

|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| 島根原子力発電所第2号機 審査資料 |                     |
| 資料番号              | NS2-添 2-006-02 改 02 |
| 提出年月日             | 2022年9月8日           |

VI-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書

S2 補 VI-2-6-2-1 R0

2022年9月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 目 次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 1. 概要                         | 1  |
| 2. 一般事項                       | 1  |
| 2.1 構造計画                      | 1  |
| 2.2 評価方針                      | 3  |
| 3. 燃料集合体の地震応答解析               | 5  |
| 4. 制御棒の挿入性試験                  | 6  |
| 4.1 試験装置                      | 6  |
| 4.2 試験方法                      | 6  |
| 4.3 試験結果                      | 7  |
| 5. 制御棒挿入性に対する上下地震動による影響評価     | 13 |
| 5.1 上下地震動による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機能は、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、燃料集合体の水平地震動による相対変位であることから、制御棒挿入性試験は水平地震動に対して実施する。また、上下地震動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、タイロッド及び落下速度リミッタであり、制御棒挿入性試験により挿入機能が確認される。

なお、本評価はボロンカーバイド型制御棒及びハフニウム棒型制御棒を対象とする。

## 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（フォロワ付）制御棒は、ハンドル、落下速度リミッタ、タイロッドの溶接により骨組みを形成し、U字に加工したシースの中に中性子吸収棒を組み合わせたブレードを持つ。</p> | <p>249 mm</p> <p>4530 mm</p> <p>ハンドル</p> <p>ブレード</p> <p>シース</p> <p>フォロワ</p> <p>中性子吸収棒</p> <p>タイロッド</p> <p>落下速度リミッタ</p> <p>カップリング・ソケット</p> <p>燃料支持金具</p> <p>炉心支持板</p> <p>制御棒</p> <p>カップリング・ソケットの結合状態</p> <p>制御棒案内管</p> <p>制御棒駆動機構</p> <p>断面図</p> <p>制御棒</p> |

## 2.2 評価方針

制御棒挿入性評価については、J E A G 4 6 0 1-1991 追補版でのBWR用制御棒の評価手法を適用する。J E A G 4 6 0 1-1991 追補版の制御棒挿入性の評価手順を図 2-1 に示す。

制御棒の耐震性についての計算書では、建屋・機器連成系応答解析から得られた燃料集合体の相対変位が、制御棒の挿入試験で得られた燃料集合体の相対変位（約 40mm）以内であることを確認している。島根原子力発電所第 2 号機の制御棒の耐震性についての評価概要を表 2-2 に示す。

表 2-2 制御棒の耐震性についての評価概要

| 燃料集合体相対変位 | 機能確認済相対変位            | 鉛直方向震度<br>(上部格子板位置) |
|-----------|----------------------|---------------------|
| 35.0mm    | 約 40mm <sup>*1</sup> | 1.35 <sup>*2</sup>  |

注記\*1： 機能確認済相対変位は、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）にて実施した挿入性試験で取得したもの。燃料集合体の相対変位が約 40mm においても、スクラム時の制御棒挿入時間が全ストロークの 75% 挿入で 1.62 秒を超えることはない。

\*2： VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき、設計用震度 I（基準地震動  $S_s$ ）を設定

なお、ボロンカーバイド型制御棒及びハフニウム棒型制御棒の運転寿命は、核的寿命、機械的寿命のうち短い方で規定される。このうち、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。

一方、ハフニウム棒型制御棒のハフニウム棒は、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のように内圧を保持する構造ではないため、機械的変形要因はない。また、ハフニウム棒型制御棒は、ハフニウム棒と構造部材の熱膨張差や寿命末期におけるハフニウム棒の中性子照射による形状変化の影響を及ぼさない構造としている。

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。

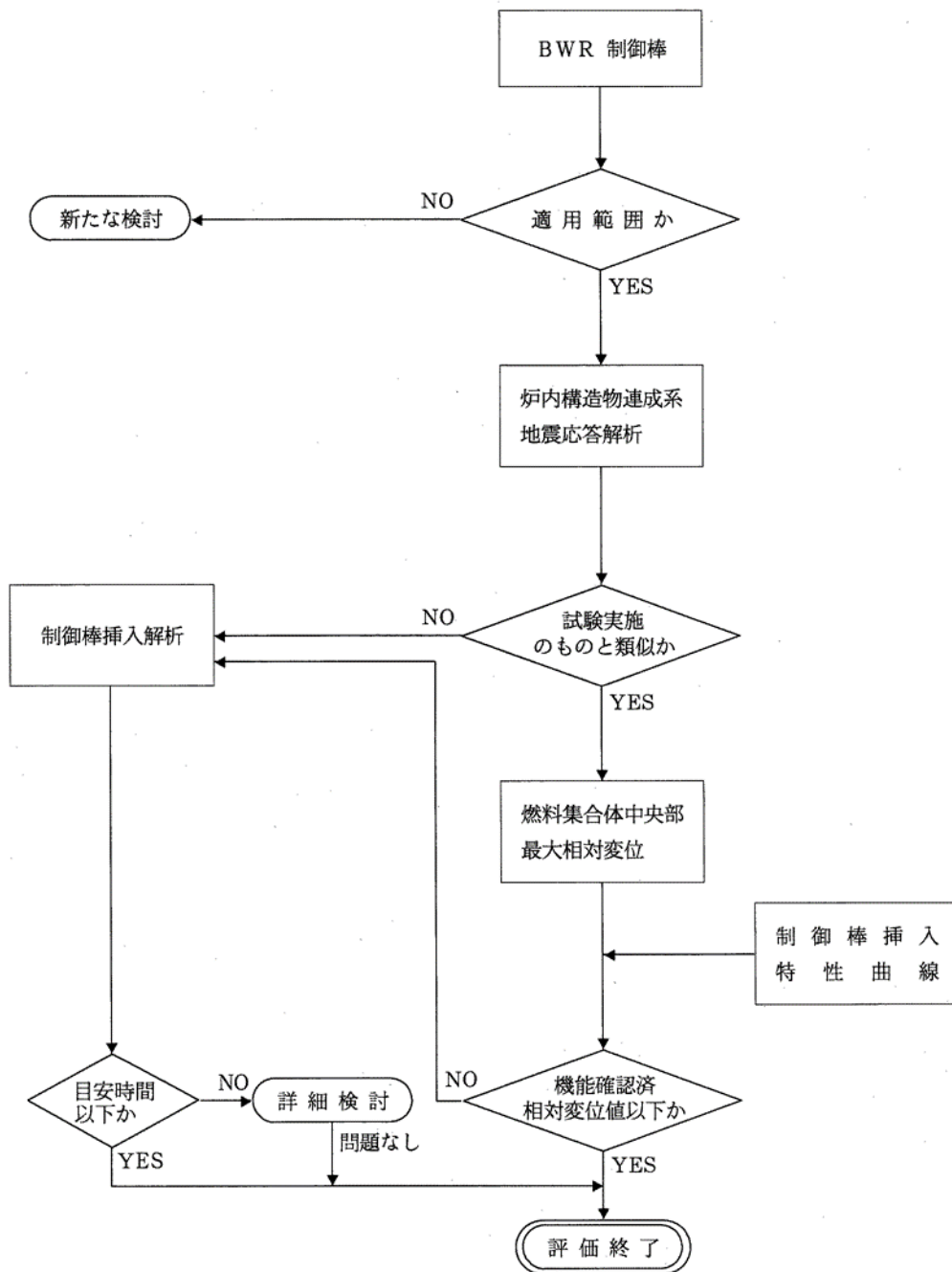


図 2-1 制御棒挿入性の評価手順 (BWR) (J E A G 4 6 0 1-1991 追補版)

### 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VI-2-2-1「炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉本体の基礎の地震応答計算書」に示している。

制御棒挿入性の評価においては，材料物性の不確かさを考慮して計算された最大相対変位 35.0mm 及びVI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に設計用震度 I（基準地震動  $S_s$ ）として示す最大鉛直加速度  $1.35 \times 9.8 \text{m/s}^2$  を用いる。

#### 4. 制御棒の挿入性試験

水平地震動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、試験を実施した。

なお、試験は二種類の制御棒について実施した。これらの制御棒は中性子吸収材が異なっており、ボロンカーバイド粉末を使用したもの、ハフニウム棒を使用したものがある。以下、制御棒の区分を容易にするため、上記制御棒をそれぞれボロンカーバイド型制御棒、ハフニウム棒型制御棒と称する。ボロンカーバイド型制御棒の試験は昭和 54 年までに当時の株式会社 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。ハフニウム棒型制御棒の試験は昭和 62 年までに当時の株式会社 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。

##### 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。

燃料集合体は質量を模擬するため、BWRの一般的な仕様に合わせて燃料ペレットに鉛を使用している。水圧制御ユニット、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。

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強制加振し、試験容器内の模擬燃料集合体を慣性力により応答させることでスクラム試験を実施した。

試験では、図 4-2 に示す計測装置により、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及び図4-4に燃料集合体相対変位と75%ストロークスクラム時間の関係を示す。

図4-3及び図4-4に示すとおり、燃料集合体の相対変位が約40mmまでは、スクラム時の制御棒挿入時間が全ストロークの75%挿入で1.62秒以内\*であることを確認した。

なお、制御棒挿入性試験において制御棒の外観に有意な変化がないことを確認した。

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<br>( 質量模擬のため燃料ペレットに<br>鉛を使用 )                       |
| 制御棒       | 実機仕様  |
| チャンネルボックス | 実機仕様 (板厚: 120mil)   |
| 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 (高速スクラム型)  |
| 水圧制御ユニット  | 実機仕様 (高速スクラム型)  |
| 油圧加振器     | 駆動力: <input type="text"/> N<br>ストローク: <input type="text"/> mm |

注記\*: 「原子炉設置変更許可申請書 添付資料八」に示す安全解析上の設計仕様を満足することをもって制御棒挿入性が確保されているものとみなす。

表 4-2 試験条件

| 項目            | 条件      |
|---------------|---------|
| 温度            |         |
| 圧力            |         |
| 加振条件          |         |
| スクラム開始時の制御棒位置 | 全引き抜き状態 |

|  |
|--|
|  |
|--|

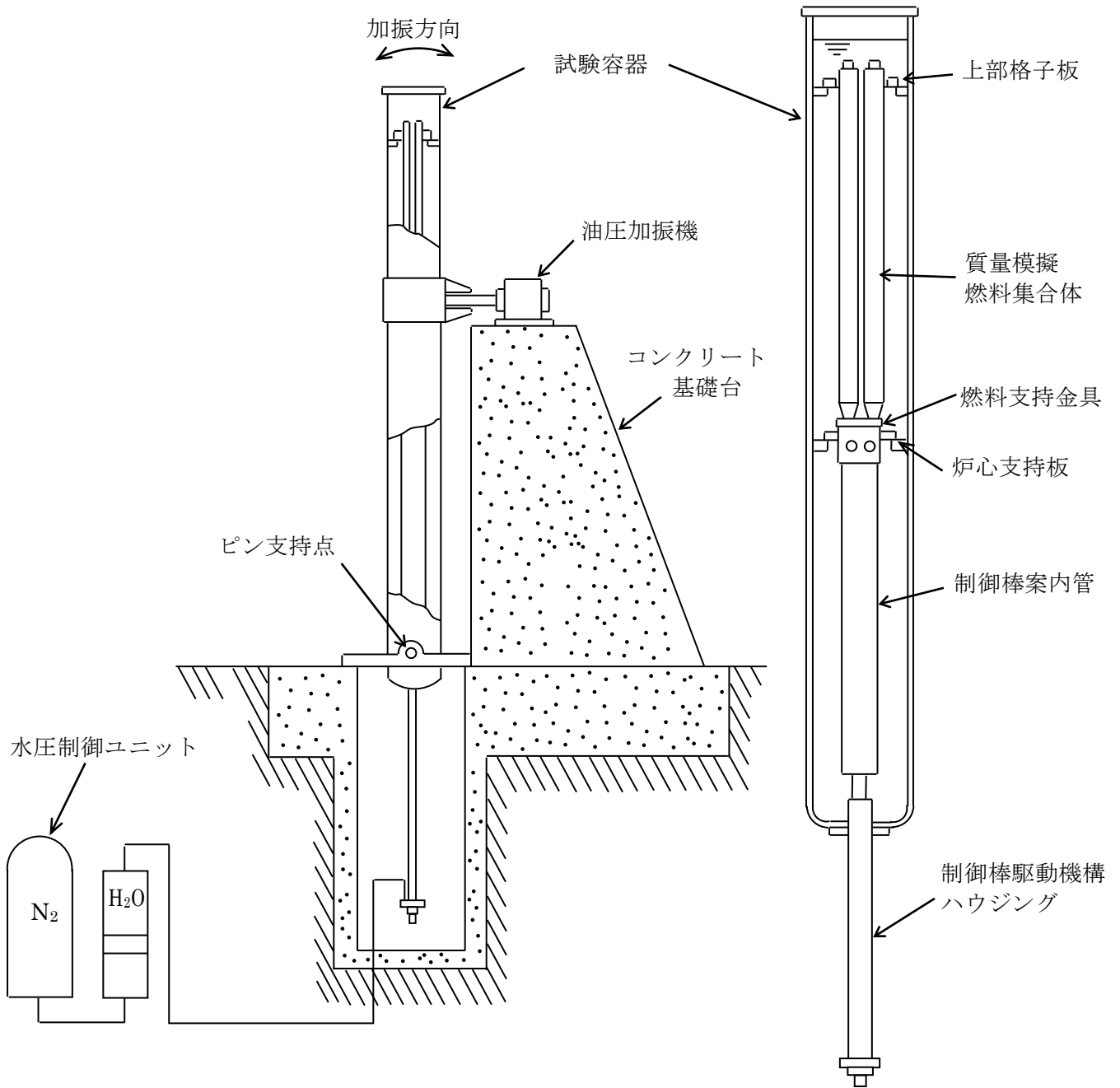


図 4-1 試験装置の概要

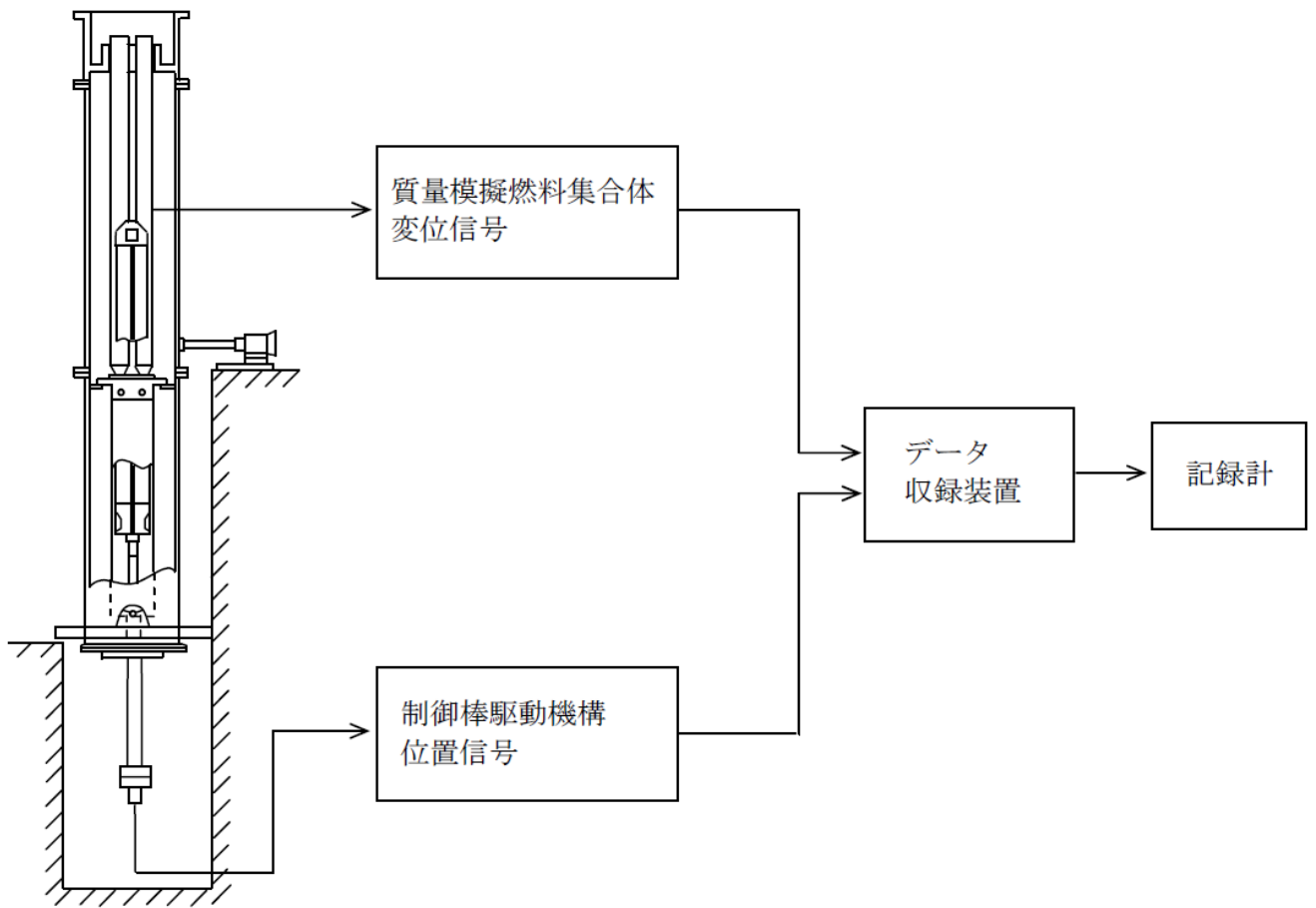


図 4-2 計測装置の概要

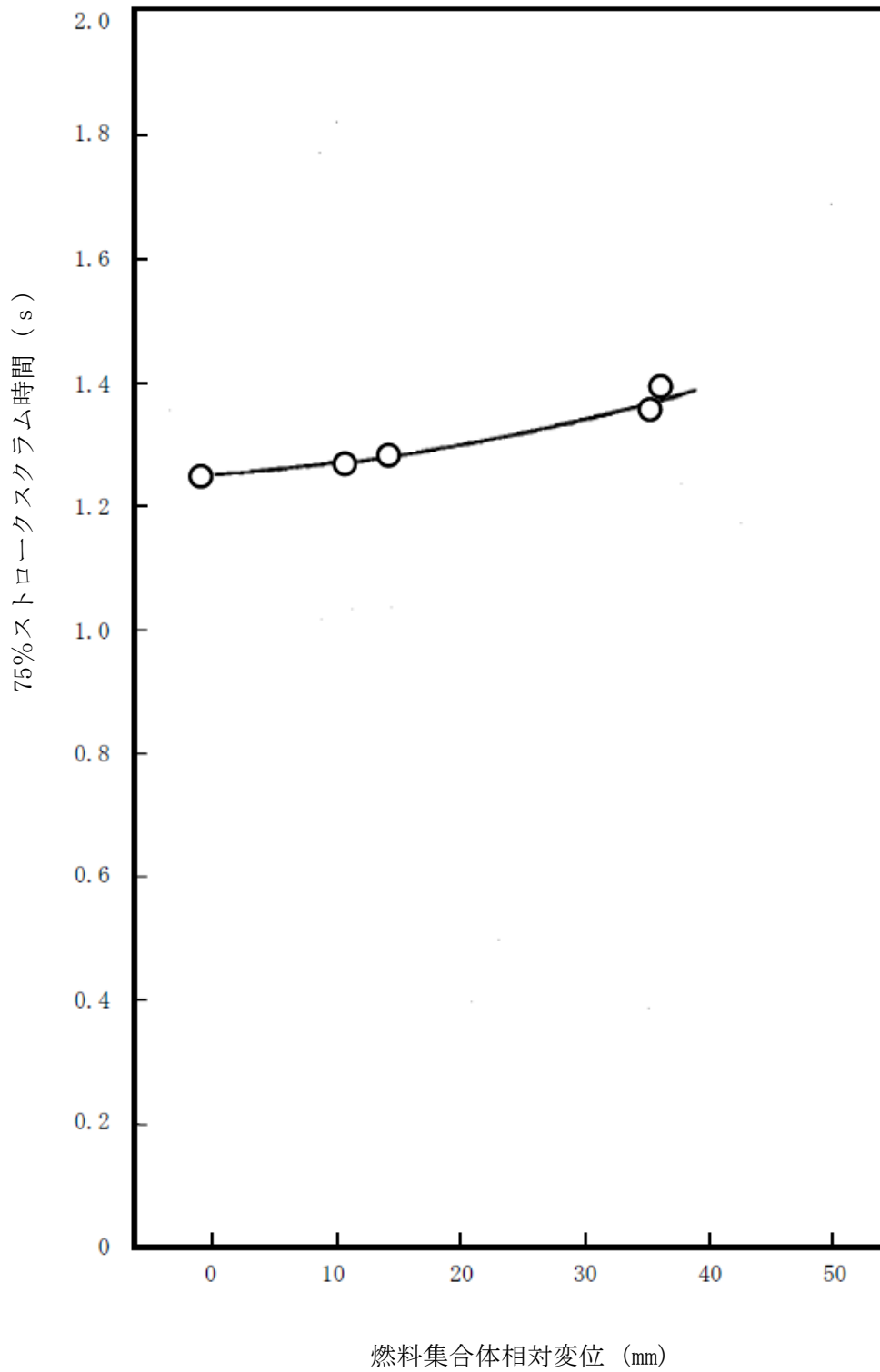


図 4-3 燃料集合体相対変位のスクラム時間に及ぼす影響  
(ボロンカーバイド型制御棒)

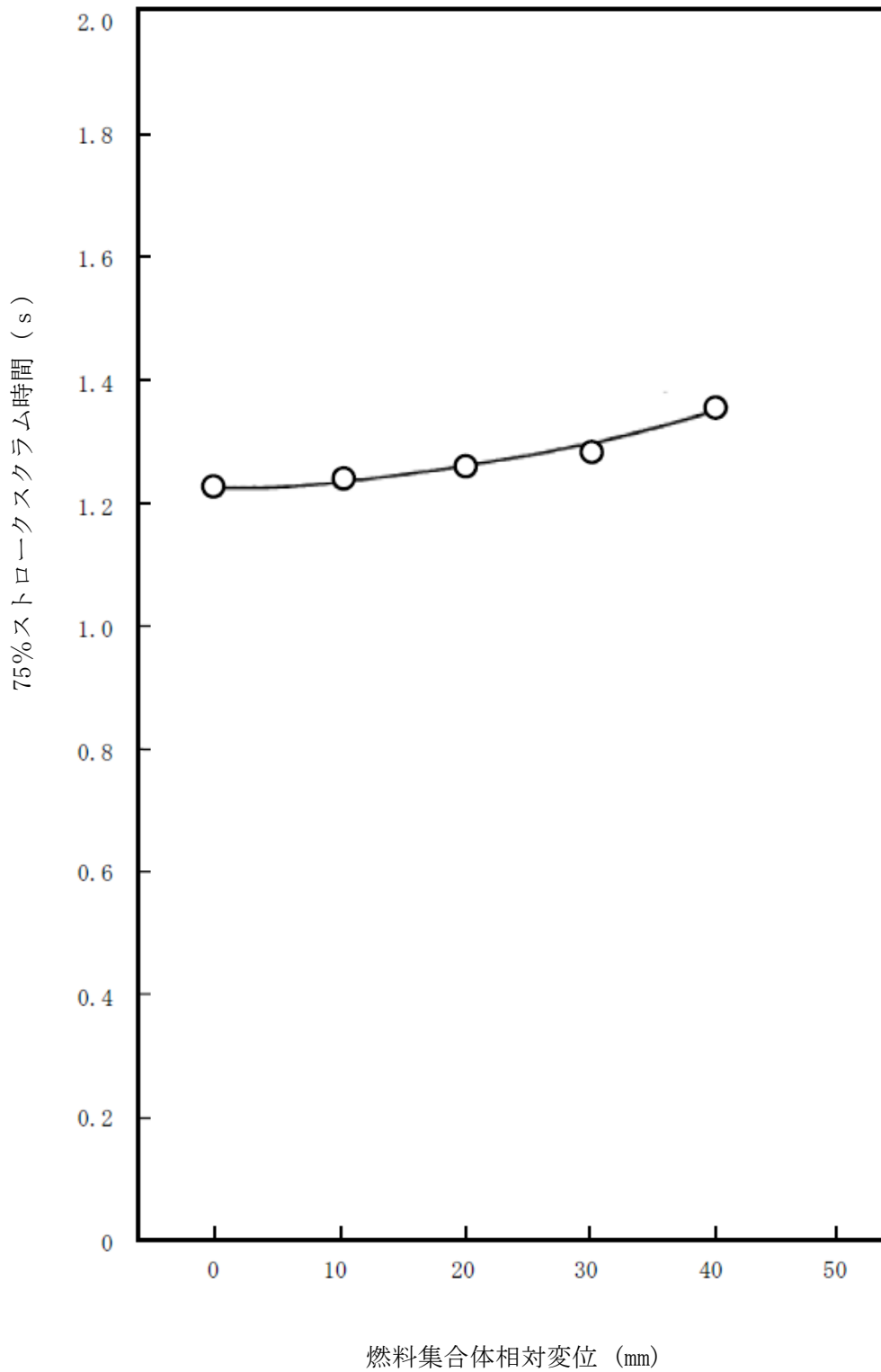


図 4-4 燃料集合体相対変位のスクラム時間に及ぼす影響  
(ハフニウム棒型制御棒)

## 5. 制御棒挿入性に対する上下地震動による影響評価

上下地震動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) 上下地震動による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 上下地震動による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方向震度 1.35 が、仮に常時制御棒の挿入方向と逆向き（下向き）に作用した場合でも、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、上下地震動による制御棒挿入性への影響はない。

また、上下地震動は、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、スクラム時の制御棒挿入時間が全ストロークの 75% 挿入で 1.62 秒を超えることはない。

### 5.2 燃料集合体の浮上り

上下地震動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、引用文献(1)及び(2)で評価している。引用文献に基づいた影響評価により、島根原子力発電所第2号機における上下地震動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ないことを確認した。

また、上下地震動に加え水平地震動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ことを確認した。

## 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 40mm 以下である。

また、制御棒挿入性試験の結果より、燃料集合体の相対変位が約 40mm までの範囲においても、通常のスクラム時の制御棒挿入時間が全ストロークの 75% 挿入で 1.62 秒以内であること、並びに、制御棒挿入性試験後、制御棒の外観に有意な変化がないことを確認した。

さらに、上下地震動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「原子力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「原子力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)