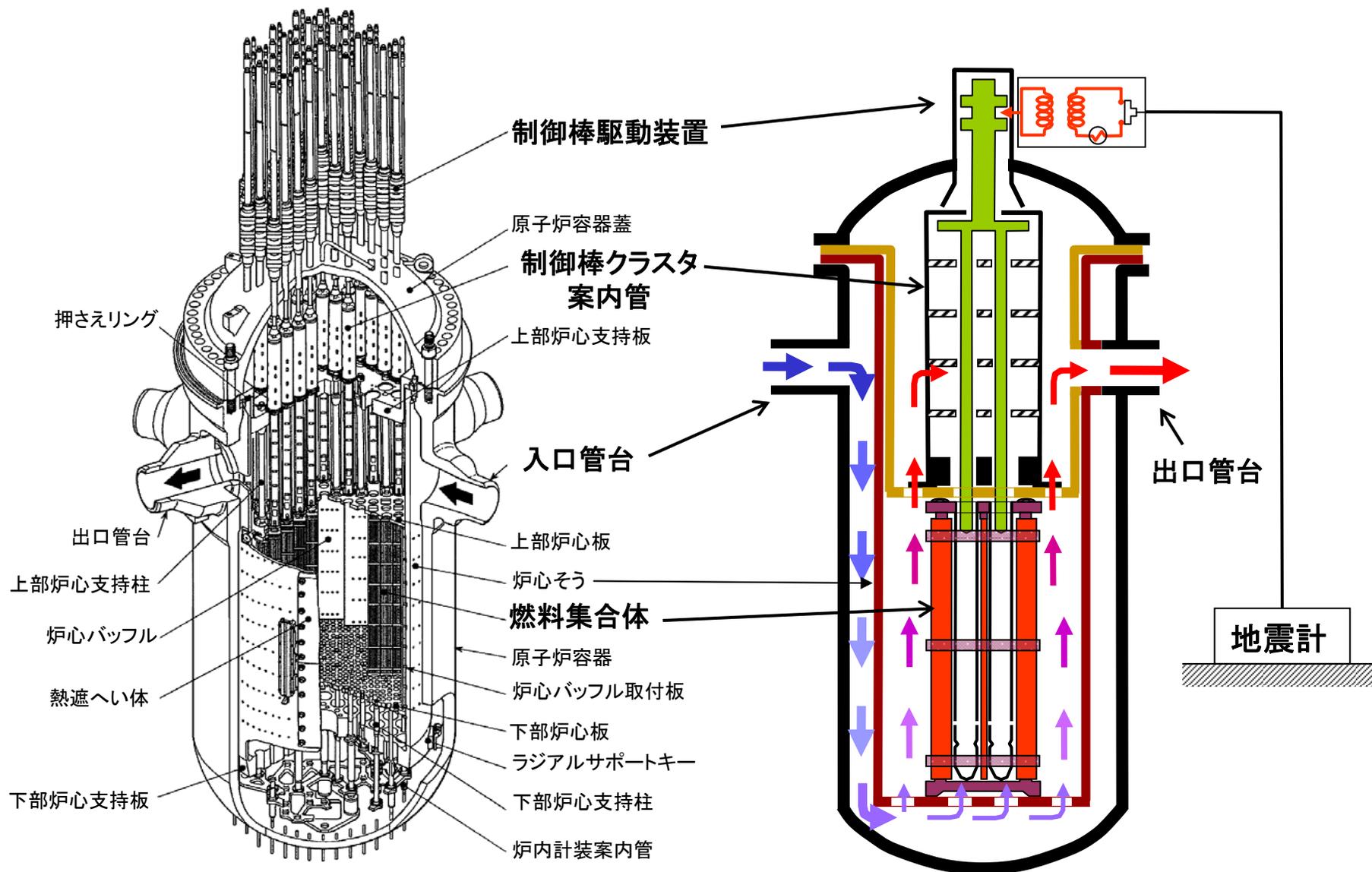


制御棒挿入性評価について

関西電力株式会社

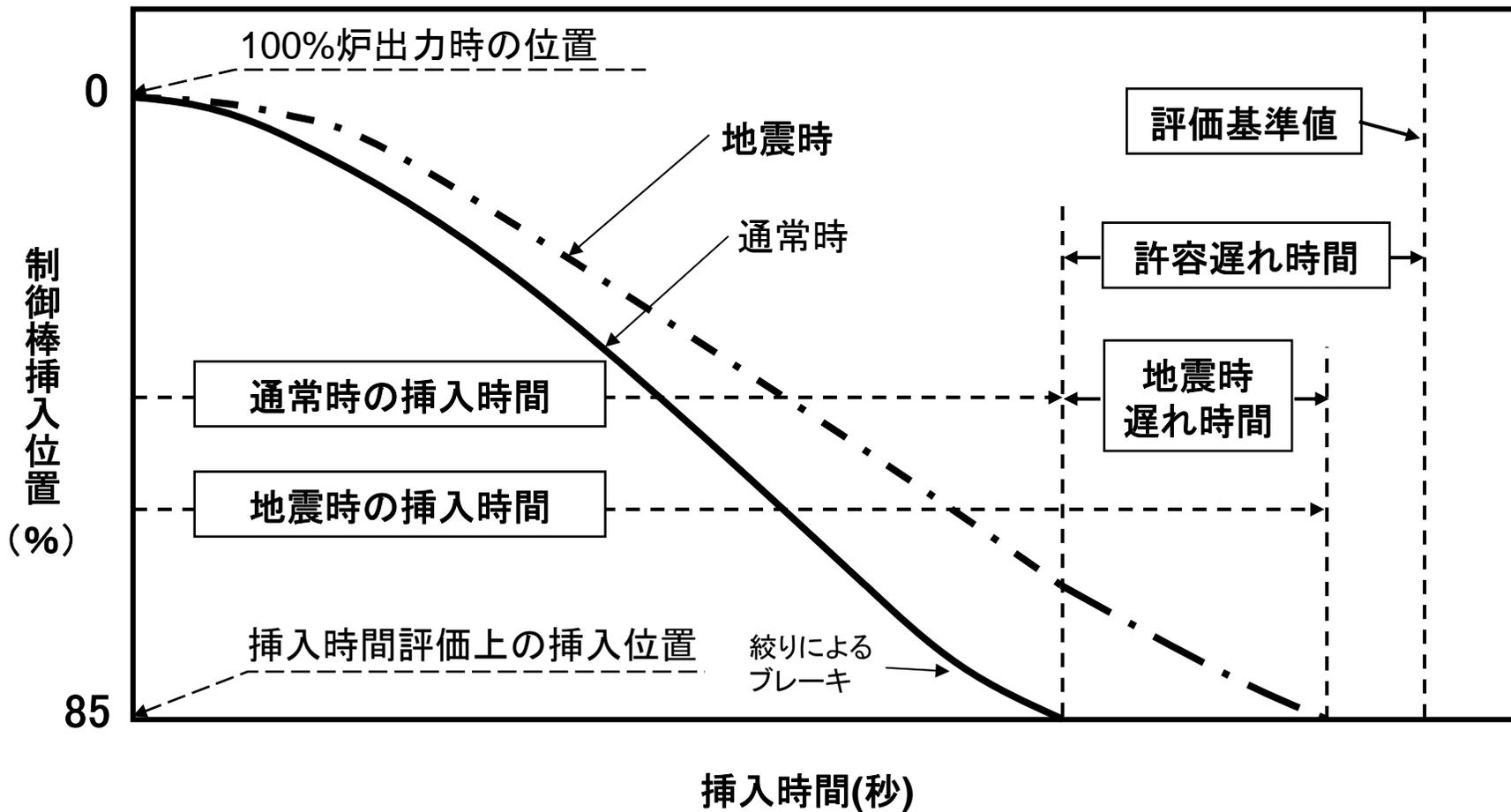
制御棒挿入性評価の概要

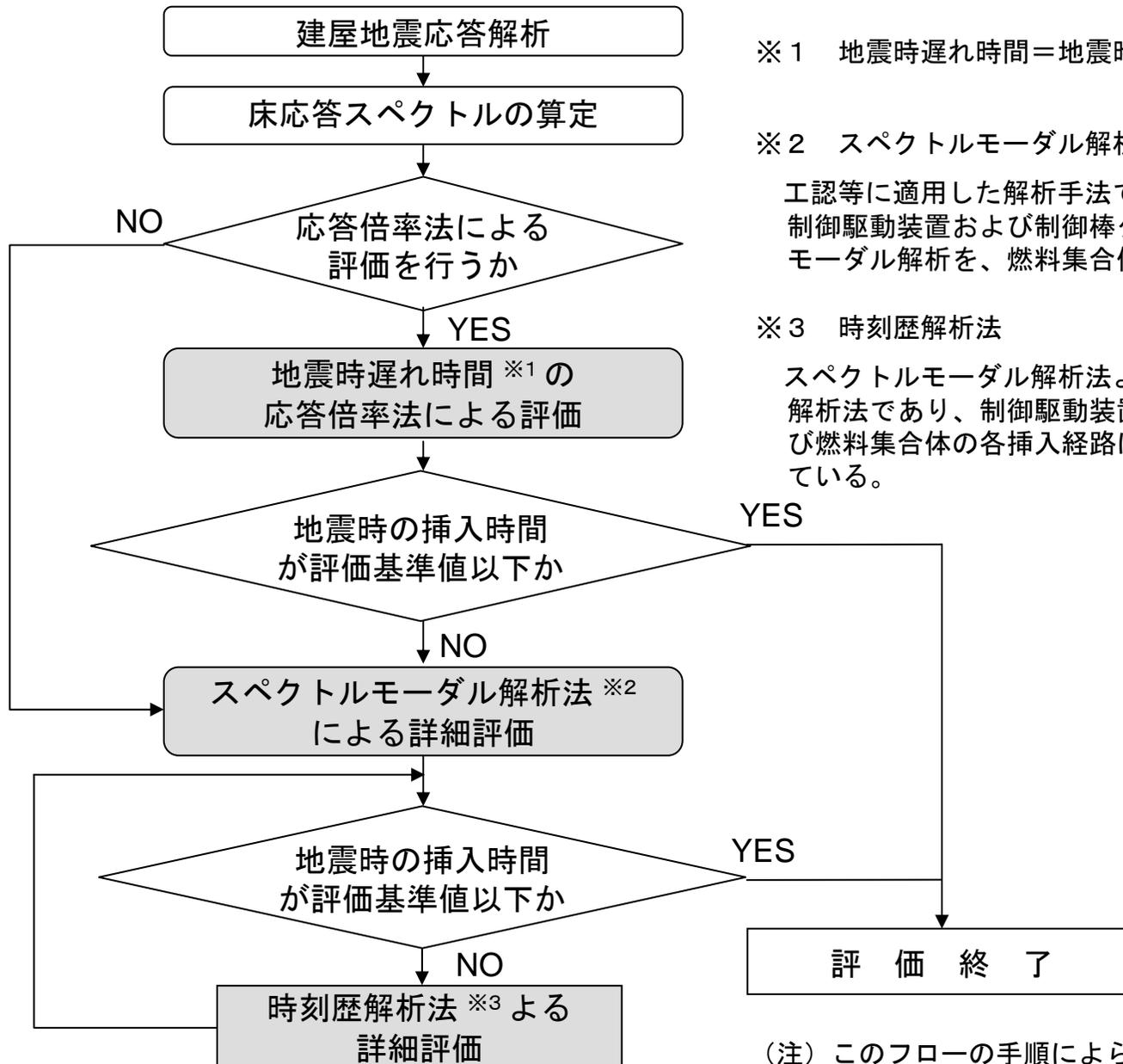
制御棒挿入性評価の概要(1/2)



制御棒挿入性評価の概要(2/2)

地震時は地震力による各部の変形等により、抵抗力が増加する。





※1 地震時遅れ時間＝地震時挿入時間－通常運転時挿入時間

※2 スペクトルモーダル解析法

工認等に適用した解析手法であり、地震応答解析において、制御駆動装置および制御棒クラスタ案内管はスペクトルモーダル解析を、燃料集合体は時刻歴解析を適用している。

※3 時刻歴解析法

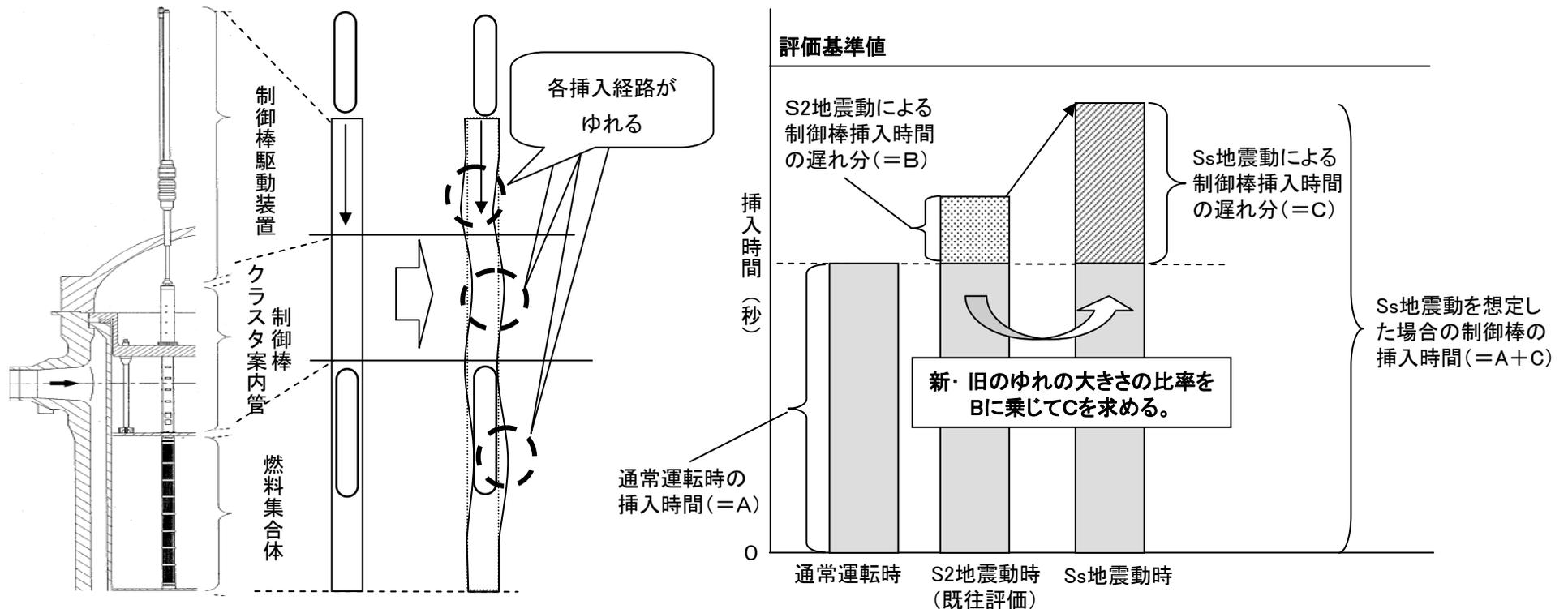
スペクトルモーダル解析法より現実的な挙動を再現する詳細解析法であり、制御駆動装置、制御棒クラスタ案内管および燃料集合体の各挿入経路について、時刻歴解析を適用している。

(注) このフローの手順によらず、当初からスペクトルモーダル解析法や時刻歴解析法を適用する場合もある。

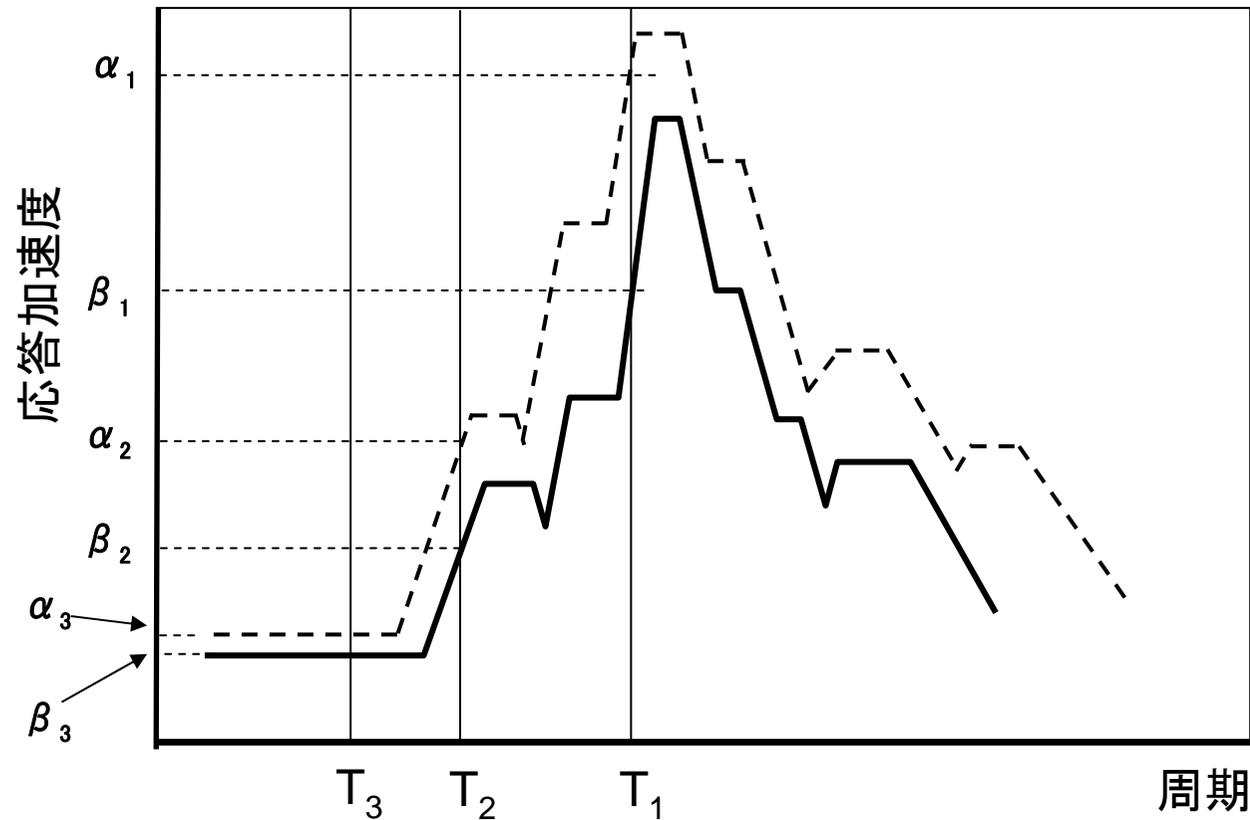
応答倍率法による制御棒挿入性評価

応答倍率法(簡易評価)による評価イメージ

- ◇ 制御棒は、挿入経路である制御棒駆動装置、制御棒クラスタ案内管、燃料集合体を上から順に通過する。
- ◇ 地震時には、挿入経路がゆれることにより、制御棒挿入時間に遅れが生じる。
- ◇ 地震力が大きいほど、制御棒挿入時間に遅れが大きくなる。
⇒ 旧耐震指針の基準地震動S2に対する挿入時間の詳細解析結果をベースに、新耐震指針の基準地震動Ssによる、ゆれの大きさの増加比率を用いて比例計算(応答倍率法)により評価



応答倍率法においては、各振動モードの固有周期ごとに応答比を求め、その最大値を一律に用いている → 個々の応答比を用いる場合より、保守的な結果となる

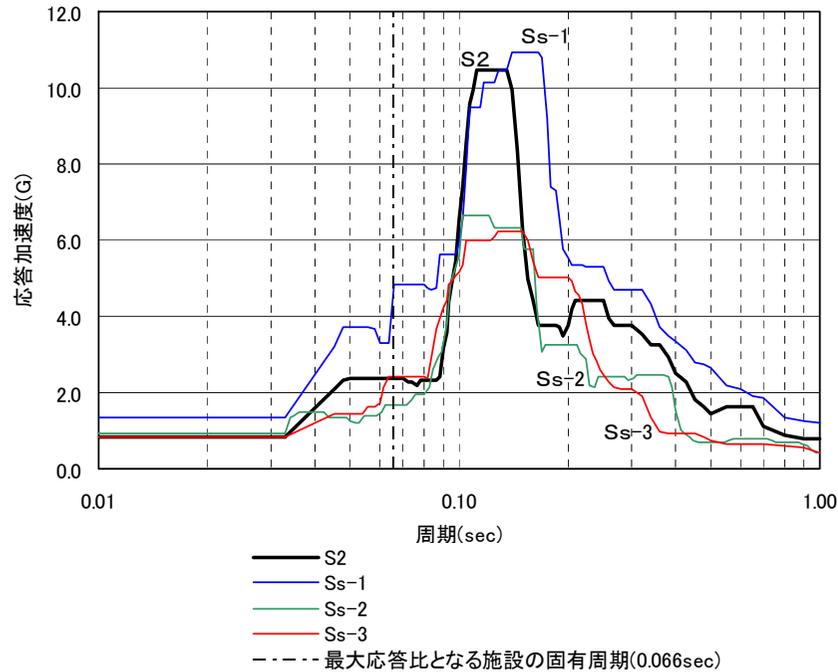


T_n : 評価対象施設のn次固有周期
 α_n : n次固有周期における新地震に対する応答値
 β_n : n次固有周期における旧地震に対する応答値

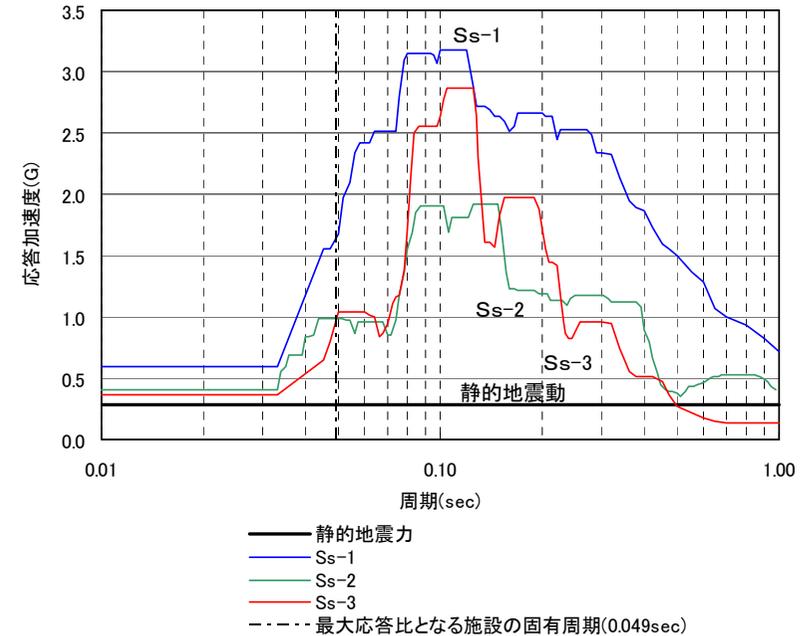
上図において、各固有周期の応答比 α_1/β_1 、 α_2/β_2 、 \dots 、 α_n/β_n を求め、そのうちの最大値をすべての固有周期で一律の値とし、旧地震動に対する荷重・応力に乗じることにより、新地震動に対する荷重・応力を算定

応答倍率法による評価結果(大飯3・4号機)

床応答スペクトル 水平方向:減衰定数1%(I/C 22.9m)



床応答スペクトル 鉛直方向:減衰定数1%(I/C 22.9m)



基準地震動Ssによる発生値の算出および評価基準値との比較

$$\text{応答比} = \frac{\text{二乗和平方根}}{\text{絶対値和}} = \frac{\sqrt{(A_{Ss}H)^2 + (A_{Ss}V)^2}}{A_{S2}H + A_{S2}V} = \frac{\sqrt{(4.70)^2 + (1.65)^2}}{2.38 + 0.288} = 1.867$$

$$\begin{aligned} \text{基準地震動Ssによる発生値(応答倍率法)} &= \text{地震以外による発生値} + \text{地震による発生値} \times \text{応答比} \\ &= 1.65 + 0.27 \times 1.867 = 2.16 \text{ [秒]} \end{aligned}$$

(既往評価における発生値=1.92秒)

記号説明

- A_{Ss}H: 基準地震動Ss(水平)
- A_{S2}H: 基準地震動S₂(水平)
- A_{Ss}V: 基準地震動Ss(鉛直)
- A_{S2}V: 旧指針(静的地震)(鉛直)

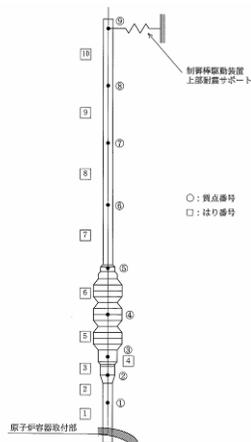
基準地震動Ssによる発生値 2.16 [秒] ≤ 評価基準値 2.2 [秒] 発生値は評価基準値以下である

詳細解析法による制御棒挿入性評価

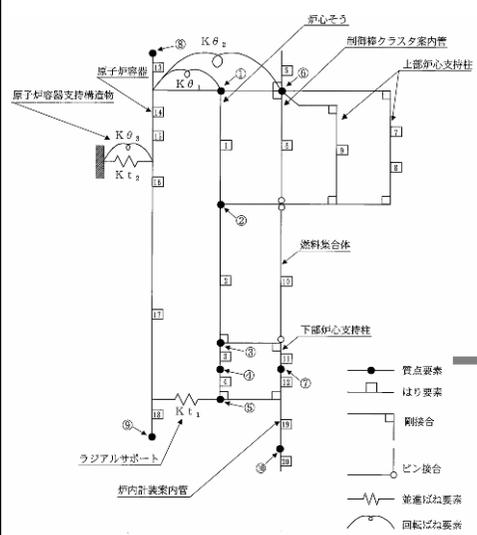
地震外力による抗力

建屋応答解析結果

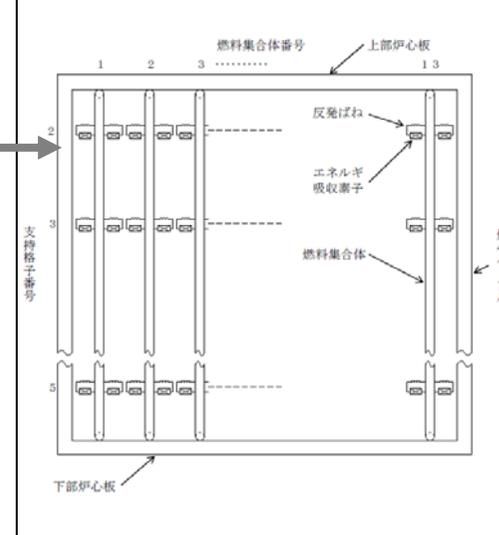
制御棒駆動装置
地震応答解析



炉内構造物 地震応答解析



燃料集合体 地震応答解析



制御棒クラスタ
の自重 $M \cdot g$

地震以外に
よる抗力

流体抗力 F_f
メカニカル抗力 F_m
浮力 F_u

制御棒駆動装置
(CRDM) 変位・加速度

地震抗力 F_{va}

制御棒クラスター案内管 (GT)
変位・加速度

地震抗力 F_{vb}

燃料集合体制御棒案内
シムブル変位・加速度

地震抗力 F_{vc}

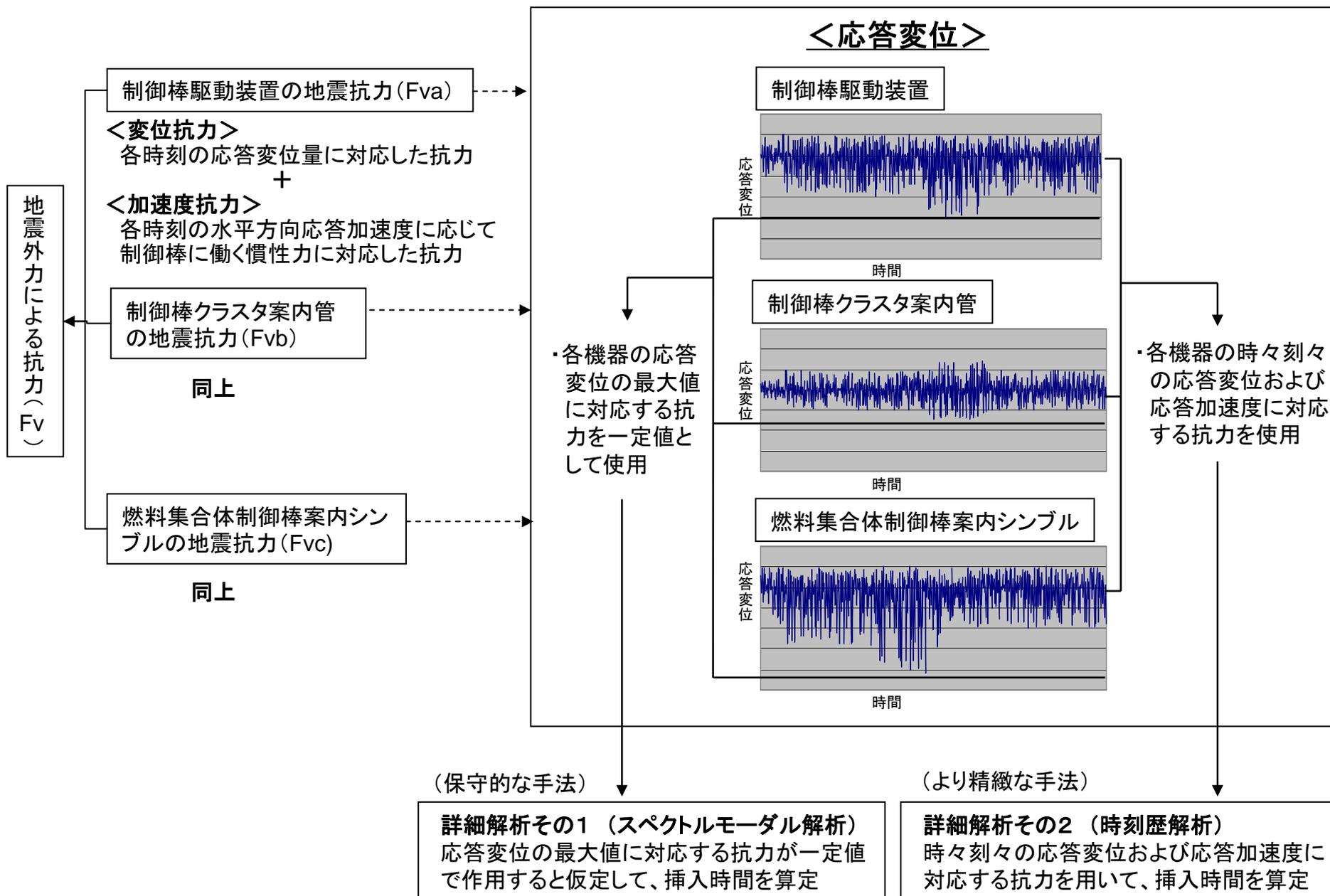
制御棒挿入時間解析

運動方程式
$$M \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = M \cdot g - \{ F_f + F_m + F_u + F_v \}$$

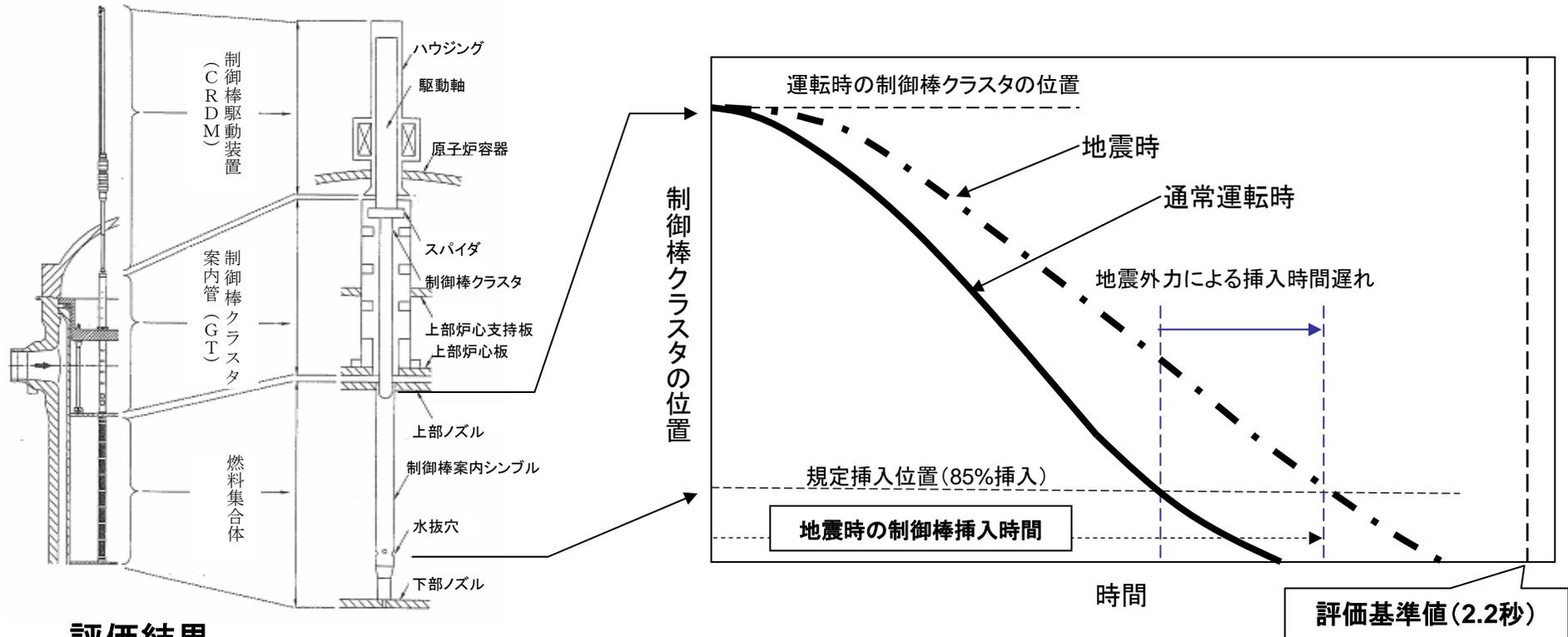
- M : 制御棒クラスター質量
- x : 制御棒クラスター挿入距離
- t : 制御棒クラスター挿入時間
- g : 重力加速度
- F_f : 流体による抗力
- F_m : メカニカル抗力
- F_u : 浮力
- F_v : 地震外力による抗力 (= $F_{va} + F_{vb} + F_{vc}$)

各抗力は実機制御棒挿入実験に基づき設定。
また、本評価手法は多度津工学試験所の実証
試験で検証されている。

(地震外力による抗力の算定)



Ss地震動に対する制御棒挿入時間解析により求め、規定時間内であることを確認した。



評価結果

	制御棒クラスタ 挿入時間(秒)	地震による 遅れ時間※ ¹ (秒)	地震時挿入時間の 評価基準値(秒)	許容遅れ時間※ ² (秒)
通常運転時	1.65	—	2.2	—
地震時(Ss-1)	1.88	0.23		0.55
地震時(Ss-2,3)	1.85	0.20		

※1:地震による遅れ時間＝地震時挿入時間－通常運転時挿入時間

※2:許容遅れ時間＝地震時挿入時間の評価基準値－通常運転時挿入時間

まとめ

- 耐震バックチェックでは、新潟県中越沖地震を踏まえ、評価期間を要する詳細評価の結果を待たず、早急に結果を中間報告するため、旧耐震指針の基準地震動S2に対する詳細解析結果1.92秒(スペクトルモーダル解析法)をもとに、簡易評価手法であるが保守的な結果となる応答倍率法による評価結果 2.16秒 を報告した。
- この評価結果は国の審議で妥当と評価されたが、耐震裕度が比較的小さい設備に対して詳細評価の実施を求められたことから、当社は当初予定していた詳細評価を進めてきた。
- ストレステスト審査の過程において、制御棒挿入性に関する質問を受け、その回答対応の参考として、新耐震指針の基準地震動Ssに対する詳細解析結果 1.88秒(時刻歴解析法)を提出した。

2. 制御棒落下時の抵抗となる浮力や流体抗力、メカニカル抗力と地震による抗力のそれぞれの寄与はどれくらいか。

(回答)

- 下記運動方程式の抗力 F_f , F_m , F_u , F_v の寄与について検討する。

運動方程式
$$M \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = M \cdot g - \{F_f + F_m + F_u + F_v\}$$

- M: 制御棒クラスタ質量
- x: 制御棒クラスタ挿入距離
- t: 制御棒クラスタ挿入時間
- g: 重力加速度
- F_f: 流体による抗力
- F_m: メカニカル抗力
- F_u: 浮力による抗力
- F_v: 地震外力による抗力

・各抗力は実機制御棒挿入実験に基づき設定。
 ・また、この運動方程式を用いた評価手法は、多度津工学試験所の実証試験で検証されており、美浜1号機の耐震バックチェックで適用し、国の審査においても審査済み。

- Ss-1地震時の挿入時間(1.88秒)に対する各抗力と挿入距離との関係を上図に示す。各抗力の寄与比は以下のとおり。

抗力の種類	寄与比 ※
F _f (流体による抗力)	3.4
F _m (メカニカル抗力)	5.2
F _u (浮力による抗力)	1.0
F _v (地震外力による抗力)	1.4

※ 上図にて85%挿入位置までの各抗力の積分値を求め、F_uを1.0としたときの比率

- 中図及び下図のとおり、自重と合計抗力とのバランスで制御棒の落下速度が決まり、初期は自重が優位で速度が上昇、その後、重力と合計抗力が釣りあうと等速度となり、地震で抗力が優位になると減速する。85%挿入付近で、制御棒案内シンプルの絞り部の効果で減速し、その後全挿入となる。

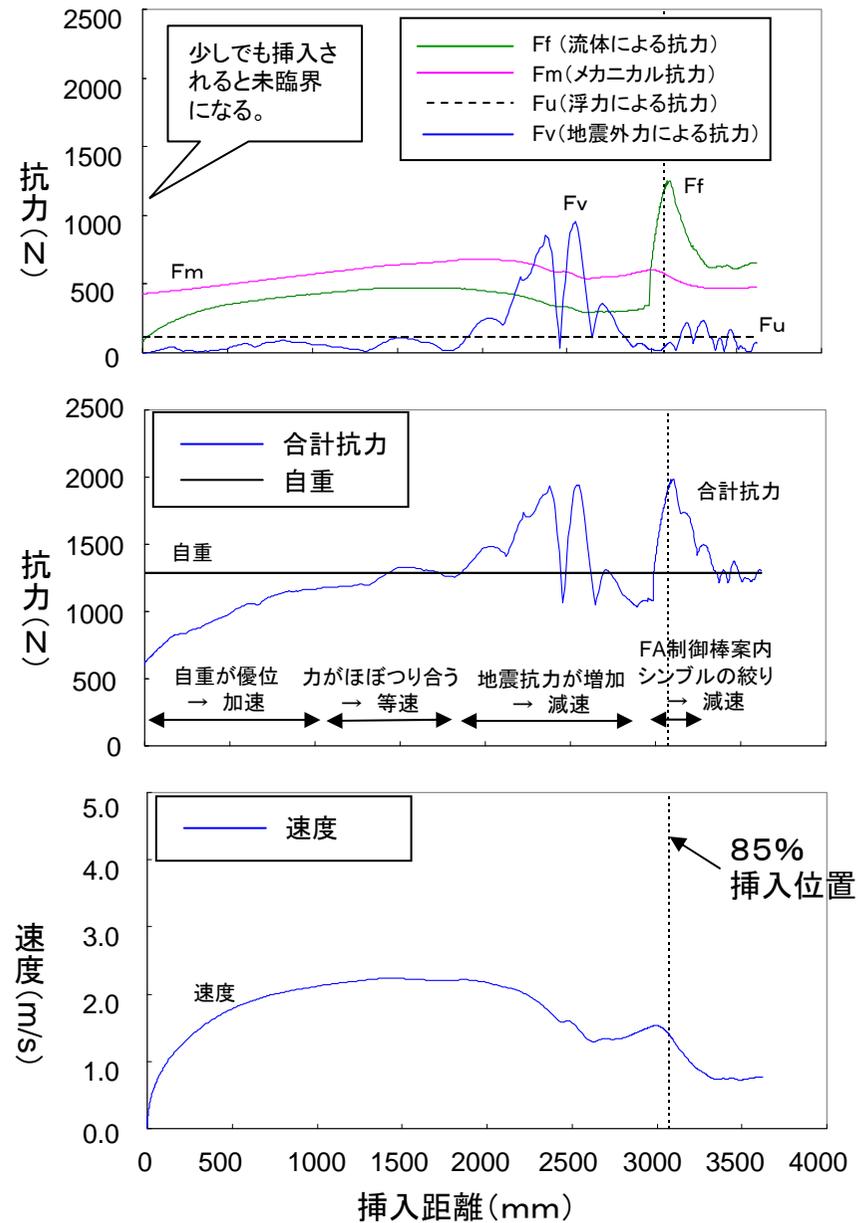
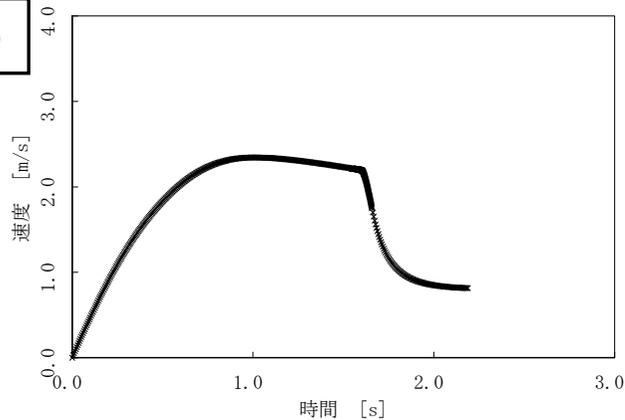
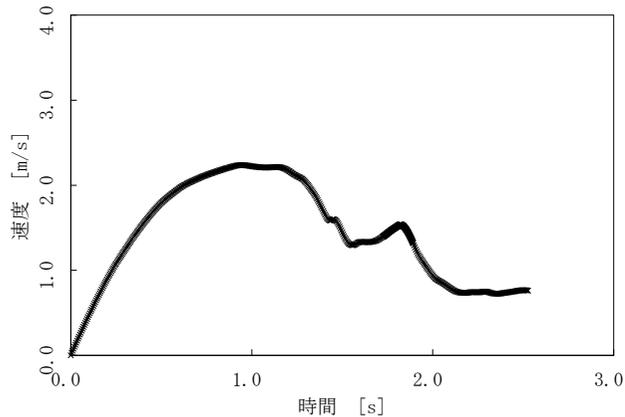


図 抗力と挿入距離、速度と挿入距離との関係

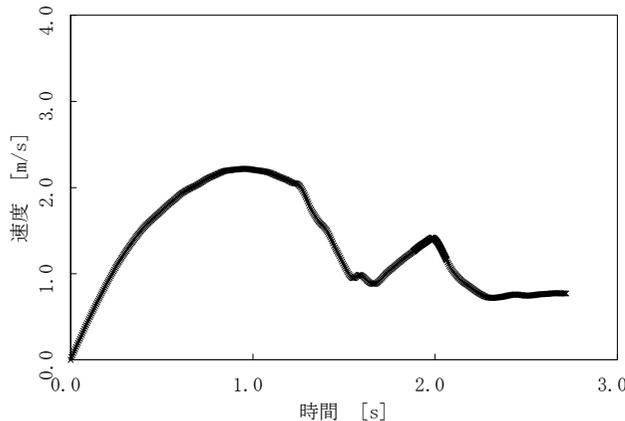
通常時(加振なし)



Ss地震時



Ss地震を超える地震時 ※



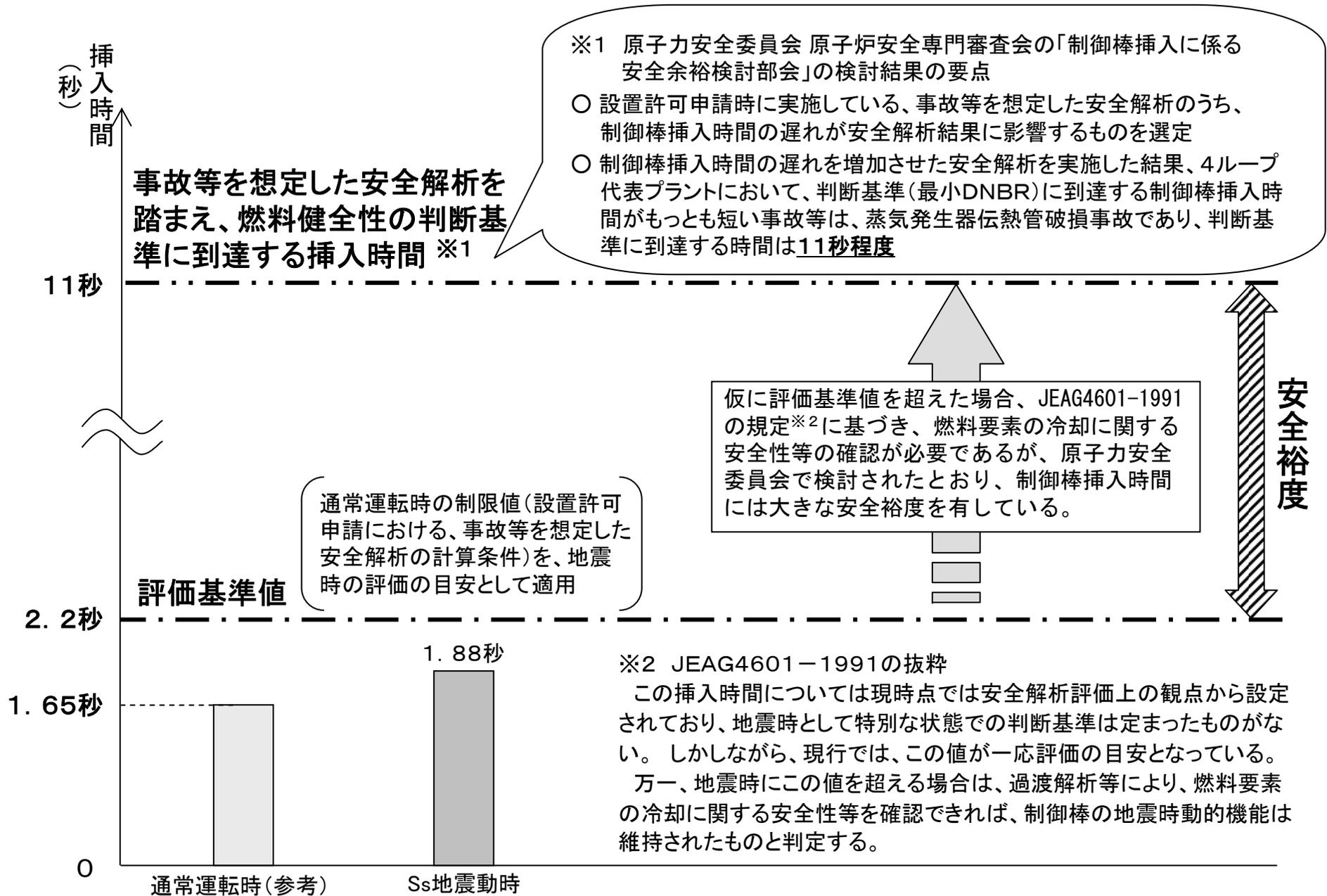
概要

- 地震動増加による影響をみるため、Ss地震時と、Ss地震を超える条件としてSsによる各挿入経路の地震応答(変位、加速度)を1000/700倍と仮定した時の制御棒挿入解析を実施した。
- 地震動が増加した時の制御棒の挿入速度と挿入時間の関係が示されている。

考察

- 地震動が増加すると、
 - 制御棒挿入速度の初期の立ち上がり傾向は、ほぼ同じであるが、制御棒挿入速度のピーク値が低下している。
 - 制御棒挿入速度のピーク値が低下する分、制御棒挿入時間が増加していく傾向がわかる。

※ Ss地震時の機器応答(変位、加速度)を1000/700倍と仮定

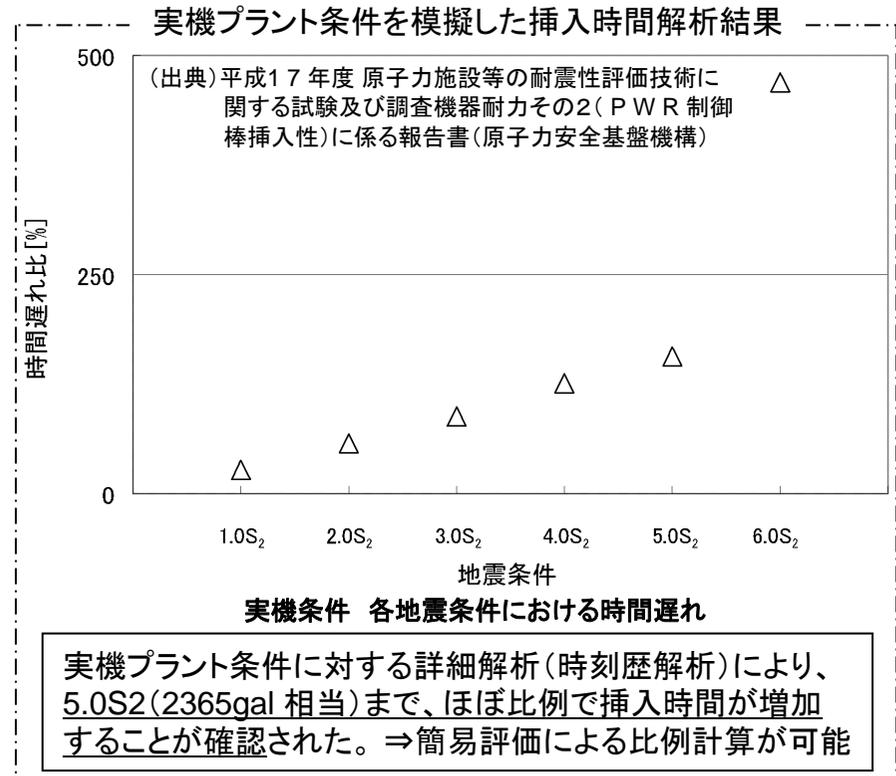
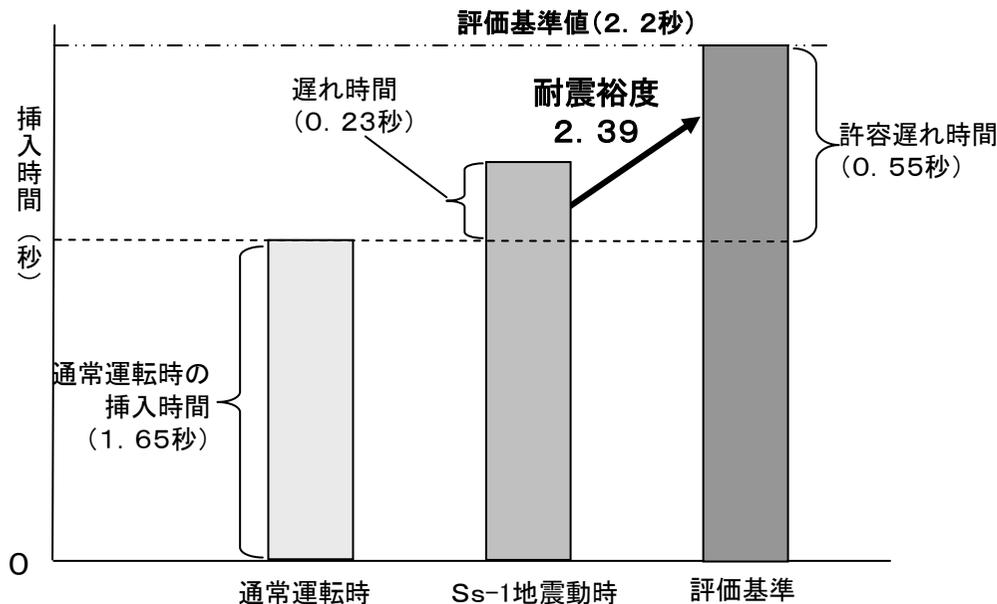


FO-A~FO-B断層と熊川断層の連動を考慮した地震動に対する制御棒挿入性について

- 大飯3、4号機の基準地震動S_s-1に対する制御棒挿入時間については、詳細解析結果より1.88秒と求まり、地震による遅れ時間は 1.88秒-1.65秒(通常時挿入時間)=0.23秒 となる。
- 地震による遅れ時間0.23秒は、評価基準値2.2秒に対する許容遅れ時間0.55秒に対して、十分な耐震裕度2.39を有している。

$$\text{耐震裕度} = \frac{\text{許容遅れ時間}}{\text{S}_{s-1}\text{に対する遅れ時間}} = \frac{2.2\text{秒} - 1.65\text{秒}}{1.88\text{秒} - 1.65\text{秒}} = \frac{0.55\text{秒}}{0.23\text{秒}} = 2.39$$

- 一方、地震による遅れ時間は、地震動の増加に対し線形的に増加する傾向があるとの知見踏まえると、FO-A~FO-B断層と熊川断層の連動を仮定した地震動が基準地震動S_s-1を部分的に超えていても、評価基準値2.2秒以内に制御棒は挿入できるものとする。



- 通常運転時について、下記運動方程式の抗力 F_f 、 F_m 、 F_u の寄与について検討する。

運動方程式
$$M \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = M \cdot g - \{F_f + F_m + F_u\}$$

M : 制御棒クラスタ質量
 x : 制御棒クラスタ挿入距離
 t : 制御棒クラスタ挿入時間
 g : 重力加速度
 F_f : 流体による抗力
 F_m : メカニカル抗力
 F_u : 浮力による抗力

・各抗力は実機制御棒挿入実験に基づき設定。
 ・また、この運動方程式を用いた評価手法は、多度津工学試験所の実証試験で検証されている。

- 通常運転時の挿入時間(1.65秒)に対する各抗力と挿入距離との関係を上図に示す。各抗力の寄与比は以下のとおり。

抗力の種類	寄与比	
	通常時 ※	参考 (Ss時)
F _f (流体による抗力)	3.9	3.4
F _m (メカニカル抗力)	5.7	5.2
F _u (浮力による抗力)	1.0	1.0
F _v (地震外力による抗力)	—	1.4

※ 上図にて85%挿入位置までの各抗力の積分値を求め、F_uを1.0としたときの比率

注) 寄与比と遅れ時間との関係

- ・地震によりF_vが加わると、制御棒の落下速度が減少するため、速度に依存するF_fやF_mは抗力はその分減少するが、挿入時間が延長するため、F_f、F_m、F_uが作用する時間も増加する。
- ・F_f、F_m、F_uが作用する時間の増加により、各抗力の寄与比も地震で変化する。
- ・以上のとおり、地震と地震以外の寄与比と通常時の抗力による遅れ時間と地震による遅れ時間の比を単純に比較できない。

- 中図及び下図のとおり、自重と合計抗力とのバランスで制御棒の落下速度が決まり、初期は自重が優位で速度が上昇し、重力と合計抗力が釣りあうと等速度となる。85%挿入位置付近で、制御棒案内シンプルの絞り部の効果で減速し、その後全挿入となる。

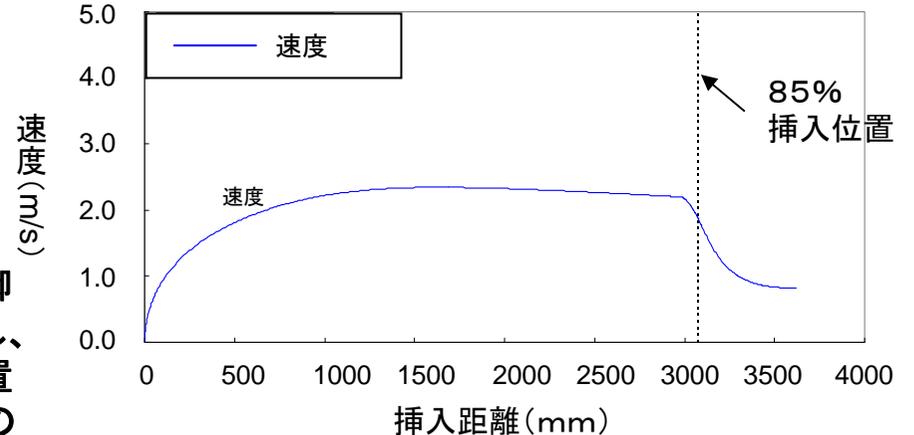
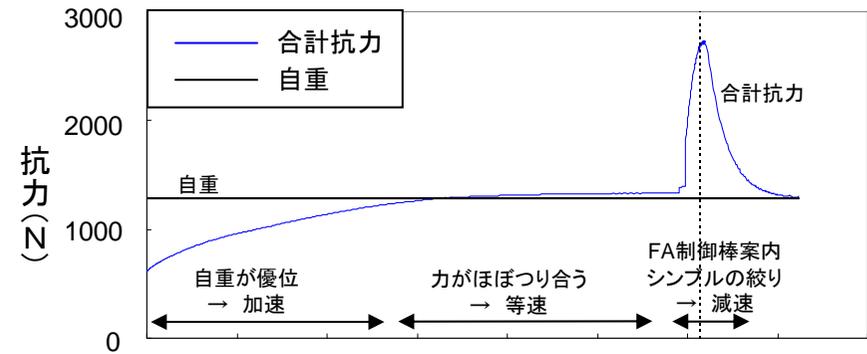
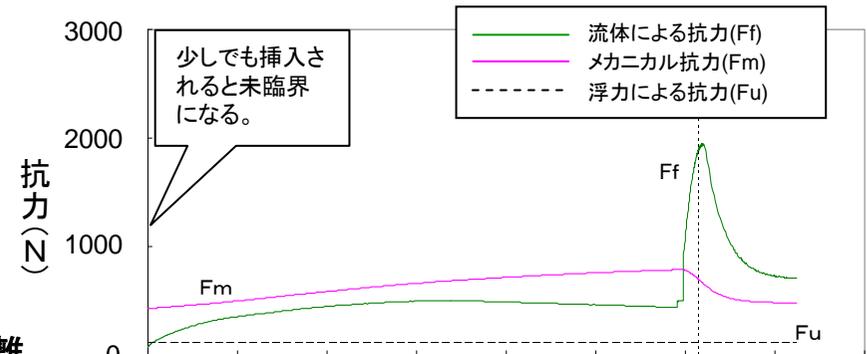
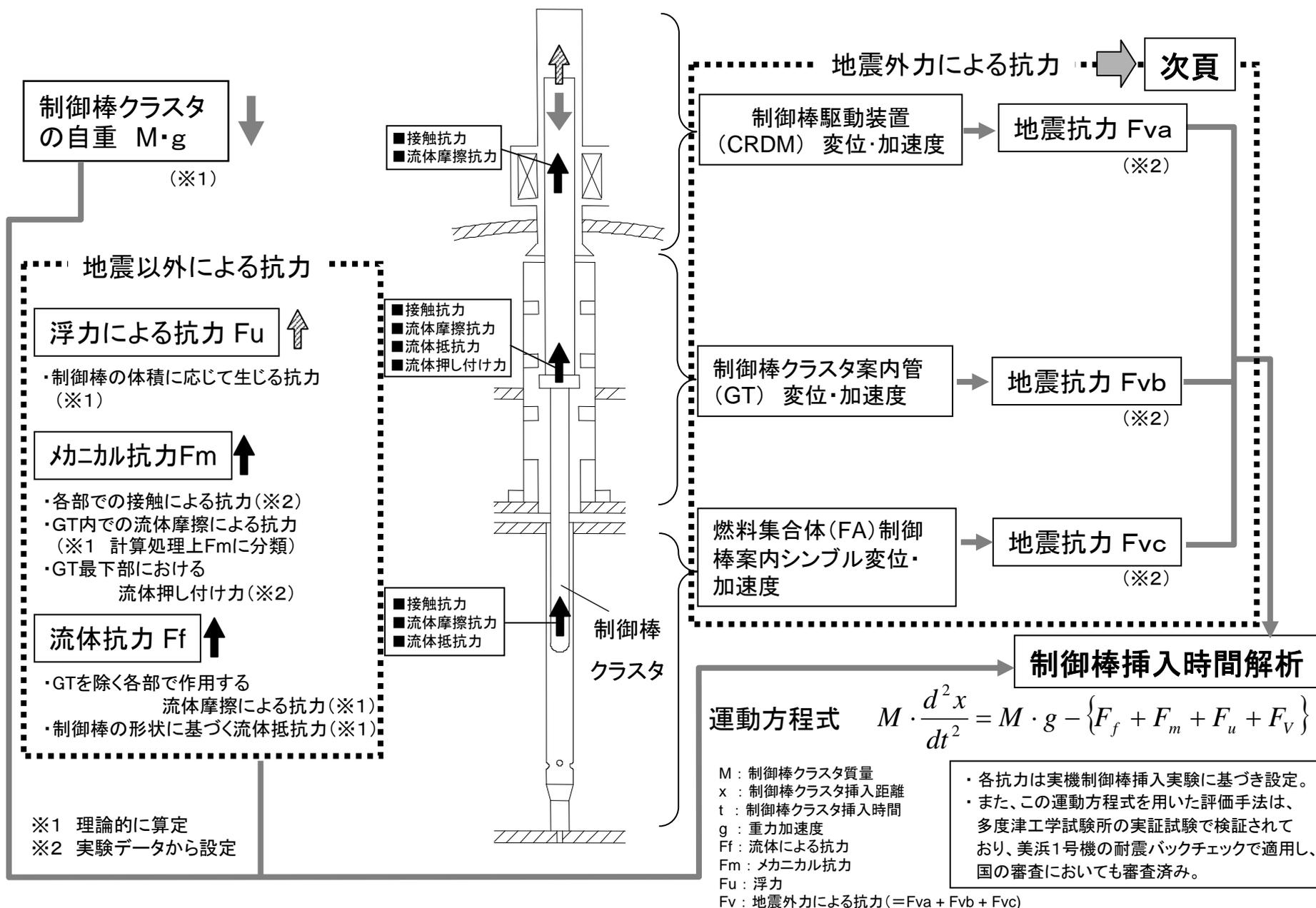


図 抗力と挿入距離、速度と挿入距離との関係

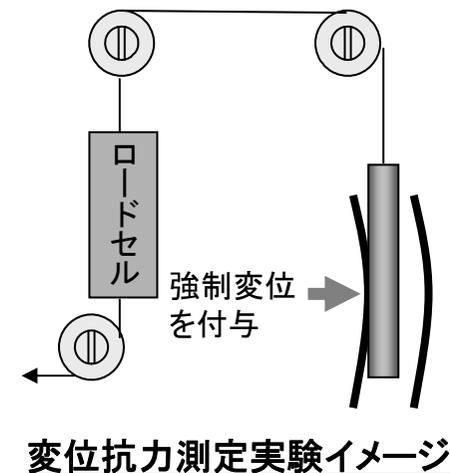
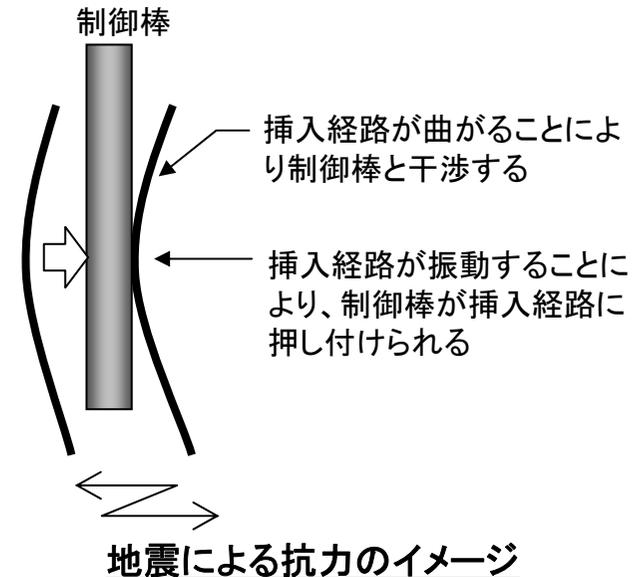


地震外力による抗力 = 変位抗力 + 加速度抗力

- 変位抗力 … 挿入経路の曲がりにより制御棒と干渉する効果によるもの
- 加速度抗力 … 挿入経路が振動することにより制御棒が挿入経路に押し付けられる効果によるもの

[設定手順]

- ① 挿入実験によるデータ取得
各挿入経路の固有振動数での正弦波加振条件で、制御棒落下試験により、落下時間および落下特性を取得
- ② 「変位抗力」の設定
 - ・ 挿入経路の各機器に静的に強制変位を与えた状態で制御棒を挿入し、抗力を測定すること(挿入抗力試験)により、変位－抗力の関係データを取得
 - ・ 試験結果を再現できることを確認した解析により、実機条件(温度等)での変位抗力と変位との関係を設定
- ③ 「加速度抗力」の設定
変位抗力と組み合わせ、正弦波加振試験における制御棒挿入時間(①で取得したデータ)を再現するような加速度抗力を設定。(変位抗力は最大値一定ではなく、正弦波振動における時間変化を考慮)



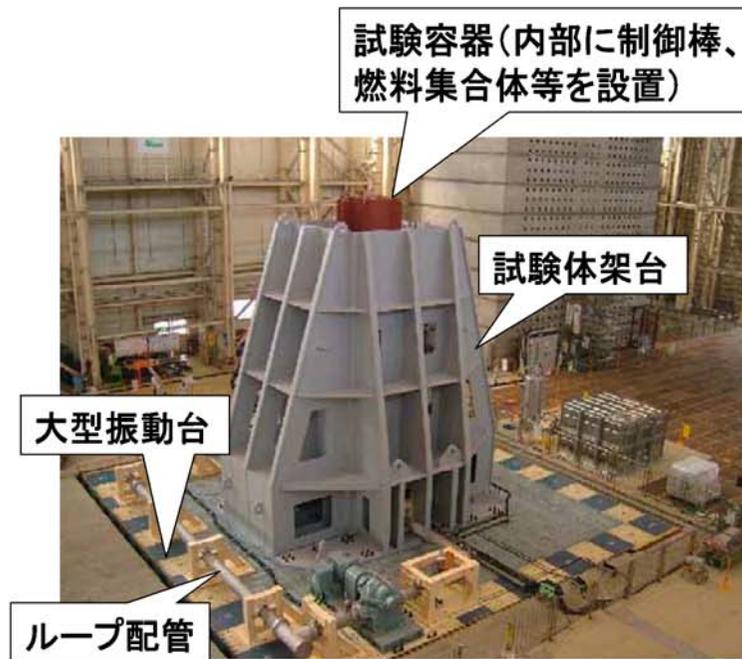
変位抗力測定実験イメージ

参 考

JNESによるPWR制御棒挿入性の機能限界試験（1／3）



PWR制御棒挿入性（実機試験体写真）



試験体概観



模擬燃料集合体

・模擬燃料集合体は、燃料ペレットを鉛で模擬した以外は実物と同一構成。

JNESによるPWR制御棒挿入性の機能限界試験(2/3)



独立行政法人 原子力安全基盤機構

PWR制御棒挿入性(既往試験条件との比較)

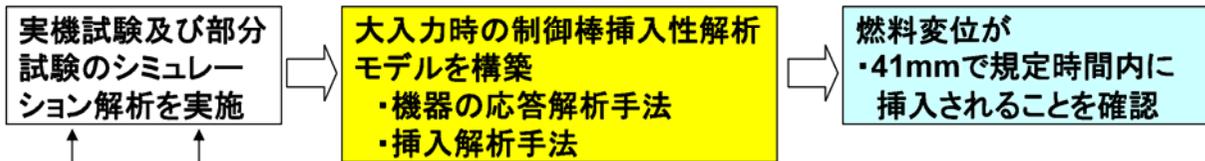
	NUPEC既往試験(1981-1986年)	JNES試験(2002-2005年)
目的	<ul style="list-style-type: none"> ○制御棒挿入機能の実証 ○地震応答解析手法の妥当性確認 	<ul style="list-style-type: none"> ○制御棒挿入機能限界(耐力)の確認 ○耐力データ蓄積と耐力評価手法の構築
試験体仕様	<ul style="list-style-type: none"> ○縮尺: 1/1(炉心機器は実機大) ○環境: 静水中、常温 ○燃料集合体: 17x17燃料集合体...15体X3列(実証モデル) (実機1100MWe級は193体) ○制御棒クラスタ: 2組 ○制御棒駆動装置: 2台 	<ul style="list-style-type: none"> ○縮尺: 1/1 ○環境: 静水/流水中、常温 ○燃料集合体: 17x17燃料集合体...3体(15体の端3体の挙動模擬) ○制御棒クラスタ: 1組 ○制御棒駆動装置: 1台

JNESによるPWR制御棒挿入性の機能限界試験(3/3)



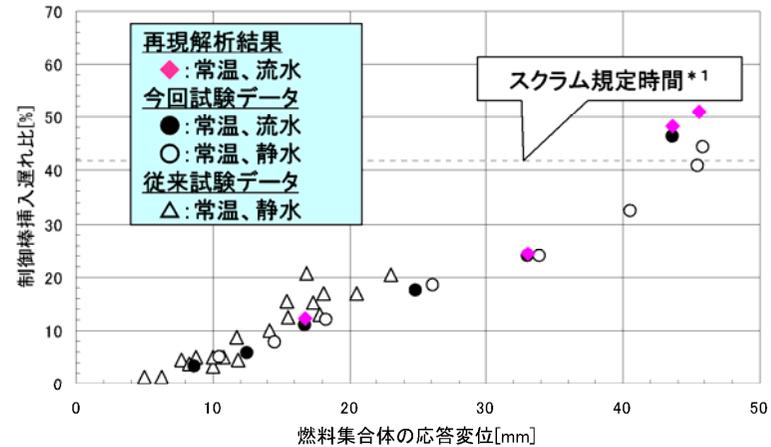
独立行政法人 原子力安全基盤機構

PWR制御棒挿入性(実機試験及び解析)



(部分試験)
燃料応答変位80mm以上の燃料非線形振動特性及び案内シムルの変形一ひずみ特性を取得

(実機試験)
従来試験データ(燃料応答変位22mm)を大幅に上回る試験データ(45mm以上)を取得



PWR制御棒挿入遅れ比データ*2

* 1: 安全評価上の規定時間、2.2秒(制御棒挿入開始～85%挿入までの時間)をスクラム規定時間として使用。
* 2: 遅れ比 = (挿入時間 - 初期値) / 初期値

・従来実績の2倍以上の燃料応答変位について試験データを取得。
・大入力加振下ではスクラム規定時間を超えるが、関連機器の構造的損傷を生じることなく、制御棒が全挿入できる。

制御棒挿入試験およびその解析結果

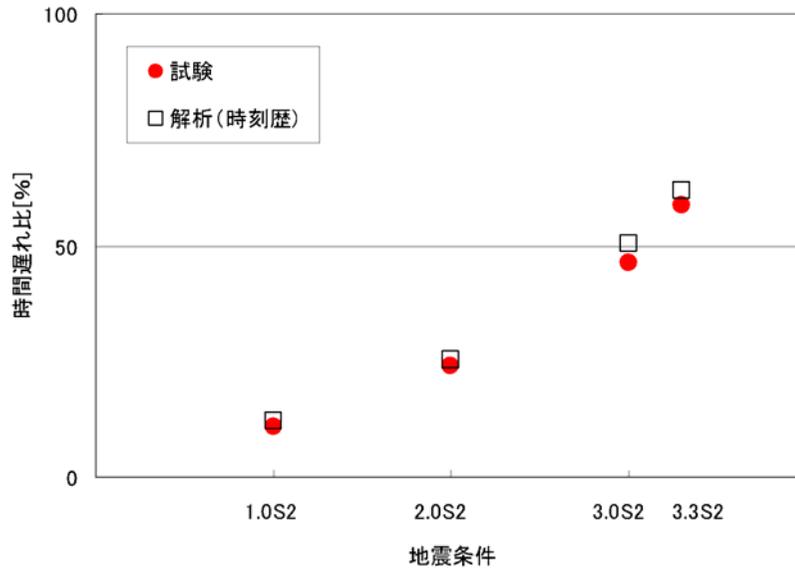


図 5.3.3-16 (2/2) 各地震条件における挿入時間遅れの比較



- 実機代表サイトにおけるS2波(473gal)の3.3倍までの条件でも制御棒が正常に挿入された。
- 試験条件パラメータを用いた解析(時刻歴解析)が実施されており、挿入時間(時間遅れ比)の解析結果は試験結果をよく再現することが確認された。

実機プラント条件を模擬した挿入時間解析結果

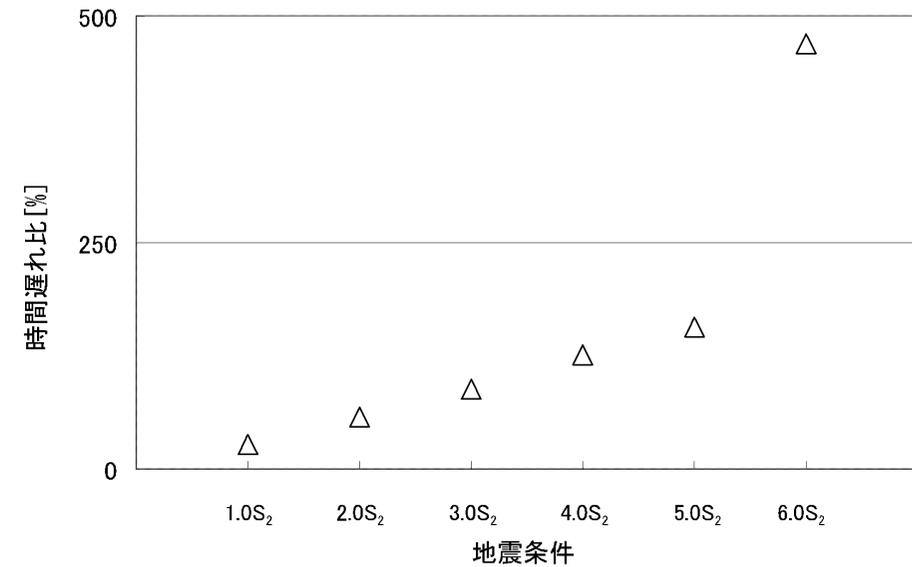


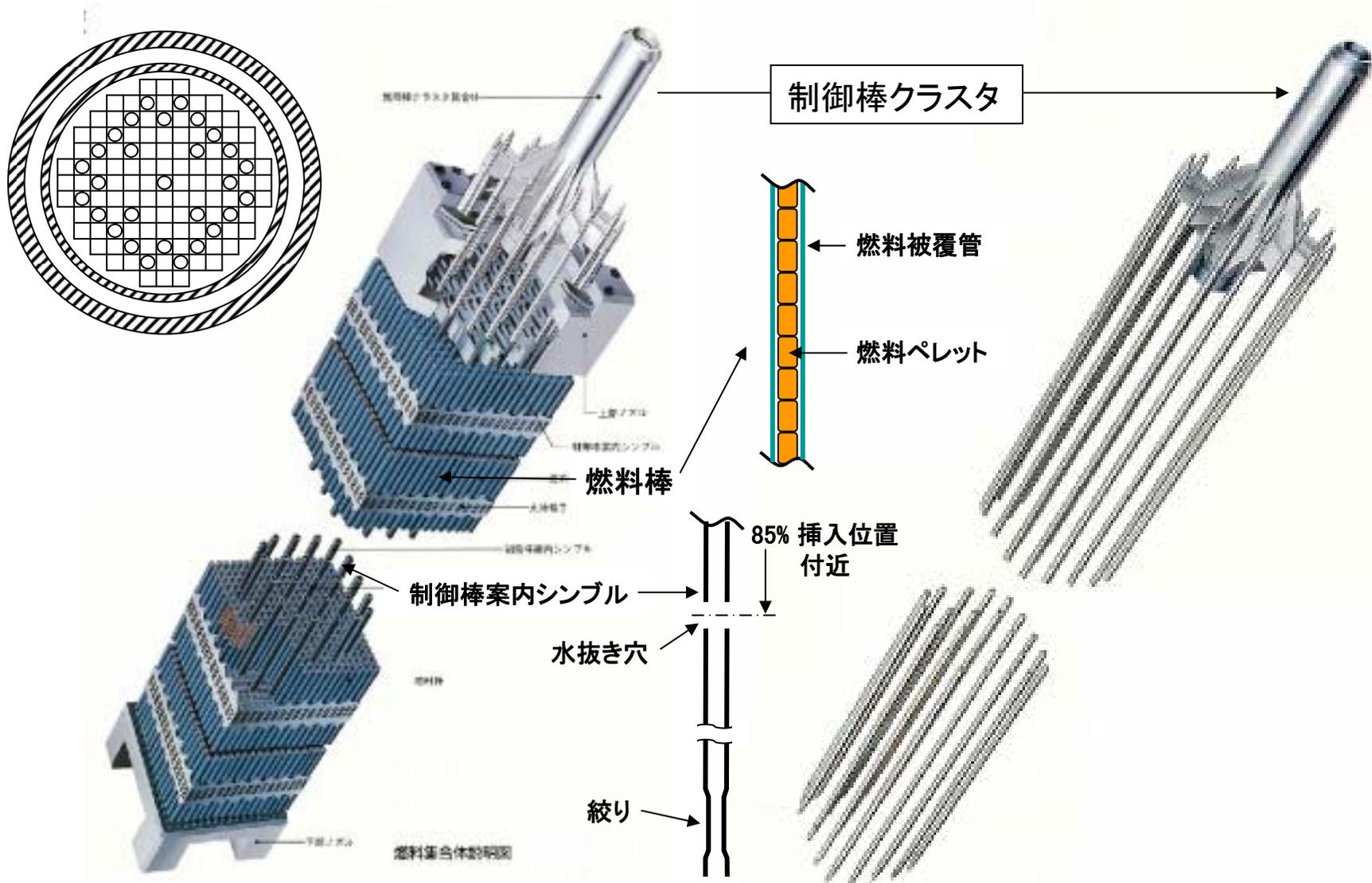
図 6.4.4-1 実機条件 各地震条件における時間遅れ



- 実機プラント条件に対する詳細解析(時刻歴解析)により、5.0S2(2365gal相当)まで、ほぼ比例で挿入時間が増加することが確認された。
⇒ 簡易評価による比例計算が実施可能

(図の出典)

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(PWR制御棒挿入性)に係る報告書(原子力安全基盤機構)



燃料集合体および制御棒クラスタ