

東海第二発電所
地震時における燃料被覆管の
閉じ込め機能の維持に係る
工事計画変更認可申請について

2019年8月1日
日本原子力発電株式会社

目次

1. 概要
2. 規則改正内容
3. 発電用原子炉設置変更許可及び工事計画変更認可申請の概要
4. 基本設計方針
5. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る設計方針
6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価
7. まとめ

1. 概要

✓従来、燃料被覆管の応力評価に関しては、燃料の健全性を確認する観点から、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力を考慮し、燃料被覆管の応力設計比の評価を行っている。[発電用原子炉設置(変更)許可申請書添付書類八及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ(応力解析)]

また、崩壊熱除去可能な形状の維持の観点から、地震時の一次応力も考慮した応力評価を実施している。[工事計画認可申請書及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ(耐震解析)]

✓一方、2017年8月30日の原子力規制委員会において、「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。)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。)の改正が決定、2017年9月11日に施行され、地震時の燃料被覆材の閉じ込め機能の維持についての要求が追加された。

✓上記改正後の設置許可基準規則へ適合するための燃料被覆材の設計方針を発電用原子炉設置変更許可申請書に追記し、2019年7月24日に許可を受けた。

✓本資料では、発電用原子炉設置変更許可及び上記改正後の技術基準規則改正に伴う地震時の燃料被覆材の閉じ込め機能維持に係る詳細評価について説明する。

2. 規則改正内容

✓ 以下に改正された設置許可基準規則第4条及び同規則の解釈を示す。

設置許可基準規則 第4条(地震による損傷防止)	設置許可基準規則の解釈 第4条(地震による損傷防止)	備考
設計基準対象施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。	一 第1項に規定する「地震力に十分に耐える」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と、弾性設計用地震動による地震力(本規程別記2第4条第4項第1号に規定する弾性設計用地震動による地震力をいう。)又は静的地震力(同項第2号に規定する静的地震力をいい、Sクラスに属する機器に対し算定されるものに限る。)のいずれか大きい方の地震力を組み合わせた荷重条件に対して、炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留まることをいう。	解釈 追記
5 炉心内の燃料被覆材は、基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	二 第5項に規定する「基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがない」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないことをいう。	追加 要求 事項

2. 規則改正内容

- ✓ 以下に改正された技術基準規則第5条及び同規則の解釈を示す。

技術基準規則 第5条(地震による損傷防止)	技術基準規則の解釈 第5条(地震による損傷防止)	備考
4 炉心内の燃料被覆材は、基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがないものでなければならぬ。	5 第4項に規定する「基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがない」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないことをいう。	追加 要求 事項

- ✓ 本規則改正に伴う要求事項として、「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について(原子力規制庁, 2017年2月15日)」において以下のとおり示されている。

『・・地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る評価として、より精緻化する観点から、**地震力並びに地震力と重畳する可能性のある1次応力及び2次応力を加味した評価を実施することを求める必要がある。**
よって、原子力規制庁としては、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に、基準地震動 S_s の地震が発生した場合でも、燃料被覆管の閉じ込め機能は維持できることを新たに要求し、耐震重要度分類Sクラスの耐震設計の考え方にならって、**その判断基準として、基準地震動 S_s の地震による1次応力を加味した運転状態における応力が設計引張強さを下回ること、また、弾性設計用地震動 S_0 の地震による1次応力を加味した運転状態における応力が設計降伏点を下回ること**としたい。』

3. 発電用原子炉設置変更許可及び工事計画変更認可申請の概要

3. 1. 発電用原子炉設置変更許可

✓2. に示す設置許可基準規則等へ適合するための燃料被覆材の設計方針として、発電用原子炉設置変更許可申請書に以下のとおり追記し、2019年7月24日に許可を受けた。

○本文五号 □ 発電用原子炉施設の一般構造 (1) 耐震構造 (i) 設計基準対象施設の耐震設計
炉心内の燃料被覆材(燃料被覆管)の放射性物質の閉じ込め機能については、以下のとおり設計する。
・弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対して、炉心内の燃料被覆管の応答が全体的におおむね弾性状態にとどまるように設計する。
・基準地震動による地震力に対して、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないように設計する。

○添付書類八 1. 安全設計 1.3 耐震設計 1.3.1.4 荷重の組合せと許容限界

(3) 荷重の組合せ b. 機器・配管系 (e)

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能の確認においては、通常運転時の状態で燃料被覆管に作用する荷重及び運転時の異常な過渡変化時の状態のうち地震によって引き起こされるおそれのある事象によって燃料被覆管に作用する荷重と地震力を組み合わせる。

(4) 許容限界 b. 機器・配管系 (d) 燃料被覆管

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおりとする。

i) 弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

応答が全体的におおむね弾性状態にとどまることとする。

ii) 基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界

塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルにとどまって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないこととする。

3. 発電用原子炉設置変更許可及び工事計画変更認可申請の概要

- 2019年1月18日 発電用原子炉設置変更許可申請
- 2019年2月21日 審査会合(初回)
- 2019年4月19日 発電用原子炉設置変更許可申請の補正
- 2019年5月 9日 審査会合(2回目)
- 2019年6月20日 発電用原子炉設置変更許可申請の補正
- 2019年7月24日 発電用原子炉設置変更許可

3. 2. 工事計画変更認可申請の概要

- ✓ 発電用原子炉設置変更許可及び技術基準規則改正に伴い、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る基本設計方針の追加、評価方法、評価結果等を示し、改正後の技術基準規則に適合するものであることを確認する(2019年7月26日申請)。

項目		記載内容	
本文	原子炉本体の基本設計方針 原子炉冷却系統施設の基本設計方針	地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る基本設計方針の追加	
	設計及び工事に係る品質管理の方法等に関する事項	本申請に係る品質保証計画	
添付書類	V-1-1-1	発電用原子炉の設置の許可との整合性に関する説明書	本工認で追加した基本設計方針と発電用原子炉設置変更許可申請書との整合性
	V-1-10	設計及び工事に係る品質管理の方法等に関する説明書	設計に係る品質管理の方法
	V-2	耐震性に関する説明書	地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る設計の基本方針、評価方法、評価結果
	V-5	計算機プログラム(解析コード)の概要	地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価に使用した解析コードの概要

なお、本申請において、設備や運用の変更を伴わないことから、保安規定の変更は必要ない。

4. 基本設計方針

- ✓2. に示す技術基準規則等の改正内容を踏まえ、工事計画変更認可申請書本文に、地震時の閉じ込め機能に係る基本設計方針を、以下のとおり追加する。なお、本基本設計方針は、3. 1. で示した発電用原子炉設置変更許可における設計方針と同じである。

原子炉冷却系統施設 (1) 基本設計方針

2. 自然現象 2.1 地震による損傷の防止 2.1.1 耐震設計

(1) 耐震設計の基本方針

1. 炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおり設計する。

弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対して、炉心内の燃料被覆管の応答が全体的におおむね弾性状態にとどまるように設計する。

基準地震動による地震力に対して、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないように設計する。

(4) 荷重の組合せと許容限界 c. 荷重の組合せ (b) 機器・配管系 ト

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能の確認においては、通常運転時の状態で燃料被覆管に作用する荷重及び運転時の異常な過渡変化時の状態のうち地震によって引き起こされるおそれのある事象によって燃料被覆管に作用する荷重と地震力を組み合わせる。

d. 許容限界 (b) 機器・配管系 ヘ

炉心内の燃料被覆管の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下のとおりとする。

- i) 弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

応答が全体的におおむね弾性状態にとどまることとする。

- ii) 基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界

塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルにとどまって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないこととする。

5. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る設計方針

✓4. に示す基本設計方針等を踏まえ、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能について技術基準規則への適合性を示すための設計方針を定め、添付書類「耐震性に関する説明書」に示す。

- 通常運転時の状態で燃料被覆管に作用する荷重及び運転時の異常な過渡変化時の状態のうち地震によって引き起こされるおそれのある事象によって燃料被覆管に作用する荷重と地震力を組み合わせる。
- 弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界は、応答が全体的におおむね弾性状態にとどまることを確認する。
- 基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界は、塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルにとどまって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないことを確認する。
- 燃料の機械設計においては、燃料被覆管応力、累積疲労サイクル、過度の寸法変化防止に対する設計方針を満足するように燃料要素の設計を行うが、上記の設計方針を満足させるための設計に当たっては、これらのうち燃料被覆管への地震力の影響を考慮すべき項目として、燃料被覆管応力及び累積疲労サイクルを評価項目とする。
- 評価においては、内外圧差による応力、熱応力、水力振動による応力、支持格子の接触圧による応力等の他、地震による応力を考慮し、設計疲労曲線としては、Langer-O'Donnellの曲線を使用する。



基本設計方針と同じ。



発電用原子炉設置変更許可申請書(2019年7月24日許可)添付書類八「1.9 発電用原子炉設置変更許可申請に係る安全設計の方針」に示した設計方針と同じ。

6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(1/12)

✓5. で示した設計方針に基づく具体的な評価方法, 評価結果を添付資料「耐震性に関する説明書」に示す。

6. 1. 評価対象燃料

東海第二発電所で使用可能な既認可燃料体を対象とする。

具体的には, 9×9燃料(A型)と9×9燃料(B型)について評価対象とする。

6. 2. 荷重の組合せと許容限界

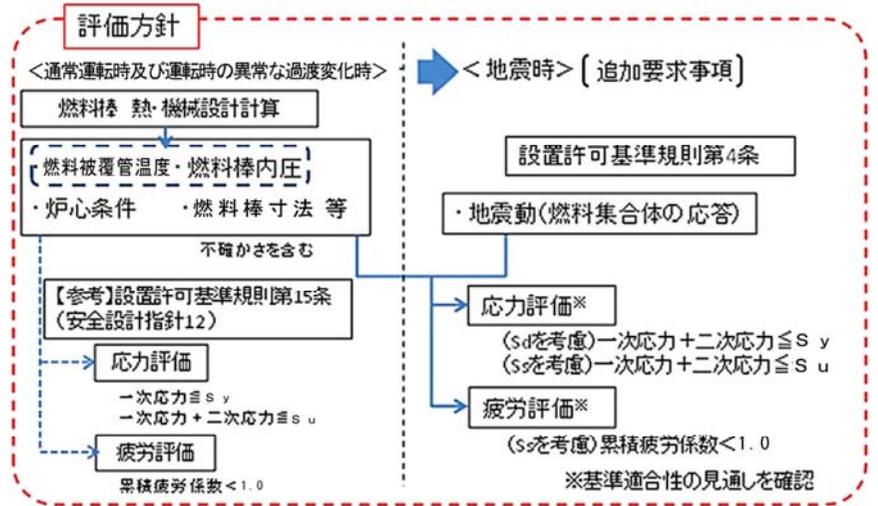
5. で示した, 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能維持に係る評価項目である「燃料被覆管応力」及び「燃料被覆管疲労」に対し, 評価に対して考慮する荷重の組合せ及び許容限界は以下のとおり。

運転状態	要求機能	荷重の組合せ	許容限界	
			一次+二次応力	一次+二次+ピーク応力
地震時	燃料被覆管の閉じ込め機能	運転時荷重(通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の荷重)+設計地震荷重(S_d)を考慮)	降伏応力(S_y)※	地震動のみによる疲労解析を行い, 運転状態Ⅰ, Ⅱ及びⅢにおける累積疲労係数との和が1.0未満であること。
		運転時荷重(通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の荷重)+設計地震荷重(S_s)を考慮)	引張強さ(S_u)※	

※: 上記表のとおり, 弾性設計用地震動 S_d に対して降伏応力, 基準地震動 S_s に対して引張強さが許容応力であるが, 基準地震動 S_s により生じる燃料被覆管応力は弾性設計用地震動 S_d により生じる応力を包含するため, 本評価においては, 基準地震動 S_s により生じる応力を加えた場合でも降伏応力以下となることを確認することにより, 弾性設計用地震動 S_d に対する要求も満足する。

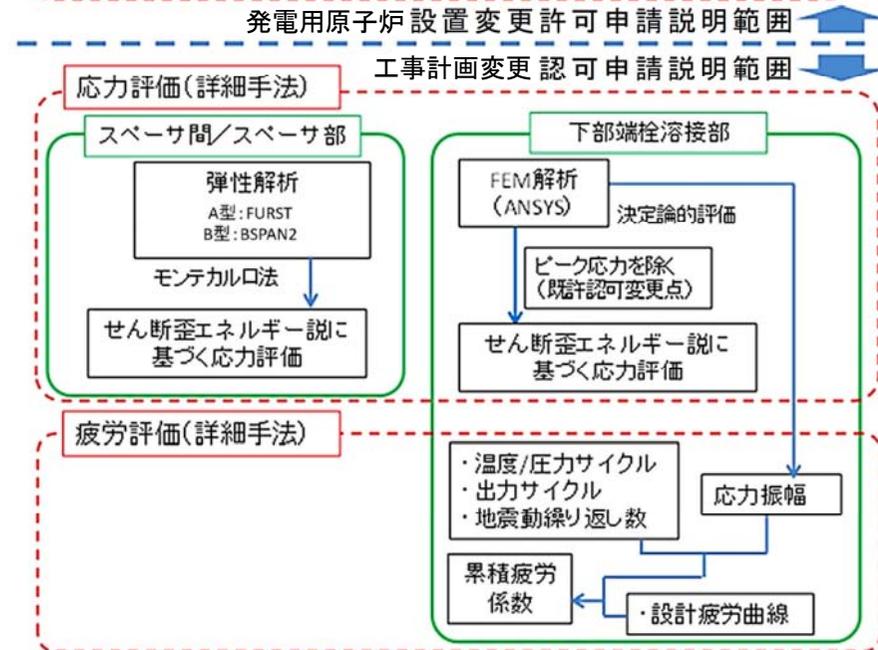
6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(2/12)

6.3. 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針



✓ 発電用原子炉設置変更許可申請では、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る設計方針及び基準地震動等に対する基準適合性の見直しについて説明した。

✓ 工事計画変更認可申請では、評価手法の詳細について説明する。



6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(3/12)

6.4. 応力評価手法

(1) 応力評価対象部位:

✓ 従来評価と同様、スペーサ間、スペーサ部、下部端栓溶接部とする。

(2) スペーサ間・スペーサ部の応力評価手法:

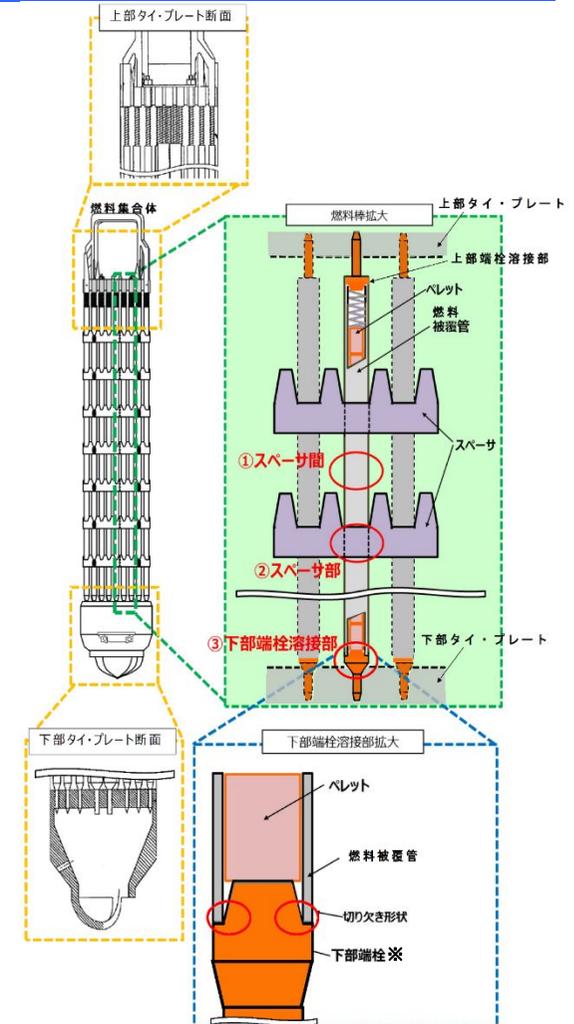
✓ 厚肉円筒式を用いた弾性解析を用いる。応力計算は、燃料被覆管に発生する全ての応力を三軸方向(半径方向, 円周方向及び軸方向)について解析し, せん断歪エネルギー説に基づき燃料被覆管の相当応力を求め応力設計比を評価。

✓ 応力設計比は, 燃料被覆管温度, 燃料棒内圧, 炉心条件, 許容応力などの統計的入力変数の関数となる。入力変数の統計的分布として, ノミナル値, 製造実績, 実機運転データ等を考慮して設定された標準偏差を弾性解析の入力とし, モンテカルロ法により統計評価を行い, 応力設計比の95%確率上限値を求め, 1以下であることを確認。

(3) 下部端栓溶接部の応力評価手法:

✓ 切り欠き形状を含む複雑形状のため有限要素法を用いる。入力変数には95%確率上下限值を使用し, 決定論的評価を行う。

✓ 切り欠き部の応力集中によるピーク応力を除いた, 一次応力と二次応力を評価。応力設計比が1以下であることを確認。



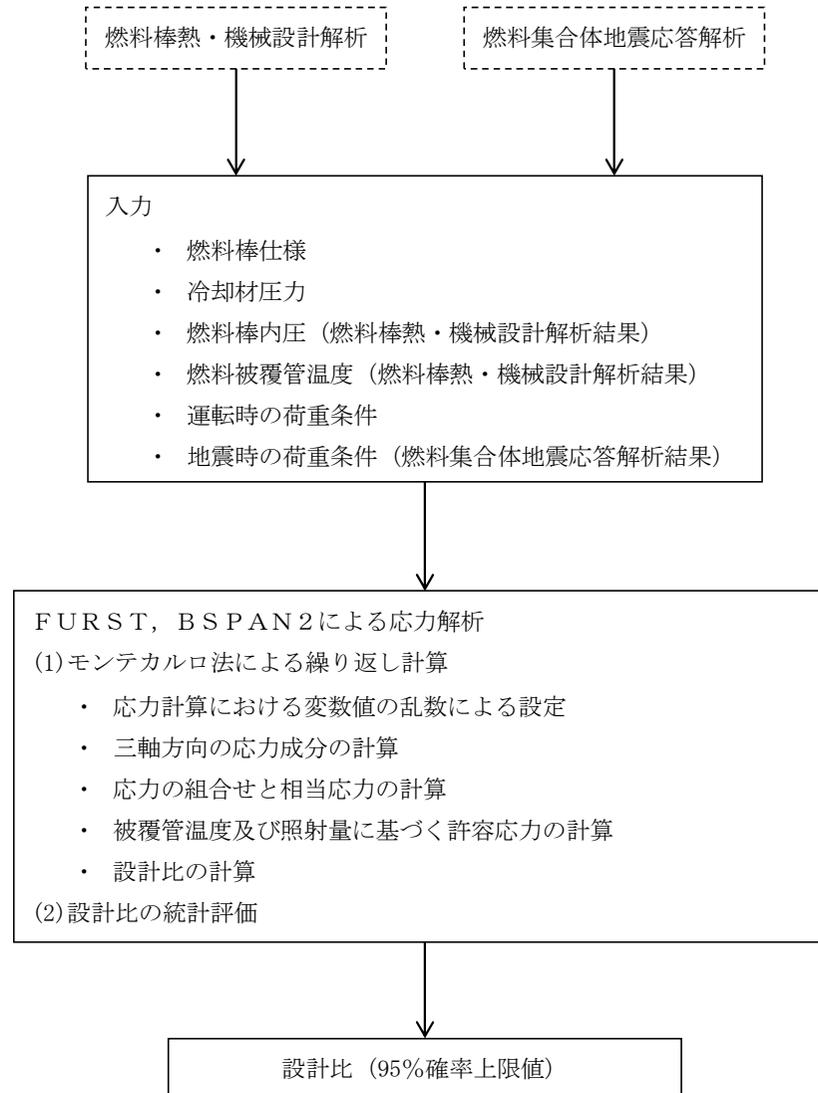
※下部端栓の材料は燃料被覆管と同じジルコニウム合金(ジルカロイ-2)を使用。溶加材を用いずに付き合わせ溶接により燃料被覆管と溶接しており, 異種の溶接金属は使用していない。

評価対象部位(イメージ)

6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(4/12)

【具体的なスペーサ間/スペーサ部の応力評価手法】

具体的なスペーサ間/スペーサ部の応力評価フローは以下のとおり。



通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の荷重及び設計地震荷重によるスペーサ間/スペーサ部応力については次ページに示す。

6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(5/12)

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の荷重によるスペーサ間/スペーサ部応力		
項目	9×9燃料(A型)	9×9燃料(B型)
評価コード	FURST	BSPAN2
内外圧差に基づく応力	内外圧を受ける両端閉じの厚肉円筒公式で計算	
水力振動に基づく応力※1	両端支持梁の曲げ応力の式で計算	
楕円度に基づく応力	内外圧を受ける元たわみをもつ円管の応力式で計算	
スペーサの接触力に基づく応力※2	スプリングの押圧による局所応力の経験式で計算	
半径方向温度差に基づく応力	定常熱伝導での径方向温度勾配による熱応力式で計算	
円周方向温度差に基づく応力	対象軸の左右で温度差のある梁の熱湾曲による熱応力式で計算	
膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力	軸方向荷重/燃料被覆管断面積で計算	
ウォータ・チャンネルと燃料棒の熱膨張差による応力	—※3	伸び差により生じる摩擦力を公式より計算

※1 9×9燃料(B型)はスペーサ間のみ考慮(9×9燃料(A型)はスペーサ間/スペーサ部いずれも考慮)

※2 9×9燃料(A型)及び9×9燃料(A型)及び9×9燃料(B型)いずれもスペーサ部のみ考慮

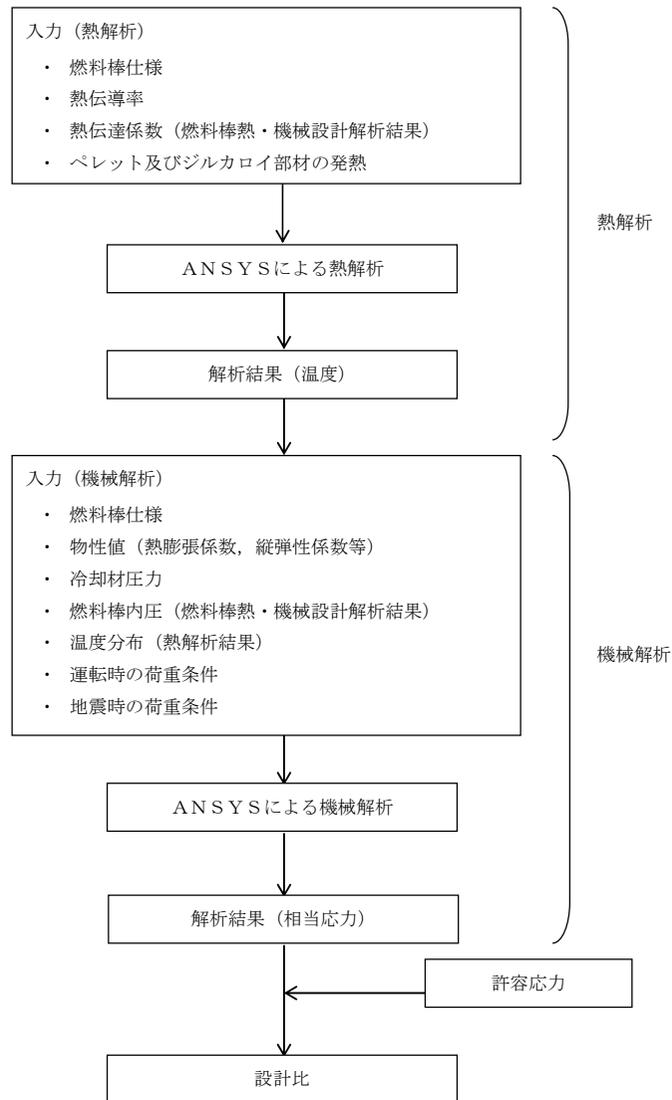
※3 影響は軽微であり無視できるものとして取り扱っている

設計地震荷重(既認可工事計画認可申請書におけるSs地震動)によるスペーサ間/スペーサ部応力		
項目	9×9燃料(A型)	9×9燃料(B型)
評価コード	FURST	BSPAN2
燃料棒のたわみに基づく応力	等分布荷重が作用する梁の曲げ応力式で計算	
チャンネル・ボックスのたわみに基づく応力	チャンネル・ボックスのたわみで強制変位を受けた梁の曲げ応力式で計算	
鉛直地震加速度に基づく応力	鉛直加速度による軸力/燃料被覆管断面積で計算	見掛けの重量増加として考慮

6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(6/12)

【具体的な下部端栓溶接部の応力評価手法】

具体的な下部端栓溶接部の応力評価フローは以下のとおり。



通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の荷重及び設計地震荷重による下部端栓溶接応力については次ページに示す。

6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(7/12)

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の荷重による下部端栓溶接部応力解析で考慮する荷重		
項目	9×9燃料(A型)	9×9燃料(B型)
評価コード	ANSYS	ANSYS
燃料棒内圧	解析モデルの内表面に燃料棒内圧を付加	
燃料棒内圧及び冷却材圧力	解析モデルの外表面に冷却材圧力を付加 燃料被覆管上端に内外圧力差を軸力として付加	
下部端栓及び被覆管の温度分布	解析モデル内温度分布として熱解析結果を読み込む	
燃料被覆管の周方向温度差による 初期曲がりに基づく曲げ荷重	燃料棒の曲がりに伴う曲げ応力を軸方向の荷重分布として燃料被覆管上端に付加	※
端栓取付角公差による初期曲がりに基づく曲げ荷重		※
膨張スプリング等による軸方向荷重	軸方向荷重を燃料被覆管上端に付加	※

※ 影響は軽微であり無視できるものとして取り扱っている

設計地震荷重(既認可工事計画認可申請書におけるSs地震動)による下部端栓溶接部応力解析で考慮する荷重		
項目	9×9燃料(A型)	9×9燃料(B型)
評価コード	ANSYS	ANSYS
燃料棒のたわみに基づく曲げ荷重	燃料棒の曲がりに伴う曲げ応力を軸方向の荷重分布として燃料被覆管上端に付加	燃料棒の曲がりを強制変位として径方向に付加
チャンネル・ボックスのたわみに基づく曲げ荷重		
鉛直地震加速度に基づく軸方向荷重	軸方向荷重を燃料被覆管上端に付加	見掛けの重量増加として付加

6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(8/12)

6. 5. 疲労評価手法

(1)評価対象部位:

✓ 切り欠き形状を有し応力集中が発生する下部端栓溶接部を評価部位とする。

(2)疲労評価手法:

✓ 疲労評価は累積損傷の法則(Minerの仮説)及びLanger-O' Donnellの考え方に基づく。Langer-O' Donnellの設計疲労曲線は、最確曲線に対して応力の片振幅を1/2倍、許容繰返し回数を1/20倍に設定している。

✓ 温度・圧力及び出力の予測サイクル※1による累積疲労係数に加え、地震動による繰返し荷重を考慮し、累積疲労係数が1.0未満であることを確認。

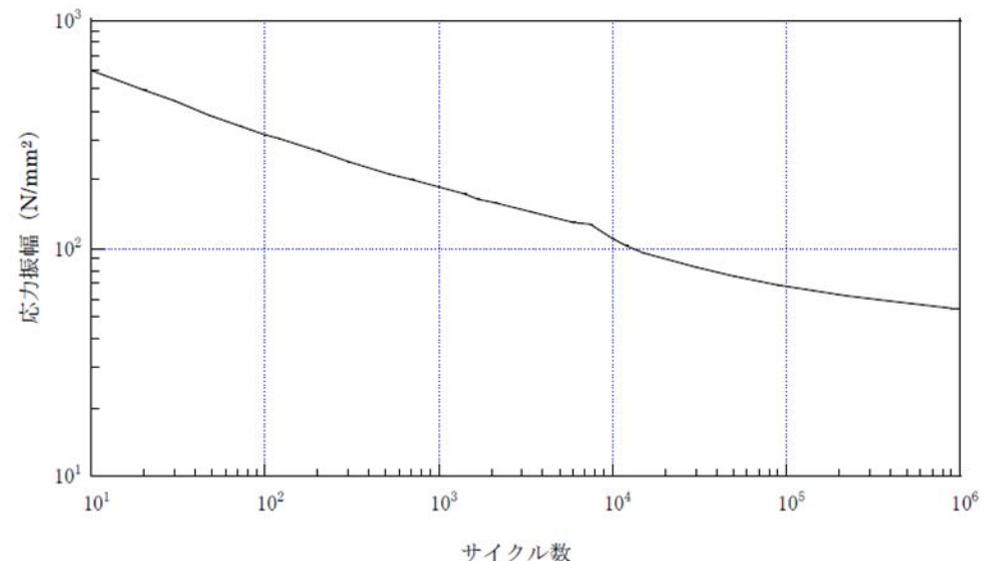
✓ 応力振幅は前述の有限要素法により、切り欠き部の応力集中によるピーク応力を含めて評価。

(3)地震荷重の繰返し回数:

✓ 基準地震動に対する建屋-炉内構造物系連成の地震応答解析により算出された等価繰返し回数を踏まえ、160回と設定する。

※1:東海第二発電所発電用原子炉設置(変更)許可申請書添付書類八

※2:W. J. O' Donnell and B. F. Langer, "Fatigue Design Basis for Zircaloy Components", Nuclear Science and Engineering, 20, 1-12 (1964)



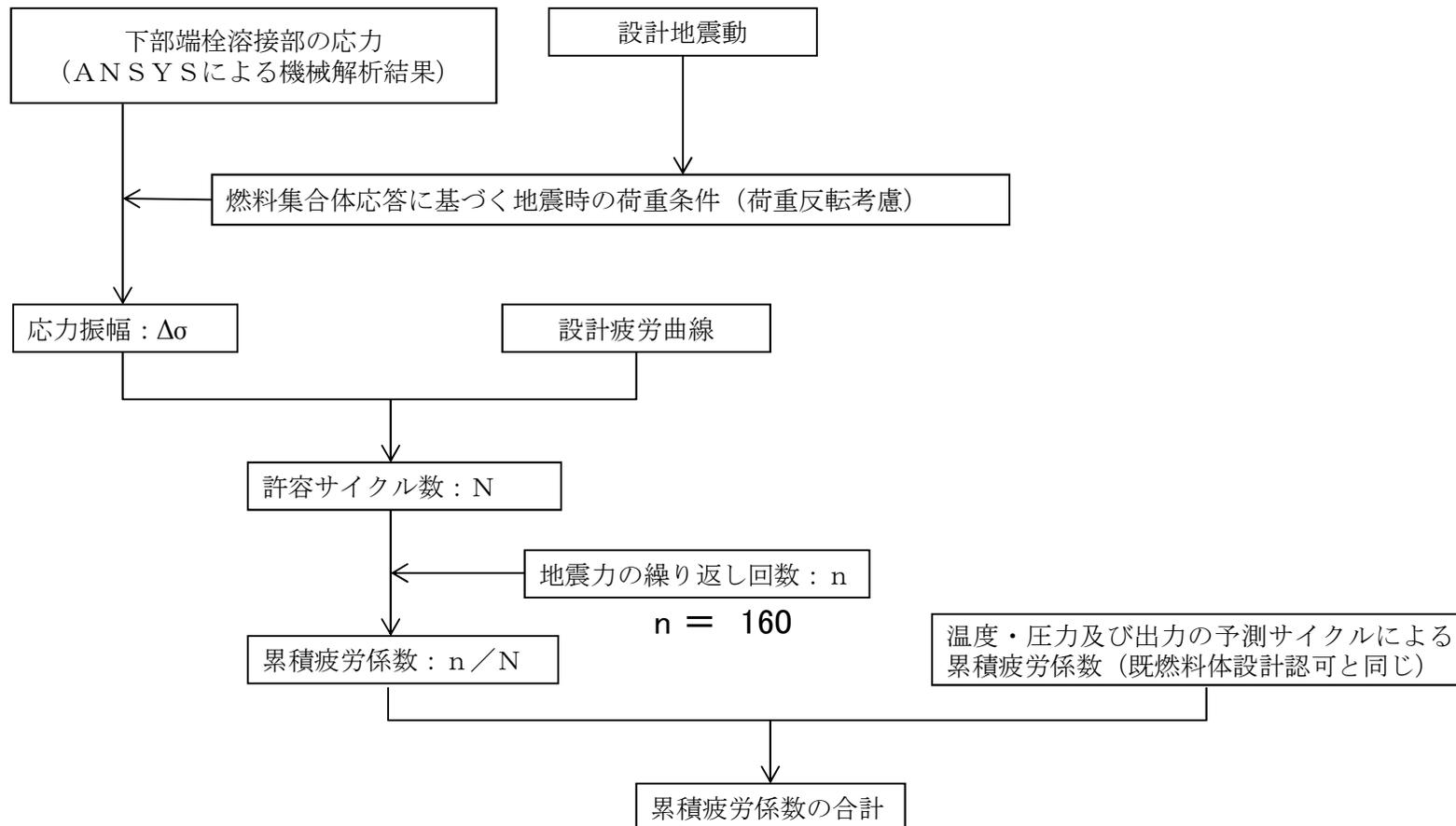
ジルカロイの設計疲労曲線※2

6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(9/12)

【具体的な下部端栓溶接部の疲労評価手法】

地震力が繰り返された場合の具体的な下部端栓溶接部の疲労評価フローは以下のとおり。
下記フローで得られる地震力が繰り返された場合の累積疲労係数増分を温度・圧力及び出力の予測サイクルによる累積疲労係数に加える。

(温度・圧力及び出力の予測サイクルによる累積疲労係数については既燃料体設計認可と同じ)



6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(10/12)

6.6. 応力評価結果

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力に加えて地震による応力を考慮した場合においても、応力設計比は最大で0.70(A型)及び0.71(B型)であり、共に1.0より小さいことを確認した。

燃料被覆管応力の評価結果(9×9燃料(A型))

地震動と許容応力	運転条件	評価点	スペーサ間 (応力設計比)	スペーサ部 (応力設計比)	下部端栓溶接部 (応力設計比)
			一次応力+二次応力		
基準地震動 S_s に対して降伏応力 S_y	圧力過渡 ^{※1}	寿命初期	0.70	0.54	0.63
		寿命中期	0.26	0.24	0.30
		寿命末期	0.22	0.21	0.23
	出力過渡 ^{※2}	寿命初期	0.65	0.45	-
		寿命中期	0.27	0.25	-
		寿命末期	0.22	0.21	-

※1: 負荷の喪失 ※2: 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き

下部端栓溶接部の評価では、下部端栓溶接部の燃料棒の出力が低く、出力過渡時に発生する応力は圧力過渡時の応力より小さいため、圧力過渡時を評価対象とした。

6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(11/12)

6.6. 応力評価結果

燃料被覆管応力の評価結果(9×9燃料(B型))

地震動と許容応力	運転条件	評価点	スペーサ間 (応力設計比)	スペーサ部 (応力設計比)	下部端栓溶接部 (応力設計比)
			一次応力+二次応力		
基準地震動 S_s に対して降伏応力 S_y	圧力過渡※1	寿命初期	0.66	0.71	0.62
		寿命中期	0.32	0.28	0.49
		寿命末期	0.26	0.25	0.47
	出力過渡※2	寿命初期	0.63	0.66	-
		寿命中期	0.34	0.29	-
		寿命末期	0.25	0.23	-

※1: 負荷の喪失 ※2: 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き

下部端栓溶接部の評価では、下部端栓溶接部の燃料棒の出力が低く、出力過渡時に発生する応力は圧力過渡時の応力より小さいため、圧力過渡時を評価対象とした。

6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価(12/12)

6.7. 疲労評価結果

- ✓ 基準地震動による地震力が繰り返された場合の応力振幅と繰り返し回数, ジルカロイの設計疲労曲線を用いて評価された疲労係数の増分は0.00016(9×9燃料(A型)及び9×9燃料(B型))となった。
- ✓ 全寿命を通じた累積疲労係数(約0.003^{※1}(9×9燃料(A型))及び約0.006^{※3}(9×9燃料(B型)))に, 地震動による疲労係数の増分を加えても累積疲労係数は1.0より小さいことを確認した。

9×9燃料(A型)

地震動	評価点	応力振幅 (MPa)	許容 サイクル数	地震荷重の 繰り返し回数	疲労係数の 増分	全寿命を通し た累積疲労 係数	合計
基準地震動 S _s	寿命初期	38	1.0×10 ⁶	160	0.00016	0.003 ^{※1}	0.004 ^{※2}
	寿命中期	38	1.0×10 ⁶	160	0.00016	0.003 ^{※1}	0.004 ^{※2}
	寿命末期	38	1.0×10 ⁶	160	0.00016	0.003 ^{※1}	0.004 ^{※2}

9×9燃料(B型)

地震動	評価点	応力振幅 (MPa)	許容 サイクル数	地震荷重の 繰り返し回数	疲労係数の 増分	全寿命を通し た累積疲労 係数	合計
基準地震動 S _s	寿命初期	45	1.0×10 ⁶	160	0.00016	0.006 ^{※3}	0.007 ^{※2}
	寿命中期	45	1.0×10 ⁶	160	0.00016	0.006 ^{※3}	0.007 ^{※2}
	寿命末期	44	1.0×10 ⁶	160	0.00016	0.006 ^{※3}	0.007 ^{※2}

※1: 東海第二発電所「燃料体設計認可申請書」(GNF燃設認第36号, 平成21年11月5日認可)の記載値を小数点以下第4位で切り上げた値。

※2: 地震動による疲労係数の増分及び全寿命を通じた累積疲労係数をそれぞれ小数点以下第4位で切り上げ, 足した値。

※3: 東海第二発電所「燃料体設計認可申請書」(20原燃東第794号, 平成20年9月12日認可)の記載値を小数点以下第4位で切り上げた値。

7. まとめ

- ✓東海第二発電所において、使用可能な既認可燃料体に対し、地震時における燃料被覆管の放射性物質の閉じ込め機能維持の要求事項に対する評価を実施することにより、改正後の技術基準規則に適合するものであることを確認した。

<参考>

評価する応力の種類(1/4)

考慮する応力	スペーサ間	スペーサ部	下部端栓 溶接部
(1)内外圧差に基づく応力	○	○	○
(2)水力振動に基づく応力	○	○※1	—
(3)楕円度に基づく応力	○	○	—
(4)スペーサの接触力に基づく応力	—	○	—
(5)半径方向温度差に基づく応力	○	○	○
(6)円周方向温度差に基づく応力	○	○	○※1
(7)膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力	○	○	○※1
(8)ウォータ・チャンネルと燃料棒の熱膨張差による応力	○※2	○※2	—
(9)端栓取付角公差による曲がりに基づく応力	—	—	○※1
(10)燃料棒のたわみに基づく応力※3	○	○	○
(11)チャンネル・ボックスのたわみに基づく応力※3	○	○	○
(12)鉛直地震加速度に基づく応力※3	○	○	○

※1: 9×9燃料(A型)の場合に考慮

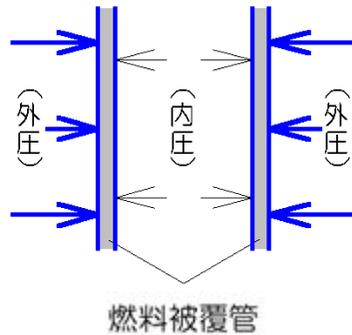
※2: 9×9燃料(B型)の場合に考慮

※3: 地震動を考慮する場合に新たに加わる応力

評価する応力の種類(2/4)

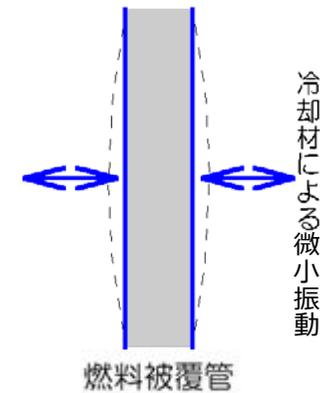
(1)内外圧差に基づく応力

燃料被覆管内部ガス圧力と冷却材圧力の差圧により発生する応力。



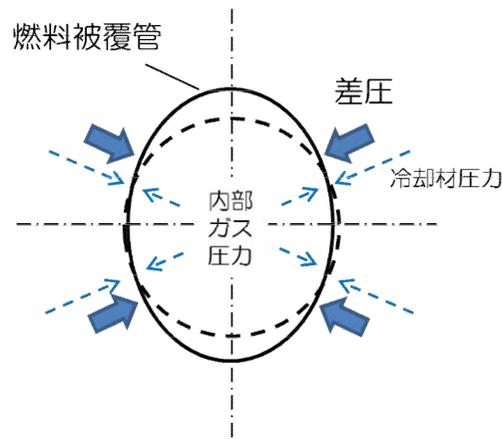
(2)水力振動に基づく応力

冷却材の流れによって生じる燃料被覆管の微小振動に基づき発生する応力。



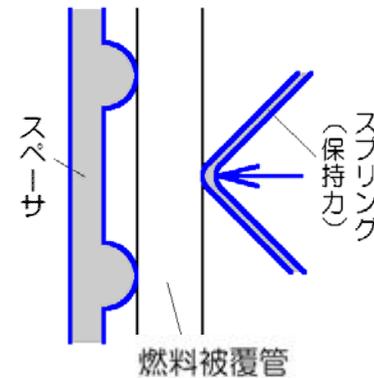
(3)楕円度に基づく応力

燃料被覆管製造時に生じる真円からの僅かな歪みにより、燃料被覆管内部ガス圧力と冷却材圧力の差圧により発生する応力。



(4)スペーサの接触力に基づく応力

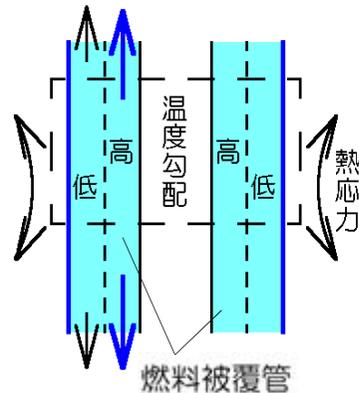
スペーサのばね押圧により、スペーサ部に発生する応力。



評価する応力の種類(3/4)

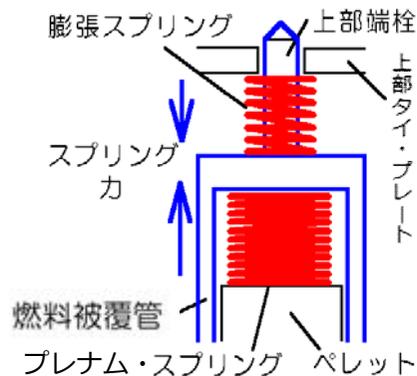
(5)半径方向温度差に基づく応力

燃料被覆管内外面の温度差に基づく熱膨張差が拘束されることにより発生する応力。



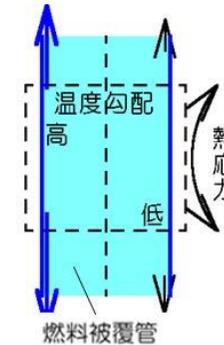
(7)膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力

膨張スプリング及びプレナム・スプリング(内部スプリング)による発生する応力。9×9燃料(A型)については、燃料自重による応力も含む。



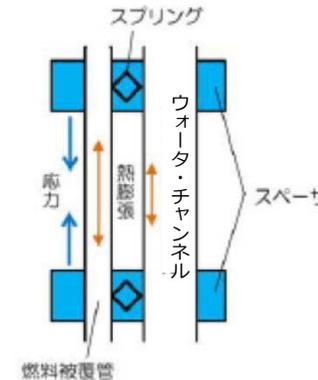
(6)円周方向温度差に基づく応力

燃料被覆管の円周方向温度分布の不均一による燃料被覆管の湾曲がスペーサにより拘束されることで発生する応力(9×9燃料(B型)の熱湾曲矯正による応力も同様の応力)。



(8)ウォータ・チャンネルと燃料棒の熱膨張差による応力

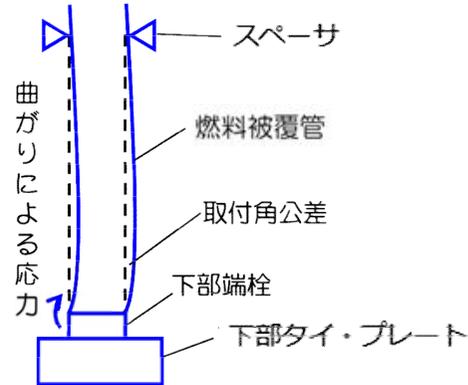
ウォータ・チャンネルと燃料被覆管の熱膨張差により燃料被覆管の伸びが拘束されることにより発生する応力(9×9燃料(B型))。



評価する応力の種類(4/4)

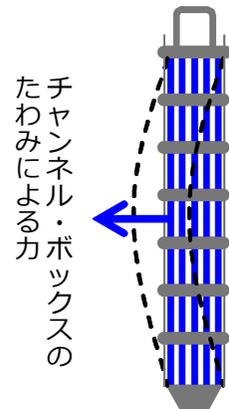
(9)端栓取付角公差による曲がりに基づく応力

下部端栓の取付角の公差により、下部端栓とスペーサとの間で燃料被覆管に曲げが生じることにより発生する応力(9×9燃料(A型))。



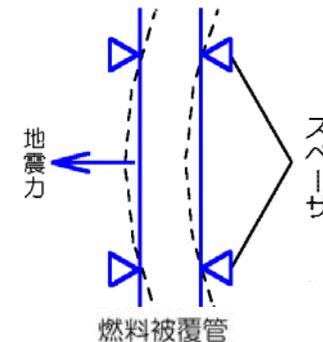
(11)チャンネル・ボックスのたわみに基づく応力

水平地震荷重によるチャンネル・ボックスのたわみに従って、燃料被覆管がたわむことにより発生する応力。



(10)燃料被覆管のたわみに基づく応力

水平地震荷重により、スペーサを支持点として燃料被覆管がたわむことにより発生する応力。



(12)鉛直地震加速度に基づく応力

鉛直方向地震加速度により、燃料被覆管に見掛けの質量が軸方向に付加されることにより発生する応力。なお、9×9燃料(B型)では「(10)燃料被覆管のたわみに基づく応力」に加味する形で考慮している。

下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについて(1/4)

<概要>

- ✓9×9燃料(A型)の下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについては、既認可の評価ではMARCを使用しているが、本評価においてはANSYSを使用。
- ✓いずれのコードも様々な分野の構造解析に広く利用されている汎用の解析コードであり、ANSYSは9×9燃料(B型)の下部端栓溶接部の応力評価や工事計画認可申請書における応力解析等、これまで多くの構造解析に対し使用実績がある。
- ✓今回、9×9燃料(A型)の評価では、汎用有限要素法解析コードの集約化のためANSYSを使用する。
- ✓本資料は、9×9燃料(A型)の評価にANSYSを適用するに当たり、既認可の9×9燃料(A型)の下部端栓溶接部応力解析において使用されたMARCと同等な入力条件を設定可能なこと、MARCと本解析コードとで同等な解析結果となることを説明する。

下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについて(2/4)

<下部端栓溶接部の応力評価のフロー>

入力(熱解析)

- ・燃料棒仕様
- ・熱伝導率
- ・熱伝達係数(燃料棒熱・機械設計コード解析結果)
- ・ペレット及びジルカロイ部材の発熱

ANSYSによる熱解析

解析結果(温度)

入力(機械解析)

- ・燃料棒仕様
- ・物性値(熱膨張係数, 縦弾性係数等)
- ・冷却材圧力
- ・燃料棒内圧(燃料棒熱・機械設計コード解析結果)
- ・温度分布(熱解析結果)
- ・運転時の荷重条件
- ・地震時の荷重条件(本再現解析では含まれない)

ANSYSによる機械解析

解析結果(相当応力)

設計比

熱解析

有限要素法を用いた熱解析により下部端栓溶接部近傍での温度分布を評価

機械解析

次に, 熱解析で得られた下部端栓溶接部近傍の温度分布を読み込み, 熱膨張差による熱応力の分布, 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における荷重条件に基づき発生する応力分布を, 有限要素法を用いた機械解析により評価

下部端栓溶接部に発生する三軸方向(半径, 円周及び軸方向)の応力を解析し, それらより相当応力を計算。
許容応力は, 下部端栓溶接部の温度及び照射の影響を考慮した保守側の95%確率下限値を用い, 設計比を求める。

許容応力

下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについて(3/4)

<解析条件>

- ✓ MARCによる既存の解析結果とANSYSによる解析結果を比較するため、従来の下部端栓溶接部応力評価(通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時・地震動なし)と同等の入力条件にて応力設計比の比較を行った。
- ✓ MARCとANSYSの解析入力値は、一部の物性値について温度依存性を関数式で入力するかテーブル形式で入力するかの差があることを除いては全て同一であり、同等な入力条件を設定可能であることを確認。

・燃料タイプ: 9×9燃料(A型)

・評価部位: 下部端栓溶接部

・解析コード: ①有限要素法解析コードMARC Ver.K4, ②有限要素法解析コードANSYS Ver.14

・評価点: 燃料寿命初期, 中期, 末期※¹

・運転条件: 圧力過渡※²

・考慮する荷重: 16頁参照

・許容応力: 引張強さ(S_u)

※¹: 燃料寿命初期, 中期, 末期は, 燃料棒熱・機械解析で設定された評価点を引き継ぎ, 炉内滞在期間がそれぞれ0年, 2.2年及び8年に相当する評価点。

※²: 下部端栓溶接部の燃料棒の出力は低く, 出力過渡時に発生する応力は圧力過渡時の応力より小さいため, 圧力過渡時を評価対象とした。

下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについて(4/4)

<解析結果>

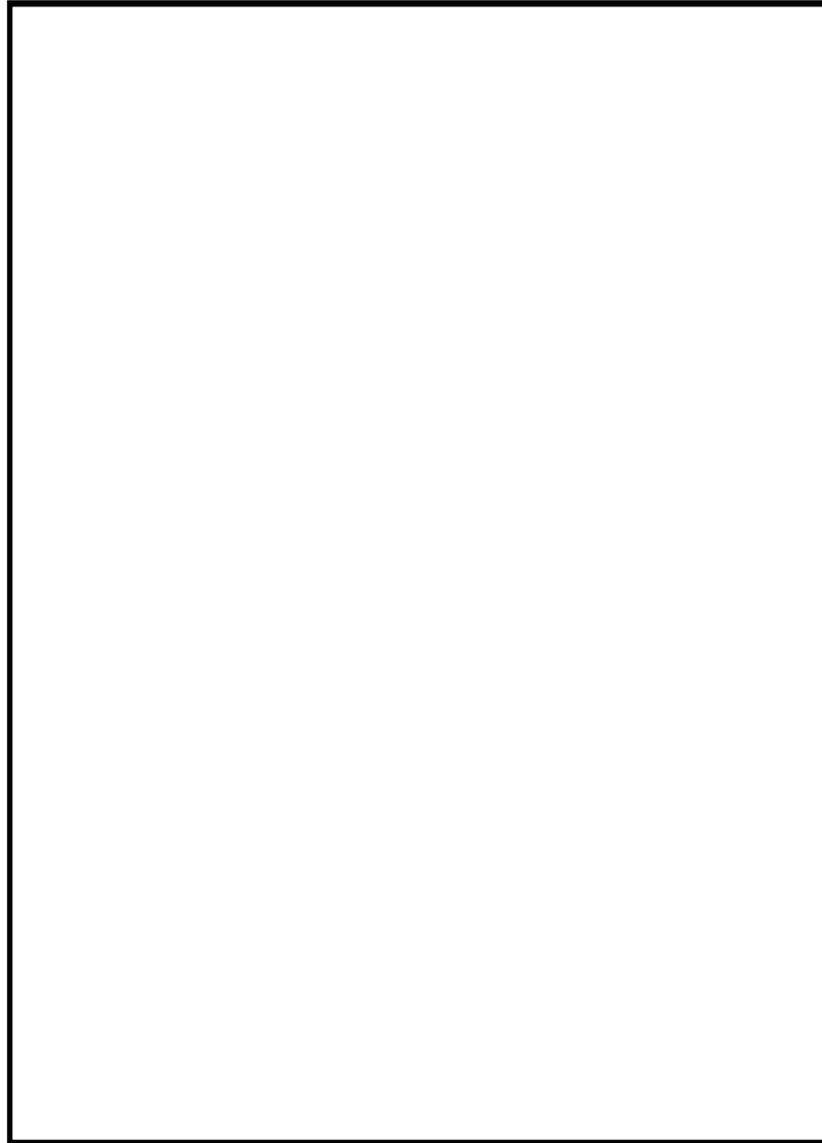
- ✓ MARCとANSYSによる同等な入力条件に基づく解析結果の差分は0.02であり, 判定基準(応力設計比が1以下であること)に対し十分小さく同等な結果が得られ, 下部端栓溶接部の応力評価への適用に支障はないものとする。

解析コード	運転条件	許容応力	応力設計比		
			寿命初期	寿命中期	寿命末期
MARC	圧力過渡	Su	0.39	0.42	0.28
ANSYS	同上	同上	0.40	0.40	0.27

- ✓ 既認可の9×9燃料(A型)の下部端栓溶接部応力解析において使用されたMARCと同等な入力条件を設定可能なこと, MARCと本解析コードとで同等な解析結果となることを確認し, 9×9燃料(A型)の下部端栓溶接部応力評価の用途にANSYSを適用できることを確認した。

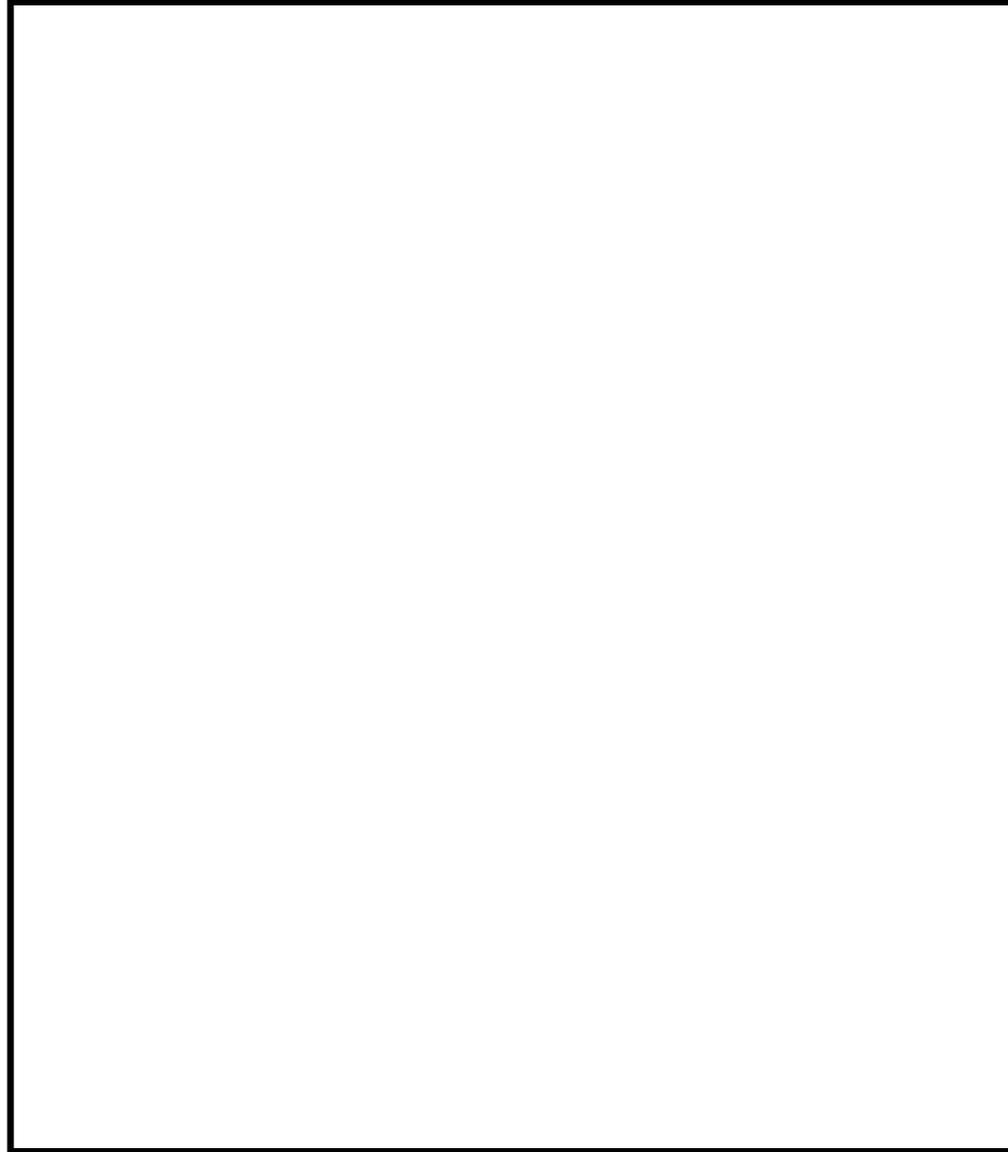
有限要素法解析モデル

下部端栓溶接部の熱解析における有限要素解析モデル(9×9燃料(A型))



有限要素法解析モデル

下部端栓溶接部の機械解析における有限要素解析モデル(9×9燃料(A型))



有限要素法解析モデル

下部端栓溶接部の熱・機械解析における有限要素解析モデル(9×9燃料(B型))

