

補足説明資料 6

高燃焼度燃料における燃料被覆材に関する

補足説明資料

目 次

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

補足説明資料 6 - 1

高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る
適合性説明内容に関する補足説明資料

目 次

- 補足説明資料 6-1-1 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（美浜発電所第3号機）
- 補足説明資料 6-1-2 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（高浜発電所第1, 2号機）

補足説明資料 6－1－1

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
(美浜発電所第3号機)

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 系ジルコニウム基合金及び Sn-Fe-Nb 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 16 年 4 月 15 日平成 15・07・28 原第 40 号許可）では設置許可基準規則に代わる前の「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」の要求に適合していることを確認している。

※2 公開文献「三菱 PWR 高燃焼度化ステップ 2 燃料の機械設計 MHI - NES - 1021 改 5 三菱重工業 平成 15 年」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 ^{※1}	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	—	核分裂するウランを含むペレットにおいて考慮する事項 ^{※2} であるため、燃料被覆材としては考慮不要。

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

※2 核性質については、核分裂反応に係る影響を確認しており、具体的にはペレットに対して考慮すべき性質としている。「ガドリニア入り燃料の核設計 MAPI-1066 改 5 三菱重工業 平成 15 年 (2.1.3 ガドリニア濃度)」参照 (設置許可で引用)

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>	燃料被覆材硬さの測定結果よりジルコニウム基合金の硬さはジルカロイ-4と同等であり、支持格子と燃料被覆材の接触による摩耗は燃料被覆材によらず同等であることを確認。
		耐PCI性 ^{※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破損はペレットと燃料被覆材の接触による物理的作用及び腐食性FPによる化学的作用が重畳して生じる。従って耐PCI性は物理的及び化学的性質の両方の性質によるものであり、単一の性質によるものではないことを踏まえ、「その他考慮すべき性質」に分類する。

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (3/3)

性質		確認項目 ^{※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燃料被覆材との反応 ^{※2}	海外商業炉での照射実績よりジルコニウム基合金燃料被覆材の内面酸化及びボンディング層は小さく、PCI への影響がないことを確認している。
		ガドリニア入り二酸化ウランペレットと燃料被覆材との反応 ^{※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燃料被覆材との反応は、二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金燃料被覆材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。
		<u>高温特性</u>	昇温内圧破裂試験結果及び高温時のジルコニウム-水反応の試験結果よりジルコニウム基合金の高温破裂特性及び高温酸化挙動はジルカロイ-4 と同等であることを確認。

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

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

2.2 各段階における説明内容

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

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

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

なお、本設計内容は、平成 23 年 6 月 15 日付け平成 23・03・08 原第 9 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 17 年 8 月 23 日付け平成 17・07・13 原第 14 号にて特殊加工認可、平成 17 年 8 月 25 日付け平成 17・07・13 原第 34 号にて燃料体設計認可を取得している。

55GWd/t 燃料導入以降に取得した照射データについては燃料体設計認可申請書に反映するとともに、燃料集合体の照射挙動に係る設計評価への影響が無いことも確認している。（燃料被覆材等のデータ拡充箇所については添付参照）

今回の設工認申請書における照射データは、最新の平成 24 年 7 月 3 日付け平成 24・06・04 原第 6 号の燃料体設計認可における照射データと同じ内容となっている。

4. まとめ

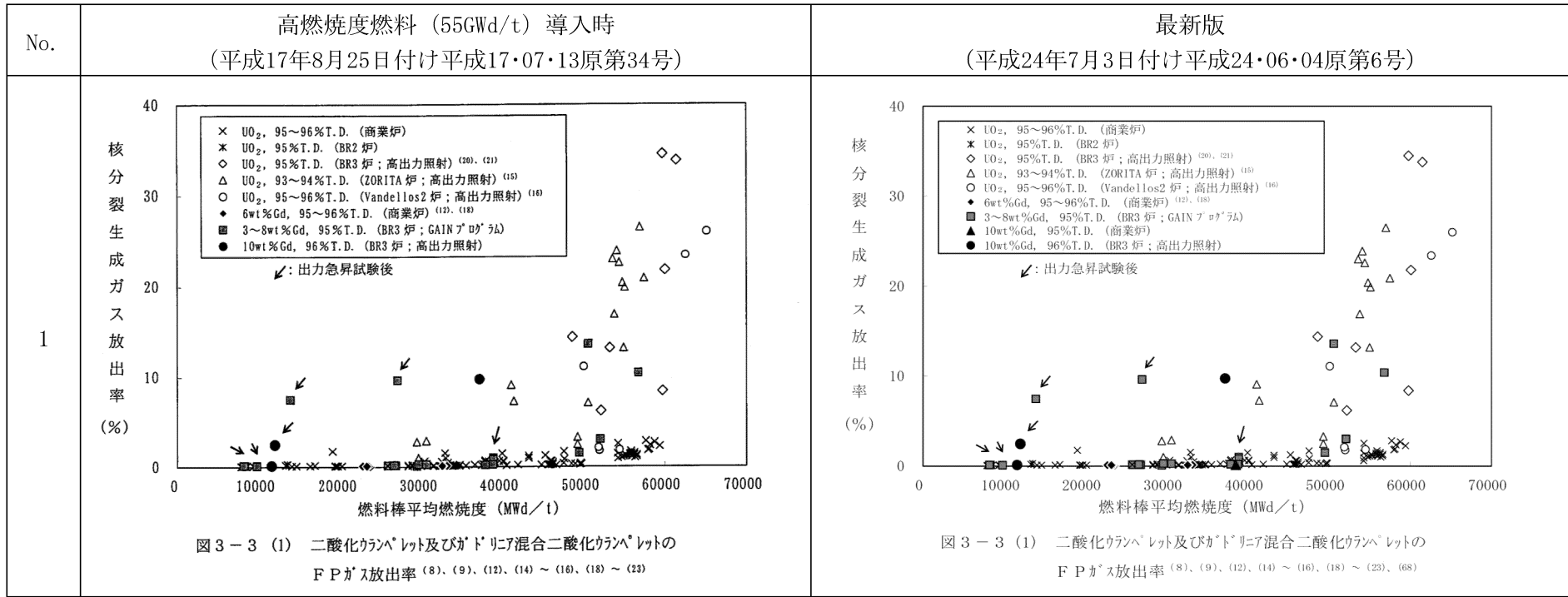
高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯を表 2 にまとめる。

表 2 高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯

許認可手続き等 (【】：申請者)	申請又は 許可年月日等	適合性概要
設置変更許可申請 【関西電力】	平成 16 年 4 月 15 日 許可	ジルコニウム基合金がジルカロイ-4 と同等以上の物理的及び化学的性質を有していることを確認。
燃料体設計認可申請 特殊加工認可申請 (55GWd/t 導入時) 【三菱重工】	平成 17 年 8 月 23 日 平成 17 年 8 月 25 日 認可	設置許可 (平成 16 年 4 月 15 日) に基づく燃料体設計認可及び特殊加工認可を取得。
燃料体設計認可申請 特殊加工認可申請 (最新) 【三菱原子燃料】	平成 24 年 7 月 3 日 平成 23 年 6 月 15 日 認可	燃料事業に関する権利義務継承のため、設置許可 (平成 16 年 4 月 15 日) に基づく特殊加工認可を取得。ペレット L/D(長さ/直径)変更の反映のため、設置許可 (平成 16 年 4 月 15 日) に基づく燃料体設計認可を取得。
設計及び工事の計画 の認可申請 【関西電力】	令和 3 年 11 月 26 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 (平成 16 年 4 月 15 日) に基づく申請であり、平成 24 年に取得した燃料体設計認可及び平成 23 年に取得した特殊加工認可から設計に変更はない。

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 16 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。

高燃焼度燃料(55GWd/t)導入時以降の燃料体設計認可申請書データ拡充について



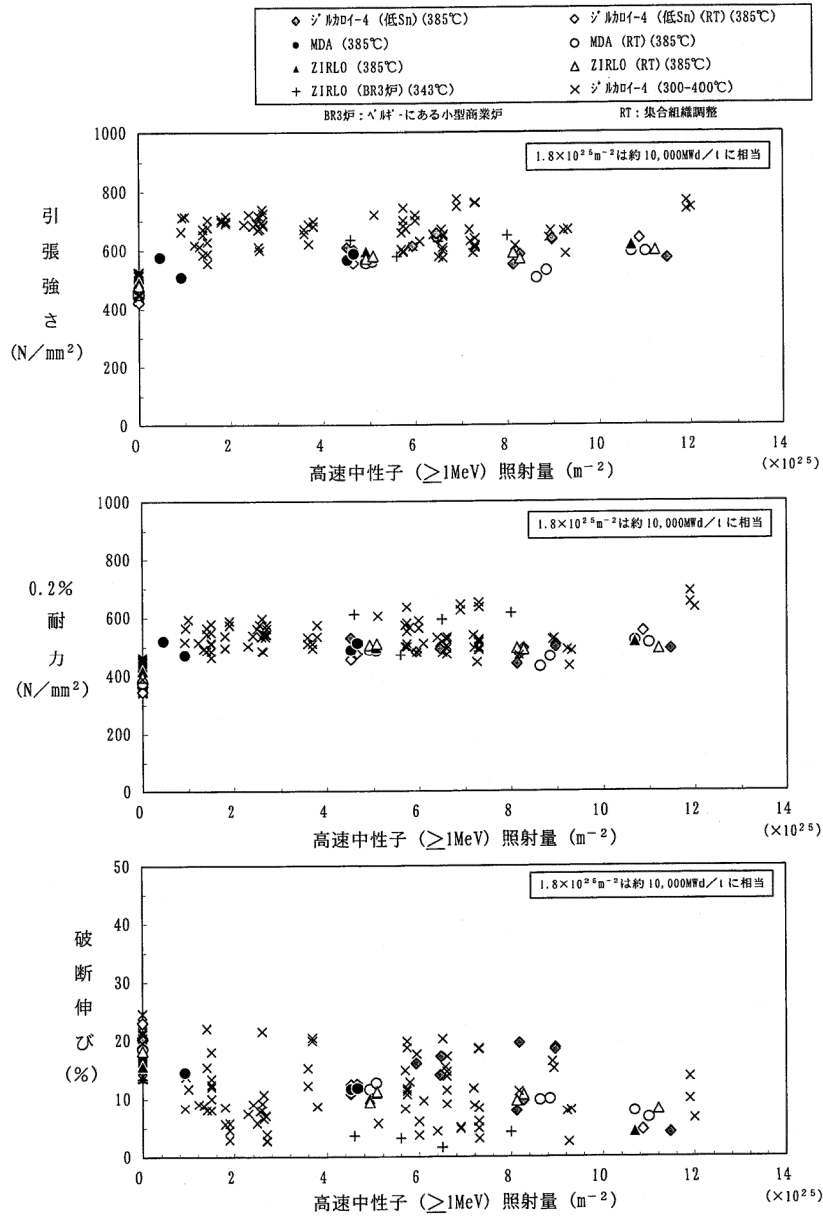


図5-1 MDA及びZIRLO被覆管の機械特性 (13) ~ (15)、(19)、(39)、(41) ~ (43)

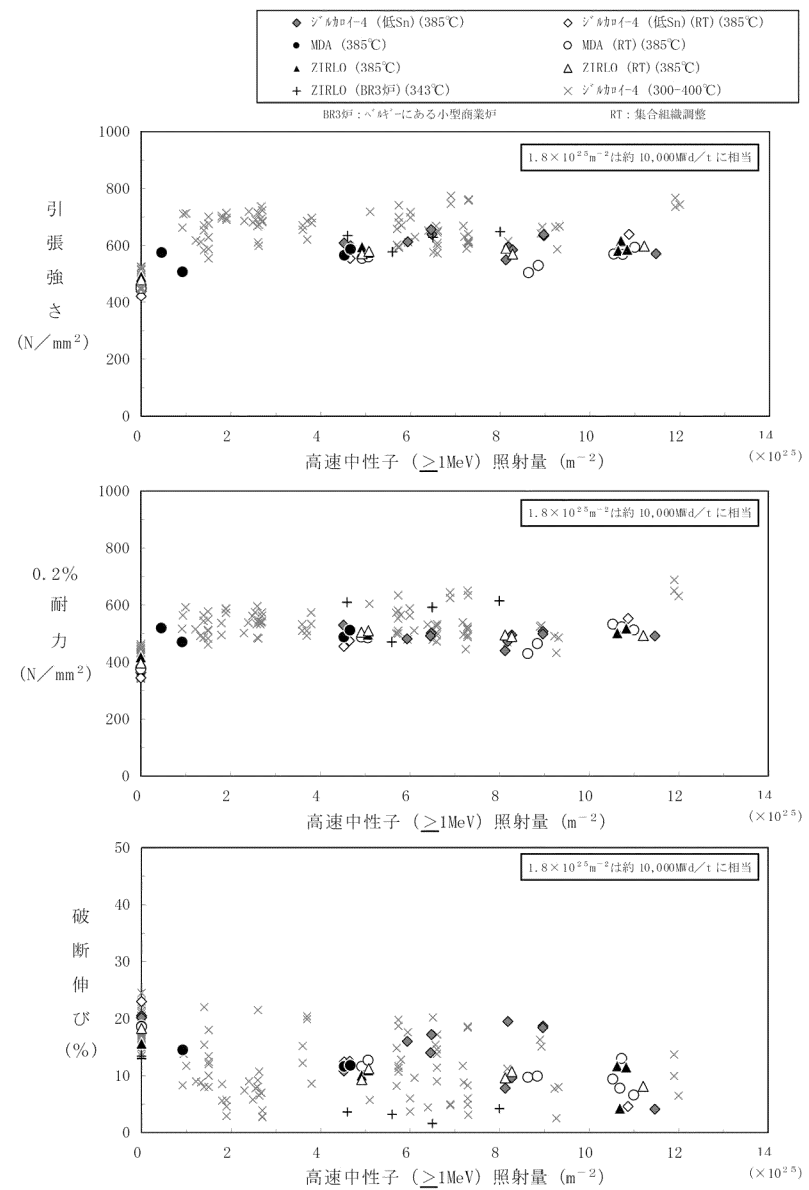


図5-1 MDA及びZIRLO被覆管の機械特性 (13) ~ (15)、(19)、(39)、(41) ~ (43)、(68)

3

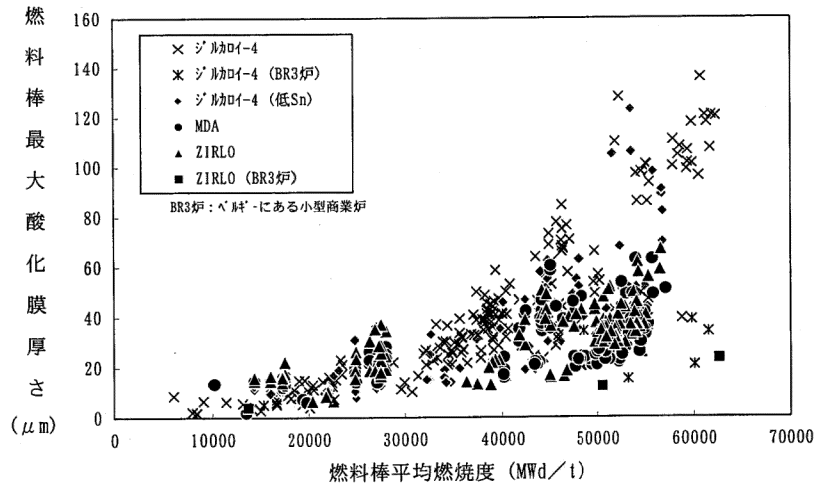


図5-8 MDA及びZIRLO被覆管の
炉内酸化膜厚さ (8) ~ (12)、(18)、(19)、(39)、(44)、(49) ~ (51)、(54) ~ (56)

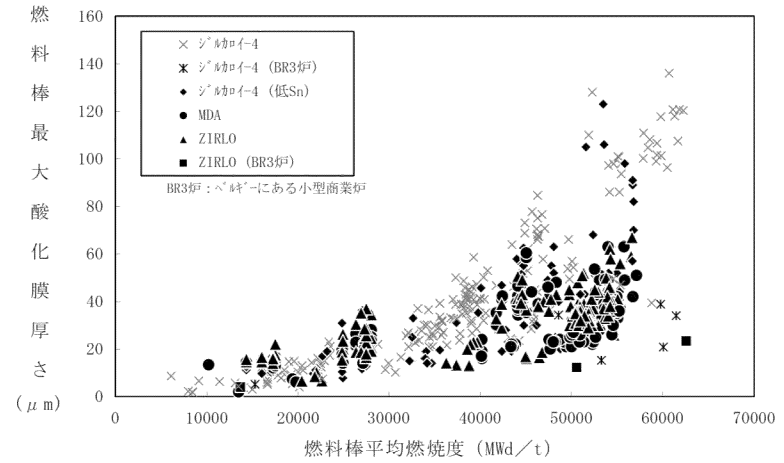


図5-8 MDA及びZIRLO被覆管の
炉内酸化膜厚さ (8) ~ (12)、(18)、(19)、(39)、(44)、(49) ~ (51)、(54) ~ (56)、(68) 注)
注) オンサイト酸化膜厚さデータの一部はホットセルデータを参考に評価。

4

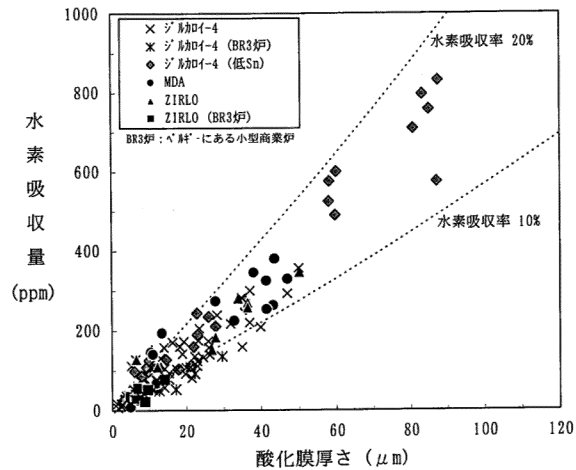


図5-10 MDA及びZIRLO被覆管の
炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (8)、(9)、(11) ~ (13)、(47)

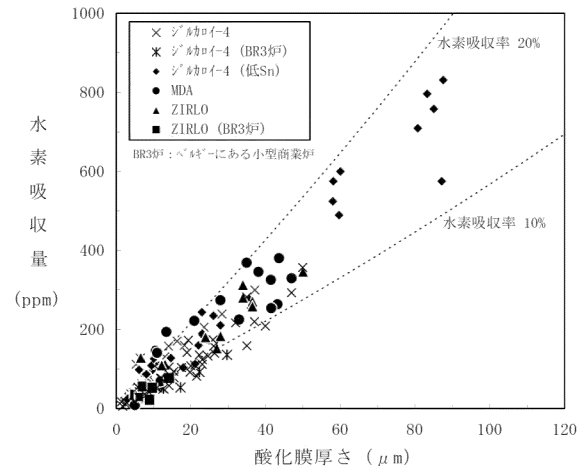


図5-10 MDA及びZIRLO被覆管の
炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (8)、(9)、(11) ~ (13)、(47)、(68)

補足説明資料 6－1－2

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
(高浜発電所第1，2号機)

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 系ジルコニウム基合金及び Sn-Fe-Nb 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 22 年 4 月 19 日平成 20・08・12 原第 33 号許可）では設置許可基準規則に代わる前の「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」の要求に適合していることを確認している。

※2 公開文献「三菱 PWR 高燃焼度化ステップ 2 燃料の機械設計 MNF - 1001 三菱原子燃料 平成 21 年」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 ^{※1}	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	—	核分裂するウランを含むペレットにおいて考慮する事項 ^{※2} であるため、燃料被覆材としては考慮不要。

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

※2 核性質については、核分裂反応に係る影響を確認しており、具体的にはペレットに対して考慮すべき性質としている。「ガドリニア入り燃料の核設計 MAPI-1066 改 6 三菱重工業 平成 17 年 (2.1.3 ガドリニア濃度)」参照 (設置許可で引用)

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>	燃料被覆材硬さの測定結果よりジルコニウム基合金の硬さはジルカロイ-4と同等であり、支持格子と燃料被覆材の接触による摩耗は燃料被覆材によらず同等であることを確認。
		耐PCI性 ^{※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破損はペレットと燃料被覆材の接触による物理的作用及び腐食性FPによる化学的作用が重畳して生じる。従って耐PCI性は物理的及び化学的性質の両方の性質によるものであり、単一の性質によるものではないことを踏まえ、「その他考慮すべき性質」に分類する。

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (3/3)

性質		確認項目 ^{※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燃料被覆材との反応 ^{※2}	海外商業炉での照射実績よりジルコニウム基合金燃料被覆材の内面酸化及びボンディング層は小さく、PCI への影響がないことを確認している。
		ガドリニア入り二酸化ウランペレットと燃料被覆材との反応 ^{※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燃料被覆材との反応は、二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金燃料被覆材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。
		<u>高温特性</u>	昇温内圧破裂試験結果及び高温時のジルコニウム-水反応の試験結果よりジルコニウム基合金の高温破裂特性及び高温酸化挙動はジルカロイ-4 と同等であることを確認。

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

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

2.2 各段階における説明内容

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

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

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

なお、本設計内容は、平成 23 年 6 月 15 日付け平成 23・03・08 原第 9 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 23 年 6 月 15 日付け平成 23・03・08 原第 9 号にて特殊加工認可、同日付け平成 23・03・08 原第 10 号にて燃料体設計認可を取得している。

上記以降については、新たに公開された照射データはなく、設計評価へ影響を及ぼすような照射データも得られていない。また、国内外の事象を踏まえ設計評価へ反映すべき新たな知見もないため、今回の設工認申請書における照射データは、最新の平成 24 年 7 月 3 日付け平成 24・06・04 原第 6 号の燃料体設計認可における照射データと同じ内容となっている。

4. まとめ

高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯を表 2 にまとめる。

表 2 高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯

許認可手続き 等 (【】：申請者)	申請又は 許可年月日 等	適合性概要
設置変更許可申請 【関西電力】	平成 22 年 4 月 19 日 許可	ジルコニウム基合金がジルカロイ-4 と同等以上の物理的及び化学的性質を有していることを確認。
燃料体設計認可申請 特殊加工認可申請 (55GWd/t 導入時) 【三菱原子燃料】	平成 23 年 6 月 15 日 平成 23 年 6 月 15 日 認可	設置許可 (平成 22 年 4 月 19 日) に基づく燃料体設計認可及び特殊加工認可を取得。
燃料体設計認可申請 (最新) 【三菱原子燃料】	平成 24 年 7 月 3 日 認可	ペレット L/D(長さ/直径) 変更の反映のため、設置許可 (平成 22 年 4 月 19 日) に基づく燃料体設計認可を取得。
設計及び工事の計画 の認可申請 【関西電力】	令和 3 年 11 月 26 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 (平成 22 年 4 月 19 日) に基づく申請であり、平成 24 年に取得した燃料体設計認可及び平成 23 年に取得した特殊加工認可から設計に変更はない。

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 22 年の設置許可よりジルコニウム基合金がジルカロイ-4 と同等以上の物理的及び化学的性質を有していることを確認しており、本設工認申請においても当該設置許可に基づく確認項目及び確認内容の説明を実施しているものである。

補足説明資料 6 - 2

設置許可との整合性に関する補足説明資料

目 次

- 補足説明資料 6 - 2 - 1 設置許可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 - 2 - 2 設置許可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 6－2－1

設置許可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、「美浜発電所 発電用原子炉設置変更許可申請書」（平成 16 年 4 月 15 日 平成 15・07・28 原第 40 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：B型燃料集合体に係る記載

(1/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																																																																																																						
<p>【本文】</p> <p>五、発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備</p> <p>ハ、原子炉本体の構造及び設備</p> <p>(2) 燃料体</p> <p>(ii) 燃料被覆材の種類</p> <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-ニオブ合金にス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26 領域燃料については、ジルカロイ-4</p>	<p>【安全審査資料：美浜発電所3号炉ステップ2燃料の概要について】</p> <p>2. ステップ2燃料の基本仕様</p> <p>燃料棒及び燃料集合体の概要を図3-1に示す。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、制御棒案内シムプル、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、高燃焼度化に際して、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こととしている。</p> <p style="text-align: center;">表 3-1 15×15型燃料の主要仕様 (1/2)</p> <table border="1" data-bbox="869 863 1605 1556"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>ステップ1燃料</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4.0～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.5～約1.9wt%)</td> <td>約4.6wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.0wt%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>約95%理論密度</td> <td>約97%理論密度 (ガドリニア入り燃料については約96%理論密度)</td> </tr> <tr> <td>ペレット直径</td> <td>約9.29mm 又は約9.21mm</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>ペレット長さ</td> <td>約12.6mm、約11.2mm、 又は約10.0mm</td> <td>約12.6mm 又は約10.0mm</td> </tr> <tr> <td>ペレット最高燃焼度</td> <td>約62,000MWdt</td> <td>約71,000MWdt</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⁽²⁾ Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系⁽¹⁾ジルコニウム基合金⁽²⁾ Sn-Fe-Nb系⁽¹⁾ジルコニウム基合金⁽²⁾</td> </tr> <tr> <td>外径*</td> <td>約10.72mm</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>厚さ*</td> <td>約0.62mm 又は約0.66mm</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>被覆管-ペレット間隙(直径)</td> <td>約0.19mm</td> <td>同左</td> </tr> </tbody> </table> <p>* 基本仕様（原子炉設置変更許可申請書本文記載事項。ただし、本表では一部の値について詳細に示している。）</p> <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	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4.0～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.5～約1.9wt%)	約4.6wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.0wt%以下)	ガドリニア濃度*	約6wt%	約10wt%以下	初期密度*	約95%理論密度	約97%理論密度 (ガドリニア入り燃料については約96%理論密度)	ペレット直径	約9.29mm 又は約9.21mm	同左	ペレット長さ	約12.6mm、約11.2mm、 又は約10.0mm	約12.6mm 又は約10.0mm	ペレット最高燃焼度	約62,000MWdt	約71,000MWdt	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 ⁽²⁾ Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系 ⁽¹⁾ ジルコニウム基合金 ⁽²⁾ Sn-Fe-Nb系 ⁽¹⁾ ジルコニウム基合金 ⁽²⁾	外径*	約10.72mm	同左	厚さ*	約0.62mm 又は約0.66mm	同左	被覆管-ペレット間隙(直径)	約0.19mm	同左	<p>【要目表】</p> <p style="text-align: right;">(3/5)</p> <table border="1" data-bbox="1754 373 2407 1014"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>変更前</th> <th>変更後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="10">材料</td> <td rowspan="10">二酸化ウラン燃料材</td> <td>ウラン235濃縮度 wt%</td> <td>4.60^(注1,3)</td> <td>変更なし</td> </tr> <tr> <td>密度(理論密度比) %</td> <td>97^(注3)</td> <td>97.0^(注1,4)</td> </tr> <tr> <td>ウラン含有率 wt%</td> <td>—</td> <td>□以上^(注4)</td> </tr> <tr> <td>酸素対ウラン比</td> <td>—</td> <td>2.000^(注1,4)</td> </tr> <tr> <td>炭素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td>ふっ素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td>水素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td>窒素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td rowspan="10">材料</td> <td rowspan="10">ガドリニア混合二酸化ウラン燃料材</td> <td>ウラン235濃縮度 wt%</td> <td>3.00^(注1,3)</td> <td>変更なし</td> </tr> <tr> <td>密度(理論密度比) %</td> <td>96^(注3)</td> <td>96.0^(注1,4)</td> </tr> <tr> <td>ウラン含有率 wt%</td> <td>—</td> <td>□以上^(注4)</td> </tr> <tr> <td>酸素対ウラン比</td> <td>—</td> <td>2.083^(注1,4)</td> </tr> <tr> <td>ガドリニア濃度 wt%</td> <td>10^(注1,12)</td> <td>10.00^(注4)</td> </tr> <tr> <td>ガドリニウム濃度 wt%</td> <td>—</td> <td>8.68^(注4)</td> </tr> <tr> <td>炭素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td>ふっ素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td>水素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td>窒素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td>燃料被覆材</td> <td>—</td> <td>Sn-Fe-Cr-Nb系^(注3)ジルコニウム基合金 Sn-Fe-Nb系^(注3)ジルコニウム基合金</td> <td>変更なし</td> </tr> </tbody> </table> <p>【添付資料8 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書】</p> <p>5. ジルコニウム基合金</p> <p>MDA及びZIRLO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年6月15日、平成23・03・08原第9号）。</p> <p>MDA及びZIRLO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、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^(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>			変更前	変更後	材料	二酸化ウラン燃料材	ウラン235濃縮度 wt%	4.60 ^(注1,3)	変更なし	密度(理論密度比) %	97 ^(注3)	97.0 ^(注1,4)	ウラン含有率 wt%	—	□以上 ^(注4)	酸素対ウラン比	—	2.000 ^(注1,4)	炭素 wt%	—	□以下 ^(注4)	ふっ素 wt%	—	□以下 ^(注4)	水素 wt%	—	□以下 ^(注4)	窒素 wt%	—	□以下 ^(注4)	材料	ガドリニア混合二酸化ウラン燃料材	ウラン235濃縮度 wt%	3.00 ^(注1,3)	変更なし	密度(理論密度比) %	96 ^(注3)	96.0 ^(注1,4)	ウラン含有率 wt%	—	□以上 ^(注4)	酸素対ウラン比	—	2.083 ^(注1,4)	ガドリニア濃度 wt%	10 ^(注1,12)	10.00 ^(注4)	ガドリニウム濃度 wt%	—	8.68 ^(注4)	炭素 wt%	—	□以下 ^(注4)	ふっ素 wt%	—	□以下 ^(注4)	水素 wt%	—	□以下 ^(注4)	窒素 wt%	—	□以下 ^(注4)	燃料被覆材	—	Sn-Fe-Cr-Nb系 ^(注3) ジルコニウム基合金 Sn-Fe-Nb系 ^(注3) ジルコニウム基合金	変更なし	
項目	ステップ1燃料	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4.0～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.5～約1.9wt%)	約4.6wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.0wt%以下)																																																																																																							
ガドリニア濃度*	約6wt%	約10wt%以下																																																																																																							
初期密度*	約95%理論密度	約97%理論密度 (ガドリニア入り燃料については約96%理論密度)																																																																																																							
ペレット直径	約9.29mm 又は約9.21mm	同左																																																																																																							
ペレット長さ	約12.6mm、約11.2mm、 又は約10.0mm	約12.6mm 又は約10.0mm																																																																																																							
ペレット最高燃焼度	約62,000MWdt	約71,000MWdt																																																																																																							
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 ⁽²⁾ Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系 ⁽¹⁾ ジルコニウム基合金 ⁽²⁾ Sn-Fe-Nb系 ⁽¹⁾ ジルコニウム基合金 ⁽²⁾																																																																																																							
外径*	約10.72mm	同左																																																																																																							
厚さ*	約0.62mm 又は約0.66mm	同左																																																																																																							
被覆管-ペレット間隙(直径)	約0.19mm	同左																																																																																																							
		変更前	変更後																																																																																																						
材料	二酸化ウラン燃料材	ウラン235濃縮度 wt%	4.60 ^(注1,3)	変更なし																																																																																																					
		密度(理論密度比) %	97 ^(注3)	97.0 ^(注1,4)																																																																																																					
		ウラン含有率 wt%	—	□以上 ^(注4)																																																																																																					
		酸素対ウラン比	—	2.000 ^(注1,4)																																																																																																					
		炭素 wt%	—	□以下 ^(注4)																																																																																																					
		ふっ素 wt%	—	□以下 ^(注4)																																																																																																					
		水素 wt%	—	□以下 ^(注4)																																																																																																					
		窒素 wt%	—	□以下 ^(注4)																																																																																																					
		材料	ガドリニア混合二酸化ウラン燃料材	ウラン235濃縮度 wt%	3.00 ^(注1,3)	変更なし																																																																																																			
				密度(理論密度比) %	96 ^(注3)	96.0 ^(注1,4)																																																																																																			
ウラン含有率 wt%	—			□以上 ^(注4)																																																																																																					
酸素対ウラン比	—			2.083 ^(注1,4)																																																																																																					
ガドリニア濃度 wt%	10 ^(注1,12)			10.00 ^(注4)																																																																																																					
ガドリニウム濃度 wt%	—			8.68 ^(注4)																																																																																																					
炭素 wt%	—			□以下 ^(注4)																																																																																																					
ふっ素 wt%	—			□以下 ^(注4)																																																																																																					
水素 wt%	—			□以下 ^(注4)																																																																																																					
窒素 wt%	—			□以下 ^(注4)																																																																																																					
燃料被覆材	—	Sn-Fe-Cr-Nb系 ^(注3) ジルコニウム基合金 Sn-Fe-Nb系 ^(注3) ジルコニウム基合金	変更なし																																																																																																						

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：B型燃料集合体に係る記載

(2/25)

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 燃料</p> <p>3.2.1 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-ニオブ合金にス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、<u>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(2)燃料体(ii)燃料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-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金」</u>（以下、3.2では「<u>ジルコニウム基合金</u>」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、15×15であり、そのうち204本が燃料棒、20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、中性子源又はシンプルプラグアセンブリの挿入に使用する。</p>	<p>2. ステップ2燃料の基本仕様</p> <p>(4) 被覆管材料</p> <p>炉内滞在期間の長期化に伴う被覆管の腐食及び水素吸収量増加を抑制するため、<u>被覆管材料をステップ1燃料のジルカロイ-4から表3-2に示すジルコニウム基合金（MDA、NDA及びZIRLO™）に変更する。</u>なお、A型燃料にはMDA及びZIRLO、<u>B型燃料にはNDAの改良被覆管を採用する。</u></p> <p>MDAは、三菱重工業（株）により開発されたものであり、豊富な照射実績を持つジルカロイ-4をベースとして、耐食性向上のためSn含有量を低下させ、さらに水素吸収率の低減と機械的強度の向上のためにNbを添加したSn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金である。</p> <p><u>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である。</u></p> <p>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である。</p>	<p>2. 構成材料の概要</p> <p>燃料集合体の材料は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を含むプラントの使用条件の下で、燃料寿命中その健全性が維持されるよう選定している。<u>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。</u>また、燃料集合体主材料の機械的性質を表2-2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：B型燃料集合体に係る記載

(3/25)

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基合金</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金</p> <p>(Sn：0.7～0.9wt%、 Fe：0.18～0.24wt%、 Cr：0.07～0.13wt%、 Fe+Cr：0.28～0.37wt%、 Nb：0.45～0.55wt%、 Zr：残り)</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金</p> <p>(Sn：0.90～1.15wt%、 Fe：0.24～0.30wt%、 Cr：0.13～0.19wt%、 Nb：0.08～0.14wt%、 Ni：0.007～0.014wt%、 Zr：残り)</p> <p>ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金</p> <p>・Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金</p> <p>(Sn：0.9～1.3wt%、 Fe：0.08～0.12wt%、 Nb：0.8～1.2wt%、 Zr：残り)</p> <p>ただし、第1～第26領域 ジルカロイ-4 ＜中略＞</p>	<p>表 3-2 被覆管の合金成分</p> <table border="1" data-bbox="854 436 1644 810"> <thead> <tr> <th rowspan="2">主成分*1</th> <th colspan="3">ジルカロイ-4*2</th> <th colspan="3">改良被覆管</th> </tr> <tr> <th>規格</th> <th>従来Sn</th> <th>低Sn</th> <th>MDA</th> <th>NDA</th> <th>ZIRLO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sn</td> <td>1.2～1.7</td> <td>1.5</td> <td>1.3</td> <td>0.7～0.9</td> <td>0.90～1.15</td> <td>0.9～1.3</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18～0.24</td> <td>0.2</td> <td>←</td> <td>0.18～0.24</td> <td>0.24～0.30</td> <td>0.08～0.12</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07～0.13</td> <td>0.1</td> <td>←</td> <td>0.07～0.13</td> <td>0.13～0.19</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28～0.37</td> <td>0.3</td> <td>←</td> <td>0.28～0.37</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>0.45～0.55</td> <td>0.08～0.14</td> <td>0.8～1.2</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>0.007～0.014</td> <td>—</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1 数値の単位はwt%。また、上記以外の残りの成分はジルコニウム。 *2 ジルカロイ-4のうち、規格内でSn含有量を少なくしたものを低Snジルカロイ-4、それ以外を従来Snジルカロイ-4と呼ぶ。</p>	主成分*1	ジルカロイ-4*2			改良被覆管			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>表 2-1 燃料集合体主材料の化学成分（続き）</p> <table border="1" data-bbox="1730 407 2427 852"> <thead> <tr> <th rowspan="2">構成部品</th> <th rowspan="2">材料の種類</th> <th colspan="2">主成分 (wt%)</th> <th colspan="11">不 純 物 (ppm)</th> </tr> <tr> <th>Sn</th> <th>Fe+Cr</th> <th>Al</th> <th>B</th> <th>Ca</th> <th>Cd</th> <th>Cu</th> <th>Hf</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Ni</th> <th>N</th> <th>Si</th> <th>Ti</th> <th>U</th> <th>W</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註3)</td> <td>Sn</td> <td>0.70/0.90</td> <td>Al</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>B</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>Ca</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Cd</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.45/0.55</td> <td>C</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>10</td> <td>Co</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註4)</td> <td>Sn</td> <td>0.90/1.30</td> <td>Al</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.08/0.12</td> <td>B</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.80/1.20</td> <td>Ca</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>10</td> <td>Cd</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残り</td> <td>C</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>—</td> <td>—</td> <td>Co</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table> <p>表 2-2 燃料集合体主材料の機械的性質（15×15型）</p> <table border="1" data-bbox="1685 972 2472 1142"> <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">MDA ZIRLO</td> <td>(高温引張試験：385℃)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>引張強さ</td> <td>110 MPa</td> </tr> <tr> <td>耐力</td> <td>110 MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>伸び</td> <td>11%</td> </tr> </tbody> </table>	構成部品	材料の種類	主成分 (wt%)		不 純 物 (ppm)											Sn	Fe+Cr	Al	B	Ca	Cd	Cu	Hf	Mg	Mn	Ni	N	Si	Ti	U	W	燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註3)	Sn	0.70/0.90	Al	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	Fe	0.18/0.24	B	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	Cr	0.07/0.13	Ca	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	Fe+Cr	0.28/0.37	Cd	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	Nb	0.45/0.55	C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	O	10	Co	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	燃料被覆材	Sn-Fe-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註4)	Sn	0.90/1.30	Al	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	Fe	0.08/0.12	B	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	Nb	0.80/1.20	Ca	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	O	10	Cd	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	Zr	残り	C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	—	—	Co	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	構成部品	材料の種類	項目	規定値	燃料被覆材	MDA ZIRLO	(高温引張試験：385℃)		引張強さ	110 MPa	耐力	110 MPa		伸び	11%	<p>・燃料被覆材の化学成分のうち酸素については、別記-10に定められているジルコニウム合金燃料被覆材の規格であるJIS H 4751において化学成分の一つとして挙げられているものの、「酸素含有量は、受渡当事者間の協定による。」とされていることを踏まえ、基本設計である設置許可では化学成分として酸素を記載しておらず、詳細設計である設計及び工事の計画においては酸素を記載している。（酸素含有量の設定については添付参照）</p> <p>・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			改良被覆管																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	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	Fe+Cr	Al	B	Ca	Cd	Cu	Hf	Mg	Mn	Ni	N	Si	Ti	U	W																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註3)	Sn	0.70/0.90	Al	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Fe	0.18/0.24	B	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Cr	0.07/0.13	Ca	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Fe+Cr	0.28/0.37	Cd	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Nb	0.45/0.55	C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		O	10	Co	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
燃料被覆材	Sn-Fe-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註4)	Sn	0.90/1.30	Al	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Fe	0.08/0.12	B	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Nb	0.80/1.20	Ca	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		O	10	Cd	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Zr	残り	C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		—	—	Co	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
構成部品	材料の種類	項目	規定値																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
燃料被覆材	MDA ZIRLO	(高温引張試験：385℃)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		引張強さ	110 MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		耐力	110 MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	伸び	11%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						

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：B型燃料集合体に係る記載

(4/25)

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 燃料</p> <p>3.2.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材である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、その健全性を確証し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者等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、大飯発電所4号炉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高燃焼度域における照射データ（燃料棒平均燃焼度約62,000MWd/tまで）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高燃焼度域における照射データ（ペレット燃焼度約61,000MWd/tまで）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熔融点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いられたデータに比べ高い値が得られている（図4-9及び図4-10参照）。</p>	<p>5.3 耐食性</p> <p>MDA及びZIRLO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>炉内での被覆管酸化膜を図5-8に示す。</u>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、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO被覆管の腐食挙動は<u>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MDA及びZIRLO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。</u></p>	

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

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

(5/25)

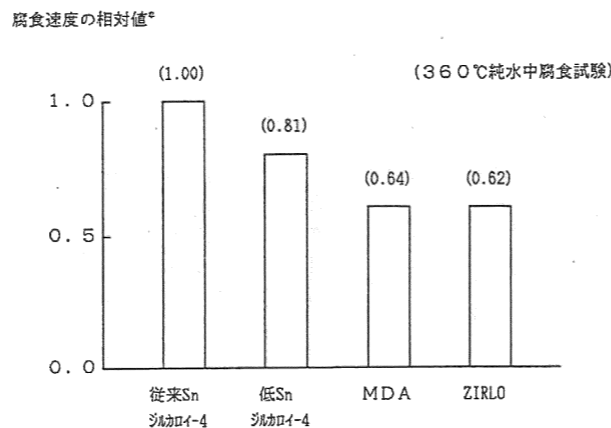
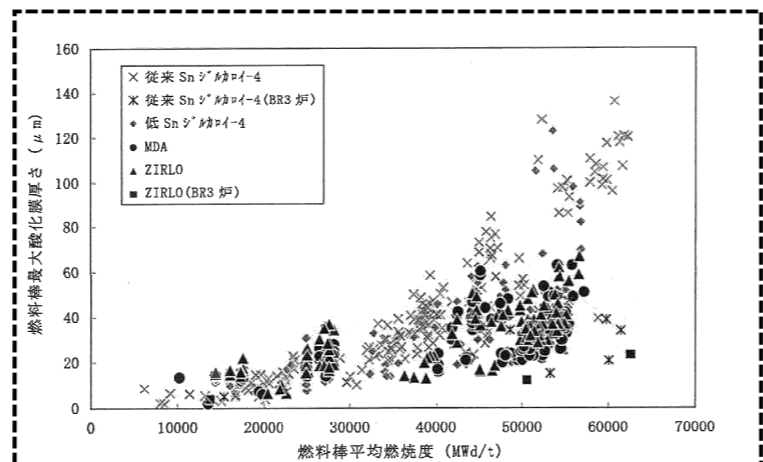
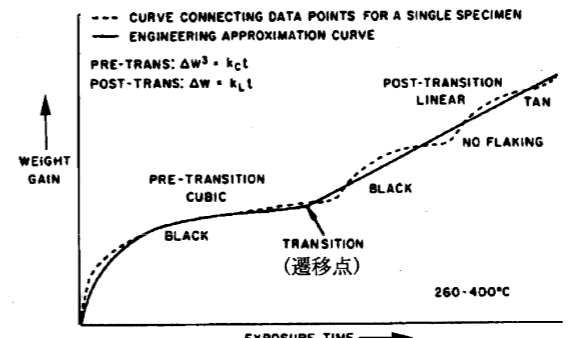
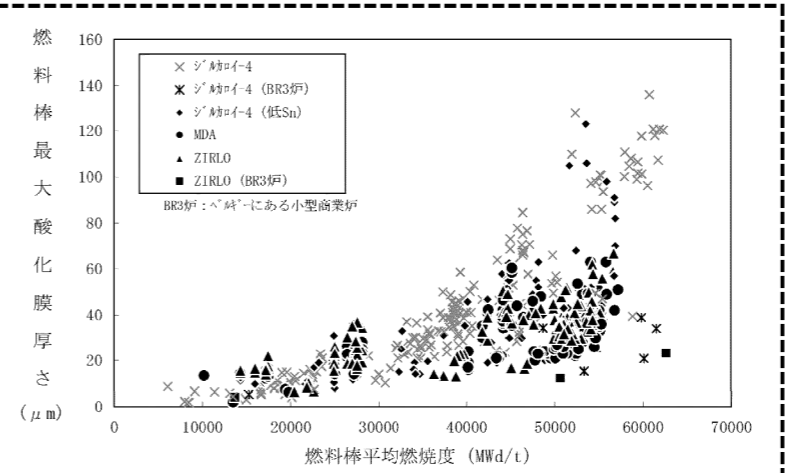
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>腐食速度の相対値*</p>  <p>(360°C純水中腐食試験)</p> <p>*従来Snジルカロー4の腐食速度を1.0とした場合の各被覆管材の腐食速度（180～780日間）の相対値。</p> <p>図4-1(1) 炉外腐食試験における改良被覆管（MDA及びZIRLO）の腐食特性⁽¹⁾</p>  <p>図4-1(2) 改良被覆管（MDA及びZIRLO）の炉内酸化膜厚さ⁽¹⁾</p>	<p>設計及び工事計画認可申請書 該当事項</p>  <p>図5-7 炉外腐食試験におけるジルカロー2とジルカロー4の典型的な腐食増量曲線⁽⁵³⁾</p>  <p>図5-8 MDA及びZIRLO被覆管の炉内酸化膜厚さ^{(8)～(12)、(18)、(19)、(50)、(44)、(49)～(51)、(54)～(56)、(68) (注1)}</p> <p>(注1) オンサイト酸化膜厚さデータの一部はホットセルデータを参考に評価。</p>	<p>備考</p> <p>・安全審査資料に図4-1(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4-1(2)を用いて設計評価（添付資料7）に反映しているため、設計及び工事の計画では記載不要である。</p>

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

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

(6/25)

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 燃料</p> <p>3.2.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材である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、その健全性を確証し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者等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、大飯発電所4号炉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高燃焼度域における照射データ（燃料棒平均燃焼度約62,000MWd/tまで）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（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（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高燃焼度域における照射データ（ペレット燃焼度約61,000MWd/tまで）をもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いられたデータに比べ高い値が得られている（図4-9及び図4-10参照）。</p>	<p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>ジルコニウムと水との反応で発生した水素の一部は、<u>被覆管に吸収される。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、MDA及びZIRLO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。ジルカロイ-4被覆管の水素吸収率は、被覆管10%減肉相当の酸化膜厚さ程度まで酸化膜厚さによらずほぼ一定の水素吸収率となっている。また、MDA及びZIRLO被覆管についても、酸化膜厚さ50μm程度まで酸化膜厚さによらずジルカロイ-4被覆管と同等の水素吸収率となっている。これは酸化膜を透過する水素量及び金属部に吸収される水素吸収量が被覆管の種類（ジルカロイ-4被覆管、MDA及びZIRLO被覆管）によらないためと考えられる。</u></p> <p>従って、MDA及びZIRLO被覆管の腐食量が、本申請の燃料集合体の使用範囲においてジルカロイ-4被覆管に比較して低減すること、及び<u>水素吸収率が酸化膜厚さによらずジルカロイ-4被覆管と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。</u></p> <p>また、MDA及びZIRLO被覆管の水素吸収量は、本申請の燃料集合体の使用範囲までジルカロイ-4被覆管に比較して低減すると考えられる。</p>	

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

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

(7/25)

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 4-3 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係⁽¹⁾</p>	<p>図 5-9 MDA 及び ZIRLO 被覆管の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (8)、(9)、(11) ~ (13)、(47)、(68)</p> <p>図 5-10 MDA 及び ZIRLO 被覆管の酸化膜厚さと水素吸収率の関係⁽¹⁶⁾</p>	<p>設計及び工事の計画に図5-10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ーイ-4と同等であることを設計評価 (添付資料7) に反映しているため、記載している。</p>

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

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

(8/25)

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 燃料</p> <p>3.2.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材であるジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</p>	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確証し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者等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、大飯発電所4号炉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高燃焼度域における照射データ（燃料棒平均燃焼度約62,000MWd/tまで）をもとに確認されており、<u>ジルカロイ-4製被覆管と比べて以下のとおりである。</u></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）。 ・<u>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）。</u> ・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高燃焼度域における照射データ（ペレット燃焼度約61,000MWd/tまで）をもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いられたデータに比べ高い値が得られている（図4-9及び図4-10参照）。</p>	<p>5.2.3 クリープ特性^(註1)</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。<u>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、MDA及びZIRLO被覆管は、ジルカロイ-4被覆管に比べて、外径減少が小さく、クリープがしにくくなっている。これは、クリープが転位（材料に元々ある結晶格子ずれ）の移動によるものであり、Zr中に固溶しているSn、特にNbが転位を捕獲してその動きを抑制するため、Nbを含まないジルカロイ-4被覆管に比べて、Nbを含むMDA及びZIRLO被覆管のクリープがしにくくなったためである。以上より、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(2)c.項に示す）設計評価に反映している。</u></p> <p>図5-5 燃料棒外径変化（実機照射セグメント燃料棒）^{(13)、(39)、(46)}</p>	<p>・設計及び工事の計画には、クリープ特性を定量的に示すため、関連する情報を記載している。</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：B型燃料集合体に係る記載

(9/25)

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4-5 改良被覆管（MDA及びZIRLO）の外径変化 [実機照射長尺燃料棒]⁽¹⁾</p>		<p>・安全審査資料に図4-5を記載しているのは、参考となる実験結果も示しており、実際のMDA及びZIRLOの外径変化はセグメント燃料棒の図から判断できるため、設計及び工事の計画では記載不要である。</p>

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

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

(10/25)

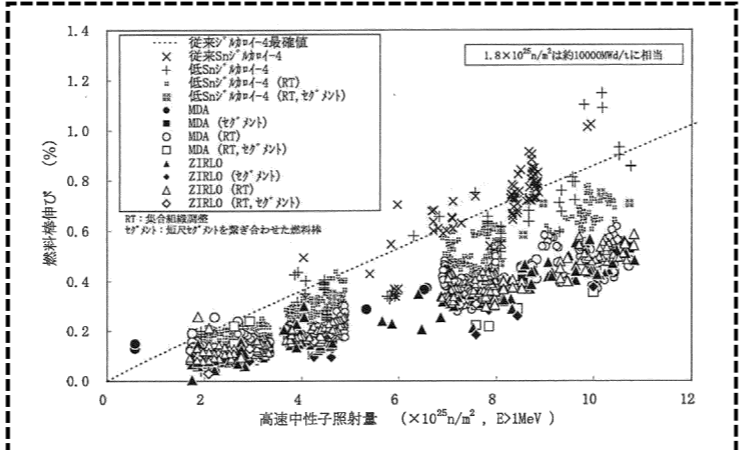
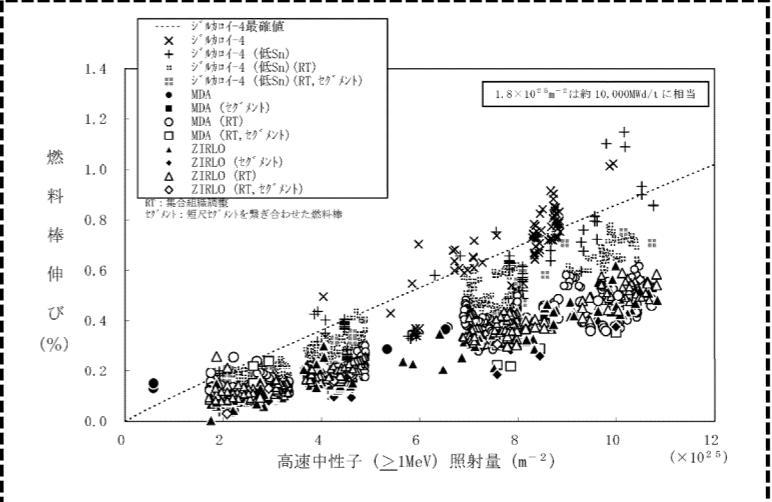
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者等により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、大飯発電所4号炉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高燃焼度域における照射データ（燃料棒平均燃焼度約62,000MWd/tまで）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高燃焼度域における照射データ（ペレット燃焼度約61,000MWd/tまで）をもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いられたデータに比べ高い値が得られている（図4-9及び図4-10参照）。</p>  <p>図4-7 改良被覆管（MDA及びZIRLO）の照射成長¹⁴⁾</p>	<p>5.2.4 照射成長^(註2)</p> <p>照射成長の支配要因は、ジルカロイ中の稠密六方晶（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されている。図5-6に示すように、MDA及びZIRLO被覆管とジルカロイ-4被覆管の照射成長は、ともに高速中性子照射量にほぼ比例し、ジルカロイ-4被覆管については高燃焼度領域でもこの傾向が認められる。また、MDA及びZIRLO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。これは固溶Sn、特にNbが照射欠陥の動きを抑制するため、Nbを含まないジルカロイ-4被覆管と比較して、Nbを含むMDA及びZIRLO被覆管の照射成長が小さくなるためと考えられる。</p> <p>従って、ジルカロイ-4被覆管と比較してMDA及びZIRLO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(2)c.項に示す）設計評価に反映している。</p> <p>燃料棒の設計に当たっては、上記の耐放射線性に関する事項を考慮した上で、被覆管応力等が設計基準を満足するようにする。</p>  <p>図5-6 MDA及びZIRLO被覆管の照射成長^{(12)、(14)、(19)、(47)～(52)}</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：B型燃料集合体に係る記載

(11/25)

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>MDA及びZIRLO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。α線及びβ線のような荷電粒子は、金属中を通り抜けるとき、電気的な相互作用によって原子の軌道電子を引き離すイオン化作用を起こす。また、γ線も軌道電子を原子から引き離す作用を起こす。このようにα線、β線、γ線は、主に金属原子の軌道電子と作用してエネルギーを消失していくので、MDA及びZIRLO被覆管の照射損傷に与える影響は軽微である。</p> <p>核分裂片は、その飛程が限定された近距離にしか及ばないため、二酸化ウラン燃料の表面で起こった核分裂だけが被覆管の内表面にしか作用せず、事実上の照射損傷を与えない。</p> <p>中性子は電荷を持たないので、金属中での電気的な相互作用によってエネルギーを失うことがなく、そのエネルギーは主として原子核との弾性衝突により多数の原子を格子位置からはじき出す作用によって消失される。この結果、金属の結晶格子内あるいは結晶粒界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、MDA及びZIRLO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>従って、MDA及びZIRLO被覆管の放射線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：B型燃料集合体に係る記載

(12/25)

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：美浜発電所3号炉ステップ2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、<u>図2.1-4に示すように、改良被覆管(MDA、NDA及びZIRLO)の耐力は、ジルカロイ-4製被覆管の耐力と同等であり、炉内での使用温度及び高速中性子照射の効果を考慮すると、約310N/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。</u></p> <p>(4) 被覆管引張歪</p> <p>被覆管に生じる円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に際して1%を超えないこと。</p> <p>ここで、<u>図2.1-5に示すように、改良被覆管(MDA、NDA及びZIRLO)の延性は、ジルカロイ-4製被覆管の延性と同等であり、従来と同様、各過渡変化に際して円周方向引張歪の変化量が1%を超えないことを設計基準として使用する。</u></p>	<p>5.2.1 機械的性質</p> <p>機械特性への影響因子としては、照射脆化と水素脆化が考えられる。照射脆化は照射欠陥の蓄積（濃度）によるが、これは高速中性子束、被覆管温度、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定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。MDA及びZIRLO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^(註1)は、<u>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。</u>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⁽³⁹⁾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$27\sim 32\times 10^{25}\text{n/m}^2$ ($E>1\text{MeV}$)まで十分な延性が確保されているとの報告例もある⁽⁶⁶⁾。</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MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO被覆管は上述のとおり、未照射材で水素吸収による機械特性への影響がジルカロイ-4被覆管と同等であることから、照射材についてもジルカロイ-4被覆管と同様に本申請の燃料集合体の使用範囲まで機械特性は変わらない。以上より、<u>MDA及びZIRLO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。</u></p>	

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

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

(13/25)

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(1) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の耐力⁽¹⁾</p> <p>図 2.1-5(1) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の延性⁽¹⁾</p>	<p>図 5-1 MDA 及び ZIRLO 被覆管の機械特性^{(13) ~ (15)、(19)、(39)、(41) ~ (43)、(68)}</p> <p>(注1) 仕様内でSn含有量を下限近くまで下げたもの。</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、表2-2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：B型燃料集合体に係る記載

(14/25)

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ている主要事項について以下に示す。</p> <p>a. 被覆管の腐食及び水素吸収</p> <p>炉内滞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型燃料で約9.8%、B型燃料で約9.3%となり、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>(中略)</p> <p>被覆管の水素吸収については図2.2-3に示すように未照射被覆管では水素吸収量約800ppmまで延性への影響が認められず、また図2.2-4に示すように、ジルカロイ-4製被覆管の試験結果から延性は水素吸収量約800ppmまで顕著な低下は見られない。改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）は、データが取得されている水素吸収量約400ppmまではジルカロイ-4製被覆管と同程度の延性を示しており、またジルカロイ-4製被覆管と同様、成分の約98%がジルコニウムであるとともに同様の加工方法をとることから延性に影響する水素化物の配向も同等となり、ジルカロイ-4製被覆管の照射データにて延性が確保されていることが確認できる水素吸収量約800ppmまでであれば、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）についても延性は確保できる。</p> <p>ここで被覆管の最大水素吸収量を評価した結果、A型燃料で約690ppm、B型燃料で約720ppmとなり、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MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>(中略)</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、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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MDA及びZIRLO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>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>(中略)</p> <p>従って、MDA及びZIRLO被覆管の腐食量が、本申請の燃料集合体の使用範囲においてジルカロイ-4被覆管に比較して低減すること、及び水素吸収率が酸化膜厚さによらずジルカロイ-4被覆管と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、MDA及びZIRLO被覆管の水素吸収量は、本申請の燃料集合体の使用範囲までジルカロイ-4被覆管に比較して低減すると考えられる。</p>	

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

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

(15/25)

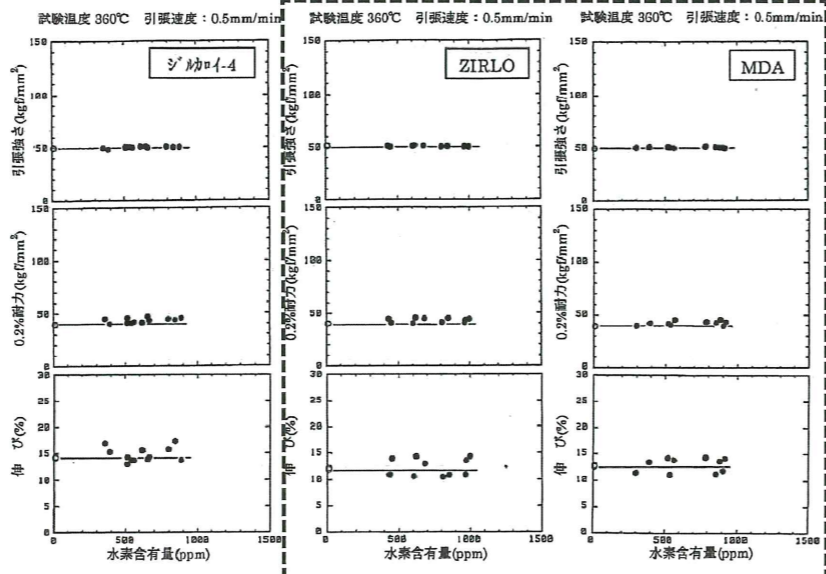
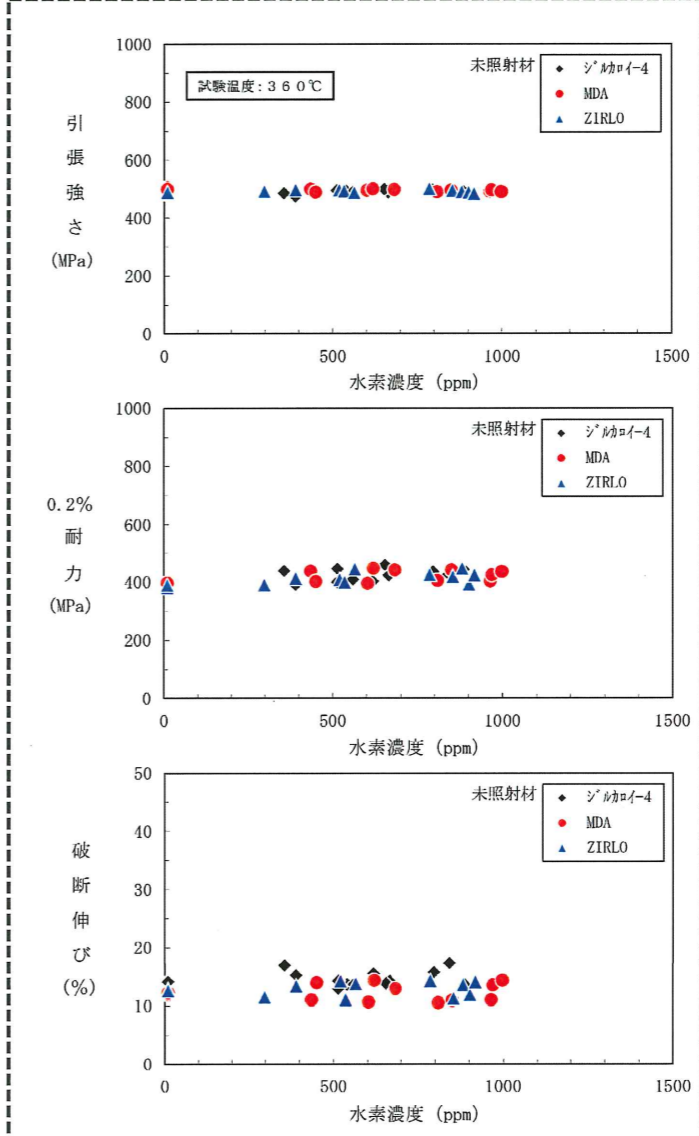
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図 2.2-3(1) 被覆管水素吸収量（水素含有量）と機械特性の関係^[1] (高温引張試験；未照射改良被覆管(MDA及びZIRLO))</p>	 <p>図 5-2 未照射被覆管の機械的特性と水素濃度の関係⁽⁴⁰⁾</p>	

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：B型燃料集合体に係る記載

(16/25)

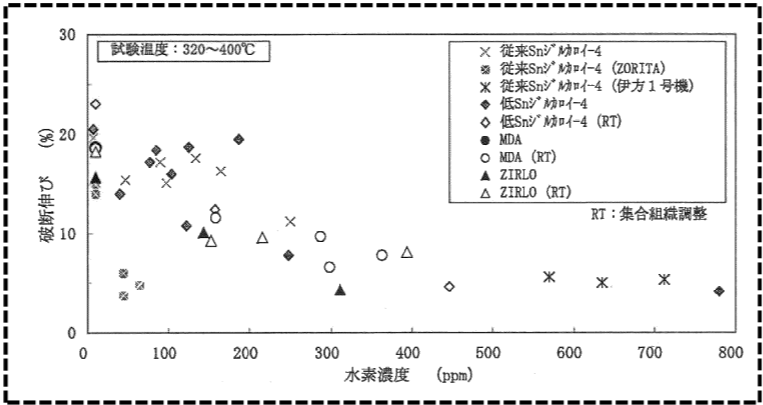
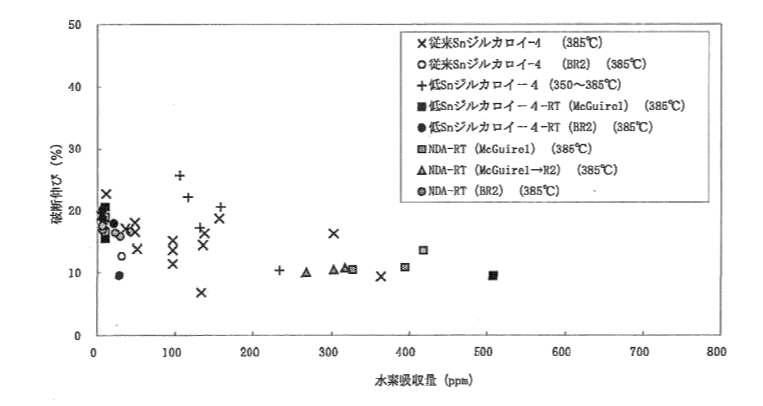
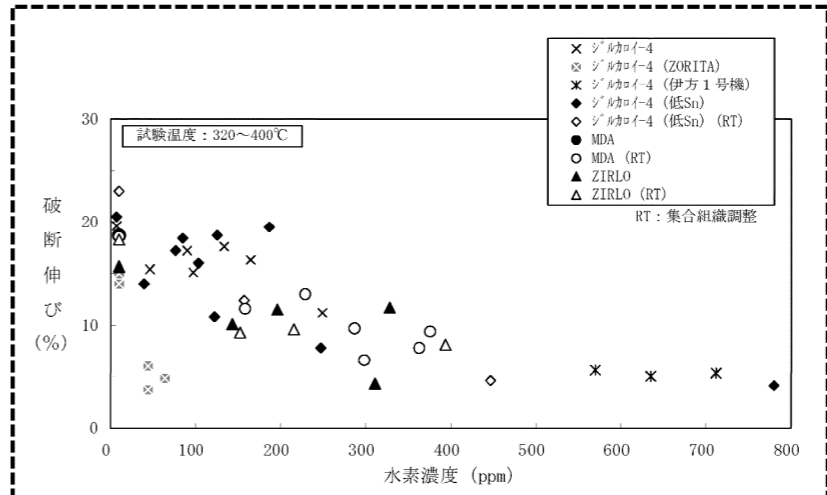
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	  <p data-bbox="1009 1155 1513 1239">図 2.2-4 被覆管水素吸収量（水素濃度）と破断伸びの関係^{[1][2]} (高温引張試験；照射被覆管)</p>	 <p data-bbox="1899 819 2285 850">図 5-3 被覆管水素濃度と破断伸びの関係^[40]</p>	

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：B型燃料集合体に係る記載

(17/25)

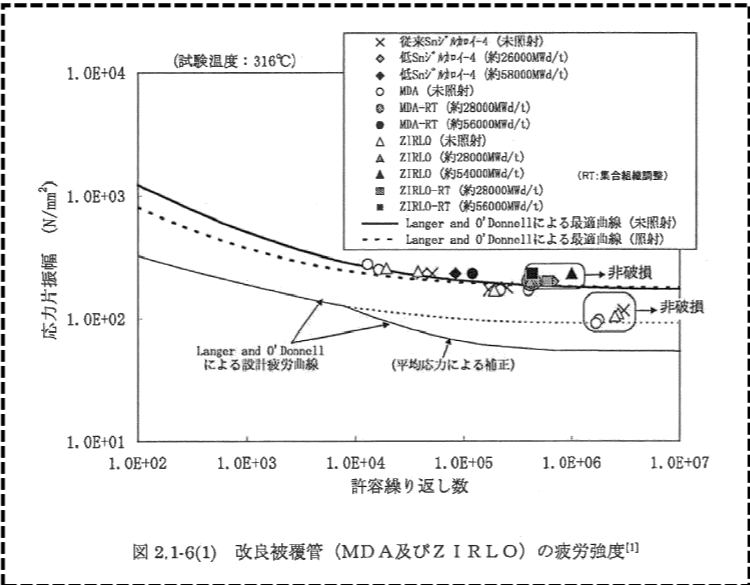
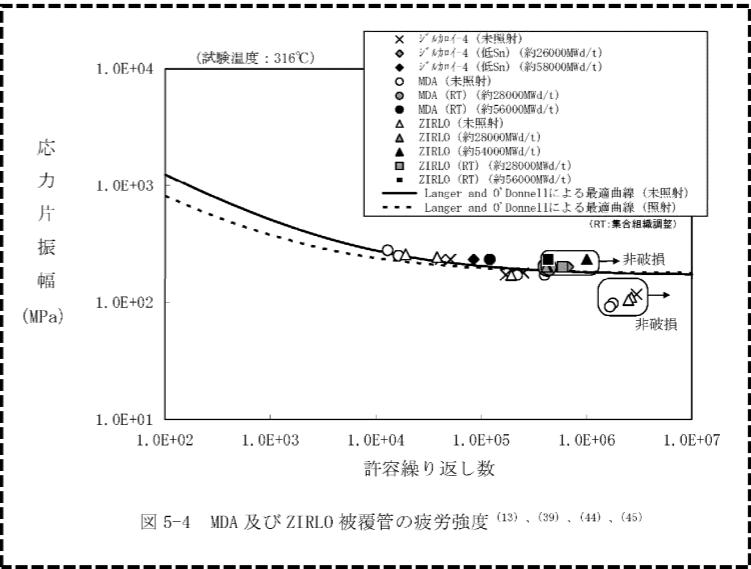
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>2.1 設計方針</p> <p>(5) 被覆管累積疲労</p> <p>被覆管の累積疲労サイクル数は、設計疲労寿命を超えないこと。</p> <p>ここで、図2.1-6に示すように、改良被覆管(MDA、NDA及びZIRLO)の疲労強度は、ジルカロイ-4製被覆管の疲労強度と同等であり、設計疲労曲線としては、従来と同様、Langer and O'Donnellの曲線を使用する。</p>  <p>図 2.1-6(1) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の疲労強度⁽¹⁾</p>	<p>5.2.2 疲労特性</p> <p>MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO被覆管はジルカロイ-4被覆管と同等であるため、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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>  <p>図 5-4 MDA 及び ZIRLO 被覆管の疲労強度^{(13)、(39)、(44)、(45)}</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：B型燃料集合体に係る記載

(18/25)

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 燃料</p> <p>3.2.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材である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>図2.2-5に示す試験データから、改良被覆管の耐PCI性は、局所燃焼度約60,000MWd/tまではジルカロイ-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されており、また局所燃焼度約30,000MWd/t以上の燃焼度域において低下する傾向は見られないことから、PCI評価では現行のPCI破損しきい値を適用する。</p> <p>ここで、サイクル初期及びサイクル末期において想定した原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を、図2.2-6にPCI破損しきい値とともに示す。これより、運転時の異常な過渡変化時における最大線出力密度及び線出力密度変化幅は、同時にPCI破損しきい値を超えることはなく、PCI破損は生じない。</p>	<p>5.4.1 耐PCI性</p> <p>被覆管は、腐食性FPガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用（PCMI）を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ（SCC）による破損（PCI破損）を起こす。このPCI破損におけるSCCは、ジルカロイ中の稠密六方晶（α相）の底面にほぼ平行な面上を伝播するが、現行の被覆管製法においては、この底面がPCMI時の発生応力方向、すなわち周方向に配向（C軸を径方向に配向）されており、PCI破損の抑制が図られている。</p> <p>被覆管の耐PCI性を把握するため、試験炉において出力急昇試験が実施されており、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にある値（PCI破損しきい値）を超えた場合にPCI破損が起こることが経験的に知られている。</p> <p>MDA及びZIRLO被覆管の耐PCI性を図5-11に破損しきい値とともに示す。この図ではC軸を径方向に現行より更に配向させた集合組織調整管のデータも示されているが、合金の相違、集合組織調整の有無に係わらず、PCI破損しきい値に対して十分余裕がある。この余裕は局所燃焼度が約40,000MWd/t程度以上では燃焼とともに増加する傾向が見られることから、本申請の燃料集合体の使用範囲まで高い耐PCI性能を有すると考えられる。以上より、MDA及びZIRLO被覆管のPCI破損しきい値はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</p>	

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：B型燃料集合体に係る記載

(19/25)

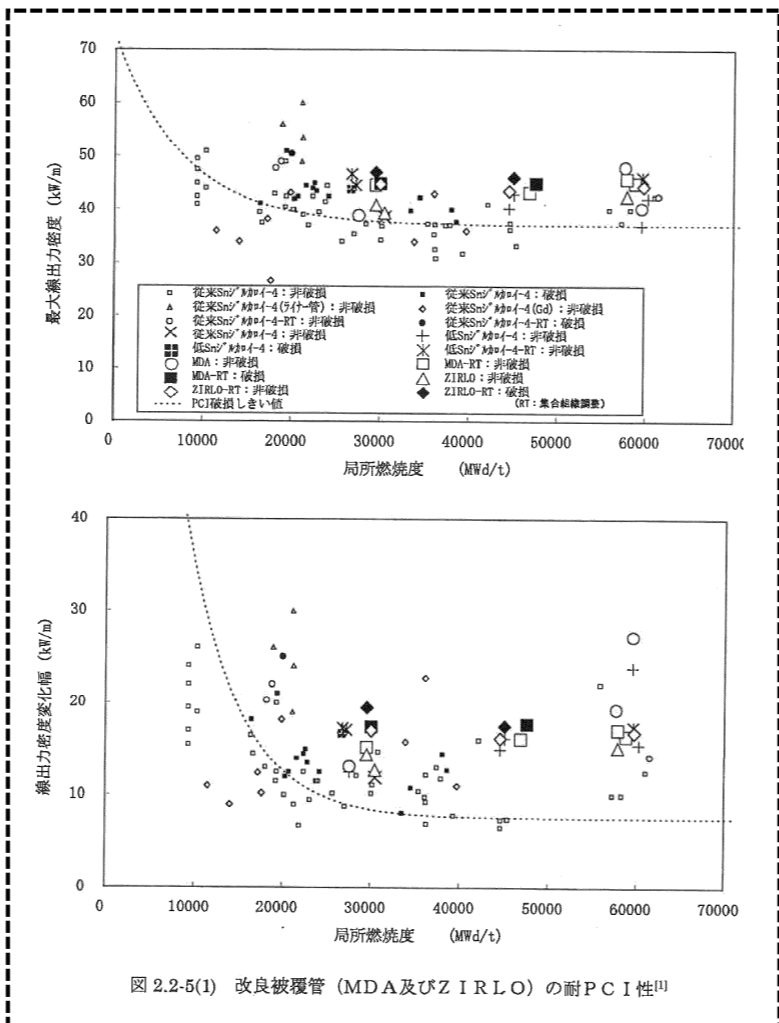
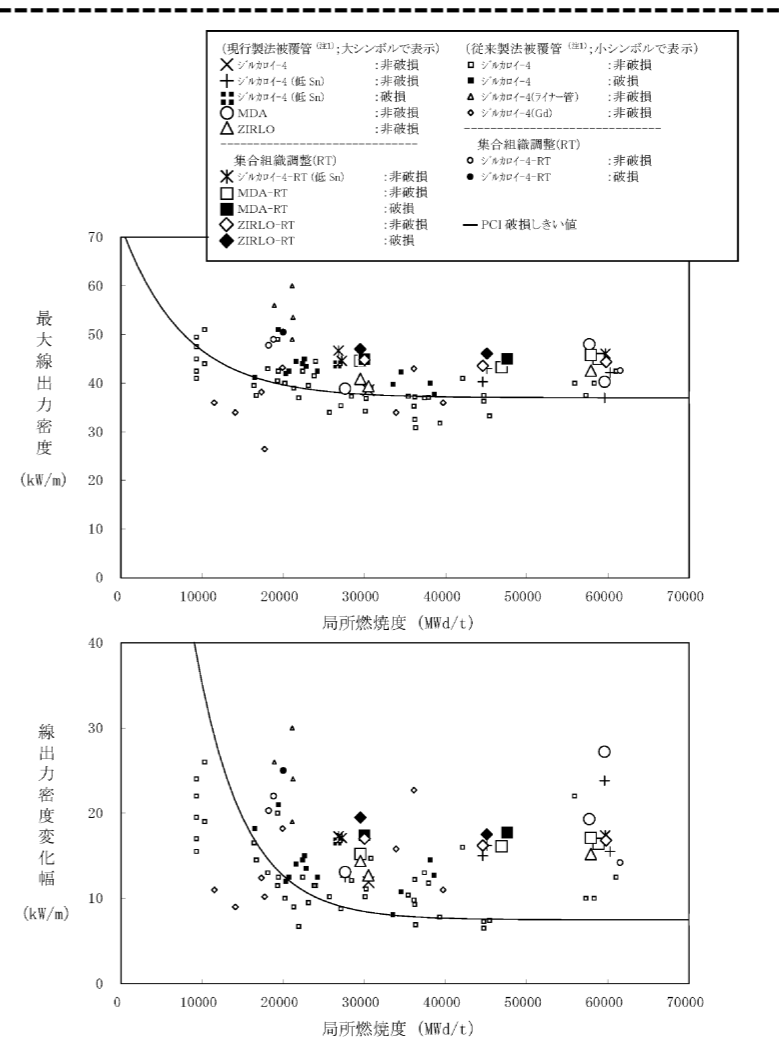
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図 2.2-5(1) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の耐PCI性⁽¹⁾</p>	 <p>図 5-11 MDA及びZIRLO被覆管の耐PCI性^{(19)、(19)、(50)、(51)}</p> <p>(注1) 耐PCI性能向上を図るため被覆管の集合組織調整割合が高くなるように製法を変更しており、それ以前に製造された被覆管を「従来製法被覆管」、以降に製造された被覆管を「現行製法被覆管」と称している。</p>	

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：B型燃料集合体に係る記載

(20/25)

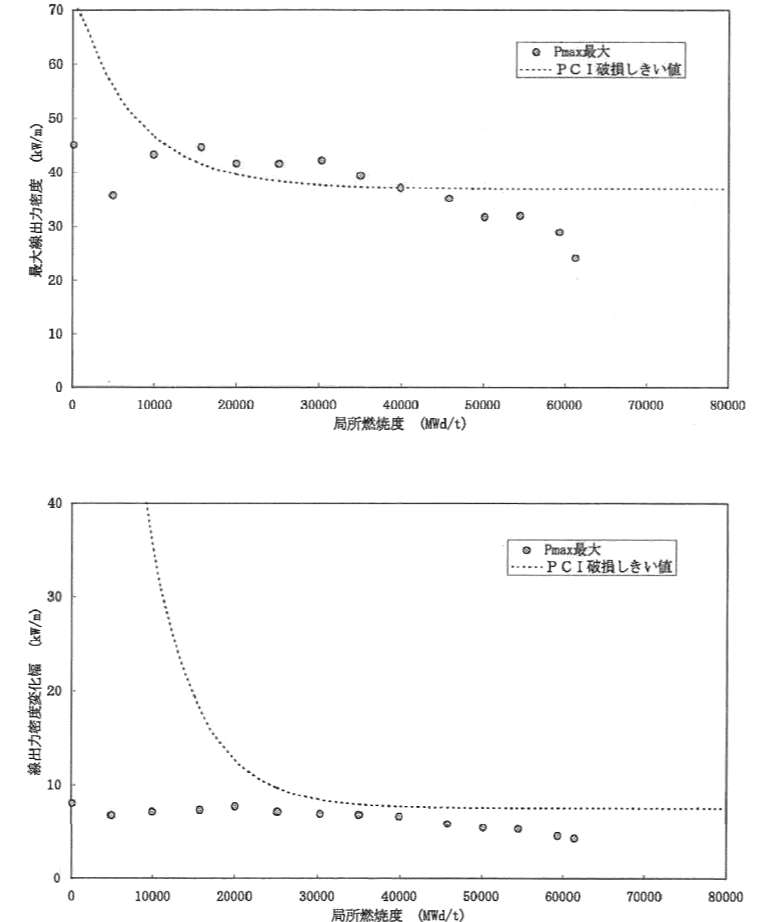
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p style="text-align: center;">図 2.2-6(1) PCI 評価結果 (最大線出力密度 (P_{max}) に着目した整理)</p>		<p>・安全審査資料の図2.2-6(1)については、添付資料7に記載している。</p>

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

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：B型燃料集合体に係る記載

(21/25)

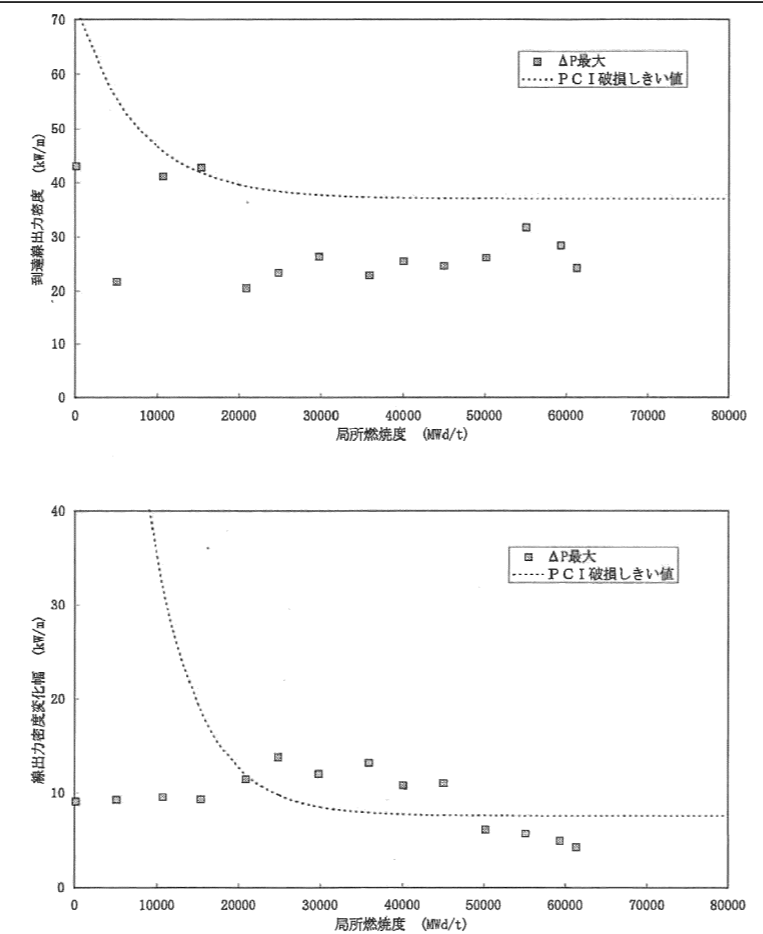
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p data-bbox="1127 1197 1424 1260">図 2.2-6(2) PCI 評価結果 (線出力密度変化幅 (ΔP) に着目した整理)</p>		<p data-bbox="2507 346 2849 472">・安全審査資料の図2.2-6(2)については、添付資料7に記載している。</p>

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

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：B型燃料集合体に係る記載

(22/25)

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 燃料</p> <p>3.2.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材である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>図2.2-5に示す試験データから、改良被覆管の耐PCI性は、局所燃焼度約60,000MWd/tまではジルカロイ-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されており、また局所燃焼度約30,000MWd/t以上の燃焼度域において低下する傾向は見られないことから、PCI評価では現行のPCI破損しきい値を適用する。</p> <p>ここで、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ジルコニウム基合金被覆管との反応</p> <p>ジルコニウム基合金と二酸化ウランが接触した場合、照射により過剰になった二酸化ウラン中の酸素がジルカロイ中に拡散し、被覆管内面酸化膜（ZrO₂）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）O₂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。⁽⁶⁹⁾これらは、被覆管の腐食及びPCI^(注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。⁽⁵⁾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、海外商業炉で照射された約60,000MWd/tまでのMDA及びZIRLO被覆管の燃料棒では被覆管内面酸化及びボンディングが認められるが、その反応層は高々10~20μmと小さく、被覆管応力への影響は小さい。さらに、図5-11に見られるように約30,000~40,000MWd/tにおいてPCI破損が認められる出力レベルでも、約60,000MWd/t程度の上記燃料棒はPCI破損していないことから、この程度の反応層であればPCIへの影響はない。⁽¹⁶⁾</p> <p>なお、MDA及びZIRLO被覆管と二酸化ウランペレットの反応は、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。同様に、二酸化ウランペレットと燃料被覆材端栓との反応についても、PWR燃料の照射後試験⁽¹⁴⁾、⁽³⁰⁾により反応は認められていないことから、二酸化ウランペレットと燃料被覆材端栓とは安定に共存する。従って有意な反応が認められていないことからそれらの反応を設計評価では考慮していない。</p> <p>4.3.1 ガドリニア混合二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応</p> <p>ガドリニア混合二酸化ウランは、4.1項で述べたように置換型固溶体を形成して安定である。10wt%までの濃度のガドリニア混合二酸化ウランとSn-Fe-Cr系ジルコニウム合金（ジルカロイ-4）の共存性については、二酸化ウランと同等あるいはそれ以上に良好な共存性を有することが報告されている。⁽³⁷⁾従って、ガドリニア混合二酸化ウランペレットとMDA及びZIRLO被覆管との反応は、二酸化ウランペレットとMDA及びZIRLO被覆管が安定に共存する場合と大差はない。さらに、上述のとおり、ガドリニア混合二酸化ウランペレットと燃料被覆材端栓とは安定に共存する。従って、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：B型燃料集合体に係る記載

(23/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考								
		<p>5.4.2 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表5-3に示す。この表から分かるようにMDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO被覆管）によらず同等である。以上より、MDA及びZIRLO被覆管の摩耗はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</p> <p>表 5-3 MDA 及び ZIRLO 被覆管の硬さの測定結果⁽⁴⁰⁾ (単位：HK（ヌーブ硬さ値）)</p> <table border="1" data-bbox="1846 751 2258 982"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HK 0.1^(注1))</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>206</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>205</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4（参考）</td> <td>204</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注1) HK 0.1：ヌーブ硬さ試験力 0.9807N</p>	種類	平均値 (HK 0.1 ^(注1))	MDA	206	ZIRLO	205	ジルカロイ-4（参考）	204	<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7）に反映しているため、記載している。</p>
種類	平均値 (HK 0.1 ^(注1))										
MDA	206										
ZIRLO	205										
ジルカロイ-4（参考）	204										

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：B型燃料集合体に係る記載

(24/25)

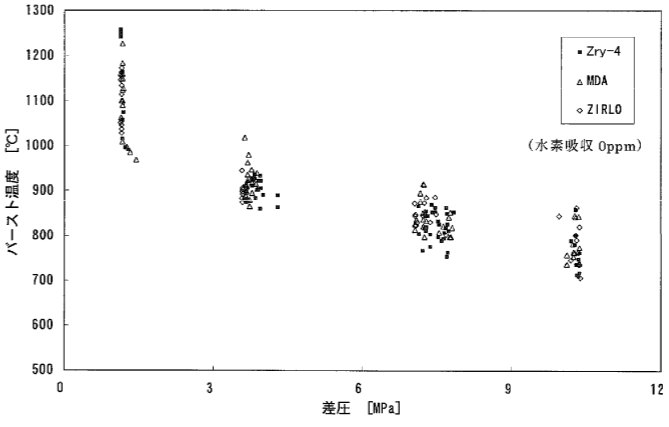
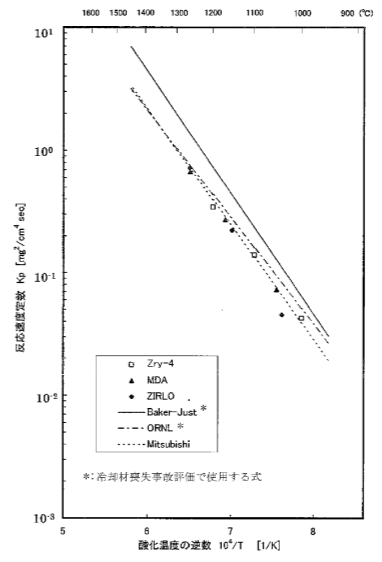
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>5.4.3 高温特性</p> <p>被覆管の相変態（α相からβ相に変化）が生じるような高温時においては、MDA及びZIRLO被覆管は、ジルカロイ-4被覆管同様、約98wt%のジルコニウムを主成分としているため、それらの主要な特性はジルカロイ-4と同等である。冷却材喪失事故にて考慮する昇温内圧破裂試験結果、高温時のジルコニウムと水反応の試験結果をそれぞれ図5-12及び図5-13に示す。図5-12及び図5-13に示すとおり、MDA及びZIRLO被覆管の高温破裂特性及び高温酸化挙動はジルカロイ-4被覆管と同等である。</p>  <p>図5-12 未照射管のLOCA時破裂挙動試験結果（受取管）⁽⁴⁰⁾</p>  <p>図5-13 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数（受取管）⁽⁴⁰⁾</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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。

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：B型燃料集合体に係る記載

(25/25)

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>5.1 耐熱性</p> <p>ジルカロイ-4の融点は1,825℃であり⁽³⁹⁾、⁽⁴⁰⁾、結晶構造が820℃でα相から(α+β)相へ、また、970℃で(α+β)相からβ相に変態する。</p> <p>MDA及びZIRLO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>MDA及びZIRLOの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、MDA及びZIRLOの融点は約1,840℃、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約770～780℃及び約940～960℃であり、いずれも燃料被覆管の異常な過渡変化時の最高温度(約□℃)よりもかなり高いので、プラントの使用条件の下で融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融融あるいは相変態が生じることはないので、当該の挙動を設計評価では考慮していない。</p> <p style="text-align: center;">表 5-1 MDA 及び ZIRLO の融点測定結果^{(39)、(40)} (単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1846 1058 2306 1304"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>融点測定結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>1,844</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>1,842</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>1,825</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">表 5-2 MDA 及び ZIRLO の相変態温度測定結果⁽⁴⁰⁾ (単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1804 1436 2350 1644"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>α→α+β</th> <th>α+β→β</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>780</td> <td>960</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>770</td> <td>940</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>820</td> <td>970</td> </tr> </tbody> </table>	種類	融点測定結果	MDA	1,844	ZIRLO	1,842	ジルカロイ-4 (参考)	1,825	種類	α→α+β	α+β→β	MDA	780	960	ZIRLO	770	940	ジルカロイ-4 (参考)	820	970	<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>
種類	融点測定結果																						
MDA	1,844																						
ZIRLO	1,842																						
ジルカロイ-4 (参考)	1,825																						
種類	α→α+β	α+β→β																					
MDA	780	960																					
ZIRLO	770	940																					
ジルカロイ-4 (参考)	820	970																					

ジルコニウム基合金における酸素含有量の設定について

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

1. 酸素含有量が燃料被覆材へ及ぼす影響

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

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

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

したがって、ジルコニウム基合金の酸素含有量については、JIS 及び ASTM を踏まえ、豊富な使用実績を持つジルカロイ-4 で設定している値（ wt%）の範囲内とすることで、上述の燃料被覆材の性質への影響は問題ないものと判断している。また、本酸素含有量では設置許可における安全解析結果に影響はない。

次項に、酸素含有量の設定プロセスを示す。

2. 設定プロセス

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

で、燃料被覆材製造メーカーに酸素含有量を提示している。

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

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

以 上

補足説明資料 6－2－2

設置許可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、「高浜発電所 発電用原子炉設置変更許可申請書」（平成 22 年 4 月 19 日 平成 20・08・12 原第 33 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：B型燃料集合体に係る記載

(1/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																																																																																													
<p>【本文】</p> <p>五、発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備</p> <p>ハ、原子炉本体の構造及び設備</p> <p>(2) 燃料体</p> <p>(ii) 燃料被覆材の種類</p> <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-ニオブ合金にス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31領域燃料については、ジルカロイ-4</p>	<p>【安全審査資料：高浜発電所1号及び2号炉ステップ2燃料の概要について】</p> <p>3. ステップ2燃料の基本仕様</p> <p>燃料棒及び燃料集合体の概要を図3-1に示す。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、制御棒案内シムル、支持格子、上部ノズル及び下部ノズルで骨格を形成することを基本構造としている。</p> <p>ステップ2燃料は、ステップ1燃料と同一な基本構造であるが、高燃焼度化に際して、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こととしている。</p> <p style="text-align: center;">表 3-1 15×15型燃料の主要仕様 (1/2)</p> <table border="1" data-bbox="884 898 1587 1560"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>ステップ1燃料</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4.0～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.5～約1.9wt%)</td> <td>約4.6wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.0wt%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>約95%理論密度</td> <td>約97%理論密度 (ガドリニア入り燃料については約96%理論密度)</td> </tr> <tr> <td>ペレット直径</td> <td>約9.29mm又は約9.21mm</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>ペレット長さ</td> <td>約12.6mm、約11.2mm、又は約10.0mm</td> <td>約12.6mm又は約10.0mm</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系ジルコニウム基合金⁽¹⁾ Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金⁽²⁾ Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金⁽³⁾</td> </tr> <tr> <td>外径*</td> <td>約10.72mm</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>厚さ*</td> <td>約0.62mm又は約0.66mm</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>被覆管-ペレット間隙(直径)</td> <td>約0.19mm</td> <td>同左</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1 基本仕様（原子炉設置変更許可申請書本文記載事項。ただし、本表では一部の値について詳細に示している。） (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	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4.0～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.5～約1.9wt%)	約4.6wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.0wt%以下)	ガドリニア濃度*	約6wt%	約10wt%以下	初期密度*	約95%理論密度	約97%理論密度 (ガドリニア入り燃料については約96%理論密度)	ペレット直径	約9.29mm又は約9.21mm	同左	ペレット長さ	約12.6mm、約11.2mm、又は約10.0mm	約12.6mm又は約10.0mm	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系ジルコニウム基合金 ⁽¹⁾ Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 ⁽²⁾ Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金 ⁽³⁾	外径*	約10.72mm	同左	厚さ*	約0.62mm又は約0.66mm	同左	被覆管-ペレット間隙(直径)	約0.19mm	同左	<p>【要目表】</p> <p style="text-align: right;">(3/5)</p> <table border="1" data-bbox="1754 373 2407 1018"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>変更前</th> <th>変更後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="10">燃料</td> <td rowspan="5">二酸化ウラン燃料材</td> <td>ウラン235濃縮度 wt%</td> <td>4.60^(注1,2)</td> <td>変更なし</td> </tr> <tr> <td>密度(理論密度比) %</td> <td>97^(注3)</td> <td>97.0^(注1,4)</td> </tr> <tr> <td>ウラン含有率 wt%</td> <td>—</td> <td>□以上^(注4)</td> </tr> <tr> <td>酸素対ウラン比</td> <td>—</td> <td>2.000^(注1,4)</td> </tr> <tr> <td>炭素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td rowspan="5">ガドリニア混合二酸化ウラン燃料材</td> <td>ウラン235濃縮度 wt%</td> <td>3.00^(注1,2)</td> <td>変更なし</td> </tr> <tr> <td>密度(理論密度比) %</td> <td>96^(注3)</td> <td>96.0^(注1,4)</td> </tr> <tr> <td>ウラン含有率 wt%</td> <td>—</td> <td>□以上^(注4)</td> </tr> <tr> <td>酸素対ウラン比</td> <td>—</td> <td>2.083^(注1,4)</td> </tr> <tr> <td>ガドリニア濃度 wt%</td> <td>10^(注1,12)</td> <td>10.00^(注4)</td> </tr> <tr> <td rowspan="5">燃料被覆材</td> <td>ガドリニウム濃度 wt%</td> <td>—</td> <td>8.68^(注4)</td> </tr> <tr> <td>炭素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td>ふっ素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td>水素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td>窒素 wt%</td> <td>—</td> <td>□以下^(注4)</td> </tr> <tr> <td>燃料被覆材</td> <td>—</td> <td>Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金^(注3) Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金^(注3)</td> <td>変更なし</td> </tr> </tbody> </table> <p>【添付資料8 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書】</p> <p>5. ジルコニウム基合金</p> <p>MDA及びZIRLO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年6月15日、平成23・03・08原第9号）。</p> <p>MDA及びZIRLO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、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^(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>			変更前	変更後	燃料	二酸化ウラン燃料材	ウラン235濃縮度 wt%	4.60 ^(注1,2)	変更なし	密度(理論密度比) %	97 ^(注3)	97.0 ^(注1,4)	ウラン含有率 wt%	—	□以上 ^(注4)	酸素対ウラン比	—	2.000 ^(注1,4)	炭素 wt%	—	□以下 ^(注4)	ガドリニア混合二酸化ウラン燃料材	ウラン235濃縮度 wt%	3.00 ^(注1,2)	変更なし	密度(理論密度比) %	96 ^(注3)	96.0 ^(注1,4)	ウラン含有率 wt%	—	□以上 ^(注4)	酸素対ウラン比	—	2.083 ^(注1,4)	ガドリニア濃度 wt%	10 ^(注1,12)	10.00 ^(注4)	燃料被覆材	ガドリニウム濃度 wt%	—	8.68 ^(注4)	炭素 wt%	—	□以下 ^(注4)	ふっ素 wt%	—	□以下 ^(注4)	水素 wt%	—	□以下 ^(注4)	窒素 wt%	—	□以下 ^(注4)	燃料被覆材	—	Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金 ^(注3) Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金 ^(注3)	変更なし	
項目	ステップ1燃料	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4.0～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.5～約1.9wt%)	約4.6wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.0wt%以下)																																																																																														
ガドリニア濃度*	約6wt%	約10wt%以下																																																																																														
初期密度*	約95%理論密度	約97%理論密度 (ガドリニア入り燃料については約96%理論密度)																																																																																														
ペレット直径	約9.29mm又は約9.21mm	同左																																																																																														
ペレット長さ	約12.6mm、約11.2mm、又は約10.0mm	約12.6mm又は約10.0mm																																																																																														
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系ジルコニウム基合金 ⁽¹⁾ Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 ⁽²⁾ Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金 ⁽³⁾																																																																																														
外径*	約10.72mm	同左																																																																																														
厚さ*	約0.62mm又は約0.66mm	同左																																																																																														
被覆管-ペレット間隙(直径)	約0.19mm	同左																																																																																														
		変更前	変更後																																																																																													
燃料	二酸化ウラン燃料材	ウラン235濃縮度 wt%	4.60 ^(注1,2)	変更なし																																																																																												
		密度(理論密度比) %	97 ^(注3)	97.0 ^(注1,4)																																																																																												
		ウラン含有率 wt%	—	□以上 ^(注4)																																																																																												
		酸素対ウラン比	—	2.000 ^(注1,4)																																																																																												
		炭素 wt%	—	□以下 ^(注4)																																																																																												
	ガドリニア混合二酸化ウラン燃料材	ウラン235濃縮度 wt%	3.00 ^(注1,2)	変更なし																																																																																												
		密度(理論密度比) %	96 ^(注3)	96.0 ^(注1,4)																																																																																												
		ウラン含有率 wt%	—	□以上 ^(注4)																																																																																												
		酸素対ウラン比	—	2.083 ^(注1,4)																																																																																												
		ガドリニア濃度 wt%	10 ^(注1,12)	10.00 ^(注4)																																																																																												
燃料被覆材	ガドリニウム濃度 wt%	—	8.68 ^(注4)																																																																																													
	炭素 wt%	—	□以下 ^(注4)																																																																																													
	ふっ素 wt%	—	□以下 ^(注4)																																																																																													
	水素 wt%	—	□以下 ^(注4)																																																																																													
	窒素 wt%	—	□以下 ^(注4)																																																																																													
燃料被覆材	—	Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金 ^(注3) Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金 ^(注3)	変更なし																																																																																													

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：B型燃料集合体に係る記載

(2/25)

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 燃料</p> <p>3.2.1 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-ニオブ合金にス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、制御棒案内シムル、炉内計装用案内シムル、支持格子、上部ノズル、下部ノズル等で構成する。申請書本文における五、発電用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(2)燃料体(ii)燃料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-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金」(以下、3.2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、15×15であり、そのうち204本が燃料棒、20本が制御棒案内シムル、残り1本が炉内計装用案内シムルである。制御棒案内シムルは、制御棒クラスタ、バーナブルポイズン、中性子源又はシムルプラグアセンブリの挿入に使用する。</p>	<p>3. ステップ2燃料の基本仕様</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(MDA、NDA及びZIRLOTM)に変更する。なお、A型燃料にはMDA及びZIRLO、B型燃料にはNDAの改良被覆管を採用する。</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向上のためにNbを添加したSn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金である。</p> <p>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である。</p> <p>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。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>	

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：B型燃料集合体に係る記載

(3/25)

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基合金</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金</p> <p>(Sn：0.7～0.9wt%、 Fe：0.18～0.24wt%、 Cr：0.07～0.13wt%、 Fe+Cr：0.28～0.37wt%、 Nb：0.45～0.55wt%、 Zr：残り)</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金</p> <p>(Sn：0.90～1.15wt%、 Fe：0.24～0.30wt%、 Cr：0.13～0.19wt%、 Nb：0.08～0.14wt%、 Ni：0.007～0.014wt%、 Zr：残り)</p> <p>ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金</p> <p>・Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金</p> <p>(Sn：0.9～1.3wt%、 Fe：0.08～0.12wt%、 Nb：0.8～1.2wt%、 Zr：残り)</p> <p>ただし、第1～第31領域 ジルカロイ-4 ＜中略＞</p>	<p>表3-2 被覆管の合金成分</p> <table border="1" data-bbox="875 420 1617 787"> <thead> <tr> <th rowspan="2">主成分*1</th> <th colspan="3">ジルカロイ-4*2</th> <th colspan="3">改良被覆管</th> </tr> <tr> <th>規格</th> <th>従来Sn</th> <th>低Sn</th> <th>MDA</th> <th>NDA</th> <th>ZIRLO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sn</td> <td>1.2～1.7</td> <td>1.5</td> <td>1.3</td> <td>0.7～0.9</td> <td>0.90～1.15</td> <td>0.9～1.3</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18～0.24</td> <td>0.2</td> <td>←</td> <td>0.18～0.24</td> <td>0.24～0.30</td> <td>0.08～0.12</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07～0.13</td> <td>0.1</td> <td>←</td> <td>0.07～0.13</td> <td>0.13～0.19</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28～0.37</td> <td>0.3</td> <td>←</td> <td>0.28～0.37</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>0.45～0.55</td> <td>0.08～0.14</td> <td>0.8～1.2</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>0.007～0.014</td> <td>—</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1 数値の単位はwt%。また、上記以外の残りの成分はジルコニウム。 *2 ジルカロイ-4のうち、規格内でSn含有量を少なくしたものを低Snジルカロイ-4、それ以外を従来Snジルカロイ-4と呼ぶ。</p>	主成分*1	ジルカロイ-4*2			改良被覆管			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>表2-1 燃料集合体主材料の化学成分（続き）</p> <table border="1" data-bbox="1736 409 2418 850"> <thead> <tr> <th rowspan="2">構成部品</th> <th rowspan="2">材料の種類</th> <th rowspan="2">主成分 (wt%)</th> <th colspan="10">不 純 物 (ppm)</th> </tr> <tr> <th>Al</th> <th>B</th> <th>Ca</th> <th>Cd</th> <th>C</th> <th>Co</th> <th>Cu</th> <th>Hf</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Ni</th> <th>N</th> <th>Si</th> <th>Ti</th> <th>U</th> <th>W</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註3)</td> <td>Sn</td> <td>0.70/0.90</td> <td>Al</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>B</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>Ca</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Cd</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.45/0.55</td> <td>C</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td></td> <td>Co</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註4)</td> <td>Sn</td> <td>0.90/1.30</td> <td>Al</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.08/0.12</td> <td>B</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.80/1.20</td> <td>Ca</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td></td> <td>Cd</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残り</td> <td>C</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Co</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> </tbody> </table> <p>表2-2 燃料集合体主材料の機械的性質（15×15型）</p> <table border="1" data-bbox="1676 966 2463 1144"> <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">MDA ZIRLO</td> <td>(高温引張試験：385℃) 引張強さ</td> <td>15 MPa</td> </tr> <tr> <td>耐 力</td> <td>15 MPa</td> </tr> <tr> <td>伸 び</td> <td>15 %</td> </tr> </tbody> </table>	構成部品	材料の種類	主成分 (wt%)	不 純 物 (ppm)										Al	B	Ca	Cd	C	Co	Cu	Hf	Mg	Mn	Ni	N	Si	Ti	U	W	燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註3)	Sn	0.70/0.90	Al	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	Fe	0.18/0.24	B	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	Cr	0.07/0.13	Ca	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	Fe+Cr	0.28/0.37	Cd	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	Nb	0.45/0.55	C	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	0		Co	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	燃料被覆材	Sn-Fe-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註4)	Sn	0.90/1.30	Al	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	Fe	0.08/0.12	B	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	Nb	0.80/1.20	Ca	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	0		Cd	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	Zr	残り	C	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15			Co	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	構成部品	材料の種類	項目	規定値	燃料被覆材	MDA ZIRLO	(高温引張試験：385℃) 引張強さ	15 MPa	耐 力	15 MPa	伸 び	15 %	<p>・燃料被覆材の化学成分のうち酸素については、別記-10に定められているジルコニウム合金燃料被覆材の規格であるJIS H 4751において化学成分の一つとして挙げられているものの、「酸素含有量は、受渡当事者間の協定による。」とされていることを踏まえ、基本設計である設置許可では化学成分として酸素を記載しておらず、詳細設計である設計及び工事の計画においては酸素を記載している。（酸素含有量の設定については添付参照）</p> <p>・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			改良被覆管																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	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)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
			Al	B	Ca	Cd	C	Co	Cu	Hf	Mg	Mn	Ni	N	Si	Ti	U	W																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註3)	Sn	0.70/0.90	Al	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Fe	0.18/0.24	B	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Cr	0.07/0.13	Ca	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Fe+Cr	0.28/0.37	Cd	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Nb	0.45/0.55	C	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		0		Co	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
燃料被覆材	Sn-Fe-Nb系 ジルコニウム 基合金 (註4)	Sn	0.90/1.30	Al	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
		Fe	0.08/0.12	B	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
		Nb	0.80/1.20	Ca	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
		0		Cd	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
		Zr	残り	C	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
				Co	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
構成部品	材料の種類	項目	規定値																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
燃料被覆材	MDA ZIRLO	(高温引張試験：385℃) 引張強さ	15 MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		耐 力	15 MPa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		伸 び	15 %																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						

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：B型燃料集合体に係る記載

(4/25)

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 燃料</p> <p>3.2.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材である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、その健全性を確証し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者等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、大飯発電所4号炉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高燃焼度域における照射データ（燃料棒平均燃焼度約63,000MWd/tまで）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高燃焼度域における照射データ（ペレット燃焼度約61,000MWd/tまで）をもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いられたデータに比べ高い値が得られている（図4-9及び図4-10参照）。</p>	<p>5.3 耐食性</p> <p>MDA及びZIRLO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>炉内での被覆管酸化膜を図5-8に示す。</u>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、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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MDA及びZIRLO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>	

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：B型燃料集合体に係る記載

(5/25)

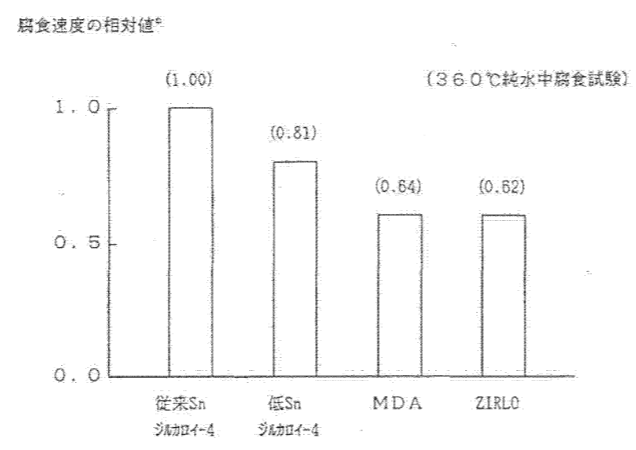
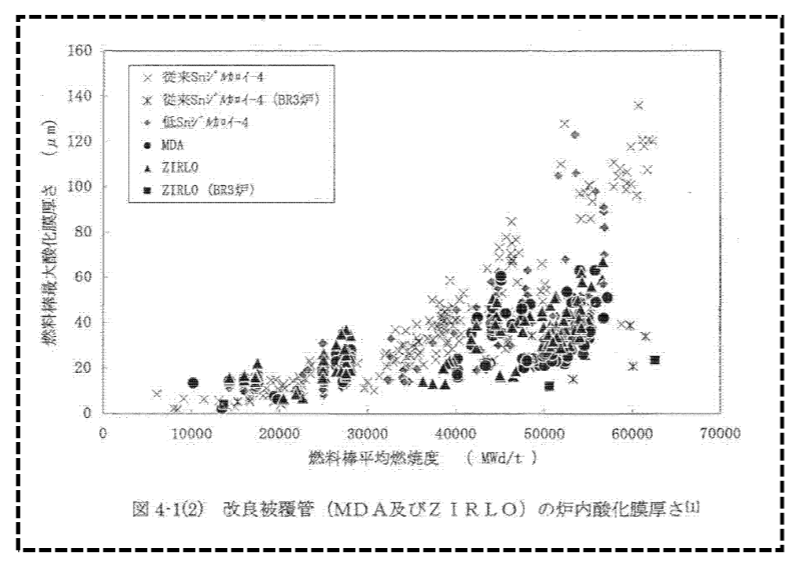
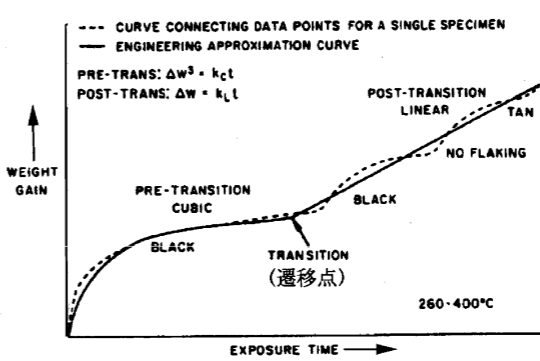
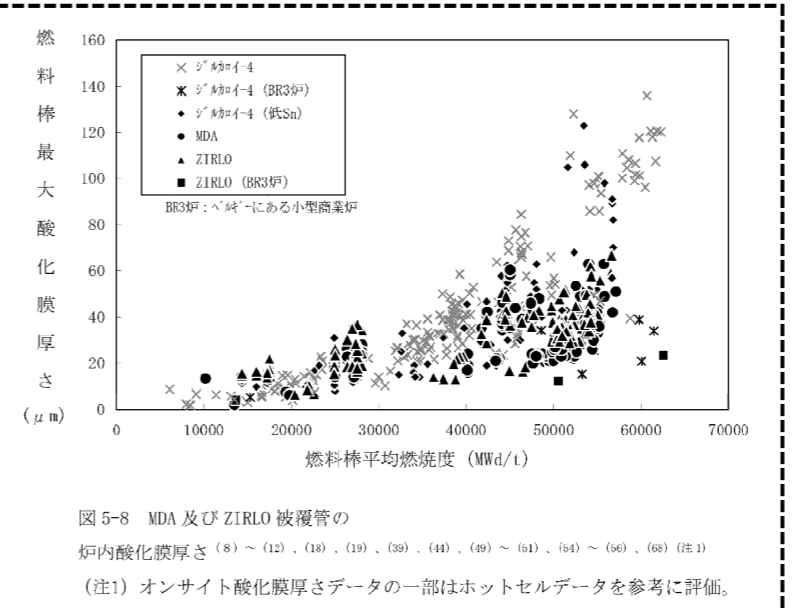
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>腐食速度の相対値*</p>  <p>(36.0℃純水中腐食試験)</p> <p>※従来Snジルカロイ-4の腐食速度を1.0とした場合の各被覆管材の腐食速度（180～780日間）の相対値。</p> <p>図4-1(1) 炉外腐食試験における改良被覆管（MDA及びZIRLO）の腐食特性⁴⁾</p>  <p>図4-1(2) 改良被覆管（MDA及びZIRLO）の炉内酸化膜厚さ⁴⁾</p>	 <p>図5-7 炉外腐食試験におけるジルカロイ-2とジルカロイ-4の典型的な腐食増量曲線⁽⁵³⁾</p>  <p>図5-8 MDA及びZIRLO被覆管の炉内酸化膜厚さ（8）～（12）、（18）、（19）、（39）、（44）、（49）～（51）、（54）～（56）、（68）^(注1)</p> <p>（注1）オンサイト酸化膜厚さデータの一部はホットセルデータを参考に評価。</p>	<p>・安全審査資料に図4-1(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4-1(2)を用いて設計評価（添付資料7）に反映しているため、設計及び工事の計画では記載不要である。</p>

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

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

(6/25)

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 燃料</p> <p>3.2.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材である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、その健全性を確証し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者等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、大飯発電所4号炉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高燃焼度域における照射データ（燃料棒平均燃焼度約63,000MWd/tまで）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（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（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高燃焼度域における照射データ（ペレット燃焼度約61,000MWd/tまで）をもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いられたデータに比べ高い値が得られている（図4-9及び図4-10参照）。</p>	<p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>ジルコニウムと水との反応で発生した水素の一部は、<u>被覆管に吸収される。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、MDA及びZIRLO被覆管の水素吸収量と酸化膜厚さはジルカロイ-4被覆管と同様に良い相関がある。酸化膜厚さと水素吸収率（酸化反応で生じた水素量に対する被覆管金属部に吸収された水素量の割合）の関係を図5-10に示す。ジルカロイ-4被覆管の水素吸収率は、被覆管10%減肉相当の酸化膜厚さ程度まで酸化膜厚さによらずほぼ一定の水素吸収率となっている。また、MDA及びZIRLO被覆管についても、酸化膜厚さ50μm程度まで酸化膜厚さによらずジルカロイ-4被覆管と同等の水素吸収率となっている。これは酸化膜を透過する水素量及び金属部に吸収される水素吸収量が被覆管の種類（ジルカロイ-4被覆管、MDA及びZIRLO被覆管）によらないためと考えられる。</u></p> <p>従って、MDA及びZIRLO被覆管の腐食量が、本申請の燃料集合体の使用範囲においてジルカロイ-4被覆管に比較して低減すること、及び<u>水素吸収率が酸化膜厚さによらずジルカロイ-4被覆管と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。</u></p> <p>また、MDA及びZIRLO被覆管の水素吸収量は、本申請の燃料集合体の使用範囲までジルカロイ-4被覆管に比較して低減すると考えられる。</p>	

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

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

(7/25)

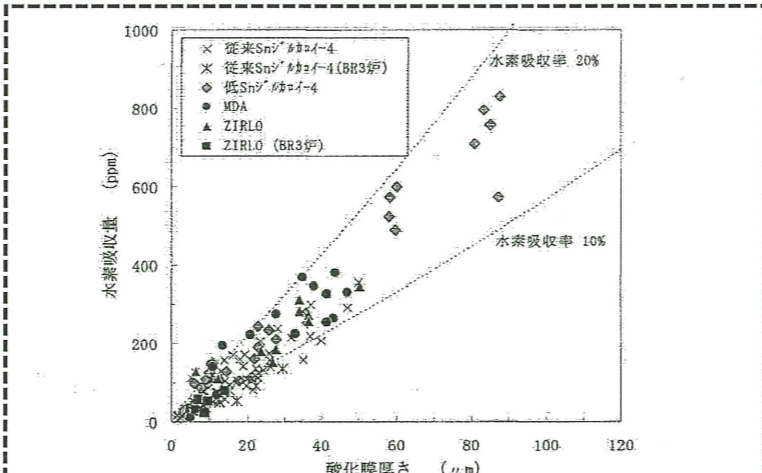
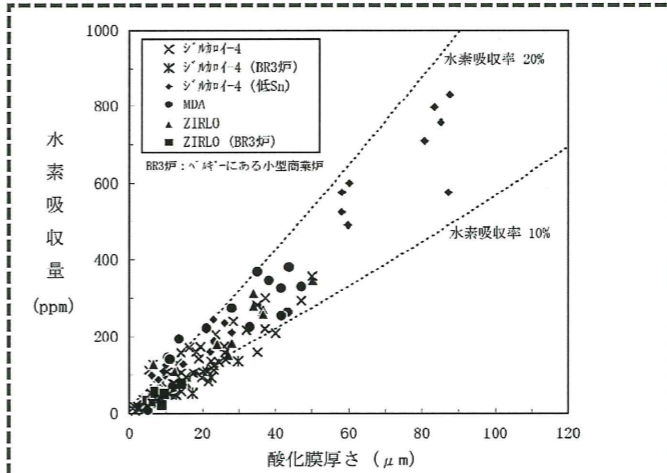
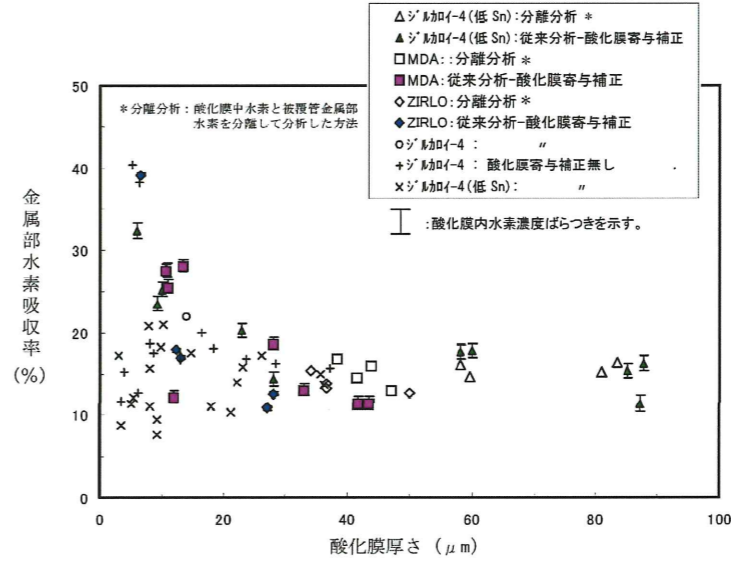
設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図4-8 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係⁽¹⁾</p>	 <p>図5-9 MDA及びZIRLO被覆管の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (8)、(9)、(11)~(13)、(17)、(68)</p>  <p>図5-10 MDA及びZIRLO被覆管の酸化膜厚さと水素吸収率の関係⁽¹⁶⁾</p>	<p>・設計及び工事の計画に第5-10図を記載しているのは、酸化膜厚さと水素吸収率の関係性がジルカロイ-4と同等であることを設計評価 (添付資料7) に反映しているため、記載している。</p>

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

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

(8/25)

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 燃料</p> <p>3.2.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材であるジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</p>	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確証し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者等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、大飯発電所4号炉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高燃焼度域における照射データ（燃料棒平均燃焼度約63,000MWd/tまで）をもとに確認されており、<u>ジルカロイ-4製被覆管と比べて以下のとおりである。</u></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）。 ・<u>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）。</u> ・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高燃焼度域における照射データ（ペレット燃焼度約61,000MWd/tまで）をもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いられたデータに比べ高い値が得られている（図4-9及び図4-10参照）。</p>	<p>5.2.3 クリープ特性^(註1)</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。<u>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、MDA及びZIRLO被覆管は、ジルカロイ-4被覆管に比べて、外径減少が小さく、クリープがしにくくなっている。これは、クリープが転位（材料に元々ある結晶格子ずれ）の移動によるものであり、Zr中に固溶しているSn、特にNbが転位を捕獲してその動きを抑制するため、Nbを含まないジルカロイ-4被覆管に比べて、Nbを含むMDA及びZIRLO被覆管のクリープがしにくくなったためである。以上より、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(2)c.項に示す）設計評価に反映している。</u></p> <p>図5-5 燃料棒外径変化（実機照射セグメント燃料棒）^{(13)、(39)、(46)}</p>	<p>・設計及び工事の計画には、クリープ特性を定量的に示すため、関連する情報を記載している。</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：B型燃料集合体に係る記載

(9/25)

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4-5 改良被覆管（MDA及びZIRLO）の外径変化 [実機照射長尺燃料棒] 註</p>		<p>・安全審査資料に図4-5を記載しているのは、参考となる実験結果も示しており、実際のMDA及びZIRLOの外径変化はセグメント燃料棒の図から判断できるため、設計及び工事の計画では記載不要である。</p>

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

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

(10/25)

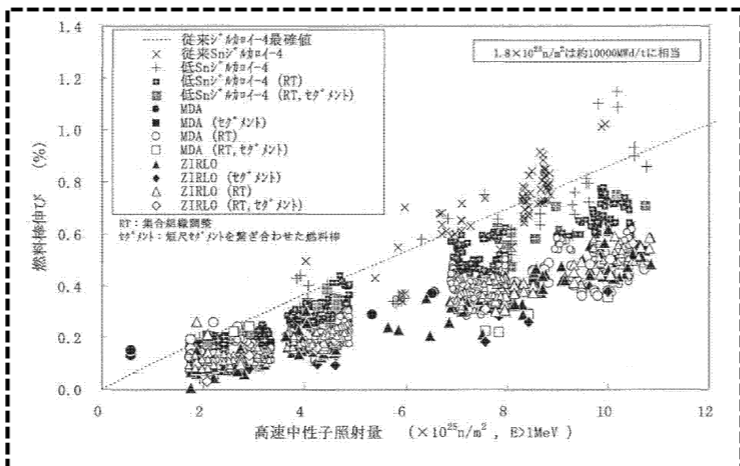
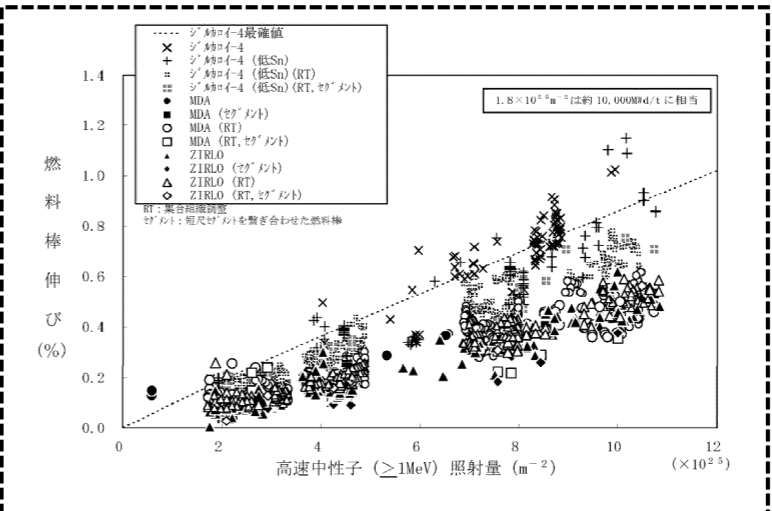
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者等により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、大飯発電所4号炉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高燃焼度域における照射データ（燃料棒平均燃焼度約63,000MWd/tまで）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高燃焼度域における照射データ（ペレット燃焼度約61,000MWd/tまで）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熔融点及び熱伝導率が低下する。なお、熱伝導率は、最近の測定結果から、ステップ1燃料及びステップ2先行照射燃料の設計評価に用いられたデータに比べ高い値が得られている（図4-9及び図4-10参照）。</p>  <p>図4-7 改良被覆管(MDA及びZIRLO)の照射成長⁽¹⁾</p>	<p>5.2.4 照射成長^(註2)</p> <p>照射成長の支配要因は、ジルカロイ中の稠密六方晶(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されている。図5-6に示すように、MDA及びZIRLO被覆管とジルカロイ-4被覆管の照射成長は、ともに高速中性子照射量にほぼ比例し、ジルカロイ-4被覆管については高燃焼度領域でもこの傾向が認められる。また、MDA及びZIRLO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。これは固溶Sn、特にNbが照射欠陥の動きを抑制するため、Nbを含まないジルカロイ-4被覆管と比較して、Nbを含むMDA及びZIRLO被覆管の照射成長が小さくなるためと考えられる。</p> <p>従って、ジルカロイ-4被覆管と比較してMDA及びZIRLO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(2)c.項に示す)設計評価に反映している。</p> <p>燃料棒の設計に当たっては、上記の耐放射線性に関する事項を考慮した上で、被覆管応力等が設計基準を満足するようにする。</p>  <p>図5-6 MDA及びZIRLO被覆管の照射成長^{(12)・(14)・(19)・(47)～(52)}</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：B型燃料集合体に係る記載

(11/25)

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>MDA及びZIRLO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。α線及びβ線のような荷電粒子は、金属中を通り抜けるとき、電気的な相互作用によって原子の軌道電子を引き離すイオン化作用を起こす。また、γ線も軌道電子を原子から引き離す作用を起こす。このようにα線、β線、γ線は、主に金属原子の軌道電子と作用してエネルギーを消失していくので、MDA及びZIRLO被覆管の照射損傷に与える影響は軽微である。</p> <p>核分裂片は、その飛程が限定された近距離にしか及ばないため、二酸化ウラン燃料の表面で起こった核分裂だけが被覆管の内表面にしか作用せず、事実上の照射損傷を与えない。</p> <p>中性子は電荷を持たないので、金属中での電気的な相互作用によってエネルギーを失うことがなく、そのエネルギーは主として原子核との弾性衝突により多数の原子を格子位置からはじき出す作用によって消失される。この結果、金属の結晶格子内あるいは結晶粒界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、MDA及びZIRLO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>従って、MDA及びZIRLO被覆管の放射線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：B型燃料集合体に係る記載

(12/25)

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：高浜発電所1号及び2号炉ステップ2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、<u>図2.1-4に示すように、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の耐力は、ジルカロイ-4製被覆管の耐力と同等であり、炉内での使用温度及び高速中性子照射の効果を考慮すると、約310N/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。</u></p> <p>(4) 被覆管引張歪</p> <p>被覆管に生じる円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に際して1%を超えないこと。</p> <p>ここで、<u>図2.1-5に示すように、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の延性は、ジルカロイ-4製被覆管の延性と同等であり、従来と同様、各過渡変化に際して円周方向引張歪の変化量が1%を超えないことを設計基準として使用する。</u></p>	<p>5.2.1 機械的性質</p> <p>機械特性への影響因子としては、照射脆化と水素脆化が考えられる。照射脆化は照射欠陥の蓄積（濃度）によるが、これは高速中性子束、被覆管温度、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定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。MDA及びZIRLO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^(註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、<u>ジルカロイ-4被覆管と同等である。</u>また、破断伸びは、照射初期に低下した後には照射量によらず著しい変化がなく、<u>ジルカロイ-4被覆管と同等である。</u>その他の材料物性においても、原子炉安全小委員会においてジルカロイ-4被覆管と同等⁽³⁹⁾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$27\sim 32\times 10^{25}\text{n/m}^2$ (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⁽⁶⁶⁾。</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、<u>ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでMDA及びZIRLO被覆管の機械特性は変わらない。</u>照射材については、図5-3に示すとおり<u>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、MDA及びZIRLO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。</u>以上より、<u>MDA及びZIRLO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。</u></p>	

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

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

(13/25)

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 style="text-align: center;">高燃焼度燃料導入時の安全審査資料</p> <p style="text-align: center;">図 2.1-4(1) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の耐力⁽¹⁾</p> <p style="text-align: center;">図 2.1-5(1) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の延性⁽¹⁾</p>	<p style="text-align: center;">設計及び工事計画認可申請書 該当事項</p> <p style="text-align: center;">図 5-1 MDA 及び ZIRLO 被覆管の機械特性^{(13)～(15)、(19)、(39)、(41)～(43)、(68)}</p> <p>(注1) 仕様内でSn含有量を下限近くまで下げたもの。</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：B型燃料集合体に係る記載

(14/25)

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ている主要事項について以下に示す。</p> <p>a. 被覆管の腐食及び水素吸収</p> <p>炉内滞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型燃料で約9.8%、B型燃料で約9.3%となり、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>(中略)</p> <p>被覆管の水素吸収については図2.2-3に示すように未照射被覆管では水素吸収量約800ppmまで延性への影響が認められず、また図2.2-4に示すように、ジルカロイ-4製被覆管の試験結果から延性は水素吸収量約800ppmまで顕著な低下は見られない。改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）は、データが取得されている水素吸収量約400ppmまではジルカロイ-4製被覆管と同程度の延性を示しており、またジルカロイ-4製被覆管と同様、成分の約98%がジルコニウムであるとともに同様の加工方法をとることから延性に影響する水素化物の配向も同等となり、ジルカロイ-4製被覆管の照射データにて延性が確保されていることが確認できる水素吸収量約800ppmまでであれば、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）についても延性は確保できる。</p> <p>ここで被覆管の最大水素吸収量を評価した結果、A型燃料で約690ppm、B型燃料で約720ppmとなり、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MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>(中略)</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、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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MDA及びZIRLO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>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>(中略)</p> <p>従って、MDA及びZIRLO被覆管の腐食量が、本申請の燃料集合体の使用範囲においてジルカロイ-4被覆管に比較して低減すること、及び水素吸収率が酸化膜厚さによらずジルカロイ-4被覆管と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、MDA及びZIRLO被覆管の水素吸収量は、本申請の燃料集合体の使用範囲までジルカロイ-4被覆管に比較して低減すると考えられる。</p>	

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

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

(15/25)

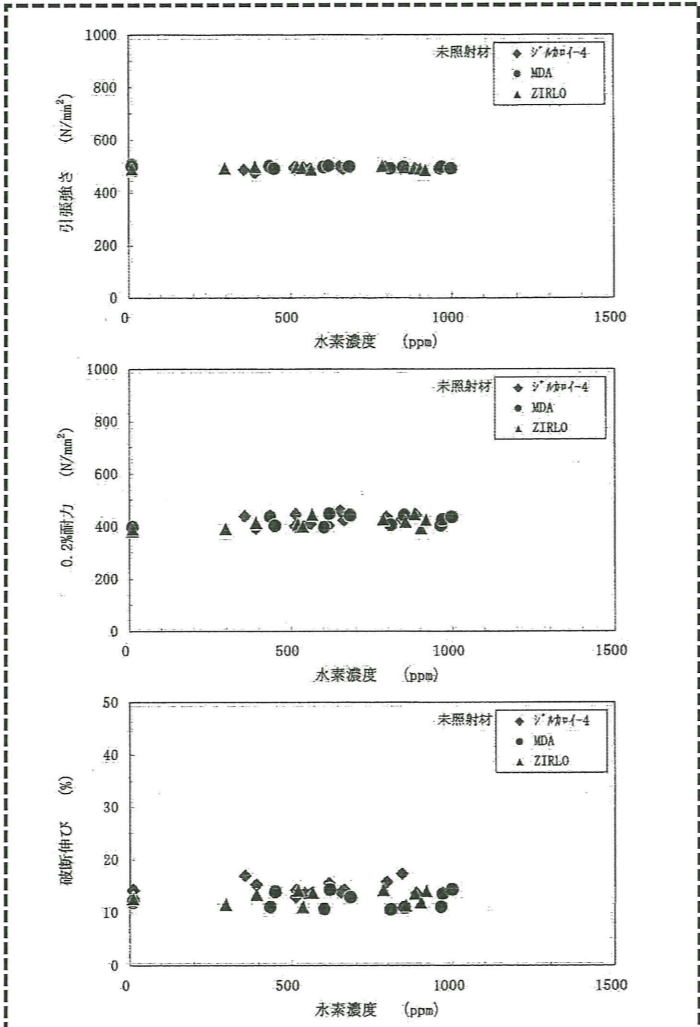
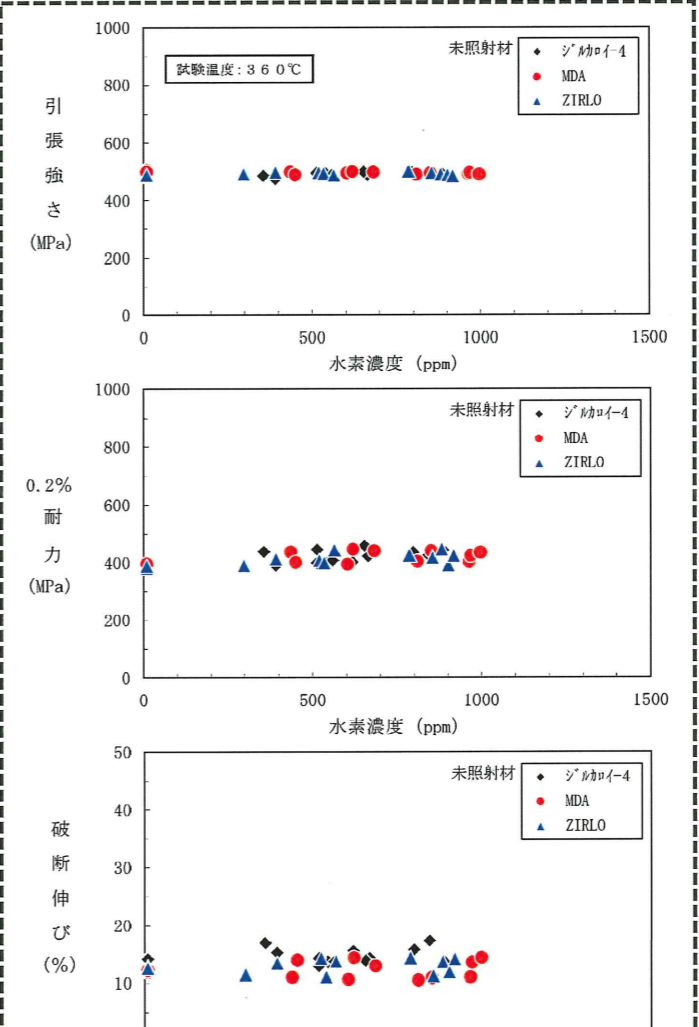
設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図 2.2-3(1) 被覆管水素吸収量 (水素含有量) と機械特性の関係⁽¹⁾ (高温引張試験; 未照射改良被覆管(MDA 及び ZIRLO))</p>	 <p>図 5-2 未照射被覆管の機械的特性と水素濃度の関係⁽⁴⁰⁾</p>	

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：B型燃料集合体に係る記載

(16/25)

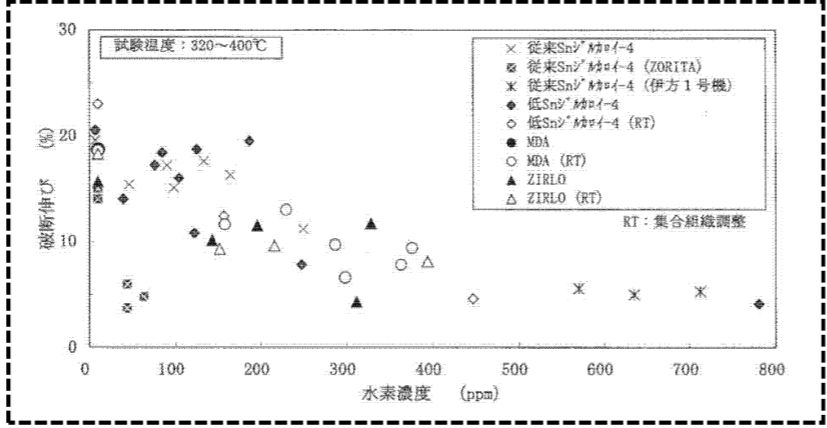
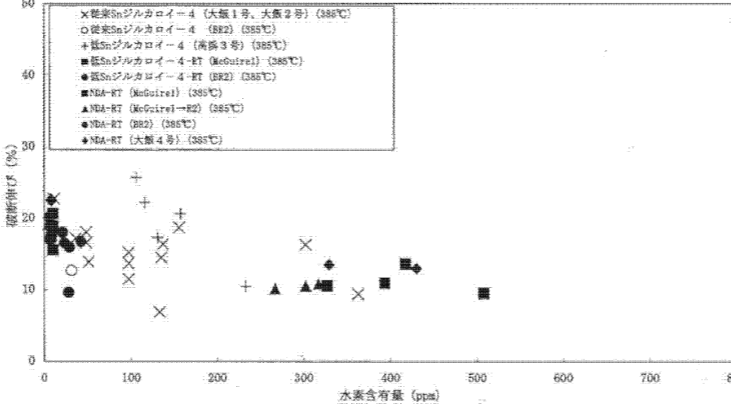
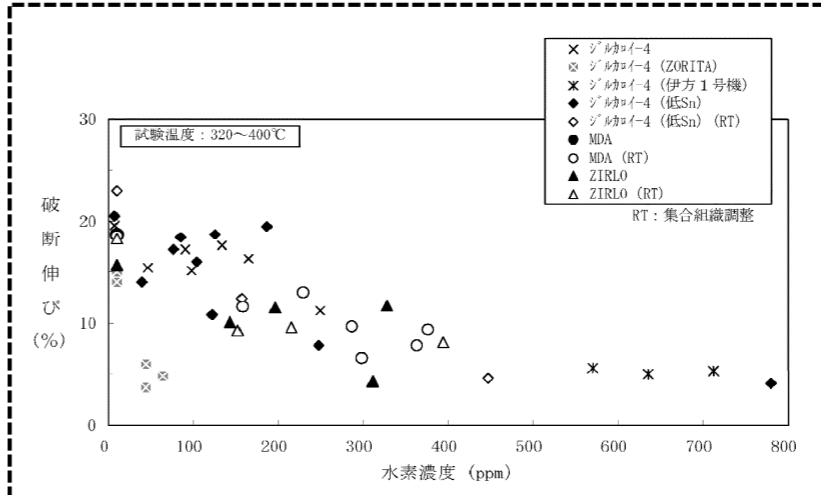
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	  <p data-bbox="952 1220 1546 1293">図 2.2-4 被覆管水素吸収量（水素濃度、水素含有量）と破断伸びの関係^{[1][2]} (高温引張試験; 照射被覆管)</p>	 <p data-bbox="1917 821 2288 842">図 5-3 被覆管水素濃度と破断伸びの関係⁽⁴⁰⁾</p>	

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：B型燃料集合体に係る記載

(17/25)

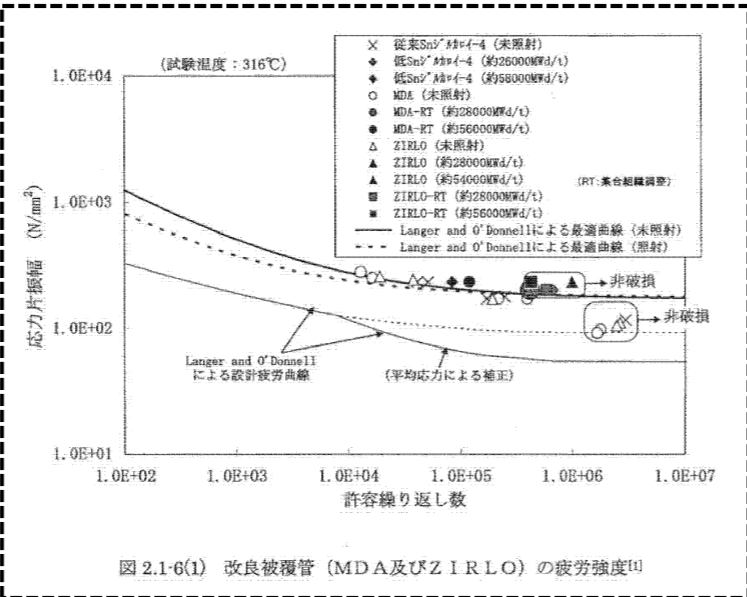
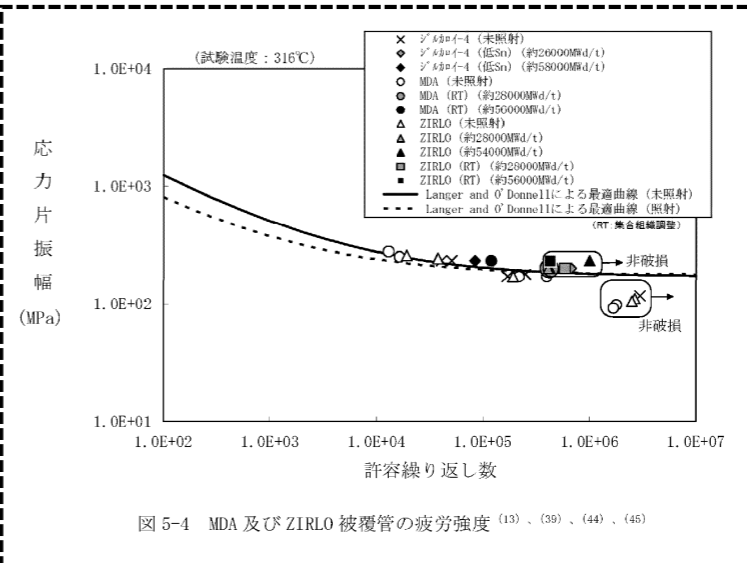
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>2.1 設計方針</p> <p>(5) 被覆管累積疲労</p> <p>被覆管の累積疲労サイクル数は、設計疲労寿命を超えないこと。</p> <p>ここで、図2.1-6に示すように、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の疲労強度は、ジルカロイ-4製被覆管の疲労強度と同等であり、設計疲労曲線としては、従来と同様、Langer and O'Donnellの曲線を使用する。</p>  <p>図 2.1-6(1) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の疲労強度^[1]</p>	<p>5.2.2 疲労特性</p> <p>MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO被覆管はジルカロイ-4被覆管と同等であるため、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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>  <p>図 5-4 MDA 及び ZIRLO 被覆管の疲労強度^{(13)、(39)、(44)、(45)}</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：B型燃料集合体に係る記載

(18/25)

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 燃料</p> <p>3.2.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材である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>図2.2-5に示す試験データから、改良被覆管の耐PCI性は、局所燃焼度約60,000MWd/tまではジルカロイ-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されており、また局所燃焼度約30,000MWd/t以上の燃焼度域において低下する傾向は見られないことから、PCI評価では現行のPCI破損しきい値を適用する。</p> <p>ここで、サイクル初期及びサイクル末期において想定した原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を、図2.2-6にPCI破損しきい値とともに示す。これより、運転時の異常な過渡変化時における最大線出力密度及び線出力密度変化幅は、同時にPCI破損しきい値を超えることはなく、PCI破損は生じない。</p>	<p>5.4.1 耐PCI性</p> <p>被覆管は、腐食性FPガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用（PCMI）を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ（SCC）による破損（PCI破損）を起こす。このPCI破損におけるSCCは、ジルカロイ中の稠密六方晶（α相）の底面にほぼ平行な面上を伝播するが、現行の被覆管製法においては、この底面がPCMI時の発生応力方向、すなわち周方向に配向（C軸を径方向に配向）されており、PCI破損の抑制が図られている。</p> <p>被覆管の耐PCI性を把握するため、試験炉において出力急昇試験が実施されており、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にある値（PCI破損しきい値）を超えた場合にPCI破損が起こることが経験的に知られている。</p> <p>MDA及びZIRLO被覆管の耐PCI性を図5-11に破損しきい値とともに示す。この図ではC軸を径方向に現行より更に配向させた集合組織調整管のデータも示されているが、合金の相違、集合組織調整の有無に係わらず、PCI破損しきい値に対して十分余裕がある。この余裕は局所燃焼度が約40,000MWd/t程度以上では燃焼とともに増加する傾向が見られることから、本申請の燃料集合体の使用範囲まで高い耐PCI性能を有すると考えられる。以上より、MDA及びZIRLO被覆管のPCI破損しきい値はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</p>	

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：B型燃料集合体に係る記載

(19/25)

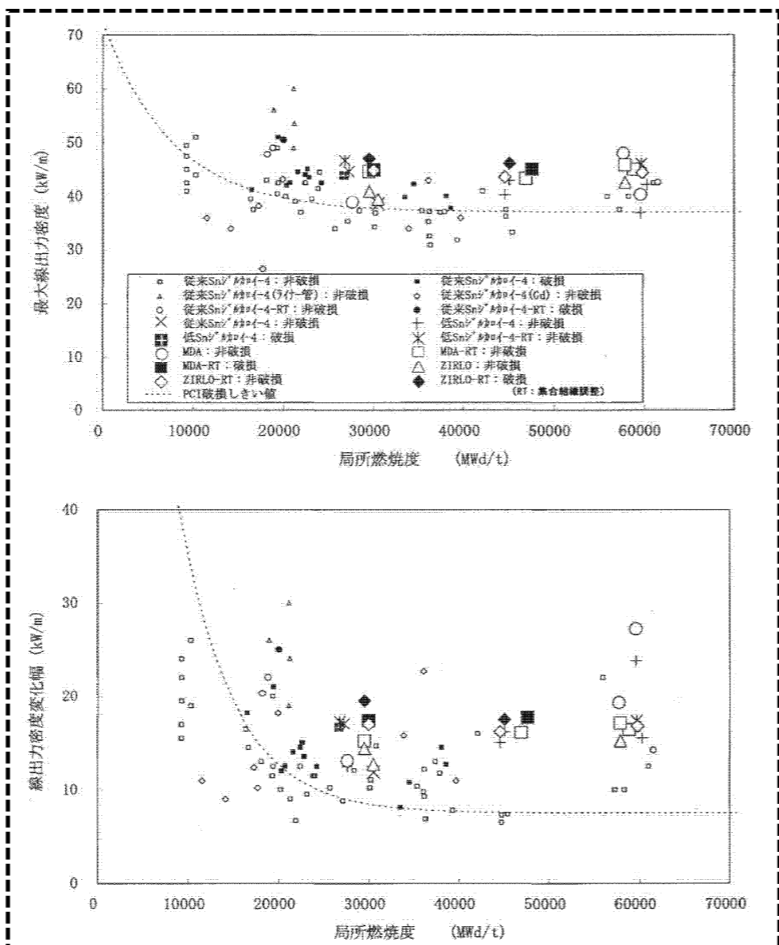
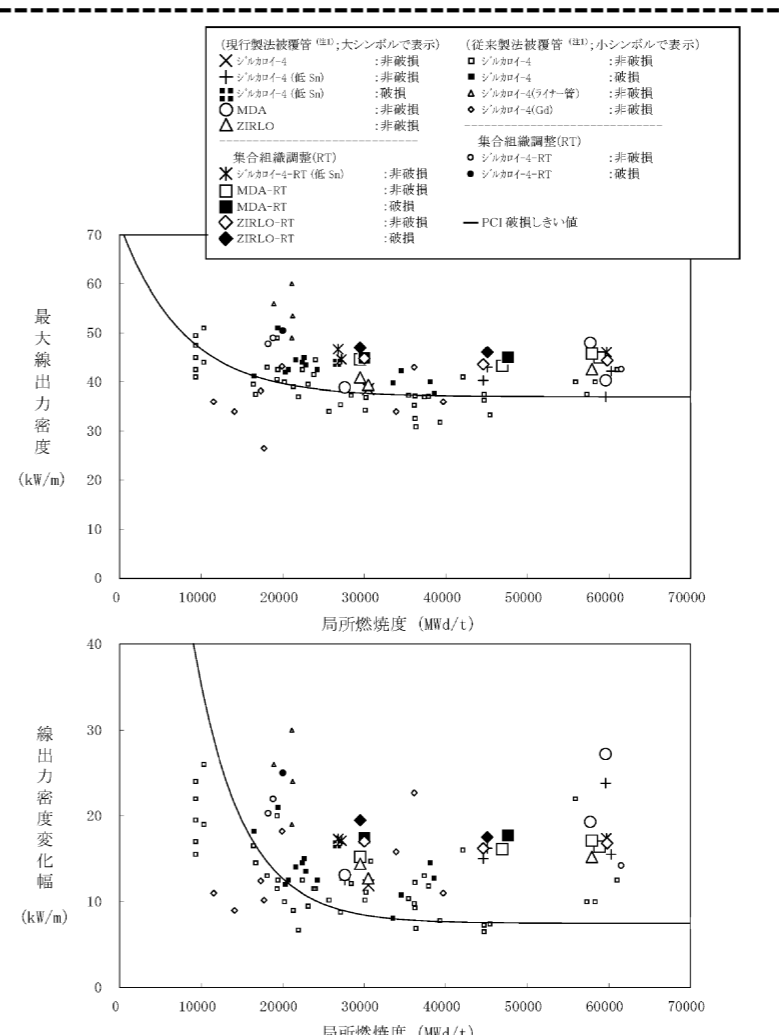
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図 2.2-5(1) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の耐PCI性¹⁴⁾</p>	 <p>図 5-11 MDA 及び ZIRLO 被覆管の耐 PCI 性^{(13)、(19)、(60)、(61)}</p> <p>(注1) 耐PCI性能向上を図るため被覆管の集合組織調整度合いが高くなるように製法を変更しており、それ以前に製造された被覆管を「従来製法被覆管」、以降に製造された被覆管を「現行製法被覆管」と称している。</p>	

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：B型燃料集合体に係る記載

(20/25)

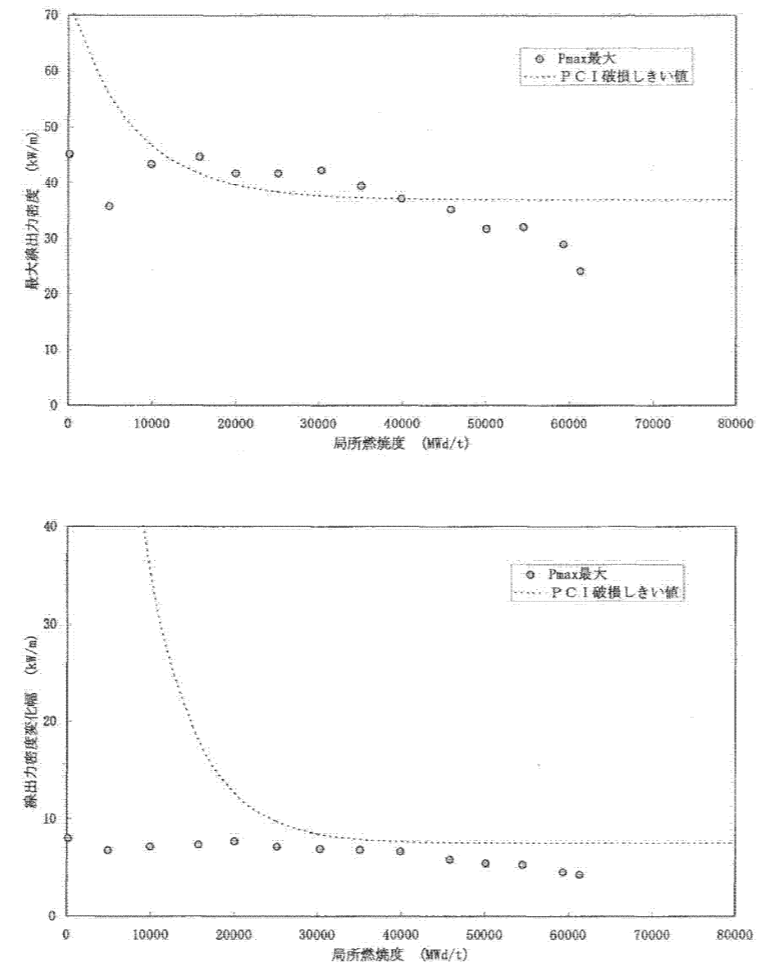
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p style="text-align: center;">図 2.2-6(1) PCI 評価結果 (最大線出力密度 (P_{max}) に着目した整理)</p>		<ul style="list-style-type: none"> 安全審査資料の図2.2-6(1)については、添付資料7に記載している。

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：B型燃料集合体に係る記載

(21/25)

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 2.2-6(2) PCI評価結果 (線出力密度変化幅 (ΔP) に着目した整理)</p>		<p>・安全審査資料の図2.2-6(2)については、添付資料7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

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：B型燃料集合体に係る記載

(22/25)

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 燃料</p> <p>3.2.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材である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>図2.2-5に示す試験データから、改良被覆管の耐PCI性は、局所燃焼度約60,000MWd/tまではジルカロイ-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されており、また局所燃焼度約30,000MWd/t以上の燃焼度域において低下する傾向は見られないことから、PCI評価では現行のPCI破損しきい値を適用する。</p> <p>ここで、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ジルコニウム基合金被覆管との反応</p> <p>ジルコニウム基合金と二酸化ウランが接触した場合、照射により過剰になった二酸化ウラン中の酸素がジルカロイ中に拡散し、被覆管内面酸化膜（ZrO₂）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）O₂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。⁽⁶⁹⁾これらは、被覆管の腐食及びPCI^(注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。⁽⁵⁾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、海外商業炉で照射された約60,000MWd/tまでのMDA及びZIRLO被覆管の燃料棒では被覆管内面酸化及びボンディングが認められるが、その反応層は高々10~20μmと小さく、被覆管応力への影響は小さい。さらに、図5-11に見られるように約30,000~40,000MWd/tにおいてPCI破損が認められる出力レベルでも、約60,000MWd/t程度の上記燃料棒はPCI破損していないことから、この程度の反応層であればPCIへの影響はない。⁽¹⁶⁾</p> <p>なお、MDA及びZIRLO被覆管と二酸化ウランペレットの反応は、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。同様に、二酸化ウランペレットと燃料被覆材端栓との反応についても、PWR燃料の照射後試験⁽¹⁴⁾、⁽³⁰⁾により反応は認められていないことから、二酸化ウランペレットと燃料被覆材端栓とは安定に共存する。従って有意な反応が認められていないことからそれらの反応を設計評価では考慮していない。</p> <p>4.3.1 ガドリニア混合二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応</p> <p>ガドリニア混合二酸化ウランは、4.1項で述べたように置換型固溶体を形成して安定である。10wt%までの濃度のガドリニア混合二酸化ウランとSn-Fe-Cr系ジルコニウム合金（ジルカロイ-4）の共存性については、二酸化ウランと同等あるいはそれ以上に良好な共存性を有することが報告されている。⁽³⁷⁾従って、ガドリニア混合二酸化ウランペレットとMDA及びZIRLO被覆管との反応は、二酸化ウランペレットとMDA及びZIRLO被覆管が安定に共存する場合と大差はない。さらに、上述のとおり、ガドリニア混合二酸化ウランペレットと燃料被覆材端栓とは安定に共存する。従って、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：B型燃料集合体に係る記載

(23/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考								
		<p>5.4.2 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表5-3に示す。この表から分かるようにMDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO被覆管）によらず同等である。以上より、MDA及びZIRLO被覆管の摩耗はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</p> <p>表5-3 MDA及びZIRLO被覆管の硬さの測定結果⁽⁴⁰⁾ (単位：HK（ヌーブ硬さ値）)</p> <table border="1" data-bbox="1843 751 2258 982"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HK 0.1^(注1))</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>206</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>205</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4（参考）</td> <td>204</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注1) HK 0.1：ヌーブ硬さ試験力 0.9807N</p>	種類	平均値 (HK 0.1 ^(注1))	MDA	206	ZIRLO	205	ジルカロイ-4（参考）	204	<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7）に反映しているため、記載している。</p>
種類	平均値 (HK 0.1 ^(注1))										
MDA	206										
ZIRLO	205										
ジルカロイ-4（参考）	204										

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：B型燃料集合体に係る記載

(24/25)

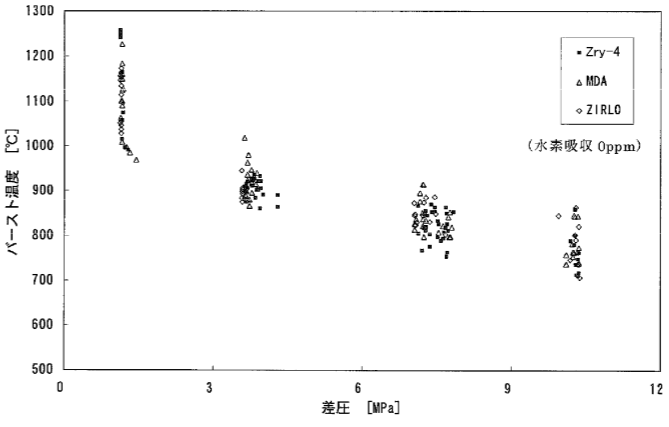
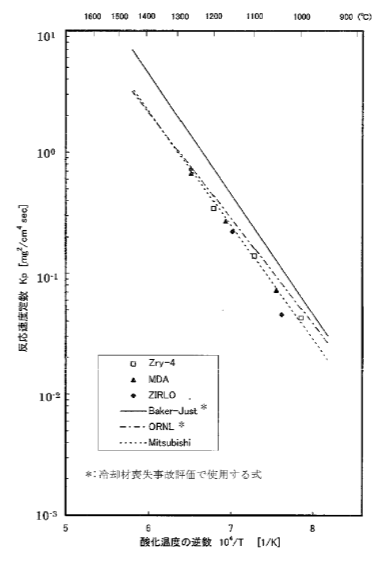
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>5.4.3 高温特性</p> <p>被覆管の相変態（α相からβ相に変化）が生じるような高温時においては、MDA及びZIRLO被覆管は、ジルカロイ-4被覆管同様、約98wt%のジルコニウムを主成分としているため、それらの主要な特性はジルカロイ-4と同等である。冷却材喪失事故にて考慮する昇温内圧破裂試験結果、高温時のジルコニウムと水反応の試験結果をそれぞれ図5-12及び図5-13に示す。図5-12及び図5-13に示すとおり、MDA及びZIRLO被覆管の高温破裂特性及び高温酸化挙動はジルカロイ-4被覆管と同等である。</p>  <p>図5-12 未照射管のLOCA時破裂挙動試験結果（受取管）⁽⁴⁰⁾</p>  <p>図5-13 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数（受取管）⁽⁴⁰⁾</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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。

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：B型燃料集合体に係る記載

(25/25)

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>5.1 耐熱性</p> <p>ジルカロイ-4の融点⁽³⁹⁾は1,825℃であり⁽³⁹⁾、⁽⁴⁰⁾、結晶構造が820℃でα相から(α+β)相へ、また、970℃で(α+β)相からβ相に変態する。</p> <p>MDA及びZIRLO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>MDA及びZIRLOの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、MDA及びZIRLOの融点は約1,840℃、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約770~780℃及び約940~960℃であり、いずれも燃料被覆管の異常な過渡変化時の最高温度(約□℃)よりもかなり高いので、プラントの使用条件の下で融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融融あるいは相変態が生じることはないので、当該の挙動を設計評価では考慮していない。</p> <p style="text-align: center;">表 5-1 MDA 及び ZIRLO の融点測定結果⁽³⁹⁾、⁽⁴⁰⁾ (単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1846 1060 2306 1302"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>融点測定結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>1,844</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>1,842</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>1,825</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">表 5-2 MDA 及び ZIRLO の相変態温度測定結果⁽⁴⁰⁾ (単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1804 1438 2350 1638"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>α→α+β</th> <th>α+β→β</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>780</td> <td>960</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>770</td> <td>940</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>820</td> <td>970</td> </tr> </tbody> </table>	種類	融点測定結果	MDA	1,844	ZIRLO	1,842	ジルカロイ-4 (参考)	1,825	種類	α→α+β	α+β→β	MDA	780	960	ZIRLO	770	940	ジルカロイ-4 (参考)	820	970	<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>
種類	融点測定結果																						
MDA	1,844																						
ZIRLO	1,842																						
ジルカロイ-4 (参考)	1,825																						
種類	α→α+β	α+β→β																					
MDA	780	960																					
ZIRLO	770	940																					
ジルカロイ-4 (参考)	820	970																					

ジルコニウム基合金における酸素含有量の設定について

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

1. 酸素含有量が燃料被覆材へ及ぼす影響

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

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

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

したがって、ジルコニウム基合金の酸素含有量については、JIS 及び ASTM を踏まえ、豊富な使用実績を持つジルカロイ-4で設定している値（ wt%）の範囲内とすることで、上述の燃料被覆材の性質への影響は問題ないものと判断している。また、本酸素含有量では設置許可における安全解析結果に影響はない。次項に、酸素含有量の設定プロセスを示す。

2. 設定プロセス

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

で、燃料被覆材製造メーカーに酸素含有量を提示している。

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

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

以 上

補足説明資料 6－3

特殊加工認可申請書との整合性に関する補足説明資料

目 次

	頁
1. 概 要	1
2. 整理結果	1

1. 概 要

本資料は、令和 2 年 4 月の「原子力利用における安全対策の強化のための核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等の一部を改正する法律」及び関連規則等（以下「改正法等」という。）の施行を踏まえ、本設工認申請対象の燃料被覆材について、特殊加工認可申請書（平成 23 年 6 月 15 日付け平成 23・03・08 原第 9 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 ジルコニウム基合金被覆材の説明書

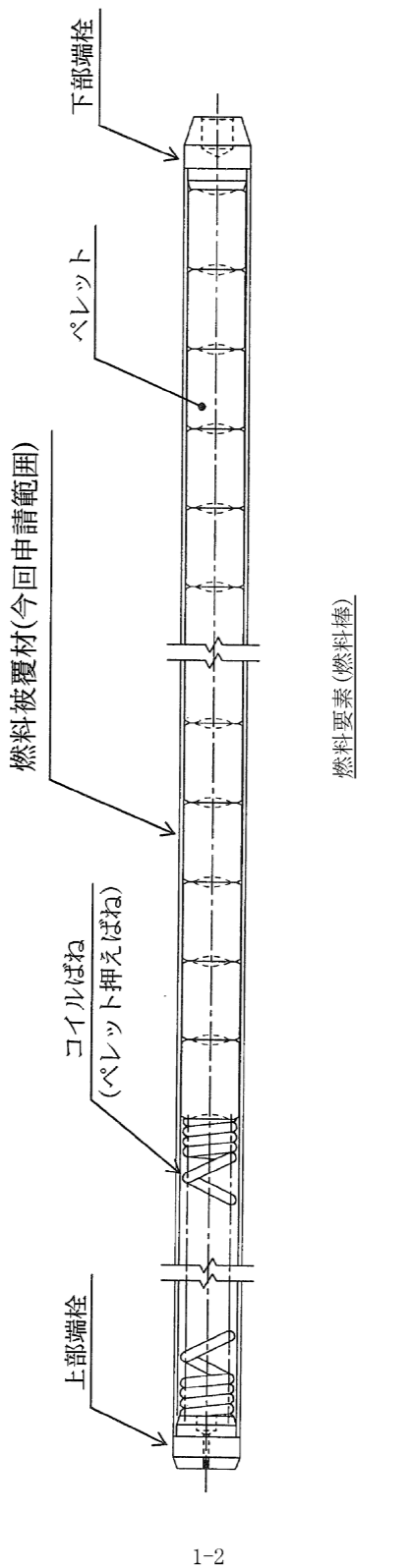
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所
表 1

特認（美浜発電所第 3 号機、高浜発電所第 1， 2 号機 A 型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第 3 号機、高浜発電所第 1， 2 号機 A 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="566 1696 1139 1797" 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;">高浜発電所第 1， 2 号機及び美浜発電所第 3 号機</td> </tr> </table> </div>	特 殊 加 工 認 可 申 請 書	資 料 1	高浜発電所第 1， 2 号機及び美浜発電所第 3 号機		—	
特 殊 加 工 認 可 申 請 書	資 料 1					
高浜発電所第 1， 2 号機及び美浜発電所第 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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>1. 特殊加工認可申請範囲</p> <p>特殊加工認可申請範囲は、高浜発電所第1, 2号機及び美浜発電所第3号機の取替燃料体（最高燃焼率 55,000MWd/t）のうち以下の部分である。</p> <p>(1) 燃料被覆材（図1参照）</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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
 <p style="text-align: center;">図 1 特殊加工認可申請範囲</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、高浜発電所第 1， 2 号機 A 型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第 3 号機、高浜発電所第 1， 2 号機 A 型燃料集合体）	備考				
<p style="text-align: center;">ジルコニウム基合金被覆材の説明書</p> <div data-bbox="528 1717 1133 1822" style="border: 1px solid black; margin: 20px auto; padding: 5px;"> <table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100%;"> <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 号機及び美浜発電所第 3 号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料 2	高浜発電所第 1， 2 号機及び美浜発電所第 3 号機		—	
特殊加工認可申請書	資料 2					
高浜発電所第 1， 2 号機及び美浜発電所第 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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<p style="text-align: center;">目 次</p> <p>1. MDA及びZIRLO被覆管の概要2-1</p> <p>2. MDA及びZIRLO被覆管の特性2-2</p> <p> 2.1 耐熱性2-2</p> <p> 2.2 耐放射線性2-2</p> <p> 2.2.1 機械的性質2-3</p> <p> 2.2.2 疲労特性2-3</p> <p> 2.2.3 クリープ特性2-4</p> <p> 2.2.4 照射成長2-4</p> <p> 2.3 耐腐食性2-4</p> <p> 2.3.1 酸化腐食による影響2-5</p> <p> 2.3.2 水素吸収による影響2-5</p> <p> 2.4 その他の性能2-6</p> <p> 2.4.1 耐PCI性2-6</p> <p> 2.4.2 耐摩耗性2-6</p> <p> 2.4.3 高温特性2-7</p> <p> 2.4.4 被覆管とペレットの反応特性2-7</p> <p>3. MDA及びZIRLO被覆管の品質及び検査方法等2-8</p> <p> 3.1 品質2-8</p> <p> 3.2 寸法許容差2-8</p> <p> 3.3 製造方法2-9</p> <p> 3.4 試験2-9</p> <p> 3.5 検査2-9</p> <p> 3.6 表示2-10</p> <p>4. 参考文献2-11</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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>1. MDA及びZIRLO被覆管の概要</p> <p>(1) MDA及びZIRLOについて</p> <p>ジルコニウムは、熱中性子吸収断面積が極めて小さいため、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、添加元素によってこ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。）用燃料被覆材（以下、被覆管と称す。）としてジルコニウムにSn、Fe及びCrを加えた“ジルカロイ-4^{*1}”が開発された。</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燃料被覆管の材料として適している。Snの含有量については、従来の製品では1.5wt%程度であったが、近年、耐食性向上を狙って規格^{*1}の範囲内（1.20～1.70wt%）でSnの含有量を低下させ、1.3wt%程度の製品が採用されている。しかし、燃料体（以下燃料集合体と称す。）の最高燃焼率（以下、燃焼度と称す。）を55,000 MWd/t^{*2}とする高燃焼度燃料（以下「ステップ2燃料」）に使用する場合には、更に耐食性を向上させるとともに、水素吸収量を低減させる必要がある。そこで、PWRにおいては、「耐食性の向上」と「水素吸収量の低減」を目的として開発された以下の新合金をステップ2燃料の被覆管として使用することとしている。</p> <ul style="list-style-type: none"> 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、機械的強度を向上させるため、Nbを微量添加したSn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金（以下、MDAと称す。） 耐食性が良好なZr-Nb系合金に機械的強度を向上させるため、SnとFeを添加したSn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金（ZIRLO^{TM*3}） <p>(2) MDA及びZIRLOの仕様</p> <p>MDA及びZIRLO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及び表1-2に示す。</p> <p>*1 JIS H 4751(1998) ZrTN 804D SR *2 燃料要素(以下、燃料棒と称す。)最高燃焼度は61,000MWd/t。ペレット最高燃焼度は71,000MWd/t。 *3 ZIRLOTMは米国ウエスティングハウス社により商標登録されたものである。以下、「ZIRLO」と称す。</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、機械的強度を向上させるため、Nbを微量添加したSn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金。以下、「MDA」と称する。 (注4) 耐食性が良好なZr-Nb系合金に機械的強度を向上させるため、SnとFeを添加したSn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金。この合金は米国ウエスティングハウス社により「ZIRLO[®]」として商標登録されたものである。以下、「ZIRLO」と称する。 (注5) 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6) 以下、「718合金」と称する。なお、718合金のうち支持格子の材料は「インコネル-718」と称する。</p>	<p>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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2. MDA及びZIRLO被覆管の特性</p> <p><u>MDA及びZIRLO被覆管をステップ2燃料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>2.1 耐熱性</p> <p><u>MDA及びZIRLO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>MDA及びZIRLOの溶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に示すように、MDA及びZIRLOの溶融点は約1840℃、α相から$(\alpha + \beta)$相及び$(\alpha + \beta)$相からβ相への相変態温度はそれぞれ約770～780℃及び約940～960℃であり、いずれも燃料被覆管の異常な過渡変化時の最高温度（約□℃）よりもかなり高いので、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</p> <p>MDA及びZIRLO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年6月15日、平成23・03・08原第9号）。</p> <p><u>MDA及びZIRLO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^(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> <p>5.1 耐熱性</p> <p>ジルカロイ-4の溶融点は1,825℃であり^{(39),(40)}、結晶構造が820℃でα相から$(\alpha + \beta)$相へ、また、970℃で$(\alpha + \beta)$相からβ相に変態する。</p> <p><u>MDA及びZIRLO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>MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLOの溶融点は約1,840℃、α相から$(\alpha + \beta)$相及び$(\alpha + \beta)$相からβ相への相変態温度はそれぞれ約770～780℃及び約940～960℃であり、いずれも燃料被覆管の異常な過渡変化時の最高温度（約□℃）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、高浜発電所第1，2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1，2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2.2 耐放射線性</p> <p><u>MDA及びZIRLO被覆管は、二酸化ウラン燃料と接触して原子炉内に置かれるので、α線、β線、γ線、核分裂片及び中性子の影響を受ける。</u></p> <p><u>α線及びβ線のような荷電粒子は、金属中を通り抜けるとき、電気的な相互作用によって原子の軌道電子を引き離すイオン化作用を起こす。また、γ線も軌道電子を原子から引き離す作用を起こす。このようにα線、β線、γ線は、主に金属原子の軌道電子と作用してエネルギーを消失していくので、MDA及びZIRLO被覆管の照射損傷に与える影響は軽微である。</u></p> <p><u>核分裂片は、その飛程が限定された近距離にしか及ばないため、二酸化ウラン燃料の表面で起こった核分裂だけが被覆管の内表面にしか作用せず、事実上の照射損傷を与えない。</u></p> <p><u>中性子は電荷を持たないので、金属中での電気的な相互作用によってエネルギーを失うことがなく、そのエネルギーは主として原子核との弾性衝突により多数の原子を格子位置からはじき出す作用によって消失される。この結果、金属の結晶格子内あるいは結晶粒界などに空孔あるいは格子間原子の存在が認められるようになり、この微視的欠陥が材料の巨視的な物性値に変化をもたらすことになる。中性子が金属中を通り抜けるとき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、MDA及びZIRLO被覆管の照射損傷に最も大きな寄与をするのは高速中性子である。</u></p> <p><u>したがって、MDA及びZIRLO被覆管の放射線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>	<p>(添付資料 8)</p> <p>5.2 耐放射線性</p> <p><u>MDA及びZIRLO被覆管は、二酸化ウラン燃料と接触して原子炉内に置かれるので、α線、β線、γ線、核分裂片及び中性子の影響を受ける。</u></p> <p><u>α線及びβ線のような荷電粒子は、金属中を通り抜けるとき、電気的な相互作用によって原子の軌道電子を引き離すイオン化作用を起こす。また、γ線も軌道電子を原子から引き離す作用を起こす。このようにα線、β線、γ線は、主に金属原子の軌道電子と作用してエネルギーを消失していくので、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO被覆管の放射線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、高浜発電所第1，2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1，2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2.2.1 機械的性質</p> <p><u>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、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定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。MDA及びZIRLO被覆管の引張試験結果を図2.2-1に示す。引張強さ及び耐力^(注)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。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。</u></p> <p><u>なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量$27\sim 32\times 10^{25}\text{n/m}^2$ ($E>1\text{MeV}$)まで十分な延性が確保されているとの報告例がある^[3]。</u></p> <p><u>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2.2-2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MDA及びZIRLO被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、図2.2-3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、MDA及びZIRLO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被覆管と同様にステップ2燃料の使用範囲まで機械特性は変わらない。</u></p> <p>2.2.2 疲労特性</p> <p><u>MDA及びZIRLO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2.2-4に示す。一般に疲労特性は機械特性に依存するが、2.2.1節で述べたとおり、MDA及びZIRLO被覆管の機械特性はジルカロイ-4被覆管と同等であるため、MDA及びZIRLO被覆管の疲労特性は、ジルカロイ-4被覆管と同等となる。</u></p> <p>(注) 0.2%の塑性変形を起こす応力をいう。</p>	<p>(添付資料 8)</p> <p>5.2.1 機械的性質</p> <p><u>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、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定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。MDA及びZIRLO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^(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⁽³⁹⁾であることが確認されている。</u></p> <p><u>なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量$27\sim 32\times 10^{25}\text{n/m}^2$ ($E>1\text{MeV}$)まで十分な延性が確保されているとの報告例もある⁽⁶⁶⁾。</u></p> <p><u>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MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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。</u></p> <p>5.2.2 疲労特性</p> <p><u>MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO被覆管はジルカロイ-4被覆管と同等であるため、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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> <p>(注1) 0.2%の塑性変形を起こす応力をいう。</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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2.2.3 クリープ特性^(注1) <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2.2-5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、MDA及びZIRLO被覆管は、ジルカロイ-4被覆管に比べて、外径減少が小さく、クリープがしにくくなっている。これは、クリープが転位（材料に元々ある結晶格子ずれ）の移動によるものであり、Zr中に固溶しているSn、特にNbが転位を捕獲してその動きを抑制するため、Nbを含まないジルカロイ-4被覆管に比べて、Nbを含むMDA及びZIRLO被覆管のクリープがしにくくなったためである。</u></p> <p>2.2.4 照射成長^(注2) <u>照射成長の支配要因は、Zr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。図2.2-6に示すように、MDA及びZIRLO被覆管とジルカロイ-4被覆管の照射成長は、ともに高速中性子照射量にほぼ比例し、ジルカロイ-4被覆管については高燃焼度領域でもこの傾向が認められる。また、MDA及びZIRLO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。これは固溶Sn、特にNbが照射欠陥の動きを抑制するため、Nbを含まないジルカロイ-4被覆管と比較して、Nbを含むMDA及びZIRLO被覆管の照射成長が小さくなるためと考えられる。</u> <u>したがって、ジルカロイ-4被覆管と比較してMDA及びZIRLO被覆管の照射成長は、ステップ2燃料の使用範囲まで照射成長量が小さくなると考えられる。</u></p> <p>(注1) 材料が一定応力あるいは一定荷重の下で時間とともに変形する現象。 (注2) 無応力状態でも高速中性子照射によって特定の方向に成長し、他の方向に収縮して体積変化を伴わない現象。</p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5.2.3 クリープ特性^(注1) <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、MDA及びZIRLO被覆管は、ジルカロイ-4被覆管に比べて、外径減少が小さく、クリープがしにくくなっている。これは、クリープが転位（材料に元々ある結晶格子ずれ）の移動によるものであり、Zr中に固溶しているSn、特にNbが転位を捕獲してその動きを抑制するため、Nbを含まないジルカロイ-4被覆管に比べて、Nbを含むMDA及びZIRLO被覆管のクリープがしにくくなったためである。以上より、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(2)c.項に示す）設計評価に反映している。</u></p> <p>5.2.4 照射成長^(注2) <u>照射成長の支配要因は、ジルカロイ中の稠密六方晶（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。図5-6に示すように、MDA及びZIRLO被覆管とジルカロイ-4被覆管の照射成長は、ともに高速中性子照射量にほぼ比例し、ジルカロイ-4被覆管については高燃焼度領域でもこの傾向が認められる。また、MDA及びZIRLO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。これは固溶Sn、特にNbが照射欠陥の動きを抑制するため、Nbを含まないジルカロイ-4被覆管と比較して、Nbを含むMDA及びZIRLO被覆管の照射成長が小さくなるためと考えられる。</u> <u>従って、ジルカロイ-4被覆管と比較してMDA及びZIRLO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(2)c.項に示す）設計評価に反映している。</u> 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> <p>(注1) 材料が一定応力あるいは一定荷重の下で時間とともに変形する現象。 (注2) 無応力状態でも高速中性子照射によって特定の方向に成長し、他の方向に収縮して体積変化を伴わない現象。</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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2.3 耐腐食性</p> <p>MDA及びZIRLO被覆管が1次冷却水と接触すると、ジルカロイ-4被覆管と同様に、 $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ の反応により酸化腐食が進むとともに、発生した水素の一部を吸収する。 <u>実機では放射線照射下で冷却水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では冷却水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。</u></p> <p>2.3.1 酸化腐食による影響</p> <p><u>ジルカロイ被覆管外面には、炉内使用条件下で高温の1次冷却水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2.3-1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を図2.3-2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。</u></p> <p><u>図2.3-2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、MDA及びZIRLO被覆管については、腐食速度の低減が認められるとともに、ジルカロイ-4被覆管と同様、腐食の進行に伴う腐食量の急激な増加が認められる。炉外での被覆管腐食速度の水素吸収量依存性を図2.3-3に示すが、水素化物により腐食が急激に増加する領域においても、ジルカロイ-4被覆管に比較してMDA及びZIRLO被覆管の腐食速度の低減が認められる。</u></p> <p><u>したがって、MDA及びZIRLO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、ステップ2燃料の使用範囲までMDA及びZIRLO被覆管の耐食性の向上が維持されると考えられる。</u></p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5.3 耐食性</p> <p>MDA及びZIRLO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、 $\text{Zr}+2\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{ZrO}_2+2\text{H}_2$ の反応により酸化腐食が進むとともに、発生した水素の一部を吸収する。 <u>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。</u></p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p><u>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。</u></p> <p><u>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、MDA及びZIRLO被覆管については、腐食速度の低減が認められる。</u></p> <p><u>従って、MDA及びZIRLO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MDA及びZIRLO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。</u></p>	<p>腐食が急激に増加する領域においてもMDA及びZIRLO被覆管の耐食性が向上していることは前述（添付資料8図5-8）にて説明している。</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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2.3.2 水素吸収による影響</p> <p><u>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2.3-4に示すが、MDA及びZIRLO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2.3-5に示す。ジルカロイ-4被覆管の水素吸収率は、被覆管10%減肉相当の酸化膜厚さ程度まで酸化膜厚さによらずほぼ一定の水素吸収率となっている。また、MDA及びZIRLO被覆管についても、酸化膜厚さ50μm程度まで酸化膜厚さによらずジルカロイ-4被覆管と同等の水素吸収率となっている。これは酸化膜を透過する水素量及び金属部に吸収される水素吸収量が被覆管の種類（ジルカロイ-4被覆管、MDA及びZIRLO被覆管）によらないためと考えられる。</u></p> <p><u>したがって、MDA及びZIRLO被覆管の腐食量が、ステップ2燃料の使用範囲においてジルカロイ-4被覆管に比較して低減すること、及び水素吸収率が酸化膜厚さによらずジルカロイ-4被覆管と同等であることから、MDA及びZIRLO被覆管の水素吸収量は、ステップ2燃料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。</u></p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p><u>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、MDA及びZIRLO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。ジルカロイ-4被覆管の水素吸収率は、被覆管10%減肉相当の酸化膜厚さ程度まで酸化膜厚さによらずほぼ一定の水素吸収率となっている。また、MDA及びZIRLO被覆管についても、酸化膜厚さ50μm程度まで酸化膜厚さによらずジルカロイ-4被覆管と同等の水素吸収率となっている。これは酸化膜を透過する水素量及び金属部に吸収される水素吸収量が被覆管の種類（ジルカロイ-4被覆管、MDA及びZIRLO被覆管）によらないためと考えられる。</u></p> <p><u>従って、MDA及びZIRLO被覆管の腐食量が、本申請の燃料集合体の使用範囲においてジルカロイ-4被覆管に比較して低減すること、及び水素吸収率が酸化膜厚さによらずジルカロイ-4被覆管と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。</u></p> <p><u>また、MDA及びZIRLO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。</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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A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>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。</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>MDA及びZIRLO被覆管の耐PCI性を図2.4-1に破損しきい値とともに示す。この図ではC軸を径方向に現行より更に配向させた集合組織調整管のデータも示されているが、合金の相違、集合組織調整の有無に係わらず、PCI破損しきい値に対して十分余裕がある。この余裕は局所燃焼度が約40,000MWd/t程度以上では燃焼とともに増加する傾向が見られることから、ステップ2燃料の使用範囲まで高い耐PCI性能を有すると考えられる。</u></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（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。</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>MDA及びZIRLO被覆管の耐PCI性を図5-11に破損しきい値とともに示す。この図ではC軸を径方向に現行より更に配向させた集合組織調整管のデータも示されているが、合金の相違、集合組織調整の有無に係わらず、PCI破損しきい値に対して十分余裕がある。この余裕は局所燃焼度が約40,000MWd/t程度以上では燃焼とともに増加する傾向が見られることから、本申請の燃料集合体の使用範囲まで高い耐PCI性能を有すると考えられる。以上より、MDA及びZIRLO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>	

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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2.4.2 耐摩耗性</p> <p>①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が、②ジルカロイ-4被覆管での摩耗は被覆管肉厚に比較して十分小さく健全性上影響ないことが確認されている^[2]。①被覆管の硬さの測定結果を表2.4-1に示す。この表から分かるようにMDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO被覆管）によらず同等である。</p>	<p>(添付資料8)</p> <p>5.4.2 耐摩耗性</p> <p>①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MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO被覆管）によらず同等である。以上より、MDA及びZIRLO被覆管の摩耗はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</p> <p>(添付資料7-1)</p> <p>3.4 その他の考慮事項</p> <p>(6) フレッシング摩耗評価 (省略)</p> <p>流水試験結果によると、②ジルカロイ-4被覆管とインコネル-718支持格子の間でのフレッシング摩耗は、燃料寿命末期での支持格子ばね力においても発生しないが、それ以下あるいはばね力がない場合にはわずかながら発生していることを確認している。この試験結果を基に、全寿命を4サイクルとし、評価上はサイクル1のばね力を [] のばね力に、また、サイクル2、3、4のばね力を [] と安全側に仮定して被覆管の摩耗減肉量を求めると、②終 [] mm であり被覆管肉厚の10%より小さいことから、被覆管の健全性は確保される。</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、高浜発電所第1，2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1，2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2.4.3 高温特性 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、MDA及びZIRLO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2.4-2及び図2.4-3に示す。MDA及びZIRLO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>2.4.4 被覆管とペレットの反応特性 ジルカロイ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_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。^[5]これらは、被覆管の腐食及びPCIへ影響を及ぼす可能性が考えられる。</p> <p>MDA及びZIRLO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、これらの反応はジルカロイ-4被覆管と同等であり、海外商業炉で照射された約60,000MWd/tまでのMDA及びZIRLO被覆管の燃料棒では被覆管内面酸化及びボンディングが認められるが、その反応層は高々10~20μmと小さい。^[4]</p>	<p>(添付資料 8)</p> <p>5.4.3 高温特性 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、MDA及びZIRLO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、MDA及びZIRLO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>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_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。⁽⁶⁹⁾これらは、被覆管の腐食及びPCI^(注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。⁽⁵⁾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、海外商業炉で照射された約60,000MWd/tまでのMDA及びZIRLO被覆管の燃料棒では被覆管内面酸化及びボンディングが認められるが、その反応層は高々10~20μmと小さく、被覆管応力への影響は小さい。さらに、図5-11に見られるように約30,000~40,000MWd/tにおいてPCI破損が認められる出力レベルでも、約60,000MWd/t程度の上記燃料棒はPCI破損していないことから、この程度の反応層であればPCIへの影響はない。⁽¹⁶⁾</p> <p>なお、MDA及びZIRLO被覆管と二酸化ウランペレットの反応は、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>同様に、二酸化ウランペレットと燃料被覆材端栓との反応についても、PWR燃料の照射後試験^{(14)、(30)}により反応は認められていないことから、二酸化ウランペレットと燃料被覆材端栓とは安定に共存する。従って有意な反応が認められていないことからそれらの反応を設計評価では考慮していない。</p>	<p>MDA及びZIRLO被覆管とペレットの反応については、海外商業炉における検証結果にて反応が小さ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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>3. MDA及びZIRLO被覆管の品質及び検査方法等</p> <p>MDA及びZIRLO被覆管の品質及び検査方法等については、ジルカロイ-4での規格であるJIS H4751(1998) ZrTN 804D SRに基本的に従うこととしている。なお、MDA及びZIRLOはNbを合金成分としているため化学成分分析における許容変動値は、ASTM B 350 に従っている。以下に、MDA及びZIRLO被覆管の品質及び検査方法等について示す。</p> <p>3.1 品質</p> <p>MDA及びZIRLO被覆管の品質は、以下のとおりとしている。</p> <ul style="list-style-type: none"> a) 被覆管の軸は、著しくわん曲していないこと。 b) 被覆管表面に割れ、きず等で有害なものがないこと。 c) 被覆管表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。 d) 被覆管表面の粗さの程度は、実用上差し支えないものであること。 e) 被覆管の化学成分は、表 1-1 による。また、不純物は、表 1-2 による。 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とき、引張強さ、耐力及び伸びが設計上必要な値であること。 g) 被覆管は、3.4c) 又はこれと同等の方法によって腐食試験を行った場合、336時間 で 38 mg/dm^2 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 22 mg/dm^2 以下であった場合には、それ以後の試験は行わない。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。 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、水素化物方向性係数 F_n 値は0.45を超えてはならない。 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、対比試験片の人工きずからの信号と同等、又はそれより大きい欠陥信号があってはならない。 <p>3.2 寸法許容差</p> <p>被覆管の寸法許容差は、設計上必要な値としている。</p> <p style="text-align: center;">2-8</p>	—	<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、高浜発電所第1，2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1，2号機 A型燃料集合体）	備考
<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>a) 化学成分及び不純物の分析試験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 の 11 号試験片とする。ただし、荷重を加える速度は、耐力まではひずみ増加率 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 0.05 mm/mm・min まで増加することができる。</p> <p>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 H4751（1998）の附属書 2 による。</p> <p>d) 水素化物方位試験は、JIS H4751（1998）の附属書 3 による。</p> <p>e) 超音波探傷試験は、JIS H4751（1998）の附属書 4 による。</p> <p>3.5 検査</p> <p>検査は、次による。</p> <p>a) 被覆管は、外観、寸法を検査するとともに、第 3.4 節によって試験を行い、第 3.1 節及び第 3.2 節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管から任意に 2 本の供試管をとって、それぞれの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管から任意に 2 本の供試管をとって、それぞれの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 style="text-align: center;">2-9</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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<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管から任意に1本の供試管をとって、その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) そのほかの一般事項は、JIS H0321 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、管理することとしている。</p> <p style="text-align: center;">2-10</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、高浜発電所第1，2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1，2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>4. 参考文献</p> <p>[1] 原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会, “PWR 燃料の高燃焼度化（ステップ2）及び燃料の高燃焼度化に係る安全研究の現状と課題について”, 平成13年12月7日</p> <p>[2] 三菱原子燃料株式会社, “三菱 PWR 高燃焼度化ステップ2 燃料の機械設計”, MNF-1001 改0, 平成21年6月</p> <p>[3] S. T Mahmood et al., “Post-Irradiation Characterization of Ultra-High-Fluence Zircaloy-2 Plate”, ASTM STP 1354, 2000</p> <p>[4] (財)原子力発電技術機構、平成13年度 高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書（PWR 高燃焼度燃料 総合評価編）、平成14年3月</p> <p>[5] (財)原子力安全研究協会 “軽水炉燃料のふるまい” 実務テキストシリーズ No. 3 平成10年7月</p> <p style="text-align: center;">2-11</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、高浜発電所第 1， 2 号機 A 型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第 3 号機、高浜発電所第 1， 2 号機 A 型燃料集合体）	備考																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
<p style="text-align: center;">表 1-1 化学成分</p> <p style="text-align: right;">単位：wt%</p> <table border="1" data-bbox="270 451 1077 779"> <thead> <tr> <th>合金名 化学成分</th> <th>MDA</th> <th>ZIRLO</th> <th>ジルカロイ-4 *1 (参考)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sn</td> <td>0.70~0.90</td> <td>0.90~1.30</td> <td>1.20~1.70</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18~0.24</td> <td>0.08~0.12</td> <td>0.18~0.24</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07~0.13</td> <td>----</td> <td>0.07~0.13</td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28~0.37</td> <td>----</td> <td>0.28~0.37</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.45~0.55</td> <td>0.80~1.20</td> <td>----</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td></td> <td> *2</td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>残部</td> <td>残部</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">表 1-2 不純物</p> <p style="text-align: right;">単位：wt%</p> <table border="1" data-bbox="270 884 1077 1619"> <thead> <tr> <th>合金名 不純物</th> <th>MDA</th> <th>ZIRLO*3</th> <th>ジルカロイ-4 *1 (参考)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Al</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0075 以下</td></tr> <tr><td>B</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.00005 以下</td></tr> <tr><td>Ca</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0030 以下</td></tr> <tr><td>Cd</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.00005 以下</td></tr> <tr><td>C</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.027 以下</td></tr> <tr><td>Co</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0020 以下</td></tr> <tr><td>Cu</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0050 以下</td></tr> <tr><td>Hf</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.010 以下</td></tr> <tr><td>H</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0025 以下</td></tr> <tr><td>Mg</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0020 以下</td></tr> <tr><td>Mn</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0050 以下</td></tr> <tr><td>Mo</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0050 以下</td></tr> <tr><td>Ni</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0070 以下</td></tr> <tr><td>N</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0080 以下</td></tr> <tr><td>Nb</td><td>----</td><td>----</td><td>0.0100 以下</td></tr> <tr><td>Si</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0120 以下</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.0050 以下</td></tr> <tr><td>U</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.00035 以下</td></tr> <tr><td>W</td><td>以下</td><td>以下</td><td>0.010 以下</td></tr> </tbody> </table> <p>*1 JIS H4751 (1998) Zr-TN 804D *2 酸素は、JIS H4751 (1998) Zr-TN 804D では規定されていない。 *3 ZIRLO : Cr は %以下</p>	合金名 化学成分	MDA	ZIRLO	ジルカロイ-4 *1 (参考)	Sn	0.70~0.90	0.90~1.30	1.20~1.70	Fe	0.18~0.24	0.08~0.12	0.18~0.24	Cr	0.07~0.13	----	0.07~0.13	Fe+Cr	0.28~0.37	----	0.28~0.37	Nb	0.45~0.55	0.80~1.20	----	O			 *2	Zr	残部	残部	残部	合金名 不純物	MDA	ZIRLO*3	ジルカロイ-4 *1 (参考)	Al	以下	以下	0.0075 以下	B	以下	以下	0.00005 以下	Ca	以下	以下	0.0030 以下	Cd	以下	以下	0.00005 以下	C	以下	以下	0.027 以下	Co	以下	以下	0.0020 以下	Cu	以下	以下	0.0050 以下	Hf	以下	以下	0.010 以下	H	以下	以下	0.0025 以下	Mg	以下	以下	0.0020 以下	Mn	以下	以下	0.0050 以下	Mo	以下	以下	0.0050 以下	Ni	以下	以下	0.0070 以下	N	以下	以下	0.0080 以下	Nb	----	----	0.0100 以下	Si	以下	以下	0.0120 以下	Ti	以下	以下	0.0050 以下	U	以下	以下	0.00035 以下	W	以下	以下	0.010 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="1368 474 2303 1073"> <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="12">不 純 物 (ppm)</th> </tr> <tr> <th>Sn</th> <th>Fe+Cr</th> <th>Al</th> <th>B</th> <th>Ca</th> <th>Cd</th> <th>C</th> <th>Co</th> <th>Cu</th> <th>Hf</th> <th>H</th> <th>Mg</th> <th>Mn</th> <th>Mo</th> <th>Ni</th> <th>N</th> <th>Si</th> <th>Ti</th> <th>U</th> <th>W</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="7">燃料被覆材</td> <td rowspan="7">Sn-Fe-Cr-Nb系 ジルコニウム 基合金 (注3)</td> <td>Sn</td> <td>0.70/0.90</td> <td>Al</td> <td></td> <td>Cu</td> <td></td> <td>N</td> <td></td> <td>Si</td> <td></td> <td>Ti</td> <td></td> <td>U</td> <td></td> <td>W</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>B</td> <td></td> <td>Hf</td> <td></td> <td>Si</td> <td></td> <td>Ti</td> <td></td> <td>U</td> <td></td> <td>W</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>Ca</td> <td></td> <td>H</td> <td></td> <td>Si</td> <td></td> <td>Ti</td> <td></td> <td>U</td> <td></td> <td>W</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Cd</td> <td></td> <td>Mg</td> <td></td> <td>Ti</td> <td></td> <td>U</td> <td></td> <td>W</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.45/0.55</td> <td>C</td> <td></td> <td>Mn</td> <td></td> <td>U</td> <td></td> <td>W</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td>Mo</td> <td></td> <td>W</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残り</td> <td>Co</td> <td></td> <td>Ni</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td rowspan="5">燃料被覆材</td> <td rowspan="5">Sn-Fe-Nb系 ジルコニウム 基合金 (注4)</td> <td>Sn</td> <td>0.90/1.30</td> <td>Al</td> <td></td> <td>Cr</td> <td></td> <td>Ni</td> <td></td> <td>W</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.08/0.12</td> <td>B</td> <td></td> <td>Cu</td> <td></td> <td>N</td> <td></td> <td>Si</td> <td></td> <td>Ti</td> <td></td> <td>U</td> <td></td> <td>W</td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.80/1.20</td> <td>Ca</td> <td></td> <td>Hf</td> <td></td> <td>Si</td> <td></td> <td>Ti</td> <td></td> <td>U</td> <td></td> <td>W</td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td>Cd</td> <td></td> <td>H</td> <td></td> <td>Si</td> <td></td> <td>Ti</td> <td></td> <td>U</td> <td></td> <td>W</td> <td></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残り</td> <td>C</td> <td></td> <td>Mg</td> <td></td> <td>Ti</td> <td></td> <td>U</td> <td></td> <td>W</td> <td></td> <td colspan="4"></td> </tr> </tbody> </table>	構成部品	材料の種類	主成分 (wt%)		不 純 物 (ppm)												Sn	Fe+Cr	Al	B	Ca	Cd	C	Co	Cu	Hf	H	Mg	Mn	Mo	Ni	N	Si	Ti	U	W	燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb系 ジルコニウム 基合金 (注3)	Sn	0.70/0.90	Al		Cu		N		Si		Ti		U		W						Fe	0.18/0.24	B		Hf		Si		Ti		U		W						Cr	0.07/0.13	Ca		H		Si		Ti		U		W						Fe+Cr	0.28/0.37	Cd		Mg		Ti		U		W						Nb	0.45/0.55	C		Mn		U		W						O		Mo		W						Zr	残り	Co		Ni						燃料被覆材	Sn-Fe-Nb系 ジルコニウム 基合金 (注4)	Sn	0.90/1.30	Al		Cr		Ni		W						Fe	0.08/0.12	B		Cu		N		Si		Ti		U		W				Nb	0.80/1.20	Ca		Hf		Si		Ti		U		W				O		Cd		H		Si		Ti		U		W				Zr	残り	C		Mg		Ti		U		W						<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>
合金名 化学成分	MDA	ZIRLO	ジルカロイ-4 *1 (参考)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Sn	0.70~0.90	0.90~1.30	1.20~1.70																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Fe	0.18~0.24	0.08~0.12	0.18~0.24																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Cr	0.07~0.13	----	0.07~0.13																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Fe+Cr	0.28~0.37	----	0.28~0.37																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Nb	0.45~0.55	0.80~1.20	----																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
O			 *2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Zr	残部	残部	残部																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
合金名 不純物	MDA	ZIRLO*3	ジルカロイ-4 *1 (参考)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Al	以下	以下	0.0075 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
B	以下	以下	0.00005 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Ca	以下	以下	0.0030 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Cd	以下	以下	0.00005 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
C	以下	以下	0.027 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Co	以下	以下	0.0020 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Cu	以下	以下	0.0050 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Hf	以下	以下	0.010 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
H	以下	以下	0.0025 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Mg	以下	以下	0.0020 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Mn	以下	以下	0.0050 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Mo	以下	以下	0.0050 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Ni	以下	以下	0.0070 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
N	以下	以下	0.0080 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Nb	----	----	0.0100 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Si	以下	以下	0.0120 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Ti	以下	以下	0.0050 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
U	以下	以下	0.00035 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
W	以下	以下	0.010 以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
構成部品	材料の種類	主成分 (wt%)		不 純 物 (ppm)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
		Sn	Fe+Cr	Al	B	Ca	Cd	C	Co	Cu	Hf	H	Mg	Mn	Mo	Ni	N	Si	Ti	U	W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb系 ジルコニウム 基合金 (注3)	Sn	0.70/0.90	Al		Cu		N		Si		Ti		U		W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Fe	0.18/0.24	B		Hf		Si		Ti		U		W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Cr	0.07/0.13	Ca		H		Si		Ti		U		W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Fe+Cr	0.28/0.37	Cd		Mg		Ti		U		W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
		Nb	0.45/0.55	C		Mn		U		W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		O		Mo		W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
		Zr	残り	Co		Ni																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
燃料被覆材	Sn-Fe-Nb系 ジルコニウム 基合金 (注4)	Sn	0.90/1.30	Al		Cr		Ni		W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Fe	0.08/0.12	B		Cu		N		Si		Ti		U		W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Nb	0.80/1.20	Ca		Hf		Si		Ti		U		W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		O		Cd		H		Si		Ti		U		W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Zr	残り	C		Mg		Ti		U		W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								

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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考																																																								
<p>表 2. 1-1 MDA及びZIRLOの溶融点測定結果^[1,2] 単位：℃</p> <table border="1" data-bbox="424 472 943 751"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>溶融点測定結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>1, 844</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>1, 842</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4（参考）</td> <td>1, 825</td> </tr> </tbody> </table> <p>表 2. 1-2 MDA及びZIRLOの相変態温度測定結果^[2] 単位：℃</p> <table border="1" data-bbox="373 926 994 1165"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$</th> <th>$\alpha + \beta \rightarrow \beta$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>780</td> <td>960</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>770</td> <td>940</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4（参考）</td> <td>820</td> <td>970</td> </tr> </tbody> </table> <p>表 2. 4-1 MDA及びZIRLO被覆管の硬さの測定結果^[2] 単位：HK（ヌーブ硬さ値）</p> <table border="1" data-bbox="457 1291 920 1543"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HK 0.1^[1])</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>206</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>205</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4（参考）</td> <td>204</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1 HK0.1: ヌーブ硬さ試験力 0.9807N</p>	種類	溶融点測定結果	MDA	1, 844	ZIRLO	1, 842	ジルカロイ-4（参考）	1, 825	種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$	MDA	780	960	ZIRLO	770	940	ジルカロイ-4（参考）	820	970	種類	平均値 (HK 0.1 ^[1])	MDA	206	ZIRLO	205	ジルカロイ-4（参考）	204	<p>(添付資料8)</p> <p>表 5-1 MDA 及び ZIRLO の溶融点測定結果^{(39)、(40)} (単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1522 472 2071 766"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>溶融点測定結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>1, 844</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>1, 842</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4（参考）</td> <td>1, 825</td> </tr> </tbody> </table> <p>表 5-2 MDA 及び ZIRLO の相変態温度測定結果⁽⁴⁰⁾ (単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1472 926 2131 1176"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$</th> <th>$\alpha + \beta \rightarrow \beta$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>780</td> <td>960</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>770</td> <td>940</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4（参考）</td> <td>820</td> <td>970</td> </tr> </tbody> </table> <p>表 5-3 MDA 及び ZIRLO 被覆管の硬さの測定結果⁽⁴⁰⁾ (単位：HK（ヌーブ硬さ値）)</p> <table border="1" data-bbox="1570 1333 2062 1612"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HK 0.1^(注1))</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>206</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>205</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4（参考）</td> <td>204</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注1) HK 0.1: ヌーブ硬さ試験力 0.9807N</p>	種類	溶融点測定結果	MDA	1, 844	ZIRLO	1, 842	ジルカロイ-4（参考）	1, 825	種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$	MDA	780	960	ZIRLO	770	940	ジルカロイ-4（参考）	820	970	種類	平均値 (HK 0.1 ^(注1))	MDA	206	ZIRLO	205	ジルカロイ-4（参考）	204	
種類	溶融点測定結果																																																									
MDA	1, 844																																																									
ZIRLO	1, 842																																																									
ジルカロイ-4（参考）	1, 825																																																									
種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$																																																								
MDA	780	960																																																								
ZIRLO	770	940																																																								
ジルカロイ-4（参考）	820	970																																																								
種類	平均値 (HK 0.1 ^[1])																																																									
MDA	206																																																									
ZIRLO	205																																																									
ジルカロイ-4（参考）	204																																																									
種類	溶融点測定結果																																																									
MDA	1, 844																																																									
ZIRLO	1, 842																																																									
ジルカロイ-4（参考）	1, 825																																																									
種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$																																																								
MDA	780	960																																																								
ZIRLO	770	940																																																								
ジルカロイ-4（参考）	820	970																																																								
種類	平均値 (HK 0.1 ^(注1))																																																									
MDA	206																																																									
ZIRLO	205																																																									
ジルカロイ-4（参考）	204																																																									

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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考																																																					
<p style="text-align: center;">表 3. 4-1 化学成分及び不純物の分析試験方法及びに許容変動値 単位：wt%</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>化学成分 不純物</th> <th>分析試験方法</th> <th>許容変動値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Sn</td><td>JIS H 1659 又は JIS H 1669</td><td>0.050</td></tr> <tr><td>Fe</td><td>JIS H 1654 又は JIS H 1669</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>Cr</td><td>JIS H 1656 又は JIS H 1669</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>Fe+Cr</td><td>—</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>Nb</td><td>JIS H 1668-71</td><td style="border: 2px solid black;">[]</td></tr> <tr><td>O</td><td>JIS H 1665</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>Al</td><td>JIS H 1661</td><td rowspan="10" style="border: 2px solid black;">[]</td></tr> <tr><td>B</td><td>JIS H 1670-82</td></tr> <tr><td>C</td><td>JIS H 1663</td></tr> <tr><td>Cd</td><td>JIS H 1671-82</td></tr> <tr><td>Co</td><td>JIS H 1658</td></tr> <tr><td>Cu</td><td>JIS H 1657</td></tr> <tr><td>Hf</td><td>JIS H 1667</td></tr> <tr><td>H</td><td>JIS H 1664</td></tr> <tr><td>Mn</td><td>JIS H 1652</td></tr> <tr><td>Ni</td><td>JIS H 1655 又は JIS H 1669</td></tr> <tr><td>N</td><td>JIS H 1653</td><td rowspan="5" style="border: 2px solid black;">[]</td></tr> <tr><td>Si</td><td>JIS H 1660</td></tr> <tr><td>Ti</td><td>JIS H 1662</td></tr> <tr><td>U</td><td>JIS H 1672-82</td></tr> <tr><td>W</td><td>JIS H 1674-92</td></tr> </tbody> </table> <p>備考 1. 許容変動値とは、注文者側が管の受入分析試験を行った場合、規格値の上限又は下限を超えて許容される値をいう。 2. 日本工業規格以外の分析試験方法を適用する場合は、上記の許容変動値を満足する分析試験方法を適用する。 3. MDA及びZIRLO被覆管のNb許容変動値は、[]に従う。 4. MDA及びZIRLO被覆管のNi許容変動値は、[] 5. ZIRLO被覆管のCr許容変動値は、[]</p> <p style="text-align: center;">2-14</p>	化学成分 不純物	分析試験方法	許容変動値	Sn	JIS H 1659 又は JIS H 1669	0.050	Fe	JIS H 1654 又は JIS H 1669	0.020	Cr	JIS H 1656 又は JIS H 1669	0.010	Fe+Cr	—	0.020	Nb	JIS H 1668-71	[]	O	JIS H 1665	0.020	Al	JIS H 1661	[]	B	JIS H 1670-82	C	JIS H 1663	Cd	JIS H 1671-82	Co	JIS H 1658	Cu	JIS H 1657	Hf	JIS H 1667	H	JIS H 1664	Mn	JIS H 1652	Ni	JIS H 1655 又は JIS H 1669	N	JIS H 1653	[]	Si	JIS H 1660	Ti	JIS H 1662	U	JIS H 1672-82	W	JIS H 1674-92	—	<p>検査方法等については、本設工認における工事の方法にて、全施設を網羅するように工事の手順、使用前事業者検査の方法等を記載している。以上のことから、当該記載については比較対象外。</p>
化学成分 不純物	分析試験方法	許容変動値																																																					
Sn	JIS H 1659 又は JIS H 1669	0.050																																																					
Fe	JIS H 1654 又は JIS H 1669	0.020																																																					
Cr	JIS H 1656 又は JIS H 1669	0.010																																																					
Fe+Cr	—	0.020																																																					
Nb	JIS H 1668-71	[]																																																					
O	JIS H 1665	0.020																																																					
Al	JIS H 1661	[]																																																					
B	JIS H 1670-82																																																						
C	JIS H 1663																																																						
Cd	JIS H 1671-82																																																						
Co	JIS H 1658																																																						
Cu	JIS H 1657																																																						
Hf	JIS H 1667																																																						
H	JIS H 1664																																																						
Mn	JIS H 1652																																																						
Ni	JIS H 1655 又は JIS H 1669																																																						
N	JIS H 1653	[]																																																					
Si	JIS H 1660																																																						
Ti	JIS H 1662																																																						
U	JIS H 1672-82																																																						
W	JIS H 1674-92																																																						

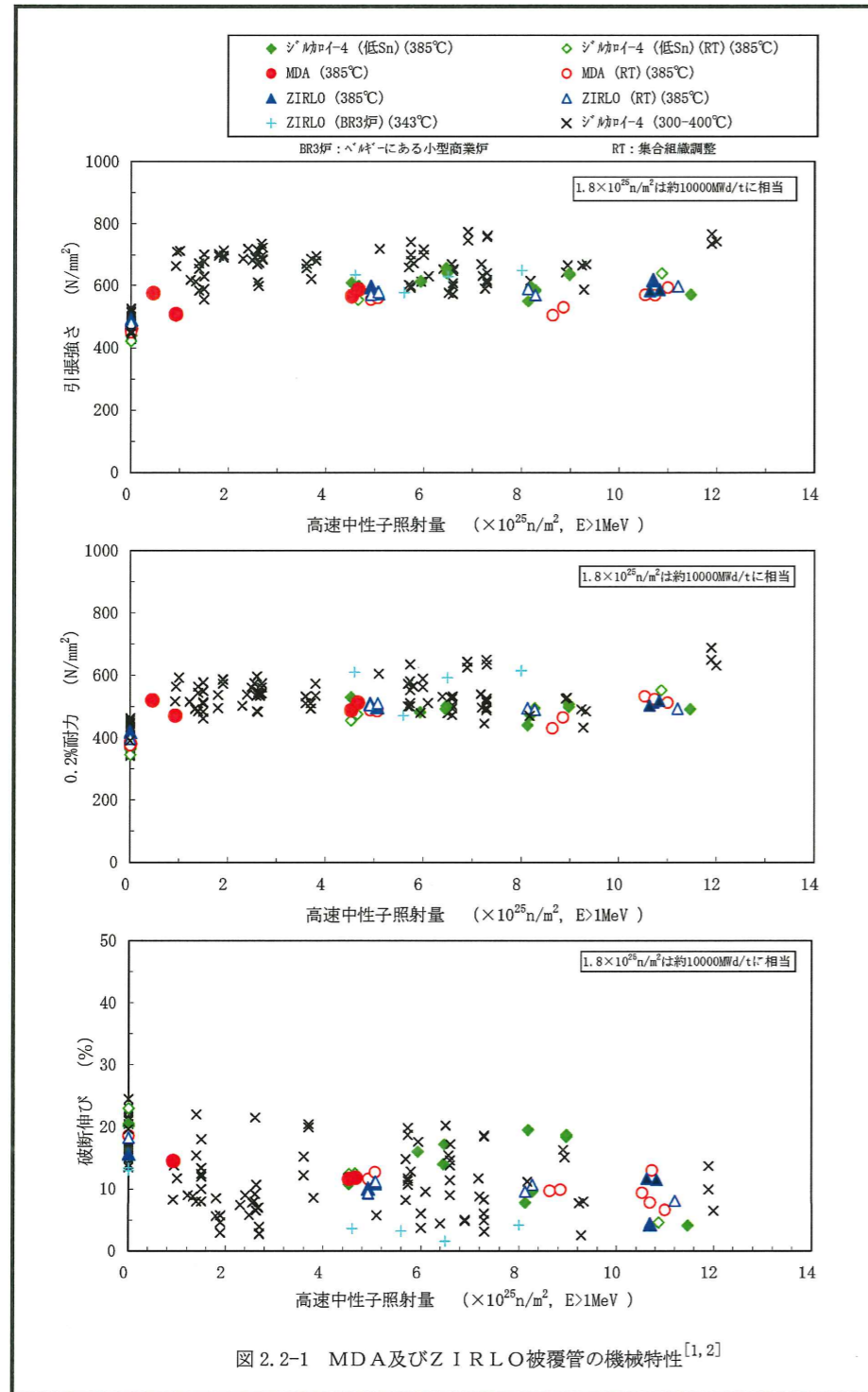
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所

表 1

特認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）

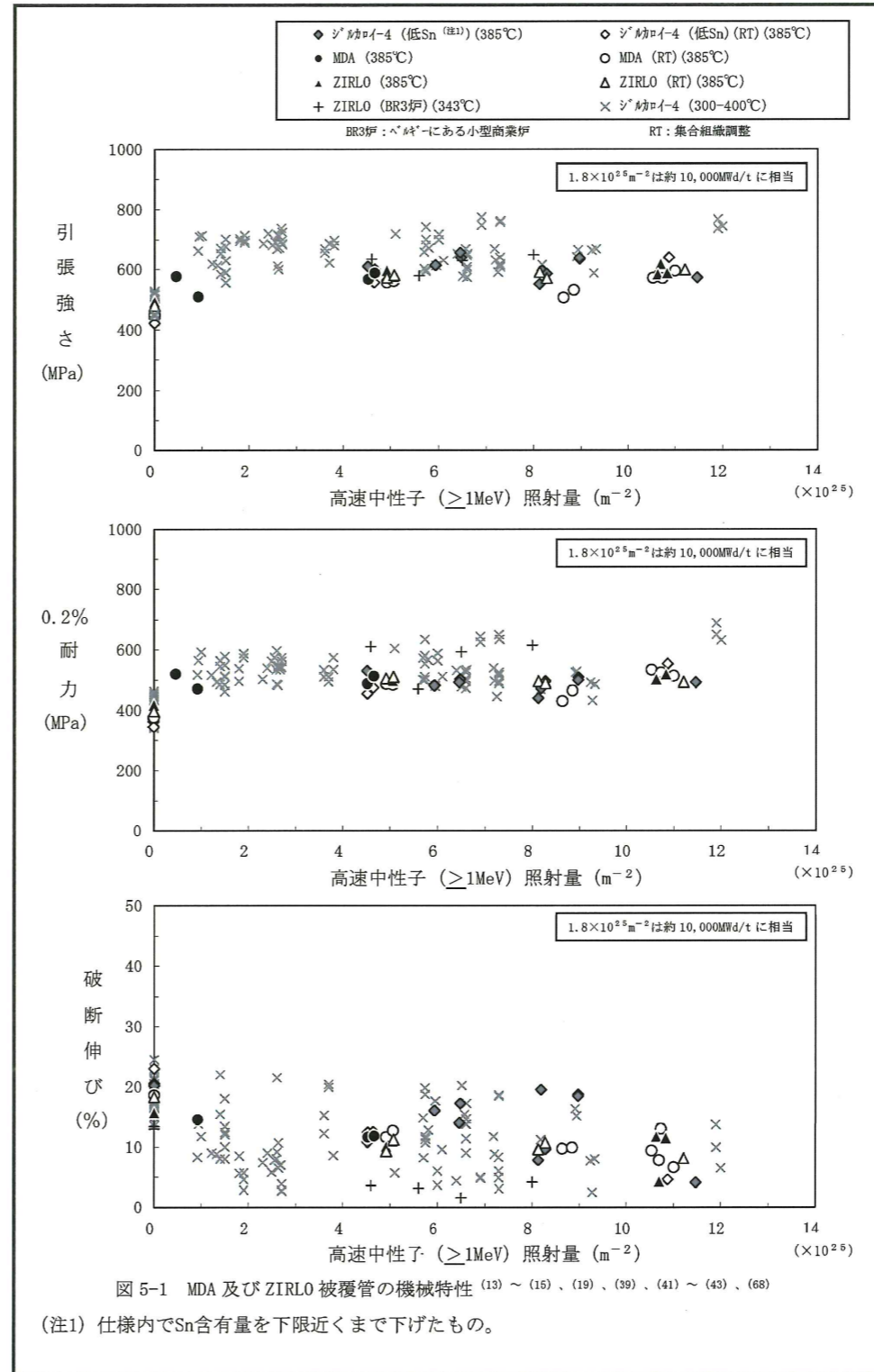
設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）

備考



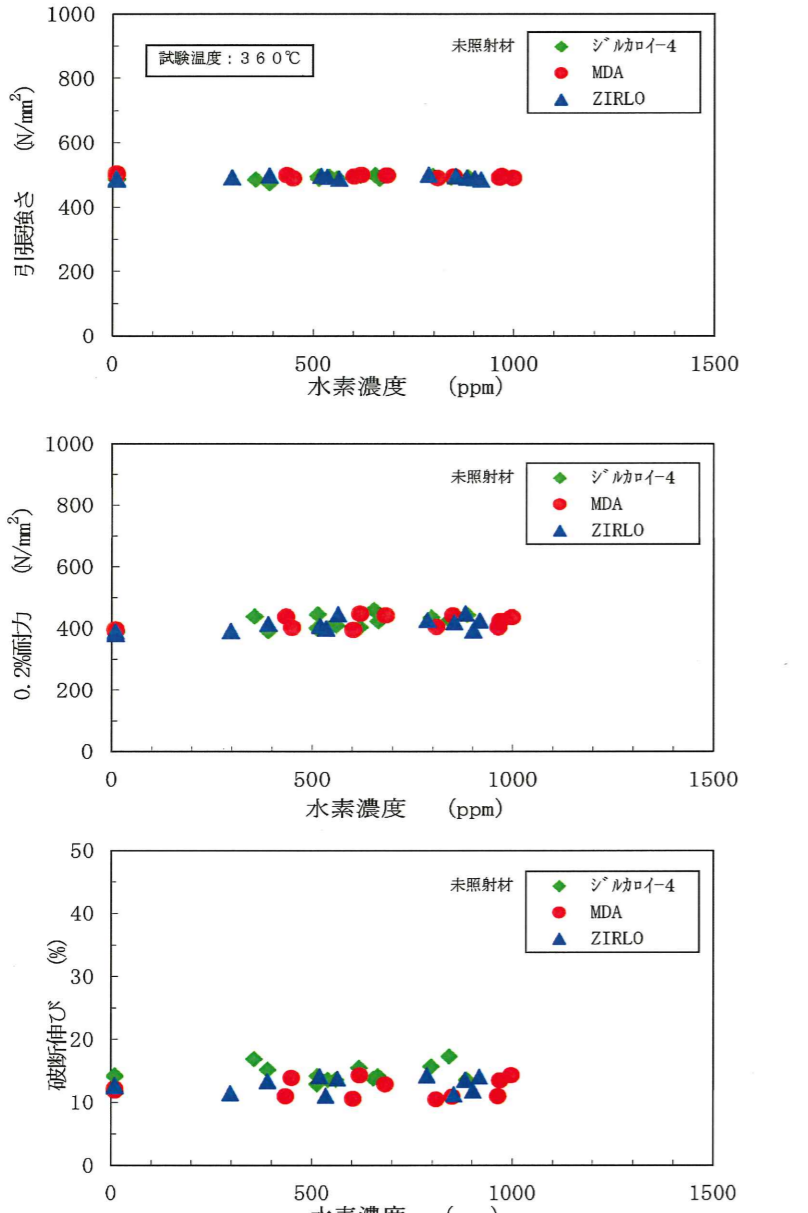
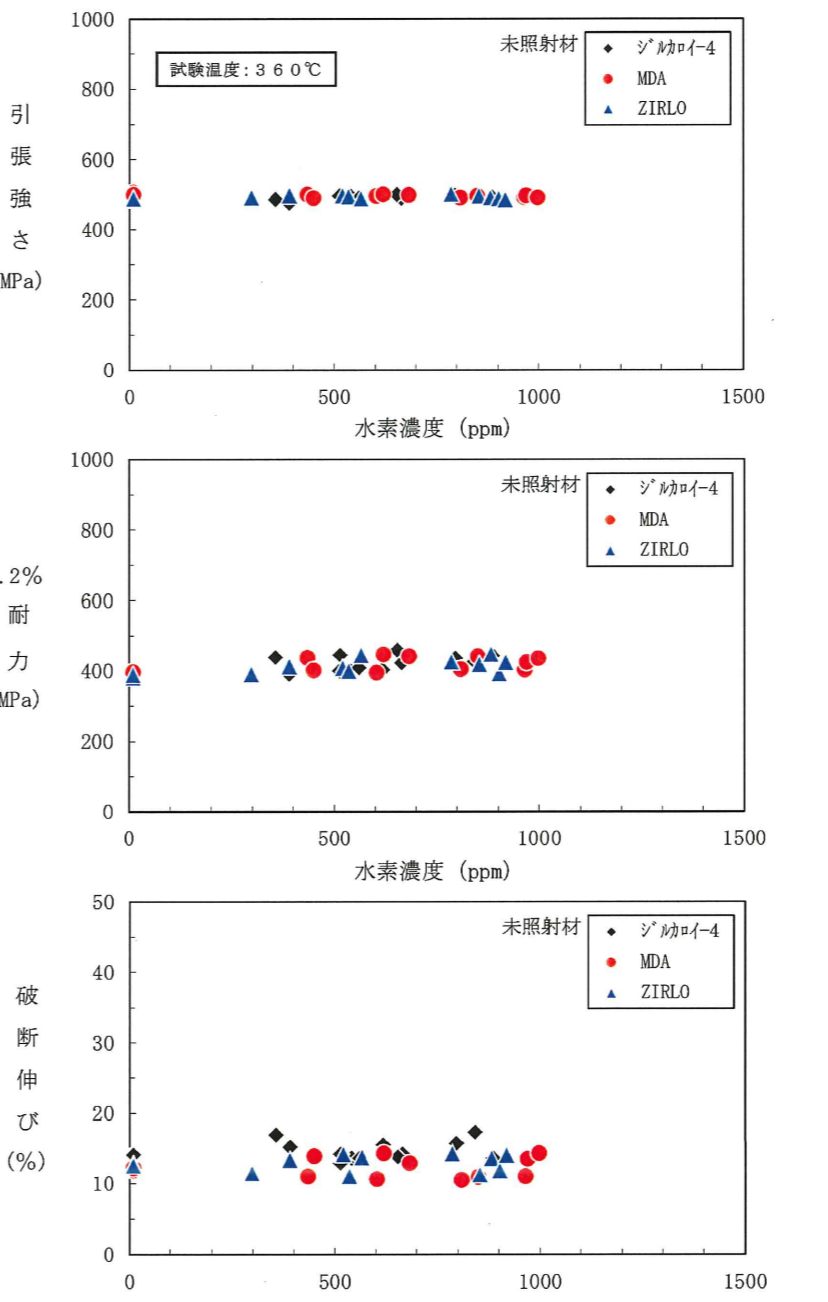
2-15

(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（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="231 382 1104 1654" style="border: 1px solid black; padding: 10px;">  <p data-bbox="430 1585 949 1617">図 2.2-2 未照射被覆管の機械的特性と水素濃度の関係 [2]</p> <p data-bbox="652 1669 712 1690">2-16</p> </div>	<div data-bbox="1389 361 2249 1717" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p data-bbox="1276 315 1439 346">(添付資料8)</p>  <p data-bbox="1558 1669 2092 1701">図 5-2 未照射被覆管の機械的特性と水素濃度の関係 (40)</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、高浜発電所第 1, 2 号機 A 型燃料集合体）

設工認（美浜発電所第 3 号機、高浜発電所第 1, 2 号機 A 型燃料集合体）

備考

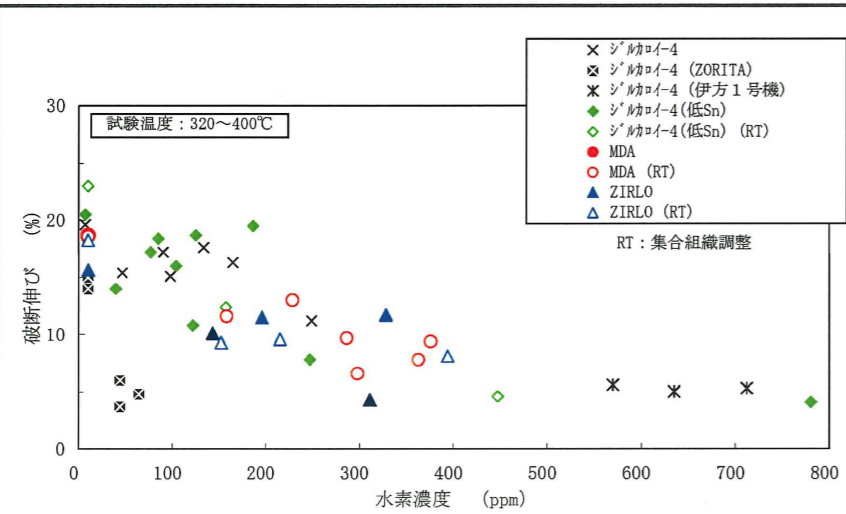


図 2.2-3 被覆管水素濃度と破断伸びの関係^[2]

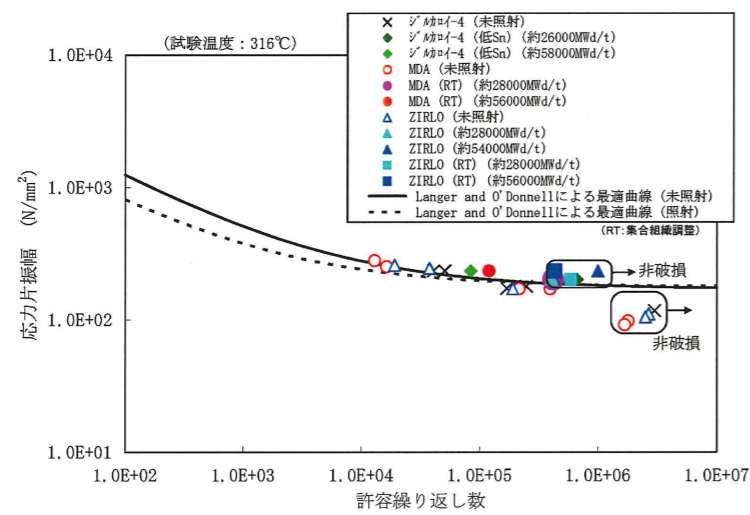


図 2.2-4 MDA 及び ZIRLO 被覆管の疲労強度^[1,2]

2-17

(添付資料8)

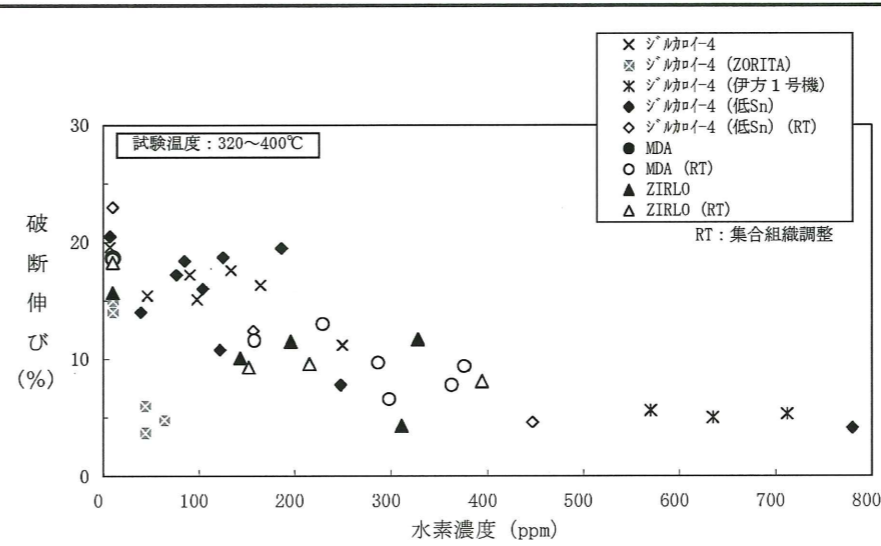


図 5-3 被覆管水素濃度と破断伸びの関係⁽⁴⁰⁾

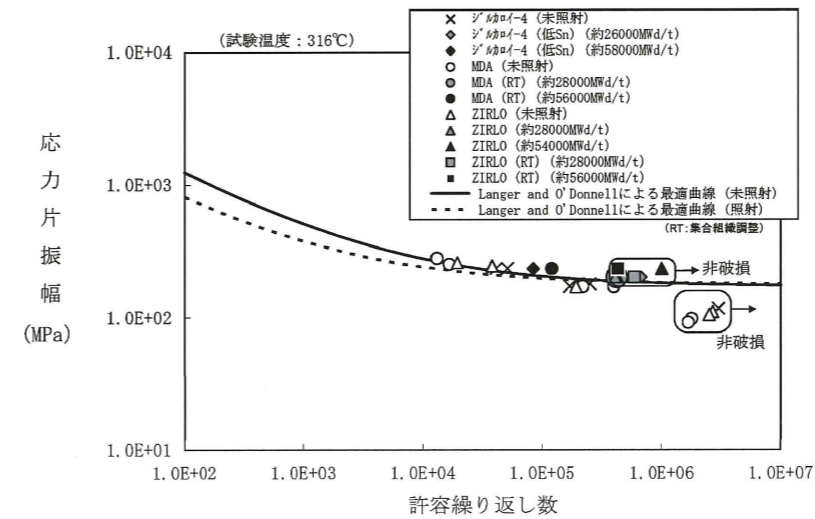


図 5-4 MDA 及び ZIRLO 被覆管の疲労強度^{(13)、(39)、(44)、(45)}

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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="240 384 1083 892"> </div> <div data-bbox="400 913 979 945"> <p>図 2.2-5 燃料棒外径変化（実機照射セグメント燃料棒）^[1,2]</p> </div> <div data-bbox="240 1060 1083 1554"> </div> <div data-bbox="460 1564 949 1606"> <p>図 2.2-6 MDA及びZIRLO被覆管の照射成長^[2]</p> </div>	<div data-bbox="1276 304 1439 346"> <p>(添付資料8)</p> </div> <div data-bbox="1394 378 2329 955"> </div> <div data-bbox="1558 976 2211 1018"> <p>図 5-5 燃料棒外径変化（実機照射セグメント燃料棒）^{(13)、(39)、(46)}</p> </div> <div data-bbox="1394 1071 2329 1659"> </div> <div data-bbox="1558 1669 2211 1711"> <p>図 5-6 MDA 及び ZIRLO 被覆管の照射成長^{(12)、(14)、(19)、(47) ~ (52)}</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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）

設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）

備考

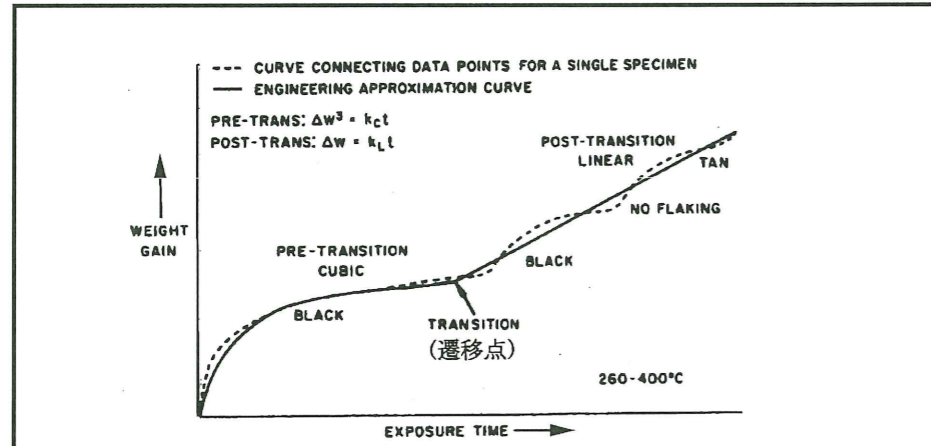


図 2.3-1 炉外腐食試験におけるジルカロイ-2 とジルカロイ-4 の典型的な腐食増量曲線^[2]

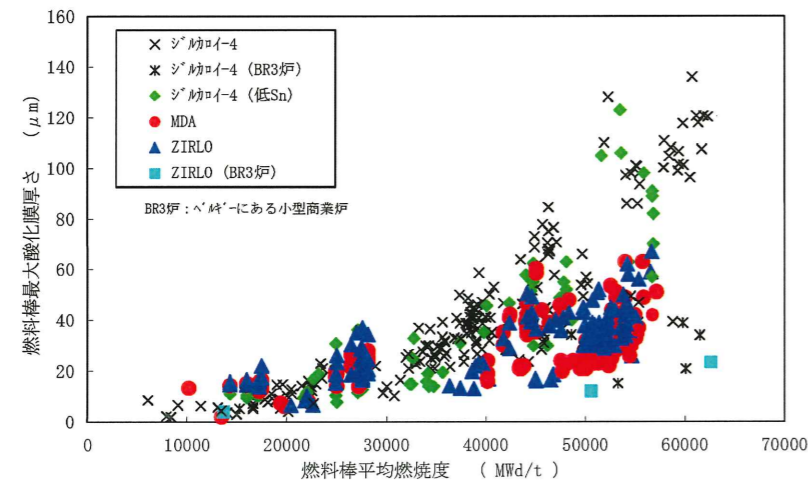


図 2.3-2 MDA及びZIRLO被覆管の炉内酸化膜厚さ^{[2]*1}
*1) オンサイト酸化膜厚さデータの一部はホットセルデータを参考に評価。

2-19

(添付資料8)

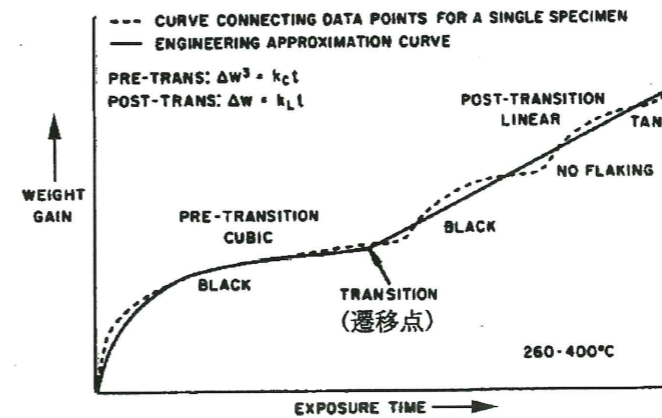


図 5-7 炉外腐食試験におけるジルカロイ-2 とジルカロイ-4 の典型的な腐食増量曲線⁽⁵³⁾

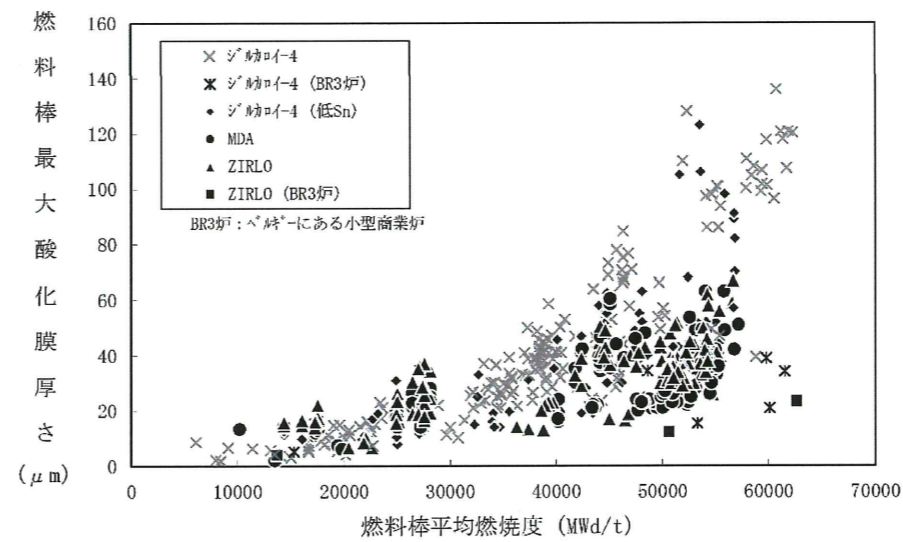


図 5-8 MDA及びZIRLO被覆管の
炉内酸化膜厚さ (8) ~ (12)、(18)、(19)、(39)、(44)、(49) ~ (51)、(54) ~ (56)、(68) (注1)
(注1) オンサイト酸化膜厚さデータの一部はホットセルデータを参考に評価。

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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
<p>360°C, 純水中</p> <p>腐食速度 (ng/dm²/day)</p> <p>初期水素濃度 (ppm)</p> <p>○MDA ■ZIRLO ◇ジロコイ-4</p> <p>図 2.3-3 水素吸収させた被覆管の炉外腐食速度^[2]</p>		<p>腐食が急激に増加する領域においてもMDA及びZIRLO被覆管の耐食性が向上していることは前述（添付資料8図5-8）にて説明している。</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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）

設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）

備考

(添付資料8)

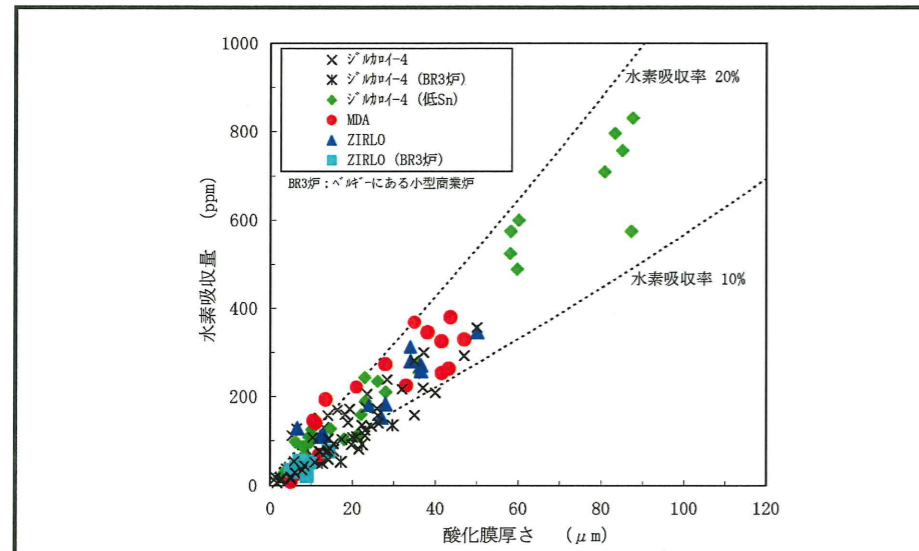


図 2.3-4 MDA及びZIRLO被覆管の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係^[2]

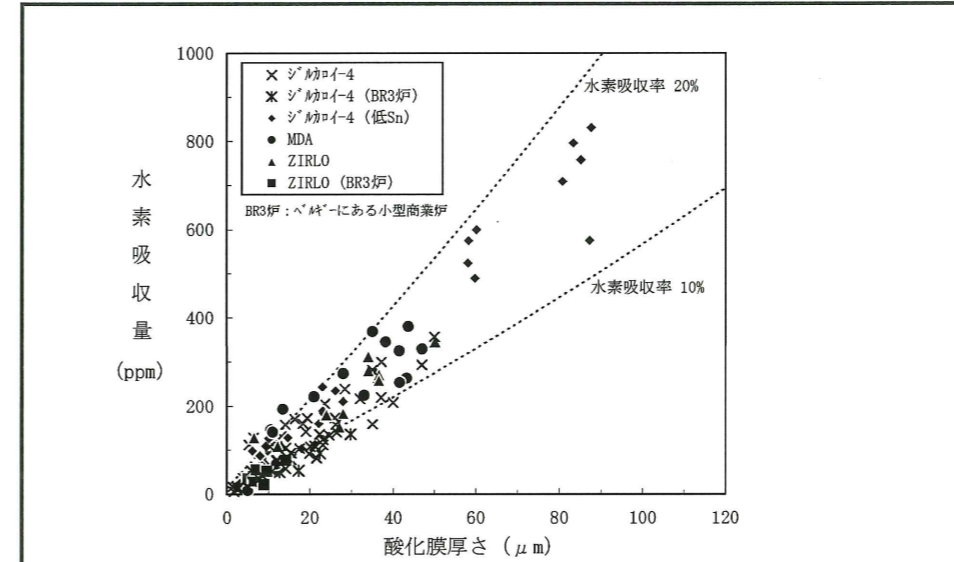


図 5-9 MDA 及び ZIRLO 被覆管の
炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係^{(8)、(9)、(11)~(13)、(47)、(68)}

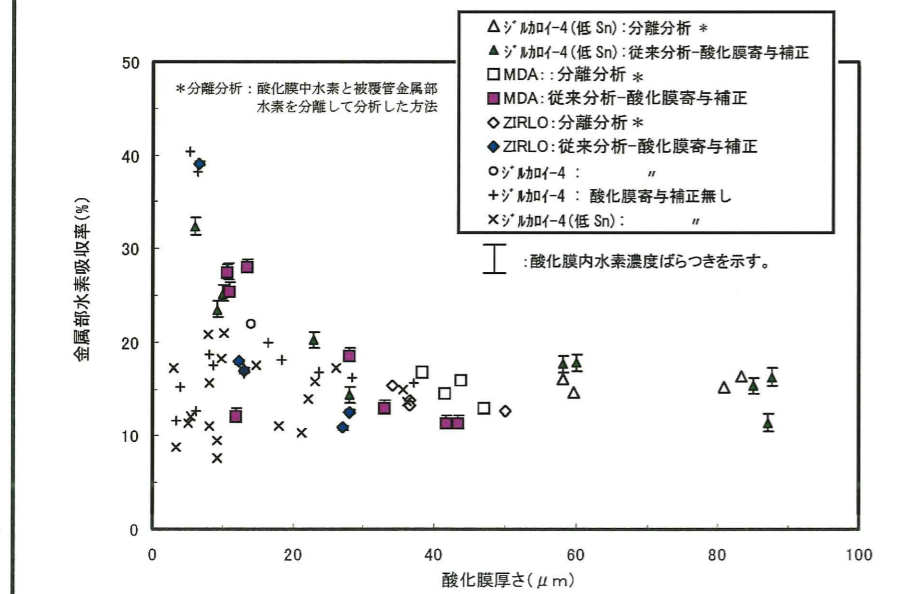


図 2.3-5 MDA及びZIRLO被覆管の酸化膜厚さと水素吸収率の関係^[4]

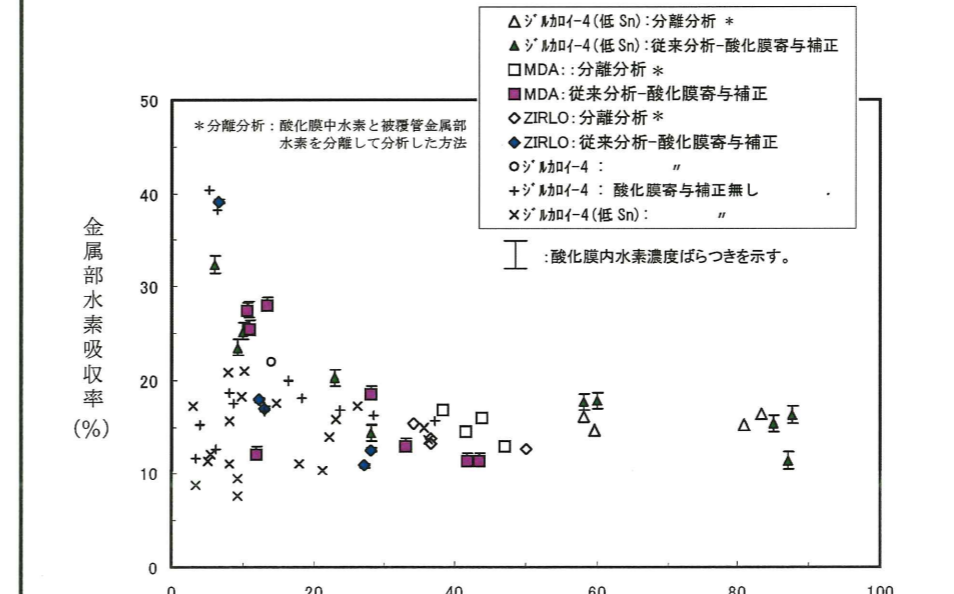


図 5-10 MDA 及び ZIRLO 被覆管の酸化膜厚さと水素吸収率の関係⁽¹⁶⁾

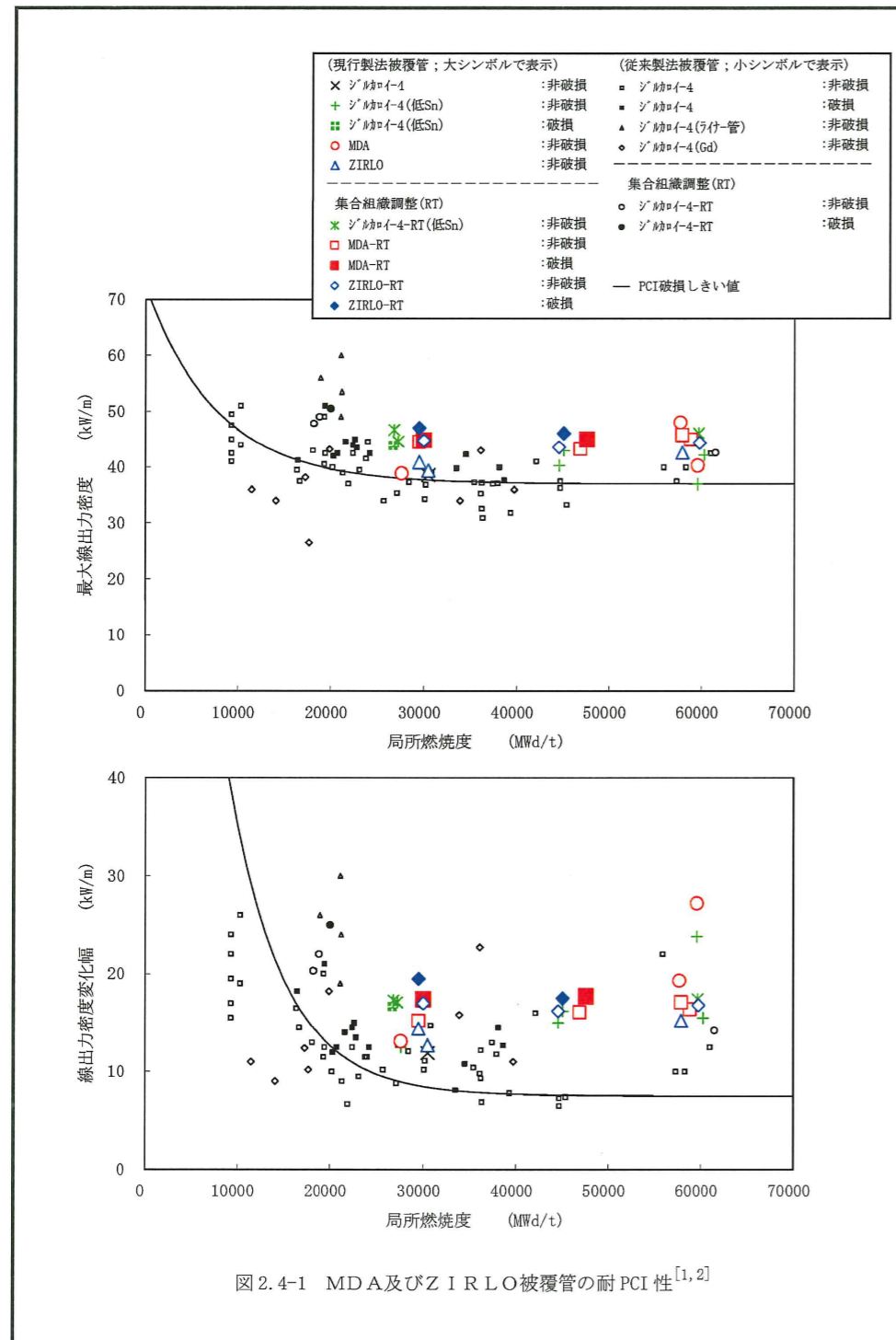
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所

表 1

特認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）

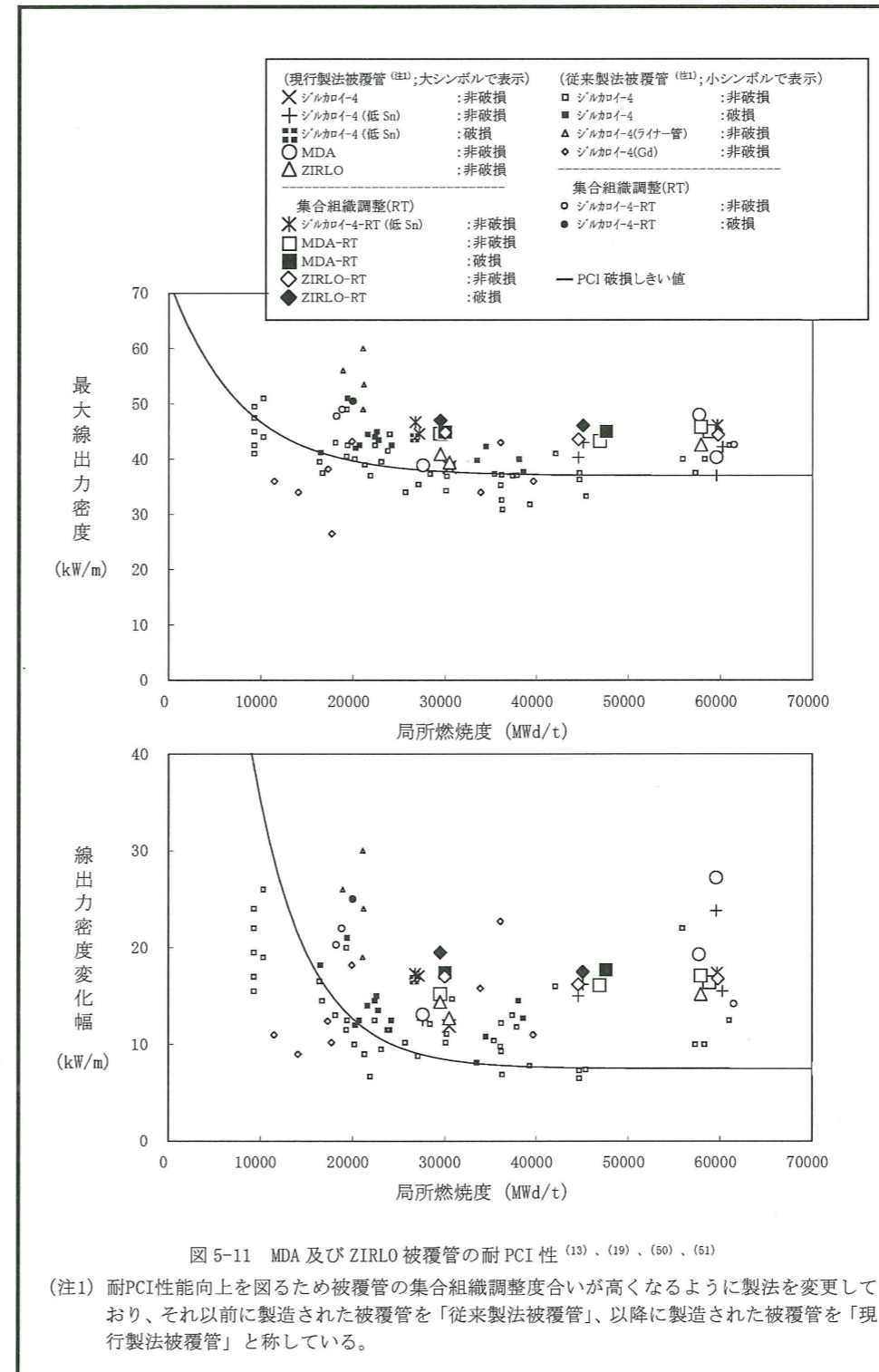
設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）

備考



2-22

(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（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）

設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）

備考

(添付資料8)

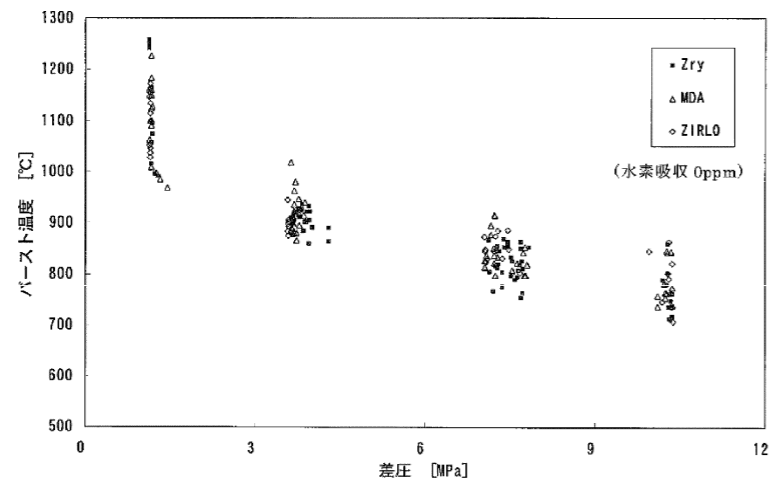


図 2.4-2 未照射管のLOCA時破裂挙動試験結果（受取管）^[2]

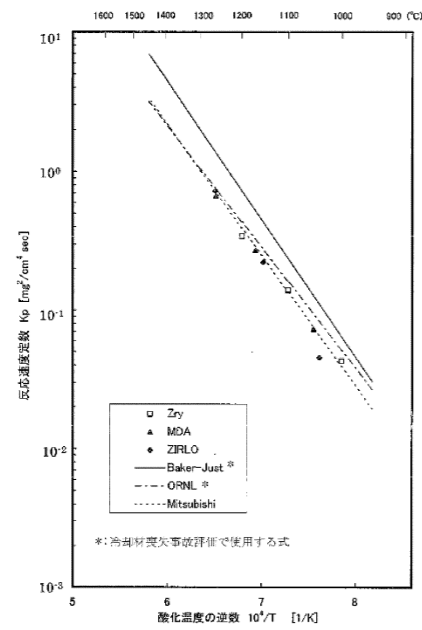


図 2.4-3 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数（受取管）^[2]

2-23

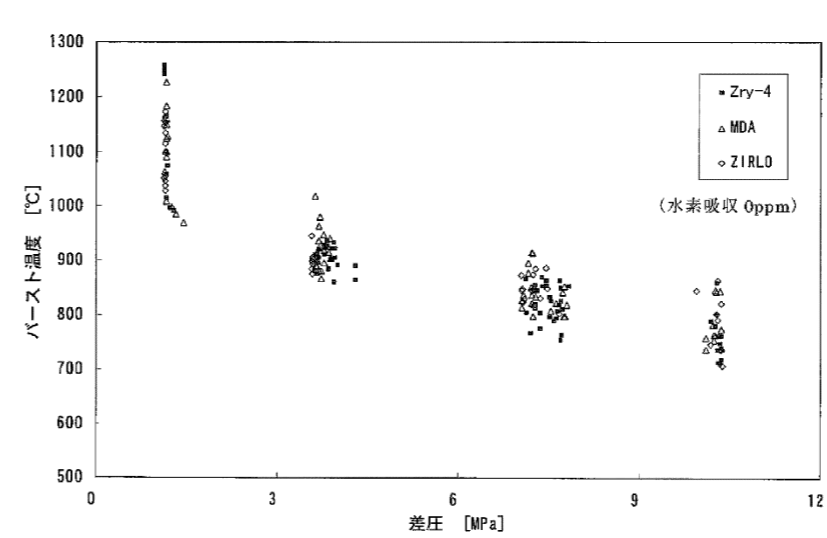


図 5-12 未照射管のLOCA時破裂挙動試験結果（受取管）^[40]

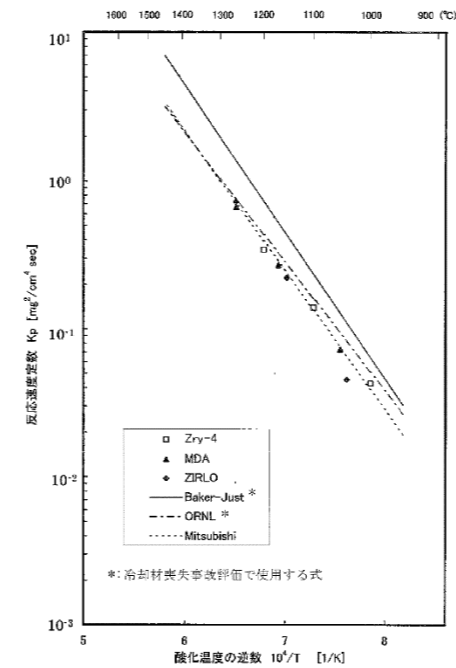
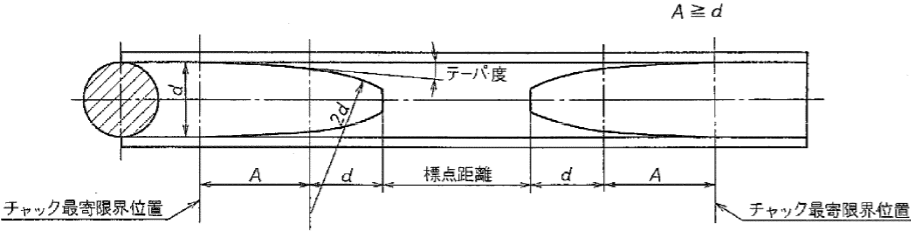


図 5-13 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数（受取管）^[40]

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、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	設工認（美浜発電所第3号機、高浜発電所第1, 2号機 A型燃料集合体）	備考
 <p data-bbox="587 724 777 745">図 3.4-1 心金の形状</p>	<p data-bbox="1825 1081 1855 1102">—</p>	<p data-bbox="2412 331 2831 598">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