

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密あるいは防護上の観点
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-432 改4
提出年月日	平成30年8月31日

V-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
3. 燃料集合体の地震応答解析	3
4. 制御棒の挿入性試験	7
4.1 試験装置	7
4.2 試験方法	7
4.3 試験結果	7
5. 制御棒挿入性に対する鉛直方向地震による影響評価	13
5.1 作用荷重及びそれに伴う挿入時間遅れ	13
5.2 燃料集合体の浮上り	13
6. 評価結果	14
7. 引用文献	14

1. 概要

本計算書は、制御棒の耐震性について示すものである。

地震時において制御棒に要求されるのは、制御棒の挿入機能の確保である。

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）にしたがって、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_0 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。ここで、地震時に制御棒の挿入性を阻害する支配的要因は、燃料集合体の水平方向地震による相対変位であることから、制御棒挿入試験は水平方向地震に対して実施する。また、鉛直方向地震に対してはその影響を評価する。

制御棒の挿入機能確保に必要な形状を維持するための構造部材は、シース、ハンドル、タイロッド、落下速度リミッタであり、制御棒挿入試験により挿入機能が確認される。

なお、ボロンカーバイド型制御棒の運転寿命は、核的寿命、機械的寿命のうち核的寿命によって定まる。

ボロンカーバイド型制御棒のボロンカーバイド粉末を充填した中性子吸収棒については、中性子照射によるガス等の発生に伴い中性子吸収棒の内圧が上昇するが、寿命末期において中性子吸収棒の変形は生じない。

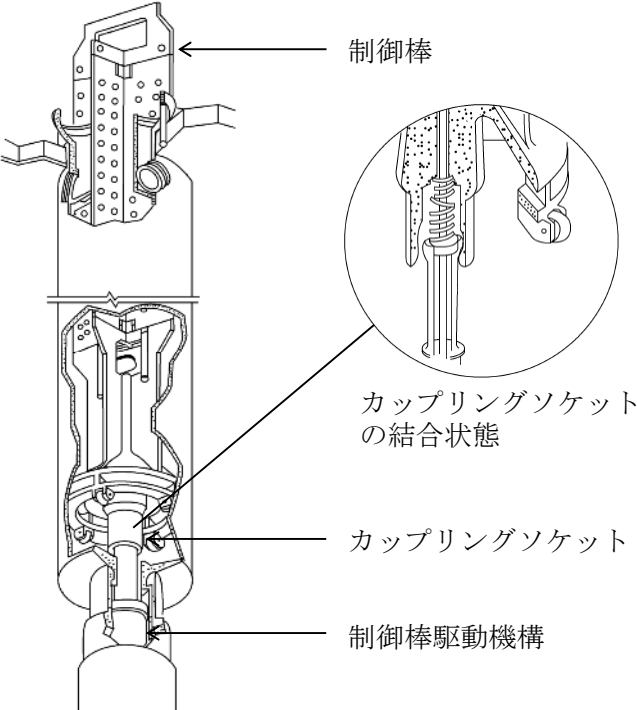
以上より、制御棒の寿命中において中性子吸収材によるシースの変形はないことから、制御棒の挿入性に影響を与えることはない。

2. 一般事項

2.1 構造計画

制御棒の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

計 画 の 概 要		概 略 構 造 図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>制御棒は、カップリングソケットにより制御棒駆動機構に支持される。</p>	<p>十字形制御棒</p>	

3. 燃料集合体の地震応答解析

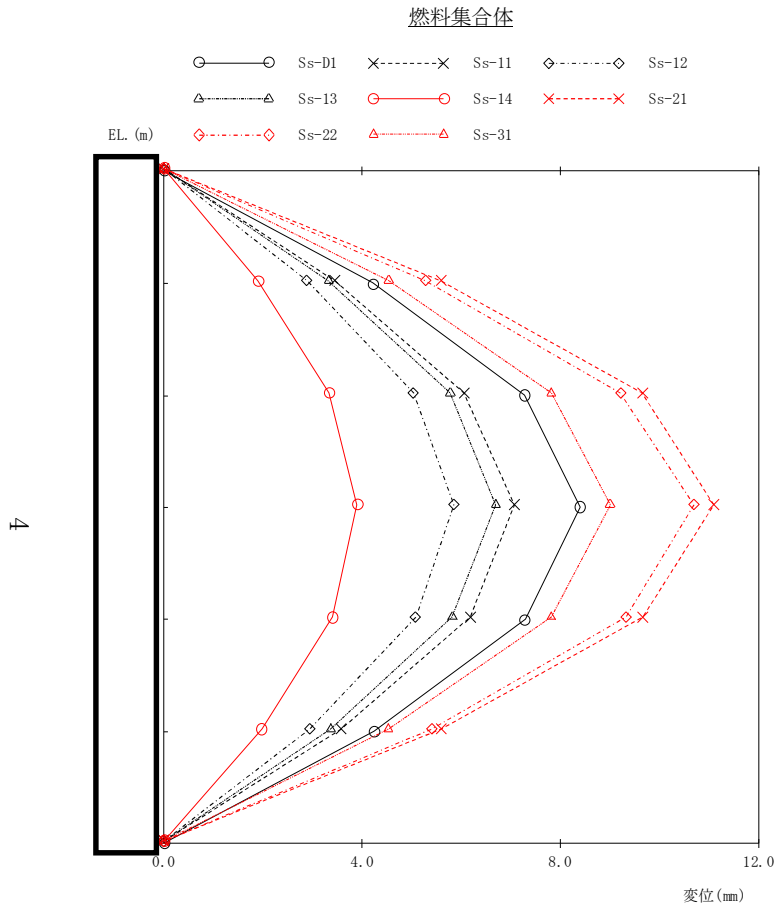
燃料集合体の地震応答解析は、添付書類「V-2-3-2 炉心，原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」にて压力容器内部構造物の一部として実施している。

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方向，EW方向及び鉛直方向について実施している。

燃料集合体の計算された最大応答相対変位は，地震応答解析の結果，図3-1に示すとおり11.1mmであり，制御棒挿入性の評価に適用する相対変位は，最大応答相対変位を1.5倍した16.8mmとする。

また，燃料集合体の計算された鉛直方向の加速度は，地震応答解析の結果，図3-2に示すとおり $0.83 \times 9.8 \text{m/s}^2$ であり，制御棒挿入性の評価に適用する鉛直方向の加速度は，地震応答解析結果を1.5倍した $1.24 \times 9.8 \text{m/s}^2$ とする。

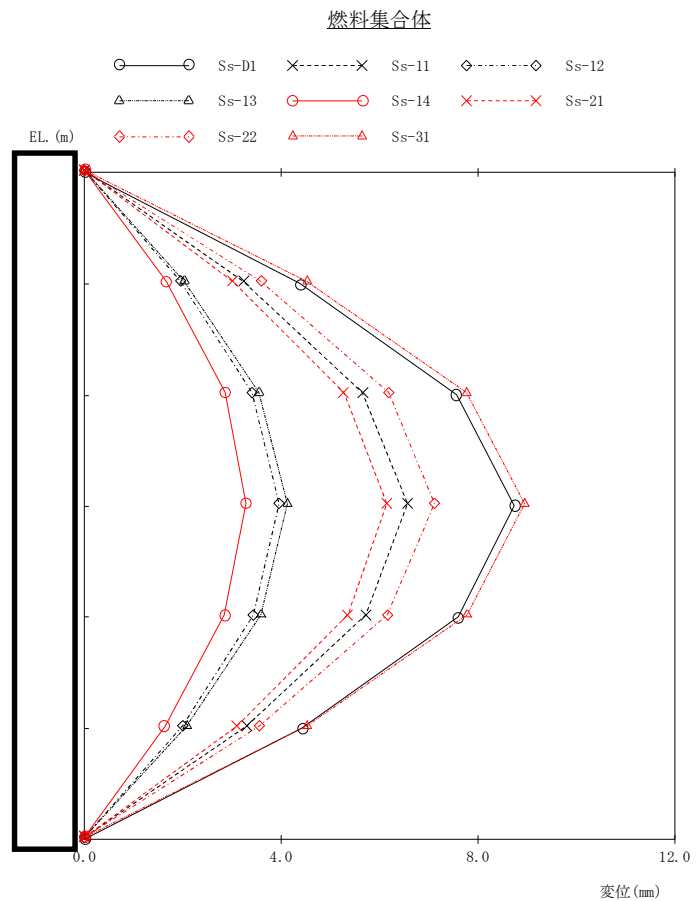


(単位: mm)

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備 考
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	上部格子板
4.21	3.45	2.89	3.32	1.90	5.59	5.28	4.54	燃料集合体中央
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	
7.29	6.18	5.08	5.82	3.40	9.67	9.33	7.81	炉心支持板
4.24	3.58	2.94	3.37	1.98	5.60	5.41	4.53	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

図 3-1(1) 燃料集合体最大応答相対変位 (NS 方向)

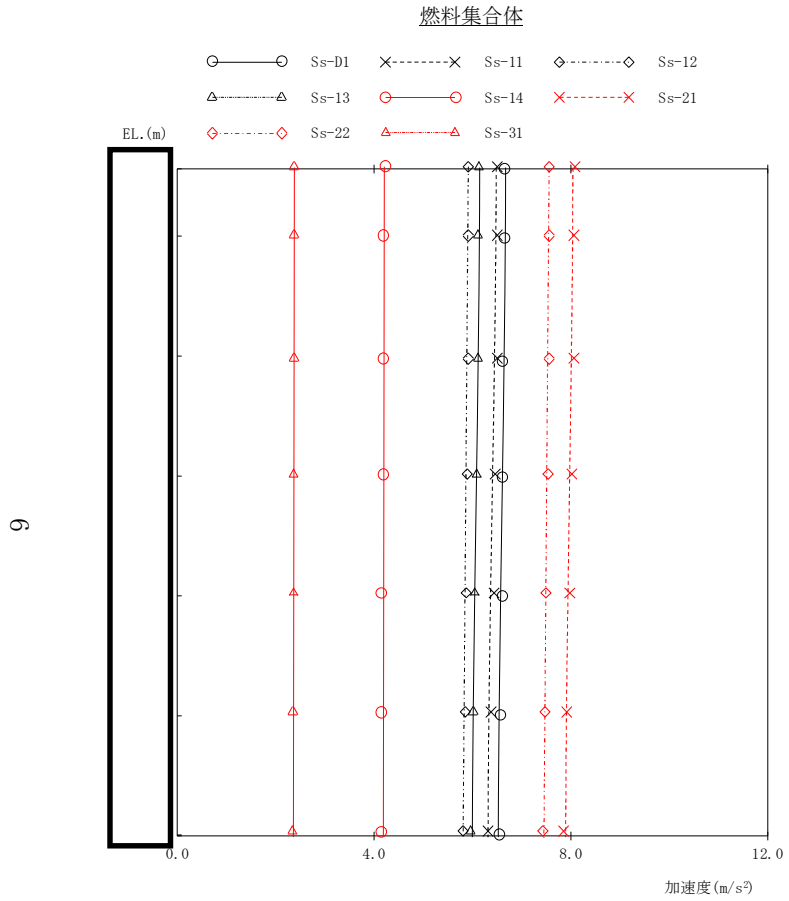
5



(単位 : mm)

Ss-D1	Ss-11	Ss-12	Ss-13	Ss-14	Ss-21	Ss-22	Ss-31	備考
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	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	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	炉心支持板

図 3-1(2) 燃料集合体最大応答相対変位 (E W方向)



(单位: 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	炉心支持板
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	

図 3-2 燃料集合体最大応答加速度 (UD方向)

4. 制御棒の挿入性試験

水平方向地震により燃料集合体に相対変位が生じた状態で制御棒の挿入性が確保されることを確認するため、試験を実施している。試験は昭和 53 年まで当時の株式会社 日立製作所（現在の日立GEニュークリア・エナジー株式会社）にて実施したものである。

4.1 試験装置

試験装置の概要を図 4-1 に示す。試験装置は炉心を模擬するために、試験容器内に上部格子板、燃料集合体、制御棒案内管を据え付け、下部に制御棒駆動機構ハウジングを接続している。

試験用機器仕様の概要を表 4-1 に示す。燃料集合体の質量を模擬するため、燃料ペレットに鉛を使用している。制御棒及び制御棒駆動機構等の供試体は実機仕様である。

試験に用いた計測装置の概要を図 4-2 に示す。

4.2 試験方法

試験条件を表 4-2 に示す。

図 4-1 に示す試験容器内に 4 体の質量模擬燃料集合体を組み込んで、試験容器中央部に設けられている油圧加振機により試験容器を介して燃料集合体を強制加振し、スクラム試験を実施した。

試験では、燃料集合体の相対変位（振幅）及び制御棒の挿入時間を測定した。

4.3 試験結果

図 4-3 に燃料集合体相対変位と 90%ストロークスクラム時間の関係を示す。

これによると、燃料集合体の相対変位が約 40mm においても、90%ストロークスクラム時間が 3.5 秒以内である。

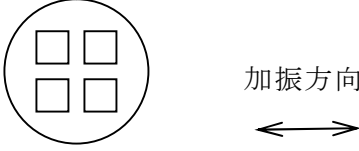
なお、制御棒挿入試験後において制御棒の外観に有意な変化はなかった。

表 4-1 試験用機器仕様の概要

試験用機器	仕様の概要
燃料集合体	質量模擬燃料集合体 (質量模擬のため、燃料ペレットに鉛を使用)
制御棒	実機仕様*
燃料支持金具	実機仕様
制御棒案内管	実機仕様
制御棒駆動機構	実機仕様
水圧制御ユニット	実機仕様
油圧加振機	加振力 : 水平 2.5×10^5 N ストローク : ± 100 mm

注記* : 試験用の制御棒は、フォロー付制御棒である。フォローとは、制御棒先端にあるステンレス鋼製のハンドル部を延長した部分のことである。その設置目的は、制御棒先端部の出力分布の勾配を緩やかにして、制御棒引抜時の出力変動幅を低減し、燃料の健全性向上を図ることである。なお、フォロー付制御棒が国内プラントに採用されたのは東海第二発電所の運転開始以降であるため、東海第二発電所にはフォロー付制御棒は採用されていないが、フォロー付の方が制御棒の質量が増加する分、挿入時間は増す方向であり、試験としては安全側である。

表 4-2 試験条件

項目	条件
温度	室温
圧力	常圧*
加振条件	<p>加振方向 : 水平方向</p>  <p>加振振幅 : 燃料集合体の最大振幅が 0~40mm の範囲</p> <p>加振振動数 : 約 5~6Hz (燃料集合体の 水中固有振動数相当)</p> <p>加振波形 : 正弦波</p>
スクラム開始時の制御棒位置	全引き抜き状態

注記* : アキュムレータ圧力の調整により原子炉定格圧力
(6.93MPa[gage]) 時のスクラムを模擬

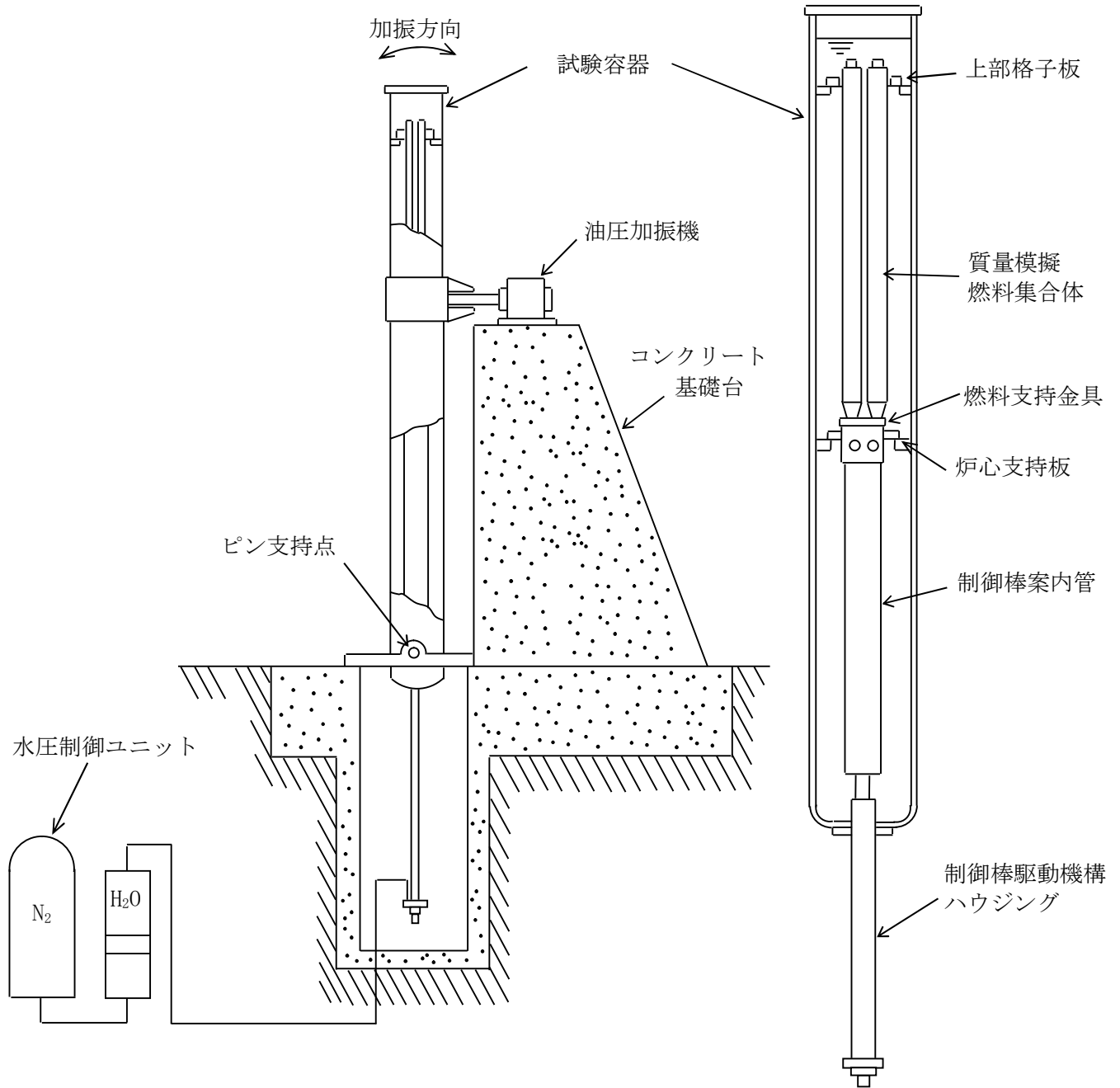


図 4-1 試験装置の概要

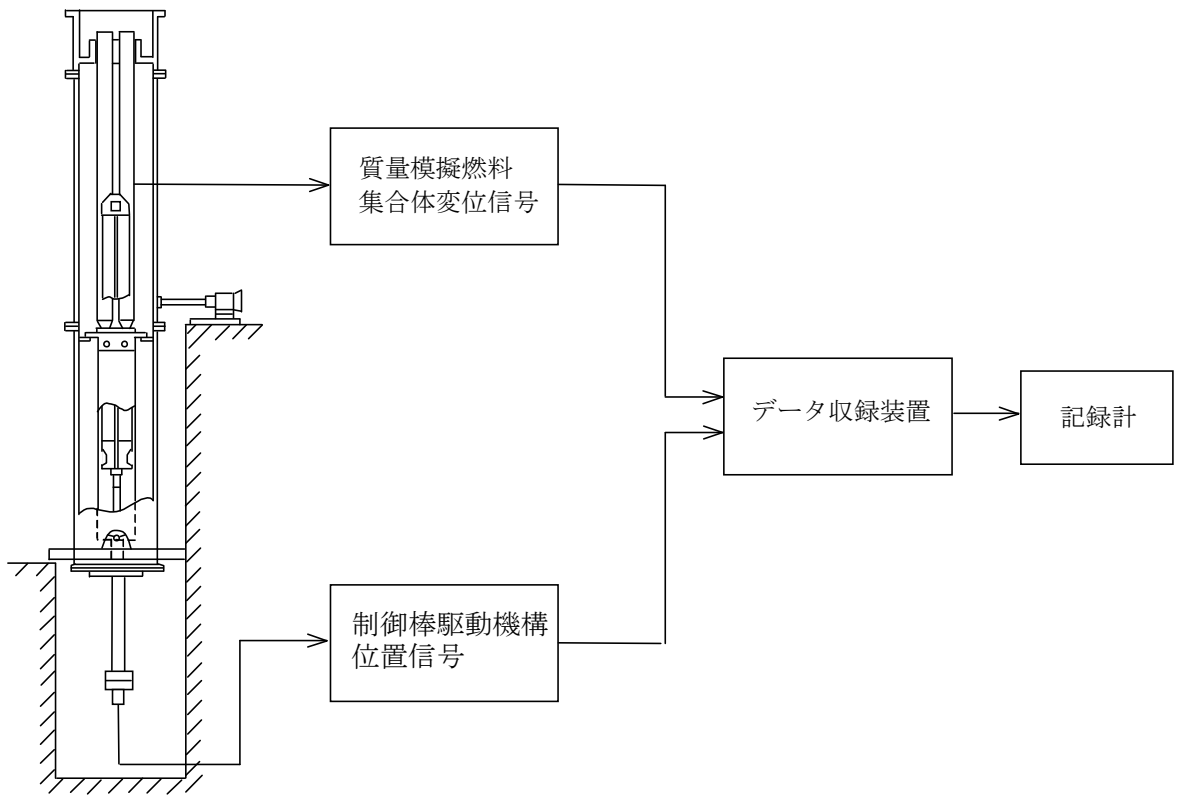


図 4-2 計測装置の概要

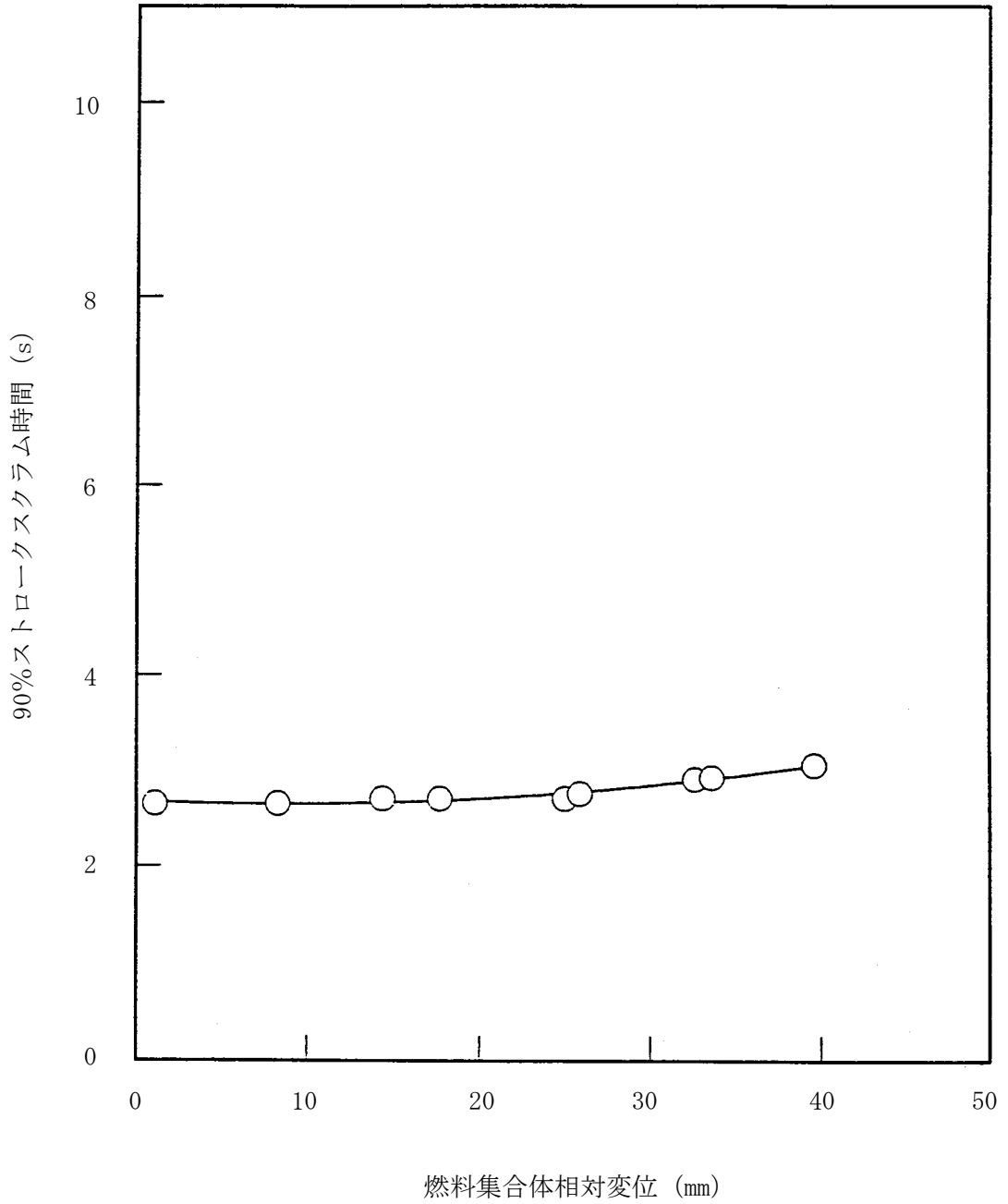


図 4-3 燃料集合体相対変位のスクラム時間に及ぼす影響
(ボロンカーバイド型制御棒)

5. 制御棒挿入性に対する鉛直方向地震による影響評価

鉛直方向地震により制御棒の挿入性に与える影響について、次の観点で評価する。

- (1) 鉛直方向の作用荷重及びそれに伴う挿入時間遅れ
- (2) 燃料集合体の浮上り

5.1 作用荷重及びそれに伴う挿入時間遅れ

制御棒に作用する荷重について、制御棒に作用する鉛直方向地震力と地震スクラムにより生じるその他の荷重との大小関係を確認し、評価した。その結果、交番荷重である鉛直地震動の加速度 $1.24 \times 9.8 \text{m/s}^2$ が、仮に常時制御棒の挿入方向と逆向き（下向き）の場合でも、制御棒の挿入力（上向き）は下向きの力に対して、大きくなっており、鉛直方向の作用荷重による制御棒挿入性への影響はない。また、鉛直方向の作用荷重は、実際には交番荷重として作用することから、挿入時間の遅れに対する影響は小さく、スクラム目安時間を超えることはない。

5.2 燃料集合体の浮上り

鉛直方向地震による燃料集合体の浮上りの制御棒挿入性への影響については、独立行政法人 原子力安全基盤機構⁽¹⁾⁽²⁾で評価している。評価結果に基づき影響を評価すると、東海第二発電所における鉛直方向地震に対して燃料集合体が燃料支持金具設置深さ 60mm を超えるような浮上りは生じず、さらに、鉛直方向地震に加え水平方向地震が作用し燃料支持金具の面に沿って上方向に移動する事象を想定する場合でも、燃料支持金具からの離脱は生じない。

6. 評価結果

燃料集合体の地震応答解析の結果、燃料集合体の最大応答相対変位は図 3-1 に示したように 40mm 以下である。

また、制御棒挿入試験の結果より、燃料集合体の相対変位が約 40mm においても、通常のスラム仕様値 90% ストローク 3.5 秒以内であり、試験後において制御棒の外観に有意な変化がないことが確認された。さらに、鉛直方向地震による制御棒挿入性への影響について、制御棒に作用する荷重、挿入時間遅れ及び燃料集合体の浮上りに対して問題ないことを確認した。

したがって、基準地震動 S_s に対する制御棒の挿入性と健全性は確保される。

7. 引用文献

- (1) 独立行政法人 原子力安全基盤機構 平成 17 年度「原子炉施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 機器耐力その 2 (BWR 制御棒挿入性) に係る報告書」(平成 18 年 9 月)
- (2) 独立行政法人 原子力安全基盤機構 平成 17 年度「原子炉施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 機器耐力その 3 (総合評価) に係る報告書」(平成 18 年 8 月)