

HTTR 設工認 第 4 回申請の再申請(R2.3.30)の
コメントに係る回答
(耐震性(波及的影響含む))

令和 2 年 6 月 18 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

第 4 回申請の再申請(R2.3.30)に対する確認事項(No.1 R2/6/8):第 4 回第 1 編(耐震性)

第 4 回申請における耐震性の確認、水平方向の解析モデルにおいて用いている側面地盤ばねについては、地震観測シミュレーション解析により、解析モデル②の方が観測記録との整合性が良いため、妥当であるとの説明をされている。この比較結果である添 1-2-1-1-8 第 6 図「最大応答加速度の比較(3.11 地震)」を見ると、解析モデル②は、観測記録点の若干危険側に位置している。解析モデル②の採用が適切である旨の説明をすること。
また、同図の NS 方向と EW 方向において、C/V と R/B の上方の応答が逆転している理由を説明すること。

【回答】

地震応答解析モデルについては、解析モデル①及び②ともに観測記録をおおむね再現できていると考えられるが、最大応答加速度のほか、加速度応答スペクトルにおける各周期の加速度がより観測記録と整合している解析モデル②を採用している(図 1 及び図 2)。また、解析モデル②は建家周辺地盤の状況を考慮し、大地震時に表層地盤(オープンカットの埋土)の側面抵抗を見込まず、基礎浮き上がりの評価に対して保守的なモデル化としている(図 3)。

NS 方向と EW 方向における応答については、入力地震動の加速度応答スペクトルが方向によって異なることと、解析モデル①と②では固有周期、固有モードが若干異なる(1 次固有周期、0.27 秒と 0.29 秒)ため、入力地震動と固有周期、固有モードの組合せによって応答に差が生じたと考えられる(図 4)。

なお、地震観測シミュレーションについては、平成 30 年 11 月 28 日のヒアリング(HT-140-1)で説明している。

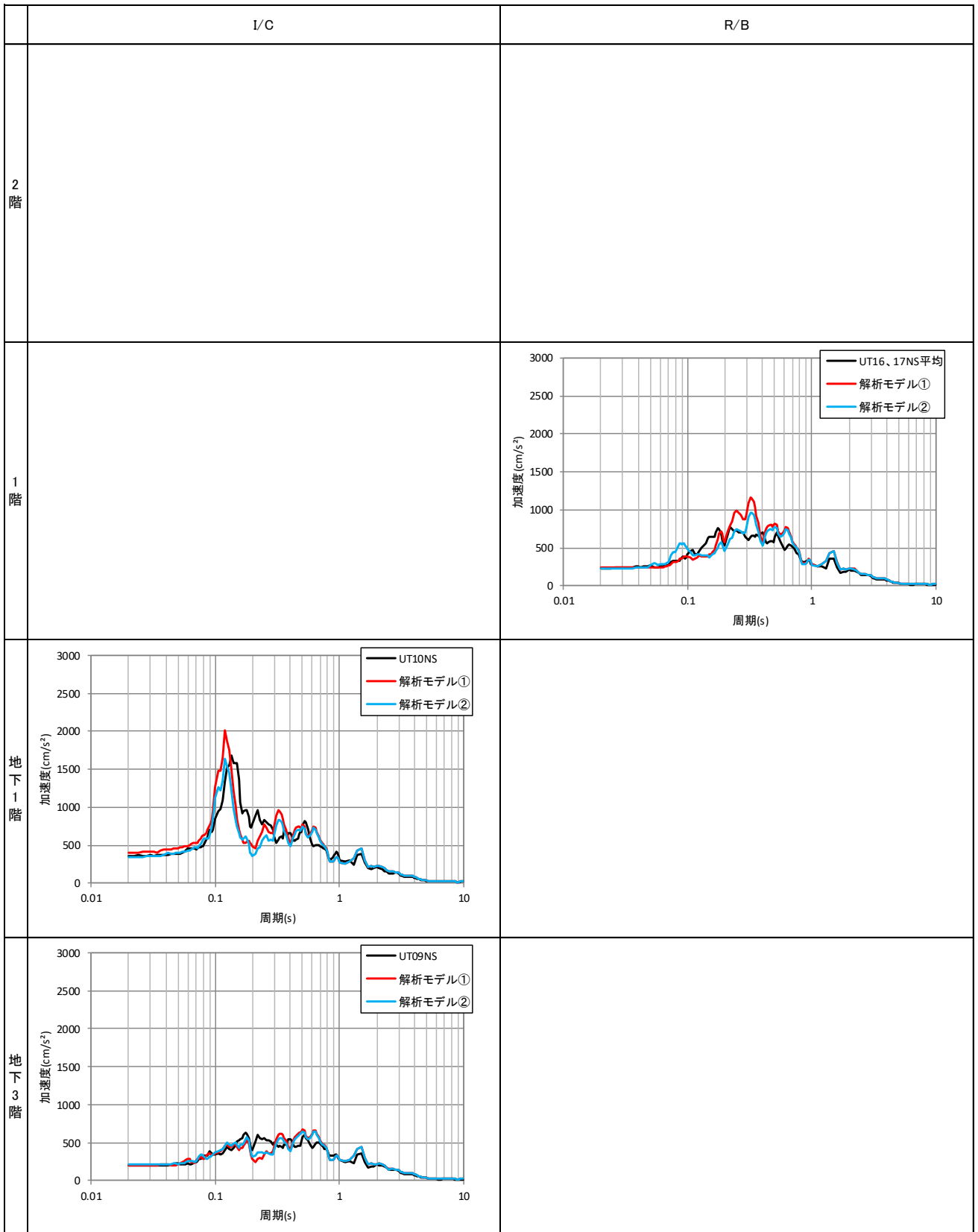


図1 加速度応答スペクトルの比較(3.11地震、NS方向、h=0.05)

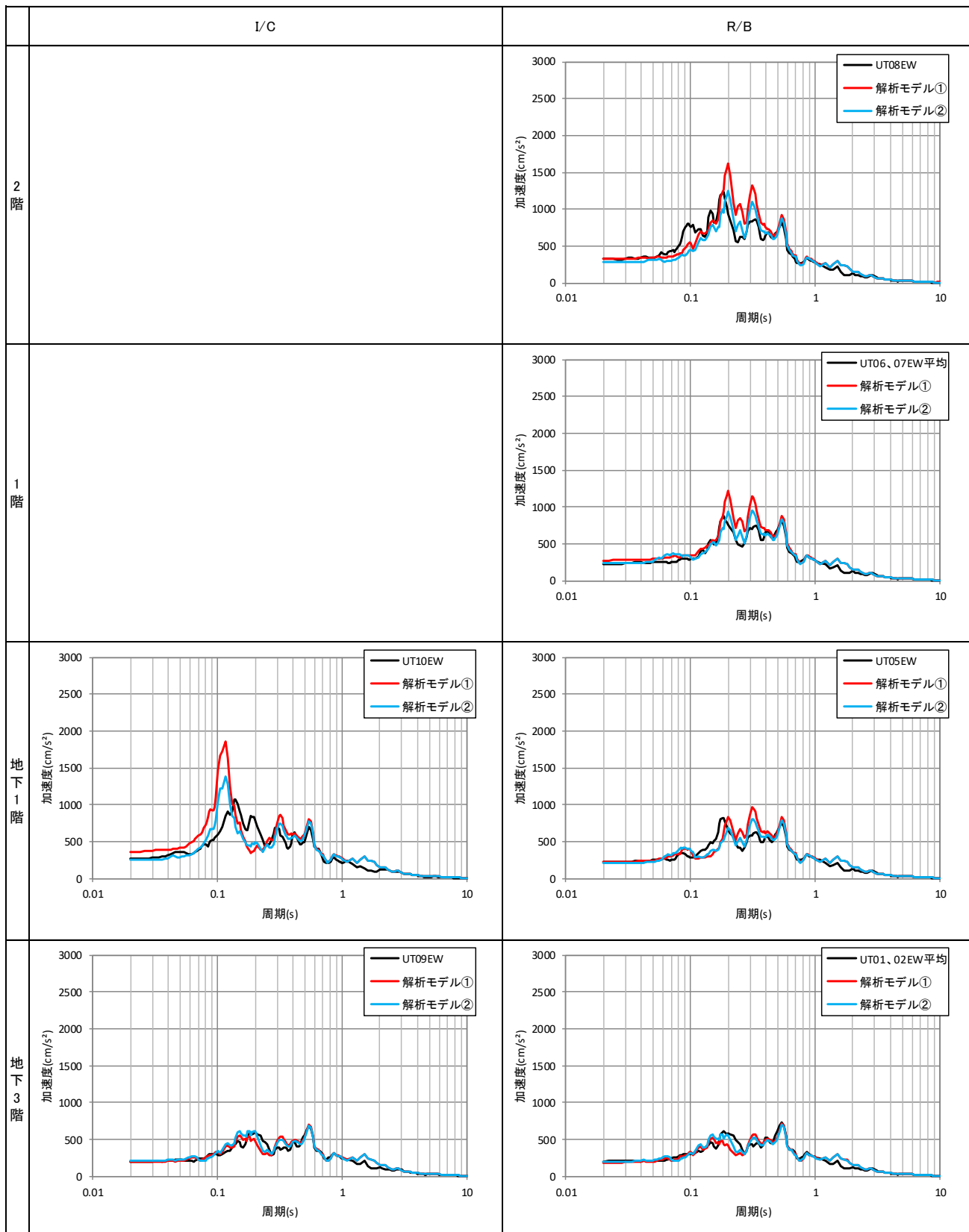


図2 加速度応答スペクトルの比較(3.11地震、EW方向、h=0.05)

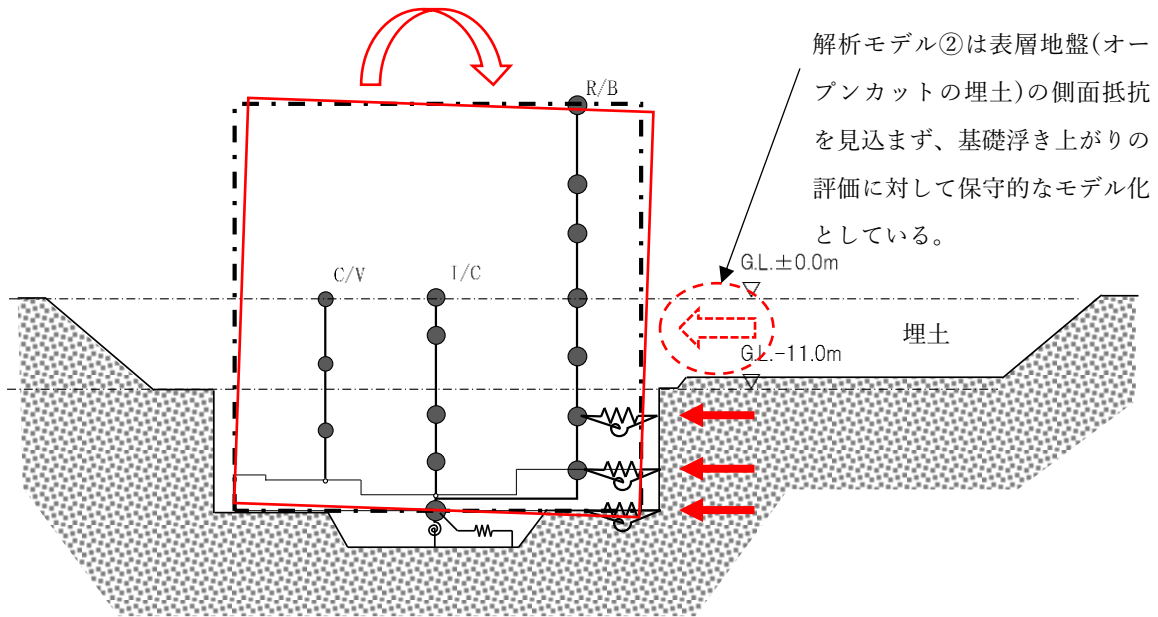


図3 原子炉建家建設時の地盤の掘削状況(NS方向)

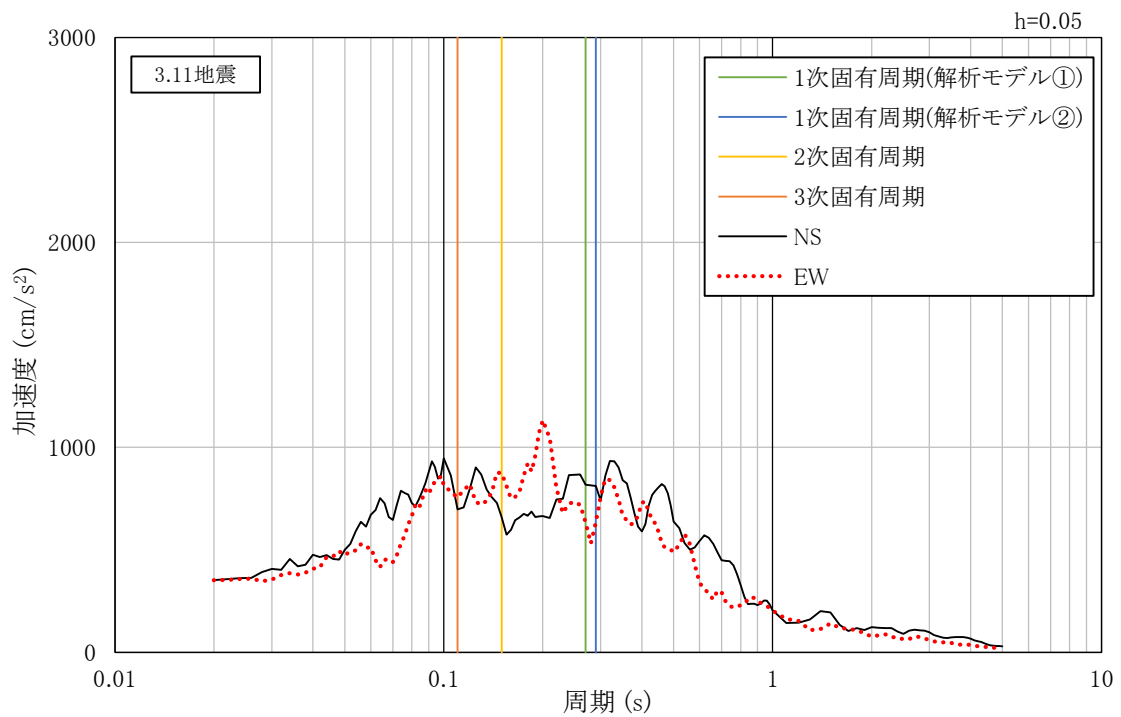


図4 入力地震動の加速度応答スペクトル(3.11地震)

第4回申請の再申請(R2.3.30)に対する確認事項(No.2 R2/6/8):第4回第1編(耐震性)

旧耐震指針では、鉛直地震力は静的地震力としており、新規制基準で鉛直地震動に動的地震力を考慮することとしている。鉛直地震動の動的地震力を評価する建家モデルは、今回新たに設定したものであるため、設定の考え方を説明すること。(質点の置き方、ばね定数、減衰定数の設定)

【回答】

鉛直方向の建家解析モデルは、JEAC4601-2015を踏まえ、質点の位置(質点の置き方)、ばね定数、減衰定数の設定を行っている。

質点の位置(質点の置き方)については、水平方向の解析モデルと同一高さとし、集中質点にてモデル化している。R/B 頂部の質点については、屋根トラス部分の鉛直振動を解析するため、スパン中央部から端部に質点を分けて配置している。

ばね定数については、R/B、C/V 及び I/C の各質点間を結ぶ軸ばねの軸剛性を「構造要素(耐震壁等)の軸断面積」及び「コンクリートの設計基準強度から定められる材料物性」に基づき設定している。屋根トラス部分は屋根の形状・構造に基づき、梁要素でモデル化している。基礎底面位置に設ける鉛直方向の地盤ばねは水平方向と同様に JEAG4601 に基づき、振動アドミタンス理論により算定している。

減衰定数については、JEAG4601 に示される各構造形式で慣用的に使用されている値に基づき設定している。R/B 及び I/C(RC 造)は慣用的に 5%とされているが、保守的に 3%を、屋根トラス(S 造)は 2%を、C/V(鋼製格納容器)は 1%を設定している。

下表に鉛直方向の地震応答解析モデルの設定について整理した結果を示す。なお、今回評価の設工認からの変更点については、平成 29 年 10 月 13 日第 222 回審査会合の資料 1 で説明している。

表 鉛直方向の地震応答解析モデルの設定

項目	内容	設工認	今回評価	設定理由
地震 応答 解析	建家 モデル	なし	耐震壁の軸剛性を軸ばねで表現した多質点系モデル	規則 ¹⁾ を踏まえ新規に実施、現在の規格・基準 ²⁾ に基づき設定
	材料 物性		・コンクリートの圧縮強度 Fc=23.5 N/mm ²	規則 ¹⁾ を踏まえ新規に実施、現在の規格・基準 ³⁾ に基づき設定
	減衰 定数		RC 造:3% S 造:2% S 造(鋼製格納容器):1%	規則 ¹⁾ を踏まえ新規に実施、現在の規格・基準 ^{2),4)} に基づき設定。 RC 構造は減衰定数のばらつきを考慮し ¹⁾ 、保守的に 3%に設定
	底面 ばね		鉛直ばねを考慮 振動アドミタンス理論による	規則 ¹⁾ を踏まえ新規に実施、現在の規格・基準 ^{2),5)} に基づき設定
	側面 ばね		考慮なし	

- 1) 「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則」
- 2) 「原子力発電所耐震設計技術規程」(日本電気協会 JEAC4601-2015)
- 3) 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」(1999 年日本建築学会)
- 4) 「原子力発電所耐震設計技術指針」(日本電気協会 JEAG4601-1987)
- 5) 「原子力発電所耐震設計技術指針」(日本電気協会 JEAG4601-1991 追補版)

第 4 回申請の再申請(R2.3.30)に対する確認事項(No.4 R2/6/8):第 4 回第 1 編(耐震性)

評価対象機器のうち、一部の許容値が建設設工認と異なっているものがあるので(ⅢAS⇒ⅣAS)、許容値を変更した設計の考え方を説明すること。

【回答】

○ 耐震健全性評価

耐震健全性評価の許容値の設計の考え方は、 S_s を用いた評価では許容応力状態Ⅳ_AS における許容値、 S_d 及び $1/2S_d$ を用いた評価で許容応力状態Ⅲ_AS における許容値とする。ただし、S クラスの配管に対しては、 S_s を用いた評価で許容応力状態Ⅲ_AS における許容値とする。そのため、S クラス配管の評価では、 S_d による評価を省略している。

許容応力状態がⅢ_AS からⅣ_AS に変更した設備として、添付書類 1-4-4(P.11)の 1 次ヘリウム純化設備の入口フィルタ等がある。これらの設備は、耐震重要度分類が A クラスから S クラスに変更され、 S_s を用いた評価が新たに必要となる。そのため、 S_s を用いた評価で許容応力状態Ⅳ_AS における許容値を用いている。

○ 波及的影響評価

波及的影響評価の許容値の設計の考え方は、許可基準規則に記載している「耐震重要施設が、耐震重要度分類の下位のクラスに属するものの波及的影響によって、その安全機能を損なわないように設計すること」を参考にし、下位のクラスに属するものの転倒等が発生せず耐震重要施設の安全機能に影響がないことを確認する。したがって、耐震健全性評価で用いる許容値を満足できない排気筒、燃料交換機の取付ボルト及び制御棒交換機の取付ボルトの許容値は、部材が実際に破断せず下位のクラスに属するものの転倒等の有無を判断するために、日本機械学会(JSME)等の規格に記載されている引張強さ S_u とする。解析値が引張強さ S_u を下回れば、部材に破断が発生せず下位のクラスに属するものの転倒が発生せず、耐震重要施設の安全機能に影響を及ぼすおそれはないと考える。なお、JSME 等の引張強さ S_u は、ミルシートに記載の引張強さ S_u に対して保守性を有している。

第4回申請の再申請(R2.3.30)に対する確認事項(No.7 R2/6/8):第4回第1編(耐震性)

既設工認の応力値に乗ずる応答倍率をどのように評価しているのか。機器によっては応答の固有周期が異なり、床応答スペクトルの比も異なるので、これをどのように考慮しているのか。また、1次モードの固有周期に対して床応答スペクトル比をかけると推察されるが、高次モードの寄与を考慮したとしても、十分な保守性があるといえるのか説明すること。(高次モードに大きなモーダルウエイトがないことの説明が必要。)

【回答】

HTTR では、設計及び工事の方法の認可(設工認)に関する耐震性評価・波及的影響評価に先立って、平成29年6月29日に応答倍率法による評価の妥当性を説明した。応答倍率法による評価は、規制庁との議論を経て、以下の方法で実施することとなった。

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.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。

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)

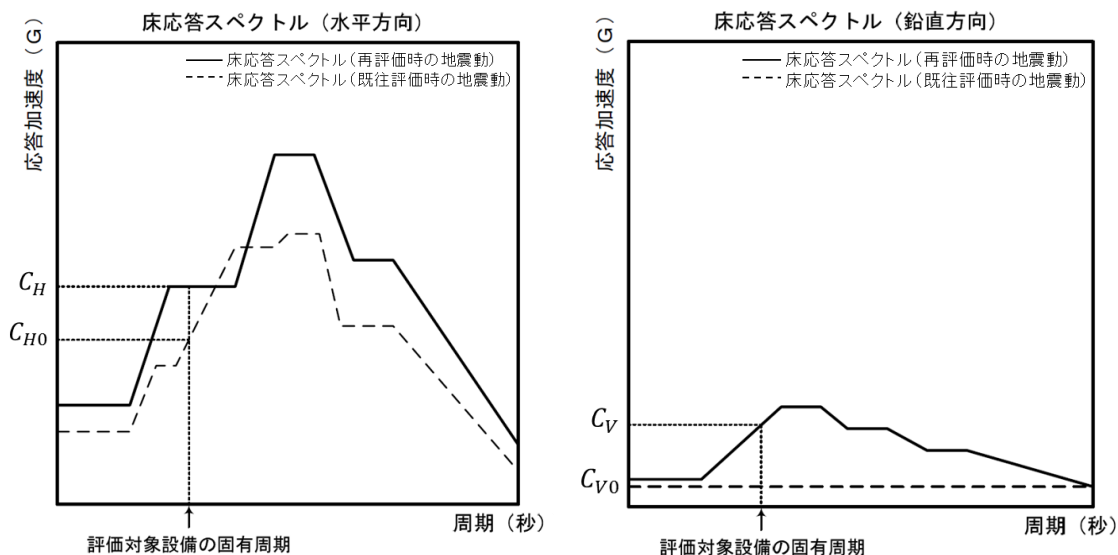


図 1 再評価時と既往評価時の床応答スペクトルの例

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。

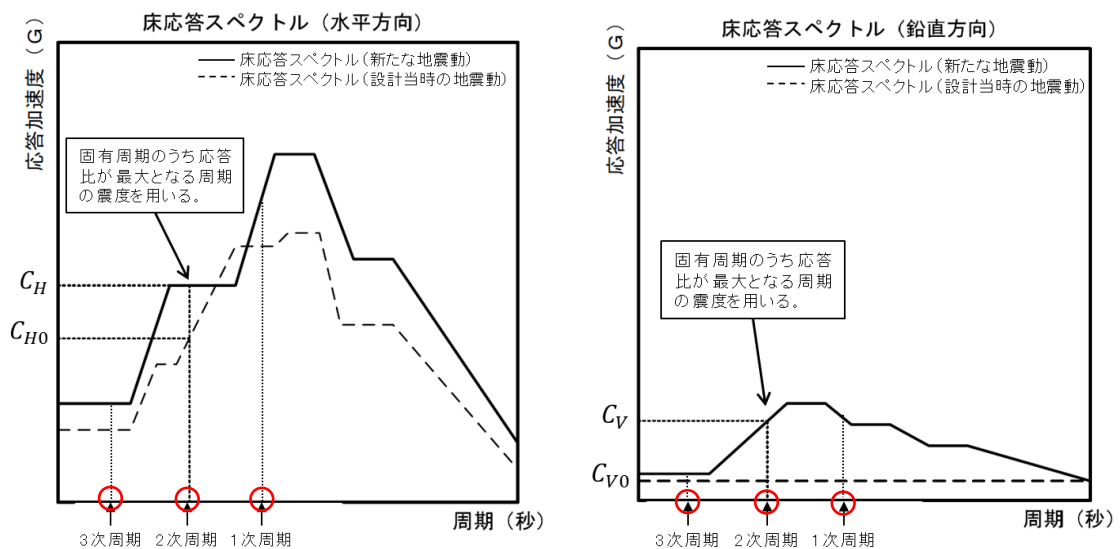


図1 一般的な応答比の算出

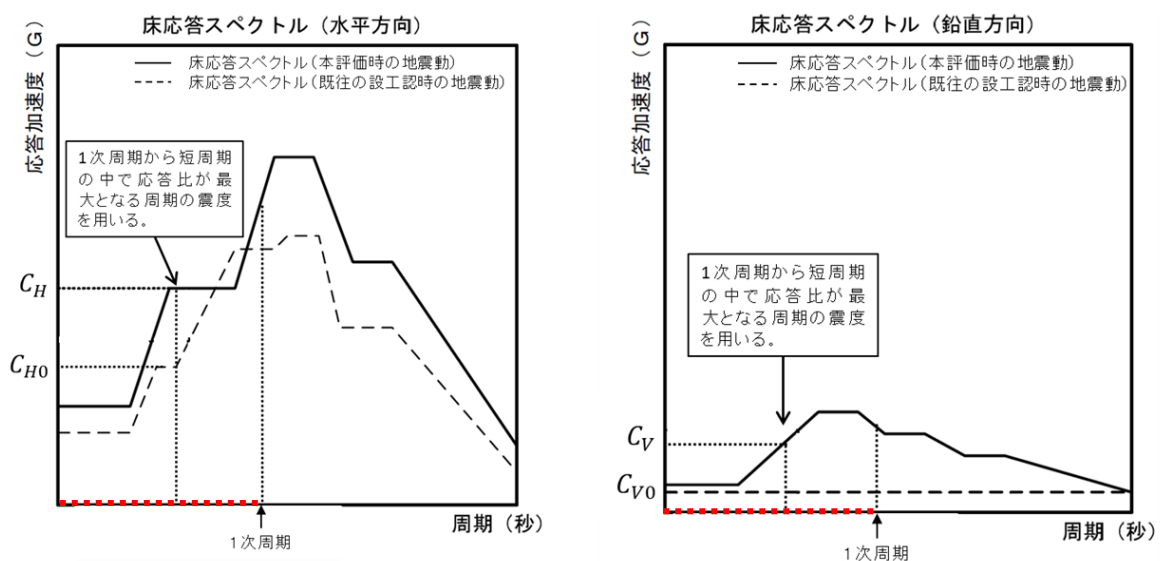


図2 HTTR が用いる応答比の算出

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。

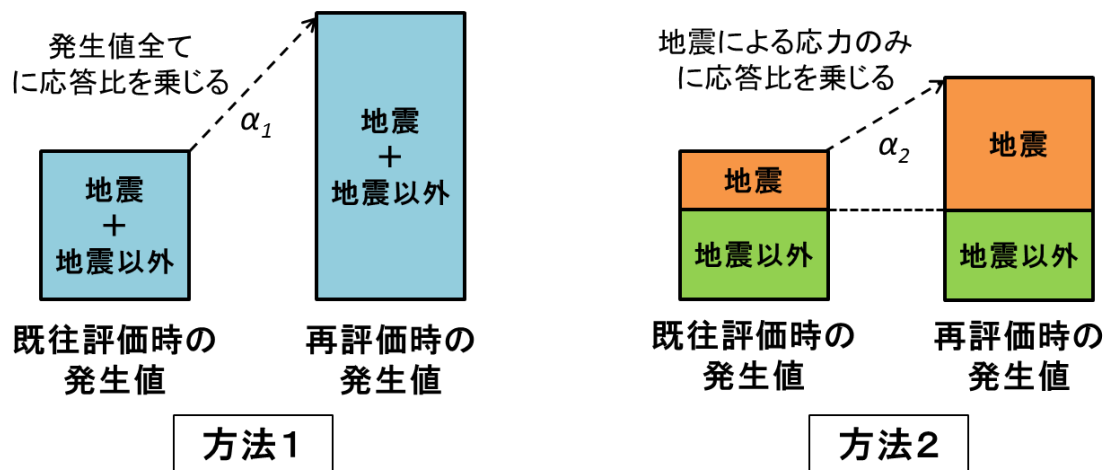
$$\begin{aligned} \sigma &= (\sigma_a + \sigma_b) \times \alpha_1 && \text{方法1による算出方法} \\ \sigma &= \sigma_a \times \alpha_2 + \sigma_b && \text{方法2による算出方法} \end{aligned}$$

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(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。

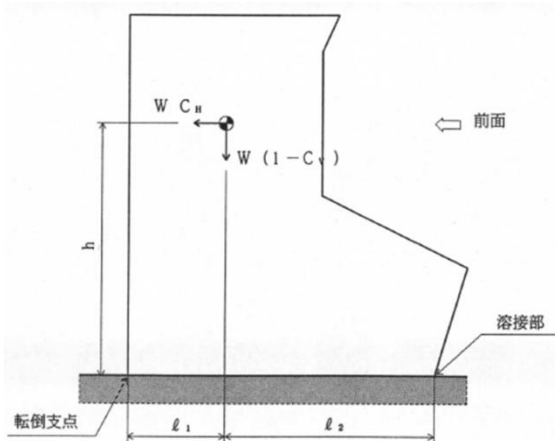


図 2 溶接の場合(盤)

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

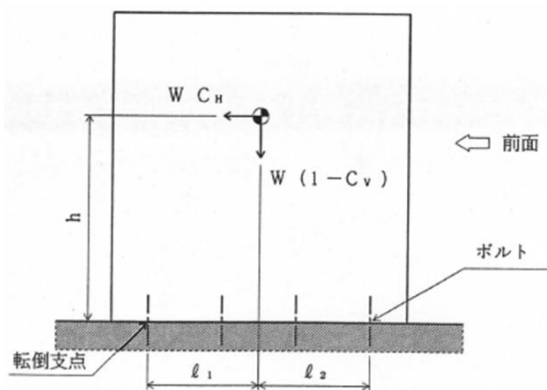


表 3 解析結果の比較(ボルト)

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。

第4回申請の再申請(R2.3.30)に対する確認事項(No.8,9 R2/6/8):第4回第1編(耐震性)

設計当初からの改造工事などにより、機器の固有周期が変わっていることはないのか説明すること。機器の固有周期に変更があれば、単純に床応答スペクトル比を乗じるだけでよいとは判断できないと考えられる。

建設設工認から機器配管系の減衰定数に変更はないのか説明すること。

【回答】

HTTR 原子炉施設の設備、機器等は、設計当初から改造工事等はない。そのため、機器の固有周期、重量等に変更はない。また、建設設工認から機器配管系の減衰定数の変更はない。