資料１－１

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ついて

2019年5月9日

日本原子力発電株式会社

指摘事項一覧

No.	審査日	指摘事項	回答日	回答資料	回答内容
1	2019/2/21	損傷限界等に影響を与えないことについて説明すること。	2019/5/9	資料1-2　p6	損傷限界について地震の影響が無いことを記載しました。
2	2019/2/21	評価対象部位として，スペーサ間・スペーサ部・下部端栓溶接部の3箇所を選定したことについて，モデルを含めて説明すること。	2019/5/9	資料1-2 添付資料9	評価部位の選定理由を記載しました。
3	2019/2/21	解析コード（ANSYS，MARC）の違いについて説明すること。	2019/5/9	本資料 参考p21-24 資料1-2 添付資料8	ANSYS及びMARCで比較解析を実施し，同等な解析結果であることを記載しました。

目次

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. 追加要求事項を踏まえた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

＜参考＞

・評価する応力の種類

・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

・燃料集合体の燃料支持金具からの外れ対策

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。[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，平成29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」の改正が決定，平成29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地震動等に対する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(1／2)

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. 基本方針(2／2)

2．1．要求事項の整理

✓本規則改正に伴う要求事項として，「実用発電用原子炉に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，平成29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_d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。

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。

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）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るべき評価項目

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，繰り返し応力として作用するため，上記のうち，（1）及び（2）について地震影響を考慮した評価を行う。

（3）の燃料集合体に異常な寸法形状変化を生じさせないための以下の配慮は地震の影響が問題とならないことから評価対象としない。

・燃料被覆管製造時における残留応力除去

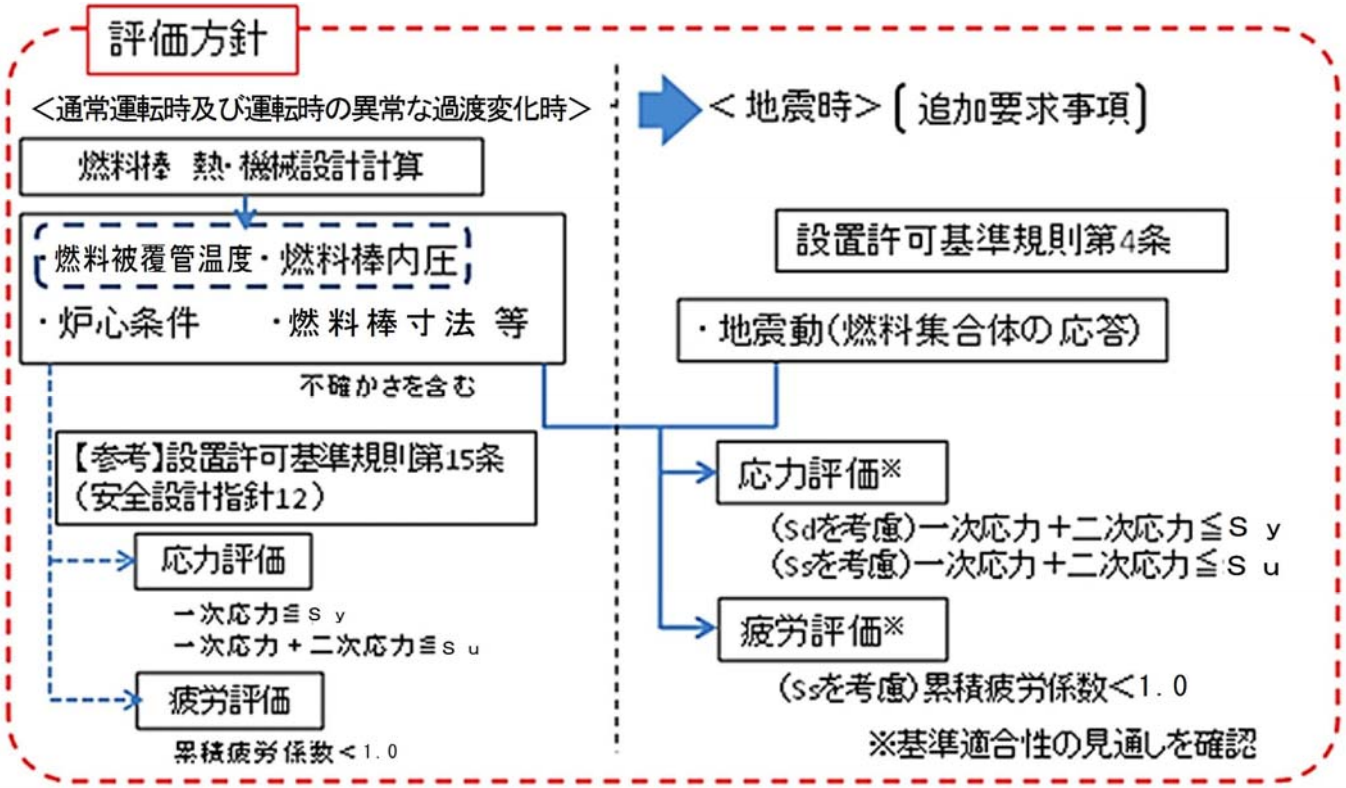
・スペーサによる燃料棒の間隔保持及び燃料棒の軸方向伸縮を拘束しない接触圧保持

・上部タイ・プレートを通して燃料棒の軸方向伸びを自由に逃げられるようにすること

・スペーサ等によるウォータ・ロッドと燃料棒の軸方向伸びの差への処置

4. 地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針

✓通常運転時及び運転時の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燃料被覆管温度や燃料棒内圧のほか，燃料棒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。



・地震動として，東海第二発電所発電用原子炉設置変更許可申請書(平成30年9月26日許可)の基準地震動を用いる。

5. 追加要求事項を踏まえた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（平成29年2月15日，原子力規制庁）」に基づき応力評価基準を以下のように設定。

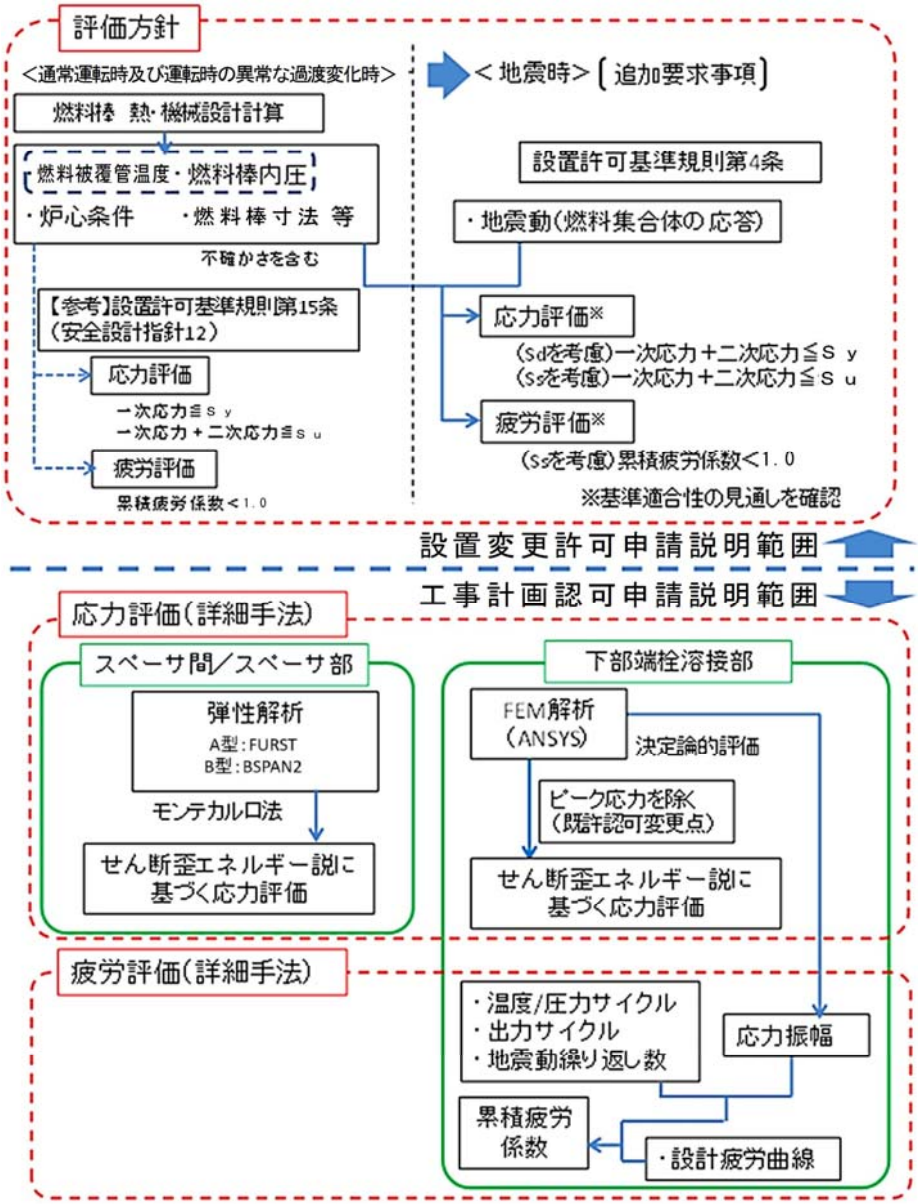
運転状態	要求機能	考慮する応力と地震動※	許容応力
地震時	燃料被覆管の閉じ込め機能	一次応力（S_dを考慮）＋二次応力（S_dを考慮）	降伏応力（Sy）
		一次応力（S_sを考慮）＋二次応力（S_sを考慮）	引張強さ（Su）

※：本評価においては，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，S_sにより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S_d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	考慮する応力と地震動	許容応力
通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時	燃料被覆管の閉じ込め機能	一次応力	降伏応力（Sy）
		一次応力＋二次応力	引張強さ（Su）
地震時	崩壊熱除去可能な形状の維持	一次応力	0.7Su

6. 評価手法



- 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通しについて説明。
- 次のページより，基準適合性の見通しを示すため，評価方法及び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. 評価手法

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:

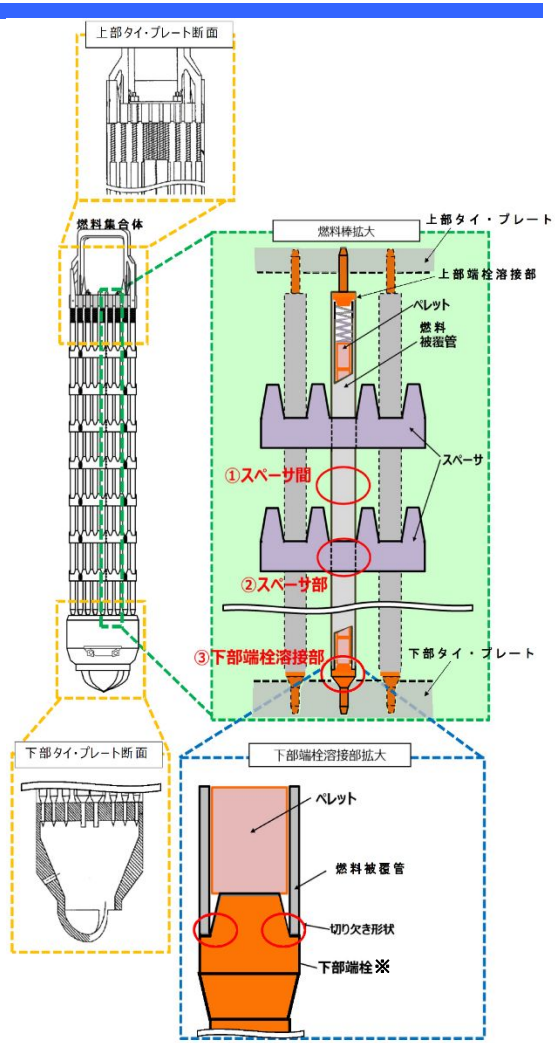
・厚肉円筒式を用いた弾性解析を用いる。応力計算は，燃料被覆管に発生する全ての応力を三軸方向(半径方向，円周方向及び軸方向)について解析し，せん断歪エネルギー説に基づき燃料被覆管の相当応力を求め設計比を評価。

・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%確率上限値を求める。

✓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%確率上下限値を使用し，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。



※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. 評価手法

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下部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※1による疲労に加え，地震動による繰り返し荷重を考慮し，累積疲労係数が1.0未満であることを確認。

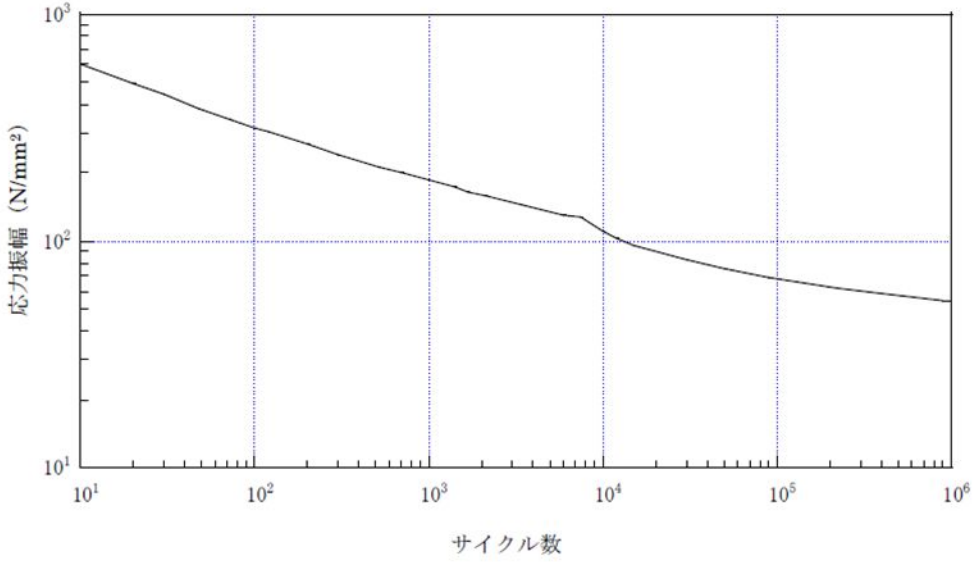
・ 応力振幅は前述の有限要素法により，切り欠き部の応力集中によるピーク応力を含めて評価。

✓地震荷重の繰り返し回数:

・ 基準地震動に対する建屋ー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

7. 評価結果（1／3）

✓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Ssに対して降伏応力Sy	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	－
基準地震動Ssに対して引張強さSu	圧力過渡※1	寿命初期	0.39	0.29	0.34
		寿命中期	0.24	0.22	0.27
		寿命末期	0.20	0.19	0.22
	出力過渡※2	寿命初期	0.38	0.25	－
		寿命中期	0.24	0.23	－
		寿命末期	0.19	0.18	－

※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。

7. 評価結果(2／3)

✓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Ssに対して降伏応力Sy	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	－
基準地震動Ssに対して引張強さSu	圧力過渡※1	寿命初期	0.38	0.41	0.34
		寿命中期	0.28	0.24	0.31
		寿命末期	0.23	0.22	0.30
	出力過渡※2	寿命初期	0.38	0.38	－
		寿命中期	0.29	0.24	－
		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。

7. 評価結果(3／3)

✓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。
- 全寿命を通した累積疲労係数(約0.003※1(９×９燃料(A型))及び約0.006※2 (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 (N／mm^2)	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
基準地震動Ss	寿命初期	38	1.0×10^6	160	0.00016	約0.003※1
	寿命中期	38	1.0×10^6	160	0.00016	約0.003※1
	寿命末期	38	1.0×10^6	160	0.00016	約0.003※1

９×９燃料(B型)

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回数	疲労係数の増分	全寿命を通した累積疲労係数
基準地震動Ss	寿命初期	45	1.0×10^6	160	0.00016	約0.006※2
	寿命中期	45	1.0×10^6	160	0.00016	約0.006※2
	寿命末期	44	1.0×10^6	160	0.00016	約0.006※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)
※2：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)

＜参考＞

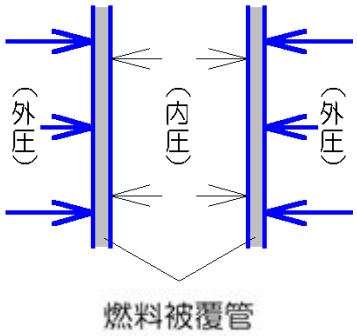
評価する応力の種類（1／4）

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・チャンネルと燃料被覆管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)スペーサ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※3	○	○	○
(11)チャンネル・ボックスの水平地震動によるたわみに基づく応力※3	○	○	○
(12)鉛直方向地震加速度に基づく応力※3	○	○	○

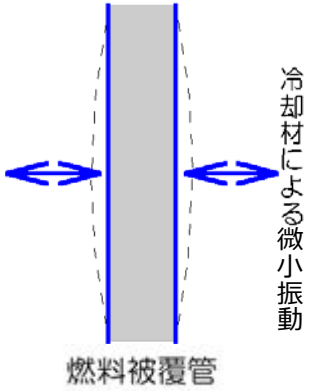
※1：９×９燃料(A型)の場合に考慮
※2：９×９燃料(B型)の場合に考慮
※3：地震動を考慮する場合に新たに加わる応力

評価する応力の種類（2／4）

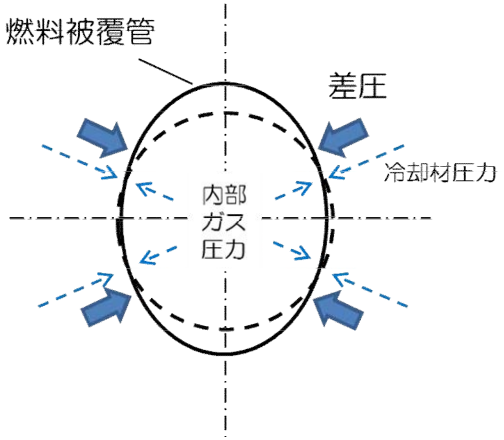
(1)内外圧差に基づく応力
　燃料被覆管内部ガス圧力と冷却材圧力の差圧により発生する応力。



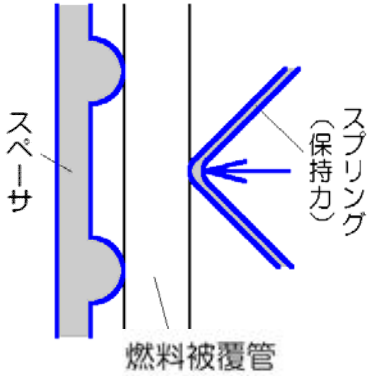
(2)水力振動に基づく応力
　冷却材の流れによって生じる燃料被覆管の微小振動に基づき発生する応力。



(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。

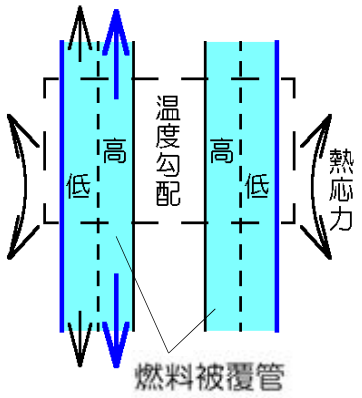


(4)スペーサの接触力に基づく応力
　スペーサのばね押圧により，スペーサ部に発生する応力。

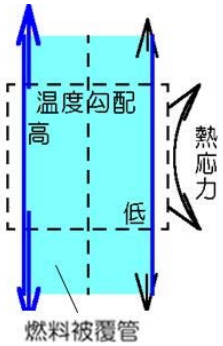


評価する応力の種類（3／4）

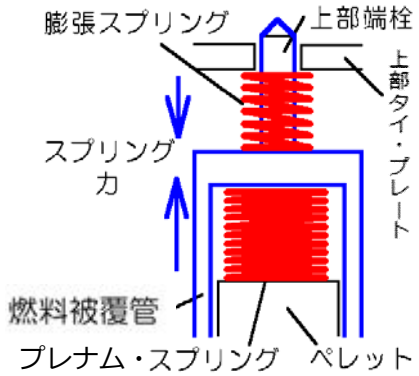
(5)半径方向温度差に基づく応力
　燃料被覆管内外面の温度差に基づく熱膨張差が拘束されることにより発生する応力。



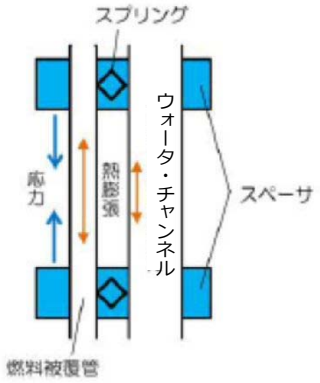
(6)円周方向温度差に基づく応力
　燃料被覆管の円周方向温度分布の不均一による燃料被覆管の湾曲がスペーサにより拘束されることで発生する応力。（９×９燃料（B型）の熱湾曲矯正による応力も同様の応力）



(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。



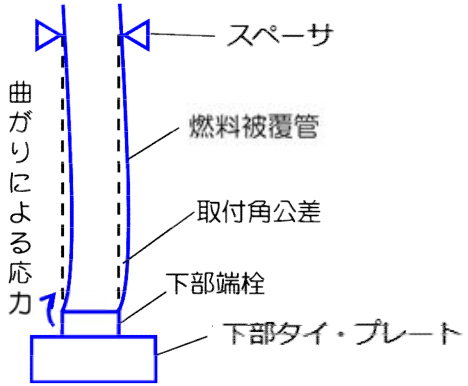
(8)ウォータ・チャンネルと燃料被覆管の熱膨張差による応力
　ウォータ・チャンネルと燃料被覆管の熱膨張差により燃料被覆管の伸びが拘束されることにより発生する応力（９×９燃料（B型））。



評価する応力の種類（4／4）

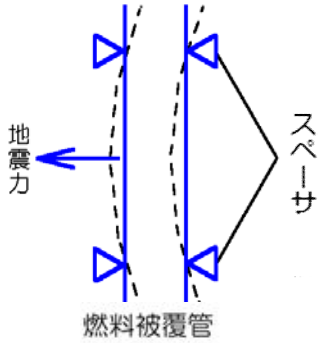
(9)端栓取付角公差による曲がりに基づく応力

　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））



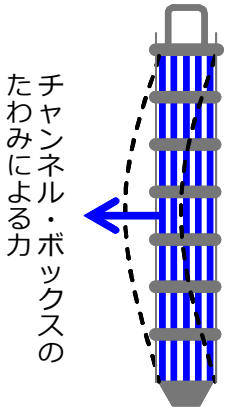
(10)スペーサ間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力

　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。



(11)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。



(12)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)スペーサ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」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。

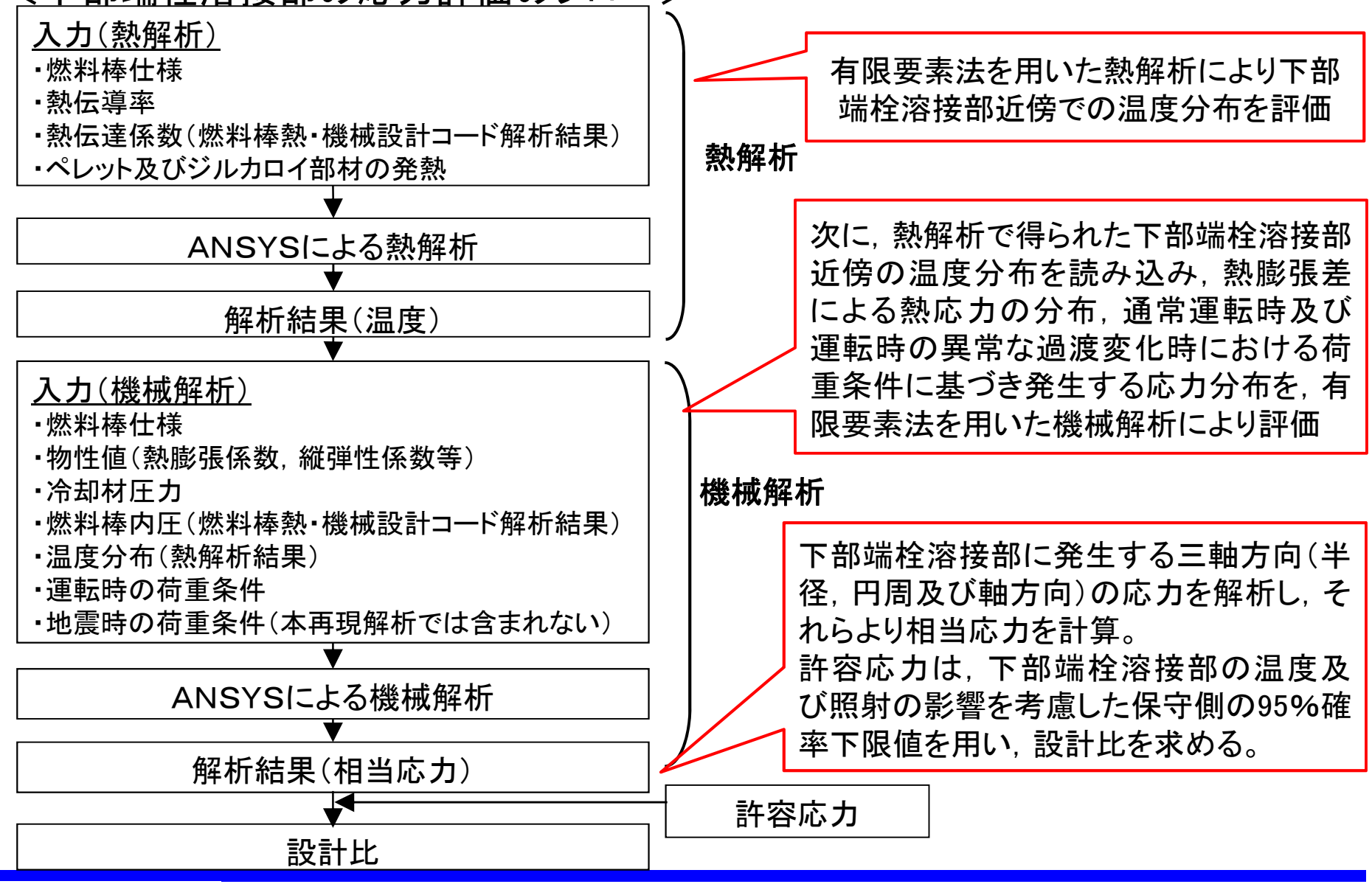
✓いずれのコードも様々な分野の構造解析に広く利用されている汎用の解析コードであり，ANSYSは９×９燃料（B型）の下部端栓溶接部の応力評価や工事計画認可申請書における応力解析等，これまで多くの構造解析に対し使用実績がある。

✓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）

＜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）

＜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。（資料1-2　添付資料8の添付8-1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：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：資料1-2　添付資料8の2.3参照

・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考える 。

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。

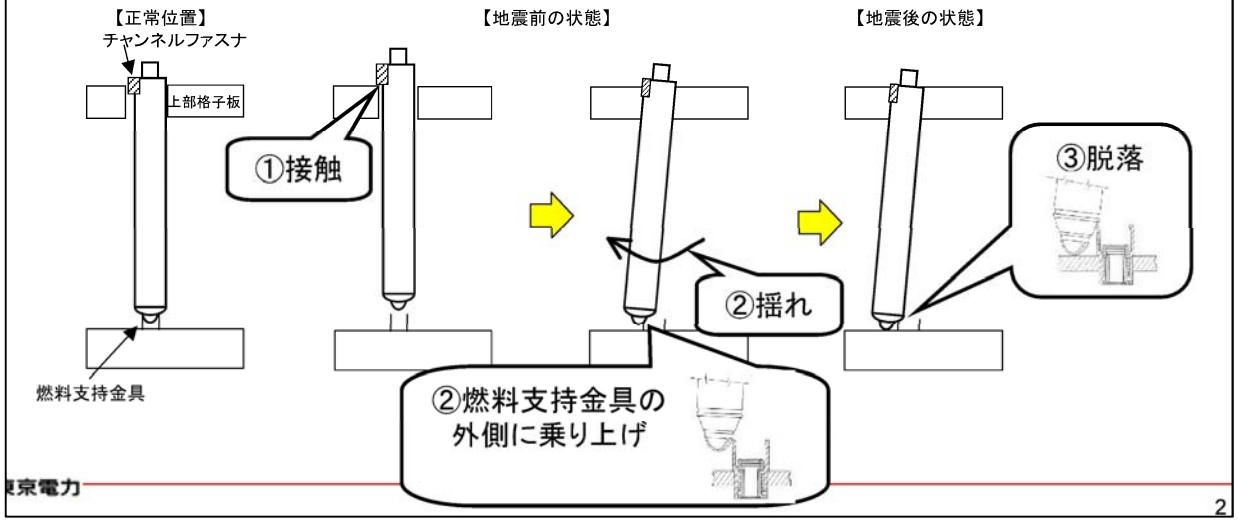
燃料集合体の燃料支持金具からの外れ対策（1／2）

✓平成19年11月，柏崎刈羽原子力発電所5号機にて，燃料集合体が正しい原子炉内の装荷位置から外れている事象（以下「本事象」という。）が確認された。

✓本事象については，「新潟県中越沖地震発生時の運営管理に係る教訓と課題」として，原子力施設情報公開ライブラリー（ニューシア）に登録されており，本事象の推定原因は以下のとおりとされている。

・模擬燃料による装荷試験から、以下のメカニズムにより燃料集合体が燃料支持金具から脱落したと推定した。

①燃料交換機の座標設定が適切でなかったため、燃料を装荷する際にチャンネルファスナと上部格子板が接触した。
②接触時に燃料集合体の下降速度が十分減速されていなかったことから、接触により燃料が大きく揺れ、燃料集合体の下部先端部が燃料支持金具の外側に乗り上げた。
③新潟県中越沖地震の震動により、当該先端部が燃料支持金具から脱落した。



燃料集合体の燃料支持金具からの外れ対策（2／2）

✓本事象の対策として，以下の措置を講じることとされている。

・燃料集合体が燃料支持金具から外れることを防止するため、以下の対策を実施する。

1．燃料交換機の設定座標を、チャンネルファスナと上部格子板が接触しにくい位置に調整する。

2．チャンネルファスナと上部格子板が接触しても揺れが小さくなるように、燃料集合体の据え付け位置付近における下降速度を最低速度とする。

なお、最外周の燃料を装荷する際には、燃料集合体の高さ位置を確認するとともに、燃料交換機に加わってる荷重の変化を確認することとする。

✓東海第二発電所においては，上記運用管理は反映済であり，同様の事象は発生することはない。