

本資料のうち、枠囲みの内容は営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-390 改0
提出年月日	平成30年5月18日

V-2-3-3-1 燃料集合体の耐震性についての計算書

目 次

1. 概 要	1
2. 基本方針	2
2.1 構造の説明	2
2.2 評価方針	3
3. 燃料集合体の地震応答解析	4
4. 地震時の制御棒挿入性試験検討	7
4.1 検討方法	7
4.2 検討結果	7
5. 地震時の燃料集合体の応力評価	8
5.1 燃料集合体の応力評価に用いる地震加速度	8
5.2 地震時の応力評価の方法	8
5.3 検討内容	9
5.4 検討結果	9

1. 概 要

本計算書は、燃料集合体の耐震性について示すものである。

地震時において燃料集合体に要求されるのは、制御棒の挿入機能の確保及び崩壊熱除去可能な形状の維持である。

制御棒の挿入機能の確保については、原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編（JEAG4601・補-1984）に従って、地震時における制御棒の挿入性についての検討を行い、基準地震動 S_s に対し制御棒の挿入性が確保されることを試験により確認する。

崩壊熱除去可能な形状の維持については、燃料集合体を支持している炉心支持構造物が耐震設計上の重要度分類Sクラスで設計されており、その支持機能は地震時においても維持されるので、崩壊熱除去可能な形状は維持されると考えられる。燃料被覆管自体の損傷は必ずしも崩壊熱除去可能な形状の喪失を意味するわけではないが、ここではさらに、参考として燃料被覆管の地震時応力を簡易弾性解析によって求める。

2. 基本方針

2.1 構造の説明

燃料集合体の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 燃料集合体の構造計画

主要区分	計画の概要		説明図
	基礎・支持構造	主体構造	
燃料集合体	<p>炉心は十字型制御棒とそれを囲む4体の燃料集合体を1ユニットとして構成される。燃料集合体の下部は下部タイププレートの着座面が炉心支持板上の燃料支持金具に嵌合して支持され、上部はユニットを構成する燃料集合体とともに上部炉心格子板内で水平方向に支持される。上下部タイププレート、スペーサ、ウォータロッド及びタイロッドには結合又は支持により骨格を形成する。4体の燃料集合体の外側にはめたチャンネルボックスの外面が制御棒の通路を構成する。</p>	<p>9×9燃料(A型)の燃料集合体は74本の燃料棒と2本のウォータロッドを、9×9燃料(B型)の燃料集合体は72本の燃料棒と1本のウォータチャンネルを、それぞれ9×9の正方格子に配列して7個のスペーサにより束ね、それらの上下端が上部タイププレート及び下部タイププレートと嵌合することにより形成される。燃料集合体を炉心に装荷する際には、外側にはチャンネルボックスをはめる。</p>	<p>The diagram illustrates the fuel assembly structure. It shows a vertical assembly with a 9x9 grid of fuel rods. Key components labeled include: 燃料集合体 (Fuel Assembly), 上部炉心格子板 (Upper Core Grid Plate), チャンネルボックス (Channel Box), 制御棒 (Control Rod), 炉心支持板 (Core Support Plate), 下部タイププレート (Lower Type Plate), 燃料支持金具 (Fuel Support Fitting), 上部タイププレート (Upper Type Plate), タイロッド (Thyroid Rod), スペーサ (Spacer), 燃料棒 (Fuel Rod), ウォータロッド (Water Rod), and チャンネルボックス (Channel Box). The diagram shows how the fuel rods are supported and how the control rods pass through the channel boxes.</p>

制御棒の構造計画の詳細は「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」に示されている。

2.2 評価方針

地震時において燃料集合体に要求されるのは、制御棒の挿入機能の確保及び崩壊熱除去可能な形状の維持である。

制御棒の地震時挿入性の評価については、炉心を模擬した実物大の部分モデルによる加振時制御棒挿入試験結果から挿入機能に支障を与えない最大燃料集合体変位を求め、地震応答解析から求めた燃料集合体変位がその最大燃料集合体変位を下回ることを確認する。

崩壊熱除去可能な形状の維持については、燃料集合体を支持している炉心支持構造物の支持機能が維持されれば、崩壊熱除去可能な形状は維持されると考えられる。燃料被覆管自体の損傷は必ずしも崩壊熱除去可能な形状の喪失を意味するわけではないが、参考として燃料被覆管の地震時応力を簡易弾性解析によって求める。燃料被覆管の地震時応力は、運転時（通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時）に燃料被覆管に作用している荷重と地震力を組み合わせて評価する。また、運転中に燃料に生じる燃料被覆管の腐食等の照射の影響を考慮して、燃料被覆管の地震時応力を求めている。

燃料集合体の耐震評価の方法は、平成14年7月1日付け平成14・05・16原第3号にて認可された工事計画の実績に基づいている。

3. 燃料集合体の地震応答解析

燃料集合体の地震応答解析は原子炉压力容器内部構造物の一部として実施されており、この詳細は「V-2-3-2 炉心，原子炉压力容器及び压力容器内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書」に示されている。燃料集合体の剛性はチャンネルボックスにより支配され，燃料集合体の質量は燃料タイプによらず同等であることから，燃料集合体の地震応答は燃料タイプによらず，この燃料集合体の地震応答解析結果が適用可能である。設計用地震波としては，基準地震動 S_s を採用している。

応答解析は，時刻歴応答解析法を適用して建屋の NS，EW 両方について実施している。

計算された燃料集合体の最大応答相対変位を図 3-1 に示すが，最大応答相対変位は約 11.1 mm となる。また，燃料集合体の最大応答加速度を図 3-2 及び図 3-3 に示すが，最大応答加速度は，水平方向で 13.2 m/s^2 ，鉛直方向で 8.07 m/s^2 となる。

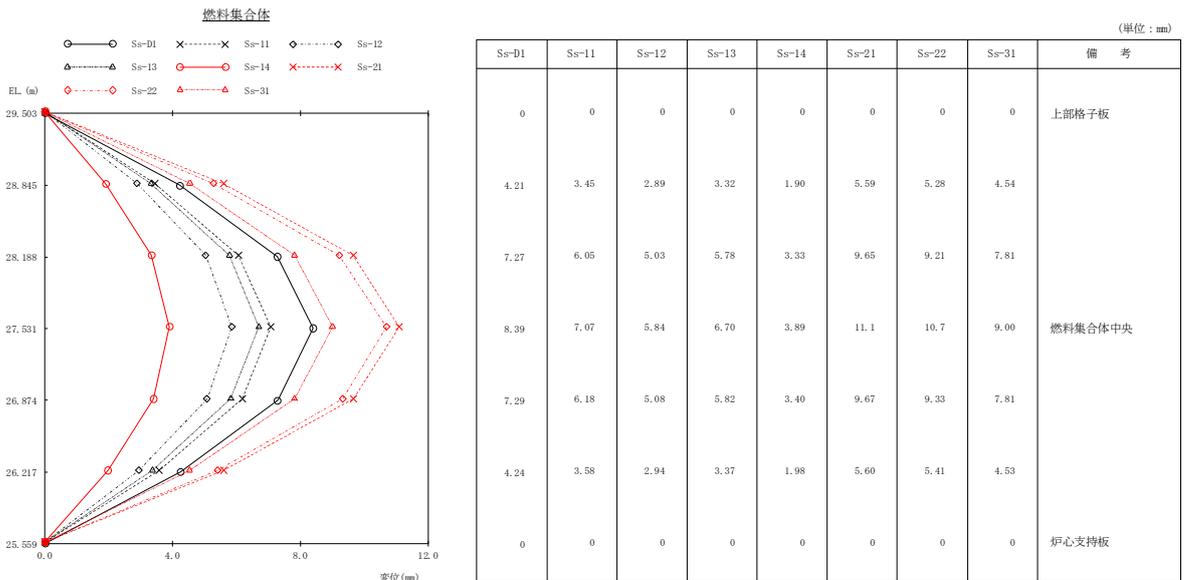
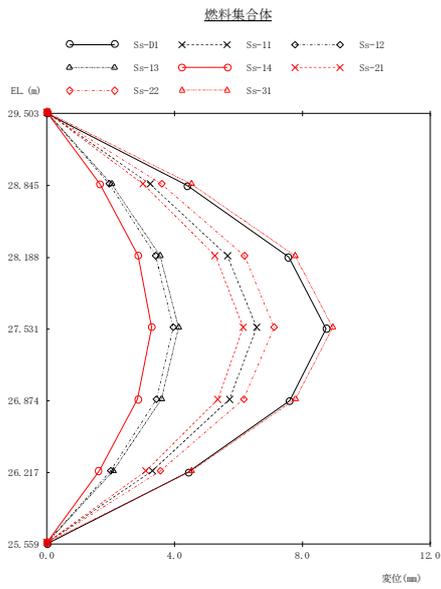


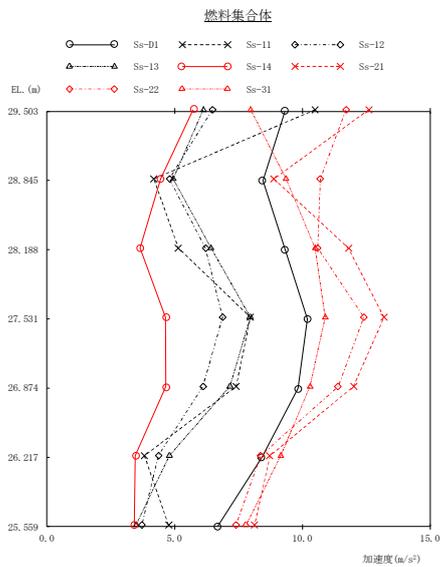
図 3-1(1) 燃料集合体最大応答相対変位 (NS 方向)



(単位: mm)

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備 考
0	0	0	0	0	0	0	0	上部格子板
4.38	3.23	1.95	2.03	1.66	3.01	3.59	4.52	燃料集合体中央
7.57	5.65	3.40	3.55	2.86	5.27	6.19	7.77	
8.74	6.57	3.95	4.13	3.28	6.14	7.12	8.95	
7.60	5.72	3.43	3.59	2.84	5.35	6.16	7.78	炉心支持板
4.42	3.30	1.99	2.08	1.64	3.10	3.56	4.52	
0	0	0	0	0	0	0	0	

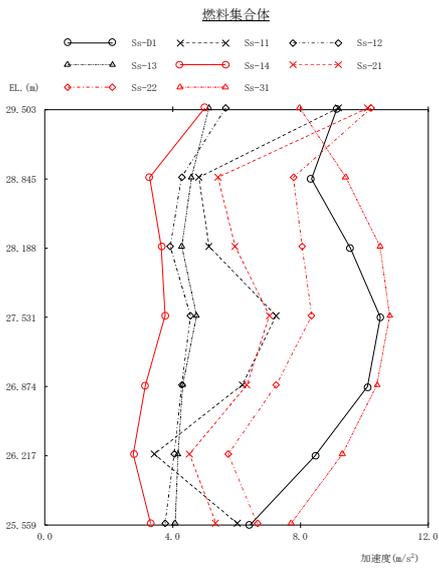
図 3-1(2) 燃料集合体最大応答相対変位 (E W方向)



(単位: m/s²)

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備 考
9.31	10.5	6.48	6.12	5.74	12.6	11.7	7.97	上部格子板
8.45	4.19	4.80	4.95	4.46	8.88	10.7	9.36	燃料集合体中央
9.32	5.15	6.21	6.43	3.65	11.8	10.6	10.5	
10.2	7.97	6.88	7.96	4.65	13.2	12.4	10.9	
9.83	7.41	6.11	7.16	4.66	12.0	11.4	10.3	炉心支持板
8.41	3.82	4.37	4.80	3.47	8.73	8.37	9.15	
6.67	4.76	3.73	3.50	3.43	8.12	7.41	7.79	

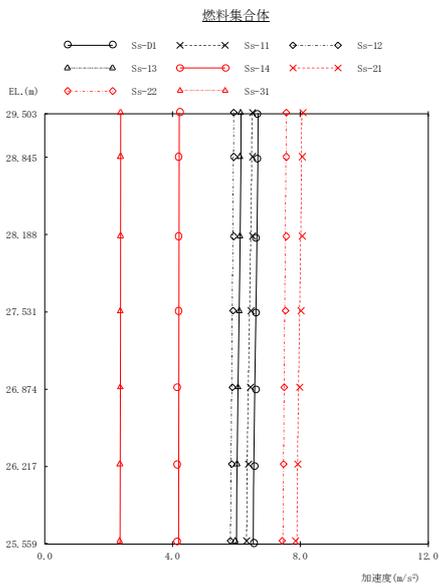
図 3-2(1) 燃料集合体最大応答加速度 (N S方向)



(単位: m/s²)

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備考
9.13	9.19	5.66	5.14	5.01	10.1	10.2	7.97	上部格子板
8.34	4.82	4.28	4.59	3.29	5.41	7.78	9.42	燃料集合体中央
9.56	5.14	3.93	4.28	3.65	5.95	8.05	10.5	
10.5	7.24	4.56	4.75	3.77	7.02	8.35	10.8	
10.1	6.18	4.29	4.31	3.15	6.32	7.25	10.4	
8.45	3.42	4.05	4.16	2.77	4.52	5.75	9.31	炉心支持板
6.41	6.02	3.77	4.07	3.32	5.35	6.65	7.70	

図 3-2(2) 燃料集合体最大応答加速度 (EW方向)



(単位: m/s²)

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備考
6.63	6.51	5.92	6.12	4.21	8.08	7.56	2.37	上部格子板
6.63	6.51	5.92	6.11	4.20	8.07	7.56	2.37	燃料集合体中央
6.62	6.50	5.91	6.10	4.19	8.05	7.55	2.37	
6.61	6.47	5.90	6.08	4.17	8.01	7.53	2.36	
6.59	6.43	5.87	6.04	4.15	7.97	7.50	2.36	
6.57	6.38	5.85	6.01	4.15	7.91	7.46	2.35	炉心支持板
6.54	6.32	5.81	5.96	4.15	7.84	7.42	2.34	

図 3-3 燃料集合体最大応答加速度 (鉛直方向)

4. 地震時の制御棒挿入性試験検討

4.1 検討方法

地震時における制御棒挿入性についての検討方法は、工事計画認可申請書添付書類「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」にてその詳細を示す。

4.2 検討結果

工事計画認可申請書添付書類「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」に示すとおり、制御棒挿入試験の結果、燃料集合体の相対変位が約 40 mm においても、通常のスクリム仕様値 90 %ストローク 3.5 秒以内であり、検査後において制御棒の外観に優位な変化がないことが確認された。

したがって、基準地震動 S_s による最大相対変位に対し制御棒の挿入性と健全性は確保される。

5. 地震時の燃料集合体の応力評価

5.1 燃料集合体の応力評価に用いる地震加速度

地震時における燃料被覆管の応力評価では、3章に記載した基準地震動 S_s よりも大きな加速度として、燃料集合体に作用する水平地震加速度は 20 m/s^2 を、鉛直地震加速度は 12 m/s^2 を用いる。

5.2 地震時の応力評価の方法

地震時における燃料被覆管の応力評価は、簡易弾性解析によりせん断歪エネルギー説（von Mises 理論）に基づき相当応力（一次応力の値）を求め、原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1991 追補版）で定められた許容応力 $0.7 S_u$ （ S_u : 引張強さ）に対する相当応力の比（設計比）を評価する。許容応力は、被覆管の温度及び照射の影響を考慮した値を用いる。

本手法は、平成 14 年 7 月 1 日付け平成 14・05・16 原第 3 号にて認可された工事計画の実績に基づいている。

(1) 応力の計算

応力計算は、通常運転時または、過渡時の応力に地震により発生する応力を加えて三軸方向（半径方向、円周方向及び軸方向）について解析し、それらより相当応力を計算する。

(2) 発生応力

9×9 燃料（A 型）については、通常運転時及び過渡時に発生する応力として、

- ・内外圧力差に基づく応力
- ・水力振動に基づく応力
- ・楕円度に基づく応力
- ・膨張スプリングの圧縮力に基づく応力

を考慮する。

さらに地震時には、水平地震加速度により発生する応力として、

- ・燃料棒のたわみに基づく応力

鉛直地震加速度により発生する応力として、

- ・鉛直地震加速度に基づく応力

を考慮する。

9×9 燃料（B 型）については、

通常運転時及び過渡時に発生する応力として、

- ・冷却材による外圧及び燃料要素内圧によって生じる応力
- ・燃料被覆管楕円度による曲げ応力

- ・流力振動による応力

を考慮する。

さらに地震時には、水平地震加速度及び鉛直地震加速度により発生する応力として、

- ・支持格子間のたわみに基づく応力

を考慮する。

発生する応力の計算式及び計算式で使用した記号の説明を9×9燃料（A型）については表5-1及び表5-2に、9×9燃料（B型）については表5-3及び表5-4に示す。

(3) 設計比の評価

設計比の評価では、燃料被覆管温度、燃料棒内圧、炉心条件、燃料棒寸法及び許容応力の統計的分布を考慮し、モンテカルロ法により統計評価を行う。ここで、燃料被覆管温度、燃料棒内圧については、燃料棒熱・機械設計コードによる解析結果を用いる。

モンテカルロ法による評価では、1回の試行ごとに乱数を用い、統計的分布に従い設定される入力条件から1つの設計比が得られる。この試行を繰り返すことにより設計比の統計的分布を求め、設計比の95%確率上限値が1以下であることをもって、燃料集合体の耐震性を確認する。

5.3 検討内容

燃料集合体を支持している炉心支持構造物は、地震時にもその支持機能は維持されるので、崩壊熱除去可能な形状は維持されると考えられる。ここではさらに、基準地震動 S_s による地震力並びに静的地震力に対し崩壊熱除去可能な形状が維持されることを確認するため、参考として燃料被覆管の地震時応力を簡易弾性解析によって求めたところ、設計比の95%確率上限値が1を下回る結果を得た。

地震時における水平地震加速度及び鉛直地震加速度を考慮した応力評価の結果を、設計比（95%確率上限値）が最大となるスペーサ間について表5-5に示す。

5.4 検討結果

設計比が最大となるのは寿命初期であり、水平地震加速度及び鉛直地震加速度を考慮した場合でもその値は0.37である。

表 5-1 地震時の応力の計算式
(9×9燃料 (A型))

応力の種類	応力の成分	内 面	外 面
(1) 内外圧力差に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(2) 水力振動に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(3) 楕円度に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(4) 膨張スプリングの圧縮力に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(5) 燃料棒のたわみに基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(6) 鉛直地震加速度に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		

NT2 補② V-2-3-3-1 R0

表 5-2 地震時の応力計算式の記号の説明
(9×9燃料(A型))

記号	説明
P_c	冷却材圧力 * ¹
P_g	燃料棒内圧 * ²
r_1	被覆管外半径
r_2	被覆管内半径
r_m	被覆管平均半径
t	被覆管肉厚 * ³
d	被覆管楕円度
q_{cr}	被覆管臨界座屈荷重
ℓ	スペーサ間距離
δ	水力振動による振幅
E	被覆管の縦弾性係数
ν	被覆管のポアソン比
G_h	地震時水平方向最大加速度
W_s	スペーサ間距離当たりの燃料棒質量
Z	被覆管断面係数 * ³
F	膨張スプリングにより燃料棒に作用する力
G_v	地震時鉛直方向最大加速度
W_r	燃料棒全質量

*1: 評価結果が厳しくなる圧力過渡時の冷却材圧力を使用。

*2: 外圧支配条件において評価結果が厳しくなる寿命初期の内圧を使用。

*3: ライナ部を無視し、照射に伴う腐食減肉を考慮。

表 5-3 地震時の応力の計算式
(9×9燃料 (B型))

応力の種類	成分	内 面	外 面
(1) 冷却材外圧及び 燃料要素内圧に よって生じる応 力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(2) 燃料被覆管楕円 度による曲げ応 力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(3) 流力振動による 応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(4) 支持格子間たわ みによる応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		

NT2 補② V-2-3-3-1 R0

表 5-4 地震時の応力計算式の記号の説明
(9×9燃料(B型))

記号	説明
P_i	燃料要素内圧 (MPa)
P_o	冷却材圧力 (MPa)
r_i	燃料被覆管内半径 (mm)
r_o	燃料被覆管外半径 (mm)
r_m	燃料被覆管平均半径 (mm)
D_o	燃料被覆管外径 (mm)
D_i	燃料被覆管内径 (mm)
$D_{i\max}$	燃料被覆管最大内径 (mm)
$D_{i\min}$	燃料被覆管最小内径 (mm)
t	燃料被覆管肉厚 (mm)
ν	ポアソン比
E	被覆管ヤング率 (MPa)
I	燃料被覆管の断面二次モーメント (mm ⁴) $I = \frac{\pi}{64}(D_o^4 - D_i^4)$
ω	$\omega = \frac{1}{4} \cdot (D_{i\max} - D_{i\min})$
P_{cr}	$P_{cr} = \frac{E}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{r_m}\right)^3$
l	スペーサ間距離 (mm)
A	流力振動振幅 (=0.05 mm)
W_o	燃料要素単位長重量 (kg/mm)
G	地震時加速度 (m/s ²)
C_1	定数

表 5-5 地震時のスペーサ間の設計比

	9 × 9 燃料 (A 型)	9 × 9 燃料 (B 型)
寿命初期	0.36	0.37
寿命中期	0.22	0.28
寿命末期	0.23	0.26