

# 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7月29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 制御棒挿入性解析に用いる計算機プログラムCR-INの概要

参考3 制御棒挿入性解析に係るスクラム開始時刻の設定

参考4 制御棒挿入性評価に係る既往知見における検討内容

参考5 設置変更許可段階からの追加検討事項

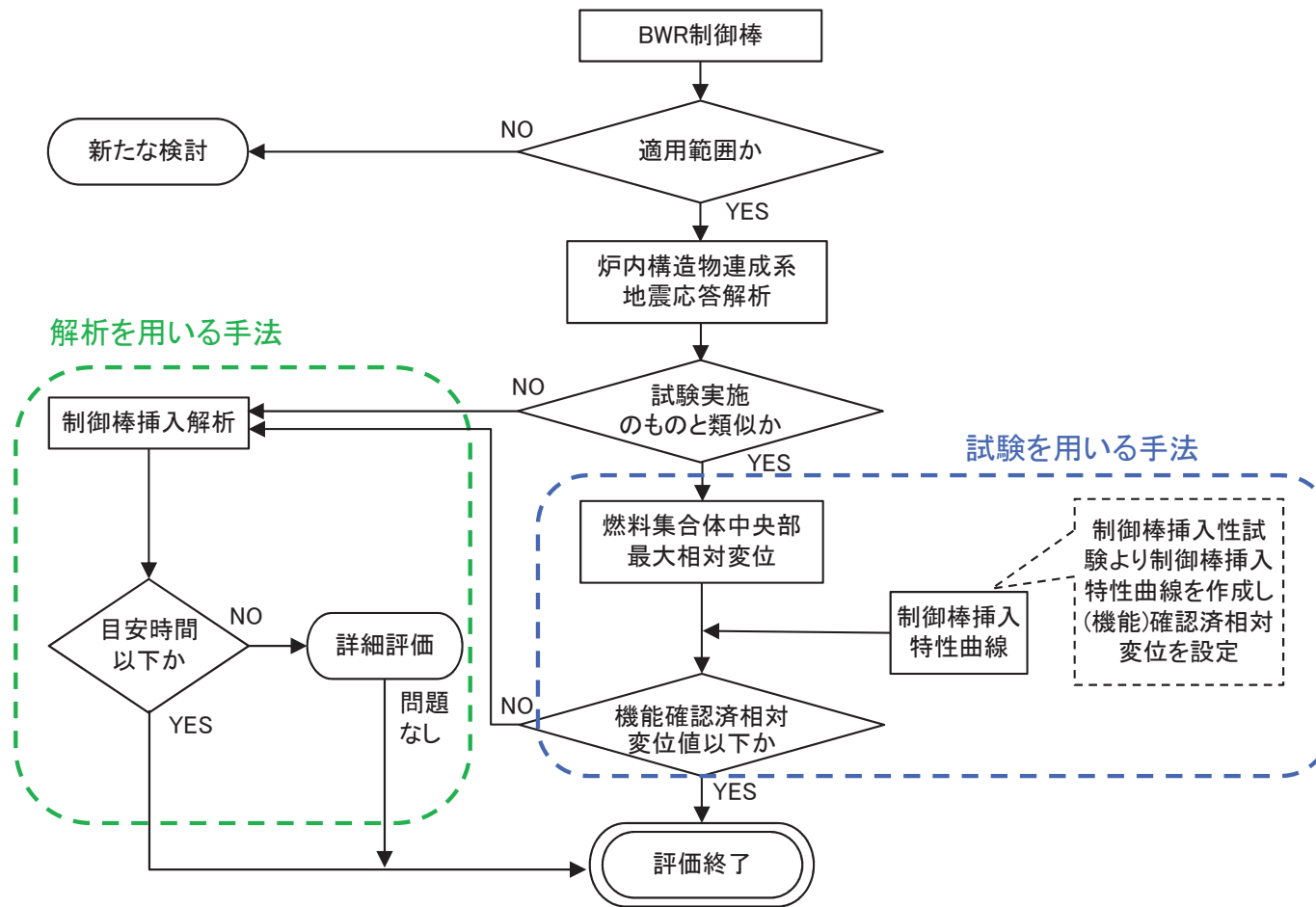
## 1. はじめに

- 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。)に記載の評価方法に従って、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、既工認と同様に制御棒挿入性試験を実施し、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。

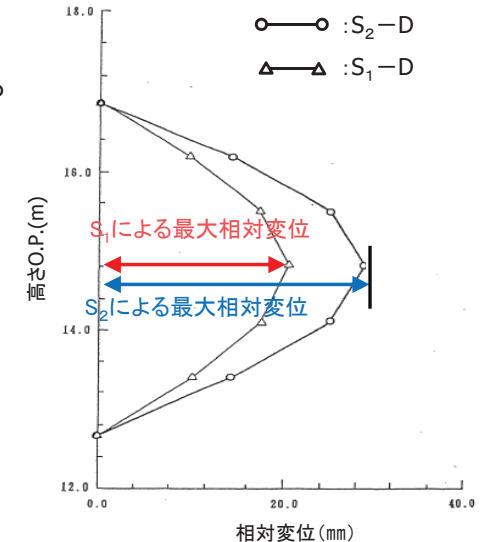
	設置変更許可段階	工認段階
基準地震動 $S_s$ による 燃料集合体相対変位(発生値)	45.3mm	54.2mm
確認済相対変位(許容値)	55mm	60mm
確認済相対変位の 設定方法	制御棒挿入性試験に対し 保守性を考慮	制御棒挿入性試験 + 制御棒挿入性解析により 保守性を定量的に確認

## 2. 女川2号機における制御棒挿入性評価方法

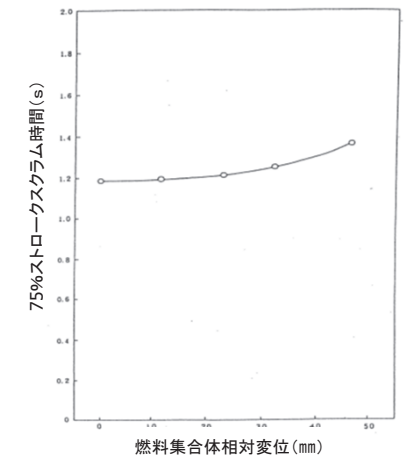
- 制御棒挿入性評価は、地震時に原子炉を確実に停止するために制御棒が炉心に挿入されることを確認するもので、JEAG4601に記載の評価方法には、“試験を用いる手法”と“解析を用いる手法”が示されている。なお、制御棒挿入性評価は、制御棒挿入時間(75%ストロークスクラムに要する時間)が規定値(1.62s)以内であることを確認するものである。
- 女川2号機の制御棒挿入性評価は、既工認より試験を用いる手法を採用している。



制御棒挿入性評価フロー(JEAG4601より抜粋, 一部加筆)



燃料集合体中央部最大相対変位 (女川2号機既工認より抜粋, 一部加筆)



制御棒挿入特性曲線 (女川2号機既工認より抜粋)

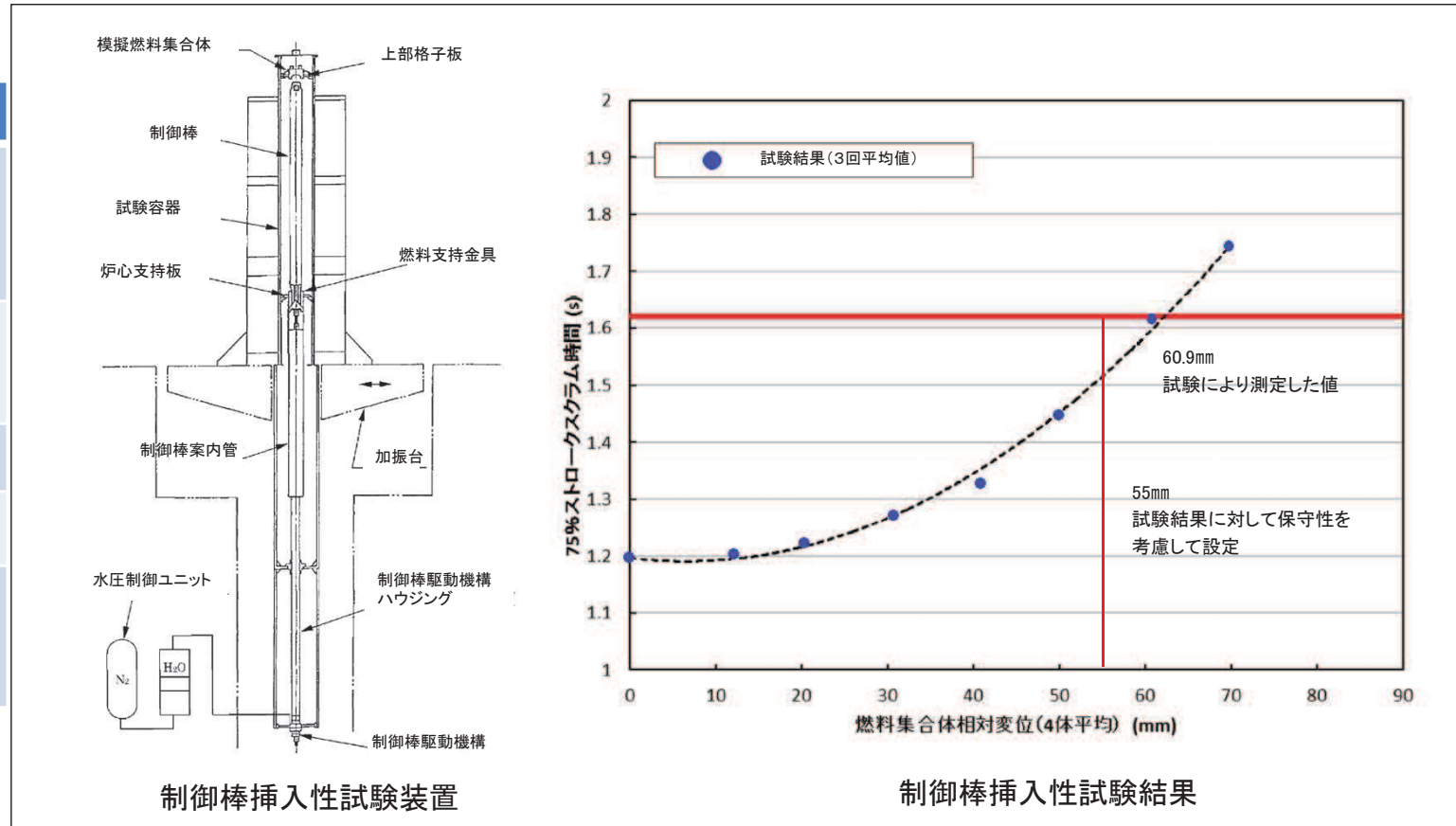
### 3. 設置変更許可段階での説明内容

- 今回の新規制基準対応では、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。(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(燃料集合体相対変位60mmを目標とした試験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より抜粋

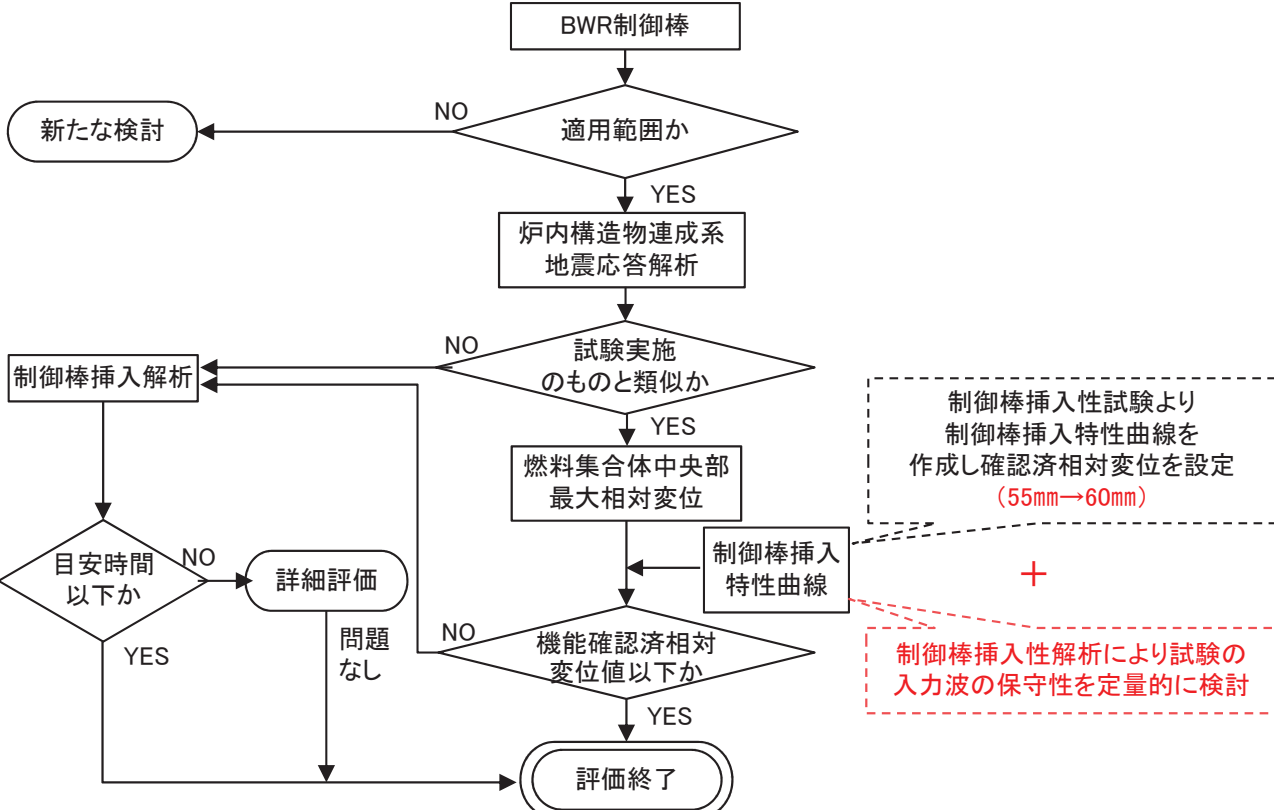
制御棒挿入性試験条件

項目	試験条件
機器構成	実機を模擬 なお、燃料集合体の高温状態を模擬するためチャンネルボックスの板厚を調整
試験回数	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(ただし、70mmに対しては2回)
入力波	正弦波
温度	常温
圧力	大気圧 なお、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

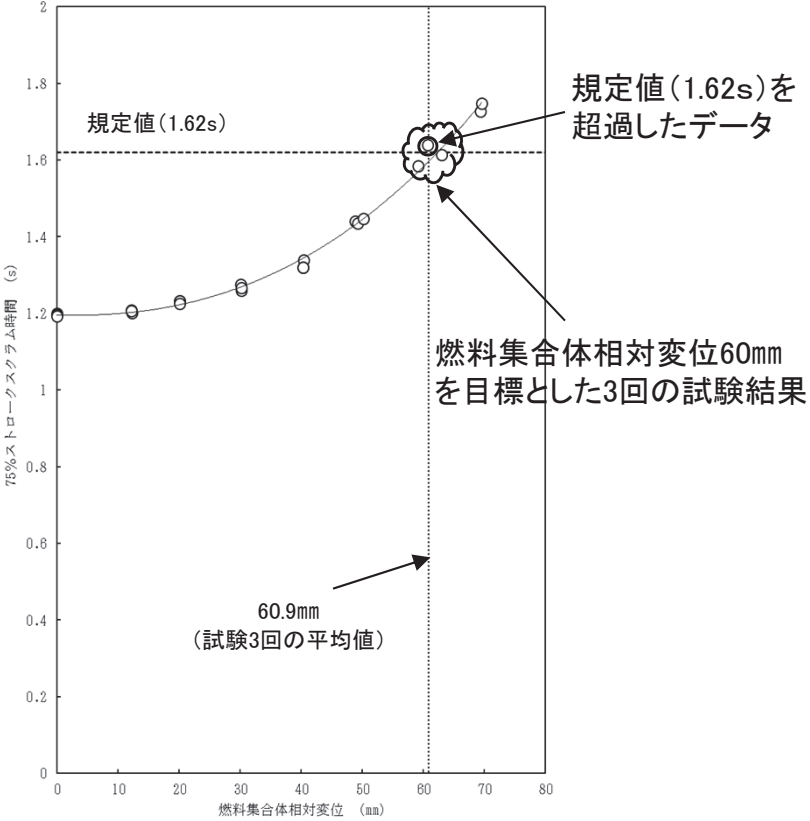


# 4. 工認段階での説明内容(設置変更許可段階からの変更点)

- 設置変更許可段階では、制御棒挿入性試験結果から確認済相対変位を55mmに設定する方針としていたが、今回工認における詳細検討を踏まえ、確認済相対変位を60mmに設定する。
- 確認済相対変位を60mmに設定するにあたっては、制御棒挿入性試験結果から制御棒挿入時間が規定値(1.62s)に達する際の燃料集合体相対変位が60.9mm(試験3回の平均値)とのデータに基づくものの、そのうち1回の試験データが規定値(1.62s)を超過している。
- これに対し、制御棒挿入性試験における試験条件が正弦波入力であり、保守性が含まれているものと考えられることから、制御棒挿入性解析により制御棒挿入性試験の入力波の保守性を定量的に検討し、確認済相対変位を60mmに設定することの妥当性を確認した。



制御棒挿入性評価フロー(JEAG4601より抜粋, 一部加筆)



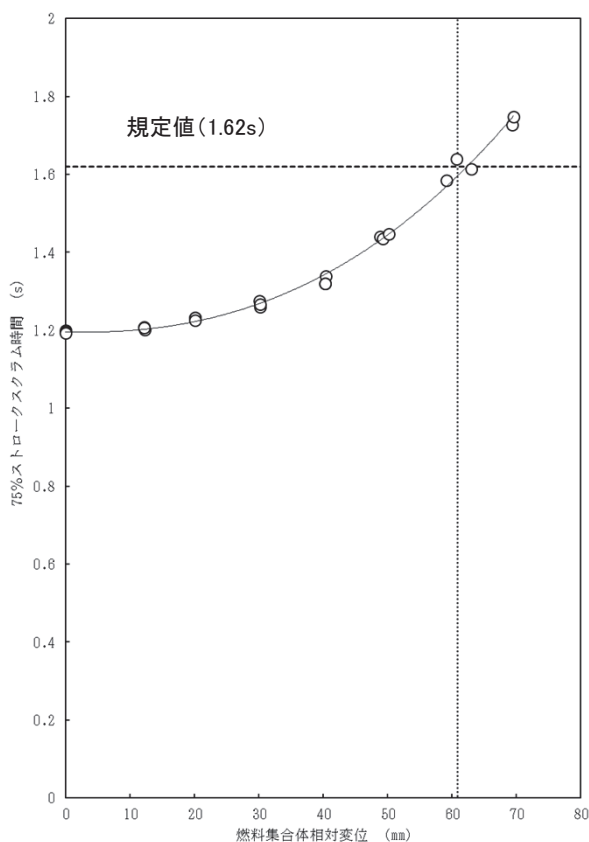
制御棒挿入性試験結果



## 5. 制御棒挿入性解析

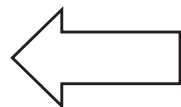
### 5.1 目的

- 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力（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入力波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、入力波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。

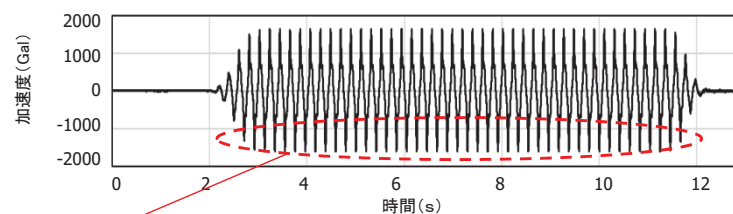


制御棒挿入性試験結果

正弦波による  
試験結果



加振試験条件



最大振幅が繰返し発生

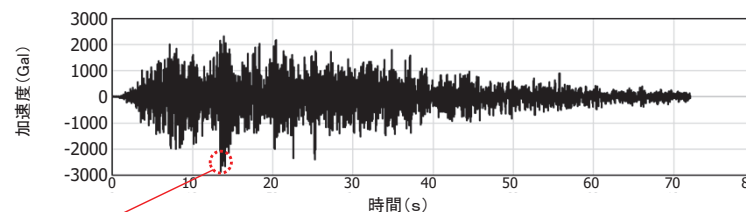
正弦波のイメージ

(制御棒挿入性試験において目標相対変位となるように入力した共振正弦波)

入力波の違いによる  
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。

実機条件



最大振幅は瞬間的に発生

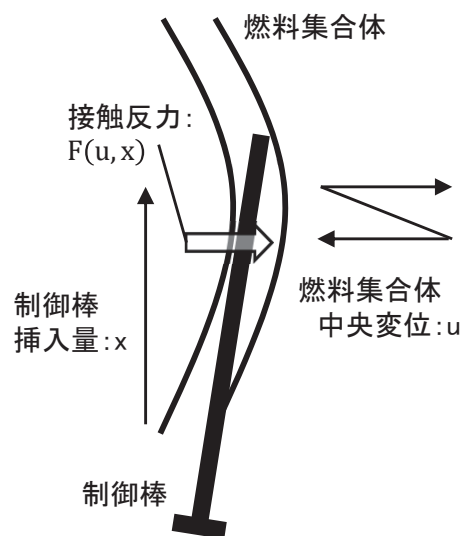
地震波のイメージ

(炉内構造物系地震応答解析において燃料集合体下端位置で得られた加速度時刻歴波で  
制御棒挿入性解析において目標相対変位となるように係数倍した地震波)

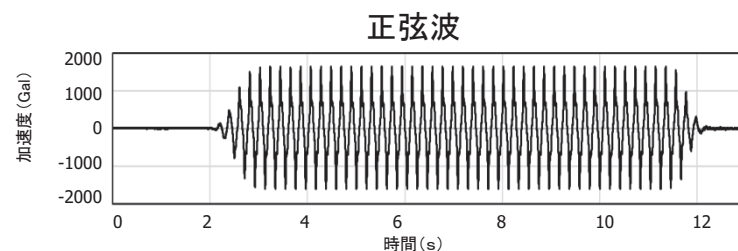
## 5. 制御棒挿入性解析

### 5.2 解析内容

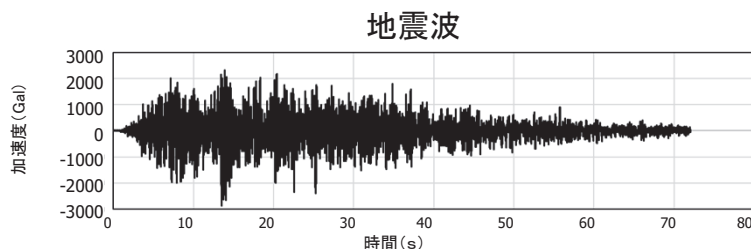
- 制御棒挿入性解析は、制御棒挿入性試験を再現できる計算機プログラム(CR-IN)を使用する。なお、本プログラムは女川1号機において制御棒挿入性試験とは板厚の異なる燃料集合体(チャンネルボックスを含む)を導入するにあたり、制御棒挿入性評価への影響を確認するために使用しており、工事計画認可実績を有したプログラムである。
- CR-INでは、制御棒を挿入する過程で、地震によって制御棒と燃料集合体が接触することで生じる接触反力を算出し、この反力が制御棒挿入時間に与える影響を定量的に評価できる。(参考2参照)
- 今回実施した制御棒挿入性解析では、入力波として制御棒挿入性試験に使用した正弦波及び実機を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。
- なお、地震波入力においては、評価が保守的になるように、燃料集合体相対変位が最大となる時刻を考慮し制御棒挿入時間が最も長くなるタイミングをスクラム開始時刻として設定している。(参考3参照)



制御棒挿入性解析のイメージ



正弦波と地震波を入力し、制御棒挿入時間を比較する。





## 5. 制御棒挿入性解析

### 5.3 解析条件及び結果

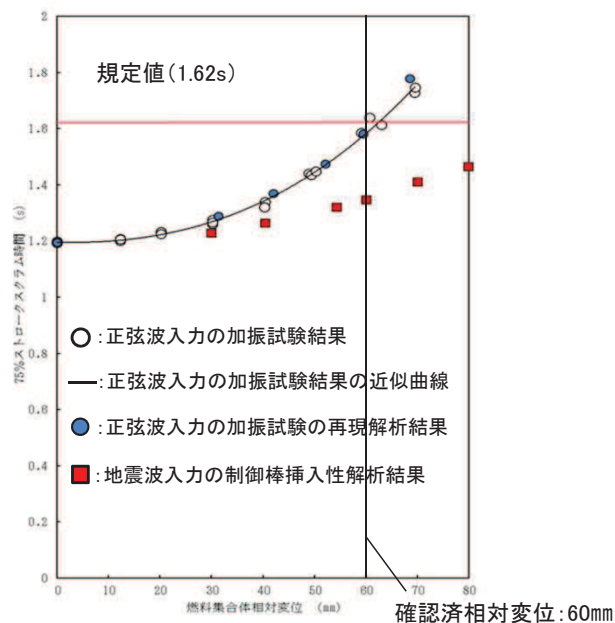
- 以下に示す2通りの条件によって制御棒挿入性解析を実施した。
  - 制御棒挿入性試験に使用した正弦波
  - 今回工認において燃料集合体相対変位が最大(54.2mm)となった基準地震動Ss-D2
- 解析の結果、正弦波入力の場合が地震波入力の場合に比べ保守的であり、地震波入力では燃料集合体相対変位が約80mmの範囲まで、規定値(1.62s)に余裕をもって制御棒が挿入されることを確認した。なお、既往知見\*においても地震波入力とした制御棒挿入性に係る検討がされており、今回工認と同様、地震波入力とした場合には、制御棒挿入性試験及び制御棒挿入性解析ともに燃料集合体相対変位が約80mmを超える範囲においても規定値(1.62s)を満足することが確認されている。(参考4参照)
- 以上より、正弦波入力による制御棒挿入性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。

\*: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)及び  
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)

制御棒挿入性解析条件

解析条件	正弦波入力	地震波入力
入力波*	正弦波	地震波 (Ss-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同等と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

<本検討の手順>

- 正弦波入力の加振試験結果が再現できるようにCR-INを設定  
⇒ CR-INの解析は正弦波入力の加振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による地震波入力の制御棒挿入性解析を実施  
⇒ 同程度の相対変位であれば正弦波入力より地震波入力の方が早く制御棒が挿入される。  
(●と■間で比較)  
⇒ 地震波入力(■)では、約80mmの範囲まで、規定値(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、既工認と同様に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)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を実施した。
- 解析の結果、正弦波入力の場合が地震波入力の場合に比べ保守的であり、地震波入力では燃料集合体相対変位が約80mmの範囲まで、規定値(1.62s)に余裕をもって制御棒が挿入され、正弦波入力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。
- 制御棒挿入性解析結果から制御棒挿入性試験の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は、既工認と同様に制御棒挿入性試験を実施した。
- 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制御棒挿入時の接触痕や微小な変形は見られたものの、制御棒挿入性に影響を及ぼすような有意な変形や損傷がないことを確認した。

既工認と今回工認の試験条件の比較

条件項目	既工認	今回工認
機器・装置構成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・模擬燃料集合体(8×8燃料,チャンネルボックス含む)</li> <li>・制御棒</li> <li>・燃料支持金具</li> <li>・制御棒案内管</li> <li>・制御棒駆動機構</li> <li>・水圧制御ユニット</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・模擬燃料集合体(9×9燃料*1,チャンネルボックス含む)</li> <li>・同左</li> <li>・同左</li> <li>・同左</li> <li>・同左</li> <li>・同左</li> </ul>
試験方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・加振状態で75%ストロークスクラムに要する時間を計測</li> <li>・正弦波により加振</li> <li>・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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同左</li> <li>・同左</li> <li>・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*2</li> </ul>
入力波	正弦波	同左
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)

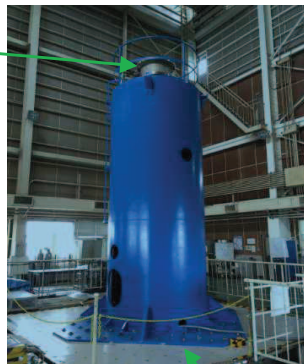
\* 1: 女川2号機で使用している燃料型式

\* 2: 70mmに対しては2回試験を実施

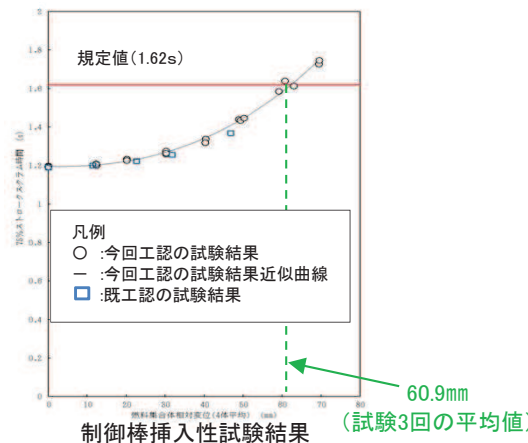
\* 3: 高温時の曲げ剛性と同等になるようチャンネルボックス板厚を調整

100mil(2.54mm) \*3

試験容器



加振台  
試験装置外観

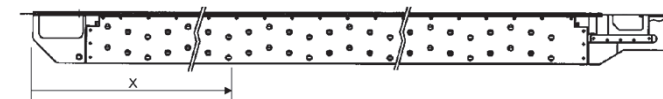
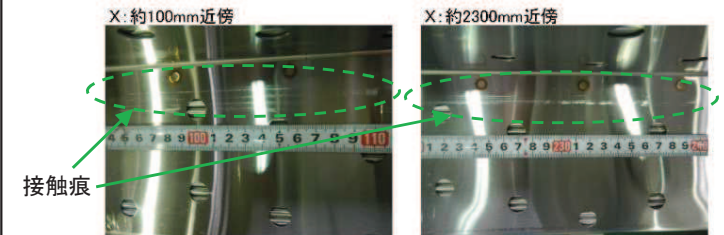


(チャンネルボックス上端側)



(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

接触痕はあるものの、制御棒挿入性に影響を及ぼすような有意な変形や損傷がないことを確認

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

## 【参考2】 制御棒挿入性解析に用いる計算機プログラムCR-INの概要(1/5)

- 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 $x$ における制御棒と燃料集合体(チャンネルボックスを含む)の挿入抗力を考慮した解析を行う。
- CR-INにおいては、制御棒と燃料集合体の接触するケースを考慮し、各接触様式における挿入抗力を考慮している。

# 【参考2】 制御棒挿入性解析に用いる計算機プログラムCR-INの概要(2/5)

- 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)と式(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。

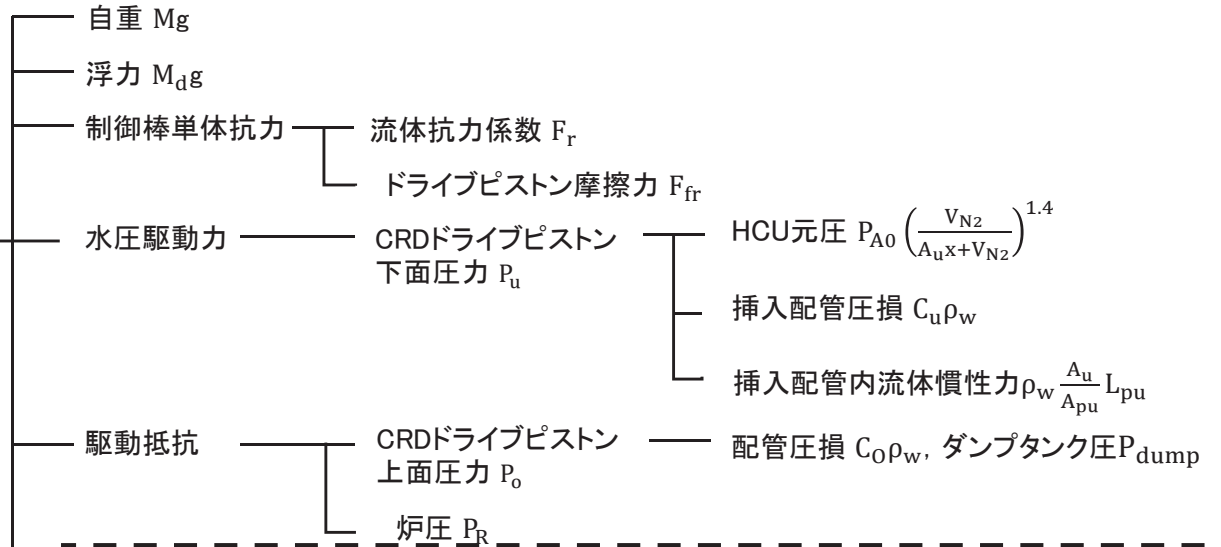
**制御棒挿入運動方程式** 制御棒挿入量x

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

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

$$P_o = C_o \rho_w \dot{x}^2 + P_{dump}$$

制御棒挿入時間 t



地震外力による抗力と摩擦係数  $F(u, x), R_0$

- 復元力・接触反力
  - 復元力  $k(u, x)$
  - 制御棒側面抗力  $P_1$
  - 制御棒先端抗力  $P_2$
  - 燃料集合体下端抗力  $R_1$
  - 制御棒下端抗力  $R_2$
- 制御棒と燃料集合体の接触の摩擦係数  $R_0$
- 水平地震加速度  $\ddot{\eta}$

**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 $\beta$ ，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

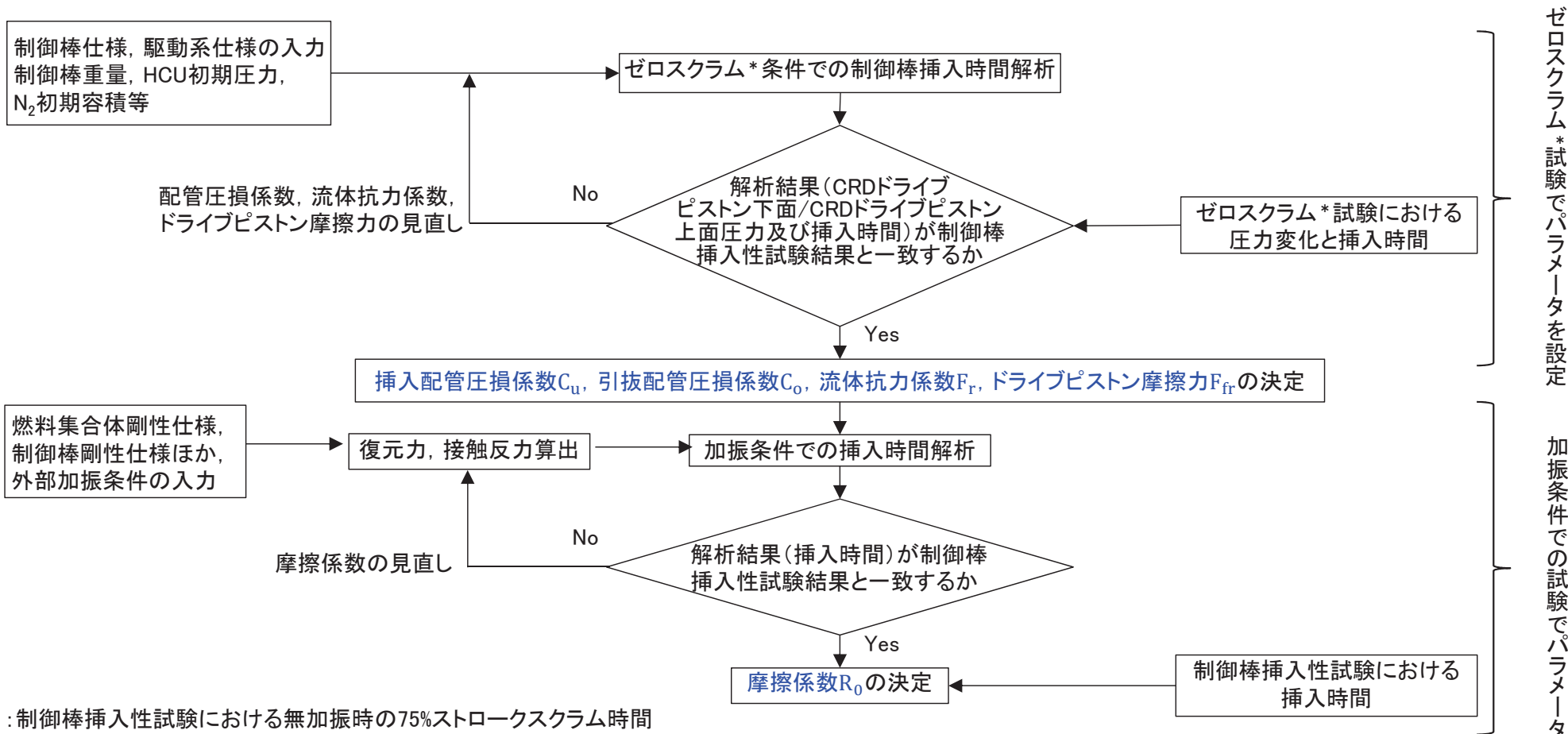
制御棒と燃料集合体の接触による力

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



# 【参考2】 制御棒挿入性解析に用いる計算機プログラムCR-INの概要(3/5)

- 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 $F_{fr}$ 及び制御棒と燃料集合体の接触の摩擦係数 $R_0$ （以下「摩擦係数」という。）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。



\* : 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

CR-INの各パラメータの設定フロー



## 【参考2】 制御棒挿入性解析に用いる計算機プログラムCR-INの概要(4/5)

- 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	設定の妥当性
挿入配管 圧損係数	$C_u$		—	ゼロスクラム * 試験で得られたデータより設定	
引抜配管 圧損係数	$C_o$		—	同上	
流体抗力 係数	$F_r$	1050	N/(m/s) <sup>2</sup>	同上	流体抗力の理論式から算出される1000N/(m/s) <sup>2</sup> と概ね一致している
ドライブピストン 摩擦力	$F_{fr}$	500	N	同上	女川2号機で実測されたドライブピストン摩擦力500Nと一致している
摩擦係数	$R_0$	0.182	—	加振条件での試験から各目標変位(30mm~70mm)における摩擦係数の平均値を算出し、そのうち最大値(目標変位60mm)を適用	摩擦係数のパラメータスタディを行い、設定の妥当性を確認(15頁参照)

\* : 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2】 制御棒挿入性解析に用いる計算機プログラムCR-INの概要(5/5)

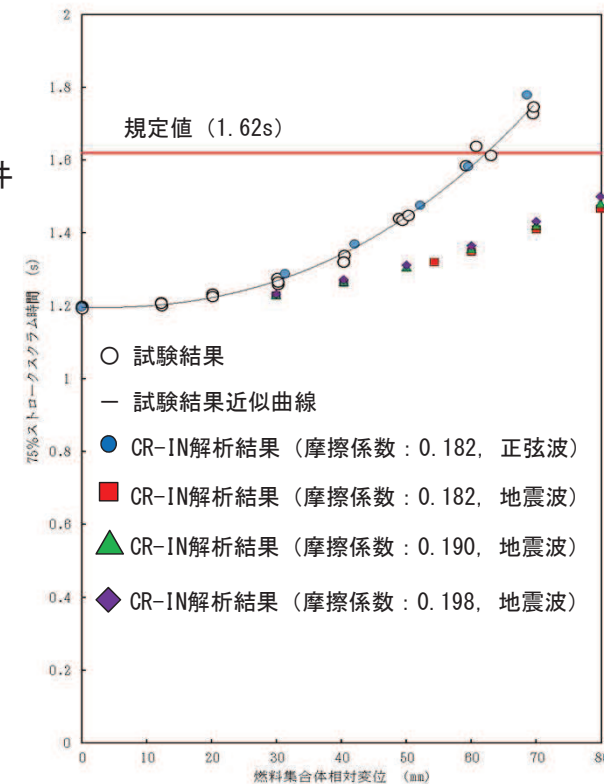
- 今回工認における摩擦係数 $R_0$ は、各目標変位(30mm~70mm)における摩擦係数平均値のうち、最大値となる目標変位60mmにおける値0.182を設定している。
- 摩擦力は制御棒挿入時の抵抗力として働くため、摩擦係数が高いほど制御棒挿入時間は遅くなる。そこで、制御棒挿入時間に対する摩擦係数の影響を確認するため、各試験結果から得られる摩擦係数の最大値0.190及びばらつきを考慮するため試験結果から得られる摩擦係数の平均値(0.166)に $+2\sigma$ を考慮した摩擦係数0.198を用いて制御棒挿入時間を確認した。
- 燃料集合体相対変位が大きくなるにつれて制御棒挿入時間が遅くなる傾向になるものの、いずれの結果も規定値(1.62s)には十分に余裕がある結果となったことから、制御棒挿入時間に対する摩擦係数の影響は軽微であり、0.182の設定は妥当であることを確認した。

試験結果から得られる摩擦係数

目標変位 (mm)	燃料集合体相対変位 (mm)	試験結果から得られる摩擦係数*	各目標変位における摩擦係数平均値
30	30.2	0.135	0.150
	30.1	0.165	
	30.2	0.150	
40	40.4	0.160	0.153
	40.3	0.148	
	40.3	0.149	
50	48.8	0.181	0.179
	49.3	0.176	
	50.2	0.178	
60	59.1	0.182	0.182
	60.7	0.190	
	63.0	0.174	
70	69.4	0.170	0.171
	69.6	0.172	
平均値		0.166	
標準偏差( $\sigma$ )		0.016	

パラメータスタディを行った摩擦係数の設定条件

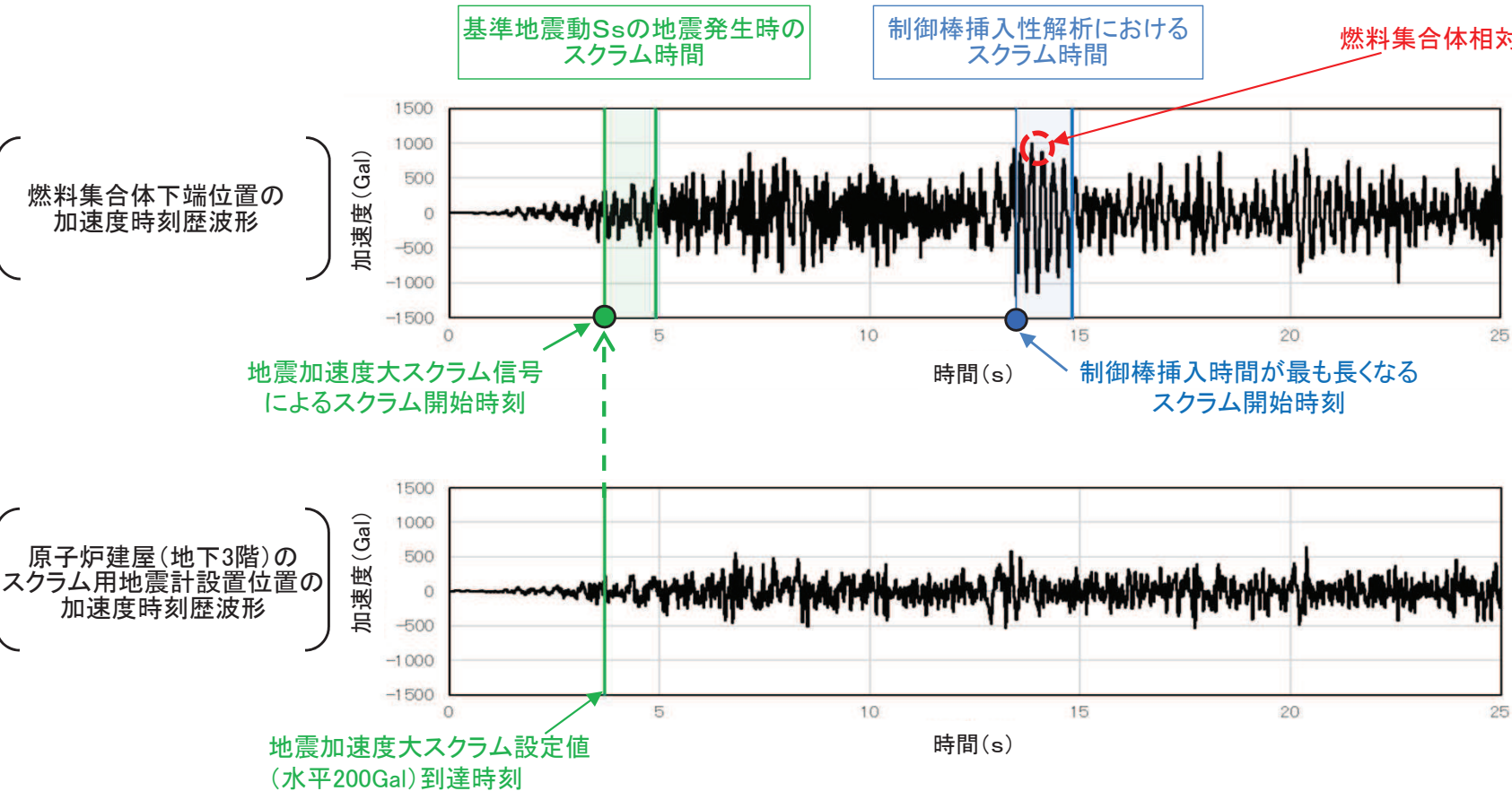
摩擦係数	設定根拠
0.182	各目標変位(30mm~70mm)における摩擦係数平均値の最大値
0.190	試験における摩擦係数最大値
0.198	試験結果から得られる摩擦係数平均値に $+2\sigma$ を考慮した摩擦係数



\* : 試験結果とCR-INでの挿入性解析結果が整合するよう調整した結果から得られる摩擦係数

## 【参考3】 制御棒挿入性解析に係るスクラム開始時刻の設定

- 今回工認で実施した制御棒挿入性解析における地震波入力では、評価が保守的になるように燃料集合体相対変位が最大となる時刻を考慮しパラメータスタディを実施した上で、制御棒挿入時間が最も長くなるタイミングをスクラム開始時刻として設定した。
- 一方で、実際に基準地震動S<sub>s</sub>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「地震加速度大」によりスクラムし、燃料集合体相対変位が最大となる前に挿入されることとなるため、今回工認で実施した地震波による制御棒挿入性解析結果は保守性を考慮した結果になっている。



原子炉建屋のスクラム用地震計

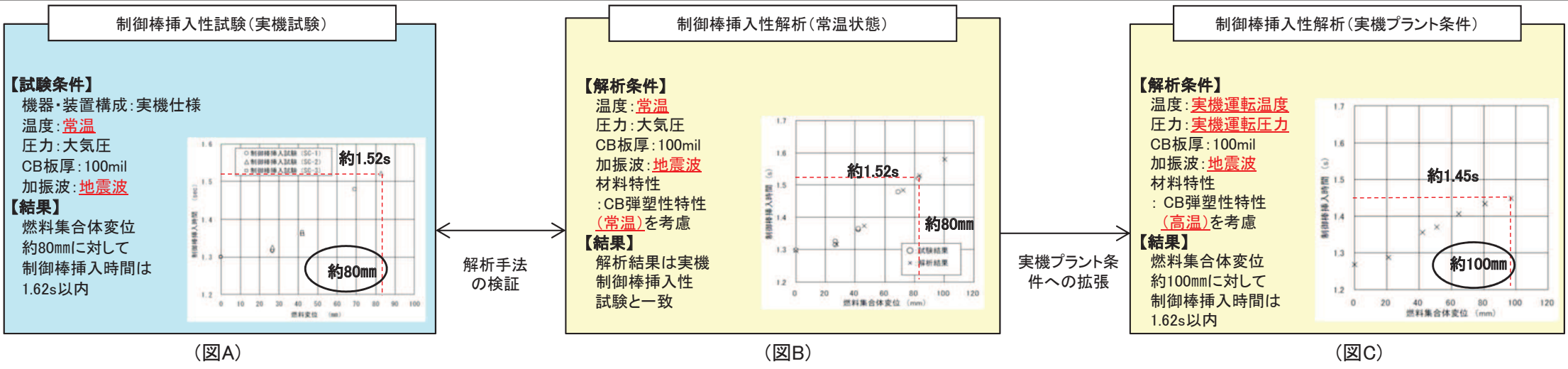
設置位置	地震加速度大スクラム設定値	
O.P.6.00m (地下1階)	水平	400Gal
O.P.-8.10m (地下3階)	水平	200Gal
	鉛直	100Gal

# 【参考4】 制御棒挿入性評価に係る既往知見における検討内容

- 既往知見\*では、地震波入力における制御棒挿入性試験及び制御棒挿入性解析を実施し、制御棒挿入性試験では燃料集合体相対変位約80mm(図A)、制御棒挿入性解析では燃料集合体相対変位約100mm(図C)において制御棒挿入時間が規定値(1.62s)を満足することが確認されている。
- 今回工認で実施した制御棒挿入性解析においても、地震波入力では燃料集合体相対変位が約80mmの範囲まで、規定値(1.62s)を満足しており、同様の結果となる。(8頁参照)
- なお、既往知見の結果を女川2号機の制御棒挿入性評価に適用する場合には、既往知見で用いた地震波が女川2号機の地震波(基準地震動S<sub>s</sub>)とは異なるものである等、条件に差異があることから、既往知見の適用性を基準地震動S<sub>s</sub>7波全てに対し詳細に検討する必要がある。そこで、女川2号機の制御棒挿入性試験では、保守的に正弦波加振とすることによりいずれの地震波に対しても適用性のあるデータを取得し、制御棒挿入性評価を実施することとしているものである。

\* :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)及び  
 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)

第705回審査会合資料(2019年4月16日)資料1-1-6より抜粋,一部加筆



制御棒挿入性評価に係る既往知見における検討内容の概要



# 【参考5】 設置変更許可段階からの追加検討事項(1/4)

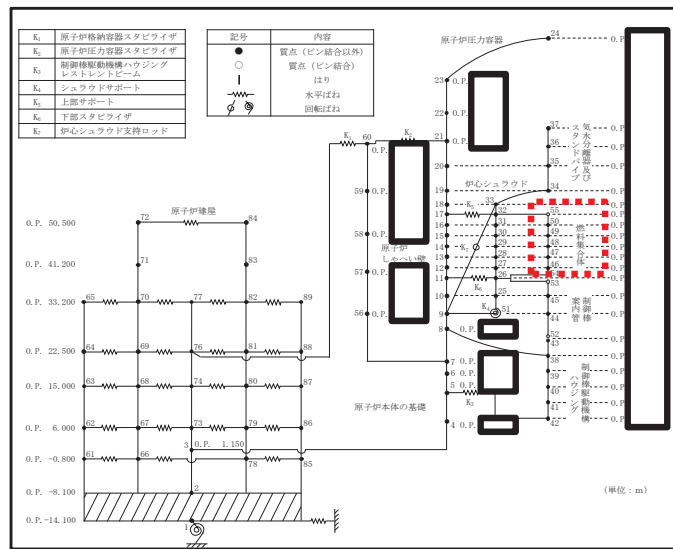
➤ 今回工認では、燃料集合体相対変位54.2mmと変位が大きくなったこと及び新規制基準において鉛直方向の動的な地震動が導入されたことを踏まえ、チャンネルボックスの弾塑性特性の影響及び鉛直地震動の影響を確認するため、設置変更許可段階から追加検討を行った。

## 【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。

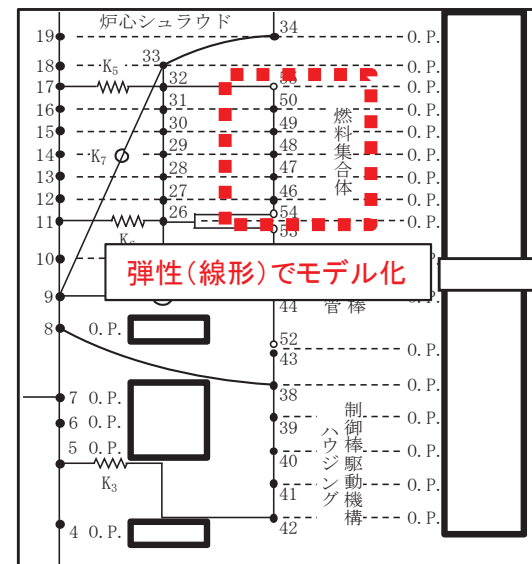
\*1: 燃料集合体の剛性はチャンネルボックスの剛性が支配的となっているため、解析モデルにおいてはチャンネルボックスの剛性を適用しモデル化している。

\*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)



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, 炉心シュラウド, 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



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)

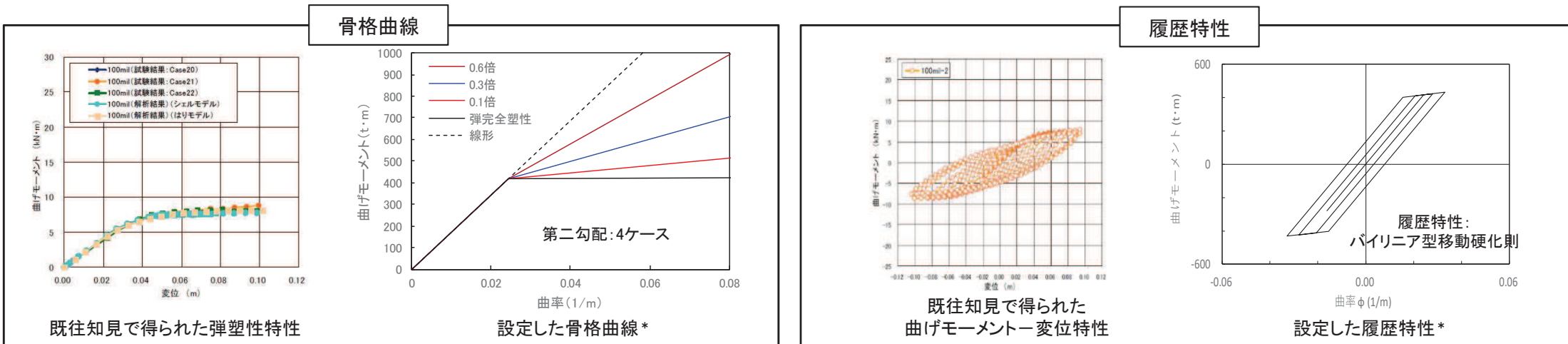
弾塑性特性を与え、燃料集合体相対変位に対する影響を確認

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

## 【参考5】 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のうち骨格曲線は、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、弾塑性特性のうち履歴特性は、既往知見を参考としてバイリニア型移動硬化則を設定した。
- 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。

\* :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)



\* :横軸は、解析コードの入力値である 曲率で記載

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Ss-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。  
 なお、線形解析による燃料集合体相対変位が保守的になったのは、地震慣性力が交番荷重であるため、弾塑性特性を考慮したケースでは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が発生して燃料集合体相対変位が抑制されたものである。



# 【参考5】 設置変更許可段階からの追加検討事項(3/4)

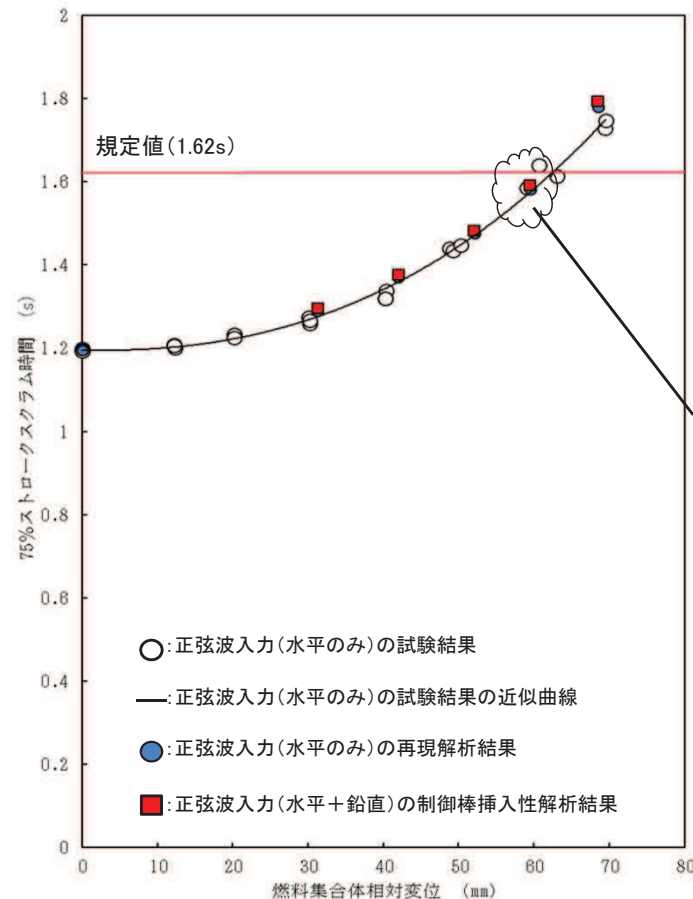
## 【鉛直地震動の影響】

### 【I. 鉛直方向加速度が制御棒挿入時間に与える影響】

- CR-INを用いた制御棒挿入性解析により、水平入力のみの場合と、水平＋鉛直入力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。

制御棒挿入性解析条件

解析条件	水平入力	水平＋鉛直入力
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



◆ 同程度の相対変位であれば、水平入力のみの場合と、水平＋鉛直入力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秒であり影響は軽微。

■ : 1.58s  
 ● : 1.59s

制御棒挿入性解析結果

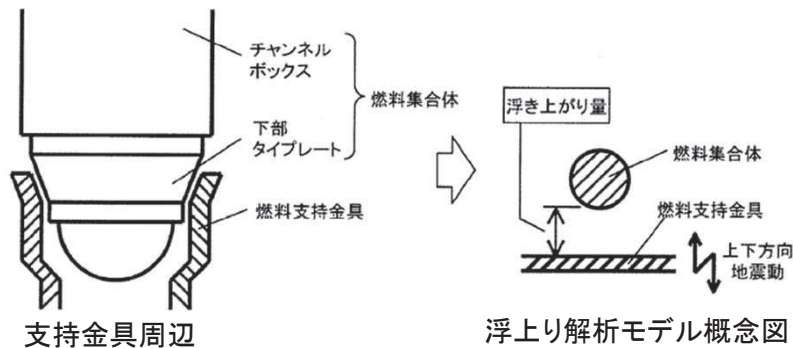
# 【参考5】 設置変更許可段階からの追加検討事項(4/4)

## 【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。

\*：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)

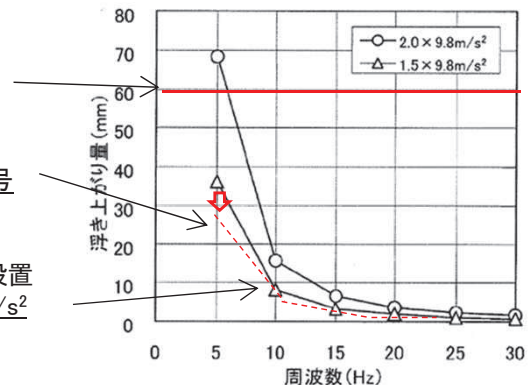
### (i) 鉛直方向加速度による浮上り



支持金具への  
設置深さ: 60mm

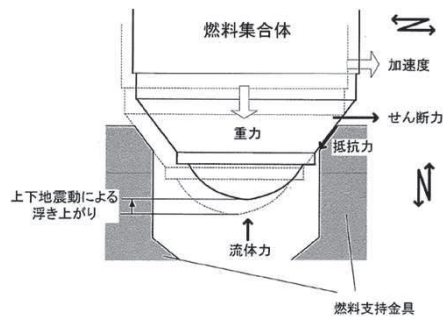
既往知見の検討結果  
1.5 × 9.8m/s<sup>2</sup>より女川2号  
機の浮上りは小さくなる

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。