

基準地震動  $S_s$  に対する事故対処設備の健全性  
(高放射性廃液貯蔵場(HAW))

1. 目的

「再処理施設の性能に係る技術基準に関する規則」第六条(地震による損傷の防止)の2について、廃止措置計画に定めるところにより基準地震動  $S_s$  に対して高放射性廃液貯蔵場(HAW)の事故対処設備が健全性を維持できることを示すものである。

2. 評価の方針

廃止措置計画において選定した高放射性廃液貯蔵場(HAW)の想定事故である高放射性廃液貯槽(272V31~V35)及び中間貯槽(272V37, V38)における蒸発乾固に対し発生防止、拡大防止及び影響緩和の機能を期待する事故対処設備について、基準地震動  $S_s$  によって生じる地震力が作用したとしてもその安全機能の維持が可能であることを示す。

- (1) 建家の評価については、設置する地盤との相互作用と建屋の振動特性を適切に考慮できる地震応答解析モデルを用いる。また、地震時の建家各層の応答変位が弾性範囲を超えることを考慮し、塑性域の変形挙動を扱うことができる時刻歴解析を行う。これらの解析に基づき、建家各層の最大応答せん断ひずみ度が許容限界を超えないこと、建家基礎の最大接地圧が支持地盤の極限支持力度を超えないことを確認する。
- (2) 機器・配管系の評価については、建家の地震応答解析の結果得られる各層の床応答加速度等に基づき、当該機器・配管系に地震時に発生する最大応力を評価し、構造強度上の許容限界を超えないことを確認する。最大応力の評価においては、当該機器・配管系の構造特性、配置、構造強度上の裕度、地震時に健全性の維持が必要とされる機能の内容等を考慮して、適切な評価法を使用する。

### 3. 建家耐震評価について

#### 3.1 評価対象

評価対象は、高放射性廃液を直接内包する設備及び重大事故対処設備を収納し、支持している高放射性廃液貯蔵場(HAW)建家とする。

#### 3.2 評価方法

建物の耐震評価は、基準地震動  $S_s$  を用いた地震応答解析によって行う。鉄筋コンクリート造・鉄骨鉄筋コンクリート造の建物の地震応答解析は、建物を質点系、地盤を等価なばねで評価した地盤-建物連成モデルを作成し、水平方向、鉛直方向それぞれについて実施することを基本とする。地震応答解析に用いる入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動  $S_s$  を一次元波動論により評価したものを用いる。

基準地震動  $S_s$  に対して建家の安全機能が保持できることの確認は、構造物全体としての変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有し、建物・構築物の終局耐力に対し妥当な安全裕度を有していることについて、建家各層の鉄筋コンクリート耐震壁の最大応答せん断ひずみ度が許容限界 ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) を超えないことにより評価する。さらに、建家が十分な支持性能を持つ地盤に設置されていることについて、建家基礎の最大接地圧が支持地盤の極限支持力度を超えないことにより評価する。

#### 3.3 評価条件

##### 3.3.1 入力地震動

入力地震動に用いる基準地震動  $S_s$  として、令和元年9月26日に申請した「再処理施設に係る廃止措置計画変更認可申請書の一部補正について」の六に示した基準地震動  $S_s$ -D、 $S_s$ -1、 $S_s$ -2 の内、振動特性の観点から施設への影響の最も大きい  $S_s$ -2 を用いる。

評価に用いる入力地震動について、水平方向、鉛直方向は以下のとおり算出したものを用いる。

##### (1) 水平方向

基準地震動  $S_s$ -2 の水平方向の加速度時刻歴波形を図 3.1 に、加速度応答スペクトルを図 3.2 に示す。

建家基礎面へ入力する地震動は、基準地震動を解放基盤表面に入力して一次元波動論により算定した建家基礎底面位置での応答波を用いる。

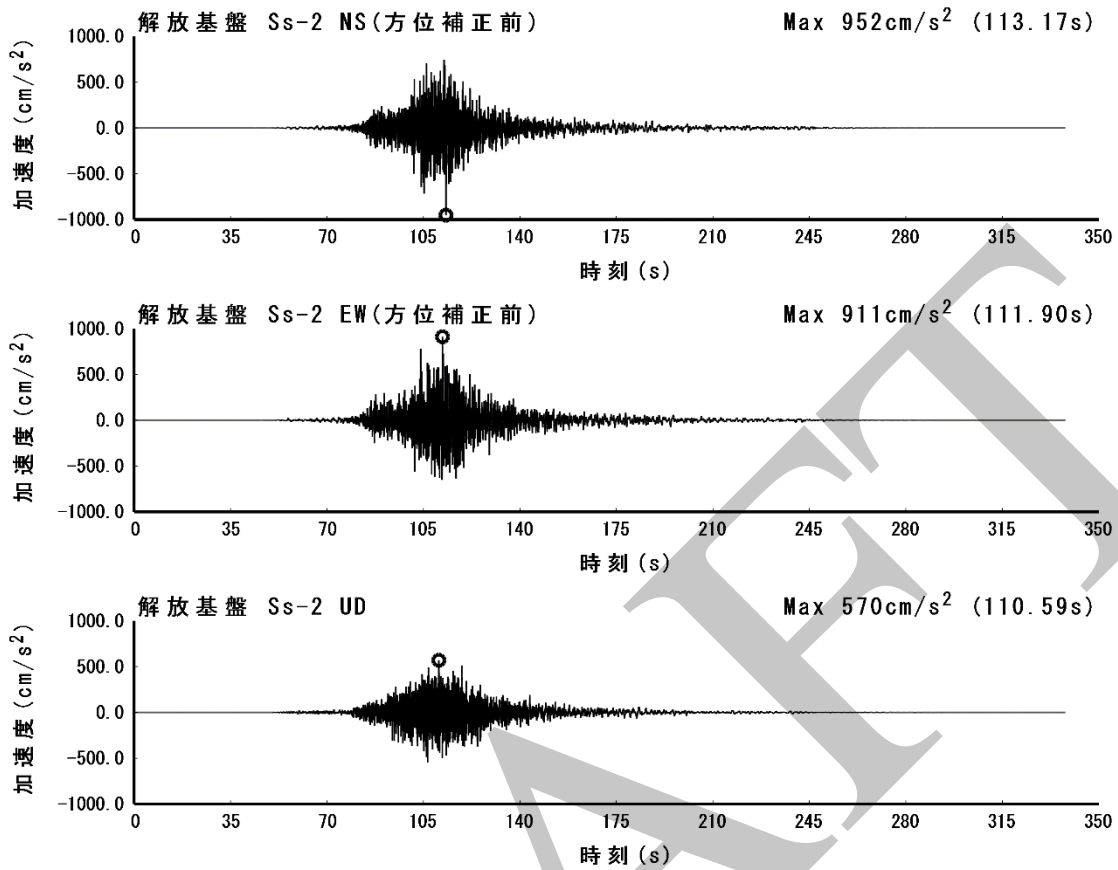
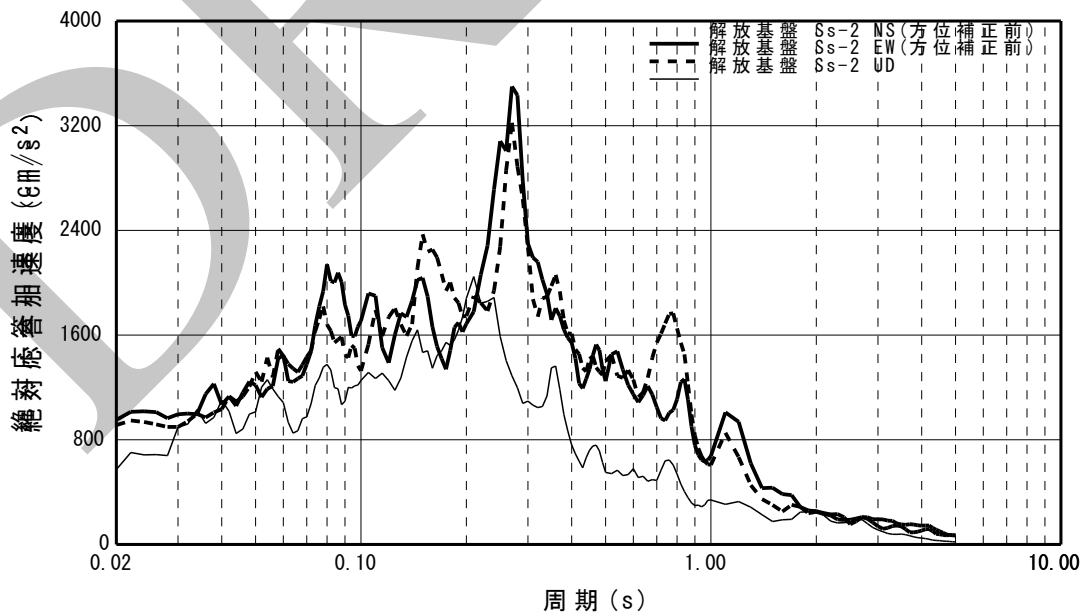


図 3.2 検討用地震動 Ss-2 の加速度時刻歴波形

図 3.3 検討用地震動 Ss-2 の加速度応答スペクトル (h=5%)



基準地震動の内、南北及び東西方向で個別の地震波動が定義されている Ss-1 と Ss-2 については、解放基盤表面への入力前に建家座標系に方位補正する。磁北方向とプラントノースの角度  $\phi$  は、35 度 44 分 44 秒 (35.7°) である。

なお、波の向き (ns/ew) を図 3.3 の向きとすれば、方位補正後の NS 方向、EW 方向の地震波の大きさは下式で表される。

$$\begin{aligned} \text{NS} &= \text{ns} \times \cos \phi + \text{ew} \times \sin \phi \\ \text{EW} &= -\text{ns} \times \sin \phi + \text{ew} \times \cos \phi \end{aligned}$$

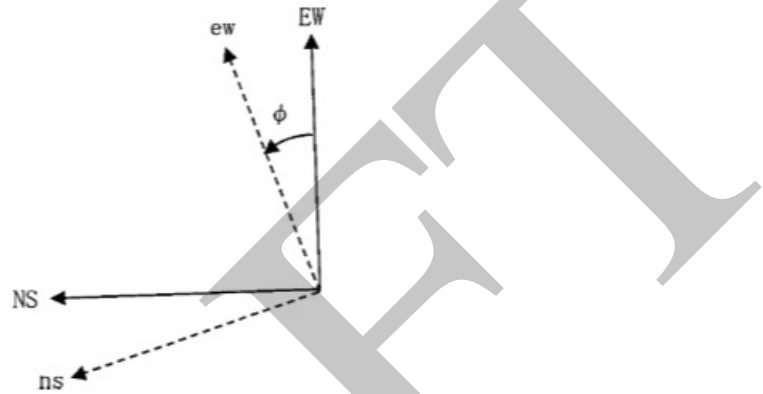


図 3.3 方位補正

## (2) 鉛直方向

基準地震動 Ss-2 の鉛直方向の加速度時刻歴波形を図 3.4 に、加速度応答スペクトルを図 3.5 に示す。

建家基礎面へ入力する地震動は、基準地震動を解放基盤表面に入力して次元波動論により算定した建家基礎底面位置での応答波を用いる。

[波形及び加速度応答スペクトル図 (図 3.4~3.5) は追而]

## 3.3.2 解析モデル

### (1) 水平方向の解析モデル

水平方向の解析モデルは、建家と地盤の相互作用を地盤ばねによって考慮した曲げせん断型の多軸多質点系 (スウェイ-ロッキングモデル、SR モデル) によってモデル化する。

水平方向の解析モデルを図 3.6 に、解析モデルの諸元を表 3.1 及び表 3.2 に示す。耐震壁の復元力特性は、図 3.7 に示すトリリニア型のスケルトンカーブにより表し、せん断変形の履歴特性は最大点指向型モデル、曲げ変形の履歴特性はディグレイディングモデルとする。スケルトンカーブにおける各折点を、せん断変形については表 3.3 及び表 3.4 に、曲げ変形については表 3.5 及び表 3.6 にそれぞれ示す。

基礎底面地盤ばねは、JEAG4601-1991 追補版に基づき、振動アドミッタンス理論により算定した。また、埋め込み部分の側面地盤ばねは、Novak の方法により

算定する。地盤ばね定数及び減衰係数を表 3.7 に示す。

建家の減衰はモード減衰として与え、各次のモード減衰定数は建家各部のひずみエネルギーに比例した値として算定する。建家のコンクリート部分の減衰定数は 3% とする。

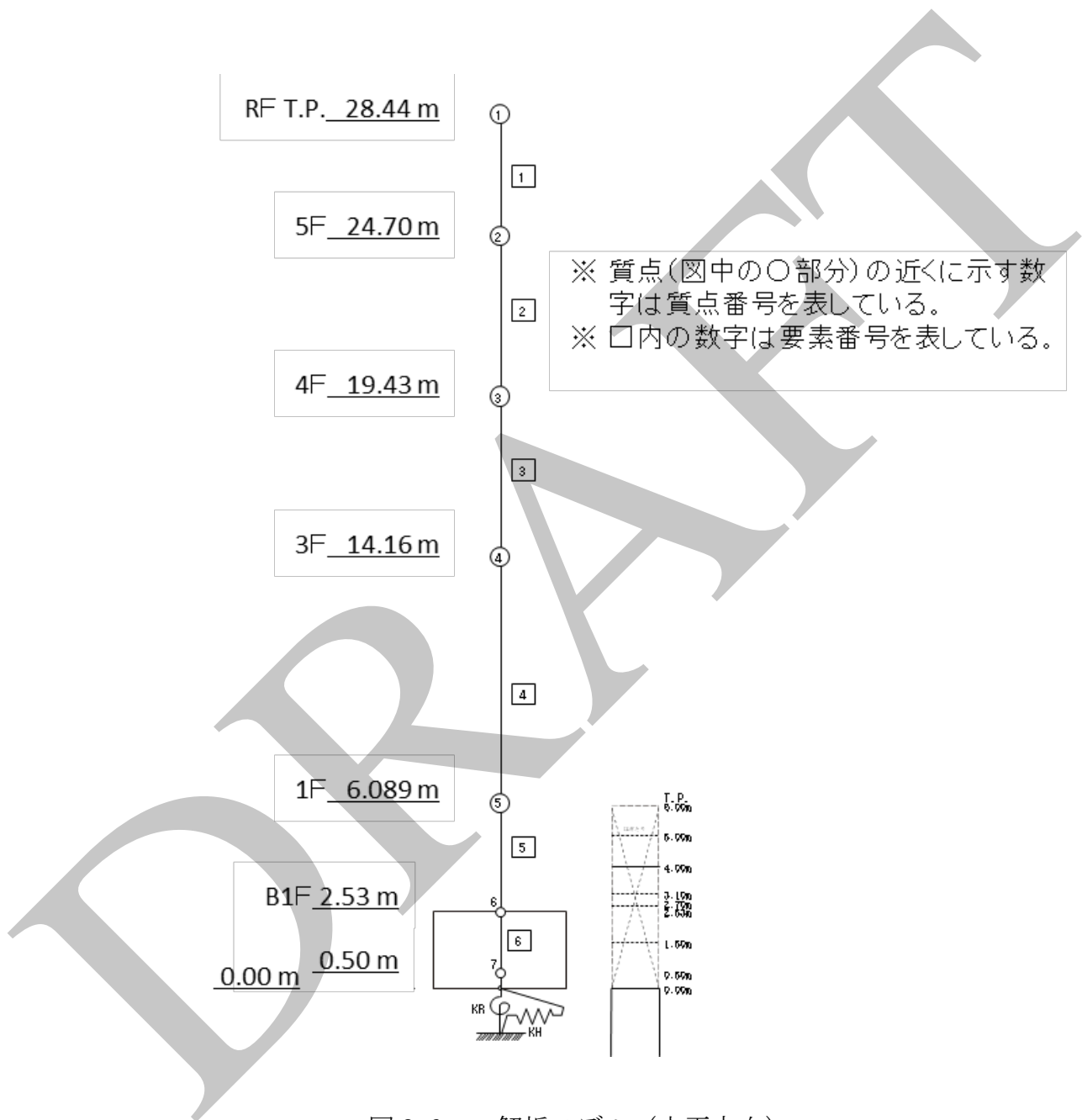


図 3.6 解析モデル (水平方向)

表 3.1 解析モデルの諸元 (NS 方向)

質点 番号	高さ G. L. (m)	重量 (kN)	回転慣性 重量 ( $\times 10^2 \text{kN}\cdot\text{m}^2$ )	部材 番号	せん断 断面積 ( $\text{m}^2$ )	断面二次 モーメント ( $\times 10^3 \text{m}^4$ )
1	28.44	4,154.6	4,712	—		
2	24.70	36,046.5	40,490	1	4.5	27
3	19.43	51,038.2	57,700	2	65.2	6,290
4	14.16	121,100.8	137,800	3	87.1	8,730
5	6.089	79,292.5	90,780	4	212.5	22,330
6	2.53	72,321.2	81,070	5	212.5	20,650
7	0.50	31,655.0	35,390	6	790.6	92,910

表 3.2 解析モデルの諸元 (EW 方向)

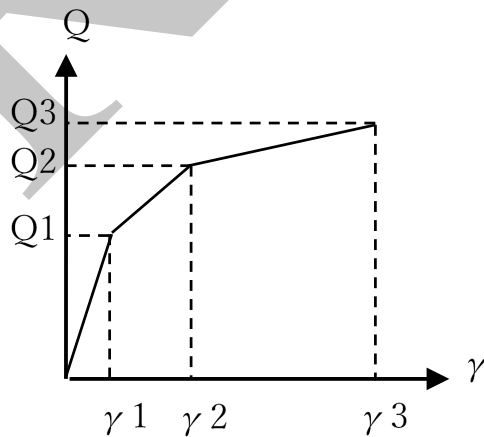
質点 番号	高さ G. L. (m)	重量 (kN)	回転慣性 重量 ( $\times 10^2 \text{kN}\cdot\text{m}^2$ )	部材 番号	せん断 断面積 ( $\text{m}^2$ )	断面二次 モーメント ( $\times 10^3 \text{m}^4$ )
1	28.44	4,154.6	4,328	—		
2	24.70	36,046.5	36,830	1	5.5	79
3	19.43	51,038.2	52,510	2	39.9	3,850
4	14.16	121,100.8	125,500	3	93.2	6,650
5	6.089	79,292.5	82,800	4	208.8	19,550
6	2.53	72,321.2	73,670	5	229.8	18,020
7	0.50	31,655.0	32,220	6	830.9	92,670

表 3.3 復元力特性 (Q- $\gamma$  関係、NS 方向)

要素番号	Q <sub>1</sub> ( $\times 10^3$ kN)	$\gamma_1$ ( $\times 10^{-3}$ )	Q <sub>2</sub> ( $\times 10^3$ kN)	$\gamma_2$ ( $\times 10^{-3}$ )	Q <sub>3</sub> ( $\times 10^3$ kN)	$\gamma_3$ ( $\times 10^{-3}$ )
1	7.073	0.175	9.548	0.525	18.69	4.00
2	102.6	0.175	138.5	0.526	302.0	4.00
3	143.7	0.184	194.0	0.551	420.7	4.00
4	352.4	0.185	475.7	0.554	902.5	4.00
5	366.0	0.192	494.1	0.576	906.4	4.00

表 3.4 復元力特性 (Q- $\gamma$  関係、EW 方向)

要素番号	Q <sub>1</sub> ( $\times 10^3$ kN)	$\gamma_1$ ( $\times 10^{-3}$ )	Q <sub>2</sub> ( $\times 10^3$ kN)	$\gamma_2$ ( $\times 10^{-3}$ )	Q <sub>3</sub> ( $\times 10^3$ kN)	$\gamma_3$ ( $\times 10^{-3}$ )
1	8.644	0.175	11.67	0.525	25.00	4.00
2	62.76	0.175	84.73	0.526	187.4	4.00
3	153.8	0.184	207.6	0.551	466.6	4.00
4	346.2	0.185	467.4	0.554	891.0	4.00
5	395.8	0.192	534.3	0.576	975.4	4.00



Q- $\gamma$  関係

図 3.7 せん断のスケルトンカーブ ( $\tau - \gamma$  関係)

表 3.5 曲げのスケルトンカーブ (M- $\phi$  関係、NS 方向)

[追而]

表 3.6 曲げのスケルトンカーブ (M- $\phi$  関係、EW 方向)

[追而]

表 3.7 地盤ばね定数 (水平方向、底面) [Ss-2]

振動 方向	水平ばね		回転ばね	
	剛性	減衰係数 <sup>※1</sup>	剛性	減衰係数 <sup>※1</sup>
	$K_H$ (kN/m)	$C_H$ (kN·s/m)	$K_R$ (kN·m/rad)	$C_R$ (kN·m·s/rad)
NS	$4.066 \times 10^7$	$1.032 \times 10^6$	$1.671 \times 10^{10}$	$1.148 \times 10^8$
EW	$4.084 \times 10^7$	$1.041 \times 10^6$	$1.561 \times 10^{10}$	$1.011 \times 10^8$

※1：建家-地盤連成系の1次固有振動数に基づき算出

## (2) 鉛直方向の解析モデル

鉛直方向の解析モデルは、建家と地盤の相互作用を地盤ばねで考慮した一軸多質点系モデルとする。建家部分は質点を鉛直方向のばねで連結しモデル化する。なお、建家の埋め込み部分は考慮しない。

鉛直方向の解析モデルを図 3.8 に、解析モデルの諸元を表 3.8 に示す。底面地盤ばねは、JEAG4601-1991 追補版に基づき、振動アドミタンス理論により算定する。地盤ばね定数及び減衰係数を表 3.9 に示す。

建家の減衰はモード減衰として与え、各次のモード減衰定数は建家各部のひずみエネルギーに比例した値として算定する。建家のコンクリート部分の減衰定数は3%とする。



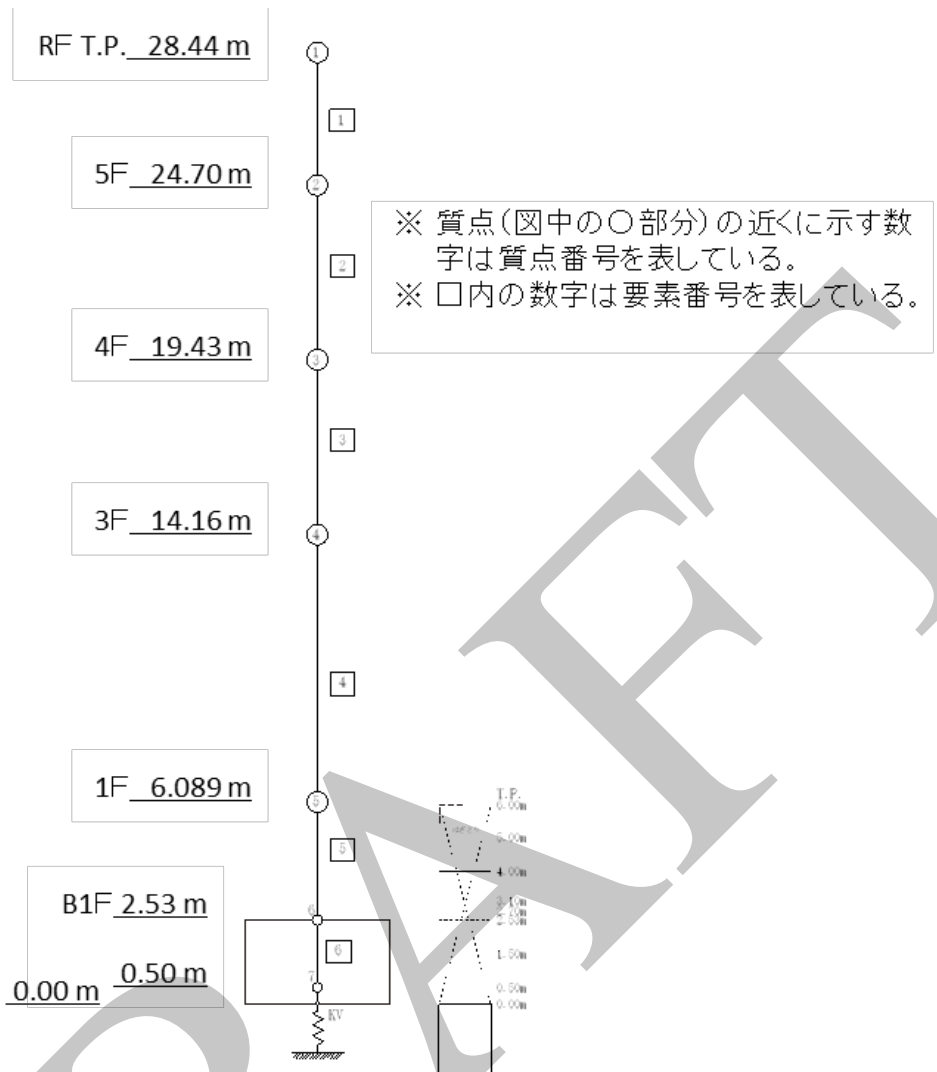


図 3.8 解析モデル (鉛直方向)

表 3.8 解析モデルの諸元（鉛直方向）

階	高さ T.P. (m)	軸断面積 (m <sup>2</sup> )
5F	+28.44～ +24.70	11.9
4F	+24.70～ +19.43	114.2
3F	+19.43～ +14.16	172.8
1F	+14.16～ +6.089	387.8
B1F	+6.089～ +2.53	415.4
基礎	+2.53～ +0.50	1130.9

表 3.9 地盤ばね定数（鉛直方向）

振動 方向	鉛直ばね	
	剛性	減衰係数 <sup>※1</sup>
	K <sub>V</sub> (kN/m)	C <sub>V</sub> (kN・s/m)
鉛直	$6.089 \times 10^7$	$2.283 \times 10^6$

※1：建家－地盤連成系の1次固有振動数に基づき算出

### 3.4 評価結果

#### 3.4.1 建家各層の耐震壁のせん断ひずみ度

地震応答解析の結果得られた建家各層の耐震壁の最大せん断ひずみ度を、各層のスケルトンカーブ上に示したものを図 3.9 及び図 3.10 に示す。

以上の結果から、建家各層の耐震壁の最大応答せん断ひずみ度は何れも許容限界 ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) を超えていないことから、基準地震動 S<sub>s</sub> によって生じる地震力に対して、高放射性廃液貯蔵場の建家は妥当な安全裕度を有している。

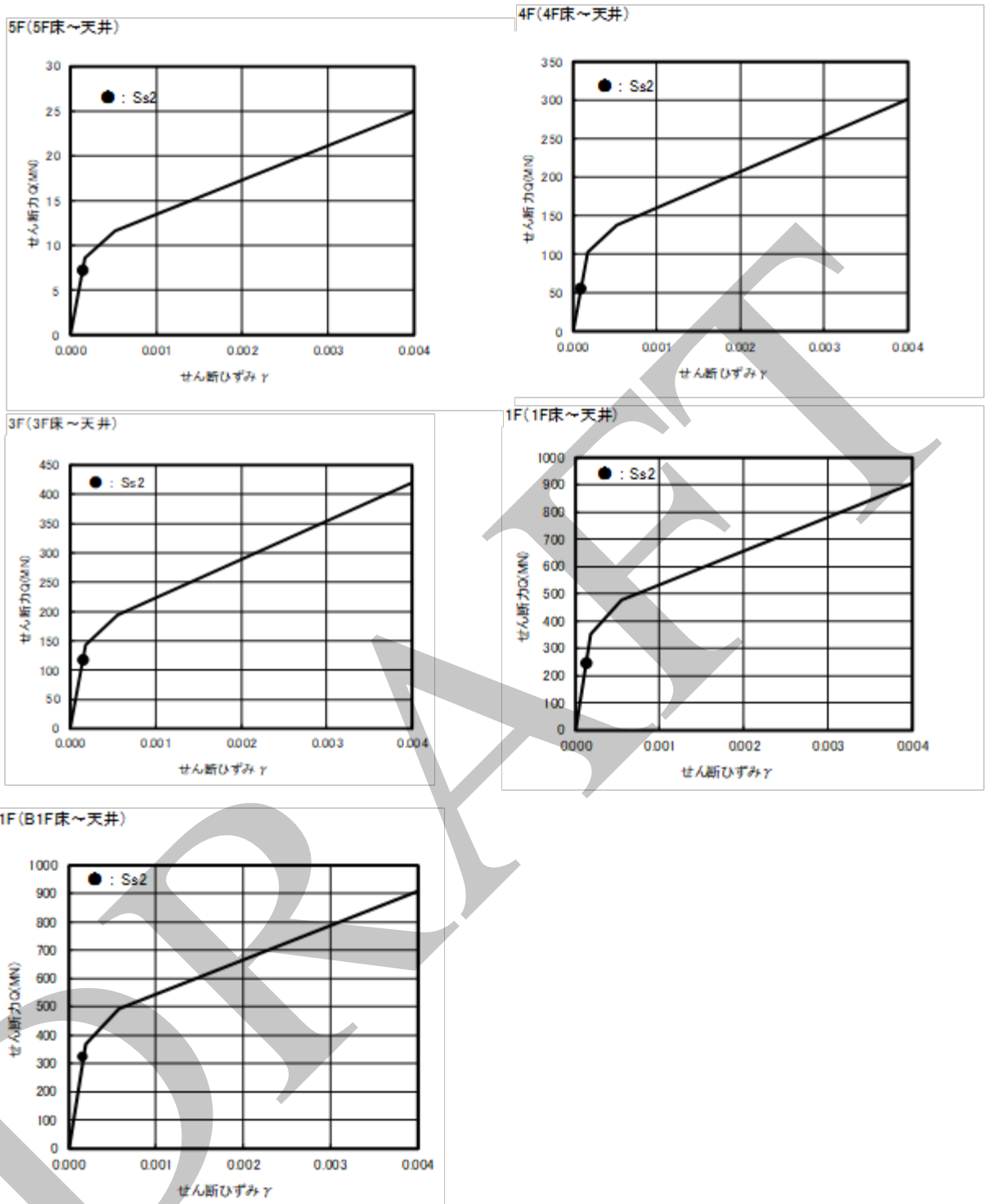


図 3.9 せん断のスケルトンカーブ上の最大応答値 (Ss-2、NS 方向)

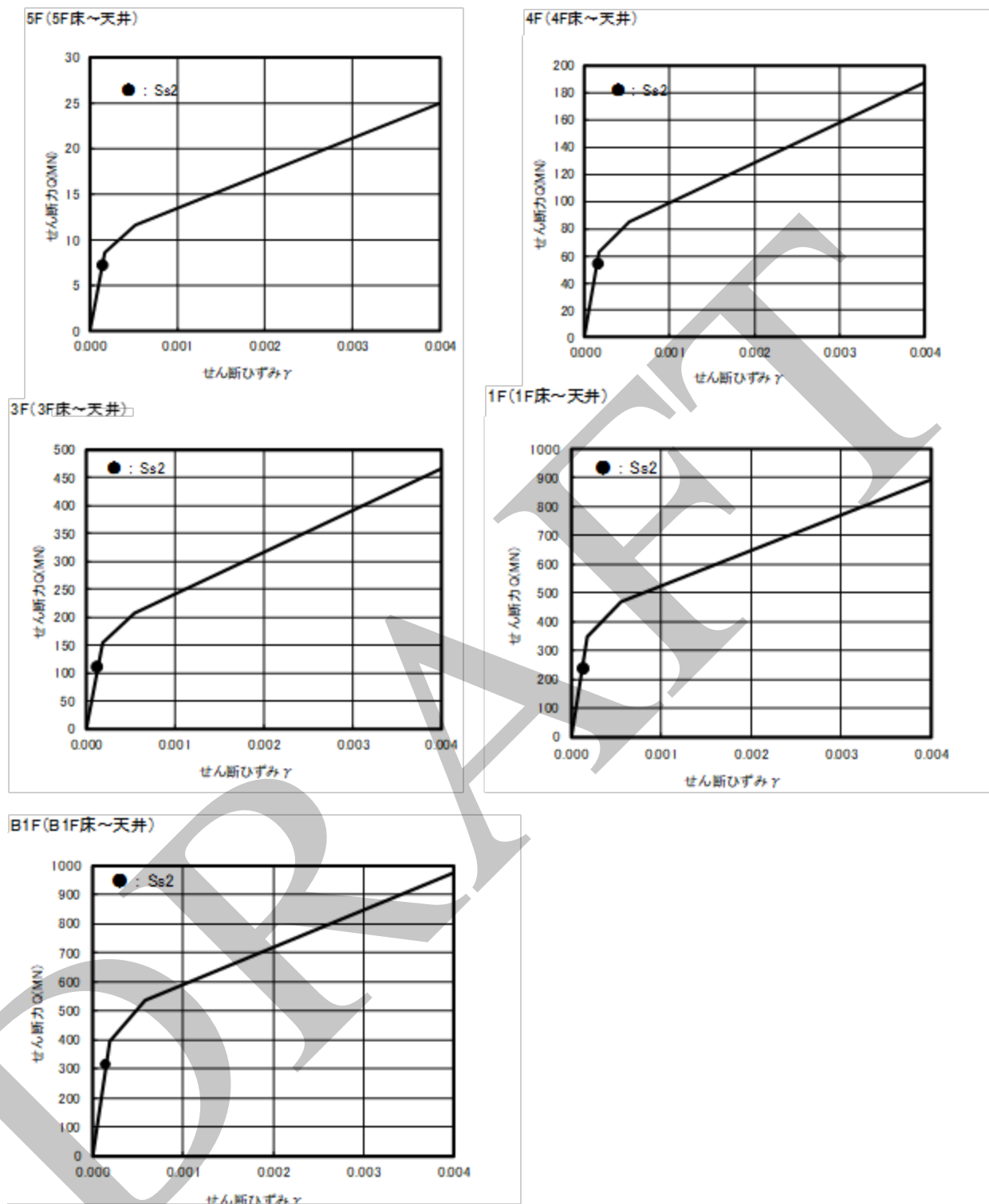


図 3.10 せん断のスケルトンカーブ上の最大応答値 (Ss-2、NS 方向)

### 3.4.2 建家基礎の検討

#### (1) 接地率

上述した SR モデルの地震応答解析結果から求めた基準地震動 Ss-2 による HAW 建家基礎の接地率は表 3.10 の通りとなり、「JEAC4601-2008 原子力発電所耐震設計技術規程」に示されている、基礎浮き上がりによる幾何学的非線形について SR モデル以外の評価手法を用いた特別な検討を考慮すべきとされる判断基準である 50%を下回った。このことから、現象を精密に取り扱う方法の一つであるジョイント要素を用いた 3次元 FEM による評価を行う。

表 3.10 基準地震動 Ss2 (NS 方向) による接地率

	解析結果	評価値
接地率	23%	50%以上

### 3.5 ジョイント要素を用いた3次元FEMによる耐震性評価

地震時において基礎に作用する転倒モーメントが大きい場合には基礎の浮上りが生じ、それに伴い鉛直動（誘発上下動）が誘発されることになる。前項の評価において用いたSRモデルではこれらの現象を精度よく評価することが難しいことから、より精密に現象を考慮できる地震応答解析法であるジョイント要素を用いた3次元FEMによる評価を実施する。

#### 3.5.1 評価手法

解析方法は、建家およびジョイント要素の非線形性を考慮するため時刻歴応答解析法とする。

#### 3.5.2 評価条件

##### (1) 入力地震動

本予備評価においては基準地震動の内、図 3.11 及び図 3.12 に示す S<sub>s</sub>-D を用いる。

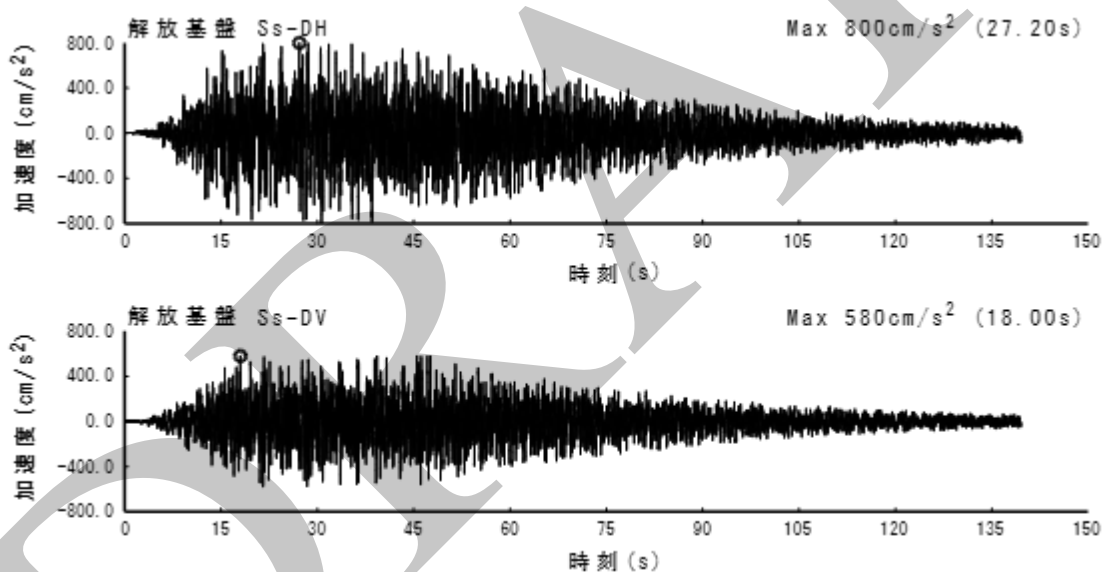


図 3.11 基準地震動 S<sub>s</sub>-D の加速度時刻歴波形

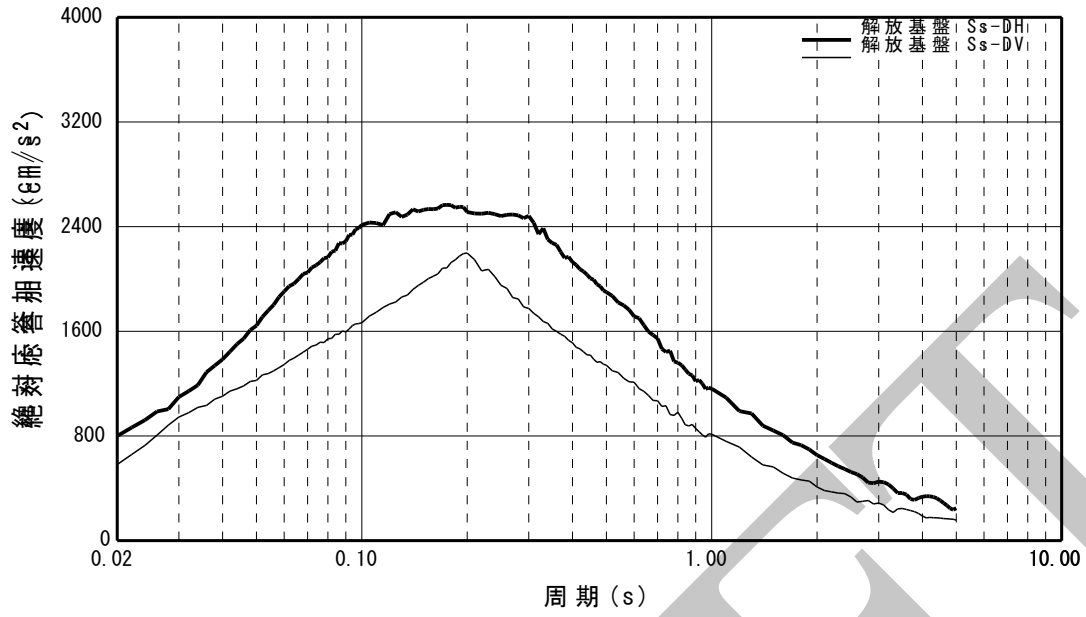


図 3.12 基準地震動 Ss-D の加速度応答スペクトル (h=5%)

### 3.5.3 解析モデル

注：自由地盤と地盤 (FEM 領域) の間は、粘性要素で連結する。

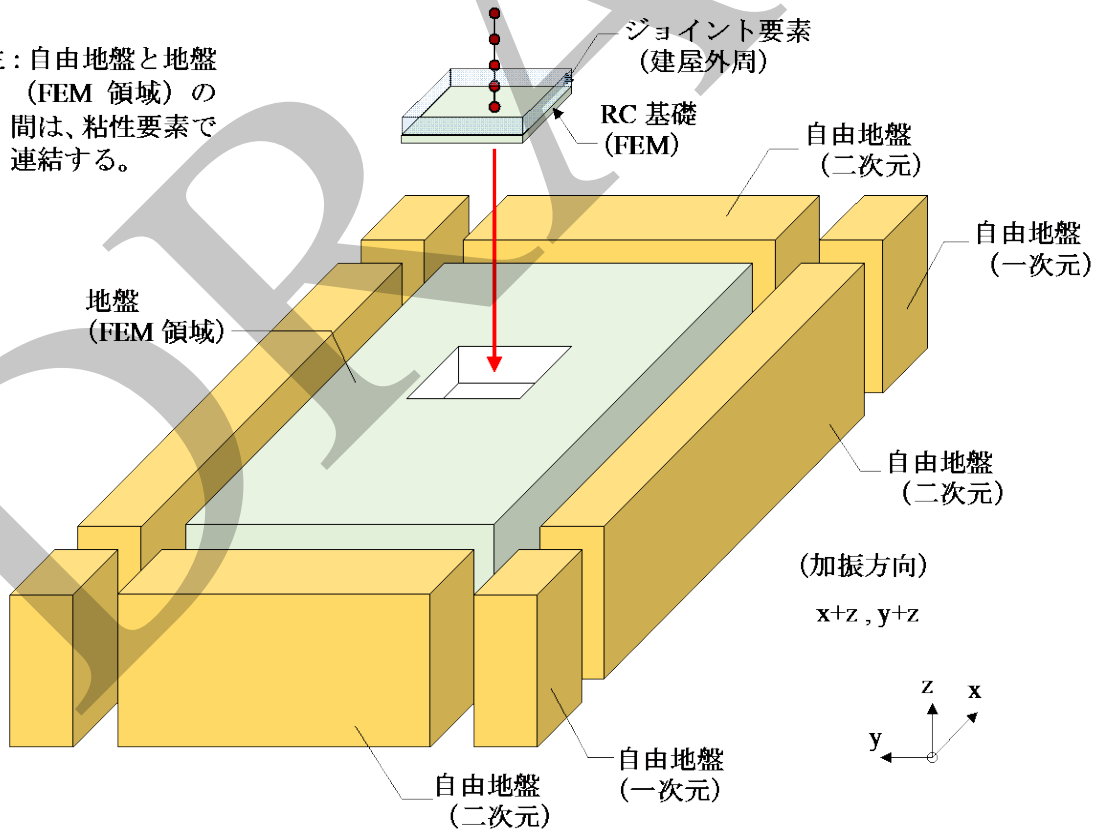


図 3.13 三次元 FEM 地盤モデル、建家と地盤

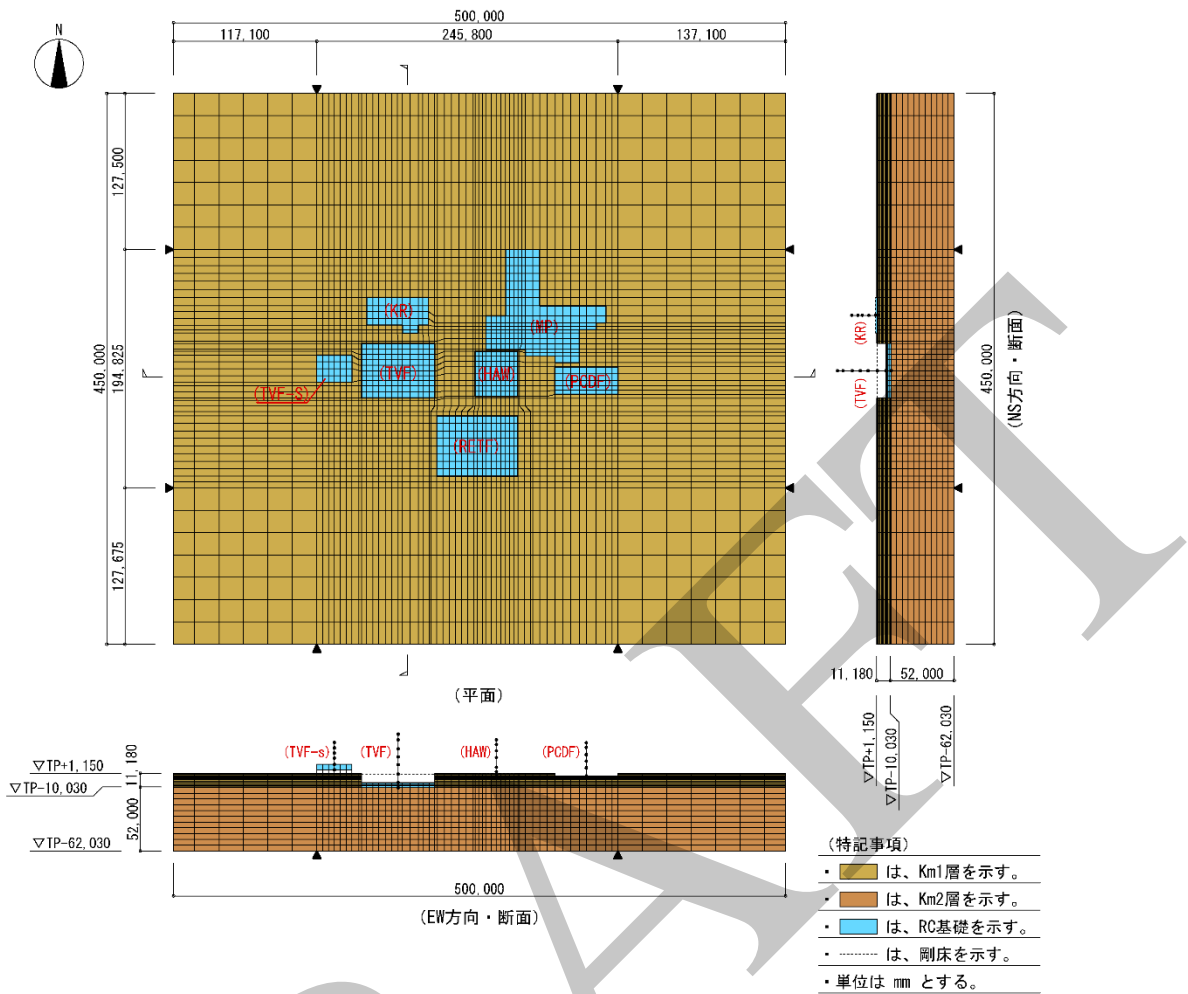


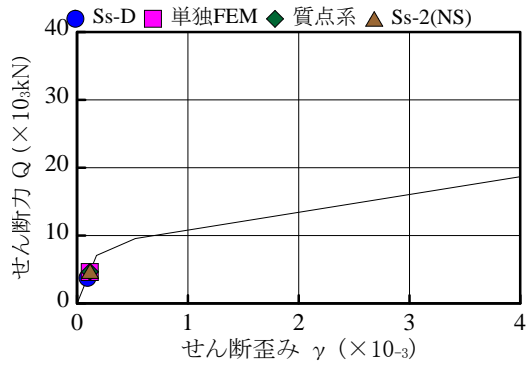
図 3.14 三次元 FEM 地盤モデル、隣接建家と断面

### 3.5.4 評価結果

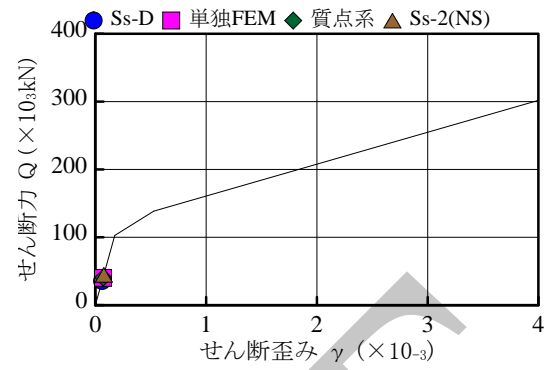
#### (1) 建家各層の耐震壁のせん断ひずみ度

地震動により建家各層に発生する最大せん断力とせん断ひずみ度の関係を図 3.15、図 3.16 に示す。これらの結果より、HAW 建屋の耐震壁に作用する最大応答せん断ひずみ度は許容限界を超えない見通しであることが確認された。

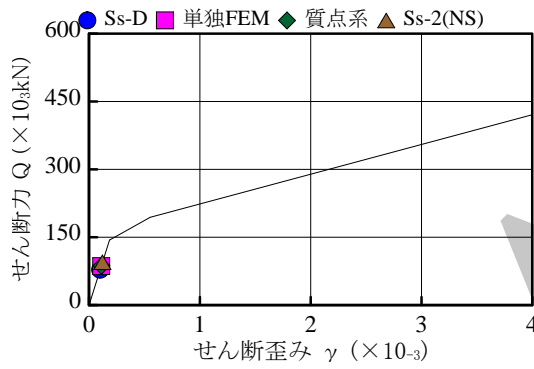




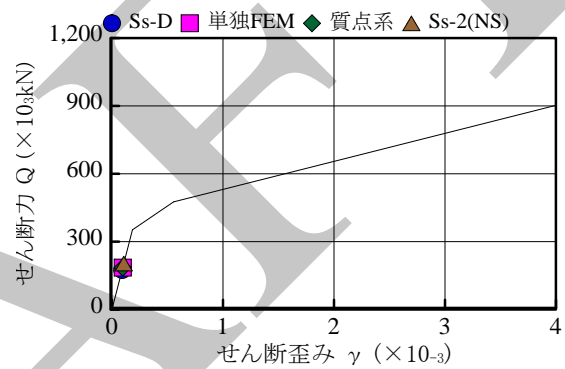
a) 5F



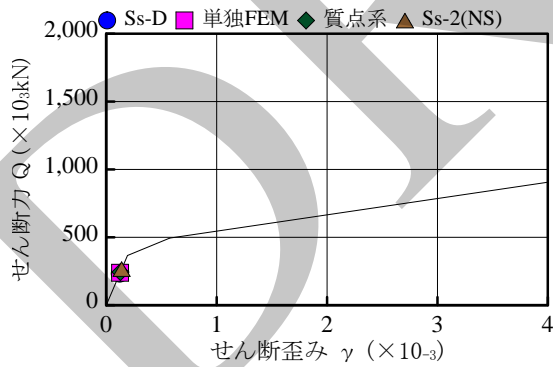
b) 4F



c) 3F

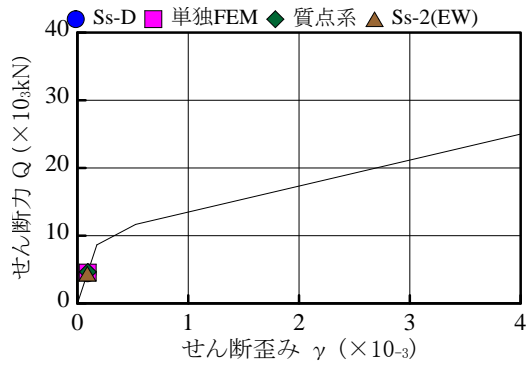


d) 1F

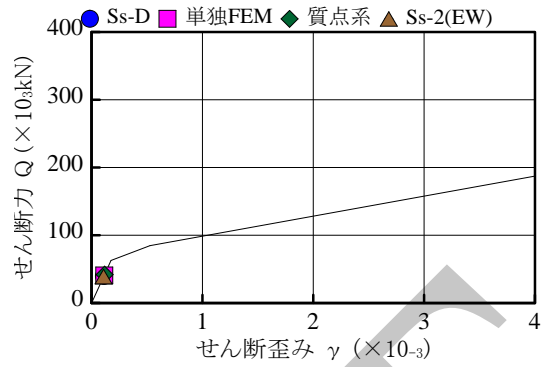


e) B1F

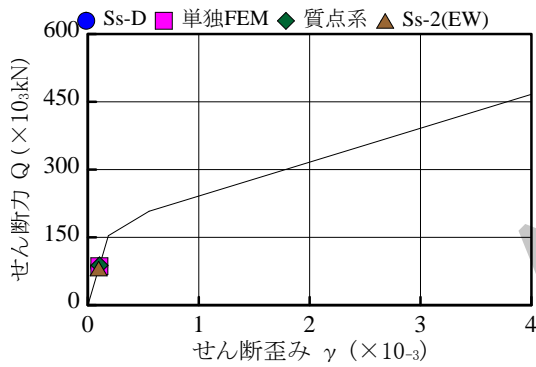
図 3.15 せん断ひずみ度のスケルトンカーブ上の最大応答値 (SsD、NS 方向)



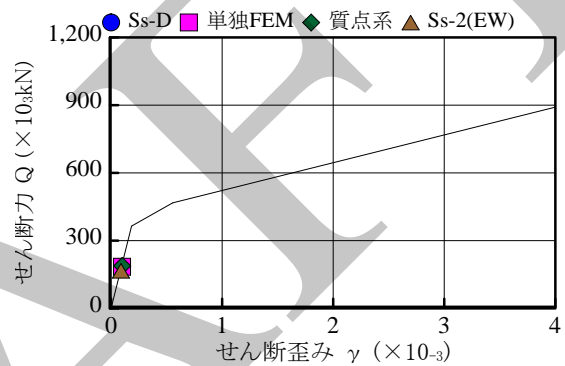
a) 5F



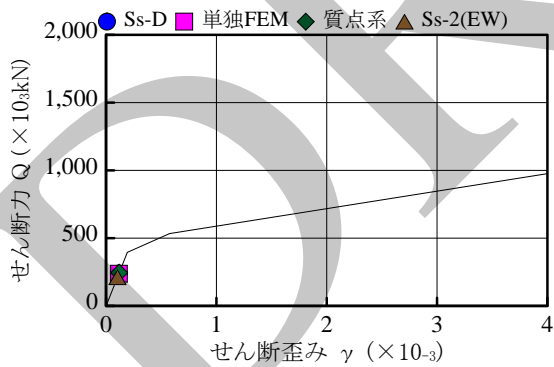
b) 4F



c) 3F



d) 1F



e) B1F

図 3.16 せん断ひずみ度のスケルトンカーブ上の最大応答値 (SsD、EW 方向)

## (2) 建家基礎の検討

ジョイント要素を用いた 3 次元 FEM の結果から求めた基準地震動 Ss-D による HAW 建家基礎の接地率及び接地圧は表 3.11 の通りとなった。この結果より、基準地震動によって生じる建家基礎の最大接地圧は支持地盤の極限支持力度 ( $3260\text{kN/m}^2$ ) を超えないこと見通しであることが確認できた。

表 3.11 基準地震動 Ss-D による接地率、接地圧

方向	接地率 (%)	接地圧 ( $\text{kN/m}^2$ )
NS	71.8	1,700
EW	67.1	2,040

#### 4. 機器評価について

事故対処設備機器・配管系の基準地震動に対する構造強度の健全性の確認を行うために、床応答結果が3次元FEMの結果よりも保守的となるSRモデルの建家地震応答解析の結果を用いて評価を実施する。

##### 4.1 評価対象

事故対処として使用する設備のうち、施設内に設置されている以下の設備を対象とする。

- ・高放射性廃液貯槽(272V31～V35)
- ・中間貯槽(272V37, V38)
- ・1次冷却水システムの配管(B1F～3F)
- ・緊急放出系の配管(B1F～RF)
- ・水封槽(272V41, V42)
- ・緊急放出系フィルタユニット(272F480)

##### 4.2 評価手法

構造強度の評価は、「原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2015」等に基づき、以下に示す評価手法を用いて最大発生応力を算出し、評価基準値と比較することにより行った。

評価手法は、機器については、既往評価結果を用いた応答倍率法により評価を行い、配管については、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2015」に示される定型化された計算式等により力学平衡評価を行った。

###### 4.2.1 応答倍率法

評価用地震力（基準地震動  $S_s$ ）について、既往評価の地震力に対する比（ $\beta$ ）を求め、それを既往評価結果に乗じることで、それぞれの評価用地震力に対する発生応力を算定し評価基準値と照査した。

$S_s$  による地震力は、剛構造設備に対しては床応答最大加速度を2割増しした地震力（静的な震度）を、剛構造でない設備に対しては床応答スペクトルを用いた。

既往評価の地震力に対する比（ $\beta$ ）の算定方法を下記に示す。評価用地震力に静的な震度を用いる場合は算定方法1を、評価用地震力に床応答スペクトルを用いる場合は算定方法2を適用した。

なお、剛構造とは、評価対象の1次固有周期が0.05s以下（1次固有振動数が20Hz以上）のものとした。

###### ① $\beta$ の算定方法1（評価用地震力に静的な震度を用いる場合）

$$\beta = \max \left( \frac{C_{H1}}{C_{H0}}, \frac{1 + C_{V1}}{1 + C_{V0}} \right)$$

- $C_{H1}$  : 評価用地震力の水平震度 ( $S_s$  の床応答最大加速度  $\times 1.2$ 、静的地震力)
- $C_{V1}$  : 評価用地震力の鉛直震度 ( $S_s$  の床応答最大加速度  $\times 1.2$ 、静的地震力)
- $C_{H0}$  : 既往評価における水平震度
- $C_{V0}$  : 既往評価における鉛直震度

②  $\beta$  の算定方法 2 (評価用地震力に床応答スペクトルを用いる場合)

評価用地震力及び既往評価の床応答スペクトルにおいて、評価対象の固有周期でのスペクトル値 (応答加速度値) の比のうち最も大きい値を  $\beta$  とする。評価対象が複数次の固有周期をもつ場合、1 次の固有周期から剛 (0.05 s) までの固有周期を考慮し算定する (図 4.1 参照)。

$$\beta = \max \left( \max \left( \frac{A_{H1-n}}{A_{H0-n}} \right), \max \left( \frac{1 + A_{V1-n}}{1 + A_{V0-n}} \right) \right)$$

- $A_{H1-n}$  : 評価用地震力の床応答スペクトル (水平) の評価対象固有周期における読み値
- $A_{V1-n}$  : 評価用地震力の床応答スペクトル (鉛直) の評価対象固有周期における読み値
- $A_{H0-n}$  : 既往評価の床応答スペクトル (水平) の評価対象固有周期における読み値
- $A_{V0-n}$  : 既往評価の床応答スペクトル (鉛直) の評価対象固有周期における読み値、既往評価における鉛直震度

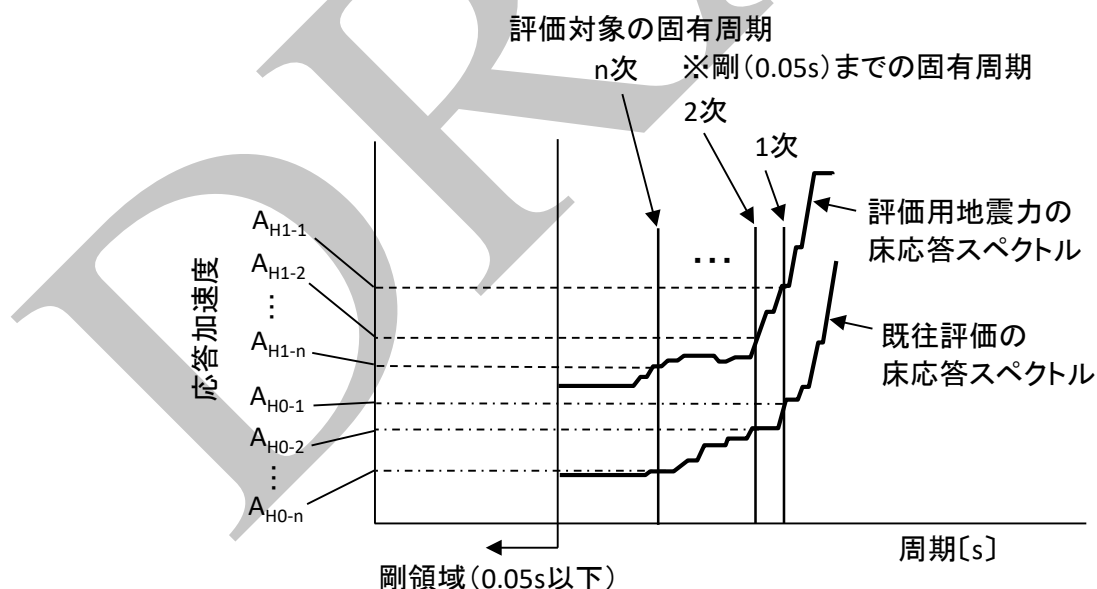


図 4.1 床応答スペクトルの評価対象固有周期における読み値 (水平の例)

- (2) JEAG4601-2015 に示される定型化された計算式等による力学平衡評価  
 JEAG4601-2015 に示される定型化された計算式等による力学平衡評価について

は、算出した最大発生応力と評価基準値を照査することにより行った。

モデル化に当たって使用する物性値等については、機器・配管系の設計条件、仕様等を考慮し設定した。

#### 4.3 評価条件

##### 4.3.1 評価用地震力

評価用地震力は、基準地震動  $S_s$  に対する SR モデルの建家地震応答解析から得られた各階の床応答加速度等を用いた。

評価対象設備が剛構造の場合（固有振動数が 20Hz 以上）は、設備の設置階における床応答最大加速度をもとに算定した静的震度（1.2ZPA）を適用し、剛構造でない場合（固有振動数が 20Hz 未満）は、設備の設置階における床応答スペクトル（周期軸方向に 10% 拡幅したもの）を適用した。

##### 4.3.2 減衰定数

減衰定数は、「原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2015」に規定された値を用いた。

##### 4.3.3 構造強度の評価基準値

構造強度の評価基準値は、原則、設備の機能に影響を及ぼすことがないものとし、JEAC4601-2015 及び「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2012」を準拠するとともに、その他の規格基準類で規定される値、実験値等で妥当性が確認されているものを用いるものとした。基準地震動  $S_s$  による評価にあたっては供用状態  $D_s$  を適用した。

#### 4.4 構造強度の評価結果

構造強度の評価結果を表 4.1 に示す。

設備の構造強度評価としては、保守的となる建家 SR モデルにより算出した床応答加速度等を用いた場合でも評価基準値を満足する。上述した応答倍率法は FEM 解析などの精算法よりも概ね保守側の計算結果となることを考慮すれば、これらの結果には十分な裕度があるといえる。

表 4.1 構造強度の評価結果

評価対象 設備	評価部位	応力分類	1次 固有 振動 数 (Hz)	評価 フロ ア	基準地震動 S <sub>s</sub> の評価結果			評価手法
					発生応力 [MPa]	評価基準 値 [MPa]	応力比 (発生応力 /評価基準 値)	
高放射性廃液 貯槽(272V31 ~V35)	胴(冷却ジ ヤケットを 含む)	一次一般 膜	14.1	1F	150	278	0.54	応答倍率 法
	胴(冷却ジ ヤケットを 含む)	一次			297	417	0.72	
	ラグ	一次			151	210	0.72	
	据付ボルト	引張			44	246	0.18	
	据付ボルト	せん断			197	244	0.81	
中間貯槽 (272V37, V38)	胴	一次一般 膜	30.3	1F	149	269	0.56	応答倍率 法
	胴	一次			191	404	0.48	
	据付ボルト	せん断			137	142	0.97	
1次冷却水系 統の配管	本体	一次	剛	B1F~ 3F	65	170	0.39	JEAG4601- 2015 の計 算式
緊急放出系の 配管	本体	一次	剛	B1F~ RF	43	146	0.30	JEAG4601- 2015 の計 算式
水封槽 (272V41, V42)	胴	一次一般 膜	250	4F	17	263	0.07	応答倍率 法
	据付ボルト	引張			94	237	0.40	
	据付ボルト	せん断			18	137	0.14	
緊急放出系フ ィルタユニッ ト(272F480)	据付ボルト	引張	剛	4F	47	233	0.21	応答倍率 法
	据付ボルト	せん断			18	134	0.14	

## 5. まとめ

基準地震動  $S_s$  に対する高放射性廃液貯蔵場 (HAW) 建家の地震時応答について、建屋基礎の浮上り現象を精密に扱えるジョイント要素を用いた 3 次元 FEM を用いた評価の結果、建家各層の耐震壁は建物・構築物の終局耐力に対し妥当な安全裕度を有しており、また建家を支持する地盤も十分な支持性能を持つ見通しが得られた。

建屋内部に設置されている事故対処設備について、基準地震動  $S_s$  によって当該機器・配管系に生じる最大応力が、構造強度上の許容限界を超えない見通しであることが確認出来た。

以上のことから、基準地震動  $S_s$  に対しても高放射性廃液貯蔵場 (HAW) の事故対処設備は健全性を維持できる見通しである。