

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

O2-他-F-01-0067_改1

提出年月日

2021年 6月25日

女川原子力発電所第2号機 制御棒の挿入性評価について

2021年6月25日
東北電力株式会社

本日のご説明内容

1. はじめに
2. 女川2号機における制御棒挿入性評価方法
3. 設置変更許可段階での説明内容
4. 工認段階での説明内容(設置変更許可段階からの変更点)
5. 制御棒挿入性解析
 - 5.1 目的
 - 5.2 解析内容
 - 5.3 解析条件及び結果
6. まとめ

(参考1) 制御棒挿入性試験の概要

(参考2) CR-INの概要

(参考3) 設置変更許可段階からの追加検討事項

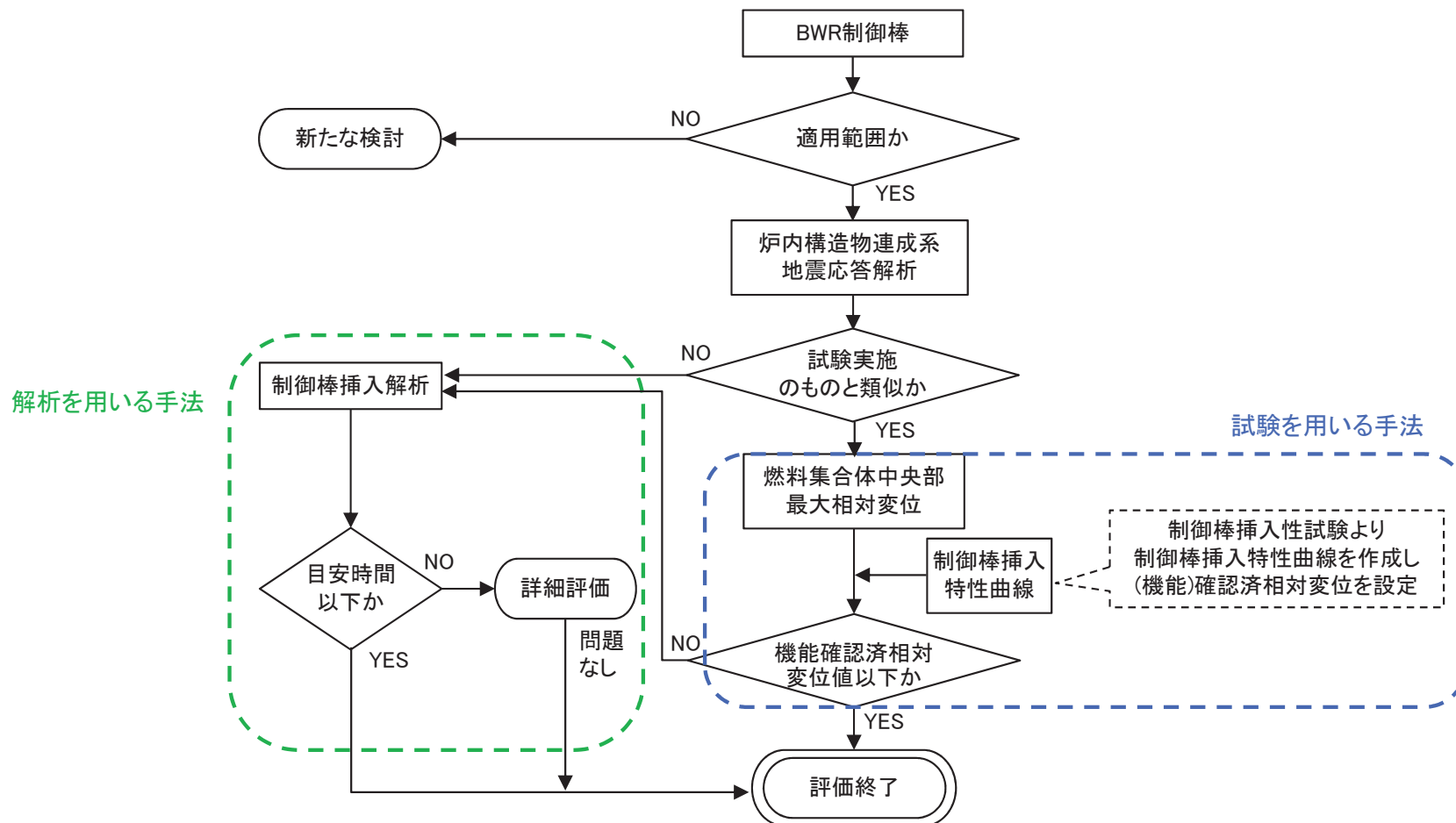
1. はじめに

- 女川2号機の制御棒挿入性評価は、JEAG4601－1991追補版(以下「JEAG4601」という。)に記載のフローに従って、地震時の燃料集合体相対変位(発生値)が、制御棒挿入性試験結果に基づき設定する確認済相対変位(許容値)以内であることを確認することで実施する。
- 今回の新規制基準対応では、基準地震動 S_s が増大して燃料集合体相対変位が大きくなることが想定されたため、制御棒挿入性試験を既工認と同様の方法で実施し、データを拡充している。
- 設置変更許可段階(第705回審査会合, 2019年4月16日他)では、設置変更許可申請時(平成25年12月)の基準地震動 $S_s-1, 2$ に対する検討を踏まえ、今回実施した制御棒挿入性試験の結果を考慮して、確認済相対変位(許容値)を55mmと設定する方針としていた。
- しかしながら、工認段階では、 $S_s-1, 2$ からの地震動の追加及び地盤物性の不確かさ等を追加した基準地震動 S_s に対する燃料集合体相対変位(発生値)が増大したことを踏まえ、制御棒挿入性解析によって制御棒挿入性試験の保守性を定量的に分析した上で、確認済相対変位(許容値)を60mmと設定した。
- 本資料では、確認済相対変位(許容値)60mmの妥当性について、制御棒挿入性解析による制御棒挿入性試験の保守性の確認結果を含めて説明する。

	設置変更許可段階	工認段階
燃料集合体相対変位(発生値)	45.3mm	54.2mm
確認済相対変位(許容値)	55mm	60mm
確認済相対変位の 設定方法	制御棒挿入性試験に 対し保守性を考慮	制御棒挿入性試験 + 制御棒挿入性解析に より保守性を定量的に確認

2. 女川2号機における制御棒挿入性評価方法

- 制御棒挿入性評価は、地震時に原子炉を確実に停止するために制御棒が炉心に挿入されること確認するもので、JEAG4601に記載のフローには、“試験を用いる手法”と“解析を用いる手法”が示されている。なお、制御棒挿入性評価は、制御棒挿入時間(75%ストロークスクラムに要する時間)が規定値(1.62s)以内であることを確認するものである。
- 女川2号機の制御棒挿入性評価は、既工認より試験を用いる手法を採用している。



制御棒挿入性評価フロー(JEAG4601より抜粋、一部加筆)

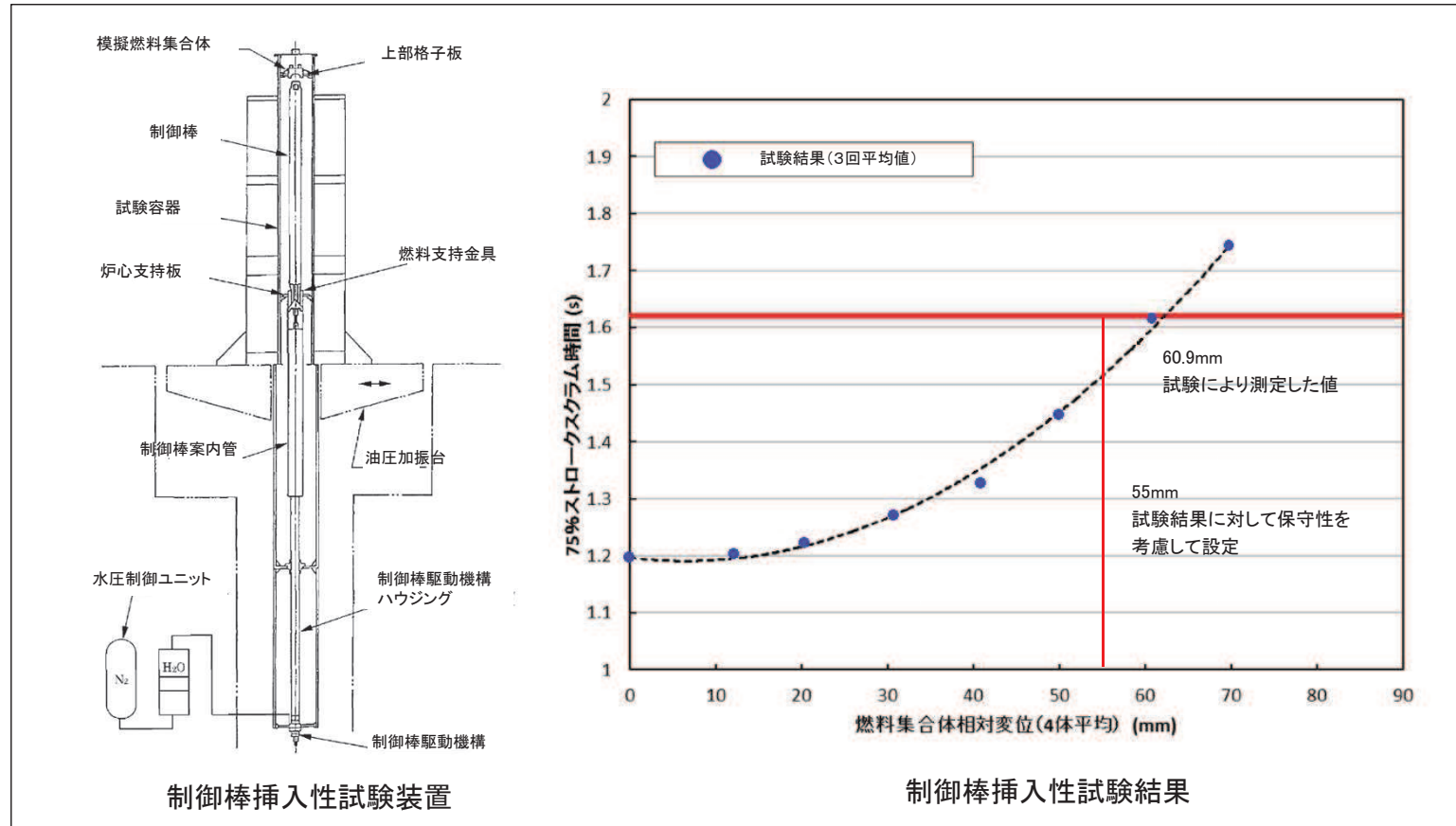
3. 設置変更許可段階での説明内容

- 今回の新規規制基準対応では、基準地震動 S_s の増大に伴い、燃料集合体相対変位が既工認で設定した確認済相対変位を上回ることが想定されたため、既工認と同様に制御棒挿入性試験を実施し、新たな確認済相対変位を設定するためのデータを拡充を実施した。(制御棒挿入性試験の概要は参考1参照)
- 制御棒挿入時間(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60.9mm(試験3回の平均値)のデータを得た。
- 設置変更許可段階では、制御棒挿入性試験結果(60.9mm)に保守性を考慮して、確認済相対変位を55mmと設定する方針とした。

第705回審査会合資料(2019年4月16日)資料1-1-6抜粋

制御棒挿入性試験条件

項目	試験条件
機器構成	実機を模擬
加振波	正弦波
圧力	大気圧 ただし、定格運転相当の圧力条件はアクムレータ圧力の調整で模擬
温度	常温 ただし、燃料集合体の高温状態はチャネルボックスの板厚で模擬

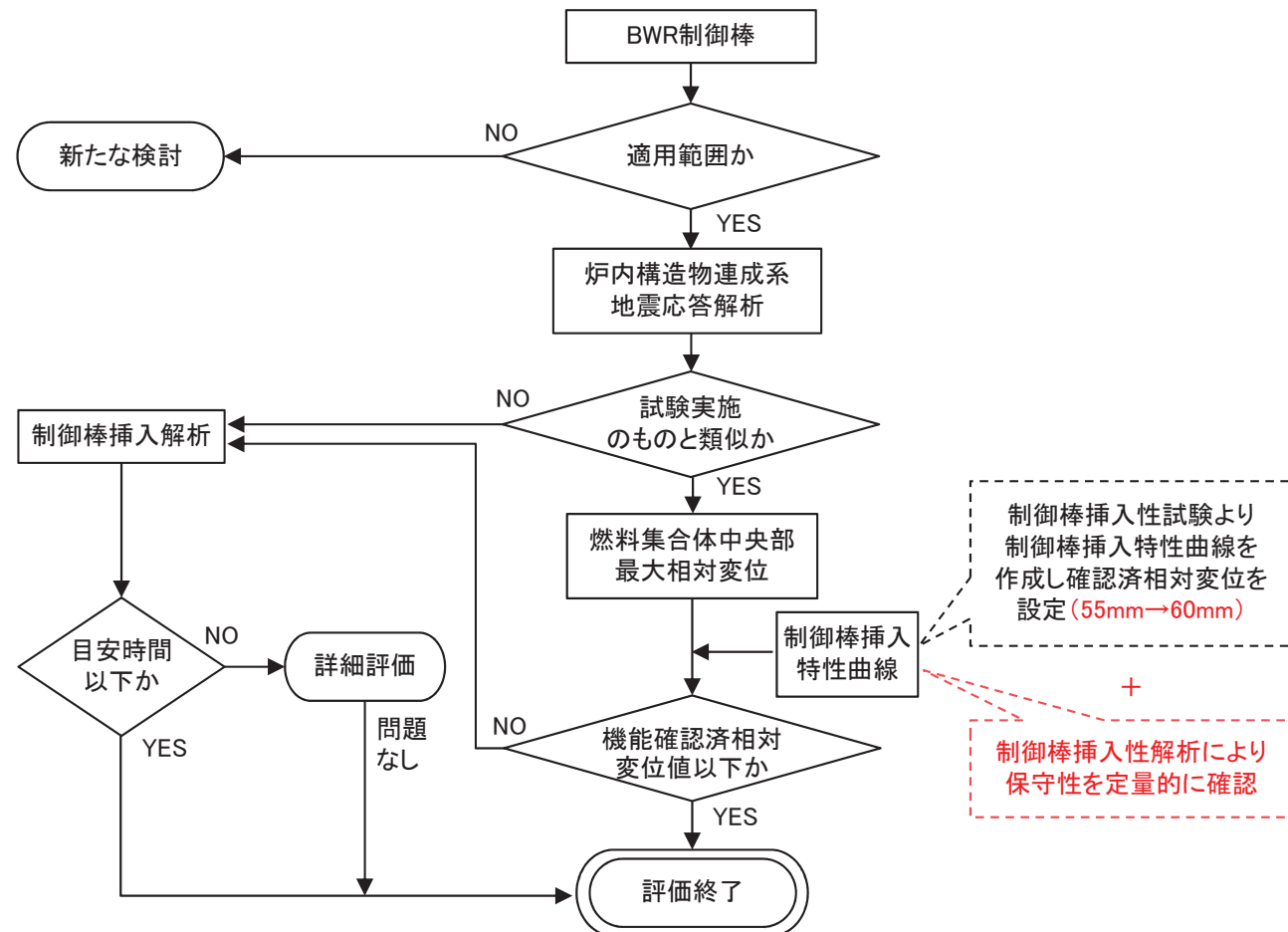


4. 工認段階での説明内容(設置変更許可段階からの変更点)

- 工認段階では、地震動の追加及び地盤物性の不確かさ等の追加の影響で、燃料集合体相対変位について、設置変更許可段階で得られていた45.3mmから54.2mmに増大した。
- 制御棒挿入性試験が再現できる制御棒挿入性解析によって、正弦波加振による制御棒挿入性試験が有する保守性について定量的な分析を行った。
- 制御棒挿入解析結果として、正弦波加振による試験結果が十分に保守性を有することを確認したため、設置変更許可段階で設定した確認済相対変位55mmから、工認段階では確認済相対変位を60mmに変更した。

設置変更許可段階から工認段階での変更点

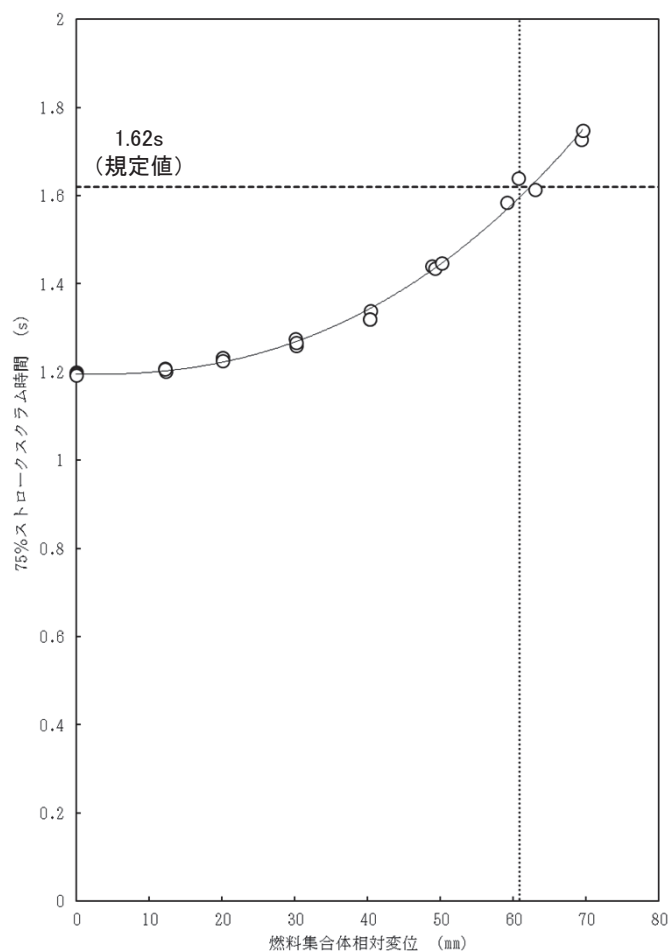
	設置変更許可段階	工認段階
燃料集合体相対変位 (発生値)	45.3mm	54.2mm
確認済相対変位 (許容値)	55mm	60mm
確認済相対変位の 設定方法	制御棒挿入性試験に 対し保守性を考慮	制御棒挿入性試験 + 制御棒挿入性解析に より保守性を定量的に確認



5. 制御棒挿入性解析

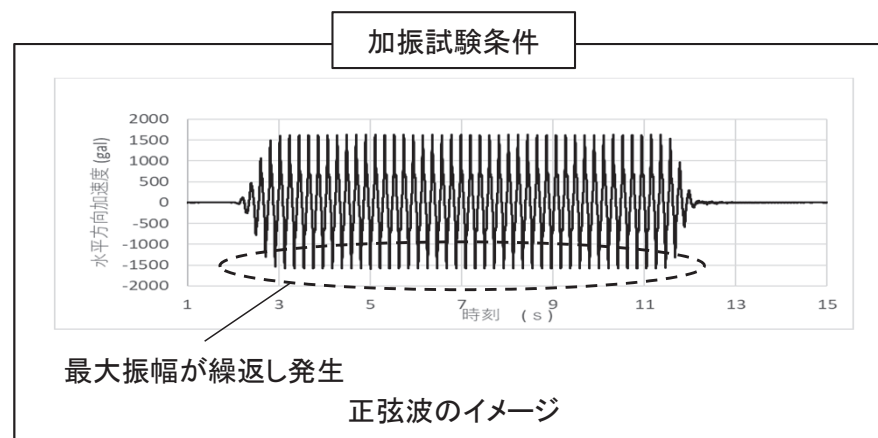
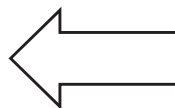
5.1 目的

- 制御棒挿入性試験は最大振幅が繰返し発生する正弦波を用いているため、挿入時間を遅らせる抵抗カ（制御棒と燃料集合体の接触により発生する力）が常に大きな状態を繰り返す条件となっている。
- 実際の地震波は最大振幅が繰り返すものではないため、制御棒挿入性試験結果には試験条件が正弦波であることの保守性が含まれているものと考えられる。
- 制御棒挿入性試験（正弦波）の保守性を確認するために、制御棒挿入性解析により、加振条件が正弦波の場合と地震波の場合の制御棒挿入時間（75%ストロークスクラムに要する時間）の比較を行う。



制御棒挿入性試験結果

正弦波による
試験結果



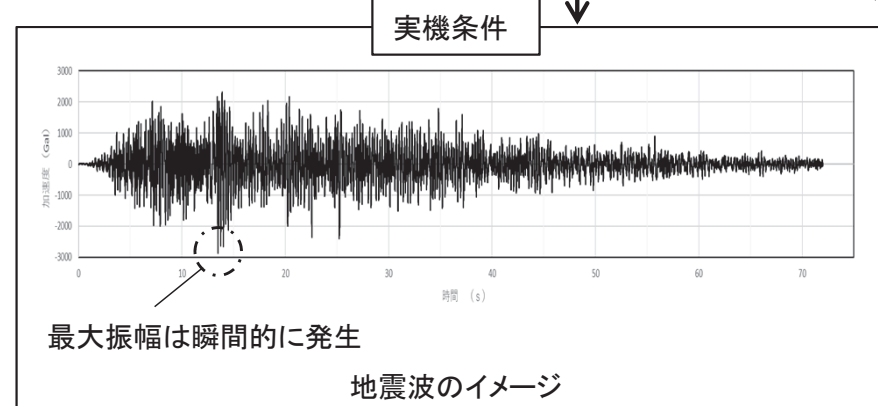
最大振幅が繰返し発生

正弦波のイメージ

加振条件による
保守性が内在



制御棒挿入性解析に
より試験の保守性を
確認する。



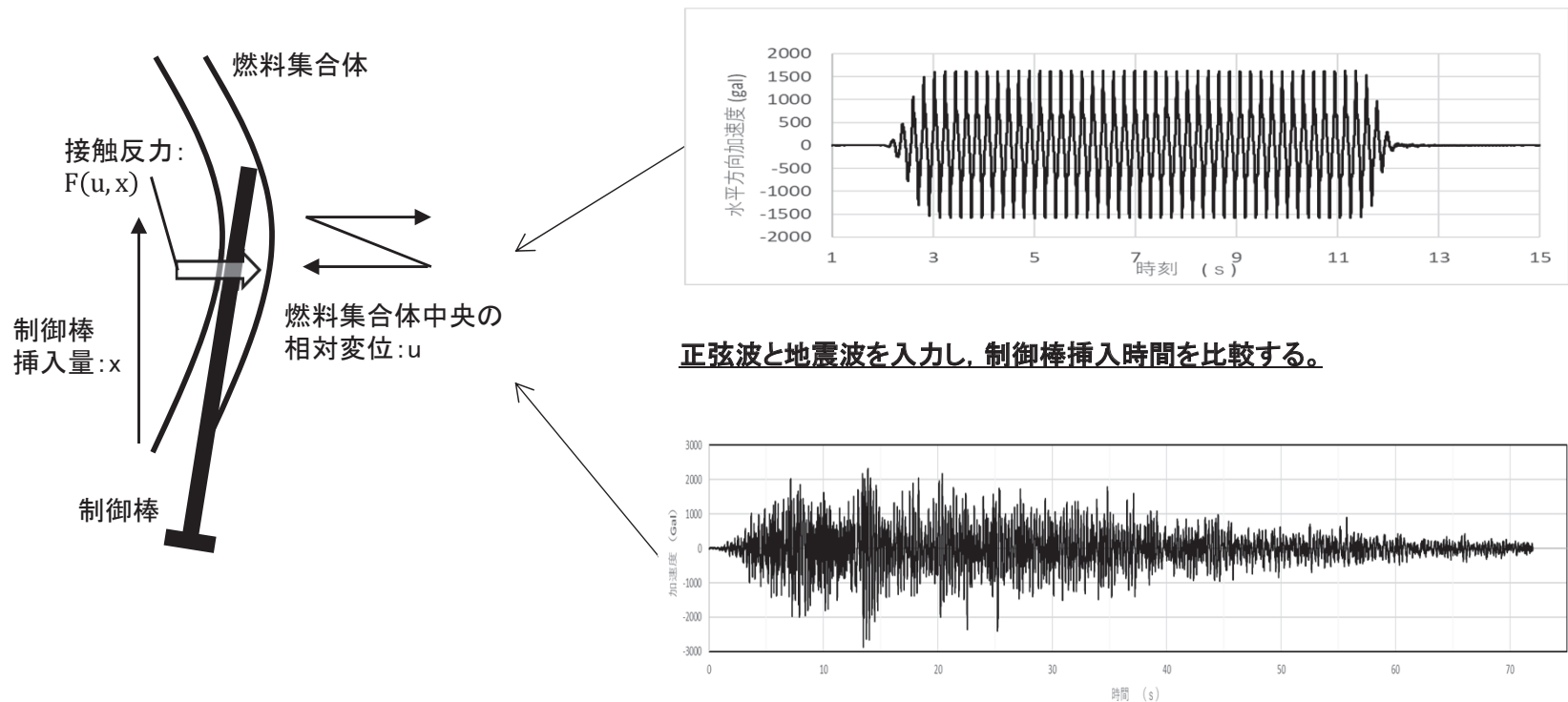
最大振幅は瞬間的に発生

地震波のイメージ

5. 制御棒挿入性解析

5.2 解析内容

- 制御棒挿入性解析は、制御棒挿入性試験を再現できる計算機プログラム(CR-IN)を使用する。なお、本プログラムは女川1号機において制御棒挿入性試験とは板厚の異なるチャンネルボックスを適用した燃料集合体を導入するにあたり、制御棒挿入性評価への影響を確認するために使用しており、工事計画認可実績を有したプログラムである。
- CR-INでは、制御棒を挿入する過程で、地震によって制御棒と燃料集合体が接触することで生じる接触反力を算出し、この反力が制御棒挿入時間に与える影響を定量的に評価できる。(詳細は参考2参照)
- 今回実施した制御棒挿入性解析では入力地震動として、制御棒挿入性試験を模擬した正弦波及び実機を模擬した地震波を適用し、制御棒挿入時間を比較することで入力波の違いが制御棒挿入時間へ及ぼす影響を確認する。



正弦波と地震波を入力し、制御棒挿入時間を比較する。

制御棒挿入性解析のイメージ

5. 制御棒挿入性解析

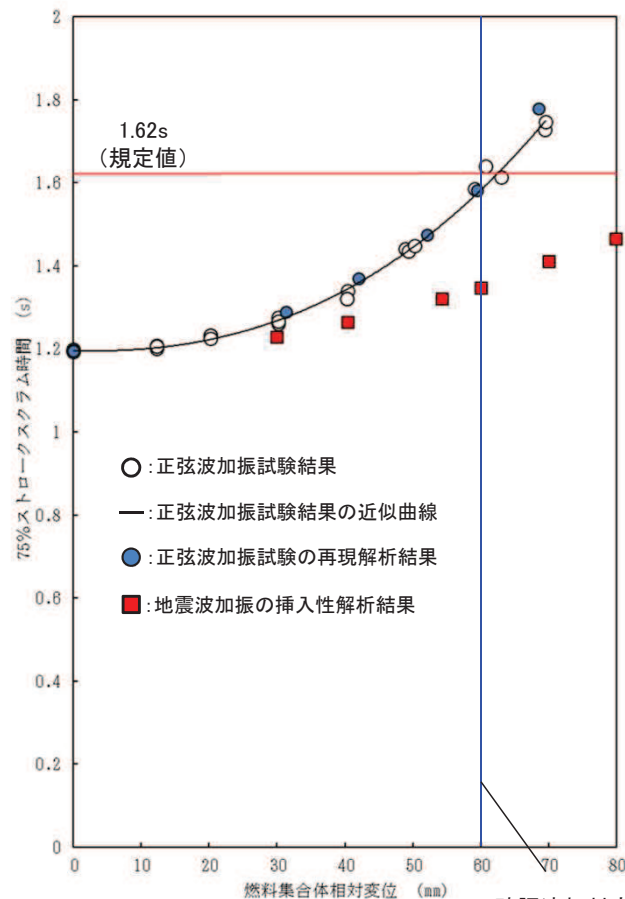
5.3 解析条件及び結果

- 以下に示す2通りの条件によって制御棒挿入性解析を実施した。
 - 制御棒挿入性試験を模擬する正弦波
 - 今回工認において燃料集合体の最大相対変位54.2mmが算出された基準地震動S_s-D2
- 解析の結果, 正弦波加振の方が地震波加振に比べ保守的であり, 地震波加振では燃料集合体相対変位が約80mm程度の範囲まで, 規定時間(1.62s)に余裕をもって制御棒が挿入されることを確認した。
- 正弦波加振による試験結果は十分に保守性を有しており, 確認済相対変位を60mmと設定することは妥当であることを確認した。

挿入性解析条件

解析条件	正弦波加振	地震波加振
入力波*	正弦波	地震波 (S _s -D2の係数倍)
温度	試験温度 (常温)	同左
圧力	大気圧	同左

*: 燃料集合体相対変位を調整するために入力波を線形倍し目標の変位に合わせた解析を実施。



制御棒挿入性解析結果

確認済相対変位: 60mm

<本検討の手順>

- 正弦波による加振試験結果が再現できるようにCR-INを設定
⇒ CR-INの解析は正弦波試験を再現できている。(●と○間で比較)
- 加振試験結果の再現が出来ていることを確認した上で, CR-INによる地震波での挿入性解析を実施
⇒ 同程度の相対変位であれば正弦波加振より地震波加振の方が早く制御棒が挿入される。(●と■間で比較)
⇒ 地震波加振(■)では, 約80mm程度の範囲まで, 規定時間(1.62s)に余裕をもって制御棒が挿入される。



確認済相対変位: 60mmと設定することは妥当

6. まとめ

- 今回の新規制基準対応では、基準地震動 S_s が増大して燃料集合体相対変位が大きくなることが想定されたため、制御棒挿入性試験を既工認と同様の方法で実施し、制御棒挿入時間(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60.9mm(試験3回の平均値)のデータを得た。
- 今回工認では上記試験結果を踏まえて、確認済相対変位(許容値)として60mmを設定することとし、制御棒挿入性試験の保守性を定量的に確認するため、試験を再現する制御棒挿入性解析(計算機プログラム:CR-IN)を実施した。
- 解析の結果、正弦波加振の方が地震波加振に比べ保守的であり、地震波加振では燃料集合体相対変位が約80mm程度の範囲まで、規定時間(1.62s)に余裕をもって制御棒が挿入され、正弦波加振で実施した制御棒挿入性試験結果は十分保守性を有することを確認した。
- 上記の制御棒挿入性試験及び制御棒挿入性解析結果から保守性が確認できたことから、女川2号機における確認済相対変位を60mmと設定することは妥当である。

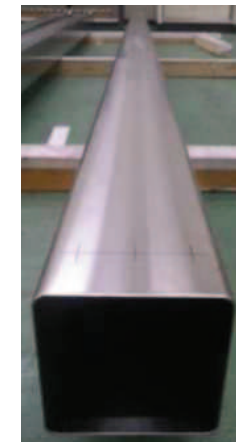
(参考1) 制御棒挿入性試験の概要

- 今回の新規制基準対応で実施した制御棒挿入性試験は、既工認と同様の条件で実施した。
- 制御棒挿入時間(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60.9mm(試験3回の平均値)のデータを得た。
- 試験後のチャンネルボックス及び制御棒は有意な損傷がないことを確認した。

既工認と今回工認の試験の比較

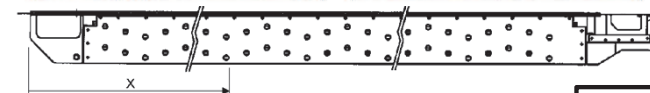
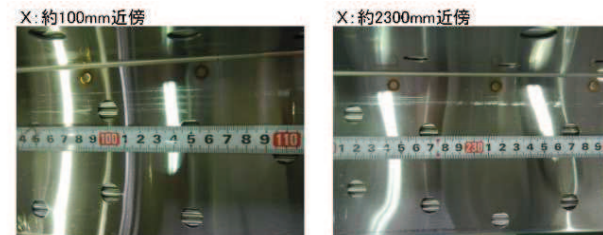
条件項目	既工認	今回工認
機器・装置構成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 模擬燃料集合体 ・ 制御棒 ・ 燃料支持金具 ・ 制御棒案内管 ・ 制御棒駆動機構 ・ 水圧制御ユニット 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 模擬燃料集合体 ・ 同左 ・ 同左 ・ 同左 ・ 同左 ・ 同左
試験方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ 加振状態で75%ストロークスクラムに要する時間を計測 ・ 正弦波により加振 ・ 各相対変位(0~40mm範囲で10mm刻みに設定)に対して3回試験を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 同左 ・ 同左 ・ 各相対変位(0~70mm範囲で10mm刻みに設定)に対して3回試験を実施
温度	常温	同左
圧力	大気圧	同左
チャンネルボックス板厚	100mil(2.54mm)	100mil(2.54mm)

(チャンネルボックス上端側)



(チャンネルボックス下端側)

制御棒挿入性試験後のチャンネルボックスの外観



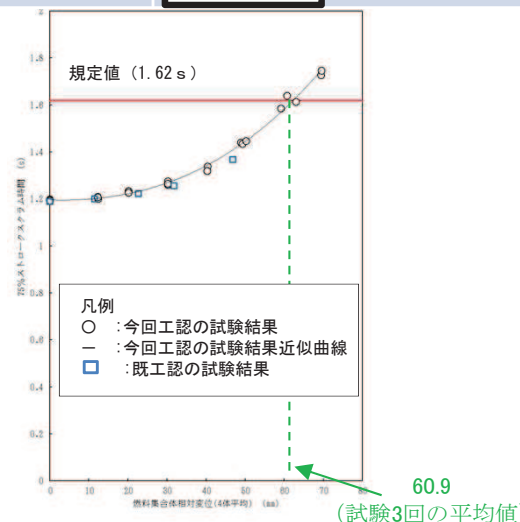
制御棒挿入性試験後の制御棒の外観

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

試験容器



加振台
試験装置外観



制御棒挿入性試験結果

(参考2) CR-INの概要(1/4)

- 今回工認における制御棒挿入性解析に用いる計算機プログラムCR-IN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ものである。
- 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 の運動方程式及び燃料集合体相対変位 u の振動方程式を用いて、制御棒の挿入位置 x における制御棒とチャンネルボックス挿入抗力を考慮した解析を行う。
- CR-INにおいては、制御棒とチャンネルボックスの接触するケースとして を考慮し、各接触様式における挿入抗力を考慮している。

(参考2) CR-INの概要(2/4)

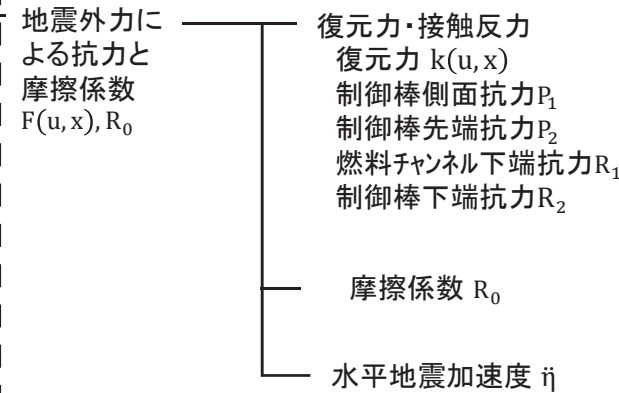
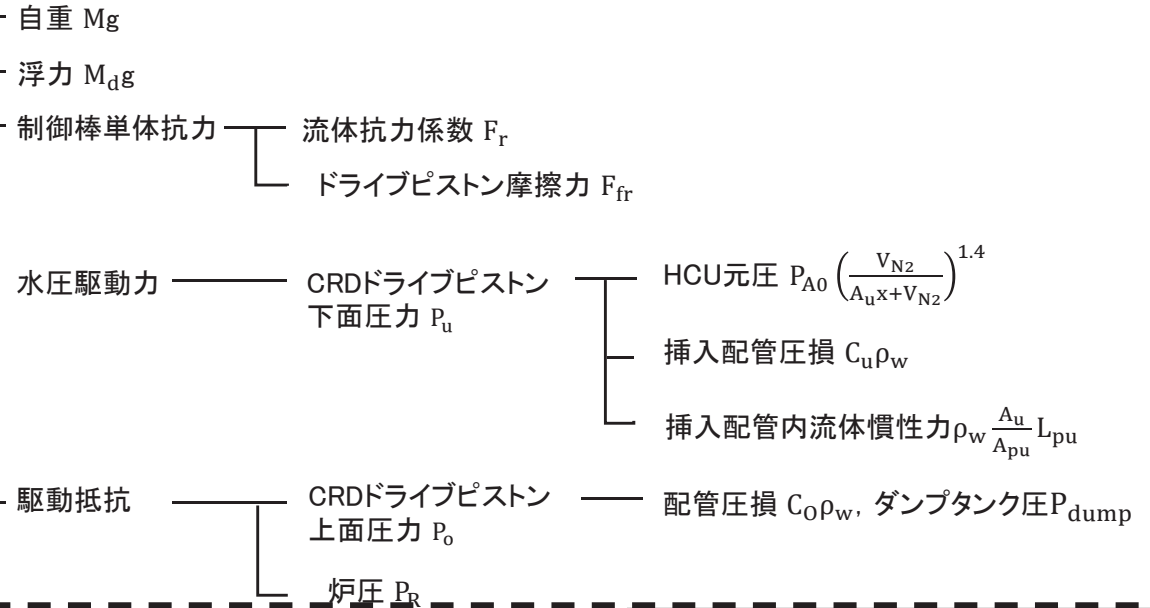
- 制御棒の挿入位置 x の運動方程式が式(1)，燃料集合体相対変位 u の振動方程式が式(3)で表される。
- CR-INの特徴は，式(1)と(3)を連成させ，式(1)の右辺最後の項 $R_0F(u, x)$ の接触反力 $F(u, x)$ と，式(3)の左辺最後の項である復元力 $k(u, x)$ を，組合せはりモデルで計算していることにある。

制御棒挿入運動方程式 制御棒挿入量 x

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

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

制御棒挿入時間 t



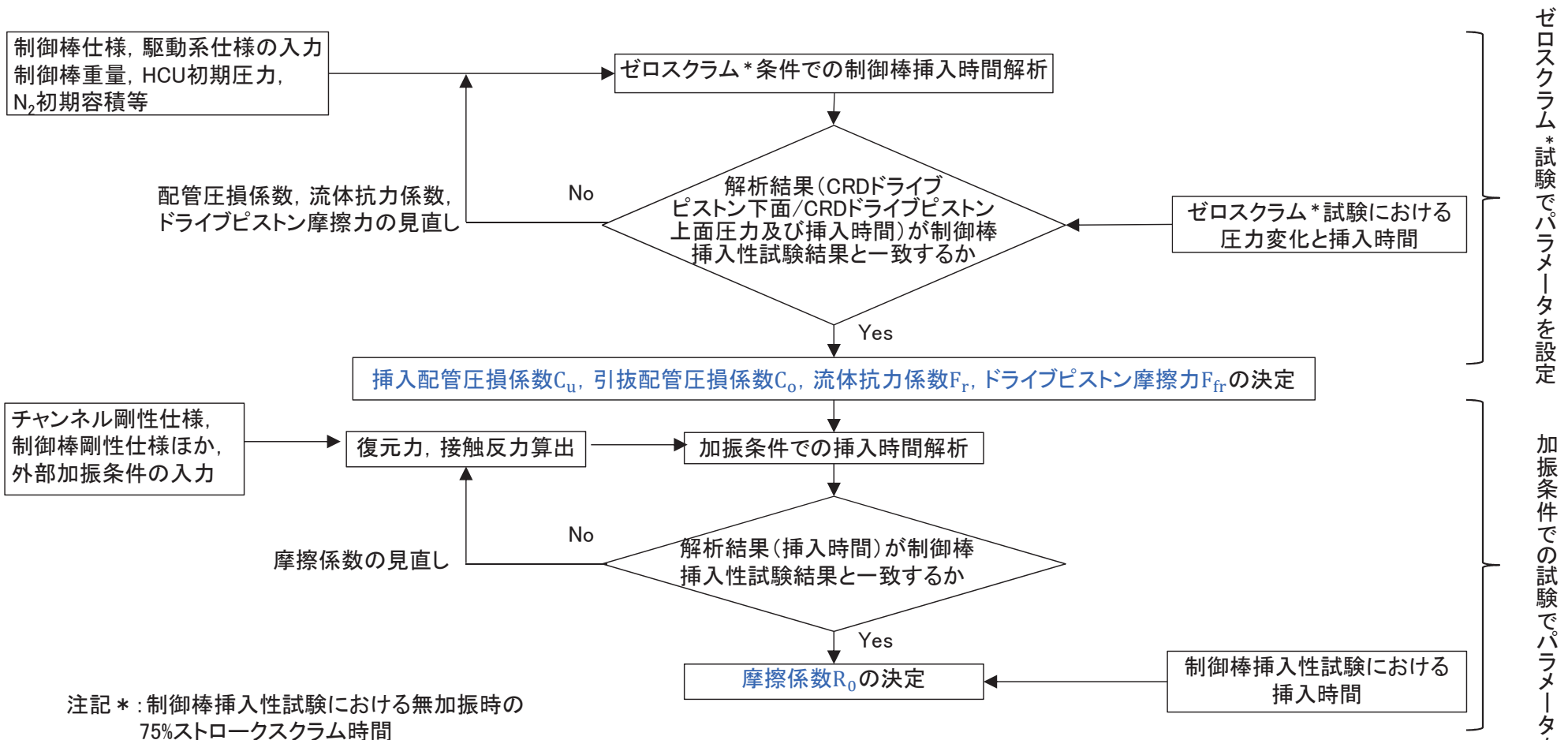
燃料集合体振動方程式 中央の相対変位 u

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

燃料集合体質量 m_f ，燃料集合体の制御棒挿入前の付加質量 m_o ，燃料集合体の制御棒挿入量 x での付加質量増分 m_x ，燃料集合体の制御棒挿入前の減衰係数 C_o ，燃料集合体の制御棒挿入量 x での減衰係数増分 C_x ，制御棒／燃料集合体での接触様式に基づく復元力 $k(u, x)$ ，燃料集合体の排除質量 m_d ，両端支持はりの1次モード(弓形)中央変位の励振係数 β ，支持点での外力加速度 $\ddot{\eta}$ ，燃料集合体中央変位 u ，制御棒挿入量 x

(参考2) CR-INの概要 (3/4)

- CR-INにおいては、複数のパラメータを設定する必要があり、今回工認に用いるCR-INの各パラメータは、設備の形状や仕様等で定まる値及び今回の新規基準対応で実施した制御棒挿入性試験に基づき設定した値を用いており、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に基づき設定している。



(参考2) CR-INの概要(4/4)

- 前頁のCR-INのパラメータの設定フローに基づき、ゼロスクラム試験で挿入配管圧損係数 C_u 、引抜配管圧損係数 C_o 、流体抗力係数 F_r 、及びドライブピストン摩擦力 F_{fr} を、加振条件での試験で摩擦係数 R_0 を設定した。

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

パラメータ	記号	設定値	単位	設定の根拠
挿入配管 圧損係数	C_u		—	ゼロスクラム* ¹ 試験より 得られたデータより設定
引抜配管 圧損係数	C_o		—	
流体抗力 係数	F_r	1050	N/(m/s) ²	
ドライブピストン 摩擦力	F_{fr}	500	N	
摩擦係数	R_0	0.182	—	加振条件での試験における 燃料集合体相対変位59.1mm の結果より設定

* 1 : 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3)設置変更許可段階からの追加検討事項(1/4)

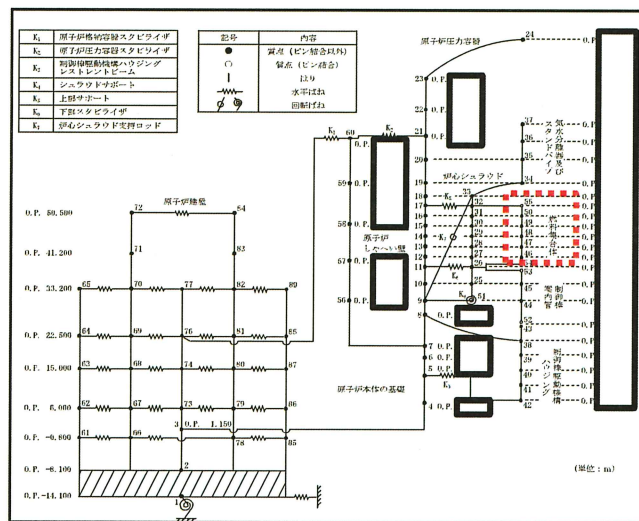
➤ 今回工認では、燃料集合体相対変位54.2mmと変位が大きくなったこと及び新規制基準において鉛直方向の動的な地震動が導入されたことを踏まえ、チャンネルボックスの弾塑性特性の影響及び鉛直地震動の影響を確認するため、設置変更許可段階から追加検討を行った。

【チャンネルボックスの弾塑性特性の影響】

- 制御棒挿入性評価における燃料集合体相対変位は、炉内構造物系地震応答解析によって算出されるものであり、今回工認の炉内構造物系地震応答解析ではチャンネルボックスを弾性(線形)*1で設定している。
- 一方で、チャンネルボックスは相対変位40mmを超える領域で塑性領域となることが既往知見*2から知られており実機と解析で差異があることから、チャ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行い燃料集合体相対変位へ及ぼす影響を確認した。

* 1: 燃料集合体の剛性はチャンネルボックスの剛性が支配的となっているため、解析モデルにおいてはチャンネルボックスの剛性を適用しモデル化している。

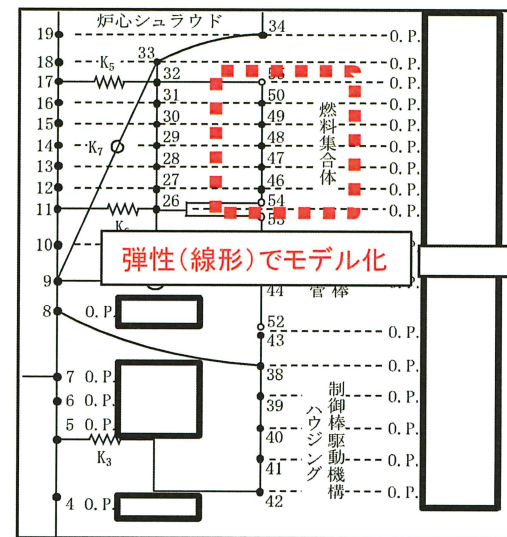
* 2: 平成17年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 機器耐力その2(BWR制御棒挿入性)に係る報告書(06 基構報-0014,(独)原子力安全基盤機構 (以下、本資料中に記載する既往知見とは本文献を指すものである。))



炉内構造物系地震応答解析モデル(NS方向 全体図)

モデル化対象: 原子炉圧力容器, 原子炉しゃへい壁, 原子炉本体の基礎, 炉心シールド, 気水分離器及びスタンドパイプ, 燃料集合体, 制御棒案内管, 制御棒駆動機構ハウジング

拡大



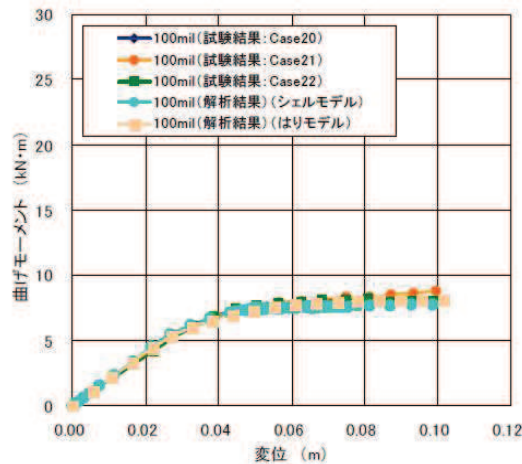
炉内構造物系地震応答解析モデル (燃料集合体周辺拡大図)

弾塑性特性を与え、燃料集合体相対変位に対する影響を確認

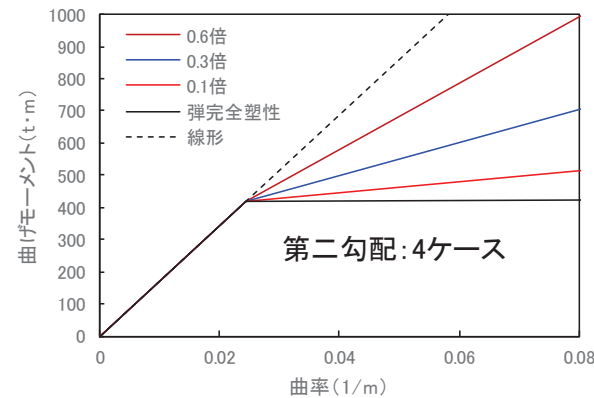
枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

(参考3)設置変更許可段階からの追加検討事項(2/4)

- チャンネルボックスの弾塑性特性は、既往知見を参考として第二勾配弾完全塑性及び初期剛性に対し0.1倍, 0.3倍, 0.6倍の倍率の4ケースを設定した。
- チャ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た結果、いずれのケースにおいても燃料集合体相対変位は線形の解析結果と比べて小さい値となることを確認した。



既往知見で得られた弾塑性特性



設定した弾塑性特性*

*:横軸は、解析コードの入力値である曲率で記載している

○既往知見
塑性変形領域では初期の弾性変形領域の0.1倍程度の剛性になることが知られている。

↓

○影響確認
弾塑性特性の感度を確認するため、最も柔らかい弾完全塑性から初期剛性の0.6倍までの範囲で解析を実施。

弾塑性特性を考慮した燃料集合体相対変位算出結果(線形で相対変位が最大のS_s-D2による結果)

解析ケース	線形	弾塑性特性(倍率は初期剛性に対する第二勾配の倍率)			
		弾完全塑性	0.1倍	0.3倍	0.6倍
燃料集合体相対変位の解析結果	54.2 mm	49.5 mm	49.6 mm	50.4 mm	52.7 mm



チャンネルボックスの弾塑性特性を考慮した結果、今回工認の地震応答解析で用いている線形解析による燃料集合体相対変位が保守的になっており、今回工認の制御棒挿入性評価は妥当であることを確認した。

(参考3) 設置変更許可段階からの追加検討事項(3/4)

【鉛直地震動の影響】

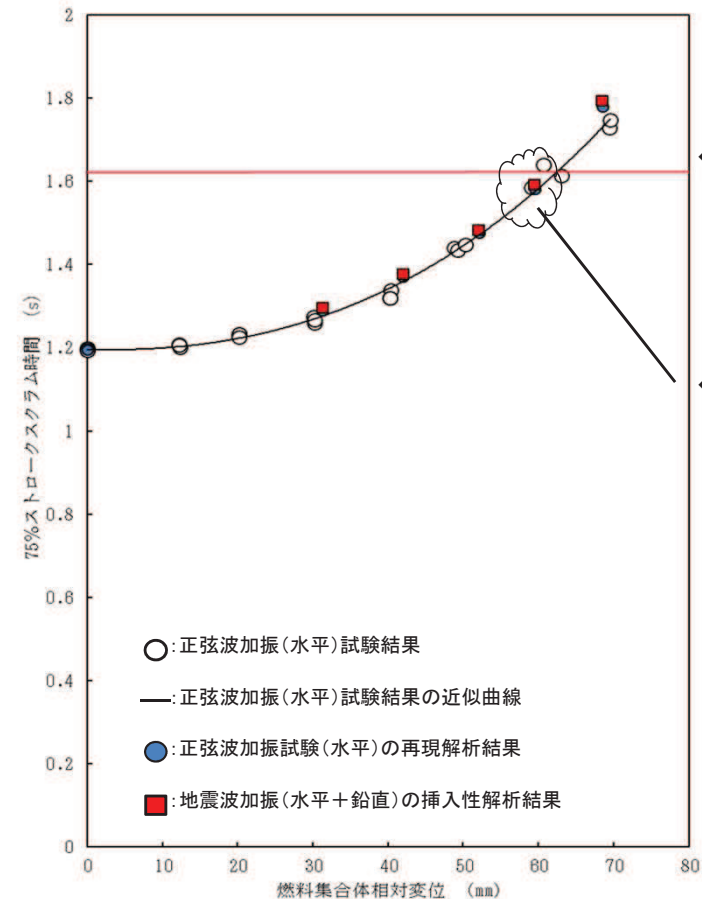
【I. 鉛直方向加速度が制御棒挿入時間に与える影響】

- 制御棒挿入性解析により、水平加振のみを入力した場合と、水平加振と鉛直加振を同時に入力した場合の制御棒挿入時間(75%ストロークスクラムに要する時間)の比較を行い、影響が軽微(最大で時間遅れ0.01秒)であることを確認した。

＜挿入性解析条件＞

解析条件	水平加振	水平+鉛直加振
入力波	正弦波 (水平)	正弦波 (水平+鉛直)
温度	試験温度 (常温)	同左
圧力	大気圧	同左

＜挿入性解析結果＞



◆ 同程度の相対変位であれば、水平加振のみの場合と、水平+鉛直加振の場合で制御棒挿入時間にほとんど差がない。
(●と■間で比較)

◆ 約60mmにおいて、時間遅れが最大で0.01秒で影響が軽微である。

■ : 1.58s
 ● : 1.59s

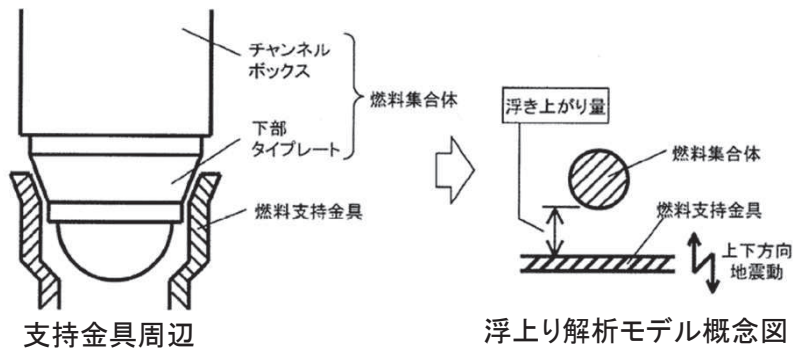
鉛直方向加速度の影響が軽微であることを確認

(参考3)設置変更許可段階からの追加検討事項(4/4)

【Ⅱ. 燃料支持金具からの離脱の有無】

- 既往知見では「鉛直方向加速度のみによる浮上り」及び「鉛直方向加速度＋水平方向加速度による浮上り」について検討されており、燃料支持金具から離脱しないことを確認している。
- 女川2号機の地震条件は既往知見の検討条件を下回っていることから、離脱が生じないことを確認した。

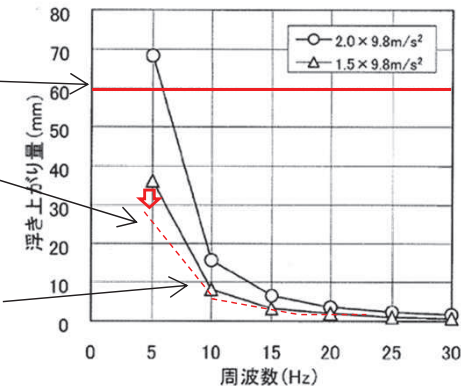
(i) 鉛直方向加速度による浮上り



支持金具への
設置深さ: 60mm

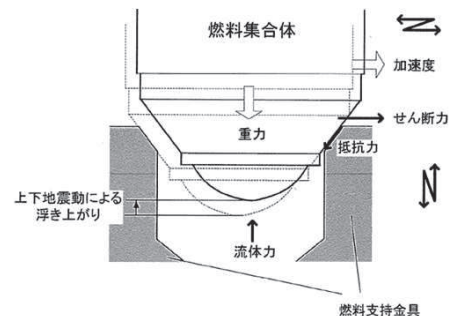
既往知見の検討結果
1.5 × 9.8m/s²より女川2号
機の浮上りは小さくなる

女川2号機の燃料集合体設置
位置の加速度: 1.38 × 9.8m/s²
(赤点線はイメージ)



浮上り解析結果(既往知見(抜粋)に一部加筆(赤色部))

(ii) 鉛直方向＋水平方向加速度による浮上り



浮上り検討概念図

既往知見との浮上り条件比較(水平＋鉛直)

項目	鉛直加速度 (m/s ²)	燃料集合体下端 水平加速度 (m/s ²)	燃料集合体下端 せん断力 (N)	浮上り量 (mm)
既往知見	1.5 × 9.8	7.62 × 9.8	5.23 × 10 ⁶	6.9
女川2号機	1.38 × 9.8	1.64 × 9.8	3.62 × 10 ⁶	<6.9(既往知見に条件が包絡されるため)



水平方向と鉛直方向を同時入力した制御棒挿入性解析結果及び既往知見の結果との比較から、鉛直地震動が制御棒挿入性評価に影響を及ぼさないことを確認した。