

【添付－ 2 】

伊方発電所 3 号機 制御棒挿入性の評価における 応答倍率法の適用性

平成 2 1 年 1 2 月

四国電力株式会社

【 目 次 】

1 . 概 要	1
2 . 応答倍率法の適用性	1
3 . 鉛直地震動の影響	23
4 . ま と め	31

1. 概 要

新耐震指針に照らした耐震安全性評価(中間報告(伊方3号機))では、機器・配管系設備の評価手法として、応答倍率法を適用している。

以下に、制御棒挿入性の評価における応答倍率法の適用性について、検討した結果を整理する。

2. 応答倍率法の適用性

工認時の耐震計算書における地震時の制御棒挿入性評価では、通常運転時の挿入時間に影響する、流体による抗力、メカニカル抗力、浮力、自重に加え、地震外力による抗力を考慮して挿入時間を求めている。

制御棒の挿入時間遅れは、構成要素の様々な非線形挙動の影響を受けるものではあるが、地震時の制御棒挿入性評価で重要な地震外力による抗力は、燃料集合体等の地震時応答変位量に依存し、燃料集合体等の地震時応答変位量はある範囲までは地震力に比例することから、地震による挿入遅れ時間と地震力には相関性があると考えられる。

「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 (PWR 制御棒挿入性)に係る報告書(平成 18 年 8 月(独)原子力安全基盤機構)」(以下、「JNES 文献」という。)によれば、制御棒の挿入性については、地震入力レベルがある範囲までは遅れ時間が直線的に増加する傾向が確認されている。

したがって、地震入力レベルに対し遅れ時間が直線的に増加する範囲であれば、遅れ時間を比例倍することで概略評価可能と考える。

伊方 3 号機の既往評価結果(工認時の耐震計算書:基準地震動 S_2 [最大加速度値: 4 7 3 ガル])における制御棒挿入解析より、 S_2 地震時の燃料集合体の応答変位は約 3 0 mm である。

中間報告における基準地震動 S_s (最大加速度値: 5 7 0 ガル[基準地震動 S_2 の約 1.2 倍])に対する評価では、JNES 文献データ

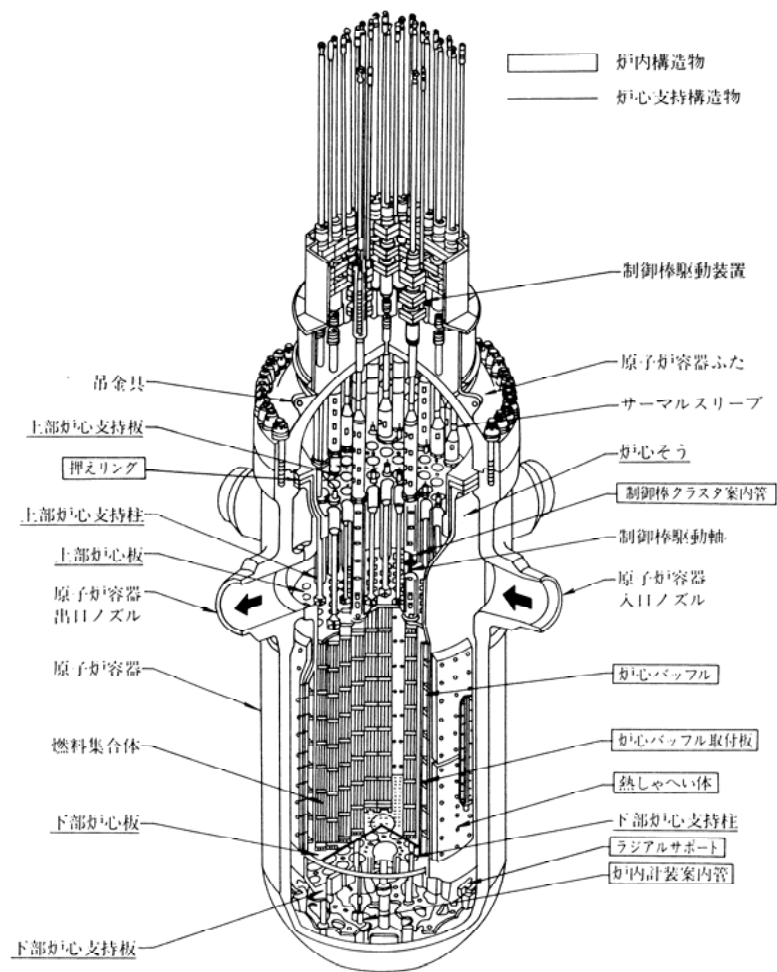
から，地震入力レベルに対して遅れ時間が直線的に増加する範囲であると判断し，地震による挿入遅れ時間に応答比を乗じて挿入時間を評価している。

- ・ 計算方法

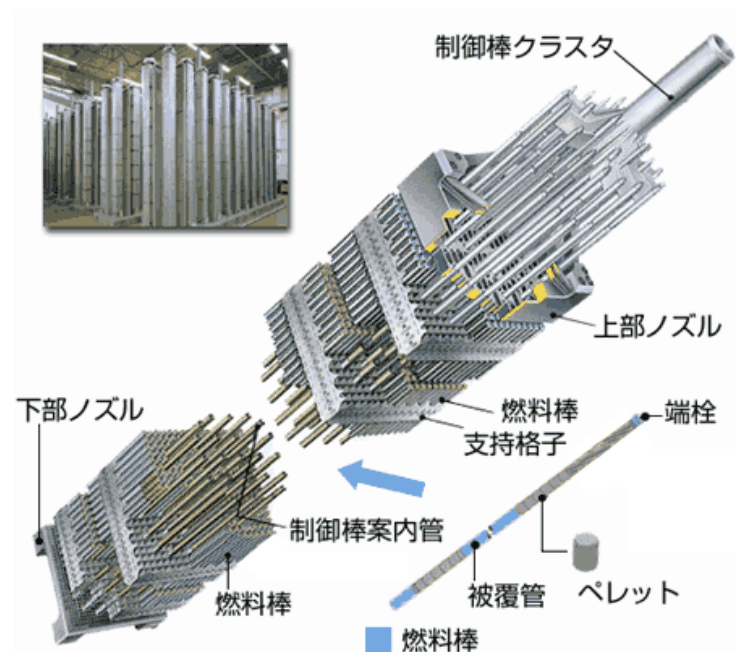
$$\begin{aligned} \text{挿入時間} = & (\text{通常時の落下時間}) \\ & + (\text{地震による遅れ時間}) \times \text{応答比} \end{aligned}$$

なお，制御棒挿入経路には，制御棒クラスタ駆動装置，制御棒クラスタ案内管および燃料集合体が存在するため，それらの機器の中で最大の応答比を求め，評価している。

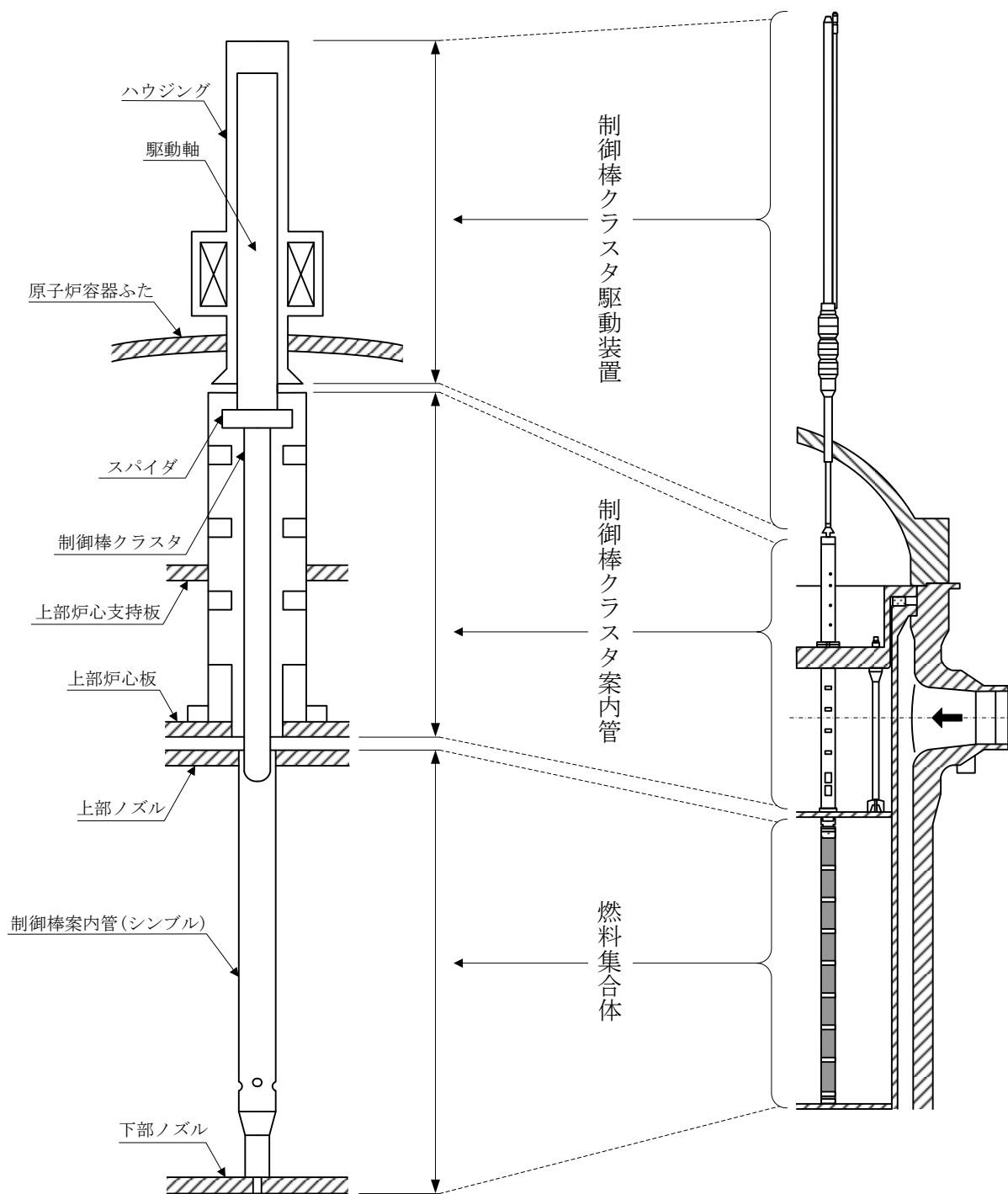
(第 1， 2， 3， 4 図参照)



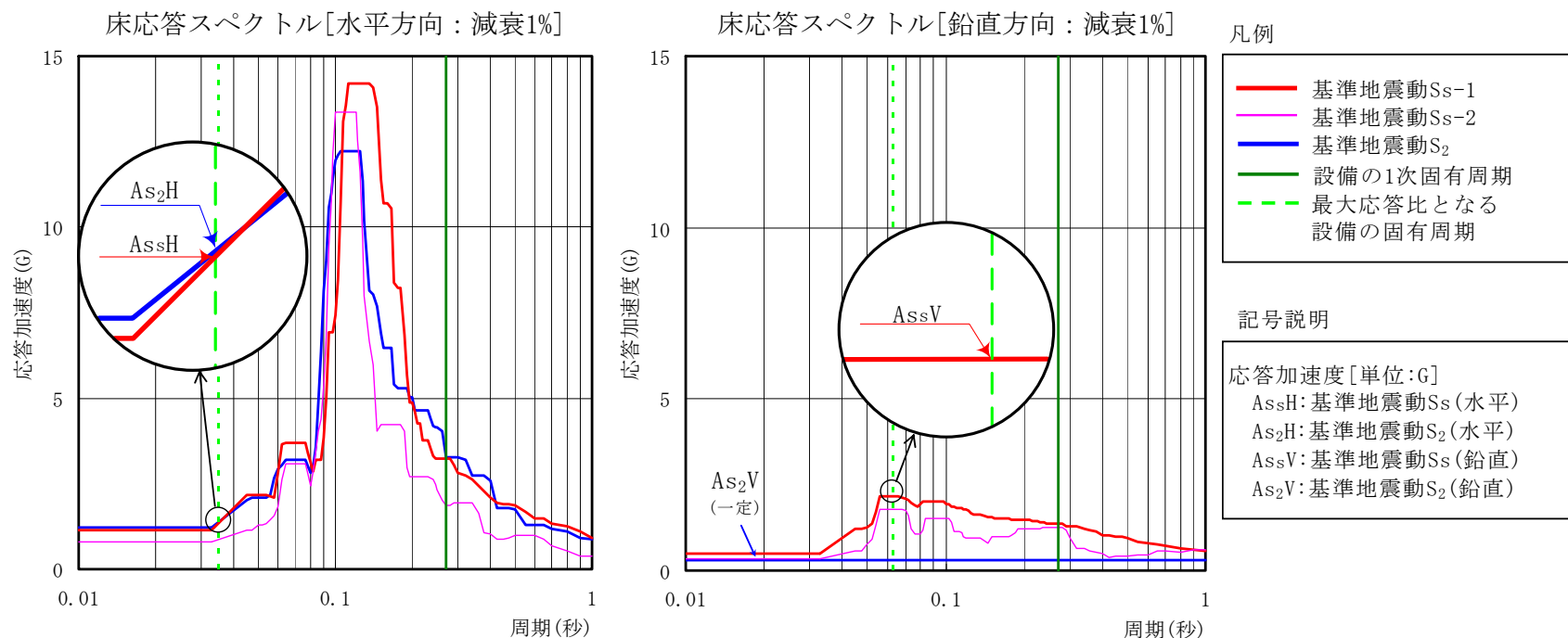
第 1 図 原子炉容器および炉内構造物概要図



第 2 図 燃料集合体および制御棒クラスター概要図



第 3 図 制御棒クラスタの挿入経路の概要



基準地震動S_s時の挿入時間の算出および評価基準値との比較

$$\text{応答比} = \frac{\text{二乗和平方根}}{\text{絶対和}} = \frac{\sqrt{(As_{sH})^2 + (As_{sV})^2}}{As_{2H} + As_{2V}} = \frac{\sqrt{(1.31)^2 + (2.15)^2}}{1.33 + 0.29} = 1.555$$

$$\text{基準地震動S}_{ss} \text{ 時の挿入時間} = \underbrace{\text{通常運転時の挿入時間}}_{\text{(既往評価結果を参照)}} + \underbrace{\text{S}_2 \text{ 地震による遅れ時間}} \times \text{応答比} = 1.87[\text{秒}] + 0.10[\text{秒}] \times 1.555 = 2.03[\text{秒}]$$

基準地震動S_s時の挿入時間 2.03[秒] < 評価基準値 2.50[秒] 挿入時間は評価基準値を下回る

鉛直地震力が制御棒挿入性に与える影響は、解析および試験から水平地震力に比べ十分小さいと考えられる。

第 4 図 制御棒挿入性評価結果（伊方 3 号機）

(c) 解析結果

① 挿入時間遅れ

※ 1

試験によって測定された制御棒挿入時間遅れ（地震波加振時の非加振時からの挿入時間遅れ）と、時刻歴解析によって求められた制御棒挿入時間遅れを比較して図 5.3.3-16 に示す。また、このときの燃料集合体変位と遅れ時間との比較を、図 5.3.3-17 に示す。

解析結果は試験結果に対し、地震入力が増大に対する時間遅れの増加傾向を同等あるいは安全側に模擬できていることがわかる。

※ 2

S₂ : JNESにおいて、制御棒挿入性試験用の模擬地震波として設定したもの。

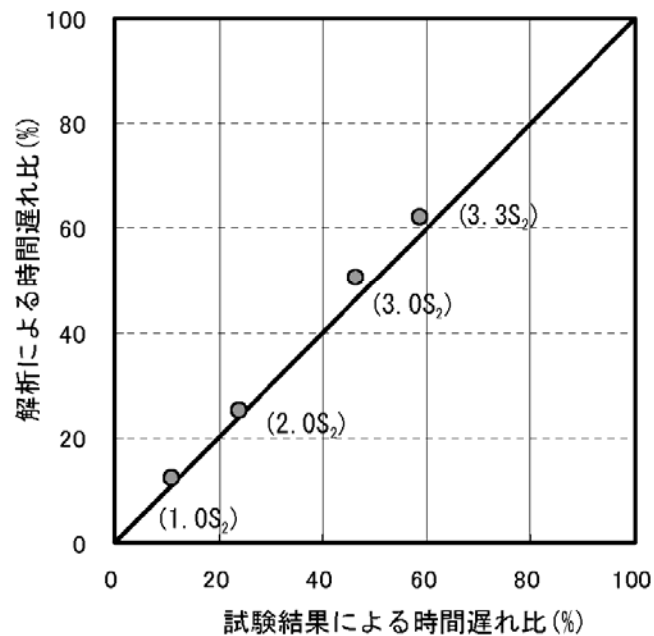


図 5.3.3-16 (1/2) 各地震条件における挿入時間遅れの比較

(JNES報告書抜粋)

5.3.3-24

※ 1 : 枠囲み加筆

※ 2 : 加筆

※ S₂ : J N E S において、制御棒挿入性試験用の模擬地震波として設定したもの。

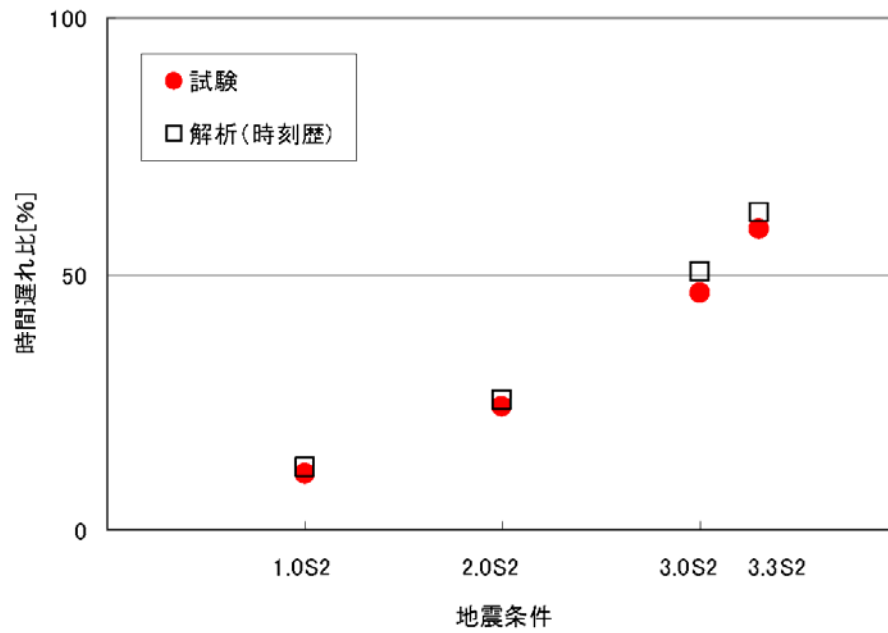


図 5.3.3-16 (2/2) 各地震条件における挿入時間遅れの比較

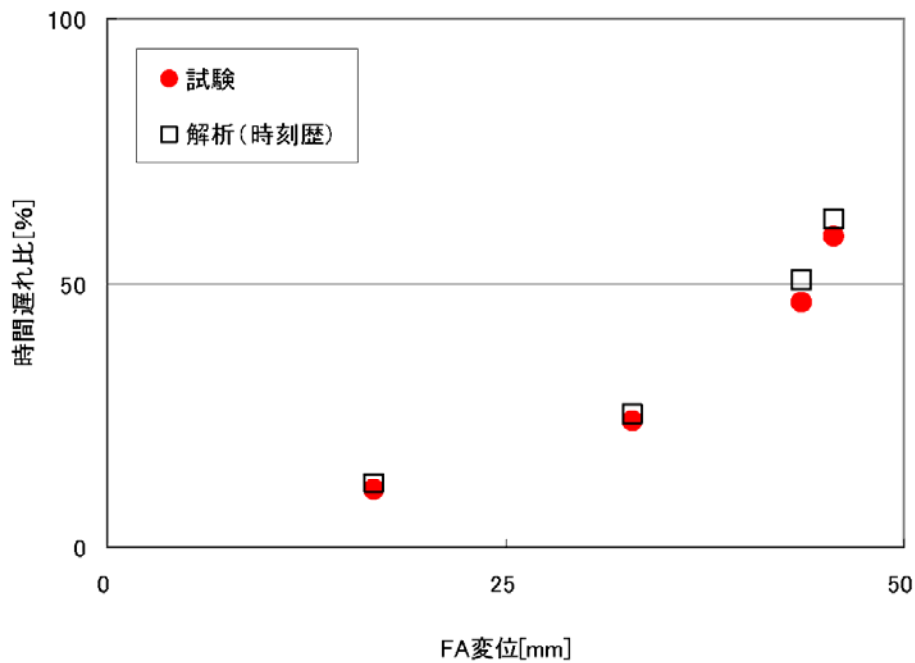


図 5.3.3-17 燃料集合体変位と挿入時間遅れ

(J N E S 報 告 書 抜 粋)

5.3.3-25

※ : 加 筆

6. 4. 4 挿入時間遅れ

時刻歴解析によって求められた制御棒挿入時間遅れ（地震波加振時の非加振時からの挿入時間遅れ）を地震波の加速度倍率と比較して図 6. 4. 4-1 に示す。また、このときの燃料集合体変位と遅れ時間との比較を、図 6. 4. 4-2 に示す。

挿入時間遅れは初期値（非加振時の制御棒挿入時間で 4 ループプラントの設計値 1. 63 秒を使用）を基準とすると、 $1.0 \times S_2$ 地震時で約 25%、 $3.0 \times S_2$ 地震時で約 90%、 $4.0 \times S_2$ 地震時で約 130%、 $5.0 \times S_2$ 地震時で約 160% 程度であった。 $6.0 \times S_2$ 地震時には停止状態が長く続くため遅れは約 450% になるが、制御棒の挿入は継続することが確認された。

この結果から、地震抗力が非常に大きい場合は、制御棒挿入速度は小さくなり停止状態になるが、地震波の加速度が小さくなれば、機器の応答変位及び加速度は小さくなり制御棒挿入速度が大きくなり、挿入は継続すると推定される。

※ S₂ : J N E S において、制御棒挿入性試験用の模擬地震波として設定したもの。

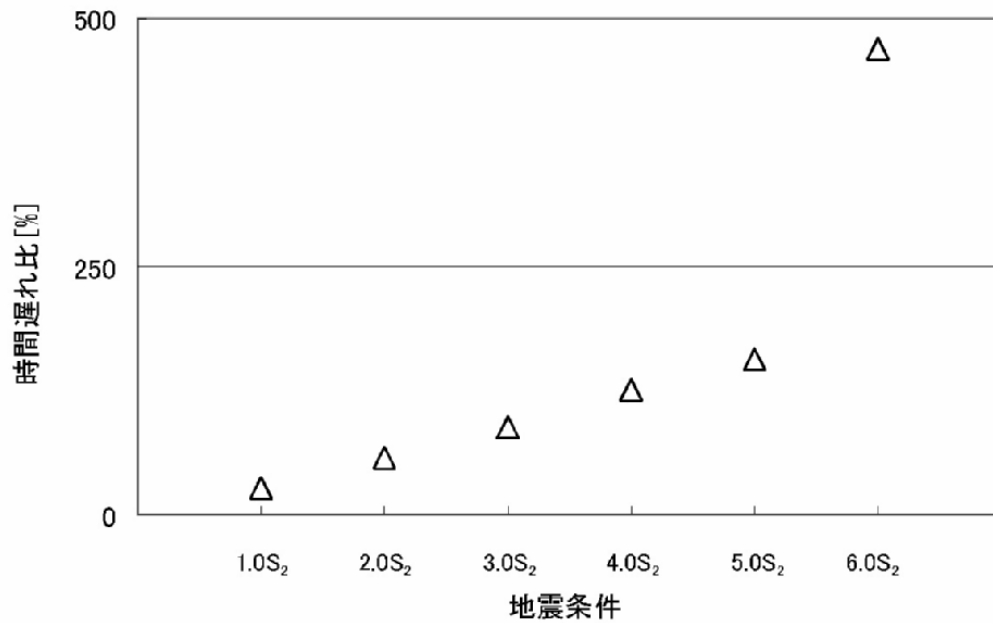


図 6.4.4-1 実機条件 各地震条件における時間遅れ

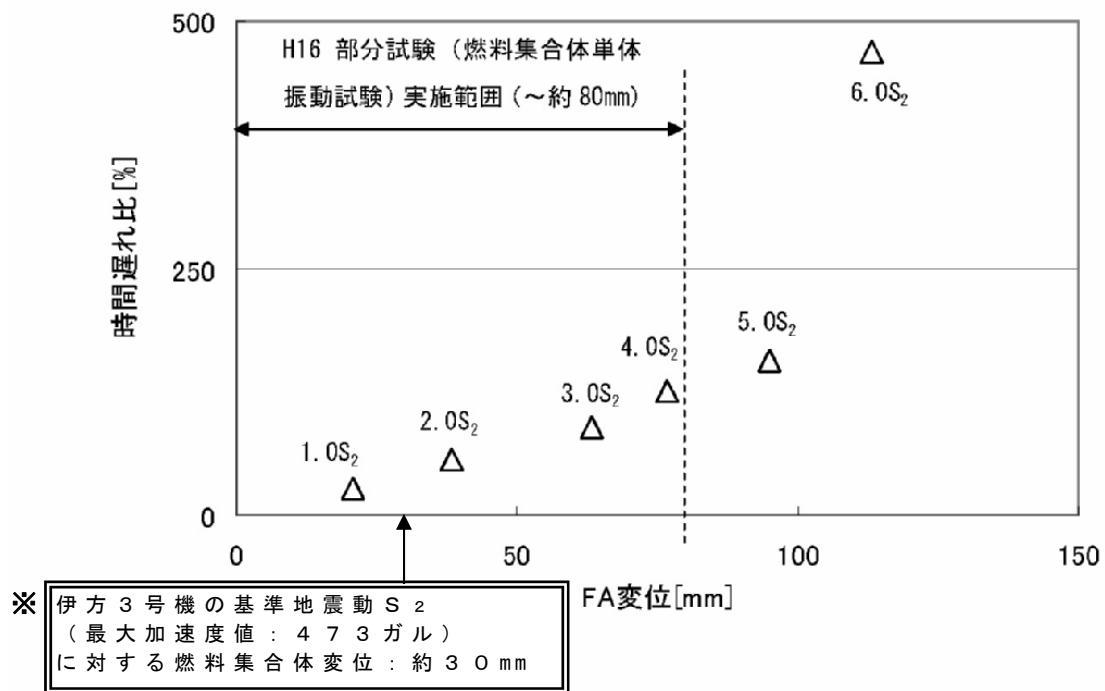


図 6.4.4-2 燃料集合体変位と時間遅れ

J N E S 試験条件の整理について

○実機試験の概要

1. 試験体および装置

(1) 基本方針

試験体および装置については，実機の構造的特徴，機能および振動試験に供するという点を考慮し，設計および製作を行っている。

- ①試験体の型式は，国内の改良標準型プラントに用いられている 17×17 型燃料集合体に対する制御棒挿入経路および制御棒クラスタとする。
- ②制御棒挿入に係る試験体の寸法，材質などは，基本的に実機相当の仕様を模擬する。
- ③炉心部の振動挙動は実機の振動特性を模擬する。
- ④試験容器および試験体サポートは，十分に剛な構造とし，振動台に自立させる。
- ⑤試験容器は，炉心部の流動（流速）が実機と同等となるようなものとする。

(2) 試験体および装置の基本仕様

実機において制御棒挿入経路を構成する機器，また，実機原子炉構造と本実機試験における試験体の比較を示す。

（別図 1， 2， 3 参照）

2. 入力波

(1) 模擬地震波

改良標準化以降の P W R プラントから最も厳しい設計地震波（基準地震動 S_2 ）を選定し，制御棒挿入性に特に影響が大きい燃料集合体，制御棒クラスタ駆動装置（C R D M）および制御棒クラスタ案内管（G T）の応答が実機と同等になるように模擬地震波を設定している。（別図 4， 5 参照）

(2) 模擬地震波と基準地震動 S_s

模擬地震波と基準地震動 S_s を比較した場合，エネルギー，位相特性等，必ずしも基本的性質が同一とは言えない。

しかしながら，模擬地震波は，制御棒挿入性評価に影響する燃料集合体変位およびCRDMの応答変位を励起し易い目標スペクトルを狙って策定されており，制御棒挿入性に係る機能限界を確認する観点で妥当であり，一般性は十分にあると考えられる。

（別図 6 参照）

3．鉛直動の影響

地震力が制御棒挿入性に与える影響については，解析および試験から水平地震力が支配的であることが確認されている。

燃料集合体および制御棒駆動装置等の案内経路の機器が，水平方向振動により変位すると，制御棒がそれらの機器と接触する。その時に鉛直動による地震力が作用すると，制御棒に対して上向きまたは下向きの摩擦力が抵抗力として作用する。また，鉛直地震力は，制御棒案内経路にあたる機器を上下に振動させ，自重落下する制御棒に対しても，内部流体を介して慣性力が作用する。

しかし，いずれも鉛直方向の交番荷重となるため，制御棒挿入性への影響は水平地震力に比べて十分小さいと考えられる。

以上より，実機試験においては，鉛直動による加振を行っていない。

4．地震波加振試験

模擬地震波による地震波加振を実施した時の燃料集合体，制御棒駆動装置（CRDM），制御棒クラスタ案内管（GT）および制御棒挿入挙動について主要な結果を整理する。

（1）燃料集合体

燃料集合体の最大変位は入力加速度の増加とともに，ほぼ線形的に増加しているが，変位が 40 mm 以上になると燃料集合体が両側のバッフル壁に衝突するようになるので，変位が抑制されている。

（別図 7 参照）

（2）制御棒クラスタ駆動装置（CRDM）

CRDMの最大変位は，加振入力に対して直線的な増加傾向を示している。地震波加振試験における加振入力が最大となる $3.3 \times S_2$ 地震の応答変位は約 17 mm であり，これは実機の耐震解析結果の約 3 倍に相当するため，目標に近い変位まで試験ができたと評価される。

（別図 8 参照）

(3) 制御棒クラスタ案内管 (G T)

G T (上部) の変位は $3.3 \times S_2$ 加振時の最大変位は 1 mm 以下であり, G T 内の制御棒案内板の制御棒案内孔と制御棒間の隙間 (数 mm) より小さいことが確認された。 (別図 9 参照)

(4) 制御棒挿入挙動

振動台の入力加速度に対して, 入力小さいレベルでは直線的に増加しているが, 入力大きいレベルでは, 増加幅が少しずつ大きくなっている。特に, 流水時の $3.0 \times S_2$ 時加振以上では, 挿入時間の遅れの増加が大きくなっている。

(別図 10 参照)

(5) 実機における地震時の変位 (伊方 3 号機: 基準地震動 S_2)

基準地震動 S_2 (最大加速度値: 473ガル) 入力時の伊方 3 号機の各部における最大変位量を表 1 に示す。

表 1 地震時の変位

[単位: mm]

位置 \ 最大変位	S_2 地震時
制御棒クラスタ駆動装置 (C R D M)	約 9
制御棒クラスタ案内管 (G T)	約 1
燃料集合体 (制御棒案内シンブル)	約 30

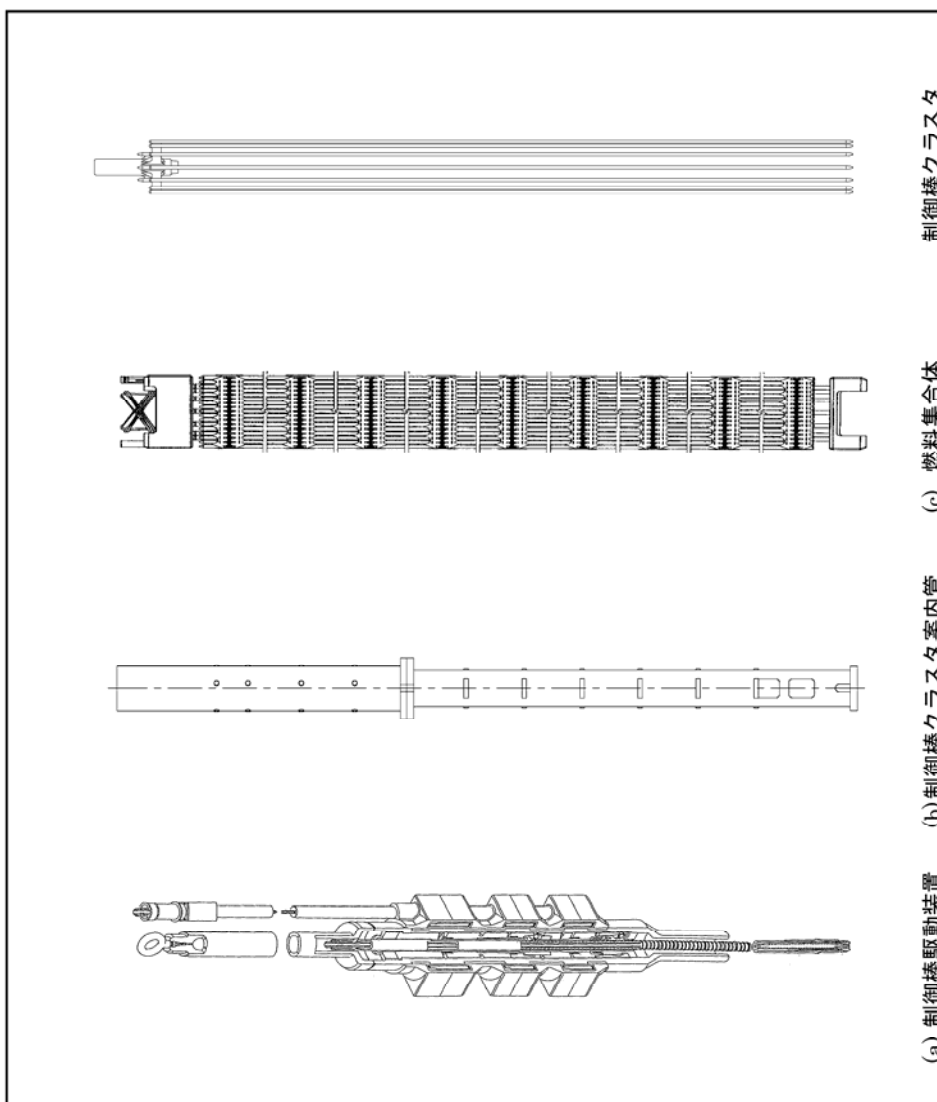
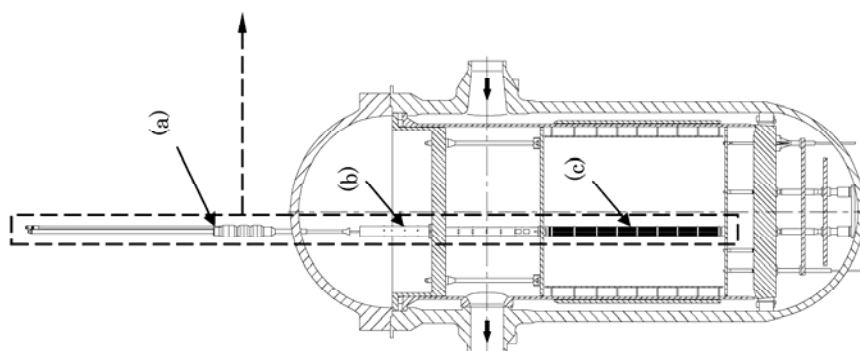


図 5.1-1 制御棒挿入経路構成機器



5.1-2

(JNES 報 告 書 抜 粋)

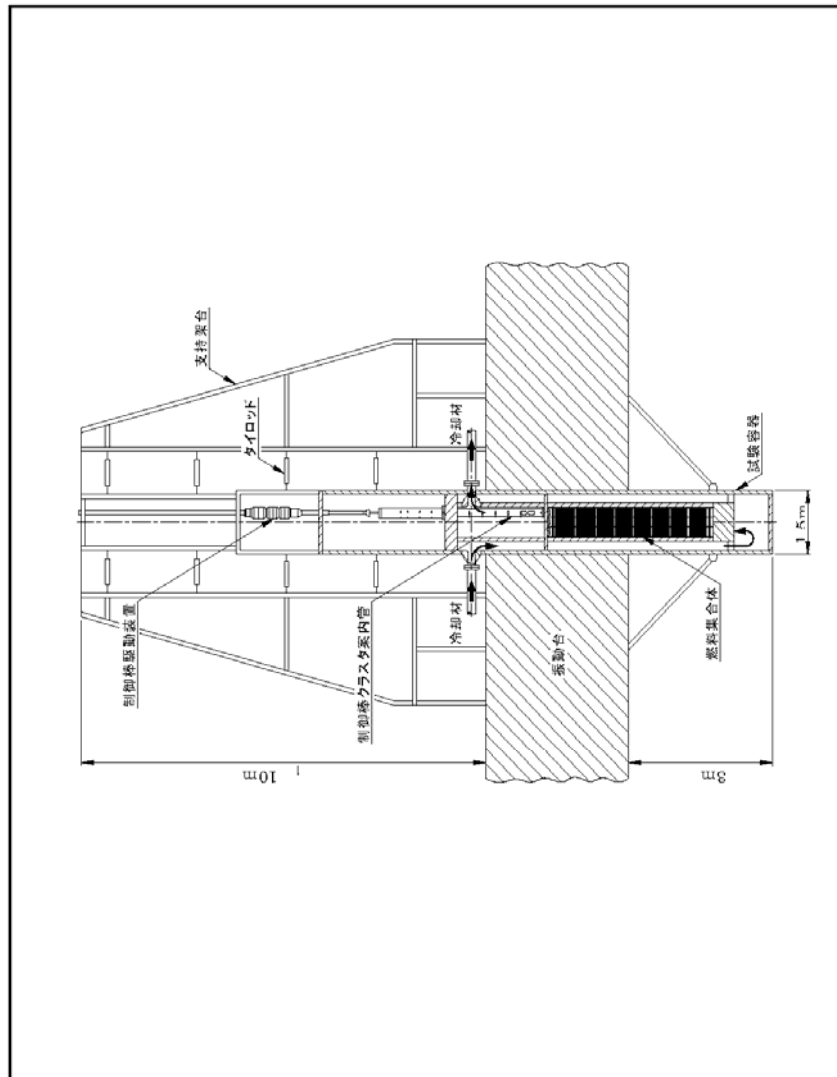
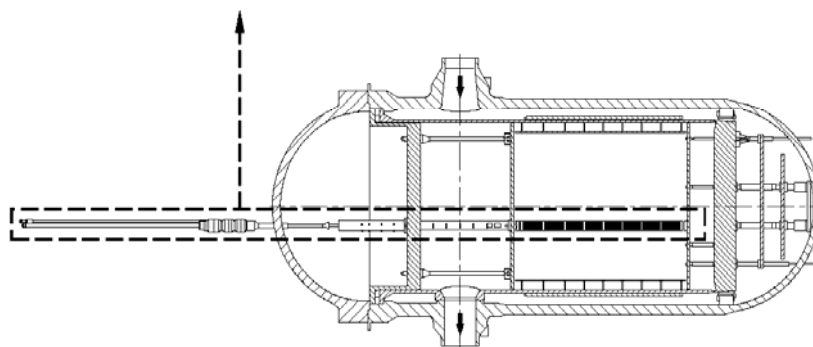


図 5.1-2 実機原子炉構造と試験体の比較



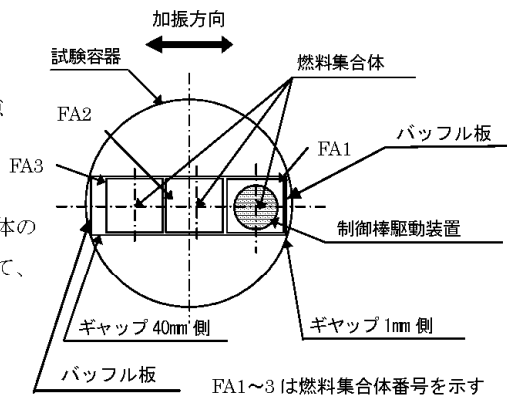
5.1-3

(JNES報告書抜粋)

(4) 燃料集合体配置 (右図参照)

- ・燃料集合体間隙 1mm
- ・燃料集合体／炉心バップル板間隙 1mm（制御棒クラスタ挿入位置）
40mm（上記の反対側）

間隙の設定に際しては、燃料集合体の応答解析により、実機試験において、燃料集合体の応答が実機と同等のものが得られるように配慮した。



(5) 試験ケース

地震波加振を含め以下の試験を実施した。

(a) 振動台の振動特性把握試験

試験体、装置を設置した状態で、振動台の振動特性を把握するため、ランダム波加振試験（～300gal）を実施し、その特性を用い、入力補償を行いながら正弦波掃引試験を実施した。

(b) 試験体の振動特性把握試験

試験体の振動数、振動モードを把握するため、正弦波掃引試験 (50gal、2-30Hz) を実施した。

(c) 地震波加振試験

模擬地震波による加振を実施し、各機器の応答及び制御棒挿入時間を測定した。

(d) 燃料模擬波加振試験

燃料模擬波による加振を実施し、各機器の応答及び制御棒挿入時間を測定した。地震波加振では燃料集合体応答が限界に達していると判断し、更に大きな応答を得るべく実施したものである。

上記試験の内、地震波及び燃料模擬波加振試験の試験ケースを表 5.1-1 に示す。制御棒挿入時間の初期値を得るため、また、機器の変形による影響や異常の有無を確認するため、各試験の都度、制御棒挿入試験（非加振）を実施した。

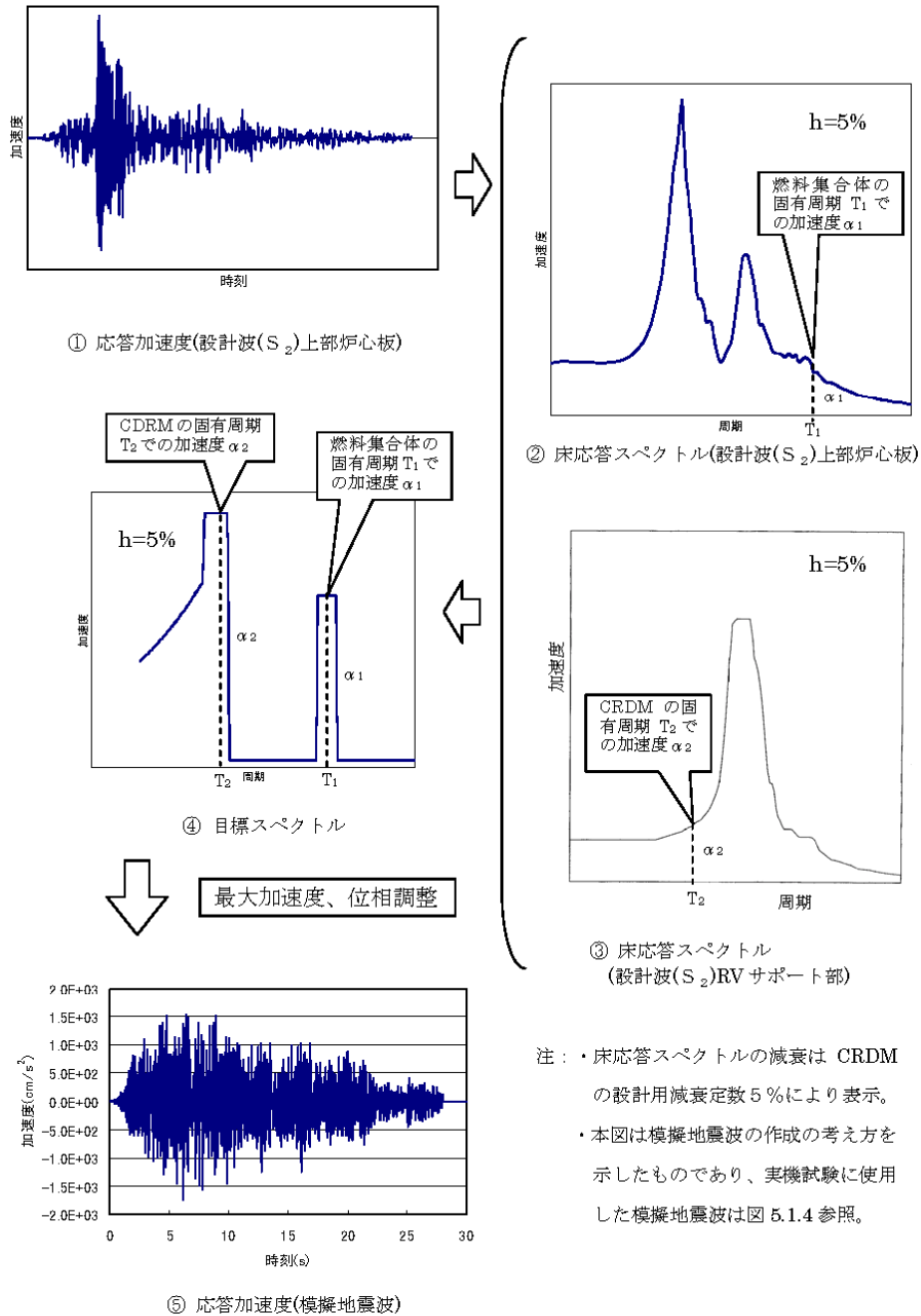
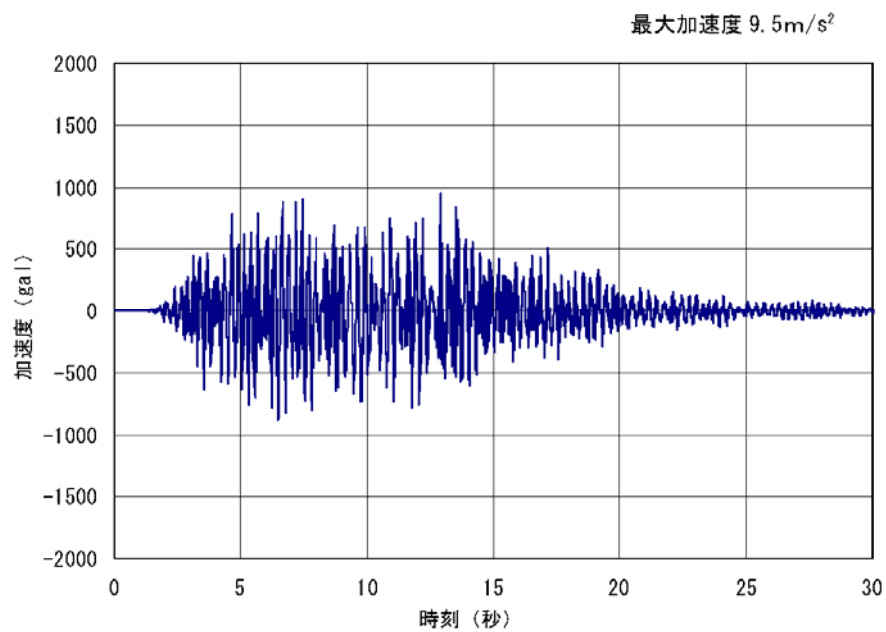
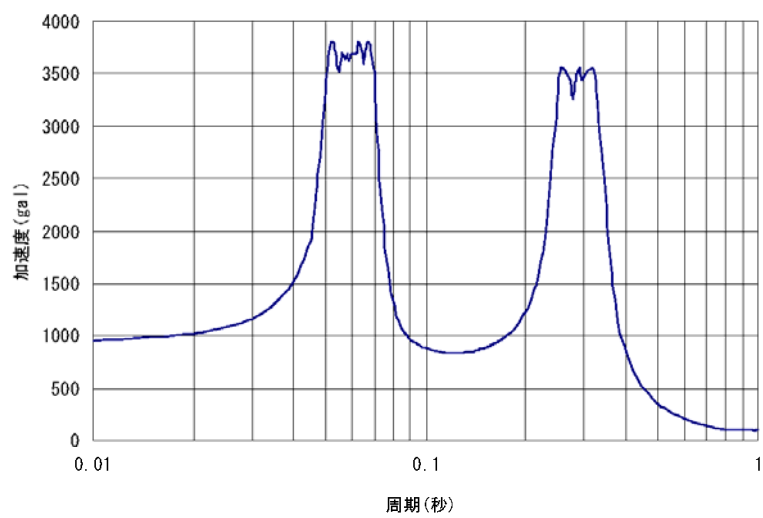


図 5.1-3 模擬地震波の作成方法



(a) 時刻歴波形



(b) 応答スペクトル (減衰比 5%)

図 5.1-4 模擬地震波 (S_2 波)

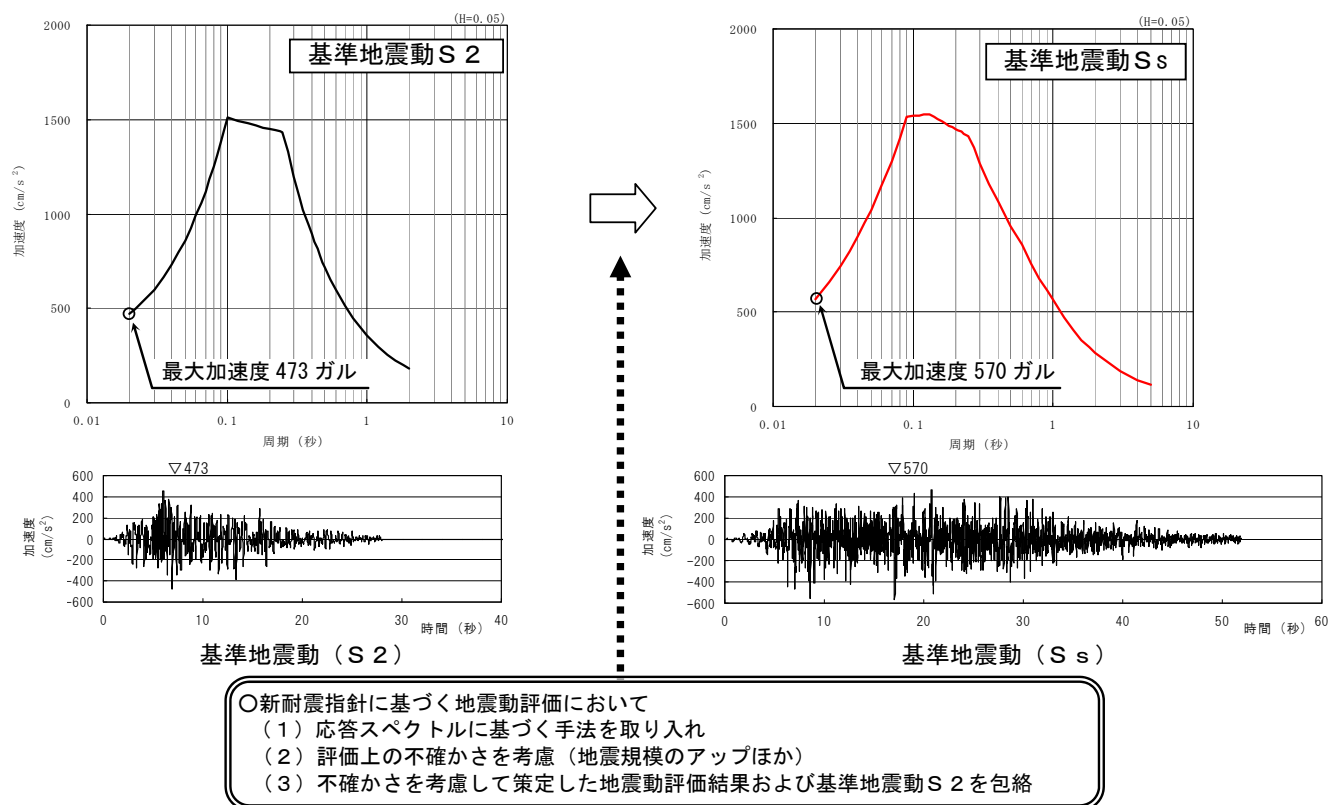
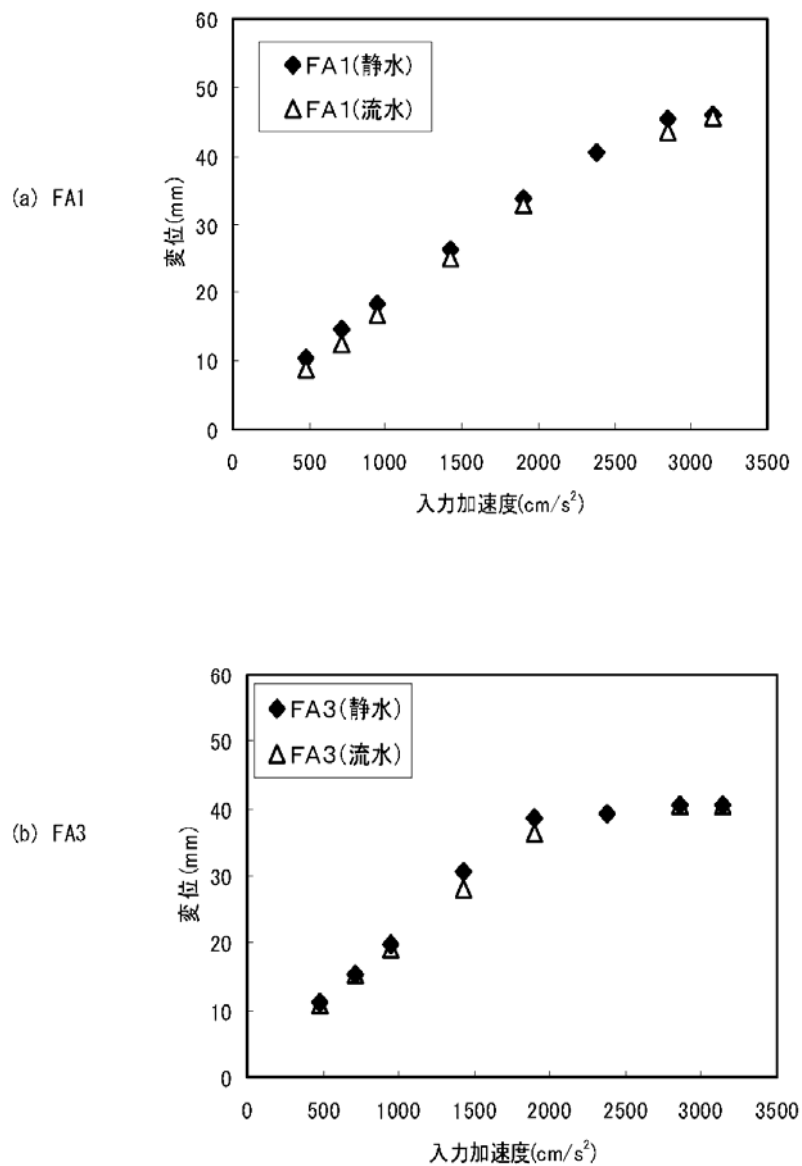


図 基準地震動 S_s および S₂ の比較 (伊方 3 号機)



注) ・ FA1 : 燃料集合体番号を示す (5.1 節参照)

・ 上図の変位は燃料集合体とバップル板の相対応答変位を示す。

図 5.2.3.2-3 燃料集合体変位と入力加速度の関係

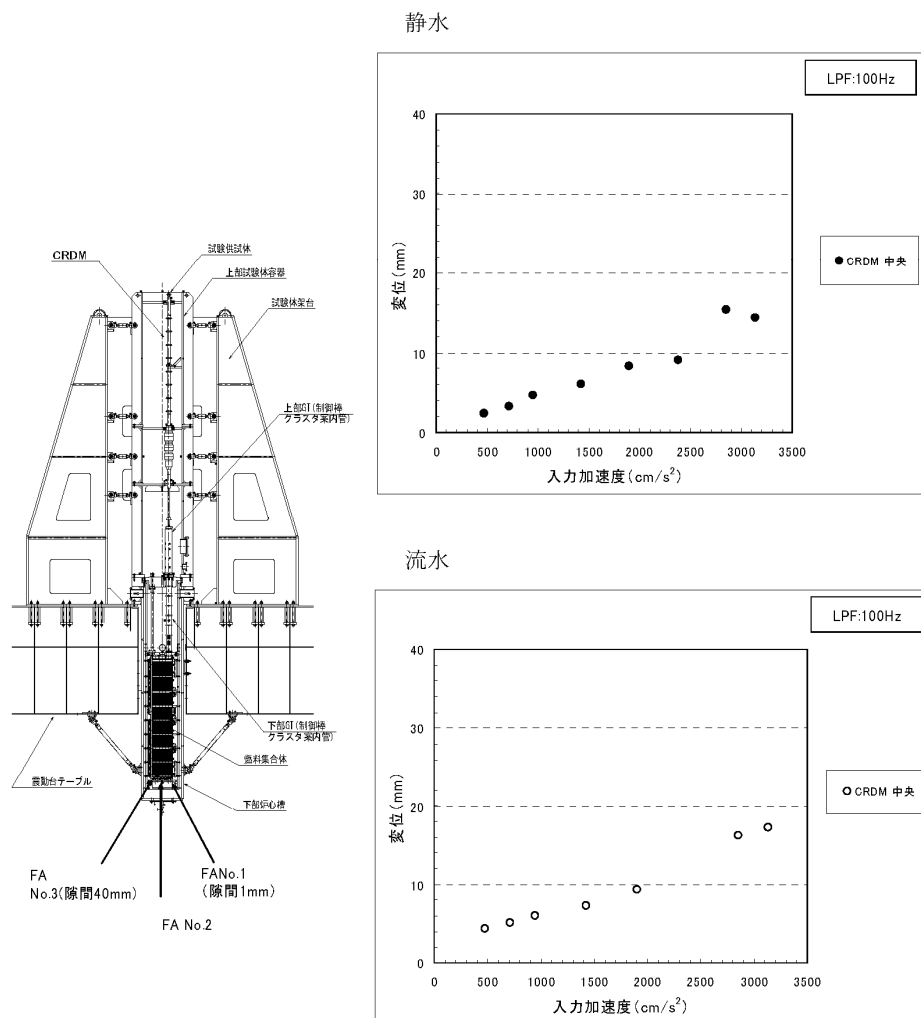


図 5.2.3.3-2 地震波加振時のCRDM変位の最大値と入力波の関係

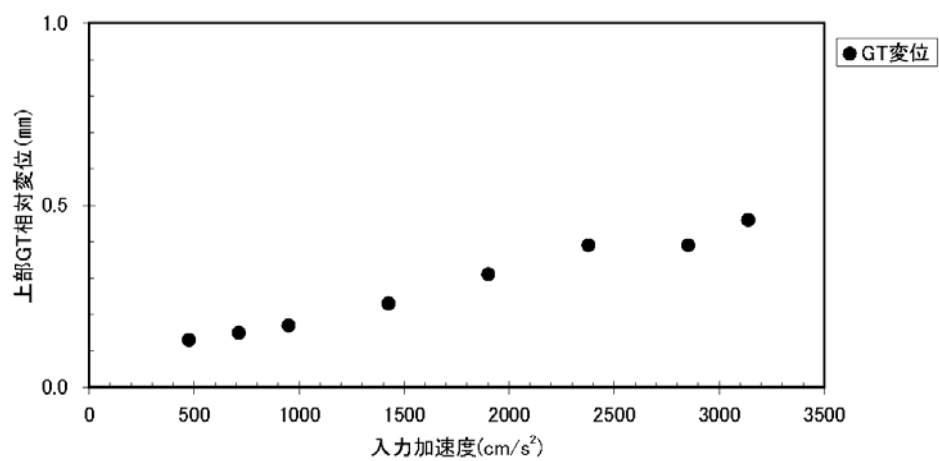
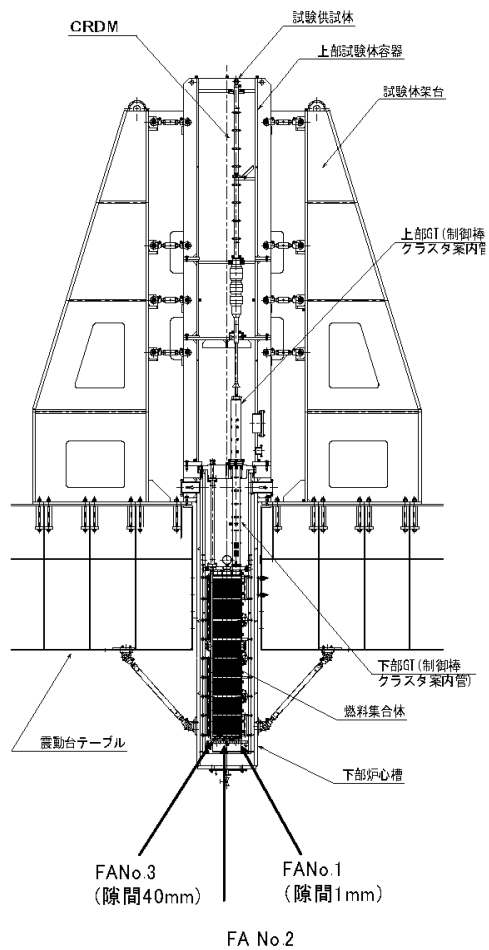
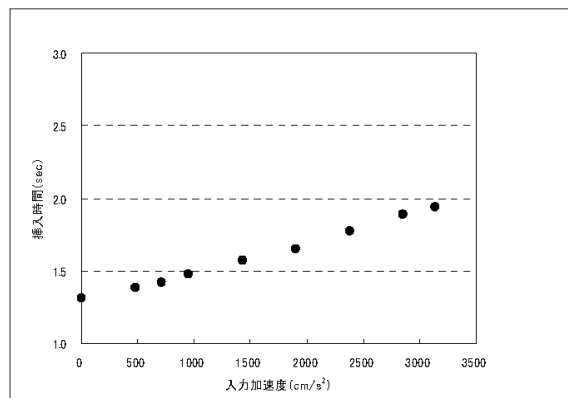


図 5.2.3.4-3 地震波加振時の G T 応答変位の最大値



静水



流水

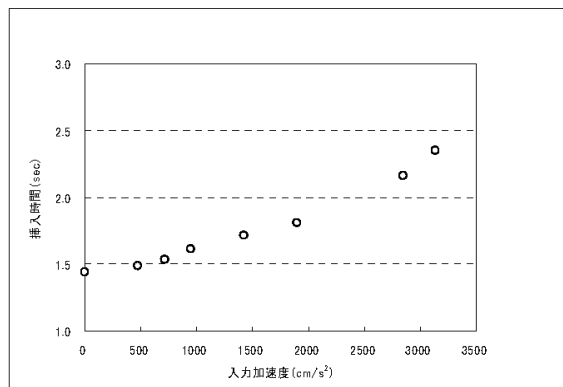


図 5.2.3.5-1 地震波加振時の制御棒挿入時間

3. 鉛直地震動の影響

地震力が制御棒挿入性に与える影響については，解析および試験から水平地震力が支配的であることが確認されている。^(参考文献)

燃料集合体および制御棒駆動装置等の案内経路の機器が，水平方向振動により変位すると，制御棒がそれらの機器と接触する。その時に鉛直動による地震力が作用すると，制御棒に対して上向きまたは下向きの摩擦力が抵抗力として作用する。また，鉛直地震力は，制御棒案内経路にあたる機器を上下に振動させ，自重落下する制御棒に対しても，内部流体を介して慣性力が作用する。

しかし，いずれも鉛直方向の交番荷重となるため，制御棒挿入性への影響は水平地震力に比べて十分小さいと考えられる。

具体的には，「平成 10 年度 耐震設計高度化調査 原子炉建屋・機器の水平・上下応答特性評価法の調査 報告書」(平成 11 年 3 月，(財)原子力発電技術機構)において，模擬地震動(M7.0， Δ 20km)に対する PWR 建屋に対する地震応答解析結果を用いて，制御棒挿入性解析における鉛直地震動による遅れ時間を評価している。

その結果，原子炉容器頂部の鉛直方向応答加速度が 1 G 以下(最大加速度値：約 166 ガル(下向き)[NUPEC 解析条件])^(参考)であれば，安全側に加速度最大値が上向き，かつ，制御棒クラスタ駆動装置保持コイルの電源しゃ断から落下開始までの時間(約 5/100 秒)にわたって，最大加速度が継続して作用すると仮定した評価を行っても，本報告書に示すように，鉛直地震動を考慮することによる制御棒の挿入時間遅れは僅かであることを確認している。

(参考) 伊方 3 号機の基準地震動 S_s に対する原子炉容器頂部の鉛直方向応答加速度値：0.7 G 以下

【参考文献】

(独) 原子力安全基盤機構，「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(平成 18 年 8 月)」，『添付資料 A 上下動による制御棒挿入性への影響』

3.6.3 解析モデル化手法の検討

水平動とあわせて上下動を考慮した場合の挿入時間評価の流れを、図 3.6-5 に示す。

(1) CRDM 上下動応答解析

(a) 解析モデル及び解析方法

CRDM をはり及び質点により模擬した解析モデルを図 3.6-6 に示す。原子炉建屋及び機器連成モデルによる上下動応答解析より得られる RV 頂部の上下加速度応答波を、図 3.6-6 の解析モデルに入力し、地震応答解析を行い、CRDM ラッチ部の上下動応答加速度を求める。

(b) ラッチ部加速度レベルの見積

CRDM のラッチが開放し、RCC が落下開始するときに、ラッチ部に鉛直上向きの加速度が生じた場合、RCC の落下挙動に影響を及ぼす。以下に、ラッチ部の上下応答加速レベルによる評価方法の考え方を示す

a) 上向きの加速度が 1 G を越えた場合：

この場合は、RCC は一度浮き上がってから落下を開始する。このとき RCC が浮き上ってから落下を開始するまでの挙動を時刻歴に解析し、遅れ時間を求める必要がある。

b) 上向きの加速度が 1 G を越えない場合：

この場合は、RCC は浮き上がることはない。しかし、ラッチ開放中に上向きの加速度が生じている場合、通常 1 G の重力加速度により落下力を得ている RCC に比べて、鉛直動による加速度分だけ下向きの力が減少する。このため、上向きの加速度が働いている間は、RCC の落下力が一時的に減少し、RCC 挿入時間が遅れる。

※

今回の検討においては RV 頂部の加速度レベルは、後述するように 1 G (=980GAL) を超えていない。CRDM は鉛直方向に剛であり、原子炉容器の応答がほぼそのまま CRDM のラッチ部に伝達されるため、ラッチ部の応答も 1 G 以内であり、上記 b) のケースとして以下検討を行う。

(2) 制御棒挿入時間解析

(a) 上下動による遅れ時間の見積（鉛直加速度による RCC 挿入抗力の算定）

通常時の制御棒はラッチ開放後、重力により落下力を得て挿入されるが、動的上下動を考慮した場合はラッチ開放の瞬間に鉛直上向きに上下動による加速度が作用したと想定すると、上下動の加速度分だけ見かけ上重量が軽くなり、落下力が減少することにより、挿入時間が遅れる。

本検討においては、ラッチ開放中に上下動の最大加速度が発生し、その時点に RCC が落下を開始すると仮定する。RCC は、駆動軸がラッチから離れた瞬間より通常の重力場（1 G）に開放され、上下動の加速度と関係なく落下を始める。最大加速度の作用時

間はごく短い時間であるが（解析結果の図 3.6-9 参照）、ここでは安全側に、実機において計測される CRDM 保持コイルの電源遮断から落下開始までの時間（約 5/100 秒）にわたって、上記の最大加速度が継続して作用すると仮定する。

この加速度による抗力を考慮することにより、RCC の落下挙動を解析し、鉛直地震動が無い場合の落下挙動と比較して、鉛直地震による遅れ時間 Δt_v を求める。（図 3.6-5 参照）

(b) 地震時制御棒挿入時間解析

制御棒の挿入時間は、挿入経路各部において制御棒クラスタが受ける諸抗力を考慮した解析により求められる。

制御棒挿入解析で考慮している諸抗力を図 3.6-7 に示す。挿入経路各部で受ける制御棒クラスタの抗力は、流体による抗力及びメカニカル抗力である。地震時には、これに地震外力による抗力が付加される。さらに制御棒クラスタの浮力及び自重を考慮する。

流体による抗力及びメカニカル抗力は、PWR 先行プラント等にて実施された制御棒挿入実験において得られており、炉内の冷却材温度、圧力、流速等の条件や落下速度等の関数として、解析コード内で計算される。また、地震外力による抗力は、地震応答解析で得られた挿入経路各部の地震変位と、挿入実験で得られた各部の地震抗力との関係から求めることができる。

制御棒クラスタの挿入時間は、これら諸抗力を利用して、次式より求める。

$$\frac{W}{g} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = W - (F_f + F_v + F_m + F_u)$$

ここで、 F_f ：流体による抗力

F_v ：地震外力による抗力

F_m ：メカニカル抗力

F_u ：浮力

W ：自重

なお、上下動による抗力はラッチ開放の瞬間に、制御棒に上向きに作用するものとして上式にて考慮する。

地震時挿入時間の算定にあたっては、図 3.6-5 に示すように、制御棒挿入経路機器の水平地震に対する応答変位に基づく挿入時間解析より求めた地震時遅れ時間 Δt_H と、上記の鉛直地震による遅れ時間 Δt_v を、通常運転時の挿入時間に加えることにより、上下動を考慮した地震時挿入時間を算定する。

なお、CRDM のラッチが完全に開放した後は、RCC は通常の重力場（1G）に開放され、上下動の影響を受けずに落下を開始するため、落下後の挙動は上下動の有無に関係なく評価でき、上記のように上下動による遅れと水平地震による遅れは分離して考える。

(b)上下動による遅れ

- ※ ラッチ開放中に図 3.6-10 に示した上下動の最大加速度が発生し、その時点に RCC が落下を開始すると仮定した。加速度最大値は、下向きに発生するが、ここでは安全側にこれを上向きとして考慮した。また、最大加速度の作用時間は図 3.6-10 に示すようにごく短い時間であるが、ここでは安全側に、実機において計測される CRDM 保持コイルの電源遮断から落下開始までの時間（約 5/100 秒）にわたって、上記の最大加速度が継続して作用すると仮定した。
- (a)に示した水平地震動を考慮した挿入時間解析モデルをベースに、図 3.6-10 に示した上下方向加速度を考慮した場合の挿入時間を解析した。解析結果を、水平地震のみの場合の結果及び規定時間と比較して、表 3.6-1 に示す。
- 同表よりわかるように、鉛直地震動を考慮することによる挿入時間遅れの増加は、+0.02 秒と僅かであることがわかる。

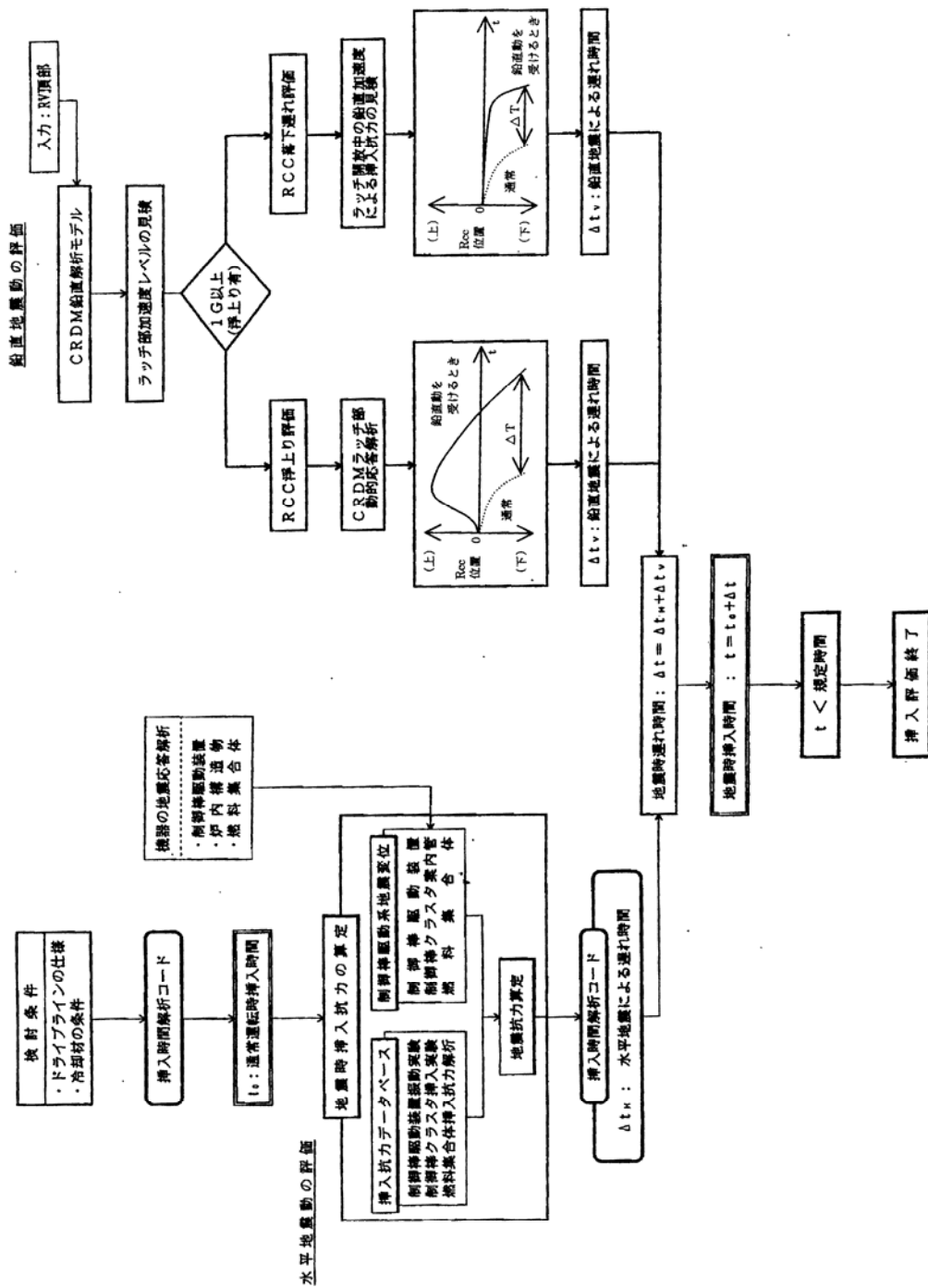
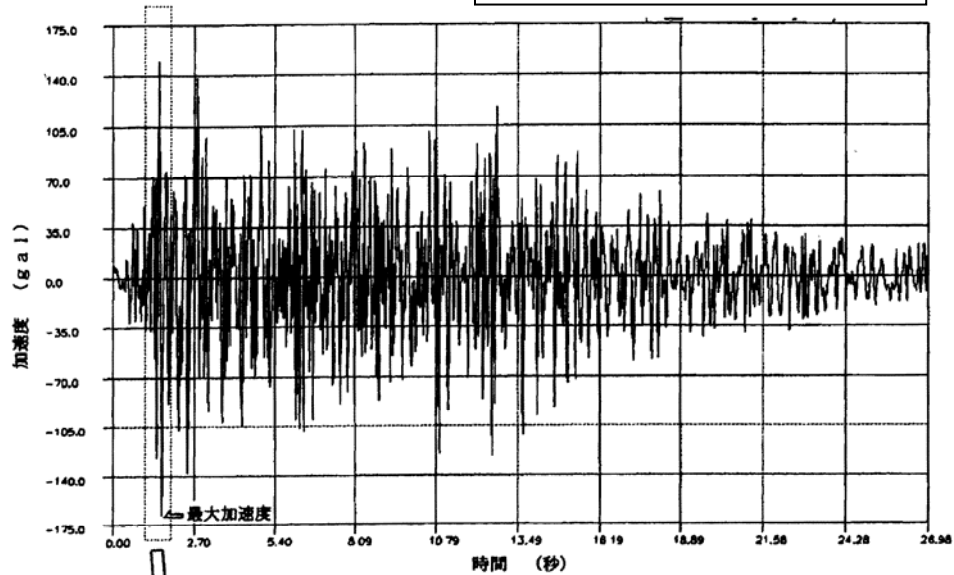


図 3.6-5 地震時制御棒挿入時間解析評価の流れ

※ NUPECにおいて、制御棒挿入性解析用の模擬地震波として設定したもの。



☆ 最大加速度は下向きであるが、安全側にこれを上向きとして考慮する。

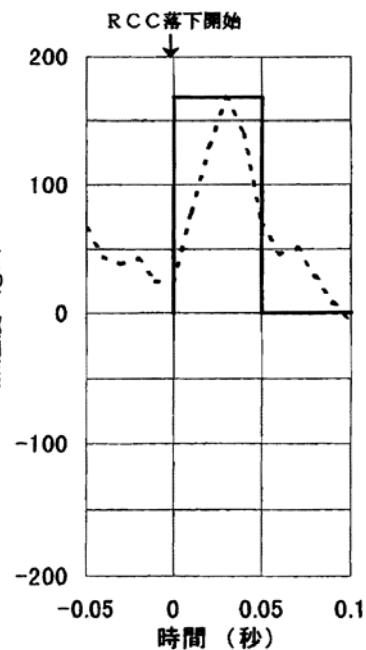
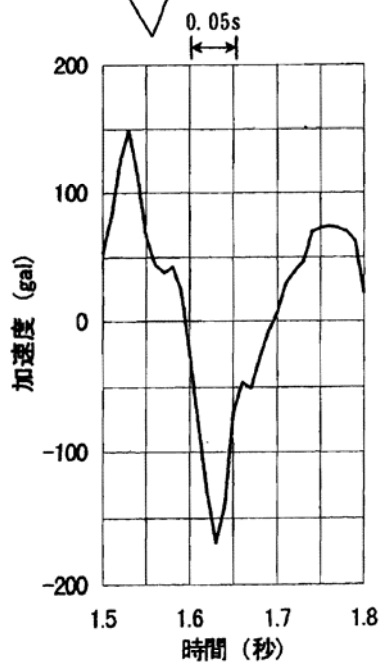


図 3.6-10 制御棒への上下方向地震動入力概要

※

表 3.6-1 挿入時間解析結果

(単位：秒)

挿入時間解析条件	挿入時間遅れ
通常運転時	ベース
水平地震	+0.08
水平地震+鉛直地震	+0.10 (水平+0.02)

4. まとめ

制御棒挿入時間遅れと地震力には一定の相関性があり、ある入力レベル範囲までは線形関係にあるので、応答倍率法でも概略評価は可能と考える。

また、制御棒挿入性に関して、JNES 文献等より鉛直動の影響は余りないと考える。

以 上