

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉 発電用原子炉設置変更許可申請

TEPCO

【地震時における燃料被覆管の閉じ込め機能の維持】

2019年2月21日
東京電ホールディングス株式会社

1. はじめに
2. 基本方針
 - 2.1 要求事項の整理
 - 2.2 追加要求事項への適合性に係る設計方針
3. 追加要求事項に係る評価項目の選定
4. 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針
5. 燃料被覆管応力評価条件
6. 評価手法
 - 6.1 応力評価手法
 - 6.2 疲労評価手法
7. 評価結果

1. はじめに

- 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。[原子炉設置(変更)許可申請書添付八及び燃料体設計認可申請書添付書類（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（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的位置、構造及び設備の基準に関する規則」の改正が決定、2017年9月11日に施行され、地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持についての要求が追加された。
- 本資料では、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適合性の見通しについて説明する。なお、詳細評価については工事計画認可申請で説明する。

2. 基本方針

2.1 要求事項の整理

□ 以下に改正された設置許可基準規則第4条並びに同規則の解釈を示す。

設置許可基準規則 第4条(地震による損傷の防止)	設置許可基準規則の解釈 第4条(地震による損傷の防止)	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. 基本方針

2.1 要求事項の整理

- 本規則改正に伴う要求事項として、「**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**」(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Ssの地震が発生した場合でも、燃料被覆管の閉じ込め機能が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って、**その判断基準として、基準地震動Ss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Sd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。』

2.2 追加要求事項への適合性に係る設計方針

- 規則へ適合するための設計方針として、発電用原子炉設置変更許可申請書に以下の通り追記。

- 燃料被覆管については、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設計とする。
- また、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設計とする。

3. 追加要求事項に係る評価項目の選定

□ 構造強度設計での考慮事項

BWR燃料集合体は「沸騰水型原子炉に用いられる8行8列型の燃料集合体について(昭和49年12月25日原子炉安全専門審査会)」に従い、構造強度設計で以下を考慮している。

- (1) 燃料被覆管にかかる応力は、設計応力強さ限界を超えないこと。
- (2) 累積疲労サイクル数は、設計疲労寿命を超えないこと。
- (3) 使用中に燃料棒の変形等による過度の寸法変化を生じないこと。

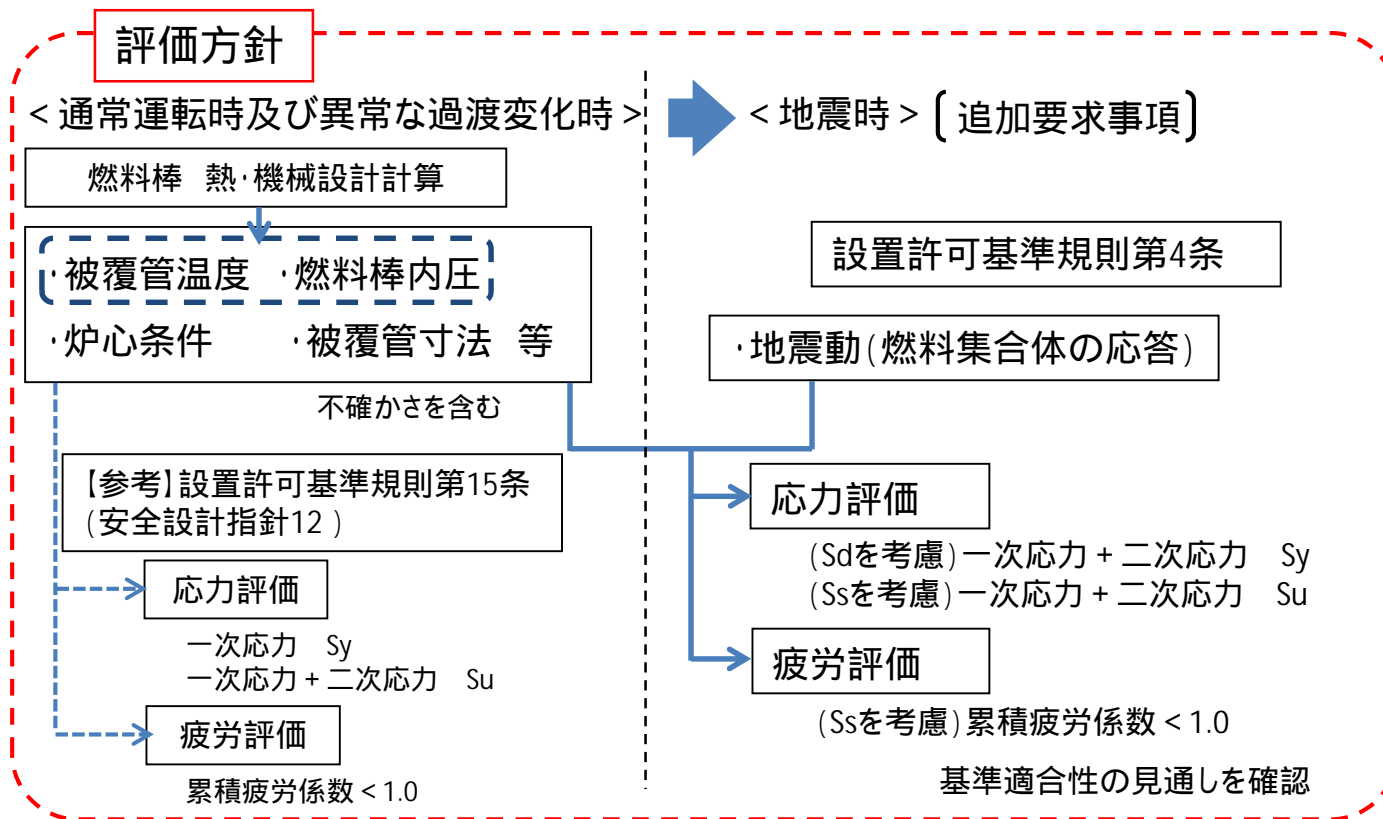
□ 地震動の影響を考慮すべき評価項目

地震動により燃料被覆管に外力として応力が作用し、また、地震動が継続する間繰返し応力として作用するため、上記の内、(1)及び(2)について地震影響を考慮した評価を行う。

(3)は燃料集合体に異常な寸法形状変化を生じさせないため、燃料被覆管製造時における残留応力除去、上下部タイプレート及びスペーサによる燃料棒の保持等、設計及び製造上考慮されている項目であり、地震時の被覆管の閉じ込め機能には影響しないことから評価対象としない。

4. 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針

- 通常運転時及び異常な過渡変化時に燃料被覆管にかかる荷重に加え、地震時の荷重を考慮。燃料棒熱・機械設計解析コードから得られる被覆管温度や燃料棒内圧のほか、被覆管寸法や冷却材圧力等の炉心条件、地震動に対する燃料集合体の応答加速度、応答変位を入力値とした応力評価及び疲労評価を行う方針とする。



- 代表として9x9燃料(A型)の評価結果を示す。
- 地震動として、平成29年12月27日柏崎刈羽原子力発電所の発電用原子炉の設置変更(6号及び7号原子炉施設の変更)許可取得時の基準地震動を用いる。

5. 燃料被覆管応力評価条件

□ 荷重の組合せと許容応力

「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)に基づき応力評価基準を以下のように設定。

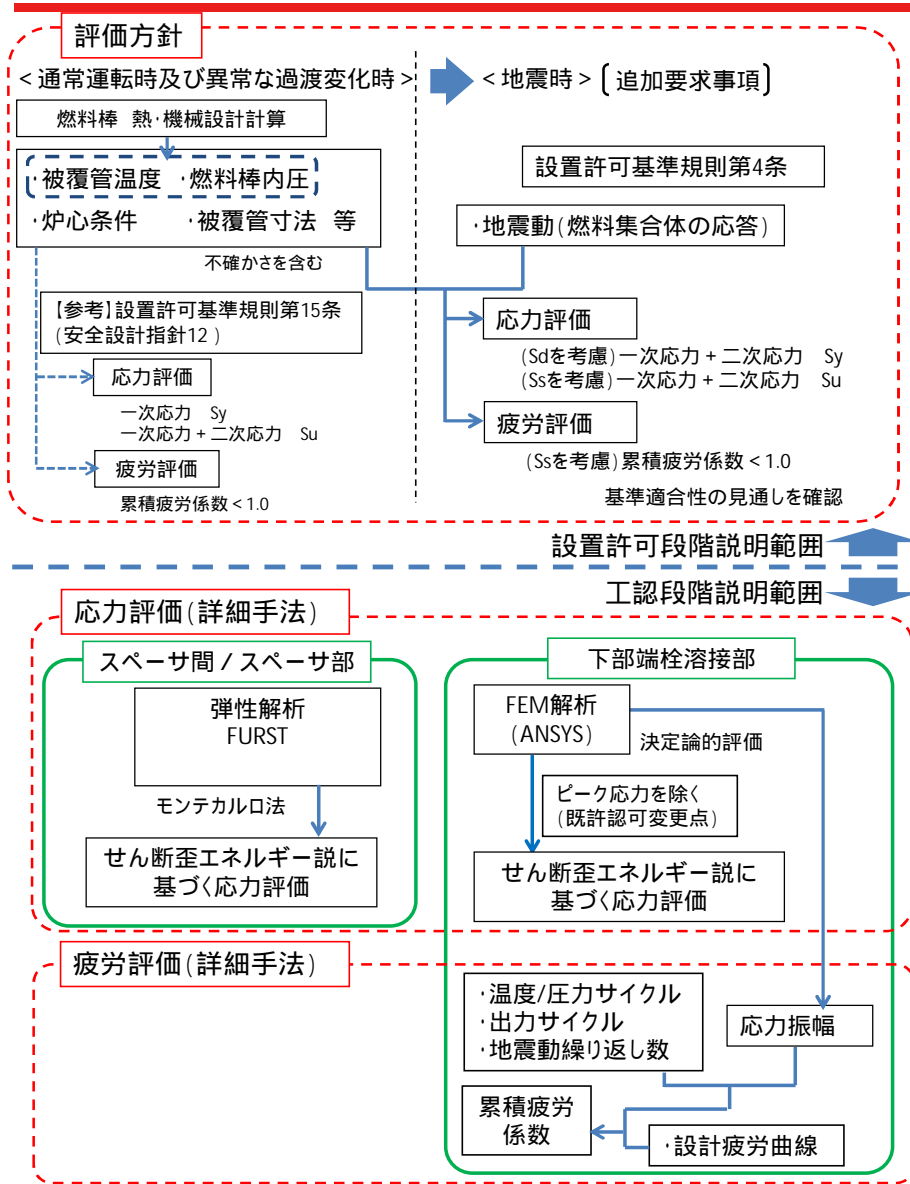
運転状態	要求機能	考慮すべき応力と地震動	許容応力
地震時	閉じ込め機能の維持	1 次応力 (Sd を考慮) +2 次応力 (Sd を考慮)	降伏応力 (Sy)
		1 次応力 (Ss を考慮) +2 次応力 (Ss を考慮)	引張強さ (Su)

ただし本評価においては、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、Ssによる発生す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Sdに対する要求も満足することを示す。

□ (参考) 従来の応力評価基準 (BWR)

運転状態	要求機能	考慮すべき応力と地震動	許容応力
通常運転時 及び過渡時	閉じ込め機能の維持	1 次応力	降伏応力 (Sy)
		1 次応力+2 次応力	設計引張強さ (Su)
地震時	崩壊熱除去可能な形状の維持	1 次応力	0.7Su

6. 評価方法



- 設置変更許可では、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適合性の見直しについて説明。
- 次のページより、基準適合性を見直しを示すため、評価方法並びに評価結果についてまとめる。
- 評価手法の詳細は工事計画認可申請で説明する。

6.1 応力評価手法

□ 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。

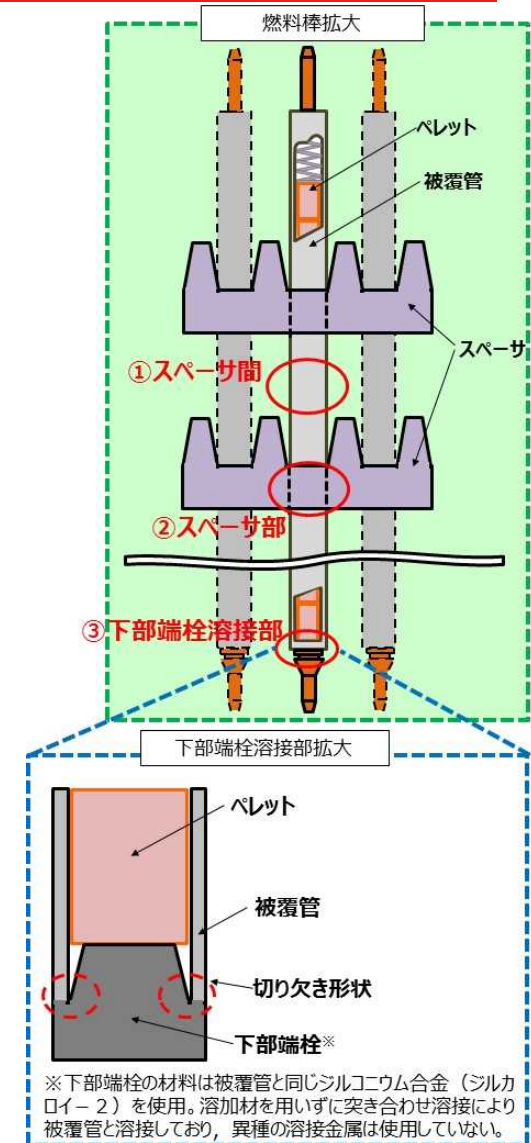
□ スペーサ間・スペーサ部の応力評価手法：

- 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すべての応力を三軸方向(半径方向、円周方向及び軸方向)について評価し、せん断歪エネルギー説に基づき被覆管の相当応力を求め設計比を評価。
- 応力設計比は、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、ミナマル値と、製造実績、実機運転データ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%確率上限値を求める。

□ 下部端栓部の応力評価手法：

- 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%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。

TEPCO



評価対象部位（イメージ）

6.2 疲労評価手法

□ 評価対象部位：

- 切り欠き形状を有し応力集中が発生する端栓溶接部を評価部位とする。

□ 疲労評価手法：

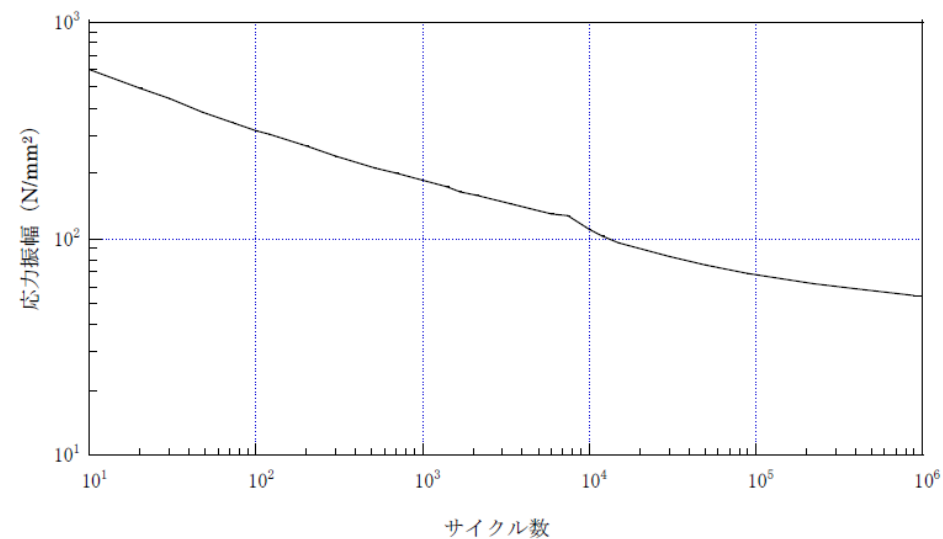
- 疲労評価は累積損傷の法則 (Minerの仮説) 及びLanger-O' Donnellの考え方に基づく。
- 温度・圧力及び出力の予測サイクルによる累積疲労係数に加え、地震動による繰り返し荷重を考慮した累積疲労係数が1.0未満であることを確認。
- 応力振幅は前述の有限要素法により、切り欠き部の応力集中によるピーク応力を含めて評価。

□ 地震荷重の繰り返し数：

- 基準地震動Ss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り返し回数をふまえ、200回と設定する。

*) 参考文献

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*)

7. 評価結果

□ 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0.76となり、1.0より小さいことを確認した。

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Ssに対して降伏応力Sy	圧力過渡	寿命初期	0.76	0.61	0.69
		寿命中期	0.28	0.26	0.33
		寿命末期	0.24	0.23	0.25
	出力過渡	寿命初期	0.73	0.52	-
		寿命中期	0.30	0.28	-
		寿命末期	0.25	0.24	-
基準地震動Ssに対して引張強さSu	圧力過渡	寿命初期	0.43	0.33	0.38
		寿命中期	0.26	0.24	0.29
		寿命末期	0.22	0.22	0.24
	出力過渡	寿命初期	0.42	0.29	-
		寿命中期	0.27	0.25	-
		寿命末期	0.23	0.21	-

下部端栓溶接部の評価では、下部端栓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。

7. 評価結果

□ 疲労評価結果

基準地震動Ss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0.00043となった。よって、全寿命を通じた累積疲労係数(約0.003^{*})に、地震動による疲労係数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。

地震動	評価点	応力振幅 (N/mm ²)	許容 サイクル数	地震荷重の 繰り返し数	疲労係数の 増分
基準地震動 Ss	寿命初期	58	4.6×10^5	200	0.00043
	寿命中期	58	4.6×10^5	200	0.00043
	寿命末期	58	4.6×10^5	200	0.00043

^{*})引用：柏崎刈羽原子力発電所第6号機及び第7号機「燃料体設計認可申請書」(GNF燃設認第42-A号,平成24年9月7日認可)

< 参考 >

評価する応力の種類 (1/4)

□ 9 x 9 (A型) の例

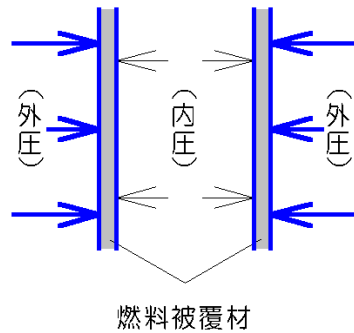
考慮する応力	スペーサ間	スペーサ部	下部端栓 溶接部
(1)内外圧力差に基づく応力			
(2)水力振動に基づく応力			—
(3)楕円度に基づく応力			—
(4)スペーサ(支持格子)の接触力に基づく応力	—		—
(5)半径方向温度差に基づく応力			
(6)円周方向温度差に基づく応力			
(7)膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力			
(8)端栓取付角公差による曲がりに基づく応力	—	—	
(9)スペーサ(支持格子)間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力			
(10)チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力			
(11)鉛直方向地震加速度に基づく応力			

: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)

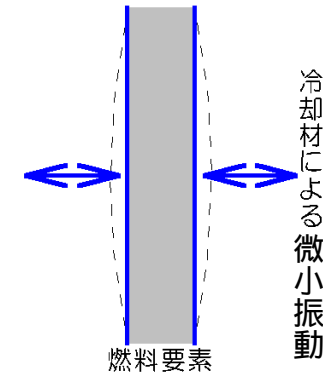
(1)内外圧力差に基づく応力

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。



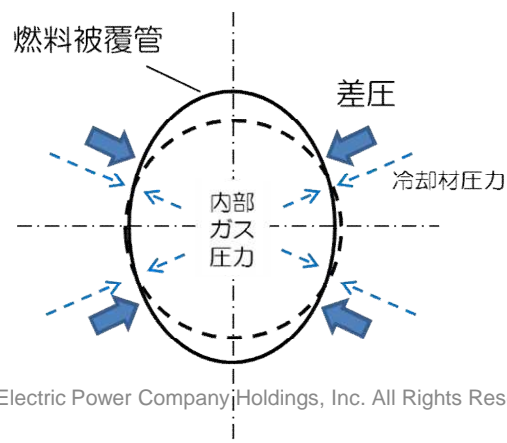
(2)水力振動に基づく応力

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。



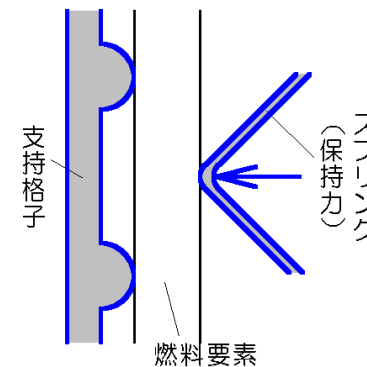
(3)楕円度に基づく応力

燃料被覆管製作時に生じる真円からのわずかな歪みにより、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(支持格子)の接触力に基づく応力

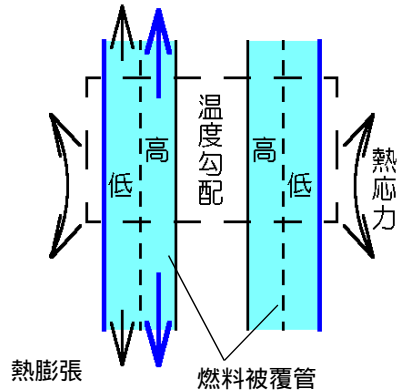
スペーサ(支持格子)のばね押圧により、スペーサ部に発生する応力。



評価する応力の種類 (3/4)

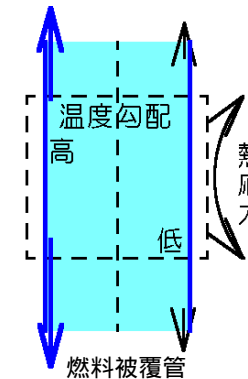
(5)半径方向温度差に基づく応力

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。



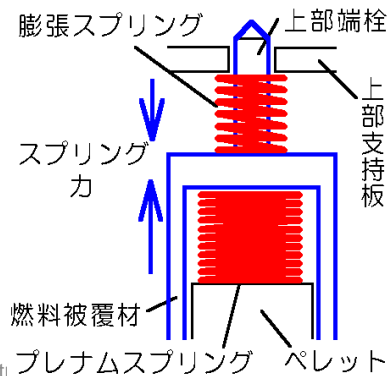
(6)円周方向温度差に基づく応力

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(支持格子)により拘束されることで発生する応力。



(7)膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力

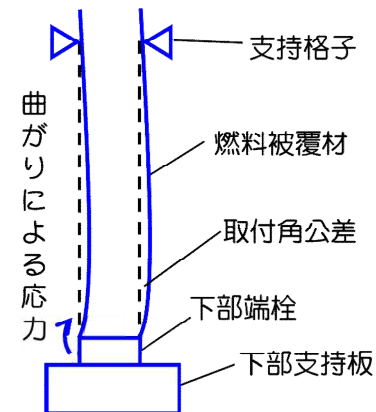
膨張スプリング及びプレナムスプリング(内部スプリング)による発生する応力。燃料自重により応力も含む。



©Tokyo Electric Power Company Limited. All Rights Reserved.

(8)端栓取付角公差による曲がりに基づく応力

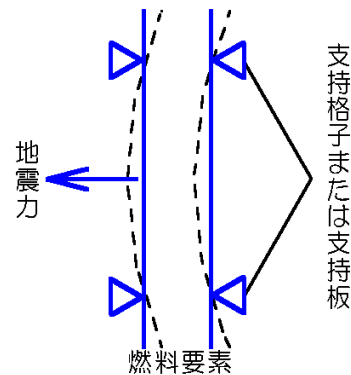
下部端栓の取付角の公差により、下部端栓とスペーサ(支持格子)との間で燃料被覆管に曲げが生じることにより発生する応力。



評価する応力の種類 (4/4)

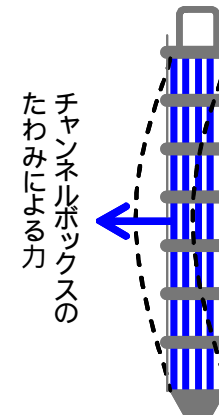
(9) スペース (支持格子) 間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力

水平地震荷重により、スペース (支持格子) 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。



(10) チャンネルボックスの水平地震力による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



(11) 鉛直方向地震加速度に基づく応力

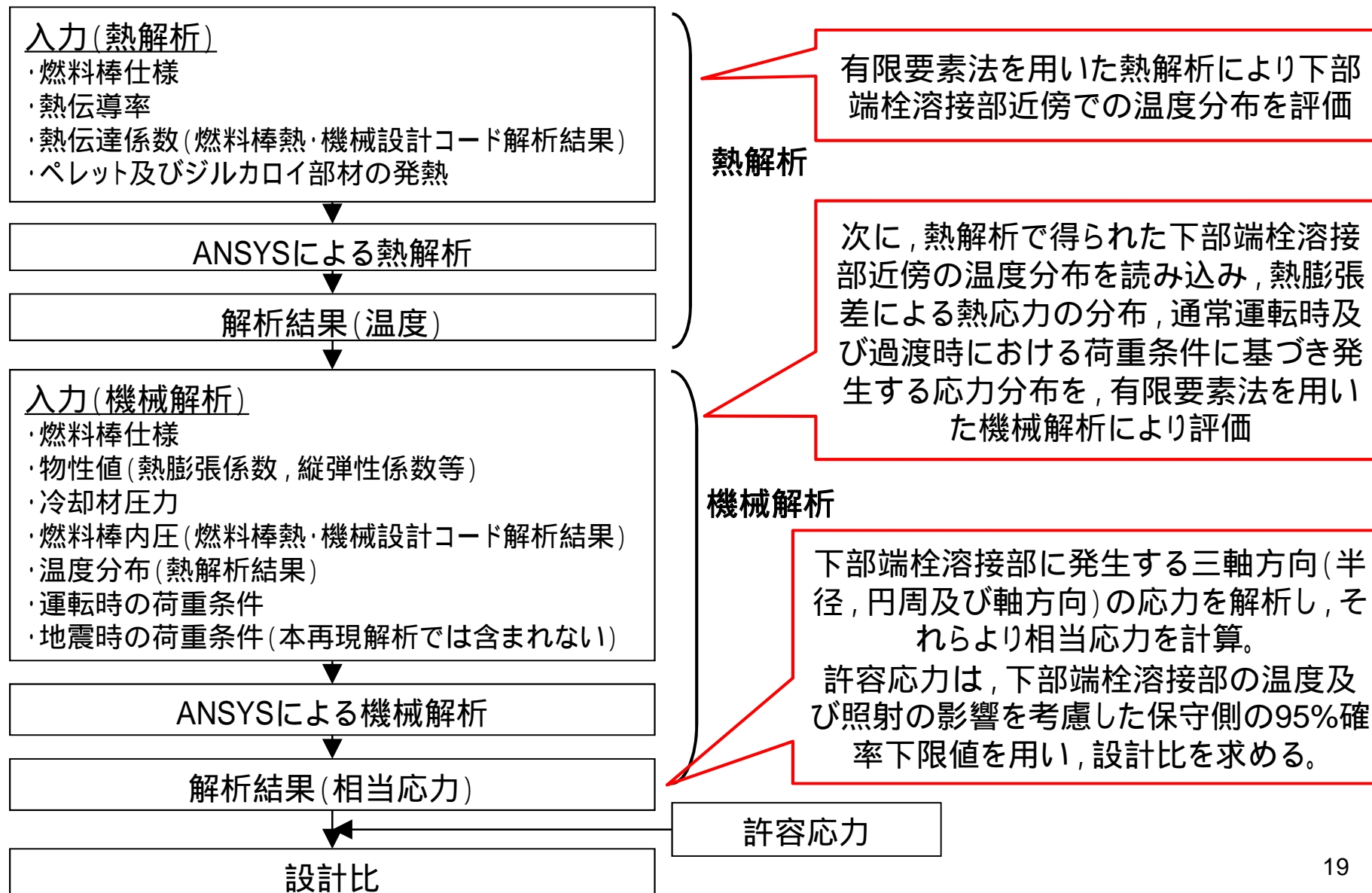
鉛直方向地震加速度により、燃料被覆管に見かけの質量が軸方向に付加されることにより発生する応力。

< 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を適用するにあたり、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) **TEPCO**

< 下部端栓溶接部の応力評価のフロー >



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) **TEPCO**

< 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、従来の下部端栓部応力評価(通常時及び異常な過渡変化時・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すべて同一であり、同等な入力条件を設定可能であることを確認。(添付資料7の添付7-1表参照)

- ・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: 有限要素法解析コードMARC Ver.K4、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
- ・運転状態: 圧力過渡 2
- ・考慮する応力: まとめ資料添付資料7の2. 参照
- ・許容応力: 引張強さ(Su)

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, 7.5年に相当する評価点。

2) 下部端栓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) **TEPCO**

< 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	0.43	0.28
ANSYS	同上	同上	0.40	0.41	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)の下部端栓部応力評価の用途にANSYSを適用できることを確認した。