

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3

提出年月日

2021年 9月 3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9月3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、S_s-D2以外の基準地震動による制御棒挿入時間は、S_s-D2と同様、確認済相対変位60mmにおいて規定値(1.62s)を十分に下回っており、正弦波による制御棒挿入性試験結果の制御棒挿入時間よりも早いことを確認した。 また、S_s-D2に比べてS_s-F1の制御棒挿入時間が僅かに遅かったことから、60mm以外の燃料集合体相対変位においても検討した結果、燃料集合体相対変位がいずれの場合にも、S_s-F1の制御棒挿入時間はS_s-D2と同等であることを確認した。 以上の結果から、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。 | P4~6 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解析パラメータを整理した。 整理結果を踏まえて、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も十分に早いことを確認した。 以上の結果から、実機条件による制御棒挿入性解析に対して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。 | P7,8 別紙3, 4 |

1. 今回工認における制御棒挿入性評価に対する検討の概要(1/2)

- 今回工認における制御棒挿入性評価では、基準地震動 S_s の増大に伴い燃料集合体相対変位(発生値)が大きくなったことから、既工認と同様に制御棒挿入性試験を実施し、燃料集合体相対変位が既工認時よりも大きな領域までのデータを拡充した結果等から、確認済相対変位(許容値)として60mmを設定することにした。
- 制御棒挿入性試験では、正弦波による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として60.9mm(試験3回の平均値)のデータを取得したものの、試験3回のうち1回のデータが規定値を上回っていたため、制御棒挿入性試験結果の保守性の確認を目的とし試験を再現する制御棒挿入性解析を実施した。

制御棒挿入性試験*1

【試験条件】

| | |
|------|------------|
| 入力波 | 正弦波 |
| 試験条件 | 常温*2 |
| | 大気圧*3 |
| | 燃料集合体4体を模擬 |

【試験結果】

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相対変位として60.9mm(試験3回の平均値)を取得

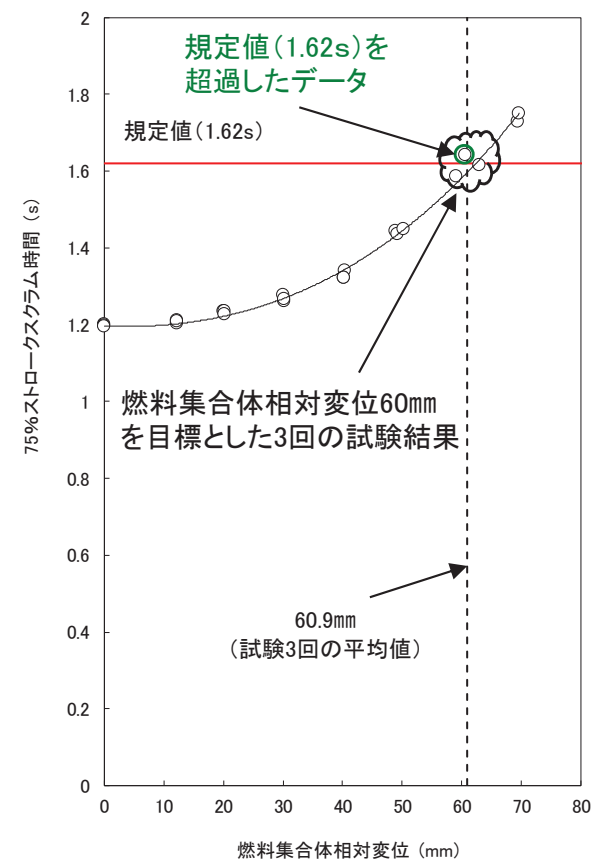
【確認済相対変位の設定】

試験結果を踏まえて60mmと設定

【確認済相対変位の設定に係る今回工認での検討内容(参考1参照)】

- 設置変更許可段階の55mmから工認段階での検討を踏まえ60mmへ変更。
- 制御棒挿入性試験における燃料集合体相対変位60.9mm(試験3回の平均値)のうち1回のデータが規定値(1.62s)を超過している。
- ⇒制御棒挿入性解析により試験結果の保守性を確認する。

| | 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確認 |



制御棒挿入性試験結果

*1: 試験概要は参考2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に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。

1. 今回工認における制御棒挿入性評価に対する検討の概要(2/2)

- 制御棒挿入性解析では、確認済相対変位(60mm)の設定にあたり、試験に用いた正弦波が地震波に対して保守性があること、制御棒挿入性解析における解析パラメータを実機条件とした場合でも、確認済相対変位60mmにおいて正弦波による試験結果に保守性があることを確認する。

| 制御棒挿入性試験*1 | |
|------------|------------|
| 【試験条件】 | |
| 入力波 | 正弦波 |
| 試験条件 | 常温*3 |
| | 大気圧*4 |
| | 燃料集合体4体を模擬 |

保守性の確認

(1)試験条件(入力波)の保守性

↓
試験(正弦波)と解析(地震波)の挿入時間を比較(赤枠部)

(2)実機条件に対する試験結果の保守性

↓
試験条件(常温)と実機条件(高温等)の挿入時間を比較(青枠部)

今回工認における詳細検討内容

【前回審査会合(7/29)での説明内容】

制御棒挿入性解析(試験条件)*2

【解析条件】

| 試験条件 | |
|------|---|
| 入力波 | 地震波 S _s -D2 (燃料集合体相対変位が最大の地震動として選定) |
| 解析条件 | 常温*3 |
| | 大気圧*4 |
| | 燃料集合体4体を考慮 |

【解析結果】

制御棒挿入時間は、正弦波による試験に比べて地震波による解析の方が早い結果となったことから、試験結果の保守性を確認した。

【今回の検討に対する説明内容】

制御棒挿入性解析(試験条件及び実機条件)*2

【解析条件】

| | 試験条件 | 実機条件 |
|------|------------|--|
| | 入力波 | 地震波 S _s -D1, D3, F1, F2, F3, N1 |
| 解析条件 | 常温*3 | 高温 |
| | 大気圧*4 | 大気圧*4 |
| | 燃料集合体4体を考慮 | 燃料集合体560体を考慮*5 |

【指摘事項に対する確認事項】

- ①: S_s-D2以外の地震波に対する試験結果の保守性を確認する。
- ②: 実機条件(高温等)に対する確認済相対変位60mmにおける試験結果の保守性を確認する。

*1: 試験概要は参考2に示す。 *2: 解析概要は参考3に示す。 *3: 燃料集合体の曲げ剛性が高温時と同等になるようにチャンネルボックス板厚を調整。(次頁以降の注記は省略)

*4: 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。(次頁以降の注記は省略)

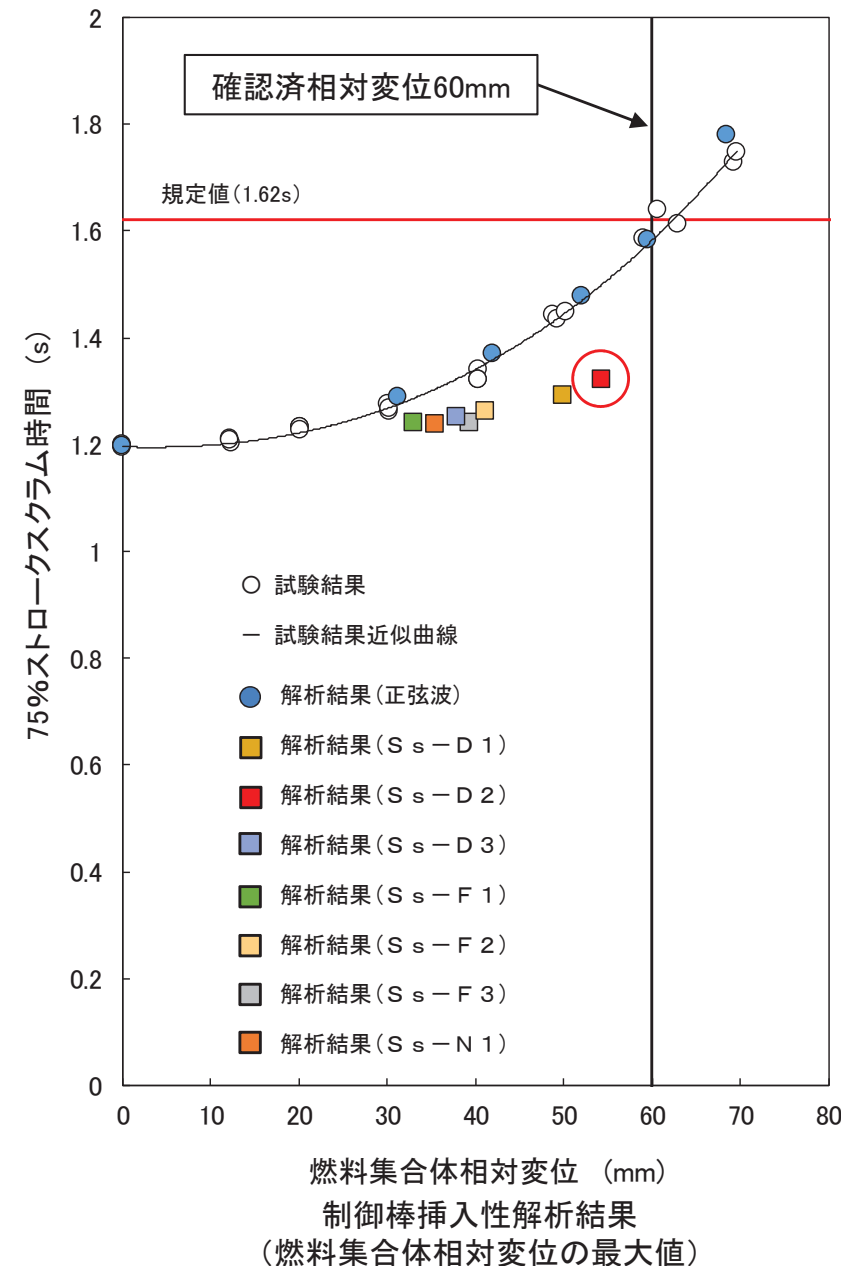
*5: 地震時に全燃料集合体が同位相で振動することが既往知見より確認されているため(別紙3参照)、解析では560体分の質量に係るパラメータを1セル分(制御棒1体と燃料集合体4体)へ換算し解析を行う。

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結果の保守性(1/3)】

【基準地震動S_s7波の燃料集合体相対変位(最大値)に対する制御棒挿入時間の関係】

- 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、確認済相対変位60mmに対して最も余裕が小さい基準地震動S_s-D2(燃料集合体相対変位54.2mm)を選定している。
- 基準地震動S_s7波の地震応答解析結果による燃料集合体相対変位に対する制御棒挿入時間(75%ストロークスクラム時間)を解析した結果、S_s-D2が規定値(1.62s)内で最も遅くなっている。
- 以上の確認結果を踏まえて、**制御棒挿入性試験結果の保守性を確認するための制御棒挿入性解析に用いる地震波は、S_s-D2が適切と考えているが、地震波に対する確認済相対変位60mmにおける試験結果の保守性を確認するためS_s-D2以外の地震波についても制御棒挿入性解析を実施する。**



制御棒挿入性解析条件 (燃料集合体相対変位の最大値)

| 入力波 | 地震波 (基準地震動S _s 7波*1) |
|-----------|-----------------------------------|
| 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*2 |
| 温度 | 常温 |
| 圧力 | 大気圧 |

制御棒挿入性解析結果(燃料集合体相対変位の最大値)

| 入力波 | 各基準地震動での燃料集合体相対変位の最大値*2(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 |

*1: 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。

*2: 基準地震動S_s7波を用いた地震応答解析結果(不確かさケース含む)から最も大きな相対変位の値(NS/EW方向包絡)。

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結果の保守性(2/3)】

【基準地震動S_s7波を用いた確認済相対変位60mmに対する解析結果】

- 今回工認の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に加え, S_s-D2以外の基準地震動に対する制御棒挿入性試験結果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確認済相対変位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, いずれの基準地震動S_sの制御棒挿入時間は, S_s-D2と同様, 確認済相対変位60mmにおいて規定値(1.62s)を十分に下回っており, 正弦波による制御棒挿入性試験結果の制御棒挿入時間(○)よりも早いことを確認した。
- 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結果が保守性を有していることを確認した。

制御棒挿入性解析結果(確認済相対変位60mm)

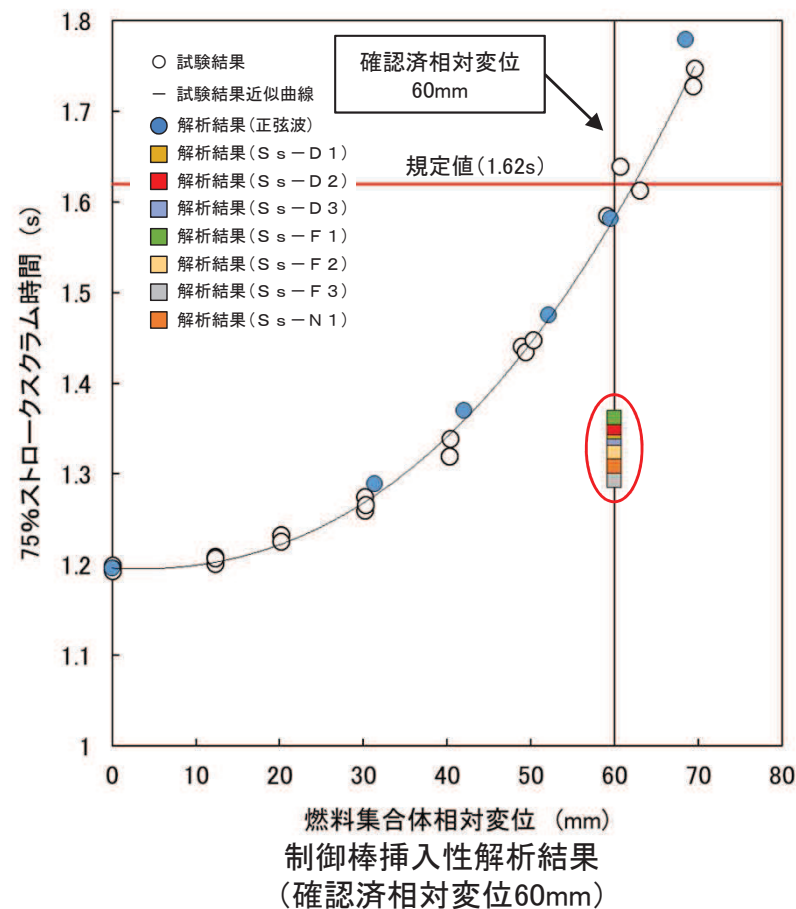
| 制御棒挿入性解析条件 (確認済相対変位60mm) | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| 入力波*1 | 地震波 (基準地震動S _s 7波) |
| 燃料集合体 相対変位 | 60mm |
| 温度 | 常温 |
| 圧力 | 大気圧 |

*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となるように入力波となる各基準地震動の応答を係数倍する。

| 入力波*2 | 制御棒挿入 時間(s) | 挿入時間 比率*3 |
|---------------------|----------------|--------------|
| 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 |
| 75%ストローク スクラム規定値 | 1.62 | — |

*2: 各基準地震動の応答を係数倍して燃料集合体相対変位が60mmとなるように調整した入力波とする。

*3: 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

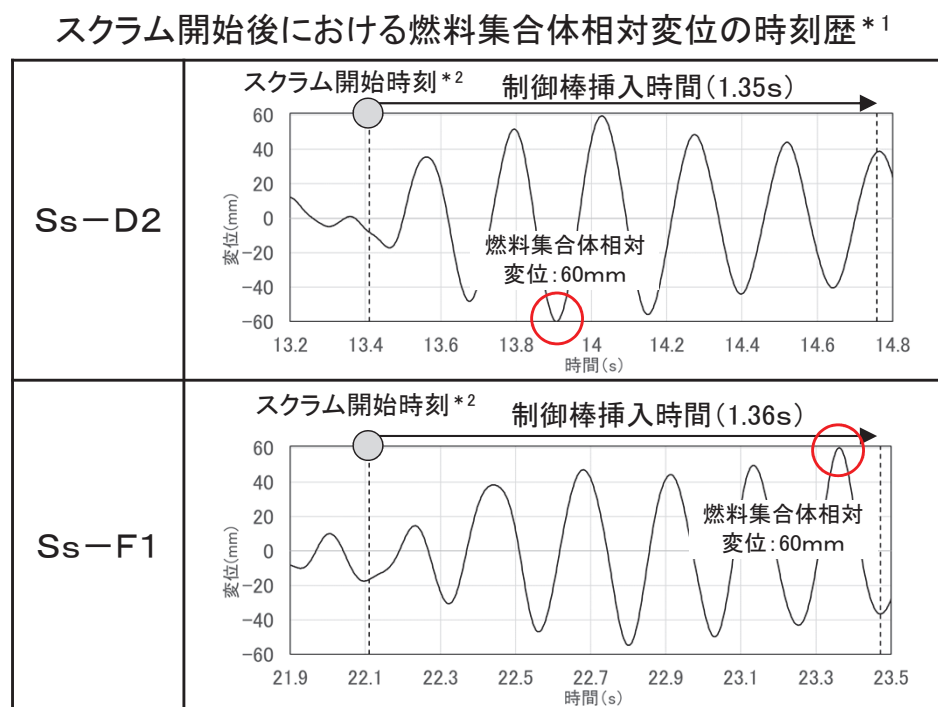


2. 指摘事項①に対する回答

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

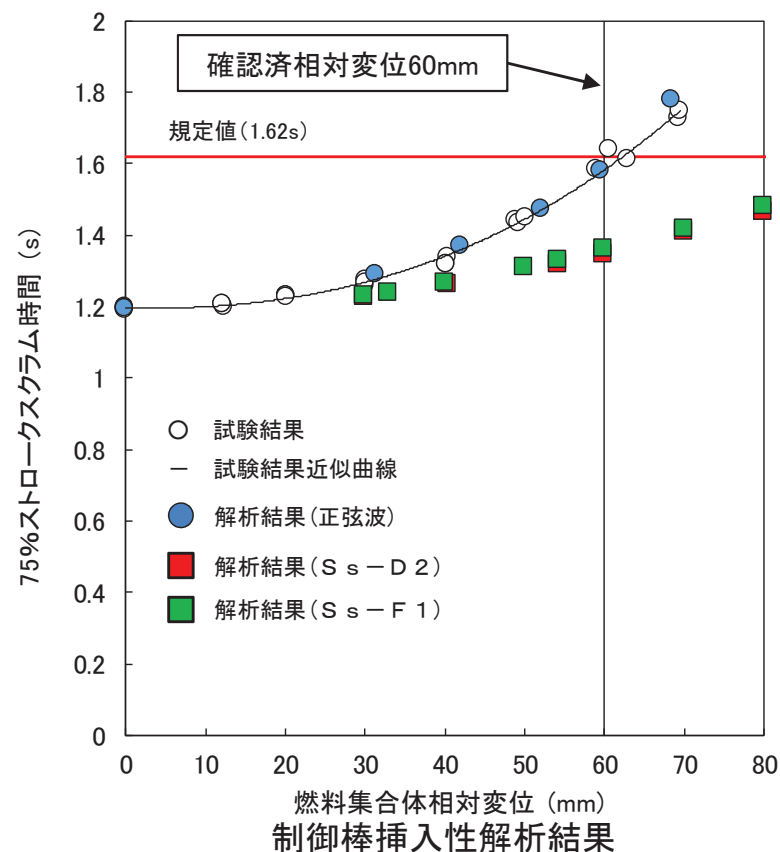
【制御棒挿入性解析に用いる地震動の代表性】

- 確認済相対変位60mmの制御棒挿入時間において、S_s-D2(1.35s)に対してS_s-F1(1.36s)が僅かに遅くなった理由は、解析条件として設定した燃料集合体相対変位60mmの発生時刻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(左下図参照)。
- 上記を踏まえ、S_s-F1を入力波として、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た結果、燃料集合体相対変位がいずれの場合(確認済相対変位60mm含む)においても、S_s-F1の制御棒挿入時間(■)は、S_s-D2の制御棒挿入時間(■)と同等であることを確認した(右下図参照)。
- また、S_s-F1の地震応答解析による実際の燃料集合体相対変位が33.4mmであることから、基準地震動7波のうち地震応答解析による燃料集合体相対変位が最大の54.2mmであるS_s-D2を代表として制御棒挿入性解析に適用することは妥当であると判断した。



*1: 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: 制御棒挿入時間が保守的になるように設定。参考5参照。



3. 指摘事項②に対する回答

【実機条件に対する試験結果の保守性(1/2)】

- 制御棒挿入性解析は試験の再現解析として実施したことから、解析パラメータには試験条件を適用している。
- 試験条件では常温*¹としているが、実機においては運転時に高温となる等、解析パラメータに差が生じることになるため、実機条件に対する制御棒挿入試験結果の保守性について検討する。
- 制御棒挿入性解析に適用する解析パラメータについて、試験条件と実機条件で比較した結果、温度の違いやモデル化の違いを要因として、以下に示す解析パラメータに差異がある。
- なお、実機条件の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 については、温度と摩擦の関係に係る既往知見*²を踏まえ、温度依存性無し(試験条件の1.0倍)/有り(試験条件の1.2倍)の2ケースとしている。

*1: 燃料集合体の曲げ剛性が高温と同等になるようにチャンネルボックス板厚を調整(詳細は参考2参照)。

【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体を考慮して水の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解析パラメータ一覧*^{3,4}

| 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 | 500N/600 N* ² | 温度の違い | ○ | |
| R_0 | 制御棒と燃料集合体の接触の摩擦係数 | 0.182 | 0.182/0.218* ² | 温度の違い | ○ | |
| 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 | 燃料集合体の水の付加質量(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 | 燃料集合体の減衰係数* ⁵ | | 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 | ○ | ○ |

*2: 既往知見^[1]において、金属同士の摩擦係数は温度依存性のあるヤング率と変形抵抗に影響を受けて、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内容が示されている。一方で、制御棒挿入性評価に関連した既往知見^[2]の検討では高温での摩擦係数を常温での1.2倍と設定している。このため実機条件の摩擦係数を試験条件と同じ1.0倍と保守的に試験条件の1.2倍の2ケースとした。

*3: 差異のない解析パラメータを含めた比較結果は別紙4に示す。 *4: 試験条件及び実機条件についての既往知見との比較を参考6に示す。

*5: 減衰定数のことを表す。

[1] V.L. Popov, et al. : Friction coefficient in "rail - wheel" -contacts as a function of material and loading parameters, Physical Mesomechanics 5 3 (2002) 17-24

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

[2] 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

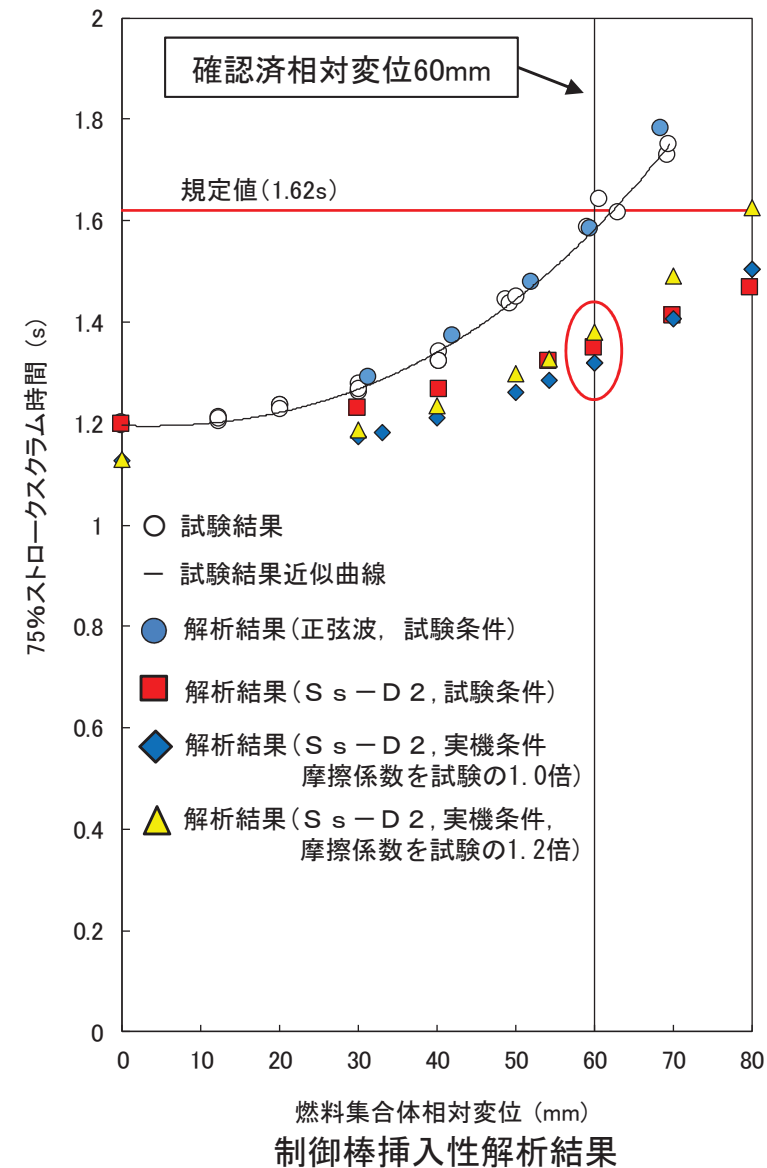
平成17年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査機器耐力その2(BWR制御棒挿入性)に係る報告書(06 基構報-0014.(独)原子力安全基盤機構)

3. 指摘事項②に対する回答

【実機条件に対する試験結果の保守性(2/2)】

【実機条件に対する試験結果の保守性に係る解析結果】

- 制御棒挿入性解析の解析パラメータに実機条件(高温等)を用いた制御棒挿入性解析を実施し、試験条件(常温)に対する解析結果による制御棒挿入時間との比較とともに、試験結果の制御棒挿入時間との比較を行った。
- 適用する地震動は、6頁の制御棒挿入性解析に用いる地震動の代表性に係る検討結果及び解析パラメータの値が地震動によらず同じ値となることを踏まえて、確認済相対変位60mmに対して最も余裕が小さいS_s-D2とした。
- 実機条件の制御棒挿入時間(◆:摩擦係数を試験条件の1.0倍及び△:摩擦係数を試験条件の1.2倍)は、今回工認で設定する確認済相対変位(60mm)において、試験結果の制御棒挿入時間(○)に対して十分早いことから、正弦波による制御棒挿入性試験結果は保守性を有していることを確認した。
- なお、今回工認で設定する確認済相対変位(60mm)において、実機条件の制御棒挿入時間(◆:摩擦係数を試験条件と同じ1.0倍)は、試験条件の制御棒挿入時間(■)よりもやや早くなり、実機条件の制御棒挿入時間(△:摩擦係数を試験条件の1.2倍)は、試験条件の制御棒挿入時間(■)よりもやや遅くなっている。



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 | |

4. まとめ

- 女川2号機の今回工認における制御棒挿入性評価では、基準地震動 S_s の増大に伴い燃料集合体相対変位(発生値)が大きくなったことから、既工認と同様に制御棒挿入性試験を実施し、燃料集合体相対変位が既工認時よりも大きな領域までのデータを拡充した結果等を踏まえ、確認済相対変位(許容値)として60mmを設定することにした。
- 制御棒挿入性試験では、正弦波による制御棒挿入時間(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相対変位として60.9mm(試験3回の平均値)のデータを取得したものの、試験3回のうち1回のデータが規定値を上回っていたため、制御棒挿入性試験結果に対する保守性の確認を目的とし、制御棒挿入性試験を再現する制御棒挿入性解析を実施した。
- 制御棒挿入性解析の結果、以下の通り、制御棒挿入性試験結果の保守性を確認したことから、女川2号機の今回工認における制御棒挿入性評価に対して、確認済相対変位(許容値)を60mmと設定することは妥当であると判断した。
 - 基準地震動 S_s 7波全ての制御棒挿入時間は、正弦波を用いた試験結果の制御棒挿入時間より早いことを確認した。
 - 実機条件による制御棒挿入時間は、確認済相対変位60mmにおいて正弦波を用いた試験結果の制御棒挿入時間よりも十分早いことを確認した。

(別紙)

- 別紙1 制御棒挿入性解析に用いる入力波
- 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
- 別紙3 試験条件と実機条件における燃料集合体の水の付加質量の考え方の違い
- 別紙4 試験条件と実機条件における解析パラメータ比較

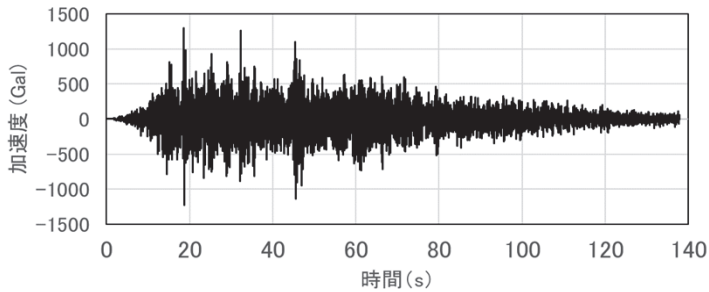
(参考資料)

- 参考1 女川2号機における制御棒挿入性評価方法
- 参考2 制御棒挿入性試験の概要
- 参考3 制御棒挿入性解析の概要
- 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
- 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
- 参考6 制御棒挿入性評価に係る既往知見との比較

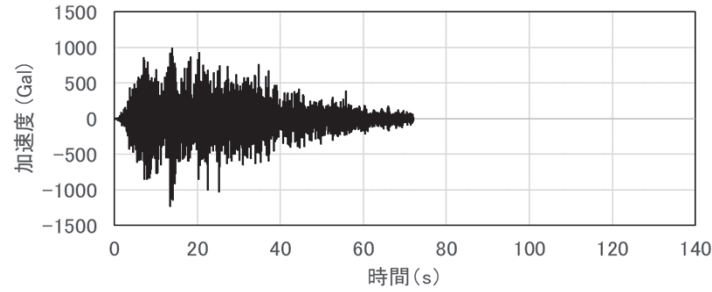
別紙1 制御棒挿入性解析に用いる入力波

➤ 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。

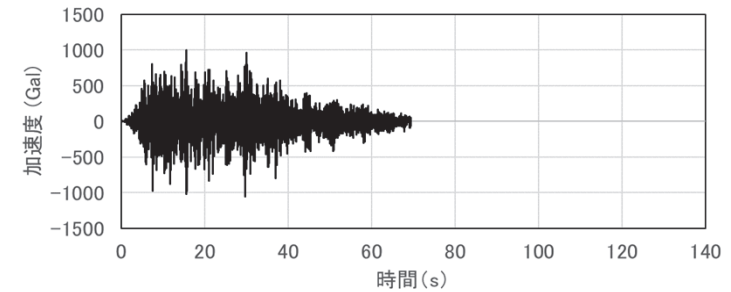
* : 建屋—大型機器連成地震応答解析モデル(炉内構造物系)の燃料集合体下端位置における加速度時刻歴



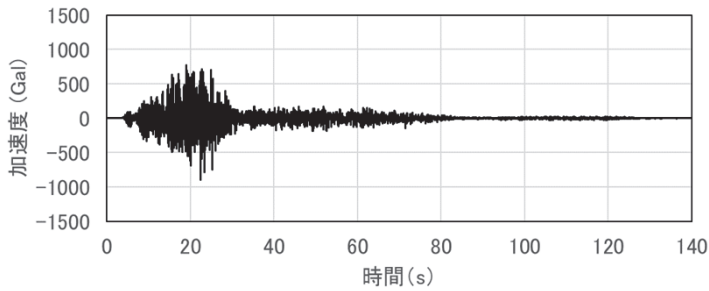
(Ss-D1)



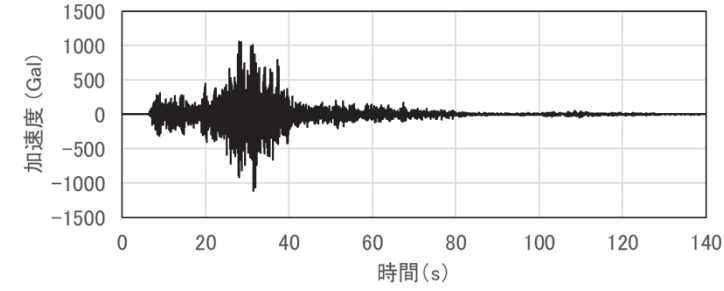
(Ss-D2)



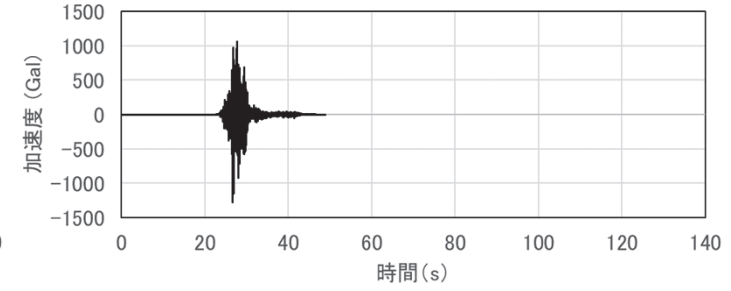
(Ss-D3)



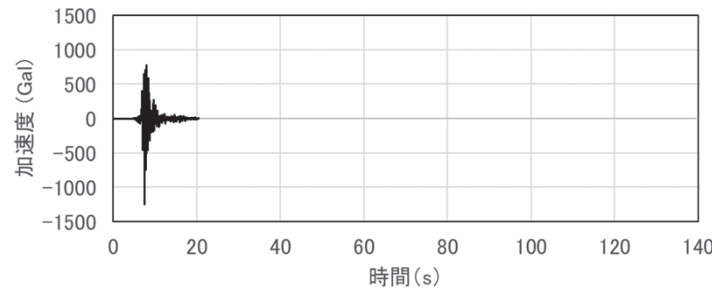
(Ss-F1)



(Ss-F2)



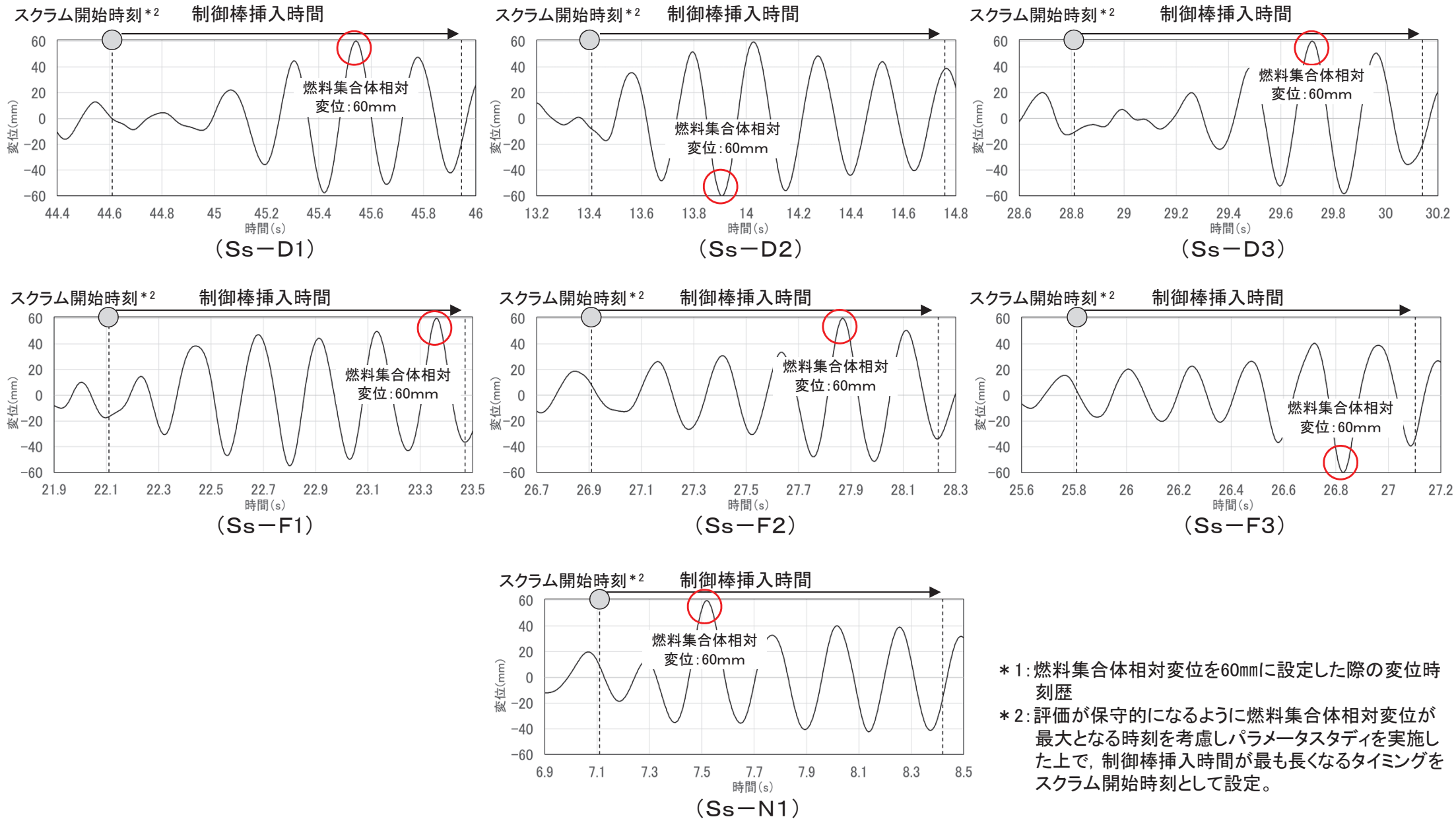
(Ss-F3)



(Ss-N1)

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*1は以下のとおり。

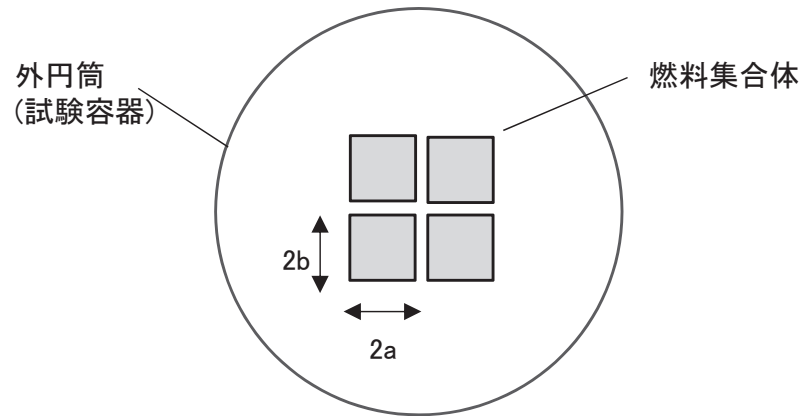


- *1: 燃料集合体相対変位を60mmに設定した際の変位時刻歴
- *2: 評価が保守的になるように燃料集合体相対変位が最大となる時刻を考慮しパラメータスタディを実施した上で、制御棒挿入時間が最も長くなるタイミングをスクラム開始時刻として設定。

別紙3 試験条件と実機条件における燃料集合体の水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水の付加質量の設定方法は以下のとおり。

●試験条件での水の付加質量の考え方*1



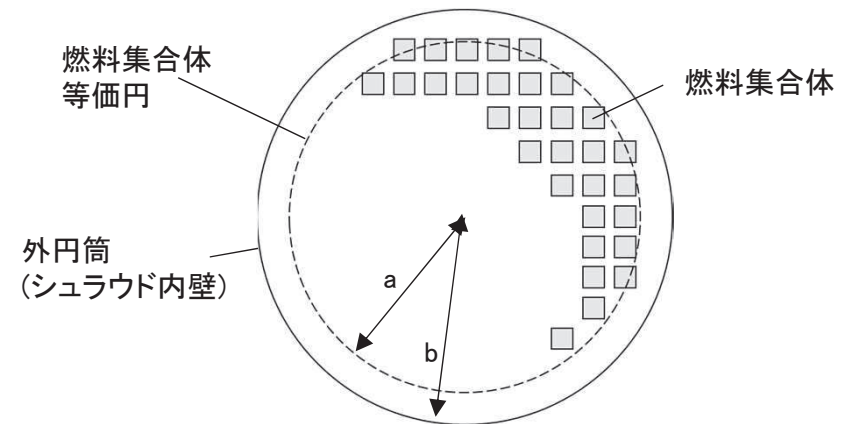
試験条件における燃料集合体のイメージ図

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水の付加質量を算出する。

(水の付加質量算出式)

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

●実機条件での水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水の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の二重円筒での水の付加質量を求め、この値を4/560倍することで、燃料集合体4体の水の付加質量を算出する。

(水の付加質量算出式)

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

※ 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水の付加質量の考慮方法と同じである

注記*1: 既往知見^[1]において模擬燃料(368体)が装荷された実規模相当の試験体の振動試験により、全燃料集合体が同位相で振動することが確認されているため、制御棒挿入性試験及び制御棒挿入性解析では、1セル分(制御棒1体と燃料集合体4体)を模擬している。

[1] 原子力発電施設信頼性実証試験の現状 昭和62年(財)原子力工学試験センター及び原子力発電施設信頼性実証試験の現状 昭和63年(財)原子力工学試験センター

別紙4 試験条件と実機条件における解析パラメータ比較

➤ 試験条件と実機条件における解析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} | ダンブタンク圧力* ¹ | 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 | 500 N / 600 N* ³ | m ₀ | 燃料集合体の水の付加質量(4体分) | | |
| A _u | ドライブピストン下面面積 | | 同左 | m _d | 燃料集合体の排除質量(4体分) | | |
| 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 | 燃料集合体の減衰係数* ² | 7 % | |
| R ₀ | 制御棒と燃料集合体の接触の摩擦係数 | 0.182 | 0.182 / 0.218* ³ | 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 | |
| P _{A0} | HCU・アキュムレータ初期圧力* ¹ | | 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 |
| 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 | | 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 |
| A _{pu} | 挿入配管断面積 | | 同左 | t | 燃料集合体板厚 | | 100 mil |
| L _{pu} | 挿入配管長 | | 同左 | | | | |
| | | | | E _{OR} | 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 | | |

*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。

*3: 実機条件の摩擦係数を試験条件と同じ1.0倍と保守的に試験条件の1.2倍の2ケースとした。

【参考1】 女川2号機における制御棒挿入性評価方法(1/4)

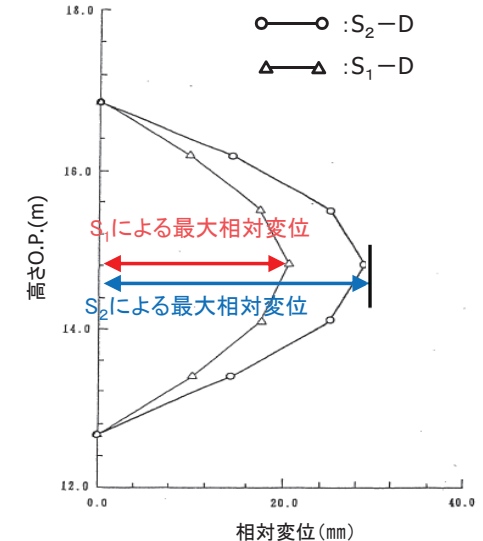
(制御棒挿入性評価の考え方)

- 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。

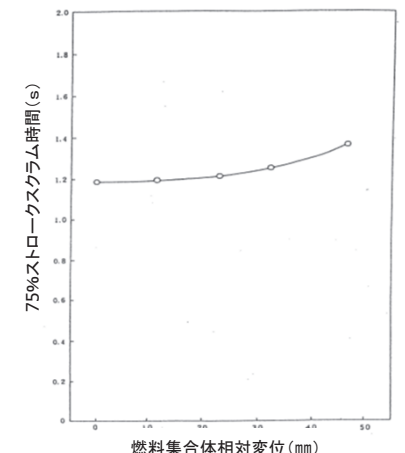
| | 設置変更許可段階 | 工認段階 |
|-----------------------------------|-----------------------|---|
| 基準地震動 S_s による 燃料集合体相対変位(発生値) | 45.3mm | 54.2mm |
| 確認済相対変位(許容値) | 55mm | 60mm |
| 確認済相対変位の 設定方法 | 制御棒挿入性試験に対し 保守性を考慮 | 制御棒挿入性試験 + 制御棒挿入性解析により 保守性を定量的に確認 |

【参考1】 女川2号機における制御棒挿入性評価方法(2/4) (制御棒挿入性評価の考え方)

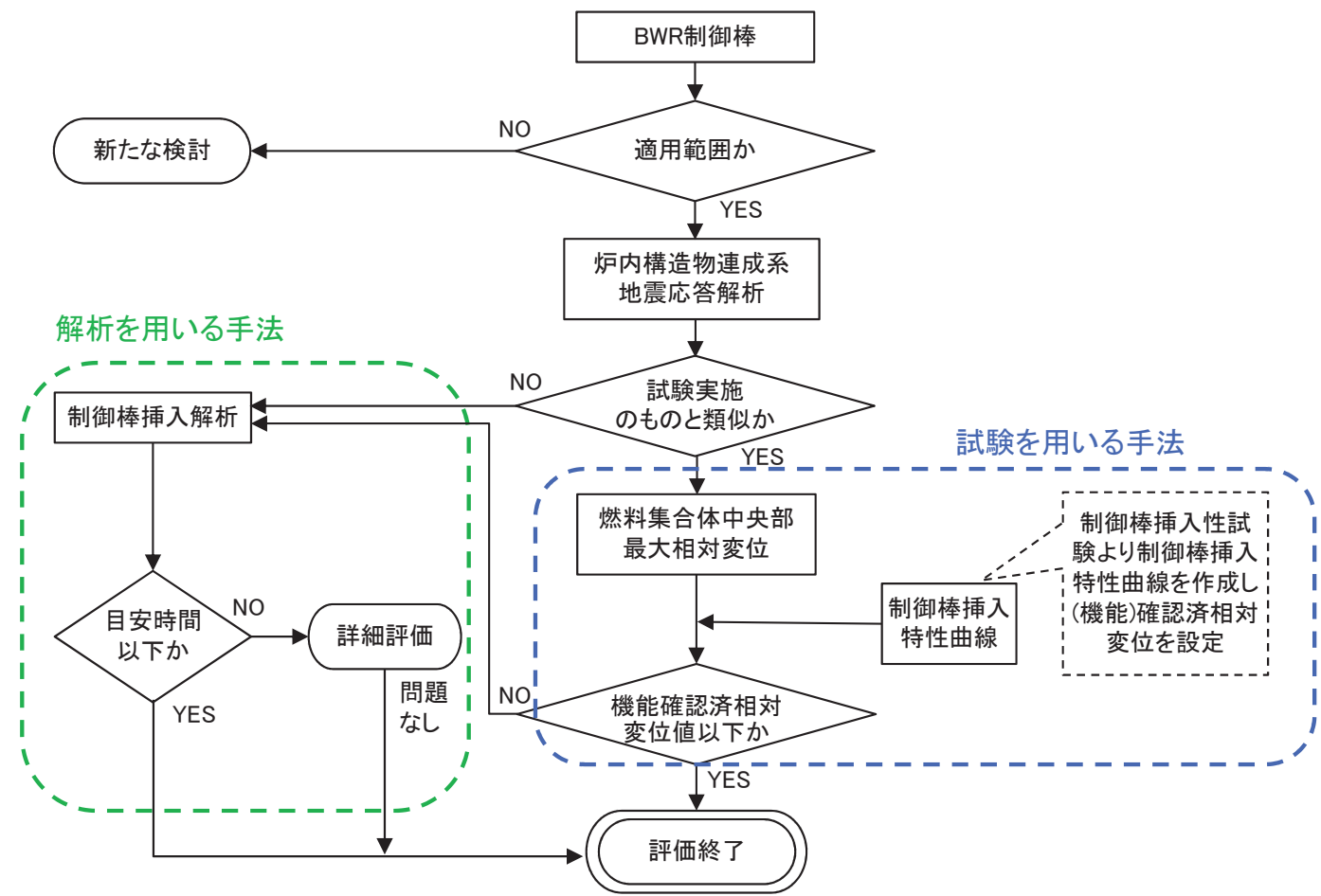
- 制御棒挿入性評価は、地震時に原子炉を確実に停止するために制御棒が炉心に挿入されることを確認するもので、JEAG4601に記載の評価方法には、“試験を用いる手法”と“解析を用いる手法”が示されている。なお、制御棒挿入性評価は、制御棒挿入時間(75%ストロークスクラム時間)が規定値(1.62s)以内であることを確認するものである。
- 女川2号機の制御棒挿入性評価は、既工認より試験を用いる手法を採用している。



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)



制御棒挿入性評価フロー(JEAG4601より抜粋, 一部加筆)

【参考1】 女川2号機における制御棒挿入性評価方法(3/4) (設置変更許可段階での説明内容)

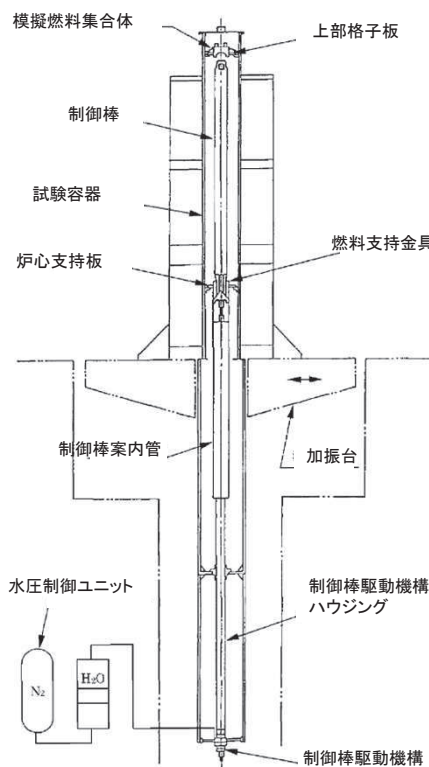
第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋, 赤字部変更

- 今回の新規制基準対応では、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。

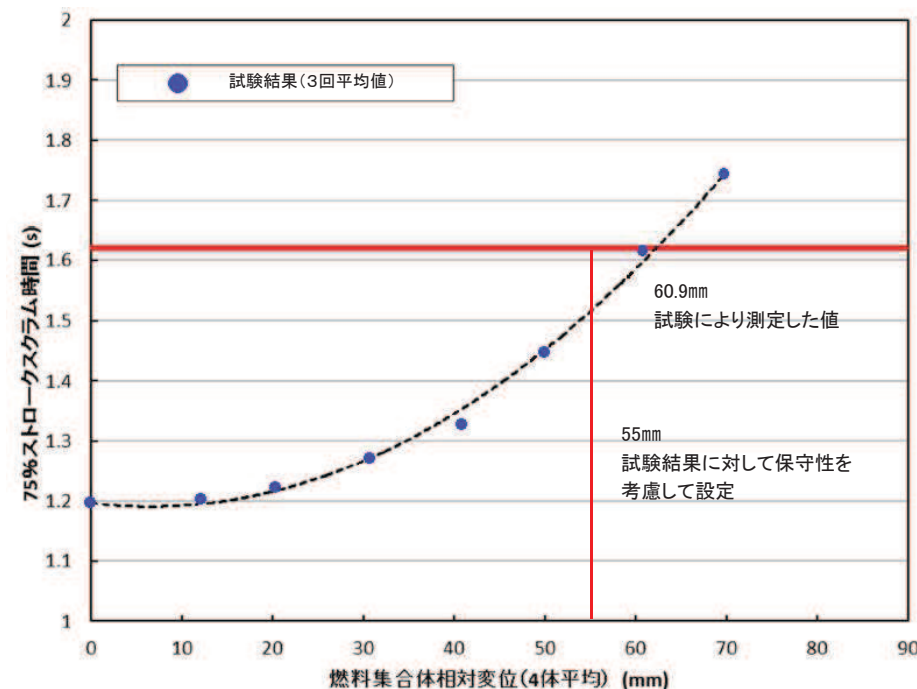
第705回審査会合資料(2019年4月16日)資料1-1-6より抜粋

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クムレータ圧力の調整で模擬 |



制御棒挿入性試験装置

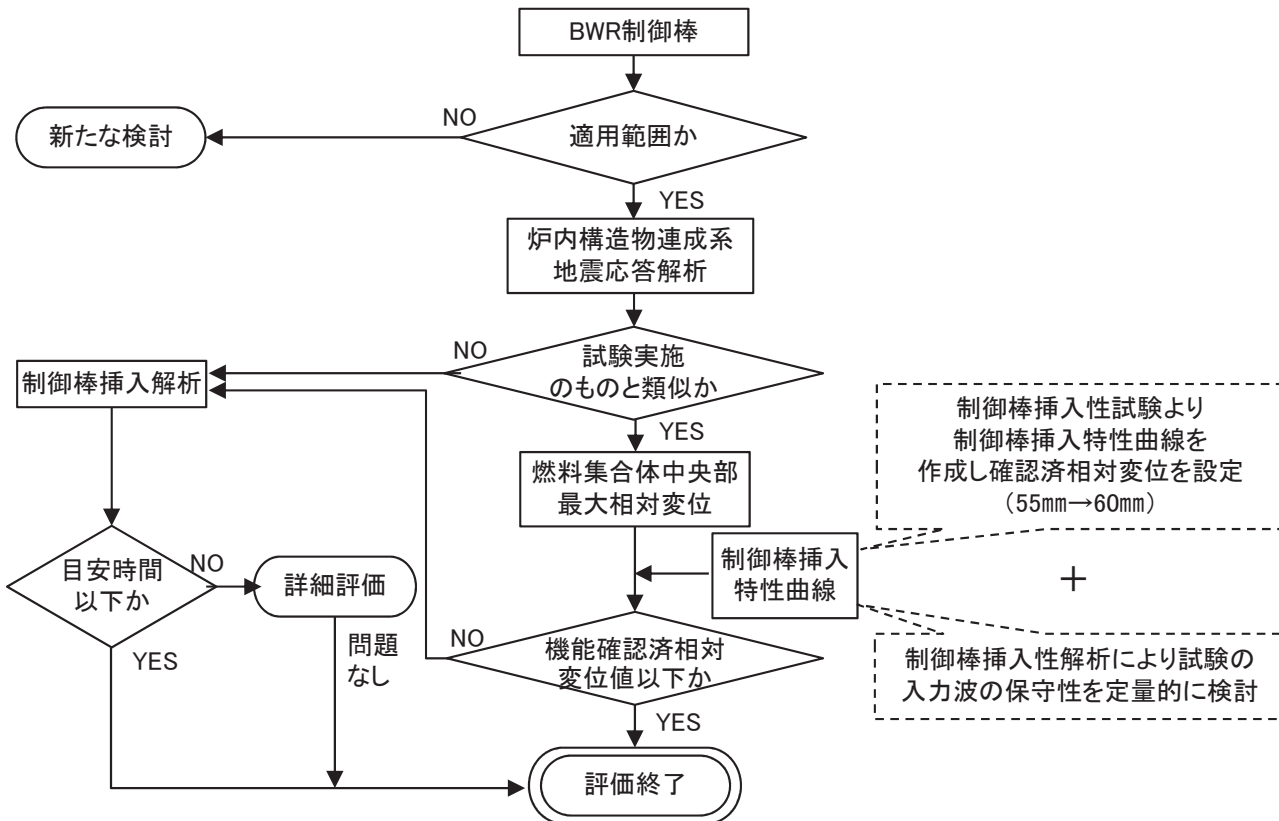


制御棒挿入性試験結果

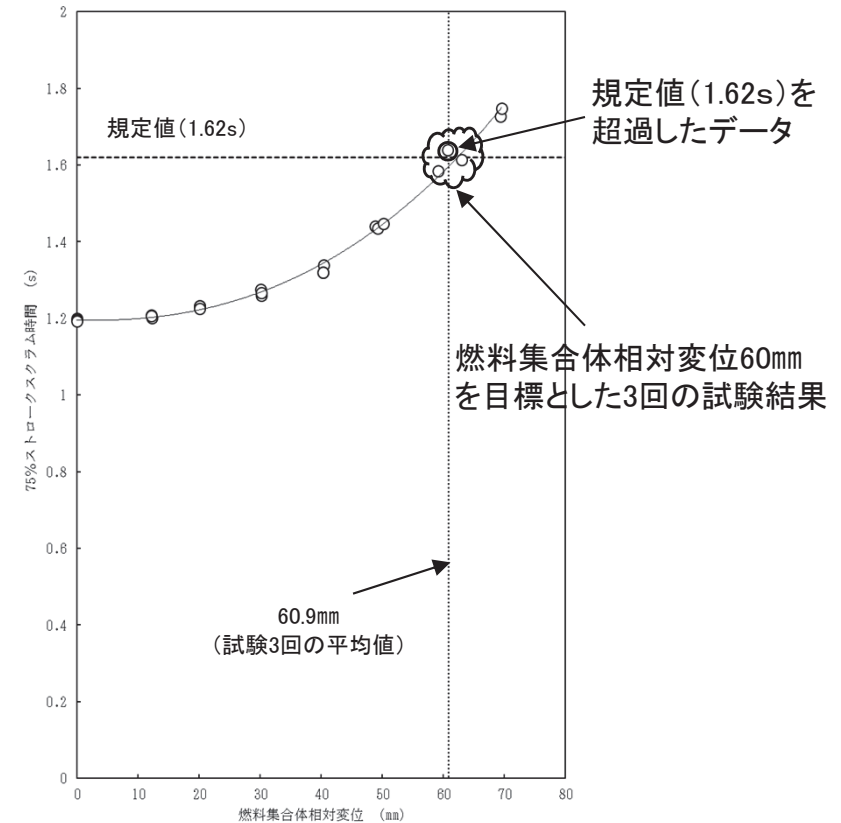
【参考1】 女川2号機における制御棒挿入性評価方法(4/4)

(工認段階での説明内容)

- 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

【参考2】 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。

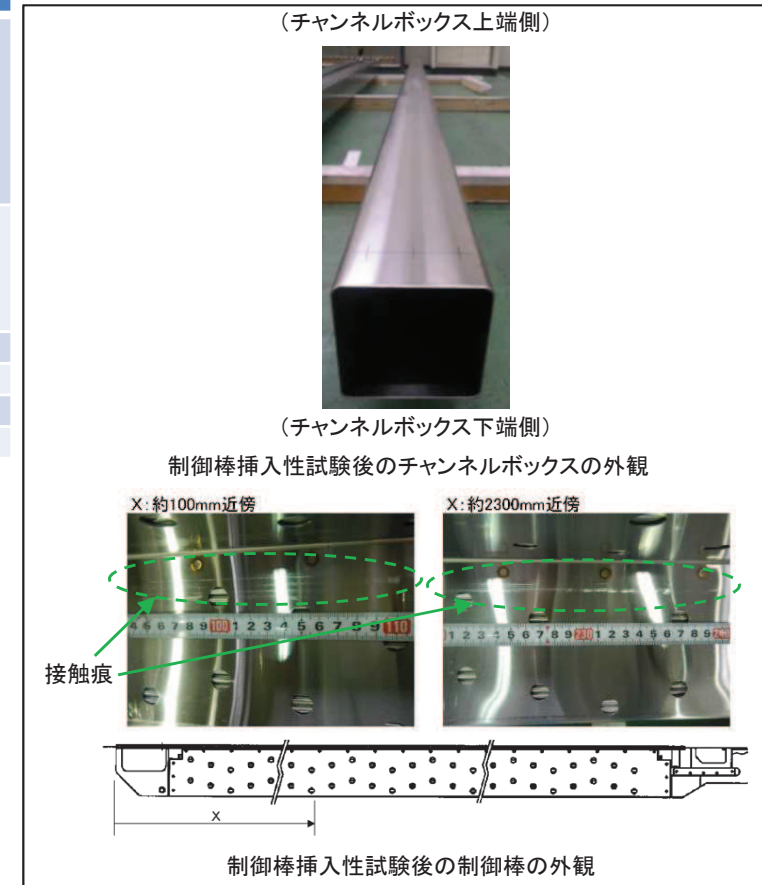
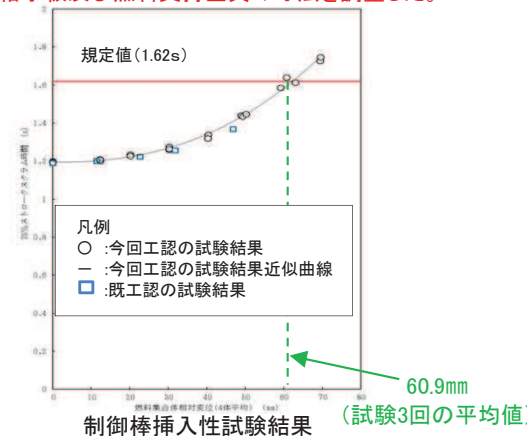
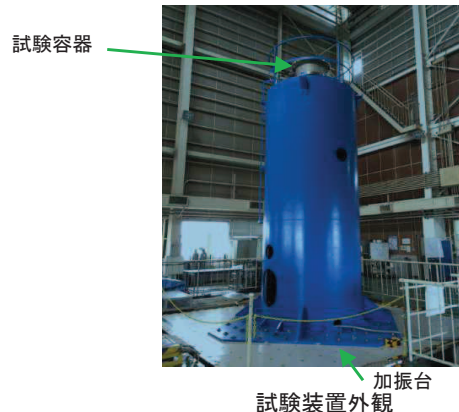
既工認と今回工認の試験条件の比較

| 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 |

* 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。また、チャンネルボックス板厚を調整したことでチャンネルボックス間の間隙が広くなり、制御棒挿入性に影響を与えないように、上部格子板及び燃料支持金具の寸法を調整した。



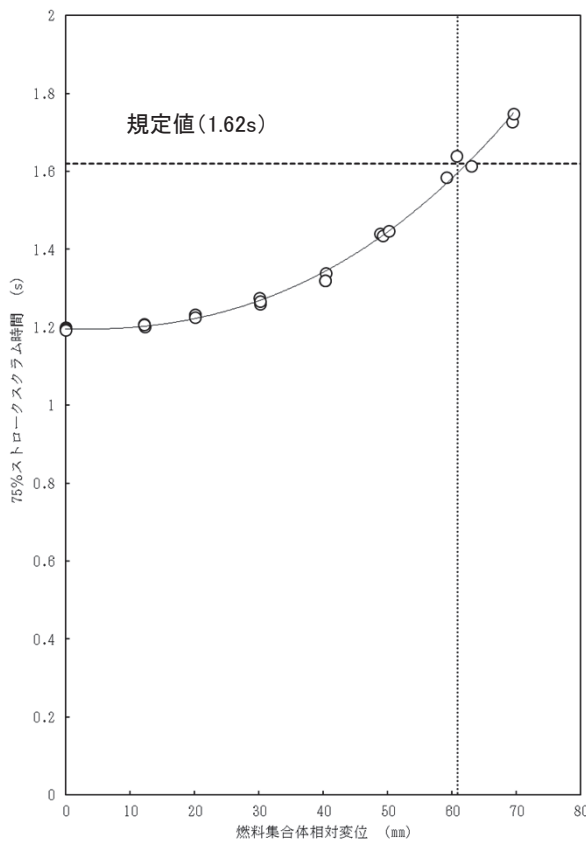
接触痕はあるものの、制御棒挿入性に影響を及ぼすような有意な変形や損傷がないことを確認

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3】 制御棒挿入性解析の概要(1/3)

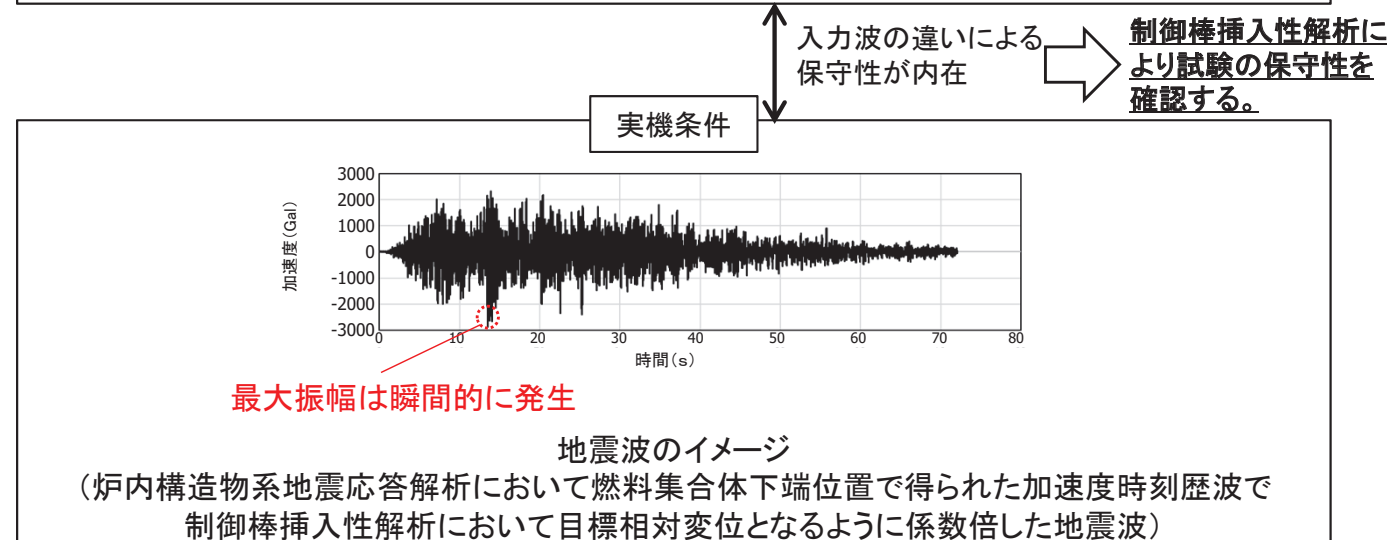
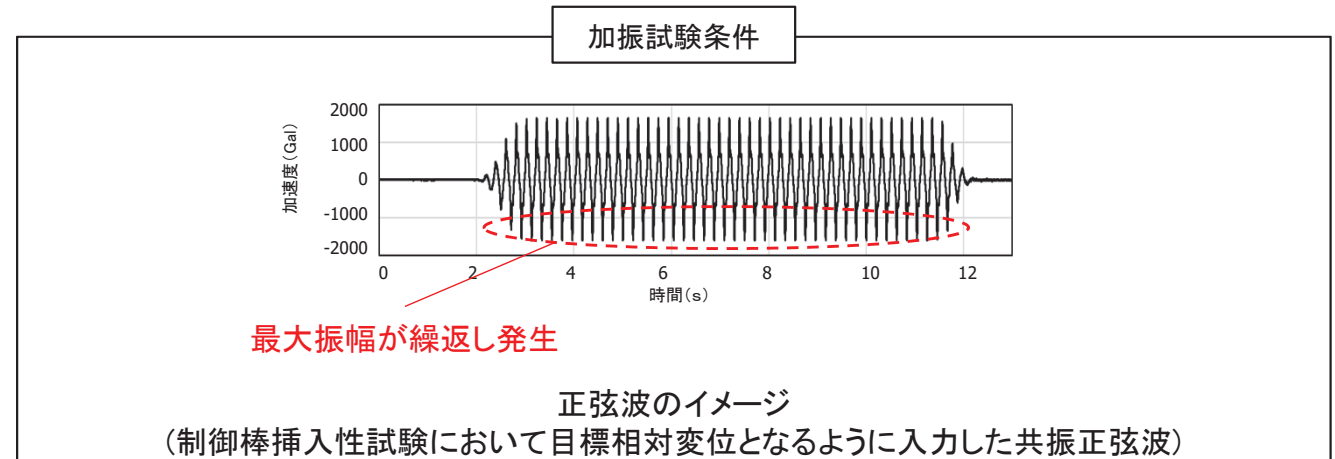
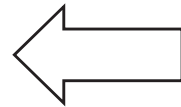
第993回審査会合(2021年7月29日)資料2-4抜粋, 赤字部変更

- 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

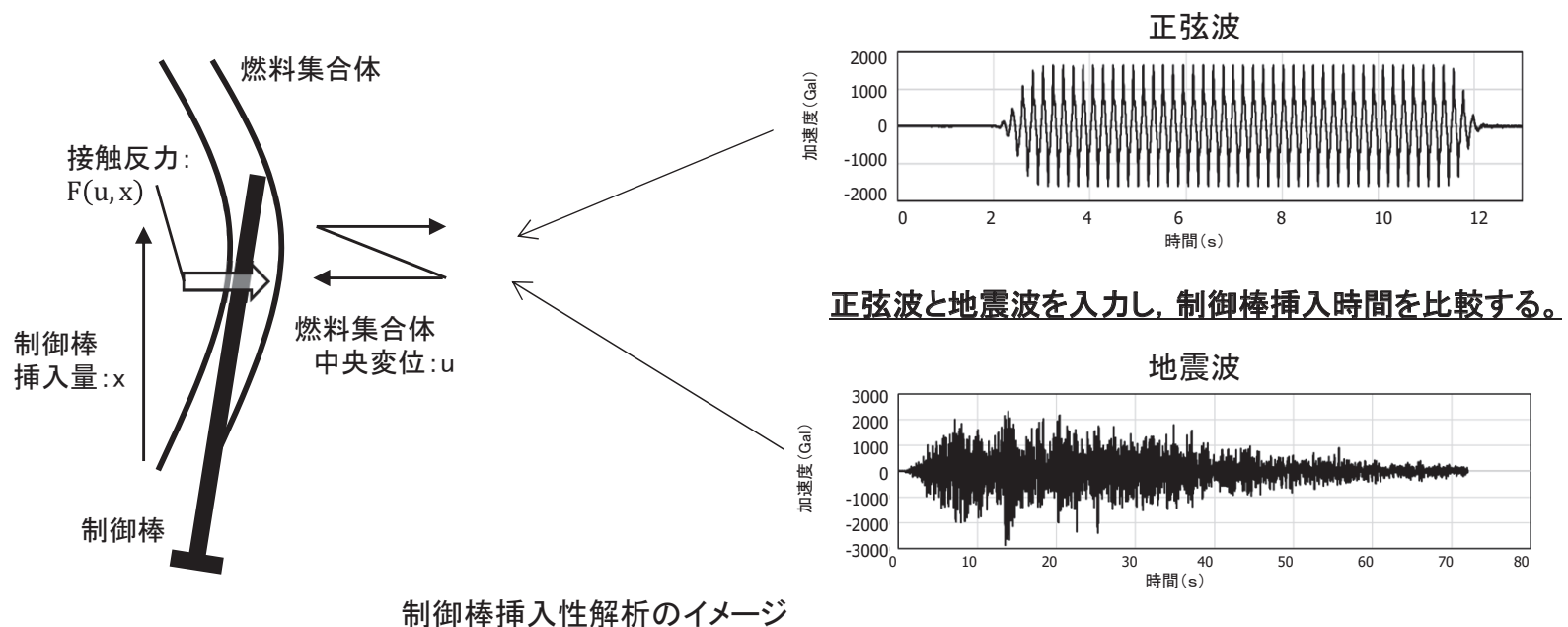
正弦波による
試験結果



【参考3】 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, 赤字部変更

- 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4参照)
- 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5参照)



【参考3】 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

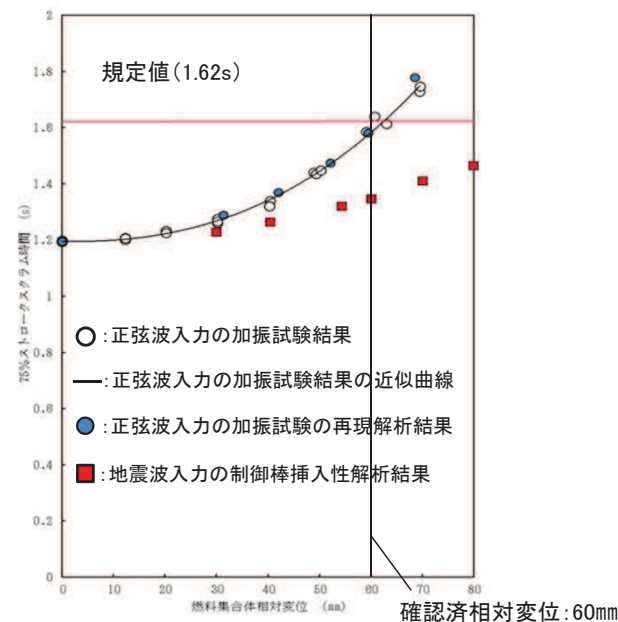
- 以下に示す2通りの条件によって制御棒挿入性解析を実施した。
 - ・ 制御棒挿入性試験に使用した正弦波
 - ・ 今回工認において燃料集合体相対変位が最大(54.2mm)となった基準地震動S_s-D2
- 解析の結果, 地震波を用いた制御棒挿入解析による制御棒挿入時間(■)は正弦波を用いた制御棒挿入性試験による制御棒挿入時間(○)よりも十分に早いことから, 制御棒挿入性試験が保守性を有していることを確認した。なお, 既往知見*においても地震波入力とした制御棒挿入性に係る検討が実施されており, 今回工認と同様, 地震波入力とした場合には, 制御棒挿入時間は規定値(1.62s)に対して十分に余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



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, 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, 赤字部変更

- 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。

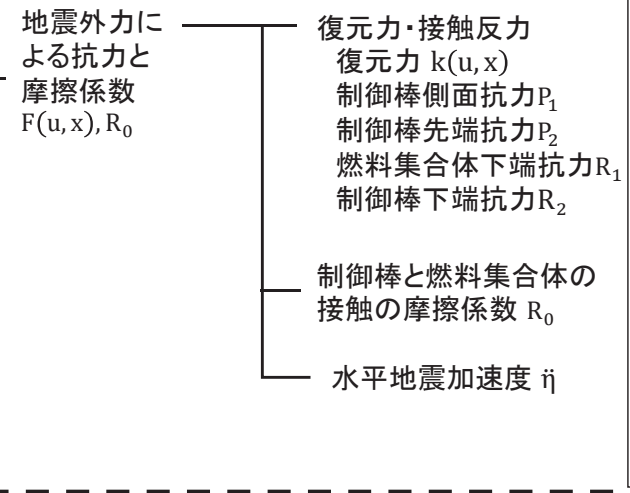
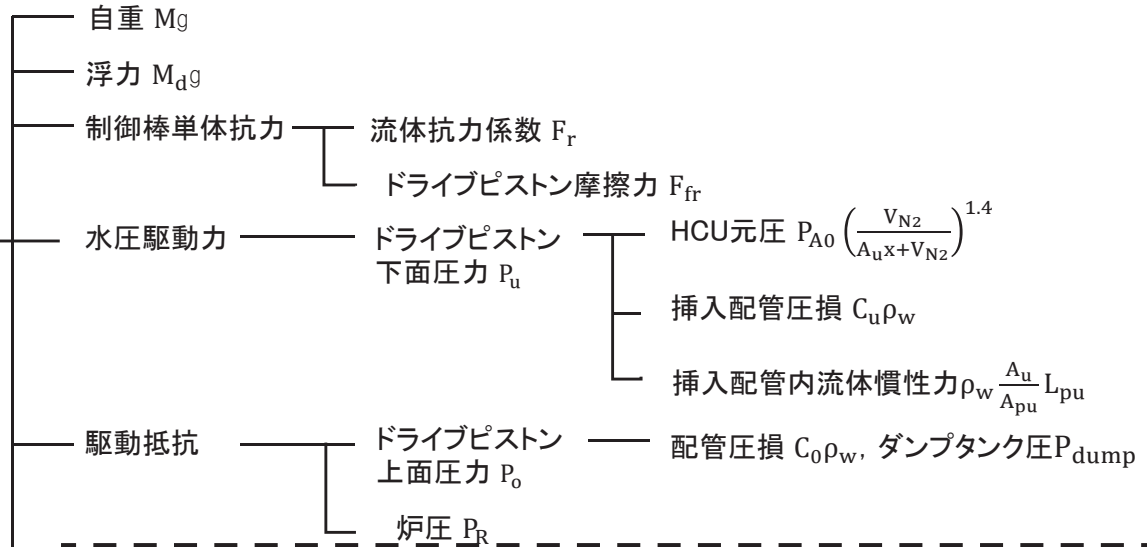
制御棒挿入運動方程式 制御棒挿入量 x

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

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

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

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

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

燃料集合体質量 m_f , 燃料集合体の水の付加質量 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 , 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

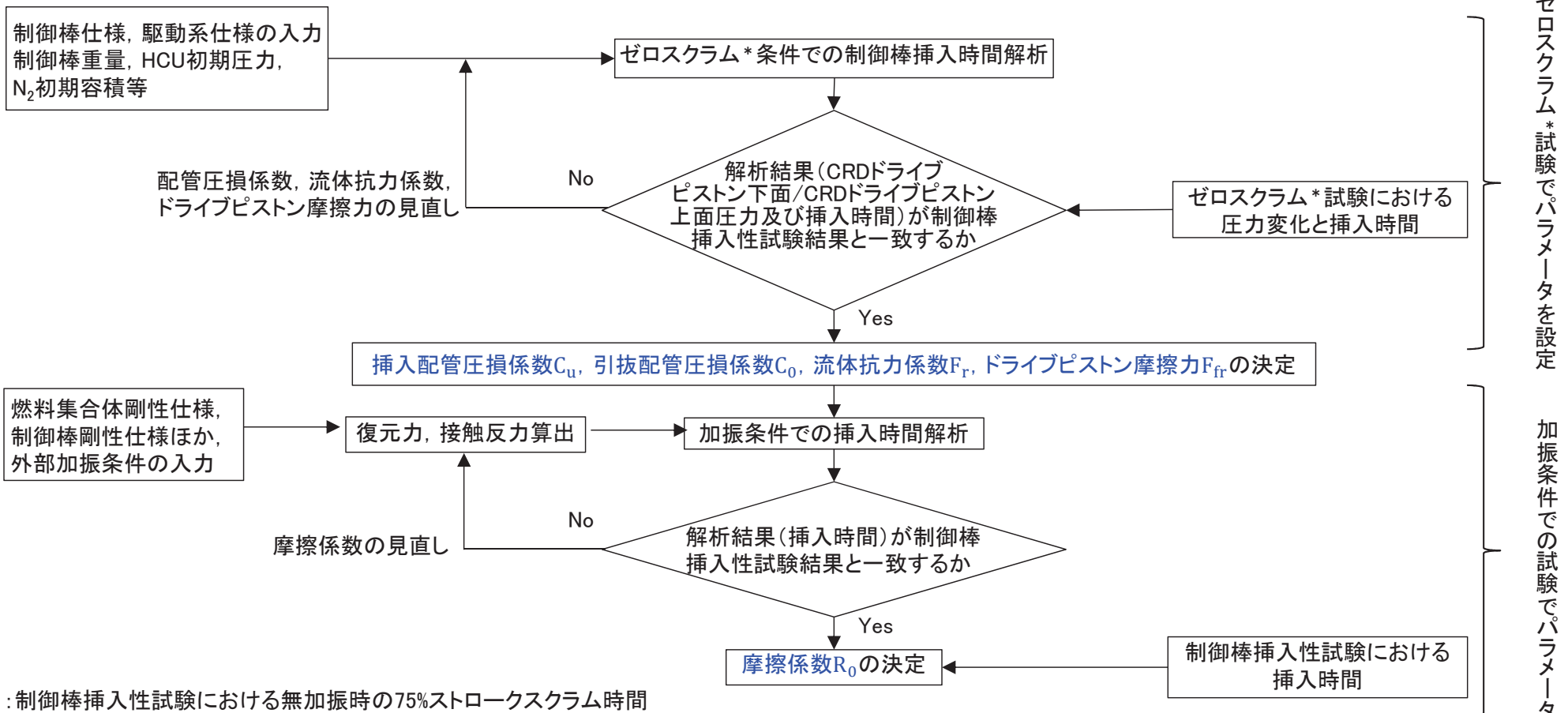
制御棒と燃料集合体の接触による力

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, 赤字部変更

- CR-INにおいては、複数の解析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の各解析パラメータは、設備の形状や仕様等で定まる値及び今回の新規規制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_0 、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**解析**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**解析**パラメータの設定値

| 解析パラメータ | 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

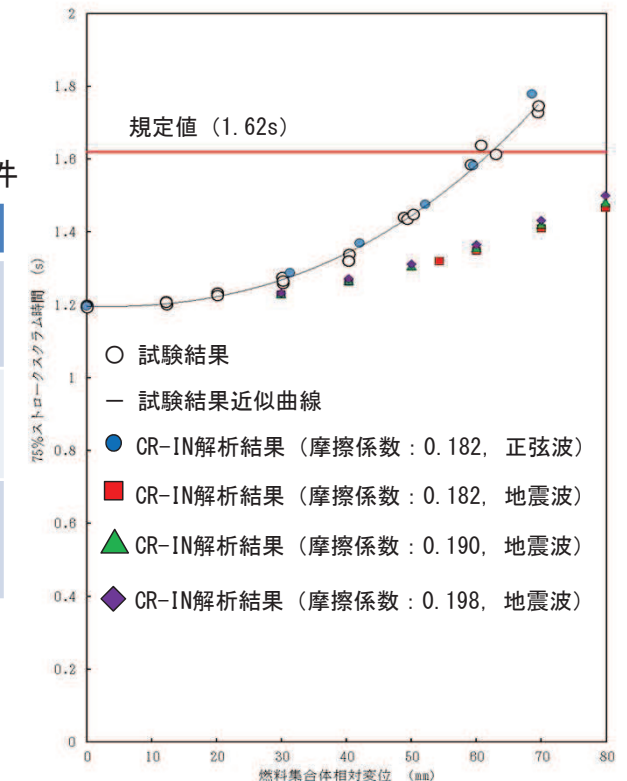
- 今回工認における摩擦係数 R_0 は、各目標変位(30mm~70mm)における摩擦係数平均値のうち、最大値となる目標変位60mmにおける値0.182を設定している。
- 摩擦力は制御棒挿入時の抵抗力として働くため、摩擦係数が高いほど制御棒挿入時間は遅くなる。そこで、制御棒挿入時間に対する摩擦係数の影響を確認するため、各試験結果から得られる摩擦係数の最大値0.190及びばらつきを考慮するため試験結果から得られる摩擦係数の平均値(0.166)に $+2\sigma$ を考慮した摩擦係数0.198を用いて制御棒挿入時間を確認した。
- 燃料集合体相対変位が大きくなるにつれて制御棒挿入時間が遅くな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

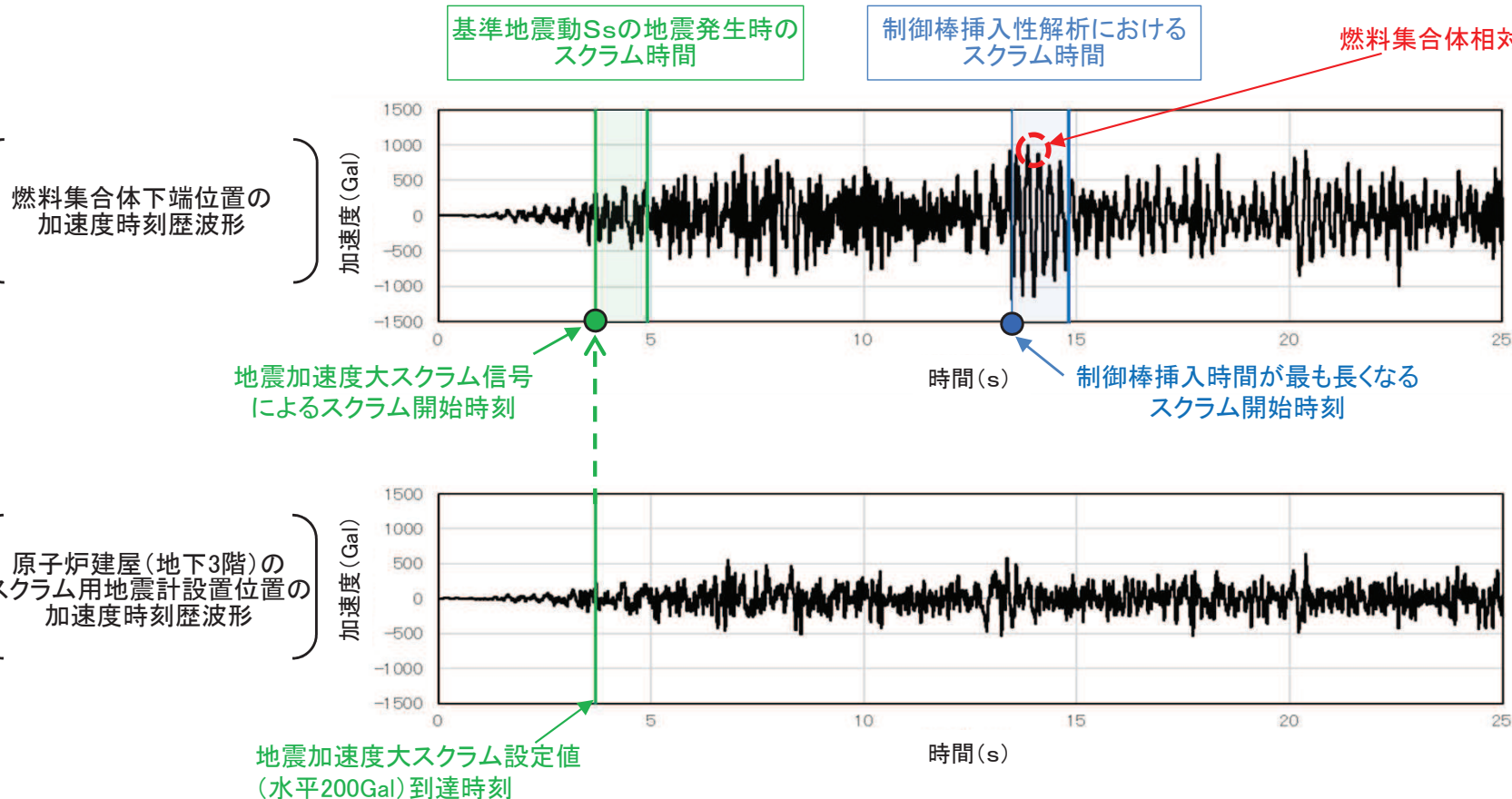


* : 試験結果とCR-INでの挿入性解析結果が整合するよう調整した結果から得られる摩擦係数

【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との比較(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

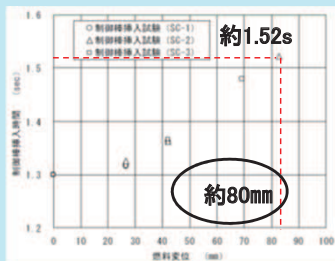
制御棒挿入性試験(実機試験)

【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



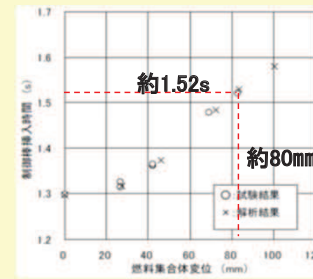
(図A)

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
(常温)を考慮

【結果】
解析結果は実機
制御棒挿入性
試験と一致



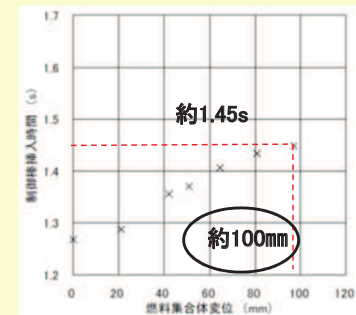
(図B)

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

【参考6】 制御棒挿入性評価に係る既往知見との比較(2/2)

➤ 制御棒挿入性評価について、既往知見*1の結果と女川2号機の結果を比較した。比較結果は以下のとおり。(なお、既往知見*1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、以下の比較結果は推定を含む。)

| | 試験条件 | 実機条件 | 試験条件と実機条件との比較 (既往知見と女川2号機の差異 有り:塗りつぶし有り, 無し:塗りつぶし無し) | 既往知見と女川2号機の 比較結果に対する考察 (既往知見と女川2号機の差異 有り:塗りつぶし有り, 無し:塗りつぶし無し) | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---|---|--|--|----|----|------------------------|---------------|---------|---------------|-----|-----------------------------|-------------|---|-------|--|
| 既往知見 *1 | <p>Graph showing control rod insertion time (s) vs fuel assembly displacement (mm) for test conditions. Data points: 0mm (1.30s), 約80mm (1.52s). Difference at 80mm is 0.22s.</p> | <p>Graph showing control rod insertion time (s) vs fuel assembly displacement (mm) for actual conditions. Data points: 0mm (1.25s), 約80mm (1.45s). Difference at 80mm is 0.20s.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ○ゼロスクラム*2における制御棒挿入時間は、試験条件に比べ実機条件の方が早い。 ●燃料集合体相対変位80mmにおける制御棒挿入時間は、試験条件に比べ実機条件の方が早い。 ●燃料集合体相対変位0mmと燃料集合体相対変位80mmに対する制御棒挿入時間の時間遅れは、試験条件に比べ実機条件の方が小さい。 | <ul style="list-style-type: none"> ○ゼロスクラム*2における制御棒挿入時間 ⇒既往知見*1と女川2号機で同様の結果である。いずれの結果も、試験条件と実機条件の温度の違いにより水の密度が低下し挿入抗力が低下したためと考えられる。 ●燃料集合体相対変位80mmにおける制御棒挿入時間及び制御棒挿入時間の時間遅れ ⇒既往知見*1と女川2号機で異なる結果である。既往知見*1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詳細な分析は行うことはできないが、以下項目の差異によるものと推定される。 | | | | | | | | | | | | |
| 女川2号機 | <p>Graph showing 75% stroke scram time (s) vs fuel assembly displacement (mm) for test conditions. Data points: 0mm (1.20s), 80mm (1.47s). Difference at 80mm is 0.27s.</p> | <p>Graph showing 75% stroke scram time (s) vs fuel assembly displacement (mm) for actual conditions. Data points: 0mm (1.13s), 80mm (1.47s). Friction coefficients: 1.2倍 (0.50s), 1.0倍 (0.37s).</p> | <ul style="list-style-type: none"> ○ゼロスクラム*2における制御棒挿入時間は、試験条件に比べ実機条件の方が早い。 ●燃料集合体相対変位80mmにおける制御棒挿入時間は、試験条件に比べ実機条件の方が遅い。 ●燃料集合体相対変位0mmと燃料集合体相対変位80mmに対する制御棒挿入時間の時間遅れは、試験条件に比べ実機条件の方が大きい。 | <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>差異</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>プラント設計 (制御棒駆動系システム)</td> <td>詳細内容が公開されていない</td> </tr> <tr> <td>解析プログラム</td> <td>詳細内容が公開されていない</td> </tr> <tr> <td>入力波</td> <td>波形の異なる波を入力スクラム開始時刻等詳細内容は非公開</td> </tr> <tr> <td>チャンネルボックス設計</td> <td>既往知見は試験条件及び実機条件で異なる弾塑性特性を入力 女川2号機は試験において高温模擬</td> </tr> <tr> <td>制御棒設計</td> <td>既往知見はハフニウムフラットチューブ型 女川2号機はボロンカーバイド型</td> </tr> </tbody> </table> | 項目 | 差異 | プラント設計 (制御棒駆動系システム) | 詳細内容が公開されていない | 解析プログラム | 詳細内容が公開されていない | 入力波 | 波形の異なる波を入力スクラム開始時刻等詳細内容は非公開 | チャンネルボックス設計 | 既往知見は試験条件及び実機条件で異なる弾塑性特性を入力 女川2号機は試験において高温模擬 | 制御棒設計 | 既往知見はハフニウムフラットチューブ型 女川2号機はボロンカーバイド型 |
| 項目 | 差異 | | | | | | | | | | | | | | | |
| プラント設計 (制御棒駆動系システム) | 詳細内容が公開されていない | | | | | | | | | | | | | | | |
| 解析プログラム | 詳細内容が公開されていない | | | | | | | | | | | | | | | |
| 入力波 | 波形の異なる波を入力スクラム開始時刻等詳細内容は非公開 | | | | | | | | | | | | | | | |
| チャンネルボックス設計 | 既往知見は試験条件及び実機条件で異なる弾塑性特性を入力 女川2号機は試験において高温模擬 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 制御棒設計 | 既往知見はハフニウムフラットチューブ型 女川2号機はボロンカーバイド型 | | | | | | | | | | | | | | | |

*1: 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)

*2: 無加振時の75%ストロークスクラム時間