

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

補足説明資料

令和 5 年 1 月 1 2 日

四国電力株式会社

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

目 次

補足説明資料 1 設計及び工事計画認可申請における適用条文等の整理について

補足説明資料 2 設計及び工事計画認可申請書に添付する書類の整理について

補足説明資料 3 燃料体設計認可申請書と設計及び工事計画認可申請書の記載に関する補足説明資料

補足説明資料 4 基本設計方針の確認方法について

補足説明資料 5 強度に関する補足説明資料

補足説明資料 6 高燃焼度燃料における燃料被覆材に関する補足説明資料

補足説明資料 7 耐震性に関する説明書に関する補足説明資料

補足説明資料 8 基本設計方針と技術基準規則等の関係について

赤枠：今回抜粋し提出した箇所

補足説明資料 9

設計及び工事計画認可申請書の記載事項に関連する設置
変更許可について

補足説明資料 1

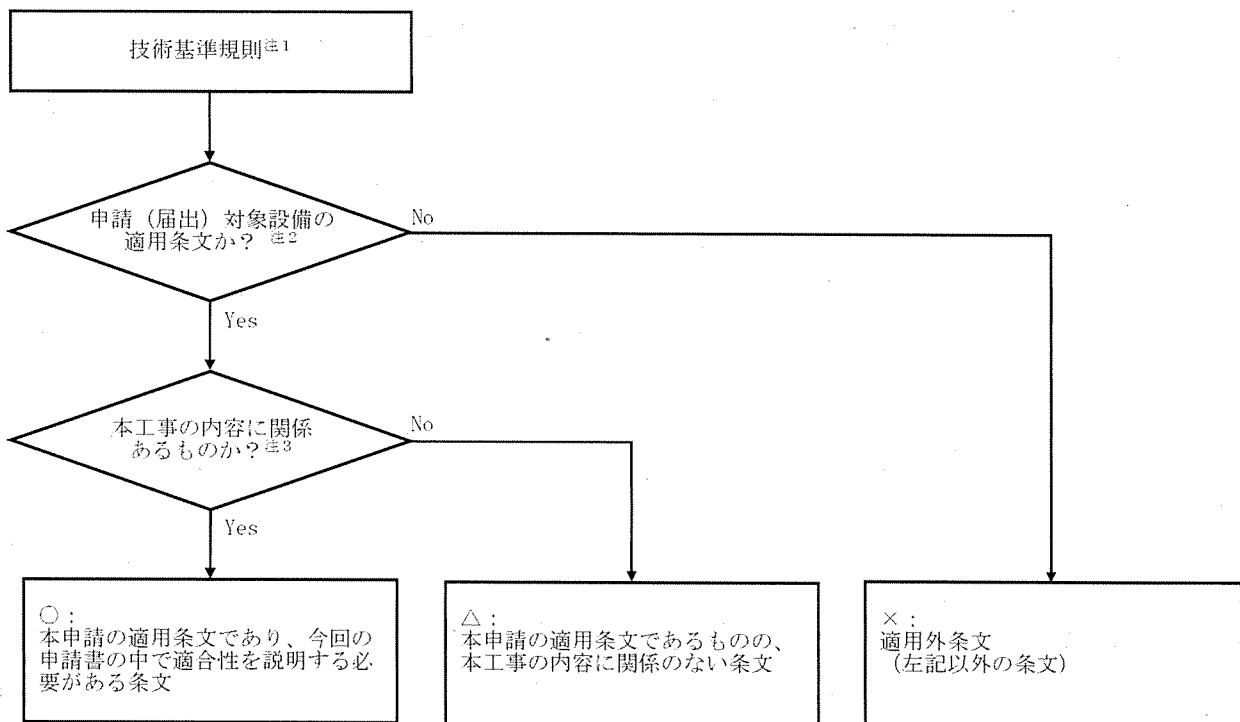
設計及び工事計画認可申請における
適用条文等の整理について

1. 概要

本資料では、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づく当該工事計画の手続きを行うにあたり、申請対象が適用を受ける「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」の条文について整理すると共に、今回の申請書の中で適合性を説明する必要があ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条文整理フロー

設計及び工事計画認可申請における条文整理に当たっては、以下のフローに従い分類する。



注1：直接の技術要求ではない条文（第一条 適用範囲、第二条 定義、第三条 特殊な設計による発電用原子炉施設）は除く。

注2：申請（届出）対象設備が、技術基準規則の各条文の適用を受ける設備か否かで判断する。具体的には、対象設備が明確となっている条文において、明らかに申請（届出）対象設備と条文の対象設備が合致していない場合は「No」とし、それ以外は「Yes」とする。ただし、第十条については、基本設計方針において、急傾斜地崩壊危険区域でない地域に設備を施設する方針としており、全ての設備においてこの適合性を確認する必要があることから、全ての申請（届出）対象設備において「Yes」とする。

注3：申請（届出）対象設備の適用条文となった条文のうち、以下の両方が該当する条文であるか否かで判断する。

- ・設計段階で確認する条文
- ・本申請（届出）内容が、過去の設計及び工事計画認可申請書（既工事計画認可申請書を含む）の基準適合性確認結果に影響を与える条文

ただし、上記に該当しない場合であっても、申請（届出）対象設備が、法令改正等により新たに要目表へ追加する設備である場合は、以下のどちらかに該当する条文であるか否かで判断する。

- ・申請（届出）対象設備の設計に関する条文
- ・申請（届出）対象設備が防護すべき対象となっている条文

3. 本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ついて、2. の条文整理フローに従い整理した適用条文整理結果を第1表に示す。

○申請対象

別表第二		対象設備
原子炉本体	基本設計方針 対象設備	燃料体

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

技術基準規則	分類 [※]	備考
(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」という設備区分として適合性が確認されている。(以下第五～九、十一～十五、十九、二十三条に同じ) 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。設備の設置位置および設備の取扱い場所を変更しないことから、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。
(第五条) 地震による損傷の防止	○	地震による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)および地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能要求が追加されたことに対する工事計画認可申請書(原規規発第1906103号 2019年6月10日認可)の添付資料「耐震性に関する説明書」において、既に確認している。 今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はないものの、本設備を新たに「燃料体」という設備区分で要目表に追加することから、本設備が安全重要度分類クラス1機器であり防護対象設備に該当することを踏まえ、今回の申請書の中で適合性を説明する。
(第六条) 津波による損傷の防止	○	津波による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)の添付資料「耐震設計上重要な設備を設置する施設に関する説明書(自然現象への配慮に関する説明を含む。)」において、既に確認している。 今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はないものの、本設備を新たに「燃料体」という設備区分で要目表に追加することから、本設備が安全重要度分類クラス1機器であり防護対象設備に該当することを踏まえ、今回の申請書の中で適合性を説明する。
(第七条) 外部からの衝撃による損傷の防止	○	外部からの衝撃による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)の添付資料「耐震設計上重要な設備を設置する施設に関する説明書(自然現象への配慮に関する説明を含む。)」において、既に確認している。 今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はないものの、本設備を新たに「燃料体」という設備区分で要目表に追加することから、本設備が安全重要度分類クラス1機器であり防護対象設備に該当することを踏まえ、今回の申請書の中で適合性を説明する。
(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。設備の設置位置および設備の取扱い場所を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。
(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。設備の設置位置および設備の取扱い場所を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。
(第十条) 急傾斜地の崩壊の防止	△	急傾斜地の崩壊の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。伊方発電所は、急傾斜地崩壊危険区域に指定された箇所がないことから、急傾斜地の崩壊の防止に係る設計は工事の内容(本申請内容)に関係しない。
(第十一条) 火災による損傷の防止	○	火災による損傷の防止については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)の添付資料「発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書」において、既に確認している。 今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はないものの、本設備を新たに「燃料体」という設備区分で要目表に追加することから、本設備が燃料体の設計に関する条文であることを踏まえ、今回の申請書の中で適合性を説明する。
(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。設備の設置位置および設備の取扱い場所を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。
(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。設備の設置位置および設備の取扱い場所を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。
(第十四条) 安全設備	○	安全設備については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)の添付資料「安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書」において、既に確認している。 今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はないものの、本設備を新たに「燃料体」という設備区分で要目表に追加することから、本設備が燃料体の設計に関する条文であることを踏まえ、今回の申請書の中で適合性を説明する。
(第十五条) 設計基準対象施設の機能	○	設計基準対象施設の機能については、既工事計画において適合性が確認されている。具体的には、新規制基準適合性確認に関する工事計画認可申請書(原規規発第1603231号 2016年3月23日認可)の添付資料「安全設備及び重大事故等対処設備が使用される条件の下における健全性に関する説明書」において、既に確認している。 今回の申請は、既工事計画から設計内容に変更はないものの、本設備を新たに「燃料体」という設備区分で要目表に追加することから、本設備が燃料体の設計に関する条文であることを踏まえ、今回の申請書の中で適合性を説明する。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。

技術基準規則	分類※	備考
(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。具体的には、高燃焼度燃料導入時の工事計画認可申請書(平成15・12・26原第7号 2004年4月16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いものの、本設備を新たに「燃料体」という設備区分で要目表に追加することから、本条文が燃料体の設計に関する条文であることを踏まえ、今回の申請書の中で適合性を説明する。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(第二十三条) 炉心等	○	改正された「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」に対して申請設備の適合性を確認する必要があるため、変更の工事の内容に関連し、今回の申請書の中で適合性を説明する。
(第二十四条) 熱遮蔽材	×	熱遮蔽材に対する要求であり、本設備は、熱遮蔽材に該当しないため、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(第三十九条) 廃棄物処理設備等	×	廃棄物処理設備等に対する要求であり、本設備は、廃棄物処理設備等に該当しないため、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。

技術基準規則	分類 [※]	備考
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、適用条文とならない。
(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、本設備は、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、適用条文とならない。

※：以下の考え方に基づき記載する。

○：本申請の適用条文であり、今回の申請書の中で適合性を説明する必要がある条文

△：本申請の適用条文であるものの、本工事の内容に関係のない条文

×：適用外条文

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

技術基準規則	分類※	備考
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(第七十二条) 電源設備	×	重大事故等対処施設に対する要求であり、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。

技術基準規則	分類 [※]	備考
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。
(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、本設備は、重大事故等対処施設に該当しないため、適用条文とならない。

※：以下の考え方に基づき記載する。

○：本申請の適用条文であり、今回の申請書の中で適合性を説明する必要がある条文

△：本申請の適用条文であるものの、本工事の内容に関係のない条文

×：適用外条文

補足説明資料 5

強度に関する補足説明資料

目 次

	頁
1. 概 要	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	3
3. 燃料棒の強度計算	4
3.1 燃料棒の設計基準	4
3.2 燃料棒の強度評価方法	6
3.3 強度評価結果	8
3.4 その他の考慮事項	39
4. 燃料集合体の強度計算	52
4.1 燃料集合体の設計基準	52
4.2 燃料集合体強度評価方法	55
4.3 強度評価結果	62
5. 参考文献	67

1. 概要

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

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

2. 設計条件

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

2.1 燃焼度

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

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

2.2 線出力密度

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

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

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

2.3 原子炉運転条件

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

・原子炉熱出力	:	2,652	MW
・運転圧力	:	15.5	MPa[abs]
・炉心入口温度			
通常運転時	:	283.6	°C
高温停止時	:	286.1	°C
・1次冷却材全流量	:	45.7×10^6	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、第 3-1 表に示す基準を満足するように燃料棒を設計する。

設計基準を設定するに当たっての基本的な考慮事項と設計基準を同表に示す。

なお、これらの基準は、原子力規制委員会規則「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(平成 25 年 6 月 28 日原子力規制委員会規則第 5 号)」、技術基準規則、原子炉安全基準専門部会報告書「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について(昭和 63 年 5 月 12 日)」及び原子炉安全専門審査会内規「加圧水型原子炉に用いられる 17 行 17 列型の燃料集合体について(昭和 51 年 2 月 16 日)」に記載されている考え方に基づいている。

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

第3-1表 各評価項目と出力履歴との関係

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
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） 第15条6項 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。	(1) 燃料温度	1) ベレレット溶融に伴う過大な膨張を防ぐ。 2) 燃料スタックの不安定化を防ぐ。 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。 4) ベレレットと被覆管の有害な化学反応を防ぐ。	燃料中心最高温度は二酸化ウラン及びトリウム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実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 $-32^{\circ}\text{C}/10,000\text{MWd/t}$ 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出力条件を保守的に設定している。
	(2) 燃料棒内圧	サーマルフィードバック効果（ β_{eff} ）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ブ変形により、ベレ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ベレ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実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実性を考慮している。
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） 3.2.1 燃料棒内圧基準 PWR 燃料棒の内圧基準については、従来の「燃料棒の内圧は、運転中冷却材圧力(157kg/cm ² g)以下であること。」という基準を変更し、「燃料棒の内圧は、通常運転時において被覆管の外向きのクリーブ変形によりベレ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。	(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。	被覆管の耐力（ $\sigma_{0.2}$ ）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ことにより、実質的に0.2%塑性歪以下に制限される。	-
原子炉安全専門部会「加圧水型原子炉に用いられる1717列型の燃料集合体について」（昭和51年2月16日） 2-1 構造設計基準 構造設計基準は次のように設定されている。 (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。 (2) 燃料棒内圧は運転中冷却材圧力(157kg/cm ² g)以下であること。 (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。 (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。 (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。	(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被覆管曲線（Langer and Donnellの曲線）は実測データより求めまる最確曲線に対し、さらに保守的に余裕（応力に対し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、実際の装置が受ける繰り返し回数以下であることとから、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ブ変形により外径が増加し、一旦接触したベレ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増加すると、更にFPガスが放出されて内圧が上昇し、その結果、更にギャップが広がる。
 (注2) 0.2%の塑性変形を起こす応力をいう。

3.2 燃料棒の強度評価方法

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

また第 3-1 図に燃料棒強度評価フロー図を示す。

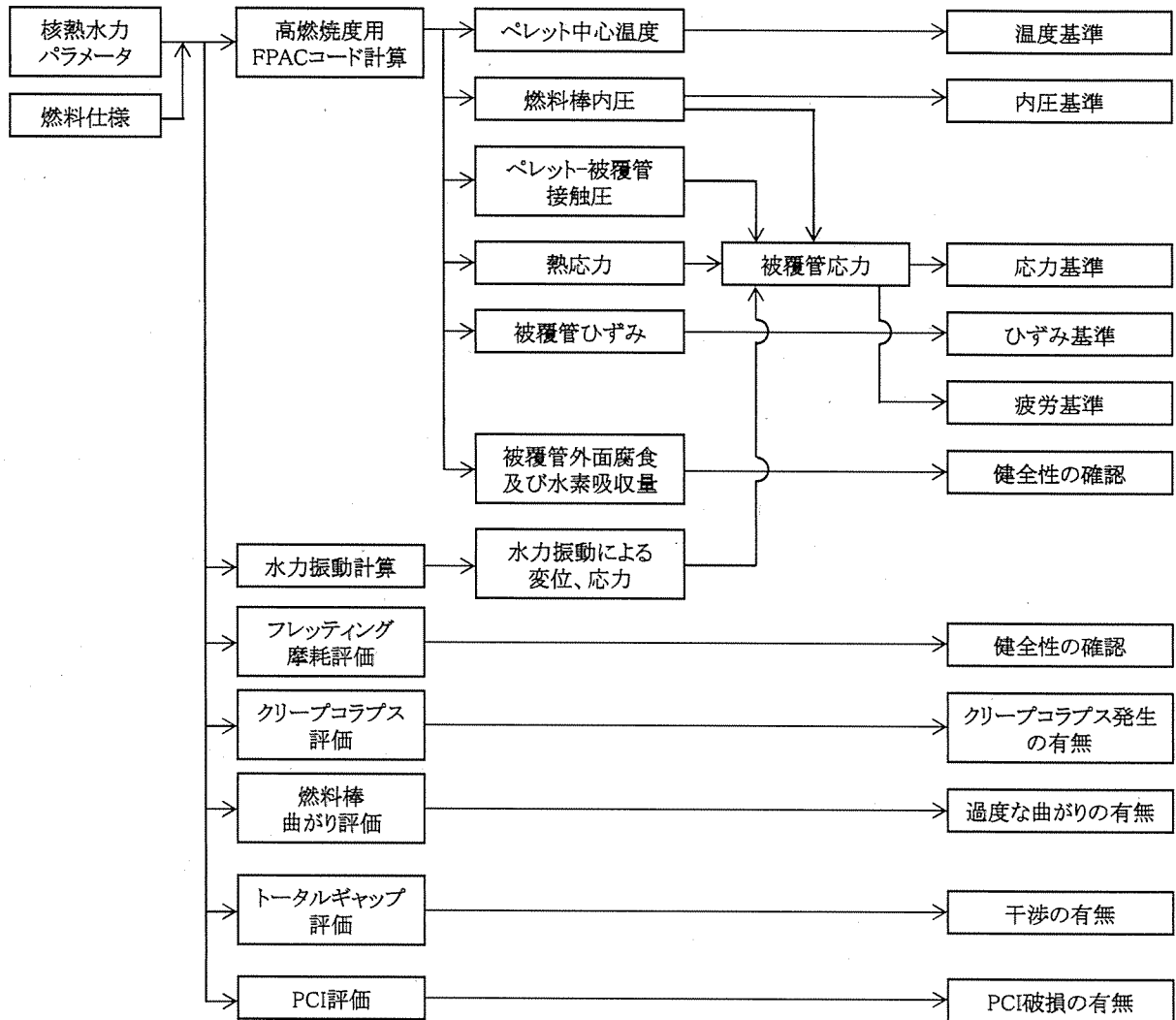
3.2.1 燃料棒設計計算コードの概要

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」という。）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、燃料棒が原子炉内で示す挙動（核分裂生成物（以下「FP」という。）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、ひずみ及び疲労等を評価することができる。

燃料棒評価



第 3-1 図 燃料棒強度評価フロー図

3.3 強度評価結果

以下に燃料棒解析コードを用いて、燃料集合体の性能評価を行った結果を示す。

3.3.1 計算条件

今回の燃料集合体の評価に使用した主要なインプットは次のとおりである。

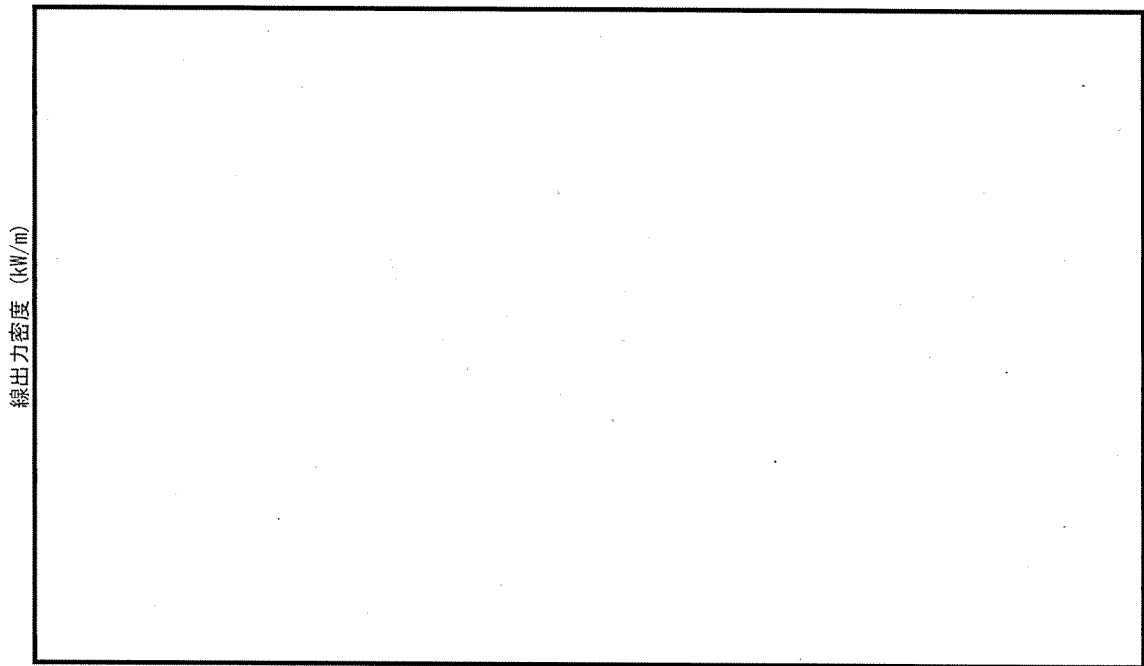
ペレット	濃縮度	4.80wt% (二酸化ウラン燃料棒) 4.10wt% (二酸化ウラン燃料棒) 3.20wt% (ガドリニア入り燃料棒)	
	直径	8.190mm	
	長さ	9.2mm	
	形状	ディッシュ、チャンファ付き	
	密度	97.0% T.D. (二酸化ウラン燃料棒) 96.0% T.D. (ガドリニア入り燃料棒)	
	ガドリニア濃度	10.00wt% (タイプ 3 燃料集合体における ガドリニア入り燃料棒)	
	ガドリニウム濃度	<input type="text"/> wt% (タイプ 3 燃料集合体における ガドリニア入り燃料棒)	
	被覆管	材質	NDA
		内径	8.36mm
		肉厚	0.57mm
燃料棒	上部プレナム長さ	<input type="text"/> mm	
	下部プレナム長さ	<input type="text"/> mm	
	初期加圧量	<input type="text"/> MPa [abs]	
	封入ガス	ヘリウム	
	有効長さ	3,648mm	
1次冷却材 の条件	運転圧力	15.5MPa [abs]	
	入口温度	284℃	
	入口流量	0.28kg/s	
出力分布	熱水力等価直径	11.78mm	
	平均線出力密度	17.1kW/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したうえで、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。炉心としては、二酸化ウラン燃料集合体(濃縮度4.8wt%)、二酸化ウラン燃料集合体(濃縮度4.1wt%)及びガドリニア入り二酸化ウラン燃料集合体(以下「ガドリニア入り燃料集合体」という。)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。

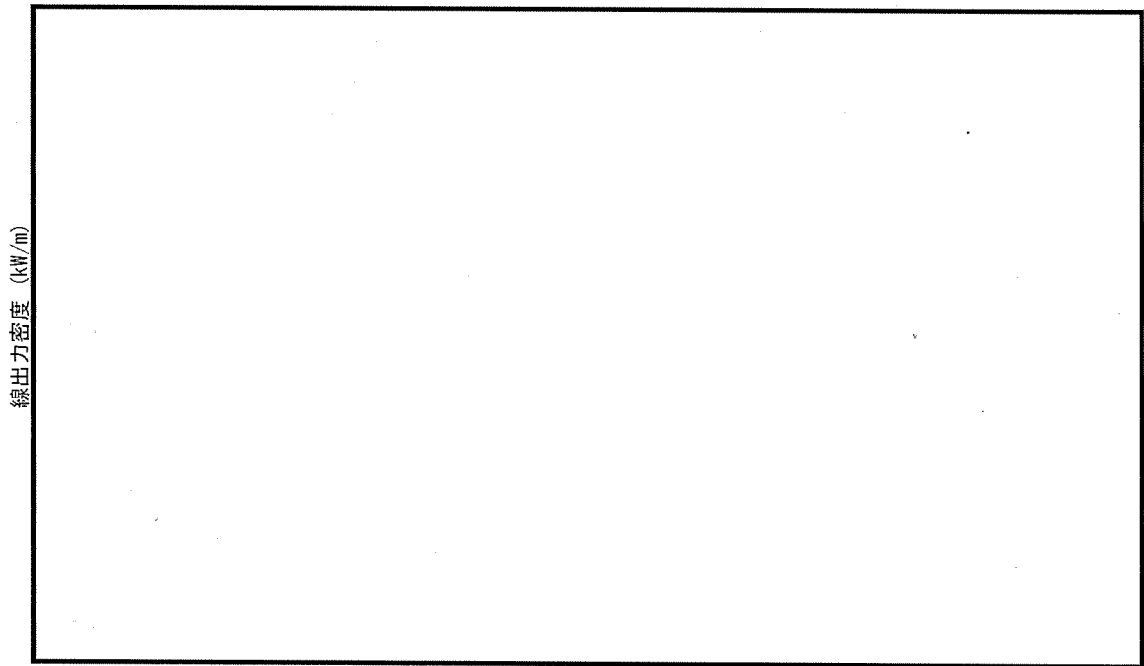
強度計算に用いた出力履歴を第3-2図に、軸方向出力分布を第3-3図に示す。また、出力履歴選定の考え方を第3-2表に示す。

第3-3-2表 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/出力履歴	本申請における 設計出力履歴の設定
燃料温度	(1)燃料温度	出力が大きいため高くなる。	a. 最高温度は、ペレット-被覆管ギャップが大いBOLで厳しくなり、評価出力条件に依存し出力履歴による。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。	下記の最大燃焼度燃料棒の設計出力履歴を用いる。 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、取替炉心ごとこの出力の違いを考慮し、出力のかき上げを行い設定する。
	(1)FPガス放出	a. 燃焼度の伸長により増大する。 (コホ・ツグガガ)		
燃料棒内圧	(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。	最大燃焼度 各サイクル最大出力
	(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。	
被覆管応力	(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いため(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、寿命前半に比較的高い出力が高く、接触後高出力となる燃料棒で厳しくなる傾向がある。	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。
	(3)熱応力	被覆管内外面温度差が大きいため、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。	
	(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重みであり、過渡時の出力増分が大きいため厳しくなる。	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、寿命前半に比較的高い出力が高く、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	被覆管疲労は、被覆管に発生する応力片振幅が大きいため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。
	(2)応力発生期間			

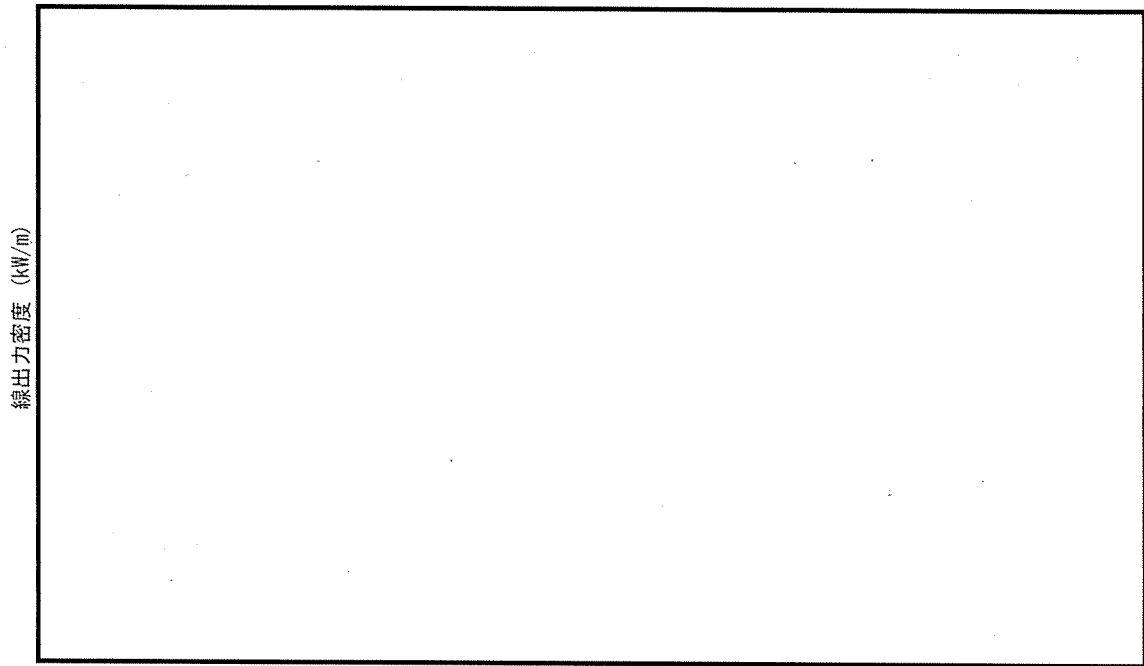


運転時間 (EFPH)

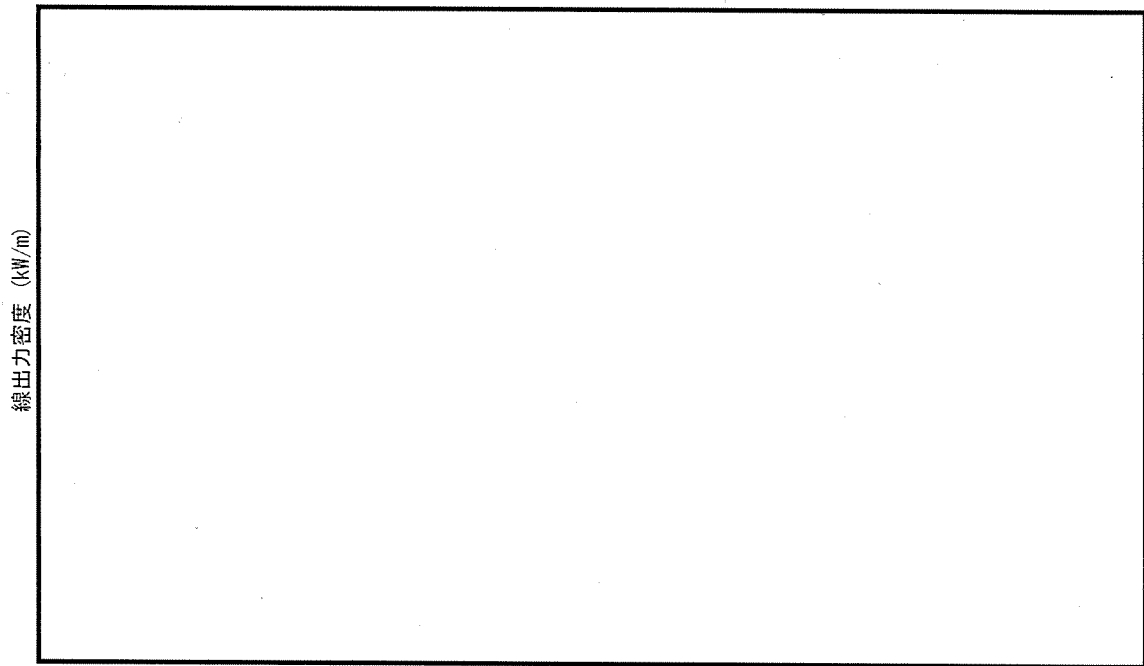


運転時間 (EFPH)

第 3-2 図 (1) 二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.8wt%) 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中の燃料棒)

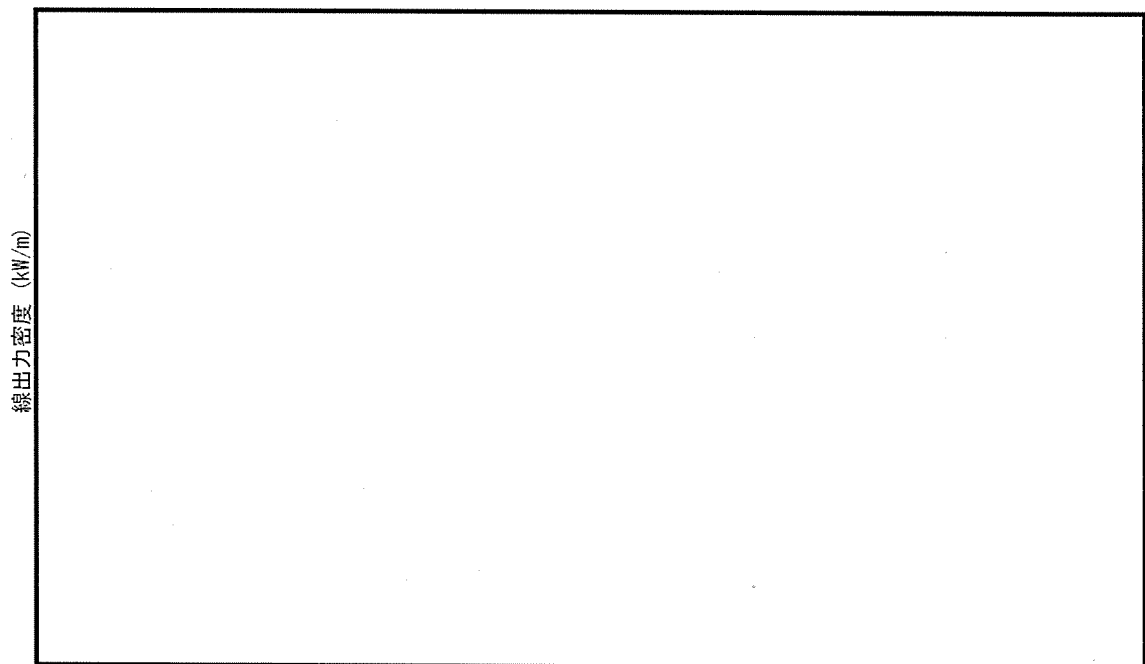
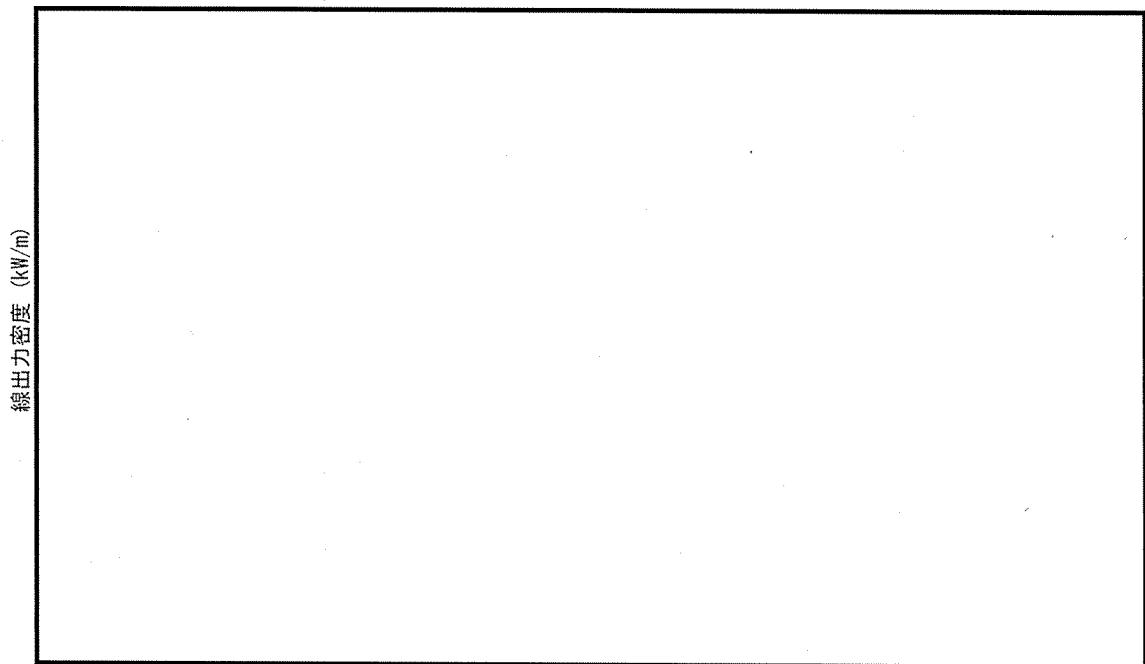


運転時間 (EFPH)

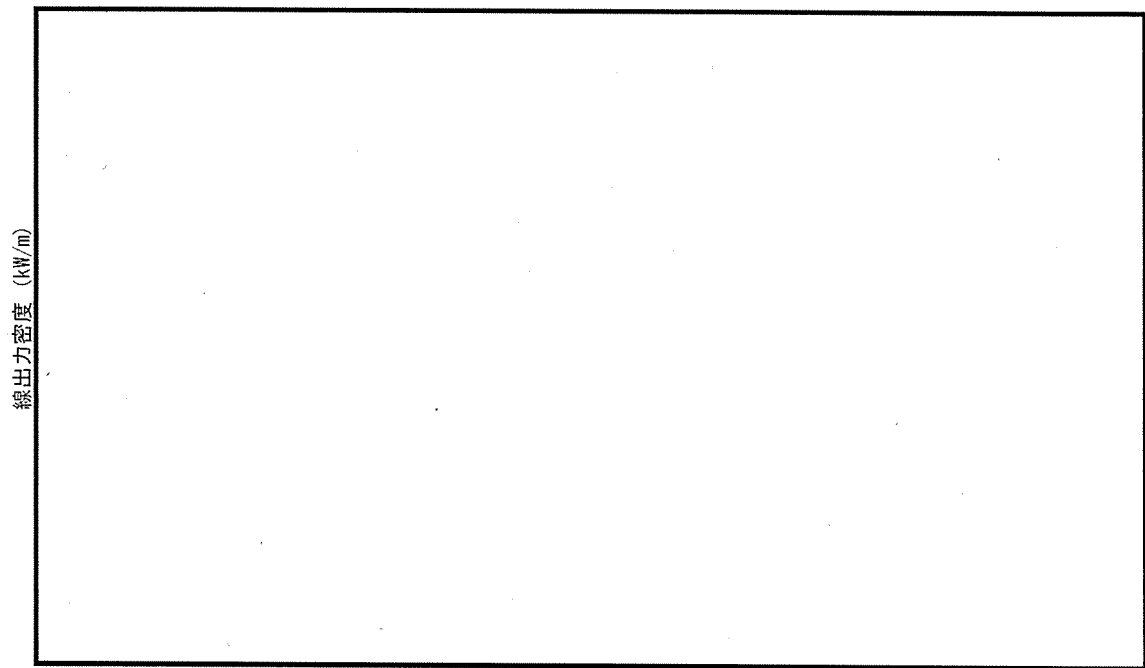


運転時間 (EFPH)

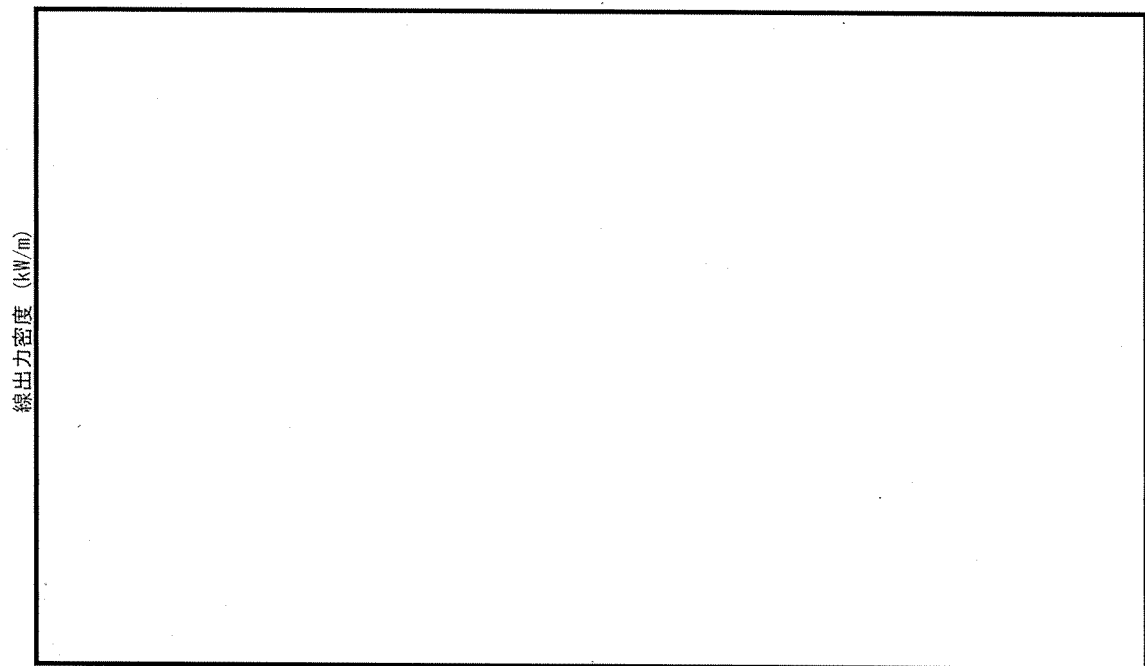
第 3-2 図 (2) 二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.8wt%) の出力履歴
 (3 サイクル照射される二酸化ウラン燃料集合体中の燃料棒)



第 3-2 図 (3) 二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.8wt%) の出力履歴
(3 サイクル照射されるガドリニア入り燃料集合体中の燃料棒)

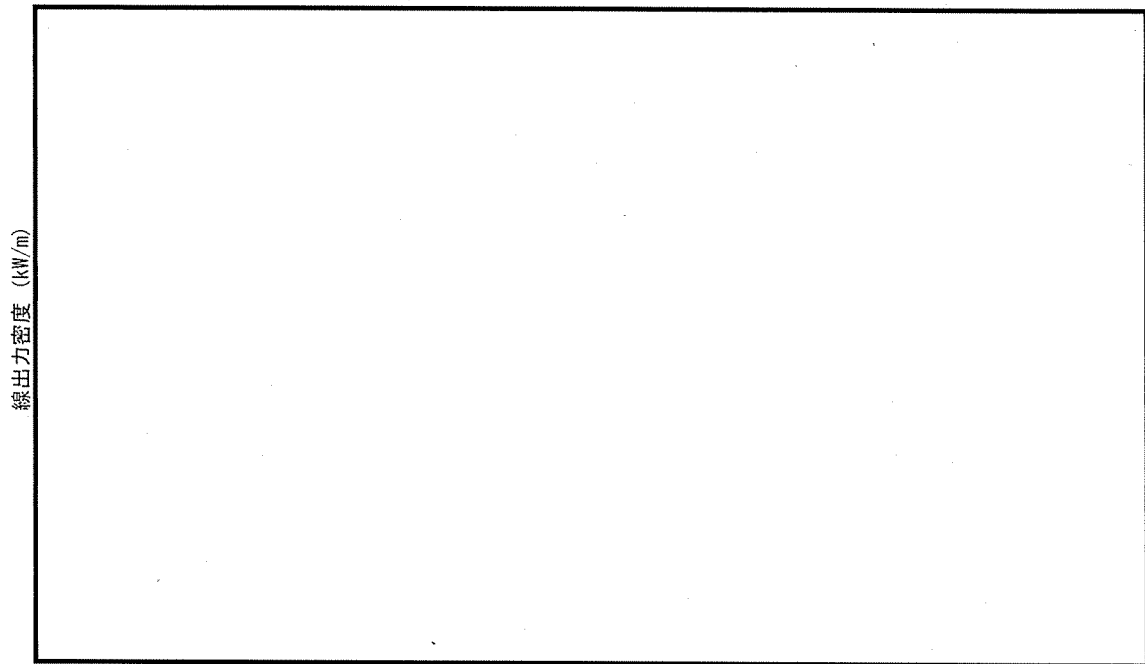


運転時間 (EFPH)

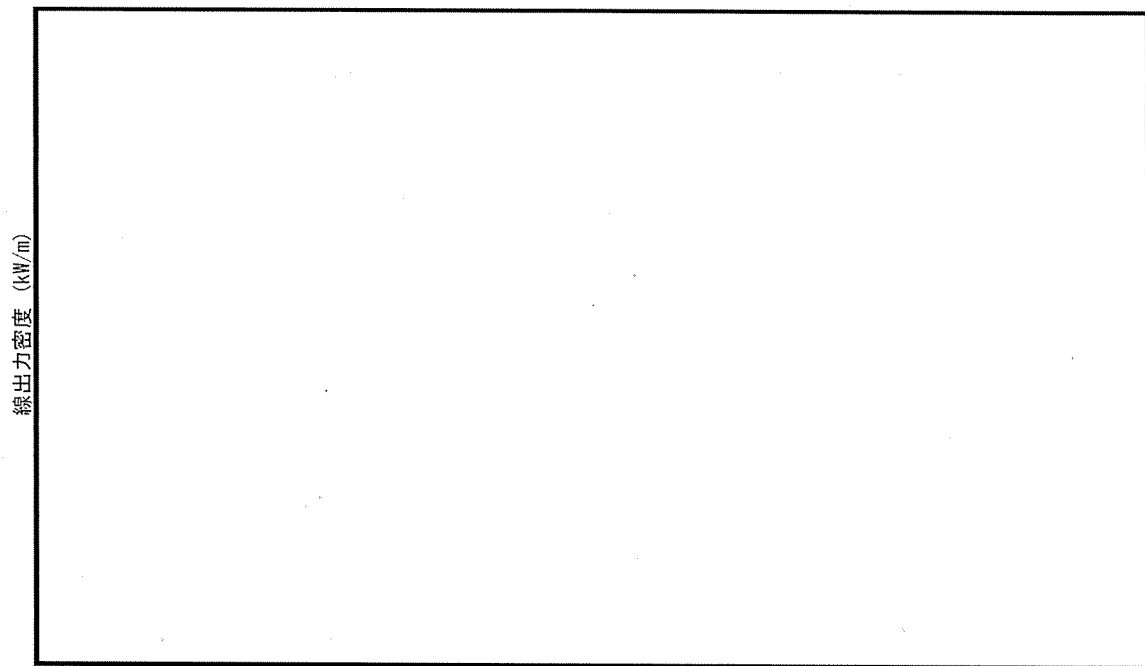


運転時間 (EFPH)

第 3-2 図 (4) 二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.1wt%) 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中の燃料棒)

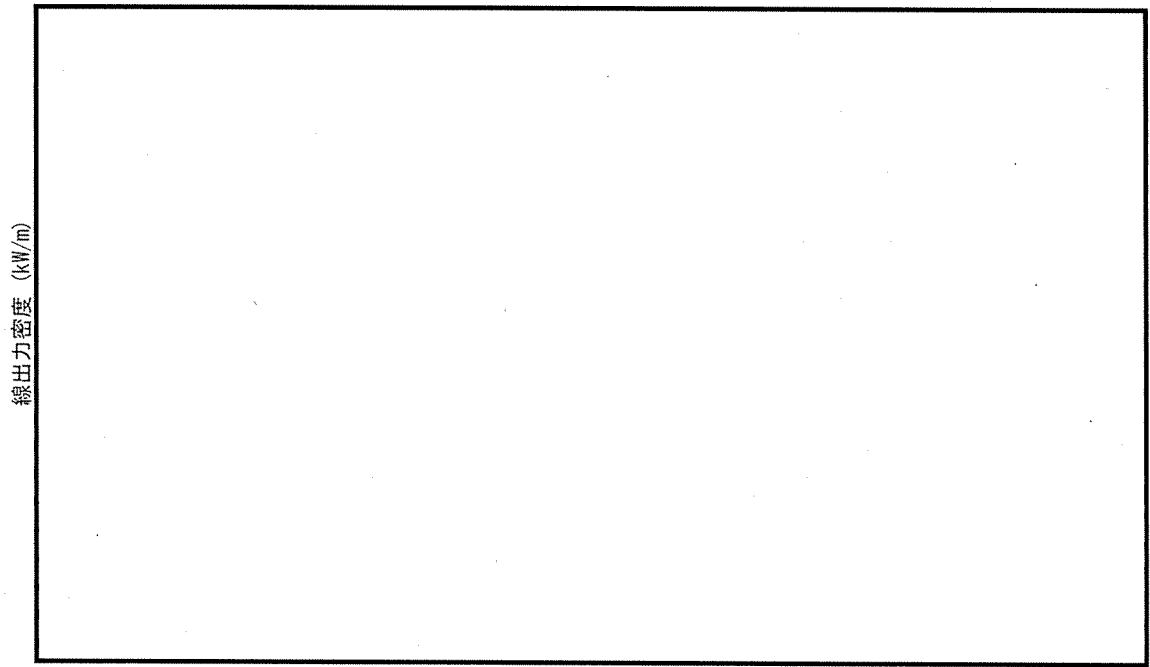


運転時間 (EFPH)

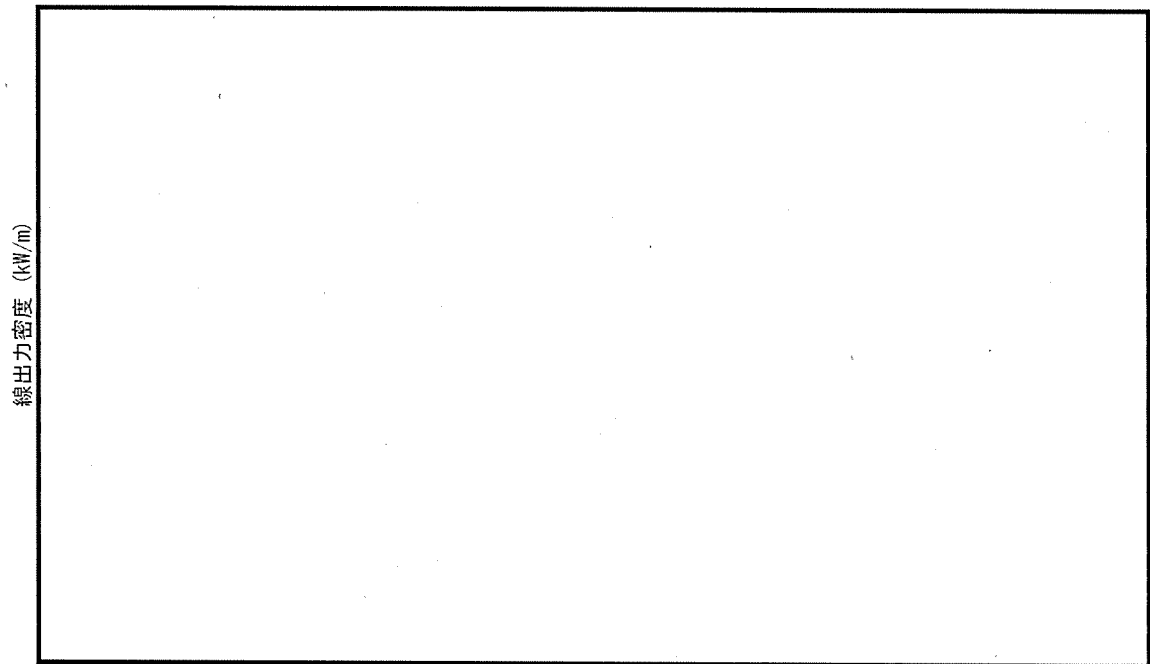


運転時間 (EFPH)

第 3-2 図 (5) 二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.1wt%) 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中の燃料棒)

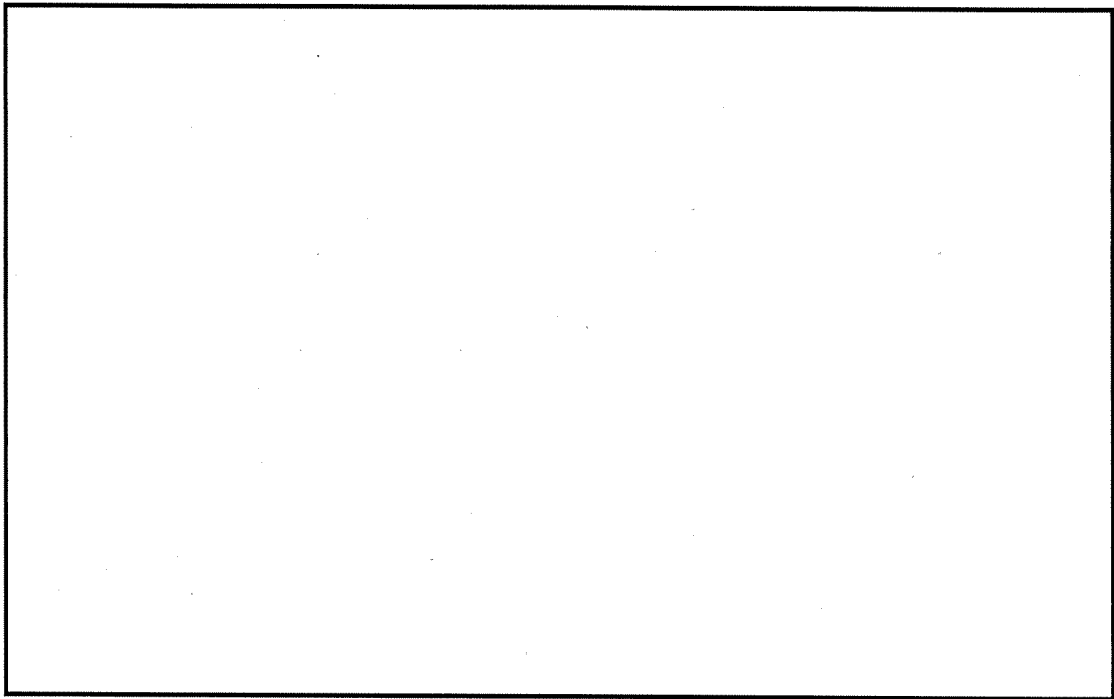


運転時間 (EFPH)



運転時間 (EFPH)

第3-2図 (6) ガドリニア入り燃料棒の出力履歴
(3 サイクル照射されるガドリニア入り燃料集合体中の燃料棒)



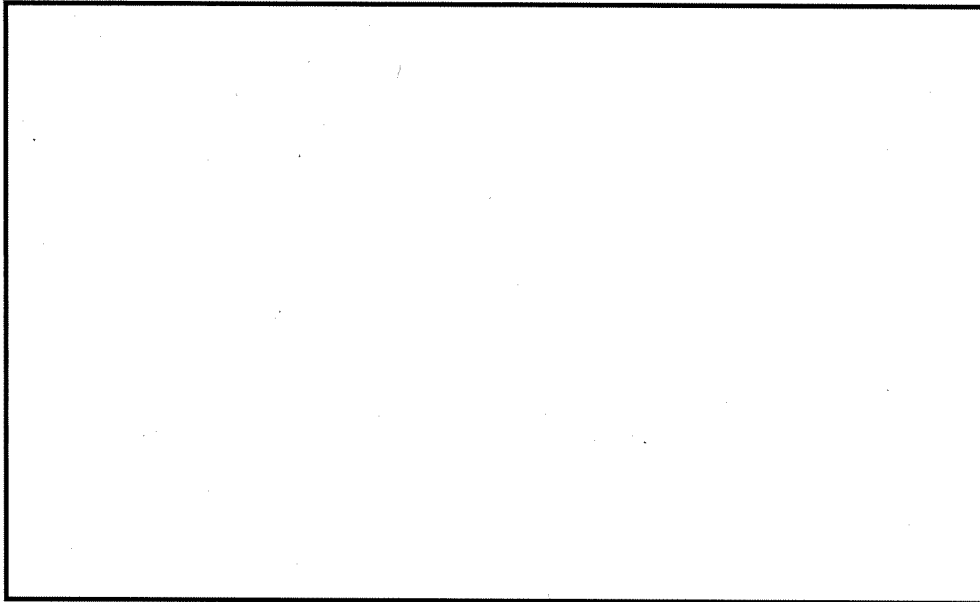
(注1) 燃料中心温度、被覆管ひずみ、被覆管応力及び被覆管疲労は、上図の局所的に出力を高く設定した箇所において評価する。

第3-3図 軸方向出力分布図

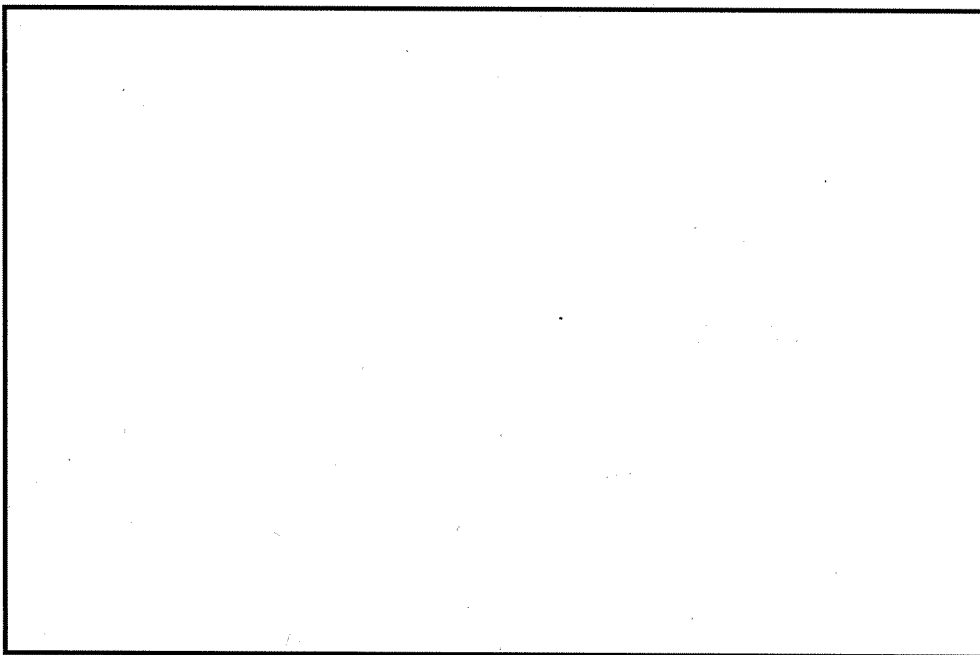
3.3.2 計算結果

各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴（比出力）と内圧履歴をまとめて、第3-4図及び第3-5図に示す。

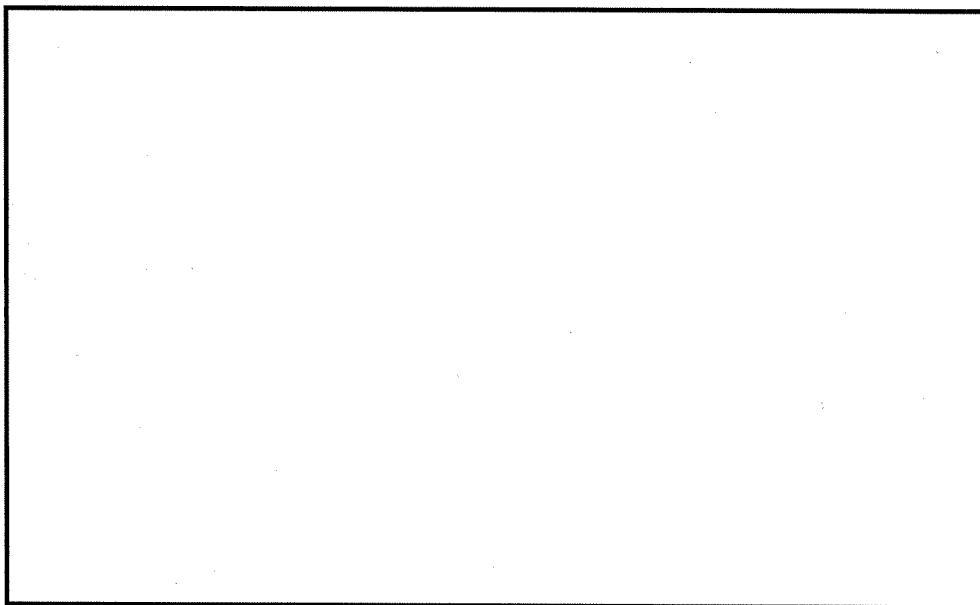
また、被覆管内径とペレット外径の変化について、第3-6図に示す。



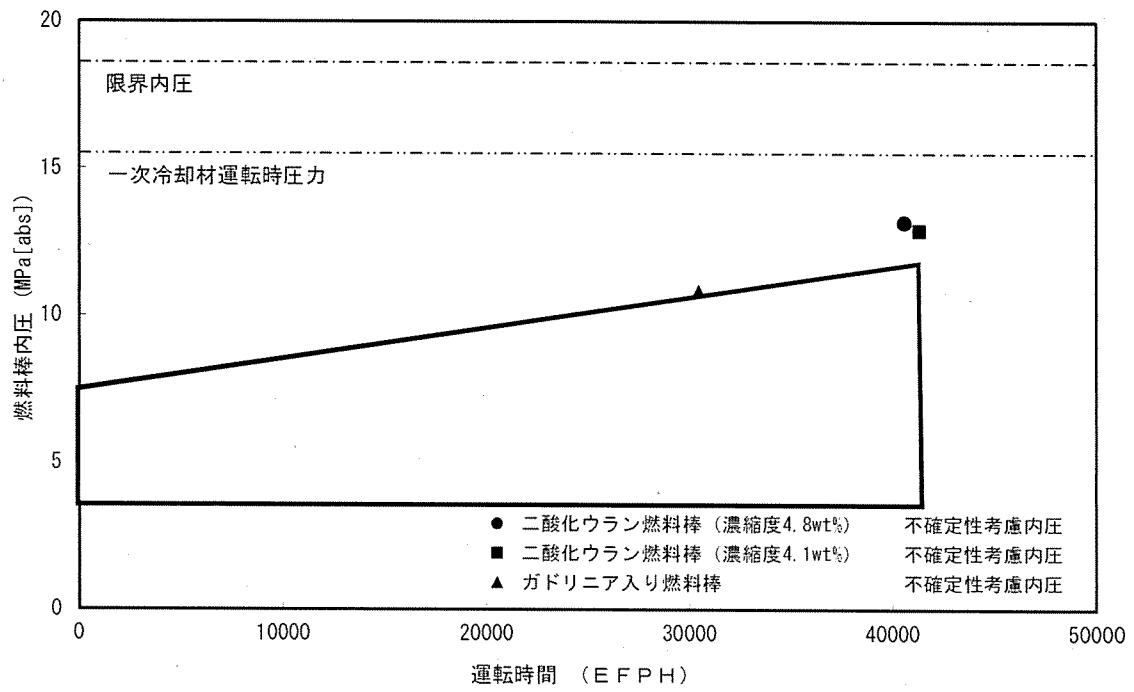
第3-4図 (1) 各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴 (通常運転時)
(二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.8wt%))



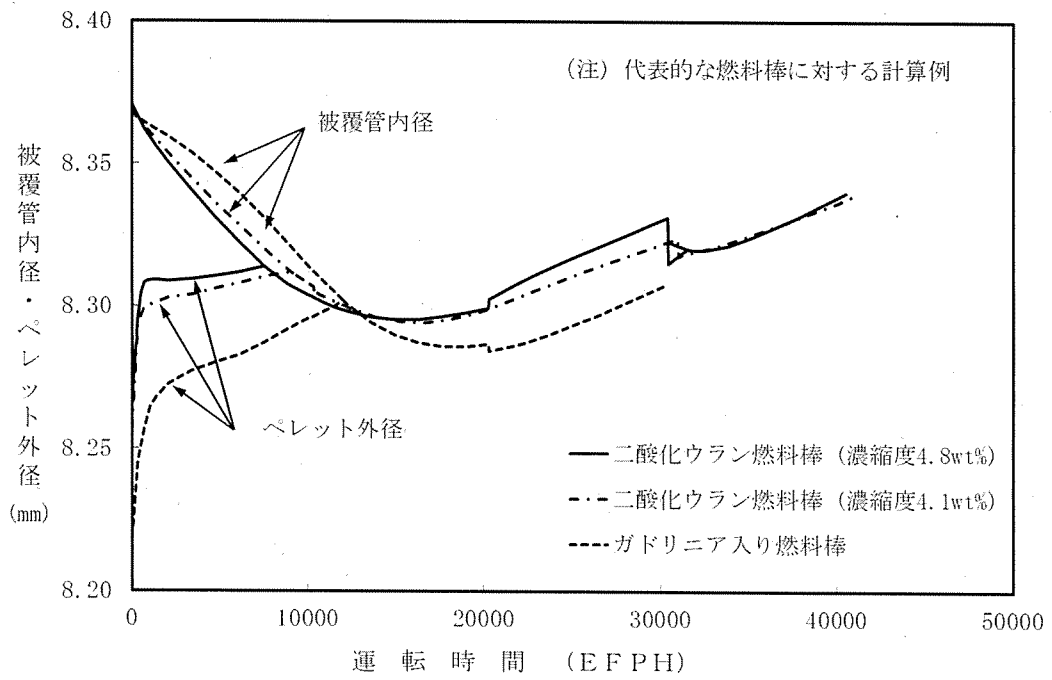
第3-4図 (2) 各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴 (通常運転時)
(二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.1wt%))



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



第 3-5 図 内圧評価上で最も厳しくなる燃料棒の内圧履歴 (通常運転時)



第3-6図 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、燃料スタックの不安定化あるいは、FP ガスの過度な放出・移動、更にはペレットと被覆管の有害な化学反応を引き起こす恐れがある。これらを防ぐため、燃料寿命中の燃料最高温度（燃料中心温度）を燃料の溶融点未満とする。

溶融点は、未照射状態における二酸化ウランペレットに対して 2,800°C、またガドリニア混合二酸化ウランペレットでは 2,700°C 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実性及び燃料中心温度が高くなる方向に影響する主な燃料製造公差に基づく不確実性を基に燃料中心温度の不確実性 220°C 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実性 220°C を考慮し、2,580°C とする。以降燃焼に伴い 10,000MWd/t あたり 32°C 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実性 220°C を考慮し、2,480°C とする。以降燃焼に伴い 10,000MWd/t あたり 32°C の割合で低下するとする。

二酸化ウランペレット（濃縮度 4.8wt%、4.1wt%）については、燃料中心温度の評価が最も厳しくなるのは、燃料中心温度が最高となり、かつ、燃料中心温度と制限値との差が最も小さくなる燃料寿命初期である。この時点の通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における燃料中心温度を第 3-3 表に示す。同表に示されるように、評価上最も厳しい燃料中心温度でも制限値を十分に下回っている。

ガドリニア混合二酸化ウランペレットについては、濃縮度を二酸化ウランペレットより低下させることにより最大線出力密度が二酸化ウラン燃料より低くなるような設計としている。ガドリニウム同位体の中性子吸収効果が減少する効果を考慮した線出力密度が最高となる時期において燃料中心温度が最大となり、かつ制限値に対する余裕が最小となるが第 3-3 表に示すように制限値を十分に下回っている。

第 3-3 表 燃料中心温度評価結果

種類	条件	燃焼度 (MWd/t)	燃料中心温度 (°C)	判定	設計基準 (°C)
二酸化ウラン 燃料棒（濃縮度 4.8wt%）	通常運転時 (41.1kW/m)	0	約 1,690	<	2,580
	運転時の異常 な過渡変化時 (59.1kW/m)		約 2,170		
二酸化ウラン 燃料棒（濃縮度 4.1wt%）	通常運転時 (41.1kW/m)	0	約 1,690	<	2,580
	運転時の異常 な過渡変化時 (59.1kW/m)		約 2,170		
ガドリニア入り 燃料棒	通常運転時 (31.9kW/m)	25,000	約 1,470	<	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、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時点を求め、この時点での内圧を限界内圧とする。

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

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

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第 3-4 表に示す。同表より、種々の不確定因子を考慮しても、燃料棒の内圧は設計基準を満足している。

また、その燃料寿命中の内圧変化は第 3-5 図に示したとおりである。

第 3-4 表 燃料棒内圧評価結果 (通常運転時)

(単位 : MPa[abs])

種類	時期	内圧 ^(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 (濃縮度 4.8wt%)				13.2	≤18.6	0.71
二酸化ウラン 燃料棒 (濃縮度 4.1wt%)				13.0	≤18.6	0.70
ガドリニア入り 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に体積の重みを付けて平均したものである。

被覆管の材料であるジルコニウム基合金の耐力は、高速中性子照射によって増加するが、比較的短時間の照射で飽和する。したがって、燃料寿命初期は未照射の耐力と、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。照射材の設計基準の求め方を第 3-7 図に示す。

燃料寿命初期においては、被覆管とペレット間のギャップにより、被覆管には主に内外圧差による応力が発生するが、その値は小さい。燃焼が進むと被覆管は径方向内向きにクリープ変形（クリープダウン）し、ペレットはスエリングにより外径が増加し、ペレットと被覆管の接触が生じ被覆管応力が大きくなる。通常運転時におけるこのような被覆管とペレットの径変化を第 3-6 図に示す。

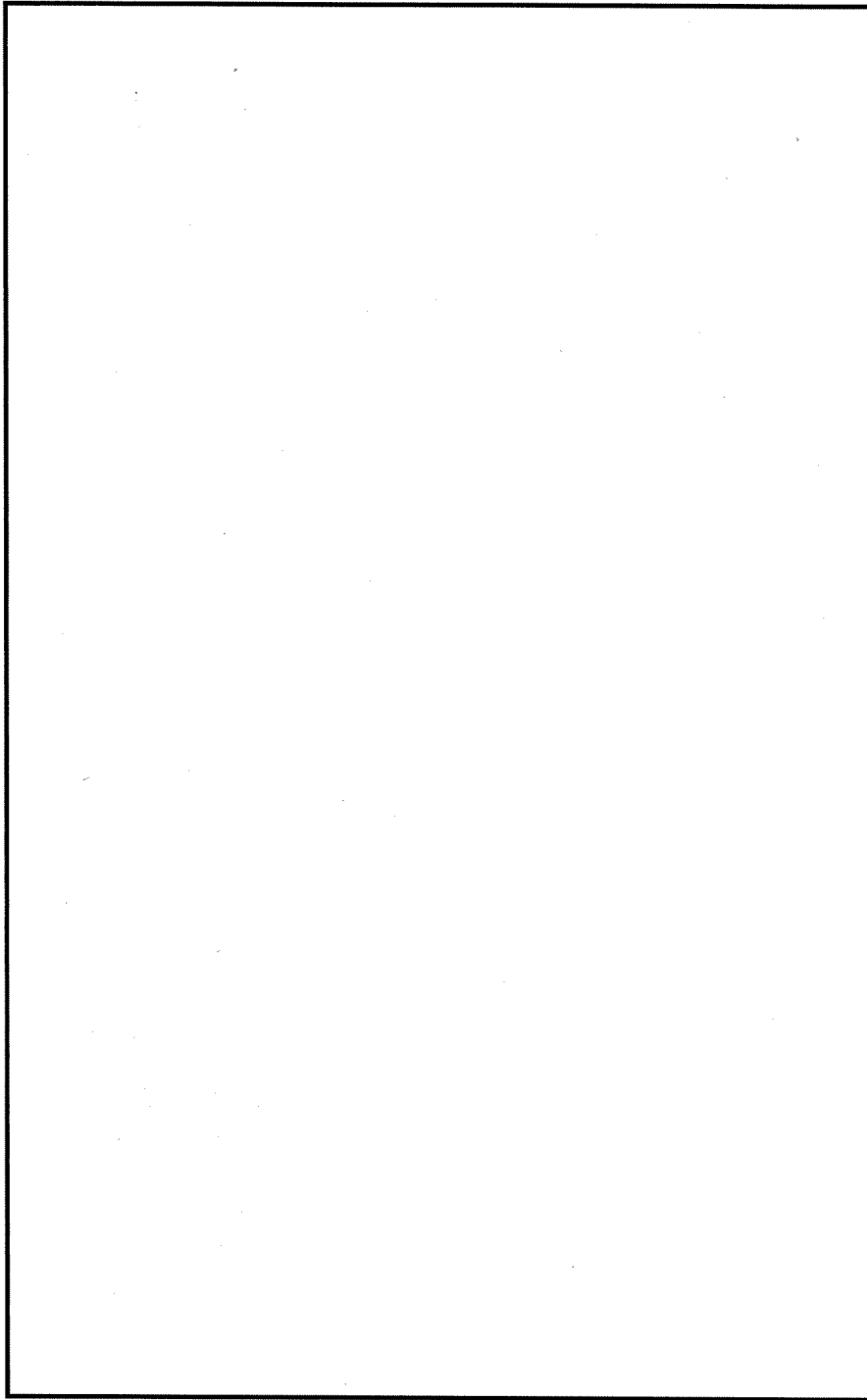
被覆管応力評価では、内外圧差及び接触圧（ペレット－被覆管相互作用）による応力、熱応力、水力振動による応力を考慮する。発生応力が厳しくなる運転時の異常な過渡変化時における評価結果を第 3-5 表及び第 3-8 図に示す。これより二酸化ウラン燃料棒（濃縮度 4.8wt%、4.1wt%）及びガドリニア入り燃料棒での被覆管応力はいずれも設計基準を満足している。

第3-5表 二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア入り燃料棒被覆管応力評価結果

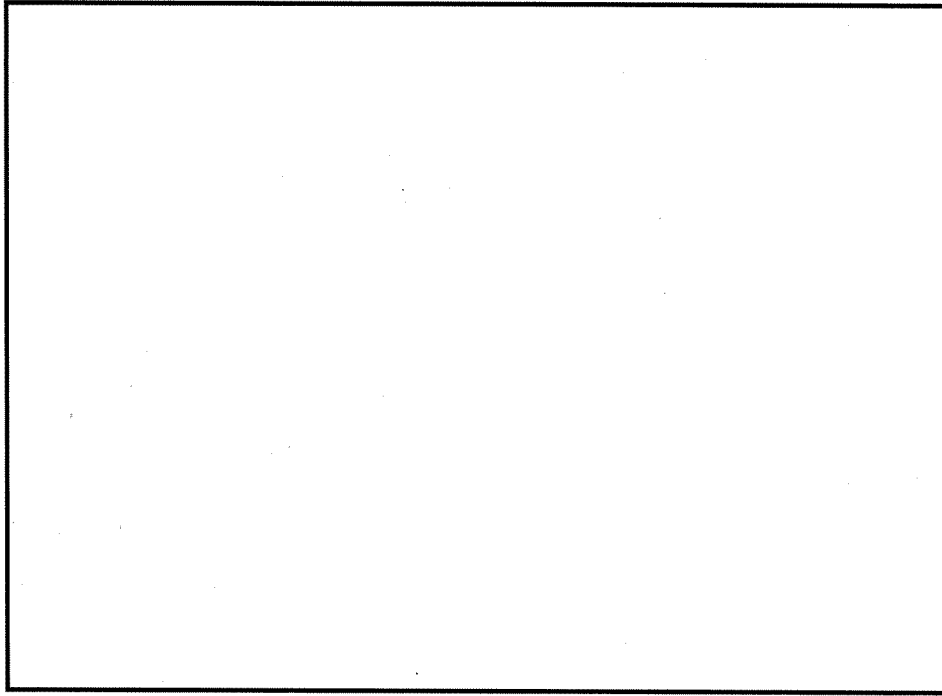
(単位：MPa)

評価条件	運転時の異常な過渡変化時												
	二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.8wt%)				二酸化ウラン燃料棒 (濃縮度 4.1wt%)				ガドリニア入り燃料棒				
	σ_{θ}	σ_r	σ_z		σ_{θ}	σ_r	σ_z		σ_{θ}	σ_r	σ_z		
項目	応力成分												
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 (注1) 1+2+3	内面												
	外面												
評価時点													
体積平均相当応力 (注1)													
設計基準 (被覆管耐力)													
設計比 (注1) (注2)													
0.57													
0.57													
0.49													
0.49													

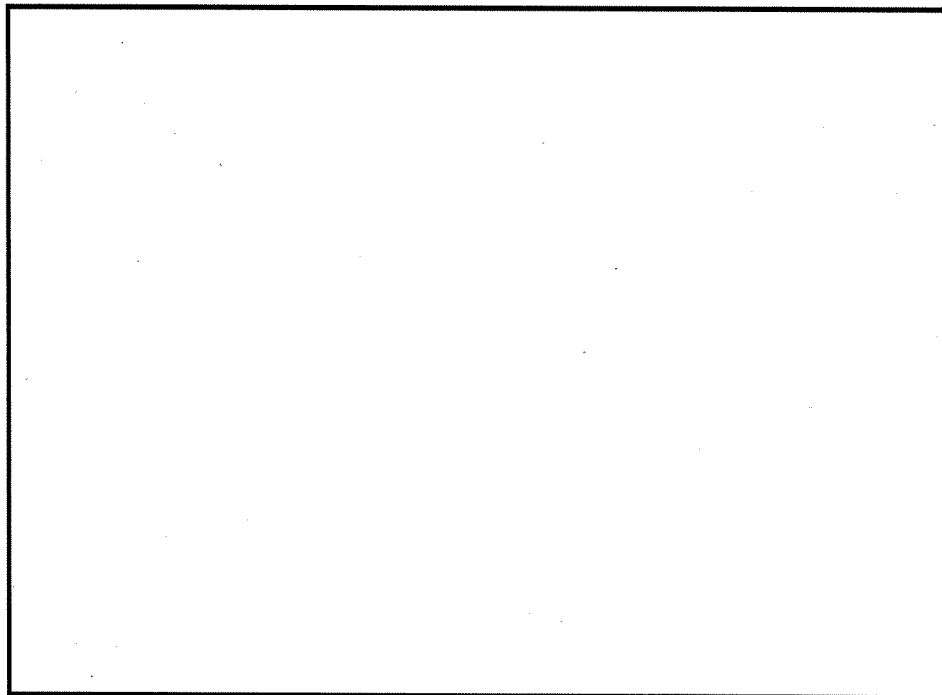
(注1) 上段は水力振動による応力を十方向に、下段は一方向にとったものである。
 (注2) 設計基準 (被覆管耐力) に対する評価値との比である。



第 3-7 図 被覆管の応力評価における設計基準

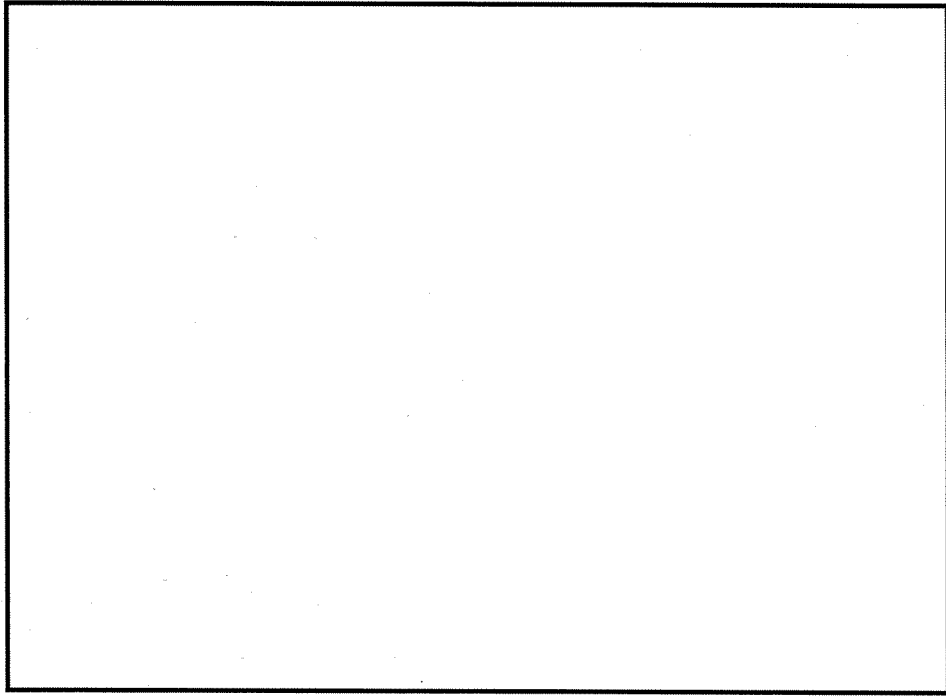


(濃縮度 4.8wt%)



(濃縮度 4.1wt%)

第 3-8 図 (1) 被覆管の応力履歴 (運転時の異常な過渡変化時)
(二酸化ウラン燃料棒)



第3-8図 (2) 被覆管の応力履歴 (運転時の異常な過渡変化時)
(ガドリニア入り燃料棒)

3.3.6 被覆管のひずみ評価結果

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、それ以降はペレットのスエリングにより被覆管の径は増加をはじめ、最終的にはスエリングによる膨張速度と接触圧及び内圧によるクリープ速度が釣り合った状態で、径が徐々に増加する（第3-6図参照）。

通常運転時でのペレットのスエリングによる被覆管ひずみの増加は接触してから燃料寿命末期までのひずみ増加率が小さく、このような場合、被覆管は10%以上のひずみ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。

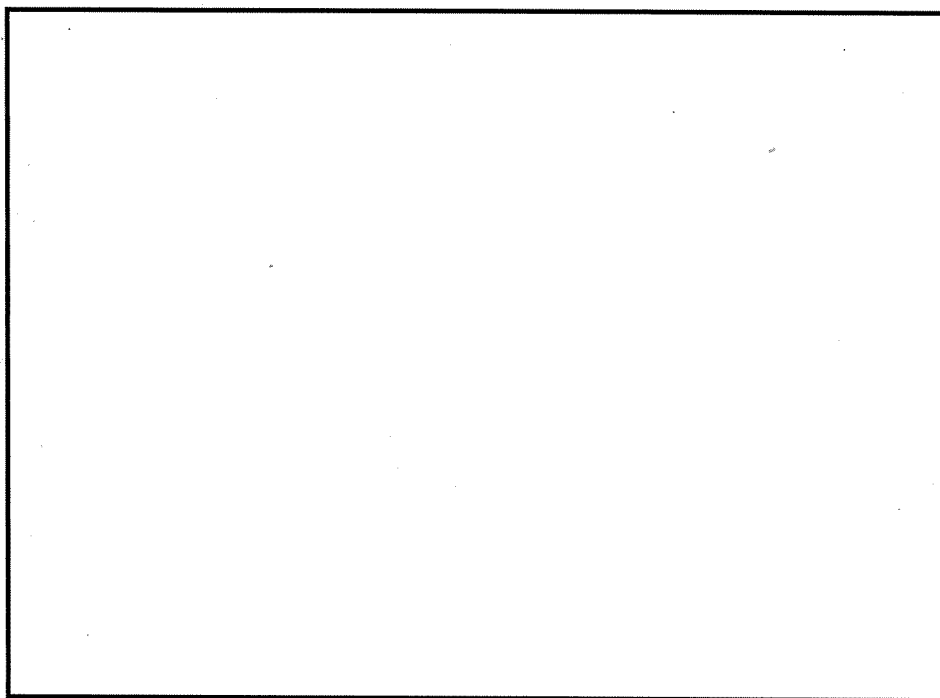
これに対して、運転時の異常な過渡変化時には、被覆管にはペレットと被覆管の接触後に引張ひずみが発生する。このため、応力評価と同様にペレットと被覆管の接触後引張ひずみは大きくなる。運転時の異常な過渡変化時における被覆管引張ひずみの変化量は、第3-6表及び第3-9図に示すとおり二酸化ウラン燃料棒（濃縮度4.8wt%、4.1wt%）及びガドリニア入り燃料棒ともに設計基準1%以下を満足している。

第 3-6 表 運転時の異常な過渡変化時の引張ひずみ評価結果

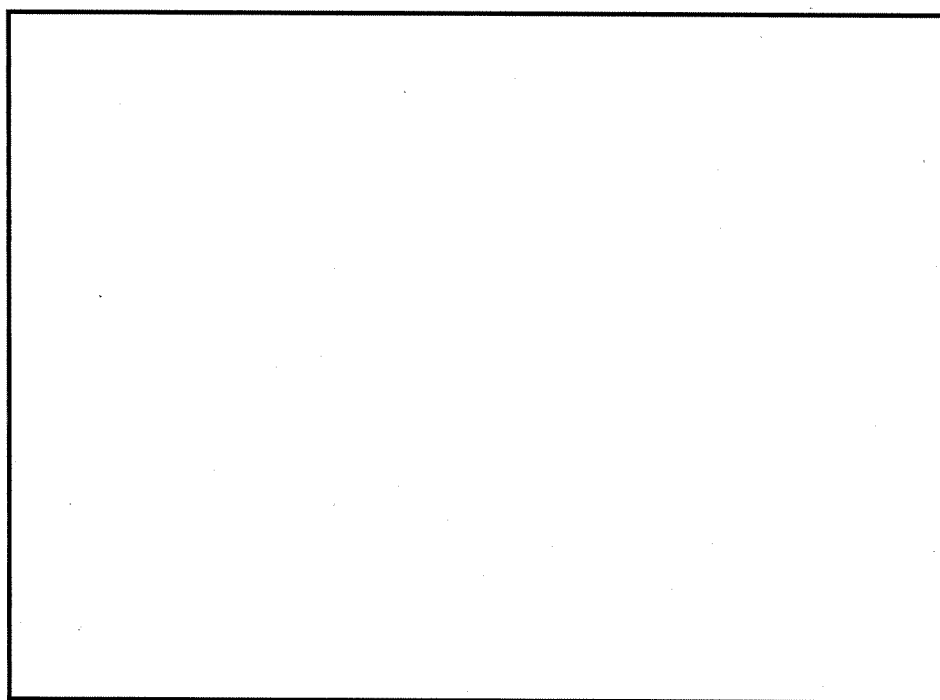
(単位：%)

種類	時期	ひずみ	設計基準	設計比 ^(注1)
二酸化ウラン 燃料棒（濃縮度 4.8wt%）		0.26	≦1	0.26
二酸化ウラン 燃料棒（濃縮度 4.1wt%）		0.23	≦1	0.23
ガドリニア入り 燃料棒		0.23	≦1	0.23

(注1) 設計基準値に対する評価値の比である。



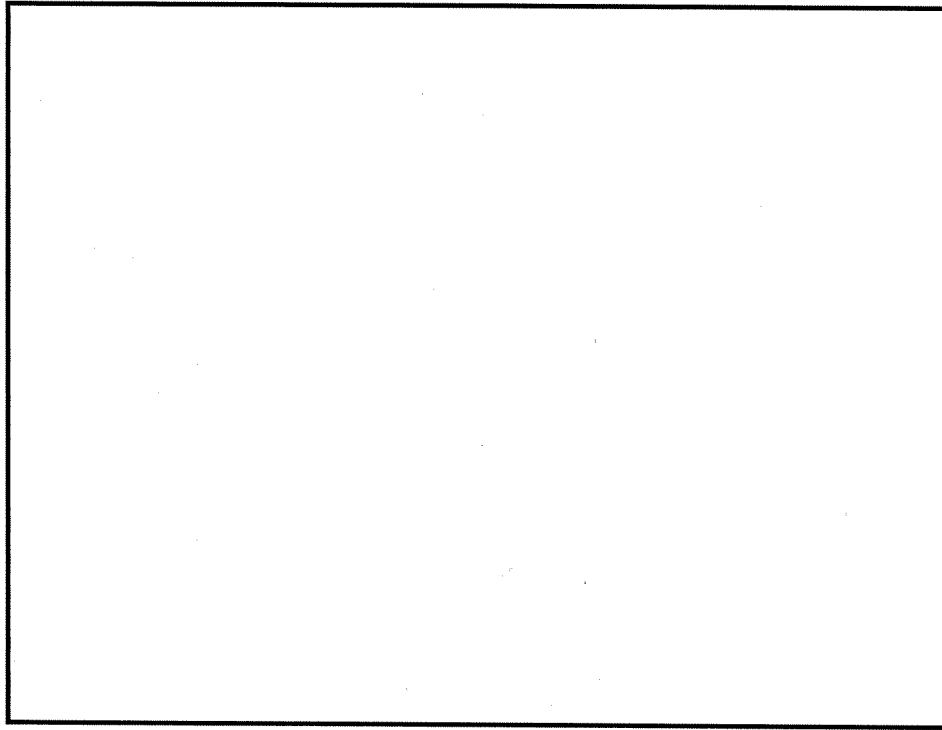
(濃縮度 4.8wt%)



(濃縮度 4.1wt%)

第3-9図 (1) 被覆管のひずみ履歴 (運転時の異常な過渡変化時)

(二酸化ウラン燃料棒)



第 3-9 図 (2) 被覆管のひずみ履歴 (運転時の異常な過渡変化時)
(ガドリニア入り燃料棒)

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サイクルあたり□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サイクルあたり□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サイクルあたり□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、燃焼サイクル毎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-被覆管相互作用）及び熱応力を考慮している。過渡変化毎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毎に求めた設計許容繰返し数 N_1 、 N_2 、……とそれに対応する応力の繰返し数 n_1 、 n_2 、……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 に関する第 3-10 図に示す 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

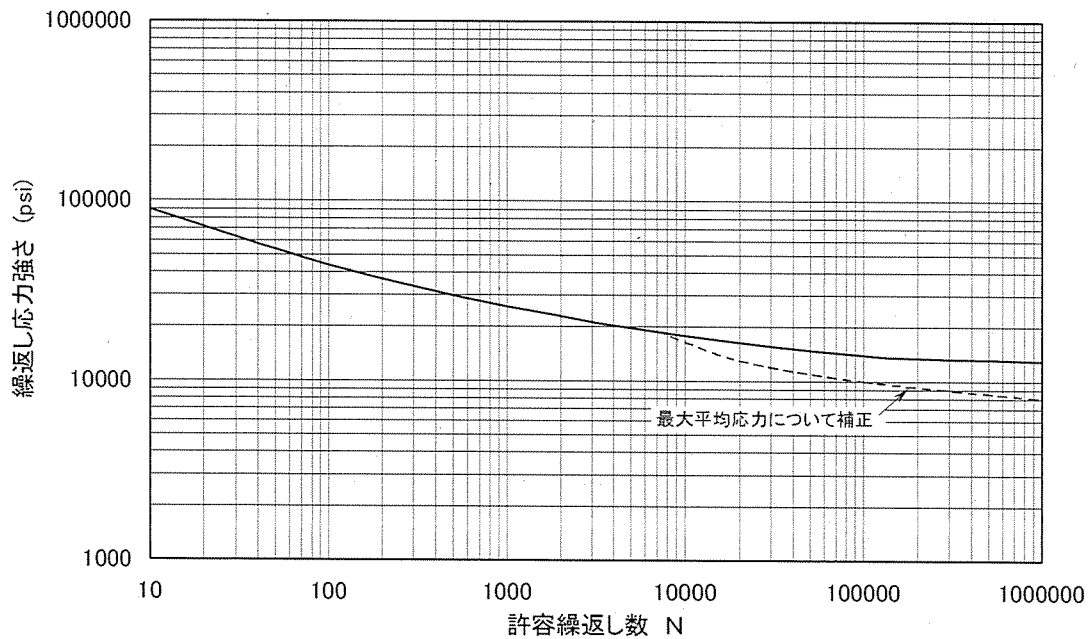
各事象に対する損傷係数を合計した結果を第 3-7 表に示すが、二酸化ウラン燃料棒(濃縮度 4.8wt%、4.1wt%)及びガドリニア入り燃料棒ともに設計基準 100%を満足している。

第3-7表 被覆管の疲労評価結果

(単位：%)

種類	位置	累積疲労損傷係数	設計基準	設計比 ^(注1)
二酸化ウラン 燃料棒 (濃縮度 4.8wt%)	内面	8.2	≦100	0.09
	外面	3.5		0.04
二酸化ウラン 燃料棒 (濃縮度 4.1wt%)	内面	4.4	≦100	0.05
	外面	2.1		0.03
ガドリニア入り 燃料棒	内面	3.0	≦100	0.03
	外面	1.4		0.02

(注1) 設計基準値に対する評価値の比である。



第3-10図 NDA 被覆管の設計疲労曲線⁽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、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併せて第 3-11 図に示す。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。

第 3-11 図に示すように、本燃料集合体は過度の燃料棒曲がりは発生しない。したがって、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、制御棒案内シンプルに発生する照射クリープ伸びが永久変形となることによって、更に燃料集合体の伸びが増加する。したがって、燃料集合体の伸びは炉心板と燃料集合体が干渉しないように制限する必要がある。

燃料集合体の伸びについて、実績を第 3-12 図に示す。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。したがって、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。

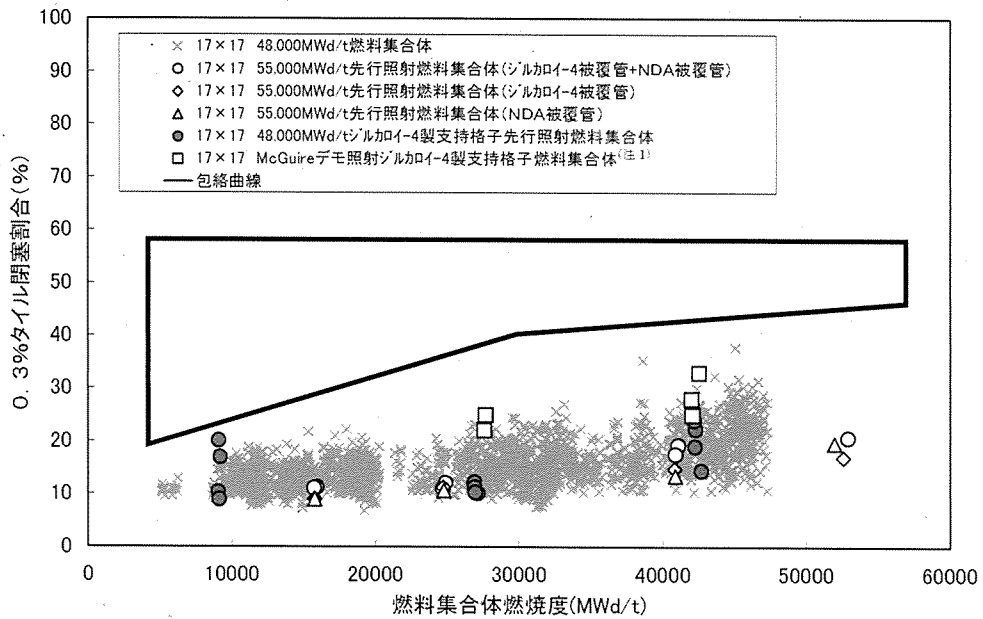
b. 燃料棒と上部及び下部ノズルの間隔

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

トータルギャップの減少量について、実績を第3-13図に示す。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集合体はジルカロイ-4被覆管を採用する燃料集合体と比べ、トータルギャップの減少量が小さくなることが認められる。

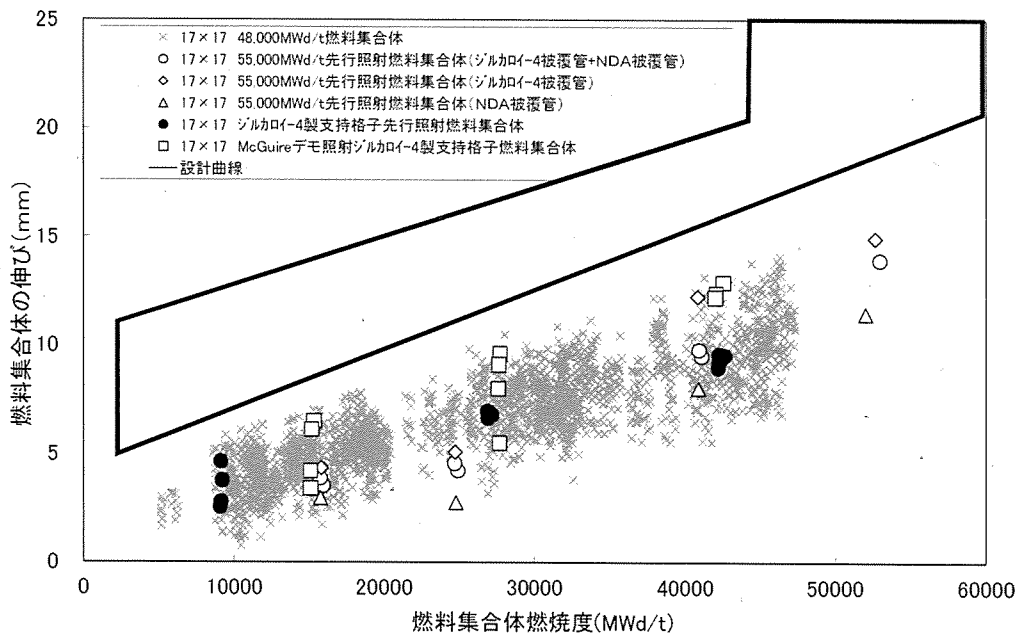
設計においては、61,000Mwd/t(燃料集合体で55,000Mwd/tに相当)までの燃料棒の伸びを考慮してもトータルギャップが閉塞することのないように、製造時の燃料棒と上部ノズルとの軸方向ギャップを設定している。

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。

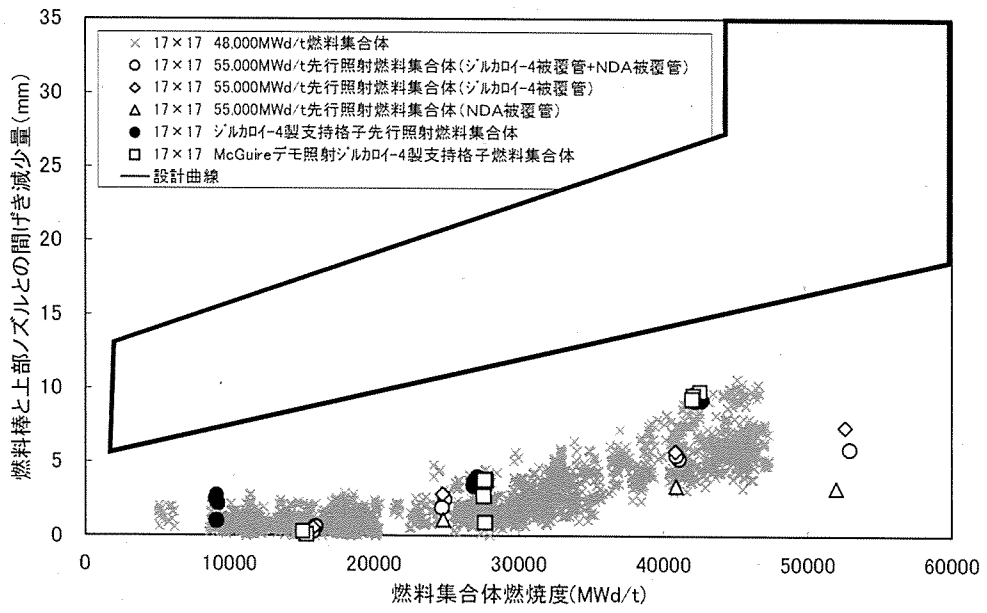


(注1) McGuire デモ照射ジルカロイ-4 製支持格子燃料の段数は8段であり、国内向け燃料よりも1段少ない。

第3-11 図 燃料棒間隔の閉塞割合⁽⁴⁾



第3-12 図 燃料集合体の伸び⁽⁴⁾



第 3-13 図 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、したがって、NDA 被覆管の腐食モデル式は第 3-8 表に示すジルカロイ-4 被覆管のモデル式と同様とする。ここで NDA 被覆管の腐食特性（原子炉外腐食試験、腐食速度比から低 Sn ジルカロイ-4 に対して改良効果約 20%）を考慮した。NDA 被覆管の原子炉内腐食量については、実測値と予測値を第 3-14 図に比較した。第 3-14 図に示すとおり、被覆管腐食モデルは実測値を適切に予測していることから、高燃焼度用 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 被覆管の原子炉内水素吸収量の実測値と予測値を第 3-15 図に示す。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。第 3-15 図に示すとおり、水素吸収モデルは実測値を適切に予測していることから、高燃焼度用 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、原子炉内滞在中に生じる腐食による被覆管肉厚の最大減肉量を高燃焼度用 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、原子炉外試験及び照射試験により延性が確保されていることが確認できる約 800ppm 以下である。

(注 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

第 3-8 表 腐食評価式

遷移領域前

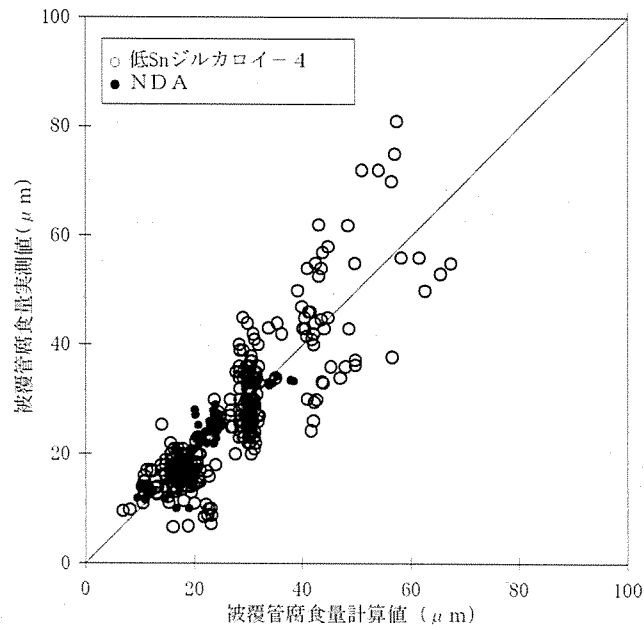
$$(dS^n / dt) = A \exp(-Q_1 / RT)$$

遷移領域後

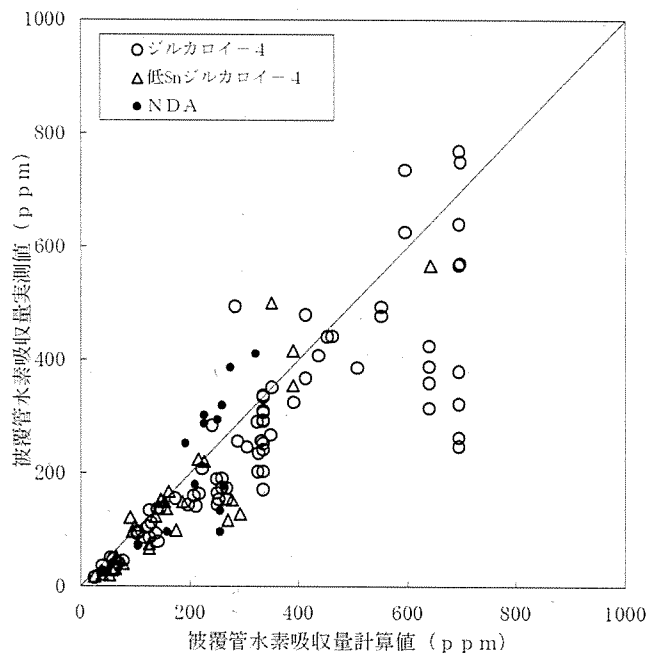
$$(dS / dt) = B \exp(-Q_2 / RT)$$

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



第3-14 図 被覆管腐食量（最大酸化膜厚）の実測値と予測値の比較



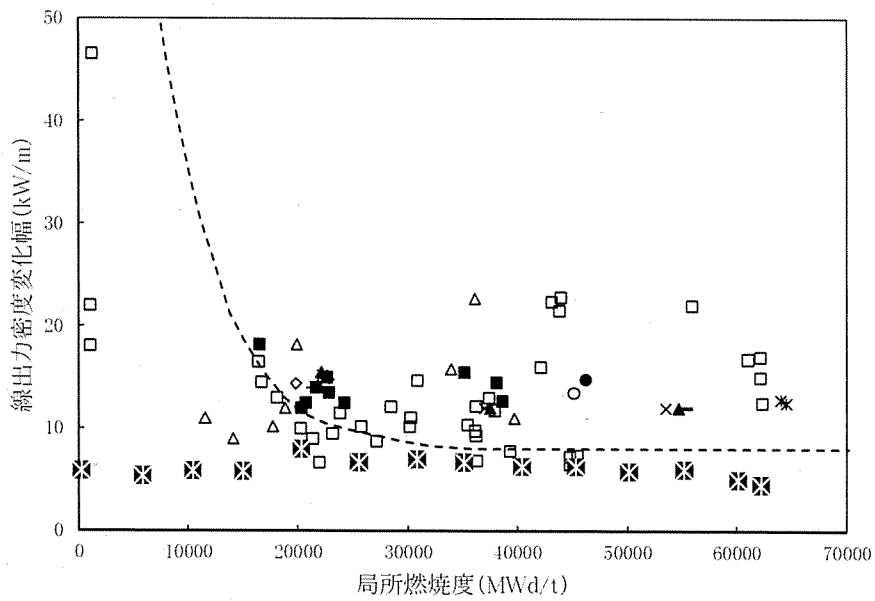
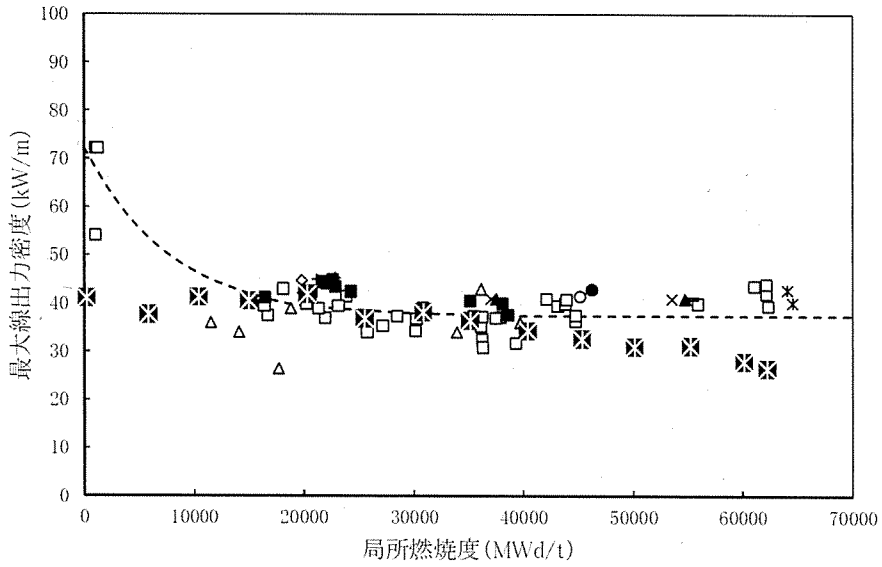
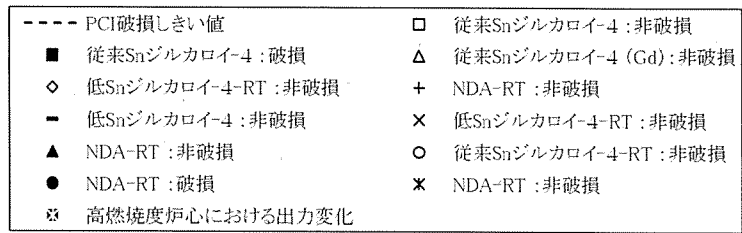
第3-15 図 被覆管水素吸収量の実測値と予測値の比較

(4) PCI 評価

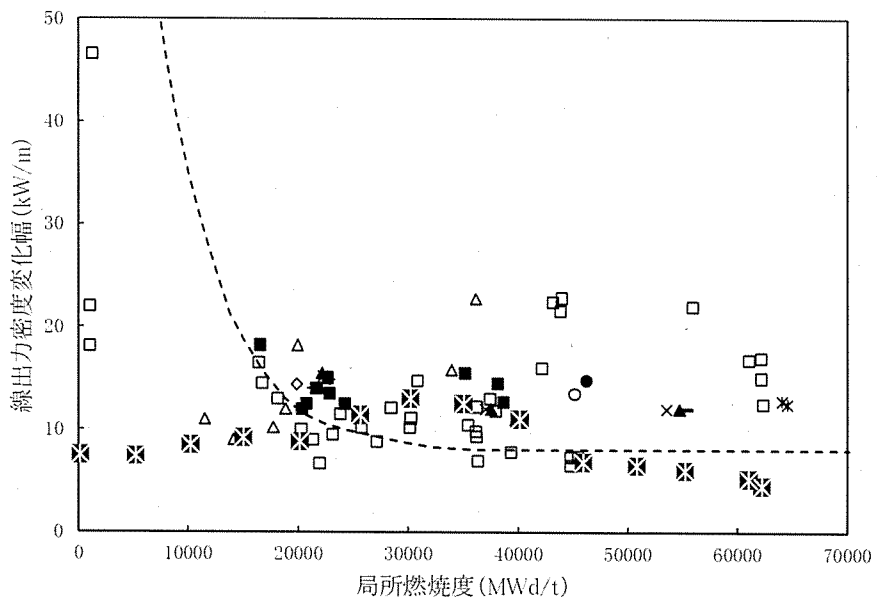
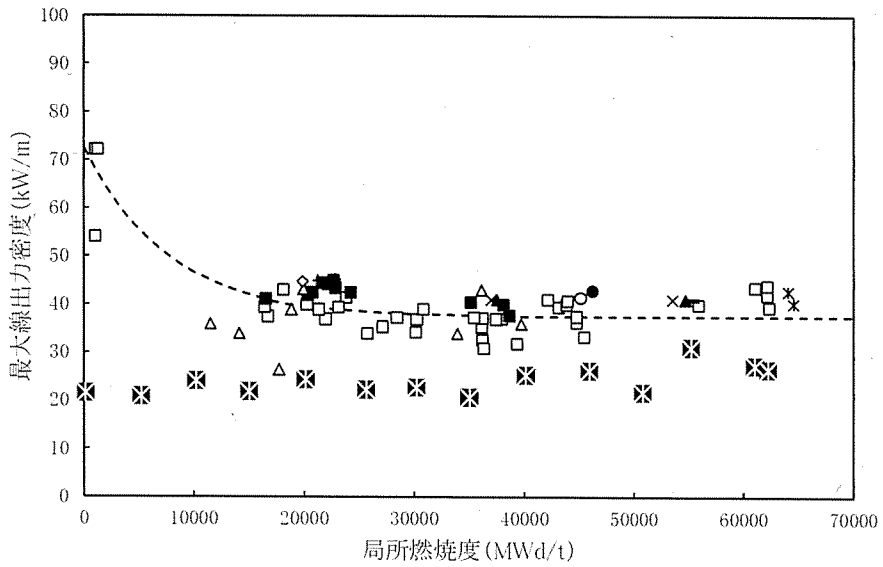
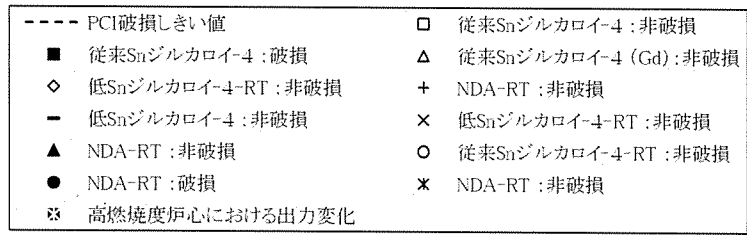
NDA 被覆管の出力ランプ試験データを第 3-16 図に示す。被覆管の PCI 破損限界は、高燃焼度領域まで PCI 破損しきい値以上であることが確認でき、NDA 被覆管に対して安全側に PCI 破損しきい値が適用できる。

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。

第 3-16 図に示したとおり、運転時の異常な過渡変化時の出力は、PCI 破損しきい値以下であり、PCI 破損は発生しない。また、ガドリニア入り燃料棒では出力が高くないように、濃縮度を低下させているので PCI 破損は生じない。



第3-16図 (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)



第3-16図 (2) 被覆管の出カランプ試験結果
(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ペレットに大きな焼きしまりが生じると、ペレットスタックの一部に軸方向のギャップが生じる可能性がある。その位置で1次冷却材圧力による被覆管の外圧クリープで偏平化し、座屈して破損に至る現象をクリープコラプスという。

初期のPWR燃料で発生したクリープコラプスについては、ヘリウム加圧の採用、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」という。）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原子炉外の流水試験で分かっている。したがって、燃料寿命中燃料棒と支持格子が接触していれば良い。第3-17図⁽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

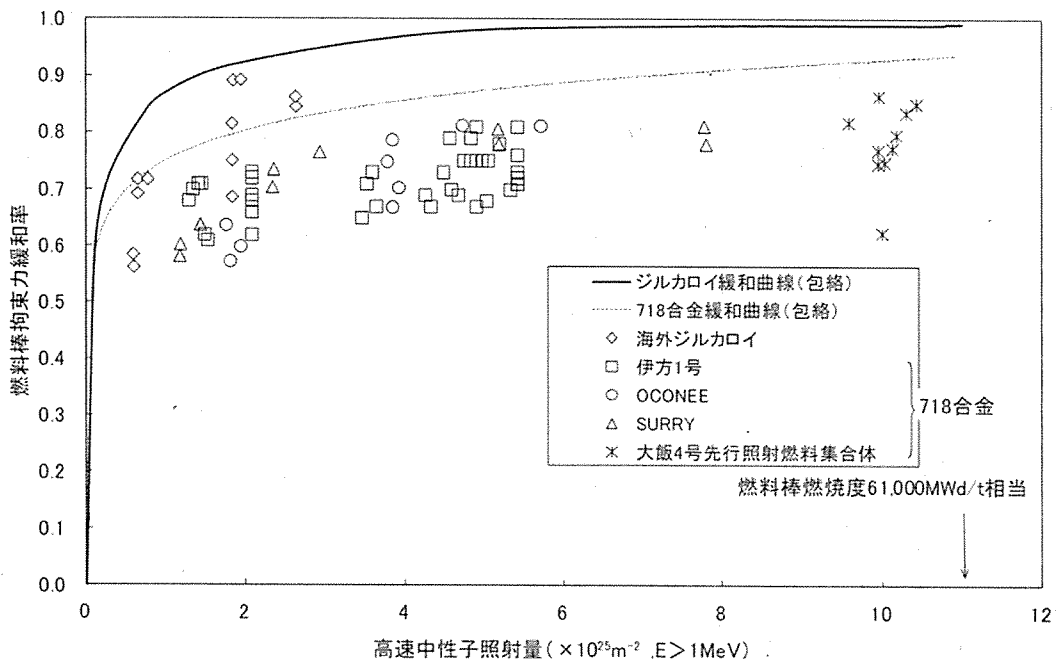
ジルカロイ-4製支持格子の拘束力緩和データを、718合金製支持格子データと併せて第3-17図に示す。同図から、ジルカロイ-4製支持格子の拘束力緩和が大きいことが確認できる。しかし、718合金製支持格子で確認したように、拘束力緩和は燃料寿命末期において飽和することを考えると、ジルカロイ-4製支持格子の場合でも、燃料寿命末期まで支持格子拘束力緩和率が1を超える（非接触となる）ことはないと考えられる。

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、フレット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、フレットング摩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、原子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、フレットング摩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 被覆管のフレットング摩耗はジルカロイ-4 被覆管と同等である。



第3-17図 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、燃料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第 4-1 表及び第 4-2 表に示す。

なお、これらの基準は、原子力規制委員会規則「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(平成 25 年 6 月 28 日原子力規制委員会規則第 5 号)」、技術基準規則及び原子炉安全専門審査会内規「加圧水型原子炉に用いられる 17 行 17 列型の燃料集合体について(昭和 51 年 2 月 16 日)」に記載されている考え方に基づいている。

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

第 4-1 表 燃料輸送及び取扱い時の燃料集合体の評価項目

(軸方向荷重に対する評価、設計荷重=6G)

構成部品	考慮点	材料	応力 ^(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 鋳鋼	$P_L + P_b$	1.5Sm
上部ノズルー 制御棒案内シン ブル結合部	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
支持格子ー 制御棒案内シン ブル結合部	荷重分布を考慮し、拡管部の強度評価を行う。 ^(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 ブル	荷重分布を考慮し、応力評価を行う。	ジルカロイ-4	P_m	Sm

(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。但し、ジルカロイ-4 については、0.2% 耐力の 2/3 あるいは引張強さの 1/3 のいずれか小さい方)

(注2) 上部支持格子ー制御棒案内シンブル結合部は拡管結合であり、下部支持格子ー制御棒案内シンブ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、上部支持格子ー制御棒案内シンブル結合部を評価する (添付 2 参照)。

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

構成部品	考慮点	材料	応力 ^(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	ステンレス鋼鋳鋼	$P_L + P_b$	1.5Sm
制御棒案内シン ブル	スクラム時の衝 撃力	ジルカロイ-4	P_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。但し、ジルカロイ-4 については、0.2% 耐力の 2/3 あるいは引張強さの 1/3 のいずれか小さい方)

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

- ・ 支持格子と燃料棒がすべることにより、燃料棒と制御棒案内シンの熱膨張差、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。
- ・ 制御棒案内シンはジルカロイ-4 材であり、一般原子炉機器で採用されているステンレス鋼に比べクリープしやすく応力緩和すること。

4.2 燃料集合体強度評価方法

4.1 項で述べた設計基準に従って強度評価を行う。以下にこれら評価方法の概要を述べる。
また第 4-1 図に燃料集合体強度評価フロー図を示す。

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

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

また、燃料集合体は照射により全長が伸びるため、上部ノズル押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。

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第 4-2 図に示す。

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

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

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

(1) 上部及び下部ノズルの応力評価

上部ノズルは、燃料輸送及び取扱い時で、上述のように荷重の加わり方が異なるため、それぞれの荷重条件を考慮し、有限要素法にて最大応力を NASTRAN コードを用いて評価する。

一方、下部ノズルには、燃料輸送及び取扱い時ともに、圧縮荷重が加わるので、そのときの最大応力を NASTRAN コードを用いて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) 支持格子ー制御棒案内シンプル結合部強度評価

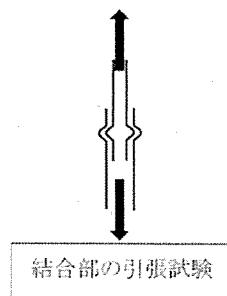
支持格子ー制御棒案内シンプル結合部は、制御棒案内シンプルと燃料棒に荷重が分担されるが、保守的に支持格子ー制御棒案内シンプル結合部がすべての荷重を受けた際の、1本あたりに作用する荷重を NASTRAN コードを用いて評価する。支持格子ー制御棒案内シンプル結合部は、応力強さで評価することは困難であるため、試験により1本あたりの許容荷重^(注2)を求めており、この許容値と比較して弾性限界荷重を超えないことを確認する。

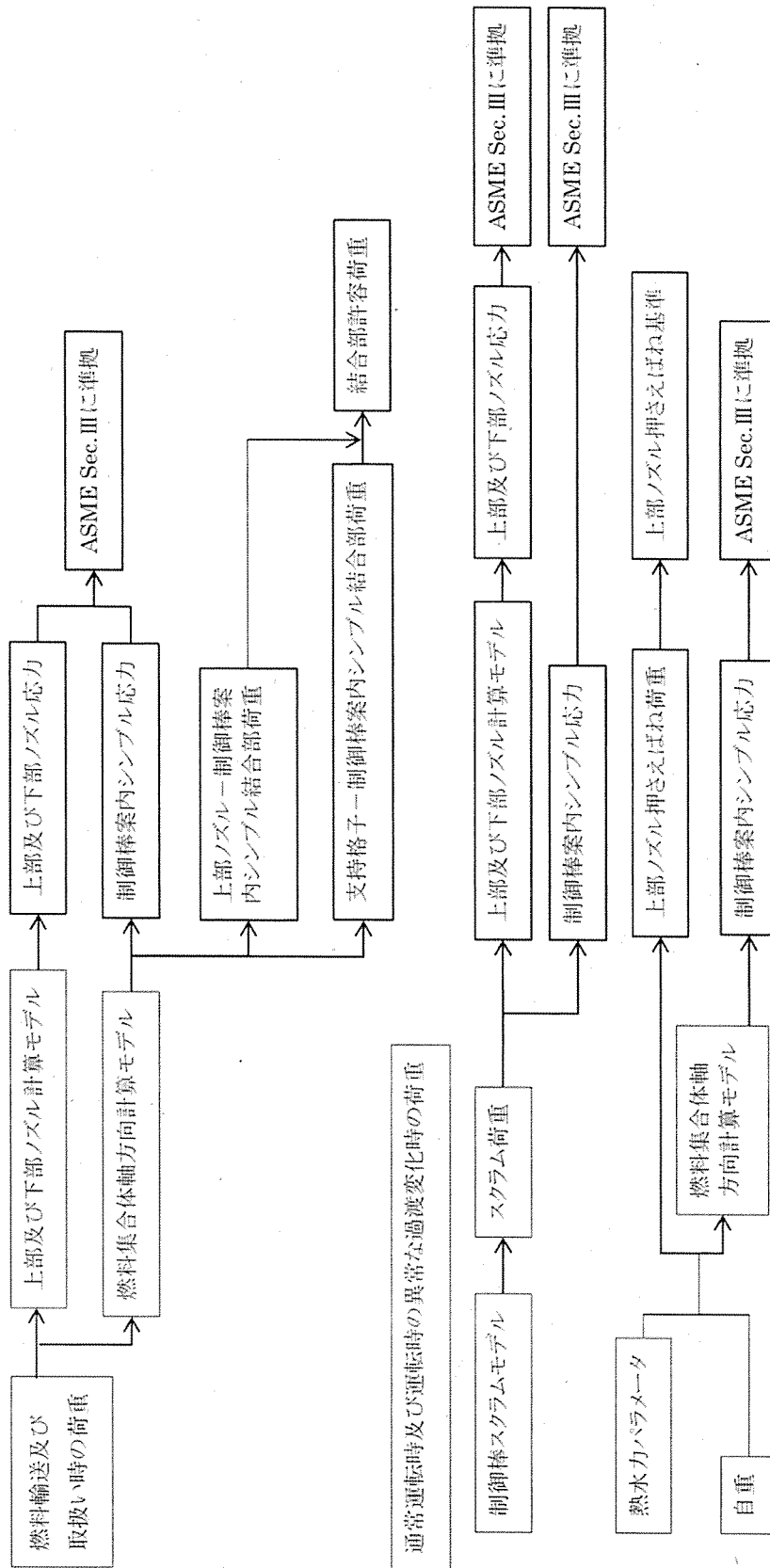
(4) 制御棒案内シンプル応力評価

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。

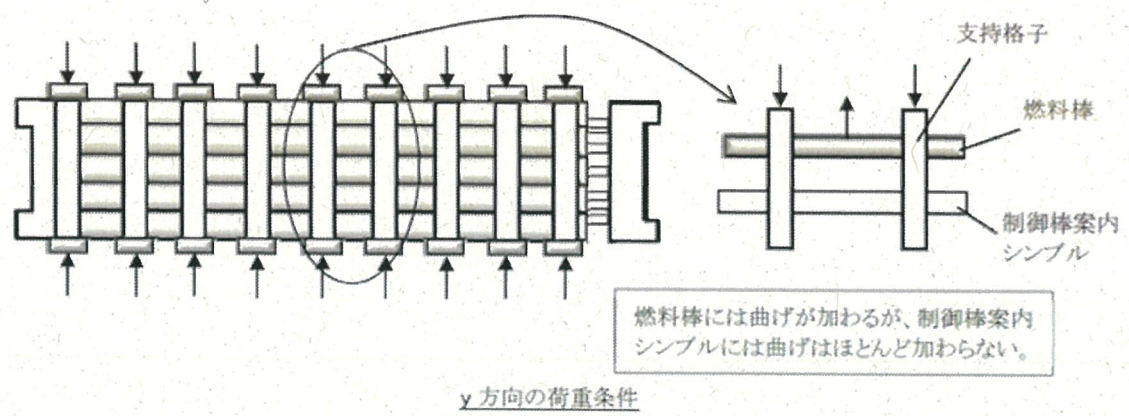
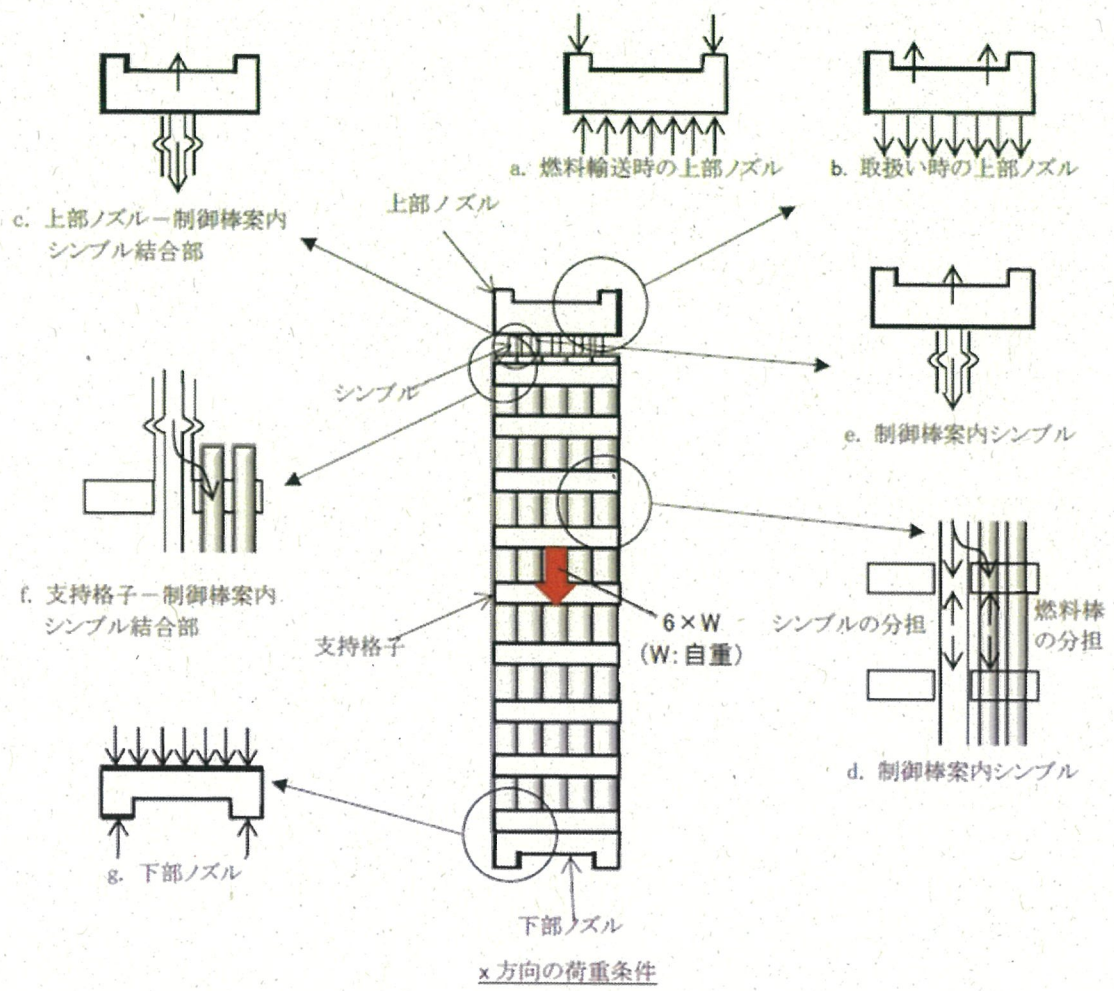
(注1) ネジ部の有効断面積は約 \square mm² であり、制御棒案内シンプルの管断面積約 \square mm² より大きい(添付3参照)。

(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)。





第4-1図 燃料集合体強度評価フロー図



第 4-2 図 燃料集合体にかかる荷重

4.2.2 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における評価方法

(1) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における応力評価

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

スクラム時の荷重としては、

a. ダッシュポット部^(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。

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

なお、燃料寿命中にスクラムが□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□%、制御棒案内シンプルで□%程度であり、疲労に与える影響は小さい。

(注1) 制御棒案内シンプ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。

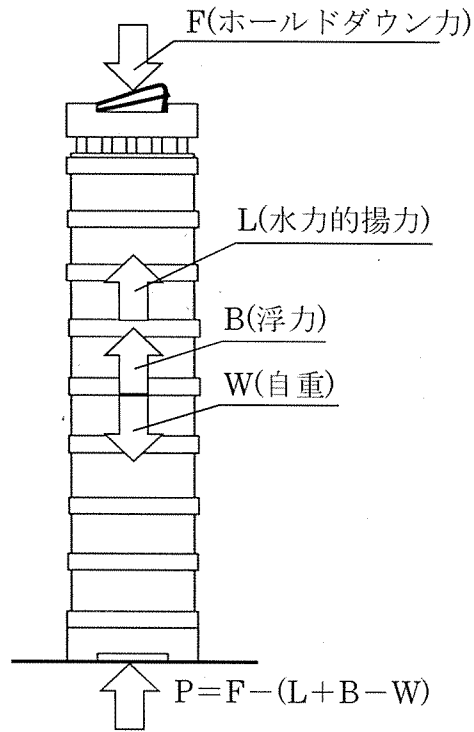
- a. 機械設計流量に対して、燃料集合体の浮き上がりを防止する。
- b. 運転時の異常な過渡変化時の事象であるポンプオーバースピード^(注1)条件で、上部ノズル押さえばねの塑性変形は進行しない。

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。

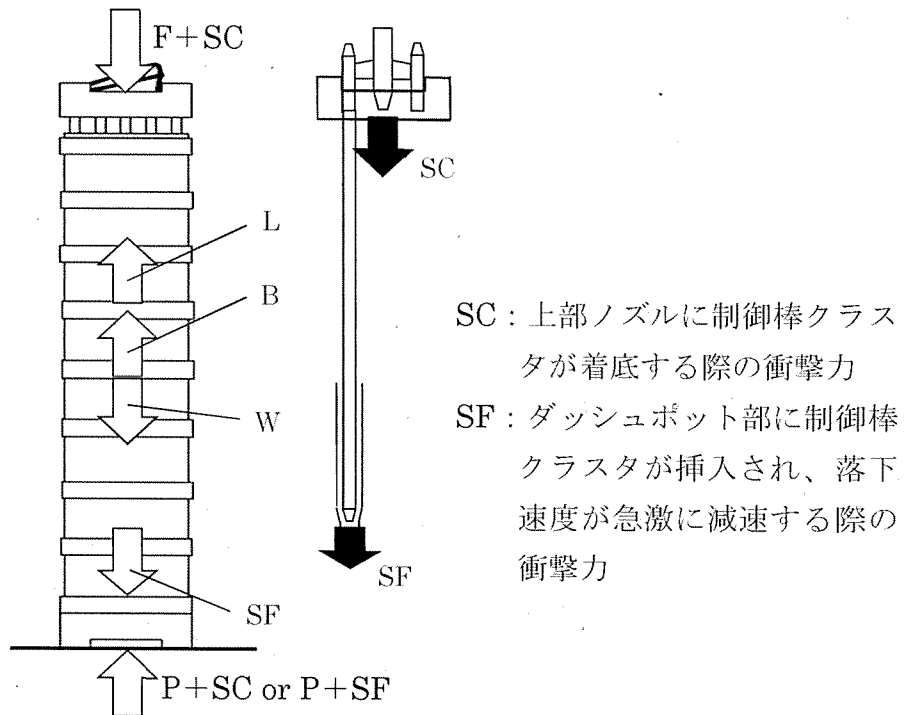
運転時の異常な過渡変化時の事象であるポンプオーバースピード条件下では、

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



第 4-3 図 通常運転時荷重



第 4-4 図 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時荷重

4.3 強度評価結果

4.3.1 燃料輸送及び取扱い時における評価結果

(1) 上部及び下部ノズルの応力評価

第 4-3 表に上部及び下部ノズルに生じる最大応力と許容応力を示す。上部ノズルの最大応力は上部ノズル外周部で発生し、下部ノズルの最大応力は下部ノズル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プル結合部強度評価

上部ノズルと制御棒案内シンプルの結合は、ネジ構造により行われているため、制御棒案内シンプ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、制御棒案内シンプ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プルに発生する応力より小さくなる。

したがって、ノズルー制御棒案内シンプル結合部は、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プル結合部強度評価

第 4-3 表に結合部に生じる最大荷重と許容荷重を示す。最大荷重は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) 制御棒案内シンプル応力評価

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

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 \square MPa と耐力 (約 310MPa) に比べ十分に小さい。また、支持格子のばねに作用する荷重は約 \square 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 \square N であるので、支持格子のばねに永久変形が生じることはなく、保持機能は確保される。

第 4-3 表 燃料輸送及び取扱い時の荷重における評価結果

(単位 : MPa)

構成部品	最大応力	許容応力	設計比 ^(注3)
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1)	<input type="text"/> ^(注2)	0.67 ^(注4)
制御棒案内シンプル	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0.89

(注 1) 最大荷重(N)

(注 2) 許容荷重(N)

(注 3) 許容応力値に対する最大応力値の比である。

(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第 4-4 表に示す。ここから分かるとおり、最大応力は許容応力よりも小さい。

b. 下部ノズル

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

c. 制御棒案内シンプル

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

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

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

(2) 上部ノズル押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第 4-5 表に示す。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 () では、燃料集合体は浮き上がるものの、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。

種々の条件下における上部ノズル押さえばねの挙動を添付 4 に示す

第 4-4 表 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の応力評価結果

(単位 : MPa)

	最大応力	許容応力	設計比 ^(注1)
上部ノズル	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.31
下部ノズル ^(注2)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.15
制御棒案内シンプル ^(注2) ダッシュポット部	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.48
制御棒案内シンプル ^(注3) ダッシュポット部	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.14

(注 1) 許容応力値に対する最大応力値の比である。

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

(注 3) 制御棒案内シンプルに対する通常運転時の応力。

第 4-5 表 上部ノズル押さえばね評価結果

(単位：N)

	上部ノズル押さえばねに要求される力 ^(注1)	上部ノズル押さえばね力	評価	^(注2) 設計比
低温起動時	<input type="text"/>	<input type="text"/>	浮き上がらない。	0.58
高温全出力時	<input type="text"/>	<input type="text"/>	浮き上がらない。	0.43
ポンプオーバー スピード時 (高温)	<input type="text"/>	—	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. Kreyns 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/40年 ≒ 24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-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-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-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-制御棒案内シンプル結合部を評価する。

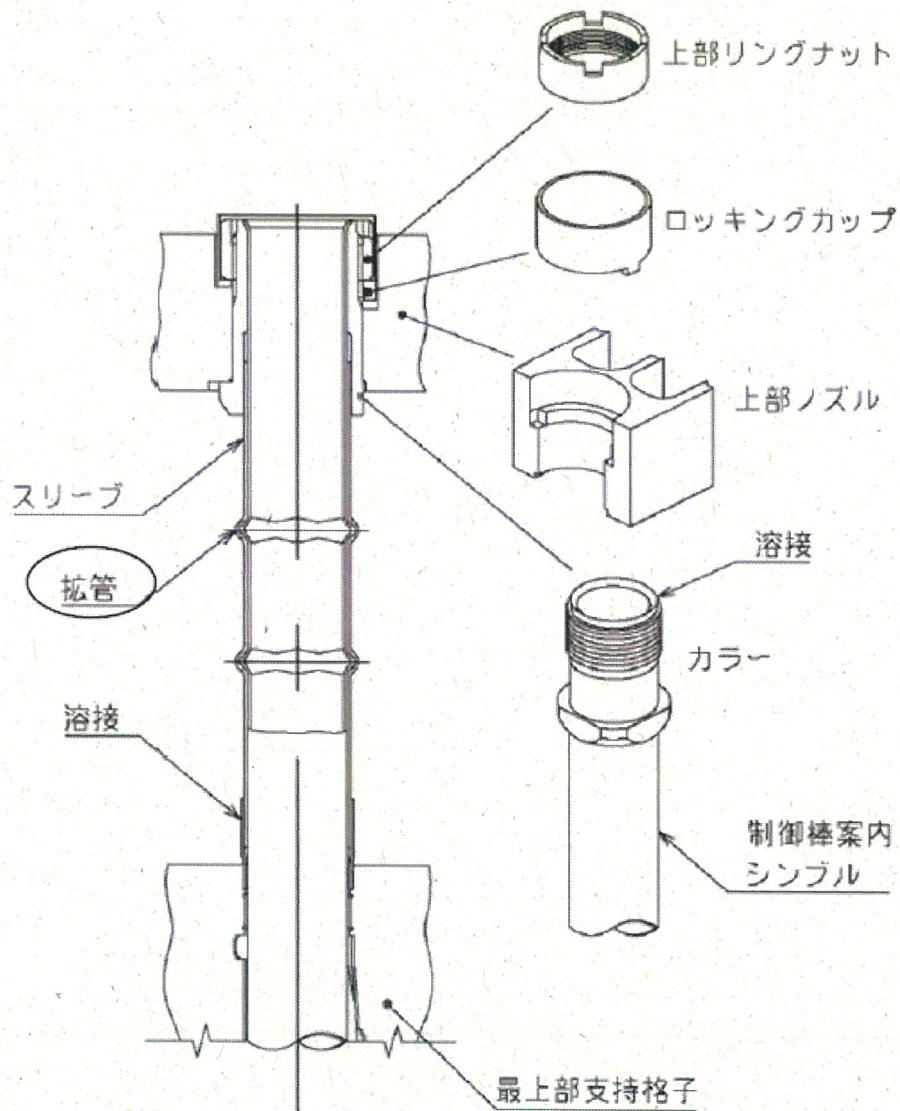


図1 上部支持格子-制御棒案内シンプル結合部の拡管結合

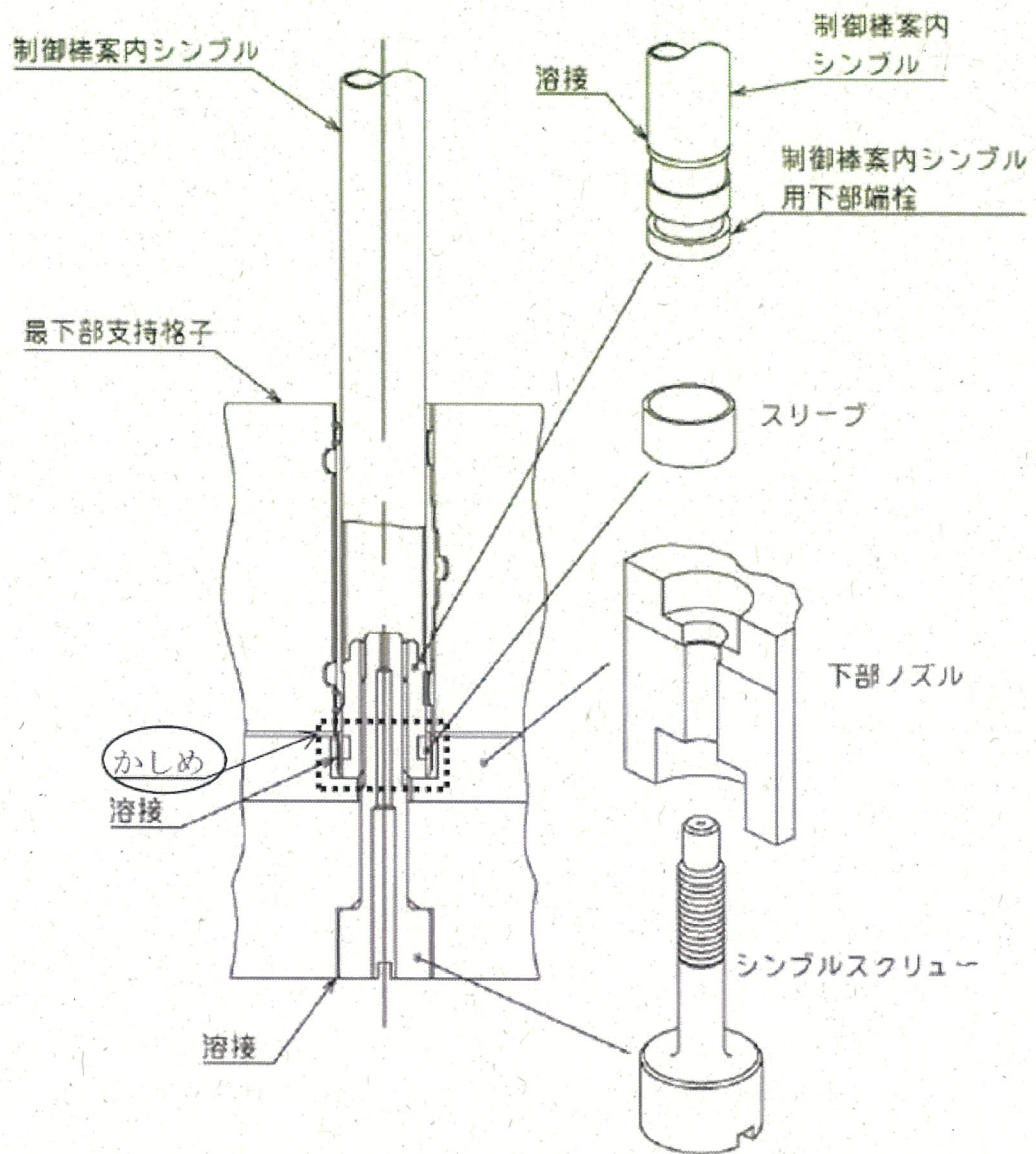


図2 下部支持格子ー制御棒案内シンプル結合部のスリーブを下部端栓の溝にかしめている

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□mm²である。また、制御棒案内シンプルの管断面積は約□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。

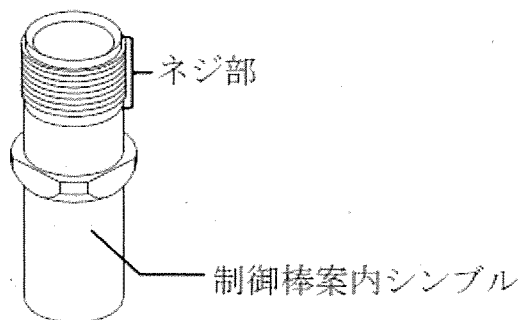


図1 上部ノズル制御棒案内シンプル結合部のネジ部

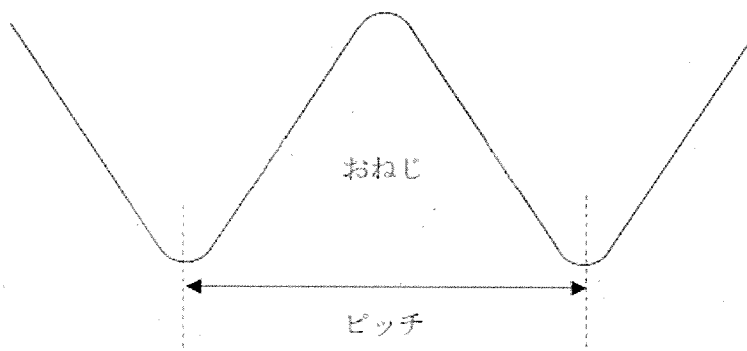
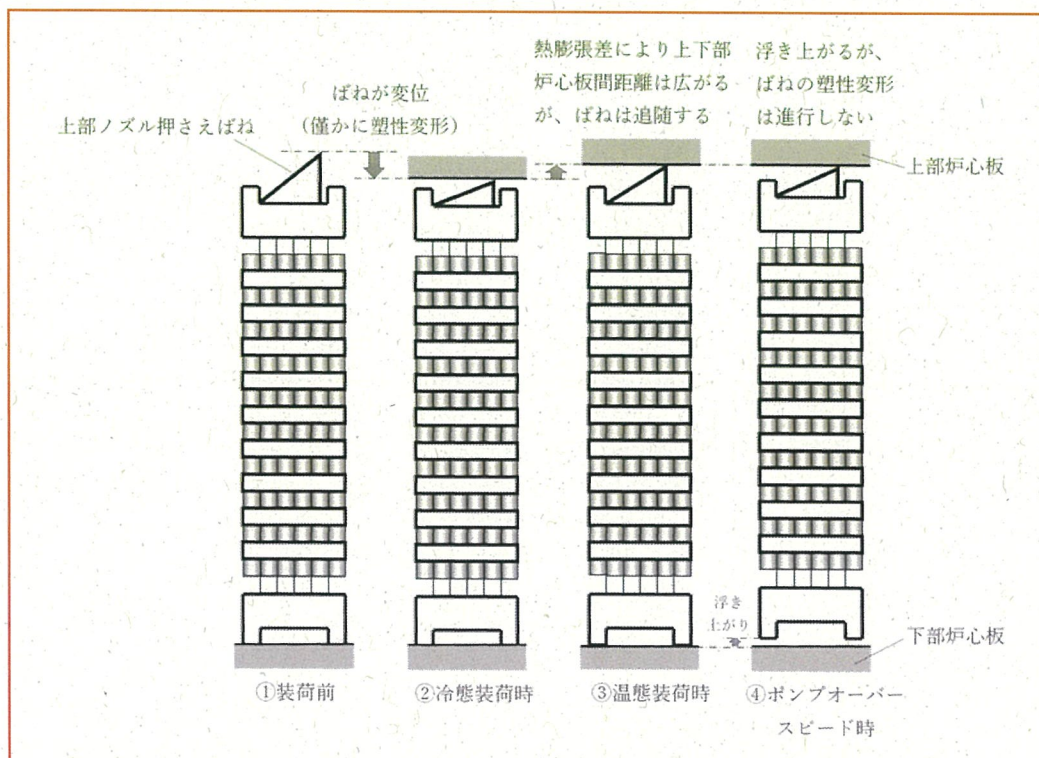


図2 ネジのピッチ

上部ノズル押さえばねの挙動について



装荷前の燃料は、上図①のとおり上下部炉心板間距離よりも長い。このため、冷態装荷時には上図②のように上部ノズル押さえばねが上部炉心板に押しつけられる。この状態で上部ノズル押さえばねに掛かる荷重は弾性限界荷重を超えるため、上部ノズル押さえばねには僅かに塑性変形が生じる。

ここから温態にすると、熱膨張差により上図③のとおり上下部炉心板間距離が広がる。この状態の燃料は、上部ノズル押さえばねに塑性変形が残っているものの、なお上下部炉心板間距離よりも長いため、上部ノズル押さえばねは上部炉心板に追従し、上部ノズル押さえばねは上部炉心板に押しつけられたままとなる。ただし、上下部炉心板間距離が広がっているため、上部ノズル押さえばねの変位は上図②よりも小さく、塑性変形は進行しない。

ポンプオーバースピード時には上図④のとおり浮き上がりが生じるが、上部ノズル押さえばねの変位は上図②よりも小さいため、塑性変形は進行しない。