

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-03-0600-16_改2
提出年月日	2021年 5月 14日

補足-600-16 制御棒の挿入性評価について

目次

1.	はじめに	1
2.	今回工認における制御棒挿入性評価の概要	2
3.	地震応答解析による燃料集合体相対変位（発生値）の算出	4
4.	確認済相対変位（許容値）の設定に係る制御棒挿入性試験データの拡充	8
4.1	既工認と今回工認で実施した制御棒挿入性試験の比較	10
4.2	高温時の変位特性を考慮したチャンネルボックス板厚の調整	11
4.3	制御棒挿入性試験結果	14
4.4	制御棒挿入性試験後のチャンネルボックス健全性確認結果	17
4.5	制御棒挿入性試験後の制御棒健全性確認結果	18
4.6	既往知見を踏まえた制御棒挿入性試験結果に対する考察	22
4.6.1	制御棒挿入時間	22
4.6.2	チャンネルボックスの弾塑性特性	24
5.	制御棒挿入性評価の妥当性確認	27
5.1	制御棒挿入性評価における実機条件との差異項目の分類及び検討項目の整理	30
5.2	実機条件との差異に係る検討	32
5.2.1	チャンネルボックスの弾塑性特性の影響確認	32
5.2.2	制御棒挿入性試験における保守性（制御棒挿入性解析に基づく定量評価）	37
5.2.3	鉛直方向加速度の影響	44
5.3	制御棒挿入性評価の妥当性	52
6.	制御棒挿入性試験及び制御棒挿入性解析に基づく確認済相対変位（許容値）の設定	54
7.	まとめ	54
8.	引用文献	54

別紙 CR-IN の概要

1. はじめに

女川原子力発電所第2号機の今回工認における制御棒挿入性評価については、「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」(以下「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」という。)での評価手法を適用し、新規制基準による基準地震動 S_s に対する炉内構造物系地震応答解析から得られた燃料集合体中央部最大相対変位(以下「燃料集合体相対変位」という。)が、制御棒挿入性試験で得られた機能確認済相対変位値(以下「確認済相対変位」という。)以内であることを添付書類「VI-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」にて確認している。

本資料は、女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性評価に関して、今回工認で実施した燃料集合体相対変位データ拡充のための制御棒挿入性試験及びそれらを踏まえた制御棒挿入性評価の妥当性に係る検討結果を説明するものである。

なお、設置変更許可段階では、平成26年7月設置変更許可申請時の基準地震動 $S_{s-1,2}$ に対する燃料集合体相対変位が45.3 mmであったこと及び制御棒挿入性評価に対する保守性を考慮して確認済相対変位55 mmと設定していたが、今回工認では改めて制御棒挿入性評価の妥当性に係る検討結果を踏まえて確認済相対変位を60mmと設定した。また、今回工認における基準地震動 S_s に対する燃料集合体相対変位は54.2 mmとなっている。

2. 今回工認における制御棒挿入性評価の概要

今回工認における女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性評価は、既工認の評価手法と同様、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版に記載のBWR用制御棒の評価手法に基づいている。J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版の評価手法を図2-1に示す。

女川原子力発電所2号機の制御棒挿入性評価は、燃料集合体を含めた炉内構造物系地震応答解析モデルを用いて、基準地震動 S_s に対する水平方向の地震応答解析結果として得られる燃料集合体相対変位（発生値）が、制御棒挿入性試験により得られる制御棒挿入性特性曲線から設定した確認済相対変位（許容値）以下であることを確認する。

以降、本資料では、3章として、基準地震動 S_s に対する地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出について説明する。燃料集合体相対変位の算出結果として、基準地震動 S_s に対して最大54.2mmであることを確認した。

4章では、基準地震動 S_s の増大に伴って燃料集合体相対変位が大きくなることを考慮し、確認済相対変位データの拡充を目的として、既工認と同様の制御棒挿入性試験を実施した結果について説明する。制御棒挿入性試験結果として、燃料集合体相対変位約60mmに対する75%ストロークスクラム時間が規定値（1.62s*）を満足することを確認した。

5章では、上記を踏まえ、地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出及び制御棒挿入性試験の結果について、それぞれ実機条件との差異項目を抽出し、各差異項目における影響について制御棒挿入性解析を用いて解析的に検討し、改めて制御棒挿入性評価の妥当性を総合的に確認した結果について説明する。

6章では、4章及び5章の結果を踏まえ、今回工認における制御棒挿入性評価に用いる確認済相対変位（許容値）を60mmと設定し、基準地震動 S_s に対する地震応答解析による燃料集合体相対変位（54.2mm）が制御棒挿入性試験による確認済相対変位（60mm）以下であることを満足することを確認した。

注記*：75%ストロークスクラム時間1.62秒以内については、「原子炉設置変更許可申請書本文五号」による

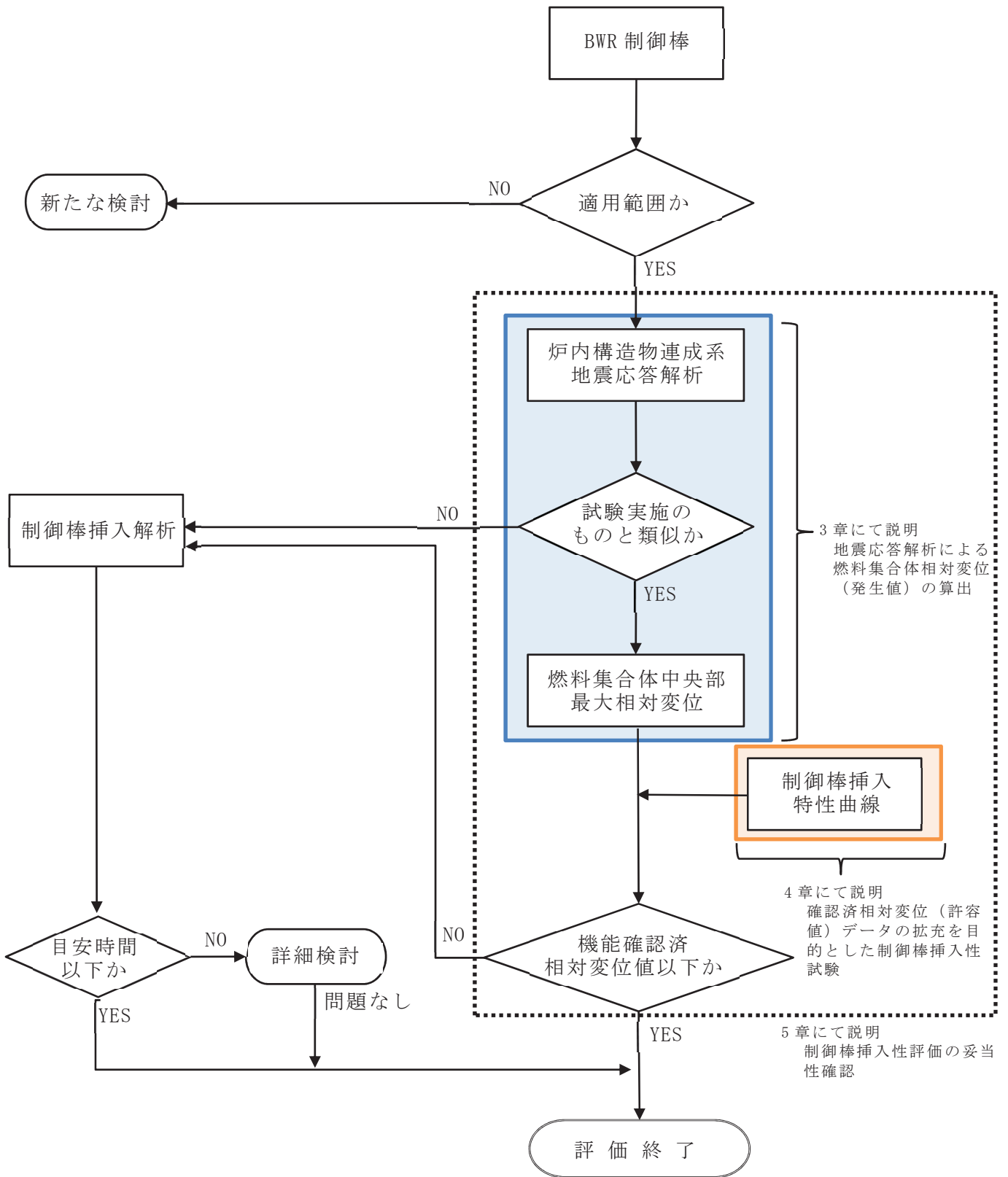


図 2-1 制御棒挿入性評価の評価手法
(J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に一部加筆)

3. 地震応答解析による燃料集合体相対変位（発生値）の算出

制御棒挿入性評価における燃料集合体相対変位は、既工認同様、燃料集合体を含む炉内構造物系地震応答解析モデルを用いて、基準地震動 S_s に対する水平方向の地震応答解析結果として算出する。また、燃料集合体相対変位とは、図 3-1 に示すように燃料集合体の上下端の変位を 0 とした場合の中央部の最大変位である。なお、炉内構造物系地震応答解析モデルを図 3-2～図 3-4 に示す。

今回工認の基準地震動 S_s に対する燃料集合体相対変位は、表 3-1 の通り、基準地震動 $S_s - D 2$ （EW 方向）が最大で 54.2mm* となることを確認した。

なお、今回工認における燃料集合体相対変位は、新規制基準に伴う基準地震動 S_s の増大に伴って、既工認の制御棒挿入性評価に適用していた確認済相対変位 40mm を上回る結果となった。

注記*：補足説明資料「600-8-1 建屋-機器連成解析モデルの時刻歴応答解析における材料物性の不確かさ等を考慮した設計用地震力の設定について」参照

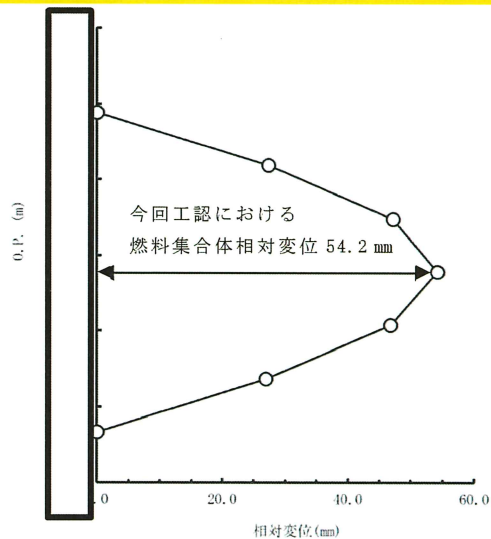
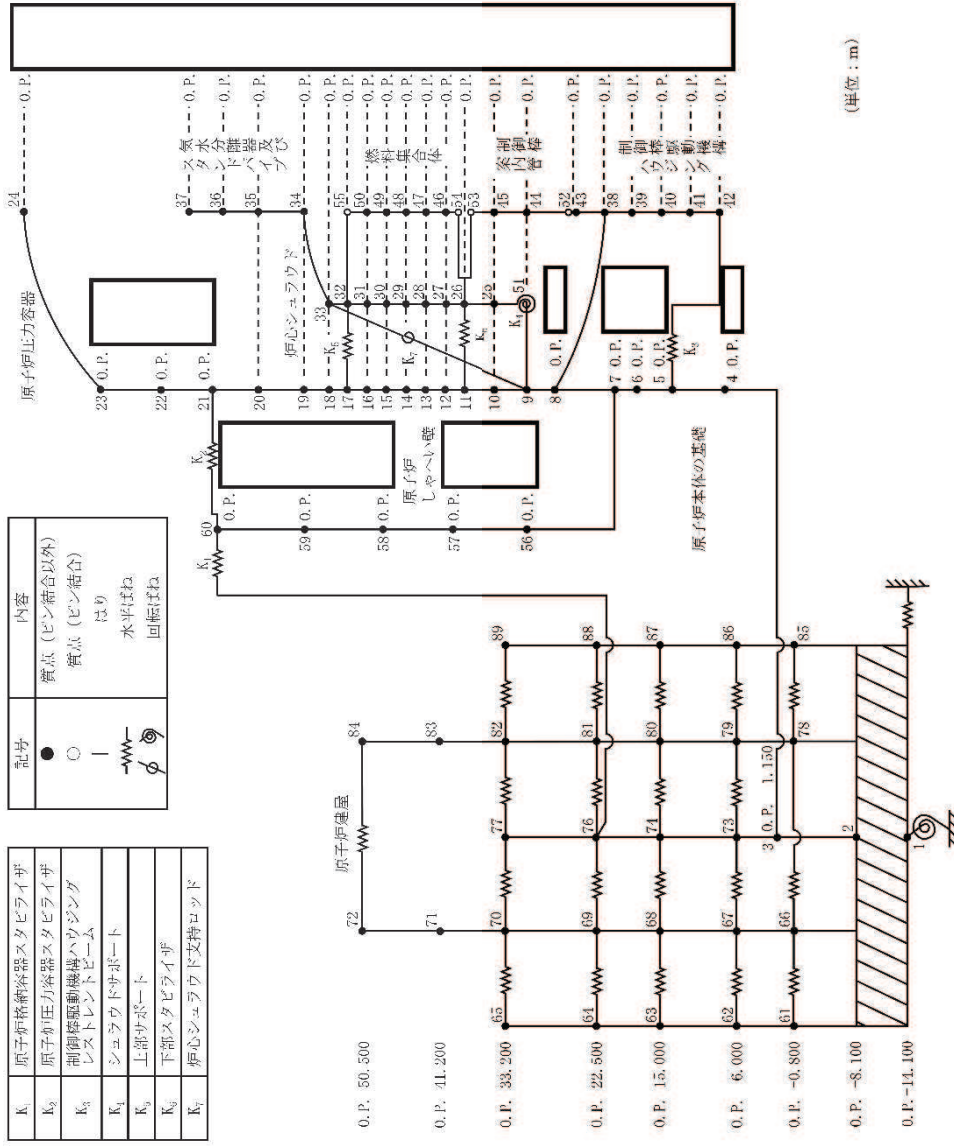


図 3-1 地震応答解析による燃料集合体相対変位

表 3-1 基準地震動 S_s に対する燃料集合体相対変位

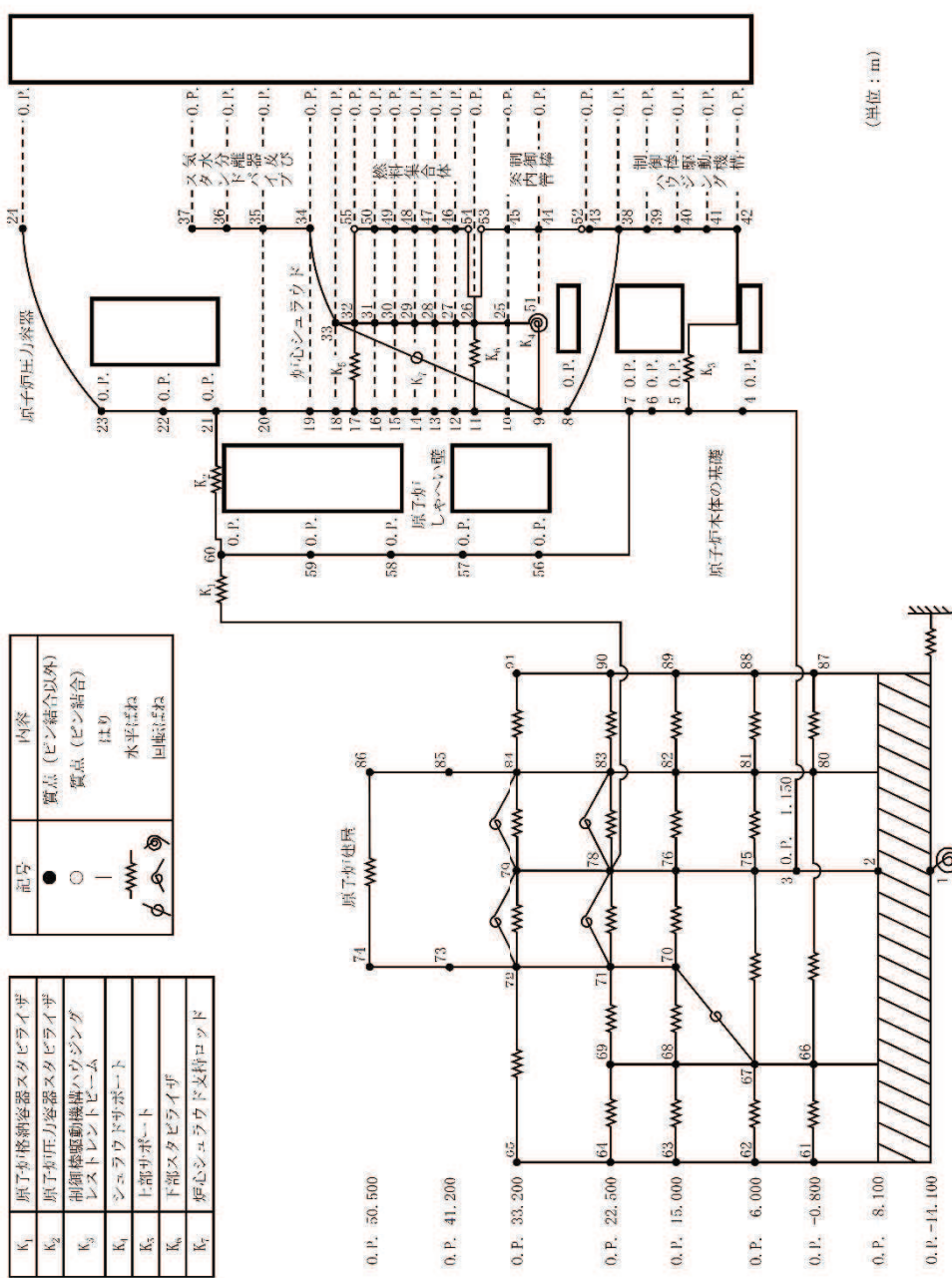
基準地震動	燃料集合体相対変位 (mm)	
	NS 方向	EW 方向
$S_s - D 1$	47.7	49.8
$S_s - D 2$	50.5	<u>54.2</u>
$S_s - D 3$	37.9	37.0
$S_s - F 1$	33.4	31.4
$S_s - F 2$	41.2	39.5
$S_s - F 3$	39.4	36.6
$S_s - N 1$	33.3	35.4



注* : 添付書類「VI-2-3-2 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格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」より

図 3-2 炉内構造物系地震応答解析モデル (NS 方向)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



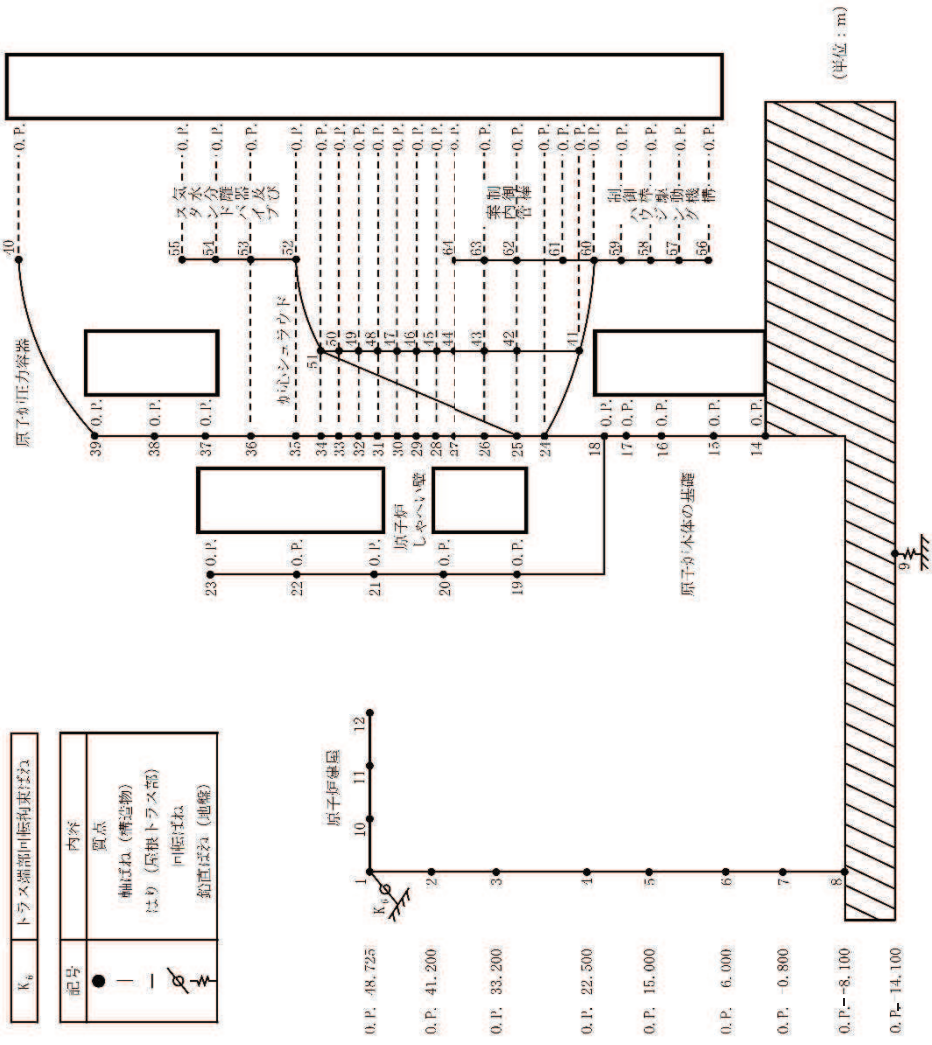
記号	内容
●	質点 (ピン結合以外)
○	質点 (ピン結合)
—	はり
—	水平はね
φ	回転はね

K_1	原子炉格納容器スタビライザ
K_2	原子炉圧力容器スタビライザ
K_3	制御棒駆動機構ハウジングレストレイントビーム
K_4	シユラウドサポート
K_5	上部サポート
K_6	下部スタビライザ
K_7	炉心シユラウド支持ロッド

注* : 添付書類「VI-2-3-2 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格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」より

図 3-3 炉内構造物系地震応答解析モデル (EW 方向)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



注* : 添付書類「VI-2-3-2 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格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」より

図 3-4 炉内構造物系地震応答解析モデル (鉛直方向)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 確認済相対変位（許容値）の設定に係る制御棒挿入性試験データの拡充

女川原子力発電所第2号機の既工認の制御棒挿入性評価では、確認済相対変位を40 mmとしていたが、今回工認では新規制基準による基準地震動 S_s の増大を考慮し、既工認と同様の制御棒挿入性試験を実施し、データを拡充している（図4-1）。

試験の結果、75%ストロークスクラムに要する時間が規定値（1.62s）に達する際の燃料集合体の相対変位として60.9 mm（試験3回の平均値）が得られた。また、制御棒挿入性試験後のチャンネルボックス及び制御棒の健全性に問題はなく、制御棒の挿入性に係る機能に影響を及ぼすものではないことを確認した。

本章では、今回工認における制御棒挿入性試験データの拡充について、試験条件の既工認との比較、制御棒挿入性試験結果、試験後のチャンネルボックス及び制御棒の健全性確認結果及び既往知見を踏まえた考察を纏める。

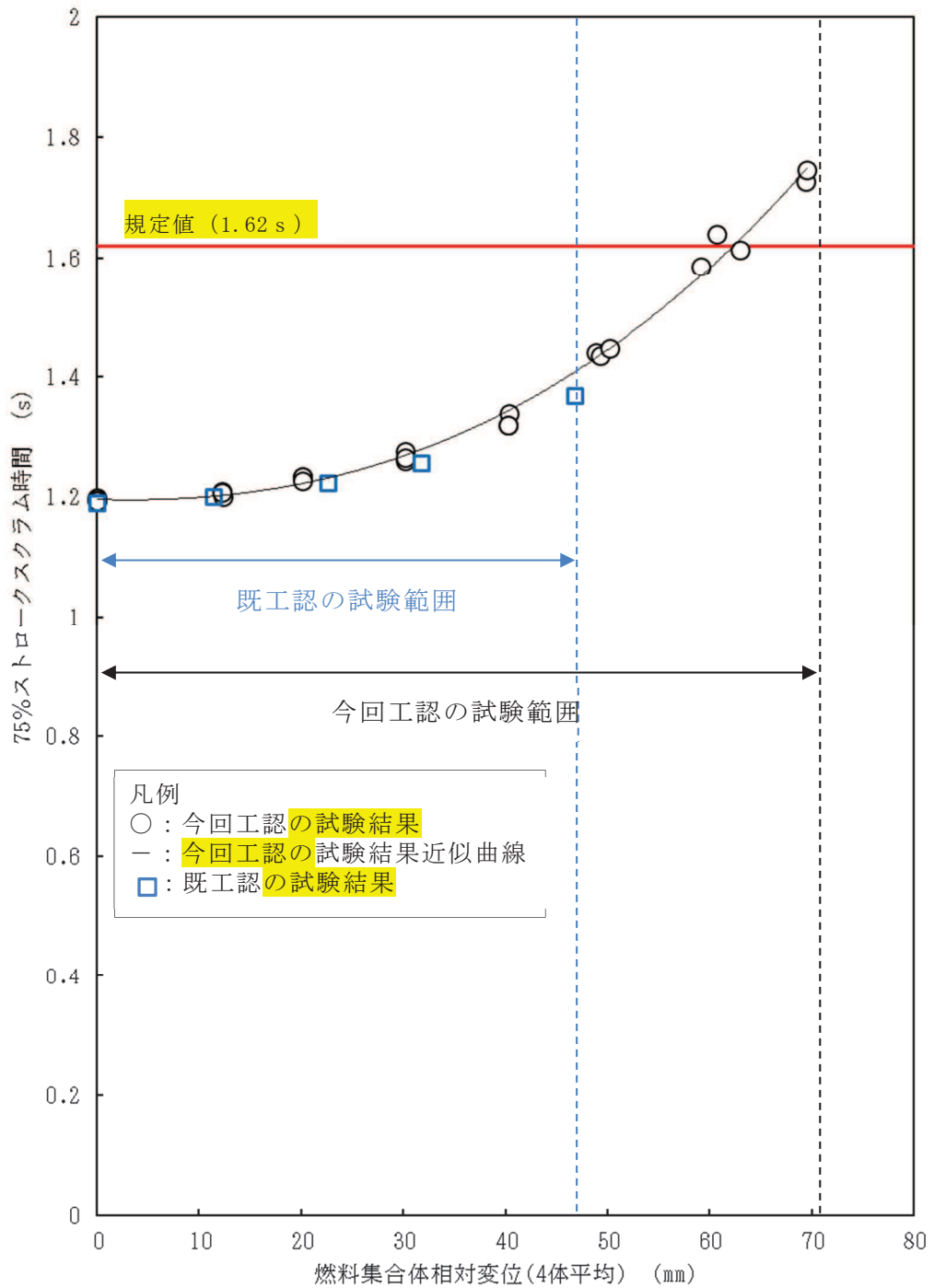


図 4-1 制御棒挿入性試験の既工認との比較概要図

4.1 既工認と今回工認で実施した制御棒挿入性試験の比較

今回工認の制御棒挿入性試験は、基本的に既工認同様の試験条件としている。ただし、既工認より大きな変位でのデータを拡充するためには加振台の性能による制限を受けることから、今回工認では、チャンネルボックスの変位特性を考慮し、高温時の曲げ剛性と同等になるようにチャンネルボックスの板厚を調整することで大きな相対変位を付加した。なお、チャンネルボックスの板厚の調整方法の詳細については4.2項に示す。

表4-1に既工認と今回工認の制御棒挿入性試験の比較結果を示す。また、図4-2に試験装置概要、図4-3に試験装置外観を示す。

表4-1 既工認と今回工認の試験の比較

条件項目	既工認	今回工認	備考
機器・装置構成	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬燃料集合体 (8×8燃料, チャンネルボックス含む) ・制御棒 ・燃料支持金具 ・制御棒案内管 ・制御棒駆動機構 ・水圧制御ユニット 	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬燃料集合体 (9×9燃料, チャンネルボックス含む) ・同左 ・同左 ・同左 ・同左 ・同左 	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬燃料集合体は鉛にて質量模擬 ・その他機器は実機仕様 (実機寸法) ・東芝エネルギーシステムズ (株) エネルギーシステム技術開発センターにて試験実施
試験方法	<ul style="list-style-type: none"> ・加振により燃料集合体に相対変位を発生させ、その状態で75%ストロークスクラムに要する時間を計測 ・正弦波により加振 ・各相対変位 (0~40 mm範囲で10 mm刻みに設定) に対して3回試験を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左 ・同左 ・各相対変位 (0~70 mm範囲で10 mm刻みに設定) に対して3回試験を実施 	<ul style="list-style-type: none"> 「0~50mm 挿入性試験」 ・各条件での試験後に確認の結果、有意な変形はなく、再使用可能であると判断したため、同一のチャンネルボックスを使用 「60mm, 70mm 挿入性試験」 ・1回ごとにチャンネルボックスを交換
温度	常温	同左	—
圧力	大気圧*1	同左	—
チャンネルボックス板厚	100mil (2.54 mm)*2	<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 15px;"></div>	<ul style="list-style-type: none"> ・高温時の変位特性 (加速度に対する変位量) と同等になるように設定 ・チャンネルボックス板厚を調整したことの配慮として、チャンネルボックス間隙を既工認と同等の条件に設定

注記*1：実機 (炉圧状態) では圧力抵抗が増すため、制御棒挿入に要する時間が増加する。制御棒挿入性試験は大気圧条件で実施するが、制御棒挿入圧力を調整し、ゼロスクラム時間 (無加振時の75%ストロークスクラムに要する時間) を実機と合わせることで炉圧状態を模擬している

*2：1mil=0.0254 mm

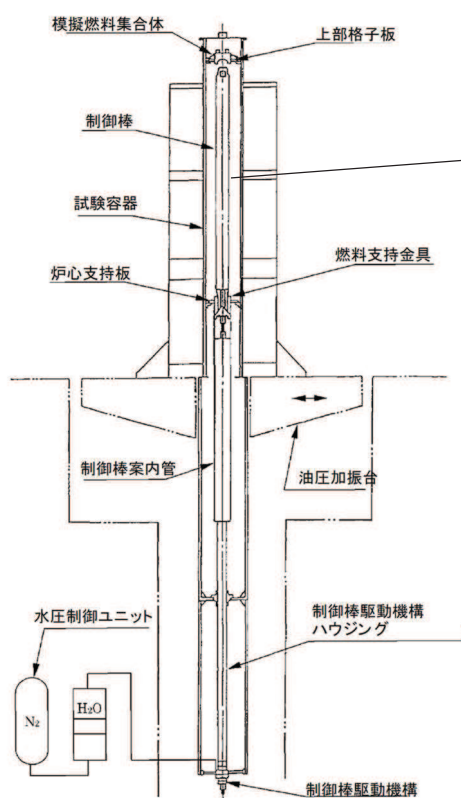


図 4-2 試験装置概要

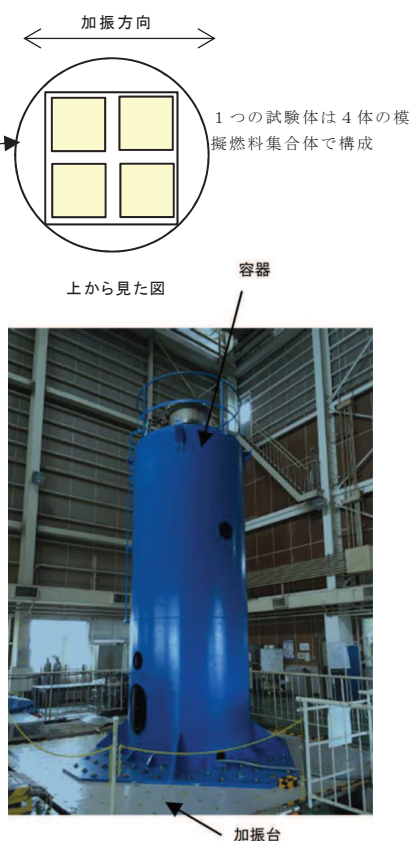


図 4-3 試験装置外観

4.2 高温時の変位特性を考慮したチャンネルボックス板厚の調整

今回工認では、より大きな相対変位の試験条件を設定するため、高温時の変位特性を考慮してチャンネルボックスの板厚を調整し、制御棒挿入性試験を実施した。チャンネルボックスの仕様比較を表 4-2、試験用チャンネルボックスの概略図を図 4-4 に示す。

板厚の調整に当たっては、チャンネルボックス材料（ジルカロイ）の実機使用環境（高温時）の縦弾性係数が、試験環境（常温時）と比較して約 3 割程度低くなる特徴を考慮している。ただし、試験環境（常温時）での縦弾性係数を実機使用環境（高温時）と同等に調整することは困難であることから、実機使用環境（高温時）の剛性を模擬するために実機仕様チャンネルボックスと試験用チャンネルボックスの変位特性（加速度に対する変位量）が同等になるように板厚を設定した。チャンネルボックスの変位－加速度の関係（試験条件設定用）を図 4-5 に示す。

表 4-2 チャンネルボックスの仕様比較

対象	使用温度 (°C)	縦弾性係数 (GPa)	板厚 (mm)
実機仕様チャンネルボックス	302 (高温)	77.2	2.54
試験用チャンネルボックス (板厚調整)	20 (常温)	98.0	

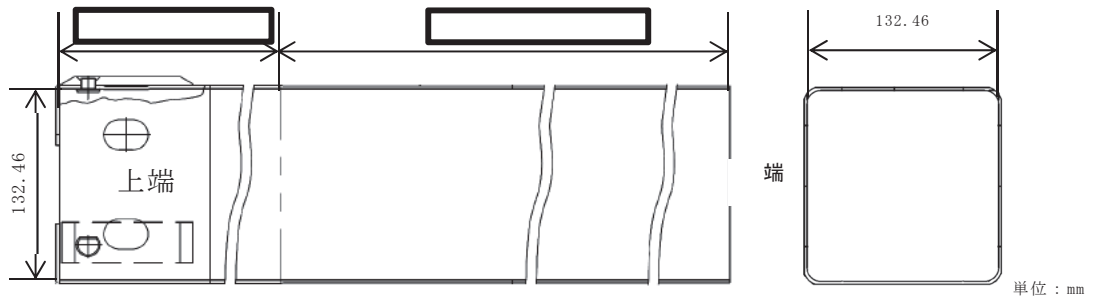


図 4-4 試験用チャンネルボックスの概略図



図 4-5 チャンネルボックスの変位－加速度の関係
(試験条件設定用)

「試験用チャンネルボックス板厚決定方法」



注記*：平成 26 年 7 月設置変更許可申請時の基準地震動 S s - 1, 2 に対する燃料集合体相対変位 45.3 mm を考慮し，チャンネルボックスの変位－加速度の関係から算出した加速度

今回工認の制御棒挿入性試験に用いるチャンネルボックス板厚の調整に当たっては，スクラム時の運転状態を考慮した際に最も高温状態になった場合を想定し，実機使用環境（高温時）として最高使用温度（302℃）を考慮した。最高使用温度（302℃）は，運転状態における炉水温度（280～290℃程度）より高い温度設定であるが，約 10～20℃程度の温度差によるチャンネルボックスの縦弾性係数の差は約 1～2%* と小さいため，制御棒挿入性に与える影響は軽微であると考えられる。

なお，チャンネルボックス板厚を調整したことでチャンネルボックス間の間隙が広くなり，制御棒挿入性に影響を与えることがないように，上部格子板及び燃料支持金具の寸法を調整することでチャンネルボックス間の間隙を既工認と同等の条件に設定している。既工認と今回工認のチャンネルボックス配置図を図 4-6 に示す。

注記*： The elastic properties of zirconium alloy fuel cladding and pressure tubing materials (Journal of Nuclear Materials, Volume 79, No. 1, January 1979, Table 4, H. E. Rosinger, D. O. Northwood) より，ジルカロイ 4 の縦弾性係数 E は下記式で計算される

$$E = 98.82 - 0.076 (T - 273) \quad (T \text{ は絶対温度})$$

【既工認】

【今回工認】

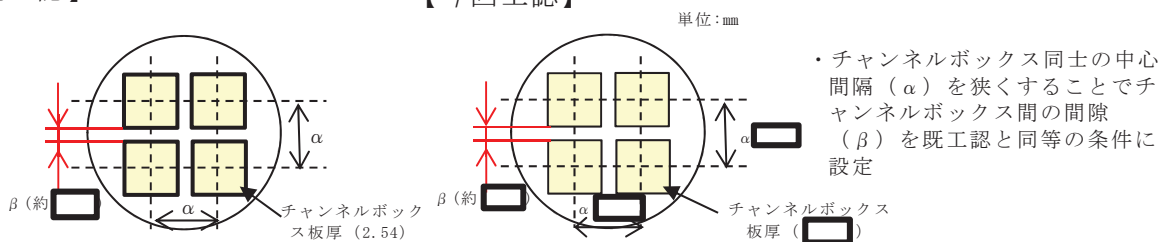


図 4-6 既工認と今回工認のチャンネルボックス配置図

4.3 制御棒挿入性試験結果

制御棒挿入性試験で得られた燃料集合体相対変位及び 75%ストロークスクラム時間を表 4-3 に示す。また、制御棒挿入性試験結果について図 4-7 に示す。今回工認の試験の結果、燃料集合体相対変位は 60.9 mm（試験 3 回の平均値）に対する 75%ストロークスクラム時間が 1.61s（試験 3 回の平均値）となった。

なお、相対変位 45 mm 程度までのデータにおいて、今回工認と既工認時の制御棒挿入性については同様な傾向を示している。今回工認では、チャンネルボックスの板厚を実機仕様に合わせて調整したことにより、挿入抵抗は小さくなるが、相対変位 45 mm 程度では、チャンネルボックスと制御棒の変形に起因する抵抗が小さく、差が生じなかったものと考えられる。

また、制御棒挿入性試験時の各燃料集合体中央部の変位データより、試験体を構成する 4 つの燃料集合体が同位相で動いていることを確認した（図 4-8）。

表 4-3 制御棒挿入性試験における燃料集合体相対変位及び
75%ストロークスクラム時間

目標変位 (mm)	燃料集合体相対変位 (4 体平均) (mm)	75%ストローク スクラム時間 (s)	試験 3 回の平均値	
			燃料集合体 相対変位 (mm)	75%ストローク スクラム時間 (s)
0	0	1.20	0	1.20
	0	1.20		
	0	1.19		
10	12.3	1.20	12.3	1.21
	12.2	1.21		
	12.2	1.21		
20	20.2	1.23	20.2	1.23
	20.2	1.23		
	20.2	1.23		
30	30.2	1.26	30.2	1.27
	30.1	1.28		
	30.2	1.27		
40	40.4	1.34	40.3	1.33
	40.3	1.32		
	40.3	1.32		
50	48.8	1.44	49.5	1.44
	49.3	1.44		
	50.2	1.45		
60	59.1	1.59	60.9	1.61
	60.7	1.64*		
	63.0	1.61		

注記*：75%ストロークスクラム時間が 1.62s を超えているため、5 章にて制御棒挿入性試験の保守性を解析的に確認した上で確認済相対変位を設定する

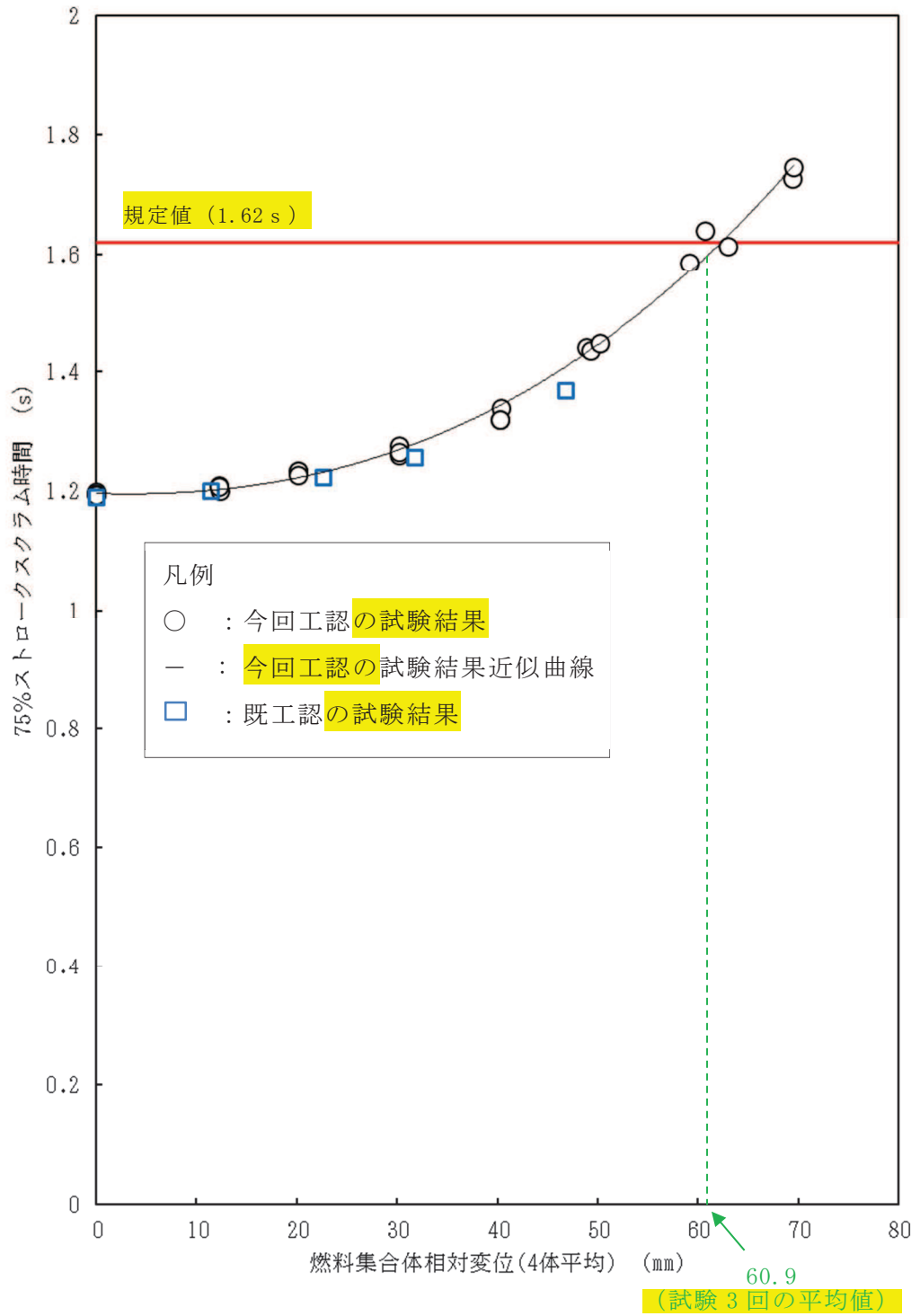


図 4-7 制御棒挿入性試験結果

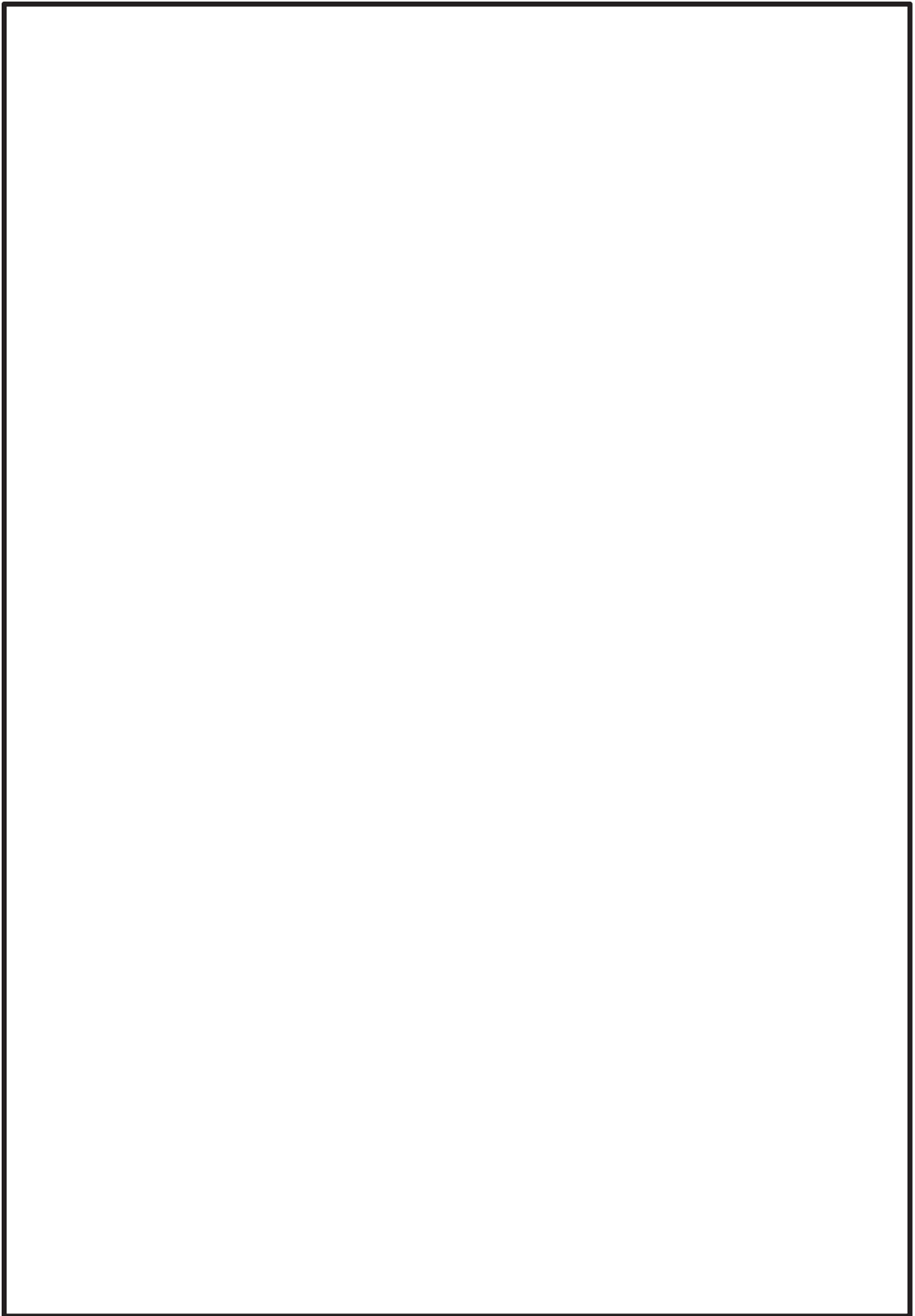


図 4-8 燃料集合体変位データ（燃料集合体目標変位 60 mm試験実施時）

4.4 制御棒挿入性試験後のチャンネルボックス健全性確認結果

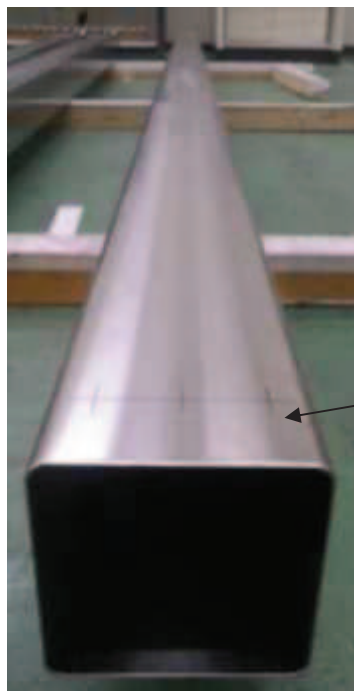
制御棒挿入性試験後のチャンネルボックスの外観の一例を図 4-9 に示す。制御棒挿入性試験後、チャンネルボックスの外観点検を行い、制御棒の挿入性に影響を与える損傷がないことを確認した。

チャンネルボックス詳細測定結果を表 4-4 に、チャンネルボックス周りの位置関係図を図 4-10 に示す。チャンネルボックスの詳細な測定の結果、長手の曲がり変化量が mm 及び波状変形量が mm* であり、チャンネルボックスと制御棒との間隙（約 mm）及びチャンネルボックスと燃料被覆管との間隙（ mm 以上）に対して十分に小さいため、冷却材流路や燃料集合体に影響を及ぼすものではないことを確認した。

また、チャンネルボックスと制御棒との間隙（約 mm）は常温時の値であるが、上部格子板、制御棒及びチャンネルボックスの構造・寸法に対するそれぞれの熱膨張量の関係から、高温時はチャンネルボックスと制御棒との間隙が広がり（約 mm）、制御棒挿入抵抗が小さくなるため、制御棒の挿入性や冷却材流路に影響を及ぼすものではない。

注記*：60 mm挿入性試験実施後の3回平均値

（チャンネルボックス上端側）



制御棒挿入性試験後の
チャンネルボックス

（チャンネルボックス下端側）

図 4-9 制御棒挿入性試験後のチャンネルボックスの外観

表 4-4 チャンネルボックス詳細測定結果

測定対象	曲がり変化量 (mm)	波状変形量 (mm)
チャンネルボックス (燃料集合体目標変位 60 mm 試験実施後 3 回平均値)		

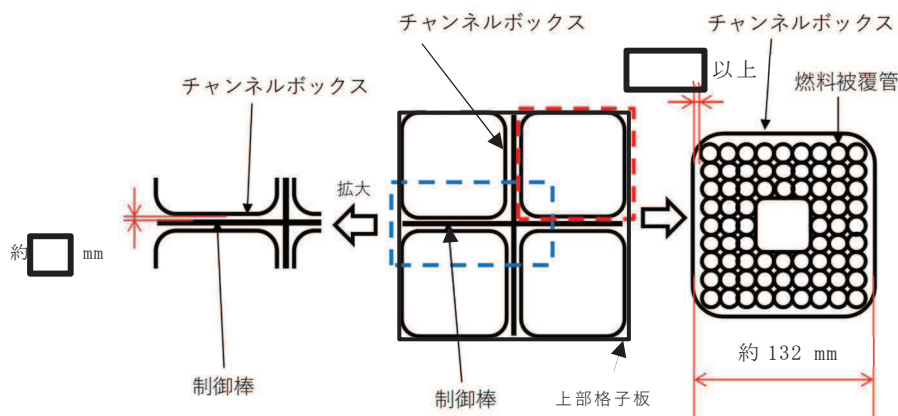
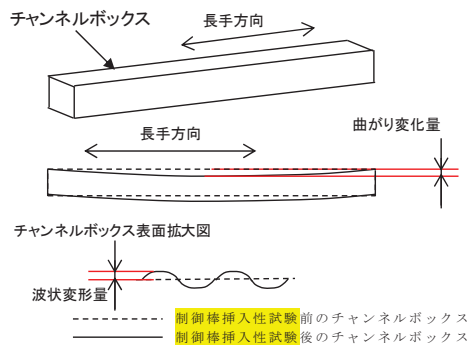


図 4-10 チャンネルボックス周りの位置関係図

4.5 制御棒挿入性試験後の制御棒健全性確認結果

制御棒挿入性試験後の制御棒の外観の一例を図 4-11 示す。制御棒の外観点検を行った結果は、制御棒のブレード、タイロッドに変形等は認められたものの、いずれの試験条件においても制御棒を構成するブレード（シース、中性子吸収棒）、タイロッド、ローラ等の健全性に影響を与える有意な損傷がないことを確認した。

制御棒ブレードの厚さ測定の結果（表 4-5）、局所的なシースの膨れが一部の試験条件において確認されたものの、ブレード全体にわたって仕様値を超えるものではなく、中性子吸収棒を支持する上下端位置でのブレード厚さは仕様値以内であり、シース内の中性子吸収棒が移動することはなく、制御棒の機能に影響はない（図 4-12）

また、シースの膨れの状況は、ブレード厚さが最大（ mm）になった箇所においても、ブレードの長手方向（上端～下端）及び横方向（ブレード中央部～翼端）に連続してブレード厚さの仕様値を超過しておらず局所的な範囲に収まっており、図 4-13 の通り、チャンネルボックス間の間隙は約 mm であるため、制御棒とチャンネルボックスが接触してチャンネルボックスとの間隙を閉塞するものではない。なお、照射によりチャンネルボックスの変形（反り）についても、定検毎に燃料集合体の向きを変更することで変形が生じにくくなるよう考慮しているため、影響軽微と考えられる。

さらに、シースが変形してブレード厚さが増加しても、制御棒の構造上、シースの冷却孔を通じて冷却材が流れるため、冷却材流量への影響もない（図 4-14）。

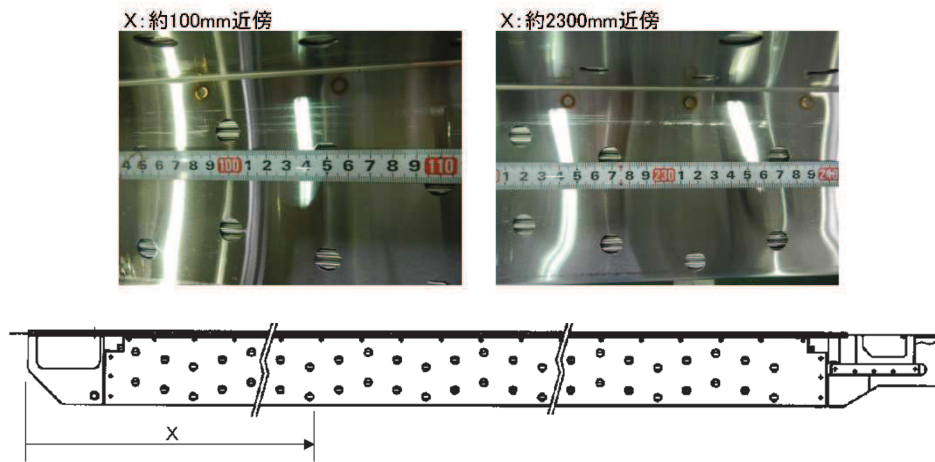


図 4-11 制御棒挿入性試験後の制御棒の外観

表 4-5 制御棒ブレードの厚さ測定結果*¹

ブレード厚さ	仕様値* ²	測定位置* ³								
		上端部			下端部			膨れ部* ⁴		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
試験実施前	8.3+1.7/-0.5									
試験実施後	8.3+1.7/-0.5									

注記*¹ : 相対変位 60 mm 目標における試験実施時 (制御棒 3 体の平均値)

*² : 寸法 (mm) は, 中性子吸収棒を内包する制御棒として炉心格子から決まる値。公差 (mm) はメーカーの製造能力により設定される値

*³ : A: ブレードの翼端, B: ブレード中央部, C: タイロッド部

*⁴ : ブレード長手方向における最大値の平均値

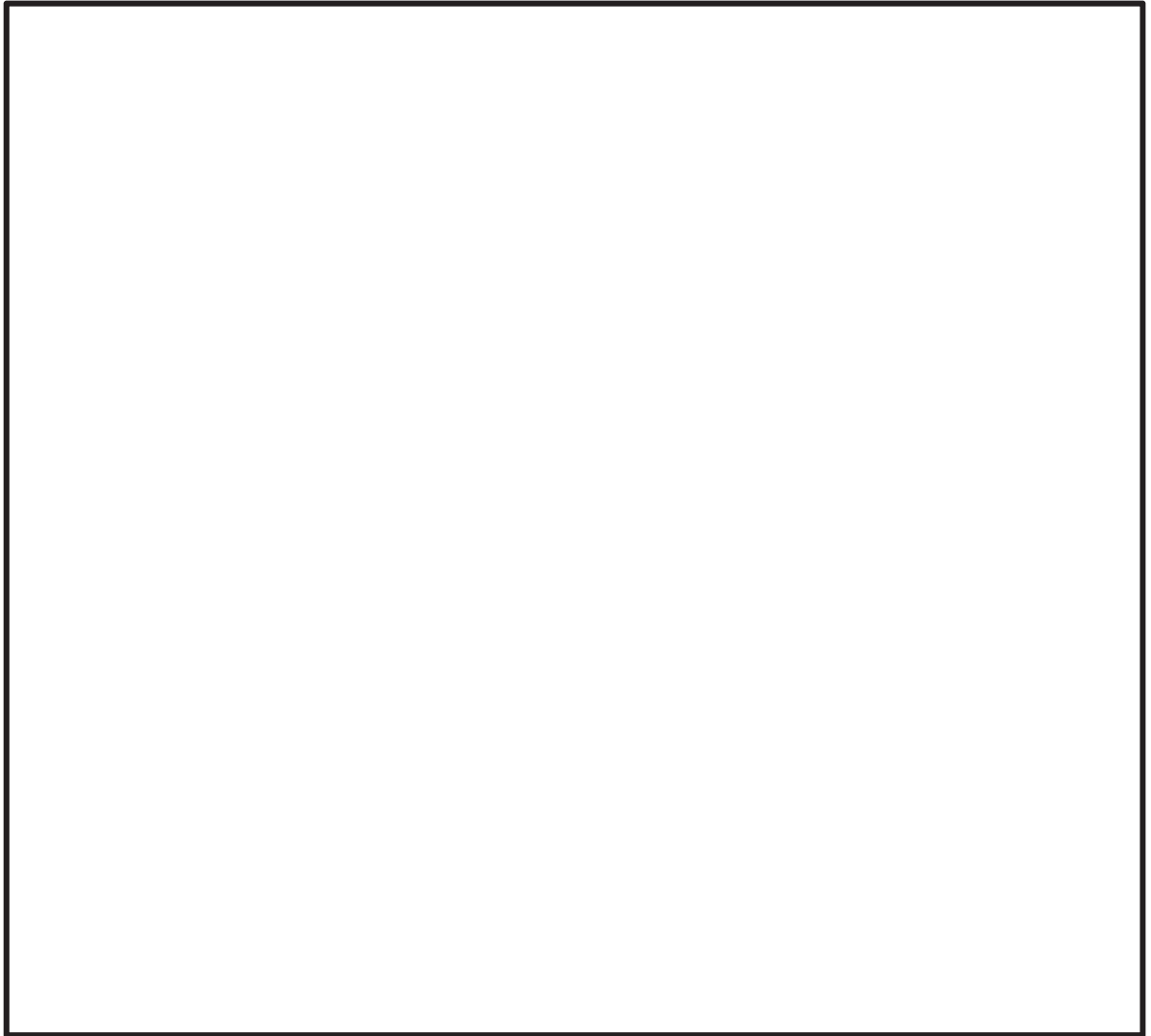


図 4-12 制御棒ブレード厚さ測定位置

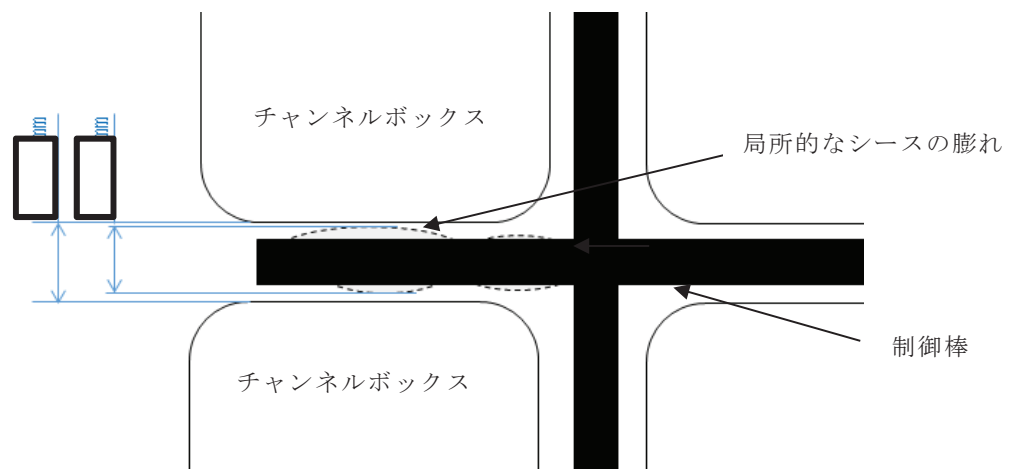


図 4-13 制御棒挿入性試験後の制御棒ブレードの局所的なシースの膨れ(イメージ)

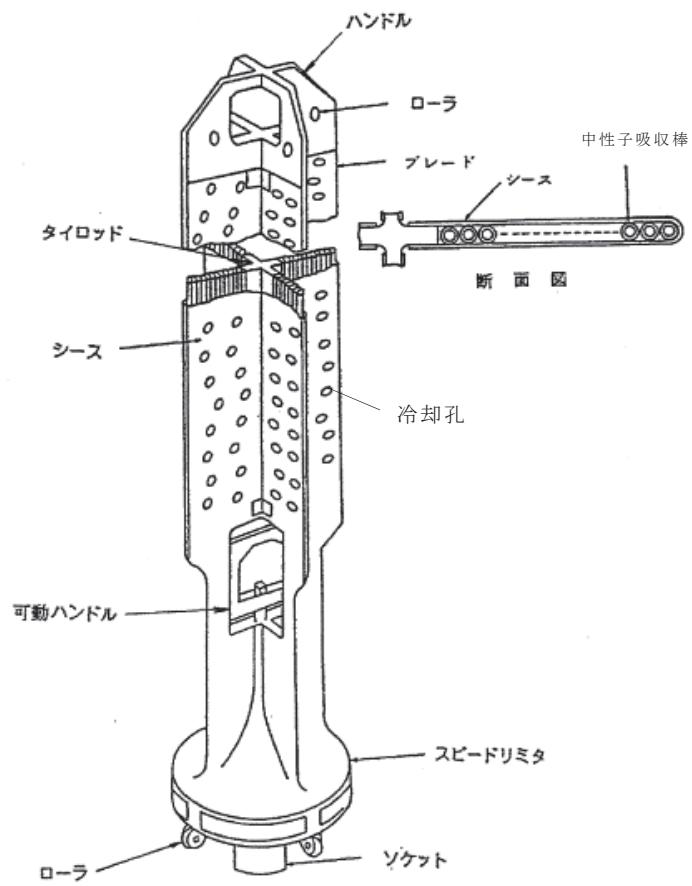


図 4-14 制御棒構造図

4.6 既往知見を踏まえた制御棒挿入性試験結果に対する考察

制御棒挿入性に係る検討を実施した既往知見⁽¹⁾⁽²⁾を調査し、制御棒挿入時間及び弾塑性特性の観点で比較・検討することにより、今回工認で実施した制御棒挿入性試験結果について考察した。

4.6.1 制御棒挿入時間

既往知見及び女川原子力発電所第2号機制御棒挿入性試験の全体概要を図4-15に示す。

既往知見では、実機試験（常温状態）を模擬した制御棒挿入性解析を行い、大入力での地震に対しても制御棒挿入挙動を予測できることを確認するとともに、その解析手法を用いて、実機プラント条件（実機運転温度、圧力）における制御棒挿入性の限界状態を解析・評価している。

既往知見の解析結果（常温状態、実機プラント条件）は、女川原子力発電所第2号機の試験結果に対して、いずれも大きな変形領域において制御棒の挿入時間が短くなっている。この差異は、女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性試験は、保守的な試験条件の設定として、最大相対変位を繰り返し付加する正弦波加振であることに対して、既往知見の制御棒挿入性試験は、地震波を用いた加振であることによるものと考えられる。

ここで既往知見の結果を女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性評価に適用することも可能と考えられるが、制御棒の挿入時間は加振波の特性に依存するため、既往知見の加振波である地震波と女川原子力発電所第2号機の基準地震動 S_s （7波）との関係を検討する必要がある。また、今回工認試験用の加振波として基準地震動 S_s を用いる場合、全ての基準地震動 S_s に対して、各相対変位条件における制御棒挿入性試験が必要になり現実的ではない。このため、女川原子力発電所第2号機の今回工認試験では、既工認と同様、保守的に正弦波加振とすることにより制御棒挿入性試験の保守的かつ合理的な正弦波加振による試験で、相対変位データの拡充を行った。

【既往知見】

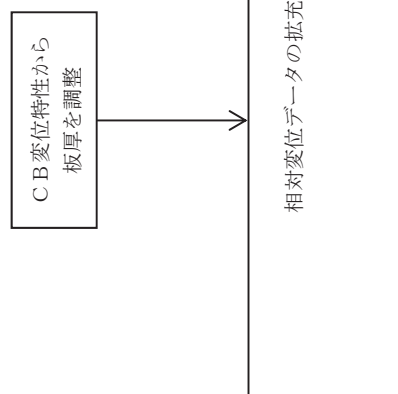
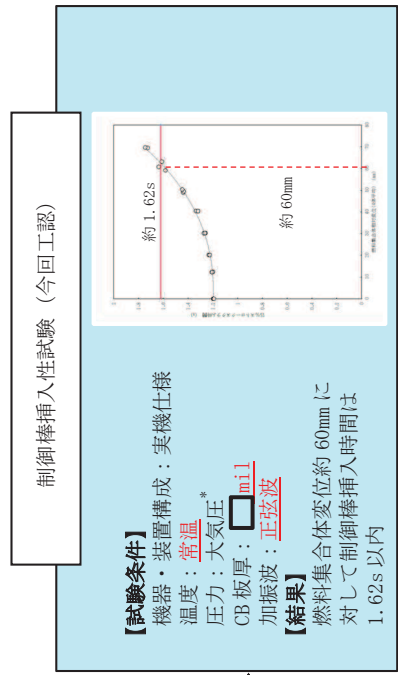
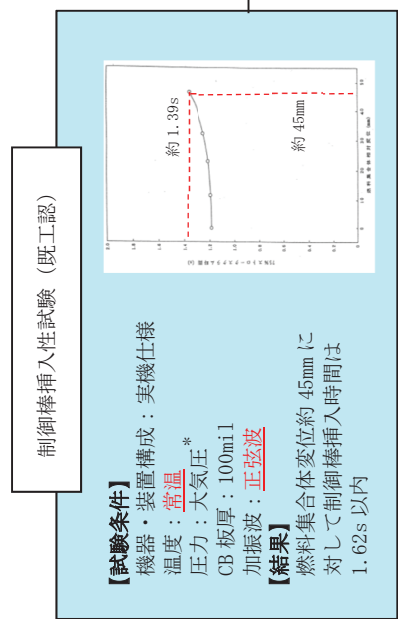
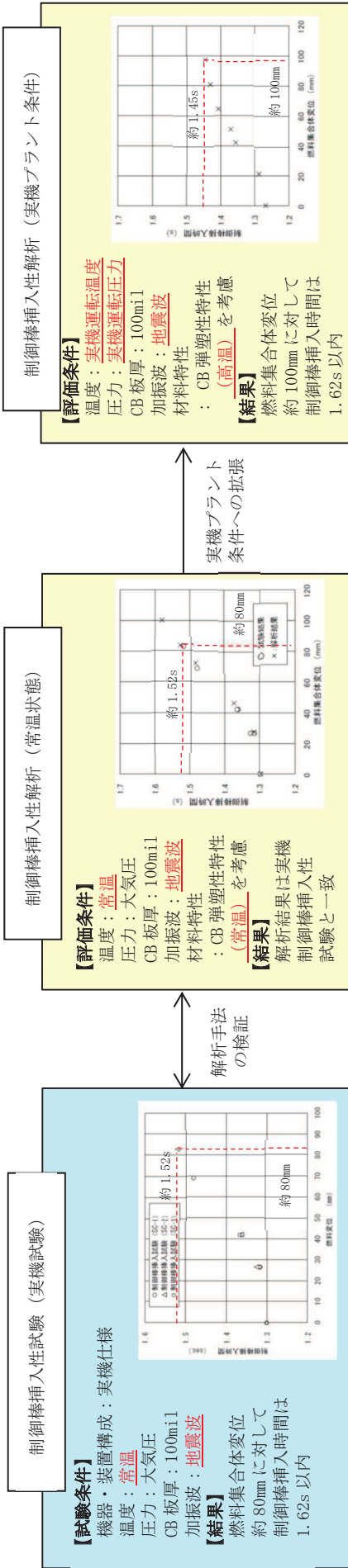


図 4-15

既往知見及び女川原子力発電所第2号機制御棒挿入性試験の全体概要

【女川原子力発電所第2号機今回工認試験】

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4.6.2 チャンネルボックスの弾塑性特性

より大きな相対変位における制御棒の挿入状態でチャンネルボックスの塑性化が考えられることについて、既往知見の制御棒挿入性解析では、4点曲げ試験（図 4-16）に基づくチャンネルボックスの弾塑性特性（図 4-17）を考慮しており、高温時でより大きな相対変位の条件では、常温時よりチャンネルボックスの剛性が低下するため、制御棒の挿入抵抗が減少し、制御棒の挿入時間が短くなると考察されている。一方、女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性試験では、チャンネルボックスの高温時と常温時の縦弾性係数を考慮して板厚を調整した試験体を用いて、大きな相対変位を付加した試験であることから、チャンネルボックスの弾塑性特性が試験体に実際に反映された結果となる。女川原子力発電所第2号機の今回工認試験における振動台加速度と相対変位の関係（図 4-18）によれば、相対変位が45mm程度の領域で塑性域に入る。女川原子力発電所第2号機の今回工認試験は常温で実施しているためチャンネルボックスの耐力（降伏点）は高温時のチャンネルボックスと差異があるが、高温時の縦弾性係数を考慮して板厚を調整したことにより、塑性挙動が始まる変位は、既往知見に示されている高温時の塑性開始変位（図 4-17）とおおむね一致する結果になっているものと考えられる。

なお、チャンネルボックスと燃料集合体の間には炉水が存在し、チャンネルボックスの温度は炉水温度に依存することから、実機運転状態における炉心上部と下部の炉水温度差は約10℃（図 4-19）と小さいことを考慮すると、チャンネルボックスの長手方向で大きく温度分布及び弾塑性特性が異なることはないと考えられる。

既往知見に示されている高温時のチャンネルボックスの弾塑性特性（図 4-17）は、4点曲げ試験という静荷重条件による試験であり、変位が40mm程度を超える領域から、曲げモーメントの増加とともに大きく変位量が増加している。一方、女川原子力発電所第2号機の今回工認試験においては、振動台加速度と相対変位の関係（図 4-18）から分かるように、チャンネルボックスの相対変位が45mm程度の領域に入っても相対変位が極端に増加することはなく、振動台加速度を上げても変位が増加しにくくなる傾向が見られる。これは、既往知見の弾塑性特性は静的な荷重を負荷してチャンネルボックスを変形させた場合のものであるのに対して、女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性試験では、地震と同様の交番荷重による慣性加振で行われているため、チャンネルボックスが塑性領域に入ったことによる履歴減衰の効果や振動挙動（固有周期）の変化などが要因となり、変位の増加が抑えられたと考えられる。

なお、女川原子力発電所第2号機の地震応答解析では、チャンネルボックスを線形でモデル化し、燃料集合体の相対変位を評価しているため、チャンネルボックスの弾塑性特性の影響については5章にて詳細検討結果を説明する。

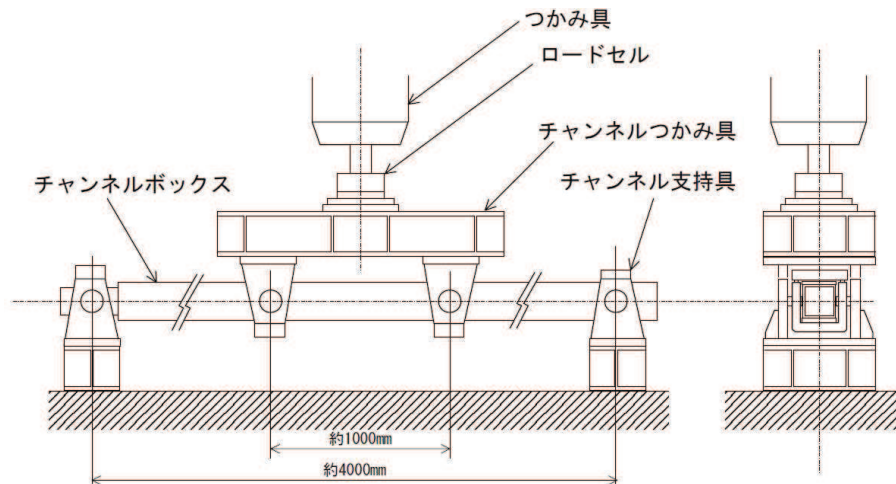


図 4-16 チャンネルボックスの4点曲げ試験の概要図（既往知見⁽²⁾）

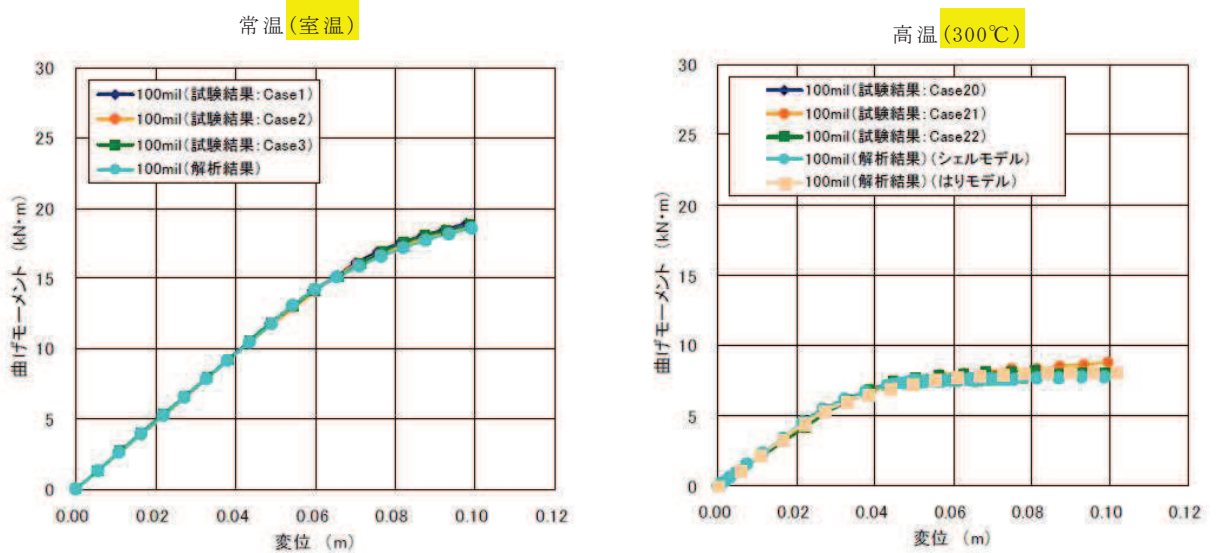


図 4-17 4点曲げ試験に基づくチャンネルボックス弾塑性特性（常温及び高温）
（既往知見⁽²⁾）

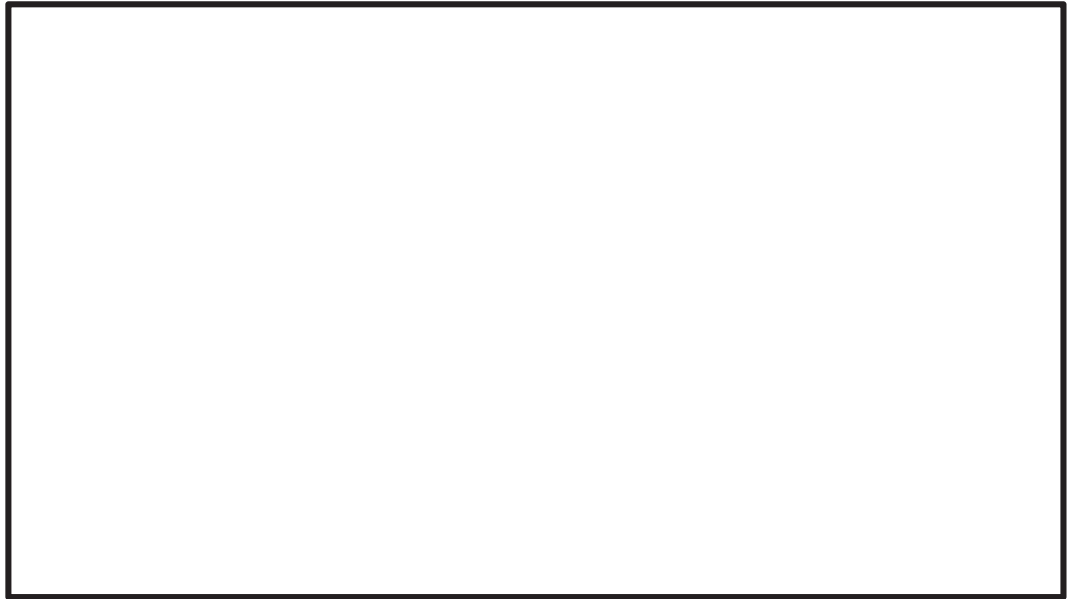


図 4-18 女川原子力発電所第 2 号機の今回工認試験における
振動台加速度と相対変位の関係図

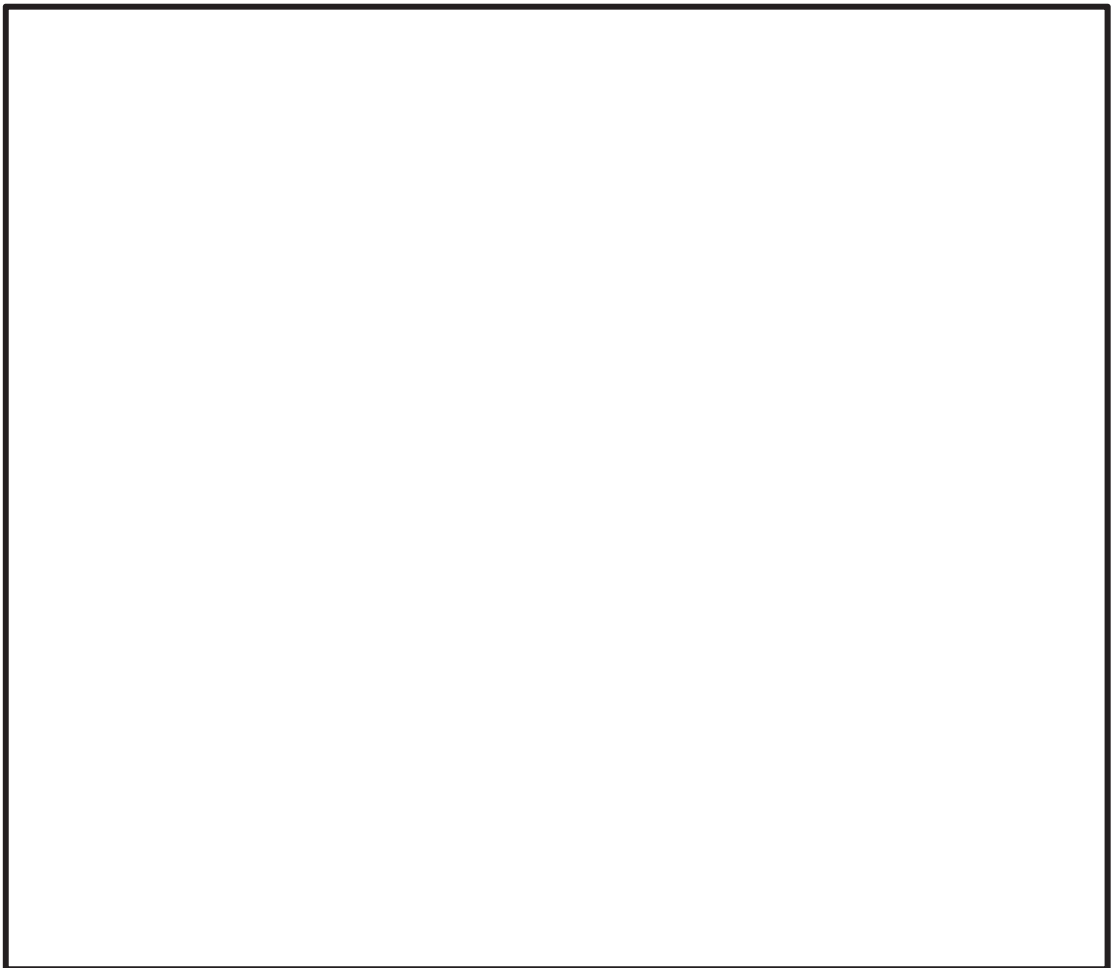


図 4-19 原子炉系ヒートバランスより算出した炉水温度

5. 制御棒挿入性評価の妥当性確認

今回工認における制御棒挿入性評価は、図 2-1 に示す J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版の評価手法を適用する。また、御棒挿入性評価における地震応答解析による「燃料集合体相対変位（発生値）の算出」及び制御棒挿入性試験による「確認済相対変位（許容値）の設定」の手順を図 5-1 に示す。

本章では、女川原子力発電所第 2 号機における制御棒挿入性評価の妥当性について、4.6 項での考察を踏まえ、燃料集合体相対変位の増大に伴うチャンネルボックスの弾塑性特性の影響、制御棒挿入性試験の有する保守性等の観点から確認を行う。

制御棒挿入性評価の妥当性確認検討フローを図 5-2 に示す。制御棒挿入性評価の妥当性確認を実施するにあたっては、地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出及び制御棒挿入性試験による確認済相対変位の設定に係る各手順について実機条件に対する差異項目を抽出・分類し、各分類項目に応じた影響検討を実施・確認した上で、総合的な評価結果を纏めた。

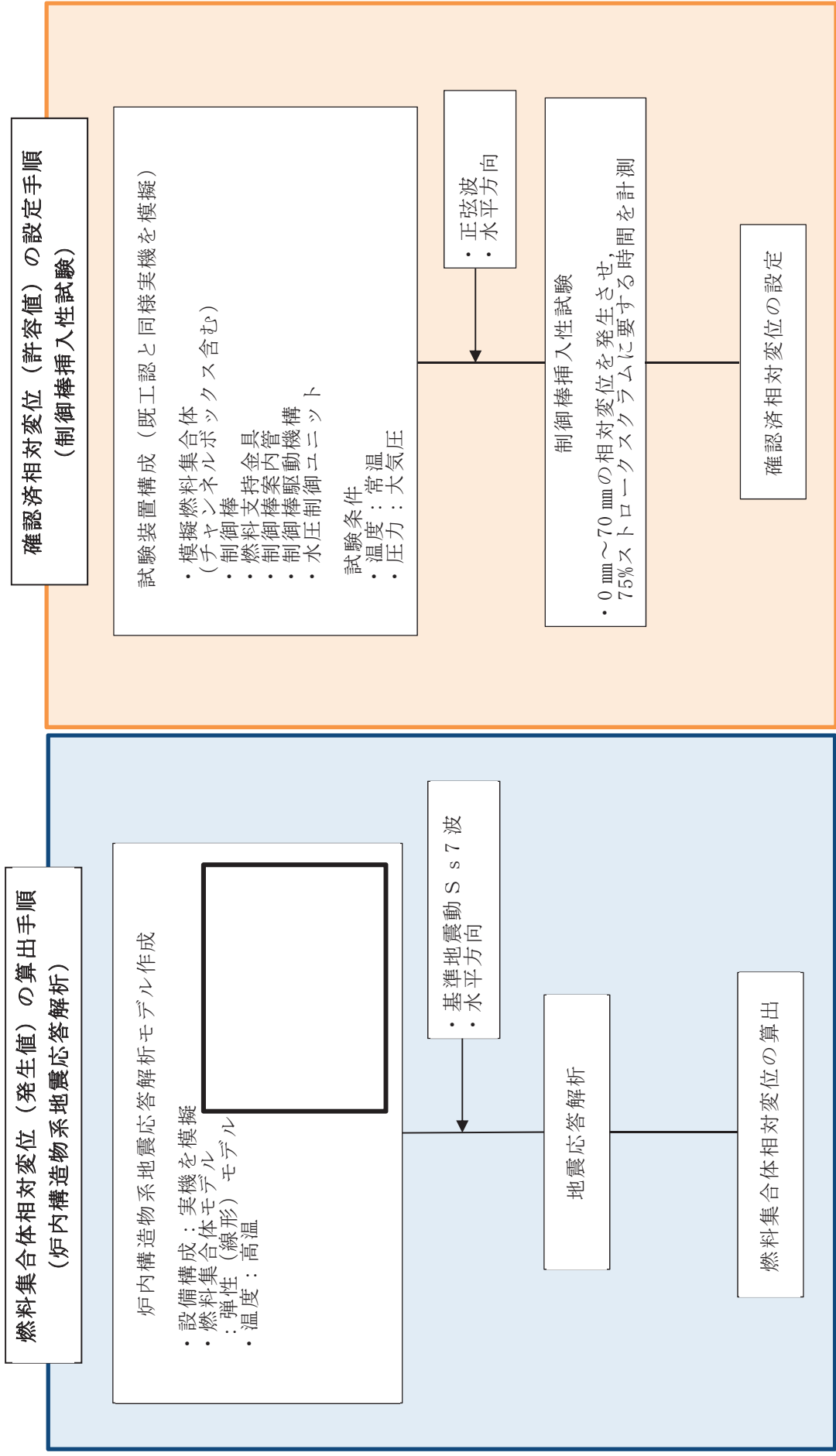


図 5-1 制御棒挿入性評価に係る各手順

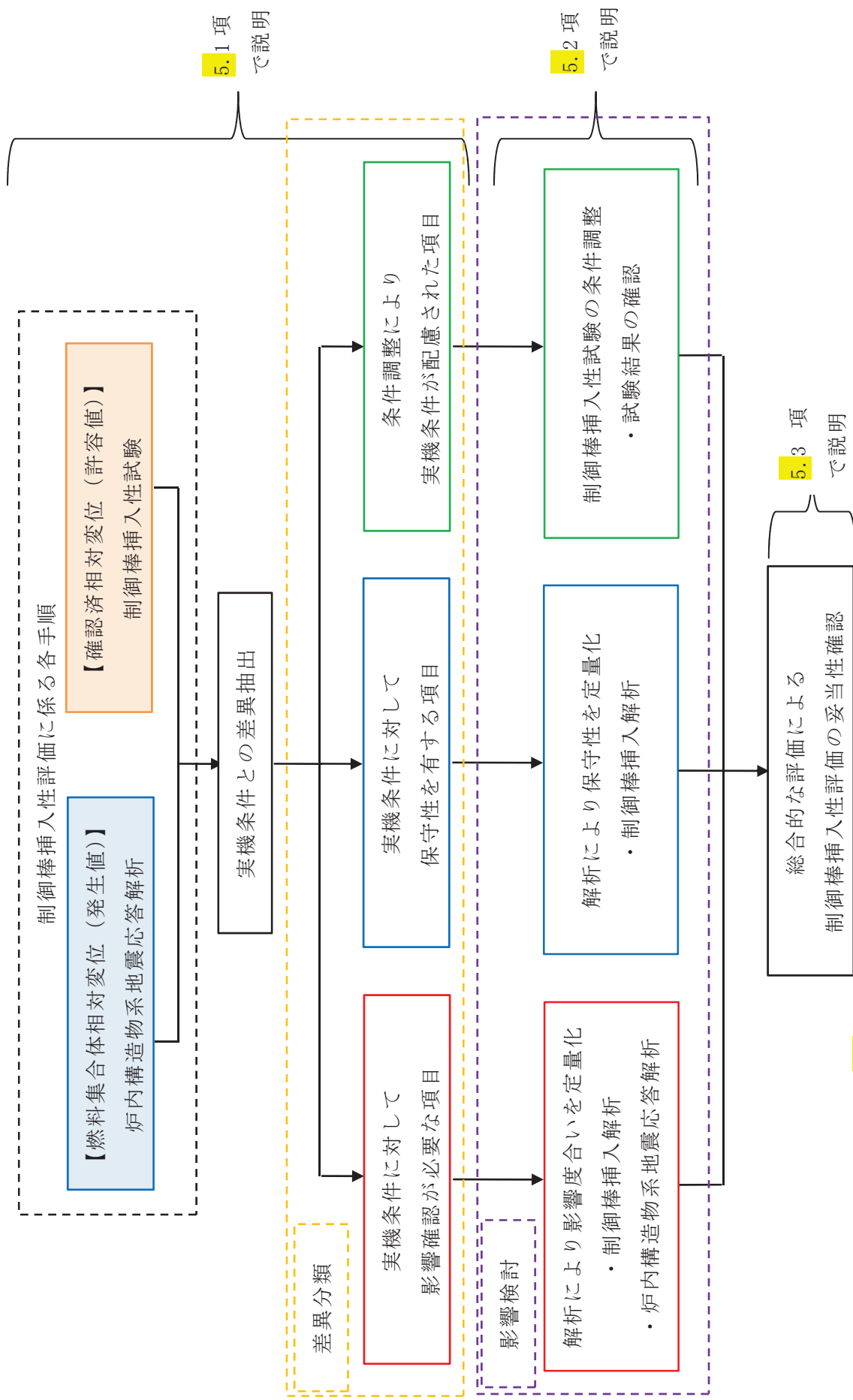


図 5-2 女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性評価の妥当性確認検討フロー

5.1 制御棒挿入性評価における実機条件との差異項目の分類及び検討項目の整理

地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出条件及び制御棒挿入性試験による確認済相対変位の設定条件について、実機条件との差異項目を抽出及び分類した結果を表 5-1 及び表 5-2 に、差異分類に応じた検討項目の整理結果を表 5-3 に示す。

- (1) 実機条件に対して影響確認が必要な項目 赤
- (2) 実機条件に対して保守性を有する項目 青
- (3) 条件調整により実機条件が配慮された項目 緑

表 5-1 実機条件との差異項目抽出及び分類結果（炉内構造物系地震応答解析）

条件項目	実機条件	炉内構造物系地震応答解析	実機条件との差異及び分類結果
機器・装置構成	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体（チャンネルボックス含む） ・制御棒 ・燃料支持金具 ・制御棒案内管 ・制御棒駆動機構 ・水圧制御ユニット 	実機をモデル化	無
燃料集合体モデル	チャンネルボックスの弾塑性特性の影響が考えられる	弾性（線形）モデル	有（1）
温度	高温	高温	無
入力波	地震波	地震波	無

表 5-2 実機条件との差異項目抽出及び分類結果（制御棒挿入性試験）

条件項目	実機条件	制御棒挿入性試験	実機条件との差異及び分類結果
機器・装置構成	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体（チャンネルボックス含む） ・制御棒 ・燃料支持金具 ・制御棒案内管 ・制御棒駆動機構 ・水圧制御ユニット 	実機と同じ構成 （ただし、高温状態模擬のためにチャンネルボックス厚さは100mil→ <input type="text"/> に調整）	無
温度	高温	常温 （ただし、高温状態模擬のためにチャンネルボックス厚さは100mil→ <input type="text"/> に調整）	有（3）
圧力	高压	大気圧 （アキュムレータ圧力調整により原子炉定格圧力時のスクラムを模擬）	有（3）
入力波	地震波	正弦波	有（2）
	水平+鉛直	水平	有（1）

表 5-3 差異分類に応じた検討項目の整理結果

差異分類	実機条件との差異		検討項目
実機条件に対して影響確認が必要な項目	炉内構造物系地震応答解析	実機：燃料集合体（弾塑性） 今回：燃料集合体（弾性）	チャンネルボックスの弾塑性特性の影響確認 (5.2.1項参照)
実機条件に対して保守性を有する項目	制御棒挿入性試験	実機：地震波 今回：正弦波	制御棒挿入性試験における保守性の確認 (5.2.2項参照)
実機条件に対して影響確認が必要な項目	制御棒挿入性試験	実機：水平＋鉛直 今回：水平	鉛直方向加速度の影響確認 (5.2.3項参照)
条件調整により実機条件が配慮された項目	制御棒挿入性試験	実機：高温 今回：常温	温度条件の差異に対する検討 (4.2項参照)
		実機：高圧 今回：大気圧	圧力条件の差異に対する検討 (4.1項参照)

5.2 実機条件との差異に係る検討

本項では、実機条件に対する差異分類に応じた検討項目について、それらの確認結果を示す。なお、条件調整により実機条件が配慮された項目（実機条件と制御棒挿入性試験における温度及び圧力条件との差異）については4章で述べたとおり、実機の運転状態を模擬した配慮を行っており、制御棒挿入性評価へ影響を与えるものではない。

5.2.1 チャンネルボックスの弾塑性特性の影響確認

今回工認の炉内構造物系地震応答解析モデル（図3-2～図3-4）では、燃料集合体の剛性はチャンネルボックスによるものとして、チャンネルボックスの断面性状、縦弾性係数等を用いてモデル化している。

既往知見⁽¹⁾⁽²⁾を踏まえると、より大きな相対変位における制御棒の挿入状態においては、チャンネルボックスの塑性化が考えられ、女川原子力発電所第2号機の燃料集合体相対変位 54.2 mmの状態ではチャンネルボックスの塑性化が考えられる領域となる。一方、燃料集合体相対変位を算出した炉内構造物系地震応答解析における燃料集合体のモデルはチャンネルボックスを線形（弾性）でモデル化している。

本項では、炉内構造物系地震応答解析モデルの燃料集合体にチャンネルボックスの弾塑性特性を考慮して算出した燃料集合体相対変位と、線形モデルから算出した燃料集合体相対変位の比較により、チャンネルボックスの弾塑性特性が制御棒挿入性評価に与える影響について確認する。

(1) チャンネルボックスの弾塑性特性の影響

炉内構造物系地震応答解析において、燃料集合体要素に弾塑性特性を設定する。今回工認の制御棒挿入性試験結果における振動台加速度と相対変位の関係（図5-3）では、燃料集合体変位が 45mm 程度の状態で振動台加速度と燃料集合体変位の勾配が変わっていることが確認できるため、チャンネルボックスの弾塑性特性に係る影響確認においては燃料集合体変位 45mm を折れ点とした二直線（バイリニア）で骨格曲線を設定する。

燃料集合体は、上部格子板及び炉心支持板によって上下が支持されているため、炉内構造物系地震応答解析モデルにおける燃料集合体は、両端ピン支持のほりとしてモデル化している。また、燃料集合体の応答は曲げが支配的となるため、炉内構造物系地震応答解析モデルでは、曲げモーメントの弾塑性特性を表す骨格曲線として曲げモーメント及び曲率の関係を定義している。そのため、両端ピン支持のほりに等分布荷重が加わる条件にて、中央の変位が 45mm となるときの曲げモーメントとほりの曲率を求め、骨格曲線の第一折れ点とした。

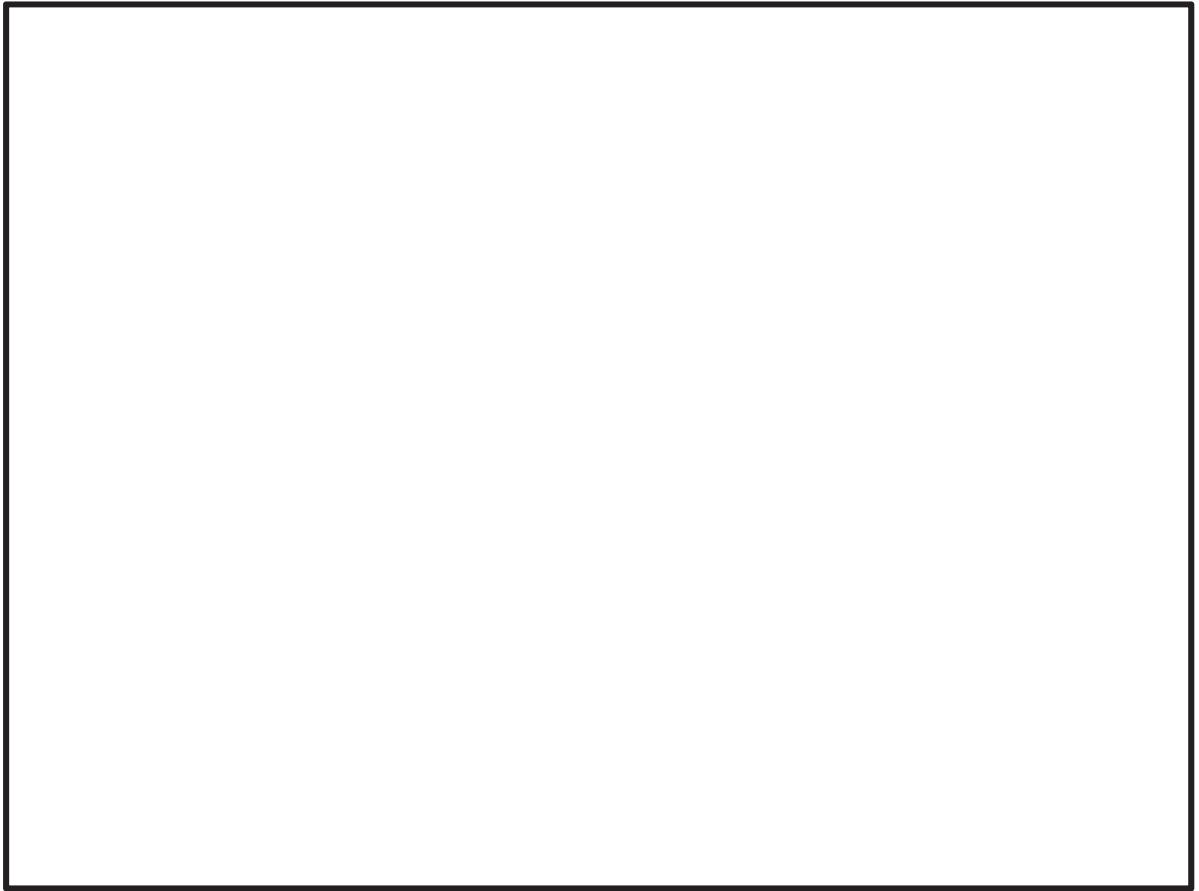


図 5-3 制御棒挿入性試験結果（振動台加速度と燃料中央変位の関係）

骨格曲線の第一勾配は、従来の連成解析モデルで設定していた線形モデルの勾配を用いる。また、既往知見⁽²⁾に示されている高温時のチャンネルボックス4点曲げ試験から得られた弾塑性特性（図 5-4）によると第一勾配の0.1倍程度であることが確認できるため、今回の評価における第二勾配は、既往知見に最も近い0.1倍に加えて、弾塑性の影響を幅広く確認する観点から第一勾配の0.6倍、0.3倍及び弾完全塑性の合計4つのケースを評価対象とした（図 5-5）。

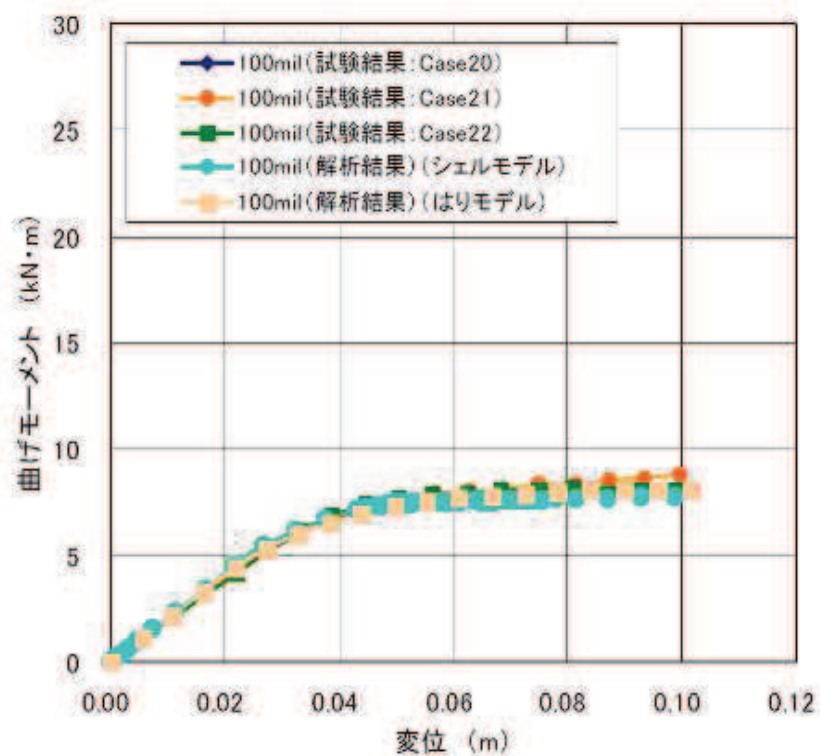


図 5-4 チャンネルボックス弾塑性特性（既往知見⁽²⁾）

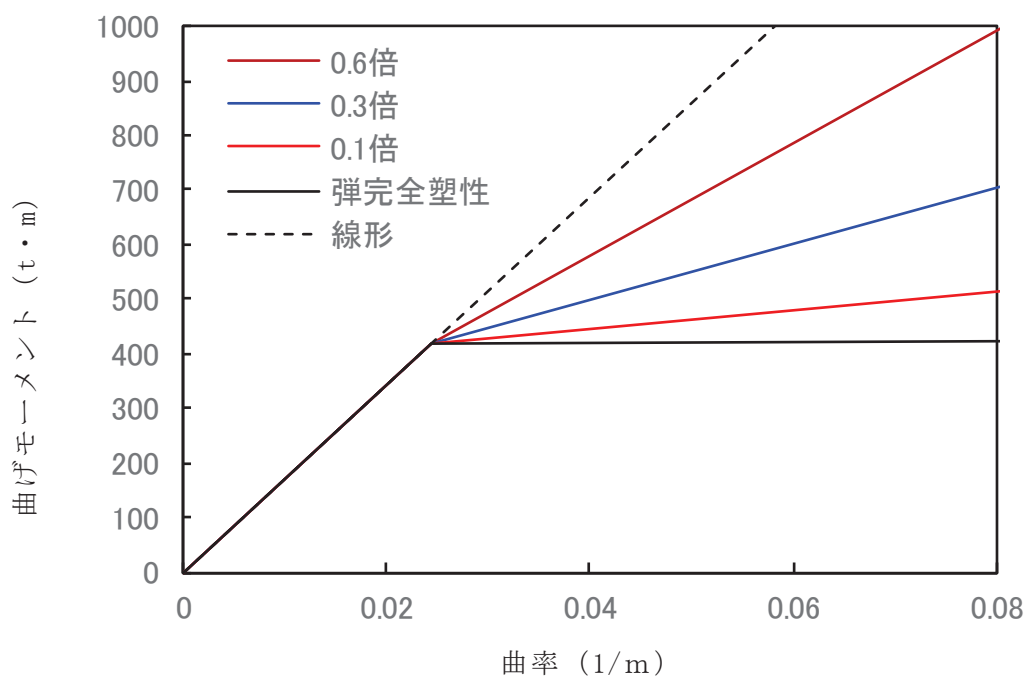


図 5-5 炉内構造物系地震応答解析に用いるチャンネルボックスの弾塑性特性の骨格曲線

履歴特性については、同じ既往知見によるとチャンネルボックスの曲げモーメントー変位特性（図 5-6）がループ状を示していることから、本影響確認においては、図 5-7 に示すようなバイリニア型移動硬化則*を設定する。

注記*：移動硬化則とは、弾塑性材料の力学的変形挙動（繰返し載荷）を考える場合、塑性変形の進行に伴って降伏曲面の形状は変わらずに、中心位置が移動すると規定したもの。

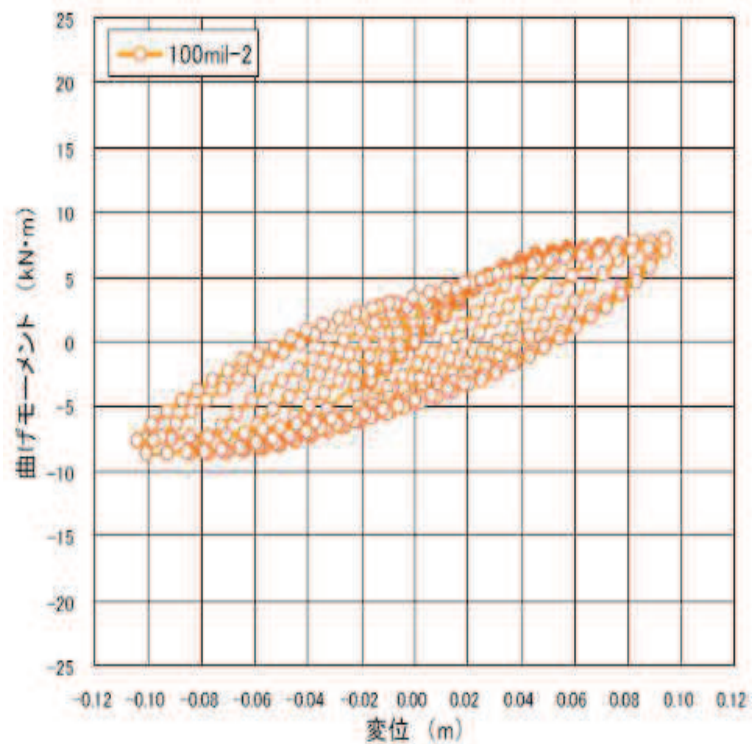


図 5-6 チャンネルボックス曲げモーメントー変位特性（既往知見⁽²⁾）

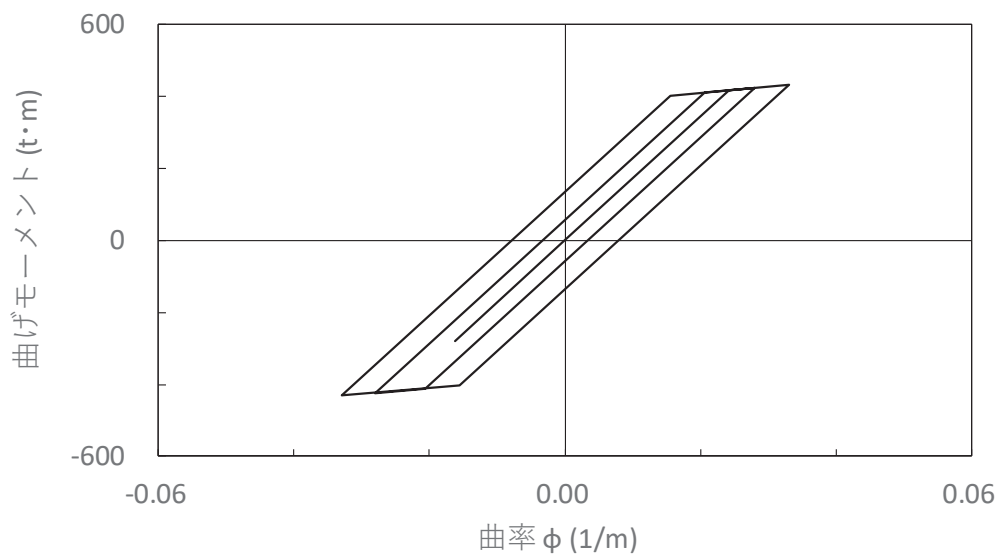


図 5-7 バイリニア型移動硬化則の履歴特性

(2) 弾塑性特性を考慮した地震応答解析結果

燃料集合体にチャンネルボックスの弾塑性特性を考慮した炉内構造物系地震応答解析モデルで地震応答解析を実施した。解析条件を表 5-4 及び地震応答解析で得られた燃料集合体相対変位の解析結果を表 5-5 に示す。

チャンネルボックスの弾塑性特性を考慮した場合の燃料集合体相対変位の解析結果は、骨格曲線の第二勾配をパラメータとしたいずれの解析ケースにおいても線形モデルに対する燃料集合体相対変位よりも小さな値となっている。これは、地震慣性力が交番荷重であるため、チャンネルボックスが塑性領域に入ったことで、履歴減衰によるエネルギー消散によって燃料集合体相対変位が抑制されたものである。

以上より、女川原子力発電所第 2 号機の地震応答解析におけるチャンネルボックスの線形でのモデル化が制御棒挿入性評価に影響を与えないことを確認した。

表 5-4 チャンネルボックスの弾塑性特性を考慮した解析条件

条件項目		解析条件
入力波		地震波 (S _s - D 2) *
温度		高温
骨格曲線	第一勾配	線形モデルと同様
	第二勾配	4 ケース (第一勾配の 0.6, 0.3 及び 0.1 倍, 弾完全塑性体)
履歴特性		バイリニア型移動硬化則

注記* : 女川原子力発電所第 2 号機の基準地震動 S_s 7 波における地震応答解析で燃料集合体相対変位が最大となる地震動

表 5-5 弾塑性特性を考慮した燃料集合体相対変位の解析結果

(単位 : mm)

解析ケース	弾塑性特性 (骨格曲線の第二勾配)				線形モデル
	0.6 倍	0.3 倍	0.1 倍	弾完全塑性体	
相対変位	52.7	50.4	49.6	49.5	54.2

5.2.2 制御棒挿入性試験における保守性（制御棒挿入性解析に基づく定量評価）

4.6 項に前述のとおり既往知見⁽¹⁾⁽²⁾の解析結果では、燃料集合体相対変位が80mm や 100mm となる変形領域においても75%ストロークスクラム時間が規定値(1.62s)以下となっており、今回工認の制御棒挿入性試験結果に比べて短い挿入時間となっている(図4-15参照)。これは、既往知見では地震波による解析を実施しているのに対して、今回工認の制御棒挿入性試験では保守的な条件として最大相対変位を繰り返す正弦波加振で実施していることの違いによるものと考えられる。

本項では、女川原子力発電所第1号機で工認実績があり、制御棒が炉心に挿入される際の制御棒と燃料集合体の接触を模擬し制御棒挿入位置を時刻歴応答で計算できる制御棒挿入性計算プログラムCR-INを用いて、制御棒挿入性解析により入力波を正弦波加振及び地震波加振とした場合の75%ストロークスクラム時間を算出し、比較することで正弦波加振が地震波加振に対して有する保守性を確認する。

(1) 制御棒挿入性解析の概要

制御棒挿入性解析は、制御棒が炉内に挿入される際の運動方程式と地震時における燃料集合体の振動方程式の関係から制御棒挿入時間を求める解析である。

また、今回工認の制御棒挿入性解析に用いる計算機プログラムCR-INは、燃料集合体と制御棒のたわみをはりでモデル化した組合せはりを用い、燃料集合体と制御棒の接触反力を時刻歴で計算し、接触反力に摩擦係数を乗じて挿入時の抵抗力とし、制御棒挿入の運動方程式と燃料集合体の振動方程式を連立して挿入時間を計算するプログラムである。(別紙参照)

(2) 制御棒挿入性計算プログラムCR-INの適用性確認

入力波条件の差異(正弦波加振、地震波加振)に対する保守性を確認するにあたり、CR-INによる制御棒挿入性解析を用いた影響検討への適用性を確認するため、今回工認における制御棒挿入性試験結果の再現解析(燃料集合体相対変位に対する75%ストロークスクラム時間)を実施し、制御棒挿入性試験結果とCR-INによる制御棒挿入性解析結果を比較した。CR-INによる再現解析条件は表5-6のとおり。

表 5-6 制御棒挿入性試験の再現解析条件

条件項目	CR-IN による再現解析条件 (今回工認における制御棒挿入性試験)
入力波	正弦波 (<input type="text"/>) *
温度	常温
圧力	アキュムレータ圧力調整により原子炉定格 圧力時のスクラムを模擬
チャンネルボックス厚さ	<input type="text"/>
燃料集合体相対変位	0mm～70mm

注記*：正弦波の振動数は常温時のチャンネルボックスの水平方向の固有振動数
() に合わせて設定

CR-IN による再現解析結果として、今回工認における制御棒挿入性試験との比較結果を図 5-8 に示す。CR-IN による再現解析結果は、今回工認における制御棒挿入性試験（制御棒挿入性試験に基づく制御棒挿入特性曲線）とよく整合し、CR-IN による制御棒挿入性解析は制御棒挿入性試験に対する再現性があることから、実機条件に対する差異分類に応じた影響検討に適用可能であると判断した。

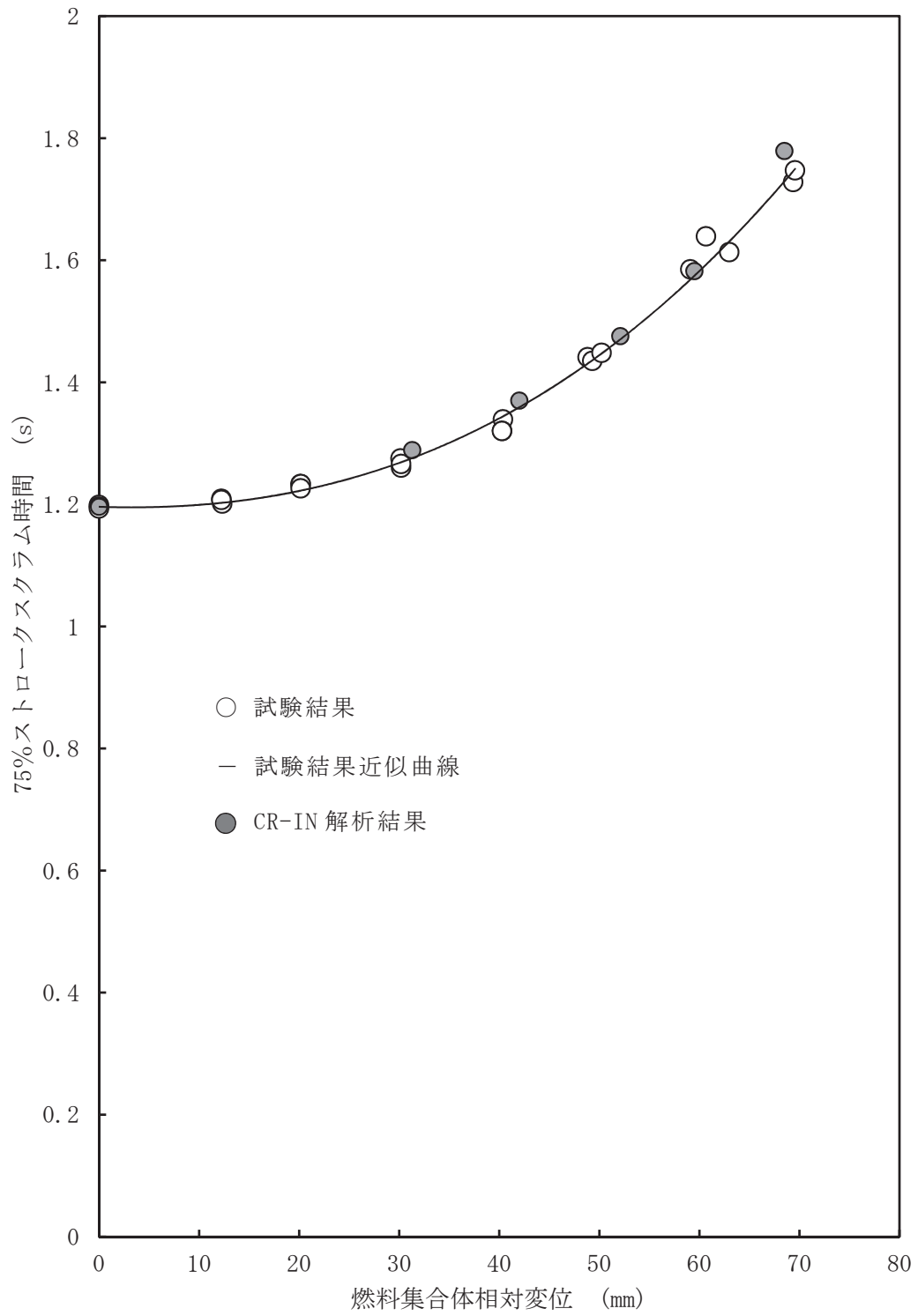


図 5-8 制御棒挿入性試験と CR-IN による制御棒挿入性解析の比較結果

(3) 入力波条件の差異に対する制御棒挿入性解析結果

CR-IN による制御棒挿入解析を用いて，入力波条件を地震波加振とした場合と正弦波加振とした場合の 75%ストロークスクラム時間を算出し，今回工認における制御棒挿入性試験の入力波条件として，正弦波加振の有する保守性を確認する。

CR-IN による制御棒挿入性解析に当たっては，表 5-7 のとおり，入力波以外の条件を一致させた上で，75%ストロークスクラム時間の差異を確認した。

本検討に係る CR-IN への入力波は，地震応答解析から得られる地震応答のうち，燃料集合体相対変位が最も大きくなる S_s-D2 における加速度時刻歴波形を使用した。CR-IN は制御棒挿入性試験の試験体を模擬しており，炉内構造物全体を模擬した炉内構造物系地震応答解析結果をそのまま CR-IN にインプットしても同じアウトプット（燃料集合体相対変位）とはならない。そのため，CR-IN における燃料集合体相対変位が目標変位となるように，地震応答解析から得られる加速度時刻歴波形を振幅方向に係数倍した上で CR-IN への入力波とした（別紙 別添 2 参照）。入力波条件の差異に対する検討に係る CR-IN への入力波を図 5-9 に示す。

なお，基準地震動 S_s の地震発生を想定した場合，地震発生後数秒でスクラム信号「地震加速度高」により自動スクラムすることとなるが，本検討で実施した地震波加振に対する制御棒挿入性解析については，75%ストロークスクラム時間を保守的に算出するため，燃料集合体相対変位が最大となる時間帯を考慮して最も挿入時間が長くなるタイミングをスクラム開始時間とした（図 5-10）。

表 5-7 入力波条件の相違に対する制御棒挿入性解析の条件

条件項目	地震波加振	正弦波加振
入力波	地震波（S _s -D2）	正弦波（水平 ）
温度	常温	同左
圧力	実機相当	同左
チャンネルボックス厚さ	 	同左
燃料集合体相対変位	30.0 mm, 40.4 mm, 54.3 mm, 60.0 mm, 70.0 mm, 79.9 mm	31.3 mm, 42.0 mm, 52.1 mm, 59.5 mm, 68.5 mm

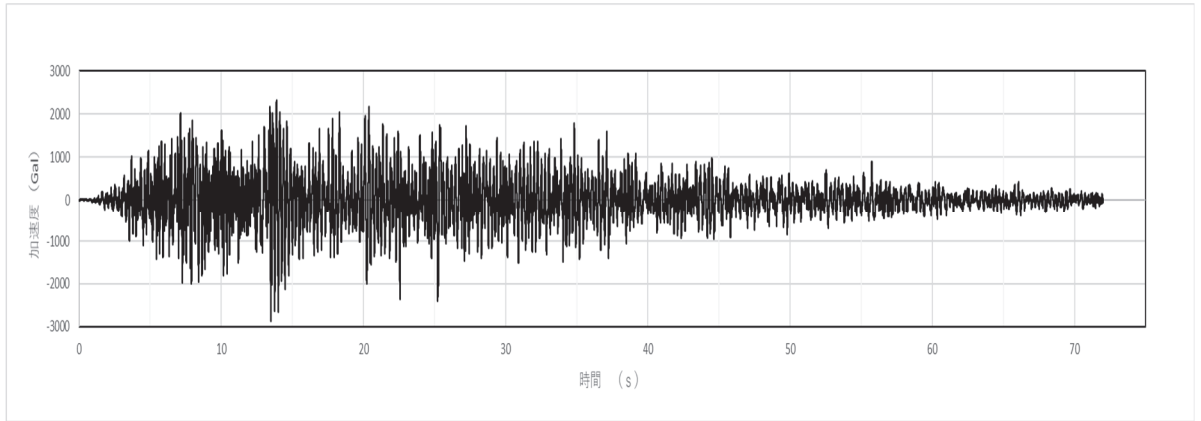


図 5-9 入力波条件の差異に対する検討に係る CR-IN への入力波^{*1*2}

注記*1：地震波加振条件における燃料集合体相対変位 54.3 mmとなる地震波

*2：添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」の基準地震動 S_s における燃料集合体下端位置（質点 54）の加速度時刻歴波形を振幅方向に 2.35 倍した地震波

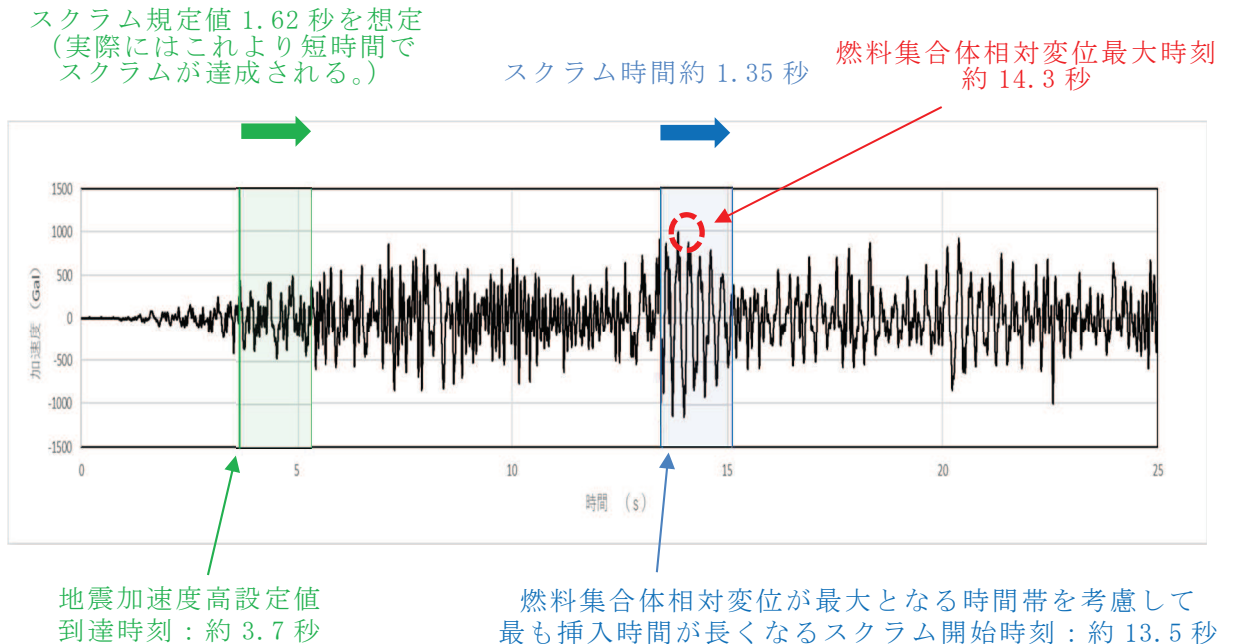


図 5-10 女川原子力発電所第 2 号機の地震波加振条件におけるスクラム入力時間

入力波条件を地震波加振及び正弦波加振とした場合の 75%ストロークスクラム時間の解析結果を図 5-11 に示す。図 5-11 の通り、制御棒挿入性試験を実施した燃料集合体相対変位の範囲（～70mm）に対して正弦波加振の 75%ストロークスクラム時間は、地震波加振の 75%ストロークスクラム時間に比べて保守的であることを確認し、燃料集合体相対変位 60mm において、約 0.2 秒の保守性を有することを確認した。また、地震波加振の 75%ストロークスクラム時間が規定値(1.62s)に達する際の燃料集合体相対変位は、本検討における最大条件（80 mm）以上であり、燃料集合体相対変位 60 mm に対して 1.3 倍以上（20mm 以上）の余裕があることを確認した。

なお、今回工認の制御棒挿入性試験における燃料集合体相対変位は、既工認と同様、試験 3 回の平均値としているが、上記のとおり、正弦波加振による保守性が各燃料集合体相対変位条件におけるばらつきよりも十分に大きく、試験 3 回の平均値を適用することに問題はないと言える。

以上より、女川原子力発電所第 2 号機の今回工認の制御棒挿入性試験における入力波条件を正弦波加振としていることについて、既往知見における検討結果と同様に保守性を有することを定量的に確認した。

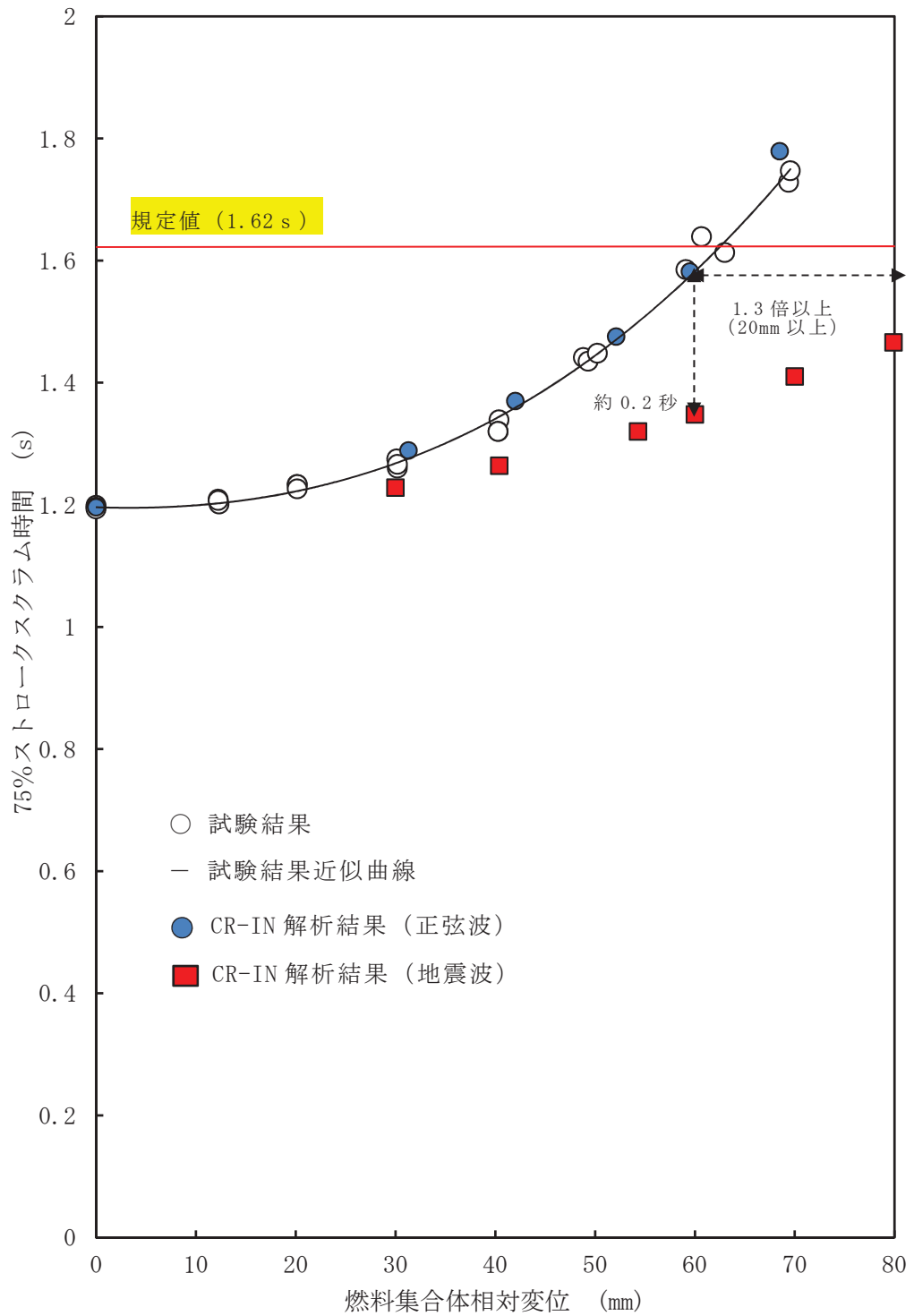


図 5-11 入力波条件の差異による 75%ストロークスクラム時間の解析結果

5.2.3 鉛直方向加速度の影響

5.1 項における実機条件に対する差異の抽出結果として、制御棒挿入性試験の入力波条件として、鉛直方向の影響を抽出している。本項では、制御棒挿入性評価における鉛直方向加速度による影響については、次の項目について確認する。

- (1) 制御棒に対する鉛直方向加速度の影響
- (2) 燃料集合体に対する鉛直方向加速度の影響

(1) 制御棒に対する鉛直方向加速度の影響

制御棒の挿入過程において鉛直方向加速度が付与された場合、制御棒挿入性に対して時間遅れを生じさせる影響が考えられるため、制御棒の挿入時間に着目した検討を実施し、鉛直方向加速度の影響を確認する。

影響検討としては、CR-IN を用いて、入力波条件として水平方向（正弦波）とした場合及び水平方向＋鉛直方向（正弦波）とした場合の 75% ストロークスクラム時間をそれぞれ解析し、鉛直方向加速度が制御棒挿入性に与える影響を確認する。なお、入力する鉛直方向加速度については、別紙「4. 鉛直方向加速度が加わった場合の挿入時間影響評価」の評価方針に基づき、固有振動数 及び の正弦波をそれぞれ同位相及び逆位相の条件で入力した。制御棒挿入時に作用する鉛直方向荷重（概略イメージ）を図 5-12 に示す。

制御棒に対する鉛直方向加速度の影響確認に用いた評価条件を表 5-8 に示す。なお、表 5-8 の水平方向＋鉛直方向の入力波条件は、燃料集合体相対変位 60mm において 75% ストロークスクラム時間が最も長くなる条件を記載した。

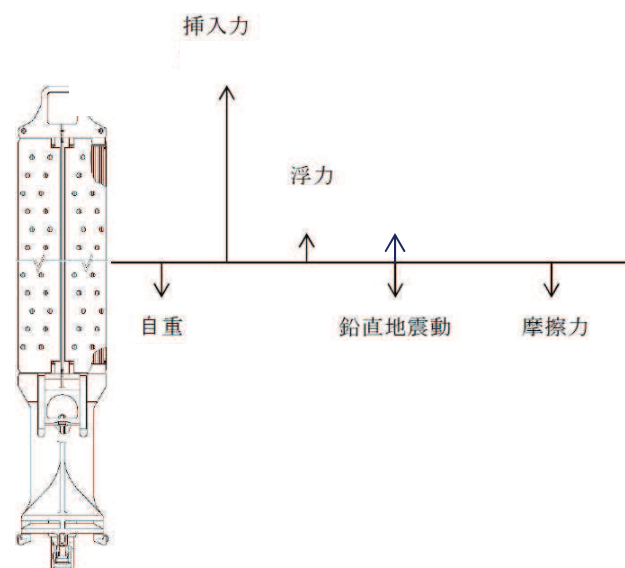


図 5-12 制御棒挿入時に作用する鉛直方向荷重（概略イメージ）

表 5-8 制御棒に対する鉛直方向加速度の影響確認に用いた評価条件

条件項目	水平方向	水平方向+鉛直方向
入力波	正弦波（水平 <input type="text"/> ）*	正弦波（水平 <input type="text"/> + 鉛直 <input type="text"/> 同位相）*
温度	常温	同左
圧力	実機相当	同左
チャンネルボックス厚さ	<input type="text"/>	同左
燃料集合体相対変位（水平）	31.3 mm, 42.0 mm, 52.1 mm, 59.5 mm, 68.5 mm	同左

注記*：正弦波の振動数は常温時のチャンネルボックスの水平方向の固有振動数 に合わせて設定

入力波条件として水平方向（正弦波）とした場合及び水平方向+鉛直方向（正弦波）とした場合の75%ストロークスクラム時間の解析結果を図 5-13 に示す。図 5-13 の通り、いずれの燃料集合体相対変位の条件においても、入力波条件が水平方向のみ場合の75%ストロークスクラム時間に対して、鉛直方向加速度を考慮した場合の制御棒挿入性に係る時間遅れは極僅かであることを確認し、燃料集合体相対変位 60mm においても時間遅れは約 0.01 秒で極僅かとなることから、制御棒に対する鉛直方向加速度の影響が軽微であることを確認した。

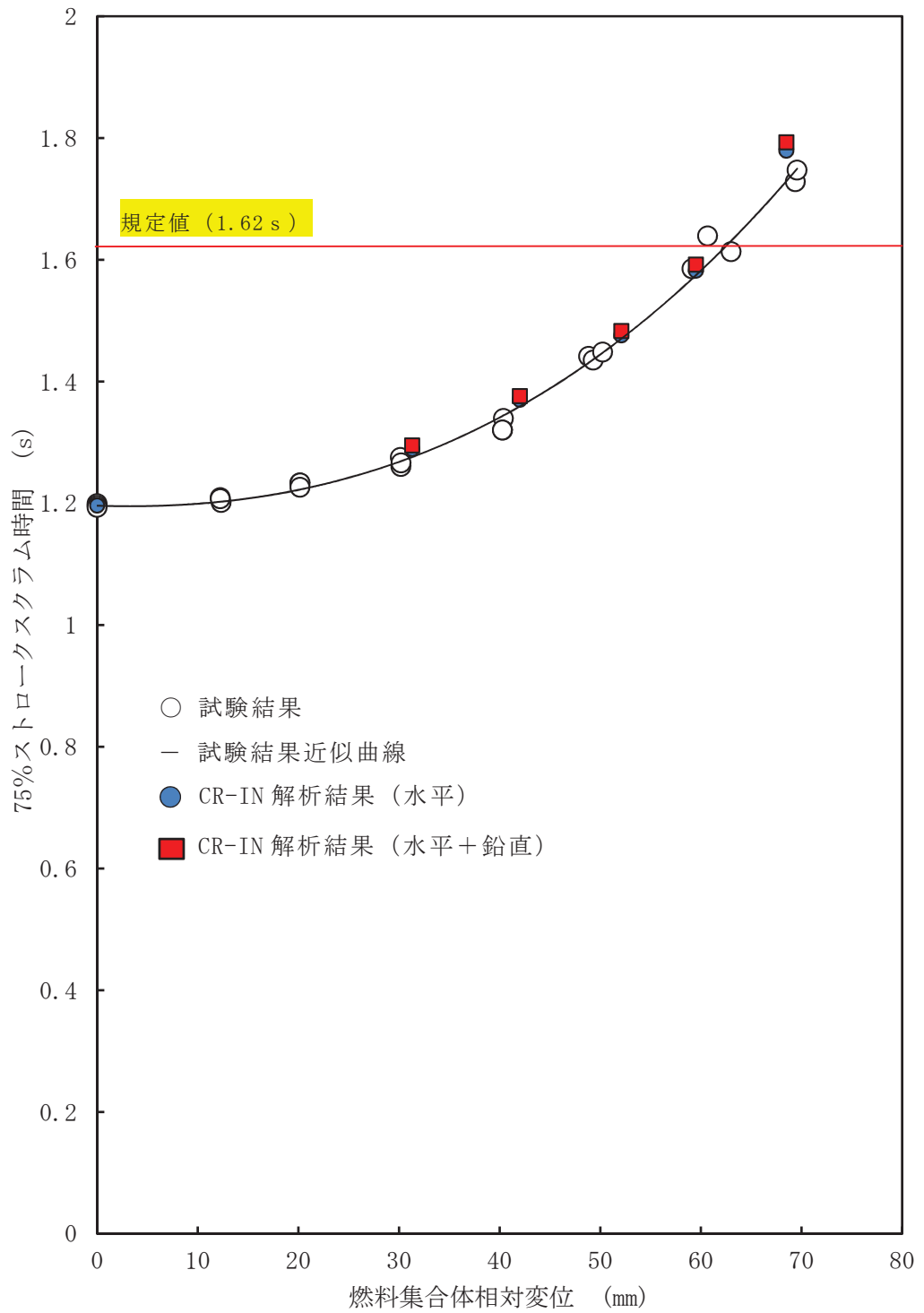


図 5-13 制御棒に対する鉛直方向加速度の影響確認結果

(2) 燃料集合体に対する鉛直方向加速度の影響

a. 評価方針

制御棒上部は、スクラム開始前の初期状態においても燃料集合体間に挿入されており、仮に鉛直方向加速度による浮上りが生じた場合でも燃料集合体下部の水平方向の移動は制御棒により拘束されるため、制御棒挿入が不可能になることはないと考えられる。

本項では、既往知見⁽²⁾を基に、仮に鉛直方向加速度により燃料集合体に浮上りが生じた場合として、次の2ケースについて確認する。

- (a) 鉛直方向加速度による燃料集合体の浮上り
- (b) 水平及び鉛直方向加速度による燃料集合体の浮上り

b. 既往知見の整理

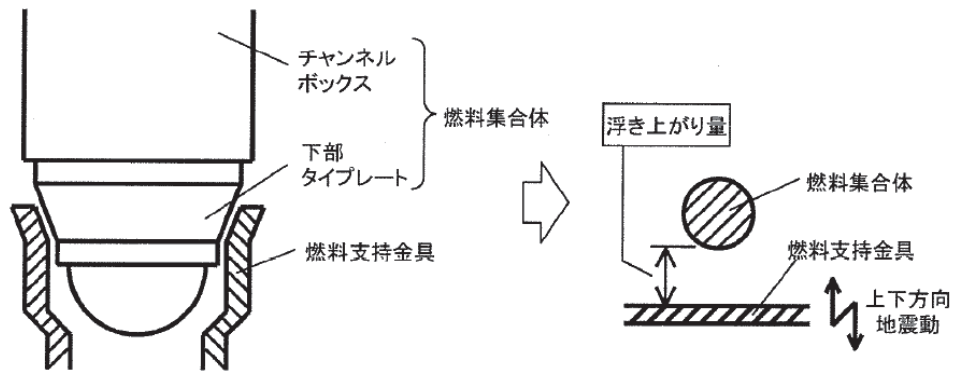
既往知見⁽²⁾では、 $1.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 以上の鉛直方向加速度が燃料集合体に作用する場合には、燃料集合体が浮上る可能性があることから、制御棒挿入性への影響として、制御棒の挿入現象・挿入時間及び燃料集合体の浮上りについて検討し、解析による制御棒挿入時間の評価及び $2.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ が作用し、仮に燃料集合体に浮上りが生じた場合でも、燃料支持金具から離脱することはないとしている。

c. 評価結果

(a) 鉛直方向加速度による燃料集合体の浮上り

既往知見⁽²⁾では、鉛直方向加速度による燃料集合体の燃料支持金具からの浮上り量について、1自由度1質点の簡易解析モデルに正弦波を入力する解析により検討している。モデルを図5-14に、解析結果を図5-15に示す。浮上り量の最大は、入力加速度 $2.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 、振動数5Hzの場合で浮上り量は68mmとなっている。

女川原子力発電所第2号機の鉛直方向震度は $1.38 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ であり、既往知見



燃料集合体と燃料支持金具の接触部周辺

解析モデル概略図

図 5-14 燃料集合体の浮上り量解析モデルの概略図（既往知見⁽²⁾）

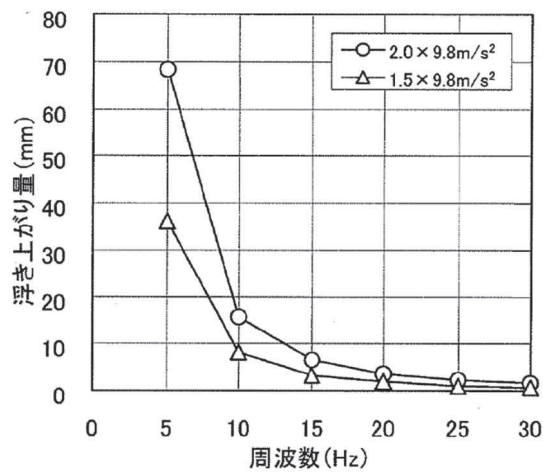


図 5-15 浮上り量解析結果（正弦波）（既往知見⁽²⁾）

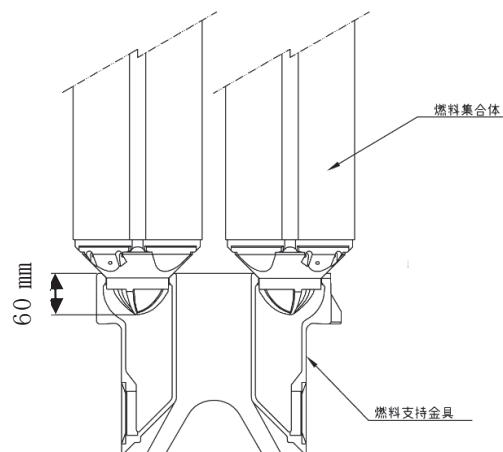


図 5-16 女川原子力発電所第 2 号機の燃料支持金具と燃料集合体の関係

(b) 水平及び鉛直方向加速度による燃料集合体の浮上り

既往知見⁽²⁾において、鉛直方向に加えて水平方向**加速度**を考慮し、燃料集合体が燃料支持金具から離脱する可能性について検討している。燃料集合体が鉛直方向加速度により浮上り、水平**方向**加速度により燃料支持金具の面に沿って**鉛直**方向に移動する事象を考えている。概要図を図 5-17 に示す。

図 5-17 の条件において力学的検討を行い、鉛直方向加速度によって燃料集合体が浮き上がった状態で水平方向**加速度**の影響を受けた場合の**鉛直**方向の**浮上り**量を求めている。実プラントの基準地震動条件での検討では、**浮上り**量評価条件は表 5-9 に示すとおりで、既往知見⁽²⁾において**水平方向加速度**に対する評価結果では、**鉛直方向加速度**が $1.5 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときの**水平方向加速度**による**鉛直**方向の**浮上り**量は 1.1mm、 $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときの**浮上り**量は 1.3mm となっている。結果として、水平及び鉛直方向加速度による上方向の**浮上り**量は、**鉛直方向加速度**が $1.5 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときは $5.8 \text{mm} + 1.1 \text{mm} = 6.9 \text{mm}$ 、**鉛直方向加速度**が $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときは $21.2 \text{mm} + 1.3 \text{mm} = 22.5 \text{mm}$ となり、鉛直方向加速度に加え水平方向加速度を考慮した場合でも、燃料支持金具設置深さ 60mm に対し十分小さい値となることが確認されている。

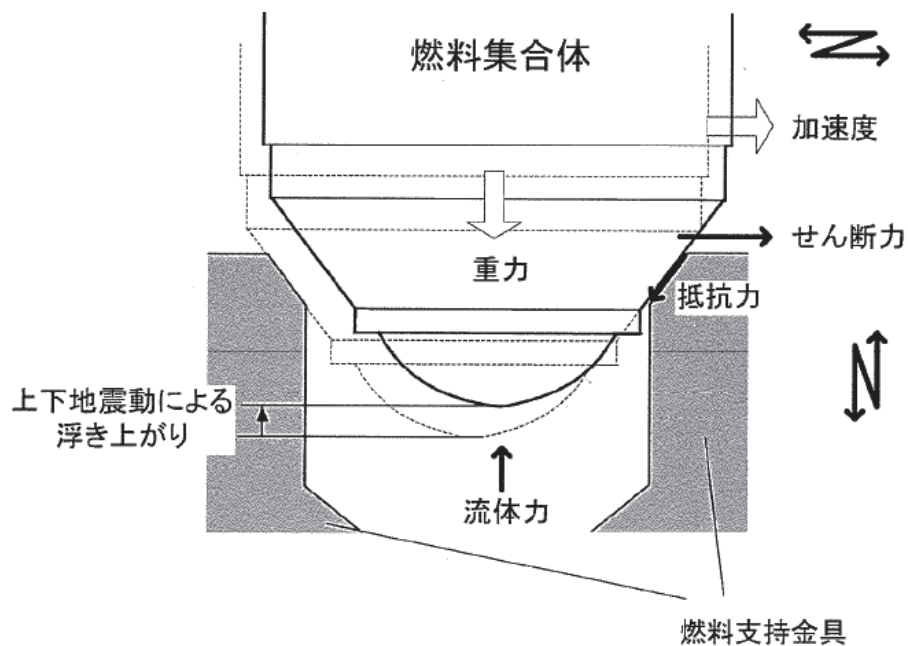


図 5-17 水平・鉛直方向**加速度**による浮上り検討概要図 (既往知見⁽²⁾)

表 5-9 鉛直方向最大加速度 $2.0 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 及び $1.5 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ のときの浮上り量評価条件
(既往知見⁽²⁾より引用)

鉛直方向 最大加速度 [m/s^2]	燃料集合体下端 加速度最大値 (水平方向)[m/s^2]	燃料集合体下端 せん断力最大値 (水平方向)[N]	鉛直方向加速度 による浮上り量 [mm]	水平方向加速度 による浮上り量 [mm]	水平+鉛直方向 加速度による 浮上り量[mm]
1.5×9.8	7.62×9.8	5.23×10^6	5.8	1.1	6.9
2.0×9.8	10.0×9.8	5.50×10^6	21.2	1.3	22.5

次に女川原子力発電所第2号機の基準地震動条件での浮上り量評価条件を整理し、既往知見⁽²⁾の浮上り量評価条件と対比して、表 5-10 に示す。既往知見⁽²⁾の検討条件に対し、女川原子力発電所第2号機の基準地震動 S_s の条件の方が、燃料集合体下端の加速度最大値及びせん断力最大値ともに小さい。このため、水平及び鉛直方向加速度による上方向の浮上り量は、既往知見⁽²⁾で算出された 6.9mm ($1.5 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ の場合) より小さくなり、浮上りによる燃料支持金具からの離脱の影響はないと考える。

以上より、既往知見⁽²⁾を基に燃料集合体の浮上り量を算出し、浮上りによる燃料支持金具からの離脱の影響がないことから燃料集合体に対する鉛直方向加速度の影響がないことを確認した。

なお、燃料集合体の浮上に伴い、一時的に燃料集合体と燃料支持金具の間の流量が増加し、燃料集合体内の流量低下が生じる可能性があるが、浮上り量も小さく、浮上り継続時間も短時間であることから、燃料集合体の冷却が著しく損なわれることはないと考える。

表 5-10 女川原子力発電所第2号機の浮上り量評価条件 (既往知見⁽²⁾と対比)

項目	鉛直方向 最大加速度 (m/s^2)	燃料集合体下端 加速度最大値 (水平方向) (m/s^2)	燃料集合体下端 せん断力最大値 (水平方向) (N)
既往知見 ⁽²⁾	1.5×9.8	7.62×9.8	5.23×10^6
	2.0×9.8	10.0×9.8	5.50×10^6
女川原子力発電所第2号機	$1.38 \times 9.8^{*1}$	$1.64 \times 9.8^{*2}$	$3.62 \times 10^6^{*3}$

注記*1：添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」の基準地震動 S_s における制御棒案内管上端位置 (質点 64) の地震応答解析による

*2：添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」の基準地震動 S_s における燃料集合体下端位置 (質点 54) の地震応答解析による

*3：添付書類「VI-2-3-2 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格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」の基準地震動 S_s における燃料集合体下端位置 (質点 54) の地震応答解析による

本項(1)、(2)の検討結果から鉛直方向加速度は制御棒及び燃料集合体の地震応答に影響を与えないことから鉛直方向加速度が制御棒挿入性評価に影響を与えないことを確認した。

d. 既往知見の女川原子力発電所第2号機への適用性

既往知見の検討に関連する燃料集合体等の機器仕様と女川原子力発電所第2号機の機器仕様についての比較結果を表 5-11 に示す。

検討に関連する機器仕様は、制御棒（中性子吸収材）以外の機器仕様は、同一条件である。また、制御棒（中性子吸収材）が異なるものの、制御棒質量は同等であることから、制御棒の型式の違いによる影響は軽微と考えられる。さらに、燃料集合体の鉛直方向の剛性も十分に高いことから、地震動の違いによる影響もないと考えられる。

以上より、既往知見の結果について、女川原子力発電所第2号機への適用性はあるものと判断できる。

表 5-11 機器仕様に係る既往知見との比較結果

機器	既往知見	女川原子力発電所第2号機	相違の有無
燃料集合体	9×9 燃料	9×9 燃料	無
チャンネルボックス*	100mil	100mil	無
制御棒	ハフニウム型	B ₄ C 型	有
上部格子板	S 格子	S 格子	無
制御棒駆動機構	FSCRD	FSCRD	無

注記*：燃料集合体の固有値解析の結果、鉛直方向の固有振動数は 45.9Hz となることを確認

5.3 制御棒挿入性評価の妥当性

5.2 項における実機条件との差異に対する影響検討結果を踏まえ、女川原子力発電所 2 号機の制御棒挿入性評価に対して総合的な評価を実施した結果を以下に示すとともに、詳細整理結果を表 5-12 に示す。

- 地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出（発生値）については、チャンネルボックスの剛性を弾性（線形）モデルとした地震応答解析に対して、チャンネルボックスの弾塑性特性を考慮した燃料集合体相対変位は小さくなる傾向にあり、保守性を有する。
- 制御棒挿入性試験による確認済相対変位の設定（許容値）については、燃料集合体相対変位 60mm において、制御棒挿入性試験における正弦波加振は地震波加振に対して 75%ストロークスクラム時間が保守的（約 0.2 秒長い）であることを確認した。また、地震波加振の 75%ストロークスクラム時間が規定値（1.62s）に達する際の燃料集合体相対変位は、燃料集合体相対変位 60 mmに対しても 1.3 倍以上（20mm 以上）の余裕があることを確認した。一方、鉛直方向加速度による制御棒挿入性に係る時間遅れの影響は軽微（約 0.01 秒）であり、制御棒挿入性試験における加振条件の保守性に包絡される。
- 影響検討に用いた CR-IN による制御棒挿入性解析においては、燃料集合体相対変位が最大となる時間帯を考慮して最も挿入時間が長くなるようにスクラム開始時間を設定していることに対して、実機におけるスクラム開始時間は、燃料集合体が最大変位となる前にスクラム信号によって制御棒が挿入されることから、CR-IN による制御棒挿入性解析にも保守性を有する。

表 5-12 実機条件との差異に対する影響検討の総合的評価

差異分類	検討項目	検討内容	影響検討の結果	
			地震応答解析による燃料集合体相対変位（発生値）の算出	制御棒挿入性試験による確認済相対変位（許容値）の設定
実機条件に対する影響確認を実施する項目	チャレンネルボックスの弾塑性影響の影響確認	チャレンネルボックスの弾塑性特性を考慮した地震応答解析を実施し、弾性（線形）モデルでの燃料集合体相対変位結果を比較	線形モデルに比べ、 <u>弾塑性モデルの燃料集合体相対変位が小さくなる傾向にあること（保守性あり）</u> を確認した	○
実機条件より明らかに保守性を有する項目	制御棒挿入性試験における保守性の確認	入力波条件が正弦波加振及び地震波加振に対する制御棒挿入性解析を実施し、75%ストロークスクラム時間を比較	—	○
実機条件に対する影響確認を実施する項目	鉛直方向加速度の影響確認	入力波条件が水平方向及び水平方向+鉛直方向に対する制御棒挿入性解析を実施し、75%ストロークスクラム時間を比較 既往知見を基に燃料集合体の浮上り量を算出し、浮上りによる燃料支持金具からの離脱の有無を確認	—	△
	実機と制御棒挿入性試験の温度条件の差異に対する検討 実機と制御棒挿入性試験の圧力条件の差異に対する検討	制御棒挿入性試験で配慮した試験条件を確認	実機条件を模擬した配慮を行っていることを確認	—
条件調整により実機条件を模擬する項目	総合的な評価	線形モデルによる地震応答解析に対し、チャレンネルボックスの弾塑性特性を考慮した燃料集合体相対変位は小さくなる傾向にあり、 <u>保守性を有する</u>	制御棒挿入性試験における正弦波加振の保守性に對し、鉛直方向加速度による時間遅れの影響が軽微であるため、 <u>保守性を有する</u>	○

6. 制御棒挿入性試験及び制御棒挿入性解析に基づく確認済相対変位（許容値）の設定
4章で示す制御棒挿入性試験結果及び5章で示す制御棒挿入性解析を用いた制御棒挿入性評価の妥当性確認結果を踏まえ、今回工認における制御棒挿入性評価に用いる確認済相対変位（許容値）を60mmと設定する。その上で、基準地震動 S_s に対する地震応答解析による燃料集合体相対変位（54.2mm）が制御棒挿入性試験による確認済相対変位（60mm）以下であることを満足することを確認した。

7. まとめ

今回工認における女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性評価は、既工認の評価手法と同様、J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に記載のBWR用制御棒の評価手法に基づき評価を実施した。

女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性評価においては、新規制基準による基準地震動 S_s の増大に伴い燃料集合体相対変位が増大したことから、既工認と同様の制御棒挿入性試験を実施し、確認済相対変位のデータを拡充し、75%ストロークスクラムの規定値（1.62s）に達する際の燃料集合体の相対変位として60.9mm（試験3回の平均値）が得られた。

制御棒挿入性評価に係る地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出及び制御棒挿入性試験の結果について、実機条件との差異に着目した影響検討を実施した結果、総合的に保守性を有する結果となっていることを確認した。

8. 引用文献

- (1) 平成16年度 原子力発電施設耐震信頼性実証に関する報告書 機器耐力その2（制御棒挿入性）（05 基構報-0003,（独）原子力安全基盤機構）
- (2) 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（06 基構報-0014,（独）原子力安全基盤機構）

CR-IN の概要

目次

1.	はじめに.....	1
2.	解析手法.....	2
2.1	制御棒の挿入運動方程式及び燃料集合体相対変位の振動方程式.....	5
2.2	組合せはりモデルによる接触反力と復元力の計算.....	7
3.	計算例.....	12
4.	鉛直方向加速度を考慮した挿入時間影響評価.....	14
別添 1	CR-IN に用いるパラメータの設定.....	17
別添 2	CR-IN に入力する地震波条件.....	23
別添 3	CR-IN に係る女川原子力発電所第 1 号機工認実績と今回工認との比較.....	26
別添 4	制御棒挿入性解析に係る既往知見との比較.....	29

1. はじめに

CR-IN は、1980 年代に開発された計算機プログラム（解析コード）で、BWR の地震スクラム時に制御棒が炉心に挿入される時間を解析するプログラムである。制御棒が水圧によって炉心に挿入される際の制御棒の挿入運動方程式と、地震による燃料集合体の振動方程式を、制御棒と燃料集合体の接触反力及び復元力によって連成させて、スクラム開始後の制御棒挿入位置を時刻歴応答で計算し、規定挿入位置までの挿入時間を算出する。

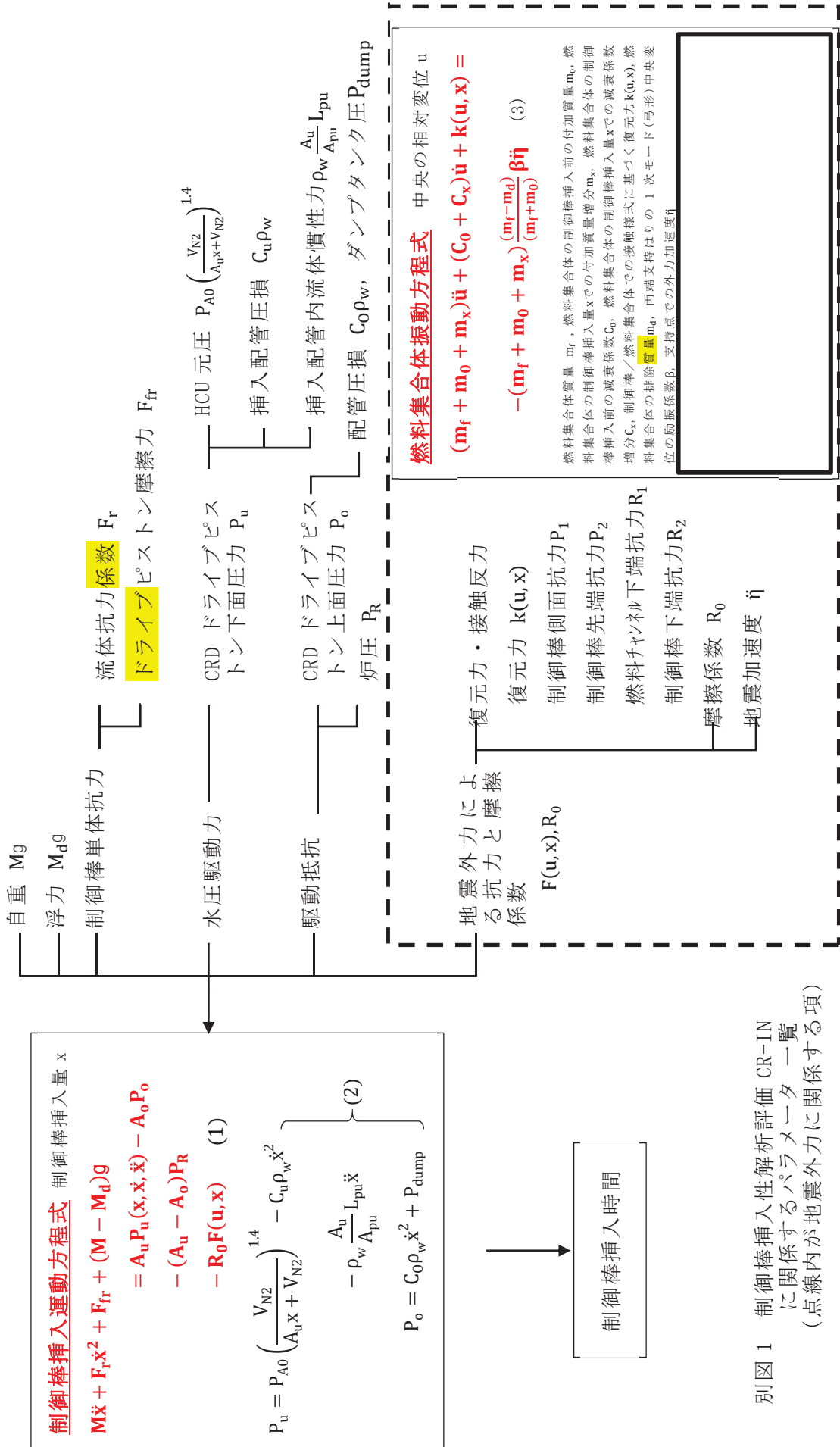
過去には女川原子力発電所第 1 号機の工認（6 資庁第 14412 号、1995 年）において、同様の評価に用いた実績のある計算機プログラムである。

本資料では、CR-IN の概要について説明する。

2. 解析手法

別図 1 に、CR-IN で扱われるパラメータの一覧を示す。制御棒の挿入位置を x 、燃料集合体中央の相対変位を u として、制御棒の挿入位置 x の運動方程式が式 (1)、水圧駆動が式 (2) で表わされ、燃料集合体相対変位 u の振動方程式が式 (3) で表される。CR-IN の特徴は、式 (1) と (3) を連成させ、式 (1) の右辺最後の項 $R_0 F(u, x)$ の接触反力 $F(u, x)$ と、式 (3) の左辺最後の項である復元力 $k(u, x)$ を、モデルで計算していることにある。

式 (1) ~ (3) の連成方程式を解く各時刻ステップにおいて、燃料集合体相対変位 u と制御棒挿入量 x から、復元力 $k(u, x)$ と、接触反力 $F(u, x)$ が逐次計算されて時刻歴応答計算が構成される。なお、CR-IN では制御棒挿入量 x と燃料集合体相対変位 u の 2 つの変数の 2 階連立微分方程式 (別図 1 中の (1) 及び (3) の連立方程式) を Runge-Kutta 法により時刻歴で解いている。



別図 1 制御棒挿入性解析評価 CR-IN に関するパラメータ一覧 (点線内が地震外力に関する項)



別図 2 制御棒と燃料チャンネルの接触による力

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

2.1 制御棒の挿入運動方程式及び燃料集合体相対変位の振動方程式

別図 1 に示した制御棒の挿入運動方程式(1)、水圧駆動式(2)及び燃料集合体相対変位の振動方程式(3)の各項を以下に説明する。

【制御棒の挿入運動式】

$$M\ddot{x} + F_r\dot{x}^2 + F_{fr} + (M - M_d)g = A_u P_u(x, \dot{x}, \ddot{x}) - A_o P_o - (A_u - A_o)P_R - R_0 F(u, x) \quad (1)$$

【水圧駆動式】

$$\left. \begin{aligned} P_u &= P_{A0} \left(\frac{V_{N2}}{A_u x + V_{N2}} \right)^{1.4} - C_u \rho_w \dot{x}^2 - \rho_w \frac{A_u}{A_{pu}} L_{pu} \ddot{x} \\ P_o &= C_o \rho_w \dot{x}^2 + P_{dump} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、

x	:	制御棒挿入量（鉛直上向き正）、 \dot{x} は挿入速度、 \ddot{x} は挿入加速度
u	:	燃料集合体中央の相対（撓み）変位（水平方向）
g	:	重力加速度
M	:	制御棒可動部質量（CRD の可動部（ドライブピストン等）を含む）
M_d	:	制御棒可動部の排除質量（ $M_d g$ が浮力に相当）
F_r	:	制御棒の流体抵抗係数 $F_r = C_d \rho S / 2$ C_d は抗力係数、 ρ は炉水密度、 S は投影面積
F_{fr}	:	CRD ドライブピストン摩擦力
P_u	:	CRD ドライブピストン下面圧力
A_u	:	CRD ドライブピストン下面面積
P_o	:	CRD ドライブピストン上面圧力
A_o	:	CRD ドライブピストン上面面積
P_R	:	炉圧（加振試験では容器圧力）
$F(u, x)$:	制御棒／燃料チャンネルでの接触様式に基づく接触反力（別紙 2.2 項参照；接触反力 P_1, P_2, R_1, R_2 の絶対値和）
R_0	:	制御棒／燃料チャンネルでの接触反力の摩擦係数
P_{A0}	:	HCU・アキュムレータ初期圧力
V_{N2}	:	HCU・ N_2 初期容積
C_u, C_o	:	挿入配管系及び引抜配管系の弁及び配管の圧損係数
ρ_w	:	駆動水密度
A_{pu}	:	挿入配管断面積
L_{pu}	:	挿入配管長
P_{dump}	:	ダンプタンク圧力

非加振（ゼロスクラム条件）では、(1)式右辺の $R_0 F(u, x)$ の項がゼロとなり、

$$M\ddot{x} + F_r\dot{x}^2 + F_{fr} + (M - M_d)g = A_u P_u(x, \dot{x}, \ddot{x}) - A_o P_o - (A_u - A_o)P_R \quad (1)'$$

の変位 x のみの運動方程式となる。(1)式の $R_0 F(u, x)$ の項以外は加振／非加振で共通とし、ゼロスクラム試験結果を使って設定する。

【燃料集合体中央の相対変位振動方程式】

$$(m_f + m_0 + m_x)\ddot{u} + (C_0 + C_x)\dot{u} + k(u, x) = -(m_f - m_d) \frac{(m_f - m_d)}{(m_f + m_0)} \beta \ddot{\eta} \quad (3)$$

ここで、

- x : 制御棒挿入量（鉛直上向き正）
- u : 燃料集合体中央の相対（撓み）変位（水平方向） \dot{u} は撓み速度、 \ddot{u} は撓み加速度
- m_f : 燃料集合体（チャンネル4体）の（等価）質量
- m_0 : 燃料集合体（チャンネル4体）の制御棒挿入前の付加質量
- m_x : 燃料集合体（チャンネル4体）の制御棒挿入量 x での付加質量増分
- C_0 : 燃料集合体（チャンネル4体）の制御棒挿入前の減衰係数
- C_x : 燃料集合体（チャンネル4体）の制御棒挿入量 x での減衰係数増分
- $k(u, x)$: 制御棒／チャンネルでの接触様式に基づく復元力（別紙 2.2 項参照）
- m_d : 燃料集合体（チャンネル4体）の排除質量
- $\frac{(m_f - m_d)}{(m_f + m_0)}$ で燃料集合体の水中励振係数を表す
- β : 両端支持はりの1次モード(弓形)中央変位の励振係数。 $4/\pi$ で近似
- $\ddot{\eta}$: 支持点での外力加速度（外部入力値）

(3)式で、質量／付加質量／排除質量は、仕様値から設定される項目であり、(3)式の右辺は仕様あるいは加振条件に基づき設定する値である。

(1)式右辺の接触反力 $F(u, x)$ と(3)式左辺の復元力 $k(u, x)$ は、燃料集合体中央変位 u と制御棒挿入量 x の関数として表される。

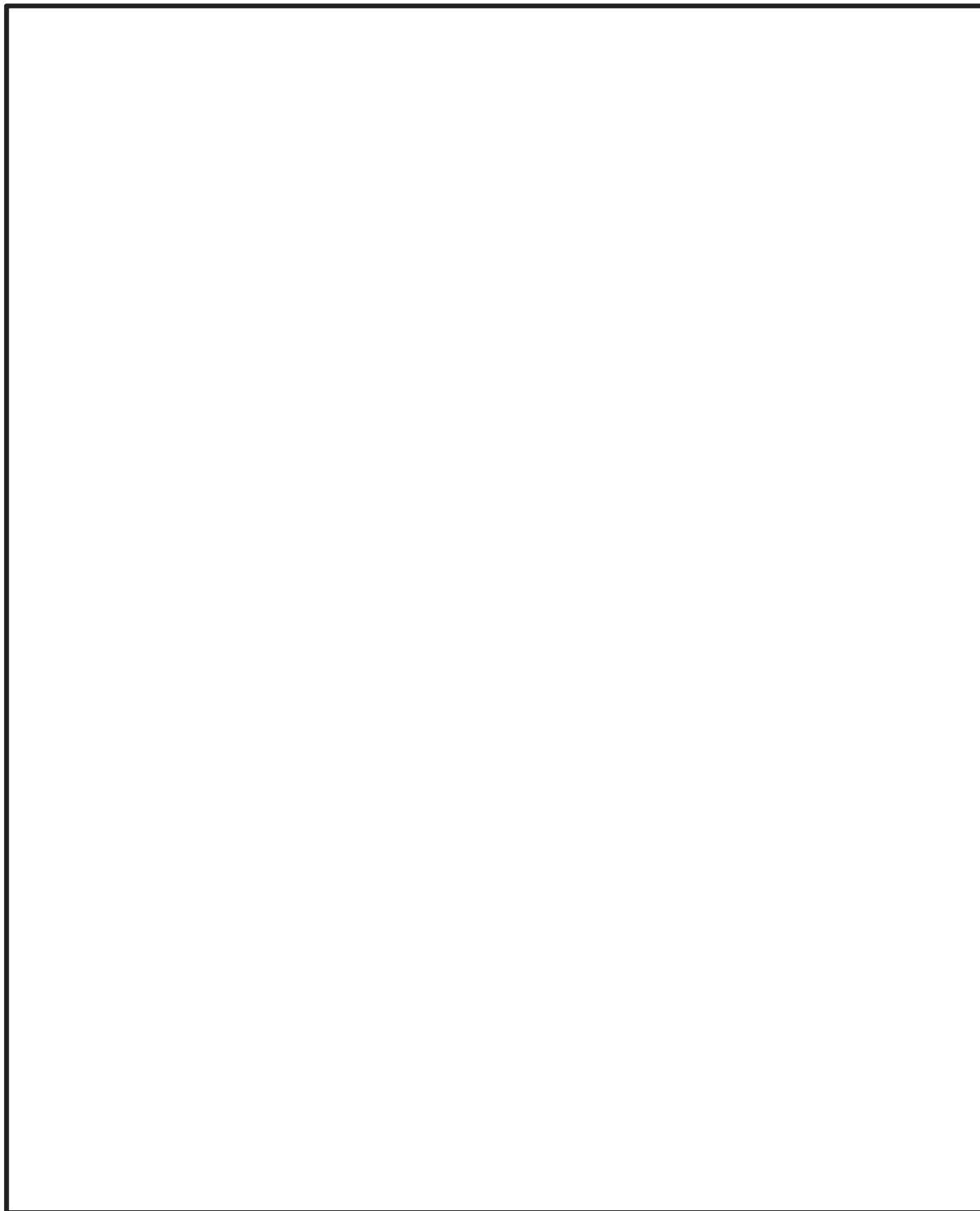
なお、挿入配管圧損係数 C_u 、引抜配管圧損係数 C_o 、流体抗力係数 F_r 、ドライブピストン摩擦力 F_{fr} 及び摩擦係数 R_0 は理論値をベースに制御棒挿入性試験結果に基づき設定した値であり、それ以外のパラメータについては設備の形状、仕様等で定まる値である。

挿入配管圧損係数 C_u 、引抜配管圧損係数 C_o 、流体抗力係数 F_r 、ドライブピストン摩擦力 F_{fr} 及び摩擦係数 R_0 の設定について別添 1 に示す。

2.2 モデルによる接触反力と復元力の計算

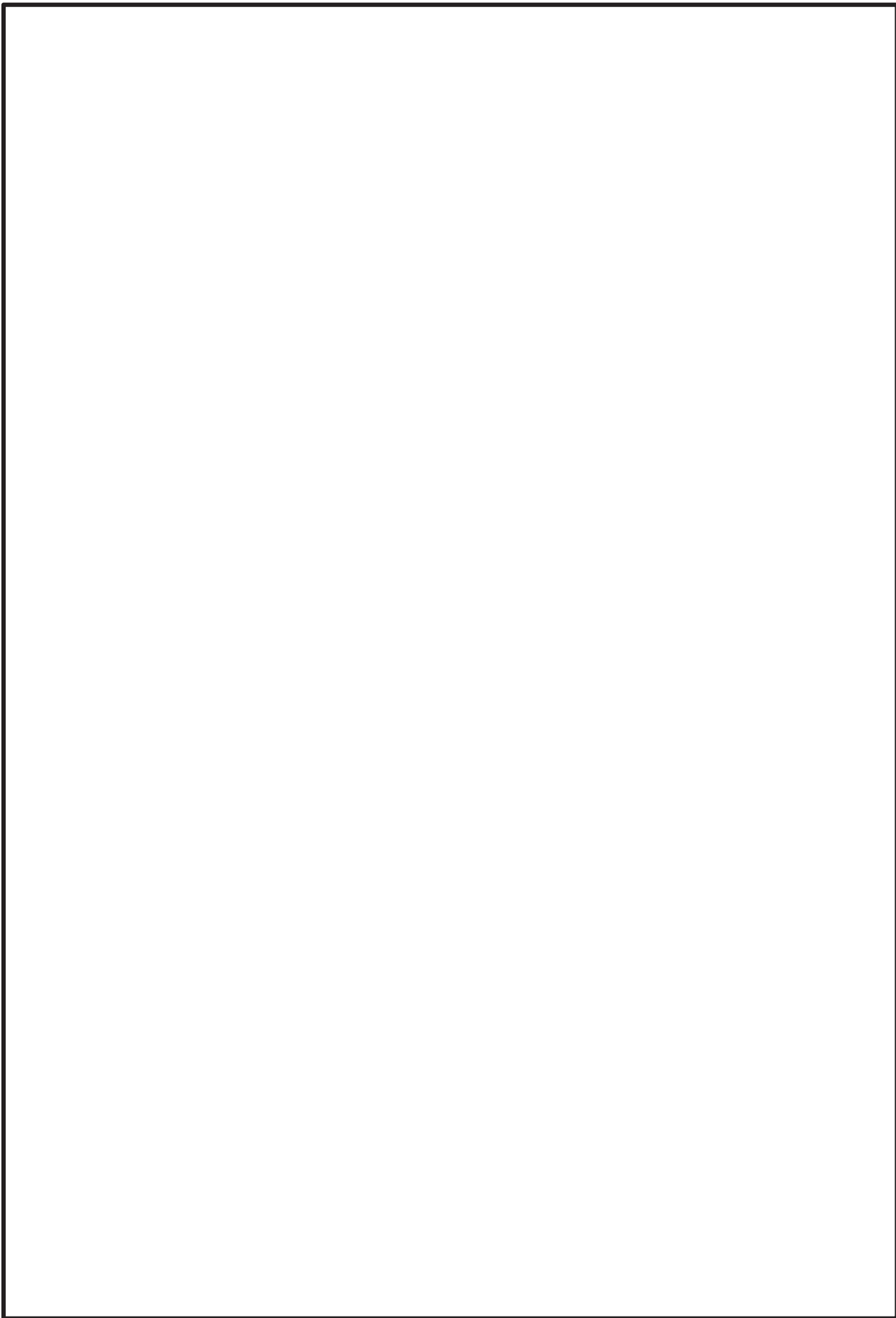


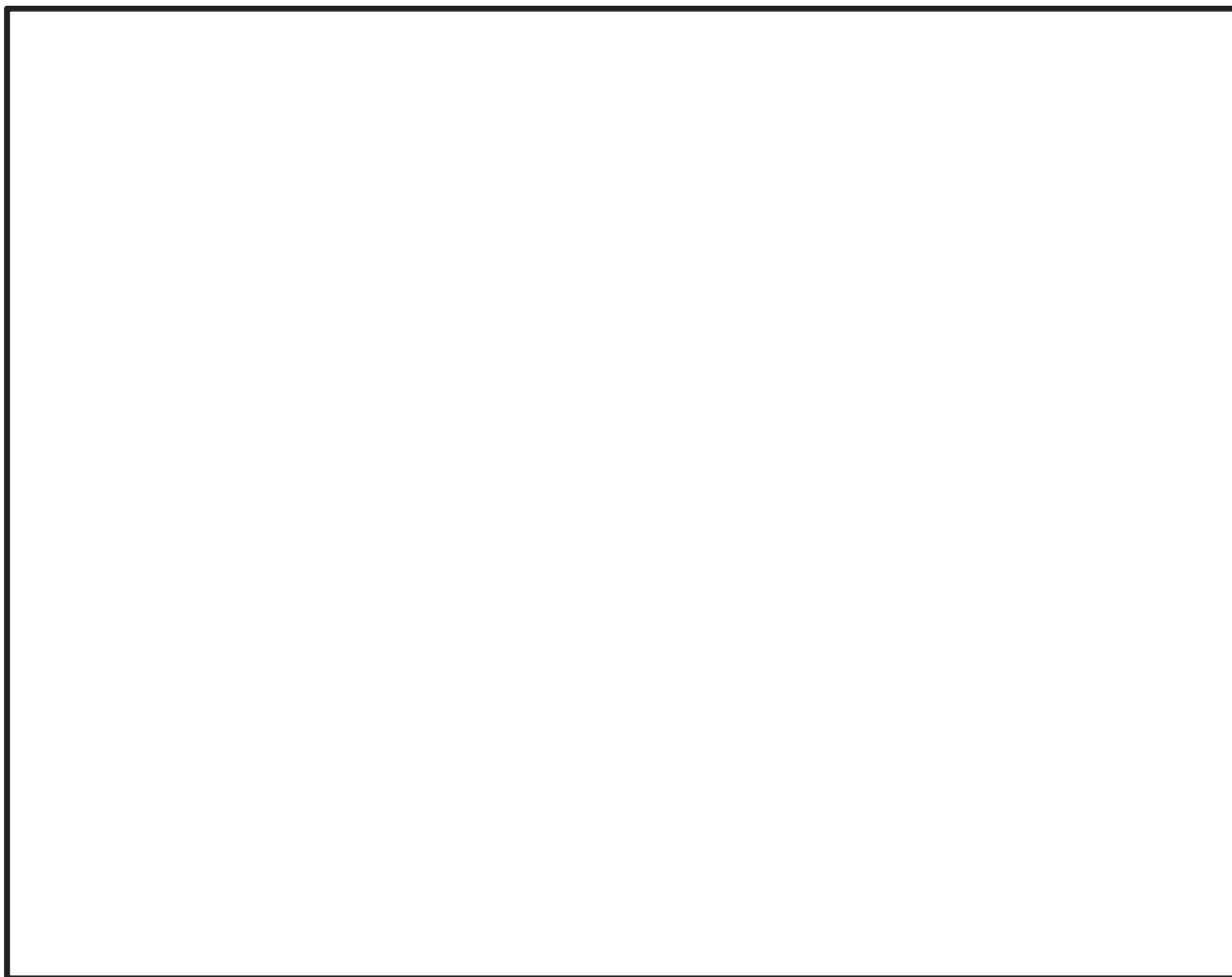
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



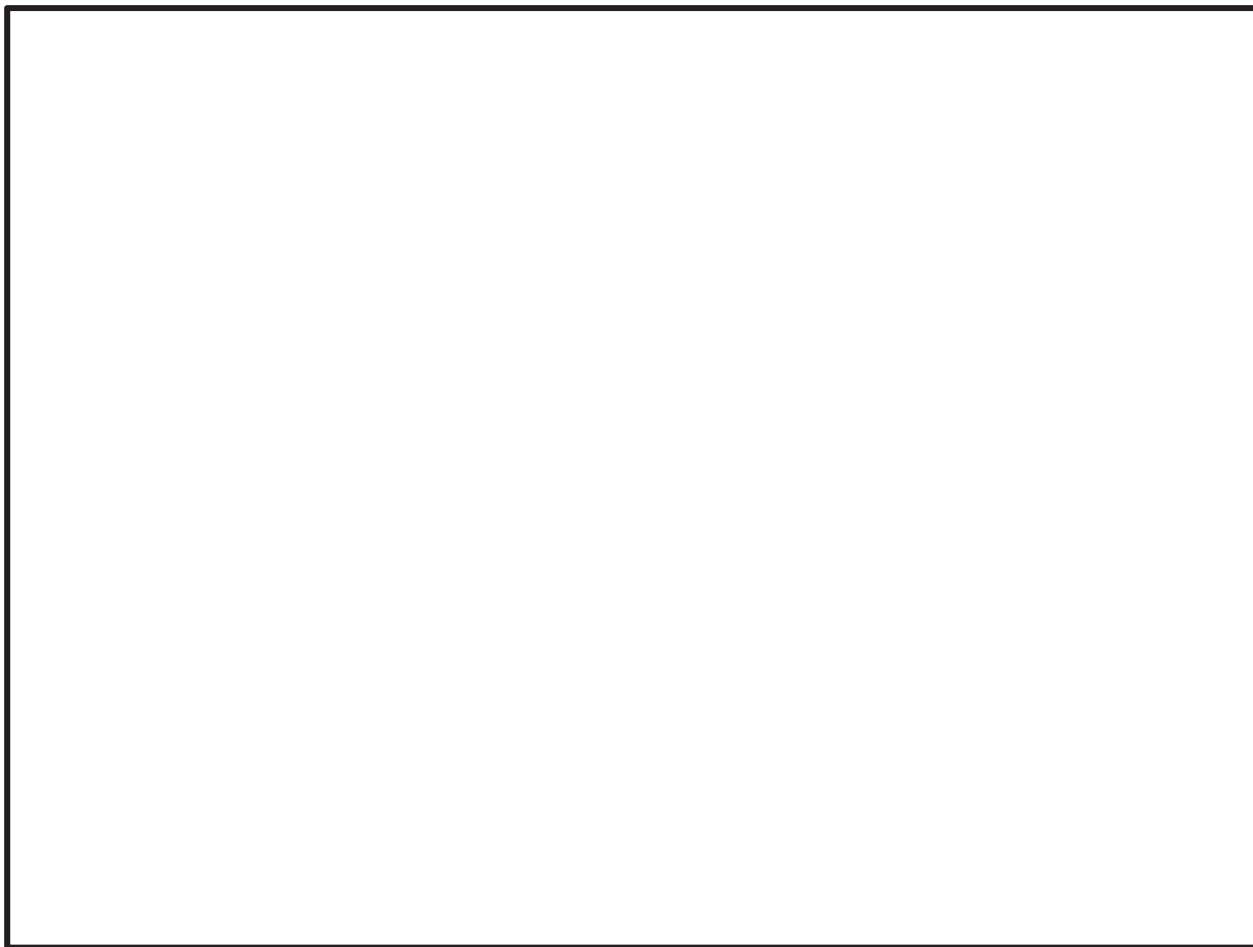
別図 3 燃料チャンネルと制御棒の 5 接触様式

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。





枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

3. 計算例

前章で説明した 挿入抗力を，計算例にもとに説明する。

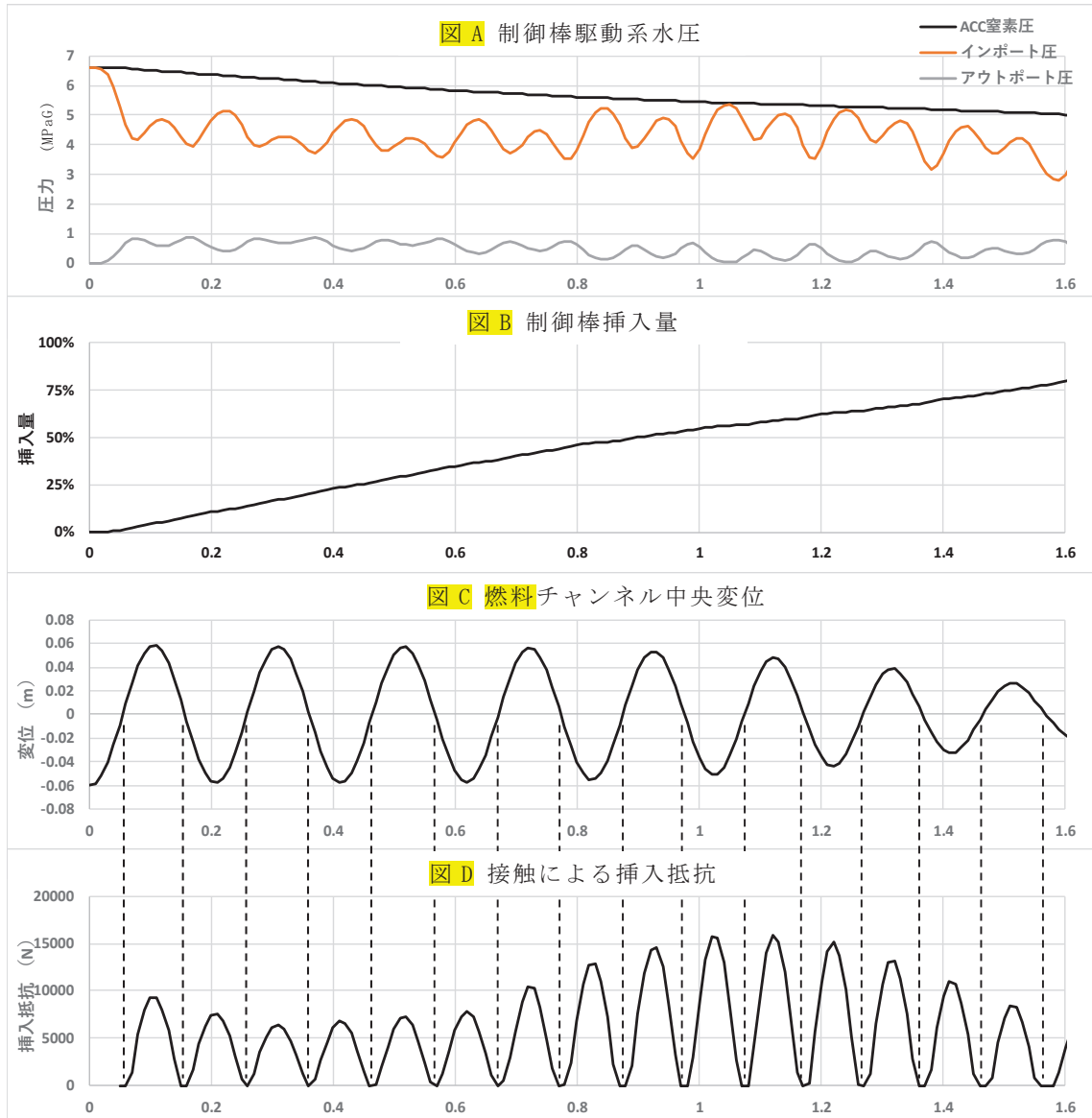
別図 5 は，正弦波加振試験を再現することを目的に，正弦波を水平加振波として CR-IN で解析した例である。上から，図 A 制御棒水圧駆動系の圧力（アキュムレータ室素圧，CRD ドライブピストン下面圧力，CRD ドライブピストン上面圧力），図 B 制御棒挿入量（フルストローク基準の%で表示），図 C 燃料チャンネル中央のたわみ変位（相対変位），図 D 接触による挿入抵抗（総抵抗），図 E をスクラム開始後の時刻歴で示している。別図 5 の例では，図 B に示す 75% 挿入時間は約 1.5 秒であり，スクラム弁の遅れ時間 0.09 秒を加えた挿入時間 1.59 秒は，スクラム開始時の燃料チャンネル中央変位 59.1mm での試験結果に一致する。

制御棒水圧駆動系（図 A）では，スクラム開始後制御棒の挿入量と共に，アキュムレータ圧は徐々に低下する。CRD ドライブピストン下面 圧力とアキュムレータ圧力の差分は，(2) 式から分かるように挿入速度の二乗に比例する圧損部分が主であり，両者の差が小さい時は，制御棒挿入速度が小さいことを意味する。

図 C の燃料チャンネル中央変位の時刻歴から徐々に変位が小さくなることが分かる。これは，制御棒が挿入され燃料チャンネルと接触することにより，制御棒の剛性が加わるためである。図 D の挿入抵抗（総抵抗）との関係を見ると，変位の絶対値が大きい時に挿入抵抗が大きく，挿入抵抗の変動周期が，変位の周期の倍になることが分かる。



枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



別図 5 正弦波加振の解析例

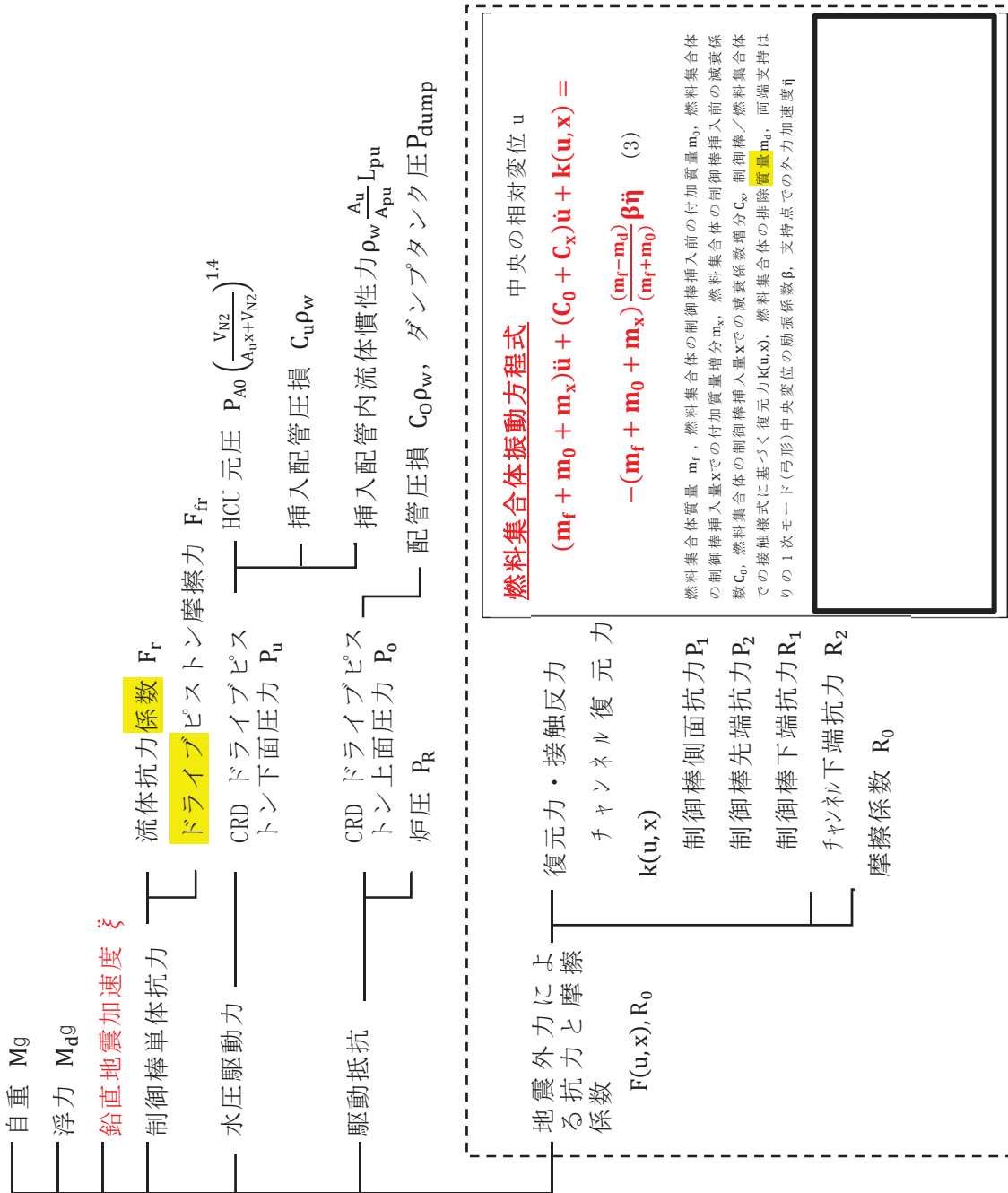
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 鉛直方向加速度を考慮した挿入時間影響評価

ここでは、CR-IN を使って、制御棒の挿入中に鉛直方向加速度が加わった場合の制御棒挿入時間への影響を評価する方法について説明する。別図 5 に、鉛直方向加速度が加わった場合の CR-IN で扱われるパラメータの一覧を示す。別図 6 に示すように、制御棒の質量 M に鉛直方向加速度を乗じて荷重とみなし、制御棒挿入運動方程式に組み込むモデルを採用し、鉛直方向加速度を重力と同等に扱うモデルで評価する。ただし重力と異なり、今回の評価に用いた変動荷重の平均値はゼロである。同様に制御棒挿入運動に関わる力で変動力となるのは、燃料チャンネルと制御棒の接触による挿入抵抗力である。水平加振が正弦波である場合には、3 章で示したように、正弦波周期の $1/2$ の周期で挿入抵抗力は変動する。(別図 6・右図)

鉛直方向加速度がこの挿入抵抗力と同期する場合には、挿入抵抗と同期してブレーキとなると考えられる。鉛直方向加速度が主要な動的変動である挿入抵抗とカップリングして作用するこのケースは、極端ではあるが最も鉛直方向加速度が挿入時間に影響するケースと考える。

別図 6 では、鉛直加振として水平加振と同じ振動数及び 2 倍振動数の正弦波を加えた挿入時間解析を CR-IN で行い、制御棒挿入時間への鉛直方向加速度の影響を評価するモデルを考えている。鉛直正弦加振波は、別図 6 右図に示すように、下向き加速度を正として、挿入抵抗力と同相となる場合と逆相となる場合が想定される。



制御棒挿入運動方程式 制御棒挿入量 x

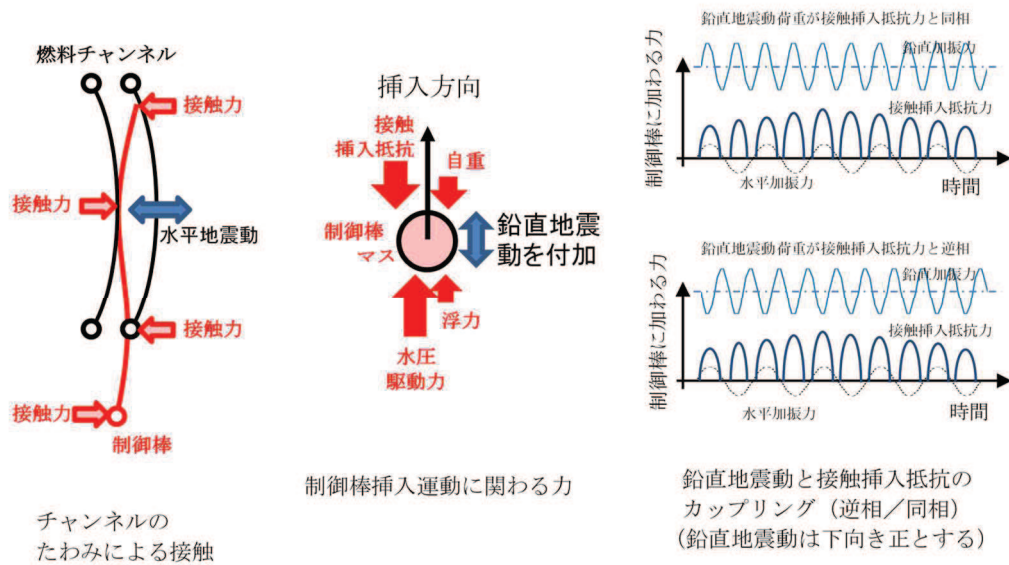
$$M \ddot{x} + F_{fr} \dot{x}^2 + F_{fr} + (M - M_d)g + M \ddot{\xi} = A_u P_u(x, \dot{x}, \ddot{x}) - A_0 P_0 - (A_u - A_0) P_R - R_0 F(u, x) \quad (1)$$

$$P_u = P_{A0} \left(\frac{V_{N2}}{A_u x + V_{N2}} \right)^{1.4} - C_u \rho_w \dot{x}^2 - \rho_w \frac{A_u}{A_{pu}} L_{pu} \ddot{x} \quad (2)$$

$$P_0 = C_0 \rho_w \dot{x}^2 + P_{dump}$$

制御棒挿入時間

別図 5 制御棒挿入性解析評価 CR-IN に関するパラメータ一覧 (点線内が地震外力に関係する項) 赤字が、鉛直方向加速度に関わる項



別図 6 CR-IN による鉛直方向加速度の挿入時間への影響解析モデル

参考文献：

- 1) Watanabe, Y. et al., and Motora, Y., "Analysis of control rod Scrammability Characteristics on the Condition of the Forced Vibration of Fuel Assemblies", Proc. of the 7th SMiRT, F7/8, 1983
- 2) Watanabe, Y. et al., "BWR CONTROL ROD DRIVE SCARAMMABILITY DURING EARTHQUAKES". 1989 ASME PVP Conference in Honolulu

CR-IN に用いるパラメータの設定

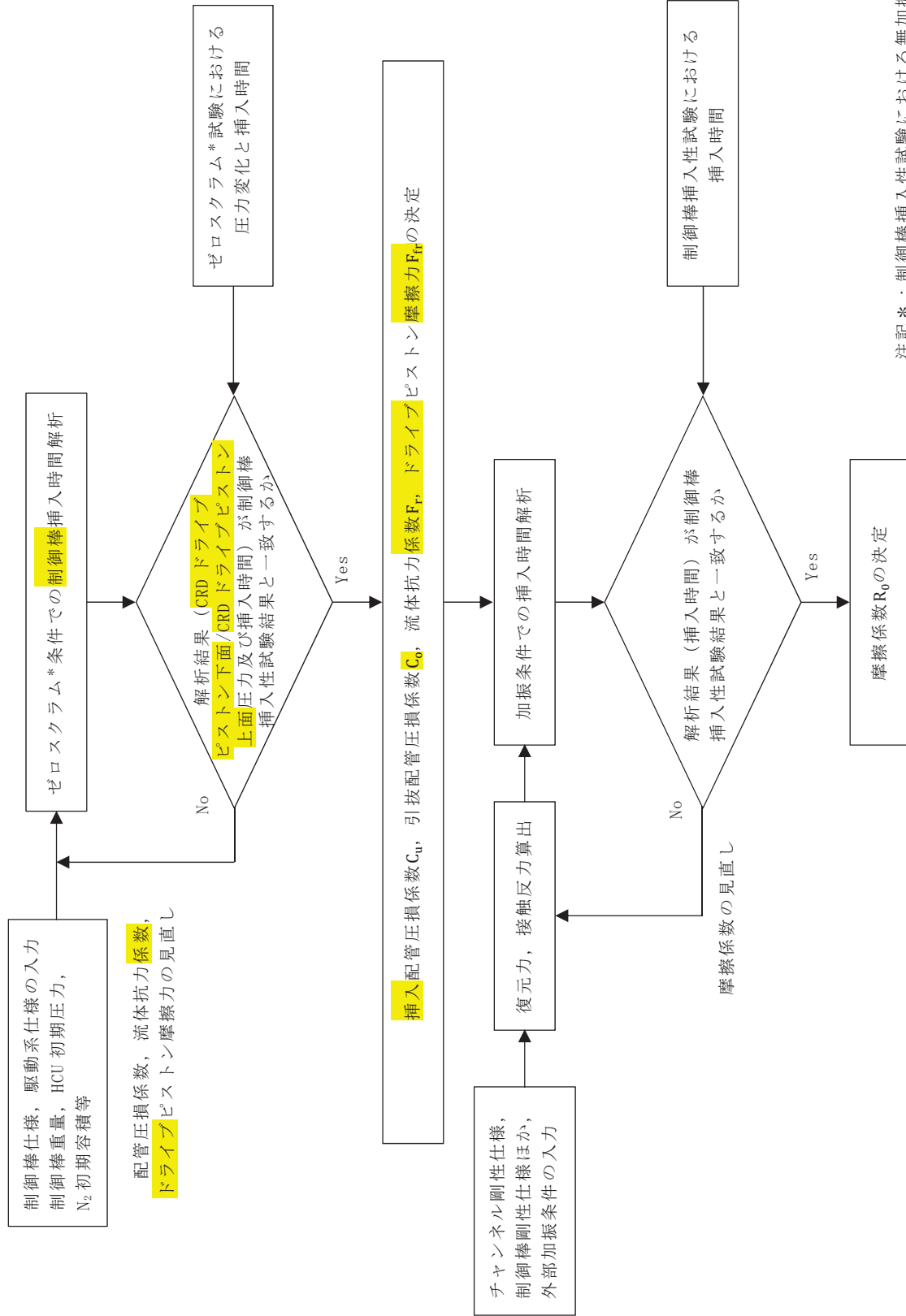
1. はじめに

女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性解析に用いた解析コード CR-IN においてはいくつかパラメータを設定する必要があり、挿入配管圧損係数 C_u 、引抜配管圧損係数 C_o 、流体抗力係数 F_r 、ドライブピストン摩擦力 F_{fr} 及び摩擦係数 R_0 については、制御棒挿入性試験結果から得られた結果に基づき設定している。

本資料は、挿入配管圧損係数 C_u 、引抜配管圧損係数 C_o 、流体抗力係数 F_r 、ドライブピストン摩擦力 F_{fr} 及び摩擦係数 R_0 の設定について整理した資料である。

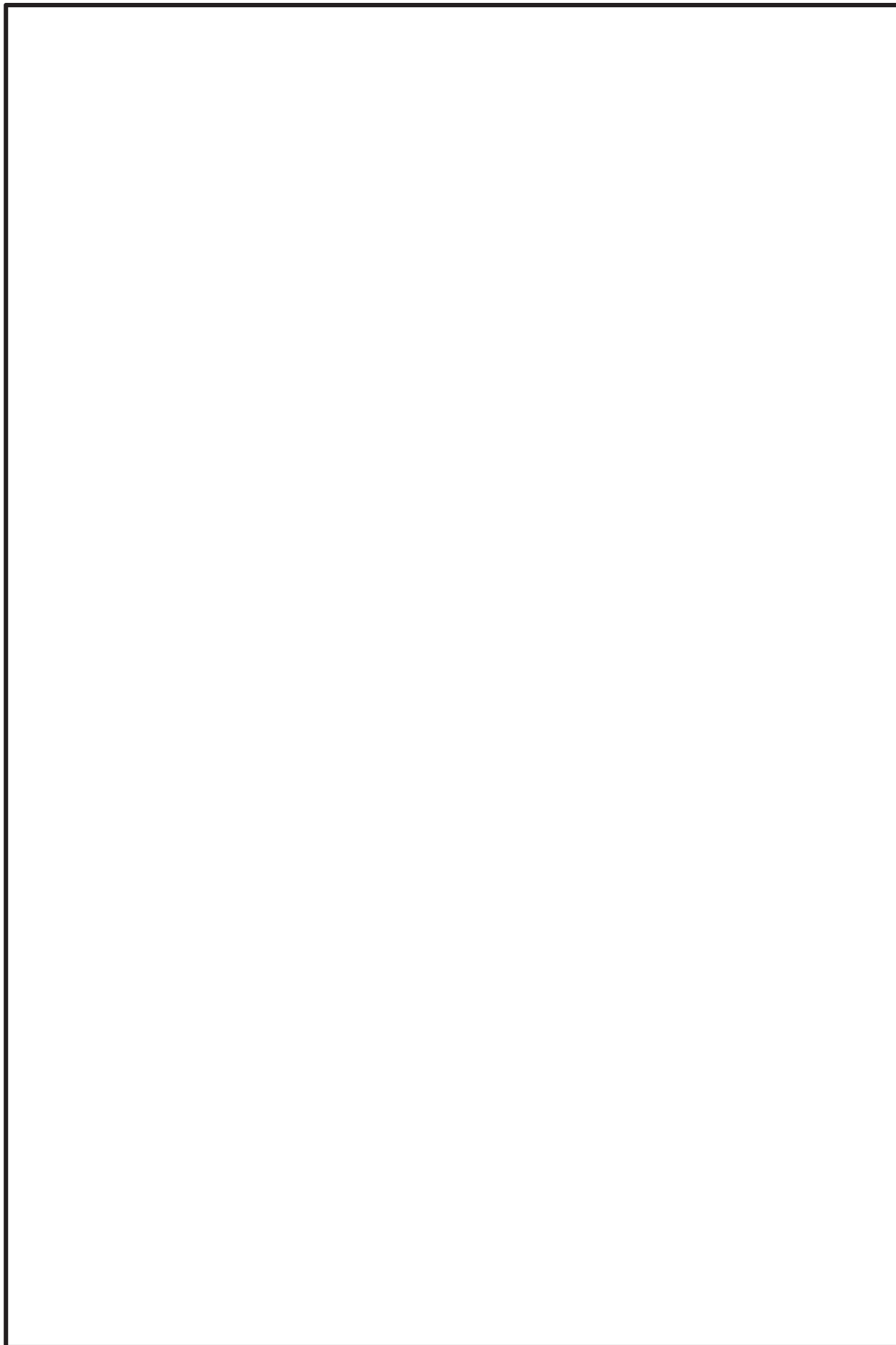
2. CR-IN のパラメータの設定

CR-IN に用いるパラメータは別紙 2.1 項に示すとおりであるが、挿入配管圧損係数 C_u 、引抜配管圧損係数 C_o 、流体抗力係数 F_r 、ドライブピストン摩擦力 F_{fr} 及び摩擦係数 R_0 については、実際の試験装置の構造特徴によって数値が変わってくるパラメータやそもそも理論的に設定することが難しいパラメータであることから、精度の高いパラメータを理論的に算出することは難しいと考え、制御棒挿入性試験結果に基づき設定した。別添 2 図 1 に、CR-IN を用いた各パラメータの設定フローを示す。



注記* : 制御棒挿入性試験における無加振時の
75%ストロークスクラム時間

別添 1 図 1 CR-IN の各パラメータの設定フロー





別添 1 図 3 CRD ドライブピストン上面圧力の制御棒挿入性試験と解析結果の比較

2.3 流体抗力係数 F_r の設定

流体抗力係数 F_r は、CR-IN によるゼロスクラム条件での制御棒挿入時間が制御棒挿入性試験結果のゼロスクラム時間と同様となるように $1050\text{N}/(\text{m/s})^2$ を設定した。

なお、下記の通り、推定値は $1000\text{N}/(\text{m/s})^2$ であるが、制御棒の投影面積、体積等は概算値を用いて算出しているため、わずかに相違が生じるものであり、試験での設定については妥当であると考ええる。

《推定値の算出》

物体が流体中を運動する際に受ける流体抗力は、一般的には次式で定義される。

$$\text{流体抗力} = 1/2 \times C_d \times (\text{流体密度}) \times (\text{物体の投影面積}) \times (\text{物体の速度})^2$$

ここで C_d は抗力係数であり、物体形状や移動する流路に依存する。CR-IN における流体抗力係数 F_r は、流体抗力を物体の速度の二乗で除した係数として定義するため

$$F_r = 1/2 \times C_d \times (\text{炉心流体密度}) \times (\text{制御棒の面積})$$

に相当する。

制御棒はチャンネルボックスとの狭い間隙を駆動されるので、知見¹⁾によると、 $C_d = 0.5$ と推定される。炉心流体密度は、常温挿入試験では室温の水の密度 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 、制御棒の面積についてはブレード面積 (約 4.0m^2) を用いると、

$$F_r = 1/2 \times 0.5 \times 1000 \times 4.0 = 1000$$

と推定される。

2.4 ドライブピストン摩擦力 F_{fr} の設定

ドライブピストン摩擦力 F_{fr} は、挿入速度に依存しないドライブピストン駆動時に CRD 内部で部材同士が接触して生じる摩擦力となり流体抗力係数 F_r とは独立に設定される。ドライブピストン摩擦力 F_{fr} は、CR-IN によるゼロスクラム条件での制御棒挿入時間が制御棒挿入性試験結果のゼロスクラム時間と同様となるように 500N を設定した。

なお、女川原子力発電所第 2 号機の定期検査時に測定されたドライブピストン摩擦力は 500N であり同等の値となっていることから、CR-IN における設定は妥当であると考えられる。

2.5 摩擦係数 R_0 の設定

摩擦係数 R_0 は、CR-IN の解析結果と制御棒挿入性試験における燃料集合体相対変位 59.1mm の正弦波加振試験の 75% 挿入時間 1.59 秒の試験結果とが同等となるように、0.182 を設定した。

なお、機械工学便覧によれば境界潤滑（流体潤滑のように境界面が完全に隔離されておらず部分的に金属表面の接触が生じている潤滑状態）の条件では摩擦係数が 0.1 前後であると言われている。挿入性試験においては制御棒と燃料集合体の接触抗力が大きいことから一般的な境界潤滑状態よりも乾燥摩擦の状態に近かったものと推察される。

2.6 まとめ

CR-IN のパラメータの内、制御棒挿入性試験結果に基づき設定する挿入配管圧損係数 C_u 、引抜配管圧損係数 C_o 、流体抗力係数 F_r 、ドライブピストン摩擦力 F_{fr} 及び摩擦係数 R_0 の設定値について別添 1 表 2 に示す。CR-IN における圧損係数、流体抗力係数及び摩擦係数のパラメータの設定値については、制御棒挿入性試験結果から得られたパラメータを基に設定しており、また、推定値とも同等の値となっているため妥当な設定値と考える。なお、圧損係数、流体抗力係数及び摩擦係数以外のパラメータについては、設備の形状、仕様等で定まる値を設定している。

別添 1 表 2 制御棒挿入性試験結果に基づき設定するパラメータの設定値

--

注記*：制御棒挿入性試験における無加振時の75%ストロークスクラム時間

参考文献

- 1] 坂本ら,「乱流境界層内におかれたにぶい物体周辺の流れに関する研究:2 報 傾斜平板に作用する流体力」 機械学会論文集 42 卷 (357) 1976

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

CR-IN に入力する地震波条件

1. はじめに

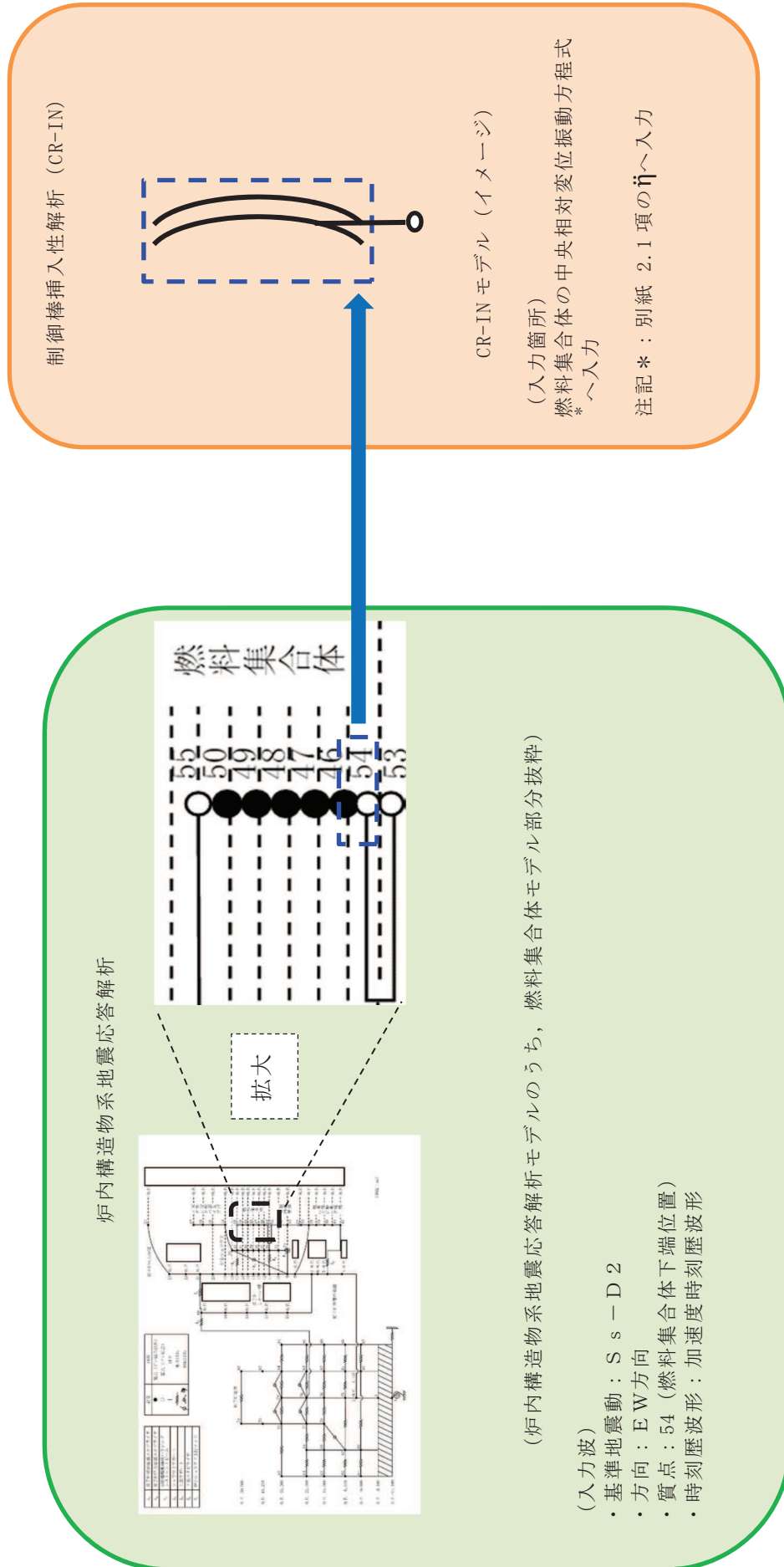
今回工認における CR-IN の入力波は、炉内構造物系地震応答解析結果から得られた応答を用いている。

本資料は、CR-IN に入力する地震波条件を説明する資料である。

2. CR-IN に入力する地震波条件

今回工認における CR-IN の入力波は炉内構造物系地震応答解析から得られた応答を用いている。CR-IN の入力波は、地震応答解析から得られる地震応答のうち、燃料集合体相対変位が最も大きくなる S s - D 2 における加速度時刻歴を使用した。また、炉内構造物系地震応答解析モデルの質点 54* (燃料集合体下端位置) の加速度時刻歴波形を CR-IN の燃料集合体の中央相対変位振動方程式へ入力している。CR-IN に入力する地震波について別添 2 図 1 に示す。

注記* : 炉内構造物系地震応答解析モデルについては本文図 3-2, 図 3-3 及び図 3-4 参照



別添 2 図 1 CR-IN に入力する地震波

また、炉内構造物系地震応答解析モデルは炉内構造物全体に対して実機条件を模擬したモデルであり、CR-IN は燃料集合体及び制御棒に対して制御棒挿入性試験条件を模擬したモデルである。炉内構造物系地震応答解析モデルは別添 2 図 1 に示すように、建物及び原子炉圧力容器等の大型構造物がモデル化されており、燃料集合体と周辺の構造物との相互作用を踏まえた地震応答を算出しているものである。一方、CR-IN は燃料集合体と制御棒の相互作用のみを考慮して計算しているものであるため、解析モデルとして大きな相違がある。そのため、炉内構造物系地震応答解析モデルの応答をそのまま CR-IN にインプットしても同じアウトプット（燃料集合体相対変位）とはならない。

以上を踏まえて、今回工認の CR-IN における入力については、CR-IN における燃料集合体相対変位が目標値となるように、地震応答解析から得られる加速度時刻歴を係数倍した上で CR-IN への入力波とした。CR-IN における燃料集合体相対変位の目標値に対する係数倍を別添 2 表 1 にまとめる。

別添 2 表 1 CR-IN における燃料集合体相対変位の目標値に対する係数倍

CR-IN における燃料集合体 相対変位の目標値 (mm)	係数倍
30.0	1.15
40.4	1.65
54.3	2.35
30.0	2.63
70.0	3.10
80.0	3.50

CR-INに係る女川原子力発電所第1号機工認実績と今回工認との比較

1. はじめに

女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性解析においては、女川原子力発電所第1号機での工認実績のある計算機プログラムCR-INを用いている。

本資料は、CR-INに係る女川原子力発電所第1号機における評価内容を整理するとともに、今回工認との比較を行ったものである。

2. CR-INに係る女川原子力発電所第1号機工認実績と今回工認との比較

(1) 女川原子力発電所第1号機における評価内容

女川原子力発電所第1号機では、制御棒挿入性試験のチャンネルボックス板厚(2.03 mm)と実機チャンネルボックスの板厚(2.54 mm)との差異の影響を確認する目的でCR-INを使用し、チャンネルボックスの板厚の差異によるスクラム時間を評価した。別添3図1及び別添3図2に女川原子力発電所第1号機におけるCR-INによる制御棒挿入性評価結果を示す。

(2) 今回工認との比較

CR-INに係る女川原子力発電所第1号機工認実績と今回工認の評価内容の比較を別添3表1に示す。女川原子力発電所第1号機も今回工認と同様、制御棒挿入性試験と実機条件との差異に対し影響検討を実施している目的でCR-INが使用されている。

別添3表1 CR-INに係る評価内容の比較

項目	女川原子力発電所第1号機	女川原子力発電所第2号機
評価目的	制御棒挿入性評価にあたり、制御棒挿入性試験のチャンネルボックス板厚(2.03 mm)と実機チャンネルボックスの板厚(2.54 mm)との差異の影響を確認するため	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒挿入性評価にあたり、制御棒挿入性試験の入力波としての正弦波と実機における入力波となる地震波との差異の影響を確認するため 制御棒挿入性評価にあたり、入力波の入力条件として水平方向と水平方向+鉛直方向との差異の影響を確認するため
評価方法	CR-INを用いて、解析条件(チャンネルボックス板厚)を変えた制御棒挿入性解析を実施	CR-INを用いて、解析条件(入力波、入力条件)を変えた制御棒挿入性解析を実施
評価結果	チャンネルボックスの板厚の差異によってスクラム時間に有意な差がないことを確認	<ul style="list-style-type: none"> 入力波の差異によってスクラム時間に差があり、制御棒挿入性試験の入力波を正弦波とすることが保守的であることを確認 入力波の入力条件の差異によってスクラム時間に有意な差がないことを確認

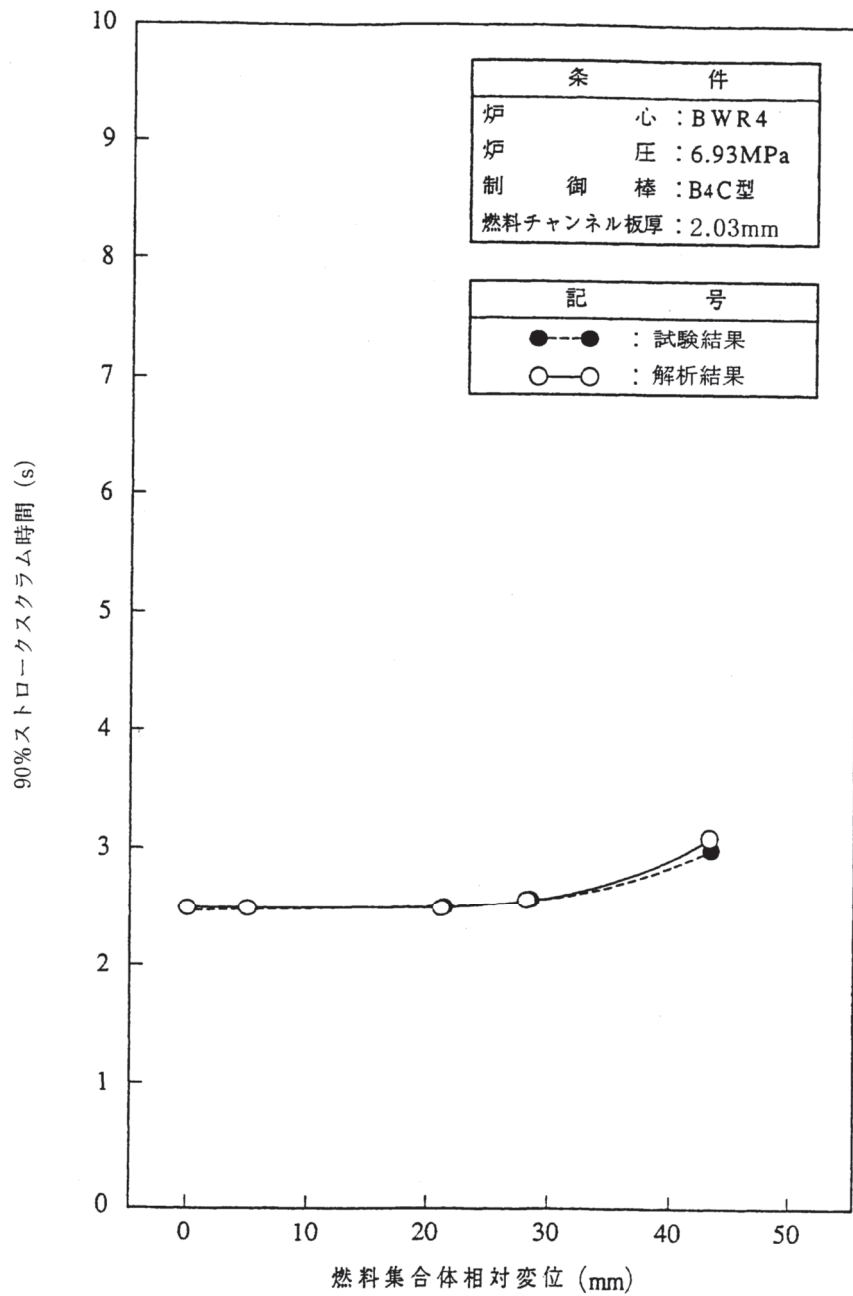


図 4 - 2 制御棒挿入時間における解析結果と試験結果の比較

別添 3 図 2 女川原子力発電所第 1 号機工認実績*

(再現解析結果)

注記* : 6 資庁第 14412 号 平成 7 年 1 月 12 日認可 高燃焼度 8×8 燃料工認 IV-3 「燃料集合体の耐震性についての計算書」抜粋

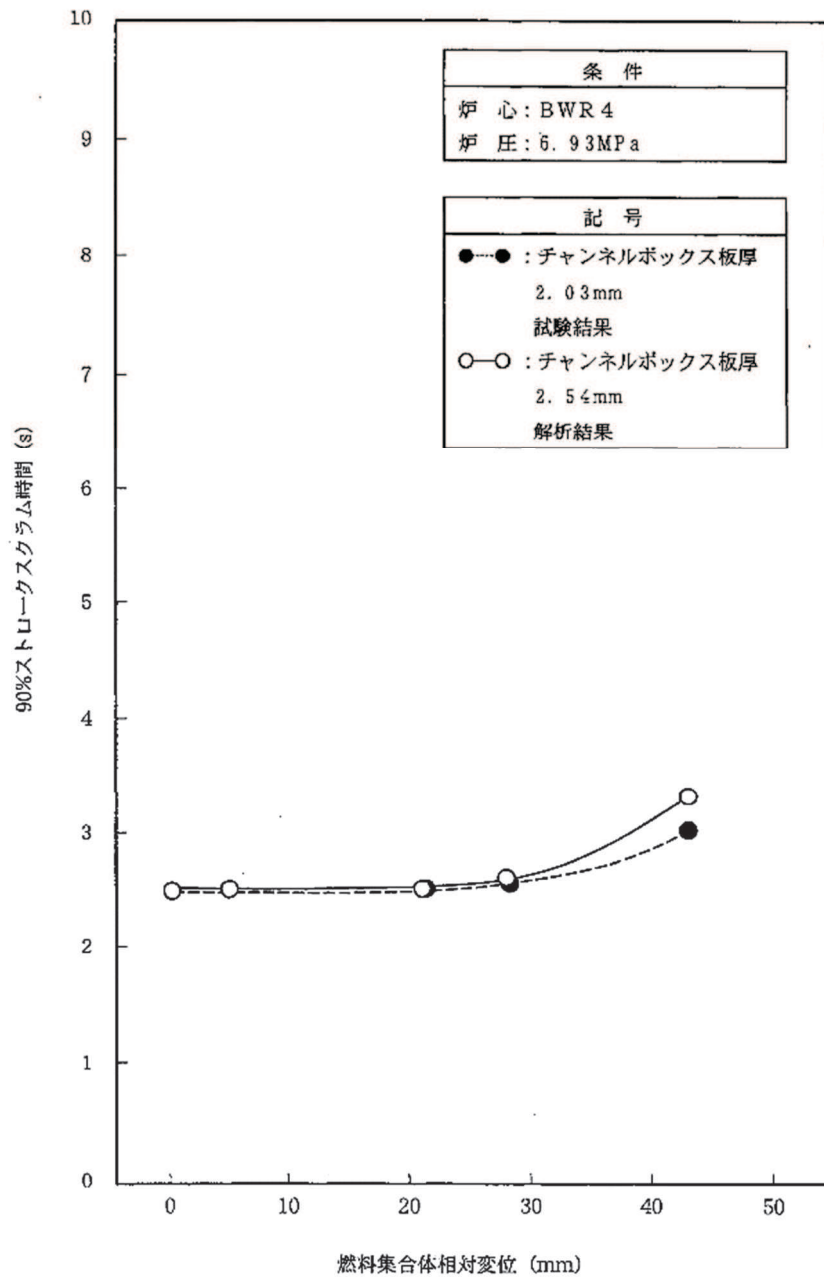


図4-1 燃料集合体相対変位のスクラム時間に及ぼすチャンネルボックス板厚の影響
(ボロンカーバイド型制御棒の試験結果と解析結果の比較)

別添3図2 女川原子力発電所第1号機工認実績*
(解析による影響確認結果)

注記* : 6 資庁第14412号 平成7年1月12日認可 高燃焼度8×8燃料工認IV-3「燃料集合体の耐震性についての計算書」抜粋

制御棒挿入性解析に係る既往知見との比較

1. はじめに

制御棒挿入性解析は制御棒挿入性評価に用いられており、既往知見でも使用されている。

本資料は、既往知見の内、「06 基構報-0014 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」(以下「JNES 知見」という。)及び「原子力発電施設 信頼性実証試験の現状」(以下「NUPEC 知見」という。)で用いられた制御棒挿入性解析と今回工認の評価に用いた CR-IN との比較を行ったものである。

2. JNES 知見との比較

今回工認に用いた CR-IN と JNES 知見の制御棒挿入性解析との比較を別添 4 表 1 に示す。

3. NUPEC 知見との比較

今回工認に用いた CR-IN と NUPEC 知見の制御棒挿入性解析との比較を別添 4 表 2 に示す。また、NUPEC 知見の評価結果について、別添 4 図 1 に示す。

4. 比較結果

NUPEC 知見、JNES 知見共に、制御棒挿入性解析に係るパラメータの詳細内容が公開されていないため、CR-IN における各パラメータの比較を行うことはできないが、いずれの知見も制御棒挿入性試験の結果とシミュレーション解析の結果を比較することで、解析の妥当性を確認しており妥当性の検証方法は女川原子力発電所第 2 号機の今回工認における検証方法と同じであることを確認した。

今回工認における CR-IN のパラメータ設定は、別添 1 に記載のとおり、制御棒挿入性試験の条件を踏まえて理論値や試験結果から設定をしているものであり、試験結果と解析結果の整合性を踏まえて十分に妥当であるものとする。

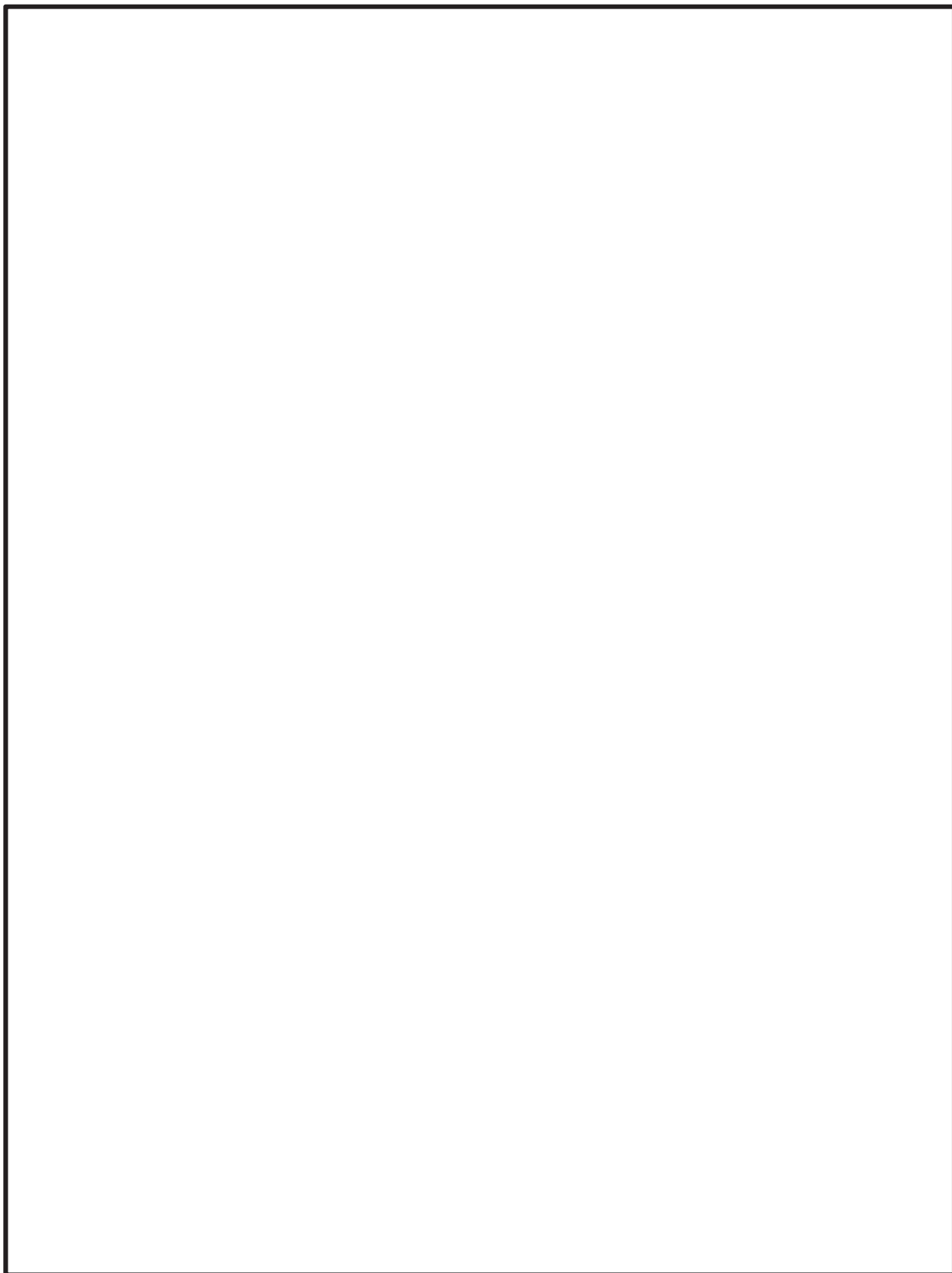
別添 4 表 1 CR-IN と JNES 知見の制御棒挿入性解析の比較

項目	CR-IN	JNES 知見
プログラム名称	CR-IN ver. 2.0	－（報告書に記載無し）
開発機関	東芝エネルギーシステムズ株式会社	－（報告書に記載無し）
使用目的	地震波及び鉛直地震動を考慮したスクラム時間を算出し、制御棒挿入性試験の保守性を定量的に評価する。	制御棒挿入性試験とシミュレーション解析を組合せて機器耐力を評価し、耐力データベース整備を行う。
スクラム時間の計算方法	制御棒と燃料集合体のたわみをはりでモデル化した を用い、制御棒と燃料集合体の接触反力を時刻歴で計算する。接触反力に摩擦係数を乗じて制御棒挿入時の抵抗力とし、水圧駆動の制御棒挿入運動方程式と燃料集合体の振動方程式を連立させ、制御棒の挿入時間を計算する。	制御棒、燃料集合体、制御棒案内管、燃料支持金具をはり・質点でモデル化し、制御棒駆動機構の挿入力、自重、流体抵抗力及び浮力を制御棒に作用させることで制御棒挿入挙動を模擬する。燃料集合体と制御棒の表面を定義して求めた接触反力に摩擦係数を乗じて制御棒挿入時の抵抗力とする。
制御棒型式	ボロンカーバイド型	ハフニウムフラットチューブ型
制御棒駆動機構型式	高速型	同左
加振波	地震波	同左
燃料集合体相対変位	0～80mm	0～100mm
制御棒挿入性試験結果との同定方法	燃料集合体と制御棒の摩擦係数により同定	同左
燃料集合体と制御棒の摩擦係数	0.182	燃料集合体相対変位 40mm 以下：0.16 燃料集合体変位 40～60mm：0.4 燃料集合体相対変位 60mm 以上：0.45
鉛直地震動の影響考慮	有り	同左
出典	VI-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書	06 基構報-0014 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 独立行政法人 原子力安全基盤機構

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

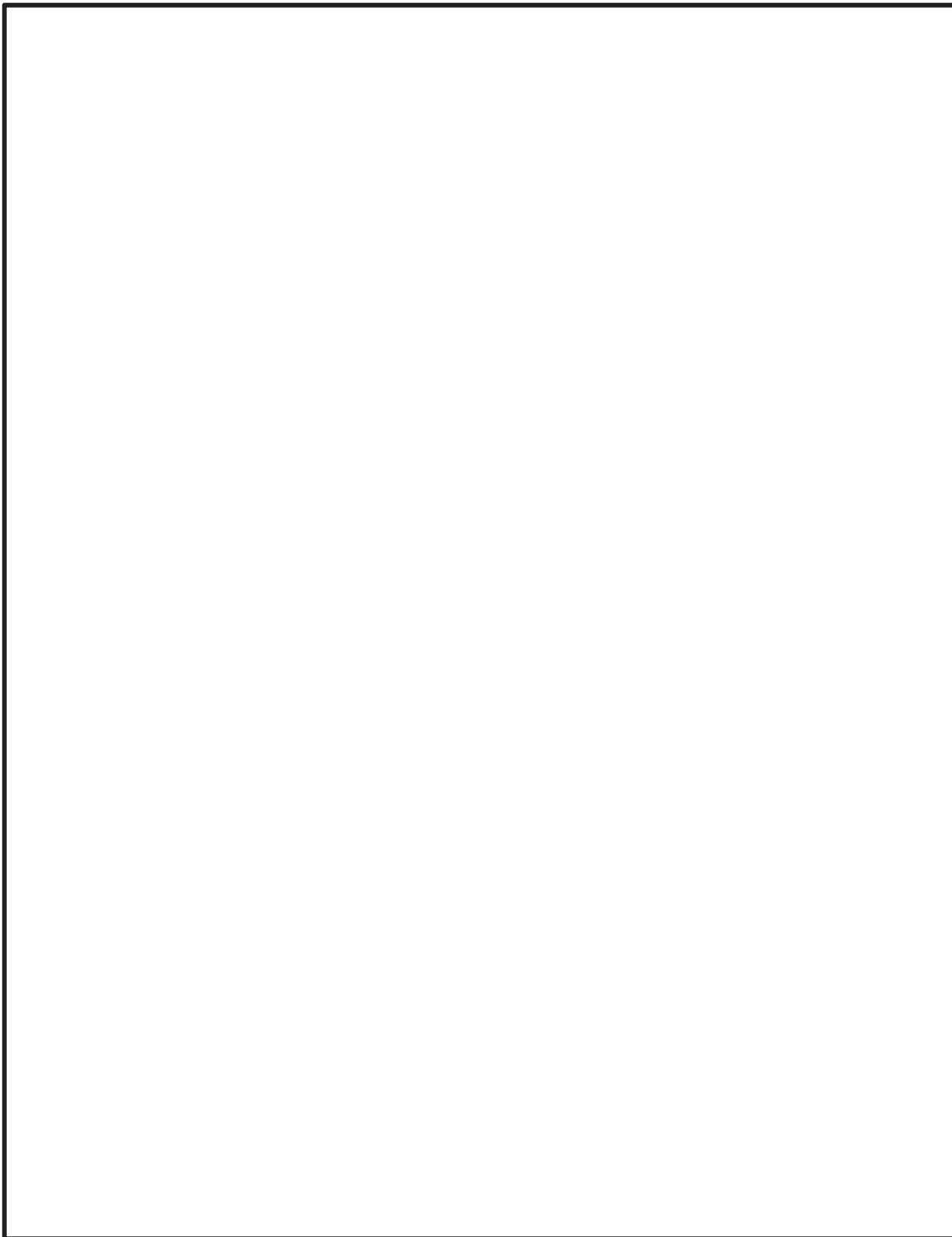
別添 4 表 2 CR-IN と NUPEC 知見の制御棒挿入性解析の比較

項目	CR-IN	NUPEC 知見
プログラム名称	CR-IN ver. 2.0	－（報告書に記載無し）
開発機関	東芝エネルギーシステムズ株式会社	－（報告書に記載無し）
使用目的	地震波及び鉛直地震動を考慮したスクラム時間を算出し、正弦波による挿入性試験の保守性を定量的に評価する。	地震波による制御棒挿入性試験結果に対し、シミュレーション解析手法の妥当性を評価する。
スクラム時間の計算方法	制御棒と燃料集合体のたわみをはりでモデル化した「 」を用い、制御棒と燃料集合体の接触反力を時刻歴で計算する。接触反力に摩擦係数を乗じて制御棒挿入時の駆動抵抗とし、制御棒挿入の運動方程式と燃料集合体の振動方程式を連立させ、制御棒の挿入時間を計算する。	同左
制御棒型式	ボロンカーバイド型	同左
制御棒駆動機構型式	高速型	同左
加振波	地震波	同左
燃料集合体相対変位	0～80mm	0～38mm
制御棒挿入性試験結果との同定方法	燃料集合体と制御棒の摩擦係数により同定	－（報告書に記載無し）
燃料集合体と制御棒の摩擦係数	0.182	－（報告書に記載無し）
鉛直地震動の影響考慮	有り	無し
出典	VI-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書	原子力発電施設 信頼性実証試験の現状 原子力工学試験センター* 昭和 63 年 報告書



注*：原子力発電施設信頼性実証試験の現状 原子力工学試験センター昭和 63 年報告書より抜粋

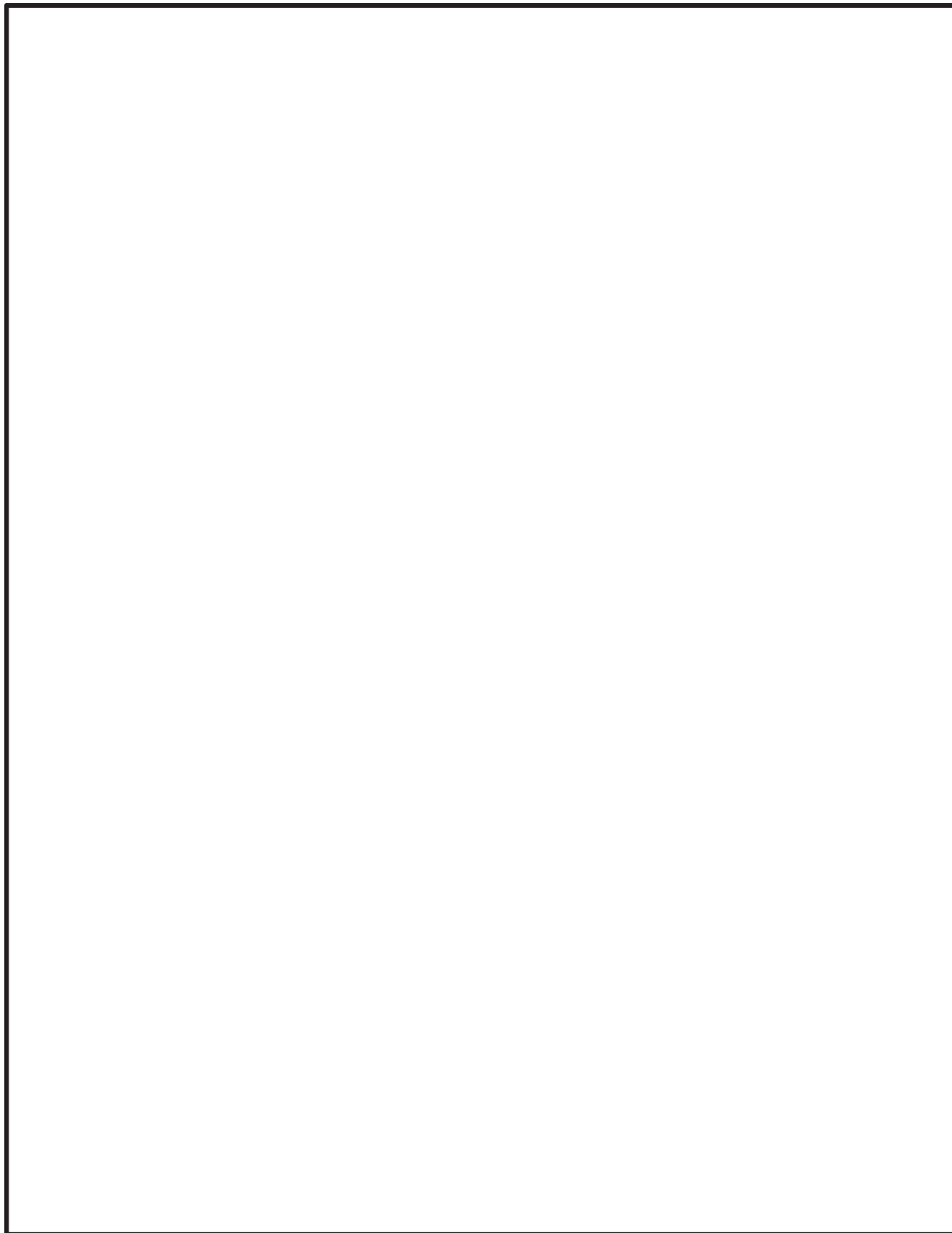
添 4 図 1 NUPEC 知見における制御棒挿入性解析の概要 (1/3)



注*：原子力発電施設信頼性実証試験の現状 原子力工学試験センター昭和63年報告書より抜粋

別添 4 図 1 NUPEC 知見における制御棒挿入性解析の概要 (2/3)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



注*：原子力発電施設信頼性実証試験の現状 原子力工学試験センター昭和 63 年報告書より抜粋

別添 4 図 1 NUPEC 知見における制御棒挿入性解析の概要 (3/3)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。