

改 1

大飯発電所第 3, 4 号機
燃料体に係る設計及び工事計画認可申請
(17行17列 B 型燃料集合体
(ウラン燃料))

補足説明資料

2022年4月22日

関西電力株式会社

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

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 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 大飯3・4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)

- ※1 ○: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
 ※2 ○:設計及び工事計画認可申請書で確認が必要な条文
 ×:設計及び工事計画認可申請書で確認が不要な条文
 (確認が不要な条文については、適用条文が○となっている条文の内、認可申請設備以外の他の施設による対策内容に変更が無い場合も含み、その旨変更欄に記載。)
 ※3 ○:審査対象条文(設計及び工事計画認可申請書で確認が必要な条文と同じ条文)
 ×:審査対象外条文(設計及び工事計画認可申請書で確認が不要な条文と同じ条文)

技術基準規則	適用条文 ^{※1}	工事の内容に 関係あるもの ^{※2}	審査対象条文 ^{※3}	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(3号機は原規規発第1708254号 2017年8月25日認可、4号機は原規規発第1708255号 2017年8月25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(3号機は原規規発第1907291号 2019年7月29日認可、4号機は原規規発第1907292号 2019年7月29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(3号機は原規規発第1708254号 2017年8月25日認可、4号機は原規規発第1708255号 2017年8月25日認可)の添付資料「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」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(3号機は原規規発第1708254号 2017年8月25日認可、4号機は原規規発第1708255号 2017年8月25日認可)の添付資料「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」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が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、大飯発電所は、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(3号機は原規規発第1708254号 2017年8月25日認可、4号機は原規規発第1708255号 2017年8月25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(3号機は原規規発第1708254号 2017年8月25日認可、4号機は原規規発第1708255号 2017年8月25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」及び3号機については緊急時対策所機能の移行に関する設計及び工事計画認可申請書(原規規発第2005141号 2020年5月14日認可)、4号機については有毒ガス防護に係る技術基準規則等の改正に伴う設計及び工事計画認可申請書(原規規発第2005143号 2020年5月14日認可)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を行なうことから、適合性の内容に変更はない。

技術基準規則	適用条文※1	工事の内容に 関係あるもの※2	審査対象条文※3	理由
(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(3号機は原規規発第1708254号 2017年8月25日認可、4号機は原規規発第1708255号 2017年8月25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」及び3号機については緊急時対策所機能の移行に関する設計及び工事計画認可申請書(原規規発第2005141号 2020年5月14日認可)、4号機については有毒ガス防護に係る技術基準規則等の改正に伴う設計及び工事計画認可申請書(原規規発第2005143号 2020年5月14日認可)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。
(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「 <u>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Ⅱ</u> 」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、 <u>審査対象条文である。</u>
(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) 原子炉冷却材圧力バウンダリ	×	×	×	原子炉冷却材圧力バウンダリに対する要求であり、本設備は、原子炉冷却材圧力バ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) 原子炉冷却材圧力バウンダリの隔離装置等	×	×	×	原子炉冷却材圧力バ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、原子炉冷却材圧力バ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。

技術基準規則	適用条文 ^{※1}	工事の内容に関係あるもの ^{※2}	審査対象条文 ^{※3}	理由
(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。
(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。

大飯3・4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)

※1 ○: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

※2 ○:設計及び工事計画認可申請書で確認が必要な条文

×:設計及び工事計画認可申請書で確認が不要な条文
(確認が不要な条文については、適用条文が○となっている条文の内、認可申請設備以外の他の施設による対策内容に変更が無い場合も含み、その旨変更欄に記載。)

※3 ○:審査対象条文(設計及び工事計画認可申請書で確認が必要な条文と同じ条文)

×:審査対象外条文(設計及び工事計画認可申請書で確認が不要な条文と同じ条文)

技術基準規則	適用条文※1	工事の内容に関係あるもの※2	審査対象条文※3	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溶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。

技術基準規則	適用条文 ^{※1}	工事の内容に 関係あるもの ^{※2}	審査対象条文 ^{※3}	理由
(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。
(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係るものに限る。」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 ^{※1} 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 3号機については平成16年10月1日付け平成16・06・18原第22号で認可された工事計画

4号機については平成16年9月10日付け平成16・06・18原第23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 ^{※2} 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 3号機については平成29年8月25日付け原規規発第1708254号で認可された工事計画

4号機については平成29年8月25日付け原規規発第1708255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 ^{※3} 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 ^{※4} 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 3号機については平成29年8月25日付け原規規発第1708254号で認可された工事計画及び令和2年5月14日付け原規規発第2005141号にて認可された設計及び工事の計画
 4号機については平成29年8月25日付け原規規発第1708255号で認可された工事計画及び令和2年5月14日付け原規規発第2005143号にて認可された設計及び工事の計画

※4 3号機については平成29年8月25日付け原規規発第1708254号で認可された工事計画

4号機については平成29年8月25日付け原規規発第1708255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 ^{※5} 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。
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」に関する品質管理の方法等を示す必要があるため、説明書を添付する。

※5 3号機については平成29年8月25日付け原規規発第1708254号及び令和元年7月29日付け原規規発第1907291号で認可された工事計画

4号機については平成29年8月25日付け原規規発第1708255号及び令和元年7月29日付け原規規発第1907292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	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>	・ <u>要目表（燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料）</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^(注)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。

	大飯発電所第 3 号機	大飯発電所第 4 号機
既工認①：再稼働時	平成 29 年 8 月 25 日付け原規規発第 1708254 号にて認可を受けた工事計画	平成 29 年 8 月 25 日付け原規規発第 1708255 号にて認可を受けた工事計画
既工認②：高燃焼度燃料の装荷時	平成 16 年 10 月 1 日付け平成 16・06・18 原第 22 号にて認可を受けた工事計画	平成 16 年 9 月 10 日付け平成 16・06・18 資第 23 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	—	—	
	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(B型ウラン燃料体)

燃料体設計認可申請書(カッコ書きの斜体文字は記載なし)		設工認 要目表	設工認 添付図面	備考		
燃料の種類	二酸化ウラン					
	二酸化ウラン燃料体					
初期濃縮度	二酸化ウラン燃料体平均濃縮度	—	—	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		
	二酸化ウラン燃料要素濃縮度	—	—			
	(二酸化ウラン焼結ペレット濃縮度)	○	○			
	ガドリニア混合二酸化ウラン燃料体					
	ガドリニア混合二酸化ウラン燃料体平均濃縮度	—	—	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		
	二酸化ウラン燃料要素濃縮度	—	—			
	ガドリニア入り二酸化ウラン燃料要素濃縮度	—	—			
	(二酸化ウラン焼結ペレット濃縮度)	○	○			
燃焼率	燃料体最高	—	—	既工認①の要目表に記載済みのため、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	燃料材	(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なる二酸化ウラン多結晶組織	—	—	既工認①の要目表に記載済みのため、記載不要		
	(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	○	—			
	ガドリニア重量百分率	○	—			
	ガドリニウム重量百分率	○	—			
	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な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の要目表に記載済みのため、記載不要			
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-Ni系ジルコニウム基合金				
		(組成)				
		すず				
		鉄				
		クロム	○	—	設工認の本文で材料の成分を記載し、添付8で組成を記載。	
		ニオブ				
		ニッケル				
		酸素				
		ジルコニウム				
		(組織)				
冷間加工応力除去焼きなまし組織	○	—	既工認①の要目表に記載済みのため、記載不要			
燃料材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	○	—	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。	
		鉄+クロム				
		酸素				
		ジルコニウム				
		(組織)				
		再結晶焼きなまし組織	○	—	既工認①の要目表に記載済みのため、記載不要	
	上部プレナムコイルばね	(種類)ステンレス鋼				
		(組成)				
		ニッケル				
		クロム				
		炭素	○	—	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。	
		鉄				
		下部プレナムコイルばね	(種類)耐食耐熱ニッケル合金			
			(組成)			
			ニッケル			
			クロム			
炭素	○		—	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。		
鉄						
押え板(下部プレナムコイルばね用部品)	(種類)ステンレス鋼					
	(組成)					
	ニッケル					
	クロム					
	炭素	○	—	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。		
	鉄					
	連結棒(下部プレナムコイルばね用部品)	(種類)ステンレス鋼				
		(組成)				
		ニッケル				
		クロム				
炭素		○	—	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。		
鉄						
制御棒案内シンプル及び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)				
		燃料被覆材端栓材に同じ	○	—	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)Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金				
	(組成)					
	燃料被覆材端栓材に同じ	○	—	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。		
	最上部及び最下部支持格子	(種類)耐食耐熱ニッケル基合金				
		(組成)				
		ニッケル				
		クロム				
モリブデン						
ニオブ						
チタン						
アルミニウム						
炭素		○	—	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。		
マンガン						
けい素						
りん						
いおう						
コバルト						
ほう素						
銅						
タンタル						
鉄						
中間部支持格子	(種類)Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金					
	(組成)					
	すず					
	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。		

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(B型ウラン燃料体)

燃料体設計認可申請書(カッコ書きの斜体文字は記載なし)		設工認 要目表	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	上部ノズル及び下部ノズル(異物フィルター付)	(種類)ステンレス鋼			
		(組成)			
		ニッケル			
		クロム			
		炭素	○	—	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。
		鉄			
	上部ノズル押えばね	(種類)耐食耐熱ニッケル合金			
		(組成)			
		最上部及び最下部支持格子材に同じ	○	—	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。
	クランプスクロウ	(種類)ニッケル・クロム・鉄合金			
		(組成)			
		ニッケル			
		クロム			
		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。
	上部リングナット・シンプルスクロウ・ロッキングカップ	(種類)ステンレス鋼			
		(組成)			
		ニッケル			
		クロム			
		炭素	○	—	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。
		鉄			
	スリーブ	(種類)ステンレス鋼			
		(組成)			
		ニッケル			
クロム					
炭素		○	—	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。	
鉄					
リベット	(種類)ステンレス鋼				
	(組成)				
	ニッケル				
	クロム				
	炭素	○	—	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。	
	鉄				
ストッパー	(種類)Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金				
	(組成)				
	中間部支持格子に同じ	○	—	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。	
燃料体の構造及び質量	燃料体	1.燃料体構造の概要	—	—	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
		文章			
		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(二酸化ウラン燃料体、ガドリニア混合二酸化ウラン燃料体)	—	—	同上
		(2)寸法			
		全長(下部ノズル下面より上部ノズル上部プレート上面までの長さ)	○	○	
		断面寸法	○	○	
		燃料要素ピッチ	○	○	
		上部ノズル下面と燃料要素上端距離	○	○	
		(3)燃料要素配列			
	17行17列	—	○	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	
	燃料要素	3.各部品の質量、寸法、数量等			
		3.1燃料要素			
		(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
		二酸化ウラン燃料要素	—	—	
		ガドリニア混合二酸化ウラン燃料要素	—	—	
		燃料材質量	—	—	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
		二酸化ウラン燃料要素	—	—	
		ガドリニア混合二酸化ウラン燃料要素	—	—	
		(2)寸法等			
		長さ	○	○	
有効長さ		○	○		
ペレット直径	○	○			
ペレット長さ	○	○			
燃料被覆材外径	○	○			
燃料被覆材内径	○	○			
燃料被覆材肉厚	○	○			
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	—	○	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)種類及び数量(燃料体当たり)					
二酸化ウラン燃料体	○	○	設工認本文の要目表に記載		
ガドリニア混合二酸化ウラン燃料体	○	○			
燃料体内の配置	○	○	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		
上部ノズル(組立体)及び下部ノズル	3.2上部ノズル及び下部ノズル(異物フィルター付)				
	(1)質量				
	上部ノズル/下部ノズル	—	—	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	
	(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: 燃料体当たり	○	—	設工認本文の要目表の注釈に記載	
	下部ノズル: 燃料体当たり	○	—	同上	
	制御棒案内シンプル	3.3制御棒案内シンプル			
(1)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	
(2)寸法					
外径(太径部/細径部)		○	○		
肉厚(太径部/細径部)		○	○		
(3)数量(燃料体当たり)		○	—	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	3.4炉内計装用案内シンプル				
	(1)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	
	(2)寸法				
	外径	○	○		
	肉厚	○	○		
	(3)数量(燃料体当たり)	○	—	設工認本文の要目表の注釈に記載	
最上部及び最下部支持格子	3.5最上部及び最下部支持格子				
	(1)質量				
	最上部/最下部	—	—	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	
	(2)寸法				
	外寸法	○	○		
	高さ	○	○		
	(3)数量				
	最上部: 燃料体当たり	○	—	設工認本文の要目表の注釈に記載	
最下部: 燃料体当たり	○	—	同上		

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(B型ウラン燃料体)

燃料体設計認可申請書(カッコ書きの斜体文字は記載なし)		設工認 要目表	設工認 添付図面	備考	
燃料体の構造及び質量	支持格子	3.6中間部支持格子			
		(1)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
		(2)寸法			
		外寸法	○	○	
	高さ	○	○		
	(3)数量				
	中間部：燃料体当たり	○	—	設工認本文の要目表の注釈に記載	
	コイルばね	3.7コイルばね			
		(1)質量			
		上部/下部	—	—	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
		(2)寸法等			
		コイル外径(上部/下部)	○	○	
		ばね定数(上部/下部)	○	○	設工認本文の要目表の注釈に記載
		(3)数量			
上部：燃料体当たり		○	—	設工認本文の要目表の注釈に記載	
下部：燃料体当たり	○	—	同上		

大飯発電所第3号機および4号機 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則 別表第二と既工認および燃料体の設工認申請書における記載の整理

原子炉本体		既工認および燃料体の設工認における記載	
		大飯発電所第3号機	大飯発電所第4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①*1、2 炉心に係る次の事項(1)に記載	既工認①*2、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*1、2 炉心に係る次の事項(2)に記載*3	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②*4、2 炉心に係る次の事項(3)に記載	既工認②*5、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②*4、2 炉心に係る次の事項(4)に記載	既工認②*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。)	2021年11月26日付け関原発第438号にて申請の設工認に記載	2021年11月26日付け関原発第440号にて申請の設工認に記載	

*1：平成29年8月25日付け原規規発第1708254号にて認可を受けた工事計画(再稼働時)

*2：平成29年8月25日付け原規規発第1708255号にて認可を受けた工事計画(再稼働時)

*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16年10月1日付け平成16・06・18原第22号にて認可を受けた工事計画(高燃焼度燃料の装荷時)

*5：平成16年9月10日付け平成16・06・18資第23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。

B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 1.1.2 17行17列B型燃料集合体(ウラン燃料)	—	—	—
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。 (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。 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	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 添付B 表2-1 燃料集合体主材料の化学成分	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	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	材料検査
(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。 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。	申請書 検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	a.寸法検査 b.材料検査 c.外観検査 d.外観検査
(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。 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。	申請書 検査	添付B 表2-1 燃料集合体主材料の化学成分	a.材料検査 b.材料検査
(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。 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	添付B 表2-1 燃料集合体主材料の化学成分 添付図面 第1-1-2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	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	寸法検査

B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>(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-Ni系ジルコニウム基合金</p> <table border="0"> <tr><td>スズ</td><td>0.90 ~1.15</td></tr> <tr><td>鉄</td><td>0.24 ~0.30</td></tr> <tr><td>クロム</td><td>0.13 ~0.19</td></tr> <tr><td>ニオブ</td><td>0.08 ~0.14</td></tr> <tr><td>ニッケル</td><td>0.007~0.014</td></tr> <tr><td>酸素</td><td>〇</td></tr> <tr><td>ジルコニウム</td><td>残り</td></tr> </table>	スズ	0.90 ~1.15	鉄	0.24 ~0.30	クロム	0.13 ~0.19	ニオブ	0.08 ~0.14	ニッケル	0.007~0.014	酸素	〇	ジルコニウム	残り	申請書検査	添付8 表2-1 燃料集合体主材料の化学成分	材料検査
スズ	0.90 ~1.15																
鉄	0.24 ~0.30																
クロム	0.13 ~0.19																
ニオブ	0.08 ~0.14																
ニッケル	0.007~0.014																
酸素	〇																
ジルコニウム	残り																
(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														
(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22mg/dm ² 以下又は14日間で38mg/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	添付8 表2-2 燃料集合体主材料の機械的性質	材料検査														
<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>	申請書検査	9 原子炉本体に係る工事の方法 2.1.3 表4	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	添付8 表2-1 燃料集合体主材料の化学成分	材料検査														

B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
(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
(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。 a. 試験温度 室温 引張強さ: $415\text{N}/\text{mm}^2$ 以上 耐力: $240\text{N}/\text{mm}^2$ 以上 伸び: 14%以上 b. 試験温度 316°C 引張強さ: $215\text{N}/\text{mm}^2$ 以上 耐力: $105\text{N}/\text{mm}^2$ 以上 伸び: 24%以上	申請書 検査	添付8 表2-2 燃料集合体主材料の機械的性質	a.材料検査 b.材料検査
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。 (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	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
(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っては、次に適合する設計とする。 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。 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。	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8 表2-2 燃料集合体主材料の機械的性質	a.材料検査 b.材料検査

B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) 上部プレナムコイルばね、下部プレナムコイルばねにあつては、ばね定数が次のとおりであること。 a. 上部プレナムコイルばね <input type="text"/> N/cm b. 下部プレナムコイルばね <input type="text"/> N/cm	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
燃料要素は、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	寸法検査
(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	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 ² 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	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 ³ /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	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、 <input type="text"/> MPa[gauge]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	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	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
(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 燃料棒設計計算コードの概要	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	14
3.3.3 燃料棒の温度評価結果	18
3.3.4 燃料棒の内圧評価結果	20
3.3.5 被覆管の応力評価結果	21
3.3.6 被覆管の歪評価結果	25
3.3.7 被覆管の疲労評価結果	27
3.4 その他の考慮事項	31
4. 燃料集合体の強度計算	45
4.1 燃料集合体の設計基準	45
4.2 燃料集合体強度評価方法	48
4.2.1 燃料輸送及び取扱い時における評価方法	48
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	52
4.3 強度評価結果	55
4.3.1 燃料輸送及び取扱い時における評価結果	55
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	57
5. 参考文献	59

1. はじめに

添付資料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第23条第2項の要求に基づき、17行17列B型燃料集合体（ウラン燃料）（以下、「燃料集合体」と称する。）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。

具体的には、同規則第23条解釈第3項において、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）」によることとされている。さらに、「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について」は、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日原子力安全委員会了承）」に基づく通常運転時及び運転時の異常な過渡変化状態に対する燃料設計基準に対して、燃料棒内圧基準を見直したものである。

このため、「強度に関する説明書」では、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化状態に対する強度について説明する。

なお、炉心は193体の燃料集合体で構成され、原子炉熱出力3,411MW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」と称する。）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17.9kW/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>ガドリニア混合二酸化ウラン燃料棒</u>
通常運転時の		
最大線出力密度	: 43.1 kW/m	33.4 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

ガドリニア混合二酸化ウラン燃料棒（以下、「ガドリニア混合燃料棒」と称する。）ではガドリニアを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、ガドリニア混合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	:	3,411	MW
・運転圧力	:	15.5	MPa[abs]
・炉心入口温度			
通常運転時	:	289.2	°C
高温停止時	:	291.7	°C
・1次冷却材全流量	:	60.1×10 ⁶	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、表3-1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的位置、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）」、「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（平成 25 年 6 月 28 日原子力規制委員会規則第 6 号）」、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）」、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、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キング評価について記載する。

表3-1 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」と称する。)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>	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。	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-32°C/10,000Mwd/tを適用している。	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>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> <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/cm²g)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>	(2) 燃料棒内圧	サーマルフィードバック効果(注1)による燃料温度の過度な上昇を防ぐ。	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。	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と余裕を考慮して設定している。	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>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/cm²g)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>	(3) 被覆管応力	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。	被覆材の耐力(注2)以下であること。	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。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。	—
	(4) 被覆管歪		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。	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。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。	—
	(5) 周期的な被覆管歪(累積損傷係数)	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。	ASME Sec. IIIの概念による設計疲労寿命以下であること。	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、許容繰り返し回数に対して1/20)を見込んで設定されている。	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(繰り返し回数)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り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。

(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、さらにFPガスが放出されて内圧が上昇し、その結果さら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項で述べた燃料設計基準に従って行うが、以下にこれら評価方法及び設計評価コードの概要を述べる。

また、図3-1に燃料棒強度評価流れ図を示す。

3.2.1 燃料棒設計計算コードの概要

現在の発電用軽水炉においては、二酸化ウラン粉末を焼結したペレットあるいは二酸化ウラン粉末にガドリニア粉末を混合し焼結したペレットを、ジルコニウムを主成分とした合金被覆管の中に挿入した燃料棒が用いられている。

この燃料棒の強度評価を、二酸化ウランペレットやガドリニア混合二酸化ウランペレット（ガドリニア濃度10wt%以下）の照射挙動をモデル化し、燃焼によるペレット熱伝導率の低下等の高燃焼度下での照射挙動、あるいは、Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金（以下、「NDA」と称する。）被覆管の照射挙動をモデル化した高燃焼度用FPACコード⁽¹⁾（Fuel Performance Analysis Code）を用いて行う。

高燃焼度用FPACコードは、燃料棒が炉内で示す挙動（核分裂生成物（以下、「FP」と称する。）の生成及び放出、ペレットの割れ、熱膨張、スエリング及び焼きしまり、被覆管の熱膨張、弾性変形、クリープ及び照射成長、ペレットと被覆管の相互作用等）をモデル化して、ペレット中心温度、燃料棒内圧、被覆管の応力、歪及び疲労等の評価することができる。

燃料棒評価

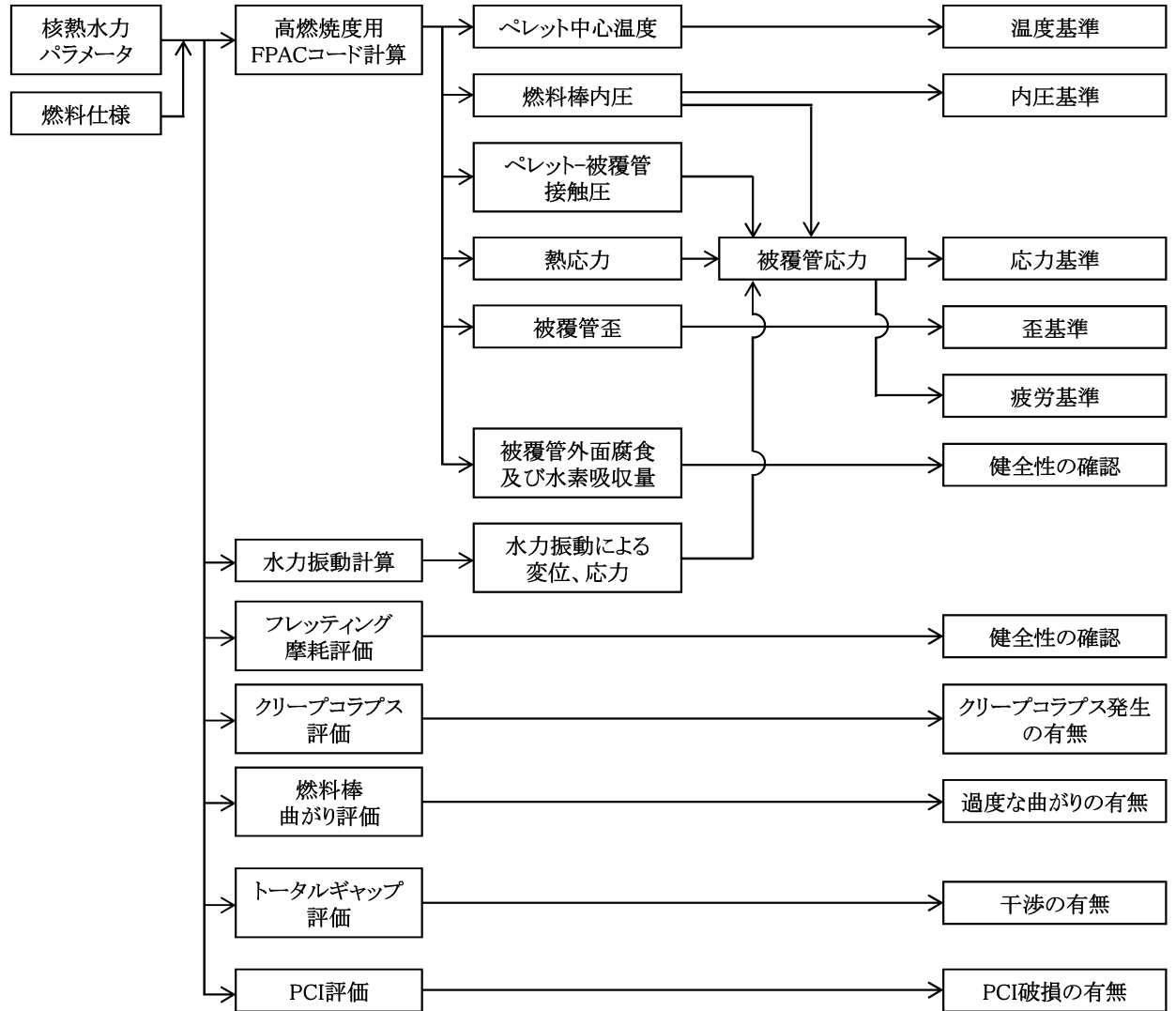


図 3-1 燃料棒強度評価流れ図

3.3 強度評価結果

以下に燃料棒設計計算コードを用いて、取替燃料の性能評価を行った結果を示す。

3.3.1 計算条件

代表的な取替燃料を設計するのに使用した主要なインプットは次のとおりである。

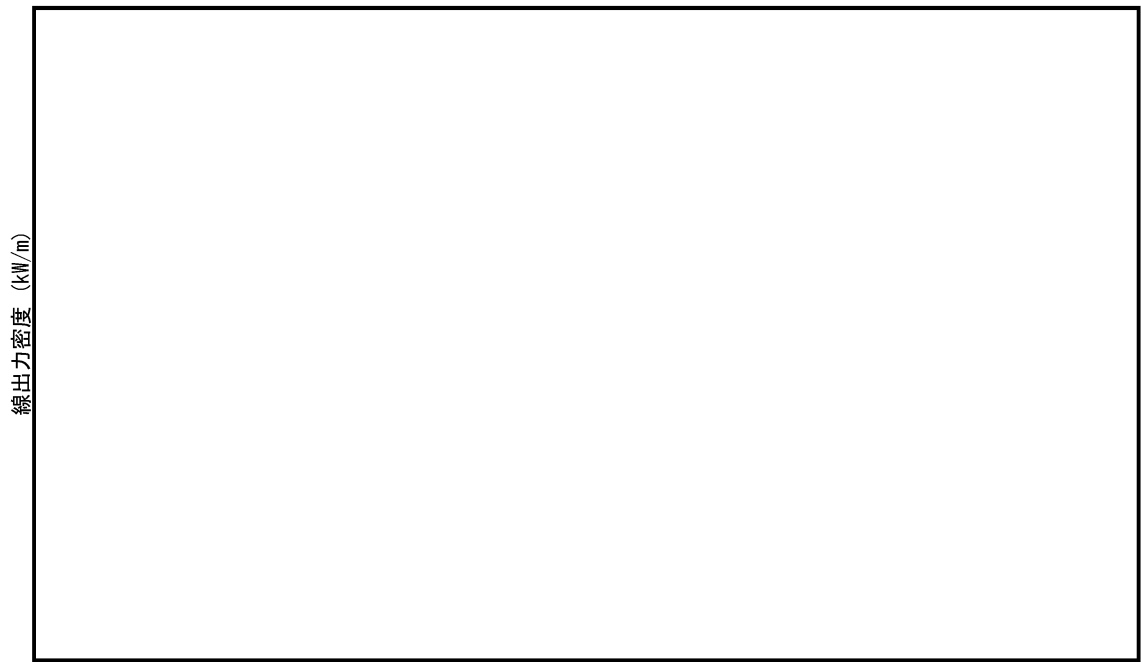
ペレット	濃縮度	4.80wt% (二酸化ウラン燃料棒) 3.20wt% (ガドリニア混合燃料棒)
	直径	8.19mm
	高さ	9.2mm
	形状	ディッシュ、チャンファ付き
	密度	97%T.D. (二酸化ウラン燃料棒) 96%T.D. (ガドリニア混合燃料棒)
		ガドリニア濃度
被覆管	ガドリニウム濃度	<input type="text"/> wt%
	材質	NDA
	内径	8.36mm
燃料棒	肉厚	0.57mm
	プレナム長さ	<input type="text"/> mm
	初期加圧量	<input type="text"/> MPa [abs]
	封入ガス	ヘリウム
	スタック長さ	3,648mm
1次冷却材 の条件	運転圧力	15.5MPa [abs]
	入口温度	289°C
	入口流量	0.29kg/s
出力分布	熱水力等価直径	11.78mm
	平均線出力密度	17.9kW/m

強度計算に用いる出力履歴は、実際の取替炉心における出力履歴の多様性を考慮して設定する。評価対象の燃料棒は、代表的な炉心の最大及び最小燃料棒燃焼度となる燃料棒並びに各サイクルで最大及び最小燃料棒平均線出力密度となる燃料棒を対象とする。出力履歴の多様性を考慮するため、対象燃料棒の燃料棒平均線出力密度を一律に嵩上げたうえで、最大燃焼度となる燃料棒の燃料棒平均燃焼度が設計燃焼度(61,000MWd/t)に達するように照射時間を照射期間にわたって一律に延長する。代表的な炉心としては、二酸化ウラン燃料集合体及びガドリニア混合二酸化ウラン燃料集合体(以下、「ガドリニア混合燃料集合体」と称する。)が混在した炉心を考慮する。また、軸方向出力分布は、ペレット最高燃焼度が設計燃焼度(71,000MWd/t)に達するように設定する。

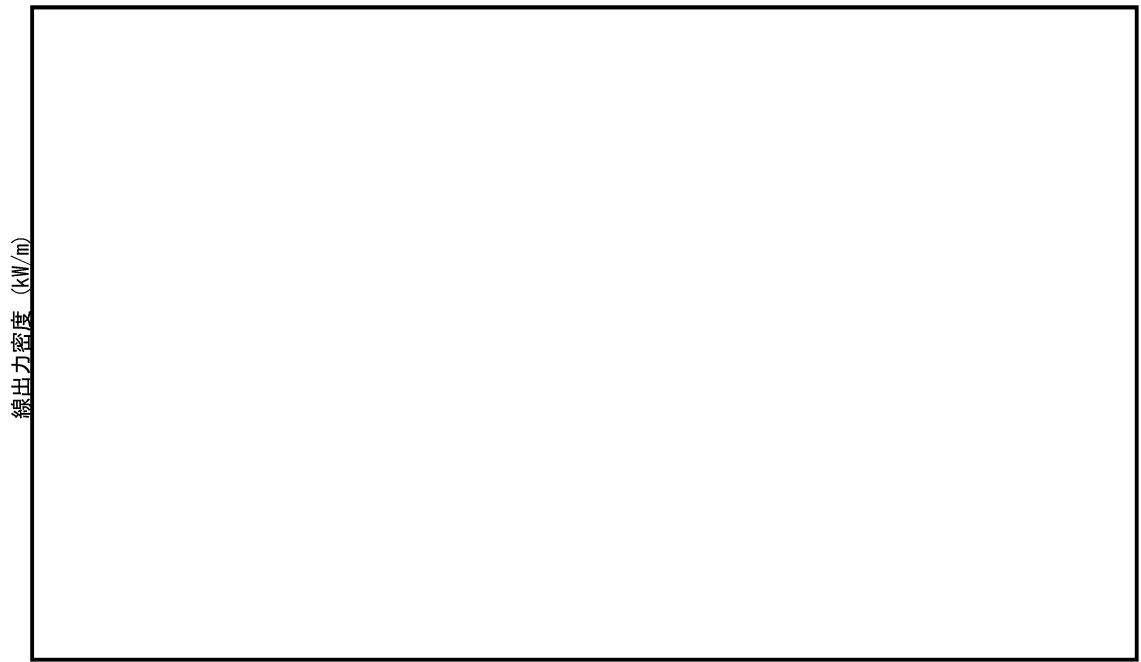
強度計算に用いた出力履歴を図3-2に、軸方向出力分布を図3-3に示す。また、出力履歴選定の考え方を表3-2に示す。

表 3-2 各評価項目と出力履歴との関係

評価項目	関連する燃料挙動／特性	傾向	厳しくなりやすい出力履歴		本申請における設計線出力履歴の設定
燃料温度	(1)燃料温度	出力が大きいほど高くなる。	a. 最高温度はペレット被覆管ギャップが大きいBOLで厳しくなり、評価線出力条件に依存し出力履歴によらない。	—	下記の最大燃焼度燃料棒の設計線出力履歴を用いる。
燃料棒内圧	(1) F P ガス放出	a. 燃焼度の伸長により増大する。(リコル・フックアウト) b. 燃料温度(出力)が高いほど放出量は増大する。(拡散)	a. 高燃焼度燃料棒となる出力履歴で厳しくなる傾向がある。 b. 高出力燃料棒となる出力履歴で厳しくなる傾向がある。	最大燃焼度 各サイクル最大出力	安全審査の代表炉心における最大燃焼度／最小燃焼度／各サイクル最大出力／各サイクル最小出力となる燃料棒出力履歴をベースとして、取替炉心ごとの出力の違いを考慮し、出力のかさ上げを行い設定する。
	(2)燃料棒内自由体積	自由体積が小さいほど、内圧は大きくなる。	平均的に出力が高く、早期にペレット被覆管ギャップが閉じ、燃料棒の熱膨張も大きくなる出力履歴で厳しくなる傾向がある。		
被覆管応力	(1)内外圧差	内外圧差が最大となるBOL出力の低い燃料で厳しくなる	特に出力履歴設定には考慮していないが、以下の項目に対して設定した出力履歴でカバーされる。	最大燃焼度 各サイクル最大出力 (各サイクル最小出力*) * 最小出力となる燃料棒は当該サイクル以外のサイクルで高い出力となりやすいため選定している。	
	(2)ペレット被覆管接触圧	ペレットと被覆管の接触により発生する応力であり、通常運転時の応力が大きく、かつ過渡時の出力が大きく(ペレット熱膨張量が大きく)なるほど厳しくなる。	ペレット被覆管が早期に接触しやすく、かつ過渡変化時の出力が大きくなる出力履歴で厳しくなる傾向がある。具体的には、寿命前半に比較的出力が高く、接触後高出力となる燃料棒で厳しくなる傾向がある。		
	(3)熱応力	被覆管内外面温度差が大きいほど厳しくなる。	高出力(熱流束大)燃料棒ほど温度差は大きく熱応力は大きくなる傾向がある。		
	(4)水力振動応力	燃料棒質量に依存し、質量が大きいほど厳しくなる。	燃料仕様は各燃料棒で同じであることから、特に出力履歴とは関係しない。		
被覆管歪	(1) ペレット被覆管接触圧	ペレットと被覆管の接触により発生する歪であり、過渡時の出力増分が大きいほど厳しくなる。	ペレット被覆管が早期に接触しやすく、かつ過渡変化時の出力が大きくなる出力履歴で厳しくなる傾向がある。具体的には、寿命前半に比較的出力が高く、接触後高出力となる燃料棒で厳しくなる傾向がある。		
周期的な被覆管歪(被覆管疲労)	(1)被覆管応力変化 (2)応力発生期間	被覆管疲労は、被覆管に発生する応力片振幅が大きいほど非線形的に厳しくなる。また、応力が発生している期間が長いほど、厳しくなる。	出力が平均的に高く早期にペレットと被覆管が接触し、応力が発生するケースで厳しくなる。	最大燃焼度 (各サイクル最大出力**) **後半のサイクルで出力が高い場合、被覆管発生応力が大きくなるため、設計疲労曲線の非線形性により、評価が厳しくなるケースがあるため選定している。	



運転時間 (EFPH)



運転時間 (EFPH)

図 3-2 (1) 二酸化ウラン燃料棒の出力履歴
 (4 サイクル照射される二酸化ウラン燃料集合体の燃料棒)

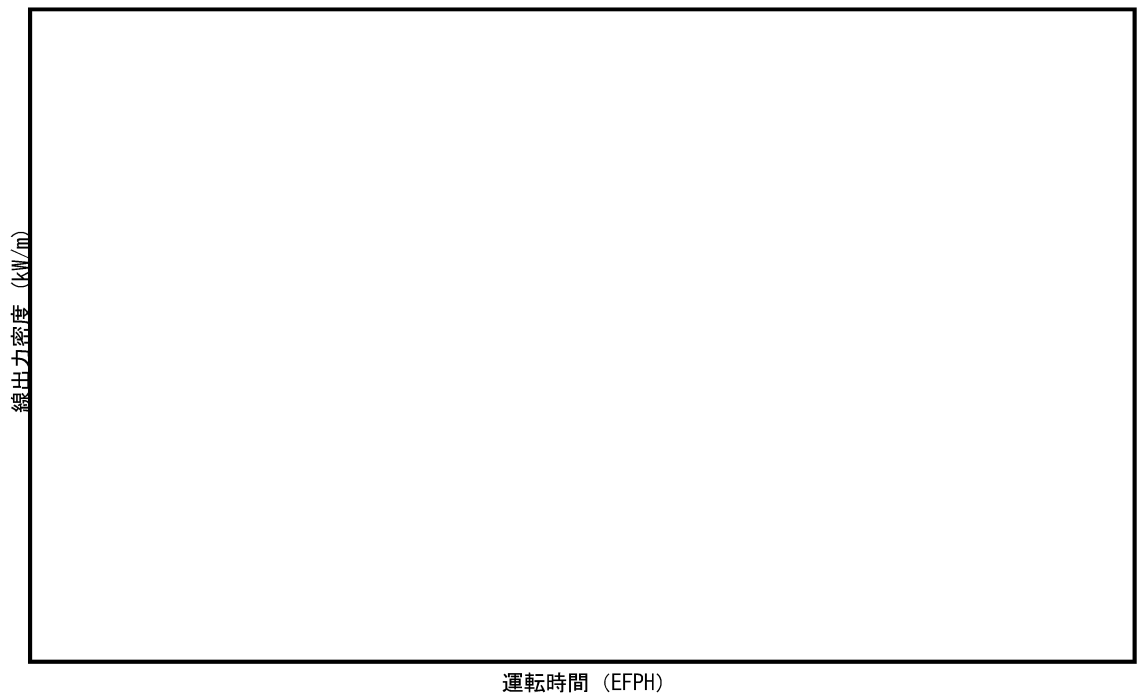
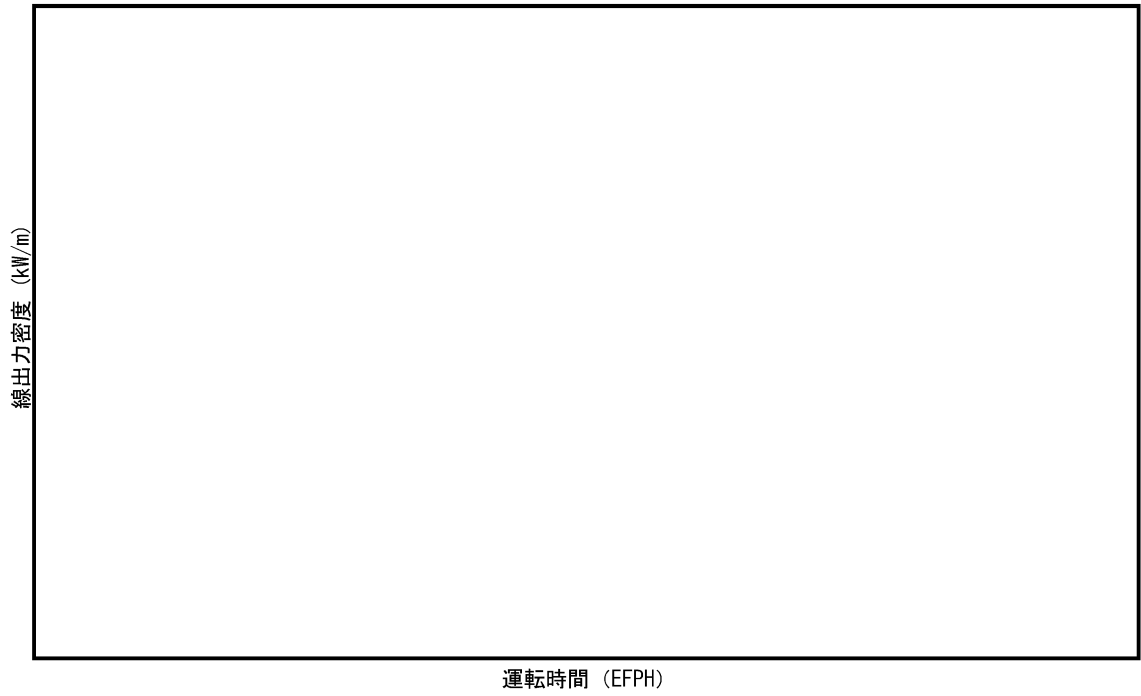


図 3-2 (2) 二酸化ウラン燃料棒の出力履歴
 (3 サイクル照射される二酸化ウラン燃料集合体の燃料棒)

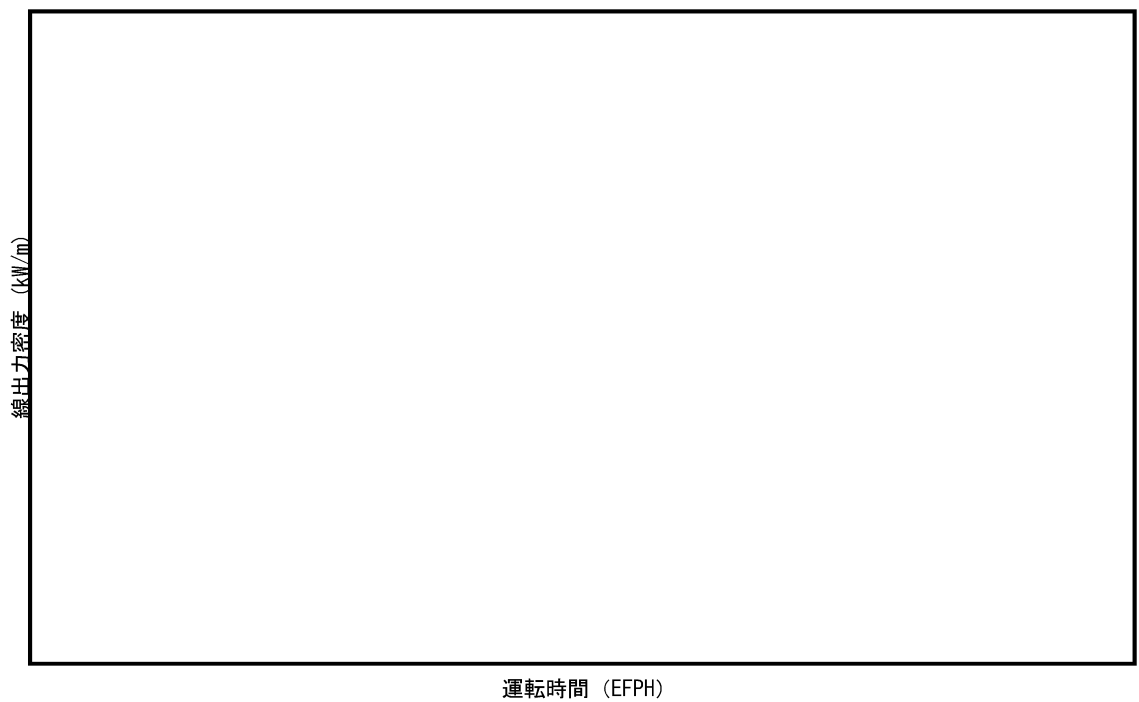
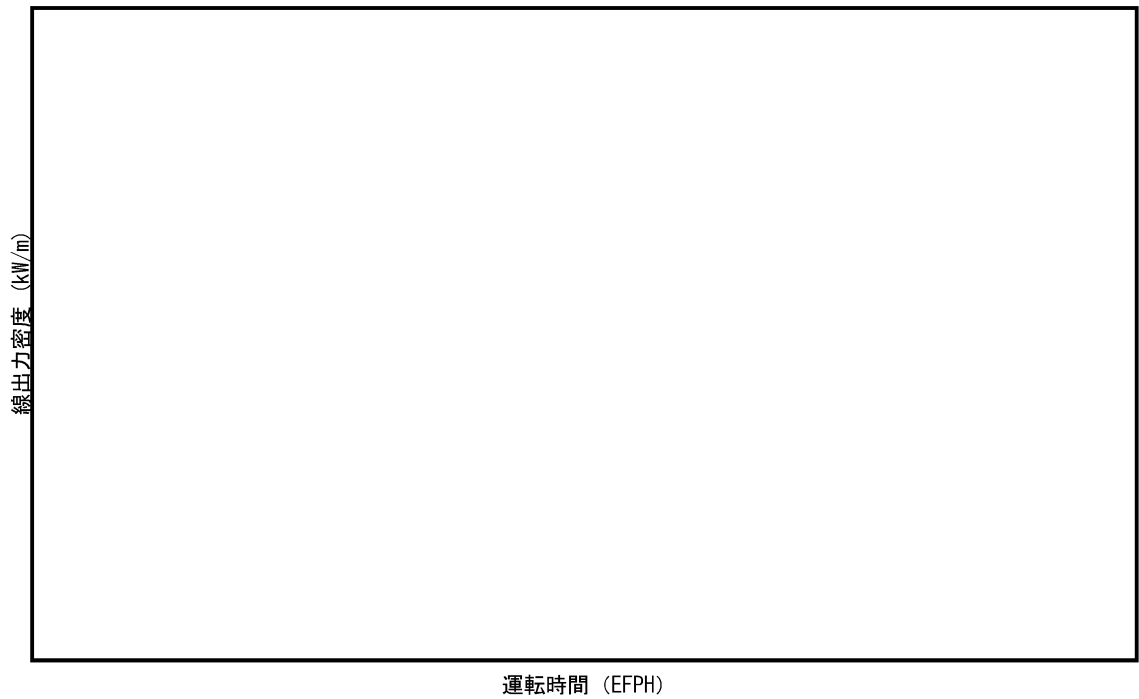
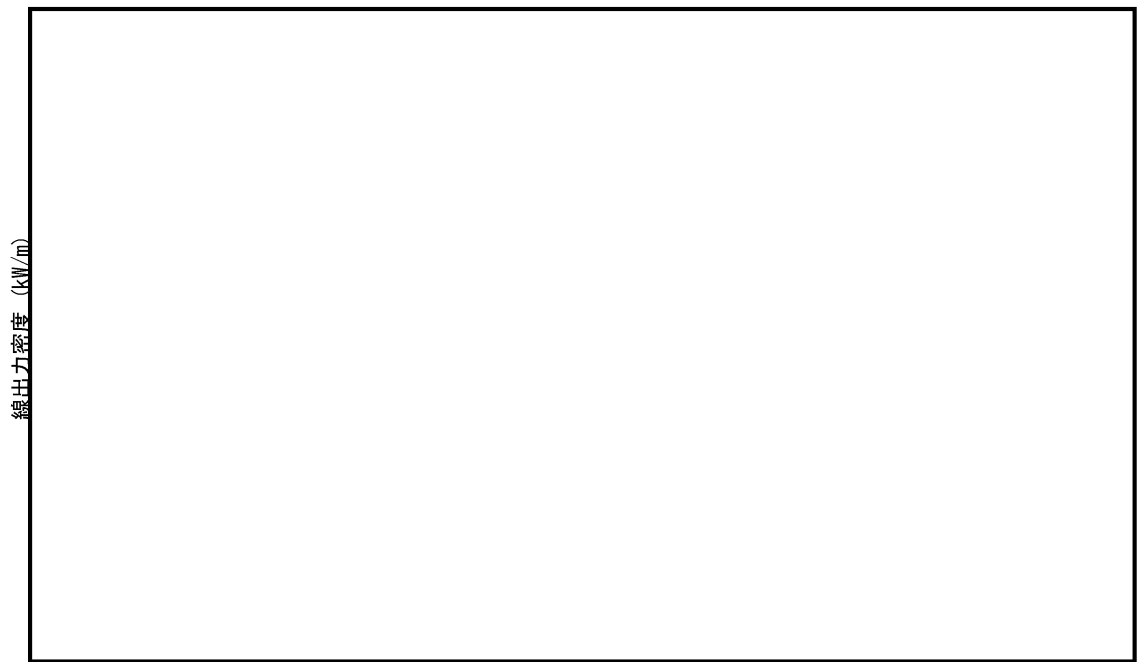
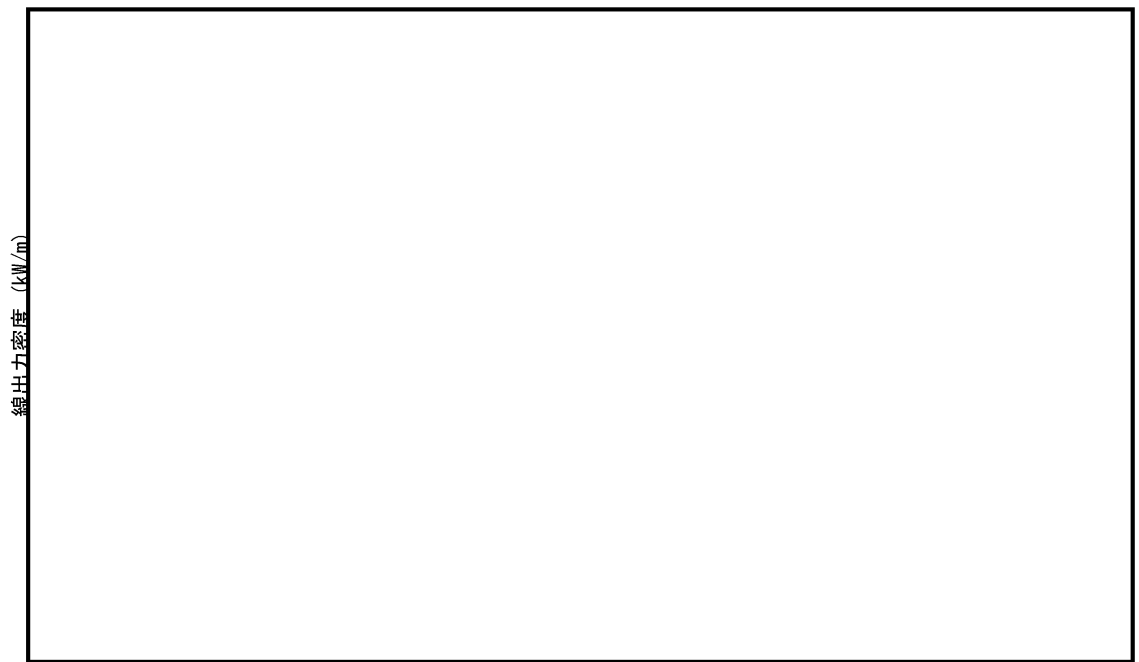


図 3-2 (3) 二酸化ウラン燃料棒の出力履歴
 (3 サイクル照射されるガドリニア混合燃料集合体中の燃料棒)

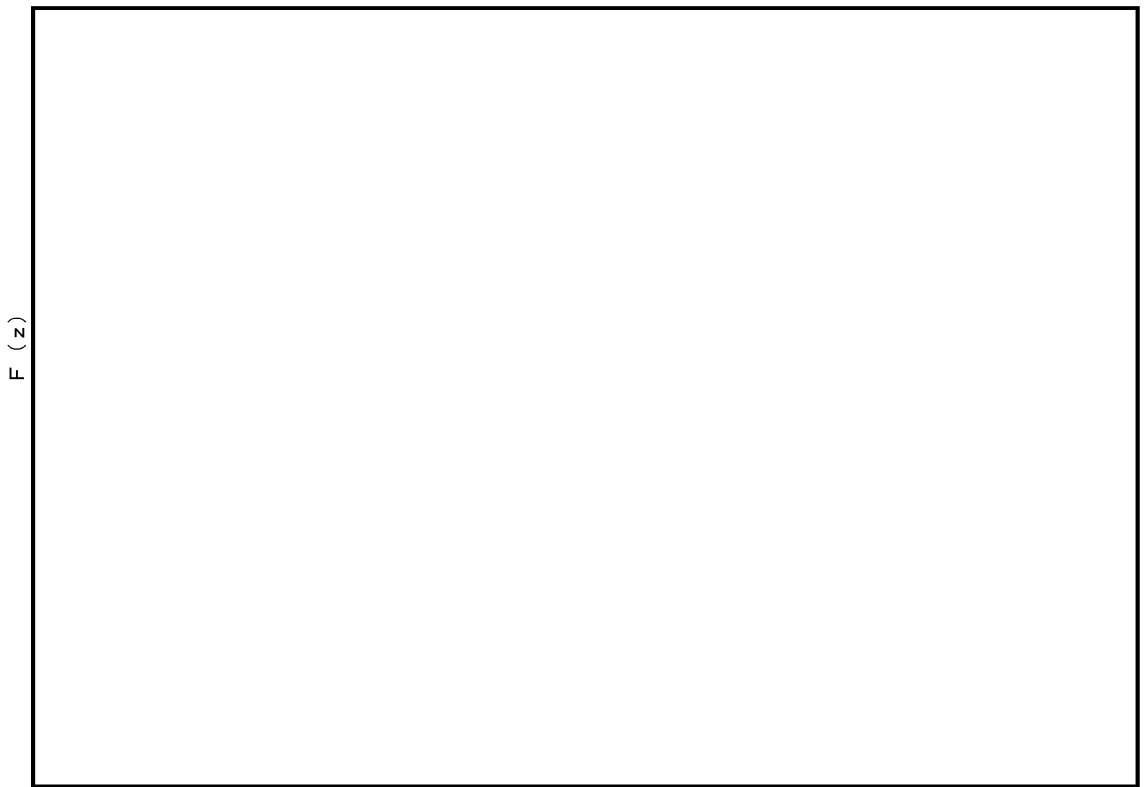


運転時間 (EFPH)



運転時間 (EFPH)

図 3-2 (4) ガドリニア混合燃料棒の出力履歴
 (3 サイクル照射されるガドリニア混合燃料集合体中の燃料棒)



(注1) 燃料中心温度、被覆管歪、被覆管応力及び被覆管疲労は、上図の局所的に出力を高く設定した箇所において評価する。

図 3-3 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、図3-4及び図3-5に示す。

また、被覆管内径とペレット外径の変化について、図3-6に示す。

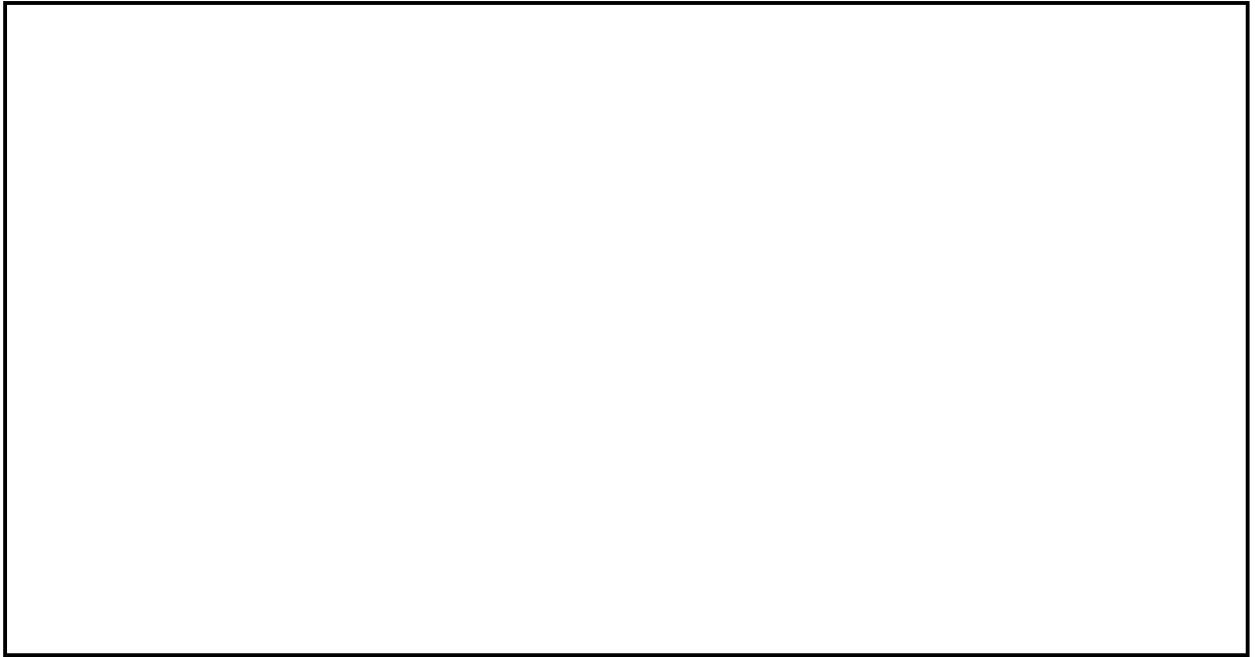


図 3-4 (1) 各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴 (通常運転時)
(二酸化ウラン燃料棒)

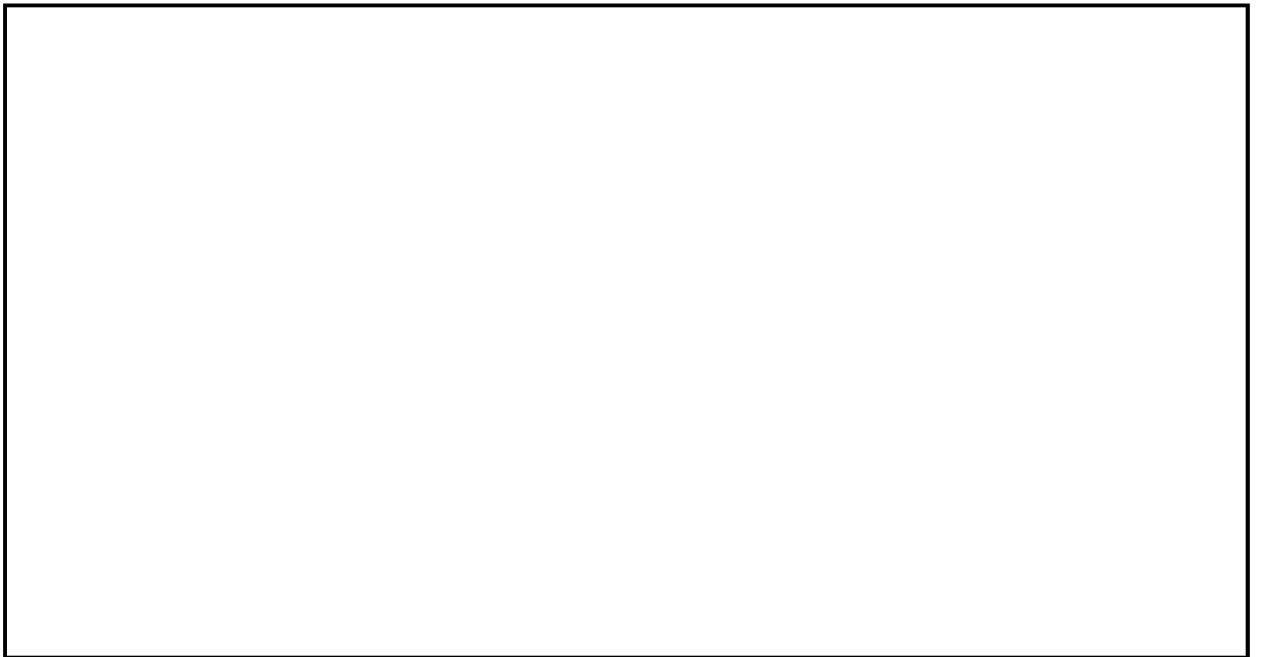


図 3-4 (2) 各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴 (通常運転時)
(ガドリニア混合燃料棒)

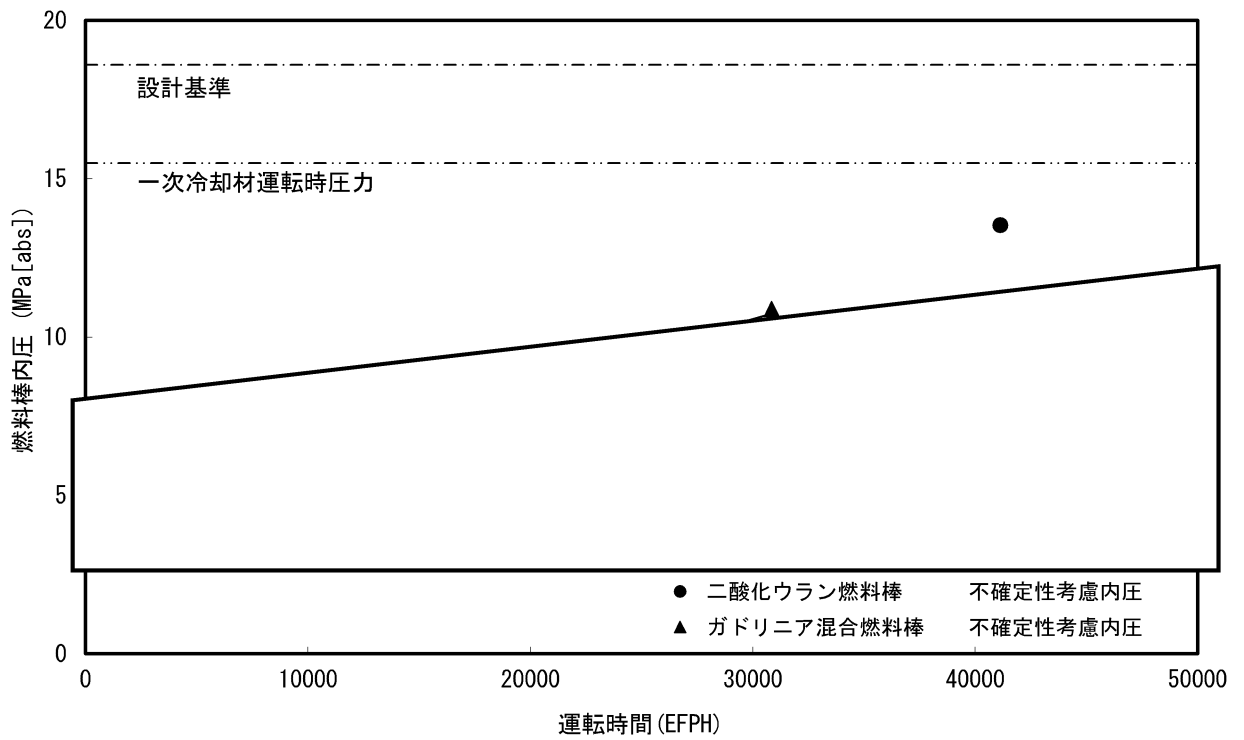


図 3-5 内圧評価上で最も厳しくなる燃料棒の内圧履歴（通常運転時）

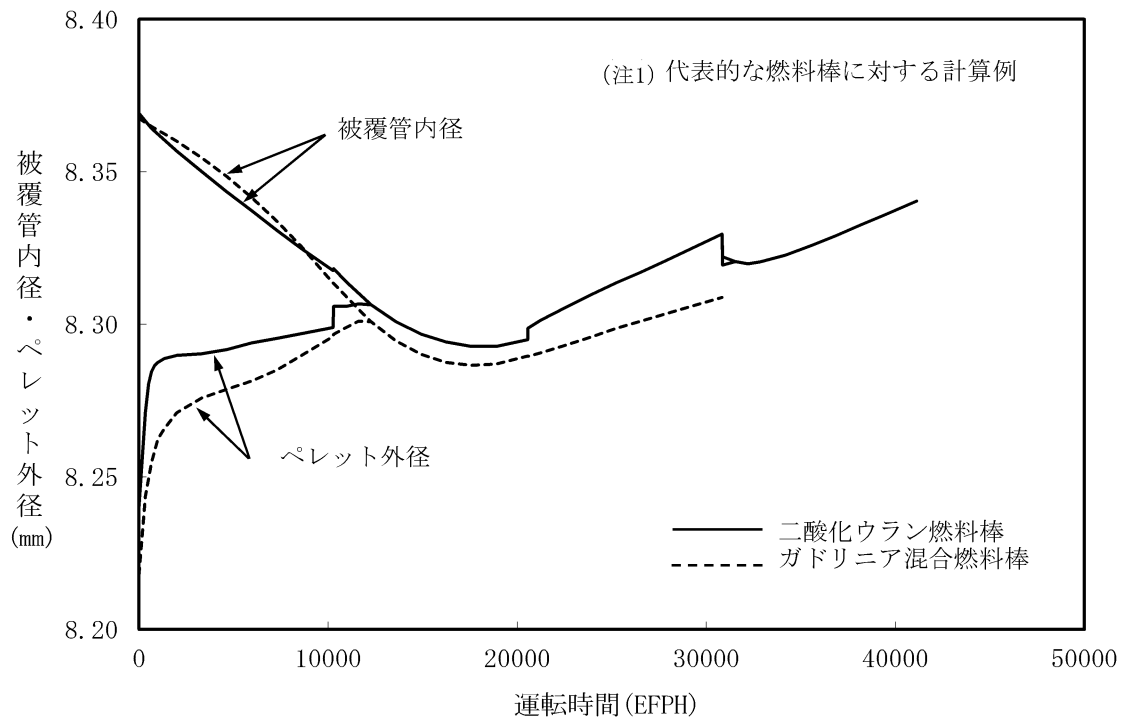


図 3-6 被覆管内径及びペレット外径変化

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、燃料スタックの寸法不安定性あるいは、FP ガスの過度な放出・移動、さらにはペレットと被覆管の有害な化学反応を引き起こすおそれがある。これらを防ぐため、燃料寿命中の燃料最高温度（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 当たり 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 当たり 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、中心温度が最高となり、かつ、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表3-3に示す。同表に示されるように、評価上最も厳しい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の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表3-3に示すように制限値を十分に下回っている。

表 3-3 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 (43.1kW/m)	0	約 1,750	<	2,580
	運転時の異常な 過渡変化時 (59.1kW/m)		約 2,170		
カトリニア混 合燃料棒	通常運転時 (33.4kW/m)	25,000	約 1,540	<	2,400
	運転時の異常な 過渡変化時 (44.3kW/m)	15,000	約 1,900		2,430

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 FPAC 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 ガス放出率及び燃料棒出力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ギャップを求めることにより、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、17×17 型燃料と 14×14 型(及び 15×15 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。

$$\text{限界内圧} = 18.6 \text{ MPa[abs]}$$

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表 3-4 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図 3-5 に示したとおりである。

表 3-4 燃料棒内圧評価結果 (通常運転時)

(単位 : MPa[abs])

種 類	時 期	内 圧 ^(注1)			設計基準	設計比 ^(注2)
		最確値	不確定性	合計		
二酸化ウラン燃料棒				13.6	≤18.6	0.74
ガドリニア混合燃料棒				10.9	≤18.6	0.59

(注1) 最確値と不確定性を足し合わせ、小数点以下第1位に切り上げたものを合計としている。

(注2) 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を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。従って、燃料寿命初期は未照射材の耐力と、またそれ以外の時点では、照射材の耐力と比較する。ここで、未照射材及び照射材の耐力基準値は、それぞれ耐力実績データに基づき、データのばらつきを考慮して導いた値（また、耐力基準値は被覆管温度の関数としている）を用いる。許容基準の求め方を図3-7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図3-6に示す。

被覆管応力評価では、内外圧差及びペレット－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。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表3-5及び図3-8に示す。これより二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア混合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。

表 3-5 二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア混合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							
		二酸化ウラン燃料棒			ガドリニア混合燃料棒				
項目		応力成分		σ_{θ}	σ_r	σ_z	σ_{θ}	σ_r	σ_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	内面								
	外面								
4. 合計応力 ^(*) 1+2+3	内面								
	外面								
評価時点									
体積平均相当応力 ^(*)									
被覆材耐力									
設計比 ^(*) ^(**)		0.57			0.46				
		0.57			0.46				

(*) 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。

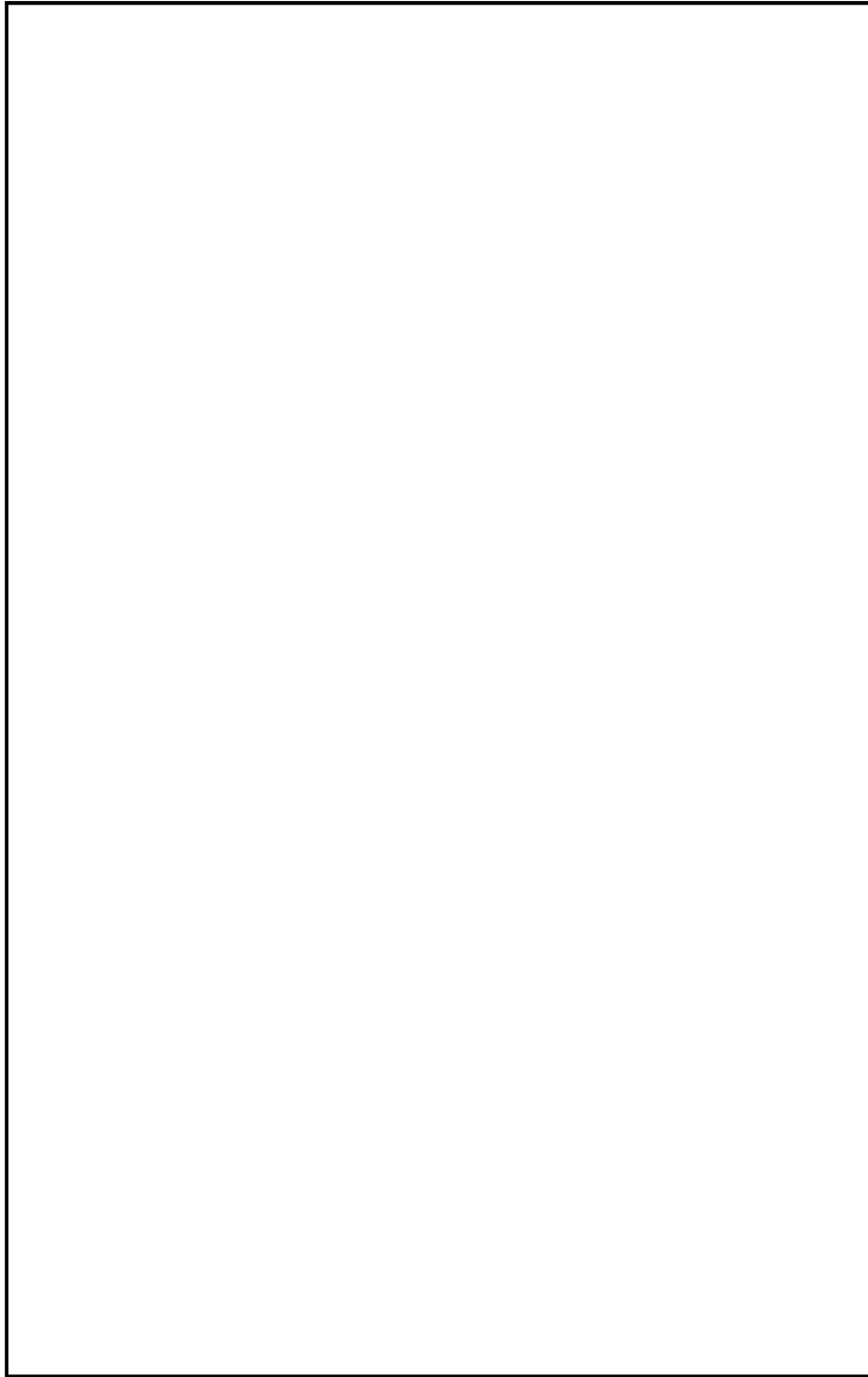
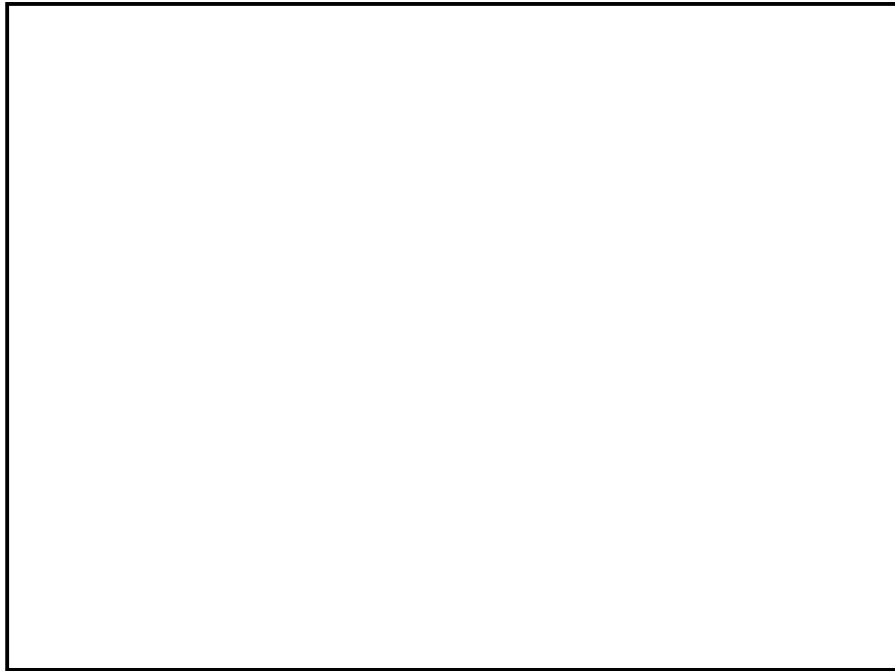


図 3-7 被覆管の応力評価における許容基準



(二酸化ウラン燃料棒)



(ガドリニア混合燃料棒)

図 3-8 被覆管の応力履歴 (運転時の異常な過渡変化時)

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。(図3-6参照)

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量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。

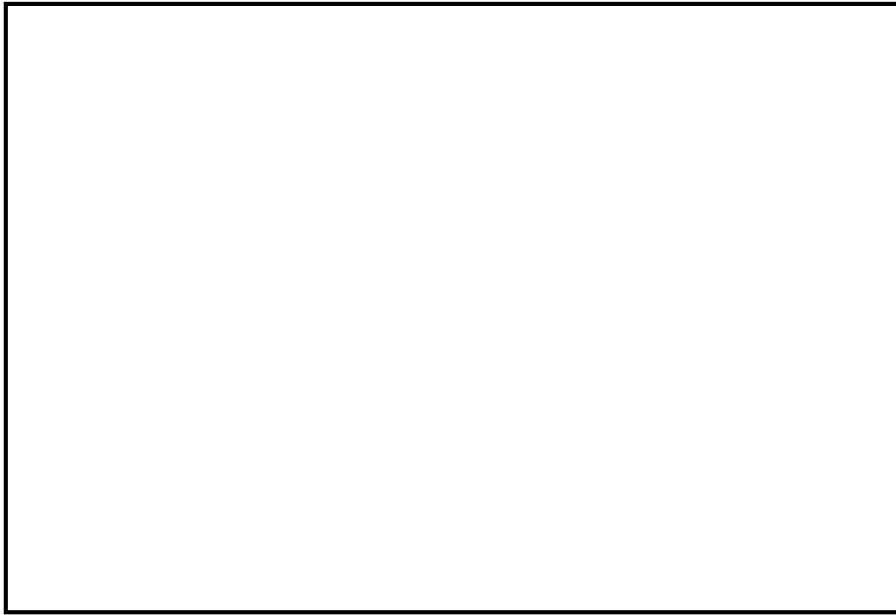
これに対して、運転時の異常な過渡変化時には、被覆管にはペレットと被覆管の接触後に引張歪が発生する。このため、応力評価と同様にペレットと被覆管の接触後引張歪は大きくなる。運転時の異常な過渡変化時における被覆管引張歪の変化量は、表3-6及び図3-9に示すとおり二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア混合燃料棒ともに設計基準1%以下を満足している。

表 3-6 運転時の異常な過渡変化時の引張歪評価結果

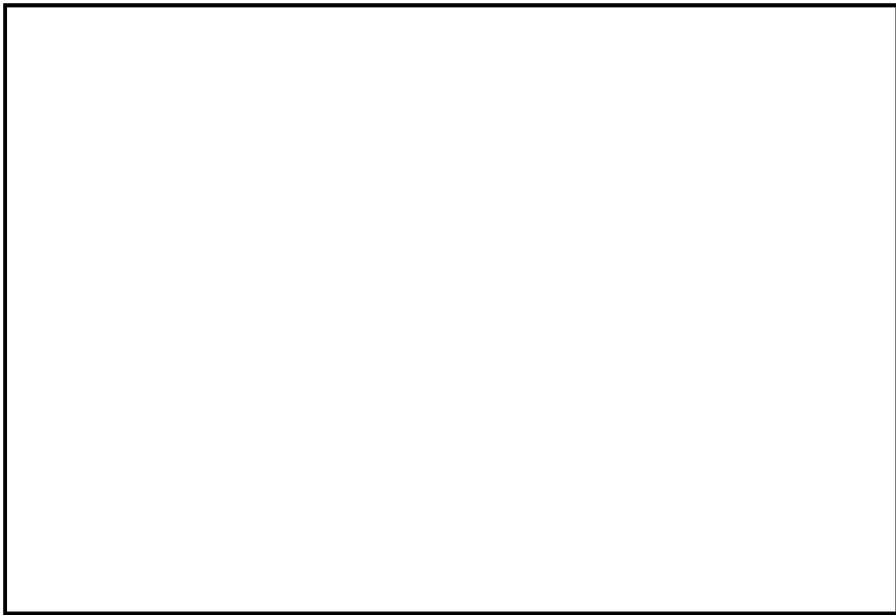
(単位：%)

種 類	時 期	歪	設計基準	設計比 ^(注1)
二酸化ウラン 燃料棒		0.26	≤1	0.26
ガドリニア混合 燃料棒		0.22	≤1	0.22

(注1) 設計基準値に対する評価値の比である。



(二酸化ウラン燃料棒)



(ガドリニア混合燃料棒)

図 3-9 被覆管の歪履歴 (運転時の異常な過渡変化時)

3.3.7 被覆管の疲労評価結果

燃料棒は原子炉に装荷されてから取り出されるまでの間、出力変動及び圧力変動を受け、これにより繰返し応力が被覆管に加わる。この繰返し応力は、ASME Sec. IIIに準拠した方法により評価し、累積疲労サイクル数と設計疲労寿命との比として表される累積疲労損傷係数が1を超えないことを確認する。

(1) 疲労解析条件

疲労解析では、繰返し応力の発生原因となる条件の回数を燃料において14ヶ月4サイクル運転を仮定する（添付1参照）。

a. 起動・停止

起動・停止に応じて被覆管の応力は、低温停止状態から高温零出力時の値に変化する。

起動・停止は1サイクル当たり□回起こるとして評価する。応力の変動幅は燃料寿命初期が最も大きいので、燃料寿命中この値が繰り返されるものとして評価する。

b. 日間負荷変化サイクル

通常の日間負荷変化に安全側にすべての高温零出力時と高温全出力時との間の出力変動及び10%ステップ状変化と1ループにおける起動停止を安全側に考慮し、1サイクル当たり□回起こるとして評価する。

c. その他の過渡変化

その他の過渡変化として、高温全出力時からの原子炉トリップ、1次冷却材流量の部分喪失等をまとめて1サイクル当たり□回起こるとして評価する。

上記 a. から c. の過渡変化事象について、燃焼サイクルごとに繰返し応力の振幅を計算する。応力の振幅の算出には、a. 起動・停止については寿命初期における応力評価値を、b. 日間負荷変化サイクル及び c. その他の過渡変化については各サイクル末期の応力評価値を用いる。なお、このとき、被覆管に発生する応力としては、内外圧差及び接触圧による応力（ペレット-被覆管接触圧も含む）及び熱応力を考慮している。過渡変化ごとに応力の主応力成分（ σ_r , σ_θ , σ_z ）より、それぞれの主応力の差 $|\sigma_r - \sigma_\theta|$ 、 $|\sigma_\theta - \sigma_z|$ 、 $|\sigma_z - \sigma_r|$ を求め、それぞれの主応力差について、最大値と最小値を求め、（最大値-最小値）/2より応力振幅 S_{alt} を算出する。その上で、3つの応力振幅 S_{alt} の中から最大となるものを $MAX S_{alt}$ とし、 $MAX S_{alt}$ に対応する許容繰返

し数 N を、設計疲労曲線に基づき算出する。

各過渡変化のサイクルごとに求めた設計許容繰返し数 N_1, N_2, \dots とそれに対応する応力の繰返し数 n_1, n_2, \dots とから累積疲労損傷係数 $\sum n_i/N_i$ を求める。

設計疲労曲線としては、照射したジルカロイ-4に関する図3-10に示すLanger and O'Donnellのデータを使用する⁽²⁾。

この設計疲労曲線は、実測データに対して試料寸法、表面状況及び環境等の影響及びデータのばらつきを十分補償できるように交番応力値(時間の周期的な関数として変化する応力)についてはファクター2、繰返し数についてはファクター20の安全率をとって作成されたものである。なお、NDA被覆管の設計疲労曲線としてもこの設計曲線が使用できることを確認している⁽³⁾。

(2) 疲労解析結果

各事象に対する損傷係数を合計した結果を表3-7に示すが、両燃料棒とも設計基準100%を満足している。

表 3-7 被覆管の疲労評価結果

(単位：%)

種 類	位置	累積損傷係数	設計基準	設計比 ^(注1)
二酸化ウラン 燃料棒	内面	6.9	≦100	0.07
	外面	3.1		0.04
ガドリニア混合 燃料棒	内面	2.6	≦100	0.03
	外面	1.1		0.02

(注1) 設計基準値に対する評価値の比である。

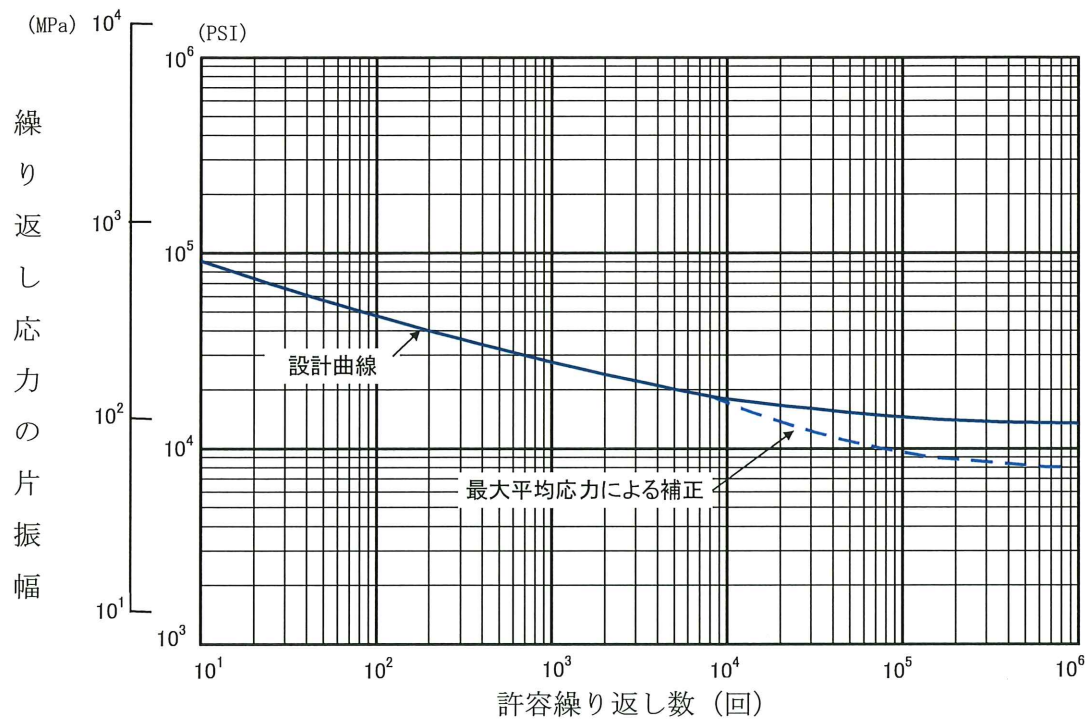


図 3-10 ジルカロイ-4 の設計疲労曲線⁽²⁾

3.4 その他の考慮事項

(1) 燃料棒曲がり評価

燃料集合体の制御棒案内シン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、制御棒案内シン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。

55,000MWd/t先行照射燃料集合体の燃料棒曲がりを48,000MWd/t燃料集合体の実績とあわせて図3-11に示す。55,000MWd/t先行照射燃料集合体の燃料棒曲がりは、NDA被覆管を採用している燃料集合体とジルカロイ-4被覆管を採用している燃料集合体とで同等である。また、燃料棒曲がりは、燃料寿命初期に進行するが、中性子照射に伴う支持格子拘束力の緩和により、燃料寿命末期では飽和傾向にある。

図3-11に示すように、本燃料集合体は過度の燃料棒曲がりは発生しない。従って、燃料棒曲がりの影響は評価不要である。

(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、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り更に燃料集合体の伸びが増加する。従って、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図3-12に示す。55,000MWd/t先行照射燃料集合体の燃料集合体の伸びは、ジルカロイ-4被覆管を採用している燃料集合体よりNDA被覆管を採用している燃料集合体が小さい。また、ジルカロイグリッド燃料集合体（ジルカロイ-4被覆管）の燃料集合体の伸びは、48,000MWd/t燃料集合体の実績と同等であり、中間部支持格子の差による燃料集合体の伸びへの影響は認められない。従って、NDA被覆管を採用する本燃料集合体の伸びは、48,000MWd/t燃料集合体のそれよりも小さくなる。

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、本燃料集合体の伸びは保守的に 48,000MWd/t 燃料集合体の設計線を用いて評価している。

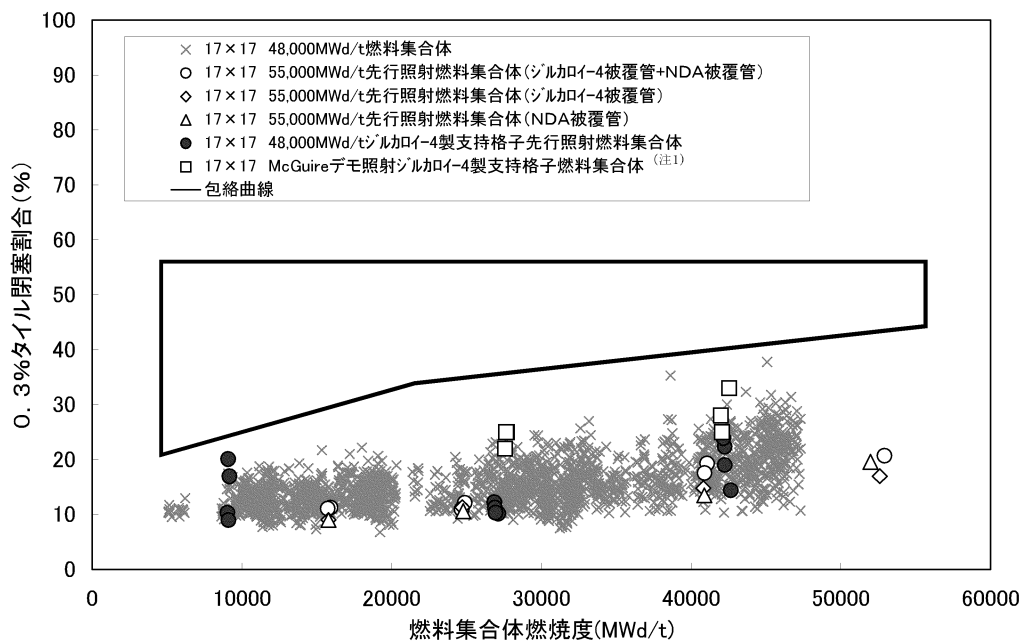
b. 燃料棒と上部及び下部ノズルの間隙

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」と称する。)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。従って、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図3-13に示す。照射成長がジルカロイ-4より小さいNDA被覆管を採用する燃料はジルカロイ-4被覆管を採用する燃料と比べ、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、保守的にジルカロイ-4 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設定している。



(注1) McGuireデモ照射ジルカロイ-4製支持格子燃料の段数は8段であり、国内向け燃料よりも1段少ない。

図 3-11 燃料棒間隔の閉塞割合 ⁽⁴⁾

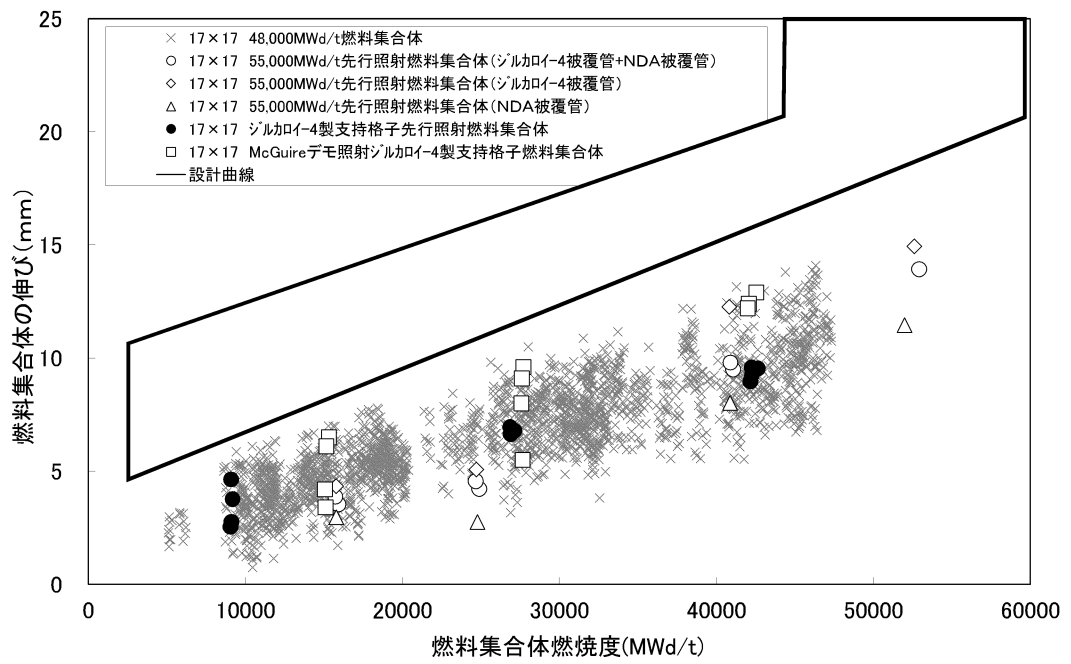


図 3-12 燃料集合体伸び⁽⁴⁾

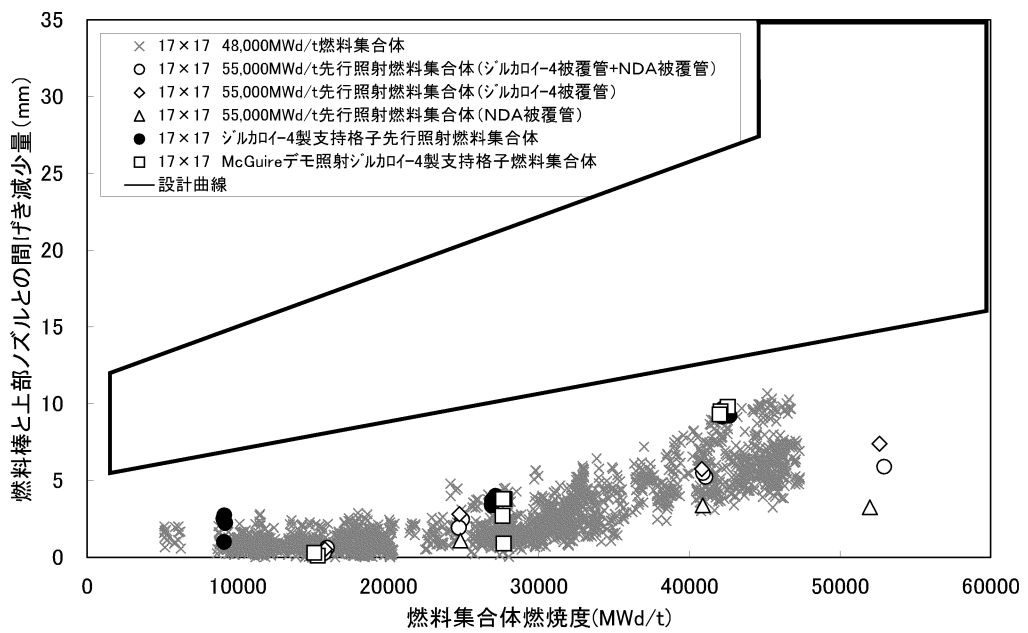


図 3-13 トータルギャップ減少量⁽⁴⁾

(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。NDA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、従って、NDA被覆管の腐食モデル式は表3-8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NDA被覆管の腐食特性（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20%）を考慮した。NDA被覆管の炉内腐食量について、実測値と予測値を図3-14に比較した。図3-14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FPACコードによりNDA被覆管の腐食量を適切に評価できる。

また、NDA被覆管の炉内水素吸収量の実測値と予測値を図3-15に示す。ここでは腐食量の予測値に対し、被覆管の腐食により発生した水素の一部が酸化膜厚さに応じてある割合で被覆管に取り込まれるとしてNDA被覆管の水素吸収量を計算した。図3-15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FPACコードによりNDA被覆管の水素吸収量を適切に評価できる。

以上より、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 FPACコードにより評価した結果、約□□%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^(注1)である。

また、被覆管の最大水素吸収量を高燃焼度用FPACコードにより評価した結果、約□□ppmとなり、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1) 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。

表 3-8 腐食評価式

遷移領域前

$$(dS^n/ dt)=A \exp(-Q_1/ RT)$$

遷移領域後

$$(dS/ dt)=A \exp(-Q_2/ RT)$$

ここで、

- S : 酸化膜厚さ
- t : 時間
- n : 定数
- Q_1, Q_2 : 活性化エネルギー
- R : ガス定数
- T : 被覆管と酸化膜との界面温度
- A, B : 関数

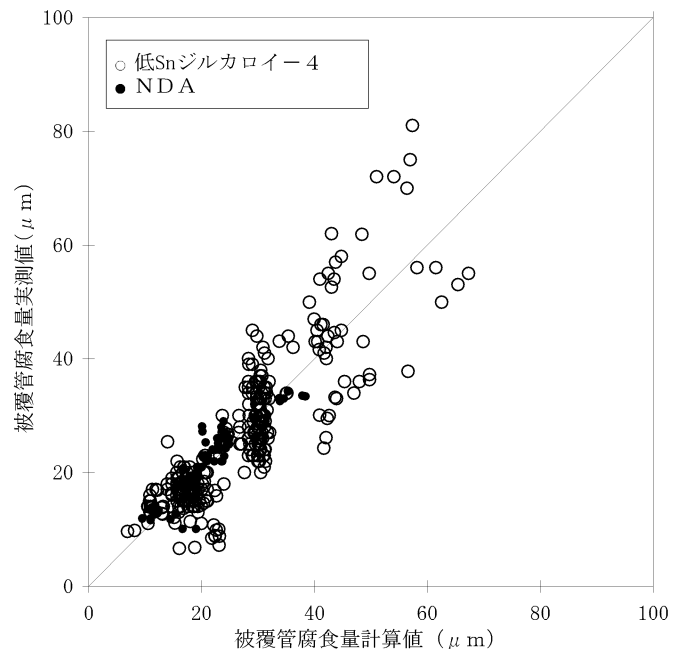


図 3-14 被覆管腐食量（最大酸化膜厚）の実測値と予測値の比較

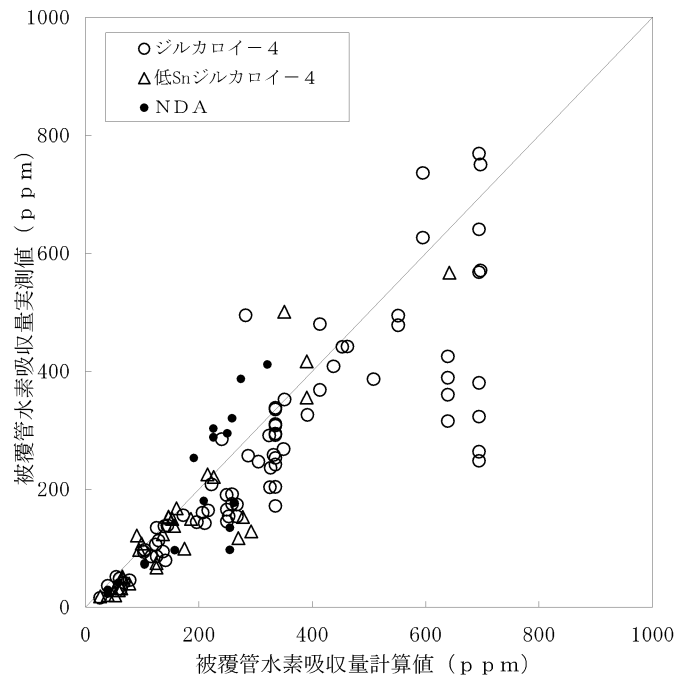


図 3-15 被覆管水素吸収量の実測値と予測値の比較

(4) PCI評価

NDA被覆管の出力ランプ試験データを図3-16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、NDA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。

図3-16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、ガドリニア混合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。

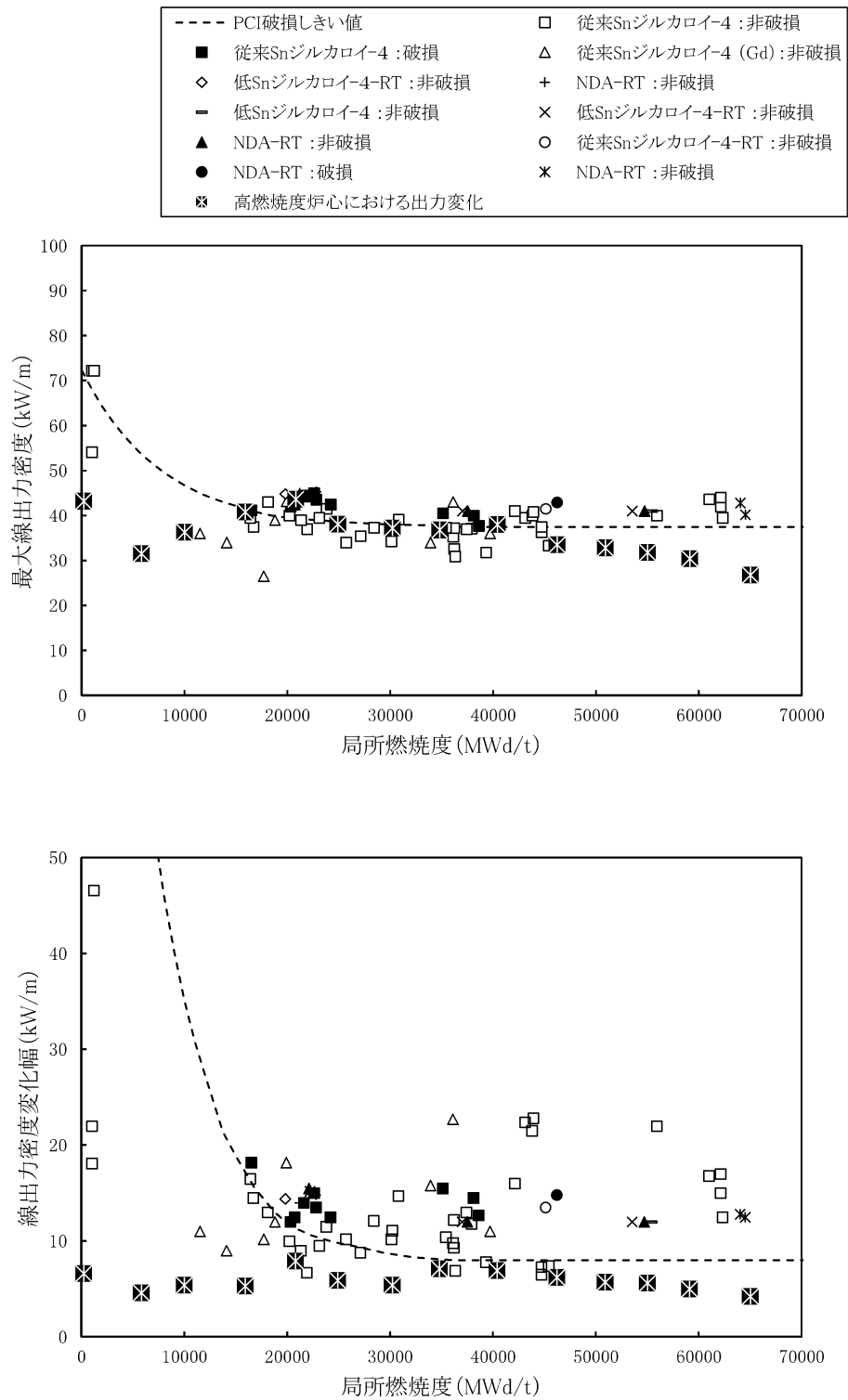


図 3-16 (1) 被覆管の出力ランプ試験結果
(最大線出力密度が最大の場合の出力変化)

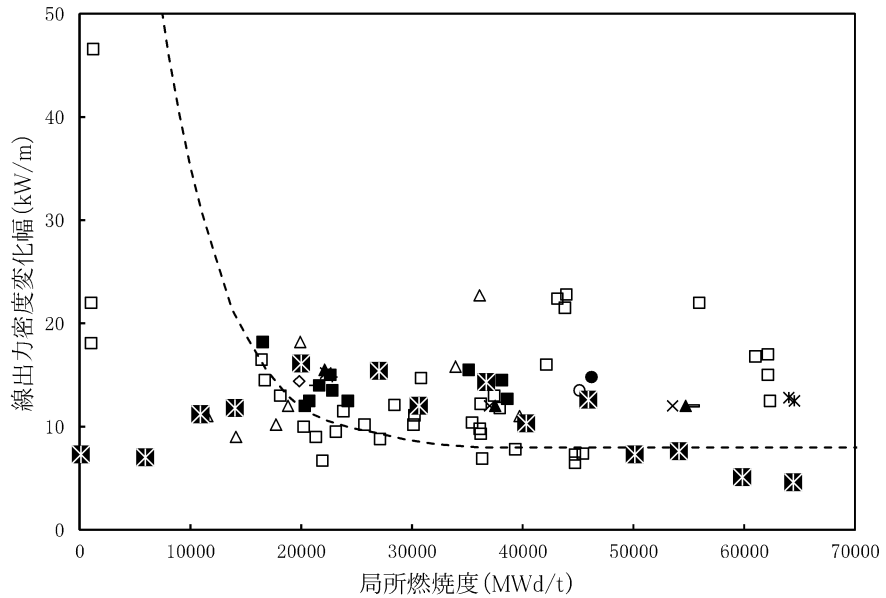
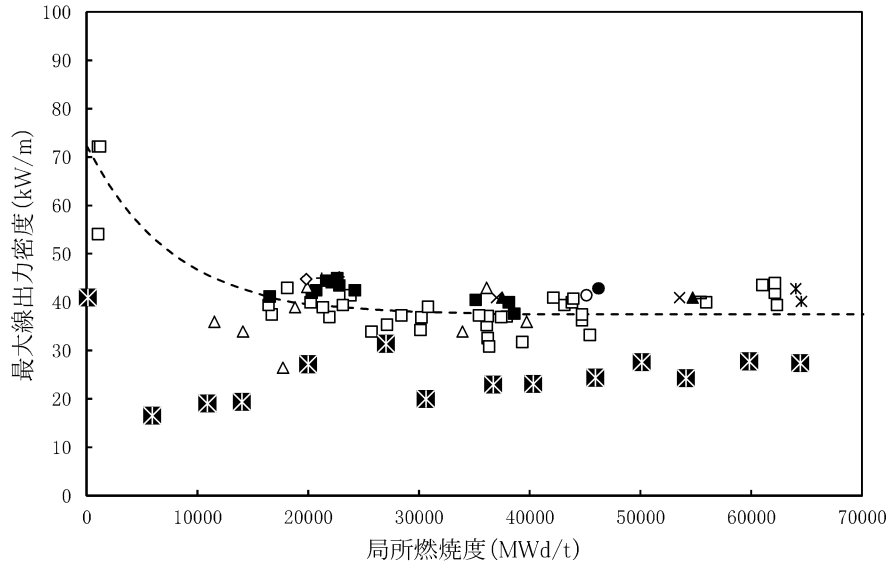
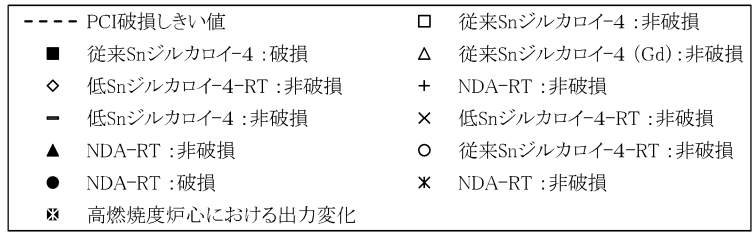


図 3-16 (2) 被覆管の出力ランプ試験結果
(線出力密度変化幅が最大の場合の出力変化)

(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扁平化し、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、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、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。

a. 析出硬化型ニッケル基合金製の最上部及び最下部支持格子

析出硬化型ニッケル基合金（以下、「718合金」と称する。）製の支持格子ばねは、中性子の照射により応力緩和するが、燃料棒と支持格子が接触していれば、フレッシング摩耗量を十分小さく保てること、実機条件を模擬した炉外の流水試験で分かっている。従って、燃料寿命中燃料棒と支持格子が接触していれば良い。図3-17⁽⁵⁾⁽⁶⁾に支持格子拘束力緩和のデータを示す。これより、支持格子拘束力は燃焼初期に大きく緩和するものの、その後飽和傾向を示し、高燃焼度での支持格子拘束力緩和率は1を超える（非接触となる）ことはないと考えられる。

b. ジルカロイ-4の中間部支持格子

ジルカロイ-4製支持格子の拘束力緩和データを、718合金製支持格子データとあわせて図3-17に示す。同図から、ジルカロイ-4製支持格子の拘束力緩和が大きいことが確認できる。しかし、718合金製支持格子で確認したように、拘束力緩和は燃料寿命末期において飽和することを考えると、ジルカロイ-4製支持格子の場合でも、燃料寿命末期まで支持格子拘束力緩和率が1を超える（非接触となる）ことはないと考えられる。

ジルカロイ-4製支持格子についても、718合金製支持格子と同様、燃焼期間中において燃料棒と支持格子ばねの接触が保たれていればフレッシング摩耗が生じない。さらに、照射済み燃料に対する照射後燃料棒引抜きにおいて、支持格子拘束力が残存していること、即ち、燃料寿命末期でも支持格子と燃料棒の接触が保たれることを確認している。また、燃料棒には、フレッシング摩耗等の外観異常も認められていない。

以上述べたように、燃料集合体に用いている718合金製及びジルカロイ-4製支持格

子と燃料棒との接触は、燃料寿命末期においても保たれており、フレット磨耗は十分小さく燃料棒の健全性が損なわれることはない。

なお、炉外の流水試験結果は、ジルカロイ-4 被覆管の結果である。燃料棒及び支持格子の材料特性のうち、フレット磨耗に最も影響するのは材料の硬度であるが、ジルカロイ-4 被覆管と NDA 被覆管の硬度は同等であり⁽³⁾、NDA 被覆管のフレット磨耗はジルカロイ-4 被覆管と同等である。

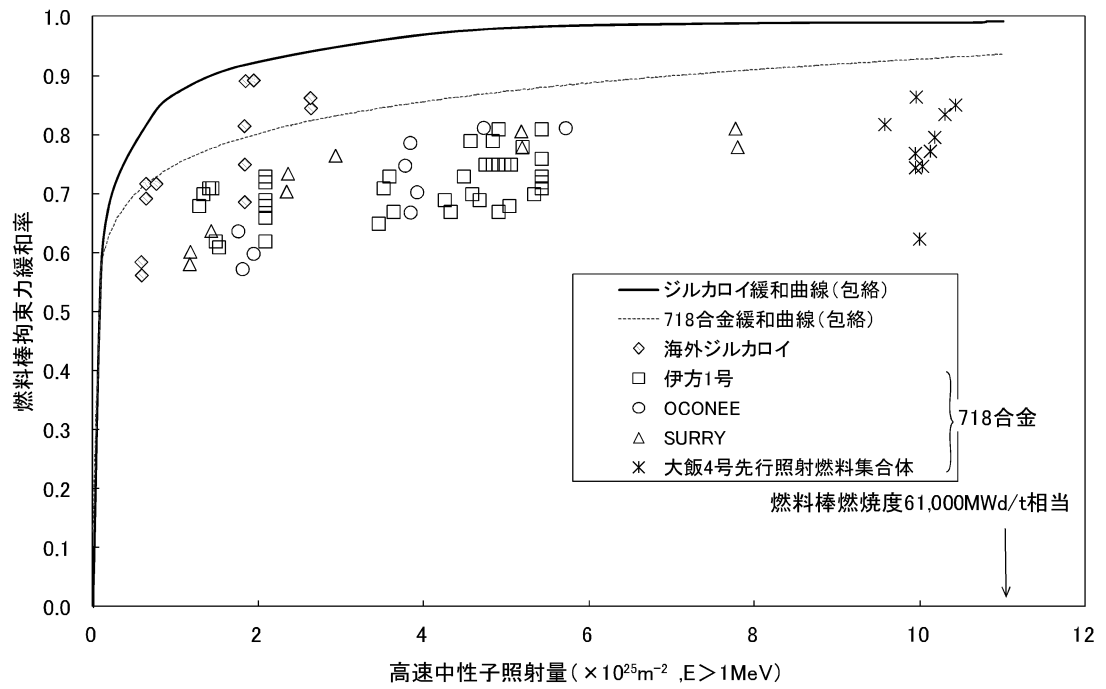


図 3-17 支持格子拘束力の緩和率実測データ^{(5) (6)}

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、輸送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^(注1)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表4-1及び表4-2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）」、「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（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第6号）」、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。

表 4-1 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 ^(注1)	許容値 ^(注1)
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 鋼	$P_L + P_b$	1.5Sm
上部ノズル- 制御棒案内シ ンプル結合部	荷重分布を考慮し、結合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
支持格子- 制御棒案内シ ンプル結合部	荷重分布を考慮し、拡管部の強度評価を行う。 ^(注2)	ステンレス鋼 ジルカロイ-4 718 合金	—	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 ンプル	荷重分布を考慮し、応力評価を行う。	ジルカロイ-4	P_m	Sm

(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_L : 一次局部膜応力
- P_b : 一次曲げ応力
- Sm : 設計応力強さ (ASME に従う。ただし、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) 上部支持格子-制御棒案内シンプル結合部は拡管結合であり、下部支持格子-制御棒案内シンプル結合部はかしめ結合である。ここで、拡管結合の強度が約 N に対して、かしめ結合の強度は約 N であり、拡管結合の方の強度が低いことから、上部支持格子-制御棒案内シンプル結合部を評価する (添付2参照)。

表 4-2 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 ^(注1)	許容値 ^(注1)
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 鋼	$P_L + P_b$	1.5Sm
制御棒案内シ ンプル	スクラム時の衝撃力	ジルカロイ-4	P_L	1.5Sm
	運転時荷重		P_m ^(注2)	Sm
上部ノズル押 さえばね	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なばね力
	ポンプオーバースピード時		—	上部ノズル押さ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_L : 一次局部膜応力

P_b : 一次曲げ応力

Sm : 設計応力強さ (ASME に従う。ただし、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、図 4-1 に燃料集合体強度評価流れ図を示す。

燃料集合体の強度評価においては、燃料輸送及び取扱い中に加わる 6G の設計荷重及び通常運転時並びに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健全性評価は、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、上部ノズル押さえばね力は照射に伴い増加する。このため、上部ノズル押さ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。

なお、評価に使用する解析コードは「NASTRAN Ver. 70」である。

4.2.1 燃料輸送及び取扱い時における評価方法

燃料輸送及び取扱い時の燃料集合体各部に加わる荷重の概略図を図 4-2 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。ただし、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、NASTRAN コードを用い、有限要素法にて最大応力に最大応力を評価する。

一方、下部ノズルには、燃料輸送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 NASTRAN コードを用い、有限要素法にて評価する。

(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は、上部ノズル直下の制御棒案内シンプル部と同じように全荷重を受ける。ここで結合部であるネジ部の有効断面積は、制御棒

案内シンプルの管断面積より大きい^(注1)ため、ネジ部の発生応力は制御棒案内シンプルに発生する応力より小さくなる。したがって、評価は制御棒案内シンプルと同じとする。

(3) 支持格子－制御棒案内シンプル結合部強度評価

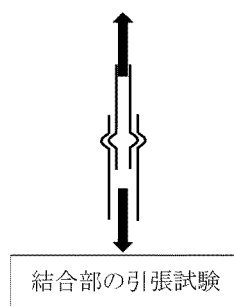
支持格子－制御棒案内シンプル結合部は、制御棒案内シンプルと燃料棒に荷重が分担されるが、保守的に支持格子－制御棒案内シンプル結合部がすべての荷重を受けた際の、1本あたりに作用する荷重をNASTRANコードを用いて評価する。支持格子－制御棒案内シンプル結合部は、応力強さで評価することは困難であるため、試験により1本あたりの許容荷重^(注2)を求めており、この許容値と比較して弾性限界荷重を超えないことを確認する。

(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NASTRANコードを用いて評価する。

(注1) ネジ部の有効断面積は約□mm²であり、制御棒案内シンプルの管断面積約□mm²より大きい(添付3参照)。

(注2) 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)。



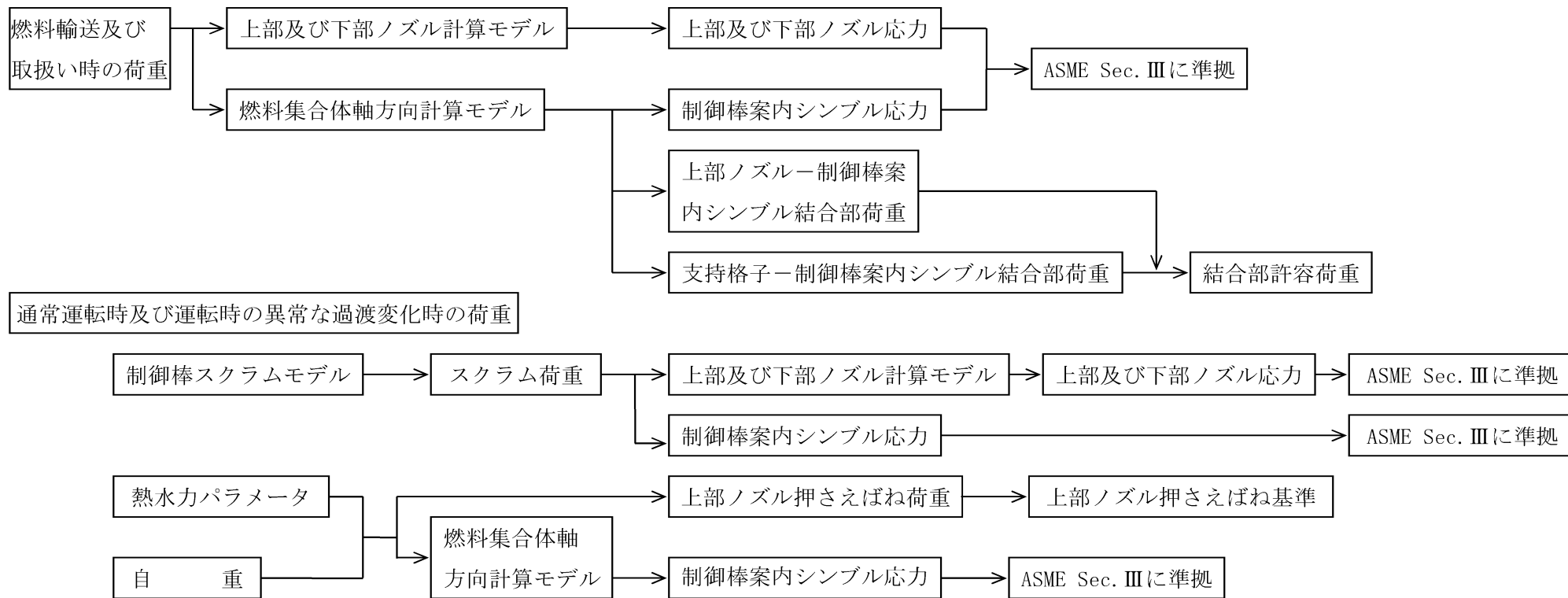


図 4-1 燃料集合体強度評価流れ図

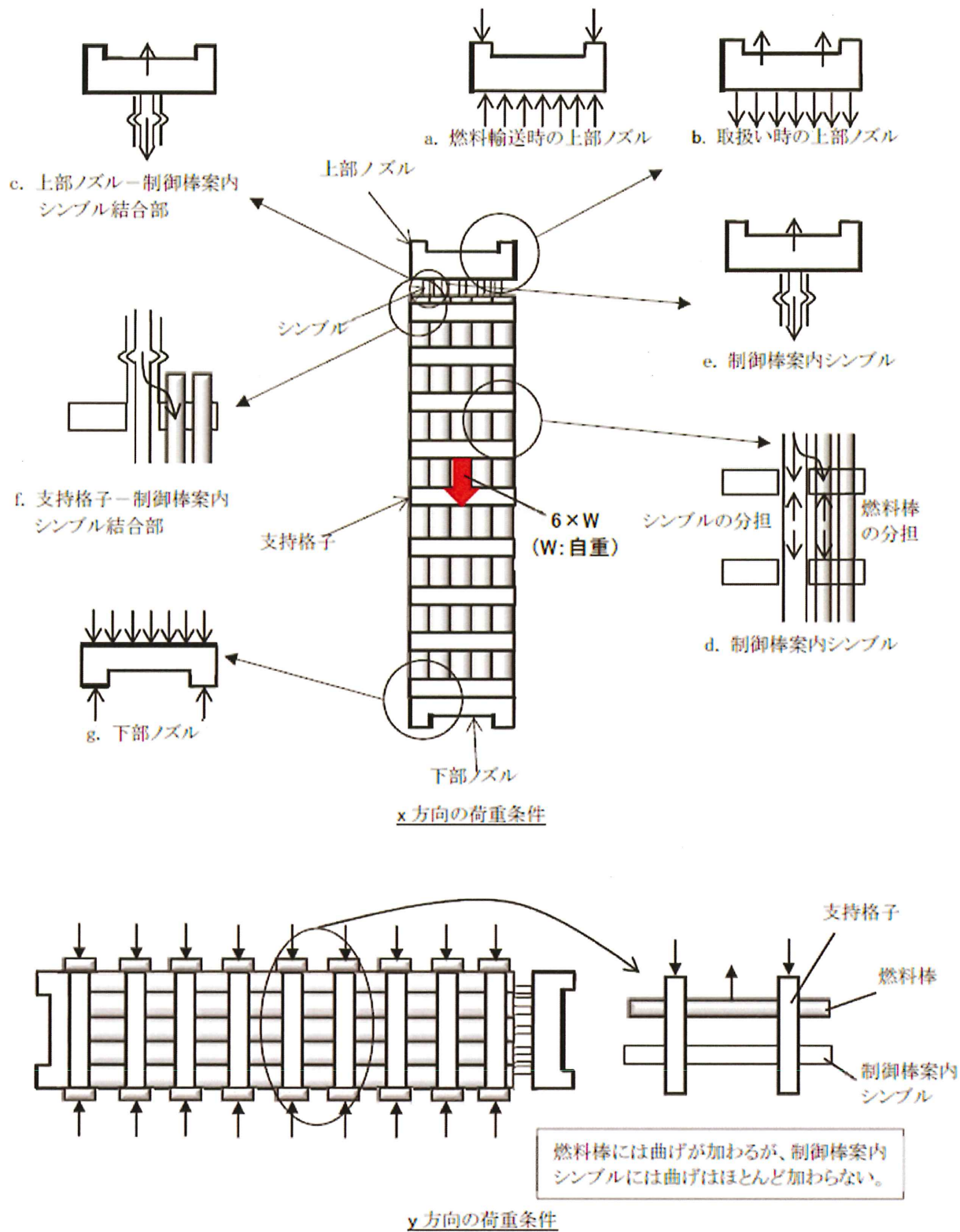


図 4-2 燃料集合体にかかる荷重

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。図4-3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、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^(注1)に制御棒クラスタ^(注2)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。

従って、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NASTRANコードを用いて行う。図4-4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□回^(注3)と設定しても累積疲労損傷係数は上部ノズルで□%、下部ノズルで□%、制御棒案内シンブルで□%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、□回（添付1参照）に燃料寿命の4サイクルをかけて□回と設定している。

(2) 上部ノズル押さえばねの機能評価

上部ノズル押さ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^(注1)条件で、上部ノズル押さ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、上部ノズル押さ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

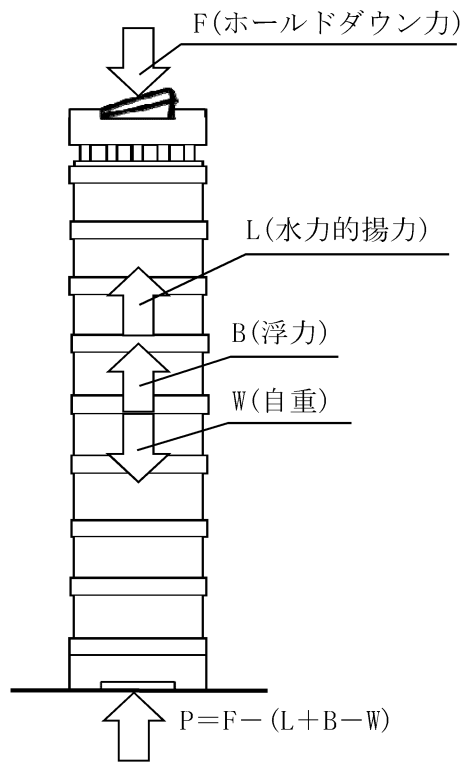
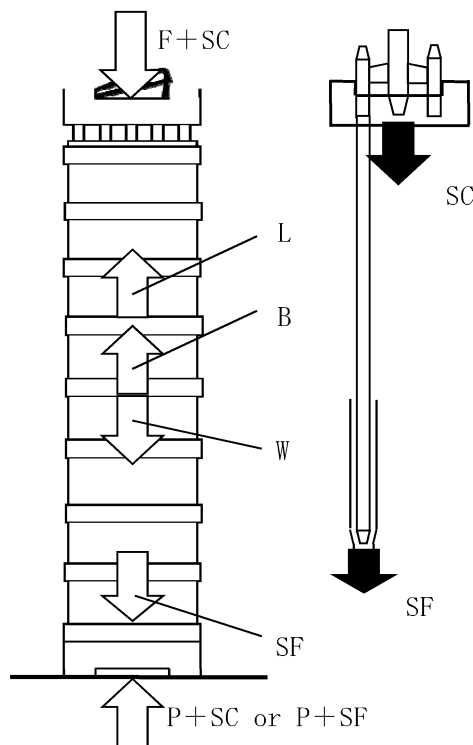


図 4-3 通常運転時荷重



SC : 上部ノズルに制御棒クラスタが着底する際の衝撃力
 SF : ダッシュポット部に制御棒クラスタが挿入され、落下速度が急に減速する際の衝撃力

図 4-4 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

表4-3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外周部で発生するが、永久変形は生じない。

(2) 上部ノズルー制御棒案内シンブル結合部強度評価

上部ノズルと制御棒案内シンブルの結合は、ネジ構造により行われているため、制御棒案内シンブルと同じ設計荷重が作用する。

ここで結合部であるネジ部の有効断面積は、制御棒案内シンブルの管断面積より大きいいため、ネジ部の発生応力は制御棒案内シンブルに発生する応力より小さくなる。

従って、ノズルー制御棒案内シンブル結合部は、設計荷重に対する強度評価を行う上で制限因子とならず、健全性が損なわれることはない。

(3) 支持格子ー制御棒案内シンブル結合部強度評価

表4-3に結合部に生じる最大荷重と許容荷重を示す。最大荷重は最上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) 制御棒案内シンブル応力評価

表4-3に制御棒案内シンブルに生じる最大応力と許容応力を示す。最大応力は上部ノズルと最上部支持格子間の制御棒案内シンブルで発生するが、永久変形は生じない。

横方向に6G荷重が作用した場合、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310MPa）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。

表4-3 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 ^(注1)
上 部 ノ ズ ル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.87
下 部 ノ ズ ル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.83
支持格子－制御棒案 内シンプル結合部	<input type="text"/> ^(注2)	<input type="text"/> ^(注3)	0.67 ^(注4)
制御棒案内シンプル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.89

(注1) 許容応力値に対する最大応力値の比である。

(注2) 最大荷重 (N)

(注3) 許容荷重 (N)

(注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表4-4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表4-4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表4-4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表4-4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) 上部ノズル押さえばねの機能評価

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表4-5に示す。それぞれの場合に上部ノズル押さ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、燃料集合体が若干浮き上がるものの、その際の上部ノズル押さえばねのたわみ量の増加は、ばねの塑性変形を増加させない範囲内であり、通常運転時に復帰した時には、表4-5に示すばね力を維持し、上部ノズル押さえばねの機能は損なわれない。

表4-4 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 ^(注1)
上部ノズル			0.31
下部ノズル ^(注2)			0.15
制御棒案内シンプル ^(注2) ダッシュポット部			0.61
制御棒案内シンプル ^(注3) ダッシュポット部			0.19

(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。

表4-5 上部ノズル押さえばね評価結果

(単位：N)

	^(注1) 上部ノズル押さえばねに要求される力	上部ノズル 押さえばね力	評価	^(注2) 設計比
低温起動時			浮き上がらない。	0.76
高温全出力時			浮き上がらない。	0.74
ポンプオーバー スピード時 (高温)		—	浮き上がるがばねの塑性変形は進行しない。	—

(注1) 水力的揚力+浮力-自重

(注2) 「上部ノズル押さえばね力」に対する「上部ノズル押さえばねに要求される力」の比である。

5. 参考文献

- (1) 原子燃料工業, “燃料棒性能解析コード (FPAC)”, NFK-8011 改 11, (2009)
- (2) W. J. O'Donnell and B. F. Langer, “Fatigue Design Basis for Zircaloy Components”, Nucl. Sci. and Eng., 20 (1964)
- (3) 原子燃料工業, “原燃工製 PWR ステップ 2 燃料の改良因子について”, NFK-8116 改 8, (2011)
- (4) 原子燃料工業, “原燃工製 PWR ステップ 2 燃料集合体の開発”, NFK-8114 改 2 (2003)
- (5) W. Arbiter and J. A. Kuszyk, “Surry Unit 2 End of Cycle 5 Onsite Examination of 17×17 Demonstration Fuel Assembly RD-2 After Four Cycles of Exposure”, Volume 1, WCAP-10317 (1984)
- (6) P. H. Kreyms and M. W. Burkart, “Radiation-enhanced relaxation in Zircaloy-4 and Zr/2.5wt% Nb/0.5wt% Cu alloys”, J. Nucl. Mat., 26, pp.87-104 (1968)

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40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/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

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

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	120
(b) 停 止	120
(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	1,400
(h) 15%から0%への負荷減少	1,400
(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

支持格子ー制御棒案内シンプル結合部強度評価について

上部支持格子ー制御棒案内シンプル結合部は図 1 のような拡管結合であり、下部支持格子ー制御棒案内シンプル結合部は図 2 のようなかしめ結合である。ここで、拡管結合の強度が約 N に対して、かしめ結合の強度は約 N であり、拡管結合の方が強度が低いことから、上部支持格子ー制御棒案内シンプル結合部を評価する。

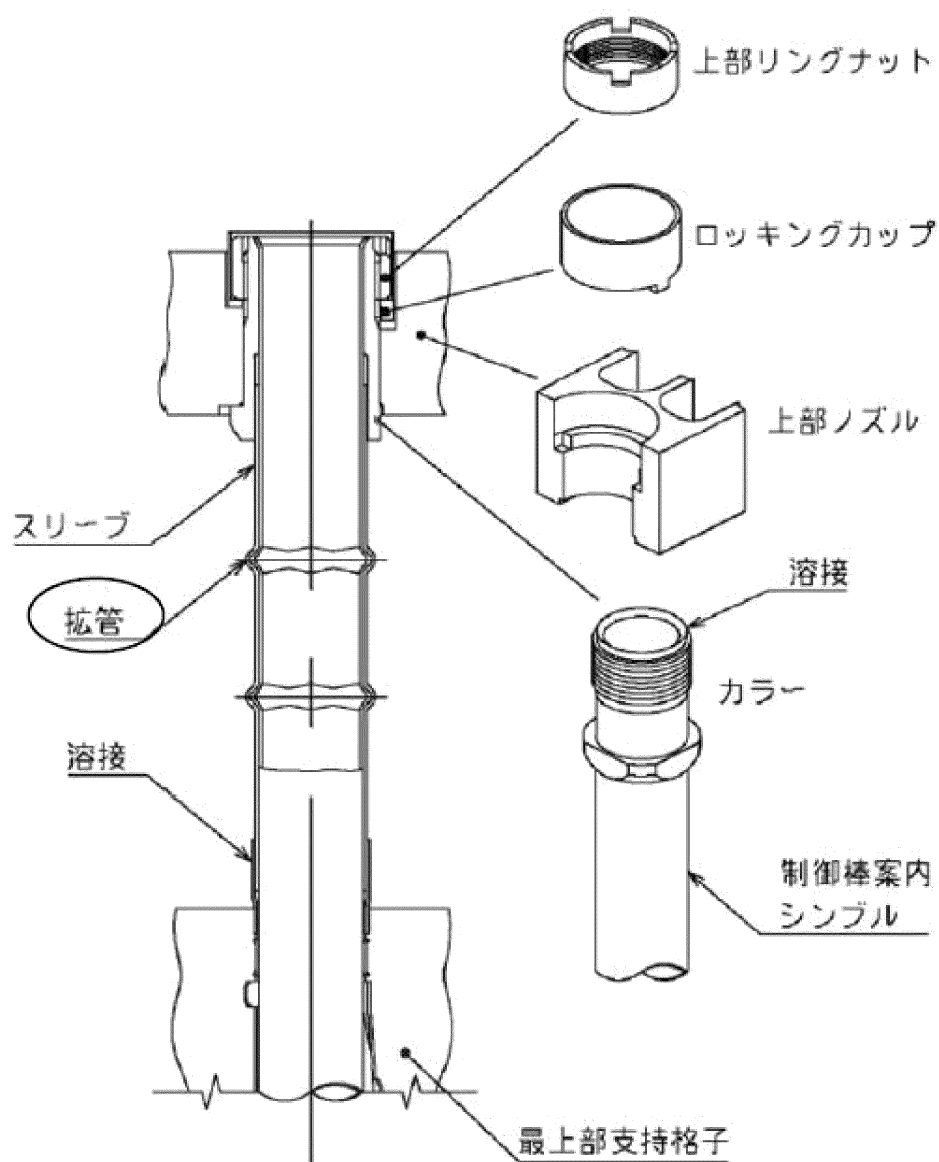


図 1 上部支持格子ー制御棒案内シンプル結合部の拡管結合

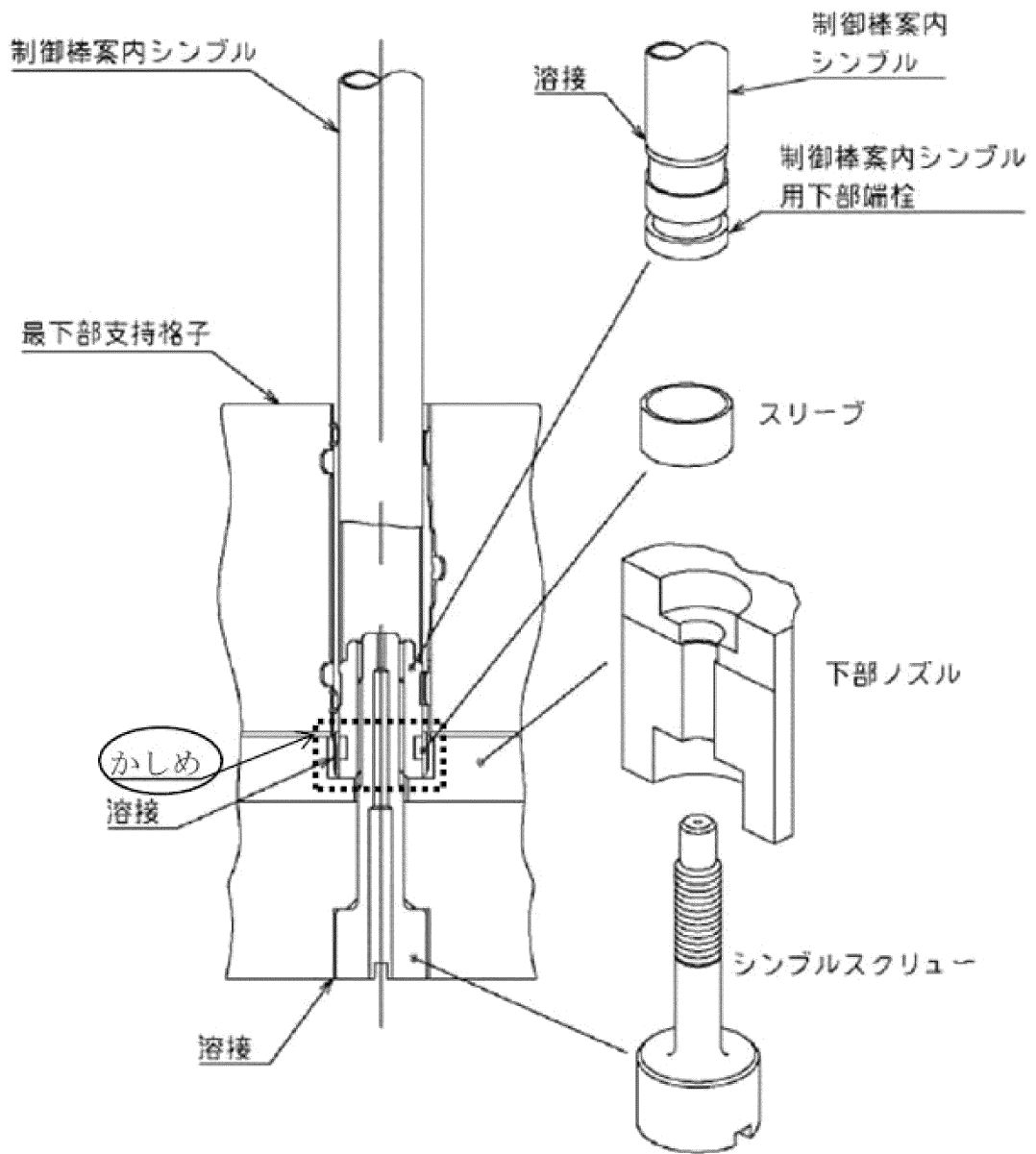


図2 下部支持格子ー制御棒案内シンプル結合部のスリーブを下部端栓の溝にかしめている

上部ノズル制御棒案内シンプル結合部強度評価について

上部ノズル制御棒案内シンプル結合部は、上部ノズル直下の制御棒案内シンプル部と同じように全荷重を受ける。

上部ノズル制御棒案内シンプル結合部のネジ部は図 1 であり、ネジ部の有効断面積はネジのピッチ（図 2）を用いて算出され、約 \square mm² である。また、制御棒案内シンプルの管断面積は約 \square mm² であり、ネジ部の有効断面積の方が大きいことから、評価については、制御棒案内シンプルを評価している。

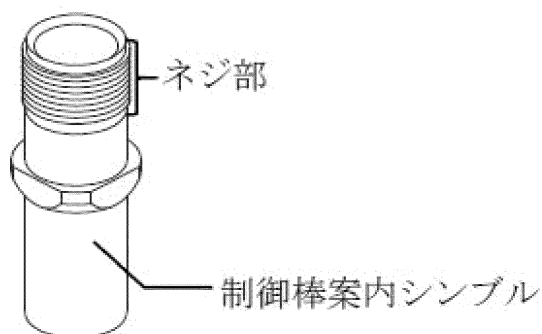


図 1 上部ノズル制御棒案内シンプル結合部のネジ部

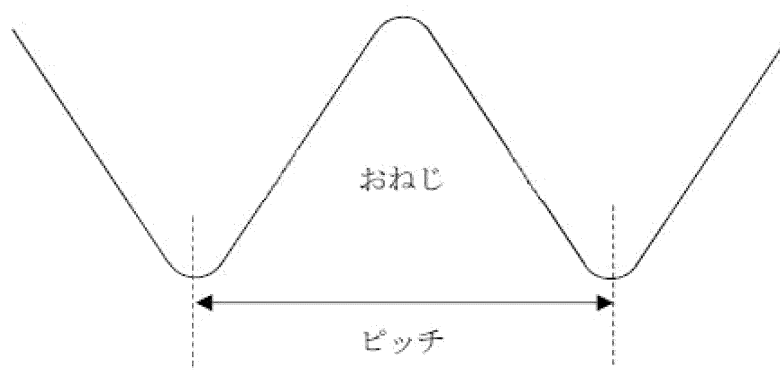


図 2 ネジのピッチ

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-Ni 系ジルコニウム基合金（以下「ジルコニウム基合金」という。）を使用する設計としている。

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

別記-10(3)はジルカロイ-4 の規定であるため、高燃焼度燃料用ジルコニウム基合金がそれに適合することはできないが、物理的及び化学的性質がジルカロイ-4 と同等以上を有しているは設置許可段階で確認^{*1、2}しており、本資料では、その同等以上であることを説明する。また、ジルコニウム基合金の設置許可基準規則第 15 条第 5 項及び技術基準規則第 23 条第 1 項への適合性に係る設置許可段階からの確認内容を整理するとともに、あわせて高燃焼度燃料(55GWd/t)導入以降の照射実績反映状況についても整理している。

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

※1 高燃焼度燃料(55GWd/t)導入時の設置変更許可申請（平成 15 年 9 月 25 日平成 14・08・21 原第 5 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「原燃工製PWRステップ2燃料の改良因子について NFK-8116
改3 原子燃料工業、平成14年」踏まえた設計としている。

2. 設置許可段階からの確認及び説明内容

2.1 確認項目及び確認内容

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

表 1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (1/3)

性質	確認項目※1	確認内容	
物理的性質 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】	機械的性質 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.1】	照射材並びに水素吸収させた未照射材及び照射材での引張試験結果よりジルコニウム基合金の機械特性がジルカロイ-4 と同等であることを確認。	
	疲労特性 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.2】	未照射材及び照射材の疲労試験結果よりジルコニウム基合金の疲労特性がジルカロイ-4 と同等であることを確認。	
	クリープ特性 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.3】	実機で照射された燃料棒の外径変化より、ジルコニウム基合金のクリープ特性がジルカロイ-4 と同等以上であることを確認。	
	照射成長 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.4】	各材料の照射成長の結果より、ジルコニウム基合金の照射成長がジルカロイ-4 に比べて、小さくなることを確認。	
	寸法安定性 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】	クリープ特性 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.3】	寸法安定性は、被覆材のクリープ特性と照射成長によって確認されるが、これらの確認項目は、耐放射線性（添付資料八 5.2 章）において問題ないことを確認している。
		照射成長 【本文 記載なし】 【添付八 5.2.4】	
耐熱性 【本文 1. 炉心等】 【添付八 5.1】	耐熱性 【本文 1. 炉心等】 【添付八 5.1】	ジルコニウム基合金は、約 98wt%のジルコニウムを主成分としているため、材料物性がジルカロイ-4 と同等であること、及び溶融点及び相変態温度の測定結果より燃料被覆材の溶融点及び相変態温度が異常な過渡変化時の最高温度よりも高いことを確認。	

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (2/3)

性質		確認項目 ^{※1}	確認内容
物理的性質 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】	核性質 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】	—	核分裂するウランを含むペレットにおいて考慮する事項 ^{※2} であるため、燃料被覆材としては考慮不要。
	その他の性能 【本文 1. 炉心等】 【添付八 5.4】	<u>耐摩耗性</u> 【本文 記載なし】 【添付八 5.4.2】	燃料被覆材硬さの測定結果よりジルコニウム基合金の硬さはジルカロイ-4 と同等であり、支持格子と燃料被覆材の接触による摩耗は燃料被覆材によらず同等であることを確認。
		<u>耐 PCI 性^{※3}</u> 【本文 記載なし】 【添付八 5.4.1】	試験炉における出力急昇試験結果よりジルコニウム基合金耐 PCI 性がジルカロイ-4 と同等以上であることを確認。

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

※2 核性質については、核分裂反応に係る影響を確認しており、具体的にはペレットに対して考慮すべき性質としている。「PWR 核設計手法と信頼性 (改良 NULIF システム) NFK-8102 原子燃料工業平成7年 (1.2 計算コードの概要)」参照 (設置許可で引用)

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

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (3/3)

性質		確認項目 ^{※1}	確認内容
化学的性質 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】	耐食性 【本文 1. 炉心等】 【添付八 5.3】	酸化腐食 【本文 記載なし】 【添付八 5.3.1】	原子炉内腐食データよりジルコニウム基合金の腐食速度がジルカロイ-4に比べ低減することを確認。
		水素吸収 【本文 記載なし】 【添付八 5.3.2】	燃料被覆材の原子炉内での酸化膜厚さと水素吸収量及び吸収率の関係からジルコニウム基合金の水素吸収量がジルカロイ-4に比べ低減することを確認。
	化学的安定性 【本文 1. 炉心等】 【添付八 記載なし】	二酸化ウランペレットと燃料被覆材との反応 ^{※2} 【本文 記載なし】 【添付八 3.3.1】	化学的安定性は、ペレットと被覆材の化学反応に関する性質であるため、添付資料八では被覆材の性質ではなくペレットの性質（添付資料八 3.3章、4.3章）として問題ないことを確認している。
		ガドリニア入り二酸化ウランペレットと燃料被覆材との反応 ^{※2} 【本文 記載なし】 【添付八 4.3.1】	
	その他の性能 【本文 1. 炉心等】 【添付八 5.4】	耐 PCI 性 ^{※3} 【本文 記載なし】 【添付八 5.4.1】	試験炉における出力急昇試験結果よりジルコニウム基合金耐 PCI 性がジルカロイ-4と同等以上であることを確認。
		高温特性 【本文 記載なし】 【添付八 5.4.3】	昇温内圧破裂試験結果及び高温時のジルコニウム-水反応の試験結果よりジルコニウム基合金の高温破裂特性及び高温酸化挙動はジルカロイ-4と同等であることを確認。

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

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

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

2.2 各段階における説明内容

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

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

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

なお、本設計内容は、平成 16 年 3 月 5 日付け平成 16・01・29 原第 2 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 16 年 3 月 5 日付け平成 16・01・29 原第 2 号にて特殊加工認可、平成 16 年 3 月 26 日付け平成 16・01・29 原第 17 号にて燃料体設計認可を取得している。

上記以降については、新たに公開された照射データはなく、設計評価へ影響を及ぼすような照射データも得られていない。また、国内外の事象を踏まえ設計評価へ反映すべき新たな知見もないため、今回の設工認申請書における照射データは、平成 16 年 3 月 26 日付け平成 16・01・29 原第 17 号の燃料体設計認可における照射データと同じ内容となっている。

4. まとめ

高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯を表 2 にまとめる。

表 2 高燃焼度燃料における燃料被覆材に係る適合性の経緯

許認可手続き 等 (【】：申請者)	申請又は 許可年月日 等	適合性概要
設置変更許可申請 【関西電力】	平成 15 年 9 月 25 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 【原子燃料工業】	平成 16 年 3 月 26 日 平成 16 年 3 月 5 日 認可	設置許可（平成 15 年 9 月 25 日）に基づく燃料体設計認可及び特殊加工認可を取得。
設計及び工事の計画 の認可申請 【関西電力】	令和 3 年 11 月 26 日 申請	検査制度見直しに伴い、既燃料体設計認可及び特殊加工認可の内容を設計及び工事の計画として申請。 設置許可（平成 15 年 9 月 25 日）に基づく申請であり、平成 16 年に取得した燃料体設計認可及び特殊加工認可から設計に変更はない。

表に示すとおり、本設工認申請対象の燃料体に使用するジルコニウム基合金に係る設置許可基準規則第 15 条第 5 項及び技術基準第 23 条第 1 項への適合性については、平成 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。

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、「大飯発電所 発電用原子炉設置変更許可申請書」（平成15年9月25日 平成14・08・21原第5号にて許可された発電用原子炉設置変更許可申請書）（以下「設置変更許可申請書」という。）、「高燃焼度燃料導入時の安全審査資料」及び「設計及び工事計画認可申請書」（以下「設工認」という。）の記載事項の関連を整理したものである。

2. 整理結果

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

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

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

(1/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																																																																																																																																																					
<p>【本文】</p> <p>五、発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備</p> <p>ハ、原子炉本体の構造及び設備</p> <p>(2) 燃料体</p> <p>(ii) 燃料被覆材の種類</p> <ul style="list-style-type: none"> ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金 ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金 <p>ただし、第1～第13領域燃料については、ジルカロイ-4</p>	<p>【安全審査資料：大飯発電所1号、2号、3号及び4号炉ステップ2燃料の使用について】</p> <p>2. ステップ2燃料の仕様</p> <p>ステップ2燃料の主要仕様を表2-1に、その概要を図2-1に示す。PWR燃料は、格子状に組み合わせた支持格子によって燃料棒を格子配列に保ち、制御棒案内シンプル、支持格子、上部ノズル及び下部ノズルで骨格を形成することを基本構造としている。</p> <p>ステップ2燃料は、ステップ1燃料と同一な基本構造であるが、以下のとおりペレット、被覆管等の仕様の一部を変更することとしている。</p> <p style="text-align: center;">表2-1 17×17型燃料の主要仕様 (1/2)</p> <table border="1" data-bbox="884 856 1611 1402"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>ステップ1燃料</th> <th>ステップ2燃料</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ペレット材料*</td> <td>二酸化ウラン (一部ガドリニアを含む)</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>濃縮度*</td> <td>約4.1wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%以下)</td> <td>約4.8wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.2wt%以下)</td> </tr> <tr> <td>ガドリニア濃度*</td> <td>約6wt%</td> <td>約10wt%以下</td> </tr> <tr> <td>初期密度*</td> <td>約95%理論密度</td> <td>約97%理論密度 (ガドリニア入り燃料については約96%理論密度)</td> </tr> <tr> <td>ペレット直径</td> <td>約8.19mm及び約8.05mm</td> <td>約8.19mm</td> </tr> <tr> <td>ペレット長さ</td> <td>約11.5mm、約10.0mm、約9.8mm又は約9.0mm</td> <td>約11.5mm又は約9.2mm</td> </tr> <tr> <td>ペレット最高燃焼度</td> <td>約62.000MW/t</td> <td>約71.000MW/t</td> </tr> <tr> <td>被覆管材料*</td> <td>ジルカロイ-4</td> <td>MDA、NDA、ZIRLO</td> </tr> <tr> <td>外径*</td> <td>約9.50mm</td> <td>同左</td> </tr> <tr> <td>厚さ*</td> <td>約0.57mm又は約0.64mm</td> <td>約0.57mm</td> </tr> <tr> <td>被覆管-ペレット間隙(直径)</td> <td>約0.17mm</td> <td>同左</td> </tr> </tbody> </table> <p>* 基本仕様（原子炉設置変更許可申請書本文記載項目。ただし、本表では一部の値について詳細に示している。）</p>	項目	ステップ1燃料	ステップ2燃料	ペレット材料*	二酸化ウラン (一部ガドリニアを含む)	同左	濃縮度*	約4.1wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%以下)	約4.8wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.2wt%以下)	ガドリニア濃度*	約6wt%	約10wt%以下	初期密度*	約95%理論密度	約97%理論密度 (ガドリニア入り燃料については約96%理論密度)	ペレット直径	約8.19mm及び約8.05mm	約8.19mm	ペレット長さ	約11.5mm、約10.0mm、約9.8mm又は約9.0mm	約11.5mm又は約9.2mm	ペレット最高燃焼度	約62.000MW/t	約71.000MW/t	被覆管材料*	ジルカロイ-4	MDA、 NDA 、ZIRLO	外径*	約9.50mm	同左	厚さ*	約0.57mm又は約0.64mm	約0.57mm	被覆管-ペレット間隙(直径)	約0.17mm	同左	<p>【要目表】</p> <table border="1" data-bbox="1783 359 2368 1104"> <thead> <tr> <th colspan="4"></th> <th colspan="2" style="text-align: right;">(3/5)</th> </tr> <tr> <th colspan="4"></th> <th>変更前</th> <th>変更後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">主要寸法</td> <td rowspan="4">取替燃料</td> <td rowspan="2">(注1) 制御棒案内シンプル</td> <td>外(太径部/細径部)</td> <td>mm</td> <td>—</td> <td>太径部: 12.24 (注1,2) 細径部: 10.90 (注1,2)</td> </tr> <tr> <td>肉(太径部/細径部)</td> <td>mm</td> <td>—</td> <td>太径部: 0.41 (注1,2) 細径部: 0.41 (注1,2)</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">(注2) 伊内計装用案内シンプル</td> <td>外</td> <td>mm</td> <td>—</td> <td>12.24 (注1,2)</td> </tr> <tr> <td>肉</td> <td>mm</td> <td>—</td> <td>0.41 (注1,2)</td> </tr> <tr> <td rowspan="14">材料</td> <td rowspan="14">取替燃料</td> <td rowspan="14">二酸化ウラン燃料組成</td> <td>ウラン235濃縮度</td> <td>wt%</td> <td>4.80 (注2,3)</td> <td>変更なし</td> </tr> <tr> <td>密度(理論密度比)</td> <td>%</td> <td>97 (注3)</td> <td>97.0 (注1,2)</td> </tr> <tr> <td>ウラン含有率</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>□以上 (注1)</td> </tr> <tr> <td>酸素対ウラン比</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>2.00 (注1,2)</td> </tr> <tr> <td>炭素</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>□以下 (注1)</td> </tr> <tr> <td>ふっ素</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>□以下 (注1)</td> </tr> <tr> <td>水素</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>□以下 (注1)</td> </tr> <tr> <td>窒素</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>□以下 (注1)</td> </tr> <tr> <td rowspan="7">ガドリニア混合二酸化ウラン燃料組成</td> <td>ウラン235濃縮度</td> <td>wt%</td> <td>3.20 (注2,3)</td> <td>変更なし</td> </tr> <tr> <td>密度(理論密度比)</td> <td>%</td> <td>96 (注3)</td> <td>96.0 (注1,2)</td> </tr> <tr> <td>ウラン含有率</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>□以上 (注1)</td> </tr> <tr> <td>酸素対ウラン比</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>□ (注1,2)</td> </tr> <tr> <td>ガドリニア濃度</td> <td>wt%</td> <td>10 (注2,10)</td> <td>10.00 (注1,2)</td> </tr> <tr> <td>ガドリニウム濃度</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>□ (注1,2)</td> </tr> <tr> <td>炭素</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>□以下 (注1)</td> </tr> <tr> <td>ふっ素</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>□以下 (注1)</td> </tr> <tr> <td>水素</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>□以下 (注1)</td> </tr> <tr> <td>窒素</td> <td>wt%</td> <td>—</td> <td>□以下 (注1)</td> </tr> <tr> <td>燃料被覆材</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系 ジルコニウム基合金 (注3)</td> <td>変更なし</td> </tr> </tbody> </table> <p>【添付資料8 燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書】</p> <p>5. ジルコニウム基合金</p> <p>NDA被覆管は「発電用核燃料物質に関する技術基準を定める省令（昭和40年6月15日通商産業省令第63号）」（以下、「省令第63号」と称する。）第7条に規定されていない材料であったことから、省令第63号第2条の規定に基づき、特殊加工認可を取得している（平成16・01・29原第2号）。</p> <p>NDA被覆管を本申請の燃料集合体に使用する場合には、以下に示すこれらの特性を適切に反映して燃料集合体の設計を行う必要がある。</p> <p>なお、資料8中に示すジルコニウム基合金被覆管の照射挙動データには、ジルコニウム基合金とジルコニウム基合金-RTの2種類のデータがあり、前者は通常組織管、後者は集合組織調整管を指している。集合組織調整管は、被覆管の圧延工程を調整することによって、ジルコニウムの稠密六方晶C軸^(注1)の径方向への配向割合を、通常組織管よりも僅かに高めた被覆管であるが、本章で示す被覆管の各特性は同等である。そのため、本申請においては両者を区別しない。</p>					(3/5)						変更前	変更後	主要寸法	取替燃料	(注1) 制御棒案内シンプル	外(太径部/細径部)	mm	—	太径部: 12.24 (注1,2) 細径部: 10.90 (注1,2)	肉(太径部/細径部)	mm	—	太径部: 0.41 (注1,2) 細径部: 0.41 (注1,2)	(注2) 伊内計装用案内シンプル	外	mm	—	12.24 (注1,2)	肉	mm	—	0.41 (注1,2)	材料	取替燃料	二酸化ウラン燃料組成	ウラン235濃縮度	wt%	4.80 (注2,3)	変更なし	密度(理論密度比)	%	97 (注3)	97.0 (注1,2)	ウラン含有率	wt%	—	□以上 (注1)	酸素対ウラン比	—	—	2.00 (注1,2)	炭素	wt%	—	□以下 (注1)	ふっ素	wt%	—	□以下 (注1)	水素	wt%	—	□以下 (注1)	窒素	wt%	—	□以下 (注1)	ガドリニア混合二酸化ウラン燃料組成	ウラン235濃縮度	wt%	3.20 (注2,3)	変更なし	密度(理論密度比)	%	96 (注3)	96.0 (注1,2)	ウラン含有率	wt%	—	□以上 (注1)	酸素対ウラン比	—	—	□ (注1,2)	ガドリニア濃度	wt%	10 (注2,10)	10.00 (注1,2)	ガドリニウム濃度	wt%	—	□ (注1,2)	炭素	wt%	—	□以下 (注1)	ふっ素	wt%	—	□以下 (注1)	水素	wt%	—	□以下 (注1)	窒素	wt%	—	□以下 (注1)	燃料被覆材	—	—	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系 ジルコニウム基合金 (注3)	変更なし	
項目	ステップ1燃料	ステップ2燃料																																																																																																																																																						
ペレット材料*	二酸化ウラン (一部ガドリニアを含む)	同左																																																																																																																																																						
濃縮度*	約4.1wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%以下)	約4.8wt%以下 (ガドリニア入り燃料については約3.2wt%以下)																																																																																																																																																						
ガドリニア濃度*	約6wt%	約10wt%以下																																																																																																																																																						
初期密度*	約95%理論密度	約97%理論密度 (ガドリニア入り燃料については約96%理論密度)																																																																																																																																																						
ペレット直径	約8.19mm及び約8.05mm	約8.19mm																																																																																																																																																						
ペレット長さ	約11.5mm、約10.0mm、約9.8mm又は約9.0mm	約11.5mm又は約9.2mm																																																																																																																																																						
ペレット最高燃焼度	約62.000MW/t	約71.000MW/t																																																																																																																																																						
被覆管材料*	ジルカロイ-4	MDA、 NDA 、ZIRLO																																																																																																																																																						
外径*	約9.50mm	同左																																																																																																																																																						
厚さ*	約0.57mm又は約0.64mm	約0.57mm																																																																																																																																																						
被覆管-ペレット間隙(直径)	約0.17mm	同左																																																																																																																																																						
				(3/5)																																																																																																																																																				
				変更前	変更後																																																																																																																																																			
主要寸法	取替燃料	(注1) 制御棒案内シンプル	外(太径部/細径部)	mm	—	太径部: 12.24 (注1,2) 細径部: 10.90 (注1,2)																																																																																																																																																		
			肉(太径部/細径部)	mm	—	太径部: 0.41 (注1,2) 細径部: 0.41 (注1,2)																																																																																																																																																		
		(注2) 伊内計装用案内シンプル	外	mm	—	12.24 (注1,2)																																																																																																																																																		
			肉	mm	—	0.41 (注1,2)																																																																																																																																																		
材料	取替燃料	二酸化ウラン燃料組成	ウラン235濃縮度	wt%	4.80 (注2,3)	変更なし																																																																																																																																																		
			密度(理論密度比)	%	97 (注3)	97.0 (注1,2)																																																																																																																																																		
			ウラン含有率	wt%	—	□以上 (注1)																																																																																																																																																		
			酸素対ウラン比	—	—	2.00 (注1,2)																																																																																																																																																		
			炭素	wt%	—	□以下 (注1)																																																																																																																																																		
			ふっ素	wt%	—	□以下 (注1)																																																																																																																																																		
			水素	wt%	—	□以下 (注1)																																																																																																																																																		
			窒素	wt%	—	□以下 (注1)																																																																																																																																																		
			ガドリニア混合二酸化ウラン燃料組成	ウラン235濃縮度	wt%	3.20 (注2,3)	変更なし																																																																																																																																																	
				密度(理論密度比)	%	96 (注3)	96.0 (注1,2)																																																																																																																																																	
				ウラン含有率	wt%	—	□以上 (注1)																																																																																																																																																	
				酸素対ウラン比	—	—	□ (注1,2)																																																																																																																																																	
				ガドリニア濃度	wt%	10 (注2,10)	10.00 (注1,2)																																																																																																																																																	
				ガドリニウム濃度	wt%	—	□ (注1,2)																																																																																																																																																	
炭素	wt%	—		□以下 (注1)																																																																																																																																																				
ふっ素	wt%	—	□以下 (注1)																																																																																																																																																					
水素	wt%	—	□以下 (注1)																																																																																																																																																					
窒素	wt%	—	□以下 (注1)																																																																																																																																																					
燃料被覆材	—	—	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系 ジルコニウム基合金 (注3)	変更なし																																																																																																																																																				

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

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

(2/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>【添付書類八】</p> <p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>3.2.1.1 概要</p> <p>燃料集合体は、多数の二酸化ウラン焼結ペレット又はガドリニア入り二酸化ウラン焼結ペレットを「ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金」若しくは「ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金」又はジルカロイ-4で被覆した燃料棒、制御棒案内シムル、炉内計装用案内シムル、支持格子、上部ノズル、下部ノズル等で構成する。申請書本文における五、発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備ハ、原子炉本体の構造及び設備 (2) 燃料体 (ii) 燃料被覆材の種類に示す「ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金」若しくは「ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金」（以下、3.2.1では「ジルコニウム基合金」という。）の主成分は第3.2.1表のとおりである。⁽¹⁾⁽²⁾ 燃料棒の配列は、17×17であり、そのうち264本が燃料棒、24本が制御棒案内シムル、残り1本が炉内計装用案内シムルである。制御棒案内シムルは、制御棒クラスタ、バーナブルポイズン、中性子源又はシムルプラグアセンブリの挿入に使用する。</p>	<p>2. ステップ2燃料の仕様</p> <p>(5) 被覆管材料</p> <p>炉内滞在期間の長期化に伴う被覆管の腐食及び水素吸収量増加を抑制するため、被覆管材料をステップ1燃料のジルカロイ-4から表2-2に示す「ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金」であるMDA又はNDA、若しくは「ジルコニウム-ニオブ合金にスズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金」であるZIRLO™*に変更し、これら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イ-4をベースとして、耐食性向上のためSn含有量を低下させ、さらに水素吸収率の低減と機械的強度の向上のためにNbを添加したSn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金製被覆管である。NDAは、原子燃料工業(株)により開発されたものであり、MDAと同様、ジルカロイ-4をベースとして、耐食性向上のためSn含有量を低下させるとともにNb及びNiを添加し、さらに機械的強度を維持するためFe及びCr含有量を若干増やしたSn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金製被覆管である。ZIRLOは、ウエスチングハウス社により開発されたものであり、耐食性が良好で水素吸収率も低いと考えられているZr-Nb二元合金をベースとして、機械的強度の向上のためSn及びFeを添加したSn-Fe-Nb系ジルコニウム基合金製被覆管である。</p>	<p>2. 構成材料の概要</p> <p>燃料集合体の材料は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を含むプラントの使用条件の下で、燃料寿命中その健全性が維持されるよう選定している。主な構成部品の材料及び各材料の化学成分を表2-1に示す。また、燃料集合体主材料の機械的性質を表2-2に示す。</p>	

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

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

(3/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																																																																																																																																																																			
<p>第3.2.1表 燃料の主要仕様（3号炉）</p> <p>(2) 被覆管</p> <p>材 料 ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム基合金</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム基合金 (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 (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 (Sn：0.9～1.3wt%、 Fe：0.08～0.12wt%、 Nb：0.8～1.2wt%、 Zr：残り)</p> <p>ただし、第1～第13領域 ジルカロイ-4 ＜中略＞</p>	<p>表2-2 被覆管の合金成分</p> <table border="1" data-bbox="899 407 1593 726"> <thead> <tr> <th rowspan="2">主成分*1</th> <th colspan="3">ジルカロイ-4*2</th> <th colspan="3">改良被覆管</th> </tr> <tr> <th>規格</th> <th>従来Sn</th> <th>低Sn</th> <th>MDA*3</th> <th>NDA*4</th> <th>ZIRLO*3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sn</td> <td>1.2-1.7</td> <td>1.5</td> <td>1.3</td> <td>0.7-0.9</td> <td>0.90-1.15</td> <td>0.9-1.3</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18-0.24</td> <td>0.2</td> <td>←</td> <td>0.18-0.24</td> <td>0.24-0.30</td> <td>0.08-0.12</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07-0.13</td> <td>0.1</td> <td>←</td> <td>0.07-0.13</td> <td>0.13-0.19</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28-0.37</td> <td>0.3</td> <td>←</td> <td>0.28-0.37</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0.45-0.55</td> <td>0.08-0.14</td> <td>0.8-1.2</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>0.007-0.014</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1 数値の単位はwt%。また、上記以外の残りの成分はジルコニウム。 *2 ジルカロイ-4のうち、規格内でSn含有量を少なくしたものを低Snジルカロイ-4、それ以外を従来Snジルカロイ-4と呼ぶ。 *3 「三菱PWR高燃焼度化ステップ2燃料の機械設計」MH1-NES-1021改2、平成14年 *4 「原燃工製PWRステップ2燃料の改良因子について」NPK-8116改2、平成14年</p>	主成分*1	ジルカロイ-4*2			改良被覆管			規格	従来Sn	低Sn	MDA*3	NDA*4	ZIRLO*3	Sn	1.2-1.7	1.5	1.3	0.7-0.9	0.90-1.15	0.9-1.3	Fe	0.18-0.24	0.2	←	0.18-0.24	0.24-0.30	0.08-0.12	Cr	0.07-0.13	0.1	←	0.07-0.13	0.13-0.19	-	Fe+Cr	0.28-0.37	0.3	←	0.28-0.37	-	-	Nb	-	-	-	0.45-0.55	0.08-0.14	0.8-1.2	Ni	-	-	-	-	0.007-0.014	-	<p>表2-1 燃料集合体主材料の化学成分（続き）</p> <table border="1" data-bbox="1697 457 2457 676"> <thead> <tr> <th rowspan="2">構成部品</th> <th rowspan="2">材料の種類</th> <th colspan="2">主成分 (wt%)</th> <th colspan="8">不純物 (ppm)</th> </tr> <tr> <th>Sn</th> <th>Fe</th> <th>C</th> <th>N</th> <th>O</th> <th>H</th> <th>S</th> <th>P</th> <th>Si</th> <th>Al</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金</td> <td>0.90/1.15</td> <td>0.24/0.30</td> <td>0.01</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> </tr> <tr> <td>0.24/0.30</td> <td>0.13/0.19</td> <td>0.01</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> </tr> <tr> <td>0.13/0.19</td> <td>0.08/0.14</td> <td>0.01</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> </tr> <tr> <td>0.08/0.14</td> <td>0.007/0.014</td> <td>0.01</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> </tr> <tr> <td>0.007/0.014</td> <td></td> <td>0.01</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> </tr> <tr> <td>残り</td> <td></td> <td>0.01</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> </tr> </tbody> </table> <p>表2-2 燃料集合体主材料の機械的性質（17×17型）</p> <table border="1" data-bbox="1718 795 2436 938"> <thead> <tr> <th>構成部品</th> <th>材料の種類</th> <th>項目</th> <th>規定値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">燃料被覆材</td> <td rowspan="3">NDA</td> <td>引張強さ (高温引張試験：385℃)</td> <td>≧□ MPa</td> </tr> <tr> <td>耐力</td> <td>≧310 MPa</td> </tr> <tr> <td>伸び</td> <td>≧□ %</td> </tr> </tbody> </table>	構成部品	材料の種類	主成分 (wt%)		不純物 (ppm)								Sn	Fe	C	N	O	H	S	P	Si	Al	燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金	0.90/1.15	0.24/0.30	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.24/0.30	0.13/0.19	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.13/0.19	0.08/0.14	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.08/0.14	0.007/0.014	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.007/0.014		0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	残り		0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	構成部品	材料の種類	項目	規定値	燃料被覆材	NDA	引張強さ (高温引張試験：385℃)	≧□ MPa	耐力	≧310 MPa	伸び	≧□ %	<p>・燃料被覆材の化学成分のうち酸素については、別記-10に定められているジルコニウム合金燃料被覆材の規格であるJIS H 4751において化学成分の一つとして挙げられているものの、「酸素含有量は、受渡当事者間の協定による。」とされていることを踏まえ、基本設計である設置許可では化学成分として酸素を記載しておらず、詳細設計である設計及び工事の計画においては酸素を記載している。（酸素含有量の設定については添付参照）</p> <p>・設計及び工事の計画に機械的性質を記載しているのは、技術基準規則23条に適合するため、記載している。</p>
主成分*1	ジルカロイ-4*2			改良被覆管																																																																																																																																																																		
	規格	従来Sn	低Sn	MDA*3	NDA*4	ZIRLO*3																																																																																																																																																																
Sn	1.2-1.7	1.5	1.3	0.7-0.9	0.90-1.15	0.9-1.3																																																																																																																																																																
Fe	0.18-0.24	0.2	←	0.18-0.24	0.24-0.30	0.08-0.12																																																																																																																																																																
Cr	0.07-0.13	0.1	←	0.07-0.13	0.13-0.19	-																																																																																																																																																																
Fe+Cr	0.28-0.37	0.3	←	0.28-0.37	-	-																																																																																																																																																																
Nb	-	-	-	0.45-0.55	0.08-0.14	0.8-1.2																																																																																																																																																																
Ni	-	-	-	-	0.007-0.014	-																																																																																																																																																																
構成部品	材料の種類	主成分 (wt%)		不純物 (ppm)																																																																																																																																																																		
		Sn	Fe	C	N	O	H	S	P	Si	Al																																																																																																																																																											
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金	0.90/1.15	0.24/0.30	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005																																																																																																																																																									
		0.24/0.30	0.13/0.19	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005																																																																																																																																																									
		0.13/0.19	0.08/0.14	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005																																																																																																																																																									
		0.08/0.14	0.007/0.014	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005																																																																																																																																																									
		0.007/0.014		0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005																																																																																																																																																									
		残り		0.01	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005																																																																																																																																																									
構成部品	材料の種類	項目	規定値																																																																																																																																																																			
燃料被覆材	NDA	引張強さ (高温引張試験：385℃)	≧□ MPa																																																																																																																																																																			
		耐力	≧310 MPa																																																																																																																																																																			
		伸び	≧□ %																																																																																																																																																																			

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

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

(4/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>3.2.1.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材であるジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、<u>1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</u></p>	<p>3. ステップ2燃料の被覆管特性及びペレット特性</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並びに最新の知見</p> <p>(財)原子力発電技術機構並びに電気事業者及び燃料メーカーは、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について、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における高燃焼度域までの照射試験を実施し、その特性データを取得しており、平成13年度の総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会の報告書「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」（以下、「原子炉安全小委員会報告書」という。）においても、その特性が示されている。</p> <p>以下にその特性について概要を示す。</p> <p>a. 改良被覆管</p> <p>改良被覆管の特性は、以下のとおり確認されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・<u>ジルカロイ-4製被覆管と比べて耐食性は向上</u> ・ジルカロイ-4製被覆管と比べて照射成長は減少 ・炉内クリープについて、MDA及びZIRLOはジルカロイ-4製被覆管と比べて減少、NDAは低Snジルカロイ-4製被覆管と同等 ・水素吸収率、比熱、密度等の材料物性、機械的性質及び耐PCI性についてはジルカロイ-4製被覆管と同等 	<p>5.3 耐食性</p> <p>NDA被覆管が1次冷却材と接触すると、ジルカロイ-4被覆管と同様に、</p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p>の反応により酸化腐食が進むとともに、発生した水素の一部を吸収する。</p> <p>実機では放射線照射下で1次冷却材の放射線分解により発生する酸素により、ジルカロイの腐食が放射線照射のない環境に比べて加速される可能性があるが、PWRでは1次冷却材に水素注入を行い酸素の発生を抑制している。実機の腐食は以下に示すとおりである。</p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>ジルカロイ被覆管外面には、炉内使用条件下で高温の1次冷却材との反応により酸化膜が形成される。一般に、ジルカロイ被覆管の腐食速度は、酸化膜と被覆管金属母材の界面温度についてのアレニウス型温度依存性を示す。また、その腐食増量（酸素による質量増加）の時間変化を図5-7に示すが、初期の段階では時間に対して立方則（時間の3乗根に比例）に従って増加し、酸化膜厚さが2~3μm（遷移点）を超えた後は時間に対して直線的に増加する。炉内での被覆管酸化膜厚さを図5-8に示す。炉内では滞在期間が長くなり酸化膜が厚くなるに従って、形成された酸化膜と金属母材の境界温度が上昇するため、燃焼度の進行に伴って酸化膜厚さは増大する傾向になる。更に腐食が進行すると腐食量の急激な増加が見られるが、これは酸化により発生する水素のうち、被覆管に吸収された水素が被覆管外面に析出し、この析出物が腐食に起因すると考えられている。</p> <p>図5-8から分かるように、ジルカロイ-4被覆管の炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されている。また、NDA被覆管については、腐食速度の低減が認められる。</p> <p>従って、<u>NDA被覆管の腐食挙動はジルカロイ-4被覆管と同様であり、腐食が急激に増加する領域でも耐食性の向上が維持されることから、本申請の燃料集合体の使用範囲までNDA被覆管の耐食性の向上が維持されると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（資料7-1「燃料体の強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。）設計評価に反映している。</u></p>	

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

下線部及び黒枠部：設置変更許可申請書と設工認の整合箇所、下点線部及び点線枠部：安全審査資料と設工認の整合箇所、ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載 (5/25)

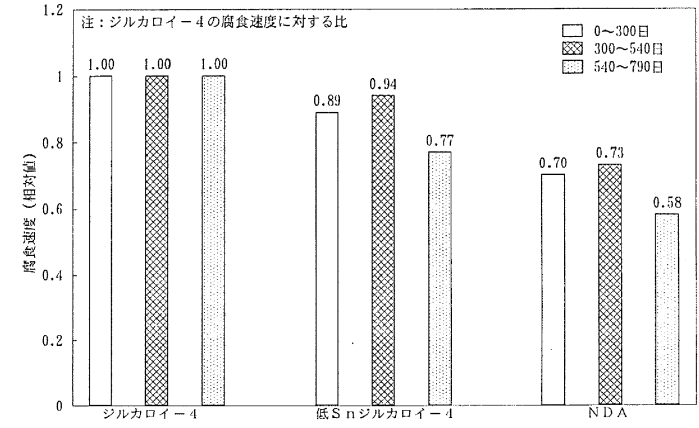
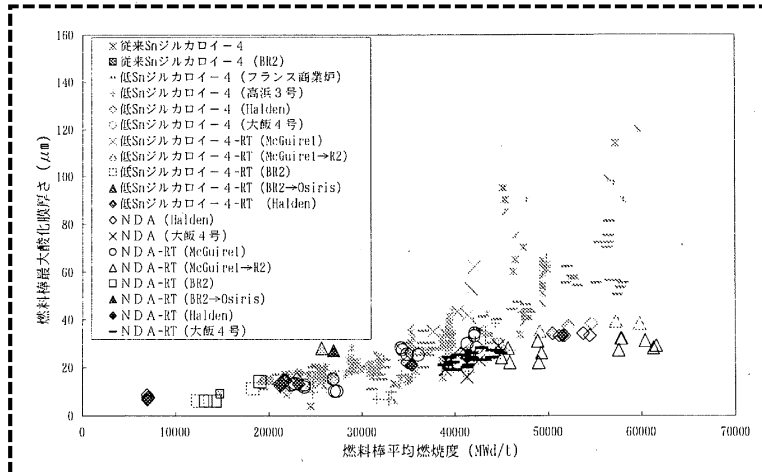
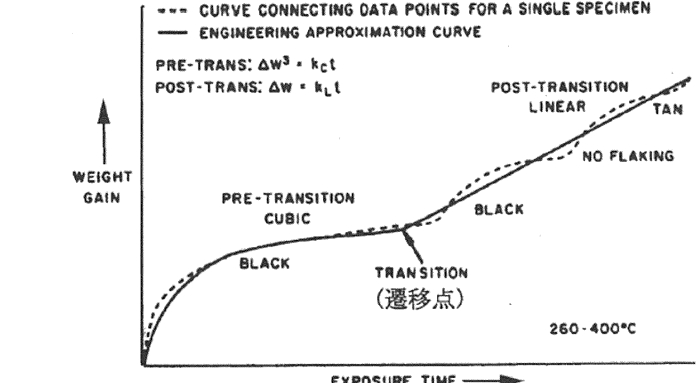
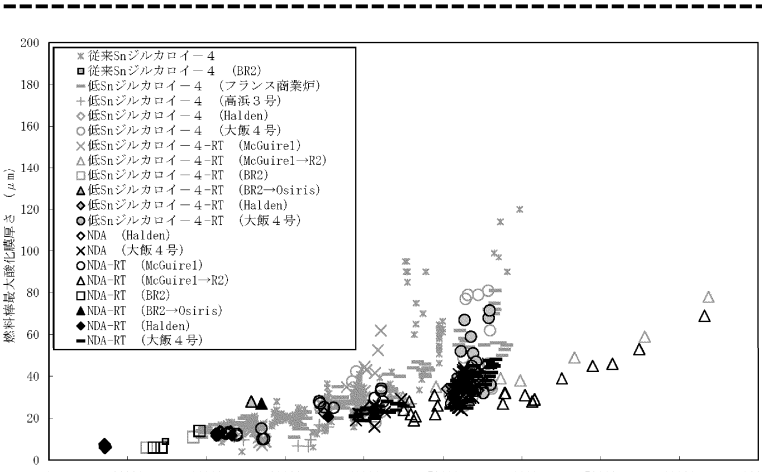
設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>【安全審査資料：燃料棒設計コードについて】</p>  <p>注：ジルカローイ-4の腐食速度に対する比</p> <p>0~300日 300~540日 540~790日</p> <p>ジルカローイ-4 1.00 1.00 1.00 低Snジルカローイ-4 0.89 0.94 0.77 NDA 0.70 0.73 0.58</p> <p>図 4.4-6 炉外腐食試験における被覆管の腐食特性⁽¹⁰⁾</p>  <p>図 4.4-7 改良被覆管 (NDA) の炉内酸化膜厚さ⁽¹⁰⁾</p>	 <p>--- CURVE CONNECTING DATA POINTS FOR A SINGLE SPECIMEN — ENGINEERING APPROXIMATION CURVE</p> <p>PRE-TRANS: $\Delta W^3 = k_c t$ POST-TRANS: $\Delta W = k_L t$</p> <p>PRE-TRANSITION CUBIC BLACK TRANSITION (遷移点) POST-TRANSITION LINEAR NO FLAKING TAN</p> <p>260-400°C</p> <p>図 5-7 炉外腐食試験におけるジルカローイ-2とジルカローイ-4の典型的な腐食増量曲線⁽³⁰⁾</p>  <p>図 5-8 NDA 被覆管の炉内酸化膜厚さ⁽²⁰⁾</p>	<p>・安全審査資料に図4.4-6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4.4-7を用いて設計評価 (添付資料7) に反映しているため、設計及び工事の計画では記載不要である。</p>

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

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

(6/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>3.2.1.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材であるジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、<u>1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</u></p>	<p>【安全審査資料：大飯発電所1号、2号、3号及び4号炉ステップ2燃料の使用について】</p> <p>3. ステップ2燃料の被覆管特性及びペレット特性</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並びに最新の知見</p> <p>(財)原子力発電技術機構並びに電気事業者及び燃料メーカは、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について、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における高燃焼度域までの照射試験を実施し、その特性データを取得しており、平成13年度の総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会の報告書「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」（以下、「原子炉安全小委員会報告書」という。）においても、その特性が示されている。</p> <p>以下にその特性について概要を示す。</p> <p>a. 改良被覆管</p> <p>改良被覆管の特性は、以下のとおり確認されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ジルカロイ-4製被覆管と比べて耐食性は向上 ・ジルカロイ-4製被覆管と比べて照射成長は減少 ・炉内クリープについて、MDA及びZIRLOはジルカロイ-4製被覆管と比べて減少、NDAは低Snジルカロイ-4製被覆管と同等 ・水素吸収率、比熱、密度等の材料物性、機械的性質及び耐PCI性については<u>ジルカロイ-4製被覆管と同等</u> 	<p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>ジルコニウムと水との反応で発生した水素の一部は、被覆管に吸収される。<u>被覆管の炉内での水素吸収量と酸化膜厚さの関係を図5-9に示すが、NDA被覆管の水素吸収量と酸化膜厚さとはジルカロイ-4被覆管と同様に良い相関がある。酸化膜厚さと水素吸収率（酸化反応で生じた水素量に対する被覆管金属部に吸収された水素量の割合）の関係を図5-10に示す。NDA被覆管の水素吸収特性は、ジルカロイ-4被覆管のそれと同等である⁽²⁰⁾。これは酸化膜を透過する水素量及び金属部に吸収される水素吸収量が被覆管の種類（ジルカロイ-4被覆管及びNDA被覆管）によらないためと考えられる。</u></p> <p>従って、<u>NDA被覆管の水素吸収率は腐食により発生した水素の一部が酸化膜厚さに応じてある割合で被覆管に取り込まれること、及びその割合はNDA被覆管とジルカロイ-4被覆管で同等であることから、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（資料7-1「燃料体の強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。）設計評価に反映している。</u></p> <p>また、NDA被覆管の水素吸収量は、本申請の燃料集合体の使用範囲までジルカロイ-4被覆管に比較して低減すると考えられる。</p>	

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

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

(7/25)

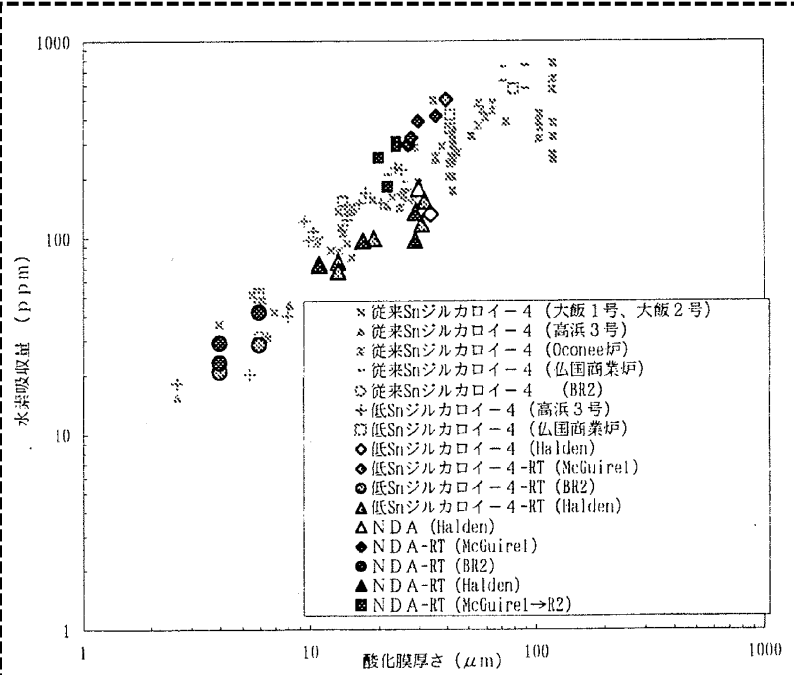
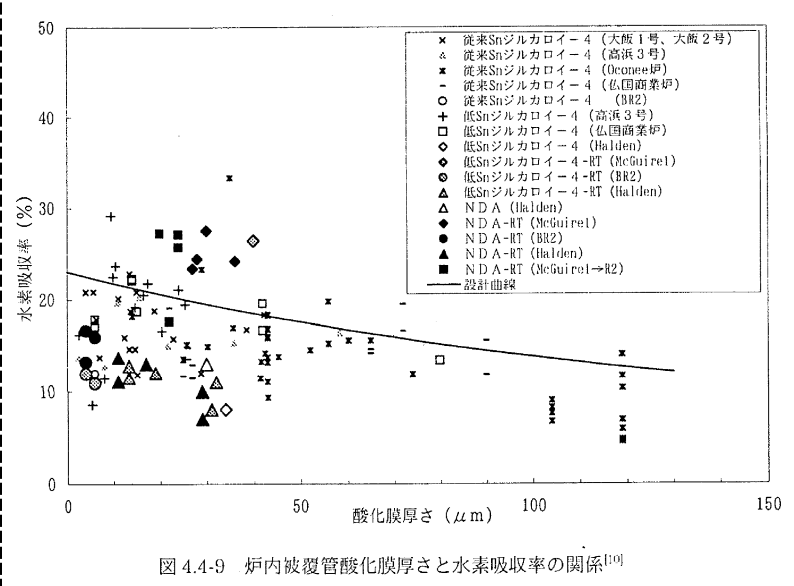
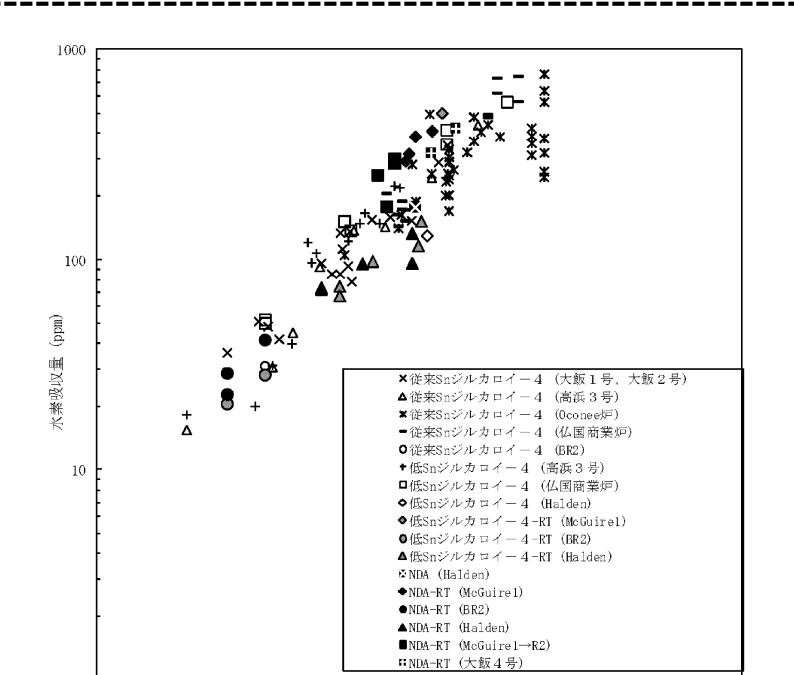
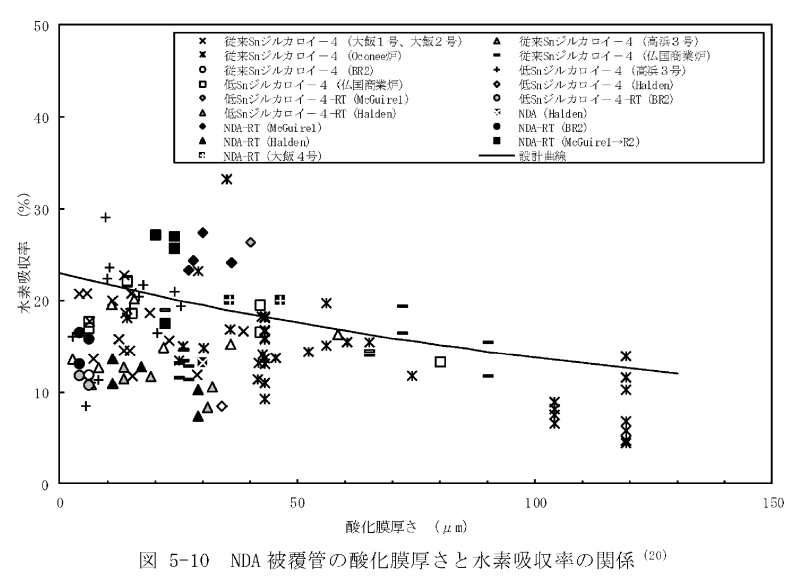
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>【安全審査資料：燃料棒設計コードについて】</p>  <p>図 4.4-8 炉内被覆管酸化膜厚さと水素吸収量の関係⁽¹⁰⁾</p>  <p>図 4.4-9 炉内被覆管酸化膜厚さと水素吸収率の関係⁽¹⁰⁾</p>	 <p>図 5-9 NDA 被覆管の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係⁽²⁰⁾</p>  <p>図 5-10 NDA 被覆管の酸化膜厚さと水素吸収率の関係⁽²⁰⁾</p>	

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

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

(8/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>3.2.1.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材であるジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</p>	<p>【安全審査資料：大飯発電所1号、2号、3号及び4号炉ステップ2燃料の使用について】</p> <p>3. ステップ2燃料の被覆管特性及びペレット特性</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並びに最新の知見</p> <p>(財)原子力発電技術機構並びに電気事業者及び燃料メーカは、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について、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における高燃焼度域までの照射試験を実施し、その特性データを取得しており、平成13年度の総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会の報告書「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」（以下、「原子炉安全小委員会報告書」という。）においても、その特性が示されている。</p> <p>以下にその特性について概要を示す。</p> <p>a. 改良被覆管</p> <p>改良被覆管の特性は、以下のとおり確認されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ジルカロイ-4製被覆管と比べて耐食性は向上 ・ジルカロイ-4製被覆管と比べて照射成長は減少 ・炉内クリープについて、MDA及びZIRLOはジルカロイ-4製被覆管と比べて減少、NDAは低Snジルカロイ-4製被覆管と同等 ・水素吸収率、比熱、密度等の材料物性、機械的性質及び耐PCI性についてはジルカロイ-4製被覆管と同等 	<p>5.2.3 クリープ特性^(註1)</p> <p>燃料被覆管は内外圧差に基づくクリープによって外径が減少していくが、ペレットと被覆管が接触した後は、ペレットの外径変化に依存して被覆管外径が増加する。実機PWR燃料棒の照射後の外径変化を図5-5に示すが、約20,000MWd/t程度までの低燃焼度域の外径減少より、NDA被覆管を採用した燃料棒の照射による外径変化は、低Snジルカロイ-4被覆管を採用した燃料棒のそれと同等となっている。被覆管クリープは、転位（材料に元々ある結晶格子のずれ）の移動によるものであるが、ジルコニウム中に固溶しているSn、Nbは転位を捕獲し、その動きを抑制する。NDA被覆管と低Snジルカロイ-4被覆管のクリープ特性が同等であることは、NDA被覆管中の固溶Sn及び固溶Nbによるクリープを抑制する効果が、低Snジルカロイ-4被覆管の固溶Snによるそれと同程度の効果であることを示している⁽²⁰⁾。以上より、NDA被覆管のクリープ特性は低Snジルカロイ-4被覆管と同じとして計算モデルに組み込んで（資料7-1「燃料体の強度に関する説明書」の3.2.2(3)項d.に示す。）設計評価に反映している。</p>	

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

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

(9/25)

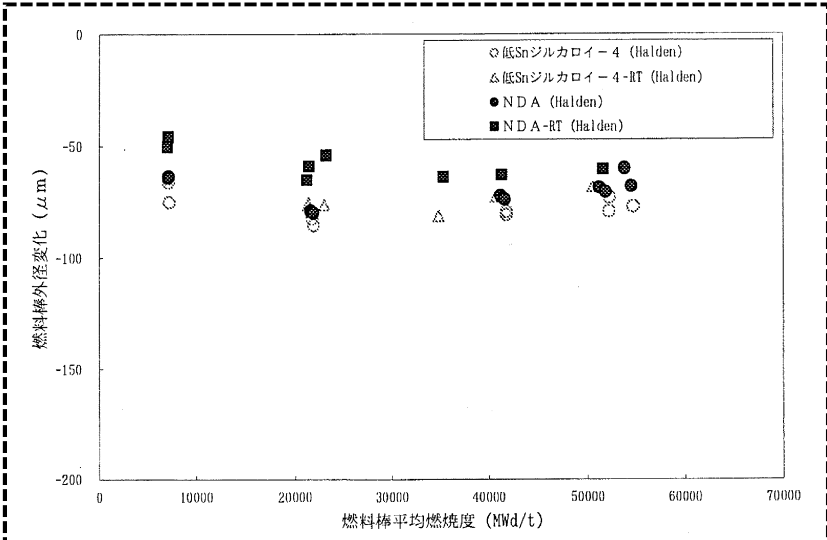
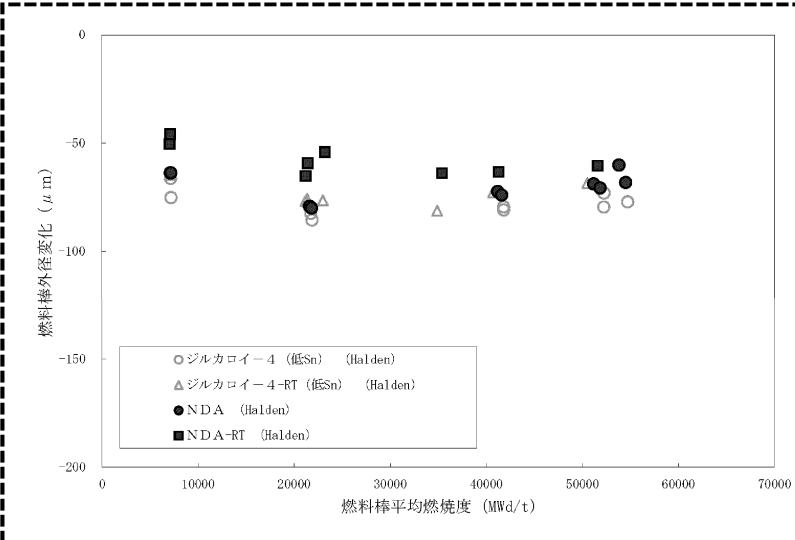
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>【安全審査資料：燃料棒設計コードについて】</p>  <p>図 4.3-6 改良被覆管 (NDA) の外径変化 [Halden 炉] ⁽¹⁰⁾</p>	 <p>図 5-5 燃料棒外径変化 (実機照射セグメント燃料棒) ⁽²⁰⁾</p>	

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

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

(10/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>【安全審査資料：大飯発電所1号、2号、3号及び4号炉ステップ2燃料の使用について】</p> <p>3. ステップ2燃料の被覆管特性及びペレット特性</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並びに最新の知見</p> <p>(財)原子力発電技術機構並びに電気事業者及び燃料メーカは、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について、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における高燃焼度域までの照射試験を実施し、その特性データを取得しており、平成13年度の総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会の報告書「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」（以下、「原子炉安全小委員会報告書」という。）においても、その特性が示されている。</p> <p>以下にその特性について概要を示す。</p> <p>a. 改良被覆管</p> <p>改良被覆管の特性は、以下のとおり確認されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ジルカロイ-4製被覆管と比べて耐食性は向上 ・<u>ジルカロイ-4製被覆管と比べて照射成長は減少</u> ・炉内クリープについて、MDA及びZIRLOはジルカロイ-4製被覆管と比べて減少、NDAは低Snジルカロイ-4製被覆管と同等 ・水素吸収率、比熱、密度等の材料物性、機械的性質及び耐PCI性についてはジルカロイ-4製被覆管と同等 	<p>5.2.4 照射成長^(註2)</p> <p>照射成長の支配要因は、ジルカロイ中の稠密六方晶（α相）の向きが比較的揃った組織において中性子照射で生じる格子欠陥のうち、空孔は六方晶底面へ、格子間原子は柱面へ選択的に集まるためと言われている。図5-6に示すように、NDA被覆管とジルカロイ-4被覆管の照射成長は、ともに高燃焼度域まで高速中性子照射量にほぼ比例している。また、NDA被覆管の照射成長はジルカロイ-4被覆管と比較して小さくなっており、この傾向は比較的高燃焼度領域まで認められる。NDA被覆管に含まれているNbは照射欠陥の動きを抑制するため、照射成長は小さくなる傾向にあると考えられる。</p> <p>従って、<u>ジルカロイ-4被覆管と比較してNDA被覆管の照射成長は、本申請の燃料集合体の使用範囲まで照射成長量が小さくなると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで（資料7-1「燃料体の強度に関する説明書」の3.2.2(3)項e.に示す。）設計評価に反映している。</u></p> <p>燃料棒の設計に当たっては、これらの耐放射線性に関する事項を考慮した上で、被覆管応力等が設計基準を満足するようにする。</p>	

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

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

(11/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>【安全審査資料：燃料棒設計コードについて】</p> <p>図 4.3-8 改良被覆管とジルカローイ4製被覆管及び低Snジルカローイ4製被覆管の燃料棒伸びの比較¹⁰⁾</p>	<p>図 5-6 NDA 被覆管の照射成長²⁰⁾</p>	

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

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

(12/25)

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

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

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

(13/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>【安全審査資料：大飯発電所1号、2号、3号及び4号炉ステップ2燃料の機械設計について】</p> <p>2. 燃料棒の健全性</p> <p>2.1 設計方針</p> <p>(3) 被覆管応力</p> <p>被覆管にかかる応力は、被覆材の耐力以下であること。</p> <p>ここで、図2.1-4に示すように、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の耐力は、ジルカロイ-4製被覆管の耐力と同等であり、炉内での使用温度及び高速中性子照射の効果を考慮すると、約310N/mm²～約590N/mm²となる。被覆管応力基準値は、未照射、照射のいずれの場合でも、被覆管耐力の最確値にその不確定性（95%確率×95%信頼度下限）を考慮して保守的に定めた温度依存の被覆管耐力を使用する。</p> <p>(4) 被覆管引張歪</p> <p>被覆管に生じる円周方向引張歪の変化量は、各過渡変化に際して1%を超えないこと。</p> <p>ここで、図2.1-5に示すように、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の延性は、ジルカロイ-4製被覆管の延性と同等であり、従来と同様、各過渡変化に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。</p>	<p>5.2.1 機械的性質</p> <p>機械特性への影響因子としては、照射脆化と水素脆化が考えられる。照射脆化は照射欠陥の蓄積（濃度）によるが、これは高速中性子束、被覆管温度及び時間に依存する。実機炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を図5-1に示す。引張強さ及び耐力^(註1)は、照射初期において増加した後、照射量によらず著しい変化が見られず、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^(註2)であることが確認されている。</p> <p>なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量27～32×10²⁵n/m² (E>1MeV)まで十分な延性が確保されているとの報告例もある^(註3)。</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を図5-2に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、図5-3に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、NDA被覆管は上述のとおり、未照射材で水素吸収による機械特性への影響がジルカロイ-4被覆管と同等であることから、照射材についてもジルカロイ-4被覆管と同様に本申請の燃料集合体の使用範囲まで機械特性は変わらない。以上より、NDA被覆管の応力及び歪に対する設計基準や材料物性はジルカロイ-4被覆管と同じとして設計評価する。</p>	

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

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

(14/25)

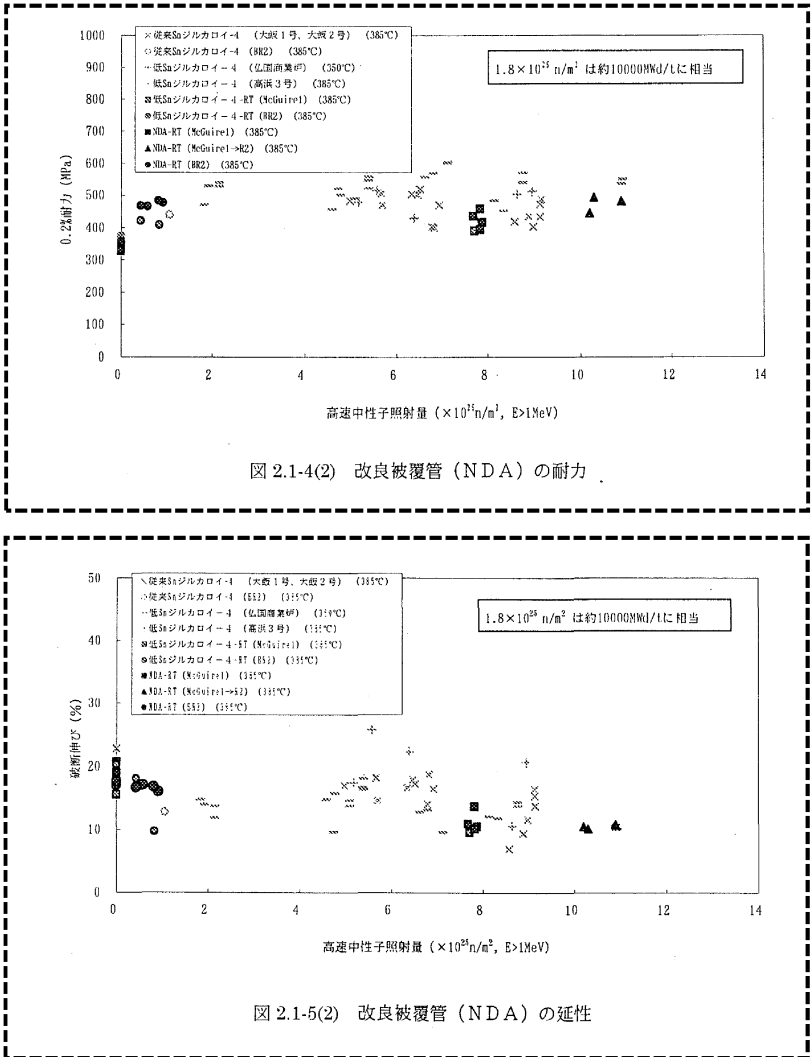
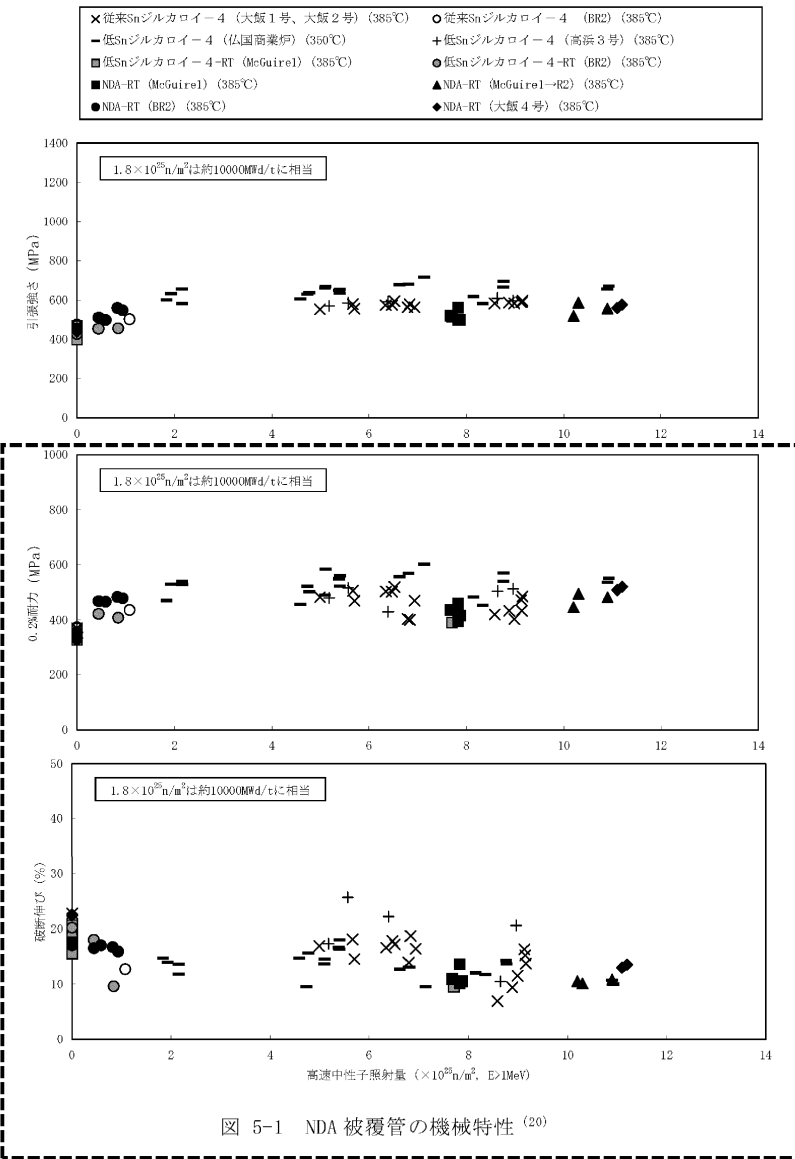
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図 2.1-4(2) 改良被覆管 (NDA) の耐力</p> <p>図 2.1-5(2) 改良被覆管 (NDA) の延性</p>	 <p>図 5-1 NDA 被覆管の機械特性⁽²⁰⁾</p>	<p>・設計及び工事の計画に引張強さを記載しているのは、表2-2の機械的性質の項目との整合のため、記載している。</p>

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

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

(15/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>2.2 設計評価</p> <p>(6) その他の評価事項</p> <p>ステップ2燃料棒の健全性評価に際し、上述の評価事項の他に高燃焼度化に伴う影響を確認している主要事項について以下に示す。</p> <p>a. 被覆管の腐食及び水素吸収</p> <p>炉内滞在中に生じる腐食による被覆管肉厚の最大減肉量を評価した結果、A型燃料で約8.4%、B型燃料で約8.3%となり、被覆管応力への影響が小さい10%以下の減肉量である。</p> <p>また、被覆管の最大水素吸収量を評価した結果、A型燃料で約580ppm、B型燃料で約700ppmとなり、図2.2-3に示す水素吸収させた未照射被覆管の高温引張試験結果及び図2.2-4に示す照射被覆管の高温引張試験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図5-2に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、図5-3に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、NDA被覆管は上述のとおり、未照射材で水素吸収による機械特性への影響がジルカロイ-4被覆管と同等であることから、照射材についてもジルカロイ-4被覆管と同様に本申請の燃料集合体の使用範囲まで機械特性は変わらない。以上より、NDA被覆管の応力及び歪に対する設計基準や材料物性はジルカロイ-4被覆管と同じとして設計評価する。</p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>(中略)</p> <p>図5-8から分かるように、ジルカロイ-4被覆管の炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されている。また、NDA被覆管については、腐食速度の低減が認められる。</p> <p>従って、NDA被覆管の腐食挙動はジルカロイ-4被覆管と同様であり、腐食が急激に増加する領域でも耐食性の向上が維持されることから、本申請の燃料集合体の使用範囲までNDA被覆管の耐食性の向上が維持されると考えられ、これらの挙動を計算モデルに組み込んで(資料7-1「燃料体の強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。)設計評価に反映している。</p> <p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>(中略)</p> <p>従って、NDA被覆管の水素吸収率は腐食により発生した水素の一部が酸化膜厚さに応じてある割合で被覆管に取り込まれること、及びその割合はNDA被覆管とジルカロイ-4被覆管で同等であることから、これらの挙動を計算モデルに組み込んで(資料7-1「燃料体の強度に関する説明書」の3.4.3項に示す。)設計評価に反映している。</p> <p>また、NDA被覆管の水素吸収量は、本申請の燃料集合体の使用範囲までジルカロイ-4被覆管と比較して低減すると考えられる。</p>	

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

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

(16/25)

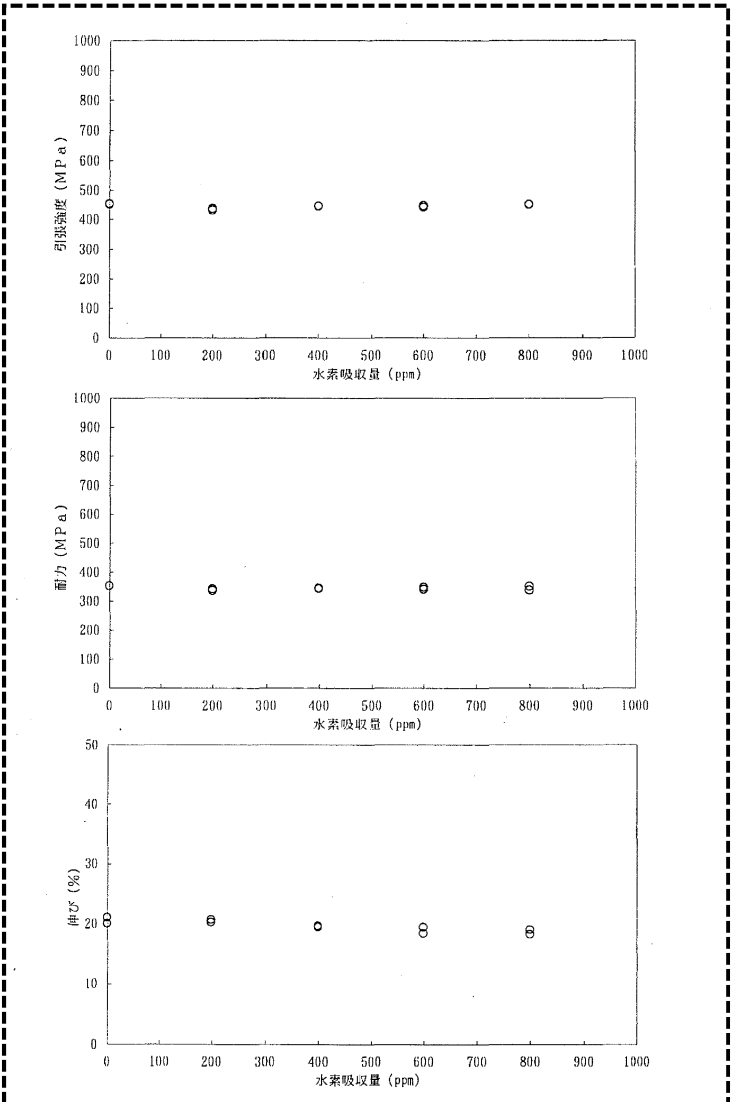
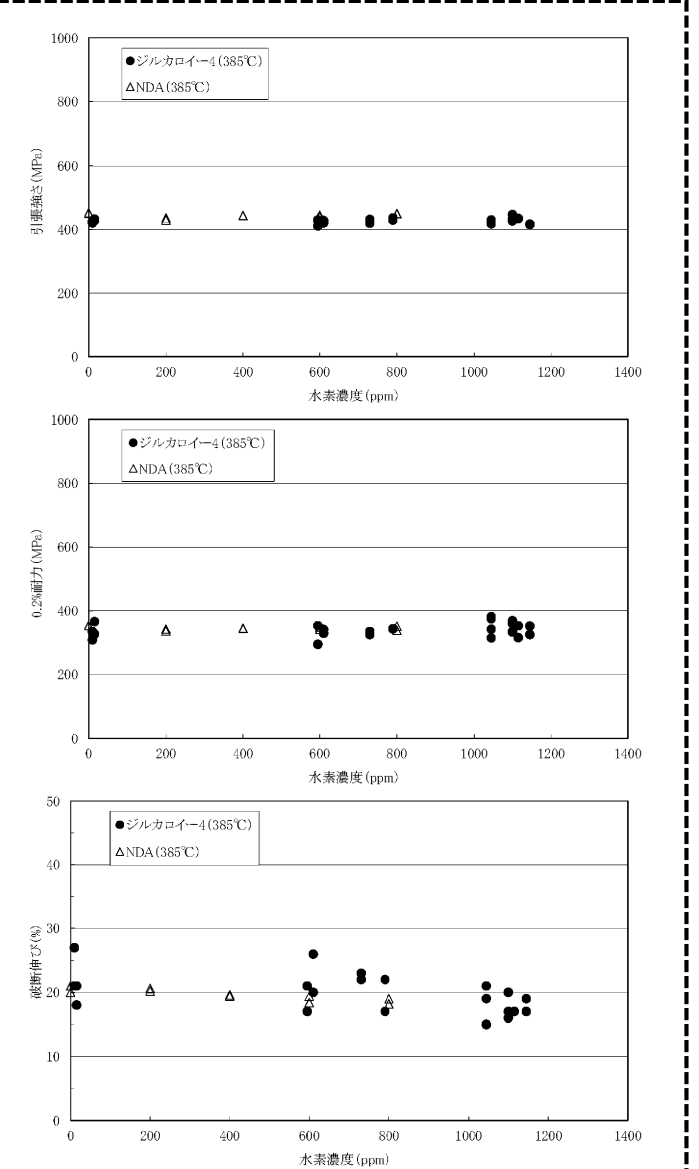
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p data-bbox="1023 1417 1469 1480">図 2.2-3(2) 被覆管水素吸収量と機械特性の関係 (高温引張試験；未照射改良被覆管(NDA))</p>	 <p data-bbox="1795 1449 2359 1480">図 5-2 未照射 NDA 被覆管の機械特性と水素濃度の関係⁽²⁰⁾</p>	

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

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

(17/25)

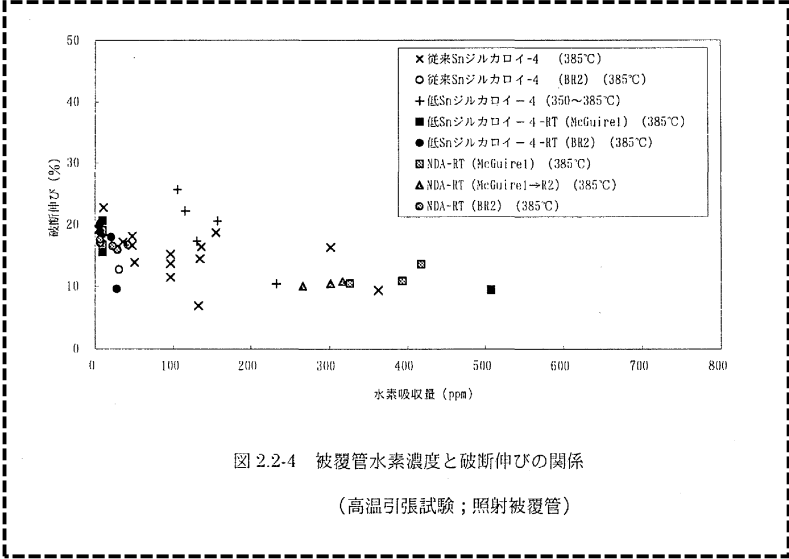
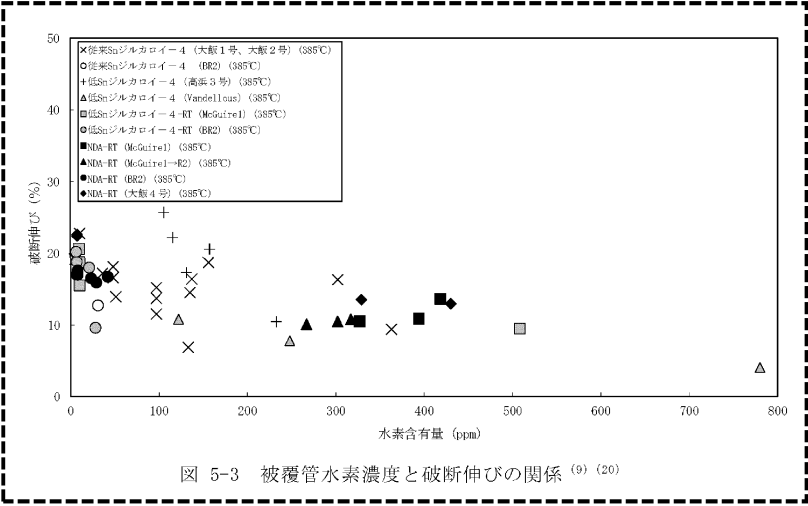
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図 2.2-4 被覆管水素濃度と破断伸びの関係 (高温引張試験；照射被覆管)</p>	 <p>図 5-3 被覆管水素濃度と破断伸びの関係⁽⁹⁾ (20)</p>	

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

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

(18/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>2.1 設計方針</p> <p>(5) 被覆管累積疲労</p> <p>被覆管の累積疲労サイクル数は、設計疲労寿命を超えないこと。</p> <p>ここで、図2.1-6に示すように、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の疲労強度は、ジルカロイ-4製被覆管の疲労強度と同等であり、設計疲労曲線としては、従来と同様、Langer and O'Donnellの曲線を使用する。</p> <div data-bbox="902 674 1605 1205" style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">図 2.1-6(2) 改良被覆管 (NDA) の疲労強度</p> </div>	<p>5.2.2 疲労特性</p> <p>NDA被覆管の疲労試験結果と、ジルカロイに対するLanger and O'Donnellの疲労試験結果を図5-4に示す。一般に疲労特性は機械特性に依存するが、5.2.1項で述べたとおり、NDA被覆管はジルカロイ-4被覆管と同等であるため、NDA被覆管の疲労特性は、ジルカロイ-4被覆管と同等となる。以上より、NDA被覆管の設計疲労曲線はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</p> <div data-bbox="1673 674 2466 1205" style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">図 5-4 NDA 被覆管の疲労強度⁽²⁰⁾</p> </div>	

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

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

(19/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>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>3.2.1.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材であるジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</p>	<p>(6) その他の評価事項</p> <p>b. PCI破損</p> <p>燃料のPCI（ペレット-被覆管相互作用）破損は、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にPCI破損しきい値を超えた場合に起こることが、種々の実験結果や実炉での経験から知られている。</p> <p>改良被覆管の耐PCI性は、図2.2-5に示すとおり、高燃焼度領域までジルカロイ-4製被覆管と同等以上であり、現行のPCI破損しきい値に対し十分余裕があることが確認でき、これをPCI破損評価に適用する。</p> <p>原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を、図2.2-6にPCI破損しきい値とともに示す。これより、運転時の異常な過渡変化時における最大線出力密度及び線出力密度変化幅は、同時にPCI破損しきい値を超えることはなく、PCI破損は生じない。</p>	<p>5.4.1 耐PCI性</p> <p>被覆管は、腐食性FPガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用(PCMI)を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ(SCC)による破損(PCI破損)を起こす。このPCI破損におけるSCCは、ジルカロイ中の稠密六方晶(α相)の底面にほぼ平行な面上を伝播するが、現行の被覆管製法においては、この底面がPCMI時の発生応力方向、すなわち周方向に配向(C軸を径方向に配向)されており、PCI破損の抑制が図られている。</p> <p>被覆管の耐PCI性を把握するため、試験炉において出力急昇試験が実施されており、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にある値(PCI破損しきい値)を超えた場合にPCI破損が起こることが経験的に知られている。</p> <p>NDA被覆管の耐PCI性を図5-11に破損しきい値とともに示す。NDA被覆管の耐PCI性、すなわちSCC破損特性はジルカロイ-4被覆管と同等以上であり、ジルカロイ-4被覆管で使用されている現行のPCI破損しきい値が適用できる⁽²⁰⁾。以上より、NDA被覆管のPCI破損しきい値はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</p>	

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

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

(20/25)

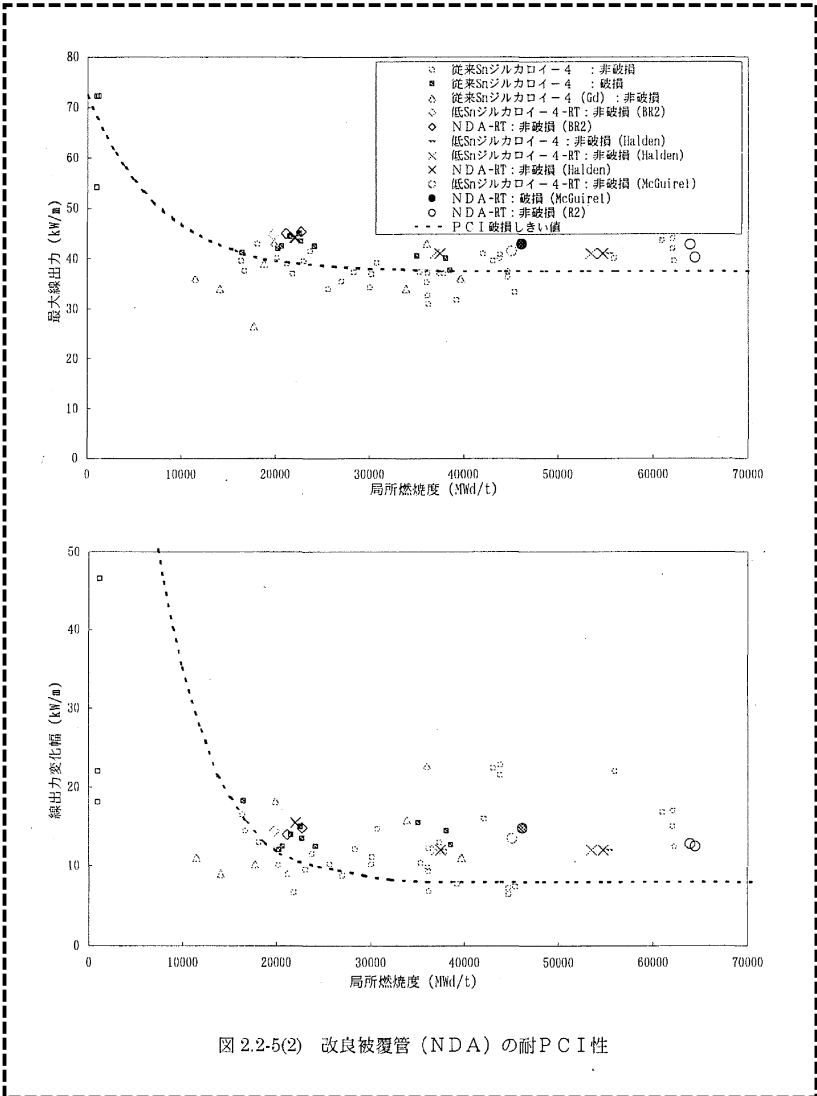
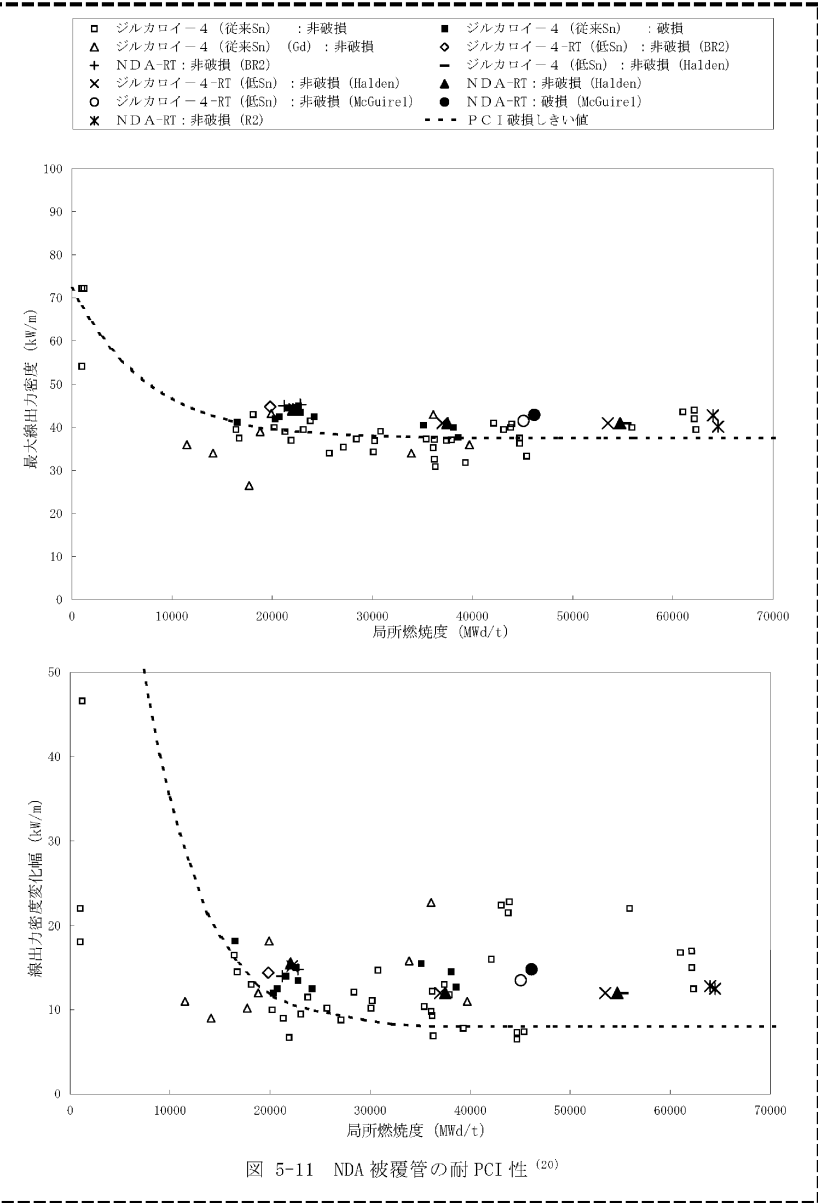
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図 2.2-5(2) 改良被覆管 (NDA) の耐 PCI 性</p>	 <p>図 5-11 NDA 被覆管の耐 PCI 性⁽²⁰⁾</p>	

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

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

(21/25)

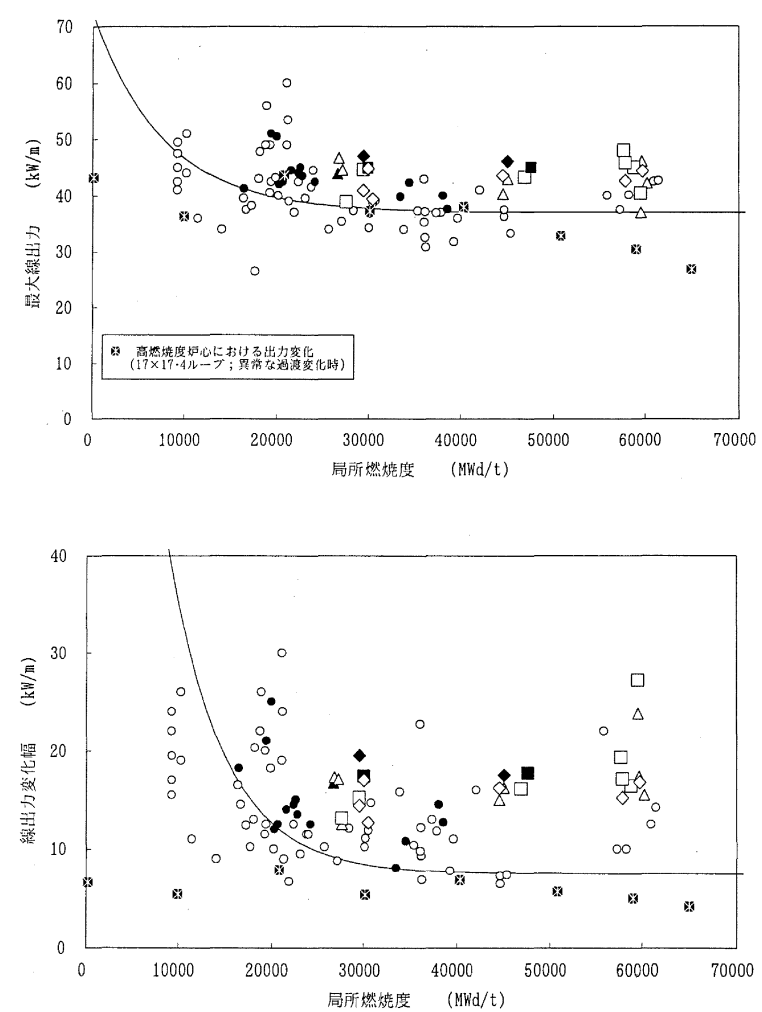
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p data-bbox="1127 1281 1365 1312">図 2.2-6 PCI 評価結果</p>		<p data-bbox="2507 346 2834 472">・安全審査資料の図2.2-6については、添付資料7に記載している。</p>

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

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

(22/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>3.2.1.5 評価</p> <p>(1) 構成材料⁽¹⁾⁽²⁾</p> <p>(中略)</p> <p>被覆材であるジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</p>	<p>(6) その他の評価事項</p> <p>b. PCI破損</p> <p>燃料のPCI（ペレット-被覆管相互作用）破損は、最大線出力密度及び線出力密度変化幅について同時にPCI破損しきい値を超えた場合に起こることが、種々の実験結果や実炉での経験から知られている。</p> <p>改良被覆管の耐PCI性は、図2.2-5に示すとおり、高燃焼度領域までジルカロイ-4製被覆管と同等以上であり、現行のPCI破損しきい値に対し十分余裕があることが確認でき、これをPCI破損評価に適用する。</p> <p>原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を、図2.2-6にPCI破損しきい値とともに示す。これより、運転時の異常な過渡変化時における最大線出力密度及び線出力密度変化幅は、同時にPCI破損しきい値を超えることはなく、PCI破損は生じない。</p>	<p>3.3.1 二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金被覆管との反応</p> <p>ジルコニウム基合金と二酸化ウランが接触した場合、照射により過剰になった二酸化ウラン中の酸素がジルカロイ中に拡散し、被覆管内面酸化膜(ZrO₂)が形成される。さらに、両者が強く接触するようになるとジルコニウム酸化層へのウランの拡散により、ジルコニウム酸化層は(Zr,U)O₂固溶体となり、これがボンディング層を形成して、強固なペレット-被覆管の固着の原因となる⁽¹⁰⁾。これらは、被覆管の腐食及びPCI^(注1)へ影響を及ぼす可能性が考えられる。</p> <p>しかしながら、二酸化ウランペレットとジルコニウムを密着させ510℃で約500日以上保持した場合においても反応は生じないことが報告されている⁽²⁾。通常運転中においてペレットと被覆管及び燃料被覆材端栓の接触面の温度が長期間にわたって500℃を超えないことから、反応は小さいと考えられる。</p> <p>また、ハルデン炉において燃料棒平均燃焼度55,000Mwd/tまで照射された燃料棒の被覆管内面観察によれば、低Snジルカロイ-4被覆管^(注2)とNDA被覆管とで、被覆管内面酸化膜の状態に差は認められていない⁽¹¹⁾。また、燃料棒平均燃焼度約69,000Mwd/tまで照射されたジルカロイ-4被覆管において、過度の内面酸化膜は観察されていない⁽¹²⁾。このことから、想定する照射量の範囲において、NDA被覆管の内面酸化は燃料棒の健全性を確保する上で影響は小さい。</p> <p>なお、NDA被覆管と二酸化ウランペレットとの反応は、前記のとおりウラン原子及びジルコニウム原子の拡散によって生ずるものであるため、ペレット密度にはほとんど影響しない。</p> <p>以上のことから、二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応は設計評価では考慮していない。</p> <p>4.3.1 ガドリニア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。ガドリニア混合二酸化ウラン燃料棒について、原子燃料工業製燃料に対して実施した照射試験結果では、二酸化ウラン燃料棒に比べて被覆管内面酸化の増加は観察されていない⁽²⁶⁾。従って、ガドリニア混合二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応は、二酸化ウランペレットとNDA被覆管が安定に共存する場合と大差はない。従って、当該の反応を設計評価では考慮していない。</p> <p>なお、3.3.1項で述べたとおり、ペレット密度が増加した場合の共存性への影響はない。</p>	

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

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

(23/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考						
		<p>5.4.2 耐摩耗性</p> <p>原子炉内では、燃料棒の流動振動による支持格子との接触部で、被覆管の摩耗が発生する可能性がある。被覆管の硬さの測定結果を表 5-3に示す。この表から分かるようにNDA被覆管の硬さはジルカロイ-4被覆管の硬さと同じであり、支持格子と被覆管の接触による摩耗は被覆管材料（ジルカロイ-4被覆管及びNDA被覆管）によらず同等である。以上より、NDA被覆管の摩耗はジルカロイ-4被覆管と同じとする。</p> <p style="text-align: center;">表 5-3 NDA 被覆管の硬さの測定結果⁽²⁰⁾</p> <p style="text-align: center;">(単位：HV (ピッカース硬さ値))</p> <table border="1" data-bbox="1739 793 2415 974"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HV0.2^(注1))</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>215</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>218</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(注1) HV0.2：ピッカース硬さ試験力0.2kgf</p>	種類	平均値 (HV0.2 ^(注1))	NDA	215	ジルカロイ-4 (参考)	218	<p>・設置変更許可申請書及び高燃焼度燃料導入時の安全審査資料では耐摩耗性について詳細な内容は説明していないものの、設計及び工事の計画では、摩耗特性が同等であることを設計評価（添付資料7）に反映しているため、記載している。</p>
種類	平均値 (HV0.2 ^(注1))								
NDA	215								
ジルカロイ-4 (参考)	218								

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

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

(24/25)

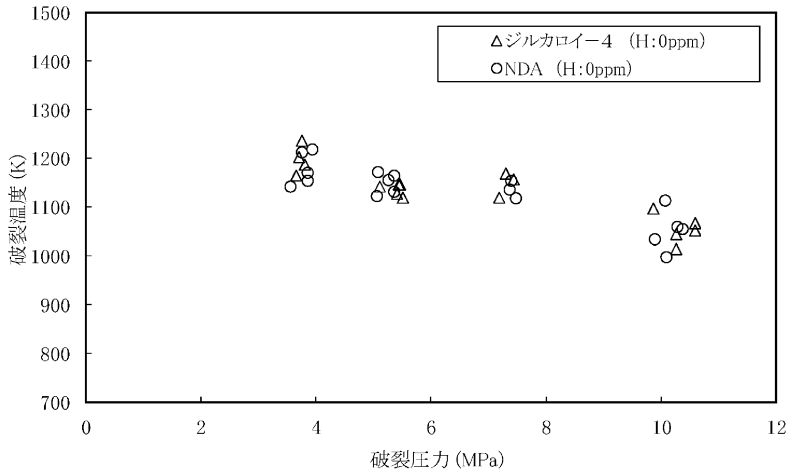
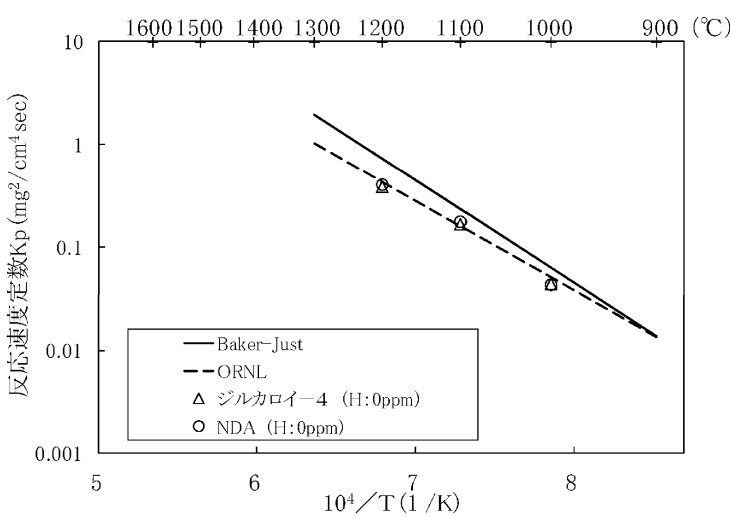
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
		<p>5.4.3 高温特性</p> <p>被覆管の相変態（α相からβ相に変化）が生じるような高温時においては、NDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管同様、約98wt%のジルコニウムを主成分としているため、それらの主要な特性はジルカロイ-4と同等である。冷却材喪失事故にて考慮する昇温内圧破裂試験結果、高温時のジルコニウムと水反応の試験結果をそれぞれ図5-12及び図5-13に示す。図5-12及び図5-13に示すとおり、NDA被覆管の高温破裂特性及び高温酸化挙動はジルカロイ-4被覆管と同等である。</p>  <p>図 5-12 未照射管の LOCA 時破裂挙動試験結果（受取管）⁽²⁰⁾</p>  <p>図 5-13 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数（受取管）⁽²⁰⁾</p>	<ul style="list-style-type: none"> 設置変更許可申請書及び高燃焼度燃料導入時の安全審査資料では高温特性について詳細な内容は説明していないものの、設計及び工事の計画では、技術基準規則23条に適合するため、記載している。

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

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

(25/25)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考															
		<p>5.1 耐熱性</p> <p>ジルカロイ-4の溶融点は1,782℃であり、結晶構造が820℃でα相から$(\alpha+\beta)$相へ、また、958℃で$(\alpha+\beta)$相からβ相に変態する⁽²⁰⁾。</p> <p>NDAは、ジルカロイ-4同様、約98wt%のジルコニウム(Zr)を主成分としているため、それらの材料物性はジルカロイ-4とほぼ同等である。</p> <p>NDAの溶融点及び相変態温度の測定結果を表5-1及び表5-2に示すように、NDAの溶融点は1,796℃、α相から$(\alpha+\beta)$相及び$(\alpha+\beta)$相からβ相への相変態温度はそれぞれ802℃及び937℃であり、いずれも被覆管の異常な過渡変化時の最高温度(約□℃以下)よりもかなり高いので、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはない。従って、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはないので、当該の挙動を設計評価では考慮していない。</p> <p style="text-align: center;">表 5-1 NDA の溶融点測定結果⁽²⁰⁾ (単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1774 1024 2371 1270"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>溶融点測定結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>1,796</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>1,782</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">表 5-2 NDA の相変態温度測定結果⁽²⁰⁾ (単位：℃)</p> <table border="1" data-bbox="1730 1409 2418 1606"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$</th> <th>$\alpha + \beta \rightarrow \beta$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>802</td> <td>937</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4 (参考)</td> <td>820</td> <td>958</td> </tr> </tbody> </table>	種類	溶融点測定結果	NDA	1,796	ジルカロイ-4 (参考)	1,782	種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$	NDA	802	937	ジルカロイ-4 (参考)	820	958	<p>・設置変更許可申請書及び高燃焼度燃料導入時の安全審査資料では耐熱性について詳細な内容は説明していないものの、設計及び工事の計画では、技術基準規則23条に適合するため、記載している。</p>
種類	溶融点測定結果																	
NDA	1,796																	
ジルカロイ-4 (参考)	1,782																	
種類	$\alpha \rightarrow \alpha + \beta$	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$																
NDA	802	937																
ジルカロイ-4 (参考)	820	958																

ジルコニウム基合金における酸素含有量の設定について

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

1. 酸素含有量が燃料被覆材へ及ぼす影響

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

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

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

したがって、ジルコニウム基合金の酸素含有量については、JIS 及び ASTM を踏まえ、 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