

柏崎刈羽原子力発電所5号機

新潟県中越沖地震後の設備健全性に係る
点検・評価状況について
(原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換器建屋、排気筒)

平成21年10月13日



東京電力

本日のご説明項目

■建物・構築物の点検・評価結果について

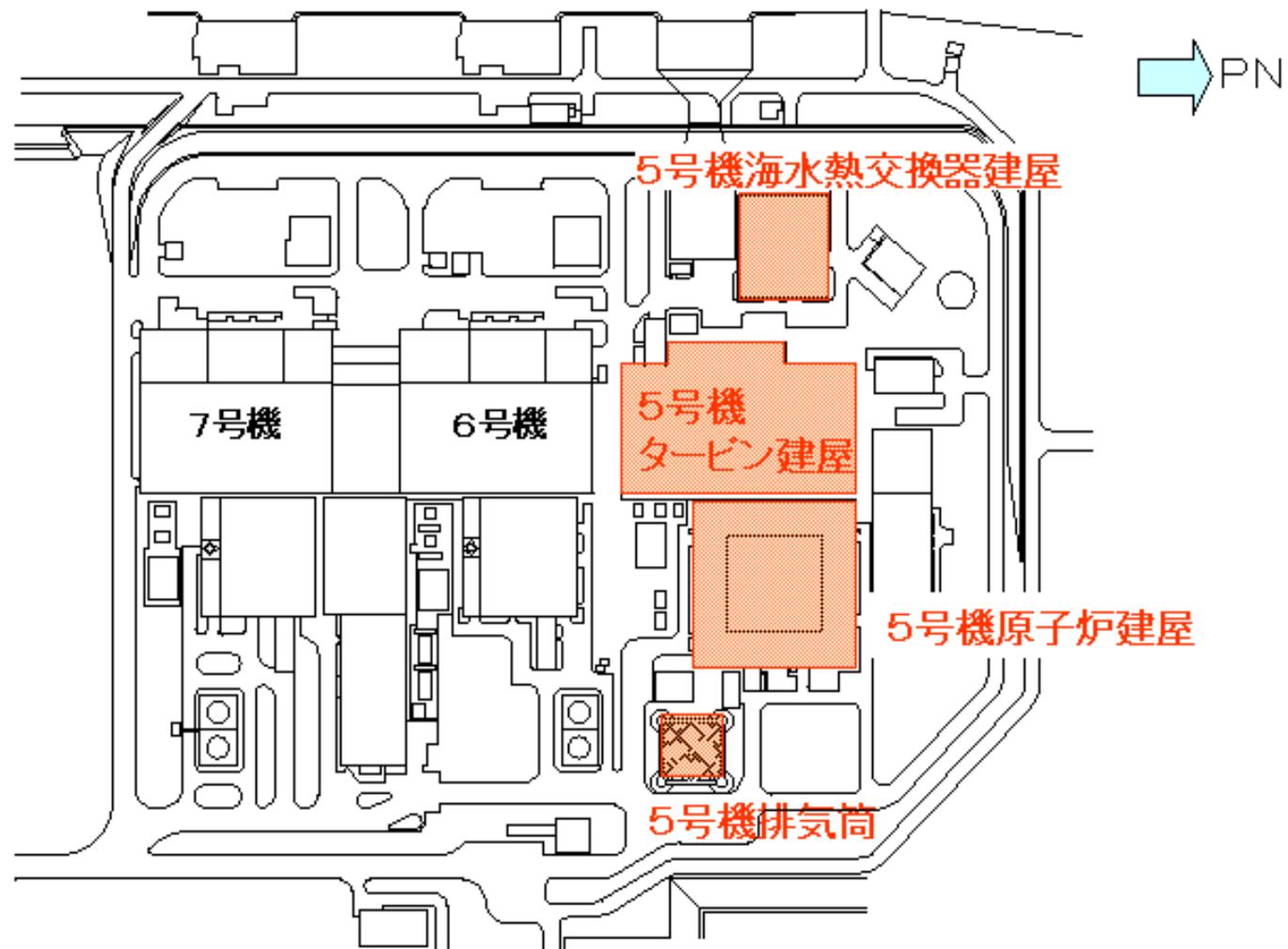
- 原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換器建屋、排気筒の点検・評価結果についてご報告。

1 . 構内配置図

1. 構内配置図 (全体)



1 . 構内配置図 (5 ~ 7号機周辺)



2 . 対象設備の概要

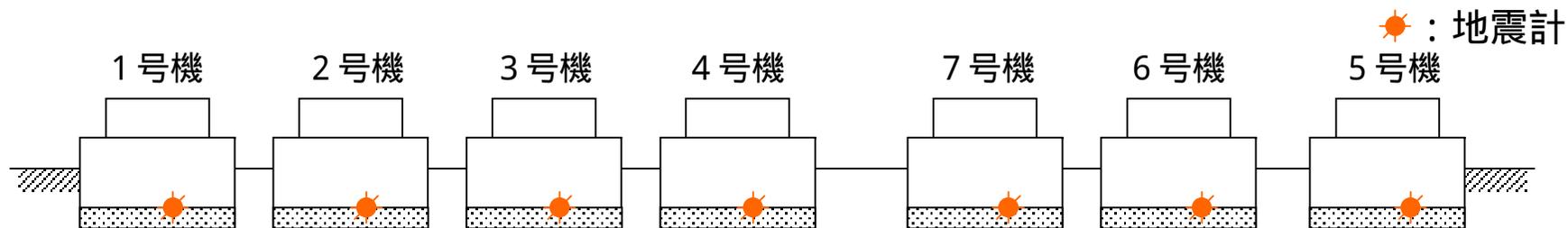
2 . 対象設備の概要（点検・評価の対象）

- 建物・構築物の点検・評価対象としては、
 - 電気事業法に基づく事業用工作物の工事計画書に記載のあるすべての建物・構築物
 - 耐震上重要な機器の間接支持構造物に該当する建物・構築物
 - 安全上の重要度分類クラス1に該当する建物・構築物に該当するものを選定している。

- 5号機の点検・評価の対象は以下のとおり。

- 原子炉建屋（ 、 、 に該当）
 - タービン建屋（ に該当）
 - 海水熱交換器建屋（ に該当）
 - 排気筒（ 、 に該当）
 - 原子炉補機冷却系配管ダクト（ に該当）
 - 非常用ガス処理系配管ダクト（ に該当）
 - 非常用取水路（ に該当）
- 本資料でご説明する
建物・構築物
- 構造W41 - 4 - 2でご
説明する建物・構築物

2 . 対象設備の概要（基礎版上の地震観測記録比較）



中越沖地震時に観測された最大加速度（単位：cm/s²） 設計時（ 1 ）の加速度応答値（単位：cm/s²）

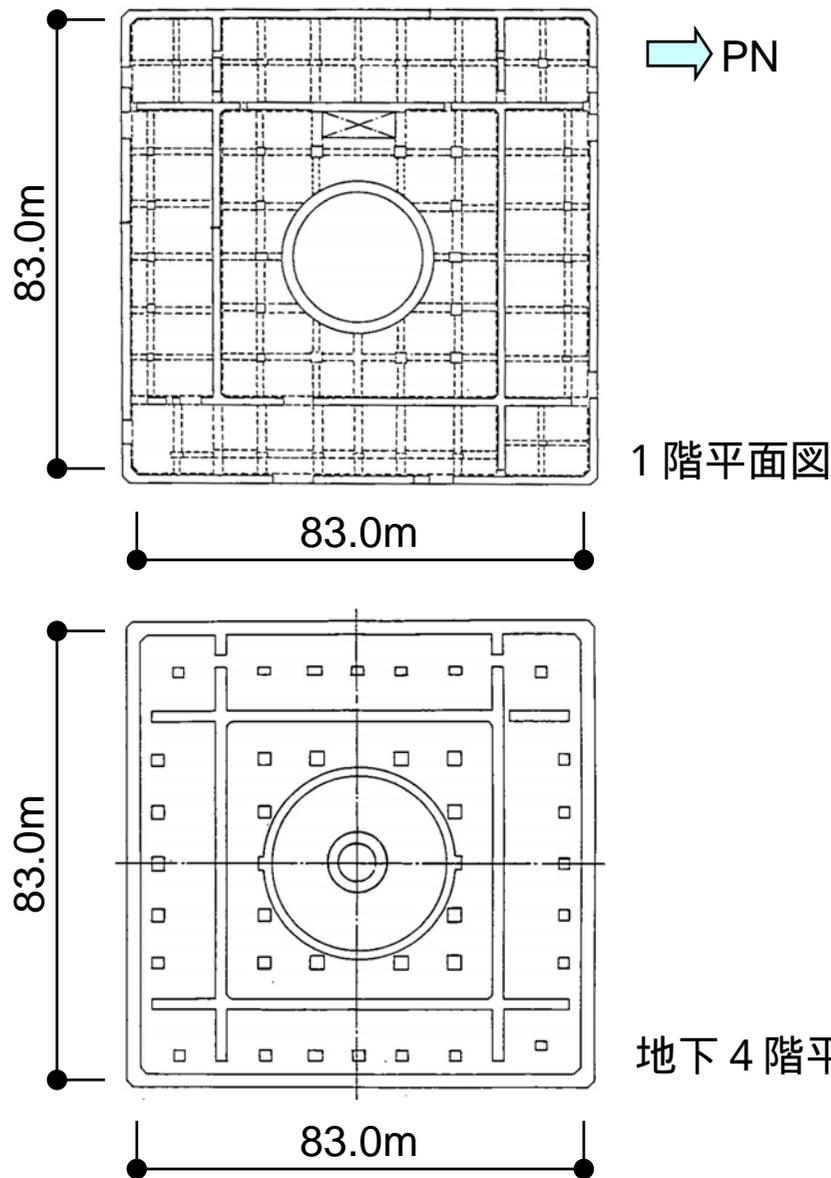
観測値		南北方向	東西方向	上下方向
1号機	最下階（B5F）	311	680	408
2号機	最下階（B5F）	304	606	282
3号機	最下階（B5F）	308	384	311
4号機	最下階（B5F）	310	492	337
5号機	最下階（B4F）	277	442	205
6号機	最下階（B3F）	271	322	488
7号機	最下階（B3F）	267	356	355

観測値		南北方向	東西方向	上下方向 ₂
1号機	最下階（B5F）	274	273	(235)
2号機	最下階（B5F）	167	167	(235)
3号機	最下階（B5F）	192	193	(235)
4号機	最下階（B5F）	193	194	(235)
5号機	最下階（B4F）	249	254	(235)
6号機	最下階（B3F）	263	263	(235)
7号機	最下階（B3F）	263	263	(235)

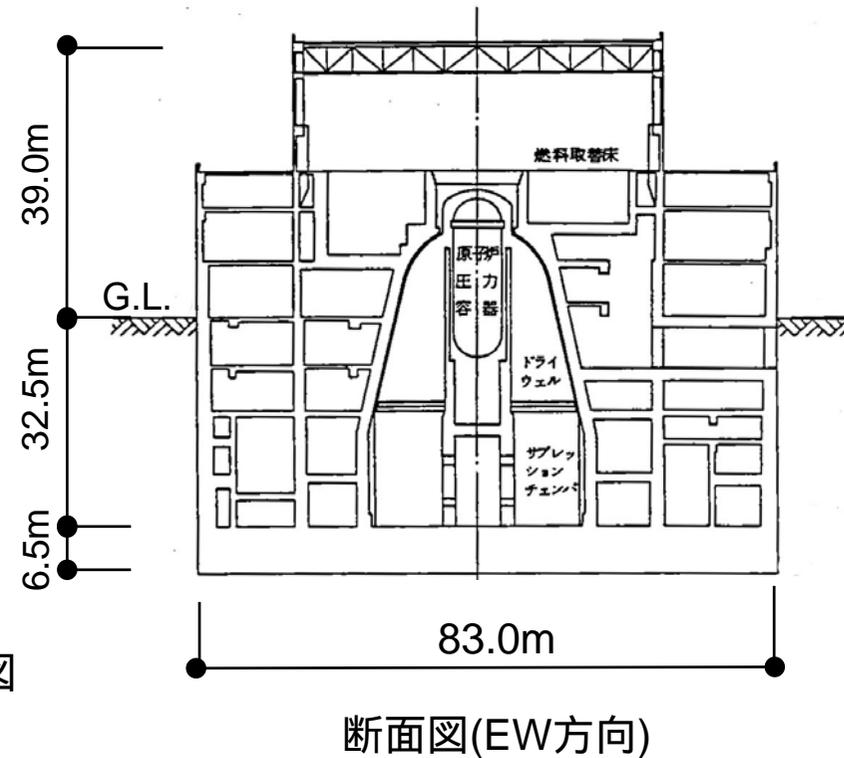
【スクラム設定値】 水平方向120cm/s²，上下方向100cm/s²

- 1 設計時の基準地震動S2（1号機についてはEL CENTRO等）による応答値
- 2 上下方向については、（ ）内の値を静的設計で用いている

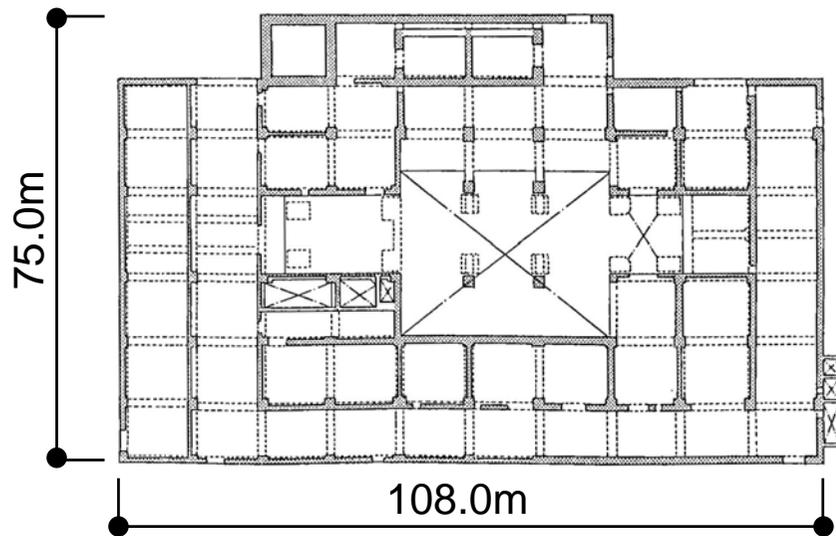
2. 対象設備の概要 (5号機原子炉建屋)



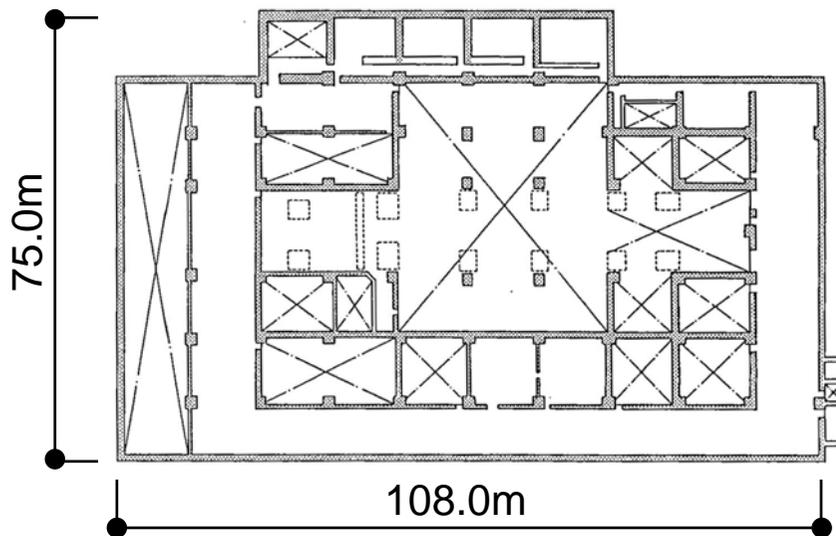
階数 : 地上4階・地下4階
延床面積 : 47,574m²
建屋容積 : 443,093m³
構造 : RC+SRC+S



2. 対象設備の概要(5号機タービン建屋)



1階平面図



地下2階平面図

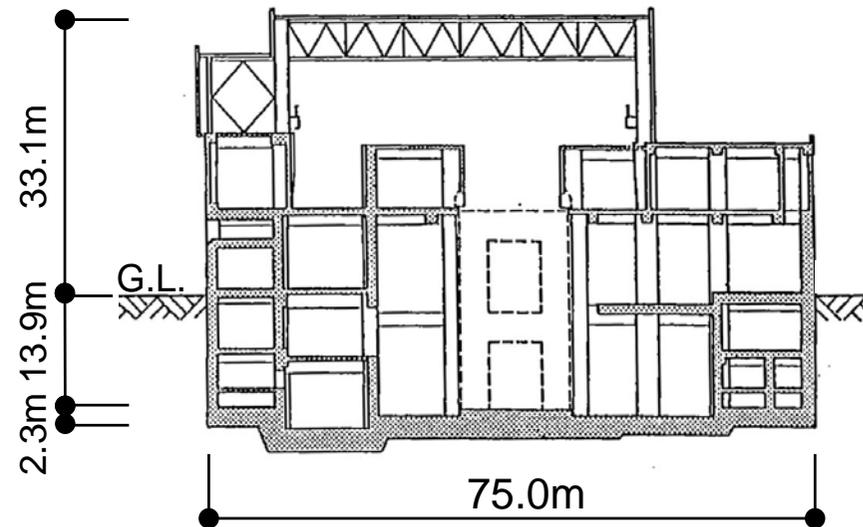


階数 : 地上3階・地下2階

延床面積 : 31,700m²

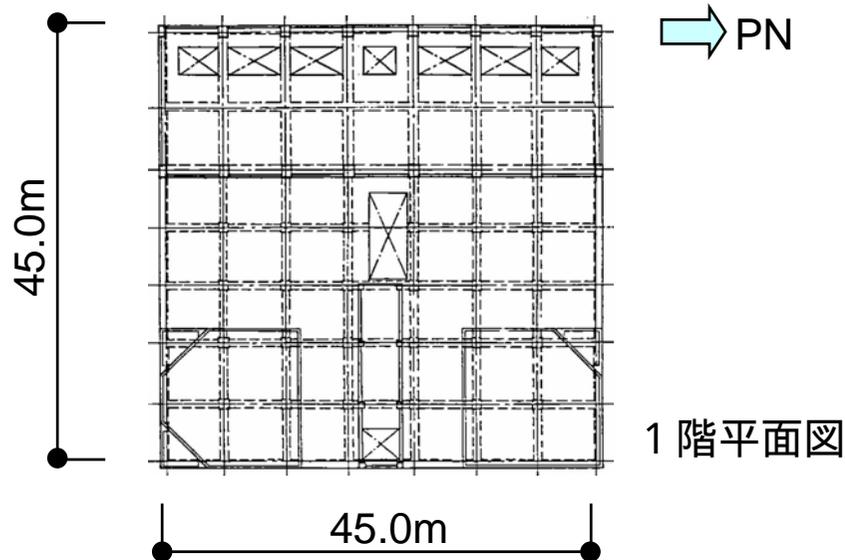
建屋容積 : 399,089m³

構造 : RC+SRC+S

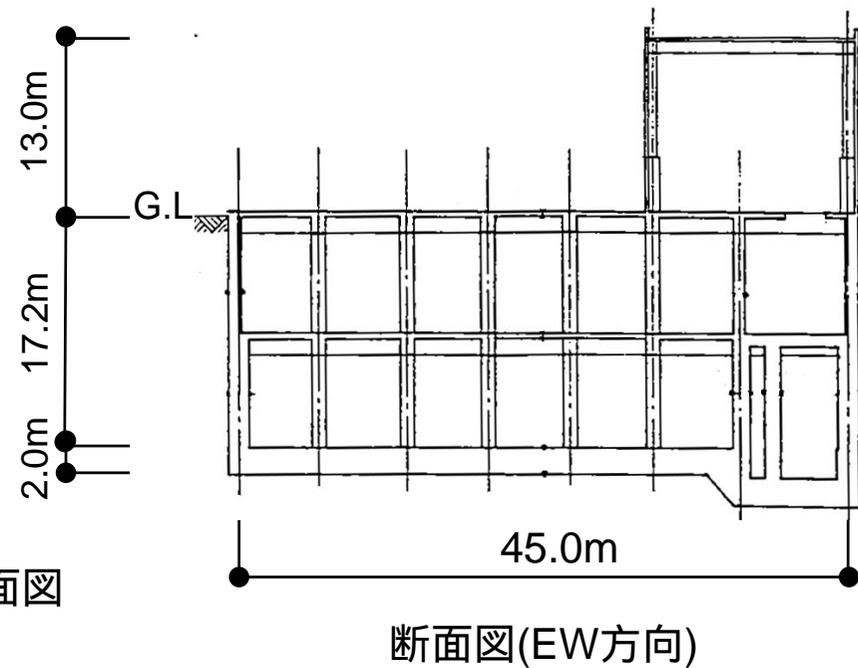
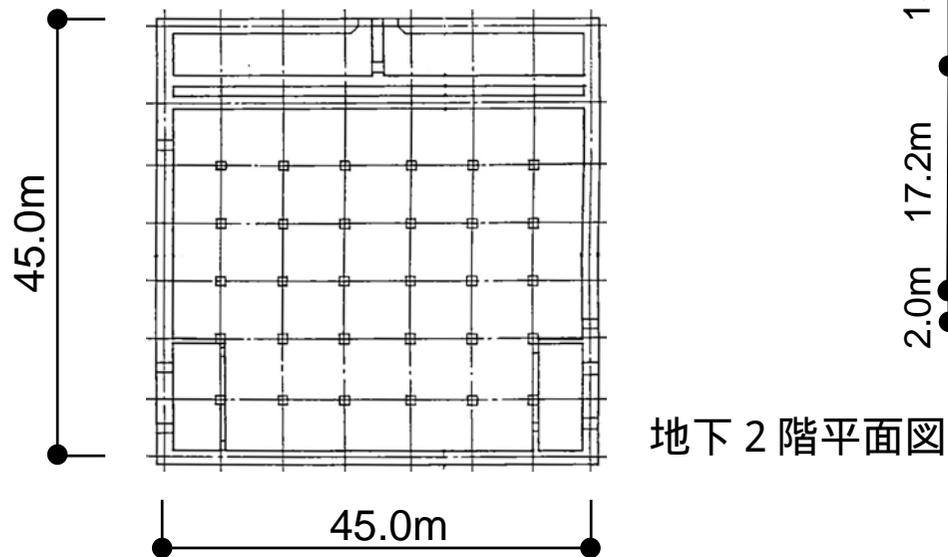


断面図(EW方向)

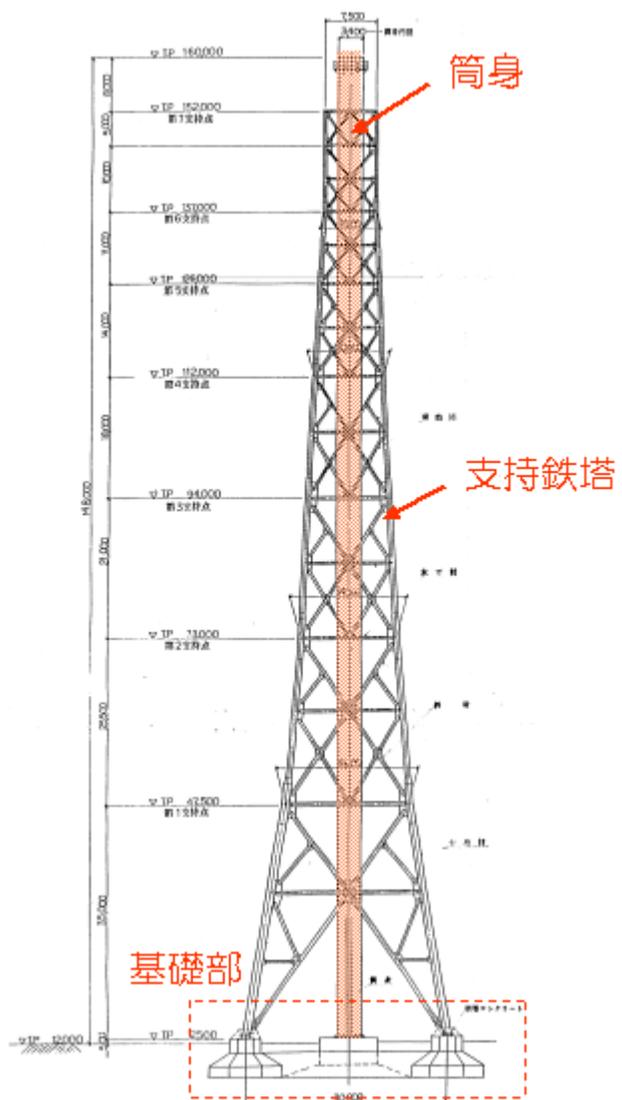
2 . 対象設備の概要(5号機海水熱交換器建屋)



階数 : 地上1階・地下2階
延床面積 : 5,109m²
建屋容積 : 52,635m³
構造 : RC+S

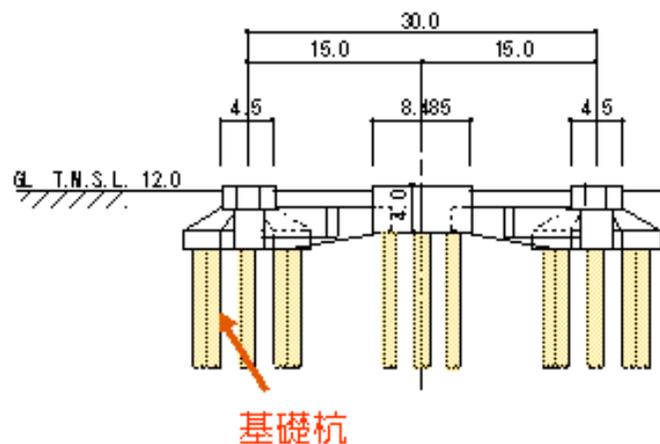


2 . 対象設備の概要 (5号機排気筒)



立面図

- 構造形式 : 四角鉄塔支持型鋼管構造
- 地上高さ : 148 m
- 筒身内径 : 3.4 m
- 杭本数 : 53本
- 杭長 : 約25 m ~ 27 m
- 杭径 : 1.2 m
- 施工種別 : 場所打ちコンクリート杭



基礎部詳細図

2 . 本日のご報告内容の概要（1）

■点検結果

- 原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換器建屋については、耐震壁のひび割れについて調査を実施し、確認された地震により発生したことが否定できないひび割れについては、すべて評価基準値（1.0mm）を下回っていることを確認した。
- 排気筒の鉄骨部、屋根トラスについては、部材の変形、座屈・破断、溶接部のきれつおよびボルト接合部のボルト破断・緩みについて評価を実施した。排気筒のボルト接合部の一部で緩みが確認されたが、排気筒の耐震性能に与える影響は軽微であり、今後適切な補修を実施する予定であることから、健全性に与える影響は無いと評価した。それ以外の部位では異常は確認されなかった。
- 排気筒の杭構造については基礎の傾斜・沈下量の測量、杭頭部の目視点検を実施し、異常の無いことを確認した。

2 . 本日のご報告内容の概要 (2)

■耐震健全性評価結果

- 原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換器建屋については、地震応答解析を実施し、発生応力が設計配筋量のみで負担可能かについて確認した。
 - ◆原子炉建屋は評価基準値を満足するとともに裕度を有していることを確認した。
 - ◆タービン建屋(機能維持範囲)、海水熱交換器建屋では、発生応力を、コンクリートの負担分を考慮せずに、設計配筋量のみで負担可能なせん断応力度と比較した場合は「裕度が少ない」もしくは「上回る」部位があった。ただし、コンクリートの負担分を考慮し、せん断スケルトン曲線上の応答値としてみた場合は、第一折れ点を下回る応答であり、弾性範囲にあると判断されることから健全であるものと評価した。
- 原子炉建屋屋根トラス、排気筒については、3次元モデルによる地震応答解析を実施し、評価基準を下回っているかについて確認した。
 - ◆原子炉建屋屋根トラス、排気筒共に評価基準値を下回っていることを確認した。

■総合評価結果

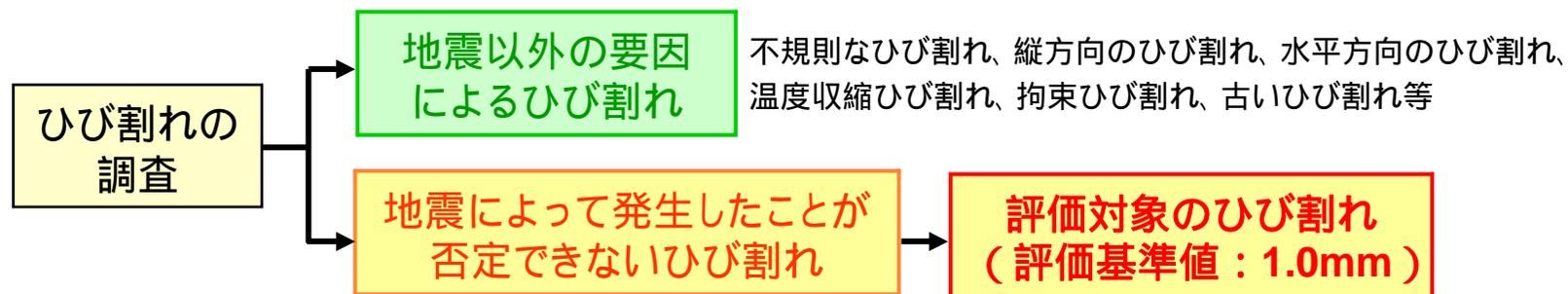
- 点検・地震応答解析の両面から評価を行った結果、原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換器建屋、排気筒の健全性が確保されているものと評価した。

3 . 点検

3.1 鉄筋コンクリート構造（点検方法）

■ 鉄筋コンクリート構造に対しては、以下の点検方針を設定。

- ・ 目視点検を主体とした点検を実施。
- ・ 点検項目はコンクリート部材の調査（ひび割れ、剥離・剥落の有無）。
- ・ ひび割れに関しては、下記のフローに基づき、今回の地震によって発生したことが否定できないひび割れを抽出し、そのひび割れの幅により、要求性能に与える影響の有無を確認する。
- ・ ひび割れ幅の評価基準値 は **1.0mm** とする。
日本建築防災協会「震災建築物の被災度判定基準および復旧技術指針」を参考に設定した値。
- ・ 点検対象としては、原子炉建屋・タービン建屋・海水熱交換器建屋の耐震壁が該当。



3.1 鉄筋コンクリート構造（点検結果）

■ 5号機原子炉建屋耐震壁ひび割れ調査結果（1）

（今回の地震によって発生したことが否定できないひび割れ）

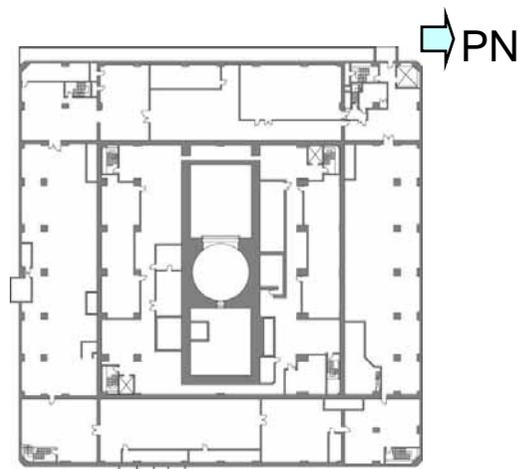
階	ひび割れ箇所数 (W:ひび割れ幅(mm))					最大幅
	W < 0.3	0.3 ≤ W < 1.0	1.0 ≤ W < 2.0	2.0 ≤ W < 3.0	合計	
B4F	1	0	0	0	1	0.1mm
B3F	2	0	0	0	2	0.2mm
B2F	1	1	0	0	2	0.3mm
B1F	3	1	0	0	4	0.3mm
1F	19	1	0	0	20	0.3mm
2F	3	0	0	0	3	0.2mm
3F	3	3	0	0	6	0.6mm
4F	0	0	0	0	0	-
合計	32	6	0	0	38	

点検により確認された、今回の地震によって発生したことが否定できないひび割れは最大でも幅0.6mmであり、すべて評価基準値(1.0mm)未満であることを確認した。

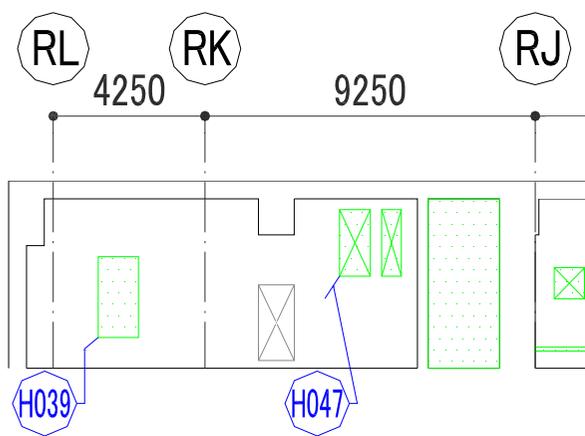
3.1 鉄筋コンクリート構造（点検結果）

■ 5号機原子炉建屋耐震壁ひび割れ調査結果（2） （ひび割れの代表例）

階	3階
通り	R9
番号	H047
壁厚(mm)	700
配筋	2-D25@200
幅(mm)	0.6
長さ(m)	0.5



3階平面図



展開図



3.1 鉄筋コンクリート構造（点検結果）

■ 5号機タービン建屋耐震壁ひび割れ調査結果（1）

（今回の地震によって発生したことが否定できないひび割れ）

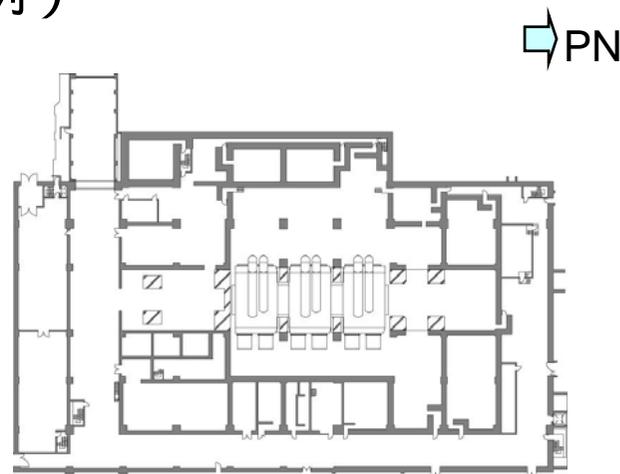
階	ひび割れ箇所数 (W:ひび割れ幅(mm))					最大幅
	W < 0.3	0.3 < W < 1.0	1.0 < W	合計		
B2F	5	3	0	8	0.4mm	
B1F	11	1	0	12	0.3mm	
1F	17	5	0	22	0.4mm	
2F	10	3	0	13	0.4mm	
3F	11	3	0	14	0.4mm	
合計	54	15	0	69		

点検により確認された、今回の地震によって発生したことが否定できないひび割れは、最大でも幅0.4mmであり、すべて評価基準値(1.0mm)未満であることを確認した。

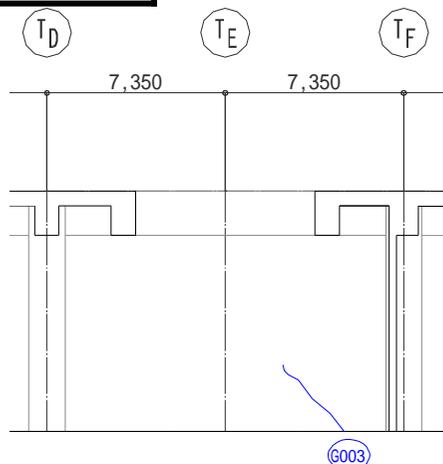
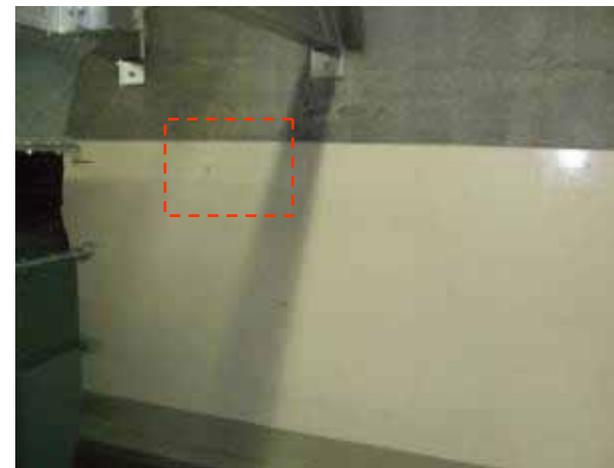
3.1 鉄筋コンクリート構造（点検結果）

■ 5号機タービン建屋耐震壁ひび割れ調査結果（2） （ひび割れの代表例）

階	1階
通り	T2
番号	G003
壁厚(mm)	600
配筋	D16・D19交互 @250
幅(mm)	0.4
長さ(m)	3.3



1階平面図



展開図



3.1 鉄筋コンクリート構造（点検結果）

■ 5号機海水熱交換器建屋耐震壁ひび割れ調査結果（1）

（今回の地震によって発生したことが否定できないひび割れ）

階	ひび割れ箇所数 (W:ひび割れ幅(mm))					最大幅
	W < 0.3	0.3 ≤ W < 1.0	1.0 ≤ W < 2.0	2.0 ≤ W < 3.0	合計	
B2F	1	0	0	0	1	0.2mm
B1F	1	1	0	0	2	0.3mm
合計	2	1	0	0	3	

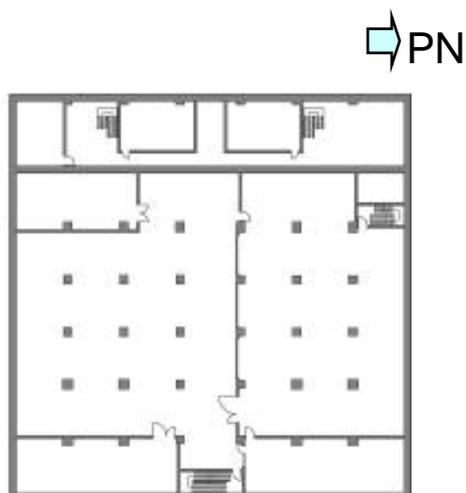
点検により確認された、今回の地震によって発生したことが否定できないひび割れは最大でも0.3mmであり、すべて評価基準値(1.0mm)未満であることを確認した。

3.1 鉄筋コンクリート構造（点検結果）

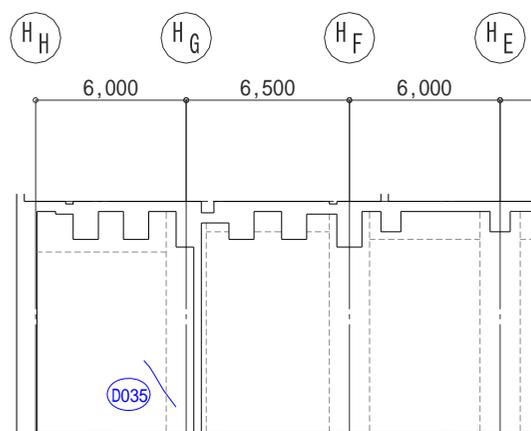
■ 5号機海水熱交換器建屋耐震壁ひび割れ調査結果（2）

（ひび割れの代表例）

階	地下1階
通り	1
番号	D035
壁厚(mm)	800
配筋	縦筋：D29@200 横筋：D25@200
幅(mm)	0.3
長さ(m)	2.3



地下1階平面図



展開図

3.2 鉄骨構造（点検方法）

■ 鉄骨構造に対しては、以下の点検方針を設定。

- ・ 目視点検を主体とした点検を実施。
- ・ 以下に示す点検項目を設定。

部材（主材・支柱・ブレース）の変形・座屈・破断の有無
溶接接合部のきれつ・破断の有無
ボルト接合部のボルト破断・緩みの有無

- ・ 点検対象には、原子炉建屋の屋根トラス、排気筒の筒身・支持鉄塔が該当。

3.2 鉄骨構造（点検結果）

■ 原子炉建屋屋根トラス

- 点検の結果、屋根トラスに地震による影響は確認されなかった。

対象	項目	発生の有無
部材	変形・座屈・破断	なし
溶接接合部	きれつ・破断	なし
ボルト接合部	ボルト破断・緩み	なし



主トラス



主トラス - つなぎ梁



ボルト接合部

3.2 鉄骨構造（点検結果）

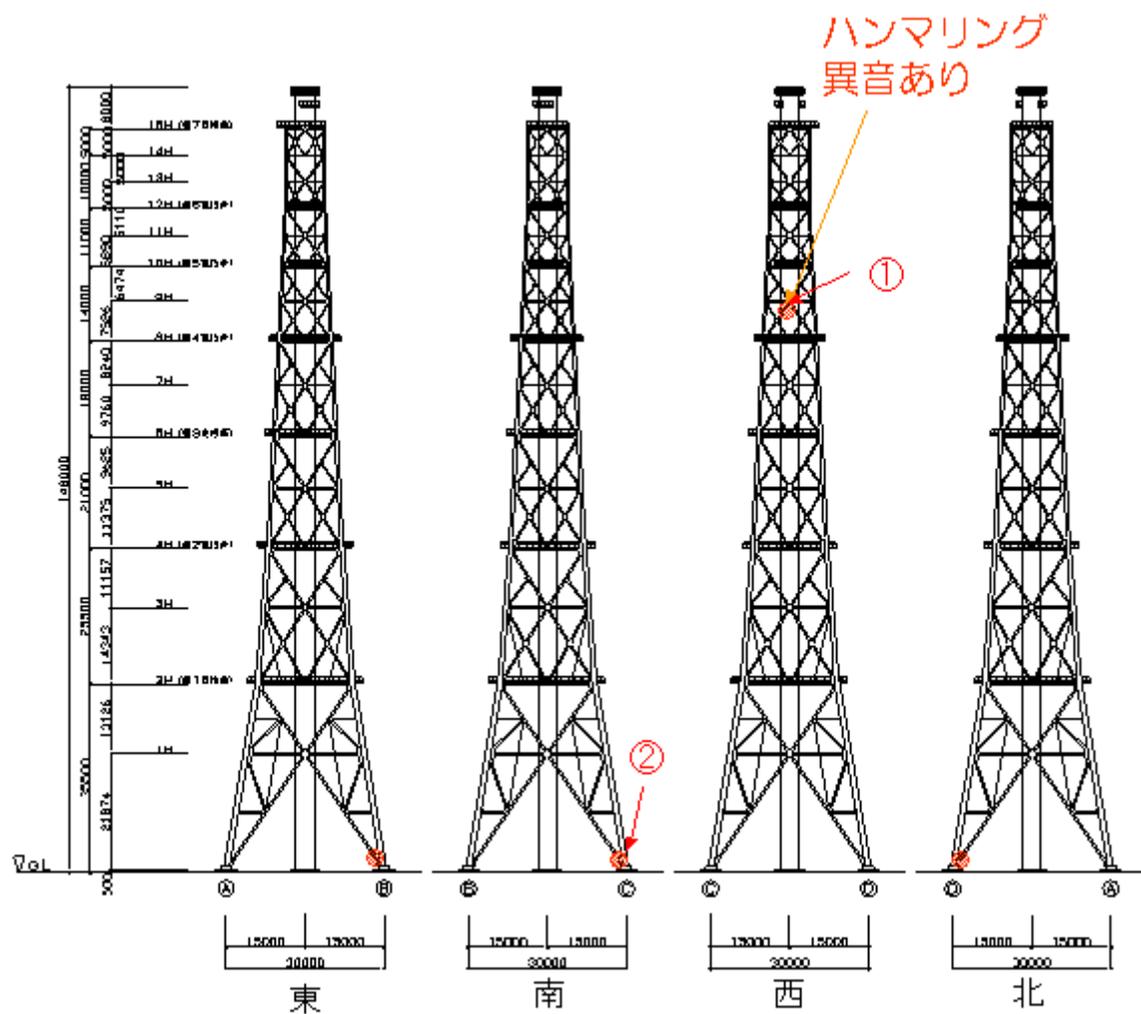
■ 排気筒（筒身、支持鉄塔）

- 点検の結果、斜材のボルト接合部において、塗膜剥離が確認されたため、ハンマリング試験を実施した結果、一つの接合部で異音が確認された。
（ 部位等については次ページに詳細を示す）
- 異音が確認されたボルト（12本）については、取替えを実施する予定であり、健全性に与える影響は無いと評価した。
- その他の部位に地震による影響は確認されなかった

対象	項目	発生の有無
部材	変形・座屈・破断	なし
溶接接合部	きれつ・破断	なし
ボルト接合部	ボルト破断・緩み	あり

3.2 鉄骨構造（点検結果）

■ 排気筒（筒身、支持鉄塔）



● : 斜材接合部塗膜剥離箇所

3.2 鉄骨構造（点検結果）

■ 排気筒（筒身内部）

- 筒身内部において、地震による影響は確認されなかった。



筒身内部状況



SGTS配管接合部



SGTS配管・筒身取合部



配管支持架台

3.3 杭基礎構造（点検方法）

■ 杭基礎構造の測定および目視点検。

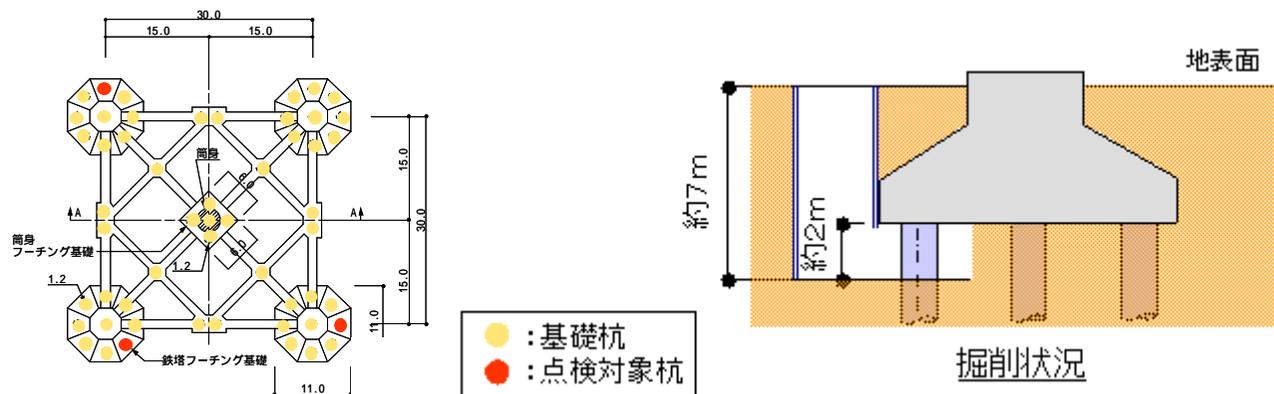
- ・ 以下に示す点検項目を設定。

基礎の傾斜・沈下量を測量により確認

評価基準値 は、傾斜量：1 / 300未満、沈下量：50mm未満

「兵庫県南部地震における震災建物基礎の被災度調査（日本建築学会技術報告集 第5号，1997年12月）」を参考に設定。

杭頭部の目視点検による損傷状況の確認（下図）

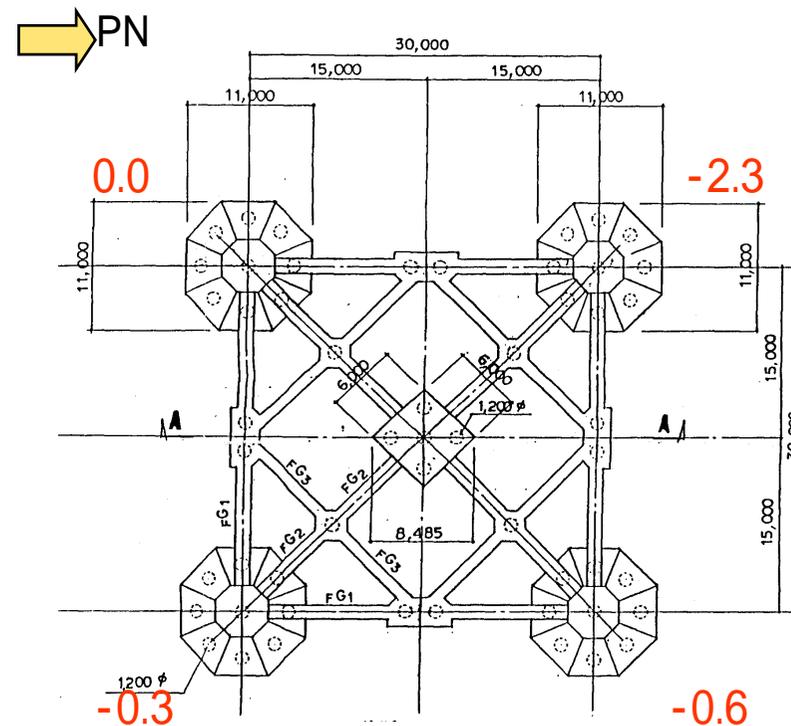


- ・ 本報告における点検対象には、排気筒の杭基礎構造が該当。

3.3 杭基礎構造（点検結果）

■ 排気筒（杭基礎構造）

- 排気筒基礎の最大傾斜量は約 $1 / 13000$ 、最大沈下量は 2.3 mm であり、評価基準値（傾斜量： $1 / 3000$ 未満かつ沈下量： 50 mm 未満）を満足していることを確認した。

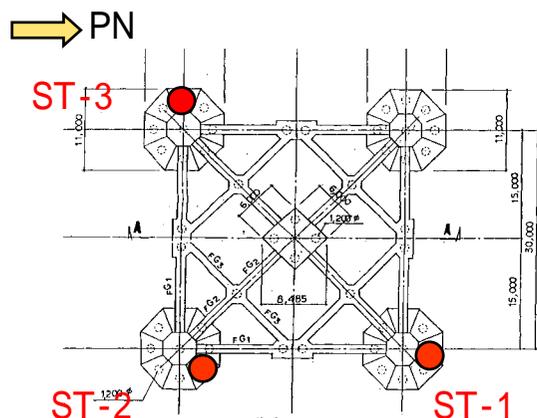


各フーチング基礎の沈下量(mm)
(南西部を基準としている)

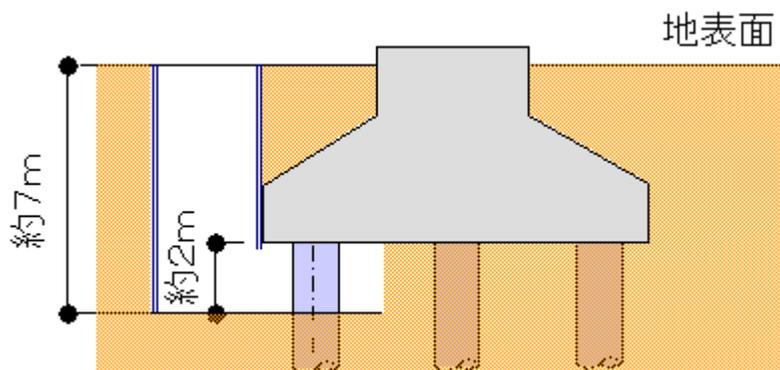
3.3 杭基礎構造（点検結果）

■ 排気筒（杭基礎構造）

- 杭頭において、地震による影響が無いことを確認。



調査箇所	杭頭状況
ST - 1	ひび割れなし
ST - 2	ひび割れなし
ST - 3	ひび割れなし



ST-2



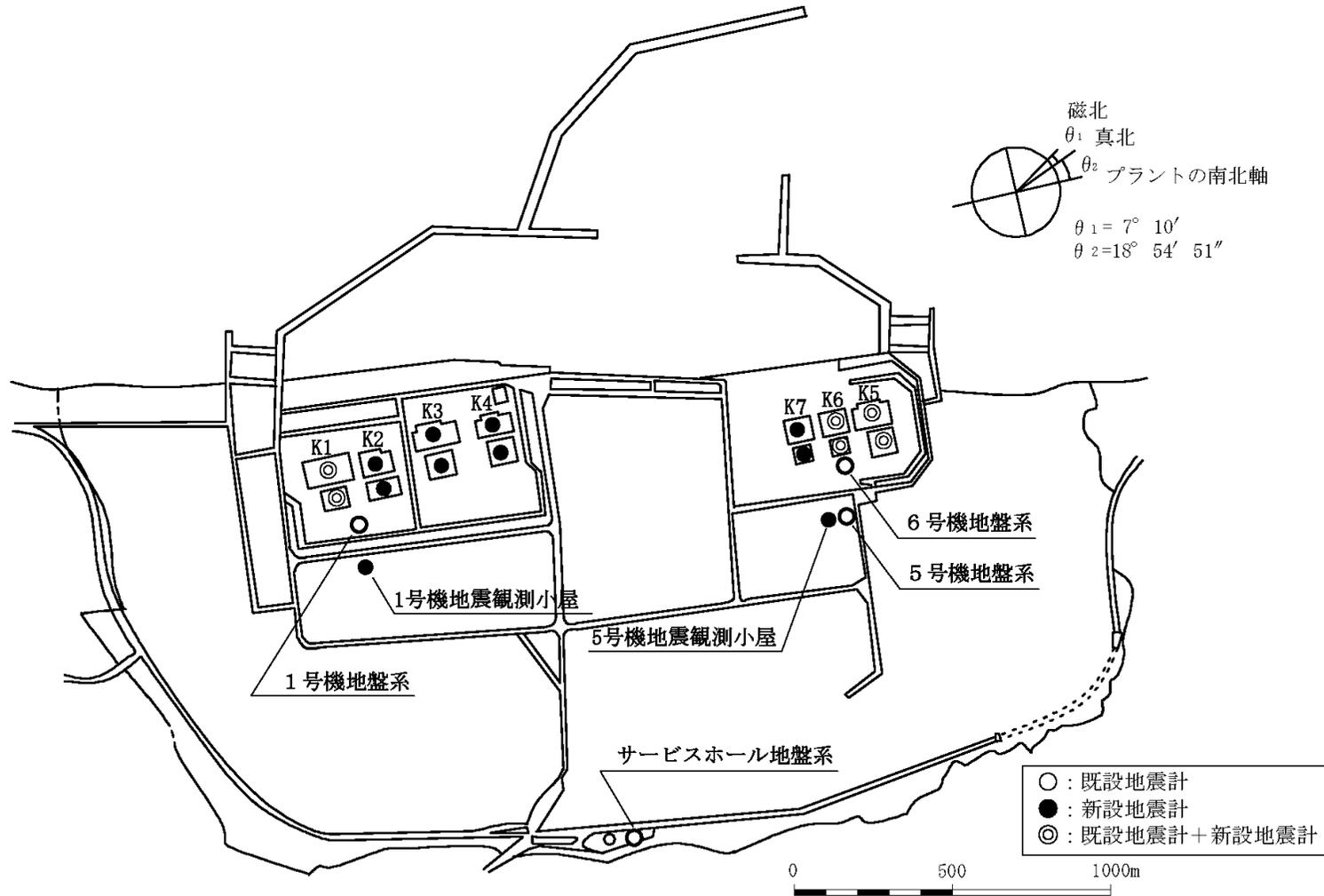
ST-1

- 杭頭状況 -

4 . 耐震健全性評価

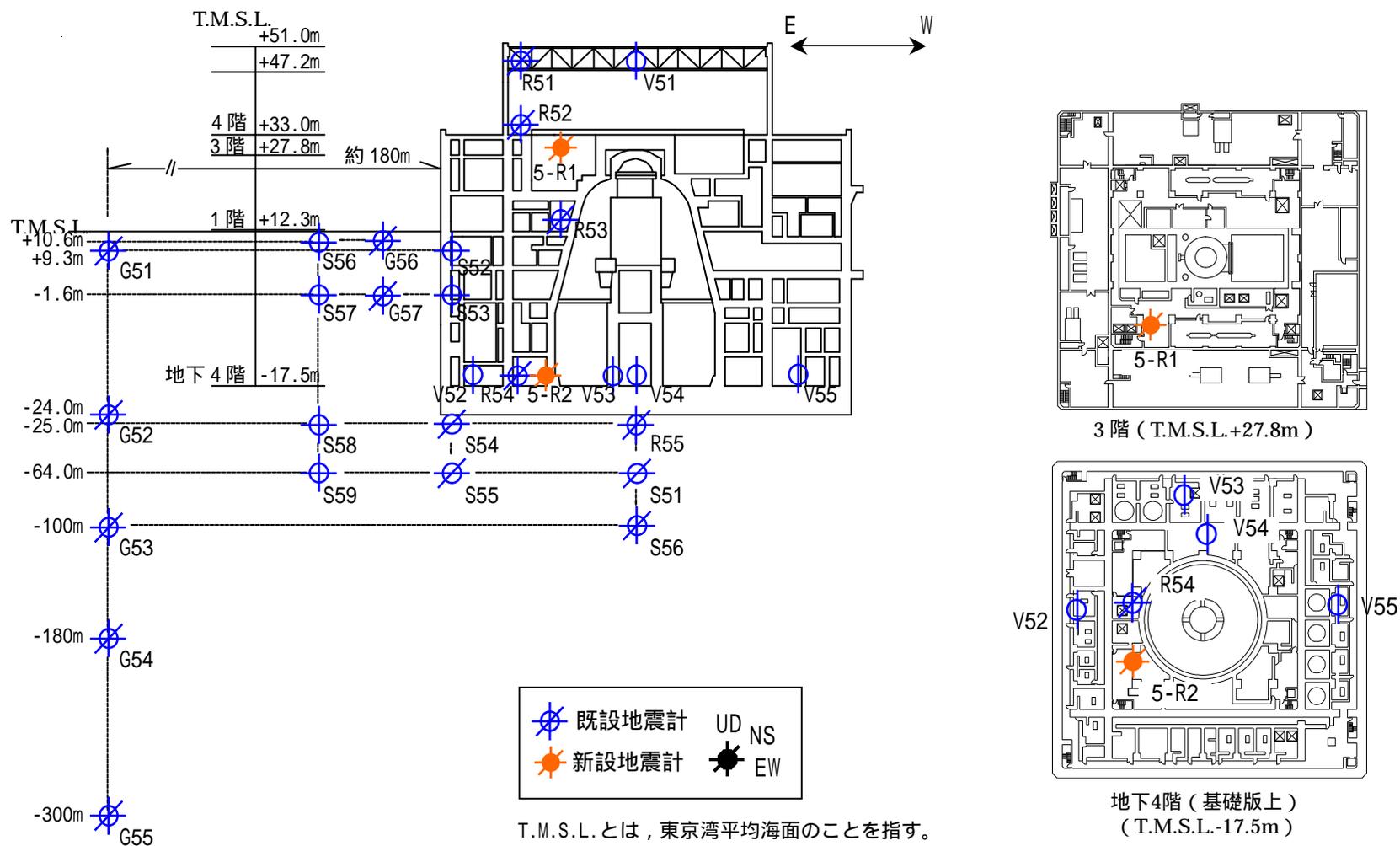
4.1 原子炉建屋の地震観測記録

柏崎刈羽原子力発電所に設置されている地震計の配置を示す。



4.1 原子炉建屋の地震観測記録

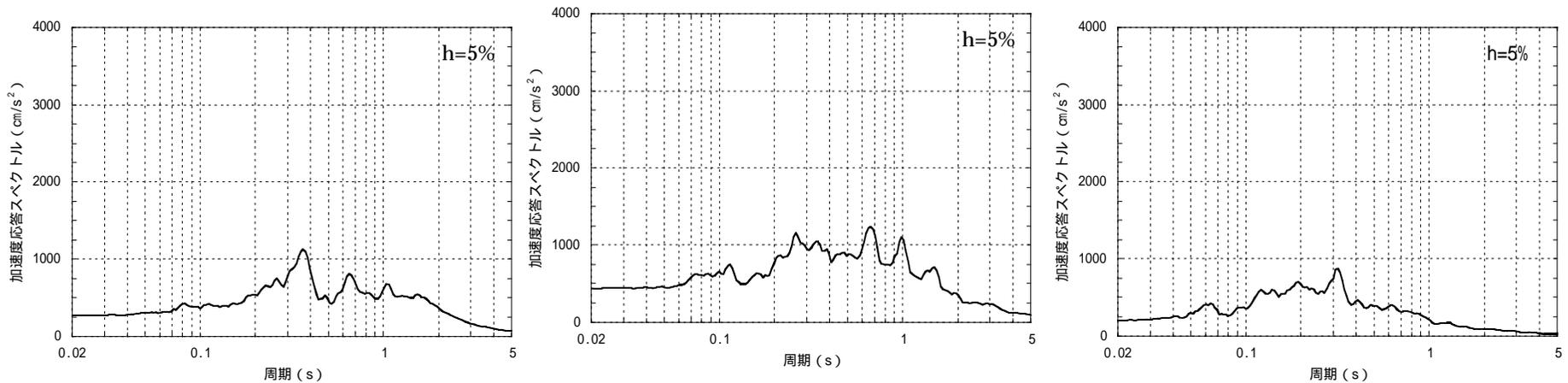
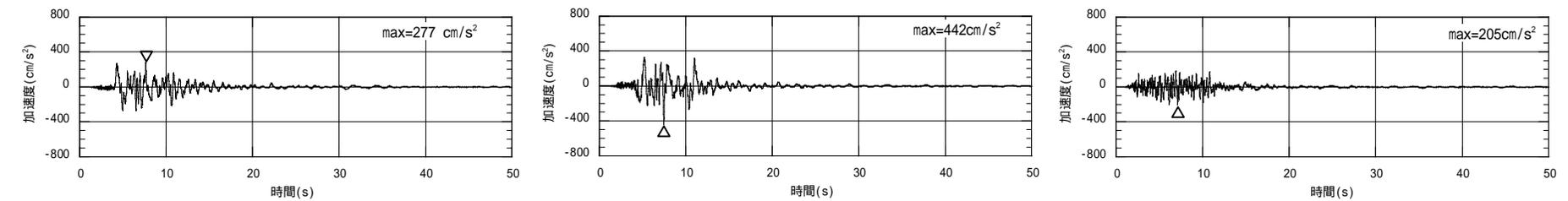
5号機原子炉建屋に設置されている地震計の配置を以下に示す。



4.1 原子炉建屋の地震観測記録

5号機原子炉建屋の基礎版上で得られた観測記録を以下に示す。

△ 最大値



NS方向

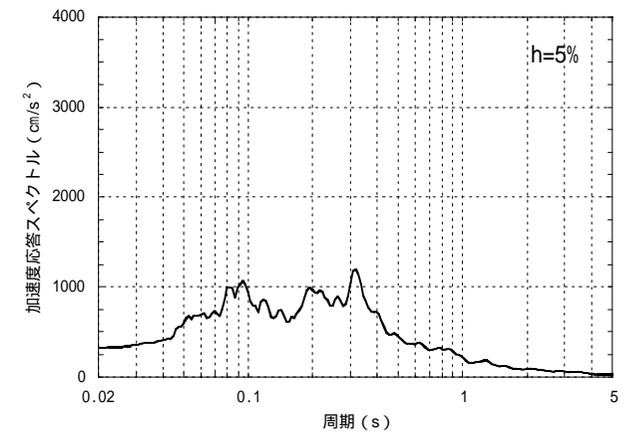
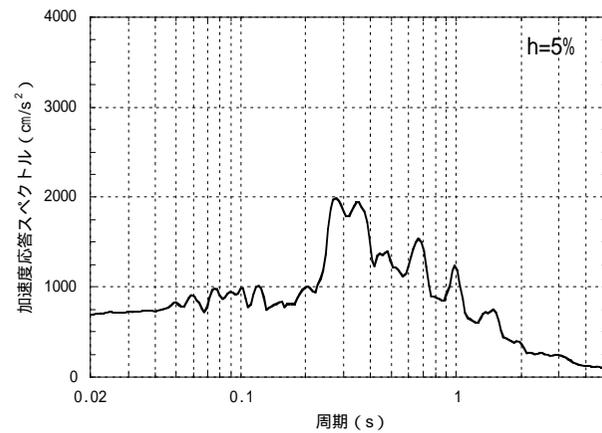
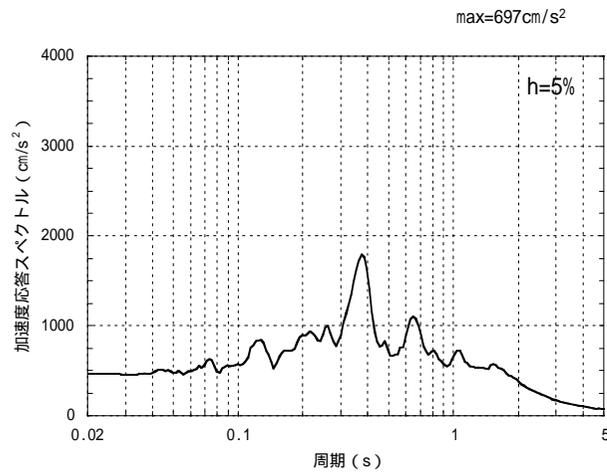
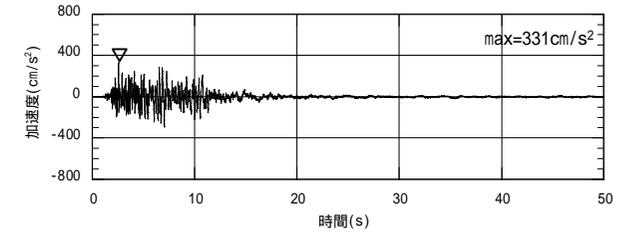
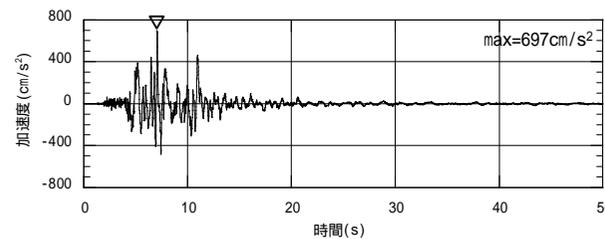
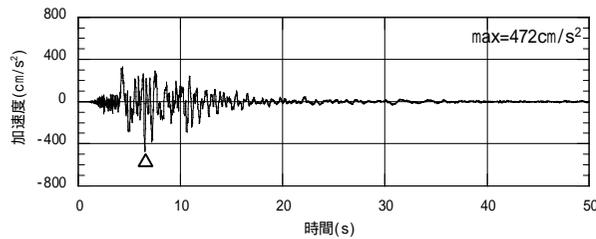
EW方向

UD方向

4.1 原子炉建屋の地震観測記録

5号機原子炉建屋の中間階で得られた観測記録を以下に示す。

△ 最大値



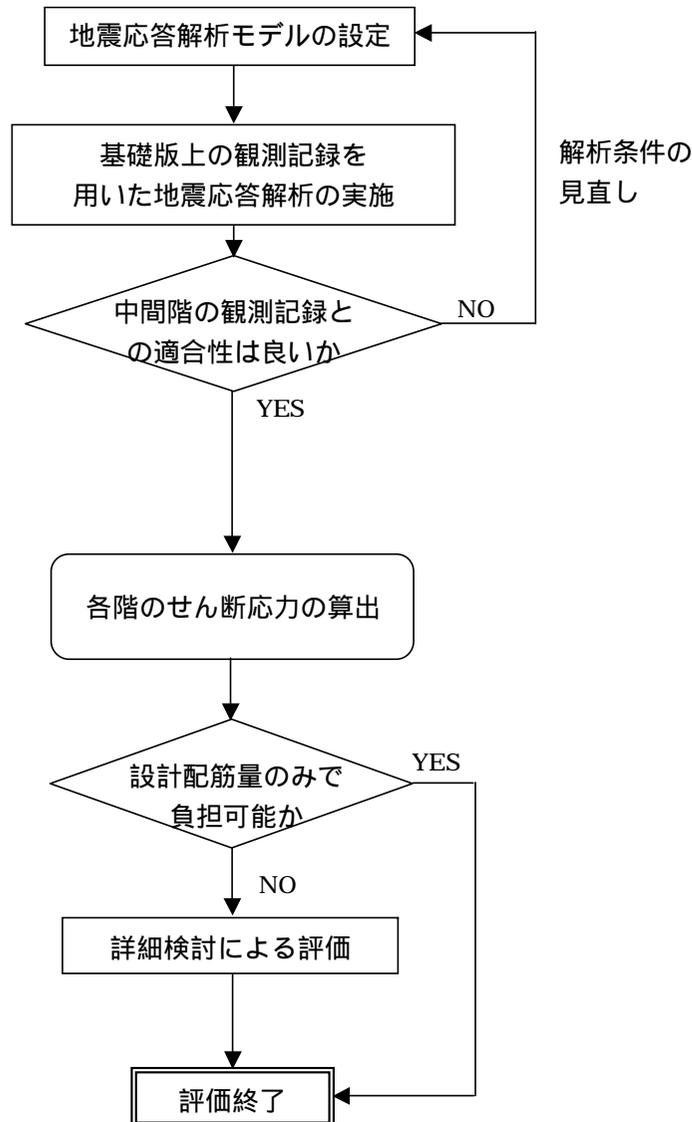
NS方向

EW方向

UD方向

4 . 1 原子炉建屋のシミュレーション解析

原子炉建屋のシミュレーション解析の評価手順

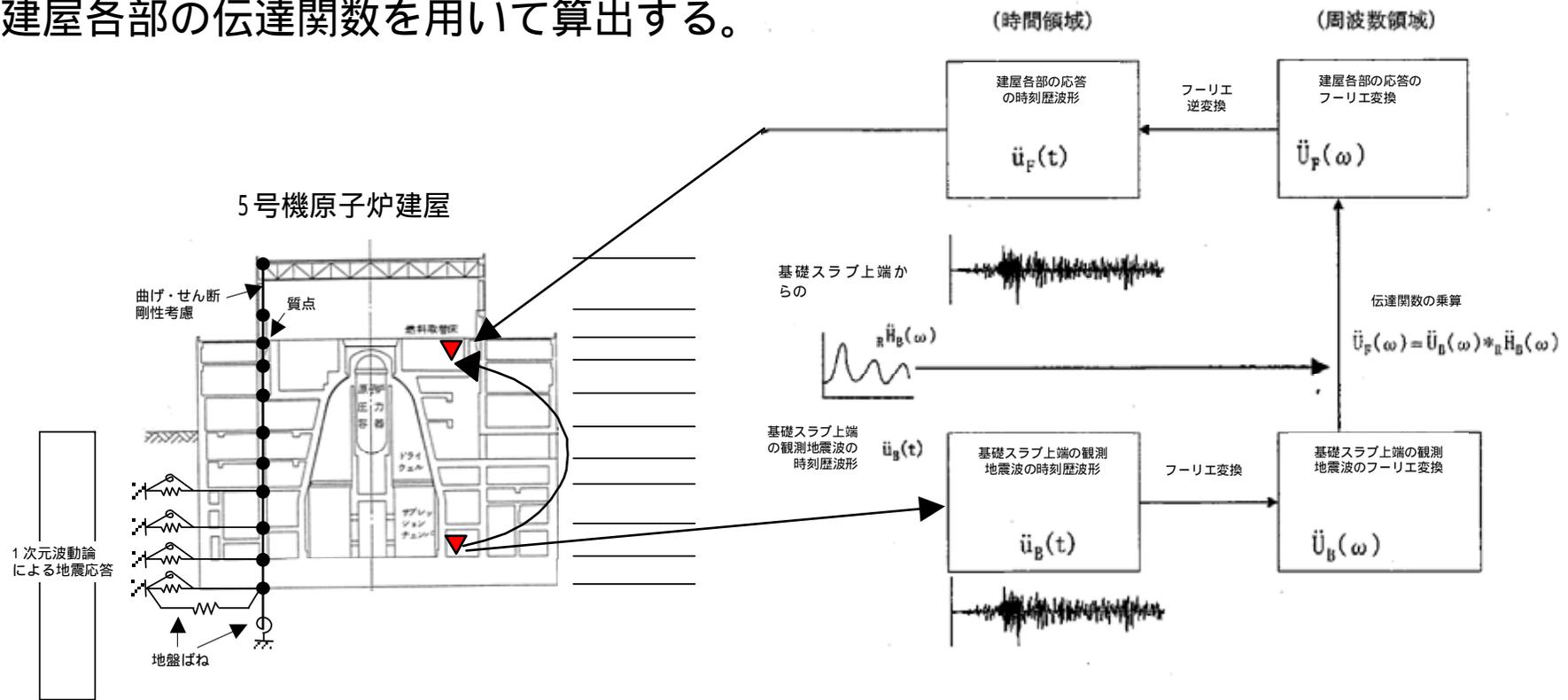


4.1 原子炉建屋のシミュレーション解析

シミュレーション解析方針

本地震に対する原子炉建屋の地震応答解析は、地震時に観測した基礎版上における観測記録を用いた動的解析による。

建屋各部位の応答は、原子炉建屋の基礎版上での観測記録波と、基礎版上から建屋各部の伝達関数を用いて算出する。



4.1 原子炉建屋のシミュレーション解析

シミュレーション解析の考え方

- (1) 1～7号機原子炉建屋に共通の条件を設定
建屋および地盤ばねともに線形
水平および鉛直3成分(NS,EW,UD)
を独立に解析
基礎版上における観測記録を入力

(2) 解析モデル

建屋質点系モデル

- ・重量：各床位置の質点に重量を集中
- ・剛性：曲げ・せん断剛性（水平）、軸剛性（鉛直）を考慮

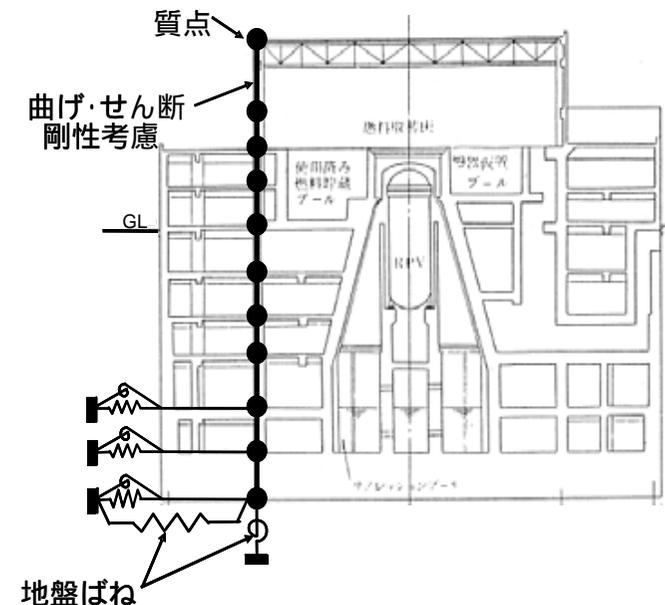
地盤ばね

- ・水平：底面および側面地盤ばね（水平、回転）を考慮
- ・鉛直：底面ばねを考慮

地盤物性

- ・地震動レベルに応じて、号機毎に物性を設定し、地盤ばねの評価に反映

質点系モデル(水平)



4.1 原子炉建屋のシミュレーション解析

シミュレーション解析の考え方

(3) 実情に応じて、設計条件を変更

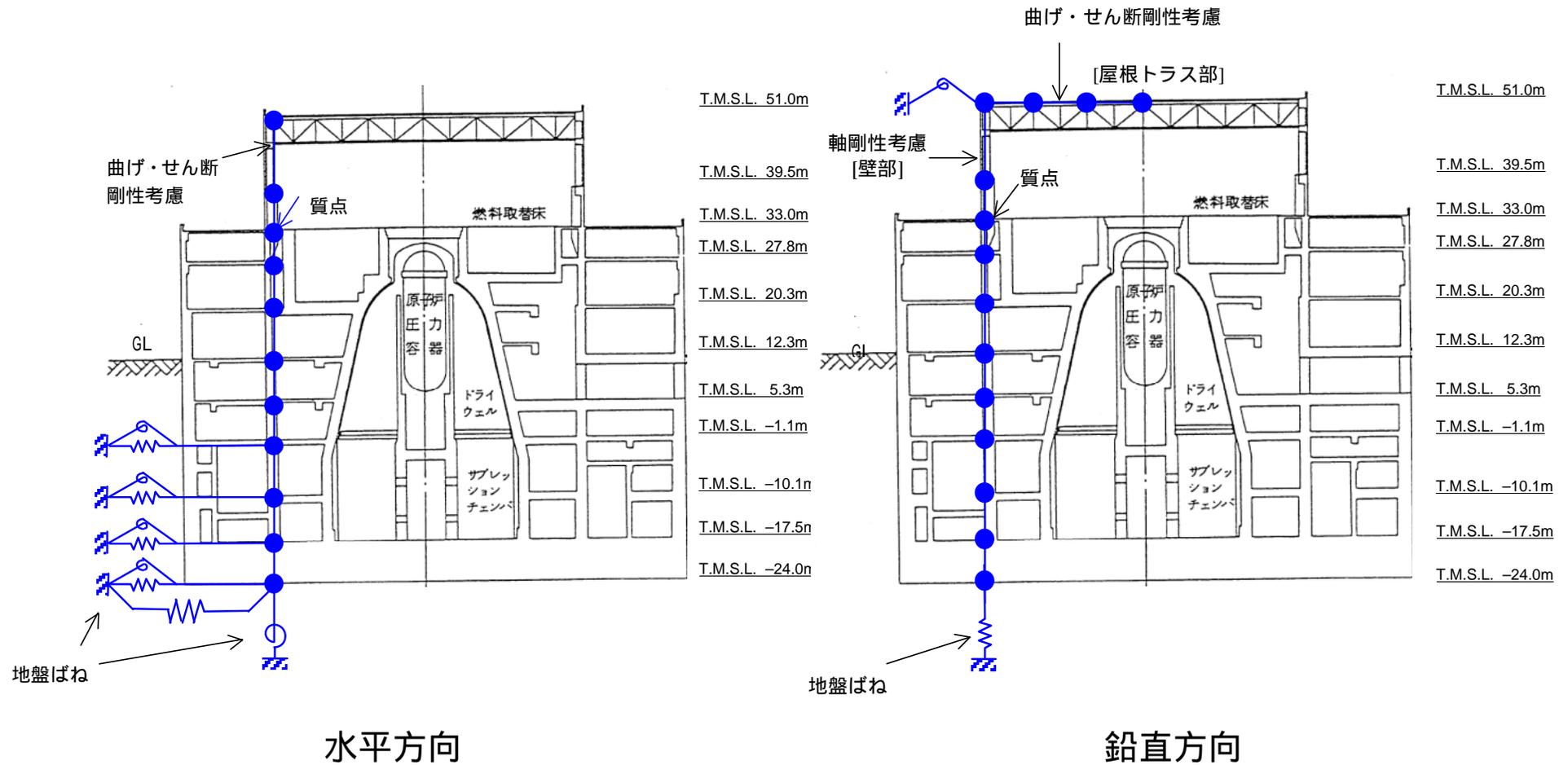
		設計時	シミュレーション解析時
建屋剛性	コンクリートのヤング係数	設計基準強度を用いて算出 1,2,5号機 : 240kgf/cm ² 3,4,6,7号機 : 330kgf/cm ²	実強度*を用いて算出 1,2,5号機 : 450kgf/cm ² 3,4,6,7号機 : 500kgf/cm ²
	剛性を考慮する部位	耐震壁のみ (弾性)	耐震壁 + 補助壁** (弾性)
建屋減衰 (減衰定数)		5 %	5 %

* 圧縮強度試験結果の平均値を用いて設定

** 設計時には考慮していないが、「日本建築学会 鉄筋コンクリート 構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 - 1999」の規定に照らして耐震壁として評価可能な壁

4.1 原子炉建屋のシミュレーション解析

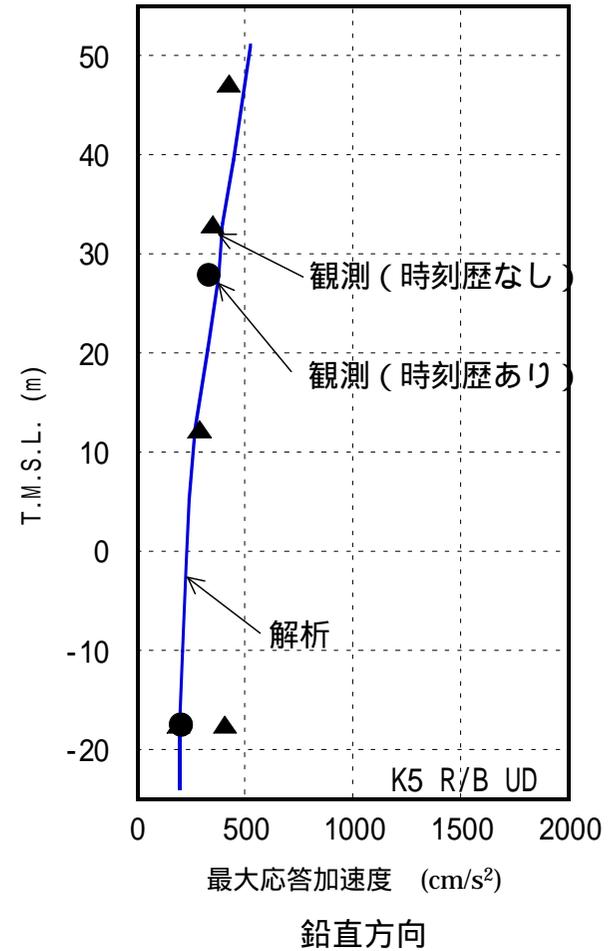
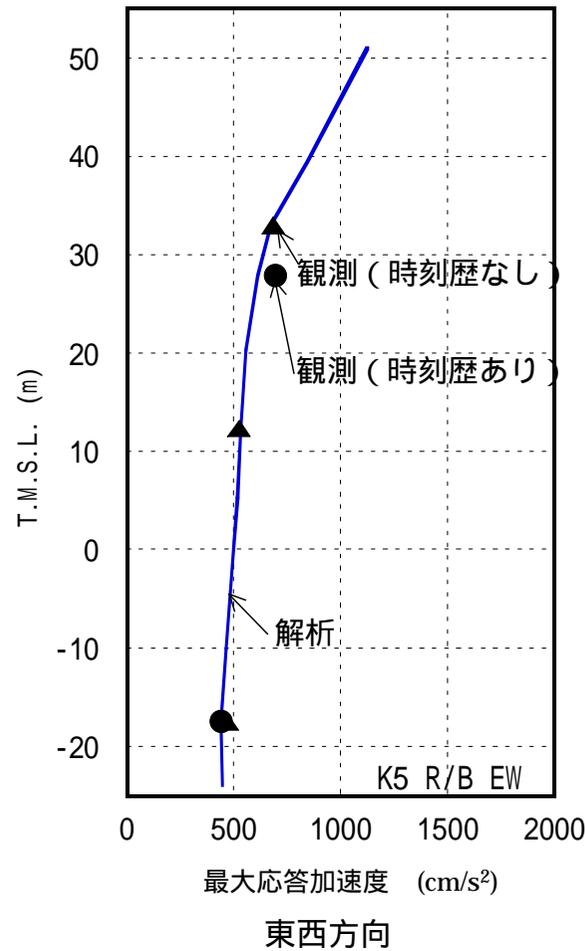
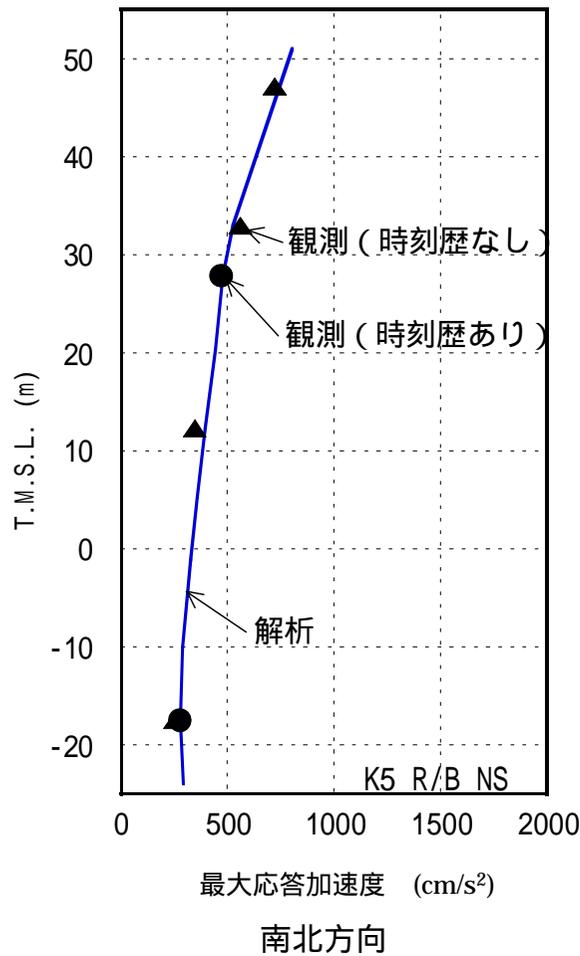
5号機原子炉建屋の地震応答解析モデルを以下に示す。



4.1 原子炉建屋のシミュレーション解析結果

■ 5号機原子炉建屋 最大応答加速度

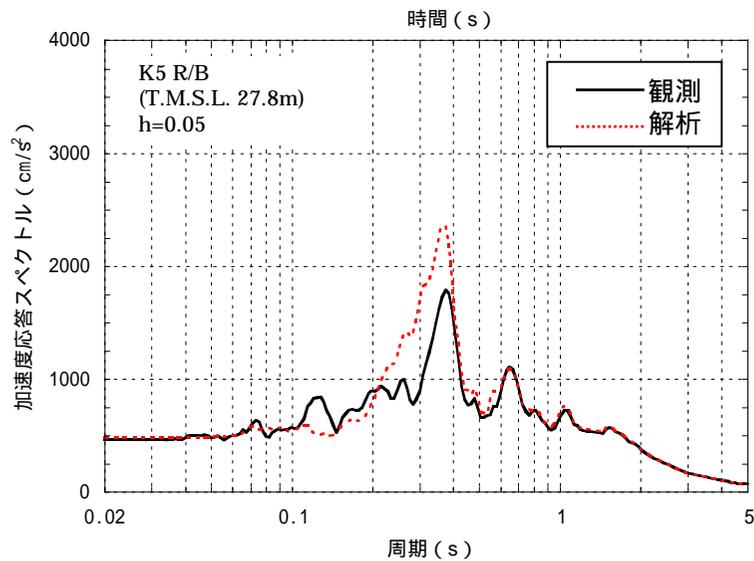
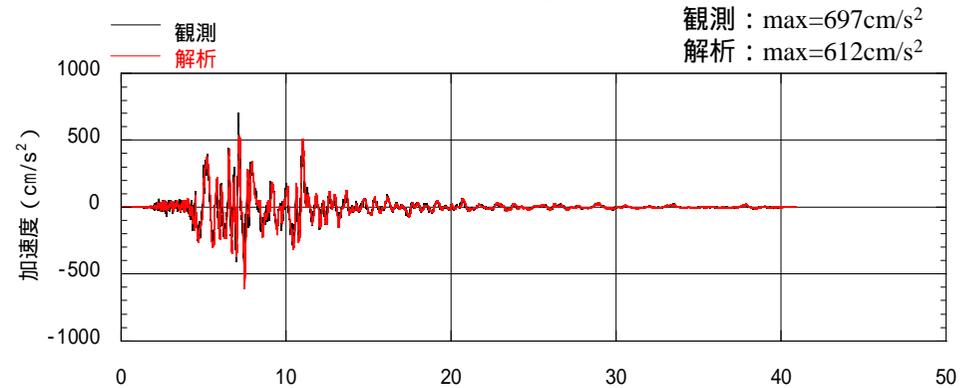
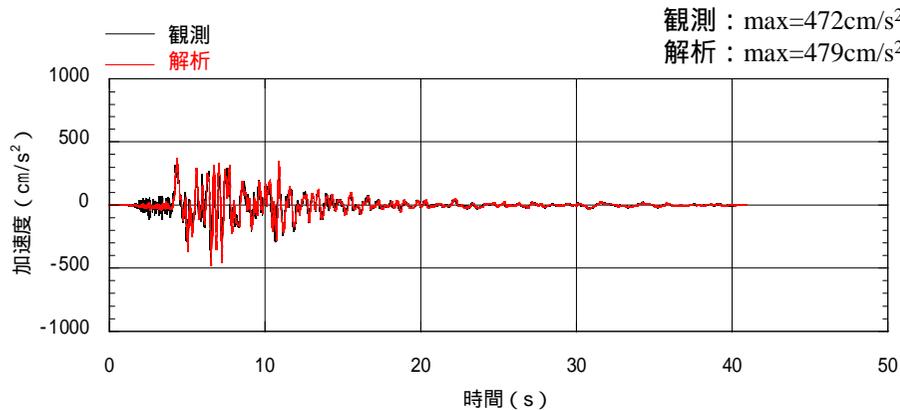
- 観測記録と解析結果は十分に整合していることを確認。



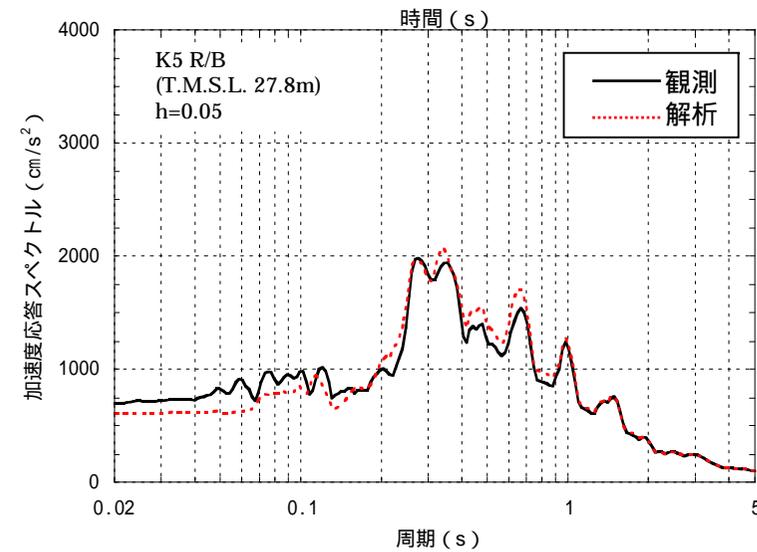
4.1 原子炉建屋のシミュレーション解析結果

■ 加速度応答波形・加速度応答スペクトルの比較（水平方向）

● 観測記録と解析結果は十分に整合していることを確認。



南北方向

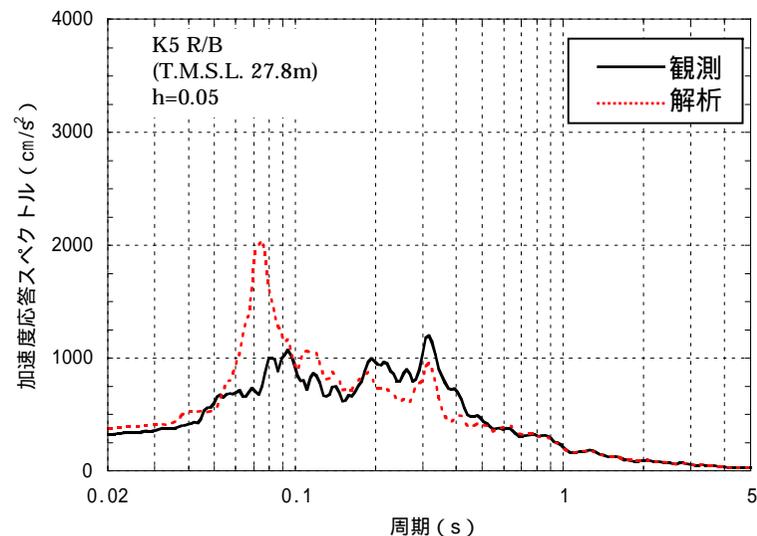
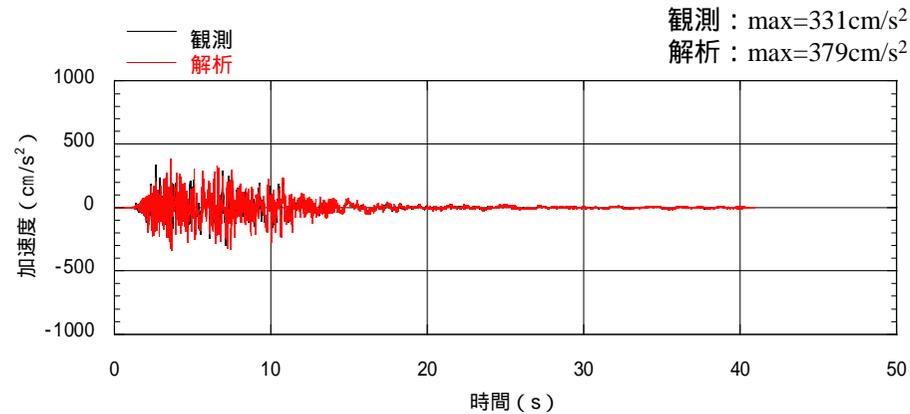


東西方向

床応答スペクトル（中間階，T.M.S.L. 27.8m）

4.1 原子炉建屋のシミュレーション解析結果

■ 加速度応答波形・加速度応答スペクトルの比較（鉛直方向）

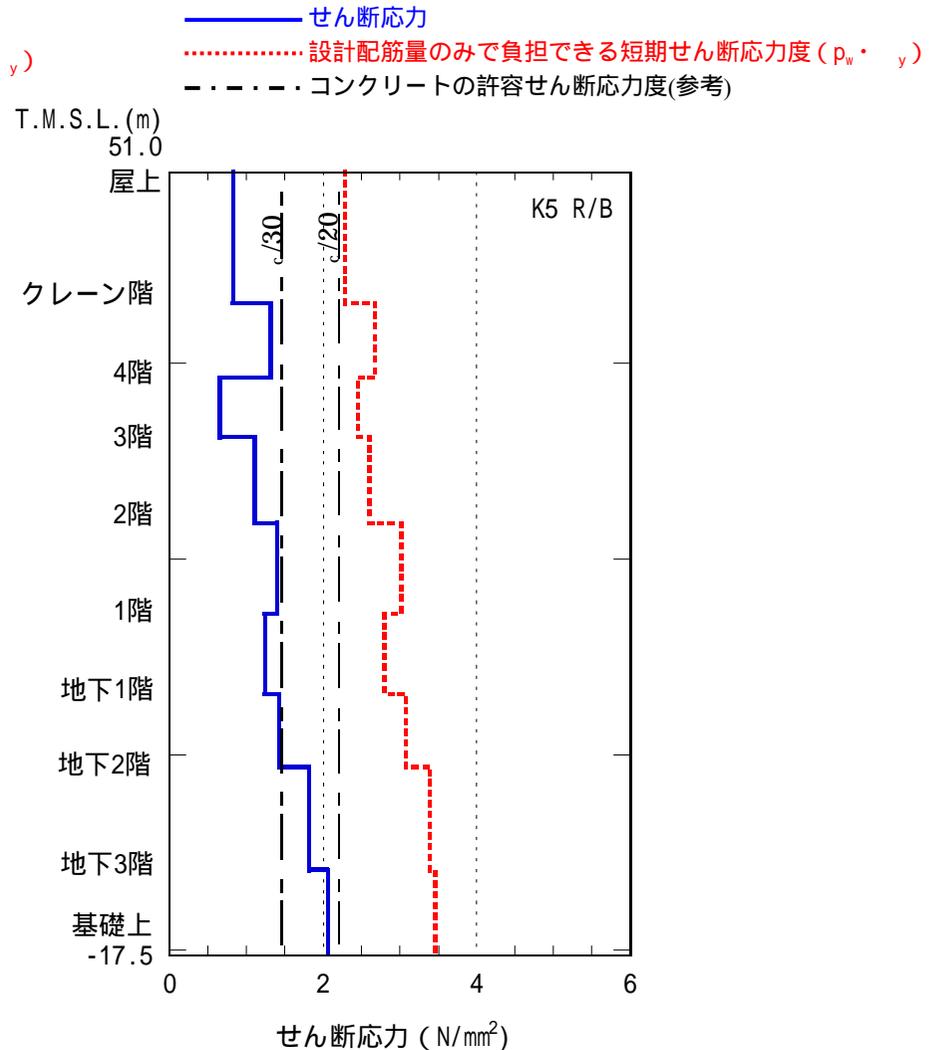
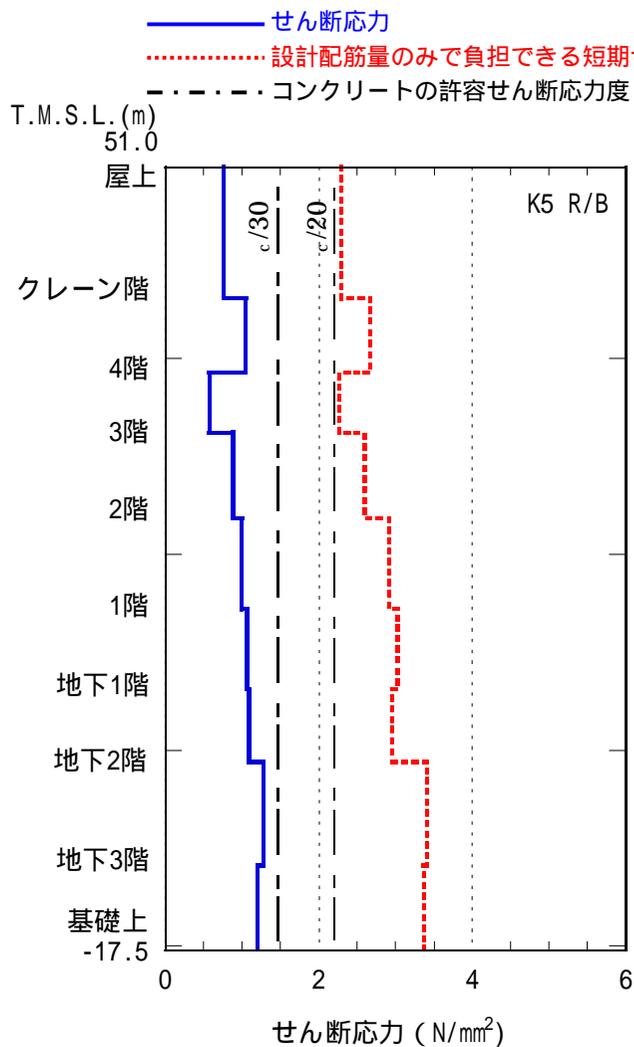


鉛直方向

床応答スペクトル（中間階，T.M.S.L. 27.8m）

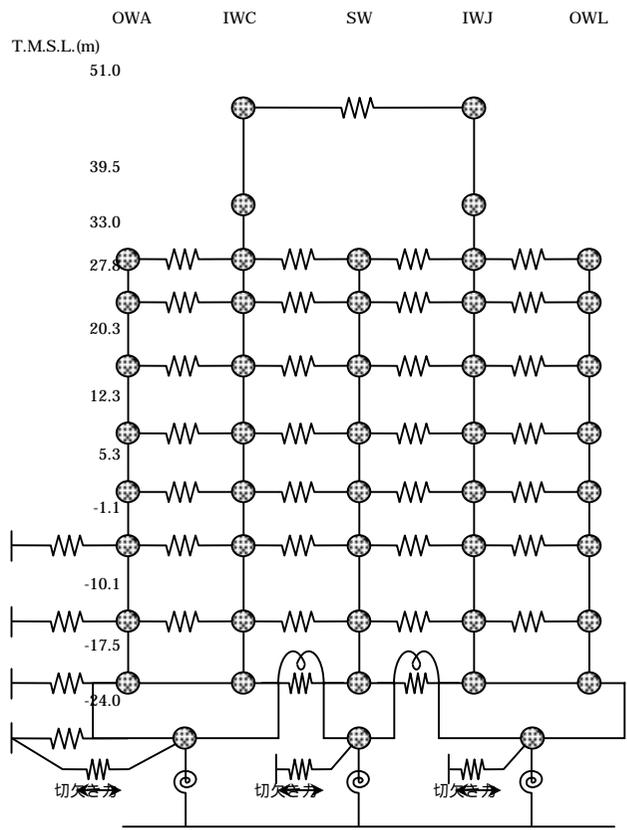
4 . 1 原子炉建屋の耐震健全性評価結果

5号機原子炉建屋 耐震壁のせん断応力

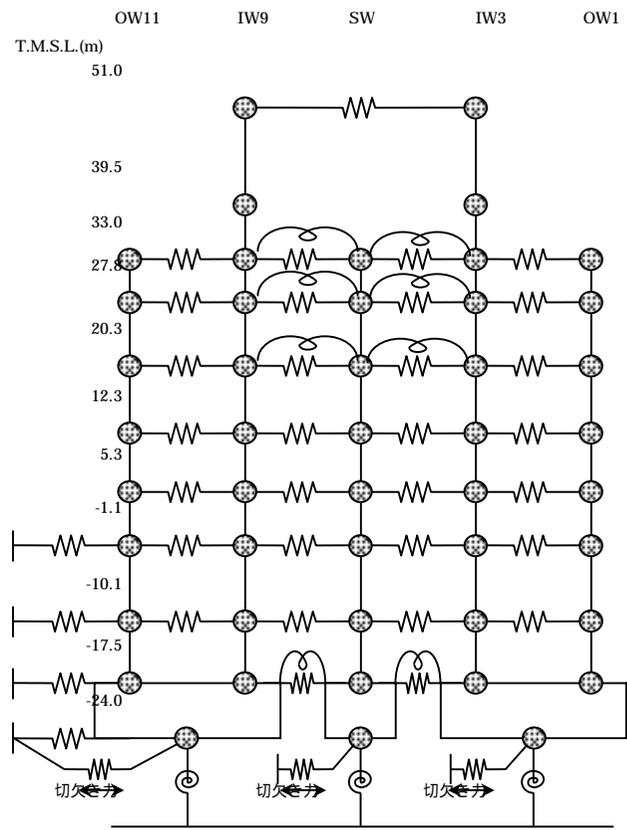


4.1 原子炉建屋の追加検討モデルによる検討

- 水平方向の解析モデルについては、床の柔性を考慮した解析モデルによる検討を実施し、応答結果への影響を確認した。モデル図を以下に示す。



南北方向

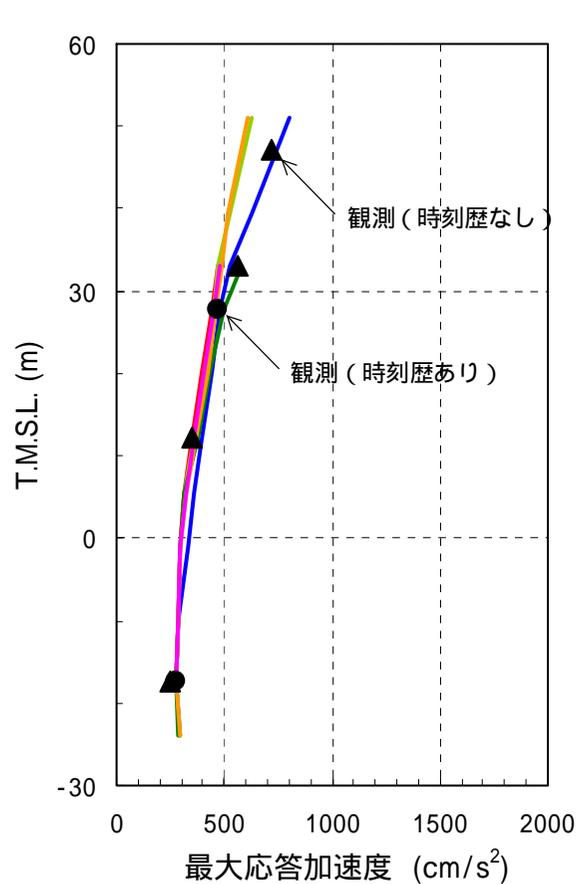


東西方向

4.1 原子炉建屋の追加検討モデルによる検討

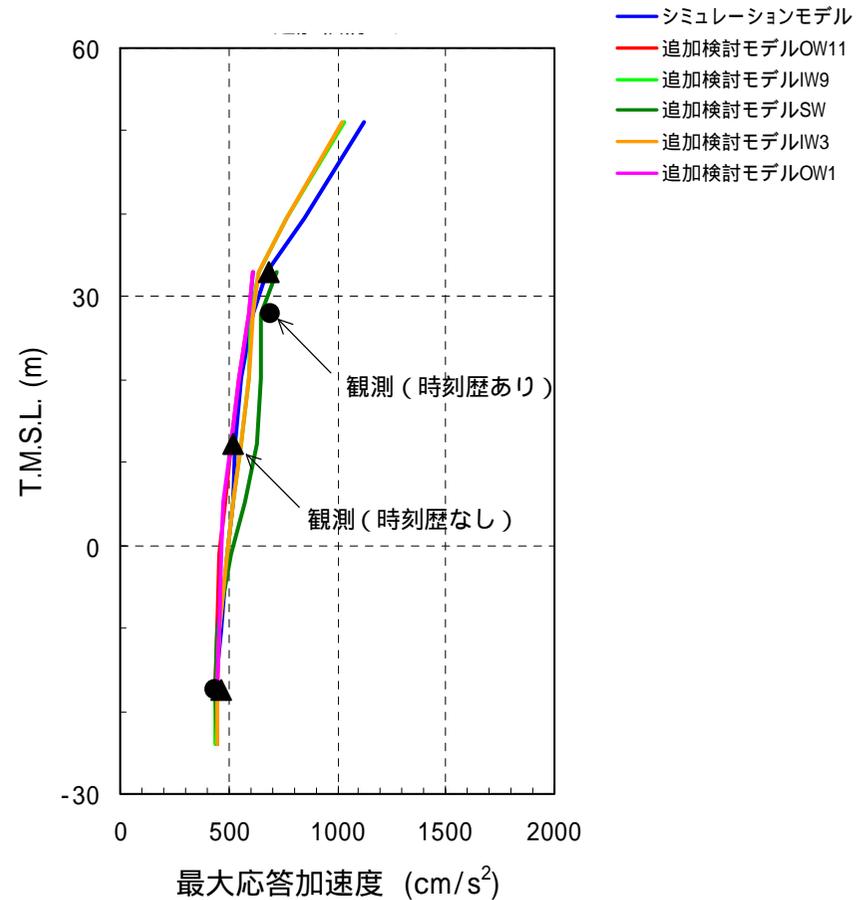
■最大応答加速度の比較

- 現状の解析モデルによる結果と大きな差が無いことを確認した。



南北方向

- シミュレーションモデル
- 追加検討モデルOWA
- 追加検討モデルIWC
- 追加検討モデルSW
- 追加検討モデルIWJ
- 追加検討モデルOWL



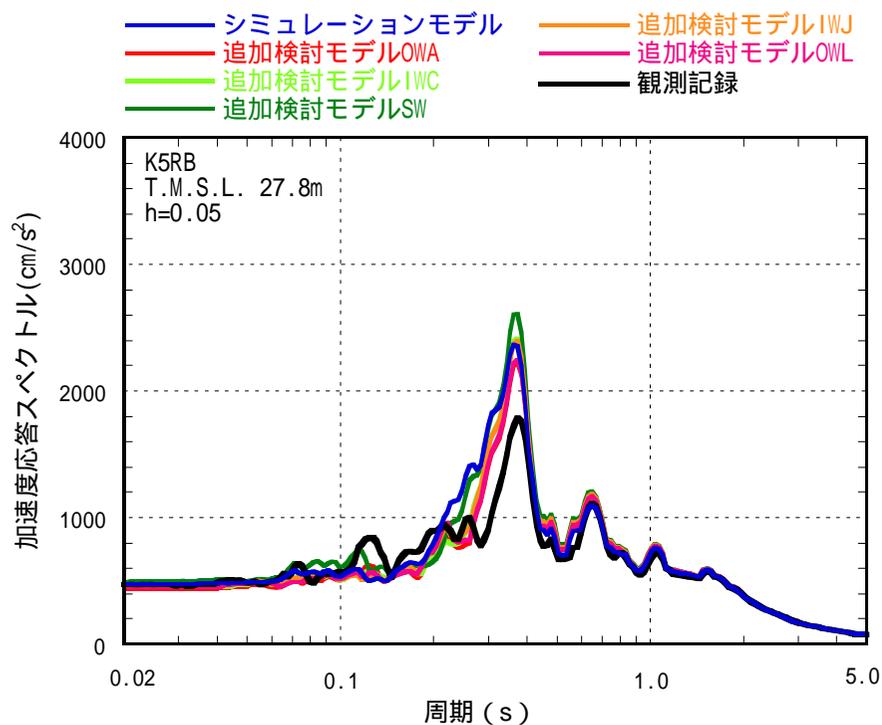
東西方向

- シミュレーションモデル
- 追加検討モデルOW11
- 追加検討モデルIW9
- 追加検討モデルSW
- 追加検討モデルIW3
- 追加検討モデルOW1

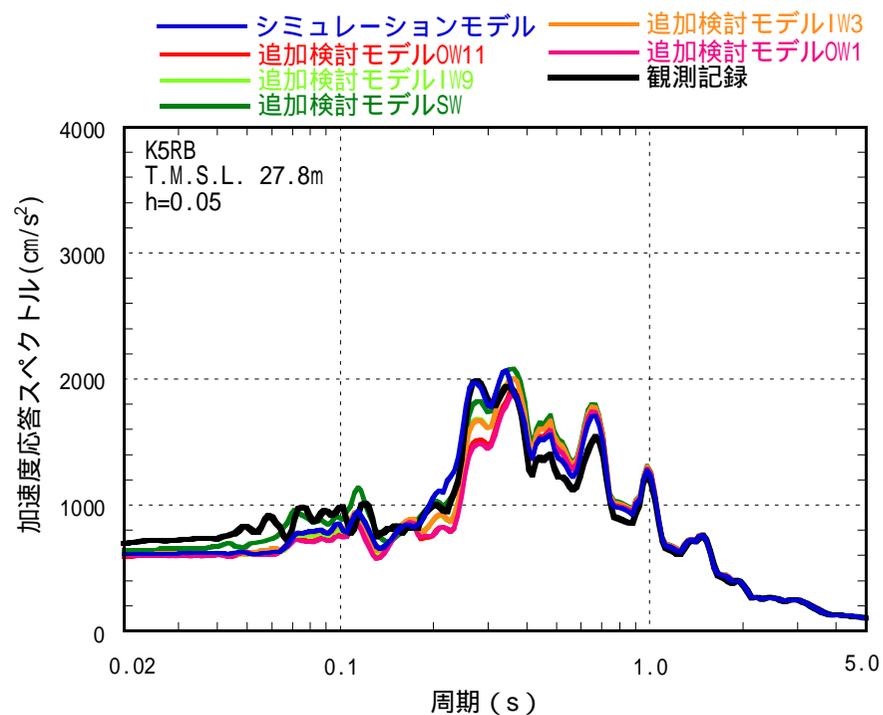
4.1 原子炉建屋の追加検討モデルによる検討

■ 加速度応答スペクトルの比較

- 現状の解析モデルによる結果と大きな差が無いことを確認した。



南北方向



東西方向

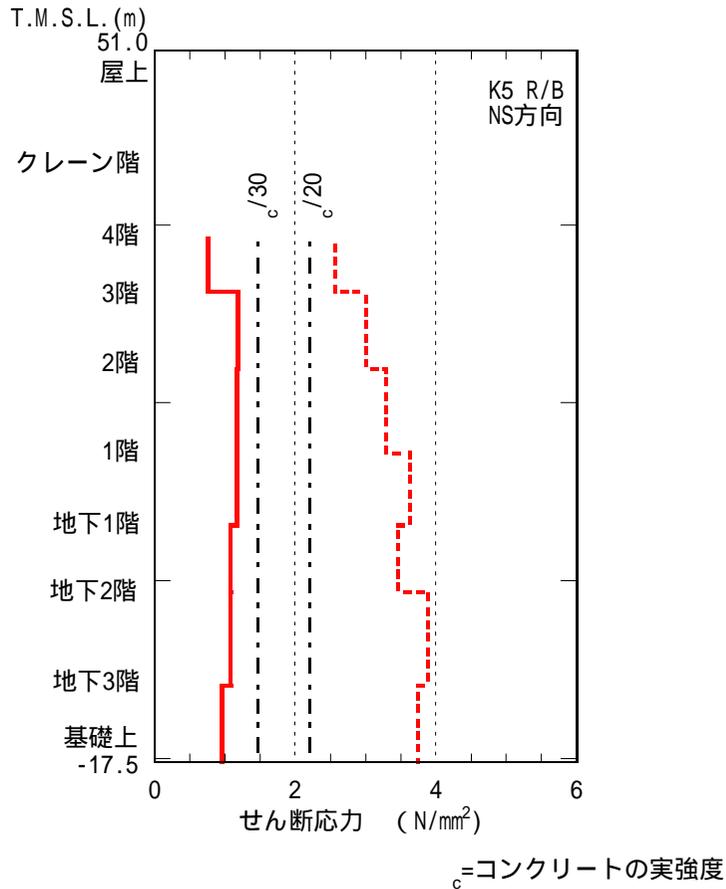
中間階(T.M.S.L. 27.8m)

4.1 原子炉建屋の追加検討モデルによる検討

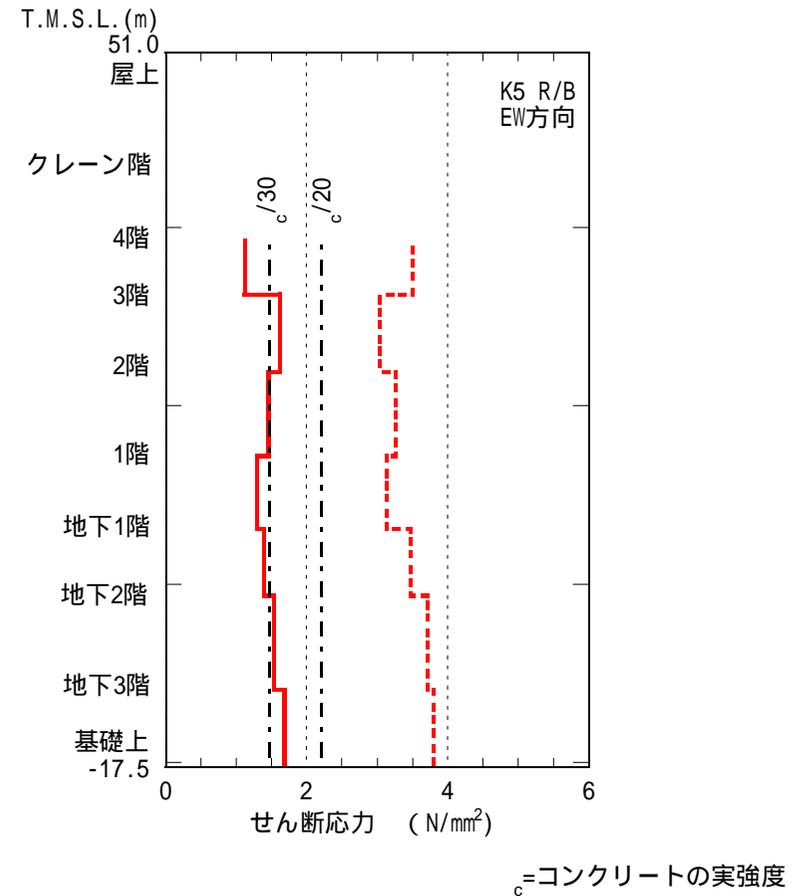
■外部ボックス壁のせん断応力

- せん断応力(追加検討モデル)
- - - 設計配筋量のみで負担できる短期せん断応力度($\rho_w \cdot y$)
- - - コンクリートの許容せん断応力度(参考)

- せん断応力(追加検討モデル)
- - - 設計配筋量のみで負担できる短期せん断応力度($\rho_w \cdot y$)
- - - コンクリートの許容せん断応力度(参考)



南北方向



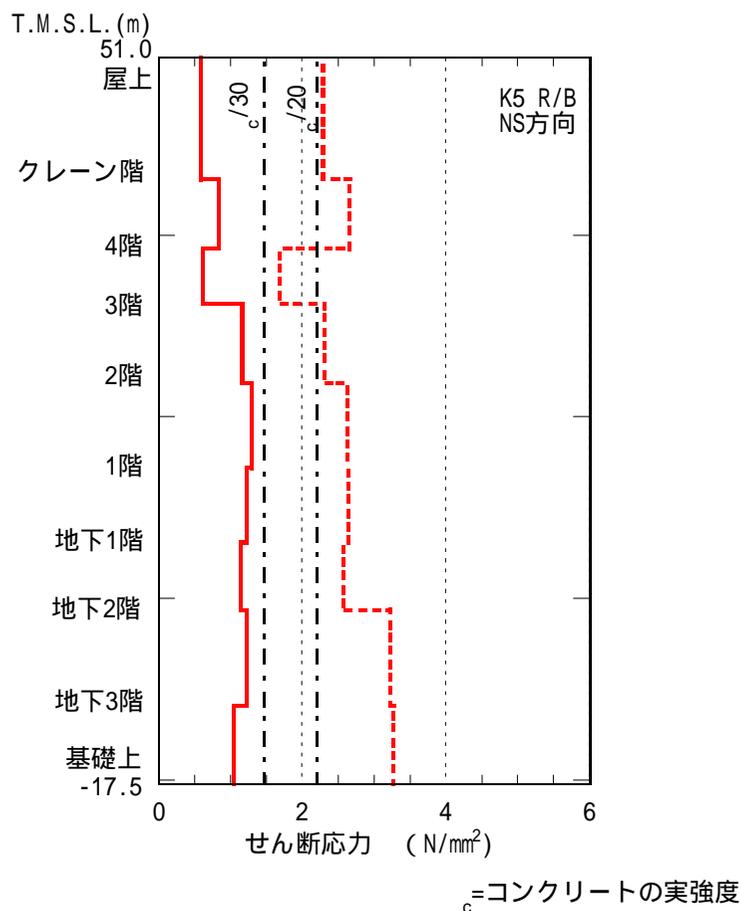
東西方向

4.1 原子炉建屋の追加検討モデルによる検討

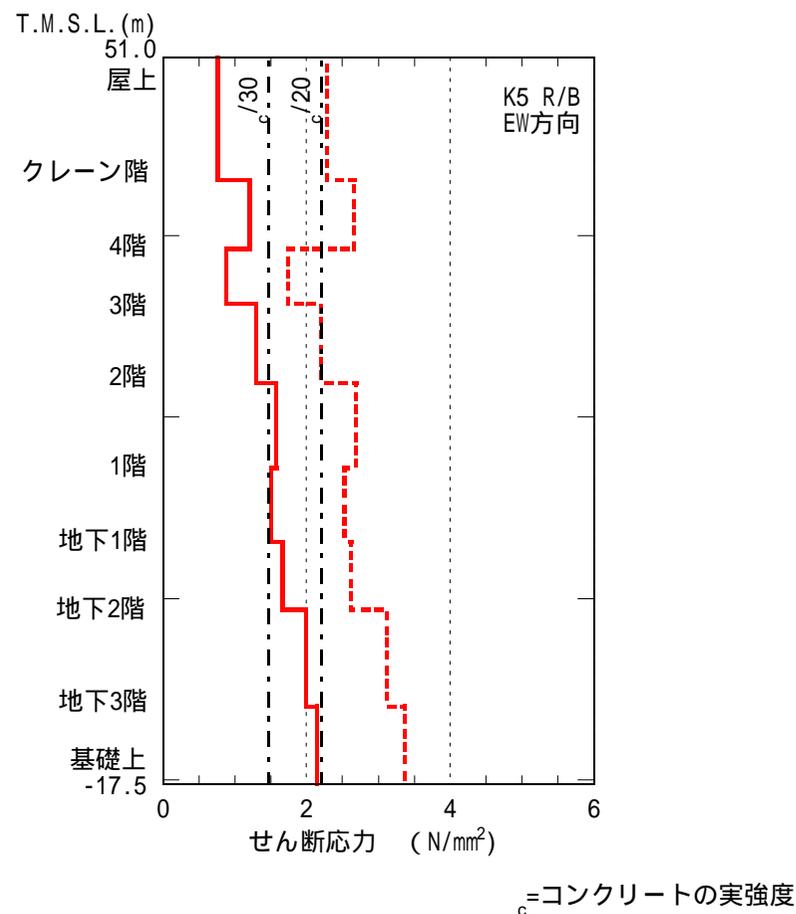
■内部ボックス壁のせん断応力

- せん断応力(追加検討モデル)
- - - 設計配筋量のみで負担できる短期せん断応力度($\rho_w \cdot y$)
- - - コンクリートの許容せん断応力度(参考)

- せん断応力(追加検討モデル)
- - - 設計配筋量のみで負担できる短期せん断応力度($\rho_w \cdot y$)
- - - コンクリートの許容せん断応力度(参考)



南北方向

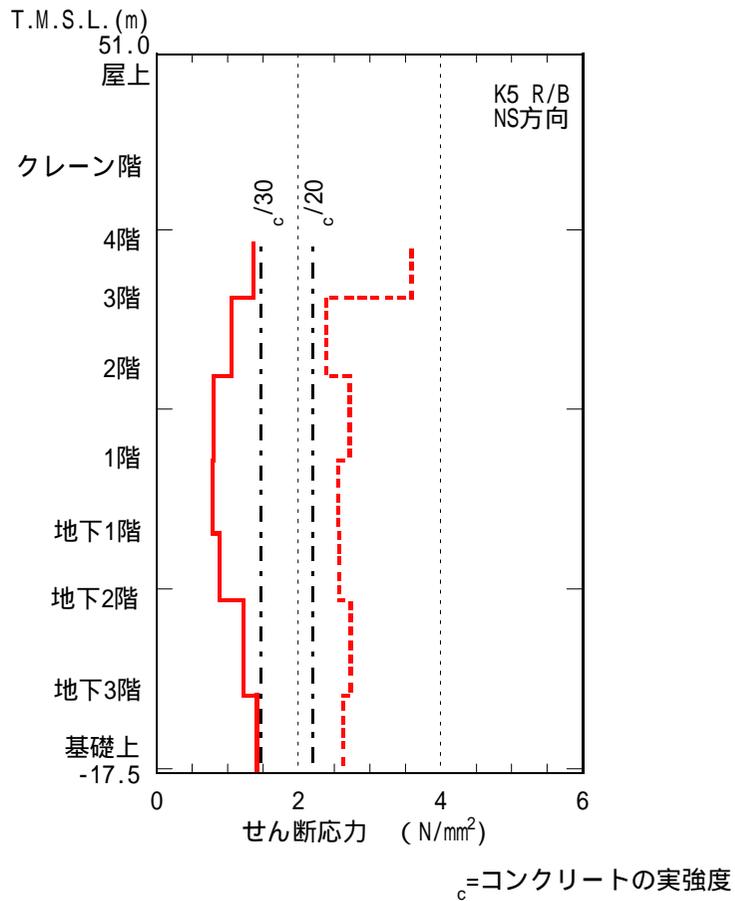


東西方向

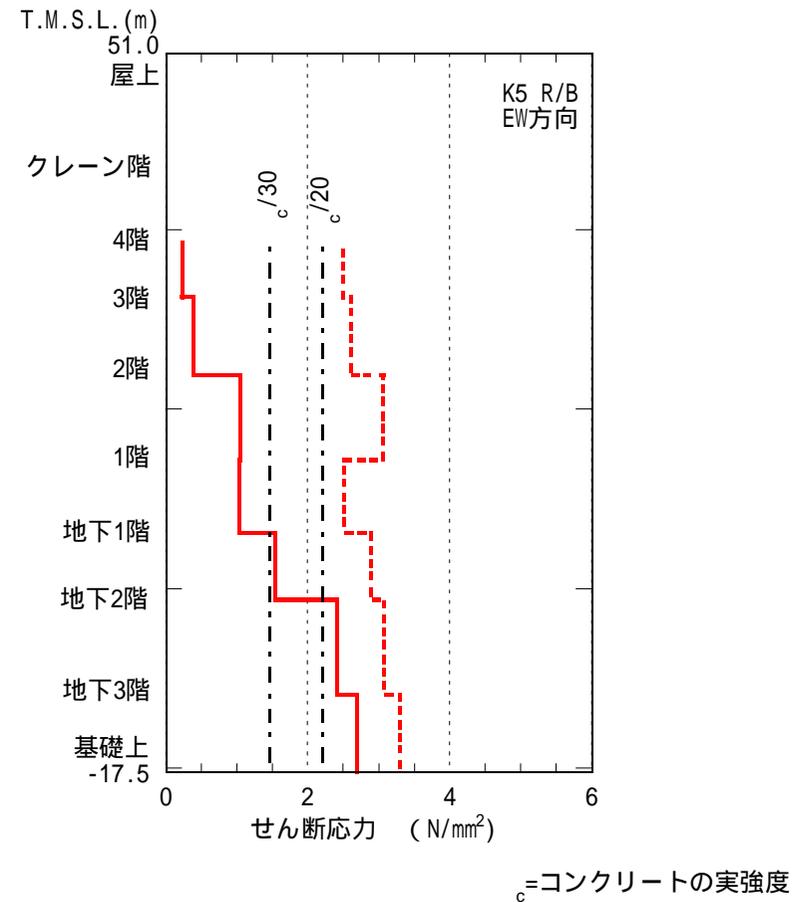
4.1 原子炉建屋の追加検討モデルによる検討

■ シェル壁のせん断応力

- せん断応力(追加検討モデル)
- - - 設計配筋量のみで負担できる短期せん断応力度($p_w \cdot y$)
- - - コンクリートの許容せん断応力度(参考)



南北方向

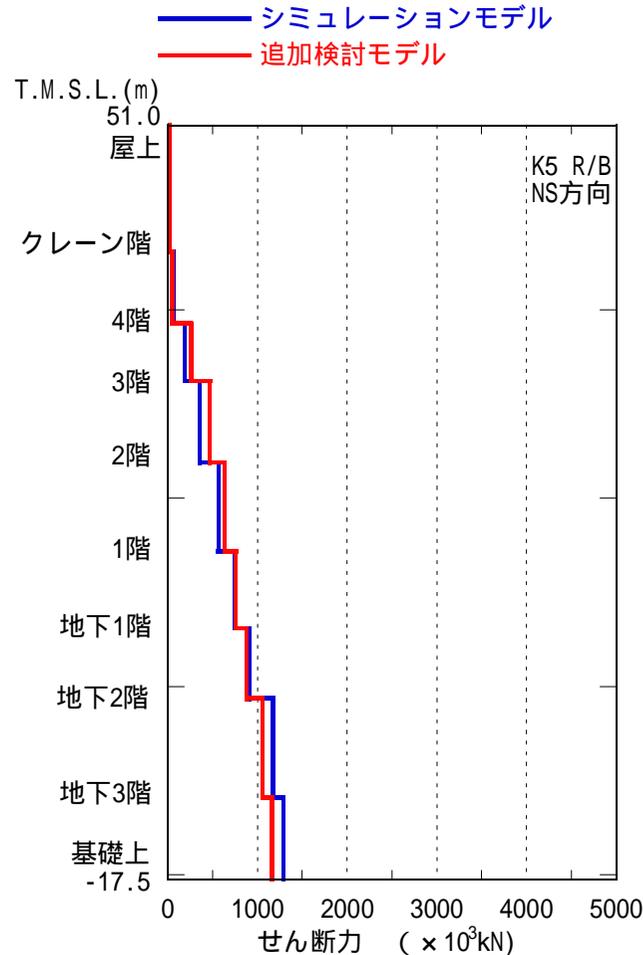


東西方向

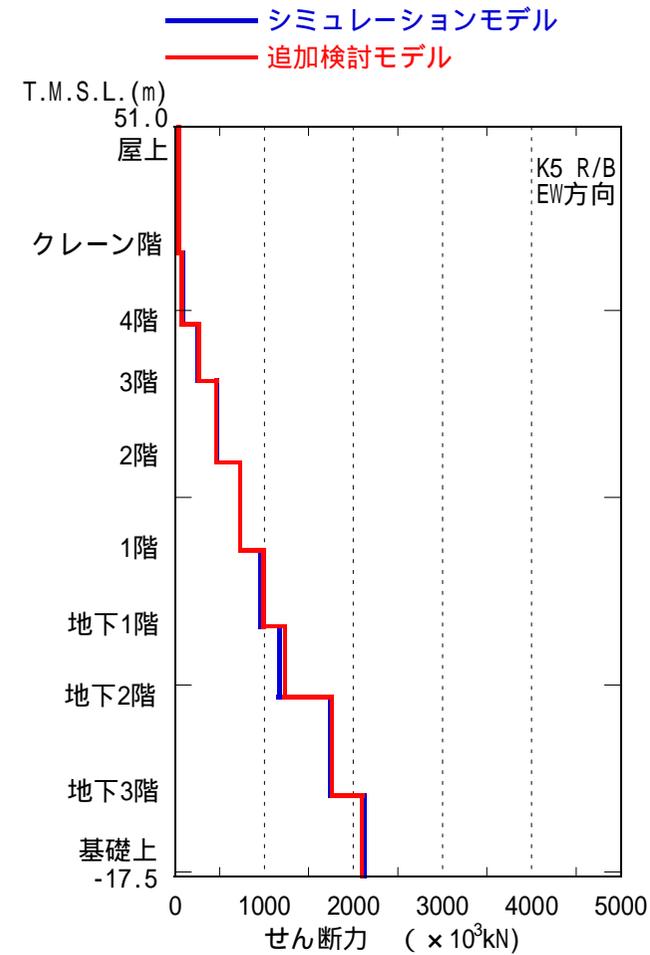
4.1 原子炉建屋の追加検討モデルによる検討

■ 層せん断力の比較

- 各軸のせん断力を1軸へ集約し、現状の解析モデルによる結果と比較し、結果に大きな差が無いことを確認した。



南北方向



東西方向

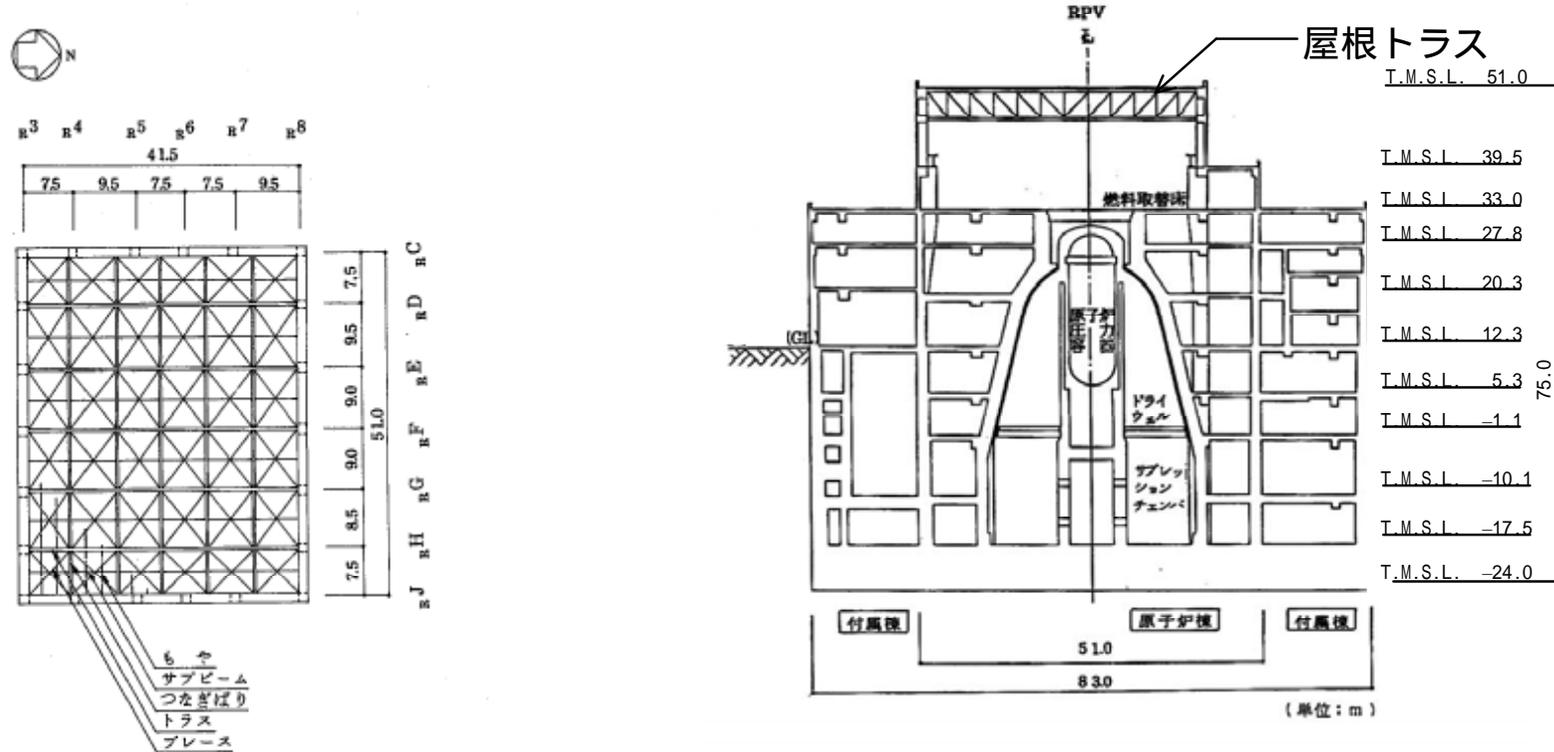
4 . 1 原子炉建屋の耐震健全性評価結果（まとめ）

- 南北方向、東西方向の中間階におけるシミュレーション解析結果は、最大応答加速度、加速度応答波形、加速度応答スペクトル共に十分整合していることを確認した。鉛直方向については、加速度応答スペクトルの解析結果が一部の周期帯で大きめの評価となっているものの、その部分を除けば観測記録と解析結果が整合していることを確認した。
- せん断応力による検討の結果、発生応力は設計配筋量のみで負担可能な短期せん断応力度を下回る結果となり、概ね弾性範囲と判断された。
- 以上のことを踏まえ、原子炉建屋の耐震健全性は確保されているものと評価した。
- 点検結果では、1階の耐震壁において、ひび割れの本数が多いことが確認されているが、解析結果では顕著な差は確認できなかった。
- 床の柔性を考慮した追加検討モデルによる検討を実施し、現状の解析モデルと応答結果に大きな差が無いことを確認した。

4.2 屋根トラスの耐震健全性評価

屋根トラスの概要

5号機原子炉建屋の上部構造は、鉄骨造陸屋根をもつ屋根トラスで構成されている。屋根トラスは、鉛直方向の地震動の影響を受けやすいと考え、水平方向と鉛直方向の同時入力による評価を行うため、3次元モデルによる地震応答解析を行う。



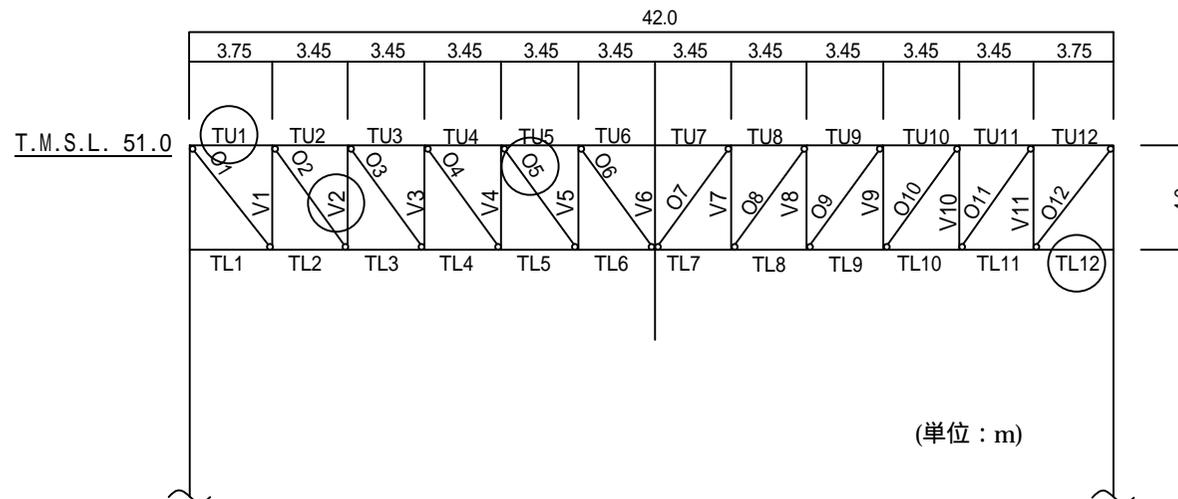
屋根伏図 (T.M.S.L.51.0m)

断面図

4.2 屋根トラスの耐震健全性評価結果

屋根トラスの評価結果の比較

部材		発生応力 (N/mm ²)	評価基準値 (N/mm ²)	発生応力/ 評価基準値	位置	使用部材
上弦材	(引張)	17.7	325	0.23	TU1	H-428×407×20×35
	(曲げ)	55.9	325			
下弦材	(圧縮)	66.2	225	0.47	TL12	H-428×407×20×35
	(曲げ)	58.7	325			
斜材	(引張)	81.3	235	0.35	O5	2[s-250×90×9×13
束材	(圧縮)	102.4	274	0.40	V2	H-344×348×10×16
	(曲げ)	7.3	325			



: (発生応力/評価基準値)が最大となる位置を示す

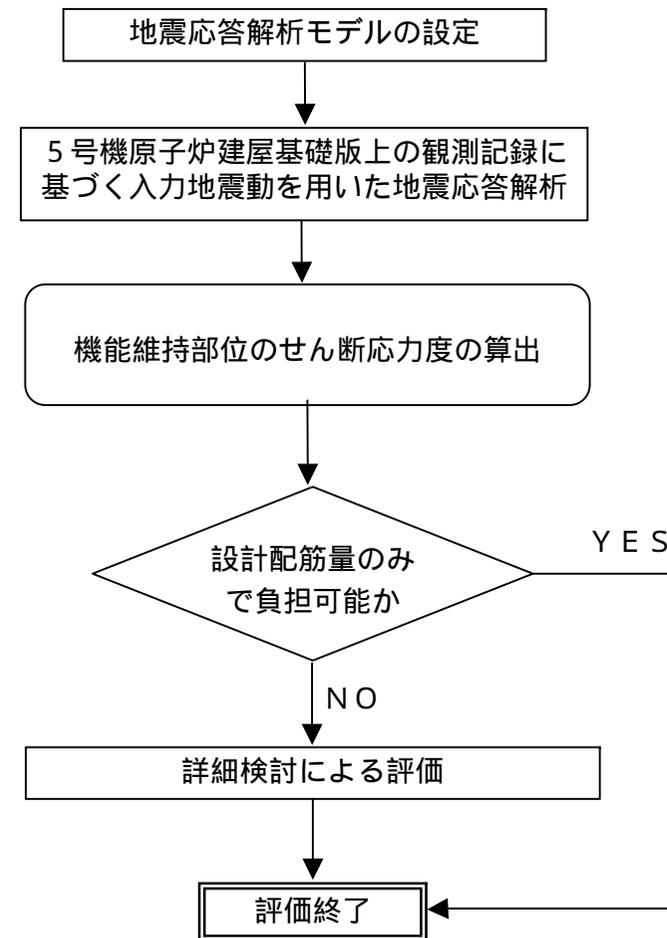
4.2 屋根トラスの耐震健全性評価結果（まとめ）

- 地震応答解析の結果、屋根トラスを構成する各部材の発生応力度と評価基準値の比は最大でも 0.2～0.5 程度であり、概ね弾性範囲であると判断されることから、耐震健全性は確保されているものと評価した。

4.3 タービン建屋のシミュレーション解析

■タービン建屋のシミュレーション解析の評価手順

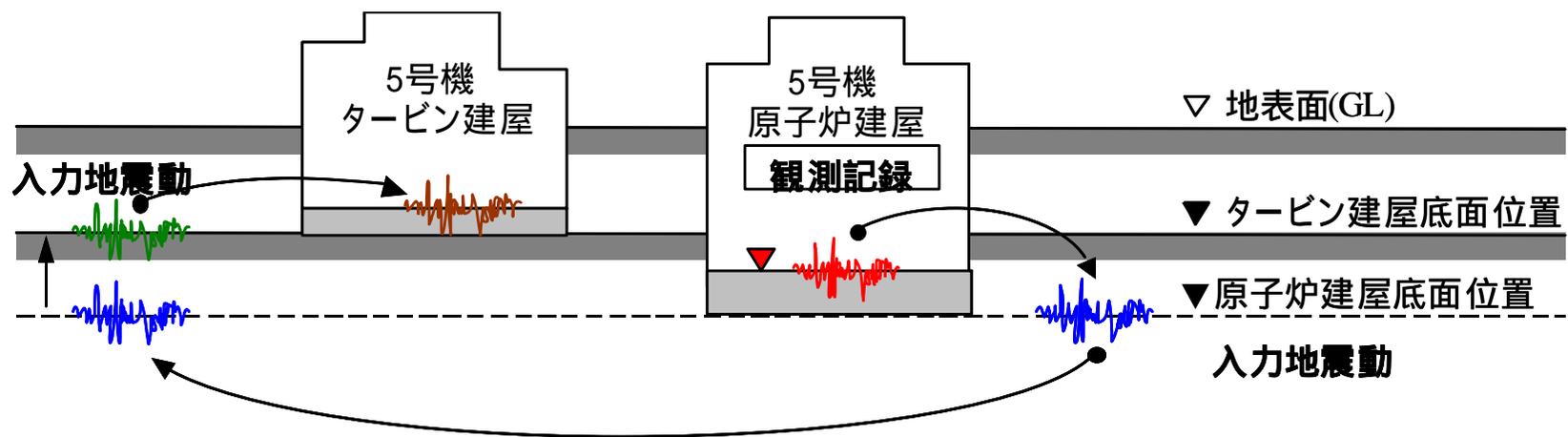
タービン建屋の構造評価は、タービン建屋の一部に耐震上重要な機器・配管系の間接支持機能が要求されることから、該当部位の機能維持について評価することとする。



4.3 タービン建屋のシミュレーション解析

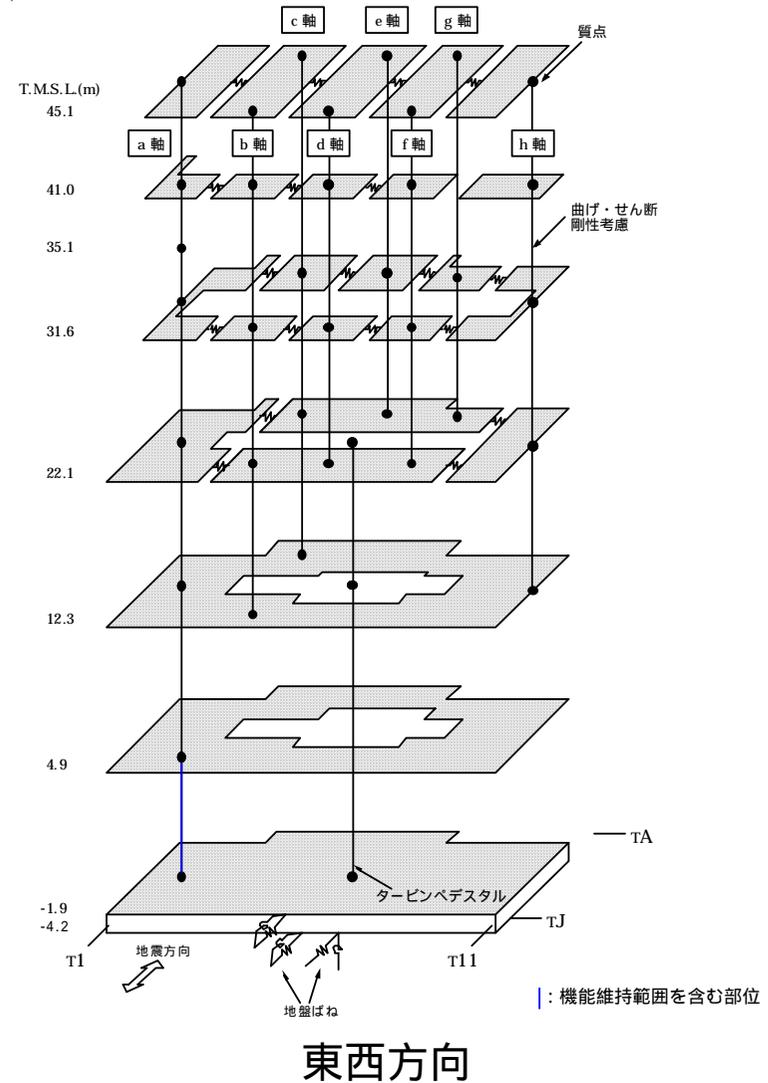
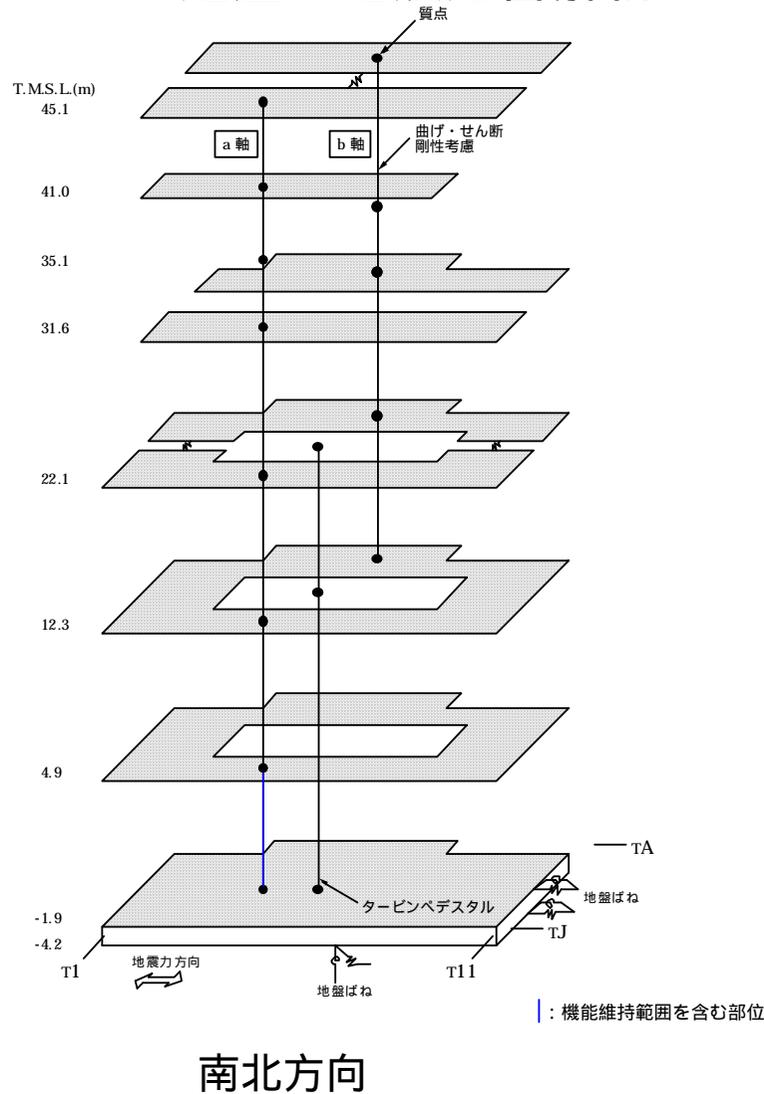
タービン建屋のシミュレーション解析方針

5号機タービン建屋の地震応答解析に用いる入力地震動は、5号機の原子炉建屋の基礎版上における観測記録波から、原子炉建屋の解析モデルの伝達関数を用いて基礎下端における入力地震動を算出し、それをタービン建屋の地盤モデルの同一レベル位置に定義し、地盤の応答解析を実施して求める。



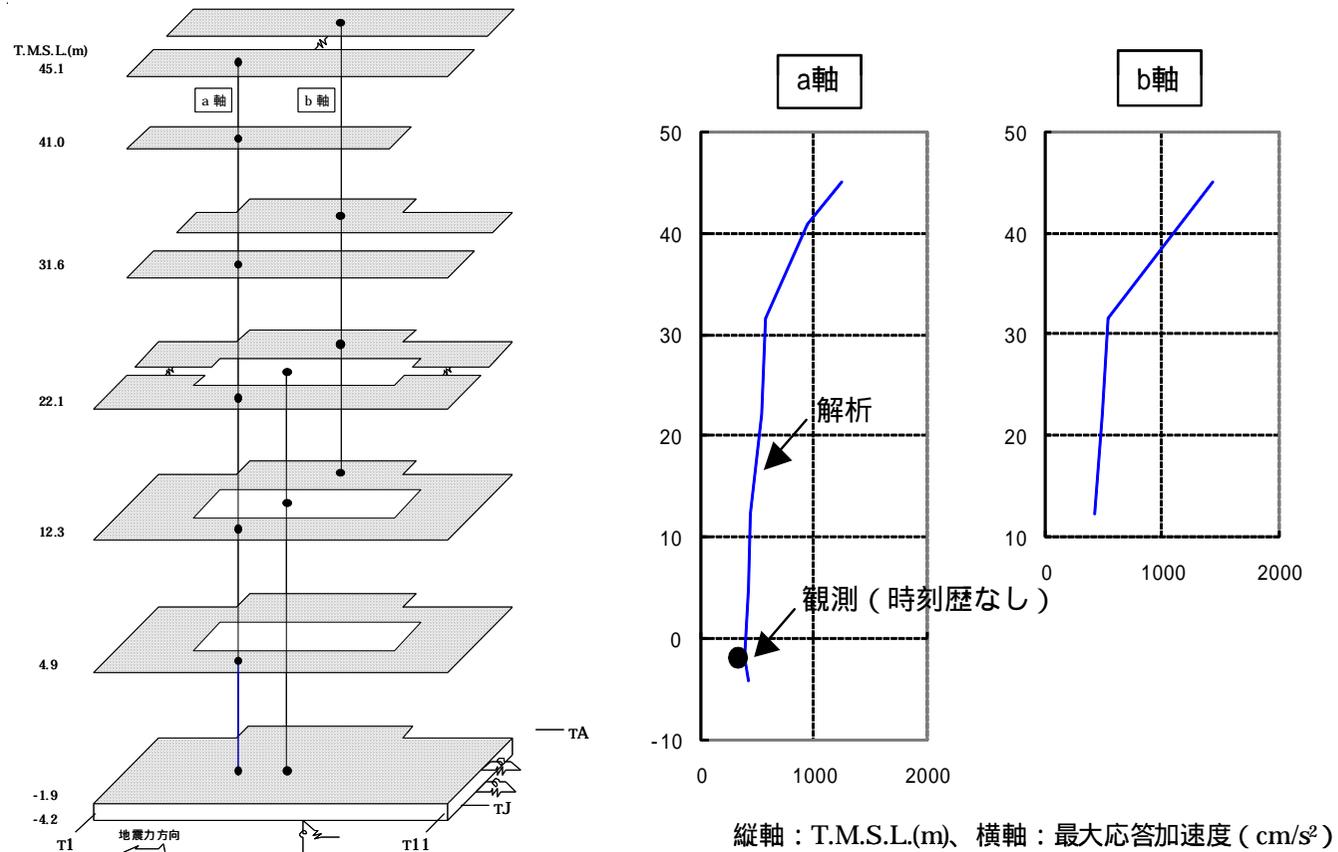
4.3 タービン建屋のシミュレーション解析

タービン建屋の地震応答解析モデル



4.3 タービン建屋のシミュレーション解析結果

最大応答加速度の比較（南北方向）

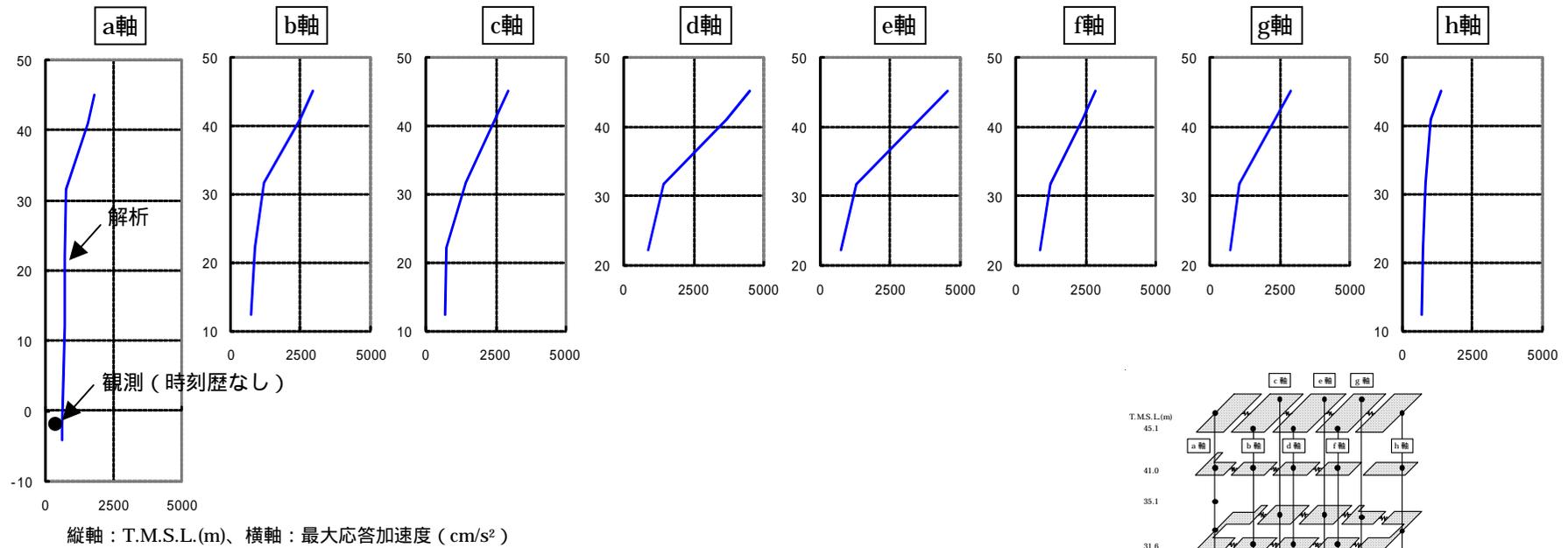


| : 機能維持範囲を含む部位

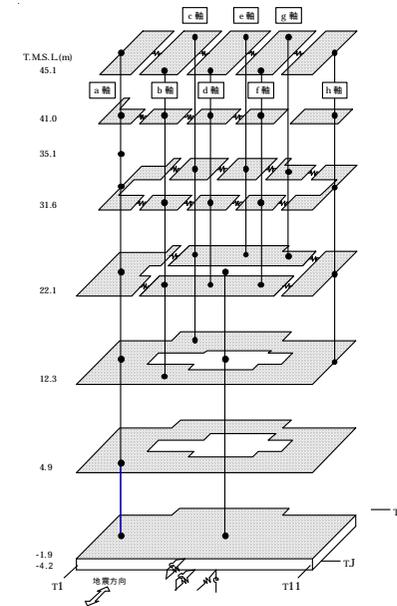
南北方向

4.3 タービン建屋のシミュレーション解析結果

最大応答加速度の比較（東西方向）

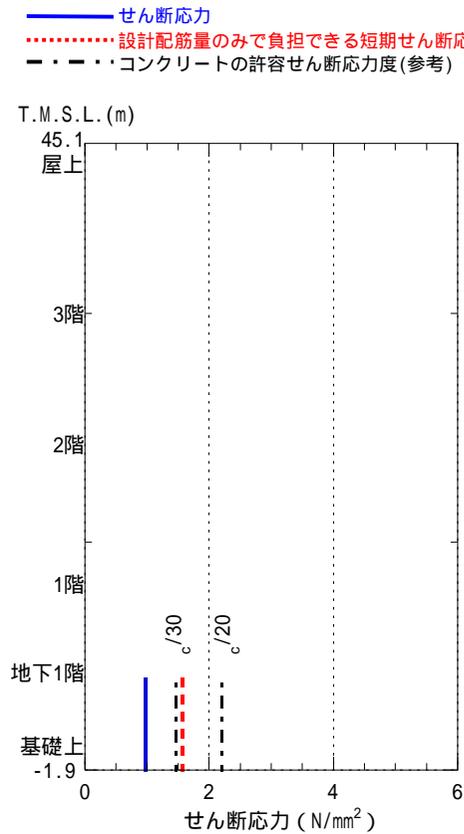


東西方向



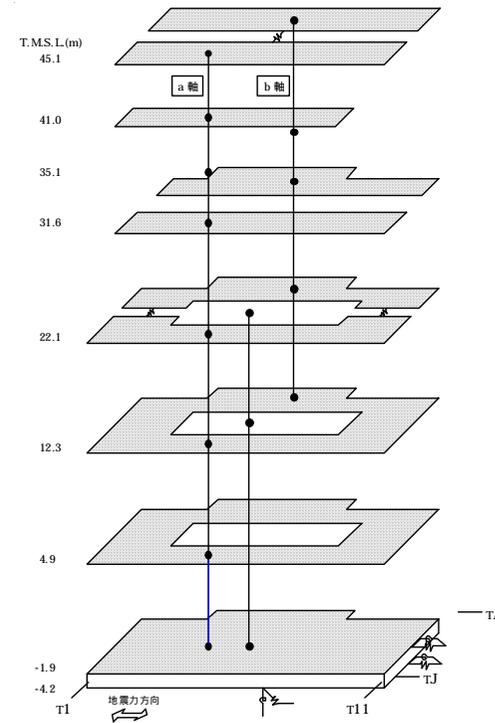
4.3 タービン建屋の耐震健全性評価結果

耐震壁のせん断応力の比較（南北方向）



機能維持部位

c : コンクリートの実強度



機能維持範囲を含む部位

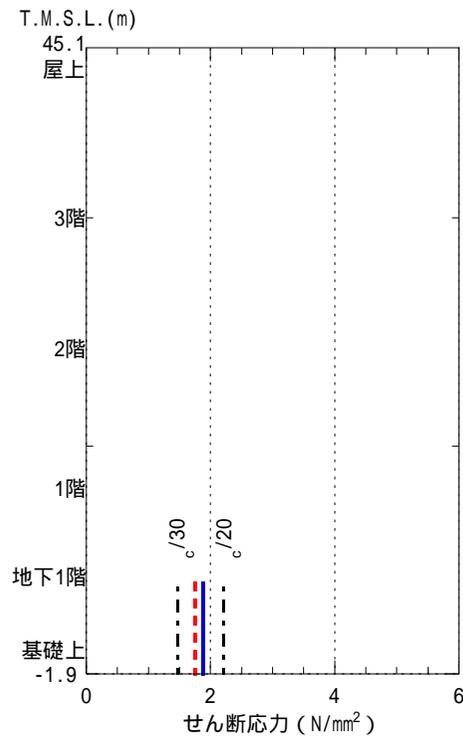
は機能維持範囲を含む

南北方向

4.3 タービン建屋の耐震健全性評価結果

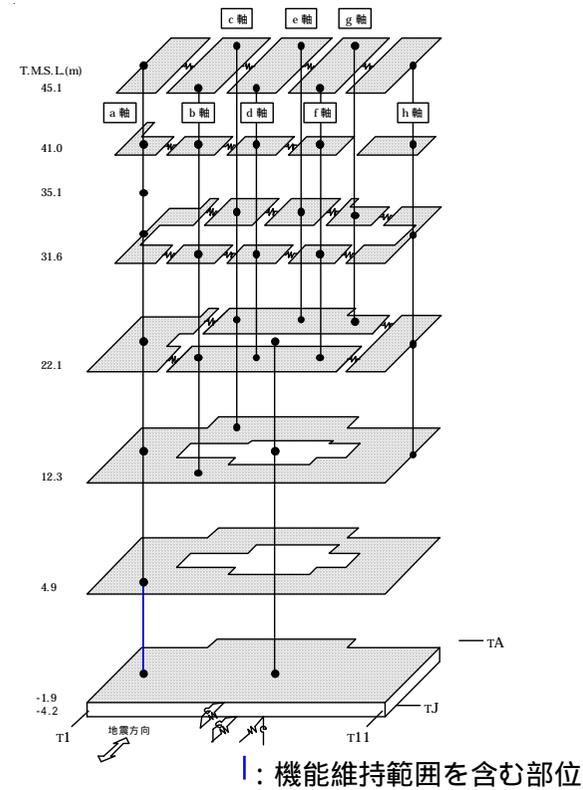
耐震壁のせん断応力の比較（東西方向）

— せん断応力
- - - 設計配筋量のみで負担できる短期せん断応力度 ($p_w \cdot y$)
- - - コンクリートの許容せん断応力度 (参考)



c: コンクリートの実強度

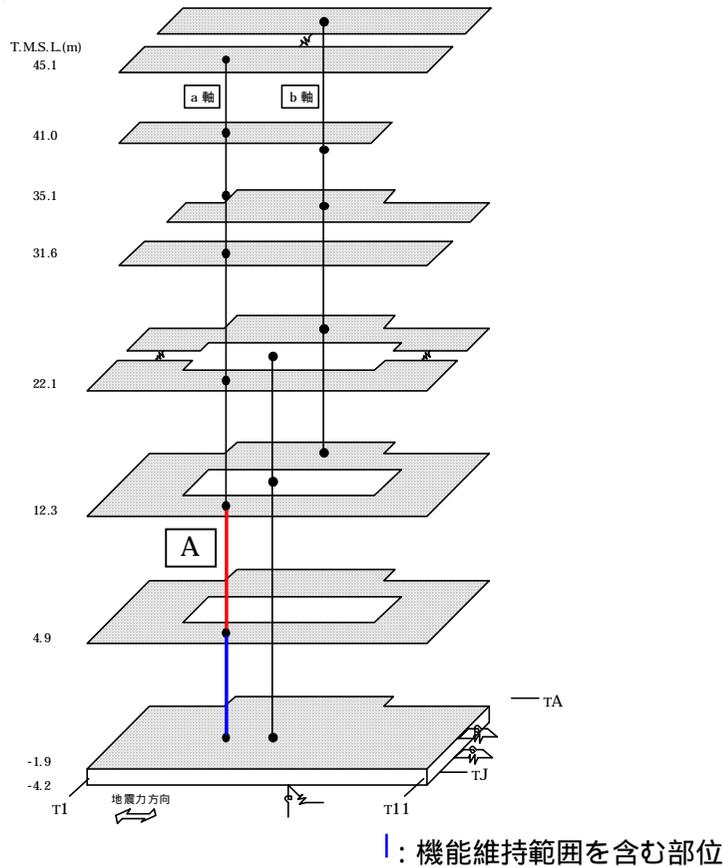
機能維持部位



東西方向

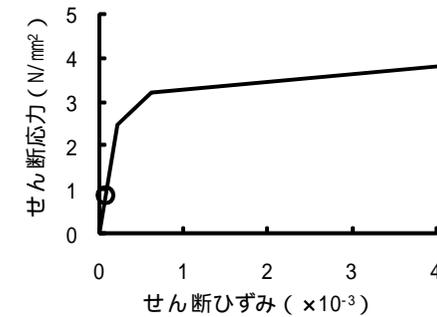
4.3 タービン建屋の耐震健全性評価結果

耐震壁のせん断スケルトン曲線上の最大応答値の比較（南北方向）



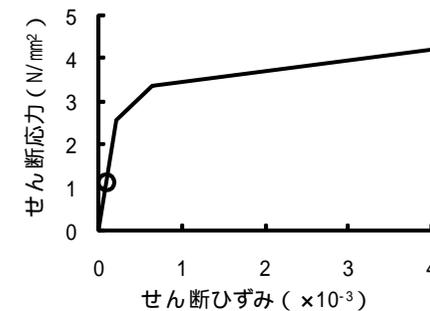
はせん断スケルトン曲線上の最大応答値を表す。

機能維持範囲を含まない部位で第1折点に最も近い部位 **A**



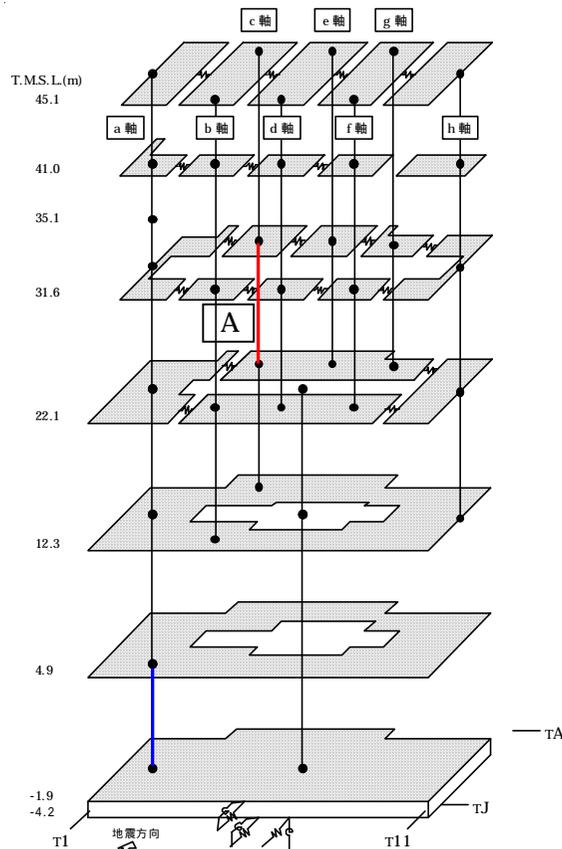
は機能維持範囲を含むはせん断スケルトン曲線上の最大応答値を表す。

機能維持範囲



4.3 タービン建屋の耐震健全性評価結果

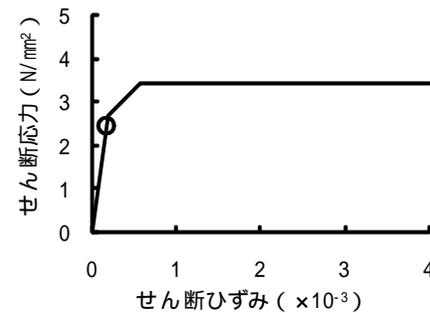
耐震壁のせん断スケルトン曲線上の最大応答値の比較（東西方向）



┃: 機能維持範囲を含む部位

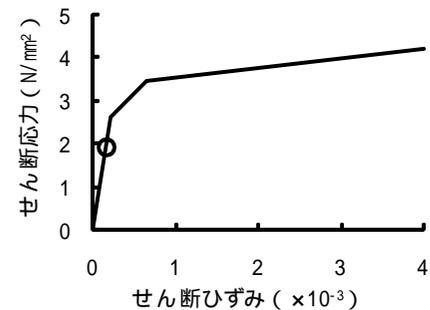
はせん断スケルトン曲線上の最大応答値を表す。

機能維持範囲を含まない部位で第1折点に最も近い部位 **A**



は機能維持範囲を含む
はせん断スケルトン曲線上の最大応答値を表す。

機能維持範囲

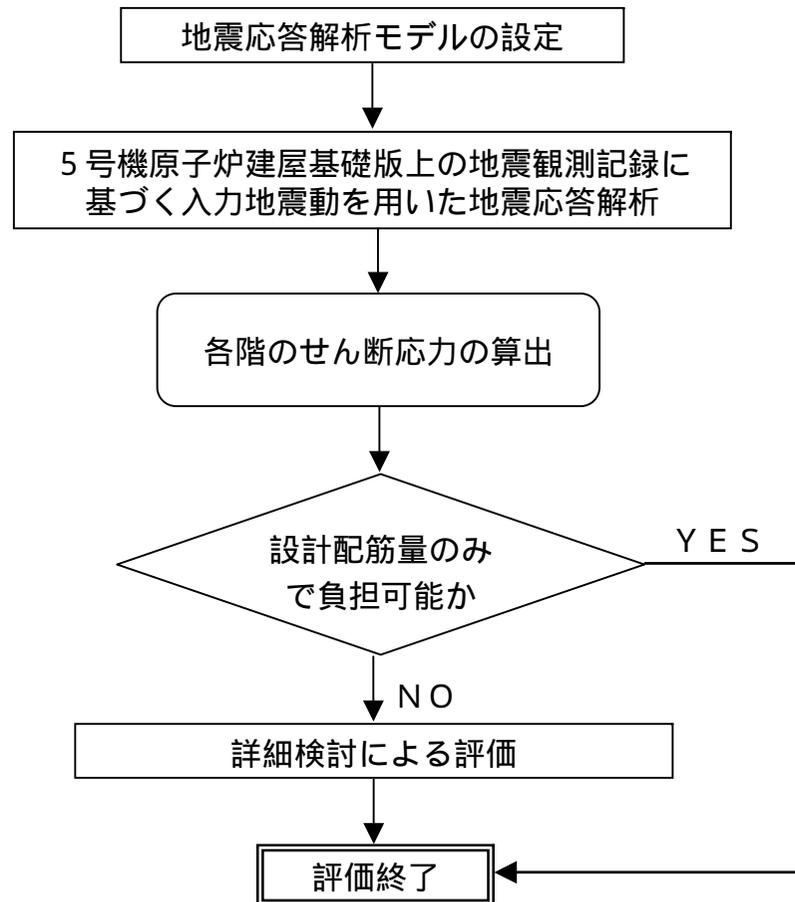


4.3 タービン建屋の耐震健全性評価結果（まとめ）

- コンクリートの負担分を考慮せずに、設計配筋量のみで負担可能な短期せん断応力度と比較した場合、東西方向の発生応力はわずかに上回る結果となり、南北方向の発生応力は、短期せん断応力度を下回る結果となった。
- コンクリートの負担分を考慮し、せん断スケルトン曲線上の応答としてみた場合は、東西方向、南北方向共に第一折れ点を下回る結果となり、弾性範囲にあると判断された。
- 以上のことを踏まえ、タービン建屋の耐震健全性は確保されているものと評価した。

4 . 4 海水熱交換器建屋のシミュレーション解析

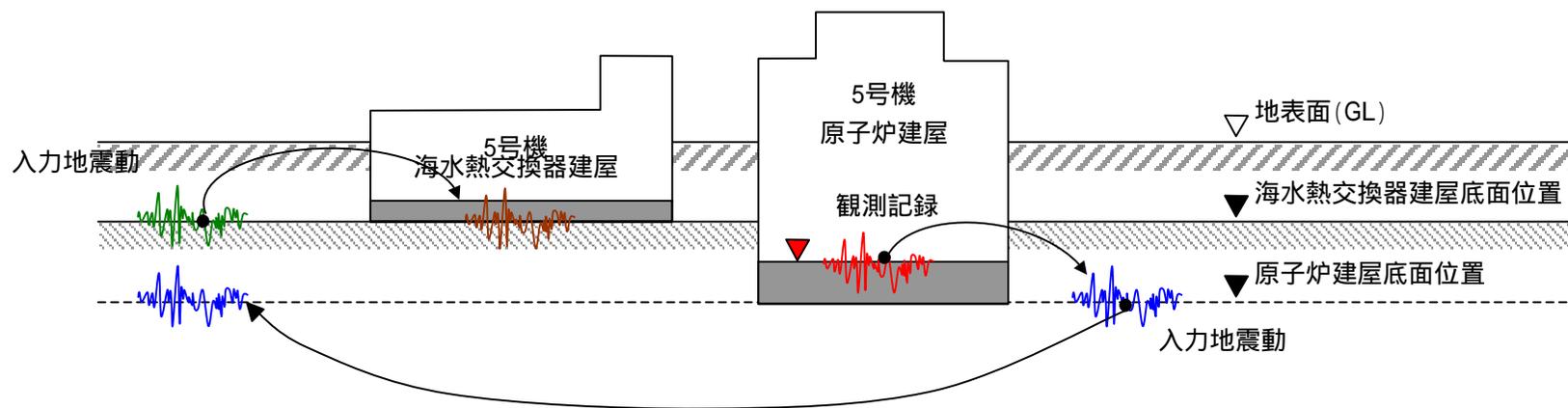
海水熱交換器建屋のシミュレーション解析の評価手順



4.4 海水熱交換器建屋のシミュレーション解析

海水熱交換器建屋のシミュレーション解析方針

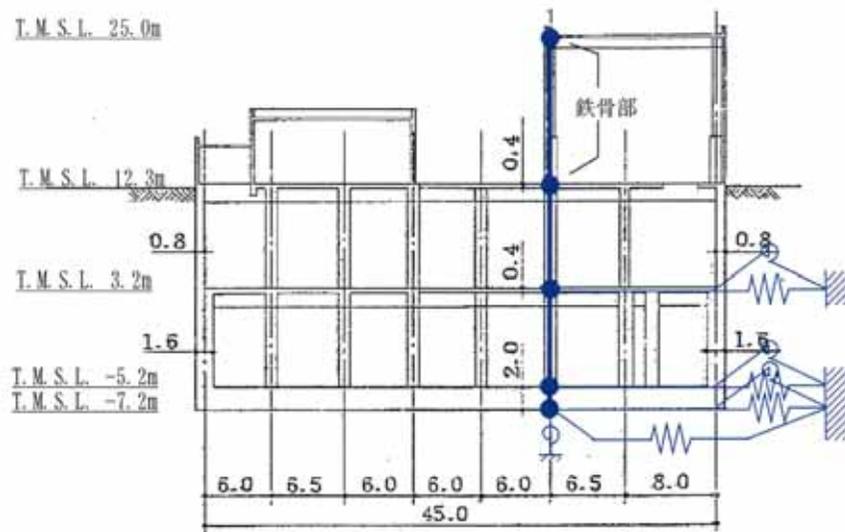
- 5号機海水熱交換器建屋の地震応答解析に用いる入力地震動 は、5号機原子炉建屋基礎版上での地震観測記録から、原子炉建屋の解析モデルの伝達関数を用いて基礎下端における入力地震動 を算出し、それを海水熱交換器建屋の地盤モデルの同一レベル位置に定義して、地盤の応答解析を実施して求める。



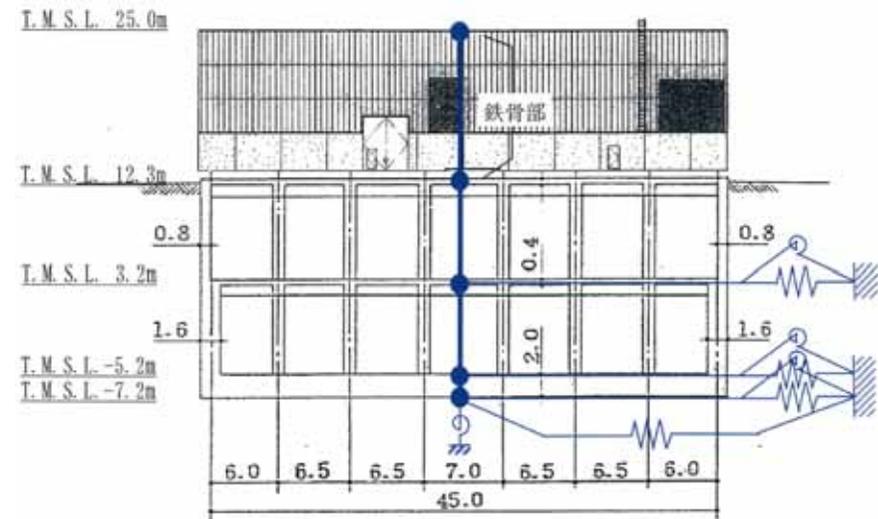
入力地震動の考え方

4.4 海水熱交換器建屋のシミュレーション解析

海水熱交換器建屋の地震応答解析モデル



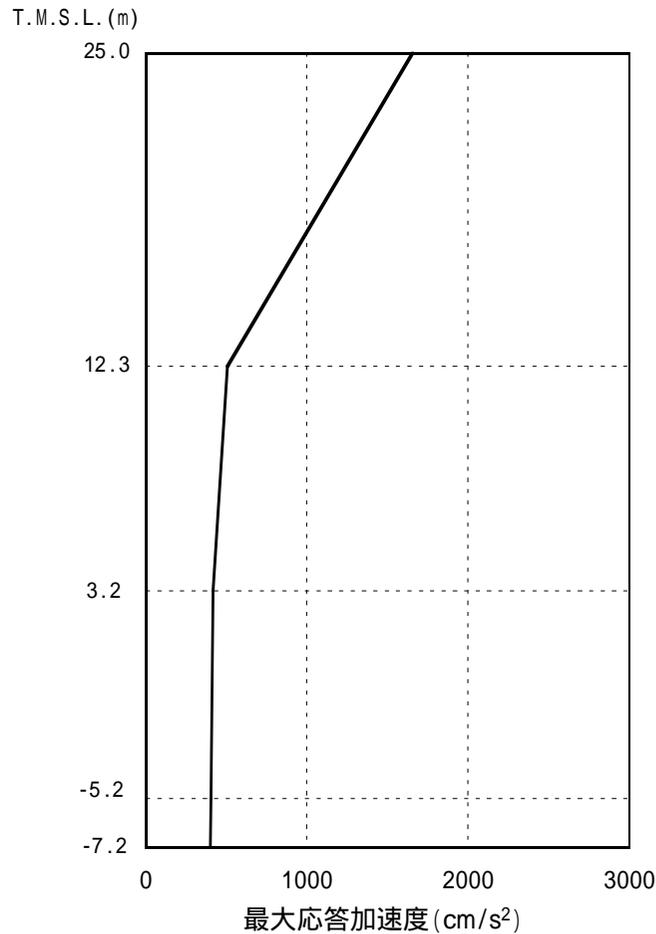
解析モデル（南北方向）



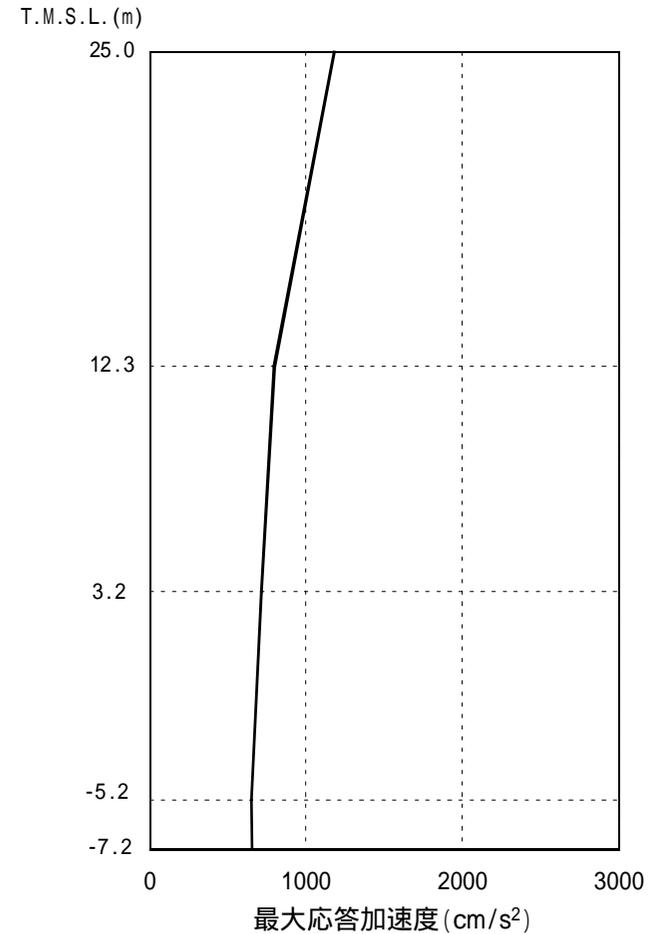
解析モデル（東西方向）

4.4 海水熱交換器建屋の耐震健全性評価結果

最大応答加速度



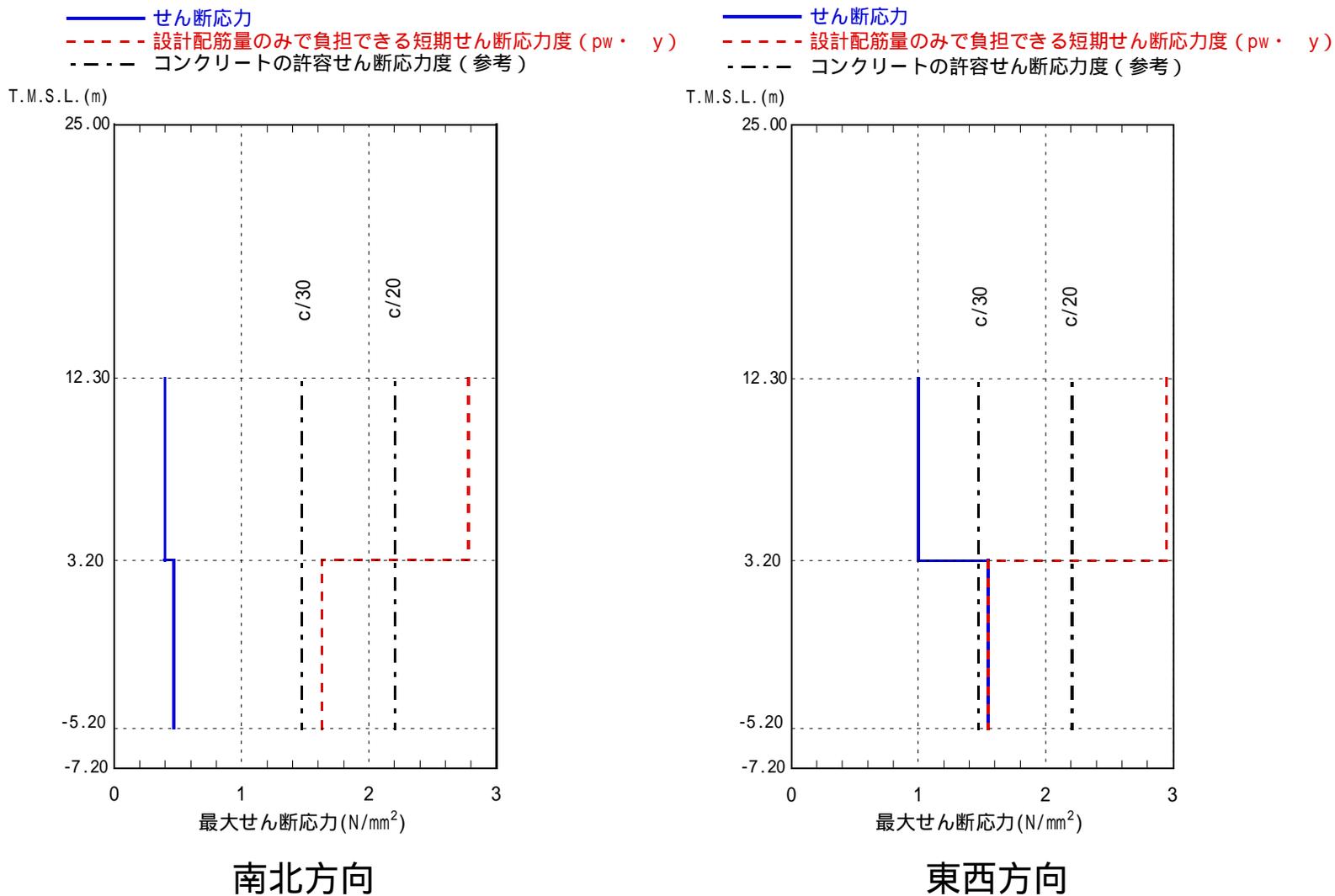
南北方向



東西方向

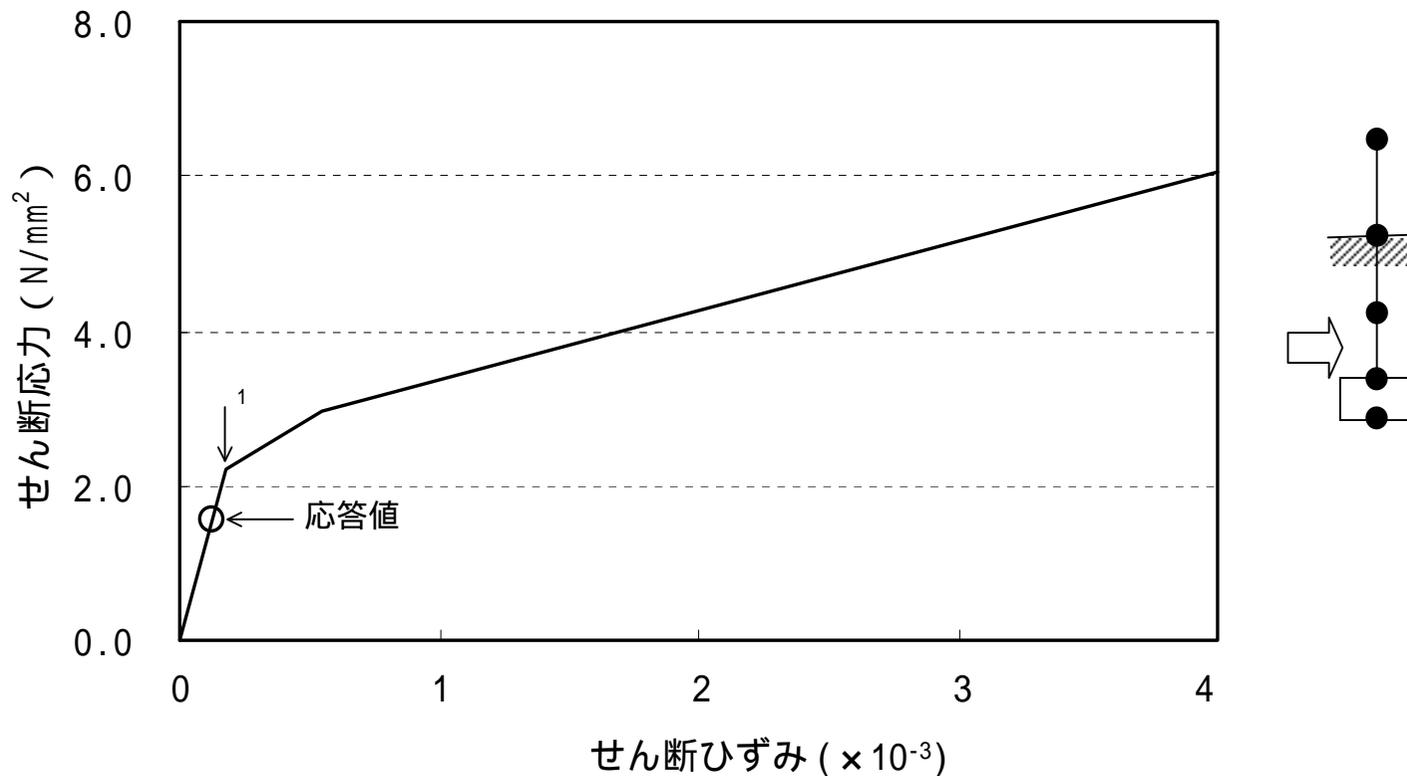
4.4 海水熱交換器建屋の耐震健全性評価結果

耐震壁のせん断応力の比較



4.4 海水熱交換器建屋の耐震健全性評価結果

- せん断スケルトン曲線上の応答値（東西方向、地下2階）
 - せん断応力による検討の結果、東西方向の地下二階での裕度が少なかったため、せん断スケルトン曲線上に応答値をプロットする追加検討を実施した。



4 . 4 海水熱交換器建屋の健全性評価結果（まとめ）

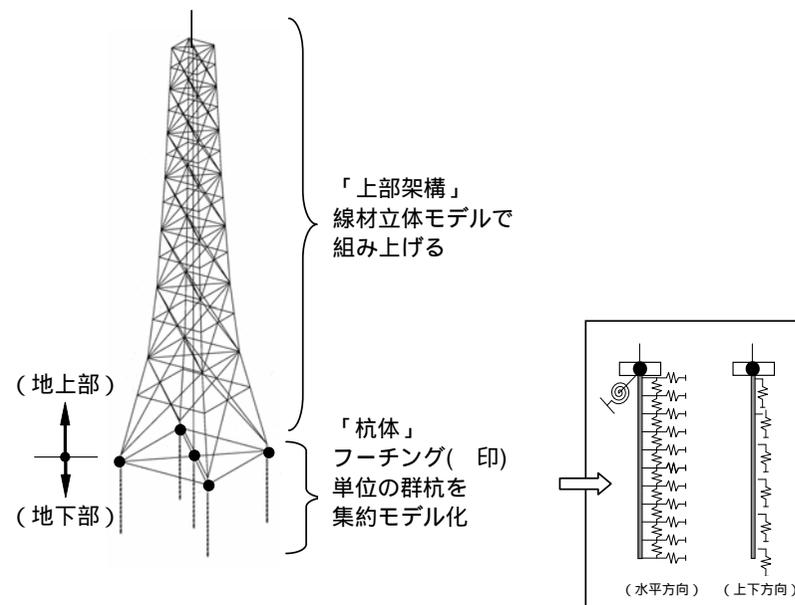
- コンクリートの負担分を考慮せずに、設計配筋量のみで負担可能な短期せん断応力度と比較した場合、東西方向・地下二階の発生応力が短期せん断応力度とほぼ同等となり、それ以外の部位では、短期せん断応力度を下回る結果となった。
- 裕度の少なかった東西方向・地下二階については、追加検討として、コンクリートの負担分を考慮して算出したせん断スケルトン曲線上の応答値を確認した。その結果、最大応答値はせん断スケルトン曲線の第一折れ点を下回る結果となり、弾性範囲にあると判断された。
- 以上のことを踏まえ、海水熱交換器建屋の耐震健全性は確保されているものと評価した。

4.5 排気筒の耐震健全性評価

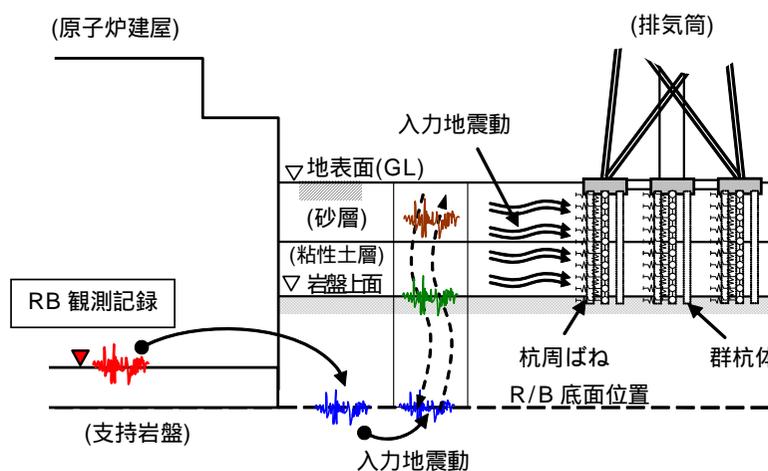
排気筒の地震応答解析モデル

排気筒の地震応答解析モデルは、杭-上部構造を立体的にモデル化した立体架構モデルとする。

解析モデルへの入力は、5号機原子炉建屋の基礎下端における入力地震動を算出し、それを排気筒の地盤モデルの同一レベル位置に定義し、地盤モデルを用いて入力地震動を求める手順で行う。



地震応答解析モデル



地上型排気筒の入力地震動の考え方

4.5 排気筒の耐震健全性評価結果

固有値解析結果

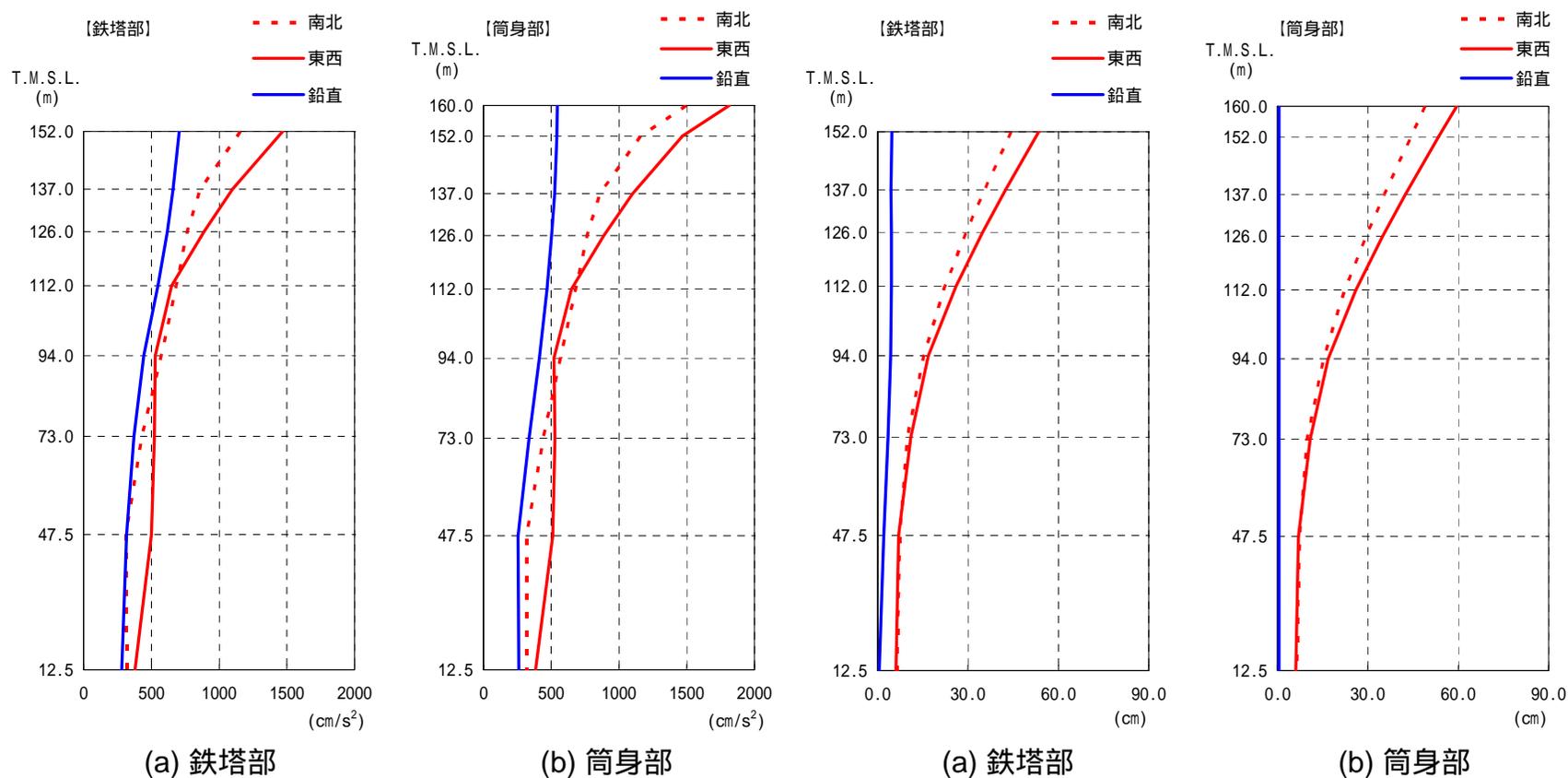
排気筒の地震応答解析に用いた立体架構モデルの固有値解析結果を示す。

		周期 (s)	振動数 (Hz)	刺激係数(注)	備考
南北方向	1次	1.254	0.80	1.952	全体1次
	2次	0.429	2.33	-2.351	全体3次
	3次	0.257	3.89	4.618	全体5次
東西方向	1次	1.254	0.80	1.952	全体2次
	2次	0.429	2.33	-2.351	全体4次
	3次	0.257	3.89	4.618	全体6次
鉛直方向	1次	0.155	6.44	2.379	全体12次
	2次	0.136	7.38	2.420	全体13次
	3次	0.095	10.57	-1.958	全体18次

注) モードごとに固有ベクトルの最大値を1に規準化して得られる刺激係数を示す。

4.5 排気筒の耐震健全性評価結果

最大応答値の比較 - 1

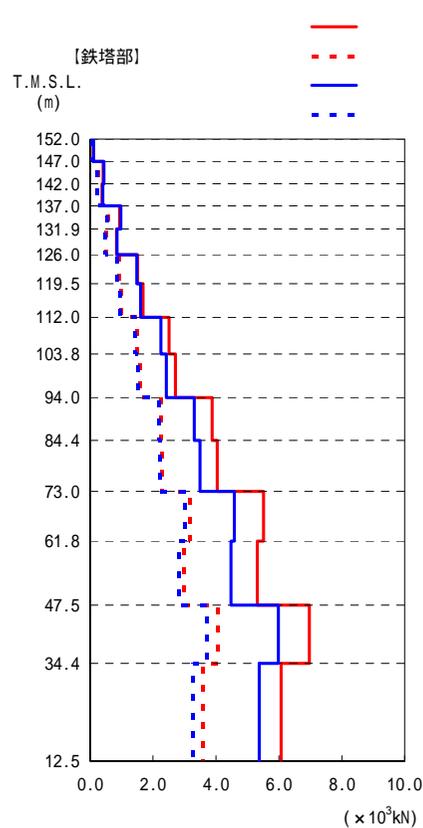
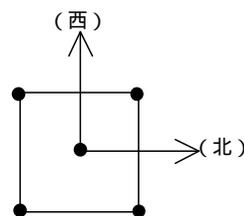


最大応答加速度

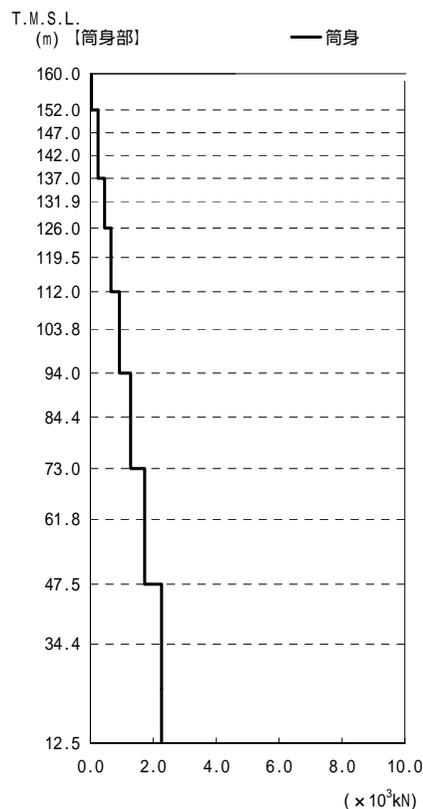
最大応答変位

4.5 排気筒の耐震健全性評価結果

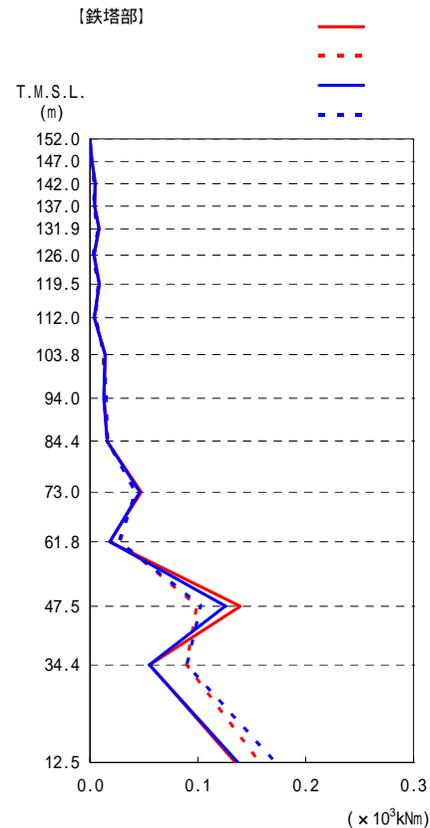
最大応答値の比較 - 2



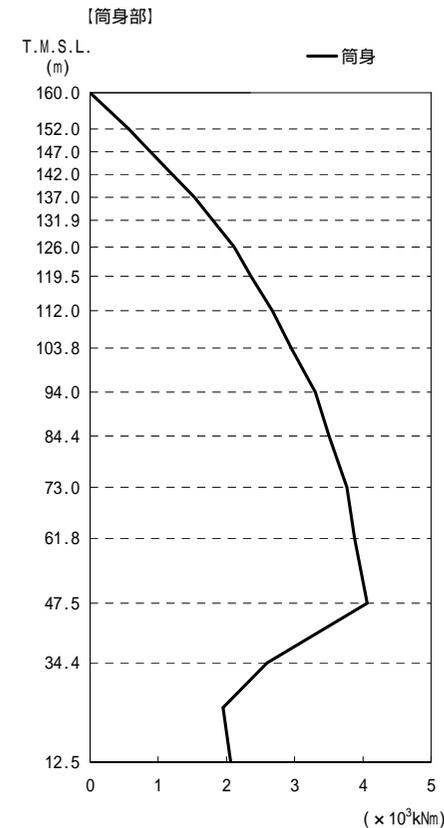
(a) 鉄塔部 (主柱材)



(b) 筒身部



(a) 鉄塔部 (主柱材)



(b) 筒身部

最大応答軸力

最大応答曲げモーメント

4.5 排気筒の耐震健全性評価結果

鉄塔部及び筒身部の健全性評価結果

各部材の評価結果のうち、発生応力度と評価基準値の比（発生応力 / 評価基準値）が最大となる部位について、評価結果を示す。

各部の最大応力比

箇所	部材	N (kN)	M (kNm)	A ($\times 10^2 \text{mm}^2$)	Z ($\times 10^3 \text{mm}^3$)	${}_s\sigma_c$ (N/mm ²)	${}_s\sigma_b$ (N/mm ²)	${}_s f_c$ (N/mm ²)	${}_s f_b$ (N/mm ²)	$\frac{\sigma_c + s\sigma_b}{{}_s f_c + {}_s f_b}$
鉄塔	主柱材	4039	46	225	3301	179.3	13.8	256.5	325.0	0.74
	斜材	1148	-	88	659	131.1	-	259.7	-	0.50
	水平材	646	-	69	522	94.3	-	186.4	-	0.51
筒身	-	1421	3828	1073	91275	13.2	41.9	189.8	200.8	0.28

注) 有効板厚：腐蝕代を内径に2mm考慮

記号の説明

N：軸力（圧縮を正とする。）

M：曲げモーメント

A：断面積

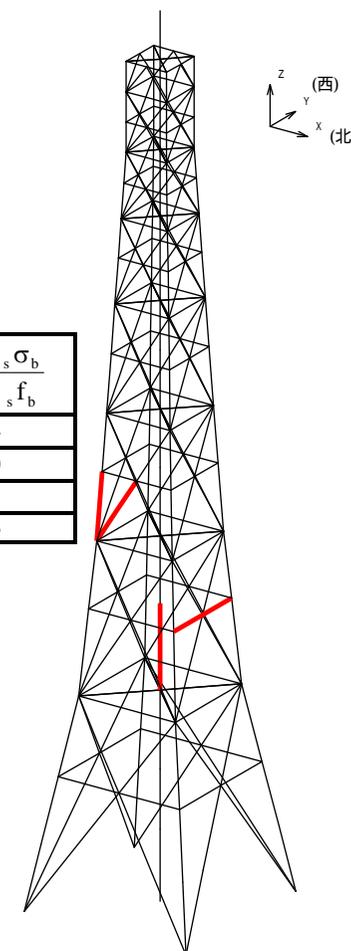
Z：断面係数

${}_s f_c$ ：許容圧縮応力度

${}_s f_b$ ：許容曲げ応力度

${}_s\sigma_c$ ：圧縮応力（N/A）

${}_s\sigma_b$ ：曲げ応力（M/Z）



応力評価部位

：最大応力度発生位置を示す。

4.5 排気筒の耐震健全性評価結果

斜材（接合部ボルト異音発生箇所）の健全性評価結果

斜材のうち、最大応力比が発生する部材と点検時に接合部ボルトで異音が確認された部材の評価結果を示す。

斜材の応力比（最大応力比の部材、接合部ボルト異音の部材）

箇所	部材	N (kN)	M (kNm)	A ($\times 10^2 \text{mm}^2$)	Z ($\times 10^3 \text{mm}^3$)	${}_s\sigma_c$ (N/mm ²)	${}_s\sigma_b$ (N/mm ²)	${}_s f_c$ (N/mm ²)	${}_s f_b$ (N/mm ²)	$\frac{{}_s\sigma_c + {}_s\sigma_b}{{}_s f_c + {}_s f_b}$
斜材 (鉄塔)	最大応力比の部材	1148	-	88	659	131.1	-	259.7	-	0.50
	ボルト異音の部材	425	-	65	411	65.2	-	285.8	-	0.23

以上の結果より、接合部ボルトのハンマリングにより異音が確認された部位に該当する斜材は、解析評価上、特段大きな応力が生じている結果とはなっていない。

記号の説明

N：軸力（圧縮を正とする。）

M：曲げモーメント

A：断面積

Z：断面係数

${}_s f_c$ ：許容圧縮応力度

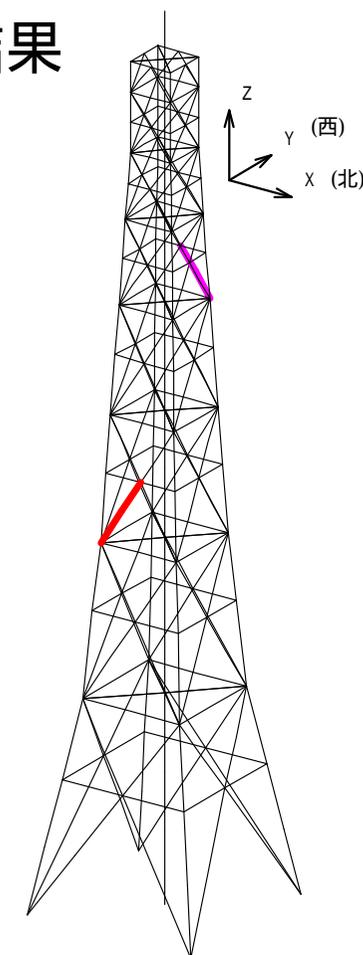
${}_s f_b$ ：許容曲げ応力度

${}_s\sigma_c$ ：圧縮応力（N/A）

${}_s\sigma_b$ ：曲げ応力（M/Z）

—：最大応力比発生位置

—：接合部ボルト異音発生箇所

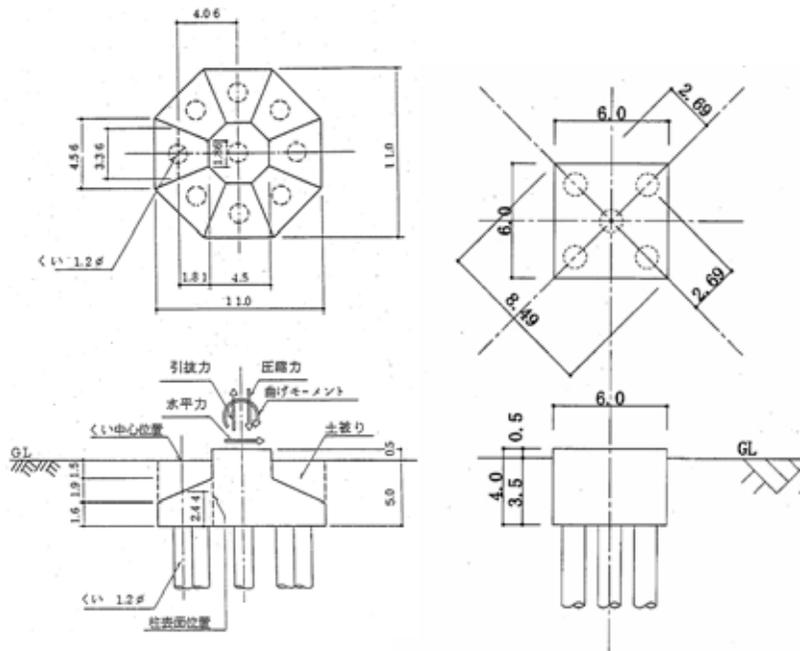


応力評価部位

4.5 排気筒の耐震健全性評価結果

基礎部の健全性評価結果

排気筒のフーチング基礎部と杭配置の概要、上部架溝からフーチング基礎に伝達される荷重および杭の支持力確認結果を示す。



(a) 鉄塔部フーチング基礎 (b) 筒身部フーチング基礎

フーチング基礎の概要

各部位の最大応力度比

		鉄塔部	筒身部	備考
上部から伝達される荷重	圧縮力 (kN/脚)	7,747	2,155	長期軸力含む
	引抜き力 (kN/脚)	5,592	(生じない)	
	水平力 (kN/脚)	1,987	118	南北方向及び東西方向のベクトル和
	曲げモーメント (kNm/脚)	163	1,963	
杭支持力の確認用の荷重 (フーチング下面)	フーチング基礎下端位置における曲げモーメント (kNm/脚)	11,092	2,436	南北方向及び東西方向のベクトル和
	フーチング基礎廻り自重 (kN/脚)	12,876	4,962	基礎梁及び土被り重量含む

杭の鉛直支持力等の確認(鉄塔部)

検定項目	発生応力	評価基準値 (抵抗力)	発生応力等評価基準値
全体引き抜き力の確認 (kN/脚)	5,592 (最大引抜き力)	12,876 (フーチング+基礎梁+土被り)	0.43
杭の支持力の確認 (最外縁杭: kN/本)	2,974 (最大圧縮力)	3,923 (短期許容支持力)	0.76

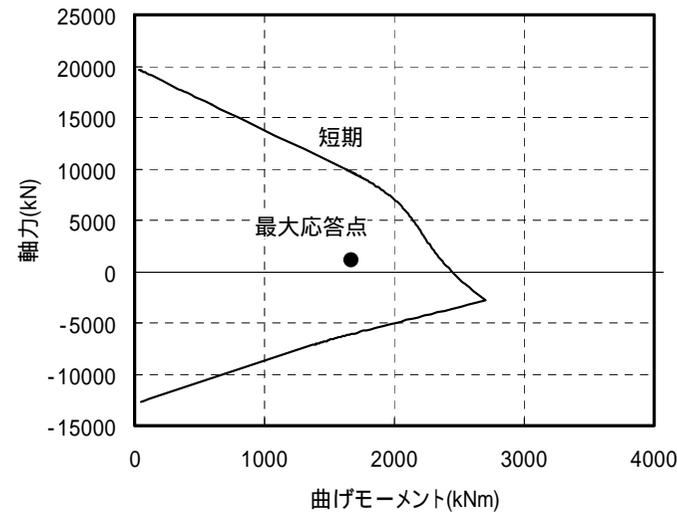
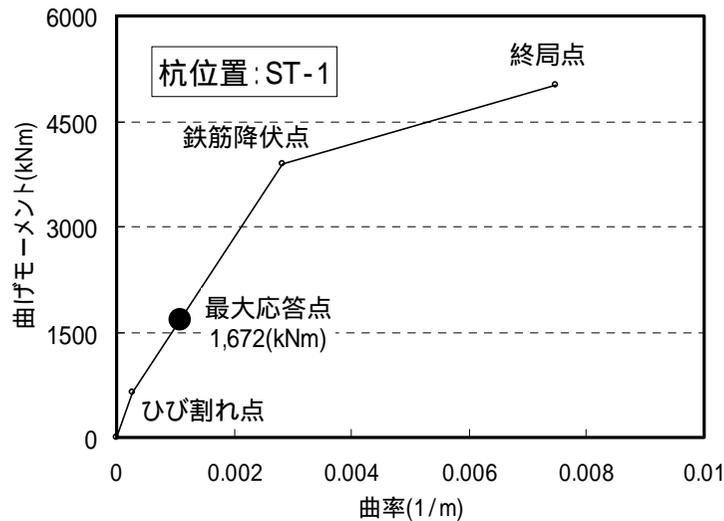
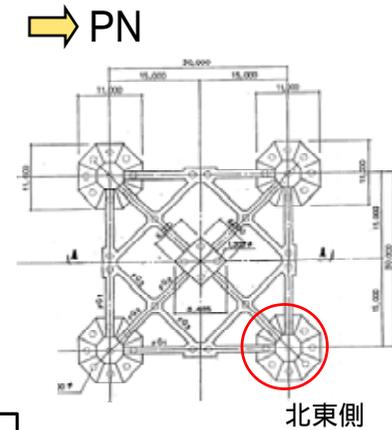
杭の鉛直支持力等の確認(筒身部)

検定項目	発生応力	評価基準値 (抵抗力)	発生応力等評価基準値
全体引き抜き力の確認 (kN/脚)	- (引抜きは生じない)	4,962 (フーチング+基礎梁+土被り)	-
杭の支持力の確認 (最外縁杭: kN/本)	1,876 (最大圧縮力)	3,923 (短期許容支持力)	0.48

4.5 排気筒の耐震健全性評価結果

基礎部の健全性評価結果

北東側フーチング部分の杭において、地震応答解析から求まる応答曲げモーメントおよび応答軸力を曲げモーメント-曲率(M- κ)関係図と軸力-曲げモーメント相関図にプロットして下図に示す。



注) 最大応答点 : 最大曲げモーメント発生時の曲げモーメントおよび軸力の点をプロット

(a) 杭のM- κ 関係図と応答プロット点

(b) 杭のN-M相関図と応答プロット点

地震応答解析から求まる杭頭付近の応答軸力～曲げモーメント関係 (EW方向)

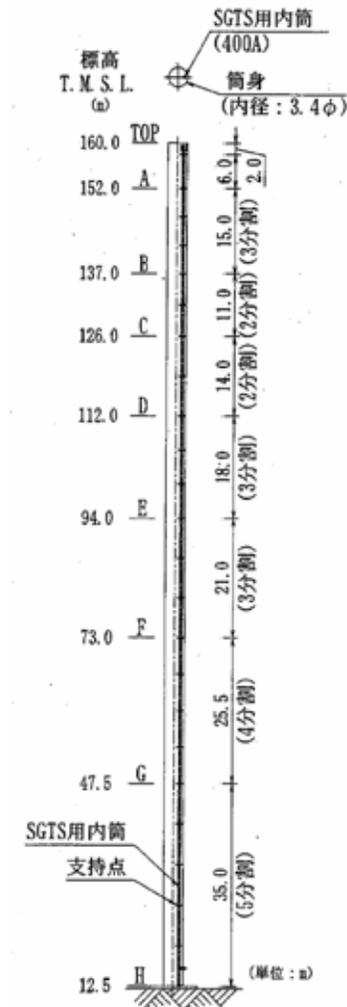
4.5 排気筒の耐震健全性評価結果

SGTS（非常用ガス処理系）用排気筒の健全性評価結果

SGTS用排気筒は筒身（換気空調系用）内で筒身に支持されている。SGTS用排気筒の剛性は筒身の剛性に比べて小さいので、変形は筒身の変形に追従する。したがって、筒身の変位をSGTS用排気筒に強制的に与えることにより応力を算出し、最大応力で健全性の確認を行う。

筒身の変位

支持点	標高 T.M.S.L. (m)	地震応答解析結果 (mm)
TOP	160.0	689
A	152.0	619
B	137.0	493
C	126.0	406
D	112.0	304
E	94.0	191
F	73.0	90
G	47.5	23



筒身部およびSGTS用排気筒の概要図

4.5 排気筒の耐震健全性評価結果

SGTS（非常用ガス処理系）用排気筒の健全性評価結果

SGTS用排気筒の評価結果

支持点 T.M.S.L. (m)	N (kN)	M (kNm)	A ($\times 10^2 \text{mm}^2$)	Z ($\times 10^3 \text{mm}^3$)	${}_s\sigma_c$ (N/mm ²)	${}_s\sigma_b$ (N/mm ²)	${}_s f_c$ (N/mm ²)	${}_s f_b$ (N/mm ²)	$\frac{{}_s\sigma_c}{{}_s f_c} + \frac{{}_s\sigma_b}{{}_s f_b}$
160.0	11.3	1.0	94.0	920	1.2	1.1	218	245	0.01
152.0	28.3	1.9			3.0	2.0	226		0.02
137.0	40.0	2.5			4.3	2.7	222		0.03
126.0	55.3	3.1			5.9	3.3	210		0.04
112.0	74.7	3.5			7.9	3.8	218		0.05
94.0	97.2	5.0			10.3	5.4	210		0.07
73.0	123.9	5.0			13.2	5.4	215		0.08
47.5	157.6	3.4			16.8	3.6	210		0.09

注) 有効板厚：腐蝕代を内径に 2mm 考慮

記号の説明

N：軸力（圧縮を正とする。）

M：曲げモーメント

A：断面積

Z：断面係数

${}_s f_c$ ：許容圧縮応力度

${}_s f_b$ ：許容曲げ応力度

${}_s\sigma_c$ ：圧縮応力（N/A）

${}_s\sigma_b$ ：曲げ応力（M/Z）

4 . 5 排気筒の耐震健全性評価結果

SGTS用排気筒支持部の健全性評価結果

SGTS用排気筒支持部は、筒身内部でSGTS用排気筒を水平方向に支持する構造である。

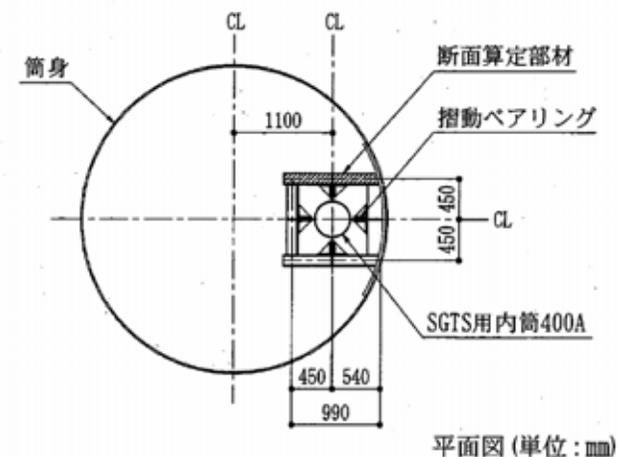
支持部の評価に用いる応力としては、支持部に発生する最大水平力を考慮する。応力度が最大となる部材の評価結果を示す。

SGTS用排気筒支持部材の評価結果

N (kN)	M (kNm)	${}_s\sigma_c$ (N/mm ²)	${}_s\sigma_b$ (N/mm ²)	${}_s f_c$ (N/mm ²)	${}_s f_b$ (N/mm ²)	$\frac{{}_s\sigma_c}{{}_s f_c} + \frac{{}_s\sigma_b}{{}_s f_b}$
0.0	2.1	0.0	20.5	221	235	0.09

記号の説明

N : 軸力 (圧縮を正とする。)	${}_s f_c$: 許容圧縮応力度
M : 曲げモーメント	${}_s f_b$: 許容曲げ応力度
A : 断面積	${}_s\sigma_c$: 圧縮応力 (N/A)
Z : 断面係数	${}_s\sigma_b$: 曲げ応力 (M/Z)



SGTS用排気筒支持部の概要

4.5 排気筒の耐震健全性評価結果（まとめ）

- 排気筒の鉄塔部および筒身部の各部材における発生応力は、評価基準値以下であり、弾性範囲にあると判断された。
 - ハンマリング試験の結果、一部のボルト接合部において、異音が確認されているが、解析結果では、当該の斜材にそれほど大きな応力は発生していない評価となっている。
- 排気筒の杭基礎部の発生応力は、評価基準値以下であることを確認した。
 - 杭頭部において、解析結果ではひび割れ発生の目安を超えているが、点検結果ではひび割れは確認できていない。
- SGTS用排気筒、SGTS用排気筒支持部における発生応力は評価基準値以下であり、弾性範囲にあると判断された。
- 以上のことを踏まえ、排気筒の耐震健全性は確保されているものと評価した。

5 . 総合評価

5 . 総合評価

■点検結果

- 原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換器建屋の各部位で要求性能を損なうような事象は確認されなかった。
- 排気筒については、ボルト接合部で軽微な被害が確認されたものの、耐震性能に与える影響は限定的であり、今後適切な補修を実施する予定であることから、健全性に与える影響は無いと評価した。それ以外の部位では異常は確認されなかった。

■地震応答解析結果

- 原子炉建屋、排気筒については、評価基準を満足することを確認した。
- タービン建屋(機能維持範囲)、海水熱交換器建屋では、発生応力を、コンクリートの負担分を考慮せずに、設計配筋量のみで負担可能なせん断応力度と比較した場合は「裕度が少ない」もしくは「上回る」部位があった。ただし、コンクリートの負担分を考慮し、せん断スケルトン曲線上の応答としてみた場合、第一折れ点を下回る応答であり、弾性範囲にあると判断されることから健全であるものと評価した。

■総合評価結果

- 点検と地震応答解析の両面から評価を行った結果、原子炉建屋、タービン建屋、海水熱交換器建屋、排気筒の健全性が確保されているものと評価した。