

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 | 02-補-E-03-0600-16_改0 |
| 提出年月日 | 2021年 1月22日 |

補足-600-16 制御棒の挿入性評価について

2021年1月

東北電力株式会社

目次

| | |
|------------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 今回工認における制御棒挿入性試験データ範囲の拡充..... | 2 |
| 2.1 既工認と今回工認で実施した制御棒挿入性試験の比較..... | 3 |
| 2.2 チャンネルボックス板厚の調整..... | 4 |
| 2.3 制御棒挿入性試験結果 | 7 |
| 2.4 チャンネルボックス健全性確認結果..... | 9 |
| 2.5 制御棒健全性確認結果 | 10 |
| 2.6 既往知見を踏まえた制御棒挿入性試験結果に対する考察..... | 12 |
| 2.6.1 制御棒挿入時間 | 12 |
| 2.6.2 弾塑性特性 | 12 |
| 3. 制御棒挿入性評価に係る妥当性..... | 17 |
| 3.1 実機条件に対する差異項目の抽出及び分類..... | 21 |
| 3.2 実機条件に対する差異分類に応じた検討..... | 23 |
| 3.2.1 チャンネルボックスの弾塑性特性の影響確認..... | 23 |
| 3.2.2 制御棒挿入性試験における保守性の確認..... | 27 |
| 3.2.3 鉛直方向加速度の影響確認..... | 30 |
| 3.3 実機条件との差異に対する影響検討の総合的評価..... | 36 |
| 4. まとめ | 38 |
| 5. 引用文献 | 38 |

別紙1 CR-IN の概要

1. はじめに

女川原子力発電所第2号機における制御棒挿入性評価については、「原子力発電所耐震設計技術指針J E A G 4 6 0 1-1991 追補版」(以下「J E A G 4 6 0 1-1991 追補版という。」)での評価手法を適用し、炉内構造物系の地震応答解析から得られた燃料集合体相対変位が、制御棒挿入性試験で得られた確認済相対変位以内であることを確認した。

女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性評価に当たり、新規制基準による基準地震動 S_s の増大に伴い燃料集合体相対変位が増大したことから、既工認と同様の制御棒挿入試験を実施し、確認済相対変位のデータ範囲を拡充した。

また、地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出および制御棒挿入試験による確認済相対変位の設定について、それぞれ実機条件との差異を抽出し、各差異項目における影響を検討した上で制御棒挿入性評価の妥当性を総合的に確認した。

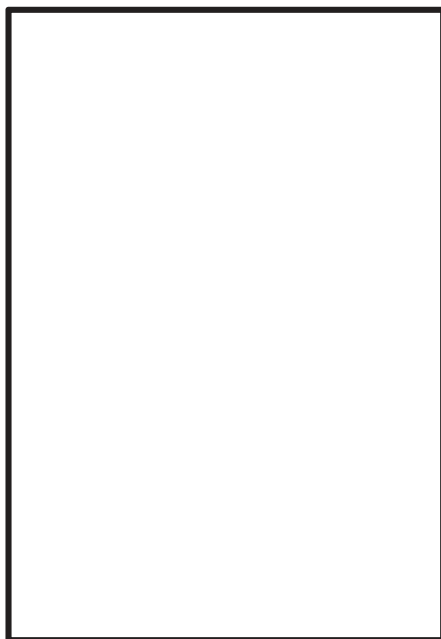
本資料は、女川原子力発電所第2号機における燃料集合体相対変位データ範囲拡充のための制御棒挿入試験及びそれらを踏まえた制御棒挿入性評価の妥当性を説明するものである。

2. 今回工認における制御棒挿入性試験データ範囲の拡充

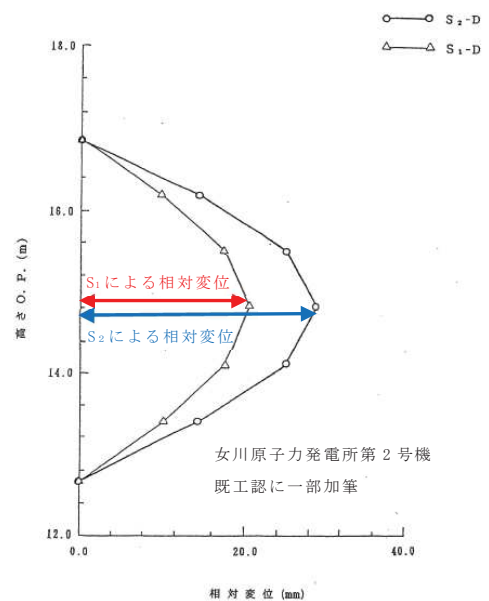
女川原子力発電所第2号機の既工認の制御棒挿入性に係る評価では、燃料集合体相対変位について、既工認を踏まえて確認済相対変位を約40mmとしていたが、新規制基準による基準地震動 S_s の増大を考慮し、既工認と同様の制御棒挿入性試験を実施し、燃料集合体相対変位データ範囲を拡充している(図1)。

試験の結果、75%ストロークスクラムに要する時間が規定値(1.62s)に達する際の燃料集合体の相対変位として60.9mm(試験3回の平均値)が得られた。また、制御棒挿入性試験後のチャンネルボックス及び制御棒の健全性に問題はなく、制御棒の挿入性に係る機能に影響を及ぼすものではないことを確認した。

本章では、今回工認における制御棒挿入性試験データ範囲の拡充について、試験条件の既工認との比較、制御棒挿入性試験結果、試験後のチャンネルボックス及び制御棒の健全性確認結果及び既往知見を踏まえた考察を纏める。



既工認との比較概要図



燃料集合体の上下端の変位を0とした場合の中央部の最大変位


図1 燃料集合体相対変位データ範囲の拡充

2.1 既工認と今回工認で実施した制御棒挿入性試験の比較

今回工認の制御棒挿入性試験は、基本的に既工認同様の試験条件としている。ただし、既工認より大きな変位でのデータを拡充するためには加振台の性能による制限を受けることから、今回工認では、チャンネルボックスの変位特性を考慮し、チャンネルボックスの板厚を調整することで大きな相対変位を付加した（板厚の調整方法詳細については第2.2項に示す）。

表1に既工認と今回工認の制御棒挿入性試験の比較結果を示す。また、図2に試験装置概要、図3に試験装置外観を示す。

表1 既工認と今回工認の試験の比較

| 条件項目 | 既工認 | 今回工認 | 備考 |
|-------------|--|---|---|
| 機器・装置構成 | <ul style="list-style-type: none"> ・模擬燃料集合体（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 | 同左 | <ul style="list-style-type: none"> ・模擬燃料集合体は鉛にて質量模擬 ・その他機器は実機仕様 ・東芝エネルギーシステムズ（株）エネルギーシステム技術開発センターにて試験実施 |
| 試験方法 | <ul style="list-style-type: none"> ・加振により燃料集合体に相対変位を発生させ、その状態で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（0～40 mm範囲で10 mm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（0～70 mm範囲で10 mm刻みに設定）に対して3回試験を実施 | <p>「0～50mm 挿入性試験」</p> <ul style="list-style-type: none"> ・各条件での試験後に確認の結果、有意な変形はなく、再使用可能であると判断したため、同一のチャンネルボックスを使用 <p>「60mm, 70mm 挿入性試験」</p> <ul style="list-style-type: none"> ・1回ごとにチャンネルボックスを交換 |
| 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 |  | <ul style="list-style-type: none"> ・高温時の変位特性（加速度に対する変位量）と同等になるように設定 ・チャンネルボックス板厚を調整したことの配慮として、チャンネルボックス間の間隙を既工認と同等の条件に設定 |

注記*：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。

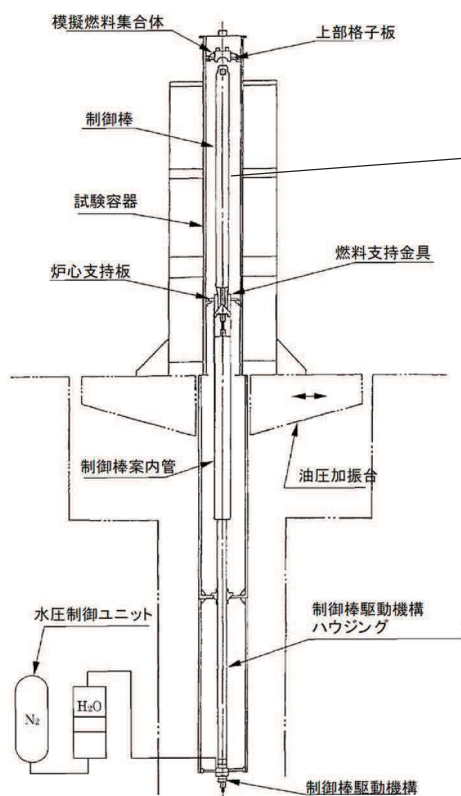


図2 試験装置概要



図3 試験装置外観

2.2 チャンネルボックス板厚の調整

今回工認では、より大きな相対変位の試験条件を設定するため、チャンネルボックスの板厚を調整し、制御棒挿入性試験を実施した。チャンネルボックスの仕様比較を表2、試験用チャンネルボックスの概略図を図4に示す。

板厚の調整に当たっては、チャンネルボックス材料（ジルカロイ）の実機使用環境（高温時）の縦弾性係数が、試験環境（常温時）と比較して約3割程度低くなる特徴を考慮している。ただし、試験環境（常温時）での縦弾性係数を実機使用環境（高温時）と同等に調整することは困難であることから、実機使用環境（高温時）の剛性を模擬するために実機仕様チャンネルボックスと試験用チャンネルボックスの変位特性（加速度に対する変位量）が同等になるように板厚を設定した。チャンネルボックスの相対変位—床応答加速度曲線（試験条件設定用）を図5に示す。

「試験用チャンネルボックス板厚決定方法」



今回工認の制御棒挿入性試験では、スクラム時の運転状態を考慮した際に最も高温状態になった場合を想定し、実機使用環境（高温時）として最高使用温度（302℃）を用いた。最高使用温度（302℃）は、運転状態における炉水温度（280～290℃程度）より高い温度設定であるが、約10～20℃程度の温度差によるチャンネルボックスの縦弾性係数の差は約1～2%*と小さいため、制御棒挿入性に与える影響は軽微であると考えられる。

なお、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ることがないように、上部格子板及び燃料支持金具の寸法を調整することでチャンネルボックス間の間隙を既工認と同等の条件に設定している。既工認と今回工認のチャンネルボックス配置図を図6に示す。

注記*： The elastic properties of zirconium alloy fuel cladding and pressure tubing materials (Journal of Nuclear Materials Vol179 H.E.Rosinger, D.O.Northwood) より

表 2 チャンネルボックスの仕様比較

| 対象 | 使用温度 (°C) | 縦弾性係数 (GPa) | 板厚 (mm) |
|------------------------|-----------|-------------|---|
| 実機仕様チャンネルボックス | 302 (高温) | 77.2 | 2.54 (100mil) |
| 試験用チャンネルボックス (板厚調整) | 20 (常温) | 98.0 |  |

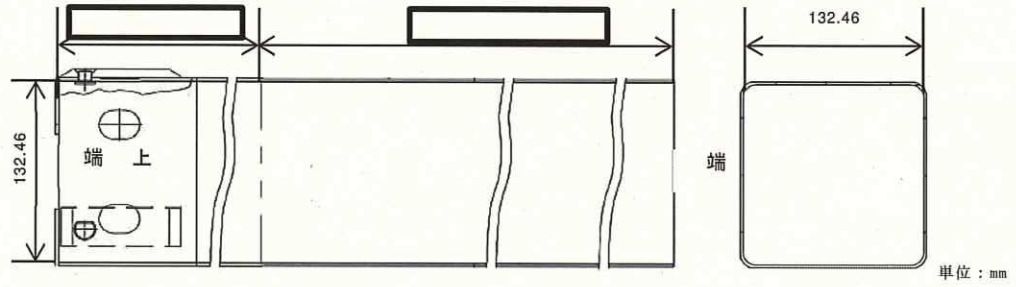


図 4 試験用チャンネルボックスの概略図

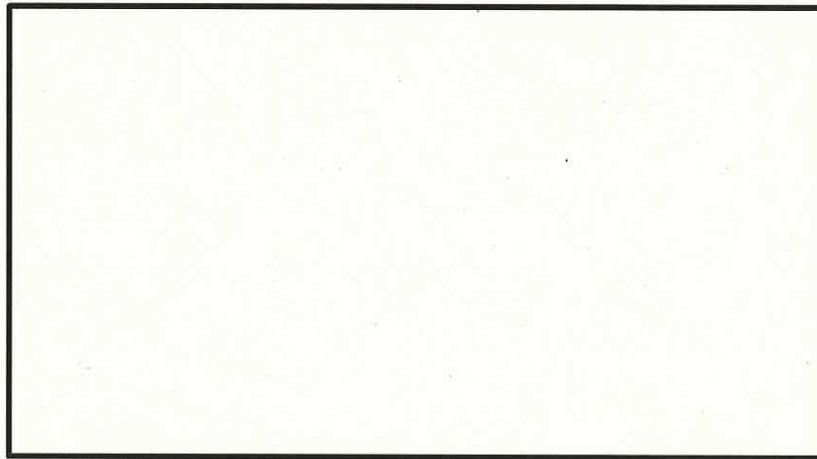


図 5 チャンネルボックスの相対変位—床応答加速度曲線
(試験条件設定用)

【既工認】

【今回工認】

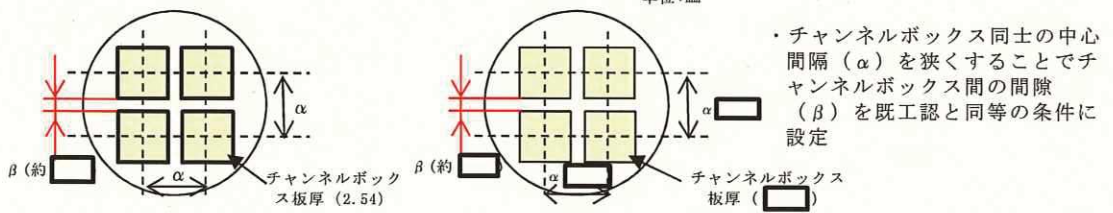


図 6 既工認と今回工認のチャンネルボックス配置図

2.3 制御棒挿入性試験結果

制御棒挿入性試験結果について図7に示す。今回工認の試験の結果、75%ストロークプログラムに要する時間が規定値（保安規定要求）である1.62sに達する際の燃料集合体相対変位は60.9mm（試験3回の平均値）となった。表3に女川原子力発電所第2号機工事計画認可申請における制御棒挿入性評価を示す。

なお、相対変位45mm程度までのデータ範囲において、今回工認と既工認時の制御棒挿入性については同様な傾向を示している。今回工認では、チャンネル板厚の違いから挿入抵抗は小さくなるが、相対変位45mm程度では、チャンネルボックスと制御棒の変形に起因する抵抗が小さく、差が生じなかったものと考えられる。

また、制御棒挿入性試験時の各燃料集合体中央部の変位データより、試験体を構成する4つの燃料集合体が同位相で動いていることを確認した（図8）。

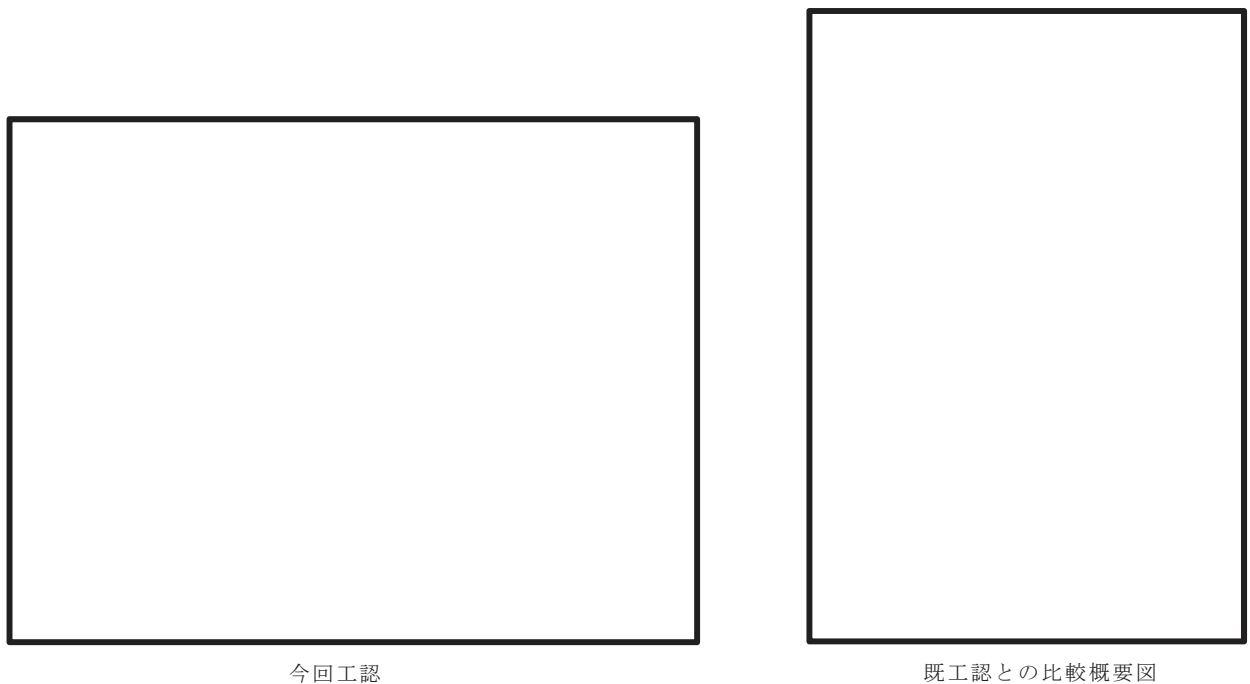


図7 制御棒挿入性試験結果

表3 女川原子力発電所第2号機工事計画認可申請における制御棒挿入性評価

| 制御棒挿入性 | 工事計画認可申請 | 基準地震動 | 燃料集合体相対変位 (mm) | 確認済相対変位 (mm) |
|--------|----------|---------------------------------|----------------|--------------|
| | 既工認 | S ₁ , S ₂ | 29.1 | 約40 |
| | 今回工認 | 基準地震動 S _s | 54.2 | 約60 |

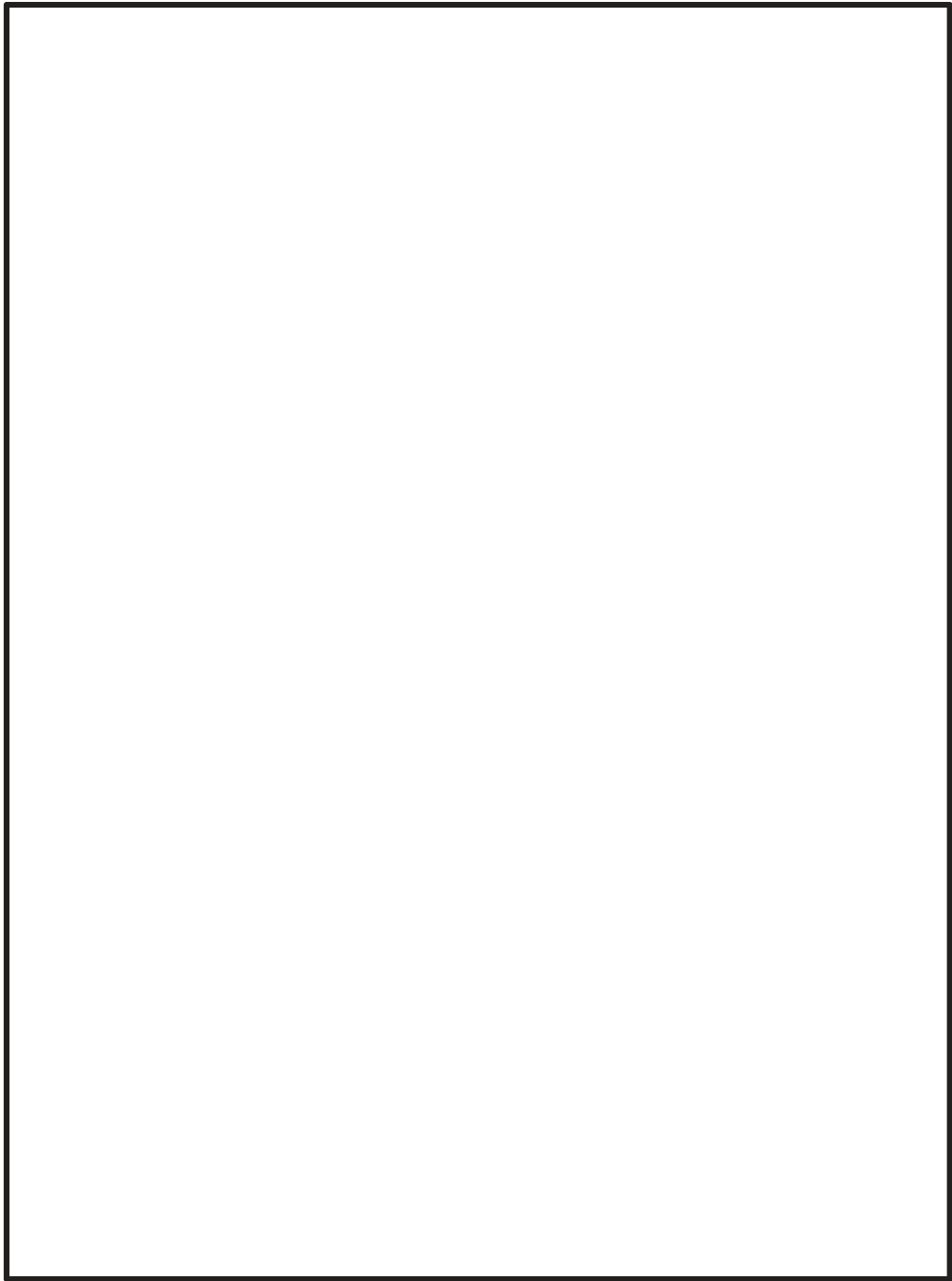


図 8 燃料集合体変位データ（燃料集合体目標変位 60 mm 試験実施時）

2.4 チャンネルボックス健全性確認結果

今回工認では、挿入性試験後、チャンネルボックスの外観点検を行い、制御棒の挿入性に影響を与える損傷がないことを確認した。

また、チャンネルボックスの詳細な測定の結果、長手の曲がり変化量が \square mm* 及び波状変形量が \square mm* であり、チャンネルボックスと制御棒との間隙 (約 \square mm) 及びチャンネルボックスと燃料被覆管との間隙 (\square mm 以上) に対して十分に小さいため、冷却材流路や燃料集合体に影響を及ぼすものではないことを確認した。表 4 にチャンネルボックス詳細測定結果、図 9 にチャンネルボックス周りの位置関係図を示す。

なお、チャンネルボックスと制御棒との間隙 (約 \square mm) は常温時の値であるが、高温時は上部格子板の熱膨張の影響によりチャンネルボックスと制御棒との間隙が広がり、制御棒挿入抵抗が小さくなるため、制御棒の挿入性や冷却材流路に影響を及ぼすものではない。

注記* : 60 mm 挿入性試験実施後の 3 回平均値

表 4 チャンネルボックス詳細測定結果

| 測定対象 | 曲がり変化量 (mm) | 波状変形量 (mm) |
|--|-------------|------------|
| チャンネルボックス (60 mm 挿入性試験 実施後 3 回平均値) | \square | \square |

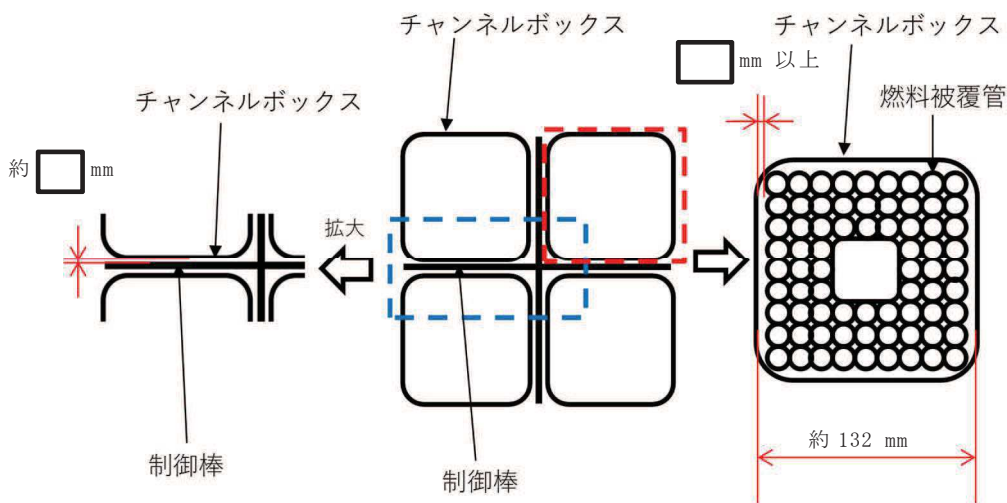
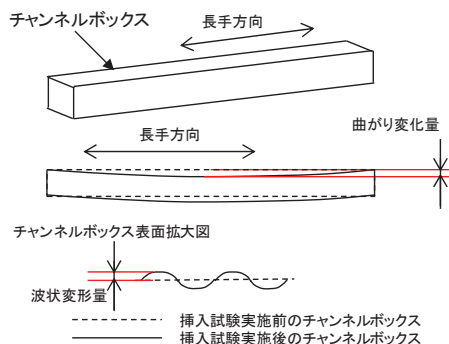


図 9 チャンネルボックス周りの位置関係図

2.5 制御棒健全性確認結果

今回工認の制御棒挿入性試験実施後、制御棒の外観点検を行った結果は、制御棒のブレード、タイロッドに変形等は認められたものの、いずれの試験条件においても制御棒を構成するブレード（シース、中性子吸収棒）、タイロッド、ローラ等の健全性に影響を与える有意な損傷がないことを確認した。

また、制御棒ブレードの厚さ測定の結果（表 5）、局所的なシースの膨れが一部の試験条件において確認されたものの、ブレード全体にわたって仕様値を超えるものではなく、中性子吸収棒を支持する上下端位置でのブレード厚さは仕様値以内であり、シース内の中性子吸収棒が移動することはなく、制御棒の機能に影響はない。なお、シースの膨れの状況は、ブレードの長手方向（上端～下端）及び横方向（ブレード中央部～翼端）の局所的な範囲に納まっており、ブレード厚さが最大（ mm）となった箇所においても制御棒とチャンネルボックスが接触してチャンネルボックスとの間隙を閉塞するものではない。さらに、シースが変形してブレード厚さが増加しても、制御棒の構造上、シースの冷却孔を通じて冷却材が流れるため、冷却材流量への影響もない（図 10～図 11）。

表 5 制御棒ブレードの厚さ測定結果*1

| ブレード厚さ | 仕様値*2 | 測定位置*3 | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|--------|---|---|-----|---|---|-------|---|---|--|--|--|
| | | 上端部 | | | 下端部 | | | 膨れ部*4 | | | | | |
| | | A | B | C | A | B | C | A | B | C | | | |
| 試験実施前 | | | | | | | | | | | | | |
| 試験実施後 | | | | | | | | | | | | | |

注記*1：相対変位 60 mm 目標における試験実施時（制御棒 3 体の平均値）

*2：寸法（ mm）は、中性子吸収棒を内包する制御棒として炉心格子から決まる値。公差（ mm）はメーカーの製造能力により設定される値。

*3：A：ブレードの翼端，B：ブレード中央部，C：タイロッド部

*4：ブレード長手方向における最大値の平均値

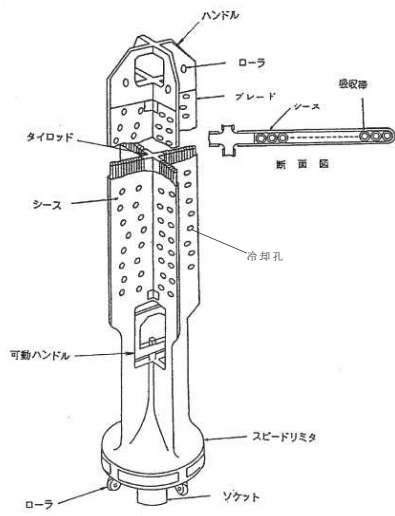


図 10 制御棒構造図

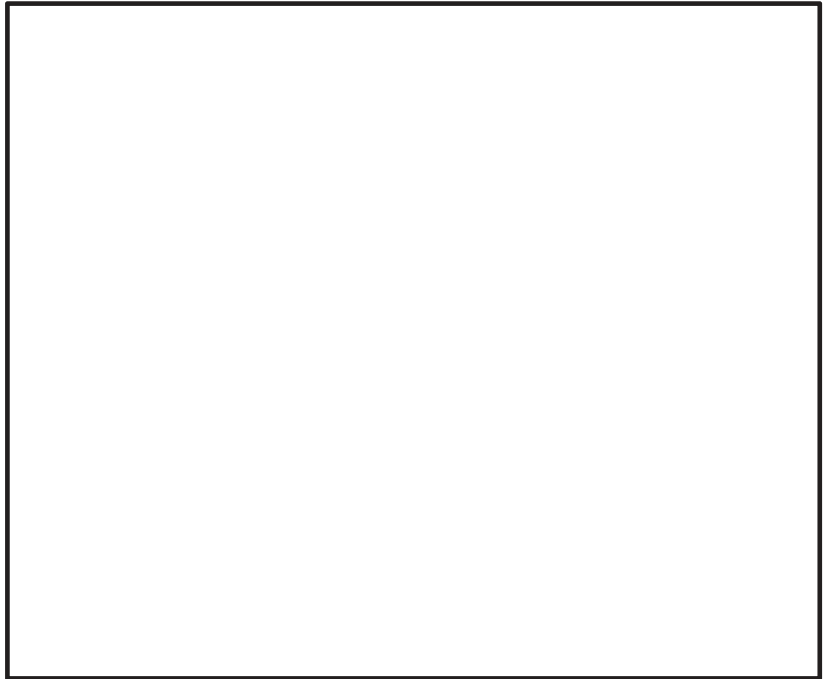


図 11 制御棒ブレード厚さ測定位置

2.6 既往知見を踏まえた制御棒挿入性試験結果に対する考察

制御棒挿入性に係る検討を実施した既往知見⁽¹⁾⁽²⁾を調査し、制御棒挿入時間及び弾塑性特性の観点で比較・検討することにより、今回工認で実施した制御棒挿入性試験結果について考察した。

2.6.1 制御棒挿入時間

既往知見及び女川原子力発電所第2号機制御棒挿入性試験の全体概要を図12に示す。

既往知見では、実機試験（常温状態）を模擬した制御棒挿入性解析を行い、大入力での地震に対しても制御棒挿入挙動を予測できることを確認するとともに、その解析手法を用いて、実機プラント条件（実機運転温度、圧力）における制御棒挿入性の限界状態を解析・評価している。

既往知見の解析結果（常温状態、実機プラント状態）は、女川原子力発電所第2号機の試験結果に対して、いずれも大きな変形領域において制御棒の挿入時間が短くなっている。この差異は、女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性試験は、保守的な試験条件の設定として、最大相対変位を繰り返し付加する正弦波加振であることに対して、既往知見の制御棒挿入性試験は、ランダム波を用いた加振であることによるものと考えられる。

ここで既往知見の結果を女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性に係る評価に適用することも可能と考えられるが、制御棒の挿入時間は加振波の特性に依存するため、既往知見の加振波であるランダム波と女川原子力発電所第2号機の基準地震動 S_s （7波）との関係を検討する必要がある。また、今回工認試験用の加振波として基準地震動 S_s を用いる場合、全ての基準地震動 S_s に対して、各相対変位条件における制御棒挿入性試験が必要になり現実的ではない。このため、女川原子力発電所第2号機の今回工認試験では、既工認と同様、保守的に正弦波加振とすることにより制御棒挿入性試験の簡便化を図り、相対変位データの拡充を行った。

2.6.2 弾塑性特性

より大きな相対変位における制御棒の挿入状態でチャンネルボックスの塑性化が考えられることについて、既往知見の制御棒挿入性解析では、材料試験に基づくチャンネルボックスの弾塑性特性（図13）を考慮しており、高温時でより大きな相対変位の条件では、常温時よりチャンネルボックスの剛性が低下するため、制御棒の挿入抵抗が減少し、制御棒の挿入時間が短くなると考察されている。一方、女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性試験では、チャンネルボックスの高温時と常温時の縦弾性係数を考慮して板厚を調整した試験体を用いて、大きな相対変位を付加した試験であることから、チャンネルボックスの弾塑性特性が試験体に実際に反映された結果となる。

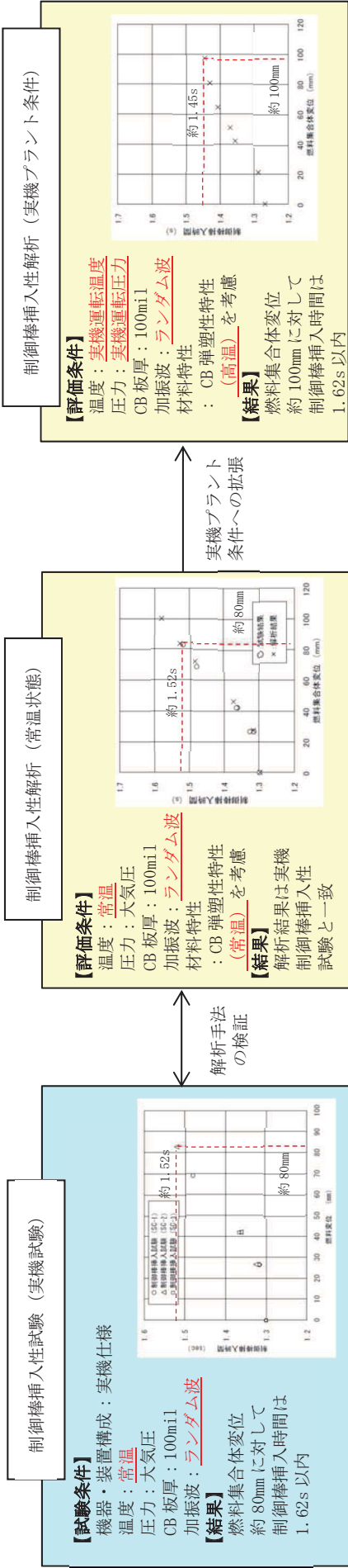
女川原子力発電所第 2 号機の今回工認試験における振動台加速度と相対変位の関係（図 14）によれば、相対変位が 45mm 程度の領域で塑性挙動が始まっている。女川原子力発電所第 2 号機の今回工認試験は常温で実施しているためチャンネルボックスの耐力（降伏点）は高温時のチャンネルボックスと差異があるが、高温時の縦弾性係数を考慮して板厚を調整したことにより、塑性挙動が始まる変位は、既往知見に示されている高温時の塑性開始変位（図 13）とおおむね一致する結果になっているものと考えられる。

なお、チャンネルボックスと燃料集合体の間には炉水が存在し、チャンネルボックスの温度は炉水温度に依存することから、実機運転状態における炉心上部と下部の炉水温度差は約 10℃（図 15）と小さいことを考慮すると、チャンネルボックスの長手方向で大きく温度分布及び弾塑性特性が異なることはないと考えられる。

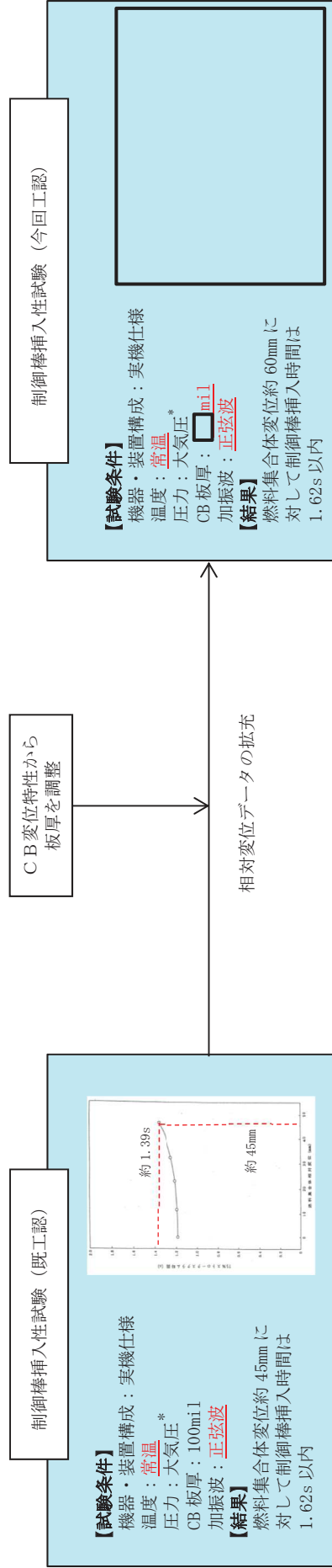
既往知見に示されている高温時のチャンネルボックスの弾塑性特性（図 13）は、4 点曲げ試験という静荷重条件による試験であり、変位が 40mm 程度を超える領域から、曲げモーメントの増加とともに大きく変位量が増加している。一方、女川原子力発電所第 2 号機の今回工認試験においては、振動台加速度と相対変位の関係（図 14）から分かるように、チャンネルボックスの相対変位が 45mm 程度の領域に入っても相対変位が極端に増加することはなく、振動台加速度を上げて変位が増加しにくくなる傾向が見られる。これは、既往知見の弾塑性特性は静的な荷重を負荷してチャンネルボックスを変形させた場合のものであるのに対して、女川原子力発電所第 2 号機の制御棒挿入性試験では、地震と同様の交番荷重による慣性加振で行われているため、チャンネルボックスが塑性領域に入ったことによる履歴減衰の効果や振動挙動（固有周期）の変化などが要因となり、変位の増加が抑えられたと考えられる。

なお、女川原子力発電所第 2 号機の地震応答解析では、チャンネルボックスを線形でモデル化し、燃料集合体の相対変位を評価しているため、チャンネルボックスの弾塑性特性の影響については 3 章にて詳細検討結果を説明する。

【既往知見】



【女川原子力発電所第2号機
今回工認試験】



*：炉圧模擬

図 12 既往知見及び女川原子力発電所第2号機制御棒挿入性試験の全体概要

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

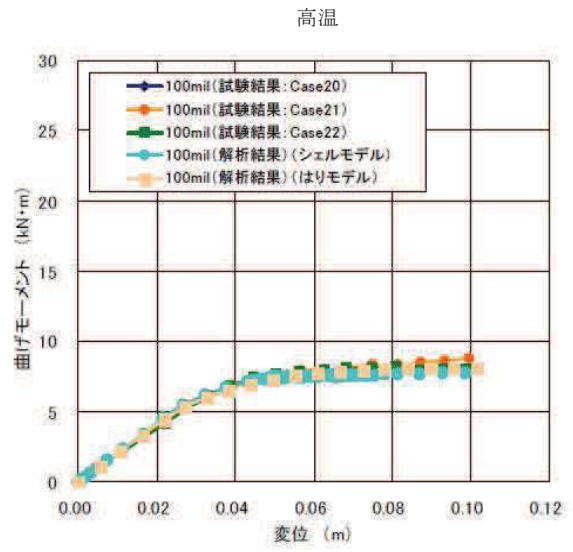
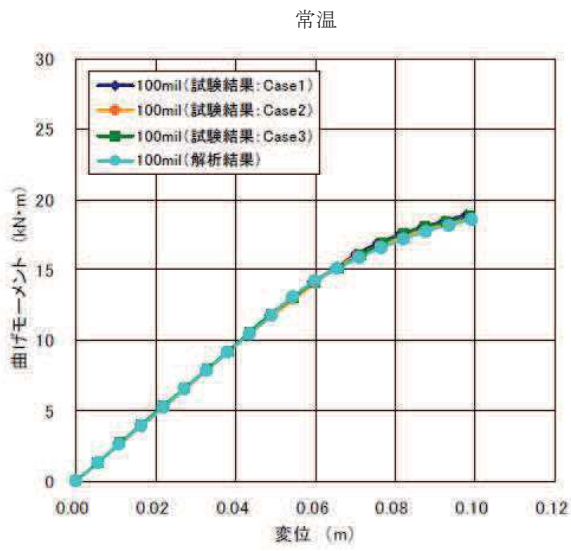


図 13 チャンネルボックス弾塑性特性（常温及び高温）（既往知見⁽²⁾）



図 14 振動台加速度と相対変位の関係図

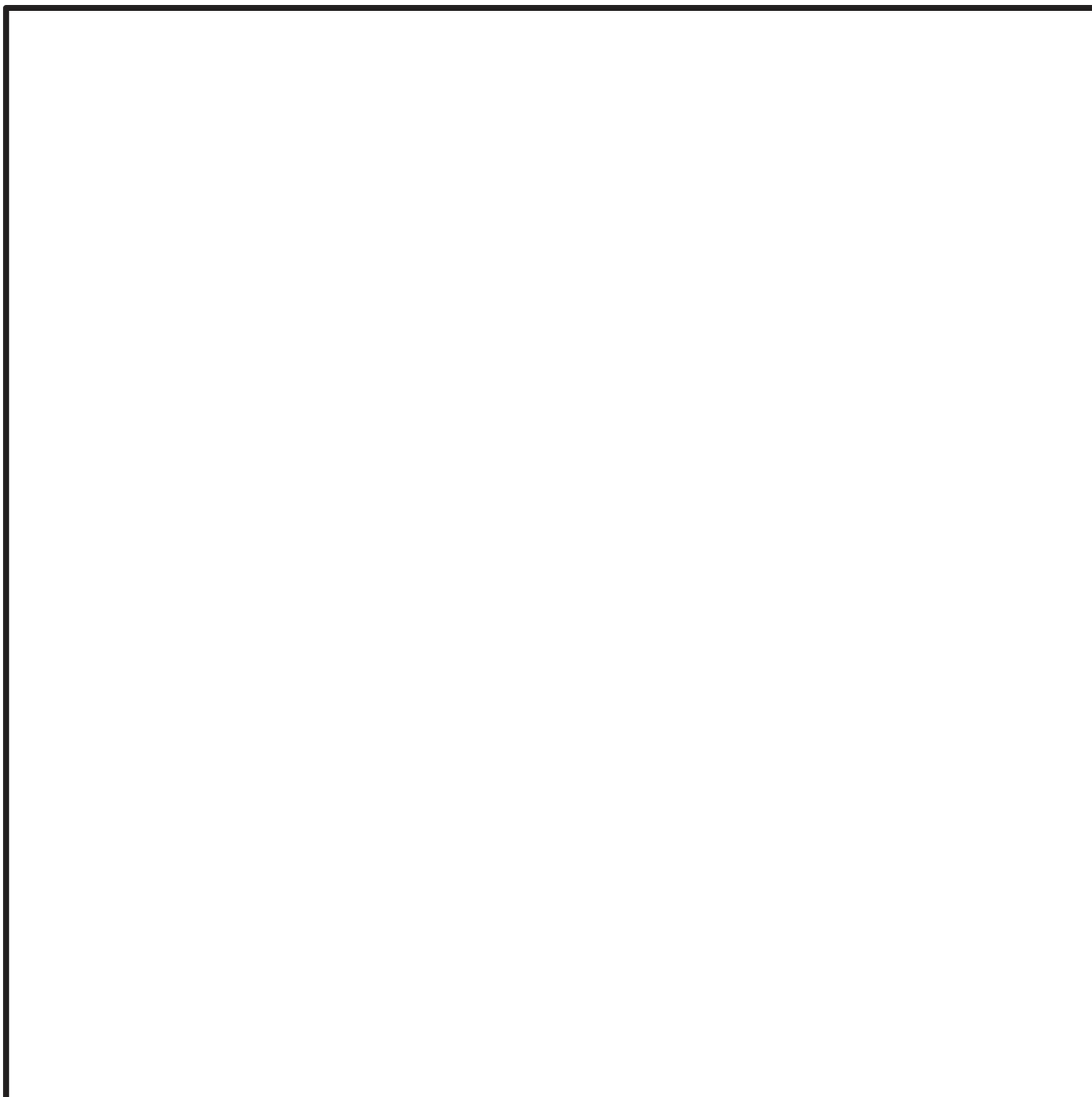


図 15 原子炉系ヒートバランスより算出した炉水温度

3. 制御棒挿入性評価に係る妥当性

今回工認における制御棒挿入性評価については、図 16 に示す J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版での BWR 用制御棒の評価手法を適用する。また、制御棒挿入性評価における地震応答解析による「燃料集合体相対変位（発生値）の算出」及び制御棒挿入性試験による「確認済相対変位（許容値）の設定」の手順を図 17 に示す。

今回工認における制御棒挿入性に係る評価結果の概要を表 6 に示す。基準地震動 S_s に対する最大の燃料集合体相対変位は 54.2 mm となるが、今回工認で実施した制御棒挿入性試験結果から設定した確認済相対変位（約 60 mm）に収まることを確認した。なお、制御棒挿入性評価の詳細については、添付書類「VI-2-6-2-1 制御棒の耐震性についての計算書」に示す。

本章では、女川原子力発電所第 2 号機における制御棒挿入性評価の妥当性について、前章での考察を踏まえ、燃料集合体相対変位の増大に伴うチャンネルボックスの弾塑性特性の影響、制御棒挿入性試験の有する保守性等の観点から検討を行う。

制御棒挿入性評価の妥当性確認検討フローを図 18 に示す。制御棒挿入性評価の妥当性確認を実施するにあたっては、地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出及び制御棒挿入性試験による確認済相対変位の設定に係る各手順について実機条件に対する差異項目を抽出・分類し、各分類項目に応じた影響検討を実施・確認した上で、総合的な評価結果を纏めた。

表 6 制御棒挿入性に係る評価結果の概要

| 燃料集合体相対変位 | 確認済相対変位 | 鉛直方向震度 |
|----------------------|----------------------|--------------------|
| 54.2mm ^{*1} | 約 60mm ^{*2} | 1.20 ^{*1} |

注記*1：添付書類「VI-2-3-2 炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」の基準地震動 S_s における地震応答解析結果

*2：確認済相対変位は、平成 27 年に当時の株式会社 東芝（現在の東芝エネルギーシステムズ株式会社）にて実施した制御棒挿入性試験で取得したもの。燃料集合体相対変位が約 60mm においても、75%ストロークスクラム時間が 1.62 秒以内である。

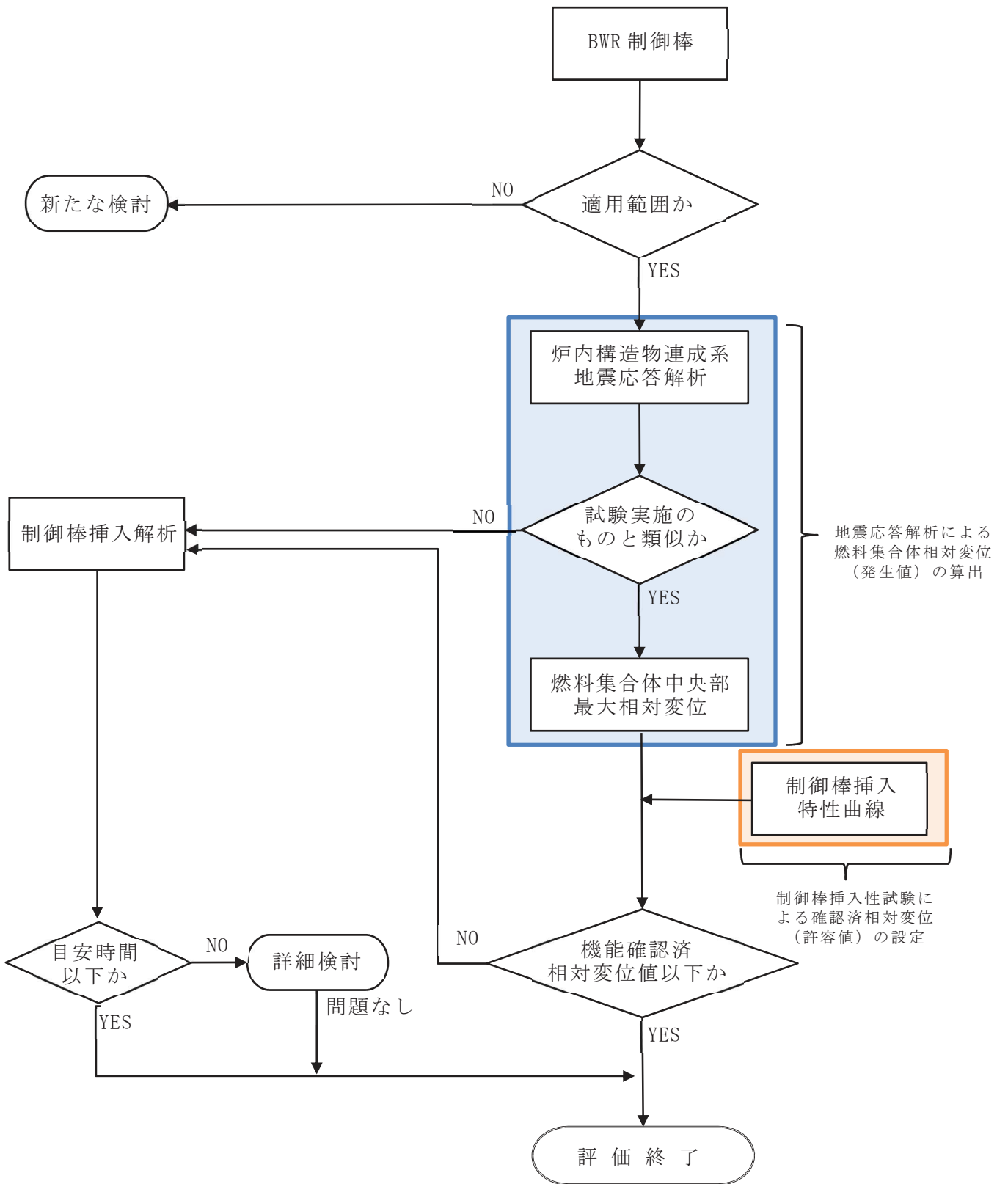


図 16 制御棒挿入性の評価手順（BWR）（J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版に一部加筆）

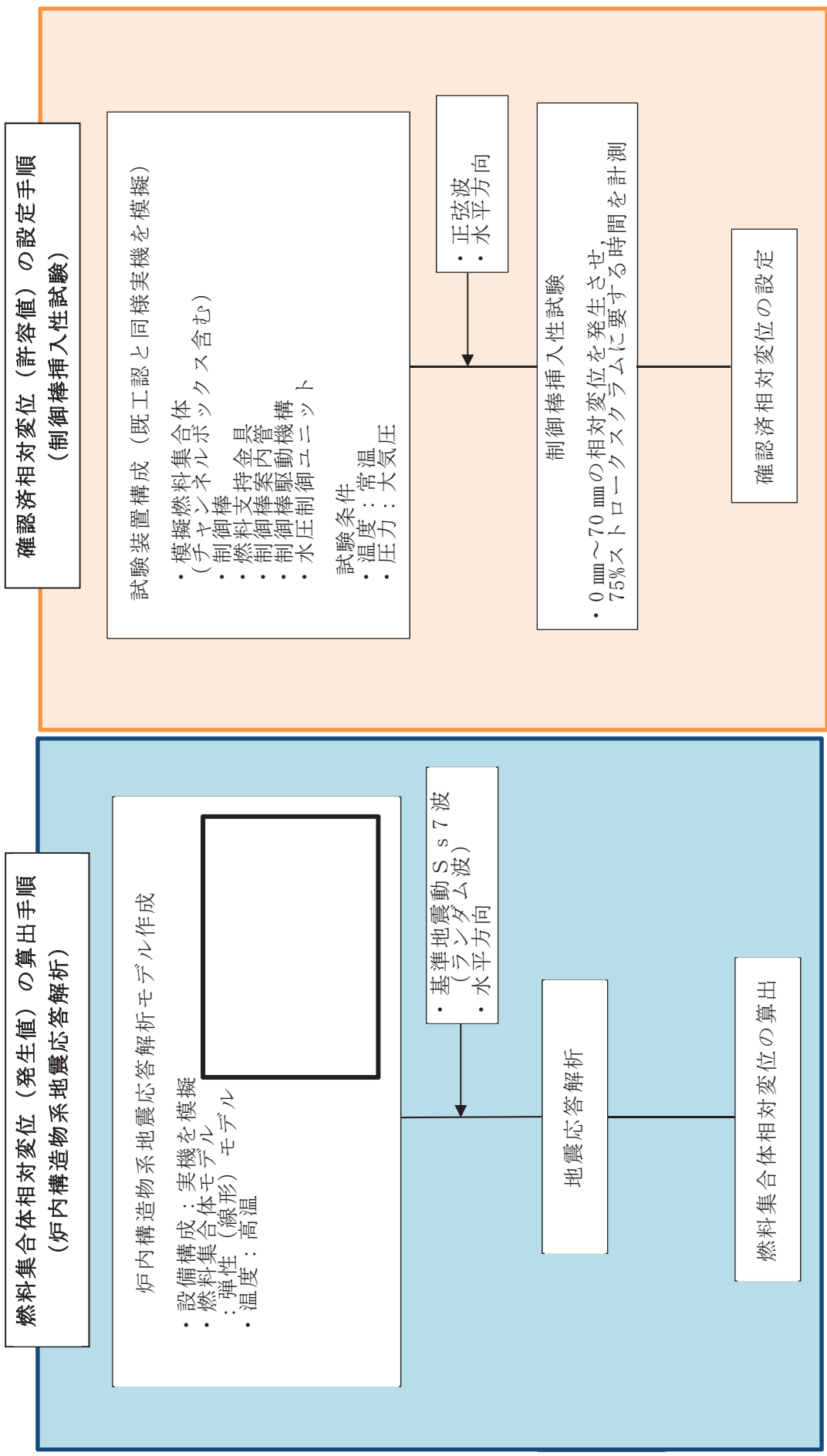


図 17 制御棒挿入性評価に係る各手順

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

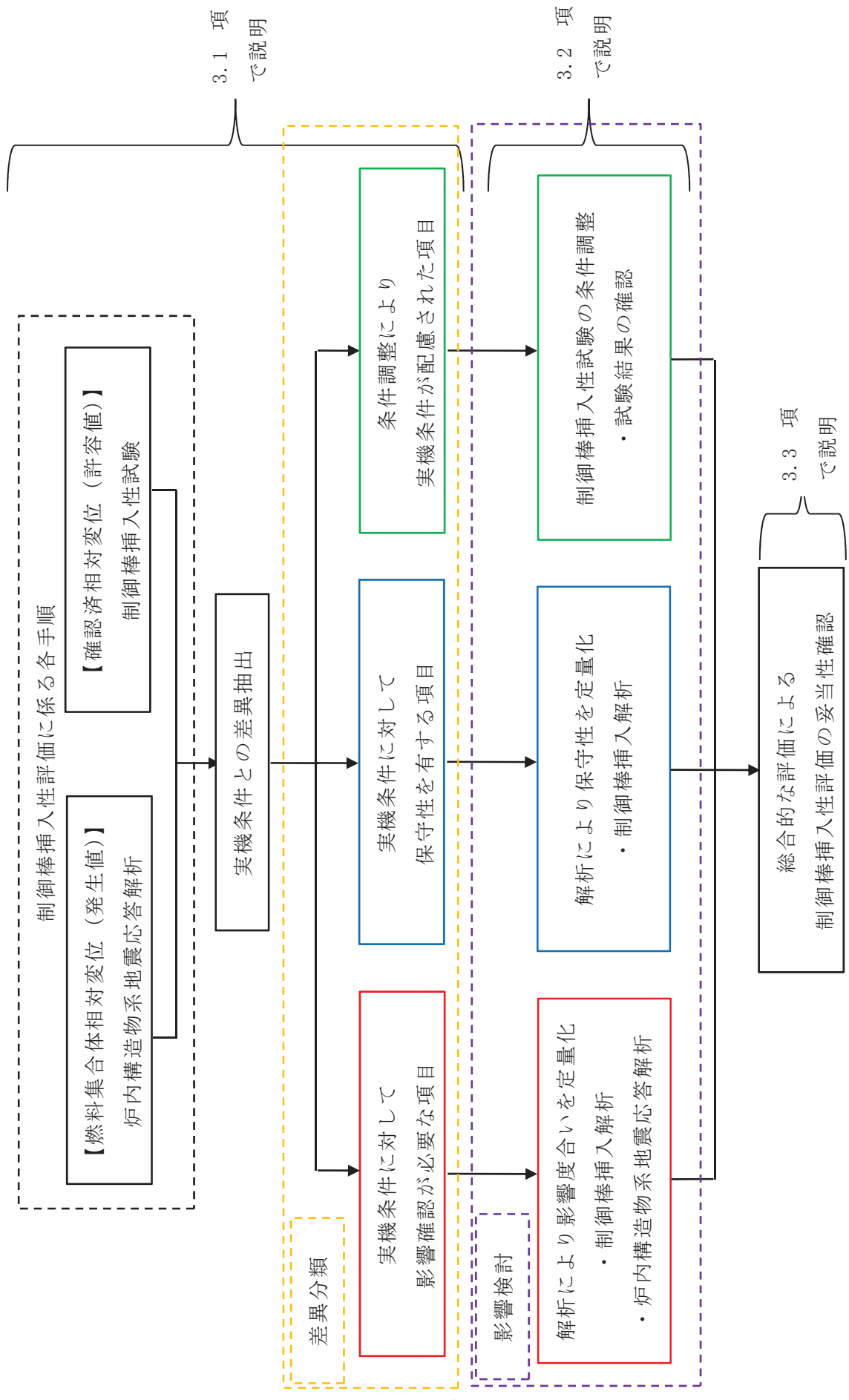


図 18 女川原子力発電所第 2 号機の制御棒挿入性評価の妥当性確認検討フロー

3.1 実機条件に対する差異項目の抽出及び分類

地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出条件及び制御棒挿入性試験による確認済相対変位の設定条件について、実機条件との差異項目を抽出及び分類した結果を表7-1、7-2に、差異分類に応じた検討項目の整理結果を表8に示す。

- (1) 実機条件に対して影響確認が必要な項目 赤
- (2) 実機条件に対して保守性を有する項目 青
- (3) 条件調整により実機条件が配慮された項目 緑

表 7-1 実機条件との差異項目抽出及び分類結果（炉内構造物系地震応答解析）

| 条件項目 | 実機条件 | 炉内構造物系地震応答解析 | 実機条件との差異及び分類結果 |
|----------|--|--------------|----------------|
| 機器・装置構成 | <ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体（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 | 実機をモデル化 | 無 |
| 燃料集合体モデル | チャンネルボックスの弾塑性特性の影響が考えられる | 弾性（線形）モデル | 有（1） |
| 温度 | 高温 | 高温 | 無 |
| 入力波 | 地震波 | 地震波 | 無 |

表 7-2 実機条件との差異項目抽出及び分類結果（制御棒挿入性試験）

| 条件項目 | 実機条件 | 制御棒挿入性試験 | 実機条件との差異及び分類結果 |
|---------|--|--|----------------|
| 機器・装置構成 | <ul style="list-style-type: none"> ・燃料集合体（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 | 実機と同じ構成 （ただし、高温状態模擬のためにチャンネルボックス厚さは100mil- に調整） | 無 |
| 温度 | 高温 | 常温 （ただし、高温状態模擬のためにチャンネルボックス厚さは100mil- に調整） | 有（3） |
| 圧力 | 高压 | 大気圧 （アキュムレータ圧力調整により原子炉定格圧力時のスクラムを模擬） | 有（3） |
| 入力波 | 地震波 | 正弦波 | 有（2） |
| | 水平+鉛直 | 水平 | 有（1） |

表 8 差異分類に応じた検討項目の整理結果

| 差異分類 | 実機条件との差異 | | 検討項目 |
|---------------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 実機条件に対して影響確認が必要な項目 | 炉内構造物系地震応答解析 | 実機：燃料集合体（弾塑性） 今回：燃料集合体（弾性） | チャンネルボックスの弾塑性特性の影響確認 (3.2.1 項参照) |
| 実機条件に対して保守性を有する項目 | 制御棒挿入性試験 | 実機：地震波 今回：正弦波 | 制御棒挿入性試験における保守性の確認 (3.2.2 項参照) |
| 実機条件に対して影響確認が必要な項目 | 制御棒挿入性試験 | 実機：水平＋鉛直 今回：水平 | 鉛直方向加速度の影響確認 (3.2.3 項参照) |
| 条件調整により実機条件が配慮された項目 | 制御棒挿入性試験 | 実機：高温 今回：常温 | 温度条件の差異に対する検討 (2.2 項参照) |
| | | 実機：高圧 今回：大気圧 | 圧力条件の差異に対する検討 (2.1 項参照) |

3.2 実機条件に対する差異分類に応じた検討

本項では、実機条件に対する差異分類に応じた検討項目について、それらの確認結果を示す。なお、条件調整により実機条件が配慮された項目（実機条件と制御棒挿入性試験における温度及び圧力条件との差異）については、2章で述べたとおり、実機の運転状態を模擬した配慮を行っており、制御棒挿入性評価へ影響を与えるものではない。

3.2.1 チャンネルボックスの弾塑性特性の影響確認

今回工認の炉内構造物系地震応答解析モデルでは、燃料集合体の剛性はチャンネルボックスによるものとして、チャンネルボックスの断面性状、縦弾性係数等を用いてモデル化している。

既往知見⁽¹⁾⁽²⁾を踏まえると、より大きな相対変位における制御棒の挿入状態においては、チャンネルボックスの塑性化が考えられ、女川原子力発電所第2号機の燃料集合体相対変位 54.2 mmの状態ではチャンネルボックスの塑性化が考えられる領域となる。一方、燃料集合体相対変位を算出した炉内構造物系地震応答解析における燃料集合体のモデルはチャンネルボックスを線形（弾性）でモデル化している。

本項では、炉内構造物系地震応答解析モデルの燃料集合体にチャンネルボックスの弾塑性特性を考慮して算出した燃料集合体相対変位と、線形モデルから算出した燃料集合体相対変位の比較により、チャンネルボックスの弾塑性特性が制御棒挿入性評価に与える影響について確認する。

(1) チャンネルボックスの弾塑性特性の設定

炉内構造物系地震応答解析において、燃料集合体要素に弾塑性特性を設定する。今回工認の制御棒挿入性試験結果における振動台加速度と相対変位の関係（図19）では、燃料集合体変位が45mm程度の状態で振動台加速度と燃料集合体変位の勾配が変わっていることが確認できるため、チャンネルボックスの弾塑性特性に係る影響確認においては燃料集合体変位45mmを折れ点とした二直線（バイリニア）で骨格曲線を設定する。



図19 制御棒挿入性試験結果（振動台加速度と燃料中央変位の関係）

骨格曲線の第一勾配は，従来の連成解析モデルで設定していた線形モデルの勾配を用いる。また，既往知見⁽²⁾に示されている高温時のチャンネルボックス4点曲げ試験から得られた弾塑性特性（図20）によると第一勾配の0.1倍程度であることが確認できるため，今回の評価における第二勾配は，既往知見に最も近い0.1倍に加えて，弾塑性の影響を幅広く確認する観点から第一勾配の0.6倍，0.3倍及び弾完全塑性の合計4つのケースを評価対象とし影響確認を実施した（図21）。

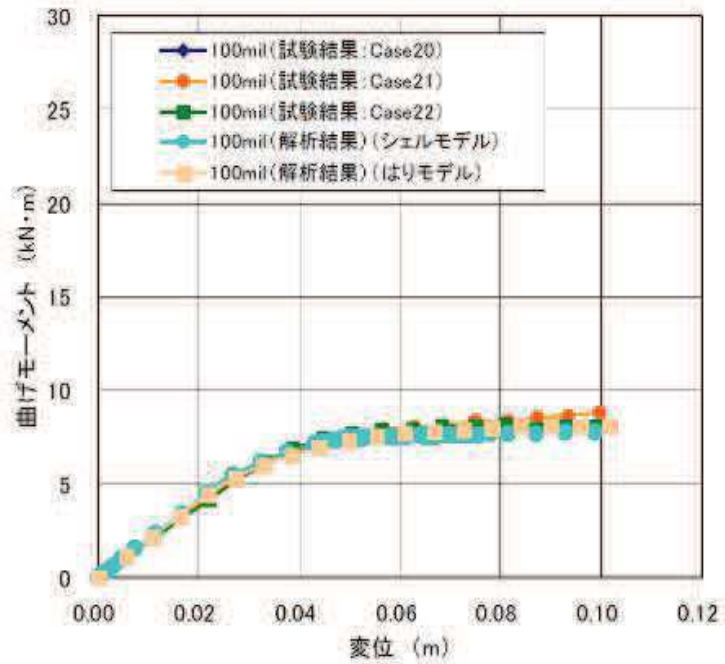


図20 チャンネルボックス弾塑性特性（既往知見⁽²⁾）

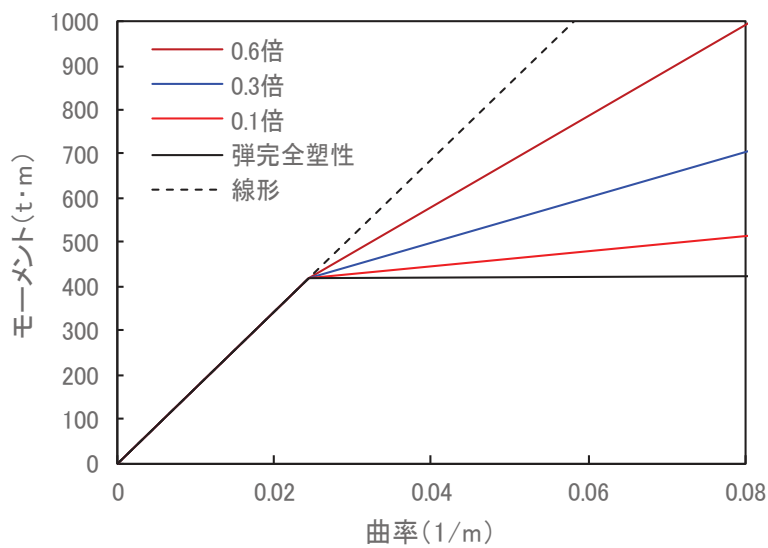


図21 弾塑性特性の骨格曲線

履歴特性については、同じ既往知見によるとチャンネルボックスの曲げモーメントー変位特性（図 22）がループ状を示していることから、本影響確認においては、図 23 に示すようなバイリニア型移動硬化則を設定する。

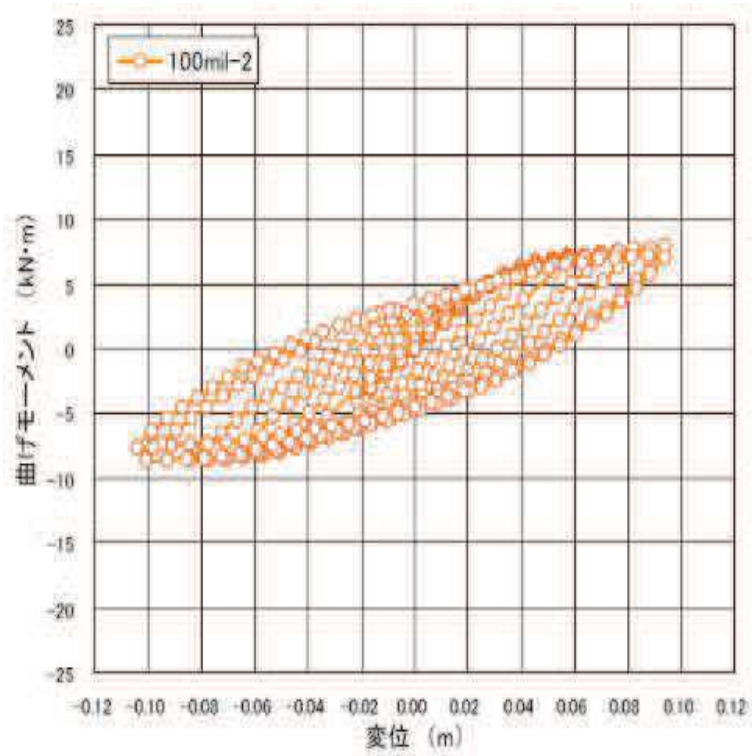


図 22 チャンネルボックス曲げモーメントー変位特性（既往知見⁽²⁾）

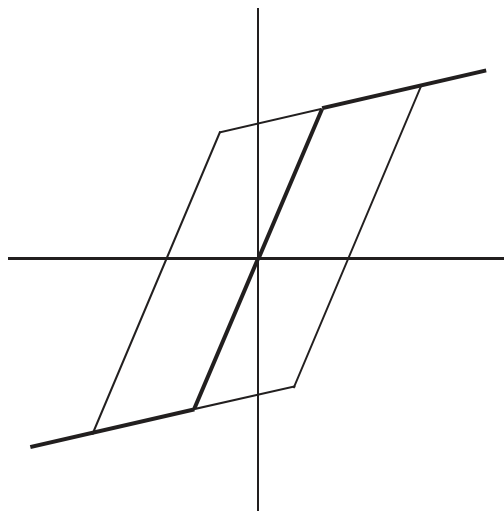


図 23 バイリニア型移動硬化則の履歴特性

(2) 弾塑性特性を考慮した地震応答解析結果

燃料集合体にチャンネルボックスの弾塑性特性を考慮した炉内構造物系地震応答解析モデルで地震応答解析を実施した。解析条件を表 9 及び地震応答解析で得られた燃料集合体相対変位の解析結果を表 10 に示す。

チャンネルボックスの弾塑性特性を考慮した場合の燃料集合体相対変位の解析結果は、骨格曲線の第二勾配をパラメータとしたいずれの解析ケースにおいても線形モデルに対する燃料集合体相対変位よりも小さな値となっている。これは、地震慣性力が交番荷重であるため、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によって燃料集合体相対変位が抑制されたものである。

以上より、女川原子力発電所第 2 号機の地震応答解析におけるチャンネルボックスの線形でのモデル化が制御棒挿入性評価に影響を与えないことを確認した。

表 9 チャンネルボックスの弾塑性特性を考慮した解析条件

| 条件項目 | | 解析条件 |
|------|------|---|
| 入力波 | | 地震波 (S _s -D2) * |
| 温度 | | 高温 |
| 骨格曲線 | 第一勾配 | 線形モデルと同様 |
| | 第二勾配 | 4 ケース (第一勾配の 0.6, 0.3 及び 0.1 倍, 弾完全塑性体) |
| 履歴特性 | | バイリニア型移動硬化則 |

注記* : 女川原子力発電所第 2 号機の基準地震動 S_s 7 波における地震応答解析で燃料集合体相対変位が最大となる地震動

表 10 弾塑性特性を考慮した燃料集合体相対変位の解析結果

(単位 : mm)

| 解析ケース | 弾塑性特性 (骨格曲線の第二勾配) | | | | 線形モデル |
|-------|-------------------|-------|-------|--------|-------|
| | 0.6 倍 | 0.3 倍 | 0.1 倍 | 弾完全塑性体 | |
| 相対変位 | 52.7 | 50.3 | 49.5 | 49.4 | 54.2 |

3.2.2 制御棒挿入性試験における保守性の確認

制御棒挿入性試験における保守性は、実機条件における入力波は地震波（ランダム波）であることに対して、制御棒挿入性試験における入力波条件は最大相対変位を繰返し付加する正弦波加振であることにあり、正弦波加振が地震波加振に比べて保守的であることは、既往知見(1)(2)でも確認されている。

本項では、他プラントでの工認実績があり、制御棒が炉心に挿入される際の制御棒と燃料集合体の接触を模擬し制御棒挿入位置を時刻歴応答で計算できる制御棒挿入性計算プログラム CR-IN（別紙 1）を用いて、入力波を正弦波加振及び地震波加振とした場合の 75%ストロークスクラム時間を算出し、比較することで正弦波加振が地震波加振に対して有する保守性を確認する。

(1) 制御棒挿入性計算プログラム CR-IN の適用性確認

入力波条件の差異（正弦波加振，地震波加振）に対する保守性を確認するにあたり，CR-IN による制御棒挿入性解析を用いた影響検討への適用性を確認するため，今回工認における制御棒挿入性試験結果の再現解析（燃料集合体相対変位に対する 75%ストロークスクラム時間）を実施し，制御棒挿入性試験結果と CR-IN による制御棒挿入性解析結果を比較した。CR-IN による再現解析条件は表 11 のとおり。

表 11 制御棒挿入性試験の再現解析条件

| 条件項目 | CR-IN による再現解析条件 (今回工認における制御棒挿入性試験) |
|-------------|---------------------------------------|
| 入力波 | 正弦波 (<input type="text"/>) * |
| 温度 | 常温 |
| 圧力 | アキュムレータ圧力調整により原子炉定格 圧力時のスクラムを模擬 |
| チャンネルボックス厚さ | <input type="text"/> |
| 燃料集合体相対変位 | 0mm～70mm |

注記*：正弦波の周波数は常温時のチャンネルボックスの水平方向の固有周波数 () に合わせて設定

CR-IN による再現解析結果として，今回工認における制御棒挿入性試験との比較結果を図 24 に示す。CR-IN による再現解析結果は，今回工認における制御棒挿入性試験（制御棒挿入性試験に基づく制御棒挿入特性曲線）とよく整合し，CR-IN による制御棒挿入性解析は制御棒挿入性試験に対する再現性があることから，実機条件に対する差異分類に応じた影響検討に適用可能であると判断した。

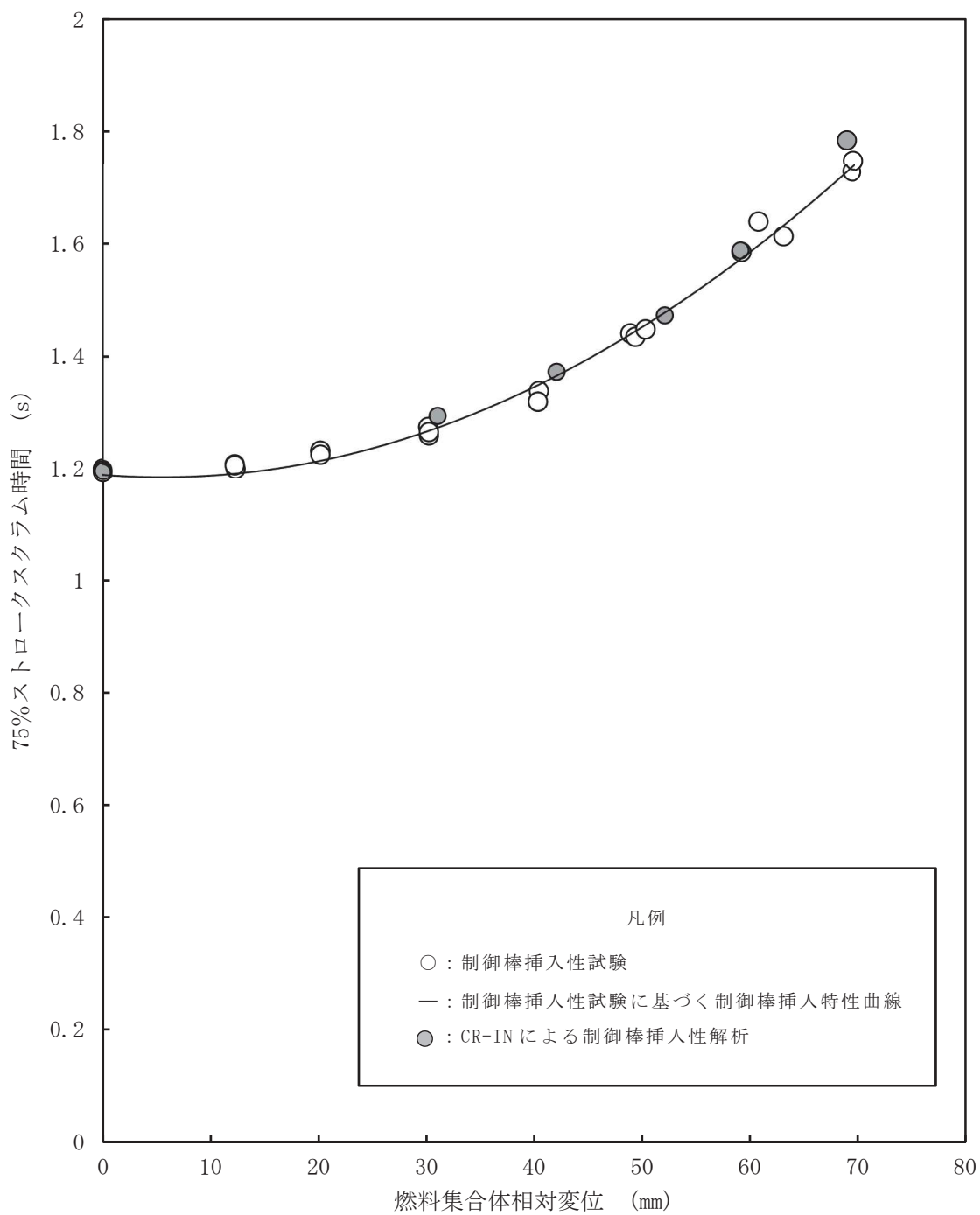


図 24 制御棒挿入性試験と CR-IN による制御棒挿入性解析の比較結果

(2) 入力波条件の差異に対する制御棒挿入性解析結果

CR-IN による制御棒挿入解析を用いて，入力波条件を地震波加振とした場合と正弦波加振とした場合の 75%ストロークスクラム時間を算出し，今回工認における制御棒挿入性試験の入力波条件として，正弦波加振の有する保守性を確認する。

CR-IN による制御棒挿入性解析に当たっては，表 12 のとおり，入力波以外の条件を一致させた上で，75%ストロークスクラム時間の差異を確認した。

なお，地震波加振に対する制御棒挿入性解析については，75%ストロークスクラム時間を保守的に算出するため，燃料集合体相対変位が最大となる時間帯を考慮して最も挿入時間が遅くなるタイミングをスクラム開始時間とした。

表 12 入力波条件の相違に対する制御棒挿入性解析の条件

| 条件項目 | 地震波加振 | 正弦波加振 |
|-------------|-----------------|---|
| 入力波* | 地震波 (S s - D 2) | 正弦波 () * |
| 温度 | 実機運転状態模擬 | 同左 |
| 圧力 | 実機相当 | 同左 |
| チャンネルボックス厚さ | 100mil | 同左 |
| 燃料集合体相対変位 | 54.2 mm | 同左 |

注記*: 正弦波の周波数は高温時時のチャンネルボックスの水平方向の固有周波数 () に合わせて設定

入力波条件を地震波加振及び正弦波加振とした場合の 75%ストロークスクラム時間の解析結果を表 13 に示す。正弦波加振の 75%ストロークスクラム時間は，地震波加振の 75%ストロークスクラム時間に比べて，制御棒挿入時間が遅くなること (0.14 秒) を確認した。

以上より，女川原子力発電所第 2 号機の今回工認の制御棒挿入性試験における入力波条件を正弦波加振としていることについて，既往知見における検討結果と同様に保守性を有することを定量的に確認した。

表 13 入力波条件の差異による 75%ストロークスクラム時間の解析結果

| 入力波条件 | 地震波加振 | 正弦波加振 | 規定値 |
|----------------|--------|--------|--------|
| 75%ストロークスクラム時間 | 1.31 秒 | 1.45 秒 | 1.62 秒 |

3.2.3 鉛直方向加速度の影響確認

3.1 項における実機条件に対する差異の抽出結果として、制御棒挿入性試験の入力波条件として、鉛直方向の影響を抽出している。本項では、制御棒挿入性評価における鉛直方向加速度による影響については、次の項目について確認する。

- (1) 制御棒に対する鉛直方向加速度の影響
- (2) 燃料集合体に対する鉛直方向加速度の影響

(1) 制御棒に対する鉛直方向加速度の影響

制御棒の挿入過程において鉛直方向加速度が付与された場合、制御棒挿入性に対して時間遅れを生じさせる影響が考えられるため、制御棒の挿入時間に着目した検討を実施し、鉛直方向加速度の影響を確認する。

影響検討としては、CR-IN を用いて、入力波条件として水平方向（正弦波）とした場合及び水平方向＋鉛直方向（正弦波）とした場合の 75%ストロークスクラム時間をそれぞれ解析し、鉛直方向加速度が制御棒挿入性に与える影響を確認する。なお、入力する鉛直方向加速度については、別紙 1「4. 鉛直方向加速度が加わった場合の挿入時間影響評価」の評価方針に基づき、固有周波数 及び の正弦波をそれぞれ同位相及び逆位相の条件で入力した。制御棒挿入時に作用する鉛直方向荷重（概略イメージ）を図 25 に示す。

制御棒に対する鉛直方向加速度の影響確認に用いた評価条件を表 14 に示す。なお、表 14 の水平方向＋鉛直方向の入力波条件は 75%ストロークスクラム時間が最も長くなる条件を記載した。

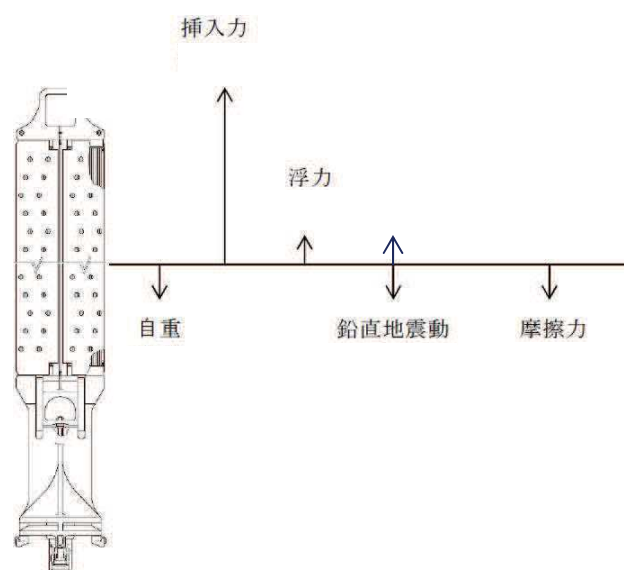


図 25 制御棒挿入時に作用する鉛直方向荷重（概略イメージ）

表 14 制御棒に対する鉛直方向加速度の影響確認に用いた評価条件

| 条件項目 | 水平方向 | 水平方向+鉛直方向 |
|---------------|--------------------------------|---|
| 入力波 | 正弦波（水平 <input type="text"/> *） | 正弦波（水平 <input type="text"/> + 鉛直 <input type="text"/> 同位相）* |
| 温度 | 常温 | 同左 |
| 圧力 | 実機相当 | 同左 |
| チャンネルボックス厚さ | <input type="text"/> | 同左 |
| 燃料集合体相対変位（水平） | 54.2 mm | 同左 |

注記*：正弦波の周波数は常温時のチャンネルボックスの水平方向の固有周波数（）に合わせて設定

入力波条件として水平方向（正弦波）とした場合及び水平方向+鉛直方向（正弦波）とした場合の75%ストロークスクラム時間の解析結果を表15に示す。

入力波条件が水平方向のみ場合の75%ストロークスクラム時間（1.51秒）に対して、水平方向+鉛直方向の場合の75%ストロークスクラム時間（1.52秒）であり、鉛直方向加速度を考慮した場合の制御棒挿入性に係る時間遅れは極僅か（0.01秒）となることから、制御棒に対する鉛直方向加速度の影響が軽微であることを確認した。

表 15 制御棒に対する鉛直方向加速度の影響確認結果

| 入力波 | 水平 | 水平+鉛直 | 規定値 |
|----------------|--------|--------|--------|
| 75%ストロークスクラム時間 | 1.51 秒 | 1.52 秒 | 1.62 秒 |

(2) 燃料集合体に対する鉛直方向加速度の影響

a. 評価方針

制御棒上部は、スクラム開始前の初期状態においても燃料集合体間に挿入されており、仮に鉛直方向加速度による浮上りが生じた場合でも燃料集合体下部の水平方向の移動は制御棒により拘束されるため、制御棒挿入が不可能になることはないと考えられる。

本項では、既往知見⁽²⁾を基に、仮に鉛直方向加速度により燃料集合体に浮上りが生じた場合として、次の2ケースについて確認する。

(a) 鉛直方向加速度による燃料集合体の浮上り

(b) 水平及び鉛直方向加速度による燃料集合体の浮上り

b. 既往知見の整理

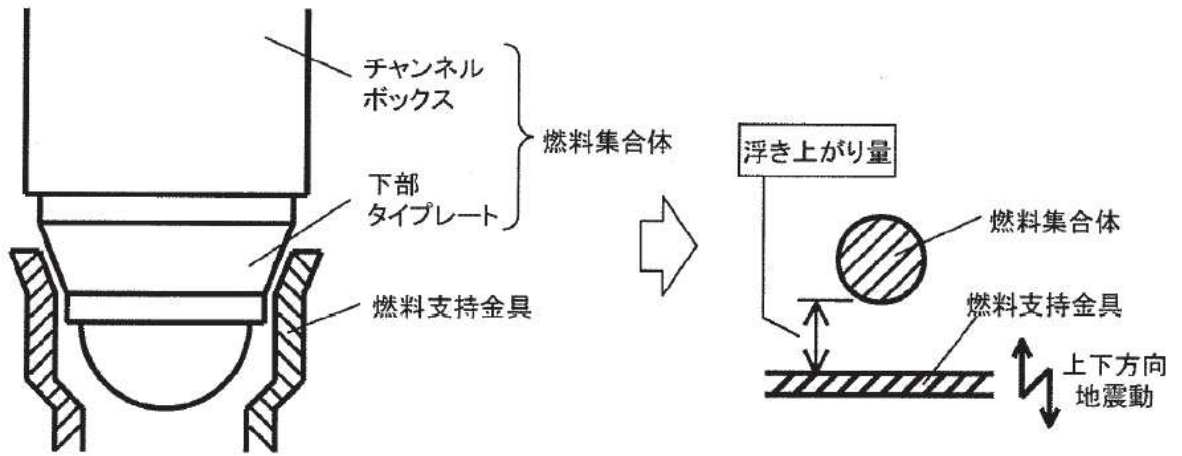
既往知見⁽²⁾では、 $1.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ 以上の鉛直方向加速度が燃料集合体に作用する場合には、燃料集合体が浮上る可能性があることから、制御棒挿入性への影響として、制御棒の挿入現象・挿入時間及び燃料集合体の浮上りについて検討し、解析による制御棒挿入時間の評価及び $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ が作用し、仮に燃料集合体に浮上りが生じた場合でも、燃料支持金具から離脱することはないとしている。

c. 評価結果

(a) 鉛直方向加速度による燃料集合体の浮上り

既往知見⁽²⁾では、鉛直方向加速度による燃料集合体の燃料支持金具からの浮上り量について、1自由度1質点の簡易解析モデルに正弦波を入力する解析により検討している。モデルを図26に、解析結果を図27に示す。浮上り量の最大は、入力加速度 $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ 、周波数 5Hz の場合で浮上り量は 68mm となっている。

女川原子力発電所第2号機の鉛直方向震度は $1.07 \times 9.8 \text{m/s}^2$ であり、既往知見⁽²⁾の解析結果における $1.5 \times 9.8 \text{m/s}^2$ での浮上り量 37mm を超えることはなく、浮上り量は燃料支持金具設置深さ 60mm より小さい。



燃料集合体と燃料支持金具の接触部周辺

解析モデル概略図

図 26 燃料集合体の浮上り量解析モデルの概略図（既往知見⁽²⁾）

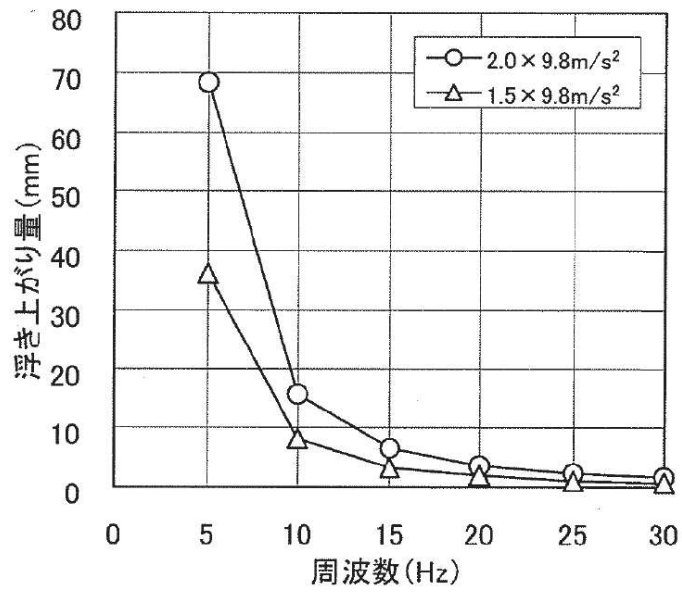


図 27 浮上り量解析結果（正弦波）（既往知見⁽²⁾）

(b) 水平及び鉛直方向加速度による燃料集合体の浮上り

既往知見⁽²⁾において、鉛直方向に加えて水平方向の地震力を考慮し、燃料集合体が燃料支持金具から離脱する可能性について検討している。燃料集合体が鉛直方向加速度により浮上り、水平地震動の加速度により燃料支持金具の面に沿って上方方向に移動する事象を考えている。概要図を図 28 に示す。

図 28 の条件において力学的検討を行い、鉛直方向加速度によって燃料集合体が浮き上がった状態で水平方向の地震動の影響を受けた場合の水平動による上方方向の移動量を求めている。実プラントの基準地震動条件での検討では、移動量評価条件は表 16 に示すとおりで、既往知見⁽²⁾において水平動に対する評価結果では、鉛直動が $1.5 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときの水平動による上方方向の移動量は 1.1mm、 $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときの移動量は 1.3mm となっている。結果として、水平及び鉛直方向加速度による上方方向の移動量は、鉛直動が $1.5 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときは $5.8 \text{mm} + 1.1 \text{mm} = 6.9 \text{mm}$ 、鉛直動が $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときは $21.2 \text{mm} + 1.3 \text{mm} = 22.5 \text{mm}$ となり、鉛直方向加速度に加え水平方向加速度を考慮した場合でも、燃料支持金具設置深さ 60mm に対し十分小さい値となることが確認されている。

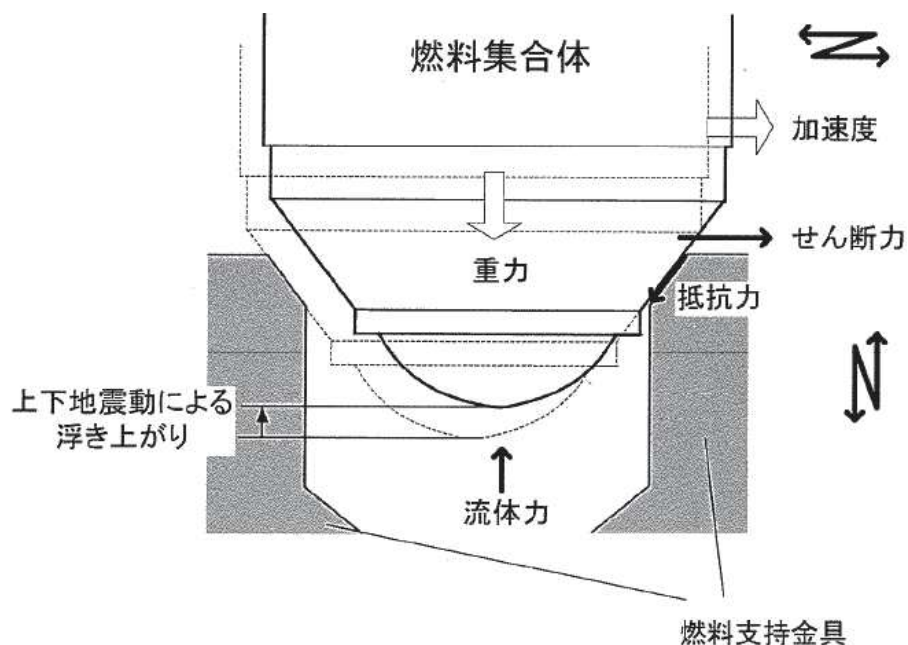


図 28 水平・鉛直方向の地震動による浮上り検討概要図（既往知見⁽²⁾）

表 16 $2.0 \times 9.8 \text{m/s}^2$ 及び $1.5 \times 9.8 \text{m/s}^2$ のときの移動量評価条件（既往知見⁽²⁾より引用）

| 鉛直方向 最大加速度 [m/s^2] | 燃料集合体下端 加速度最大値 (水平方向) [m/s^2] | 燃料集合体下端 せん断力最大値 (水平方向) [N] | 鉛直方向加速度 による浮上り量 [mm] |
|-------------------------------------|--|----------------------------------|----------------------------|
| 1.5×9.8 | 7.62×9.8 | 5.23×10^6 | 5.8 |
| 2.0×9.8 | 10.0×9.8 | 5.50×10^6 | 21.2 |

次に女川原子力発電所第2号機の基準地震動条件での移動量評価条件を整理し、既往知見⁽²⁾の移動量評価条件と対比して、表17に示す。既往知見⁽²⁾の検討条件に対し、女川原子力発電所第2号機の基準地震動S_sの条件の方が、燃料集合体下端の加速度最大値及びせん断力最大値ともに小さい。このため、水平及び鉛直方向加速度による上方向の移動量は、既往知見⁽²⁾で算出された6.9mm($1.5 \times 9.8 \text{m/s}^2$ の場合)より小さくなり、浮上りによる燃料支持金具からの離脱の影響はないと考える。

以上より、既往知見⁽²⁾を基に燃料集合体の浮上り量を算出し、浮上りによる燃料支持金具からの離脱の影響がないことから燃料集合体に対する鉛直方向加速度の影響がないことを確認した。

なお、燃料集合体の浮上に伴い、一時的に燃料集合体と燃料支持金具の間の流量が増加し、燃料集合体内の流量低下が生じる可能性があるが、浮上り量も小さく、浮上り継続時間も短時間であることから、燃料集合体の冷却が著しく損なわれることはないと考える。

表 17 女川原子力発電所第2号機の移動量評価条件（既往知見⁽²⁾と対比）

| 項目 | 鉛直方向 最大加速度 (m/s^2) | 燃料集合体下端 加速度最大値 (水平方向) (m/s^2) | 燃料集合体下端 せん断力最大値 (水平方向) (N) |
|---------------------|-------------------------------------|---|----------------------------------|
| 既往知見 ⁽²⁾ | 1.5×9.8 | 7.62×9.8 | 5.23×10^6 |
| | 2.0×9.8 | 10.0×9.8 | 5.50×10^6 |
| 女川原子力発電所 第2号機 | 1.07×9.8 | 1.50×9.8 | 3.21×10^6 |

本項(1)、(2)の検討結果から鉛直方向加速度は制御棒及び燃料集合体の地震応答に影響を与えないことから鉛直方向加速度が制御棒挿入性評価に影響を与えないことを確認した。

3.3 実機条件との差異に対する影響検討の総合的評価

3.2 項における実機条件との差異に対する影響検討結果を踏まえ、女川原子力発電所 2 号機の制御棒挿入性評価に対して総合的な評価を実施した結果を以下に示すとともに、詳細整理表結果を表 19 に示す。

- 地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出（発生値）については、チャンネルボックスの剛性を弾性（線形）モデルとした地震応答解析に対して、チャンネルボックスの弾塑性特性を考慮した燃料集合体相対変位は小さくなる傾向にあり、保守性を有する。
- 制御棒挿入試験による確認済相対変位の設定（許容値）については、制御棒挿入性試験における正弦波加振は地震波加振に対して 75%ストロークスクラム時間が長く（0.14 秒）なる（地震波加振の場合、正弦波加振に対して 75%ストロークスクラム時間が短くなるので、確認済相対変位は大きくなる傾向となる）。一方、鉛直方向加速度による制御棒挿入性に係る時間遅れの影響が軽微（0.01 秒）であり、制御棒挿入性試験全体としては、保守性を有する。
- 影響検討に用いた CR-IN による制御棒挿入性解析においては、燃料集合体相対変位が最大となる時間帯を考慮して最も挿入時間が長くなるようにスクラム開始時間を設定していることに対して、実機におけるスクラム開始時間は、燃料集合体が最大変位となる前にスクラム信号によって制御棒が挿入されることから、CR-IN による制御棒挿入性解析にも保守性を有する。

以上より、制御棒挿入性評価に係る地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出（発生値）及び制御棒挿入試験による確認済相対変位の設定（許容値）について、それぞれ保守性があることを定量的に確認しており、女川原子力発電所第 2 号機の制御棒挿入性評価が妥当性であることを総合的に確認した。

表 19 実機条件との差異に対する影響検討の総合的評価

| 差異分類 | 検討項目 | 検討内容 | 影響検討の結果 | | 保守性確認 |
|---------------------------------|--|---|--|--|---|
| | | | 地震応答解析による燃料集合体相対変位(発生値)(燃料集合体相対変位 54.2 mm; 基準地震動 S s の最大値) | 制御棒挿入性試験による確認済相対変位(許容値) 【確認済相対変位約 60 mm; 75%ストロークスクラム時間 1.62 秒に相当】 | |
| 実機条件に 対する影響 確認を実施 する項目 | チャレンネルボックスの 弾塑性影響の影響確認 | チャレ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、弾性(線形)モデルでの燃料集合体相対変位結果を比較 | 線形モデルに比べ、 <u>弾塑性モデルの燃料集合体相対変位が小さくなる傾向にあること(保守性あり)</u> を確認した | — | ○ |
| 実機条件より 明らかに 保守性を有 する項目 | 制御棒挿入性試験における 保守性の確認 | 入力波条件が正弦波加振及び地震波加振に対する制御棒挿入性解析を実施し、75%スクラム時間を比較 | — | 地震波加振に比べ、 <u>正弦波加振の75%ストロークスクラム時間が長い(0.14 秒)こと(保守性あり)</u> を確認した なお、制御棒挿入解析では、75%スクラム時間が保守的となるようにスクラム時間を設定している | ○ |
| 実機条件に 対する影響 確認を実施 する項目 | 鉛直方向加速 度の影響確認 | 鉛直方向+鉛直方向に対する制御棒挿入性解析を実施し、75%スクラム時間を比較 | — | 水平方向のみに比べ、 <u>水平+鉛直方向の場合の75%ストロークスクラム時間の時間遅れが極値か(0.01 秒遅い)こと(影響軽微)</u> を確認した | △ |
| 条件調整に より実機条 件を模擬す る項目 | 実機と制御棒挿入性試験の温度 条件の差異に対する検討 実機と制御棒挿入性試験の圧力 条件の差異に対する検討 | 既往知見を基に燃料集合体の浮上り量を算出し、浮上りによる燃料支持金具からの離脱の有無を確認 | — | 鉛直方向地震動を考慮した場合でも、燃料集合体が燃料支持金具から離脱しないことを確認し、 <u>挿入性に影響を与えないこと</u> を確認した | — |
| 総合的な評価 | | 線形モデルによる地震応答解析に対し、チャレンネルボックスの弾塑性特性を考慮した燃料集合体相対変位は小さくなる傾向にあり、 <u>保守性を有する</u> | 制御棒挿入性試験における正弦波加振の保守性に対し、鉛直方向加速度による時間遅れの影響が軽微であるため、 <u>保守性を有する</u> | | ○ <u>女川原子力発電所第2号機における制御棒挿入性評価の妥当性を確認した</u> |

4. まとめ

女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性評価においては、新規制基準による基準地震動 S_s の増大に伴い燃料集合体相対変位が増大したことから、既工認と同様の制御棒挿入性試験を実施し、確認済相対変位のデータ範囲を拡充した（約 60mm）。

また、制御棒挿入性評価に係る地震応答解析による燃料集合体相対変位の算出および制御棒挿入試験による確認済相対変位の設定について、実機条件との差異に着目した影響検討を実施した結果、総合的に保守性を有する評価となっており、女川原子力発電所第2号機の制御棒挿入性評価が妥当性であることを確認した。

5. 引用文献

- (1) 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）
- (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）

制御棒のスクラム時間を解析する計算機プログラム（解析コード）

「CR-IN」

1. 概要

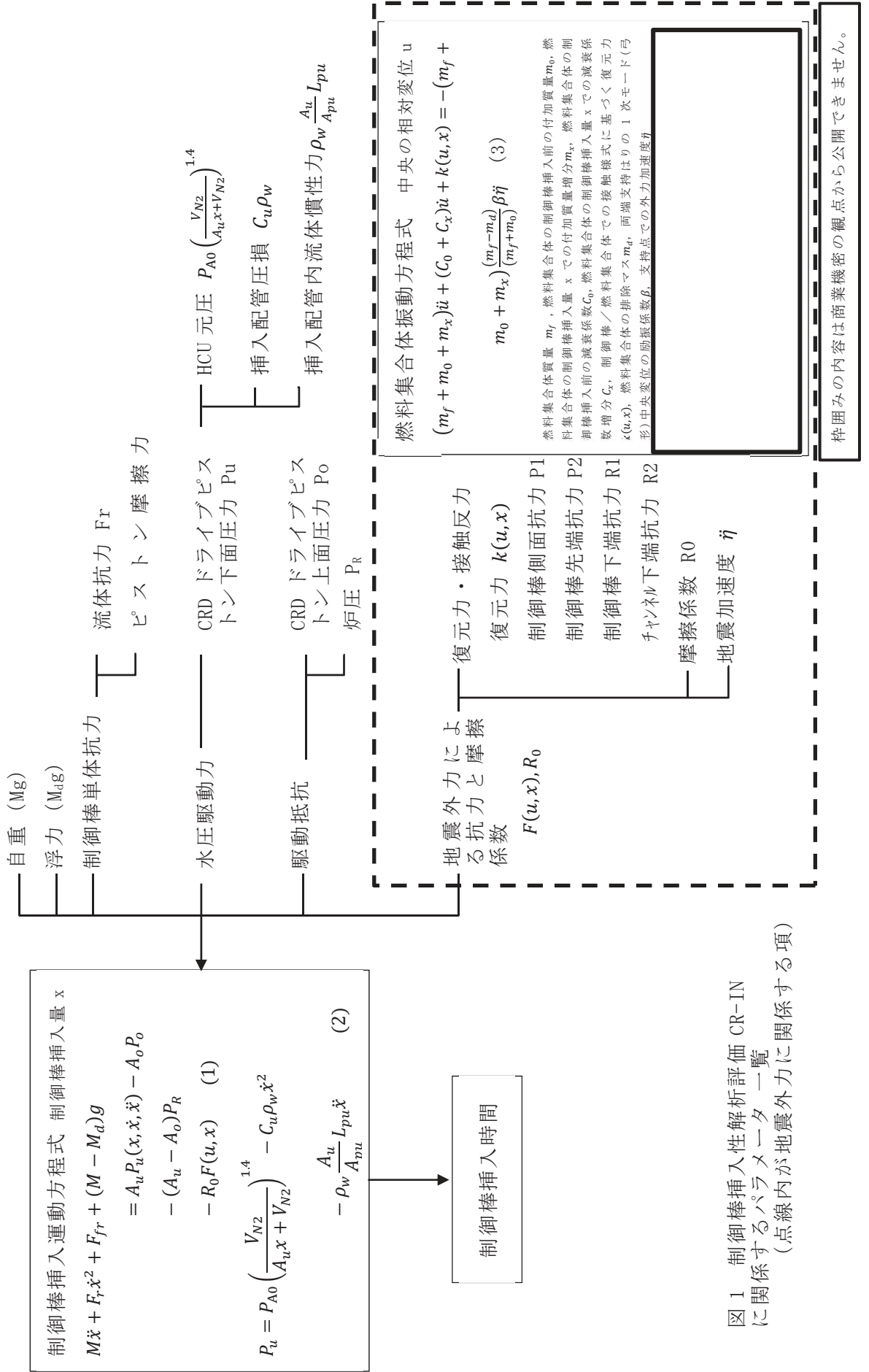
制御棒のスクラム時間を解析する計算機プログラム（解析コード）CR-INは、1980年代に開発された、BWRの地震スクラム時に制御棒が炉心に挿入される時間を解析するプログラムで、制御棒が水圧によって炉心に挿入される際の制御棒の駆動運動方程式と、地震による燃料集合体の振動方程式を、制御棒と燃料集合体の接触反力及び復元力によって連成させて、スクラム開始後の制御棒挿入位置を時刻歴応答で計算するものである。

過去には、女川原子力発電所1号機の工認（6資庁第14412号、1995年）にも使用された実績のある計算機プログラムである。ここでは、改めてCR-INの概要について説明する。

2. 解析手法

図1に、CR-INで扱われるパラメータの一覧を示す。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 の運動方程式が式(1)、水圧駆動が式(2)で表わされ、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(3)を連成させている、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、モデルで計算していることにある。

式(1)～(3)の連成方程式を解く各時刻ステップにおいて、燃料集合体相対変位 u と制御棒挿入量 x から、復元力 $k(u,x)$ と、接触反力 $F(u,x)$ が逐次計算されて時刻歴応答計算が構成される。



2. 1 制御棒の駆動運動方程式と、燃料集合体相対変位の振動方程式

図 1 に示した制御棒の駆動運動方程式(1)と、水圧駆動式(2), 及び燃料集合体相対変位の振動方程式(3)の各項を以下に説明する。

【制御棒の挿入運動式】

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

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

ここで、

- x : 制御棒挿入量 (鉛直上向き正), \dot{x} は挿入速度, \ddot{x} は挿入加速度
- u : 燃料集合体中央の相対 (撓み) 変位 (水平方向)
- g : 重力加速度
- M : 制御棒可動部質量 (CRD の可動部 (ドライブピストン等) を含む)
- M_d : 制御棒可動部の排除マス ($M_d g$ が浮力に相当)
- F_r : 制御棒の流体抵抗係数 $F_r = C_d \rho S / 2$ C_d は抗力係数, ρ は炉水密度, S は投影面積
- F_{fr} : CRD ドライブピストン摩擦力
- P_u : CRD ドライブピストン下面圧力
- A_u : CRD ドライブピストン下面面積
- P_o : CRD ドライブピストン上面圧力
- A_o : CRD ドライブピストン上面面積
- P_R : 炉圧 (加振試験では容器圧力)
- $F(u, x)$: 制御棒 / チャンネルでの接触様式に基づく接触抗力
(2.2 項にて説明; 接触反力 P1, P2, R1, R2 の絶対値和)
- R_0 : 制御棒 / チャンネルでの接触抗力の摩擦係数
- P_{A0} : HCU・アキュムレータ初期圧力
- V_{N2} : HCU・N2 初期容積
- C_u : 挿入配管系の弁及び配管の圧損係数
- ρ_w : 駆動水密度
- A_{pu} : 挿入配管断面積
- L_{pu} : 挿入配管長

非加振 (ゼロスクラム条件) では, (1)式右辺の $R_0 F(u, x)$ の項がゼロとなり,

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

の変位 x のみの運動方程式となる。(1)式の $R_0 F(u, x)$ の項以外は加振 / 非加振で共通と考えられ, ゼロスクラム試験結果を使って設定する。

【チャンネルの中央相対変位振動方程式】

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

ここで,

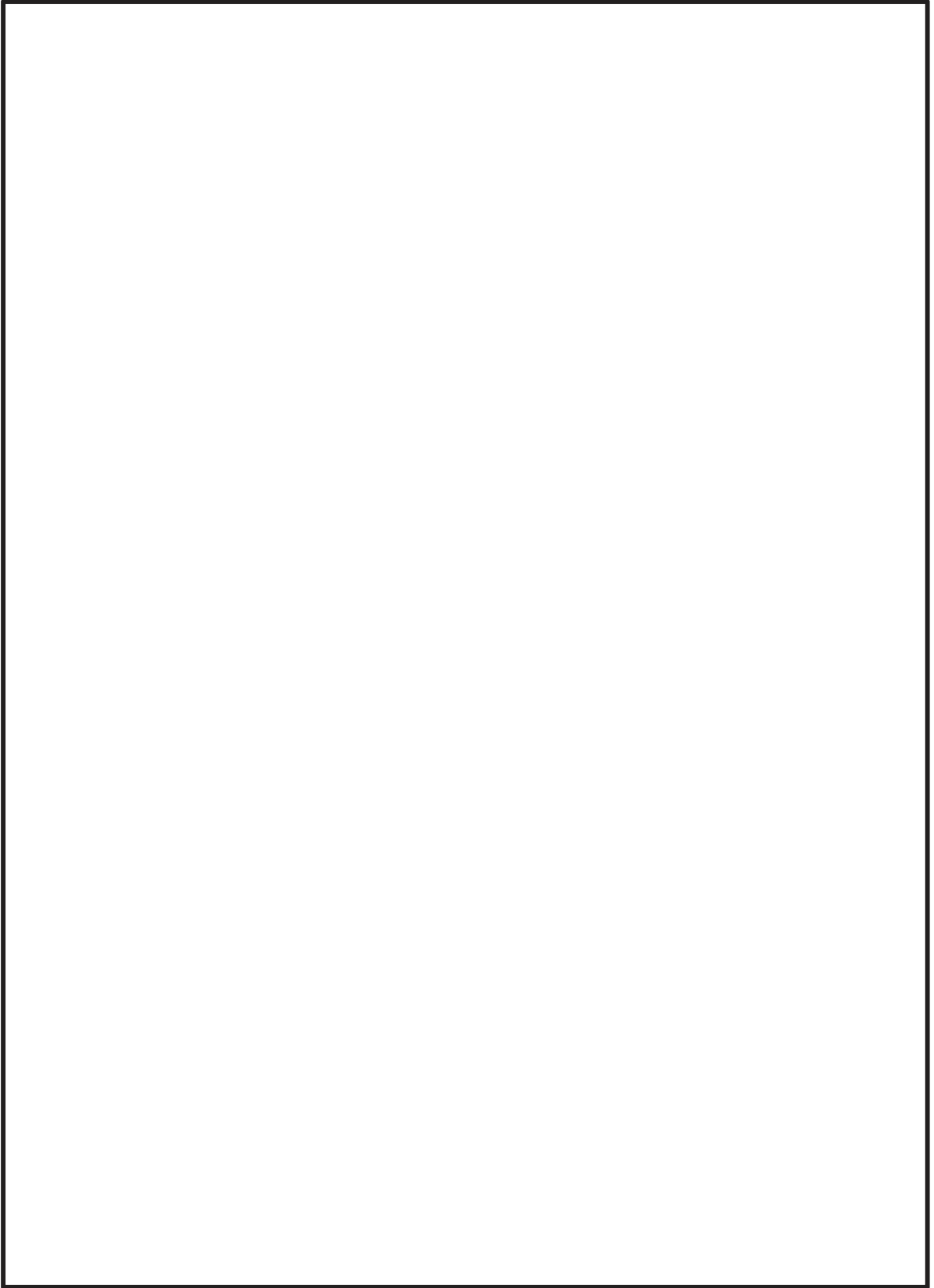
- x : 制御棒挿入量 (鉛直上向き正)
- u : 燃料集合体中央の相対 (撓み) 変位 (水平方向) \dot{u} は撓み速度, \ddot{u} は撓み加速度
- m_f : 燃料集合体 (チャンネル 4 体) の (等価) 質量
- m_0 : 燃料集合体 (チャンネル 4 体) の制御棒挿入前の付加質量
- m_x : 燃料集合体 (チャンネル 4 体) の制御棒挿入量 x での付加質量増分
- C_0 : 燃料集合体 (チャンネル 4 体) の制御棒挿入前の減衰係数
- C_x : 燃料集合体 (チャンネル 4 体) の制御棒挿入量 x での減衰係数増分
- $k(u, x)$: 制御棒 / チャンネルでの接触様式に基づく復元力 (2.2 項で説明)
- m_d : 燃料集合体 (チャンネル 4 体) の排除マス
- $\frac{(m_f - m_d)}{(m_f + m_0)}$ で燃料集合体の水中励振係数を表す
- β : 両端支持はりの 1 次モード (弓形) 中央変位の励振係数。 $4/\pi$ で近似
- $\ddot{\eta}$: 支持点での外力加速度 (外部入力値)

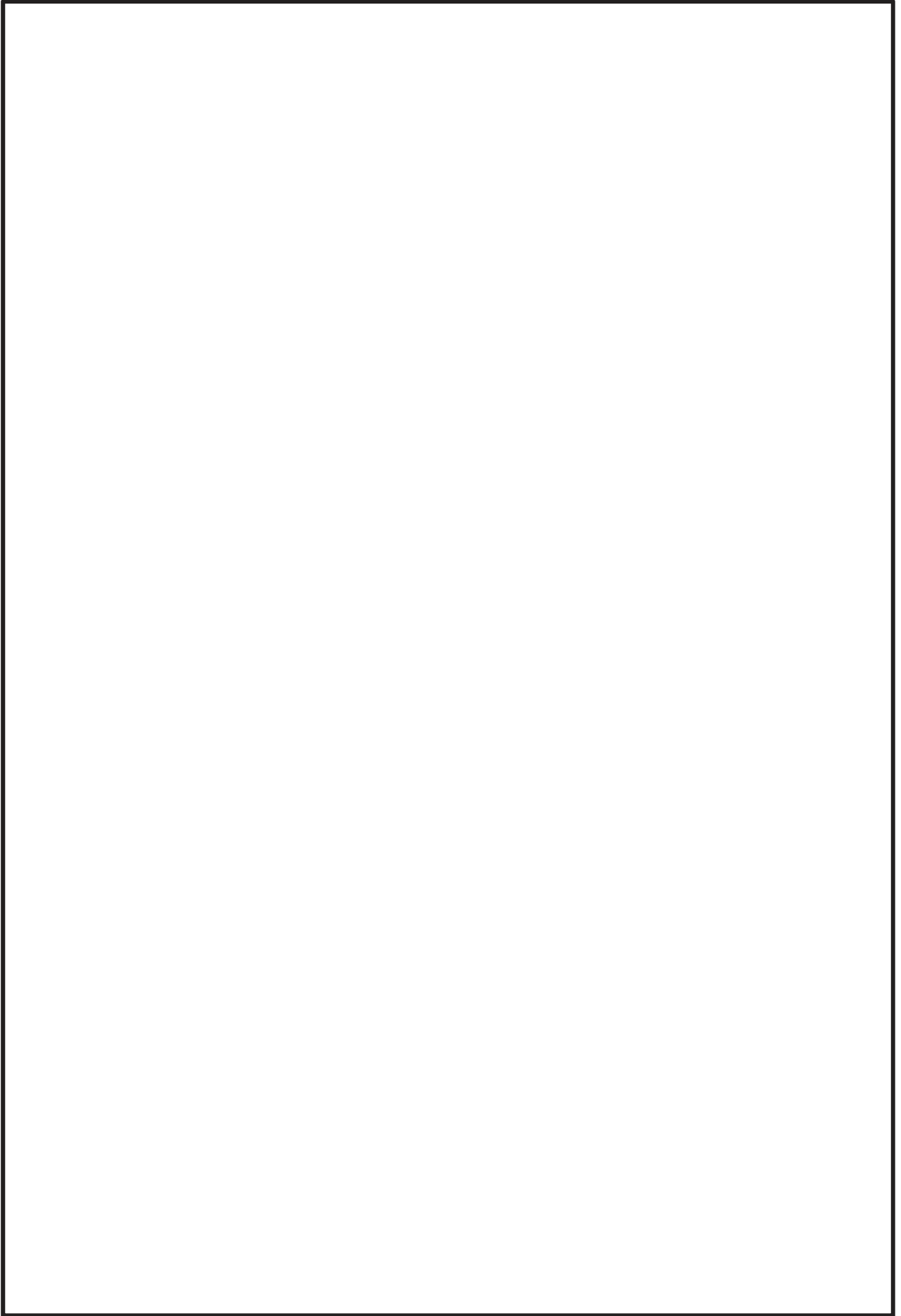
(3)式で, 質量 / 付加質量 / 排除マスは, 仕様値から設定される項目であり, (3)式の右辺は仕様あるいは加振条件に基づき設定する値である。

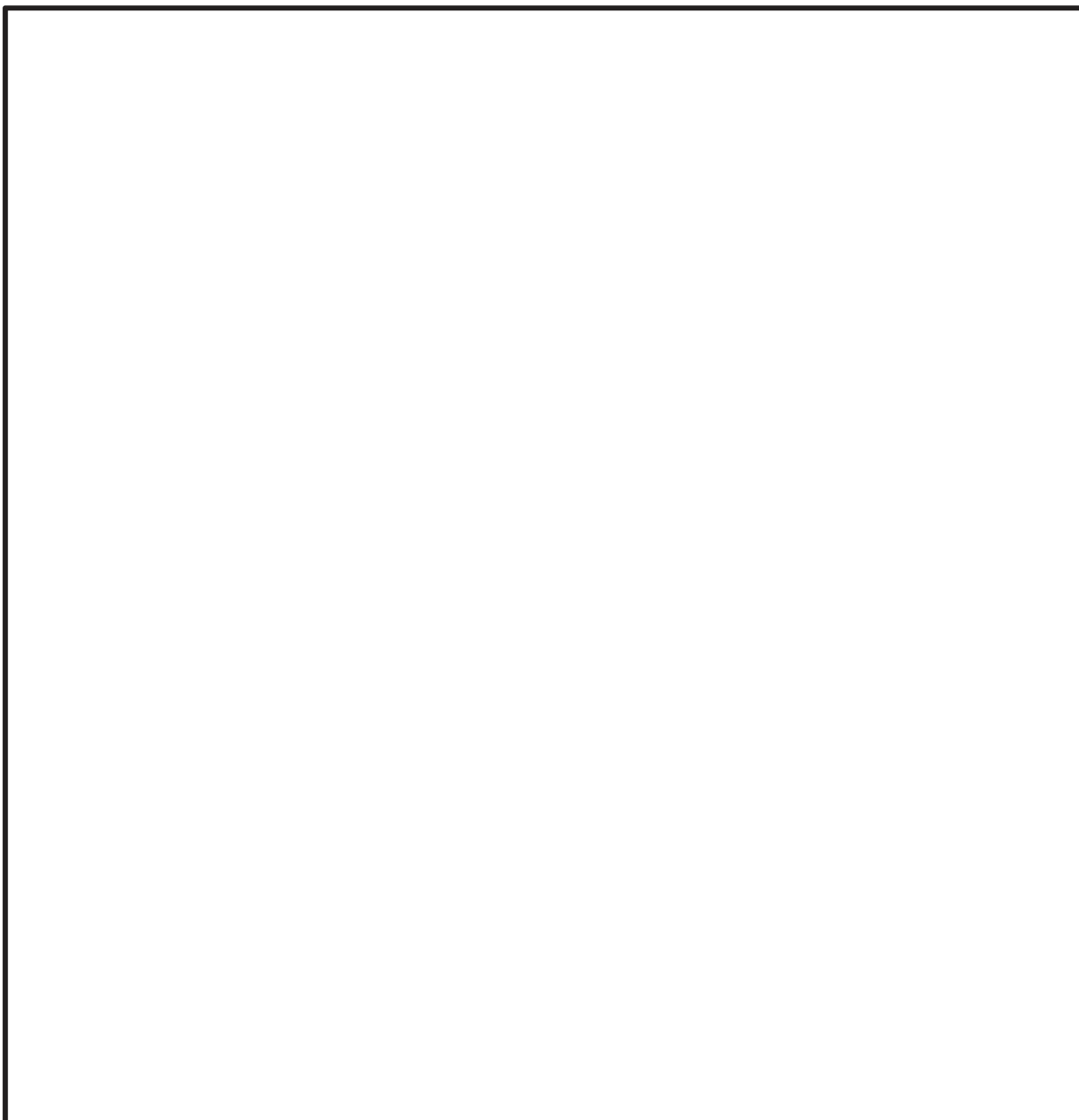
(1)式右辺の接触抗力 $F(u, x)$ と (3)式左辺の復元力 $k(u, x)$ は, 燃料集合体中央変位 u と制御棒挿入量 x の関数として表される。

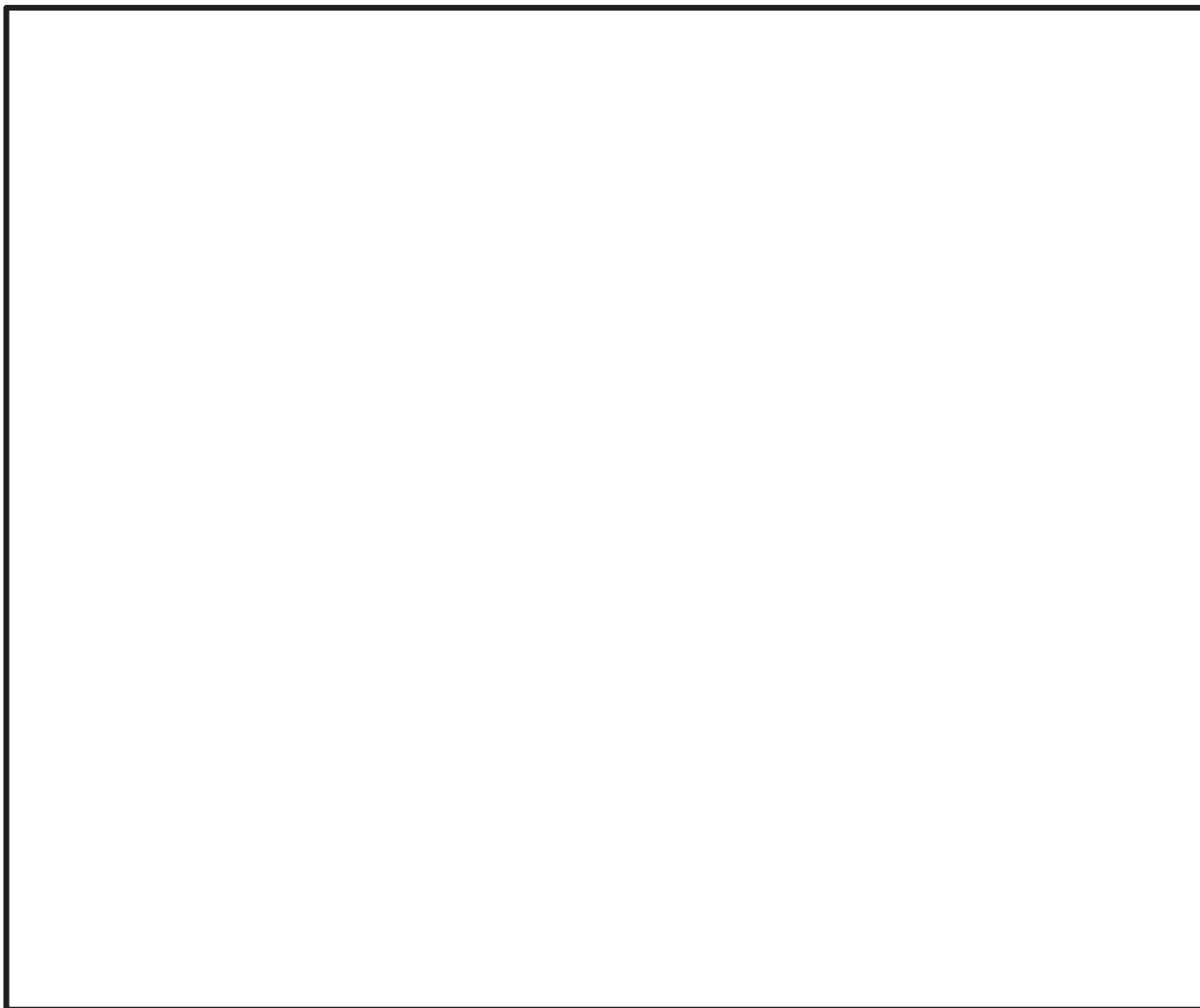
2.2 モデルによる接触抗力と復元力の計算











3. 計算例

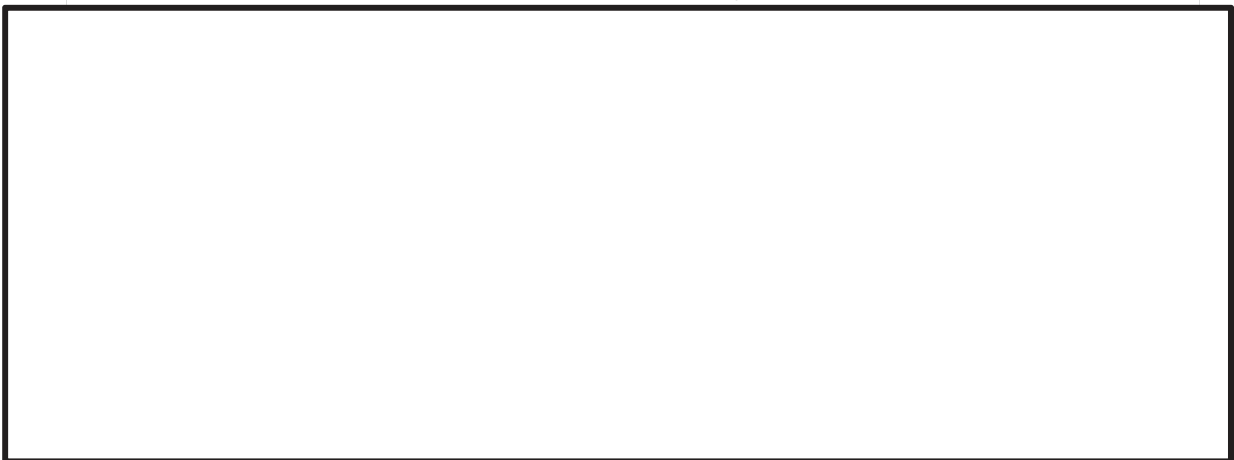
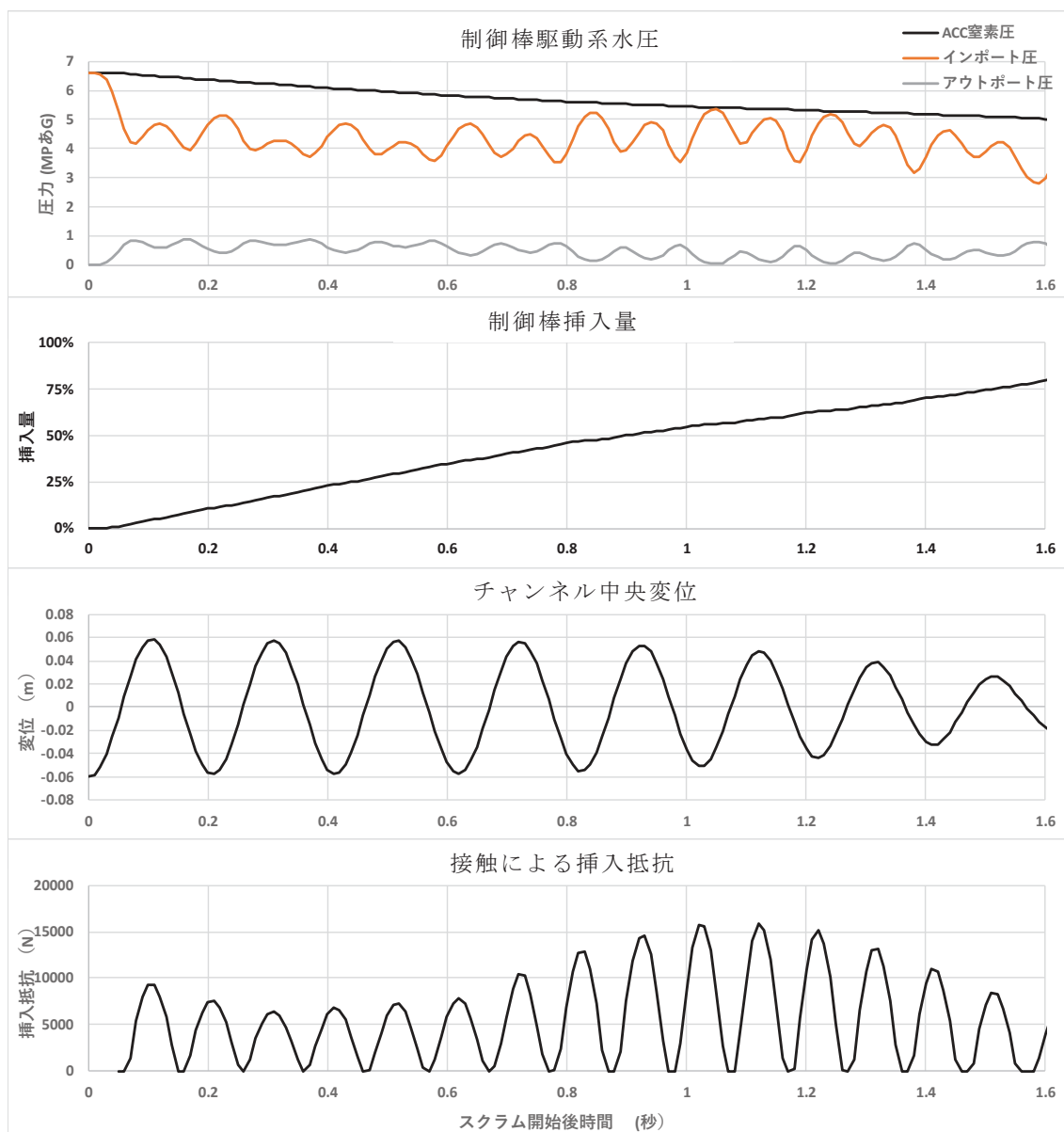
前章で説明した、 挿入抗力を，計算例にもとに説明する。

図 4 は，正弦波加振試験を解析した例である。上から，制御棒水圧駆動系の圧力（アキュムレータ窒素圧，CRD ドライブピストン下面圧力（インポート圧），CRD ドライブピストン上面圧力（アウトポート圧），制御棒挿入量（フルストローク基準の％で表示），燃料チャンネル中央のたわみ変位（相対変位），接触による挿入抵抗（総抵抗），
 をスクラム開始後の時刻歴で示している。図 4 の例では，上から 2 段目に示す 75% 挿入時間は約 1.5 秒であり，スクラム弁の遅れ時間 0.09 秒を加えた挿入時間 1.59 秒は，試験結果に一致する。

制御棒水圧駆動系では，スクラム開始後制御棒の挿入量と共に，アキュムレータ圧は徐々に低下する。インポート圧力とアキュムレータ圧力の差分は，(3)式から分かるように挿入速度の二乗に比例する圧損部分が主であり，両者の差が小さい時は，制御棒挿入速度が小さいことを意味する。

3 段目のチャンネル中央変位の時刻歴から徐々に変位が小さくなるのが分かる。これは，制御棒が挿入されチャンネルと接触することにより，制御棒の剛性が加わるためである。その下の挿入抵抗（総抵抗）との関係を見ると，変位の絶対値が大きい時に挿入抵抗が大きく，挿入抵抗の変動周期が，変位の周期の倍になることが分かる。



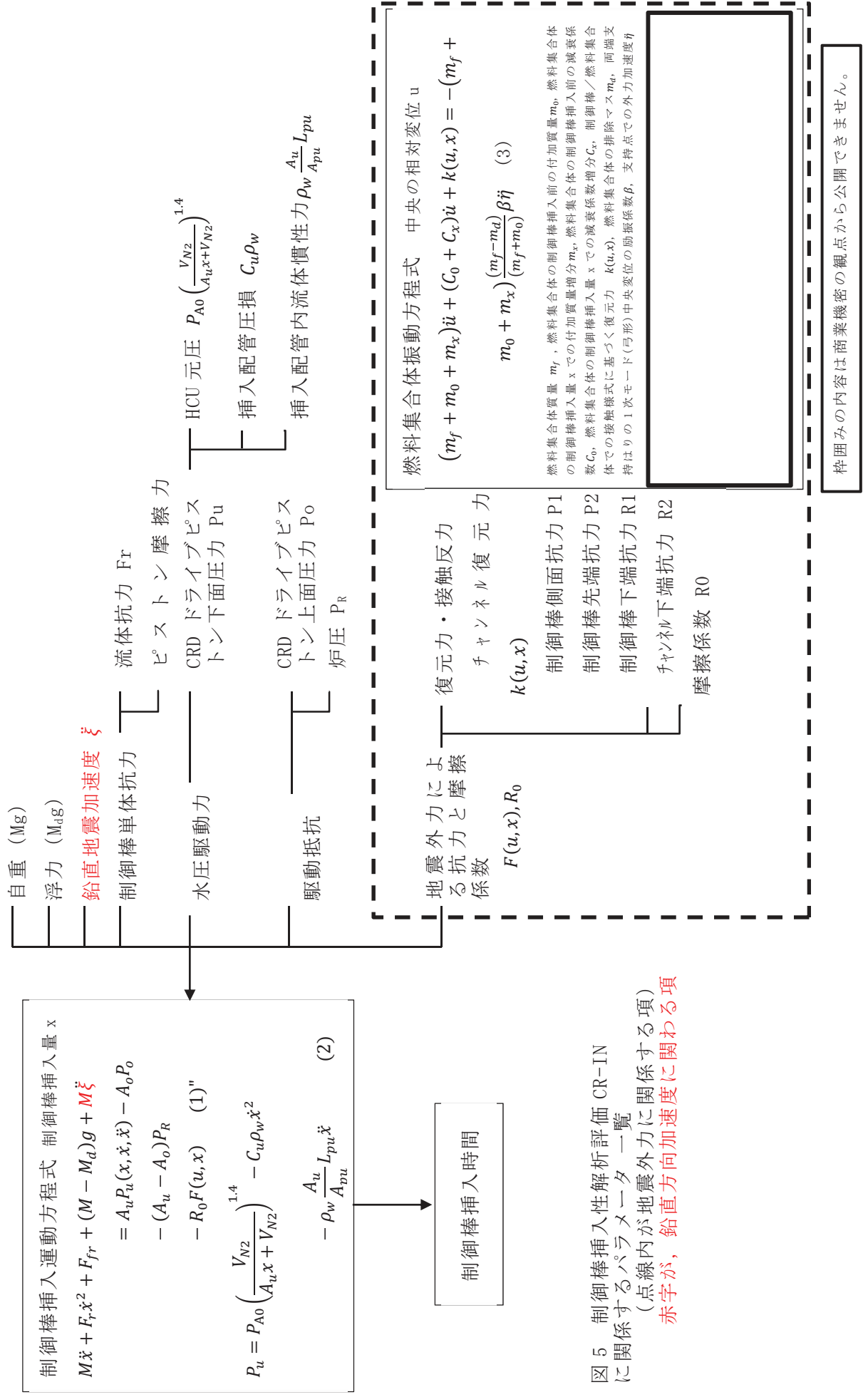


4. 鉛直方向加速度が加わった場合の挿入時間影響評価

ここでは、CR-IN を使って、制御棒の挿入中に鉛直方向加速度が加わった場合の制御棒挿入時間への影響を評価する方法について説明する。図 5 に示すように、制御棒の質量 M に鉛直方向加速度を乗じて荷重とみなし、制御棒挿入方程式に組み込むモデルを採用し、鉛直方向加速度を“重力”と同等に扱うモデルで評価する。ただし重力と異なり、変動荷重で平均値はゼロである。同様に制御棒挿入運動に関わる力で変動力となるのは、チャンネルと制御棒の接触による挿入抵抗力である。水平加振が正弦波である場合には、3 章で示したように、正弦波周期の $1/2$ の周期で挿入抵抗力は変動する。(図 6・右図)

鉛直方向加速度がこの挿入抵抗力と同期する場合には、挿入抵抗と同期してブレーキになると考えられる。鉛直方向加速度が主要な動的変動である挿入抵抗とカップリングして作用するこのケースは、極端ではあるが最も鉛直方向加速度が挿入時間に影響するケースと考える。

図 6 では、鉛直加振として水平加振と同じ周波数及び 2 倍周波数の正弦波を加えた挿入時間解析を CR-IN で行い、制御棒挿入時間への鉛直方向加速度の影響を評価するモデルを考えている。鉛直正弦加振波は、図 6 右図に示すように、下向き加速度を正として、挿入抵抗力と同相となる場合と逆相となる場合が想定される。



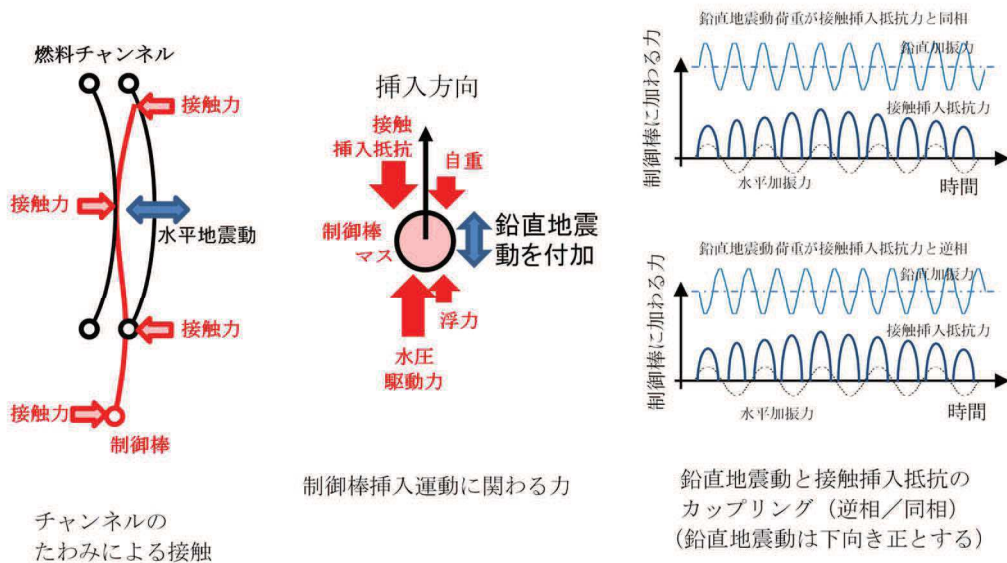


図 6 CR-IN による鉛直方向加速度の挿入時間への影響解析モデル

参考文献：

- 1) Watanabe, Y. et al., and Motora, Y., "Analysis of control rod Scrammability Characteristics on the Condition of the Forced Vibration of Fuel Assemblies", Proc. of the 7th SMiRT, F7/8, 1983
- 2) Watanabe, Y. et al., "BWR CONTROL ROD DRIVE SCARAMMABILITY DURING EARTHQUAKES". 1989 ASME PVP Conference in Honolulu