

### 3. 水平 2 方向同時加振の影響評価について（制御棒・破損燃料貯蔵ラック）

#### 3.1 はじめに

本項は、制御棒・破損燃料貯蔵ラック（以下「ラック」という。）の支持ビームに対する水平 2 方向同時加振の影響についてまとめたものである。

#### 3.2 支持ビームの構造

本支持ビームは、ラックの耐震上弱軸方向となる短辺方向の転倒防止を目的として、使用済燃料貯蔵プール壁面から腕を張り出す形で設置されており、ラックの短辺方向側を支持し、長辺方向側は荷重を受けない構造となっている（図 3-1）。

#### 3.3 水平 2 方向の地震力による影響について

現行評価において、支持ビームの応力は、地震力によりラックから入力される荷重（反力）、支持ビーム自身の荷重（自重及び自身の慣性力）と、部材の断面特性を用いて下記の地震条件時のそれぞれについて求めている。

- ・長辺方向（水平 x 方向）＋鉛直方向
- ・短辺方向（水平 y 方向）＋鉛直方向

長辺方向（x 方向）の地震の場合、支持ビームはラックを支持していないため、ラックから入力される荷重（反力）は生じず、支持ビーム自身の慣性力による応力のみが発生する。短辺方向（y 方向）の地震の場合、支持ビームには、ラックからの反力と自身の慣性力による応力が発生する。支持ビーム自身の慣性力は、いずれの方向の地震においても、ラックからの反力と比較して小さい。

したがって、支持ビームの応力は、水平 1 方向（短辺方向（y 方向））の地震力の応答が支配的であり、他の水平方向の地震力による応答は小さいため、水平 2 方向入力の影響は軽微である。

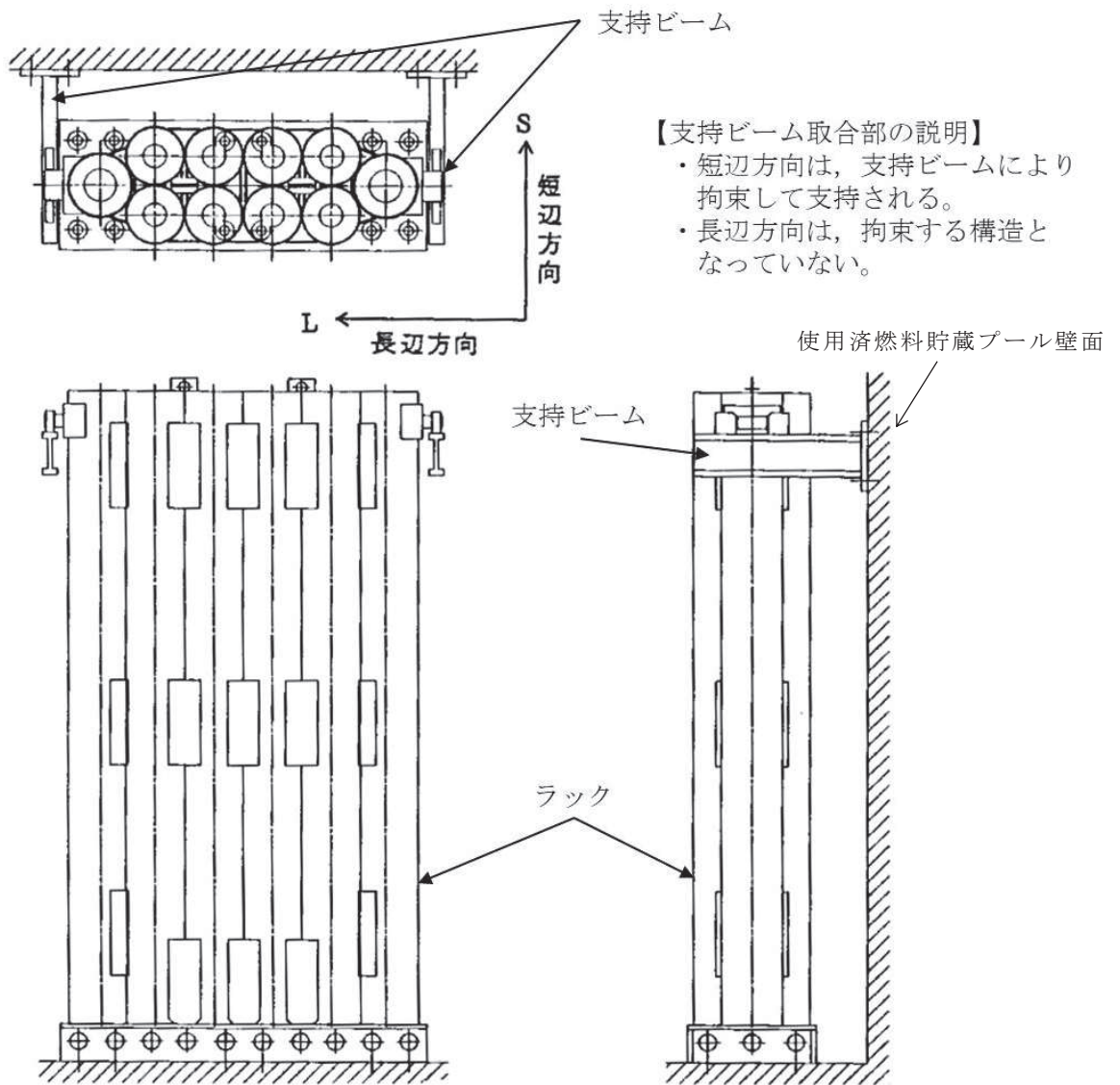


図3-1 制御棒・破損燃料貯蔵ラック設置状態

#### 4. 水平 2 方向同時加振の影響評価について（円筒形容器）

##### 4.1 はじめに

本項は、水平地震動が水平 2 方向に作用した場合の円筒形容器に対する影響を FEM で確認した結果をまとめたものである。

円筒形容器については、別紙 4.1 にて記載しているとおおり、X 方向地震と Y 方向地震とでは最大応力点が異なるため、それぞれの地震による応力を組み合わせても影響軽微としている。本項には、別紙 4.1 にて記載していることを解析にて確認することを目的として、円筒形容器の FEM モデルを用いた解析を実施した結果を示す。ここで、本検討は軸方向応力、周方向応力及びせん断応力の組合せに基づく胴の応力強さを対象としたものである。

具体的な確認項目として、以下 2 点を確認した。

- ① X 方向地震と Y 方向地震とで最大応力点が異なることの確認
- ② 最大応力点以外に、X 方向地震と Y 方向地震による応力を組み合わせた場合に影響のあるような点があるかを確認

##### 4.2 影響評価検討

評価検討モデル及び応力の定義について図 4-1 に示す。なお、応力については要素ごとの局部座標系として図 4-1 に示すように定義する。検討方法を以下に示す。

- ・ 検討方法 : 水平地震力 1G を X 方向へ入力し、周方向の 0° 方向から 90° 方向にかけて応力分布を確認する。また、水平 1 方向地震による応力を用いて水平 2 方向地震による応力を評価する。
- ・ 検討モデル : たて置き円筒形容器をシェル要素にてモデル化
- ・ 拘束点 : 容器基部を拘束
- ・ 荷重条件 : モデル座標の X 方向に水平地震力 1G を負荷
- ・ 解析手法 : 静的解析
- ・ 対象部位及び応力 : 容器基部における応力強さ
- ・ 水平 2 方向同時加振時の考慮方法
  - 組合せ係数法（最大応答の非同時性を考慮）
  - SRSS 法（最大応答の非同時性を考慮）

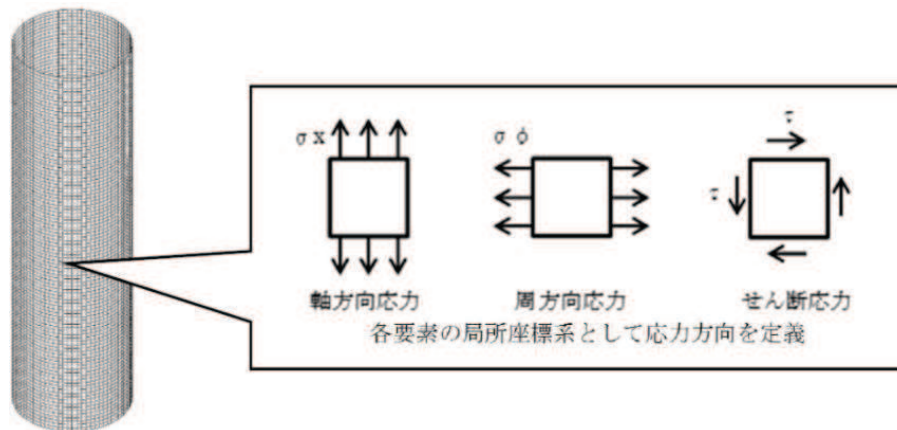


図4-1 評価検討モデル及び各応力の定義

### 4.3 検討結果

#### 4.3.1 軸方向応力 $\sigma_x$

容器基部における水平地震時の軸方向応力コンター図を図4-2に示す。

この結果より、最大応力点は  $0^\circ / 180^\circ$  位置に発生していることが分かる。円筒形容器のため評価部位が円形の一様断面であることから、Y方向から水平地震力を入力した場合においても、最大応力点は  $90^\circ / 270^\circ$  位置に発生することは明白であるため、水平方向地震動の入力方向により最大応力点は異なる。

また、表-1にX方向、Y方向、2方向入力時の軸方向応力分布を示す。

中間部 ( $0^\circ / 90^\circ$  方向以外) において2方向入力時の影響が確認できる。なお、組合せ係数法及びSRSS法のそれぞれを用いた水平2方向入力時の応力  $\sigma_{x,c}(\theta)$  及び  $\sigma_{x,s}(\theta)$  は、水平1方向入力時の軸方向応力解析結果 (X方向入力時応力  $\sigma_{x,X}(\theta)$ 、Y方向入力時応力  $\sigma_{x,Y}(\theta)$ ) により、以下のとおり算出する。

< 組合せ係数法 >

$$\sigma_{x,c}(\theta) = \max (\sigma_{x,c(X)}(\theta), \sigma_{x,c(Y)}(\theta))$$

ただし、 $\sigma_{x,c(X)}(\theta)$  は  $\sigma_{x,X}(\theta)$  に1、 $\sigma_{x,Y}(\theta)$  に0.4の係数を乗じてX・Y方向入力時それぞれの軸方向応力を組み合わせた応力、 $\sigma_{x,c(Y)}(\theta)$  は  $\sigma_{x,Y}(\theta)$  に1、 $\sigma_{x,X}(\theta)$  に0.4の係数を乗じてX・Y方向入力時それぞれの応力を組み合わせた応力であり、以下のように表される。

$$\sigma_{x,c(X)}(\theta) = \sigma_{x,X}(\theta) + 0.4 \times \sigma_{x,Y}(\theta)$$

$$\sigma_{x,c(Y)}(\theta) = 0.4 \times \sigma_{x,X}(\theta) + \sigma_{x,Y}(\theta)$$

< SRSS法 >

$$\sigma_{x,s}(\theta) = \sqrt{\sigma_{x,X}(\theta)^2 + \sigma_{x,Y}(\theta)^2}$$

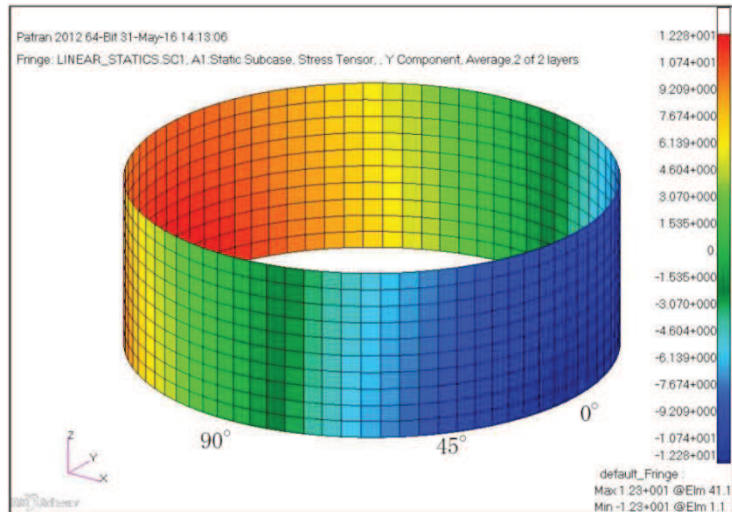


図4-2 水平地震時軸方向応力コンター図

表 4-1 水平地震時の軸方向応力分布

角度	X 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{x,x}(\theta)$	Y 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{x,y}(\theta)$	2 方向入力時応力 (MPa)	
			組合せ係数法 $\sigma_{x,c}(\theta)$	SRSS 法 $\sigma_{x,s}(\theta)$
0° 方向	12.28	0.00	12.28 $\sigma_{x,c(x)}(0^\circ) = 12.28$ $\sigma_{x,c(y)}(0^\circ) = 4.91$	12.28
22.5° 方向	11.34	4.70	13.22 $\sigma_{x,c(x)}(22.5^\circ) = 13.22$ $\sigma_{x,c(y)}(22.5^\circ) = 9.24$	12.28
45° 方向	8.68	8.68	12.15 $\sigma_{x,c(x)}(45^\circ) = 12.15$ $\sigma_{x,c(y)}(45^\circ) = 12.15$	12.28
67.5° 方向	4.70	11.34	13.22 $\sigma_{x,c(x)}(67.5^\circ) = 9.24$ $\sigma_{x,c(y)}(67.5^\circ) = 13.22$	12.28
90° 方向	0.00	12.28	12.28 $\sigma_{x,c(x)}(90^\circ) = 4.91$ $\sigma_{x,c(y)}(90^\circ) = 12.28$	12.28

#### 4.3.2 周方向応力 $\sigma_\phi$

容器基部における水平地震時の周方向応力コンター図を図 4-3 に、周方向応力分布を表 4-2 に示す。軸方向応力同様に最大応力点は  $0^\circ / 180^\circ$  位置に発生しており、最大応力点が異なることについて確認できる。

また、2 方向入力時の影響についても軸方向応力と同様に中間部 ( $0^\circ / 90^\circ$  方向以外) において 2 方向入力時の影響が確認できる。なお、組合せ係数法及び SRSS 法のそれぞれを用いた水平 2 方向入力時の応力  $\sigma_{\phi,c}(\theta)$  及び  $\sigma_{\phi,s}(\theta)$  は、水平 1 方向入力時の周方向応力解析結果 (X 方向入力時応力  $\sigma_{\phi,X}(\theta)$ , Y 方向入力時応力  $\sigma_{\phi,Y}(\theta)$ ) により、以下のとおり算出する。

< 組合せ係数法 >

$$\sigma_{\phi,c}(\theta) = \max (\sigma_{\phi,c(X)}(\theta), \sigma_{\phi,c(Y)}(\theta))$$

ただし、 $\sigma_{\phi,c(X)}(\theta)$  は  $\sigma_{\phi,X}(\theta)$  に 1,  $\sigma_{\phi,Y}(\theta)$  に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの周方向応力を組み合わせた応力、 $\sigma_{\phi,c(Y)}(\theta)$  は  $\sigma_{\phi,Y}(\theta)$  に 1,  $\sigma_{\phi,X}(\theta)$  に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの応力を組み合わせた応力であり、以下のように表される。

$$\sigma_{\phi,c(X)}(\theta) = \sigma_{\phi,X}(\theta) + 0.4 \times \sigma_{\phi,Y}(\theta)$$

$$\sigma_{\phi,c(Y)}(\theta) = 0.4 \times \sigma_{\phi,X}(\theta) + \sigma_{\phi,Y}(\theta)$$

< SRSS 法 >

$$\sigma_{\phi,s}(\theta) = \sqrt{\sigma_{\phi,X}(\theta)^2 + \sigma_{\phi,Y}(\theta)^2}$$

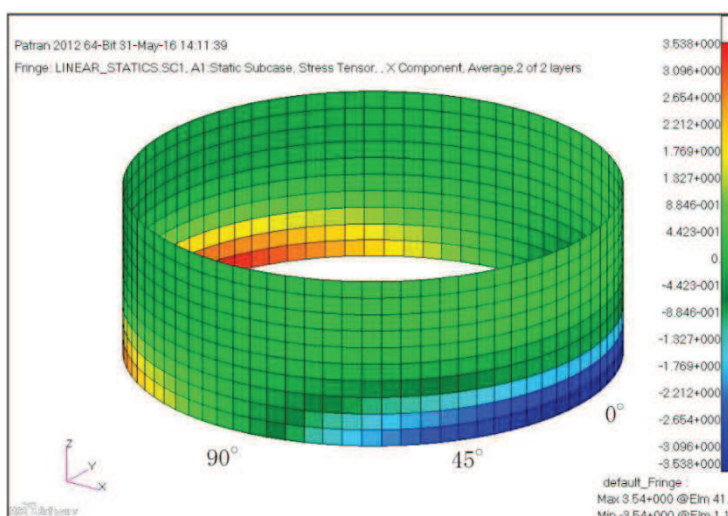


図4-3 水平地震時周方向応力コンター図

表 4-2 水平地震時の周方向応力分布

角度	X 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{\phi, X}(\theta)$	Y 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{\phi, Y}(\theta)$	2 方向入力時応力 (MPa)	
			組合せ係数法 $\sigma_{\phi, c}(\theta)$	SRSS 法 $\sigma_{\phi, s}(\theta)$
0° 方向	3.54	0.00	3.54 $\sigma_{\phi, c(x)}(0^\circ) = 3.54$ $\sigma_{\phi, c(y)}(0^\circ) = 1.42$	3.54
22.5° 方向	3.27	1.35	3.81 $\sigma_{\phi, c(x)}(22.5^\circ) = 3.81$ $\sigma_{\phi, c(y)}(22.5^\circ) = 2.66$	3.54
45° 方向	2.50	2.50	3.50 $\sigma_{\phi, c(x)}(45^\circ) = 3.50$ $\sigma_{\phi, c(y)}(45^\circ) = 3.50$	3.54
67.5° 方向	1.35	3.27	3.81 $\sigma_{\phi, c(x)}(67.5^\circ) = 2.66$ $\sigma_{\phi, c(y)}(67.5^\circ) = 3.81$	3.54
90° 方向	0.00	3.54	3.54 $\sigma_{\phi, c(x)}(90^\circ) = 1.42$ $\sigma_{\phi, c(y)}(90^\circ) = 3.54$	3.54

#### 4.3.3 せん断応力 $\tau$

容器基部における水平地震時のせん断応力コンター図を図 4-4 に示し、せん断応力分布を表 4-3 に示す。せん断応力は軸方向及び周方向応力とは異なり、最大応力は 90° /270° 位置に生じているが、最大応力と最小応力の生じる点が回転しているのみで応力の傾向として最大応力点が異なることについて確認できる。

また、2 方向入力時の影響についても軸方向応力、周方向応力と同様に中間部 (0° /90° 方向以外) において 2 方向入力時の影響が確認できる。なお、組合せ係数法及び SRSS 法のそれぞれを用いた水平 2 方向入力時の応力  $\tau_c(\theta)$  及び  $\tau_s(\theta)$  は、水平 1 方向入力時のせん断応力解析結果 (X 方向入力時応力  $\tau_X(\theta)$ 、Y 方向入力時応力  $\tau_Y(\theta)$ ) により、以下のとおり算出する。

< 組合せ係数法 >

$$\tau_c(\theta) = \max(\tau_{c(x)}(\theta), \tau_{c(y)}(\theta))$$

ただし、 $\tau_{c(x)}(\theta)$  は  $\tau_X(\theta)$  に 1、 $\tau_Y(\theta)$  に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれのせん断応力を組み合わせた応力、 $\tau_{c(y)}(\theta)$  は  $\tau_Y(\theta)$  に

1,  $\tau_x(\theta)$  に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの応力を組み合わせた応力であり, 以下のように表される。

$$\tau_{c(X)}(\theta) = \tau_x(\theta) + 0.4 \times \tau_y(\theta)$$

$$\tau_{c(Y)}(\theta) = 0.4 \times \tau_x(\theta) + \tau_y(\theta)$$

< SRSS 法 >

$$\tau_s(\theta) = \sqrt{\tau_{c(X)}(\theta)^2 + \tau_{c(Y)}(\theta)^2}$$

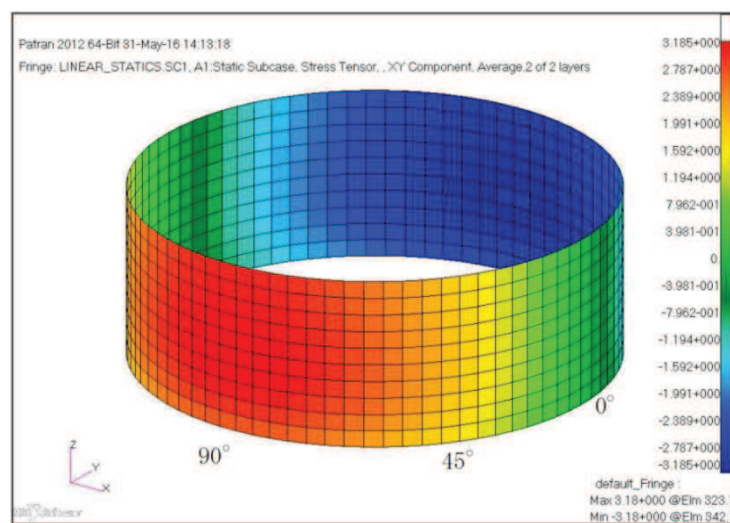


図4-4 水平地震時せん断応力コンター図



表 4-3 水平地震時のせん断応力分布

角度	X 方向入力時 応力 (MPa) $\tau_x(\theta)$	Y 方向入力時 応力 (MPa) $\tau_y(\theta)$	2 方向入力時応力 (MPa)	
			組合せ係数法 $\tau_c(\theta)$	SRSS 法 $\tau_s(\theta)$
0° 方向	0.00	2.70	2.70 $\tau_{c(x)}(0^\circ) = 1.08$ $\tau_{c(y)}(0^\circ) = 2.70$	2.70
22.5° 方向	1.03	2.49	2.91 $\tau_{c(x)}(22.5^\circ) = 2.03$ $\tau_{c(y)}(22.5^\circ) = 2.91$	2.70
45° 方向	1.91	1.91	2.67 $\tau_{c(x)}(45^\circ) = 2.67$ $\tau_{c(y)}(45^\circ) = 2.67$	2.70
67.5° 方向	2.49	1.03	2.91 $\tau_{c(x)}(67.5^\circ) = 2.91$ $\tau_{c(y)}(67.5^\circ) = 2.03$	2.70
90° 方向	2.70	0.00	2.70 $\tau_{c(x)}(90^\circ) = 2.70$ $\tau_{c(y)}(90^\circ) = 1.08$	2.70

#### 4.3.4 応力強さ $\sigma$

胴の応力強さ  $\sigma$  は、表 4-1~3 に示した X 方向、Y 方向、2 方向入力時それぞれの軸方向応力  $\sigma_x$ 、周方向応力  $\sigma_\phi$  及びせん断応力  $\tau$  を組み合わせ、耐震評価結果として用いている。

< 水平 1 方向のうち、X 方向入力時の組合せ応力強さ  $\sigma_x(\theta)$  >

主応力  $\sigma_{1,x}(\theta)$ 、 $\sigma_{2,x}(\theta)$ 、 $\sigma_{3,x}(\theta)$  は以下のとおりに表される。

$$\sigma_{1,x}(\theta) = \frac{1}{2} \left( \sigma_{x,x}(\theta) + \sigma_{\phi,x}(\theta) + \sqrt{(\sigma_{x,x}(\theta) - \sigma_{\phi,x}(\theta))^2 + 4\tau_x(\theta)^2} \right)$$

$$\sigma_{2,x}(\theta) = \frac{1}{2} \left( \sigma_{x,x}(\theta) + \sigma_{\phi,x}(\theta) - \sqrt{(\sigma_{x,x}(\theta) - \sigma_{\phi,x}(\theta))^2 + 4\tau_x(\theta)^2} \right)$$

$$\sigma_{3,x}(\theta) = 0$$

各主応力により、応力強さ  $\sigma_x(\theta)$  は以下のとおりとなる。

$$\sigma_x(\theta) = \max(|\sigma_{1,x}(\theta) - \sigma_{2,x}(\theta)|, |\sigma_{2,x}(\theta) - \sigma_{3,x}(\theta)|, |\sigma_{3,x}(\theta) - \sigma_{1,x}(\theta)|)$$

なお、Y方向入力時の応力強さ  $\sigma_Y(\theta)$  は、上記の式における X を Y に置き換えた式により算出する。

ここで  $\theta = 0^\circ$  の場合、表 4-1 より  $\sigma_{x,x}(0^\circ) = 12.28$ ，第 4-2 表より  $\sigma_{\phi,x}(0^\circ) = 3.54$ ，表 4-3 より  $\tau_x(0^\circ) = 0$  であるため

$$\sigma_{1,x}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left( 12.28 + 3.54 + \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(0)^2} \right) = 12.28$$

$$\sigma_{2,x}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left( 12.28 + 3.54 - \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(0)^2} \right) = 3.54$$

$$\sigma_{3,x}(0^\circ) = 0$$

となる。したがって、

$$\sigma_x(0^\circ) = \max(|12.28 - 3.54|, |3.54 - 0|, |0 - 12.28|) = 12.28$$

< 組合せ係数法による水平 2 方向同時加振を考慮した応力強さ  $\sigma_c(\theta)$  >  
 $\sigma_c(\theta)$  の算出フローを図 4-5 に示す。

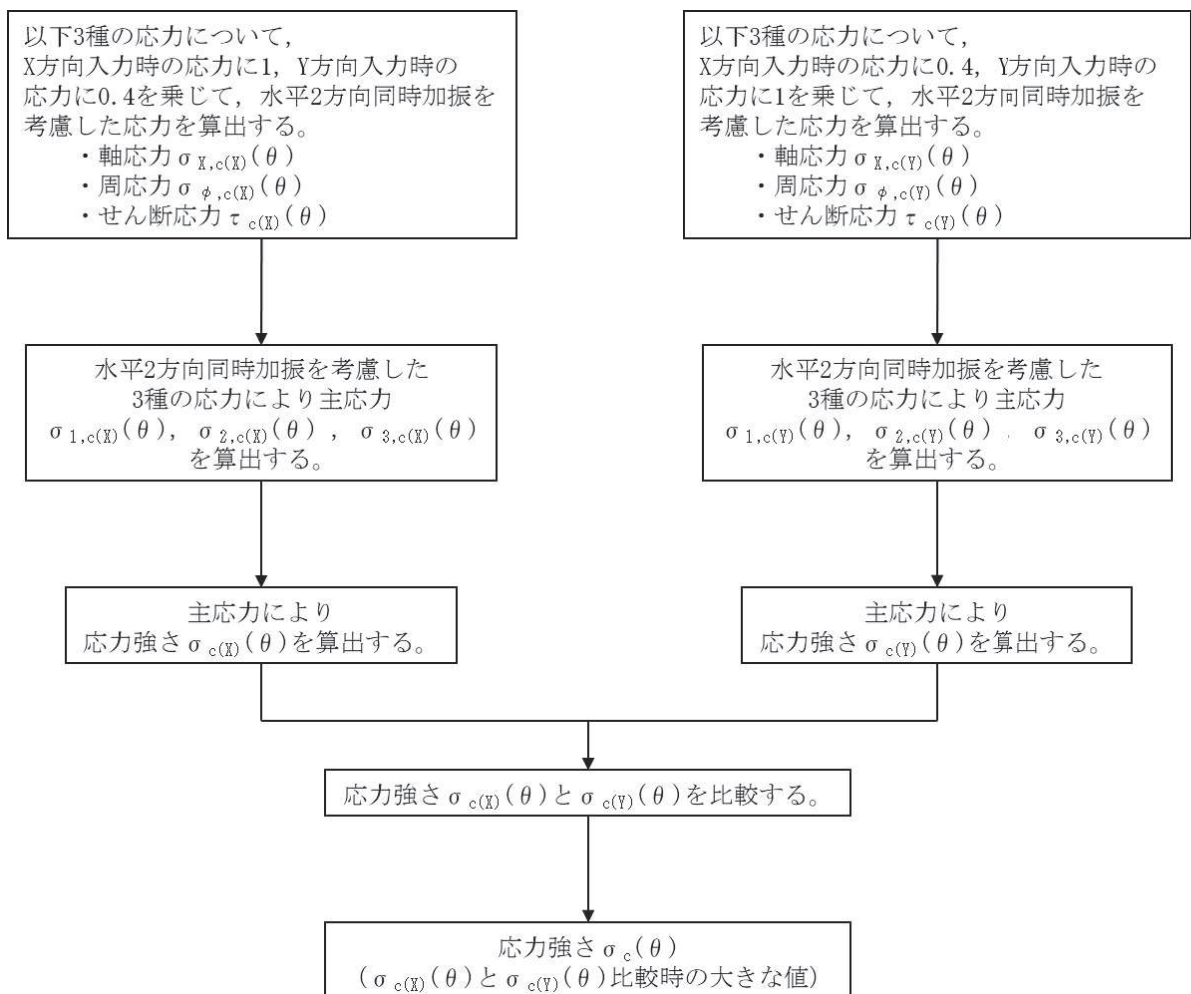


図4-5 組合せ係数法による応力強さ算出フロー

X 方向入力時の応力に 1, Y 方向入力時の応力に 0.4 を乗じて組み合わせた水平 2 方向同時加振を考慮した応力は以下のとおりとなる。

$$\sigma_{x,c(X)}(\theta) = \sigma_{x,X}(\theta) + 0.4 \times \sigma_{x,Y}(\theta)$$

$$\sigma_{\phi,c(X)}(\theta) = \sigma_{\phi,X}(\theta) + 0.4 \times \sigma_{\phi,Y}(\theta)$$

$$\tau_{c(X)}(\theta) = \tau_X(\theta) + 0.4 \times \tau_Y(\theta)$$

水平 2 方向同時加振を考慮した各応力により, 主応力  $\sigma_{1,c(X)}(\theta)$ ,  $\sigma_{2,c(X)}(\theta)$ ,  $\sigma_{3,c(X)}(\theta)$  は以下のとおりに表される。

$$\sigma_{1,c(X)}(\theta) = \frac{1}{2} \left( \sigma_{x,c(X)}(\theta) + \sigma_{\phi,c(X)}(\theta) + \sqrt{(\sigma_{x,c(X)}(\theta) - \sigma_{\phi,c(X)}(\theta))^2 + 4\tau_{c(X)}(\theta)^2} \right)$$

$$\sigma_{2,c(X)}(\theta) = \frac{1}{2} \left( \sigma_{x,c(X)}(\theta) + \sigma_{\phi,c(X)}(\theta) - \sqrt{(\sigma_{x,c(X)}(\theta) - \sigma_{\phi,c(X)}(\theta))^2 + 4\tau_{c(X)}(\theta)^2} \right)$$

$$\sigma_{3,c(X)}(\theta) = 0$$

各主応力により, 応力強さ  $\sigma_{c(X)}(\theta)$  は以下のとおりとなる。

$$\sigma_{c(X)}(\theta) = \max(|\sigma_{1,c(X)}(\theta) - \sigma_{2,c(X)}(\theta)|, |\sigma_{2,c(X)}(\theta) - \sigma_{3,c(X)}(\theta)|, |\sigma_{3,c(X)}(\theta) - \sigma_{1,c(X)}(\theta)|)$$

同様に, Y 方向入力時の応力に 1, X 方向入力時の応力に 0.4 を乗じて組み合わせた水平 2 方向同時加振を考慮した応力により, 応力強さ  $\sigma_{c(Y)}(\theta)$  を算出する。

この応力強さ  $\sigma_{c(X)}(\theta)$  と  $\sigma_{c(Y)}(\theta)$  を比較し, 大きな値を  $\sigma_c(\theta)$  とする。

$$\sigma_c(\theta) = \max(\sigma_{c(X)}(\theta), \sigma_{c(Y)}(\theta))$$

ここで  $\theta = 0^\circ$  の場合, 第 4-1 表より  $\sigma_{x,c(X)}(0^\circ) = 12.28$ , 表 4-2 より

$\sigma_{\phi,c(X)}(0^\circ) = 3.54$ , 第 4-3 表より  $\tau_{c(X)}(0^\circ) = 1.08$  であるため,

$$\sigma_{1,c(X)}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left( 12.28 + 3.54 + \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(1.08)^2} \right) = 12.41$$

$$\sigma_{2,c(X)}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left( 12.28 + 3.54 - \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(1.08)^2} \right) = 3.41$$

$$\sigma_{3,c(X)}(0^\circ) = 0$$

となる。したがって, 応力強さ  $\sigma_{c(X)}(0^\circ)$  は以下のように算出される。

$$\sigma_{c(X)}(0^\circ) = \max(|12.41 - 3.41|, |3.41 - 0|, |0 - 12.41|) = 12.41$$

同様に, 表 4-1 より  $\sigma_{x,c(Y)}(0^\circ) = 4.91$ , 第 4-2 表より  $\sigma_{\phi,c(Y)}(0^\circ) = 1.42$ , 表 4-3 より  $\tau_{c(Y)}(0^\circ) = 2.70$  であるため

$$\sigma_{1,c(Y)}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left( 4.91 + 1.42 + \sqrt{(4.91 - 1.42)^2 + 4(2.70)^2} \right) = 6.38$$

$$\sigma_{2,c(x)}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left( 4.91 + 1.42 - \sqrt{(4.91 - 1.42)^2 + 4(2.70)^2} \right) = -0.05$$

$$\sigma_{3,c(x)}(0^\circ) = 0$$

となる。したがって、応力強さ  $\sigma_{c(y)}(0^\circ)$  は以下のように算出される。

$$\sigma_{c(x)}(0^\circ) = \max(|6.38 - (-0.05)|, |-0.05 - 0|, |0 - 6.38|) = 6.43$$

応力強さ  $\sigma_{c(x)}(0^\circ)$  と  $\sigma_{c(y)}(0^\circ)$  により、組合せ係数法による水平 2 方向同時加振時を考慮した応力強さ  $\sigma_c(0^\circ)$  は

$$\sigma_c(0^\circ) = \max(12.41, 6.43) = 12.41$$

となる。

<SRSS 法による水平 2 方向同時加振を考慮した応力強さ  $\sigma_s(\theta)$ >

主応力  $\sigma_{1,s}(\theta)$ ,  $\sigma_{2,s}(\theta)$ ,  $\sigma_{3,s}(\theta)$  は以下のとおりに表される。

$$\sigma_{1,s}(\theta) = \frac{1}{2} \left( \sigma_{x,s}(\theta) + \sigma_{\phi,s}(\theta) + \sqrt{(\sigma_{x,s}(\theta) - \sigma_{\phi,s}(\theta))^2 + 4\tau_s(\theta)^2} \right)$$

$$\sigma_{2,s}(\theta) = \frac{1}{2} \left( \sigma_{x,s}(\theta) + \sigma_{\phi,s}(\theta) - \sqrt{(\sigma_{x,s}(\theta) - \sigma_{\phi,s}(\theta))^2 + 4\tau_s(\theta)^2} \right)$$

$$\sigma_{3,s}(\theta) = 0$$

各主応力により、応力強さ  $\sigma_s(\theta)$  は以下のとおりとなる。

$$\sigma_s(\theta) = \max(|\sigma_{1,s}(\theta) - \sigma_{2,s}(\theta)|, |\sigma_{2,s}(\theta) - \sigma_{3,s}(\theta)|, |\sigma_{3,s}(\theta) - \sigma_{1,s}(\theta)|)$$

ここで  $\theta = 0^\circ$  の場合には、表 4-1 より  $\sigma_{x,s}(0^\circ) = 12.28$ 、表 4-2 より  $\sigma_{\phi,s}(0^\circ) = 3.54$ 、表 4-3 より  $\tau_s(0^\circ) = 2.70$  であるため、

$$\sigma_{1,s}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left( 12.28 + 3.54 + \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(2.70)^2} \right) = 13.05$$

$$\sigma_{2,s}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left( 12.28 + 3.54 - \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(2.70)^2} \right) = 2.77$$

$$\sigma_{3,s}(0^\circ) = 0$$

となる。したがって、

$$\sigma_s(0^\circ) = \max(|13.05 - 2.77|, |2.77 - 0|, |0 - 13.05|) = 13.05$$

$\theta = 0^\circ$  の場合に SRSS 法、組合せ係数法を用いて算出した応力強さを表 4-4 にまとめる。

表 4-4 SRSS 法, 組合せ係数法を用いて算出した応力強さ (  $\theta = 0^\circ$  )

	X	Y	SRSS 法	組合せ係数法	
				$1.0 \times X + 0.4 \times Y$	$0.4 \times X + 1.0 \times Y$
$\sigma_x(\theta)$	12.28	0.00	$\sqrt{(12.28^2 + 0.00^2)} =$ 12.28	$12.28 \times 1.0 + 0.00 \times 0.4 =$ 12.28	$12.28 \times 0.4 + 0.00 \times 1.0 =$ 4.91
$\sigma_\phi(\theta)$	3.54	0.00	$\sqrt{(3.54^2 + 0.00^2)} =$ 3.54	$3.54 \times 1.0 + 0.00 \times 0.4 =$ 3.54	$3.54 \times 0.4 + 0.00 \times 1.0 =$ 1.42
$\tau(\theta)$	0.00	2.70	$\sqrt{(0.00^2 + 2.70^2)} =$ 2.70	$0.00 \times 1.0 + 2.70 \times 0.4 =$ 1.08	$0.00 \times 0.4 + 2.70 \times 1.0 =$ 2.70
$\sigma_1(\theta)$	-	-	$1/2 \times [12.28 + 3.54 +$ $\sqrt{\{(12.28 - 3.54)^2 + 4 \times 2.70^2\}}] =$ 13.05	$1/2 \times [12.28 + 3.54 +$ $\sqrt{\{(12.28 - 3.54)^2 + 4 \times 1.08^2\}}] =$ 12.41	$1/2 \times [4.91 + 1.42 +$ $\sqrt{\{(4.91 - 1.42)^2 + 4 \times 2.70^2\}}] =$ 6.38
$\sigma_2(\theta)$	-	-	$1/2 \times [12.28 + 3.54 -$ $\sqrt{\{(12.28 - 3.54)^2 + 4 \times 2.70^2\}}] =$ 2.77	$1/2 \times [12.28 + 3.54 -$ $\sqrt{\{(12.28 - 3.54)^2 + 4 \times 1.08^2\}}] =$ 3.41	$1/2 \times [4.91 + 1.42 -$ $\sqrt{\{(4.91 - 1.42)^2 + 4 \times 2.70^2\}}] =$ -0.05
$\sigma_3(\theta)$	-	-	0	0	0
$\sigma(\theta)$	-	-	MAX ( $ 13.05 - 2.77 $ , $ 2.77 - 0 $ , $ 0 - 13.05 $ ) = 13.05	MAX ( $ 12.41 - 3.41 $ , $ 3.41 - 0 $ , $ 0 - 12.41 $ ) = 12.41	MAX ( $ 6.38 - (-0.05) $ , $ -0.05 - 0 $ , $ 0 - 6.38 $ ) = 6.43
					Max(12.41, 6.43) = 12.41

(注) 本表記載の数値は計算例を示すものであり, 実際の評価とは桁数処理の関係上, 一致しないことがある。

算出した応力強さの分布及び分布図を表 4-5 及び図 4-6 に示す。

表4-5 水平地震時の応力強さ分布

角度	X 方向入力時 応力強さ (MPa) $\sigma_x(\theta)$	Y 方向入力時 応力強さ (MPa) $\sigma_y(\theta)$	2 方向入力時応力強さ (MPa)	
			組合せ係数法 $\sigma_c(\theta)$	SRSS 法 $\sigma_s(\theta)$
0° 方向	12.28	5.40	12.41	13.04
22.5° 方向	11.47	6.03	13.64	13.04
45° 方向	9.22	9.22	12.91	13.04
67.5° 方向	6.03	11.47	13.64	13.04
90° 方向	5.40	12.28	12.41	13.04

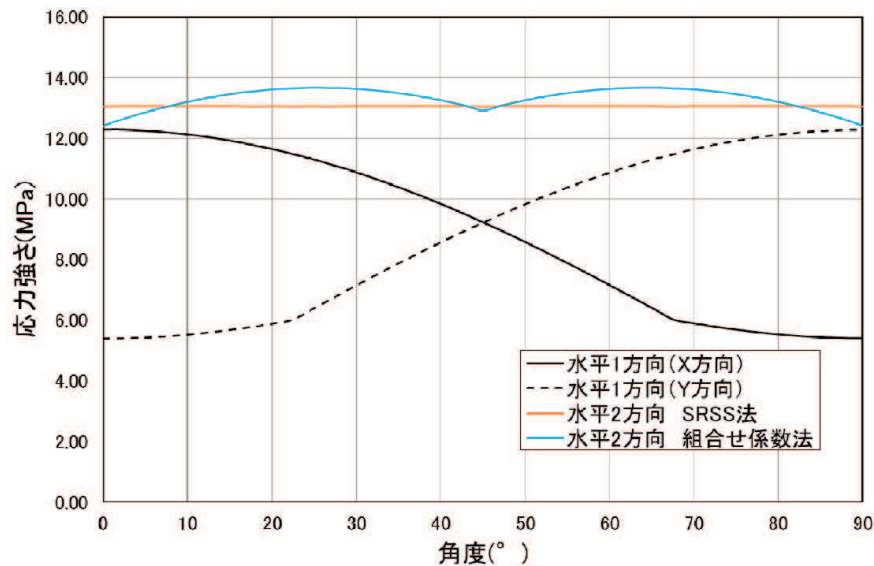


図 4-6 水平地震時応力強さ分布図

応力強さは SRSS 法では全方向において一定であるのに対して、組合せ係数法では 24.75° /65.25° 方向に 2 つのピークをもつ分布となった。応力強さは 0° /45° /90° 方向付近では SRSS 法の方が組合せ係数法に比べ大きな値となるのに対して、組合せ係数法がピークを持つ 24.75° /65.25° 方向付近では SRSS 法を約 5%上回る結果となった。

水平 2 方向入力時の SRSS 法による最大応力強さは水平 1 方向入力時の最大応力強さに対して 6%上回る程度であり (第 4-6 表参照)、水平 2 方向による影響は軽微と言える。一方、水平 2 方向入力時の組合せ係数法による最大応力強さについては、水平 1 方向入力時の最大応力強さに対して 11%上回る結果となった。これは水平 2 方向の影響軽微と判断する基準(応力の増分が 1 割)を超えているが、

本検討においては水平地震力のみを考慮しており，実際の耐震評価においては水平地震力以外に自重，内圧及び鉛直地震力等を考慮して評価を実施することから，水平2方向を考慮した際の応力強さの増分は小さくなる。このため，水平2方向による影響は軽微であると考えられる。

表4-6 水平地震時の最大応力強さ及び水平2方向による影響

		最大応力強さ (MPa)	水平2方向／水平1方向 最大応力強さ比
水平1方向入力		12.28	—
水平2方向入力	SRSS法	13.05	1.06
	組合せ係数法	13.67	1.11

## 5. 水平 2 方向同時加振の影響評価について（燃料交換機）

### 5.1 はじめに

本項は、燃料交換機（以下「FHM」という。）に対する水平 2 方向同時加振の影響についてまとめたものである。

### 5.2 既工認評価の手法

FHM はレール上を車輪で移動する構造であるため、基本的には建屋との固定はないが、地震時に横行方向（走行レールに対し直角方向）にすべりが生じた場合は、レールに沿って取り付けられているブリッジ転倒防止装置がレールの側面と接触し、FHM のすべりを制限する構造となっている。つまり、ブリッジ転倒防止装置とレールが接触し、FHM が横行方向に建屋と固定された体系では、地震入力も FHM 本体へそのまま伝達されることが想定される。

一方、走行方向（走行レールの長手方向）については、FHM の車輪とレールの接触面（踏面）を介して FHM 本体へと荷重が伝達される構造であり、その荷重は摩擦力により制限されるため、地震入力により生じる荷重は軽微（FHM 本体への影響は軽微）と考えられる。

上記より、FHM 本体の耐震評価では横行方向に対する地震応答が支配的であり、走行方向に対しては比較的軽微であると考えられるため、水平 2 方向同時加振の考慮として、耐震性評価で走行方向の地震応答を追加で組み合わせたとしても、既工認評価の応答結果への影響は小さいと考えられる。



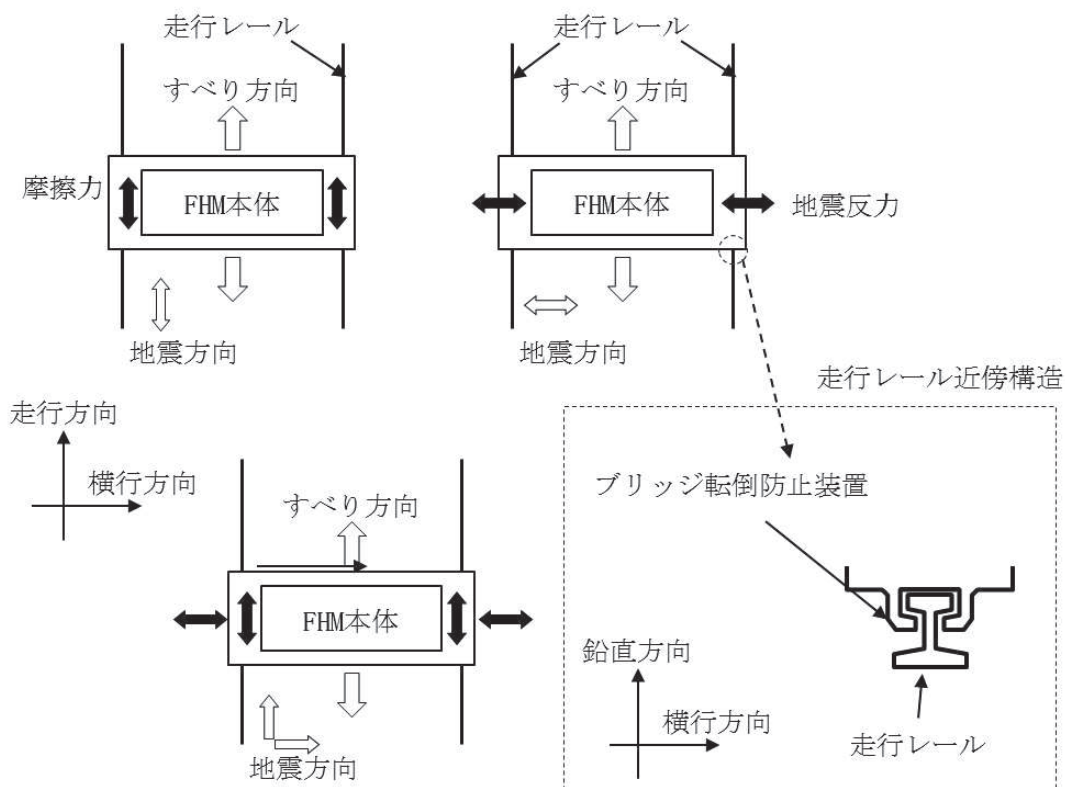


図5-1 燃料交換機の負担する水平地震荷重

### 5.3 今回工認の評価手法への適用について

今回工認におけるFHMの耐震評価では、水平方向については、既工認評価と同様にスペクトルモーダル解析を基本とした評価を行っている。一方、鉛直方向については、FHMが柔構造であることを踏まえ、鉛直地震動についてもスペクトルモーダル解析（鉛直方向はブリッジ転倒防止装置によって浮き上がらないため、固定条件での解析が可能）を実施している。そこで、前述を踏まえ、水平2方向及び鉛直方向の同時加振を想定した場合の今回工認の妥当性を検討する。

### 5.4 水平2方向同時加振の影響

表5-1に今回工認における評価と水平2方向同時加振による評価（水平2方向）の比較結果を示す。なお、評価結果の比較は、評価上厳しくなるトロリが中央位置にある場合の評価結果により行う。

表5-1 応力評価結果（トロリ中央位置）

評価部位	応力分類	算出応力 (MPa)		許容応力 (MPa)	応答増加率
		(工認耐震計算書)	(水平2方向)		
燃料交換機構造物フレーム	引張り	239	242		1.01
	せん断	54	55		1.02
	組合せ	256	259		1.01
ブリッジ	曲げ	71	74		1.04
	せん断	16	17		1.06
	組合せ	76	79		1.04
転倒防止装置 取付ボルト	せん断	152	153		1.01
	引張り	213	216		1.01
	曲げ	100	102		1.02
トロリ	引張り	12	12		1.00
	せん断	7	7		1.00
	組合せ	112	114		1.02
転倒防止装置 取付ボルト	せん断	23	24		1.04
	引張り	102	103		1.01
	曲げ	239	240	1.00	
走行レール	引張り	16	17	1.06	
	せん断	23	23	1.00	
	組合せ	257	260	1.01	
横行レール	曲げ	197	204	1.04	
	引張り	37	37	1.00	
	せん断	9 (8.86)	10 (9.18)	1.04*	
	組合せ	234	242	1.03	

注記\*：算出応力が小さく、整数に丸めた算出応力（小数点以下を切上げ）での応答増加率は大きくなるため、丸める前の算出応力（括弧書き）での応答増加率を記載。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

## 5.5 結論

FHM の地震時評価に関し、鉛直地震動を動的地震力へ変更した場合について、水平 2 方向同時加振への影響検討を行った。工認耐震計算書と比較した結果、両者の差異は 10%未満という結果から、水平 2 方向を考慮しても影響としては軽微である。

## 6. 水平 2 方向同時加振の影響評価について（応答軸が明確である設備）

### 6.1 はじめに

本項は、応答軸が明確である設備について、水平 2 方向の地震力を考慮した場合においても設備の有する耐震性に対して影響軽微であることを説明するものである。

### 6.2 設備の有する耐震性に対して影響がないことの説明

従来設計手法として、設備の応答軸の方向、あるいは厳しい応力が発生する向きを有した設備があり、このような設備については解析上の地震力の入力を NS 方向・EW 方向を包絡した地震力（床応答曲線など）を用いて X 方向及び Y 方向から入力し、最も大きな評価結果を用いる等、保守的な評価を実施している場合がある。このような応答軸が明確な設備については、水平 2 方向の地震力による従来設計手法への影響が懸念されるようなことはないと考ええる。その理由を以下に示す。

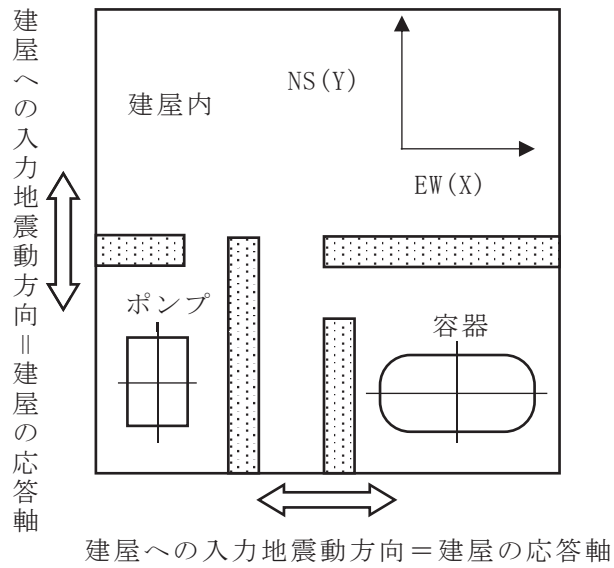
#### 6.2.1 設備の有する耐震性に対して影響がないことの理由

応答軸（設備の弱軸・強軸）の方向、あるいは厳しい応力が発生する向きが明確である設備にて、建物・構築物の応答である NS・EW 方向の応答を機器の応答軸（図 6-1 X, Y 方向）へ入力している場合、水平 1 方向入力としては当然厳しい入力を用いた評価がなされていると考える。（さらに、機器の配置方向とは無関係に機器の応答軸へ地震力を入力している設備や水平方向を包絡した応答を用いるなどの保守性も考慮している。）

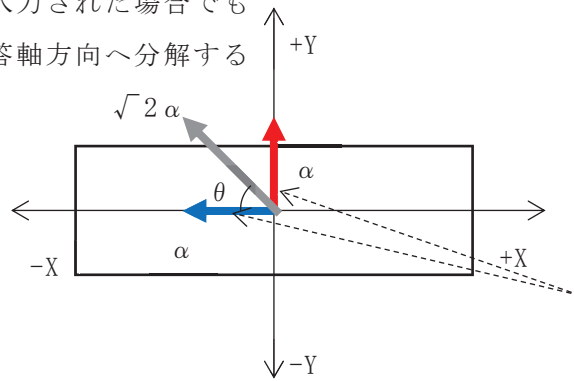
応答軸の方向あるいは厳しい応力が発生する向きが明確である設備について、水平 2 方向の地震力を想定した場合、2 方向の地震力が合成されるとすると、最大値が同時に発生する場合、最大で $\sqrt{2}$ 倍の大きさの入力となることが考えられるが、これらはそれぞれの応答軸方向に応答が分解され、強軸側の応答は十分に小さくなることから、実質的には弱軸方向に 1 方向を入力した評価で用いている応答レベルと同等となる。

さらに各方向における最大値の生起時刻の非同時性を考慮すると、さらにその影響は小さくなり、弱軸 1 方向入力による評価と大きく変わらない結果となる。

なお、6.2 項で述べたとおり、応答軸の方向あるいは厳しい応力が発生する向きが明確である設備について、設計手法として、地震力の入力を NS 方向・EW 方向を包絡した地震力（設計用床応答曲線など）を用いて保守的な評価を実施している場合も考えると、応答軸が明確な設備については、水平 2 方向の地震力を考慮した場合においても影響軽微であることが分かる。



斜め方向が入力された場合でも  
 応答は各応答軸方向へ分解する



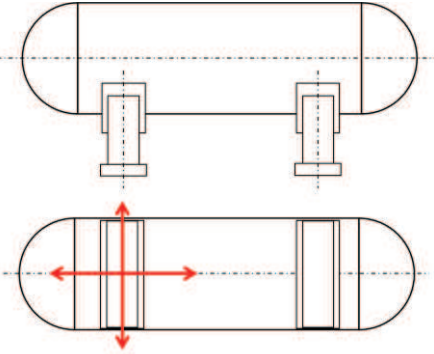
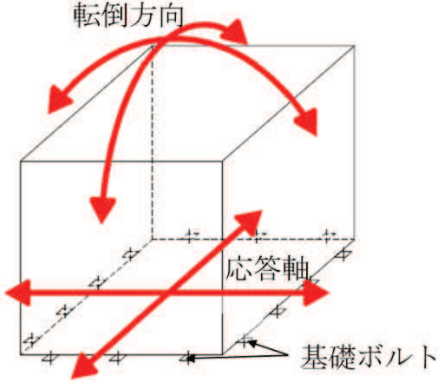
強軸方向（青）に比べて転倒し易い  
 弱軸方向（赤）が最弱条件となる。  
 →従来設計手法においても、弱軸  
 方向での水平1方向による評価を  
 実施しているため評価結果は同等  
 以下となる。

図 6-1 水平 2 方向同時加振時の応答イメージ

### 6.2.2 本考え方が適用可能である設備（部位）例

上述の考え方は、設備の応答軸の方向と入力方向の関係によるものであることから、部位・応力分類によらず、各設備の耐震評価における入力方法によって影響軽微か否かを判断できると考える。本考え方が適用可能である設備の例を表 6-1 に示す。

表 6-1 応答軸が明確な設備について

設備	構造図	説明	備考
横置き容器		<p>横置き円筒形容器は矩形形状の支持脚により支持されており強軸と弱軸の関係が明確である。この応答軸の方向に地震力を入力した評価を実施している。</p>	<p>NS・EW 包絡地震力を用いている。</p>
空調ファン，空調ユニット，横形ポンプ，電気盤（ボルト），非常用ディーゼル機関・発電機（ボルト）		<p>空調ファン及び空調ユニット等は矩形に配置されたボルトにて支持されている。対角方向へ転倒し難く，設備の各応答軸方向へ応答し易いため，その方向に地震を入力した評価を実施している。</p>	<p>NS・EW 包絡地震力を用いている。</p>
ガスタービン発電機		<p>ガスタービン発電機は，固定装置により固定されており強軸と弱軸の関係が明確である。この応答軸の方向に地震力を入力した評価を実施している。</p>	<p>NS・EW 包絡地震力を用いている。</p>

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

## 7. 水平2方向同時加振の影響評価について（正方形配置されたボルト）

### 7.1 はじめに

本項は、水平2方向に地震力が作用した場合の矩形配置されたボルトに対する影響検討結果をまとめたものである。強軸・弱軸が明確なものについては、弱軸方向に応答し水平2方向地震力による影響が軽微であるため、機器の形状を正方形として検討をおこなった。

### 7.2 引張応力への影響

水平1方向に地震力が作用する場合と水平2方向に地震力が作用する場合のボルトへの引張力の違いを考察する。なお、簡単のため機器の振動による影響は考えないこととする。

#### (1) 水平1方向に地震力が作用する場合

図7-1のようにX方向に震度 $C_X$ が与えられる場合を考慮する。

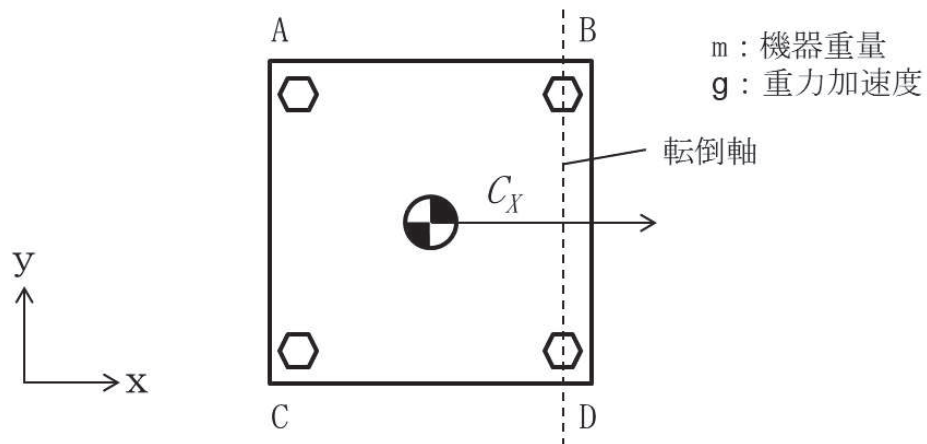


図7-1 水平1方向の地震力による応答（概要）

この場合、対象としている系の重心に作用する水平方向の力 $F_H$ は

$$F_H = mg C_X \quad (\text{式1})$$

と表せ、 $F_H$ によりボルトBとボルトDの中心を結んだ軸を中心に転倒モーメントを生じる。この転倒モーメントはボルトA、Cにより負担される。

このとき、系の重心に生じる力は、図7-2に示すとおりである。

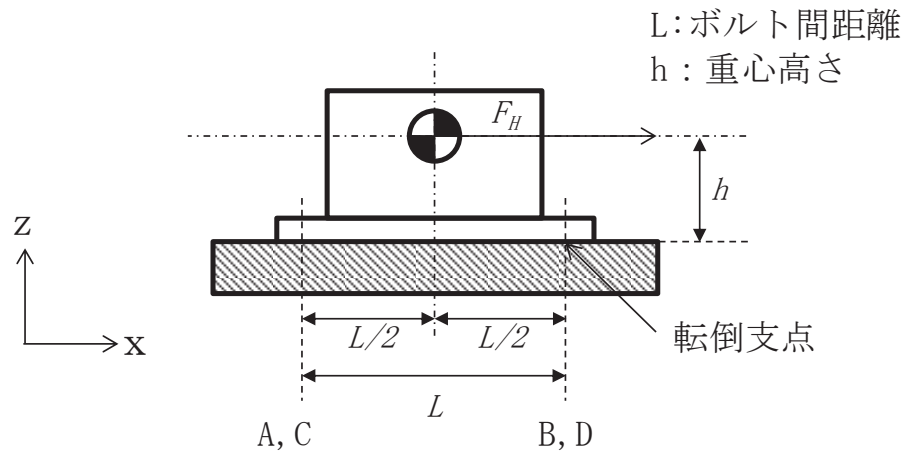


図 7-2 水平 1 方向の地震力による力

機器が転倒を起こさない場合、転倒支点まわりの転倒モーメントとボルトからの反力が釣り合うため、水平方向地震動によりボルトに発生する全引張力  $F_b$  は

$$F_b = \frac{1}{L} (mgC_x h) \quad (\text{式 2})$$

となる。

ボルトに掛かる引張応力  $\sigma_b$  は全引張力を断面積  $A$  のボルト  $n$  本で受けると考え、

$$\sigma_b = \frac{F_b}{n A} \quad (\text{式 3})$$

である。水平 1 方向地震力を考慮する場合、ボルト A, C で全引張力を負担することから、 $n = 2$  であり、ボルトに掛かる引張応力  $\sigma_b$  は

$$\sigma_b = \frac{F_b}{2 A} = \frac{mgC_x h}{2A L} \quad (\text{式 4})$$

となる。



(2) 水平 2 方向に地震力が作用する場合

図 7-3 のように X 方向と Y 方向にそれぞれ震度  $C_X, C_Y$  が作用する場合を考慮する。なお、本検討においては、X 方向と Y 方向に同時に最大震度が発生する可能性は低いと考え、X 方向の震度と Y 方向の震度を  $1 : 0.4$  ( $0.4C_X = C_Y$ ) と仮定する。

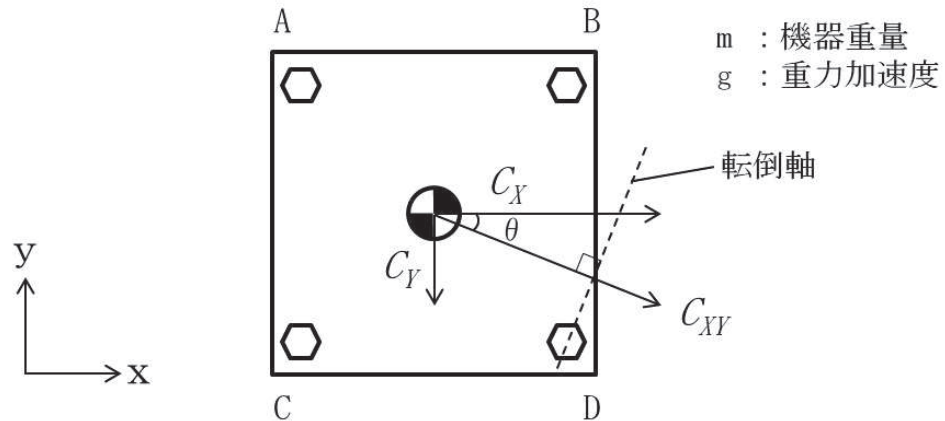


図 7-3 水平 2 方向の地震力による応答 (概要)

この時、 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{C_Y}{C_X}\right) = \tan^{-1}(0.4)$  であることから、水平方向の震度  $C_{XY}$  は

$$\begin{aligned} C_{XY} &= C_X \cos \theta + C_Y \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \\ &= \frac{5}{\sqrt{29}} C_X + 0.4 \times \frac{2}{\sqrt{29}} C_X \\ &= \frac{5.8}{\sqrt{29}} C_X \end{aligned} \quad (\text{式 5})$$

と表すことができる。この時、対象としている系の重心に作用する水平方向の力  $F_H$  は

$$F_H = mg C_{XY} = mg \frac{5.8}{\sqrt{29}} C_X \quad (\text{式 6})$$

となる。この  $F_H$  により、転倒軸を中心に転倒モーメントが生じ、ボルト A, B, C により負担される。

水平 2 方向の地震力を受けた場合、各ボルトにかかる引張力を  $F_A, F_B, F_C$  とし、図 7-4 に示すようにボルト D の中心を通り水平方向の震度  $C_{XY}$  と直交する直線を転倒軸とすると、

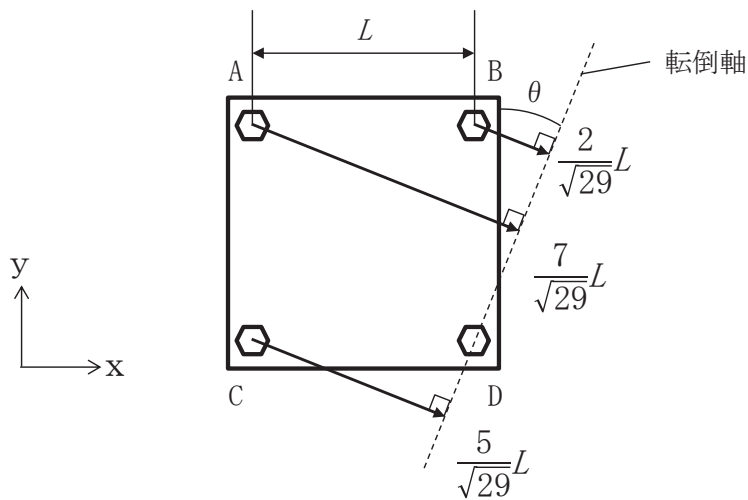


図 7-4 対角方向に応答する場合の転倒軸からの距離

ボルト A, B, C に発生する引張力は転倒軸からの距離に比例するため、

$$F_A : F_B : F_C = 7 : 2 : 5$$

であり、転倒軸周りのボルトの軸力により発生するモーメント M は、

$$\begin{aligned} M &= \frac{7}{\sqrt{29}}LF_A + \frac{2}{\sqrt{29}}LF_B + \frac{5}{\sqrt{29}}LF_C \\ &= \frac{7}{\sqrt{29}}L \times F_A + \frac{2}{\sqrt{29}}L \times \frac{2}{7}F_A + \frac{5}{\sqrt{29}}L \times \frac{5}{7}F_A \\ &= \frac{78}{7\sqrt{29}}LF_A \quad (\text{式 7}) \end{aligned}$$

である。

転倒しない場合、ボルトの軸力により発生する転倒軸周りのモーメントと、水平方向地震力によるモーメントが釣り合っているので、(式 6) 及び (式 7) より、

$$mgC_{XY} h = \frac{78}{7\sqrt{29}}LF_A \quad (\text{式 8})$$

であり、引張力  $F_A$  は以下のとおりとなる。

$$F_A = \frac{7\sqrt{29}}{78L} mgC_{XY} h \quad (\text{式 9})$$

以上より，最も発生応力の大きいボルト A に発生する応力  $\sigma_b'$  は

$$\sigma_b' = \frac{F_A}{A} = \frac{7\sqrt{29}}{78AL} mgC_{XY} h \quad (\text{式 10})$$

であり，(式 4) (式 5) 及び (式 10) より

$$\begin{aligned} \sigma_b' &= \frac{F_A}{A} = \frac{7\sqrt{29}}{78AL} \times \frac{5.8}{\sqrt{29}} mgC_X h \\ &= \frac{7 \times 5.8}{39} \times \frac{mgC_X h}{2AL} \\ &= \frac{40.6}{39} \times \sigma_b \\ &\cong 1.04 \sigma_b \end{aligned} \quad (\text{式 11})$$

となる。

したがって，水平 2 方向地震を考慮した場合，ボルトに発生する引張応力は増加するが，その影響は軽微である。

### 7.3 せん断応力への影響

せん断力は全基礎ボルト断面で負担するが，全ボルトに対するせん断力  $Q_b$  は，

$$Q_b = F_H \quad (\text{式 12})$$

であり，せん断応力  $\tau_b$  は断面積  $A$  のボルト全本数  $n$  でせん断力  $Q_b$  を受けるため，

$$\tau_b = \frac{Q_b}{nA} \quad (\text{式 13})$$

となる。

水平 1 方向の地震力を考慮した場合のせん断力  $Q_b$  及び水平 2 方向の地震力を考慮した場合のせん断力  $Q_b'$  は (式 1) 及び (式 5) より

$$Q_b = mgC_X \quad (\text{式 14})$$

$$Q_b' = mgC_{XY}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{5.8}{\sqrt{29}} mgC_x \\ &\cong 1.08 mgC_x \end{aligned} \quad (\text{式 15})$$

となる。水平 1 方向及び水平 2 方向地震時に断面積  $A$  及びボルト全本数  $n$  は変わらないため、水平 2 方向地震を考慮した場合、ボルトに発生するせん断応力は増加するが、その影響は軽微である。

## 8. 水平2方向同時加振の影響評価について（円形配置されたボルト）

### 8.1 はじめに

本項は、水平2方向に地震力が作用した場合の円形配置されたボルトに対する影響検討結果をまとめたものである。なお、せん断応力への影響は、円形／矩形の配置形状に依らず、7章に記載している矩形配置されたボルトと同様に影響軽微となるため、本章における検討では省略する。

円形配置されたボルトは、支持する構造物から伝達される地震力を受け持つことから、4章に記載している円筒容器の検討結果を踏まえた検討を行う。具体的には、図8-1に示す円筒容器基部における水平地震時の軸方向応力コンター図において、180°方向位置にて円筒容器の軸方向応力に算定されるZ方向荷重を1.00と規格化し、円形配置されたボルトに作用する引張荷重 $F_b$ と考慮した検討を行う。

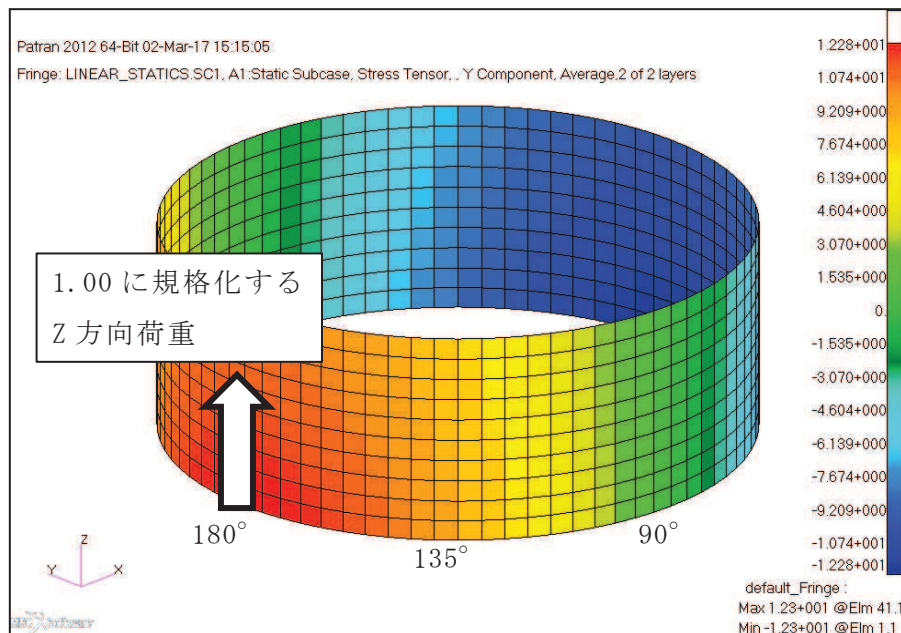


図 8-1 水平地震時軸方向応力コンター図

## 8.2 引張応力への影響

円形配置されたボルトに作用する引張荷重  $F_b$  の分布を表 8-1 に示す。X 方向に水平地震動を入力した際には、最大荷重発生点は  $180^\circ$  方向位置に発生する。また、円筒形容器のため評価部位が円形の一様断面であることから、Y 方向に水平地震動を入力した際には、最大荷重発生点は  $90^\circ$  位置に発生し、水平地震動の入力方向により最大荷重発生点は異なる。

表 8-1 水平地震時の引張荷重分布

角度	X 方向入力時	Y 方向入力時	2 方向入力時荷重(－)	
	引張荷重 (－) $F_{b,x}(\theta)$	引張荷重 (－) $F_{b,y}(\theta)$	組合せ係数法 $F_{b,c}(\theta)$	SRSS 法 $F_{b,s}(\theta)$
$90^\circ$ 方向	0.00	1.00	1.00 $F_{b,c(X)}(90^\circ)=0.40$ $F_{b,c(Y)}(90^\circ)=1.00$	1.00
$112.5^\circ$ 方向	0.38	0.91	1.08 $F_{b,c(X)}(112.5^\circ)=0.75$ $F_{b,c(Y)}(112.5^\circ)=1.08$	1.00
$135^\circ$ 方向	0.71	0.71	0.99 $F_{b,c(X)}(135^\circ)=0.99$ $F_{b,c(Y)}(135^\circ)=0.99$	1.00
$157.5^\circ$ 方向	0.91	0.38	1.08 $F_{b,c(X)}(157.5^\circ)=1.08$ $F_{b,c(Y)}(157.5^\circ)=0.75$	1.00
$180^\circ$ 方向	1.00	0.00	1.00 $F_{b,c(X)}(180^\circ)=1.00$ $F_{b,c(Y)}(180^\circ)=0.40$	1.00

水平 2 方向同時加振時の引張荷重の合力は、水平 1 方向加振時の最大の引張荷重と比較し、SRSS 法を用いた場合は同値、組合せ係数法を用いた場合は最大で約 1.08 倍の値となる (図 8-2) ため、水平 2 方向同時加振の引張応力への影響は軽微である。

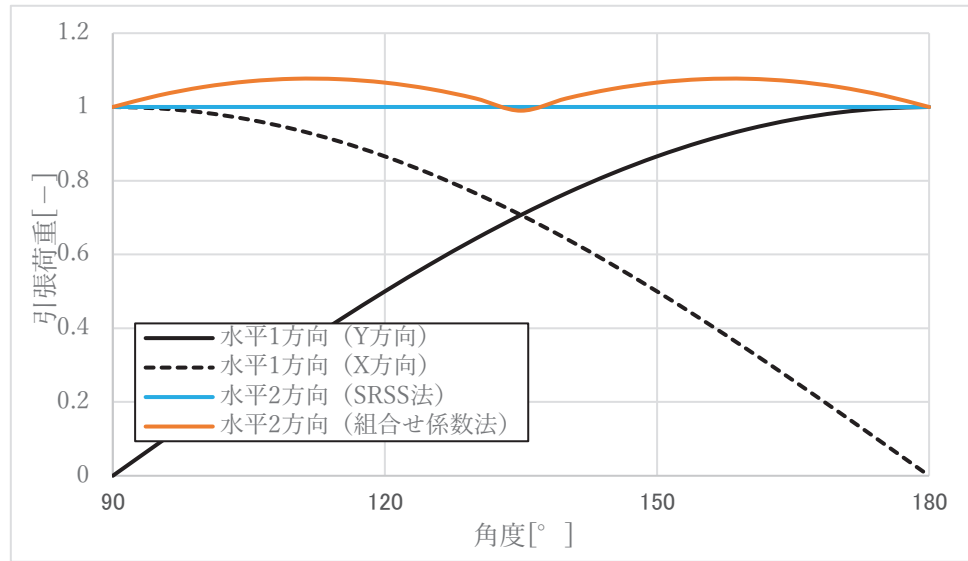


図 8-2 水平 2 方向同時加振時の水平力分布について

## 9. 水平 2 方向同時加振の影響評価について（電気盤）

### 9.1 はじめに

本項は、電気盤に取り付けられている器具に対する水平 2 方向入力の影響をまとめたものである。

### 9.2 水平 2 方向加振の影響について

器具への影響検討については器具の構造に着目した分類を行い、分類ごとに影響検討を行う。影響検討の評価フローを図 9-1 に、器具の構造ごとの分類結果を表 9-1 に示す。

電気盤に取り付けられている器具については、1 次元的な接点の ON-OFF に関わる比較的単純な構造をしている。加えて、基本的にはすべて梁、扉等の強度部材に強固に固定されているため、器具の非線形応答もなく、水平 2 方向の加振に対しては独立に扱うことで問題ないものとする。さらに器具の誤動作モードは、水平 1 方向を起因としたモードであるため、水平 2 方向加振による影響は軽微であるとする。

次項より表 9-1 に示す分類ごとに器具の構造から検討した結果を示す。

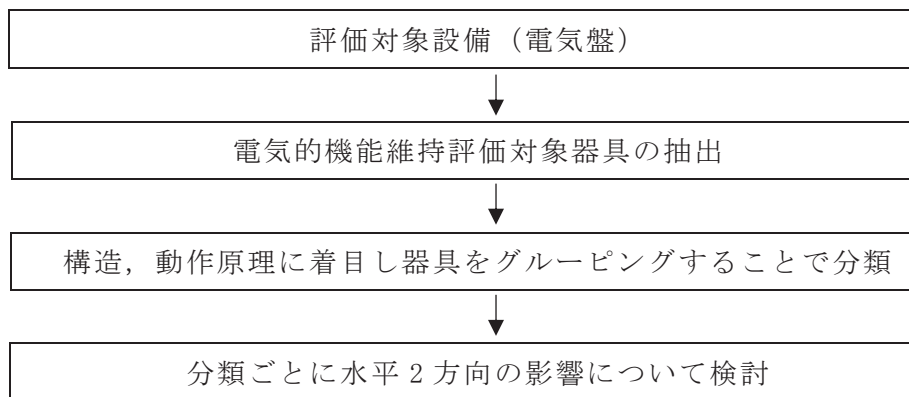


図 9-1 電気盤に取り付られる器具の影響検討フロー



表 9-1 電気盤に取り付けられる器具の分類

分類番号	分類名称	器具取付設備例
1	補助リレー	重大事故時モニタ盤(2)
2	ノーヒューズブレーカ	原子炉冷却制御盤 ESS-I・III
3	過電流リレー (保護リレー)	6.9kV メタルクラッドスイッチギア 6-2G
4	真空遮断器	6.9kV メタルクラッドスイッチギア 6-2G
5	気中遮断器	460V パワーセンタ 4-2G
6	電磁接触器	460V 原子炉建屋 MCC 2G-1
7	操作スイッチ	原子炉冷却制御盤 ESS-I・III
8	ロックアウトリレー	非常用ディーゼル発電機 2A 制御盤
9	カード類	2号 SPDS 緊急時伝送盤(1)
10	指示計	原子炉冷却制御盤 ESS-I・III

### 9.3 器具の構造に着目した影響検討結果

#### 9.3.1 補助リレー

##### (1) 構造，作動機構の概要

図 9-2 に補助リレーの構造及び作動機構を示す。補助リレーはコイルに通電されることにより生じる電磁力で可動鉄心部を動作させ，接点の開閉を行うものである。

補助リレーのうち，固定鉄心，固定接点はいずれも強固に固定されており，可動接点は前後方向にのみ動くことのできる構造になっている。



図 9-2 補助リレー構造図

##### (2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

図 9-2 から，器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・地震力で可動接点が振動することにより，接点が誤接触，又は誤開放する（前後方向）

ただし，補助リレーは取付部をボルト固定していること，また，器具の可動部は前後方向にのみ振動することから，誤動作にいたる事象に多次元的な影響はないと考えられる。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度と補助リレーの既往試験での確認済加速度を表 9-2 に示す。

表 9-2 補助リレーの発生加速度及び機能確認済加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )

方向	水平	鉛直
評価用加速度*	2.41	1.69
確認済加速度		

注記\* : 2号機制御建屋 0.P. 23. 45mにおける添付書類「VI-2-1-7 設計用床  
応答曲線の作成方針」に基づき設定した値を記載。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

### 9.3.2 ノーヒューズブレーカ

#### (1) 構造，作動機構の概要

図 9-3 にノーヒューズブレーカの構造及び作動機構を示す。ノーヒューズブレーカには熱動電磁式と完全電磁式がある。下記に代表として熱動電磁式の動作原理と内部構造を示す。

熱動電磁式は、過電流が流れるとバイメタルが湾曲し、トリップ桿によりラッチの掛け合いが外れ、キャッチがバネにより回転し、リンクに連結された可動接点が作動し回路を遮断する。また、短絡電流等の大電流が流れた場合は、固定鉄心の電磁力で可動鉄心が吸引されトリップ桿が作動し、以降は上述と同じ動作により回路を遮断する。

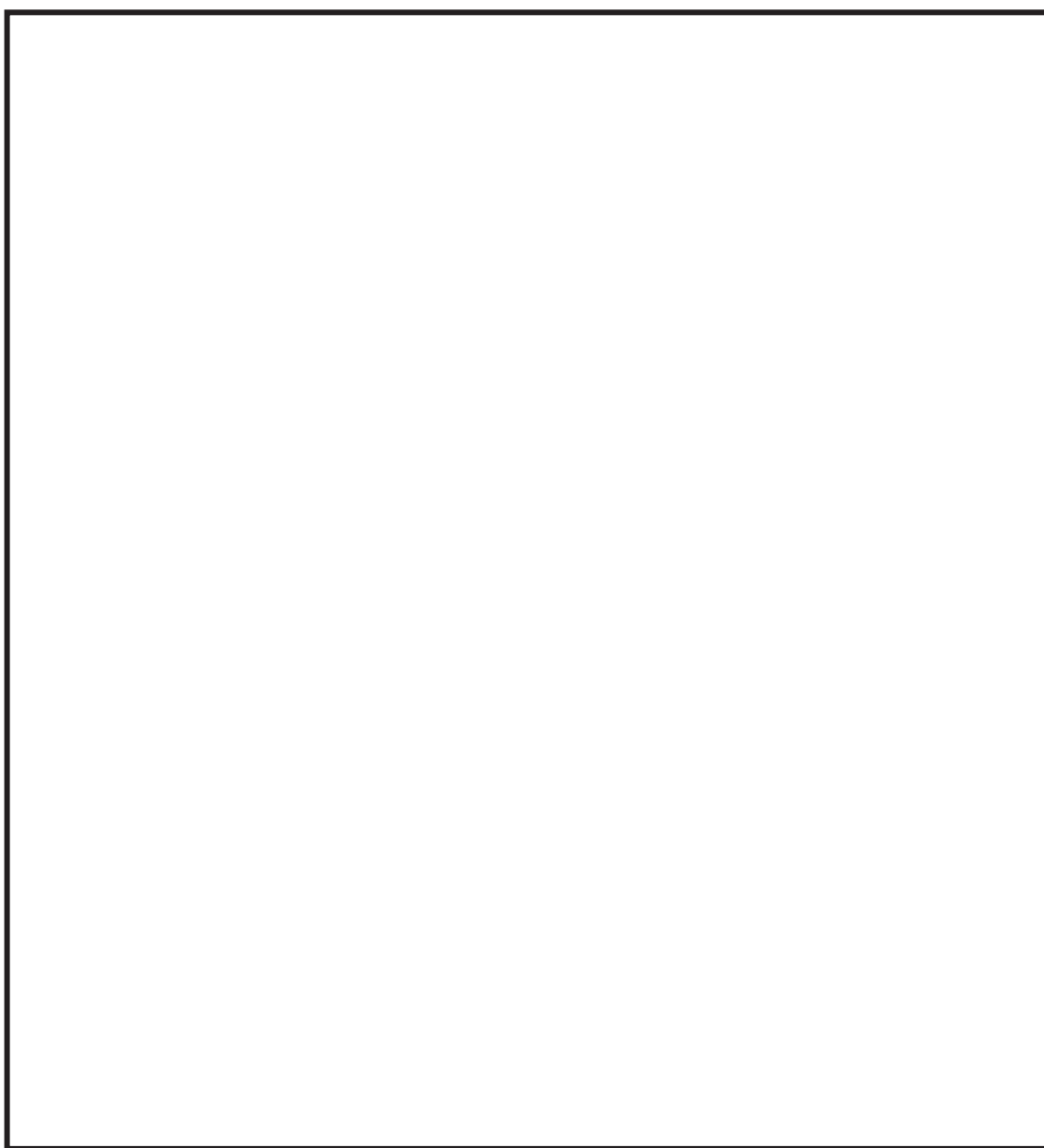


図 9-3 ノーヒューズブレーカ構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

図 9-3 から、器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・ハンドルが逆方向へ動作する（上下方向）
- ・接点が乖離する（前後方向，左右方向）
- ・ラッチが外れてトリップする（前後方向，上下方向）

従って、ノーヒューズブレーカの誤動作として 2 方向の振動の影響が考えられる。ただし、ハンドルは 1 方向にしか振動できないこと、前後－左右の接点乖離は各々独立であること（前後方向は接触－非接触，左右方向はずれによる）から、これらについては誤動作に至る事象は多次元的な影響はないものと考えられる。

ラッチ外れについては 2 軸（前後方向，上下方向）の影響は無視できないと考えられるが、左右方向はラッチ外れに影響を与える誤動作モードではないため、水平 2 方向の影響はないものと考えられる。なお、既往試験においては、ハンドルの移動に起因する誤動作事象は発生していない。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度とノーヒューズブレーカの既往試験での確認済加速度を表 9-3 に示す。

表 9-3 ノーヒューズブレーカの発生加速度及び機能確認済加速度（ $\times 9.8\text{m/s}^2$ ）

方向	水平	鉛直
評価用加速度*	2.41	1.69
確認済加速度		

注記\*：2号機制御建屋 0.P. 23.45m における添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した値を記載。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

### 9.3.3 過電流リレー（保護リレー）

#### (1) 構造，作動機構の概要

図 9-4 に過電流リレー（保護リレー）の構造を示す。過電流リレーに用いているデジタル型リレーでは，計器用変流器からの入力電流をデジタル信号に変換後，演算処理回路で動作判定して設定値を超過すると補助リレーが励磁され接点が閉となる。なお，過電流リレーはボルトにて，盤の扉面に強固に取り付けられている。

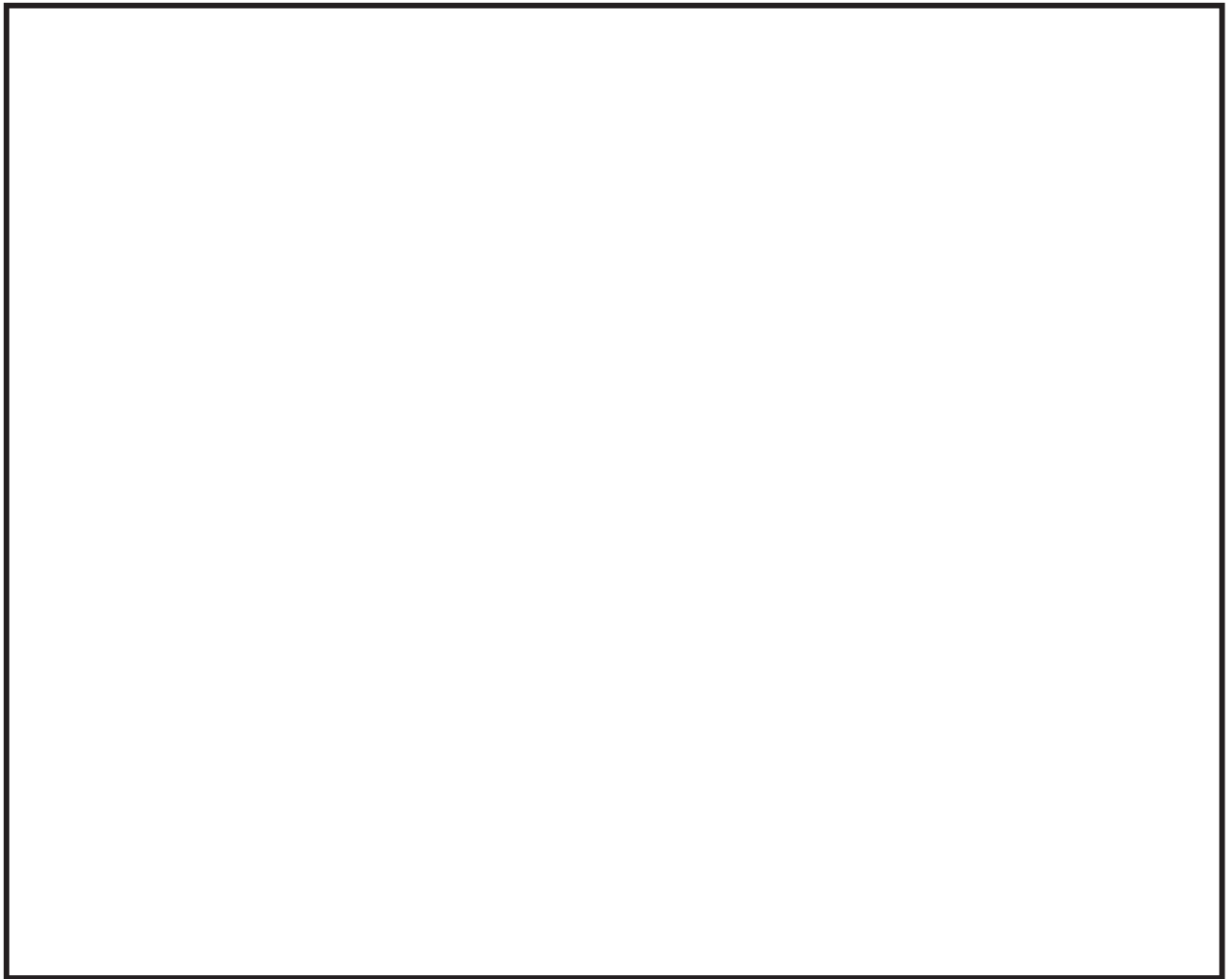


図 9-4 過電流リレー構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

図 9-4 から、器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・可動接点が振動により誤接触又は誤開放する（前後方向）

過電流リレーは盤に強固に固定されていること、器具の可動部は 1 方向（前後方向）にのみ振動することから、誤動作にいたる事象に多次元的な影響はないと考えられる。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度と過電流リレーの既往試験での確認済加速度を表 9-4 に示す。

表 9-4 過電流リレーの発生加速度及び機能確認済加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )

方向	水平	鉛直
評価用加速度*	1.77	1.30
確認済加速度		

注記\* : 2号機原子炉建屋 0.P. 22.50m における添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した値を記載。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

#### 9.3.4 真空遮断器

##### (1) 構造，作動機構の概要

図 9-5 に真空遮断器の構造を示す。真空遮断器は，遮断部，動作機構部から構成されており，投入コイル又はトリップコイルが励磁されると動作機構部が動作し遮断部が開閉する。なお，真空遮断器は遮断器室内に設けられた主回路断路部，制御回路断路部と係合しているため，容易に振動しない構造となっている。

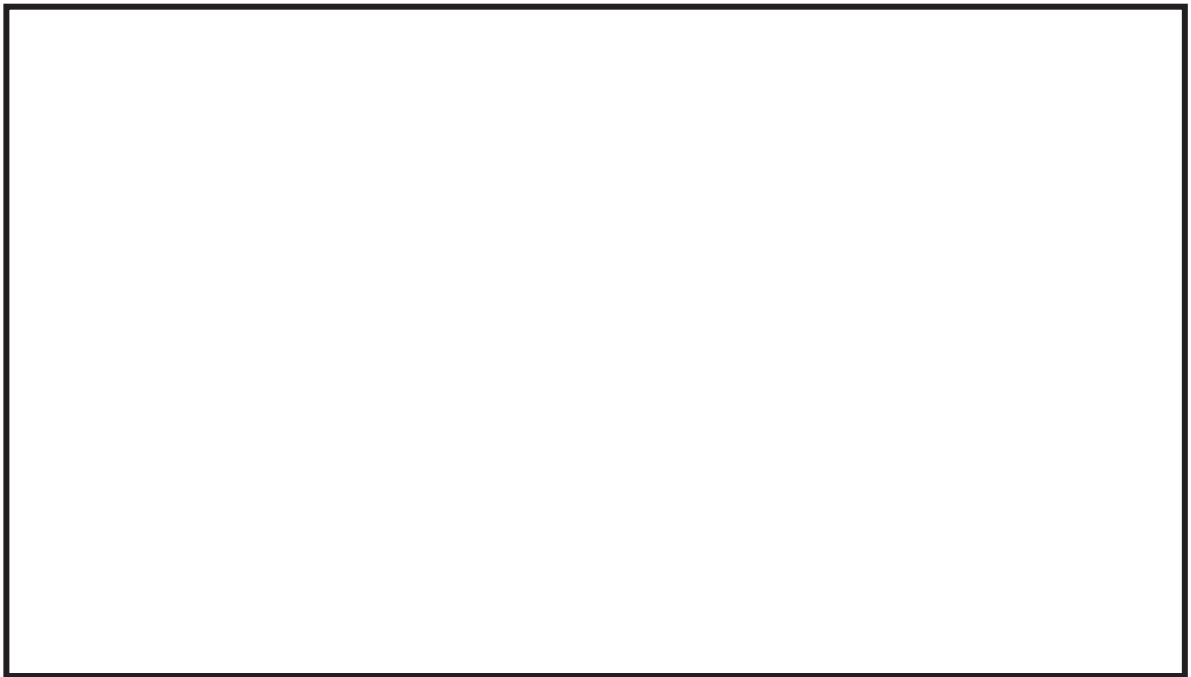


図 9-5 真空遮断器構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



次に図 9-6 に真空遮断器の動作機構を示す。投入時は投入コイルが励磁されると投入パドルが回転して、投入キャッチと投入シャフトの係合が外れ、投入ばね荷重により投入カムが回転して閉路状態となる。開放時はトリップコイルが励磁されると、トリップキャッチが回転し、トリップキャッチとトリップローラの係合が外れ開路状態となる。

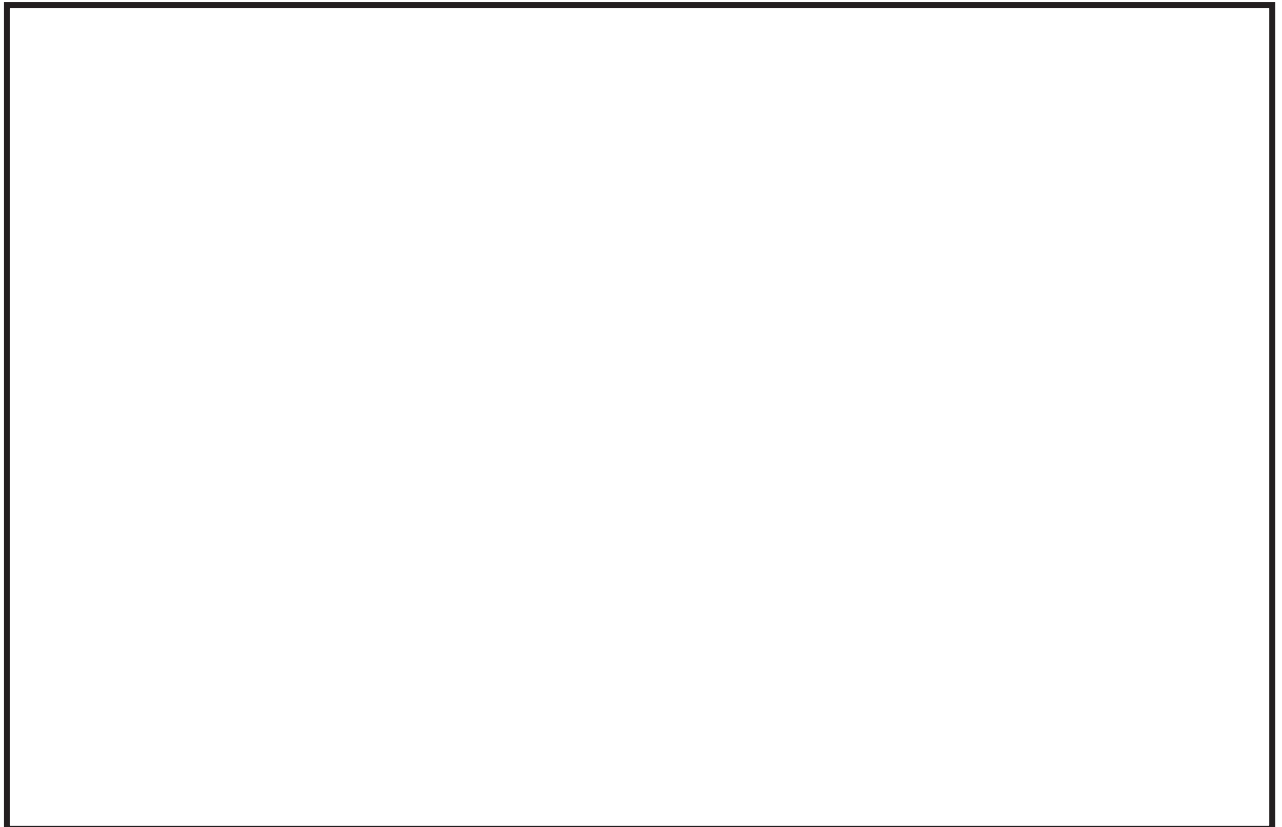


図 9-6 動作機構図

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

図 9-5, 9-6 から、器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・ 動作機構部が動作し、遮断器が誤投入する。(前後方向, 上下方向)
- ・ 動作機構部が動作し、遮断器投入状態が解除され、遮断器が誤開放する。(前後方向, 上下方向)

ただし、動作機構部は前後方向及び上下方向にのみ可動するため、水平 2 方向の影響はないものと考えられる。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度と真空遮断器の既往試験での確認済加速度を表 9-5 に示す。

表 9-5 真空遮断器の発生加速度及び機能確認済加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )

方向	水平	鉛直
評価用加速度*	1.77	1.30
確認済加速度		

注記\* : 2号機原子炉建屋 O.P. 22.50m における添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した値を記載。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

### 9.3.5 気中遮断器

#### (1) 構造，作動機構の概要

図 9-7 に気中遮断器の構造を示す。気中遮断器は，遮断部，動作機構部から構成されており，投入コイル又は引外しコイルが励磁されると動作機構部が動作し遮断部が開閉する。なお，気中遮断器は盤内にボルトで固定された引出装置の溝の気中遮断器側面にあるスタッドで係合されているため，容易に振動しない構造となっている。

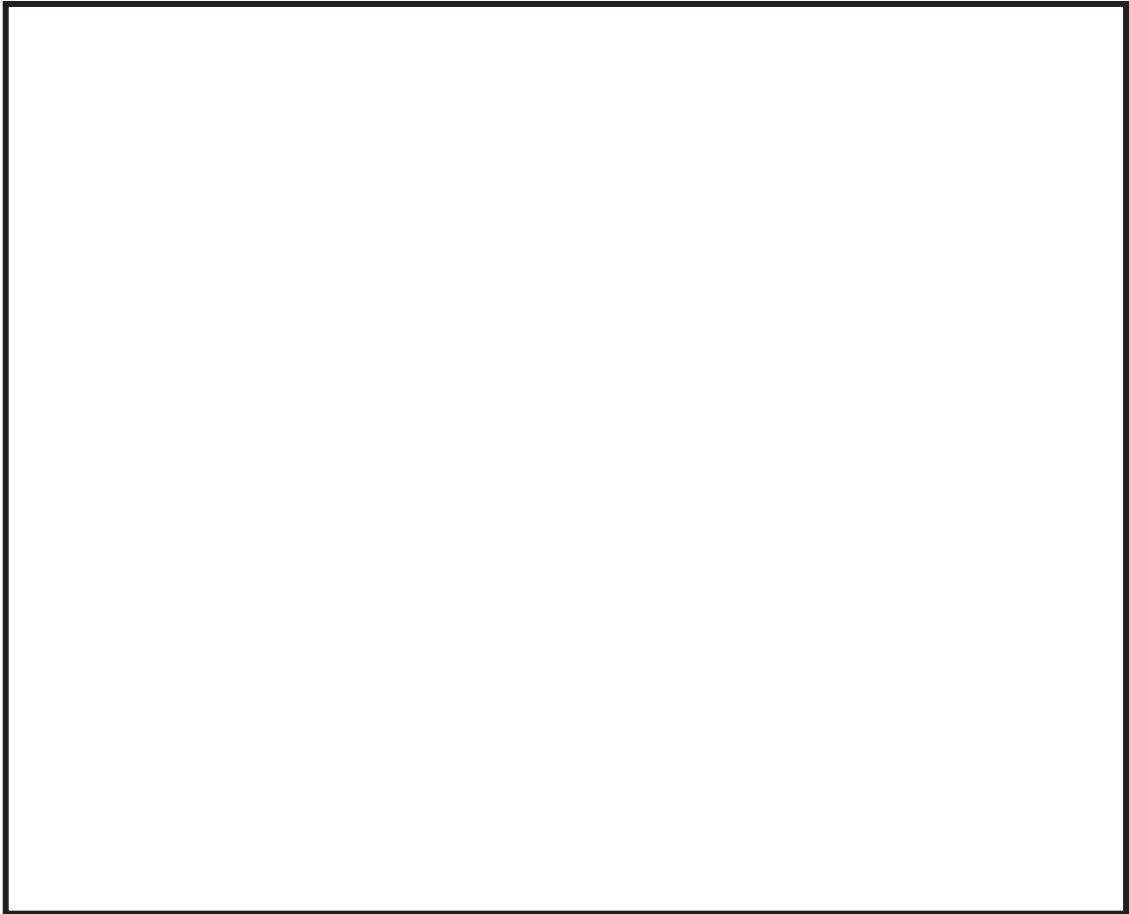


図 9-7 気中遮断器構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

次に図 9-8 に気中遮断器の動作機構を示す。投入動作は、投入ボタンの押下又は投入コイルの励磁により投入カムが急速に回転し閉じる。また、開放動作は、引外しボタンの押下又は引外しコイルの励磁により引外しキャッチが外れ、接触子が開く。

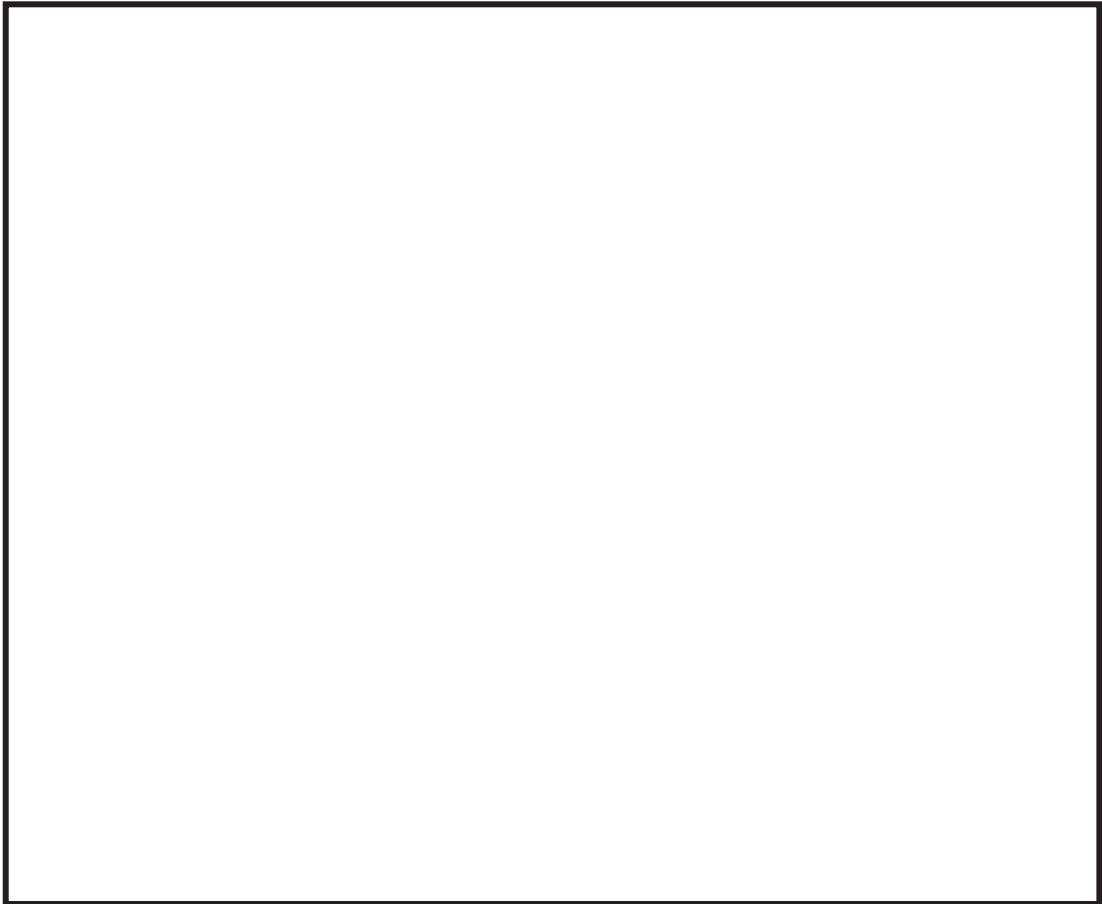


図 9-8 動作機構図

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

図 9-8 から、器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・ 動作機構部が動作し、遮断器が誤投入する。(前後方向, 上下方向)
- ・ 引外しボタンや動作機構部が動作し、遮断器投入状態が解除され、遮断器が誤開放する。(前後方向, 上下方向)

ただし、動作機構部は前後方向及び上下方向にのみ可動するため、水平 2 方向の影響はないものと考えられる。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度と気中遮断器の既往試験での確認済加速度を表 9-6 に示す。

表 9-6 気中遮断器の発生加速度及び機能確認済加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )

方向	水平	鉛直
評価用加速度*	1.31	0.91
確認済加速度		

注記\* : 2号機原子炉建屋 0.P.6.00mにおける添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した値を記載。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

### 9.3.6 電磁接触器

#### (1) 構造，作動機構の概要

図 9-9 に電磁接触器の構造及び作動機構を示す。電磁接触器は，コイルに通電されることにより生じる電磁力により可動鉄心を動作させ，接点の開閉を行うものである。

電磁接触器のうち，固定鉄心，固定接点はいずれも強固に固定されており，可動鉄心，可動接点は器具の前後方向にのみ動くことができる構造になっている。

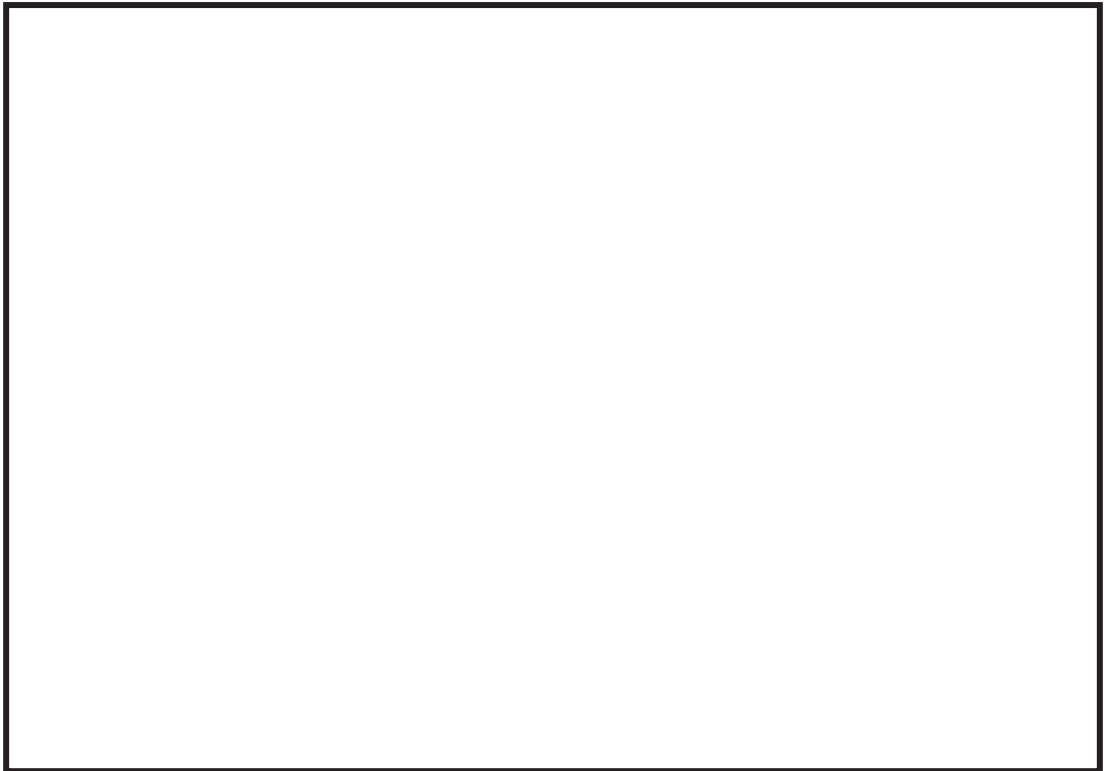


図 9-9 電磁接触器構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

図 9-9 から、器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・地震力で可動鉄心（可動接点）が振動することにより、接点が誤接触又は誤開放する。（前後方向）

ただし、電磁接触器は取付部をボルトで固定していること、器具の可動部は前後方向にのみ振動することから、誤動作にいたる事象に多次元的な影響はないと考えられる。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度と電磁接触器の既往試験での確認済加速度を表 9-7 に示す。

表 9-7 電磁接触器の発生加速度及び機能確認済加速度（ $\times 9.8\text{m/s}^2$ ）

方向	水平	鉛直
評価用加速度*	1.77	1.30
確認済加速度		

注記\*：2号機制御建屋 0.P. 22.50m における添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した値を記載。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

### 9.3.7 操作スイッチ

#### (1) 構造，作動機構の概要

図 9-10 に操作スイッチの構造及び作動機構を示す。操作スイッチは，手動にてハンドルを回転させることで内部のカムが回転し，カムの可動接触子と固定接触子が嵌め合うことで接点の開閉を行うものである。なお，操作スイッチは，ボルトにより盤に強固に取り付けられている。



図 9-10 操作スイッチ構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

図 9-10 から、器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・地震力で可動接点が振動することにより、接点が誤接触又は誤開放する。

(左右方向)

ただし、可動接点の動作は左右の 1 方向のみであるため、誤動作に至る事象に多次元的な影響はないと考えられる。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度と操作スイッチの既往試験での確認済加速度を表 9-8 に示す。

表 9-8 操作スイッチの発生加速度及び機能確認済加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )

方向	水平	鉛直
評価用加速度*	2.41	1.69
確認済加速度		

注記\* : 2号機制御建屋 O.P. 23.45m における添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した値を記載。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

### 9.3.8 ロックアウトリレー

#### (1) 構造，作動機構の概要

図 9-11 にロックアウトリレーの構造及び作動機構を示す。ロックアウトリレーは，コイルに電圧が印加されるとヒンジ形アーマチュアが吸引され，バネの絞られた復帰力によってシャフトを反時計方向に回転し，接点の開閉を行うものである。また，ロックアウトリレーはボルトにて盤に強固に取り付けられている。

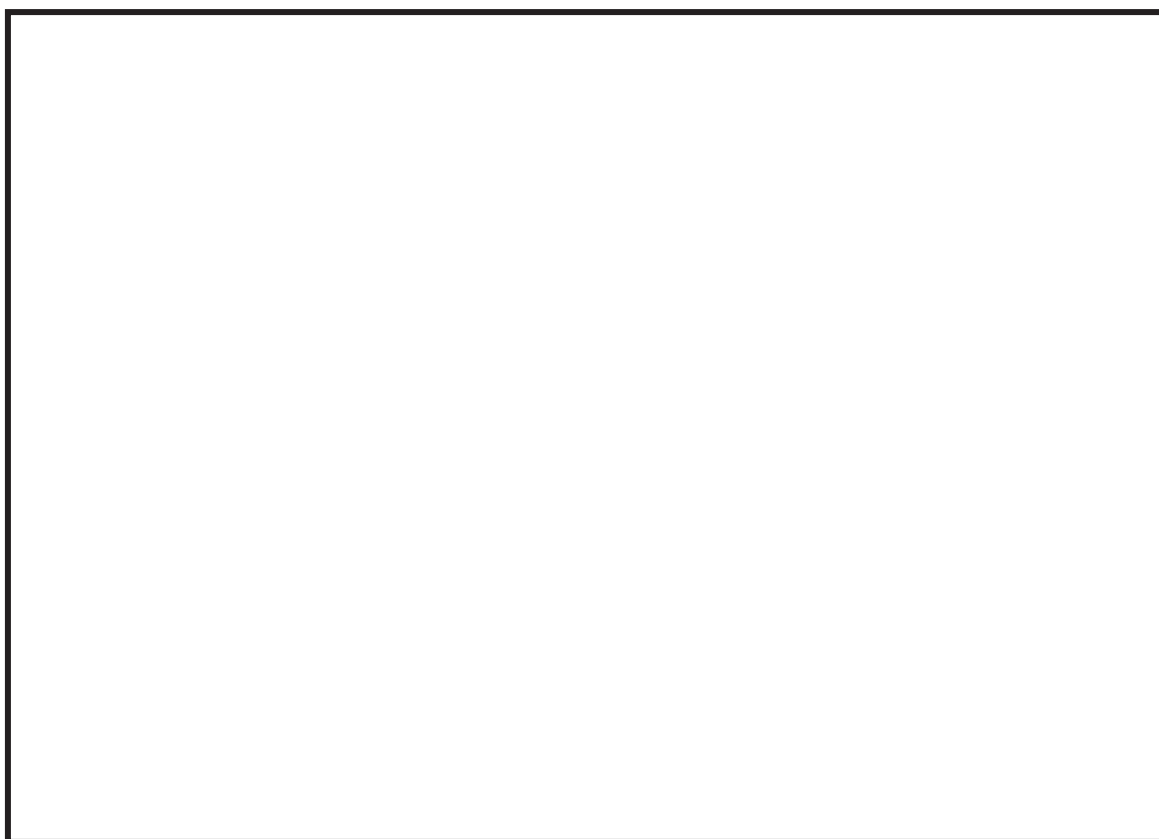


図 9-11 ロックアウトリレー構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

図 9-11 から，器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・地震力で可動接点が振動することにより，接点が誤接触，誤開放する。（左右方向）
- ・地震力でキャッチが解除されることにより，接点が誤接触，誤開放する。（上下方向）

ただし，可動接点は左右方向，キャッチは上下方向にのみ可動することから，水平 2 方向の影響はないものと考えられる。

(3) 機能確認済加速度

参考として，発生加速度とロックアウトリレーの既往試験での確認済加速度を表 9-9 に示す。

表 9-9 ロックアウトリレーの発生加速度及び機能確認済加速度（ $\times 9.8\text{m/s}^2$ ）

方向	水平	鉛直
評価用加速度*	1.65	1.15
確認済加速度		

注記\*：2号機原子炉建屋 0.P.15.00mにおける添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した値を記載。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

### 9.3.9 カード類

#### (1) 構造，作動機構の概要

図 9-12 にカード類の構造及び作動機構を示す。カード類は，基板がシャーシに実装された状態で盤に取り付けられており，シャーシは盤にボルトで固定されている。

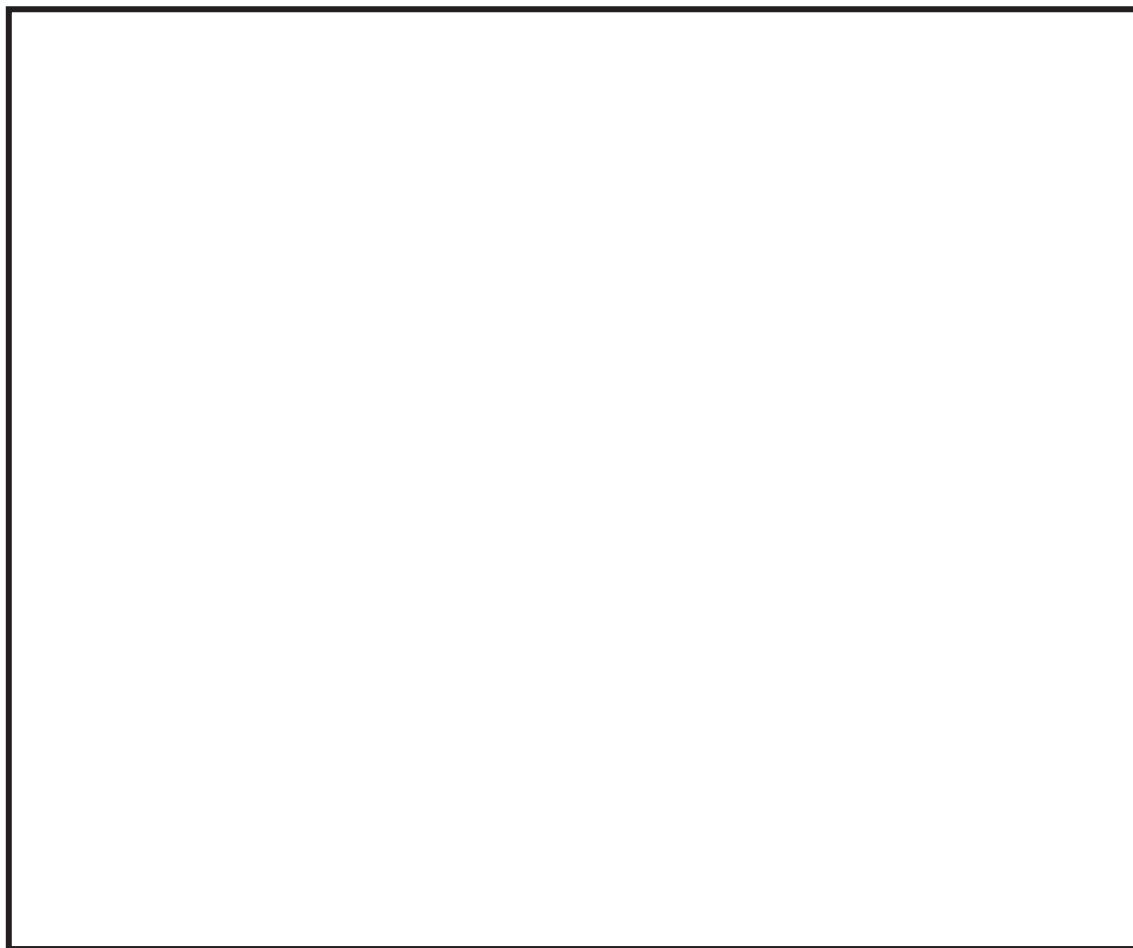


図 9-12 カード類構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

図 9-12 から，器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・地震力により基板がシャーシから脱落する（前後方向）

ただし，基板類の取付方向は前後方向であり，ネジにより前後方向を抑える構造となっていることから，誤動作に至る事象に多次元的な影響はないと考えられる。

(3) 機能確認済加速度

参考として，発生加速度とカード類の既往試験での確認済加速度を表 9-10 に示す。

表 9-10 カード類の発生加速度及び機能確認済加速度 (×9.8m/s<sup>2</sup>)

方向	水平	鉛直
評価用加速度*	2.41	1.69
確認済加速度		

注記\*：2号機制御建屋 0.P.23.469mにおける添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した値を記載。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

### 9.3.10 指示計

#### (1) 構造，作動機構の概要

図 9-13 に指示計の構造及び作動機構を示す。指示計は，圧力・水位・流量・電圧・電流等のプロセス値に相当する電気信号を入力し，目盛板に表示させるものである。また，指示計は取付ボルトにより盤に強固に取り付けられている。

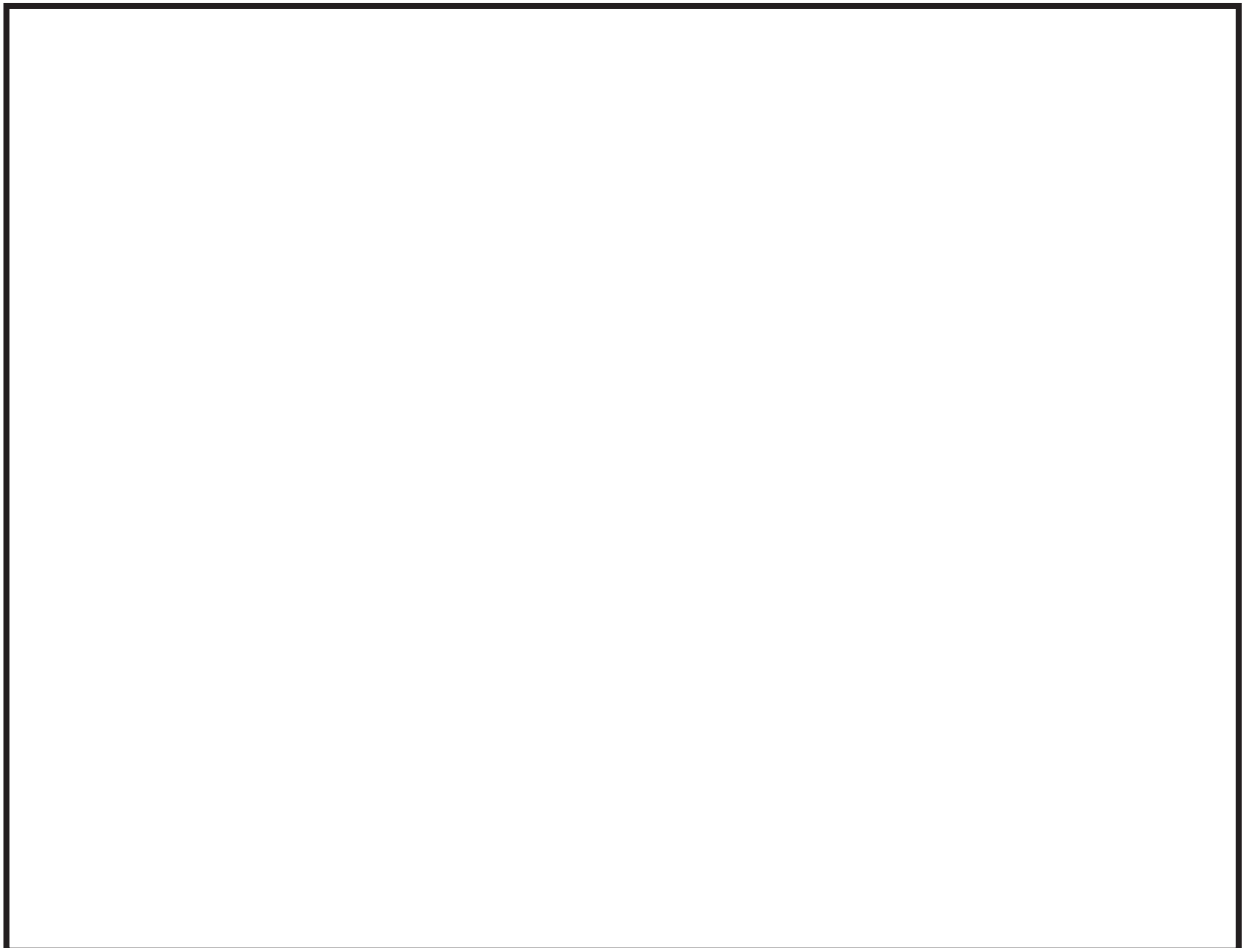


図 9-13 指示計構造図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

図 9-13 から，器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・地震力により指針が振動することにより，指針の指示に誤差が生じる。(上下，左右方向)

ただし，図 9-13 に示す指示計（縦形）については指針の可動方向は上下方向であるため，誤動作にいたる事象に多次元的な影響はないと考えられる。

また，図 9-13 に示す指示計（横形）については器具の可動部は左右方向にのみ振動することから，誤動作にいたる事象に多次元的な影響はないと考えられる。

(3) 機能確認済加速度

参考として，発生加速度と指示計の既往試験での確認済加速度を表 9-11 に示す。

表 9-11 指示計の発生加速度及び機能確認済加速度 ( $\times 9.8\text{m/s}^2$ )

方向	水平	鉛直
評価用加速度*	2.41	1.69
確認済加速度		

注記\* : 2号機制御建屋 0.P.23.45mにおける添付書類「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定した値を記載。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

## 10. 水平 2 方向同時加振の影響について（動的機能維持）

### 10.1 はじめに

動的機器の機能維持評価における保守性の観点より、水平 2 方向同時入力を考慮した場合の影響をまとめたものである。

### 10.2 機能維持評価法について

動的機器の機能維持は、動的地震力を適用し、試験による評価、解析による評価により行う。試験による評価では実物モデル等の振動試験を、解析による評価では応力・変形の解析結果を用いて、要求される安全機能が維持されることを確認する。

機種ごとの代表的な機器について、上記検討を実施した既往の試験・研究の成果から機能確認済加速度（以下「At」という。）が定められ、これにより、地震動により生じる加速度レベルが At より小さいことを確認することで、安全機能が維持されることを確認できる。なお、この手法は全ての機器について、詳細評価を実施するまでもなく機能維持を確認するための合理的な方法として確立された手法である。

### 10.3 機能維持確認済加速度の保守性

動的機器の At については、加振台の加振限界及び機器仕様の多様性等の理由から、本来の機器の機能限界加速度ではなく、保守的な範囲内で定められている。その保守性については、代表機器の At での詳細評価において、機能維持に必要な各部位\*の裕度が十分に高いことから確認することができる。

#### 注記\*：動的機器の評価項目について

解析評価における動的機器の機能維持に必要な基本評価項目（部位）は、振動特性試験により振動特性及び応答特性を把握し、機能試験の結果を踏まえ、異常要因分析に基づき抽出されている。前述のとおり At は保守的に定められており、地震応答加速度が At を上回ったとしても、個別に当該機器の基本評価項目を解析評価することで、機器の健全性が確認できる。

### 10.4 水平 2 方向同時入力（鉛直方向含む）の影響について

水平 2 方向同時入力による動的機能維持評価については、影響有無を整理の上、NS 方向 EW 方向の応答加速度を SRSS した結果、At を満たしており耐震性に問題が無いことを確認することとしているが、保守的に水平 1 方向の応答加速度を $\sqrt{2}$ 倍したとしても、機能維持評価の保守性により、対象の動的機器の安全機能維持確認に問題はないと考えられる。

また、At は水平・鉛直の各方向に設定されるものであるが、水平・鉛直の相関が懸念されるものは、水平・鉛直同時入力による解析評価により機能維持を確認した上



で各方向の加速度を設定している。そのため、水平・鉛直ごとの個別の評価とすることで問題ない。

#### 11. 水平 2 方向同時加振の影響について（疲労評価）

疲労評価に用いる疲労累積係数は設計疲労線図に基づくため、一次＋二次＋ピーク応力強さの増分と、疲労累積係数の増分が比例しない。そのため、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した場合の疲労評価への影響を定量的に確認することを目的とし、以下の設備を対象に一次＋二次＋ピーク応力強さに水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した疲労評価を行った。

- ・ 水平 2 方向の地震力の重畳による影響軽微、かつ 1.1 以上の裕度を有する設備（別紙 4.1）
- ・ 水平 2 方向の地震力の重畳による影響あり（別紙 4.1）、かつ $\sqrt{2}$ 以上の裕度を有する設備（別紙 4.2）

表 12-1 に示す評価結果の通り、一次＋二次＋ピーク応力強さに水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した場合にも、設備が有する耐震性に影響がないことを確認した。

ここで、燃料集合体、クラス 1 容器、クラス MC 容器及びクラス 1 管の耐震評価に用いる疲労累積係数は、一次＋二次＋ピーク応力強さによる疲労累積係数と運転状態 I、II における疲労累積係数の和により算定している。そのため、運転状態 I、II における疲労累積係数が支配的な設備については、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した場合であっても、疲労累積係数が水平 1 方向及び鉛直方向地震力による疲労累積係数と同等となっている。

なお、一次＋二次＋ピーク応力強さについては、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮すると、最大 $\sqrt{2}$ 倍程度となる可能性がある。ここで、簡単に一次＋二次＋ピーク応力強さが 2 倍になると仮定すれば、疲労評価に用いる JSME に規定される設計疲労線図から求まる許容繰返し回数は、その特性から最小でも 1/10 倍程度になる（図 11-1 参照）。一方、設計で用いる許容繰返し回数については、設計用疲労線図が最適疲労線図に対して 20 倍の余裕があることから、設計疲労線図上で許容繰返し回数が 1/10 倍程度となったとしても、設計上の余裕の中に収まることがわかる（図 11-2 参照）。

また、疲労評価に用いる地震による等価繰返し回数についても実際の繰返し回数に対して余裕をもって設計上設定された回数である。

以上より、別紙 4.1 及び別紙 4.2 では、疲労評価（一次＋二次＋ピーク応力強さ）も他の応力分類と同様の整理で耐震性への影響を評価している。

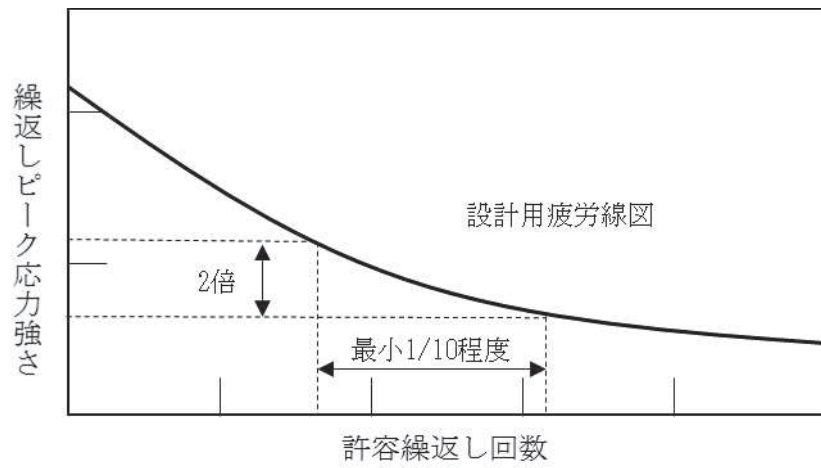


図 11-1 応力 2 倍に対する設計用疲労線図における許容繰返し回数のイメージ図

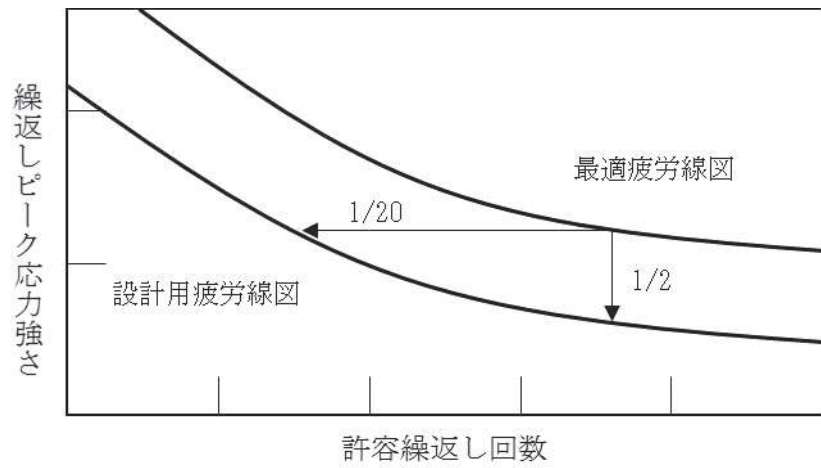


図 11-2 最適疲労線図と設計用疲労線図のイメージ図

表 11-1 水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した一次+二次+ピーク応力強さの評価結果 (1/4)

設備名称	評価部位	疲労累積係数*		水平 2 方向の考慮方法等
		水平 1 方向	水平 2 方向	
燃料集合体	燃料被覆管	0.088	0.584	水平 1 方向評価の繰返しピーク応力強さを√2 倍した繰返しピーク応力強さを適用。
	下部鏡板	0.043	0.086	水平 1 方向評価の繰返しピーク応力強さを√2 倍した繰返しピーク応力強さを適用。
制御棒駆動機構ハウジング貫通孔	ハウジング	0.002	0.002	水平 1 方向評価の繰返しピーク応力強さを√2 倍した繰返しピーク応力強さを適用。
	スタブチューブ	0.006	0.019	水平 1 方向評価の繰返しピーク応力強さを√2 倍した繰返しピーク応力強さを適用。
	下部鏡板リガメント	0.003	0.003	水平 1 方向評価の繰返しピーク応力強さを√2 倍した繰返しピーク応力強さを適用。
	ノズルセーフエンド	0.004	0.004	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
再循環水出口ノズル (N1)	溶接部	0.002	0.002	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	ノズルエンド	0.067	0.067	
	ノズルセーフエンド	0.625	0.625	
再循環水入口ノズル (N2)	サーマルスリーブ	0.017	0.017	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	ノズルエンド	0.100	0.100	
	ノズルセーフエンド	0.021	0.021	
主蒸気出口ノズル (N3)	溶接部	0.009	0.009	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	ノズルエンド	0.035	0.035	
	ノズルセーフエンド	0.021	0.021	

注記\*：燃料集合体，クラス 1 容器，クラス 1 管の疲労累積係数は，地震動のみによる疲労累積係数と運転状態 I，II における疲労累積係数の和。

表 11-1 水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した一次+二次+ピーク応力強さの評価結果 (2/4)

設備名称	評価部位	疲労累積係数*		水平 2 方向の考慮方法等
		水平 1 方向	水平 2 方向	
低圧炉心スプレイノズル (N5)	ノズルセーフエンド	0.290	0.290	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	サーマルスリーブ	0.009	0.009	
	ノズルエンド	0.025	0.025	
低圧注水ノズル (N6)	ノズルセーフエンド	0.871	0.871	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	サーマルスリーブ	0.001	0.001	
	ノズルエンド	0.031	0.031	
上蓋スプレイノズル (N7)	フランジ部	0.004	0.004	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	ノズルエンド	0.292	0.292	
	フランジ部	0.002	0.002	
ベントノズル (N8)	ノズルエンド	0.167	0.167	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	ジェットポンプ計測管貫通部シール	0.001	0.001	
	溶接部	0.001	0.001	
差圧検出・ほう酸水注入ノズル (N11)	ノズル	0.072	0.072	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	肉盛部	0.001	0.001	
	ノズル	0.004	0.004	
計装ノズル (N12)	ノズルセーフエンド	0.003	0.003	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	溶接部近傍	0.004	0.004	
	ノズルエンド	0.545	0.545	

注記\*：燃料集合体，クラス 1 容器，クラス MC 容器及びクラス 1 管の疲労累積係数は，地震動のみによる疲労累積係数と運転状態 I，II における疲労累積係数の和。

表 11-1 水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した一次+二次+ピーク応力強さの評価結果 (3/4)

設備名称	評価部位	疲労累積係数*		水平 2 方向の考慮方法等
		水平 1 方向	水平 2 方向	
計装ノズル (N13)	ノズルセーフエンド	0.003	0.003	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	溶接部近傍	0.004	0.004	
	ノズルエンド	0.543	0.543	
計装ノズル (N14)	ノズルセーフエンド	0.004	0.004	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	溶接部近傍	0.001	0.001	
	ノズルエンド	0.017	0.017	
ドレンノズル (N15)	ノズルエンド	0.027	0.027	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	肉盛部	0.016	0.016	
	ノズルセーフエンド	0.290	0.290	
高圧炉心スプレイノズル (N16)	サーマルスリーブ	0.011	0.011	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方向を考慮した荷重を包絡することを確認。
	ノズルエンド	0.024	0.024	
	スカート	0.082	0.545	
原子炉圧力容器支持スカート		0.0000	0.0000	水平 1 方向評価の繰返しピーク応力強さを $\sqrt{2}$ 倍した繰返しピーク応力強さを適用。
制御棒駆動機構	フランジ			水平 1 方向評価の繰返しピーク応力強さを $\sqrt{2}$ 倍した繰返しピーク応力強さを適用。
燃料プール冷却浄化系熱交換器	胴板	0.31	0.72	水平 1 方向評価の繰返しピーク応力強さを $\sqrt{2}$ 倍した繰返しピーク応力強さを適用。
残留熱除去系熱交換器	胴板	0.38	0.87	水平 1 方向評価の繰返しピーク応力強さを $\sqrt{2}$ 倍した繰返しピーク応力強さを適用。

注記\*：燃料集合体，クラス 1 容器，クラス MC 容器及びクラス 1 管の疲労累積係数は，地震動のみによる疲労累積係数と運転状態 I，II における疲労累積係数の和。

表 11-1 水平 2 方向及び鉛直方向地震力を考慮した一次二次ピーク応力強さの評価結果 (4/4)

設備名称	評価部位	疲労累積係数*		水平 2 方向の考慮方法等
		水平 1 方向	水平 2 方向	
原子炉補機冷却水系熱交換器	胴板	0.23	0.61	水平 1 方向評価の繰返しピーク応力強さを $\sqrt{2}$ 倍した繰返しピーク応力強さを適用。
原子炉格納容器シヤラグ	原子炉格納容器シヤラグ取付部	0.467	0.467	水平 1 方向評価に適用する荷重が水平 2 方 向を考慮した荷重を包絡することを確認。

注記\* : 燃料集合体, クラス 1 容器, クラス MC 容器及びクラス 1 管の疲労累積係数は, 地震動のみによる疲労累積係数と運転状態 I, II における疲  
 労累積係数の和。

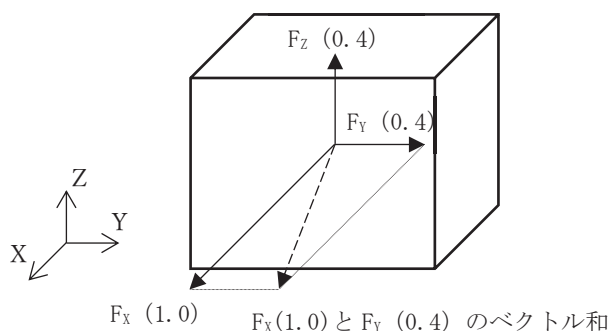
## 12. 制御棒挿入性評価に対する水平 2 方向地震力の組合せ方法

### 12.1 はじめに

本資料は、制御棒挿入性評価において水平 2 方向の地震動が作用した場合の組合せ方法についてまとめたものである。制御棒挿入性評価においては燃料集合体相対変位を評価パラメータとして用いていることから、燃料集合体相対変位に対して水平 2 方向の地震動が及ぼす影響について検討する。

### 12.2 制御棒挿入性評価における水平 2 方向の影響評価方法

制御棒の挿入性評価に対する水平 2 方向の影響評価については、既往の耐震評価においても適用実績のある組合せ係数法（1.0 : 0.4 : 0.4）を用いて水平 2 方向を考慮した場合の燃料集合体相対変位を算出する方針とする。組合せ係数法の概念図を図 1 に示す。



○組合せ係数法とは、最大応答の非同時性を考慮して地震力を設定する方法。

ある軸に作用する地震力を 1.0 と設定して、残りの軸の地震力に係数 0.4 を考慮するもの。

$F_x : F_y : F_z = (1.0 : 0.4 : 0.4)$  として 3 方向の荷重を組み合わせる。

図 1 組合せ係数法の概念図

### 12.3 水平 2 方向の影響評価結果

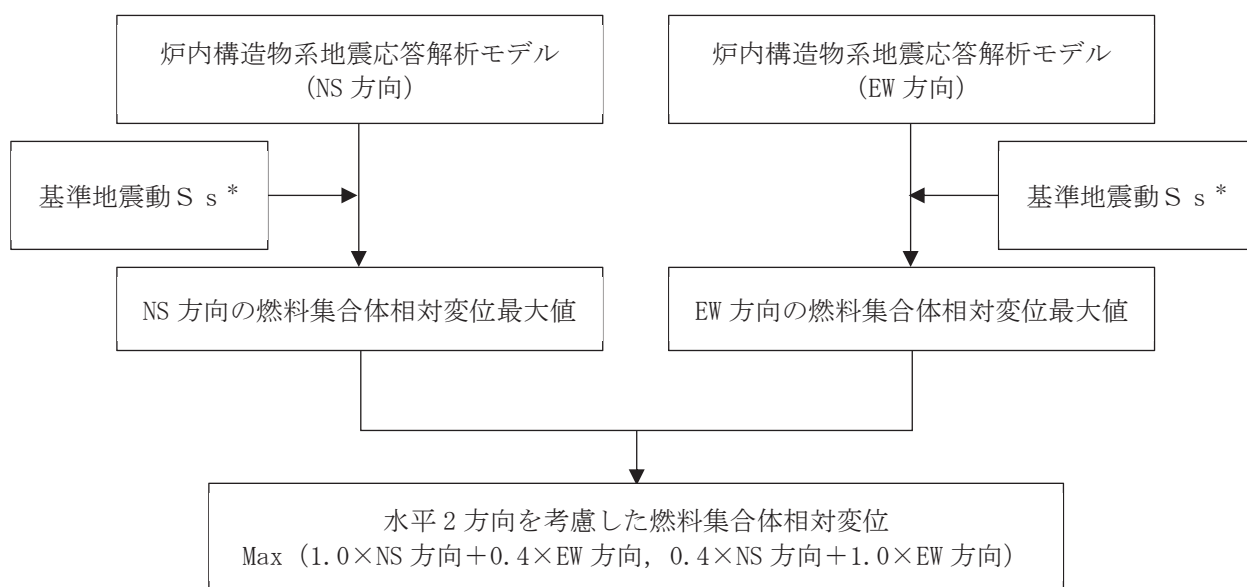
制御棒の挿入性評価に適用する組合せ係数法の評価手順を図 2 に示す。また、水平 1 方向に対する最大の燃料集合体相対変位と組合せ係数法を用いて水平 2 方向を考慮した燃料集合体相対変位の結果を表 1 に示す（別紙 4.3 表 2 記載内容を再掲）。

図 1 に示すとおり、水平 2 方向の相対変位は、NS 方向の燃料集合体相対変位及び EW 方向の燃料集合体相対変位にそれぞれ係数 0.4 を考慮して組み合わせ得られた結果から、より大きい値となる相対変位を適用するものである。表 1 に示す結果は、基準地震動 S s 7 波の中から、最も相対変位が大きくなる S s - D 2 に対して、以下 (a)、(b) の 2 式より算出される相対変位のうちより大きい結果となる (b) の相対変位を示しているものである。

$$\begin{aligned} \text{(a) NS} \times 1.0, \text{ EW} \times 0.4 & \quad \sqrt{(50.5 \times 1.0)^2 + (54.2 \times 0.4)^2} \cong 55.0 \text{mm} \\ \text{(b) NS} \times 0.4, \text{ EW} \times 1.0 & \quad \sqrt{(50.5 \times 0.4)^2 + (54.2 \times 1.0)^2} \cong 57.9 \text{mm} \end{aligned}$$

表 1 に示すとおり、水平 2 方向を考慮した場合でも燃料集合体相対変位が確認済相対変位を下回ることを確認している。





注記\*：本検討における組合せ係数法で適用する基準地震動は位相が同一のものであり，設計用の基準地震動として添付書類「VI-2-1-2 基準地震動 S s 及び弾性設計用地震動 S d の策定概要」に示すもの。

図 2 制御棒挿入性評価における組合せ係数法を用いた水平 2 方向の影響評価手順

表 1 制御棒挿入性評価における水平 2 方向の影響検討結果

評価項目	燃料集合体相対変位 (mm) *		確認済相対変位 (mm)
	水平 1 方向	水平 2 方向	
制御棒挿入性	54.2	57.9	60.0

注記\*：基準地震動 S s 7 波の中でも最も燃料集合体相対変位が大きくなる基準地震動 S s - D 2 による結果を示す。

#### 12.4 組合せ係数法の適用性

制御棒挿入性評価に組合せ係数法を適用するにあたって，耐震設計の規格や他施設も含めた適用実績等を整理し，さらに今回工認の評価における保守性の検討を行い，組合せ係数法の適用性を以下にまとめる。

##### 12.4.1 地震荷重の組合せ方法の規格基準における整理

原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987 において，地震荷重の組合せ方法については図 3 に示すとおり，絶対値和法での組合せを実施する方針が記載されている。ただし，「鉛直震度」と「水平動的応答」との記載から分かるとおり，本規格が制定された当時は鉛直方向について動的な地震応答が定義されておらず，鉛直方向は時間の概念がない静的な震度を適用することが前提であるため，絶対値和を基本とする指針になっているものである。

### 6.1.5 地震応答解析

#### (1) 応答解析法一般

機器・配管系は、その耐震重要度に応じた静的地震力に耐えられるように設計するが、耐震 As, A クラスは静的地震力と共に動的地震力に対しても耐えられるように設計する。また、B クラスであって、建屋を含む支持構造物の振動と共振するおそれのあるものは、B クラス相当の動的地震力によってその安全性を検討する。

動的地震力は、地震応答解析によって算定されるが、機器・配管系の地震応答解析は、据付床の設計用床応答スペクトルに基づいたスペクトルモーダル解析法を採用することを基本とする。

設計用床応答スペクトルは、当該系の重心位置に近い或いは耐震支持点の最も多い床のもの等最も適切な床のものを採用することを基本とするが、耐震安全評価上必要ある場合は関連する床応答スペクトルによる多入力解析又はそれと同等の近似解析法を用いることができる。

スペクトルモーダル解析に当たっては、考慮すべきモードは、その刺激係数が無視し得ない程度のものでとし、その重畳法は加速度、変位、応力、支点反力等の算定必要応答に対してそれぞれ Square Root of the Sum of the Squares 法（以下「SRSS」法という。）とする。

鉛直震度による応答と水平動的応答の組合せは絶対和法を採用するものとする。

原子炉格納容器、原子炉圧力容器、炉内構造物は、その構造体の規模、多様な耐震支持法、応答相対変位解析の重要性により原子炉建屋と連成した解析モデル又は分離したサブストラクチャー法に類似したモデルによる時刻歴応答解析法の採用を原則とする。ただし、上記のような特殊な重要構造物でなくても、据付点、耐震支持点の地震応答加速度波形、変位波形を入力として対象機器系の時刻歴応答解析法に基づいた動的地震力を算定することは差支えない。

図3 J E A G 4 6 0 1 -1987 に記載の地震荷重の組合せ方法（機器配管系）  
(P481, 482 抜粋)

続いて、J E A G 4 6 0 1 -1987 以降に発刊されている規格として、原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 -2008 における、地震荷重の組合せ方法についての内容を図 4-1~4-3 に示す。

#### 4.3.2 水平地震力と鉛直地震力による荷重の組み合わせ法

##### 4.3.2.1 動的地震力における組み合わせ

水平地震動と鉛直地震動を別々に動的解析モデルへ入力して地震荷重を求める場合、両者の荷重組み合わせには以下の方法が適用できる。

##### a. 二乗和平方根(SRSS)法

水平地震動による最大荷重の二乗と鉛直地震動による最大荷重の二乗を加算し、その値の平方根を求める方法。

##### b. 組み合わせ係数法

水平地震動による最大荷重及び鉛直地震動による最大荷重のいずれか小さい方に組み合わせ係数 0.4 を乗じて加算する方法。

##### c. 代数和法

水平地震動による荷重と鉛直地震動による荷重を計算時刻ステップ毎に代数和する方法。

なお、上記 3 方法において、地震荷重のかわりに応力を組み合わせてもよい。

また、水平地震動と鉛直地震動を動的解析モデルへ同時入力することにより、地震荷重を求める方法を用いてもよい。

図 4-1 J E A C 4 6 0 1 -2008 に記載の地震荷重の組合せ方法（機器配管系）  
(P 355 抜粋)

### 3.3.2 設計に用いる地震力

発電用原子炉施設の建物・構築物の設計に用いる地震力は、次の方法により求めなければならない。

#### (1) 基準地震動 $S_s$ による地震力

「3.1.4.3 (1)基準地震動 $S_s$ による地震力」に示す地震力の算定においては、「3.5 地震応答解析」に適合する方法を用いなければならない。この場合において、水平地震動と鉛直地震動を同時に考慮した解析結果より地震力を算定する。

ただし、水平地震動と鉛直地震動に対して各々別の解析を実施し水平地震力と鉛直地震力を算定する場合において、水平地震力と鉛直地震力による応力の組合せは、二乗和平方根法（SRSS法）又は式3.3.2-1に示す組合せ係数法を用いることができる。

組合せ係数法による地震時応力

$$= \max\{(\text{水平地震力による応力} + 0.4 \times \text{鉛直地震力による応力}), \\ (0.4 \times \text{水平地震力による応力} + \text{鉛直地震力による応力})\}$$

図 4-2 J E A C 4 6 0 1 - 2008 に記載の地震荷重の組合せ方法（建物構築物）  
(P73 抜粋)

#### (3) 地震力の重ね合わせ

水平地震動と鉛直地震動を同時に入力して応答値を求める。ただし、線形解析や等価線形解析において、水平地震動と鉛直地震動に対して各々別の解析を実施する場合、応答値の組合せは、二乗和平方根法（SRSS 法）又は組合せ係数法を用いることができる。

図 4-3 J E A C 4 6 0 1 - 2008 に記載の地震荷重の組合せ方法（屋外重要土木構造物）  
(P979 抜粋)

図 4-1 に示すとおり、鉛直地震動が動的な地震応答となったことを踏まえて、機器配管系に対する地震荷重の組合せ方法は、二乗和平方根（SRSS）法、組合せ係数法及び代数和法の 3 手法が示されている。また、組合せ係数法については、水平方向及び鉛直方向の最大荷重のいずれか小さい方に係数として「0.4」を適用するよう記載されている。

図 4-2, 4-3 には、建物構築物及び屋外重要土木構造物における地震荷重の組合せについての記載内容を示している。地震荷重の組合せ方法は、建物構築物においても屋外重要土木構造物においても、二乗和平方根法（SRSS 法）及び組合せ係数法が示されており、建物構築物に対する方針には、係数「0.4」を適用するよう記載されている。

さらに、米国 REGULATORY GUIDE 1.92\*の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」においても、地震応答の非同時性を考慮して、SRSS 法や組合せ係数法（1.0 : 0.4 : 0.4）によって3方向の地震荷重を組合せる方法が示されている。

以上に示すとおり、J E A C 4 6 0 1 -2008 や REGULATORY GUIDE 1.92 において、地震荷重の組合せ方法として SRSS 法と組合せ係数法が示されており、組合せ係数法に適用する係数として「0.4」が定義されている。

注記\* : REGULATORY GUIDE 1.92 “COMBINING MODAL RESPONSES AND SPATIAL COMPONENTS IN SEISMIC RESPONSE ANALYSIS”

#### 12.4.2 女川2号機における水平2方向及び鉛直方向の地震応答の組合せに係る方針

##### (1) 建物構築物及び屋外重要土木構築物

今回工認において、建物構築物及び屋外重要土木構築物に対する水平2方向及び鉛直方向の組合せに係る検討では、建物構築物については組合せ係数法の適用を基本とし、屋外重要土木構築物については位相の異なる地震動を適用した評価を基本としている。ここで、組合せ係数法を適用している建物構築物の水平2方向及び鉛直方向に対する荷重の組合せケースについては表3-1-14等示されている（表3-1-14を図5として再掲）。図5に示すとおり、3方向の地震荷重の組合せについては、基準地震動 $S_s$ によって発生する3方向の荷重に対して、係数（1 : 0.4 : 0.4）及び符号を入れ替えて施設に最も厳しい条件を選定している。

表 3-1-14 荷重の組合せケース (水平 2 方向)

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S s 地震時	3-1	$G + P + 1.0 S_{s\ SN} - 0.4 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ UD}$
	3-2	$G + P + 1.0 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ UD}$
	3-3	$G + P - 1.0 S_{s\ SN} - 0.4 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ UD}$
	3-4	$G + P - 1.0 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ UD}$
	3-5	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} - 1.0 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ UD}$
	3-6	$G + P - 0.4 S_{s\ SN} - 1.0 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ UD}$
	3-7	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} + 1.0 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ UD}$
	3-8	$G + P - 0.4 S_{s\ SN} + 1.0 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ UD}$
	3-9	$G + P + 1.0 S_{s\ SN} - 0.4 S_{s\ WE} - 0.4 S_{s\ UD}$
	3-10	$G + P + 1.0 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ WE} - 0.4 S_{s\ UD}$
	3-11	$G + P - 1.0 S_{s\ SN} - 0.4 S_{s\ WE} - 0.4 S_{s\ UD}$
	3-12	$G + P - 1.0 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ WE} - 0.4 S_{s\ UD}$
	3-13	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} - 1.0 S_{s\ WE} - 0.4 S_{s\ UD}$
	3-14	$G + P - 0.4 S_{s\ SN} - 1.0 S_{s\ WE} - 0.4 S_{s\ UD}$
	3-15	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} + 1.0 S_{s\ WE} - 0.4 S_{s\ UD}$
	3-16	$G + P - 0.4 S_{s\ SN} + 1.0 S_{s\ WE} - 0.4 S_{s\ UD}$
	3-17	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} - 0.4 S_{s\ WE} + 1.0 S_{s\ UD}$
	3-18	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ WE} + 1.0 S_{s\ UD}$
	3-19	$G + P - 0.4 S_{s\ SN} - 0.4 S_{s\ WE} + 1.0 S_{s\ UD}$
	3-20	$G + P - 0.4 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ WE} + 1.0 S_{s\ UD}$
	3-21	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} - 0.4 S_{s\ WE} - 1.0 S_{s\ UD}$
	3-22	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ WE} - 1.0 S_{s\ UD}$
	3-23	$G + P - 0.4 S_{s\ SN} - 0.4 S_{s\ WE} - 1.0 S_{s\ UD}$
	3-24	$G + P - 0.4 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ WE} - 1.0 S_{s\ UD}$

G : 固定荷重  
P : 積載荷重  
 $S_{s\ SN}^*$  : S→N 方向 S s 地震荷重 (S s 地震時動水圧荷重を含む)  
 $S_{s\ WE}^*$  : W→E 方向 S s 地震荷重 (S s 地震時動水圧荷重を含む)  
 $S_{s\ UD}^*$  : 鉛直方向 S s 地震荷重

図 5 建物構築物における水平 2 方向及び鉛直方向の地震荷重の組合せケースの例  
(表 3-1-14 再掲)

## (2) 機器配管系

機器配管系に対する水平 2 方向及び鉛直方向の組合せの検討においては、前項までに示すとおり、先行プラントと同様、円筒容器や矩形配置のボルトに対する影響程度を確認するために組合せ係数法を適用している。

別紙 4.4 の 4 項で検討している円筒容器に対する水平 2 方向の影響検討について図 6 に再掲するが、SRSS 法と組合せ係数法で手法による差異は軽微であることを確認している。また、本検討において適用した組合せ係数法においては、水平 2 方向にそれぞれ同一の荷重を負荷して算出された応力に対し、係数 (1 : 0.4) を考慮して地震による応力を算出している。一方、図 4-1 に示すとおり、地震による発生荷重に係数を考慮する方法もあるが、機器配管系における解析手法は線形解析が基本であることから、係数を応力に考慮した場合でも荷重に考慮した場合でも結果は変わらないものとなる。

なお、参考として、応力に対して係数を考慮した場合 (図 6) と比較するために、入力荷重に対して係数 (1 : 0.4) を考慮した場合の軸方向応力分布を表 2,3 に示す。表に示すとおり、入力荷重に係数を考慮した場合の発生応力はいずれも図 6 に示す軸方向応力分布と同一の値となっている。図 4-1 に示す J E A C 4 6 0 1 -2008 にも「地震荷重のかわりに応力を組み合わせても良い。」との記載があるが、今回検討した結果からも、荷重もしくは応力に対して組合せ係数法を考慮すれば同等の結果が得られることが分かる。

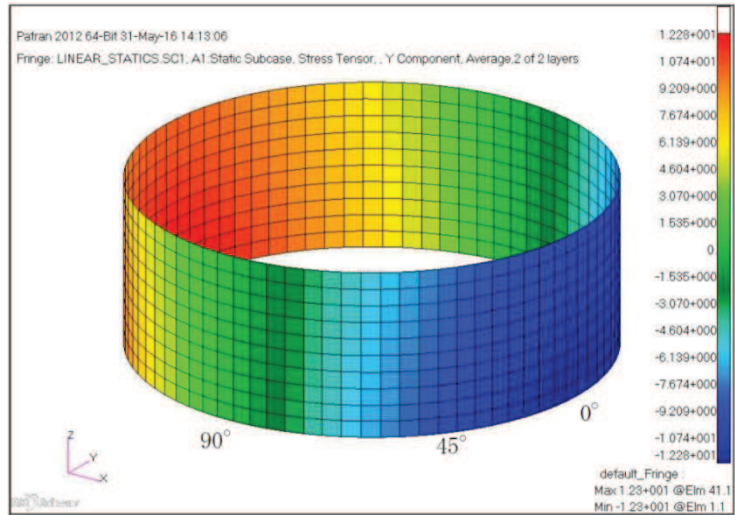


図4-2 水平地震時軸方向応力コンター図

表 4-1 水平地震時の軸方向応力分布（応力に係数を考慮した場合）

角度	X 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{x,x}(\theta)$	Y 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{x,y}(\theta)$	2 方向入力時応力 (MPa)	
			組合せ係数法 $\sigma_{x,c}(\theta)$	SRSS 法 $\sigma_{x,s}(\theta)$
0° 方向	12.28	0.00	12.28 $\sigma_{x,c(x)}(0^\circ) = 12.28 \times 1 + 0 \times 0.4 = 12.28$ $\sigma_{x,c(y)}(0^\circ) = 12.28 \times 0.4 + 0 \times 1 = 4.91$	12.28
22.5° 方向	11.34	4.70	13.22 $\sigma_{x,c(x)}(22.5^\circ) = 11.34 \times 1 + 4.70 \times 0.4 = 13.22$ $\sigma_{x,c(y)}(22.5^\circ) = 11.34 \times 0.4 + 4.70 \times 1 = 9.24$	12.28
45° 方向	8.68	8.68	12.15 $\sigma_{x,c(x)}(45^\circ) = 8.68 \times 1 + 8.68 \times 0.4 = 12.15$ $\sigma_{x,c(y)}(45^\circ) = 8.68 \times 0.4 + 8.68 \times 1 = 12.15$	12.28
67.5° 方向	4.70	11.34	13.22 $\sigma_{x,c(x)}(67.5^\circ) = 4.70 \times 1 + 11.34 \times 0.4 = 9.24$ $\sigma_{x,c(y)}(67.5^\circ) = 4.70 \times 0.4 + 11.34 \times 1 = 13.22$	12.28
90° 方向	0.00	12.28	12.28 $\sigma_{x,c(x)}(90^\circ) = 0 \times 1 + 12.28 \times 0.4 = 4.91$ $\sigma_{x,c(y)}(90^\circ) = 0 \times 0.4 + 12.28 \times 1 = 12.28$	12.28

図 6 機器配管系における組合せ係数法の適用例（1/2）（別紙 4.4 4 項より再掲，一部加筆）



表4-5 水平地震時の応力強さ分布

角度	X 方向入力時 応力強さ (MPa) $\sigma_x(\theta)$	Y 方向入力時 応力強さ (MPa) $\sigma_y(\theta)$	2 方向入力時応力強さ (MPa)	
			組合せ係数法 $\sigma_c(\theta)$	SRSS 法 $\sigma_s(\theta)$
0° 方向	12.28	5.40	12.41	13.04
22.5° 方向	11.47	6.03	13.64	13.04
45° 方向	9.22	9.22	12.91	13.04
67.5° 方向	6.03	11.47	13.64	13.04
90° 方向	5.40	12.28	12.41	13.04

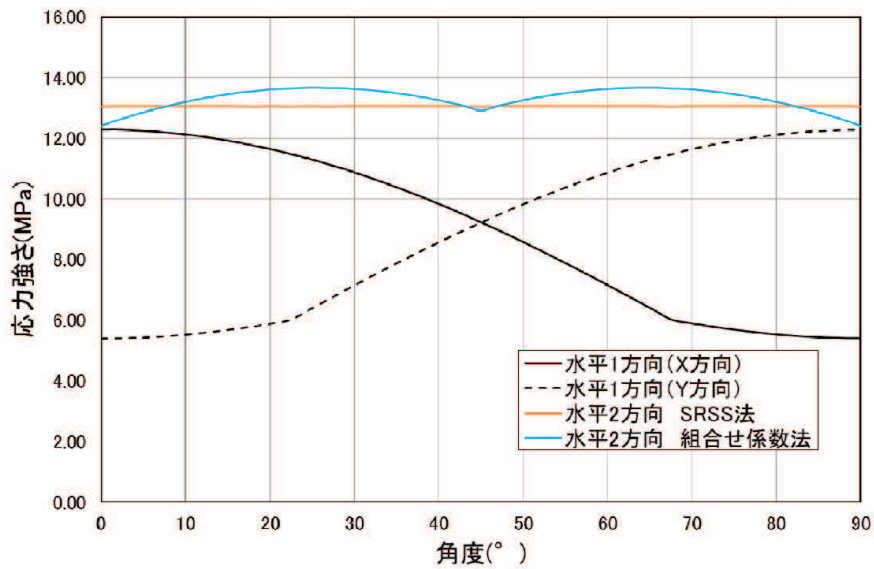


図 4-6 水平地震時応力強さ分布図

図 6 機器配管系における組合せ係数法の適用例 (2/2) (別紙 4.4 4 項より再掲)

表 2 水平地震時の軸方向応力分布(入力荷重に係数を考慮した場合, X : Y=1 : 0.4)

角度	X : Y=1 : 0.4		2 方向入力時応力 (MPa)
	X 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{x,x}(\theta)$	Y 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{x,y}(\theta)$	組合せ係数法 $\sigma_{x,c}(\theta)$
0° 方向	12.28	0.00	12.28 $\sigma_{x,c(x)}(0^\circ) = 12.28 + 0 = 12.28$
22.5° 方向	11.34	1.88	13.22 $\sigma_{x,c(x)}(22.5^\circ) = 11.34 + 1.88 = 13.22$
45° 方向	8.68	3.47	12.15 $\sigma_{x,c(x)}(45^\circ) = 8.68 + 3.47 = 12.15$
67.5° 方向	4.70	4.54	9.24 $\sigma_{x,c(x)}(67.5^\circ) = 4.70 + 4.54 = 9.24$
90° 方向	0.00	4.91	4.91 $\sigma_{x,c(x)}(90^\circ) = 0 + 4.91 = 4.91$

表 3 水平地震時の軸方向応力分布(入力荷重に係数を考慮した場合, X : Y=0.4 : 1)

角度	X : Y=0.4 : 1		2 方向入力時応力 (MPa)
	X 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{x,x}(\theta)$	Y 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{x,y}(\theta)$	組合せ係数法 $\sigma_{x,c}(\theta)$
0° 方向	4.91	0.00	4.91 $\sigma_{x,c(y)}(0^\circ) = 4.91 + 0 = 4.91$
22.5° 方向	4.54	4.70	9.24 $\sigma_{x,c(y)}(22.5^\circ) = 4.54 + 4.70 = 9.24$
45° 方向	3.47	8.68	12.15 $\sigma_{x,c(y)}(45^\circ) = 3.47 + 8.68 = 12.15$
67.5° 方向	1.88	11.34	13.22 $\sigma_{x,c(y)}(67.5^\circ) = 1.88 + 11.34 = 13.22$
90° 方向	0.00	12.28	12.28 $\sigma_{x,c(y)}(90^\circ) = 0 + 12.28 = 12.28$

#### 12.4.3 制御棒挿入性評価に適用する組合せ係数法の保守性の検討

水平2方向の検討において屋外重要土木構造物に用いている、位相の異なる地震動を適用して評価した場合の燃料集合体の相対変位を算出し組合せ係数法による結果と比較する。

位相の異なる地震動を適用して評価する場合の評価手順を図7に示すとおり、図8に示す炉内構造物系地震応答解析モデルを適用し、位相差を考慮した地震動を図8-1のNS方向モデルへ入力し、位相差を考慮していない地震動を図8-2のEW方向モデルへ入力してそれぞれ燃料集合体中央位置での相対変位の時刻歴データを算出する。次に各方向の時刻歴データを時々刻々ベクトル合成することで水平2方向入力による変位履歴を求め、この中から最大の相対変位を算出する。

NS/EW方向の燃料集合体相対変位時刻歴データを時々刻々ベクトル合成して得られた変位履歴を図9-1に示す。また、図9-2には比較のため、NS/EW方向共に位相が同一の地震動を入力した場合の変位履歴を示す。

NS/EW方向に位相差のない同一の地震動を適用した場合は、図9-2に示すとおり、斜め方向に繰返し変形することが分かる。一方、位相の異なる地震動を適用した場合は、図9-1に示すとおり、NS方向、EW方向へバランスよく比較的円に近い形の変位履歴となっていることが分かる。

位相の異なる地震動の作成方針及び作成結果については別紙5に示しており、この中で制御棒挿入性評価において最も厳しい結果となる基準地震動S<sub>s-D2</sub>を用いて検討する。基準地震動S<sub>s-D2</sub>に対する燃料集合体相対変位の算出結果は、NS方向が50.5mm、EW方向が54.2mmとなりEW方向が大きい結果となっていることから、水平2方向の影響検討として結果が厳しくなるようにEW方向は位相差を考慮しない地震動をそのまま適用しNS方向に対して位相の異なる地震動を適用して評価を行う。

図9-1に示す位相の異なる地震動を組み合わせ評価した場合の燃料集合体相対変位の最大変位を表4に示す。表4に示すとおり最大変位は54.4mmとなっており、表1に示す組合せ係数法を用いた変位57.9mmと比較して小さい値となっている。水平2方向の検討において、位相の異なる地震動を適用した評価は実際の地震挙動に近い状態での評価であると考えられることから、組合せ係数法の結果はこれよりも保守的になっていることが分かる。

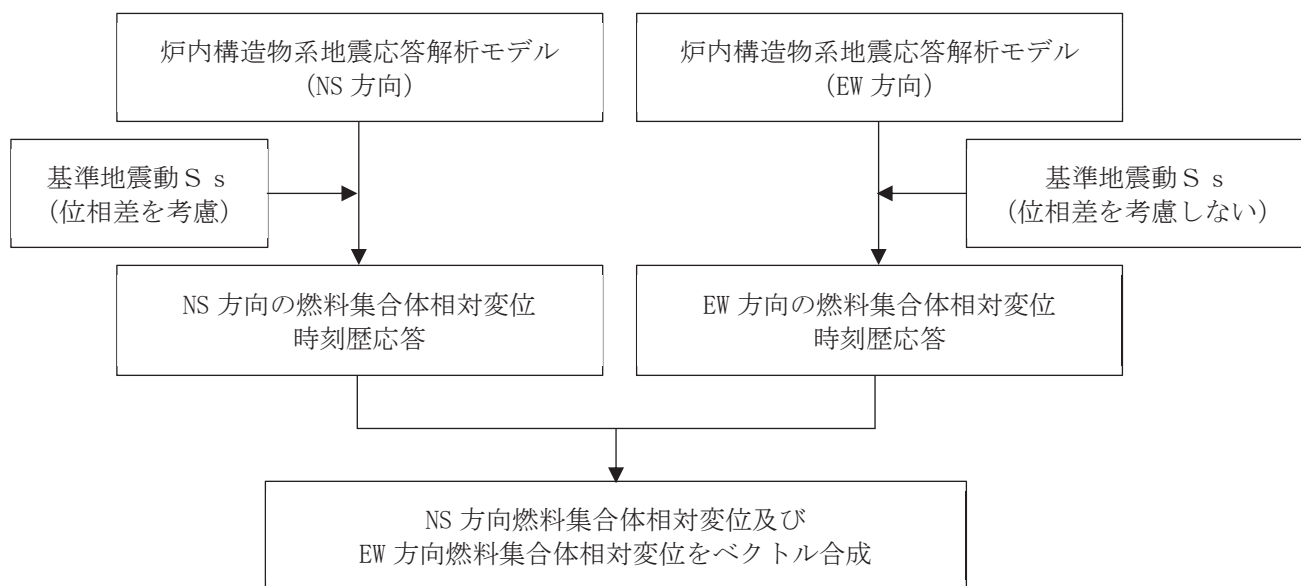


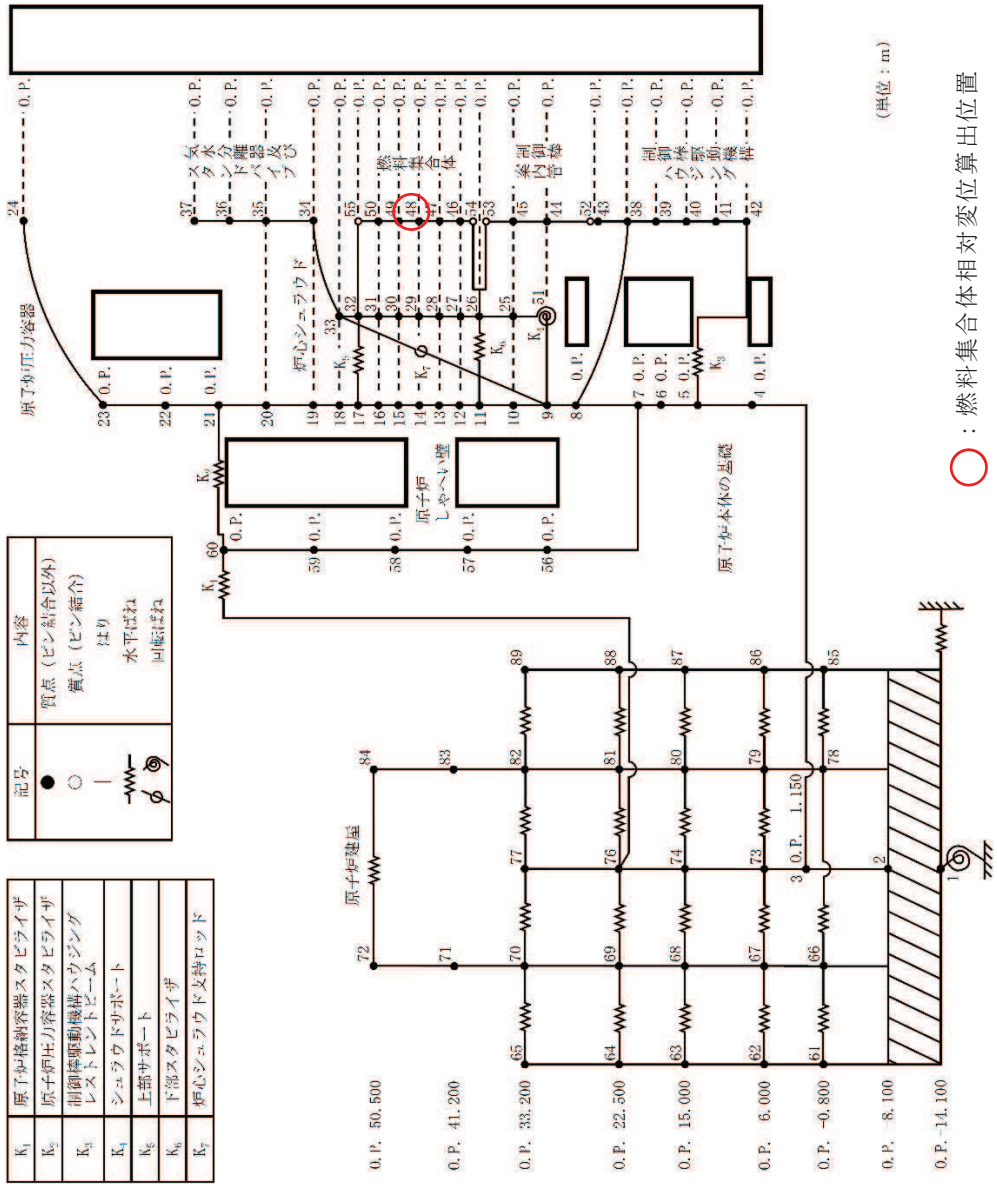
図 7 制御棒挿入性評価における位相の異なる地震動を適用した水平 2 方向の影響評価手順

表 4 位相の異なる地震動を組み合わせて評価した場合の燃料集合体相対変位

評価項目	燃料集合体相対変位 (mm)			確認済相対変位 (mm)
	NS 方向変位* <sup>1</sup> (A)	EW 方向変位* <sup>1</sup> (B)	最大変位* <sup>2</sup> (NS-EW 変位のベクトル和) $\sqrt{(A)^2+(B)^2}$	
制御棒挿入性	4.77	54.2	54.4	60.0

注記\*1：最大変位\*<sup>2</sup>が発生した時間における NS/EW 方向の変位。なお、NS/EW 方向それぞれの全時間帯における最大変位は NS 方向：44.6mm，EW 方向：54.2mm となる。

\*2：燃料集合体の地震応答の全時間帯について NS 方向変位と EW 方向変位のベクトル和を行い最も大きかった変位のこと。



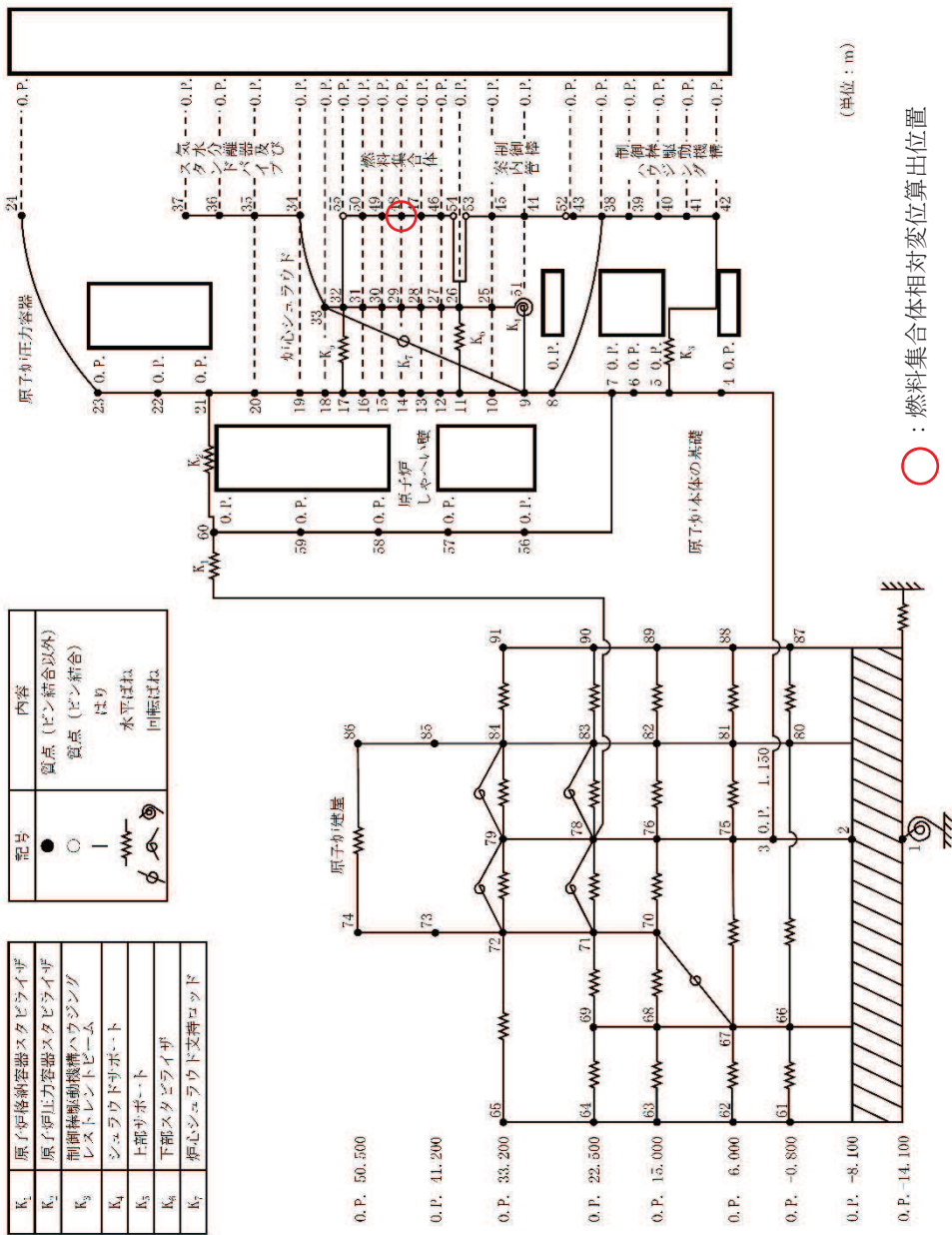
(単位: m)

○: 燃料集合体相対変位算出位置

注\*: 添付書類「VI-2-3-2 炉心, 原子炉压力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」より

図 8-1 炉内構造物系地震応答解析モデル (NS 方向)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



注\* : 添付書類「VI-2-3-2 炉心, 原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書」より

図 8-2 炉内構造物系地震応答解析モデル (EW 方向)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

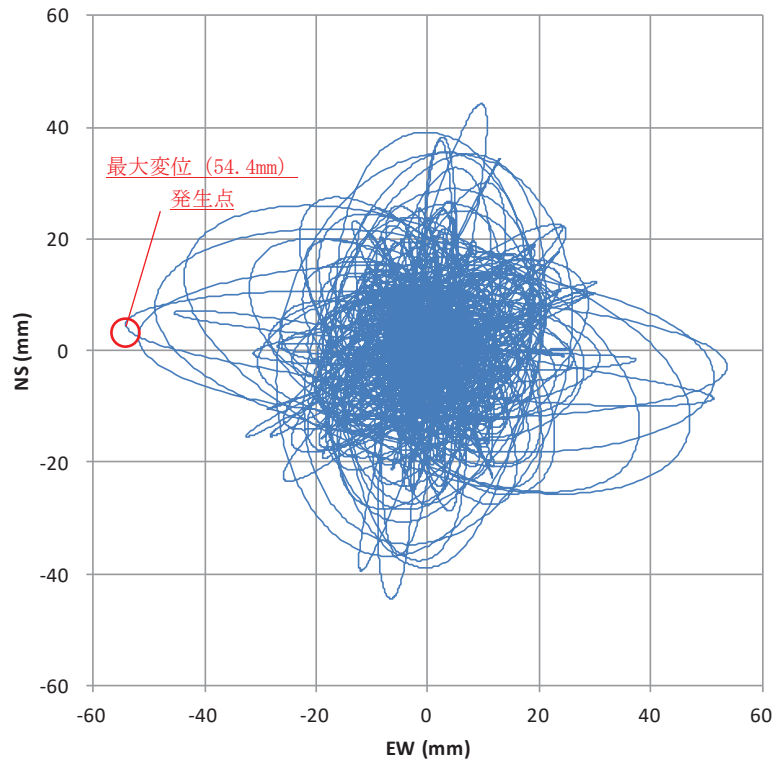


図 9-1 位相の異なる地震動を適用した地震応答解析結果（燃料集合体相対変位）のリサーチ図  
 (NS 方向：位相の異なる地震動，EW 方向：位相差なし)

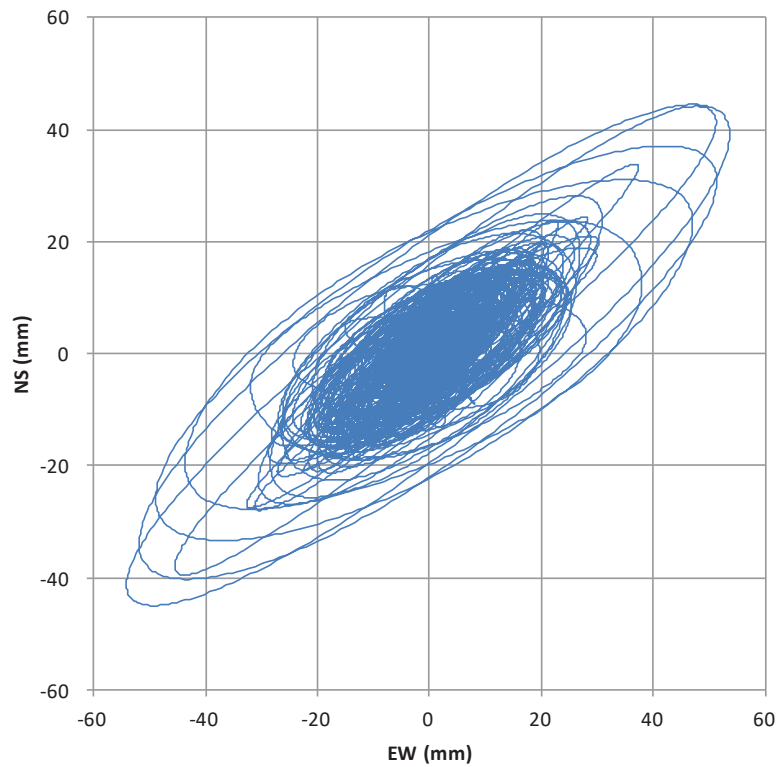


図 9-2 位相が同一の地震動を適用した地震応答解析結果（燃料集合体相対変位）のリサーチ図  
 (NS 方向：位相差なし，EW 方向：位相差なし)

#### 12.4.4 制御棒挿入性評価への組合せ係数法の適用性

4.1 項及び 4.2 項に示すとおり，J E A G 4 6 0 1 等の規格及び先行プラントの適用実績における水平 2 方向の組合せ方法として，組合せ係数法が示されていること，また建物構築物等の施設を含めて組合せ係数法の適用実績が十分であることを確認した。また，4.3 項に示すとおり，制御棒挿入性評価に対する組合せ係数法については保守性を考慮した設定としている。

以上のことから，制御棒挿入性評価に対する水平 2 方向の組合せ方法として，組合せ係数法を適用することが可能である。

#### 12.5 制御棒挿入性試験への水平 2 方向の影響

表 1 や表 2 に示している，制御棒挿入性評価の許容限界として適用している確認済相対変位 60mm は制御棒挿入性試験結果より設定しているものであるが，これは燃料チャンネルの側面に対して平行な方向（面方向）に加振して得られた結果から定めているものである。今回，水平 2 方向の影響検討を実施するにあたり，加振試験方向が制御棒挿入性に及ぼす影響を確認するため，加振方向を斜め方向として実施した試験結果を図 10 に示す。

図 10 に示すとおり，斜め方向加振による制御棒挿入時間（75%ストロークスクラム時間）は，面方向加振条件と同等かもしくは短い結果となっている。これは，燃料集合体と制御棒の間隙が，面方向に比べ斜め方向の場合の方が大きくなるためである。燃料集合体と制御棒の間隙のイメージを図 11 に示すが，斜め方向になることで燃料集合体と制御棒の間隙がおおよそ  $\sqrt{2}$  倍となることから，斜め方向よりも面方向加振の方が厳しい条件となるものである。

なお，斜め方向の制御棒挿入性試験の試験条件を表 5 に，試験装置概要を図 12 に示す。表 5 に示すとおり斜め方向の試験については，今回工認向けに実施した面方向の試験\*と同条件で実施しており試験条件に差異はない。

注記\*：面方向試験の詳細は「補足-600-16 制御棒の挿入性評価について」参照。



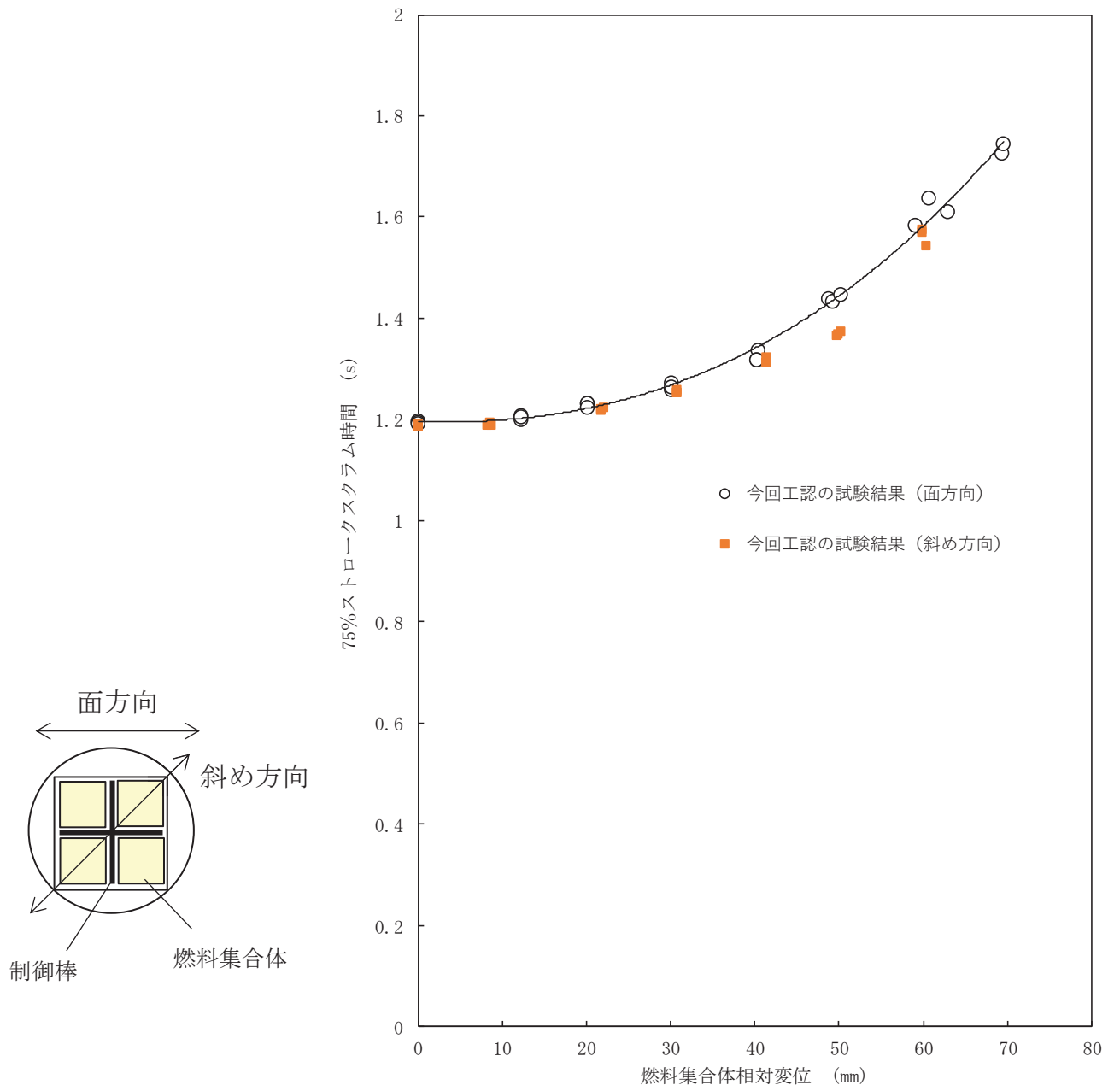


図 10 制御棒挿入性試験結果 (面方向加振－斜め方向加振の比較)

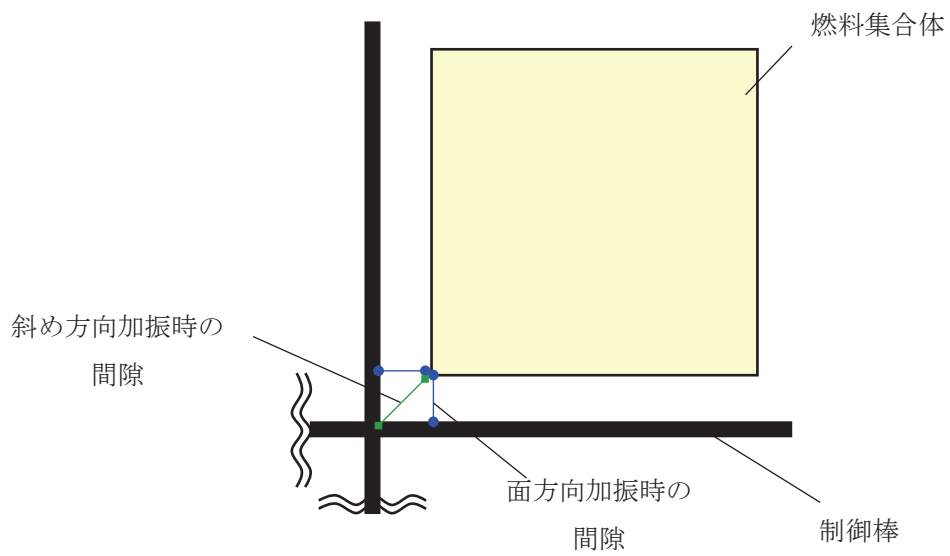



図 11 燃料集合体と制御棒の間隙のイメージ図

表 5 斜め方向加振試験の条件（面平行加振試験との比較）

条件項目	面平行（今回工認）	斜め方向（影響確認）	備考
機器・装置構成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・模擬燃料集合体（9×9燃料，チャンネルボックス含む）</li> <li>・制御棒</li> <li>・燃料支持金具</li> <li>・制御棒案内管</li> <li>・制御棒駆動機構</li> <li>・水圧制御ユニット</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同左</li> <li>・同左</li> <li>・同左</li> <li>・同左</li> <li>・同左</li> </ul>	—
試験方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・加振により燃料集合体に相対変位を発生させ，その状態で75%ストロークスクラムに要する時間を計測</li> <li>・正弦波により加振</li> <li>・各相対変位（0～70mm範囲で10mm刻みに設定）に対して3回試験を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同左</li> <li>・同左</li> <li>・各相対変位（0～60mm範囲で10mm刻みに設定）に対して3回試験を実施</li> </ul>	—
温度	常温	同左	—
圧力	大気圧*1	同左	—
チャンネルボックス板厚		同左	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高温時の変位特性（加速度に対する変位量）と同等になるように設定</li> <li>・チャンネルボックス板厚を調整したことの配慮として，チャンネルボックス間の間隙を既工認と同等の条件に設定</li> </ul>

注記\*1：実機（炉圧状態）では圧力抵抗が増すため，制御棒挿入に要する時間が増加する。制御棒挿入性試験は大気圧条件で実施するが，制御棒挿入圧力を調整し，ゼロスクラム時間（無加振時の75%ストロークスクラムに要する時間）を実機と合わせることで炉圧状態を模擬している

\*2：1mil=0.0254mm

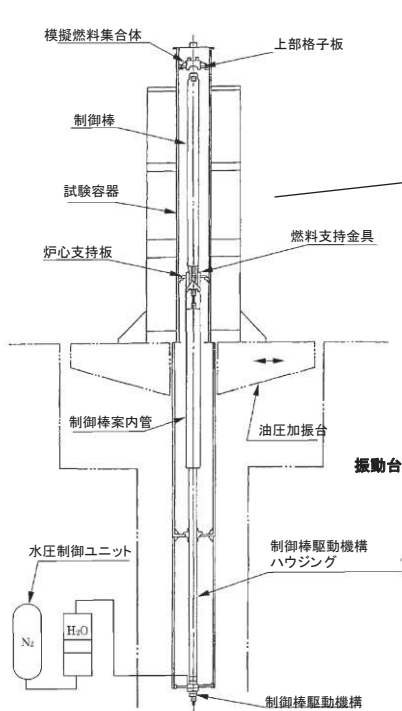


図 12-1 試験装置概要

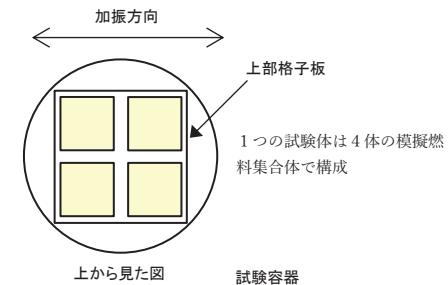


図 12-2 試験装置外観

## 12.6 まとめ

組合せ係数法を適用した場合及び位相の異なる地震動を適用した場合の水平方向2方向の影響検討結果について表6に示す。組合せ係数法による結果は、実際の地震挙動に近いと考えている位相の異なる地震動による結果に比べて保守的な値となっている。

本検討結果を踏まえて、制御棒挿入性評価の水平2方向影響検討においては、組合せ係数を適用することとした。

表6 制御棒挿入性評価における水平2方向の影響検討結果まとめ

評価項目	水平2方向の影響を考慮した 燃料集合体相対変位 (mm) *		確認済相対変位 (mm)
	位相の異なる地震動 による結果	組合せ係数法に よる結果	
制御棒挿入性	54.4	57.9	60.0

注記\*：基準地震動S<sub>s7</sub>波の中でも最も燃料集合体相対変位が大きくなる基準地震動S<sub>s-D2</sub>による結果を示す。

## 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価における代表性

## 1. はじめに

機器・配管系における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価において、水平 2 方向の影響を考慮した場合に発生値がどの程度増分するかを検討している。その際には、耐震重要施設、常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備、常設重大事故防止設備（設計基準拡張）（当該設備が属する耐震重要度分類が S クラスのもの）又は常設重大事故緩和設備（設計基準拡張）が設置される重大事故等対処施設の機器・配管系並びにこれらの施設への波及的影響防止のために耐震評価を実施する設備について、機種ごとに裕度の小さい部位を代表して影響評価を実施している。

## 2. 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価における代表性について

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価にあたっては、機種ごとに裕度の小さい部位を代表として選定しているが、その代表性について説明する。

各機種のうち一部の機種については、複数の応力分類や評価部位を有していたりするものがあり、それらについては評価結果に対する地震力の寄与度がそれぞれ変わる場合がある。従って、本影響評価においては、これらの設備について、耐震裕度が小さい部位を代表とした上で、地震以外の荷重成分を地震荷重とみなし、水平 1 方向及び鉛直方向の組合せによる評価値を水平各方向（それぞれ鉛直方向も含む）で用いるなどの簡易的かつ保守的な方法（図 2-1 参照）を適用することを基本とする。

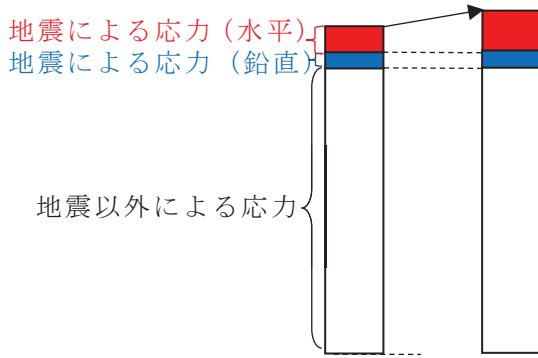
この方法を適用する機種は、耐震裕度の小さい部位や応力分類で代表することができる。

また、この簡易的かつ保守的な方法を適用しない機種は、評価結果に対する地震力の寄与度に配慮した、影響評価を個別に行う場合もある。

本影響評価の代表部位一覧を別紙 4.1 表 1 に示す。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力による発生値の算定

地震による応力（水平）  
地震による応力（鉛直）



保守的な算定

全ての応力に水平 2 方向の影響を加味

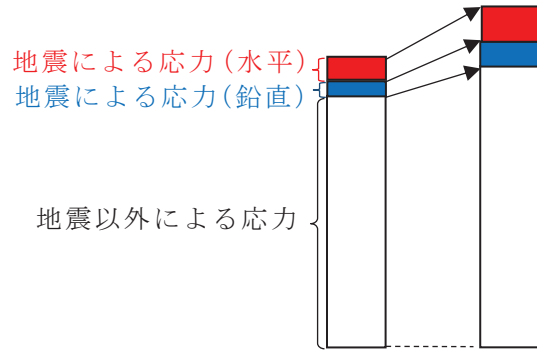


図 2-1 地震以外の荷重成分を地震荷重とみなす場合の保守的な算定イメージ

## 水平 2 方向地震動と鉛直方向地震動の組合せ方法の検討

## 1. はじめに

本資料は水平 2 方向の地震動が作用する場合の荷重の組合せ方法についてまとめたものである。本内容は電共研「新規制基準対応を踏まえた機器・配管系評価法に関する研究 (Phase2)」(平成 31 年 3 月)にて検討されており、本成果により、水平 2 方向の地震動が作用する場合に最大値の発生時間の非同時性を考慮した場合の手法として SRSS 法を用いることは妥当であることを示すものである。

## 2. 電共研における検討内容

水平 2 方向の地震動が作用する場合の機器の応答は、2 次元挙動を模擬できるモデルに水平 2 方向の地震動を同時に時々刻々入力して推定することが望ましい。一方、既往の耐震設計においては、1 質点系の地震応答解析結果を用いたスペクトルモーダル解析が主流であり、各方向の地震動入力に対し、時間に依存しない機器の最大応答のみを取り扱っている。

しかし、水平 2 方向に対しても同様に、各 1 方向のスペクトルモーダル解析で得られる応答の絶対値和を適用すると、最大値の発生時間の非同時性は考慮されないことから、過渡に保守的な評価となる。このため、新規制基準対応では、より合理的な評価手法として Regulatory Guide 1.92 を引用して水平 2 方向地震動の荷重を SRSS 法により組合せている。

本研究では、最大値の発生時間の非同時性を考慮した手法として SRSS 法を用いることの妥当性について検討している。

## 2.1 検討条件

## 2.1.1 入力波の選定

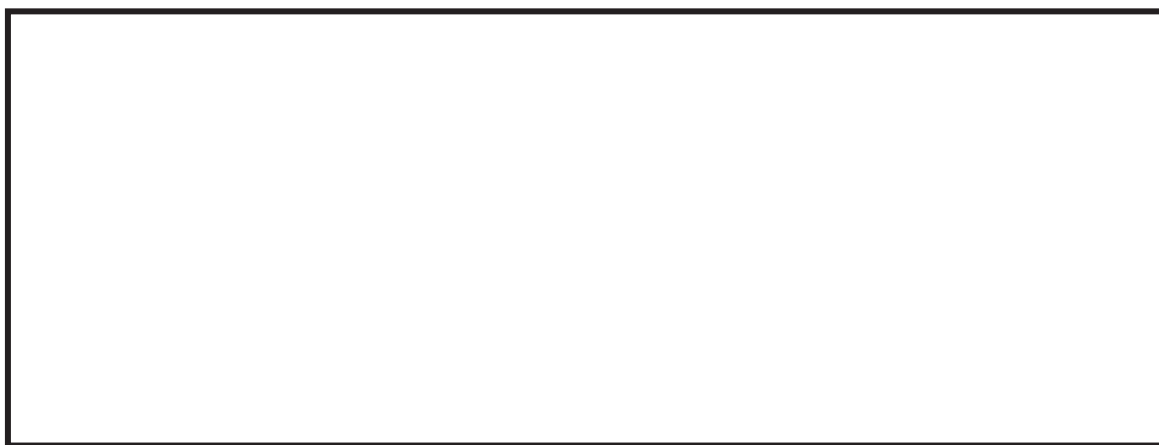
入力波は最大加速度が大きい断層波として「代表プラント断層モデル波」、配管の主要モードが卓越するような周期範囲に卓越ピークを有する観測波として「2011 年 4 月 7 日 宮城県沖の地震 (以下 4.07 地震という)」を選定した。入力地震波の波形図と加速度応答スペクトル図を図 2-1～図 2-4 に示す。入力波は、実機配管の設計に用いている荷重条件に近いものとして、建屋応答 (R/B 地下階) を適用した。



(a) NS 方向



(b) EW 方向



(c) UD 方向

図 2-1 代表プラント 断層モデル波：波形図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

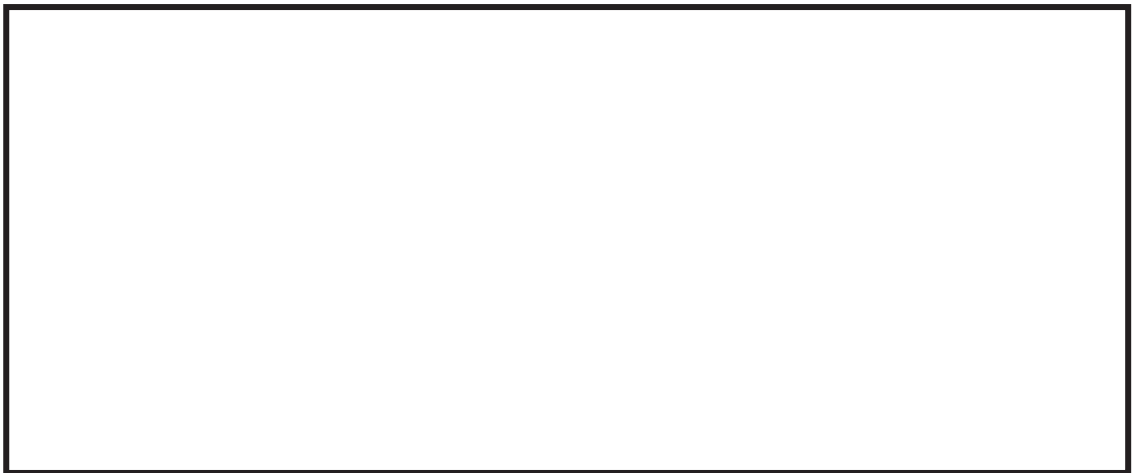




(a) NS 方向



(b) EW 方向



(c) UD 方向

図 2-2 代表プラント 断層モデル波：加速度応答スペクトル図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



(a) NS 方向



(b) EW 方向



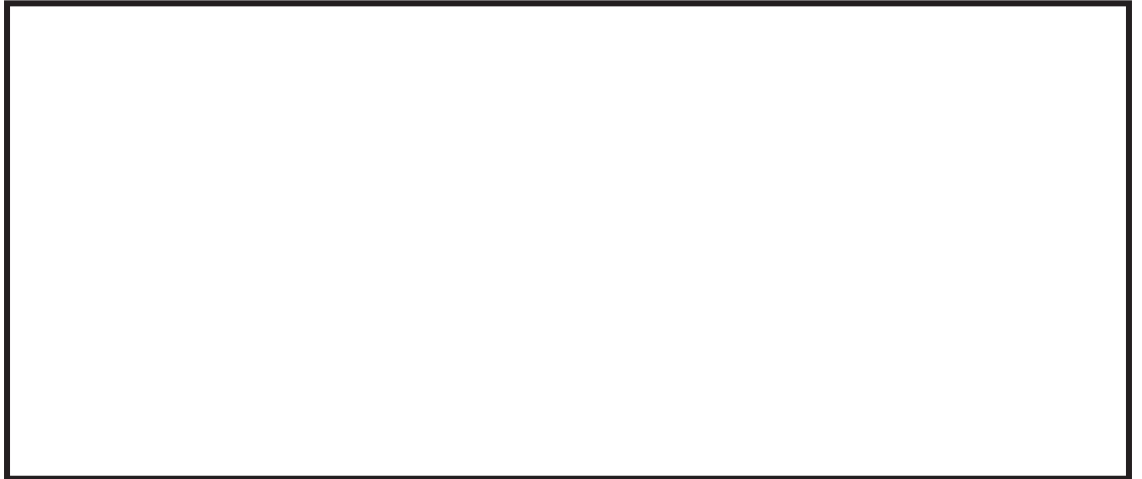
(c) UD 方向

図 2-3 4.07 地震：波形図

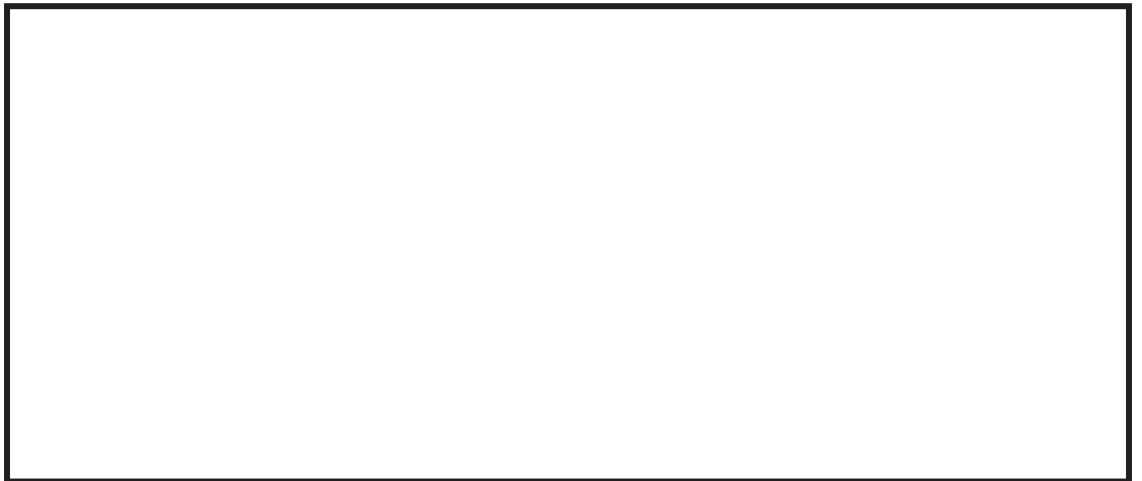
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



(a) NS 方向



(b) EW 方向



(c) UD 方向

図 2-4 4.07 地震：加速度応答スペクトル図

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

## 2.1.2 解析ケース

本検討で実施する解析ケース一覧を表 2-1 に示す。

表 2-1 解析ケース一覧

配管モデル	入力地震動		解析手法	荷重組合せ*
実機配管 モデル	断層波	代表プラン ト断層モデ ル波	時刻歴応答解析法	代数和法
			スペクトル モーダル解析	SRSS 法
				絶対値和法
	観測波	4.07 地震	時刻歴応答解析法	代数和法
			スペクトル モーダル解析	SRSS 法
				絶対値和法

注記\*：代数和法：水平 2 方向地震動による荷重と鉛直方向地震動による荷重を計算時刻ステップごとに代数和する方法。

SRSS 法：水平 2 方向地震動による各方向最大荷重の二乗と鉛直方向地震動による最大荷重の二乗を加算し、その値の平方根を求める方法。

絶対値和法：水平 2 方向地震動による各方向最大荷重と鉛直方向地震動による最大荷重を絶対値和にて加算する方法。

### 2.1.3 対象

代表配管モデルは、3次元的な構造を持ち、主要な配管要素である直管、エルボ、ティ、サポート及び弁を含む配管系の中から、1モデル(600A/300A, h=2.0%)を選定した(図2-5)。

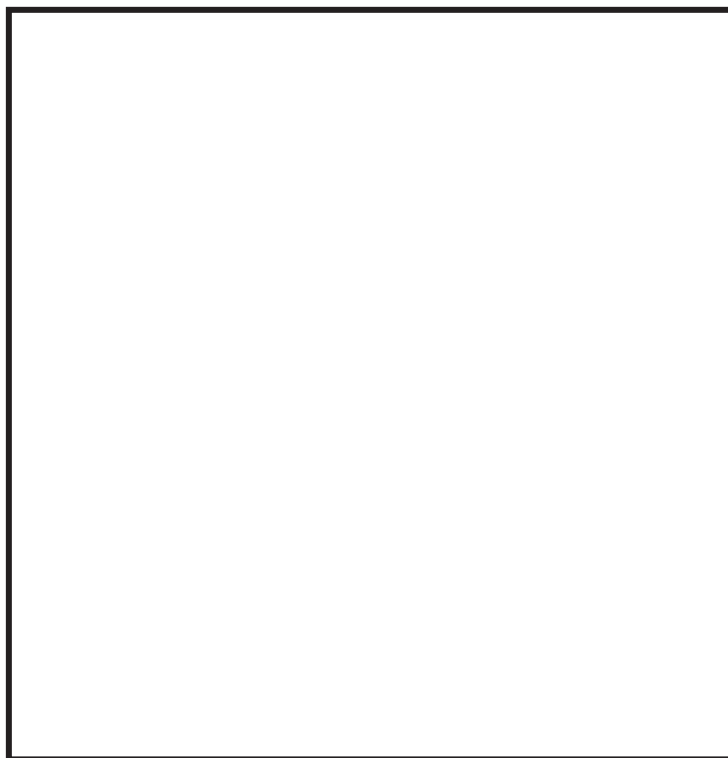


図 2-5 実機配管モデル図(鳥瞰図)

## 2.2 検討結果

### 2.2.1 実機配管モデルの固有値解析結果

前項で選定した代表モデルに対して、固有値解析を実施した。固有値解析結果を表2-2に、主要モード図を図2-6～図2-9に示す。

表 2-2 固有値解析結果

モード	固有周期 T (s)	刺激係数		
		X 方向	Y 方向	Z 方向
1 次	0.079			
2 次	0.069			
3 次	0.057			
4 次	0.051			

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

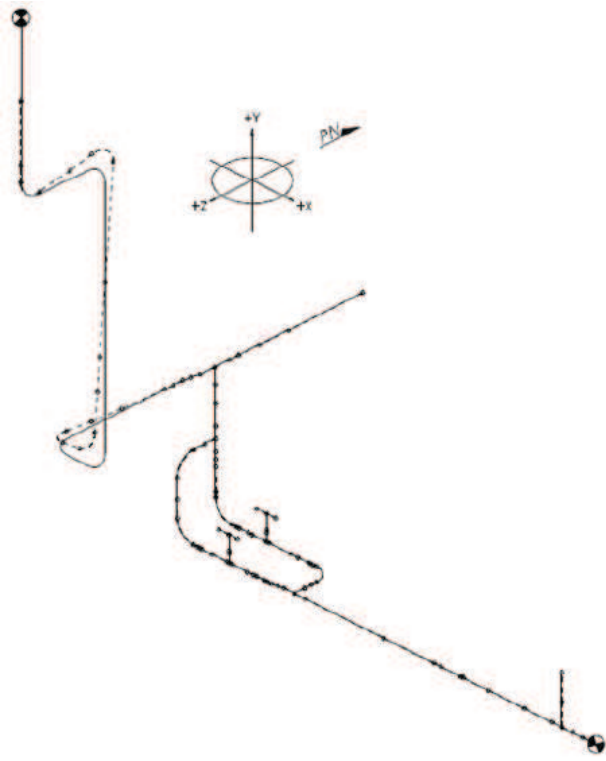


図 2-6 モード図 : 1 次モード :  $T=0.079s$

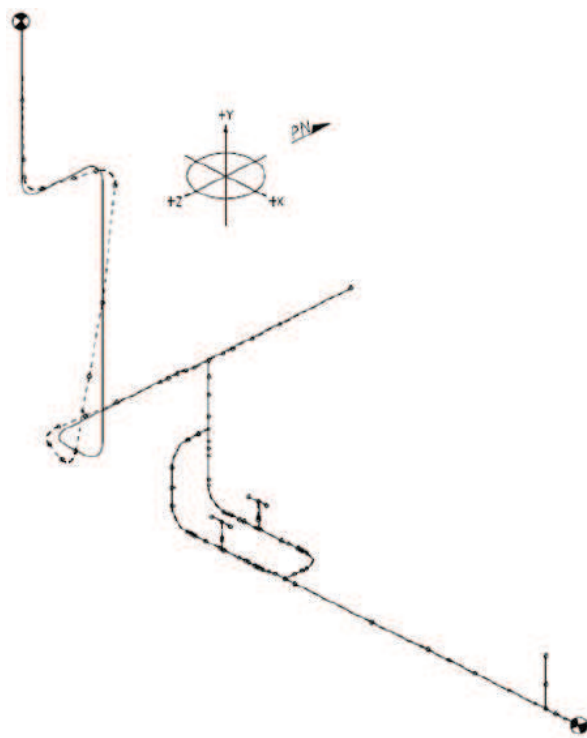


図 2-7 モード図 : 2 次モード :  $T=0.069s$

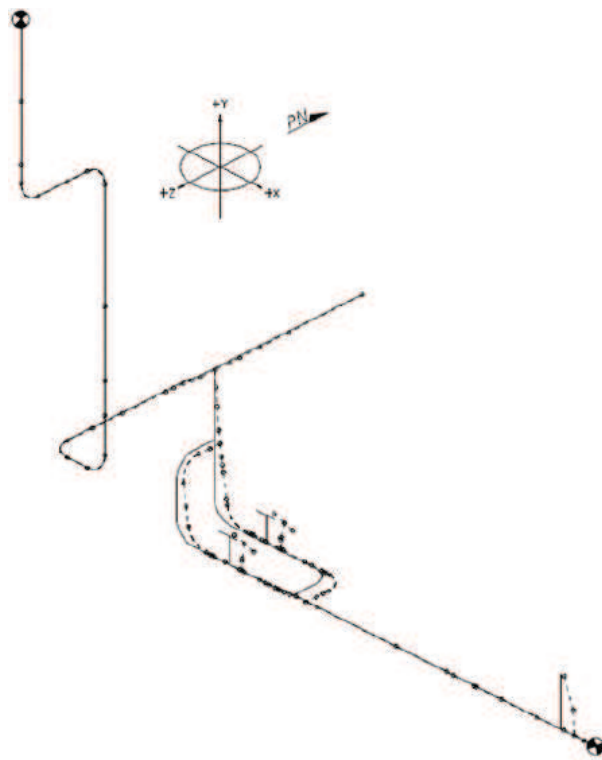


図 2-8 モード図 : 3 次モード :  $T=0.057s$

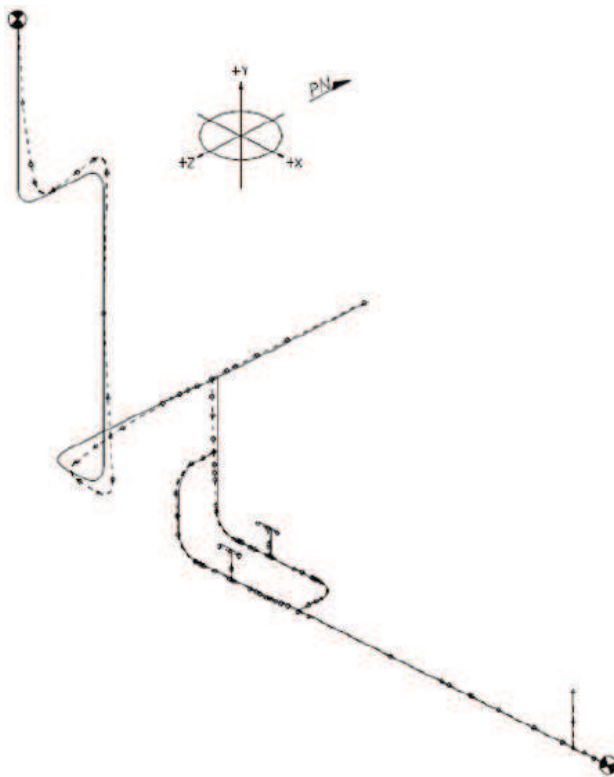


図 2-9 モード図 : 4 次モード :  $T=0.051s$

### 2.2.2 応答解析結果及び応力算出結果

断層モデル波を入力した各評価点の応答解析結果を表 2-3 に、応力算出結果を図 2-10 に示す。4.07 地震を入力した各評価点の応答解析結果を表 2-4 に、応力算出結果を図 2-11 に示す。表 2-3, 2-4 に示す応答解析結果においては、実機配管モデルを構成する標準的な部材であるエルボ（質点番号：8, 13）、ティ（質点番号：3, 52）とアンカ（質点番号：19, 98）について、代数和法のケースを基準とした組合せ手法ごとの地震荷重の比率を算定した。



表 2-3 応答解析結果：断層モデル波（代数和法で正規化）

質点番号	組合せ	地震荷重比	部位
3	SRSS 法	1.25	ティ
	絶対値和法	1.75	
52	SRSS 法	1.20	ティ
	絶対値和法	1.80	
8	SRSS 法	1.10	エルボ
	絶対値和法	1.70	
13	SRSS 法	1.10	エルボ
	絶対値和法	1.40	
19	SRSS 法	1.00	アンカ
	絶対値和法	1.50	
98	SRSS 法	1.00	アンカ
	絶対値和法	1.50	

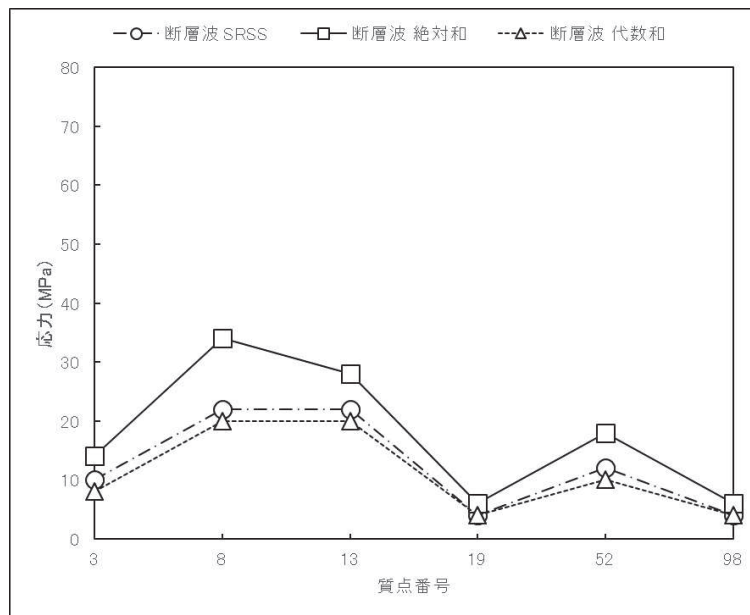


図 2-10 応力算出結果：断層モデル波

表 2-4 応答解析結果：4.07 地震（代数和方法で正規化）

質点番号	組合せ	地震荷重比	部位
3	SRSS 法	1.00	ティ
	絶対値和法	1.56	
52	SRSS 法	1.08	ティ
	絶対値和法	1.54	
8	SRSS 法	1.00	エルボ
	絶対値和法	1.76	
13	SRSS 法	1.05	エルボ
	絶対値和法	1.43	
19	SRSS 法	1.10	アンカ
	絶対値和法	1.75	
98	SRSS 法	1.25	アンカ
	絶対値和法	1.50	

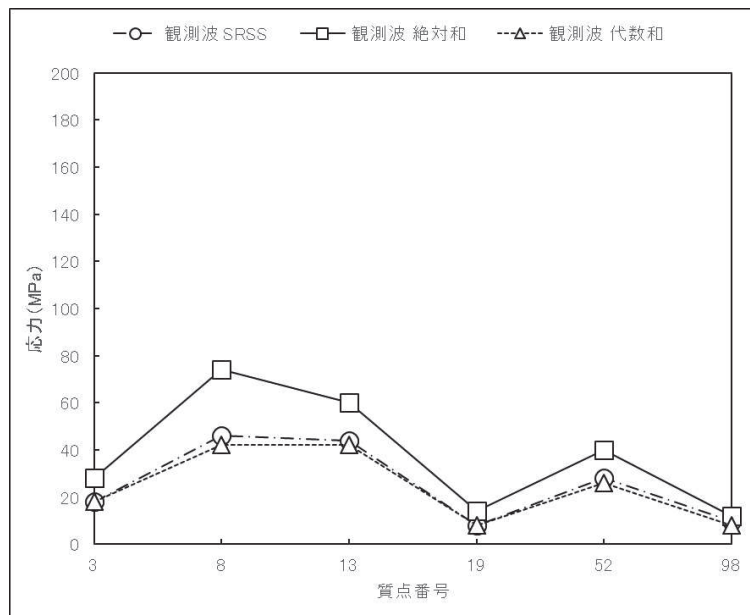


図 2-11 応力算出結果：観測波（4.07 地震）

### 2.2.3 実機配管モデルに対する SRSS 法の適用について

選定した実機配管モデルに対して、代表的な断層波及び観測波を用いて時刻歴応答解析法により算定した計算時刻ステップごとの地震荷重を代数和法にて組み合わせた結果並びにスペクトルモーダル解析法により算定した最大地震荷重を SRSS 法及び絶対値和法にて組み合わせた結果の比較検討を実施した。

断層波及び観測波ともに、組合せ法の違いによる各評価点の応答解析結果の差異の傾向は同様の傾向を示し、SRSS 法は代数和法の結果に対して 1.00～1.25 倍、絶対値和法は代数和法の結果に対して 1.40～1.80 倍となった。SRSS 法は、水平 2 方向地震動と鉛直方向地震動の同時入力による応答を精度よく模擬できている。

以上から、実機配管モデルに対して、スペクトルモーダル解析法により算定した水平 2 方向地震動と鉛直地震動による最大地震荷重の組合せ法として、SRSS 法を用いて差し支えないと判断した。

原子炉建屋 3次元 FEM モデルの面外加速度に係る機器・配管系への影響 **検討**

## 1. はじめに

「別紙 2 3次元 FEM モデルを用いた精査」の「2.5 地震応答解析結果」より、壁の中央部で面外にはらむような最大応答加速度分布となっていることから、面外加速度の機器・配管系への影響検討を実施する。なお、影響検討は、本文の「3.2 機器・配管系」の水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価結果を基に実施する。

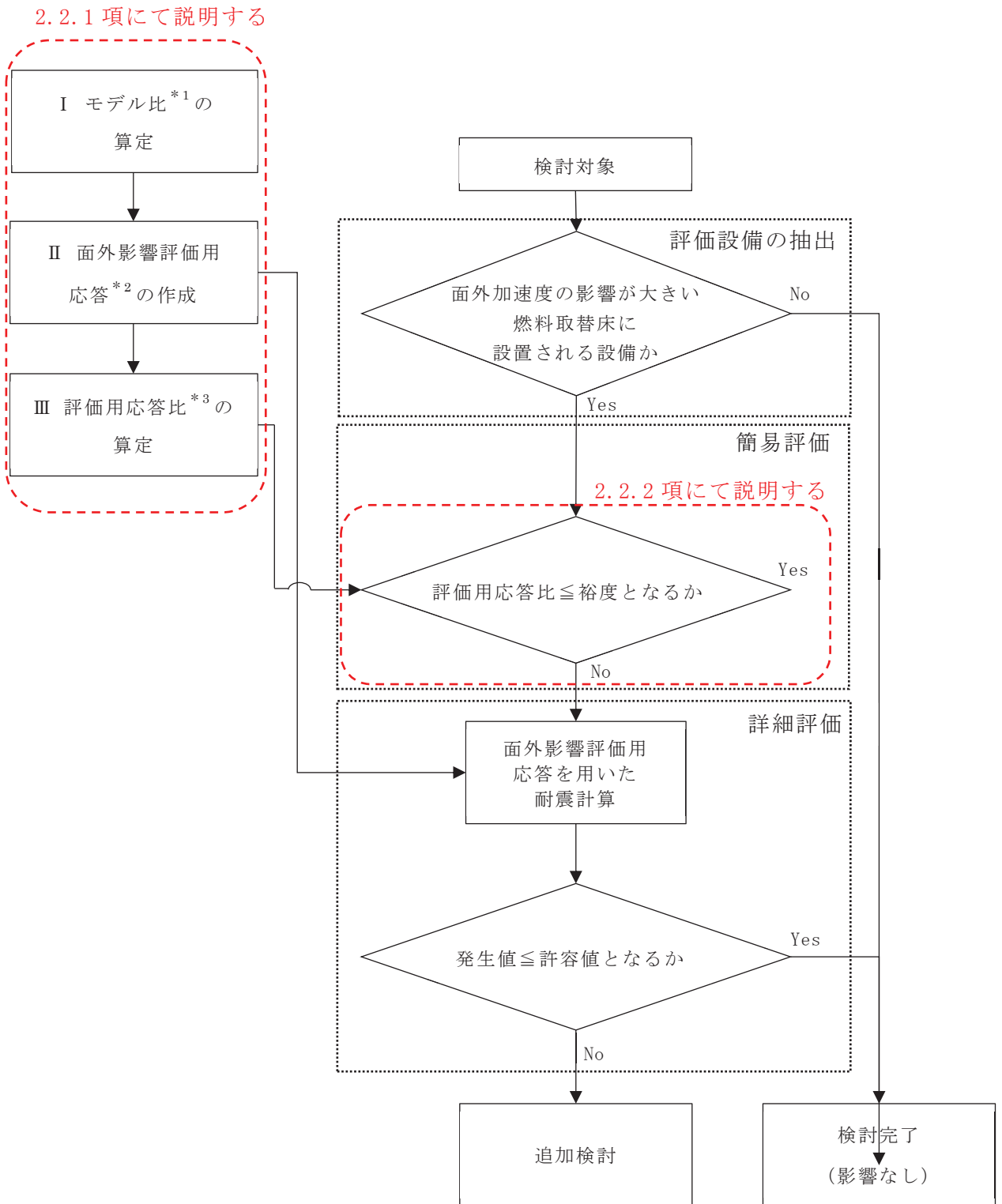
## 2. 検討方針

「2.1 検討対象」について、評価用応答比（詳細は 2.3.1 項にて説明）と各検討対象の裕度（許容値／発生値）を用いた簡易評価及び 3次元影響評価用応答（詳細は 2.3.1 項にて説明）を用いた詳細評価を行う。影響検討フローを図 1 に示す。

## 2.1 検討対象

原子炉建屋に設置され、最大応答加速度、床応答曲線及び時刻歴応答加速度を用いて評価する以下の機器・配管系を影響検討の対象とする。なお、複数スパン及び層にまたがって直交方向に壁及び床の無い連続した壁に対して、面外加速度の影響は大きいことから、原子炉建屋 3階（以下「燃料取替床」という。）に設置される設備を代表とする。また、燃料取替床の床についても燃料取替床の壁と同様であることから、機器・配管系に対する面外加速度の影響を併せて検討する。影響検討対象の機器・配管系について表 1 に示す。

- ・設計基準対象施設のうち、耐震重要度分類の S クラスに属する機器・配管系
- ・重大事故等対処施設のうち、常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備、常設重大事故防止設備（設計基準拡張）（当該設備が属する耐震重要度分類が S クラスのもの）及び常設重大事故緩和設備（設計基準拡張）に属する機器・配管系
- ・波及的影響防止のために耐震評価を実施する機器・配管系



注記\*1：モデル比 =  $S_d - D_2$  に対する 3次元 FEM モデルの応答 /  $S_d - D_2$  に対する質点系モデルの応答

\*2：面外影響評価用応答 = 質点系モデル基本ケースの  $S_s$  に対する応答 × モデル比

\*3：評価用応答比 = 面外影響評価用応答 / 耐震計算で使用している  $S_s$  に対する応答

図1 原子炉建屋 3次元 FEM モデルの面外加速度に係る機器・配管系への影響検討フロー

表 1 影響検討対象設備 (1/2)

No	設備名称
1	使用済燃料貯蔵ラック
2	制御棒・破損燃料貯蔵ラック
3	使用済燃料プール水位／温度（ガイドパルス式）
4	使用済燃料プール水位／温度（ヒートサーモ式）
5	使用済燃料プール監視カメラ
6	原子炉補機冷却水サージタンク
7	原子炉建屋内水素濃度
8	燃料取替エリア放射線モニタ
9	使用済燃料プール上部空間放射線モニタ（低線量）
10	使用済燃料プール上部空間放射線モニタ（高線量）
11	原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置
12	静的触媒式水素再結合装置（その 1）
13	静的触媒式水素再結合装置（その 2）
14	静的触媒式水素再結合装置動作監視装置
15	燃料プール冷却浄化系配管（FPC-002, 003）
16	燃料プール代替注水系配管（FPC-020）
17	燃料プールのスプレイ系配管（FPC-019）
18	原子炉補機冷却水系配管（KRCW-105, 205）
19	非常用ガス処理系配管（SGTS-001）
20	原子炉格納容器フィルタベント系配管（FCVS-004）
21	堰
22	津波監視カメラ

表 1 影響検討対象設備 (2/2)

No	設備名称
23	原子炉建屋クレーン
24	燃料交換機
25	制御棒貯蔵ラック
26	燃料チャンネル着脱機

## 2.2 検討内容

### 2.2.1 面外加速度の影響を評価するための応答の作成

3次元 FEM モデルでは、弾性設計用地震動  $S_d$  に対する地震応答解析を行っていることから、質点系モデルの基準地震動  $S_s$  に対する応答を補正し、面外加速度による影響を評価できる応答を作成する。

- I 弾性設計用地震動  $S_d$  に対する 3次元 FEM モデルの応答／弾性設計用地震動  $S_d$  に対する質点系モデルの応答の比（以下「モデル比 ( $S_d$ )」という。）を、全周期において算定する。モデル比の例を図 2 に示す。モデル比は、固有周期  $0.150s$  を例とすると  $(b/a)$  となる。なお、建屋 3次元 FEM モデルの応答による機器・配管系の耐震評価結果へ与える影響を検討するものであるため、 $1.0$  を下回るモデル比についてもそのまま考慮する。
- II 質点系モデル基本ケースの基準地震動  $S_s$  に対する固有周期毎の応答に、モデル比を乗算した応答（以下「面外影響評価用応答 ( $S_s$ )」という。）を算定する。面外影響評価用応答の例を図 3 に示す。面外影響評価用応答は、固有周期  $0.150s$  を例とすると、 $0.150s$  の質点系モデル基本ケースの基準地震動  $S_s$  に対する応答に  $0.150s$  のモデル比を乗算した値となる。
- III 面外影響評価用応答／耐震計算で使用している基準地震動  $S_s$  に対する応答の比（以下「評価用応答比 ( $S_s$ )」という。）を算定する。評価用応答比の算定例を図 4 に示す。評価用応答比は、仮に固有周期が  $0.150s$  の機器・配管系とすると、設計用床応答曲線（以下「設計用床応答曲線 ( $S_s$ )」という。）による耐震計算を実施している場合  $(d/c)$  となる。なお、配管反力等を用いて評価している機器・配管系は、反力等を算定している配管の評価用応答比を考慮して評価する。

ここで、弾性設計用地震動  $S_d$  に対する 3次元 FEM モデルの応答は、機器・配管系の設置箇所に対応する節点の応答を用いる。図 5～11 に影響検討に用いた節点を示す。



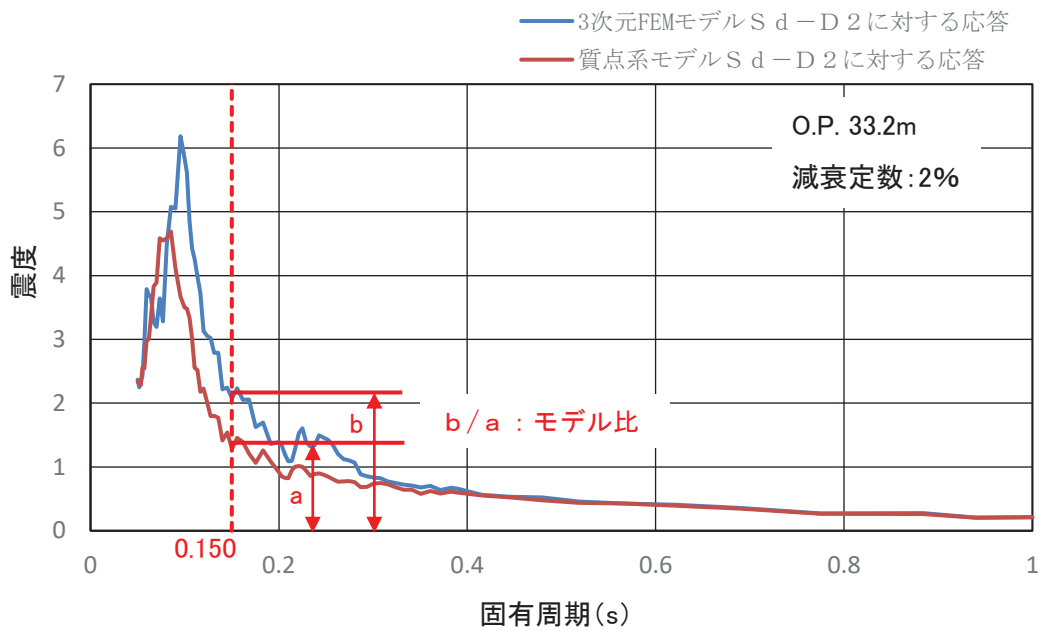


図2 モデル比 (S<sub>d</sub>) の算定例 (2.2.1 項 I)

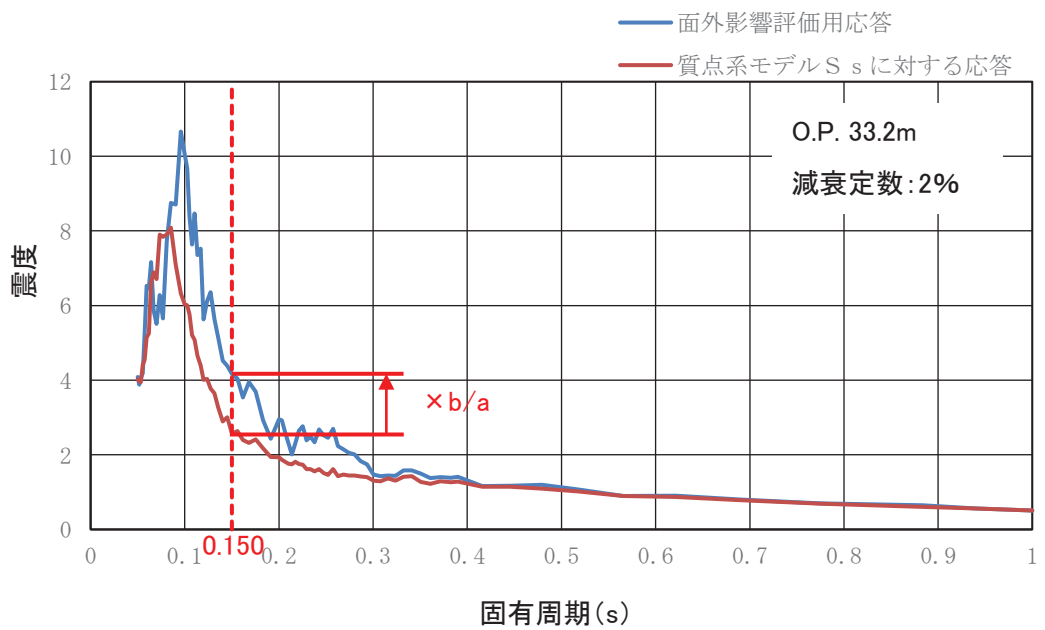
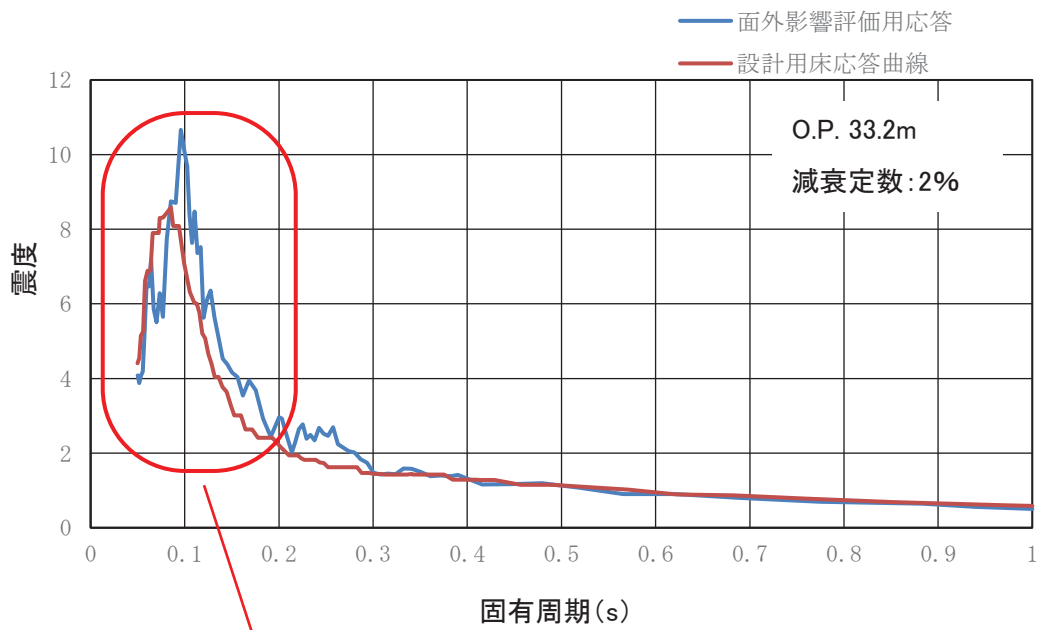
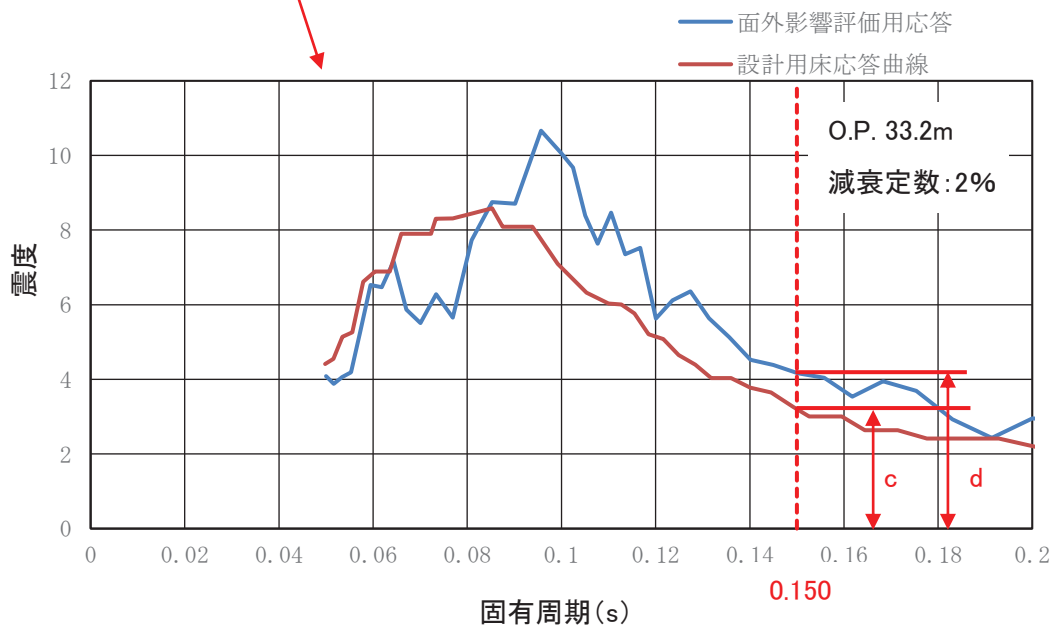


図3 面外影響評価用応答 (S<sub>s</sub>) の算定例 (2.2.1 項 II)



(全体図 (固有周期 0~1.0 s))



(拡大図 (固有周期 0~0.2 s))

図 4 評価用応答比 (S s) の算定例 (2.2.1 項Ⅲ)

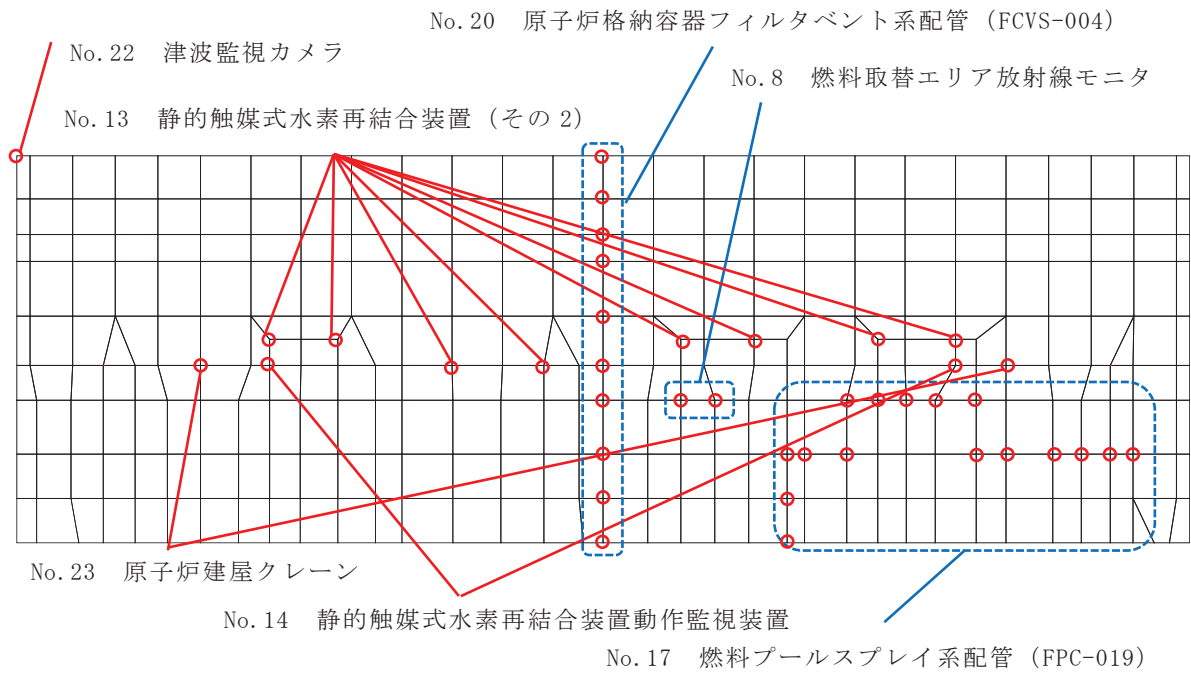


図 5 燃料取替床北面壁 (R10)

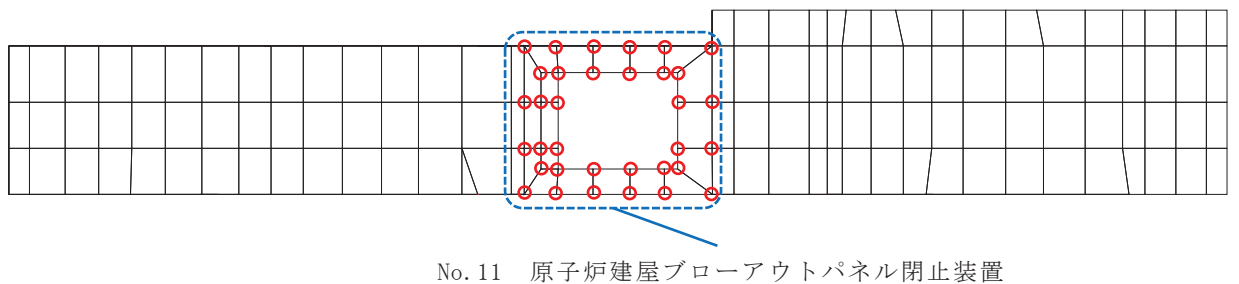


図 6 燃料取替床南面壁 (R3)

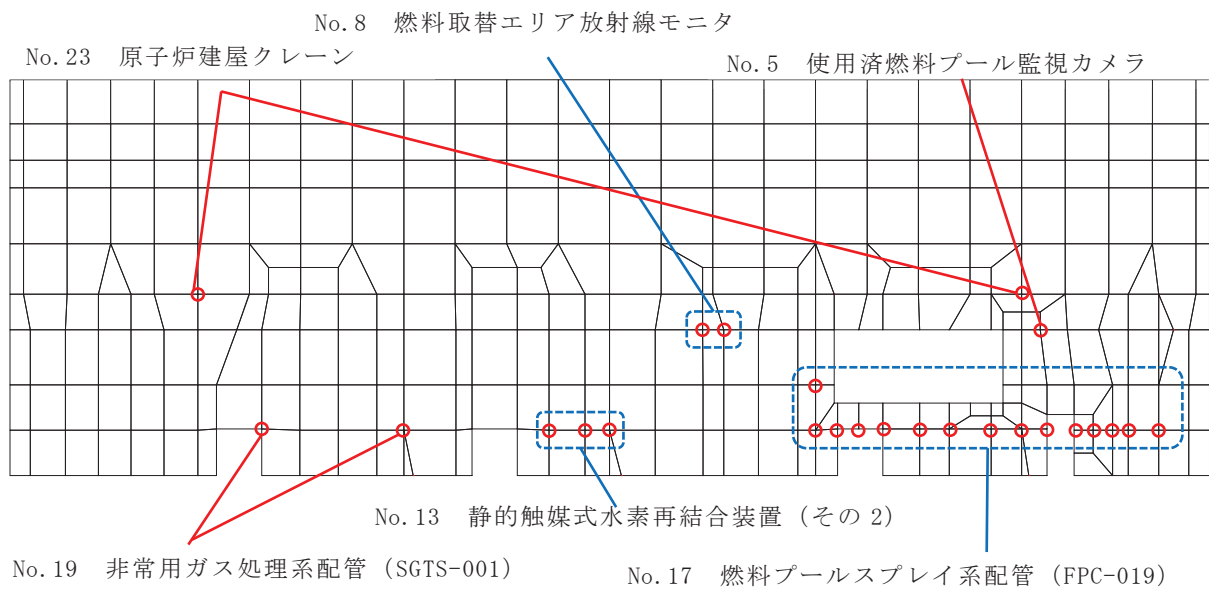
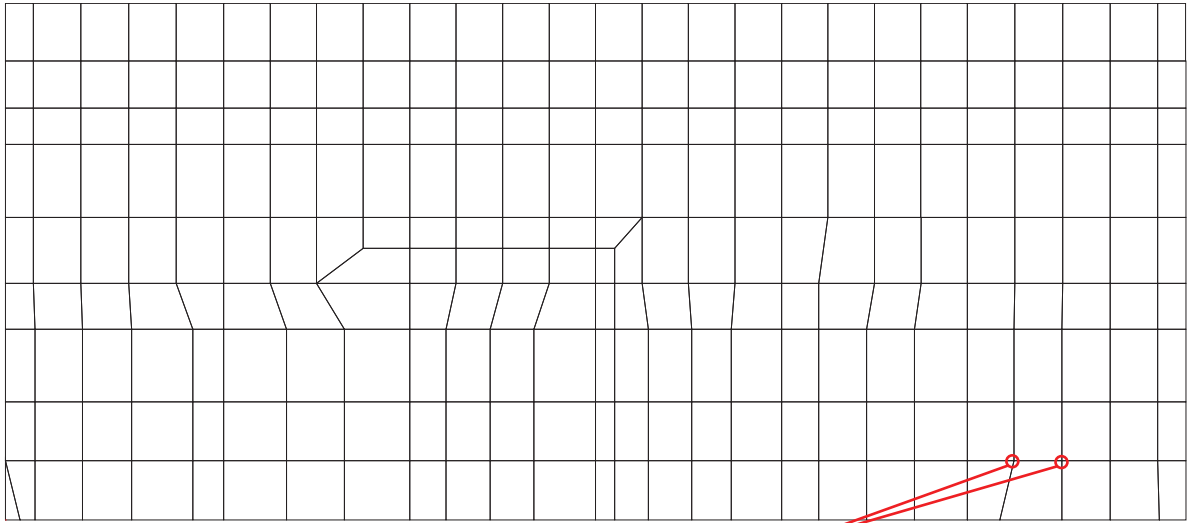
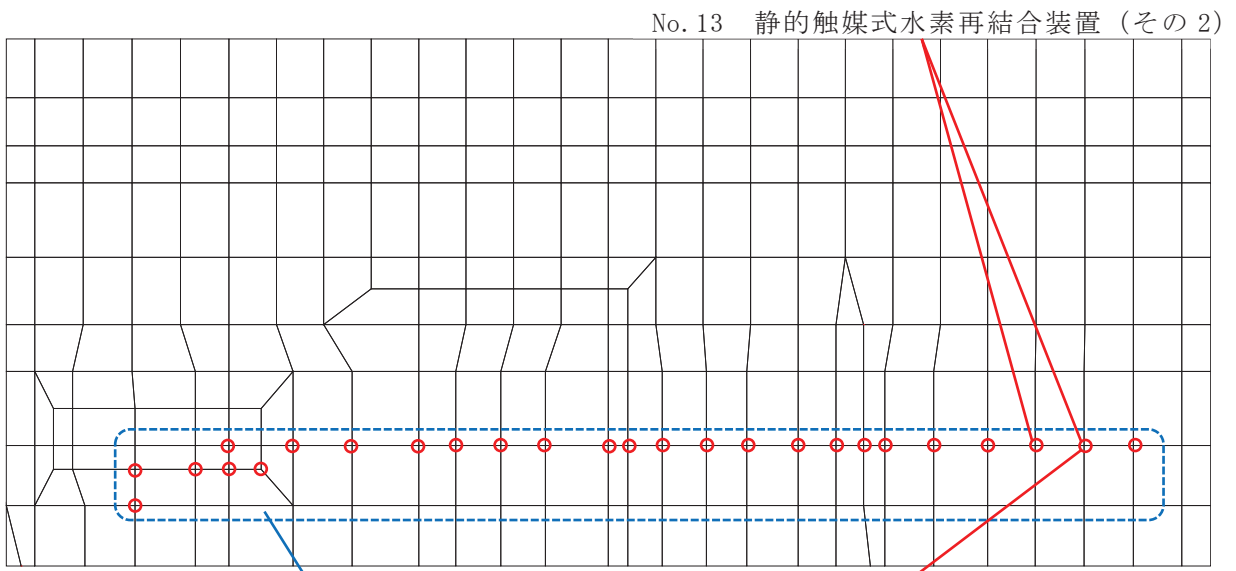


図 7 燃料取替床南面壁 (R4)



No. 13 静的触媒式水素再結合装置 (その 2)

図 8 燃料取替床東面壁 (RJ)



No. 13 静的触媒式水素再結合装置 (その 2)

No. 17 燃料プールのプレイ系配管 (FPC-019)

No. 14 静的触媒式水素再結合装置動作監視装置

図 9 燃料取替床西面壁 (RC)

No. 7 原子炉建屋内水素濃度

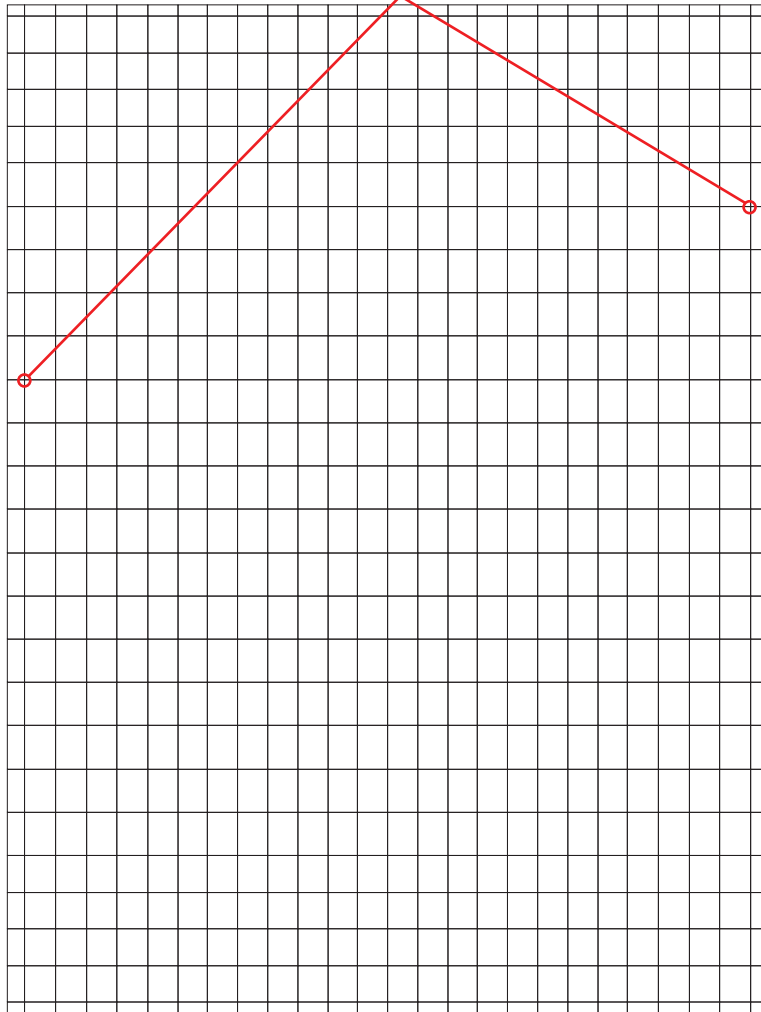


図 10 燃料取替床天井

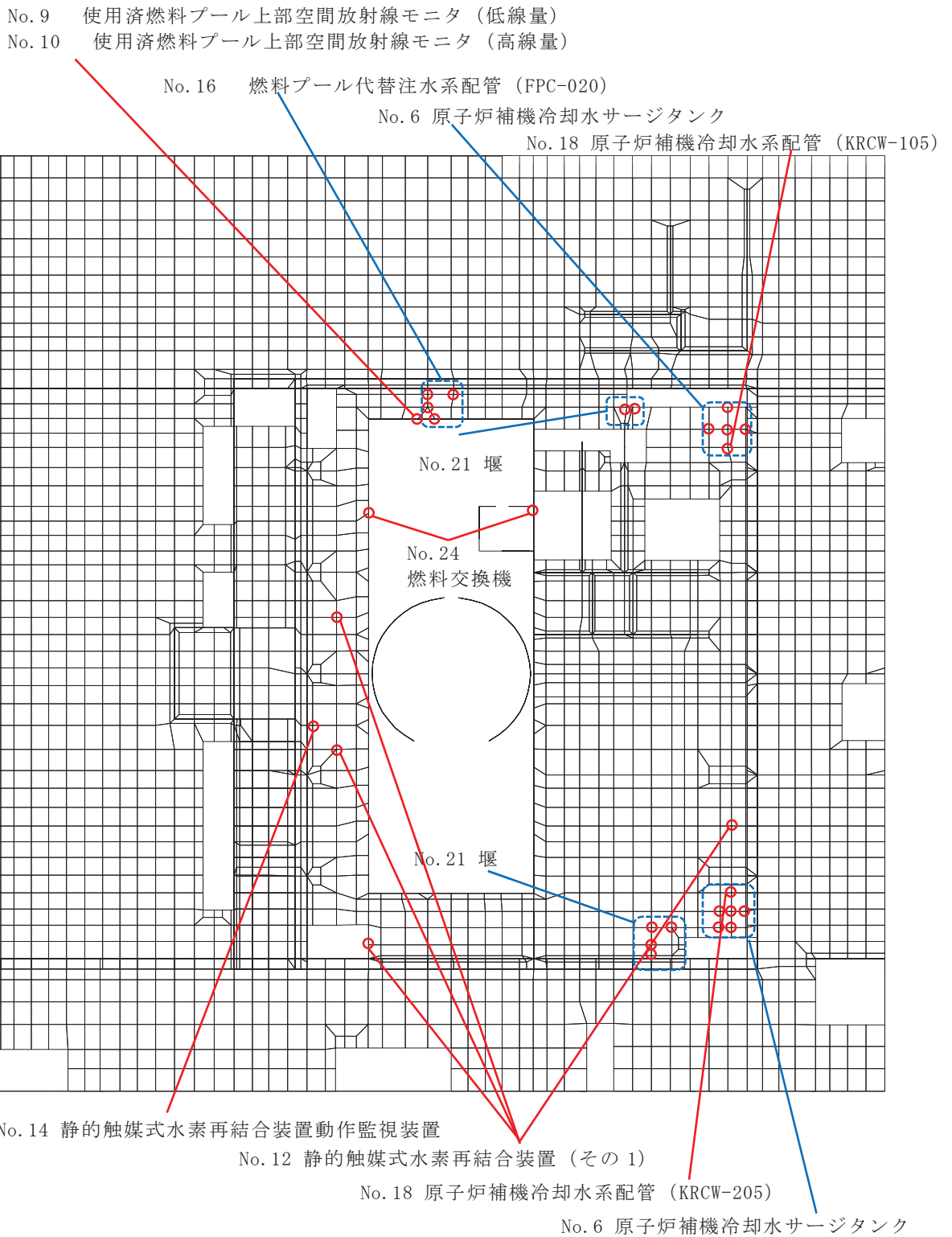


図 11 燃料取替床床

No. 15 燃料プール冷却浄化系配管 (FPC-002)

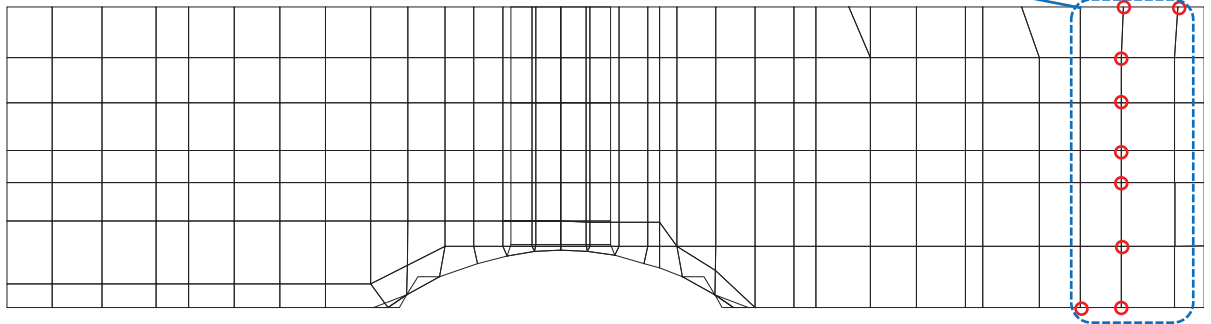
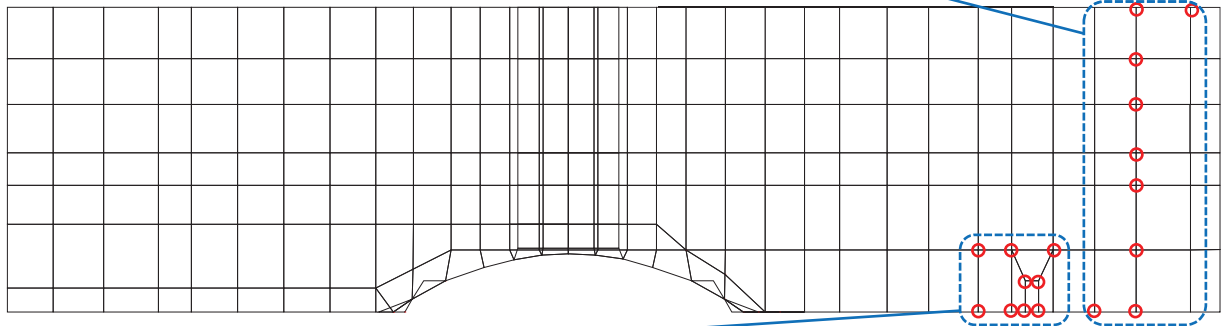


図 11 使用済燃料プール北面壁

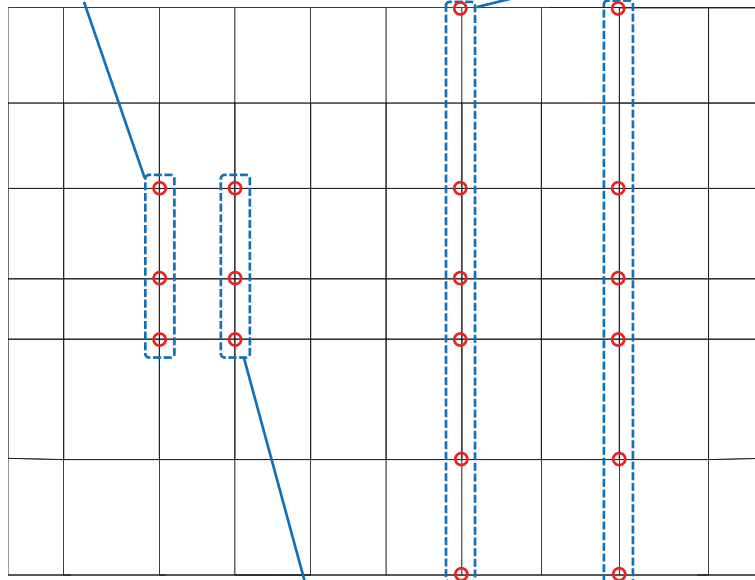
No. 15 燃料プール冷却浄化系配管 (FPC-003)



No. 2 制御棒・破損燃料貯蔵ラック

図 12 使用済燃料プール南面壁

No. 4 使用済燃料プール水位／温度 (ヒートサーモ式)      No. 26 チャンネル着脱機



No. 3 使用済燃料プール水位／温度 (ガイドパルス式)

図 13 使用済燃料プール西面壁

No. 2 制御棒・破損燃料貯蔵ラック

No. 1 使用済燃料貯蔵ラック

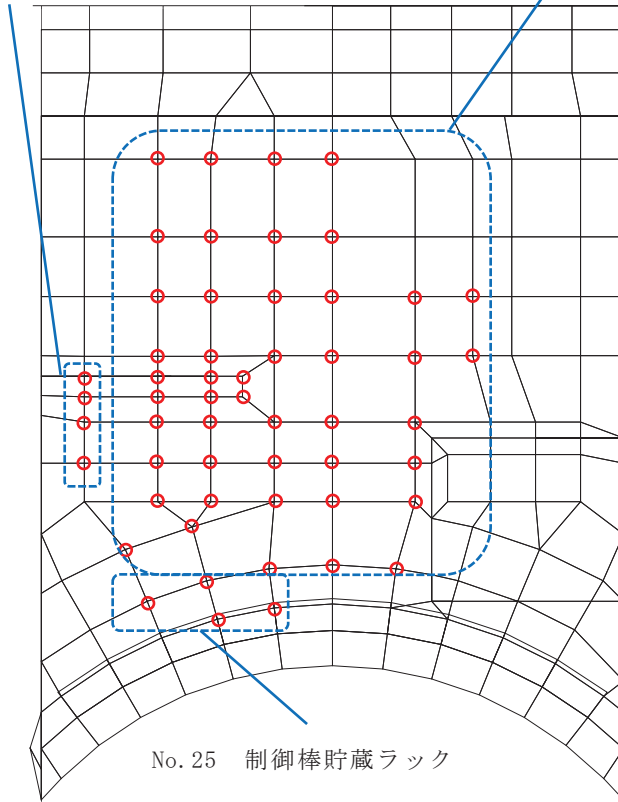


図 14 使用済燃料プール床



### 2.2.2 面外加速度による影響の評価

評価用応答比が耐震計算の裕度を上回る機器・配管系を抽出する。なお、柔な設備については、評価用応答比は 0.05s を超える全ての固有周期を考慮する。具体的な考慮方法を図 15 及び図 16 に示す。

抽出された機器・配管系に対して詳細検討を実施する。

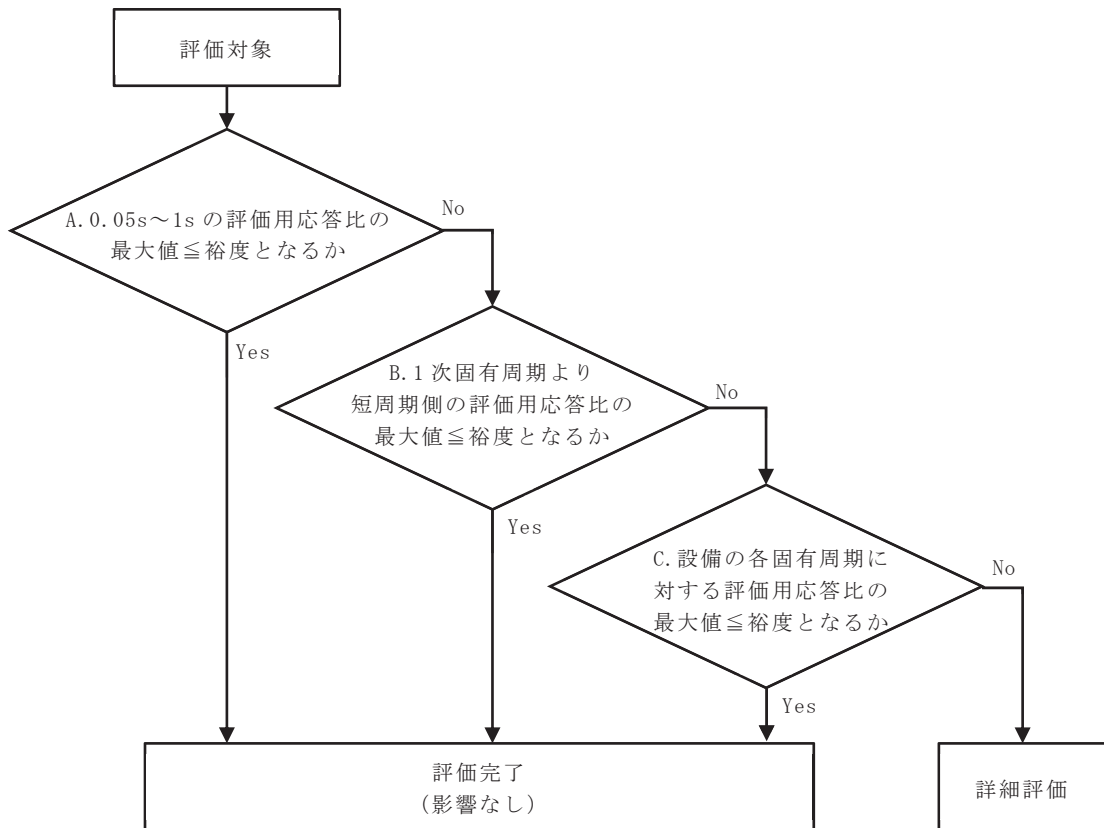
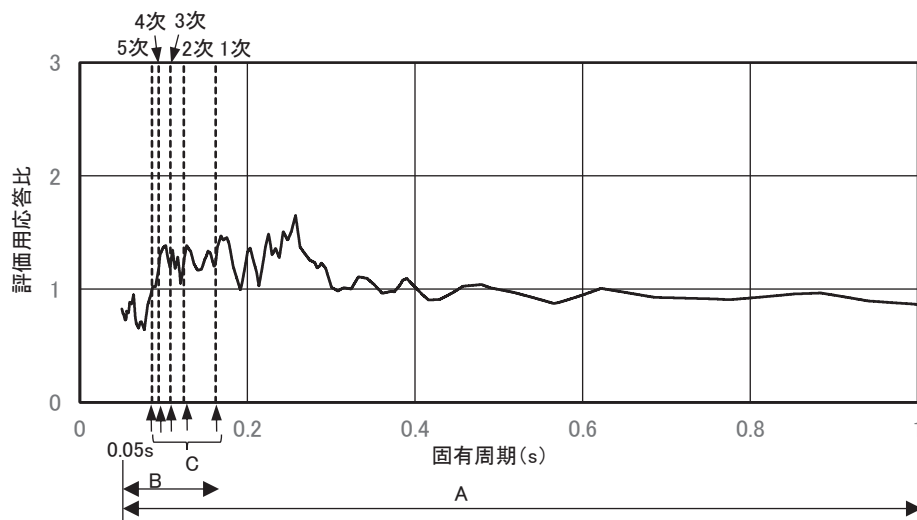


図 15 機器・配管系の固有周期における評価用応答比の考慮方法



注：A, B, C は図 15 のフローと対応

図 16 評価用応答比 (S s) の算定例

### 3. 評価結果

#### 3.1 簡易評価結果

簡易評価の結果を表 2 に示す。その結果、詳細評価が必要となった機器・配管系について表 3 に示す。

表 2 簡易評価結果 (1/2)

No	設備名称	評価用応答比	最小裕度	簡易評価
1	使用済燃料貯蔵ラック	1.32	1.06	×
2	制御棒・破損燃料貯蔵ラック	1.08	1.31	○
3	使用済燃料プール水位／温度 (ガイドパルス式)	0.61	1.35	○
4	使用済燃料プール水位／温度 (ヒートサーモ式)	0.84	2.88	○
5	使用済燃料プール監視カメラ	0.84	1.34	○
6	原子炉補機冷却水サージタンク	1.65	2.12	○
7	原子炉建屋内水素濃度	1.21		○
8	燃料取替エリア放射線モニタ	1.36		○
9	使用済燃料プール上部空間放射線モニタ (低線量)	1.04		○
10	使用済燃料プール上部空間放射線モニタ (高線量)	1.04		○
11	原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置	1.64		×
12	静的触媒式水素再結合装置 (その 1)	1.41	1.41	○
13	静的触媒式水素再結合装置 (その 2)	2.35	1.21	×
14	静的触媒式水素再結合装置動作監視装置	1.34		○
15	燃料プール冷却浄化系配管 (FPC-002, 003)	0.68	疲労累積係数 0.0034	○

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 2 簡易評価結果 (2/2)

No	設備名称	評価用応答比	最小裕度	簡易評価
16	燃料プール代替注水系配管 (FPC-020)	0.96	1.35	○
17	燃料プールスプレイ系配管 (FPC-019)	1.63	2.36	○
18	原子炉補機冷却水系配管 (KRCW-105, 205)	1.57	1.04	×
19	非常用ガス処理系配管 (SGTS- 001)	0.35	2.29	○
20	原子炉格納容器フィルタベン ト系配管 (FCVS-004)	0.78	疲労累積係数 0.3833	○
21	堰	1.44	10.87	○
22	津波監視カメラ	0.62		○
23	原子炉建屋クレーン	1.11	1.18	○
24	燃料交換機	1.32		×
25	制御棒貯蔵ラック	0.84	2.24	○
26	燃料チャンネル着脱機	1.03	2.25	○

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 3 詳細評価が必要となった設備

No	設備名称	減衰定数 (%) *2	固有周期 (s) *2,3	評価 項目	評価用 応答比	耐震 裕度 *4
1	使用済燃料貯蔵ラック	—	—	構造 強度	1.32	1.06
2	原子炉建屋ブローアウト パネル閉止装置	—	—	機能 維持	1.64	
3	静的触媒式水素再結合 装置 (その 2)	—	—	構造 強度	2.35	1.21
4	原子炉補機冷却水系配管 (KRCW-105, 205) *1			構造 強度	1.57	1.04
5	燃料交換機	2.0		構造 強度	1.32	

注記\*1：裕度が小さい KRCW-205 を代表で記載

\*2：面外方向に対して剛な設備は「—」として記載（使用済燃料貯蔵ラックの面外方向の固有周期は 0.05s 以下で剛であり，面内方向の固有周期は  s（110 体ラック）， s（170 体ラック）で柔である。原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置は，面外方向及び面内方向ともに 0.05s 以下で剛である。静的触媒式水素再結合装置（その 2）は，面外方向及び面内方向ともに 0.05s 以下で剛である。）

\*3：1 次固有周期を代表して記載

\*4：耐震裕度は各設備の耐震計算書の全評価結果のうち，最小値を記載

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

### 3.2 詳細評価結果

詳細評価が必要となった機器・配管系について、面外方向は面外影響評価用応答を用いて、面内方向は、影響検討であることから基準地震動  $S_s - D1 \sim D3$ 、 $S_s - F1 \sim F3$  及び  $S_s - N1$ （以下「 $S_s - 7$ 波」という。）の基本ケース\*を包絡した耐震条件を用いて耐震計算を実施した。評価に用いた地震力を表 4、5 に、評価結果を表 6 に示す。また、評価に用いた面外評価用応答を図 17、18 及び表 7 に示す。なお、耐震条件以外の圧力、温度等の条件は、耐震計算書と同一の条件である。

表 4 詳細評価に用いた地震力（面外方向に対して剛の設備）

方向	地震動	解析ケース	倍率
面外方向	$S_s - 7$ 波	基本ケース*	モデル比
面内方向	$S_s - 7$ 波	工認耐震計算書に用いた設計条件	1.0

表 5 詳細評価に用いた地震力（面外方向に対して柔の設備）

方向	地震動	解析ケース	拡幅	倍率
面外方向	$S_s - 7$ 波	基本ケース*	なし	モデル比
面内方向	$S_s - 7$ 波	基本ケース*	なし	1.0

注記\*：添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」に記載の材料物性の不確かさを考慮する解析ケースのうち、ケース 1（基本ケース）を示す。

表 6 詳細評価結果

No	設備名称	評価部位等	応力 分類等	計算 応力等	許容 応力等		
1	使用済燃料貯蔵ラック	補強板 d	組合せ	193MPa	205MPa		
2	原子炉建屋ブローアウト パネル閉止装置* <sup>1</sup>	扉駆動用電動機	機能維持 評価				
		門駆動用電動機					
3	静的触媒式水素再結合装置 (その2)* <sup>2</sup>	静的触媒式水素 再結合装置本体	組合せ				
4	原子炉補機冷却水系配管 (KRCW-105, 205)* <sup>3</sup>	—	一次＋ 二次応力	338MPa	458MPa		
5	燃料交換機	燃料交換機 構造物フレーム	組合せ	243MPa			

注記\*1：別紙 4.7.1 にて詳細を示す

\*2：別紙 4.7.2 にて詳細を示す

\*3：裕度が小さい KRCW-205 を代表で記載

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

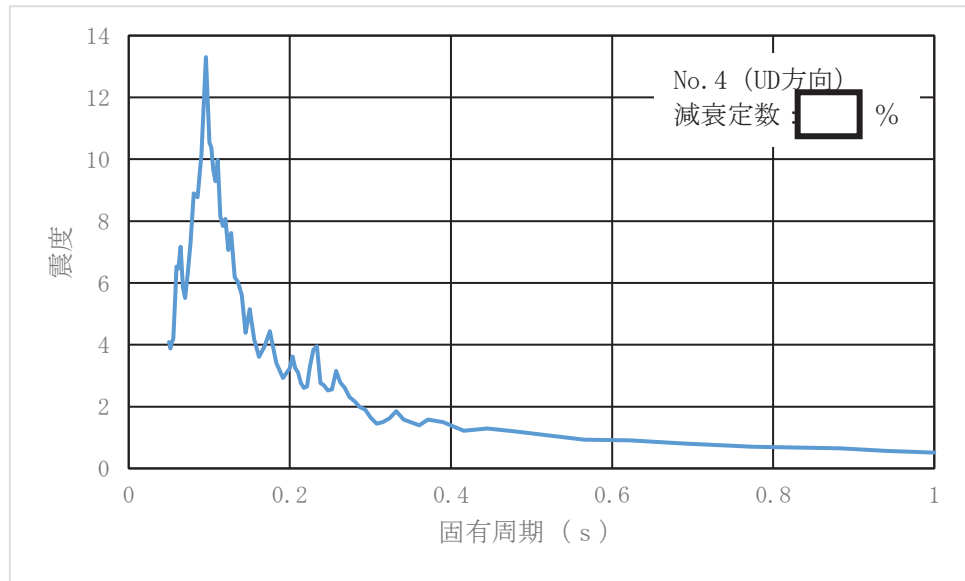


図 17 No. 4 原子炉補機冷却水系配管 (KRCW-105, 205)  
の面外影響評価用床応答曲線 (S s)

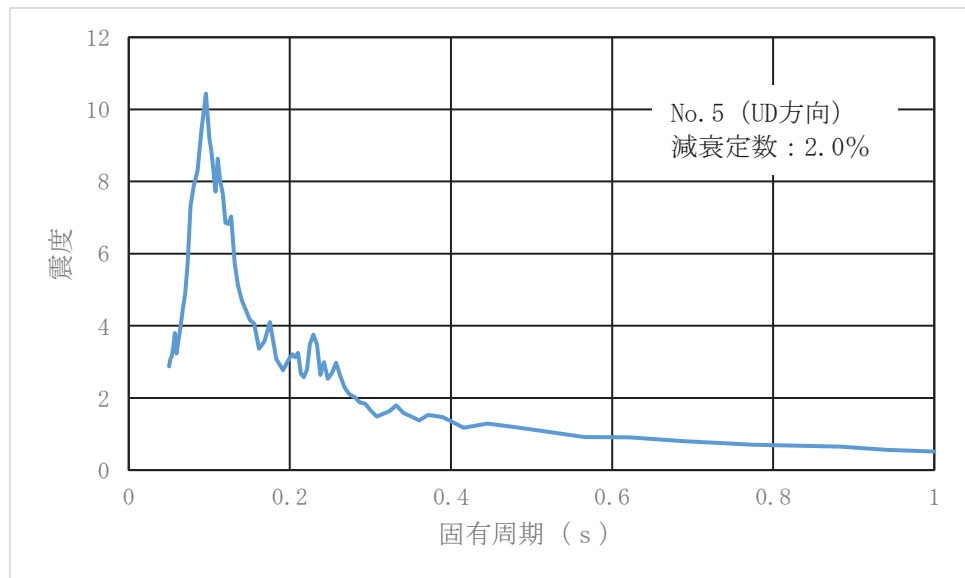


図 18 No. 5 燃料交換機の面外影響評価用床応答曲線 (S s)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 7 面外影響評価用最大応答加速度

No	設備名称	面外方向	最大応答加速度 (G)
1	使用済燃料貯蔵ラック	UD方向	2.06
2	原子炉建屋ブローアウトパネル 閉止装置* <sup>1</sup>	NS方向	
3	静的触媒式水素再結合装置 (その2)* <sup>2</sup>	NS方向	7.94
4	原子炉補機冷却水系配管 (KRCW-105, 205)* <sup>3</sup>	UD方向	2.82
5	燃料交換機	UD方向	2.70

注記\*1：別紙 4.7.1 にて詳細を示す

\*2：別紙 4.7.2 にて詳細を示す

\*3：裕度が小さい KRCW-205 を代表で記載

#### 4. まとめ

「別紙 2 3次元 FEM モデルを用いた精査」の「2.5 地震応答解析結果」より、壁の中央部で面外にはらむような最大応答加速度分布となっていることから、面外加速度の機器・配管系への影響検討を実施し、その結果、面外加速度による影響を考慮しても、機器・配管系の耐震評価に影響がないことを確認した。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



## 原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置の機能維持評価

## 1. はじめに

原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置（以下「BOP 閉止装置」という。）の機能維持評価について、簡易評価による耐震性が確認できなかったことから、詳細検討を実施した。詳細検討で用いた面外評価用最大応答加速度と機能確認済加速度について示す。

## 2. 動的機能維持評価対象設備

BOP 閉止装置における動的機能維持評価対象は、扉駆動用電動機及び門駆動用電動機である。

## 3. 面外評価用最大応答加速度による機能維持評価

## 3.1 BOP 閉止装置の機能確認済加速度による評価

評価結果を表 1 に示す。BOP 閉止装置の面外評価用最大応答加速度は、機能確認済加速度を超えており、耐震性が確認できなかった。表 1 に示す機能確認済加速度は、実機規模の試験体を用いた加振試験によって、重大事故等時における BOP 閉止装置の機能維持を確認したものであり、面外応答を考慮した加速度はこれを超過していたものである。

表 1 加振試験による機能確認済加速度を用いた評価結果

対象	面外評価用 最大応答加速度 (G)	機能確認済加速度* (G)
BOP 閉止装置		

注記\* : 添付書類「VI-2-9-4-4-1-5 原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置の耐震性について」から引用

実機規模の試験体を用いた加振試験より得られている機能確認済加速度を用いた評価で耐震性を確認できなかったことから、BOP 閉止装置の要求機能を踏まえた評価を実施する。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

### 3.2 BOP 閉止装置の機能要求を踏まえた評価

BOP 閉止装置の要求機能が、基準地震動 S s 後においても、作動性及び扉閉止後の原子炉建屋原子炉棟を負圧に維持できる気密性を保持できることであることを踏まえて、それぞれの要求機能に対して以下のとおり機能維持を確認する。

BOP 閉止装置の要求機能のうち、基準地震動 S s 後における作動性については、装置を駆動するために必要な扉駆動用電動機及び門駆動用電動機の機能維持並びに内梁や門ピン等の構造健全性を確認する必要がある。

次に、BOP 閉止装置の要求機能のうち、基準地震動 S s 後における扉閉止後の原子炉建屋原子炉棟を負圧に維持できる気密性の保持については、内梁や門ピン等の構造健全性を確認する必要がある。

以上より、BOP 閉止装置の要求機能を保持するためには、内梁や門ピン等の構造健全性及び電動機の機能維持を確認する必要があるため、その確認結果を以下に示す。

#### (1) 内梁や門ピン等の構造健全性

BOP 閉止装置の構造強度評価\*の最小裕度は  であり、面外加速度による評価用応答比 1.64 に対して十分余裕があることから問題ないことを確認した。

#### (2) 電動機の機能維持

BOP 閉止装置の扉駆動用電動機及び門駆動用電動機は、それぞれに加振試験を実施している。扉駆動用電動機及び門駆動用電動機に加振試験結果を表 2 に示す。扉駆動用電動機及び門駆動用電動機の面外評価用最大応答加速度は機能確認済加速度以下であり、耐震性に問題がないことを確認した。

注記\*：添付書類「VI-2-9-4-4-1-5 原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置の耐震性について」に記載

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 2 扉駆動用電動機及び門駆動用電動機の加振試験結果

対象	面外評価用 最大応答加速度 (G)	機能確認済加速度* (G)
扉駆動用電動機		
門駆動用電動機		

注記\* : 補足説明資料「補足-200-16 ブローアウトパネル関連設備の設計方針」から引用

#### 4. まとめ

面外加速度による影響を考慮しても、BOP 閉止装置の機能維持評価において、耐震性に影響がないことを確認した。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

## 静的触媒式水素再結合装置（その2）の応力評価

## 1. はじめに

静的触媒式水素再結合装置（その2）（以下「静的触媒式水素再結合装置」という。）の応力評価について、簡易評価による耐震性が確認できなかったことから、詳細検討を実施した。詳細検討で用いた面外評価用最大応答加速度と機能確認済加速度について示す。

## 2. 応力評価対象部位

静的触媒式水素再結合装置の応力評価対象部位は、面外方向の応答倍率>裕度となる静的触媒式水素再結合装置本体である。

## 3. 面外評価用最大応答加速度による応力評価

## 3.1 静的触媒式水素再結合装置の面外方向の応答倍率による評価

評価条件を表 1、評価結果を表 2 に示す。静的触媒式水素再結合装置本体の面外評価用最大応答加速度による算出応力は許容応力を超過しており、耐震性が確認できなかったことから、「3.2 静的触媒式水素再結合装置本体の解析モデル精緻化による評価」を実施する。

表 1 面外評価用最大応答加速度を用いた評価条件

対象	NS 方向（面外方向） 震度* <sup>1</sup>	EW 方向（面内方向） 震度* <sup>2</sup>	UD 方向（面内方向） 震度* <sup>2</sup>
静的触媒式水素 再結合装置本体	7.94	3.10	1.86

注記\*1：面外方向は基準地震動  $S_s$ （基本ケース）に対して面外方向の応答倍率（2.35 倍）を乗じた震度

\*2：面内方向は基準地震動  $S_s$ （基本ケース）の震度

表 2 面外評価用最大応答加速度を用いた評価結果

対象	応力分類	算出応力* <sup>1</sup> (MPa)	許容応力* <sup>2</sup> (MPa)
静的触媒式水素再結合装置本体	組合せ		

注記\*1: 面内方向は基準地震動 S<sub>s</sub> (基本ケース) の震度, 面外方向は基準地震動 S<sub>s</sub> (基本ケース) に対して面外方向の応答倍率を乗じた震度による算出応力

\*2: 添付書類「VI-2-9-4-4-3-1 静的触媒式水素再結合装置の耐震性についての計算書」から引用

### 3.2 静的触媒式水素再結合装置本体の解析モデル精緻化による評価

添付書類「VI-2-9-4-4-3-1 静的触媒式水素再結合装置の耐震性についての計算書」(以下「工認計算書」という。)で使用した解析モデルから, より実機の構造状態に合うよう精緻化した解析モデルによる応力評価を実施した。3.2.1 項に精緻化した解析モデルを示す。

静的触媒式水素再結合装置本体の解析モデル精緻化による評価結果を表 3 に示す。静的触媒式水素再結合装置本体の面外評価用最大応答加速度による算出応力は許容応力以下であり, 耐震性が確認できた。

表 3 静的触媒式水素再結合装置本体の解析モデル精緻化による評価結果

対象	応力分類	算出応力* <sup>1</sup> (MPa)	許容応力* <sup>2</sup> (MPa)
静的触媒式水素再結合装置本体	組合せ		

注記\*1: 面内方向は基準地震動 S<sub>s</sub> (基本ケース) の震度, 面外方向は基準地震動 S<sub>s</sub> (基本ケース) に対して面外方向の応答倍率を乗じた震度による算出応力

\*2: 添付書類「VI-2-9-4-4-3-1 静的触媒式水素再結合装置の耐震性についての計算書」から引用

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

### 3.2.1 解析モデルの精緻化

図1に工認計算書で使用した解析モデルを示す。

3.1項の評価で裕度が1未満となった箇所は、静的触媒式水素再結合装置本体の背面部の①ハウジングである。

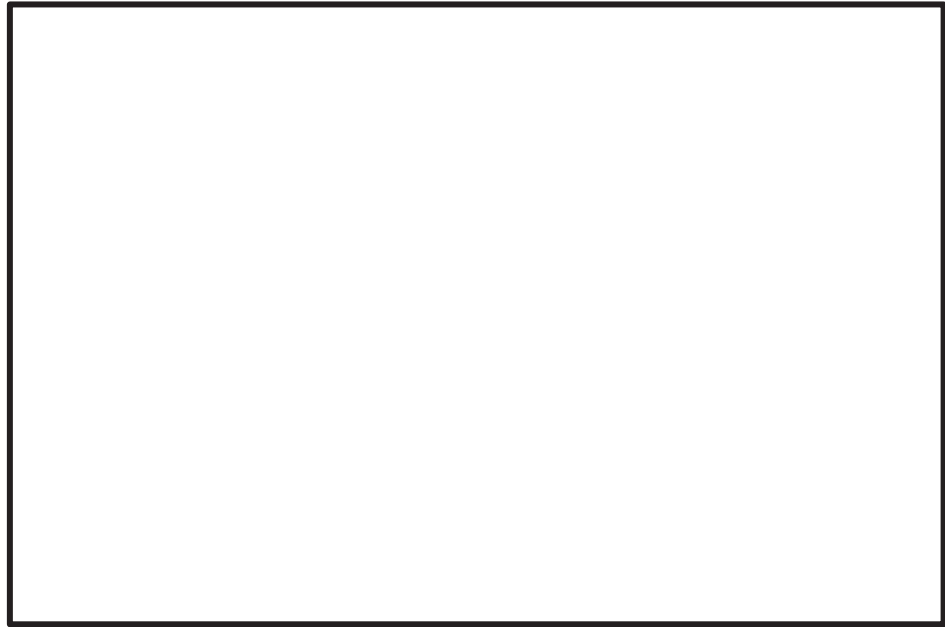


図1 工認計算書の解析モデル

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

図 2 に①ハウジングの外形図を示す。

①ハウジングは、②ブラケットと③カートリッジガイドに挟まれるようにリベットで接合された構造となっている。工認耐震計算書では①ハウジング（板厚  ）と②ブラケットをモデル化しており、③カートリッジガイドは質量のみをモデルに考慮している。

今回の検討において、建屋の面外方向の応答が増加したことにより、①ハウジングに対しても図 2 に示すとおり面外方向への入力加速度が大きくなったことから、過大な応力が発生し許容応力を上回る結果となった。

そこで、実構造を踏まえた解析モデルの精緻化を実施するため、図 2 に示す③カートリッジガイド（①ハウジングと接合する上部の板状の範囲）について解析モデルへ反映を行った。



図 2 ①ハウジングの外形図

精緻化した解析モデルを図 3 に示す。

工認計算書では、上記のとおり①ハウジングのみの板厚  をモデル化していたが、精緻化した解析モデルでは、①ハウジングの濃色部について、①ハウジングの板厚  と③カートリッジガイド上部が接合する部位（板厚  ）の板厚を考慮して板厚  としてモデル化した。

今回の検討対象である面外方向は、①ハウジングと③カートリッジガイドを接合するリベットの軸方向となるため、2枚の板を押し付ける方向に荷重が加わる。リベット接合位置ではワッシャーとリベットによって、①ハウジングと③カートリッジガイドはリジットに固定されているため、2枚の板厚を考慮できる。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

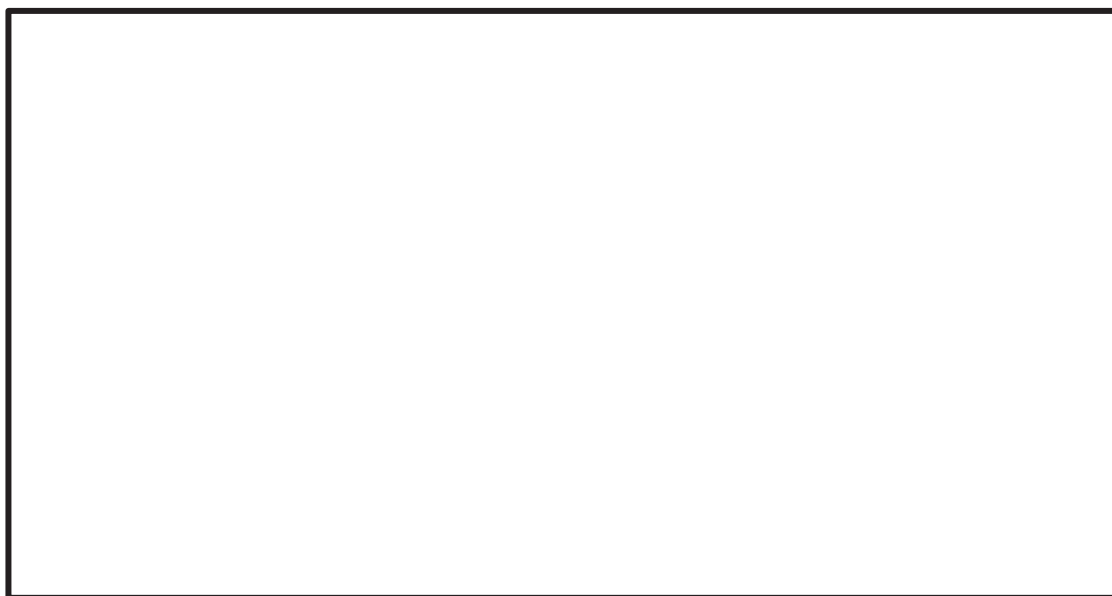


図 3 精緻化した解析モデル

4. まとめ

面外加速度による影響を考慮しても，静的触媒式水素再結合装置本体の応力評価において，耐震性に影響がないことを確認した。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



## 原子炉建屋 3次元 FEM モデルの応答解析結果に係る機器・配管系への影響検討

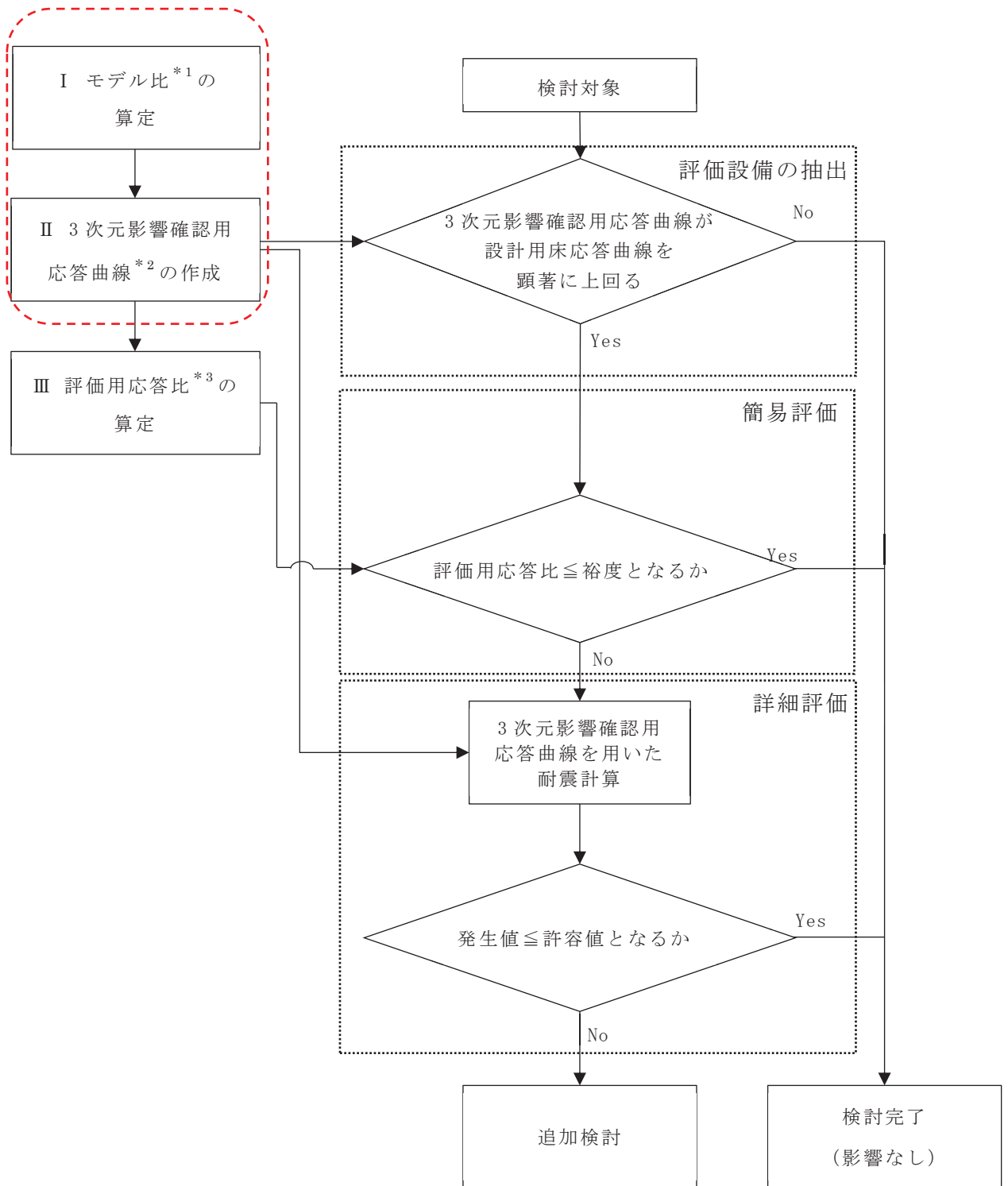
## 1. はじめに

「別紙 3 3次元 FEM モデルによる地震応答解析」の「3.4 床応答への影響検討」より、3次元 FEM モデルの応答スペクトルが質点系モデルの応答スペクトルを上回る箇所があることを踏まえて機器・配管系への影響検討を実施する。

## 2. 検討方針

3次元 FEM モデルの応答スペクトルから、3次元影響確認用応答曲線を作成し、設計用床応答曲線との比較を行う。比較対象箇所は、「別紙 3 3次元 FEM モデルによる地震応答解析」の「3.4 床応答への影響検討」と同様とする。影響検討フローを図 1 に示す。なお、応答の作成及び評価は、「別紙 4.7 原子炉建屋 3次元 FEM モデルの面外加速度に係る機器・配管系への影響検討」と同様の方法である。

2.2.1 項にて説明する



注記\*1：モデル比 = S<sub>d-D2</sub>に対する3次元FEMモデルの応答 / S<sub>d-D2</sub>に対する質点系モデルの応答

\*2：3次元影響確認用応答曲線 = 質点系モデル基本ケースのS<sub>s</sub>に対する応答 × モデル比

\*3：評価用応答比 = 3次元影響確認用応答曲線 / 耐震計算で使用しているS<sub>s</sub>に対する応答

図1 原子炉建屋3次元FEMモデルの応答解析結果に係る機器・配管系への影響検討フロー

## 2.2 検討内容

### 2.2.1 3次元影響を確認するための応答の作成

3次元 FEM モデルでは、弾性設計用地震動  $S_d$  に対する地震応答解析を行っていることから、質点系モデルの基準地震動  $S_s$  に対する応答を補正し、3次元影響を確認できる応答を作成する。

I 弾性設計用地震動  $S_d$  に対する 3次元 FEM モデルの応答／弾性設計用地震動  $S_d$  に対する質点系モデルの応答の比（以下「モデル比 ( $S_d$ )」という。）を、全周期において算定する。モデル比の例を図 2 に示す。なお、3次元 FEM モデルの応答による機器・配管系への影響を検討するものであるため、1.0 を下回るモデル比についてもそのまま考慮する。

II 質点系モデル基本ケースの基準地震動  $S_s$  に対する固有周期毎の応答に、モデル比を乗算した応答曲線（以下「3次元影響確認用応答曲線 ( $S_s$ )」という。）を算定する。3次元影響確認用応答曲線算定の例を図 3 に示す。

3次元影響確認用応答曲線と基準地震動  $S_s$  の設計用床応答曲線（以下「設計用床応答曲線 ( $S_s$ )」という。）との比較を行う。3次元影響確認用応答曲線と設計用床応答曲線との比較例を図 4 に示す。

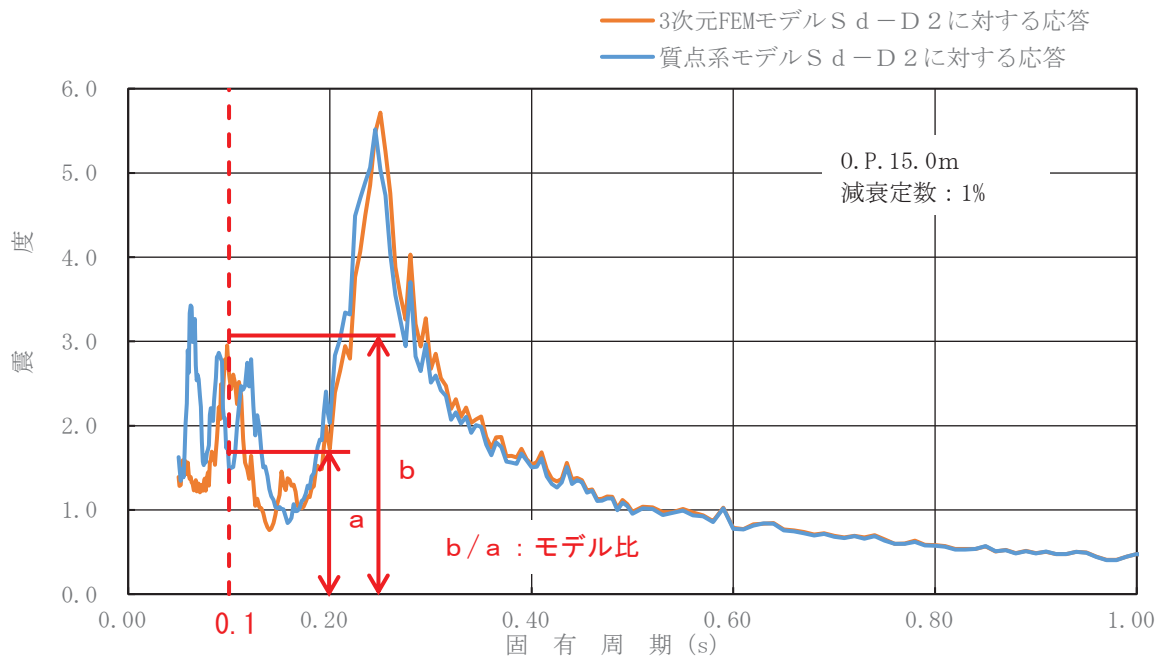


図2 モデル比 (S d) の算定例 (2.2.1 項 I)

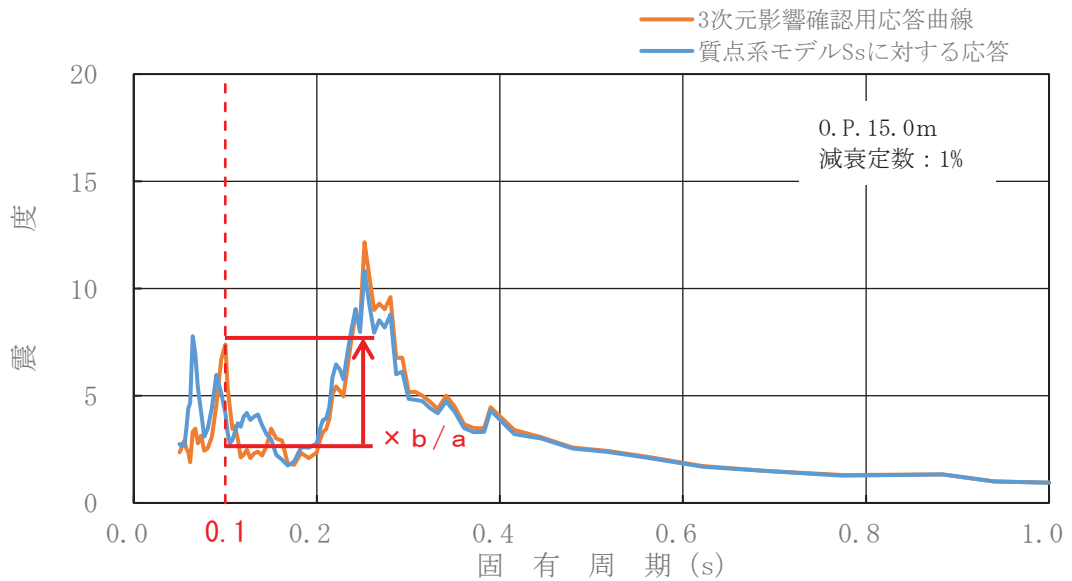


図3 3次元影響確認用応答曲線 (S s) の算定例 (2.2.1 項 II)

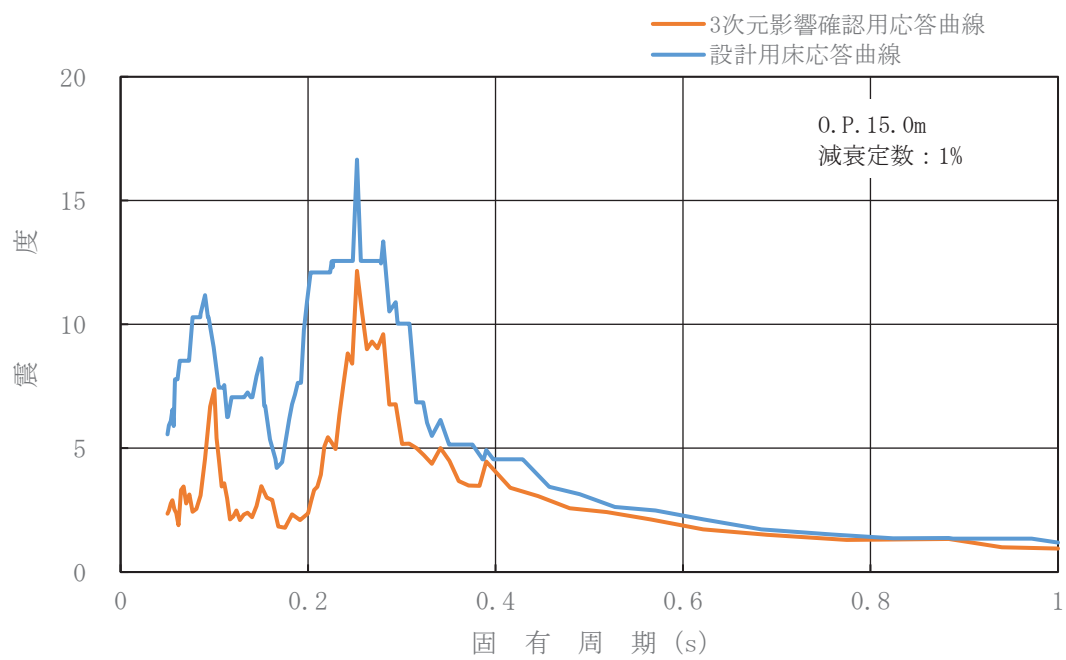


図 4 3次元影響確認用応答曲線 (S<sub>s</sub>) と設計用床応答曲線 (S<sub>s</sub>) との比較例

### 3. 比較結果

3次元影響確認用応答曲線と設計用床応答曲線との比較を図5~7に示す。

いずれの比較対象箇所においても、3次元影響確認用応答曲線が設計用床応答曲線を顕著に上回ることなく、設計用床応答曲線が3次元影響確認用応答曲線を概ね包絡していることを確認した。

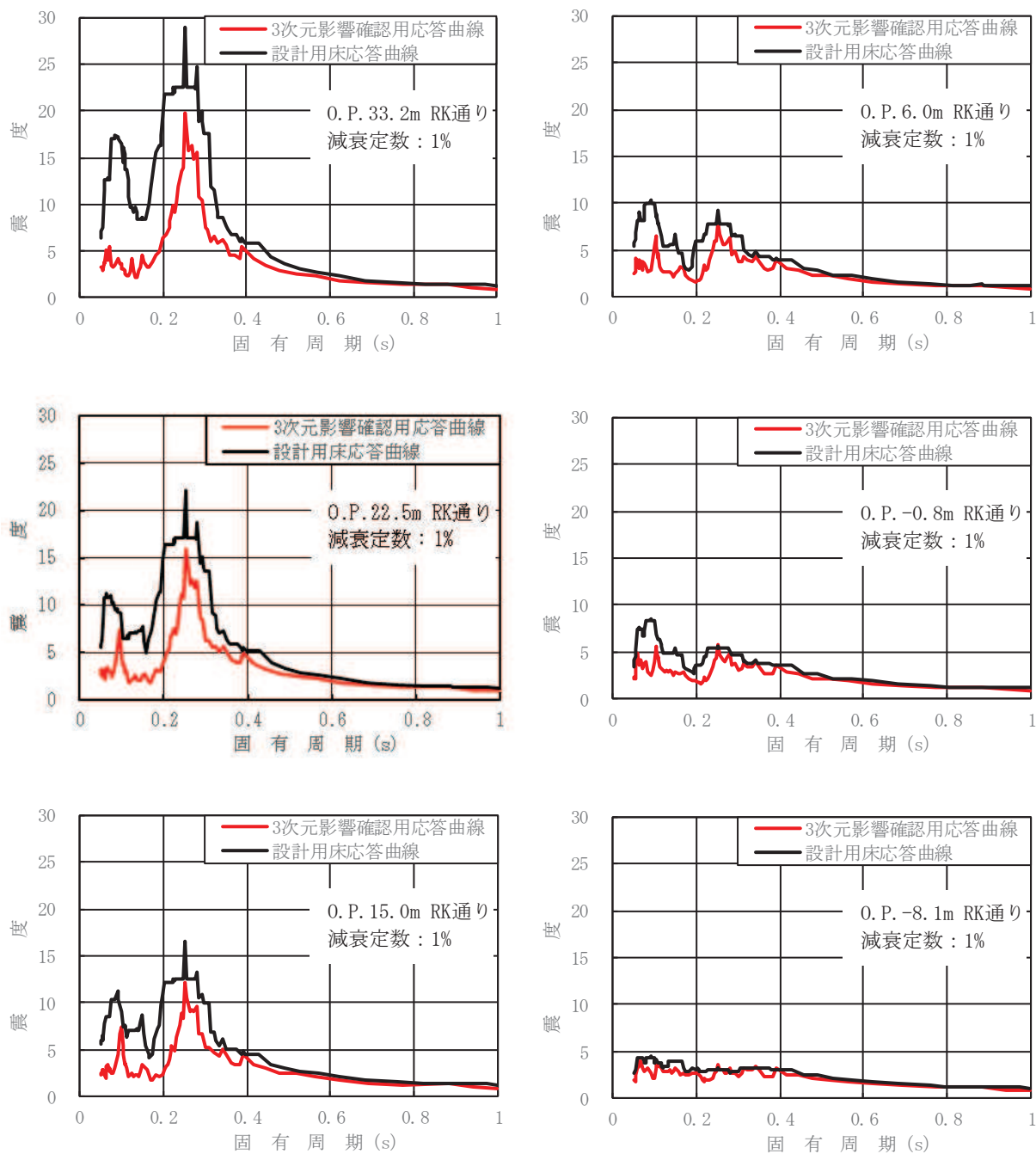


図5 3次元影響確認用応答曲線 (S s) と設計用床応答曲線 (S s) の比較 (NS 方向) (1/3)

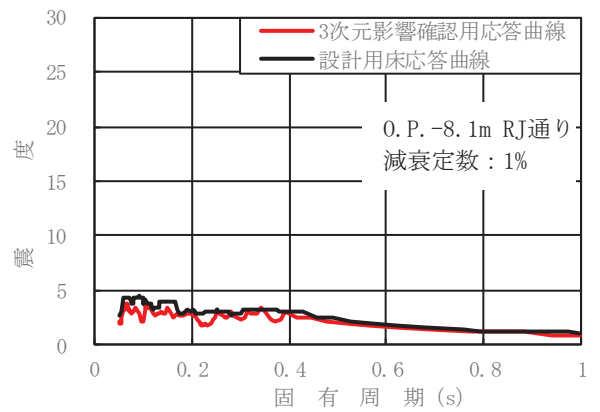
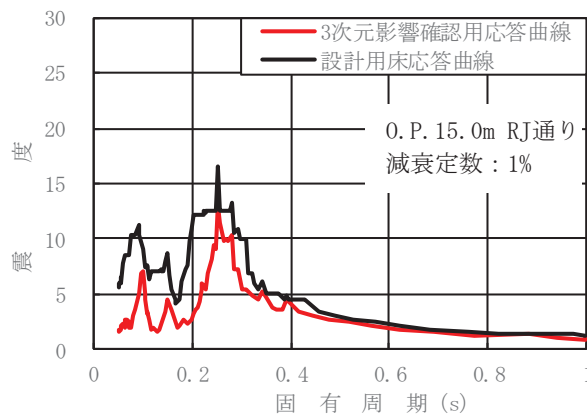
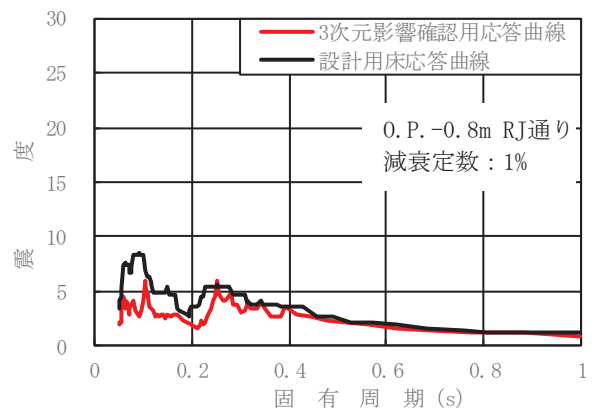
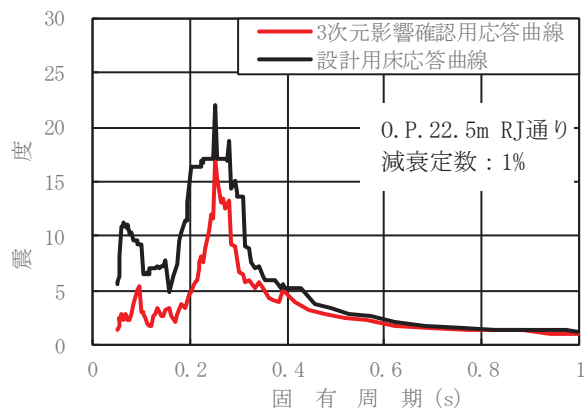
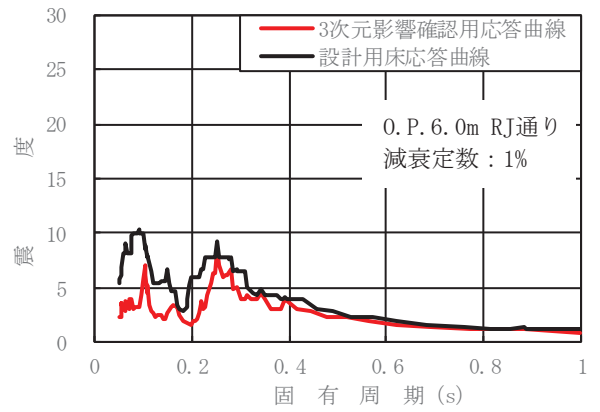
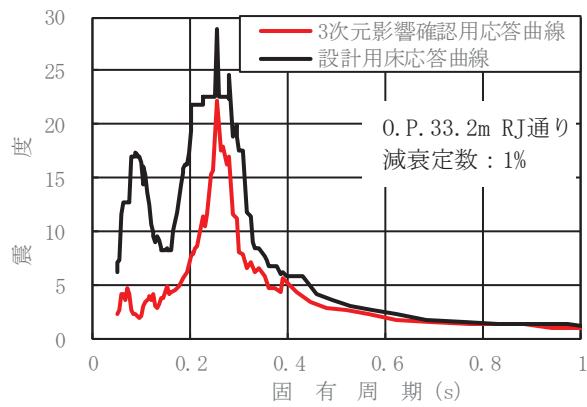


図5 3次元影響確認用応答曲線 (S<sub>s</sub>) と設計用床応答曲線 (S<sub>s</sub>) の比較 (NS方向) (2/3)

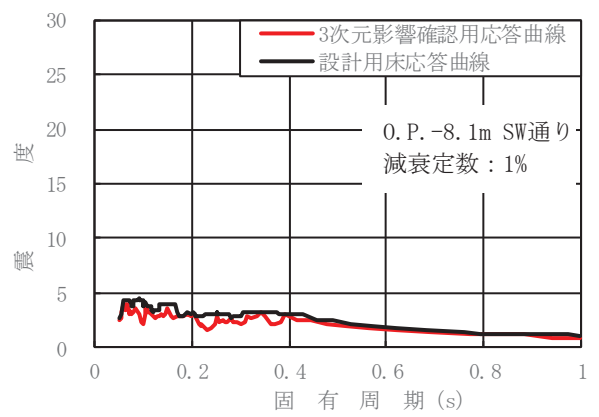
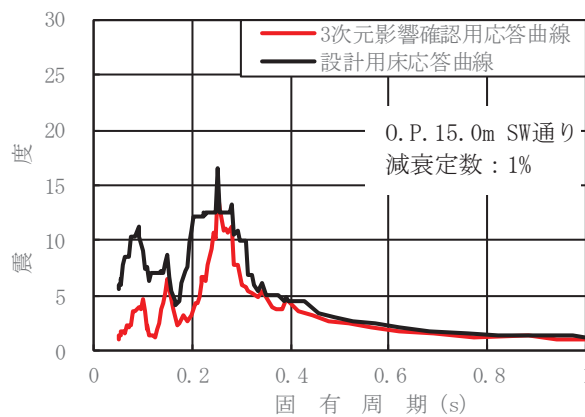
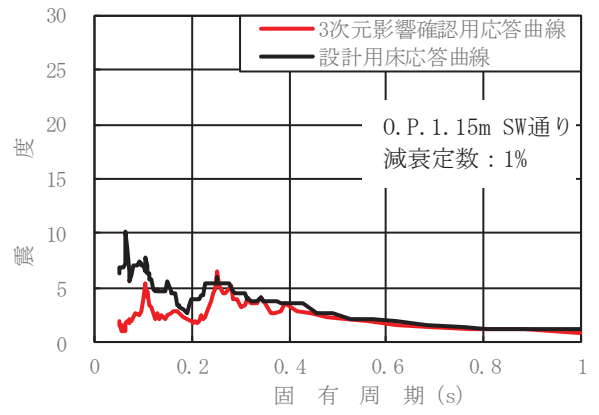
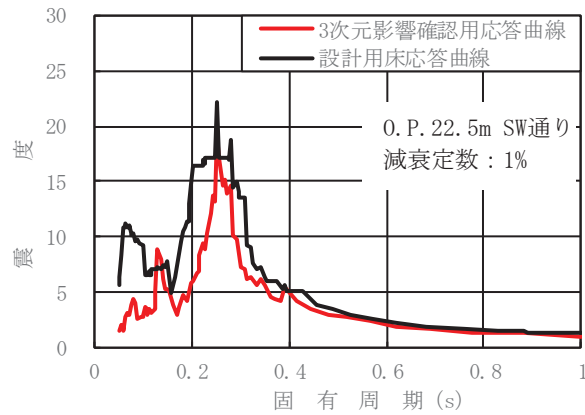
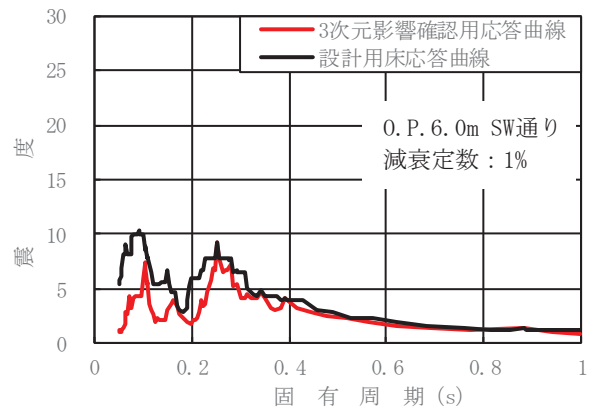
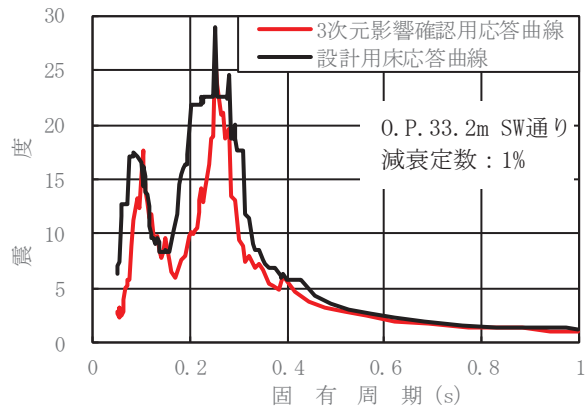


図5 3次元影響確認用応答曲線 ( $S_s$ ) と設計用床応答曲線 ( $S_s$ ) の比較 (NS方向) (3/3)



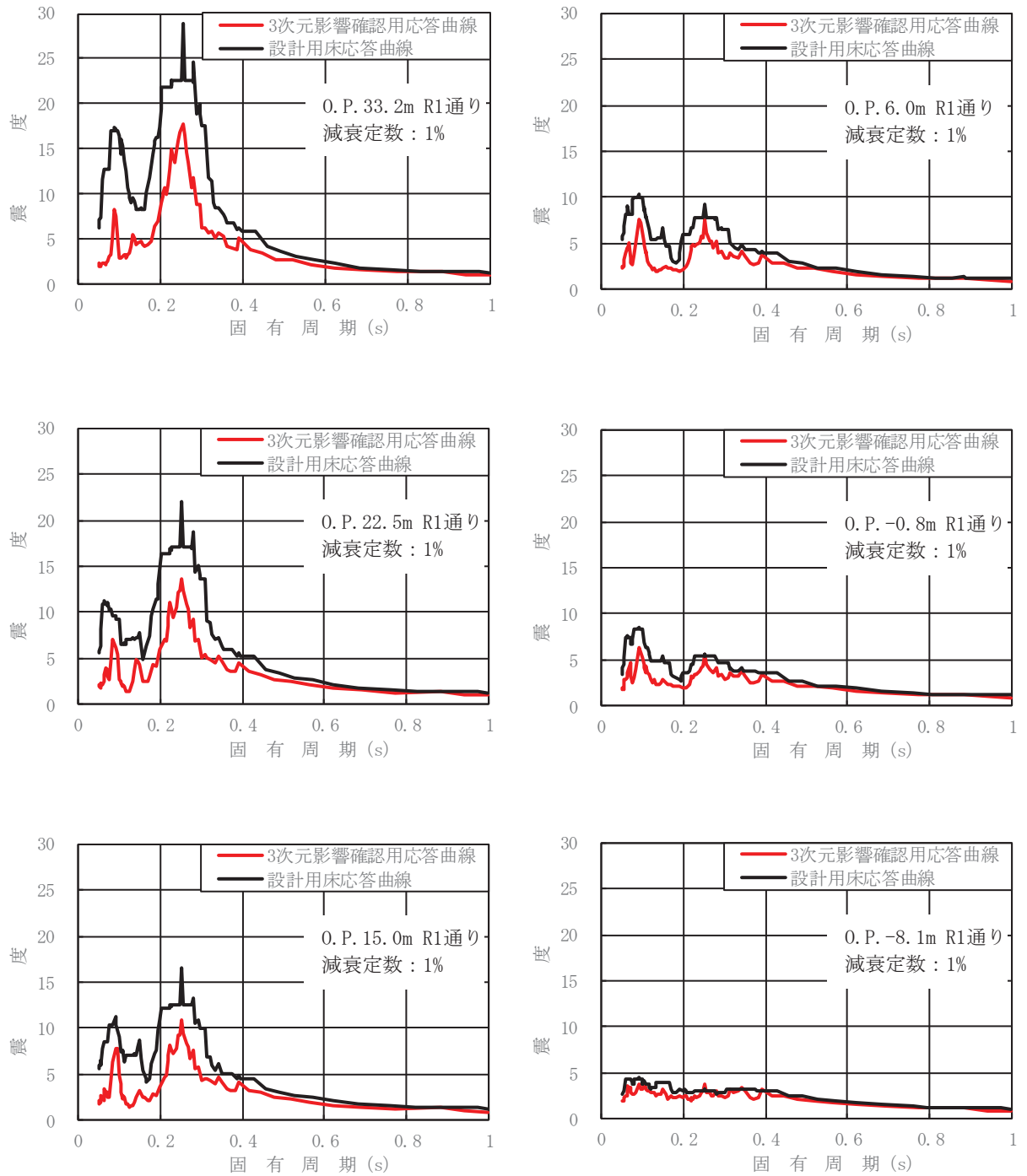


図6 3次元影響確認用応答曲線 (S<sub>s</sub>) と設計用床応答曲線 (S<sub>s</sub>) の比較 (EW方向) (1/3)

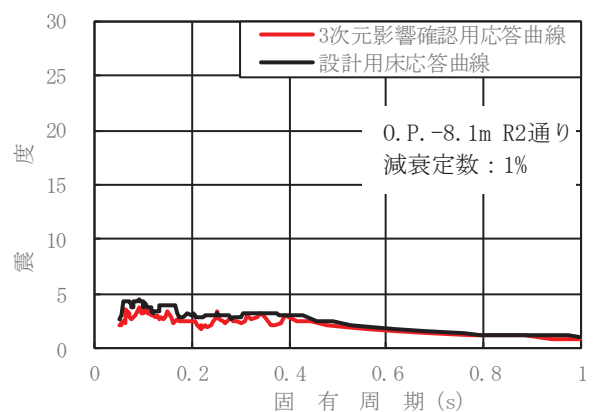
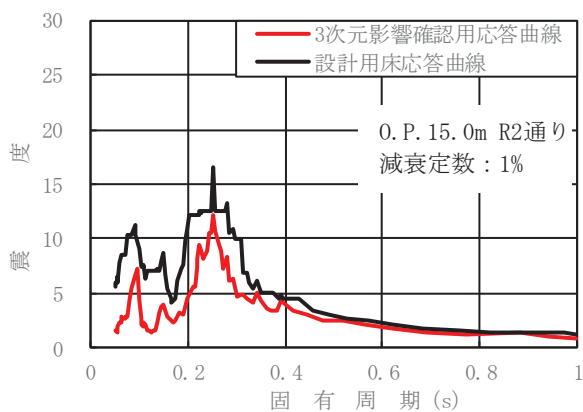
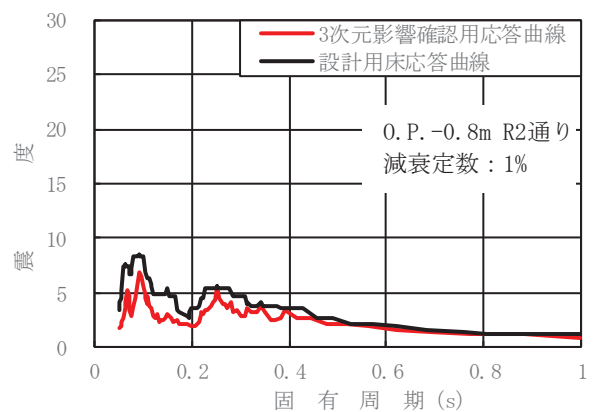
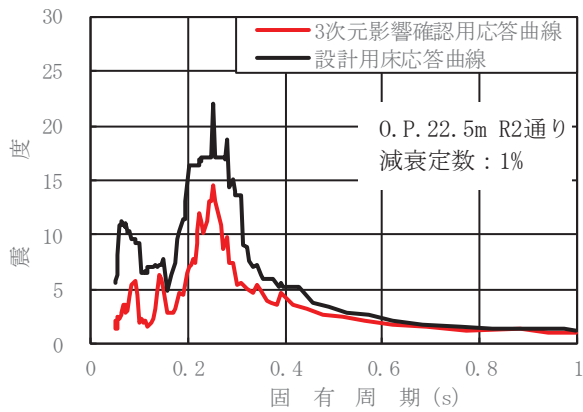
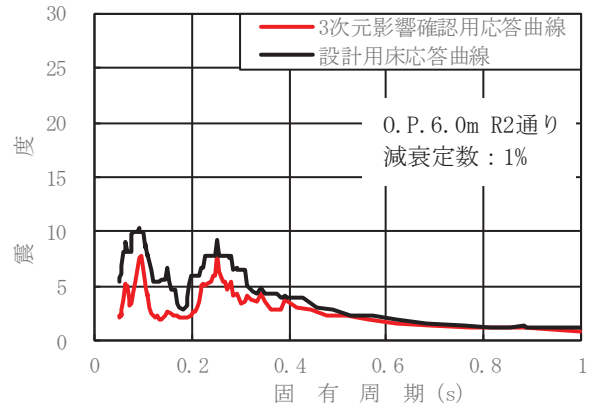
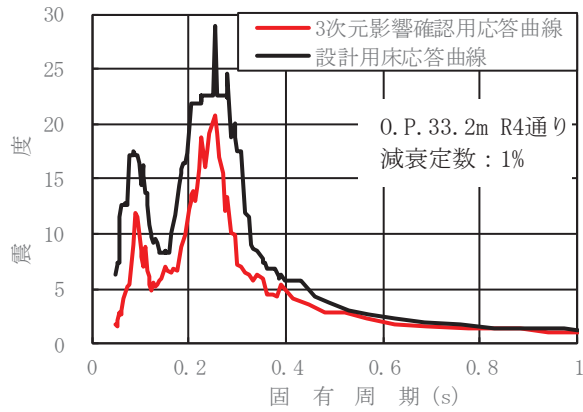


図6 3次元影響確認用応答曲線 (S<sub>s</sub>) と設計用床応答曲線 (S<sub>s</sub>) の比較 (EW方向) (2/3)

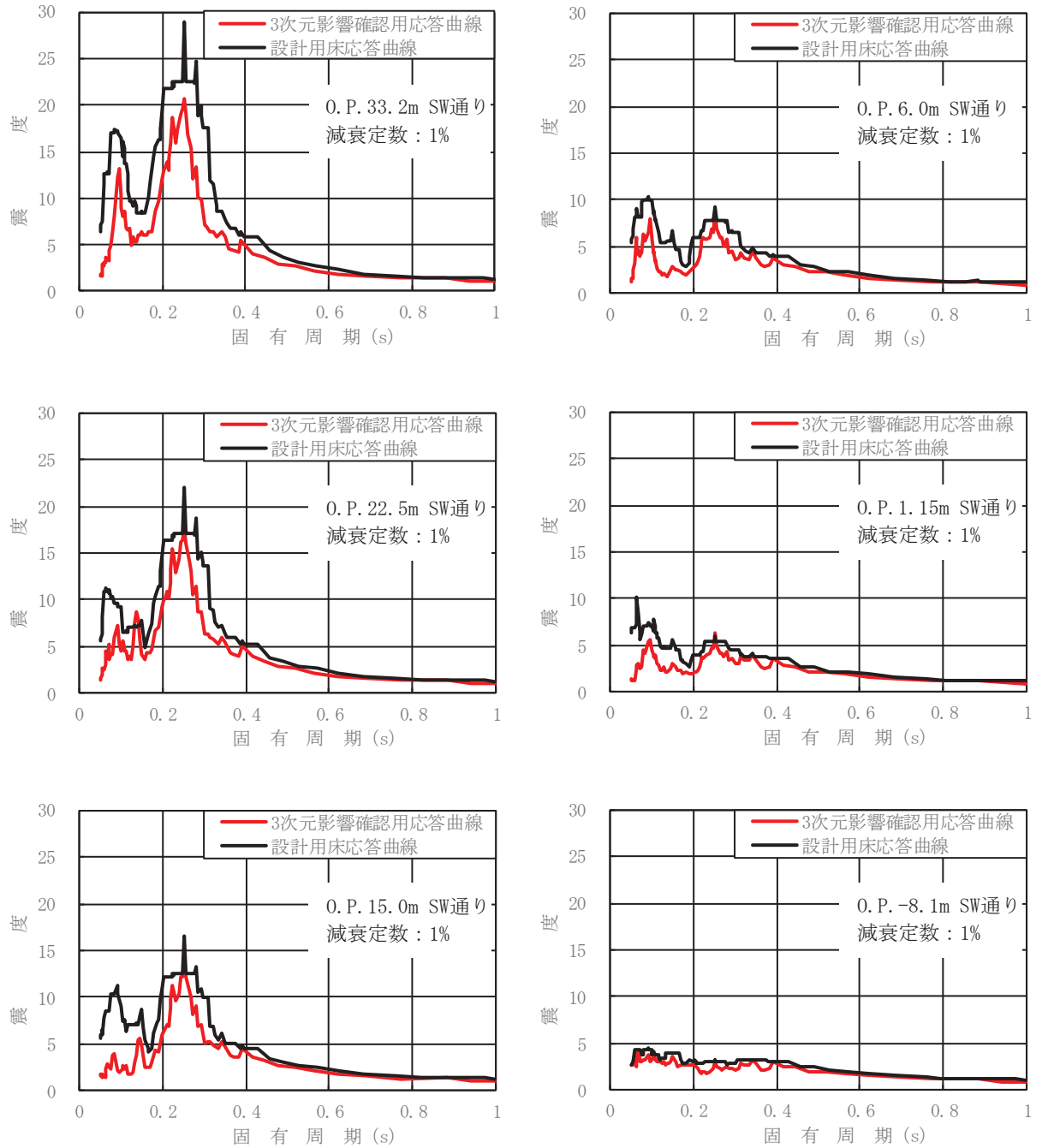


図6 3次元影響確認用応答曲線 (S<sub>s</sub>) と設計用床応答曲線 (S<sub>s</sub>) の比較 (EW方向) (3/3)

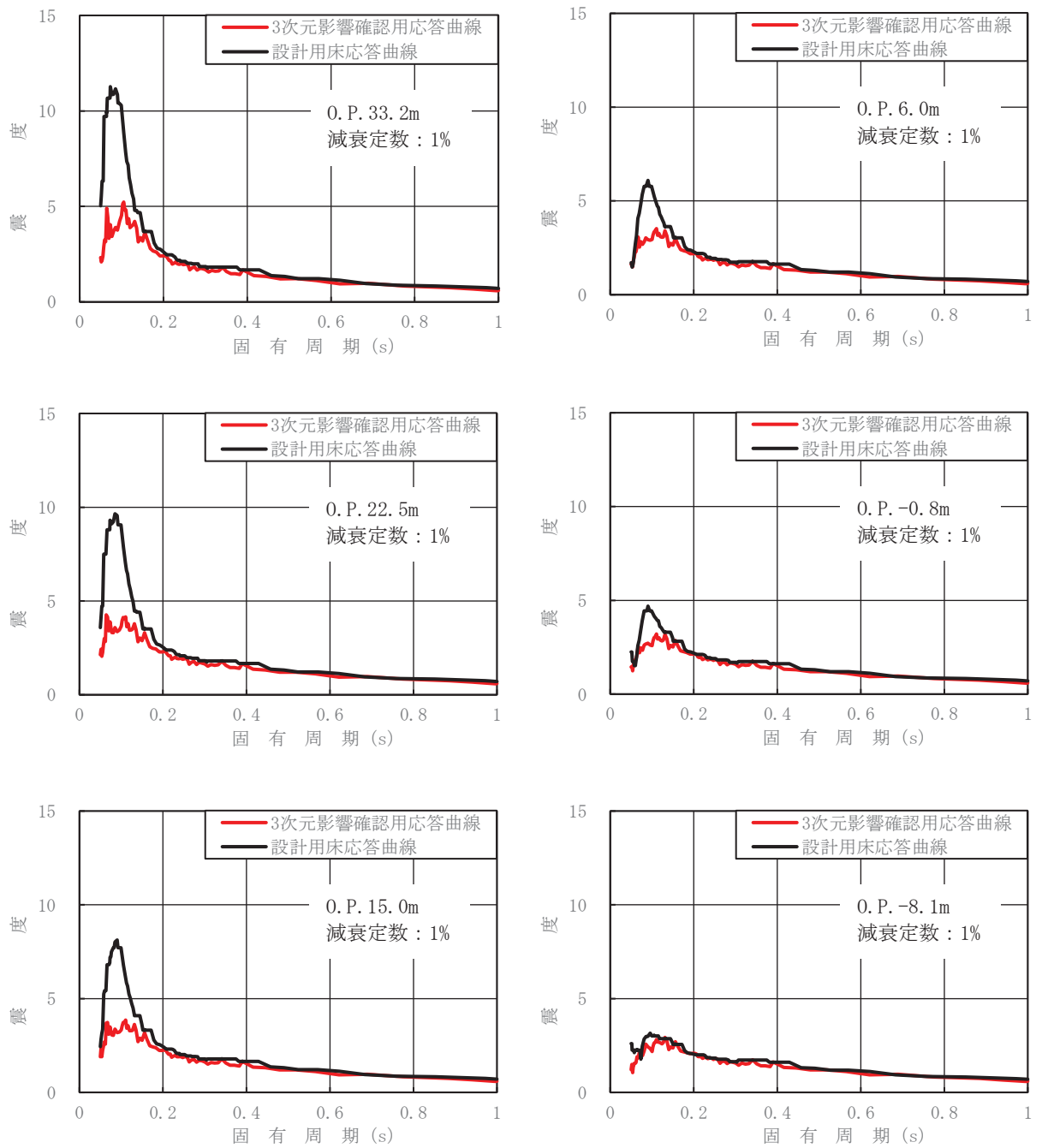


図7 3次元影響確認用応答曲線 (S<sub>s</sub>) と設計用床応答曲線 (S<sub>s</sub>) の比較 (UD方向)

#### 4. まとめ

「別紙 3 3次元 FEM モデルによる地震応答解析」の「3.4 床応答への影響検討」より、3次元 FEM モデルの応答スペクトルが質点系モデルの応答スペクトルを上回る箇所があることを踏まえて機器・配管系への影響検討を実施した。3次元影響確認用応答曲線と設計用床応答曲線との比較を行い、いずれの比較対象箇所においても、3次元影響確認用応答曲線が設計用床応答曲線を顕著に上回ることはなく、設計用床応答曲線が3次元影響確認用応答曲線を概ね包絡していることを確認したため、機器・配管系の耐震評価に影響がないことを確認した。

## 別紙5 方向性を考慮しない水平地震動における模擬地震波の作成方針

## 目次

1. はじめに..... 別紙 5-1
2. 模擬地震波等の作成方針..... 別紙 5-3
  - 2.1 敷地で得られた観測記録による確認..... 別紙 5-3
  - 2.2 各基準地震動水平方向に組み合わせる地震動の作成方針..... 別紙 5-3
    - 2.2.1 応答スペクトルに基づく手法による基準地震動に  
組み合わせる地震動..... 別紙 5-3
    - 2.2.2 断層モデルに基づく手法による基準地震動に  
組み合わせる地震動..... 別紙 5-3
    - 2.2.3 震源を特定せず策定する地震動による基準地震動に  
組み合わせる地震動..... 別紙 5-4
3. 位相特性の異なる模擬地震波等の作成結果..... 別紙 5-8

1. はじめに

水平2方向及び鉛直方向地震力の同時入力による影響検討を行う際には、水平1方向入力、あるいは鉛直方向地震力の同時入力の検討結果から、各設備に対して影響が大きいと判断される地震動を選定する方針とする。水平2方向及び鉛直方向地震力の同時入力による影響検討を行う際に、各設備に適用する地震動を表1-1に示す。

この際、水平1方向には基準地震動 $S_s-D1$ 、 $S_s-D2$ 、 $S_s-F1$ 、 $S_s-F2$ 、 $S_s-N1$ 及び弾性設計用地震動 $S_d-D2$ （以下、「基準地震動等」という。）を用いるが、その直交方向には基準地震動 $S_s-D1$ 、 $S_s-D2$ 、 $S_s-F1$ 、 $S_s-F2$ 、 $S_s-N1$ 及び弾性設計用地震動 $S_d-D2$ とは位相の異なる模擬地震波または観測記録から作成した地震動（以下「模擬地震波等」という。）を用いている。本資料では、水平2方向及び鉛直方向地震力の同時入力による影響検討に用いる模擬地震波等の作成方針について示す。

表1-1 水平2方向及び鉛直方向地震力の同時入力による  
影響検討を行う際に各設備に適用する地震動

設備名称	基準地震動					弾性設計 用地震動
	$S_s-D1$	$S_s-D2$	$S_s-F1$	$S_s-F2$	$S_s-N1$	
サプレッションチェンバ (スロッシング)	○					
軽油タンク室		○				
軽油タンク室 (H)		○				
取水口		○				
貯留堰		○				
復水貯蔵タンク基礎		○				
防潮壁 (RC 支柱)		○				
屋外排水路逆流防止設備 (北側) (集水ピット)		○				
制御棒挿入性の地震応答解析		○				
海水ポンプ室		○			○	
第3号機海水ポンプ室		○			○	
防潮壁 (杭)		○			○	
排気筒			○		○	
ガスタービン発電設備 軽油タンク室				○		
屋外排水路逆流防止設備 (南側) (集水ピット)				○		
原子炉建屋の建屋3次元 FEMによる地震応答解析						○



## 2. 模擬地震波等の作成方針

応答スペクトルに基づく手法による基準地震動  $S_s - D 1$  及び  $S_s - D 2$ ，断層モデルを用いた手法による基準地震動  $S_s - F 1$  及び  $S_s - F 2$ ，震源を特定せず策定する地震動による基準地震動  $S_s - N 1$  については，水平方向の地震動に方向性がないことから，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の同時入力による影響検討を行う場合，水平 2 方向のうち 1 方向について模擬地震波等を作成し入力する方法が考えられる。

応答スペクトルに基づく手法による基準地震動  $S_s - D 1$  及び  $S_s - D 2$ ，断層モデルを用いた手法による基準地震動  $S_s - F 1$  及び  $S_s - F 2$ ，震源を特定せず策定する地震動による基準地震動  $S_s - N 1$  の水平方向に組み合わせる地震動を以下に示す方針によって作成する。また，模擬地震波等の詳細な作成方法については，添付書類「VI-2-1-2 基準地震動  $S_s$  及び弾性設計用地震動  $S_d$  の策定概要」と同一である。

### 2.1 敷地で得られた観測記録による確認

自由地盤観測点 (O. P. -8.6m) における，2011 年東北地方太平洋沖地震 (以下，3.11 地震)，2011 年 4 月 7 日の宮城県沖の地震 (以下，4.7 地震) の観測記録から，当該サイトにおいて，水平 2 方向の地震波で位相差が生じる傾向を確認した。確認の方法として，基準地震動  $S_s - D 2$  を同時に水平 2 方向に入力した場合のオービット (図 2-1) と，観測記録の水平 2 方向のオービット (図 2-2 及び図 2-3) との比較を行った。図 2-1 から，全く同じ地震動を同時に水平 2 方向に入力した場合，オービットは現実的に考えにくい  $45^\circ$  方向に直線的な軌跡を示す。一方，図 2-2 及び図 2-3 より観測記録ではオービットは位相差によって生じるランダムな軌跡を示すことを確認した。

### 2.2 各基準地震動水平方向に組み合わせる地震動の作成方針

#### 2.2.1 応答スペクトルに基づく手法による基準地震動に組み合わせる地震動

応答スペクトルに基づく手法による基準地震動  $S_s - D 1$  及び  $S_s - D 2$  は，位相角を一様乱数とした正弦波を重ね合わせ，目標とする応答スペクトルに適合するように模擬地震波を作成している。そこで，組み合わせる地震動は，基準地震動  $S_s - D 1$  及び  $S_s - D 2$  と同一の方法で作成した位相の異なる模擬地震波とする。

#### 2.2.2 断層モデルに基づく手法による基準地震動に組み合わせる地震動

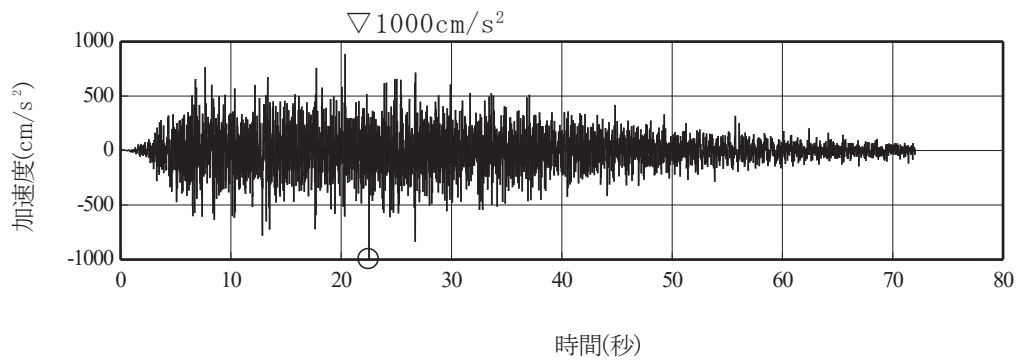
断層モデルに基づく手法による基準地震動  $S_s - F 1$  及び  $S_s - F 2$  は 3.11 地震の敷地における観測記録とシミュレーション解析との整合性が確認されている断層モデルに不確かさを考慮して，統計的グリーン関数法により評価された地震動である。また，シミュレーション結果を踏まえ放射特性を一定値としているため，水平方向の地震動に方向性がない。

波形合成にあたっては，要素地震の位相特性を一様乱数として与えていることか

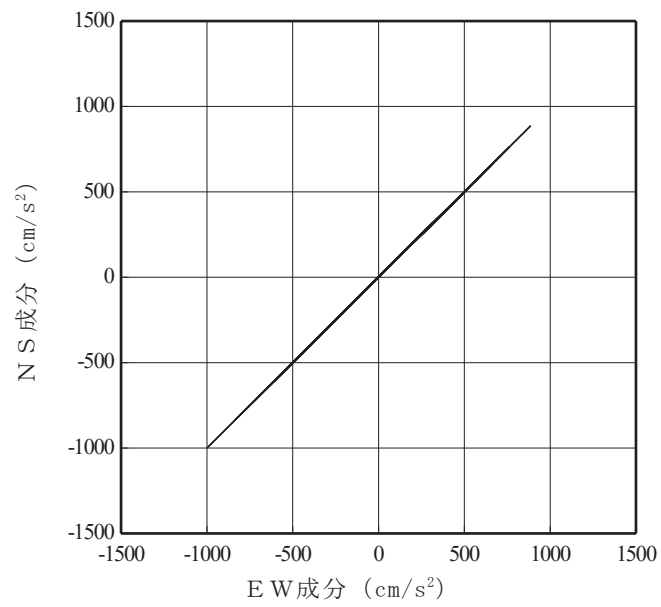
ら、組み合わせる地震動は、基準地震動  $S_s - F1$  及び  $S_s - F2$  と同一の方法で作成した位相の異なる地震動とする。

### 2.2.3 震源を特定せず策定する地震動による基準地震動に組み合わせる地震動

基準地震動  $S_s - N1$  は「震源を特定せず策定する地震動」として、2004年北海道留萌支庁南部地震の観測記録より策定された地震動である。基準地震動  $S_s - N1$  における水平方向の地震動は、観測記録から推定される解放基盤表面相当位置の地震動に基づき作成されている。そこで、組み合わせる地震動は、基準地震動  $S_s - N1$  の作成方法と同一の方法で、基準地震動  $S_s - N1$  で用いた観測記録と水平方向に直交する観測記録から作成する。

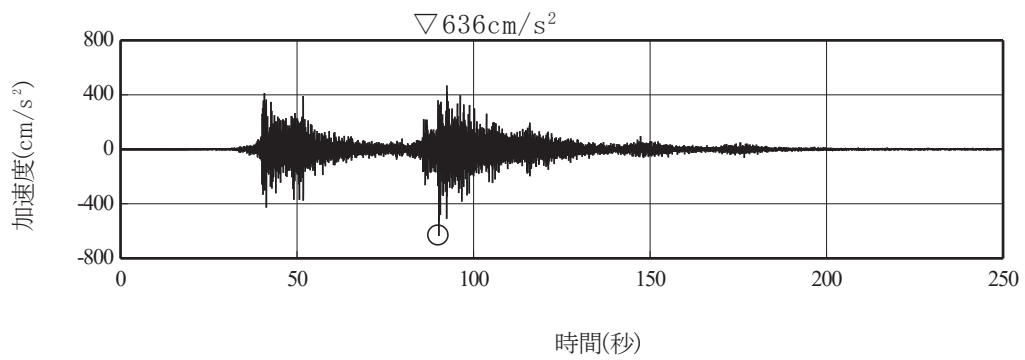
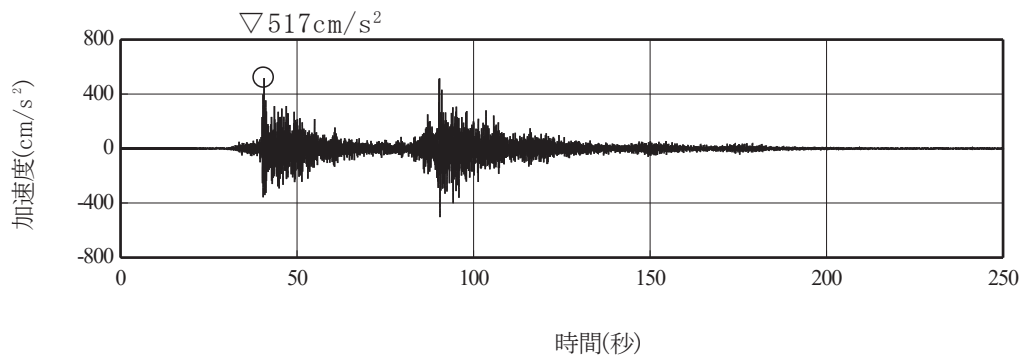


(a) 加速度時刻歴波形

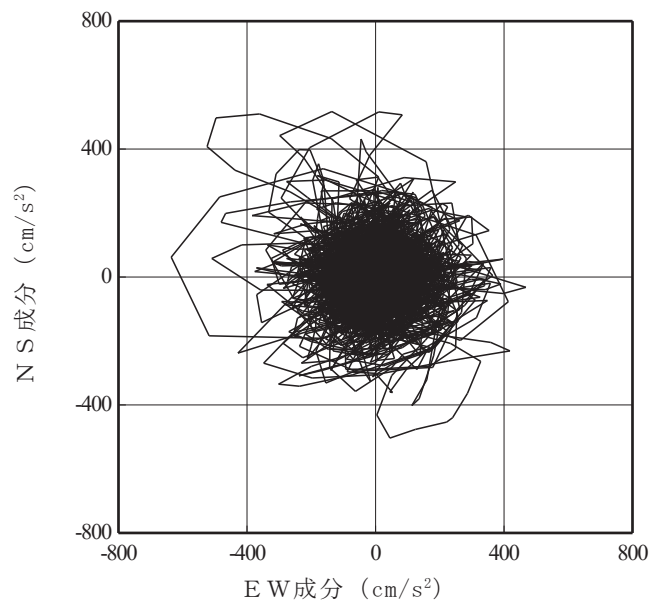


(b) 水平 2 方向の加速度成分のオービット

図2-1 基準地震動 S s - D 2

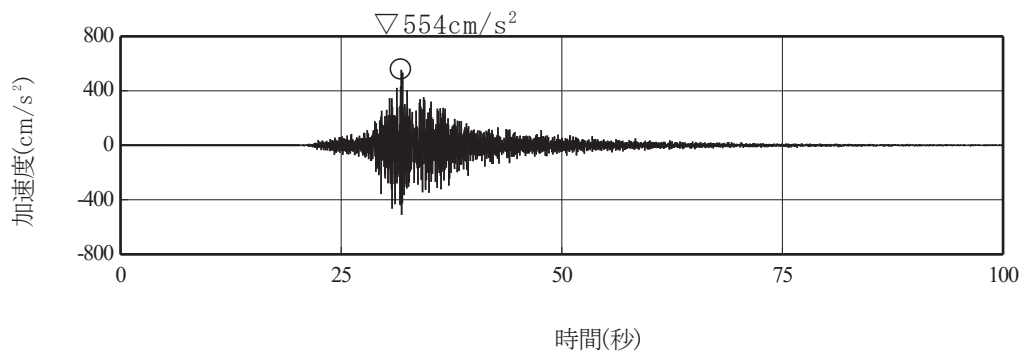
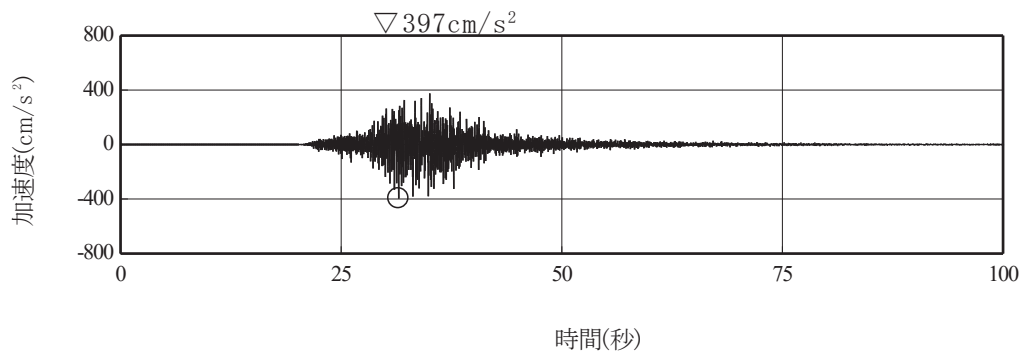


(a) 加速度時刻歴波形

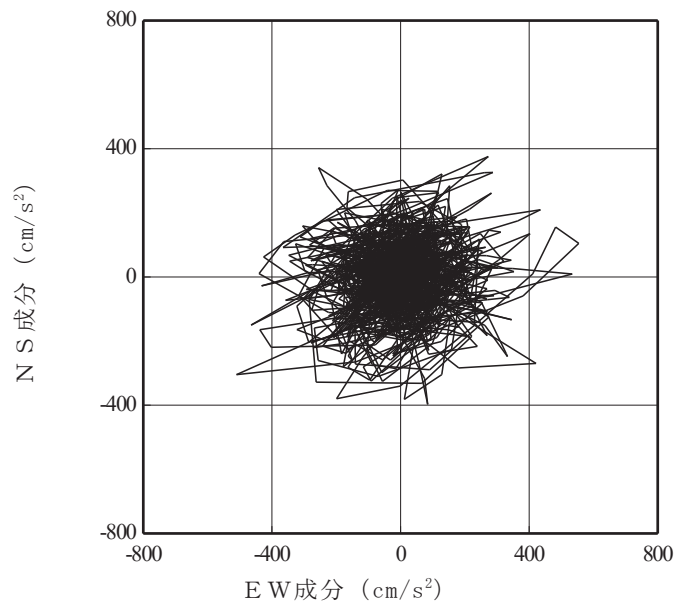


(b) 水平2方向の加速度成分のオービット

図2-2 2011年東北地方太平洋沖地震観測記録 (自由地盤観測点 0.P.-8.6m)



(a) 加速度時刻歴波形

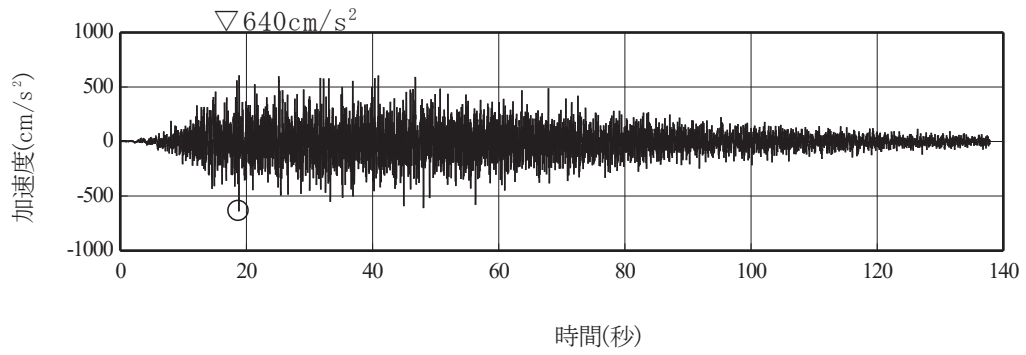


(b) 水平2方向の加速度成分のオービット

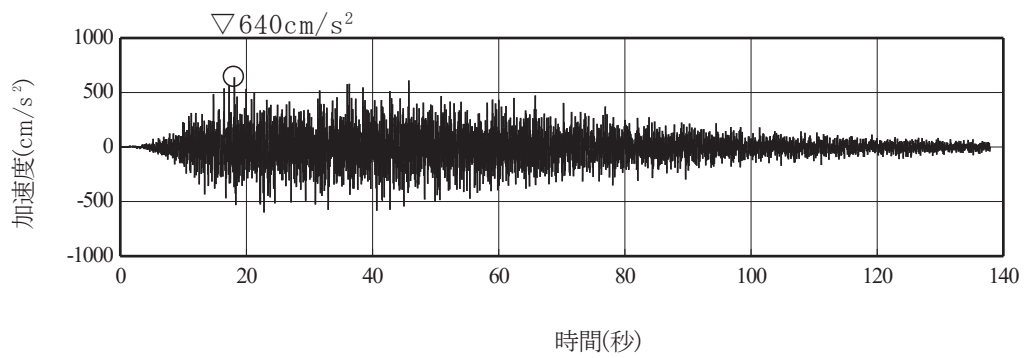
図2-3 2011年4月7日の宮城県沖の地震観測記録 (自由地盤観測点 O.P. -8.6m)

### 3. 位相特性の異なる模擬地震波等の作成結果

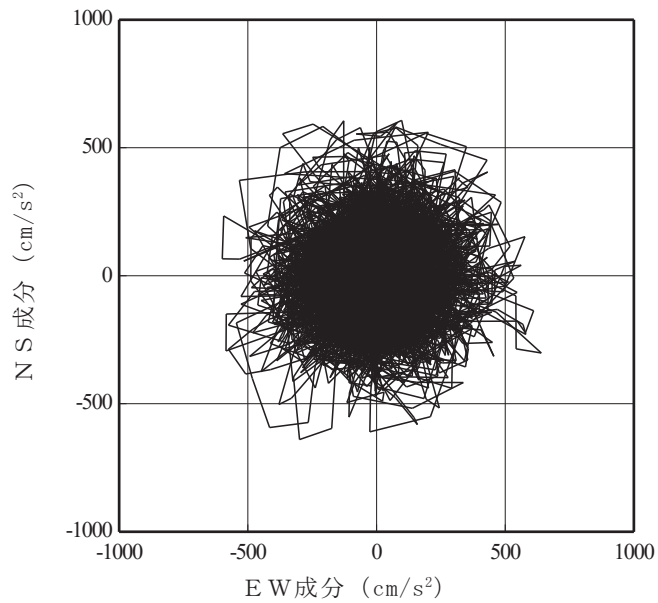
基準地震動等及び模擬地震波等の加速度時刻歴波形及びそれぞれの地震波を2方向入力した場合のオービット及び応答スペクトルを図3-1～図3-5に示す。また、基準地震動  $S_s - D 1$  及び  $S_s - D 2$  については設計用応答スペクトルもあわせて示す。



(a) 基準地震動 S s - D 1 の加速度時刻歴波形

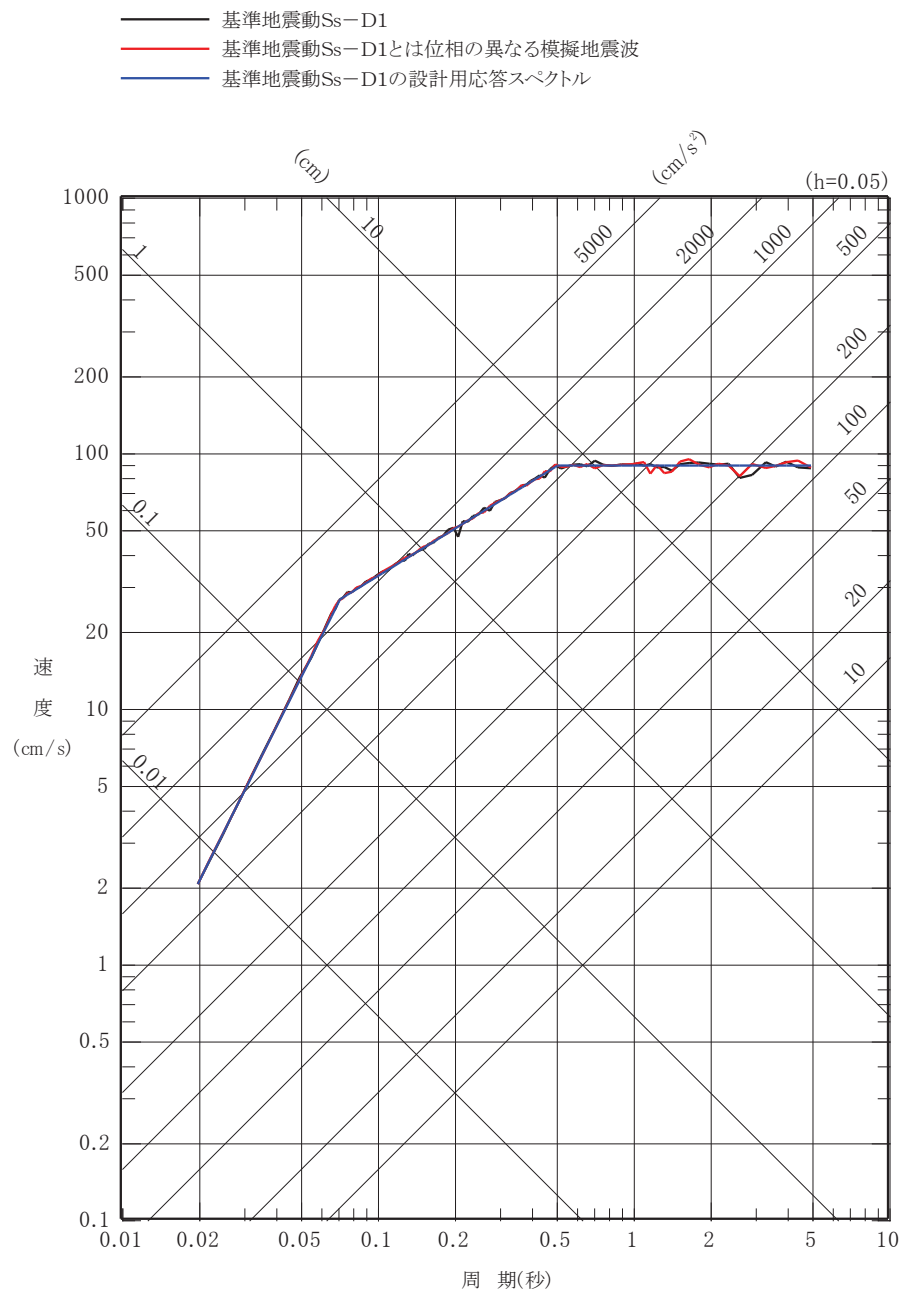


(b) 基準地震動 S s - D 1 とは位相の異なる模擬地震波の加速度時刻歴波形



(c) 水平 2 方向の加速度成分のオービット

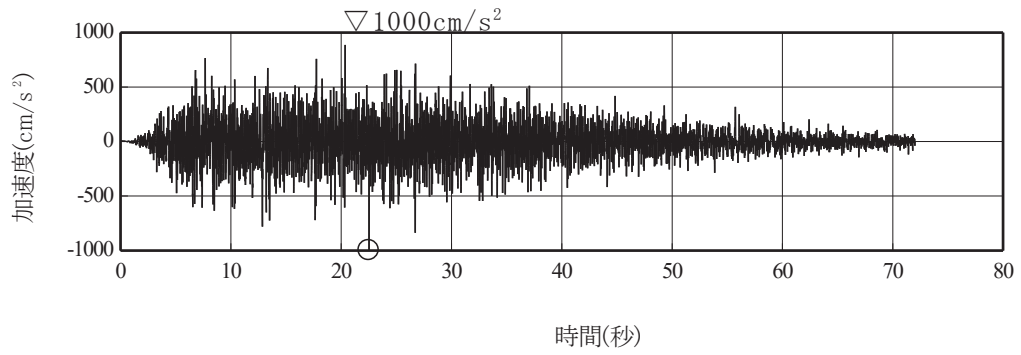
図3-1 基準地震動 S s - D 1 (1/2)



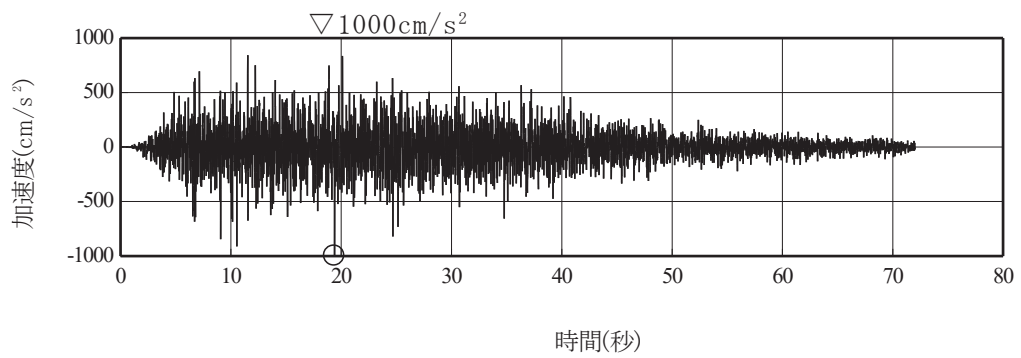
(d) 水平2方向の地震動の応答スペクトル

図3-1 基準地震動 S s - D 1 (2/2)

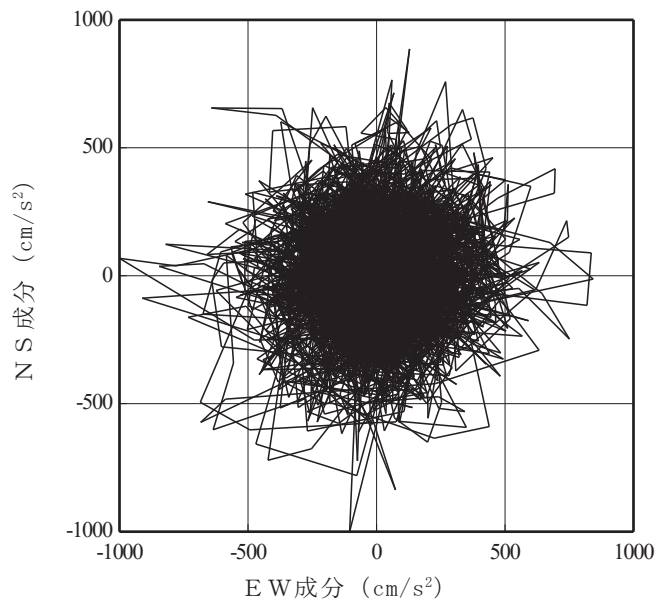




(a) 基準地震動 S s - D 2 の加速度時刻歴波形

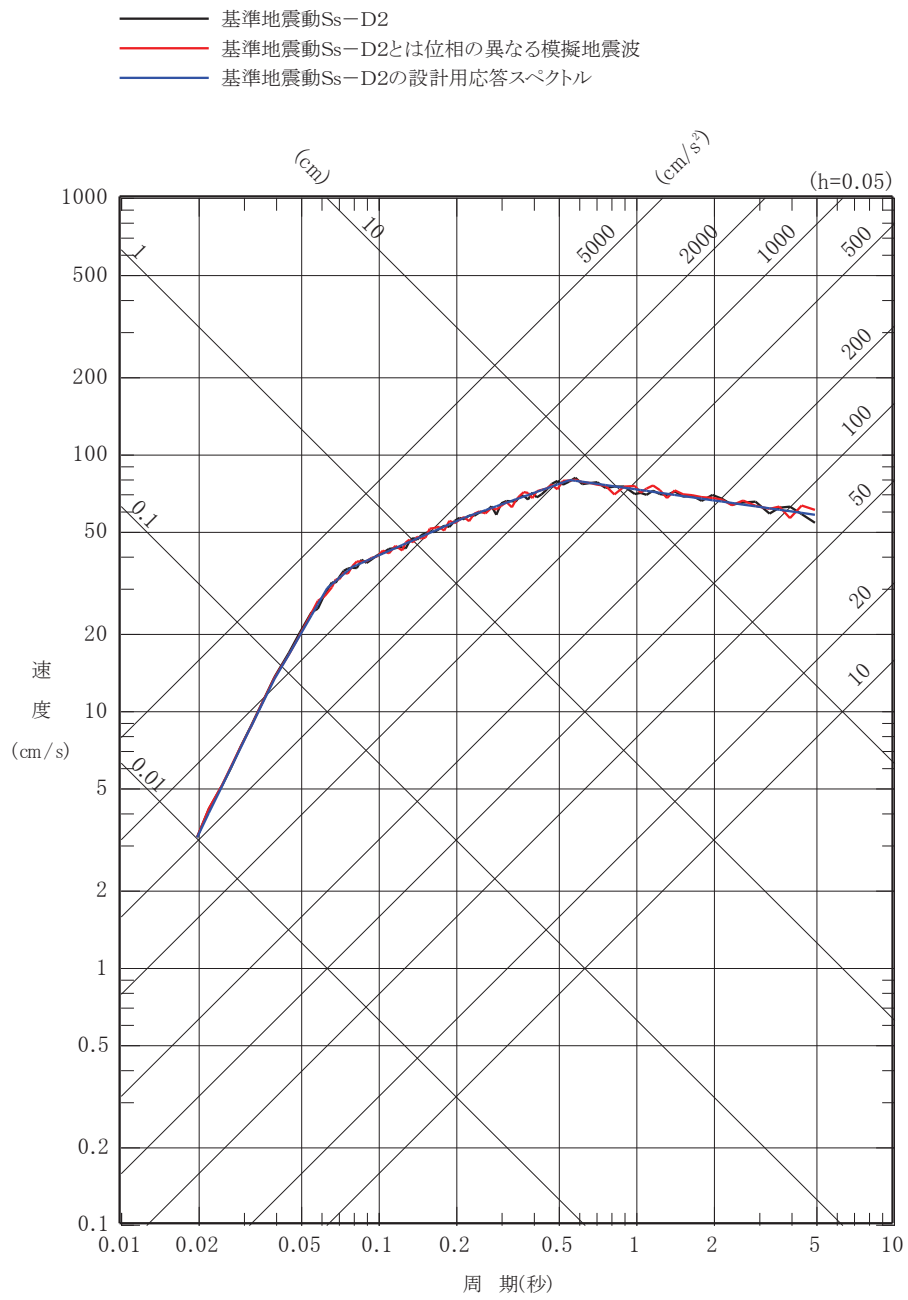


(b) 基準地震動 S s - D 2 とは位相の異なる模擬地震波の加速度時刻歴波形



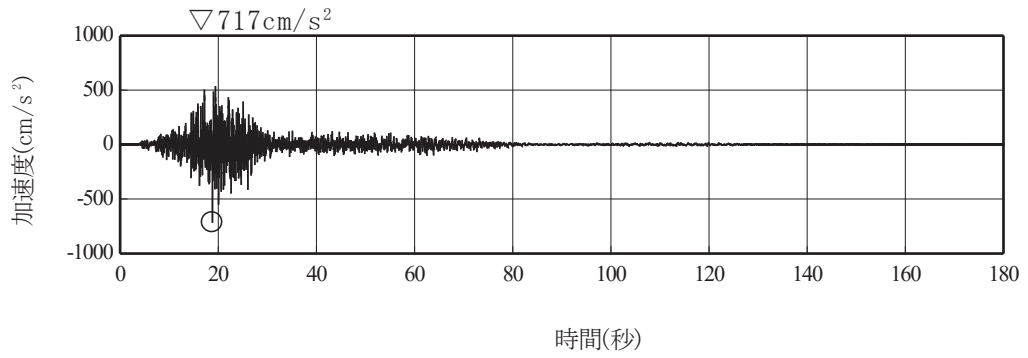
(c) 水平 2 方向の加速度成分のオービット

図3-2 基準地震動 S s - D 2 (1/2)

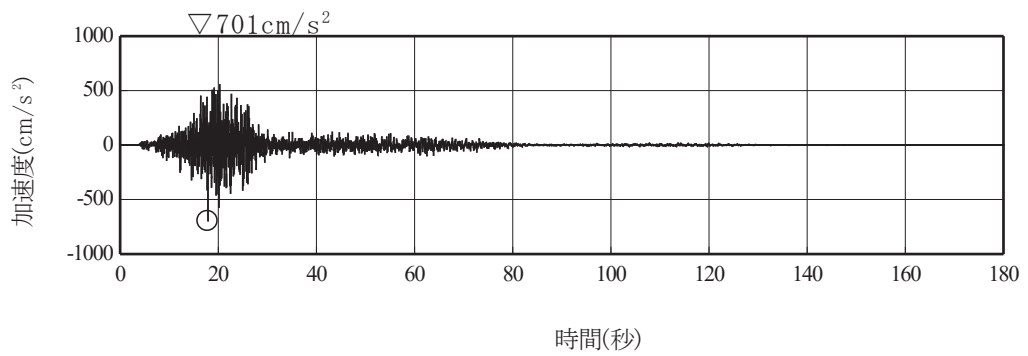


(d) 水平 2 方向の地震動の応答スペクトル

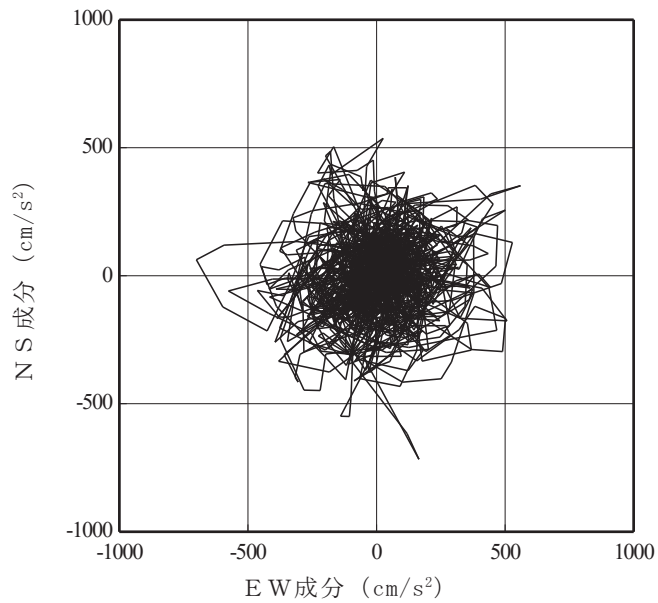
図3-2 基準地震動 S s - D 2 (2/2)



(a) 基準地震動 S s - F 1 の加速度時刻歴波形

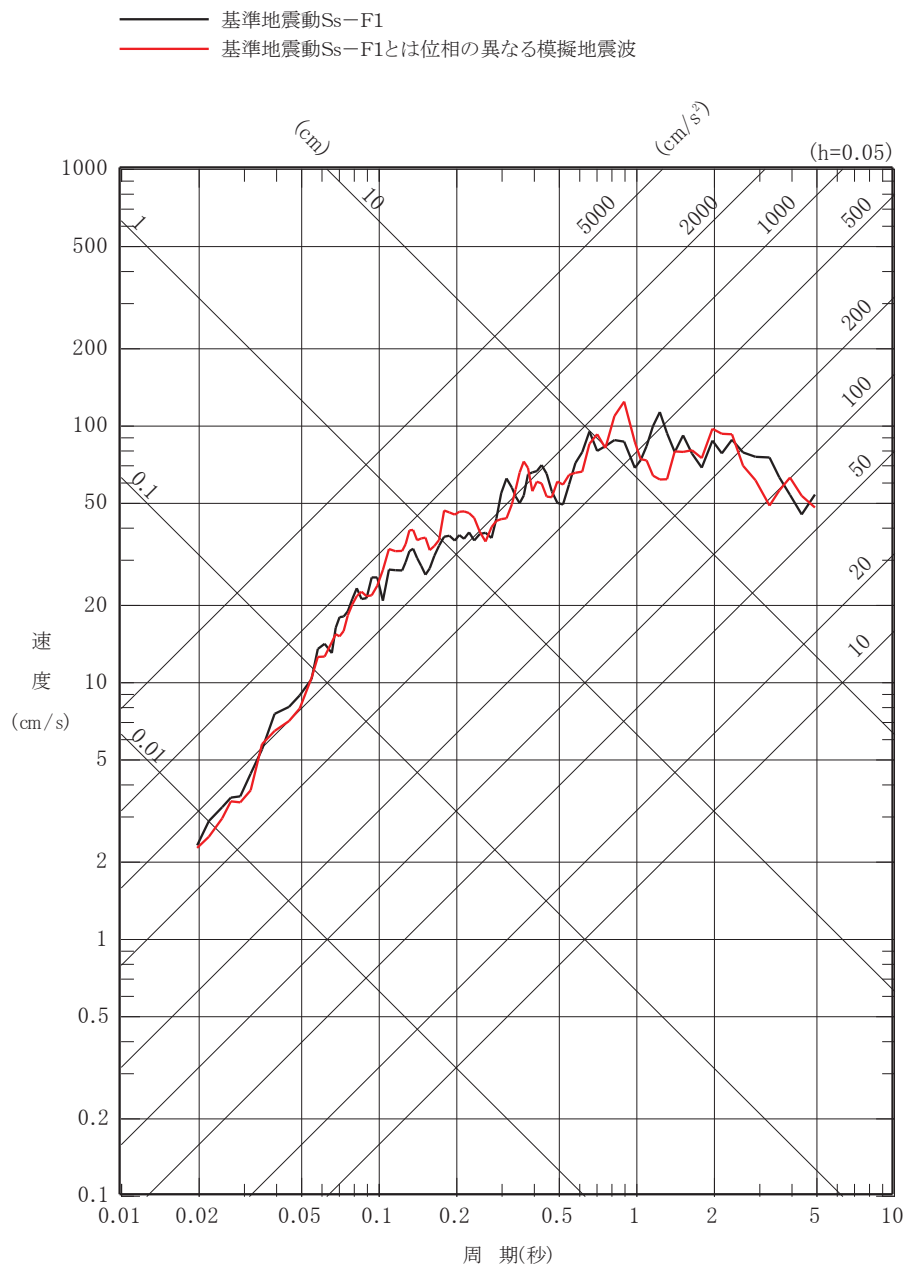


(b) 基準地震動 S s - F 1 とは位相の異なる模擬地震波の加速度時刻歴波形



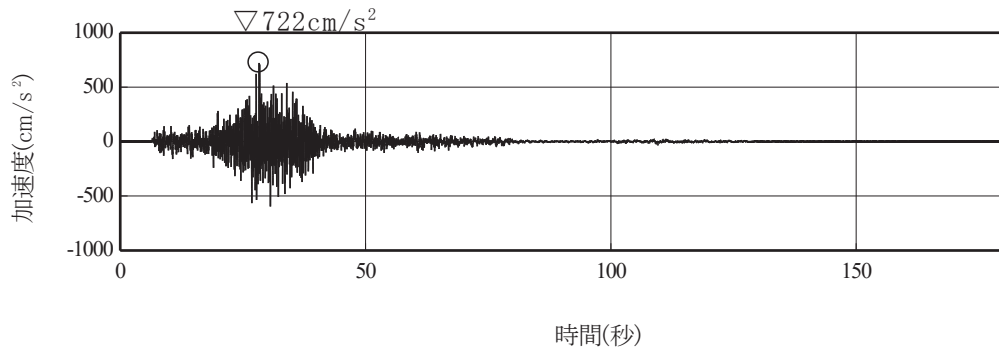
(c) 水平 2 方向の加速度成分のオービット

図3-3 基準地震動 S s - F 1 (1/2)

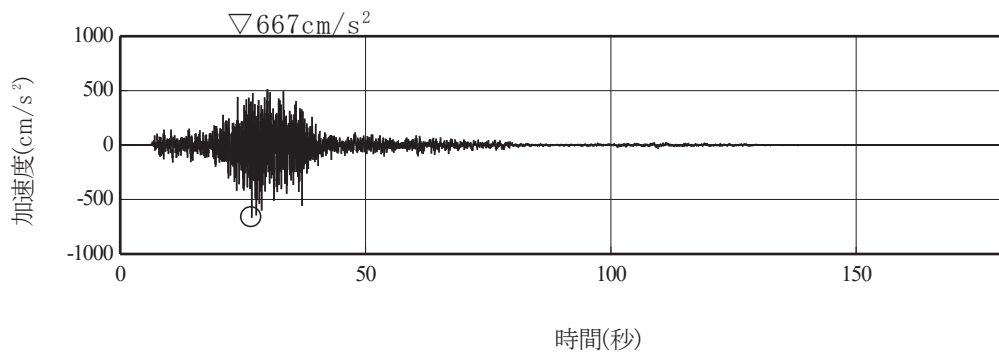


(d) 水平2方向の地震動の応答スペクトル

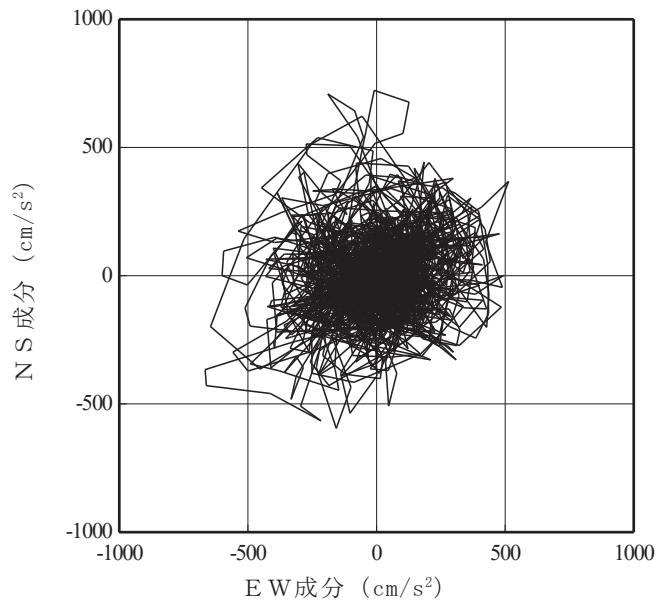
図3-3 基準地震動 S s - F 1 (2/2)



(a) 基準地震動 S<sub>s</sub>-F 2 の加速度時刻歴波形

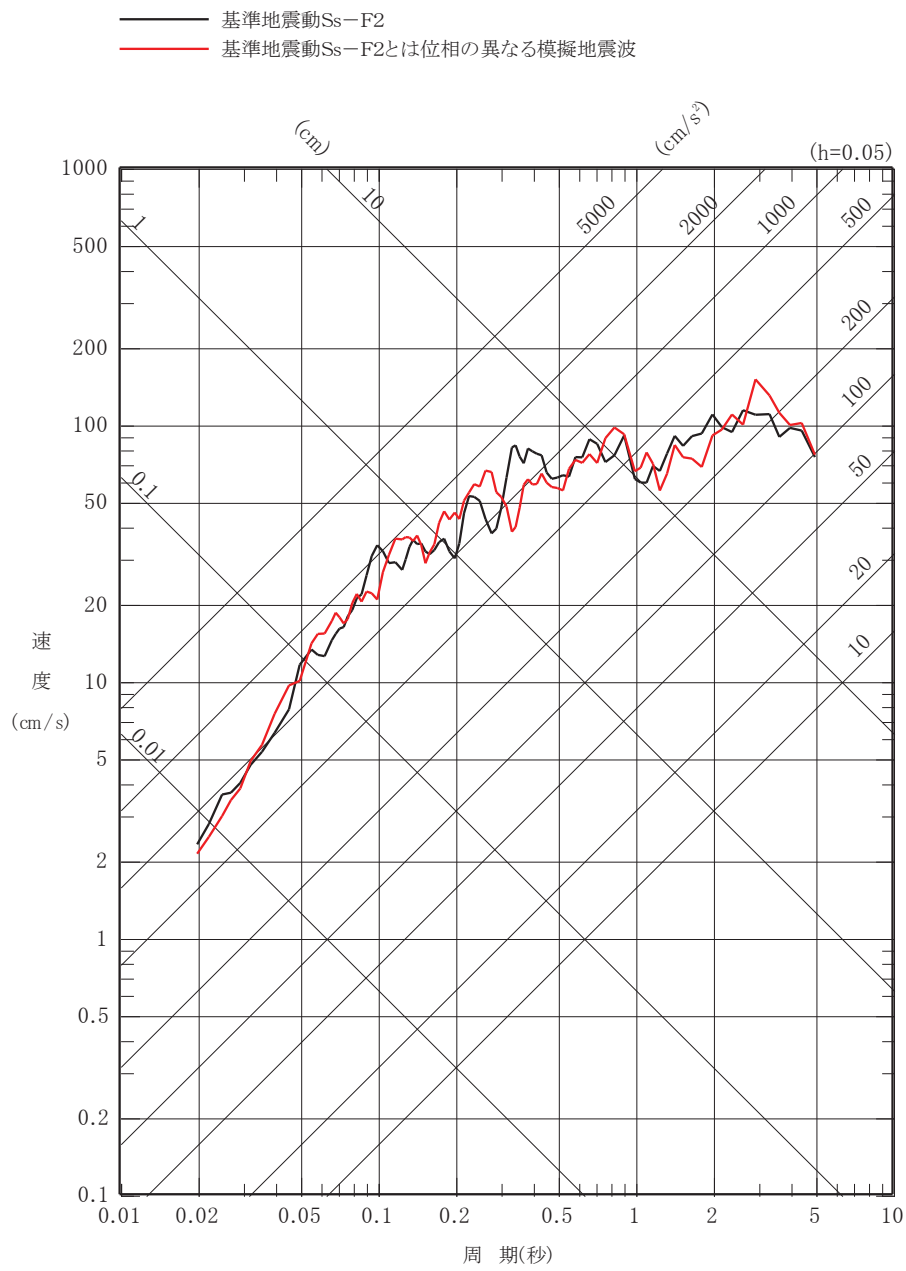


(b) 基準地震動 S<sub>s</sub>-F 2 とは位相の異なる模擬地震波の加速度時刻歴波形



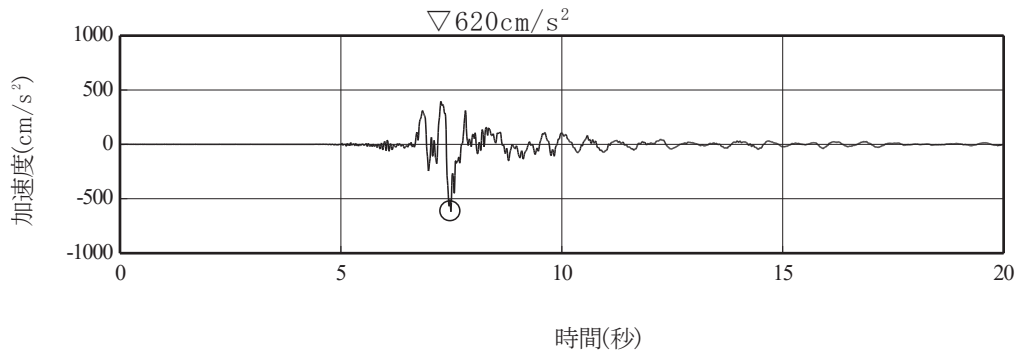
(c) 水平 2 方向の加速度成分のオービット

図 3-4 基準地震動 S<sub>s</sub>-F 2 (1/2)

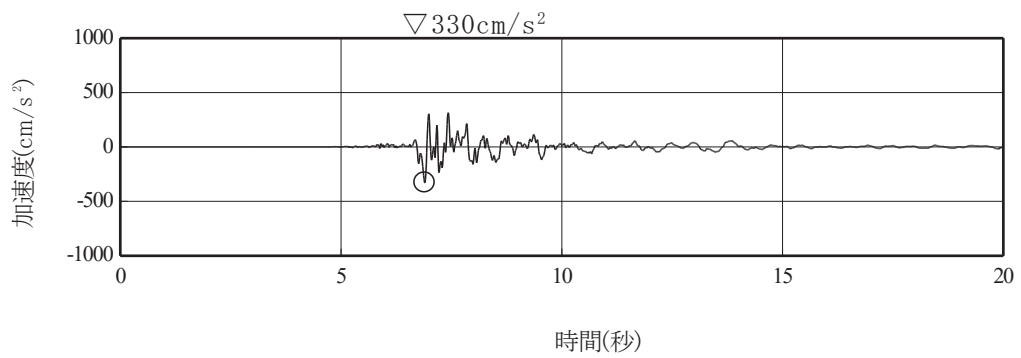


(d) 水平2方向の地震動の応答スペクトル

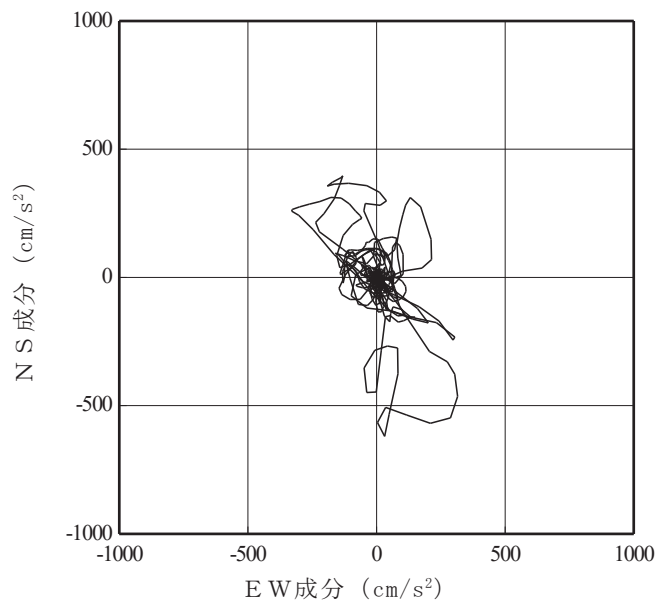
図3-4 基準地震動Ss-F2 (2/2)



(a) 基準地震動 S s - N 1 の加速度時刻歴波形



(b) 基準地震動 S s - N 1 の作成に用いた観測記録と  
水平方向に直交する観測記録から作成した地震動



(c) 水平2方向の加速度成分のオービット

図3-5 基準地震動 S s - N 1 (1/2)

## 別紙 6 原子炉建屋基礎版の応力解析における応力平均化の考え方



## 目 次

1. 概要 .....	別紙 6- 1
2. 応力平均化の考え方 .....	別紙 6- 2
2.1 応力平均化を実施した領域における断面の評価要素 .....	別紙 6- 2
2.2 応力平均化の方法 .....	別紙 6- 4
2.3 応力平均化の結果 .....	別紙 6-35
2.4 断面の評価結果 .....	別紙 6-42

## 1. 概要

本資料は、添付書類「VI-2-12-1 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果」に示す原子炉建屋基礎版の応力解析における応力平均化の考え方について示すものである。

3次元 FEM モデルを用いた応力の算定において、FEM 要素に応力集中等が見られる場合については、「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（(社)日本建築学会, 2005）」（以下「RC-N 規準」という。）に基づき、応力の再配分等を考慮してある一定の領域の応力を平均化したうえで断面の評価を行っている。この場合、当該要素における応力度ではなく、周囲の複数の要素で平均化した応力度に対して断面の評価を実施していることから、本資料では、複数の要素での応力平均化の考え方及びその結果を示す。

## 2. 応力平均化の考え方

### 2.1 応力平均化を実施した領域における断面の評価要素

断面の評価要素は、応力平均化を行うことによって応力が変わることから、応力平均化前の断面力に対する検定値を元に選定している。

原子炉建屋基礎版では、応力平均化前の応力分布において、局所的に大きな面外せん断力が発生している要素を断面の評価要素とし、応力平均化を行い、応力平均化後の値に対する断面の評価を実施した。

応力平均化を実施した要素を表 2-1、要素位置図を図 2-1 に示す。

表 2-1 応力平均化要素

評価項目	方向	要素番号	組合せケース	平均化前の検定値 (発生値/許容値)
面外せん断 応力度	放射	214	3-10	1.03
		218	3-9	1.02
		219	3-9	1.08
		220	3-9	1.08
		221	3-9	1.01
		237	3-13	1.03
		238	3-13	1.04
	NS	421	3-14	1.41
		442	3-16	1.02
		443	3-10	1.35
		1159	3-13	1.36
		1161	3-11	1.03
		1180	3-12	1.06
	EW	1181	3-9	1.39
		541	3-16	1.07
		571	3-15	1.09
		572	3-13	1.18
		594	3-9	1.28
		907	3-12	1.43
		937	3-11	1.45
			1098	3-11

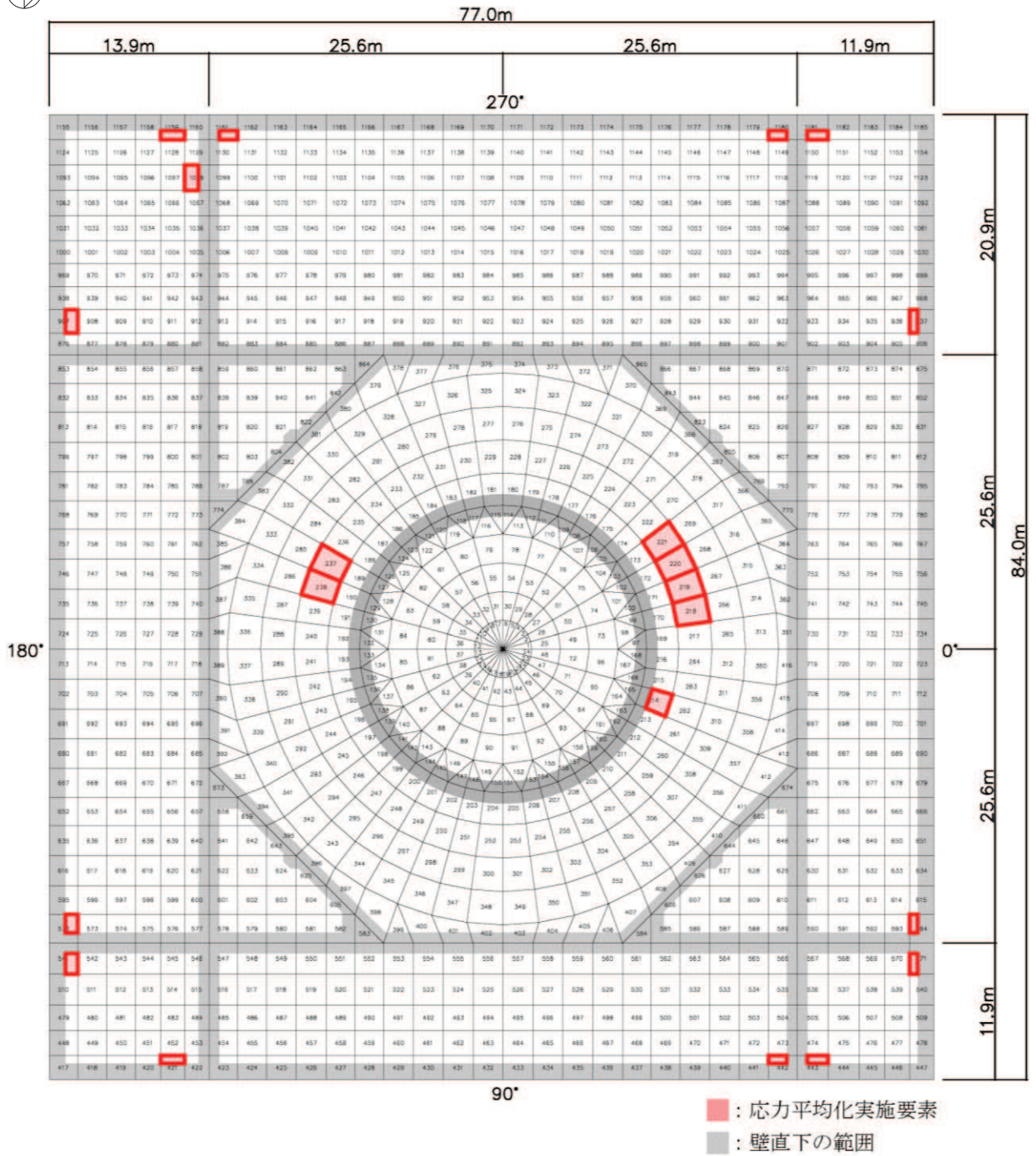


図 2-1 要素位置図

## 2.2 応力平均化の方法

3次元 FEM モデルを用いた応力解析においては、部材断面やモデル形状が大きく変化して不連続になっている箇所は、局所的な応力集中が発生しやすい。原子炉建屋基礎版の3次元 FEM モデルを用いた応力解析において、当該部は図 2-2 に示すようにシェル壁、耐震壁と隣接した要素であり、応力が集中しやすい。図 2-3 に示す面外せん断力のコンター図を見ると、当該要素周辺では大きな面外せん断力が発生していることが分かる。

そこで、今回の原子炉建屋基礎版の応力解析においては、弾塑性解析を採用し、材料の非線形特性を設定しているが、面外せん断力に対しては非線形特性を考慮できないことから、RC-N 規準を参考に、コンクリートのひび割れによる応力の再配分を考慮し、応力の平均化を行った。なお、基礎版全体でも鉄筋ひずみの最大値は  $0.832 \times 10^{-3}$  であり、鉄筋降伏時のひずみ  $1.68 \times 10^{-3}$  を下回っていること、応力平均化範囲及びその周辺領域では全般的な曲げ降伏状態には至っていないことを確認している。

RC-N 規準においては、「線材では、部材端に生じる斜めせん断ひび割れによって部材有効せい程度離れた断面の引張鉄筋の応力度が部材端と同じ大きさまで増大する現象（テンションシフト）が生じるが、面材では、斜めひび割れが発生した場合においても、材軸直交方向への応力再配分によって、線材におけるテンションシフトのような現象は生じにくいと考えられる。」とされており、耐震壁の面外せん断力について、「面材であるため、局所的に応力の集中があったとしても、応力の再配分を生じ、破壊に至ることはない。」とされている。また、基礎版のような大断面を有する面材の面外せん断力について、「通常の場合、FEM 解析の要素サイズは、基礎版厚より小さいため、付図 2.2 に模式的に示されるように設計用面外せん断力は想定されるひび割れ領域での平均面外せん断力に対して大きめの評価となっているといえる。また、基礎版においても、耐震壁と同様、面材における面外せん断力の再配分も期待できる。」とされている。RC-N 規準の付図 2.2 を図 2-4 に示す。

壁、床スラブ、基礎版のような面材については、RC-N 規準に示されるように、面材に荷重を作用させる直交部材からせん断破壊面が 45 度の角度で進展すると考えられることから、せん断破壊面が面材の表面から裏面まで貫通する範囲、すなわち部材厚の範囲に応力が再配分されると考えられる。原子炉建屋基礎版における面外せん断力に対する応力平均化の考え方を図 2-5 に示す。

以上より、応力の平均化は、応力コンター図及び基礎版の直上の壁配置等を考慮し、当該要素の壁から離れる側の応力方向に位置する隣接要素に対して、壁面から基礎版の部材厚である 6.0m 分の範囲で行った。また、応力平均化対象とする一連の要素が連続した壁により拘束される場合には、これらが壁直下の範囲に含まれていること、図 2-3 に示す面外せん断力のコンター図より、当該要素周辺では大きな面外せん断力が発生していることを踏まえると応力方向の直交方向にも応力が再配分されると考え、発生応力の直交方向に隣接する要素を含む範囲で平均化を行った。各要素について応力平均化範囲を図 2-6 に示す。

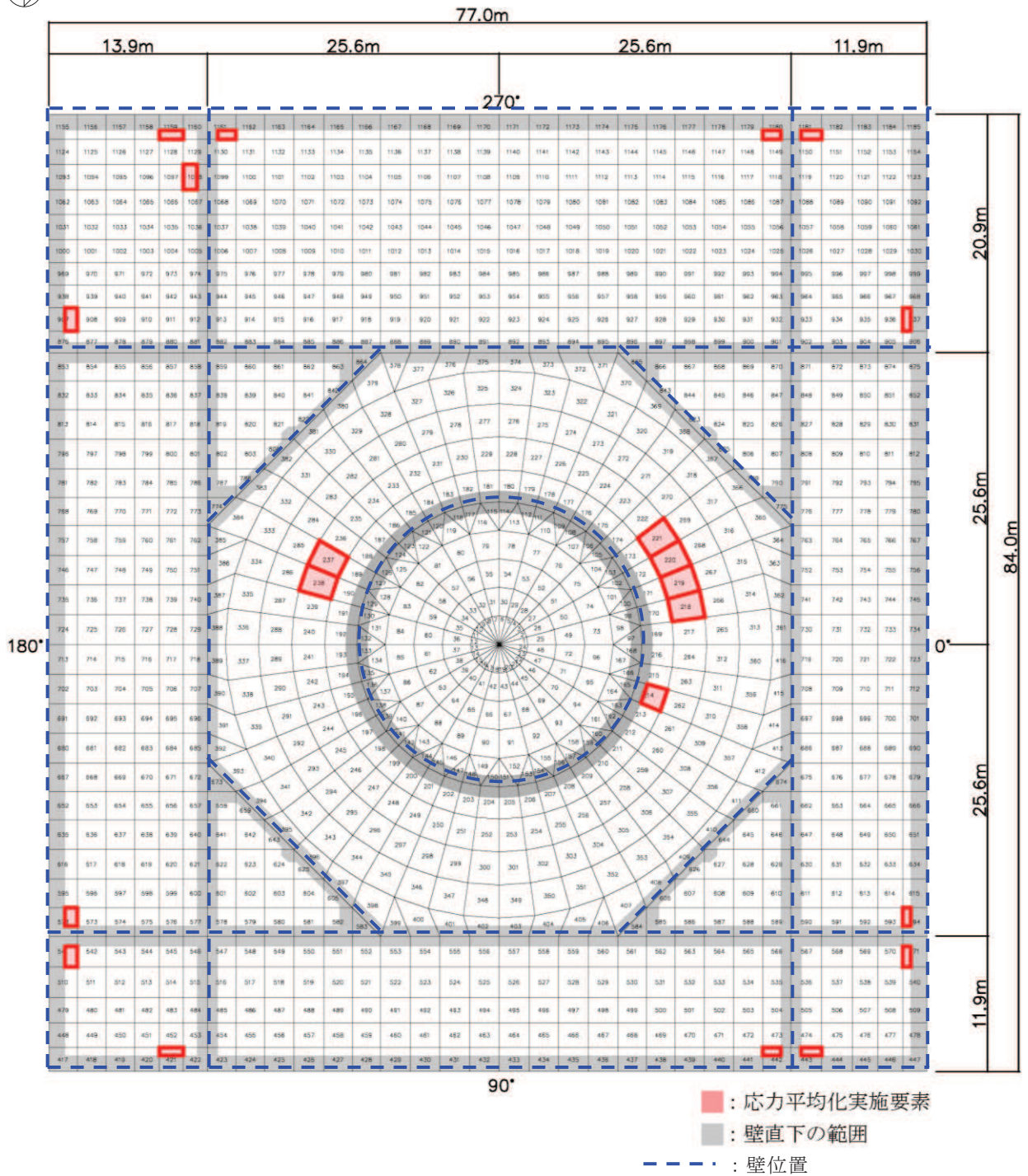
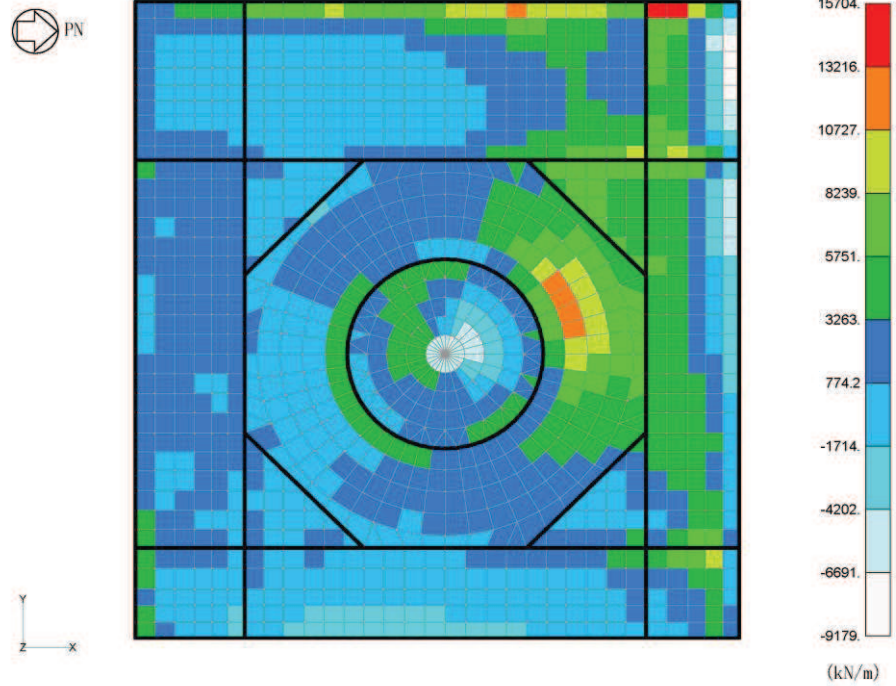


図 2-2 原子炉建屋基礎版に接続する壁の配置

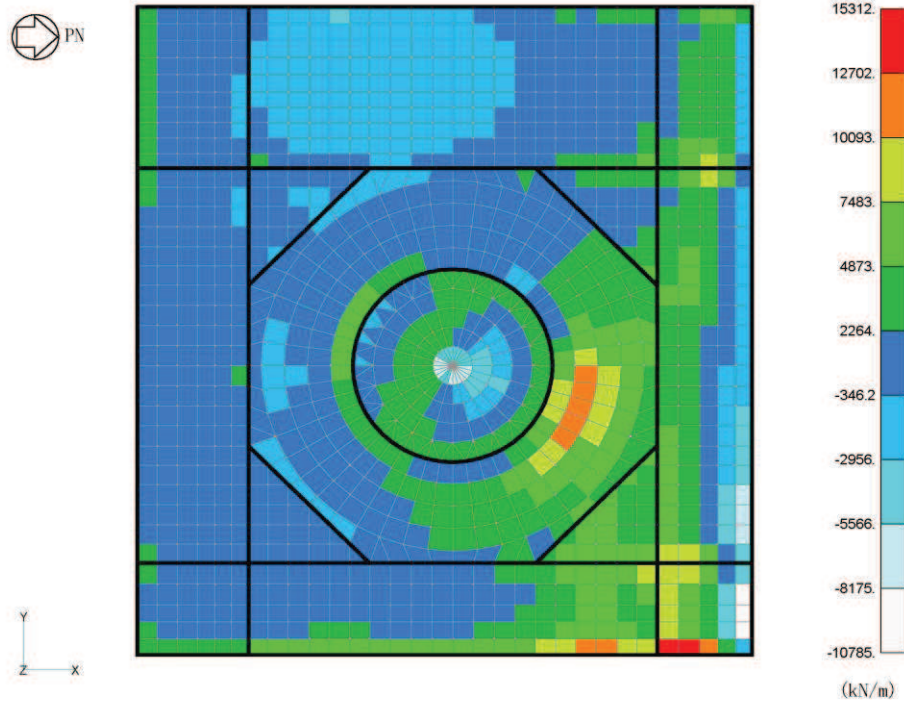
c5009 Qx



組合せケース 3-9 (放射方向, NS 方向)

図 2-3 (1) 面外せん断力のコンター図 (1/13)

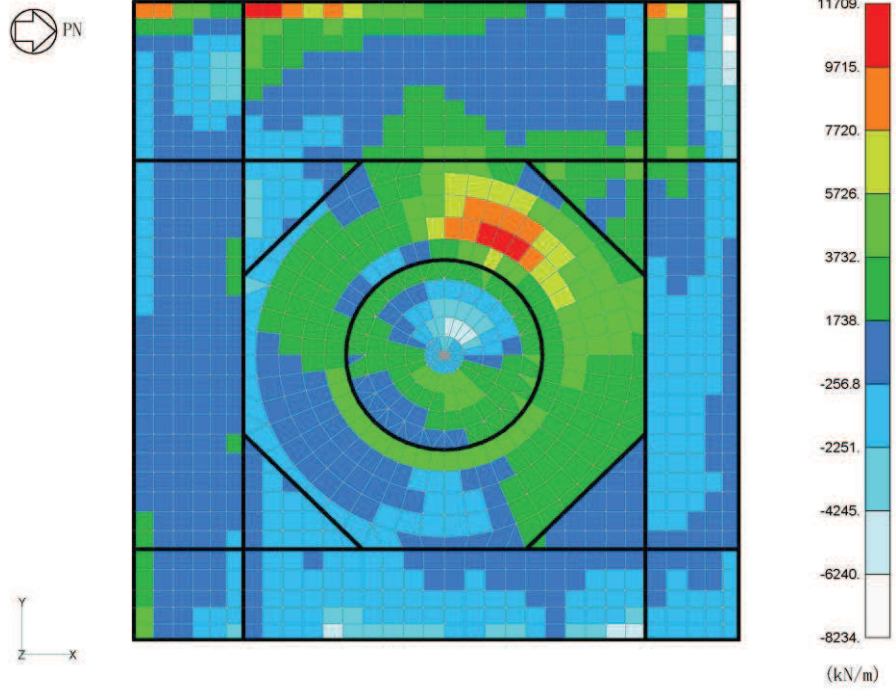
c5010 Qx



組合せケース 3-10 (放射方向, NS 方向)

図 2-3 (2) 面外せん断力のコンター図 (2/13)

c5011 Qx

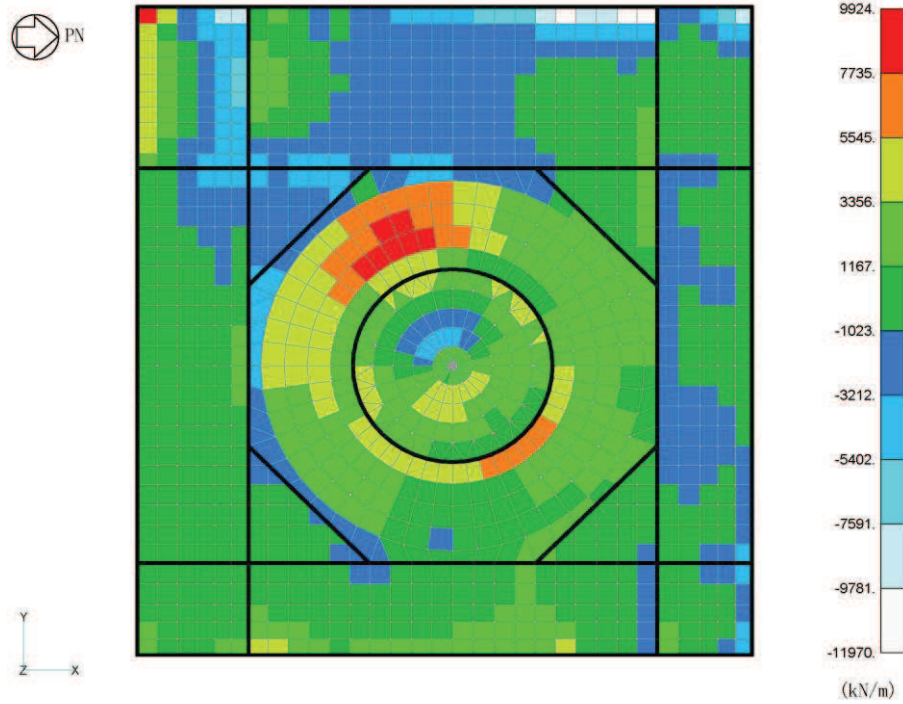


※要素25～360は放射方向を示す。  
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 3-11 (放射方向, NS 方向)

図 2-3 (3) 面外せん断力のコンター図 (3/13)

c5012 Qx



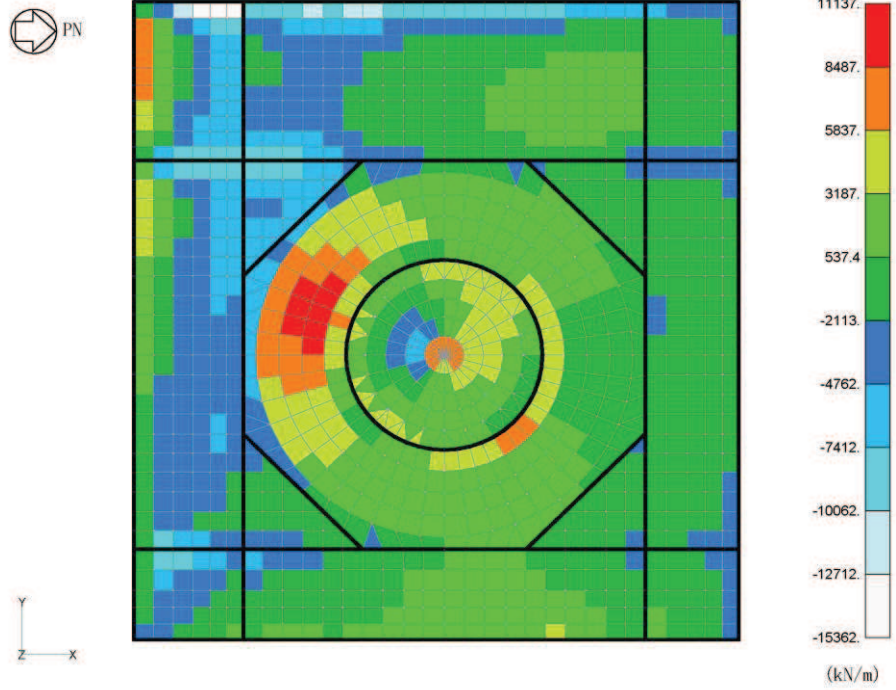
※要素25～360は放射方向を示す。  
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 3-12 (放射方向, NS 方向)

図 2-3 (4) 面外せん断力のコンター図 (4/13)



c5013 Qx

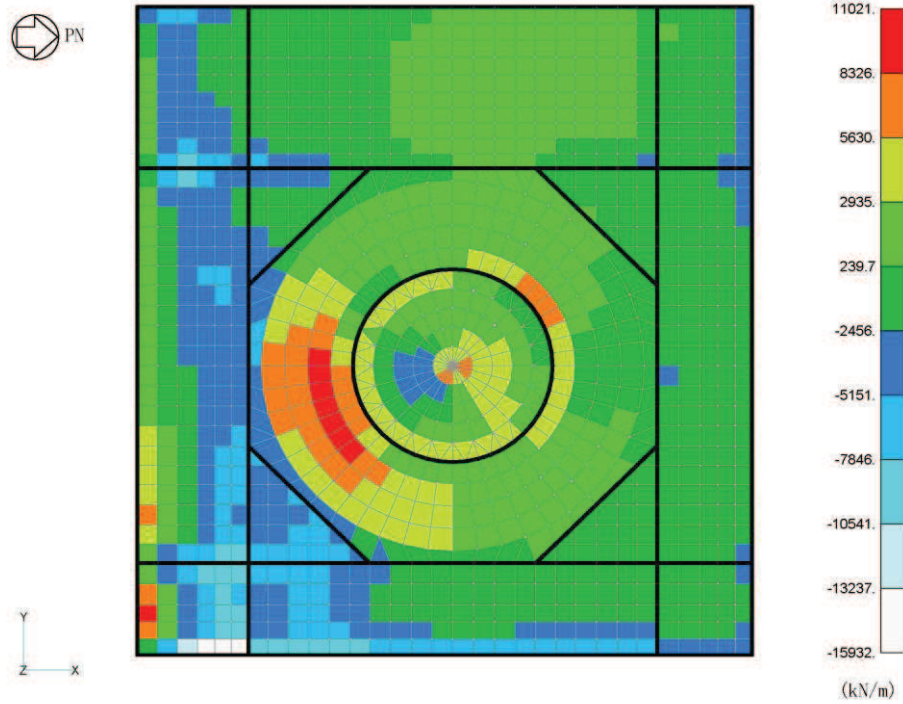


※要素25～360は放射方向を示す。  
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 3-13 (放射方向, NS 方向)

図 2-3 (5) 面外せん断力のコンター図 (5/13)

c5014 Qx

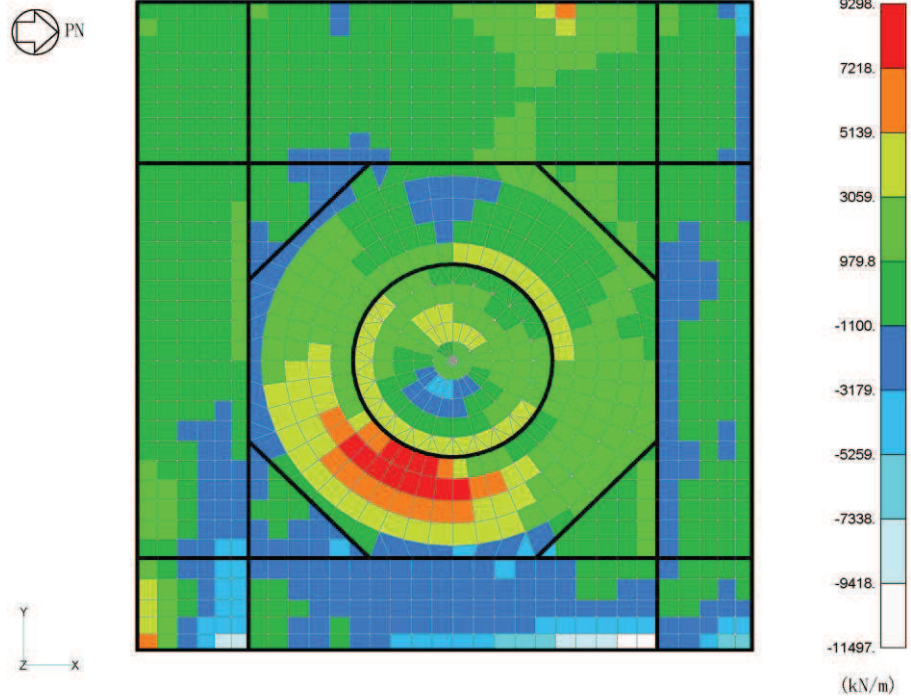


※要素25～360は放射方向を示す。  
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 3-14 (放射方向, NS 方向)

図 2-3 (6) 面外せん断力のコンター図 (6/13)

c5016 Qx

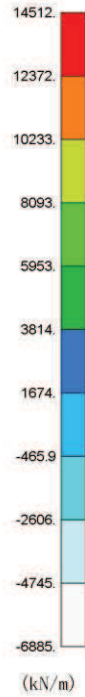
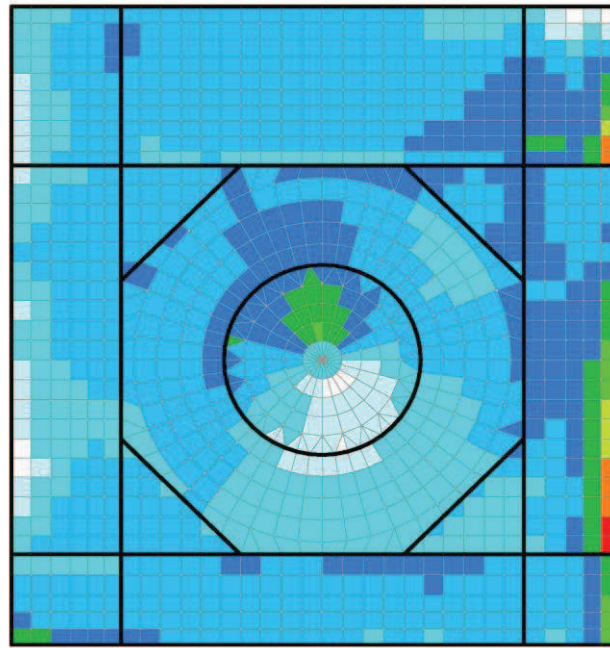


※要素25~360は放射方向を示す。  
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 3-16 (放射方向, NS 方向)

図 2-3 (7) 面外せん断力のコンター図 (7/13)

c5009 Qy

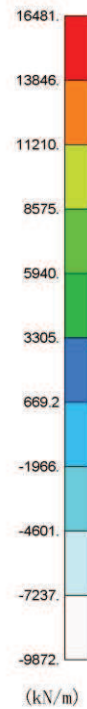
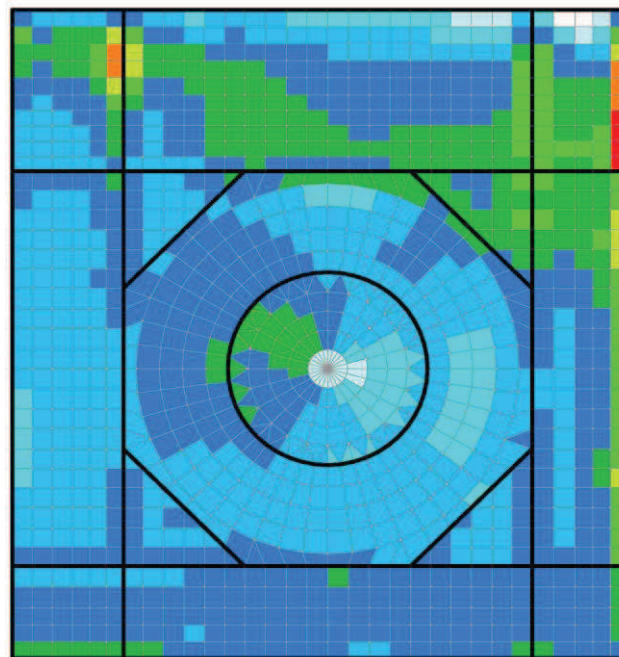


※要素25~360は放射方向を示す。  
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 3-9 (円周方向, EW 方向)

図 2-3 (8) 面外せん断力のコンター図 (8/13)

c5011 Qy

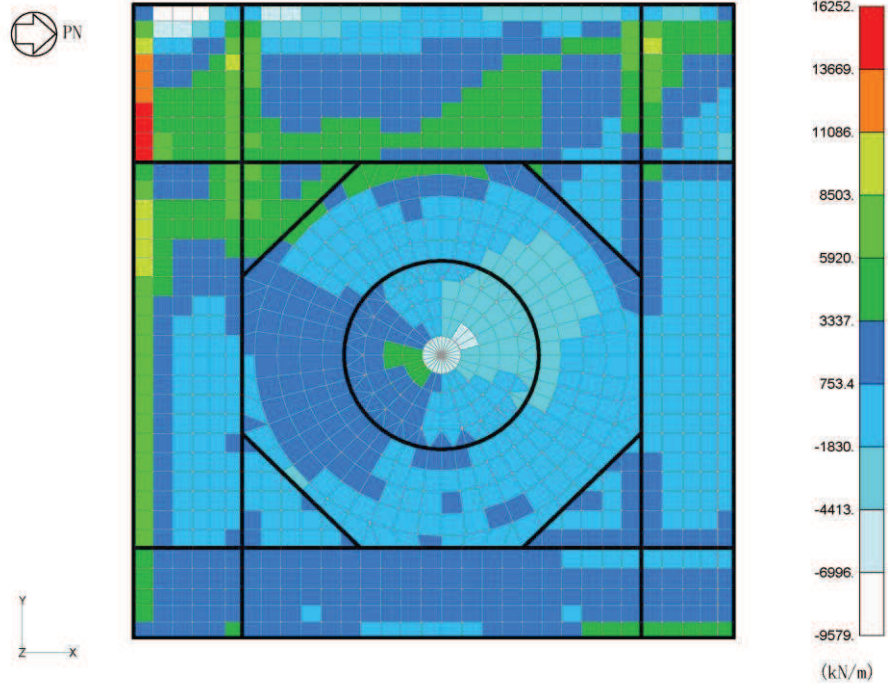


※要素25~360は放射方向を示す。  
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 3-11 (円周方向, EW 方向)

図 2-3 (9) 面外せん断力のコンター図 (9/13)

c5012 Qy

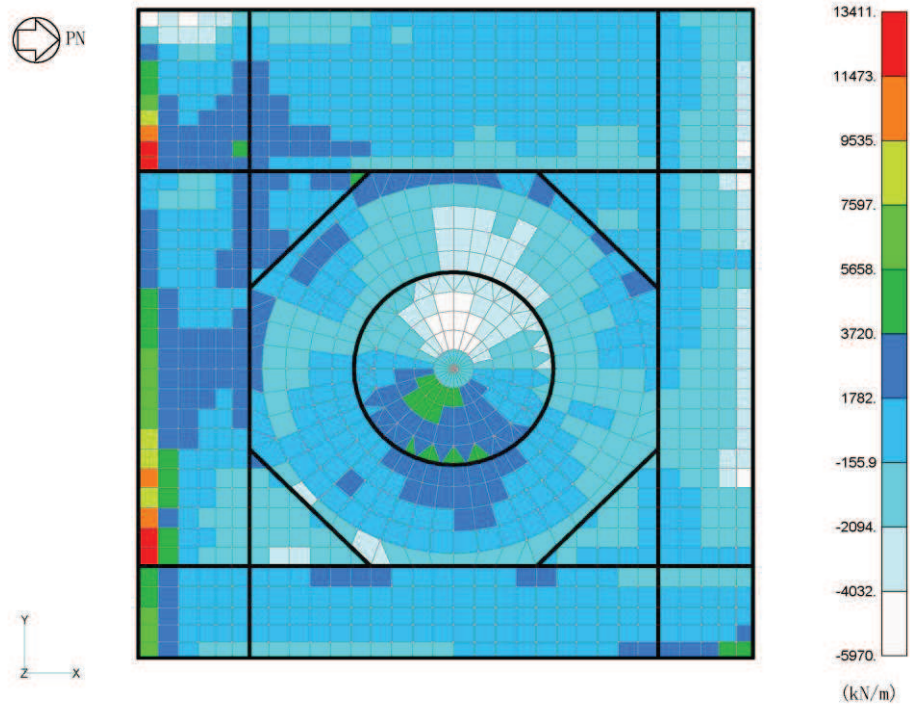


※要素25～360は放射方向を示す。  
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 3-12 (円周方向, EW 方向)

図 2-3 (10) 面外せん断力のコンター図 (10/13)

c5013 Qy

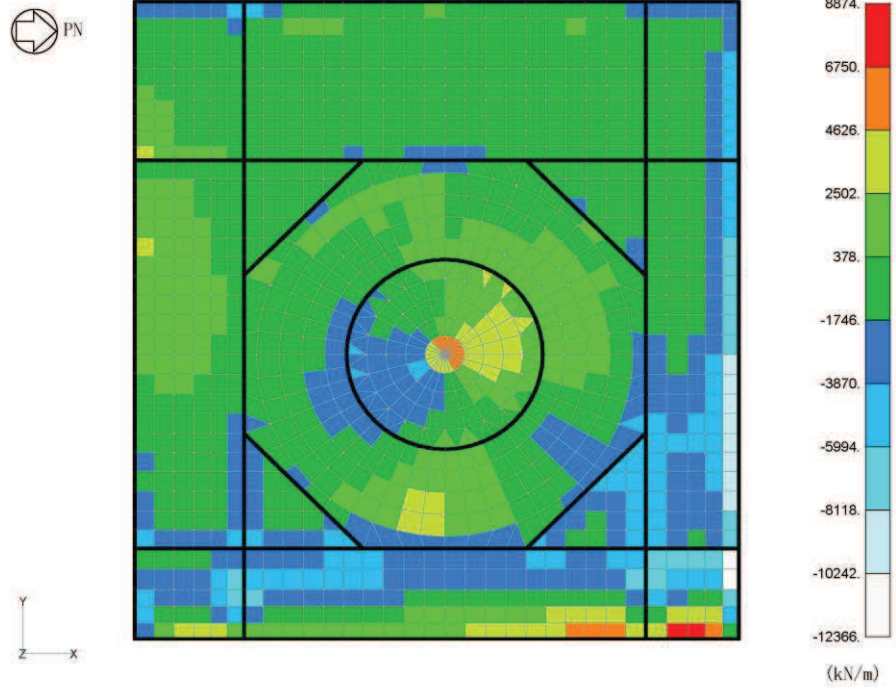


※要素25～360は放射方向を示す。  
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 3-13 (円周方向, EW 方向)

図 2-3 (11) 面外せん断力のコンター図 (11/13)

c5015 Qy

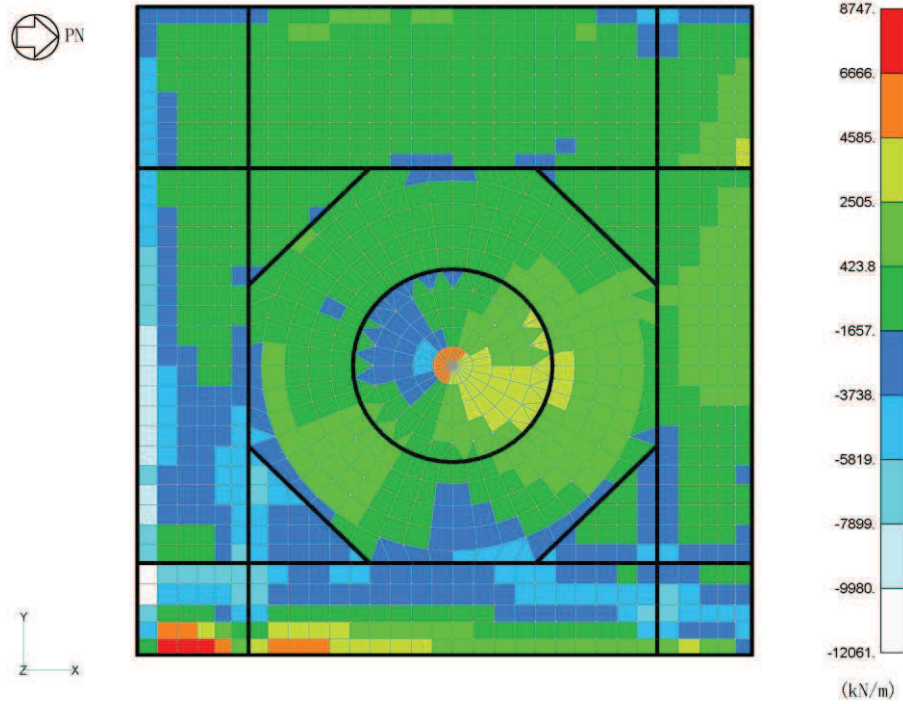


※要素25～360は放射方向を示す。  
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 3-15 (円周方向, EW 方向)

図 2-3 (12) 面外せん断力のコンター図 (12/13)

c5016 Qy



※要素25～360は放射方向を示す。  
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 3-16 (円周方向, EW 方向)

図 2-3 (13) 面外せん断力のコンター図 (13/13)

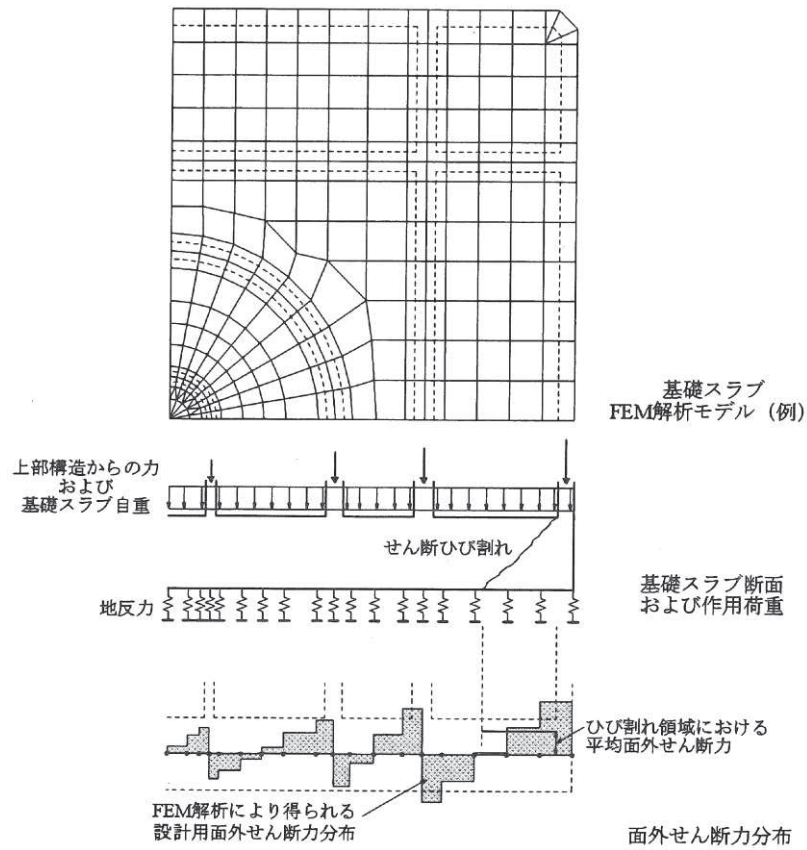


図 2-4 RC-N 規準の付図 2.2

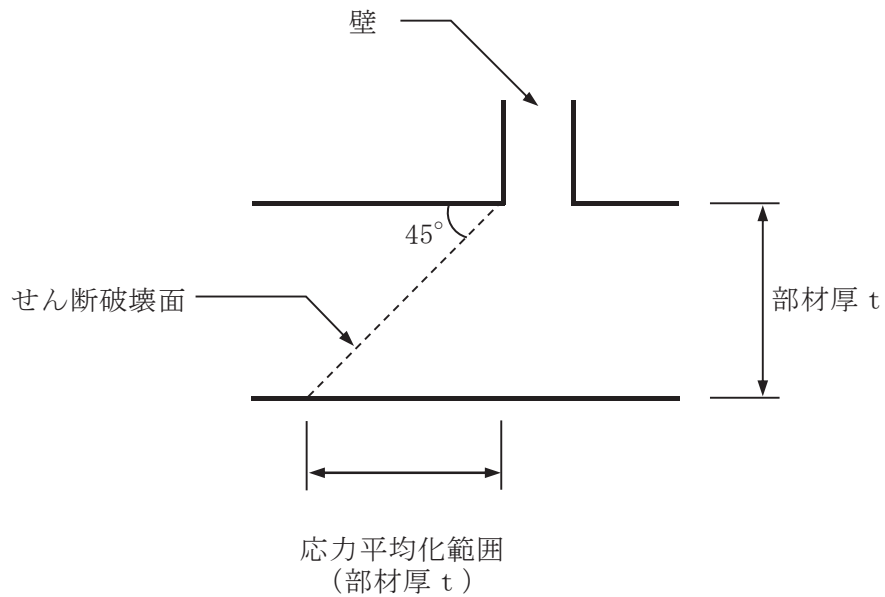
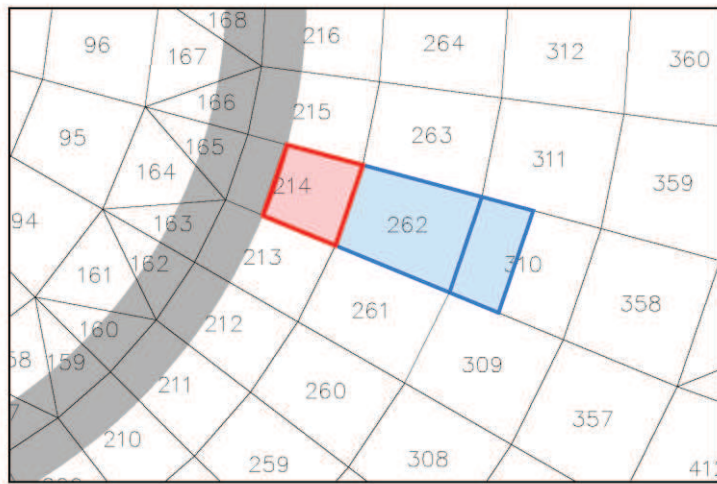
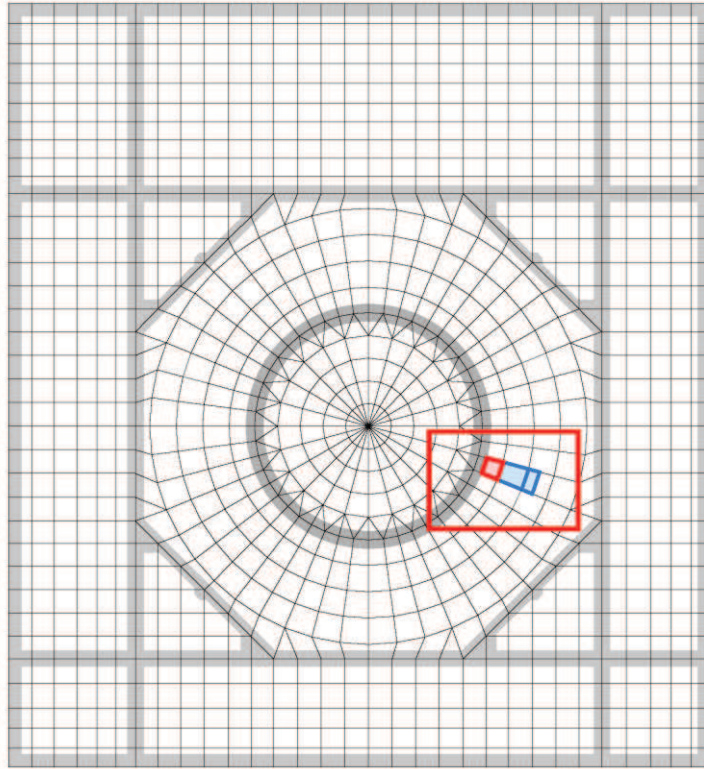


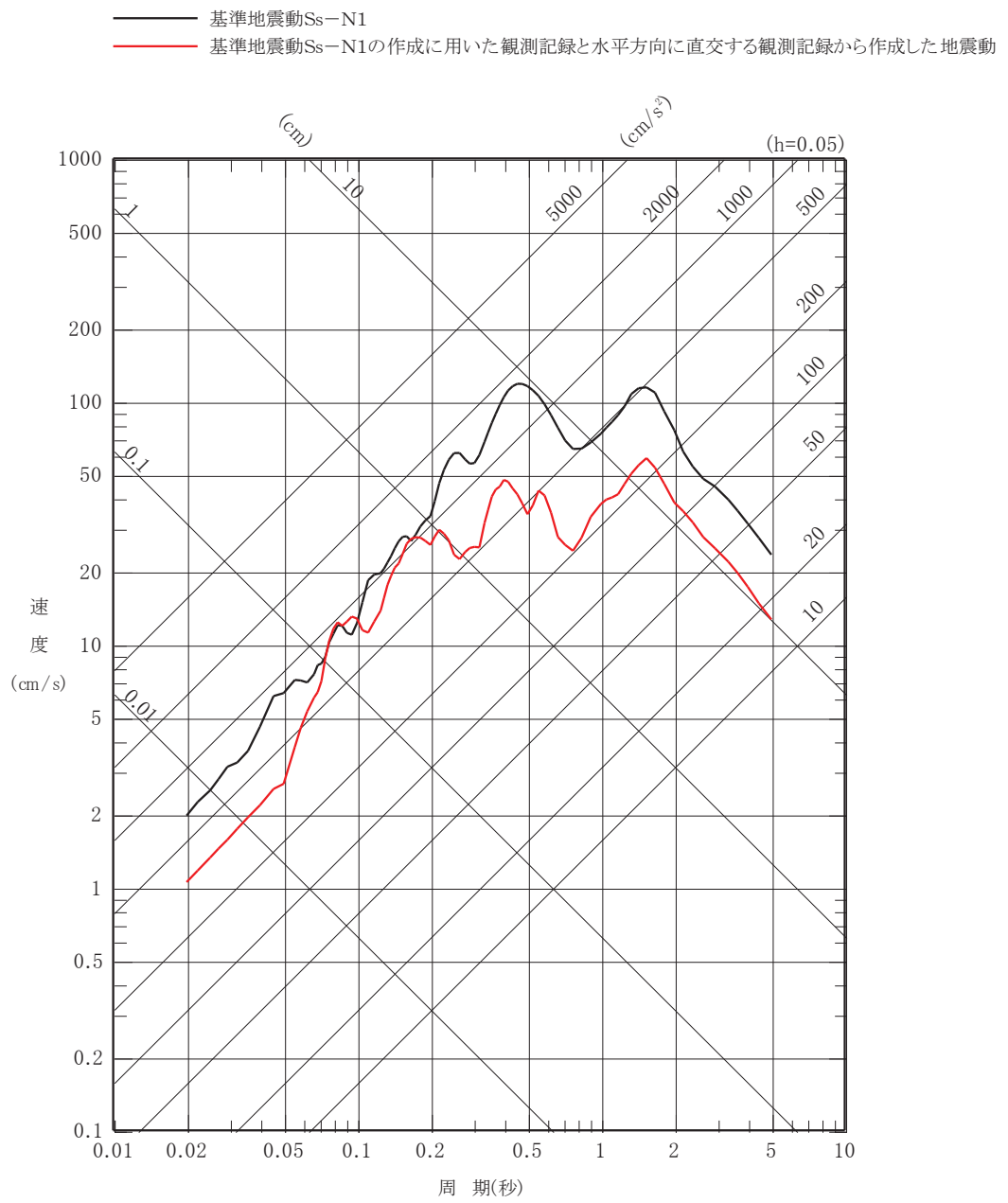
図 2-5 原子炉建屋基礎版における面外せん断力に対する応力平均化の考え方



- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)

(a) 放射方向 要素番号 214

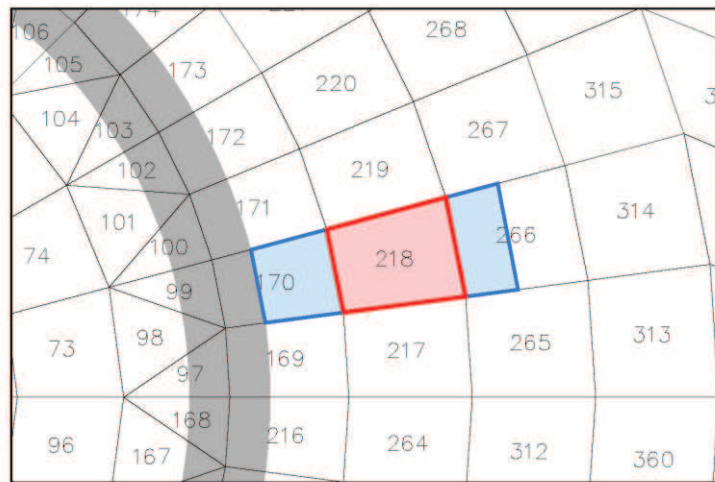
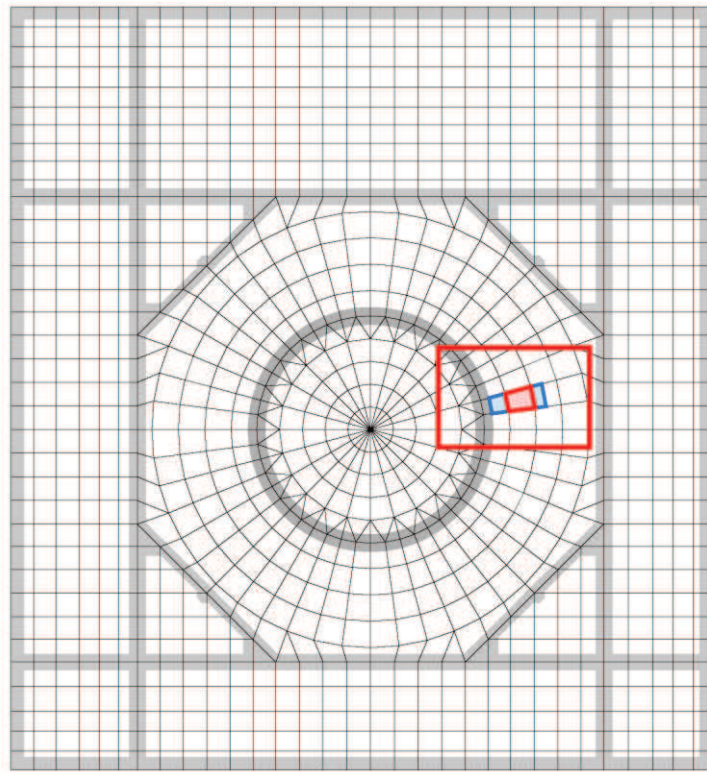
図 2-6 (1) 応力平均化範囲 (1/21)



(d) 水平2方向の地震動の応答スペクトル

図3-5 基準地震動 S s - N 1 (2/2)

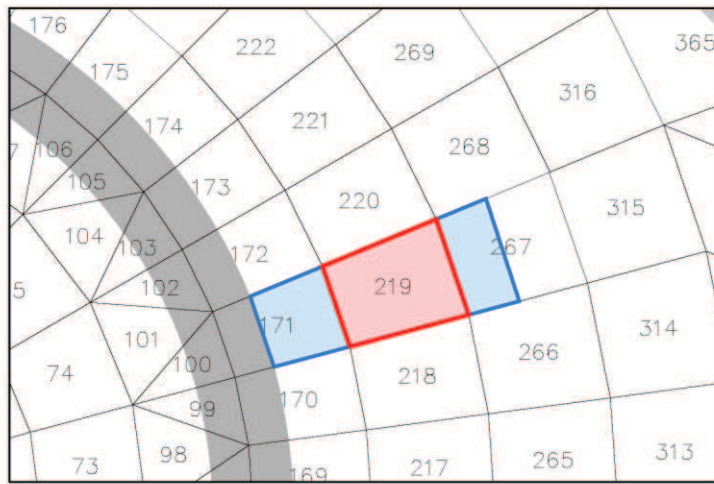
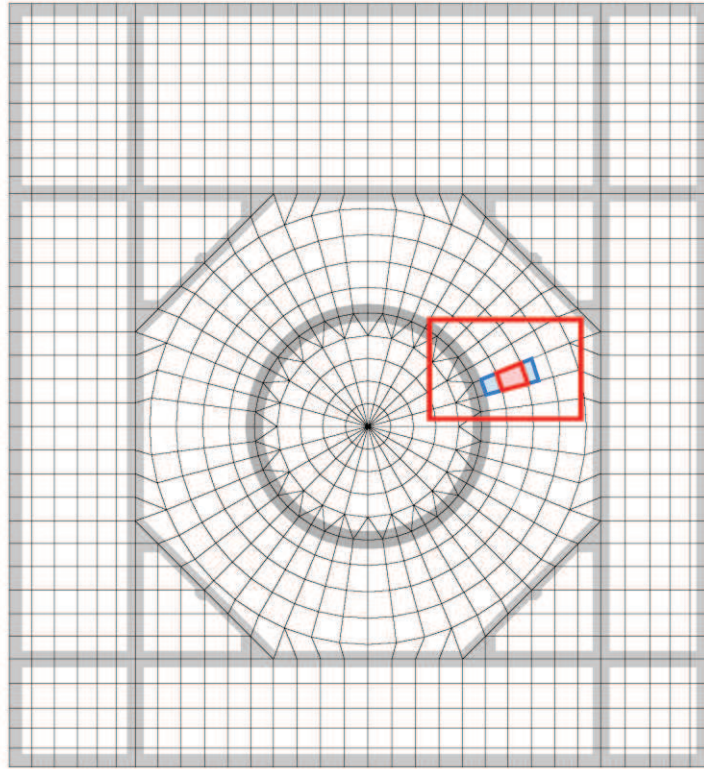




- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)

(b) 放射方向 要素番号 218

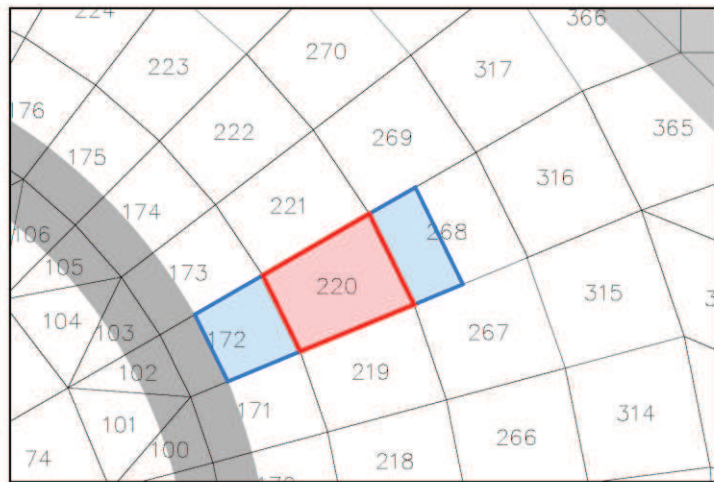
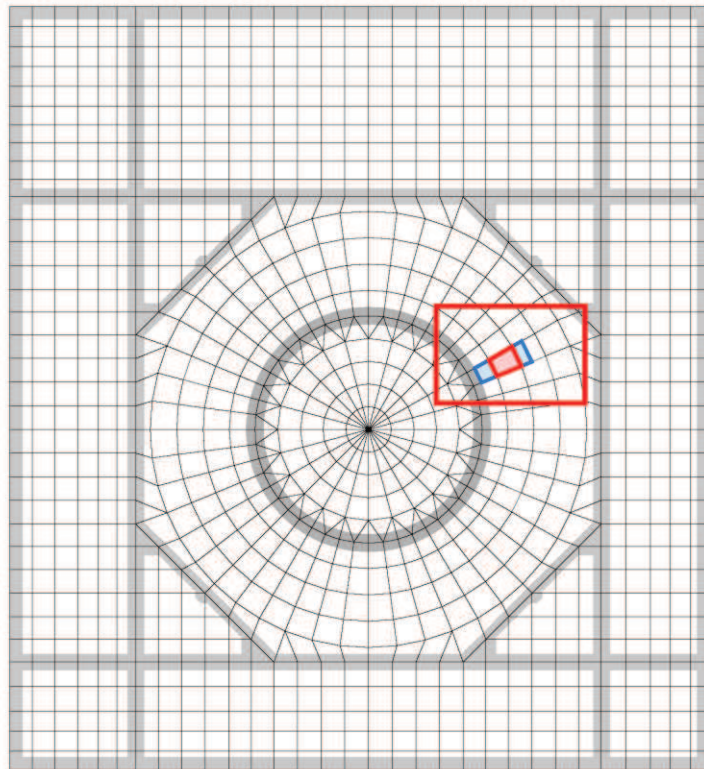
図 2-6 (2) 応力平均化範囲 (2/21)



- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)

(c) 放射方向 要素番号 219

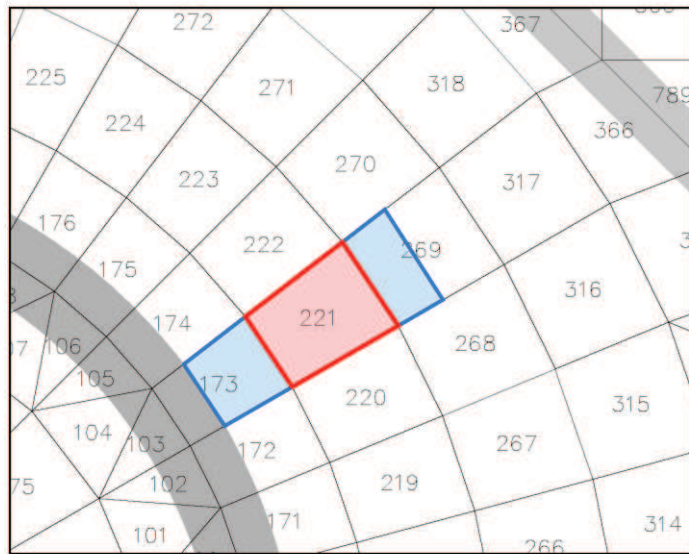
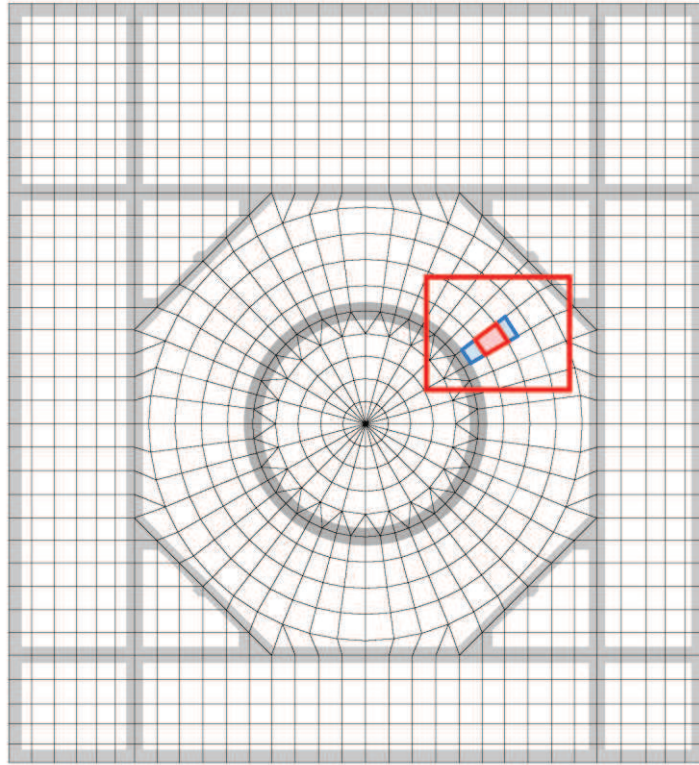
図 2-6 (3) 応力平均化範囲 (3/21)



- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)

(d) 放射方向 要素番号 220

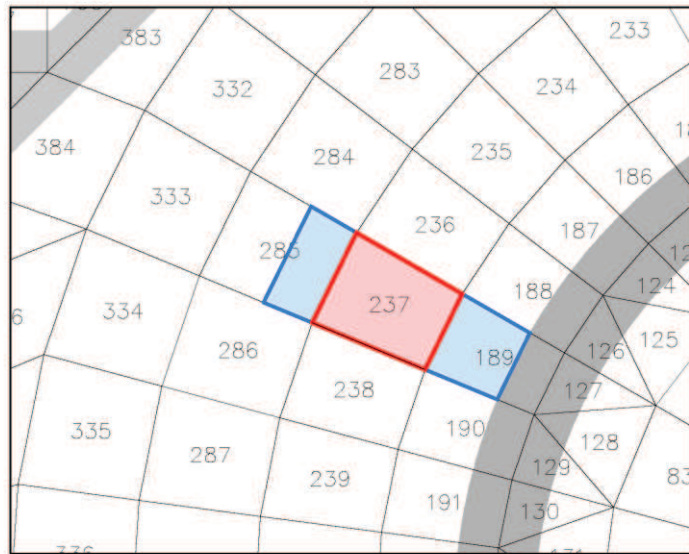
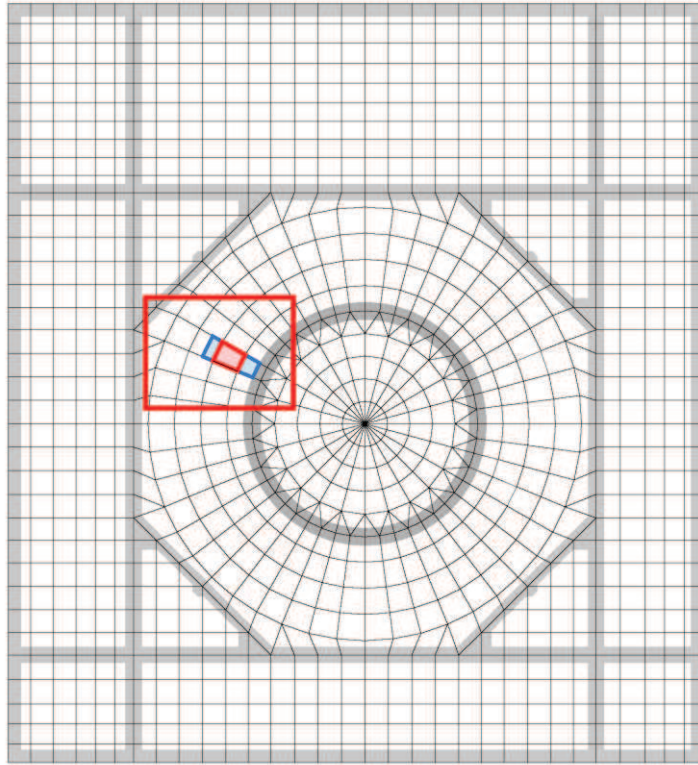
図 2-6 (4) 応力平均化範囲 (4/21)



- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)

(e) 放射方向 要素番号 221

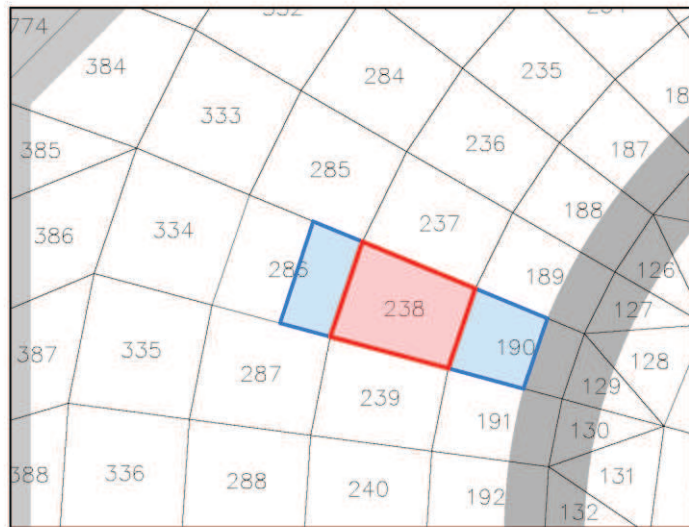
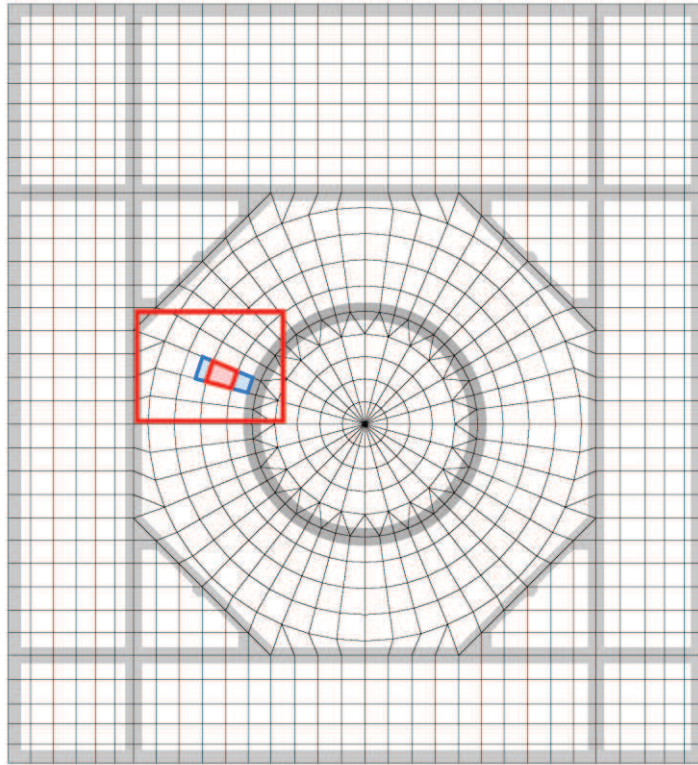
図 2-6 (5) 応力平均化範囲 (5/21)



- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)

(f) 放射方向 要素番号 237

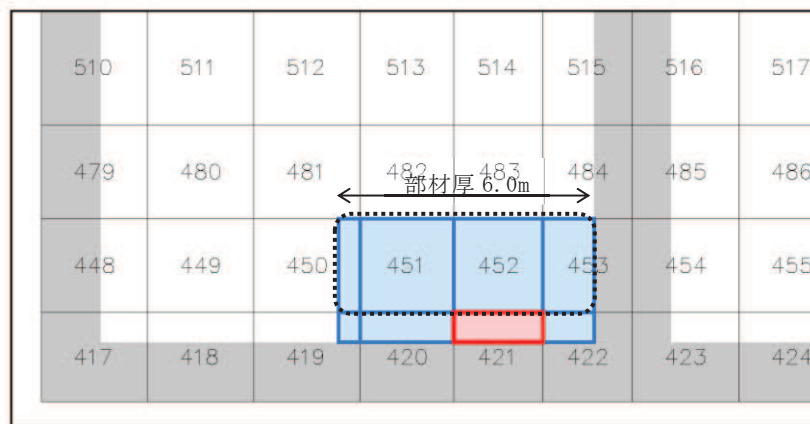
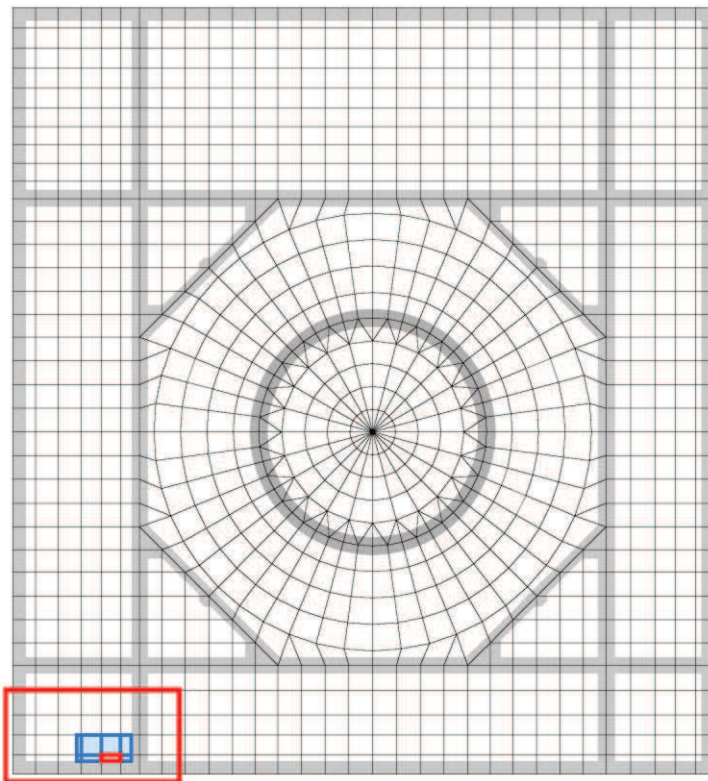
図 2-6 (6) 応力平均化範囲 (6/21)



- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)

(g) 放射方向 要素番号 238

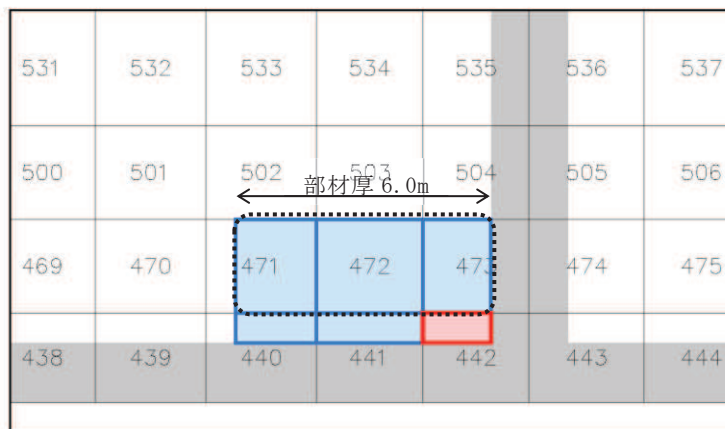
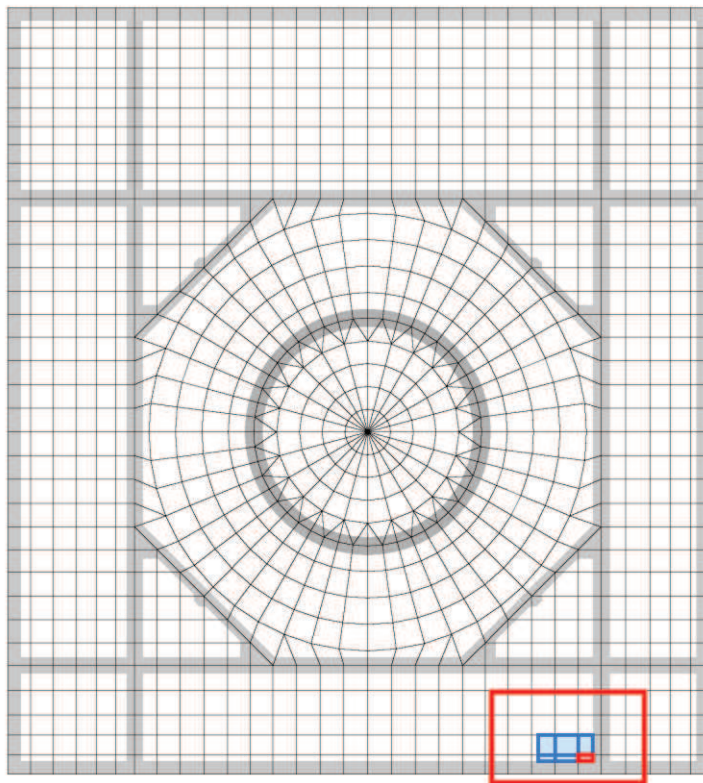
図 2-6 (7) 応力平均化範囲 (7/21)



- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(h) NS 方向 要素番号 421

図 2-6 (8) 応力平均化範囲 (8/21)

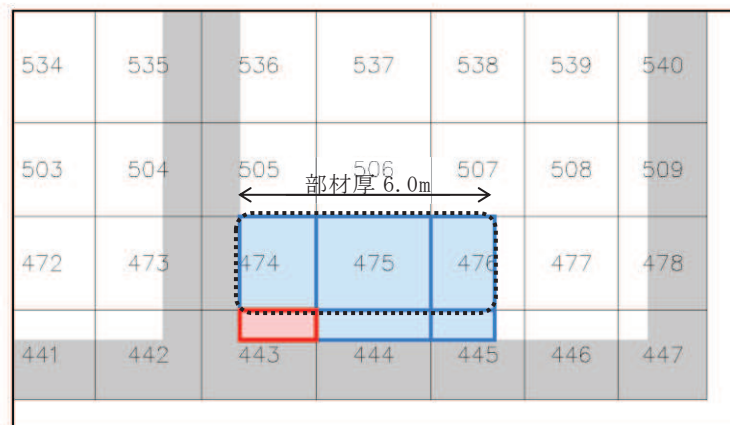
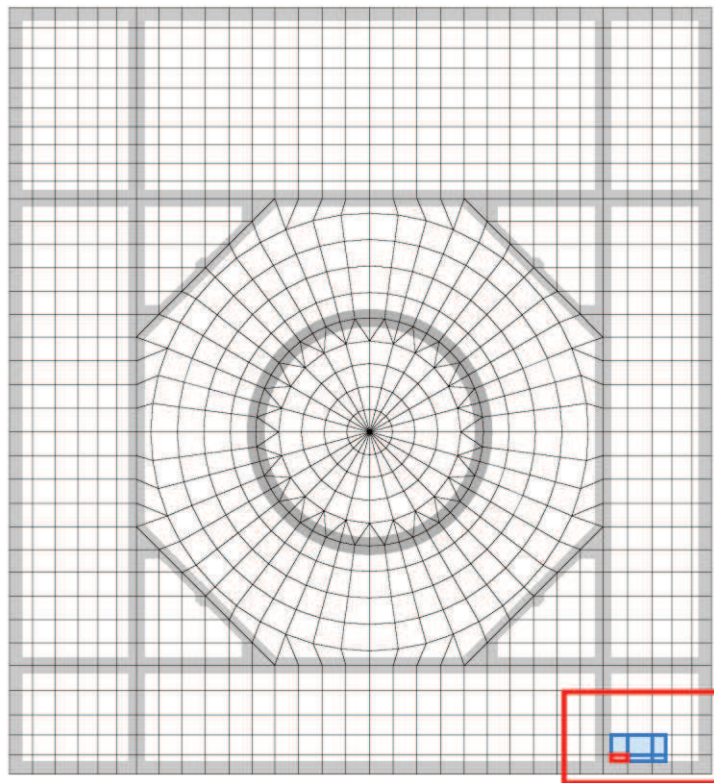


- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(i) NS 方向 要素番号 442

図 2-6 (9) 応力平均化範囲 (9/21)

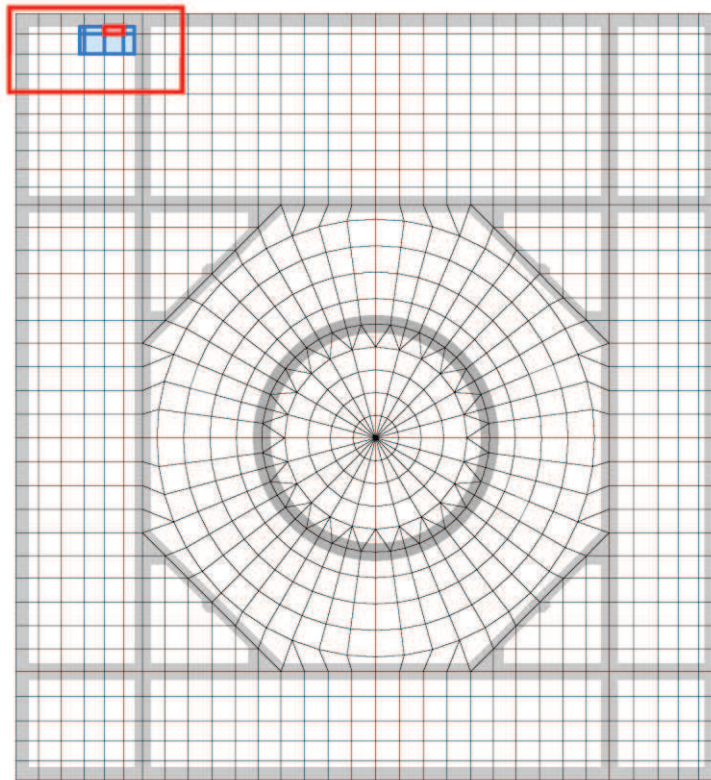




- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(j) NS 方向 要素番号 443

図 2-6 (10) 応力平均化範囲 (10/21)

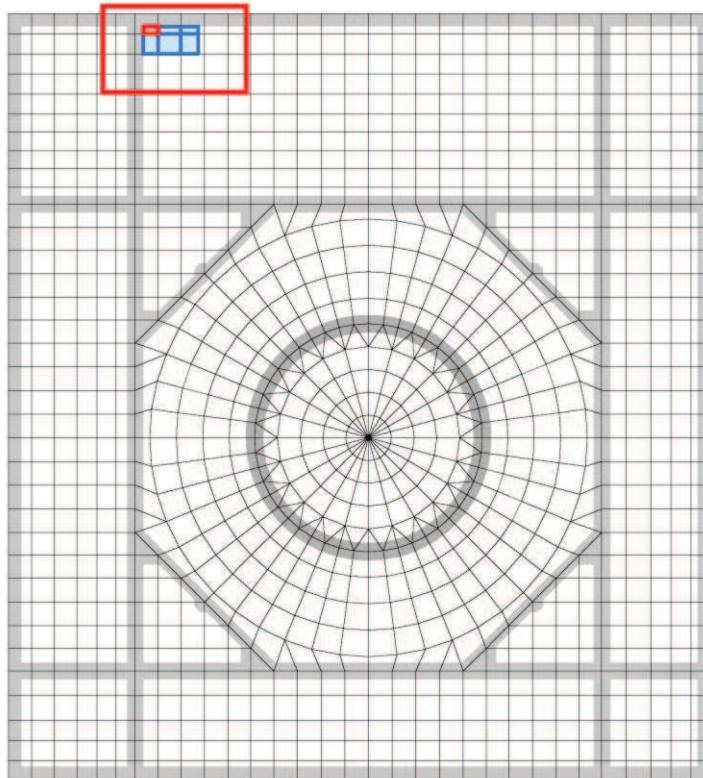


1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162
1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131
1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100
1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069

- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(k) NS 方向 要素番号 1159

図 2-6 (11) 応力平均化範囲 (11/21)



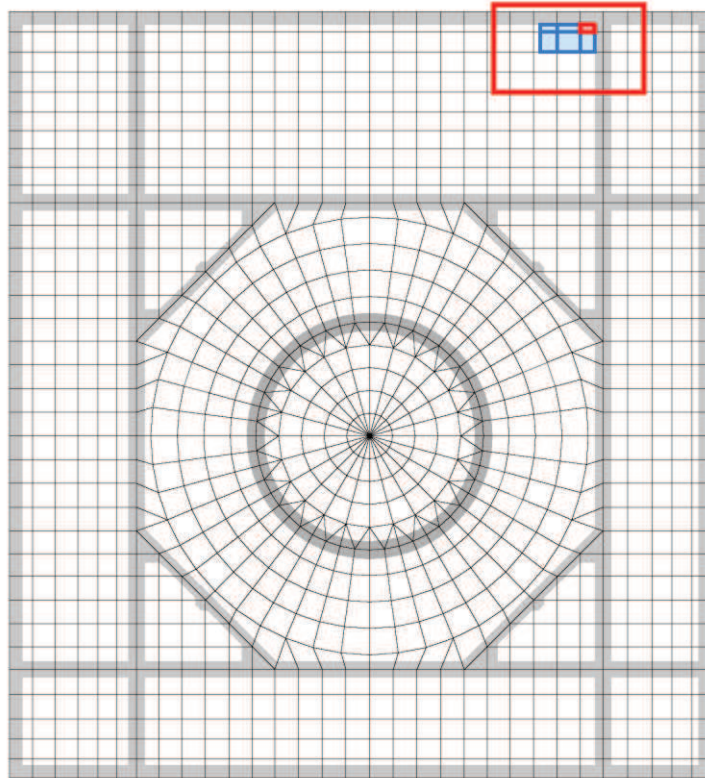
1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165
1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134
1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103
1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072

部材厚 6.0m

- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(1) NS 方向 要素番号 1161

図 2-6 (12) 応力平均化範囲 (12/21)

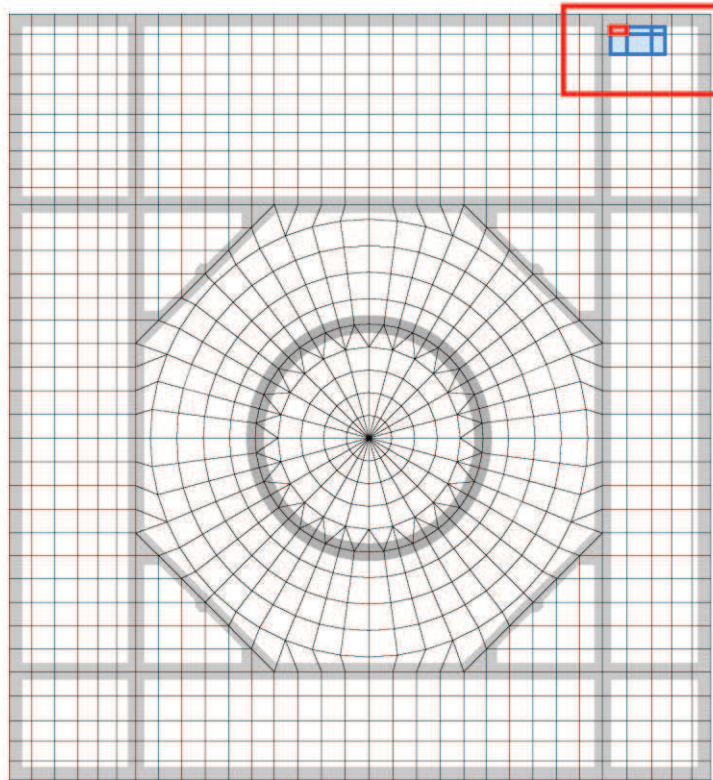


1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182
		147	1148	1149	1150	1151
1145	1146	147	1148	1149	1150	1151
1114	1115	← 1116 部材厚 6.0m 1118 →			1119	1120
1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089

- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(m) NS 方向 要素番号 1180

図 2-6 (13) 応力平均化範囲 (13/21)

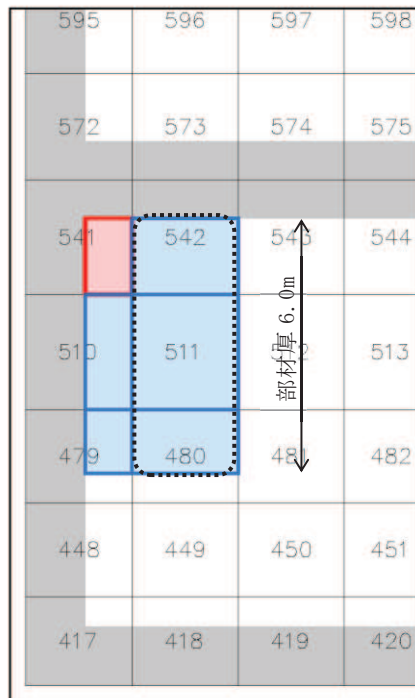
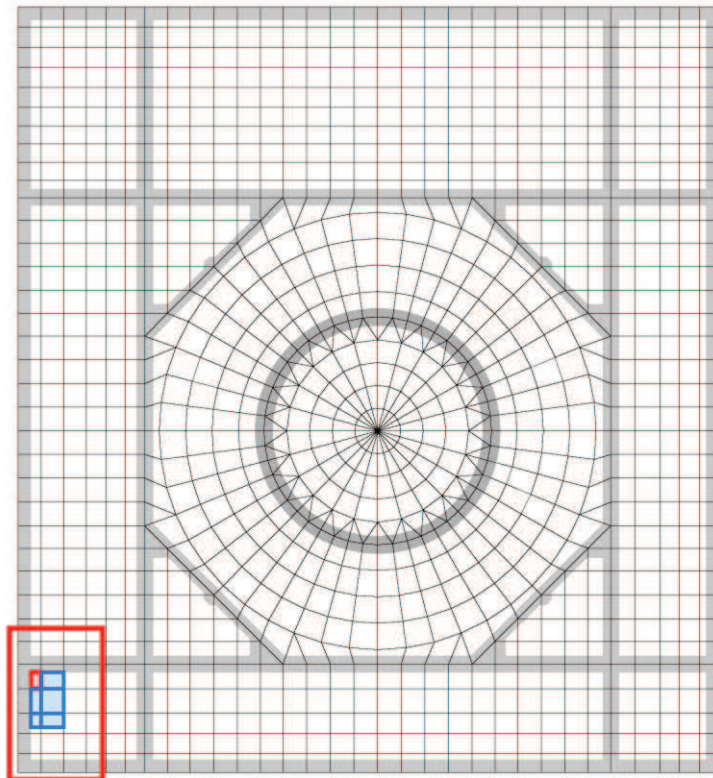


1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185
1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154
1117	1118	← 部材厚 6.0m →			1122	1123
1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092

- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(n) NS 方向 要素番号 1181

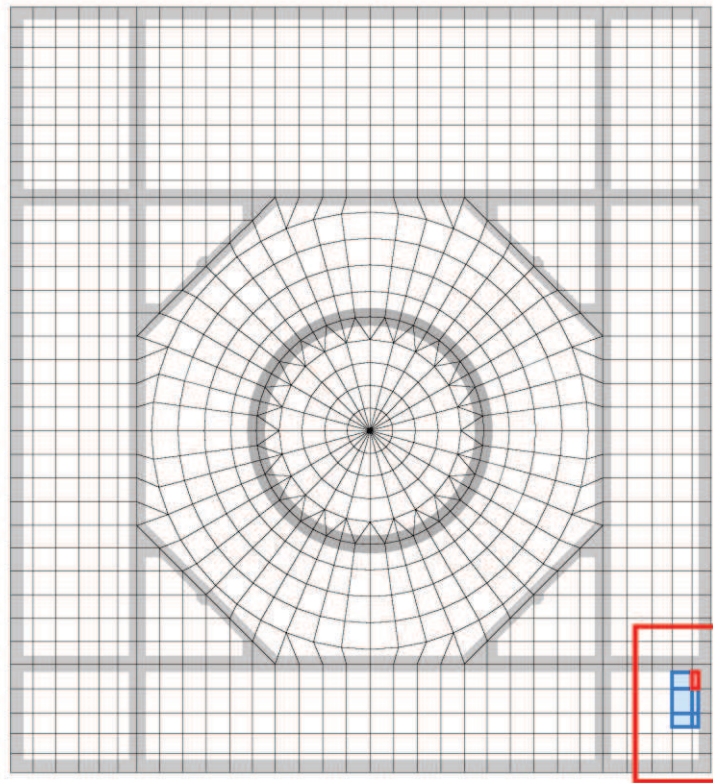
図 2-6 (14) 応力平均化範囲 (14/21)



- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(o) EW 方向 要素番号 541

図 2-6 (15) 応力平均化範囲 (15/21)

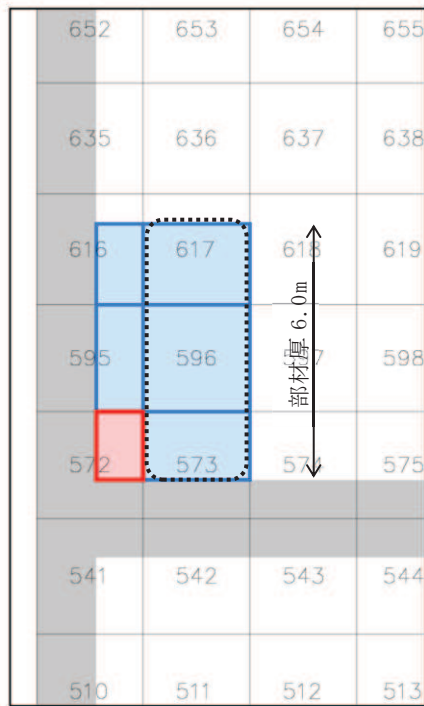
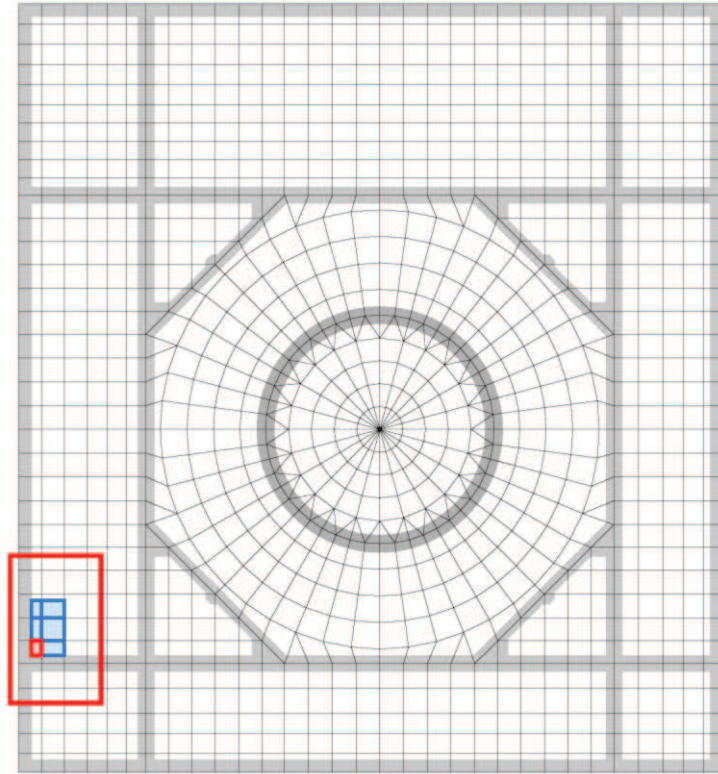


612	613	614	615
591	592	593	594
568	569	570	571
537	538	539	540
506	507	508	509
475	476	477	478
444	445	446	447

- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(p) EW 方向 要素番号 571

図 2-6 (16) 応力平均化範囲 (16/21)

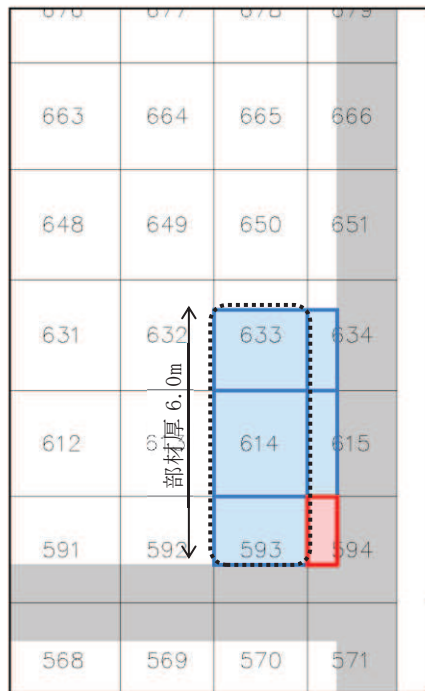
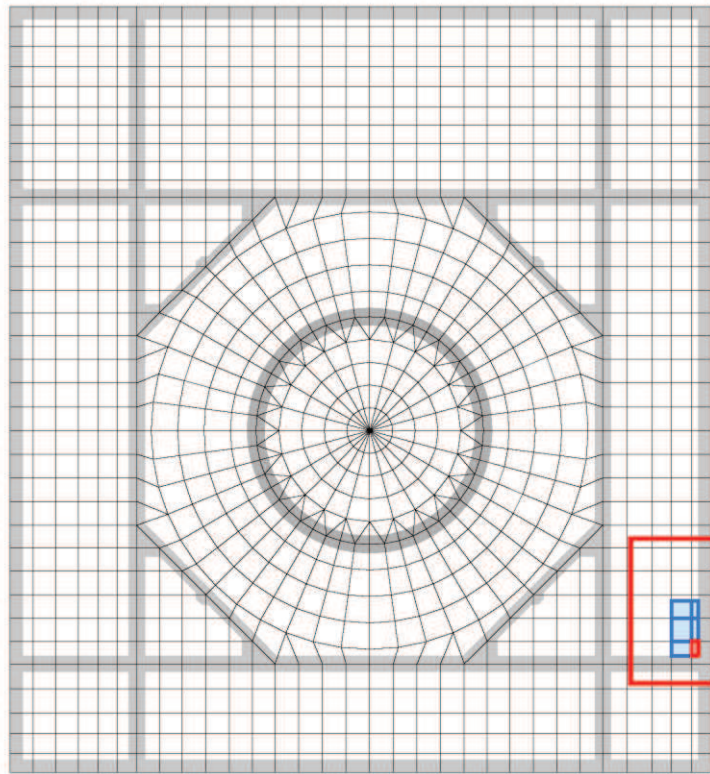


- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(q) EW 方向 要素番号 572

図 2-6 (17) 応力平均化範囲 (17/21)

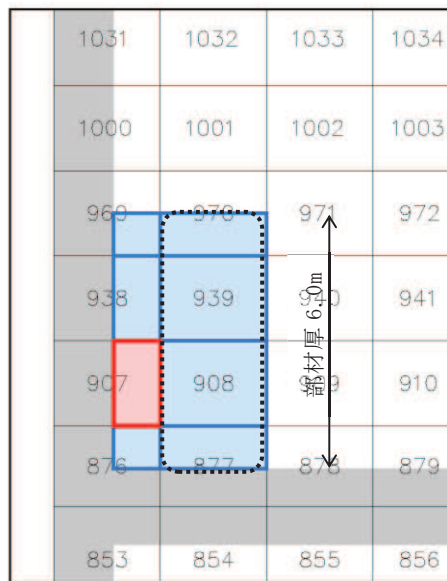
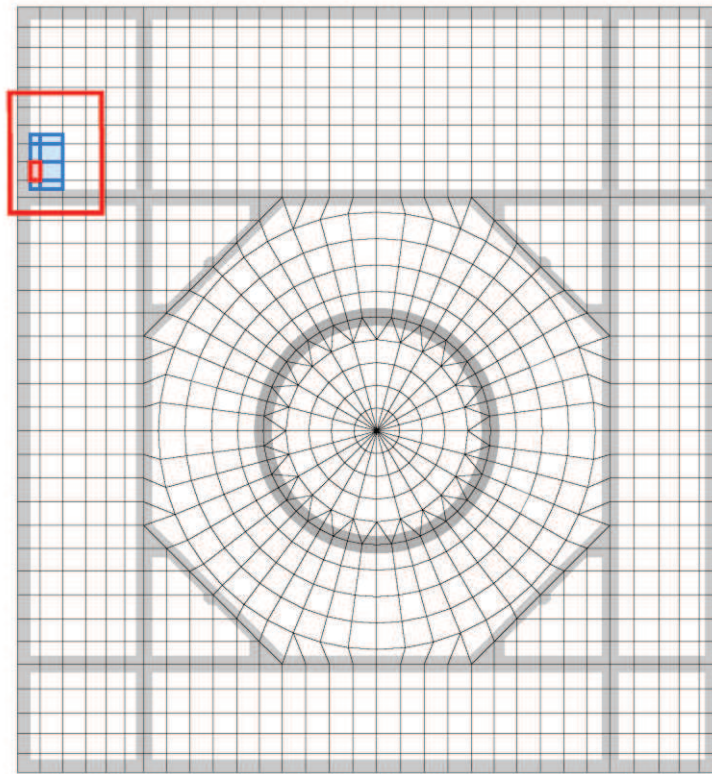




- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(r) EW 方向 要素番号 594

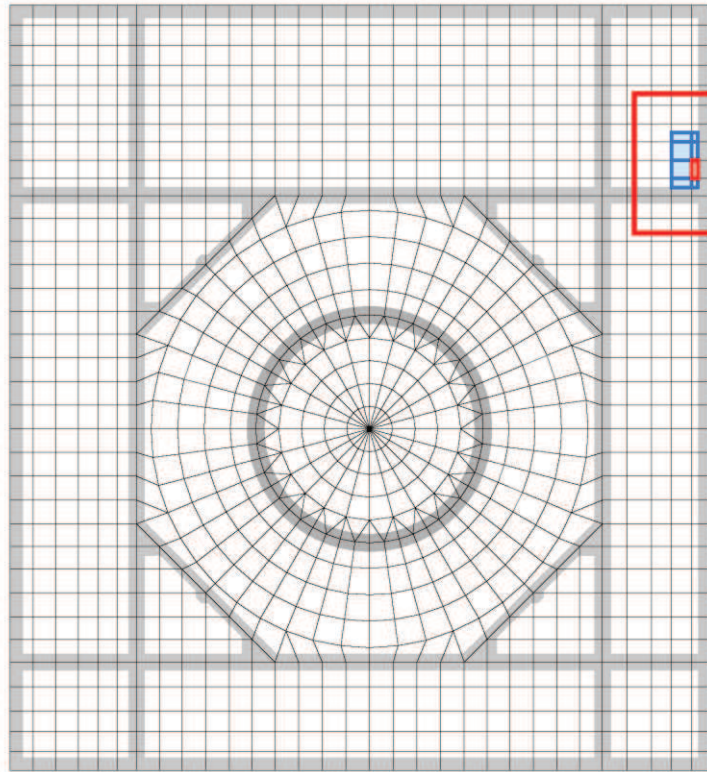
図 2-6 (18) 応力平均化範囲 (18/21)



- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(s) EW 方向 要素番号 907

図 2-6 (19) 応力平均化範囲 (19/21)

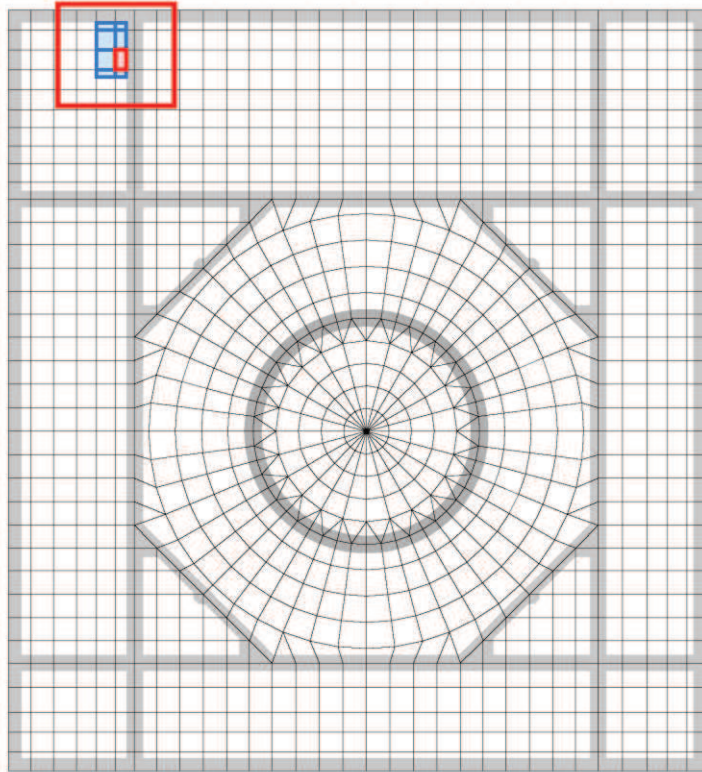


1058	1059	1060	1061
1027	1028	1029	1030
996	997	998	999
965	966	967	968
934	935	936	937
903	904	905	906
872	873	874	875
849	850	851	852

- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(t) EW 方向 要素番号 937

図 2-6 (20) 応力平均化範囲 (20/21)



1157	1158	1159	1160	1161	1162
1126	1127	1128	1129	1130	1131
1095	1096	1097	1098	1099	1100
1064	1065	1066	1067	1068	1069
1033	1034	1035	1036	1037	1038

- : 応力平均化実施要素
- : 平均化実施に用いた周辺要素
- : 壁直下の範囲 (平均化対象外)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

(u) EW 方向 要素番号 1098

図 2-6 (21) 応力平均化範囲 (21/21)

### 2.3 応力平均化の結果

応力平均化の手法として、下式のとおり、要素面積を考慮した重み付け平均で平均化を行っている。応力平均化に用いる各要素の発生値、面積及び重み付け値を表2-2に示す。また、応力平均化の結果を表2-3に示す。

$$\tau_{ave} = \Sigma (\tau_i \times A_i) / \Sigma A_i$$

ここで、

$\tau_{ave}$  : 平均化後の面外せん断応力度

$\tau_i$  : 平均化前の各要素の面外せん断応力度（発生値）

$A_i$  : 応力平均化範囲における各要素の面積

表2-2 (1) 応力平均化に用いる各要素の発生値，面積及び重み付け値 (1/5)

方向	応力平均化 対象要素	組合せ ケース	要素番号	発生値 $\tau_i$ (N/mm <sup>2</sup> )	要素面積 $A_i$ (m <sup>2</sup> )	重み付け値 $\tau_i \times A_i$ ( $\times 10^6$ N)
放射	214	3-10	214	1.94	3.47	6.72
			262	2.40	6.34	15.22
			310	1.69	3.07	5.19
合計					12.88	27.13
放射	218	3-9	170	1.31	3.47	4.55
			218	2.34	6.34	14.84
			266	1.96	3.07	6.03
合計					12.88	25.42
放射	219	3-9	171	1.45	3.47	5.05
			219	2.54	6.34	16.09
			267	2.02	3.07	6.22
合計					12.88	27.36
放射	220	3-9	172	1.43	3.47	4.98
			220	2.53	6.34	16.04
			268	1.97	3.07	6.06
合計					12.88	27.08
放射	221	3-9	173	1.25	3.47	4.35
			221	2.31	6.34	14.66
			269	1.85	3.07	5.67
合計					12.88	24.68
放射	237	3-13	189	1.22	3.47	4.24
			237	2.34	6.34	14.83
			285	1.89	3.07	5.81
合計					12.88	24.88
放射	238	3-13	190	1.25	3.47	4.36
			238	2.37	6.34	15.06
			286	1.95	3.07	5.98
合計					12.88	25.40

表2-2 (2) 応力平均化に用いる各要素の発生値，面積及び重み付け値 (2/5)

方向	応力平均化 対象要素	組合せ ケース	要素番号	発生値 $\tau_i$ (N/mm <sup>2</sup> )	要素面積 $A_i$ (m <sup>2</sup> )	重み付け値 $\tau_i \times A_i$ ( $\times 10^6$ N)
NS	421	3-14	419	2.52	0.35	0.89
			420	3.13	1.54	4.82
			421	3.39	1.47	4.99
			422	3.25	0.84	2.73
			450	0.72	1.10	0.80
			451	1.38	4.84	6.66
			452	1.92	4.62	8.87
			453	2.06	2.64	5.44
合計					17.40	35.20
NS	442	3-16	440	1.85	1.33	2.47
			441	2.24	1.75	3.92
			442	2.45	1.12	2.75
			471	0.83	4.18	3.49
			472	1.01	5.50	5.54
			473	1.02	3.52	3.61
合計					17.40	21.78
NS	443	3-10	443	3.26	1.26	4.11
			444	3.07	1.89	5.81
			445	2.16	1.05	2.27
			474	2.06	3.96	8.15
			475	1.56	5.94	9.26
			476	0.55	3.30	1.81
合計					17.40	31.41

表2-2 (3) 応力平均化に用いる各要素の発生値, 面積及び重み付け値 (3/5)

方向	応力平均化 対象要素	組合せ ケース	要素番号	発生値 $\tau_i$ (N/mm <sup>2</sup> )	要素面積 $A_i$ (m <sup>2</sup> )	重み付け値 $\tau_i \times A_i$ ( $\times 10^6$ N)
NS	1161	3-11	1130	1.07	3.52	3.75
			1131	1.00	5.50	5.51
			1132	0.78	4.18	3.28
			1161	2.49	1.28	3.19
			1162	2.28	2.00	4.57
			1163	1.71	1.52	2.61
合計					18.00	22.91
NS	1180	3-12	1147	0.73	4.18	3.06
			1148	0.89	5.50	4.91
			1149	0.90	3.52	3.19
			1178	1.84	1.52	2.79
			1179	2.30	2.00	4.61
			1180	2.55	1.28	3.27
合計					18.00	21.83
NS	1181	3-9	1150	1.71	3.96	6.78
			1151	1.24	5.94	7.39
			1152	0.38	3.30	1.27
			1181	3.34	1.44	4.82
			1182	3.05	2.16	6.60
			1183	2.10	1.20	2.53
合計					18.00	29.39
NS	1159	3-13	1126	0.55	1.10	0.61
			1127	1.13	4.84	5.45
			1128	1.65	4.62	7.62
			1129	1.80	2.64	4.76
			1157	2.22	0.40	0.89
			1158	2.94	1.76	5.17
			1159	3.27	1.68	5.50
			1160	3.19	0.96	3.07
合計					18.00	33.07



表2-2 (4) 応力平均化に用いる各要素の発生値，面積及び重み付け値 (4/5)

方向	応力平均化 対象要素	組合せ ケース	要素番号	発生値 $\tau_i$ (N/mm <sup>2</sup> )	要素面積 $A_i$ (m <sup>2</sup> )	重み付け値 $\tau_i \times A_i$ ( $\times 10^6$ N)
EW	541	3-16	479	1.47	1.65	2.44
			480	0.15	3.75	0.55
			510	2.34	2.97	6.95
			511	0.95	6.75	6.43
			541	2.57	1.98	5.09
			542	1.32	4.50	5.93
合計					21.60	27.39
EW	571	3-15	508	0.31	3.30	1.04
			509	1.48	1.05	1.56
			539	1.11	5.94	6.62
			540	2.39	1.89	4.53
			570	1.51	3.96	6.00
			571	2.63	1.26	3.32
合計					17.40	23.07
EW	572	3-13	572	2.85	1.76	5.03
			573	0.80	4.00	3.19
			595	2.64	2.75	7.27
			596	0.83	6.25	5.19
			616	2.21	2.09	4.63
			617	0.76	4.75	3.60
合計					21.60	28.91
EW	594	3-9	593	1.14	3.52	4.03
			594	3.09	1.12	3.46
			614	1.15	5.50	6.33
			615	2.87	1.75	5.02
			633	1.04	4.18	4.33
			634	2.45	1.33	3.26
合計					17.40	26.43

表2-2 (5) 応力平均化に用いる各要素の発生値, 面積及び重み付け値 (5/5)

方向	応力平均化 対象要素	組合せ ケース	要素番号	発生値 $\tau_i$ (N/mm <sup>2</sup> )	要素面積 $A_i$ (m <sup>2</sup> )	重み付け値 $\tau_i \times A_i$ ( $\times 10^6$ N)
EW	907	3-12	876	3.21	1.10	3.53
			877	1.40	2.50	3.50
			907	3.46	2.20	7.61
			908	1.40	5.00	7.02
			938	3.24	2.20	7.12
			939	1.16	5.00	5.82
			969	2.97	1.10	3.27
			970	0.97	2.50	2.42
合計					21.60	40.29
EW	937	3-11	905	1.59	2.20	3.50
			906	3.19	0.70	2.24
			936	1.64	4.40	7.22
			937	3.51	1.40	4.92
			967	1.41	4.40	6.20
			968	3.26	1.40	4.57
			998	1.19	2.20	2.61
			999	2.99	0.70	2.10
合計					17.40	33.36
EW	1098	3-11	1066	1.45	1.68	2.44
			1067	2.57	0.96	2.47
			1097	1.79	4.62	8.27
			1098	2.83	2.64	7.47
			1128	1.16	4.62	5.35
			1129	2.08	2.64	5.49
			1159	0.11	1.68	0.18
			1160	0.44	0.96	0.43
合計					19.80	32.10

表2-3 応力平均化結果

方向	要素番号	組合せケース	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	
			平均化前	平均化後
放射	214	3-10	1.94	2.11
	218	3-9	2.34	1.97
	219	3-9	2.54	2.12
	220	3-9	2.53	2.10
	221	3-9	2.31	1.92
	237	3-13	2.34	1.93
	238	3-13	2.37	1.97
NS	421	3-14	3.39	2.02
	442	3-16	2.45	1.25
	443	3-10	3.26	1.81
	1159	3-13	3.27	1.84
	1161	3-11	2.49	1.27
	1180	3-12	2.55	1.21
	1181	3-9	3.34	1.63
EW	541	3-16	2.57	1.27
	571	3-15	2.63	1.33
	572	3-13	2.85	1.34
	594	3-9	3.09	1.52
	907	3-12	3.46	1.87
	937	3-11	3.51	1.92
	1098	3-11	2.83	1.62

## 2.4 断面の評価結果

### 2.4.1 断面の評価方法

断面の評価方法として、面外せん断力の発生値が許容値を超えないことを確認する。許容値は、「RC-N 規準」に基づき算出する。

### 2.4.2 断面の評価結果

応力平均化後の評価結果を表 2-4 に示す。表 2-4 より、応力平均化後の面外せん断応力度の発生値が許容値を超えないことを確認した。

表 2-4 応力平均化後の評価結果

方向	要素番号	組合せケース	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )		平均化後の検定値 (発生値/許容値)
			発生値	許容値*	
放射	214	3-10	2.11	2.42	0.88
	218	3-9	1.97	2.09	0.95
	219	3-9	2.12	2.13	1.00
	220	3-9	2.10	2.12	1.00
	221	3-9	1.92	2.05	0.94
	237	3-13	1.93	2.05	0.95
	238	3-13	1.97	2.06	0.96
NS	421	3-14	2.02	2.42	0.84
	442	3-16	1.25	2.42	0.52
	443	3-10	1.81	2.42	0.75
	1159	3-13	1.84	2.42	0.76
	1161	3-11	1.27	2.42	0.53
	1180	3-12	1.21	2.42	0.51
	1181	3-9	1.63	2.42	0.68
EW	541	3-16	1.27	2.42	0.53
	571	3-15	1.33	2.42	0.55
	572	3-13	1.34	2.42	0.56
	594	3-9	1.52	2.42	0.63
	907	3-12	1.87	2.42	0.78
	937	3-11	1.92	2.42	0.80
	1098	3-11	1.62	2.42	0.67

注記\*：応力平均化範囲に存在する面外せん断補強筋を考慮して許容値を算定