

1号機の耐震安全性評価に関する補足説明資料

<地震時の制御棒挿入性を確認する評価について>

平成22年3月8日



燃料集合体の地震応答解析について

- 原子炉内部構造物の地震応答解析では、内部構造物をはりと集中質量でモデル化している。燃料集合体は、群振動するとし、一本のはりに集約している。
 - なお、前回行った「目的が異なる解析モデルの共通部分の応答値の比較」は、解析モデルが一定の精度で振動特性を再現できていることを示す一つのケーススタディとなった。
- 設計あるいは耐震安全性評価では、上記の解析モデルに対して安全側の減衰定数を設定している（後述）。
- 上記の地震応答解析手法は、炉内構造物の実規模試験体を用いた加振試験にて、検証されている（後述）。
- 1号機の耐震安全性評価で計算された燃料集合体の地震応答値は、検証された解析モデルに安全側の配慮を含んだものであり、信頼できるものと考えられる。

地震時の制御棒挿入性評価について

- 建設時、または、運転中のプラントで制御棒の型式を変更するときには、その都度、加振試験により燃料集合体の振幅と制御棒挿入に要する時間を評価し、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991」に基づき地震時の制御棒挿入性を確認して、監督官庁より認可を頂く手順となっている。
- 1号機の耐震安全性評価では、プラント建設に際して、設計時に行った加振試験により評価された燃料集合体の振幅と制御棒挿入に要する時間の相関関係を用いて、制御棒の挿入性を評価した。

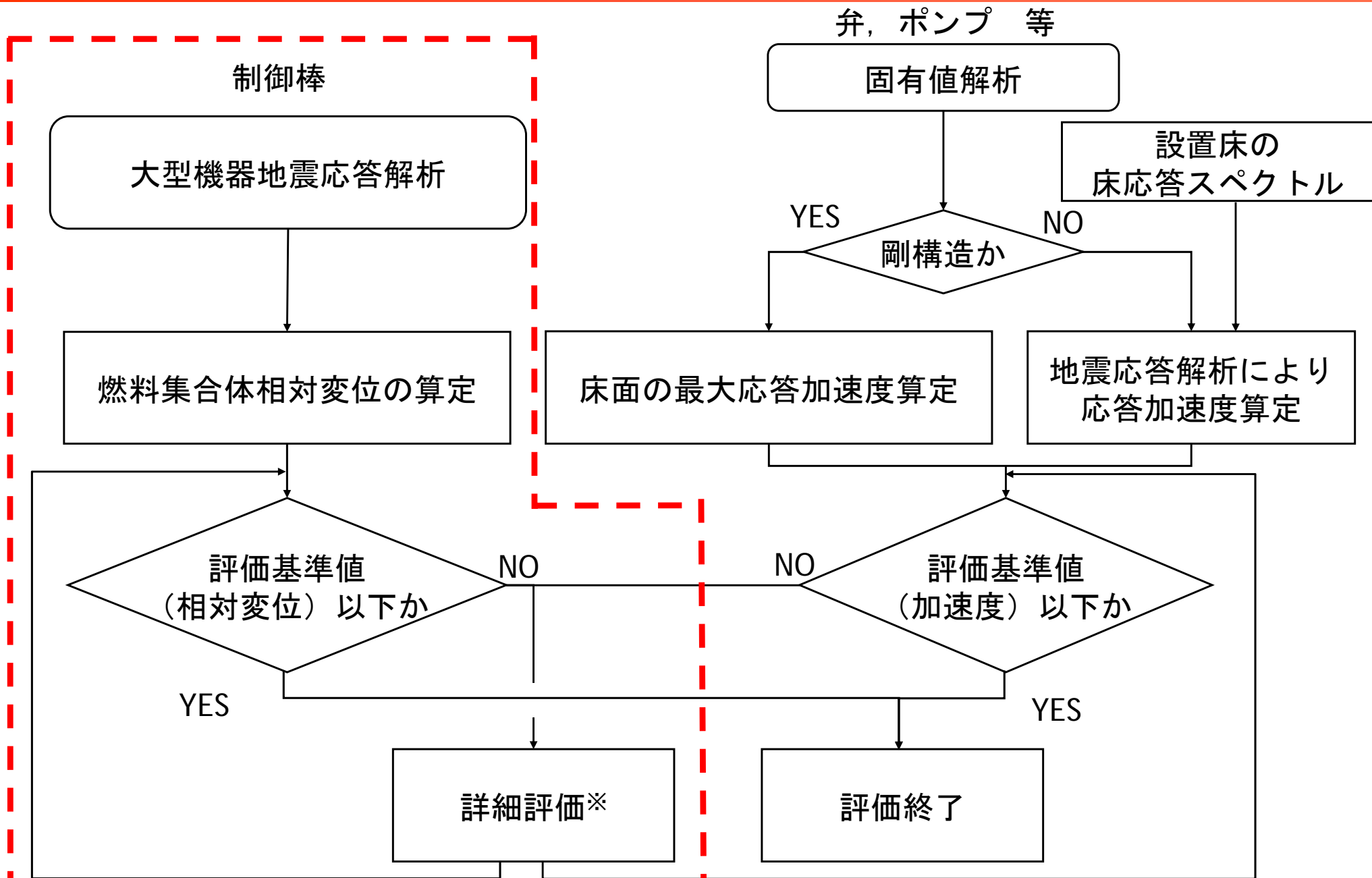
- 地震時は燃料集合体の中央部が変位することにより、制御棒の挿入時間が通常運転時に比べて増加することが予想される。
 - ✓ 地震時にも規定時間内に制御棒が挿入可能であることを確認するために、制御棒の挿入性試験を室温条件下にて実施した。(設計時)
 - 燃料集合体相対変位と制御棒挿入時間の関係を確認
 - ✓ 基準地震動 S_s に対する燃料集合体の相対変位 \ast を算定。(今回)

- 上記の試験結果、算定結果に基づき、規定時間内に制御棒が挿入できることを確認する。

\ast ここでいう「燃料集合体の相対変位」とは、燃料集合体のたわみ量を指す。地震応答解析では、各質点共通の基準点からの絶対変位が算出されるため、それと区別するために「相対変位」という表現を用いている。

動的機能維持評価の流れ

設備小委32-3-1より抜粋(一部加筆)



※構成部品の評価実施

制御棒挿入性評価に係る部分

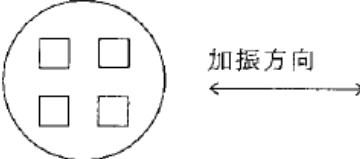
評価基準値について

- 今回の制御棒挿入性評価の評価基準値は、設計時の制御棒挿入試験の結果に基づいている。（次頁以降参照）
- 設計時の制御棒挿入試験では、燃料集合体の相対変位が少なくとも40mm程度までは、スクラム仕様値を満足することを確認している。

■ 柏崎刈羽原子力発電所1号機の制御棒である以下の制御棒について試験

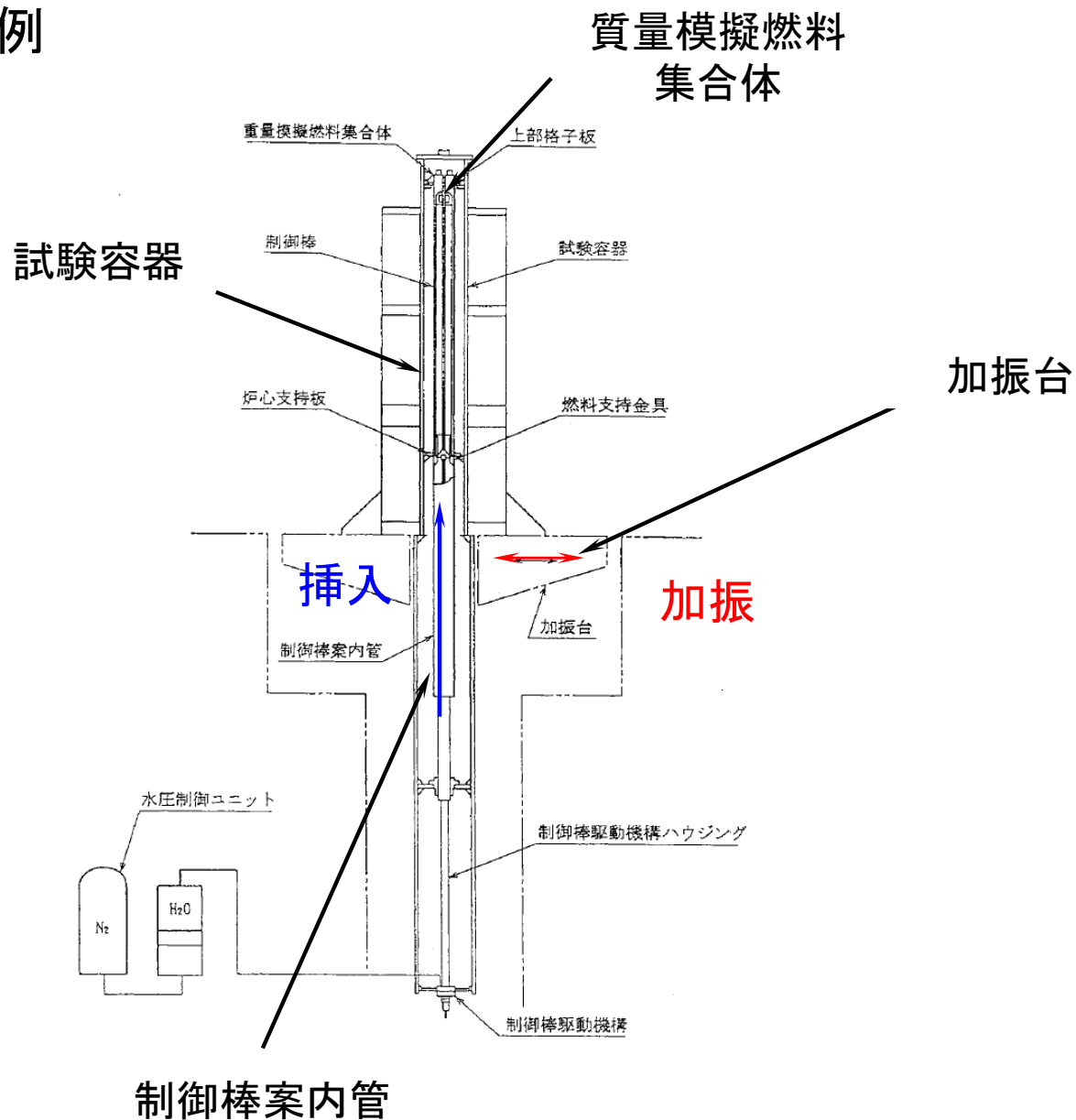
- ✓ ボロンカーバイド型

■ 試験条件

項目	条件
温度	室温
圧力	常圧*
加振条件	<p>加振方向：水平方向</p>  <p>加振振幅：燃料集合体の最大振幅が0～40mmの範囲</p> <p>加振振動数：約5～6Hz (燃料集合体の水中固有振動数相当)</p> <p>加振波形：正弦波</p>
スクラム開始時の制御棒位置	全引き抜き状態

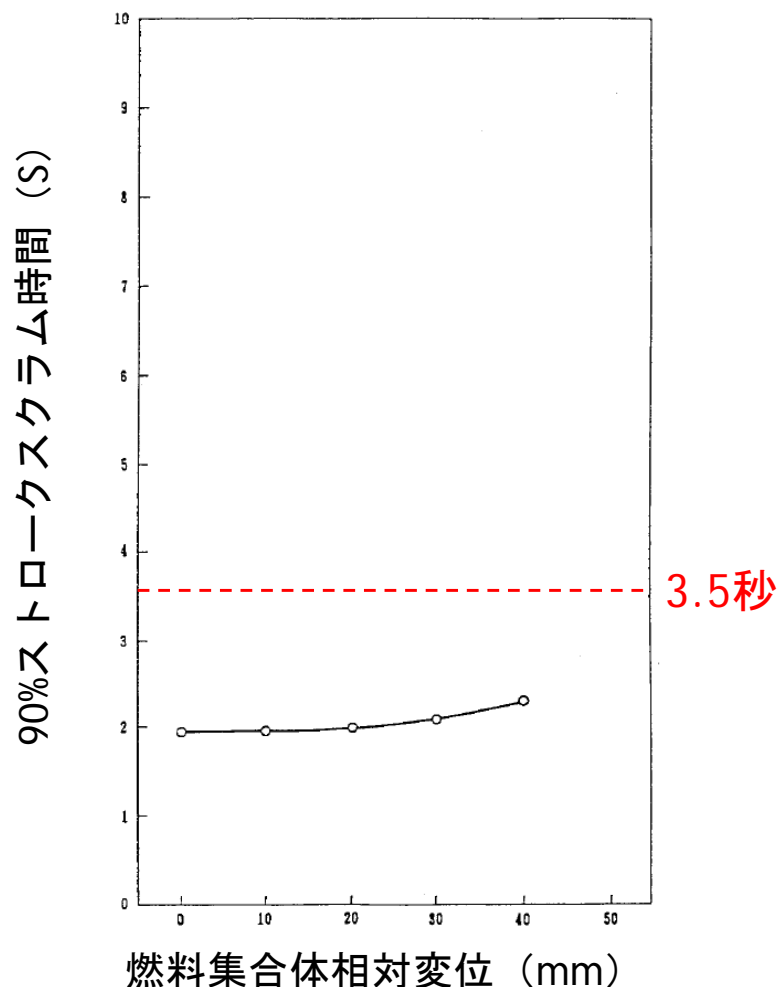
注記 *：アキュムレータ圧力の調整により原子炉定格圧力（6.93MPa[gage]）時のスクラムを模擬。

■ 試験装置の例

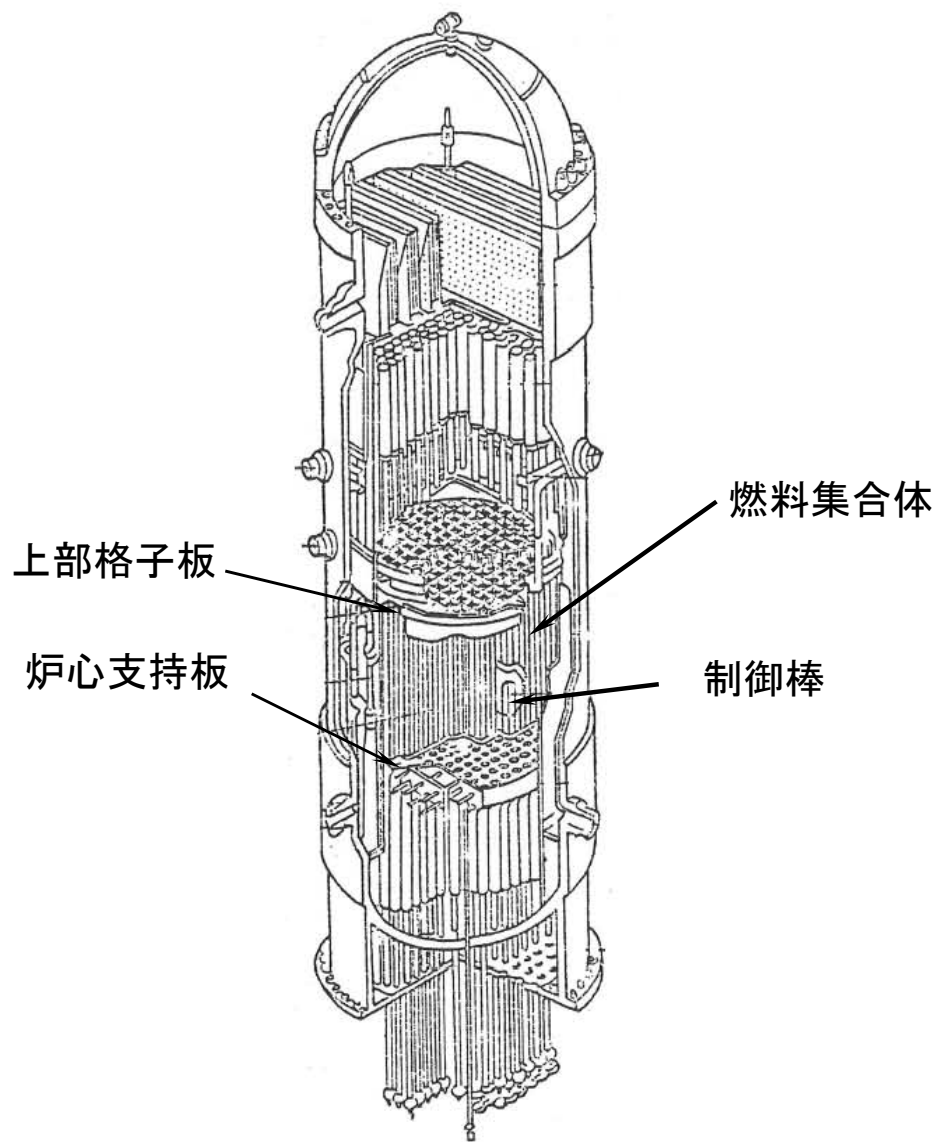


■ 試験結果

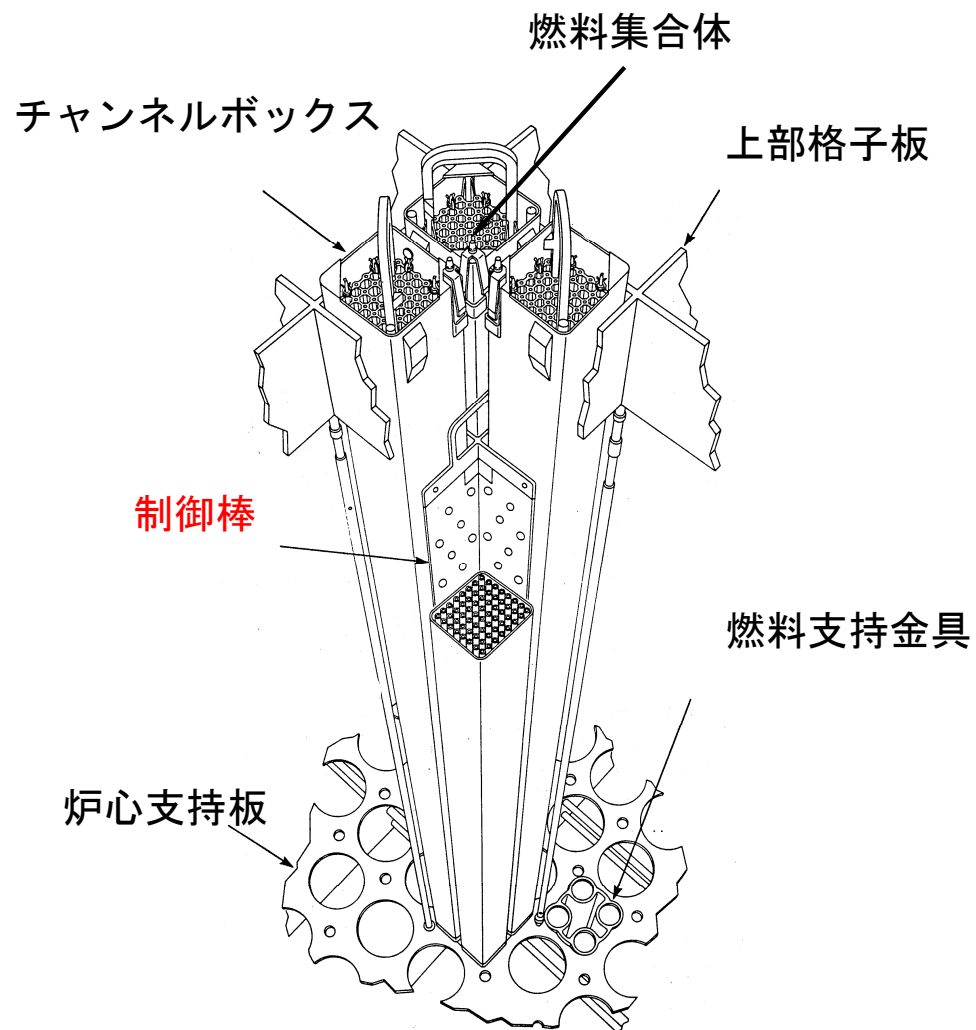
- 燃料集合体の相対変位が約40mmにおいて通常のスクラム仕様値である90%ストローク3.5秒以内であることが確認でき、試験後において制御棒の外観に有意な変化がないことを確認。



（左図）燃料集合体相対変位のスクラム時間に与える影響

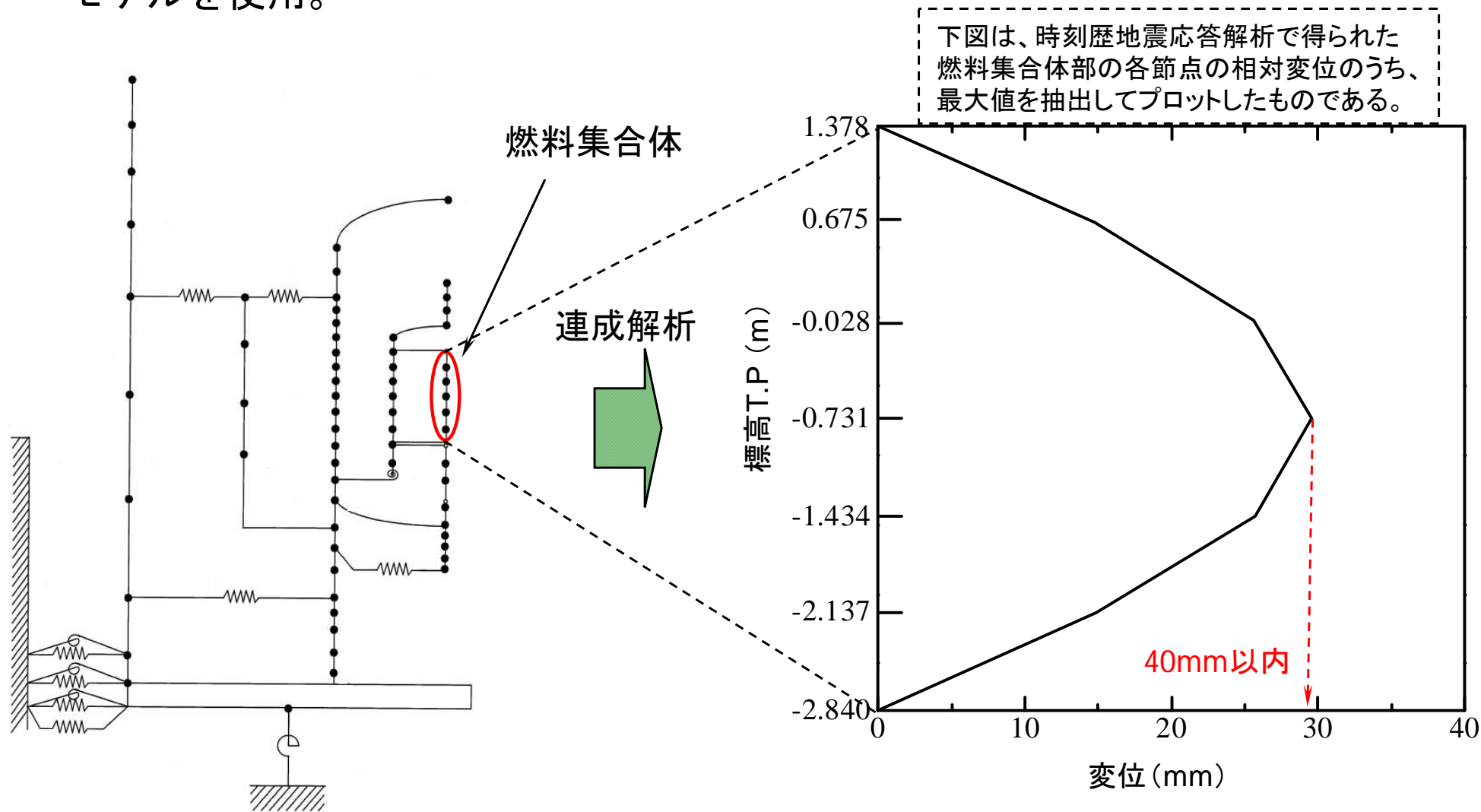


炉内構造物模式図



制御棒挿入時模式図(イメージ)

- 燃料集合体の地震応答解析は、圧力容器内部構造物の一部として左図の解析モデルを使用。



地震応答解析により求めた燃料集合体相対変位 (Ss評価)

炉内構造物解析モデル

炉内構造物地震応答解析手法の実証試験について

- 1号機の耐震安全性評価で用いている炉内構造物地震応答解析手法は、下記の通り妥当性が確認されたBWRプラントで一般的に用いられている手法を用いている。
- 通商産業省（昭和61年度当時）は、BWR炉内構造物について、地震に対する安全性、信頼性を実証するとともに、耐震設計の妥当性を再確認することを目的とした試験（以下、実証試験という）を実施した。
- 上記試験により、BWR炉内構造物の耐震設計手法の妥当性が確認された。

今回紹介する実証試験のポイント

今回は、原子炉内部構造物の地震応答解析手法が、試験により実証されていることに主眼を置いて、試験の内、下記の内容について紹介する。

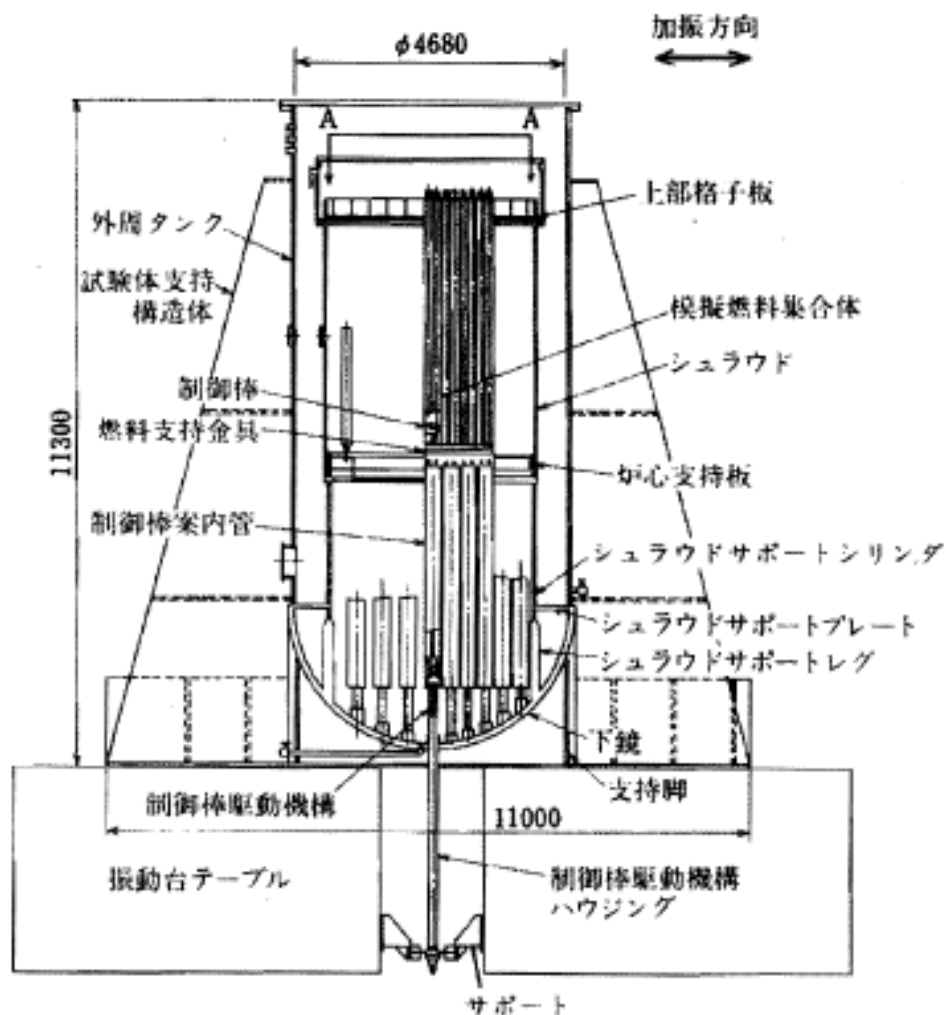
■燃料集合体が同位相で振動することの確認

原子炉内部構造物の地震応答解析モデルでは、燃料集合体を一本のはりとしてモデル化している。試験結果では、燃料集合体が同相に振動していることが確認されており、その試験結果の例を紹介する。

■試験結果と解析結果がよく対応していることの確認

BWRプラントの設計で用いられている原子炉内部構造物の地震応答解析手法に基づいた試験体の地震応答解析結果と試験結果がよく対応していることを紹介する。

実証試験の試験体について



本頁の図は、本委員会での審議を目的として、(財)エネルギー総合工学研究所の許可を得て、「原子力発電施設 信頼性実証試験の現状」((財)原子力工学試験センター、(財)発電設備技術検査協会)より転載しているものです。本資料の目的外使用は禁止します。

実証試験の試験体概略図

<試験に関する補足>

■縮尺：1/1

■実証試験条件

- 圧力：常圧
- 温度：室温

■構造は、実機1,100MWeプラント炉内構造物と同等

■入力波

- S1床応答波（以下、S1波という）

最大加速度

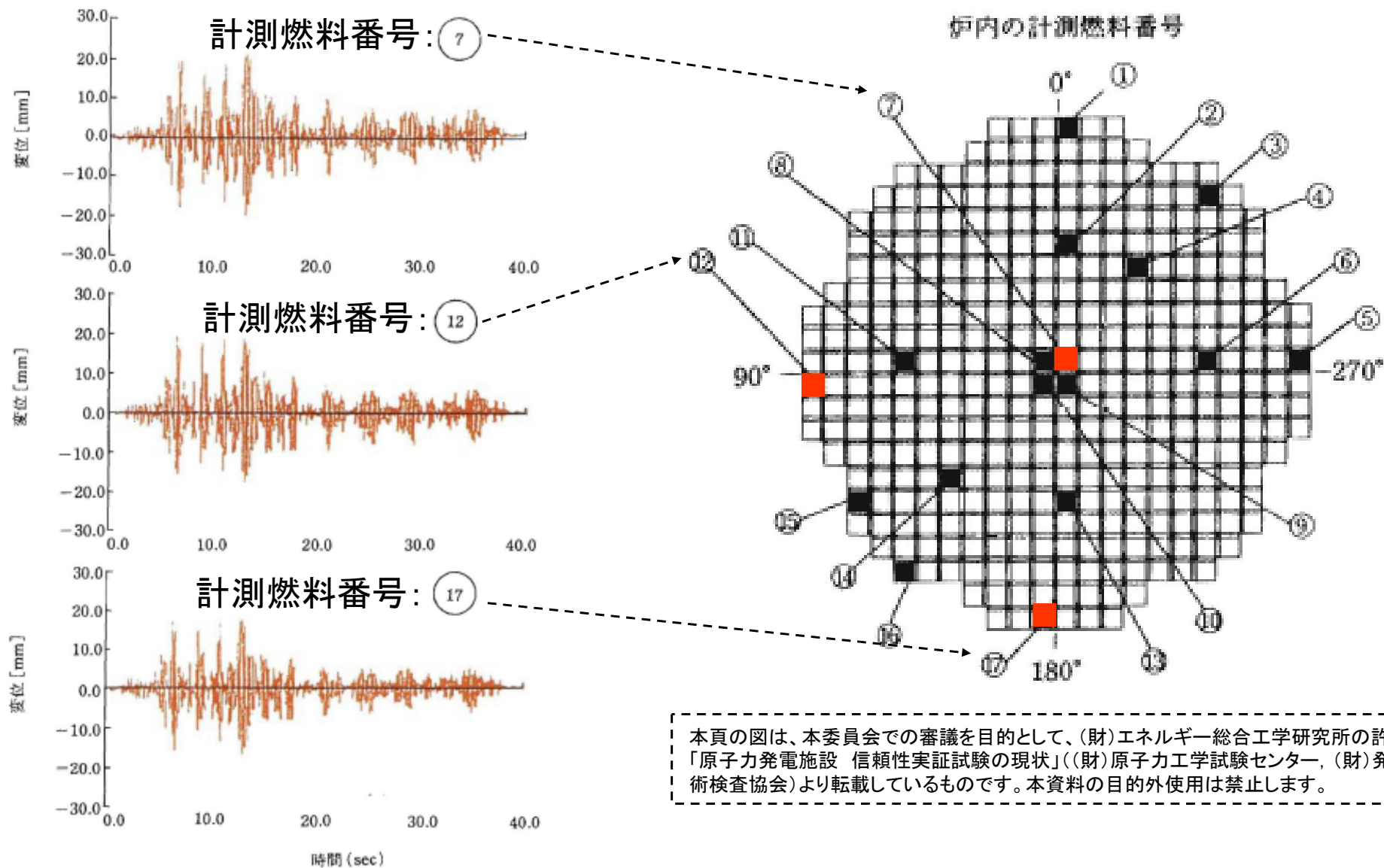
水平：970gal 上下：168gal

- S2床応答波（以下、S2波という）

最大加速度

水平：1362gal 上下：264gal

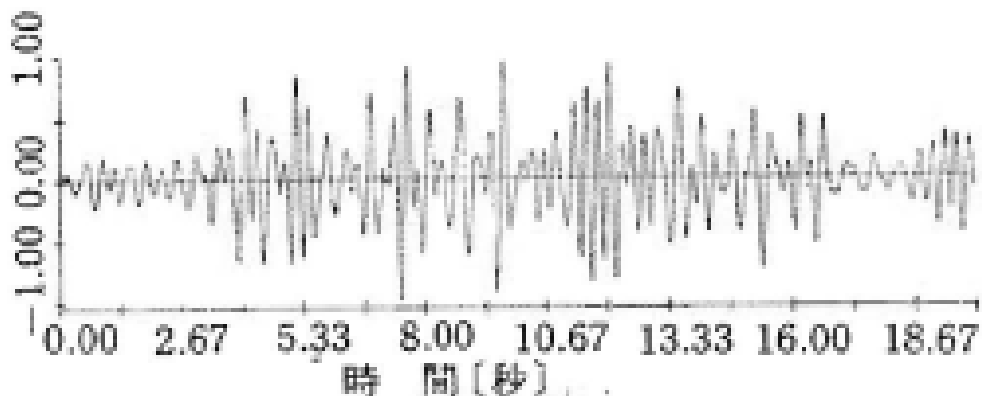
実証試験結果の例（燃料集合体の変位） その1



燃料集合体の変位波形の例
[S2波(水平・鉛直同時加振)]

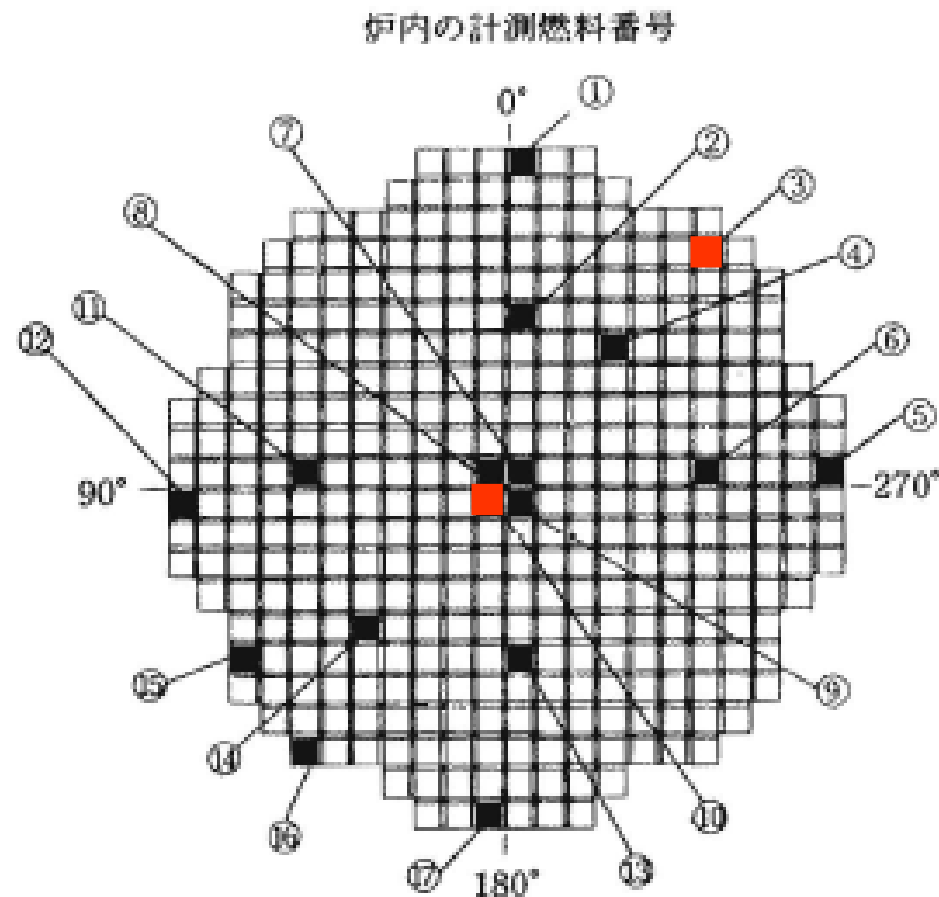
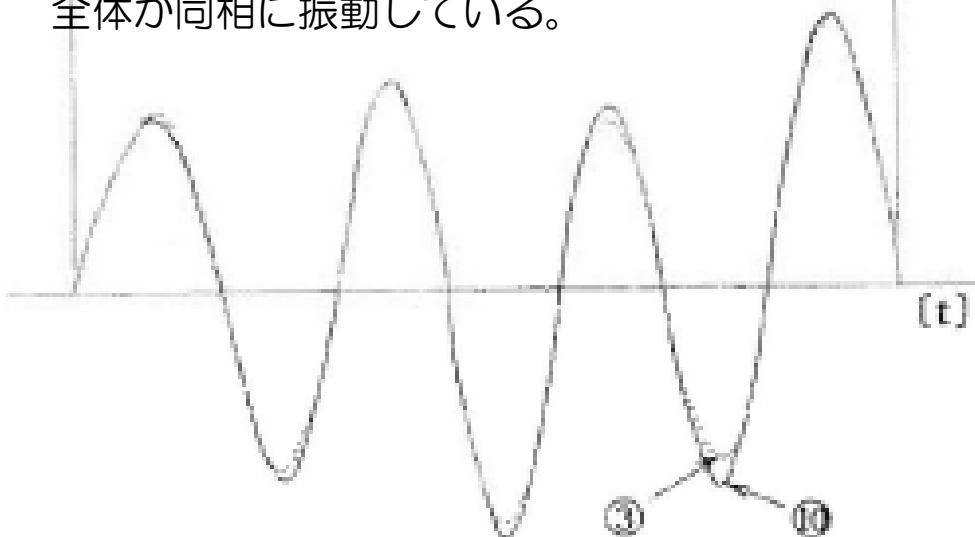
■炉心内位置に関係なく波形のパターンが一定しており、全体が同相に振動している。

実証試験結果の例（燃料集合体の変位） その2



※右図の③と⑩(赤で示した)の波形を重ね書いたもの

- 炉心内位置に関係なく波形のパターンが一定しており、全体が同相に振動している。

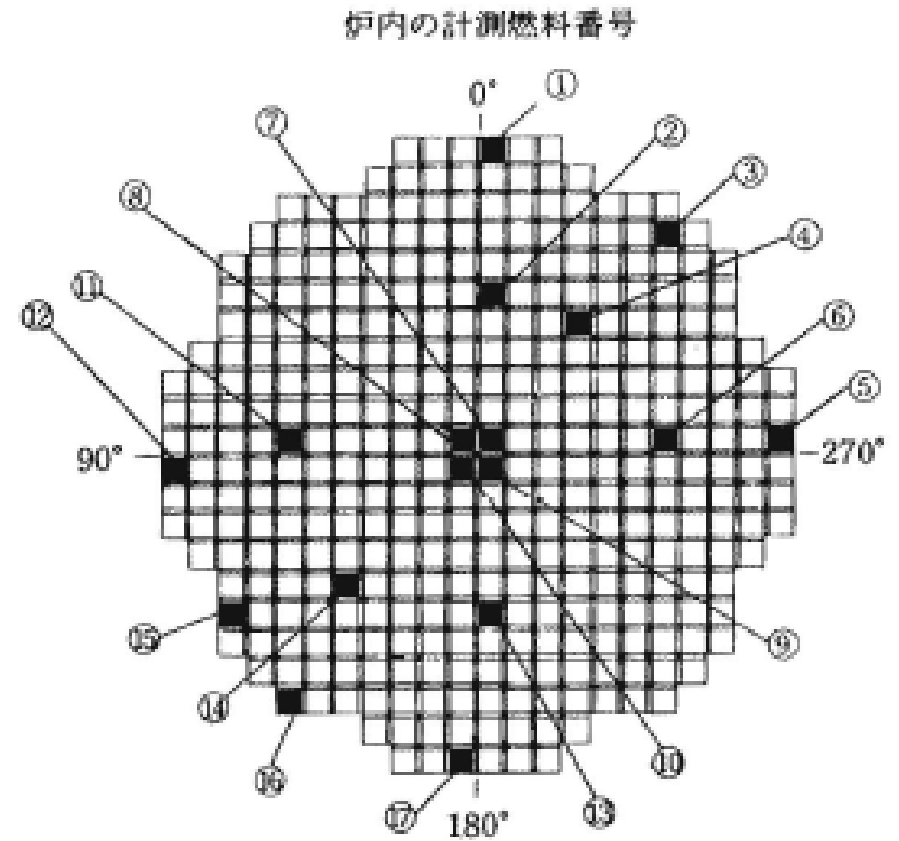
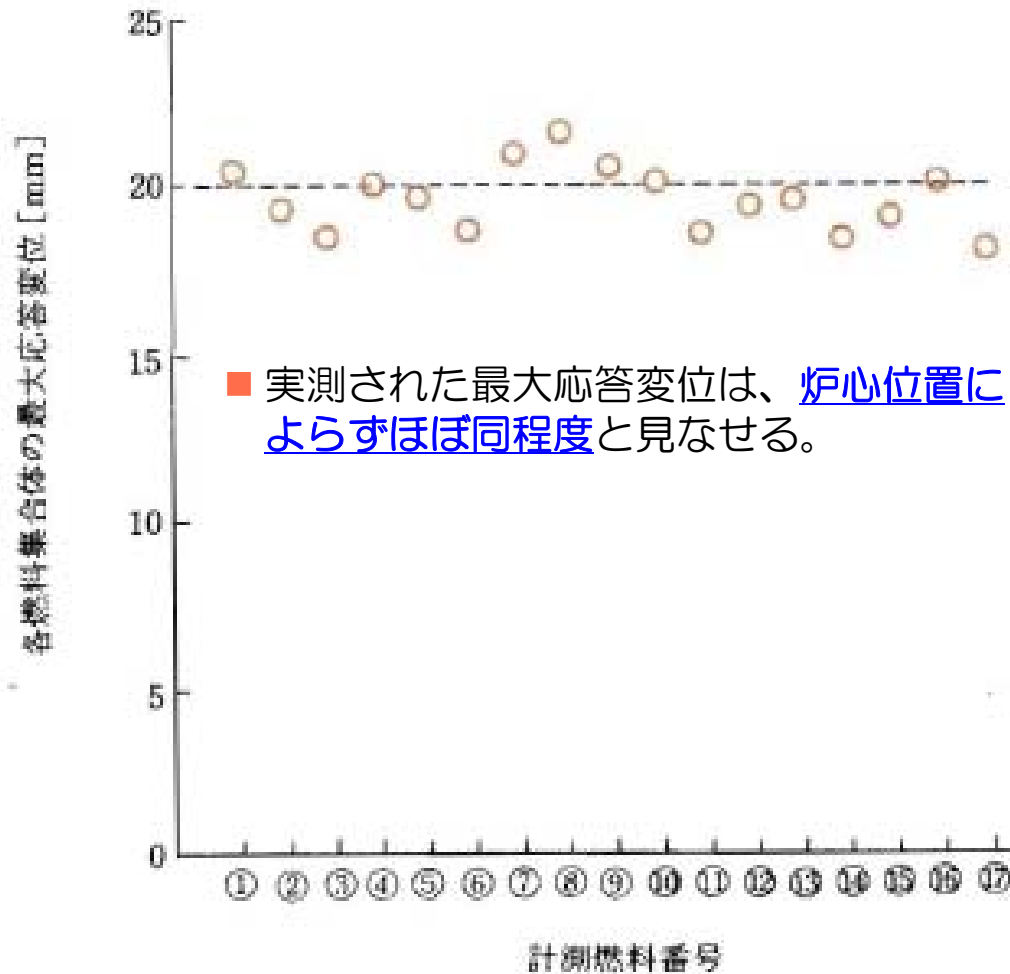


燃料集合体変位波形の重ね書き波の
拡大波形の比較例

[S1波(水平・鉛直同時加振)]

本頁の図は、本委員会での審議を目的として、(財)エネルギー総合工学研究所の許可を得て、「原子力発電施設 信頼性実証試験の現状」((財)原子力工学試験センター、(財)発電設備技術検査協会)より転載しているものです。本資料の目的外使用は禁止します。

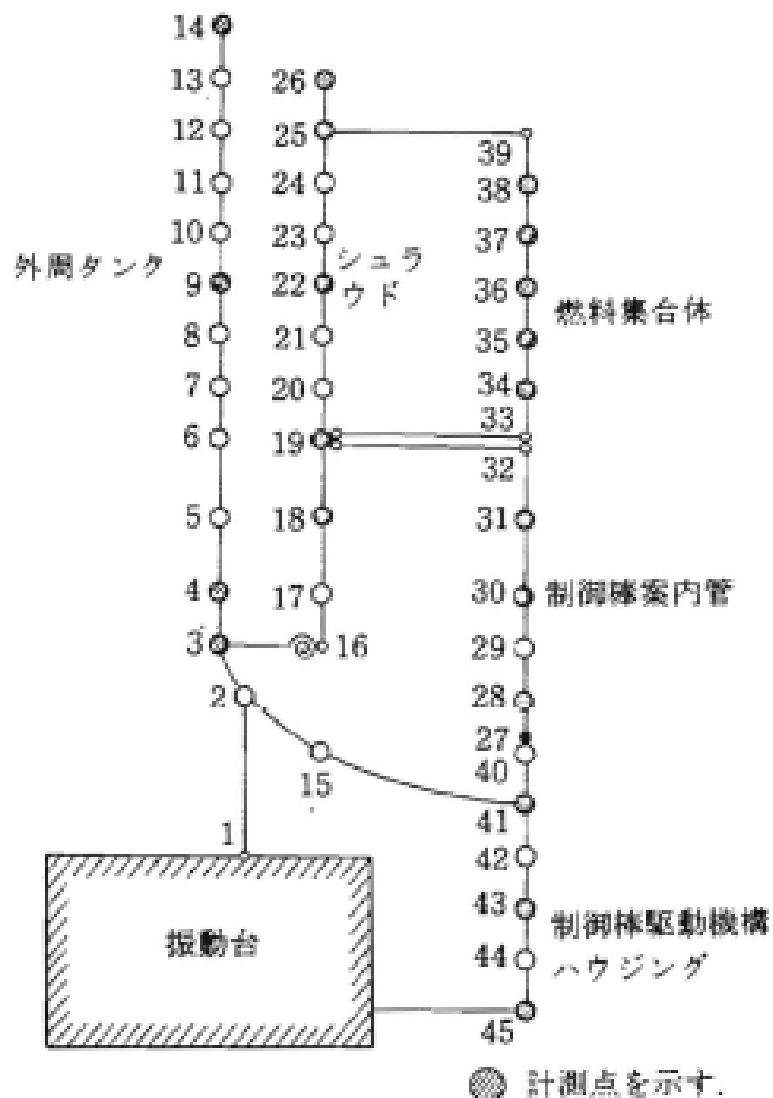
実証試験結果の例（燃料集合体の変位） その3



本頁の図は、本委員会での審議を目的として、(財)エネルギー総合工学研究所の許可を得て、「原子力発電施設 信頼性実証試験の現状」((財)原子力工学試験センター、(財)発電設備技術検査協会)より転載しているものです。本資料の目的外使用は禁止します。

各燃料集合体の最大応答変位の例（S2波で水平・鉛直同時加振）

試験体のシミュレーション解析について



試験体のシミュレーション解析モデル

本頁の図は、本委員会での審議を目的として、(財)エネルギー総合工学研究所の許可を得て、「原子力発電施設 信頼性実証試験の現状」((財)原子力工学試験センター、(財)発電設備技術検査協会)より転載しているものです。本資料の目的外使用は禁止します。

■ 設計時と同じ考え方でモデル化した解析モデルを用いた。

- 燃料集合体群は1本のはりに置換

- シュラウド部分は曲げせん断変形を考慮したはりに置換

■ シミュレーション解析モデルに適用した減衰定数は、試験で測定した値とした。

実証試験のシミュレーション解析に適用した減衰定数と耐震安全性に適用した減衰定数

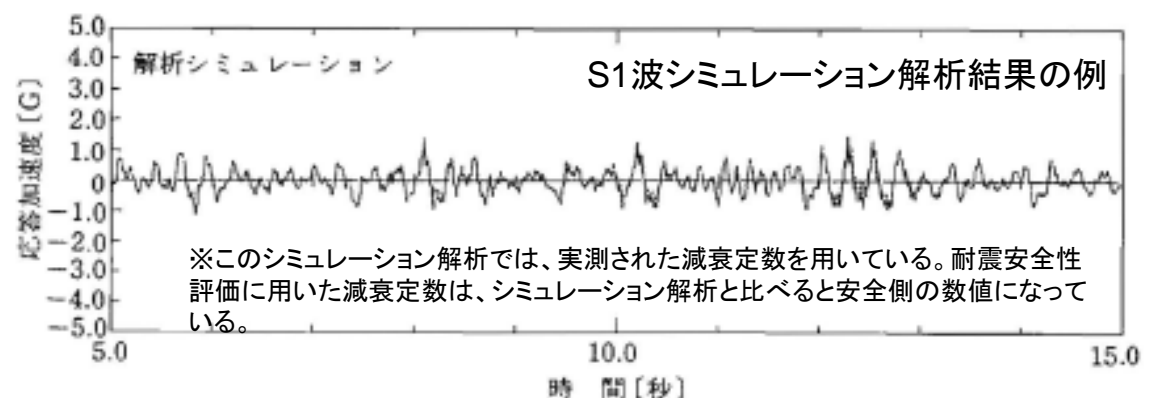
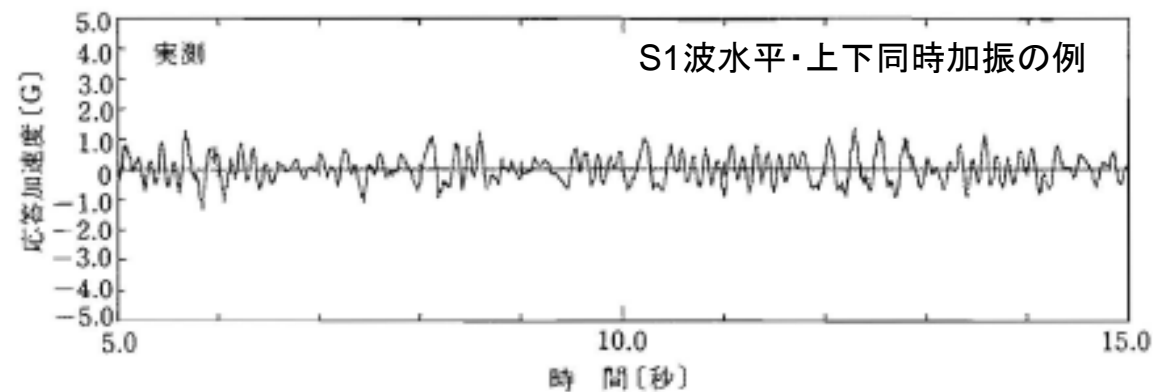
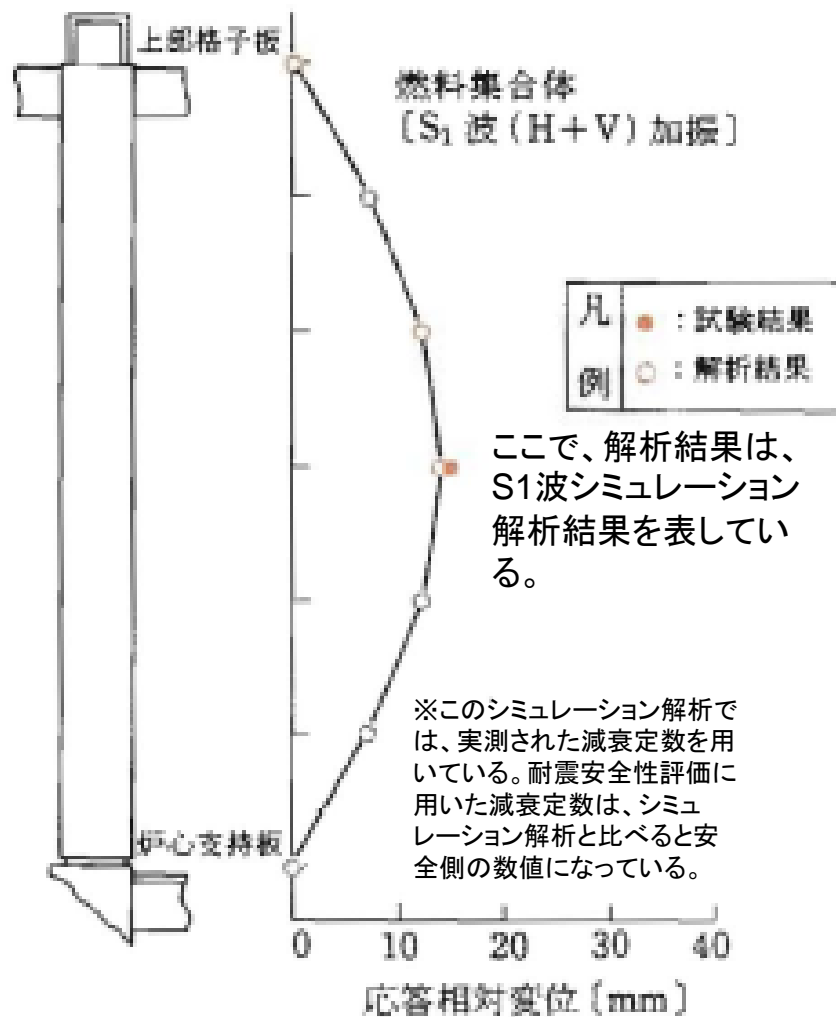
	S1波シミュレーション例	耐震安全性評価の例
燃料集合体	7.8 %	7.0 %
シュラウド	3.8 %	1.0 %
制御棒案内管	4.5 %	1.0 %

試験体の振動モードの比較（実測／解析）

	試験体／解析モデル	燃料集合体共振時	シュラウド共振時
実測			
シミュレーション解析			

本頁の図は、本委員会での審議を目的として、(財)エネルギー総合工学研究所の許可を得て、「原子力発電施設 信頼性実証試験の現状」((財)原子力工学試験センター、(財)発電設備技術検査協会)より転載しているものです。本資料の目的外使用は禁止します。

燃料集合体の応答比較 (実測／解析)



燃料集合体加速度波形の実測とシミュレーション解析結果の比較

試験体応答分布の試験結果と解析結果の比較

■試験の実測とシミュレーション解析結果はよく対応している。

本頁の図は、本委員会での審議を目的として、(財)エネルギー総合工学研究所の許可を得て、「原子力発電施設 信頼性実証試験の現状」((財)原子力工学試験センター、(財)発電設備技術検査協会)より転載しているものです。本資料の目的外使用は禁止します。

実証試験に関するまとめ

- 地震応答解析手法は、炉内構造物の実規模試験体を用いた加振試験にて、検証されている。
- 設計あるいは耐震安全性評価では、検証された解析モデルに対して安全側の減衰定数を設定している。
- 「不確かさ」は定義づけが難しく、一般的には、構造強度評価の際に、荷重や断面を安全側に配慮することで対処している。1号機の耐震安全性評価で計算された燃料集合体の地震応答値は、検証された解析モデルに安全側の配慮を含んだものであり、信頼できるものと考えられる。

評価対象設備	地震時の相対変位 (mm)	評価基準値 (相対変位) (mm)
制御棒 (地震時の挿入性)	29.6※1	40.0※2

※1 試験で実証された解析手法により計算された燃料集合体の相対変位

※2 常温における挿入試験により，規定時間内に制御棒が挿入されたことが確認された燃料変位

- 「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991追補版」(以下、JEAG4601-1991という)によれば、地震時における制御棒挿入性の評価は、以下の手順に従うとしている。

(JEAG4601-1991の361～362頁より)

- ① 各プラントの地震条件に基づき炉内構造物を含む振動解析モデルを用いて地震応答解析を行い、燃料集合体の最大相対変位を求める。なお、既往の研究において実規模の試験体を用いた振動試験が行われ、現行設計手法の妥当性が確認されており、本評価においても同一手法を用いることが望ましい。
- ② 加振試験又は妥当性が確認された解析により、燃料集合体の振幅と挿入に要する時間との関係を求める。
- ③ 上記①、②の結果より、地震時に制御棒の挿入性が維持されているかどうかを確認する。

- 建設時、または、運転中のプラントで制御棒の型式を変更するときには、その都度、加振試験により燃料集合体の振幅と制御棒挿入に要する時間を評価し、JEAG4601-1991に基づき地震時の制御棒挿入性を確認して、監督官庁より認可を頂く手順となっている。

- 1号機の耐震安全性評価における制御棒挿入性評価は、発生値が評価基準値を下回っており、地震に対する制御棒の動的機能は維持されているものと判断できる。

<ご参考>

近年では、上記のような加振試験結果は、技術文書(トピカルレポート)としてとりまとめられており、公開されている。

まとめ

- 制御棒挿入性評価における発生値（燃料集合体の相対変位）を計算する手法は、実規模試験で実証されている手法である。
- 制御棒挿入性評価における評価基準値（約40mm）は、試験により確認されたものである。
- 実証試験で実証された手法，試験で確認された評価基準値を用いた制御棒挿入性評価は、信頼できるものであると考える。

なお、上記の評価手法は、JEAG4601-1991追補版に示されているものであり、工事計画等の認可申請で採用されている手法である。