

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 5
提出年月日	平成 30 年 8 月 24 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	4
3. 燃料集合体の地震応答解析	5
4. 地震時の制御棒挿入性試験検討	11
5. 地震時の燃料集合体の応力評価	12
5.1 燃料集合体の応力評価に用いる地震加速度	12
5.2 地震時の応力評価の方法	12
5.3 検討内容	13
5.4 検討結果	13

## 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 J E A G 4 6 0 1・補-1984（(社)日本電気協会 昭和 59 年）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については添付書類「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」にて説明する。

崩壊熱除去可能な形状の維持については、添付書類「V-2-3-3-2 炉心支持構造物の耐震性についての計算書」に詳細を示すとおり、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、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、ここでは燃料被覆管の地震時応力を弾性解析によって求め、燃料被覆管が健全であり、崩壊熱除去可能な形状は維持されることを確認する。

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格子板内で水平方向に支持される。上下部タイ・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・プレート及び下部タイ・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. The top view shows a 9x9 grid of fuel rods and control rods within a channel box, supported by a lower tie plate and fuel support hardware. The side view shows the assembly of the upper tie plate, tie rods, spacers, fuel rods, water rods, and the channel box, all supported by the lower tie plate.</p>

9×9燃料（A型）と9×9燃料（B型）の概要図を図2-1に示す。9×9燃料（A型）には2本の太径のウォータ・ロッドがあるが、9×9燃料（B型）では1本の角管のウォータ・チャンネルであり、また9×9燃料（A型）のみに部分長燃料棒が存在するといった違いがあるが、本計算書での評価ではスペーサ部及びスペーサ間の応力評価であることから、構造の違いが評価結果に与える影響はない。

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

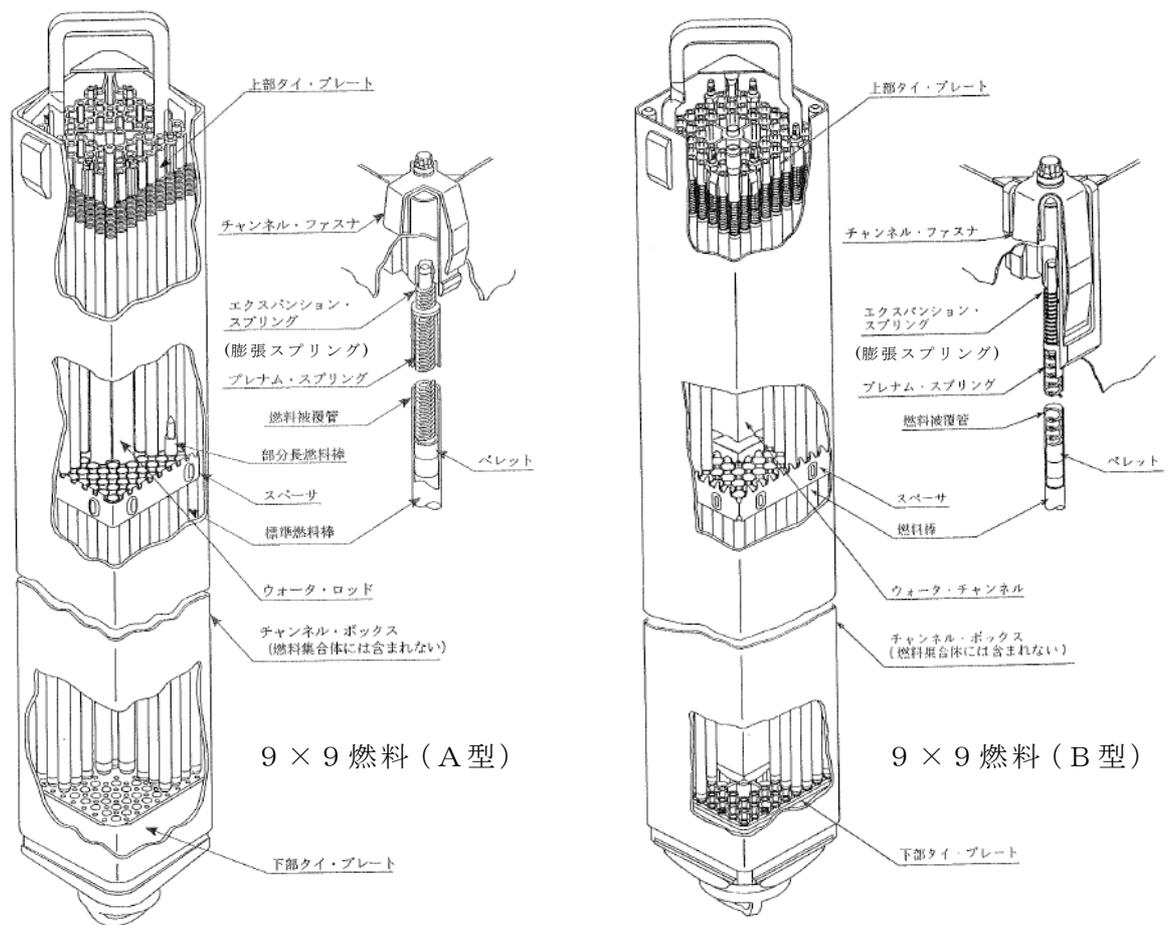


図2-1 9×9燃料（A型）と9×9燃料（B型）の概要図

## 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、燃料被覆管の一次応力により、構造的に崩壊するような状態となることを防ぐこと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、保守的に燃料被覆管の地震時応力を弾性解析によって燃料被覆管の健全性を確認する。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。

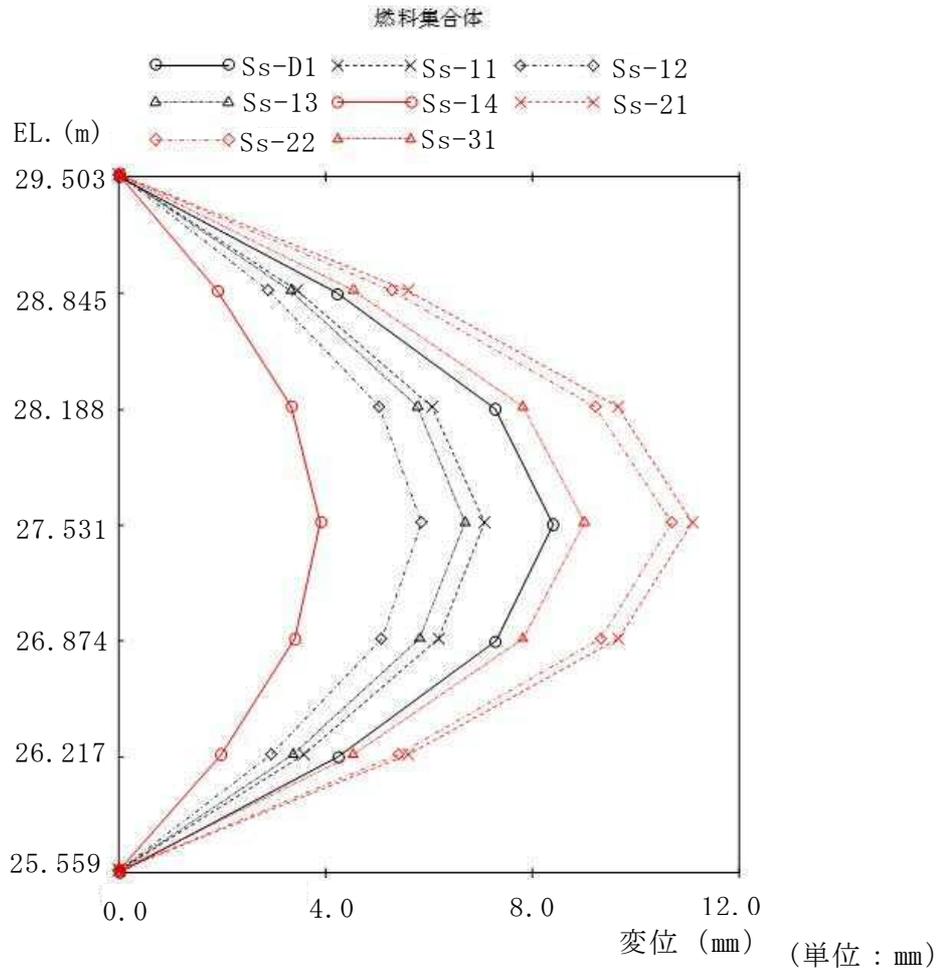
燃料集合体の耐震評価の方法は、平成 14 年 7 月 1 日付け平成 14・05・16 原第 3 号にて認可された工事計画の実績に基づいている。

### 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圧力容器内部構造物の一部として実施されており、この詳細は添付書類「V-2-3-2 炉心，原子炉圧力容器及び圧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。

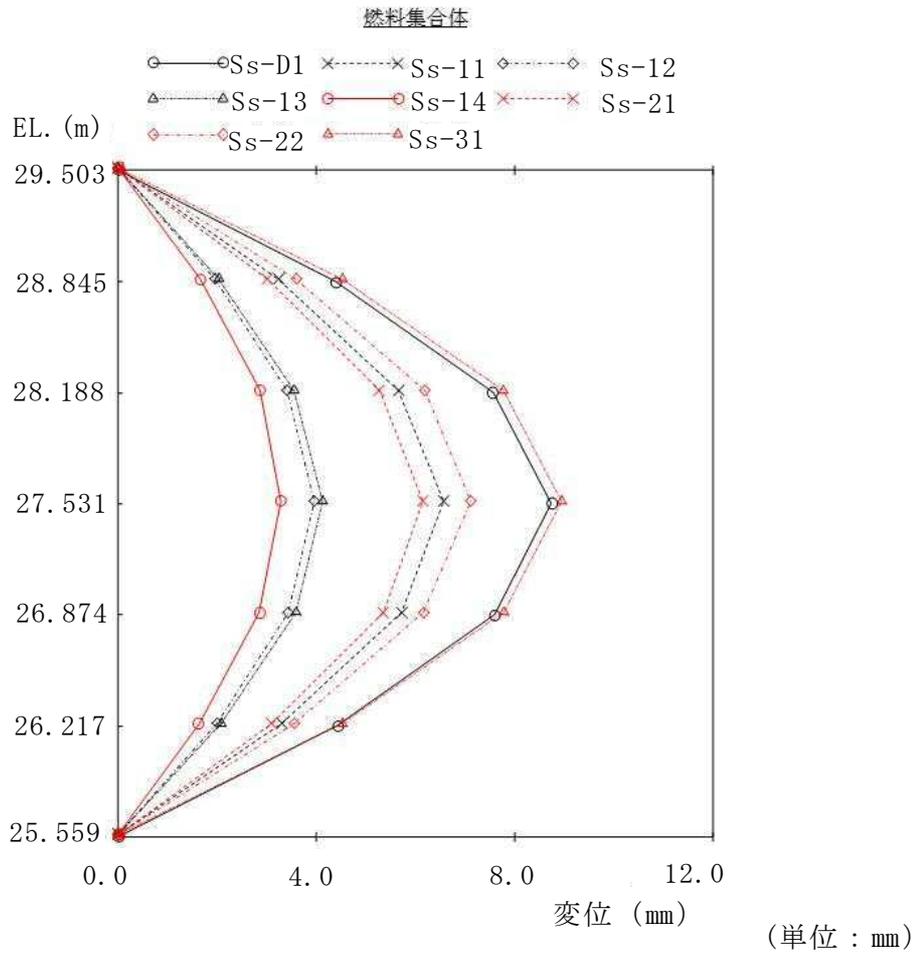
応答解析は、時刻歴応答解析法を適用して原子炉建屋のNS，EW両方について実施している。

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  $13.2 \text{ m/s}^2$ ，鉛直方向で  $8.08 \text{ m/s}^2$  となる。



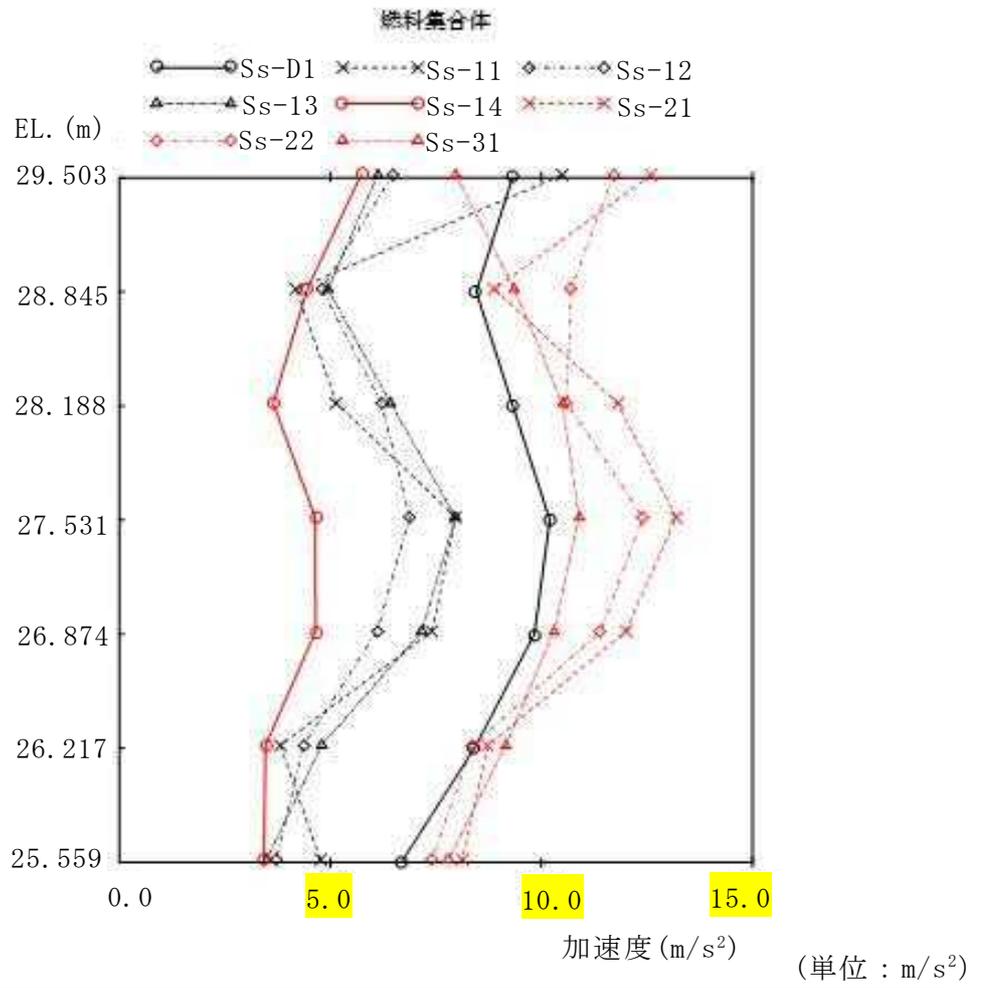
Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備考
0	0	0	0	0	0	0	0	上部格子板
4.21	3.45	2.89	3.32	1.90	5.59	5.28	4.54	
7.27	6.05	5.03	5.78	3.33	9.65	9.21	7.81	
8.39	7.07	5.84	6.70	3.89	11.1	10.7	9.00	燃料集合体中央
7.29	6.18	5.08	5.82	3.40	9.67	9.33	7.81	
4.24	3.58	2.94	3.37	1.98	5.60	5.41	4.53	
0	0	0	0	0	0	0	0	炉心支持板

図 3-1 (1) 燃料集合体最大応答相対変位 (NS 方向)



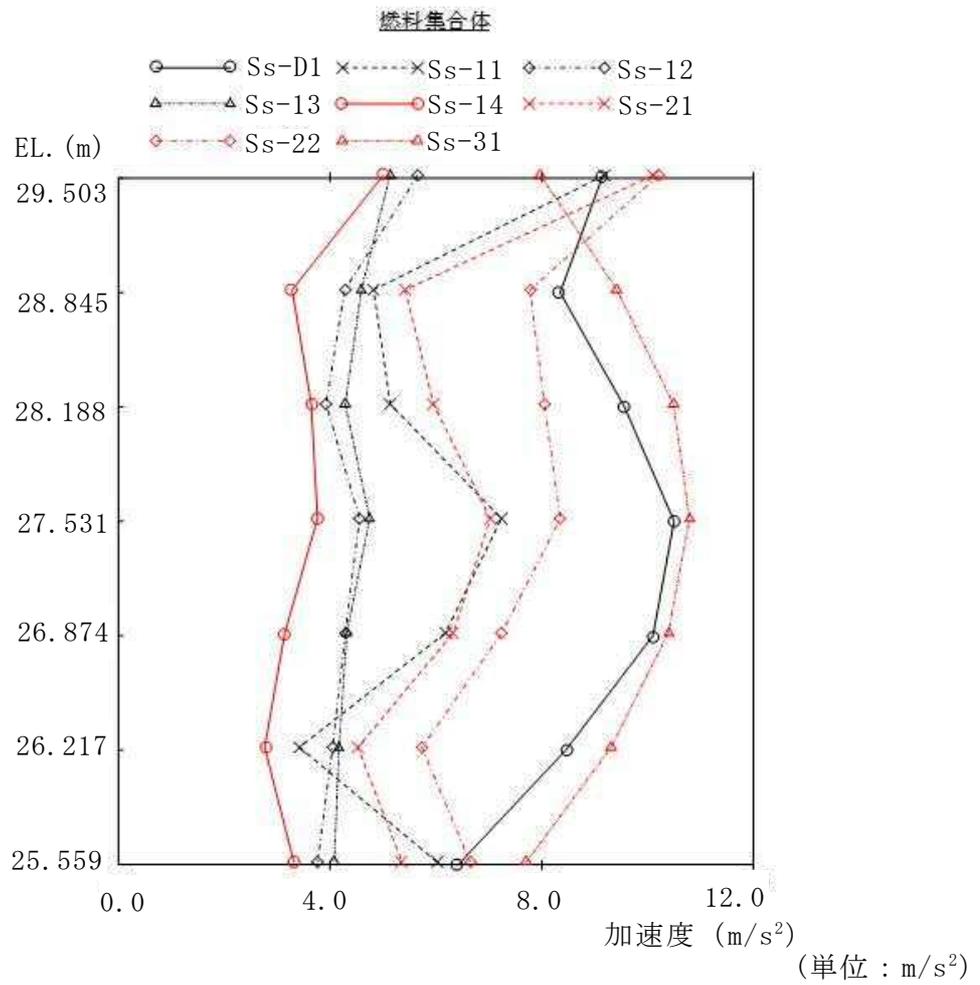
Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備考
0	0	0	0	0	0	0	0	上部格子板
4.38	3.23	1.95	2.03	1.66	3.01	3.59	4.52	
7.57	5.65	3.40	3.55	2.86	5.27	6.19	7.77	
8.74	6.57	3.95	4.13	3.28	6.14	7.12	8.95	燃料集合体中央
7.60	5.72	3.43	3.59	2.84	5.35	6.16	7.78	
4.42	3.30	1.99	2.08	1.64	3.10	3.56	4.52	
0	0	0	0	0	0	0	0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

図 3-1 (2) 燃料集合体最大応答相対変位 (EW方向)



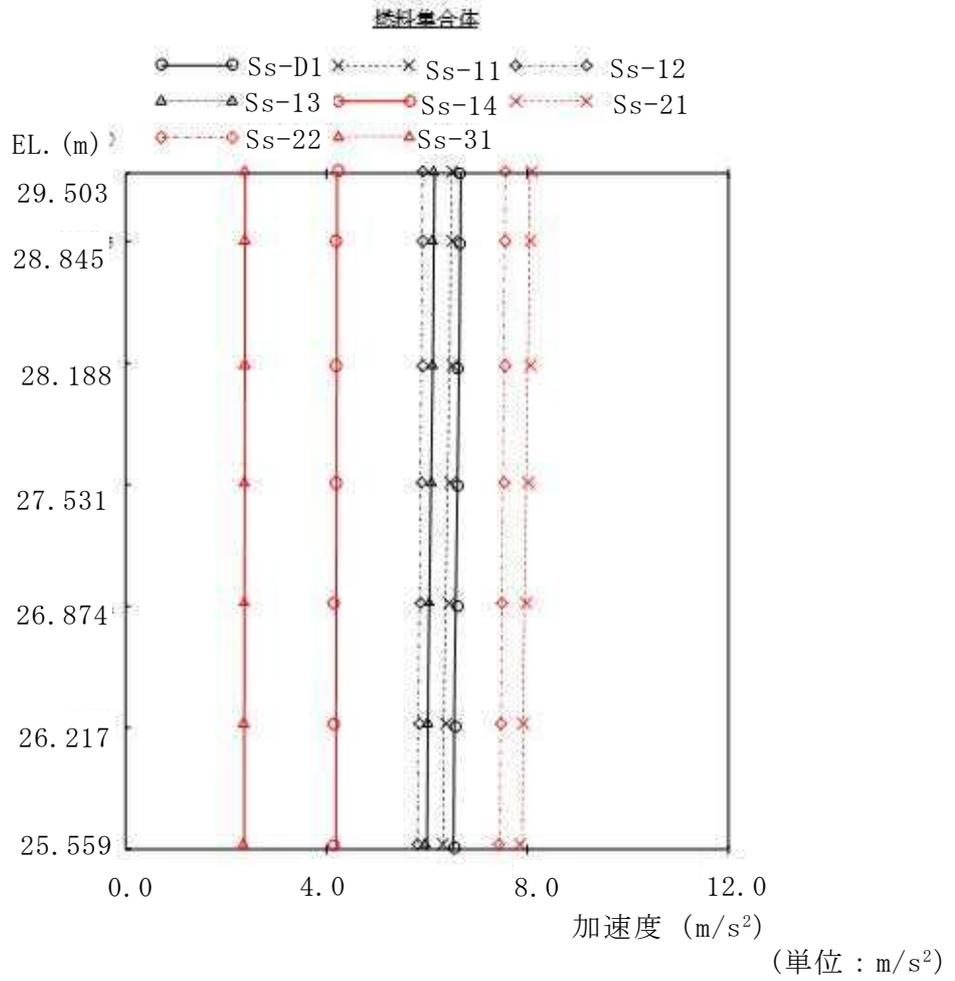
Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備考
9.31	10.5	6.48	6.12	5.74	12.6	11.7	7.97	上部格子板
8.45	4.19	4.80	4.95	4.46	8.88	10.7	9.36	
9.32	5.15	6.21	6.43	3.65	11.8	10.6	10.5	
10.2	7.97	6.88	7.96	4.65	13.2	12.4	10.9	燃料集合体中央
9.38	7.41	6.11	7.16	4.66	12.0	11.4	10.3	
8.41	3.82	4.37	4.80	3.47	8.73	8.37	9.15	
6.67	4.76	3.73	3.50	3.43	8.12	7.41	7.79	炉心支持板

図 3-2 (1) 燃料集合体最大応答加速度 (N S 方向)



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	
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	燃料集合体中央
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	
6.41	6.02	3.77	4.07	3.32	5.35	6.65	7.70	炉心支持板

図 3-2 (2) 燃料集合体最大応答加速度 (EW方向)



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	
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	燃料集合体中央
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	
6.54	6.32	5.81	5.96	4.15	7.84	7.42	2.34	炉心支持板

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

地震時における制御棒挿入性についての検討方法は,最大応答相対変位約 11.1 mm を 1.5 倍した 16.8 mm が,制御棒挿入性試験にて確認された挿入機能に支障を与えない最大燃料集合体変位を下回ることを確認する。

添付書類「V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」にその詳細を示すとおり制御棒挿入機能は確保される。

## 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.に記載した基準地震動  $S_s$  よりも大きな加速度として、水平方向及び鉛直方向の最大応答加速度をそれぞれ 1.5 倍した加速度を用いた。燃料集合体に作用する水平地震加速度は  $19.8 \text{ m/s}^2$  を、鉛直地震加速度は  $12.2 \text{ m/s}^2$  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、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 (J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会 平成 3 年)) 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、燃料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。なお、 $9 \times 9$  燃料 (A 型) の評価に用いる解析コード F U R S T の検証及び妥当性確認等の概要については添付書類「V-5-57 計算機プログラム (解析コード) の概要・F U R S T」に、 $9 \times 9$  燃料 (B 型) の評価に用いる解析コード B S P A N 2 の検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「V-5-58 計算機プログラム (解析コード) の概要・B S P A N 2」に示す。

#### (1) 応力の計算

応力計算は、通常運転時又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

$9 \times 9$  燃料 (A 型) 及び  $9 \times 9$  燃料 (B 型) の通常運転時、過渡時及び地震時に発生する応力について表 5-1 に記載する。

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  $9 \times 9$  燃料 (A 型) については表 5-2 及び表 5-3 に、 $9 \times 9$  燃料 (B 型) については表 5-4 及び表 5-5 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

添付書類「V-2-3-3-2 炉心支持構造物の耐震性についての計算書」にてその詳細を示すとおり、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ことが考えられる。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5-6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。このため、燃料被覆管は健全であり、崩壊熱除去可能な形状は維持されることを確認した。

表 5-1 燃料被覆管に発生する応力

考慮する応力	A 型	B 型	条件
内外圧力差に基づく応力	○	○	通常運転時及び過渡時
水力振動に基づく応力	○	○	
楕円度に基づく応力	○	○	
膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力	○*1	—	
燃料棒のたわみに基づく応力	○	○	地震時
鉛直地震加速度に基づく応力	○	○*2	

注記 \*1：A型においては膨張スプリング等による軸方向荷重に燃料棒自重が考慮されている為、当該応力を保守的に1次応力とし応力評価に用いている。

\*2：地震時鉛直方向最大加速度については見かけの質量増加として扱い、燃料要素単位長質量 $W_0$ で考慮している。

表 5-2 地震による応力の計算式

(9×9燃料 (A型))

応力の種類	成分	内 面	外 面
(1) 燃料棒のたわみに基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		
(2) 鉛直地震加速度に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		

表 5-3 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
$r_1$	燃料被覆管外半径 (mm)
$r_2$	燃料被覆管内半径 (mm)
$l$	スペーサ間距離 (mm)
$G_h$	地震時水平方向最大加速度 ( $m/s^2$ )
$W_s$	スペーサ間距離当たりの燃料棒質量 (kg)
$Z$	被覆管断面係数 * $Z = \frac{\pi}{4} \frac{(r_1^4 - r_2^4)}{r_1}$
$G_v$	地震時鉛直方向最大加速度 ( $m/s^2$ )
$W_r$	燃料棒全質量 (kg)

注記 \*：ライナ部を無視し、照射に伴う腐食減肉を考慮。

表 5-4 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) 燃料棒のたわみ に基づく応力	半径方向		
	円周方向		
	軸方向		

表 5-5 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
$D_1$	燃料被覆管外径 (mm)
$D_2$	燃料被覆管内径 (mm)
$I$	燃料被覆管の断面二次モーメント (mm <sup>4</sup> ) $I = \frac{\pi}{64} (D_1^4 - D_2^4)$
$l$	スペーサ間距離 (mm)
$W_0$	燃料要素単位長質量 (kg/mm) *
$G_h$	地震時水平方向最大加速度 (m/s <sup>2</sup> )

注記 \* : 地震時鉛直方向最大加速度は見かけの質量増加として扱い燃料要素端長質量 $W_0$ で考慮している。

表 5-6 地震時のスぺーサ間の設計比

	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