

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の化学成分等はジルカロイ-4 と異なるものの、製法、品質管理、検査はジルカロイ-4 と変わるものではなく、さらにこれまでの製造実績、使用実績を踏まえれば、(3)以外の仕様に対しては同等以上の性質を保持している。

別記-10(3)はジルカロイ-4 の規定であるため、高燃焼度燃料用ジルコニウム基合金がそれに適合することはできないが、物理的及び化学的性質がジルカロイ-4 と同等以上を有しているは設置許可段階で確認^{*1, 2}しており、本資料では、その同等以上であることを説明する。また、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している。

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 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】 | 機械的性質 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.1】 | 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 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.2】 | 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 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.3】 | 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 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.4】 | 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 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】 | クリープ特性 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.3】 | 寸法安定性は、被覆材のクリープ特性と照射成長によって確認されるが、これらの確認項目は、耐放射線性（添付資料八 5.2 章）において問題ないことを確認している。 |
| | | 照射成長 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.4】 | |
| 耐熱性 【本文 1. 炉心等】 【添付八 5.1】 | 耐熱性 【本文 1. 炉心等】 【添付八 5.1】 | 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。 | |

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (2/3)

| 性質 | | 確認項目 ^{※1} | 確認内容 |
|------------------------------------|---|---|---|
| 物理的性質 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】 | 核性質 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】 | — | 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。 |
| | その他の性能 【本文 1. 炉心等】 【添付八 5.4】 | <u>耐摩耗性</u> 【本文 記載なし】 【添付八 5.4.2】 | 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 ^{※3} 【本文 記載なし】 【添付八 5.4.1】 | 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 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)

※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。

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 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】 | 耐食性 【本文 1. 炉心等】 【添付八 5.3】 | 酸化腐食 【本文 記載なし】 【添付八 5.3.1】 | 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 【本文 記載なし】 【添付八 5.3.2】 | 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。 |
| | 水素吸収特性 | 水素吸収 | 水素吸収による延性への影響については機械的性質にて確認。 |
| | 化学的安定性 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】 | 二酸化ウランペレットと燃料被覆材との反応 ^{※2} 【本文 記載なし】 【添付八 3.3.1】 | 化学的安定性は、ペレットと被覆材の化学反応に関する性質であるため、添付資料八では被覆材の性質ではなくペレットの性質（添付資料八 3.3章、4.3章）として問題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} 【本文 記載なし】 【添付八 4.3.1】 | |
| | その他の性能 【本文 1. 炉心等】 【添付八 5.4】 | 耐 PCI 性 ^{※3} 【本文 記載なし】 【添付八 5.4.1】 | 試験炉における出力急昇試験結果よりジルコニウム基合金耐 PCI 性がジルカロイ-4と同等以上であることを確認。 |
| 高温特性 【本文 記載なし】 【添付八 5.4.3】 | | 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

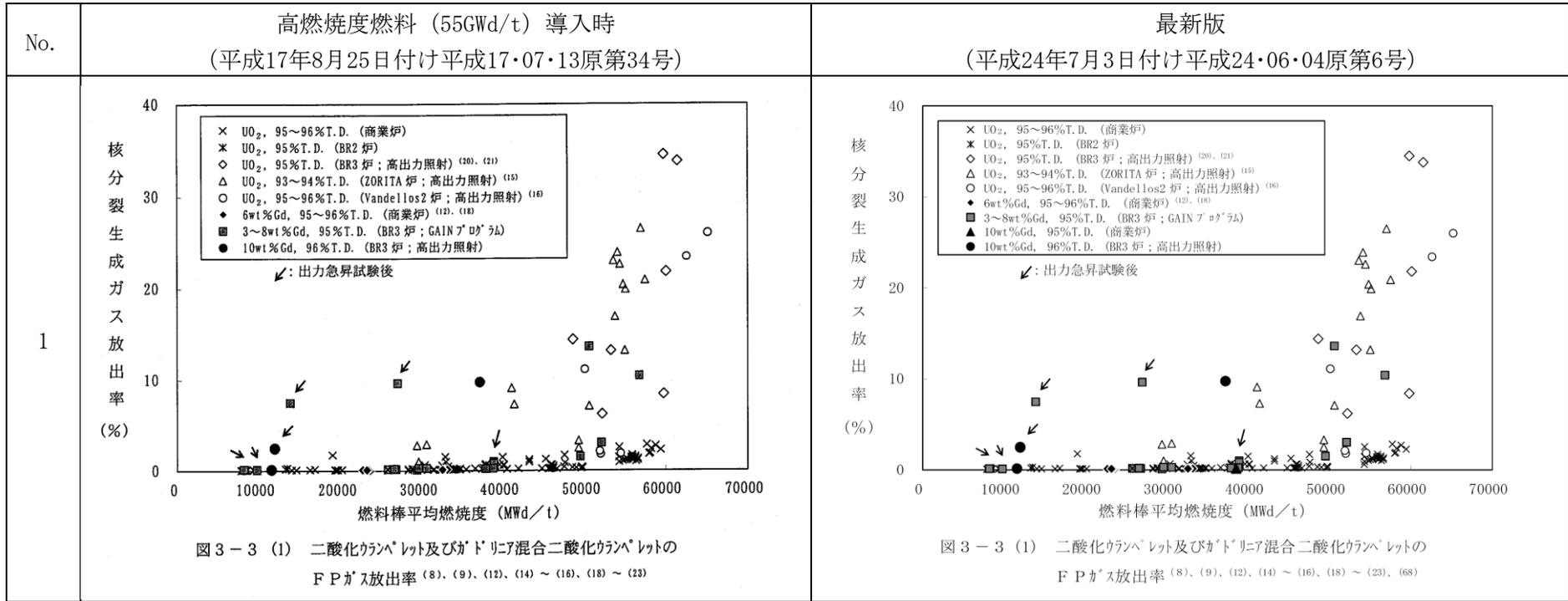
高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯を表 2 にまとめる。

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



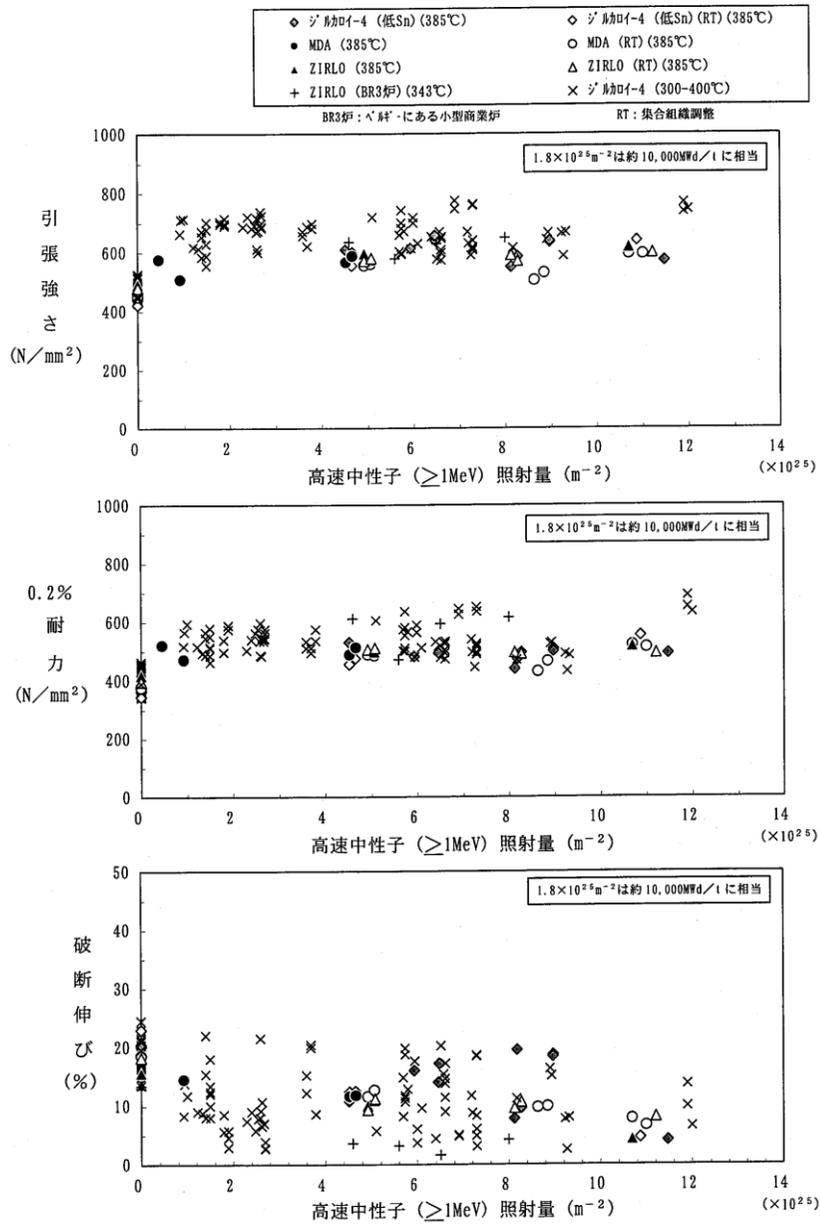


図5-1 MDA及びZIRLO被覆管の機械特性 (13) ~ (15), (19), (39), (41) ~ (43)

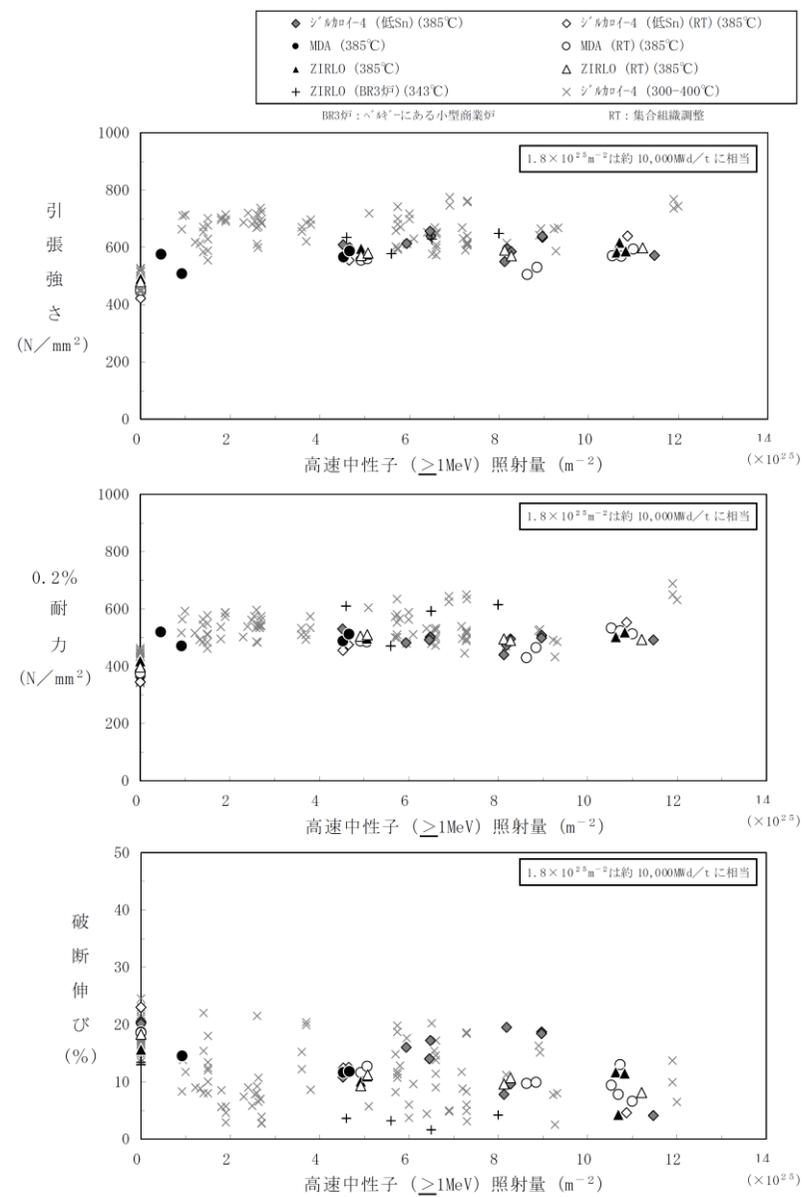


図5-1 MDA及びZIRLO被覆管の機械特性 (13) ~ (15), (19), (39), (41) ~ (43), (68)

3

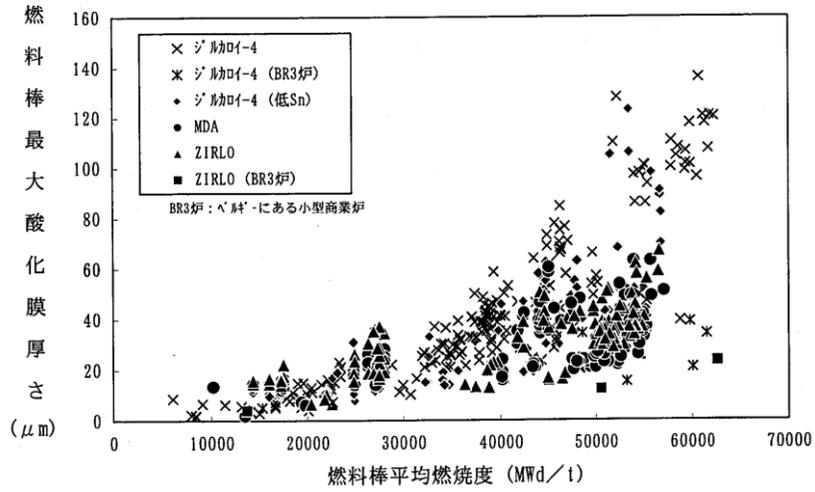


図5-8 MDA及びZIRLO被覆管の
炉内酸化膜厚さ (8) ~ (12)、(18)、(19)、(39)、(44)、(49) ~ (51)、(54) ~ (56)

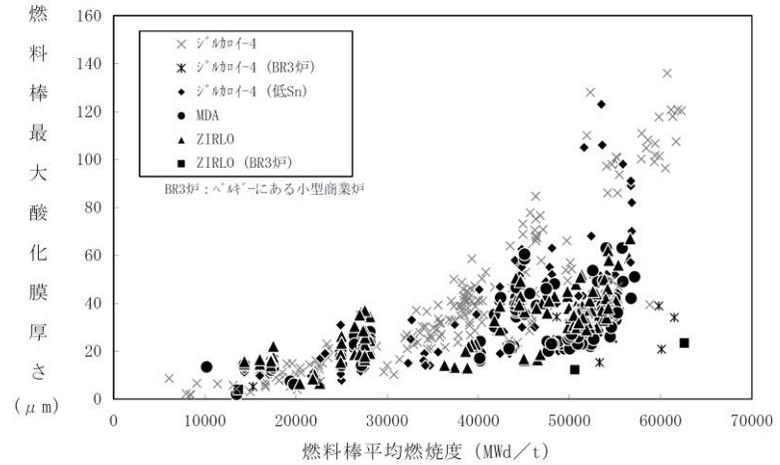


図5-8 MDA及びZIRLO被覆管の
炉内酸化膜厚さ (8) ~ (12)、(18)、(19)、(39)、(44)、(49) ~ (51)、(54) ~ (56)、(68) 注)
注) オンサイト酸化膜厚さデータの一部はホットセルデータを参考に評価。

4

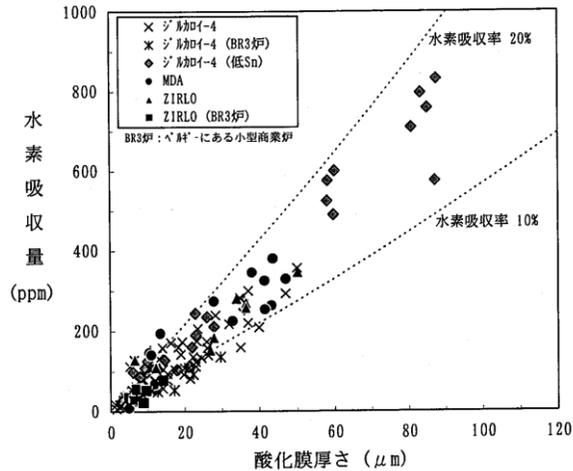


図5-10 MDA及びZIRLO被覆管の
炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (8)、(9)、(11) ~ (13)、(47)

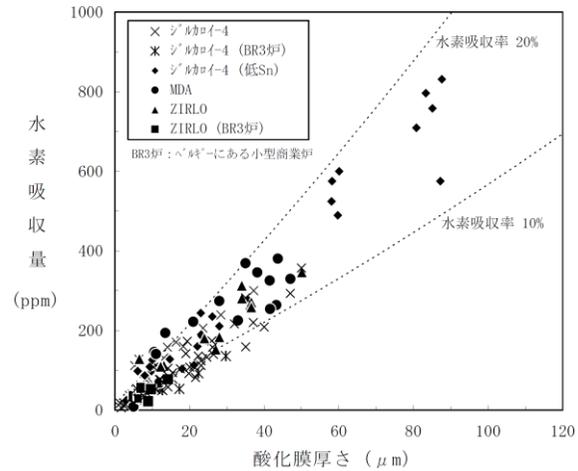


図5-10 MDA及びZIRLO被覆管の
炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (8)、(9)、(11) ~ (13)、(47)、(68)