

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1 |
| 提出年月日 | 2021年 8月27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27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。

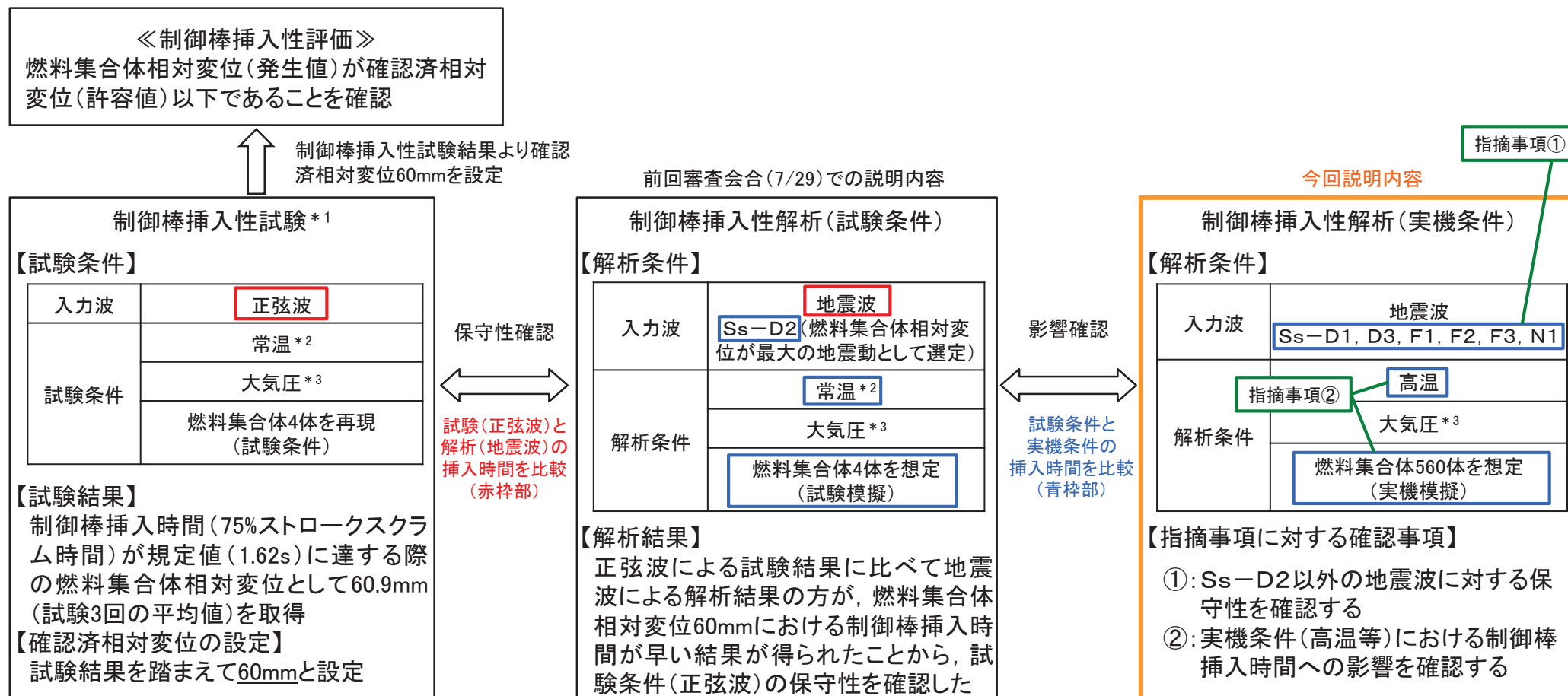
| 実施日 | 指摘事項 |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2021年7月29日 第993回審査会合 | <p>①制御棒挿入性解析における地震波の入力条件として、燃料集合体相対変位が最大となった基準地震動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。</p> <p>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。</p> |



| 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)を用いて制御棒挿入性解析を実施し、確認済相対変位60mmにおける制御棒挿入時間(75%ストロークスクラム時間)を比較した。 比較の結果、正弦波を用いた制御棒挿入性試験による制御棒挿入時間に比べて、基準地震動を用いた制御棒挿入性解析による制御棒挿入時間の方が早かったことから、基準地震動S_s-D2以外も含めた基準地震動7波全てに対して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。 | P3~5 別紙1, 2 |
| 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試験を模擬した条件(常温)を適用していたことから、実機での条件(高温)が制御棒挿入時間に及ぼす影響を確認するため、試験条件と実機条件とでパラメータを整理した。 実機条件による制御棒挿入性解析を実施した結果、確認済相対変位60mmにおける制御棒挿入時間は試験条件と実機条件で同等であり、正弦波を用いた制御棒挿入性試験による制御棒挿入時間に比べて十分に早いことから、実機条件による制御棒挿入性解析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。 | P6~8, 別紙3, 4 |

1. 女川第2号機の今回工認における制御棒挿入性評価の流れ

- 女川2号機の制御棒挿入性評価においては、JEAG4601-1991追補版に記載の評価方法(参考1)に基づき評価を行っているが、今回工認においては基準地震動 S_s が増大して燃料集合体相対変位が大きくなったことから、既工認と同様の制御棒挿入性試験を実施しデータの拡充を図っている。
- この制御棒挿入性試験結果を踏まえた制御棒挿入性評価の流れについて下図に示す。



*1: 試験概要は参考3に示す。 *2: 燃料集合体の曲げ剛性が高温時と同等になるようチャンネルボックス板厚を調整。

*3: 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. 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(1/3)】

【基準地震動S_s7波の燃料集合体相対変位に対する解析結果】

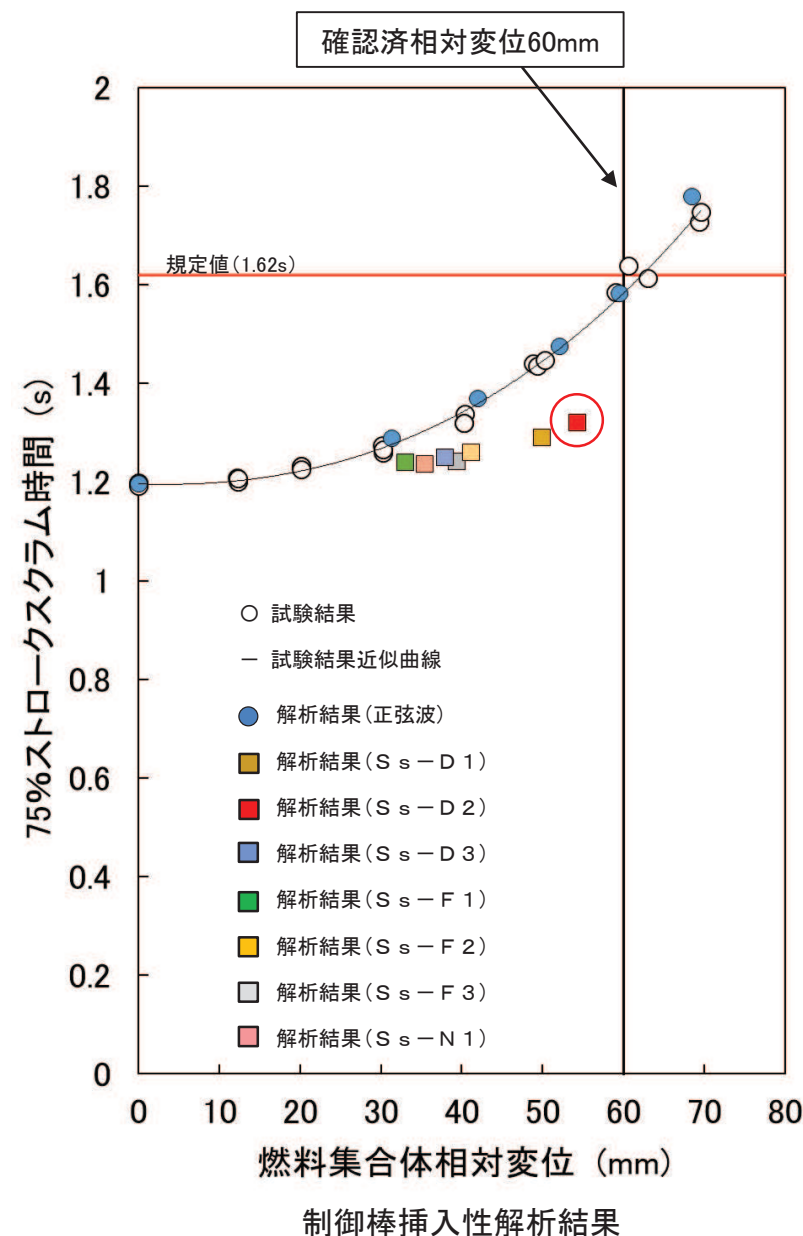
- 制御棒挿入性解析に用いる地震波は、基準地震動S_s7波のうち、燃料集合体相対変位が最大(54.2mm)となる基準地震動S_s-D2を選定している。
- 基準地震動7波の燃料集合体相対変位と制御棒挿入時間(75%ストロークスクラム時間)の関係より、確認済相対変位60mmに対して、最も余裕が小さい地震動はS_s-D2となっている。
- また、地震動の違いによらず、燃料集合体相対変位が大きくなるにつれて制御棒挿入時間は遅くなる傾向になっており、地震波の違いによる大きな傾向の差は確認されない。
- 以上の確認結果を踏まえて、**制御棒挿入性解析に用いる地震波はS_s-D2が適当と考えているが、地震動の違いによる制御棒挿入性への影響を確認するためS_s-D2以外の地震動についても制御棒挿入解析を実施する。**

制御棒挿入性解析結果

| 制御棒挿入性解析条件 | |
|------------|----------------------------------|
| 入力波 | 地震波 (基準地震動S _s 7波*) |
| 燃料集合体相対変位 | 各基準地震動に対する燃料集合体相対変位の最大値 |
| 温度 | 常温 |
| 圧力 | 大気圧 |

*: 入力した基準地震動S_s7波の加速度時刻歴を別紙1に示す。

| 入力波 | 各基準地震動での燃料集合体相対変位の最大値(mm) | 制御棒挿入時間(s) |
|---------------------|---------------------------|------------|
| S _s -D1 | 49.8 | 1.29 |
| S _s -D2 | 54.2 | 1.32 |
| S _s -D3 | 37.9 | 1.25 |
| S _s -F1 | 33.4 | 1.24 |
| S _s -F2 | 41.2 | 1.26 |
| S _s -F3 | 39.4 | 1.24 |
| S _s -N1 | 35.4 | 1.24 |
| (参考)75%ストロークスクラム規定値 | | 1.62 |



2. 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(2/3)】

【基準地震動S_s7波を用いた燃料集合体相対変位60mmに対する解析結果】

- 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、各基準地震動による燃料集合体相対変位が60mmになるように解析条件を設定(入力を係数倍)して制御棒挿入性解析を実施した。
- 制御棒挿入性解析の結果、制御棒挿入時間が最も遅くなるのはS_s-F1(1.36s)であるものの、S_s-D2(1.35s)の制御棒挿入時間とほぼ同等であることを確認した。
- S_s-F1の制御棒挿入時間が最も遅くなるのは、解析条件として設定した燃料集合体相対変位60mmが発生する時刻の近傍で大きな変位が連続していることから、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

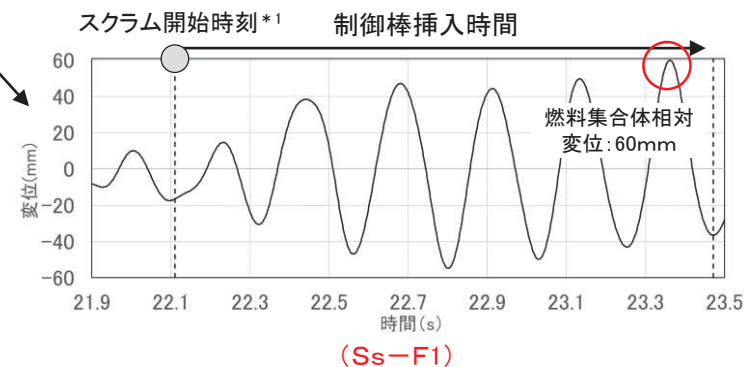
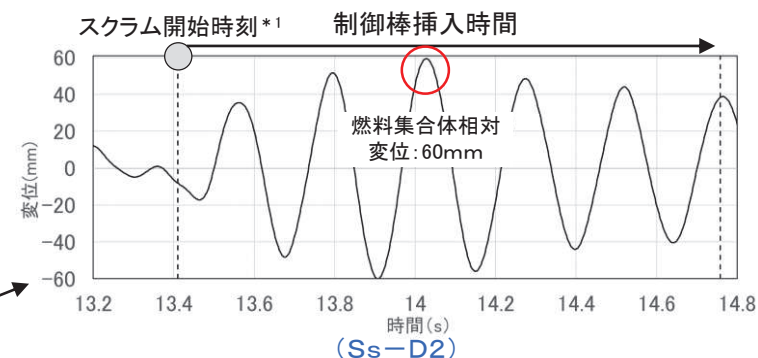
| 入力波* | 地震波 (基準地震動S _s 7波) |
|---------------|---------------------------------|
| 燃料集合体 相対変位 | 60mm |
| 温度 | 常温 |
| 圧力 | 大気圧 |

*: 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する。

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 | 1.34 | 0.99 |
| S _s -D2 | 1.35 | — |
| S _s -D3 | 1.33 | 0.99 |
| S _s -F1 | 1.36 | 1.01 |
| S _s -F2 | 1.32 | 0.98 |
| S _s -F3 | 1.29 | 0.96 |
| S _s -N1 | 1.31 | 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



スクラム開始後の燃料集合体相対変位*2

*1: 制御棒挿入時間が保守的に設定。参考5参照。

*2: S_s-D2及びS_s-F1以外の燃料集合体相対変位は別紙2参照。

2. 指摘事項①に対する回答

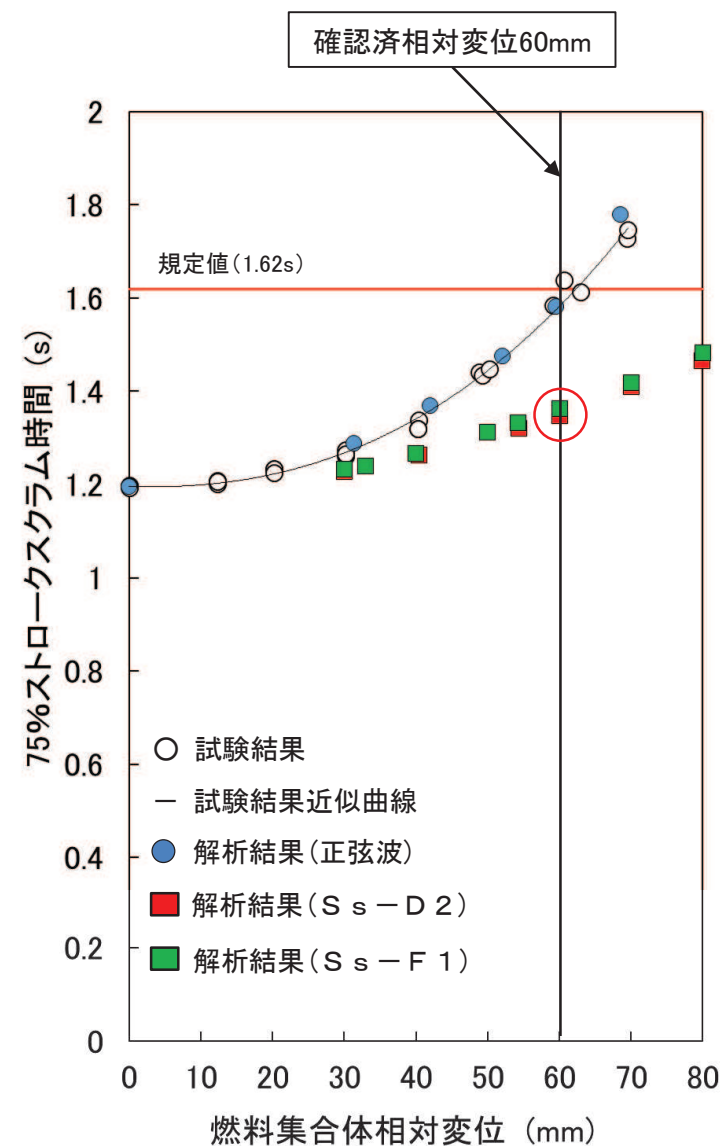
【 S_s-D2 以外の基準地震動に対する制御棒挿入性試験の保守性 (3/3)】

【 S_s-D2 及び S_s-F1 に対する解析結果】

- 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、60mm以外の燃料集合体相対変位に対す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。
- 確認済相対変位60mmにおける、 S_s-F1 による制御棒挿入時間(■)は、 S_s-D2 による制御棒挿入時間(■)と同様に、正弦波による制御棒挿入性試験における制御棒挿入時間(○)よりも早いことを確認した。この結果及び前頁の制御棒挿入性解析の結果から、他の基準地震動 S_s に対しても同様のことが言える。
- 以上より、基準地震動 S_s-D2 以外も含めた基準地震動 S_s7 波全てに対して、正弦波による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。
- なお、本検討結果より、 S_s-D2 と S_s-F1 は挿入時間がほぼ同等であったこと、3頁に示すとおり確認済相対変位60mmに対して最も余裕が小さい地震動が S_s-D2 であったことから、制御棒挿入性試験の保守性確認に S_s-D2 を代表として用いることは適当であると考えます。

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 | S_s-D2 S_s-F1 |
| 温度 | 常温 | 同左 |
| 圧力 | 大気圧 | 同左 |



制御棒挿入性解析結果

3. 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(1/3)】

- 今回工認における制御棒挿入性解析は制御棒挿入性試験の再現解析として実施したことから、制御棒挿入性試験時のパラメータ(試験条件)を適用している。
- 試験条件では温度を常温としているが、実機においては運転時に高温となる等、試験条件と実機条件において制御棒挿入性解析に用いる各種パラメータに差が生じる。
- そこで、制御棒挿入性解析に適用するパラメータについて、試験条件と実機条件での比較を行った結果、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整理した。

【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(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3)。
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 | | 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*3 | | 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4に示す。

*2: 金属同士の摩擦係数については温度上昇に伴い変化しないもしくは低下傾向であるとの既往知見^[1]を確認しているものの、制御棒挿入性評価に関連した既往知見(文献名は参考6)の検討において、高温での摩擦係数を保守的に1.2倍と設定していることを踏まえ、本検討においても実機条件では保守的に試験条件の1.2倍と設定する。

*3: 減衰定数のことを表す。

[1] Victor H. Mucino, et al. : Simulation of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Study of Friction Phenomena, Department of Mechanical and Aerospace Engineering Morgantown, West Virginia 2007

3. 指摘事項②に対する回答

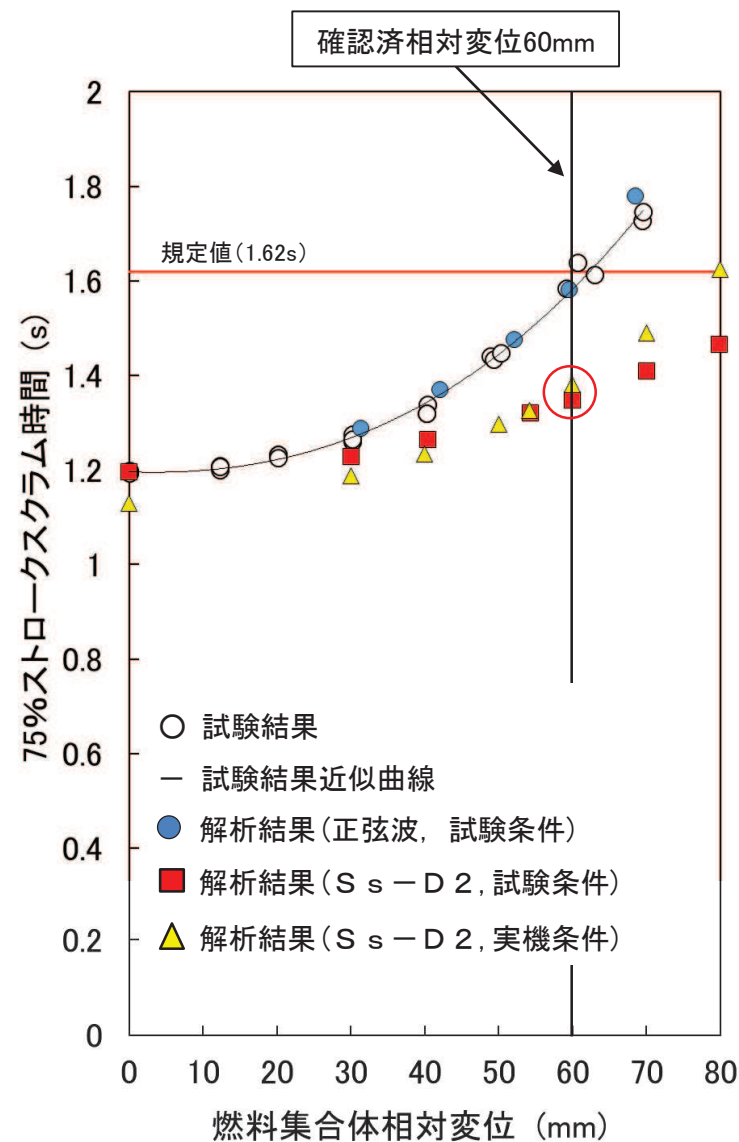
【制御棒挿入性解析における実機条件の影響(2/3)】

【実機条件の影響に係る解析結果】

- 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。
- 実機条件のパラメータを用いた制御棒挿入時間(▲)は、燃料集合体相対変位が60mmを超える大きな領域で、試験条件のパラメータを用いた制御棒挿入時間(■)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。
- 今回工認で制御棒挿入性評価に用いる確認済相対変位60mmにおける制御棒挿入時間は、実機条件と試験条件で同等であり、正弦波による制御棒挿入時間(○)に比べて十分に早いことから、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 | S_s-D2 | |
| 温度 | 常温 | 常温 | 高温 |
| 圧力 | 大気圧 | 同左 | |



制御棒挿入性解析結果

3. 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(3/3)】

【試験条件と実機条件の差異の要因】

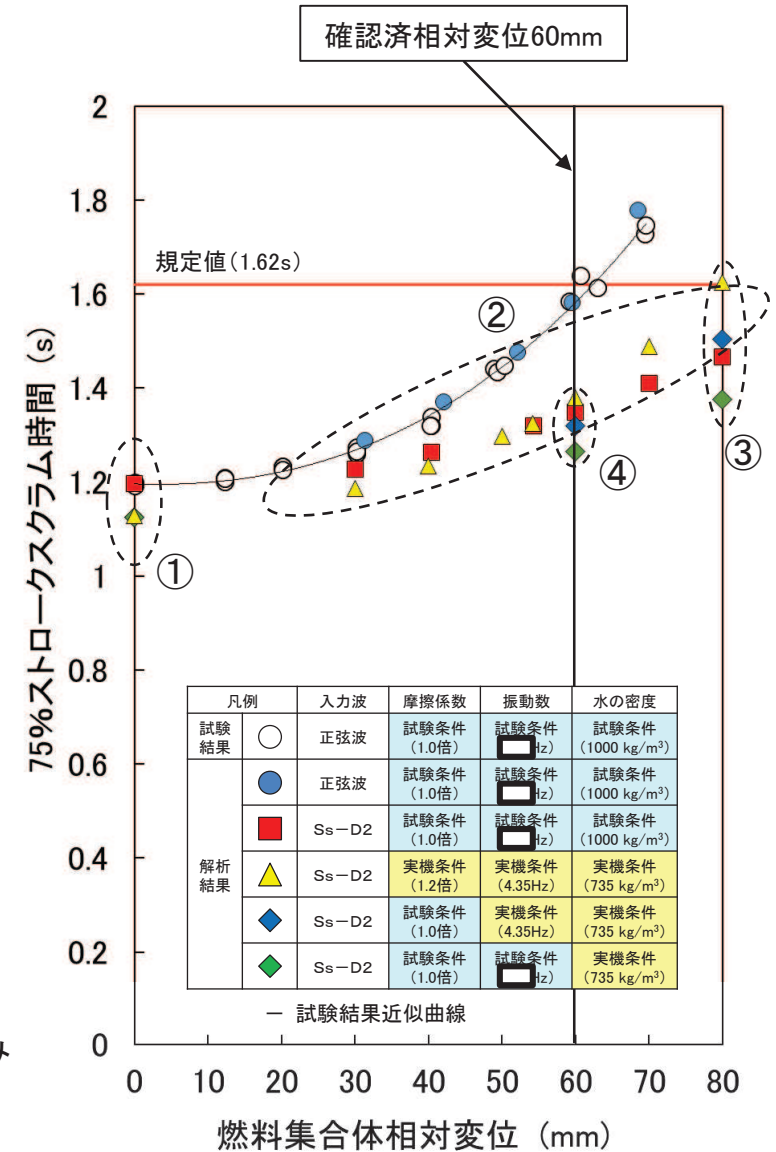
- ゼロスक्रम時間(無加振時の75%ストロークスクラム時間)は試験条件(■)より実機条件(▲)の方が制御棒挿入時間が早い(図①)。
 - ⇒ 制御棒及び燃料集合体は接触しないので水の密度の影響。
- 燃料集合体相対変位の増加に伴い、試験条件(■)より実機条件(▲)の方が制御棒挿入時間が遅くなる(図②)。
 - ⇒ 摩擦係数1.2倍*1及び燃料集合体固有振動数の違いの影響。

【差異の要因に対する影響度合い(図③*2)】

- 実機条件での場合(▲)と摩擦係数のみを試験条件に変更した場合(◆)を比較。
 - ⇒ 摩擦係数の違いにより制御棒挿入時間は短縮(▲⇒◆)。
- 摩擦係数のみを試験条件に変更した場合(◆)と摩擦係数及び燃料集合体固有振動数を試験条件に変更した場合(◇)を比較。
 - ⇒ 燃料集合体固有振動数の違いにより制御棒挿入時間は短縮(◆⇒◇)。
- 試験条件での場合(■)と摩擦係数及び燃料集合体固有振動数を試験条件に変更した場合(◇)を比較。
 - ⇒ 水の密度の違いにより制御棒挿入時間は短縮(■⇒◇)。

*1: 摩擦係数1.2倍は保守的な設定であることから、実機条件のうち摩擦係数のみを試験条件に変更し、確認済相対変位60mmにおける試験条件(■)と実機条件(◆)の制御棒挿入時間を比較すると、試験条件の方が保守であることを確認した(図④)。

*2: 実機条件と試験条件で差が大きい燃料集合体相対変位80mmで分析を実施。

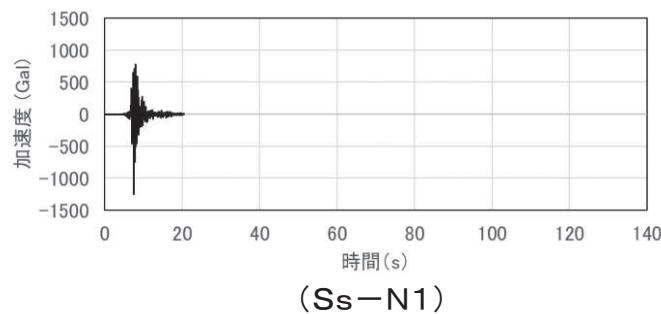
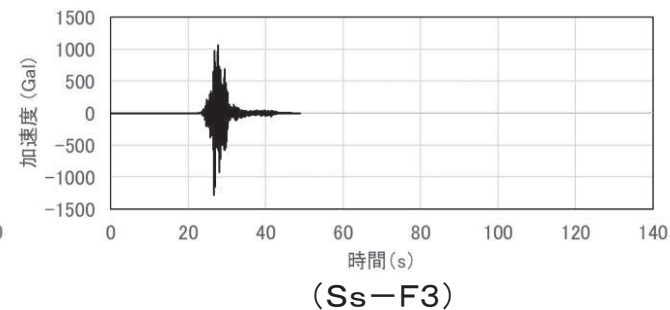
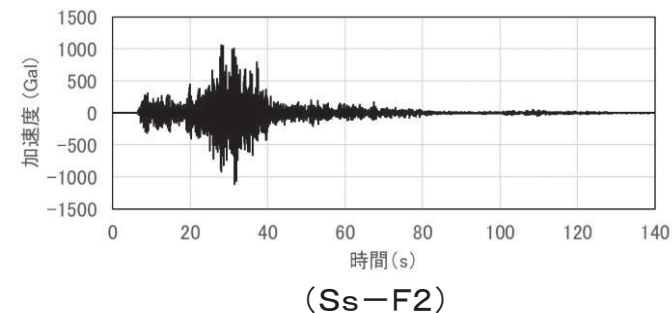
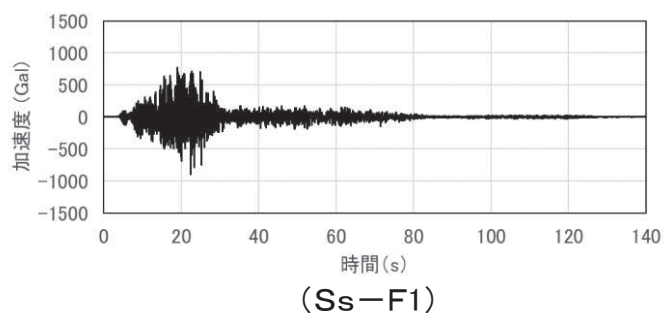
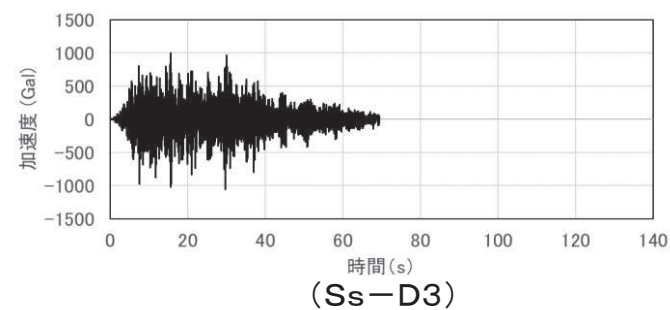
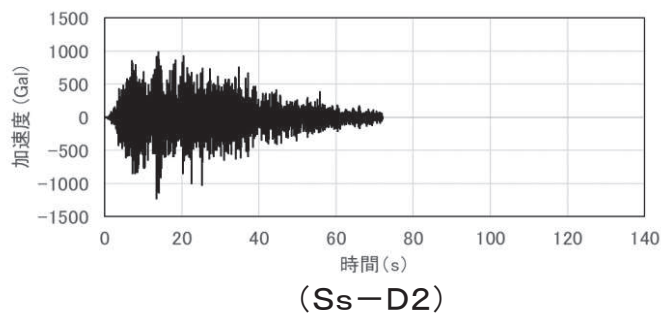
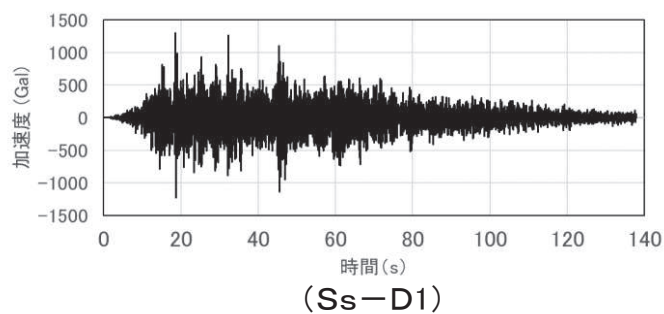


制御棒挿入性解析結果

別紙1 制御棒挿入性解析に用いる入力波

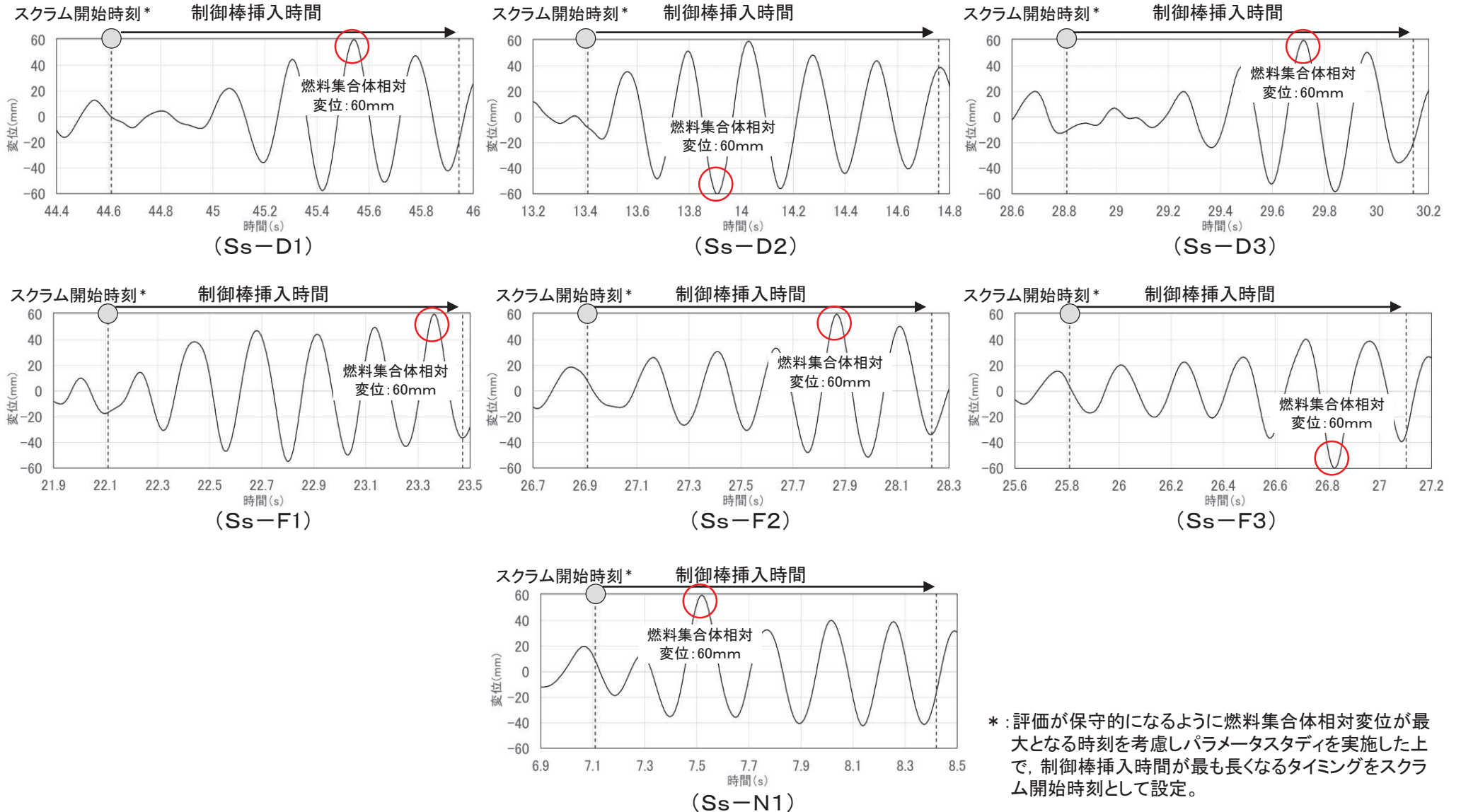
➤ 制御棒挿入性解析に用いる基準地震動Ss7波の加速度時刻歴*は以下のとおり。

* : 建屋—大型機器連成地震応答解析モデル(炉内構造物系)の燃料集合体下端位置における加速度時刻歴



別紙2 制御棒挿入性解析における燃料集合体変位時刻歴

➤ 制御棒挿入性解析における燃料集合体の変位時刻歴は以下のとおり。

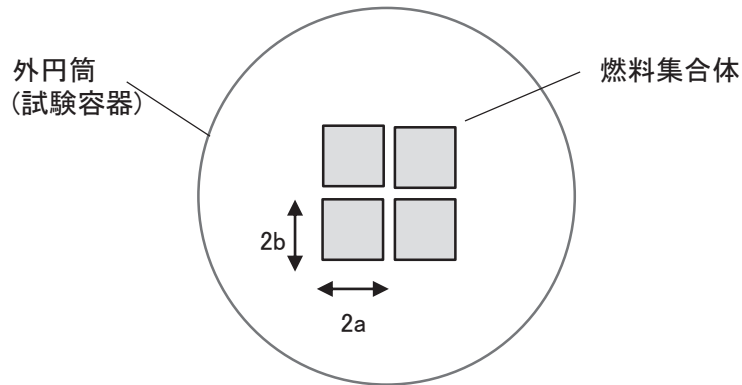


* :評価が保守的になるように燃料集合体相対変位が最大となる時刻を考慮しパラメータスタディを実施した上で、制御棒挿入時間が最も長くなるタイミングをスクラム開始時刻として設定。

別紙3 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



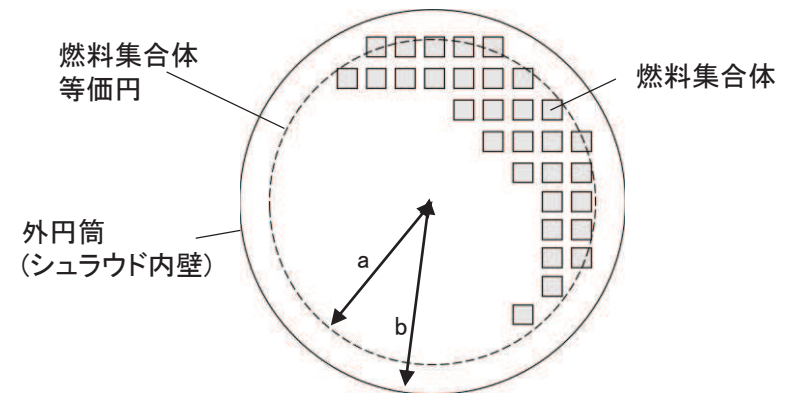
試験条件における燃料集合体のイメージ図

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

別紙4 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 | 記号 | 名称 | 試験条件 | 実機条件 |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------|------------|
| g | 重力加速度 | 9.8m/s ² | 同左 | P _{dump} | ダンクタンク圧力* | 0.1 MPa | 同左 |
| M | 制御棒質量 | | 同左 | m _f | 燃料集合体質量(4体分) | | |
| M _d | 制御棒の排除質量 | | 同左 | | | | |
| 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 | C ₀ | 燃料集合体の減衰係数* ² | | 7 % |
| A ₀ | ドライブピストン上面面積 | | 同左 | | | | |
| P _R | 炉圧* ¹ | 0.1 MPa | 同左 | 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 |
| R ₀ | 制御棒と燃料集合体の接触の摩擦係数 | 0.182 | 0.218 | 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 |
| P _{A0} | HCU・アキュムレータ初期圧力* ¹ | | 同左 | η | 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 |
| 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 | | t | 燃料集合体板厚 | | 100 mil |
| A _{pu} | 挿入配管断面積 | | 同左 | E _{CR} | 制御棒の縦弾性係数 | 195000 MPa | 176560 MPa |
| L _{pu} | 挿入配管長 | | 同左 | | | | |
| | | | | 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 |

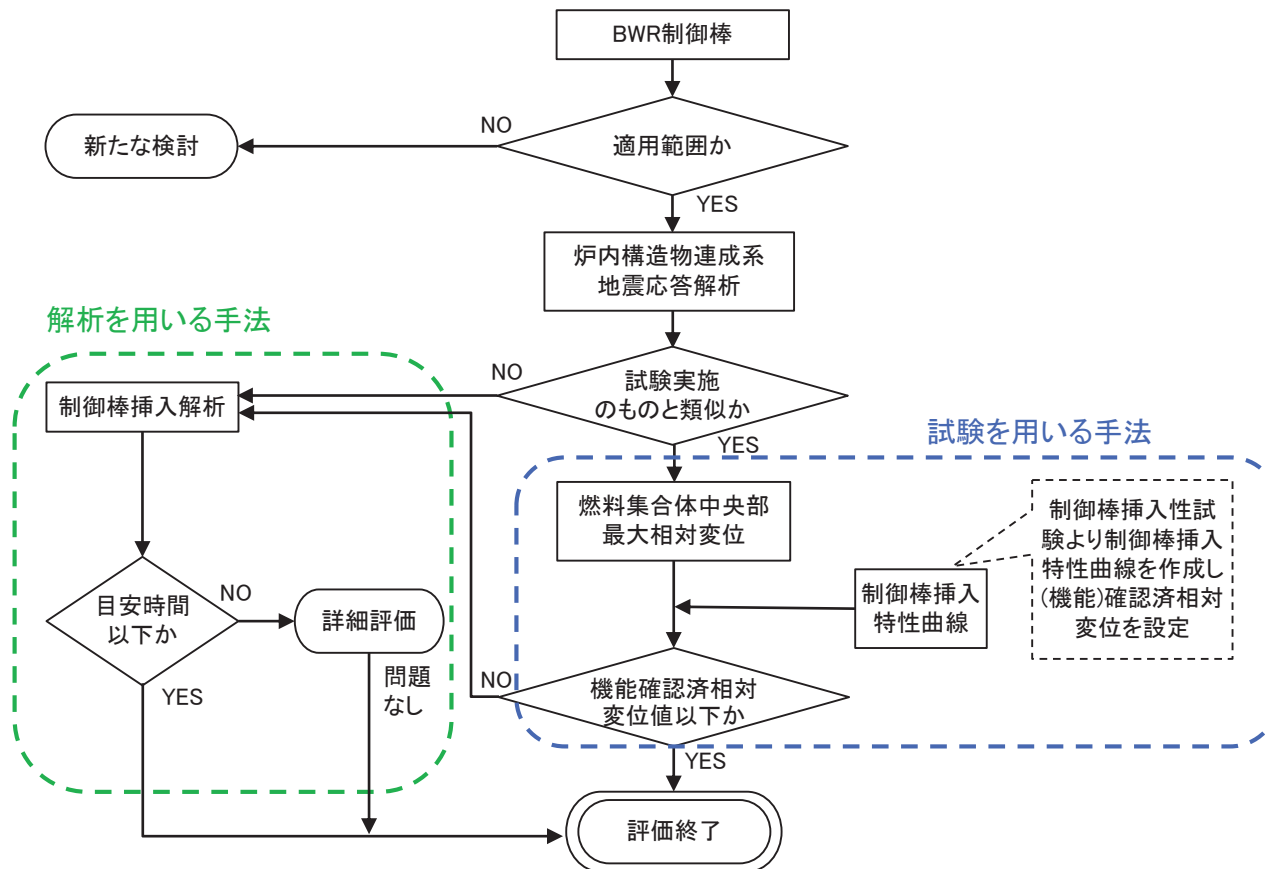
* 1: 実機(炉圧状態)では圧力抵抗が増すため、制御棒挿入に要する時間が増加する。制御棒挿入性試験は大気圧条件で実施するが、制御棒挿入圧力を調整し、ゼロスクラム時間(無加振時の75%ストロークスクラム時間)を実機と合わせることで炉圧状態を模擬していることから、試験条件及び実機条件でも数値に変更はない。

* 2: 減衰定数のことを表す。

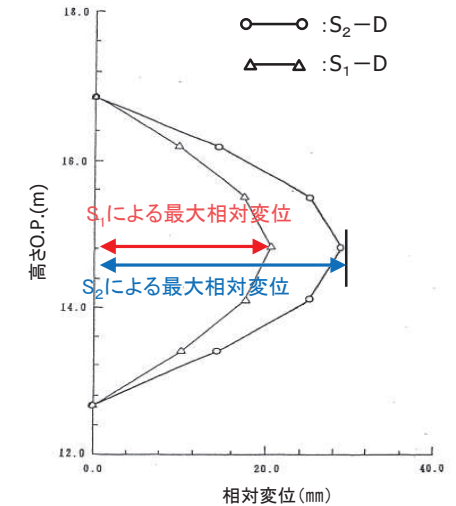
【参考1】 女川2号機における制御棒挿入性評価方法

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋, 赤字部変更

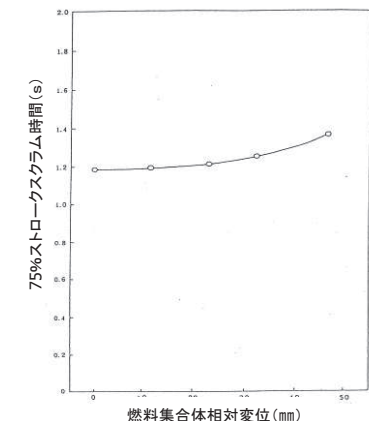
- 制御棒挿入性評価は、地震時に原子炉を確実に停止するために制御棒が炉心に挿入されることを確認するもので、JEAG4601に記載の評価方法には、“試験を用いる手法”と“解析を用いる手法”が示されている。なお、制御棒挿入性評価は、制御棒挿入時間(75%ストロークスクラム時間)が規定値(1.62s)以内であることを確認するものである。
- 女川2号機の制御棒挿入性評価は、既工認より試験を用いる手法を採用している。



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)

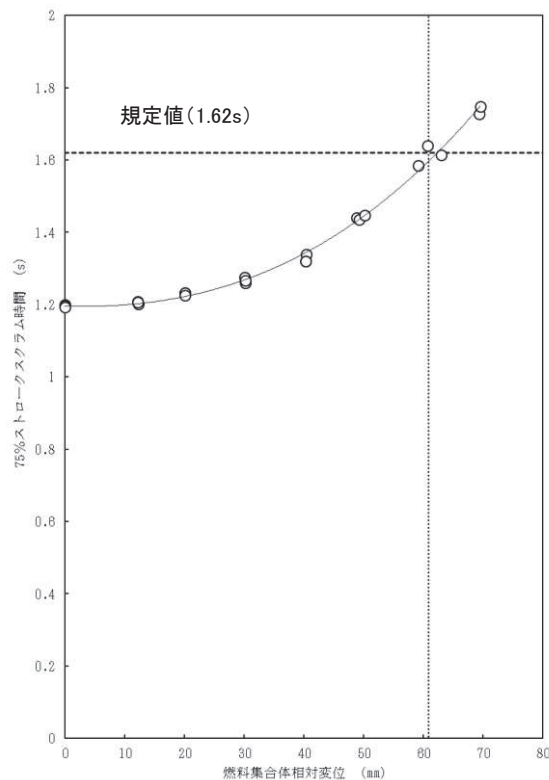


制御棒挿入特性曲線 (女川2号機既工認より抜粋)

【参考2】 制御棒挿入性解析の概要(1/3)

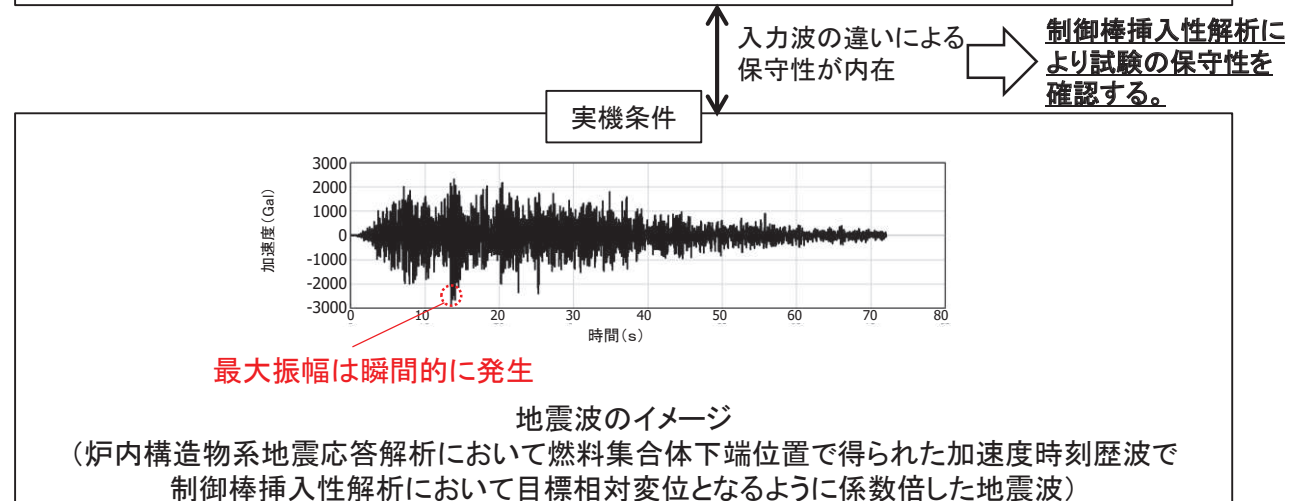
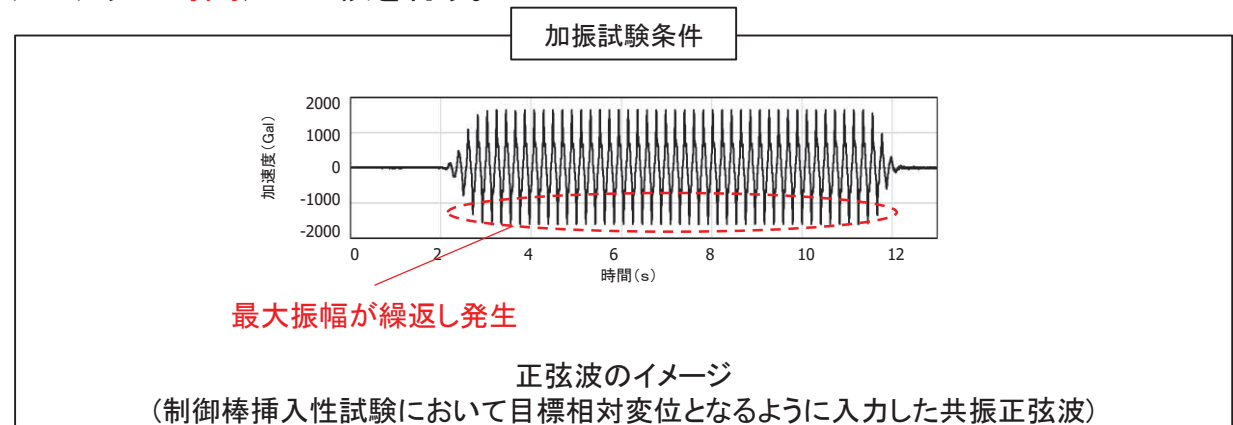
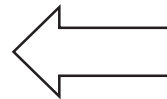
第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋, 赤字部変更

- 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(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

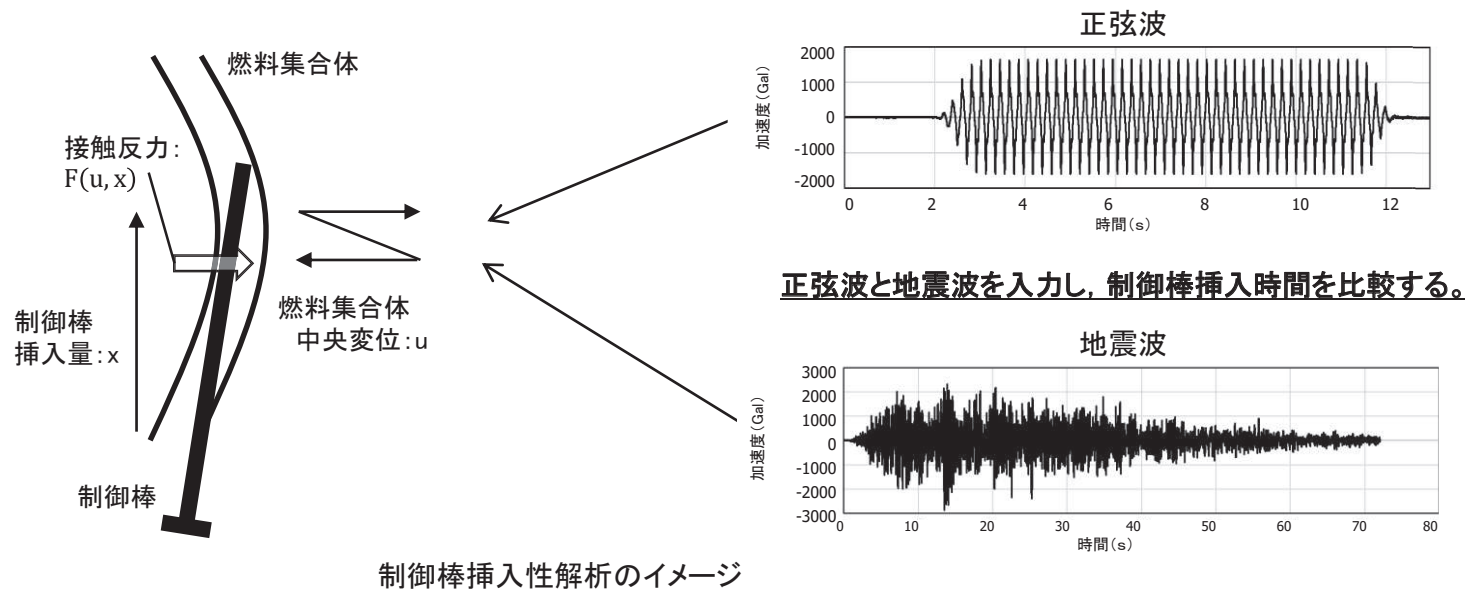
正弦波による
試験結果



【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, 赤字部変更

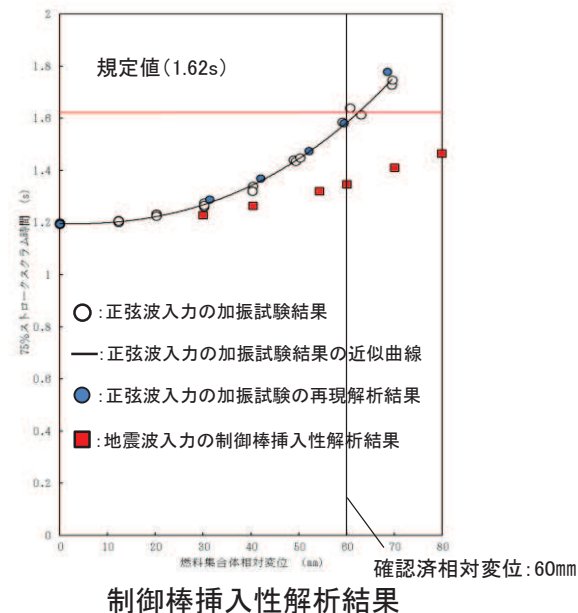
- 以下に示す2通りの条件によって制御棒挿入性解析を実施した。
 - 制御棒挿入性試験に使用した正弦波
 - 今回工認において燃料集合体相対変位が最大(54.2mm)となった基準地震動Ss-D2
- 解析の結果, 燃料集合体相対変位60mmにおいて, 地震波を用いた制御棒挿入解析による制御棒挿入時間(■)は正弦波を用いた制御棒挿入性試験による制御棒挿入時間(○)よりも十分に早いことから, 制御棒挿入性試験が保守性を有していることを確認した。なお, 既往知見*においても地震波入力とした制御棒挿入性に係る検討が実施されており, 今回工認と同様, 地震波入力とした場合には, 制御棒挿入時間は規定値(1.62s)に対して十分に余裕のある結果が得られている(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



<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, 燃料集合体相対変位60mmにおいて, 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, 赤字部変更

- 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

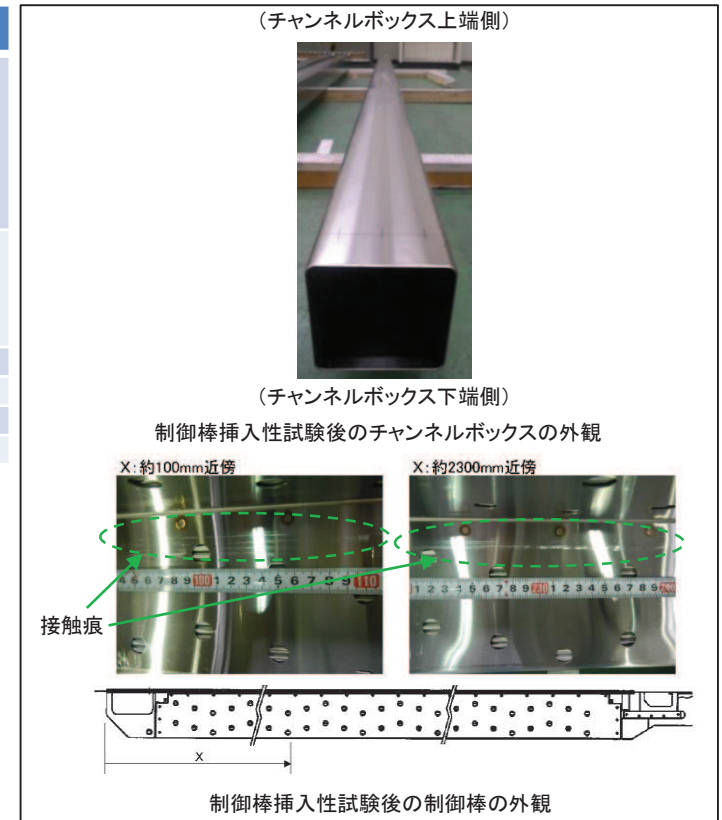
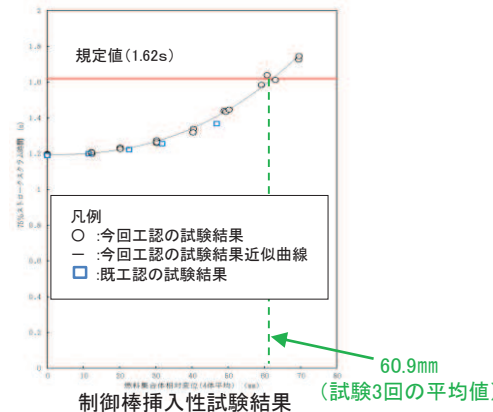
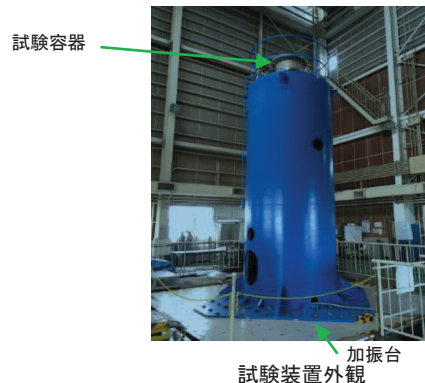
| 条件項目 | 既工認 | 今回工認 |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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) | *3 |

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。

制御棒と燃料集合体の接触様式

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

【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。

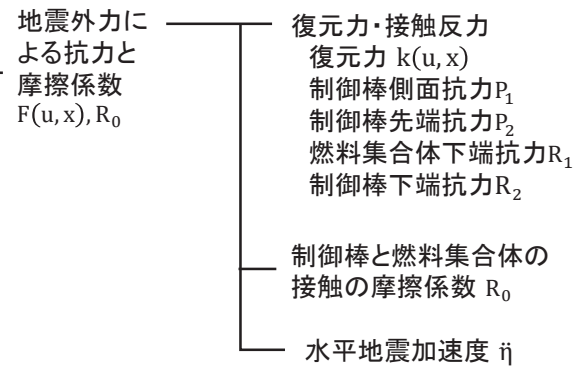
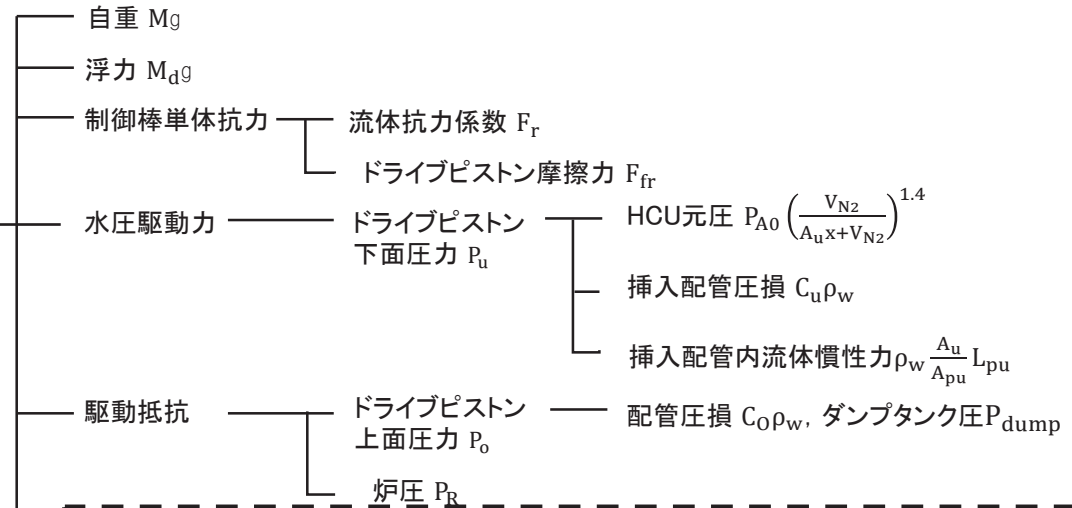
制御棒挿入運動方程式 制御棒挿入量x

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

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

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

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

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

燃料集合体質量 m_f , 燃料集合体の付加質量 m_0 , 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_0 , 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

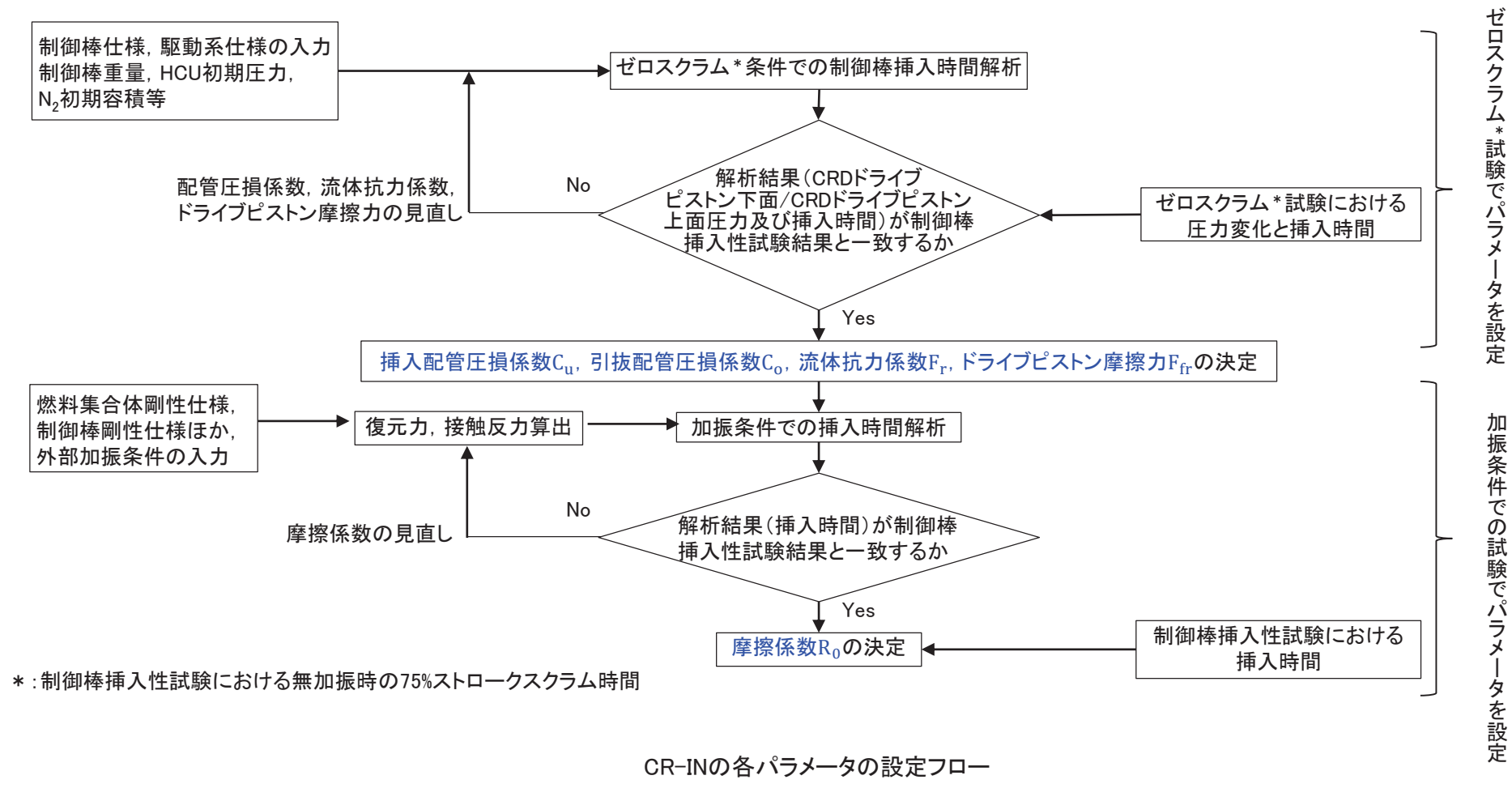
制御棒と燃料集合体の接触による力

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。



【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, 赤字部変更

- 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

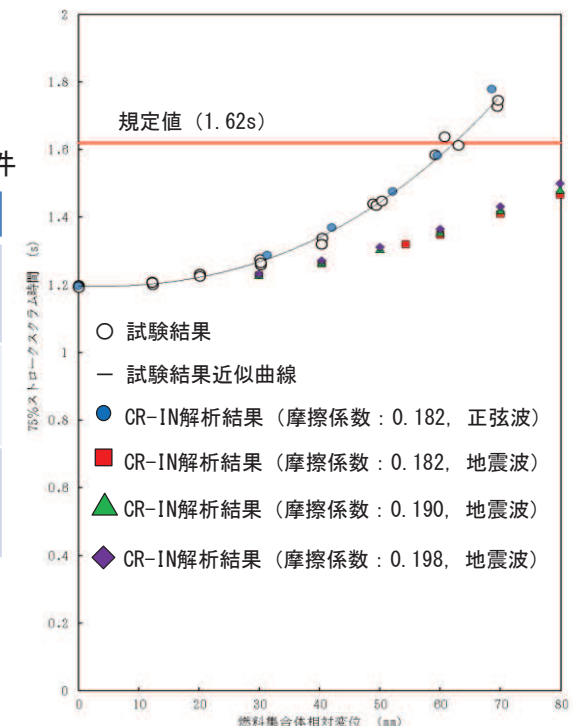
- 今回工認における摩擦係数 R_0 は、各目標変位(30mm~70mm)における摩擦係数平均値のうち、最大値となる目標変位60mmにおける値0.182を設定している。
- 摩擦力は制御棒挿入時の抵抗力として働くため、摩擦係数が大きいほど制御棒挿入時間は遅くなる。そこで、制御棒挿入時間に対する摩擦係数の影響を確認するため、各試験結果から得られる摩擦係数の最大値0.190及びばらつきを考慮するため試験結果から得られる摩擦係数の平均値(0.166)に $+2\sigma$ を考慮した摩擦係数0.198を用いて制御棒挿入時間を確認した。
- 燃料集合体相対変位が大きくなるにつれて制御棒挿入時間が遅く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

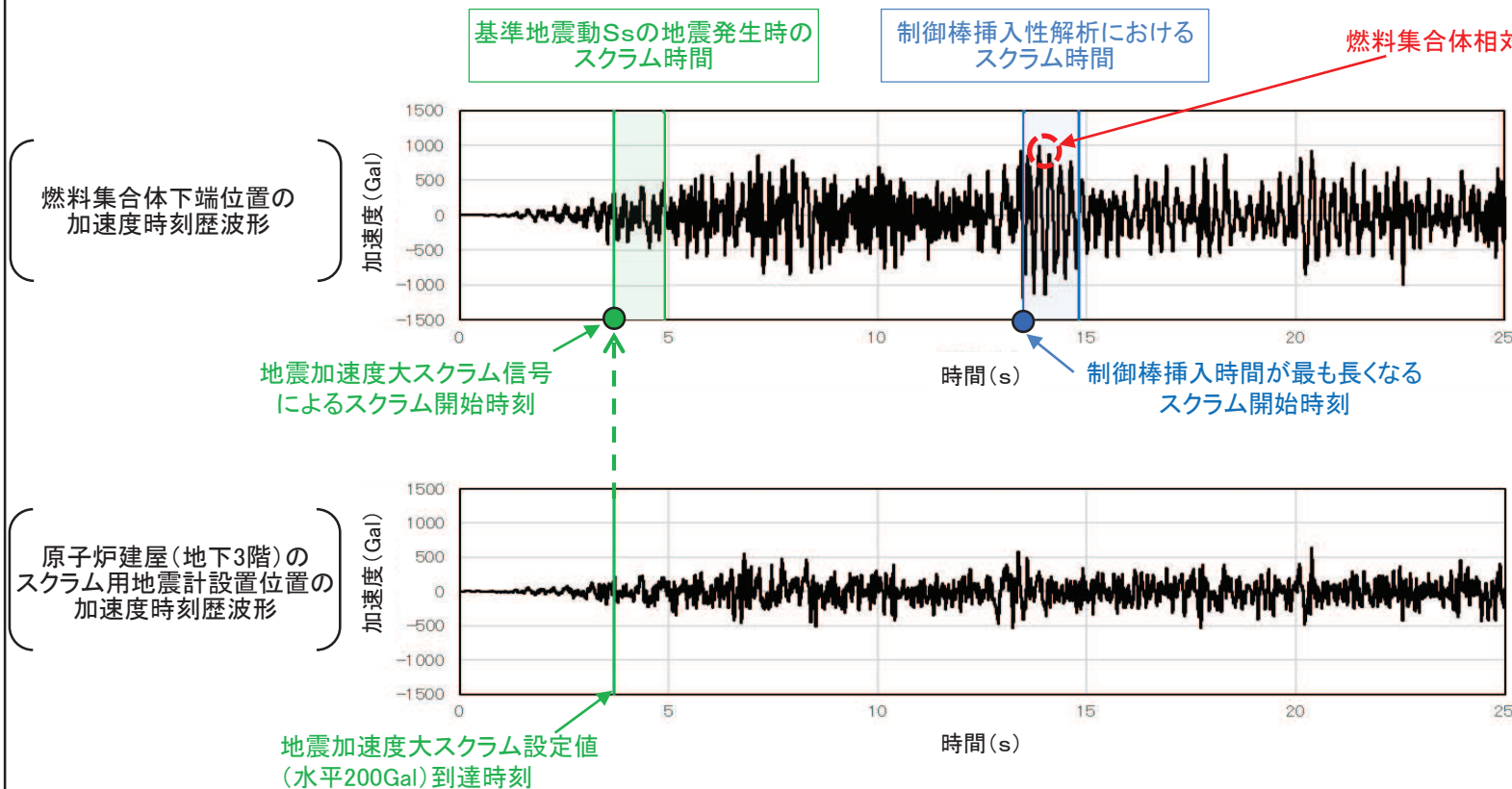


* : 試験結果とCR-INでの挿入性解析結果が整合するよう調整した結果から得られる摩擦係数

【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 |

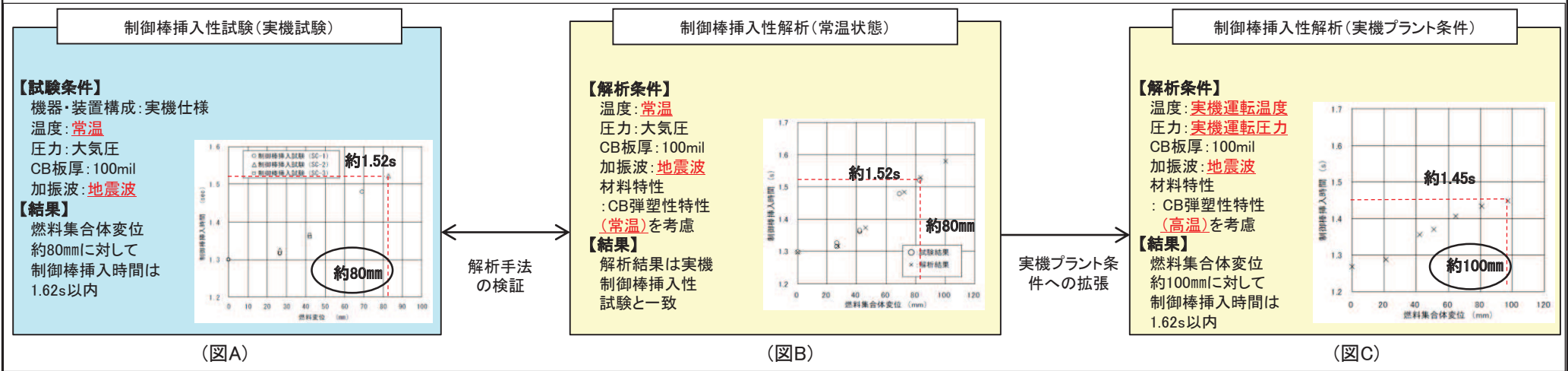
【参考6】 制御棒挿入性評価に係る既往知見における検討内容(1/2)

第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋,一部削除した内容について次頁に詳細追加

- 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。
- 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Ss)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Ss7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6】 制御棒挿入性評価に係る既往知見における検討内容(2/2)

- 今回工認の制御棒挿入性解析結果(試験条件)と既往知見*(試験条件)の制御棒挿入性解析結果の比較を行った結果、ゼロスクラム時及び燃料集合体相対変位80mm時における制御棒挿入時間は今回工認の解析結果の方が早い。
- ゼロスクラム時の挿入時間の差(0.1s)と燃料集合体相対変位80mm時の挿入時間の差(0.05s)を比較すると、80mm時の差が小さいことから、今回工認の解析における挿入抵抗の方が大きかったものと推測できる。
- 既往知見の制御棒挿入性解析に係る詳細内容が公開されていないため、上記の差異に対して詳細な分析を行うことはできないが、プラント条件、解析プログラム、入力波等の違いによるものと考えられる。

*: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)

