

川内原子力発電所第 2 号機

設計及び工事計画認可申請書

【B 型燃料集合体】

補足説明資料

令和 3 年 6 月

九州電力株式会社

枠囲みの範囲は、  
防護上の観点又は機密に  
係る事項であるため、  
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関する補足説明資料
補足説明資料 5	工事の方法に関する補足説明資料
補足説明資料 6	強度に関する補足説明資料
補足説明資料 7	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 8	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 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

当社では、川内原子力発電所第2号機向けの燃料体の加工を計画している。

燃料体に係る設計及び工事の計画については、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、改正法等の内容反映が必要となったことから、今回燃料体に係る設計及び工事の計画に係る手続きを実施する。

本資料は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づく設計及び工事計画認可申請を行うにあたり、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。

今回の手続きは、今後新たに加工する燃料体について申請するものである。したがって、本設計及び工事計画認可申請における適用条文の整理にあたっては、燃料体を要目表対象設備として位置付けたうえで（改正法等施行前は要目表対象外）、当該設備として適用を受ける条文を今回の申請において適合性の確認が必要な条文として整理する。

## 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

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は、下表に示すとおり。

### 【申請対象】

- ・原子炉本体 燃料体

### 【凡例】

「適用」欄

○：適用条文

×：適用を受けない条文

「申請」欄

○：今回の申請で適合性を確認する必要がある条文

×：今回の申請では適合性確認が不要な条文（適用を受けない条文、又は適用条文ではあるが、既に適合性が確認されている条文、若しくは設計及び工事の計画に係る内容に影響を受けないことが明確に確認できる条文）

技術基準規則	適用要否判断		理由
	適用	申請	
設計基準対象施設			
第4条 設計基準対象施設の地盤	○	×	今回の設計及び工事の計画（以下「設工認」という。）は、新たに加工を実施する燃料体に対する申請であり、既設計及び工事の計画（以下「既設工認」という。）で確認された設計に影響を与えるものではない
第5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、申請対象の燃料体の適合性を確認する必要があることから対象とする
第6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、申請対象の燃料体の適合性を確認する必要があることから対象とする
第7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、申請対象の燃料体の適合性を確認する必要があることから対象とする
第8条 立ち入りの防止	○	×	今回の設工認は、新たに加工を実施する燃料体に対する申請であり、既設工認で確認された設計に影響を与えるものではない

技術基準規則	適用要否判断		理由
	適用	申請	
第9条 発電用原子炉施設への人の 不法な侵入等の防止	○	×	今回の設工認は、新たに加工を実施する燃料体に対する申請であり、既設工認で確認された設計に影響を与えるものではない
第10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、川内原子力発電所及び玄海原子力発電所は急傾斜地崩壊危険区域として指定された地域ではない
第11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、申請対象の燃料体は防護対象施設に該当しないものの、火災の発生防止対策に対する適合性を確認する必要があることから対象とする
第12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	○	×	発電用原子炉施設内における溢水等による損傷の防止については、申請対象の燃料体は防護対象設備に該当せず、既設工認にて確認された防護設計に影響を与えるものではない
第13条 安全避難通路等	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第14条 安全設備	○	○	安全設備については、申請対象の燃料体について、第2項への適合性を確認する必要があることから対象とする なお、第1項の適用を受けるものではない

技術基準規則	適用要否判断		理由
	適用	申請	
第15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、申請対象の燃料体について、第1項及び第2項への適合性を確認する必要があることから対象とする 第4項については、申請対象の燃料体は防護対象設備に該当せず、既設工認にて確認された防護設計に影響を与えるものではない また、第3項、第5項及び第6項の適用を受けるものではない
第16条 全交流動力電源喪失対策設備	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第17条 材料及び構造	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第18条 使用中の亀裂等による破壊の防止	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第19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、申請対象の燃料体の適合性を確認する必要があることから対象とする

技術基準規則	適用要否判断		理由
	適用	申請	
第20条 安全弁等	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第21条 耐圧試験等	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第22条 監視試験片	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第23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、申請対象の燃料体の適合性を確認する必要があることから対象とする
第24条 熱遮蔽材	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第25条 一次冷却材	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第26条 燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第27条 原子炉冷却材圧力バウンダリ	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第28条 原子炉冷却材圧力バウンダリの隔離装置等	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第29条 一次冷却材処理装置	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第30条 逆止め弁	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第31条 蒸気タービン	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第32条 非常用炉心冷却設備	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要

技術基準規則	適用要否判断		理由
	適用	申請	
第33条 循環設備等	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第34条 計測装置	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第35条 安全保護装置	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第36条 反応度制御系統及び原子炉停止系統	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第37条 制御材駆動装置	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第38条 原子炉制御室等	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第39条 廃棄物処理設備等	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第40条 廃棄物貯蔵設備等	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第41条 放射性物質による汚染の防止	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第42条 生体遮蔽等	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第43条 換気設備	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第44条 原子炉格納施設	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第45条 保安電源設備	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第46条 緊急時対策所	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要
第47条 警報装置等	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要

技術基準規則	適用可否判断		理由
	適用	申請	
第 48 条 準用	×	×	本申請には関係しない条文であることから今回の申請では適合性確認不要

技術基準規則	適用要否判断		理由
	適用	申請	
重大事故等対処施設			
第 49 条 重大事故等対処施設の地盤	×	×	本申請対象は重大事故等対処施設に該当しないため、今回の申請では適合性確認不要
第 50 条 地震による損傷の防止			
第 51 条 津波による損傷の防止			
第 52 条 火災による損傷の防止			
第 53 条 特定重大事故等対処施設			
第 54 条 重大事故等対処設備			
第 55 条 材料及び構造			
第 56 条 使用中の亀裂等による破壊の防止			
第 57 条 安全弁等			
第 58 条 耐圧試験等			
第 59 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			
第 60 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			
第 61 条 原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備			
第 62 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			
第 63 条 最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備			
第 64 条 原子炉格納容器内の冷却等のための設備			
第 65 条 原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備			
第 66 条 原子炉格納容器下部の熔融炉心を冷却するための設備			
第 67 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			
第 68 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			
第 69 条 使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備			
第 70 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			
第 71 条 重大事故等の収束に必要な水の供給設備			
第 72 条 電源設備			
第 73 条 計装設備			
第 74 条 原子炉制御室			
第 75 条 監視測定設備			
第 76 条 緊急時対策所			
第 77 条 通信連絡を行うために必要な設備			
第 78 条 準用			



設計及び工事計画認可申請における適用条文一覧表

条文	総則			技術基準規則DB（条）																																												備考			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47		48		
	適用範囲	定義	特殊な設計	地震盤	地震震	津波	外部衝撃	立ち入り防止	不法侵入	急傾斜地	火災	溢水	避難通路	安全設備	設計基準対象施設	全交流電源喪失	材料構造	破壊の防止	流体振動	安全弁	耐圧試験	監視試験片	炉心遮蔽材	熱一次冷却材	燃料取扱設備	バウンダリ	バウンダリ隔離装置	一次冷却材処理装置	逆止め弁	蒸気タ	非常用炉心冷却設備	循環設備	計測装置	安全保護装置	反応度制御	制御材駆動装置	原子炉制御室	廃棄物処理設備	廃棄物貯蔵設備	汚染の防止	生体遮蔽	換気設備	原子炉格納施設	保安電源設備	緊急時対策所	警報装置等	準用				
施設区分 設備区分	分類 設備等			共通	共通	共通	共通	共通	共通	共通	共通	共通	共通	共通	共通	個別	共通	共通	個別	共通	共通	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	共通	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	共通				
原子炉本体 燃料体	燃料体																																																		

○：適用条文であり、今回の申請で適合性を確認する必要がある条文  
 —：適合性確認が不要な条文

設計及び工事計画認可申請における適用条文一覧表

— 10/E —

条文	技術基準規則 SA (条)																												備考		
	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76		77	78
	地盤	地震	津波	火災	特重設備	重大事故等対処設備	材料構造	破壊の防止	安全弁	耐圧試験	未臨界	高圧時の冷却	パウレンダリの減圧	低圧時の冷却	最終ヒ	C V 冷却	C V 過圧破損防止	下部溶融炉心冷却	C V 水素爆発	原子炉建屋水素爆発	S F P 冷却	拡散抑制	水の供給	電源設備	計装設備	原子炉制御室	監視測定設備	緊急時対策所		通信	準用
施設区分	設備区分	分類 設備等	共通	共通	共通	共通	共通	共通	共通	共通	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	個別	共通	
原子炉本体	燃料体		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

○：適用条文であり、今回の申請で適合性を確認する必要がある条文  
 —：適合性確認が不要な条文

## 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

当社では、川内原子力発電所第2号機向けの燃料体の加工を計画している。

燃料体に係る設計及び工事の計画については、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、改正法等の内容反映が必要となったことから、今回燃料体に係る設計及び工事の計画に係る手続きを実施する。

本資料は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」に基づく当該設計及び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」第9条第3項に基づき、当該申請に係る発電用原子炉施設の属する別表第二の上欄に記載される種類に応じて同表の下欄に掲げる書類並びに当該申請に係る設計及び工事に係る品質マネジメントシステムが許可を受けたところによるものであることを説明した書類を添付する必要がある。このうち別表第二に掲げる書類について、「申請に係る工事の内容に関係あるものに限る。」との規定があるため、本申請に要求される添付書類の要否の検討を行った。検討結果を表1に示す。

## 3. 「電気事業法」に基づく工事計画認可申請書に添付する書類の整理について

「電気事業法」に基づく工事計画の手続き対象となる工事については、「原子力発電工作物の保安に関する命令」（以下「保安命令」という。）の別表第一及び別表第三に規定されているが、今回の工事は、保安命令別表第一及び別表第三に該当規定された工事に該当しないため、電気事業法第47条に基づく工事の計画の申請は不要である。

表1 「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において要求される添付書類及び本申請における添付の要否の検討結果

(1/5)

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類名 (略称含む。)	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書	×	川内原子力発電所及び玄海原子力発電所において、急傾斜地崩壊危険区域の設定はないため不要
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	×	本申請では該当する設備はないため不要
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、発電用原子炉施設の熱精算図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に説明書を添付する。
発電用原子炉の設置の許可との整合性に関する説明書	○	設置許可との整合性を示す必要があるため添付する。

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類名 (略称含む。)	添付の要否 (○・×)	理 由
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、又は頻繁に出入する工場又は事業所内の場所における線量に関する説明書	×	本申請内容は、事業所内の場所における線量に影響を与えないため不要
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	○	申請対象の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条及び第7条への適合性を示すために説明書を添付する。
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、設定根拠を示す事項に該当しないことから不要
環境測定装置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	×	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	○	申請対象の燃料体を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14条及び第15条への適合性を示すために説明書を添付する。

実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 別表第二添付書類名 (略称含む。)	添付の可否 (○・×)	理 由
発電用原子炉施設の火災 防護に関する説明書	○	申請対象の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に説明書を添付する。
発電用原子炉施設の溢水 防護に関する説明書	×	溢水防護については、申請対象の燃料体は防護対象施設に該当しないことから、既設工認にて確認された防護設計に影響を与えないため不要
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	×	申請対象の燃料体の飛散物による損傷防護について、申請対象の燃料体は従来から設計変更はなく、既設工認にて確認されたタービンミサイル評価に影響を与えないことから、既設工認にて確認された防護設計に影響を与えないため不要
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

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	○	申請対象の燃料体の耐震性について、技術基準規則第 5 条への適合性を示すために説明書を添付する。
強度に関する説明書	○	申請対象の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に説明書を添付する。
構造図	○	申請対象の燃料体の構造図を添付する。
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	○	申請対象の燃料体の耐熱性、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に説明書を添付する。
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



実用発電用原子炉の設置、 運転等に関する規則 第9条第3項規定書類	添付の可否 (○・×)	理 由
設計及び工事に係る品質マネジメントシステム		
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	○	本申請に係る設計及び工事に係る品質マネジメントシステムを説明する必要があることから添付する。

## 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

# 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、燃料体設計認可申請書（以下「設認」という。）と設計及び工事計画認可申請書（以下「設工認」という。）の記載事項の関連を整理したものである。

## 2. 整理結果

### (1) 設認と設工認の記載事項の関連について

設認と設工認の本文及び添付書類の関連は、下表のとおりである。

(本文)

設認	設工認	記載事項の差
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> 三 <u>燃料材及び燃料被覆材の種類、組成及び組織並びに燃料材及び燃料被覆材以外の部品の種類及び組成</u> 四 <u>燃料材の構造及び重量</u>	二 工事計画 ・ <u>要目表（燃料体の名称、種類、主要寸法及び材料）</u>	下線部について整理した結果、以下の事項に差がある。 ・初期濃縮度及び燃焼率 ・燃料体の構造及び重量 等
—	・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 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	—	使用前確認申請書において記載する事項
—	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	記載事項の差
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	三 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	二 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	本文 (二 工事計画「工事の方法」)	—
五 品質保証に関する説明書	四 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)設認と設工認の記載事項の差について

設認と設工認の本文の差について、設工認における記載の考え方等を添付 1 に整理した。(本文の詳細な比較は添付 2、3 参照)

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

- ・既工認<sup>(注)</sup>の本文に記載がある事項
- ・設工認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」とは、以下の工事計画認可を指す。

川内原子力発電所第 2 号機	
既工認①：再稼働時	平成 27 年 5 月 22 日付け原規規発第 1505221 号にて認可された工事計画
既工認②：高燃焼度燃料装荷時	平成 18 年 11 月 9 日付け平成 18・09・25 原第 17 号にて認可された工事計画

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の既工認及び設工認における記載の整理状況については、参考資料に示す。

以上

## 設認と設工認の本文記載事項の差に係る設工認における記載の整理

設認		設工認 記載箇所	既工認 本文	設工認本文における記載の考え方
初期濃縮度	燃料体平均	—	—	燃料体平均及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	添付資料 3	○	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	添付資料 3	—	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	添付資料 3	—	
燃料体の構造		添付資料 3	—	具体的な仕様を記載しているものではなく、概要記載のため、記載不要。
質量	燃料体総質量	添付図面	—	各々の質量の変更に当たっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要。
	燃料材質量	—	—	
	主要部品	—	—	
その他	燃料要素の配置	添付図面	—	燃料要素の配列の変更に当たっては、設工認本文の要目表の名称に記載の17行17列が変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要。
	被覆材の偏肉率	添付図面	—	偏肉率の変更に当たっては、設工認本文の要目表に記載の被覆材の外径、内径、肉厚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(川内原子力発電所 B型燃料集合体)

( 1 / 3 )

燃料体設計認可申請書		設工認 本文	備 考		
燃料の種類	二酸化ウラン	—	燃料体平均及び燃料要素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。		
	二酸化ウラン燃料体	—			
	二酸化ウラン燃料体平均濃縮度	—			
	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	○			
	ガドリニア入り二酸化ウラン燃料体	—			
	ガドリニア入り二酸化ウラン燃料体平均濃縮度	—			
	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	○			
初期濃縮度	ガドリニア混合二酸化ウラン焼結ペレット濃縮度	○	燃料体平均及び燃料要素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。		
	燃料体最高	—			
	燃料要素最高	—			
	ペレット最高	—			
	燃焼率	(種類)二酸化ウラン焼結ペレット		○	既工認①の要目表で記載済みのため、記載不要。 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。
		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)		—			
燃料材の種類、組成及び組織	燃料材	○	燃料材の種類、組成及び組織		
	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			○	
	(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			—	
	ガドリニア重量百分率			—	
	ガドリニウム重量百分率			—	
	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ガドリニウム一部置換型二酸化ウラン多結晶組織	○				
燃料被覆材の種類、組成及び組織	燃料被覆管	○	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。		
	(種類)Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金			○	
	(組成)			—	
	すず			—	
	鉄			—	
	クロム			—	
	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	○				
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	○	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。		
	(種類)Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金			○	
	(組成)			—	
	すず			—	
	鉄			—	
	クロム			—	
	鉄+クロム			—	
	酸素			—	
	ジルコニウム			—	
	(組織)			—	
再結晶焼きなまし組織	○				
燃料被覆管	(種類)ステンレス鋼	○	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。		
	(組成)			—	
	ニッケル			—	
	クロム			—	
	けい素			—	
	マンガン			—	
	いおう			—	
	炭素			—	
	りん			—	
	鉄			—	
上部プレナムコイルばね	(種類)耐食耐熱ニッケル合金	○	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。		
	(組成)			—	
	ニッケル			—	
	クロム			—	
	ニオブ			—	
	チタン			—	
	アルミニウム			—	
	鉄			—	
	炭素			—	
	マンガン			—	
下部プレナムコイルばね	(種類)ステンレス鋼	○	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。		
	(組成)			—	
	ニッケル			—	
	クロム			—	
	けい素			—	
	マンガン			—	
	いおう			—	
	コバルト			—	
	銅			—	
	タンタル			—	
押さえ板(下部プレナムコイルばね用部品)	(種類)ステンレス鋼	○	設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。		
	(組成)			—	
	ニッケル			—	
	クロム			—	
	けい素			—	
	マンガン			—	
	いおう			—	
	炭素			—	
	りん			—	
	鉄			—	



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(川内原子力発電所 B型燃料集合体)

( 2 / 3 )

燃料体設計認可申請書		設工認 本文	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	連結棒(下部シ ムコイルばね 用部品)	(種類)ステンレス鋼 (組成) 押さえ板材に同じ	○ 設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。
	制御棒案内シン プル及び炉内計 装用案内シン プル用下部端栓 及びピラー	(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、添付資料4で組成を記載。
	制御棒案内シン プル用下部端栓 及びピラー	(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、添付資料4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 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	○ 設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。
	中間部支持格子	(種類)Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 (組成) チタン 鉄 クロム 鉄+クロム ジルコニウム	○ 設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。
	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 けい素 マンガン いおう 炭素 りん モリブデン 鉄	○ 設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。
	上部ノズル押さえ ばね	(種類)耐食耐熱ニッケル基合金 (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、添付資料4で組成を記載。
	クランプスク リュー	(種類)ニッケル・クロム・鉄合金 (組成) ニッケル クロム 鉄 マンガン 炭素 銅 けい素 いおう	○ 設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。
	上部リングナット・ シムプルスク リュー・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 けい素 マンガン いおう 炭素 りん 鉄	○ 設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。
	スリーブ	(種類)ステンレス鋼 (組成) ニッケル クロム けい素 マンガン いおう 炭素 りん 鉄	○ 設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。
	リベット	(種類)ステンレス鋼 (組成) ニッケル クロム けい素 マンガン いおう 炭素 りん 鉄	○ 設工認の本文で材料の規格を記載し、添付資料4で組成を記載。
	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、添付資料4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(川内原子力発電所 B型燃料集合体)

( 3 / 3 )

燃料体設計認可申請書		設工認 本文	備 考
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、寸法		
	(1)質量		
	総質量	—	各々の質量の変更に当たっては、設工認本文の要目表記載の主要寸法と材料に依存して変更となることから、当該項目で審査可能なため、本文への記載不要。
	燃料材質量	—	同上。
	(2)寸法		
	全長(下部ノズル下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(最大)	○	—
	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		
	燃料体内の配置(二酸化ウラン燃料体、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料体)	—	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。
	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。
	燃料材質量	—	同上。
	(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	○	設工認本文の要目表の注釈に記載。	
(3)数量			
二酸化ウラン燃料体	—	燃料要素の数量の変更に当たっては、設工認本文の要目表の名称に記載の17行17列が変更となることから、当該項目で審査可能なため、記載不要。	
ガドリニア入り二酸化ウラン燃料体	—	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。	
(燃料体内の配置(二酸化ウラン燃料体、ガドリニア入り二酸化ウラン燃料体)	—		
燃料体の構造及び質量	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。
	3.3制御棒案内シムル		
	(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。
	3.4炉内計装用案内シムル		
	(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。
	3.5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。
	最上部/中間部/最下部	—	
	(2)寸法		
外寸法	○	—	
高さ(最上部/中間部/最下部)	○	—	
(3)数量 燃料体当たり(最上部/中間部/最下部)	○	設工認本文の要目表の注釈に記載。	
3.6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 燃料体当たり(上部/下部)	○	同上。	

(参考資料)

川内原子力発電所第2号機

「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」 別表第二と既工認及び設工認における記載の整理

原子炉本体		既工認及び設工認における記載
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、2 炉心に係る次の事項(1)に記載
	(2)燃料材の種類、燃料材の濃縮度又は富化度（初装荷及び取替の別に記載すること。）、燃料集合体最高燃焼度（初装荷及び取替の別に記載すること。）及び核燃料物質の最大装荷量	既工認①、2 炉心に係る次の事項(2)に記載（燃料体最高燃焼度は a.ウラン燃料として記載 <sup>(注1)</sup> ）
	(3)燃料材の最高温度	既工認②、2 炉心に係る次の事項(3)に a.ウラン燃料として記載
	(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、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。）	令和2年12月15日付け原発本第276号（川内2号機B型燃料集合体）にて申請した設工認に記載	

(注) 燃料体の最高燃焼度を記載しており、燃料材及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。

## 補足説明資料 4

### 基本設計方針の確認方法に関する補足説明資料

# 目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 基本設計方針における燃料体に関する要求事項の確認方法の整理結果 .....	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、基本設計方針に燃料体に関する要求事項を追加したことから、当該事項の確認方法について整理する。

## 2. 基本設計方針における燃料体に関する要求事項の確認方法の整理結果

基本設計方針における燃料体に関する要求事項の確認方法の整理結果を下表に示す。

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法								
燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における原子炉運転状態に対応した圧力、温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量及び水質の組合せのうち想定される最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法安定性、耐熱性、核性質等のうち必要な物理的性質並びに耐食性、化学的安定性等のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。燃料体の物理的性質及び化学的性質について、具体的には「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」に基づき設計するか、これと同等以上の物理的性質及び化学的性質を保持するよう設計する。	技術基準規則第23条第1項の規定に対応する燃料体に関する要求事項については、以下のとおりとする。この場合において、以下の規定は、法第43条の3の11第2項に定める使用前事業者検査の確認を行うまでの間適用する。	—								
	1. 二酸化ウラン燃料材 二酸化ウラン燃料材は、次の(1)～(5)のいずれにも適合すること。	—								
	(1) 次の表の左欄に掲げる元素を含有する場合における当該元素の含有量のウランの含有量に対する百分率の値は、それぞれ同表の右欄に掲げる値であること。 <table border="1" data-bbox="596 792 976 943"> <tbody> <tr> <td>炭素</td> <td>0.010 以下</td> </tr> <tr> <td>ふっ素</td> <td>0.0015 以下</td> </tr> <tr> <td>水素</td> <td>0.0002 以下</td> </tr> <tr> <td>窒素</td> <td>0.0075 以下</td> </tr> </tbody> </table>	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 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査
	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									
(2) ウラン 235 の含有量のウランの含有量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。	申請書 ・要目表 ・添付図面  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こと。 ①各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。 ②密度の偏差は、著しく大きくないこと。 ③表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。 ④表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	申請書 ・要目表 ・添付図面  検査									
(4) ガドリニウムを添加していないものにあつては、次に適合すること。 ①ウランの含有量の全重量に対する百分率の値は、87.7 以上であること。 ②酸素の原子数のウランの原子数に対する比率の値は、1.99 以上 2.02 以下であること。	申請書 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査									
(5) ガドリニウムを添加したものにあつては、次に適合すること。 ①ウランの含有量の全重量に対する百分率の値は、実用上差し支えがないものであること。 ②酸素の原子数のウランの原子数に対する比率の値は、実用上差し支えがないものであること。 ③ガドリニウムの含有量の全重量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。 ④ガドリニウムの均一度は、実用上差し支えがないものであること。	申請書 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査									

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
<p>燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における原子炉運転状態に対応した圧力、温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量及び水質の組合せのうち想定される最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法安定性、耐熱性、核性質等のうち必要な物理的性質並びに耐食性、化学的安定性等のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。燃料体の物理的性質及び化学的性質について、具体的には「<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の解釈</u>」における「<u>燃料体に関する要求事項(別記-10)</u>」に基づき設計するか、これと同等以上の物理的性質及び化学的性質を保持するよう設計する。</p>	<p>2. ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料材 ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料材は、次の(1)～(5)のいずれにも適合すること。</p> <p>(1)各元素の含有量の全重量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(2)酸素の原子数のウラン及びプルトニウムの原子数の合計に対する比率の値は、実用上差し支えないものであること。</p> <p>(3)ウラン 235、プルトニウム 239 及びプルトニウム 241 の含有量の合計のウラン及びプルトニウムの含有量の合計に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。</p> <p>(4) プルトニウムの均一度は、実用上差し支えないものであること。</p> <p>(5) ペレット型燃料材にあつては、ペレットが次に適合すること。</p> <p>①各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。 ②密度の偏差は、著しく大きくないこと。 ③表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。 ④表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p>	<p>申請対象外</p>



川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における原子炉運転状態に対応した圧力、温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量及び水質の組合せのうち想定される最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法安定性、耐熱性、核性質等のうち必要な物理的性質並びに耐食性、化学的安定性等のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。燃料体の物理的性質及び化学的性質について、具体的には「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」に基づき設計するか、これと同等以上の物理的性質及び化学的性質を保持するよう設計する <sup>※1</sup> 。	3. ジルコニウム合金燃料被覆材 ジルコニウム合金燃料被覆材は、次の(1)～(11)のいずれにも適合すること。	—
	(1)各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。	申請書 ・要目表 ・添付図面  検査
	(2)被覆材の軸は、著しく湾曲していないこと。	申請書 ・添付図面  検査
	(3)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。	申請書 <sup>※1</sup> ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査 <sup>※2</sup>
	(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 ・添付図面  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。	検査
	(6)表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	検査
	(7)表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	検査
(8)表面の粗さの程度は、実用上差し支えがないものであること。	検査	

※1：本設工認で申請している燃料体の燃料被覆材には、別記-10 に規定されているジルコニウム合金管（JIS H4751「ジルコニウム合金管」）と類似の材料で、物理的及び化学的性質が同等以上である 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おり、ジルコニウム基合金の化学成分値（添付資料 4 の第 2-1 表）は、別記-10 に規定されている値とは異なるが、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いる。確認内容の詳細は補足説明資料 7 において説明する。

※2：検査において、各元素の含有量の全重量に対する百分率の値については、添付資料 4 の第 2-1 表「燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分(2/5)」に規定する値であることを確認する。

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
<p>燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における原子炉運転状態に対応した圧力、温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量及び水質の組合せのうち想定される最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法安定性、耐熱性、核性質等のうち必要な物理的性質並びに耐食性、化学的安定性等のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。燃料体の物理的性質及び化学的性質について、具体的には「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」に基づき設計するか、これと同等以上の物理的性質及び化学的性質を保持するよう設計する。</p>	<p>(9)日本産業規格 H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書 B 腐食試験方法」又はこれと同等の方法によって腐食試験を行ったとき、表面に著しい白色又は褐色の酸化物が付着せず、かつ、腐食質量増加が3日間で22 ミリグラム毎平方デシメートル以下又は14日間で38 ミリグラム毎平方デシメートル以下であること。</p>	<p>申請書 ・添付資料 4  検査</p>
	<p>(10)再結晶焼きなましを行ったものにあつては、次に適合すること。 ①日本産業規格 H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「附属書 A 結晶粒度試験方法」又はこれと同等の方法によって結晶粒度試験を行ったとき、結晶粒度が結晶粒度番号7と同等又はこれより細かいこと。 ②日本産業規格 Z2241 (2011)「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが日本産業規格 H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表 4 に規定する値であること。</p>	<p>申請対象外</p>
	<p>(11)応力除去焼きなましを行ったものにあつては、日本産業規格 Z2241 (2011)「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。</p>	<p>申請書 ・添付資料 4  検査</p>

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法																				
<p>燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における原子炉運転状態に対応した圧力、温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量及び水質の組合せのうち想定される最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法安定性、耐熱性、核性質等のうち必要な物理的性質並びに耐食性、化学的安定性等のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。燃料体の物理的性質及び化学的性質について、具体的には「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」に基づき設計するか、これと同等以上の物理的性質及び化学的性質を保持するよう設計する。</p>	4. ジルコニウム合金端栓	—																				
	<p>(1)再結晶焼きなましを行ったジルコニウム合金端栓は、日本産業規格 Z2241 (2011)「金属材料引張試験方法」、ASTM International 規格 ASTM B 351 「Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Zirconium and Zirconium Alloy Bars, Rod, and Wire for Nuclear Application」又はこれと同等の方法によって次の表の上欄に掲げるいずれかの試験温度において引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが同欄に掲げる試験温度の区分に応じ、それぞれ同表の下欄に掲げる値であること。端栓とは、燃料被覆材の両端を密封するために成形された金属部品をいう。</p> <table border="1" data-bbox="571 869 1193 1191"> <thead> <tr> <th data-bbox="577 878 689 913">温度</th> <th colspan="3" data-bbox="695 878 1187 913">引張試験</th> </tr> <tr> <td data-bbox="577 913 689 967"></td> <th data-bbox="695 913 855 967">引張強さ</th> <th data-bbox="861 913 1021 967">耐力</th> <th data-bbox="1027 913 1187 967">伸び</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="577 976 689 1120"></td> <td data-bbox="695 976 855 1120">ニュートン 毎平方 ミリメー トル</td> <td data-bbox="861 976 1021 1120">ニュートン 毎平方 ミリメー トル</td> <td data-bbox="1027 976 1187 1120">パーセン ト</td> </tr> <tr> <td data-bbox="577 1128 689 1155">室温</td> <td data-bbox="695 1128 855 1155">415 以上</td> <td data-bbox="861 1128 1021 1155">240 以上</td> <td data-bbox="1027 1128 1187 1155">14 以上</td> </tr> <tr> <td data-bbox="577 1164 689 1191">316 度</td> <td data-bbox="695 1164 855 1191">215 以上</td> <td data-bbox="861 1164 1021 1191">105 以上</td> <td data-bbox="1027 1164 1187 1191">24 以上</td> </tr> </tbody> </table>	温度	引張試験				引張強さ	耐力	伸び		ニュートン 毎平方 ミリメー トル	ニュートン 毎平方 ミリメー トル	パーセン ト	室温	415 以上	240 以上	14 以上	316 度	215 以上	105 以上	24 以上	<p>申請書 ・添付資料 4</p> <p>検査</p>
	温度	引張試験																				
	引張強さ	耐力	伸び																			
	ニュートン 毎平方 ミリメー トル	ニュートン 毎平方 ミリメー トル	パーセン ト																			
室温	415 以上	240 以上	14 以上																			
316 度	215 以上	105 以上	24 以上																			
<p>(2)応力除去焼きなましを行ったジルコニウム合金端栓は、日本産業規格 Z2241 (2011)「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。</p>	申請対象外																					
<p>(3)前記「3. ジルコニウム合金燃料被覆材」(2)、(4)、(5)、(8)、(10)及び(11)を除く。)の規定は、ジルコニウム合金端栓に準用する。ただし、(3)の日本産業規格 H4751 (2016)「ジルコニウム合金管」の「4 品質」の表 3 に掲げるニオブ及びカルシウムを除く。</p>	<p>申請書 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面</p> <p>検査</p>																					

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における原子炉運転状態に対応した圧力、温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量及び水質の組合せのうち想定される最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法安定性、耐熱性、核性質等のうち必要な物理的性質並びに耐食性、化学的安定性等のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。燃料体の物理的性質及び化学的性質について、具体的には「 <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の解釈</u> 」における「 <u>燃料体に関する要求事項(別記-10)</u> 」に基づき設計するか、これと同等以上の物理的性質及び化学的性質を保持するよう設計する。	5. その他の部品 燃料材、燃料被覆材及び端栓以外の燃料体の部品は、次の(1)～(4)のいずれにも適合すること。	—
	(1)各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。	申請書 ・要目表 ・添付図面  検査
	(2)表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	検査
	(3)表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	検査
	(4)支持格子、上部支持板、下部支持板、ウォータロッド、制御棒案内シンプルにあつては、次に適合すること。 ①各元素の含有量の全重量に対する百分率の値の偏差は、著しく大きくないこと。 ②日本産業規格 Z2241 (2011)「金属材料引張試験方法」又はこれと同等の方法によって引張試験を行ったとき、引張強さ、耐力及び伸びが必要な値であること。	申請書 ・要目表 ・添付資料 4 ・添付図面  検査

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における原子炉運転状態に対応した圧力、温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量及び水質の組合せのうち想定される最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法安定性、耐熱性、核性質等のうち必要な物理的性質並びに耐食性、化学的安定性等のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。燃料体の物理的性質及び化学的性質について、具体的には「 <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の解釈</u> 」における「 <u>燃料体に関する要求事項(別記-10)</u> 」に基づき設計するか、これと同等以上の物理的性質及び化学的性質を保持するよう設計する。	<b>6. 燃料要素</b> 燃料要素は、次の(1)～(8)のいずれにも適合すること。	—
	(1)各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。	申請書 ・要目表 ・添付図面  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 ・添付図面  検査
	(3)表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。	検査
	(4)表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。	検査
	(5)日本産業規格 Z4504 (2008)「放射線表面汚染の測定方法— $\beta$ 線放出核種(最大エネルギー0.15MeV以上)及び $\alpha$ 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0.00004ベクレル毎平方ミリメートルを超えないこと。	申請書 ・添付図面  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304メガパスカル立方ミリメートル毎秒を超えないこと。	申請書 ・添付図面  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。	検査
(8)部品の欠如がないこと。	検査	

川内・基本設計方針	別記-10	確認方法
<p>燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物の材料は、通常運転時における原子炉運転状態に対応した圧力、温度条件、燃料使用期間中の燃焼度、中性子照射量及び水質の組合せのうち想定される最も厳しい条件において、耐放射線性、寸法安定性、耐熱性、核性質等のうち必要な物理的性質並びに耐食性、化学的安定性等のうち必要な化学的性質を保持し得る材料を使用する。燃料体の物理的性質及び化学的性質について、具体的には「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項(別記-10)」に基づき設計するか、これと同等以上の物理的性質及び化学的性質を保持するよう設計する。</p>	<p>7. 燃料体 燃料体は、次の(1)～(4)のいずれにも適合すること。</p>	<p>—</p>
	<p>(1)各部分の寸法の偏差は、著しく大きくないこと。</p>	<p>申請書 ・要目表 ・添付図面</p> <p>検査</p>
	<p>(2)表面に割れ、傷等で有害なものがないこと。</p>	<p>検査</p>
	<p>(3)表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</p>	<p>検査</p>
	<p>(4)部品の欠如がないこと。</p>	<p>検査</p>

## 補足説明資料 5

工事の方法に関する補足説明資料

## 1. 概 要

工事の方法として、工事手順、使用前事業者検査の方法、工事上の留意事項を、それぞれ施設、主要な耐圧部の溶接部、燃料体に区分し定めており、これら工事手順及び使用前事業者検査の方法は、「設計及び工事に係る品質マネジメントシステム」に定めたプロセス等に基づいたものとしている。

また、工事の方法は、すべての施設を網羅するものとして作成しており、それを原子炉本体に記載し、その他の施設については該当箇所を呼び込むことにしている。

本資料では、工事の方法のうち当該工事に該当する箇所を明示するものである。

## 2. 当該工事に該当する箇所

工事の方法のうち、当該工事に該当する箇所を示す。



凡例

(黄色マーキング)：本設計及び工事の計画に該当する箇所

9 原子炉本体に係る工事の方法

変更前	変更後
<p>発電用原子炉施設の設置又は変更の工事並びに主要な耐圧部の溶接部における工事の方法として、原子炉設置(変更)許可を受けた事項、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」という。)の要求事項に適合するための設計(基本設計方針及び要目表)に従い実施する工事の手順と、それら設計や工事の手順に従い工事が行われたことを確認する使用前事業者検査の方法を以下に示す。</p> <p>これらの工事の手順及び使用前事業者検査の方法は、「設計及び工事に係る品質マネジメントシステム」に定めたプロセス等に基づいたものとする。</p> <p>1. 工事の手順</p> <p>1.1 工事の手順と使用前事業者検査</p> <p>発電用原子炉施設の設置又は変更の工事における工事の手順を使用前事業者検査との関係を含め図1に示す。</p> <p>1.2 主要な耐圧部の溶接部に係る工事の手順と使用前事業者検査</p> <p>主要な耐圧部の溶接部に係る工事の手順を使用前事業者検査との関係を含め図2に示す。</p> <p>1.3 燃料体に係る工事の手順と使用前事業者検査</p> <p>燃料体に係る工事の手順を使用前事業者検査との関係を含め図3に示す。</p> <p>2. 使用前事業者検査の方法</p> <p>構造、強度及び漏えいを確認するために十分な方法、機能及び性能を確認するために十分な方法、その他設置又は変更の工事がその設計及び工事の計画に従って行われたものであることを確認するために十分な方法により、使用前事業者検査を図1、図2及び図3のフローに基づき実施する。使用前事業者検査は「設計及び工事に係る品質マネジメントシステム」に記載したプロセスにより、抽出されたものの検査を実施する。</p> <p>また、使用前事業者検査は、検査の時期、対象、方法、検査体制に加えて、検査の内容と重要度に応じて、立会、抜取り立会、記録確認のいずれかとするを要領書等で定め実施する。</p>	<p>変更なし</p>

変更前	変更後																								
<p>2.1 構造、強度又は漏えいに係る検査</p> <p>2.1.1 構造、強度又は漏えいに係る検査</p> <p>構造、強度又は漏えいに係る検査ができるようになったとき、表1に示す検査を実施する。</p> <p>表1 構造、強度又は漏えいに係る検査（燃料体を除く。）<sup>(注1)</sup></p> <table border="1" data-bbox="290 611 1457 1787"> <thead> <tr> <th data-bbox="290 611 670 653">検査項目</th> <th colspan="2" data-bbox="670 611 1258 653">検査方法</th> <th data-bbox="1258 611 1457 653">判定基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="290 653 670 926"> 「設計及び工事に係る品質マネジメントシステム」に記載したプロセスにより、当該工事における構造、強度又は漏えいに係る確認事項として次に掲げる項目の中から抽出されたもの。 </td> <td data-bbox="670 653 893 926">材料検査</td> <td data-bbox="893 653 1258 926">使用されている材料の化学成分、機械的強度等が工事計画のとおりであることを確認する。</td> <td data-bbox="1258 653 1457 926">設工認のとおりであること、技術基準に適合するものであること。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="290 926 670 1430"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・材料検査</li> <li>・寸法検査</li> <li>・外観検査</li> <li>・組立て及び据付け状態を確認する検査（据付検査）</li> <li>・状態確認検査</li> <li>・耐圧検査</li> <li>・漏えい検査</li> <li>・原子炉格納施設が直接設置される基盤の状態を確認する検査</li> </ul> </td> <td data-bbox="670 926 893 1430">寸法検査</td> <td data-bbox="893 926 1258 1430">主要寸法が工事計画のとおりであり、許容寸法内であることを確認する。</td> <td data-bbox="1258 926 1457 1430">設工認に記載されている主要寸法の計測値が、許容寸法を満足すること。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="290 1430 670 1661"> <ul style="list-style-type: none"> <li>・建物・構築物の構造を確認する検査</li> </ul> </td> <td data-bbox="670 1430 893 1661">外観検査</td> <td data-bbox="893 1430 1258 1661">有害な欠陥がないことを確認する。</td> <td data-bbox="1258 1430 1457 1661">健全性に影響を及ぼす有害な欠陥がないこと。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="290 1661 670 1787"></td> <td data-bbox="670 1661 893 1787">組立て及び据付け状態を確認する検査（据付検査）</td> <td data-bbox="893 1661 1258 1787">組立て状態並びに据付け位置及び状態が工事計画のとおりであることを確認する。</td> <td data-bbox="1258 1661 1457 1787">設工認のとおり組立て、据付けされていること。</td> </tr> <tr> <td data-bbox="290 1787 670 1879"></td> <td data-bbox="670 1787 893 1879">状態確認検査</td> <td data-bbox="893 1787 1258 1879">評価条件、手順等が工事計画のとおりであることを確認する。</td> <td data-bbox="1258 1787 1457 1879">設工認のとおりであること。</td> </tr> </tbody> </table>	検査項目	検査方法		判定基準	「設計及び工事に係る品質マネジメントシステム」に記載したプロセスにより、当該工事における構造、強度又は漏えいに係る確認事項として次に掲げる項目の中から抽出されたもの。	材料検査	使用されている材料の化学成分、機械的強度等が工事計画のとおりであることを確認する。	設工認のとおりであること、技術基準に適合するものであること。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・材料検査</li> <li>・寸法検査</li> <li>・外観検査</li> <li>・組立て及び据付け状態を確認する検査（据付検査）</li> <li>・状態確認検査</li> <li>・耐圧検査</li> <li>・漏えい検査</li> <li>・原子炉格納施設が直接設置される基盤の状態を確認する検査</li> </ul>	寸法検査	主要寸法が工事計画のとおりであり、許容寸法内であることを確認する。	設工認に記載されている主要寸法の計測値が、許容寸法を満足すること。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・建物・構築物の構造を確認する検査</li> </ul>	外観検査	有害な欠陥がないことを確認する。	健全性に影響を及ぼす有害な欠陥がないこと。		組立て及び据付け状態を確認する検査（据付検査）	組立て状態並びに据付け位置及び状態が工事計画のとおりであることを確認する。	設工認のとおり組立て、据付けされていること。		状態確認検査	評価条件、手順等が工事計画のとおりであることを確認する。	設工認のとおりであること。	<p style="text-align: center;">変更なし</p>
検査項目	検査方法		判定基準																						
「設計及び工事に係る品質マネジメントシステム」に記載したプロセスにより、当該工事における構造、強度又は漏えいに係る確認事項として次に掲げる項目の中から抽出されたもの。	材料検査	使用されている材料の化学成分、機械的強度等が工事計画のとおりであることを確認する。	設工認のとおりであること、技術基準に適合するものであること。																						
<ul style="list-style-type: none"> <li>・材料検査</li> <li>・寸法検査</li> <li>・外観検査</li> <li>・組立て及び据付け状態を確認する検査（据付検査）</li> <li>・状態確認検査</li> <li>・耐圧検査</li> <li>・漏えい検査</li> <li>・原子炉格納施設が直接設置される基盤の状態を確認する検査</li> </ul>	寸法検査	主要寸法が工事計画のとおりであり、許容寸法内であることを確認する。	設工認に記載されている主要寸法の計測値が、許容寸法を満足すること。																						
<ul style="list-style-type: none"> <li>・建物・構築物の構造を確認する検査</li> </ul>	外観検査	有害な欠陥がないことを確認する。	健全性に影響を及ぼす有害な欠陥がないこと。																						
	組立て及び据付け状態を確認する検査（据付検査）	組立て状態並びに据付け位置及び状態が工事計画のとおりであることを確認する。	設工認のとおり組立て、据付けされていること。																						
	状態確認検査	評価条件、手順等が工事計画のとおりであることを確認する。	設工認のとおりであること。																						

変更前			変更後
表 1 構造、強度又は漏えいに係る検査（燃料体を除く。） <sup>(注1)</sup>			
検査項目	検査方法		判定基準
	<sup>(注2)</sup> 耐圧検査	技術基準の規定に基づく検査圧力で所定時間保持し、検査圧力に耐え、異常のないことを確認する。耐圧検査が構造上困難な部位については、技術基準の規定に基づく非破壊検査等により確認する。	検査圧力に耐え、かつ、異常のないこと。
	<sup>(注2)</sup> 漏えい検査	耐圧検査終了後、技術基準の規定に基づく検査圧力により漏えいの有無を確認する。なお、漏えい検査が構造上困難な部位については、技術基準の規定に基づく非破壊検査等により確認する。	著しい漏えいのないこと。
	原子炉格納施設が直接設置される基盤の状態を確認する検査	地盤の地質状況が、原子炉格納施設の基盤として十分な強度を有することを確認する。	設工認のとおりであること。
	建物・構築物の構造を確認する検査	主要寸法、組立方法、据付位置及び据付状態等が工事計画のとおり製作され、組み立てられていることを確認する。	設工認のとおりであること。
			変更なし
<p>(注 1) 基本設計方針のうち適合性確認対象に対して実施可能な検査を含む。</p> <p>(注 2) 耐圧検査及び漏えい検査の方法について、表 1 によらない場合は、基本設計方針の共通項目として定めた「耐圧試験等」の方針によるものとする。</p>			

変更前	変更後
<p>2.1.2 主要な耐圧部の溶接部に係る検査</p> <p>主要な耐圧部の溶接部に係る使用前事業者検査は、技術基準第 17 条第 15 号、第 31 条、第 48 条第 1 項及び第 55 条第 7 号、並びに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（以下「技術基準解釈」という。）に適合するよう、以下の(1)及び(2)の工程ごとに検査を実施する。</p> <p>(1) あらかじめ確認する事項</p> <p>次の①及び②については、主要な耐圧部の溶接をしようとする前に、「日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格(JSME S NB1-2007)」(以下「溶接規格」という。)第 2 部 溶接施工法認証標準及び第 3 部 溶接士技能認証標準に従い、表 2-1、表 2-2 に示す検査を行う。その際、以下のいずれかに該当する特殊な溶接方法は、その確認事項の条件及び方法の範囲内で①溶接施工法に関することを確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・平成 12 年 6 月以前に旧電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令（昭和 45 年通商産業省令第 81 号）第 2 条に基づき、通商産業大臣の認可を受けた特殊な溶接方法</li> <li>・平成 12 年 7 月以降に、一般社団法人日本溶接協会又は一般財団法人発電設備技術検査協会による確性試験により適合性確認を受けた特殊な溶接方法</li> </ul> <p>① 溶接施工法に関すること</p> <p>② 溶接士の技能に関すること</p> <p>なお、①又は②について、既に、以下のいずれかにより適合性が確認されているものは、主要な耐圧部の溶接をしようとする前に表 2-1、表 2-2 に示す検査は要さないものとする。</p> <p>① 溶接施工法に関すること</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・平成 12 年 6 月 30 日以前に電気事業法（昭和 39 年法律第 170 号）に基づき国の認可証又は合格証を取得した溶接施工法</li> <li>・平成 12 年 7 月 1 日から平成 25 年 7 月 7 日に、電気事業法に基づく溶接事業者検査において、各設置者が技術基準への適合性を確認した溶接施工法</li> </ul>	<p style="text-align: center;">変更なし</p>

変更前	変更後
<ul style="list-style-type: none"> <li>・平成 25 年 7 月 8 日以降、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）に基づき、各設置者が技術基準への適合性を確認した溶接施工法</li> <li>・前述と同等の溶接施工法として、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）における他の施設にて、認可を受けたもの、溶接安全管理検査、使用前事業者検査等で溶接施工法の確認を受けたもの又は客観性を有する方法により確認試験が行われ判定基準に適合しているもの。ここで、他の施設とは、加工施設、試験研究用等原子炉施設、使用済燃料貯蔵施設、再処理施設、特定第一種廃棄物埋設施設、特定廃棄物管理施設をいう。</li> </ul> <p>② 溶接士の技能に関すること</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・溶接規格第 3 部 溶接士技能認証標準によって認定されたものと同等と認められるものとして、技術基準解釈別記-5 に示されている溶接士が溶接を行う場合</li> <li>・溶接規格第 3 部 溶接士技能認証標準に適合する溶接士が、技術基準解釈別記-5 の有効期間内に溶接を行う場合</li> </ul>	<p style="text-align: center;">変更なし</p>

変更前		変更後																						
<p>表 2-1 あらかじめ確認すべき事項（溶接施工法）</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>検査項目</th> <th>検査方法及び判定基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>溶接施工法の内容確認</td> <td>計画している溶接施工法の内容が、技術基準に適合する方法であることを確認する。</td> </tr> <tr> <td>材料確認</td> <td>試験材の種類及び機械的性質が試験に適したものであることを確認する。</td> </tr> <tr> <td>開先確認</td> <td>試験をする上で、健全な溶接が施工できることを確認する。</td> </tr> <tr> <td>溶接作業中確認</td> <td>溶接施工法及び溶接設備等が計画どおりのものであり、溶接条件等が溶接検査計画書のとおり実施されることを確認する。</td> </tr> <tr> <td>外観確認</td> <td>試験材について、目視により外観が良好であることを確認する。</td> </tr> <tr> <td>溶接後熱処理確認</td> <td>溶接後熱処理の方法等が技術基準に基づき計画した内容に適合していることを確認する。</td> </tr> <tr> <td>浸透探傷試験確認</td> <td>技術基準に適合した試験の方法により浸透探傷試験を行い、表面における開口した欠陥の有無を確認する。</td> </tr> <tr> <td>機械試験確認</td> <td>溶接部の強度、延性及び靱性等の機械的性質を確認するため、継手引張試験、曲げ試験及び衝撃試験により溶接部の健全性を確認する。</td> </tr> <tr> <td>断面検査確認</td> <td>管と管板の取付け溶接部の断面について、技術基準に適合する方法により目視検査及びのど厚測定により確認する。</td> </tr> <tr> <td>(判定) <sup>(注)</sup></td> <td>以上の全ての工程において、技術基準に適合していることが確認された場合、当該溶接施工法は技術基準に適合するものとする。</td> </tr> </tbody> </table>		検査項目	検査方法及び判定基準	溶接施工法の内容確認	計画している溶接施工法の内容が、技術基準に適合する方法であることを確認する。	材料確認	試験材の種類及び機械的性質が試験に適したものであることを確認する。	開先確認	試験をする上で、健全な溶接が施工できることを確認する。	溶接作業中確認	溶接施工法及び溶接設備等が計画どおりのものであり、溶接条件等が溶接検査計画書のとおり実施されることを確認する。	外観確認	試験材について、目視により外観が良好であることを確認する。	溶接後熱処理確認	溶接後熱処理の方法等が技術基準に基づき計画した内容に適合していることを確認する。	浸透探傷試験確認	技術基準に適合した試験の方法により浸透探傷試験を行い、表面における開口した欠陥の有無を確認する。	機械試験確認	溶接部の強度、延性及び靱性等の機械的性質を確認するため、継手引張試験、曲げ試験及び衝撃試験により溶接部の健全性を確認する。	断面検査確認	管と管板の取付け溶接部の断面について、技術基準に適合する方法により目視検査及びのど厚測定により確認する。	(判定) <sup>(注)</sup>	以上の全ての工程において、技術基準に適合していることが確認された場合、当該溶接施工法は技術基準に適合するものとする。	<p>変更なし</p>
検査項目	検査方法及び判定基準																							
溶接施工法の内容確認	計画している溶接施工法の内容が、技術基準に適合する方法であることを確認する。																							
材料確認	試験材の種類及び機械的性質が試験に適したものであることを確認する。																							
開先確認	試験をする上で、健全な溶接が施工できることを確認する。																							
溶接作業中確認	溶接施工法及び溶接設備等が計画どおりのものであり、溶接条件等が溶接検査計画書のとおり実施されることを確認する。																							
外観確認	試験材について、目視により外観が良好であることを確認する。																							
溶接後熱処理確認	溶接後熱処理の方法等が技術基準に基づき計画した内容に適合していることを確認する。																							
浸透探傷試験確認	技術基準に適合した試験の方法により浸透探傷試験を行い、表面における開口した欠陥の有無を確認する。																							
機械試験確認	溶接部の強度、延性及び靱性等の機械的性質を確認するため、継手引張試験、曲げ試験及び衝撃試験により溶接部の健全性を確認する。																							
断面検査確認	管と管板の取付け溶接部の断面について、技術基準に適合する方法により目視検査及びのど厚測定により確認する。																							
(判定) <sup>(注)</sup>	以上の全ての工程において、技術基準に適合していることが確認された場合、当該溶接施工法は技術基準に適合するものとする。																							
<p>(注) ( ) 内は検査項目ではない。</p>																								

変更前		変更後
表 2-2 あらかじめ確認すべき事項（溶接士）		
検査項目	検査方法及び判定基準	
溶接士の試験内容の確認	検査を受けようとする溶接士の氏名、溶接訓練歴等、及びその者が行う溶接施工法の範囲を確認する。	
材料確認	試験材の種類及び機械的性質が試験に適したものであることを確認する。	
開先確認	試験をする上で、健全な溶接が施工できることを確認する。	
溶接作業中確認	溶接士及びその溶接士が行う溶接作業が溶接検査計画書のとおりであり、溶接条件が溶接検査計画書のとおり実施されることを確認する。	
外観確認	目視により外観が良好であることを確認する。	
浸透探傷試験確認	技術基準に適合した試験の方法により浸透探傷試験を行い、表面に開口した欠陥の有無を確認する。	変更なし
機械試験確認	曲げ試験を行い、欠陥の有無を確認する。	
断面検査確認	管と管板の取付け溶接部の断面について、技術基準に適合する方法により目視検査及びのど厚測定により確認する。	
(判定) <sup>(注)</sup>	以上の全ての工程において、技術基準に適合していることが確認された場合、当該溶接士は技術基準に適合する技能を持った者とする。	
(注) ( ) 内は検査項目ではない。		

変更前	変更後
<p>(2) 主要な耐圧部の溶接部に対して確認する事項</p> <p>発電用原子炉施設のうち技術基準第 17 条第 15 号、第 31 条、第 48 条第 1 項及び第 55 条第 7 号の主要な耐圧部の溶接部について、表 3-1 に示す検査を行う。</p> <p>また、以下の①又は②に限り、原子炉冷却材圧力バウンダリに属する容器に対してテンパービード溶接を適用することができ、この場合、テンパービード溶接方法を含む溶接施工法の溶接部については、表 3-1 に加えて表 3-2 に示す検査を実施する。</p> <p>① 平成 19 年 12 月 5 日以前に電気事業法に基づき実施された検査において溶接後熱処理が不要として適合性が確認された溶接施工法</p> <p>② 以下の規定に基づく溶接施工法確認試験において、溶接後熱処理が不要として適合性が確認された溶接施工法</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・平成 12 年 6 月以前に旧電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令（昭和 45 年通商産業省令第 81 号）第 2 条に基づき、通商産業大臣の許可を受けた特殊な溶接方法</li> <li>・平成 12 年 7 月以降に、一般社団法人日本溶接協会又は一般財団法人発電設備技術検査協会による確性試験による適合性確認を受けた特殊な溶接方法</li> </ul>	<p style="text-align: center;">変更なし</p>



変更前		変更後
表 3-1 主要な耐圧部の溶接部に対して確認する事項		
検査項目	検査方法及び判定基準	
適用する溶接施工法、溶接士の確認	適用する溶接施工法、溶接士について、表 2-1 及び表 2-2 に示す適合確認がなされていることを確認する。	
材料検査	溶接に使用する材料が技術基準に適合するものであることを確認する。	
開先検査	開先形状、開先面の清浄及び継手面の食違い等が技術基準に適合するものであることを確認する。	
溶接作業検査	あらかじめの確認において、技術基準に適合していることが確認された溶接施工法及び溶接士により溶接施工しているかを確認する。	
熱処理検査	溶接後熱処理の方法、熱処理設備の種類及び容量が、技術基準に適合するものであること、また、あらかじめの確認において技術基準に適合していることを確認した溶接施工法の範囲により実施しているかを確認する。	
非破壊検査	溶接部について非破壊試験を行い、その試験方法及び結果が技術基準に適合するものであることを確認する。	
機械検査	溶接部について機械試験を行い、当該溶接部の機械的性質が技術基準に適合するものであることを確認する。	
耐圧検査 <sup>(注1)</sup>	規定圧力で耐圧試験を行い、これに耐え、かつ、漏えいがないことを確認する。規定圧力で行うことが著しく困難な場合は、可能な限り高い圧力で試験を実施し、耐圧試験の代替として非破壊試験を実施する。 (外観の状況確認) 溶接部の形状、外観及び寸法が技術基準に適合することを確認する。	
(適合確認) <sup>(注2)</sup>	以上の全ての工程において、技術基準に適合していることが確認された場合、当該溶接部は技術基準に適合するものとする。	
<p>(注 1) 耐圧検査の方法について、表 3-1 によらない場合は、基本設計方針の共通項目として定めた「材料及び構造等」の方針によるものとする。</p> <p>(注 2) ( ) 内は検査項目ではない。</p>		変更なし

変更前						変更後
<p align="center">表 3-2 主要な耐圧部の溶接部に対して確認する事項 (テンパービード溶接を適用する場合)</p>						
検査項目	検査方法及び判定基準	同種材の溶接	クラッド材の溶接	異種材の溶接	バタリング材の溶接	
材料検査	1. 中性子照射 $10^{19}\text{nvt}$ 以上受ける設備を溶接する場合に使用する溶接材料の銅含有量は、0.10%以下であることを確認する。	適用	適用	適用	適用	
	2. 溶接材料の表面は、錆、油脂付着及び汚れ等がないことを確認する。	適用	適用	適用	適用	
開先検査	1. 当該施工部位は、溶接規格に規定する溶接後熱処理が困難な部位であることを図面等で確認する。	適用	適用	適用	適用	
	2. 当該施工部位は、過去に当該溶接施工法と同一又は類似の溶接後熱処理が不要な溶接方法を適用した経歴を有していないことを確認する。	適用	適用	適用	適用	
	3. 溶接を行う機器の面は、浸透探傷試験又は磁粉探傷試験を行い、これに合格することを確認する。	適用	適用	適用	適用	
	4. 溶接深さは、母材の厚さの2分の1以下であること。	適用	—	適用	—	
	5. 個々の溶接部の面積は $650\text{cm}^2$ 以下であることを確認する。	適用	—	適用	—	
	6. 適用する溶接施工法に、クラッド材の溶接開先底部とフェライト系母材との距離が規定されている場合は、その寸法が規定を満足していることを確認する。	—	適用	—	—	
	7. 適用する溶接施工法に、溶接開先部がフェライト系母材側へまたがって設けられ、そのまたがりの距離が規定されている場合は、その寸法が規定を満足していることを確認する。	—	—	適用	—	
						変更なし

変更前						変更後
表 3-2 主要な耐圧部の溶接部に対して確認する事項 (テンパービード溶接を適用する場合)						
検査項目	検査方法及び判定基準	同種材の溶接	クラッド材の溶接	異種材の溶接	バタリング材の溶接	
溶接作業検査	自動ティグ溶接を適用する場合は、次によることを確認する。					
	1. 自動ティグ溶接は、溶加材を通電加熱しない方法であることを確認する。	適用	適用	適用	適用	
	2. 溶接は、適用する溶接施工法に規定された方法に適合することを確認する。					
	①各層の溶接入熱が当該施工法に規定する範囲内で施工されていることを確認する。	適用	適用	適用	適用	
	②2層目端部の溶接は、1層目溶接端の母材熱影響部(1層目溶接による粗粒化域)が適切なテンパー効果を受けるよう、1層目溶接端と2層目溶接端の距離が1mmから5mmの範囲であることを確認する。	適用	—	適用	—	
	③予熱を行う溶接施工法の場合は、当該施工法に規定された予熱範囲及び予熱温度を満足していることを確認する。	適用	適用	適用	適用	
	④当該施工法にパス間温度が規定されている場合は、温度制限を満足していることを確認する。	適用	適用	適用	適用	
⑤当該施工法に、溶接を中断する場合及び溶接終了時の温度保持範囲と保持時間が規定されている場合は、その規定を満足していることを確認する。	適用	適用	適用	適用		
⑥余盛り溶接は、1層以上行われていることを確認する。	適用	—	適用	—		
⑦溶接後の温度保持終了後、最終層ビードの除去及び溶接部が平滑となるよう仕上げ加工されていることを確認する。	適用	—	適用	—		
						変更なし

変更前						変更後
表 3-2 主要な耐圧部の溶接部に対して確認する事項 (テンパービード溶接を適用する場合)						
検査項目	検査方法及び判定基準	同種材の溶接	クラッド材の溶接	異種材の溶接	バタリング材の溶接	
非破壊検査	溶接部の非破壊検査は、次によることを確認する。					
	1. 1層目の溶接終了後、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行い、これに合格することを確認する。	適用	-	-	-	
	2. 溶接終了後の試験は、次によることを確認する。					
	①溶接終了後の非破壊試験は、室温状態で48時間以上経過した後実施していることを確認する。	適用	適用	適用	適用	
	②予熱を行った場合はその領域を含み、溶接部は磁粉探傷試験又は浸透探傷試験を行い、これに合格することを確認する。	適用	適用	適用	適用	
	③超音波探傷試験を行い、これに合格することを確認する。	-	適用	適用	-	
④超音波探傷試験又は2層目以降の各層の磁粉探傷試験若しくは浸透探傷試験を行い、これに合格することを確認する。	適用	-	-	-		
⑤放射線透過試験又は超音波探傷試験を行い、これに合格することを確認する。	-	-	-	適用		
3. 温度管理のために取り付けた熱電対がある場合は、機械的方法で除去し、除去した面に欠陥がないことを確認する。	適用	適用	適用	適用		
						変更なし

変更前	変更後
<p>2.1.3 燃料体に係る検査</p> <p>燃料体については、以下(1)～(3)の加工の工程ごとに表 4 に示す検査を実施する。なお、燃料体を発電用原子炉に受け入れた後は、原子炉本体として機能又は性能に係る検査を実施する。</p> <p>(1) 燃料材、燃料被覆材その他の部品については、組成、構造又は強度に係る試験をすることができる状態になった時</p> <p>(2) 燃料要素の加工が完了した時</p> <p>(3) 加工が完了した時</p> <p>また、燃料体については構造、強度又は漏えいに係る検査を実施することにより、技術基準への適合性が確認できることから、構造、強度又は漏えいに係る検査の実施をもって工事の完了とする。</p>	<p>変更なし</p>

変更前

変更後

表 4 構造、強度又は漏えいに係る検査（燃料体）<sup>(注)</sup>

検査項目	検査方法		判定基準
(1) 燃料材、燃料被覆材その他の部品の化学成分の分析結果の確認その他これらの部品の組成、構造又は強度に係る検査	材料検査	使用されている材料の化学成分、機械的強度等が工事計画のとおりであることを確認する。	設工認のとおりであること、技術基準に適合するものであること。
	寸法検査	主要寸法が工事計画のとおりであり、許容寸法内であることを確認する。	
(2) 燃料要素に係る次の検査 一 寸法検査 二 外観検査 三 表面汚染密度検査 四 溶接部の非破壊検査 五 圧力検査 六 漏えい検査（この表の(3)三に掲げる検査が行われる場合を除く。）	外観検査	有害な欠陥等がないことを確認する。	変更なし
	表面汚染密度検査	表面に付着している核燃料物質の量が技術基準の規定を満足することを確認する。	
	溶接部の非破壊検査	溶接部の健全性を非破壊検査等により確認する。	
	漏えい検査	漏えい試験における漏えい量が、技術基準の規定を満足することを確認する。	
	圧力検査	初期圧力が工事計画のとおりであり、許容値内であることを確認する。	
	質量検査	燃料集合体の総質量が工事計画のとおりであり、許容値内であることを確認する。	
(3) 組み立てられた燃料体に係る次の検査 一 寸法検査 二 外観検査 三 漏えい検査（この表の(2)六に掲げる検査が行われる場合を除く。） 四 質量検査	寸法検査	寸法が工事計画のとおりであることを確認する。	変更なし
	外観検査	有害な欠陥等がないことを確認する。	
	漏えい検査	漏えい試験における漏えい量が、技術基準の規定を満足することを確認する。	
	質量検査	燃料集合体の総質量が工事計画のとおりであり、許容値内であることを確認する。	

変更なし

(注) 基本設計方針のうち適合性確認対象に対して実施可能な検査を含む。

変更前	変更後						
<p>2.2 機能又は性能に係る検査</p> <p>機能又は性能を確認するため、以下のとおり検査を行う。</p> <p>但し、表 1 の表中に示す検査により機能又は性能を確認できる場合は、表 5、表 6 又は表 7 の表中に示す検査を表 1 の表中に示す検査に替えて実施する。</p> <p>また、改造、修理又は取替の工事であって、燃料体を挿入できる段階又は臨界反応操作を開始できる段階と工事完了時が同じ時期の場合、工事完了時として実施することができる。</p> <p>構造、強度又は漏えいを確認する検査と機能又は性能を確認する検査の内容が同じ場合は、構造、強度又は漏えいを確認する検査の記録確認をもって、機能又は性能を確認する検査とすることができる。</p> <p>2.2.1 燃料体を挿入できる段階の検査</p> <p>発電用原子炉に燃料体を挿入することができる状態になったとき表 5 に示す検査を実施する。</p> <p style="text-align: center;">表 5 燃料体を挿入できる段階の検査<sup>(注)</sup></p> <table border="1" data-bbox="281 1050 1460 1554"> <thead> <tr> <th>検査項目</th> <th>検査方法</th> <th>判定基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>発電用原子炉に燃料体を挿入した状態において必要なものを確認する検査及び工程上発電用原子炉に燃料体を挿入する前でなければ実施できない検査</td> <td>発電用原子炉に燃料体を挿入するにあたり、核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設に係る機能又は性能を試運転等により確認するほか、発電用原子炉施設の安全性確保の観点から、発電用原子炉に燃料体を挿入した状態において必要な工学的安全施設、安全設備等の機能又は性能を当該各系統の試運転等により確認する。</td> <td>原子炉に燃料体を挿入するにあたり、確認が必要な範囲について、設工認のとおりであり、技術基準に適合するものであること。</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注) 基本設計方針のうち適合性確認対象に対して実施可能な検査を含む。</p>	検査項目	検査方法	判定基準	発電用原子炉に燃料体を挿入した状態において必要なものを確認する検査及び工程上発電用原子炉に燃料体を挿入する前でなければ実施できない検査	発電用原子炉に燃料体を挿入するにあたり、核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設に係る機能又は性能を試運転等により確認するほか、発電用原子炉施設の安全性確保の観点から、発電用原子炉に燃料体を挿入した状態において必要な工学的安全施設、安全設備等の機能又は性能を当該各系統の試運転等により確認する。	原子炉に燃料体を挿入するにあたり、確認が必要な範囲について、設工認のとおりであり、技術基準に適合するものであること。	<p style="text-align: center;">変更なし</p>
検査項目	検査方法	判定基準					
発電用原子炉に燃料体を挿入した状態において必要なものを確認する検査及び工程上発電用原子炉に燃料体を挿入する前でなければ実施できない検査	発電用原子炉に燃料体を挿入するにあたり、核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設に係る機能又は性能を試運転等により確認するほか、発電用原子炉施設の安全性確保の観点から、発電用原子炉に燃料体を挿入した状態において必要な工学的安全施設、安全設備等の機能又は性能を当該各系統の試運転等により確認する。	原子炉に燃料体を挿入するにあたり、確認が必要な範囲について、設工認のとおりであり、技術基準に適合するものであること。					

変更前	変更後												
<p>2.2.2 臨界反応操作を開始できる段階の検査</p> <p>発電用原子炉の臨界反応操作を開始することができる状態になったとき、表 6 に示す検査を実施する。</p> <p>表 6 臨界反応操作を開始できる段階の検査<sup>(注)</sup></p> <table border="1" data-bbox="281 512 1460 974"> <thead> <tr> <th>検査項目</th> <th>検査方法</th> <th>判定基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>発電用原子炉が臨界に達する時に必要なものを確認する検査及び工程上発電用原子炉が臨界に達する前でなければ実施できない検査</td> <td>発電用原子炉の出力を上げるにあたり、発電用原子炉に燃料体を挿入した状態での確認項目として、燃料体の炉内配置及び原子炉の核的特性等を確認する。また、工程上発電用原子炉が臨界に達する前でなければ機能又は性能を確認できない設備について、機能又は性能を当該各系統の試運転等により確認する。</td> <td>原子炉の臨界反応操作を開始するにあたり、確認が必要な範囲について、設工認のとおりであり、技術基準に適合すること。</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注) 基本設計方針のうち適合性確認対象に対して実施可能な検査を含む。</p> <p>2.2.3 工事完了時の検査</p> <p>全ての工事が完了したとき、表 7 に示す検査を実施する。</p> <p>表 7 工事完了時の検査<sup>(注)</sup></p> <table border="1" data-bbox="287 1270 1454 1772"> <thead> <tr> <th>検査項目</th> <th>検査方法</th> <th>判定基準</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>発電用原子炉の出力運転時における発電用原子炉施設の総合的な性能を確認する検査、その他工事の完了を確認するために必要な検査</td> <td>工事の完了を確認するために、発電用原子炉で発生した蒸気を用いる施設の試運転等により、当該各系統の機能又は性能の最終的な確認を行う。発電用原子炉の出力を上げた状態における確認項目として、プラント全体での最終的な試運転により発電用原子炉施設の総合的な性能を確認する。</td> <td>当該原子炉施設の供用を開始するにあたり、原子炉施設の安全性を確保するために必要な範囲について、設工認のとおりであり、技術基準に適合すること。</td> </tr> </tbody> </table> <p>(注) 基本設計方針のうち適合性確認対象に対して実施可能な検査を含む。</p>	検査項目	検査方法	判定基準	発電用原子炉が臨界に達する時に必要なものを確認する検査及び工程上発電用原子炉が臨界に達する前でなければ実施できない検査	発電用原子炉の出力を上げるにあたり、発電用原子炉に燃料体を挿入した状態での確認項目として、燃料体の炉内配置及び原子炉の核的特性等を確認する。また、工程上発電用原子炉が臨界に達する前でなければ機能又は性能を確認できない設備について、機能又は性能を当該各系統の試運転等により確認する。	原子炉の臨界反応操作を開始するにあたり、確認が必要な範囲について、設工認のとおりであり、技術基準に適合すること。	検査項目	検査方法	判定基準	発電用原子炉の出力運転時における発電用原子炉施設の総合的な性能を確認する検査、その他工事の完了を確認するために必要な検査	工事の完了を確認するために、発電用原子炉で発生した蒸気を用いる施設の試運転等により、当該各系統の機能又は性能の最終的な確認を行う。発電用原子炉の出力を上げた状態における確認項目として、プラント全体での最終的な試運転により発電用原子炉施設の総合的な性能を確認する。	当該原子炉施設の供用を開始するにあたり、原子炉施設の安全性を確保するために必要な範囲について、設工認のとおりであり、技術基準に適合すること。	<p>変更なし</p>
検査項目	検査方法	判定基準											
発電用原子炉が臨界に達する時に必要なものを確認する検査及び工程上発電用原子炉が臨界に達する前でなければ実施できない検査	発電用原子炉の出力を上げるにあたり、発電用原子炉に燃料体を挿入した状態での確認項目として、燃料体の炉内配置及び原子炉の核的特性等を確認する。また、工程上発電用原子炉が臨界に達する前でなければ機能又は性能を確認できない設備について、機能又は性能を当該各系統の試運転等により確認する。	原子炉の臨界反応操作を開始するにあたり、確認が必要な範囲について、設工認のとおりであり、技術基準に適合すること。											
検査項目	検査方法	判定基準											
発電用原子炉の出力運転時における発電用原子炉施設の総合的な性能を確認する検査、その他工事の完了を確認するために必要な検査	工事の完了を確認するために、発電用原子炉で発生した蒸気を用いる施設の試運転等により、当該各系統の機能又は性能の最終的な確認を行う。発電用原子炉の出力を上げた状態における確認項目として、プラント全体での最終的な試運転により発電用原子炉施設の総合的な性能を確認する。	当該原子炉施設の供用を開始するにあたり、原子炉施設の安全性を確保するために必要な範囲について、設工認のとおりであり、技術基準に適合すること。											



変更前

変更後

2.3 基本設計方針検査

基本設計方針のうち「構造、強度又は漏えいに係る検査」及び「機能又は性能に係る検査」では確認できない事項について、表 8 に示す検査を実施する。

表 8 基本設計方針検査

検査項目	検査方法	判定基準
基本設計方針検査	基本設計方針のうち表 1、表 4、表 5、表 6、表 7 では確認できない事項について、基本設計方針に従い工事が実施されたことを工事中又は工事完了時における適切な段階で確認する。	「基本設計方針」のとおりであること。

2.4 品質マネジメントシステムに係る検査

実施した工事が、「設計及び工事に係る品質マネジメントシステム」に記載したプロセス、「1. 工事の手順」並びに「2. 使用前事業者検査の方法」のとおり行われていることの実施状況を確認するとともに、使用前事業者検査で記録確認の対象となる工事の段階で作成される製造メーカー等の記録の信頼性を確保するため、表 9 に示す検査を実施する。

表 9 品質マネジメントシステムに係る検査

検査項目	検査方法	判定基準
品質マネジメントシステムに係る検査	工事が設工認の「工事の方法」及び「設計及び工事に係る品質マネジメントシステム」に示すプロセスのとおり実施していることを品質記録や聞取り等により確認する。この確認には、検査における記録の信頼性確認として、基となる記録採取の管理方法の確認やその管理方法の遵守状況の確認を含む。	設工認で示す「設計及び工事に係る品質マネジメントシステム」及び「工事の方法」のとおりに行工管理が行われていること。

変更なし

変更前	変更後
<p><b>3. 工事上の留意事項</b></p> <p><b>3.1 設置又は変更の工事に係る工事上の留意事項</b></p> <p>発電用原子炉施設の設置又は変更の工事並びに主要な耐圧部の溶接部における工事の実施にあたっては、発電用原子炉施設保安規定を遵守するとともに、従事者及び公衆の安全確保や既設の安全上重要な機器等への悪影響防止等の観点から、以下に留意し工事を進める。なお、工事の手順と使用前事業者検査との関係については、図 1、図 2 及び図 3 に示す。</p> <p>a. 設置又は変更の工事をを行う発電用原子炉施設の機器等について、周辺資機材、他の発電用原子炉施設及び環境条件からの悪影響や劣化等を受けないよう、隔離、作業環境維持、異物侵入防止対策等の必要な措置を講じる。</p> <p>b. 工事にあたっては、既設の安全上重要な機器等へ悪影響を与えないよう、現場状況、作業環境及び作業条件を把握し、作業に潜在する危険性又は有害性や工事用資機材から想定される影響を確認するとともに、隔離、火災防護、溢水防護、異物侵入防止対策、作業管理等の必要な措置を講じる。</p> <p>c. 設置又は変更の工事をを行う発電用原子炉施設の機器等について、必要に応じて、供用後の施設管理のための重要なデータを採取する。</p> <p>d. プラントの状況に応じて、検査・試験、試運転等の各段階における工程を管理する。</p> <p>e. 設置又は変更の工事をを行う発電用原子炉施設の機器等について、供用開始後に必要な機能性能を発揮できるよう製造から供用開始までの間、管理する。</p> <p>f. 放射性廃棄物の発生量低減に努めるとともに、その種類に応じて保管及び処理を行う。</p> <p>g. 現場状況、作業環境及び作業条件を把握し、放射線業務従事者に対して防護具の着用や作業時間管理等適切な被ばく低減措置と、被ばく線量管理を行う。また、公衆の放射線防護のため、気体及び液体廃棄物の放出管理については、周辺監視区域外の空気中・水中の放射性物質濃度が「核原料物質又は核燃料物質の精錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」に定める値を超えないようにするとともに、放出管理目標値を超えないように努める。</p> <p>h. 修理の方法は、基本的に「図 1 工事の手順と使用前事業者検査のフロー（燃料体を除く。）」の手順により行うこととし、機器等の全部又は一部に</p>	<p>変更なし</p>

変更前	変更後
<p>ついて、撤去、切断、切削又は取外しを行い、据付、溶接又は取付け、若しくは同等の方法により、同等仕様又は性能・強度が改善されたものに取り替を行う等、機器等の機能維持又は回復を行う。また、機器等の一部撤去、一部撤去の既設端部について閉止板の取付け、蒸気発生器、熱交換器又は冷却器の伝熱管への閉止栓取付け若しくは同等の方法により適切な処置を実施する。</p> <p>i. 特別な工法を採用する場合の施工方法は、技術基準に適合するよう、安全性及び信頼性について必要に応じ検証等により十分確認された方法により実施する。</p> <p>3.2 燃料体の加工に係る工事上の留意事項</p> <p>燃料体の加工に係る工事の実施にあたっては、以下に留意し工事を進める。</p> <p>a. 工事対象設備について、周辺資機材、他の加工施設及び環境条件から波及的影響を受けないよう、隔離等の必要な措置を講じる。</p> <p>b. 工事を行うことにより、他の供用中の加工施設が有する安全機能に影響を与えないよう、隔離等の必要な措置を講じる。</p> <p>c. 工事対象設備について、必要に応じて、供用後の施設管理のための重要なデータを採取する。</p> <p>d. 加工施設の状況に応じて、検査・試験等の各段階における工程を管理する。</p> <p>e. 工事対象設備について、供用開始後に必要な機能性能を発揮できるよう維持する。</p> <p>f. 放射性廃棄物の発生量低減に努めるとともに、その種類に応じて保管及び処理を行う。</p> <p>g. 放射線業務従事者に対する適切な被ばく低減措置と、被ばく線量管理を行う。</p>	<p>変更なし</p>

変更前

変更後

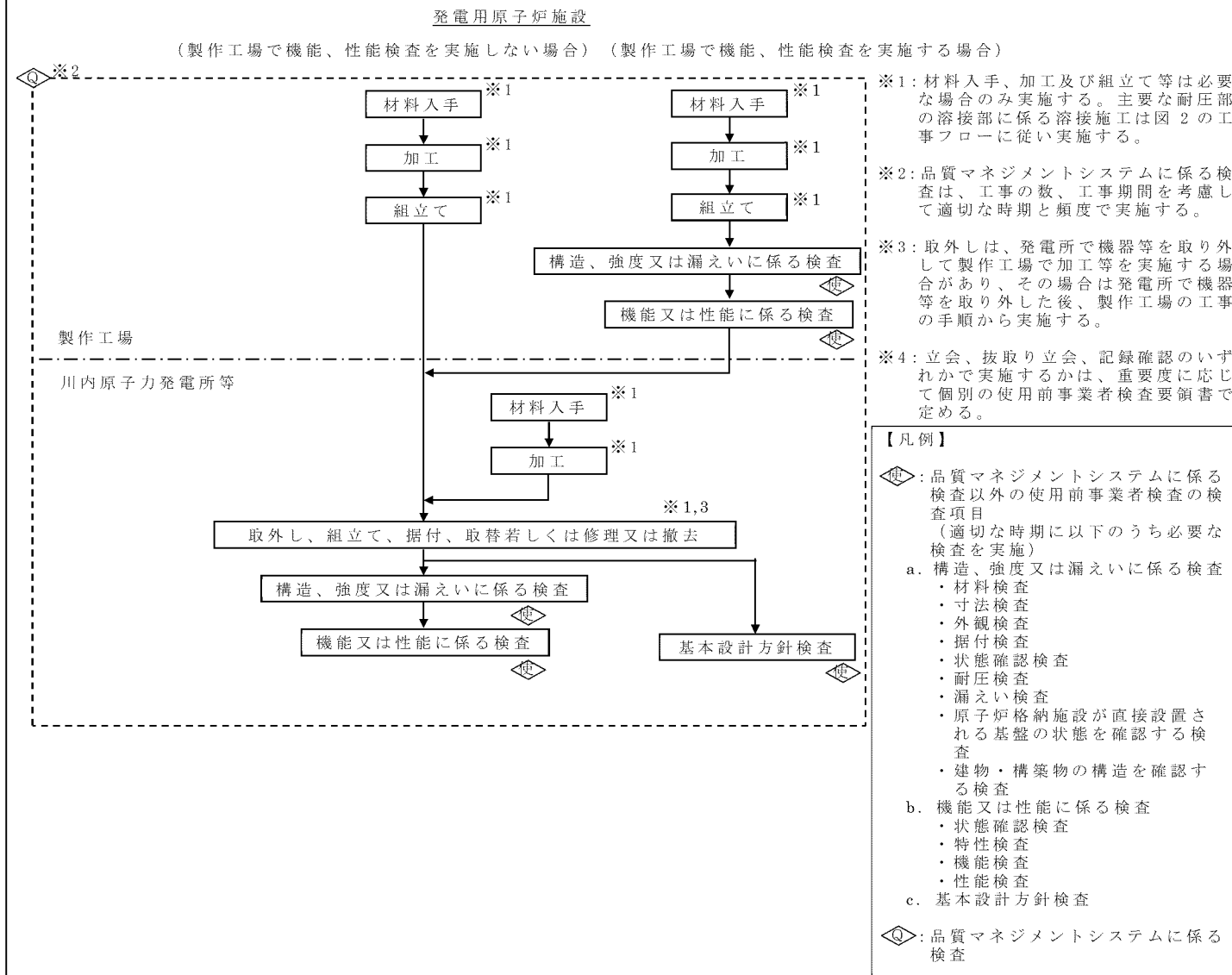


図1 工事の手順と使用前事業者検査のフロー (燃料体を除く。)

変更なし

変更前

変更後

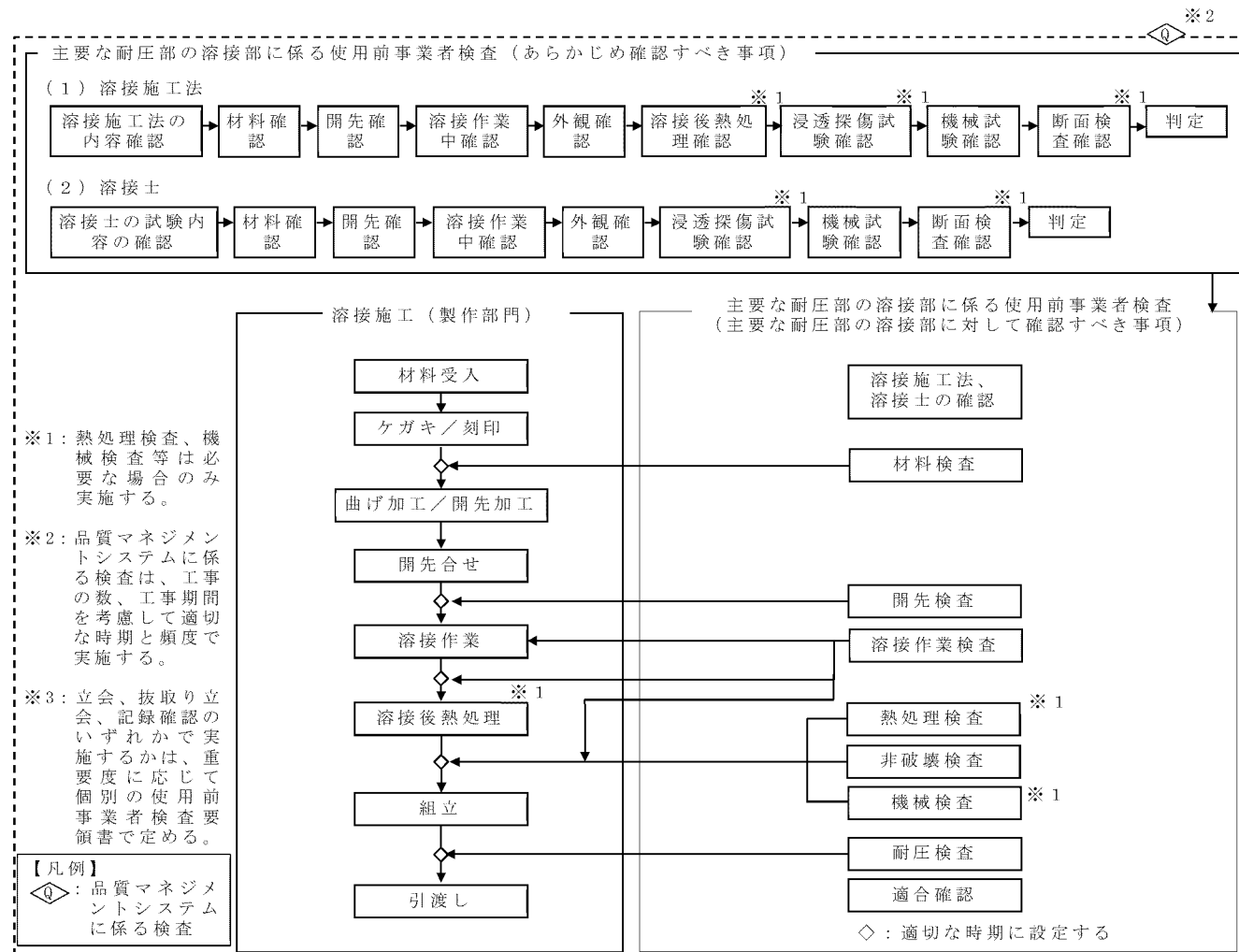


図2 主要な耐圧部の溶接部に係る工事の手順と使用前事業者検査のフロー

変更なし

変更前

変更後

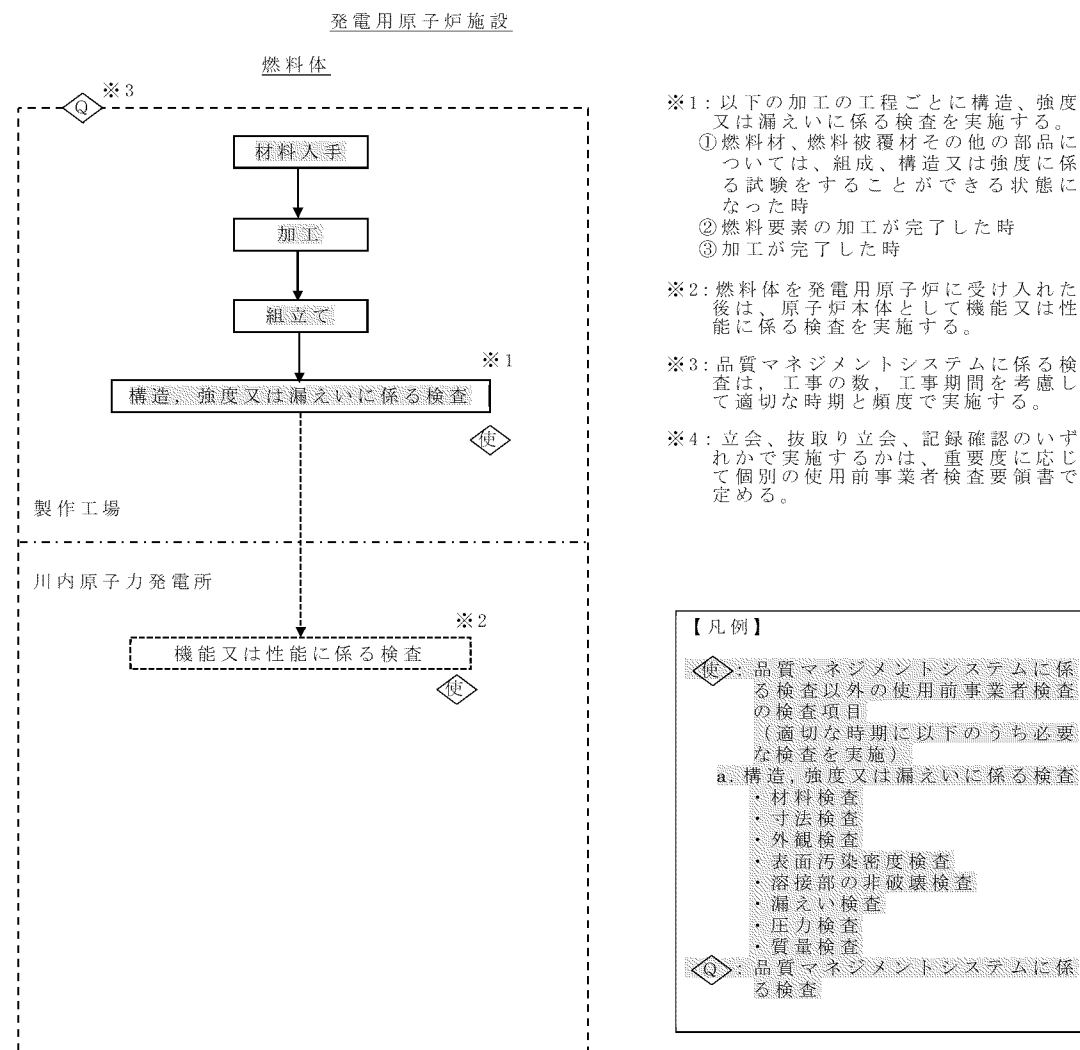


図3 工事の手順と使用前事業者検査のフロー（燃料体）

変更なし

## 補足説明資料 6

強度に関する説明書に関する補足説明資料

目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 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
3.2.1 強度評価に用いる解析コード .....	6
3.3 強度評価結果 .....	8
3.3.1 計算条件 .....	8
3.3.2 計算結果 .....	16
3.3.3 燃料棒の温度評価結果 .....	20
3.3.4 燃料棒の内圧評価結果 .....	22
3.3.5 被覆管の応力評価結果 .....	24
3.3.6 被覆管のひずみ評価結果 .....	28
3.3.7 被覆管の疲労評価結果 .....	31
3.4 その他の考慮事項 .....	34
3.4.1 燃料棒曲がり評価 .....	34
3.4.2 トータルギャップ評価 .....	34
3.4.3 被覆管外面腐食及び水素吸収量評価 .....	35
3.4.4 PCI 評価 .....	36
3.4.5 クリープコラプス評価 .....	36
3.4.6 フレッチェィング摩耗評価 .....	37
4. 燃料集合体の強度計算 .....	46
4.1 燃料集合体の設計基準 .....	46
4.2 燃料集合体強度評価方法 .....	49
4.2.1 燃料輸送及び取扱い時における評価方法 .....	49
4.2.2 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時 における評価方法 .....	54
4.3 強度評価結果 .....	57
4.3.1 燃料輸送及び取扱い時における評価結果 .....	57
4.3.2 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時 における評価結果 .....	59



## 1. 概 要

本資料は、「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、燃料要素（以下「燃料棒」という。）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 :  $45.7 \times 10^6$  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、燃料被覆材（以下「被覆管」という。）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イング摩耗評価を実施する。

第3-1表 燃料棒設計における基本的考慮事項と設計基準

規則等	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>	燃料温度	<p>1) ペレット溶融に伴う過大な膨張を防ぐ。</p> <p>2) 燃料スタックの不安定化を防ぐ。</p> <p>3) 核分裂生成ガス（以下、「FPガス」という。）の過度の放出あるいは移動を防ぐ。</p> <p>4) ペレットと被覆管の有害な化学反応を防ぐ。</p>	燃料中心最高温度は二酸化ウラン及びガドリニア入り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）</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/cm<sup>2</sup>g)以下であること。」という基準を変更し、「燃料棒の内圧は、通常運転時において被覆管の外向きのクリープ変形によりペレットと被覆管のギャップが増加する圧力を超えないこと。」によることとしている。</p>	燃料棒内圧	サーマルフィードバック効果 <sup>(注1)</sup> による燃料温度の過度な上昇を防ぐ。	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。	燃料棒解析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。	燃料棒解析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。
	被覆管応力		被覆管の耐力 <sup>(注2)</sup> 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、被覆管の破損に対して保守的な設定としている。	—
<p>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）</p> <p>2-1 構造設計基準</p> <p>構造設計基準は次のように設定されている。</p> <p>(1)燃料最高温度は二酸化ウランの溶融点未満であること。</p> <p>(2)燃料棒内圧は運転中冷却材圧力(157kg/cm<sup>2</sup>g)以下であること。</p> <p>(3)被覆にかかる応力はジルカロイ-4の耐力以下であること。</p> <p>(4)被覆に生ずる円周方向引張ひずみ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>	被覆管ひずみ	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。	円周方向引張ひずみの変化量は各過渡変化に対し1%以下であること。	O'Donnellらの塑性不安定性の理論では、ジルカロイ材は塑性ひずみ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%は塑性ひずみに対応するものであるが、評価では、塑性ひずみと弾性ひずみの合計が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%塑性ひずみ以下に制限される。	—
	周期的な被覆管ひずみ（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 O'Donnellの曲線）は実測データより求まる最確曲線に対し、更に保守的に余裕（応力に対して1/2、許容繰返し回数に対して1/20）を見込んで設定されている。	疲労損傷評価では、設計上、起動/停止、負荷追従運転及び異常な過渡変化時の原子炉トリップの過渡条件（繰返し回数）を考慮しているが、実際の装荷燃料が受ける過渡条件は設計で考慮している繰返し回数以下であることから、実質上保守的な評価となっている。

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

(注2) 0.2%の塑性変形を起こす応力をいう。

## 3.2 燃料棒の強度評価方法

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

また第 3-1 図に燃料棒強度評価フロー図を示す。

### 3.2.1 強度評価に用いる解析コード

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。

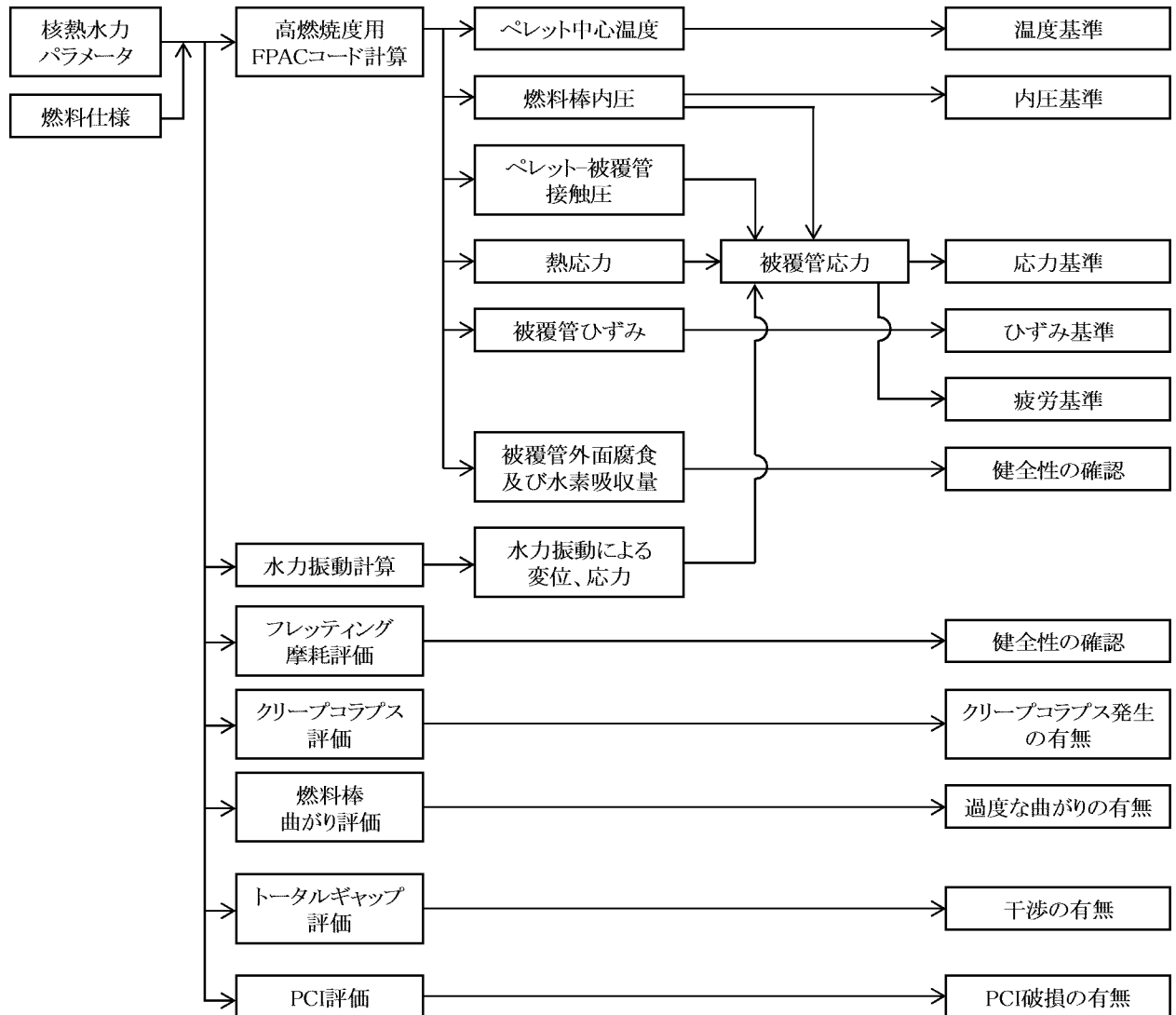
この燃料棒の性能評価を、二酸化ウラン焼結ペレット（以下「二酸化ウランペレット」という。）やガドリニア入り二酸化ウラン焼結ペレット（以下「ガドリニア入り二酸化ウランペレット」という。）（ガドリニア濃度 10wt% 以下）の照射挙動をモデル化し、燃焼によるペレット熱伝導率の低下等の高燃焼度下での照射挙動、あるいは、Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム基合金（以下「NDA」という。）被覆管の照射挙動をモデル化した高燃焼度用 FPAC コード<sup>(注1)</sup> (Fuel Performance Analysis Code) を用いて行う。

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、ひずみ及び疲労等の評価することができる。

---

(注 1) 原子燃料工業, “燃料棒性能解析コード (FPAC)”, NFK-8011 改 11, (2009)

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) 3.20wt% (ガドリニア入り燃料棒)	
	直径	8.190mm	
	高さ	9.2mm	
	形状	凹部 (以下「ディッシュ」という。)、面取り (以下「チャンファ」という。) 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 I 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	□ wt% (タイプ I 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	□ mm	
	下部プレナム長さ	□ mm	
	初期加圧量	□ 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	

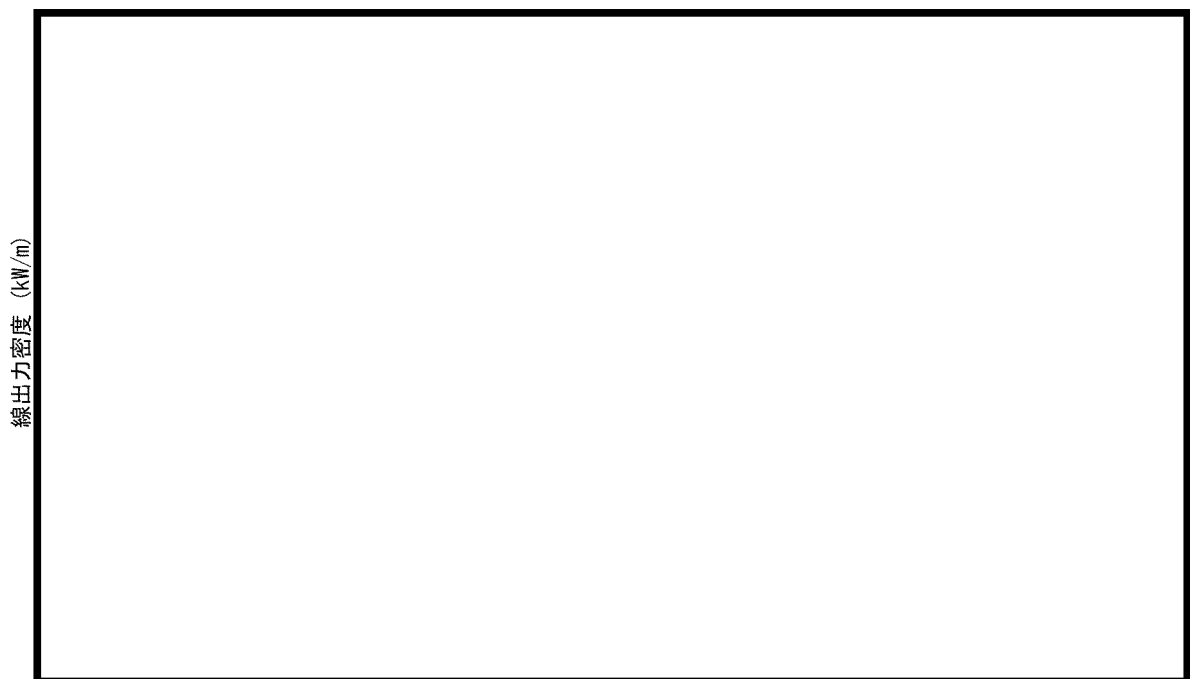


強度計算に用いる出力履歴は、実際の取替炉心における出力履歴の多様性を考慮して設定する。評価対象の燃料棒は、代表的な炉心の最大及び最小燃料棒燃焼度となる燃料棒並びに各サイクルで最大及び最小燃料棒平均線出力密度となる燃料棒を対象とする。出力履歴の多様性を考慮するため、対象燃料棒の燃料棒平均線出力密度を一律に嵩上げしたうえで、最大燃焼度となる燃料棒の燃料棒平均燃焼度が設計燃焼度(61,000MWd/t)に達するように照射時間を照射期間にわたって一律に延長する。炉心としては、二酸化ウラン燃料集合体及びガドリニア入り二酸化ウラン燃料集合体（以下「ガドリニア入り燃料集合体」という。）が混在した炉心を考慮する。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 3-2 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)FPガス放出	a.燃焼度の伸長により増大する。(リコイル・ロックアウト) 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、出力の嵩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。		
被覆管ひずみ	(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ひずみであり、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。		
周期的な被覆管ひずみ(累積損傷係数)	(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。



第 3-2 図 (1/4) 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中の燃料棒)

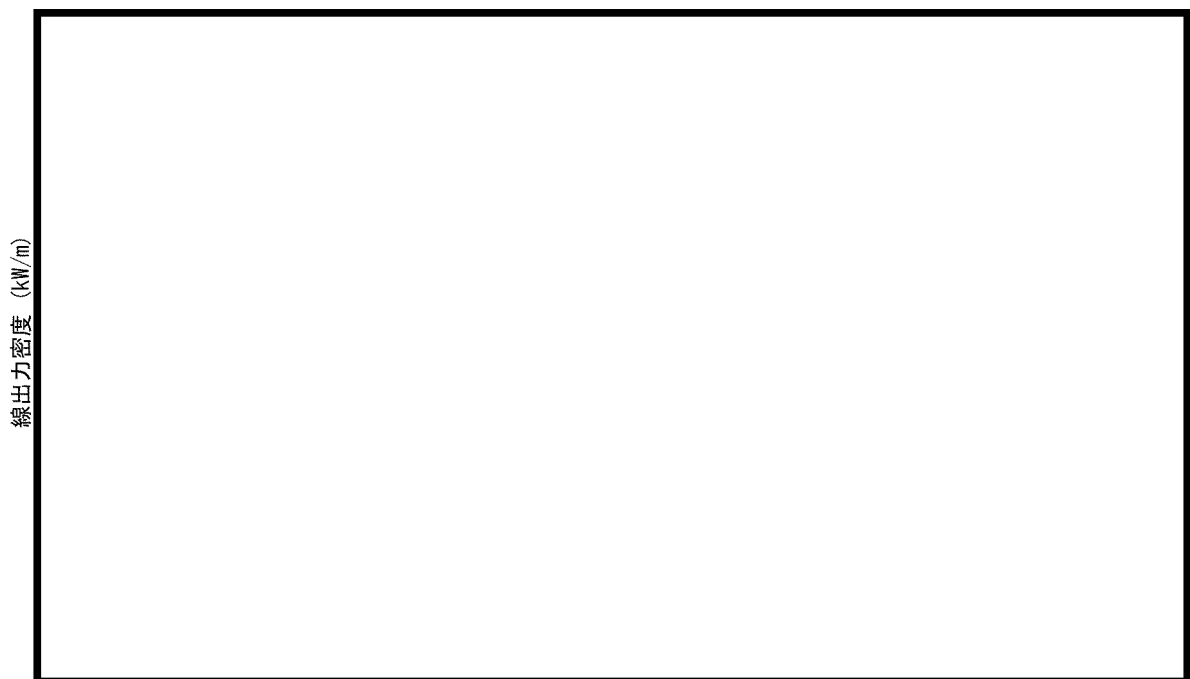


運転時間 (EFPH)

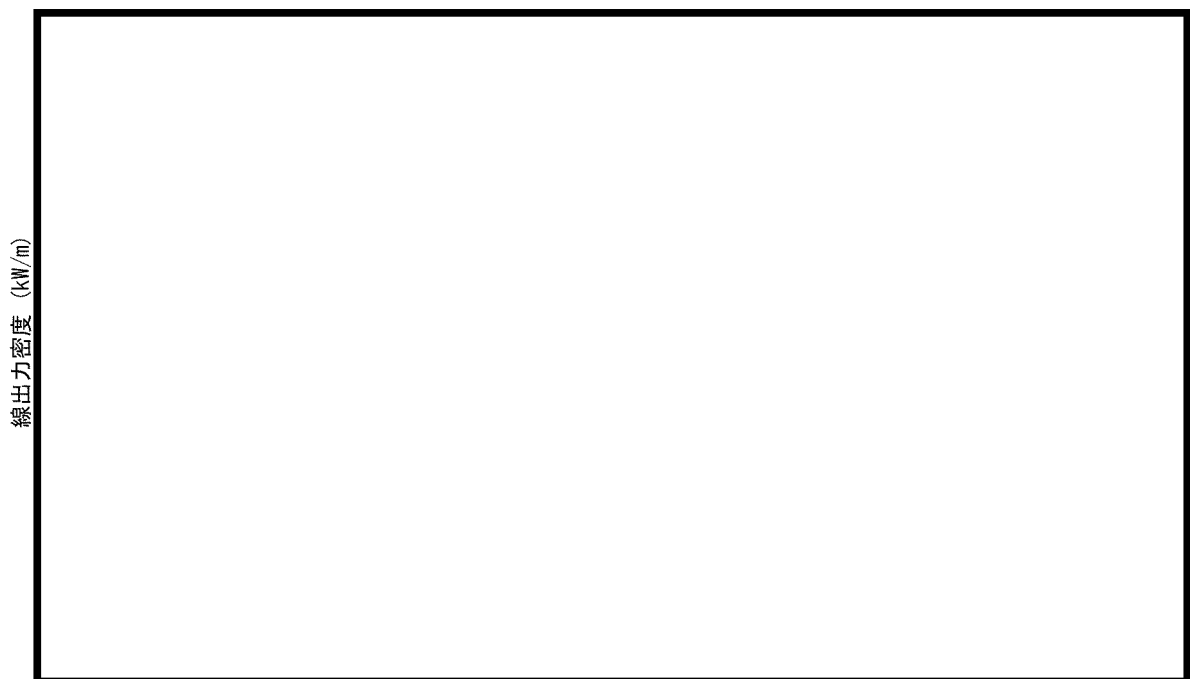


運転時間 (EFPH)

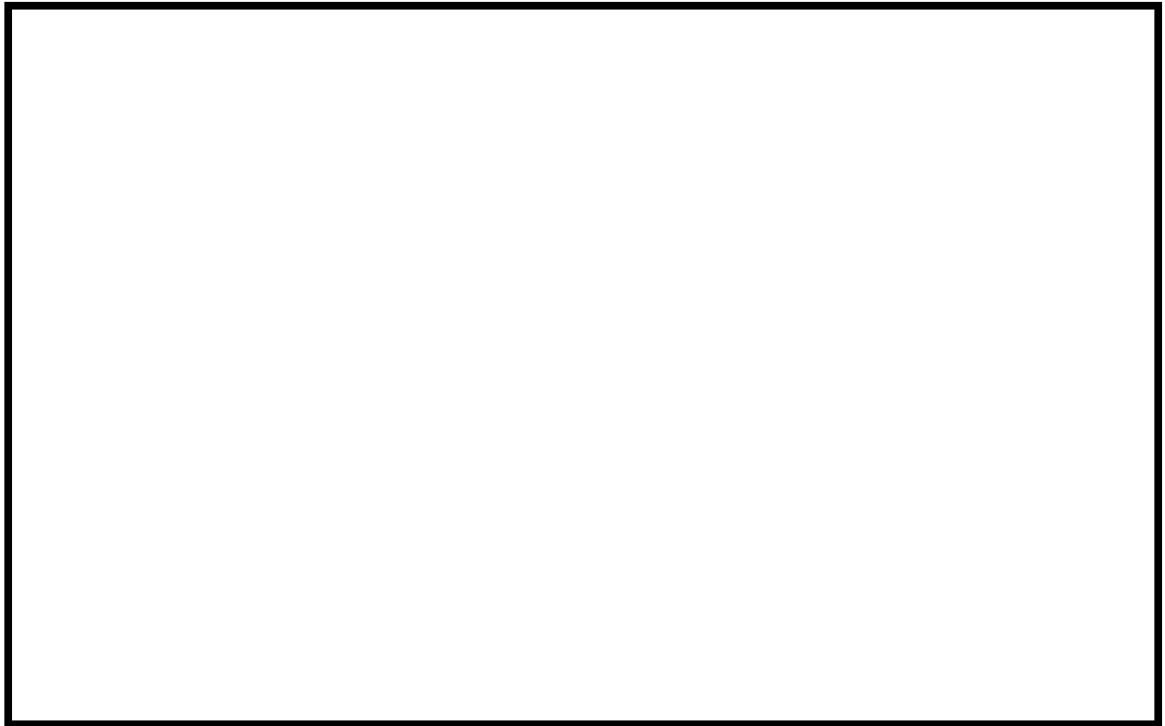
第 3-2 図 (2/4) 二酸化ウラン燃料棒の出力履歴  
(3 サイクル照射される二酸化ウラン燃料集合体中の燃料棒)



第 3-2 図 (3/4) 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入り燃料集合体中の燃料棒)



第 3-2 図 (4/4) 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)



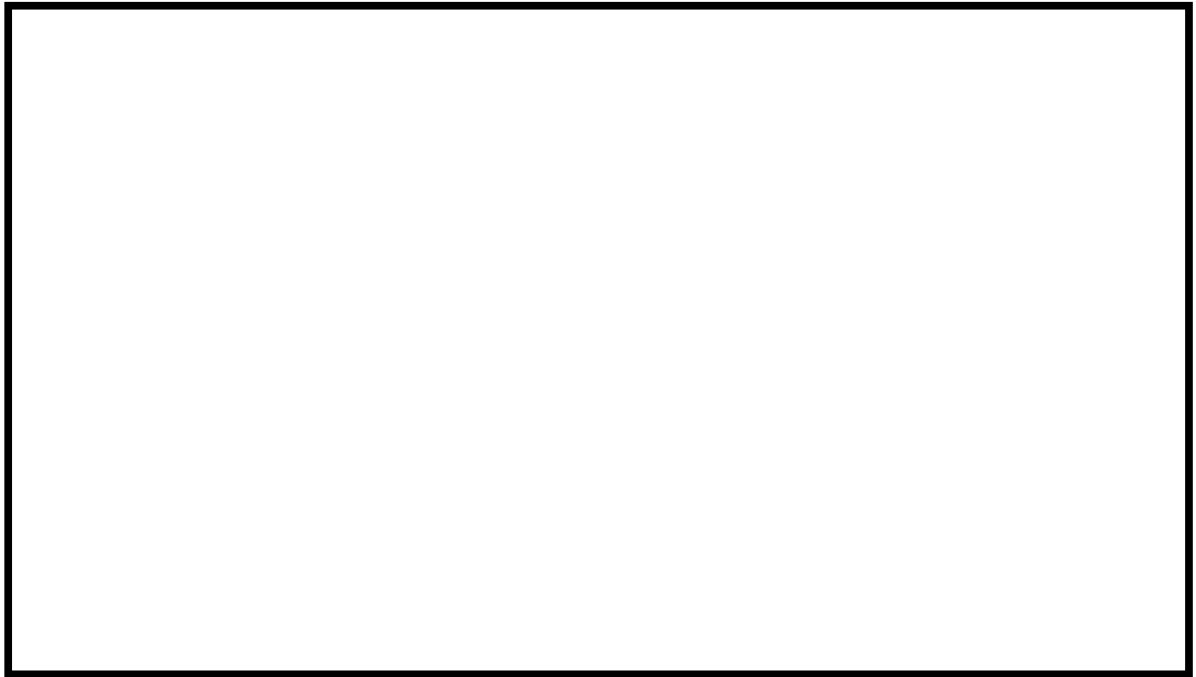
(注1) 燃料中心温度、被覆管ひずみ、被覆管応力及び被覆管疲労は、上図の局所的に出力を高く設定した箇所において評価する。

### 第3-3図 軸方向出力分布図

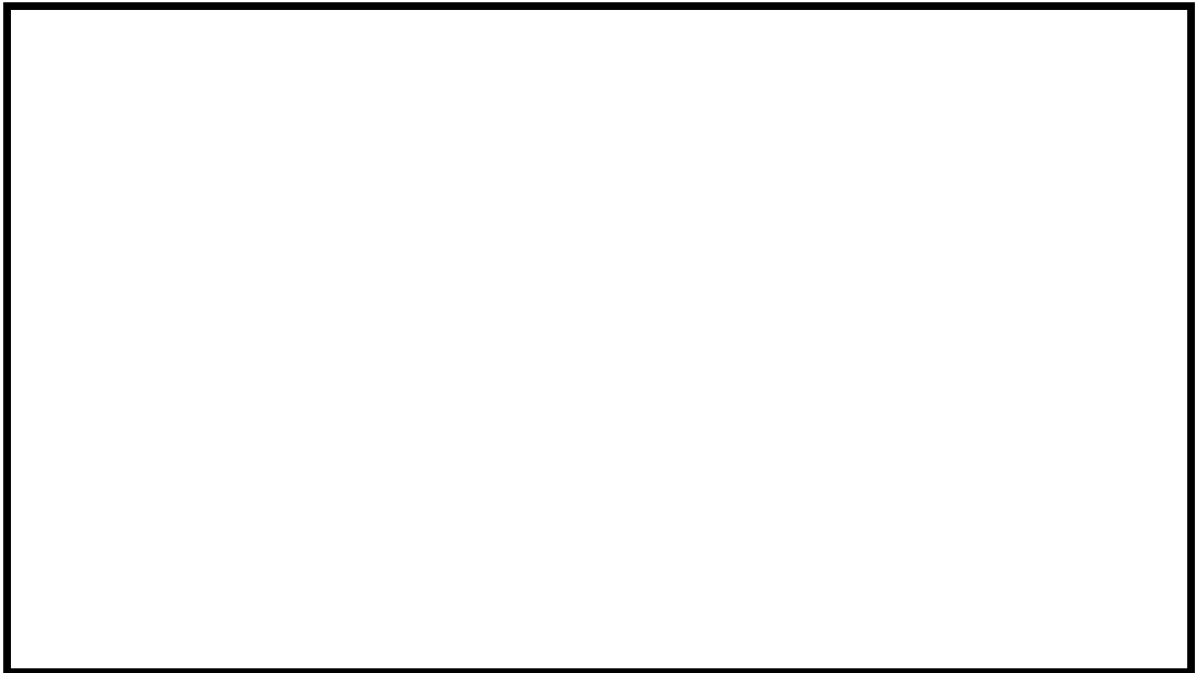
### 3.3.2 計算結果

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。

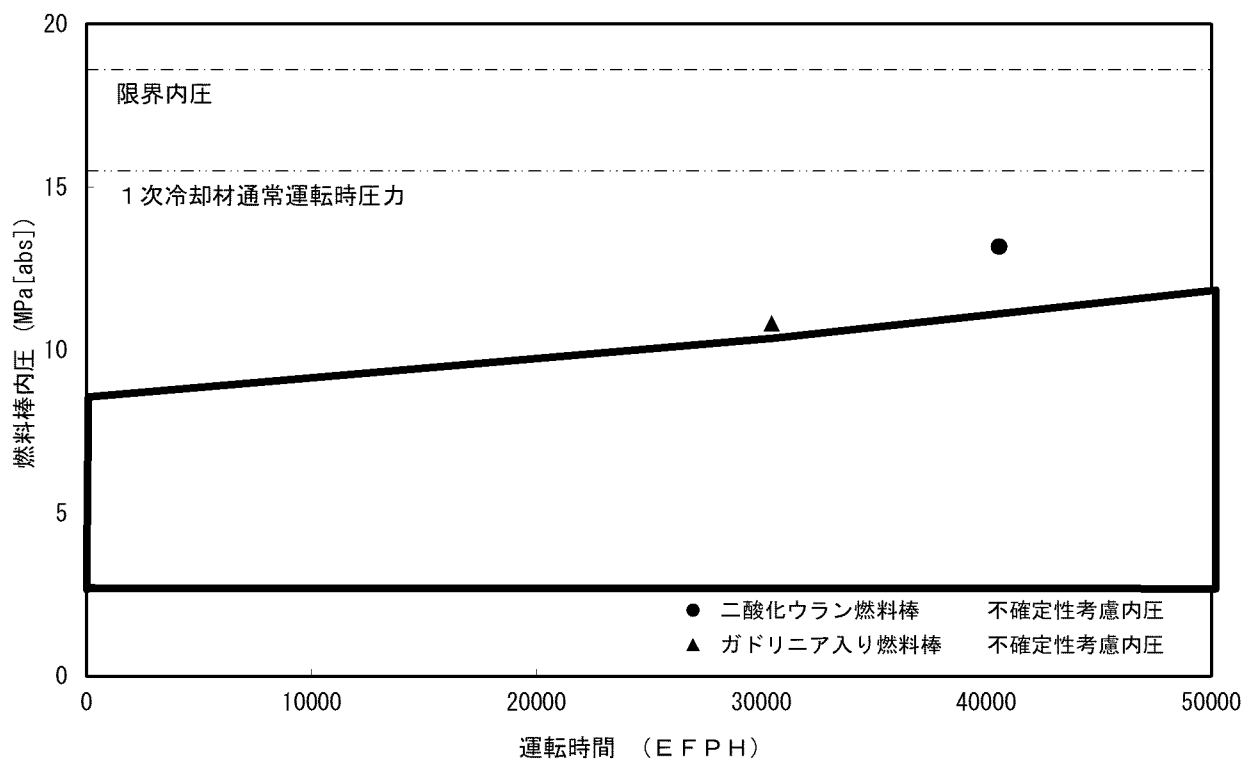




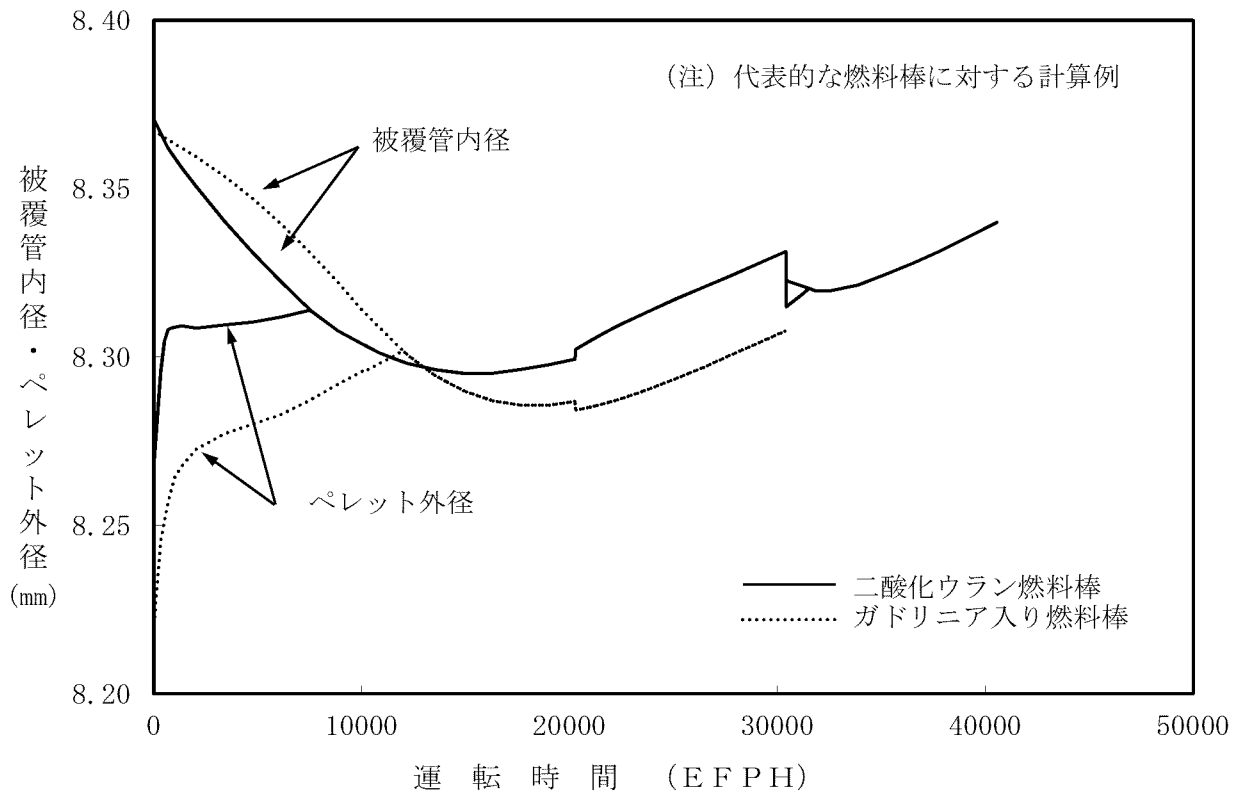
第3-4図 (1/2) 各評価項目で最も厳しくなる燃料棒の出力履歴 (通常運転時)  
(二酸化ウラン燃料棒)



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



第 3-5 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、またガドリニア入り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定性及び燃料中心温度が高くなる方向に影響する主な燃料製造公差に基づく不確定性を基に燃料中心温度の不確定性 220°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定性 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) ガドリニア入り二酸化ウランペレット

未照射燃料では不確定性 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。

ガドリニア入り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	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探し、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探し、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 <sup>(注1)</sup>			設計基準	設計比 <sup>(注2)</sup>
		最確値	不確定性	合計		
二酸化ウラン 燃料棒				13.2	≤18.6	0.71
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。



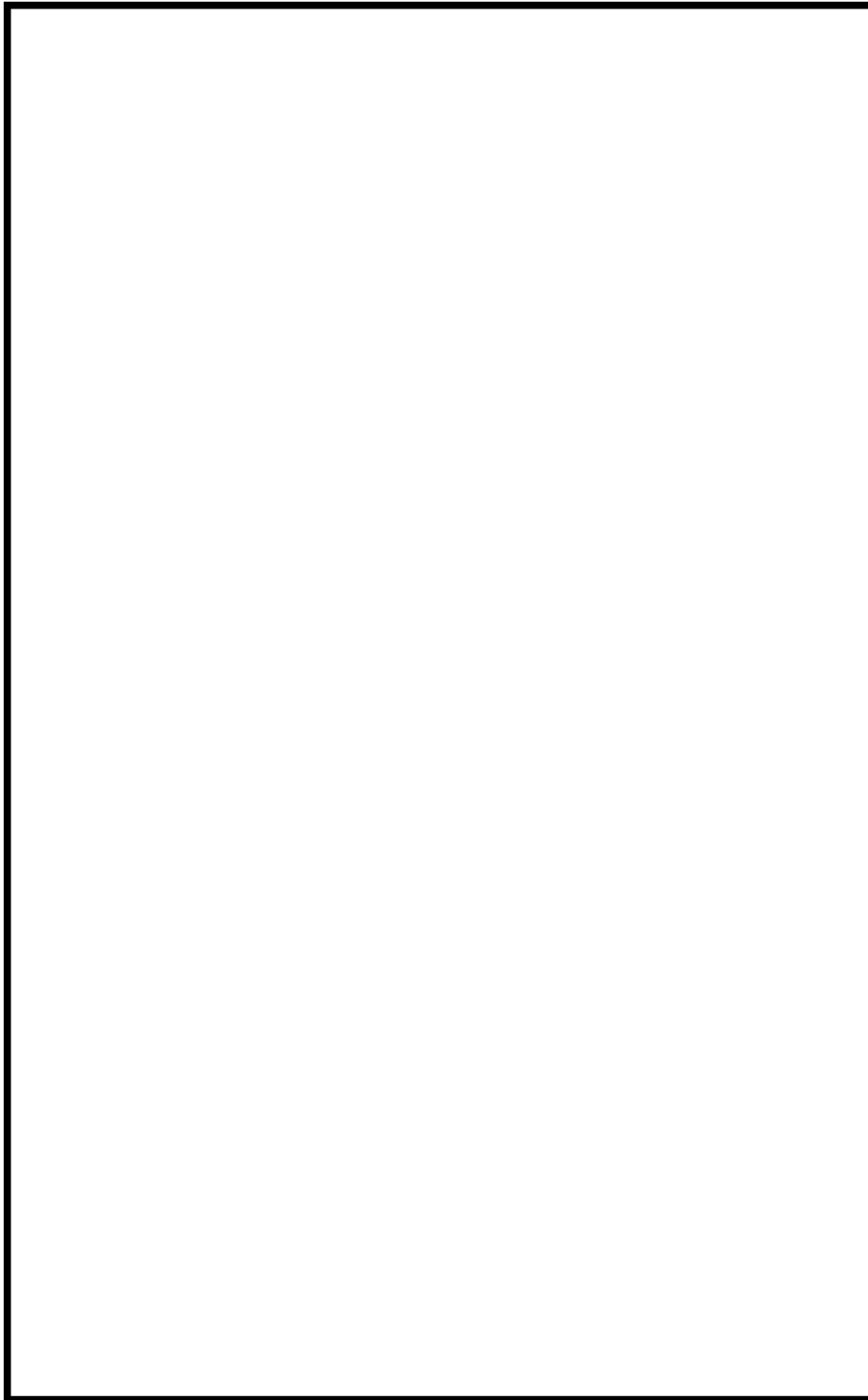
第3-5表 二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア入り燃料棒被覆管応力評価結果

(単位：MPa)

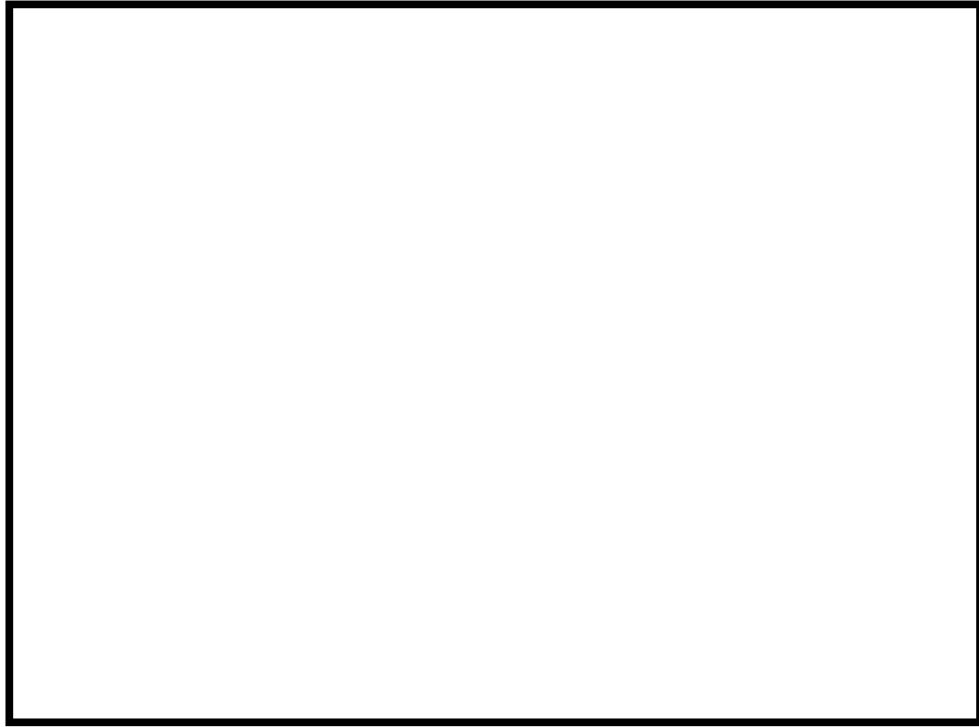
評価条件	運転時の異常な過渡変化時					
	二酸化ウラン燃料棒			ガドリニア入り燃料棒		
	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$	$\sigma_z$	$\sigma_{\theta}$	$\sigma_r$	$\sigma_z$
項目	応力成分					
1.内外圧差及び接 触圧による応力	内面					
	外面					
2.熱応力	内面					
	外面					
3.水力振動による 応力	内面					
	外面					
4.合計応力 <sup>(注1)</sup> 1+2+3	内面					
	外面					
評価時点						
体積平均相当応力 <sup>(注1)</sup>						
設計基準（被覆管耐力）						
設計比 <sup>(注1)</sup> <sup>(注2)</sup>						
			0.57			0.49
			0.57			0.49

(注1) 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。

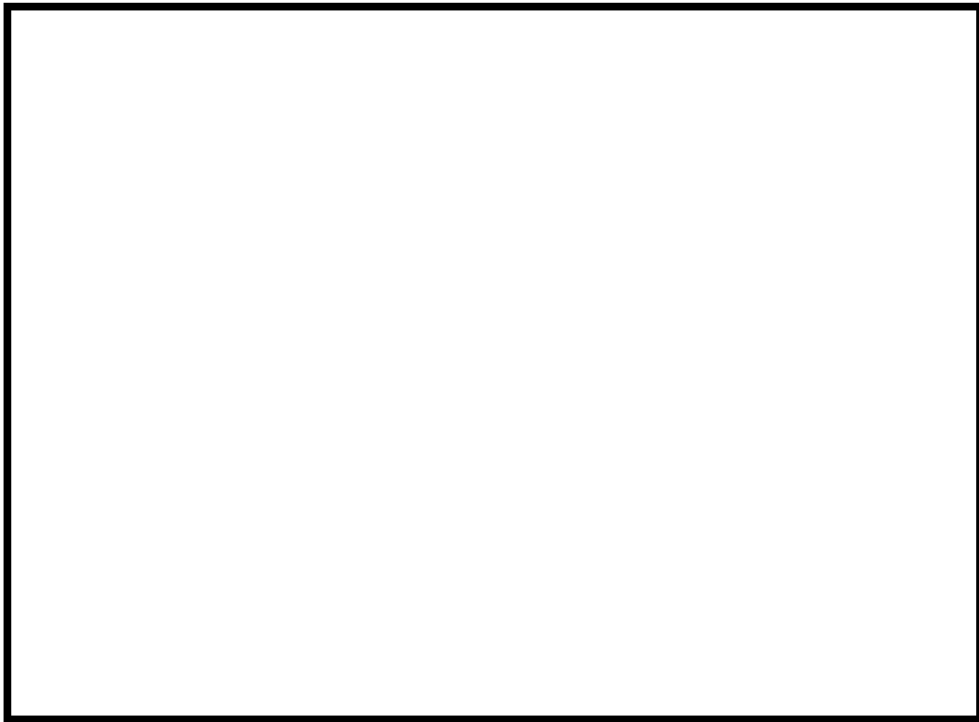
(注2) 設計基準（被覆管耐力）に対する評価値との比である。



第 3-7 図 被覆管の応力評価における設計基準



(二酸化ウラン燃料棒)



(ガドリニア入り燃料棒)

第 3-8 図 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。

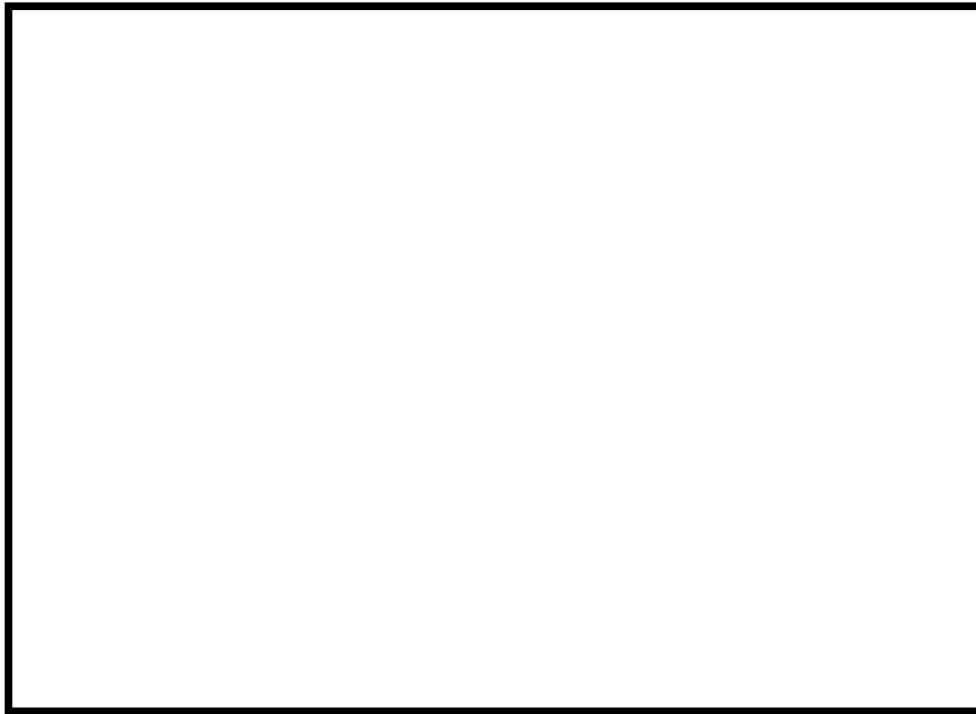
これに対して、運転時の異常な過渡変化時には、被覆管にはペレットと被覆管の接触後に引張ひずみが発生する。このため、応力評価と同様にペレットと被覆管の接触後引張ひずみは大きくなる。運転時の異常な過渡変化時における被覆管引張ひずみの変化量は、第 3-6 表及び第 3-9 図に示すとおり二酸化ウラン燃料棒及びガドリニア入り燃料棒ともに設計基準 1%以下を満足している。

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 <sup>(注1)</sup>
二酸化ウラン 燃料棒		0.26	≦1	0.26
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。



(二酸化ウラン燃料棒)



(ガドリニア入り燃料棒)

第 3-9 図 被覆管のひずみ履歴 (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（ペレット-被覆管相互作用）による応力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 ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ) 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  $N1$ 、 $N2$ 、……とそれに対応する応力の繰返し数  $n1$ 、 $n2$ 、……とから累積疲労損傷係数  $\Sigma ni/Ni$  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<sup>(注1)</sup>。

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<sup>(注2)</sup>。

## (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。

---

(注 1) W.J. O'Donnell and B.F. Langer, "Fatigue Design Basis for Zircaloy Components", Nucl. Sci. and Eng., 20 (1964)

(注 2) 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)

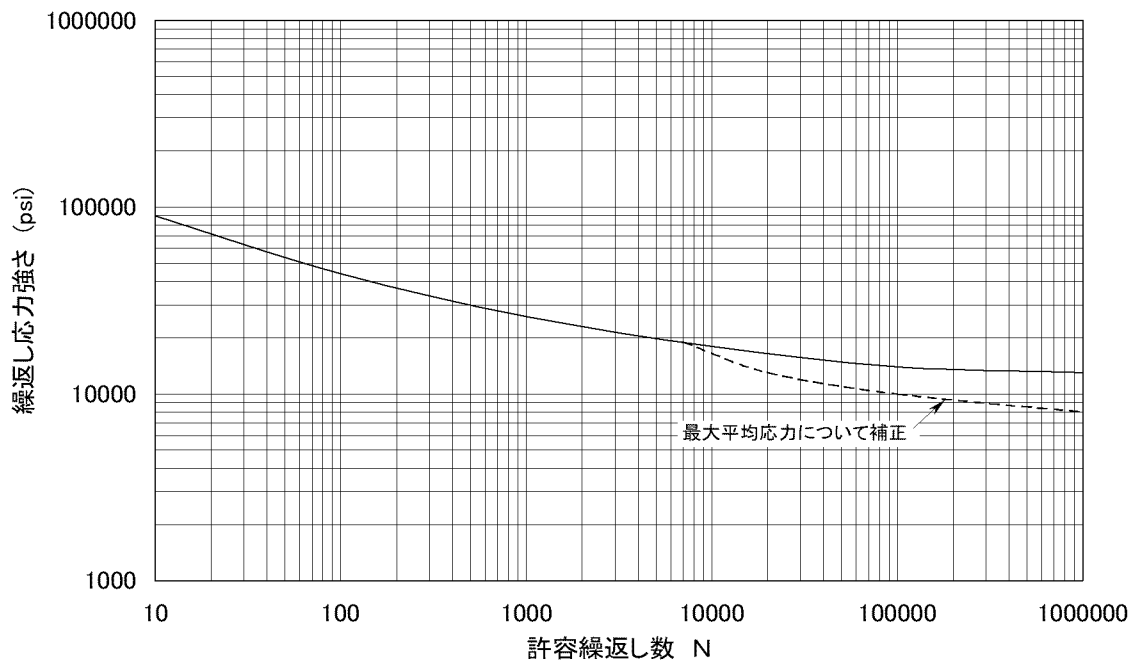


第3-7表 被覆管の疲労評価結果

(単位：%)

種類	位置	累積疲労損傷係数	設計基準	設計比 <sup>(注1)</sup>
二酸化ウラン 燃料棒	内面	10.9	≤100	0.11
	外面	4.6		0.05
ガドリニア入り 燃料棒	内面	4.0	≤100	0.04
	外面	1.7		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<sup>(注2)</sup>

(注2) W.J. O'Donnell and B.F. Langer, "Fatigue Design Basis for Zircaloy Components", Nucl. Sci. and Eng., 20 (1964)

### 3.4 その他の考慮事項

#### 3.4.1 燃料棒曲がり評価

燃料集合体の制御棒案内シンブ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、制御棒案内シンブ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。

#### 3.4.2 トータルギャップ評価

##### (1) 燃料集合体の伸び

燃料集合体は、制御棒案内シンブ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ブ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、制御棒案内シンブ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、制御棒案内シンブ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。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。

## (2) 燃料棒と上部及び下部ノズルの間隔

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

トータルギャップの減少量について、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。

### 3.4.3 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%<sup>(注1)</sup>)

---

(注1) 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)

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 3-13 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<sup>(注1)</sup>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。

#### 3.4.4 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。

#### 3.4.5 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

---

(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

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。

### 3.4.6 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。

#### (1) 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が、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<sup>(注1)</sup><sup>(注2)</sup>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。

#### (2) 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

---

(注 1) 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)

(注 2) 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)

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ト磨耗が生じない。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、フレット磨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、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<sup>(注1)</sup>、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。

---

(注 1) 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)

第 3-8 表 腐食評価式 (注1)

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

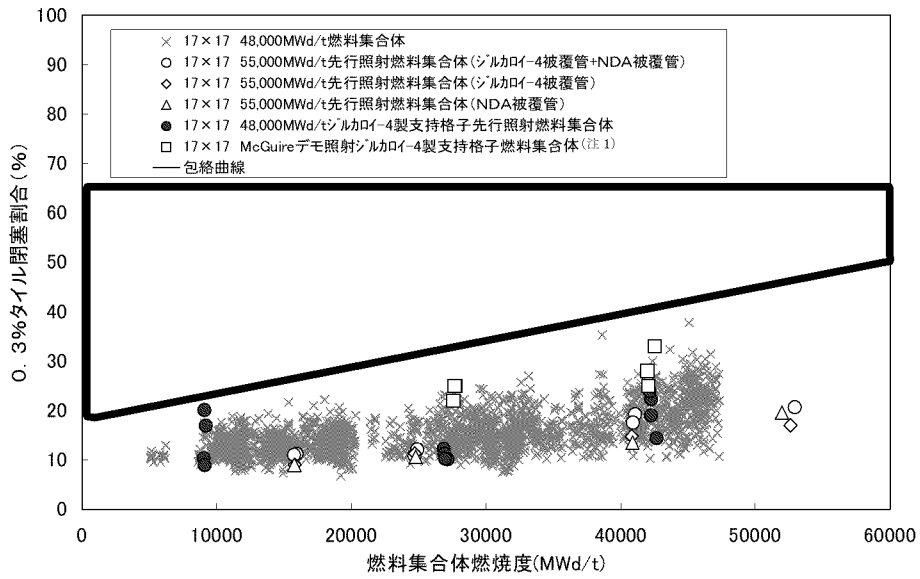
$R$  : ガス定数

$T$  : 被覆管と酸化膜との界面温度

$A, B$  : 関数

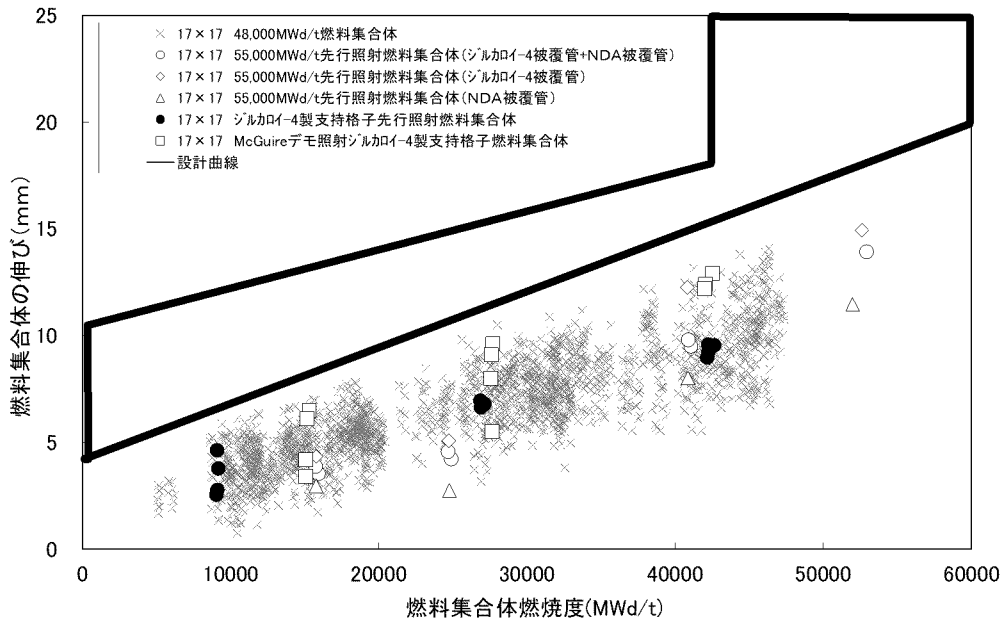
---

(注 1) A.M. Garde et al., "Waterside Corrosion of Zircaloy Fuel Rods", EPRI NP-2789 (1982)



(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。

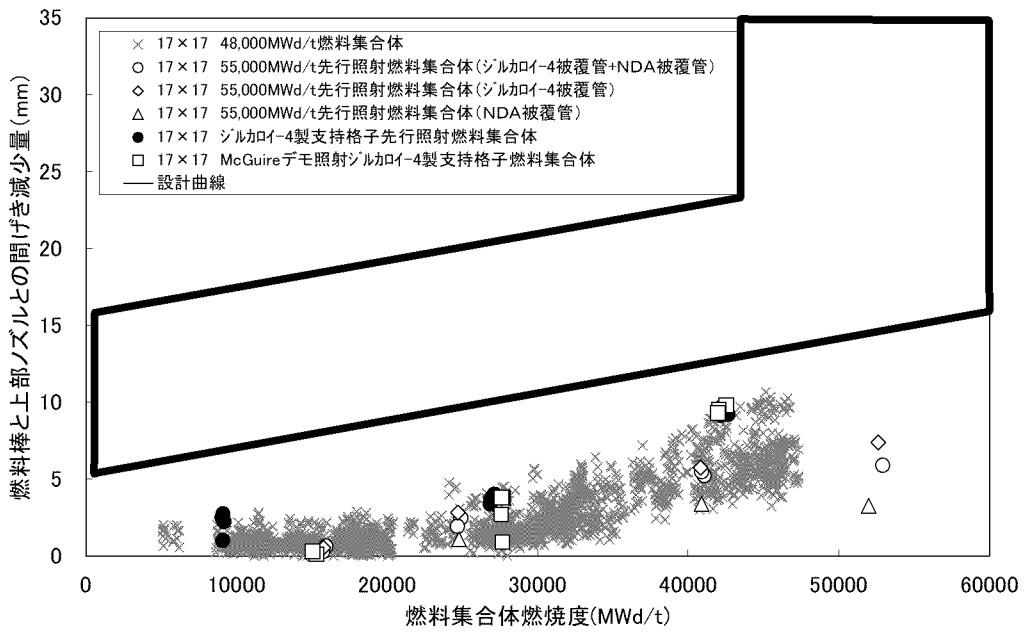
第 3-11 図 燃料棒間隔の閉塞割合 (注 1)



第 3-12 図 燃料集合体の伸び (注 1)

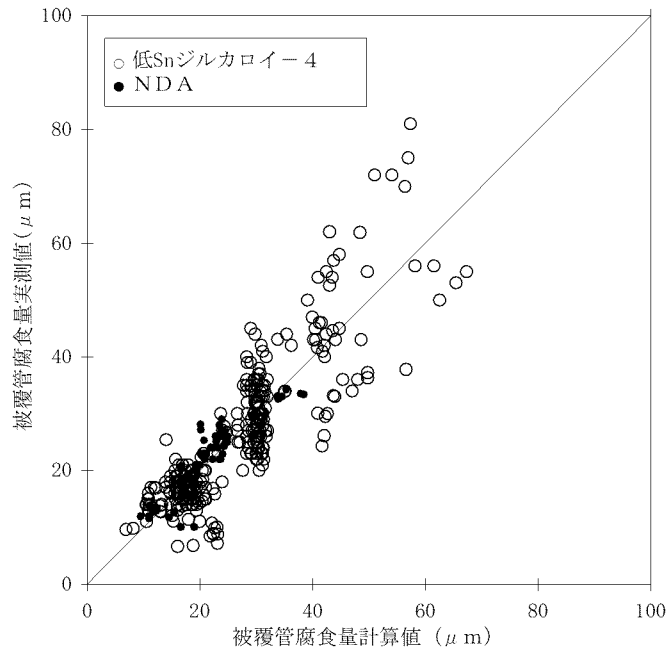
(注 1) 原子燃料工業, “原燃工製 PWR ステップ 2 燃料集合体の開発”, NFK-8114 改 2 (2003)



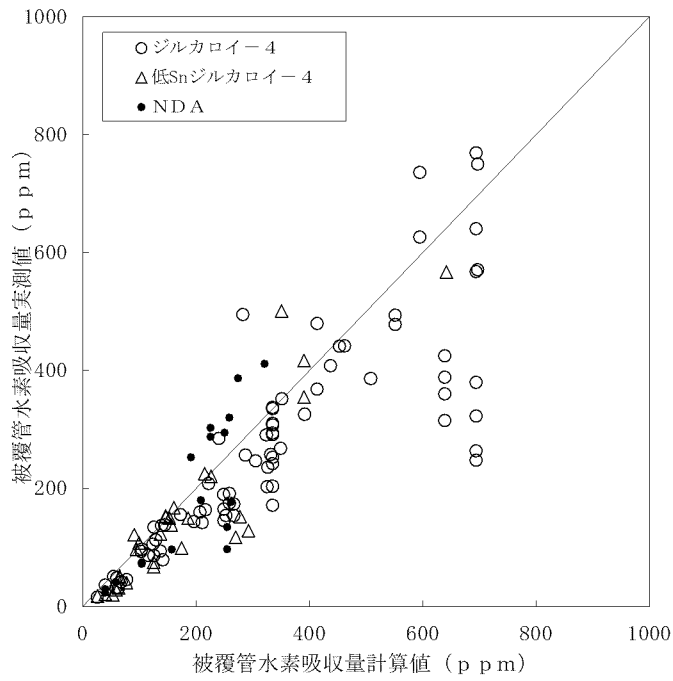


第3-13図 トータルギャップ減少量 (注1)

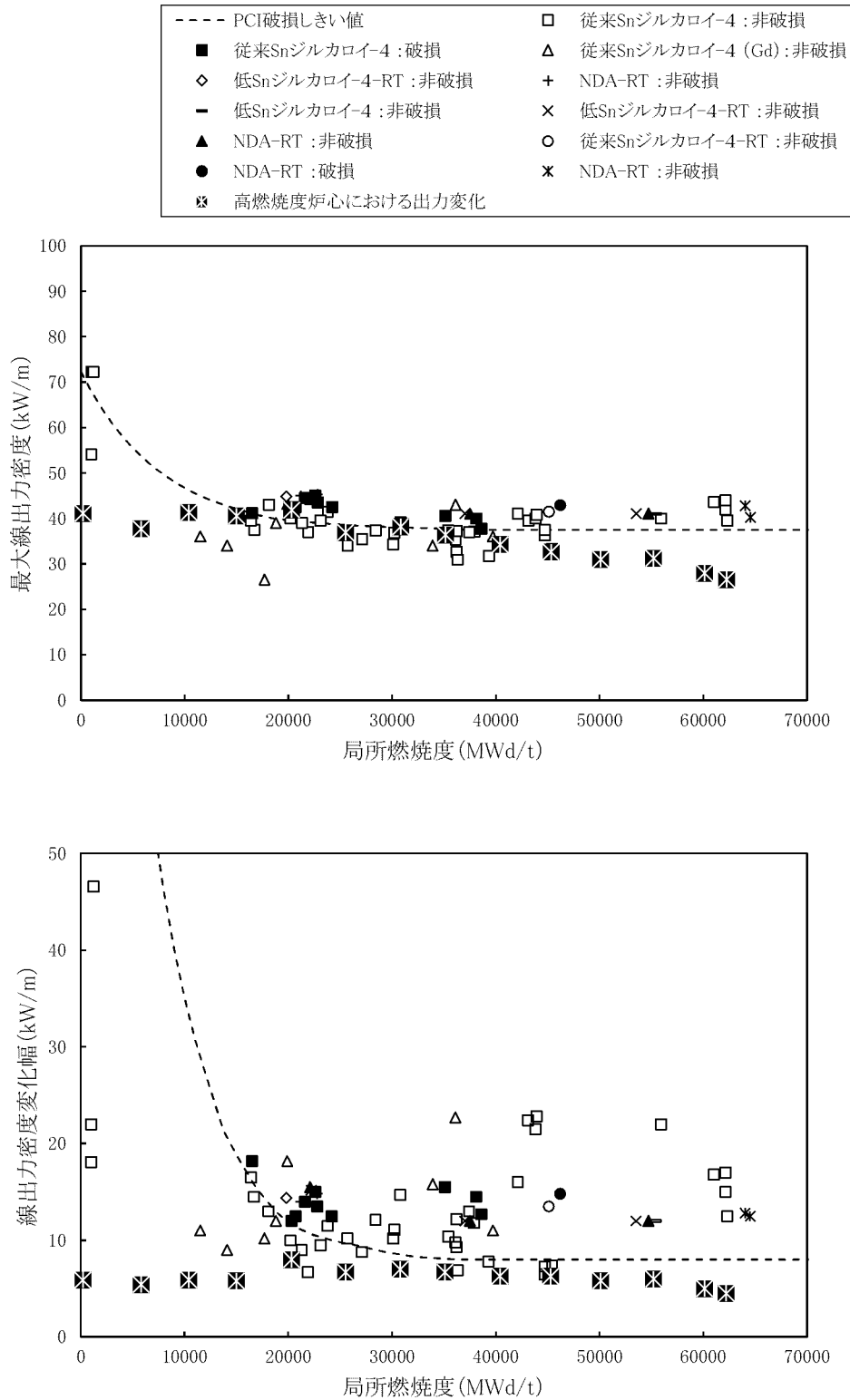
(注1) 原子燃料工業, “原燃工製PWRステップ2燃料集合体の開発”, NFK-8114改2 (2003)



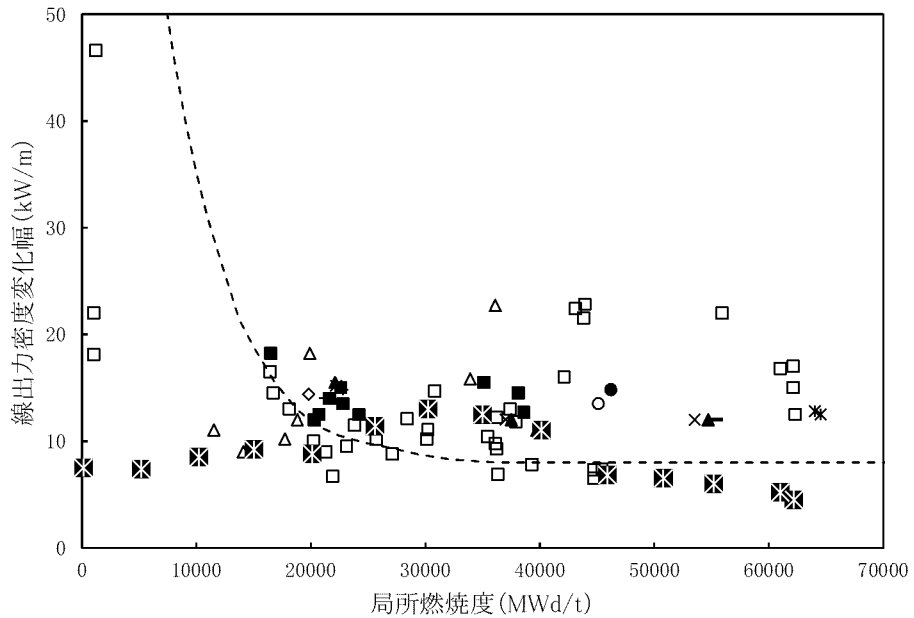
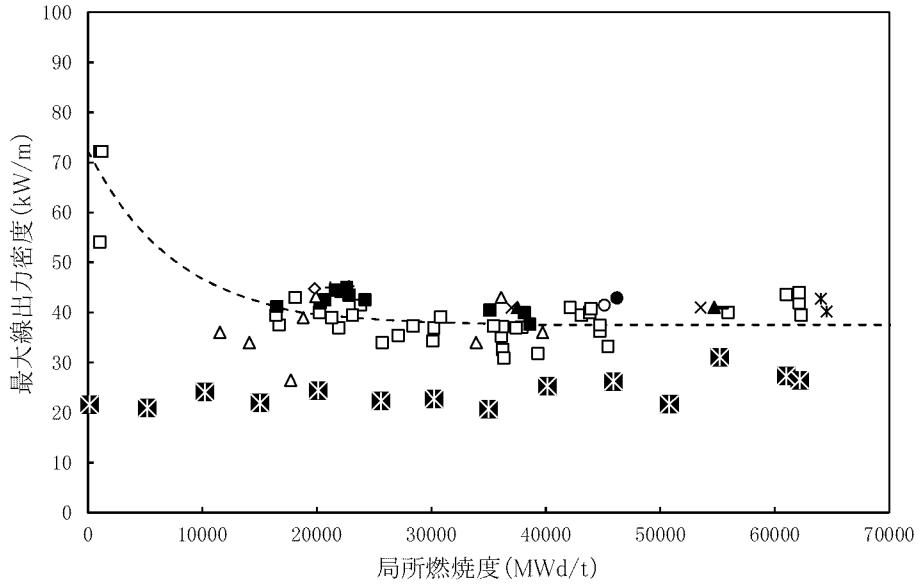
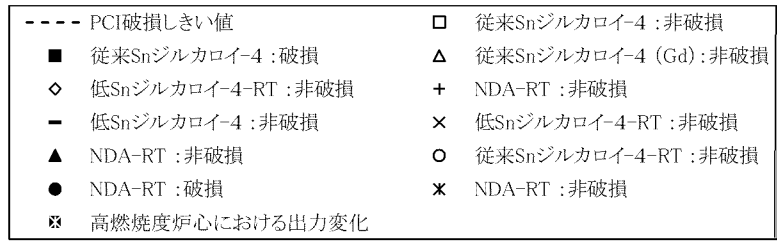
第3-14 図 被覆管腐食量（最大酸化膜厚）の実測値と予測値の比較



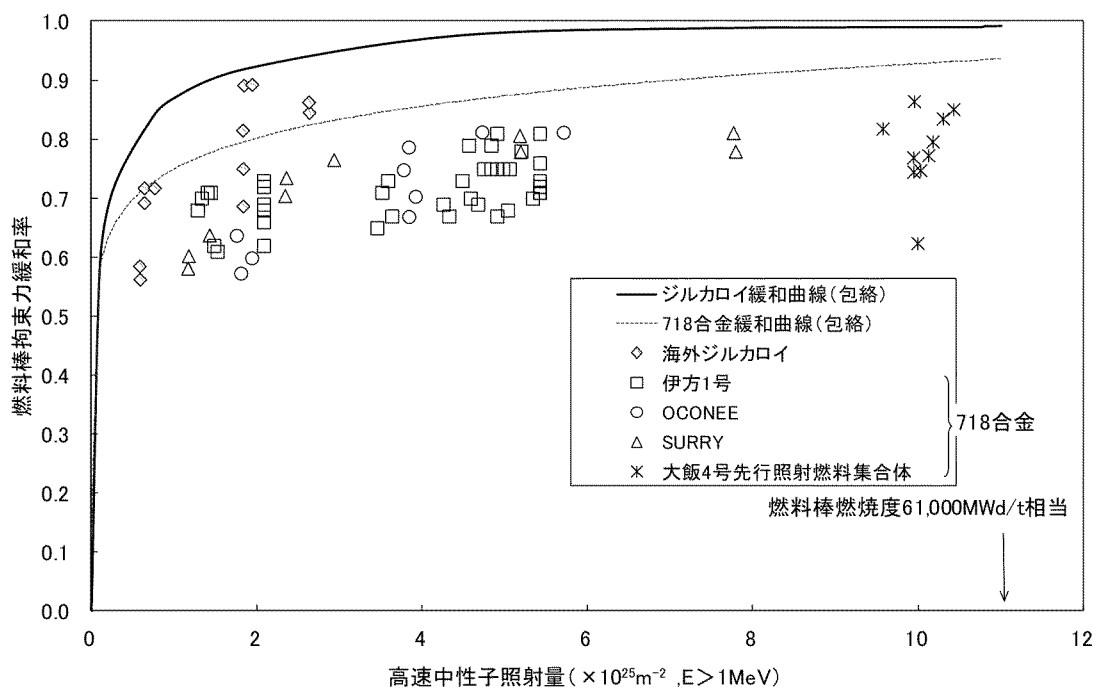
第3-15 図 被覆管水素吸収量の実測値と予測値の比較



第3-16図 (1/2) 被覆管の出カランプ試験結果  
(最大線出力密度が最大の場合の出力変化)



第3-16図 (2/2) 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)



第 3-17 図 支持格子拘束力の緩和率実測データ (注1) (注2)

(注 1) 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)

(注 2) 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)

## 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 <sup>(注1)</sup> に基づいて評価されること。

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

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

---

(注 1) ASME Sec. III では、基本的に許容値の最小単位である設計応力強さ(Sm)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、後述する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、冷間加工等により、耐力を増加させた材料についても、Sm 値が引張強さに対して一定以上の余裕を確保する観点で定められたものである。

第4-1表 燃料輸送及び取扱い時の燃料集合体の評価項目  
(軸方向荷重に対する評価、設計荷重=6G)

構成部品	考慮点	材料	応力 <sup>(注1)</sup>	許容値 <sup>(注1)</sup>
上部ノズル、 下部ノズル	上部及び下部ノズルの応力評価を行う。	ステンレス鋼 鋳鋼	$P_L + P_b$	$1.5S_m$
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。 <sup>(注2)</sup>	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	$P_m$	$S_m$

(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

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

(注2) 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)。

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

構成部品	考慮点	材料	応力 <sup>(注1)</sup>	許容値 <sup>(注1)</sup>
上部ノズル、 下部ノズル	スクラム時の 衝撃力	ステンレス鋼鋳鋼	$P_L + P_b$	$1.5S_m$
制御棒案内シ ンプル	スクラム時の 衝撃力	ジルカロイ-4	$P_L$	$1.5S_m$
	運転時荷重		$P_m$ <sup>(注2)</sup>	$S_m$
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

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

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

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



## 4.2 燃料集合体強度評価方法

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

また第 4-1 図に燃料集合体強度評価フロー図を示す。

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

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

また、燃料集合体は照射により全長が伸びるため、上部ノズル押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「MSC NASTRAN Ver.70」（以下「NASTRAN」という。）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<sup>(注1)</sup>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<sup>(注2)</sup>を求めており、この許容値と比較して弾性限界荷重を超えないことを確認する。

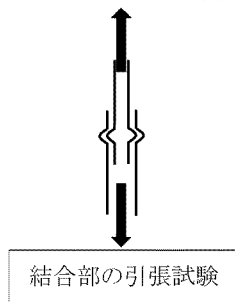
(4) 制御棒案内シンプル応力評価

制御棒案内シンプルは、制御棒案内シンプルと燃料棒に荷重が分担されるが、上部ノズル直下の部分については、燃料棒の分担がなく、全荷重を

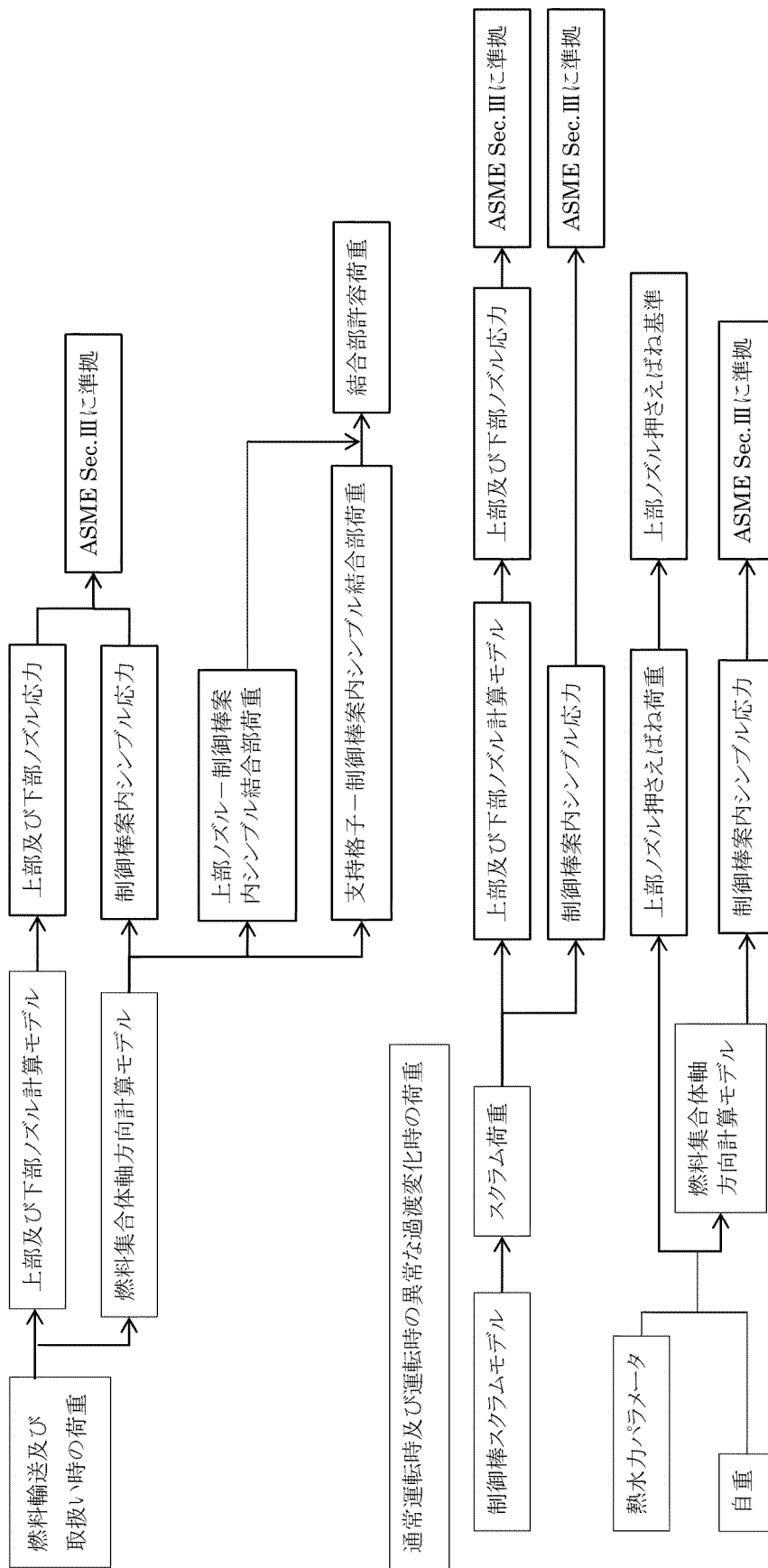
---

(注1) ネジ部の有効断面積は約  $\square$  mm<sup>2</sup> であり、制御棒案内シンプルの管断面積約  $\square$  mm<sup>2</sup> より大きい (添付3 参照)。

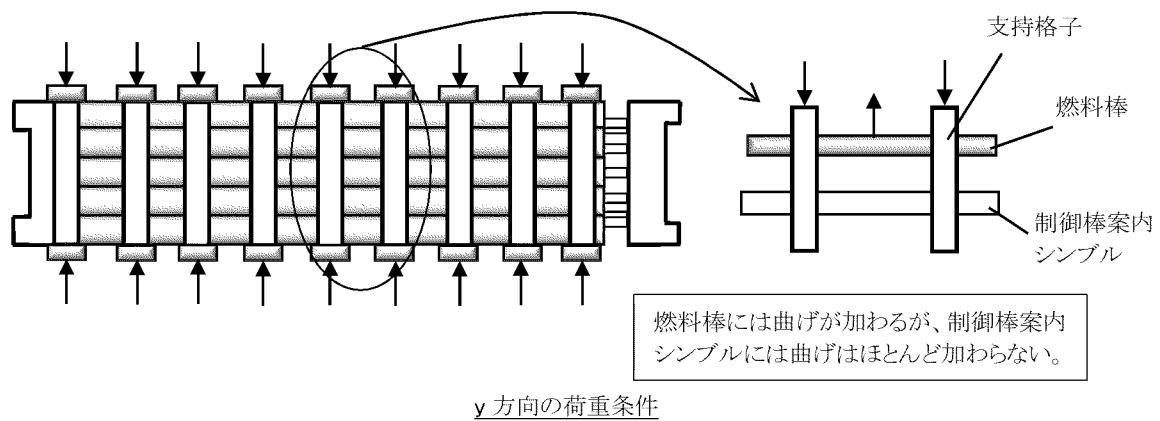
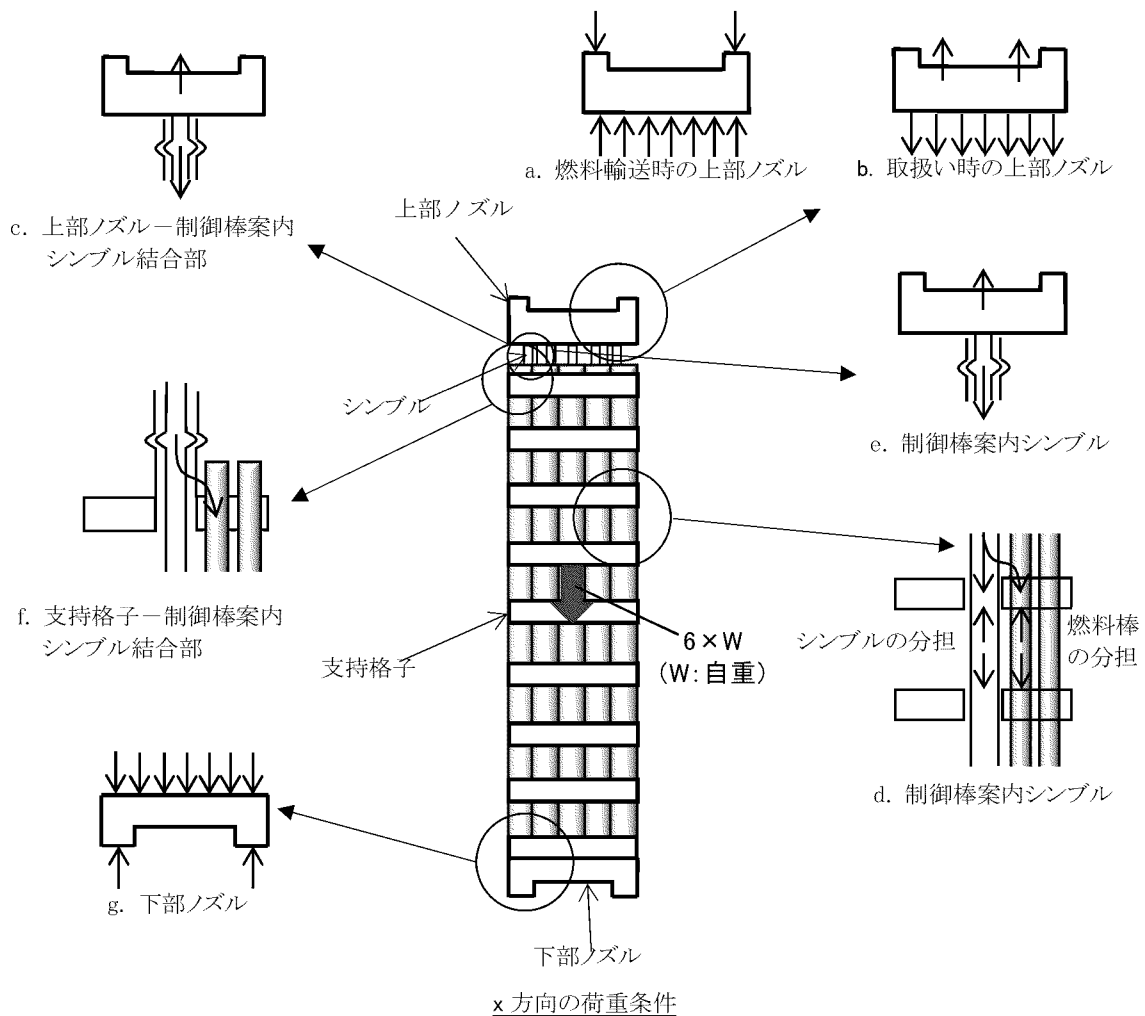
(注2) 結合部の許容荷重は、引張試験により結合部の変形が弾性変形内にとどまる範囲の荷重 (弾性限界荷重) としている (下図参照)。



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。



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

b. 上部ノズルに制御棒クラスタが着底する際の衝撃力(SC)

が挙げられる。a.はダッシュポット部よりも下部に対して、b.は上部ノズルより下部に対して荷重が作用する。また、これら2つの荷重は同時に発生しない。

したがって、上部ノズルに対してはb.を、ダッシュポット部及び下部ノズルに対してはa.又はb.の大きい方を考慮して応力評価を行う。また、上部及び下部ノズルに対する応力評価は 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<sup>(注3)</sup>と設定しても累積疲労損傷係数は上部ノズルで %、下部ノズルで %、制御棒案内シムブルで %程度であり、疲労に与える影響は小さい。

##### (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<sup>(注4)</sup>

---

(注1) 制御棒案内シム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) 繰返し回数は、回と設定している。

(注4) 運転時の異常な過渡変化として負荷急減が発生した場合、タービン及び発電機

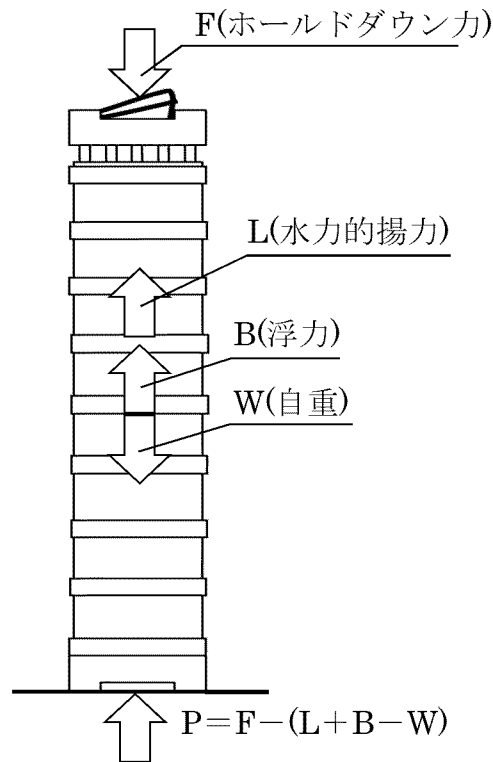
条件で、上部ノズル押さえばねの塑性変形は進行しない。

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。

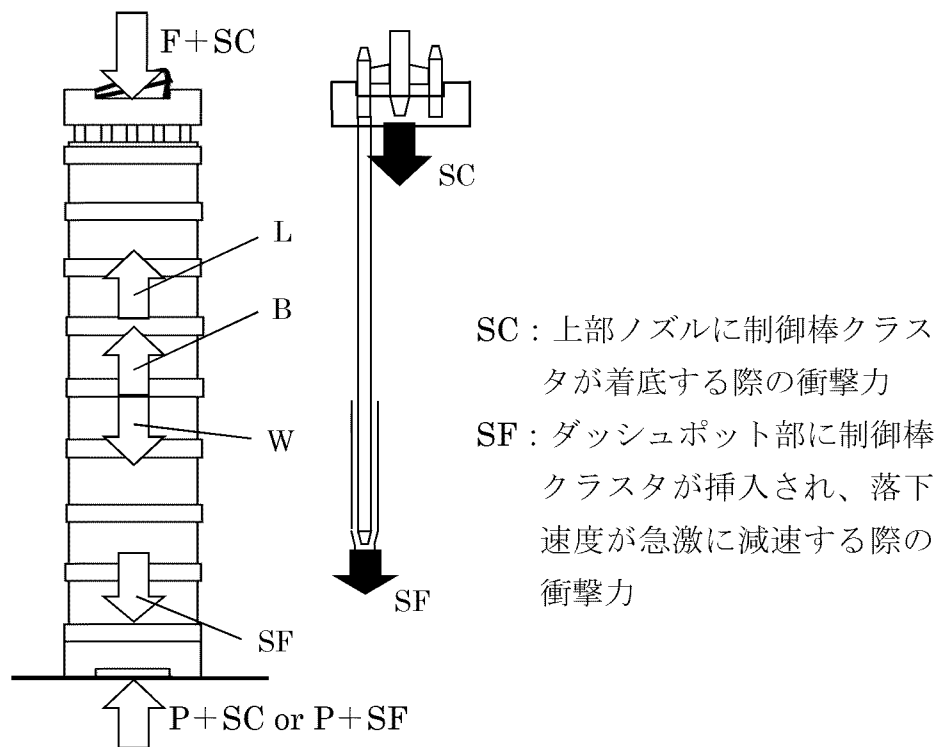
運転時の異常な過渡変化時の事象であるポンプオーバースピード条件下では、の流量に対し、上部ノズル押さえばねの健全性を評価する。

---

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-制御棒案内シムブル結合部強度評価

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

したがって、ノズル-制御棒案内シムブル結合部は、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-制御棒案内シムブル結合部強度評価

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) 制御棒案内シムブル応力評価

第 4-3 表に制御棒案内シム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ムブルで発生するが、永久変形は生じない。

なお、横方向については各支持格子部固定の条件で 6G の荷重に対して被覆管に発生する応力は、約  $\square$ 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 <sup>(注3)</sup>
上部ノズル	□	□	0.87
下部ノズル	□	□	0.83
支持格子-制御棒案内シンプル結合部	□ <sup>(注1)</sup>	□ <sup>(注2)</sup>	0.67 <sup>(注4)</sup>
制御棒案内シンプル	□	□	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が、上部ノズル押さえばねの健全性は損なわれないことを試験により確認している。

第 4-4 表 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の応力評価結果

(単位 : MPa)

	最大応力	許容応力	設計比 <sup>(注1)</sup>
上部ノズル			0.31
下部ノズル <sup>(注2)</sup>			0.15
制御棒案内シンプル <sup>(注2)</sup> ダッシュポット部			0.48
制御棒案内シンプル <sup>(注3)</sup> ダッシュポット部			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 <sup>(注1)</sup>	上部ノズル押さえばね力	評価	<sup>(注2)</sup> 設計比
低温起動時			浮き上がらない。	0.58
高温全出力時			浮き上がらない。	0.43
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。

被覆管の疲労評価における応力繰返し回数について

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集合体の原子炉内滞在期間を考慮（原子炉寿命は 30 年 30 サイクルを想定）して応力の繰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/サイクル

- 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返し回数

過 渡 条 件	繰返し回数
(a) 起 動	200
(b) 停 止	200
(c) 負荷上昇	13,200
(d) 負荷減少	13,200
(e) 100%から90%負荷へのステップ状の負荷減少	2,000
(f) 90%から100%負荷へのステップ状の負荷上昇	2,000
(g) 0%から15%への負荷上昇	1,500
(h) 15%から0%への負荷減少	1,500
(i) 1ループ停止／1ループ起動	
I) 停 止	80
II) 起 動	70
(j) 100%負荷からの大きいステップ状の負荷減少	200
(k) 100%負荷からの原子炉トリップ	400
(l) 1次冷却材流量の部分喪失	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

(添付 2)

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  $\square$  N に対して、かしめ結合の強度は約  $\square$  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。

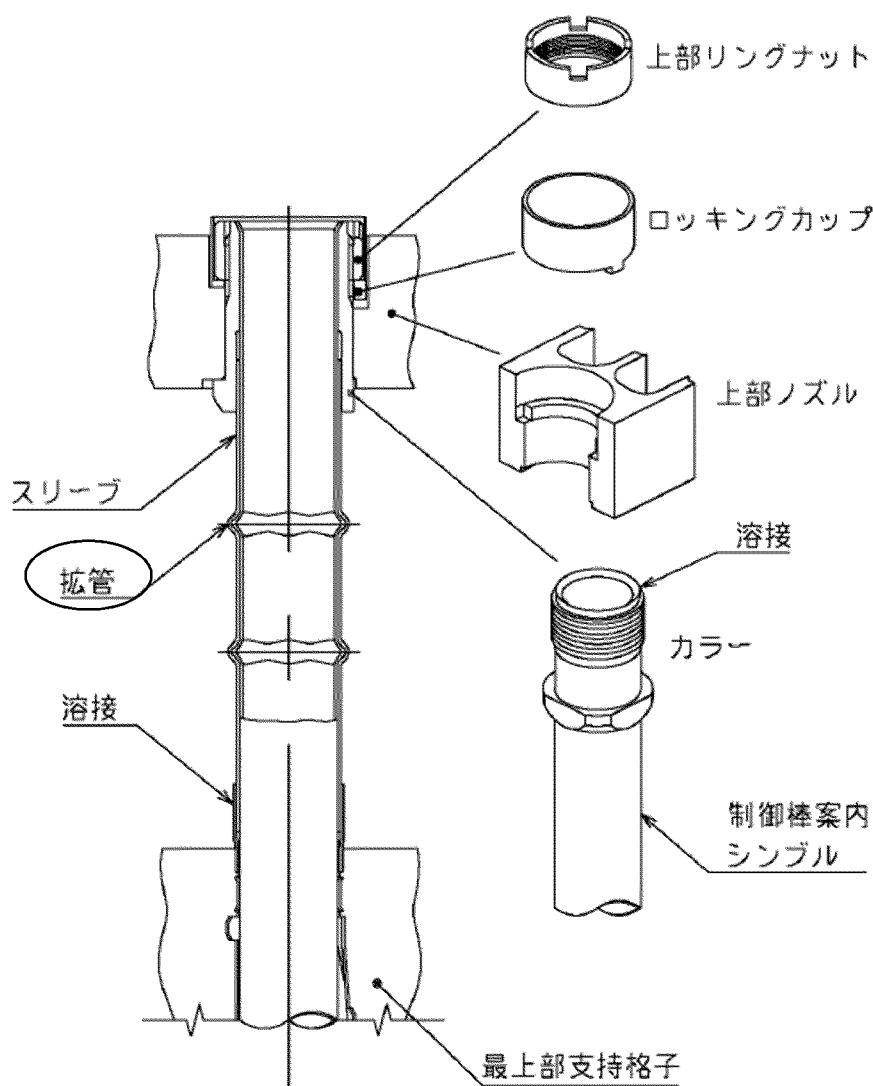


図 1 上部支持格子ー制御棒案内シンプル結合部の拡管結合



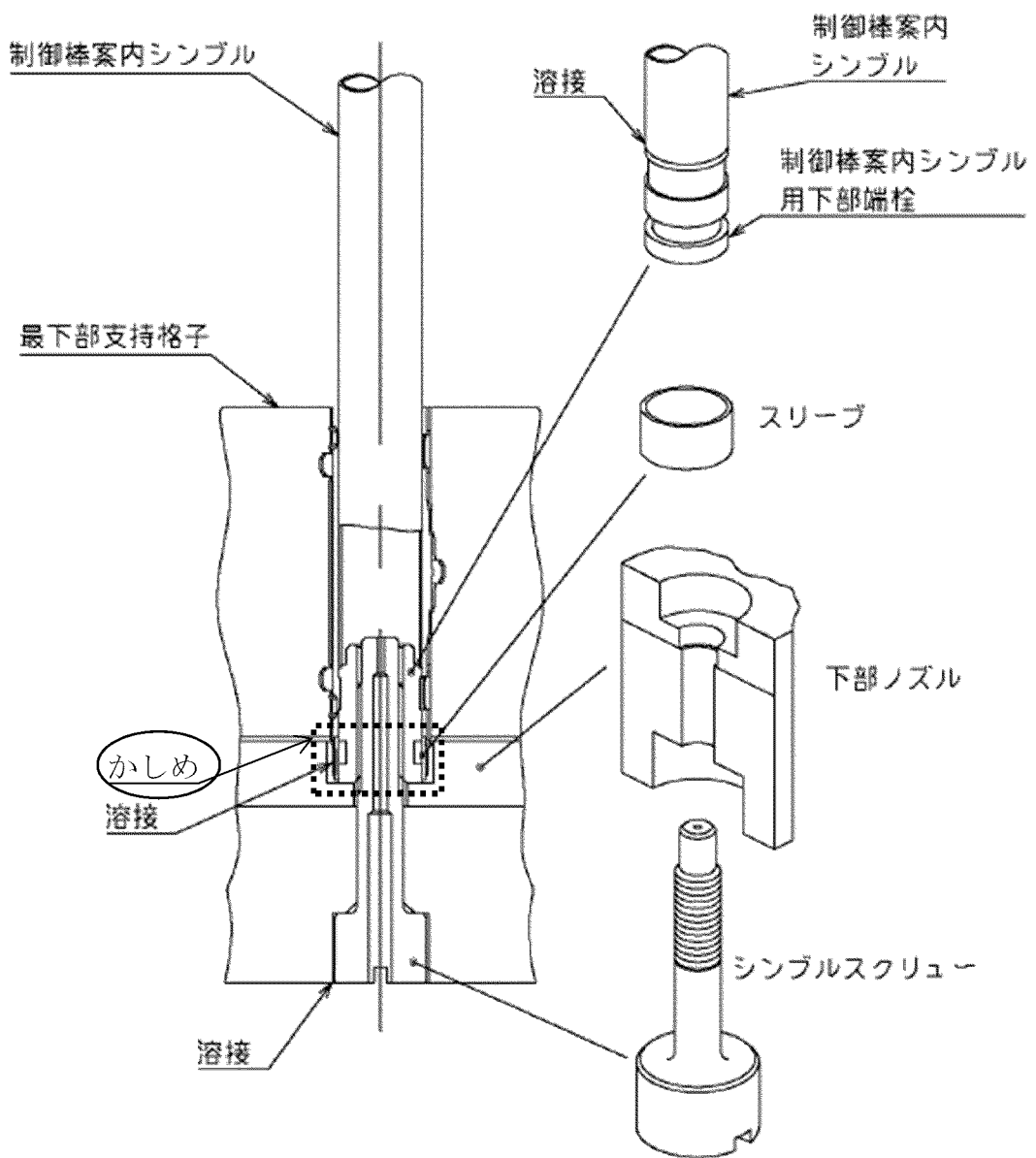


図2 下部支持格子ー制御棒案内シンプル結合部のスリーブを下部端栓の溝にかしめている

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  $\square$  mm<sup>2</sup> である。また、制御棒案内シンプルの管断面積は約  $\square$  mm<sup>2</sup> 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。

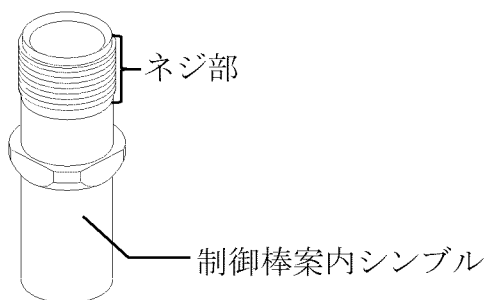


図 1 上部ノズル制御棒案内シンプル結合部のネジ部

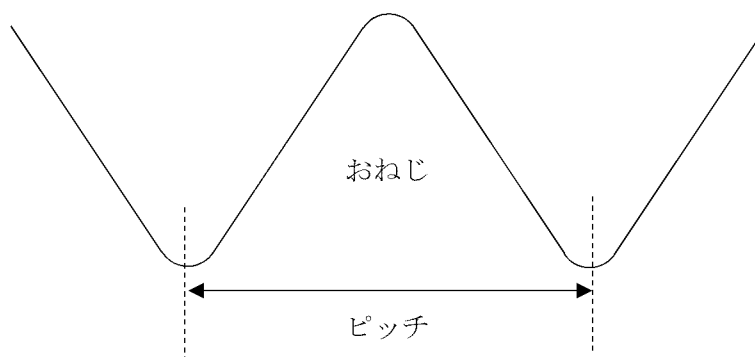


図 2 ネジのピッチ

## 補足説明資料 7

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 7-1 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 7-2 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 7-3 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 7-1

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 .....	2
3. 高燃焼度燃料（55GWd/t）導入以降の照射実績反映について .....	6
4. まとめ .....	7

## 1. 概要

燃料体については、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下「設置許可基準規則」という。）第 15 条第 5 項及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下「技術基準規則」という。）第 23 条（炉心等）第 1 項において、必要な物理的及び化学的性質を保持することが要求されており、技術基準規則の解釈における別記-10（以下「別記-10」という。）にその具体的な仕様が規定されている。

本設工認申請対象の燃料体は高燃焼度燃料(55GWd/t)であり、燃料被覆材には別記-10に規定されたジルコニウム合金管（日本産業規格 H4751（2016））（以下「ジルカロイ-4」という。）とは異なる Sn-Fe-Cr-Nb-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がジルカロイ-4 と同等以上の物理的及び化学的性質を有していることについては、設置許可段階から確認<sup>\*1、2</sup>しており、本設工認申請においてもその詳細な内容を確認している。

本資料では、ジルコニウム基合金の設置許可基準規則第 15 条第 5 項及び技術基準規則第 23 条第 1 項への適合性に係る設置許可段階からの確認内容を整理するとともに、あわせて高燃焼度燃料(55GWd/t)導入以降の照射実績反映状況についても整理するものである。

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

※1 高燃焼度燃料(55GWd/t)導入時の設置変更許可申請（平成 17 年 12 月 21 日平成 16・11・25・原第 4 号認可）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4 原子燃料工業 平成15年」を踏まえた設計としている。

## 2. 設置許可段階からの確認及び説明内容

### 2.1 確認項目及び確認内容

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

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (1/3)

性質		確認項目 <sup>※1</sup>	確認内容
物理的性質	耐放射線性	機械的性質	照射材並びに水素吸収させた未照射材及び照射材での引張試験結果よりジルコニウム基合金の機械特性がジルカロイ-4と同等であることを確認。
		疲労特性	未照射材及び照射材の疲労試験結果よりジルコニウム基合金の疲労特性がジルカロイ-4と同等であることを確認。
		クリープ特性	実機で照射された燃料棒の外径変化より、ジルコニウム基合金のクリープ特性がジルカロイ-4と同等以上であることを確認。
		照射成長	各材料の照射成長の結果より、ジルコニウム基合金の照射成長がジルカロイ-4に比べて、小さくなることを確認。
	寸法安定性	クリープ特性	上記クリープ特性と同様
		照射成長	上記照射成長と同様
	耐熱性	<u>耐熱性</u>	ジルコニウム基合金は、約98wt%のジルコニウムを主成分としているため、材料物性がジルカロイ-4と同等であること、及び溶融点及び相変態温度の測定結果より燃料被覆材の溶融点及び相変態温度が異常な過渡変化時の最高温度よりも高いことを確認。
	核性質	—	核分裂するウランを含むペレットにおいて考慮する事項 <sup>※2</sup> であるため、燃料被覆材としては考慮不要。

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

※2 核性質については、核分裂反応に係る影響を確認しており、具体的にはペレットに対して考慮すべき性質としている。「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）



表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (2/3)

性質		確認項目 <sup>※1</sup>	確認内容
物理的性質	その他の考慮すべき性質	<u>耐摩耗性</u>	燃料被覆材硬さの測定結果よりジルコニウム基合金の硬さはジルカロイ-4と同等であり、支持格子と燃料被覆材の接触による摩耗は燃料被覆材によらず同等であることを確認。
		耐 PCI 性 <sup>※2</sup>	試験炉における出力急昇試験結果よりジルコニウム基合金耐 PCI 性がジルカロイ-4と同等以上であることを確認。

※1 下線：設工認段階から詳細な確認をしている項目

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

表1 ジルコニウム基合金の物理的及び化学的性質に係る確認内容 (3/3)

性質		確認項目 <sup>※1</sup>	確認内容
化学的性質	耐食性	酸化腐食	原子炉内腐食データよりジルコニウム基合金の腐食速度がジルカロイ-4に比べ低減することを確認。
		水素吸収	燃料被覆材の原子炉内での酸化膜厚さと水素吸収量及び吸収率の関係からジルコニウム基合金の水素吸収量がジルカロイ-4に比べ低減することを確認。
	化学的安定性	二酸化ウランペレットと燃料被覆材との反応 <sup>※2</sup>	ハルデン炉での照射実績よりジルコニウム基合金燃料被覆材の内面酸化は小さく、燃料棒の健全性への影響は小さいことを確認。
		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 <sup>※2</sup>	ガドリニア入り二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金燃料被覆材との反応は、二酸化ウランペレットとジルコニウム基合金燃料被覆材が安定に共存する場合と大差はないことを確認。
	その他の考慮すべき性質	耐 PCI 性 <sup>※3</sup>	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	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 18 年 7 月 24 日付け平成 18・05・12 原第 20 号にて特殊加工認可を受けた内容から変更はない。

設置変更許可申請書、安全審査資料、本設工認申請書の具体的な記載は、補足説明資料 7-2 のとおりである。また、本設工認申請書と特殊加工認可申請書の比較は、補足説明資料 7-3 のとおりである。

### 3. 高燃焼度燃料（55GWd/t）導入以降の照射実績反映について

55GWd/t 燃料導入にあたっては、平成 18 年 7 月 24 日付け平成 18・05・12 原第 20 号にて特殊加工認可、同日付け平成 18・05・12 原第 21 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 18 年 7 月 24 日付け平成 18・05・12 原第 21 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 (【】：申請者)	申請又は 許可年月日	適合性概要
設置変更許可申請 【九州電力】	平成 17 年 12 月 21 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 18 年 7 月 24 日 認可	設置許可（平成 17 年 12 月 21 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 【九州電力】	令和 2 年 12 月 15 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 17 年 12 月 21 日）に基づく申請であり、平成 18 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 17 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 7-2

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、「川内原子力発電所発電用原子炉設置変更許可申請書」（平成 17 年 12 月 21 日付け平成 16・11・25 原第 4 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

(1/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																																																																																															
<p>【本文】</p> <p>五、原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備</p> <p>ハ、原子炉本体の構造及び設備</p> <p>(ロ) 燃料体</p> <p>(2) 燃料被覆材の種類</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>ジルコニウム-ニオブ合金にズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金</li> </ul> <p>ただし、第1～第21領域燃料については、ジルカロイ-4</p>	<p>【安全審査資料：川内原子力発電所1号及び2号炉高燃焼度燃料の概要について】</p> <p>3. ステップ2燃料の主要仕様</p> <p>燃料棒及び燃料集合体の概要を図3-1に示すが、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、前述の高燃焼度化による影響等に対応するため、表3-1に示すとおり、ペレット、被覆管等の仕様の一部を変更する。</p> <p style="text-align: center;">表3-1 燃料の主要仕様 (1/2)</p> <table border="1" data-bbox="943 808 1608 1423"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>ステップ1燃料（現行）</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%～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%～約1.9wt%)</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0wt%</td> <td>約10wt%以下</td> </tr> <tr> <td>初期密度</td> <td>理論密度の約95%</td> <td>理論密度の約97% (ガドリニア入り燃料については理論密度の約96%)</td> </tr> <tr> <td>ペレット直径</td> <td>約8.19mm又は約8.05mm</td> <td>約8.19mm</td> </tr> <tr> <td>ペレット長さ</td> <td>約11.5mm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62,000MWd/t</td> <td>約71,000MWd/t</td> </tr> <tr> <td>被覆管材料</td> <td>ジルカロイ-4</td> <td>・Sn-Fe-Cr-Nb系<sup>※1</sup>ジルコニウム基合金<sup>※1</sup> ・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系<sup>※2</sup>ジルコニウム基合金<sup>※2</sup> ・Sn-Fe-Nb系<sup>※3</sup>ジルコニウム基合金<sup>※3</sup></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>※1 MDAを指す。                  ※2 NDAを指す。                  ※3 ZIRLOを指す。</p>	項目	ステップ1燃料（現行）	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%～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%～約1.9wt%)	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0wt%	約10wt%以下	初期密度	理論密度の約95%	理論密度の約97% (ガドリニア入り燃料については理論密度の約96%)	ペレット直径	約8.19mm又は約8.05mm	約8.19mm	ペレット長さ	約11.5mm又は約9.0mm	約11.5mm又は約9.2mm	ペレット最高燃焼度	約62,000MWd/t	約71,000MWd/t	被覆管材料	ジルカロイ-4	・Sn-Fe-Cr-Nb系 <sup>※1</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※1</sup> ・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系 <sup>※2</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※2</sup> ・Sn-Fe-Nb系 <sup>※3</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※3</sup>	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="1727 296 2576 856"> <thead> <tr> <th rowspan="2">材 質</th> <th colspan="2">要 目 表</th> </tr> <tr> <th>要 目 1</th> <th>要 目 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>燃料被覆材</td> <td>Sa-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金<sup>※1</sup></td> <td>同 左</td> </tr> <tr> <td>燃料被覆材</td> <td></td> <td>ASTM B351 Gr. R60804 (Zr7N 804D相当)</td> </tr> <tr> <td>最上層支持格子及び最下層支持格子</td> <td></td> <td>AMS 5596<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>中間層支持格子</td> <td></td> <td>ASTM B352 Gr. R60804<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>上部支持板（上部ノズル）及び下部支持板（下部ノズル）</td> <td></td> <td>ASTM<sup>※3</sup></td> </tr> <tr> <td>制御棒案内シンプル</td> <td></td> <td>ASTM H353 Gr. R60804<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>上部ノズルボスあね</td> <td></td> <td>AMS 5586<sup>※4</sup></td> </tr> <tr> <td>クラウンブスクリム</td> <td></td> <td>ASTM<sup>※5</sup></td> </tr> <tr> <td>上部リングナット・シングルスクリーン・リングナット</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>グベツ</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>炉内制御管案内シンプル</td> <td></td> <td>ASTM B353 Gr. R60804<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>スリ</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>上部プレナムコイルボス</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>下部プレナムコイルボス</td> <td></td> <td>AMS<sup>※6</sup></td> </tr> <tr> <td>押さえ板（下部プレナムコイルボス部用）</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>燃料棒（下部プレナムコイルボス部用）</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>制御棒案内シンプル用下部ボス及びカバー</td> <td></td> <td>ASTM H551 Gr. R60804<sup>※2</sup></td> </tr> <tr> <td>ストッパ</td> <td></td> <td>ASTM H352 Gr. R60804<sup>※2</sup></td> </tr> </tbody> </table> <p>【添付資料4 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. Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金（NDA）</p> <p>NDA 被覆管は「実用発電用原子炉に使用する燃料体の技術基準に関する規則（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第7号）」（以下「原子力規制委員会規則第7号」という。）第8条に規定されていない材料であったことから、原子力規制委員会規則第7号第3条の規定に基づき、特殊加工認可を取得している（平成18・05・12原第20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、本添付資料中に示すNDA 被覆管の照射挙動データには、NDAとNDA-RTの2種類のデータがあり、前者は通常組織管、後者は集合組織調整管を指している。集合組織調整管は、被覆管の圧延工程を調整することによって、ジルコニウムの稠密六方晶C軸<sup>（注1）</sup>の径方向への配向割合を、通常組織管よりも僅かに高めた被覆管であるが、本章で示す被覆管の各特性は同等である。そのため、本申請においては両者を区別しない。</p>	材 質	要 目 表		要 目 1	要 目 2	燃料被覆材	Sa-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 <sup>※1</sup>	同 左	燃料被覆材		ASTM B351 Gr. R60804 (Zr7N 804D相当)	最上層支持格子及び最下層支持格子		AMS 5596 <sup>※2</sup>	中間層支持格子		ASTM B352 Gr. R60804 <sup>※2</sup>	上部支持板（上部ノズル）及び下部支持板（下部ノズル）		ASTM <sup>※3</sup>	制御棒案内シンプル		ASTM H353 Gr. R60804 <sup>※2</sup>	上部ノズルボスあね		AMS 5586 <sup>※4</sup>	クラウンブスクリム		ASTM <sup>※5</sup>	上部リングナット・シングルスクリーン・リングナット			グベツ			炉内制御管案内シンプル		ASTM B353 Gr. R60804 <sup>※2</sup>	スリ			上部プレナムコイルボス			下部プレナムコイルボス		AMS <sup>※6</sup>	押さえ板（下部プレナムコイルボス部用）			燃料棒（下部プレナムコイルボス部用）			制御棒案内シンプル用下部ボス及びカバー		ASTM H551 Gr. R60804 <sup>※2</sup>	ストッパ		ASTM H352 Gr. R60804 <sup>※2</sup>	
項目	ステップ1燃料（現行）	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%～約3.4wt% (ガドリニア入り燃料については約2.6wt%～約1.9wt%)	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0wt%	約10wt%以下																																																																																																
初期密度	理論密度の約95%	理論密度の約97% (ガドリニア入り燃料については理論密度の約96%)																																																																																																
ペレット直径	約8.19mm又は約8.05mm	約8.19mm																																																																																																
ペレット長さ	約11.5mm又は約9.0mm	約11.5mm又は約9.2mm																																																																																																
ペレット最高燃焼度	約62,000MWd/t	約71,000MWd/t																																																																																																
被覆管材料	ジルカロイ-4	・Sn-Fe-Cr-Nb系 <sup>※1</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※1</sup> ・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系 <sup>※2</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※2</sup> ・Sn-Fe-Nb系 <sup>※3</sup> ジルコニウム基合金 <sup>※3</sup>																																																																																																
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																																																																																																
材 質	要 目 表																																																																																																	
	要 目 1	要 目 2																																																																																																
燃料被覆材	Sa-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 <sup>※1</sup>	同 左																																																																																																
燃料被覆材		ASTM B351 Gr. R60804 (Zr7N 804D相当)																																																																																																
最上層支持格子及び最下層支持格子		AMS 5596 <sup>※2</sup>																																																																																																
中間層支持格子		ASTM B352 Gr. R60804 <sup>※2</sup>																																																																																																
上部支持板（上部ノズル）及び下部支持板（下部ノズル）		ASTM <sup>※3</sup>																																																																																																
制御棒案内シンプル		ASTM H353 Gr. R60804 <sup>※2</sup>																																																																																																
上部ノズルボスあね		AMS 5586 <sup>※4</sup>																																																																																																
クラウンブスクリム		ASTM <sup>※5</sup>																																																																																																
上部リングナット・シングルスクリーン・リングナット																																																																																																		
グベツ																																																																																																		
炉内制御管案内シンプル		ASTM B353 Gr. R60804 <sup>※2</sup>																																																																																																
スリ																																																																																																		
上部プレナムコイルボス																																																																																																		
下部プレナムコイルボス		AMS <sup>※6</sup>																																																																																																
押さえ板（下部プレナムコイルボス部用）																																																																																																		
燃料棒（下部プレナムコイルボス部用）																																																																																																		
制御棒案内シンプル用下部ボス及びカバー		ASTM H551 Gr. R60804 <sup>※2</sup>																																																																																																
ストッパ		ASTM H352 Gr. R60804 <sup>※2</sup>																																																																																																

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

(2/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>【添付書類八】</p> <p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(1) 概要</p> <p>燃料集合体は、多数の二酸化ウラン焼結ペレット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-ニオブ合金にズズ及び鉄を添加したジルコニウム基合金」又はジルカロイ-4で被覆した燃料棒、制御棒案内シンプル、炉内計装用案内シンプル、支持格子、上部ノズル、下部ノズル等で構成する。申請書本文における五、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</p> <p>(ロ) 燃料体 (2)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-ニオブ合金にズ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。<sup>(1)</sup><sup>(2)</sup>燃料棒の配列は、17×17であり、そのうち264本が燃料棒、24本が制御棒案内シンプル、残り1本が炉内計装用案内シンプルである。制御棒案内シンプルは、制御棒クラスタ、バーナブルポイズン、中性子源又はブラギングデバイスの挿入に使用する。</p>	<p>3. ステップ2燃料の主要仕様</p> <p>(4) 被覆管材料</p> <p>炉内滞在期間の長期化に伴う被覆管の腐食及び水素吸収量増加を抑制するため、被覆管材料をステップ1燃料のジルカロイ-4から表3-2に示すジルコニウム基合金に変更した改良被覆管（A型燃料はMDA及びZIRLO<sup>TM</sup>、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維持のために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。燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分を第2-1表に示す。また、燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質を第2-2表に示す。</p>	

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

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

(3/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																																																																																																																																																																		
<p>第3.2.1表 燃料の主要仕様</p> <p>(2) 被覆管</p> <p>材 料      ジルカロイ-4の合金成分を調整しニオブ等を添加したジルコニウム合金</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb系ジルコニウム合金</p> <p>(Sn           : 0.7~0.9wt%、</p> <p>Fe            : 0.18~0.24wt%、</p> <p>Cr            : 0.07~0.13wt%、</p> <p>Fe+Cr       : 0.28~0.37wt%、</p> <p>Nb           : 0.45~0.55wt%、</p> <p>Zr           : 残り)</p> <p>・Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金</p> <p>(Sn           : 0.90~1.15wt%、</p> <p>Fe            : 0.24~0.30wt%、</p> <p>Cr            : 0.13~0.19wt%、</p> <p>Nb           : 0.08~0.14wt%、</p> <p>Ni            : 0.007~0.014wt%、</p> <p>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合金</p> <p>・Sn-Fe-Nb系ジルコニウム合金</p> <p>(Sn           : 0.9~1.3wt%、</p> <p>Fe            : 0.08~0.12wt%、</p> <p>Nb           : 0.8~1.2wt%、</p> <p>Zr           : 残り)</p> <p>ただし、第1~第21領域      ジルカロイ-4</p>	<p>表3-2 被覆管の合金成分</p> <table border="1" data-bbox="890 346 1632 724"> <thead> <tr> <th rowspan="2">主成分<sup>1)</sup></th> <th colspan="3">ジルカロイ-4<sup>2)</sup></th> <th colspan="3">ジルコニウム合金</th> </tr> <tr> <th>規 格</th> <th>従来Sn</th> <th>低Sn</th> <th>MDA</th> <th>NDA</th> <th>ZIRLO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sn</td> <td>1.2~1.7</td> <td>1.5</td> <td>1.3</td> <td>0.7~0.9</td> <td>0.90~1.15</td> <td>0.9~1.3</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18~0.24</td> <td>0.2</td> <td>←</td> <td>0.18~0.24</td> <td>0.24~0.30</td> <td>0.08~0.12</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07~0.13</td> <td>0.1</td> <td>←</td> <td>0.07~0.13</td> <td>0.13~0.19</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28~0.37</td> <td>0.3</td> <td>←</td> <td>0.28~0.37</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>0.45~0.55</td> <td>0.08~0.14</td> <td>0.8~1.2</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>0.007~0.014</td> <td>—</td> </tr> </tbody> </table> <p>*1 数値の単位はwt%。また、上記以外の残りの成分はジルコニウム。</p> <p>*2 ジルカロイ-4のうち、規格内でSn含有量を少なくしたものを低Snジルカロイ-4、それ以外を従来Snジルカロイ-4と呼ぶ。</p>	主成分 <sup>1)</sup>	ジルカロイ-4 <sup>2)</sup>			ジルコニウム合金			規 格	従来Sn	低Sn	MDA	NDA	ZIRLO	Sn	1.2~1.7	1.5	1.3	0.7~0.9	0.90~1.15	0.9~1.3	Fe	0.18~0.24	0.2	←	0.18~0.24	0.24~0.30	0.08~0.12	Cr	0.07~0.13	0.1	←	0.07~0.13	0.13~0.19	—	Fe+Cr	0.28~0.37	0.3	←	0.28~0.37	—	—	Nb	—	—	—	0.45~0.55	0.08~0.14	0.8~1.2	Ni	—	—	—	—	0.007~0.014	—	<p>第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分(2/5)</p> <table border="1" data-bbox="1765 357 2552 640"> <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>0.90/1.15</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> <th>≦</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金<sup>(注5)</sup></td> <td>Fe</td> <td>0.24/0.30</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.13/0.19</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.08/0.14</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>0.007/0.014</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>第2-2表 燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質(1/2)</p> <table border="1" data-bbox="1780 756 2567 934"> <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>(高温引張試験：385℃)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>引張強さ</td> <td>≧ MPa</td> </tr> <tr> <td>耐 力</td> <td>≧ 310 MPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <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	0.90/1.15	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金 <sup>(注5)</sup>	Fe	0.24/0.30	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Cr	0.13/0.19	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Nb	0.08/0.14	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Ni	0.007/0.014	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	O		≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Zr	残部										構成部品	材料の種類	項目	規定値	燃料被覆材	NDA	(高温引張試験：385℃)		引張強さ	≧ 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 <sup>1)</sup>	ジルカロイ-4 <sup>2)</sup>			ジルコニウム合金																																																																																																																																																																	
	規 格	従来Sn	低Sn	MDA	NDA	ZIRLO																																																																																																																																																															
Sn	1.2~1.7	1.5	1.3	0.7~0.9	0.90~1.15	0.9~1.3																																																																																																																																																															
Fe	0.18~0.24	0.2	←	0.18~0.24	0.24~0.30	0.08~0.12																																																																																																																																																															
Cr	0.07~0.13	0.1	←	0.07~0.13	0.13~0.19	—																																																																																																																																																															
Fe+Cr	0.28~0.37	0.3	←	0.28~0.37	—	—																																																																																																																																																															
Nb	—	—	—	0.45~0.55	0.08~0.14	0.8~1.2																																																																																																																																																															
Ni	—	—	—	—	0.007~0.014	—																																																																																																																																																															
構成部品	材料の種類	主成分(wt%)		不 純 物(ppm)																																																																																																																																																																	
		Sn	0.90/1.15	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																									
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金 <sup>(注5)</sup>	Fe	0.24/0.30	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																									
		Cr	0.13/0.19	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																									
		Nb	0.08/0.14	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																									
		Ni	0.007/0.014	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																									
		O		≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																									
		Zr	残部																																																																																																																																																																		
構成部品	材料の種類	項目	規定値																																																																																																																																																																		
燃料被覆材	NDA	(高温引張試験：385℃)																																																																																																																																																																			
		引張強さ	≧ 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

(4/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3 . 原子炉及び炉心</p> <p>3 . 2 機械設計</p> <p>3 . 2 . 1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a . 構成材料<sup>(1)(2)</sup></p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、<u>1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</u></p>	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ及び燃料棒平均燃焼度で約62,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・耐食性は向上(図4-1及び図4-2参照)。</li> <li>なお、水素吸収率は同等(図4-3及び図4-4参照)。</li> <li>・炉内クリープについて、MDA及びZIRLOは減少、NDAは同等(図4-5及び図4-6参照)。</li> <li>・照射成長は減少(図4-7及び図4-8参照)。</li> </ul> <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶解点及び熱伝導率が低下する。(図4-9及び図4-10参照)。</p>	<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、原子炉内使用条件下で高温の1次冷却材との反応により酸化膜が形成される。一般に、ジルカロイ被覆管の腐食速度は、酸化膜と被覆管金属母材の界面温度についてのアレニウス型温度依存性を示す。また、その腐食増量(酸素による質量増加)の時間変化を第5-7図に示すが、初期の段階では時間に対して立方則(時間の3乗根に比例)に従って増加し、酸化膜厚さが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。<u>原子炉内での被覆管酸化膜厚さを第5-8図に示す。</u>原子炉内では滞在期間が長くなり酸化膜が厚くなるに従って、形成された酸化膜と金属母材の境界温度が上昇するため、燃焼度の進行に伴って酸化膜厚さは増大する傾向になる。更に腐食が進行すると腐食量の急激な増加が見られるが、これは酸化により発生する水素のうち、被覆管に吸収された水素が被覆管外面に析出し、この析出物が腐食に起因すると考えられている。</p> <p>第5-8図から分かるように、被覆管の原子炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されており、NDA被覆管については、ジルカロイ-4被覆管と比較して腐食速度の低減が認められる。</p> <p>したがって、<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(添付資料3「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	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
3 . 原子炉及び炉心 3 . 2 機械設計 3 . 2 . 1 燃料 ( 5 ) 評価 a . 構成材料 <sup>(1)(2)</sup> (中略) 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>	4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見  (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 ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。 改良被覆管の特性は、炉外試験データ及び燃料棒平均燃焼度で約62,000Mwd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。 ・耐食性は向上(図4-1及び図4-2参照)。 なお、 <u>水素吸収率は同等(図4-3及び図4-4参照)。</u> ・炉内クリープについて、 <u>MDA及びZIRLOは減少</u> 、NDAは同等(図4-5及び図4-6参照)。 ・照射成長は減少(図4-7及び図4-8参照)。 また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000Mwd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶解点及び熱伝導率が低下する。(図4-9及び図4-10参照)。	5.3.2 水素吸収による影響 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>被覆管の原子炉内での水素吸収量と酸化膜厚さの関係を第5-9図に示すが、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)の関係を第5-10図に示す。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<sup>(20)</sup>。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> したがって、 <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(添付資料3「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> 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。	(6/26)

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

(7/26)

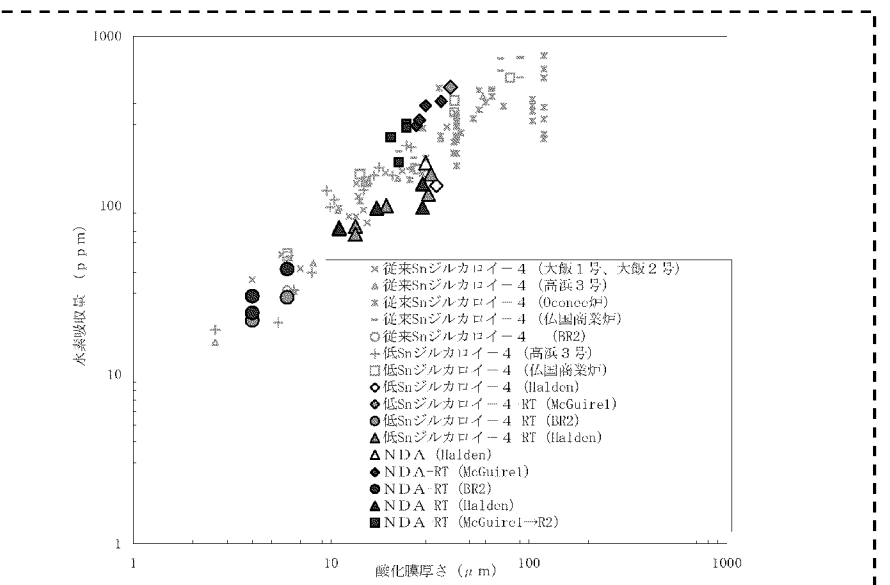
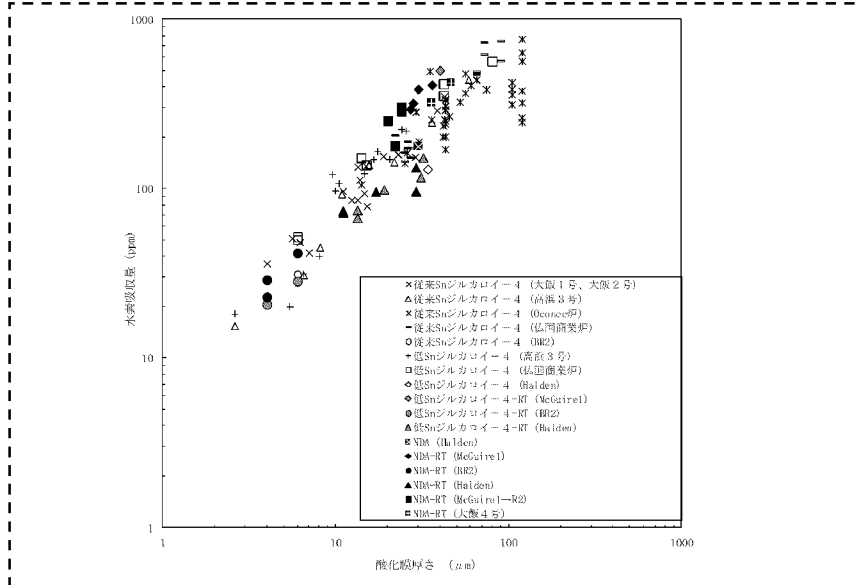
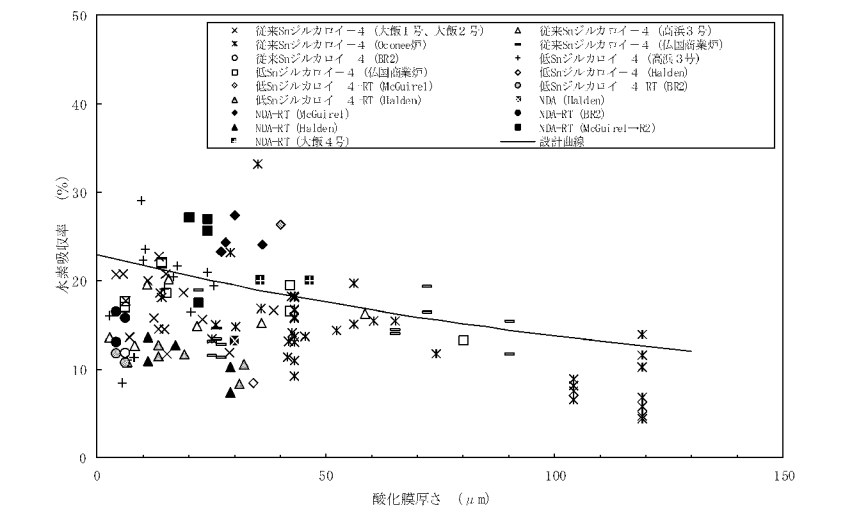
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図4-4 改良被覆管（NDA）の炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係<sup>[2]</sup></p>	 <p>第5-9図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係<sup>[20]</sup></p>  <p>第5-10図 NDA被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収率の関係<sup>[20]</sup></p>	<p>・設計及び工事の計画に第5-10図を記載しているのは、酸化膜厚さと水素吸収率の関係性がジルカローイ-4と同等であることを設計評価（添付資料3）に反映しているため、記載している。</p>

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

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

(8/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>3. 原子炉及び炉心</p> <p>3.2 機械設計</p> <p>3.2.1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a. 構成材料<sup>(1)(2)</sup></p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、ペレット-被覆管の相互作用や内外圧差による変形に十分耐える高い強度を有し、1次冷却材、二酸化ウラン、ガドリニア入り二酸化ウラン、核分裂生成物等に対して高い耐食性を示し、かつ、高い信頼性を有する材料である。</p>	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力(株)大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ及び燃料棒平均燃焼度で約62,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、<u>ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・耐食性は向上(図4-1及び図4-2参照)。</li> <li>・なお、水素吸収率は同等(図4-3及び図4-4参照)。</li> <li>・<u>炉内クリープについて、MDA及びZIRLOは減少、NDAは同等(図4-5及び図4-6参照)。</u></li> <li>・照射成長は減少(図4-7及び図4-8参照)。</li> </ul> <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000MWd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。(図4-9及び図4-10参照)。</p>	<p>5.2.3 クリープ<sup>(注1)</sup>特性</p> <p>被覆管は内外圧差に基づくクリープによって外径が減少していくが、ペレットと被覆管が接触した後は、ペレットの外径変化に依存して被覆管外径が増加する。実機PWR燃料棒の照射後の外径変化を第5-5図に示すが、約20,000MWd/t程度までの低燃焼度域の外径減少より、<u>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。</u>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<sup>(20)</sup>。<u>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(添付資料3「強度に関する説明書」の3.2.2項(3)d.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

(9/26)

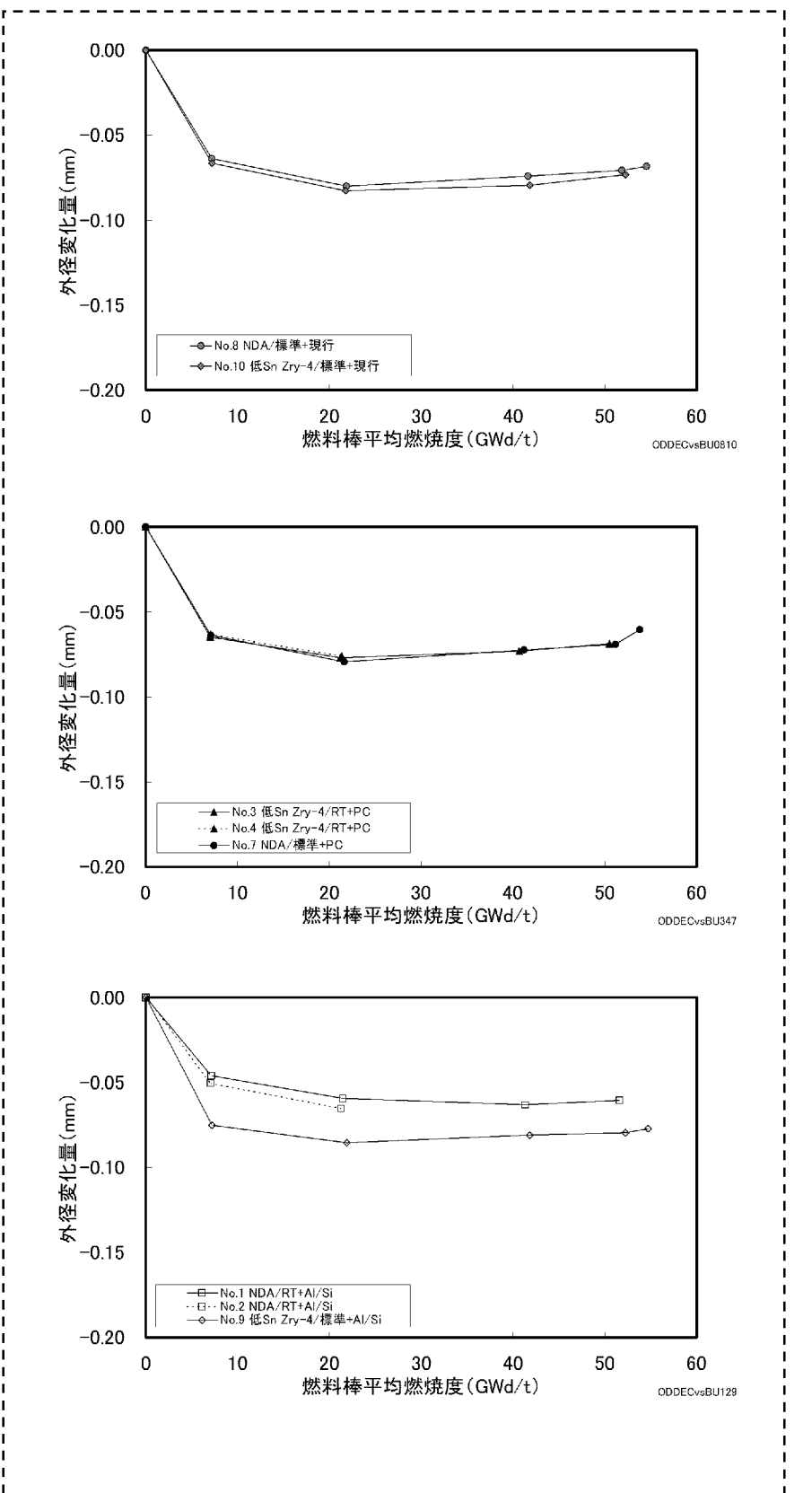
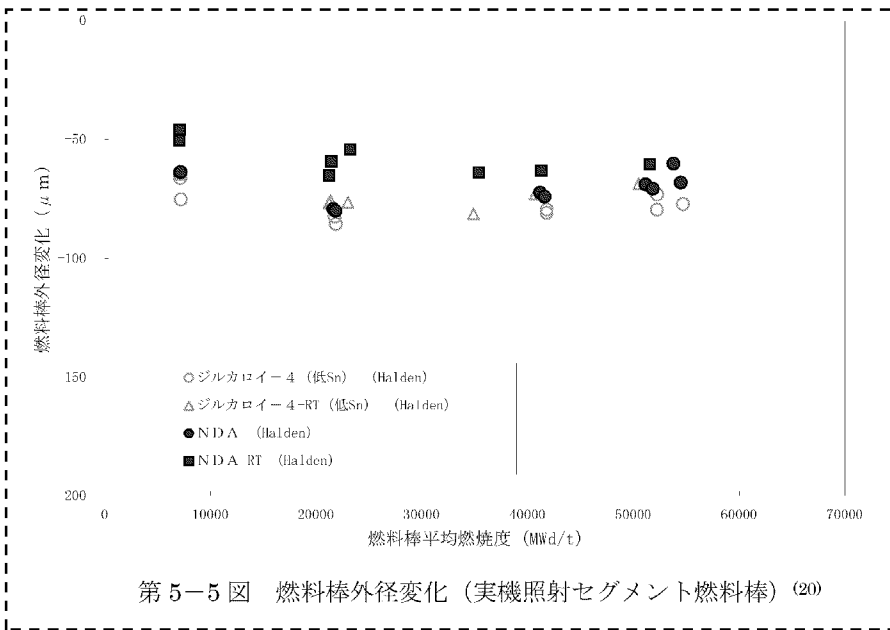
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図4-6 改良被覆管（NDA）の外径変化[Halden炉] [3]</p>	 <p>第5-5図 燃料棒外径変化（実機照射セグメント燃料棒）(20)</p>	

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

(10/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>4. 改良被覆管等の特性及びペレット照射挙動に関する最近の知見</p> <p>(1) 改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性</p> <p>ステップ2燃料において採用する改良被覆管及び高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの開発に際し、その健全性を確認し実用化を図ることを目的として、(財)原子力発電技術機構及び電気事業者により炉外試験並びに海外試験炉及び商業炉における照射試験が行われ、その特性データが取得されている。また、ステップ2燃料の本格導入に先立ち、関西電力（株）大飯4号機において行われた少数体の先行照射を通じて改良被覆管の照射データが取得されている。</p> <p>改良被覆管の特性は、炉外試験データ及び燃料棒平均燃焼度で約62,000Mwd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ジルカロイ-4製被覆管と比べて異なる特性は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・耐食性は向上（図4-1及び図4-2参照）。</li> <li>なお、水素吸収率は同等（図4-3及び図4-4参照）。</li> <li>・炉内クリープについて、MDA及びZIRLOは減少、NDAは同等（図4-5及び図4-6参照）。</li> <li>・照射成長は減少（図4-7及び図4-8参照）。</li> </ul> <p>また、高濃度ガドリニア入り二酸化ウランペレットの特性は、炉外試験データ及びペレット燃焼度で約61,000Mwd/tまでの高燃焼度域における照射データをもとに確認されており、ガドリニア濃度約6wt%と同様、二酸化ウランペレットと比べて溶融点及び熱伝導率が低下する。（図4-9及び図4-10参照）。</p>	<p>5.2.4 照射成長<sup>(注1)</sup></p> <p>照射成長の支配要因は、ジルコニウム中の稠密六方晶（α相）の向きが比較的揃った組織において中性子照射で生じる格子欠陥のうち、空孔は六方晶底面へ、格子間原子は柱面へ選択的に集まるためと言われている。第5-6図に示すように、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>したがって、<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（添付資料3「強度に関する説明書」の3.2.2項(3)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、上記の耐放射線性に関する事項を考慮した上で、被覆管応力等が設計基準を満足するようにする。</p>	

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

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

(11/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>図4-8 改良被覆管 (NDA) の照射成長<sup>12)</sup></p>	<p>第5-6図 NDA被覆管の照射成長<sup>20)</sup></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

(12/26)

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

(13/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>【安全審査資料：川内原子力発電所1号及び2号炉高燃焼度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、改良被覆管（MDA、NDA及びZIRLO）の耐力は、図2.1-4に示すように、ジルカロイ-4製被覆管の耐力と同等であり、炉内での使用温度及び高速中性子照射の効果を考慮すると、約310N/mm<sup>2</sup>～約590N/mm<sup>2</sup>となる。被覆管応力基準値は、未照射、照射のいずれの場合でも、被覆管耐力の最確値にその不確定性を考慮して保守的に定めた温度依存の被覆管耐力を使用する。</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、各過渡変化に対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。実機原子炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を第5-1図に示す。引張強さ及び耐力<sup>(注1)</sup>は、照射初期において増加した後、照射量によらず著しい変化が見られず、ジルカロイ-4被覆管と同等である。また、破断伸びは、照射初期に低下した後は照射量によらず著しい変化がなく、ジルカロイ-4被覆管と同等である。その他の材料物性においても、原子炉安全小委員会においてジルカロイ-4被覆管と同等<sup>(28)</sup>であることが確認されている。</p> <p>なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量 27～32×10<sup>25</sup>n/m<sup>2</sup> (E&gt;1MeV)まで十分な延性が確保されているとの報告例もある<sup>(29)</sup>。</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を第5-2図に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、第5-3図に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、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被覆管の応力及びひずみ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

(14/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<div data-bbox="863 279 1685 831"> <p>図2.1-4(2) 改良被覆管 (NDA) の耐力</p> </div> <div data-bbox="863 926 1685 1499"> <p>図2.1-5(2) 改良被覆管 (NDA) の延性</p> </div>	<div data-bbox="1745 302 2567 772"> </div> <div data-bbox="1745 779 2567 1549"> <p>第5-1図 NDA被覆管の機械特性(20)</p> </div>	<p>・設計及び工事の計画に引張強さを記載しているのは、第2-2表の機械的性質の項目との整合のため、記載している。</p>

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

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

(15/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>2.2 設計評価</p> <p>(6) その他の評価事項</p> <p>ステップ2燃料棒の健全性評価に際し、上述の評価事項の他に高燃焼度化に伴う影響を確認した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型で約7.6%、B型で約6.4%となり、いずれも被覆管応力への影響が小さい10%以下の減肉量である。</p> <p>また、被覆管の最大水素吸収量を評価した結果、A型で約520ppm、B型で約600ppm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より得られた破断伸びと水素吸収量の関係から、延性が確保されていることが確認できる約800ppmより小さい。</p>	<p>5.2.1 機械的性質</p> <p>(中略)</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を第5-2図に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、第5-3図に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、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被覆管の応力及びひずみに対する設計基準や材料物性はジルカロイ-4被覆管と同じとして設計評価する。</p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>(中略)</p> <p>第5-8図から分かるように、被覆管の原子炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されており、NDA被覆管については、ジルカロイ-4被覆管と比較して腐食速度の低減が認められる。</p> <p>したがって、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（添付資料3「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>したがって、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（添付資料3「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

(16/26)

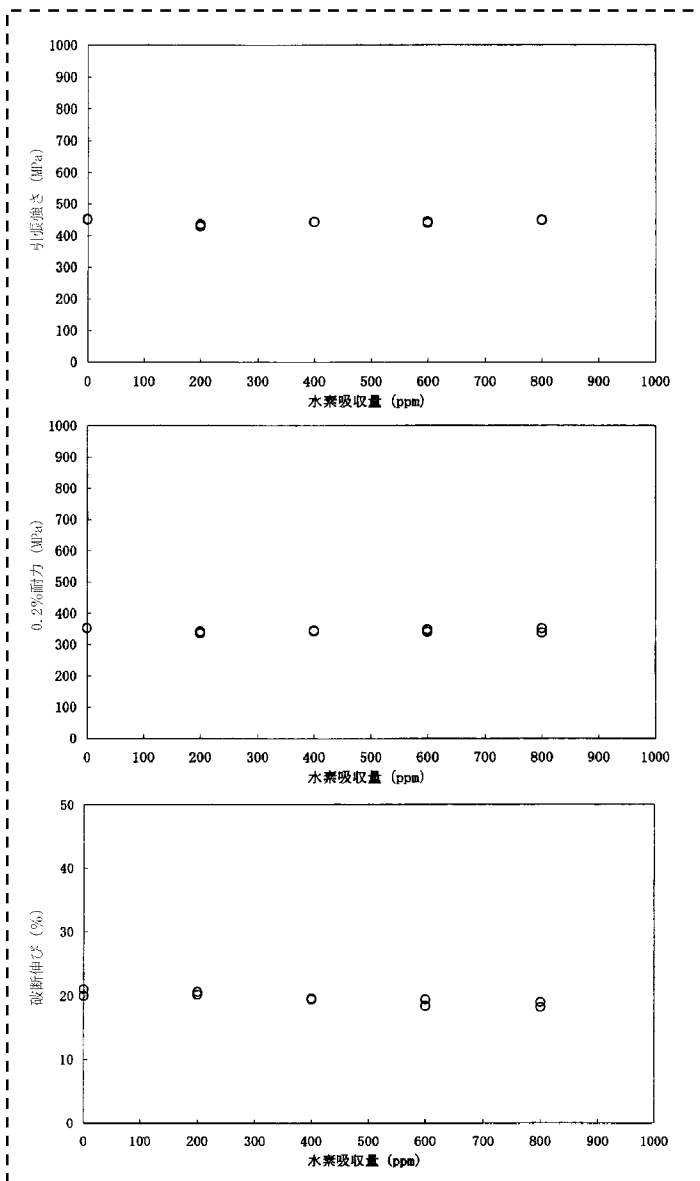
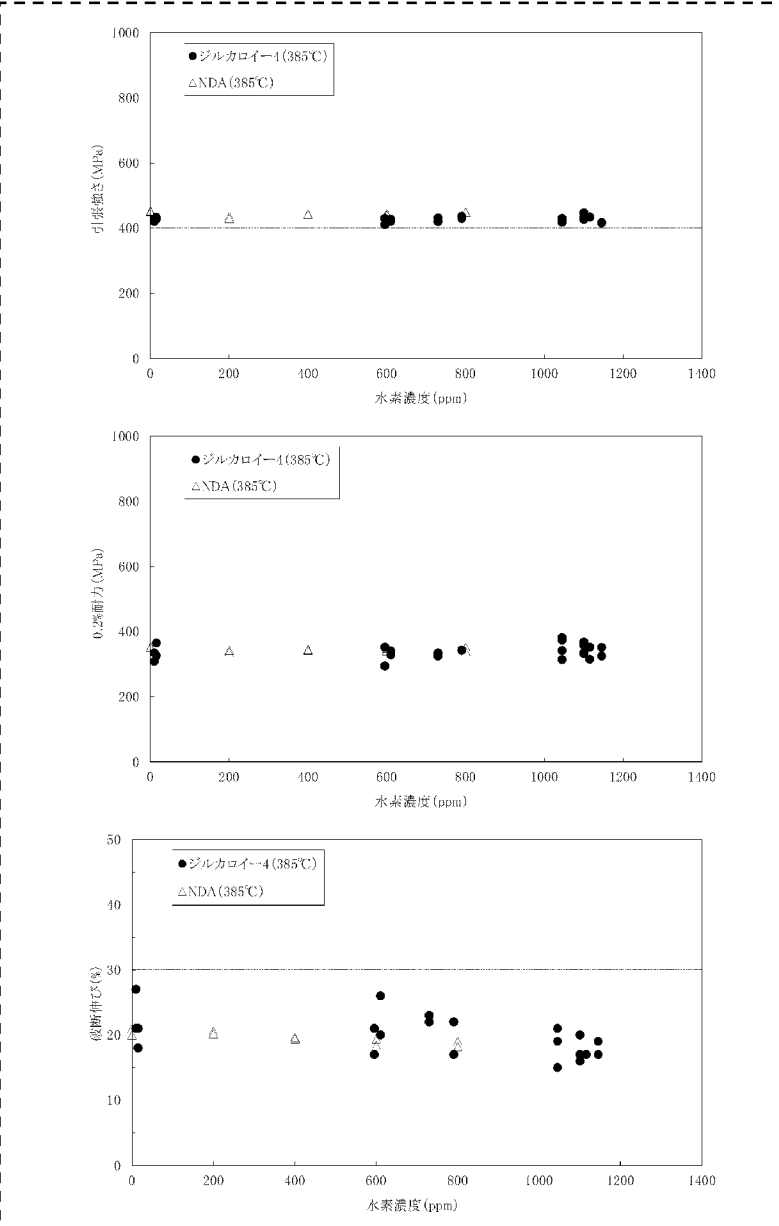
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図2.2-3(2) 未照射改良被覆管（NDA）の機械的特性と水素吸収量の関係</p>	 <p>第5-2図 未照射NDA被覆管の機械特性と水素濃度の関係<sup>(20)</sup></p>	



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

(17/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>図 2.2-4(2) 改良被覆管（NDA）の破断伸びと水素吸収量の関係</p>	<p>第 5-3 図 被覆管水素濃度と破断伸びの関係<sup>(9)(20)</sup></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

(18/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	<p>2.1 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、<u>図2.1-6</u>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="875 619 1647 1144" style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">(試験温度：316℃)</p> <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 の疲労試験結果を第 5-4 図に示す。一般に疲労特性は機械特性に依存するが、5.2.1 項で述べたとおり、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="1736 619 2567 1144" style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">(試験温度：316℃)</p> <p style="text-align: center;">第 5-4 図 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	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	(19/26) 備考
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八） 3 . 原子炉及び炉心 3 . 2 機械設計 3 . 2 . 1 燃料 ( 5 ) 評価 a . 構成材料 <sup>(1)(2)</sup> (中略) 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。	(6)その他の評価事項 b.PCI破損 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。 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。 サイクル初期及びサイクル末期において想定した原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を図2.2-6にPCI破損しきい値とともに示す。これより、運転時の異常な過渡変化時における最大線出力密度及び線出力密度変化幅は、同時にPCI破損しきい値を超えることはなく、PCI破損は生じない。	5.4.1 耐 PCI 性 被覆管は、腐食性 FP ガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用(PCMI)を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ(SCC)による破損(PCI 破損)を起こす。この PCI 破損における SCC は、Zr 中の稠密六方晶 (α相) の底面にほぼ平行な面上を伝播するが、現行の被覆管製法においては、この底面が PCMI 時の発生応力方向、すなわち周方向に配向 (C 軸を径方向に配向) されており、PCI 破損の抑制が図られている。 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。 NDA 被覆管の耐 PCI 性を第 5-11 図に PCI 破損しきい値とともに示す。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 <sup>(20)</sup> 。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。	

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

(20/26)

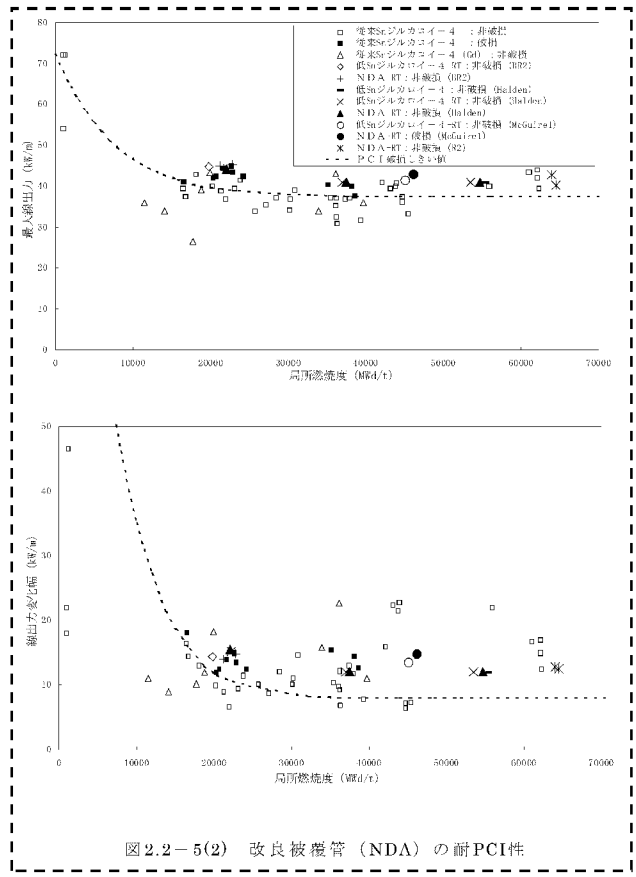
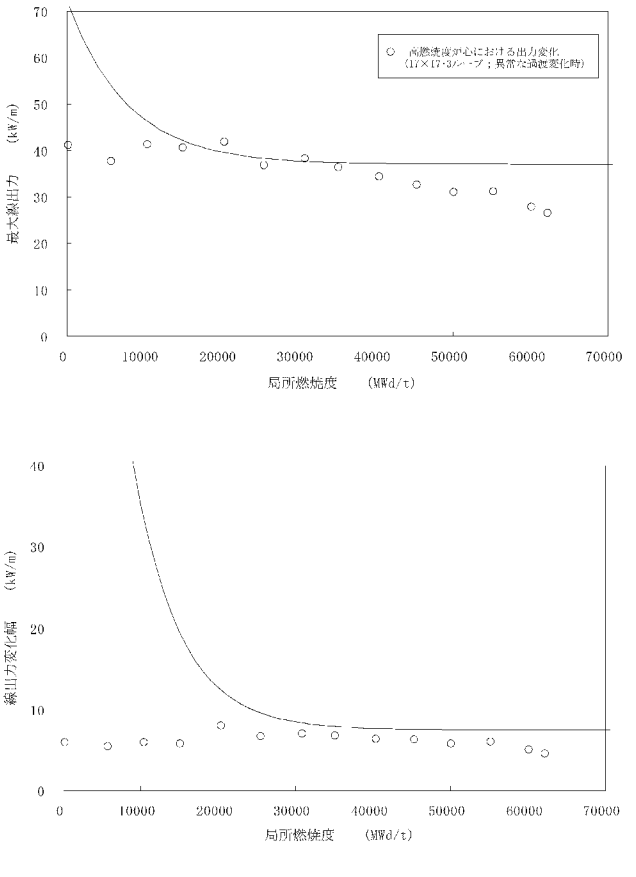
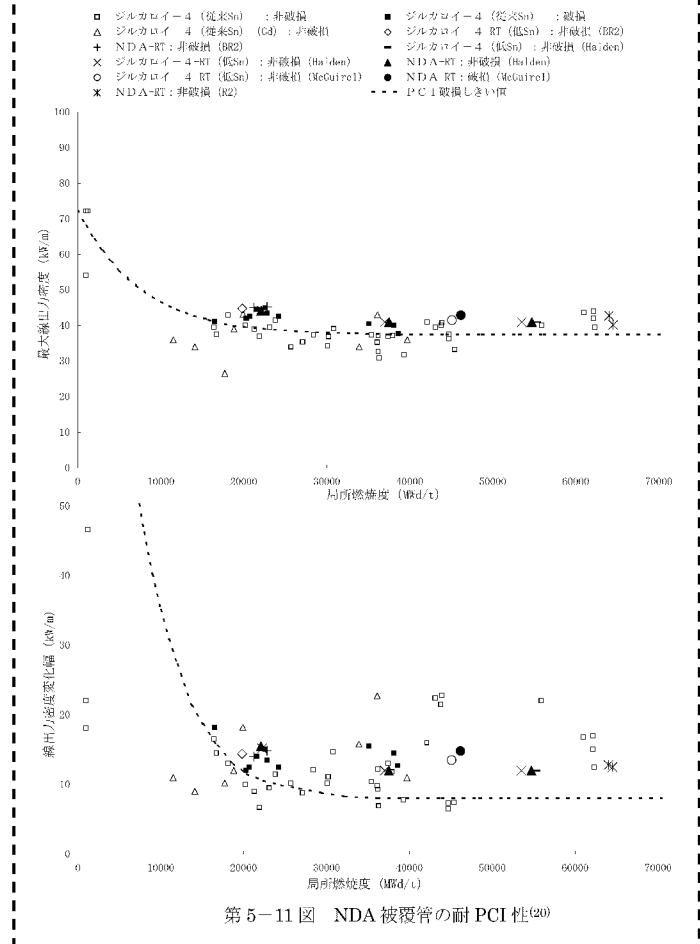
設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
	 <p>図 2.2-5(2) 改良被覆管 (NDA) の耐 PCI 性</p>  <p>図 2.2-6 PCI 評価結果</p>	 <p>第 5-11 図 NDA 被覆管の耐 PCI 性<sup>(20)</sup></p>	<p>・安全審査資料の図 2.2-6 については、添付資料 3 に記載している。</p>

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、 設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	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、 高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	ハッチング部：A型燃料集合体に係る記載 設計及び工事計画認可申請書 該当事項	(21/26) 備考
<p>3 . 原子炉及び炉心</p> <p>3 . 2 機械設計</p> <p>3 . 2 . 1 燃料</p> <p>( 5 ) 評 価</p> <p>a . 構成材料<sup>(1)(2)</sup></p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、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><u>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。</u></p> <p>サイクル初期及びサイクル末期において想定した原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈事象及び出力運転中の制御棒の異常な引き抜き事象の出力変化を図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 NDA 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コニウム中に拡散し、被覆管内面酸化膜(<math>ZrO_2</math>)が形成される。さらに、両者が強く接触するようになるとジルコニウム酸化層へのウランの拡散により、ジルコニウム酸化層は<math>(Zr,U)O_2</math> 固溶体となり、これがボンディング層を形成して、強固なペレット-被覆管の固着の原因となる<sup>(10)</sup>。これらは、被覆管の腐食及びPCI<sup>(註1)</sup>へ影響を及ぼす可能性が考えられる。</p> <p>しかしながら、二酸化ウランペレットとジルコニウムを密着させ510℃で約500日以上保持した場合においても反応は生じないことが報告されている<sup>(12)</sup>。通常運転中においてペレットと被覆管及び燃料被覆材端栓の接触面の温度が長期間にわたって500℃を超えないことから、反応は小さいと考えられる。</p> <p>また、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<sup>(註1)</sup>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<sup>(11)</sup>。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<sup>(12)</sup>。このことから、<u>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。</u></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 ガドリニア入り二酸化ウランペレットと NDA 被覆管との反応</p> <p>ガドリニア入り二酸化ウランは、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。<u>ガドリニア入り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<sup>(20)</sup>。</u>したがって、ガドリニア入り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。したがって、当該の反応を設計評価では考慮していない。</p> <p>なお、3.3.1 項で述べたとおり、ペレット密度が増加した場合の共存性への影響はない。</p>	

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

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

(22/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考												
<p>指針12. 燃料設計</p> <p>適合のための設計方針</p> <p>1 . について</p> <p>燃料集合体は、原子炉内における使用期間中を通じ、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化による起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が十分な強度を有し、その機能を保持できる設計とする。</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>( 5 ) 評価</p> <p>a . 構成材料<sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup></p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、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>3 . 6 参考文献</p> <p>( 2 ) 「原燃工製P W R ステップ2 燃料の改良因子について」</p> <p>N F K - 8 1 1 6 改4</p> <p>原子燃料工業 平成15年</p> <p>【原燃工製P W R ステップ2 燃料の改良因子について】</p> <p>N F K - 8 1 1 6 改4 原子燃料工業 平成15年】</p> <table border="1" data-bbox="94 1438 798 1711"> <caption>表 3.2-4 被覆管の硬度</caption> <thead> <tr> <th>被覆管</th> <th>マイクロビッカース硬度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4被覆管</td> <td>212~224</td> </tr> <tr> <td>NDA被覆管</td> <td>211~217</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">単位：Hv (試験荷重 0.2kgf)</p>	被覆管	マイクロビッカース硬度	ジルカロイ-4被覆管	212~224	NDA被覆管	211~217		<p>5.4.2 耐摩耗性</p> <p>原子炉内では、燃料棒の流動振動による支持格子との接触部で、被覆管の摩耗が発生する可能性がある。被覆管の硬さの測定結果を第5-3表に示す。この表から分かるように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> <table border="1" data-bbox="1765 577 2546 940"> <caption>第5-3表 NDA被覆管の硬さの測定結果<sup>(20)</sup></caption> <p style="text-align: center;">(単位：HV (ビッカース硬さ値))</p> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HV0.2<sup>(注1)</sup>)</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：ビッカース硬さ試験力 0.2kgf</p>	種類	平均値 (HV0.2 <sup>(注1)</sup> )	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3）に反映しているため、記載している。</p>
被覆管	マイクロビッカース硬度														
ジルカロイ-4被覆管	212~224														
NDA被覆管	211~217														
種類	平均値 (HV0.2 <sup>(注1)</sup> )														
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

(23/26)

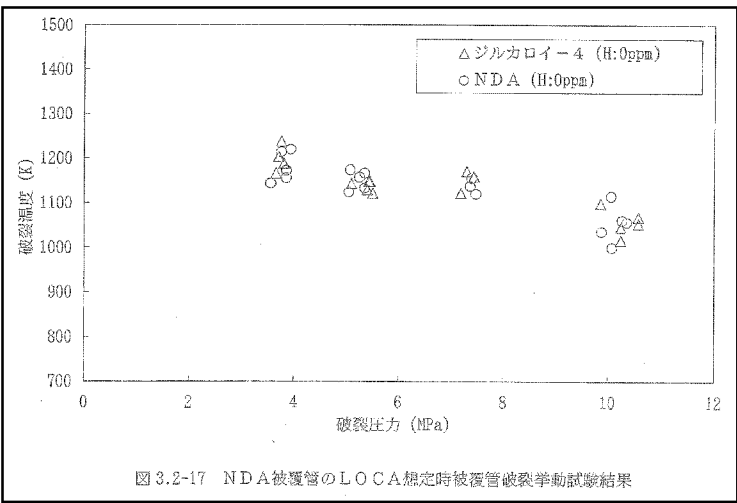
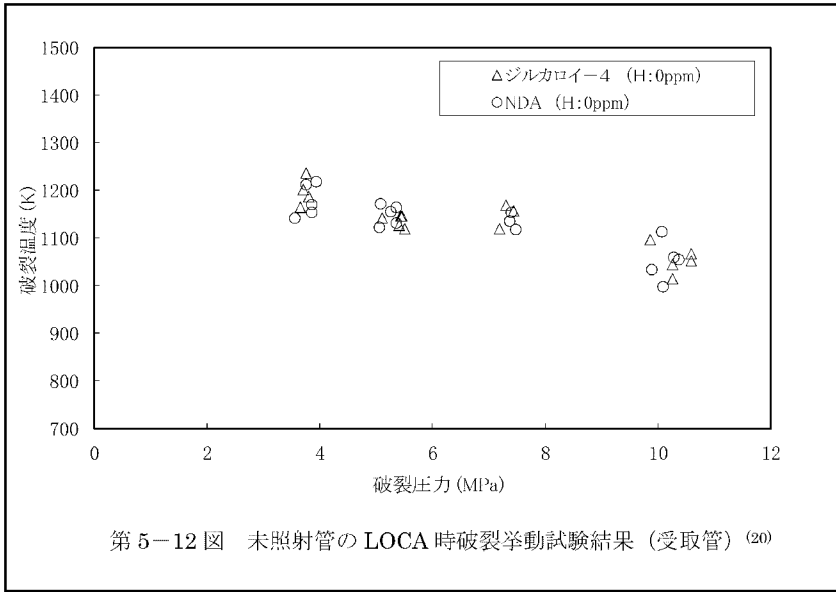
設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p><b>【添付書類八】</b></p> <p>指針12. 燃料設計 適合のための設計方針</p> <p>1 . について</p> <p>燃料集合体は、原子炉内における使用期間中を通じ、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化による起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が十分な強度を有し、その機能を保持できる設計とする。</p> <p>3 . 原子炉及び炉心</p> <p>3 . 2 機械設計</p> <p>3 . 2 . 1 燃料</p> <p>(5) 評価</p> <p>a . 構成材料<sup>(1)</sup><sup>(2)</sup></p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、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>3 . 6 参考文献</p> <p>(2) 「原燃工製PWRステップ2 燃料の改良因子について」 NFK-8116改4 原子燃料工業 平成15年</p> <p><b>【原燃工製PWRステップ2 燃料の改良因子について】</b> NFK-8116改4 原子燃料工業 平成15年】</p>  <p>図 3.2-17 NDA被覆管のLOCA想定時被覆管破裂挙動試験結果</p>		<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。1冷却材喪失事故(LOCA)にて考慮する昇温内圧破裂試験結果、高温時のジルコニウム-水反応の試験結果をそれぞれ第5-12図及び第5-13図に示す。第5-12図及び第5-13図に示すとおり、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>第5-12図 未照射管のLOCA時破裂挙動試験結果(受取管)<sup>(20)</sup></p>	<p>・設置変更許可申請書及び高燃焼度燃料導入時の安全審査資料では高温特性について詳細な内容は説明していないものの、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>

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

(24/26)

設置変更許可申請書 (本文及び添付書類八)	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考
<p>図 3.2-16 NDA被覆管のジルコニウム-水反応速度定数</p>		<p>第 5-13 図 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数 (受取管) (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

(25/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考															
<p><b>【添付書類八】</b></p> <p>指針12. 燃料設計 適合のための設計方針</p> <p>1 . について</p> <p>燃料集合体は、原子炉内における使用期間中を通じ、燃料棒の内外圧差、燃料棒及び他の材料の照射、負荷の変化による起こる圧力・温度の変化、化学的効果、静的・動的荷重、燃料ペレットの変形、燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して、各構成要素が十分な強度を有し、その機能を保持できる設計とする。</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>(5) 評価</p> <p>a . 構成材料<sup>(1)(2)</sup></p> <p>(中略)</p> <p>ジルコニウム基合金及びジルカロイ-4は、小さな吸収断面積を有し中性子経済性に優れ、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>3 . 6 参考文献</p> <p>(2) 「原燃工製PWR ステップ2 燃料の改良因子について」 NFK-8116改4 原子燃料工業 平成15年</p> <p><b>【原燃工製PWR ステップ2 燃料の改良因子について」 NFK-8116改4 原子燃料工業 平成15年】</b></p> <p>表 3.2-2 被覆管溶融点及び密度測定結果<sup>[1]</sup></p> <table border="1" data-bbox="103 1516 780 1654"> <thead> <tr> <th></th> <th>溶融点 (°C)</th> <th>密度(g/cm<sup>3</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA</td> <td>1796</td> <td>6.52</td> </tr> <tr> <td>ジルカロイ-4</td> <td>1782</td> <td>6.52</td> </tr> </tbody> </table>		溶融点 (°C)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	NDA	1796	6.52	ジルカロイ-4	1782	6.52		<p>5.1 耐熱性</p> <p>ジルカロイ-4の溶融点は1,782°Cであり、結晶構造が820°Cでα相から(α+β)相へ、また、958°Cで(α+β)相からβ相に変態する<sup>(20)</sup>。</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第5-1表及び第5-2表に示すように、NDAの溶融点は1,796°C、α相から(α+β)相及び(α+β)相からβ相への相変態温度はそれぞれ802°C及び937°C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□°C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。したがって、プラントの使用条件の下で溶融あるいは相変態が生じることはないので、当該の挙動を設計評価では考慮していない。</p> <div data-bbox="1783 751 2534 1178" style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p style="text-align: center;">第5-1表 NDAの溶融点測定結果<sup>(20)</sup></p> <p style="text-align: center;">(単位：°C)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">種類</th> <th style="width: 50%;">溶融点測定結果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NDA</td> <td style="text-align: center;">1,796</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ジルカロイ-4 (参考)</td> <td style="text-align: center;">1,782</td> </tr> </tbody> </table> </div>	種類	溶融点測定結果	NDA	1,796	ジルカロイ-4 (参考)	1,782	<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>
	溶融点 (°C)	密度(g/cm <sup>3</sup> )																
NDA	1796	6.52																
ジルカロイ-4	1782	6.52																
種類	溶融点測定結果																	
NDA	1,796																	
ジルカロイ-4 (参考)	1,782																	

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

(26/26)

設置変更許可申請書（本文及び添付書類八）	高燃焼度燃料導入時の安全審査資料	設計及び工事計画認可申請書 該当事項	備考																		
<div data-bbox="106 317 795 491" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">表 3.2-3 被覆管の相変態温度</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">被覆管</th> <th style="width: 35%;">相変態開始温度</th> <th style="width: 35%;">相変態終了温度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4被覆管</td> <td style="text-align: center;">820</td> <td style="text-align: center;">958</td> </tr> <tr> <td>NDA被覆管</td> <td style="text-align: center;">802</td> <td style="text-align: center;">937</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right; margin-top: 5px;">単位：℃</p> </div>	被覆管	相変態開始温度	相変態終了温度	ジルカロイ-4被覆管	820	958	NDA被覆管	802	937		<div data-bbox="1739 296 2558 657" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">第 5-2 表 NDA の相変態温度測定結果<sup>(20)</sup></p> <p style="text-align: right;">(単位：℃)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">種類</th> <th style="width: 35%;">α→α+β</th> <th style="width: 35%;">α+β→β</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">NDA</td> <td style="text-align: center;">802</td> <td style="text-align: center;">937</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ジルカロイ-4 (参考)</td> <td style="text-align: center;">820</td> <td style="text-align: center;">958</td> </tr> </tbody> </table> </div>	種類	α→α+β	α+β→β	NDA	802	937	ジルカロイ-4 (参考)	820	958	
被覆管	相変態開始温度	相変態終了温度																			
ジルカロイ-4被覆管	820	958																			
NDA被覆管	802	937																			
種類	α→α+β	α+β→β																			
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

## 補足説明資料 7-3

特殊加工認可申請書との整合性に関する補足説明資料

目 次

	頁
1. 概 要 .....	1
2. 整理結果 .....	1

## 1. 概 要

本資料は、令和2年4月の「原子力利用における安全対策の強化のための核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等の一部を改正する法律」及び関連規則等（以下「改正法等」という。）の施行を踏まえ、本設工認申請対象の燃料被覆材について、特殊加工認可申請書（平成18年7月24日付け平成18・05・12原第20号にて認可）（以下「特認」という。）と設計及び工事計画認可申請書（以下「設工認」という。）の記載事項の関連を整理したものである。

## 2. 整理結果

以下に特認の構成を示す。このうち特認の具体的な申請内容である資料1及び資料2について設工認との比較を表1に示す。

### 特認の構成

1. 申請燃料体
2. 申請理由
3. 加工方法

資料1 特殊加工認可申請範囲

資料2 Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金燃料被覆材の説明書

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

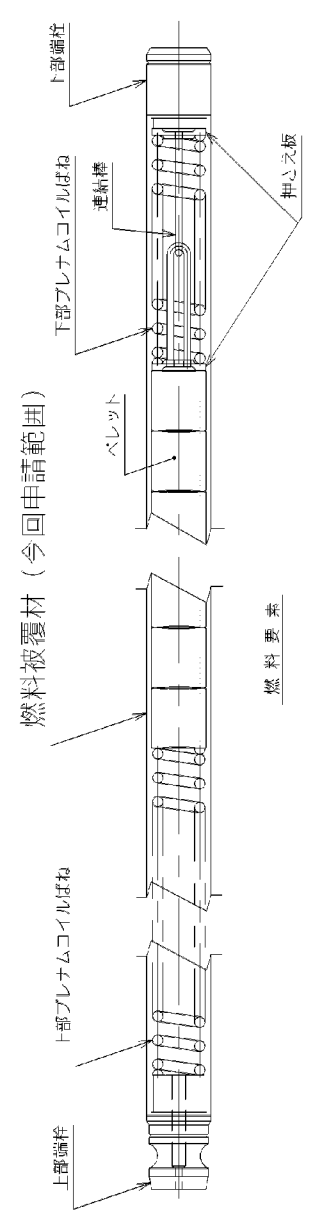
特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考				
<p style="text-align: center;">特殊加工認可申請範囲</p> <div data-bbox="540 1564 1110 1638" style="border: 1px solid black; margin: 20px auto; padding: 5px;"> <table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">特殊加工認可申請書</td> <td style="padding: 2px;">資料 1</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 2px;">川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料 1	川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 号機		—	
特殊加工認可申請書	資料 1					
川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 号機						



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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>1. 特殊加工認可申請範囲 特殊加工認可申請範囲は、川内原子力発電所第1号機及び第2号機の取替燃料体(最高燃焼率 55,000MWd/t)のうち燃料被覆材の部分である。</p> <p style="text-align: center;">1-1</p>	—	<p>特認の申請範囲を示している ものであり、比較対象外。</p>

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
 <p>Technical drawing of a B-type fuel assembly. The drawing shows a vertical cylindrical assembly with various internal components. Labels include: 上部端栓 (Upper end plug), 下部アルナムコイルばね (Lower aluminum coil spring), 燃料棒 (Fuel rod), 燃料被覆材 (Fuel cladding material), 上部アルナムコイルばね (Upper aluminum coil spring), 燃料要素 (Fuel element), 特殊加工認可申請範囲 (Special processing approval application range), and 1-2. A hatched area is shown in the middle section, labeled as the current application range (今回申請範囲).</p>	<p style="text-align: center;">—</p>	<p>特認の申請範囲を示している ものであり、比較対象外。</p>

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考				
<p style="text-align: center;">Sn-Fe-Cr-Nb-Ni 系ジルコニウム基合金燃料被覆材の説明書</p> <div data-bbox="566 1444 1136 1522" style="border: 1px solid black; margin: 20px auto; padding: 5px;"> <table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">特殊加工認可申請書</td> <td style="padding: 2px;">資料 2</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 2px;">川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 号機</td> </tr> </table> </div>	特殊加工認可申請書	資料 2	川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 号機		—	
特殊加工認可申請書	資料 2					
川内原子力発電所第 1 号機及び第 2 号機						

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p style="text-align: center;">目 次</p> <p>1. NDA 被覆管の概要 ..... 2-1</p> <p>2. NDA 被覆管の特性 ..... 2-2</p> <p>  2.1 耐熱性..... 2-2</p> <p>  2.2 耐放射線性..... 2-2</p> <p>    2.2.1 機械的性質 ..... 2-2</p> <p>    2.2.2 照射成長 ..... 2-3</p> <p>    2.2.3 クリープ特性..... 2-3</p> <p>    2.2.4 疲労特性 ..... 2-3</p> <p>  2.3 耐腐食性 ..... 2-4</p> <p>    2.3.1 酸化腐食による影響 ..... 2-4</p> <p>    2.3.2 水素吸収による影響 ..... 2-1</p> <p>  2.4 その他の性能 ..... 2-5</p> <p>    2.4.1 耐 PCI 性 ..... 2-5</p> <p>    2.4.2 耐摩耗性(フレッティング摩耗) ..... 2-5</p> <p>    2.4.3 内面酸化 ..... 2-5</p> <p>    2.4.4 ベレットとのボンディング ..... 2-5</p> <p>    2.4.5 高温時の特性..... 2-6</p> <p>3. NDA 被覆管の品質及び検査方法等 ..... 2-7</p> <p>  3.1 品質 ..... 2-7</p> <p>  3.2 寸法許容差 ..... 2-7</p> <p>  3.3 製造方法 ..... 2-7</p> <p>  3.4 試験 ..... 2-7</p> <p>  3.5 検査 ..... 2-8</p> <p>  3.6 表示 ..... 2-8</p> <p>4. 参考文献 ..... 2-9</p>	—	

表 1

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>1. NDA被覆管の概要</p> <p>①ジルコニウムは、ステンレス鋼等と比べると熱中性子吸収断面積が極めて小さく、ステンレス鋼を被覆管に使用する場合に比べて、はるかに中性子経済上有利である。ただし、機械的強度や耐食性等が劣ることから、添加元素によってそれらの点を補うべく、ジルコニウム合金の開発が行われた。このような1950年代に行われたジルコニウム合金の研究の中で、加圧水型軽水炉（以下、PWRと称する）用燃料被覆材（以下、被覆管と称する）として、ジルコニウムにSn、Fe及びCrを加えたジルコニウム合金（JIS H4751 ZrTN804D。以下、ジルカロイ-4と称する）が開発されてきた。</p> <p>ジルカロイ-4は、PWRの1次系水中の条件下において、優れた耐食性を有しており、PWR用被覆管として適した材料である。このジルカロイ-4被覆管のSn含有量については、従来の製品では1.5wt%を中心にとらっていたが、近年、耐食性向上をねらって、規格の範囲内（1.20wt%～1.70wt%）でSn含有量を低下させ、含有量が1.3wt%近傍の製品が採用されている。</p> <p>しかし、燃料体最高燃焼率（以下、燃焼度と称する）を48,000MWd/tから55,000MWd/t（以下、ステップ2燃料と称する）へ引き上げるためには、さらに被覆管の耐食性を向上させる必要がある。</p> <p>これまでの被覆管として採用されてきたジルカロイ-4の豊富な照射実績を基に、ジルカロイ-4の規格を大きく外れない範囲で耐食性を向上させるためにSn含有量を低下させるとともに、Nb及びNiを微量添加し、さらに、機械的強度を補償するために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（以下、NDAと称する）を開発している。NDAの化学成分と不純物に関する仕様をジルカロイ-4と比較して、表1.1-1及び表1.1-2に示す。②なお、NDA被覆管には集合組織調整を施す。（集合組織調整管と称する。）</p>	<p>（添付資料 4）</p> <p>2. 構成材料の概要</p> <p>燃料集合体の材料は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を含むプラントの使用条件の下で、燃料寿命中その健全性が維持されるよう選定している。燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分を第2-1表に示す。また、燃料集合体の主な構成部品の材料の機械的性質を第2-2表に示す。</p> <p>第2-1表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分(1/5)</p> <p>（表省略）</p> <p>（注1）以下「二酸化ウランペレット」という。</p> <p>（注2）以下「ガドリニア入り二酸化ウランペレット」という。</p> <p>（注3）タイプ I はガドリニア濃度10wt%を示す。 タイプ II はガドリニア濃度6wt%を示す。</p> <p>（注4）不純物の総中性子吸収をボロン量で換算したもの。</p> <p>（注5）豊富な照射実績を持つジルカロイ-4をベースに、耐食性向上のためにSn含有量を低下させるとともにNb及びNiを微量添加し、さらに、機械的強度を補償するために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。以下「NDA」という。</p> <p>（注6）以下「ジルカロイ-4」という。なお、燃料被覆材端栓の材料は、JIS H4751 ZrTN 804Dの規定からNb及びCaの化学成分を除外して、JIS H4751 ZrTN 804D相当と記載している。</p> <p>（注7）以下「718合金」という。</p> <p>（注8）以下「<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 40px; height: 15px;"></span>」という。</p> <p>（注9）以下「<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 40px; height: 15px;"></span>」という。</p>	<p>①ジルカロイ-4に対する一般論であるため、設工認申請書には記載していない。（ジルカロイ-4は本申請対象の燃料被覆材には使用されていない）</p> <p>②集合組織調整管については、添付資料4「5. Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金(NDA)」に記載している。</p>

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2. NDA 被覆管の特性</p> <p><u>NDA 被覆管を使用する燃料体においては、以下に述べる特性を踏まえた上で燃料設計を行う。</u></p> <p>2.1 耐熱性</p> <p><u>NDA 被覆管は、ジルカロイ-4 被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、融点及び相変態温度はジルカロイ-4 被覆管と同等である。</u></p> <p><u>NDA 被覆管の融点は約1,800°Cであり、約800°Cでα相から (α+β) 相へ、また、約940°Cで (α+β) 相からβ相に変態し、その温度前後で腐食速度や機械的強度が変化する。融点及び相変態温度の測定結果を表2.1-1 及び表2.1-2 に示す。</u></p> <p><u>NDA 被覆管の融点及び相変態温度はジルカロイ-4被覆管と同等である。異常な過渡変化時のNDA 被覆管の最高温度は約□°C以下であり、いずれの相変態温度よりも低いので、熔融あるいは相変態は生じない。</u></p>	<p>(添付資料4)</p> <p>5. Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム基合金 (NDA)</p> <p><u>NDA被覆管は「実用発電用原子炉に使用する燃料体の技術基準に関する規則（平成25年6月28日原子力規制委員会規則第7号）」（以下「原子力規制委員会規則第7号」という。）第8条に規定されていない材料であったことから、原子力規制委員会規則第7号第3条の規定に基づき、特殊加工認可を取得している（平成18・05・12原第20号）。</u></p> <p><u>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。</u></p> <p>なお、本添付資料中に示すNDA被覆管の照射挙動データには、NDAとNDA-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軸の径方向への配向割合を、通常組織管よりも僅かに高めた被覆管であるが、本章で示す被覆管の各特性は同等である。そのため、本申請においては両者を区別しない。</p> <p>5.1 耐熱性</p> <p>ジルカロイ-4の溶融点は1,782°Cであり、結晶構造が820°Cでα相から (α+β) 相へ、また、958°Cで (α+β) 相からβ相に変態する。</p> <p><u>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。</u></p> <p><u>NDAの溶融点及び相変態温度の測定結果を第5-1表及び第5-2表に示すように、NDAの溶融点は1,796°C、α相から (α+β) 相及び (α+β) 相からβ相への相変態温度はそれぞれ802°C及び937°C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□°C以下）よりもかなり高いので、プラントの使用条件の下で熔融あるいは相変態が生じることはない。したがって、プラントの使用条件の下で熔融あるいは相変態が生じることはないので、当該の挙動を設計評価では考慮していない。</u></p>	

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2 耐放射線性</p> <p><u>被覆管は、燃料材（以下、ペレットと称する）と接触して炉内に置かれるので、中性子、α線、β線、γ線及び核分裂片の影響を受ける。α線及びβ線のような荷電粒子は、金属中を通り抜けるとき、電気的な相互作用によって原子の軌道電子を引き離すイオン化作用を起こす。</u></p> <p><u>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、及び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。</u></p> <p><u>中性子は電荷を持たないので、金属中での電気的な相互作用によってエネルギーを失うことがなく、そのエネルギーは主として原子核との弾性衝突により多数の原子を格子位置からはじき出す作用によって消失される。この結果、金属の結晶粒界等に空けきあるいは介在原子の存在が認められるようになり、この微視的欠陥が材料の巨視的な物性値に変化をもたらすことになる。中性子が金属中を通り抜けるとき形成される格子欠陥の濃度は、中性子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。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、ペレットの表面で起こった核分裂は被覆管の内表面にしか作用せず、事実上の照射損傷を与えない。</u></p> <p><u>したがって、NDA 被覆管の耐放射線性については、照射損傷に最も大きく寄与する高速中性子についてその影響を考慮すればよい。</u></p>	<p>(添付資料4)</p> <p>5.2 耐放射線性</p> <p><u>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。</u></p> <p><u>α線及びβ線のような荷電粒子は、金属中を通り抜けるとき、電気的な相互作用によって原子の軌道電子を引き離すイオン化作用を起こす。また、γ線も軌道電子を原子から引き離す作用を起こす。このようにα線、β線、γ線は、主に金属原子の軌道電子と作用してエネルギーを消失していくので、NDA被覆管の照射損傷に与える影響は軽微である。</u></p> <p><u>核分裂片は、その飛程が限定された近距離にしか及ばないため、二酸化ウラン燃料の表面で起こった核分裂だけが被覆管の内表面にしか作用せず、事実上の照射損傷を与えない。</u></p> <p><u>中性子は電荷を持たないので、金属中での電気的な相互作用によってエネルギーを失うことがなく、そのエネルギーは主として原子核との弾性衝突により多数の原子を格子位置からはじき出す作用によって消失される。この結果、金属の結晶格子内あるいは結晶粒界などに空孔あるいは格子間原子の存在が認められるようになり、この微視的欠陥が材料の巨視的な物性値に変化をもたらすことになる。中性子が金属中を通り抜けるときに形成される格子欠陥の濃度は、中性子のエネルギーに比例するため、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。</u></p> <p><u>したがって、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。</u></p>	

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2.1 機械的性質</p> <p>①NDA被覆管の照射による機械的性質の変化を図2.2-1 に示す。ジルカロイ-4 被覆管と同様、高速中性子の照射とともに比較的早い時期にNDA被覆管の引張強さ及び耐力は増加し、その後は照射量の増加に伴う大きな変化は見られない。②したがって、燃料設計上の被覆管耐力は、未照射での耐力に対し照射による耐力増加を考慮する。①伸びについては、ジルカロイ-4被覆管と同様、高速中性子の照射とともに比較的早い時期に減少するが、その後は照射量の増加に伴う大きな変化は見られず、高照射量時においても炉内での使用温度における伸びの減少は小さい。この程度の伸びの減少であれば、被覆管歪に関する設計基準1%に対し十分な余裕があるため、被覆管の延性を確保する上で影響は小さい。</p> <p>①高速中性子照射による機械的性質の変化は照射欠陥の蓄積によるものであるが、照射欠陥の生成と、照射欠陥濃度及び温度に依存する照射欠陥の回復とが平衡状態となることから、想定する照射量の範囲においてNDA被覆管の機械的性質の大きな変化はないと考えられる。③これに関しては、PWRにおけるジルカロイ-2板材の材料照射試験（高速中性子照射量<math>27\sim 32\times 10^{25}\text{n/m}^2</math> (<math>E&gt;1\text{MeV}</math>)) において、機械的性質が大きく変化しないとの報告がある。</p>	<p>(添付資料4)</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。①照射脆化は照射欠陥の蓄積（濃度）によるが、これは高速中性子束、被覆管温度及び時間に依存する。実機原子炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を第5-1図に示す。引張強さ及び耐力は、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被覆管と同等であることが確認されている。</p> <p>③なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量<math>27\sim 32\times 10^{25}\text{n/m}^2</math> (<math>E&gt;1\text{MeV}</math>)まで十分な延性が確保されているとの報告例もある。</p> <p>(省略)</p> <p>(添付資料3)</p> <p>3.3.5 被覆管の応力評価結果 (省略)</p> <p>(2) 応力評価結果 (省略)</p> <p>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（添付資料4「燃料体の耐熱性、耐放射線性、耐食性その他の性能に関する説明書」の5.2.1項参照）。②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3-20図に示す。</p> <p>(省略)</p>	<p>添付資料4「5.2.1 機械的性質」において、NDA被覆管の破断伸びについて照射量による著しい変化がないことを説明している。</p>



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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.2.2 照射成長</p> <p>約98%のジルコニウムを主成分とするNDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管と同様、燃焼とともに軸方向に伸びる。ジルカロイ-4被覆管で認められる照射成長の支配因子は、<math>\alpha</math>-ジルコニウム中の稠密六方晶の結晶方位が比較的そろ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。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>海外試験炉及び国内外商業炉で照射された被覆管の照射成長測定結果を図2.2-2に示す。</p> <p>NDA被覆管の照射成長は、想定する照射量の範囲に相当するデータが得られており、ジルカロイ-4被覆管と比較して小さくなる傾向にある。</p>	<p>(添付資料4)</p> <p>5.2.4 照射成長</p> <p>照射成長の支配要因は、ジルコニウム中の稠密六方晶 (<math>\alpha</math>相) の向きが比較的揃った組織において中性子照射で生じる格子欠陥のうち、空孔は六方晶底面へ、格子間原子は柱面へ選択的に集まるためと言われている。第5-6図に示すように、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>したがって、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（添付資料3「強度に関する説明書」の3.2.2項(3)e.に示す。）設計評価に反映している。</p>	

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p><b>2.2.3 クリープ特性</b>  <u>Halden炉において照射された燃料棒の外径測定結果を図2.2-3に示す。燃料棒の外径変化は、ペレットと被覆管が接触するまでは被覆管のクリープ変形により、接触後は燃料棒のスエリングにより支配される。そのため、低燃焼度域における燃料棒外径変化から、被覆管のクリープ特性を確認することができる。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（材料中の結晶格子のずれ）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。</u></p> <p><b>2.2.4 疲労特性</b>  <u>未照射及び照射されたNDA被覆管の疲労試験結果を図2.2-4に示す。NDA被覆管の疲労特性は、ジルカロイ-4被覆管のそれと同等であり、これまでジルカロイ-4被覆管での疲労設計曲線として使用されているLanger-O'Donnellの疲労曲線と良く一致している。照射による疲労特性の変化についても、2.2.1で示した機械的性質同様、高速中性子照射による照射欠陥の蓄積によるものであり、照射欠陥の生成と、照射欠陥濃度及び温度に依存する照射欠陥の回復とが平衡状態となることから、想定する照射量の範囲においてNDA被覆管の疲労特性の大きな変化はないと考えられる。したがって、NDA被覆管の疲労特性はLanger-O'Donnellのそれと同等であると考えられる。</u></p>	<p>(添付資料4)</p> <p><b>5.2.3 クリープ特性</b>  <u>被覆管は内外圧差に基づくクリープによって外径が減少していくが、ペレットと被覆管が接触した後は、ペレットの外径変化に依存して被覆管外径が増加する。実機PWR燃料棒の照射後の外径変化を第5-5図に示すが、約20,000MWd/t程度までの低燃焼度域の外径減少より、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。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（添付資料3「強度に関する説明書」の3.2.2項(3)d.に示す。）設計評価に反映している。</u></p> <p><b>5.2.2 疲労特性</b>  <u>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の疲労試験結果を第5-4図に示す。一般に疲労特性は機械特性に依存するが、5.2.1項で述べたとおり、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。</u></p>	

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.3 耐腐食性</p> <p>2.3.1 酸化腐食による影響</p> <p><u>NDA被覆管は、原子炉運転中高温の一次冷却水と接していることから、以下の反応により酸化腐食が進行する。</u></p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p>一般に、高温高压水とジルカロイ-4被覆管の反応による腐食は、保持時間が短い間は、時間の経過とともに腐食速度が徐々に小さくなっていき、<u>黒色で緻密な酸化物を生じる。</u></p> <p><u>その後ある時間保持すると、腐食速度が比較的大きく一定になる現象が見られる。この腐食速度の変化は遷移と呼ばれ、腐食増量が約30mg/dm<sup>2</sup>（酸化膜厚さ約2μm）に達したところで現れると言われている。遷移の後、酸化物は徐々に褐色に変わっていく。このような腐食による変化は、NDA被覆管でも同様である。ジルカロイ-4被覆管では、かなり時間が経過すると酸化物に亀裂を生じ剥離を生じることがあり、この剥離は約1500mg/dm<sup>2</sup>（酸化膜厚さ約100μm）の腐食増量で生じると言われている。</u></p> <p><u>炉内で照射されたNDA被覆管の最大酸化膜厚さ測定結果を図2.3-1に示す。被覆管の酸化膜厚さは冷却材条件や出力履歴により影響を受けることから、全データを直接比較することはできないが、従来Snジルカロイ-4被覆管では燃料棒平均燃焼度約60,000MWd/tで約100～120μmに達する場合がある。これに対して、低Snジルカロイ-4被覆管では最大でも約80μmと従来Snジルカロイ-4被覆管と比較して耐腐食性が改善されている。一方、NDA被覆管については、想定する照射量の範囲に相当するデータが得られており、ほぼ同一の条件により照射している照射試験により酸化膜厚さを比較すると、低Snジルカロイ-4被覆管と比較して耐食性が改善されている。</u></p>	<p>(添付資料4)</p> <p>5.3 耐食性</p> <p><u>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、</u></p> $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$ <p><u>の反応により酸化腐食が進むとともに、発生した水素の一部を吸収する。</u></p> <p>実機では放射線照射下で1次冷却材の放射線分解により発生する酸素により、ジルカロイの腐食が放射線照射のない環境に比べて加速される可能性があるが、PWRでは1次冷却材に水素注入を行い酸素の発生を抑制している。実機の腐食は以下に示すとおりである。</p> <p>5.3.1 酸化腐食による影響</p> <p>ジルカロイ被覆管外面には、原子炉内使用条件下で高温の1次冷却材との反応により酸化膜が形成される。一般に、ジルカロイ被覆管の腐食速度は、酸化膜と被覆管金属母材の界面温度についてのアレニウス型温度依存性を示す。また、その腐食増量（酸素による質量増加）の時間変化を第5～7図に示すが、初期の段階では時間に対して立方則（時間の3乗根に比例）に従って増加し、酸化膜厚さが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。原子炉内での被覆管酸化膜厚さを第5～8図に示す。原子炉内では滞在期間が長くなり酸化膜が厚くなるに従って、形成された酸化膜と金属母材の境界温度が上昇するため、燃焼度の進行に伴って酸化膜厚さは増大する傾向になる。更に腐食が進行すると腐食量の急激な増加が見られるが、これは酸化により発生する水素のうち、被覆管に吸収された水素が被覆管外面に析出し、この析出物が腐食に起因すると考えられている。</p> <p>第5～8図から分かるように、被覆管の原子炉内腐食データは、高燃焼度領域まで取得されており、<u>NDA被覆管については、ジルカロイ-4被覆管と比較して腐食速度の低減が認められる。</u></p> <p>したがって、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（添付資料3「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>ジルカロイ-4被覆管に対する説明であるため、設工認申請書には記載していない。（ジルカロイ-4は本申請対象の燃料被覆材には使用されていない）</p>

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.3.2 水素吸収による影響</p> <p>2.3.1 に示したジルコニウムと水との酸化腐食反応により発生した水素の一部は、被覆管に吸収される。炉内で照射された被覆管の水素吸収量の酸化膜厚さ依存性を図2.3-2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。</p> <p>水素吸収が過度に大きくなり固溶限以上に吸収された水素は、水素化物として析出し被覆管の延性の低下をもたらす。NDA被覆管は、ジルカロイ-4被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、NDA被覆管の水素固溶限は、ジルカロイ-4被覆管と同等であると考えられる。</p> <p>NDA 被覆管の耐食性は、2.3.1に示したとおり、ジルカロイ-4 被覆管と比較して向上している。したがって、同条件で使用された場合、NDA 被覆管の水素吸収量はジルカロイ-4被覆管より小さくなる。図2.3-3及び図2.3-4に示すように、水素吸収量が約800ppm までの未照射及び照射済ジルカロイ-4被覆管及びNDA 被覆管について、機械的性質を測定した結果、未照射NDA 被覆管では水素吸収量約800ppm まで著しい延性の低下はなく、照射済被覆管でも同様に水素吸収量約500ppm まで著しい延性の低下が見られない。したがって、未照射及び照射済被覆管の試験結果から照射済NDA 被覆管は設計基準1%に対し十分な延性を確保していると考えられる。</p>	<p>(添付資料4)</p> <p>5.3.2 水素吸収による影響</p> <p>ジルコニウムと水との反応で発生した水素の一部は、被覆管に吸収される。被覆管の原子炉内での水素吸収量と酸化膜厚さの関係を第5-9図に示すが、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）の関係を第5-10図に示す。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。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。</p> <p>したがって、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（添付資料3「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被覆管に比較して低減すると考えられる。</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。実機原子炉内照射では高速中性子束と被覆管温度は通常運転状態ではほぼ一定であり、欠陥の蓄積と温度による回復が平衡状態になるため、ある照射量以上では照射脆化の著しい変化はないと考えられる。NDA被覆管の引張試験結果を第5-1図に示す。引張強さ及び耐力は、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被覆管と同等であることが確認されている。</p> <p>なお、ジルカロイ-2材ではあるが、高速中性子照射量<math>27\sim 32 \times 10^{25}n/m^2</math> (<math>E&gt;1MeV</math>)まで十分な延性が確保されているとの報告例もある。</p> <p>また、水素脆化については、水素を吸収させた未照射材での引張試験結果を第5-2図に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同様に水素吸収量が少なくとも約800ppmまでNDA被覆管の機械特性は変わらない。照射材については、第5-3図に示すとおりジルカロイ-4被覆管で約800ppmまでは破断伸びが1%以上あり、延性が確保されていること、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被覆管の応力及びひずみ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>水素脆化及びNDA被覆管に関する一般論であるため、設工認申請書には記載していない。</p>

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.4 その他の性能</p> <p>2.4.1 耐PCI性</p> <p>ジルカロイ-4被覆管のPCI損傷は、腐食性FPガス（よう素、セシウム）雰囲気下で過大な応力が作用したときに生じるSCC破損といわれている。このSCCは、<math>\alpha</math>-ジルコニウム中の稠密六方晶のほぼ底面に平行な面上を伝播するため、この底面をPCI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）するよう集合組織を調整すれば耐PCI性が向上することになる。</p> <p>出力急昇試験結果を図2.4-1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、集合組織調整を施したNDA被覆管に対しても、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。</p> <p>SCC破損しきい応力は耐力に依存するが、2.2.1で述べたとおり照射による耐力の大きな変化はないことから、想定する照射量の範囲においてNDA被覆管の耐PCI性は維持されることが考えられる。</p> <p>2.4.2 耐摩耗性（フレッティング摩耗）</p> <p>フレッティング摩耗は、接触面の周期的相対振動により起こる損傷である。燃料棒及び支持格子の材料特性のうち、フレッティング摩耗に最も影響するのは材料の硬度であるが、表2.4-1に示すようにジルカロイ-4被覆管とNDA被覆管の硬度は同等であり、NDA被覆管のフレッティング摩耗はジルカロイ-4被覆管と同程度と考えられる。</p>	<p>(添付資料4)</p> <p>5.4 その他の性能</p> <p>5.4.1 耐PCI性</p> <p>被覆管は、腐食性FPガス雰囲気下において、出力急昇によりペレットが熱膨張して被覆管との機械的相互作用(PCMI)を生じ、被覆管に過大な応力が作用した場合、応力腐食割れ(SCC)による破損(PCI破損)を起こす。このPCI破損におけるSCCは、Zr中の稠密六方晶（<math>\alpha</math>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性を第5-11図にPCI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。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> <p>5.4.2 耐摩耗性</p> <p>原子炉内では、燃料棒の流動振動による支持格子との接触部で、被覆管の摩耗が発生する可能性がある。被覆管の硬さの測定結果を第5-3表に示す。この表から分かるように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>SCC破損しきい値の一般論であり、照射量の範囲において耐PCI性が維持されることは添付資料4第5-11図で説明している。</p>



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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.4.3 内面酸化  <u>NDA被覆管はジルカロイ-4被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、NDA被覆管の内面酸化はジルカロイ-4被覆管と同等となる。Halden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。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被覆管内面酸化は小さく、特に燃料棒の健全性に影響を及ぼしていないことから、想定する照射量の範囲においてNDA被覆管の内面酸化の健全性への影響は小さいと考えられる。</u></p> <p>2.4.4 ペレットとのボンディング  <u>核分裂により生じた余剰酸素が被覆管と化学反応することにより、被覆管内面酸化膜が生成する。高燃焼度時では、ペレットと被覆管が強固に接触するようになる。その結果、被覆管内面酸化膜（ZrO<sub>2</sub>）とUO<sub>2</sub>との拡散層が形成され、ボンディングを生じることが報告されている。NDA被覆管はジルカロイ-4被覆管と同様、約98%のジルコニウムを主成分とするため、NDA被覆管はジルカロイ-4被覆管と同等となる。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被覆管のボンディングは特に燃料棒の健全性に影響を及ぼしていないことから、想定する照射量の範囲において、NDA被覆管のボンディングの健全性への影響は小さいと考えられる。</u></p>	<p>(添付資料4)</p> <p>3.3.1 二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応  <u>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コニウム中に拡散し、被覆管内面酸化膜(ZrO<sub>2</sub>)が形成される。さらに、両者が強く接触するようになるとジルコニウム酸化層へのウランの拡散により、ジルコニウム酸化層は(Zr,U)O<sub>2</sub>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。これらは、被覆管の腐食及びPCIへ影響を及ぼす可能性が考えられる。</u>  <u>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°C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。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°Cを超えないことから、反応は小さいと考えられる。</u>  <u>また、Halden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。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。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。</u>  <u>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。</u>  <u>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。</u></p> <p>4.3.1 ガドリニア入り二酸化ウランペレットとNDA被覆管との反応  <u>ガドリニア入り二酸化ウランは、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。ガドリニア入り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。したがって、ガドリニア入り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。したがって、当該の反応を設計評価では考慮していない。</u>  <u>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。</u></p>	<p>ハルデン炉における被覆管内面観察結果において、NDA被覆管とジルカロイ-4被覆管の内面酸化が同等であることを説明している。</p>

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>2.4.5 高温時の特性</p> <p><u>冷却材喪失事故（LOCA）が発生した場合、被覆管は通常運転時に比べて高温かつ水蒸気で酸化腐食が進行するとともにバーストし、その後炉心が再冠水される。</u></p> <p><u>このような冷却材喪失事故時におけるNDA被覆管の特性を図2.4-2、図2.4-3に示すが、ジルカロイ-4被覆管と同等である。したがって、NDA被覆管の高温時の特性はジルカロイ-4被覆管と同一として評価することができる。</u></p>	<p>(添付資料4)</p> <p>5.4.3 高温特性</p> <p><u>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。1冷却材喪失事故(LOCA)にて考慮する昇温内圧破裂試験結果、高温時のジルコニウム-水反応の試験結果をそれぞれ第5-12図及び第5-13図に示す。第5-12図及び第5-13図に示すとおり、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。</u></p>	

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

表 1

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>3. NDA 被覆管の品質及び検査方法等</p> <p>NDA 被覆管の品質及び検査方法等は、以下に示すとおり、Nbの化学成分分析時における許容変動差を除いて、ジルカローイ-4被覆管での規格であるJIS II 4751 ZrTN804D SR(1998)に従うこととしている。なお、NDA被覆管は、ジルカローイ-4被覆管と異なり主成分としてNbを0.08～0.14wt%添加していることから、Nbの化学成分分析時における許容変動差は、<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px; vertical-align: middle;"></span>に従うこととしている。</p> <p>3.1 品質</p> <p>品質は、以下のとおりとしている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 被覆管の軸は、著しく湾曲していないこと。</li> <li>b) 被覆管の表面に割れ、さび等で有害なものがないこと。</li> <li>c) 被覆管の表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。</li> <li>d) 被覆管の表面粗さの程度は、実用上差し支えがないものであること。</li> <li>e) 被覆管の化学成分は、表 1.1-1 による。また、不純物は、表 1.1-2 による。</li> <li>f) 被覆管は、3.1b)又はこれと同等の方法によって引張試験を行った場合、機械的性質が設計上要求する値を満足していること。</li> <li>g) 被覆管は、3.1c)又はこれと同等の方法によって 336 時間で 38mg/dm<sup>2</sup> 以下の腐食質量増加でなければならない。ただし、72 時間を経過した時点で腐食質量増加が 22mg/dm<sup>2</sup> 以下であった場合には、それ以降の試験は行わない。また、腐食試験後の試験片表面には、著しい白色又は褐色の酸化物の付着があってはならない。</li> <li>h) 被覆管は、3.1d)又はこれと同等の方法によって水素化物方位試験を行った場合、水素化物方位係数 <math>F_n</math> 値は 0.45 を超えてはならない。</li> <li>i) 被覆管は、3.1e)又はこれと同等の方法によって超音波探傷試験を行った場合、対比試験片の人工傷からの信号と同等、又はそれより大きい欠陥信号があってはならない。</li> </ul> <p>3.2 寸法許容差</p> <p>被覆管の寸法許容差は、設計上要求する値を満足していること。</p> <p>3.3 製造方法</p> <p>被覆管は、消耗電極式アーク炉によって真空中で溶製したインゴットから継ぎ目なく製造した原管を用い、これを冷間加工した後、適当な熱処理及び矯正を行う。</p> <p>3.4 試験</p> <p>試験は、次による。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 化学成分及び不純物の分析方法並びに許容変動値は、表 3.4-1 による。</li> <li>b) 引張試験は、JIS Z 2241(1998)による。この場合の試験片は、JIS Z 2201(1998)の 11 号試験片とする。ただし、荷重を加える速度は、耐力までは歪増加率 0.003～0.007mm/mm・</li> </ul>	—	<p>左記記載のうち品質については、「実用発電用原子炉及びその付属施設の技術基準に関する規則の解釈」における「燃料体に関する要求事項（別記-10）の記載事項と同じ内容であり、本設工認においては基本設計方針にて、それら要求事項に従う旨を記載している。また、検査方法等については、本設工認における工事の方法にて、全施設を網羅するように工事の手順、使用前事業者検査の方法等を記載している。以上のことから、当該記載については比較対象外。</p>



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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>min、耐力以降破断まではクロスヘッド速度で約 0.05mm/mm・min まで増加することができ る。引張試験に使用する心金の形状は図 3.4-1 とする。</p> <p>c) 腐食試験は、JIS H 4751(1998)の附属書 2 による。</p> <p>d) 水素化物方位試験は、JIS H 4751(1998)の附属書 3 による。</p> <p>e) 超音波探傷試験は、JIS H 4751(1998)の附属書 4 による。</p> <p>3.5 検査</p> <p>検査は、次による。</p> <p>a) 被覆管は、外観及び寸法を検査するとともに、3.4 によって試験を行い、3.1 及び 3.2 の規 定に適合しなければならない。</p> <p>b) 酸素、水素及び窒素については、同一インゴットを用い、同一加工条件で同時熱処理を 施した一組の被覆管から任意に 2 本の供試管をとって、それぞれの被覆管から分析試験 片をとる。 酸素、水素及び窒素以外の元素については、同一インゴット又は中間製品からそのイン ゴットの上部、中央部、下部又はこれに対応する位置から各々 1 個の分析試験片をとる。</p> <p>c) 引張試験及び腐食試験の試験片は、同一インゴットを用い、同一加工条件で同時熱処 理を施した一組の被覆管から任意に 2 本の供試管をとって、それぞれの被覆管から引張 試験及び腐食試験の試験片を各 1 個とる。</p> <p>d) 水素化物方位試験の試験片は、同一インゴットを用い、同一加工条件で同時熱処理を 施した一組の被覆管から任意に 1 本の供試管をとって、その被覆管から水素化物方位試 験の試験片を 1 個とる。</p> <p>e) 寸法試験及び超音波探傷試験は、全長にわたり行う。</p> <p>f) その他の一般事項は、JIS H 0321(1973)による。</p> <p>3.6 表示</p> <p>被覆管は、1 束ごと又は 1 包装ごとに適切な方法によって識別を行い、管理されることとしている。</p> <p style="text-align: center;">2-8</p>	—	前頁と同じ。

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>4. 参考文献</p> <p>[1] 原子燃料工業株式会社、"原燃工製 PWR ステップ 2 燃料の改良因子について"NFK-8116 改 5、平成 17 年</p> <p>[2] S.T.Mahmood,et al., "Post-Irradiation characterization of Ultra-High-Fluence Zircaloy-2 Plate", ASTM STP1354, 2000</p> <p>[3] P.GUEDENEY et al., "FRAGEMA FUEL ROD BEHAVIOUR CHARACTERIZATION AT HIGH BURNUP ", International Topical Meeting on LWR Fuel Performance,1991</p> <p>[4] (財)原子力発電技術機構、"平成 11 年度軽水炉改良技術確証試験(高燃焼度等燃料に関するもの)に関する報告書"</p> <p>[5] K.Une, "Threshold values characterizing Iodine-induced SCC of Zircalloys", IAEA Specialists Meeting on Pellet-Cladding Interaction in Water Reactors, Roskilde,Denmark,1980</p> <p>[6] (財)原子力発電技術機構、"平成 13 年度高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書"</p> <p>[7] J.O.Barner, et al., "High Burnup Effects Program – Final Report", HBEP-61, 1990"</p> <p>[8] K.NOGITA,K.UNE, "Formation of Pellet-cladding Bonding Layer in High Burnup BWR Fuels" J.Nucl.Sci.Tech.34,1997</p> <p>[9] L.Baker, L.C.Just, "Studies of Metal Water Reactions at High Temperature, Experimental and Theoretical Studies of Zircaloy-Water Reaction", ANL-6548, 1962</p>	<p>—</p>	<p>特認の参考文献を示しているものであり、比較対象外。</p>










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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
<p style="text-align: center;">表 1.1-1 NDA 被覆管の化学成分規定値</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>被覆管</th> <th>Sn</th> <th>Fe</th> <th>Cr</th> <th>Fe+Cr</th> <th>Nb</th> <th>Ni</th> <th>O</th> <th>Zr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA 被覆管</td> <td>0.90 ~ 1.15</td> <td>0.24 ~ 0.30</td> <td>0.13 ~ 0.19</td> <td>—</td> <td>0.08 ~ 0.14</td> <td>0.007 ~ 0.014</td> <td style="border: 2px solid black;"></td> <td>残部</td> </tr> <tr> <td>(参考)ジルカロイ-4 被覆管</td> <td>1.20 ~ 1.70</td> <td>0.18 ~ 0.24</td> <td>0.07 ~ 0.13</td> <td>0.28 ~ 0.37</td> <td>—</td> <td>—</td> <td style="border: 2px solid black;"></td> <td>残部</td> </tr> </tbody> </table> <p>1) JIS H4751 Zr TN804D SR(1998)では規定されていない。 <span style="float: right;">単位: wt%</span></p> <p style="text-align: center;">表 1.1-2 NDA 被覆管の不純物規定値</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>被覆管</th> <th>Sn</th> <th>Fe</th> <th>Cr</th> <th>Fe+Cr</th> <th>Nb</th> <th>Ni</th> <th>O</th> <th>Zr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA 被覆管</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> </tr> <tr> <td>(参考)ジルカロイ-4 被覆管<sup>2)</sup></td> <td>0.0075</td> <td>0.00005</td> <td>0.0030</td> <td>0.00005</td> <td>0.027</td> <td>0.0020</td> <td>0.0050</td> <td>0.010</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>被覆管</th> <th>Sn</th> <th>Fe</th> <th>Cr</th> <th>Fe+Cr</th> <th>Nb</th> <th>Ni</th> <th>O</th> <th>Zr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NDA 被覆管</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> <td style="border: 2px solid black;">以下</td> </tr> <tr> <td>(参考)ジルカロイ-4 被覆管<sup>2)</sup></td> <td>0.0020</td> <td>0.0050</td> <td>0.0050</td> <td>0.0070</td> <td>0.0080</td> <td>0.0100</td> <td>0.0120</td> <td>0.0050</td> </tr> </tbody> </table> <p>2) JIS H4751 Zr TN804D SR(1998) <span style="float: right;">単位: wt%</span></p>	被覆管	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr	NDA 被覆管	0.90 ~ 1.15	0.24 ~ 0.30	0.13 ~ 0.19	—	0.08 ~ 0.14	0.007 ~ 0.014		残部	(参考)ジルカロイ-4 被覆管	1.20 ~ 1.70	0.18 ~ 0.24	0.07 ~ 0.13	0.28 ~ 0.37	—	—		残部	被覆管	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr	NDA 被覆管	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	(参考)ジルカロイ-4 被覆管 <sup>2)</sup>	0.0075	0.00005	0.0030	0.00005	0.027	0.0020	0.0050	0.010	被覆管	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr	NDA 被覆管	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	(参考)ジルカロイ-4 被覆管 <sup>2)</sup>	0.0020	0.0050	0.0050	0.0070	0.0080	0.0100	0.0120	0.0050	<p style="text-align: center;">(添付資料4)</p> <p style="text-align: center;">第 2-1 表 燃料集合体の主な構成部品の材料及び各材料の化学成分(2/5)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <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="7">不純物(ppm)</th> </tr> <tr> <th>Sn</th> <th>Fe</th> <th>Al</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>Ni</th> <th>Si</th> <th>Ti</th> <th>Zr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金<sup>(注5)</sup></td> <td>Sn</td> <td>0.90/1.15</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.24/0.30</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.13/0.19</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>0.08/0.14</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>0.007/0.014</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> <td>≦</td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="6">燃料被覆材 端栓</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金<sup>(注6)</sup></td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al</td> <td>≦ 75</td> <td>B</td> <td>≦ 0.5</td> <td>C</td> <td>≦ 270</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>Cd</td> <td>≦ 0.5</td> <td>Co</td> <td>≦ 20</td> <td>Cu</td> <td>≦ 50</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>H</td> <td>≦ 25</td> <td>Hf</td> <td>≦ 100</td> <td>Mg</td> <td>≦ 20</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mn</td> <td>≦ 50</td> <td>Mo</td> <td>≦ 50</td> <td>N</td> <td>≦ 80</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td>Ni</td> <td>≦ 70</td> <td>Si</td> <td>≦ 120</td> <td>Ti</td> <td>≦ 50</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>U</td> <td>≦ 3.5</td> <td>W</td> <td>≦ 100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="6">制御棒案内 シンプル</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金<sup>(注6)</sup></td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al</td> <td>≦ 75</td> <td>B</td> <td>≦ 0.5</td> <td>C</td> <td>≦ 270</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>Cd</td> <td>≦ 0.5</td> <td>Co</td> <td>≦ 20</td> <td>Cu</td> <td>≦ 50</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>H</td> <td>≦ 25</td> <td>Hf</td> <td>≦ 100</td> <td>Mg</td> <td>≦ 20</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mn</td> <td>≦ 50</td> <td>Mo</td> <td>≦ 50</td> <td>N</td> <td>≦ 80</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td>Ni</td> <td>≦ 70</td> <td>Si</td> <td>≦ 120</td> <td>Ti</td> <td>≦ 50</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>U</td> <td>≦ 3.5</td> <td>W</td> <td>≦ 100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="6">制御棒案内 シンプル用 下部端栓</td> <td rowspan="6">Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金<sup>(注6)</sup></td> <td>Sn</td> <td>1.20/1.70</td> <td>Al</td> <td>≦ 75</td> <td>B</td> <td>≦ 0.5</td> <td>C</td> <td>≦ 270</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>0.18/0.24</td> <td>Cd</td> <td>≦ 0.5</td> <td>Co</td> <td>≦ 20</td> <td>Cu</td> <td>≦ 50</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.07/0.13</td> <td>H</td> <td>≦ 25</td> <td>Hf</td> <td>≦ 100</td> <td>Mg</td> <td>≦ 20</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fe+Cr</td> <td>0.28/0.37</td> <td>Mn</td> <td>≦ 50</td> <td>Mo</td> <td>≦ 50</td> <td>N</td> <td>≦ 80</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>O</td> <td></td> <td>Ni</td> <td>≦ 70</td> <td>Si</td> <td>≦ 120</td> <td>Ti</td> <td>≦ 50</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>U</td> <td>≦ 3.5</td> <td>W</td> <td>≦ 100</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">カラー</td> <td rowspan="2">ASTM B351 Grade R60804</td> <td>O</td> <td></td> <td>Ni</td> <td>≦ 70</td> <td>Si</td> <td>≦ 120</td> <td>Ti</td> <td>≦ 50</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zr</td> <td>残部</td> <td>U</td> <td>≦ 3.5</td> <td>W</td> <td>≦ 100</td> <td></td> <td></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	Al	B	C	Ni	Si	Ti	Zr	燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金 <sup>(注5)</sup>	Sn	0.90/1.15	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Fe	0.24/0.30	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Cr	0.13/0.19	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Nb	0.08/0.14	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Ni	0.007/0.014	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	O		≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	Zr	残部										燃料被覆材 端栓	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 <sup>(注6)</sup>	Sn	1.20/1.70	Al	≦ 75	B	≦ 0.5	C	≦ 270			Fe	0.18/0.24	Cd	≦ 0.5	Co	≦ 20	Cu	≦ 50			Cr	0.07/0.13	H	≦ 25	Hf	≦ 100	Mg	≦ 20			Fe+Cr	0.28/0.37	Mn	≦ 50	Mo	≦ 50	N	≦ 80			O		Ni	≦ 70	Si	≦ 120	Ti	≦ 50			Zr	残部	U	≦ 3.5	W	≦ 100					制御棒案内 シンプル	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 <sup>(注6)</sup>	Sn	1.20/1.70	Al	≦ 75	B	≦ 0.5	C	≦ 270			Fe	0.18/0.24	Cd	≦ 0.5	Co	≦ 20	Cu	≦ 50			Cr	0.07/0.13	H	≦ 25	Hf	≦ 100	Mg	≦ 20			Fe+Cr	0.28/0.37	Mn	≦ 50	Mo	≦ 50	N	≦ 80			O		Ni	≦ 70	Si	≦ 120	Ti	≦ 50			Zr	残部	U	≦ 3.5	W	≦ 100					制御棒案内 シンプル用 下部端栓	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 <sup>(注6)</sup>	Sn	1.20/1.70	Al	≦ 75	B	≦ 0.5	C	≦ 270			Fe	0.18/0.24	Cd	≦ 0.5	Co	≦ 20	Cu	≦ 50			Cr	0.07/0.13	H	≦ 25	Hf	≦ 100	Mg	≦ 20			Fe+Cr	0.28/0.37	Mn	≦ 50	Mo	≦ 50	N	≦ 80			O		Ni	≦ 70	Si	≦ 120	Ti	≦ 50			Zr	残部	U	≦ 3.5	W	≦ 100					カラー	ASTM B351 Grade R60804	O		Ni	≦ 70	Si	≦ 120	Ti	≦ 50		Zr	残部	U	≦ 3.5	W	≦ 100				<p>ジルカロイ-4は本申請対象の燃料被覆材には使用されていないため、設工認申請書には記載していない。</p>
被覆管	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
NDA 被覆管	0.90 ~ 1.15	0.24 ~ 0.30	0.13 ~ 0.19	—	0.08 ~ 0.14	0.007 ~ 0.014		残部																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
(参考)ジルカロイ-4 被覆管	1.20 ~ 1.70	0.18 ~ 0.24	0.07 ~ 0.13	0.28 ~ 0.37	—	—		残部																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
被覆管	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
NDA 被覆管	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
(参考)ジルカロイ-4 被覆管 <sup>2)</sup>	0.0075	0.00005	0.0030	0.00005	0.027	0.0020	0.0050	0.010																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
被覆管	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	O	Zr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
NDA 被覆管	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下	以下																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
(参考)ジルカロイ-4 被覆管 <sup>2)</sup>	0.0020	0.0050	0.0050	0.0070	0.0080	0.0100	0.0120	0.0050																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
構成部品	材料の種類	主成分(wt%)		不純物(ppm)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
		Sn	Fe	Al	B	C	Ni	Si	Ti	Zr																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
燃料被覆材	Sn-Fe-Cr-Nb-Ni系ジルコニウム合金 <sup>(注5)</sup>	Sn	0.90/1.15	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Fe	0.24/0.30	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Cr	0.13/0.19	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Nb	0.08/0.14	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		Ni	0.007/0.014	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		O		≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦	≦																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Zr	残部																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
燃料被覆材 端栓	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 <sup>(注6)</sup>	Sn	1.20/1.70	Al	≦ 75	B	≦ 0.5	C	≦ 270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Fe	0.18/0.24	Cd	≦ 0.5	Co	≦ 20	Cu	≦ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Cr	0.07/0.13	H	≦ 25	Hf	≦ 100	Mg	≦ 20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mn	≦ 50	Mo	≦ 50	N	≦ 80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		O		Ni	≦ 70	Si	≦ 120	Ti	≦ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Zr	残部	U	≦ 3.5	W	≦ 100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
制御棒案内 シンプル	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 <sup>(注6)</sup>	Sn	1.20/1.70	Al	≦ 75	B	≦ 0.5	C	≦ 270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Fe	0.18/0.24	Cd	≦ 0.5	Co	≦ 20	Cu	≦ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Cr	0.07/0.13	H	≦ 25	Hf	≦ 100	Mg	≦ 20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mn	≦ 50	Mo	≦ 50	N	≦ 80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		O		Ni	≦ 70	Si	≦ 120	Ti	≦ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Zr	残部	U	≦ 3.5	W	≦ 100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
制御棒案内 シンプル用 下部端栓	Sn-Fe-Cr系ジルコニウム合金 <sup>(注6)</sup>	Sn	1.20/1.70	Al	≦ 75	B	≦ 0.5	C	≦ 270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Fe	0.18/0.24	Cd	≦ 0.5	Co	≦ 20	Cu	≦ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Cr	0.07/0.13	H	≦ 25	Hf	≦ 100	Mg	≦ 20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Fe+Cr	0.28/0.37	Mn	≦ 50	Mo	≦ 50	N	≦ 80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		O		Ni	≦ 70	Si	≦ 120	Ti	≦ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Zr	残部	U	≦ 3.5	W	≦ 100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
カラー	ASTM B351 Grade R60804	O		Ni	≦ 70	Si	≦ 120	Ti	≦ 50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		Zr	残部	U	≦ 3.5	W	≦ 100																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考																																										
<p style="text-align: center;">表 2.1-1 NDA 被覆管の融点<sup>[1]</sup></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>被 覆 管</th> <th>融 点</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4 被覆管</td> <td>1782</td> </tr> <tr> <td>NDA 被覆管</td> <td>1796</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位:℃</p> <p style="text-align: center;">表 2.1-2 NDA 被覆管の相変態温度<sup>[1]</sup></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>被 覆 管</th> <th>相変態開始温度</th> <th>相変態終了温度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4 被覆管</td> <td>820</td> <td>958</td> </tr> <tr> <td>NDA 被覆管</td> <td>802</td> <td>937</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位:℃</p> <p style="text-align: center;">表 2.4-1 NDA 被覆管の硬度<sup>[1]</sup></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>被 覆 管</th> <th>マイクロビッカース硬さ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ジルカロイ-4 被覆管</td> <td>212~224</td> </tr> <tr> <td>NDA 被覆管</td> <td>211~217</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位:Hv(0.2)*</p> <p style="margin-top: 20px;">* 試験荷重 0.2kgf</p> <p style="text-align: center;">2-11</p>	被 覆 管	融 点	ジルカロイ-4 被覆管	1782	NDA 被覆管	1796	被 覆 管	相変態開始温度	相変態終了温度	ジルカロイ-4 被覆管	820	958	NDA 被覆管	802	937	被 覆 管	マイクロビッカース硬さ	ジルカロイ-4 被覆管	212~224	NDA 被覆管	211~217	<p style="text-align: center;">(添付資料4)</p> <p style="text-align: center;">第 5-1 表 NDA の溶融点測定結果<sup>(20)</sup></p> <p style="text-align: right;">(単位:℃)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <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;">第 5-2 表 NDA の相変態温度測定結果<sup>(20)</sup></p> <p style="text-align: right;">(単位:℃)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th><math>\alpha \rightarrow \alpha + \beta</math></th> <th><math>\alpha + \beta \rightarrow \beta</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>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> <p style="text-align: center;">第 5-3 表 NDA 被覆管の硬さの測定結果<sup>(20)</sup></p> <p style="text-align: right;">(単位:HV (ビッカース硬さ値))</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>種類</th> <th>平均値 (HV0.2<sup>(注1)</sup>)</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: right;">(注 1) HV0.2: ビッカース硬さ試験力 0.2kgf</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	種類	平均値 (HV0.2 <sup>(注1)</sup> )	NDA	215	ジルカロイ-4 (参考)	218	
被 覆 管	融 点																																											
ジルカロイ-4 被覆管	1782																																											
NDA 被覆管	1796																																											
被 覆 管	相変態開始温度	相変態終了温度																																										
ジルカロイ-4 被覆管	820	958																																										
NDA 被覆管	802	937																																										
被 覆 管	マイクロビッカース硬さ																																											
ジルカロイ-4 被覆管	212~224																																											
NDA 被覆管	211~217																																											
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																																										
種類	平均値 (HV0.2 <sup>(注1)</sup> )																																											
NDA	215																																											
ジルカロイ-4 (参考)	218																																											

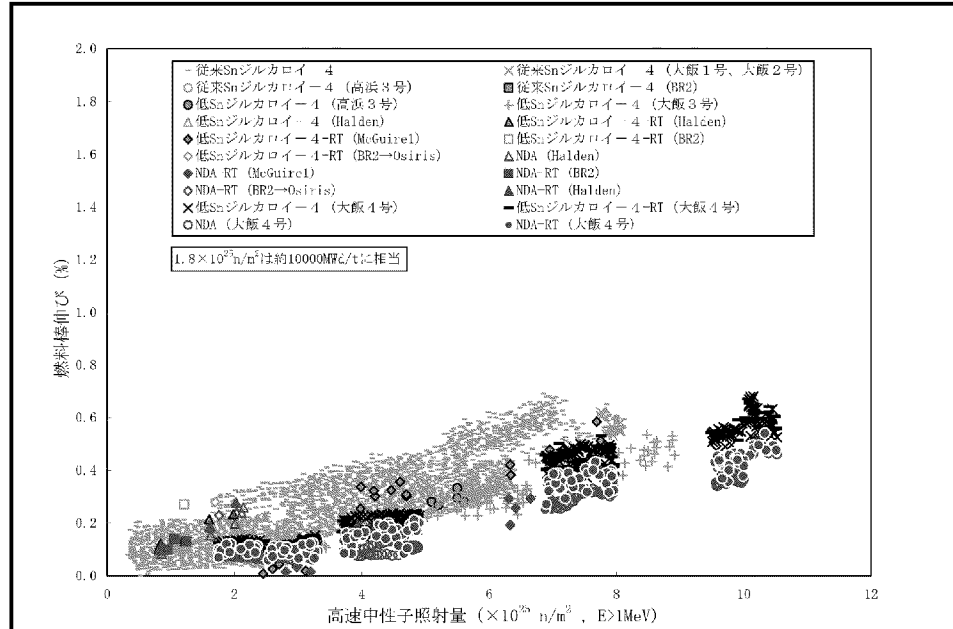
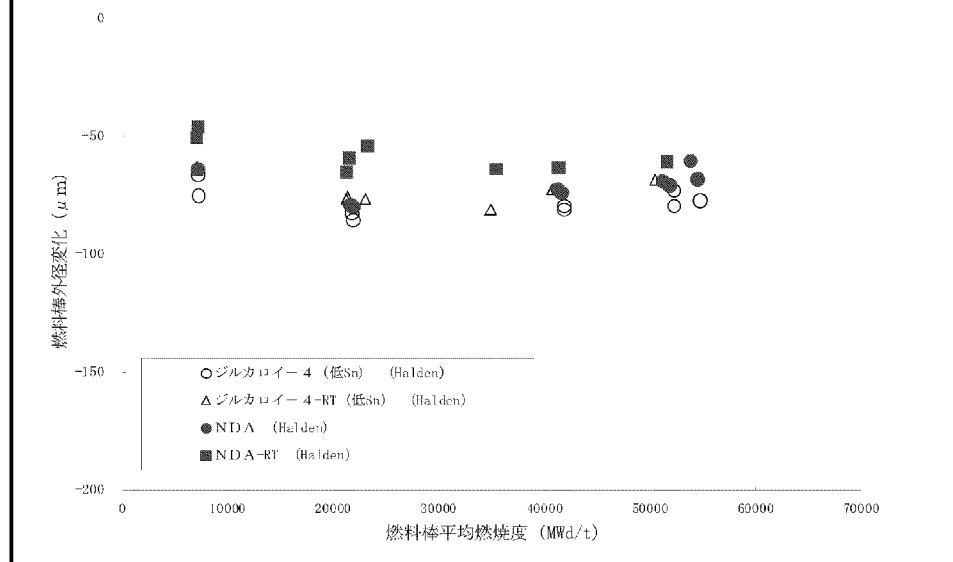
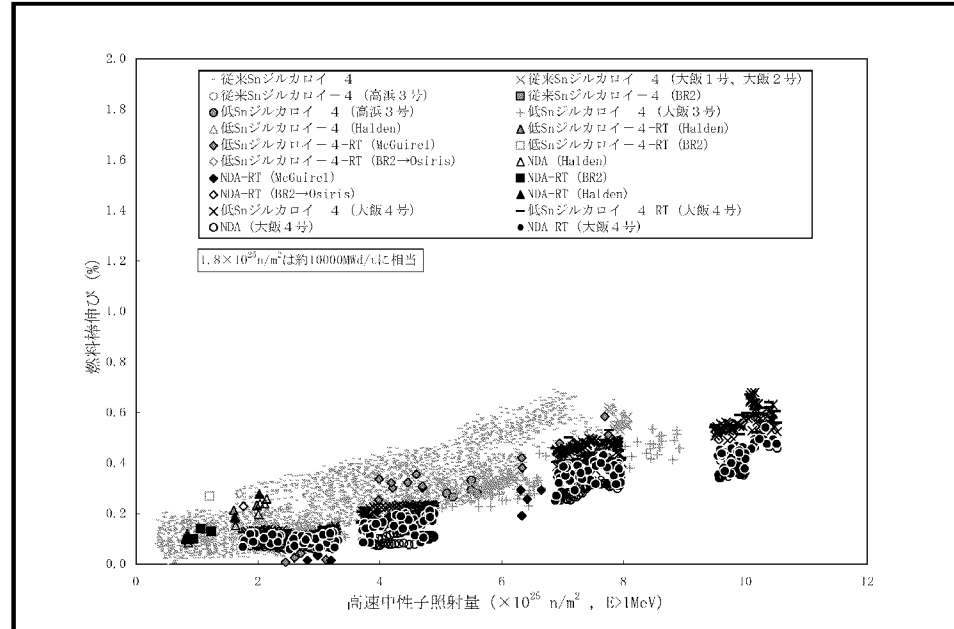
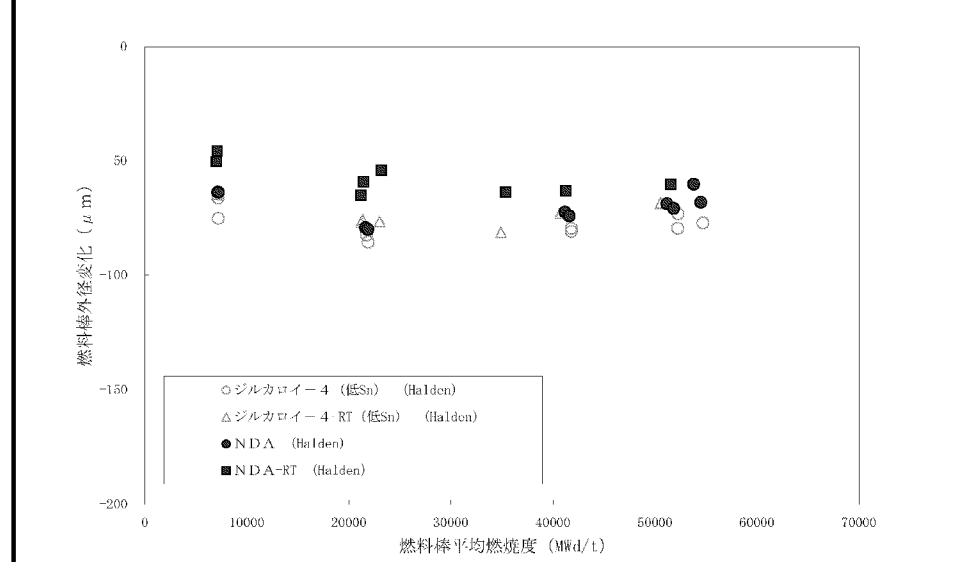
下線部及び黒枠部：特認と設工認の整合箇所、ハッチング部：備考欄に説明を追記している箇所  
表 1

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考																								
<p>表 3.4-1 NDA 被覆管の化学成分及び不純物の分析方法並びに許容変動値</p> <table border="1" data-bbox="305 527 1065 1446"> <thead> <tr> <th>化学成分不純物</th> <th>検査方法</th> <th>許容変動差</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sn</td> <td>JIS H 1659(1989)又は JIS H 1669(1990)</td> <td>0.050</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>JIS H 1654(1989)又は JIS H 1669(1990)</td> <td>0.020</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>JIS H 1656(1989)又は JIS H 1669(1990)</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>Nb</td> <td>JIS H 1668(1971)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>JIS H 1655(1989)又は JIS H 1669(1990)</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>JIS H 1665(1988)</td> <td>0.020</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>0.0020 又は規格値の 20% のいずれかの小さい 方の値</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">単位:wt%</p> <p>備考 1. 許容変動値とは、注文者側が被覆管の受入れ分析試験を行った場合、規格値の上限又は下限を超えて許容される値をいう。</p> <p>備考 2. 日本工業規格以外の分析試験方法を適用する場合は、上記許容変動値を満足する方法を適用する。</p>	化学成分不純物	検査方法	許容変動差	Sn	JIS H 1659(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.050	Fe	JIS H 1654(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.020	Cr	JIS H 1656(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.010	Nb	JIS H 1668(1971)		Ni	JIS H 1655(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.010	O	JIS H 1665(1988)	0.020			0.0020 又は規格値の 20% のいずれかの小さい 方の値	—	<p>検査方法等については、本設工認における工事の方法にて、全施設を網羅するように工事の手順、使用前事業者検査の方法等を記載している。以上のことから、当該記載については比較対象外。</p>
化学成分不純物	検査方法	許容変動差																								
Sn	JIS H 1659(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.050																								
Fe	JIS H 1654(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.020																								
Cr	JIS H 1656(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.010																								
Nb	JIS H 1668(1971)																									
Ni	JIS H 1655(1989)又は JIS H 1669(1990)	0.010																								
O	JIS H 1665(1988)	0.020																								
		0.0020 又は規格値の 20% のいずれかの小さい 方の値																								

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="252 451 1053 1711" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">図 2.2-1 NDA 被覆管の機械的性質と高速中性子照射量の関係<sup>[1]</sup></p> </div> <p style="margin-top: 10px;">RT(Radial Texture):集合組織調整を施した被覆管を表す。以降、同様。</p>	<div data-bbox="1439 451 2240 1711" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">(添付資料4)</p> <p style="text-align: center;">第 5-1 図 NDA 被覆管の機械特性<sup>(20)</sup></p> </div>	

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

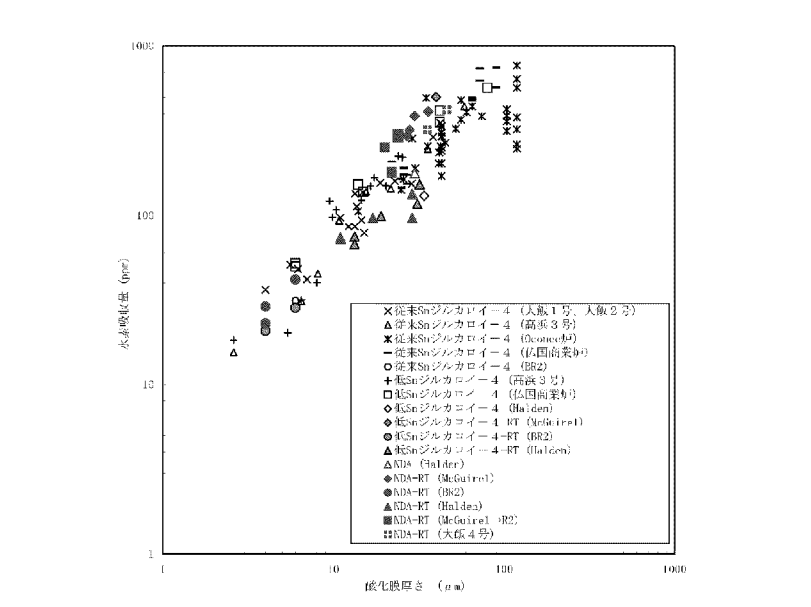
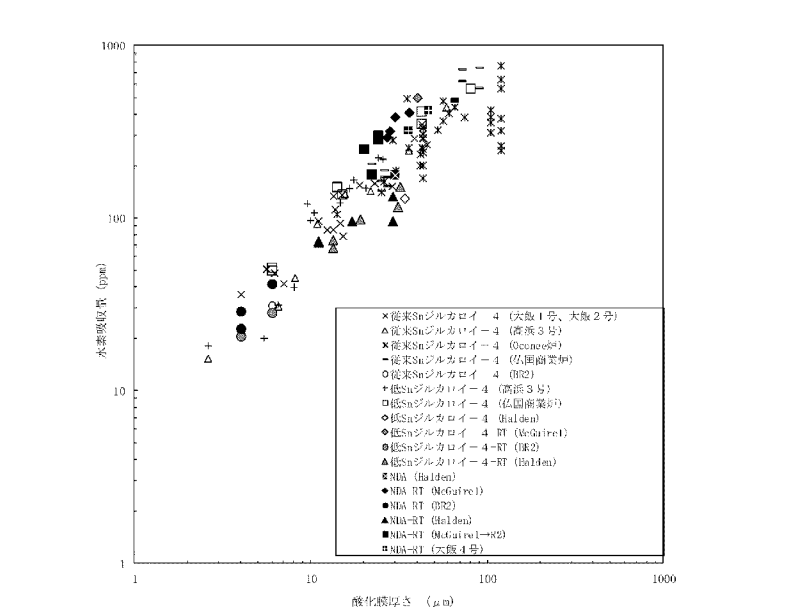
特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p style="text-align: center;">(添付資料4)</p>  <p style="text-align: center;">図 2.2-2 NDA 被覆管の照射成長と高速中性子積算照射量の関係<sup>[1]</sup></p>  <p style="text-align: center;">図 2.2-3 NDA 被覆管の燃料棒外径の照射による変化(Halden 炉照射)<sup>[1]</sup></p>	 <p style="text-align: center;">第 5-6 図 NDA 被覆管の照射成長<sup>(20)</sup></p>  <p style="text-align: center;">第 5-5 図 燃料棒外径変化（実機照射セグメント燃料棒）<sup>(20)</sup></p>	

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="252 451 1172 1018"> <p>(試験温度：316°C)</p> <p>図 2.2-4 NDA 被覆管の疲労特性<sup>[1]</sup></p> </div> <div data-bbox="252 1113 1172 1648"> <p>図 2.3-1 NDA 被覆管の炉内照射後の最大酸化膜厚さ<sup>[1]</sup></p> </div>	<div data-bbox="1276 294 1439 336">(添付資料4)</div> <div data-bbox="1409 451 2270 1018"> <p>(試験温度：316°C)</p> <p>第 5-4 図 NDA 被覆管の疲労強度<sup>[20]</sup></p> </div> <div data-bbox="1409 1113 2270 1648"> <p>第 5-8 図 NDA 被覆管の原子炉内酸化膜厚さ<sup>[20]</sup></p> </div>	



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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="284 443 1062 1131" style="border: 1px solid black; padding: 10px;">  <p data-bbox="365 1041 973 1066">図 2.3-2 NDA 被覆管の炉内照射後の水素吸収量の酸化膜厚さ依存性<sup>[1]</sup></p> </div>	<p data-bbox="1270 296 1436 327">(添付資料4)</p> <div data-bbox="1472 443 2249 1131" style="border: 1px solid black; padding: 10px;">  <p data-bbox="1546 1052 2220 1077">第 5-9 図 NDA 被覆管の原子炉内酸化膜厚さと水素吸収量の関係<sup>[20]</sup></p> </div>	

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="261 411 1184 1753" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">図 2.3-3 NDA 被覆管の機械的性質の水素吸収量依存性(未照射被覆管)<sup>[1]</sup></p> </div>	<div data-bbox="1270 296 1439 331" style="text-align: center;">(添付資料4)</div> <div data-bbox="1430 411 2353 1753" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">第 5-2 図 未照射 NDA 被覆管の機械特性と水素濃度の関係<sup>(20)</sup></p> </div>	

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="252 451 1172 1102" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">図 2.3-4 NDA 被覆管の炉内照射後の破断伸びの水素吸収量依存性<sup>1)</sup></p> </div>	<p style="text-align: center;">(添付資料4)</p> <div data-bbox="1424 451 2344 1102" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">第 5-3 図 被覆管水素濃度と破断伸びの関係<sup>(9)(20)</sup></p> </div>	

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="201 436 1121 1659" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>図 2.4-1 NDA 被覆管の出力急昇試験結果<sup>1)</sup></p> </div>	<div data-bbox="1347 436 2267 1659" style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <p>(添付資料4)</p> <p>第 5-11 図 NDA 被覆管の耐 PCI 性<sup>(20)</sup></p> </div>	

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<div data-bbox="201 430 1127 1018" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="430 1039 905 1060" data-label="Caption"> <p>図 2.4-2 NDA 被覆管のジルコニウム-水反応速度定数<sup>[1]</sup></p> </div> <div data-bbox="201 1123 1127 1606" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="400 1648 934 1669" data-label="Caption"> <p>図 2.4-3 NDA 被覆管の LOCA 想定時被覆管破裂挙動試験結果<sup>[1]</sup></p> </div>	<p>(添付資料4)</p> <div data-bbox="1365 430 2285 1018" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="1498 1018 2270 1039" data-label="Caption"> <p>第 5-13 図 未照射管のジルコニウム-水反応速度定数 (受取管) <sup>(20)</sup></p> </div> <div data-bbox="1365 1123 2285 1606" data-label="Figure"> </div> <div data-bbox="1528 1606 2181 1627" data-label="Caption"> <p>第 5-12 図 未照射管の LOCA 時破裂挙動試験結果 (受取管) <sup>(20)</sup></p> </div>	

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

特認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	設工認（川内原子力発電所第1,2号機 B型燃料集合体）	備考
<p>図 3.4-1 引張試験における心金の形状</p>	<p style="text-align: center;">—</p>	<p>検査方法等については、本設工認における工事の方法にて、全施設を網羅するように工事の手順、使用前事業者検査の方法等を記載している。以上のことから、当該記載については比較対象外。</p>

## 補足説明資料 8

耐震性に関する説明書に関する補足説明資料

## 目 次

補足説明資料 8-1	燃料集合体に係る技術基準規則第 5 条への適合性に関する 補足説明資料
------------	--



## 補足説明資料 8-1

燃料集合体に係る技術基準規則第 5 条への適合性  
に関する補足説明資料

## 1. 概要

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」及び関連規則等の施行（以下「検査制度見直し」という。）により、従前の燃料体設計認可と工事計画認可が統合され、設計及び工事計画認可として一元化されたことに伴い、本設工認申請を実施し燃料集合体の耐震性に係る説明についても実施している。

なお、燃料集合体の耐震性に係る説明について、検査制度見直し前においては、燃料体設計認可及び工事計画認可の両方で説明を実施していたものである。

本資料では、燃料体設計認可及び工事計画認可での燃料集合体の耐震性に係る評価内容を整理するとともに、本申請における説明内容を整理するものである。

## 2. 整理結果

### 2.1 検査制度見直し前までの評価内容

燃料集合体の耐震性に係る評価内容の概要を第1表に示す。

第1表 燃料集合体の耐震性に係る評価内容の概要

	耐震性に係る評価内容		
	工事計画認可／設計及び工事計画認可		燃料体設計認可
	評価対象部位	評価項目	
新規制基準施行前	燃料被覆管	一次応力評価 ・平均引張応力	(同左)
	制御棒案内シングル	一次応力評価 ・一次一般膜応力 ・一次膜応力+一次曲げ応力	
	支持格子	(注1) 強度評価	
(注2) 新規制基準 適合性工認	(同上)	(同上)	—
(注3) 被覆管BF工認	燃料被覆管	一次+二次応力評価 ・平均引張応力 疲労評価	—
検査制度見直し後 (今回申請)	新規制基準適合性工認+被覆管BFを呼び込み		(設工認に統合)

(注1) 地震によって支持格子に生じる最大衝撃力が弾性限界荷重を上回っており、支持格子の永久変形が制御棒クラスタ挿入性に支障のない範囲であることを確認

(注2) 平成25年7月の新規制基準施行に伴う基準地震動見直しにより評価を実施

(注3) 平成29年11月の技術基準規則及びその解釈等の改正に伴う燃料被覆管の閉じ込め機能維持が追加要求されたことにより評価を実施

### 2.1.1 新規制基準適合性工認時の説明内容

平成 25 年 7 月の新規制基準施行に伴い基準地震動が見直されたことから、新規制基準適合性工認（平成 27 年 5 月 22 日付け原規規発第 1505221 号にて認可）において耐震 S クラスに分類される設備については、見直された地震動に対する耐震評価を実施し、技術基準規則第 5 条第 1 項及び第 2 項へ適合するものであることを確認している。

具体的には、燃料集合体は耐震 S クラスに分類していることから、当該工認における 3-17-1-2「燃料集合体の耐震計算書」にて、燃料被覆管、制御棒案内シンプル、支持格子について評価を実施し許容値を満足することを確認している。

評価内容の概要については、第 1 表に示す。

なお、技術基準規則第 23 条（炉心等）に係る要求事項については、新規制基準施行に伴う要求事項の変更はないことを確認している。

### 2.1.2 燃料被覆管 BF 工認時の説明内容

平成 29 年 11 月の技術基準規則及びその解釈の改正に伴い、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能を維持することが要求されたことから、燃料被覆管 BF 工認（令和元年 7 月 24 日付け原規規発第 1907245 号にて認可）において燃料集合体のうち燃料被覆管については、追加要求された閉じ込め機能の維持に係る耐震評価を実施し、技術基準規則第 5 条第 4 項へ適合性するものであることを確認している。

具体的には、燃料被覆管 BF 工認における添付資料 2-2「地震時の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込め機能に係る耐震計算書」について、被覆管の評価を実施し許容値を満足することを確認している。

評価内容の概要については、第 1 表に示す。

## 2.2 本申請における説明内容

令和 2 年 4 月の検査制度見直しに伴い、燃料体については加工前までに設計及び工事計画認可を取得する必要があることから本申請を実施しているものであり、本申請対象である燃料集合体に設計変更等があるものではない。

したがって、燃料集合体の耐震性に関する説明については、燃料被覆管（一次応力評価に加えて、一次＋二次応力評価及び疲労評価）、制御棒案内シンプル、支持格子に対する評価結果として、上記 2.1.1 項における新規制基準適合性工認及び 2.1.2 項における燃料被覆管 BF 工認を呼び込むことで、技術基準規則第 5 条への適合性を確認している。

以上