

伊方発電所第3号機  
燃料体に係る設計及び工事計画認可申請  
(17行17列A型燃料集合体  
(ウラン燃料))

補足説明資料

令和4年8月31日

四国電力株式会社

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

## 目 次

- 補足説明資料 1 設計及び工事計画認可申請における適用条文等の整理について
- 補足説明資料 2 設計及び工事計画認可申請書に添付する書類の整理について
- 補足説明資料 3 燃料体設計認可申請書と設計及び工事計画認可申請書の記載に関する補足説明資料
- 補足説明資料 4 基本設計方針の確認方法について
- 補足説明資料 5 強度に関する補足説明資料
- 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
- 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
- 補足説明資料 8 基本設計方針と技術基準規則等の関係について

補足説明資料 9 設計及び工事計画認可申請書の記載事項に関連する設置  
変更許可について

## 補足説明資料 1

設計及び工事計画認可申請における  
適用条文等の整理について

## 1. 概要

本資料では、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づく当該工事計画の手続きを行うにあたり、申請対象が適用を受ける「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」の条文について整理すると共に、適合性の確認が必要となる条文を明確にするものである。

## 2. 設計及び工事計画認可申請における適用条文の整理結果

以下に示す本設計及び工事の計画の申請対象に対する適用条文の整理結果を第 1 表に示す。

### ○申請対象

別表第二		対象設備
原子炉本体	基本設計方針 対象設備	燃料体

第1表 伊方3号機 設計及び工事計画認可申請に該当する技術基準規則の条文整理表(設計基準対象施設)

※○:設備として技術基準規則の適合が必要な条文  
 ×:設備として技術基準規則の適合が不要な条文

技術基準規則	適用条文※	工事の内容に関係するもの	審査対象条文	理由
(第四条) 設計基準対象施設の地盤	○	×	×	今回の申請設備である燃料体は、原子炉容器に装荷し、炉心を構成する設備であり、既工事計画では炉心等という設備区分として適合性が確認されている。(以下同じ)設計基準対象施設の地盤については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はなく、設計基準対象施設の地盤は工事の内容(本申請内容)に関係しないため、審査対象条文とならない。
(第五条) 地震による損傷の防止	○	×	○	地震による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)および地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能要求が追加されたことに対する工事計画認可申請書(原規規発第1906103号 2019年6月10日認可)の添付資料「耐震性に関する説明書」において、既に確認している。今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はなく、認可された工事計画のとおり設計、製造、検査を行なうことから、適合性の内容に変更はない。
(第六条) 津波による損傷の防止	○	×	○	津波による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)の添付資料「耐震設計上重要な設備を設置する施設に関する説明書(自然現象への配慮に関する説明を含む。)」において、既に確認している。今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はなく、認可された工事計画のとおり設計、製造、検査を行なうことから、適合性の内容に変更はない。
(第七条) 外部からの衝撃による損傷の防止	○	×	○	外部からの衝撃による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)の添付資料「耐震設計上重要な設備を設置する施設に関する説明書(自然現象への配慮に関する説明を含む。)」において、既に確認している。今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はなく、認可された工事計画のとおり設計、製造、検査を行なうことから、適合性の内容に変更はない。
(第八条) 立入りの防止	○	×	×	立入りの防止については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、設備の設置位置および設備の取扱い場所が変更しないことから、立入りの防止に係る設計は工事の内容(本申請内容)に関係しないため、審査対象条文とならない。
(第九条) 発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止	○	×	×	発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、設備の設置位置および設備の取扱い場所の変更しないことから、発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止に係る設計は工事の内容(本申請内容)に関係しないため、審査対象条文とならない。
(第十条) 急傾斜地の崩壊の防止	×	×	×	急傾斜地の崩壊の防止に対する要求であり、伊方発電所は、急傾斜地崩壊危険区域に指定された箇所がないことから、急傾斜地の崩壊の防止に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第十一条) 火災による損傷の防止	○	×	○	火災による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)の添付資料「発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書」において、既に確認している。今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はなく、認可された工事計画のとおり設計、製造、検査を行なうことから、適合性の内容に変更はない。
(第十二条) 発電用原子炉施設内における溢水等による損傷の防止	○	×	×	溢水等による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、溢水防護に影響しない工事内容であり、また、設備の設置位置も変更しないことから、溢水等による損傷の防止に係る設計は工事の内容(本申請内容)に関係しないため、審査対象条文とならない。
(第十三条) 安全避難通路等	○	×	×	安全避難通路等については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、設備の設置位置および設備の取扱い場所が変更しないことから、安全避難通路等に係る設計は工事の内容(本申請内容)に関係しないため、審査対象条文とならない。
(第十四条) 安全設備	○	×	○	安全設備については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)の添付資料「安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書」において、既に確認している。今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はなく、認可された工事計画のとおり設計、製造、検査を行なうことから、適合性の内容に変更はない。
(第十五条) 設計基準対象施設の機能	○	×	○	設計基準対象施設の機能については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)の添付資料「安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書」において、既に確認している。今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はなく、認可された工事計画のとおり設計、製造、検査を行なうことから、適合性の内容に変更はない。
(第十六条) 全交流動力電源喪失対策設備	×	×	×	全交流動力電源喪失対策設備に対する要求であり、本設備は、全交流電源喪失対策設備に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第十七条) 材料及び構造	×	×	×	設計基準対象施設に属する容器、管、ポンプ、弁等の材料及び構造に対する要求であり、本設備は、設計基準対象施設に属する容器、管、ポンプ、弁等に該当しないため、審査対象条文とならない。

技術基準規則	適用条文※	工事の内容に 関係あるもの	審査対象条文	理由
(第十八条) 使用中の亀裂等による破 壊の防止	×	×	×	クラス機器等の使用中の亀裂等による破壊の防止に対する要求であり、本設備は、クラス機器等に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第十九条) 流体振動等による損傷の 防止	○	×	○	流体振動等による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はなく、認可された工事計画のとおり設計、製造、検査を行なうことから、適合性の内容に変更はない。
(第二十条) 安全弁等	×	×	×	安全弁等に対する要求であり、本設備は、安全弁等に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第二十一条) 耐圧試験等	×	×	×	クラス機器及び原子炉格納容器の耐圧試験等に対する要求であり、本設備は、クラス機器及び原子炉格納容器に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第二十二条) 監視試験片	×	×	×	容器の中性子照射による劣化に対する要求であり、本設備は、容器の中性子照射による劣化に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第二十三条) 炉心等	○	○	○	改正された「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解釈」に対して申請設備の適合性を確認する必要があるため、変更の工事の内容に関連し、審査対象条文である。
(第二十四条) 熱遮蔽材	×	×	×	熱遮蔽材に対する要求であり、本設備は、熱遮蔽材に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第二十五条) 1次冷却材	×	×	×	1次冷却材に対する要求であり、本設備は、1次冷却材に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第二十六条) 燃料体等の取扱施設及 び貯蔵施設	×	×	×	燃料取扱施設や貯蔵施設に対する要求であり、本設備は、燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第二十七条) 原子炉冷却材圧力パウ ンダリ	×	×	×	原子炉冷却材圧力パウンダリに対する要求であり、本設備は、原子炉冷却材圧力パウンダリに該当しないため、審査対象条文とならない。
(第二十八条) 原子炉冷却材圧力パウ ンダリの隔離装置等	×	×	×	原子炉冷却材圧力パウンダリの隔離装置・検出装置に対する要求であり、本設備は、原子炉冷却材圧力パウンダリの隔離装置・検出装置に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第二十九条) 1次冷却材処理装置	×	×	×	1次冷却材処理装置に対する要求であり、本設備は、1次冷却材処理装置に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第三十条) 逆止め弁	×	×	×	逆止め弁に対する要求であり、本設備は、逆止め弁に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第三十一条) 蒸気タービン	×	×	×	蒸気タービンに対する要求であり、本設備は、蒸気タービンに該当しないため、審査対象条文とならない。
(第三十二条) 非常用炉心冷却設備	×	×	×	非常用炉心冷却設備に対する要求であり、本設備は、非常用炉心冷却設備に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第三十三条) 循環設備等	×	×	×	循環設備等に対する要求であり、本設備は、循環設備等に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第三十四条) 計測装置	×	×	×	計測装置に対する要求であり、本設備は、計測装置に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第三十五条) 安全保護装置	×	×	×	安全保護装置に対する要求であり、本設備は、安全保護装置に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第三十六条) 反応度制御系統及び原 子炉停止系統	×	×	×	反応度制御系統及び原子炉停止系統に対する要求であり、本設備は、反応度制御系統及び原子炉停止系統に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第三十七条) 制御材駆動装置	×	×	×	制御材駆動装置に対する要求であり、本設備は、制御材駆動装置に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第三十八条) 原子炉制御室等	×	×	×	原子炉制御室等に対する要求であり、本設備は、原子炉制御室等に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第三十九条) 廃棄物処理設備等	×	×	×	廃棄物処理設備等に対する要求であり、本設備は、廃棄物処理設備等に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第四十条) 廃棄物貯蔵設備等	×	×	×	廃棄物貯蔵設備等に対する要求であり、本設備は、廃棄物貯蔵設備等に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第四十一条) 放射性物質による汚染の 防止	×	×	×	放射性物質による汚染の防止に対する要求であり、本設備は、放射性物質による汚染の防止に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第四十二条) 生体遮蔽等	×	×	×	生体遮蔽等に対する要求であり、本設備は、生体遮蔽等に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第四十三条) 換気設備	×	×	×	換気設備に対する要求であり、本設備は、換気設備に該当しないため、審査対象条文とならない。



技術基準規則	適用条文※	工事の内容に関係あるもの	審査対象条文	理由
(第四十四条) 原子炉格納施設	×	×	×	原子炉格納施設に対する要求であり、本設備は、原子炉格納施設に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第四十五条) 保安電源設備	×	×	×	保安電源設備に対する要求であり、本設備は、保安電源設備に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第四十六条) 緊急時対策所	×	×	×	緊急時対策所に対する要求であり、本設備は、緊急時対策所に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第四十七条) 警報装置等	×	×	×	警報装置等に対する要求であり、本設備は、警報装置等に該当しないため、審査対象条文とならない。
(第四十八条) 準用	×	×	×	補助ボイラー、電気設備等の準用が適用される設備に対する要求であり、対象設備は、補助ボイラー、電気設備等の準用が適用される設備に該当しないため、審査対象条文ではない。

第1表 伊方3号機 設計及び工事計画認可申請に該当する技術基準規則の条文整理表(重大事故等対処施設)

※○:設備として技術基準規則の適合が必要な条文  
 ×:設備として技術基準規則の適合が不要な条文

技術基準規則	適用条文※	工事の内容に関係あるもの	審査対象条文	理由
(第四十九条) 重大事故等対処施設の地盤	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十条) 地震による損傷の防止	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十一条) 津波による損傷の防止	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十二条) 火災による損傷の防止	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十三条) 特定重大事故等対処施設	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十四条) 重大事故等対処設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十五条) 材料及び構造	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十六条) 使用中の亀裂等による破壊の防止	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十七条) 安全弁等	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十八条) 耐圧試験等	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第五十九条) 緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十条) 原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十一条) 原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十二条) 原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十三条) 最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十四条) 原子炉格納容器内の冷却等のための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十五条) 原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十六条) 原子炉格納容器下部の熔融炉心を冷却するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十七条) 水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十八条) 水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第六十九条) 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十条) 工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十一条) 重大事故等の収束に必要な水の供給設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十二条) 電源設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十三条) 計装装置	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十四条) 運転員が原子炉制御室にとどまるための設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。

技術基準規則	適用条文※	工事の内容に関係あるもの	審査対象条文	理由
(第七十五条) 監視測定設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十六条) 緊急時対策所	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十七条) 通信連絡を行うために必要な設備	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。
(第七十八条) 準用	×	×	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、対象設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、審査対象条文ではない。

## 補足説明資料 2

設計及び工事計画認可申請書に  
添付する書類の整理について

## 1. 概要

本資料では、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づく当該工事計画の手続きを行うにあたり、設計及び工事計画認可申請書に添付する書類について整理する。

## 2. 「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づく設計及び工事計画認可申請書に添付する書類の整理について

設計及び工事計画認可申請書に添付すべき書類は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」の別表第二の上欄に記載される種類に応じて、下欄に記載される添付書類を添付する必要があるが、別表第二では「認可の申請又は届出に係る工事の内容に関係あるものに限る。」との規定があるため、本申請範囲である「原子炉本体」に要求される添付書類の要否の検討を行った。検討結果を第1表に示す。

第1表 本申請における添付書類の要否の検討結果 (1/5)

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類	添付の要否 (○・×)	理由
各発電用原子炉施設に共通		
送電関係一覧図	×	本申請内容は、送電設備に影響を与えないため不要。
急傾斜地崩壊危険区域内において行う制限工事に係る場合は、当該区域内の急傾斜地の崩壊の防止措置に関する説明	×	急傾斜地崩壊危険箇所の設定はないため対象外。
工場又は事業所の概要を明示した地形図	×	本申請内容は、地形図に影響を与えないため不要。
主要設備の配置の状況を明示した平面図及び断面図	×	本申請内容は、主要設備の配置に影響を与えないため不要。
単線結線図（接地線（計測用変成器を除く。）については電線の種類、太さ及び接地の種類も併せて記載すること。）	×	本申請内容は、単線結線図に影響を与えないため不要。
新技術の内容を十分に説明した書類	×	本申請内容は、新技術に該当しないため不要。
発電用原子炉施設の熱精算図	×	本申請内容は、熱精算に影響を与えないため不要。
熱出力計算書	○	原子炉熱出力等に関する評価について、技術基準規則第15条及び第23条への適合性を示すため、添付する。なお、既に認可済みの工事計画 <sup>※1</sup> のとおり設計を行うことから、今回の申請にあたって、適合性の内容に変更はない。

※1 平成29年9月29日付け原規規発第1709291号で認可された工事計画

第1表 本申請における添付書類の要否の検討結果 (2/5)

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類	添付の要否 (○・×)	理由
発電用原子炉の設置の許可 との整合性に関する説明書	○	許可された設置許可申請書との整合性を示す 必要があるため添付する。
排気中及び排水中の放射性 物質の濃度に関する説明書	×	本申請内容は、排気中及び排水中の放射性物 質の濃度に影響を与えないため不要。
人が常時勤務し、又は頻繁 に入出入する工場又は事業所 内の場所における線量に関 する説明書	×	本申請内容は、遮蔽設計区分の設計基準等 の設定に影響を与えるものではないので不要。
発電用原子炉施設の自然現 象等による損傷の防止に関 する説明書	○	本申請設備（燃料体）の自然現象等による損 傷の防止について、技術基準規則第6条及び 7条への適合性を示すため、添付する。な お、既に認可済みの工事計画 <sup>※2</sup> のとおり設 計を行うことから、今回の申請にあたって、 適合性の内容に変更はない。
排水監視設備及び放射性物 質を含む排水を安全に処理 する設備の配置の概要を明 示した図面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
取水口及び放水口に関する 説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
設備別記載事項の設定根拠 に関する説明書	×	本申請内容は、設定根拠に影響を与えないた め不要。

※2 平成28年3月23日付け原規規発第1603231号で認可された工事計画

第1表 本申請における添付書類の要否の検討結果 (3/5)

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類	添付の要否 (○・×)	理由
環境測定装置（放射線管理 用計測装置に係るものを除 く。）の構造図及び取付箇所 を明示した図面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
クラス1 機器及び炉心支持 構造物の応力腐食割れ対策 に関する説明書（クラス1 機器にあつては、支持構造 物を含めて記載すること。）	×	本申請では該当する設備はないため不要。
安全設備及び重大事故等対 処設備が使用される条件の 下における健全性に関する 説明書	○	本申請設備（燃料体）が使用される条件の下 における健全性について、技術基準規則第1 4条及び15条への適合性を示すため、添付 する。なお、既に認可済みの工事計画 <sup>※3</sup> の とおり設計を行うことから、今回の申請にあ たって、適合性の内容に変更はない。
発電用原子炉施設の火災防 護に関する説明書	○	本申請設備（燃料体）の火災防護について、 技術基準規則第11条への適合性を示すた め、添付する。なお、既に認可済みの工事計 画 <sup>※3</sup> のとおり設計を行うことから、今回の 申請にあたって、適合性の内容に変更はな い。
発電用原子炉施設の溢水防 護に関する説明書	×	本申請内容は、溢水防護に関する設計に影響 を与えないため不要。

※3 平成28年3月23日付け原規規発第1603231号で認可された工事計画



第1表 本申請における添付書類の要否の検討結果 (4/5)

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類	添付の要否 (○・×)	理由
発電用原子炉施設の蒸気タービン、ポンプ等の損壊に伴う飛散物による損傷防護に関する説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
通信連絡設備に関する説明書及び取付箇所を明示した図面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
安全避難通路に関する説明書及び安全避難通路を明示した図面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
非常用照明に関する説明書及び取付箇所を明示した図面	×	本申請では該当する設備はないため不要。

第1表 本申請における添付書類の要否の検討結果 (5/5)

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類	添付の要否 (○・×)	理由
原子炉本体		
耐震性に関する説明書	○	本申請設備（燃料体）の強度について技術基準規則第5条への適合性を示すため、添付する。なお、既に認可済みの工事計画 <sup>※4</sup> のとおりに設計を行うことから、今回の申請にあたって、適合性の内容に変更はない。
強度に関する説明書	○	本申請設備（燃料体）の強度について技術基準規則第23条への適合性を示すため、添付する。
構造図	○	本申請設備（燃料体）の構造図について技術基準規則第23条への適合性を示すため、添付する。
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	○	本申請設備（燃料体）の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能について技術基準規則第23条への適合性を示すため、添付する。
原子炉本体の基礎に関する説明書及びその基礎の状況を明示した図面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
監視試験片の取付箇所を明示した図面	×	本申請では該当する設備はないため不要。
原子炉（圧力）容器の脆性破壊防止に関する説明書	×	本申請では該当する設備はないため不要。
設計及び工事に係る品質マネジメントシステムに関する説明書	○	本申請における設計及び工事に係る品質マネジメントシステムについて説明するため、添付する。

※4 平成28年3月23日付け原規規発第1603231号及び令和元年6月10日付け原規規発第1906103号で認可された工事計画

## 補足説明資料 3

燃料体設計認可申請書と設計及び工事計画  
認可申請書の記載に関する補足説明資料

## 1. 概要

本申請における燃料体は、改正前の法体系下において燃料体設計認可申請書（以下、「設認」）により認可を受けた設計に基づく燃料体検査の合格を取得し、現在供用中の燃料体と同一設計であり、燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に係る説明、燃料体の強度に係る評価方法、評価結果等の内容について技術的新規性はない。

一方で、法令等改正に伴い、申請書の記載内容が一部変更になったことから、本資料では、旧法下の設認と本申請である設計及び工事計画認可申請書（以下、「設工認申請書」）の記載事項の関連を整理したものである。

## 2. 整理結果

### (1) 設認と設工認申請書の記載について

設認の記載事項と、設工認申請書の記載事項は下表のとおり差分がある。

(申請書本文)

設認	設工認申請書	記載事項の比較
一 氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、その代表者の氏名	一 氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、その代表者の氏名	
二 <u>核燃料物質の種類、初期濃縮度及び燃焼率</u>	二 工事計画 ・ <u>要目表（燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料）</u>	下線部について、以下の事項に差分がある。 ・ 初期濃縮度及び燃焼率 ・ 燃料体の構造及び重量など
三 <u>燃料材及び燃料被覆材の種類、組成及び組織並びに燃料材及び燃料被覆材以外の部品の種類及び組成</u>		
四 <u>燃料体の構造及び重量</u>		
—	・ 基本設計方針、適用基準及び適用規格 ・ 工事の方法	(新規追加)
五 燃料体を使用する発電用原子炉を設置した工場又は事業所の名称及び所在地	—	使用前確認申請書において記載する事項
六 燃料体を使用する発電用原子炉に係る発電用原子炉施設の概要		
—	三 工事工程表 四 設計及び工事に係る品質マネジメントシステム 五 変更の工事又は設計及び工事の計画の変更の場合にあっては、変更の理由	(新規追加)

(添付書類)

設認	設工認申請書	記載事項の比較
一 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐腐食性その他の性能に関する説明書	八 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	
二 燃料体の強度計算書	七 強度に関する説明書	
三 燃料体の構造図	添付図面	
四 加工のフローシート	申請書本文 (二 工事計画「工事の方法」)	
五 品質保証に関する説明書	九 設計及び工事に係る品質マネジメントシステムに関する説明書	
—	一 発電用原子炉の設置の許可との整合性に関する説明書	(新規追加)

(2) 設認（本文）と設工認申請書（本文）の差分について

設認と設工認申請書の本文の差分について、設工認申請書における記載の考え方等を添付 1 に整理した（申請書本文の詳細な比較は添付 2 参照）。

設認の本文には記載していたが、設工認申請書本文に記載しないとした基本的な考え方は以下のとおり。

- ・ 既工認<sup>(注)</sup>の本文に記載がある事項
- ・ 設工認申請書における他の本文記載内容で代替可能な事項
- ・ 具体的な仕様を示さない事項

(注)「既工認」は、次のとおり。

	伊方発電所第 3 号機
既工認①：4.1wt%ステップ 2 燃料の装荷時	平成 29 年 9 月 29 日付け原 規規発第 1709291 号にて認 可を受けた工事計画
既工認②：再稼働時	平成 28 年 3 月 23 日付け原 規規発第 1603231 号にて認 可を受けた工事計画
既工認③：ウラン・プルト ニウム混合酸化物燃料の 装荷時	平成 21 年 7 月 15 日付け平 成 21・05・12 原第 17 号に て認可を受けた工事計画
既工認④：高燃焼度燃料の 装荷時	平成 16 年 4 月 16 日付け平 成 15・12・26 原第 7 号にて 認可を受けた工事計画

なお、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則 別表第二の記載事項が、既工認と今回の設工認申請書でどのように整理されているかについては、参考資料に示す。

以 上

## 設認と設工認申請書の本文記載事項の差分に係る整理

設認本文記載		設工認 記載箇所	既工認 本文	設工認申請書本文における 記載の考え方
初期 濃縮度	燃料体平均	—	—	燃料体平均および燃料要素平均の変更に当たっては、設工認本文記載のペレット初期濃縮度により必然的に決まる値であり、当該項目で審査可能なため、記載不要。
	燃料要素平均	—	—	
燃焼率	燃料体最高	添付 7	○	既工認①の要目表で記載済みのため、記載不要。
	燃料要素最高	添付 7	—	新検査制度適用後における炉心側の本文記載事項であり、今回申請の範囲外であることから、炉心側の申請時に記載の適正化を行う。
	ペレット最高	添付 7	—	
燃料材の組織		添付 8	○	既工認①の要目表で記載済みのため、記載不要。
燃料体の構造		添付 7	—	具体的な仕様を記載しているものではなく、概要記載のため、記載不要。
質量	燃料体総質量	添付図面	—	各々の質量の変更に当たっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要。
	燃料材質量	—	—	
	主要部品	—	—	
その他	燃料要素の配置	添付図面	—	燃料要素の配列の変更に当たっては、設工認本文の要目表の名称に記載の 17 行 17 列が変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要。
	被覆材の偏肉率	添付図面	—	偏肉率の変更に当たっては、設工認本文の要目表に記載の被覆材の外径、内径、肉厚、および基本設計方針に記載の「各部の寸法の偏差は、著しく大きくないこと」が変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要。
	プレナム体積	添付図面	—	プレナム体積の変更に当たっては、設工認本文の要目表の寸法に記載のプレナム長さが変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要。

## 燃料体設計認可申請書と設計及び工事計画認可申請書の比較(A型ウラン燃料体)

燃料体設計認可申請書		設工認 本文	設工認 添付図面	備考	
核燃料物質の種類					
二酸化ウラン					
二酸化ウラン燃料体(タイプ1)					
燃料体平均		-	-	燃料体平均および燃料要素平均の変更にあたっては、設工認本文記載のペレット初期濃縮度により必然的に決まる値であり、当該項目で審査可能なため、記載不要	
二酸化ウラン燃料要素		-	-		
二酸化ウラン焼結ペレット		○	○		
二酸化ウラン燃料体(タイプ2)					
燃料体平均		-	-	燃料体平均および燃料要素平均の変更にあたっては、設工認本文記載のペレット初期濃縮度により必然的に決まる値であり、当該項目で審査可能なため、記載不要	
二酸化ウラン燃料要素		-	-		
二酸化ウラン焼結ペレット		○	○		
ガドリニア入り二酸化ウラン燃料体(タイプ3)					
燃料体平均		-	-	燃料体平均および燃料要素平均の変更にあたっては、設工認本文記載のペレット初期濃縮度により必然的に決まる値であり、当該項目で審査可能なため、記載不要	
二酸化ウラン燃料要素		-	-		
ガドリニア入り二酸化ウラン燃料要素		-	-		
二酸化ウラン焼結ペレット		○	○		
ガドリニア混合二酸化ウラン焼結ペレット		○	○		
ガドリニア入り二酸化ウラン燃料体(タイプ4)					
燃料体平均		-	-	燃料体平均および燃料要素平均の変更にあたっては、設工認本文記載のペレット初期濃縮度により必然的に決まる値であり、当該項目で審査可能なため、記載不要	
二酸化ウラン燃料要素		-	-		
ガドリニア入り二酸化ウラン燃料要素		-	-		
二酸化ウラン焼結ペレット		○	○		
ガドリニア混合二酸化ウラン焼結ペレット		○	○		
燃焼率					
燃料体最高		-	-	既工認①の要目表で記載済みのため、記載不要	
燃料要素最高		-	-	新検査制度適用後における炉心側の本文記載事項であり、今回申請の範囲外であることから、炉心側の申請時に記載の適正化を行う。	
ペレット最高		-	-		
燃料材の種類、組成及び組織	二酸化ウラン焼結ペレット(タイプA)	(種類)二酸化ウラン焼結ペレット			
		密度	○	○	
		(組成)			
		酸素対ウラン比	○	-	
		ウラン	○	-	
		炭素	○	-	
		ふっ素	○	-	
		水素	○	-	
		窒素	○	-	
		(組織)			
		焼結により作られた単一相から成る二酸化ウラン多結晶組織	-	-	既工認①の要目表で焼結ペレットであることを記載し、添付8で組織を記載
		ガドリニア混合二酸化ウラン焼結ペレット(タイプB)	(種類)ガドリニア混合二酸化ウラン焼結ペレット		
	密度		○	○	
	(組成)				
	酸素対ウラン比		○	-	
	ウラン		○	-	
	ガドリニア濃度		○	-	
	ガドリニウム濃度		○	-	
	炭素		○	-	
	ふっ素		○	-	
	水素		○	-	
	窒素		○	-	
	(組織)				
	焼結により作られた単一相から成るガドリニウム一部置換型二酸化ウラン多結晶組織	-	-	既工認①の要目表で焼結ペレットであることを記載し、添付8で組織を記載	
ガドリニア混合二酸化ウラン焼結ペレット(タイプC)	(種類)ガドリニア混合二酸化ウラン焼結ペレット				
	密度	○	○		
	(組成)				
	酸素対ウラン比	○	-		
	ウラン	○	-		
	ガドリニア濃度	○	-		
	ガドリニウム濃度	○	-		
	炭素	○	-		
	ふっ素	○	-		
	水素	○	-		
	窒素	○	-		
	(組織)				
焼結により作られた単一相から成るガドリニウム一部置換型二酸化ウラン多結晶組織	-	-	既工認①の要目表で焼結ペレットであることを記載し、添付8で組織を記載		
燃料被覆材の種類、組成及び組織	燃料被覆管	(種類)Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金			
		(組成)			
		チタニウム			
		鉄			
		クロム			
		鉄・クロム	○	-	設工認の本文及び添付8で組成を記載。
		ニオブ			
		酸素			
		ジルコニウム			
		(組織)			
		冷間加工応力除去焼鈍組織	○	-	設工認の本文で材料の成分を記載し、添付7で処理を記載。
		(種類)Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金			
		(組成)			
		チタニウム			
		鉄			
		ニオブ	○	-	設工認の本文及び添付8で組成を記載。
		酸素			
		ジルコニウム			
(組織)					
冷間加工応力除去焼鈍組織	○	-	設工認の本文で材料の成分を記載し、添付7で処理を記載。		



燃料体設計認可申請書		設工認 本文	設工認 添付図面	備考	
燃料材料及び燃料 被覆材以外の部 品の種類及び組 成	燃料被覆材端栓	〔種類〕Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金			
		〔組成〕			
		すず			
		鉄			
		クロム			
	鉄+クロム	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。	
	炭素				
	ジルコニウム				
	〔組織〕				
	再結晶組織	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で処理を記載。	
	上部ノズル及び 下部ノズル	〔種類〕オーステナイト系ステンレス鋼			
		〔組成〕			
		クロム			
		ニッケル			
		炭素			
	鉄	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。	
	上部ノズル押え ばね	〔種類〕析出硬化型ニッケル基合金			
		〔組成〕			
		ニッケル			
		クロム			
		ニオブ+タンタル			
	モリブデン	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。	
	チタン				
アルミニウム					
鉄					
スプリングスク リュウ	〔種類〕オーステナイト系ステンレス鋼				
	〔組成〕				
	クロム				
	ニッケル				
	炭素				
鉄	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。		
制御棒案内シ ンプル	〔種類〕Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金				
	〔組成〕				
制御棒案内シ ンプル端栓	〔種類〕Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金				
	〔組成〕				
炉内計装用案内 シンプル	〔種類〕Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金				
	〔組成〕				
上部スリーブ	燃料被覆材端栓の組成と同じ	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。	
	〔種類〕オーステナイト系ステンレス鋼				
	〔組成〕				
	クロム				
	ニッケル				
炭素					
鉄	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。		
中間部スリーブ	〔種類〕Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金				
	〔組成〕				
インサート管	燃料被覆材端栓の組成と同じ	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。	
	〔種類〕オーステナイト系ステンレス鋼				
	〔組成〕				
	クロム				
	ニッケル				
炭素					
鉄	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。		
インサート端栓	〔種類〕オーステナイト系ステンレス鋼				
	〔組成〕				
	クロム				
	ニッケル				
	炭素				
鉄	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。		
シンプルスクリ ュウ	〔種類〕オーステナイト系ステンレス鋼				
	〔組成〕				
上部支持格子及 び下部支持格子	スプリングスクリュウの組成と同じ	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。	
	〔種類〕析出硬化型ニッケル基合金				
中間部支持格子	〔組成〕				
	上部ノズル押えばねの組成と同じ	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。	
ブレード	〔種類〕Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金				
	〔組成〕				
コイルばね(ペ レット押えばね)	燃料被覆材端栓の組成と同じ	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。	
	〔種類〕析出硬化型ニッケル基合金				
	〔組成〕				
	上部ノズル押えばねの組成と同じ	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。	
	〔種類〕オーステナイト系ばね用ステンレス鋼				
〔組成〕					
クロム					
ニッケル					
炭素					
鉄	○	-	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付8で組成を記載。		

燃料体設計認可申請書		設工認 本文	設工認 添付図面	備考
燃料体	1構造の概要			
	文章	-	-	具体的な仕様を記載しているものではなく、概要記載のため、記載不要
	2燃料体の質量及び寸法			
	(1)質量			
	総質量	-	○	各々の質量の変更に当たっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要
	燃料材質量	-	-	同上
	(2)寸法			
	全長(下部ノズル下端より上部ノズルプレート上面まで)	○	○	-
	断面寸法(最大の断面寸法)	○	○	-
	燃料要素配列	○	○	-
	燃料要素ピッチ	○	○	-
	下部ノズル上面と燃料要素下端の間隔	○	○	-
	(3)燃料要素の配置			
	二酸化ウラン燃料体(タイプ1、タイプ2)			
	ガドリニア入り二酸化ウラン燃料体(タイプ3)	-	○	燃料要素の配列の変更に当たっては、設工認本文の要目表の名称に記載の17行17列が変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要
	ガドリニア入り二酸化ウラン燃料体(タイプ4)			
	3各部品の質量、寸法、数量等			
	3.1二酸化ウラン燃料要素(タイプA)			
	(1)質量			
	総質量	-	-	各々の質量の変更に当たっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要
燃料材質量	-	-	同上	
(2)寸法				
全長(端栓とも)	○	○	-	
有効長さ	○	○	-	
ペレット直径	○	○	-	
ペレット長さ	○	○	-	
被覆材外径	○	○	-	
被覆材内径	○	○	-	
被覆材肉厚	○	○	-	
偏肉率	-	○	偏肉率の変更に当たっては、設工認本文の要目表に記載の被覆材の外径、内径、肉厚、および基本設計方針に記載の「各部の寸法の偏差は、著しく大きいこと」が変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要	
プレナム体積	-	○	プレナム体積の変更に当たっては、設工認本文の要目表の寸法に記載のプレナム長さが変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要	
初期ヘリウム圧力	○	○	設工認本文の基本設計方針に記載	
(3)数量(燃料体あたり)				
二酸化ウラン燃料体(タイプ1、タイプ2)				
ガドリニア入り二酸化ウラン燃料体(タイプ3)	○	○	設工認本文の基本設計方針に「設置(変更)許可を受けた仕様となる構造及び設計とする」と記載されており、設置許可添八に数量が記載されている。	
ガドリニア入り二酸化ウラン燃料体(タイプ4)				
3.2ガドリニア入り二酸化ウラン燃料要素(タイプB)				
(1)質量				
総質量	-	-	各々の質量の変更に当たっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要	
燃料材質量	-	-	同上	
(2)寸法				
全長(端栓とも)	○	○	-	
有効長さ	○	○	-	
ペレット直径	○	○	-	
ペレット長さ	○	○	-	
被覆材外径	○	○	-	
被覆材内径	○	○	-	
被覆材肉厚	○	○	-	
偏肉率	-	○	偏肉率の変更に当たっては、設工認本文の要目表に記載の被覆材の外径、内径、肉厚、および基本設計方針に記載の「各部の寸法の偏差は、著しく大きいこと」が変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要	
プレナム体積	-	○	プレナム体積の変更に当たっては、設工認本文の要目表の寸法に記載のプレナム長さが変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要	
初期ヘリウム圧力	○	○	設工認本文の基本設計方針に記載	
(3)数量(燃料体(タイプ3)あたり)	○	○	設工認本文の基本設計方針に「設置(変更)許可を受けた仕様となる構造及び設計とする」と記載されており、設置許可添八に数量が記載されている。	
3.3ガドリニア入り二酸化ウラン燃料要素(タイプG)				
(1)質量				
総質量	-	-	各々の質量の変更に当たっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要	
燃料材質量	-	-	同上	
(2)寸法				
全長(端栓とも)	○	○	-	
有効長さ	○	○	-	
ペレット直径	○	○	-	
ペレット長さ	○	○	-	
被覆材外径	○	○	-	
被覆材内径	○	○	-	
被覆材肉厚	○	○	-	
偏肉率	-	○	偏肉率の変更に当たっては、設工認本文の要目表に記載の被覆材の外径、内径、肉厚、および基本設計方針に記載の「各部の寸法の偏差は、著しく大きいこと」が変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要	
プレナム体積	-	○	プレナム体積の変更に当たっては、設工認本文の要目表の寸法に記載のプレナム長さが変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要	
初期ヘリウム圧力	○	○	設工認本文の基本設計方針に記載	
(3)数量(燃料体(タイプ4)あたり)	○	○	設工認本文の基本設計方針に「設置(変更)許可を受けた仕様となる構造及び設計とする」と記載されており、設置許可添八に数量が記載されている。	

燃料体設計認可申請書		設工認 本文	設工認 添付図面	備 考		
燃料体の構造及 び質量	上部ノズル(組立 体)及び下部ノズ ル(組立体)	3.4上部ノズル(組立体)及び下部ノズル(組立体)				
		(1)質量				
		上部ノズル	-	-	各々の質量の変更にあたっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依 存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要	
		下部ノズル				
		(2)寸法				
		上部ノズル:外寸法	○	○	-	
		上部ノズル:高さ(下面からパッド上端まで)	○	○	-	
		下部ノズル:外寸法	○	○	-	
		下部ノズル:高さ	○	○	-	
	(3)数量					
	上部ノズル:燃料体あたり	○	-	設工認本文の要目表の注釈に記載		
	下部ノズル:燃料体あたり	○	-	同上		
	制御棒案内シ ンプル(組立体)	3.5制御棒案内シンプル(組立体)				
		(1)質量		-	-	各々の質量の変更にあたっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依 存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要
		(2)寸法				
		外径(太径部/細径部)	○	○	-	
		肉厚(太径部/細径部)	○	○	-	
	(3)数量(燃料体あたり)	○	-	設工認本文の要目表の注釈に記載		
	炉内計装用案内 シンプル	3.6炉内計装用案内シンプル				
		(1)質量		-	-	各々の質量の変更にあたっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依 存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要
		(2)寸法				
		外径	○	○	-	
		肉厚	○	○	-	
	(3)数量(燃料体あたり)	○	-	設工認本文の要目表の注釈に記載		
	支持格子(組立 体)	3.7支持格子(組立体)				
		(1)質量		-	-	各々の質量の変更にあたっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依 存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要
		上部支持格子				
中間部支持格子						
下部支持格子						
(2)寸法						
外寸法(上部及び下部支持格子)		○	○	-		
外寸法(中間部支持格子)		○	○	-		
高さ(上部及び下部支持格子)		○	○	-		
高さ(中間部支持格子)		○	○	-		
(3)数量(燃料体あたり)	○	-	設工認本文の要目表の注釈に記載			
コイルばね(ペ レット押えばね)	3.8コイルばね(ペレット押えばね)					
	(1)質量		-	-	各々の質量の変更にあたっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依 存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要	
	(2)寸法等					
	コイル外径	○	○	-		
	ばね定数	○	○	設工認本文の基本設計方針に記載		
(3)数量(燃料体あたり)	○	-	設工認本文の要目表の注釈に記載			

## 伊方発電所第3号機 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則 別表第二と既工認申請書における記載の整理

原子炉本体		既工認における記載
		伊方発電所第3号機
2 炉心に係る 次の事項	(1) 炉心形状、燃料集合体数、炉心有効高さ及び炉心等価直径	既工認②*1、2 炉心に係る次の事項(1)に記載
	(2) 燃料体最高燃焼度(初装荷及び取替えの別並びに燃料材、燃料要素及び燃料集合体の別に記載すること。)及び核燃料物質の最大装荷量	既工認①*2、2 炉心に係る次の事項(2)に記載*3
	(3) 燃料材の最高温度	既工認③*4、2 炉心に係る次の事項(3)に記載
	(4) 核的・熱的制限値(制御棒クラスタ落下時の制御棒価値及び核的エンタルピー上昇熱水路係数、制御棒クラスタ飛び出し時の制御棒価値及び熱流束熱水路係数、最大線出力密度、水平方向ピーキング係数、最大反応度添加率並びに通常運転時の最小限界熱流束比)	既工認④*5、2 炉心に係る次の事項(4)に記載
3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料(初装荷及び取替えの別に記載すること。)	(今回の申請にて記載)	

\*1：平成28年3月23日付け原規規発第1603231号にて認可を受けた工事計画(再稼働時)

\*2：平成29年9月29日付け原規規発第1709291号にて認可を受けた工事計画(4.1wt%ステップ2燃料の装荷時)

\*3：燃料集合体の最高燃焼度を記載しており、燃料材および燃料要素については炉心側の申請時に記載の適正化を行う。

\*4：平成21年7月15日付け平成21・05・12原第17号にて認可を受けた工事計画(ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の装荷時)

\*5：平成16年4月16日付け平成15・12・26原第7号にて認可を受けた工事計画(高燃焼度燃料の装荷時)

## 補足説明資料 4

### 基本設計方針の確認方法について

## 1. 概要

本資料は、法令等の改正内容を踏まえ、燃料体に係る要求事項を基本設計方針に追加したことから、当該事項の確認方法について別紙のとおり整理したものである。

## A型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
1.1 燃料体 1.1.1 17行17列A型燃料集合体(ウラン燃料)	—	—	—
<p>二酸化ウラン燃料材は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>(1) 以下に掲げる元素を含有する場合における当該元素の含有量のウランの含有量に対する百分率の値は、それぞれ以下に掲げる値であること。</p> <p>炭素 0.010以下            ふっ素 0.0015以下            水素 0.0002以下            窒素 0.0075以下</p>	申請書 検査	<p>要目表 3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料</p> <p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>資料8 第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分</p> <p>添付図面 第1-1、1-2図</p>	材料検査
(2) ウラン235の含有量のウラン含有量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>添付図面 第1-1、1-2図</p>	材料検査
<p>(3) ペレット型燃料材にあつては、ペレットが次に適合する設計とする。</p> <p>a. 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。            b. 密度の偏差は、著しく大きくないこと。            c. 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。            d. 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>添付図面 第1-1、1-2図</p>	a.寸法検査 b.材料検査 c.外観検査 d.外観検査
<p>(4) ガドリニウムを添加していないものにあつては、次に適合する設計とする。</p> <p>a. ウランの含有量の全重量に対する百分率の値は、87.7以上であること。            b. 酸素の原子数のウランの原子数に対する比率の値は、1.99以上2.02以下であること。</p>	申請書 検査	<p>要目表 3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料</p> <p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>資料8 第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分</p> <p>添付図面 第1-1図</p>	a.材料検査 b.材料検査

## A型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
(5) ガドリニウムを添加したものにあつては、次に適合する設計とする。 a. ウランの含有量の全重量に対する百分率の値は、実用上差し支えがないものであること。 b. 酸素の原子数のウランの原子数に対する比率の値は、実用上差し支えがないものであること。 c. ガドリニウムの含有量の全重量に対する百分率の偏差は、著しく大きくないこと。 d. ガドリニウムの均一度は、実用上差し支えがないものであること。	申請書 検査	要目表 3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料  9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  資料8 第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及 び各材料の化学成分  添付図面 第1-2図	a.材料検査 b.材料検査 c.材料検査 d.材料検査
ジルコニウム合金燃料被覆材は、次のいずれにも適合する設計とする。 (1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	寸法検査
(2) 被覆材の軸は、著しく湾曲していないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	寸法検査
(3) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値は、主成分について以下に掲げる値であること。 また、不純物は日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表3に規定する値 (主成分とするものは除く。)であること。 ・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金 スズ 0.70~0.90 鉄 0.18~0.24 クロム 0.07~0.13 鉄+クロム 0.28~0.37 ニオブ 0.45~0.55 酸素 <input type="text"/> ジルコニウム 残り ・Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金 スズ 0.90~1.30 鉄 0.08~0.12 ニオブ 0.80~1.20 酸素 <input type="text"/> ジルコニウム 残り	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  資料8 第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及 び各材料の化学成分	材料検査
(4) 日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書C 水素化物方位試験方法」又はこれと同等の方法によって水素化物方位試験を行ったとき、水素化物方向性係数が0.45を超えないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	材料検査
(5) 日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書D 超音波探傷試験方法」又はこれと同等の方法によって超音波探傷試験を行ったとき、対比試験片の人工傷からの欠陥信号と同等以上の欠陥信号がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	材料検査



## A型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
(6) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(7) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(8) 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。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(9) 日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書B 腐食試験方法」又はこれと同等の方法によって腐食試験を行ったとき、表面に著しい白色又は褐色の酸化物が付着せず、かつ、腐食質量増加が3日間で $22\text{mg}/\text{dm}^2$ 以下又は14日間で $38\text{mg}/\text{dm}^2$ 以下であること。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	材料検査
(10) 応力除去焼きなましを行ったものにあつては、日本産業規格Z2241(2011)「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  資料8 第2-2表 燃料集合体の主な構成部品の材料の 機械的性質	材料検査
ジルコニウム合金端栓は、次のいずれにも適合する設計とする。 (1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	寸法検査
(2) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値は、日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表2及び表3に規定する値であること。ただし、表3に掲げるニオブ及びカルシウムを除く。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  資料8 第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及 び各材料の化学成分	材料検査
(3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(5) 日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書B 腐食試験方法」又はこれと同等の方法によって腐食試験を行ったとき、表面に著しい白色又は褐色の酸化物が付着せず、かつ、腐食質量増加が3日間で $22\text{mg}/\text{dm}^2$ 以下又は14日間で $38\text{mg}/\text{dm}^2$ 以下であること。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	材料検査

## A型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
<p>(6) 再結晶焼きなましを行ったジルコニウム合金端栓は、日本産業規格Z2241(2011)「金属材料引張試験方法」、ASTM International規格ASTM B 351「Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Zirconium and Zirconium Alloy Bars, Rod, and Wire for Nuclear Application」又はこれと同等の方法によって以下に掲げるいずれかの試験温度において引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが同欄に掲げる試験温度の区分に応じ、それぞれ以下に掲げる値であるものであること。</p> <p>a. 試験温度 室温 引張強さ: 415N/mm<sup>2</sup>以上 耐力: 240 N/mm<sup>2</sup>以上 伸び: 14%以上</p> <p>b. 試験温度 316°C 引張強さ: 215N/mm<sup>2</sup>以上 耐力: 105N/mm<sup>2</sup>以上 伸び: 24%以上</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>資料8 第2-2表 燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質</p>	a.材料検査 b.材料検査
<p>燃料材、燃料被覆材及び端栓以外の燃料体の部品は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>添付図面 第1-3、1-5図</p>	寸法検査
(2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
<p>(4) 支持格子、上部支持板、下部支持板、制御棒案内シンプルにあつては、次に適合する設計とする。</p> <p>a. 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>b. 日本産業規格Z2241(2011)「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>資料8 第2-2表 燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質</p>	a.材料検査 b.材料検査
(5) コイルばねにあつては、ばね定数が <input type="text"/> N/cm であること。	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>添付図面 第1-1、1-2図</p>	材料検査
<p>燃料要素は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p>	申請書 検査	<p>9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4</p> <p>添付図面 第1-1、1-2図</p>	寸法検査

A型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
(2) 燃料要素の軸は、著しく湾曲していないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	寸法検査
(3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(5) 日本産業規格Z4504(2008)「放射性表面汚染の測定方法—β線放出核種(最大エネルギー0.15MeV以上)及びα線放出核種」における間接測定法又はこれと同等の方法によって測定したとき、表面に付着している核燃料物質の量が0.00004Bq/mm <sup>2</sup> を超えないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	表面汚染密度検査
(6) ヘリウム漏えい試験を行ったとき、漏えい量が1億分の304MPa・mm <sup>3</sup> /sを超えないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	漏えい検査
(7) 溶接部にブローホール、アンダーカット等で有害なものがないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	溶接部の非破壊検査
(8) 部品の欠如がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(9) ヘリウム加圧量は、次のとおりであること。 二酸化ウラン燃料要素: <input type="text"/> MPa[gauge] ガドリニア混合二酸化ウラン燃料要素: <input type="text"/> MPa[gauge]	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-1、1-2図	圧力検査
燃料要素の集合体である燃料体は、次のいずれにも適合する設計とする。 (1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4  添付図面 第1-3図	寸法検査
(2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査
(3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査

## A型ウラン燃料 基本設計方針対応表

基本設計方針	確認方法	申請書記載箇所	検査方法
(4) 部品の欠如がないこと。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	外観検査

## 補足説明資料 5

### 強度に関する補足説明資料

## 目 次

	頁
1. はじめに	1
2. 設計条件	2
2.1 燃焼度	2
2.2 線出力密度	2
2.3 原子炉運転条件	2
3. 燃料棒の強度計算	3
3.1 燃料棒の設計基準	3
3.2 燃料棒の強度評価方法	5
3.2.1 強度評価に用いる解析コード	5
3.3 強度評価結果	7
3.3.1 計算条件	7
3.3.2 計算結果	12
3.3.3 燃料棒の温度評価結果	16
3.3.4 燃料棒の内圧評価結果	18
3.3.5 被覆管の応力評価結果	19
3.3.6 被覆管の歪評価結果	22
3.3.7 被覆管の疲労評価結果	23
3.4 その他の考慮事項	28
4. 燃料集合体の強度計算	48
4.1 燃料集合体の設計基準	48
4.2 燃料集合体強度評価方法	50
4.2.1 燃料輸送及び取扱い時における評価方法	50
4.2.2 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における評価方法	54
4.3 強度評価結果	57
4.3.1 燃料輸送及び取扱い時における評価結果	57
4.3.2 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における評価結果	59
5. 参考文献	61

## 1. はじめに

資料7「強度に関する説明書」は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第23条及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」に基づき、17行17列A型燃料集合体（ウラン燃料）（以下「燃料集合体」という。）が原子炉内における使用期間中に生じ得る種々の因子を考慮しても、その健全性を失うことがないように設計されていることを示す強度計算書である。

なお、炉心は157体の燃料集合体で構成され、原子炉熱出力2,652MWを安全に出せるように設計されている。燃料集合体は所定の燃焼率（以下「燃焼度」という。）を達成できるように設計されている。

## 2. 設計条件

本申請の燃料集合体の通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における核・熱水力設計条件は以下のとおりである。

### 2.1 燃焼度

本申請の燃料集合体、燃料棒及びペレットに対する設計の燃焼度は次のとおりである。

燃料集合体最高	:	55,000	MWd/t
燃料棒最高	:	61,000	MWd/t
ペレット最高	:	71,000	MWd/t

### 2.2 線出力密度

炉心平均線出力密度は17.1kW/mである。また、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における最大線出力密度は次のとおりである。

	<u>二酸化ウラン燃料棒</u>	<u>ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒</u>
通常運転時の		
最大線出力密度	: 41.1 kW/m	31.9 kW/m
運転時の異常な		
過渡変化時における		
最大線出力密度	: 59.1 kW/m	44.3 kW/m

ガドリニア入り二酸化ウラン燃料棒（以下「ガドリニア入り燃料棒」という。）ではガドリニアを6wt%又は10wt%添加したことに対し、U-235濃縮度を二酸化ウラン燃料棒の4.80wt%より1.60wt%低下させ3.20wt%としているので、ガドリニア入り燃料棒の最大線出力密度は二酸化ウラン燃料棒の場合より低くなる。

### 2.3 原子炉運転条件

本申請の燃料集合体を使用する原子炉における1次冷却材の運転条件の主なものは次のとおりである。

・原子炉熱出力	:	2,652	MW
・運転圧力	:	15.5	MPa[abs]
・炉心入口温度			
通常運転時	:	283.6	°C
高温停止時	:	286.1	°C
・1次冷却材全流量	:	45.7×10 <sup>6</sup>	kg/h



### 3. 燃料棒の強度計算

#### 3.1 燃料棒の設計基準

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、第3-1表に示す基準を満足するように燃料棒を設計する。

設計基準を設定するに当たっての基本的な考慮事項と設計基準を同表に示す。

なお、これらの基準は、原子力規制委員会規則「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（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第5号）」、技術基準規則、原子炉安全基準専門部会報告書「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）」及び原子炉安全専門審査会内規「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について（昭和51年2月16日）」に記載されている考え方に基づいている。

このほか、その他の考慮事項として、燃料棒曲がり評価、トータルギャップ評価、被覆管外面腐食及び水素吸収量評価、ペレット-被覆管相互作用の評価（PCI評価）、クリープコラプス評価及びフレットング摩耗評価を実施する。

第3-1表 燃料健全性評価における設計基準

規則など	評価項目	基本的考慮事項	設計基準	基準の考え方	強度評価の考え方
<p>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（平成25年6月28日）第15条6項</p> <p>1. 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の燃料体に加わる負荷に耐えるものとする</p>	(1) 燃料温度	<p>1) ペレット溶融に伴う過大な膨張を防ぐ。</p> <p>2) 燃料スタックの不安定化を防ぐ。</p> <p>3) 核分裂生成ガス（以下「FPガス」という。）の過度の放出あるいは移動を防ぐ。</p> <p>4) ペレットと被覆管の有害な化学反応を防ぐ。</p>	<p>燃料中心最高温度は二酸化ウラン及びガドリニア混合二酸化ウランそれぞれの溶融点未満であること。</p>	<p>物理的溶融点（実測値の下限側）に評価モデル等の不確定性を考慮した値を制限値としている。また、燃焼に伴う溶融点の低下は<math>-32^{\circ}\text{C}/10,000\text{MWD/t}</math>を適用している。</p>	<p>通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における燃料中心温度評価用線出力条件を保守的に設定している。</p>
<p>原子炉安全基準専門部会「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）</p> <p>3.2.1 燃料棒内圧基準</p>	(2) 燃料棒内圧	<p>サーマルフィードバック効果<sup>(注1)</sup>による燃料温度の過度な上昇を防ぐ。</p>	<p>通常運転時において、被覆管の外向きのクリープ変形により、ペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えないこと。</p>	<p>燃料棒設計計算コードによりペレットと被覆管のギャップが増加する時点の内圧（限界内圧）を求め、限界内圧の下限を包絡する内圧値を設定し、更に燃料製造公差及び計算モデルの不確定性を考慮して設定している。</p>	<p>燃料棒設計計算コードにより得られた評価値に対し、燃料製造公差及び計算モデルの不確定性を考慮している。</p>
<p>PWR燃料棒の内圧基準については、従来の「燃料棒の内圧は、運転中冷却材圧力（157kg/cm<sup>2</sup>g）以下であること。」という基準を変更し、「燃料棒の内圧は、通常運転時において被覆管の外向きのクリープ変形によりペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えないこと。」によることとしている。</p>	(3) 被覆管応力		<p>被覆管の耐力<sup>(注2)</sup>以下であること。</p>	<p>被覆管応力基準値は、耐力実測データに基づき、データのばらつきを保守的に考慮して定めている。</p> <p>1次応力（内外圧差等による応力）+2次応力（熱応力、接触応力）が、耐力以下となるように制限しており、被覆材の破損に対して保守的な設定としている。</p>	—
<p>原子炉安全専門審査会「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について」（昭和51年2月16日）</p> <p>2-1 構造設計基準</p> <p>構造設計基準は次のように設定されている。</p> <p>(1) 燃料最高温度は二酸化ウランの溶融点未満であること。</p> <p>(2) 燃料棒内圧は運転中冷却材圧力（157kg/cm<sup>2</sup>g）以下であること。</p> <p>(3) 被覆にかかる応力はジルカロイ-4の耐力以下であること。</p> <p>(4) 被覆に生ず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>(5) 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>	(4) 被覆管歪	<p>通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を通じて被覆管の健全性を確保する。</p>	<p>円周方向引張歪の変化量は各過渡変化に対し1%以下であること。</p>	<p>0' Donnellらの塑性不安定性の理論では、ジルカロイ材は塑性歪2%まで塑性不安定性を示さないとされているが、設計基準では保守的に1%としている。この1%は塑性歪に対応するものであるが、評価では、塑性歪と弾性歪の合計が1%以下であることとしており、保守的な評価となっている。</p> <p>なお、応力評価基準に耐力を用いていることにより、実質的に0.2%塑性歪以下に制限される。</p>	—
<p>(1) 燃料最高温度は二酸化ウランの溶融点未満であること。</p> <p>(2) 燃料棒内圧は運転中冷却材圧力（157kg/cm<sup>2</sup>g）以下であること。</p> <p>(3) 被覆にかかる応力はジルカロイ-4の耐力以下であること。</p> <p>(4) 被覆に生ず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>(5) 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>	(5) 周期的な被覆管歪（累積損傷係数）	<p>日間負荷変動を含む種々の設計過渡条件に対して被覆管の健全性を確保する。</p>	<p>ASME Sec. IIIの概念による設計疲労寿命以下であること。</p>	<p>疲労損傷評価にて適用する設計疲労曲線（Langer and 0' Donnellの曲線）は実測データより求まる最確曲線に対し、さらに保守的に余裕（応力に対して1/2、許容繰返し回数に対して1/20）を見込んで設定されている。</p>	<p>疲労損傷評価では、設計上、起動/停止、負荷追従運転及び異常な過渡変化時の原子炉トリップの過渡条件（繰返し回数）を考慮しているが、実際の装荷燃料が受ける過渡条件は設計で考慮している繰返し回数以下であることから、実質上保守的な評価となっている。</p>

(注1) 内圧支配に至った燃料棒では、被覆管は外向きのクリープ変形により外径が増加し、一旦接触したペレットと被覆管のギャップが再度生じる可能性がある。これにより、ギャップ部の熱伝達が低下し燃料温度が増加すると、更にFPガスが放出されて内圧が上昇し、その結果、更にギャップが広がる。

(注2) 0.2%の塑性変形を起こす応力をいう。

### 3.2 燃料棒の強度評価方法

強度評価は、3.1項で述べた設計基準に従って行うが、以下にこれら評価方法及び解析コードの概要を述べる。

また第3-1図に燃料棒強度評価フロー図を示す。

#### 3.2.1 強度評価に用いる解析コード

燃料棒の強度評価には、燃料棒解析コード（高燃焼度用FINE<sup>(\*)</sup>コード<sup>(1)</sup>）を用いる。

高燃焼度用FINEコードは燃料寿命中の温度、応力及び歪等を評価するものであり、以下に示す原子炉運転中の諸現象を考慮している。

##### (1) ペレット

FPガスの生成及び放出、熱膨張、焼きしまり及びスエリング

##### (2) 被覆管

熱膨張、クリープ、照射成長、弾性変形及び腐食

##### (3) ペレット及び被覆管の相互作用

この解析コードの基本的計算機能は次のとおりである。

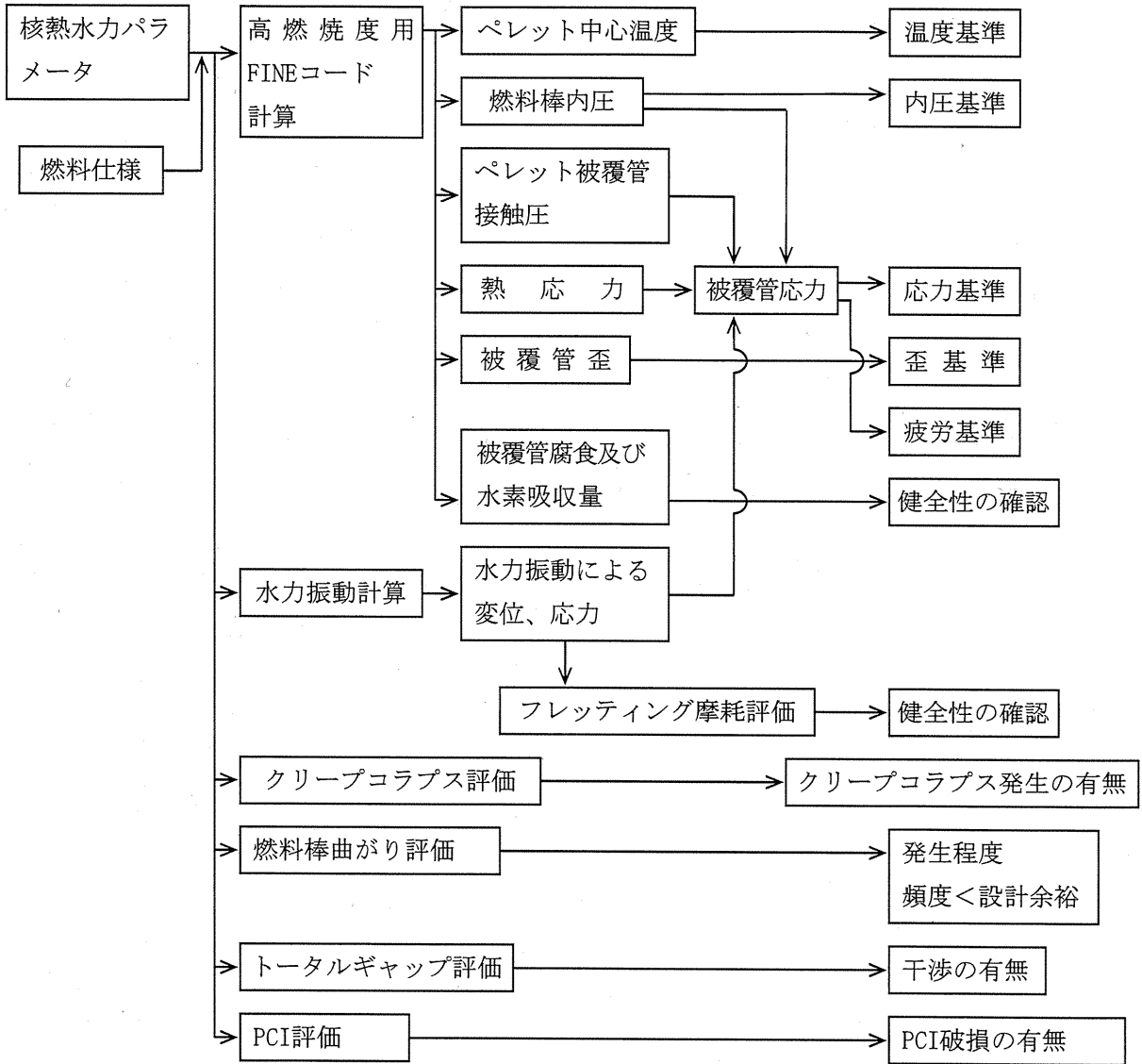
- a. 軸方向各メッシュでペレットと被覆管のギャップを仮定し、ペレットをリング状に分割して温度計算を行う。
- b. a.の結果を基に軸方向各メッシュで、ペレットと被覆管のギャップを再計算する。
- c. b.で計算されたギャップとa.で仮定したギャップが合致するまで、収束計算を繰り返す。
- d. c.にて収束した温度分布を用いて、軸方向各メッシュ、径方向各リングメッシュでFPガス放出量を計算する。
- e. 燃料棒内圧を計算する。
- f. 軸方向各メッシュで被覆管の応力及び歪を計算する。
- g. a.からf.の計算を照射時間を追いつつ実行する。

なお、高燃焼度用FINEコードにおける評価は、PWR使用条件の範囲をカバーするデータで、その実証性を確認している。

---

(\*) FINE ; Fuel Rod Integrity Evaluation Code

燃料棒評価



第3-1図 燃料棒強度評価フロー図

### 3.3 強度評価結果

本項で述べる燃料棒の強度評価において、FPガスの発生、放出、ペレットのスエリング及び熱膨張、ペレットと被覆管の相互作用等の原子炉運転中に生ずる諸現象を考慮し、燃料温度、内圧、被覆管応力、歪及び疲労が、プラントの運転上与えられる条件下においても、設計基準を満足していることを示している。

#### 3.3.1 計算条件





強度評価に用いる設計出力履歴は実際の取替炉心での運用を想定し、取替炉心ごとの出力の変動を考慮した履歴を設定する。また、1サイクル当たりの運転時間は、設計出力履歴と燃料棒設計燃焼度61,000MWd/tに基づき□ EFPD（全出力換算日）に設定している。

燃料棒の強度評価に用いた燃料諸元及び1次冷却材条件を第3-2表に示す。

燃料棒の強度評価では、それぞれの評価項目に対して厳しくなる燃料棒出力履歴を選定して評価を行う。選定の考え方を第3-3表にまとめるとともに、第3-4表に出力履歴を示す。

出力履歴については、後述の計算により各評価項目で最も厳しくなるものを同表に示す。軸方向出力分布を第3-2図に示す。

第3-2表 燃料棒の強度評価に用いた計算条件

		二酸化ウラン燃料棒	ガドリニア入り燃料棒
燃 料 諸 元	寸 法 mm		
	被覆管外径	9.50	9.50
	被覆管内径	8.36	8.36
	プレナム長さ		
	燃料有効長さ	3,648	3,648
	ペレット長さ	9.5	9.5
	ペレット直径	8.19	8.19
濃縮度 wt%	4.10又は4.80	3.20	
密 度 %T. D.	97.0	96.0	
ガドリニア濃度 wt%	—	10.00	
初期ガス圧 MPa[abs]			
1 次 冷 却 材	入口温度 °C (通常運転時)	283.6	283.6
	流 量 kg/(m <sup>2</sup> ·h)	1.13×10 <sup>7</sup>	1.13×10 <sup>7</sup>
炉心平均線出力密度 kW/m		17.1	

第3-3表 各評価項目と出力履歴との関係

評価項目	
燃料温度	
燃料棒内圧	
被覆管応力	
被覆管歪	
周期的な被覆管歪(被覆管疲労)	

第3-4表 出力履歴

燃料	出力履歴名称 (注3)	比出力 (注1)				厳しくなる項目
		サイクル1 (注2)	サイクル2	サイクル3	サイクル4	
二酸化ウラン 燃料棒	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	7					内圧/応力/歪/疲労
	8					
ガドリニア入り 燃料棒	1					
	2					
	3					
	4					内圧/応力/歪/疲労
	5					

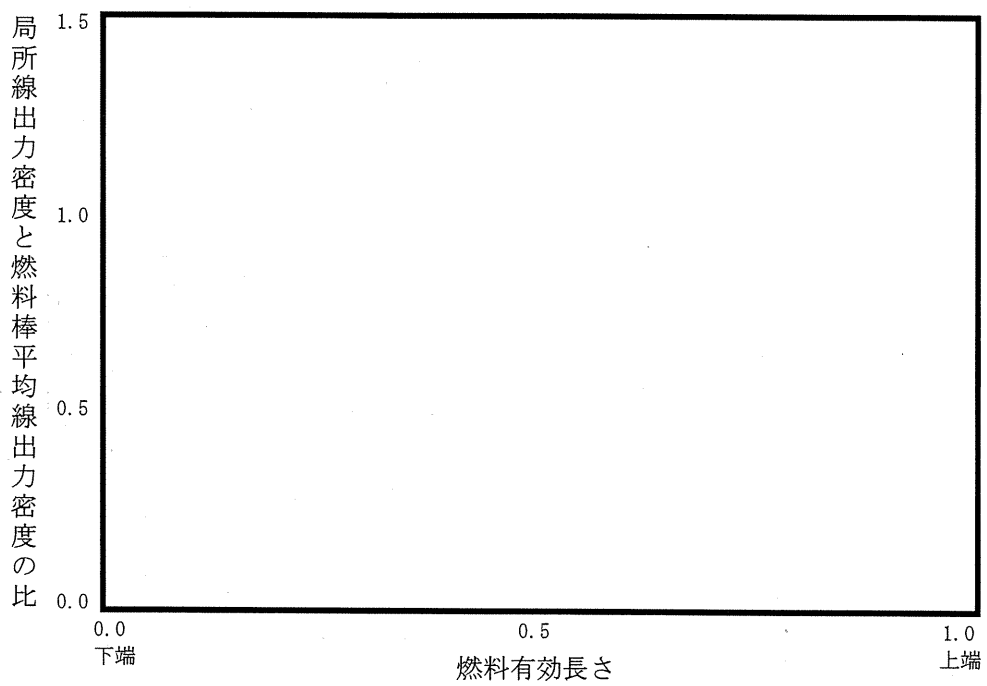
(注1) 炉心平均線出力密度(17.1kW/m)を1として規格化したもの

(注2) サイクルiとは燃料集合体のi回目の照射回数を示す。

(注3)

(注4) サイクル初期/サイクル末期の値。



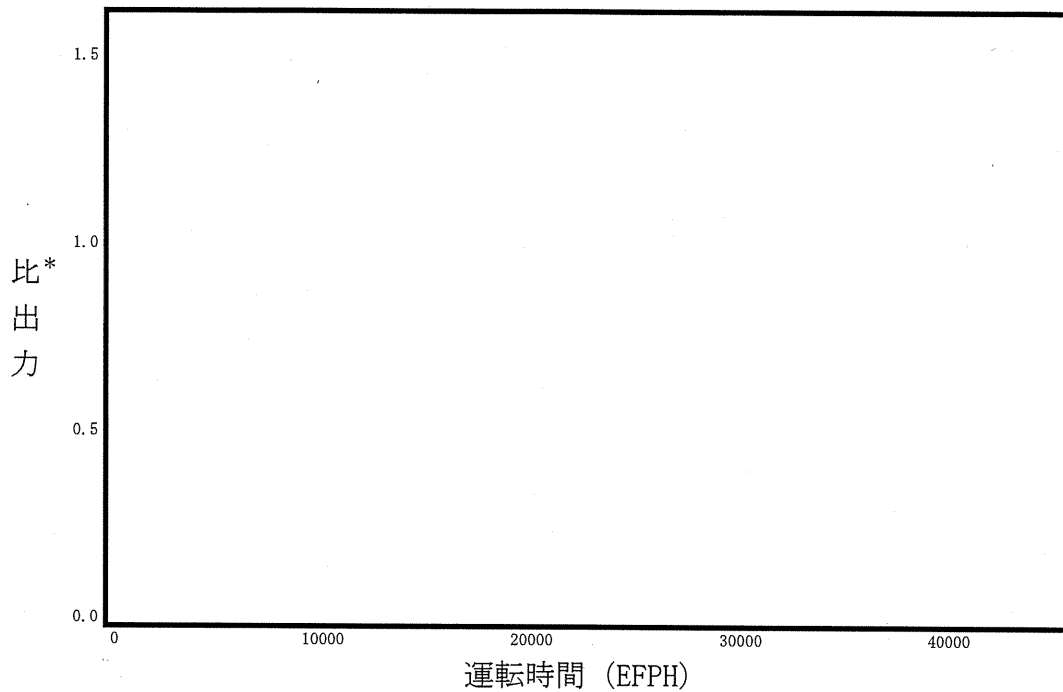


第3-2図 軸方向出力分布図

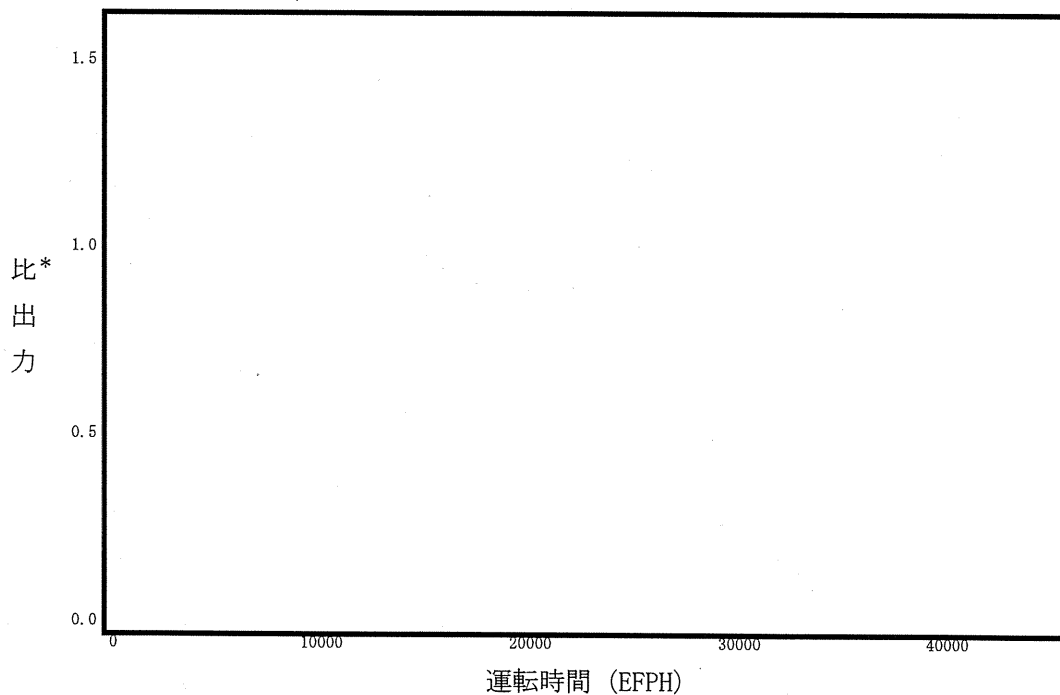
### 3.3.2 計算結果

各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴（比出力）と内圧履歴をまとめて、第3-3図及び第3-4図に示す。

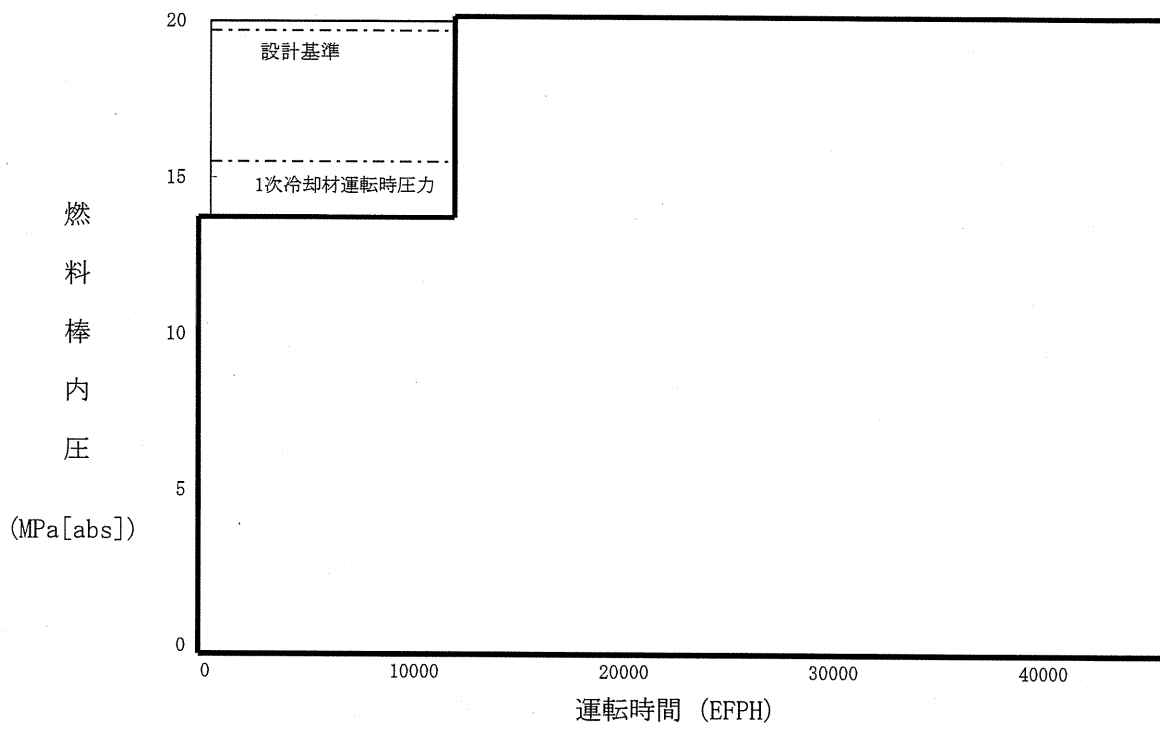
また、被覆管内径とペレット外径の変化について、第3-5図に示す。



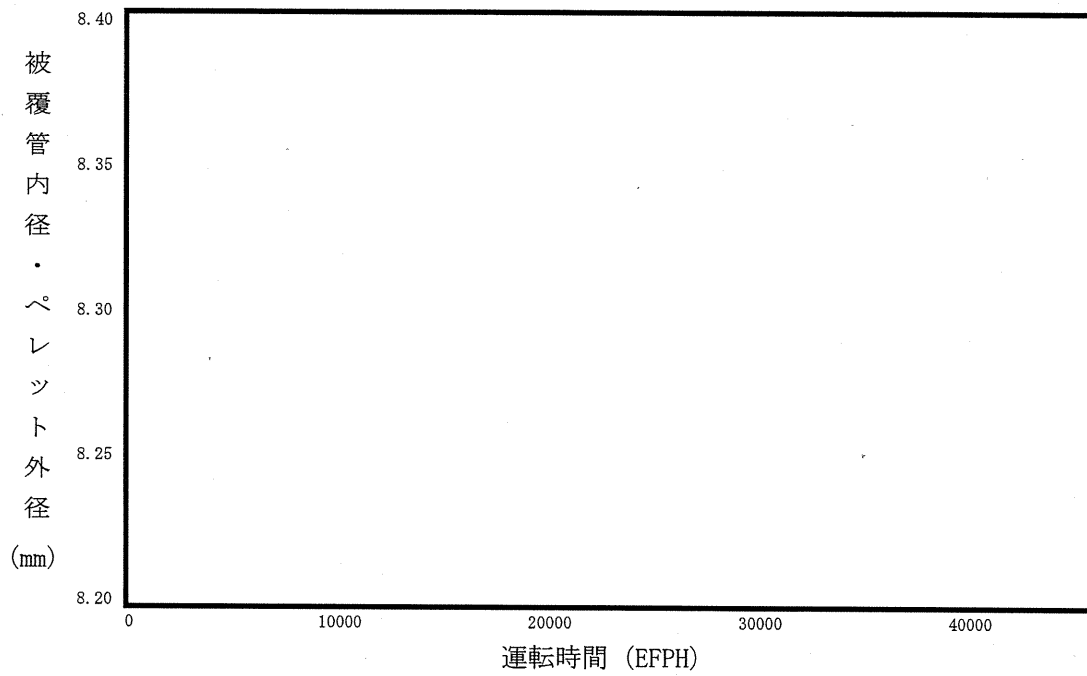
\* : 比出力は燃料棒の平均出力を炉心平均線出力密度を1として規格化したもの  
 第3-3図 (1) 各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴 (通常運転時)  
 (二酸化ウラン燃料棒)



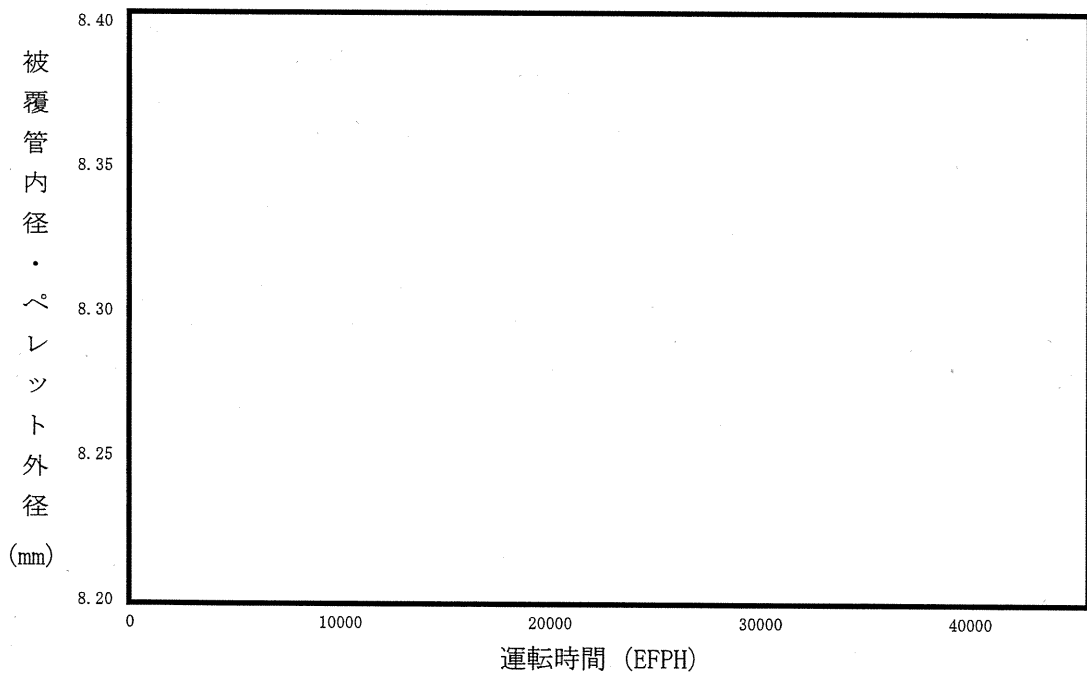
\* : 比出力は燃料棒の平均出力を炉心平均線出力密度を1として規格化したもの  
 第3-3図 (2) 各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴 (通常運転時)  
 (ガドリニア入り燃料棒)



第3-4図 内圧評価上で最も厳しくなる燃料棒の内圧履歴 (通常運転時)



第3-5図 (1) 被覆管内径及びペレット外径変化  
(二酸化ウラン燃料棒)



第3-5図 (2) 被覆管内径及びペレット外径変化  
(ガドリニア入り燃料棒)

### 3.3.3 燃料棒の温度評価結果

ペレットが溶融すると体積が膨張し、被覆管に大きな応力が発生し、また、燃料スタックの不安定化あるいは、FPガスの過度な放出・移動、更にはペレットと被覆管の有害な化学反応を引き起こす恐れがある。これらを防ぐため、燃料寿命中の燃料最高温度（燃料中心温度）を燃料の溶融点未満とする。

溶融点は、未照射状態における二酸化ウランペレットに対して2,800℃、またガドリニア混合二酸化ウランペレットでは2,700℃である。燃料中心温度の各燃焼度に対する計算上の制限値は、溶融点の燃焼に伴う低下、並びに計算モデルの不確定性及び燃料中心温度が高くなる方向に影響する主な燃料製造公差に基づく不確定性を基に燃料中心温度の不確定性220℃を考慮し、以下のとおりとする。

#### (1) 二酸化ウランペレット

未照射燃料では不確定性220℃を考慮し、2,580℃とする。以降燃焼に伴い10,000Mwd/tあたり32℃の割合で低下するとする。

#### (2) ガドリニア混合二酸化ウランペレット

未照射燃料では不確定性220℃を考慮し、2,480℃とする。以降燃焼に伴い10,000Mwd/tあたり32℃の割合で低下するとする。

二酸化ウランペレットについては、燃料中心温度の評価が最も厳しくなるのは、燃料中心温度が最高となり、かつ、燃料中心温度と制限値との差が最も小さくなる燃料寿命初期である。この時点の通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における燃料中心温度を第3-5表に示す。同表に示されるように、評価上最も厳しい燃料中心温度でも制限値を十分に下回っている。

ガドリニア混合二酸化ウランペレットについては、濃縮度を二酸化ウランペレットより低下させることにより最大線出力密度が通常二酸化ウラン燃料より低くなるような設計としている。ガドリニウム同位体の中性子吸収効果が減少する効果を考慮した線出力密度が最高となる時期において燃料中心温度が最大となり、かつ制限値に対する余裕が最小となるが第3-5表に示すように制限値を十分に下回っている。

第3-5表 燃料中心温度評価結果

種 類	条 件	燃 焼 度 (MWd/t)	燃料中心温度 (°C)	判定	設計基準 (°C)
二酸化ウラン 燃料棒	通常運転時 (41.1kW/m)	0	約1,740	<	2,580
	運転時の異常な 過渡変化時 (59.1kW/m)		約2,220		
ガドリニア入 り燃料棒	通常運転時 (31.9kW/m)	10,000	約1,630	<	2,440
	運転時の異常な 過渡変化時 (44.3kW/m)		約2,040		

### 3.3.4 燃料棒の内圧評価結果

燃料棒の内圧評価は、各燃料棒の内圧評価結果を、実炉心において想定される照射条件を基に計算した、ギャップが増加しない限界内圧と比較することで行う。

#### (1) ギャップ増加限界内圧

ペレットと被覆管のギャップが増加しない限界内圧は、高燃焼度用FINEコードを用いてギャップ変化を計算することにより求める。すなわち、仮想的に初期ヘリウム圧力及びFPガス放出率を順次高くすることにより、内圧を高くした場合の計算を行い、このときペレットと被覆管のギャップ変化を求める。そして、ギャップが最小となる、あるいは、一旦閉じたギャップが開き始める時点を求め、この時点での内圧を限界内圧とする。

限界内圧を一般化して求めるために、17行17列型燃料と14行14列型(及び15行15列型)燃料の両タイプを包絡する限界内圧を求め、更に安全側に限界内圧が低くなる方向に影響する主な燃料製造公差に基づく不確定性及び評価モデルの不確定性を考慮して評価した結果、限界内圧は次のとおりとなった。

$$\text{限界内圧} = 19.7 \text{ MPa[abs]}$$

この値を判断基準として評価を行う。

#### (2) 内圧評価

製造時の燃料棒は、ヘリウムが加圧封入されているが、燃焼によるFPガスの放出等によって、燃料棒内圧は徐々に上昇する。

最大内圧を示す燃料棒内圧に、燃料棒内圧が高くなる方向に影響する主な燃料製造公差に基づく不確定性及び評価モデルの不確定性を考慮した結果を第3-6表に示す。同表より、種々の不確定因子を考慮しても、燃料棒の内圧は設計基準を満足している。

また、その燃料寿命中の内圧変化は第3-4図に示したとおりである。

第3-6表 燃料棒内圧評価結果 (通常運転時)

(単位: MPa[abs])

種類	時期	内 圧			設計基準	設計比 (注)
		最確値	不確定性	合計		
二酸化ウラン燃料棒				15.4	≤19.7	0.78
ガトリニア入り燃料棒				12.5	≤19.7	0.64

(注) 設計基準値に対する評価値の比である。



### 3.3.5 被覆管の応力評価結果

被覆管の応力評価は、体積平均相当応力を被覆管の耐力と比較することで行う。体積平均相当応力とは、被覆管にかかる合応力に体積の重みを付けて平均したものである。

被覆管の材料であるジルコニウム基合金の耐力は、高速中性子照射によって増加するが、比較的短時間の照射で飽和する。したがって、燃料寿命初期は未照射材の耐力と、またそれ以外の時点では、照射材の耐力と比較する。ここで、未照射材及び照射材の設計基準は、それぞれ耐力実績データに基づき、データのばらつきを考慮して導いた値（また、耐力基準値は被覆管温度の関数としている。）を用いる。設計基準の求め方を第3-6図に示す。

燃料寿命初期においては、被覆管とペレット間のギャップにより、被覆管には主に内外圧差による応力が発生するが、その値は小さい。燃焼が進むと被覆管は径方向内向きにクリープ変形（クリープダウン）し、ペレットはスエリングにより外径が増加し、ペレットと被覆管の接触が生じ被覆管応力が大きくなる。通常運転時におけるこのような被覆管とペレットの径変化を第3-5図に示す。

被覆管応力評価では、内外圧差及び接触圧（ペレット－被覆管相互作用）による応力、熱応力、水力振動による応力を考慮する。ここで、水力振動による応力は、安全側に±0.5MPaとしている。発生応力が厳しくなる運転時の異常な過渡変化時における評価結果を第3-7表に示す。これより二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア入り燃料棒での被覆管応力はいずれも設計基準を満足している。

第3-7表 二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア入り燃料棒被覆管応力評価結果

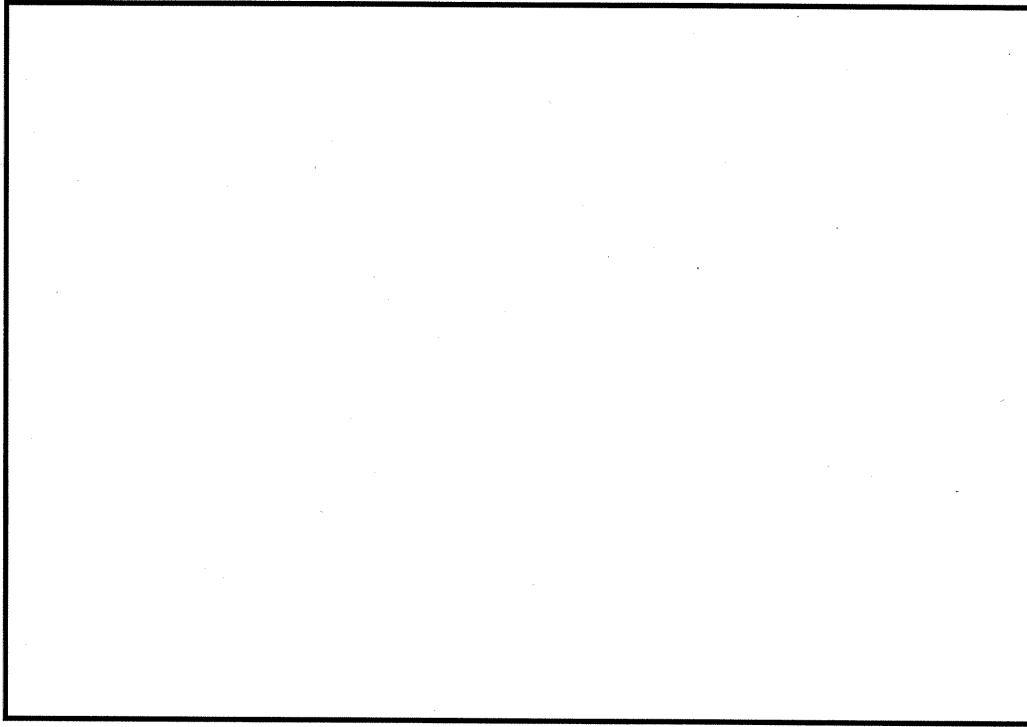
(単位：MPa)

評価条件		運転時の異常な過渡変化時											
		二酸化ウラン燃料			ガドリニア入り二酸化ウラン燃料								
項目	応力成分	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$	$\sigma_z$	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$	$\sigma_z$						
	1. 内外圧差及び接触圧による応力	内面											
外面													
2. 熱応力	内面												
	外面												
3. 水力振動による応力	内外面	0							0	±0.5	0	0	±0.5
4. 合計応力 <sup>(*)</sup> 1+2+3	内面												
	外面												
評価時点													
体積平均相当応力 <sup>(*)</sup>													
被覆材耐力													
設計比 <sup>(*)、(**)</sup>								0.92			0.80		
		0.92			0.80								

(\*) 上段は水力振動による応力を+方向に、下段は-方向にとったものである。

(\*\*) 設計基準（被覆材耐力）に対する評価値との比である。

耐  
力  
(MPa)



温 度(°C)

第3-6図 被覆管の耐力

### 3.3.6 被覆管の歪評価結果

被覆管の内圧は、燃料寿命初期においては1次冷却材運転圧力より低いので、被覆管は運転中、内外圧差による圧縮荷重を受け、ペレットに接触するまでクリープにより徐々に径が減少する。ペレットとの接触は照射の最も進んだ燃料棒の高出力部で生じ、それ以後はペレットのスエリングにより被覆管の径は増加をはじめ、最終的にはスエリングによる膨張速度と接触圧及び内圧によるクリープ速度が釣り合った状態で、径が徐々に増加する。(第3-5図参照)

通常運転時でのペレットのスエリングによる被覆管歪の増加は接触してから燃料寿命末期までの歪増加率が小さく、このような場合、被覆管は10%以上の歪に至るまで定常クリープ領域にあり、不安定化を生じない。

これに対して、運転時の異常な過渡変化時には、被覆管にはペレットと被覆管の接触後に引張歪が発生する。このため、応力評価と同様にペレットと被覆管の接触後引張歪は大きくなる。運転時の異常な過渡変化時における被覆管引張歪の変化量は、第3-8表に示すとおり二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア入り燃料棒ともに設計基準1%以下を満足している。

第3-8表 運転時の異常な過渡変化時の引張歪評価結果

(単位：%)

種類	時期	歪	設計基準	設計比 <sup>(注)</sup>
二酸化ウラン 燃料棒		0.46	≤1	0.46
ガドリニア入り 燃料棒		0.43	≤1	0.43

(注) 設計基準値に対する評価値の比である。

### 3.3.7 被覆管の疲労評価結果

被覆管の累積疲労は燃料寿命中に想定される過渡条件を、1次系機器の設計過渡条件に基づいて3つに分類し、それぞれ [ ] 保守的に設定した第3-9表に示す年当たりの繰り返し回数に、原子炉内滞在期間を考慮して応力の繰り返し回数を設定し、第3-10表に示す評価手順により評価する（添付）。

MDA及びZIRLO被覆管の設計疲労曲線としては疲労特性がジルカロイ-4被覆管と同等のため、第3-7図を用いる。

各事象に対する損傷係数を合計した結果を第3-11表及び第3-8図に示すが、両燃料棒とも設計基準100%を満足している。

第3-9表 疲労評価に用いる繰り返し回数

(単位：回)

過渡条件の分類	年当たりの繰り返し回数	サイクル長さ 箇月運転 <sup>(注3)</sup> 当たりの繰り返し回数
起動・停止 (低温停止 ↔ 高温停止)	[ ]	[ ] (注1)
負荷追従を含む運転時出力変化 (高温零出力 ↔ 高温全出力)		
異常な過渡変化における原子炉トリップ <sup>(注2)</sup> (高温零出力 ↔ 過渡変化)		

(注1) 燃料寿命中の繰り返し回数

(注2) 燃料棒の線出力密度が最も増大する2事象（出力運転中の制御棒の異常な引き抜き及び1次冷却材中のほう素の異常な希釈事象）を想定し、かつ2事象の初期線出力が零出力にあるものと仮定することにより、保守的な評価としている。

(注3) 評価上の想定運転期間

第3-10表 疲労評価手順

①第3-9表に示した過渡条件（出力条件）での応力を計算する。

出力条件	径方向応力	円周方向応力	軸方向応力
高温零出力 (起動)	$\sigma_{r1}$	$\sigma_{\theta 1}$	$\sigma_{z1}$
高温全出力 (停止)	$\sigma_{r2}$	$\sigma_{\theta 2}$	$\sigma_{z2}$

②応力の差を求め、最大の応力と最小の応力との応力変動に対する片振幅 $S_{alt}$ を求める。

出力条件	径方向応力－ 円周方向応力	円周方向応力－ 軸方向応力	軸方向応力－ 径方向応力
高温零出力 (起動)	$\sigma_{r1} - \sigma_{\theta 1}$	$\sigma_{\theta 1} - \sigma_{z1}$	$\sigma_{z1} - \sigma_{r1}$
高温全出力 (停止)	$\sigma_{r2} - \sigma_{\theta 2}$	$\sigma_{\theta 2} - \sigma_{z2}$	$\sigma_{z2} - \sigma_{r2}$
最大の応力 $S_{max}$	$\sigma_{r1} - \sigma_{\theta 1}$ と $\sigma_{r2} - \sigma_{\theta 2}$ の うち大きい方	$\sigma_{\theta 1} - \sigma_{z1}$ と $\sigma_{\theta 2} - \sigma_{z2}$ の うち大きい方	$\sigma_{z1} - \sigma_{r1}$ と $\sigma_{z2} - \sigma_{r2}$ の うち大きい方
最小の応力 $S_{min}$	$\sigma_{r1} - \sigma_{\theta 1}$ と $\sigma_{r2} - \sigma_{\theta 2}$ の うち小さい方	$\sigma_{\theta 1} - \sigma_{z1}$ と $\sigma_{\theta 2} - \sigma_{z2}$ の うち小さい方	$\sigma_{z1} - \sigma_{r1}$ と $\sigma_{z2} - \sigma_{r2}$ の うち小さい方

$$S_{alt} = \frac{1}{2} (S_{max} - S_{min})$$

③第3-7図に示した設計疲労曲線よりある期間*i*における許容繰返し回数 $N_i$ を求める。

④第3-9表に示した繰返し回数 $n_i$ と上記の許容繰返し回数 $N_i$ との比

$\left(\frac{n_i}{N_i}\right)$  を求め各過渡条件ごとに合計  $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)$  し、更にこれらの値の和（累積損傷係数）

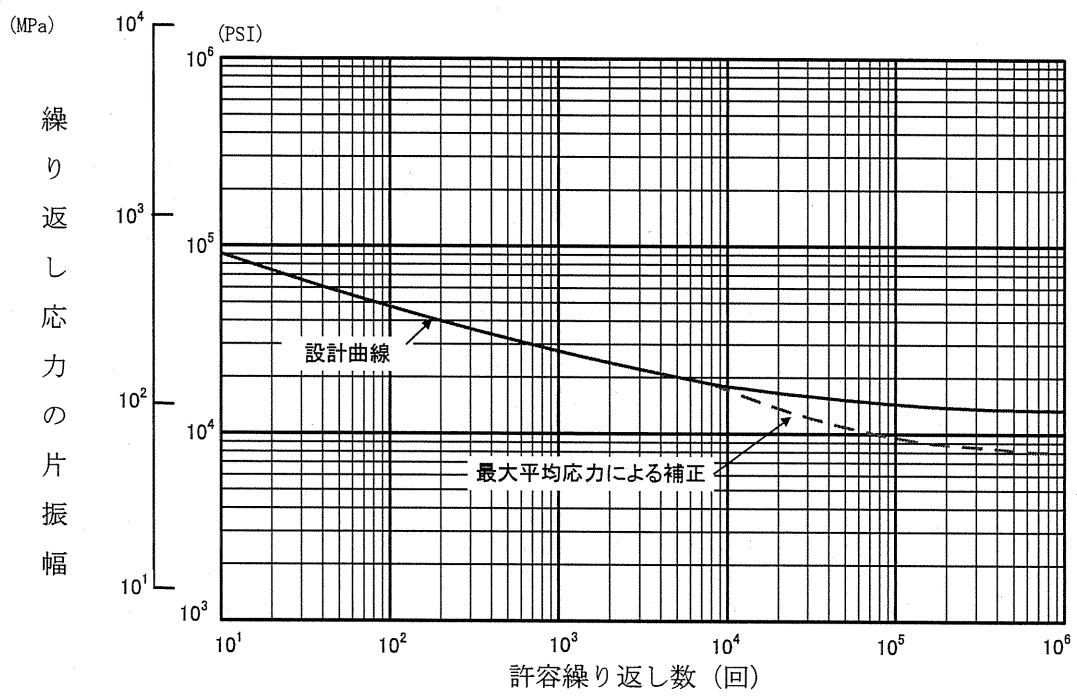
が設計基準を満足することを確認する。

第3-11表 被覆管の疲労評価結果

(単位：%)

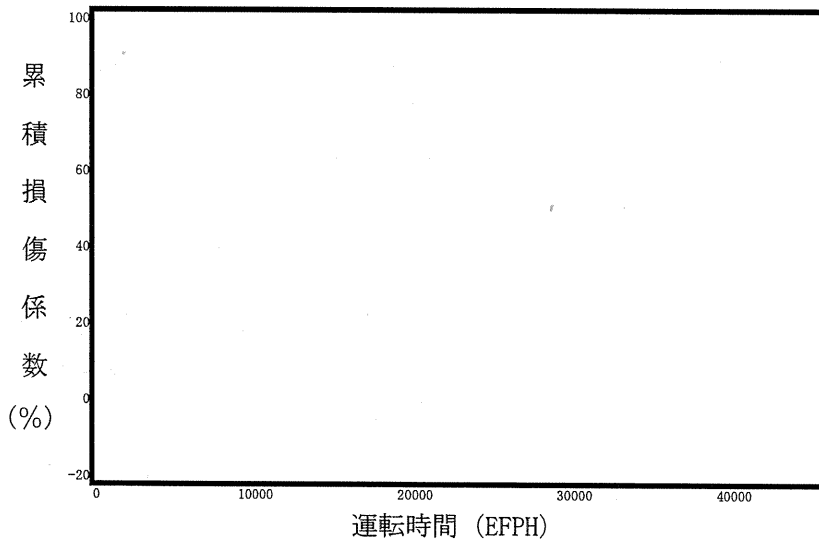
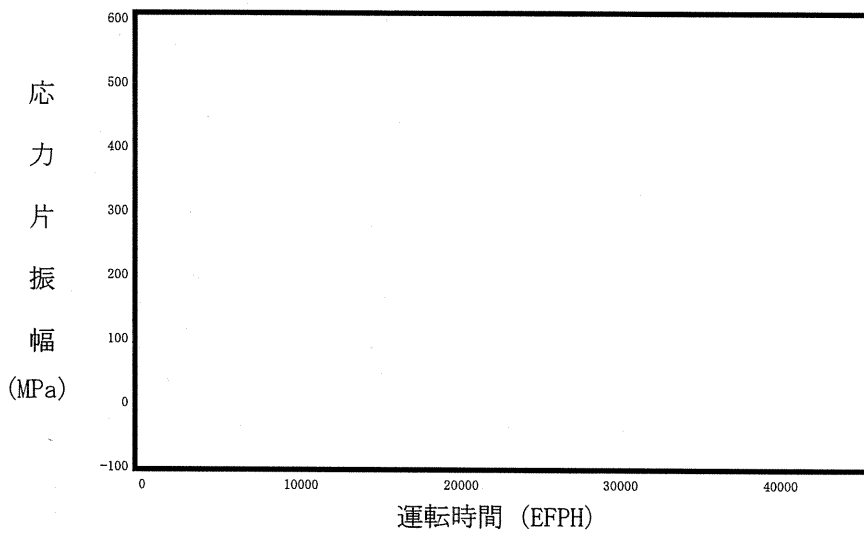
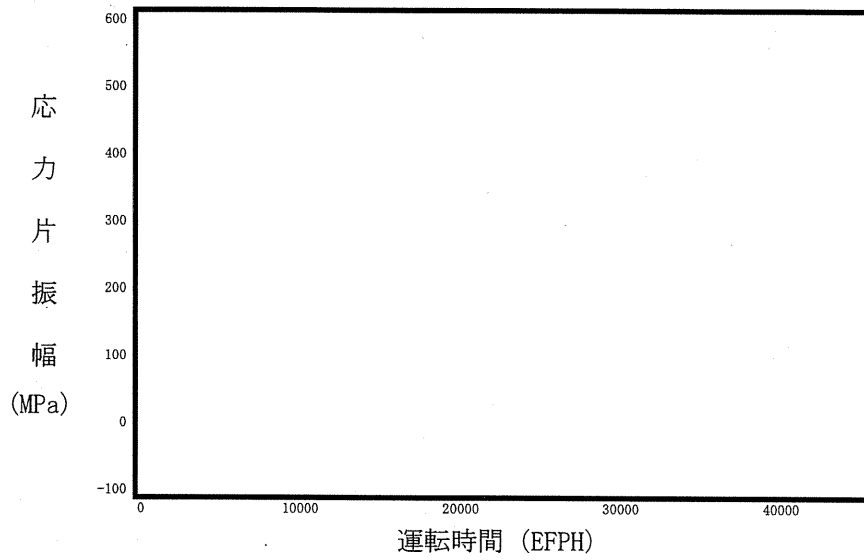
種 類	累積損傷係数	設計基準	設計比 <sup>(注)</sup>
二酸化ウラン 燃料棒	38	≤100	0.38
ガドリニア入り 燃料棒	30	≤100	0.30

(注) 設計基準値に対する評価値の比である。



第3-7図 ジルカロイ-4被覆管の設計疲労曲線<sup>(2)</sup>





第3-8図 被覆管の疲労評価

### 3.4 その他の考慮事項

#### (1) 燃料棒曲がり評価<sup>(3)</sup>

燃料集合体の制御棒案内シムプルは再結晶焼鈍されており、冷間加工応力除去焼鈍された被覆管に比較して照射成長は小さいため、両者の照射成長差により支持格子の燃料棒拘束力が相互に作用し、基本的には燃料棒には圧縮力、制御棒案内シムプルには逆に引張力が作用する。

上記圧縮力により燃料棒には曲げモーメントが発生するが、燃料棒の曲がりは、この曲げモーメントにより燃料棒に発生したクリープ変形が永久変形になったものと初期曲がりを加えたものである。

これらによって生じる燃料棒曲がりに伴う燃料棒間ギャップの減少や燃料棒同士の接触により、被覆管表面温度上昇や燃料棒同士のフレットング摩耗等の曲がり燃料棒健全性（後述の3.4(1)a.項に示す。）や炉心性能（DNB評価、後述の3.4(1)b.項に示す。）に影響を及ぼすため、燃料棒曲がりについて考慮する必要がある。

第3-9図に燃料棒にかかる圧縮力と曲がりの関係を示す。燃料棒の曲がりモデルは、燃料棒と制御棒案内シムプルの照射成長の違い及び支持格子の燃料棒拘束力に依存して発生した軸圧縮力により、燃料棒曲がりが初期曲がりより拡大していくモデルとしている。

ここで、支持格子の燃料棒拘束力は照射によって緩和するため、上記圧縮力は燃焼とともに小さくなることを考慮している。拘束力の照射による緩和実績を第3-10図に示す。

なお、ジルカロイ-4支持格子の燃料棒拘束力の照射による緩和は析出硬化型ニッケル基合金（以下「718合金」という。なお、718合金のうち支持格子の材料は「インコネル-718」という。）支持格子のそれよりも大きいことから、燃料棒に作用する圧縮力は燃料寿命全般に渡ってインコネル-718支持格子燃料よりも小さくなり、燃料棒の曲がりも小さくなる方向であるが、モデルでは安全側の仮定を設け、インコネル-718支持格子燃料の実績を包含する曲がり予測を可能としている。

燃料集合体の燃料棒間隔の閉塞割合を第3-11図に示す。

本申請の燃料集合体は、照射成長が小さいMDA又はZIRLO被覆管を用いるため、燃料棒曲がりは更に小さくなると考えられるが、これは安全側に考慮しない。

a. 接触時の曲がり燃料棒の健全性

前述の燃料寿命末期の予測曲がり量（チャンネル閉塞割合）から、燃料寿命末期における接触チャンネル数を求めると、1チャンネル以下となる。

仮に接触に至るチャンネルが生じるとした場合の評価結果を以下に示す。

(a) 被覆管表面温度の上昇の検討

燃料棒曲がりによる燃料棒間ギャップの減少に伴って、強制対流領域では、熱伝達は悪くなり、被覆管表面温度は上昇する。表面温度がThomの式より得られる温度に達すると局所沸騰が始まる。

局所沸騰の間は、これ以上に曲がりが大きくなっても、被覆管表面温度は上昇しない。

第3-12図に燃料棒間のギャップの大きさと被覆管表面温度についての計算例を示す。

Thomの式から局所沸騰時の被覆管表面温度は、1次冷却材飽和温度+数℃となり、腐食、水素吸収への影響は小さいと考えられる。

(b) 燃料棒同士のフレットング摩耗の検討

イ. 燃料棒が曲がりによって接触に至った場合、水力振動に基づく燃料棒相互間の相対運動によるフレットング摩耗が問題となる。

安全側に燃料棒の相互干渉が生じている期間を  時間としても、燃料棒同士の接触による摩耗量は、被覆管肉厚の  %以下である。したがって摩耗の進行は緩慢でかつ程度も小さく、このメカニズムによる燃料破損は生じないと考えられる。

ロ. 仮に、このメカニズムで破損が生じたとしても、次の点から破損の伝播は防護されている。

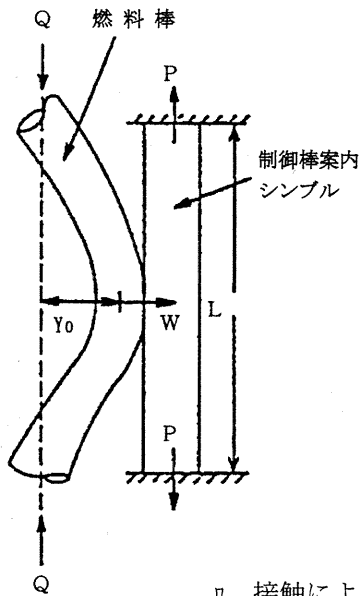
- ・燃料棒同士の接触の確率は小さい。
- ・フレットング摩耗の進行は緩慢で、ほかの原因による燃料破損と同様に、1次冷却材放射能レベルの監視が可能であり、必要な場合に適切な処置を取り得る時間的な余裕があること。

(c) 燃料棒曲がり制御棒案内シンプルに及ぼす影響

燃料棒の曲がりにより、制御棒案内シンプルと燃料棒が接触に至った場合に、制御棒案内シンプルが受ける影響を検討し、制御棒クラスタ挿入の機能について評価した。

イ. 熱膨張差により生じる制御棒案内シンプルの弾性的な変位の検討

燃料棒-制御棒案内シンプルが接触状態にあり、燃料棒が支持格子で拘束された状態で、更に熱膨張差により燃料棒の弾性的な曲がりが増大する場合、制御棒案内シンプルに変位が伝達される。



左図に示す体系で、安全側に燃料棒が支持点で回転自由であり、曲がり形状が、放物線であると仮定すると、固定端の条件にある制御棒案内シンプルの変位は、約  mm 以下となる。

ここで、

- P : 引張力
- W : 接触力
- Q : 軸圧縮力
- L : 制御棒案内シンプル長さ
- Yo : 曲がりによる燃料棒の変位

ロ. 接触による制御棒案内シンプルクリープ変形量の検討

燃料棒と制御棒案内シンプルが接触状態にある場合、通常運転時において制御棒案内シンプルに接触力及び引張力が働くが、これによって制御棒案内シンプルがクリープ変形する可能性がある。

イ. 項と同様の体系で、制御棒案内シンプルに接触力  $W$  及び引張力  $P$  が加わった場合のスパン中央のクリープ変形量を求めると、 時間で約  mm 以下となる。

ハ. 制御棒クラスタ挿入機能

イ. 項、ロ. 項で検討した結果、弾性的な変位は約  mm 以下、クリープ変形量は接触期間  時間で約  mm 以下となり、制御棒と制御棒案内シンプルクリアランス ( mm) に比べて小さい。

したがって、制御棒クラスタ挿入に対して影響を与えないと考えられる。

b. 燃料棒曲がりの炉心性能に及ぼす影響 (DNB評価)

燃料棒曲がりDNB試験結果から、接触曲がりDNBペナルティ  $\delta_{\text{contact}}$  及び85%曲がりDNBペナルティ  $\delta_{\text{pb},85}$  が求められる。

部分曲がりに対するDNBペナルティは、第3-13図に示すように原点と  $\delta_{\text{pb},85}$  と  $\delta_{\text{contact}}$  を直線で結んだもので与えられる。

一方、第3-11図は、曲がりが最大になるクリティカルスパンでの0.3%タイル曲がり  $Y_{0.3}$  (注) を表しているが、これから標準偏差  $\sigma_c$  が次のように求まる。

$$\sigma_c = \frac{Y_{0.3}}{2.75} \dots\dots\dots (3-36)$$

これより、95%確率の投影クリアランス減少量  $\Delta C_{95}$  は、

$\Delta C_{95} = 1.645 \sigma_c$  で与えられる。

$\Delta C_{95}$  が0.85より小さければ、95%確率のDNBペナルティ  $\delta_{95}$  は

$$\delta_{95} = \frac{\Delta C_{95}}{0.85} \delta_{\text{pb},85} \dots\dots\dots (3-37)$$

で与えられ、また、0.85より大きい場合には

$$\delta_{95} = \delta_{\text{pb},85} + \frac{\Delta C_{95} - 0.85}{1 - 0.85} \times (\delta_{\text{contact}} - \delta_{\text{pb},85}) \dots\dots\dots (3-38)$$

で与えられる。

本申請の燃料集合体を装荷する原子炉に関する評価結果を第3-12表に示す。

同表に示すように、燃料棒曲がりDNBペナルティ  $\delta_{95}$  は、改良統計的熱設計手法における最小DNBRの許容限界値の中で、DNBペナルティのための余裕に考慮されている。

---

(注) それよりも大きな曲がりが全体の0.3%に相当する閉塞割合

第3-12表 燃料棒曲がり炉心性能に及ぼす影響 (DNB評価結果)

標準偏差  $\sigma_c$  は第3-11図より次のように求まる。

$$\sigma_c = \frac{Y_{0.3}}{2.75} = \frac{\boxed{\phantom{0.3}}}{2.75} = \boxed{\phantom{0.3}}$$

これより、95%確率の投影クリアランス減少量  $\Delta C_{95}$  は次のように求まる。

$$\begin{aligned} \Delta C_{95} &= 1.645 \sigma_c \\ &= 1.645 \times \boxed{\phantom{0.3}} = \boxed{\phantom{0.3}} \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \delta_{pb,85} &= \boxed{\phantom{0.3}} \\ \delta_{95} &= \frac{\boxed{\phantom{0.3}}}{0.85} \times \boxed{\phantom{0.3}} = 0.038 \end{aligned}$$

となる。

[ 評価結果 ]

1. 燃料棒曲がりDNBペナルティ ( $\delta_{95}$ )	3.8%
2. 熱設計上考慮したDNB余裕 (注)	12.7%

(注) DNB余裕は次式における  $F_{DNBR, Z}^M$  により考慮している。

$$\text{DNB余裕 (\%)} = (1 - F_{DNBR, Z}^M) \times 100$$

ここで、

$$\text{DNBR}_{SL} = \frac{\text{DNBR}_{DL}}{F_{DNBR, Z}^M}$$

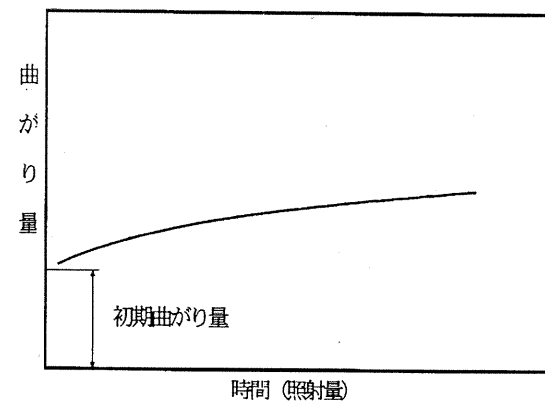
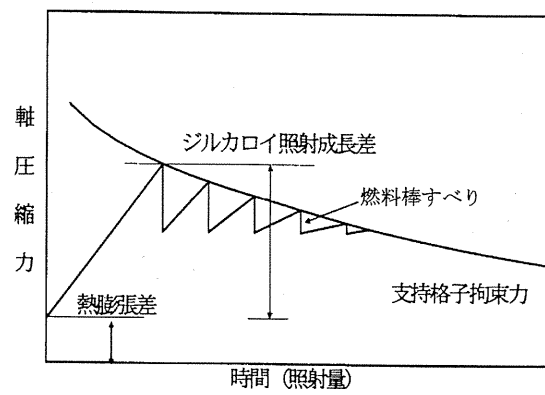
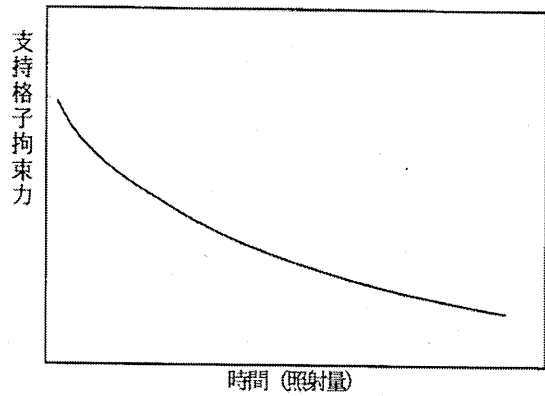
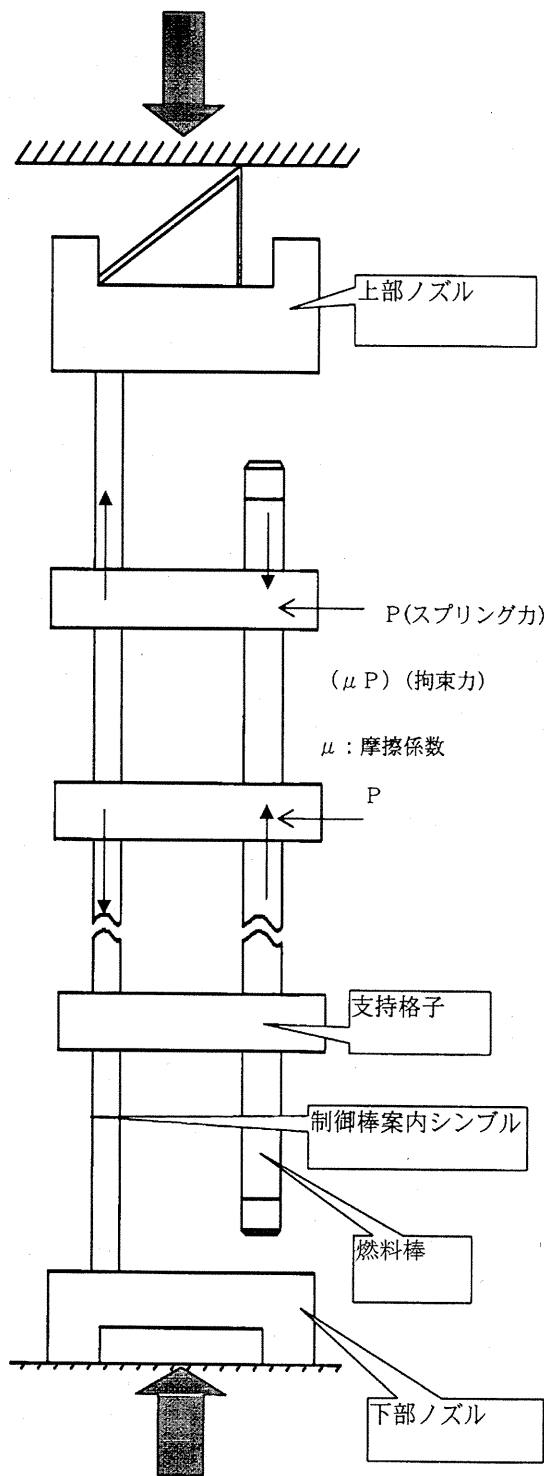
$$1.0 = \text{DNBR}_{DL} \times F_{DNBR, Z}^U$$

$F_{DNBR, Z}^M$  : DNBペナルティのための余裕

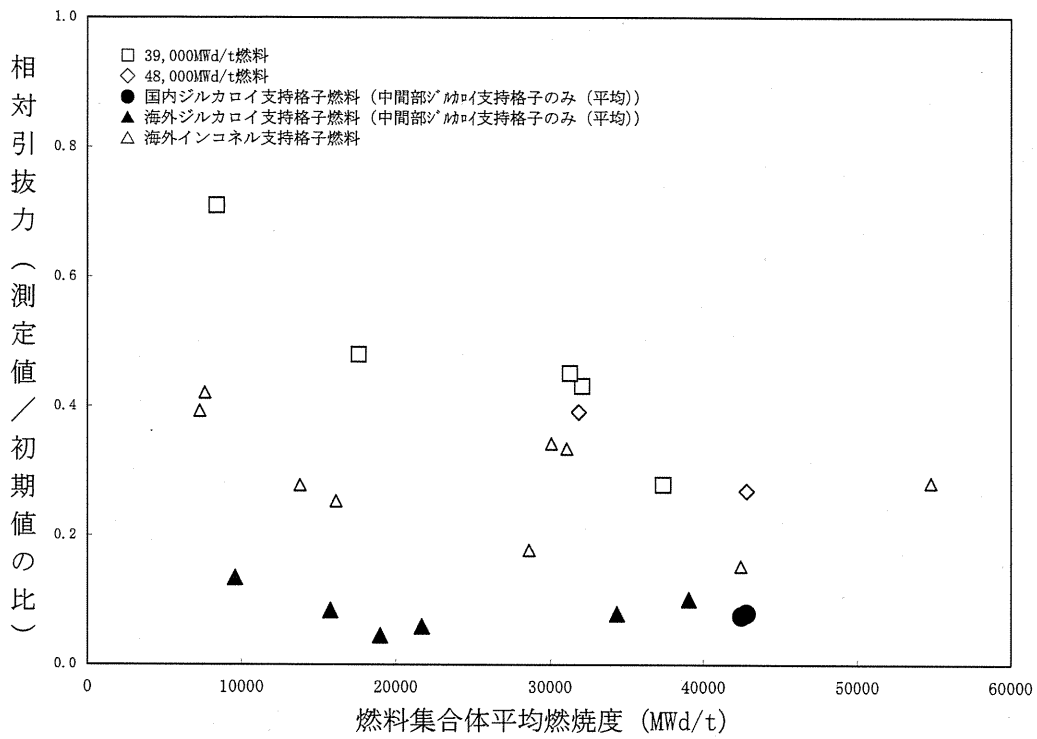
$\text{DNBR}_{SL}$  : 最小DNBRの許容限界値

$\text{DNBR}_{DL}$  : DNB設計限界値

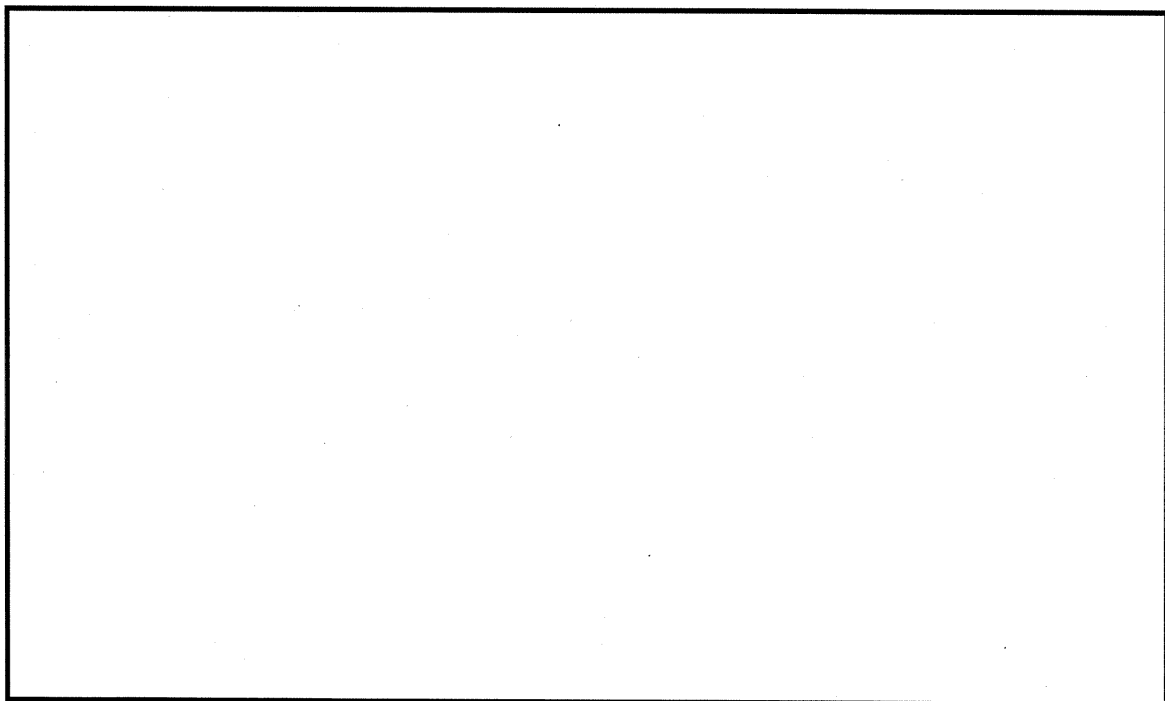
$F_{DNBR, Z}^U$  : DNB相関式の不確定性を表す確率分布と入力パラメータの不確定性に基づく最小DNBRの確率分布を一括して統計的に取り扱った確率分布の不確定性因子



第3-9図 燃料棒にかかる圧縮力と曲がり

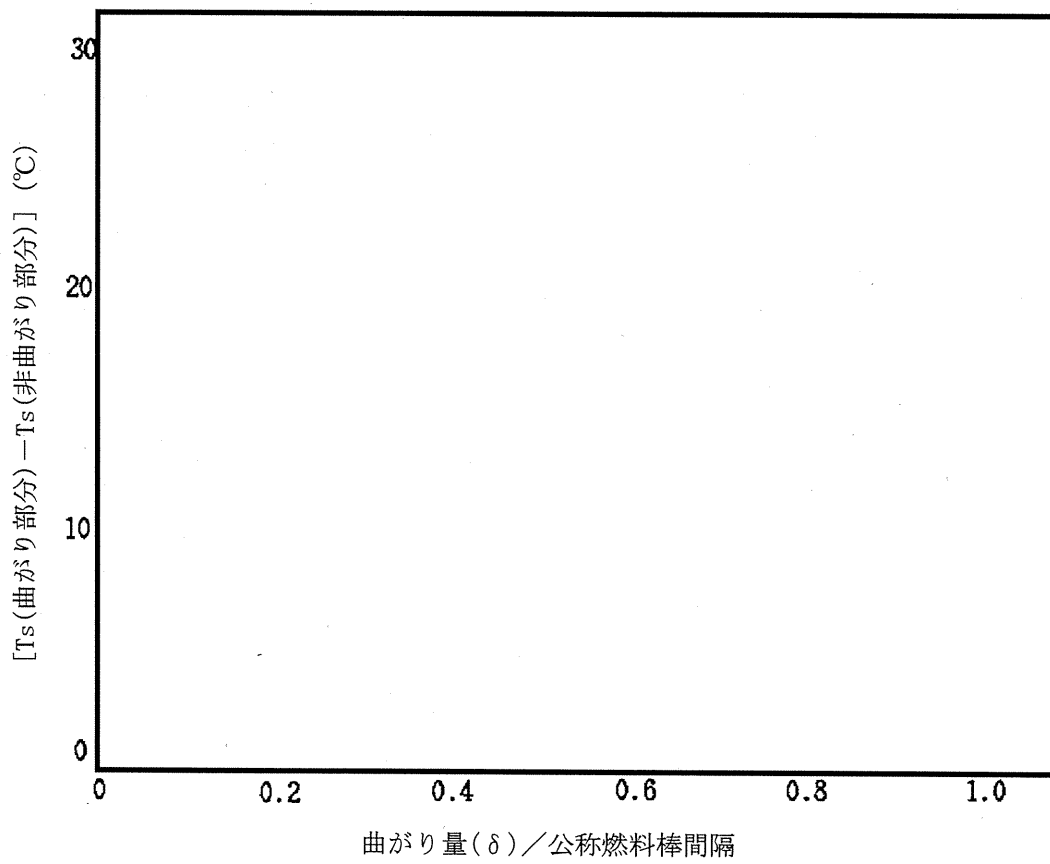


第3-10図 拘束力の照射による緩和実績

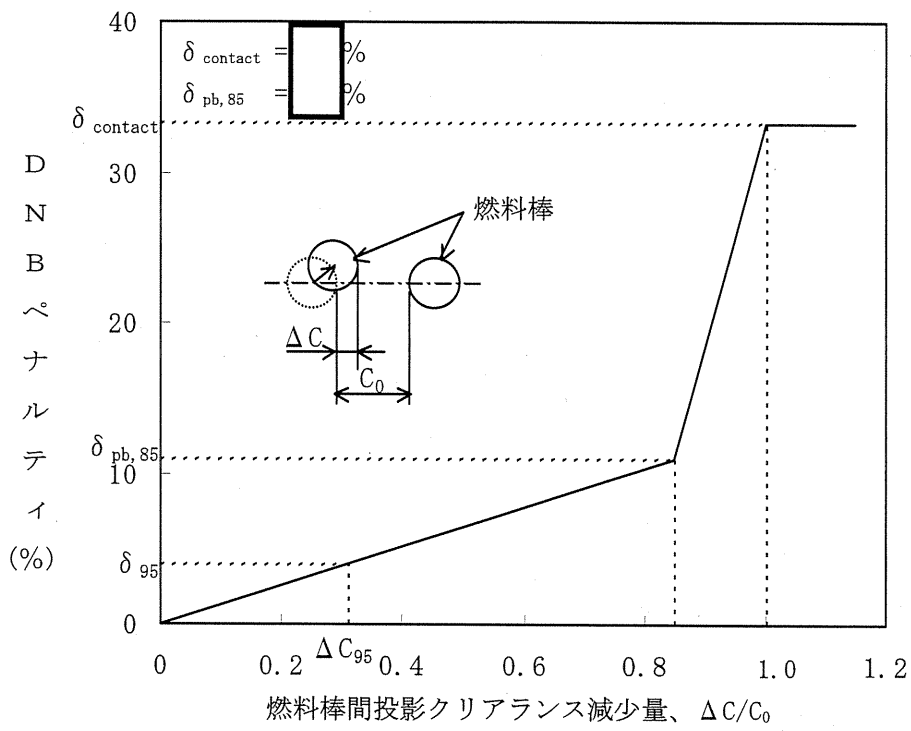


第3-11図 燃料棒 (17行17列、9支持格子) 間隔の閉塞割合 (4)、(5)





第3-12図 曲がり部分のDNB以前の被覆管表面温度



第3-13図 DNBペナルティと燃料棒間投影クリアランス減少量の関係

## (2) トータルギャップ評価

### a. 燃料集合体の伸び

燃料集合体は、制御棒案内シンプルの照射成長によって伸びる。それとともに、燃料棒と制御棒案内シンプルとの製造方法の違いによる照射成長の差が生じることから、制御棒案内シンプルには燃料棒から支持格子の拘束力に応じた軸方向の引張力が働く。この引張力により、制御棒案内シンプルに発生する照射クリープ伸びが永久変形となることによって、更に燃料集合体の伸びが増加する。したがって、燃料集合体の伸びは炉心板と燃料集合体が干渉しないように制限する必要がある。

燃料集合体の伸びについて、国内外燃料の実績を第3-14図に示す。インコネル-718支持格子燃料に対し、照射に伴う燃料棒拘束力の緩和が大きいジルカロイ-4支持格子燃料では燃料集合体の伸びは比較的小さい傾向にあることが認められる。

設計においては、55,000MWd/tまでの燃料集合体の伸びを考慮しても、上部及び下部炉心板と燃料集合体との軸方向ギャップが閉塞することのないように、製造時の燃料集合体の全長を設定している。ここで、55,000MWd/tまでの燃料集合体の伸びはインコネル-718支持格子燃料集合体の伸びの実績データに基づく最確評価にばらつきを考慮して評価している。

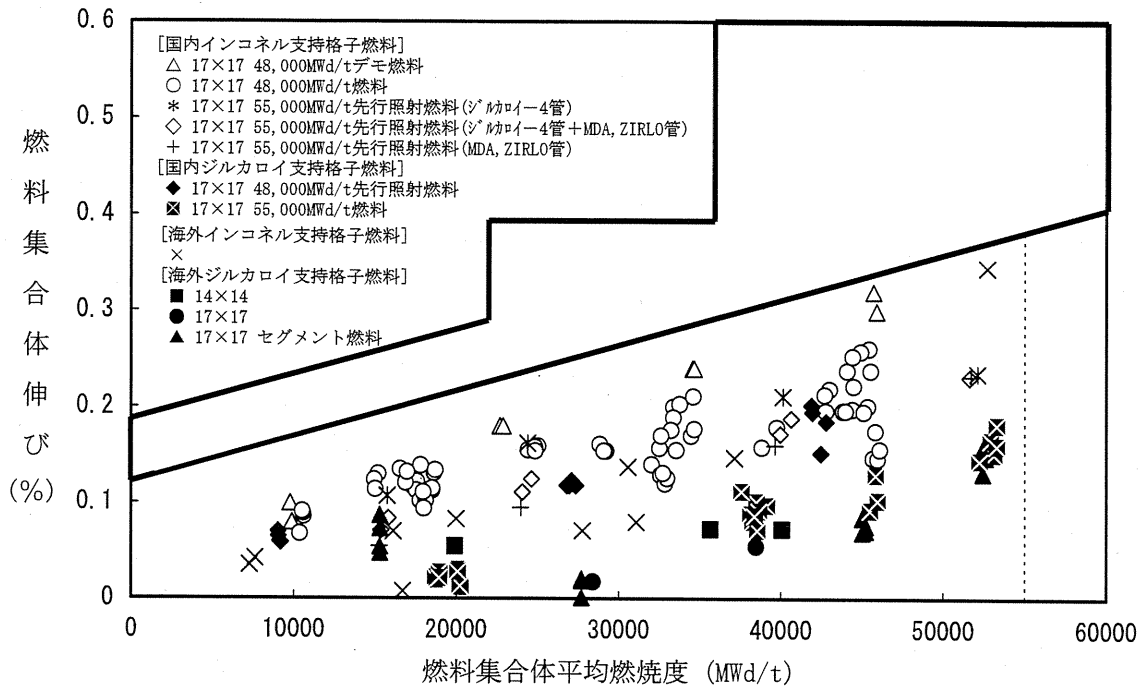
### b. 燃料棒と上部及び下部ノズルの間隔

燃料棒と上部及び下部ノズルとの間隔の合計（以下「トータルギャップ」という。）は、燃料棒の照射成長による伸びが燃料集合体の伸びよりも大きいために、燃焼とともに減少する。したがって、トータルギャップ減少量は燃料棒とノズルが干渉しないように制限する必要がある。

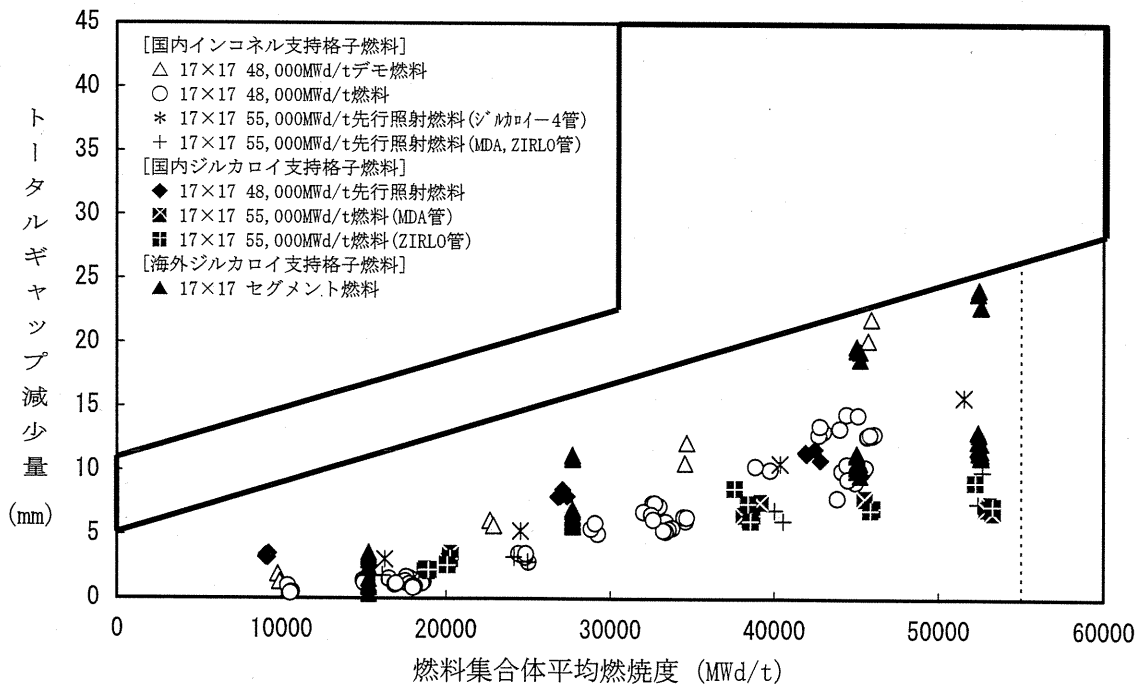
トータルギャップの減少量について、国内外燃料の実績を第3-15図に示す。照射成長がジルカロイ-4より小さいMDA及びZIRLO被覆管を採用する燃料集合体はジルカロイ-4被覆管を採用する燃料集合体と比べ、トータルギャップの減少量が小さくなることが認められる。

設計においては、61,000MWd/t（燃料集合体で55,000MWd/tに相当）までの燃料棒の伸びを考慮してもトータルギャップが閉塞することのないように、製造時の燃料棒と上部及び下部ノズルとの軸方向ギャップを設定している。

ここで61,000MWd/tまでの燃料棒の伸びは、MDA及びZIRLO被覆管の照射成長の実績データに基づき、ばらつきを考慮して評価している。



第3-14図 燃料集合体の伸び (5) ~ (10)



第3-15図 トータルギャップ減少量 (5)、(6)

### (3) 被覆管外面腐食及び水素吸収量評価

燃料の高燃焼度化に伴って、機械的健全性の観点から、被覆管外面腐食及び被覆管水素吸収量について考慮する必要がある。

MDA及びZIRLO被覆管の腐食メカニズムはジルカロイ-4被覆管と同様であり、したがって、MDA及びZIRLO被覆管の腐食モデル式は第3-13表に示すジルカロイ-4被覆管のモデル式と同様とする。ここでMDA及びZIRLO被覆管の腐食特性（原子炉外腐食試験 腐食速度比からジルカロイ-4に対して改良効果約30%<sup>(4)</sup>）を考慮した。MDA及びZIRLO被覆管の原子炉内腐食量について、実測値と予測値を第3-16図に比較した。第3-16図に示すとおり、被覆管腐食モデルは実測値を適切に予測していることから、高燃焼度用FINEコードによりMDA及びZIRLO被覆管の腐食量を適切に評価できる。

また、MDA及びZIRLO被覆管の原子炉内水素吸収量の実測値と予測値を第3-17図に示す。ここでは腐食量の予測値に対し、水素吸収率を約15%としてMDA及びZIRLO被覆管の水素吸収量を計算した。第3-17図に示すとおり、水素吸収モデルは実測値を適切に予測していることから、高燃焼度用FINEコードによりMDA及びZIRLO被覆管の水素吸収量を適切に評価できる。

以上より、原子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高燃焼度用FINEコードにより評価した結果、約7.6%となり、被覆管の機械的健全性の観点から目安としている10%減肉以下<sup>(注)</sup>である。

また、被覆管の最大水素吸収量を高燃焼度用FINEコードにより評価した結果、約520ppmとなり、原子炉外試験及び照射試験により延性が確保されていることが確認できる約800ppm以下である。

---

(注) Vノッチ疵を有するジルカロイ被覆管の機械特性試験結果に基づき、被覆管肉厚の10%深さ程度までは機械的特性への影響がわずかであることを参考に設定。

第3-13表 腐食評価式

$$\begin{aligned}
 Z &= \left[ A_1 \exp\left(-\frac{Q_1}{RT}\right) \cdot t \right]^{1/3} && (Z < Z_1) \\
 &= A_2 \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right) (t - t_1) + Z_1 && (Z_1 \leq Z < Z_2) \\
 &= A_3 \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right) (t - t_2) + Z_2 && (Z_2 \leq Z)
 \end{aligned}$$

ここで、

$Z$  : 被覆管酸化膜厚さ

$Z_1$  : 被覆管酸化膜第1遷移点

$Z_2$  : 被覆管酸化膜第2遷移点

$t$  : 時間

$t_1$  : 第1遷移点到達時間

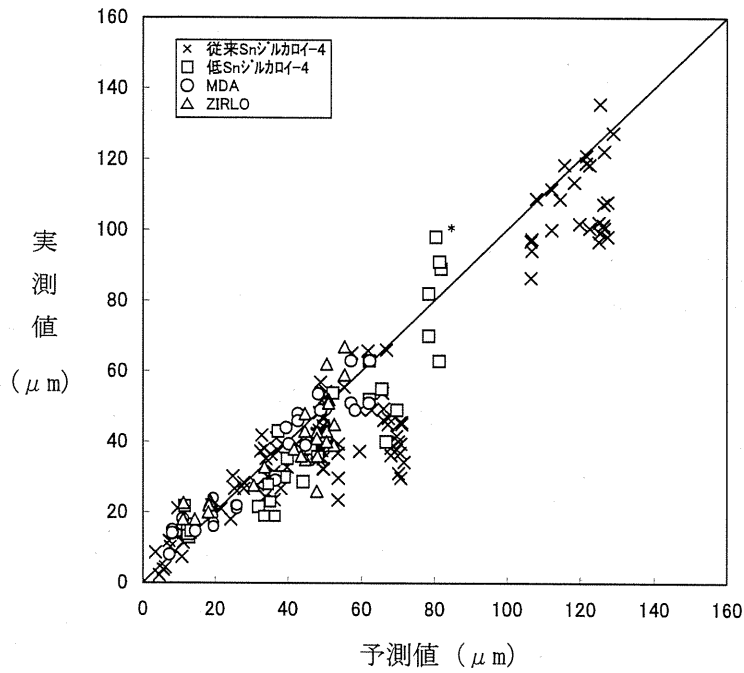
$t_2$  : 第2遷移点到達時間

$Q_1, Q_2$  : 第1遷移点前後の活性化エネルギー

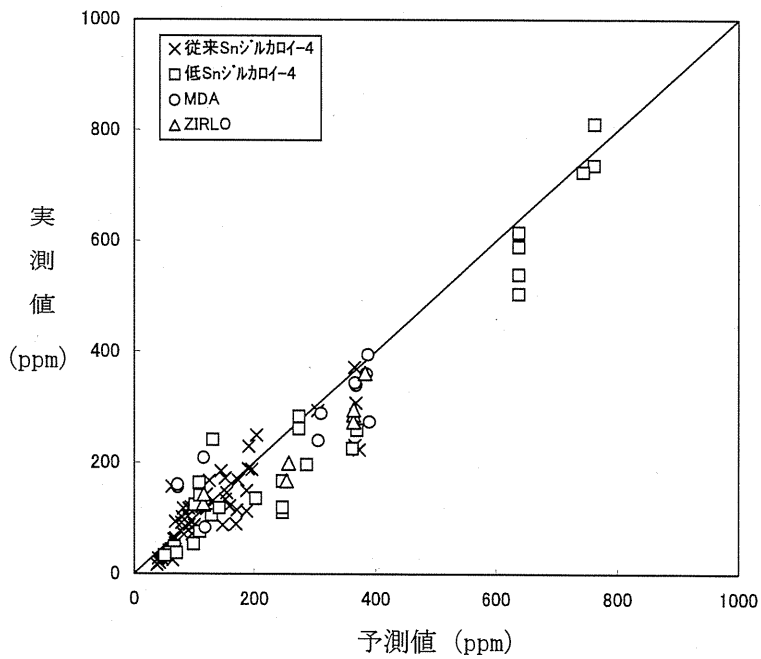
$R$  : 気体定数

$A_1, A_2, A_3$  : 定数

$T$  : 酸化膜-金属境界温度



第3-16図 被覆管腐食量（最大酸化膜厚）の実測値と予測値の比較<sup>(11)</sup>、<sup>(12)</sup>



第3-17図 被覆管水素吸収量の実測値と予測値の比較<sup>(12)</sup>

#### (4) PCI評価

MDA及びZIRLO被覆管の出力ランプ試験データを第3-18図に示す。被覆管のPCI破損限界は、高燃焼度域までPCI破損しきい値以上であることが確認でき、MDA及びZIRLO被覆管に対して安全側にPCI破損しきい値が適用できる。

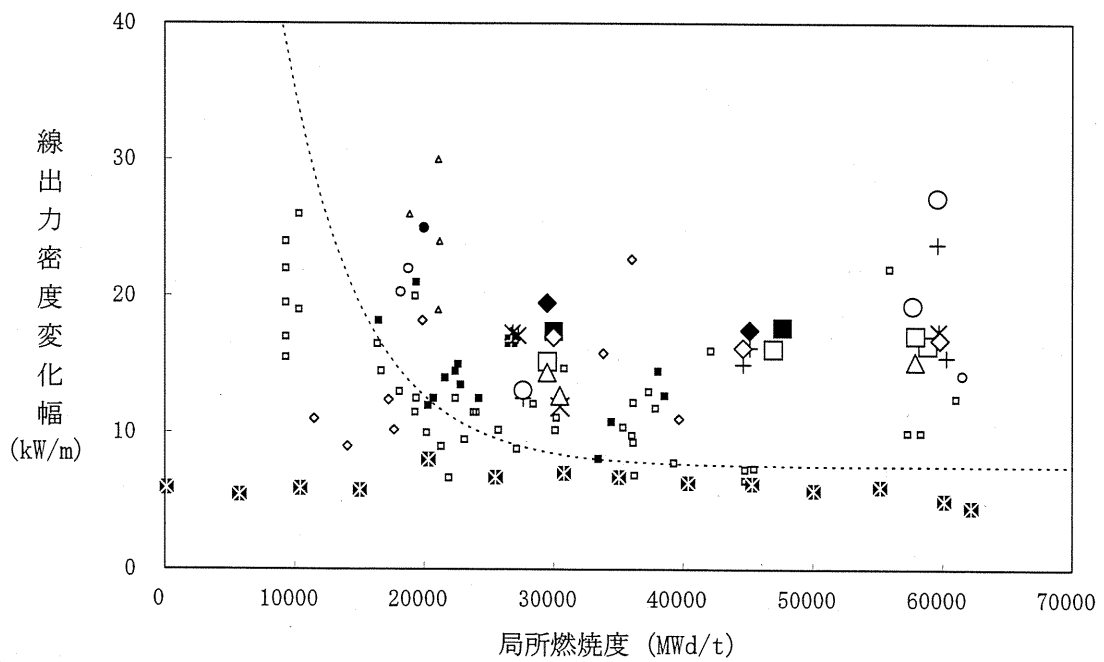
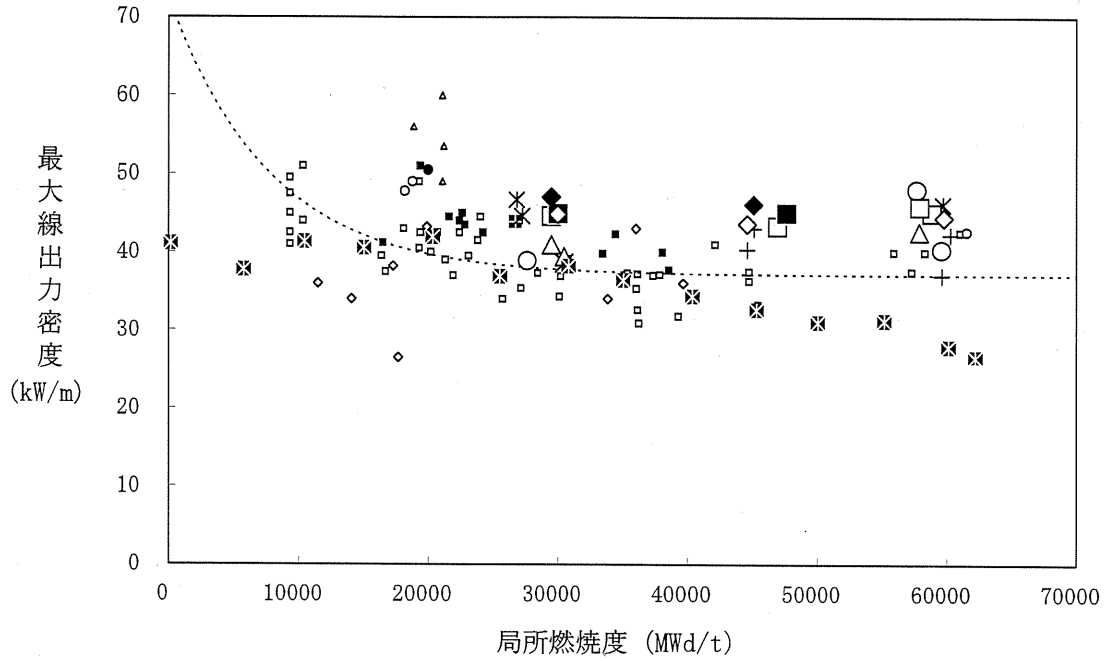
PCI破損は、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にPCI破損しきい値を超えた場合に起こることが経験的に知られている。

第3-18図に示したとおり運転時の異常な過渡変化時の出力は、PCI破損しきい値以下であり、PCI破損は発生しない。また、ガドリニア入り燃料棒では出力が高くないように、濃縮度を低下させているのでPCI破損は生じない。

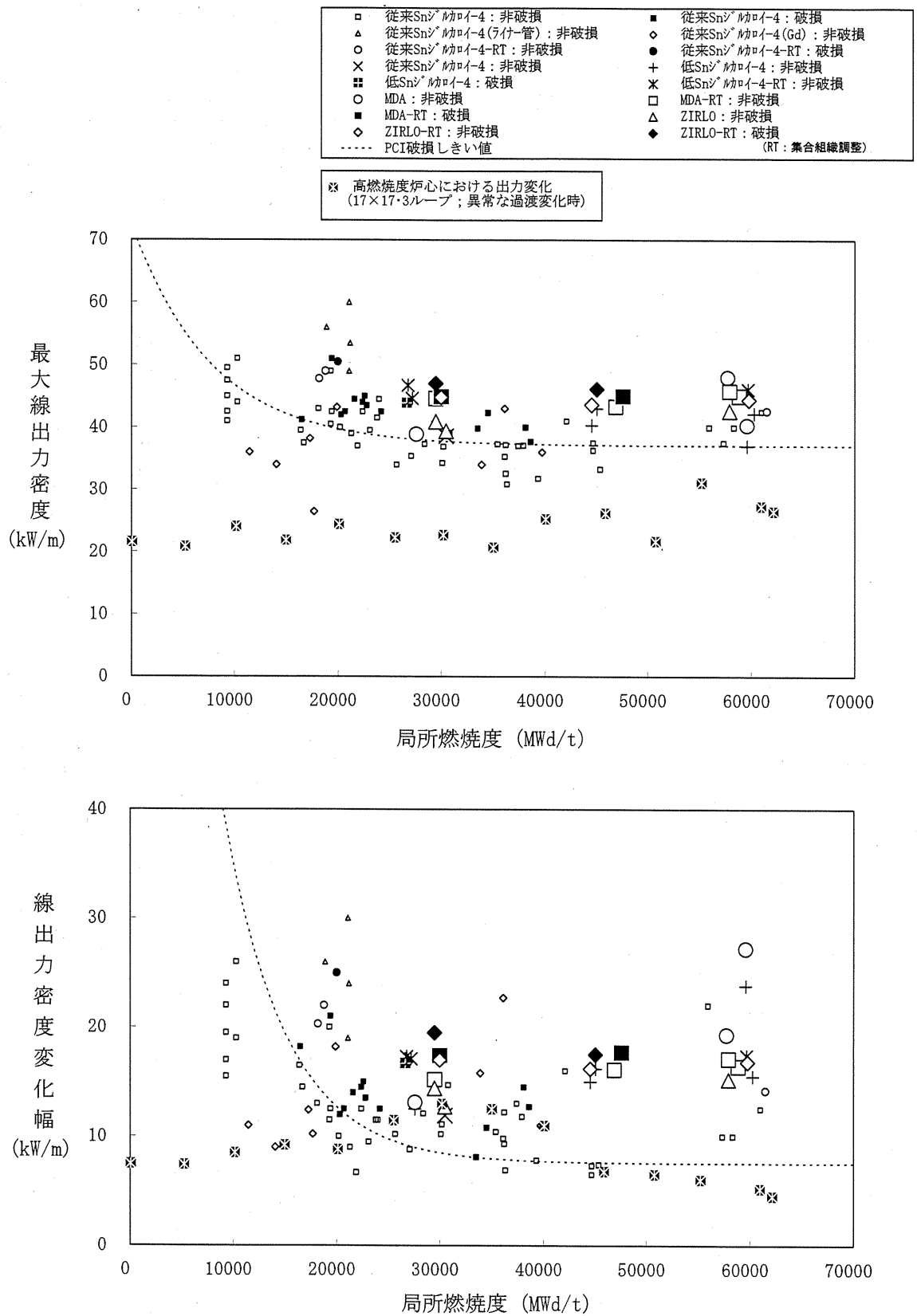


- |                                       |                                   |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| □ 従来Sn <sup>2+</sup> 炉内-4：非破損         | ■ 従来Sn <sup>2+</sup> 炉内-4：破損      |
| △ 従来Sn <sup>2+</sup> 炉内-4(ラiser管)：非破損 | ● 従来Sn <sup>2+</sup> 炉内-4(Gd)：非破損 |
| ○ 従来Sn <sup>2+</sup> 炉内-4-RT：非破損      | ◆ 従来Sn <sup>2+</sup> 炉内-4-RT：破損   |
| × 従来Sn <sup>2+</sup> 炉内-4：非破損         | +                                 |
| ⊠ 低Sn <sup>2+</sup> 炉内-4：破損           | ⊕ 低Sn <sup>2+</sup> 炉内-4：非破損      |
| □ MDA：非破損                             | ⊗ 低Sn <sup>2+</sup> 炉内-4-RT：非破損   |
| □ MDA-RT：破損                           | □ MDA-RT：非破損                      |
| ◆ ZIRLO-RT：非破損                        | △ ZIRLO：非破損                       |
| ◆ ZIRLO-RT：破損                         | ◆ ZIRLO-RT：破損                     |
| ----- PCI破損しきい値                       | (RT：集合組織調整)                       |

※ 高燃焼度炉心における出力変化  
(17×17・3ループ；異常な過渡変化時)



第3-18図 (1) 被覆管の出力ランプ試験結果 (6)、(13) ~ (15)  
(最大線出力密度が最大の場合の出力変化)



第3-18図 (2) 被覆管の出力ランプ試験結果 (6)、(13) ~ (15)  
 (線出力密度変化幅が最大の場合の出力変化)

(5) クリープコラプス評価

燃料棒が非加圧又は低加圧で燃料ペレットに大きな焼きしまりが生じると、ペレットスタックの一部に軸方向のギャップが生じる可能性がある。その位置で1次冷却材圧力による被覆管の外圧クリープで偏平化し、座屈して破損に至る現象をクリープコラプスという。

初期のPWR燃料で発生したクリープコラプスについては、ヘリウム加圧の採用、燃料ペレットの焼きしまり特性の改善により、現在では発生していない。

高密度ペレットの照射中の焼きしまりは小さいこと、原子炉内クリープが小さいMDA又はZIRLO被覆管を採用していること、また、ヘリウム加圧を採用していることからクリープコラプスは発生しないと判断できる。

(6) フレッシング摩耗評価

フレッシング摩耗は、接触面の周期的相対振動により起こる損傷であるが、燃料集合体でこの現象が起こる可能性があるのは燃料棒と支持格子の接触部であり、摩耗の程度は、燃料棒と支持格子の材料の組み合わせや、支持格子のばね力に依存する。

燃料棒と支持格子の材料について、ジルカロイ-4、MDA、ZIRLOの3種の被覆管の材料と、インコネル-718、ジルカロイ-4の2種の支持格子とのそれぞれの組合せを設定し、摩耗試験を実施している。試験で計測された摩耗体積の比を、ジルカロイ-4被覆管を1.0として規格化して、第3-19図及び第3-20図に示す。MDA及びZIRLO被覆管の摩耗は、ジルカロイ-4被覆管の摩耗と同程度であり、摩耗特性は同等であると考えられる。

したがって、3種類の被覆管の摩耗特性が同等であることより、以下に示すジルカロイ-4被覆管に対して支持格子のばね力を変えて実施した摩耗試験に基づき評価する。

a. ジルカロイ-4被覆管とインコネル-718支持格子のフレッシング摩耗

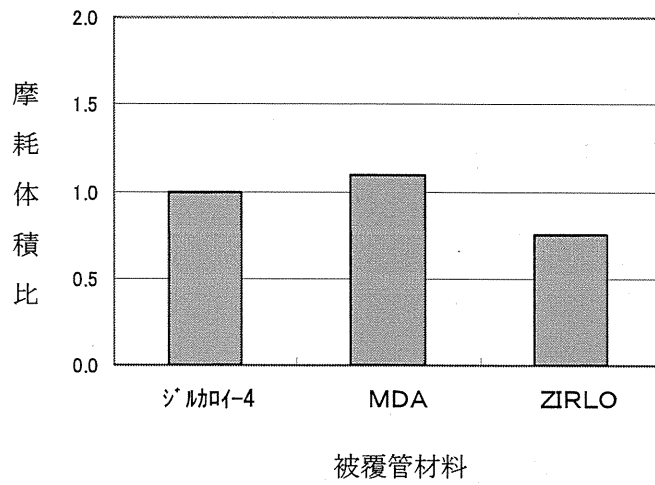
流水試験結果によると、ジルカロイ-4被覆管とインコネル-718支持格子の間でのフレッシング摩耗は、燃料寿命末期での支持格子ばね力においても発生しないが、それ以下あるいはばね力がない場合にはわずかながら発生していることを確認している。この試験結果を基に、全寿命を4サイクルとし、評価上はサイクル1のばね力を [ ] に、また、サイクル2、3、4のばね力を [ ] と安全側に仮定して被覆管の摩耗減肉量を求めると、約 [ ] mmであり被覆管肉厚の10%より小さいことから、被覆管の健全性は確保される。

なお、下部支持格子部におけるフレッシング摩耗については、本設計では寿命中下部支持格子が下部端栓を支持する設計となっており、摩耗が発生したとしても被覆管が貫通に至ることはなく問題ない。

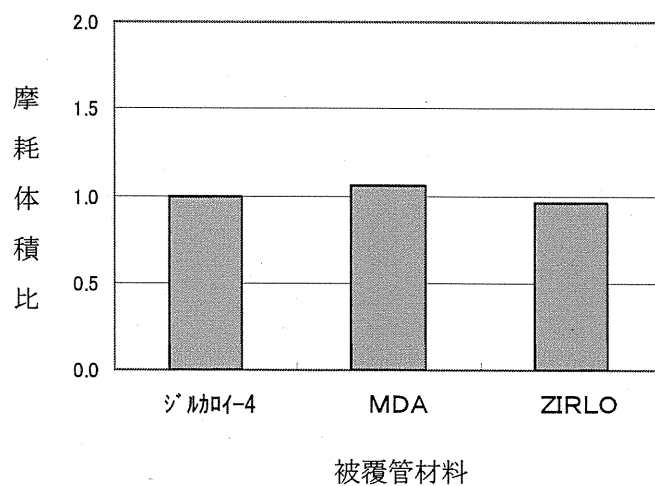
b. ジルカロイ-4被覆管とジルカロイ-4支持格子のフレッシング摩耗

流水試験によると、ジルカロイ-4被覆管とジルカロイ-4支持格子の間でのフレッシング摩耗は、上記と同様の結果であ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 [ ] 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評価す

ると、mm以下と被覆管肉厚の10%より小さいことから、被覆管の健全性は確保される。



第3-19図 インコネル-718支持格子との組合せにおける被覆管材料の摩耗体積比の比較



第3-20図 ジルコイ-4支持格子との組合せにおける被覆管材料の摩耗体積比の比較

#### 4. 燃料集合体の強度計算

##### 4.1 燃料集合体の設計基準

燃料集合体は、燃料輸送時及び取扱い時並びに運転時に次の基準を満たすように設計し、その構成部品の健全性を確保している。

- ・燃料輸送及び取扱い時の6Gの設計荷重に対して、著しい変形を生じないこと。
- ・通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において生じる荷重に対する応力は、原則としてASME Sec. III<sup>(注1)</sup>に基づいて評価されること。

強度評価の対象となる燃料集合体の構成部品、荷重及び評価基準を第4-1表及び第4-2表に示す。

なお、これらの基準は、原子力規制委員会規則「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（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第5号）」、技術基準規則及び原子炉安全専門審査会内規「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について（昭和51年2月16日）」に記載されている考え方に基づいている。

---

(注1) ASMEでは、基本的に許容値の最小単位である設計応力強さ ( $S_m$ ) を0.2%耐力の2/3あるいは引張強さの1/3のいずれか小さい方としている（オーステナイト系ステンレスの場合、 $2/3S_y$  のかわりに $0.9S_y$ を用いてもよい場合がある）。設計応力強さを0.2%耐力の2/3にしているのは、膜応力による降伏条件に対して1.5倍の安全率を見るために定められたものである。引張強さの1/3という制限を設けているのは、引張強さが材料の破壊の観点から究極的な制限となるため、許容値を引張強さからの安全率を一定以上確保する考え方による。一般的な材料では0.2%耐力に比べて引張強さは約2倍以上あるが、冷間加工などにより、耐力を増加させた材料についても、 $S_m$ 値が引張強さに対して一定以上の余裕を確保する観点で定められたものである。

第4-1表 燃料輸送及び取扱い時の燃料集合体の評価項目

(軸方向荷重に対する評価、設計荷重=6G)

構成部品	考慮点	材 料	応力 <sup>(注1)</sup>	許 容 値 <sup>(注1)</sup>
上部ノズル、 下部ノズル	上部及び下部ノズルの応力評価を行う。	ステンレス鋼	$P_m + P_b$	1.5Sm
上部ノズル- 制御棒案内シン ブル結合部	荷重分布を考慮し、 拡管部、溶接部及び スリーブの強度評価 を行う。	ステンレス鋼 ジルカロイ-4	—	結合部の強度試験に基づく 荷重変位曲線の弾性限界荷 重
支持格子- 制御棒案内シン ブル結合部	荷重分布を考慮し、 拡管部の強度評価を 行う。	ステンレス鋼 ジルカロイ-4	—	結合部の強度試験に基づく 荷重変位曲線の弾性限界荷 重
制御棒案内シン ブル	荷重分布を考慮し、 応力評価を行う。	ジルカロイ-4	$P_m$	Sm

第4-2表 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における燃料集合体の評価項目

構成部品	考慮点	材 料	応力 <sup>(注1)</sup>	許 容 値 <sup>(注1)</sup>
上部ノズル、 下部ノズル	スクラム時の衝撃力	ステンレス鋼	$P_m + P_b$	1.5Sm
制御棒案内シン ブル	スクラム時の衝撃力	ジルカロイ-4	$P_m$ <sup>(注2)</sup>	Sm
	運転時荷重			
上部ノズル押え ばね	機械設計流量時	718合金	—	燃料集合体の浮き上がり防 止のための必要ばね力
	ポンプオーバースピ ード時		—	上部ノズル押えばねの塑性 変形が進行しないたわみ量

(注1) 応力は以下に示すASME Sec. IIIの炉心支持構造物の分類に従った。

$P_m$  : 一次一般膜応力

$P_b$  : 一次曲げ応力

$S_m$  : 設計応力強さ (ASMEに従う。但し、ジルカロイ-4については、0.2%耐力の2/3あるいは引張強さの1/3のいずれか小さい方)

(注2) ASME Sec. IIIでは二次応力まで考慮している。しかし、燃料集合体では以下の理由により考慮していない。

- ・支持格子と燃料棒がすべることにより、燃料棒と制御棒案内シンプルの熱膨張差、照射成長差を吸収し、しかも燃料棒拘束力は照射により緩和していくこと。
- ・制御棒案内シンプルはジルカロイ-4材であり、一般原子炉機器で採用されているステンレス鋼に比べクリープしやすく応力緩和すること。

## 4.2 燃料集合体強度評価方法

4.1項で述べた設計基準に従って強度評価を行う。以下にこれら評価方法の概要を述べる。

また第4-1図に燃料集合体強度評価フロー図を示す。

燃料集合体の強度評価においては、燃料輸送及び取扱い時に加わる6Gの設計荷重並びに通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において加わる荷重に対して、各構成要素が著しい変形を生じないための強度を有しており、その機能を保持していることを確認する。

燃料集合体の構成部品であるジルカロイ-4及びステンレス鋼は高速中性子照射により強度は増加する。また、718合金は高速中性子照射により耐力は増加し、引張強さはわずかに変化する。これらより燃料集合体の強度評価は、安全側に未照射材の強度を用いる。

また、燃料集合体は照射により全長が伸びるため、上部ノズル押えばね力は照射に伴い増加する。このため、上部ノズル押えばね機能の評価はばね力の最も小さい未照射状態における評価を実施する。

### 4.2.1 燃料輸送及び取扱い時における評価方法

燃料輸送・取扱い時の燃料集合体各部に加わる荷重の概略図を第4-2図に示す。

燃料輸送時に急停止あるいは急加速により、上部ノズルあるいは下部ノズルを圧縮する方向に荷重が加わるが、荷重の大きさは輸送容器に装備されたショック指示計にて監視し、6Gの設計荷重内にあることを確認している。

一方、燃料取扱い時、取扱いクレーンによる荷重はクレーンが燃料集合体を吊り上げたときに上部ノズルに引張荷重が加わり、着底したときに下部ノズルに圧縮荷重が加わるが、荷重の大きさは使用されるクレーンの特性で決まり、3~4G以下である。

以上を考慮して、設計荷重は6Gを設定し評価している。但し6G以上の荷重があった場合には再評価を行う。

#### (1) 上部及び下部ノズルの応力評価

上部ノズルは、燃料輸送時及び燃料取扱い時で、上述のように荷重の加わり方が異なるため、それぞれの荷重条件を考慮し、有限要素法にて最大応力をABAQUSコードを用いて評価する。求められた応力をもとにASME Sec. IIIの考え方に則り、一次一般膜+一次曲げ応力強さ ( $P_m+P_b$ ) を評価し、許容値 ( $1.5S_m$ ) と比較して、塑性変形が生じないことを確認する。

一方、下部ノズルには、燃料輸送時及び燃料取扱い時ともに、圧縮荷重が加わるので、そのときの最大応力をABAQUSコードを用いて有限要素法にて評価する。求められた応力をもとに上部ノズルと同様に、一次一般膜+一次曲げ応力強さ ( $P_m+P_b$ ) を評価し、許容値 ( $1.5S_m$ ) と比較して、塑性変形が生じないことを確認する。

#### (2) 上部ノズルー制御棒案内シンプル結合部強度評価

上部ノズルー制御棒案内シンプル結合部が6G荷重を受けた際に、1本当たりに作用する荷重を評価する。上部ノズルー制御棒案内シンプル結合部は、応力強さで評価することは困難であるため、試験により1本あたりの許容荷重<sup>(註1)</sup>を求めており、この許容値と比較して弾性限界荷重を超えないことを確認する。



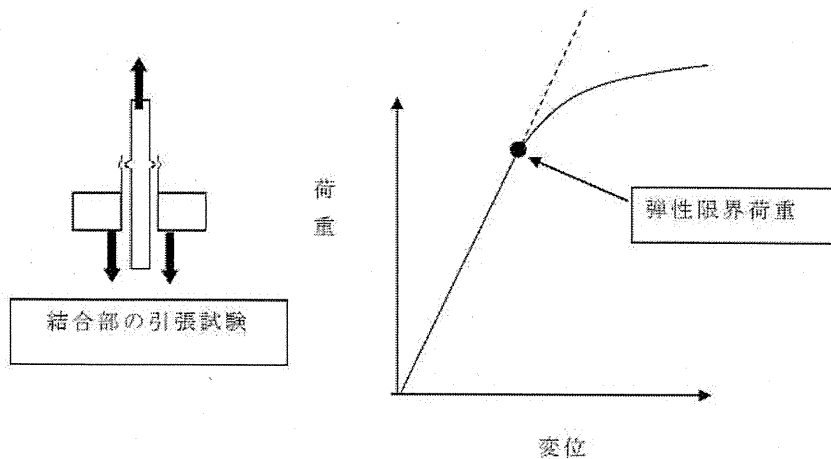
(3) 支持格子－制御棒案内シンプル結合部強度評価

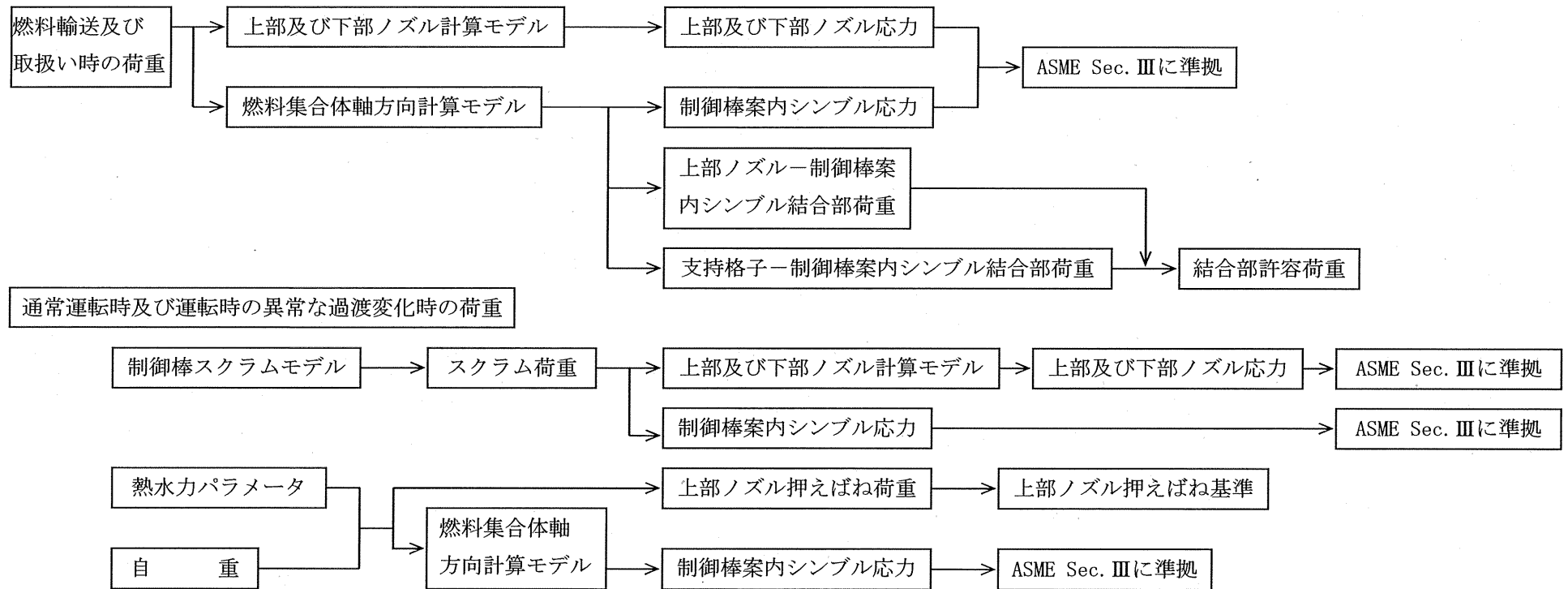
支持格子－制御棒案内シンプル結合部は、制御棒案内シンプルと燃料棒に荷重が分担されるが、保守的に支持格子－制御棒案内シンプル結合部がすべての荷重を受けた際の、1本あたりに作用する荷重を評価する。支持格子－制御棒案内シンプル結合部は、応力強さで評価することは困難であるため、試験により1本あたりの許容荷重<sup>(注1)</sup>を求めており、この許容値と比較して弾性限界荷重を超えないことを確認する。

(4) 制御棒案内シンプル応力評価

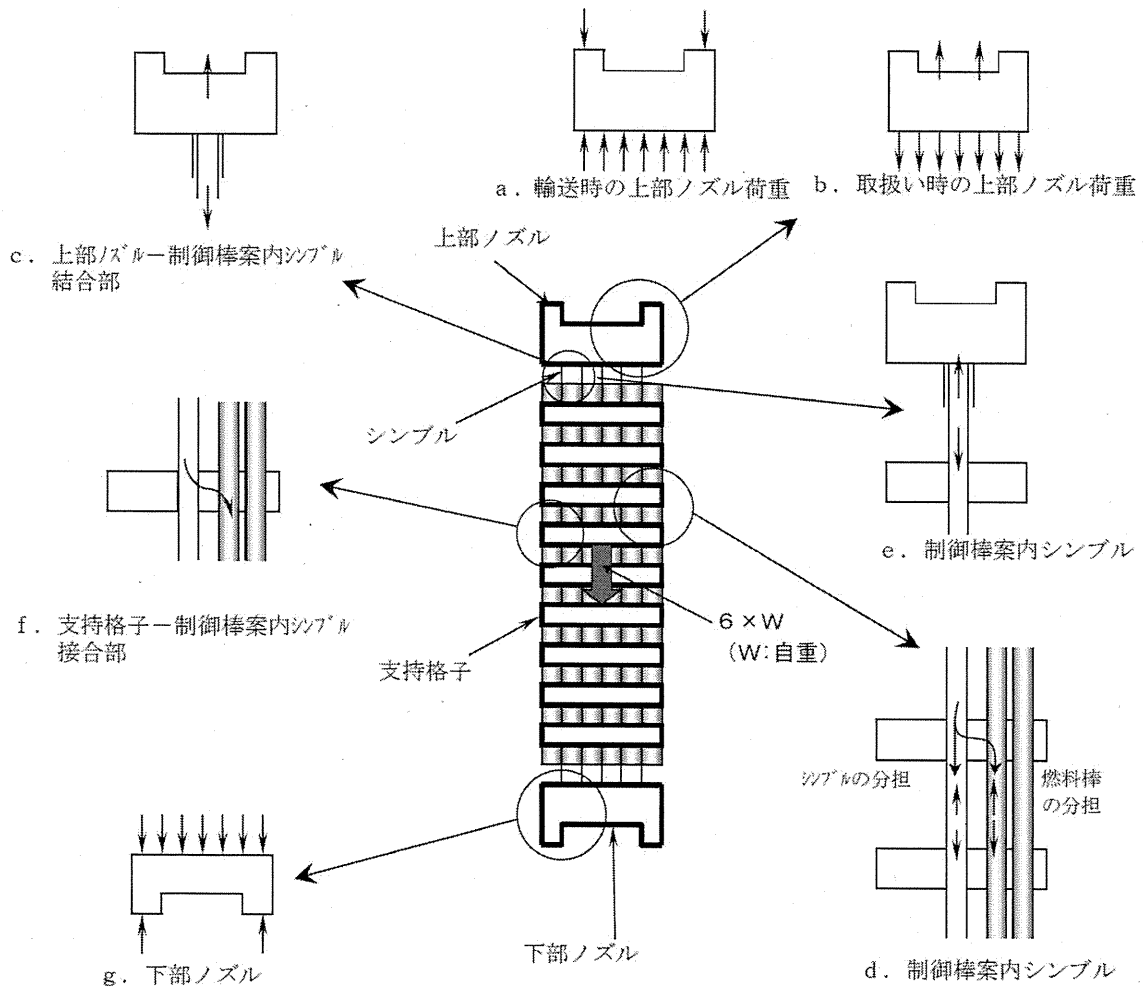
制御棒案内シンプルは、制御棒案内シンプルと燃料棒に荷重が分担されるが、上部ノズル直下の部分については、燃料棒の分担がなく、全荷重を受ける。したがって、6G荷重すべてを制御棒案内シンプルの断面積で割ったものが応力となる。このときに生じる制御棒案内シンプルの応力を評価する。

(注1) 結合部の許容荷重は、引張試験により結合部の変形が弾性変形内にとどまる範囲の荷重（弾性限界荷重）としている（下図参照）。

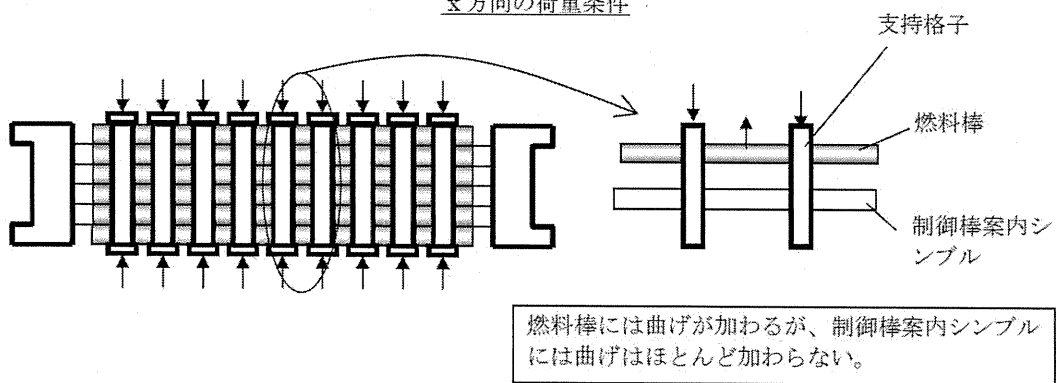




第4-1図 燃料集合体強度評価フロー図



x方向の荷重条件



y方向の荷重条件

第4-2図 燃料集合体にかかる荷重

#### 4.2.2 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における評価方法

##### (1) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における応力評価

通常運転時においては、水力的揚力(L)、浮力(B)、ホールドダウン力(F)、自重(W)を考慮して応力評価を行う。第4-3図に通常運転時に作用する荷重を示す。また、運転時の異常な過渡変化時においては通常運転時荷重に加えて、スクラムによる荷重を考慮して応力評価を行う。

スクラム時の荷重としては、

a. ダッシュポット部<sup>(注1)</sup>に制御棒クラスタ<sup>(注2)</sup>が挿入され、落下速度が急激に減速する際の衝撃力(SF)

b. 上部ノズルに制御棒クラスタが着底する際の衝撃力(SC)が挙げられる。a. はダッシュポット部よりも下部に対して、b. は上部ノズルより下部に対して荷重が作用する。また、これら2つの荷重は同時に発生しない。

したがって、上部ノズルに対してはb. を、ダッシュポット部及び下部ノズルに対してはa. 又はb. の大きい方を考慮して応力評価を行う。第4-4図に通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に作用する荷重を示す。

なお、燃料寿命中にスクラムが $\square$ 回<sup>(注3)</sup>と設定しても累積疲労損傷係数は上部ノズルで $\square$ %、下部ノズルで $\square$ %、制御棒案内シンブルで $\square$ %程度であり、疲労に与える影響は小さい。

---

(注1) 制御棒案内シンブルの下部の径を細くすることによって内部に保有する1次冷却材の抵抗により、制御棒クラスタ落下による燃料集合体への衝撃を減少させる部分

(注2) 1つの制御棒スパイダ及び24本の制御棒から構成された構造物

(注3) 繰り返し回数は、 $\square$ 回と設定している。

(2) 上部ノズル押えばねの機能評価

上部ノズル押えばねに要求される機能は次のとおりである。

- a. 機械設計流量に対して、燃料集合体の浮き上がりを防止する。
- b. 運転時の異常な過渡変化時の事象であるポンプオーバースピード<sup>(注1)</sup>条件で、上部ノズル押えばねの塑性変形は進行しない。

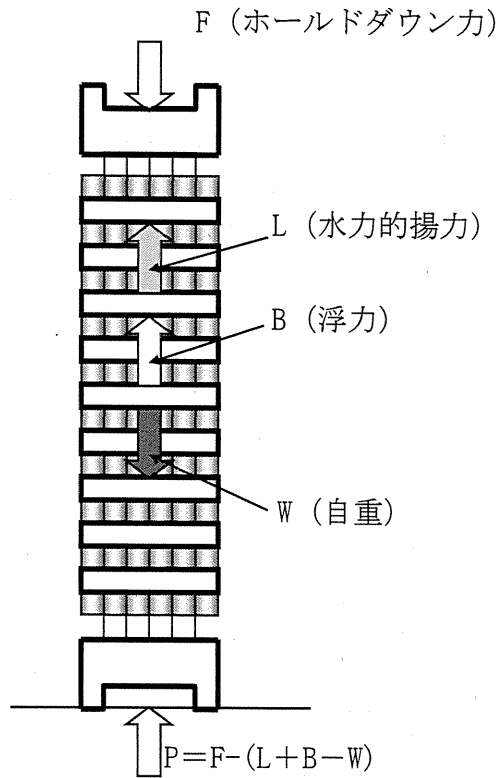
通常運転時の燃料集合体の評価は、最も条件が厳しい燃料寿命初期において行い、浮き上がり方向の荷重としては、水力的揚力及び浮力を、それと反対方向の荷重としては、燃料集合体自重及びばね力を考慮する。

運転時の異常な過渡変化時の事象であるポンプオーバースピード条件下では、

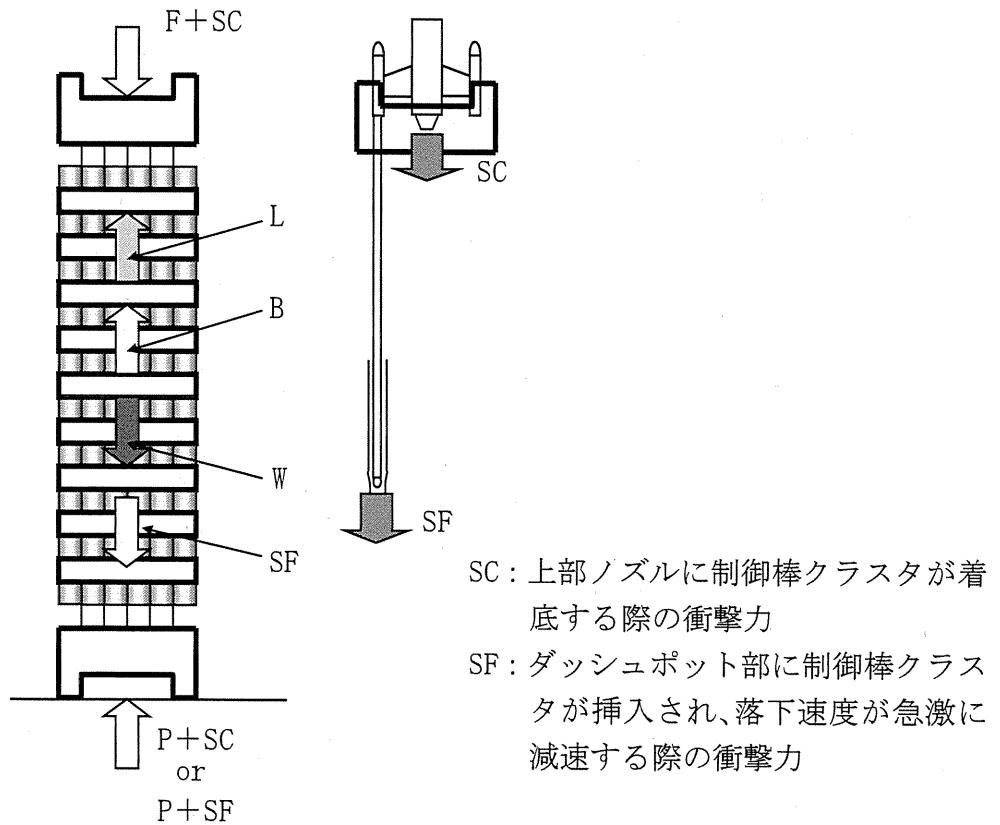
の流量に対し、上部ノズル押えばねの健全性を評価する。

---

(注1) 運転中の異常な過渡変化として急激な負荷急減が発生した場合、タービン及び発電機の回転数が増加し、それに伴い1次冷却材ポンプの回転数が増加することにより、1次冷却材流量が増加する現象



第4-3図 通常運転時荷重



第4-4図 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時荷重

### 4.3 強度評価結果

#### 4.3.1 燃料輸送及び取扱い時における評価結果

##### (1) 上部及び下部ノズルの応力評価

第4-3表に上部及び下部ノズルに生じる最大応力と許容応力を示す。上部ノズルの最大応力は上部ノズル外周部で発生し、下部ノズルの最大応力は下部ノズルプレートの内側で発生するが、永久変形は生じない。

##### (2) 上部ノズル—制御棒案内シンプル結合部強度評価

第4-3表に結合部に生じる最大荷重と許容荷重を示す。最大荷重は外周コーナー位置にある上部ノズルスリーブで発生するが、永久変形は生じない。

##### (3) 支持格子—制御棒案内シンプル結合部強度評価

第4-3表に結合部に生じる最大荷重と許容荷重を示す。最大荷重は支持格子拘束力の大きいジルカロイ—4支持格子（中間部支持格子）の結合部で発生するが、永久変形は生じない。

##### (4) 制御棒案内シンプル応力評価

第4-3表に制御棒案内シンプルに生じる最大応力と許容応力を示す。最大応力は外周コーナー位置にある上部ノズルスリーブと上部支持格子スリーブ間の制御棒案内シンプルで発生するが、永久変形は生じない。

なお、横方向については各支持格子部固定の条件で6Gの荷重に対して被覆管に発生する応力は、約□MPaと耐力（約□MPa）に比べ十分小さい。また、支持格子のばねに作用する荷重は約□Nであるのに対し、支持格子のばねの塑性変形が進行する荷重は約□Nであるので、支持格子のばねに永久変形が生じることはなく、保持機能は確保される。

第4-3表 燃料輸送及び取扱い時の荷重における評価結果

(単位：MPa)

構成部品	最大応力	許容応力	設計比*3
上部ノズル	[ ]	[ ]	0.89
下部ノズル	[ ]	[ ]	0.90
上部ノズル-制御棒案内シンプル結合部	[ ]*1	[ ]*2	0.76*4
支持格子-制御棒案内シンプル結合部	[ ]*1(ジルカロイ製)	[ ]*2(ジルカロイ製)	0.48*4
	[ ]*1(インコネル製)	[ ]*2(インコネル製)	0.45*4
制御棒案内シンプル	[ ]	[ ]	0.85

\*1：最大荷重 (N)

\*2：許容荷重 (N)

\*3：許容応力値に対する最大応力値の比である。

\*4：許容荷重値に対する最大荷重値の比である。



#### 4.3.2 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における評価結果

##### (1) 応力評価

###### a. 上部ノズル

運転中の荷重としてスクラム時の衝撃力を考慮し、上部ノズルに生じる最大応力を第4-4表に示す。ここから分かるとおり、最大応力は許容応力よりも小さい。

###### b. 下部ノズル

運転中の荷重としてスクラム時の衝撃力を考慮し、下部ノズルに生じる最大応力を第4-4表に示す。ここから分かるとおり、最大応力は許容応力よりも小さい。

###### c. 制御棒案内シンプル

運転中の制御棒案内シンプルに発生する最も厳しい荷重としてスクラム時の衝撃力を考慮し、ダッシュポット部に生じる最大応力を第4-4表に示す。ここから分かるとおり、最大応力は許容応力よりも小さい。

また、通常運転時の荷重に対する応力を評価した。ダッシュポット部の応力評価結果を第4-4表に示す。ここから分かるとおり、最大応力は許容応力よりも小さい。

なお、二次応力を考慮しても、制御棒案内シンプルに生じる最大応力は許容応力よりも小さいことを確認している。

##### (2) 上部ノズル押えばねの機能評価

燃料寿命初期の低温起動時及び高温全出力時の評価結果を第4-5表に示す。それぞれの場合に上部ノズル押えばねに要求される力に比べ、ばね力はこれよりも大きく、通常運転時における燃料集合体の浮き上がりは防止できる。

また、運転時の異常な過渡変化時の事象であるポンプオーバースピード条件下   でも、燃料集合体は浮き上がりせず、上部ノズル押えばねの機能は損なわれない。

第4-4表 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の応力評価結果

(単位：MPa)

	最大応力	許容応力	設計比 <sup>(注1)</sup>
上部ノズル			0.45
下部ノズル <sup>(注2)</sup>			0.40
制御棒案内シンプル <sup>(注2)</sup> ダッシュポット部			0.46
制御棒案内シンプル <sup>(注3)</sup> ダッシュポット部			0.05

(注1) 許容応力値に対する最大応力値の比である。

(注2) 制御棒案内シンプルダッシュポット部に制御棒クラスタが挿入され、落下速度が急激に減速する際の衝撃力。

(注3) 制御棒案内シンプルに対する通常運転時の応力。

第4-5表 上部ノズル押えばね評価結果

(単位：N)

	上部ノズル押えばねに要求される力*1	上部ノズル押えばね力	評価	設計比*2
低温起動時			浮き上がらない。	0.69
高温全出力時			浮き上がらない。	0.30
ポンプオーバー スピード時 (高温)			浮き上がらない。	0.98

\*1：水力的揚力+浮力-自重

\*2：「上部ノズル押えばね力」に対する「上部ノズル押えばねに要求される力」の比である。

## 5. 参考文献

- (1) 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1, 平成23年3月
- (2) W. J. O’Donnell and B. F. Langer, “Fatigue Design Basis for Zircaloy Components” Nuclear Science and Engineering: 20, 1-12 (1964)
- (3) 三菱原子力工業(株), “燃料棒のわん曲(Bowing)について”, MAPI-1031 改3, 昭和63年5月
- (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
- (5) 佐々木ら, “国内PWRにおける高燃焼度化ステップ2燃料(A型)の3サイクル照射後オンサイト検査結果”, 日本原子力学会「2009年秋の大会」, 2009年9月, 東北大学
- (6) (財)原子力発電技術機構, 平成11年度 軽水炉改良技術確証試験 (高燃焼度等燃料に関するもの) に関する報告書, 平成12年3月
- (7) H. W. Wilson et al., “Fuel Performance Characteristics at Extended Burnup”, ANS Topical Meeting on LWR Extended Burnup - Fuel Performance and Utilization, April 1982, Williamsburg, Virginia
- (8) R. S. Kaiser et al., “Westinghouse High Burnup Experience at Farley 1 and Point Beach 2”, ANS Topical Meeting on LWR Fuel Performance, April 1988, Williamsburg, Virginia
- (9) W. J. Leech et al., “Applications of Post-Irradiation Data from Light Water Reactor Fuel”, ANS Conference on Fast, Thermal and Fusion Reactor Experiments, 1982, Salt Lake City, Utah
- (10) 田原ら, “国内PWRにおける高燃焼度先行照射燃料 (A型) の3サイクル照射後オンサイト検査結果”, 日本原子力学会「2001年秋の大会」, 2001年9月, 北海道大学
- (11) 通商産業省 原子力発電技術顧問会 (基本設計) 高燃焼度化検討会, “加圧水型原子炉 高燃焼度化ステップ2 先行照射燃料 検討結果報告書”, 基0516-6, 平成5年4月
- (12) 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

- (13) S. Doi et al., "Advanced Fuel Design and Performance for Burnup Extension", ANS 2000 International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, April 2000, Park City, Utah
- (14) (財)原子力発電技術機構, 平成12年度 高燃焼度等燃料確証試験に関する報告書, 平成13年6月
- (15) T. Takahashi et al., "Advanced Fuel Development for Burnup Extension", ANS 1997 International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, March 1997, Portland, Oregon

(添付)

### 被覆管の疲労評価における応力繰り返し回数について

被覆管の累積疲労は燃料寿命中に想定される過渡条件を以下の3つに分類し、表1に示す1次系機器の原子炉寿命中の設計過渡条件及び燃料の炉内滞在期間を考慮（原子炉寿命は30年を想定）して応力の繰り返し回数を設定し評価している。

① 起動・停止（0%冷態 ⇔ 0%温態）：(a)，(b)

回/年

これを安全側に回/年を用いている。

⇒ 回/サイクル

⇒ 回/燃料寿命

② 日間負荷変動を含む運転時出力変化（0%温態 ⇔ 100%温態）：(c)～(i)

[(e)，(f)と(g)，(h)を合わせて0% ⇔ 100%：2000回とする。]

回/年

これを安全側に回/年を用いている。

⇒ 回/サイクル

③ 異常な過渡変化における原子炉トリップ：(j)～(r)

回/年

これを安全側に回/年を用いている。

⇒ 回/サイクル

表1 原子炉寿命中の過渡条件及び繰り返し回数

過 渡 条 件	繰り返し回数
(a) 起 動	200
(b) 停 止	200
(c) 負荷上昇	13,200
(d) 負荷減少	13,200
(e) 100%から90%負荷へのステップ状の負荷減少	2,000
(f) 90%から100%負荷へのステップ状の負荷上昇	2,000
(g) 0%から15%への負荷上昇	1,500
(h) 15%から0%への負荷減少	1,500
(i) 1ループ停止/1ループ起動	
( I ) 停 止	80
( II ) 起 動	70
(j) 100%負荷からの大きいステップ状の負荷減少	200
(k) 100%負荷からの原子炉トリップ	400
(l) ポンプ1台停止による1次系の流量喪失	80
(m) 100%負荷からの負荷喪失	80
(n) 外部電源喪失	40
(o) 1次冷却材系の異常な減圧	20
(p) 制御棒クラスタ落下	80
(q) 出力運転中の非常用炉心冷却系の誤動作	40
(r) 1次冷却系停止ループの誤起動	10

## 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

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 設置許可段階からの確認及び説明内容 .....	3
3. 高燃焼度燃料（55GWd/t）導入以降の照射実績反映について .....	7
4. まとめ .....	8

## 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、別記-10 3. (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. (3)はジルカロイ-4の規定であるため、高燃焼度燃料用の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ことは設置許可段階で確認<sup>\*1, 2</sup>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 15 年 8 月 13 日平成 14・04・03 原第 27 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3 三菱重工業 平成14年」を踏まえた設計としている。

2. 設置許可段階からの確認及び説明内容

2.1 確認項目及び確認内容

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

表 1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (1/3)

性質	確認項目 <sup>※1</sup>	確認内容	
物理的性質 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 記載なし】	機械的性質 【本文 記載なし】 【資料 8 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】 【資料 8 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】 【資料 8 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】 【資料 8 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】 【資料 8 記載なし】	クリープ特性 【本文 記載なし】 【資料 8 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（資料 8 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】 【資料 8 5.2.4】	
	耐熱性 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 5.1】	耐熱性 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 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、及び熔融点及び相変態温度の測定結果より燃料被覆材の熔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 <sup>※1</sup>	確認内容	
物理的性質 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 記載なし】	核性質 【本文 1. 炉心等】 【資料 8 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 <sup>※2</sup> 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】 【資料 8 5. 4】	耐摩耗性 【本文 記載なし】 【資料 8 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 <sup>※3</sup> 【本文 記載なし】 【資料 8 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。

※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 <sup>※1</sup>	確認内容
化学的性質 【本文 1. 炉心等】 【資料8 記載なし】	耐食性 【本文 1. 炉心等】 【資料8 5.3】	酸化腐食 【本文 記載なし】 【資料8 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】 【資料8 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。
	化学的安定性 【本文 1. 炉心等】 【資料8 記載なし】	二酸化ウランペレットと燃料被覆材との反応 <sup>※2</sup> 【本文 記載なし】 【資料8 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、資料8では被覆材の性質ではなくペレットの性質（資料8 3.3章、4.3章）として問題ないことを確認している。
		ガドリニア混合二酸化ウランペレットと燃料被覆材との反応 <sup>※2</sup> 【本文 記載なし】 【資料8 4.3.1】	
	その他の性能 【本文 1. 炉心等】 【資料8 5.4】	耐PCI性 <sup>※3</sup> 【本文 記載なし】 【資料8 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】 【資料8 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 (ガドリニア混合) 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 29 年 6 月 9 日付け原規規発第 1706092 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 6-2 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 6-3 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 15 年 12 月 16 日付け平成 15・10・14 原第 39 号にて特殊加工認可、平成 16 年 1 月 27 日付け平成 15・10・14 原第 36 号にて燃料体設計認可を取得している。

その後、17 行 17 列型 A 型燃料集合体（従来型）においては最下部支持格子におけるフレットング摩耗による漏えいが発生したことを踏まえ、下部ノズル、下部端栓形状等の設計変更を行った A 型燃料集合体（信頼性向上燃料）を導入しており（燃料被覆材は設計変更なし）、信頼性向上燃料の導入にあたっては、上述の設計変更分を適切に解析条件に反映・評価したうえで、平成 23 年 10 月 27 日付け平成 23・09・22 原第 3 号にて燃料体設計認可を取得している。

なお、上述の変更に関しては原子力安全・保安院への提出資料、「三菱製 17×17 型 55GWd/t 信頼性向上燃料導入に係る原子炉設置変更許可の要否について」（平成 22 年 9 月）にて設置変更許可申請の基本設計時の機械設計、核設計、熱水力設計および安全評価への影響は軽微であることが確認されている。

その後、4.1wt%ステップ 2 燃料導入に伴い、平成 30 年 6 月 13 日付け原規規発第 18061311 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へ反映するとともに、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）

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 30 年 6 月 13 日付け原規規発第 18061311 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

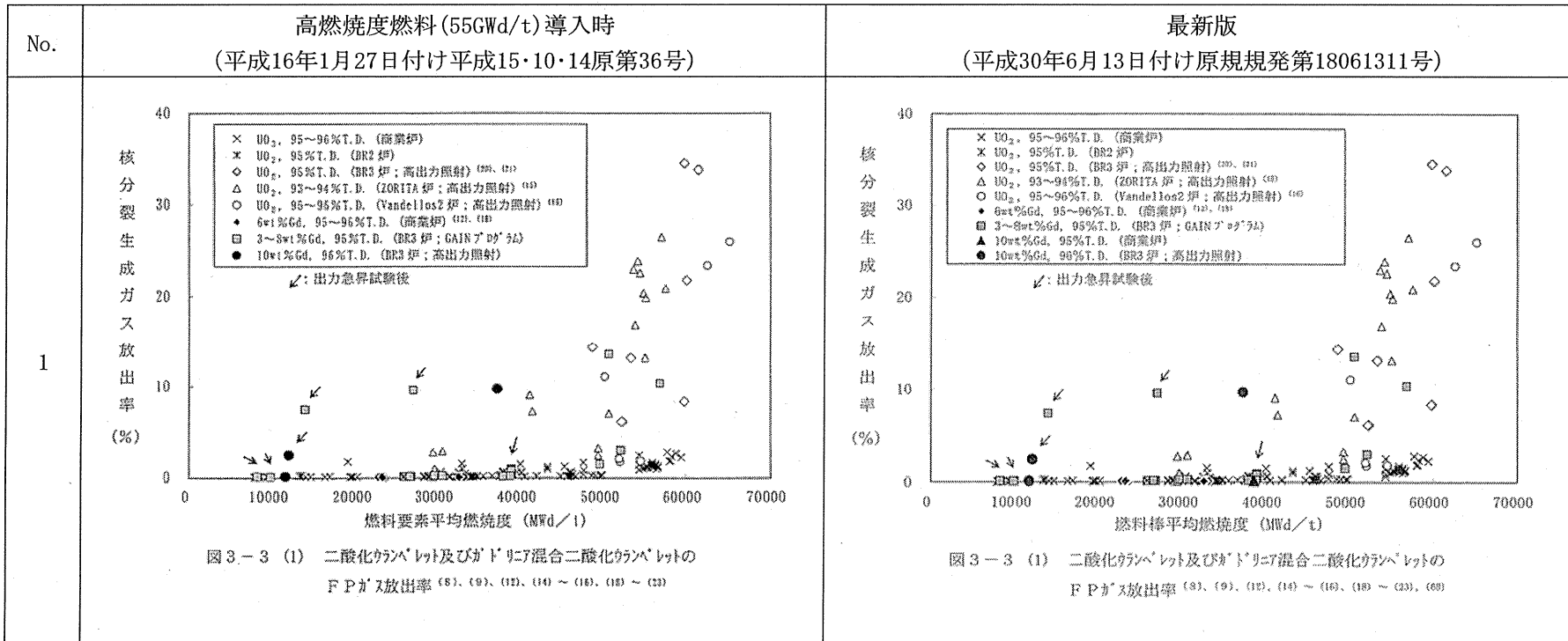
高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯を表2にまとめる。

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 【四国電力】	平成15年8月13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 (従来型) 【三菱重工】	平成16年1月27日 平成15年12月16日 認可	設置許可(平成15年8月13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 (信頼性向上燃料) 【三菱重工】	平成23年10月27日 認可	A型燃料集合体(信頼性向上燃料)については、原子力安全・保安院への提出資料(平成22年9月)にて設置変更許可申請の基本設計時の機械設計、核設計、熱水力設計および安全評価への影響は軽微であることを確認いただいたうえで、設置許可(平成15年8月13日)に基づく燃料体設計認可を取得。
燃料体設計認可申請 特殊加工認可申請 (信頼性向上燃料) 【三菱原子燃料】	平成29年6月9日 平成29年6月9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15年8月13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 (信頼性向上燃料) (最新) 【三菱原子燃料】	平成30年6月13日 認可	4.1wt%ステップ2燃料導入のため、燃料被覆材に関しては設置許可(平成15年8月13日)に基づく燃料体設計認可を取得。

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項及び技術基準規則第23条第1項への適合性については、平成15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



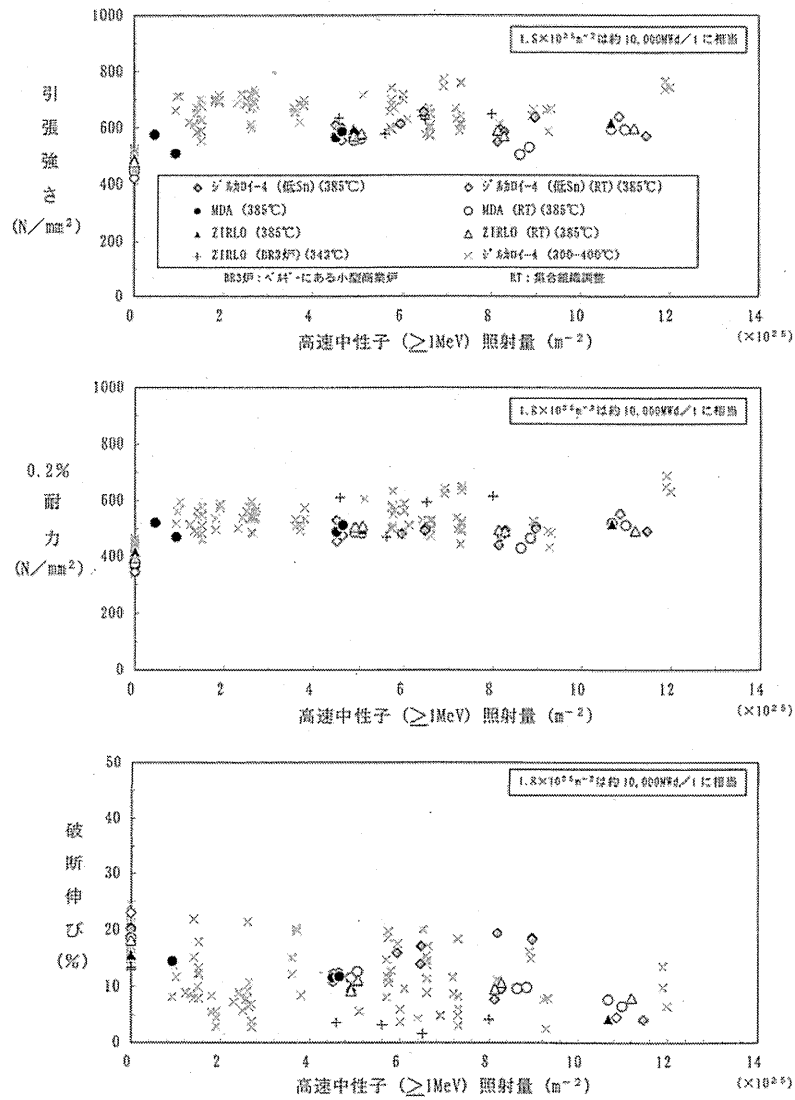


図5-1 MDA及びZIRLO被覆管の機械特性 (13) ~ (16), (18), (19), (28) ~ (31)

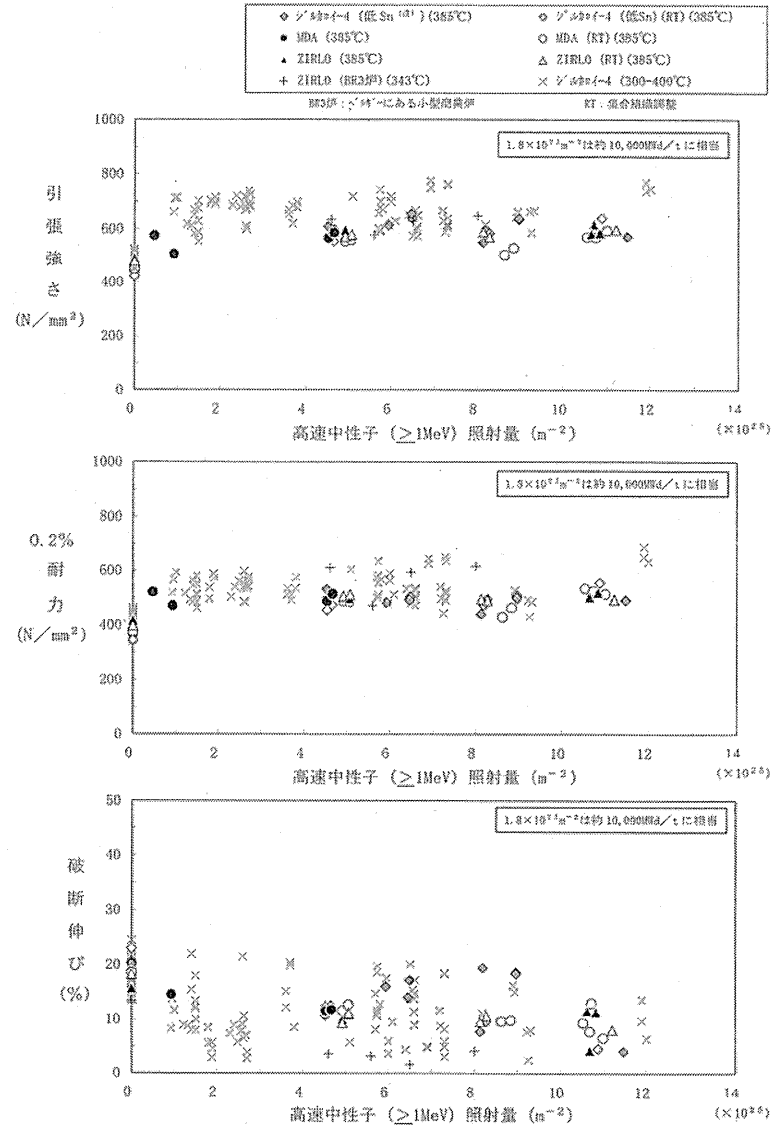


図5-1 MDA及びZIRLO被覆管の機械特性 (13) ~ (16), (18), (19), (28) ~ (31), (33)

(注) 仕体内でSn含有量を下限近くまで下げたもの。

3

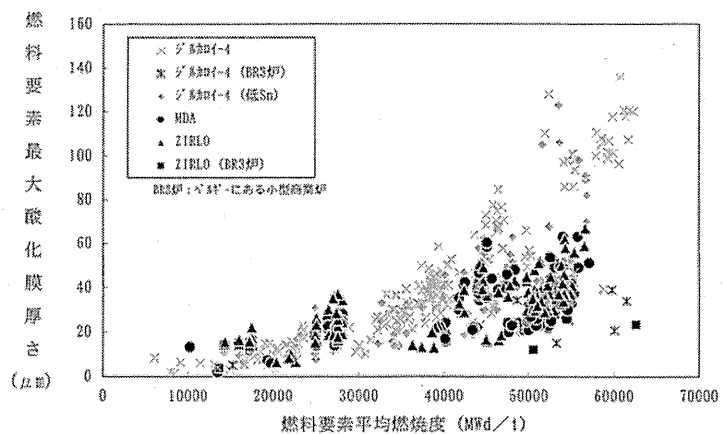


図5-8 MDA及びZIRLO被覆管の  
炉内酸化膜厚さ (8) ~ (12), (18), (19), (39), (44), (49) ~ (51), (54) ~ (59)

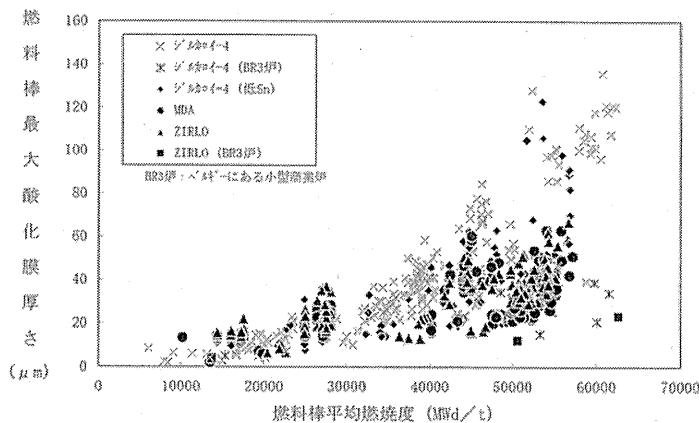


図5-8 MDA及びZIRLO被覆管の  
炉内酸化膜厚さ (8) ~ (12), (18), (19), (39), (44), (49) ~ (51), (54) ~ (59), (69) 注)  
注) オンサイト酸化膜厚さデータの一部はホットセルデータを参考に評価。

4

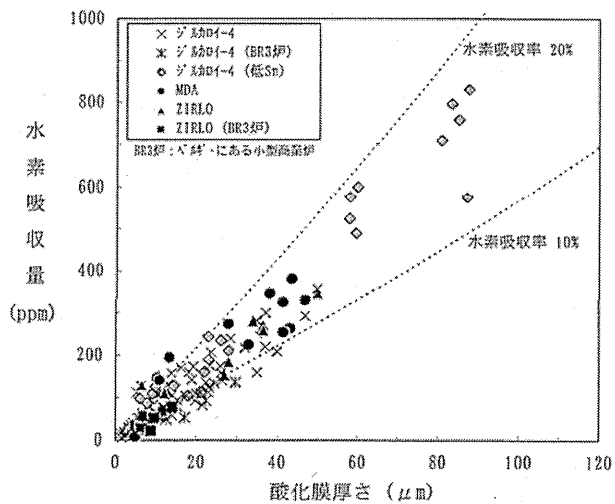


図5-10 MDA及びZIRLO被覆管の  
炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (8), (9), (11) ~ (13), (47)

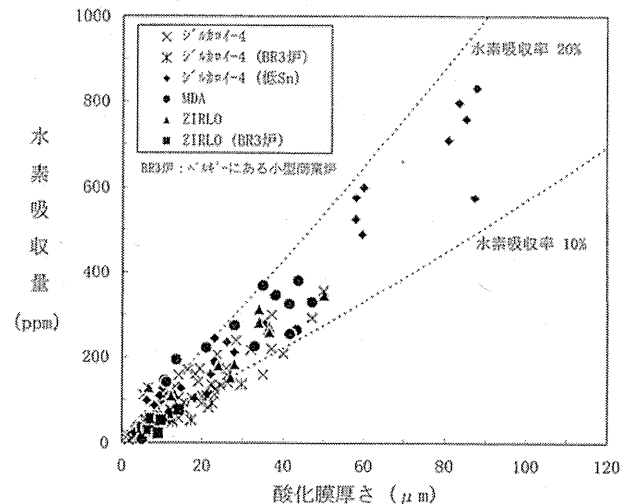


図5-10 MDA及びZIRLO被覆管の  
炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (8), (9), (11) ~ (13), (47), (68)

5

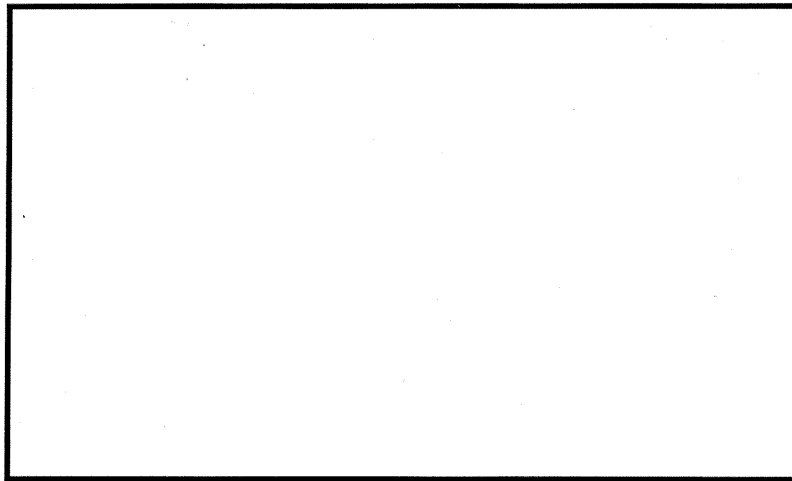


図3-28 燃料要素(17×17、9支持格子)間隔の閉塞割合<sup>(52)</sup>

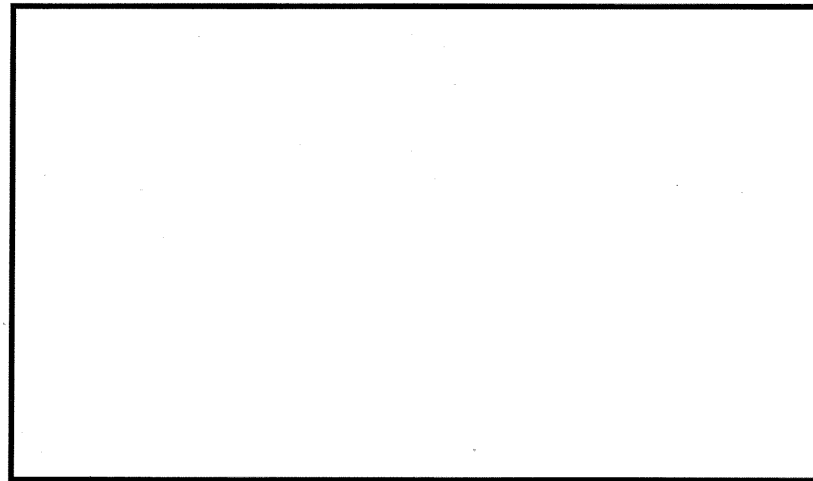


図3-28 燃料棒(17×17、9支持格子)間隔の閉塞割合<sup>(52)、(59)</sup>

6

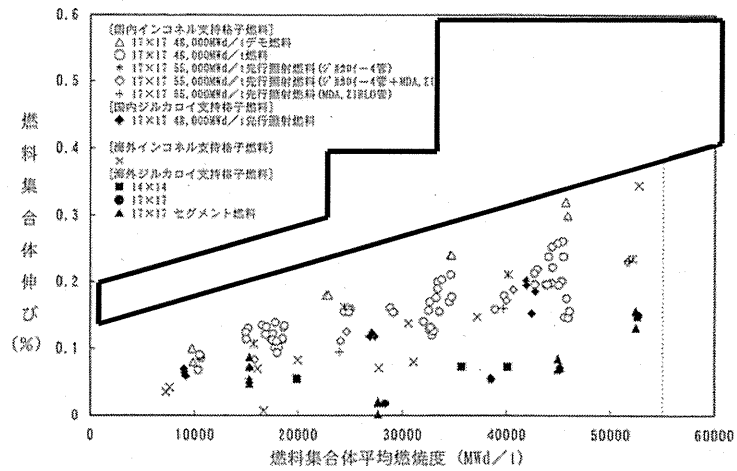


図3-31 燃料集合体伸び<sup>(11)、(53)~(56)</sup>

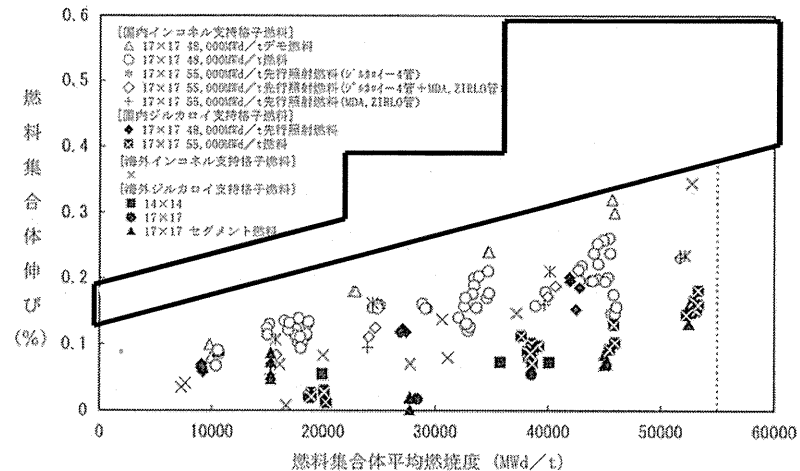


図3-31 燃料集合体伸び<sup>(11)、(53)~(56)、(59)</sup>

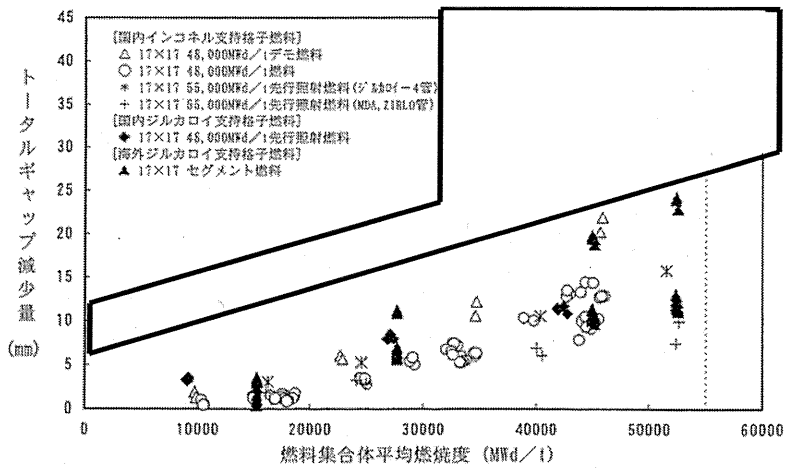


図3-32 トータルギャップ減少量<sup>(1)</sup>

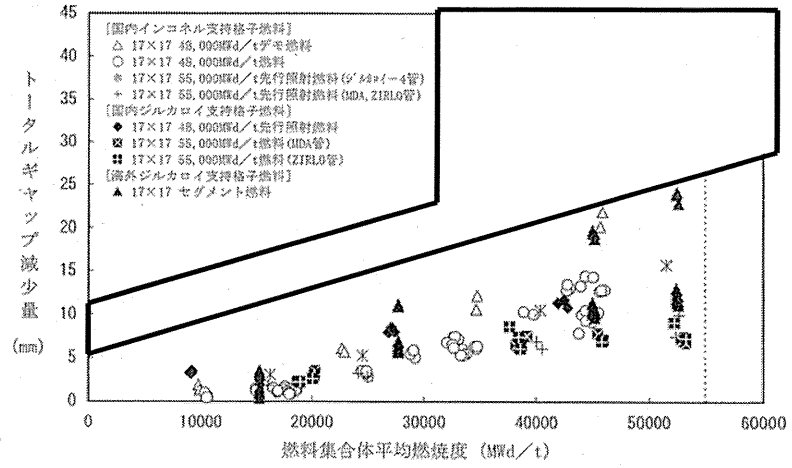


図3-32 トータルギャップ減少量<sup>(1), (99)</sup>

## 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

	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、「伊方発電所 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

(2/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>鉄 0.08～0.12</p> <p>ニオブ 0.80～1.20</p> <p>酸素 <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 40px; height: 15px; vertical-align: middle;"></span></p> <p>ジルコニウム 残り</p> <p>【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」という。）第8条に規定されていない材料であったことから、原子力規制委員会規則第7号第3条の規定に基づき、特殊加工認可を取得している（平成29年6月9日、原規規発第1706092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、本添付資料中に示すジルコニウム基合金被覆管の照射挙動データには、ジルコニウム基合金とジルコニウム基合金-RTの2種類のデータがあり、前者は通常組織管、後者は集合組織調整管を指している。集合組織調整管は、被覆管の圧延工程を調整することによって、ジルコニウムの稠密六方晶C軸<sup>(註)</sup>の径方向への配向割合を、通常組織管よりも僅かに高めた被覆管であるが、本章で示す被覆管の各特性は同等である。そのため、本申請においては両者を区別しない。</p>	

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

(3/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>【添付書類八】</p> <p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(1) 概要</p> <p>燃料集合体は、多数の二酸化ウラン焼結ペレット、ガドリニア入り二酸化ウラン焼結ペレット又はウラン・プルトニウム混合酸化物焼結ペレットを「ジルカローイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム合金」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合金」又はジルカローイ-4で被覆した燃料棒、制御棒案内シンプル、炉内計装用案内シンプル、支持格子、上部ノズル、下部ノズル等で構成する。申請書本文における五原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備ハ、原子炉本体の構造及び設備（ロ）燃料体（2）被覆材の種類に示す「ジルカローイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム合金」又は「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合金」（以下3.2.1では「ジルコニウム合金」という。）の主成分は第3.2.1表のとおりである。<sup>(1)</sup><sup>(6)</sup>燃料棒の配列は、17×17であり、そのうち264本が燃料棒、24本が制御棒案内シンプル、残り1本が炉内計装用案内シンプルである。制御棒案内シンプルは、制御棒クラスタ、バーナブルボイズン、中性子源及びシンプ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燃料の主要仕様</p> <p>(4) 被覆管材料</p> <p>炉内滞在期間の長期化に伴う被覆管の腐食及び水素吸収量増加を抑制するため、被覆管材料をステップ1燃料のジルカローイ-4から表3-3に示すジルコニウム合金に変更し、これを用いた改良被覆管（A型燃料はMDA及びZIRLO™、B型燃料はNDA）を採用する。</p> <p>MDAは、三菱重工業(株)により開発されたものであり、豊富な照射実績を持つジルカローイ-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系ジルコニウム合金製被覆管である。NDAは、原子燃料工業(株)により開発されたものであり、MDAと同様、ジルカローイ-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系ジルコニウム合金製被覆管である。ZIRLOは、ウエスチングハウス社により開発されたものであり、耐食性が良好で水素吸収率も低いと考えられているZr-Nb二元合金をベースとして、機械的強度の向上のためSn及びFeを添加したSn-Fe-Nb系ジルコニウム合金製被覆管である。</p>	<p>2. 構成材料の概要</p> <p>燃料集合体の材料は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を含むプラントの使用条件の下で、燃料寿命中その健全性が維持されるよう選定している。燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分を第2-1表に示す。また、燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質を第2-2表に示す。</p>	

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

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

(4/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画設工認申請書 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>a. ウラン燃料</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%, Cr: 0.8~1.2wt%, Zr: 残り)</p> <p>ただし、第1~第11領域 ジルカロイ-4 ＜中略＞</p>	<p>表3-3 被覆管の合金成分</p> <table border="1" data-bbox="660 359 1209 622"> <thead> <tr> <th rowspan="2">主成分*</th> <th colspan="3">ジルカロイ-4*</th> <th colspan="3">ジルコニウム基合金</th> </tr> <tr> <th>規格</th> <th>従来 Sn</th> <th>低 Sn</th> <th>MDA</th> <th>NDA</th> <th>ZIRLO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sn</td> <td>1.2~1.7</td> <td>1.5</td> <td>1.3</td> <td>0.7~0.9</td> <td>0.90~1.15</td> <td>0.9~1.3</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18~0.24</td> <td>0.2</td> <td>←</td> <td>0.18~0.24</td> <td>0.24~0.30</td> <td>0.08~0.12</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07~0.13</td> <td>0.1</td> <td>←</td> <td>0.07~0.13</td> <td>0.13~0.19</td> <td>←</td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28~0.37</td> <td>0.3</td> <td>←</td> <td>0.28~0.37</td> <td>←</td> <td>←</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>←</td> <td>←</td> <td>←</td> <td>0.45~0.55</td> <td>0.08~0.14</td> <td>0.8~1.2</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>←</td> <td>←</td> <td>←</td> <td>←</td> <td>0.007~0.014</td> <td>←</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1 数値の単位はwt%。また、上記以外の残りの成分はジルコニウム。</p> <p>*2 ジルカロイ-4のうち、規格内でSn含有量を少なくしたものを低Snジルカロイ-4。それ以外を従来Snジルカロイ-4と呼ぶ。</p>	主成分*	ジルカロイ-4*			ジルコニウム基合金			規格	従来 Sn	低 Sn	MDA	NDA	ZIRLO	Sn	1.2~1.7	1.5	1.3	0.7~0.9	0.90~1.15	0.9~1.3	Fe	0.18~0.24	0.2	←	0.18~0.24	0.24~0.30	0.08~0.12	Cr	0.07~0.13	0.1	←	0.07~0.13	0.13~0.19	←	Fe+Cr	0.28~0.37	0.3	←	0.28~0.37	←	←	Nb	←	←	←	0.45~0.55	0.08~0.14	0.8~1.2	Ni	←	←	←	←	0.007~0.014	←	<p>【基本設計方針】</p> <p>第2章 個別項目</p> <p>1. 炉心等</p> <p>1.1 燃料体</p> <p>1.1.1 17行17列A型燃料集合体 (ウラン燃料)</p> <p>(3) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値は、主成分について以下に掲げる値であること。また、不純物は日本産業規格H4751 (2016) 「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表3に規定する値 (主成分とするものは除く。) であること。</p> <p>- Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金</p> <p>スズ 0.70~0.90</p> <p>鉄 0.18~0.24</p> <p>クロム 0.07~0.13</p> <p>鉄+クロム 0.28~0.37</p> <p>ニオブ 0.45~0.55</p> <p>酸素 <input type="text"/></p> <p>ジルコニウム 残り</p> <p>- Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金</p> <p>スズ 0.90~1.30</p> <p>鉄 0.08~0.12</p> <p>ニオブ 0.80~1.20</p> <p>酸素 <input type="text"/></p> <p>ジルコニウム 残り</p>	<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>
主成分*	ジルカロイ-4*			ジルコニウム基合金																																																						
	規格	従来 Sn	低 Sn	MDA	NDA	ZIRLO																																																				
Sn	1.2~1.7	1.5	1.3	0.7~0.9	0.90~1.15	0.9~1.3																																																				
Fe	0.18~0.24	0.2	←	0.18~0.24	0.24~0.30	0.08~0.12																																																				
Cr	0.07~0.13	0.1	←	0.07~0.13	0.13~0.19	←																																																				
Fe+Cr	0.28~0.37	0.3	←	0.28~0.37	←	←																																																				
Nb	←	←	←	0.45~0.55	0.08~0.14	0.8~1.2																																																				
Ni	←	←	←	←	0.007~0.014	←																																																				

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 (5/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画設工認申請書 該当事項	備考																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		<p>【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>第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分 (続き)</p> <table border="1" data-bbox="1332 343 1736 821"> <thead> <tr> <th>構成部品</th> <th>材料の種類</th> <th colspan="2">化学成分 (wt%)</th> <th colspan="11">元素 (ppm)</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th>C</th> <th>S</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Fe</th> <th>Ni</th> <th>Cr</th> <th>Mo</th> <th>Cu</th> <th>B</th> <th>Co</th> <th>Nb</th> <th>Ti</th> <th>Zr</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Te</th> <th>Bi</th> <th>Pb</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>Hg</th> <th>Al</th> <th>Mg</th> <th>K</th> <th>Ca</th> <th>Mg</th> <th>Na</th> <th>Cl</th> <th>S</th> <th>Br</th> <th>I</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu</th> <th>Hf</th> <th>Ta</th> <th>W</th> <th>Re</th> <th>Os</th> <th>Ir</th> <th>Pt</th> <th>Au</th> <th>Pd</th> <th>Cu</th> <th>Zn</th> <th>Ga</th> <th>Ge</th> <th>As</th> <th>Se</th> <th>Br</th> <th>Kr</th> <th>Rb</th> <th>Sr</th> <th>Zr</th> <th>Nb</th> <th>Mo</th> <th>Tc</th> <th>Ru</th> <th>Rh</th> <th>Pd</th> <th>Ag</th> <th>Cd</th> <th>In</th> <th>Sn</th> <th>Sb</th> <th>Te</th> <th>I</th> <th>Xe</th> <th>Ba</th> <th>La</th> <th>Ce</th> <th>Pr</th> <th>Nd</th> <th>Pm</th> <th>Sm</th> <th>Eu</th> <th>Gd</th> <th>Tb</th> <th>Dy</th> <th>Ho</th> <th>Er</th> <th>Tm</th> <th>Yb</th> <th>Lu&lt;/</th></tr></thead></table>	構成部品	材料の種類	化学成分 (wt%)		元素 (ppm)													C	S	Si	Mn	P	S	Fe	Ni	Cr	Mo	Cu	B	Co	Nb	Ti	Zr	As	Se	Te	Bi	Pb	Ag	Cd	Hg	Al	Mg	K	Ca	Mg	Na	Cl	S	Br	I	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu</
構成部品	材料の種類	化学成分 (wt%)		元素 (ppm)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		C	S	Si	Mn	P	S	Fe	Ni	Cr	Mo	Cu	B	Co	Nb	Ti	Zr	As	Se	Te	Bi	Pb	Ag	Cd	Hg	Al	Mg	K	Ca	Mg	Na	Cl	S	Br	I	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Pd	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu</																		

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

(6/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画設工認申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a. 構成材料</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム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</u>、<u>二酸化ウラン</u>、<u>ガドリニア入り二酸化ウラン</u>、<u>ウラン・プルトニウム混合酸化物</u>、<u>核分裂生成物等</u>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。(1)(6)</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>改良被覆管及びガドリニア濃度約10wt%の高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性並びに高燃焼度下におけるペレット照射挙動に関する最近の知見は、以下のとおりである。</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大阪4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ並びに燃料棒平均燃焼度で約62,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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)。</li> <li>・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)。</li> <li>・照射成長は減少(図4-7及び図4-8参照)。</li> </ul> <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。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、原子炉内使用条件下で高温の1次冷却材との反応により酸化膜が形成される。一般に、ジルカロイ被覆管の腐食速度は、酸化膜と被覆管金属母材の界面温度についてのアレニウス型温度依存性を示す。また、その腐食増量(酸素による質量増加)の時間変化を第5-7図に示すが、初期の段階では時間に対して立方則(時間の3乗根に比例)に従って増加し、酸化膜厚が2~3μm(遷移点)を超えた後は時間に対して直線的に増加する。原子炉内での被覆管酸化膜厚さを第5-8図に示す。原子炉内では滞在期間が長くなり酸化膜が厚くなるに従って、形成された酸化膜と金属母材の境界温度が上昇するため、燃焼度の進行に伴って酸化膜厚さは増大する傾向になる。更に腐食が進行すると腐食量の急激な増加が見られるが、これは酸化により発生する水素のうち、被覆管に吸収された水素が被覆管外面に析出し、この析出物が腐食に起因すると考えられている。</p> <p>第5-8図から分かるように、ジルカロイ-4被覆管の原子炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されている。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>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、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

(7/26)

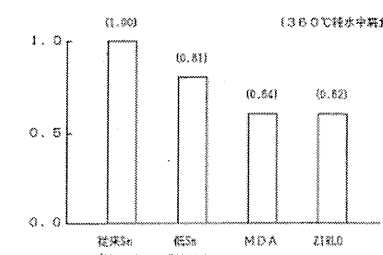
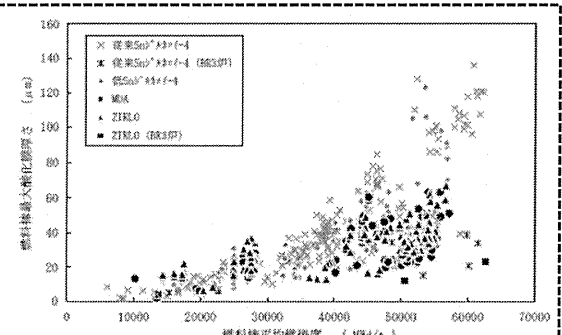
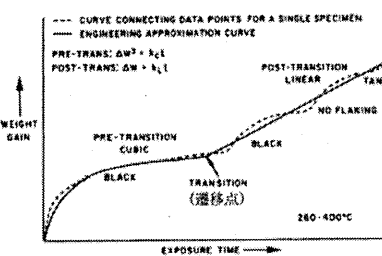
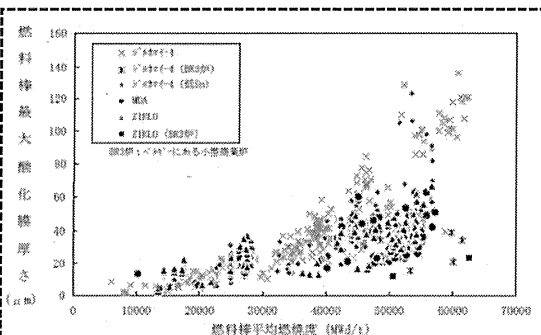
設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画設工認申請書 該当事項	備考
	<p data-bbox="784 319 1075 343">腐食速度の相対値*</p>  <p data-bbox="739 638 1120 686">*従来SiCジルカローイ-4の腐食速度を1.0とした場合の各種被覆材の腐食速度(180~780日間)の相対値。</p> <p data-bbox="672 694 1187 718">図4-1(1) 炉外腐食試験における改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の腐食特性</p>  <p data-bbox="716 1101 1142 1125">図4-1(2) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の炉内酸化膜厚さ</p>	 <p data-bbox="1276 694 1792 742">第5-7図 炉外腐食試験におけるジルカローイ-2とジルカローイ-4の典型的な腐食増量曲線 (注)</p>  <p data-bbox="1276 1101 1792 1173">第5-8図 MDA及びZIRLO被覆管の原子炉内酸化膜厚さ (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。</p>	<p data-bbox="1836 303 2083 574">・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4-2(2)を用いて設計評価(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

(8/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a. 構成材料</p> <p>（中略）</p> <p>ジルコニウム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</u>、<u>二酸化ウラン</u>、<u>ガドリニア入り二酸化ウラン</u>、<u>ウラン・プルトニウム混合酸化物</u>、<u>核分裂生成物等</u>に対して高い耐食性を示し、かつ、<u>高い信頼性を有する材料</u>である。<sup>(1)(6)</sup></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>改良被覆管及びガドリニア濃度約10wt%の高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性並びに高燃焼度下におけるペレット照射挙動に関する最近の知見は、以下のとおりである。</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ並びに燃料棒平均燃焼度で約62,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・耐食性は向上（図4-1及び図4-2参照）。</li> <li>・なお、水素吸収率は同等（図4-3及び図4-4参照）。</li> <li>・炉内クリープについて、MDA及びZIRLOは減少、<u>NDAは同等</u>（図4-5及び図4-6参照）。</li> <li>・照射成長は減少（図4-7及び図4-8参照）。</li> </ul> <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。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。被覆管の原子炉内での水素吸収量と酸化膜厚さの関係を第5-9図に示すが、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）の関係を第5-10図に示す。</u>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。</p> <p>したがって、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

(9/26)

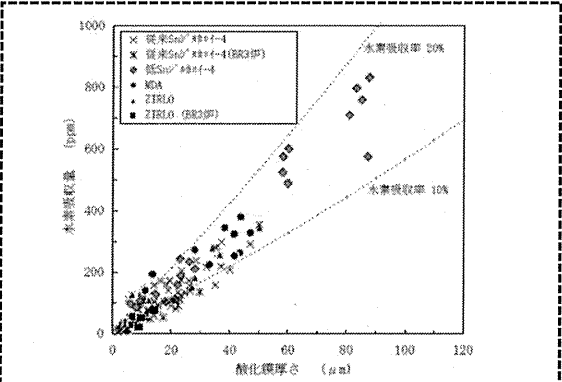
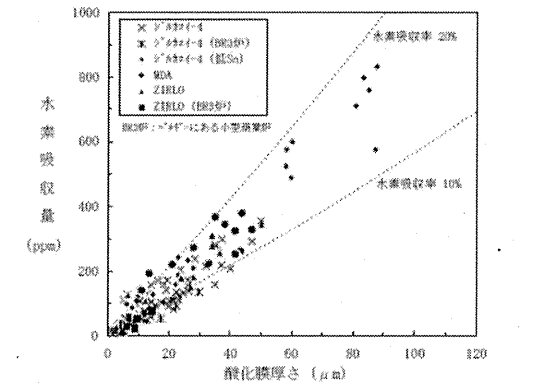
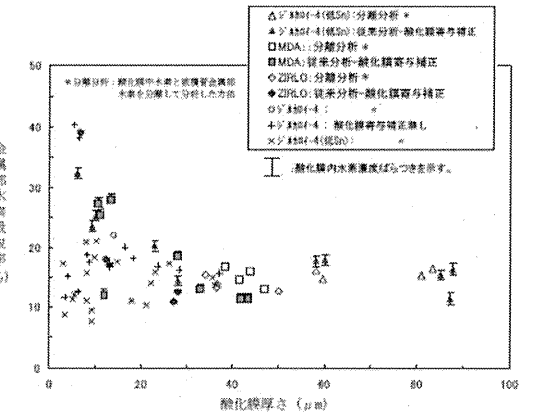
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図4-3 改良被覆管 (MDA 及び ZIRLO) の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係</p>	 <p>第5-9図 MDA及びZIRLO被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係 (30)、(31)～(33)、(47)、(69)</p>  <p>第5-10図 MDA及びZIRLO被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収率の関係 (48)</p>	<p>・設計及び工事の計画に図5-10を記載しているのは、酸化膜厚さと水素吸収率の関係性がジルカロイ-4と同等であることを設計評価（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

(10/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画設工認申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a. 構成材料</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム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、ウラン・プルトニウム混合酸化物、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。(1)(6)</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>改良被覆管及びガドリニア濃度約10wt%の高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性並びに高燃焼度下におけるペレット照射挙動に関する最近の知見は、以下のとおりである。</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、その健全性を検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により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ並びに燃料棒平均燃焼度で約62,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>耐食性は向上(図4-1及び図4-2参照)。</li> <li>なお、水素吸収率は同等(図4-3及び図4-4参照)。</li> <li>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)。</li> <li>照射成長は減少(図4-7及び図4-8参照)。</li> </ul> <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。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<sup>(注1)</sup></p> <p>被覆管は内外圧差に基づくクリープによって外径が減少していくが、ペレットと被覆管が接触した後は、ペレットの外径変化に依存して被覆管外径が増加する。実機PWR燃料棒の照射後の外径変化を第5-5図に示すが、約20,000MWd/t程度までの低燃焼度域の外径減少より、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の3.2.2(2)c.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

(11/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>図4-5 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の外径変化 [実機照射長尺燃料棒]</p>	<p>第5-5図 燃料棒外径変化 (実機照射セグメント燃料棒) (13) (15) (16)</p>	<p>・安全審査資料の図4-5と設計及び工事の計画の第5-5図は照射対象燃料が異なるものの、MDA及びZIRLOの外径変化についてはどちらの図からも判断できる。</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

(12/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>改良被覆管及びガドリニア濃度約10wt%の高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性並びに高燃焼度下におけるペレット照射挙動に関する最近の知見は、以下のとおりである。</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により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ並びに燃料棒平均燃焼度で約62,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・耐食性は向上(図4-1及び図4-2参照)。</li> <li>  なお、水素吸収率は同等(図4-3及び図4-4参照)。</li> <li>・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)。</li> <li>・照射成長は減少(図4-7及び図4-8参照)。</li> </ul> <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて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>5.2.4 照射成長<sup>(註2)</sup></p> <p>照射成長の支配要因は、Zr中の稠密六方晶(<math>\alpha</math>相)の向きが比較的揃った組織において中性子照射で生じる格子欠陥のうち、空孔は六方晶底面へ、格子間原子は柱面へ選択的に集まるためと言われている。第5-6図に示すように、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>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、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>	

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

(13/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>図4-7 改良被覆管 (MDA 及び ZIRLO) の照射成長</p>	<p>第5-6図 MDA及CSZIRLO被覆管の照射成長 (12) (14) (16) (17) ~ (22)</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

(14/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>5.2 耐放射線性</p> <p>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、<math>\alpha</math>線、<math>\beta</math>線、<math>\gamma</math>線、核分裂片及び中性子の影響を受ける。  <math>\alpha</math>線及び<math>\beta</math>線のような荷電粒子は、金属中を通り抜けるとき、電気的な相互作用によって原子の軌道電子を引き離すイオン化作用を起こす。また、<math>\gamma</math>線も軌道電子を原子から引き離す作用を起こす。このように<math>\alpha</math>線、<math>\beta</math>線、<math>\gamma</math>線は、主に金属原子の軌道電子と作用してエネルギーを消失していくので、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なく、そのエネルギーは主として原子核との弾性衝突により多数の原子を格子位置からはじき出す作用によって消失される。この結果、金属の結晶格子内あるいは結晶粒界などに空孔あるいは格子間原子の存在が認められるようになり、この微視的欠陥が材料の巨視的な物性値に変化をもたらすことになる。中性子が金属中を通り抜けるときに形成される格子欠陥の濃度は、中性子のエネルギーに比例するため、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>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。</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

(15/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画設工認申請書 該当事項	備考
	<p>【安全審査資料：伊方発電所1、2、3号炉 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/mm<sup>2</sup>～約590N/mm<sup>2</sup>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、被覆管温度及び時間に依存する。実機原子炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。MDA及びZIRLO被覆管の引張試験結果を第5-1図に示す。引張強さ及び耐力<sup>(58)</sup>は、照射初期において増加した後、照射量によらず著しい変化が見られず、<u>ジルカロイ-4被覆管と同等である。また、破断伸びは、照射初期に低下した後は照射量によらず著しい変化がなく、ジルカロイ-4被覆管と同等である。その他の材料物性においても、原子炉安全小委員会においてジルカロイ-4被覆管と同等<sup>(59)</sup>であることが確認されている。</u></p> <p>なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量27～32×10<sup>25</sup>n/m<sup>2</sup> (E&gt;1MeV) まで十分な延性が確保されているとの報告例もある<sup>(66)</sup>。</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を第5-2図に示すが、<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。照射材については、第5-3図に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、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>	

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

(16/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画設工認申請書 該当事項	備考
	<div data-bbox="645 284 1211 582"> <p>図 2.1-4 (I) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の耐力</p> </div> <div data-bbox="645 683 1211 981"> <p>図 2.1-5 (I) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の延性</p> </div>	<div data-bbox="1254 295 1803 582"> <p>第5-1図 MDA及びZIRLO被覆管の機械特性 (注) 仕様内で56含有量を下限近くまで下げたもの。</p> </div> <div data-bbox="1254 590 1803 1109"> <p>第5-1図 MDA及びZIRLO被覆管の機械特性 (注) 仕様内で56含有量を下限近くまで下げたもの。</p> </div>	<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

(17/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>2.2 設計評価</p> <p>(6) その他の評価事項</p> <p>ステップ2燃料棒の健全性評価に際し、上述の評価事項の他に高燃焼度化に伴う影響を確認した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、14×14型燃料の場合、A型で約9.5%、B型で約8.8%、17×17型燃料の場合、A型で約7.6%、B型で約6.4%となり、いずれも被覆管応力への影響が小さい10%以下の減肉量である。</p> <p>また、被覆管の最大水素吸収量を評価した結果、14×14型燃料の場合、A型で約670ppm、B型で約710ppm、17×17型燃料の場合、A型で約520ppm、B型で約600ppmとなり、図2.2-5に示す水素吸収させた未照射被覆管の高温引張試験結果及び図2.2-6に示す照射被覆管の高温引張試験により得られた破断伸びと水素吸収量の関係から、延性が確保されていることが確認できる約800ppmより小さい。</p>	<p>5.2.1 機械的性質</p> <p>(中略)</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を第5-2図に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまで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、第5-3図に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、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>第5-8図から分かるように、ジルカロイ-4被覆管の原子炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されている。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>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、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の3.4(3)項に示す。）、設計評価に反映している。</p> <p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>(中略)</p> <p>したがって、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

(18/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>第5-2図 未照射被覆管の機械的特性と水素濃度の関係<sup>(50)</sup></p>	<p>・設計及び工事の計画では、800ppm以下でMDA及びZIRLOの機械特性が変わらないことを具体的に示している。</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

(19/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>第5-3図 被覆管水素濃度と破断伸びの関係 (ppm)</p>	<p>・設計及び工事の計画では、800ppm以下でMDA及びZIRLOの機械特性が変わらないことを具体的に示している。</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

(20/26)

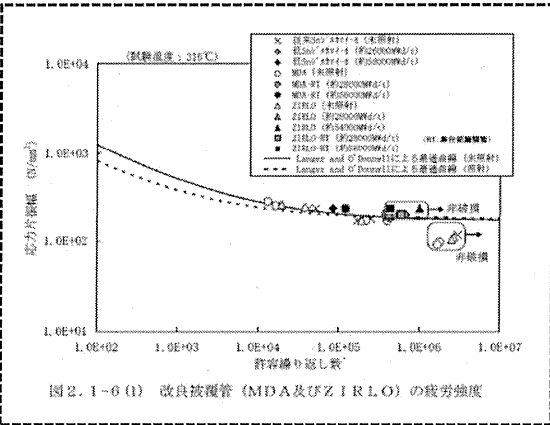
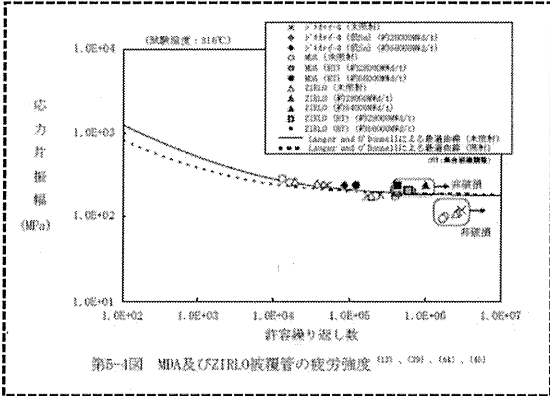
設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画設工認申請書 該当事項	備考
	<p>2. 1 設計方針</p> <p>(5) 被覆管累積疲労</p> <p>被覆管の累積疲労サイクル数は、設計疲労寿命を超えないこと。</p> <p>ここで、図2.1-6に示すように、改良被覆管 (MDA、NDA及びZIRLO) の疲労強度は、ジルカロイ-4製被覆管の疲労強度と同等であり、設計疲労曲線としては、従来と同様、Langer and O'Donnell の曲線を使用する。</p>  <p>図2.1-6 (1) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の疲労強度</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の疲労試験結果を第5-4図に示す。一般に疲労特性は機械特性に依存するが、5.2.1項で述べたとおり、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>第5-4図 MDA及びZIRLO被覆管の疲労強度 (12) - (24) - (44) - (16)</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

(21/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画設工認申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a. 構成材料</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、<u>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、ウラン・プルトニウム混合酸化物、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>(1)(6)</p>	<p>2. 2 設計評価</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>改良被覆管の耐PCI性は、<u>図2.2-7に示すとおり、高燃焼度領域までジルカロイ-4製被覆管と同等以上であり、現行のPCI破損しきい値に対し十分余裕があることが確認でき、これをPCI破損評価に適用する。</u></p> <p>サイクル初期及びサイクル末期において想定した原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を、14×14型燃料については図2.2-8、17×17型燃料については図2.2-9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、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。</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性を第5-11図にPCI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

(22/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>図2.2-7(1) 改良被覆管 (MDA及びZIRLO) の耐PCI性</p>	<p>第5-41図 MDA及びZIRLO被覆管の耐PCI性<sup>(注)</sup></p> <p>(注) 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改良しており、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

(23/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a. 構成材料</p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、<u>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、ウラン-プルトニウム混合酸化物、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>(1)(6)</p>	<p>(6) その他の評価事項</p> <p>b. PCI破損</p> <p>燃料のPCI(ペレット-被覆管相互作用)破損は、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にPCI破損しきい値を超えた場合に起こることが、種々の実験結果や実炉での経験から知られている。</p> <p><u>改良被覆管の耐PCI性は、図2.2-7に示すとおり、高燃焼度領域までジルカロイ-4製被覆管と同等以上であり、現行のPCI破損しきい値に対し十分余裕があることが確認でき、これをPCI破損評価に適用する。</u></p> <p>サイクル初期及びサイクル末期において想定した原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を、14×14型燃料については図2.2-8、17×17型燃料については図2.2-9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(<math>Zr_2O_3</math>)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<math>(Zr,U)O_2</math>固溶体となり、これがボンディング層を形成して、強固なペレット-被覆管の固着の原因となる<sup>(69)</sup>。これらは、被覆管の腐食及びPCI<sup>(82)</sup>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<sup>(6)</sup>。通常運転中においてペレットと被覆管及び燃料被覆材端栓の接触面の温度が長期間にわたって500℃を超えないことから、反応は小さいと考えられる。</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、<u>第5-11図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</u><sup>(16)</sup>。</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<sup>(14)</sup>、<sup>(30)</sup>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。したがって、いずれも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、<u>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</u><sup>(37)</sup>。したがって、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。したがって、当該の反応を設計評価では考慮していない。</p> <p>なお、3.3.1項で述べたとおり、ペレット密度が増加した場合の共存性への影響はない。</p>	

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

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

(24/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画設工認申請書 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第5-3表に示す。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>第5-3表 MDA及びZIRLO被覆管の硬さの測定結果<sup>(注)</sup> (単位：HK (ヌーブ硬さ値))</p> <table border="1" data-bbox="1368 576 1637 730"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HK 0.1<sup>(注)</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDA</td> <td>266</td> </tr> <tr> <td>ZIRLO</td> <td>265</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>264</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注) HK 0.1：ヌーブ硬さ試験力 0.9807N</p>	種類	平均値 (HK 0.1 <sup>(注)</sup> )	MDA	266	ZIRLO	265	ジルカロイ-4 (参考)	264	<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（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 <sup>(注)</sup> )										
MDA	266										
ZIRLO	265										
ジルカロイ-4 (参考)	264										

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

(25/26)

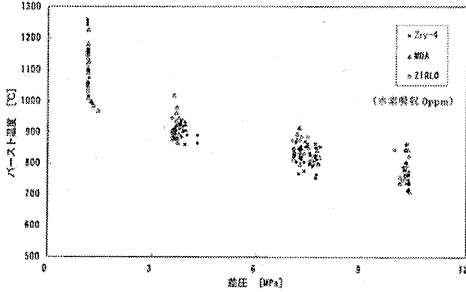
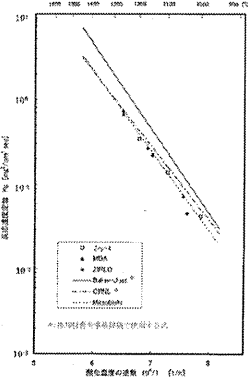
設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>5.4.3 高温特性</p> <p>被覆管の相変態 (<math>\alpha</math>相から<math>\beta</math>相に変化)が生じるような高温時においては、MDA及びZIRLO被覆管は、ジルカロイ-4被覆管同様、約98wt%のジルコニウムを主成分としているため、それらの主要な特性はジルカロイ-4と同等である。1次冷却材喪失事故(LOCA)にて考慮する昇温内圧破裂試験結果、高温時のジルコニウムと水反応の試験結果をそれぞれ図5-12及び図5-13に示す。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>第5-12図 未照射管のLOCA時破裂挙動試験結果(受取管)<sup>1)1)</sup></p>  <p>第5-13図 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数(受取管)<sup>1)1)</sup></p>	<p>・設置変更許可申請書及び高燃焼度燃料導入時の安全審査資料では高温特性について詳細な内容は説明していないもの、設計及び工事の計画では、技術基準規則23条への適合を示すため、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

(26/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																				
		<p>5.1 耐熱性</p> <p>ジルカロイ-4の融点<sup>(39)</sup>は1,825℃であり<sup>(40)</sup>、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第5-1表及び第5-2表に示すように、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。したがって、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはないので、当該の挙動を設計評価では考慮していない。</p> <p>第5-1表 MDA及びZIRLOの融点測定結果<sup>(39)</sup>、<sup>(40)</sup> (単位:℃)</p> <table border="1" data-bbox="1375 799 1688 971"> <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>第5-2表 MDA及びZIRLOの相変態温度測定結果<sup>(41)</sup> (単位:℃)</p> <table border="1" data-bbox="1346 1054 1718 1201"> <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条への適合を示すため、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表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29年6月9日付け原規規発第1706092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

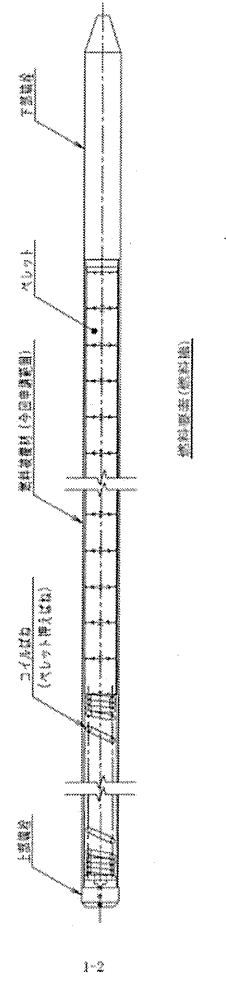
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表1

特認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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="483 1241 857 1310" style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin: 20px auto; width: fit-content;"> <table border="1"> <tr> <td style="padding: 2px;">特殊加工認可申請書</td> <td style="padding: 2px;">資料1</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center; padding: 2px;">伊方発電所第3号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料1	伊方発電所第3号機			
特殊加工認可申請書	資料1					
伊方発電所第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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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、伊方発電所第3号機の取替燃料体（最高燃焼率55,000MWt/1）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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考
 <p>図1 特殊加工認可申請範囲</p> <p>燃料芯棒 (燃料棒)</p> <p>下照管束</p> <p>ペレット</p> <p>燃料芯棒 (今回申請範囲)</p> <p>燃料芯棒 (ペレット挿入部)</p> <p>上照管束</p> <p>1-2</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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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="483 1238 857 1307" 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="text-align: center; padding: 2px;">伊方発電所第3号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料 2	伊方発電所第3号機			
特殊加工認可申請書	資料 2					
伊方発電所第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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考
目 次		
<ul style="list-style-type: none"> <li>1. MDA及びZIRLO被覆管の概要 .....2-1</li> <li>2. MDA及びZIRLO被覆管の特性 .....2-2               <ul style="list-style-type: none"> <li>2.1 耐熱性 .....2-2</li> <li>2.2 耐放射線性 .....2-2                   <ul style="list-style-type: none"> <li>2.2.1 機械的性質 .....2-3</li> <li>2.2.2 疲労特性 .....2-3</li> <li>2.2.3 クリープ特性 .....2-4</li> <li>2.2.4 照射成長 .....2-4</li> </ul> </li> <li>2.3 耐腐食性 .....2-4                   <ul style="list-style-type: none"> <li>2.3.1 酸化腐食による影響 .....2-5</li> <li>2.3.2 水素吸収による影響 .....2-5</li> </ul> </li> <li>2.4 その他の性能 .....2-6                   <ul style="list-style-type: none"> <li>2.4.1 耐PCI性 .....2-6</li> <li>2.4.2 耐摩耗性 .....2-6</li> <li>2.4.3 高温特性 .....2-7</li> <li>2.4.4 被覆管とペレットの反応特性 .....2-7</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>3. MDA及びZIRLO被覆管の品質及び検査方法等 .....2-8               <ul style="list-style-type: none"> <li>3.1 品質 .....2-8</li> <li>3.2 寸法許容差 .....2-9</li> <li>3.3 製造方法 .....2-9</li> <li>3.4 試験 .....2-9</li> <li>3.5 検査 .....2-9</li> <li>3.6 表示 .....2-10</li> </ul> </li> <li>4. 参考文献 .....2-11</li> </ul>		

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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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<sup>*1</sup>”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<sup>*1</sup>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55,000MWd/t<sup>*2</sup>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"> <li>・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。）</li> <li>・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<sup>*3</sup>）</li> </ul> <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 ZIRLO<sup>®</sup>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>(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。燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分を第2-1表に示す。また、燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質を第2-2表に示す。</p> <p>第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分（表省略）</p> <p>(注1) 以下「二酸化ウランペレット」という。 (注2) タイプAはウラン235濃縮度4.80wt%を示す。タイプBはウラン235濃縮度4.10wt%を示す。 (注3) 以下「ガドリニア混合二酸化ウランペレット」という。 (注4) タイプCはガドリニア濃度10wt%を示す。タイプDはガドリニア濃度6wt%を示す。 (注5) 不純物の総中性子吸収をBoron量で換算したもの。 (注6) 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」という。 (注7) 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<sup>®</sup>」として商標登録されたものである。以下「ZIRLO」という。 (注8) 以下「ジルカロイ-4」という。なお、燃料被覆材端栓の材料は、JIS H4751 ZrTN 804Dの規定からNb及びCaの化学成分を除外して、JIS H4751 ZrTN 804D相当と記載している。 (注9) 以下「718合金」という。なお、718合金のうち支持格子の材料は「インコネル-718」という。</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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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9.8wt%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（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 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;"> </span>℃）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>（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」という。）第8条に規定されていない材料であったことから、原子力規制委員会規則第7号第3条の規定に基づき、特殊加工認可を取得している（平成29年6月9日、原規規発第1706092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、本添付資料中に示すジルコニウム基合金被覆管の照射挙動データには、ジルコニウム基合金とジルコニウム基合金-RTの2種類のデータがあり、前者は通常組織管、後者は集合組織調整管を指している。集合組織調整管は、被覆管の圧延工程を調整することによって、ジルコニウムの稠密六方晶C軸<sup>(39)</sup>の径方向への配向割合を、通常組織管よりも僅かに高めた被覆管であるが、本章で示す被覆管の各特性は同等である。そのため、本申請においては両者を区別しない。</p> <p>5.1 耐熱性</p> <p>ジルカロイ-4の溶融点は1,825℃であり<sup>(39)・(40)</sup>、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><u>MDA及びZIRLOは、ジルカロイ-4同様、約9.8wt%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（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、いずれも被覆管の異常な過渡変化時の最高温度（約 <span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;"> </span>℃）よりもかなり高いので、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはない。したがって、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはないので、当該の挙動を設計評価では考慮していない。</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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2.2 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、<u>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>(資料 8)</p> <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、<u>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>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>	

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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2.2.1 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2.2-1に示す。引張強さ及び耐力<sup>(55)</sup>は、照射初期において増加した後、照射量によらず著しい変化が見られず、ジルカロイ-4被覆管と同等である。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。</p> <p>なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量<math>27\sim 32\times 10^{25}\text{n/m}^2</math> (<math>E&gt;1\text{MeV}</math>)まで十分な延性が確保されているとの報告例がある<sup>(51)</sup>。</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を図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。</p> <p>2.2.2 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。</p> <p>(注) 0.2%の塑性変形を起こす応力をいう。</p>	<p>(資料 8)</p> <p>5.2.1 機械的性質</p> <p>機械特性への影響因子としては、照射脆化と水素脆化が考えられる。照射脆化は照射欠陥の蓄積（濃度）によるが、これは高速中性子束、被覆管温度及び時間に依存する。実機原子炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。MDA及びZIRLO被覆管の引張試験結果を第5-1図に示す。引張強さ及び耐力<sup>(55)</sup>は、照射初期において増加した後、照射量によらず著しい変化が見られず、ジルカロイ-4被覆管と同等である。また、破断伸びは、照射初期に低下した後は照射量によらず著しい変化がなく、ジルカロイ-4被覆管と同等である。その他の材料物性においても、原子炉安全小委員会においてジルカロイ-4被覆管と同等<sup>(59)</sup>であることが確認されている。</p> <p>なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量<math>27\sim 32\times 10^{25}\text{n/m}^2</math> (<math>E&gt;1\text{MeV}</math>)まで十分な延性が確保されているとの報告例もある<sup>(66)</sup>。</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を第5-2図に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまで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、第5-3図に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、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>5.2.2 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の疲労試験結果を第5-4図に示す。一般に疲労特性は機械特性に依存するが、5.2.1項で述べたとおり、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>(注) 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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2.2.3 クリープ特性 <sup>(注1)</sup> 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。</p> <p>2.2.4 照射成長 <sup>(注2)</sup> 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。</p> <p>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。</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>(資料8)</p> <p>5.2.3 クリープ特性 <sup>(注1)</sup> 被覆管は内外圧差に基づくクリープによって外径が減少していくが、ペレットと被覆管が接触した後は、ペレットの外径変化に依存して被覆管外径が増加する。実機PWR燃料棒の照射後の外径変化を第5-5図に示すが、約20,000MWd/t程度までの低燃焼度域の外径減少より、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の3.2.2(2)c.項に示す。）設計評価に反映している。</p> <p>5.2.4 照射成長 <sup>(注2)</sup> 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。第5-6図に示すように、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>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、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>(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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考
<p>2.3 耐腐食性</p> <p><u>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、</u></p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p><u>の反応により酸化腐食が進むとともに、発生した水素の一部を吸収する。</u></p> <p><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>(資料8)</p> <p>5.3 耐食性</p> <p><u>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、</u></p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p><u>の反応により酸化腐食が進むとともに、発生した水素の一部を吸収する。</u></p> <p><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、原子炉内使用条件下で高温の1次冷却材との反応により酸化膜が形成される。一般に、ジルカロイ被覆管の腐食速度は、酸化膜と被覆管金属母材の界面温度についてのアレニウス型温度依存性を示す。また、その腐食増量（酸素による質量増加）の時間変化を第5-7図に示すが、初期の段階では時間に対して立方則（時間の3乗根に比例）に従って増加し、酸化膜厚が2~3μm（遷移点）を超えた後は時間に対して直線的に増加する。原子炉内での被覆管酸化膜厚さを第5-8図に示す。原子炉内では滞在期間が長くなり酸化膜が厚くなるに従って、形成された酸化膜と金属母材の境界温度が上昇するため、燃焼度の進行に伴って酸化膜厚さは増大する傾向になる。更に腐食が進行すると腐食量の急激な増加が見られるが、これは酸化により発生する水素のうち、被覆管に吸収された水素が被覆管外面に析出し、この析出物が腐食に起因すると考えられている。</u></p> <p><u>第5-8図から分かるように、ジルカロイ-4被覆管の原子炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されている。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>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、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（資料8第5-8図）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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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>(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。被覆管の原子炉内での水素吸収量と酸化膜厚さの関係を第5-9図に示すが、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）の関係を第5-10図に示す。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、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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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>(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、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性を第5-11図にPCI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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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<sup>[2]</sup>。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>(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第5-3表に示す。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>(資料7)</p> <p>3.4 その他の考慮事項</p> <p>(6) フレッチング摩耗評価 (省略)</p> <p>a. ジルカロイ-4被覆管とインコネル-718支持格子のフレッチング摩耗 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チング摩耗は、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<math>\square</math>に、また、サイクル2、3、4のばね力を<math>\square</math>と安全側に仮定して被覆管の摩耗減肉量を求めると、②約<math>\square</math>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> <p>なお、下部支持格子部におけるフレッチング摩耗については、本設計では寿命中下部支持格子が下部端栓を支持する設計となっており、摩耗が発生したとしても被覆管が貫通に至ることはなく問題ない。</p> <p>b. ジルカロイ-4被覆管とジルカロイ-4支持格子のフレッチング摩耗 流水試験によると、②ジルカロイ-4被覆管とジルカロイ-4支持格子の間でのフレッチング摩耗は、上記と同様の結果であ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<math>\square</math>に、また、サイクル2、3、4のばね力を<math>\square</math>と安全側に仮定して被覆管の摩耗減肉量を評価すると、②<math>\square</math>mm以下と被覆管肉厚の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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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（<math>\alpha</math>相から<math>\beta</math>相に変化）が生じるような高温時においては、MDA及びZIRLO被覆管は、ジルカロイ-4被覆管同様、約9.8wt%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（<math>ZrO_2</math>）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（<math>Zr, U</math>）<math>O_2</math>固溶体となり、これがボンディング層を形成して、強固なペレット-被覆管の固着の原因となる。<sup>(6)</sup>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。 MDA及びZIRLO被覆管は、ジルカロイ-4被覆管同様、約9.8wt%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10~20<math>\mu</math>mと小さい。<sup>(4)</sup></p>	<p>(資料8)</p> <p>5.4.3 高温特性 被覆管の相変態（<math>\alpha</math>相から<math>\beta</math>相に変化）が生じるような高温時においては、MDA及びZIRLO被覆管は、ジルカロイ-4被覆管同様、約9.8wt%のジルコニウムを主成分としているため、それらの主要な特性はジルカロイ-4と同等である。1次冷却材喪失事故（LOCA）にて考慮する昇温内圧破裂試験結果、高温時のジルコニウム-水反応の試験結果をそれぞれ第5-12図及び第5-13図に示す。第5-12図及び第5-13図に示すとおり、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（<math>ZrO_2</math>）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（<math>Zr, U</math>）<math>O_2</math>固溶体となり、これがボンディング層を形成して、強固なペレット-被覆管の固着の原因となる<sup>(6)</sup>。これらは、被覆管の腐食及びPCI<sup>(6)</sup>へ影響を及ぼす可能性が考えられる。 しかしながら、二酸化ウランペレットとジルコニウムを密着させ510℃で約500日以上保持した場合においても反応は生じないことが報告されている<sup>(6)</sup>。通常運転中においてペレットと被覆管及び燃料被覆材端栓の接触面の温度が長期間にわたって500℃を超えないことから、反応は小さいと考えられる。 また、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10~20<math>\mu</math>mと小さく、被覆管応力への影響は小さい。さらに、第5-11図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<sup>(6)</sup>。 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<sup>(14)</sup>、<sup>(30)</sup>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。したがって、いずれも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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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被覆管の品質は燃料体検査において確認される。ここで、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(1999) ZrIN 804B 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"> <li>a) 被覆管の軸は、著しくわん曲していないこと。</li> <li>b) 被覆管表面に割れ、きず等で有害なものがないこと。</li> <li>c) 被覆管表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</li> <li>d) 被覆管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。</li> <li>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。</li> <li>f) 被覆管は、3.4b) 又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが設計上必要な値であること。</li> <li>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 <math>38\text{mg/dm}^2</math> 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 <math>22\text{mg/dm}^2</math> 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。</li> <li>h) 被覆管は、3.4d) 又はこれと同等の方法によって水素化物方位試験を行った場合、水素化物方位係数 <math>F_n</math> 値は 0.45 を超えてはならない。</li> <li>i) 被覆管は、3.4e) 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。</li> </ul> <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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考
<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>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雑き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及び許容変動値は、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 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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考
<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個とする。</p> <p>d) 水素化物方位試験の試験片は、同一インゴットを用い、同一加工条件で同時熱処理を施した一組の管から任意に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個とする。</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 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>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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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 原子力安全小委員会, “FWR 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 FWR 高燃焼度化ステップ2 燃料の機械設計”, MSF-1001 改1, 平成 23 年 3 月</p> <p>[3] S. T. Mahmood et al., “Post-Irradiation Characterization of Ultra-High-Fluence Zircaloy-2 Plate”, ASTM SIP 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 (FWR 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 (改訂第5版)”, 平成 25 年 3 月</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 (伊方発電所第3号機 A型燃料集合体)

設工認 (伊方発電所第3号機 A型燃料集合体)

備考

表1-1 化学成分

合金名 化学成分	MDA	ZIRLO	単位: wt% ジルカロイ-4 <sup>*1</sup> (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	残部	残部	残部 <sup>*2</sup>
Zr	残部	残部	残部

表1-2 不純物

合金名 不純物	MDA	ZIRLO <sup>*3</sup>	単位: wt% ジルカロイ-4 <sup>*1</sup> (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	以下	以下	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

\*1 JIS H4751 (1998) ZrTN 804D  
\*2 酸素は、JIS H4751 (1998) ZrTN 804Dでは規定されていない。  
\*3 ZIRLO: Cr 13 以下

(資料8)

第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分 (続き)

構成部品	材料の種類	主成分 (wt%)	不 純 物 (ppm)											
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb系 ジルコニウム 基合金 <sup>(注)</sup>	Sn	0.70/0.90	Al	≤	□	Cu	≤	□	N	≤	□	□	□
		Fe	0.18/0.24	B	≤	□	Hf	≤	□	□	□	□	□	□
		Cr	0.07/0.13	Ca	≤	□	□	□	□	□	□	□	□	□
		Fe+Cr	0.28/0.37	Cd	≤	□	Mg	≤	□	□	□	Ti	≤	□
		Nb	0.45/0.55	C	≤	□	Mn	≤	□	□	□	U	≤	□
	O	残部	Mo	≤	□	□	□	□	□	□	W	≤	□	
	Zr	残部	Co	≤	□	Ni	≤	□	□	□	□	□	□	
	Sn-Fe-Nb系 ジルコニウム 基合金 <sup>(注)</sup>	Sn	0.90/1.30	Al	≤	□	Cr	≤	□	Ni	≤	□	□	□
		Fe	0.08/0.12	B	≤	□	Cu	≤	□	N	≤	□	□	□
		Nb	0.80/1.20	Ca	≤	□	Hf	≤	□	□	□	□	□	□
O		残部	Cd	≤	□	H	≤	□	□	□	Si	≤	□	
Zr		残部	C	≤	□	Mg	≤	□	□	□	Ti	≤	□	
制御棒案内 シンプル 伊内計装用 案内シンプル 中間部 スリーブ	Sn-Fe-Cr系 ジルコニウム 合金 <sup>(注)</sup>	Sn	1.20/1.70	Al	≤	75	Hf	≤	100	Nb	≤	100	□	
		Fe	0.18/0.24	B	≤	0.5	H	≤	25	Si	≤	120	□	
		Cr	0.07/0.13	Cu	≤	30	Mg	≤	20	Ti	≤	50	□	
		Fe+Cr	0.28/0.37	Cd	≤	0.5	Mn	≤	50	U	≤	3.5	□	
		O	残部	C	≤	270	Mo	≤	50	W	≤	100	□	
	Zr	残部	Co	≤	20	Ni	≤	70	□	□	□	□		
	燃料被覆材 端栓	Sn-Fe-Cr系 ジルコニウム 合金 <sup>(注)</sup>	Sn	1.20/1.70	Al	≤	75	Hf	≤	100	Nb	≤	100	□
			Fe	0.18/0.24	B	≤	0.5	H	≤	25	Si	≤	120	□
			Cr	0.07/0.13	Ca	≤	30	Mg	≤	20	Ti	≤	50	□
			Fe+Cr	0.28/0.37	Cd	≤	0.5	Mn	≤	50	U	≤	3.5	□
O			残部	C	≤	270	Mo	≤	50	W	≤	100	□	
Zr	残部	Co	≤	20	Ni	≤	70	□	□	□	□			
端栓	Grade R60804 JIS H 4751 ZrTN 804D(特等)	Co	≤	50	N	≤	80	□	□	□	□	□		
		□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□		

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。

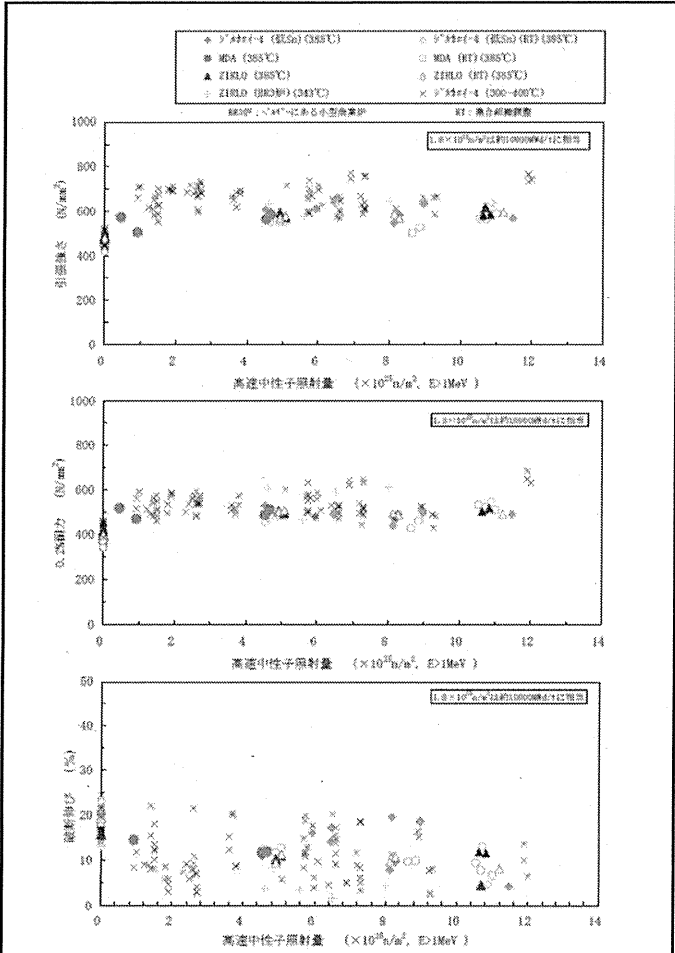
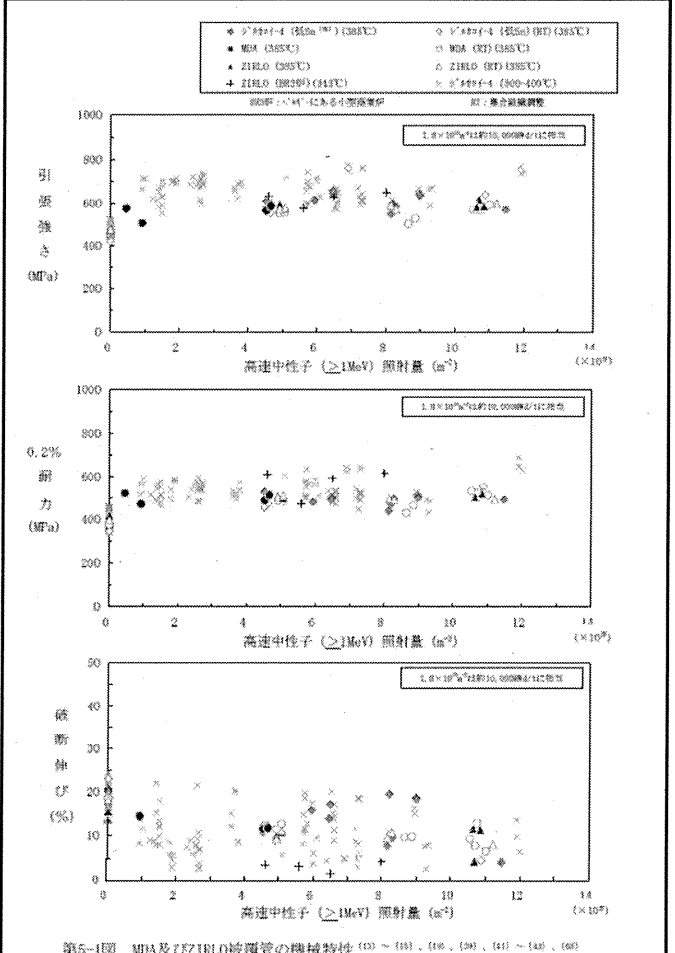
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3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<sup>(1-2)</sup> 単位：℃</p> <table border="1" data-bbox="376 454 745 655"> <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<sup>(3)</sup> 単位：℃</p> <table border="1" data-bbox="338 778 779 951"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th><math>\alpha \rightarrow \alpha + \beta</math></th> <th><math>\alpha + \beta \rightarrow \beta</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>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<sup>(4)</sup> 単位：HK（ヌーブ硬さ値）</p> <table border="1" data-bbox="396 1038 725 1219"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HK 0.1<sup>(5)</sup>)</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 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 <sup>(5)</sup> )	MDA	206	ZIRLO	205	ジルカロイ-4（参考）	204	<p>(資料8)</p> <p>第5-1表 MDA及びZIRLOの溶融点測定結果<sup>(30), (30)</sup> (単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1171 442 1532 643"> <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>第5-2表 MDA及びZIRLOの相変態温度測定結果<sup>(40)</sup> (単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1135 735 1565 906"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th><math>\alpha \rightarrow \alpha + \beta</math></th> <th><math>\alpha + \beta \rightarrow \beta</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>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>第5-3表 MDA及びZIRLO被覆管の硬さの測定結果<sup>(40)</sup> (単位：HK（ヌーブ硬さ値）)</p> <table border="1" data-bbox="1193 999 1516 1187"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HK 0.1<sup>(5)</sup>)</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) 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 <sup>(5)</sup> )	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 <sup>(5)</sup> )																																																									
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 <sup>(5)</sup> )																																																									
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

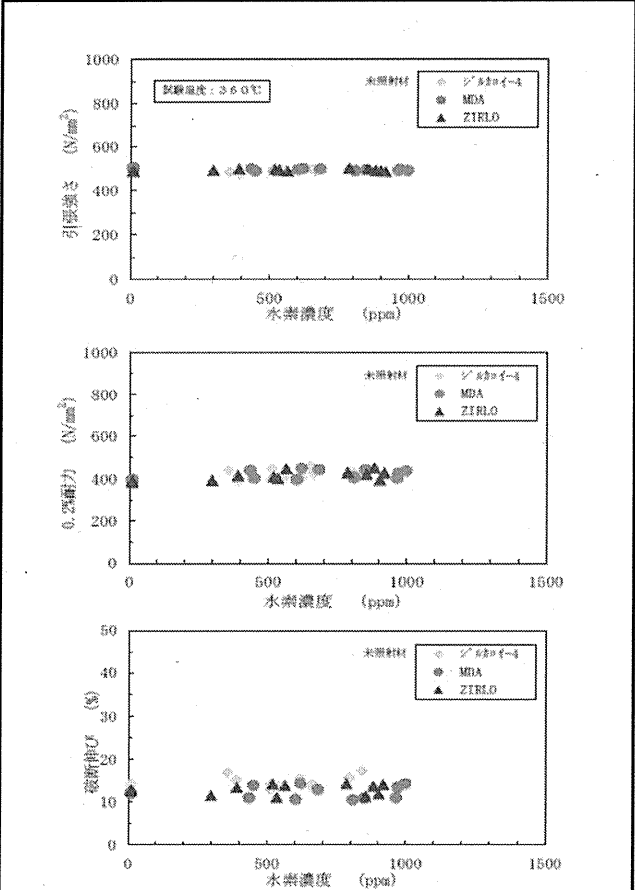
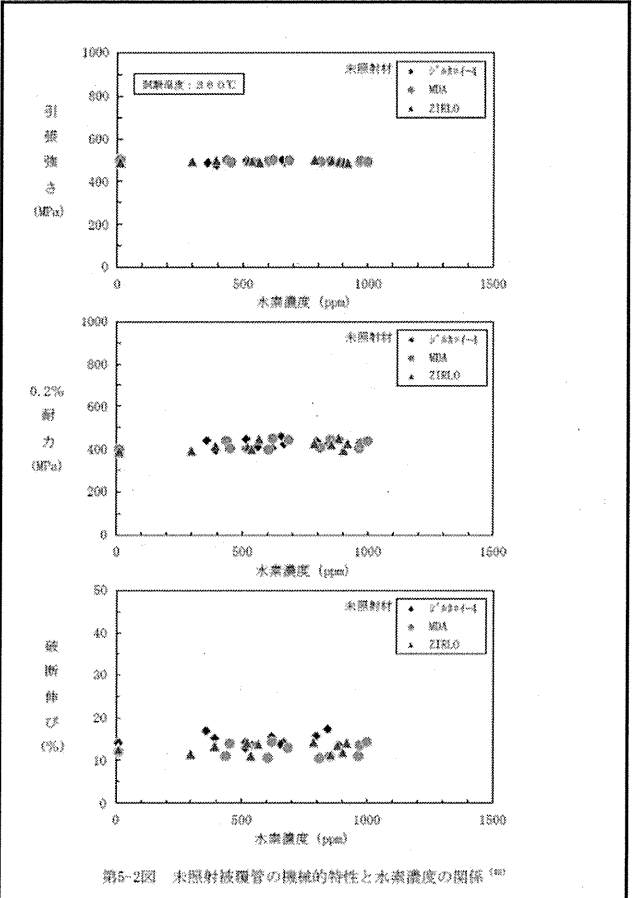
特認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考																																																						
<p style="text-align: center;">表 3. 4-1 化学成分及び不純物の分析試験方法並びに許容変動値 単位：wt%</p>																																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">化学成分 不純物</th> <th style="width: 40%;">分析試験方法 (注1)</th> <th style="width: 40%;">許容変動値 (注2)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S n</td> <td>JIS H 1659 又は JIS H 1669</td> <td>0.050</td> </tr> <tr> <td>F e</td> <td>JIS H 1654 又は JIS H 1669</td> <td>0.020</td> </tr> <tr> <td>C r</td> <td>JIS H 1656 又は JIS H 1669</td> <td>0.010 (注3)</td> </tr> <tr> <td>F e+C r</td> <td>—</td> <td>0.020</td> </tr> <tr> <td>N b (注4)</td> <td>JIS H 1668-71</td> <td style="background-color: black; color: black;">[REDACTED]</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>JIS H 1665</td> <td>0.020</td> </tr> <tr> <td>A l</td> <td>JIS H 1661</td> <td rowspan="10" style="text-align: center; vertical-align: middle;">0.0020 又は規格値の20%のいずれか の小さい方の値</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>C d</td> <td>JIS H 1671-82</td> </tr> <tr> <td>C o</td> <td>JIS H 1658</td> </tr> <tr> <td>C u</td> <td>JIS H 1657</td> </tr> <tr> <td>H l</td> <td>JIS H 1667</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>JIS H 1664</td> </tr> <tr> <td>M n</td> <td>JIS H 1652</td> </tr> <tr> <td>N i</td> <td>JIS H 1655 又は JIS H 1669</td> <td style="text-align: center;">注 4 参照</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>JIS H 1653</td> <td rowspan="5" style="text-align: center; vertical-align: middle;">0.0020 又は規格値の20%のいずれか の小さい方の値</td> </tr> <tr> <td>S i</td> <td>JIS H 1660</td> </tr> <tr> <td>T i</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>			化学成分 不純物	分析試験方法 (注1)	許容変動値 (注2)	S n	JIS H 1659 又は JIS H 1669	0.050	F e	JIS H 1654 又は JIS H 1669	0.020	C r	JIS H 1656 又は JIS H 1669	0.010 (注3)	F e+C r	—	0.020	N b (注4)	JIS H 1668-71	[REDACTED]	O	JIS H 1665	0.020	A l	JIS H 1661	0.0020 又は規格値の20%のいずれか の小さい方の値	B	JIS H 1670-82	C	JIS H 1663	C d	JIS H 1671-82	C o	JIS H 1658	C u	JIS H 1657	H l	JIS H 1667	H	JIS H 1664	M n	JIS H 1652	N i	JIS H 1655 又は JIS H 1669	注 4 参照	N	JIS H 1653	0.0020 又は規格値の20%のいずれか の小さい方の値	S i	JIS H 1660	T i	JIS H 1662	U	JIS H 1672-82	W	JIS H 1674-92
化学成分 不純物	分析試験方法 (注1)	許容変動値 (注2)																																																						
S n	JIS H 1659 又は JIS H 1669	0.050																																																						
F e	JIS H 1654 又は JIS H 1669	0.020																																																						
C r	JIS H 1656 又は JIS H 1669	0.010 (注3)																																																						
F e+C r	—	0.020																																																						
N b (注4)	JIS H 1668-71	[REDACTED]																																																						
O	JIS H 1665	0.020																																																						
A l	JIS H 1661	0.0020 又は規格値の20%のいずれか の小さい方の値																																																						
B	JIS H 1670-82																																																							
C	JIS H 1663																																																							
C d	JIS H 1671-82																																																							
C o	JIS H 1658																																																							
C u	JIS H 1657																																																							
H l	JIS H 1667																																																							
H	JIS H 1664																																																							
M n	JIS H 1652																																																							
N i	JIS H 1655 又は JIS H 1669		注 4 参照																																																					
N	JIS H 1653	0.0020 又は規格値の20%のいずれか の小さい方の値																																																						
S i	JIS H 1660																																																							
T i	JIS H 1662																																																							
U	JIS H 1672-82																																																							
W	JIS H 1674-92																																																							
<p>(注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。</p>																																																								
<p>(注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。</p>																																																								
<p>(注3) MDA及びZIRLO被覆管のNb許容変動値は、[REDACTED]に従う。</p>																																																								
<p>(注4) MDA及びZIRLO被覆管のNi許容変動値は、[REDACTED]</p>																																																								
<p>(注5) ZIRLO被覆管のCr許容変動値は、[REDACTED]</p>																																																								
<p style="text-align: center;">2-14</p>																																																								
		<p>検査方法等については、本設工認における工事の方法にて、全施設を網羅するように工事の手順、使用前事業者検査の方法等を記載している。以上のことから、当該記載については比較対象外。</p>																																																						

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 (伊方発電所第3号機 A型燃料集合体)	設工認 (伊方発電所第3号機 A型燃料集合体)	備考
 <p>図 2.2-1 MDA及びZIRLO被覆管の機械特性 (1, 2)</p> <p>2-15</p>	<p>(資料8)</p>  <p>第5-1図 MDA及びZIRLO被覆管の機械特性 (10、110、240、441、640、645)</p> <p>(注) 仕様内でSn含有量を下限近くまで下げたもの。</p> <p>- 資8-29 -</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 (伊方発電所第3号機 A型燃料集合体)	設工認 (伊方発電所第3号機 A型燃料集合体)	備考
 <p>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>(資料8)</p>  <p>第5-2図 未照射被覆管の機械的特性と水素濃度の関係 [4]</p>	

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

特認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）

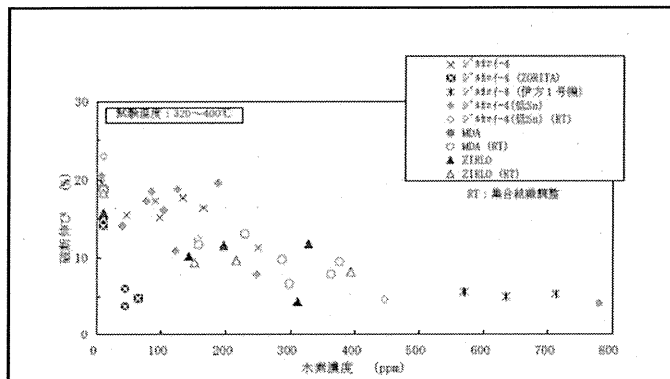


図 2.2-3 被覆管水素濃度と破断伸びの関係<sup>(2)</sup>

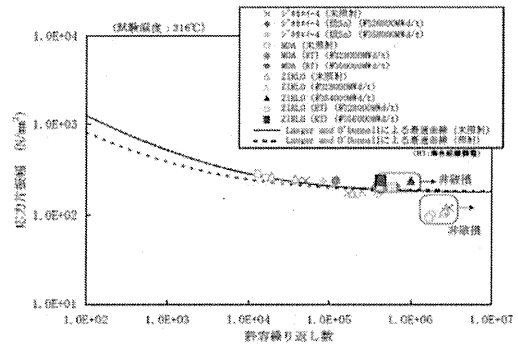
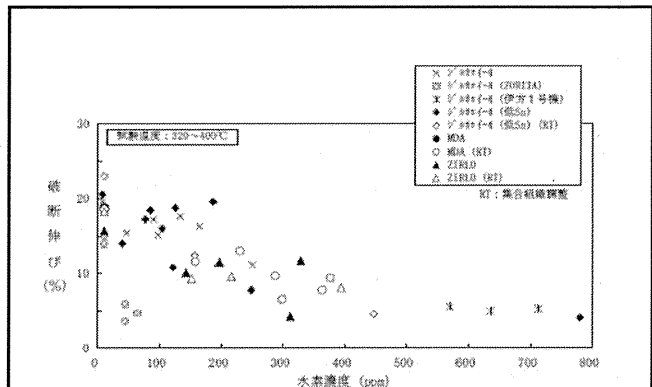


図 2.2-4 MDA及ZIRLO被覆管の疲労強度<sup>(1),(2)</sup>

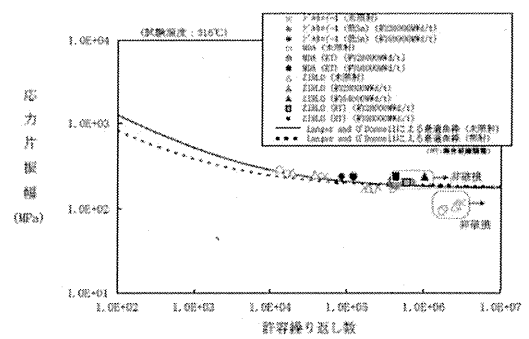
2-17

設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）

(資料8)



第5-3図 被覆管水素濃度と破断伸びの関係<sup>(a)</sup>



第5-4図 MDA及ZIRLO被覆管の疲労強度<sup>(1),(2),(3),(4),(5)</sup>

- 資8-34 -

備考

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 (伊方発電所第3号機 A型燃料集合体)	設工認 (伊方発電所第3号機 A型燃料集合体)	備考
<div data-bbox="206 328 887 711" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="358 727 784 753" data-label="Caption"> <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="259 836 819 1187" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="403 1203 761 1228" data-label="Caption"> <p>図 2.2-6 MDA及びZIRLO被覆管の照射成長 [3]</p> </div>	<div data-bbox="958 233 1030 258" data-label="Text"> <p>(資料8)</p> </div> <div data-bbox="1025 328 1688 711" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="1120 746 1590 772" data-label="Caption"> <p>第5-5図 燃料棒外径変化 (実機照射セグメント燃料棒) [12], [19], [44]</p> </div> <div data-bbox="1061 807 1621 1187" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="1120 1193 1590 1219" data-label="Caption"> <p>第5-6図 MDA及びZIRLO被覆管の照射成長 [12], [19], [44]</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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）

設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）

備考

(資料8)

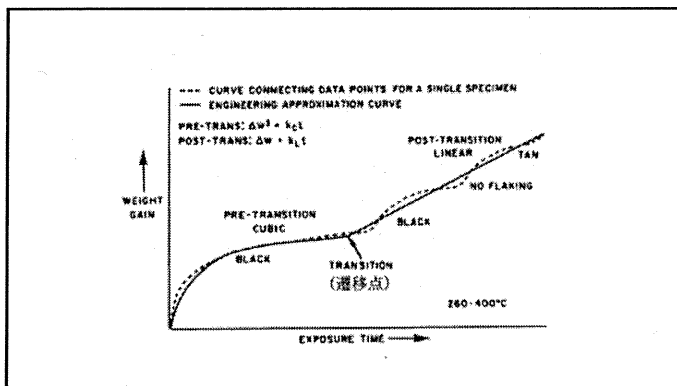
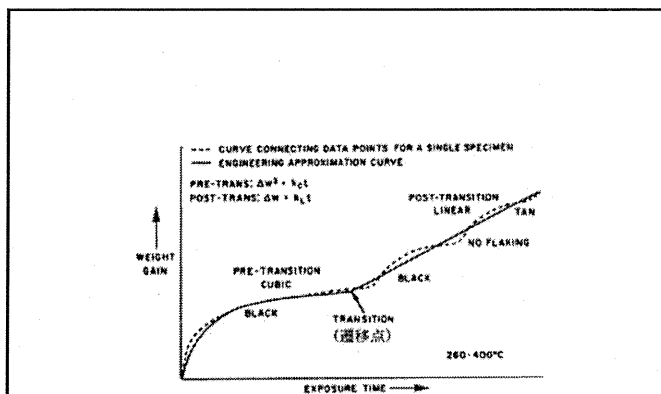


図 2.3-1 炉外腐食試験におけるジルカロイ-2とジルカロイ-4の典型的な腐食増量曲線<sup>(2)</sup>



第5-7図 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<sup>(3)</sup>

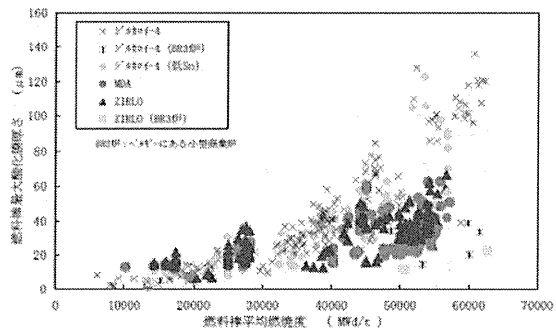
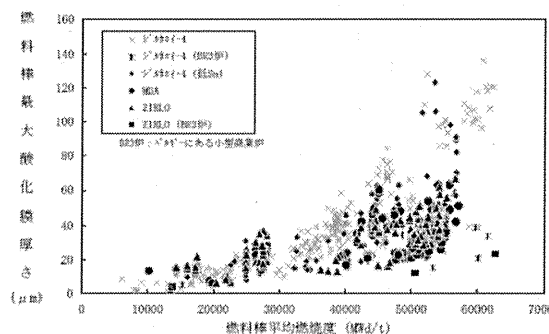
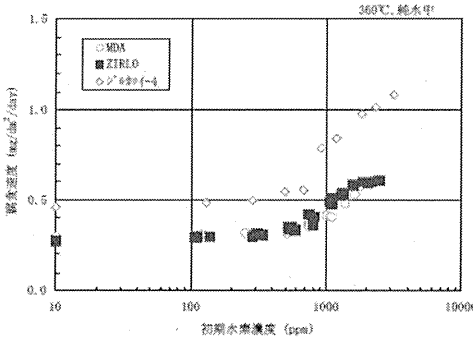


図 2.3-2 MDA及びZIRLO被覆管の炉内酸化膜厚さ<sup>(2)\*1</sup>  
\*1) オンサイト酸化膜厚さデータの一部はホットセルデータを参考に評価。



第5-8図 MDA及びZIRLO被覆管の炉内酸化膜厚さ<sup>(3)\*1</sup>、<sup>(3)\*2</sup>、<sup>(3)\*3</sup>、<sup>(3)\*4</sup>、<sup>(3)\*5</sup>、<sup>(3)\*6</sup>、<sup>(3)\*7</sup>、<sup>(3)\*8</sup>  
(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。

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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考
 <p>360℃、純水中</p> <p>○MDA ■ZIRLO ◇Zircaloy-4</p> <p>縦軸：腐食速度 (mm/year) 横軸：初期水濃度 (ppm)</p> <p>図 2.3-3 水素吸収させた被覆管の伊方腐食速度<sup>[2]</sup></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（資料8第5-8図）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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）

設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）

備考

(資料8)

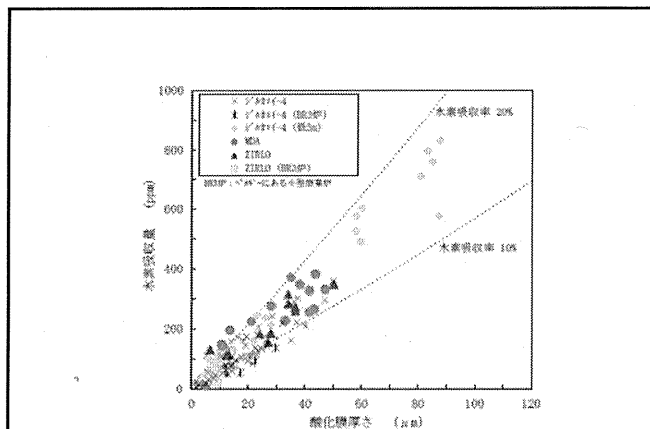
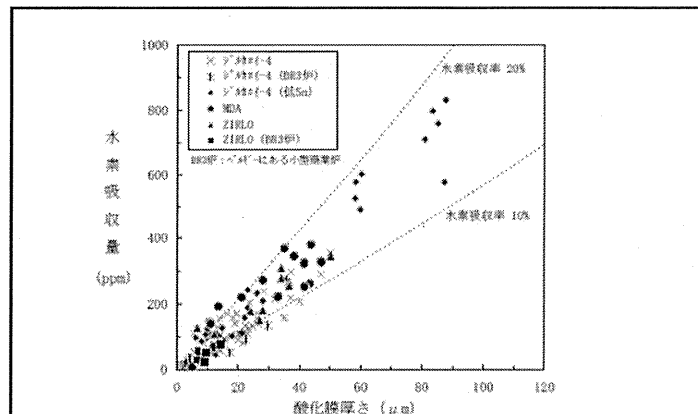


図 2-3-4 MDA及びZIRLO被覆管の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係<sup>[2]</sup>



第5-9図 MDA及びZIRLO被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係<sup>(10)、(11)、(13)～(15)、(41)、(46)</sup>

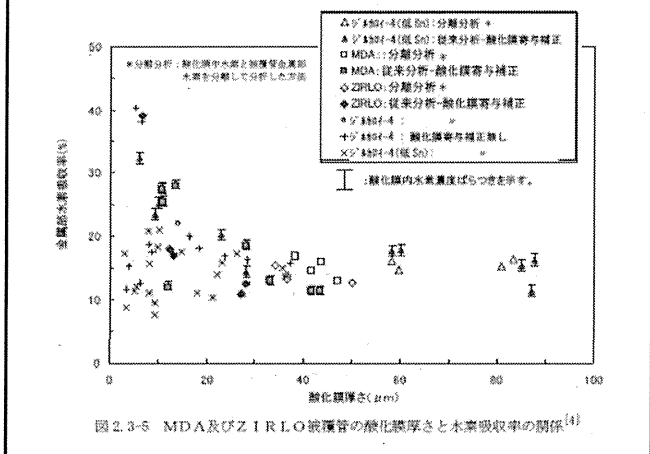
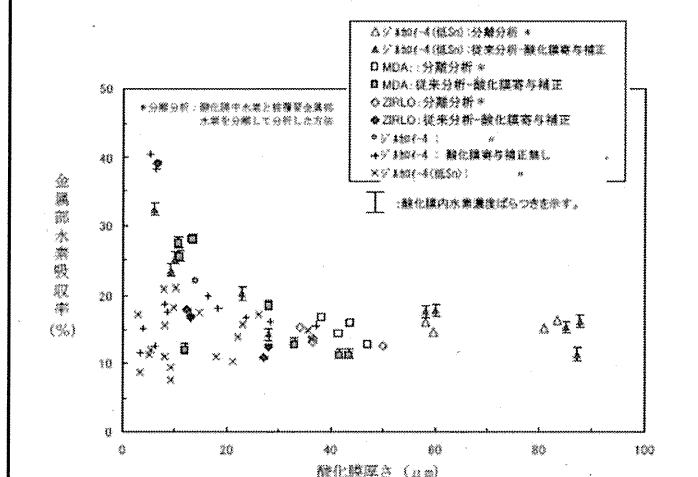


図 2-3-5 MDA及びZIRLO被覆管の酸化膜厚さと水素吸収率の関係<sup>[4]</sup>



第5-10図 MDA及びZIRLO被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収率の関係<sup>(10)</sup>

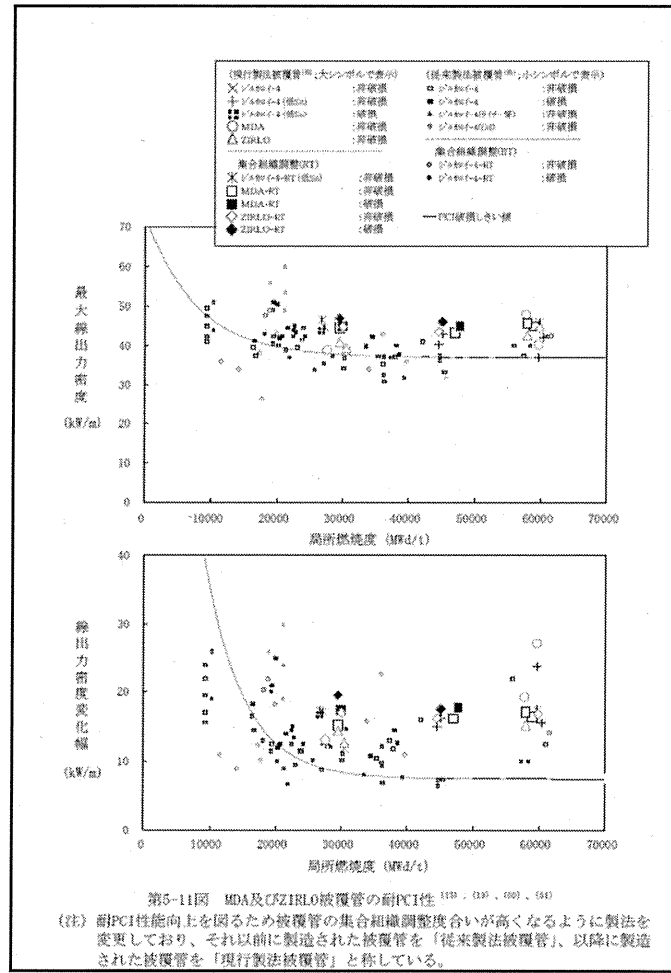
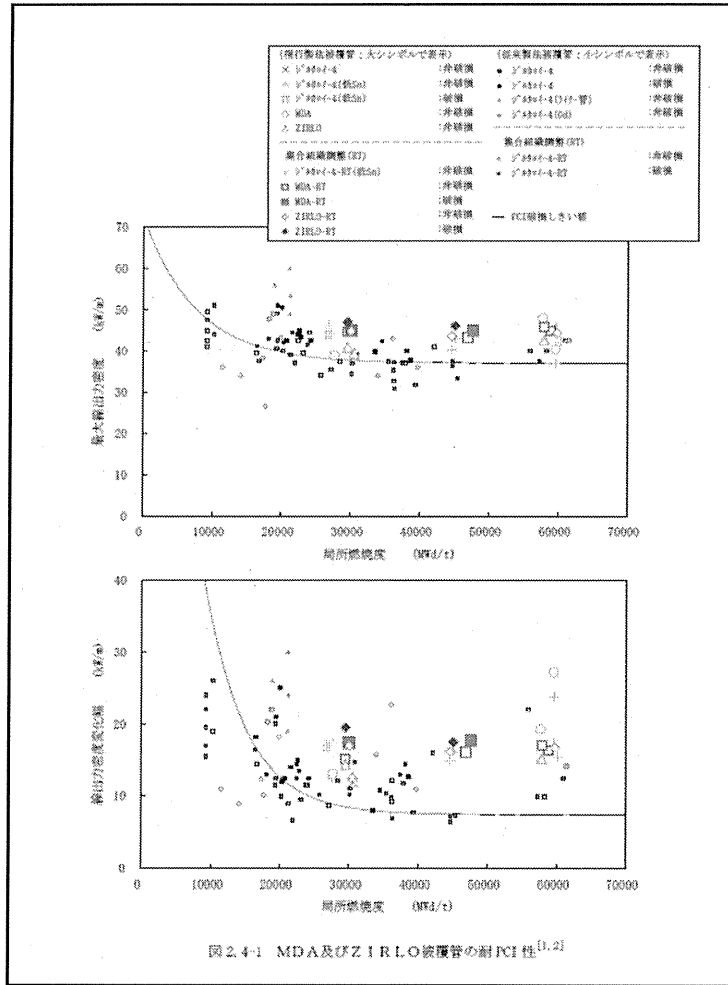
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表1

特認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）

設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）

備考

(資料8)

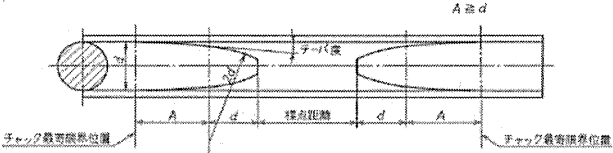


下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="192 293 887 687" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="353 715 703 735" data-label="Caption"> <p>図 2.4-2 未照射管のLOCA時破断挙動試験結果（受取管）<sup>(12)</sup></p> </div> <div data-bbox="389 788 680 1214" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="376 1241 703 1262" data-label="Caption"> <p>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）<sup>(13)</sup></p> </div>	<div data-bbox="958 236 1032 256" data-label="Text"> <p>（資料8）</p> </div> <div data-bbox="1043 256 1682 639" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="1122 660 1626 681" data-label="Caption"> <p>第5-12図 未照射管のLOCA時破断挙動試験結果（受取管）<sup>(10)</sup></p> </div> <div data-bbox="1189 751 1503 1230" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="1093 1251 1648 1272" data-label="Caption"> <p>第5-13図 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数（受取管）<sup>(10)</sup></p> </div>	<p>備考</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（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	設工認（伊方発電所第3号機 A型燃料集合体）	備考
 <p data-bbox="459 625 600 643">図 3.4-1 心金の形状</p>		<p data-bbox="1780 263 2083 459">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、資料6「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資料6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	(注2) (同左)
	制御棒案内シンプル	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3) 再稼働工認	(同上)	(同上)	—
(注4) 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) 燃料被覆管の評価については、燃料体設計認可において工事計画認可の評価項目を包含するより厳しい条件にて評価を実施

(注3) 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4) 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
伊方3号機	平成28年3月23日付け原規規発第1603231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
伊方3号機	令和元年6月10日付け原規規発第1906103号にて認可

以上

## 補足説明資料 8

### 基本設計方針と技術基準規則等 の関係について

## 1. 概要

本資料は、法令等の改正内容を踏まえ、燃料体に係る要求事項を基本設計方針に追加したことから、基本設計方針と技術基準規則等の関係について別紙のとおり整理したものである。



基本設計方針と技術基準規則等の関係

伊方3号機 17行17列A型燃料集合体	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明
<p>第2章 個別項目</p> <p>1. 炉心等</p> <p>燃料体(燃料材、燃料要素及びその他の部品を含む)は、設置(変更)許可を受けた仕様となる構造及び設計とする。</p> <p>燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における原子炉運転状態に対応した圧力、温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量及び水質の組み合わせのうち想定される最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法安定性、耐熱性、核性質及び強度のうち必要な物理的性質並びに耐食性、水素吸収特性及び化学的安定性のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。<u>燃料体の物理的性質及び化学的性質について、「1.1 燃料体」に基づき設計する。</u></p> <p>燃料体は下部炉心板の上に配列され、その荷重を下部炉心支持板及び炉心槽により原子炉容器のフランジで支持する設計とする。</p> <p>燃料体は、「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について」(昭和51年2月16日 原子炉安全専門審査会)及び「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)に基づき、設置(変更)許可を受けた、<u>通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重に加え、核分裂生成物の蓄積による燃料被覆材の内圧上昇及び熱応力の荷重に耐える設計とする。</u></p> <p>炉心支持構造物は、最高使用圧力、自重、附加荷重及び地震力に加え、熱応力の荷重に耐える設計とする。</p>	<p>(炉心等)</p> <p>第二十三条 燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない。</p> <p>2 燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物は、<u>最高使用圧力</u>、自重、附加荷重その他の燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物に加わる負荷に耐えるものでなければならない。</p>	<p>第23条(炉心等)</p> <p>1 第1項に規定する「最も厳しい条件」とは、原子炉運転状態に対応した圧力及び温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量等の組み合わせのうち想定される最も厳しい条件をいう。また、「必要な物理的及び化学的性質」とは、物理的性質については耐放射線性、寸法安定性、耐熱性及び核性質等をいい、化学的性質については耐食性及び化学的安定性等をいう。</p> <p>3 第1項及び第2項の燃料体の物理的性質、化学的性質及び強度等については「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について(昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承)」及び「燃料体に関する要求事項(別記-10)」によること。</p> <p>2 第2項における「その他の燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物に加わる負荷」には、燃料体における核分裂生成物の蓄積による燃料被覆管の内圧上昇及び熱応力等の荷重を含むものとする。</p>	<p><u>【水質を記載することについて】</u></p> <p>燃料の健全性評価において水質を考慮する必要があることから、明確化のため記載している。具体的には、「燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書」の5.3耐食性に「実機では放射線照射下で～酸素の発生を抑制している。」に1次冷却材の環境について記載があり、5.3.1酸化腐食による影響、5.3.2水素吸収による影響にて水質含めた試験結果を踏まえ影響を確認している旨記載している。</p> <p><u>【基本設計方針の1.と1.1の関係性について】</u></p> <p>基本設計方針は、別記-10の仕様を満たした上で技術基準規則の本則を満たすことを説明している。</p> <p><u>【最高使用圧力としないことについて】</u></p> <p>燃料体(燃料要素)では圧力について内外圧差の最大で評価しており、1次冷却材の圧力は保守的に通常運転時の圧力としている。そのため、基本設計方針には、「最高使用圧力」と記載していない。詳細は、添付1に示す。</p>

伊方3号機 17行17列A型燃料集合体	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明
<p>炉心は、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時に発電用原子炉の運転に支障が生ずる場合において、原子炉冷却系統、原子炉停止系統、反応度制御系統、計測制御系統及び安全保護回路の機能と併せて機能することにより、燃料要素の許容損傷限界を超えない設計とする。</p> <p>燃料体(燃料要素以外の燃料体の構成要素)、減速材、反射材及び炉心支持構造物(原子炉容器内で炉心付近に位置する燃料体以外の構成要素)は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、発電用原子炉を安全に停止し、かつ、停止後に炉心の冷却機能を維持できる設計とする。</p> <p>1.1 燃料体 1.1.1 17行17列A型燃料集合体(ウラン燃料)</p> <p>二酸化ウラン燃料材は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>(1) 以下に掲げる元素を含有する場合における当該元素の含有量のウランの含有量に対する百分率の値は、それぞれ以下に掲げる値であること。</p> <p>炭素 0.010以下 ふっ素 0.0015以下 水素 0.0002以下 窒素 0.0075以下</p> <p>(2) ウラン235の含有量のウラン含有量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(3) ペレット型燃料材にあつては、ペレットが次に適合する設計とする。</p> <p>a. 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。 b. 密度の偏差は、著しく大きくないこと。 c. 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。 d. 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(4) ガドリニウムを添加していないものにあつては、次に適合する設計とする。</p> <p>a. ウランの含有量の全重量に対する百分率の値は、87.7以上であること。</p>		<p>(別記-10)</p> <p>1. 二酸化ウラン燃料材 二酸化ウラン燃料材は、次の(1)~(5)のいずれにも適合すること。</p> <p>(1) 次の表の左欄に掲げる元素を含有する場合における当該元素の含有量のウランの含有量に対する百分率の値は、それぞれ同表の右欄に掲げる値であること。</p> <p>炭素 0.010 以下 ふっ素 0.0015 以下 水素 0.0002 以下 窒素 0.0075 以下</p> <p>(2) ウラン235 の含有量のウランの含有量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(3) ペレット型燃料材にあつては、ペレットが次に適合すること。</p> <p>①各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。 ②密度の偏差は、著しく大きくないこと。 ③表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。 ④表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(4) ガドリニウムを添加していないものにあつては、次に適合すること。</p> <p>① ウランの含有量の全重量に対する百分率の値は、87.7 以上であること。</p>	

伊方3号機 17行17列A型燃料集合体	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明
<p>b. 酸素の原子数のウランの原子数に対する比率の値は、1.99以上2.02以下であること。</p> <p>(5) ガドリニウムを添加したものにあっては、次に適合する設計とする。</p> <p>a. ウランの含有量の全重量に対する百分率の値は、実用上差し支えがないものであること。</p> <p>b. 酸素の原子数のウランの原子数に対する比率の値は、実用上差し支えがないものであること。</p> <p>c. ガドリニウムの含有量の全重量に対する百分率の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>d. ガドリニウムの均一度は、実用上差し支えがないものであること。</p>		<p>② 酸素の原子数のウランの原子数に対する比率の値は、1.99 以上2.02 以下であること。</p> <p>(5) ガドリニウムを添加したものにあっては、次に適合すること。</p> <p>① ウランの含有量の全重量に対する百分率の値は、実用上差し支えがないものであること。</p> <p>② 酸素の原子数のウランの原子数に対する比率の値は、実用上差し支えがないものであること。</p> <p>③ ガドリニウムの含有量の全重量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>④ ガドリニウムの均一度は、実用上差し支えがないものであること。</p> <p><u>2. ウラン・プルトニウム混合酸化燃料材</u></p> <p>ウラン・プルトニウム混合酸化燃料材は、次の(1)～(5)のいずれにも適合すること。</p> <p>(1) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 酸素の原子数のウラン及びプルトニウムの原子数の合計に対する比率の値は、実用上差し支えがないものであること。</p> <p>(3) ウラン235、プルトニウム239 及びプルトニウム241 の含有量の合計のウラン及びプルトニウムの含有量の合計に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(4) プルトニウムの均一度は、実用上差し支えがないものであること。</p> <p>(5) ペレット型燃料材にあっては、ペレットが次に適合すること。</p> <p>① 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>② 密度の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>③ 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p> <p>④ 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p>	<p><u>【2. を記載しないことについて】</u></p> <p>ウラン燃料に係る申請のため、ウラン・プルトニウム混合酸化燃料材の要求事項は記載しない。</p>

伊方3号機 17行17列A型燃料集合体	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明																								
<p>ジルコニウム合金燃料被覆材は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 被覆材の軸は、著しく湾曲していないこと。</p> <p>(3) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値は、主成分について以下に掲げる値であること。また、不純物は<u>日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表3</u>に規定する値（主成分とするものは除く。）であること。</p> <p>・ Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金</p> <table border="0"> <tr><td>スズ</td><td>0.70～0.90</td></tr> <tr><td>鉄</td><td>0.18～0.24</td></tr> <tr><td>クロム</td><td>0.07～0.13</td></tr> <tr><td>鉄+クロム</td><td>0.28～0.37</td></tr> <tr><td>ニオブ</td><td>0.45～0.55</td></tr> <tr><td>酸素</td><td><span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px;"></span></td></tr> <tr><td>ジルコニウム</td><td>残り</td></tr> </table> <p>・ Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金</p> <table border="0"> <tr><td>スズ</td><td>0.90～1.30</td></tr> <tr><td>鉄</td><td>0.08～0.12</td></tr> <tr><td>ニオブ</td><td>0.80～1.20</td></tr> <tr><td>酸素</td><td><span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px;"></span></td></tr> <tr><td>ジルコニウム</td><td>残り</td></tr> </table> <p>(4) <u>日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書C 水素化物方位試験方法」</u>又はこれと同等の方法によって水素化物方位試験を行ったとき、水素化物方向性係数が0.45を超えないこと。</p> <p>(5) <u>日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書D 超音波探傷試験方法」</u>又はこれと同等の方法によって超音波探傷試験を行ったとき、対比試験片の人工傷からの欠陥信号と同等以上の欠陥信号がないこと。</p> <p>(6) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p> <p>(7) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(8) 表面の粗さの程度は、実用上差し支えがないものであること。</p>	スズ	0.70～0.90	鉄	0.18～0.24	クロム	0.07～0.13	鉄+クロム	0.28～0.37	ニオブ	0.45～0.55	酸素	<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px;"></span>	ジルコニウム	残り	スズ	0.90～1.30	鉄	0.08～0.12	ニオブ	0.80～1.20	酸素	<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px;"></span>	ジルコニウム	残り		<p>3. ジルコニウム合金燃料被覆材</p> <p>ジルコニウム合金燃料被覆材は、次の(1)～(4)のいずれにも適合すること。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 被覆材の軸は、著しく湾曲していないこと。</p> <p>(3) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値は、<u>日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表2</u>及び表3に規定する値であること。</p> <p>(4) <u>日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書C 水素化物方位試験方法」</u>又はこれと同等の方法によって水素化物方位試験を行ったとき、水素化物方向性係数が0.45を超えないこと。</p> <p>(5) <u>日本産業規格H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書D 超音波探傷試験方法」</u>又はこれと同等の方法によって超音波探傷試験を行ったとき、対比試験片の人工傷からの欠陥信号と同等以上の欠陥信号がないこと。</p> <p>(6) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p> <p>(7) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(8) 表面の粗さの程度は、実用上差し支えがないものであること。</p>	<p><u>【適用基準及び適用規格の記載について】</u></p> <p>下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。（本頁の3つは同じもの）</p>
スズ	0.70～0.90																										
鉄	0.18～0.24																										
クロム	0.07～0.13																										
鉄+クロム	0.28～0.37																										
ニオブ	0.45～0.55																										
酸素	<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px;"></span>																										
ジルコニウム	残り																										
スズ	0.90～1.30																										
鉄	0.08～0.12																										
ニオブ	0.80～1.20																										
酸素	<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px;"></span>																										
ジルコニウム	残り																										

伊方3号機 17行17列A型燃料集合体	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明
<p>と。</p> <p>(9) 日本産業規格H4751 (2016) 「ジルコニウム合金管」の「附属書B 腐食試験方法」又はこれと同等の方法によって腐食試験を行ったとき、表面に著しい白色又は褐色の酸化物が付着せず、かつ、腐食質量増加が3日間で22mg/dm<sup>2</sup>以下又は14日間で38mg/dm<sup>2</sup>以下であること。</p> <p>(10) 応力除去焼きなましを行ったものにあつては、日本産業規格Z2241 (2011) 「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。</p> <p>ジルコニウム合金端栓は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値は、日本産業規格H4751 (2016) 「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表2及び表3に規定する値であること。ただし、表3に掲げるニオブ及びカルシウムを除く。</p> <p>(3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p>		<p>ること。</p> <p>(9) 日本産業規格H4751 (2016) 「ジルコニウム合金管」の「附属書B 腐食試験方法」又はこれと同等の方法によって腐食試験を行ったとき、表面に著しい白色又は褐色の酸化物が付着せず、かつ、腐食質量増加が3日間で22ミリグラム毎平方デシメートル以下又は14日間で38 ミリグラム毎平方デシメートル以下であること。</p> <p>(10) 再結晶焼きなましを行ったものにあつては、次に適合すること。</p> <p>① 日本産業規格H4751 (2016) 「ジルコニウム合金管」の「附属書A 結晶粒度試験方法」又はこれと同等の方法によって結晶粒度試験を行ったとき、結晶粒度が結晶粒度番号7と同等又はこれより細かいこと。</p> <p>② 日本産業規格Z2241 (2011) 「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが日本産業規格H4751 (2016) 「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表4 に規定する値であること。</p> <p>(11) 応力除去焼きなましを行ったものにあつては、日本産業規格Z2241 (2011) 「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。</p> <p>4. ジルコニウム合金端栓</p> <p>(1) 再結晶焼きなましを行ったジルコニウム合金端栓は、日本産業規格Z2241 (2011) 「金属材料引張試験方法」、ASTM International 規格 ASTM B 351 「Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Zirconium and Zirconium Alloy Bars, Rod, and Wire for Nuclear Application」又はこれと同等の方法によって次の表の上欄に掲げるいずれかの試験温度におい</p>	<p>【適用基準及び適用規格の記載について】</p> <p>下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。(前頁と同じもの)</p> <p>【(10) を記載しないことについて】</p> <p>ジルコニウム合金燃料被覆材に再結晶焼きなましを行ったものは使用しないため、(10) は基本設計方針に記載しない。</p> <p>【適用基準及び適用規格の記載について】</p> <p>下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</p>

伊方3号機 17行17列A型燃料集合体	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明																
<p>(4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(5) <u>日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」</u>の「附属書B 腐食試験方法」又はこれと同等の方法によって腐食試験を行ったとき、表面に著しい白色又は褐色の酸化物が付着せず、かつ、腐食質量増加が3日間で22mg/dm<sup>2</sup>以下又は14日間で38mg/dm<sup>2</sup>以下であること。</p> <p>(6) 再結晶焼きなましを行ったジルコニウム合金端栓は、<u>日本産業規格Z2241(2011)「金属材料引張試験方法」、ASTM International規格ASTM B 351「Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Zirconium and Zirconium Alloy Bars, Rod, and Wire for Nuclear Application」</u>又はこれと同等の方法によって以下に掲げるいずれかの試験温度において引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが同欄に掲げる試験温度の区分に応じ、それぞれ以下に掲げる値であるものであること。</p> <p>a. 試験温度 室温 引張強さ：415N/mm<sup>2</sup>以上 耐力：240N/mm<sup>2</sup>以上 伸び：14%以上</p> <p>b. 試験温度316℃ 引張強さ：215N/mm<sup>2</sup>以上 耐力：105N/mm<sup>2</sup>以上 伸び：24%以上</p> <p>燃料材、燃料被覆材及び端栓以外の燃料体の部品は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。 (2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。 (3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。 (4) 支持格子、上部支持板、下部支持板、制御棒案内シンプルにあつては、次に適合する設計とする。</p> <p>a. 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値の偏差は、</p>		<p>て引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが同欄に掲げる試験温度の区分に応じ、それぞれ同表の下欄に掲げる値であること。端栓とは、燃料被覆材の両端を密封するために成形された金属部品をいう。</p> <table border="1" data-bbox="1160 347 1659 603"> <thead> <tr> <th colspan="4">引張試験</th> </tr> <tr> <th>温度</th> <th>引張強さ ニュートン 毎平方ミリ メートル</th> <th>耐力 ニュートン 毎平方ミリ メートル</th> <th>伸び パーセント</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>室温</td> <td>415 以上</td> <td>240 以上</td> <td>14 以上</td> </tr> <tr> <td>316 度</td> <td>215 以上</td> <td>105 以上</td> <td>24 以上</td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 応力除去焼きなましを行ったジルコニウム合金端栓は、<u>日本産業規格Z2241(2011)「金属材料引張試験方法」</u>又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。</p> <p>(3) 前記「3. ジルコニウム合金燃料被覆材」((2)、(4)、(5)、(8)、(10)及び(11)を除く。)の規定は、ジルコニウム合金端栓に準用する。ただし、(3)の日本産業規格H4751(2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表3に掲げるニオブ及びカルシウムを除く。</p> <p>5. その他の部品 燃料材、燃料被覆材及び端栓以外の燃料体の部品は、次の(1)～(4)のいずれにも適合すること。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。 (2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。 (3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。 (4) 支持格子、上部支持板、下部支持板、ウォータロッド、制御棒案内シンプルにあつては、次に適合すること。</p> <p>① 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値の偏</p>	引張試験				温度	引張強さ ニュートン 毎平方ミリ メートル	耐力 ニュートン 毎平方ミリ メートル	伸び パーセント	室温	415 以上	240 以上	14 以上	316 度	215 以上	105 以上	24 以上	<p><u>【適用基準及び適用規格の記載について】</u> 下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。(本頁の3つのうち、2つは前頁と同じもの)</p> <p><u>【(2)を記載しないことについて】</u> ジルコニウム合金端栓に応力除去焼きなましを行ったものは使用しないため、(2)は基本設計方針に記載しない。 なお、(3)を踏まえて、ジルコニウム合金端栓材の要求事項を記載している。</p> <p><u>【(4)の一部を記載しないことについて】</u> 本申請の燃料体構成部品にウォータロッドは使用しないため、(4)の一部は基本設計方針に記載しない。</p>
引張試験																			
温度	引張強さ ニュートン 毎平方ミリ メートル	耐力 ニュートン 毎平方ミリ メートル	伸び パーセント																
室温	415 以上	240 以上	14 以上																
316 度	215 以上	105 以上	24 以上																

伊方3号機 17行17列A型燃料集合体	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明
<p>著しく大きくないこと。</p> <p>b. <u>日本産業規格Z2241 (2011)「金属材料引張試験方法」</u>又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。</p> <p>(5) <u>コイルばねにあつては、ばね定数が</u> <input type="text"/> <u>N/cmであること。</u></p> <p>燃料要素は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 燃料要素の軸は、著しく湾曲していないこと。</p> <p>(3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p> <p>(4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(5) <u>日本産業規格Z4504 (2008)「放射性表面汚染の測定方法—β線放出核種（最大エネルギー0.15MeV以上）及びα線放出核種」</u>における間接測定法又はこれと同等の方法によって測定したとき、表面に付着している核燃料物質の量が0.00004Bq/mm<sup>2</sup>を超えないこと。</p> <p>(6) ヘリウム漏えい試験を行ったとき、漏えい量が1億分の304MPa・mm<sup>3</sup>/sを超えないこと。</p> <p>(7) 溶接部にブローホール、アンダーカット等で有害なものがないこと。</p> <p>(8) 部品の欠如がないこと。</p> <p>(9) <u>ヘリウム加圧量は、次のとおりであること。</u>  <u>二酸化ウラン燃料要素：</u> <input type="text"/> <u>MPa[gauge]</u>  <u>ガドリニア入り二酸化ウラン燃料要素：</u> <input type="text"/> <u>MPa[gauge]</u></p> <p>燃料要素の集合体である燃料体は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p>		<p>差は、著しく大きくないこと。</p> <p>② <u>日本産業規格Z2241 (2011)「金属材料引張試験方法」</u>又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。</p> <p>6. 燃料要素  燃料要素は、次の(1)～(8)のいずれにも適合すること。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 燃料要素の軸は、著しく湾曲していないこと。</p> <p>(3) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p> <p>(4) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p> <p>(5) <u>日本産業規格Z4504 (2008)「放射線表面汚染の測定方法—β線放出核種（最大エネルギー0.15MeV以上）及びα線放出核種」</u>における間接測定法又はこれと同等の方法によって測定したとき、表面に付着している核燃料物質の量が0.00004ベクレル毎平方ミリメートルを超えないこと。</p> <p>(6) ヘリウム漏えい試験を行ったとき、漏えい量が1億分の304メガパスカル立方ミリメートル毎秒を超えないこと。</p> <p>(7) 溶接部にブローホール、アンダーカット等で有害なものがないこと。</p> <p>(8) 部品の欠如がないこと。</p> <p>7. 燃料体  燃料体は、次の(1)～(4)のいずれにも適合すること。</p> <p>(1) 各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2) 表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p>	<p><u>【適用基準及び適用規格の記載について】</u>  下線部の規格は適用基準及び適用規格に記載している。</p> <p><u>【(5)を記載することについて】</u>  旧法下の燃料体設計認可申請書の記載を踏まえ、設工認申請書の記載を整理した結果であり、補足説明資料3に示す。技術基準規則との関係性等の詳細説明は、添付2に示す。</p> <p><u>【(9)を記載することについて】</u>  コイルばねのばね定数と同様。詳細は、補足説明資料3、添付2に示す。</p>

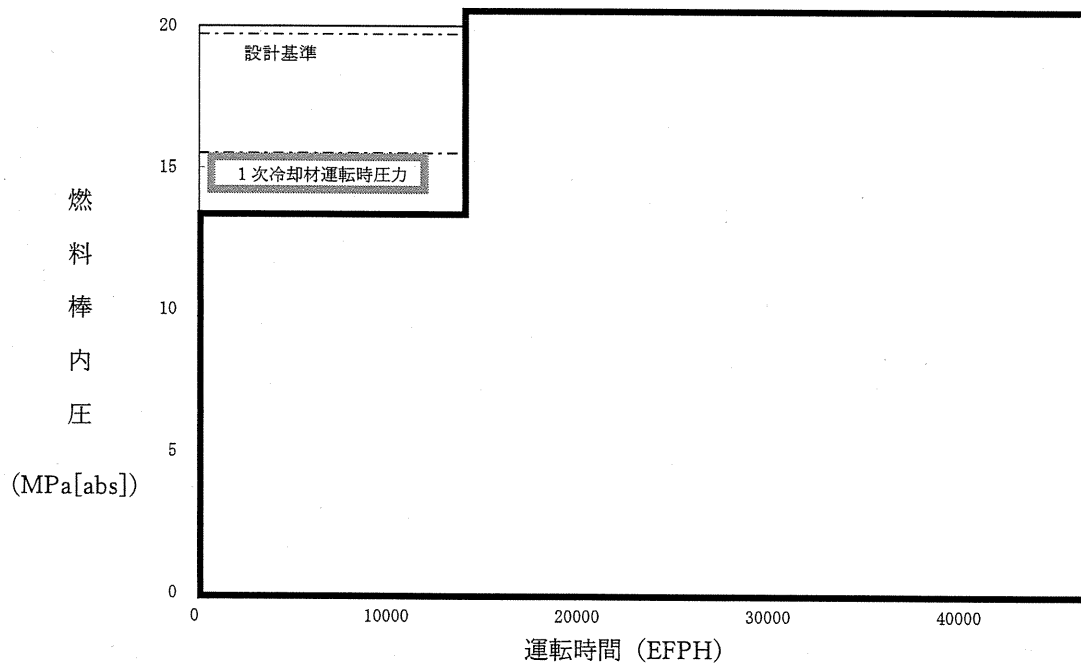
伊方3号機	技術基準規則	技術基準規則の解釈	説明
17行17列A型燃料集合体			
(3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。 (4) 部品の欠如がないこと。		(3) 表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。 (4) 部品の欠如がないこと。	



内圧評価において保守的に冷却材に通常運転時の圧力を用いる理由

燃料棒内圧基準は、通常運転時において被覆管の外向きのクリープ変形によりペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えないことであり、サーマルフィードバックにより燃料温度の過度な上昇を防ぐために、限界内圧以下であることを確認している。その場合、外圧が小さいほうが保守的であるため、1次冷却材圧力は、想定される運転条件のうち、通常運転時の圧力（15.5MPa[abs]）を用いて評価をしている。

なお、内圧が評価期間中で最大となるのは核分裂生成ガスが蓄積される燃料寿命末期である。

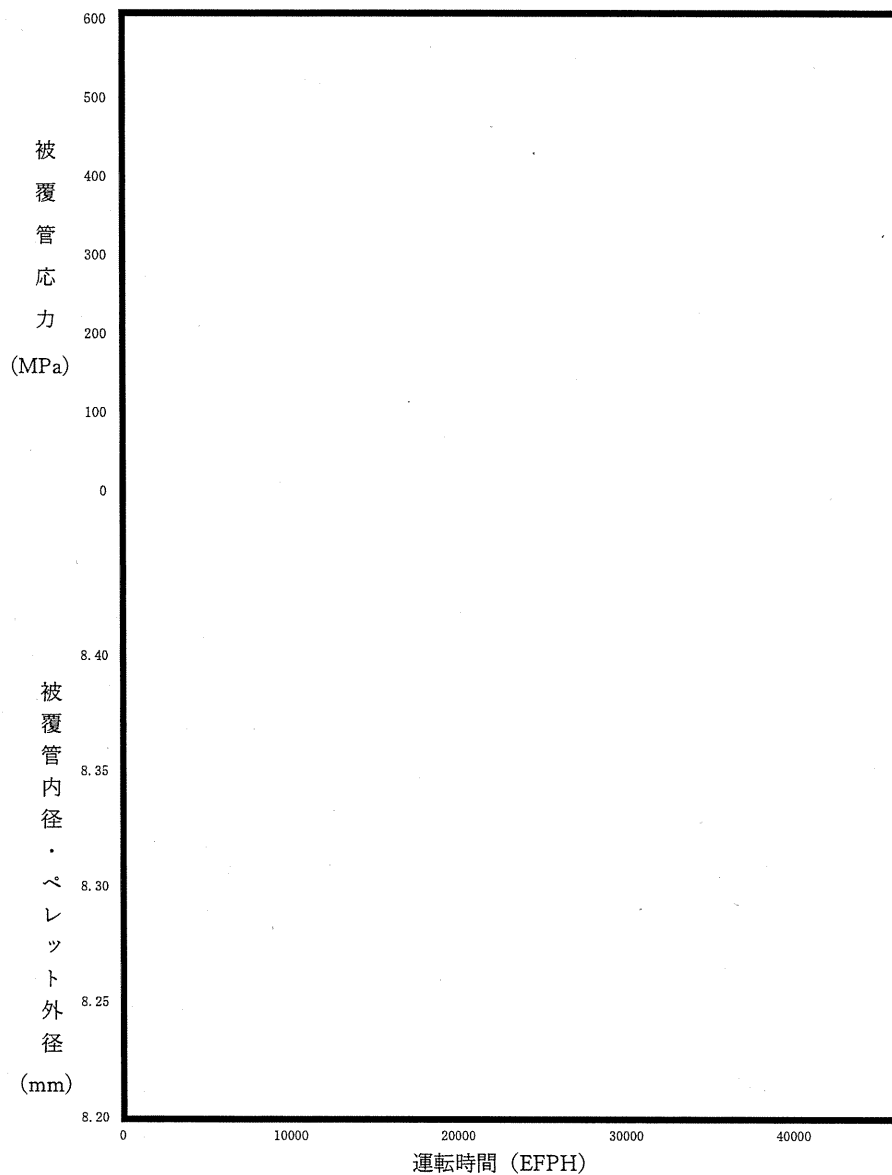


燃料棒の内圧履歴

被覆管応力評価において保守的に冷却材に通常運転時の圧力を用いる理由

内圧評価とは直接関係しないが、被覆管の応力履歴（異常な過渡変化時における応力スパイクをプロットした履歴）は、以下のとおり。

被覆管応力については、被覆管の耐力以下であることを確認することとしており、応力が評価期間中で最大となるのは、ペレットと被覆管が接触した後に異常な過渡変化が発生した場合となる。このとき外向きの力がかかることから、外圧が小さいほうが保守的であるため、1次冷却材圧力は、想定される運転条件のうち、通常運転時の圧力（15.5MPa[abs]）を用いて評価をしている。



被覆管内径及びペレット外形変化

設工認申請書の基本設計方針の記載事項について  
(補足説明資料 3 の追加説明)

補足説明資料 3 のとおり、燃料体設計認可申請書（以下、「設認」）の本文記載事項と、今回申請した設計及び工事計画認可申請書（以下、「設工認申請書」）の記載事項の関係について整理している。

本資料は、基本設計方針の記載事項について追加説明するものである。

燃料体設計認可申請書（以下、「設認」）の本文で記載のあった仕様は、原則として、設工認申請書の本文に記載することとしている。

ただし、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の別表第二のとおり、工事計画書に記載すべき事項は「燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料」とされていることから、当社の設工認申請書の作成要領に従い、要目表にはこれら事項を記載している。

上記以外の事項については、設工認への記載要否を検討した上で、基本設計方針、添付書類に記載、もしくは記載不要と整理している。（補足説明資料 3 のとおり）

その中で、コイルばねと燃料要素のヘリウム加圧については、設置許可添付書類八における燃料棒の構造の説明に登場する。このため、技術基準規則への適合性を示すにあたり、詳細設計値を記載するという観点から、基本設計方針に仕様値（ばね定数と加圧量）を記載している。

なお、基本設計方針に記載することについては、当社作成要領にも抵触するものではない。基本設計方針の記載は、原則、設置許可本文をベースとし、技術基準規則及び解釈の要求事項は、基本的に網羅して記載することとしており、対応関係を別紙に示す。

設認本文記載	設工認記載箇所	設工認申請書本文における記載の考え方
各部材の主要寸法 及び材料	本文 (要目表)	作成要領に従い、要目表に別表第二の順に記載
コイルばねの ばね定数	本文 (基本設計方針)	要目表には記載しないが、設置許可添付書類八における燃料棒の構造の説明に登場することから、技術基準規則への適合性を示す観点で、本文基本設計方針に仕様値を記載
ヘリウム加圧量		
上記以外の事項	添付書類等に記載または記載不要と整理	補足説明資料 3 参照

以上

基本設計方針と技術基準規則との関係

基本設計方針	技術基準規則	説明
伊方3号機（17行17列A型燃料集合体）		
<p>第2章 個別項目</p> <p>1. 炉心等</p> <p>燃料体(燃料材、燃料要素及びその他の部品を含む)は、設置(変更)許可を受けた仕様となる構造及び設計とする。</p> <p>燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における原子炉運転状態に対応した圧力、温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量及び水質の組み合わせのうち想定される最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法安定性、耐熱性、核性質及び強度のうち必要な物理的性質並びに耐食性、水素吸収特性及び化学的安定性のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。燃料体の物理的性質及び化学的性質について、「1.1 燃料体」に基づき設計する。</p> <p>燃料体は下部炉心板の上に配列され、その荷重を下部炉心支持板及び炉心槽により原子炉容器のフランジで支持する設計とする。</p> <p>燃料体は、「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について」（昭和51年2月16日 原子炉安全専門審査会）及び「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）に基づき、設置(変更)許可を受けた、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重に加え、核分裂生成物の蓄積による燃料被覆材の内圧上昇及び熱応力の荷重に耐える設計とする。</p> <p>炉心支持構造物は、最高使用圧力、自重、附加荷重及び地震力に加え、熱応力の荷重に耐える設計とする。</p> <p>炉心は、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時に発電用原子炉の運転に支障が生ずる場合において、原子炉冷却系統、原子炉停止系統、反応度制御系統、計測制御系統及び安全保護回路の機能と併せて機能することにより、燃料要素の許容損傷限界を超えない設計とする。</p> <p>燃料体(燃料要素以外の燃料体の構成要素)、減速材、反射材及び炉心支持構造物(原子炉容器内で炉心付近に位置する燃料体以外の構成要素)は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、発電用原子炉を安全に停止し、かつ、停止後に炉心の冷却機能を維持できる設計とする。</p> <p>1.1 燃料体</p> <p>1.1.1 17行17列A型燃料集合体（ウラン燃料）</p> <p>二酸化ウラン燃料材は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>（中略）</p>	<p>技術基準規則第23条第1項 技術基準規則の解釈第23条第1項 技術基準規則の解釈第23条第3項</p> <p>技術基準規則第23条第2項 技術基準規則の解釈第23条第2項 技術基準規則の解釈第23条第3項</p> <p>技術基準規則第23条第2項</p> <p>技術基準規則第36条第2項</p> <p>技術基準規則第36条第3項 技術基準規則の解釈第36条第2項</p> <p>技術基準規則第23条第1項 技術基準規則第23条第2項 技術基準規則の解釈第23条第3項 同解釈別記-10</p>	<p>設置許可記載との整合の観点で記載</p> <p>技術基準規則第23条及び規則の解釈を網羅</p> <p>設置許可記載との整合の観点で記載</p> <p>技術基準規則第23条及び規則の解釈を網羅</p> <p>技術基準規則第23条を網羅</p> <p>技術基準規則第36条を網羅</p> <p>技術基準規則第36条及び規則の解釈を網羅</p> <p>技術基準規則第23条及び規則の解釈を網羅</p>

基本設計方針 伊方3号機（17行17列A型燃料集合体）	技術基準規則	説明																												
<p>ジルコニウム合金燃料被覆材は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>（中略）</p> <p>(3) 各元素の含有量の全重量に対する百分率の値は、主成分について以下に掲げる値であること。また、不純物は日本産業規格H4751（2016）「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表3に規定する値（主成分とするものは除く。）であること。</p> <table border="1" data-bbox="257 411 616 694"> <tr><td colspan="2">・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金</td></tr> <tr><td>スズ</td><td>0.70～0.90</td></tr> <tr><td>鉄</td><td>0.18～0.24</td></tr> <tr><td>クロム</td><td>0.07～0.13</td></tr> <tr><td>鉄+クロム</td><td>0.28～0.37</td></tr> <tr><td>ニオブ</td><td>0.45～0.55</td></tr> <tr><td>酸素</td><td>□</td></tr> <tr><td>ジルコニウム</td><td>残り</td></tr> </table> <table border="1" data-bbox="257 702 582 909"> <tr><td colspan="2">・Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金</td></tr> <tr><td>スズ</td><td>0.90～1.30</td></tr> <tr><td>鉄</td><td>0.08～0.12</td></tr> <tr><td>ニオブ</td><td>0.80～1.20</td></tr> <tr><td>酸素</td><td>□</td></tr> <tr><td>ジルコニウム</td><td>残り</td></tr> </table> <p>（中略）</p> <p>ジルコニウム合金端栓は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>（中略）</p> <p>燃料材、燃料被覆材及び端栓以外の燃料体の部品は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>（中略）</p> <p>(5) コイルばねにあつては、ばね定数が□ N/cmであること。</p> <p>燃料要素は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p>（中略）</p> <p>(9) ヘリウム加圧量は、次のとおりであること。</p>	・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金		スズ	0.70～0.90	鉄	0.18～0.24	クロム	0.07～0.13	鉄+クロム	0.28～0.37	ニオブ	0.45～0.55	酸素	□	ジルコニウム	残り	・Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金		スズ	0.90～1.30	鉄	0.08～0.12	ニオブ	0.80～1.20	酸素	□	ジルコニウム	残り		<p>ジルコニウム合金燃料被覆材の仕様のうち、技術基準規則の解釈別記-10の(3)、「各元素の含有率の全重量に対する百分率の値は、日本産業規格H4751（2016）「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表2及び表3に規定する値であること。」にはよらないため、下線部の記載としている。</p> <p>コイルばねのばね定数およびヘリウム加圧量は、技術基準規則の解釈別記-10に記載はないが、旧法下の燃料体設計認可申請書の記載を踏まえ、設工認申請書の記載を整理した結果であり、補足説明資料3に示している。</p> <p>技術基準規則との関係性について、第23条第1項の観点において、コイルばねは必要な物理的性質および化学的性</p>
・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金																														
スズ	0.70～0.90																													
鉄	0.18～0.24																													
クロム	0.07～0.13																													
鉄+クロム	0.28～0.37																													
ニオブ	0.45～0.55																													
酸素	□																													
ジルコニウム	残り																													
・Sn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金																														
スズ	0.90～1.30																													
鉄	0.08～0.12																													
ニオブ	0.80～1.20																													
酸素	□																													
ジルコニウム	残り																													

基本設計方針	技術基準規則	説明
<p data-bbox="495 161 846 181">伊方3号機（17行17列A型燃料集合体）</p> <p data-bbox="210 197 629 220">二酸化ウラン燃料要素： <input type="text"/> MPa[gauge]</p> <p data-bbox="210 233 770 255">ガドリニア入り二酸化ウラン燃料要素： <input type="text"/> MPa[gauge]</p> <p data-bbox="190 308 840 330">燃料要素の集合体である燃料体は、次のいずれにも適合する設計とする。</p> <p data-bbox="224 343 302 365">（以下略）</p>		<p data-bbox="1568 197 2087 256">質を保持することを確認しており、また、ヘリウムは燃料材の耐食性に影響がないことを確認している。</p> <p data-bbox="1568 269 2087 437">また、第23条第2項の観点において、燃料棒の強度評価上（燃料棒5基準評価）燃料棒に挿入されたコイルばねとヘリウム加圧した設計を前提としている。なお、コイルばねについては、燃料集合体強度評価上（輸送及び取扱い時評価）においても前提としている。</p>

適用基準及び適用規格	技術基準規則	説明
伊方3号機（17行17列A型燃料集合体）		
<p>原子炉本体に適用する基準及び規格のうち、本設計及び工事計画において適用する基準及び規格は以下のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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（平成25年6月19日原規技発第1306194号）</li> <li>・ 「加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について」（昭和51年2月16日 原子炉安全専門審査会）</li> <li>・ 「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）</li> <li>・ 日本産業規格H4751（2016）「ジルコニウム合金管」</li> <li>・ 日本産業規格Z2241（2011）「金属材料引張試験方法」</li> <li>・ ASTM International規格ASTM B 351 「Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Zirconium and Zirconium Alloy Bars, Rod, and Wire for Nuclear Application」</li> <li>・ 日本産業規格Z4504（2008）「放射性表面汚染の測定方法－β線放出核種（最大エネルギー0.15MeV以上）及びα線放出核種」</li> <li>・ ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III</li> </ul>	技術基準規則の解釈第23条第3項	技術基準規則第23条の規則の解釈を網羅

## 補足説明資料 9

設計及び工事計画認可申請書の記載事項  
に関する設置変更許可について



## 1. 概要

本資料は、設工認申請書が引用している既工認に対応する設置変更許可について別紙のとおり整理したものである。

## 設工認申請書が引用している既工認に対応する設置変更許可について

本文事項	添付資料	引用している既工認	対応する設置変更許可			
Ⅱ. 工事計画 (要目表) 3 燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料	資料2-1 (許可整合 本文五号)	再稼働  4.1wt%ステップ2燃料	再稼働			
			申請	原子力発第13121号 平成25年7月8日		
				補正	原子力発第15027号 平成27年4月14日	
			原子力発第15048号 平成27年5月11日			
			原子力発第15091号 平成27年6月30日			
			原規規発第1507151号 平成27年7月15日			
			許可			
			Ⅱ. 工事計画 (基本設計方針) 1. 炉心等	資料2-1 (許可整合 本文五号) 資料1 (熱出力計算書)	4.1wt%ステップ2燃料	
Ⅱ. 工事計画 (基本設計方針) 2. 1 地震による損傷の防止	資料6 (耐震性に関する説明書)	再稼働	再稼働			
			申請	原子力発第13121号 平成25年7月8日		
				補正	原子力発第15027号 平成27年4月14日	
			原子力発第15048号 平成27年5月11日			
			原子力発第15091号 平成27年6月30日			
			原規規発第1507151号 平成27年7月15日			
		許可				
		閉じ込めBF	閉じ込めBF			
			申請	原燃発第18-13号 平成30年1月26日		
				補正	原燃発第18-101号 平成30年7月31日	
			許可		原規規発第1812123号 平成30年12月12日	
			Ⅱ. 工事計画 (基本設計方針) 2. 2 津波による損傷の防止 2. 3 外部からの衝撃による損傷の防止	資料3 (自然現象)	再稼働	再稼働
						申請
補正	原子力発第15027号 平成27年4月14日					
	原子力発第15048号 平成27年5月11日					
	原子力発第15091号 平成27年6月30日					
	原規規発第1507151号 平成27年7月15日					
	許可					
Ⅱ. 工事計画 (基本設計方針) 3. 1 火災による損傷の防止	資料5 (火災防護)	再稼働				再稼働
						申請
			補正	原子力発第15027号 平成27年4月14日		
				原子力発第15048号 平成27年5月11日		
				原子力発第15091号 平成27年6月30日		
				原規規発第1507151号 平成27年7月15日		
				許可		
			Ⅱ. 工事計画 (基本設計方針) 5. 1 安全設備、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備	資料4 (健全性説明書)	再稼働	再稼働
						申請
補正	原子力発第15027号 平成27年4月14日					
	原子力発第15048号 平成27年5月11日					
	原子力発第15091号 平成27年6月30日					
	原規規発第1507151号 平成27年7月15日					
	許可					