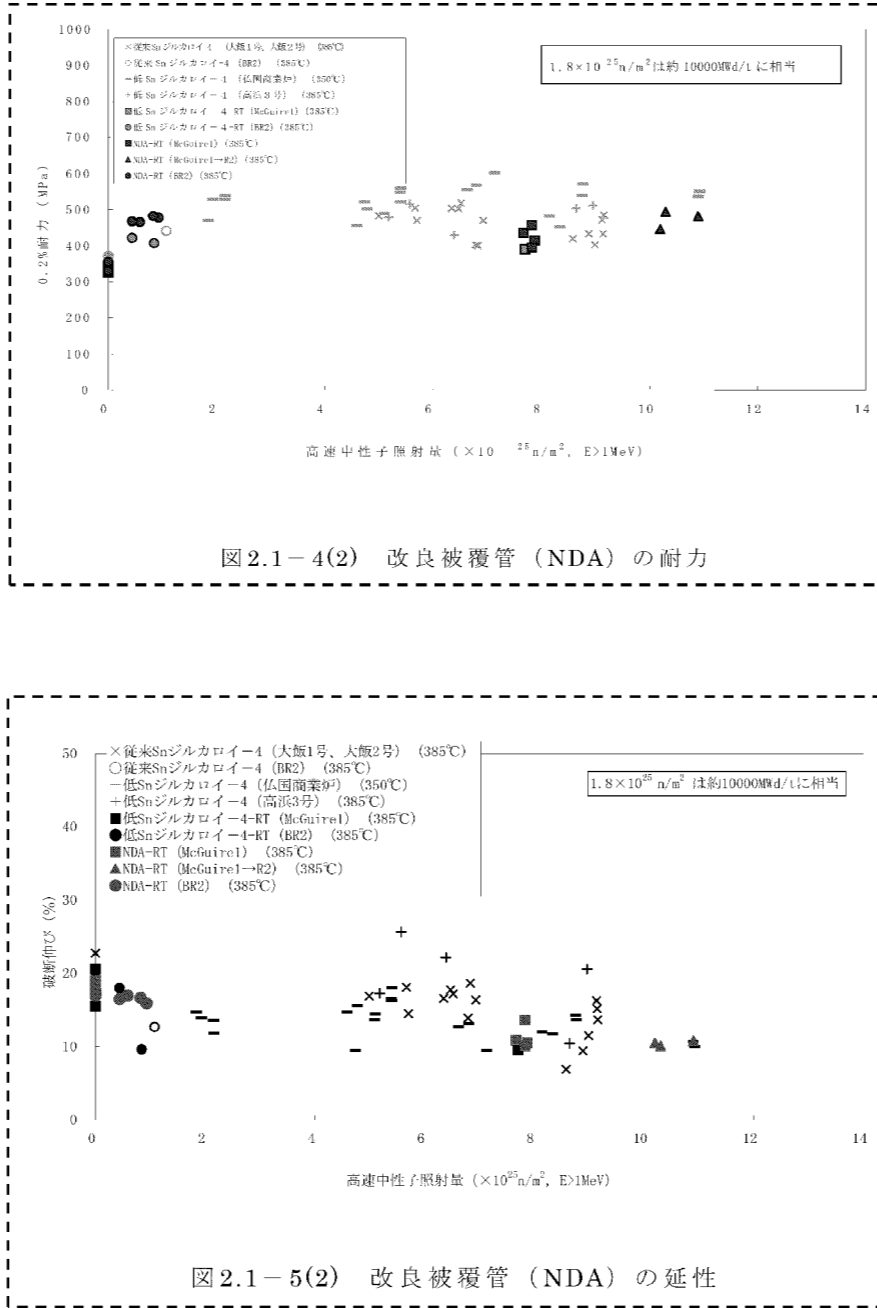
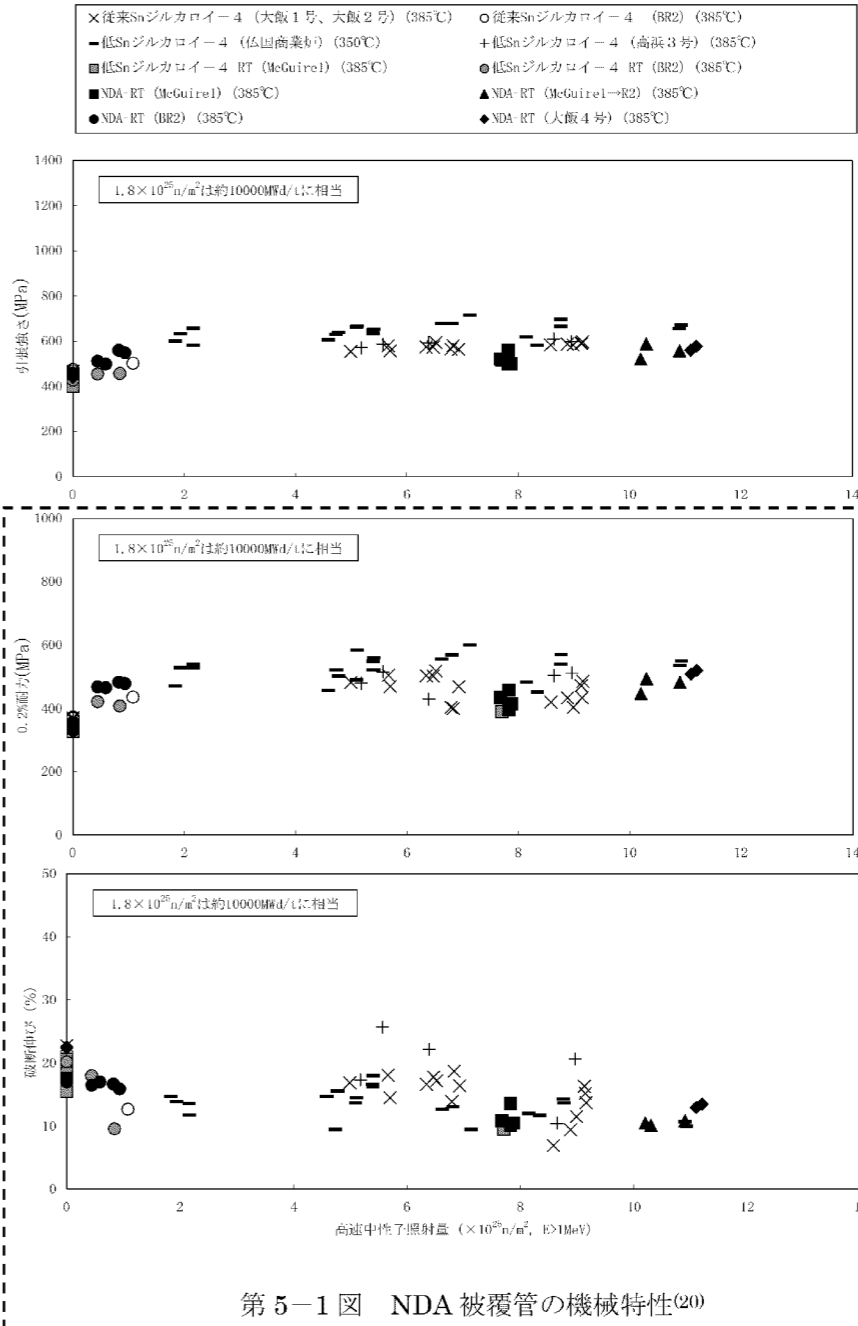
設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図 2.1-4(2) 改良被覆管 (NDA) の耐力</p> <p>図 2.1-5(2) 改良被覆管 (NDA) の延性</p>	 <p>第 5-1 図 NDA 被覆管の機械特性(20)</p>	<p>・設計及び工事の計画に引張強さを記載しているのは、第 2-2 表の機械的性質の項目との整合のため、記載している。</p>

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

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

(15/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>2.2 設計評価</p> <p>(6) その他の評価事項</p> <p>ステップ2燃料棒の健全性評価に際し、上述の評価事項の他に高燃焼度化に伴う影響を確認した事項について以下に示す。</p> <p>a.被覆管の腐食及び水素吸収</p> <p>炉内滞在中に生じる腐食による被覆管肉厚の最大減肉量を評価した結果、A型で約7.6%、B型で約6.4%となり、いずれも被覆管応力への影響が小さい10%以下の減肉量である。</p> <p>また、被覆管の最大水素吸収量を評価した結果、A型で約520ppm、B型で約600ppmとなり、図2.2-3に示す水素吸収させた未照射被覆管の高温引張試験結果及び図2.2-4に示す照射被覆管の高温引張試験より得られた破断伸びと水素吸収量の関係から、延性が確保されていることが確認できる約800ppmより小さい。</p>	<p>5.2.1 機械的性質</p> <p>(中略)</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を第5-2図に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、第5-3図に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、NDA被覆管は上述のとおり、未照射材で水素吸収による機械特性への影響がジルカロイ-4被覆管と同等であることから、照射材についてもジルカロイ-4被覆管と同様に本申請の燃料集合体の使用範囲まで機械特性は変わらない。以上より、NDA被覆管の応力及びひずみに対する設計基準や材料物性はジルカロイ-4被覆管と同じとして設計評価する。</p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>(中略)</p> <p>第5-8図から分かるように、被覆管の原子炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されており、NDA被覆管については、ジルカロイ-4被覆管と比較して腐食速度の低減が認められる。</p> <p>したがって、NDA被覆管の腐食挙動はジルカロイ-4被覆管と同様であり、腐食が急激に増加する領域でも耐食性の向上が維持されることから、本申請の燃料集合体の使用範囲までNDA被覆管の耐食性の向上が維持されると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（添付資料3「強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。）設計評価に反映している。</p> <p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>(中略)</p> <p>したがって、NDA被覆管の水素吸収率は腐食により発生した水素の一部が酸化膜厚さに応じてある割合で被覆管に取り込まれること、及びその割合はNDA被覆管とジルカロイ-4被覆管で同等であることから、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（添付資料3「強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。）設計評価に反映している。</p> <p>また、NDA被覆管の水素吸収量は、本申請の燃料集合体の使用範囲までジルカロイ-4被覆管と比較して低減すると考えられる。</p>	

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

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

(16/26)

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

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

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

(17/26)

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

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

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

(18/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>2.1 設計方針</p> <p>(5) 被覆管累積疲労</p> <p>被覆管の累積疲労サイクル数は、設計疲労寿命を超えないこと。</p> <p>ここで、<u>図2.1-6</u>に示すように、改良被覆管 (MDA、NDA及びZIRLO) の疲労強度は、ジルカロイ-4製被覆管の疲労強度と同等であり、設計疲労曲線としては、従来と同様、<u>Langer and O'Donnell</u>の曲線を使用する。</p> <div data-bbox="875 619 1647 1144" style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">(試験温度：316°C)</p> <p style="text-align: center;">図 2.1-6(2) 改良被覆管 (NDA) の疲労強度</p> </div>	<p>5.2.2 疲労特性</p> <p>NDA 被覆管の疲労試験結果と、ジルカロイに対する <u>Langer and O'Donnell</u> の疲労試験結果を <u>第5-4 図</u>に示す。一般に疲労特性は機械特性に依存するが、5.2.1 項で述べたとおり、NDA 被覆管はジルカロイ-4 被覆管と同等であるため、NDA 被覆管の疲労特性は、ジルカロイ-4 被覆管と同等となる。以上より、NDA 被覆管の設計疲労曲線はジルカロイ-4 被覆管と同じとする。</p> <div data-bbox="1736 619 2567 1144" style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">(試験温度：316°C)</p> <p style="text-align: center;">第 5-4 図 NDA 被覆管の疲労強度⁽²⁰⁾</p> </div>	

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

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、 下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、 ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	(19/26) 備考
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八） 3 . 原子炉及び炉心 3 . 2 機械設計 3 . 2 . 1 燃料 (5) 評 価 a . 構成材料 ⁽¹⁾⁽²⁾ (中略) ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。	(6)その他の評価事項 b.PCI破損 燃料のPCI (ペレット-被覆管相互作用) 破損は、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にPCI破損しきい値を超えた場合に起こることが、種々の実験結果や実炉での経験から知られている。 改良被覆管の耐PCI性は、図2.2-5に示すとおり、高燃焼度領域までジルカロイ-4製被覆管と同等以上であり、現行のPCI破損しきい値に対し十分余裕があることが確認でき、これをPCI破損評価に適用する。 サイクル初期及びサイクル末期において想定した原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を図2.2-6にPCI破損しきい値とともに示す。これより、運転時の異常な過渡変化時における最大線出力密度及び線出力密度変化幅は、同時にPCI破損しきい値を超えることはなく、PCI破損は生じない。	5.4.1 耐 PCI 性 被覆管は、腐食性 FP ガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用(PCMI)を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ(SCC)による破損(PCI 破損)を起こす。この PCI 破損における SCC は、Zr 中の稠密六方晶 (α相) の底面にほぼ平行な面上を伝播するが、現行の被覆管製法においては、この底面が PCMI 時の発生応力方向、すなわち周方向に配向 (C 軸を径方向に配向) されており、PCI 破損の抑制が図られている。 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。 NDA 被覆管の耐 PCI 性を第 5-11 図に PCI 破損しきい値とともに示す。NDA 被覆管の耐 PCI 性、すなわち SCC 破損特性はジルカロイ-4 被覆管と同等以上であり、ジルカロイ-4 被覆管で使用されている現行の PCI 破損しきい値が適用できる ⁽²⁰⁾ 。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。	

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

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

(20/26)

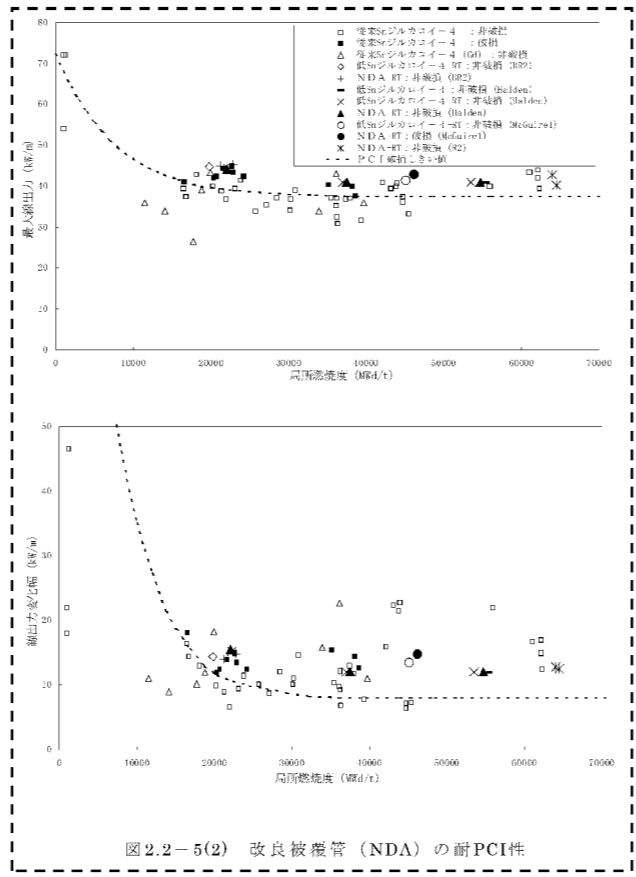
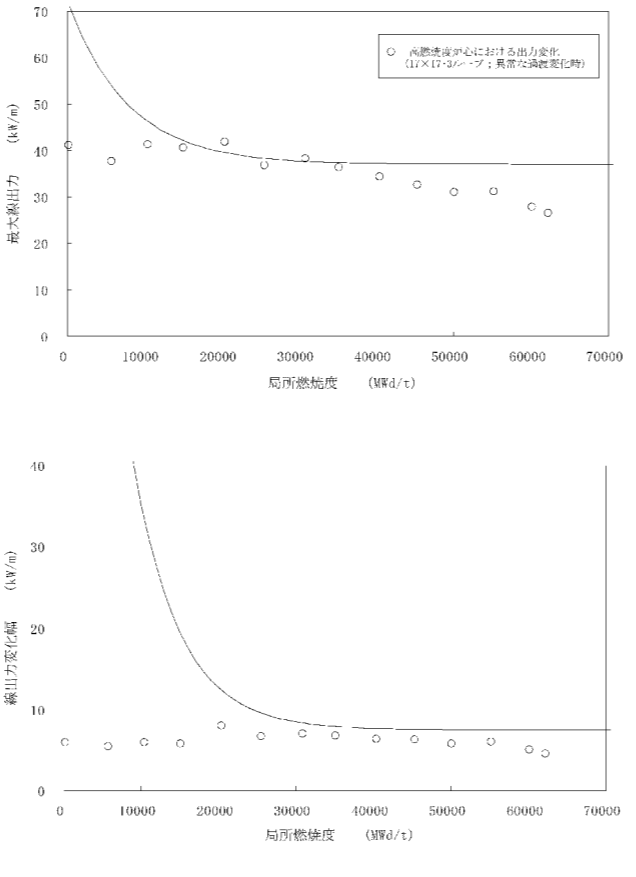
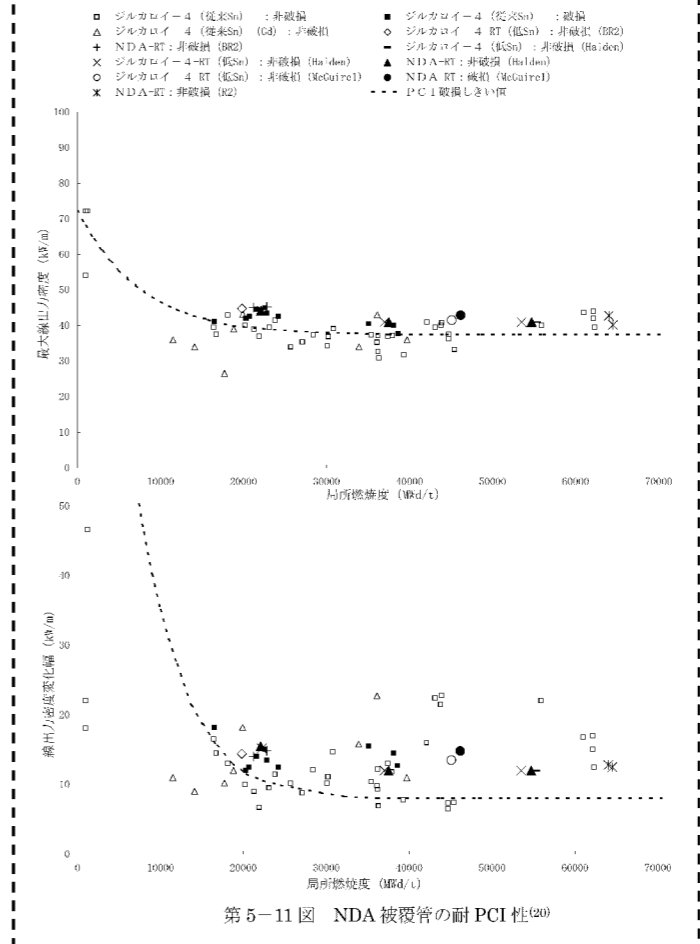
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図 2.2-5(2) 改良被覆管 (NDA) の耐 PCI 性</p>  <p>図 2.2-6 PCI 評価結果</p>	 <p>第 5-11 図 NDA 被覆管の耐 PCI 性⁽²⁰⁾</p>	<p>・安全審査資料の図 2.2-6 については、添付資料 3 に記載している。</p>

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

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3 . 原子炉及び炉心</p> <p>3 . 2 機械設計</p> <p>3 . 2 . 1 燃料</p> <p>(5) 評 価</p> <p>a . 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</p>	<p>6)その他の評価事項</p> <p>b.PCI破損</p> <p>燃料のPCI (ペレット-被覆管相互作用) 破損は、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にPCI破損しきい値を超えた場合に起こることが、種々の実験結果や実炉での経験から知られている。</p> <p><u>改良被覆管の耐PCI性は、図2.2-5に示すとおり、高燃焼度領域までジルカロイ-4製被覆管と同等以上であり、現行のPCI破損しきい値に対し十分余裕があることが確認でき、これをPCI破損評価に適用する。</u></p> <p>サイクル初期及びサイクル末期において想定した原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を図2.2-6にPCI破損しきい値とともに示す。これより、運転時の異常な過渡変化時における最大線出力密度及び線出力密度変化幅は、同時にPCI破損しきい値を超えることはなく、PCI破損は生じない。</p>	<p>3.3.1 二酸化ウランペレットと NDA 被覆管との反応</p> <p>ジルコニウム基合金と二酸化ウランが接触した場合、照射により過剰になった二酸化ウラン中の酸素がジルコニウム中に拡散し、被覆管内面酸化膜(ZrO_2)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$(Zr,U)O_2$ 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⁽¹⁰⁾。これらは、被覆管の腐食及びPCI^(註1)へ影響を及ぼす可能性が考えられる。</p> <p>しかしながら、二酸化ウランペレットとジルコニウムを密着させ510℃で約500日以上保持した場合においても反応は生じないことが報告されている⁽¹²⁾。通常運転中においてペレットと被覆管及び燃料被覆材端栓の接触面の温度が長期間にわたって500℃を超えないことから、反応は小さいと考えられる。</p> <p>また、ハルデン炉において燃料棒平均燃焼度 55,000MWd/t まで照射された燃料棒の被覆管内面観察によれば、低 Sn ジルカロイ-4 被覆管^(註1)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⁽¹¹⁾。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⁽¹²⁾。このことから、<u>想定する照射量の範囲において、NDA 被覆管の内面酸化は燃料棒の健全性を確保する上で影響は小さい。</u></p> <p>なお、NDA 被覆管と二酸化ウランペレットとの反応は、前記のとおりウラン原子及びジルコニウム原子の拡散によって生ずるものであるため、ペレット密度にはほとんど影響しない。</p> <p>以上のことから、二酸化ウランペレットと NDA 被覆管との反応は設計評価では考慮していない。</p> <p>4.3.1 ガドリニア入り二酸化ウランペレットと NDA 被覆管との反応</p> <p>ガドリニア入り二酸化ウランは、4.1 項で述べたように置換型固溶体を形成して安定である。<u>ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒について、原子燃料工業製燃料に対して実施した照射試験結果では、二酸化ウラン燃料棒に比べて被覆管内面酸化の増加は観察されていない⁽²⁰⁾。</u>したがって、ガドリニア入り二酸化ウランペレットと NDA 被覆管との反応は、二酸化ウランペレットと NDA 被覆管が安定に共存する場合と大差はない。したがって、当該の反応を設計評価では考慮していない。</p> <p>なお、3.3.1 項で述べたとおり、ペレット密度が増加した場合の共存性への影響はない。</p>	

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

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

(22/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考												
<p>指針12. 燃料設計</p> <p>適合のための設計方針</p> <p>1 . について</p> <p>燃料集合体は、原子炉内における使用期間中を通じ、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化による起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が十分な強度を有し、その機能を保持できる設計とする。</p> <p>3 . 原子炉及び炉心</p> <p>3 . 2 機械設計</p> <p>3 . 2 . 1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a . 構成材料⁽¹⁾ ⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</p> <p>3 . 6 参考文献</p> <p>(2) 「原燃工製P W R ステップ2 燃料の改良因子について」</p> <p>N F K - 8 1 1 6 改4</p> <p>原子燃料工業 平成15年</p> <p>【原燃工製P W R ステップ2 燃料の改良因子について】</p> <p>N F K - 8 1 1 6 改4 原子燃料工業 平成15年】</p> <table border="1" data-bbox="97 1438 795 1711"> <caption>表 3.2-4 被覆管の硬度</caption> <thead> <tr> <th>被覆管</th> <th>マイクロビッカース硬度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4被覆管</td> <td>212~224</td> </tr> <tr> <td>NDA被覆管</td> <td>211~217</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位：Hv (試験荷重 0.2kgf)</p>	被覆管	マイクロビッカース硬度	ジルカロイ-4被覆管	212~224	NDA被覆管	211~217		<p>5.4.2 耐摩耗性</p> <p>原子炉内では、燃料棒の流動振動による支持格子との接触部で、被覆管の摩耗が発生する可能性がある。被覆管の硬さの測定結果を第 5-3 表に示す。この表から分かるように NDA 被覆管の硬さはジルカロイ-4 被覆管の硬さと同じであり、支持格子と被覆管の接触による摩耗は被覆管材料（ジルカロイ-4 被覆管及び NDA 被覆管）によらず同等である。以上より、NDA 被覆管の摩耗はジルカロイ-4 被覆管と同じとする。</p> <table border="1" data-bbox="1765 577 2546 940"> <caption>第 5-3 表 NDA 被覆管の硬さの測定結果⁽²⁰⁾</caption> <p style="text-align: center;">(単位：HV (ビッカース硬さ値))</p> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HV0.2^(注1))</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>215</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>218</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(注 1) HV0.2：ビッカース硬さ試験力 0.2kgf</p>	種類	平均値 (HV0.2 ^(注1))	NDA	215	ジルカロイ-4 (参考)	218	<p>・設置変更許可申請書及び高燃焼度燃料導入時の安全審査資料では耐摩耗性について詳細な内容は説明していないものの、設計及び工事の計画では、摩耗特性が同等であることを設計評価（添付資料 3）に反映しているため、記載している。</p>
被覆管	マイクロビッカース硬度														
ジルカロイ-4被覆管	212~224														
NDA被覆管	211~217														
種類	平均値 (HV0.2 ^(注1))														
NDA	215														
ジルカロイ-4 (参考)	218														

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

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

(23/26)

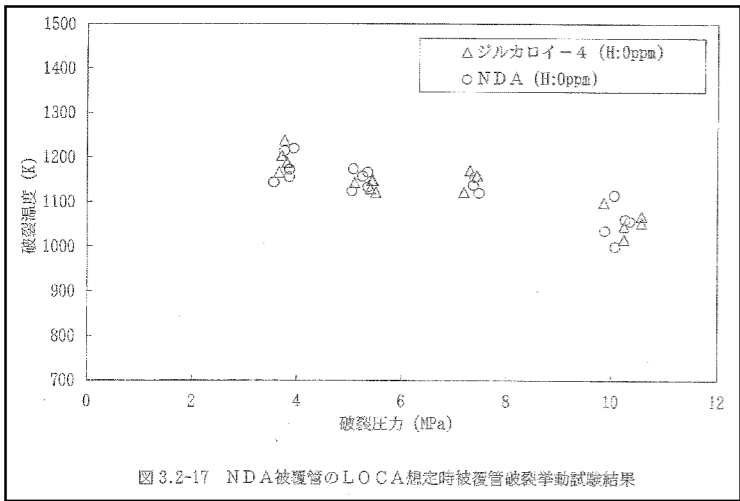
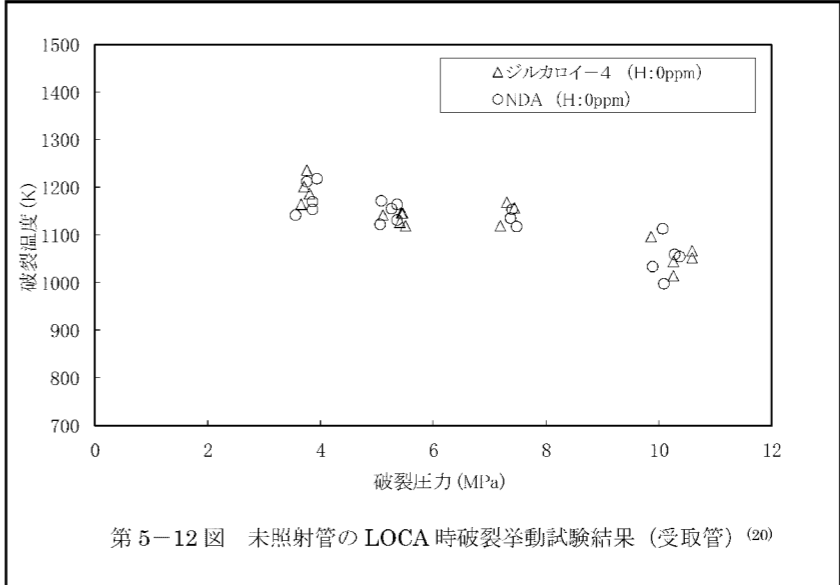
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>【添付書類八】</p> <p>指針12. 燃料設計 適合のための設計方針</p> <p>1 . について</p> <p>燃料集合体は、原子炉内における使用期間中を通じ、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化による起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が十分な強度を有し、その機能を保持できる設計とする。</p> <p>3 . 原子炉及び炉心</p> <p>3 . 2 機械設計</p> <p>3 . 2 . 1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a . 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</p> <p>3 . 6 参考文献</p> <p>(2) 「原燃工製P W R ステップ2 燃料の改良因子について」 N F K - 8 1 1 6 改4 原子燃料工業 平成15年</p> <p>【原燃工製P W R ステップ2 燃料の改良因子について】 N F K - 8 1 1 6 改4 原子燃料工業 平成15年】</p>  <p>図 3.2-17 NDA被覆管のLOCA想定時被覆管破裂挙動試験結果</p>		<p>5.4.3 高温特性</p> <p>被覆管の相変態 (α相からβ相に変化) が生じるような高温時においては、NDA 被覆管は、ジルカロイ-4 被覆管同様、約 98wt%のジルコニウムを主成分としているため、それらの主要な特性はジルカロイ-4 と同等である。1 冷却材喪失事故(LOCA)にて考慮する昇温内圧破裂試験結果、高温時のジルコニウム-水反応の試験結果をそれぞれ第 5-12 図及び第 5-13 図に示す。第 5-12 図及び第 5-13 図に示すとおり、NDA 被覆管の高温破裂特性及び高温酸化挙動はジルカロイ-4 被覆管と同等である。</p>  <p>第 5-12 図 未照射管の LOCA 時破裂挙動試験結果 (受取管) (20)</p>	<p>・設置変更許可申請書及び高燃焼度燃料導入時の安全審査資料では高温特性について詳細な内容は説明していないものの、設計及び工事の計画では、技術基準規則 23 条に適合するため、記載している。</p>

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

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

(24/26)

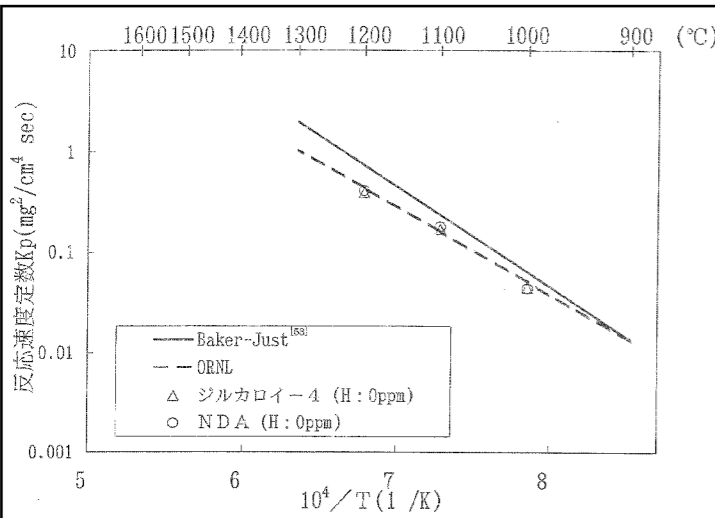
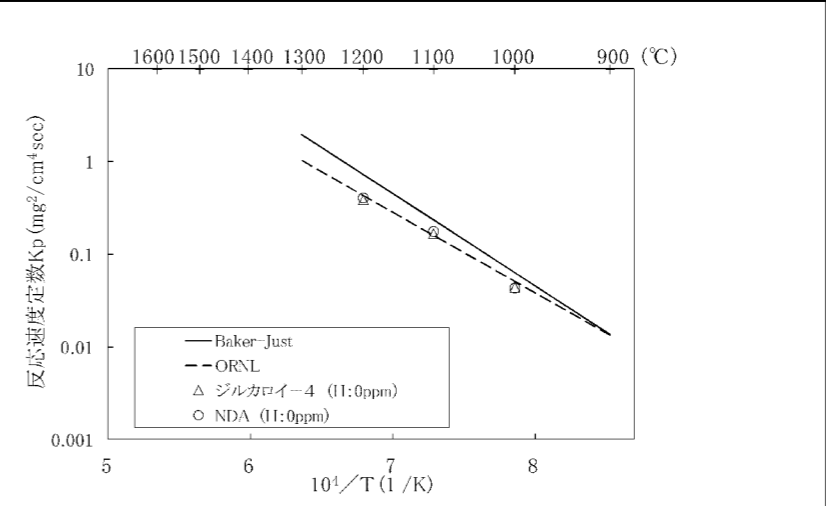
設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
 <p>図 3.2-16 NDA 被覆管のジルコニウム-水反応速度定数</p>		 <p>第 5-13 図 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数 (受取管) (20)</p>	

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

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

(25/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考															
<p>【添付書類八】</p> <p>指針12. 燃料設計 適合のための設計方針</p> <p>1 . について</p> <p>燃料集合体は、原子炉内における使用期間中を通じ、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化による起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が十分な強度を有し、その機能を保持できる設計とする。</p> <p>3 . 原子炉及び炉心</p> <p>3 . 2 機械設計</p> <p>3 . 2 . 1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a . 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</p> <p>3 . 6 参考文献</p> <p>(2) 「原燃工製PWR ステップ2 燃料の改良因子について」 NFK-8116改4 原子燃料工業 平成15年</p> <p>【原燃工製PWR ステップ2 燃料の改良因子について」 NFK-8116改4 原子燃料工業 平成15年】</p> <p>表 3.2-2 被覆管溶融点及び密度測定結果^[1]</p> <table border="1" data-bbox="103 1514 780 1654"> <thead> <tr> <th></th> <th>溶融点 (°C)</th> <th>密度(g/cm³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>1796</td> <td>6.52</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4</td> <td>1782</td> <td>6.52</td> </tr> </tbody> </table>		溶融点 (°C)	密度(g/cm ³)	NDA	1796	6.52	ジルカロイ-4	1782	6.52		<p>5.1 耐熱性</p> <p>ジルカロイ-4の溶融点は1,782°Cであり、結晶構造が820°Cでα相から(α+β)相へ、また、958°Cで(α+β)相からβ相に変態する⁽²⁰⁾。</p> <p>NDAは、ジルカロイ-4同様、約98wt%のジルコニウム(Zr)を主成分としているため、それらの材料物性はジルカロイ-4とほぼ同等である。</p> <p>NDAの溶融点及び相変態温度の測定結果を第5-1表及び第5-2表に示すように、NDAの溶融点は1,796°C、α相から(α+β)相及び(α+β)相からβ相への相変態温度はそれぞれ802°C及び937°Cであり、いずれも被覆管の異常な過渡変化時の最高温度(約□°C以下)よりもかなり高いので、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはない。したがって、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはないので、当該の挙動を設計評価では考慮していない。</p> <div data-bbox="1783 753 2534 1178" style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p style="text-align: center;">第5-1表 NDAの溶融点測定結果⁽²⁰⁾</p> <p style="text-align: center;">(単位: °C)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">種類</th> <th style="width: 50%;">溶融点測定結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NDA</td> <td style="text-align: center;">1,796</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ジルカロイ-4 (参考)</td> <td style="text-align: center;">1,782</td> </tr> </tbody> </table> </div>	種類	溶融点測定結果	NDA	1,796	ジルカロイ-4 (参考)	1,782	<p>・設置変更許可申請書及び高燃焼度燃料導入時の安全審査資料では耐熱性について詳細な内容は説明していないものの、設計及び工事の計画では、技術基準規則23条に適合するため、記載している。</p>
	溶融点 (°C)	密度(g/cm ³)																
NDA	1796	6.52																
ジルカロイ-4	1782	6.52																
種類	溶融点測定結果																	
NDA	1,796																	
ジルカロイ-4 (参考)	1,782																	

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

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

(26/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																		
<div data-bbox="106 317 795 489" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">表 3.2-3 被覆管の相変態温度</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">被覆管</th> <th style="width: 35%;">相変態開始温度</th> <th style="width: 35%;">相変態終了温度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4被覆管</td> <td style="text-align: center;">820</td> <td style="text-align: center;">958</td> </tr> <tr> <td>NDA被覆管</td> <td style="text-align: center;">802</td> <td style="text-align: center;">937</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right; margin-top: 5px;">単位：℃</p> </div>	被覆管	相変態開始温度	相変態終了温度	ジルカロイ-4被覆管	820	958	NDA被覆管	802	937		<div data-bbox="1739 296 2558 657" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">第 5-2 表 NDA の相変態温度測定結果⁽²⁰⁾</p> <p style="text-align: right;">(単位：℃)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">種類</th> <th style="width: 35%;">α→α+β</th> <th style="width: 35%;">α+β→β</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NDA</td> <td style="text-align: center;">802</td> <td style="text-align: center;">937</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ジルカロイ-4 (参考)</td> <td style="text-align: center;">820</td> <td style="text-align: center;">958</td> </tr> </tbody> </table> </div>	種類	α→α+β	α+β→β	NDA	802	937	ジルカロイ-4 (参考)	820	958	
被覆管	相変態開始温度	相変態終了温度																			
ジルカロイ-4被覆管	820	958																			
NDA被覆管	802	937																			
種類	α→α+β	α+β→β																			
NDA	802	937																			
ジルカロイ-4 (参考)	820	958																			