

資料 3

HTTR 設工認 第 4 回申請(R2.3.30)に係る補足説明
(耐震性(波及的影響含む))

令和 2 年 8 月 3 日

日本原子力研究開発機構 大洗研究所

高温ガス炉研究開発センター

高温工学試験研究炉部

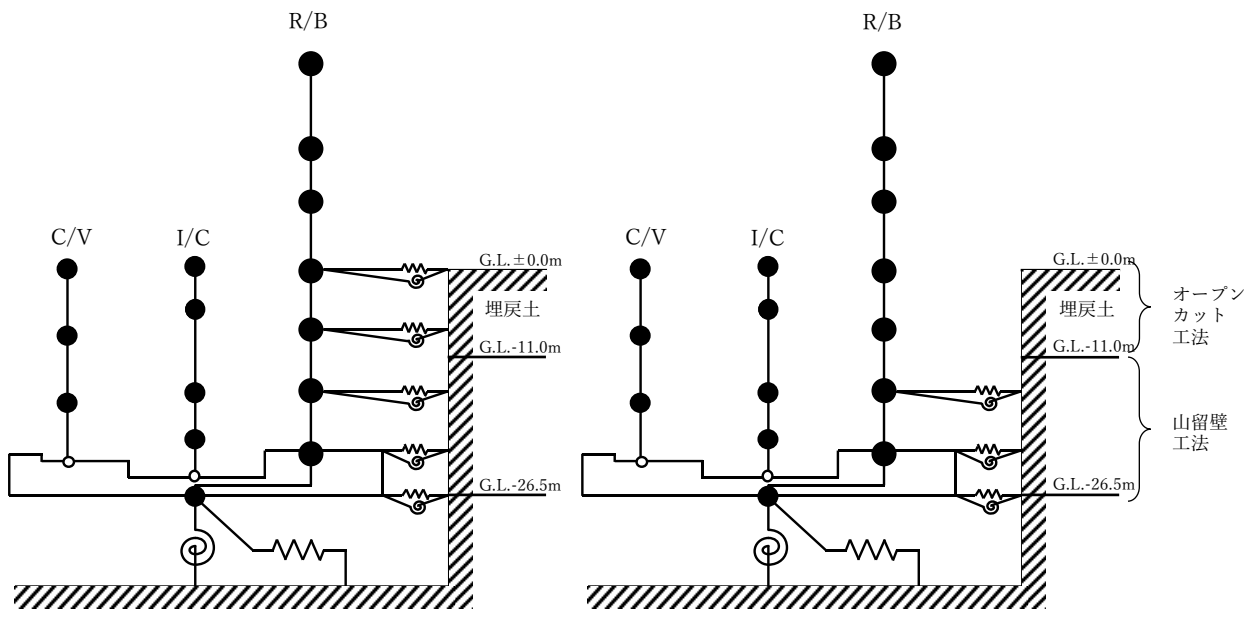
1. 側面地盤ばねの設定の妥当性について

耐震評価に用いる地震応答解析モデルは、側面地盤ばねを考慮したモデル化としている。既往の設工認時は側面地盤ばねを地表面まで設置したモデルとしていたが、今回申請した設工認では表層地盤の拘束効果がないモデル(側面地盤ばねを地下 2 階以深に設置したモデル)を採用している。地震応答解析モデルを図 1 に示す。

今回申請で採用している解析モデル②は、オープンカットし埋土に置換している表層地盤の側面ばねを考慮していない(図 2)。埋土の動せん断弾性係数 G_0 :37,300 kN/m²(せん断波速度 V_s : 146 m/s)は、表層の原地盤(Lm、Mu-S1、Mu-C)と比べて 0.2~0.9 倍程度の値となる(表 1)。 S_s 地震時の表層の原地盤の剛性低下率 G/G_0 (図 3、0.25~0.75 程度)が埋土に生じることを考慮すると、もともと小さい剛性はさらに低下するため、表層地盤(埋土)の埋め込み効果を期待しないモデル化が適切である。また、最大応答加速度及び加速度応答スペクトルは観測記録をおおむね再現できており(図 4 から図 6)、解析モデル②を採用することは適切と考えている。

NS 方向と EW 方向における応答の違いについては、解析モデルと入力地震動の固有周期、固有モード(刺激関数)の組合せによって差が生じていると考えられる。解析モデルについては、解析モデル②の刺激関数(例として 5 次モード)は①と比べて、C/V 及び R/B 頂部の値が 1.2~1.4 倍となっており、解析モデル②の応答は 5 次等の高次モードの寄与率が大き(図 7)。入力地震動については、EW 方向の加速度応答スペクトルは NS 方向と比べて、5 次固有周期付近の成分が小さい(図 8)。

以上より、解析モデル②は 5 次等の高次モードの影響により C/V 及び R/B 頂部の応答が大きくなる傾向にあるが、EW 方向は NS 方向に比べて、入力地震動に 5 次固有周期付近の加速度成分が小さいため、頂部の応答に差が生じる(逆転している)と考えられる。



(解析モデル①: 既往の設工認時)

基礎下端から地表面まで側面地盤ばねを考慮するモデル

(解析モデル②: 今回申請で採用)

オープンカット工法により掘削した表層地盤の側面地盤ばねを考慮しないモデル

図 1 解析モデル

(第 4 回設工認 添付書類 1-2-1-1 第 4 図抜粋)

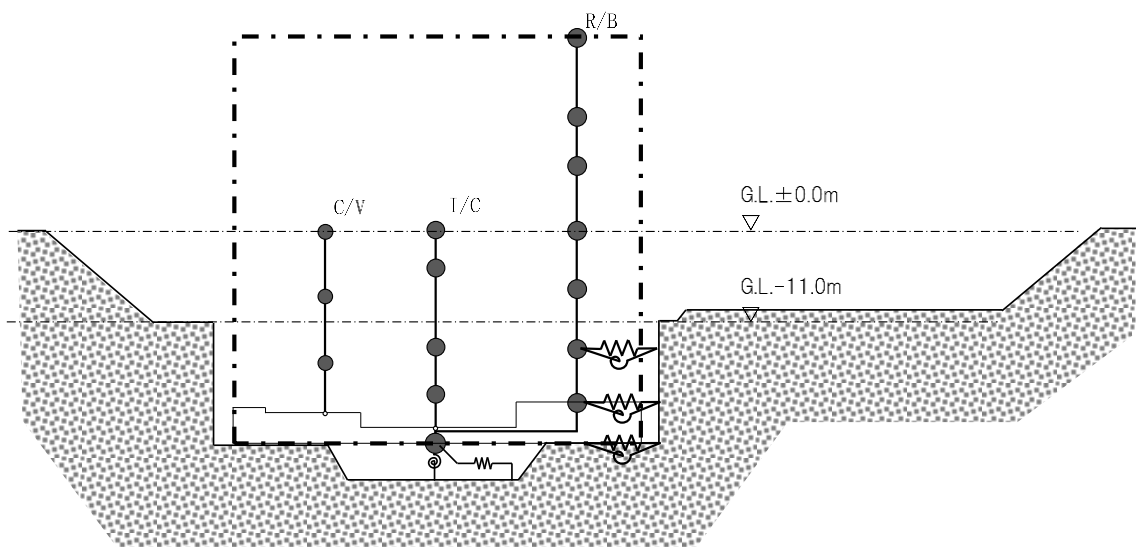


図 2 原子炉建家建設時の地盤の掘削状況(NS 方向)

(第 4 回設工認 添付書類 1-2-1-1 第 5 図抜粋)

表 1 地盤の物性値

(第 4 回設工認 添付書類 1-2-1 第 3.1 表抜粋)

| 深さ G.L. (m) | 地層名 | 地層 分類 | 湿潤密度 ρ_t (g/cm ³) | 動ポア ソン比 ν_d | 動せん断 弾性係数 G_0 (kN/m ²) |
|----------------|---------|----------|------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------|
| 0.0 | ▽地表面 | | | | |
| -1.5 | M1段丘堆積物 | Lm | 1.36 | 0.47 | 42,300 |
| -8.5 | | Mu-S1 | 1.90 | 0.44 | 222,000 |
| -11.3 | | Mu-C | 1.75 | 0.46 | 150,000 |
| -14.3 | | Mu-S2 | 1.90 | 0.41 | 354,000 |
| -15.9 | | Mu-Sg | 2.02 | 0.44 | 409,000 |
| -21.3 | | Mu-S3 | 1.81 | 0.38 | 386,000 |
| -26.3 | 東茨城層群 | Mm-Sg | 2.02 | 0.38 | 752,000 |
| -38.5 | | Is-S1 | 1.87 | 0.46 | 359,000 |
| -39.6 | | Is-C | 1.88 | 0.47 | 275,000 |
| -64.6 | | Is-S2 | 1.86 | 0.47 | 288,000 |
| -73.3 | | Is-Sc | 1.82 | 0.47 | 285,000 |
| -84.4 | | Is-S2 | 1.86 | 0.47 | 288,000 |
| -85.8 | Is-Sg | 1.98 | 0.44 | 714,000 | |
| -90.2 | Is-S3 | 1.97 | 0.45 | 485,000 | |
| -160.3 | 久米層 | Km | 1.79 | 0.45 | 464,000 |
| -171.9 | ▽解放基盤表面 | Ks | 1.88 | 0.43 | 763,000 |
| | 解放基盤 | | 1.98 | 0.36 | 2,020,000 |

埋土に置換
している層

埋土に置換している層

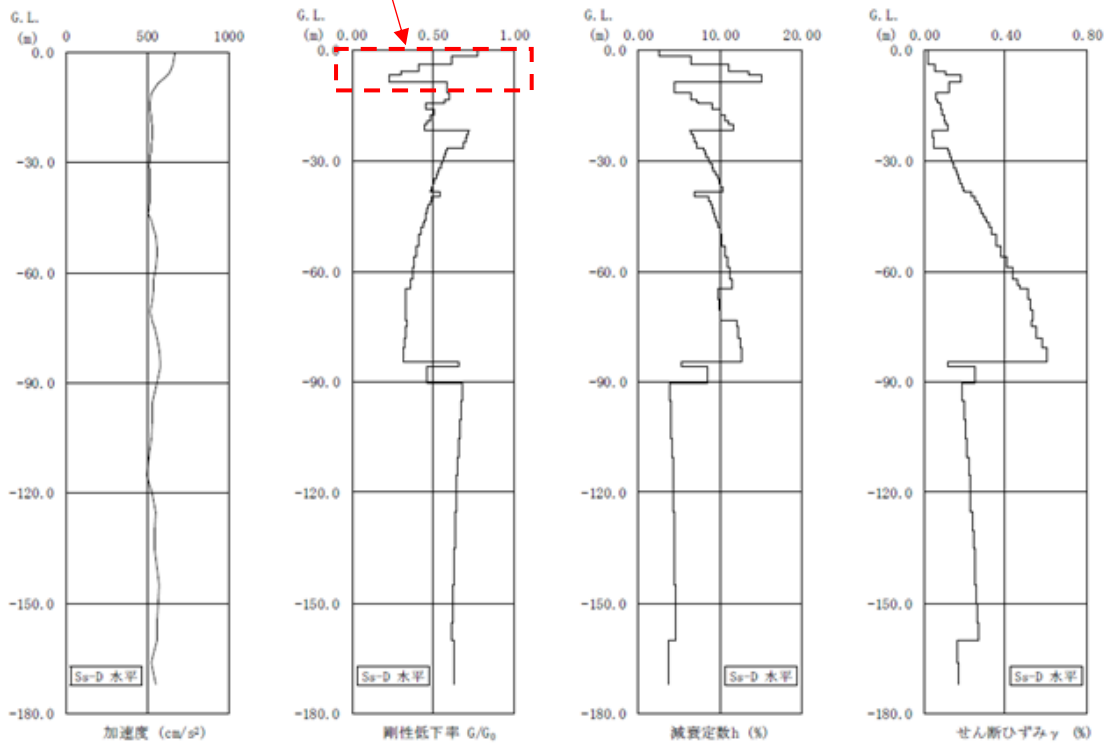
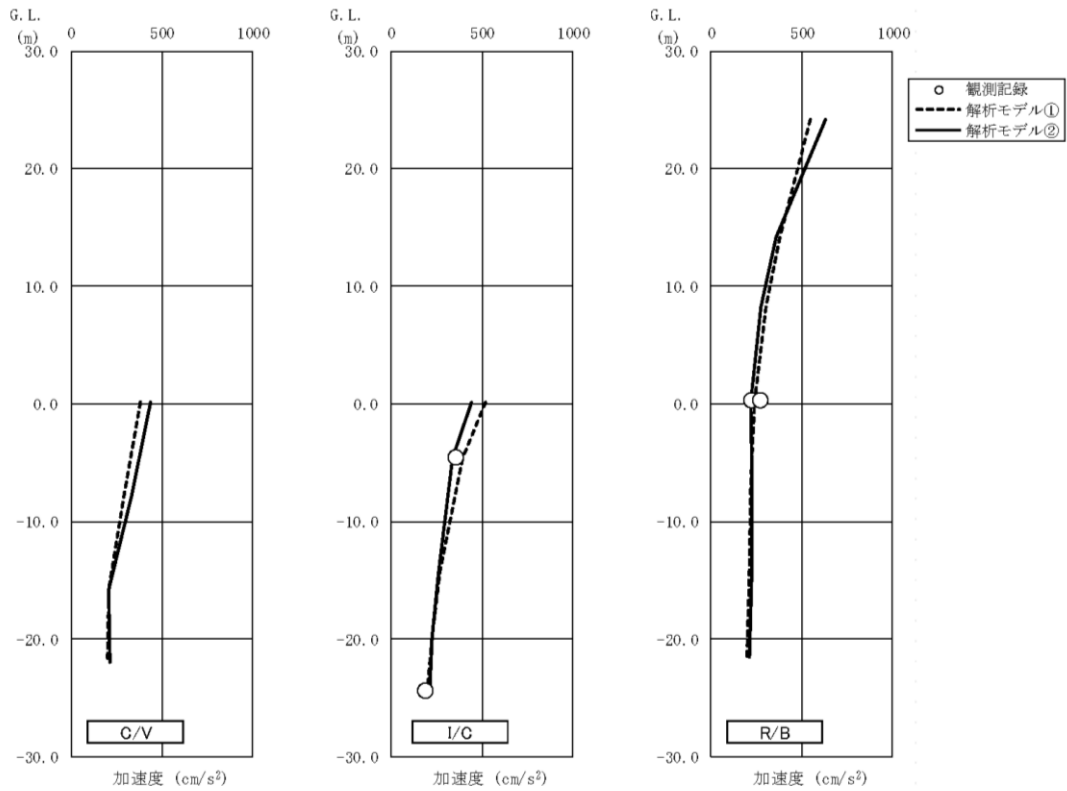
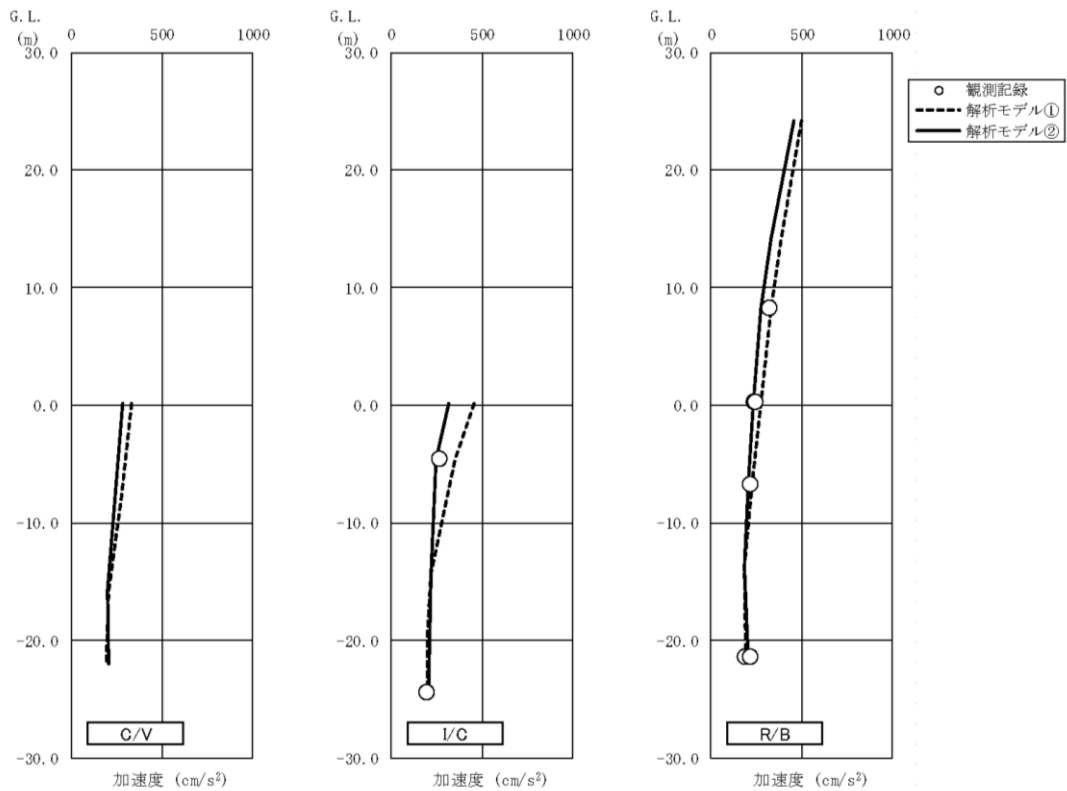


図 3 地盤の地震応答解析結果(水平方向、Ss-D)
(第 4 回設工認 添付書類 1-2-1 第 3.4 図抜粋)



(NS 方向)



(EW 方向)

図 4 最大応答加速度の比較(3.11 地震)
 (第 4 回設工認 添付書類 1-2-1-1 第 6 図抜粋)

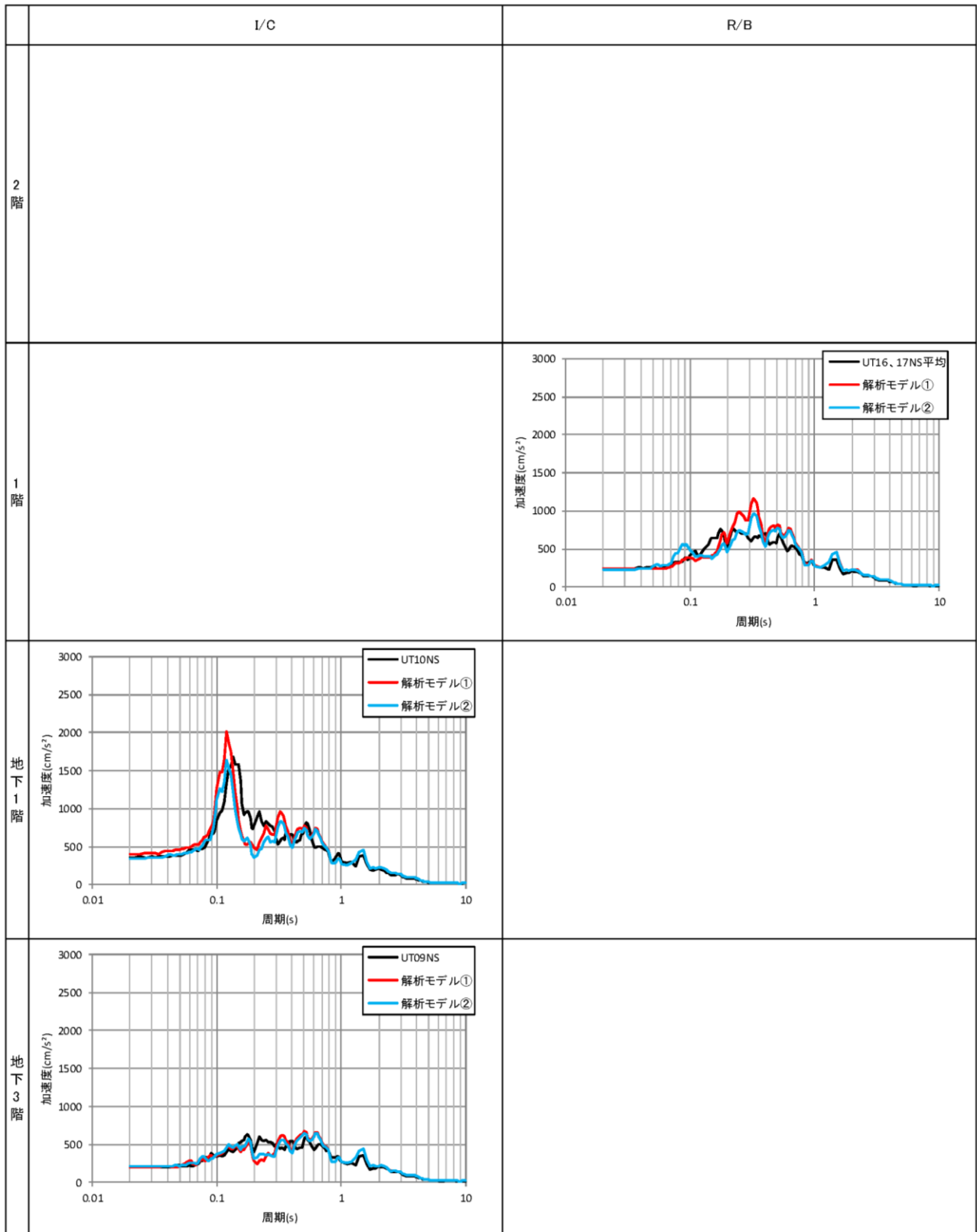


図5 加速度応答スペクトルの比較(3.11地震、NS方向、h=0.05)
(第4回設工認 添付書類 1-2-1-1 第7図抜粋)

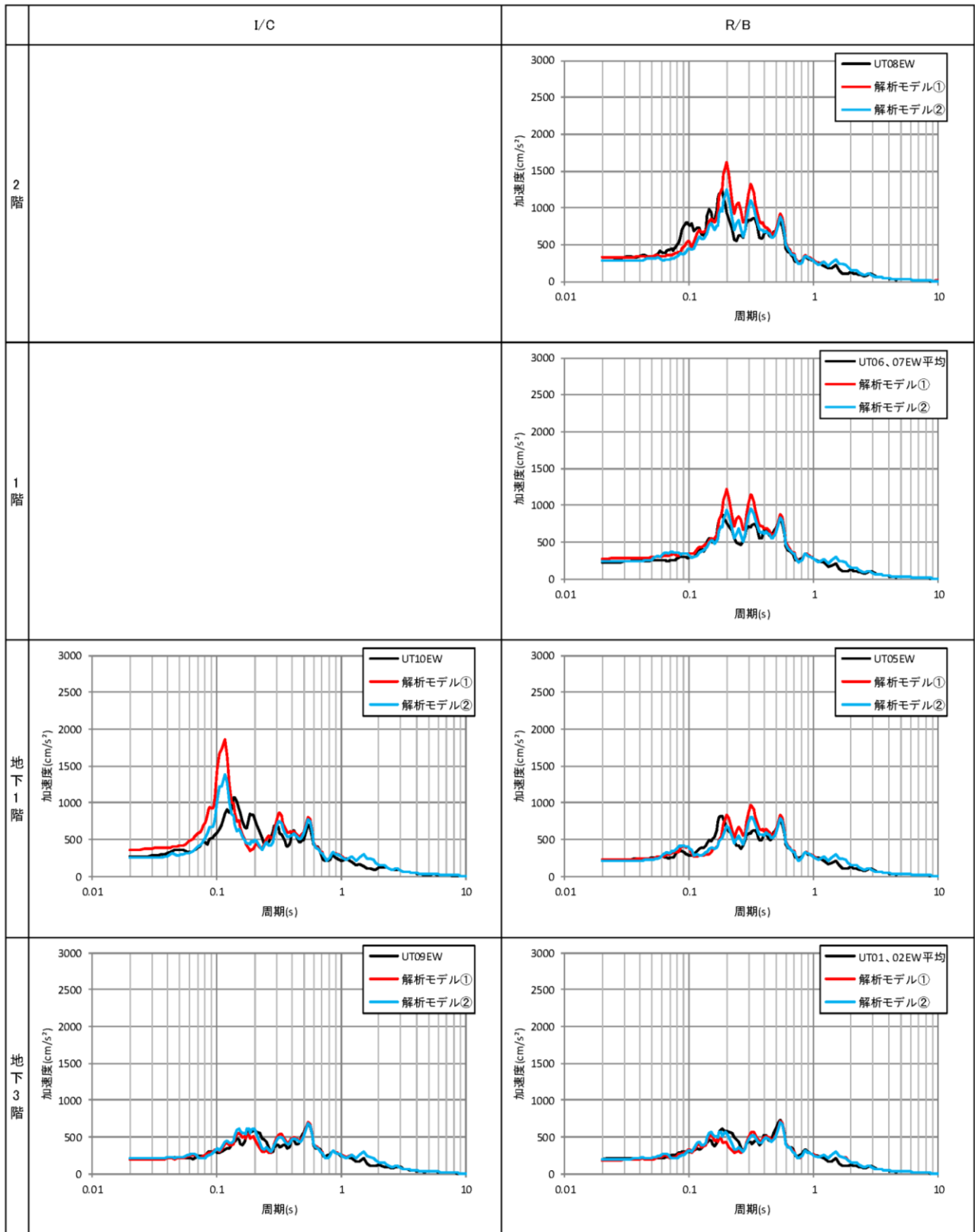


図6 加速度応答スペクトルの比較(3.11地震、EW方向、h=0.05)

(第4回設工認 添付書類 1-2-1-1 第8図抜粋)

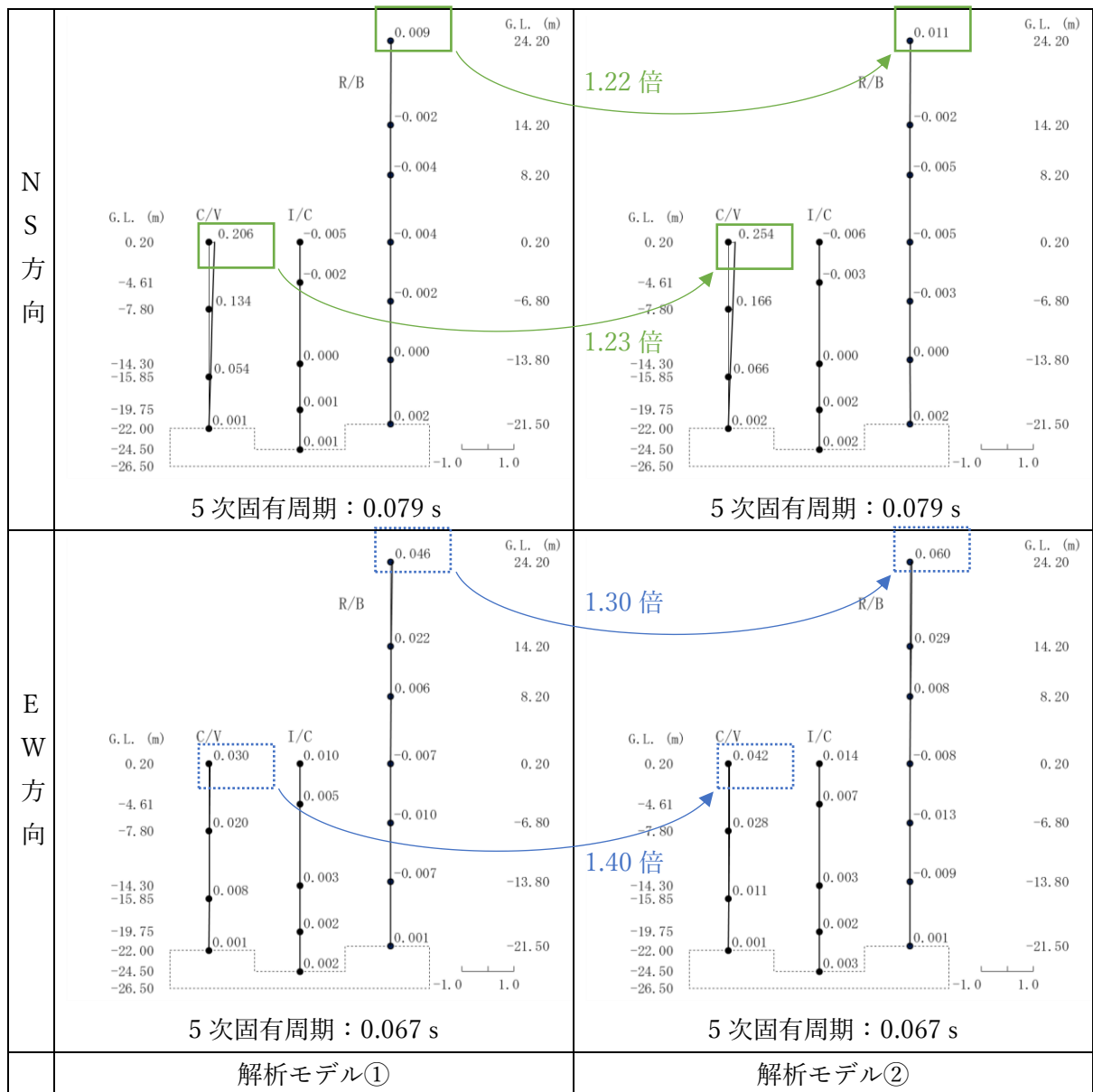


図7 刺激関数(5次、3.11地震)

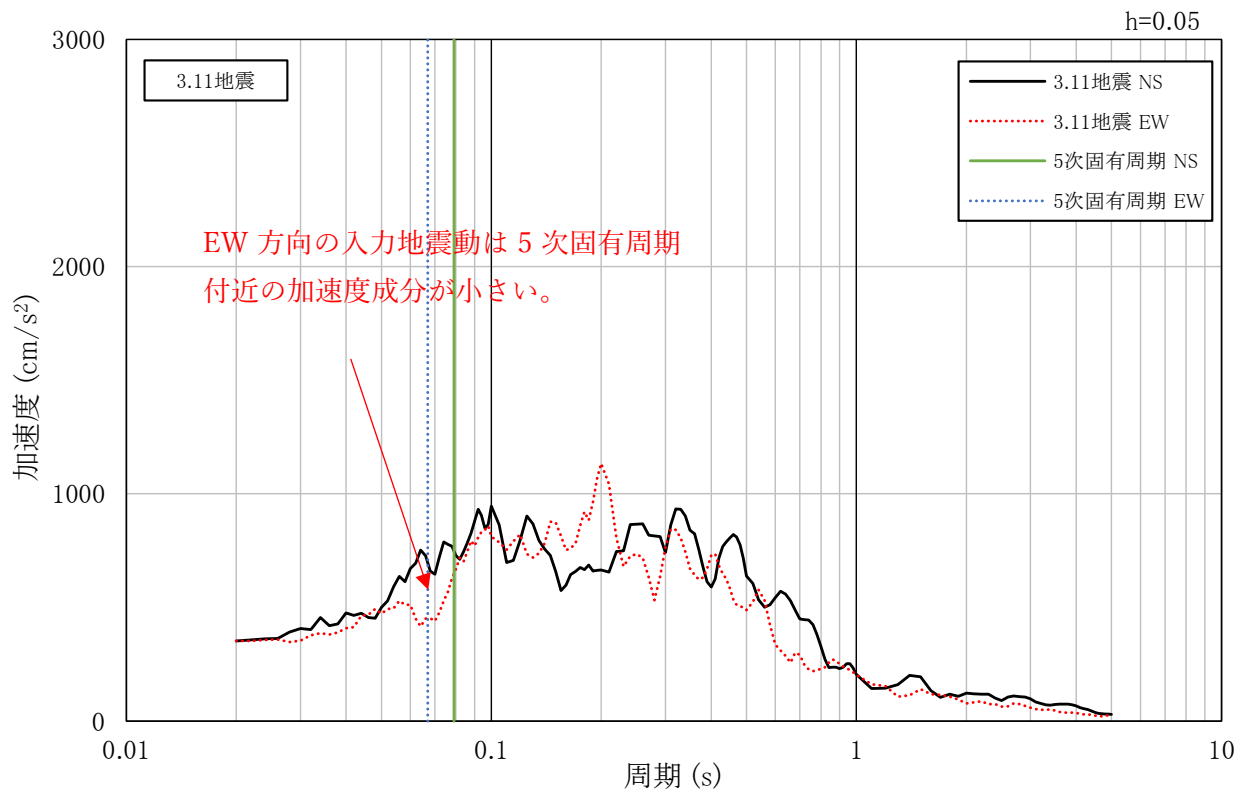


図8 入力地震動の加速度応答スペクトル(3.11地震)

2. 耐震健全性評価に用いている応答倍率法による評価の適用の妥当性について

1. 応答倍率法について

応答倍率法は、既往評価で得られた応力評価結果を用いる評価手法であり、固有周期における既往評価時と再評価時の床応答スペクトルの応答比を既往の応力評価結果に乗じることで耐震評価を実施するものである。

応答倍率法の方法は大きく 2 つあり、既往の耐震評価で得られた「地震時の応力」と「地震時以外の応力」を合わせた全応力に応答比を乗じて発生値を算出する方法(方法 1)及び「地震時の応力」のみに応答比を乗じて発生値を算出する方法(方法 2)がある。

応答比の算出方法は、評価対象設備の固有周期における再評価時及び既往評価時の水平震度、鉛直震度を用いて、別紙 1 に示す算出式により算出する。

2. 既に認可が得られた設工認(既往の設工認)について

応答倍率法に用いる既往評価は、既往の設工認の耐震評価結果とする。既往の設工認は、当時の科学技術庁に対して耐震解析の技術的内容や評価結果の妥当性を説明し認可を受けた(平成 3 年(第 1 回申請、2 安(原規)第 733 号))～平成 5 年(第 5 回申請、5 安(原規)第 84 号))。したがって、既設工認の評価結果を用いることは妥当である。

3. 保守性について

応答比の一般的な算出方法は、評価対象設備の固有周期における水平震度、鉛直震度を、既往評価時及び再評価時の地震動から読み取り算出する。また、配管のような複数の固有周期のモードを有し、複数の固有周期における震度を考慮する必要がある評価対象設備では、各周期のうち最大となる応答比を算出する。また、床置き機器等のような固有周期の 1 次モードが支配的になる評価対象設備では、固有周期の 1 次モードから応答比を算出する。一方、HTTR では、一部「地震時の応力」が支配的になる機器・配管があり、応答倍率法による解析の保守性を担保するために、全ての機器・配管に対して評価対象設備の固有周期を用いず、1 次モードから短周期の中で応答比が最大となる周期における震度を読み取り、応答比を算出する(別紙 2 参照)。

応答倍率法は方法 1 及び方法 2 があり、一般的により保守性を有している方法 1 が採用されている。一方、HTTR では、方法 1 及び方法 2 の両評価を実施し、両評価結果が評価基準値を満足することを確認する(別紙 3 参照)。

上記を考慮した応答倍率法と詳細解析の結果の比較を別紙 4 に示す。別紙 4 の表に示すとおり、HTTR で用いる応答倍率法による解析結果は、詳細解析よりも大きな値となっている。

4. 既往の設工認の評価手法で用いた地震動について

4.1 既往の設工認で床応答スペクトルを用いて評価した場合

応答倍率法の応答比は、基本的に床応答スペクトルを比較することにより算出する。この場合、既往の設工認で用いた床応答スペクトルと今回申請した設工認の床応答スペクトルによって応答比を算出する。この

ため、この場合に応答倍率法による評価を用いることができると考える。

4.2 既往の設工認で時刻歴応答解析及び静的解析により得られた大きい方の地震力を用いて評価した場合

既往の設工認において、時刻歴応答解析と静的解析で得られた加速度を比較し、大きい方(設計震度)を用いて応力計算を実施した。この場合、既往の設工認の設計震度は床応答スペクトルの震度よりも大きいため、床応答スペクトルを用いた評価よりも大きな応力が得られる。そのため、既往の設工認の床応答スペクトルと今回申請した設工認の床応答スペクトルによって応答比を算出し、その応答比を設計震度で得られた応力に乗じて評価することは保守的な評価である。このため、この場合に応答倍率法による評価を用いることができると考える。

4.3 既往の設工認で定ピッチスパン法を用いて評価した場合

既往の設工認の定ピッチスパン法は、制限振動数を 4.5Hz(0.22 秒)として、当該振動数における床応答スペクトル(谷埋めあり)の加速度を用いて応力を算出した。今回申請した設工認では、1 次周期から長周期側も含めた全周期(0.02 秒~2.0 秒)において、既往の設工認の床応答スペクトル(谷埋めなし)と今回申請した設工認の床応答スペクトル(谷埋めなし)によって応答比を算出する。この応答比の算出方法は、0.22 秒から短周期において、既往の設工認の床応答スペクトル(谷埋めなし)と今回申請した設工認の床応答スペクトル(谷埋めあり)によって算出した応答比よりも大きくなる。このため、この場合に応答倍率法による評価を用いることができると考える。

4.4 既往の設工認で時刻歴加速度を用いて評価した場合

応答倍率法を用いて評価した設備のうち、既往の設工認で時刻歴応答解析を用いて評価した設備は、圧力容器基礎ボルト、広領域中性子束検出器、炉内構造物、制御棒、制御棒駆動装置及び後備停止系駆動装置である。これらの設備に対しては、スペクトルモーダル法では評価できない積層に積まれた炉内構造物の非線形挙動を評価するために、時刻歴応答解析を実施する。評価の流れは、まず原子炉建家モデルで得られた時刻歴変位を原子炉圧力容器モデルに入力し、つぎに原子炉圧力容器モデルで得られた時刻歴変位等を炉内構造物モデルに入力する(図 1 参照)。

既往の設工認において、原子炉圧力容器モデル及び炉内構造物モデルを用いた時刻歴応答解析で最大応答加速度等を出し、得られた最大応答加速度等を用いて線形解析により応力評価を実施した。今回申請した設工認でも、非線形影響を考慮するために時刻歴応答解析を実施し、最大応答加速度等を出した。得られた最大応答加速度等を用いて応力評価を実施するために、既往の設工認及び今回申請した設工認の最大応答加速度等によって応答比を算出している。このため、この場合に応答倍率法による評価を用いることができると考える。今回申請した設工認の時刻歴応答解析を用いた応答倍率法による評価の流れを図 2 に示す。

5. 今回申請した設工認における評価箇所について

5.1 機器について

既往の設工認において、容器、ポンプ類、ユニット機器等の床置き機器等の評価箇所は、JEAG4601 に

基づき評価箇所を定めた。今回申請した設工認においても、同様に JEAG4601 に基づいて評価箇所を定めているため、評価箇所は変わらない。

既往の設工認において、圧力容器基礎ボルト、広領域中性子束検出器、制御棒等の評価箇所は、各部材の主要部分及び構造上の特徴から最大応力の発生箇所と判断された箇所である。そのため、今回申請した設工認においても評価箇所は変わらない。

既往の設工認において、炉心支持板、炉心支持格子、サポートポスト、固定反射体等の炉内構造物の応力は、炉内構造物モデルの時刻歴応答解析で得られた最大応答値を入力値として、線形弾性解析により求めた。各部材の最大応力は線形弾性解析により求めることから、解析入力値と発生応力値は比例関係にあるため、最大応力の発生箇所に変化はない。そのため、今回申請した設工認においても、評価箇所は変わらない。

5.2 配管系について

配管の最大応力は、配管の形状、構造等を反映して、エルボ部、分岐管部、支持部に発生すると考える。そのため、今回申請した設工認においても、配管の形状、構造等を反映して同様の評価箇所としている。

6. 地震による応答変位について

応答倍率法による評価では、既往の設工認で得られた一次応力及び二次応力を含めた全ての発生応力に対して応答比を乗じて、新たな地震動による発生応力を算出するものである。二次応力の大きさは、地震動の大きさと相関関係にあるため、FRS の応答比により二次応力を含めた発生応力を算出できると考える。

7. 時刻歴応答解析による非線形影響について

応答倍率法を用いて評価した設備のうち既往の設工認で時刻歴応答解析を用いて評価した設備は、上述のとおり、非線形挙動を評価した時刻歴応答解析の評価結果を用いて応答比を算出する。そのため、今回申請した設工認では、時刻歴応答解析による非線形影響を考慮しているため、応答倍率法による評価を用いることができると考える。

8. 裕度について

耐震性の評価に用いる許容値は、別紙5に示すとおり、実際の材料強度と比べて裕度を有している。そのため、応答倍率法による評価で得られた計算値と許容値を比較し、計算値が許容値を下回れば耐震裕度を有する。

9. 応答倍率法による評価と詳細評価の使い分けについて

応答倍率法による評価は、簡易かつ保守的な評価である。そのため、まず、建設当時と評価手法が異なるものを除き全ての評価対象設備に対して応答倍率法による評価を実施する。つぎに、応答倍率法による評価で許容値を満足しない評価対象設備に対して詳細評価を実施する。

10. まとめ

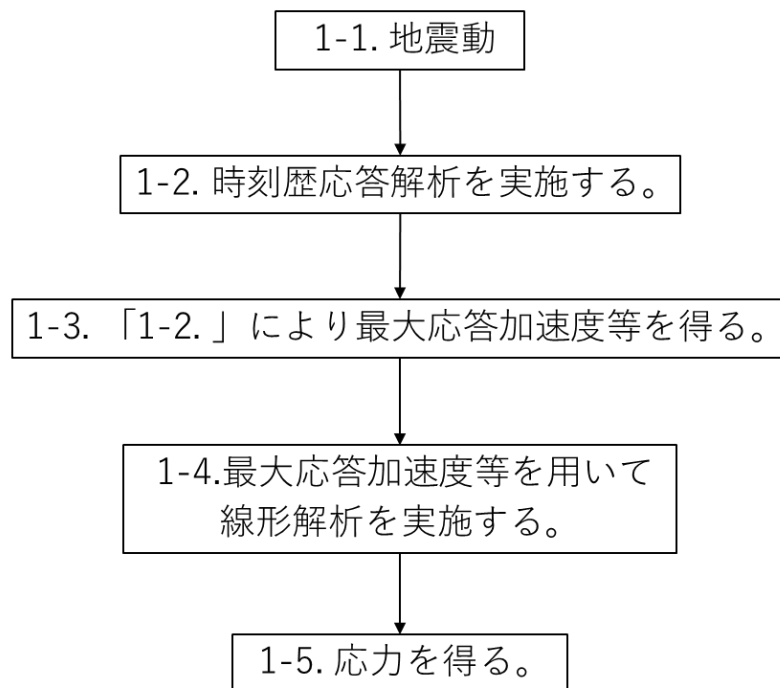
既設の機器・配管に対して耐震評価手法として用いる応答倍率法は、既往の設工認の正当性及び評価結

果の保守性を有していることから、耐震評価で用いることは妥当である。

核物質防護情報が含まれているため公開出来ません。

図 1 炉内構造物等に対する評価の流れの概念図

1. 既往の設工認



2. 今回申請した設工認

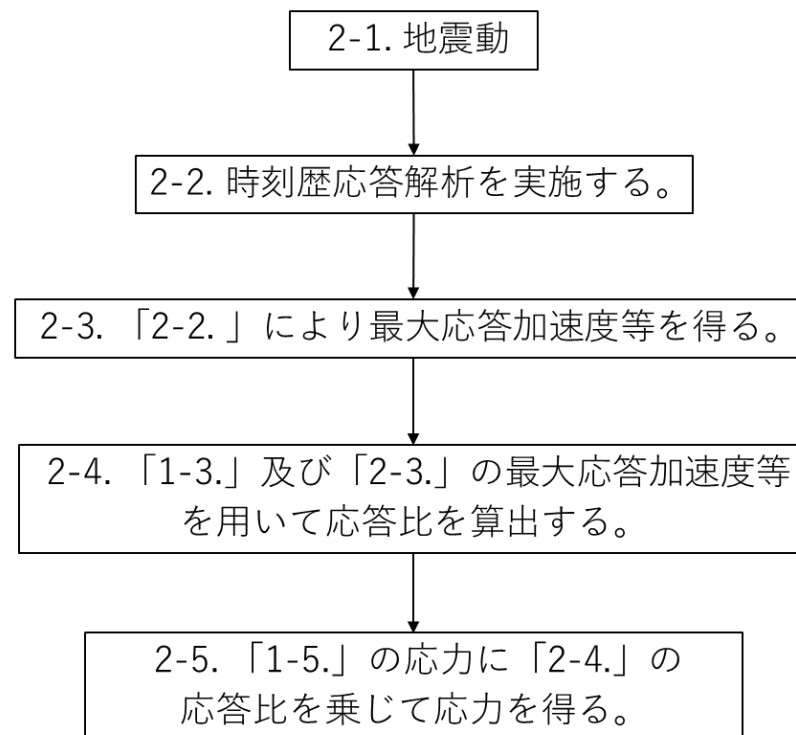


図2 今回申請した設工認の時刻歴応答解析を用いた応答倍率法による評価の流れ

一般的な応答比の算出について

応答倍率法による耐震評価で用いる応答比の算出方法を示す。応答比は、分母を既往評価時の床応答スペクトルにおける水平震度と鉛直震度の二乗和平方根(SRSS)より算出し、分子は再評価時の床応答スペクトルより算出する。

$$\frac{\sqrt{C_H^2 + (1+C_V)^2}}{\sqrt{C_{H0}^2 + (1+C_{V0})^2}} \quad : \text{方法 1 の応答比} (\alpha_1)$$

$$\frac{\sqrt{C_H^2 + C_V^2}}{\sqrt{C_{H0}^2 + C_{V0}^2}} \quad : \text{方法 2 の応答比} (\alpha_2)$$

C_H : 再評価時の地震動の水平震度(図 1 参照)

C_V : 再評価時の地震動の鉛直震度(図 1 参照)

C_{H0} : 既往評価時の地震動の水平震度(図 1 参照)

C_{V0} : 既往評価時の地震動の鉛直震度(図 1 参照)

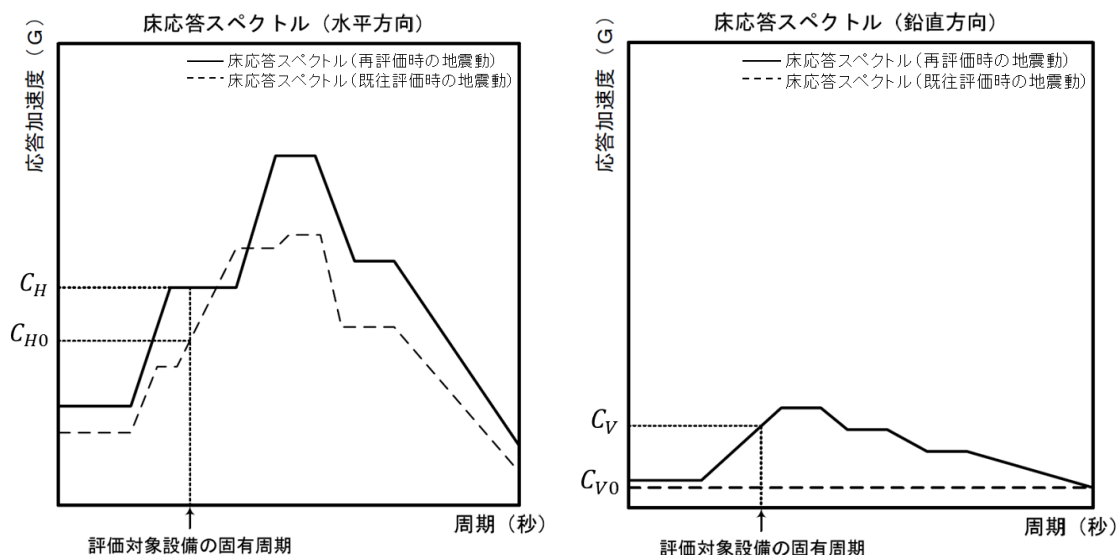


図 1 再評価時と既往評価時の床応答スペクトルの例

保守的な応答比の算出について

応答比は一般的に評価対象設備の固有周期における震度を用いて算出している(図1参照)。なお、複数の固有周期における震度を考慮する必要がある評価対象設備では、各周期のうち最大となる応答比を算出する。すなわち、3つの赤丸の周期の中から最大となる応答比を算出する。一方、HTTR では、応答倍率法による解析の保守性を担保するために、評価対象設備の固有周期を用いず、1次周期から短周期の中で応答比が最大となる周期における震度を用いて応答比を算出する。すなわち、赤の点線で示した中で最大となる応答比を算出する。

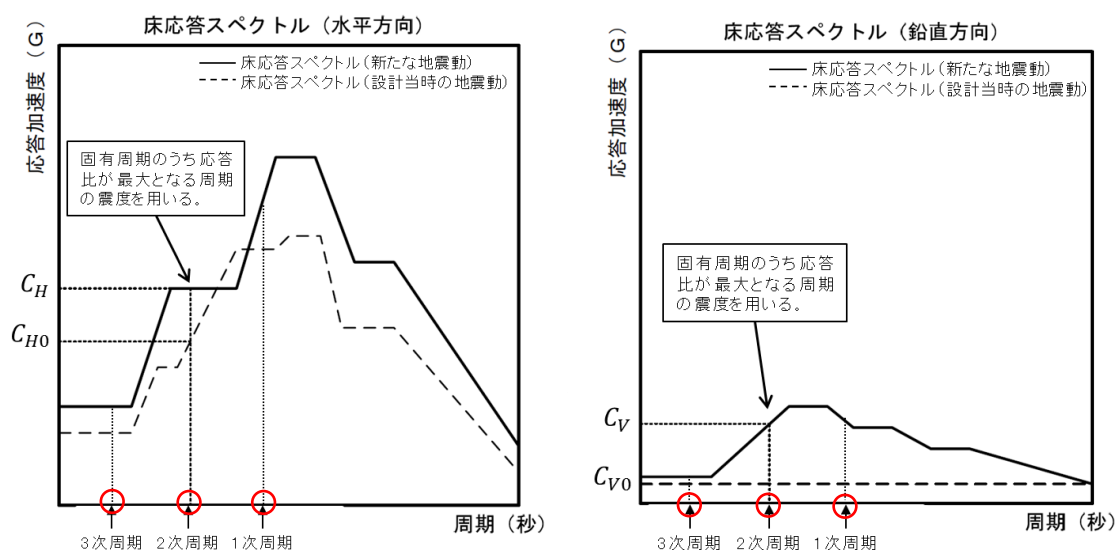


図1 一般的な応答比の算出

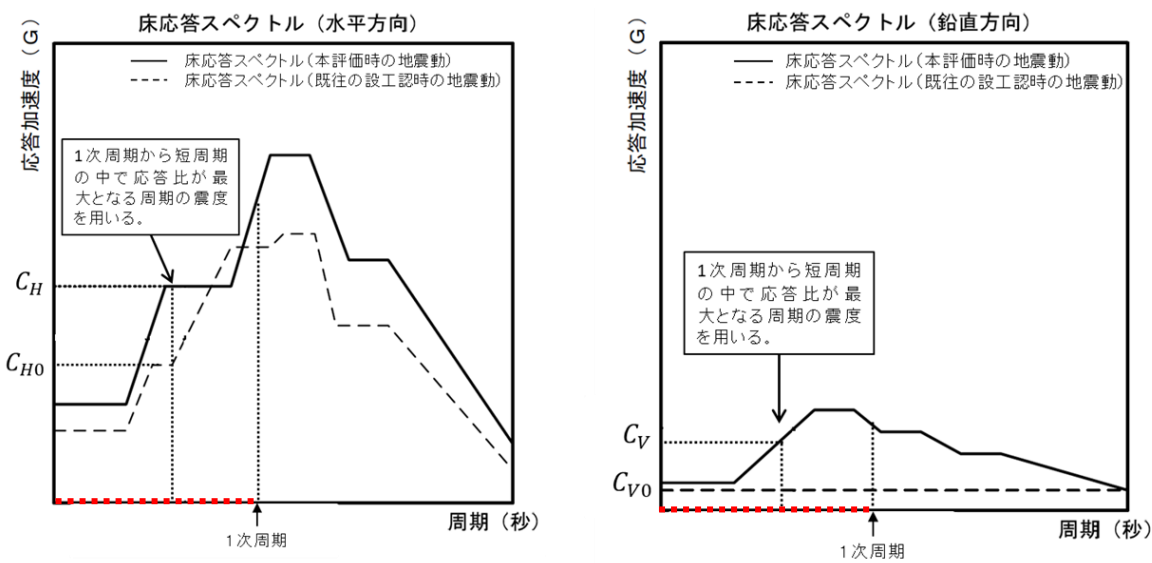


図2 HTTR が用いる応答比の算出

応答倍率法による応力の算出方法について

応答倍率法は、以下の式により発生応力を算出する。

$$\sigma = (\sigma_a + \sigma_b) \times \alpha_1 \quad \text{方法1による算出方法}$$

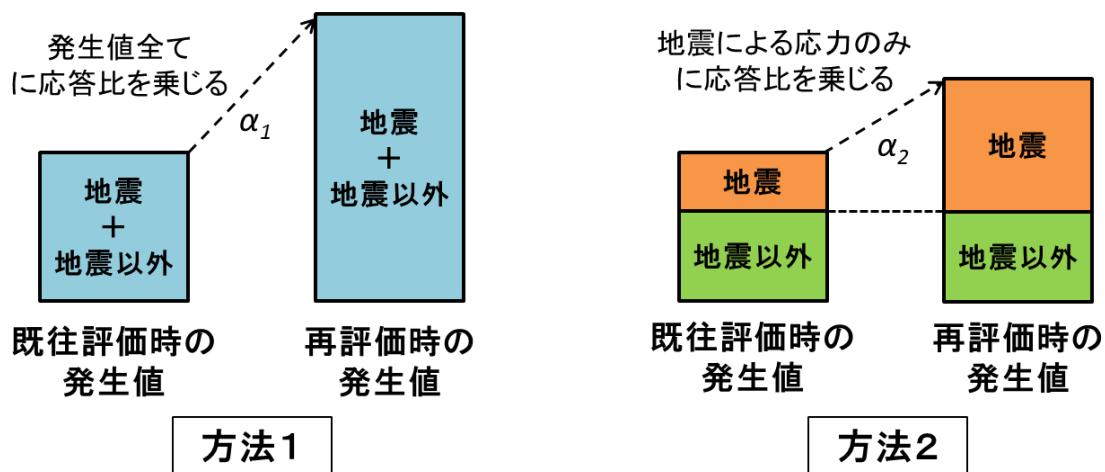
$$\sigma = \sigma_a \times \alpha_2 + \sigma_b \quad \text{方法2による算出方法}$$

ここで、

- σ : 再評価での発生応力
- σ_a : 既往評価での地震時の応力
- σ_b : 既往評価での地震時以外の応力

$$\alpha_1 : \text{方法1の応答比} \quad \frac{\sqrt{C_H^2 + (1+C_V)^2}}{\sqrt{C_{H0}^2 + (1+C_{V0})^2}}$$

$$\alpha_2 : \text{方法2の応答比} \quad \frac{\sqrt{C_H^2 + C_V^2}}{\sqrt{C_{H0}^2 + C_{V0}^2}}$$



応答倍率法のイメージ図

注:地震以外の発生値とは、自重、内圧等による応力である。

詳細解析(スペクトルモーダル解析法)との比較について

HTTR で用いる応答倍率法と詳細解析(スペクトルモーダル解析法)の解析結果の比較を示す。評価に用いた地震動は、平成 24 年 9 月に文部科学省に提出した「HTTR 原子炉施設の健全性確認に関する報告書」の地震動である。

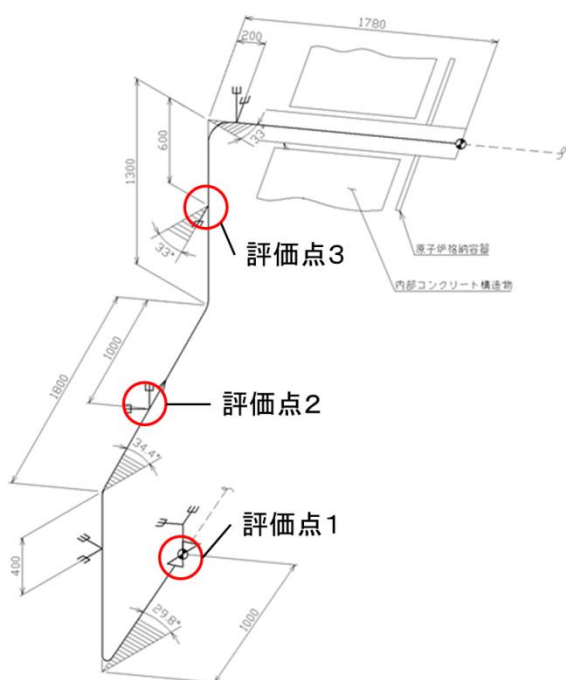


表 1 解析結果の比較(配管)

| 評価点 | 分類 | 詳細解析の結果 [MPa] | 応答倍率法の結果 [MPa] |
|-----|-------|---------------|----------------|
| 1 | 1次 | 23.8 | 103.3 |
| | 1次+2次 | 21.1 | 50.4 |
| 2 | 1次 | 29.3 | 85.6 |
| | 1次+2次 | 24.5 | 55.4 |
| 3 | 1次 | 34.4 | 60.5 |
| | 1次+2次 | 18.3 | 27.7 |

図 1 既設の配管図と評価点(配管)

以上より、HTTR で用いる応答倍率法による解析結果は、詳細解析よりも大きな値となっているため、既設の機器・配管等に対する耐震評価の手法として妥当である。

詳細解析(定式化された評価式を用いた解析法)との比較について

HTTR で用いる応答倍率法と詳細解析(定式化された評価式を用いた解析法)の解析結果の比較を示す。評価に用いた地震動は、平成 24 年 9 月に文部科学省に提出した「HTTR 原子炉施設の健全性確認に関する報告書」の地震動である。

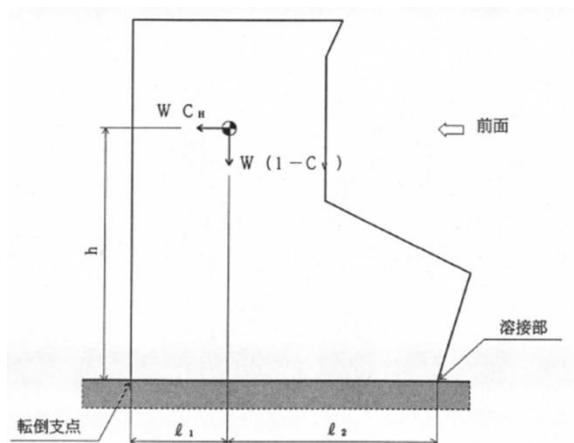


図 2 溶接の場合(盤)

表 2 解析結果の比較(溶接)

| 評価点 | 分類 | 詳細解析の結果 [MPa] | 応答倍率法の結果 [MPa] |
|-----|-----|---------------|----------------|
| 溶接 | 組合せ | 1.7 | 16.6 |

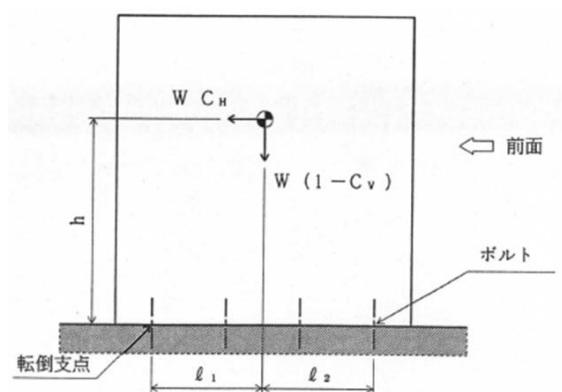


図 3 ボルトの場合(盤)

表 3 解析結果の比較(ボルト)

| 評価点 | 分類 | 詳細解析の結果 [MPa] | 応答倍率法の結果 [MPa] |
|-----|-----|---------------|----------------|
| ボルト | 引張 | 1.8 | 14.0 |
| | せん断 | 0.2 | 3.5 |

以上より、HTTR で用いる応答倍率法による解析結果は、詳細解析よりも大きな値となっているため、既設の機器・配管等に対する耐震評価の手法として妥当である。

許容値と材料強度について

材料強度の一般的な特性を示す応力-ひずみ線図を図1に示す。構造材料に加わる荷重により発生する応力は、図のように分類される。熱、内圧等の地震以外の荷重による応答に地震荷重による応答が加わり、地震時の構造材料に発生する応力が得られる。これを許容値と比較して、耐震性評価を行う。耐震性評価の許容値と材料強度の関係は、許容値は設計上の許容応力との余裕(②)に加えて、JSME 等の設計引張強さに対する余裕(①)がある¹⁾。したがって、耐震性評価で得られた計算値が許容値を下回れば耐震余裕度を有している。

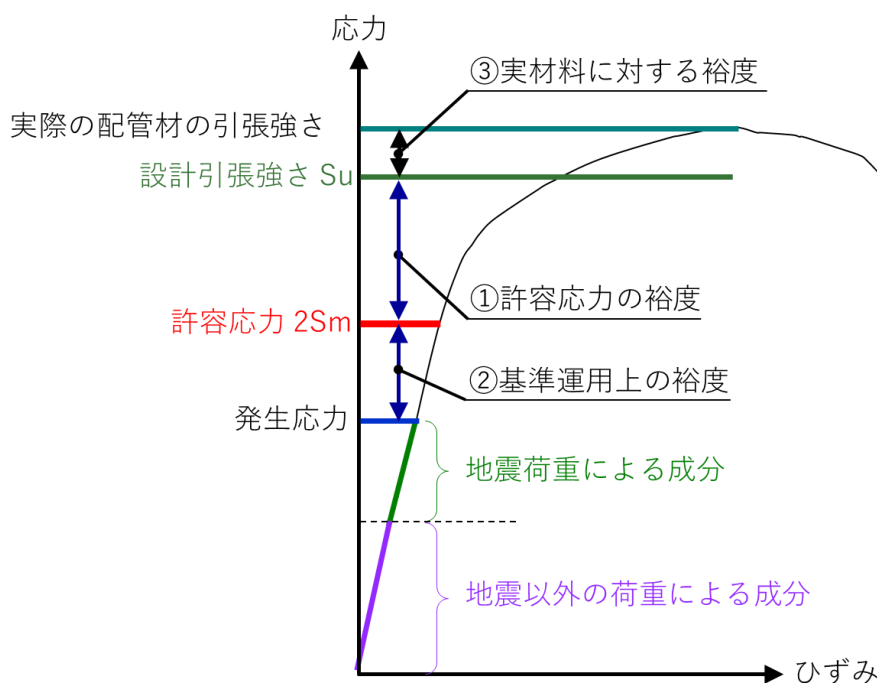


図1 配管の許容応力の例¹⁾

1) 日本機械学会、“中越沖地震の柏崎刈羽原子力発電所への影響評価研究分科会”、2008年6月。

3. 地震発生時及び地震発生後における制御棒の挿入性にかかる評価について

制御棒の挿入性にかかる評価について以下に説明する。

1. 地震時の制御棒の挿入性の考え方

設計基準事故と地震の重ね合わせとして、設計基準事故と重ね合わせる地震は B クラス地震(1/2Sd)であり、S クラス地震(Ss)とは重ね合わさない。このため、1/2Sd に対して、地震が発生している最中でも、制御棒の挿入性に係る設計上の制限値(有効炉心の 80%挿入時間 12 秒)を満足できることを制御棒挿入性試験により確認している。Ss に対して、炉内構造物の変位が発生することを想定しても、地震終了後に制御棒が挿入できることを静的挿入性試験により確認している。以下に、両者に関する試験の結果を示す。

2. 1/2Sd 時の制御棒の挿入性試験

制御棒挿入性試験は、HTTR の炉心のうち制御棒案内ブロック 1 カラムの高温プレナムブロックの上部を模擬して、加振台から吊下げた下部試験容器内に制御棒案内ブロック 1 カラム分を積み上げ、隣接するカラムは側部に設けた衝突板により模擬して実施した。入力波としては、水平方向の正弦波及び S1、S2 地震時及び 1.6S2 地震時(S2 地震時の加速度を 1.6 倍に増幅したもの)の高温プレナムブロック部における応答波を用いた。また、水平方向の 0.5 倍の加速度を有する垂直波の影響も調べた。

2.1 試験結果

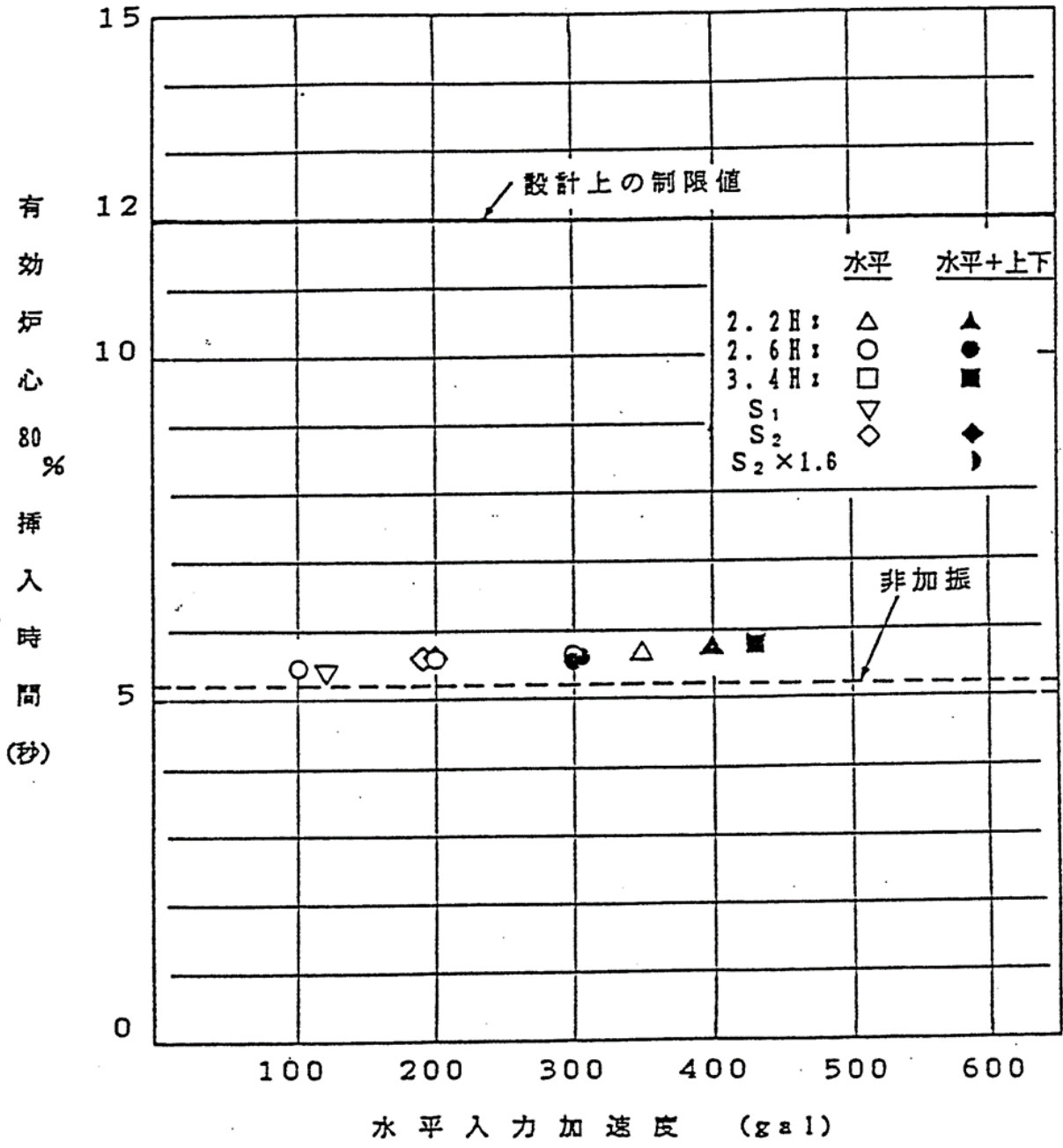
制御棒挿入性試験は、実施した全てのケースにおけるスクラム時の挿入時間は、設計上の制限値を満足した¹⁾。試験により得られたスクラム時間を図 1 に示す。

2.2 試験結果と 1/2Sd の加速度との関係

制御棒挿入性試験では、最大水平加速度約 400gal で試験を実施している。1/2Sd の高温プレナムブロック部における応答波の最大水平加速度は約 200gal である。そのため、1/2Sd 時でも設計上の制限値を満足する。

2.3 制御棒挿入孔と制御棒の接触による摩擦力(挿入抗力)に対する考え方

制御棒の挿入を遅延させる要因としては挿入中の制御棒と制御棒案内管との接触によって発生する摩擦力がある。黒鉛と金属材料の摩擦係数は金属同士の摩擦係数と比較して小さく、また図 2 に示すようにワイヤロープに吊られ、かつ制御棒挿入孔のギャップが約 10mm ある制御棒は、水平方向に拘束されていないため、接触箇所に対する垂直抗力は小さい。これらの理由により、発電炉と比較して、Ss までの範囲において摩擦力は小さく、制御棒挿入孔と制御棒の接触による挿入の阻害はない。



注) 地震波の水平入力加速度は入力加速度の最大値

図1 有効炉心 80%挿入時間¹⁾

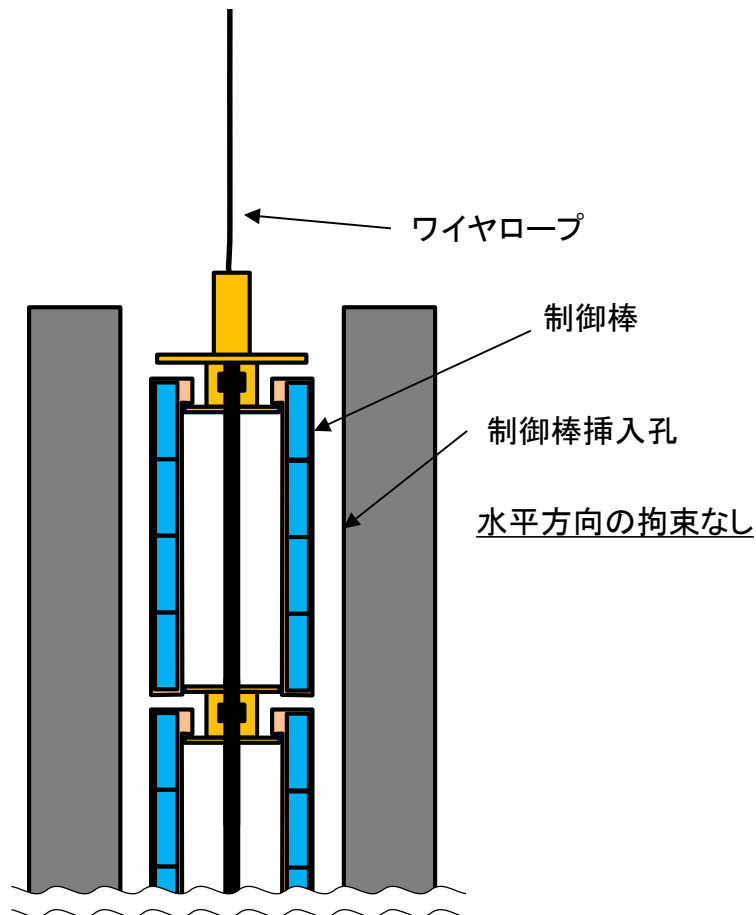


図 2 制御棒挿入孔における制御棒の状態

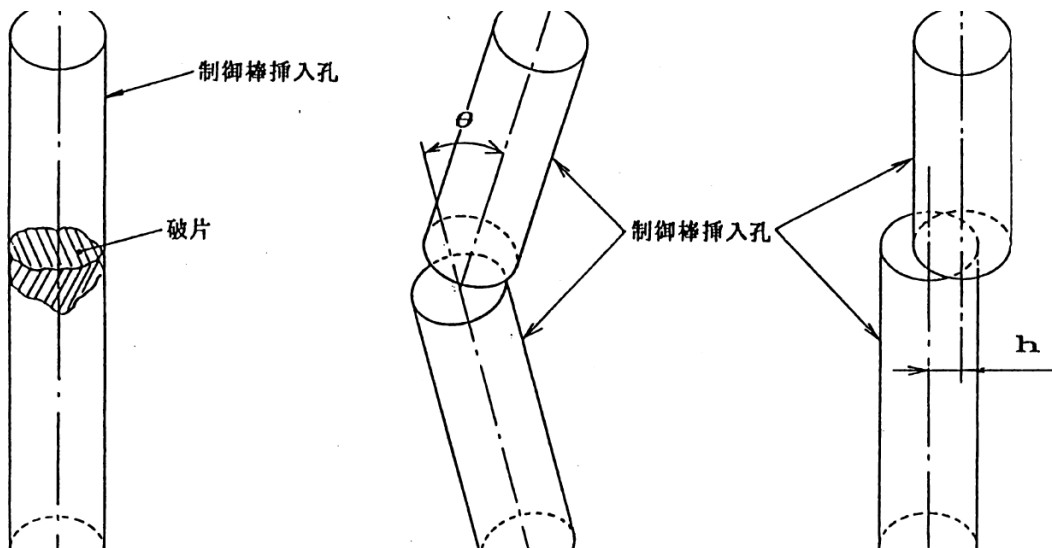
3. Ss の終了後の制御棒の静的挿入性について

Ss の終了後の制御棒の静的挿入性に関して、S クラス施設は健全性を維持し B クラス施設は破損することとし、制御棒と制御棒案内ブロックが最も相互作用する幾何学的配置となるように想定した。想定した最大変位量は約 26 mm(固定反射体ブロックが最大変位した値に各カラム間ギャップの積算値を加えた変位量)であり、このときの傾斜角は約 0.046(rad)である。また、静的挿入性試験では、最大挿入傾斜角 0.0877(rad)において、制御棒が挿入されたことを確認している。したがって、Ss の終了後に B クラス施設が破損したときの最大傾斜角を想定しても、制御棒は挿入される。

なお、制御棒の静的挿入性試験については、別紙 1(HT-193-3 まとめ資料(第 4 条:地震)より抜粋)に補足する。

4. 制御棒挿入孔の閉塞に対する考え方

重力落下する制御棒と黒鉛製の制御棒案内ブロックの摩擦による挿入の阻害は、2.3 に記したとおり無視できるため、制御棒の挿入を阻害する要因は、①制御棒挿入孔内に黒鉛ブロックの破片等が噛みこむ(閉塞)、②制御棒の可撓性を超える屈曲が制御棒案内ブロックに発生する(屈曲性)、③制御棒案内ブロックの水平方向のズレにより挿入孔が狭まる(不連続性)、3 つである(図 3)。



①挿入孔閉塞

黒鉛ブロックの破片が制御棒挿入孔を閉塞する。

②挿入孔屈曲

挿入孔傾斜角が制御棒の可撓性を上回る。

③挿入孔不連続

水平方向のズレhが制御棒先端と挿入孔のクリアランス以上となる。

図3 制御棒の挿入性が確保できなくなる可能性のある挿入孔の状態

①については、黒鉛ブロックの挿入孔は基準地震動による地震力によって破損しないとの評価を得ていること、また②については拘束バンド等が破損した場合に生じる最大の屈曲性を考慮しても制御棒の可撓性により挿入できるとの評価を、これまでに説明してきている。

③については共振周波数に対しては炉心全体の変位は大きくなるが、ブロック全体が群として振動するため、制御棒案内ブロックは隣り合う単一の黒鉛ブロックと接するため大きな上下で大きな変位は生じない。挿入性は確保され、閉塞することなく落下する。また共振周波数以外に対しては図4に示すようなズレを生じうるが、制御棒先端にあるショックアブソーバーのもつテーパ構造により、挿入性は確保され、閉塞することなく落下する。

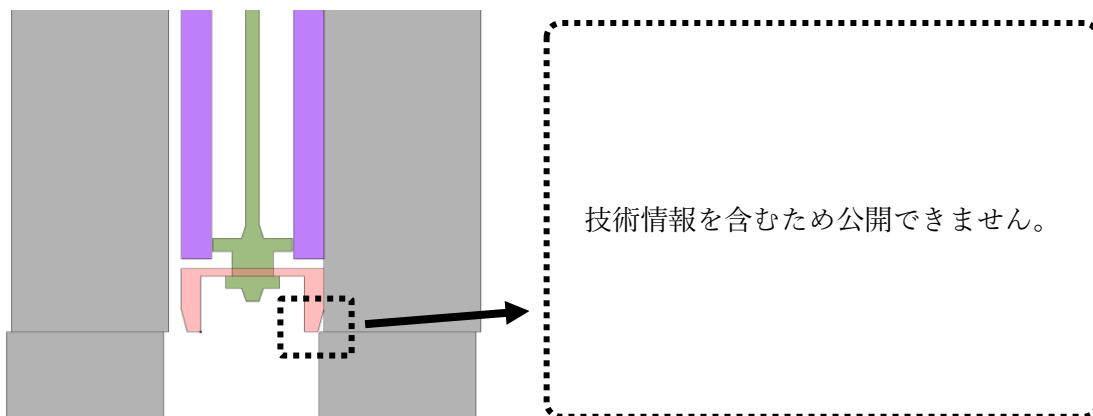


図4 ブロックの不連続性

以上により、地震によって制御棒は制御棒案内ブロック内で振動するものの、制御棒の可撓性およびテーパ構造等により、挿入性は確保され、閉塞することなく落下する。

- 1) 「IV-ニ-12 制御棒の耐震計算書」(設計及び工事の方法の認可(第4回申請)平成4年9月30日付け4安(原規)第312号)

制御棒挿入孔の連続性について

制御棒は、炉心構成要素の一部の制御棒案内ブロックの制御棒挿入孔に挿入される(図 1)。HTTR の炉心は、六角柱状の黒鉛ブロック群で構成された積層構造をしている。これら炉心構成要素は、高温プレナムブロックを介して、サポートポストにより支持されている。地震時、サポートポストの支持機能が維持されていれば、制御棒案内ブロック等の炉心構成要素は、高さ方向において元の位置に留まり、制御棒挿入孔が高さ方向で不連続となることはない。そのため、制御棒挿入性上評価すべき問題は、炉心構成要素の水平方向の動きである。

構造上、炉心全ての炉心構成要素の黒鉛ブロックは六角柱状であるとともに、最下段の制御棒案内ブロックは隣接する燃料体ブロックより 10 cm 低くしている。このため、炉心内の黒鉛ブロックは、炉心横断面の方向及び炉心縦断面の方向に拡散するように動く。図 2 に示すように、縦断面においては、①のブロックが変位した場合、隣接するブロックが 10 cm の段差をつけているため上下に広がって動き、また、横断面においては、①のブロックが変位した場合、黒鉛ブロックが六角柱状であるため、左右に動きが広がって動く。

地震時において、最も制御棒の挿入が阻害される事象は、制御棒案内ブロックの水平変位量が最大となった時に、制御棒の挿入孔が屈曲することで、挿入される制御棒要素に抵抗力が働くときである。炉心の振動特性は、横からの地震の入力により炉心全体が振動し、周波数が 2~5Hz の帯域で、制御棒案内ブロック(カラム)や燃料体ブロック(カラム)が一体となって振動する。この時が、制御棒案内ブロックの水平変位量が最大となる。ここで、炉心形状から静的に制御棒案内ブロックの水平変位量が最大になったとしても、制御棒が挿入されることを静的試験により確認している。(別添資料参照)

また、制御棒案内ブロックに作用する地震荷重に対して、制御棒挿入孔が制御棒を挿入できる形状を維持していることのみを確認する。

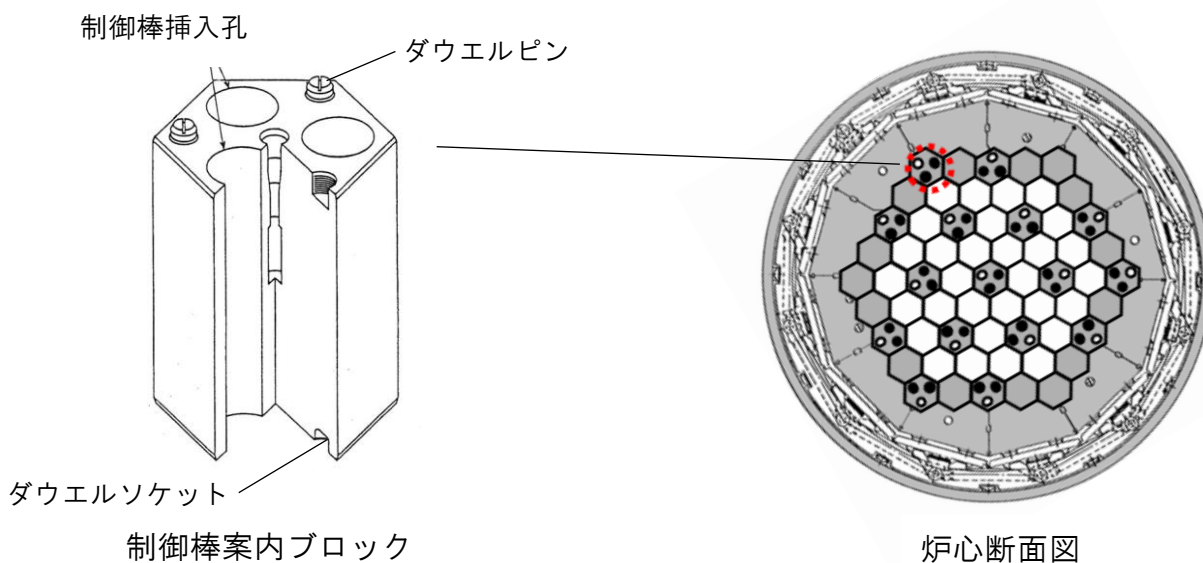


図 1 制御棒案内ブロック及び炉心断面図

あるブロックが水平に動くと、高さ方向及び横方向に広がり、制御棒案内ブロックはその上下左右のブロックと一体となって運動する。制御棒挿入孔は、梁のように連続体として水平方向に運動する。

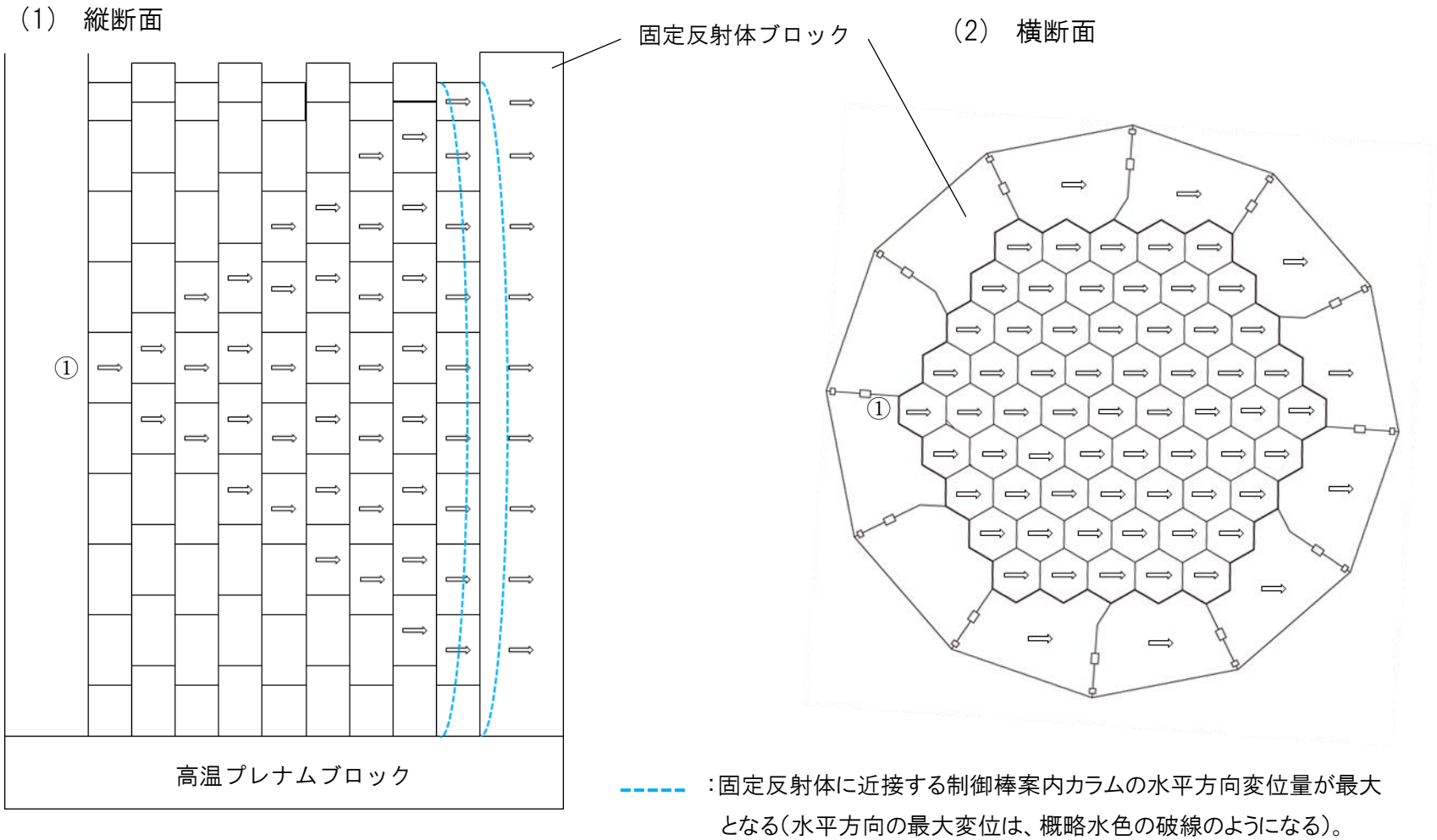


図2 水平方向のブロックの動き

水平方向変位時の制御棒挿入性

制御棒を挿入する際、制御棒挿入孔が弓なりになり変形し、その屈曲点が最も厳しくなる。即ち図1の屈曲角 θ が大きくなる程、制御棒は挿入しづらくなる。

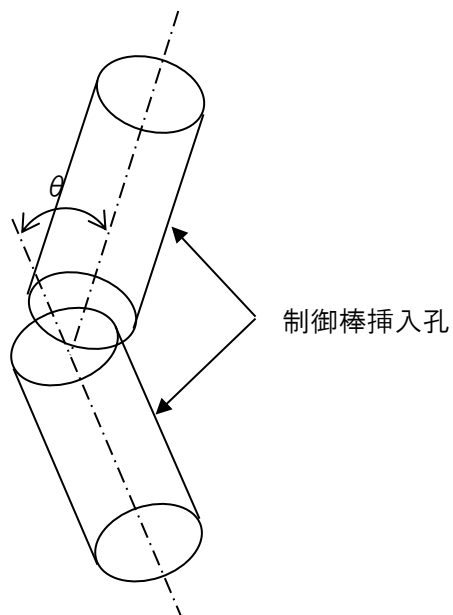


図1 制御棒挿入孔の状態図

屈曲角が物理的に最大となる条件は、拘束バンドが破損し、固定反射体ブロックが最大変位した値に各コラム間ギャップの積算値を加えた時(約 26 mm)である。(図 2)

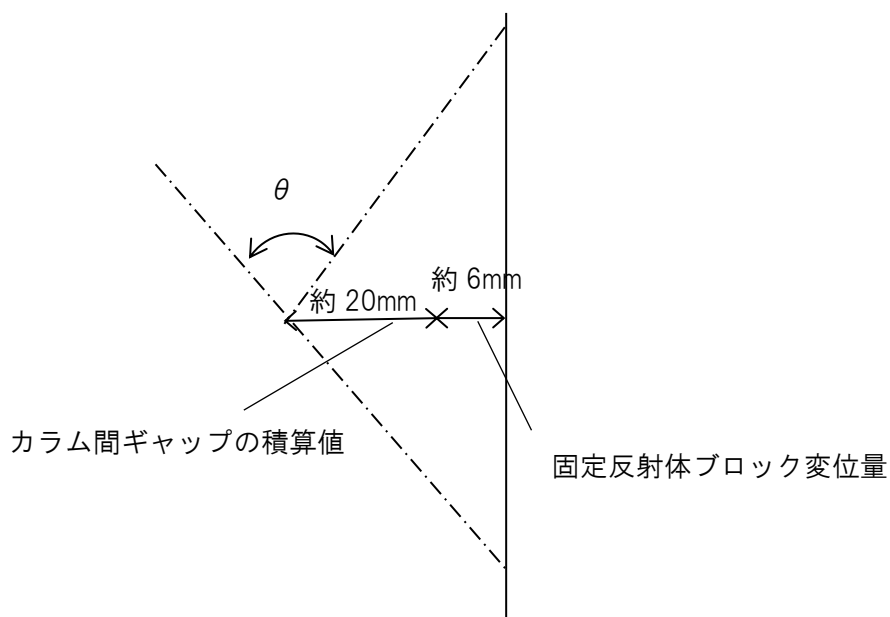


図2 想定される制御棒案内ブロック

$$\theta \cong 4(D_0 - D)/h \text{ (rad)}$$

- ここで、 D_0 : 挿入孔径(=123mm)
 D : 制御棒の最外径(=113mm)
 h : 制御棒要素長(=304mm)
 θ : 限界挿入孔傾斜角(=0.131rad)

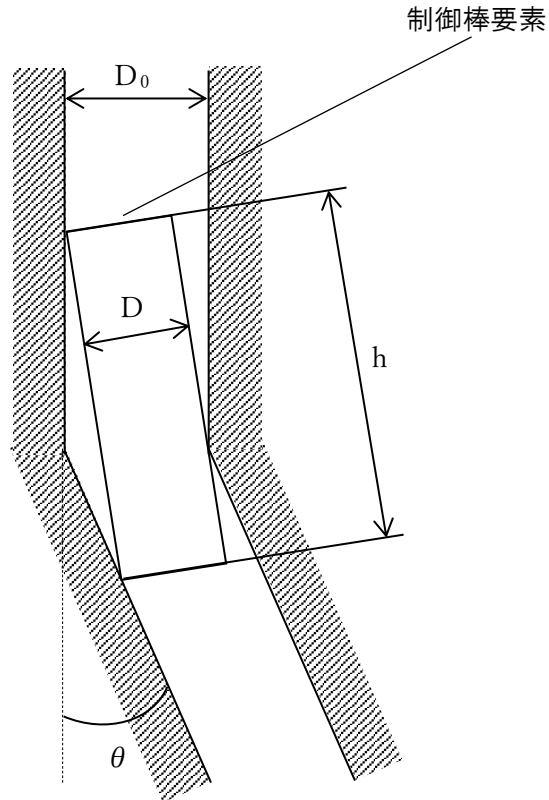


図 3 制御棒要素の限界挿入孔傾斜角

図 3 に幾何学的に制御棒が挿入される限界挿入角(=0.131rad)を示す。また、静的挿入性試験では、最大挿入傾斜角 0.0877(rad)において、制御棒が挿入されたことを確認している。

一方、拘束バンドが破損し、固定反射体ブロックが最大変位した値に各カラム間ギャップの積算値を加えた変位量が約 26 mmの時の傾斜角は約 0.046(rad)である。また、制御棒は 1 本の連結棒に制御棒要素が連結されており、挿入を妨げないよう可撓性を持たせた構造となっている。(図 4 参照)

以上のことから、傾斜角約 0.046(rad)は静的試験結果の最大挿入角 0.0877(rad)を下回るため制御棒の挿入性は確保される。

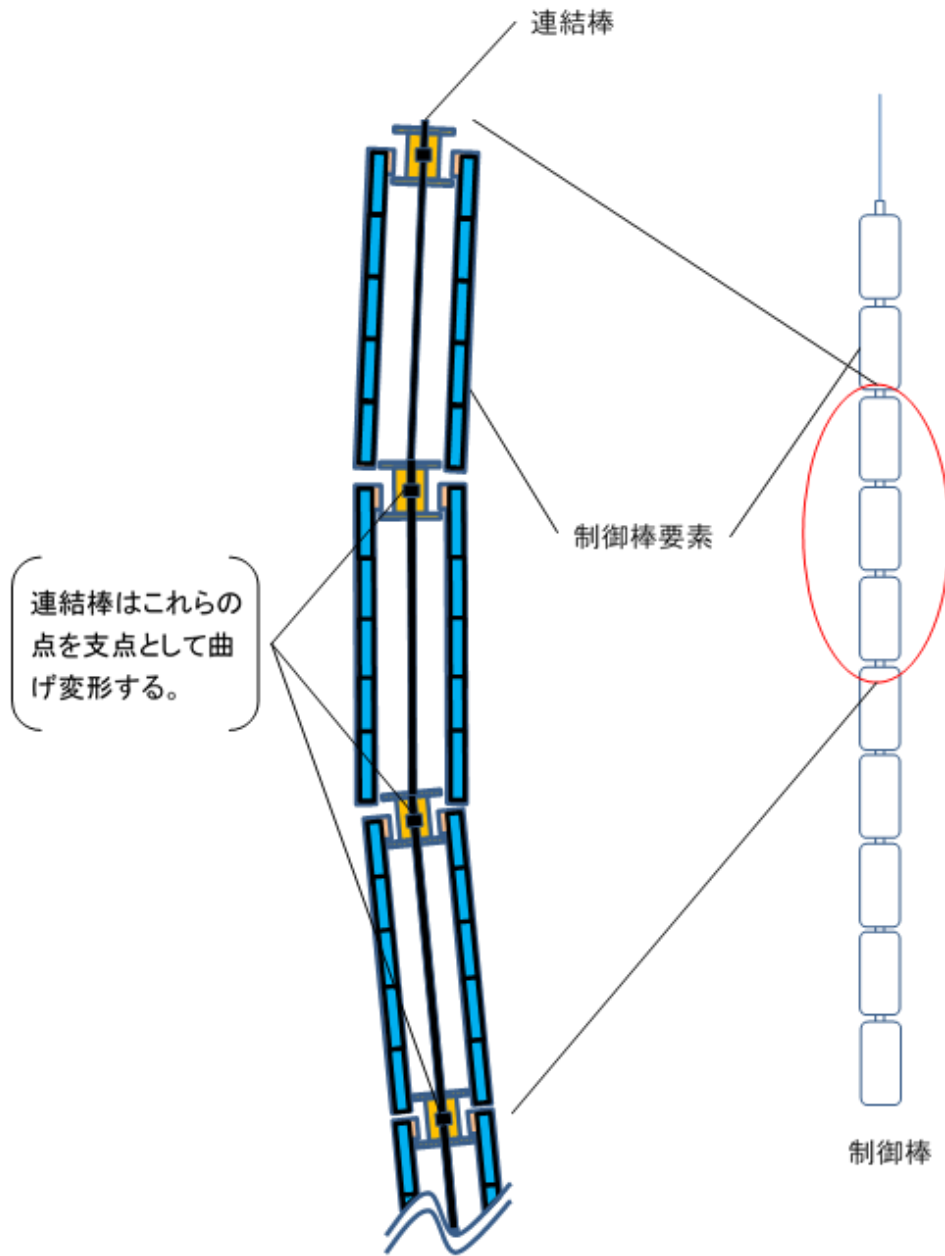


図 4 制御棒変形状況概念図