

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-01-0086_改0

提出年月日

2021年 8月24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 (指摘事項に対する回答)

2021年8月24日
東北電力株式会社

前回審査会合(7/29)における指摘事項及び回答概要

- 第993回審査会合において、審査の中で論点として新たに整理された「制御棒の挿入性評価」について説明し、以下の指摘があったことから、指摘事項に対する回答について説明する。

実施日	指摘事項
2021年7月29日 第993回審査会合	①制御棒挿入性解析における地震波の入力条件として、燃料集合体相対変位が最大となった基準地震動S _s -D2を用いているが、女川2号炉における他の基準地震動に対しても保守性を有していることを整理して説明すること。 ②制御棒挿入性解析において、実機高温状態を考慮した際の制御棒挿入時間に与える影響について整理して説明すること。



指摘事項	指摘事項に対する回答	記載箇所
①制御棒挿入性解析における地震波の入力条件として、燃料集合体相対変位が最大となった基準地震動S _s -D2を用いているが、女川2号炉における他の基準地震動に対しても保守性を有していることを整理して説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> 基準地震動S_s-D2以外の基準地震動(S_s-D1, D3, F1, F2, F3, N1)について制御棒挿入性解析を実施した結果、制御棒挿入時間が正弦波による制御棒挿入性試験での制御棒挿入時間よりも早いことから、女川2号機の基準地震動S_s-D2以外の基準地震動に対しても制御棒挿入性試験が保守性を有していることを確認した。 	p2~3
②制御棒挿入性解析において、実機高温状態を考慮した際の制御棒挿入時間に与える影響について整理して説明すること。	<ul style="list-style-type: none"> 制御棒挿入性解析において、実機高温状態を考慮した際には制御棒挿入時間に影響する(燃料集合体相対変位が約55mmを超える範囲で試験条件に比べて遅くなる)ものの、正弦波による制御棒挿入性試験での制御棒挿入時間に対しては十分に保守性を有した結果となっていることを確認した。 	p4~5, 別紙1, 2

1. 指摘事項①に対する回答

【S_s-D2以外の基準地震動に対する制御棒挿入性試験の保守性(1/2)】

- 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S_s-D2以外の基準地震動に対する制御棒挿入性試験の保守性を確認するため、S_s-D2以外の基準地震動(S_s-D1, D3, F1, F2, F3, N1)に対して計算機プログラム(CR-IN)を用いた制御棒挿入性解析を実施した。
- 下表の解析条件で燃料集合体相対変位60mmにおける制御棒挿入性解析を実施した結果、制御棒挿入時間が最も遅くなるのはS_s-F1(1.362s)であり、S_s-D2(1.348s)とほぼ同等となった。
- S_s-F1の制御棒挿入時間が最も遅くなるのは、燃料集合体相対変位の最大値が発生している時刻近傍において、比較的大きな変位が連続して発生していることから、制御棒と燃料集合体の接触による挿入抵抗が他の基準地震動に比べて大きくなったためと考えられる。

制御棒挿入性解析条件

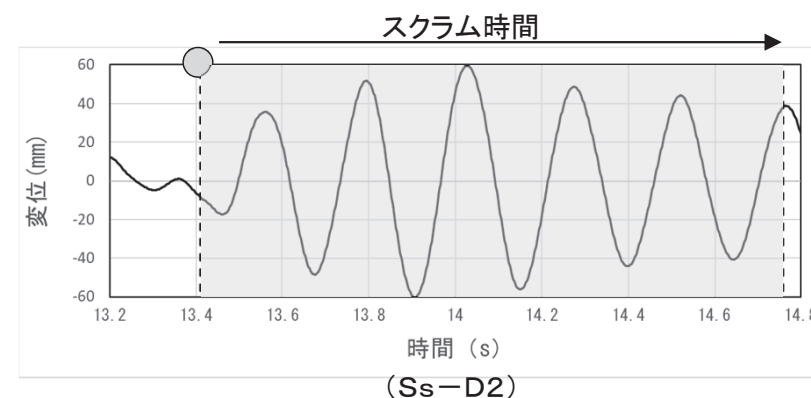
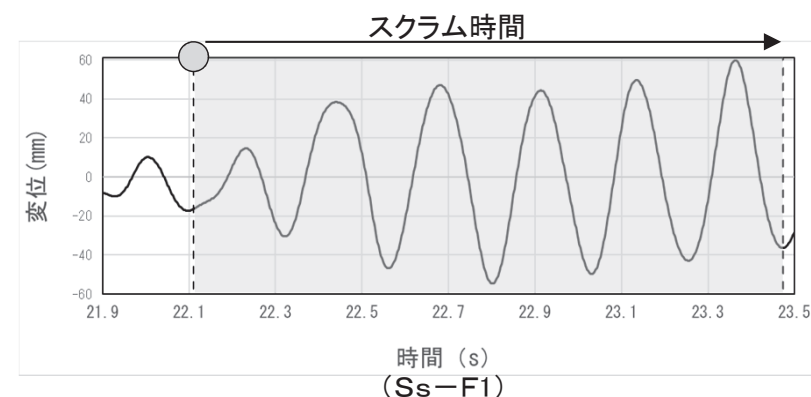
入力波*1	地震波
	S _s -D1: 49.8mm
	S _s -D2: 54.2mm
	S _s -D3: 37.9mm
	S _s -F1: 33.4mm
	S _s -F2: 41.2mm
	S _s -F3: 39.4mm
S _s -N1: 35.4mm	
燃料集合体相対変位	60mm
温度	試験温度(常温)
圧力	大気圧

- *1: 制御棒挿入時間を同じ条件で比較するため、燃料集合体相対変位が60mmとなるように各基準地震動に対する応答を係数倍したもの
 *2: 各基準地震動での地震応答解析から算出される燃料集合体相対変位の最大値

制御棒挿入性解析結果

入力波	制御棒挿入時間(s)	挿入時間比率*
S _s -D1	1.335	0.99
S _s -D2	1.348	—
S _s -D3	1.331	0.99
S _s -F1	1.362	1.01
S _s -F2	1.324	0.98
S _s -F3	1.293	0.96
S _s -N1	1.309	0.97
(参考) 75%ストロークスクラム規定値	1.62	—

- *: 挿入時間比率 = 各入力波での制御棒挿入時間 / S_s-D2での制御棒挿入時間



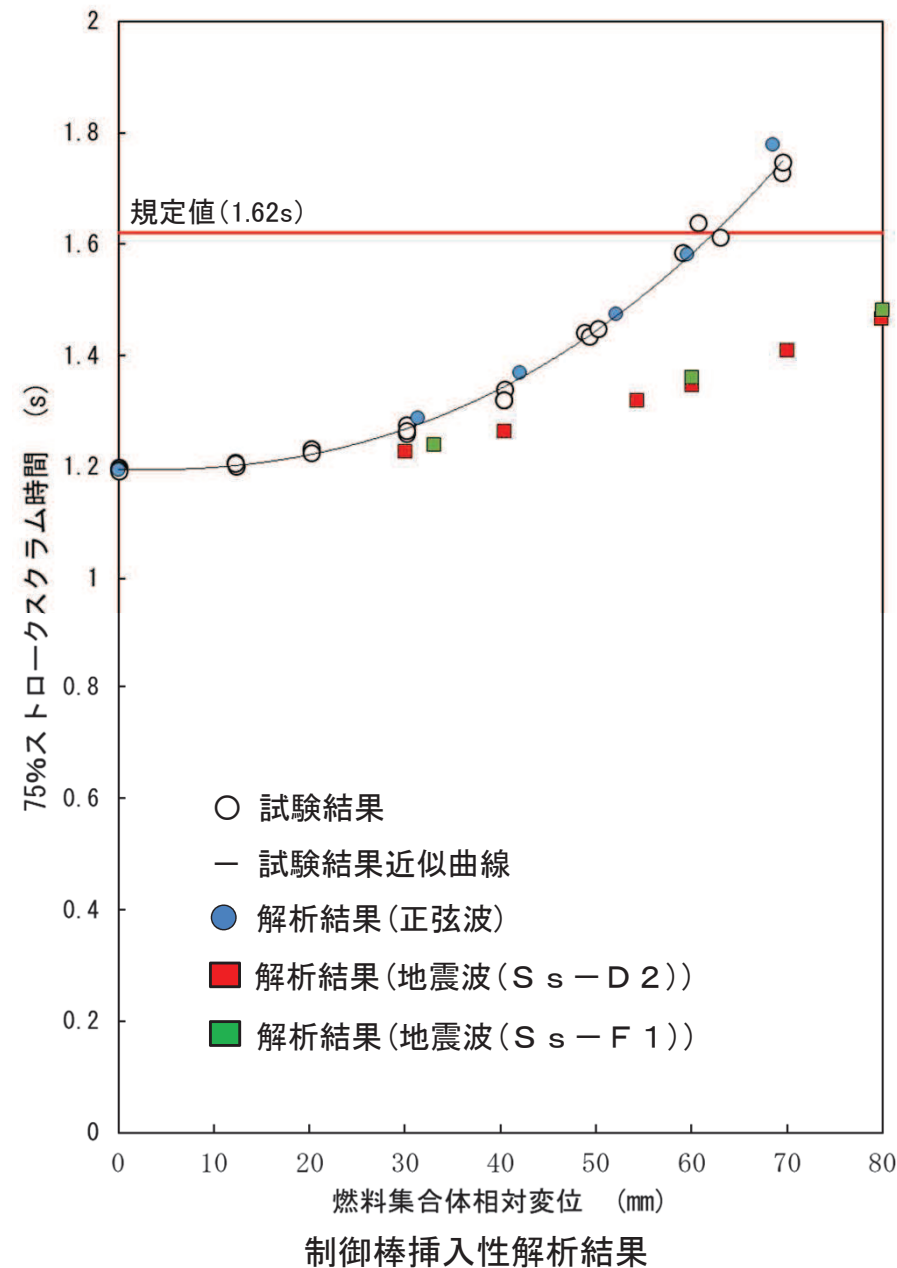
1. 指摘事項①に対する回答

【S_s-D2以外の基準地震動に対する制御棒挿入性試験の保守性（2/2）】

- 燃料集合体相対変位60mmにおける制御棒挿入時間が最も遅くなるS_s-F1について、その他の燃料集合体相対変位（33mm及び80mm）における制御棒挿入性解析を実施し、制御棒挿入性試験結果との比較を実施した。
- その結果、S_s-F1による制御棒挿入性解析での制御棒挿入時間(■)は、正弦波による制御棒挿入性試験での制御棒挿入時間(●)よりも早くなった。(燃料集合体相対変位60mmにおける制御棒挿入性解析の結果(前頁)より、他の基準地震動についても同様)
- 以上の結果より、S_s-D2に加え、S_s-D2以外の基準地震動に対しても、制御棒挿入性試験は保守性を有していることを確認した。

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	基準地震動 S _s -D2 S _s -F1
温度	試験温度 (常温)	同左
圧力	大気圧	同左



2. 指摘事項②に対する回答

【制御棒挿入性解析における実機条件の影響(1/2)】

- 制御棒挿入性解析で適用しているパラメータについて、試験条件と実機条件との比較を行った。
- パラメータの比較の結果、温度の違いやモデル化の違いを要因として、以下に示すパラメータに差異があることを確認した。

【差異要因】

○温度の違い ……試験条件では「常温(20℃)」となり、実機条件では「高温(炉内運転温度:286℃)」となる。

○モデル化の違い ……試験条件では燃料集合体4体を考慮し、実機条件では燃料集合体560体を考慮して付加質量を算出する(詳細は別紙2)。

また、試験条件では試験で確認した減衰定数とし、実機条件では設計用減衰定数とする。

試験条件と実機条件で差異のあるパラメータ一覧*1

記号	名称	試験条件	実機条件	差異理由	差異要因	
					温度	モデル化
M_d	制御棒の排除質量			水の密度の違い	○	
F_r	流体抗力係数	1050 N/(m/s) ²	772 N/(m/s) ²	水の密度の違い	○	
F_{fr}	ドライブピストン摩擦力	500 N	600 N	温度の違い*2	○	
R_0	制御棒と燃料集合体の接触の摩擦係数	0.182	0.218	温度の違い*2	○	
ρ_w	水の密度	1000 kg/m ³	735.0 kg/m ³	温度の違い	○	
m_f	燃料集合体質量(4体分)			板厚の違い	○	
m_0	燃料集合体の付加質量(4体分)			水の密度及びモデル化の違い	○	○
m_d	燃料集合体の排除質量(4体分)			水の密度及び板厚の違い	○	
C_0	燃料集合体の減衰係数		7 %	モデル化の違い		○
t	燃料集合体板厚		100 mil	温度の違いによる剛性を調整するための違い	○	
E_{CR}	制御棒の縦弾性係数	195000 MPa	176560 MPa	温度の違い	○	
E_{CB}	燃料集合体の縦弾性係数	98000 MPa	78300 MPa	温度の違い	○	
I	断面二次モーメント			板厚の違い	○	
f	燃料集合体固有振動数		4.35 Hz	温度の違い及びモデル化の違い	○	○

*1: 差異のないパラメータを含めた比較結果は別紙1に示す。

*2: 既往知見(文献名は参考6に記載)の検討において、既往の文献から常温と高温で摩擦係数に1.2倍の差があるとして実機条件(高温)では摩擦係数を試験条件の1.2倍していることを踏まえて本検討においても実機条件は試験条件の1.2倍と設定した

2. 指摘事項②に対する回答

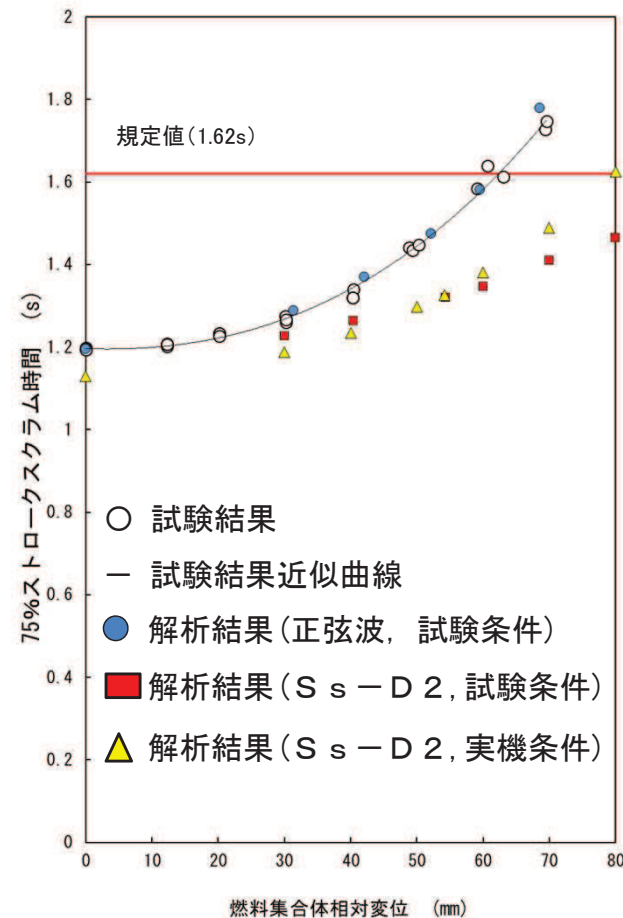
【制御棒挿入性解析における実機条件の影響(2/2)】

- パラメータの差異が制御棒挿入性に及ぼす影響を確認するため、実機条件でのパラメータを用いた制御棒挿入性解析を実施し、試験条件での制御棒挿入性解析結果と比較した。
- 適用する地震動は、今回工認において燃料集合体相対変位が最大となった基準地震動 S_s-D2 とした。
- その結果、**実機条件でのパラメータを用いた制御棒挿入性解析での制御棒挿入時間(▲)は、燃料集合体相対変位が大きな領域(約55mm以上)で、試験条件でのパラメータを用いた制御棒挿入性解析での制御棒挿入時間(■)より遅くなることから、実機高温状態を考慮することで制御棒挿入時間に影響があることを確認した*1。**
- **ただし、実機条件でのパラメータを用いた制御棒挿入性解析での制御棒挿入時間(▲)は、正弦波による制御棒挿入性試験での制御棒挿入時間(●)よりも早く、実機条件に対しても制御棒挿入性試験は保守性を有していることを確認した。**

制御棒挿入性解析条件

解析条件	正弦波入力	地震波入力	
	試験条件	試験条件	実機条件
入力波	正弦波	基準地震動 S_s-D2	
温度	試験温度 (常温)	試験温度 (常温)	実機温度 (高温)
圧力*2	大気圧	同左	

*2: 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。



*1 実機条件では高温を模擬したことで水の密度が低下し、水の抵抗も低下したため、ゼロスクラム時間が0.1秒程度早くなっている。この効果により燃料集合体相対変位が約55mm以下の範囲では試験条件よりも実機条件の挿入時間が早くなっている。

一方、高温模擬のために摩擦係数を増加させた影響で、相対変位の増加とともに挿入抵抗が増し、燃料集合体相対変位が約55mmを超える範囲で試験条件よりも実機条件の挿入時間が遅くなったものと考えられる。

別紙1 試験条件と実機条件におけるパラメータ比較

➤ 試験条件と実機条件におけるパラメータの比較結果は下表のとおり。

記号	名称	試験条件	実機条件
g	重力加速度	9.80665 m/s ²	同左
M	制御棒質量		同左
M _d	制御棒の排除質量		
F _r	流体抗力係数	1050 N/(m/s) ²	772 N/(m/s) ²
F _{fr}	ドライブピストン摩擦力	500 N	600 N
A _u	ドライブピストン下面面積		同左
A ₀	ドライブピストン上面面積		同左
P _R	炉圧*	0.1 MPa	同左
R ₀	制御棒と燃料集合体の接触の摩擦係数	0.182	0.218
P _{A0}	HCU・アキュムレータ初期圧力*		同左
V _{N2}	HCU・N ₂ 初期容積		同左
C _u	挿入配管の圧損係数		同左
C ₀	引抜配管の圧損係数		同左
ρ _w	水の密度	1000kg/m ³	735.0 kg/m ³
A _{pu}	挿入配管断面積		同左
L _{pu}	挿入配管長		同左

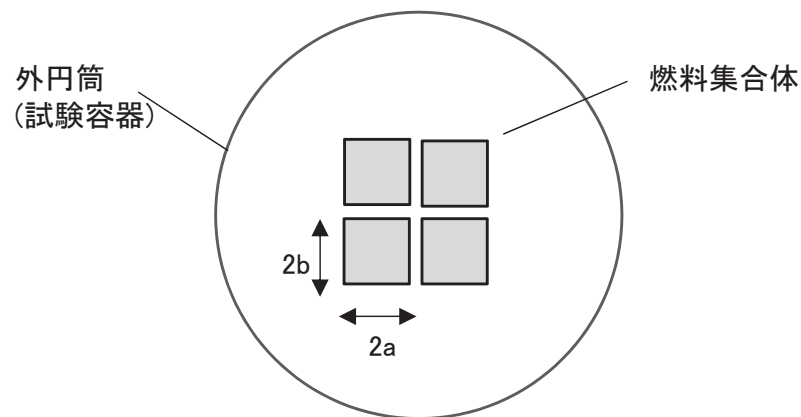
記号	名称	試験条件	実機条件
P _{dump}	ダンブタンク圧力*	0.1 MPa	同左
m _f	燃料集合体質量(4体分)		
m ₀	燃料集合体の付加質量(4体分)		
m _d	燃料集合体の排除質量(4体分)		
C ₀	燃料集合体の減衰係数		7 %
C _x	燃料集合体の制御棒挿入量xでの減衰係数増分		同左
β	両端支持はりの1次モード(弓形)中央変位の励振係数	4/π	同左
ij	支持点での外力加速度	炉心支持板部の時刻歴応答加速度	同左
t	燃料集合体板厚		100 mil
E _{CR}	制御棒の縦弾性係数	195000 MPa	176560 MPa
E _{CB}	燃料集合体の縦弾性係数	98000 MPa	78300 MPa
I	断面二次モーメント		
f	燃料集合体固有振動数		4.35 Hz

* : 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ことから、試験条件及び実機条件でも数値に変更はない。

別紙2 試験条件と実機条件における燃料集合体の付加質量の考え方の違い

- 試験条件と実機条件における燃料集合体の付加質量の設定方法は以下のとおり。

●試験条件での付加質量の考え方



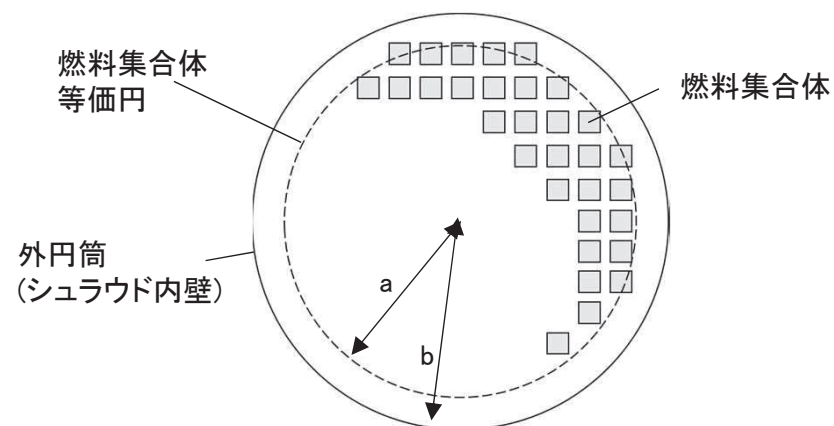
試験条件における燃料集合体のイメージ図

試験条件では、試験体の燃料集合体と外円筒(試験容器)との直径比は大きく外円筒の影響を無視できるとし、機械工学便覧記載の一般式から付加質量を算出する。

(付加質量算出式)

$$\pi K_1 \rho a^2 \quad K_1: b/a \text{より定まる係数} \quad \rho: \text{水の密度}$$

●実機条件での付加質量の考え方



実機条件における燃料集合体のイメージ図

実機条件では、燃料集合体と外円筒(シュラウド内壁)との直径比は1に近く、外円筒の影響を無視できないため、原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601-1987)記載の二重円筒の式から付加質量を算出する。

下記算出式から、燃料集合体560体の等価半径aと炉心シュラウドの半径bの二重円筒での付加質量を求め、この値を4/560倍することで、燃料集合体4体の付加質量を算出する。

(付加質量算出式)

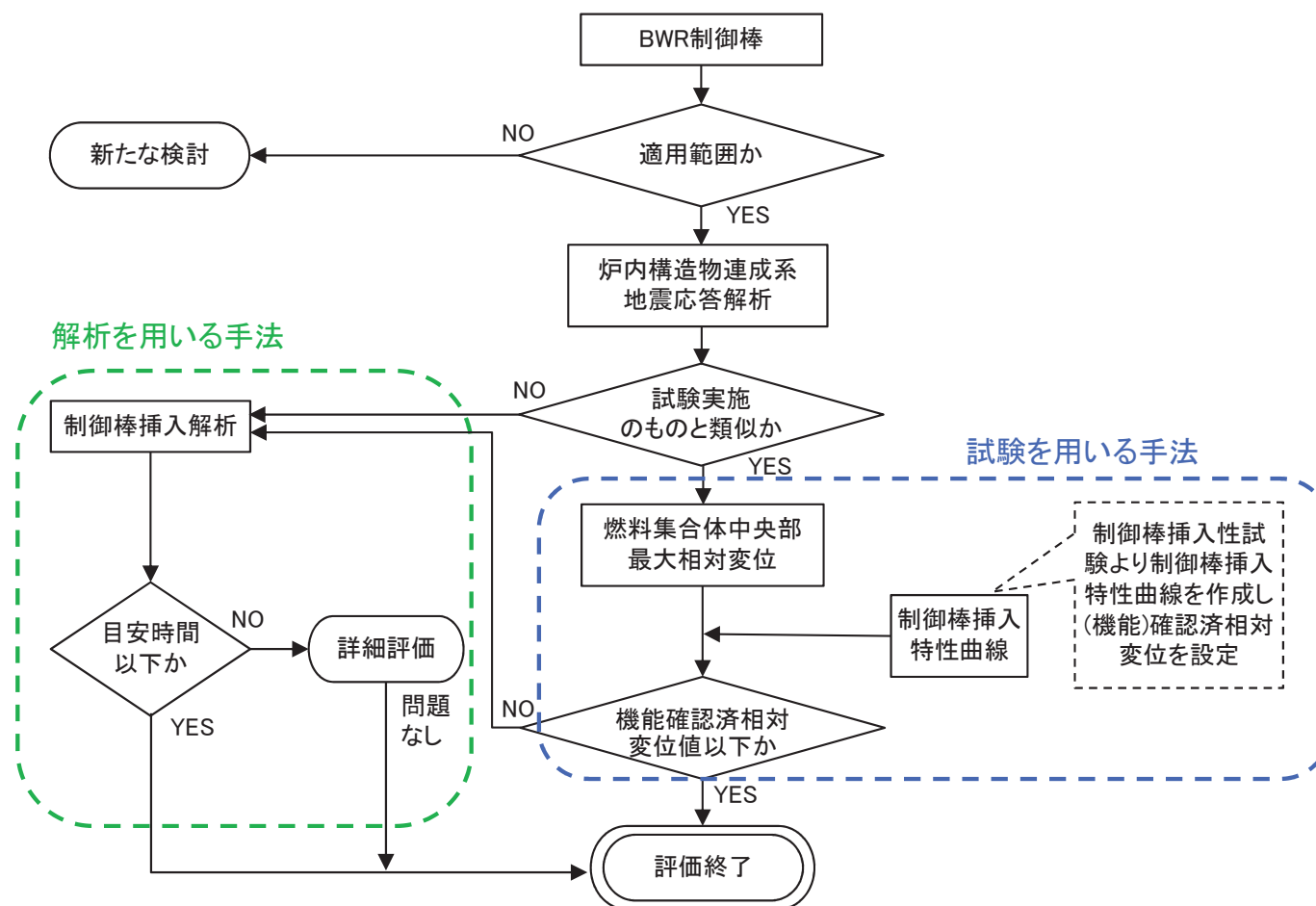
$$\pi \rho a^2 \left(\frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right) \quad \rho: \text{流体の密度}$$

※ 実機条件での考え方は原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601-1987)に示されている燃料集合体に対する付加質量の考慮方法と同じである

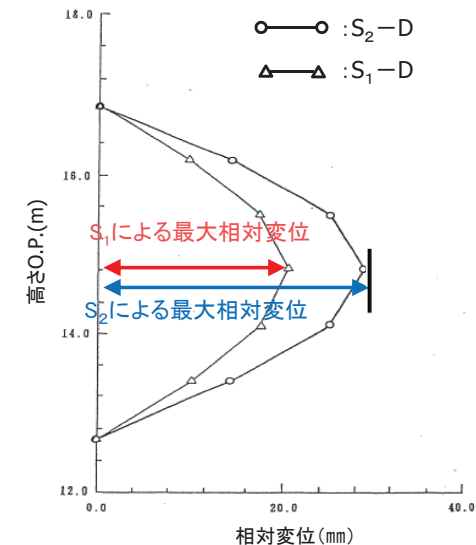
【参考1】 女川2号機における制御棒挿入性評価方法

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

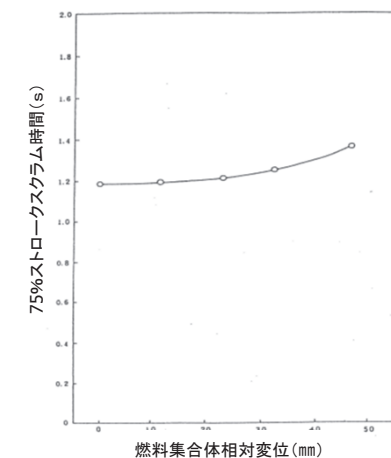
- 制御棒挿入性評価は、地震時に原子炉を確実に停止するために制御棒が炉心に挿入されることを確認するもので、JEAG4601に記載の評価方法には、“試験を用いる手法”と“解析を用いる手法”が示されている。なお、制御棒挿入性評価は、制御棒挿入時間(75%ストロークスクラムに要する時間)が規定値(1.62s)以内であることを確認するものである。
- 女川2号機の制御棒挿入性評価は、既工認より試験を用いる手法を採用している。



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)

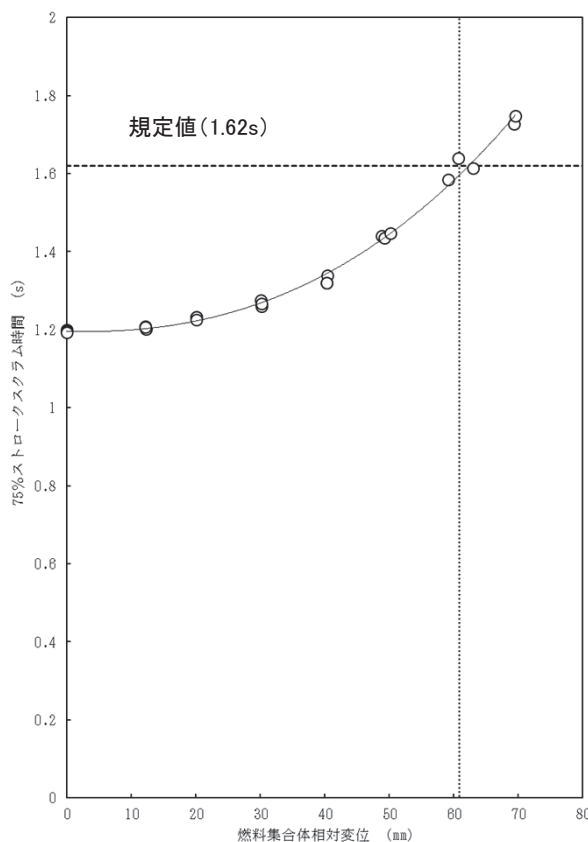


制御棒挿入特性曲線
(女川2号機既工認より抜粋)

【参考2】 制御棒挿入性解析の概要(1/3)

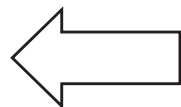
第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

- 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。

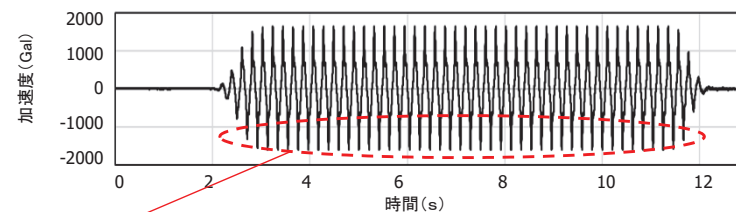


制御棒挿入性試験結果

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

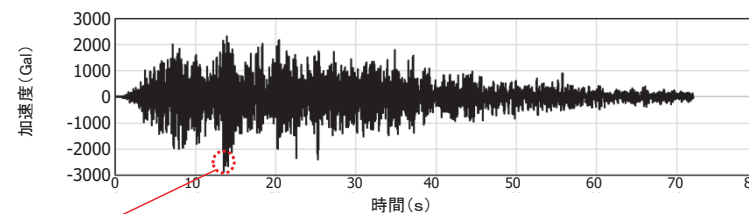
正弦波のイメージ

(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

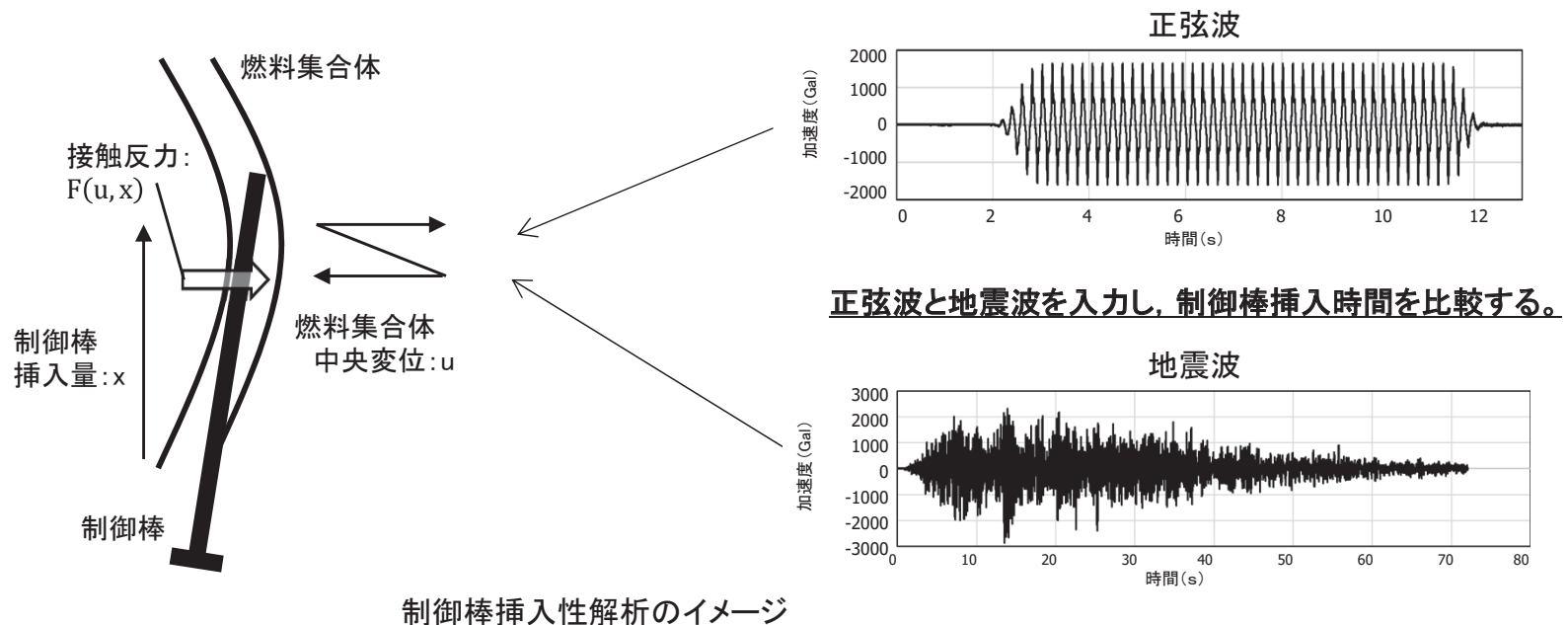
地震波のイメージ

(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)

【参考2】 制御棒挿入性解析の概要(2/3)

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

- 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)



【参考2】 制御棒挿入性解析の概要(3/3)

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

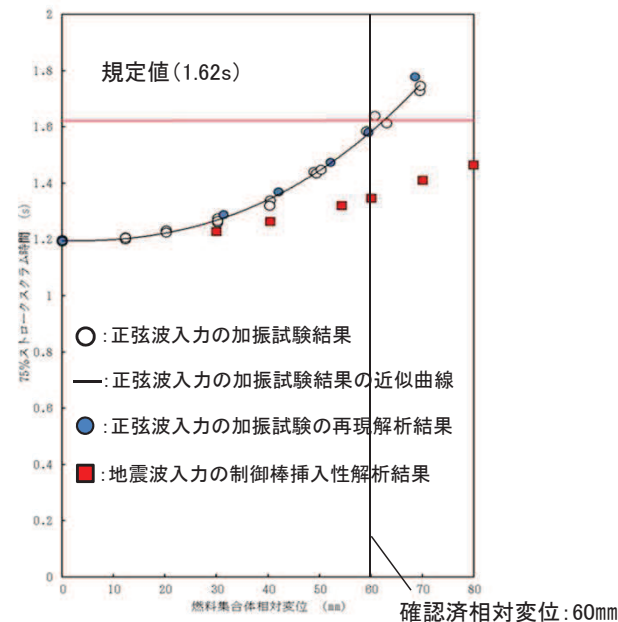
- 以下に示す2通りの条件によって制御棒挿入性解析を実施した。
 - 制御棒挿入性試験に使用した正弦波
 - 今回工認において燃料集合体相対変位が最大(54.2mm)となった基準地震動S_s-D2
- 解析の結果, 正弦波入力の場合が地震波入力の場合に比べ保守的であり, 地震波入力では燃料集合体相対変位が約80mmの範囲まで, 規定値(1.62s)に余裕をもって制御棒が挿入されることを確認した。なお, 既往知見*においても地震波入力とした制御棒挿入性に係る検討がされており, 今回工認と同様, 地震波入力とした場合には, 制御棒挿入性試験及び制御棒挿入性解析ともに燃料集合体相対変位が約80mmを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



＜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

【参考3】 制御棒挿入性試験の概要

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

- 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

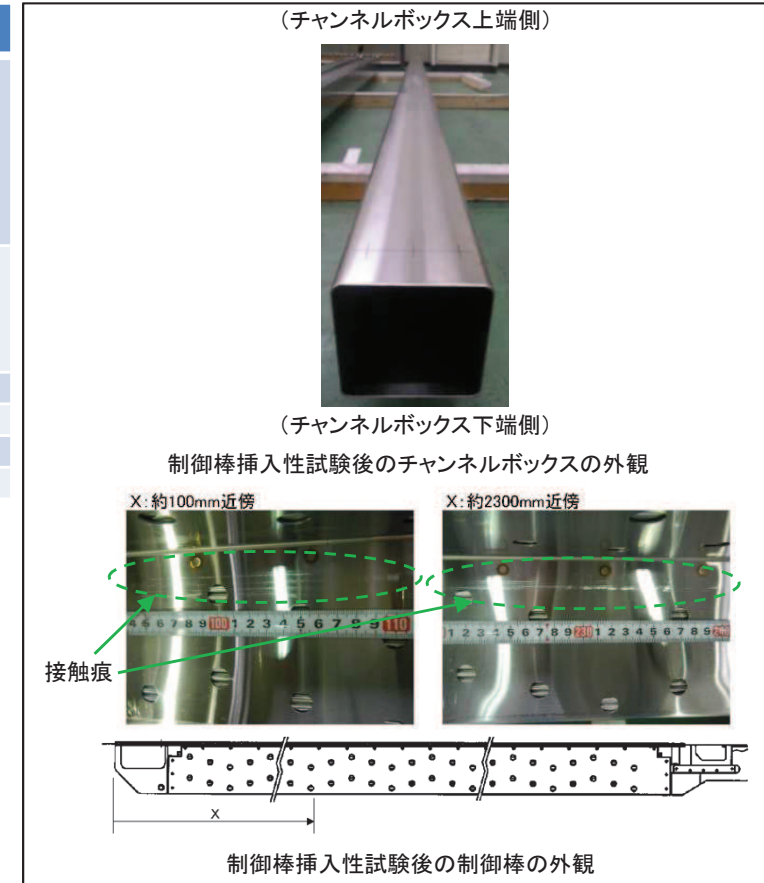
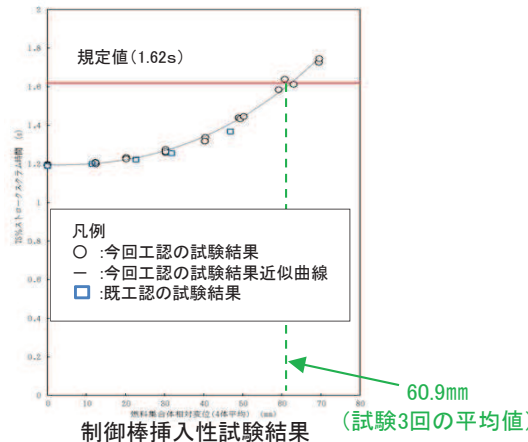
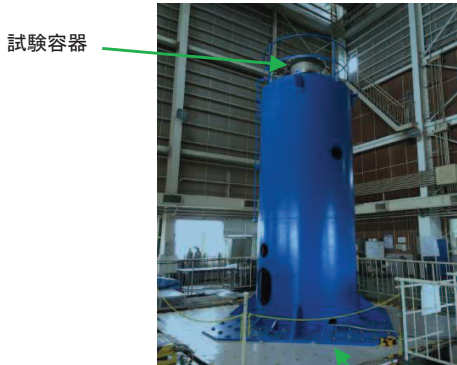
条件項目	既工認	今回工認
機器・装置構成	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬燃料集合体(8×8燃料,チャンネルボックス含む) ・制御棒 ・燃料支持金具 ・制御棒案内管 ・制御棒駆動機構 ・水圧制御ユニット 	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬燃料集合体(9×9燃料*1,チャンネルボックス含む) ・同左 ・同左 ・同左 ・同左 ・同左
試験方法	<ul style="list-style-type: none"> ・加振状態で75%ストロークスクラムに要する時間を計測 ・正弦波により加振 ・各相対変位(0~40mm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*2
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



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4】 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)

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

- 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4】 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)

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

- 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。

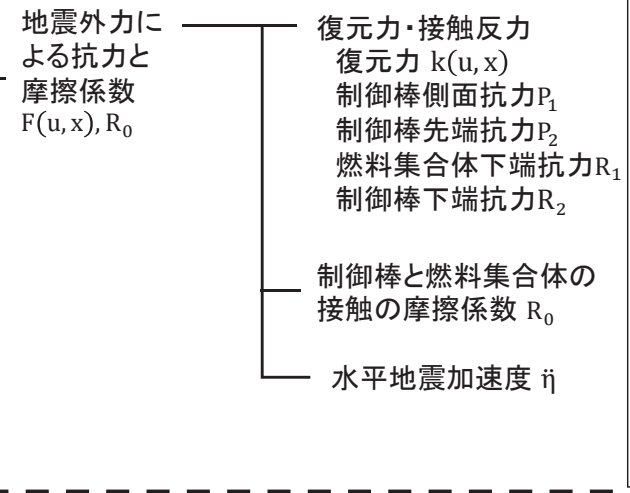
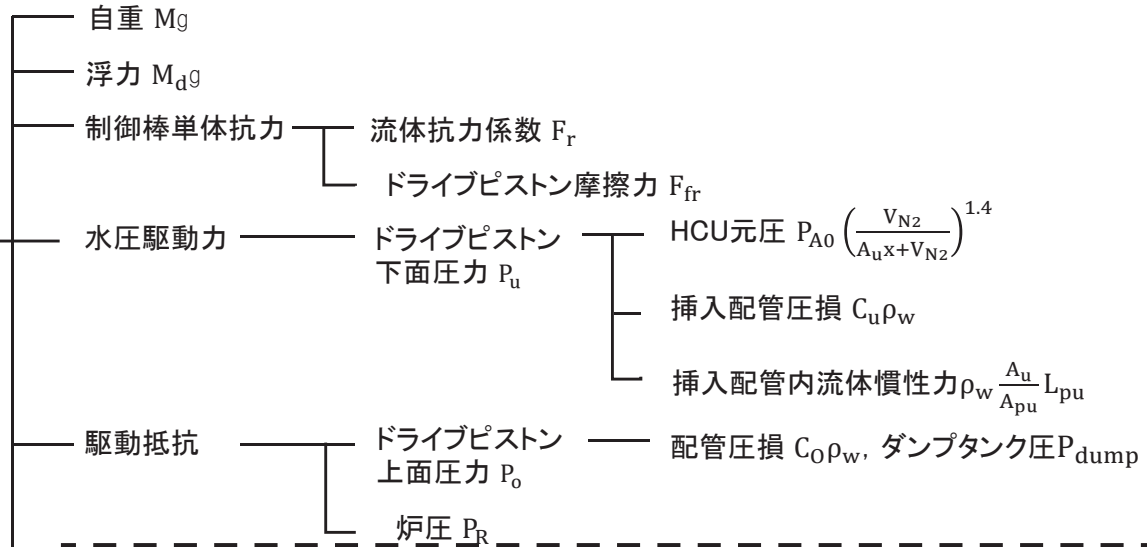
制御棒挿入運動方程式 制御棒挿入量 x

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

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

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

制御棒挿入時間 t



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 , 燃料集合体の付加質量 m_o , 燃料集合体の制御棒挿入量 x での制御棒による質量増分 m_x , 燃料集合体の減衰係数 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

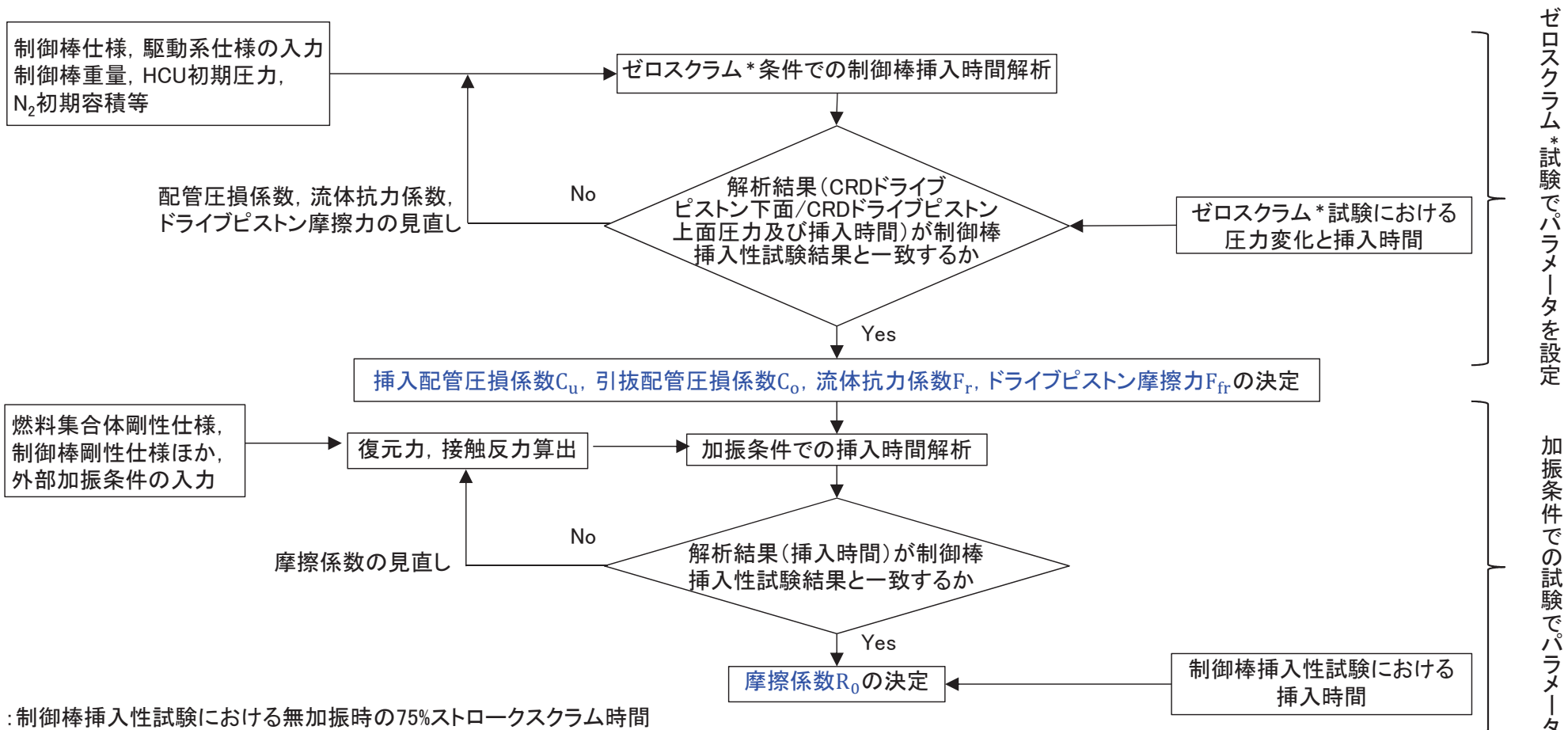
制御棒と燃料集合体の接触による力

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4】 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)

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

- 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

【参考4】 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)

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

- 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_0 、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_0		—	同上	
流体抗力 係数	F_r	1050	$N/(m/s)^2$	同上	流体抗力の理論式から算出される $1000N/(m/s)^2$ 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

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4】 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)

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

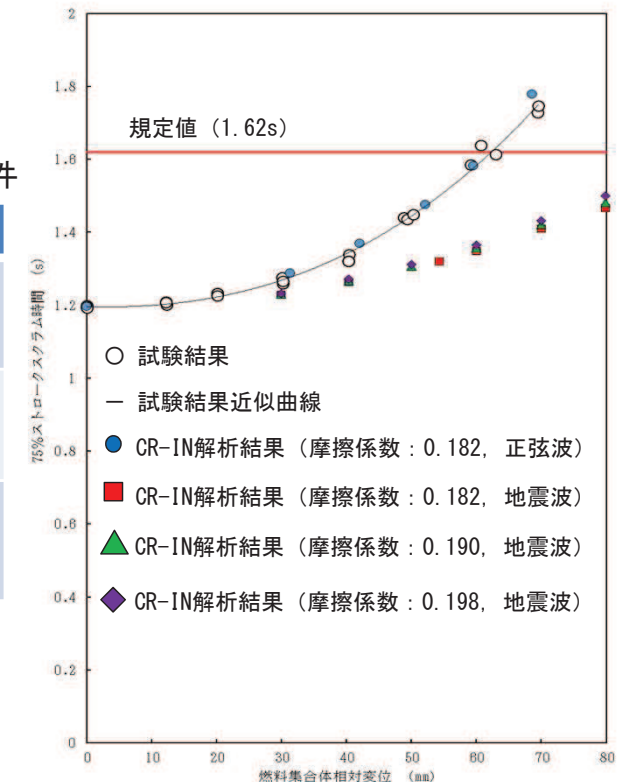
- 今回工認における摩擦係数 R_0 は、各目標変位(30mm~70mm)における摩擦係数平均値のうち、最大値となる目標変位60mmにおける値0.182を設定している。
- 摩擦力は制御棒挿入時の抵抗力として働くため、摩擦係数が高いほど制御棒挿入時間は遅くなる。そこで、制御棒挿入時間に対する摩擦係数の影響を確認するため、各試験結果から得られる摩擦係数の最大値0.190及びばらつきを考慮するため試験結果から得られる摩擦係数の平均値(0.166)に $+2\sigma$ を考慮した摩擦係数0.198を用いて制御棒挿入時間を確認した。
- 燃料集合体相対変位が大きくなるにつれて制御棒挿入時間が遅くな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(σ)		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

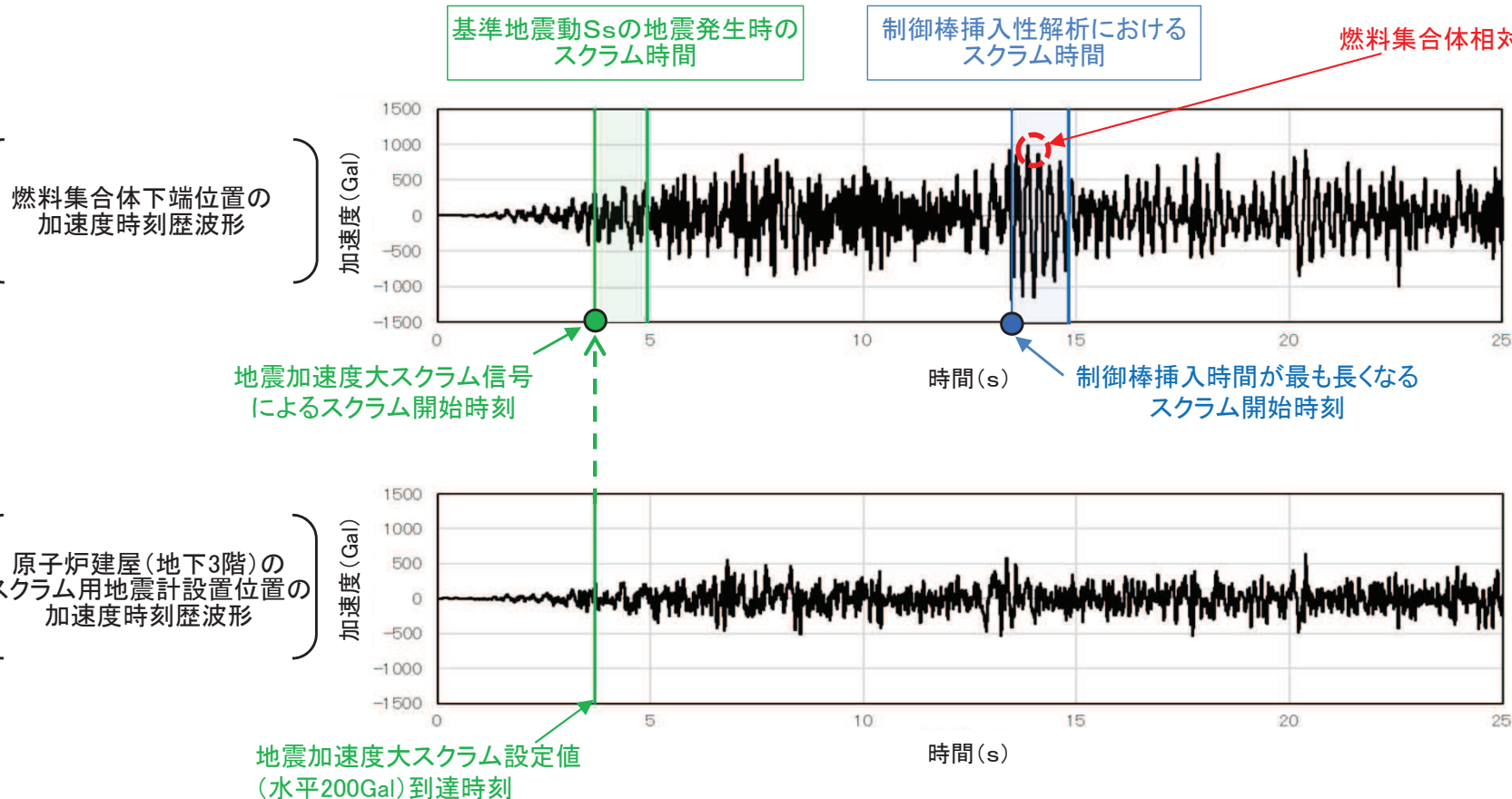


* : 試験結果とCR-INでの挿入性解析結果が整合するよう調整した結果から得られる摩擦係数

【参考5】 制御棒挿入性解析に係るスクラム開始時刻の設定

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

- 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_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6】 制御棒挿入性評価に係る既往知見における検討内容

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋

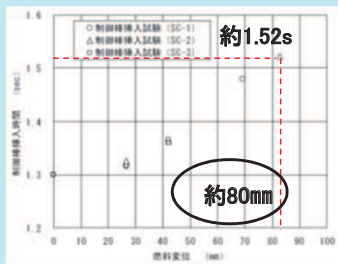
- 既往知見*では、地震波入力における制御棒挿入性試験及び制御棒挿入性解析を実施し、制御棒挿入性試験では燃料集合体相対変位約80mm(図A)、制御棒挿入性解析では燃料集合体相対変位約100mm(図C)において制御棒挿入時間が規定値(1.62s)を満足することが確認されている。
- 今回工認で実施した制御棒挿入性解析においても、地震波入力では燃料集合体相対変位が約80mmの範囲まで、規定値(1.62s)を満足しており、同様の結果となる。(8頁参照)
- なお、既往知見の結果を女川2号機の制御棒挿入性評価に適用する場合には、既往知見で用いた地震波が女川2号機の地震波(基準地震動S_s)とは異なるものである等、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_s7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

制御棒挿入性試験(実機試験)

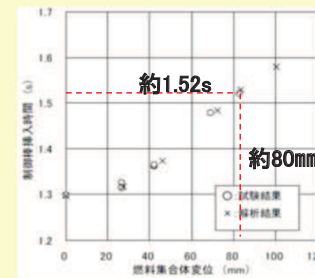
【試験条件】
 機器・装置構成:実機仕様
 温度:常温
 圧力:大気圧
 CB板厚:100mil
 加振波:地震波
【結果】
 燃料集合体変位
 約80mmに対して
 制御棒挿入時間は
 1.62s以内



(図A)

制御棒挿入性解析(常温状態)

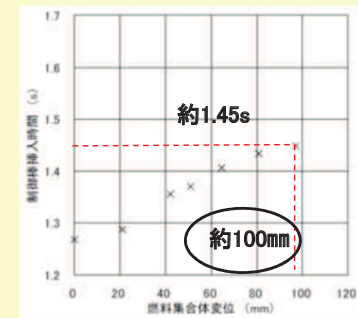
【解析条件】
 温度:常温
 圧力:大気圧
 CB板厚:100mil
 加振波:地震波
 材料特性
 :CB弾塑性特性
 (高温)を考慮
【結果】
 解析結果は実機
 制御棒挿入性
 試験と一致



(図B)

制御棒挿入性解析(実機プラント条件)

【解析条件】
 温度:実機運転温度
 圧力:実機運転圧力
 CB板厚:100mil
 加振波:地震波
 材料特性
 :CB弾塑性特性
 (高温)を考慮
【結果】
 燃料集合体変位
 約100mmに対して
 制御棒挿入時間は
 1.62s以内



(図C)

解析手法
の検証

実機プラント条
件への拡張

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