

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0
提出年月日	2021年 6月 4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4日  
東北電力株式会社

## 本日の説明内容

---

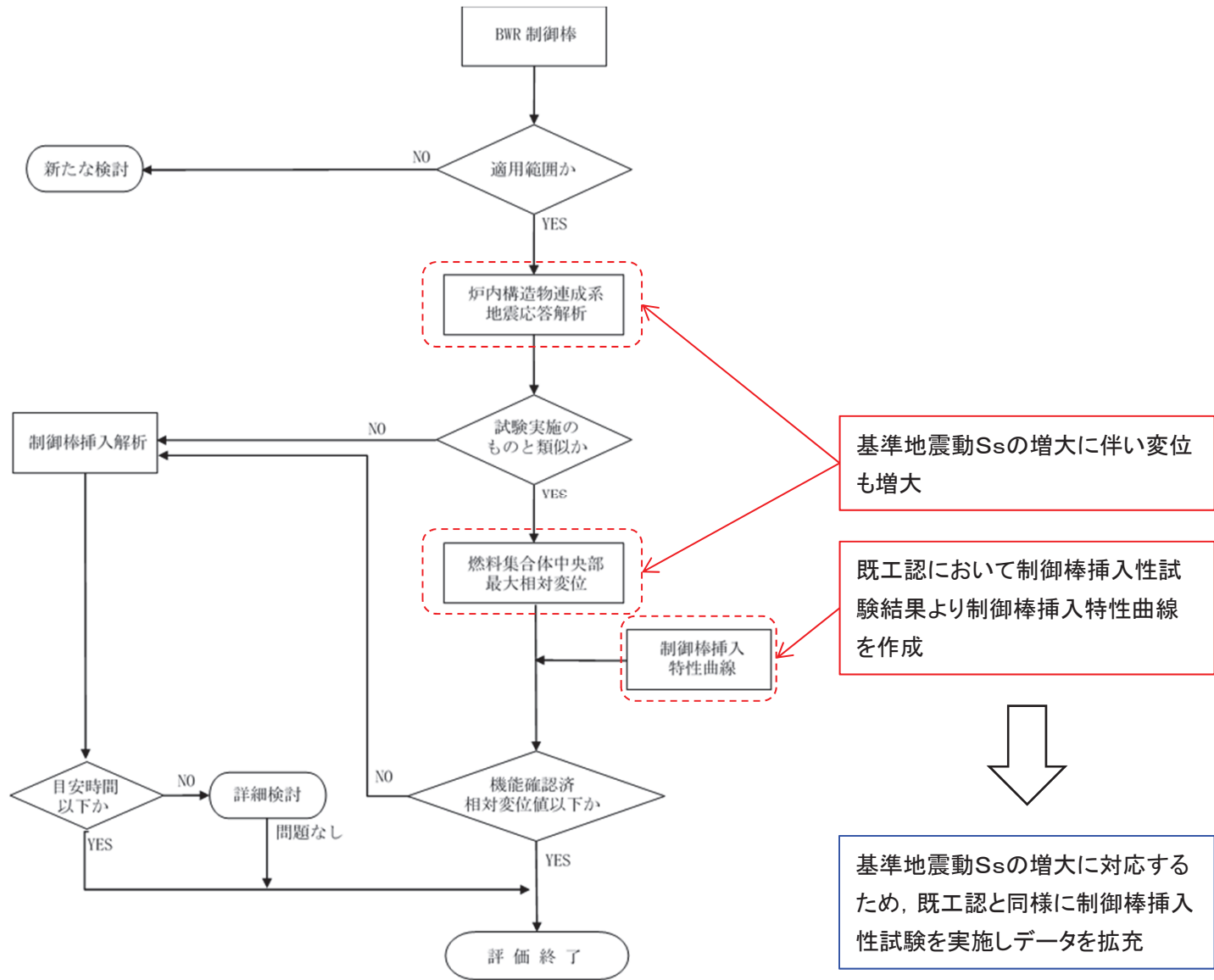
1. はじめに
  2. 設置変更許可段階での説明内容(詳細設計申送り事項の詳細)
  3. 今回工認における対応
    3. 1 チャンネルボックスの弾塑性特性の影響
    3. 2 制御棒挿入性試験の保守性
    3. 3 鉛直地震動の影響
  4. まとめ
- (別紙)制御棒挿入性解析に用いた計算機プログラム(CR-IN)について

## 1. はじめに(1/2)

---

- 女川2号機の既工認における制御棒挿入性評価は、次頁に示すJEAG4601－1991に記載のフローに従って、制御棒挿入性試験により設定した「制御棒挿入特性曲線」を用いて、地震時の発生値(燃料集合体相対変位)と許容値(確認済相対変位)を比較することで実施していた。
- 今回工認では、基準地震動 $S_s$ の増大に伴い燃料集合体相対変位が大きくなったことを踏まえ、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ている。
- 今回工認において実施した制御棒挿入性試験の内容及び結果については、設置変更許可審査(第705回審査会合, 2019年4月16日他)において説明を行っている。
- 設置変更許可審査時の詳細設計申送り事項を踏まえ、制御棒挿入性解析により影響確認を実施した。
- 本資料は、設置変更許可審査時の詳細設計申送り事項に対する回答を行うものである。

# 1. はじめに(2/2)



制御棒挿入性評価フロー(JEAG4601-1991追補版から抜粋)

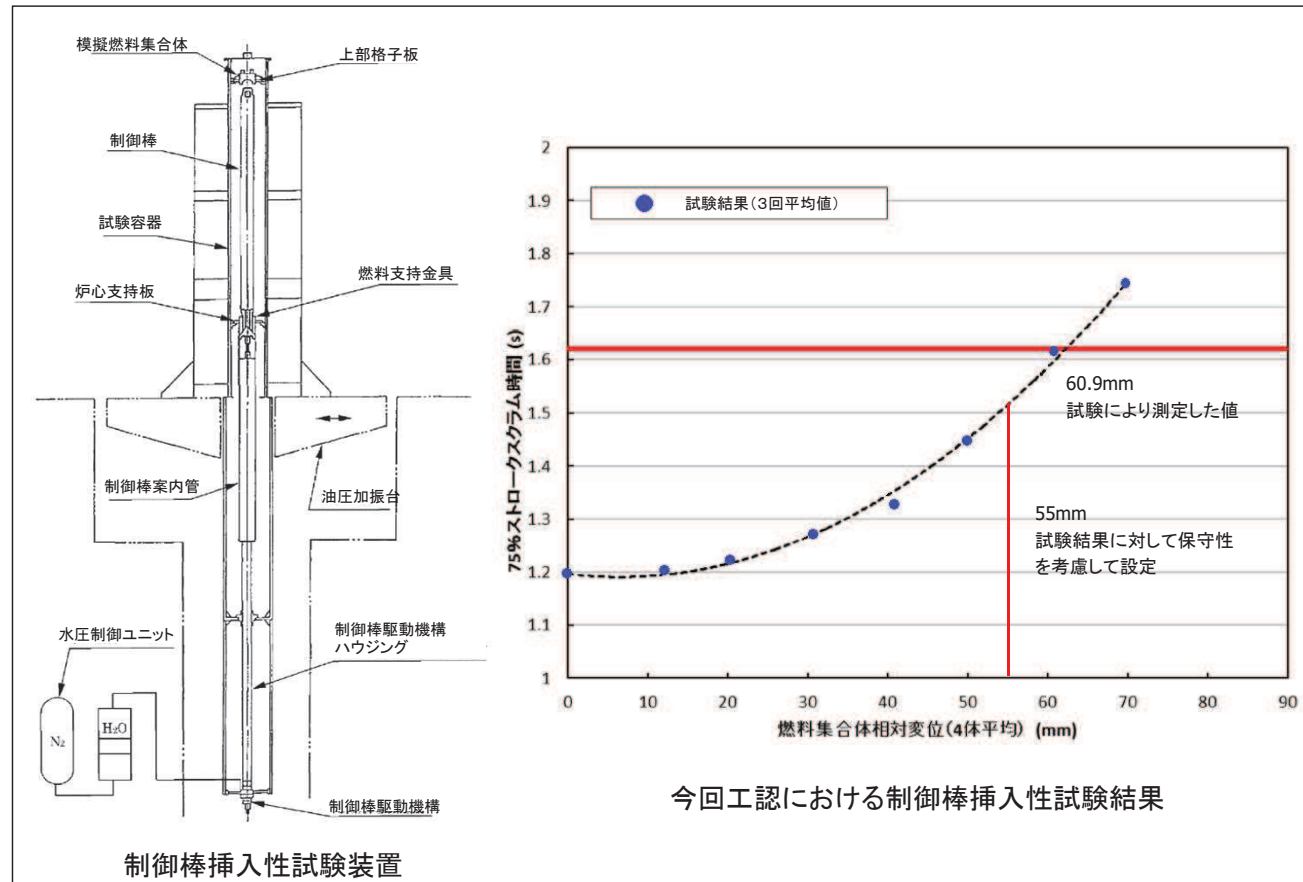
## 2. 設置変更許可段階での説明内容(詳細設計申送り事項の詳細)(1/2)

- 女川2号機の制御棒挿入性評価において、既工認と同様の制御棒挿入性試験を実施し、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)が得られた。
- 制御棒挿入性試験結果を基に確認済相対変位を55mmと設定する方針としていた。

※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
圧力	大気圧 ただし、定格運転相当の圧力条件はアキュ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ンネルボックスの板厚で模擬



## 2. 設置変更許可段階での説明内容(詳細設計申送り事項の詳細)(2/2)

- 制御棒挿入性試験結果を基に確認済相対変位を55mmと設定し、平成26年7月工事計画認可申請したSs-1, 2に対する燃料集合体相対変位(45.3mm)よりも大きいことを確認していた。
- 本説明内容に対して、評価の保守性の考え方など4項目についての詳細設計申送り事項(第734回審査会合資料, 2019年6月25日他)があり、工認段階で説明することとしていた。

設置変更許可審査時の制御棒挿入性評価結果

燃料集合体相対変位(発生値)	確認済相対変位(許容値)
45.3 mm	55 mm

### 【詳細設計申送り事項】

- ① 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, 挿入性への影響について説明する。
- ② 制御棒挿入性試験の結果を踏まえた確認済相対変位を設定する際の保守性の考え方について説明する。
- ③-1 詳細設計段階で鉛直方向地震による影響について説明する。
- ③-2 地震応答に対する燃料集合体の浮上りの影響について詳細設計段階で説明する。

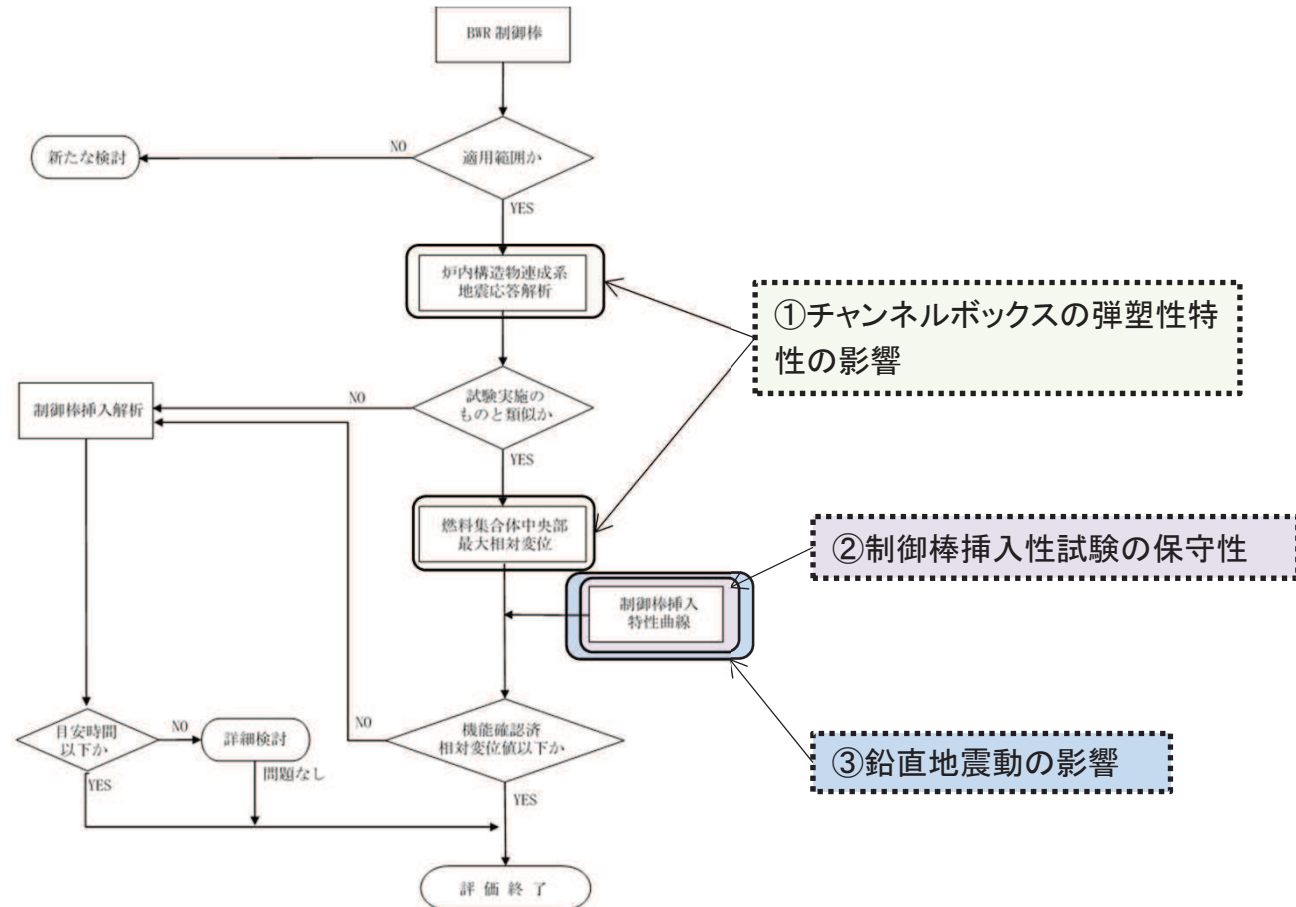
### 3. 今回工認における対応(1/2)

- 今回工認では、詳細設計申送り事項について、「①チャンネルボックスの弾塑性特性の影響」、  
「②制御棒挿入性試験の保守性」及び「③鉛直地震動の影響」の3項目に分類し検討を行った。

検討項目	詳細設計申送り事項	説明内容	備考
①チャンネルボックスの弾塑性特性の影響	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、挿入性への影響について説明する。	チャンネルボックスの弾塑性を考慮した地震応答解析により、現在設定している燃料集合体相対変位が妥当であることを説明する。	3.1項で説明
②制御棒挿入性試験の保守性	<p>制御棒挿入性試験の結果を踏まえた確認済相対変位を設定する際の保守性の考え方について説明する。</p> <p>上記の保守性の検討を踏まえて確認済相対変位については60mmに設定する。(設置変更許可審査からの変更点)</p>	地震波を用いた制御棒挿入性解析により、正弦波条件での加振試験に基づく確認済相対変位の設定が保守的であることが確認できたことから、確認済相対変位を55mmから60mmに変更することを説明する。	3.2項で説明
③鉛直地震動の影響	<p>1. 詳細設計段階で鉛直方向地震による影響について説明する。</p> <p>2. 地震応答に対する燃料集合体の浮上りの影響について詳細設計段階で説明する。</p>	鉛直地震動が制御棒の挿入性に影響しないことを、制御棒挿入性解析結果を用いて検討し、鉛直地震動による燃料集合体の浮上りが制御棒挿入性に影響しないことを既往知見を用いて説明する。	3.3項で説明

### 3. 今回工認における対応(2/2)

- 3つの検討項目とJEAG4601-1991の評価フローとの対応関係を以下に示す。
- 「①チャンネルボックスの弾塑性特性の影響」については、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、燃料集合体相対変位への影響を確認する。
- 「②制御棒挿入性試験の保守性」及び「③鉛直地震動の影響」については、制御棒挿入性解析を実施し、制御棒挿入性試験より得られる制御棒挿入特性曲線に及ぼす影響を確認する。



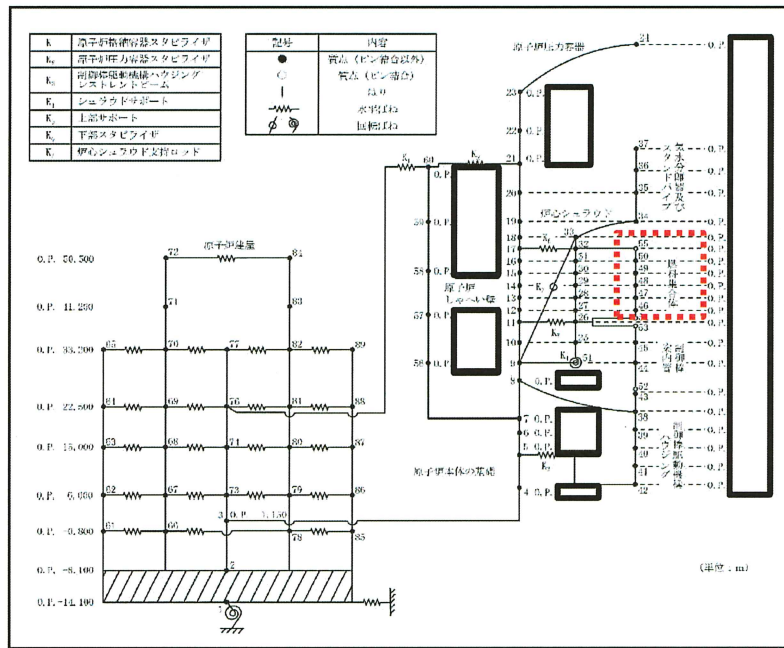
制御棒挿入性評価フロー(JEAG4601-1991追補版から抜粋)



### 3.1 チャンネルボックスの弾塑性特性の影響(1/2)

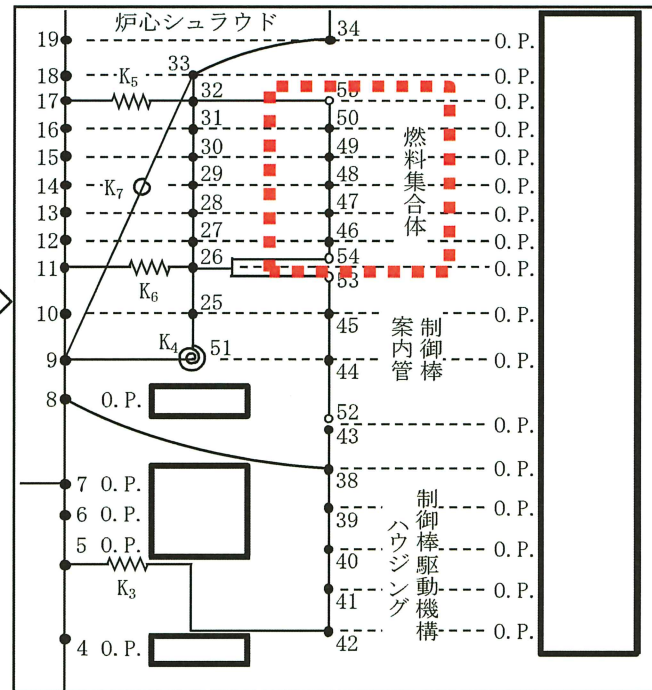
- 制御棒挿入性評価における燃料集合体相対変位は、炉内構造物系地震応答解析によって算出される。
- 上記の解析モデルにおいて、チャンネルボックスの剛性(燃料集合体の剛性\*1)は線形で設定されている。
- 一方で、チャンネルボックスは相対変位40mmを超える領域で塑性領域となることが既往知見\*2から知られており実機と解析で差異がある。

\*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)

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)

図中赤枠の燃料集合体部分

○解析モデル:  
剛性は線形で設定

○実機:  
相対変位40mm程度から弾塑性領域

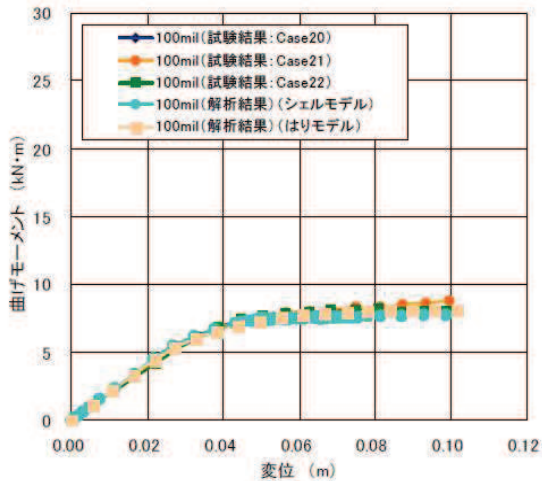
↓

解析と実機とで差異

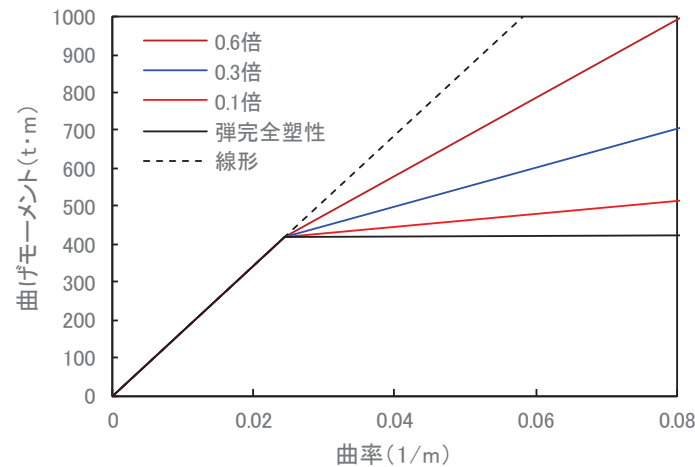
枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

### 3. 1 チャンネルボックスの弾塑性特性の影響 (2/2)

- 地震応答解析(線形)と実機(弾塑性)との差異の影響を確認するために、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。
- 弾塑性特性を考慮した解析を実施した結果、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燃料集合体の弾塑性特性



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体から初期剛性の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<sub>s</sub>-D2による結果)

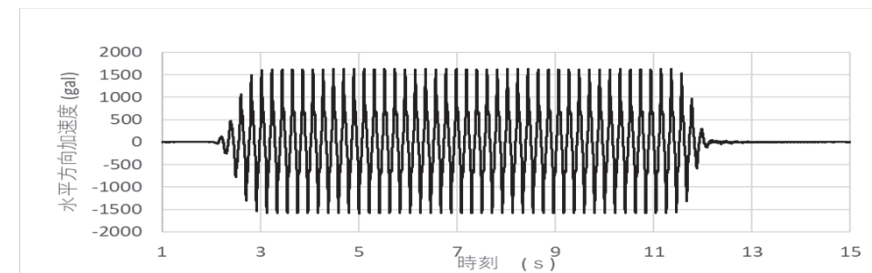
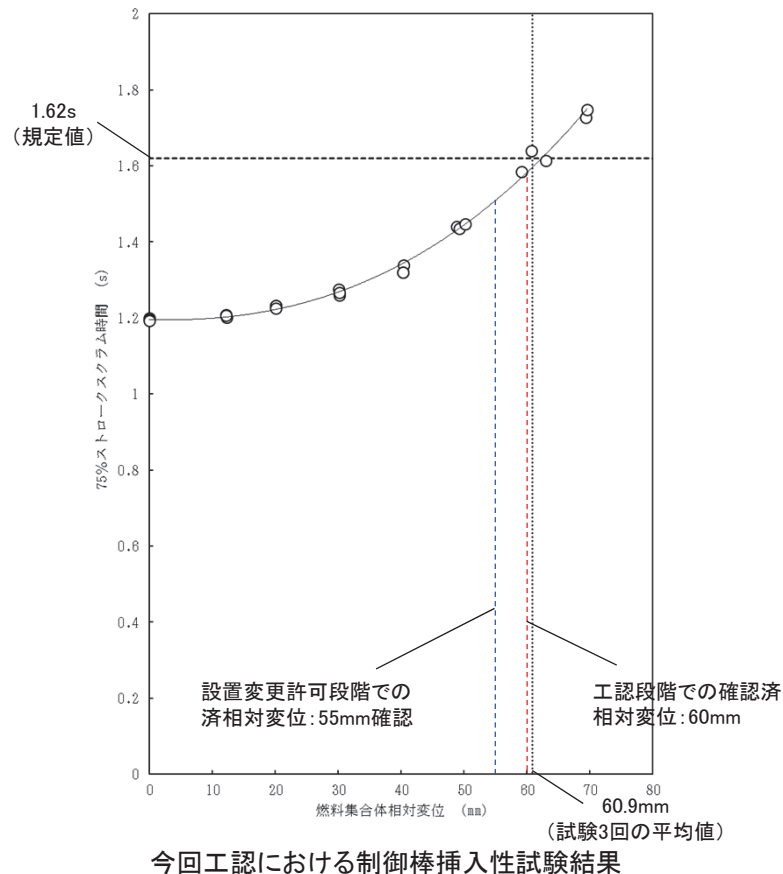
解析ケース	線形	弾塑性特性(倍率は初期剛性に対する第二勾配の倍率)			
		弾完全塑性体	0.1倍	0.3倍	0.6倍
燃料集合体相対変位の解析結果	54.2 mm	49.5 mm	49.6 mm	50.4 mm	52.7 mm



チャンネルボックスの弾塑性特性を考慮した解析結果は現状の線形モデルでの解析結果よりも小さくなることから、現状の制御棒挿入性評価は妥当であることを確認した。

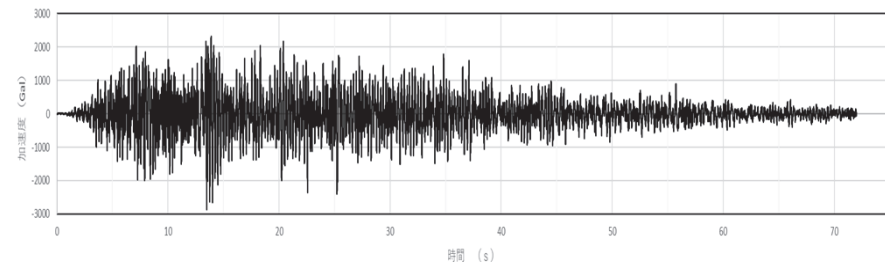
### 3. 2 制御棒挿入性試験の保守性(1/2)

- 制御棒挿入性評価の確認済相対変位については、制御棒挿入性試験結果を基に、設置変更許可審査時は55mmと設定していた。これに対して工認段階では確認済相対変位を60mmとする方針へ変更している。
- 制御棒挿入時間の規定値である1.62秒に達する相対変位は60.9mm(試験3回の平均値)であり、確認済相対変位として60mmと設定した場合、余裕が小さい状況となっている。
- ただし、制御棒挿入性試験の加振条件は最大振幅が繰返し発生する正弦波を用いているが、実際の地震は最大振幅が繰り返すものではないため、試験は厳しい条件になっている。



正弦波(加振試験条件)のイメージ\*

\* : 制御棒挿入性試験における振動台上で計測された加速度の例



地震波(実機条件)のイメージ\*

\* : 最大相対変位54.2mmが算出されたSs-D2による解析ケースでの質点54(燃料集合体下端位置)での加速度応答時刻歴データ

## 3.2 制御棒挿入性試験の保守性(2/2)

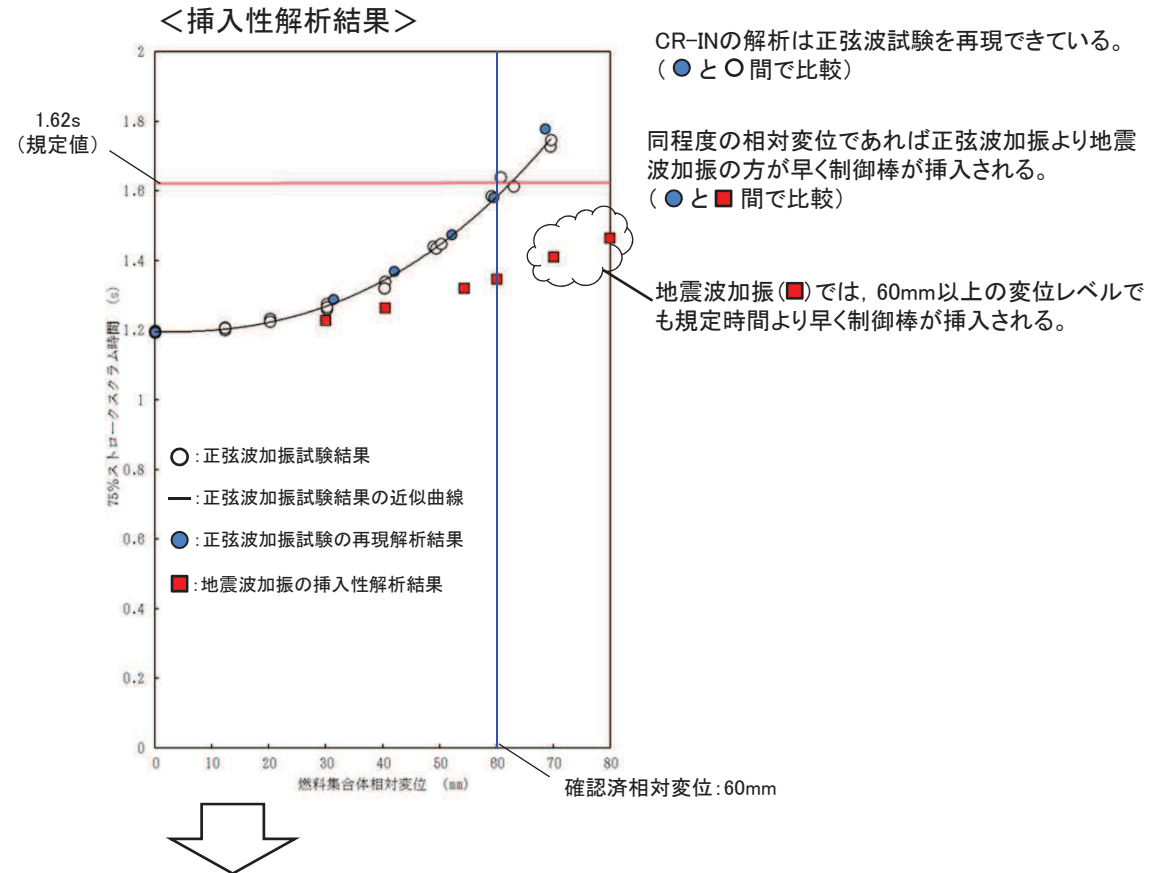
- 制御棒挿入性試験を再現解析できる計算機プログラム(CR-IN)(別紙参照)を用いて、最大相対変位54.2mmが算出された基準地震動S<sub>s</sub>-D2の地震応答解析結果を係数倍して燃料集合体相対変位が30~80mmとなるように調整し、制御棒挿入性解析を実施した。
- 解析の結果、相対変位が約80mm程度の範囲まで、規定時間(1.62s)に余裕をもって制御棒が挿入されることが確認できた。

### <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
- 加振試験結果の再現が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

### <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 <sub>s</sub> -D2の係数倍)
温度	試験温度 (常温)	同左
圧力	大気圧	同左



正弦波加振で実施した制御棒挿入性試験の結果は、地震波による制御棒挿入性解析の結果に比べ十分に保守的であることを確認したことから、確認済相対変位として60mmと設定することは妥当であることを確認した。

### 3.3 鉛直地震動の影響(1/2)

- JEAG4601-1991に基づく制御棒挿入性評価は、水平地震動によって発生する燃料集合体の相対変位を用いて評価を実施している。
- 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から、以下の2項目について鉛直地震動が制御棒挿入性評価に及ぼす影響を確認する。
  - I. 鉛直方向加速度が制御棒挿入時間に与える影響
  - II. 燃料支持金具からの離脱の有無

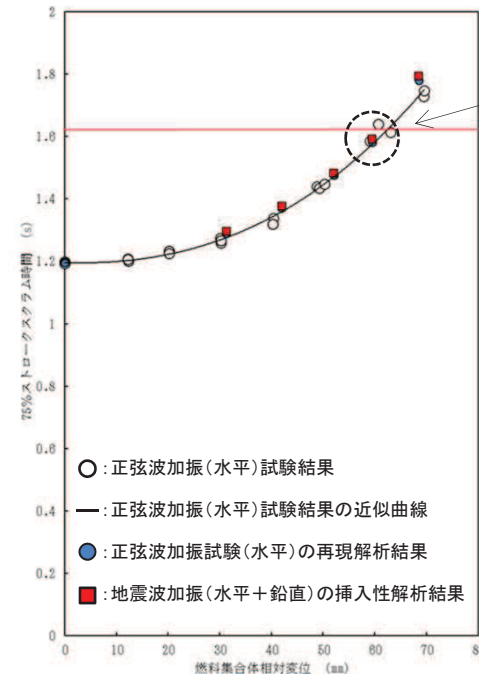
#### 【I. 鉛直方向加速度が制御棒挿入時間に与える影響】

- 計算機プログラム(CR-IN)を用いて、水平加振と鉛直加振を同時に入力した制御棒挿入性解析を実施し、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＞



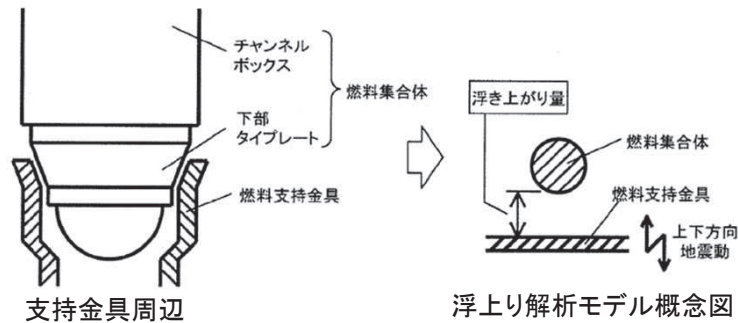
鉛直方向加速度の影響が軽微であることを確認

### 3.3 鉛直地震動の影響(2/2)

#### 【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。

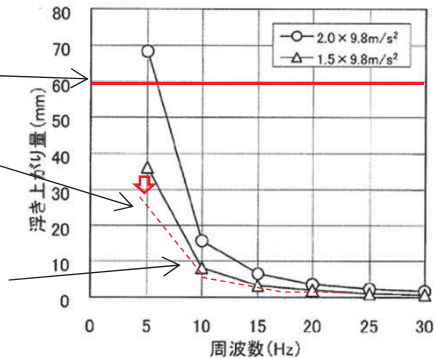
##### (i) 鉛直方向加速度による浮上り



支持金具への  
設置深さ: 60mm

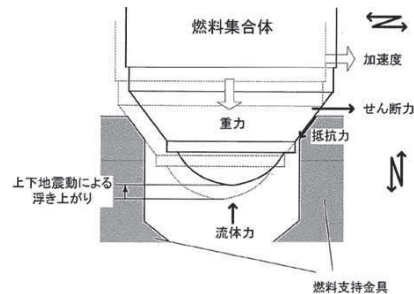
既往知見の検討結果  
1.5 × 9.8m/s<sup>2</sup>より女川2号  
機の浮上りは小さくなる

女川2号機の燃料集合体設置  
位置の加速度: 1.38 × 9.8m/s<sup>2</sup>  
(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 <sup>2</sup> )	燃料集合体下端 水平加速度(m/s <sup>2</sup> )	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 <sup>6</sup>	6.9
女川2号機	1.38 × 9.8	1.64 × 9.8	3.62 × 10 <sup>6</sup>	< 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。

## 4. まとめ

---

設置変更許可段階の詳細設計申送り事項に対する検討を行った結果は以下のとおり。

- 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、現在設定している燃料集合体相対変位が妥当であることを確認した。
- 地震波を用いた制御棒挿入性解析を実施し、正弦波条件での加振試験に基づく確認済相対変位の設定が十分に保守的であることを確認し、確認済相対変位を60mmと設定することが妥当であることを確認した。
- 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を実施し、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。

## (別紙)制御棒挿入性解析に用いた計算機プログラム(CR-IN)について

- 今回の検討では、制御棒挿入性を解析できる計算機プログラム、(CR-IN)を使用している。
- CR-INは、制御棒挿入の運動方程式と燃料集合体の振動方程式を、両者の接触力を介して連立し、地震時の制御棒挿入運動を解析できる。
- CR-INは、女川1号機の工認で認可実績がある。

### 【制御棒挿入の運動方程式】

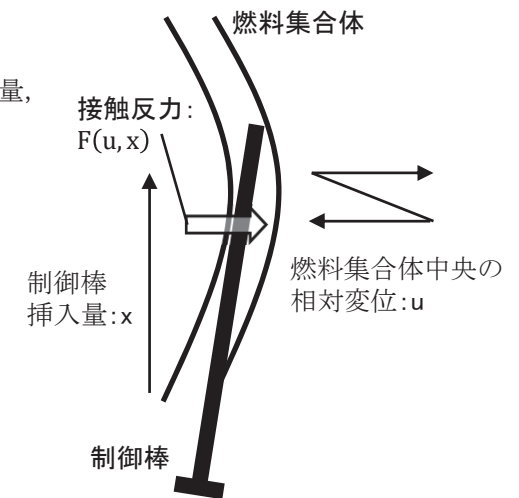
$$M\ddot{x} + F_r\dot{x}^2 + F_{fr} + (M - M_d)g = A_u P_u(x, \dot{x}, \ddot{x}) - A_o P_o - (A_u - A_o)P_R - R_o F(u, x)$$

$x$ :制御棒挿入量,  $u$ :燃料集合体中央の相対変位,  $g$ :重力加速度,  $M$ :制御棒可動部質量,  $M_d$ :制御棒可動部の排除質量,  
 $F_r$ :制御棒の流体抵抗係数,  $F_{fr}$ :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,  $F(u, x)$ :制御棒/燃料集合体の接触反力  $R_o$ :制御棒/燃料集合体の接触反力の摩擦係数

### 【燃料集合体の振動方程式】

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

$x$ :制御棒挿入量,  $u$ :燃料集合体中央の相対変位,  $m_f$ :燃料集合体の質量,  
 $m_o$ :燃料集合体の制御棒挿入前の付加質量,  $m_x$ :燃料集合体の制御棒挿入量 $x$ での付加質量増分,  
 $C_o$ :燃料集合体の制御棒挿入前の減衰係数,  $C_x$ :燃料集合体の制御棒挿入量 $x$ での減衰係数増分,  
 $k(u, x)$ :制御棒/燃料集合体の復元力,  $m_d$ :燃料集合体の排除質量,  
 $\beta$ :両端支持はりの1次モード中央変位の励振係数,  $\ddot{\eta}$ :支持点での外力加速度



接触反力 $F(u, x)$ を介して連立して解析

燃料集合体中央の相対変位: $u$   
 制御棒挿入量: $x$

CR-IN 概念図