

高浜発電所1・2・3・4号機
地震時の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
関西電力株式会社

目次

1. 規則改正内容	⇒	3
2. 発電用原子炉設置変更許可	⇒	5
3. 工事計画(変更)認可申請の概要	⇒	6
4. 基本設計方針	⇒	7
5. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る設計方針	⇒	8
6. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る評価	⇒	9
7. まとめ	⇒	23

1. 規則改正内容

2017年9月11日に「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。)、「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。)及びそれらの解釈が施行され、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。以下に変更箇所を示す。(下線は今回の規則改正で追加された箇所)

対象規則	変更前	変更後
設置許可基準規則	(地震による損傷の防止) 第四条 要求なし。	(地震による損傷の防止) 第四条 5 <u>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。</u>
設置許可基準規則の解釈	要求なし。	別記2のとおりとする。 <u>ただし、炉心内の燃料被覆材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。</u> 一 <u>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。</u> 二 <u>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。</u>

対象規則	変更前	変更後
技術基準規則	(地震による損傷の防止) 第五条 要求なし。	(地震による損傷の防止) 第五条 4 <u>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ように施設しなければならない。</u>
技術基準規則の解釈	要求なし。	<u>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。</u>

また、本規則改正に伴う要求事項の具体的な考え方について、「实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(平成29年2月15日 原子力規制委員会資料)」において以下のとおり示されている。

- ・要求事項は、「通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に、地震時の荷重が付加された時に燃料被覆管の閉じ込め機能が維持できること」。
- ・具体的には、燃料被覆管に1次応力と2次応力と地震応力が作用した場合でも、燃料被覆管の許容値以下であること。

2. 発電用原子炉設置変更許可

1.に示す設置許可基準規則等改正に係る要求事項を満足し、規則への適合性を示すため、燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る設計方針を定め、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31日に許可を受けた。

○本文五号 口. 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、炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留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 荷重の組み合わせと許容限界 (4)許容限界 b.機器・配管系 (d)燃料被覆材

炉心内の燃料被覆材の放射性物質の閉じ込め機能については、以下のとおり確認する。

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又は静的地震力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確認する。

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機能に影響を及ぼさないことを確認する。

○	2018年 2月 5日	発電用原子炉設置変更許可申請
○	2018年 2月27日	審査会合
○	2018年 7月27日	発電用原子炉設置変更許可申請の補正
○	2019年 6月14日	発電用原子炉設置変更許可申請の補正
○	2019年 7月31日	発電用原子炉設置変更許可

地震時の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

3. 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ものである。

(2019年7月31日申請)

また、「地震時の燃料被覆材の閉じ込め機能に関する審査について－伊方発電所3号機用の燃料体設計認可－」(平成30年6月13日 原子力規制委員会資料)に従い、今後高浜1・2・3・4号機で使用する既認可燃料体^(注1)について、改正後の技術基準規則への適合性についても確認するものである。

申請内容の概要については、次スライド以降で説明する。

(注1)燃料メーカー等が既に燃料体設計認可等を取得した燃料体

項目 ^(注2)		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
添付2 (添付13)	耐震性に関する説明書 2-1(13-1) 耐震設計の基本方針 2-2(13-20) 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	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設計の基本方針、評価方法、評価結果
添付3 (添付17)	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

(注2)項目の()書きは高浜1・2号機工事計画変更認可申請書における添付資料番号を示す。

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

4. 基本設計方針【本文】

1.に示す技術基準規則等の改正内容を踏まえ、工事計画認可申請書本文に、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を、以下のとおり追加する。

なお、本基本設計方針は、2.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

第1章 共通項目 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

炉心内の燃料被覆材の放射性物質の閉じ込めの機能については、以下の設計とする。

- ・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、炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留まる設計とする。
- ・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設計とする。

(4) 荷重の組合せと許容限界 d.許容限界 (b)機器・配管系

ホ. 燃料被覆材

炉心内の燃料被覆材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。

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又は静的地震力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ものとする。

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ものとする。

5. 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能に係る設計方針【耐震性に関する説明書(基本方針)】

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、添付資料「耐震設計の基本方針」に示す。

- 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 S_d 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を組み合わせた荷重条件に対して、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留まるものとする。
- 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 S_s 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機能に影響を及ぼさないものとする。
- 燃料の機械設計においては、燃料中心最高温度、燃料要素内圧、燃料被覆管応力、燃料被覆管に生じる円周方向引張歪の変化量及び累積疲労サイクル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、ペレットの接触圧による応力、熱応力、地震による応力及び水力振動による応力を考慮し、設計疲労曲線としては、Langer and 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31日許可)添付書類八「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【耐震性に関する説明書(耐震計算書)】

5.に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「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」に示す。

(1) 評価対象燃料

高浜1・2・3・4号機において今後使用する既認可燃料体のすべてを対象とする。具体的には、三菱原子燃料製燃料(A型燃料)と原子燃料工業製燃料(B型燃料)のそれぞれについて、以下の燃料を評価対象とする。

三菱原子燃料製燃料(A型燃料)

ユニット	燃料タイプ	燃料
高浜1号機	ウラン燃料	ステップ1燃料(注1)
		ステップ2燃料(注2)
高浜2号機	ウラン燃料	ステップ1燃料(注1)
		ステップ2燃料(注2)
高浜3, 4号機	ウラン燃料	ステップ1燃料(注1)(国産)
		ステップ1燃料(注1)(輸入)
	ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料(MOX燃料)	

原子燃料工業製燃料(B型燃料)

ユニット	燃料タイプ	燃料
高浜1号機	ウラン燃料	ステップ1燃料(注1)
		ステップ2燃料(注2)
高浜2号機	ウラン燃料	ステップ1燃料(注1)
		ステップ2燃料(注2)
高浜3, 4号機	ウラン燃料	ステップ1燃料(注1)
	ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料(MOX燃料)	

(注1) 燃料集合体最高燃焼度48,000Mwd/t

(注2) 燃料集合体最高燃焼度55,000Mwd/t

(2) 荷重の組合せ及び許容応力

5. で示した、燃料被覆管閉じ込め機能評価において地震動の影響を考慮すべき項目である「燃料被覆管応力」及び「燃料被覆管疲労」の評価に対して考慮する荷重の組合せ及び許容値は以下のとおり。

構成部品	要求事項		荷重の組合せ	評価値	許容値
燃料被覆管	通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時 ^(注1) に閉じ込め機能を維持すること	応力	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	体積平均相当応力	Sd地震動時: 耐力(Sy) Ss地震動時: 設計引張強さ(Su)
		疲労	種々の設計過渡条件(起動・停止、負荷追従運転、運転時の異常な過渡変化時) + 設計地震荷重	累積損傷係数	ASME Sec.Ⅲの概念による設計疲労寿命以下であること ^(注2)

(注1) 設計基準事故を除く。

(注2) 設計疲労曲線にはLanger and O' Donnellの曲線を使用する。

燃料被覆管応力評価の許容値について

燃料被覆管応力評価の許容値は、上記表のとおり、弾性設計用地震動Sdに対して耐力(Sy)、基準地震動Ssに対して設計引張強さ(Su)であるが、基準地震動Ssにより生じる燃料被覆管応力は弾性設計用地震動Sdにより生じる応力を包含するため、以下を確認することで、弾性設計用地震動Sdに対する要求も満足する。

$$1\text{次応力}(Ss\text{地震動を考慮})+2\text{次応力} \leq \text{耐力}(Sy)$$

(3) 燃料被覆管の応力評価方法

【燃料被覆管の応力評価条件】

燃料被覆管応力評価にあたっては、燃料被覆管に加わる右図a.~e.の応力を考慮する。

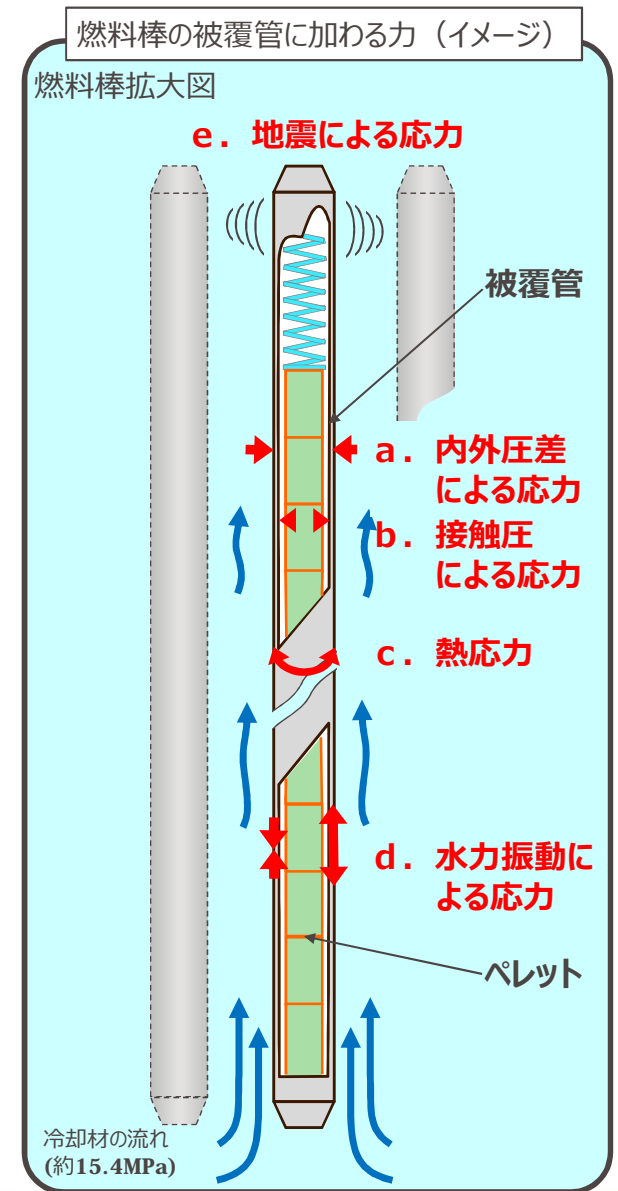
本工事計画認可申請書における燃料被覆管応力評価にあたっては、各応力に対し、下記のとおり厳しい条件に基づき評価を行う。

u 運転時(通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時)荷重(a.~d.)

- 運転時の異常な過渡変件事象として、様々な事象の中から被覆管応力が厳しくなる2事象(線出力密度が上昇しペレット熱膨張に伴うペレット-被覆管接触応力が厳しくなる事象:出力運転中の制御棒の異常な引き抜き、原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈)を選定。
- 通常運転時(高温停止時及び通常運転時)、運転時の異常な過渡変化時について、寿命初期/中期/末期を対象に評価を行い、燃料タイプ毎に最も厳しい条件においても判断基準を満足することを確認。
- 燃料体設計認可等と同じ保守性を持った出力履歴を使用。

u 設計地震荷重(e.)

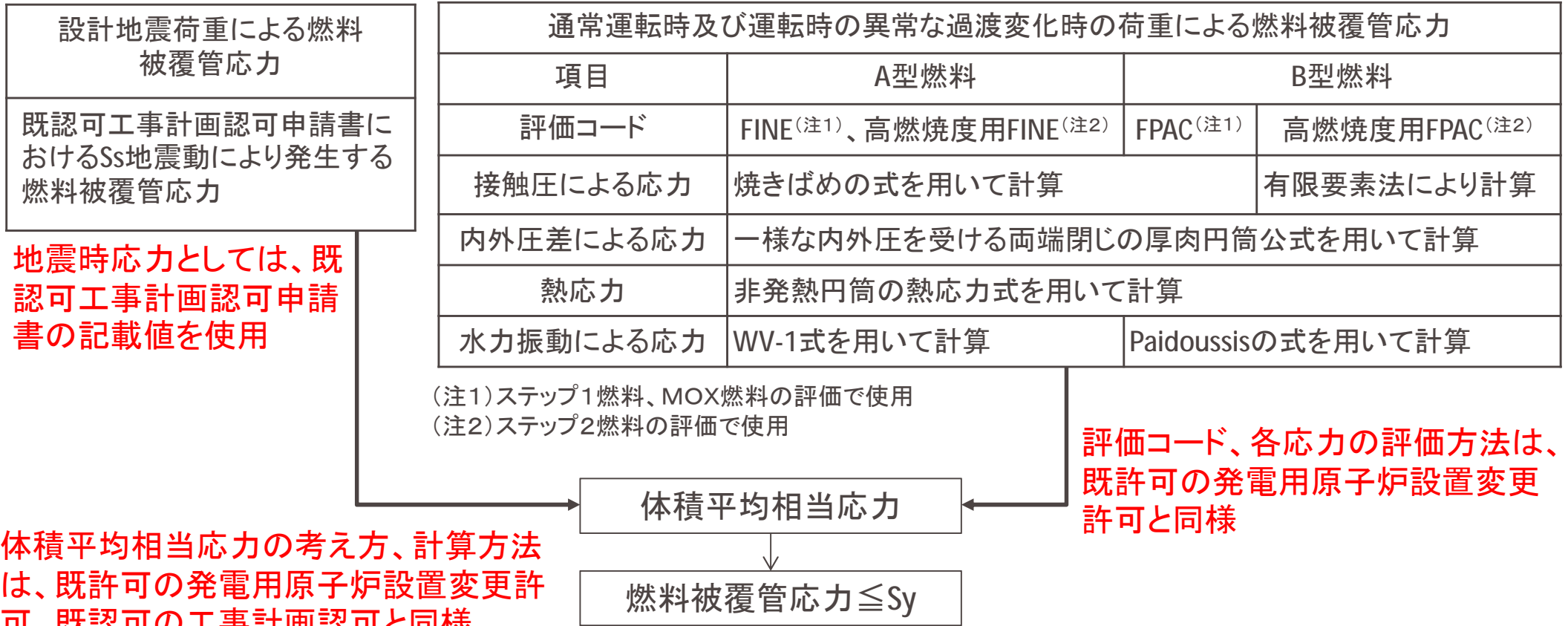
- 地震による応力として、複数のSs地震動を対象とした地震時応力評価結果のうち、最大となるものを選定。
- 地震による応力の評価にあたっては、運転期間中における燃料集合体の照射の影響も考慮。



※:それぞれの応力の詳細は参考資料参照

【具体的な燃料被覆管の応力評価方法】

具体的な燃料被覆管の応力評価方法は以下のとおり。これらの評価方法は既許可の発電用原子炉設置変更許可と同様であり、2018年2月27日の審査会合において説明済み。



【燃料被覆管の応力評価における保守性】

前頁スライドに示す厳しい評価条件に加え、許容応力に以下のような保守性を考慮している。

- 基準地震動Ssに対し、許容応力として設計引張り強さ(Su)ではなく耐力(Sy)を用いている。
- Syの基準値は、Sy実測データのばらつきによる不確定性を考慮して保守的に設定している。

(4) 燃料被覆管の疲労評価方法

【燃料被覆管の疲労評価条件】

燃料被覆管疲労評価は、(3)で示した燃料被覆管応力評価と同じ応力を考慮し、ASME Sec.Ⅲの概念による評価を行う。

- ① 応力繰り返しサイクル条件の設定
- ② 各過渡条件での応力変動幅の算出
- ③ Langer and O' Donnellの曲線を用いた許容繰り返し回数の算出
- ④ 各過渡条件での疲労損傷係数の算出
- ⑤ 上記の疲労損傷係数を足し合わせて累積疲労損傷係数を算出

本工認における燃料被覆管疲労評価にあたっては、各応力に対し、下記のとおり厳しい条件に基づき評価を行う。

U 設計過渡条件(通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時)

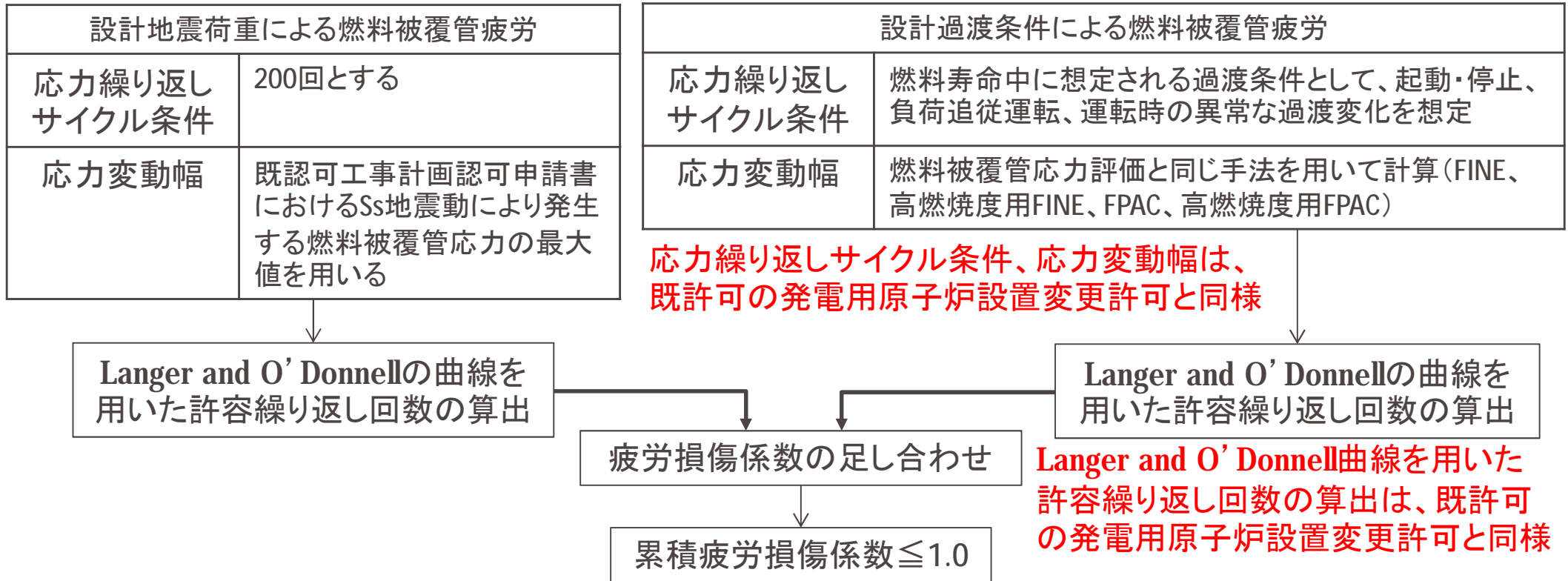
- 通常運転時として起動・停止、負荷追従運転(日負荷追従)を考慮。
- 運転時の異常な過渡変化として、様々な事象の中から被覆管応力が厳しくなる2事象(線出力密度が上昇しペレット熱膨張に伴うペレット-被覆管接触応力が厳しくなる事象:出力運転中の制御棒の異常な引き抜き、原子炉冷却材中のほう素の異常な希釈)を選定。
- 燃料体設計認可等と同じ保守性を持った出力履歴を使用。

U 設計地震荷重

- 地震による繰り返し応力として、複数のSs地震動を対象とした地震時応力評価結果のうち、運転期間中における燃料集合体の照射の影響も考慮して評価した結果のうち、最大となるものを選定し、この最大応力が200回作用すると想定。

【具体的な燃料被覆管の疲労評価方法】

具体的な燃料被覆管の疲労評価方法は以下のとおり。設計過渡条件における燃料被覆管疲労評価方法は、既許可の発電用原子炉設置変更許可と同様であり、設計地震荷重による燃料被覆管疲労の評価方法及び双方の足し合わせの考え方は、2018年2月27日の審査会合において説明済み。



【燃料被覆管の疲労評価における保守性】

前頁スライドに示す厳しい評価条件に加え、以下のような保守性を考慮している。

- Langer and 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、許容繰り返し回数を1/20倍して設定している。
- 地震時の応力繰り返し回数(200回)については、レインフロー法により、燃料集合体の地震応答解析結果に基づき、実際に繰り返し回数を計数し、200回を下回ることを確認している。

(5) 燃料被覆管の応力評価結果

(1)に示した評価対象燃料に対する基準地震動Ss時の体積平均相当応力評価結果を、燃料タイプ毎に最も裕度が少ないものについて以下に示す。いずれも許容応力を満足していることを確認した。

燃料被覆管応力評価結果(注1)

(高浜1号機 A型ウラン燃料)

(単位:MPa)

項目		応力成分		
		σ_{θ}	σ_r	σ_z
内外圧差及び接触圧による応力	内面	0.0	0.0	±0.9
	外面			
熱応力	内面			
	外面			
水力振動による応力	内外面			
地震による応力	内外面			
合計応力(注2)	内面			
	外面			
体積平均相当応力(注2)				
許容応力(注3)				
設計比(注4)		0.945 0.945		

- (注1)ステップ2燃料の評価結果を示す。
高温停止時(寿命初期)、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時(寿命初期、中期、末期)の評価結果のうち、最も裕度が少ない時点の応力を記載している。
負の数値は圧縮応力、正の数値は引張応力であることを示す。
- (注2)上段は地震及び水力振動に基づく応力の正符号の値を加えたもので、下段は負符号の値を加えたものである。
- (注3)燃料被覆管耐力データのばらつきを考慮した値である。
- (注4)体積平均相当応力/許容応力

燃料被覆管応力評価結果(注1)
(高浜1号機 B型ウラン燃料)

(単位:MPa)

項目		応力成分	σ_{θ}	σ_r	σ_z				
内外圧差及び接触圧による応力	内面								
	外面								
熱応力	内面								
	外面								
水力振動による応力	内面								
	外面								
地震による応力	内面								
	外面								
合計応力(注2)	内面								
	外面								
体積平均相当応力(注2)									
許容応力(注3)									
設計比(注4)				0.697	0.665				

- (注1)ステップ2燃料の評価結果を示す。
高温停止時(寿命初期)、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時(寿命初期、中期、末期)の評価結果のうち、最も裕度が少ない時点の応力を記載している。
負の数値は圧縮応力、正の数値は引張応力であることを示す。
- (注2)上段は地震及び水力振動に基づく応力の正符号の値を加えたもので、下段は負符号の値を加えたものである。
- (注3)燃料被覆管耐力データのばらつきを考慮した値である。
- (注4)体積平均相当応力/許容応力

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

燃料被覆管応力評価結果^(注1)
(高浜2号機 A型ウラン燃料)

(単位:MPa)

項目		応力成分	σ_{θ}	σ_r	σ_z
内外圧差及び接触圧による応力	内面		0.0	0.0	±0.9
	外面				
熱応力	内面				
	外面				
水力振動による応力	内外面				
地震による応力	内外面				
合計応力 ^(注2)	内面				
	外面				
体積平均相当応力 ^(注2)					
許容応力 ^(注3)					
設計比 ^(注4)			0.945	0.945	

- (注1) ステップ2燃料の評価結果を示す。
高温停止時(寿命初期)、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時(寿命初期、中期、末期)の評価結果のうち、最も裕度が少ない時点の応力を記載している。
負の数値は圧縮応力、正の数値は引張応力であることを示す。
- (注2) 上段は地震及び水力振動に基づく応力の正符号の値を加えたもので、下段は負符号の値を加えたものである。
- (注3) 燃料被覆管耐力データのばらつきを考慮した値である。
- (注4) 体積平均相当応力/許容応力

燃料被覆管応力評価結果(注1)
 (高浜2号機 B型ウラン燃料) (単位:MPa)

項目		応力成分	σ_{θ}	σ_r	σ_z				
内外圧差及び接触圧による応力	内面								
	外面								
熱応力	内面								
	外面								
水力振動による応力	内面								
	外面								
地震による応力	内面								
	外面								
合計応力(注2)	内面								
	外面								
体積平均相当応力(注2)									
許容応力(注3)									
設計比(注4)							0.697	0.668	

- (注1)ステップ2燃料の評価結果を示す。
 高温停止時(寿命初期)、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時(寿命初期、中期、末期)の評価結果のうち、最も裕度が少ない時点の応力を記載している。
 負の数値は圧縮応力、正の数値は引張応力であることを示す。
- (注2)上段は地震及び水力振動に基づく応力の正符号の値を加えたもので、下段は負符号の値を加えたものである。
- (注3)燃料被覆管耐力データのばらつきを考慮した値である。
- (注4)体積平均相当応力/許容応力

燃料被覆管応力評価結果^(注1)
(高浜3・4号機 A型ウラン燃料)

(単位:MPa)

項目	応力成分		σ_{θ}	σ_r	σ_z
	内外圧差及び接触圧による応力	内面			
	外面				
熱応力	内面				
	外面				
水力振動による応力	内外面	0.0	0.0	±1.8	
地震による応力	内外面				
合計応力 ^(注2)	内面				
		外面			
体積平均相当応力 ^(注2)					
許容応力 ^(注3)					
設計比 ^(注4)			0.494		
			0.494		

- (注1) ステップ1燃料(輸入)の評価結果を示す。
高温停止時(寿命初期)、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時(寿命初期、中期、末期)の評価結果のうち、最も裕度が少ない時点の応力を記載している。
負の数値は圧縮応力、正の数値は引張応力であることを示す。
- (注2) 上段は地震及び水力振動に基づく応力の正符号の値を加えたもので、下段は負符号の値を加えたものである。
- (注3) 燃料被覆管耐力データのばらつきを考慮した値である。
- (注4) 体積平均相当応力/許容応力

燃料被覆管応力評価結果^(注1)
(高浜3・4号機 A型MOX燃料)

(単位:MPa)

項目	応力成分		σ_{θ}	σ_r	σ_z	
	内外圧差及び接触圧による応力	内面		0.0	0.0	±0.6
	外面					
熱応力	内面					
	外面					
水力振動による応力	内外面					
地震による応力	内外面					
合計応力 ^(注2)	内面					
	外面					
体積平均相当応力 ^(注2)						
許容応力 ^(注3)						
設計比 ^(注4)		0.881				
		0.881				

(注1) 高温停止時(寿命初期)、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時(寿命初期、中期、末期)の評価結果のうち、最も裕度が少ない時点の応力を記載している。

負の数値は圧縮応力、正の数値は引張応力であることを示す。

(注2) 上段は地震及び水力振動に基づく応力の正符号の値を加えたもので、下段は負符号の値を加えたものである。

(注3) 燃料被覆管耐力データのばらつきを考慮した値である。

(注4) 体積平均相当応力/許容応力

燃料被覆管応力評価結果^(注1)
 (高浜3・4号機 B型ウラン燃料) (単位:MPa)

項目		応力成分					
		σ_{θ}	σ_r	σ_z			
内外圧差及び接触圧による応力	内面						
	外面						
熱応力	内面						
	外面						
水力振動による応力	内面						
	外面						
地震による応力	内面						
	外面						
合計応力 ^(注2)	内面						
	外面						
体積平均相当応力 ^(注2)							
許容応力 ^(注3)							
設計比 ^(注4)						0.742	0.742

- (注1) 高温停止時(寿命初期)、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時(寿命初期、中期、末期)の評価結果のうち、最も裕度が少ない時点の応力を記載している。
 負の数値は圧縮応力、正の数値は引張応力であることを示す。
- (注2) 上段は地震及び水力振動に基づく応力の正符号の値を加えたもので、下段は負符号の値を加えたものである。
- (注3) 燃料被覆管耐力データのばらつきを考慮した値である。
- (注4) 体積平均相当応力/許容応力

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

燃料被覆管応力評価結果^(注1)
 (高浜3・4号機 B型MOX燃料) (単位:MPa)

項目		応力成分					
		σ_{θ}	σ_r	σ_z			
内外圧差及び接触圧による応力	内面						
	外面						
熱応力	内面						
	外面						
水力振動による応力	内面						
	外面						
地震による応力	内面						
	外面						
合計応力 ^(注2)	内面						
	外面						
体積平均相当応力 ^(注2)							
許容応力 ^(注3)							
設計比 ^(注4)			0.828	0.825			

- (注1) 高温停止時(寿命初期)、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時(寿命初期、中期、末期)の評価結果のうち、最も裕度が少ない時点の応力を記載している。
 負の数値は圧縮応力、正の数値は引張応力であることを示す。
- (注2) 上段は地震及び水力振動に基づく応力の正符号の値を加えたもので、下段は負符号の値を加えたものである。
- (注3) 燃料被覆管耐力データのばらつきを考慮した値である。
- (注4) 体積平均相当応力/許容応力

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(6) 燃料被覆管の疲労評価結果

(1)に示した評価対象燃料に対する基準地震動Ss時に燃料被覆管に発生する応力による疲労評価結果を、燃料タイプ毎に最も裕度が少ないものについて以下に示す。いずれも基準を満足していることを確認した。

プラント	燃料タイプ	寿命期間中における 累積疲労損傷係数	地震による 疲労損傷係数	合計	基準
高浜1号機	A型ウラン燃料 ^(注1)	0.69	0.01	0.70	≤ 1.0
	B型ウラン燃料 ^(注1)	0.08	0.02	0.10	
高浜2号機	A型ウラン燃料 ^(注1)	0.69	0.01	0.70	
	B型ウラン燃料 ^(注1)	0.08	0.03	0.11	
高浜3, 4号機	A型ウラン燃料 ^(注2)	0.14	0.02	0.16	
	A型MOX燃料	0.42	0.01	0.43	
	B型ウラン燃料	0.04	0.02	0.06	
	B型MOX燃料	0.23	0.02	0.25	

(注1)ステップ2燃料の評価結果を示す。

(注2)ステップ1燃料(輸入)の評価結果を示す。

7. まとめ

高浜1・2・3・4号機において、今後使用する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。

参考資料

地震時の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

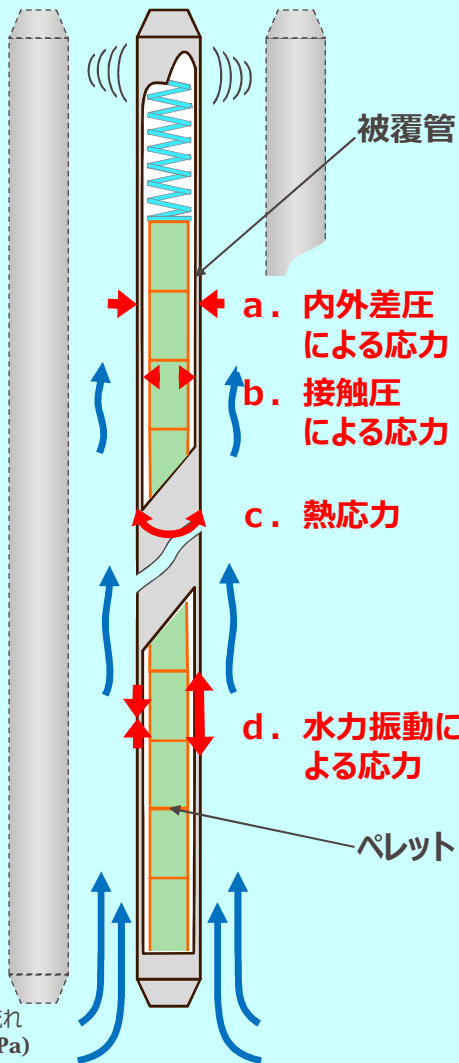
<燃料被覆管に発生する応力>

原子炉の運転中、燃料被覆管に発生する応力として以下の要因を考慮している。

燃料棒の被覆管に加わる力 (イメージ)

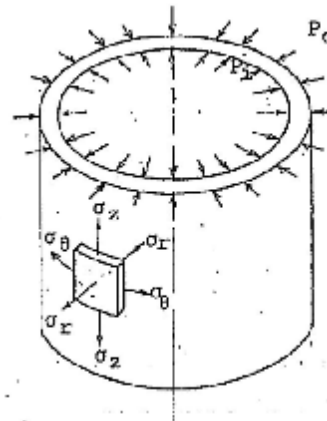
燃料棒拡大図

e. 地震による応力



a. 内外圧差による応力

燃料被覆管の内外の差圧により燃料被覆管が周りから圧縮されることにより発生する応力。1次応力に分類される。



P_o : 外 圧

P_i : 内 圧

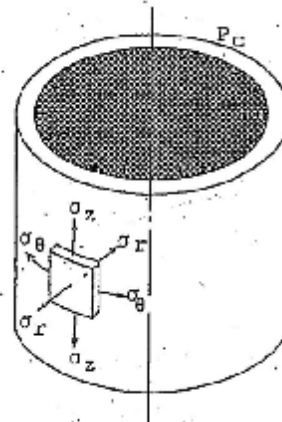
σ_r : 内外圧差による半径方向応力

σ_θ : 内外圧差による円周方向応力

σ_z : 内外圧差による軸方向応力

b. 接触圧による応力

ペレットと燃料被覆管の接触により、ペレットが燃料被覆管を押し広げようとする事により発生する応力。2次応力に分類される。

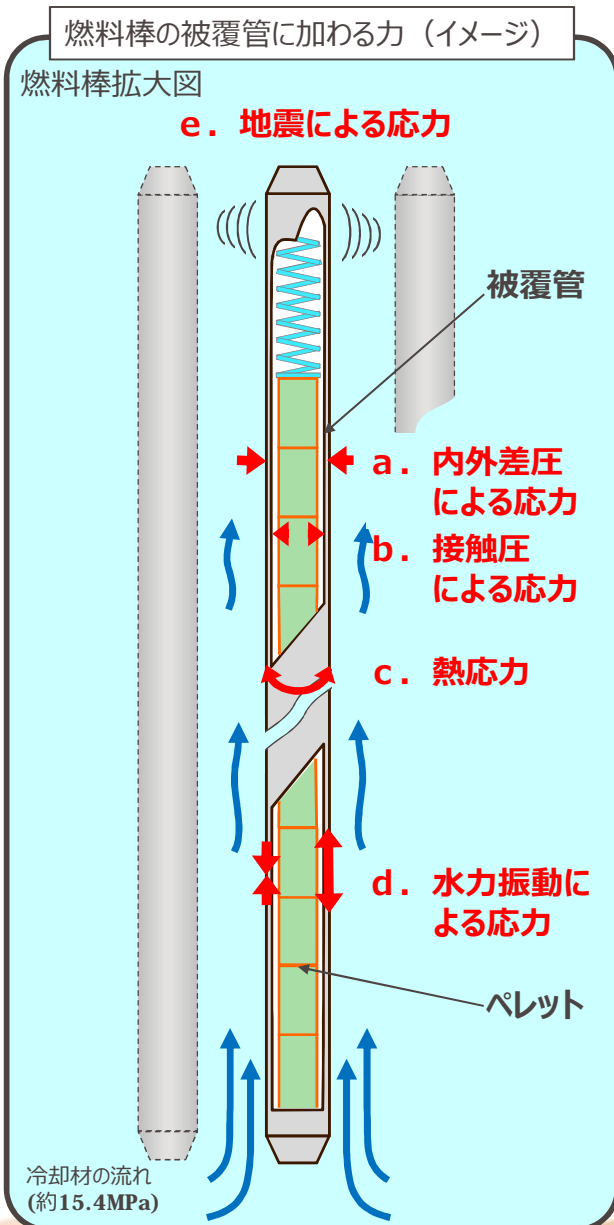


P_c : ペレットと被覆管の熱膨張差による接触圧

σ_r : 接触圧による半径方向応力

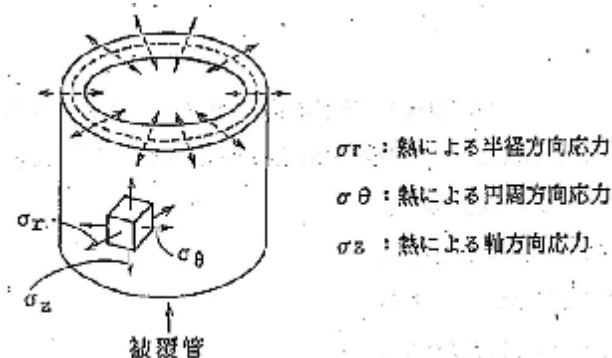
σ_θ : 接触圧による円周方向応力

σ_z : 接触圧による軸方向応力



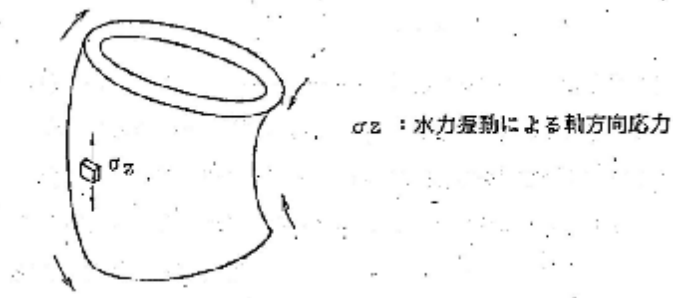
c. 熱応力

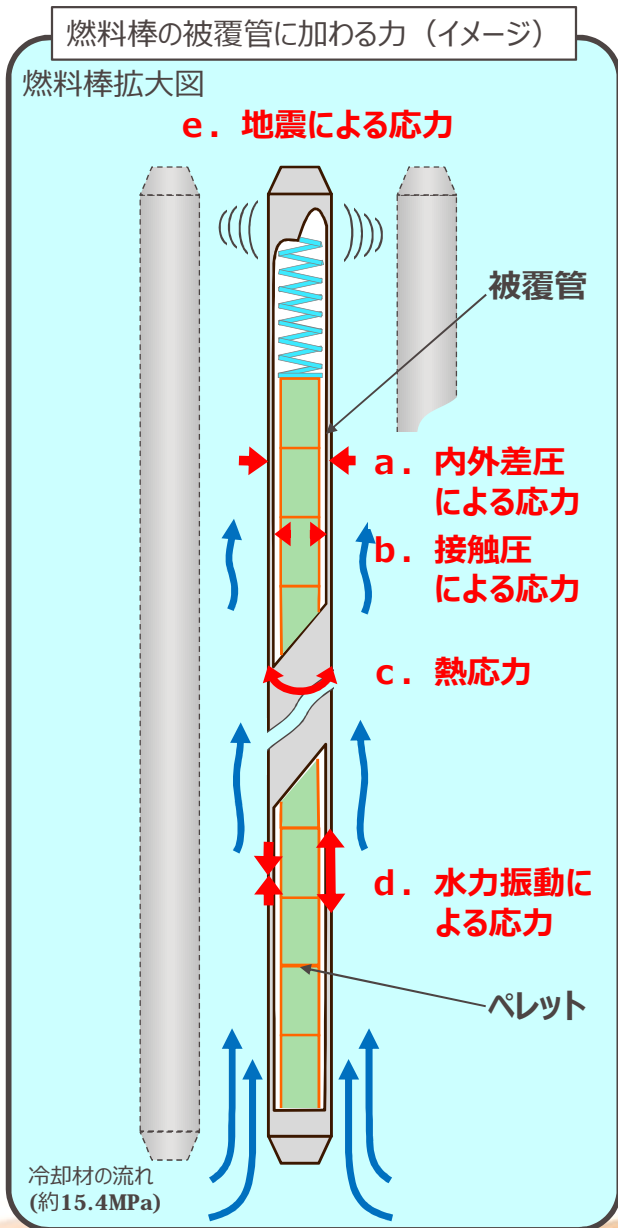
燃料被覆管内外面で温度が異なるため、熱膨張の差により発生する応力。内面側は、温度が高く熱膨張量が大きくなるが、外面側では温度が低く、内面側に比べ熱膨張量が小さい。このため、内面側では外面側に押さえられ圧縮応力が発生し、外面側では、内側から広げられることにより引張り応力が発生する。2次応力に分類される。



d. 水力振動による応力

燃料棒軸方向の冷却材の流れによって燃料棒が振動し、燃料被覆管が曲げられることにより発生する応力。1次応力に分類される。

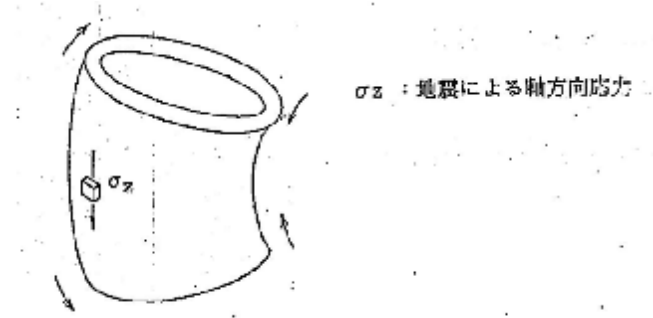




e. 地震による応力

地震による応力において、軸方向のゆれについては、燃料被覆管は自重による軸方向の荷重を受け、軸方向に応力が発生する。

また、水平方向のゆれについては、燃料棒の曲がりが発生することにより応力が発生する。この曲がりについては、地震時に発生する燃料集合体の水平方向の変位により燃料棒が変位することにより発生するものであり周方向・径方向応力は、軸方向応力に比べ極めて小さく無視しうることから、燃料被覆管の地震による応力については、軸方向についてのみ考慮している。また、支持格子の衝突による荷重は支持格子が変形することにより、支持格子が荷重を負担吸収することから、考慮していない。なお、地震による応力は1次応力に分類される。



なお、燃料被覆管応力の評価項目については、許可を受けた発電用原子炉設置変更許可申請書添付八において記載されており、具体的な応力の説明については審査資料に記載されている。

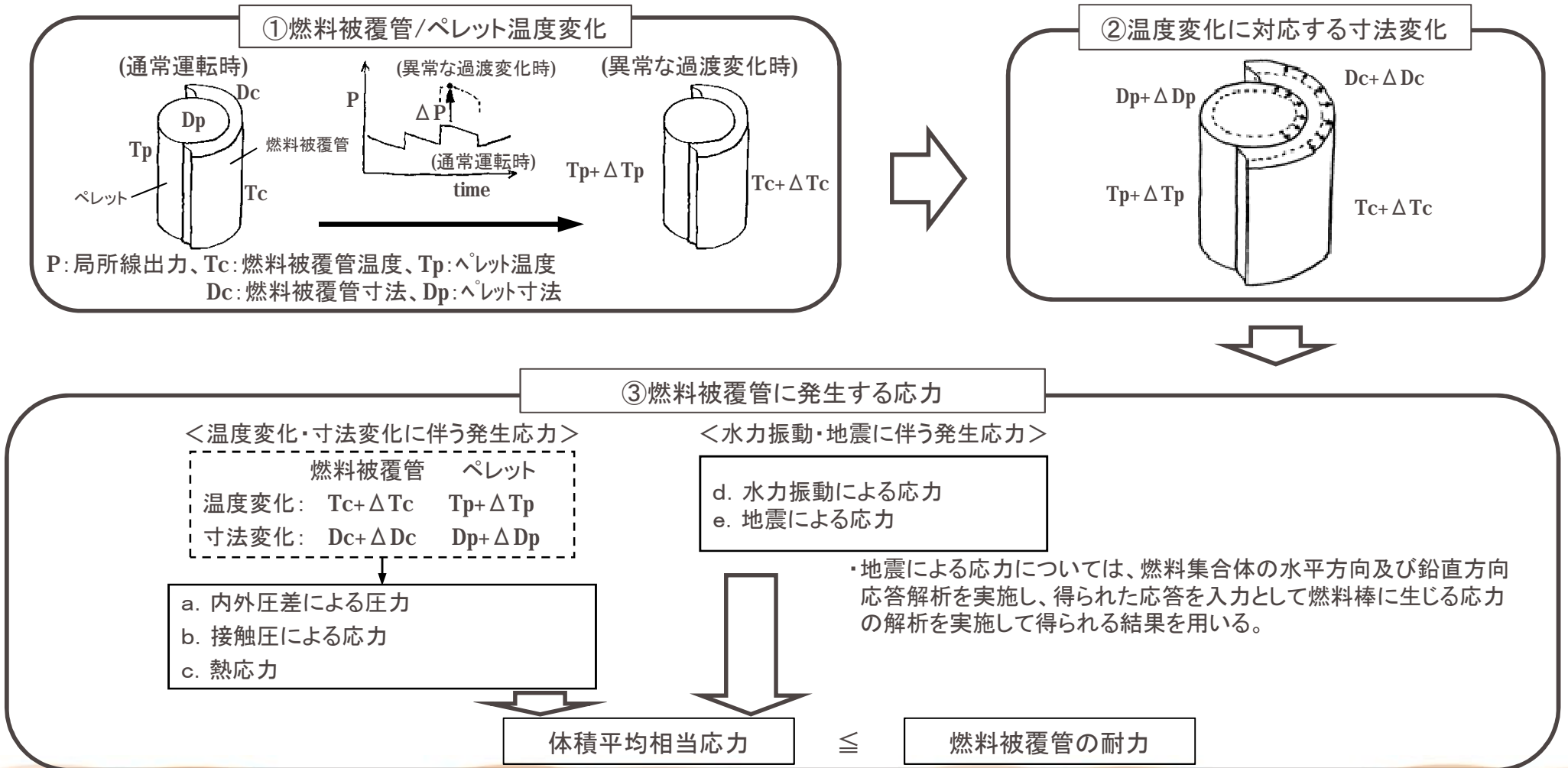
(高浜発電所安全審査資料「高浜発電所1号及び2号炉ステップ2燃料の機械設計について(補足説明資料1) 7. ステップ2燃料の被覆管応力評価について」平成21年7月29日)

地震時の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

<既許可の燃料被覆管応力評価方法>

燃料被覆管応力評価は、燃料棒健全性評価の手法として許可を受けている燃料棒挙動解析モデルによって行う。
 詳細は以下の通り。

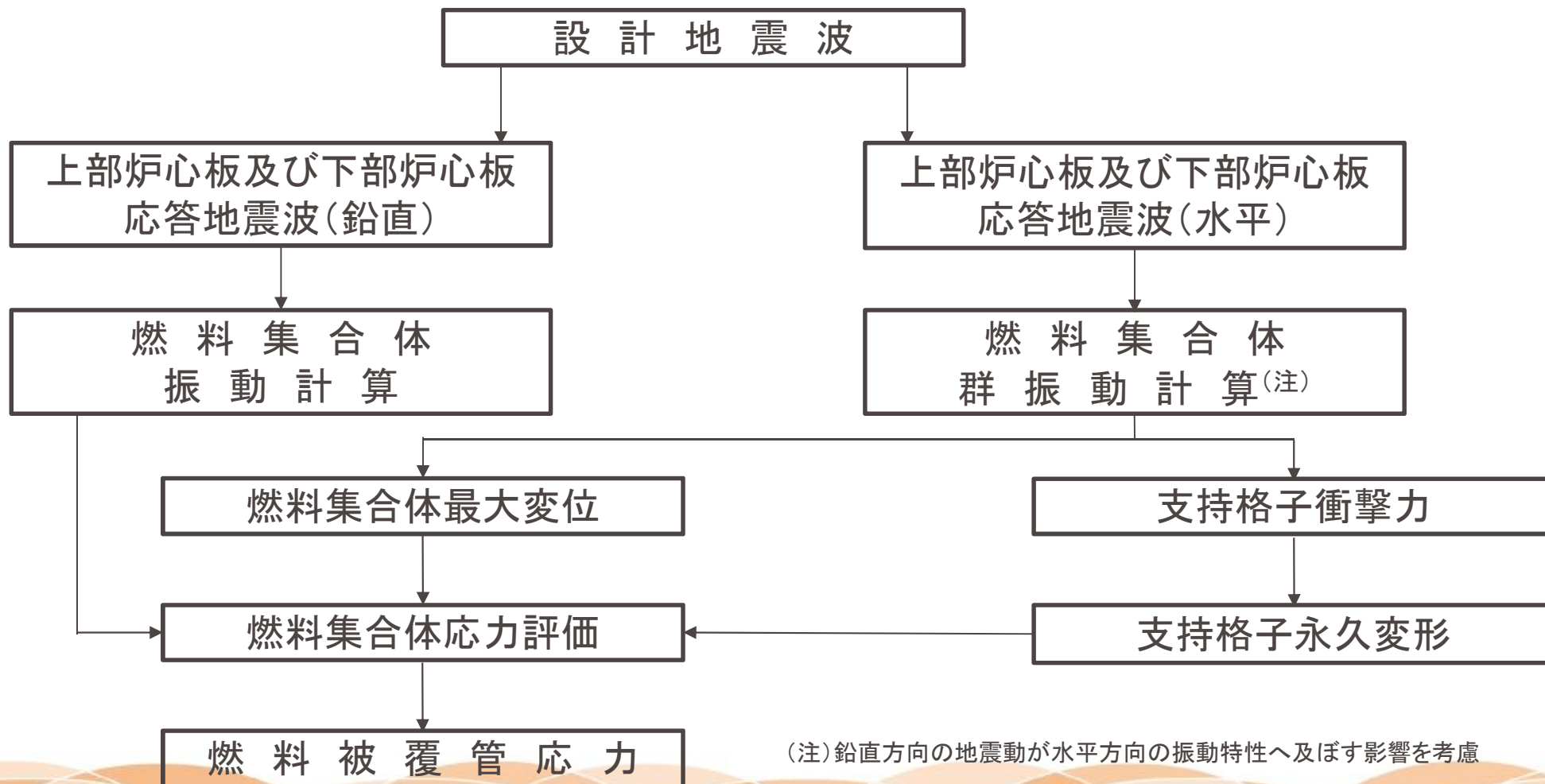
(高浜発電所安全審査資料「高浜発電所1号及び2号炉ステップ2燃料の機械設計
 について(補足説明資料1) 7. ステップ2燃料の被覆管応力評価について」平成21年7月29日)



<既認可の地震時の燃料被覆管の応力評価方法>

既認可の工事計画認可申請書 燃料集合体の耐震計算書に記載の地震時の燃料被覆管の応力評価方法について示す。
以下、三菱原子燃料製燃料の例について示す。

1. 燃料被覆管の応力評価フローは以下のとおり。



第1図 燃料被覆管の応力評価フロー

2. 地震応答解析

地震による燃料集合体の変形、支持格子の衝撃力及び変形を求めるために、基準地震動 S_s に対する水平方向及び鉛直方向の地震応答解析を時刻歴法にて実施する。

- ・計算に用いる寸法は、公称値を使用する。
- ・群振動解析に当たって、最新知見の反映として、照射による耐震性への影響の程度を確認するため、運転期間中における照射の影響を取り込んで評価を行う。照射による影響の程度の確認においては、以下の影響を考慮する。
 - ①支持格子ばね力緩和
 - ②燃料被覆管及び制御棒案内シンプルの腐食
- ・燃料集合体の耐震解析は上部炉心板及び下部炉心板の地震波に対し、支持格子の衝突を考慮した時刻歴群振動解析により行う。
- ・炉内構造物の地震応答解析により得られる上部炉心板及び下部炉心板の時刻歴応答波を入力地震波とする。

(1) 水平方向の解析方法

○解析モデル

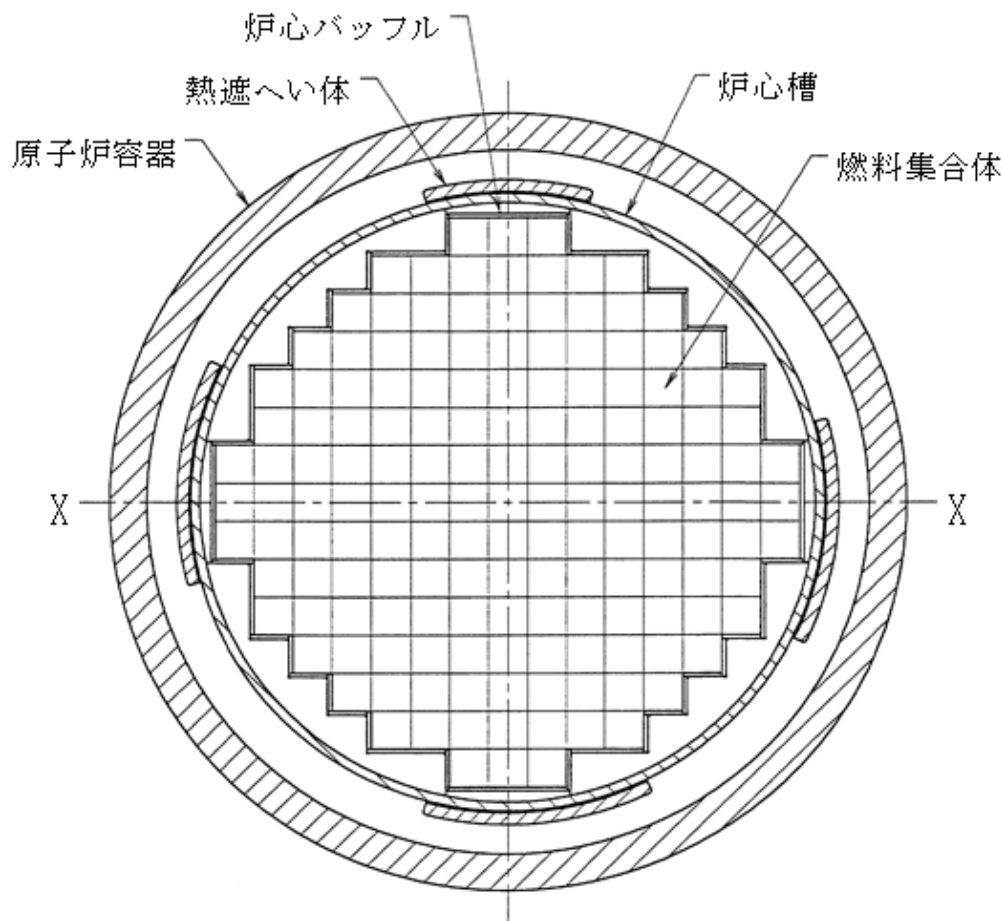
「原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1987)」に基づき、第2図に示すように、炉心内の燃料集合体の最大体数15体の一列(X-X軸上)について、この燃料集合体群が地震によりその列方向に加振される場合を扱うことにする。

解析モデルは、第3図に示すように燃料集合体を模擬した15列のはりが間隙 δ で配列されたモデルとする。

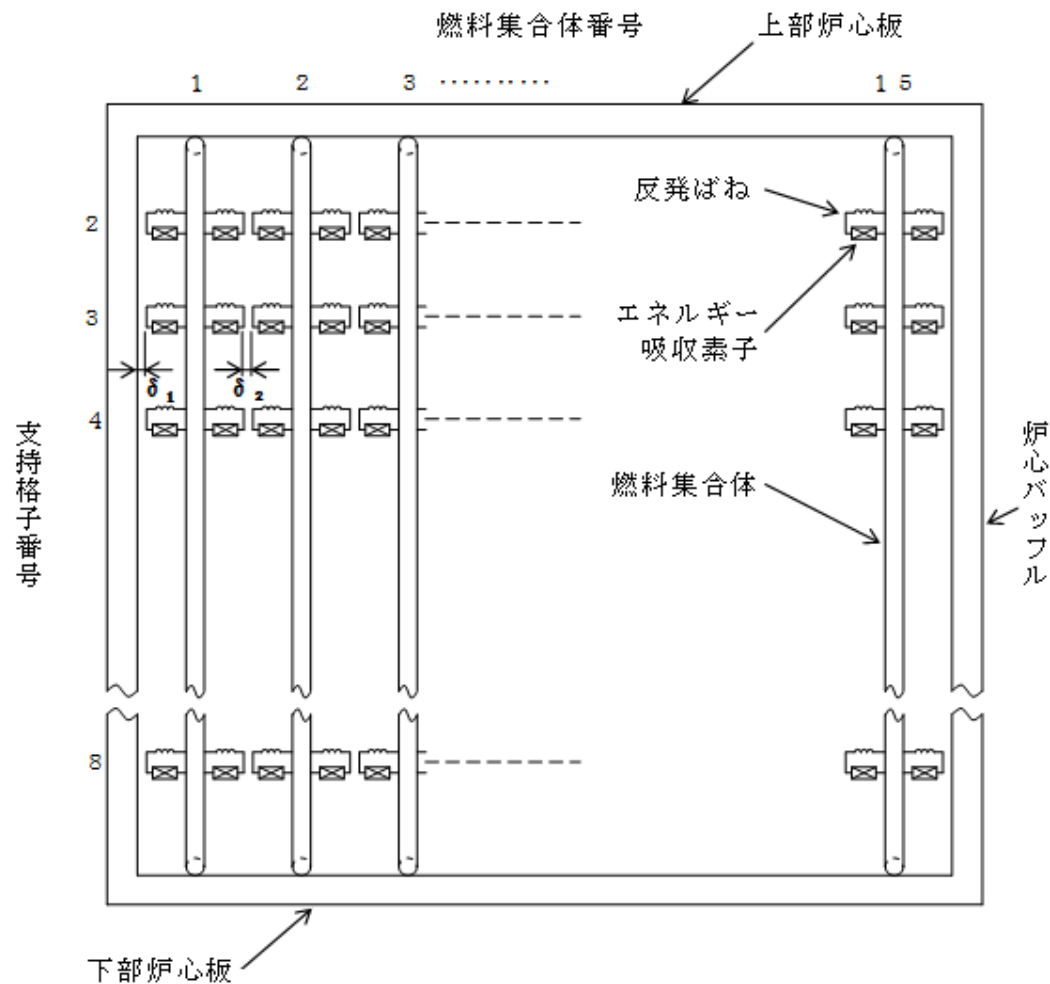
炉心バツフルと上部炉心板及び下部炉心板は一列の燃料集合体群と冷却水を格納する1つの剛なる閉じた容器(水槽)とみなし、また、燃料集合体の上端及び下端は容器にピン支持されているとする。衝突は支持格子の位置で発生することから、この位置に解析上、反発ばね及びエネルギー吸収素子を考慮する。

支持格子の数は実際には9個あるが、上端及び下端の2個はそれぞれ上部ノズル及び下部ノズルに近い位置にあり、衝突を生じ得ないと考えられるので省略する。

炉心内の水は付加質量として燃料集合体に加えており、また、燃料集合体の振動特性(固有振動数、減衰定数)で考慮する。



第2図 炉心断面



第3図 群振動解析モデル

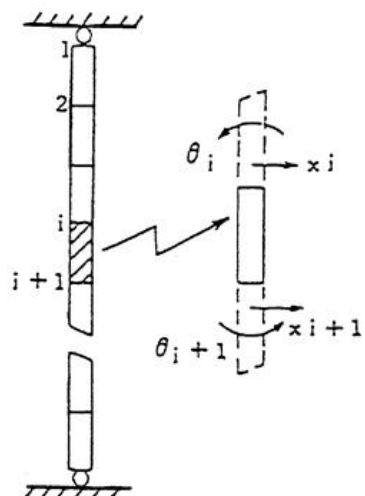
○解析方法

燃料集合体は上部支点及び下部支点(上部炉心板及び下部炉心板)から入力された地震波により加振され、燃料集合体の振幅が間隔 δ より大となると、まず、炉心バップルと燃料集合体の間に衝突が生じ、以後は複雑な衝撃を伴う振動性状を示す。

従って、応答解析は、衝突を考慮した時刻歴法により行う。

振動方程式を以下に示す。

$$M \cdot \ddot{X} + C \cdot \dot{X} + K \cdot X = -M \cdot \ddot{X}_0 + F - F_P$$



$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \theta_1 \\ X_2 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ X_n \\ \theta_n \end{bmatrix}$$

$$\ddot{X}_0 = \begin{bmatrix} \ddot{X}_{01} \\ \ddot{\theta}_0 \\ \ddot{X}_{02} \\ \ddot{\theta}_0 \\ \vdots \\ \ddot{X}_{0n} \\ \ddot{\theta}_0 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} f_1 \\ 0 \\ f_2 \\ 0 \\ \vdots \\ f_n \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$F_P = \begin{bmatrix} f_{px1} \\ f_{p\theta 1} \\ f_{px2} \\ f_{p\theta 2} \\ \vdots \\ f_{pxn} \\ f_{p\theta n} \end{bmatrix}$$

- X_0 : 容器の絶対変位
- X_{0i} : 容器のi節点相当高さ位置における絶対変位(並進成分)
- θ_0 : 容器の絶対変位(回転成分)
- X_i : i節点の容器に対する相対変位(並進成分)
- θ_i : i節点の容器に対する相対変位(回転成分)
- f_i : i節点の衝突力又は支持反力
- f_{pxi} : i節点の軸力による補正荷重(並進成分)
- $f_{p\theta i}$: i節点の軸力による補正荷重(回転成分)
- M : 質量マトリックス
- K : 剛性マトリックス
- C : 粘性マトリックス

上記方程式を時刻歴解析することにより各節点の変位及び衝撃力を時間の関数として求める。

解析に使用するコードはA型燃料集合体については燃料集合体群振動解析コード「FINDS Ver.4」である。

(2)に示す鉛直方向応答解析コードVERSALで求められた時刻歴軸荷重を取り込んで解析を行う。

地震時の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

(2)鉛直方向の解析方法

○解析モデル及び解析方法

第4図に燃料集合体の解析モデルを示す。主要部材である燃料棒と制御棒案内シンプル(炉内計装用案内シンプル、スリーブ等を含む)を各々1本の1次元ばね要素で扱い、それらの質量を支持格子位置にて集中質量で与えている。

支持格子位置では、燃料棒と制御棒案内シンプル間をばね-摩擦要素で結合し、すべりを考慮できるようにしている。

下部ノズルの質点の下側には下部ノズル剛性を模擬したばね要素を配している。

一方、上部ノズルの質点上方のばね要素は、上部ノズル押えばねを表わすものである。

上記の解析モデルを用いて、次の振動方程式を時刻歴により解く。

$$M \cdot \ddot{X} + C \cdot \dot{X} + K \cdot X = M \cdot \ddot{X}_0 + F_L$$

ここで、

M : 質量マトリックス

K : 剛性マトリックス

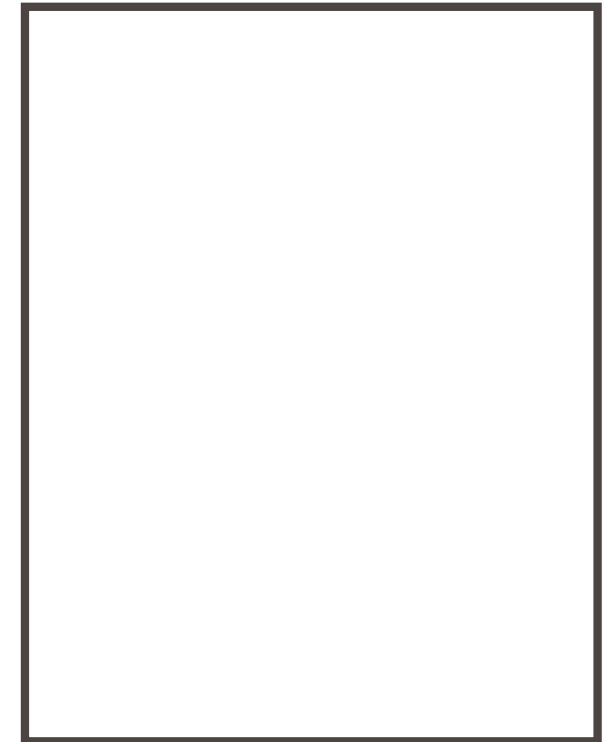
C : 粘性マトリックス

\ddot{X}_0 : 炉心板の応答加速度

F_L : 浮力、揚力、上部ノズル押えばね力

ここで求まる各要素の時刻歴軸荷重については、(1)に示す燃料集合体群振動解析コードFINDSの軸荷重成分としても用いられる。

解析に使用するコードは、鉛直方向応答解析コード「VERSAL Ver.1」である。



第4図 燃料集合体応答解析モデル(鉛直方向)

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

3. 地震による燃料被覆管応力解析

燃料被覆管には、地震時において、燃料集合体の変形に応じた応力が発生するので、応力解析を行う。

応力解析においては、地震応答解析で得られる各支持格子の最大変位における燃料集合体の振動モードを強制変位として、第5図の水平方向応力解析モデルに与えることにより水平地震による応力を求め、さらに、鉛直地震による応力を第6図の鉛直方向応力解析モデルにより求め、足し合わせ、地震時応力とする。

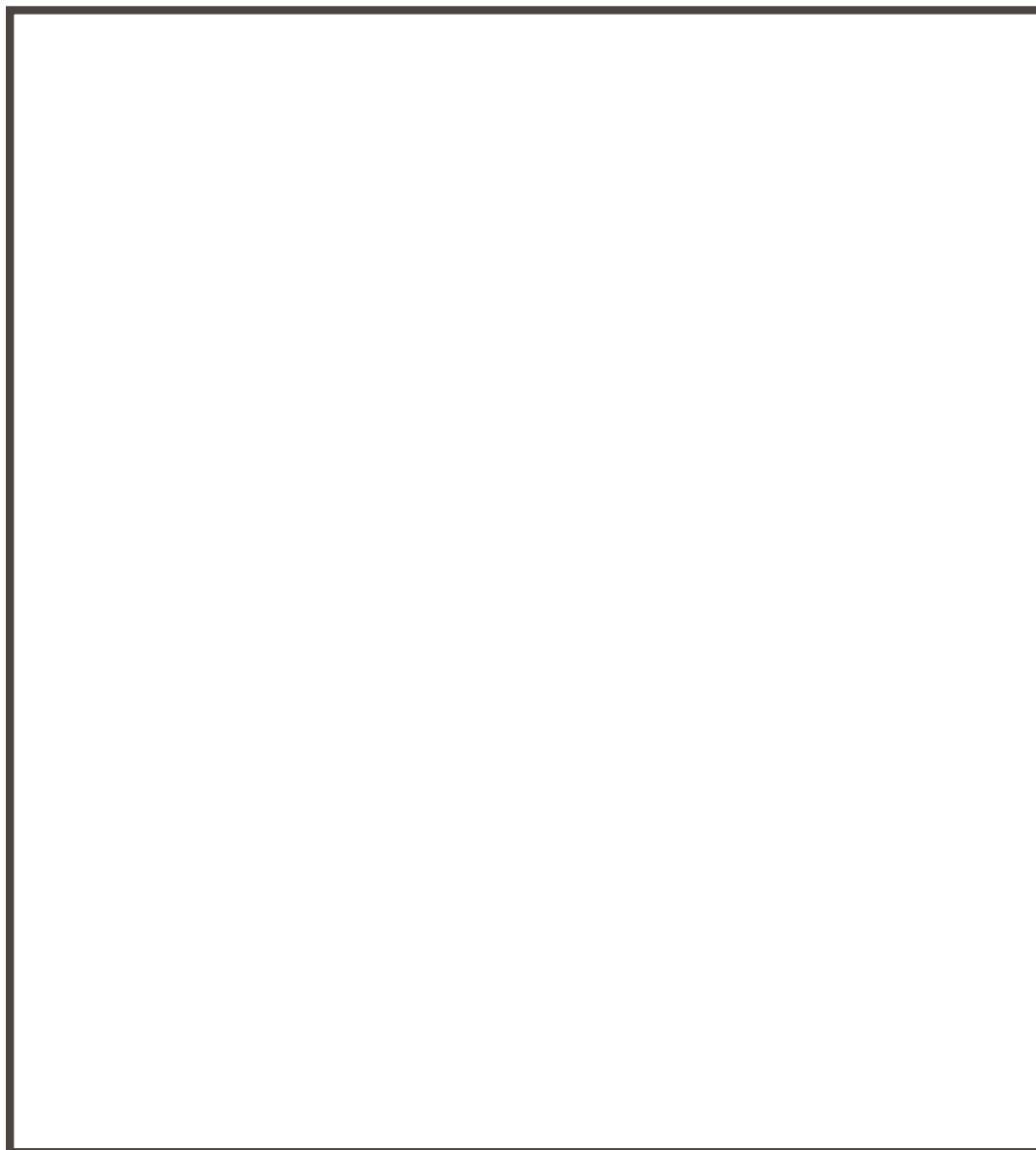
なお、解析に使用するコードは「ANSYS Ver.11.0」である。

(1) 水平方向の解析モデル

水平方向応力解析モデルを第5図に示す。燃料棒、制御棒案内シンブル、スリーブ、インサート、上部ノズル、下部ノズル及び支持格子は、はり要素で、また支持格子ばね及びディンプルは、ばね-摩擦要素にて模擬している。ここで上部ノズル及び下部ノズルは固定、ノズルと制御棒案内シンブル及び制御棒案内シンブルと支持格子は剛結合、燃料棒と支持格子は弾性結合、ノズル及び支持格子は変形に対して剛とする。燃料棒及び制御棒案内シンブルについては、複数本あるのでそれぞれ等価な剛性を持つ2本のはりとして扱う。

(2) 鉛直方向の解析モデル

鉛直方向応力解析モデルを第6図に示す。上部ノズル、下部ノズル、制御棒案内シンブル及び燃料棒等は、はり要素で、支持格子ばね及びディンプルは、ばね-摩擦要素で模擬している。



第5図 燃料棒の水平方向応力解析モデル



第6図 燃料棒の鉛直方向応力解析モデル

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

地震時の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

<既許可の燃料被覆管累積疲労評価方法>

燃料被覆管疲労評価は、ASME Section IIIの疲労評価手順(最大せん断応力説による疲労損傷評価)に基づいて実施する。以下、許可を受けた発電用原子炉設置変更許可申請書の安全審査において確認されている評価手順を示す。

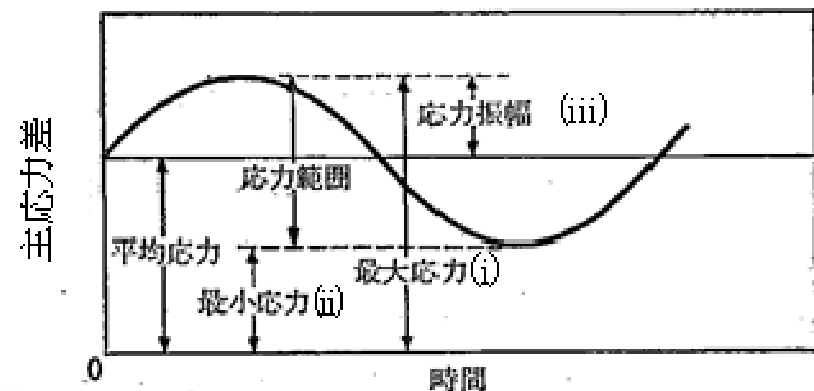
(1) 応力繰り返しサイクル条件の設定

燃料寿命中に想定される3つの過渡条件(起動・停止、負荷追従、異常な過渡変化)について、それぞれの応力繰り返しサイクル数を設定する。なお、認可を受けている燃料体設計認可申請書に記載の条件と同じである。

(2) 応力変動幅の算出

想定している3つの過渡条件毎に以下のとおり実施する。

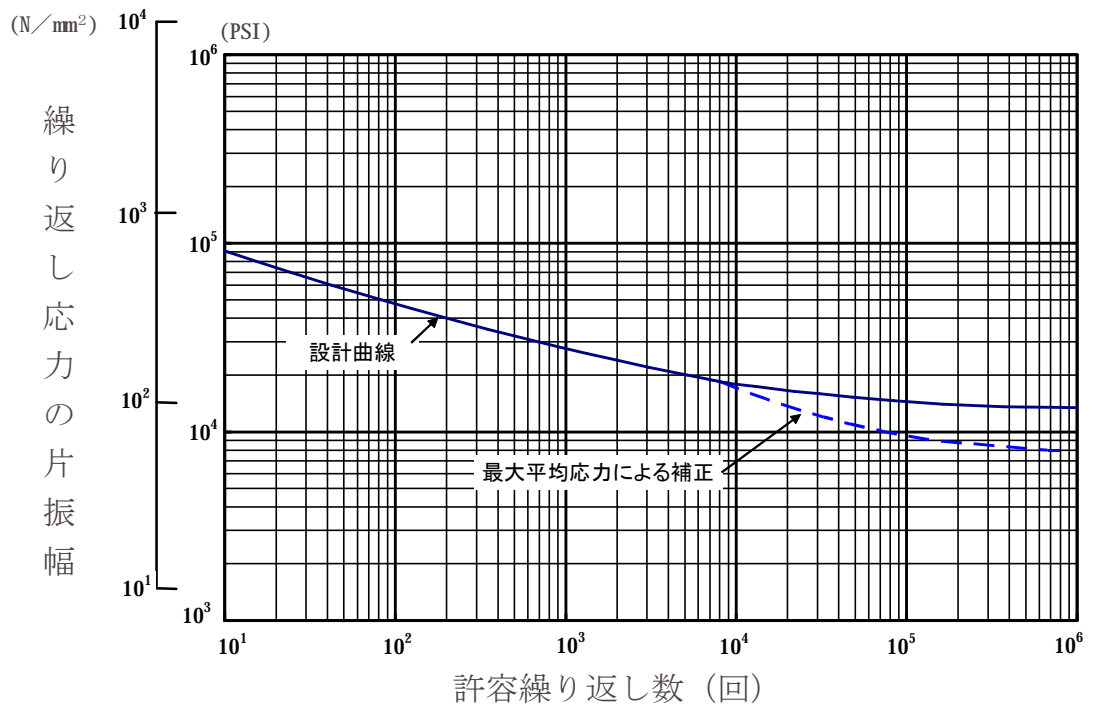
- a. 燃料被覆管に発生する主応力成分($\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$)を温態停止時及び過渡条件時(冷態停止時、100%出力時(負荷追従)、異常な過渡変化時)について算出する。
- b. ASME Section IIIの考え方に基づいて、温態停止時及び過渡条件時について、主応力差を求める。
- c. 温態停止時の主応力差と過渡条件時の主応力差との幅を、疲労評価における繰り返し応力の全振幅と考えて、大きい方の主応力差を最大値(下図の(i))、小さい方の主応力差を最小値(下図の(ii))として、(最大値－最小値)／2より片振幅 S_{alt} (下図の(iii))を算出する。
- d. 燃料棒の寿命中の評価期間に対して上記の計算を行う。



繰り返し応力(主応力差)の時間変化(概念図)

(3) 許容繰り返し回数の算出

(2)にて算出した各過渡条件における S_{alt} のうち、それぞれ最大となる $Max S_{alt}$ について、対応する許容繰り返しサイクル数 N を、Langer and O' Donnellによるジルカロイ材の設計疲労曲線に基づき算出する。



Langer and O' Donnellの設計疲労曲線

(4) 累積疲労損傷係数の算出

評価期間毎に(3)にて求めた最大応力変動幅 $Max S_{alt}$ に対応する許容繰り返しサイクル数 N と、各過渡条件にて想定される応力繰り返しサイクル数 n の比、すなわち疲労損傷係数 n/N を求め、これらを寿命全般に渡って足し合わせ、累積疲労損傷係数を算出する。

(高浜1号炉発電用原子炉設置変更許可申請書添付書類ハ3.7.7 参考文献

(5)「三菱PWR高燃焼度化ステップ2燃料の機械設計MNF-1001 三菱原子燃料、平成21年

(12)「原燃工製PWRステップ2燃料の機械設計について(15×15型・3ループ炉)NFK-8127改2 原子燃料工業、平成21年)」