

## 【添付資料 1】

耐震設計上の重要度分類 B・Cクラスの  
建物・構築物に関する地盤支持性能確認結果について

## 耐震設計上の重要度分類 B・C クラスの 建物・構築物に関する地盤支持性能確認結果について

### 1. 概要

平成 18 年 9 月に改訂された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（以下、新耐震指針という）では、その基本方針の中で、「建物・構築物は、十分な支持性能を持つ地盤に設置されなければならない」とされている。

また、「新潟県中越沖地震による影響に関する原子力安全委員会の見解と今後の対応」（平成 19 年 7 月 30 日原子力安全委員会決定）では、「新耐震指針においては、旧耐震指針のように重要な建物・構築物に限定することなく、全ての建物・構築物は、重要度に応じた設計荷重に対して十分な支持性能を持つ地盤に設置することを求めている」とされている。

本資料は、柏崎刈羽原子力発電所 6 号機に係る耐震安全性評価の評価対象施設以外の主要な建物・構築物が、耐震重要度分類 B・C クラス相当の設計荷重に対して、十分な支持性能を持つ地盤に設置されていることを改めて確認した結果を取りまとめたものである。

### 2. 確認対象施設

確認対象施設は、柏崎刈羽原子力発電所 6 号機に係る耐震安全性評価の評価対象施設以外の主要な建物・構築物とする。

### 3. 確認方法

地盤の支持性能は、新耐震設計審査指針に示される静的地震力により生じる地震時荷重が、地盤支持における許容限界を超えないことを確認する。

なお、静的地震力は、各々の耐震重要度分類に相当する係数（B クラス：1.5，C クラス：1.0）を考慮して算定する。

#### 4. 確認結果

柏崎刈羽原子力発電所6号機に係る耐震安全性評価の評価対象施設以外の主要な建物・構築物が、十分な支持性能を持つ地盤に設置されていることを確認した。

耐震重要度分類B・Cクラス相当の地震時荷重に対する許容限界との比較における地盤支持性能の確認結果を添表1-1に記載する。

以 上

添表 1-1 B・Cクラス施設の地盤支持性能確認結果

耐震重要度分類 <sup>※1</sup>	設備	基礎の構造	支持地盤	支持地盤性能確認結果		
				地震時荷重	許容限界 <sup>※2</sup>	準拠基準 <sup>※3</sup>
B	タービン建屋	直接基礎	岩盤	750 (kN/m <sup>2</sup> )	4,110 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	廃棄物処理建屋	直接基礎	岩盤	1,140 (kN/m <sup>2</sup> )	4,110 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	焼却炉建屋	杭基礎	岩盤	2,050 (kN/本)	2,740 (kN/本)	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
C	サービス建屋	直接基礎	洪積層	363 (kN/m <sup>2</sup> )	686 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	固体廃棄物貯蔵庫 (第1棟)	杭基礎	沖積層	1,020 (kN/本)	1,100 (kN/本)	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	固体廃棄物貯蔵庫 (第2棟)	杭基礎	沖積層	1,100 (kN/本)	1,960 (kN/本)	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	66kV開閉所 (GIS基礎)	直接基礎	洪積層	143 (kN/m <sup>2</sup> )	392 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	500kV開閉所 (GIS基礎)	直接基礎	洪積層	121 (kN/m <sup>2</sup> )	392 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	水処理建屋	直接基礎	沖積層	77 (kN/m <sup>2</sup> )	147 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	事務建屋	杭基礎	洪積層	3,510 (kN/本)	4,700 (kN/本)	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	補助ボイラ建屋	直接基礎	沖積層	97 (kN/m <sup>2</sup> )	196 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	補助建屋	杭基礎	岩盤	1,600 (kN/本)	2,740 (kN/本)	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	ランドリ建屋	直接基礎	改良地盤	93 (kN/m <sup>2</sup> )	1,540 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	使用済燃料輸送容器 保管建屋	杭基礎	岩盤	2,270 (kN/本)	5,880 (kN/本)	JEAG4601 建築基準法 建築基礎指針
	放水路	直接基礎	埋戻地盤	250 (kN/m <sup>2</sup> )	1,580 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 道路橋示方書
	ろ過水タンク	直接基礎	沖積層	173 (kN/m <sup>2</sup> )	798 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 消防法
	変圧器	直接基礎	マンメイドロック	93 (kN/m <sup>2</sup> )	669 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 道路橋示方書
	OPケーブルダクト	直接基礎	埋戻地盤	105 (kN/m <sup>2</sup> )	1,170 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 道路橋示方書
	C/B～R/B間連絡ダクト	直接基礎	マンメイドロック	362 (kN/m <sup>2</sup> )	717 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 道路橋示方書
	純水タンク	直接基礎	沖積層	143 (kN/m <sup>2</sup> )	1,120 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 消防法
	MUW配管ダクト	直接基礎	埋戻地盤	88 (kN/m <sup>2</sup> )	1,110 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 道路橋示方書
	軽油タンク	杭基礎	岩盤	杭:490 (kN/本)	杭:2,230 (kN/本)	JEAG4601 道路橋示方書
	軽油配管ダクト	杭基礎と 直接基礎	岩盤と マンメイドロック	321 (kN/本) マンメイドロック:67 (kN/m <sup>2</sup> )	1,220 (kN/本) マンメイドロック:637 (kN/m <sup>2</sup> )	JEAG4601 道路橋示方書

※1 静的地震力算定にあたって考慮する耐震重要度分類。

※2 各種試験結果および準拠法令、指針に基づき設定。

※3 建築基準法：建築基準法・同施行令・告示

建築基礎指針：建築基礎構造設計指針（（社）日本建築学会，2001改定）

消防法：消防法・「危険物の規制に関する規則」・「危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示」

道路橋示方書：道路橋示方書・同解説（（社）日本道路協会，平成14年3月）

## 【付録 1】

耐震強化工事の基本的な考え方について

## 耐震強化工事の基本的な考え方について

## 1. 基本方針

基準地震動  $S_s$  に対して耐震設計上重要な施設の安全機能をより確かにする目的で耐震強化工事を実施する。

## 2. 対象範囲

耐震重要度分類 S クラス設備と、耐震重要度分類 B クラスまたは C クラス設備のうち、S クラス設備に波及的破損を生じさせる恐れがある設備のなかから、耐震強化工事を検討する設備を選定する。

## 3. 建物・構築物に関する耐震強化に対する考え方

6号機の建物・構築物に関する耐震強化工事は、以下の手順で実施した。

- ① 基準地震動  $S_s$  の策定前に耐震強化工事の計画を立案する必要があったため、耐震強化用地震動（原子炉建屋基礎版上で 1,000 ガルの揺れになるように定めた地震動）による動的解析を実施して、余裕の少ない部位を抽出する。
- ② 余裕の少ない部位の補強設計用荷重については、耐震強化用地震動による動的解析の結果を参考にして工学的判断により定める。
- ③ 耐震強化工事を実施中に策定された基準地震動  $S_s$  に対して、暫定的な動的解析を行い追加補強が必要とならないかどうかをチェックする。
- ④ 最終的に決定した基準地震動  $S_s$  に対して、耐震強化工事の結果を反映した動的解析の結果に基づき耐震安全性の確認を行い、報告書として取り纏める。

上記のステップで行った検討の結果、6号機の建物・構築物に関する耐震強化

工事は、以下の方針で進めることとした（①及び②）。なお、③に関するチェックで追加補強が必要になる部位は無く、④に関しては、本報告書に記載しているように全て評価基準値を満足していることを確認している。

#### (1) 原子炉建屋等の耐震壁に代表される鉄筋コンクリート構造

耐震強化用地震動による動的解析の結果において、まだ十分な余裕があることが確認されたので、耐震強化工事の対象とはしないこととした。

これは、従来の基準地震動  $S_2$  に比べれば大きな地震動ではあるものの、静的地震力に対して余裕を持たせた設計用地震力によって短期許容応力度設計を実施していることによる効果と、鉄筋コンクリート構造の終局限界が大きいことを意味しているものと考えられる。

#### (2) 原子炉建屋の屋根トラス（鉄骨構造）

耐震強化用地震動による動的解析の結果において、主トラスについては余裕があることが確認されたものの、それと直交するサブトラスの一部や下面水平ブレースなどの二次部材（設計時においては非構造部材）には余裕が少ないことが確認されたため、これらの余裕の少ない部材についていくつかの耐震強化工事を実施した。この補強を行うことにより、主トラスの負担応力も低減されるので、屋根トラス全体としての安全余裕も向上することとなる。

鉄筋コンクリート構造に比べこのように余裕が少ない結果となるのは、①指針で新たに追加された鉛直方向の動的地震力の影響が大きいこと、②鉄骨構造はこれまで短期許容応力度設計を基本にしており、基準地震動  $S_s$  の検討の際には  $F$  値を 1.1 倍した評価基準値を用いたりしているものの、鉄筋コンクリート構造ほどは終局限界が大きくない、ということが主な理由として考えられる。

### (3) 排気筒（鉄骨構造）

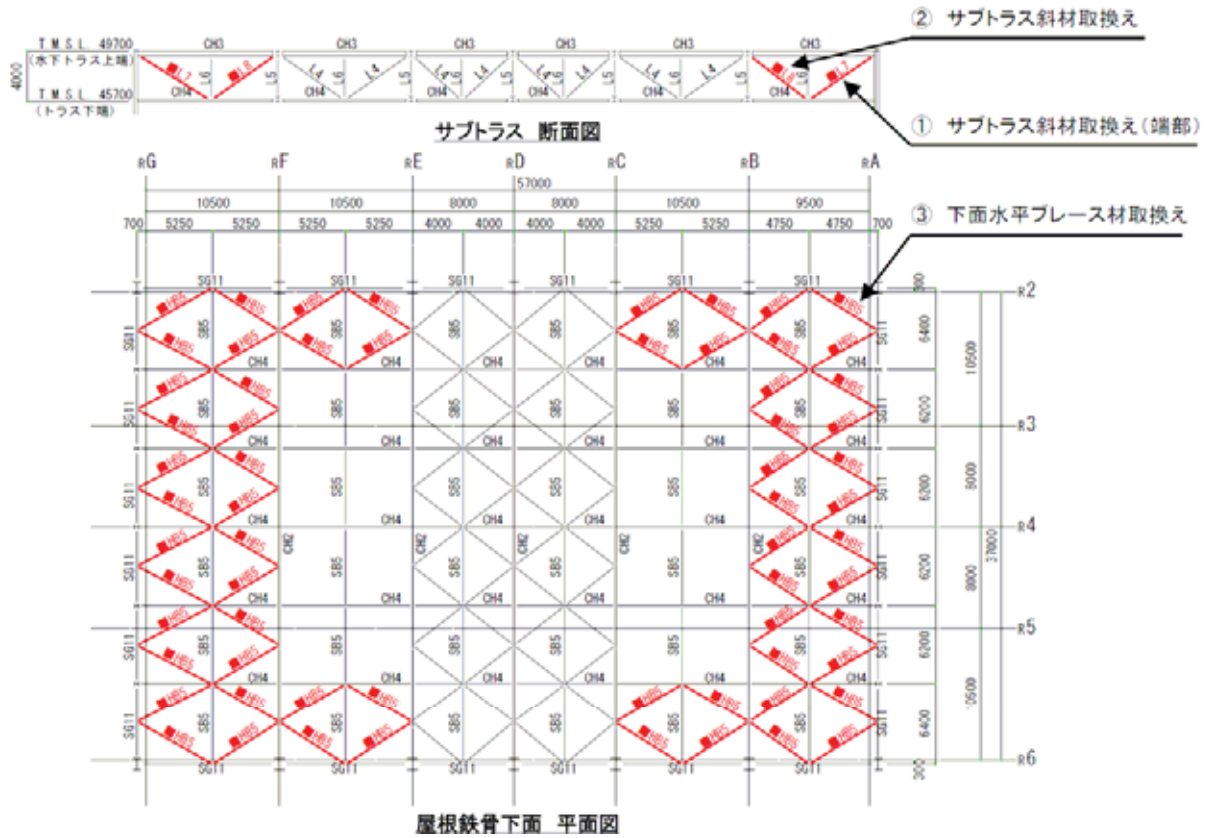
耐震強化用地震動による動的解析の結果において、支持鉄塔の部材の一部で余裕が少ないことが確認された。ただし、これらの部材を直接的に取り替える場合には大規模な工事が発生し、工程も長く必要になるため、比較検討の結果として制震装置の導入を行うこととした。

これは、上記の「(2) 原子炉建屋の屋根トラス（鉄骨構造）」に述べた 2 つの理由に加え、旧指針では A クラスであった SGTS 配管の耐震クラスが S クラスに変更されたため、排気筒としては従来の S<sub>1</sub> 機能維持から S<sub>s</sub> 機能維持に格上げになった影響が非常に大きい。柏崎刈羽原子力発電所の場合には基準地震動 S<sub>1</sub> の影響があまり大きくなかったこともあり、排気筒は部位によっては風荷重など他の荷重で決定している場合もあるので一概には言えないが、基準地震動 S<sub>s</sub> が大きいことも含めるとクラス分類による地震荷重の増加は 3～4 倍程度となっている。









## 【補強の実例】

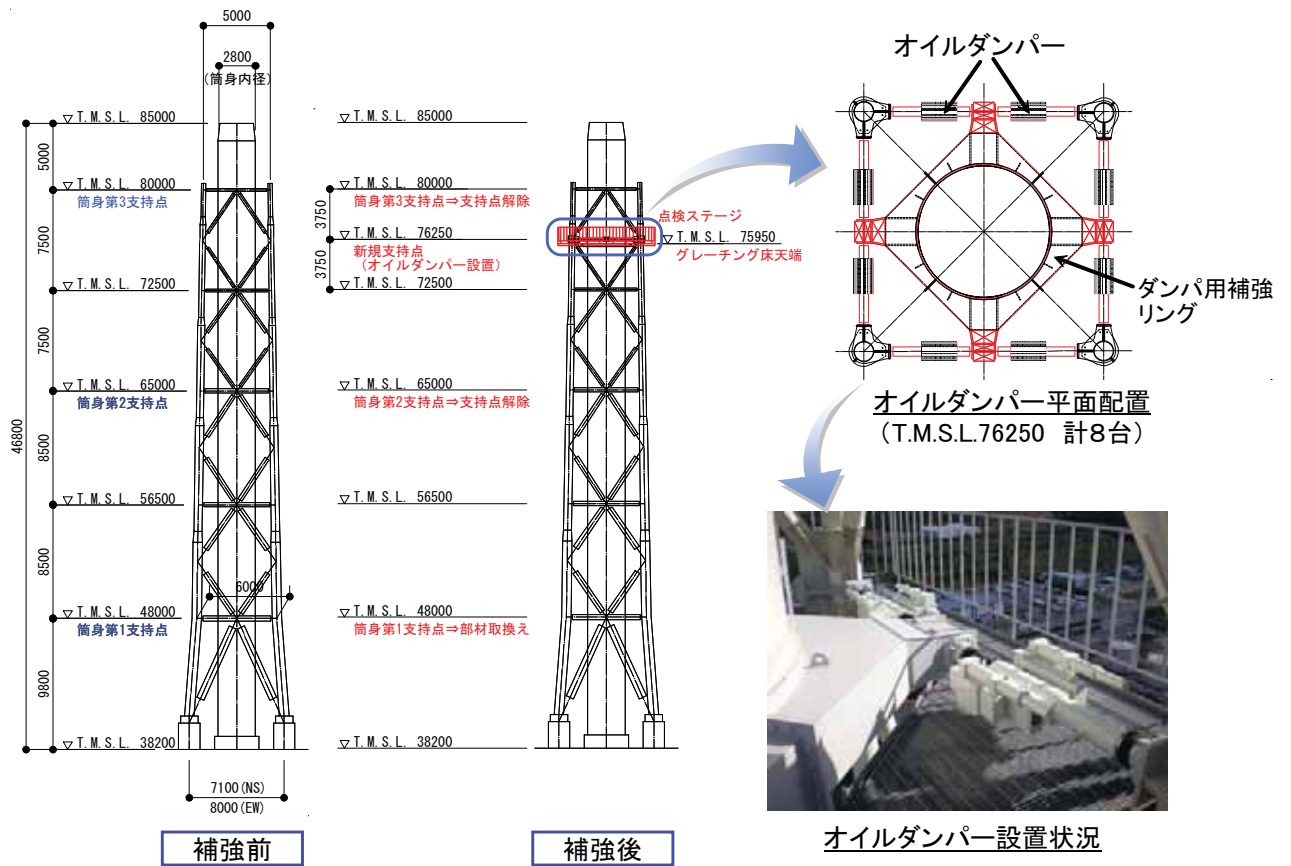
### (1) 原子炉建屋の屋根トラス（鉄骨構造）



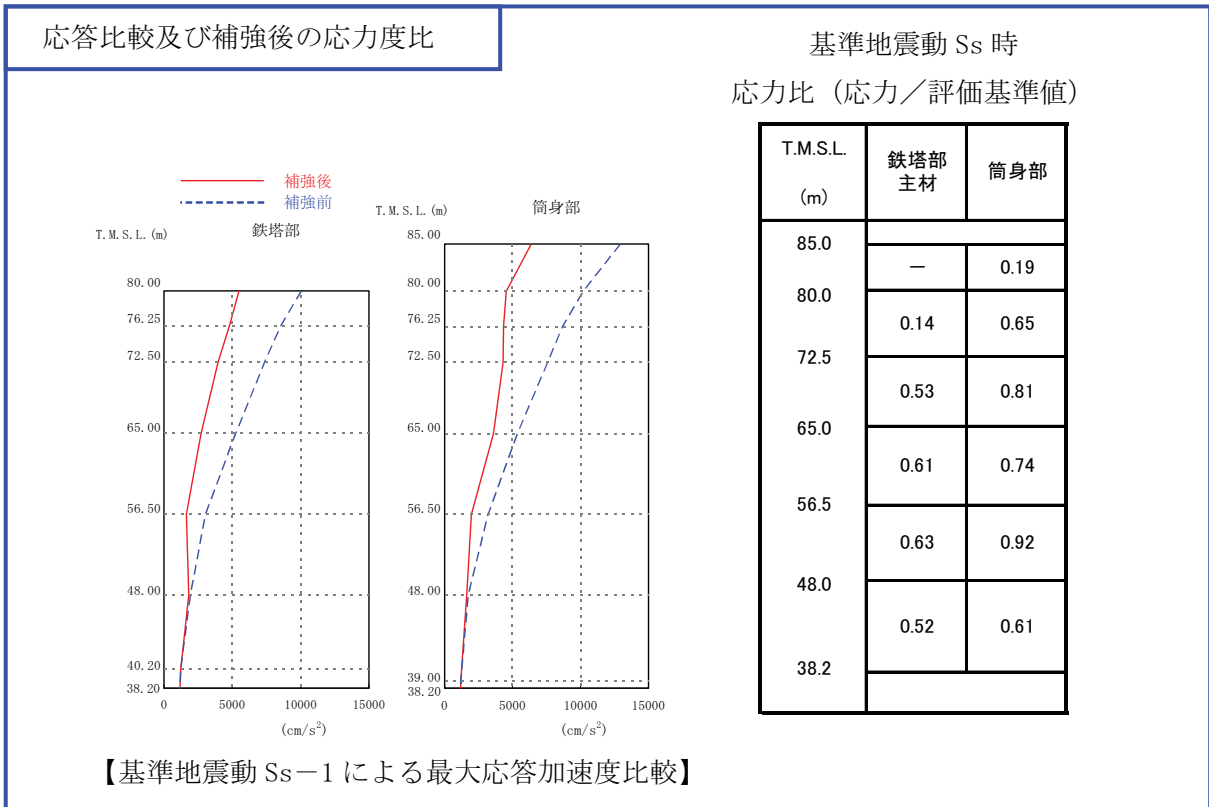
(注) ■印は、本補強工事で取換える部材を示す。

No	箇所及び補強方法			座屈耐力 (kN)	引張耐力 (kN)	
①	サブトラス斜材 取換え(端部)	補強前 2Ls-90×90×10		補強前	211	879
		補強後 2Ls-120×120×8		補強後	436	970
②	サブトラス斜材 取換え	補強前 2Ls-90×90×10		補強前	254	879
		補強後 2Ls-130×130×9		補強後	729	1176
③	下面水平ブレース材 取換え	補強前 CT-150×300×10×15		補強前	507	1548
		補強後 CT-175×350×12×19		補強後	965	2248

## (2) 排気筒（鉄骨構造）



補強工事箇所



## 4. 機器・配管系に関する耐震強化に対する考え方

### 4. 1 設計時の地震応答解析手法と許容基準値の位置づけ

設計時の地震応答解析手法や許容基準値は、現実の地震に対する破損限界に対して十分に余裕を持っていることが、既往の研究<sup>1)</sup>からわかっている。従って、設計時と同等の地震応答解析による評価対象設備の応答値が、IV<sub>A</sub>S 相当の許容基準値を上回ることを仮定したとしても、その設備が直ちに安全機能を失うことを意味しない。一方で、設計時と同等の地震応答解析による応答値が、IV<sub>A</sub>S 相当の許容基準値を下回ることが確認された設備は、現実の破損限界に対して非常に大きな余裕を持っているといえる。

以上を踏まえ、設計時と同等の地震応答解析手法と許容基準値に基づく評価の位置づけを以下のとおりと考えている。

表 4-1 設備の状態の解釈と対応

設備の状態	状態の解釈	設備への対応
設計時と同等の地震応答解析手法による応答値が許容基準値を上回る状態	現実の破損限界に対する余裕が比較的少ない	対応 1 : 地震応答解析手法や許容基準値が持つ余裕を分析し、現実の破損限界に対する真の余裕を評価する。 対応 2 : 耐震強化工事を実施し、設計時と同等の地震応答解析手法による発生値が許容基準値以下となるような構造とする。
設計時と同等の地震応答解析手法による応答値が許容基準値を下回る状態	現実の破損限界に対する余裕が大きい	—

表 4-1 の「設備への対応」で記載した、「対応 1」における「現実の破損限界に対する真の余裕を評価」する方法について、いくつか例示する。

表 4-2 真の余裕の評価例

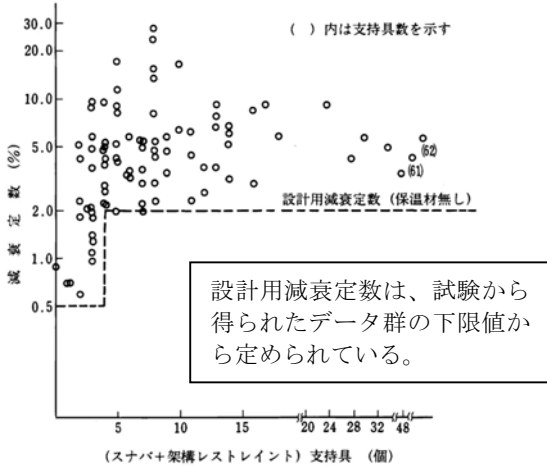
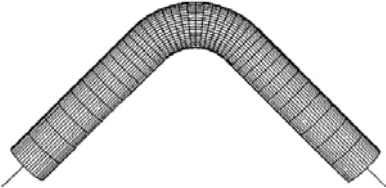
評価方法	説明									
<p>現実的な減衰定数の採用</p>	<p>機器・配管系を設計する時の地震応答解析では、応答値を安全側に算出するために、保守的な減衰定数を採用している（配管系の減衰定数に関する具体的な例は下図参照）。評価対象設備の振動試験を行い、現実的な減衰定数を取得し、地震応答解析に適用することで、設計手法に基づく地震応答解析で得られる応答値よりも現実的な応答値を算出する。</p>  <p>図 振動試験から得られた減衰定数と設計用減衰定数 (JEAG4601)</p>									
<p>詳細な FEM 解析の適用</p>	<p>機器・配管系の設計をする時の地震応答解析は、簡便な地震応答解析モデルを用いていることが多い。例えば、配管系の地震応答解析モデルは、配管の剛性をはり要素で模擬した簡易的なモデルを用いている。配管の発生値を評価する際には、JEAG4601 等の規格で定められた保守性を有する応力評価式に、地震応答解析で得られたモーメントを代入して応力を算出する。</p> <p>シェル要素あるいはソリッド要素によるより精緻な FEM 解析を行うことで、現実的な応答値を算出する。</p>  <p>図 シェル要素による配管の FEM 解析モデルのイメージ</p>									
<p>現実の材料物性の採用</p>	<p>機器・配管系の構造強度評価の許容基準値は、設備を構成する構造部材の材料の物性値（降伏点、引張強さ）により定められる。許容基準値を算出する際に参照する材料の物性値は、JSME 等の規格で定められた材料毎の物性値を参照している。現実の材料は、規格で定められた物性値に対して余裕を持ったものになっている。評価対象設備を構成する構造部材の材料試験成績表を参照して、現実の物性値を参照した許容基準値を採用することで、より現実的な構造強度評価を行う。</p> <p>(炭素鋼の例)</p> <table border="1" data-bbox="657 1832 1177 1995"> <thead> <tr> <th></th> <th>規格値 (MPa)</th> <th>成績値 (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>降伏点</td> <td>245</td> <td>337</td> </tr> <tr> <td>引張強さ</td> <td>410</td> <td>501</td> </tr> </tbody> </table>		規格値 (MPa)	成績値 (MPa)	降伏点	245	337	引張強さ	410	501
	規格値 (MPa)	成績値 (MPa)								
降伏点	245	337								
引張強さ	410	501								

表 4-2 で例示したような真の余裕の評価を、現実の破損限界に対する余裕が比較的少ない設備毎に行うのは、現実的には検討時間を要するものであることから、表 4-1 の「対応 2」である耐震強化工事を選択することもある。また、現実の破損限界に対する余裕をより大きく確保する観点から耐震強化工事を行う場合もある。

なお、今回の 6 号機の耐震安全性評価においては、表 4-1 の「対応 1」における「現実の破損限界に対する真の余裕を評価」のみで対応している設備は無く、現実の破損限界に対する余裕をより大きく確保する観点から耐震強化工事を行っている。

6 号機において耐震強化工事を行った設備に関する考え方を次項以降で説明する。

#### 4. 2 耐震強化工事実施設備の選定について

耐震強化工事を検討する設備は、基準地震動  $S_s$  に対して現実の破損限界に対する余裕が比較的少ないと考えられるものとした。先行号機の7号機においては、その判断の材料として、建設時の設計情報はもとより、新潟県中越沖地震に対する設備健全性評価結果、当社が自主的な条件として設定した原子炉建屋基礎版上で1,000ガルの揺れとなる条件（以下、1,000ガル条件という）、および、耐震設計審査指針の改訂による設備への影響を考慮した。

6号機は7号機と同型プラントで、設備配置や設備構成は概ね同一であることから、6号機において耐震強化工事を検討する設備は、7号機での検討結果を参考にして、以下のとおりとした。

- ・ 耐震 S クラスに属する主配管
- ・ 燃料取替機
- ・ 原子炉補機冷却系熱交換器
- ・ 原子炉建屋クレーン

#### 4. 3 耐震強化工事の設計について

##### (1) 設計方針

原子炉建屋基礎版上で約 1,000 ガルの揺れとなるもの (1,000 ガル条件) に対して設計時と同等の地震応答解析を行い、その応答値が  $IV_{AS}$  相当の許容基準以内になる構造とする。(なお、既存の規格基準類で、 $IV_{AS}$  相当の許容基準値が規定されていない設備が存在する場合には、その設備の安全機能が損なわれない基準値を別途定めて設計を行う。その許容基準値についても、ここでは、 $IV_{AS}$  相当と位置づける。)

##### (2) 設計の妥当性確認

基準地震動  $S_s$  による耐震安全性評価を行い、応答値が  $IV_{AS}$  相当の許容基準値を下回ることを確認することとした。

##### (3) 耐震強化後の設備について

耐震強化工事を行った設備は、当社の自主的な条件である 1,000 ガル条件と基準地震動  $S_s$  の両方に対して、地震応答解析を行った際の応答値が、 $IV_{AS}$  相当の許容基準値以内に収まる構造強度を有しているものとなった。

#### 4. 4 まとめ

- 耐震強化工事は、基準地震動  $S_s$  に対して耐震設計上重要な機器が、その安全機能を保持する観点から行った。
- 耐震強化工事は、耐震 S クラス設備と耐震 B クラスまたは C クラス設備のうち、耐震 S クラス設備に波及的破損を生じさせる恐れがある設備とした。
- 具体的な設備の検討対象は、先行号機の 7 号機での検討結果を参考にして決定した。
- 耐震強化工事の設計は、1,000 ガル条件を用いて地震応答解析を行い、 $IV_{AS}$  相当の許容基準値を適用して行った。
- 耐震強化工事の設計の妥当性確認方法は、基準地震動  $S_s$  に対する耐震安全性評価とした。
- 耐震強化工事を行った施設については、1,000 ガル条件と基準地震動  $S_s$  の両方に対して、耐震安全性を確保した構造となった。

#### 参考文献

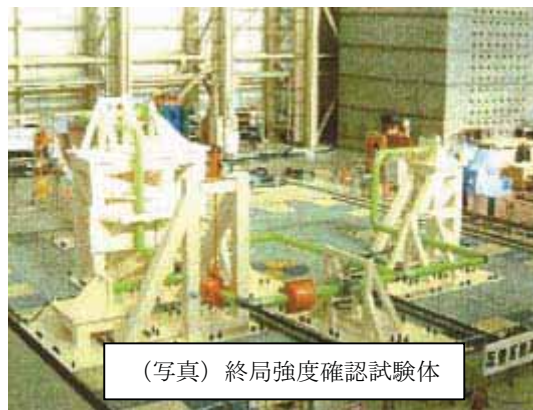
- 1) JNES-SS-0617 原子力発電施設耐震信頼性実証試験の概要 JNES-SS レポート 2006 年 11 月  
独立行政法人 原子力安全基盤機構 規格基準部



## (参考 4-1) 既往の研究による配管系の終局強度について <参考文献 2)より>

### 1. はじめに

既往の研究では、実機配管系の特徴を有する試験体を用いて加振試験を行い、配管系に対する既往の設計手法の妥当性の確認と実機配管系の終局強度の確認を行っている。



(写真) 終局強度確認試験体

### 2. 加振試験条件の概要

#### (1) 設計手法確認試験

設計手法による解析で試験体配管本体に $IV_{AS}$ 相当の許容応力と同等の応力が発生する大きさの加振、および、 $IV_{AS}$ 相当の許容応力の1.5~4倍以上となる応力が発生する大きさの加振を行い、配管の振動特性を把握した。

#### (2) 終局強度確認試験

設計手法による解析で試験体配管本体に $IV_{AS}$ 相当の許容応力の8.5倍の応力が発生する大きさの加振を、試験体が破損するまで行い、配管の終局強度を把握した。

### 3. 試験結果の概要

#### (1) 設計手法確認試験

設計手法による解析で $IV_{AS}$ 相当の4倍の応力が発生する大きさの加振を行っても、試験体配管の崩壊現象や破損による内部水の漏洩がないことを確認した。

#### (2) 終局強度確認試験

設計手法による解析で試験体配管本体に $IV_{AS}$ 相当の許容応力の8.5倍の応力が発生する大きさの加振を行ったところ、1回の加振では破損せず、5回目の加振で低サイクル疲労による貫通亀裂が発生した。

### 4. 耐震設計手法の安全裕度

既往の研究では、3.での試験結果等を踏まえて、耐震設計手法の安全裕度を評価している。すなわち、一回の加振で配管が疲労破損するとしたときの想定入力地震レベルと設計上許容される $S_2$ 地震の入力レベル( $IV_{AS}$ 相当の応力が発生する入力レベル)の比を安全裕度と定義したとき、耐震設計手法には、4倍以上の安全裕度があることを確認したとしている。

以上

## (参考 4-2) 6号機の耐震強化工事の内容について

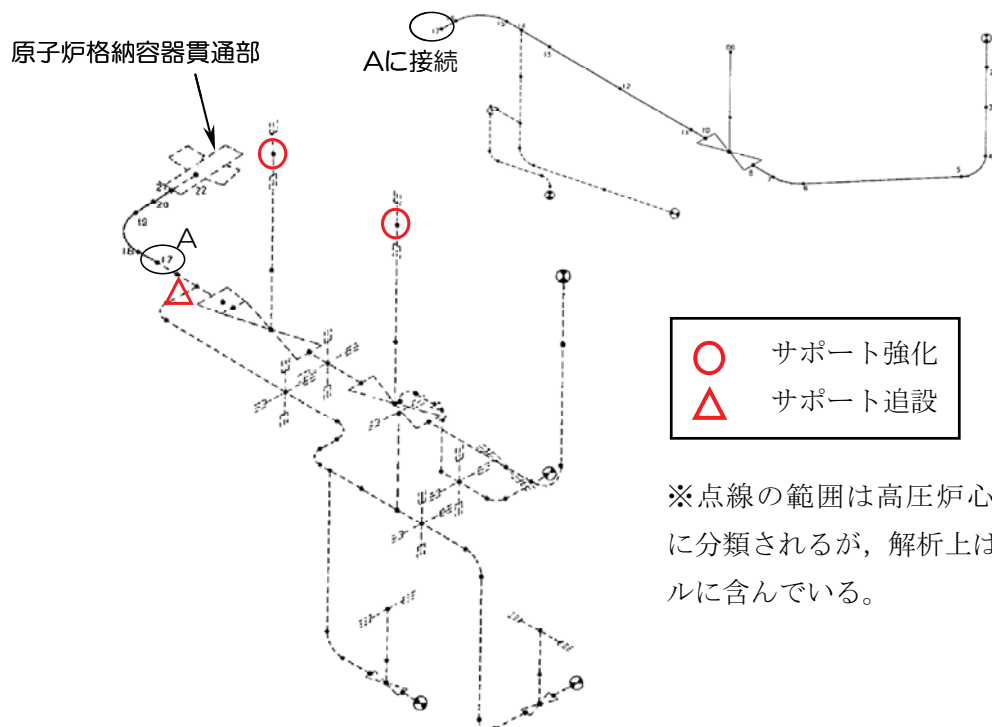
### 1. 配管系について

#### (1) 耐震強化方針

配管本体に発生する応力を低減するために、配管支持構造物を追加設置し、配管の地震に対する応答振動の低減を図る。また、配管支持構造物に対しては、地震による配管反力の増大が懸念されることから、配管支持構造物そのものの強度の向上も図る。なお、配管支持構造物を追加設置することで、配管本体の拘束が厳しくなることにより、配管の熱膨張による応力が著しく増幅しないよう配慮する。

#### (2) 耐震強化例

ここでは、残留熱除去系配管の1モデルを例に、耐震強化工事を行った例を示す。○印は、設計時においても配管の振動を拘束していた箇所での支持構造物について、その支持機能を強化した箇所を示すものである。また△印は、設計時には配管支持装置を設置していなかった箇所に、配管支持構造物を追加で設置した箇所を示している。



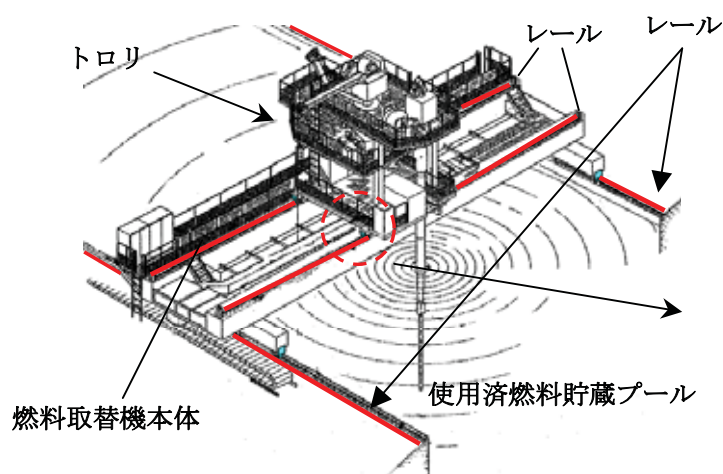
## 2. 燃料取替機について

### (1) 耐震強化方針

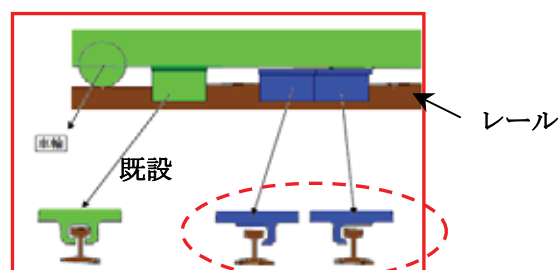
燃料取替機は、耐震 B クラス設備であるものの、耐震 S クラス設備である使用済燃料貯蔵プールの上を走行することが多いため、耐震 S クラス設備に波及的破損を及ぼす可能性がある設備として位置づけられる。基準地震動  $S_s$  に対して燃料取替機が使用済燃料貯蔵プールに落下しないことを確実にするために耐震強化工事を実施する。

### (2) 耐震強化工事内容

燃料取替機の本体は、使用済燃料貯蔵プールの淵に設置されているレール上を走行する。また、燃料取替機のブリッジ上に設置されているレール上をトロリが横行する。本体あるいはトロリには、走行時の脱線を防止する金具が設置されている。6号機の耐震強化では、燃料取替機本体に対しては、走行レールに沿ってガイドプレートを設置し、脱線して使用済燃料貯蔵プールに落下しないことを確実にしている。また、トロリに対しては、脱線防止金具を追加設置し、脱線して使用済燃料貯蔵プールに落下しないことを確実にしている。なお、燃料取替機本体についても、一部構造部材を追加して強度を増している。



ガイドプレートの設置



トロリ脱線防止金具の追加設置

燃料取替機 耐震強化工事の概略説明図

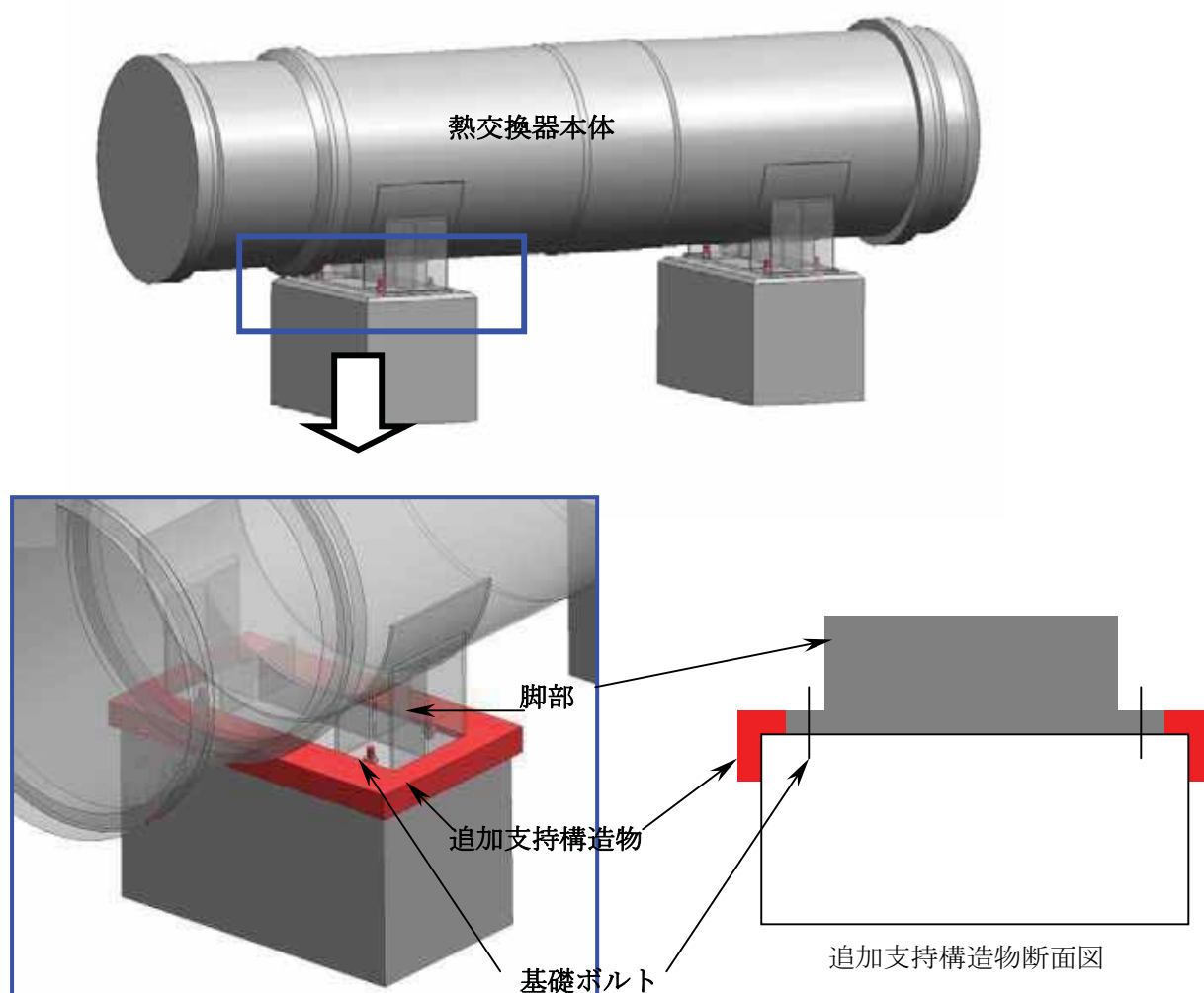
### 3. 原子炉補機冷却系熱交換器

#### (1) 耐震強化方針

原子炉補機冷却系熱交換器の脚部に支持構造物を追加設置することで、基礎ボルトへの荷重分担を期待せずに、せん断方向の地震荷重に耐える構造とするよう耐震強化工事を実施する。

#### (2) 耐震強化工事内容

熱交換器の脚を取り囲む様に新たな支持構造物を設置し、基礎ボルト部に発生するせん断荷重を新たな支持構造物が分担して支持する構造とした。



原子炉補機冷却系熱交換器 耐震強化内容概念図

## 4. 原子炉建屋クレーン

### (1) 耐震強化方針

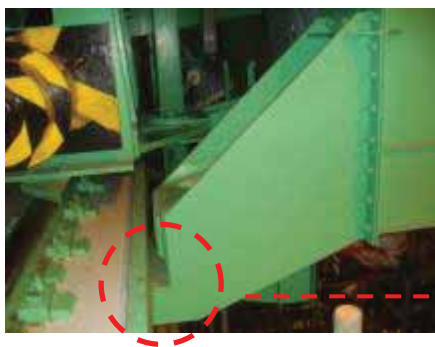
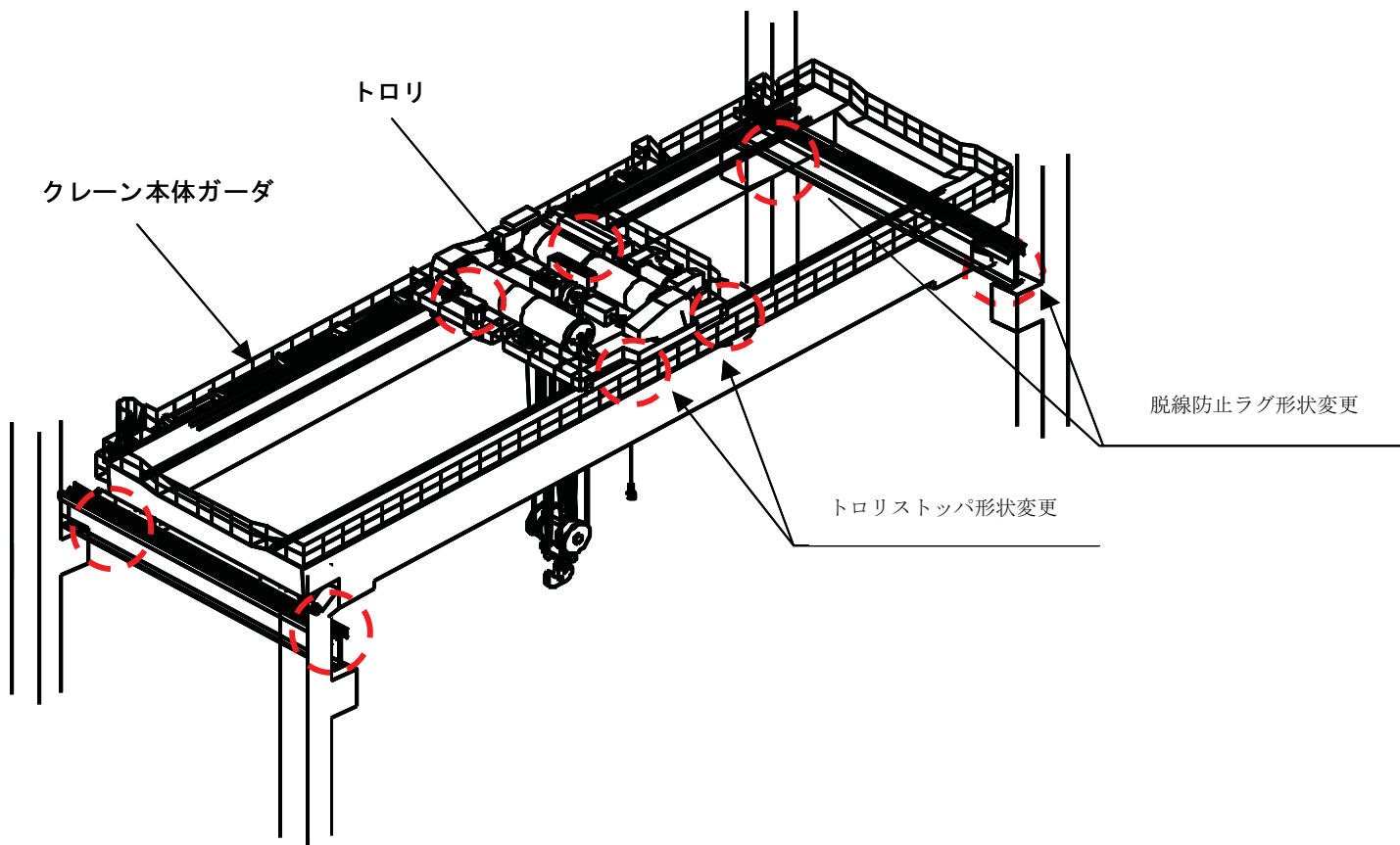
原子炉建屋クレーンは、耐震 B クラス設備であるものの、クレーンを使用する際に、耐震 S クラス設備である使用済燃料貯蔵プールの上を一時的に通過する場合があることから、耐震 S クラス設備に波及的破損を及ぼす可能性がある設備として位置づけられる。地震動に対して原子炉建屋クレーンが使用済燃料貯蔵プールに落下しないことを確実にするために耐震強化工事を実施する。

### (2) 耐震強化工事内容

原子炉建屋クレーンは、原子炉建屋の天井付近の高さに設置されているレール上を走行する。また、原子炉建屋クレーンの本体ガード上に設置されているレール上をトロリが横行する。本体ガードには、走行時の脱線を防止する目的で脱線防止ラグが設置されている。また、トロリには、同じく横行時の脱線を防止する目的でトロリストoppaが設置されている。

脱線防止ラグは、次頁に示すようにレール支持構造物（以下、ランウェイガードという）の空隙に潜り込む構造となっていた。原子炉建屋クレーンに鉛直方向の動的地震力を考慮した場合、ランウェイガードの空隙に潜り込んでいる脱線防止ラグの部分が、ランウェイガードを破損させる恐れがある。耐震強化工事では、この脱線防止ラグの形状を変更する改造を行い、ランウェイガードの空隙に潜り込んでいる部分を削除し、クレーンの浮き上がり寸法を考慮した構造にしたことで、鉛直方向に動的地震力を考慮してもランウェイガードが破損しない構造としている。ランウェイガードの破損を防止することで、クレーン本体が脱線して使用済燃料貯蔵プールに落下しないことを確実にしている。

トロリストoppaは、改造によりトロリの浮き上がり寸法を考慮した形状に変更することで、トロリが脱線して使用済燃料貯蔵プールに落下しないことを確実にしている。



形状変更

脱線防止ラグ 改造概要



形状変更

トロリストoppa 改造概要

原子炉建屋クレーン 耐震強化工事概要説明図

## 【付録 2】

耐震強化用地震動による評価結果について

## 耐震強化用地震動による評価結果について

参考として原子炉建屋基礎版上で 1,000 ガルの揺れとなるように定めた地震動（耐震強化用地震動）による構造強度の評価結果を以下に示す。

発生値は、いずれも評価基準値以下であることを確認した。

なお、耐震強化工事を実施した設備については、工事終了後の状況を反映して評価を実施した。



1. 建物・構築物

1.1 原子炉建屋（耐震壁）

表1-1 耐震壁のせん断ひずみ一覧（NS方向）

外壁							( $\times 10^{-3}$ )
階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	耐震強化用 地震動 (参考)	評価基準値
CRF	0.13	0.08	0.08	0.06	0.05	0.12	2.0以下
4F	0.15	0.10	0.10	0.07	0.06	0.14	
3F	0.14	0.09	0.10	0.06	0.05	0.12	
2F	0.30	0.17	0.17	0.11	0.10	0.21	
1F	0.28	0.16	0.16	0.10	0.10	0.19	
B1F	0.34	0.19	0.19	0.12	0.12	0.23	
B2F	0.46	0.20	0.22	0.12	0.13	0.24	
B3F	0.21	0.16	0.17	0.09	0.11	0.15	

RCCV							( $\times 10^{-3}$ )
階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	耐震強化用 地震動 (参考)	評価基準値
3F	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	2.0以下
2F	0.13	0.09	0.09	0.06	0.06	0.11	
1F	0.11	0.08	0.08	0.05	0.05	0.09	
B1F	0.17	0.12	0.12	0.08	0.08	0.13	
B2F	0.33	0.14	0.18	0.09	0.10	0.16	
B3F	0.18	0.15	0.16	0.08	0.10	0.14	

表1-2 耐震壁のせん断ひずみ一覧 (EW方向)

外壁							( $\times 10^{-3}$ )
階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	耐震強化用 地震動 (参考)	評価基準値
CRF	0.09	0.08	0.06	0.05	0.06	0.10	2.0以下
4F	0.10	0.09	0.07	0.06	0.07	0.12	
3F	0.13	0.13	0.08	0.07	0.08	0.15	
2F	0.17	0.19	0.12	0.10	0.12	0.21	
1F	0.22	0.26	0.15	0.12	0.15	0.31	
B1F	0.29	0.36	0.18	0.16	0.18	0.59	
B2F	0.27	0.32	0.17	0.16	0.17	0.71	
B3F	0.30	0.40	0.17	0.17	0.16	1.16	

RCCV							( $\times 10^{-3}$ )
階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	耐震強化用 地震動 (参考)	評価基準値
3F	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	2.0以下
2F	0.08	0.09	0.07	0.06	0.07	0.10	
1F	0.12	0.13	0.09	0.08	0.09	0.17	
B1F	0.18	0.21	0.12	0.12	0.13	0.44	
B2F	0.17	0.20	0.13	0.13	0.13	0.59	
B3F	0.26	0.35	0.16	0.16	0.15	1.10	

## 1.2 原子炉建屋屋根トラス

表 1-3 屋根トラスの鉄骨部における評価結果

部 材		基準地震動 Ss			耐震強化用 地震動 (参考)
		発生応力 (N/mm <sup>2</sup> )	評価基準値 (N/mm <sup>2</sup> )	発生応力/ 評価基準値	発生応力/ 評価基準値
上弦材	(引張)	137.8	357	0.68	0.70
	(曲げ)	101.4	357		
下弦材	(圧縮)	146.1	313	0.82	0.84
	(曲げ)	125.9	357		
斜材	(引張)	201.6	357	0.57	0.58
束材	(圧縮)	92.4	206	0.45	0.51

注：評価基準値は、建築基準法に基づく鋼材の材料強度（F 値の 1.1 倍）による許容値を示す。

### 1.3 タービン建屋（耐震壁）

表1-4 機能維持部位における耐震壁のせん断ひずみ一覧

(NS方向)

a軸 (×10<sup>-3</sup>)

階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	耐震強化用 地震動 (参考)	評価基準値
B2F	0.20	0.16	0.16	0.09	0.09	0.16	2.0以下

b軸 (×10<sup>-3</sup>)

階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	耐震強化用 地震動 (参考)	評価基準値
1F	0.12	0.09	0.10	0.05	0.05	0.11	2.0以下
B1F	0.12	0.09	0.09	0.05	0.05	0.10	
MB2F	0.13	0.09	0.10	0.05	0.05	0.11	
B2F	0.16	0.11	0.12	0.07	0.07	0.13	

表1-5 機能維持部位における耐震壁のせん断ひずみ一覧

(EW方向)

a軸 (×10<sup>-3</sup>)

階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	耐震強化用 地震動 (参考)	評価基準値
B1F	0.14	0.15	0.12	0.11	0.13	0.32	2.0以下
MB2F	0.17	0.18	0.14	0.15	0.15	0.56	
B2F	0.19	0.19	0.14	0.15	0.16	0.53	

e軸 (×10<sup>-3</sup>)

階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	耐震強化用 地震動 (参考)	評価基準値
B1F	0.10	0.08	0.07	0.05	0.06	0.11	2.0以下
MB2F	0.16	0.14	0.11	0.10	0.11	0.22	
B2F	0.22	0.21	0.16	0.16	0.16	0.40	

h軸 (×10<sup>-3</sup>)

階	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-4	Ss-5	耐震強化用 地震動 (参考)	評価基準値
1F	0.16	0.16	0.17	0.14	0.15	0.54	2.0以下
B1F	0.18	0.20	0.16	0.16	0.17	0.61	

## 1.4 排気筒

表 1-6 鉄塔部および筒身部における評価結果

基準地震動 Ss											耐震 強化用 地震動 (参考)
箇所	部材	N (kN)	M (kN・m)	A ×10 <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Z ×10 <sup>3</sup> (mm <sup>3</sup> )	σc (N/mm <sup>2</sup> )	σb (N/mm <sup>2</sup> )	fc (N/mm <sup>2</sup> )	fb (N/mm <sup>2</sup> )	$\frac{\sigma_c + \sigma_b}{f_c + f_b}$	$\frac{\sigma_c + \sigma_b}{f_c + f_b}$
鉄塔	主柱材	2495	142	124.1	1530	201.1	92.9	339	357	0.86	0.99
	斜材	650	-	29.94	-	217.2	-	255	-	0.86	0.87
	水平材	293	-	58.91	-	49.8	-	216	-	0.24	0.24
筒身	-	344	6457	529	37000	6.6	174.6	183	199	0.92	0.93

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

σc : 圧縮応力 (N/A)

σb : 曲げ応力 (M/Z)

fc : 圧縮応力に対する許容値

fb : 曲げ応力に対する許容値

表 1-7 SGTS 用排気筒筒身部における評価結果

基準地震動 Ss										耐震 強化用 地震動 (参考)
部材間	部材長 (m)	A ×10 <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Z ×10 <sup>3</sup> (mm <sup>3</sup> )	σc (N/mm <sup>2</sup> )	σb (N/mm <sup>2</sup> )	fc (N/mm <sup>2</sup> )	fb (N/mm <sup>2</sup> )	$\frac{\sigma_c + \sigma_b}{f_c + f_b}$	$\frac{\sigma_c + \sigma_b}{f_c + f_b}$	
A-B	3.20	80.9	611	1.1	4.0	232	245	0.03	0.04	
B-C	5.00			2.2	9.5	216		0.05	0.07	
C-D	5.00			3.3	7.7	216		0.05	0.06	
D-E	5.67			4.5	12.0	207		0.08	0.08	
E-F	5.67			5.7	16.4	207		0.10	0.10	
F-G	5.60			7.3	16.4	208		0.11	0.11	

## 2. 機器・配管系

表 2-1 構造強度評価結果 (1/4)

評価対象設備	評価部位	応力 分類	発生値(MPa)		評価基準値 (MPa)	評価 手法 ※1	備考
			基準 地震動 Ss	耐震強化 用地震動			
原子炉圧力容器	基礎ボルト	引張 応力	148	190	499	B2	
原子炉格納容器	配管貫通部 スリーブ	一次一般 膜応力	-	266	282	B2	評価箇所：X-30C
	配管貫通部 フランジプレート	曲げ応力	70	-	317	B2	評価箇所：X-31C
炉心支持構造物	シュラウド サポート	軸圧縮 応力	170	184	260	B1	
シュラウドヘッド	鏡板	一次一般 膜＋一次 曲げ応力	103	108	222	B1	
主蒸気逃がし安全弁 逃がし弁機能用 アキュムレータ	Uバンド及び リブ	組合せ 応力	23	25	203	A2	
主蒸気逃がし安全弁 自動減圧機能用 アキュムレータ	Uバンド及び リブ	組合せ 応力	187	198	203	B2	
残留熱除去系 熱交換器	胴板	一次 応力	161	180	408	B2	
残留熱除去系ポンプ	原動機台取付 ボルト	引張 応力	38	53	444	B2	
原子炉隔離時冷却系 ポンプ	基礎ボルト	引張 応力	78	86	202	A2	
原子炉隔離時冷却系 ポンプ駆動用蒸気タービン	基礎ボルト	引張 応力	61	67	202	A2	
高圧炉心注水系ポンプ	原動機取付 ボルト	引張 応力	36	49	455	B2	
原子炉補機冷却水系 熱交換器	基礎ボルト	引張 応力	108	142	190	B2	
原子炉補機冷却水系 ポンプ	原動機取付 ボルト	せん断 応力	13	14	146	A2	
原子炉補機冷却海水系 ポンプ	原動機取付 ボルト	引張 応力	47	78	475	B2	

表 2-1 構造強度評価結果 (2/4)

評価対象設備	評価部位	応力 分類	発生値(MPa)		評価基準値 (MPa)	評価 手法 ※1	備考
			基準 地震動 Ss	耐震強化 用地震動			
原子炉補機冷却海水系 ストレーナ	基礎ボルト	せん断 応力	10	10	159	A2	
水圧制御ユニット	フレーム	組合せ 応力	40	46	276	A2	
ほう酸水注入系ポンプ	ポンプ取付 ボルト	せん断 応力	48	57	146	A2	
ほう酸水注入系 貯蔵タンク	基礎ボルト	引張 応力	72	90	207	B2	
局部出力領域モニタ 検出器集合体	LPRM 検出器 集合体 カバーチューブ	一次一般 膜+一次 曲げ応力	123	153	254	B2	
起動領域モニタ ドライチューブ	パイプ	一次一般 膜+一次 曲げ応力	148	170	427	B2	
ベンチ形制御盤 (運転監視補助盤 I)	取付ボルト	せん断 応力	12	14	159	A2	
垂直自立型制御盤 (安全保護系盤区分 1)	取付ボルト	引張 応力	23	29	207	A2	
原子炉系 (I 系) 計装ラック	取付ボルト	引張 応力	7	8	207	A2	
燃料取替機	構造物 フレーム	組合せ 応力	195	204	276	B2	
制御棒・破損燃料 貯蔵ラック	ラック本体	組合せ 応力	26	30	205	B2	
燃料取替エリア 排気放射線モニタ	検出器 取付ボルト	引張 応力	8	4	207	右記 参照	基準地震動 Ss の 評価は A2, 耐震 強化用地震動の 評価は B2
非常用ガス処理系 排風機	基礎ボルト	引張 応力	36	46	202	B2	
非常用ガス処理系 乾燥装置	基礎ボルト	引張 応力	52	64	202	B2	



表 2-1 構造強度評価結果 (3/4)

評価対象設備	評価部位	応力 分類	発生値(MPa)		評価基準値 (MPa)	評価 手法 ※1	備考
			基準 地震動 Ss	耐震強化 用地震動			
非常用ガス処理系 フィルタ装置	取付ボルト	せん断 応力	146	165	342	B2	
中央制御室送風機	基礎ボルト	引張 応力	84	103	207	B2	
中央制御室再循環 送風機	基礎ボルト	引張 応力	19	23	207	B2	
中央制御室排風機	基礎ボルト	引張 応力	10	12	207	B2	
中央制御室再循環 フィルタ装置	基礎ボルト	せん断 応力	42	46	159	B2	
ディーゼル機関	基礎ボルト	せん断 応力	62	68	225	A2	
空気だめ	胴板	一次一般 膜応力	91	91	262	B1	
燃料ディタンク	スカート	座屈	0.24	0.28	1.00	A2	座屈に対する評 価式により、発生 値は評価基準値 に対する比率で 示す。
発電機	機関側軸受台 下部ベース 取付ボルト	引張 応力	101	112	205	A2	
蓄電池	取付ボルト	せん断 応力	29	32	159	A2	
充電器	取付ボルト	せん断 応力	15	16	159	A2	
バイタル交流電源設備	取付ボルト	せん断 応力	11	12	159	A2	

表 2-1 構造強度評価結果 (4/4)

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値(MPa)		評価基準値(MPa)	評価手法※1	備考
			基準地震動 Ss	耐震強化用地震動			
主蒸気系配管本体	配管本体	一次応力	201	361	375	B2	
原子炉冷却材浄化系配管本体	配管本体	一次応力	141	208	366	B2	
残留熱除去系配管本体	配管本体	一次応力	—	237	364	B2	評価温度：100℃
			192	—	363	B2	評価温度：104℃
原子炉隔離時冷却系配管本体	配管本体	一次応力	185	216	324	B2	
高压炉心注水系配管本体	配管本体	一次応力	146	208	366	B2	
給水系配管本体	配管本体	一次応力	149	211	375	B2	
放射性ドレン移送系配管本体	配管本体	一次応力	106	128	315	B2	
原子炉補機冷却水系配管本体	配管本体	一次応力	150	258	344	B2	
原子炉補機冷却海水系配管本体	配管本体	一次応力	153	245	354	B2	
制御棒駆動系配管本体	配管本体	一次応力	87	197	318	B2	
ほう酸水注入系配管本体	配管本体	一次応力	—	89	335	B2	材料：SUS316LTP
			94	—	325	B2	材料：SUS304LTP
非常用ガス処理系配管本体	配管本体	一次応力	88	140	363	B2	
可燃性ガス濃度制御系配管本体	配管本体	一次応力	109	203	363	B2	
不活性ガス系配管本体	配管本体	一次応力	113	147	363	B2	

- ※1 「評価方法」の欄に記載されている[A1],[A2],[B1],[B2]の凡例は、以下のとおり。
- A1：応答倍率法において、耐震強化用地震動または基準地震動  $S_s$  による地震力と既往評価の地震力との応答比を用いた評価方法
  - A2：応答倍率法において、耐震強化用地震動または基準地震動  $S_s$  による床応答スペクトル等と、既往評価で用いた床応答スペクトル等から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め、大きい方の値を用いた評価方法
  - B1：詳細評価（既往評価の地震荷重と地震以外の荷重を区別し、地震荷重による応力のみに応答比を乗じ、地震以外の荷重による応力を組み合わせて、発生値を求める手法）
  - B2：詳細評価（スペクトルモーダル解析法等による評価）

また、動的機能維持の評価結果を表 2-2 に示す。

制御棒の地震時挿入性について、耐震強化用地震動による燃料集合体の相対変位が、試験により挿入性が確認された相対変位以下あることを確認した。

表 2-2 動的機能維持評価結果（耐震強化用地震動）

評価対象設備	地震時の相対変位 (mm)		基準値 (mm)
	基準地震動 Ss	耐震強化用 地震動	
制御棒（挿入性）	13.3	15.7	40.0

## 2. 屋外重要土木構造物（非常用取水路）

表 3-1 層間変形角による照査結果

	照査用応答値 $R_d$ ／評価基準値（限界層間変形角） $R_u$	
	基準地震動 $S_s$	耐震強化用地震動 （参考）
スクリーン室	0.46	0.51
取水路	0.51	0.65
補機冷却用海水取水路 （南側）	0.38	0.41
補機冷却用海水取水路 （北側）	0.44	0.52

表 3-2 せん断力による照査結果

	照査用応答値 $V_d$ ／評価基準値（せん断耐力） $V_{yd}$	
	基準地震動 $S_s$	耐震強化用地震動 （参考）
スクリーン室	0.74	0.73
取水路	0.61	0.58
補機冷却用海水取水路 （南側）	0.73	0.72
補機冷却用海水取水路 （北側）	0.60	0.65

以 上

## 【付録 3】

耐震強化工事を実施した耐震安全上重要な設備の

耐震性評価に関する整理

## 耐震強化工事を実施した耐震安全上重要な設備の

### 耐震性評価に関する整理

平成 21 年 2 月 18 日の原子力安全委員会において、「既設原子力施設の耐震安全性確認における弾性設計用地震動評価の位置付け等について」（21 安委決第 9 号）が決定された。本決定事項において「耐震強化工事が行われる場合には、その工事による耐震強化の効果を明らかにする観点から、工事前後の評価結果を示すことが望ましいと考える」とされていることから、耐震強化工事を実施した耐震安全上重要な設備について、工事前および工事後それぞれの状態において、弾性設計用地震動  $S_d$  および基準地震動  $S_s$  による応答値を算出し、耐震性評価に関する整理を行った（表 1, 表 2）。また、参考として、新潟県中越沖地震の応答値を表 1, 表 2 に合わせて記載した。

表 1 耐震強化工事を実施した主要な設備に関する整理

(単位 : MPa)

設備名	S <sub>1</sub> *応答値 ※2	NCO 応答値	Sd 応答値	III <sub>A</sub> S	S <sub>2</sub> 応答値 ※2	Ss 応答値	IV <sub>A</sub> S
主蒸気系配管※1	強化前	175	167※4	281	246	241※3	375
	強化後		128			201	
残留熱除去系配管※1	強化前	104※5	193	219	77	315	363
	強化後		130			192	

S<sub>1</sub>\* : S<sub>1</sub> 又は静的地震力のうち大きいものを示す。

NCO : 新潟県中越沖地震を示す。

※1 : 配管の応答値は一次応力を示す。

※2 : S<sub>1</sub>\* 及び S<sub>2</sub> 応答値は建設時工認における最大応力値を記載した。

※3 : 強化後の評価点と同じ評価点の発生値を記載しているため、S<sub>2</sub> による応答値を下回っている。S<sub>2</sub> と同じ評価点における発生値は 294MPa である。

※4 : 強化後の評価点と同じ評価点の発生値を記載しているため、S<sub>1</sub> による応答値を下回っている。S<sub>1</sub> と同じ評価点における発生値は 198MPa である。

※5 : Sd 及び Ss による評価とは異なる評価点の応答値を示しているため参考値。対応する評価点の III<sub>A</sub>S は 274MPa となる。



表 2 耐震強化工事を実施した耐震安全上重要な設備の耐震性評価に関する整理

(単位：MPa)

設備名	S1*応答値 ※1	NCO 応答値	Sd 応答値	III <sub>A</sub> S	S2 応答値 ※1	Ss 応答値	IV <sub>A</sub> S
原子炉補機冷却水系 熱交換器 注1)	強化前	172 <sup>※2</sup>	※4	126	28	108	170
	強化後		※4	158		108	190
原子炉冷却材浄化系 配管 注2)	強化前	130	※4	274	152	189	366
	強化後		※4			141	
給水系配管 注2)	強化前	111	※4	281	131	127 <sup>※5</sup>	375
	強化後		※4			149 <sup>※5</sup>	
原子炉補機冷却水系 配管 注2)	強化前	125	※4	233	153	175	344
	強化後		※4			150	
原子炉補機冷却海水系 配管 注2)	強化前	66	※4	241	83	152 <sup>※6</sup>	354
	強化後		※4			153 <sup>※6</sup>	
制御棒駆動系 配管 注2)	強化前	128	※4	159	129	87 <sup>※7</sup>	318
	強化後		※4			87 <sup>※7</sup>	
不活性ガス系配管 注2)	強化前	50	※4	211	58	113 <sup>※8</sup>	363
	強化後		※4			113 <sup>※8</sup>	
燃料取替機 注3)	強化前	—	—	231	82	154 <sup>※9</sup>	276
	強化後		—	—		195 <sup>※9</sup>	
原子炉建屋クレーン 注4)	強化前	136	218 <sup>※10</sup>	336	—	—	—
	強化後		223 <sup>※10</sup>	336		—	—

S1\*：S1 又は静的地震力のうち大きいものを示す。 NCO：新潟県中越沖地震を示す。

注1) NCO 応答値は胴板の一次応力，他は基礎ボルトの引張応力を示す。

- 注2) 配管の応答値は一次応力を示す。
- 注3) 応答値は構造物フレームの組合せ応力を示す。燃料取替機は「耐震BクラスS2 (Ss) 落下防止確認」と位置づけられているためS1\*およびSd\*の評価は不要。
- 注4) 応答値はクレーン本体ガードの曲げ応力を示す。原子炉建屋クレーンは「耐震BクラスS1 (Sd) 落下防止確認」と位置づけられているためS2およびSsの評価は不要。
- ※ 1 : S1\* 及び S2 応答値は建設時工認における最大応力値を記載した。
- ※ 2 : Sd 及び Ss による評価とは異なる評価部位の応答値を示しているため参考値。
- ※ 3 : Sd 及び Ss による評価とは異なる評価点の応答値を示しているため参考値。
- ※ 4 : 「Ss 応答値」が許容基準値ⅢAS 以下であるため、Sd による応答値が許容基準値ⅢAS を下回ることが明白であるもの
- ※ 5 : サポートの強化により、サポートの剛性が上がり配管の拘束条件が変更となったため、配管応答が変わり強化後の応答値が強化前の応答値よりも大きくなっている。強化前の最大応力点とは異なり、強化前の最大応力点における応答値は154MPaである。
- ※ 6 : サポートの強化により、サポートの剛性が上がり配管の拘束条件が変更となったため、配管応答が変わり強化後の応答値が強化前の応答値よりも若干大きくなっている。
- ※ 7 : ロッドレストレイントの取替を実施しているが、ロッドレストレイントの拘束方向、ばね定数は変更が無いため、配管本体の発生応力は改造前後で同じになる。
- ※ 8 : サポートの強化を行っているが、サポートの拘束方向、ばね定数は変更が無いため、配管本体の発生応力は改造前後で同じになる。
- ※ 9 : 燃料取替機の耐震強化は、燃料取替機の脚廻りの改造（走行レールに沿ってガイドプレートを設置）であり、強化後は、燃料取替機本体がガイドプレートに接触することにより構造物フレームに反力が生じるため、強化後の応答値が強化前と比べて増加している。なお、脚廻りにおける応答値は低減されている。
- ※ 10 : 原子炉建屋クレーンの耐震強化は本体ガード脱線防止ラグとトロリストップの改造（大型化）であり、本体ガードの強度に関わる改造はない。クレーンの総重量が増えたことにより、強化後の本体ガードの応答値が強化前と比べて増加している。

## 【付録 4】

中越沖地震の観測記録における上下動が大きいことに関する  
観測記録の分析および理由，耐震安全性評価への影響の考察

## 中越沖地震の観測記録における上下動が大きいことに関する 観測記録の分析および理由，耐震安全性評価への影響の考察

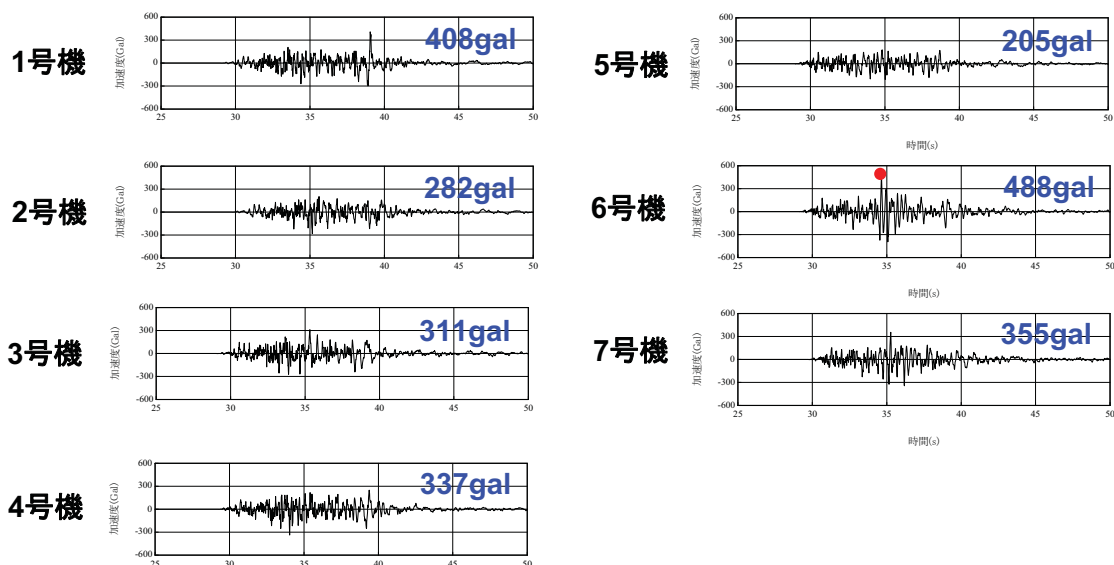
平成 19 年新潟県中越沖地震時の観測記録において，原子炉建屋基礎版上の上下動は，6 号機で最も大きい値を記録している（最大値 488 ガル）。この事象の原因の分析および耐震安全性評価への影響について整理を行った。

添付に検討結果を示す。

# 6号機の上下動が大きいことについて —観測記録の分析及び理由の考察—

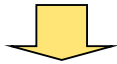
## 中越沖地震で観測された基礎版上の観測記録

- 原子炉建屋基礎版上の上下動は、6号機が最も大きい。  
(最大値の生起時刻は35秒付近)



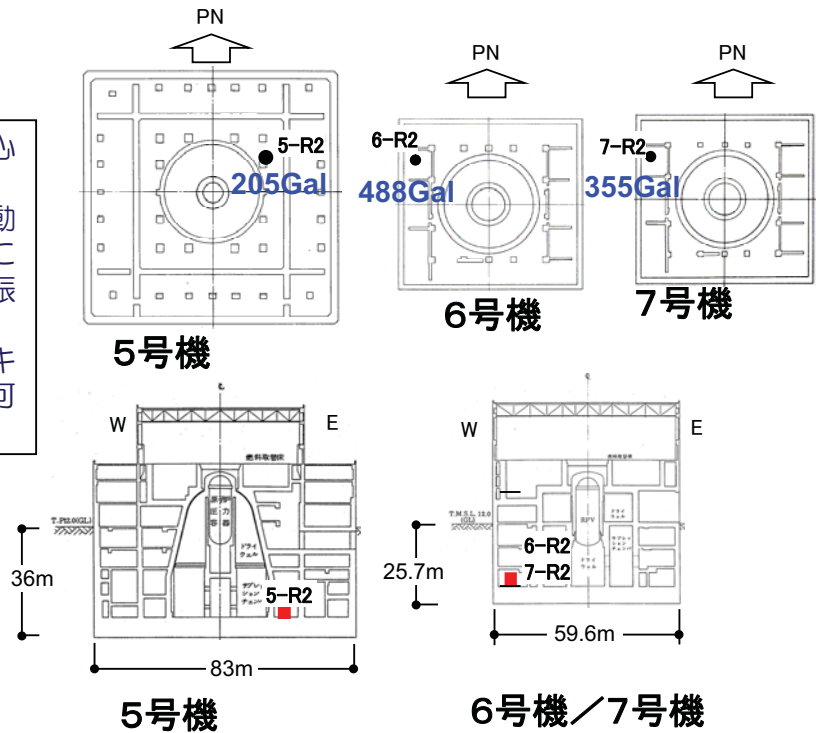
# 5号機、6号機、7号機の地震計配置位置

- 同じ大湊側でも、6号機上下動の最大加速度が特に大きい。
- 何故、この差が生じたのか？

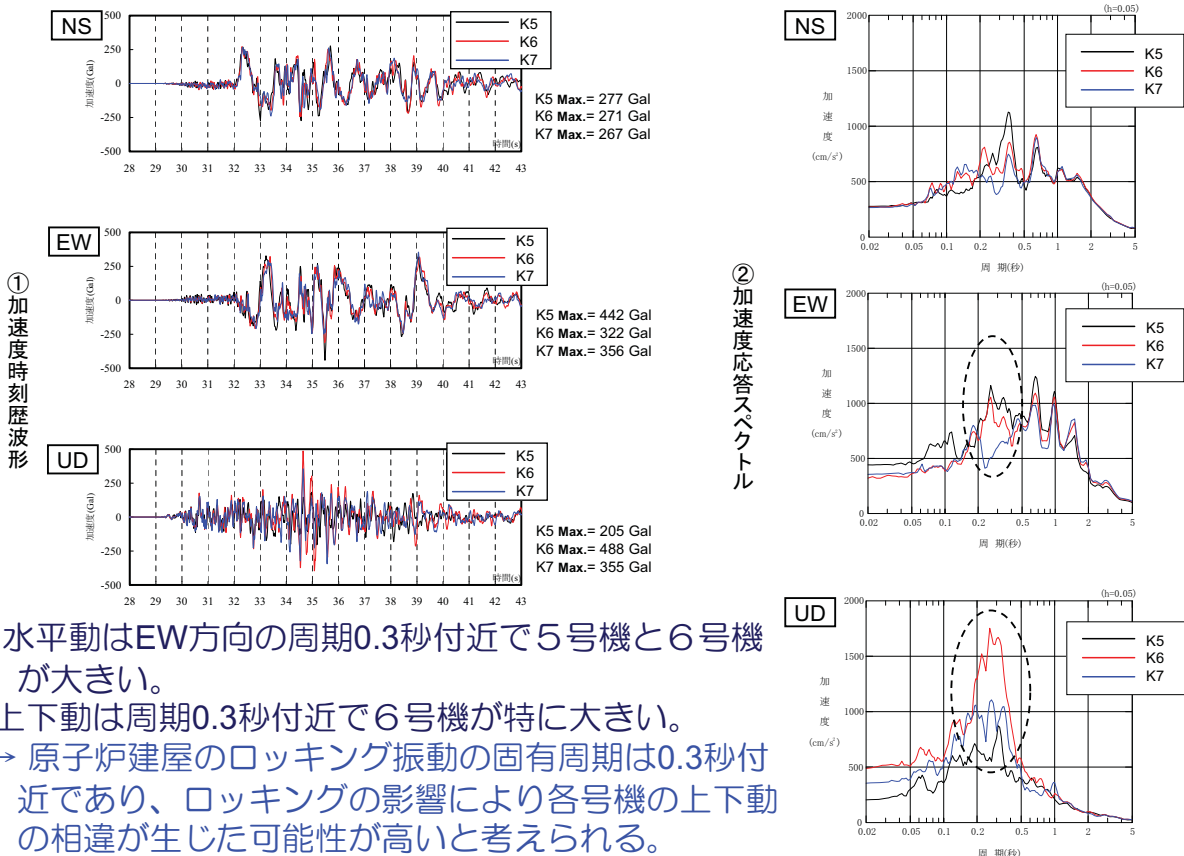


## ● 建屋ロッキングの影響

- ①地震計は各号機とも建屋の中心から離れた位置にある。
- ②地震時に建屋は水平方向に振動（スウェイ振動）するとともに回転方向に振動（ロッキング振動）する。
- ③地震計の観測値は、このロッキング振動の影響を受けている可能性がある。



# 5号機、6号機、7号機の基礎版上記録の比較



- 水平動はEW方向の周期0.3秒付近で5号機と6号機が大きい。
- 上下動は周期0.3秒付近で6号機が特に大きい。  
→ 原子炉建屋のロッキング振動の固有周期は0.3秒付近であり、ロッキングの影響により各号機の上下動の相違が生じた可能性が高いと考えられる。

## 6号機の上下動が大きい理由について

### <仮説>

○水平方向（特にEW成分）の入力動（ロッキングの固有周期に対応する0.3秒付近）が7号機に比べ5号機／6号機で大きかった。

○水平方向地震動のロッキング固有周期に対応する周期帯のパワーが同一の場合には、5号機に比べ6号機／7号機の方がロッキングの影響を受け易い。

○以上から、結果として6号機で大きな上下動が記録されたものとする。

### <検討事項>

検討1：本震の上下動の観測記録から、シミュレーション解析から推定されるロッキング振動を除き、純粋な上下動を推定し比較する。

検討2：余震記録を用いて、シミュレーション解析を介さずに実際の記録により「検討1」が妥当なものかを検証する。

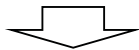
検討3：なぜ固有周期0.3秒付近のEW成分の入力が、7号機に比べ5／6号機で大きかったのかということについて、地下構造の影響による可能性について検討する。

4

## ロッキング振動のイメージ

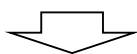
### ■ 5号機と6/7号機の相違点

- ・ 6/7号機の方が埋込が浅い
- ・ 6/7号機の方が底面積が小さい
- ・ 新設地震計は、5号機の方が建屋の中心に近い位置にある

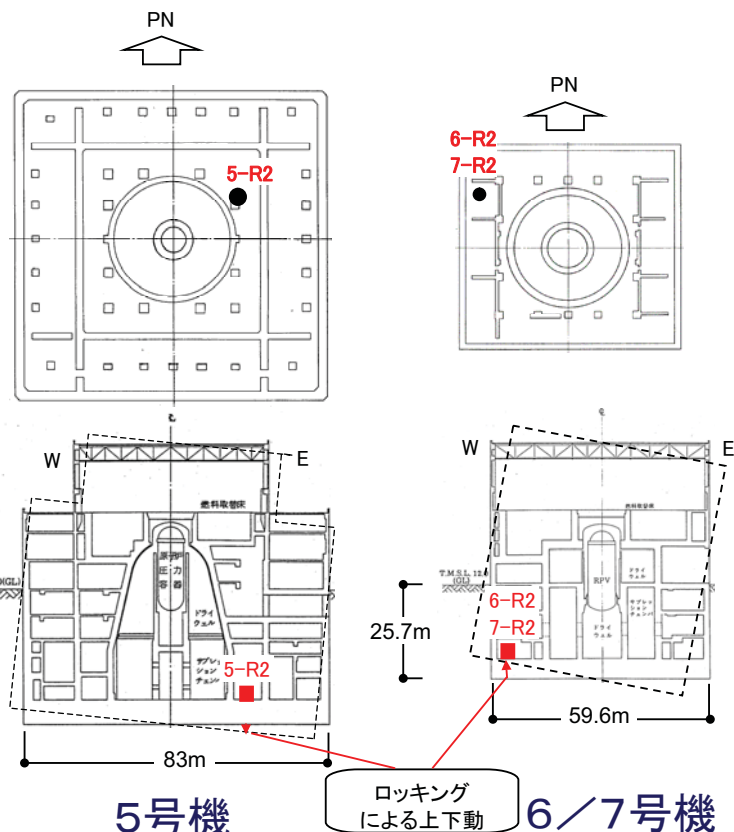


### ■ 考察

- ・ 建屋の形状から6/7号機の方がロッキング振動を励起し易い
- ・ 地震計の配置から、6/7号機の方がロッキングによる上下動記録が入りやすい



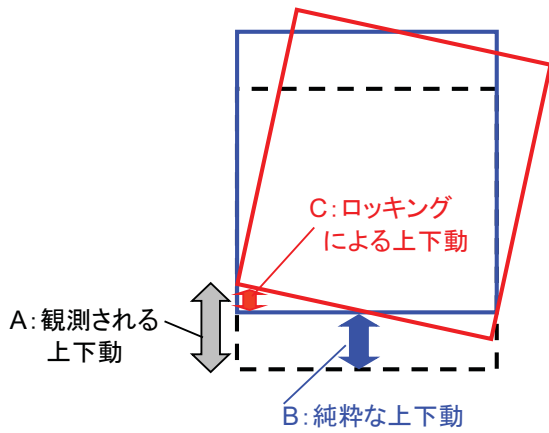
- ・ 5号機に比較し、6/7号機の記録には、ロッキング振動による上下動成分が、多く含まれると考えられる



5

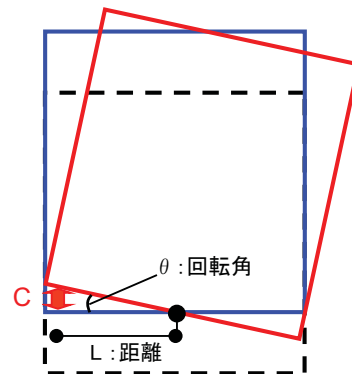
## 検討1：本震記録による検討（剛体のロッキングによる上下動について）

(1) 観測された上下動は、純粋な上下動とロッキングによる上下動の和と考えられる



$$\text{観測される上下動} \\ A = B + C$$

(2) ロッキングによる回転角が既知であれば、ロッキングによる上下動を確定することができる



$$\text{ロッキングによる上下動} \\ C \doteq \theta \times L$$

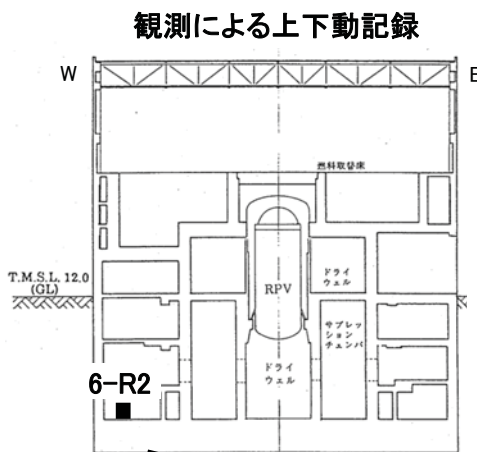
( $\theta$  が微小である場合)

6

## 検討1：本震記録による検討（検討概要）

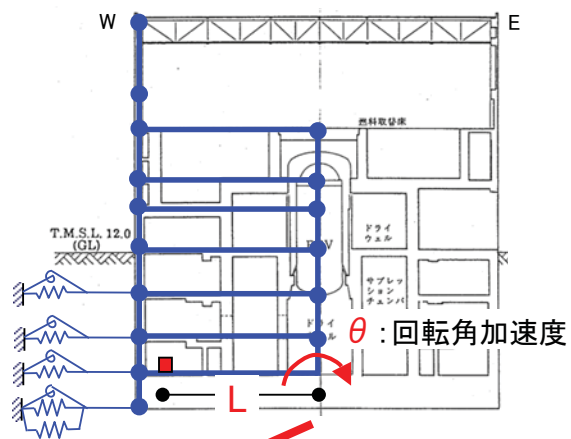
■ 本震時に観測された上下動記録とシミュレーション解析から得られた回転角を用いて、5号機～7号機基礎版の純粋な上下動を試算する。

- <仮定>
- ① 原子炉建屋を剛体と仮定
  - ② ロッキング中心は建屋中心にある



観測上下動

### シミュレーション解析による回転角



ロッキング上下動

$$\text{純粋な上下動} = \text{観測上下動} - \theta \times L$$

7



# 検討1：本震記録による検討（6号機の検討）

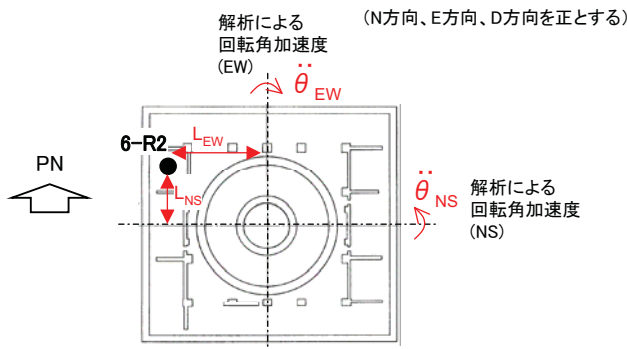
＜解析条件：全号機共通＞

- ①NS方向のロッキング成分とEW方向のロッキング成分の両方を考慮する
- ②加速度記録を用いて検討する

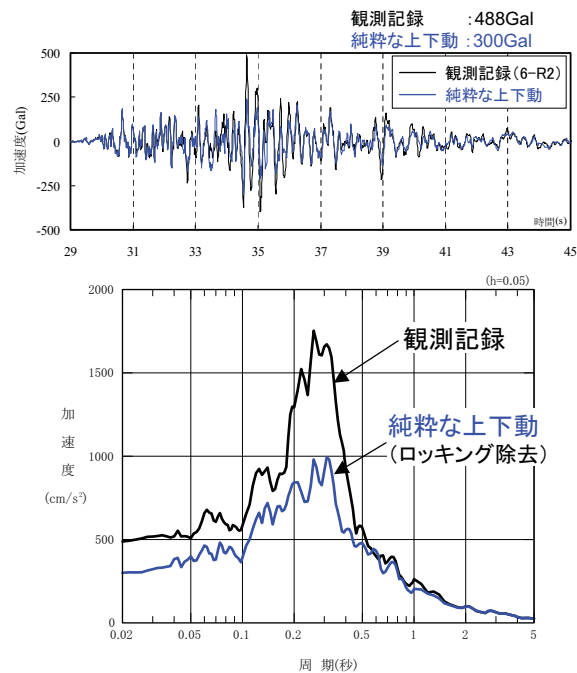
## ① 6号機の場合

下式を用いて、ロッキング振動による上下動成分の除去を行った。

$$\text{純粋な上下動} = \text{観測記録} + \ddot{\theta}_{NS} \cdot L_{NS} - \ddot{\theta}_{EW} \cdot L_{EW}$$



- 6号機の上下動記録からロッキングによる上下動成分を除去すると地震動が小さくなる



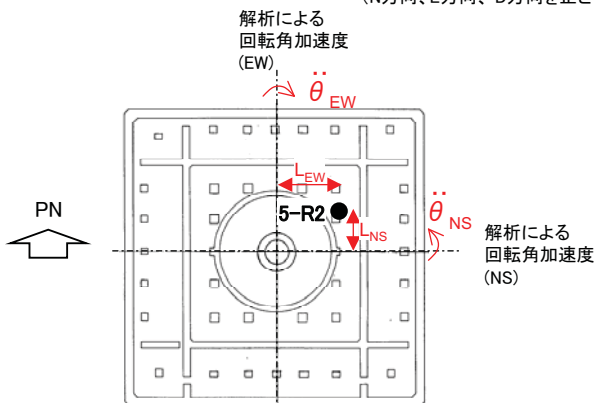
8

# 検討1：本震記録による検討（5号機の検討）

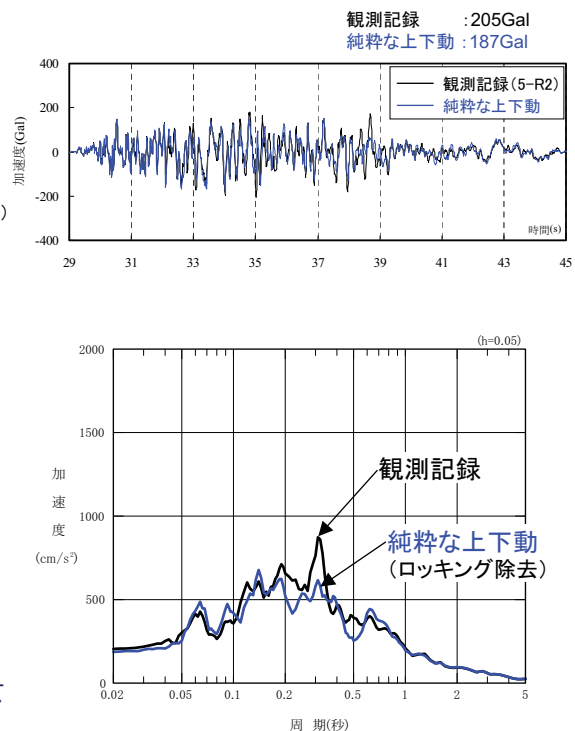
## ② 5号機の場合

下式を用いて、ロッキング振動による上下動成分の除去を行った。

$$\text{純粋な上下動} = \text{観測記録} + \ddot{\theta}_{NS} \cdot L_{NS} + \ddot{\theta}_{EW} \cdot L_{EW}$$



- 5号機の場合は、ロッキング振動による上下動成分を除去しても、地震動の低減は少ない



9

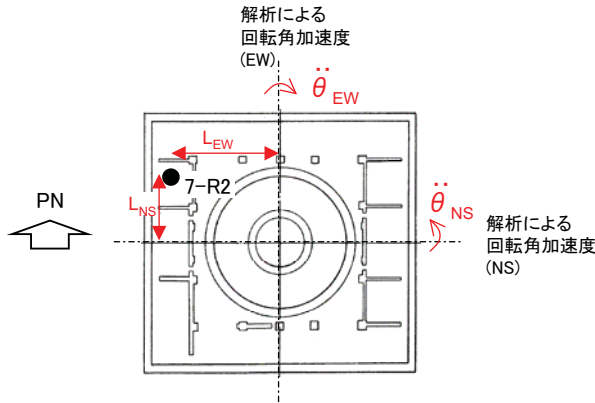
# 検討1：本震記録による検討（7号機の検討）

## ③ 7号機の場合

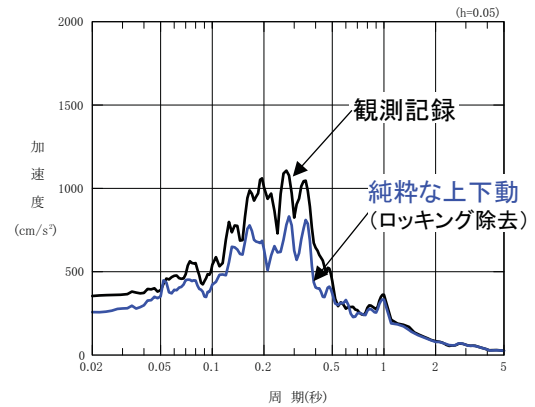
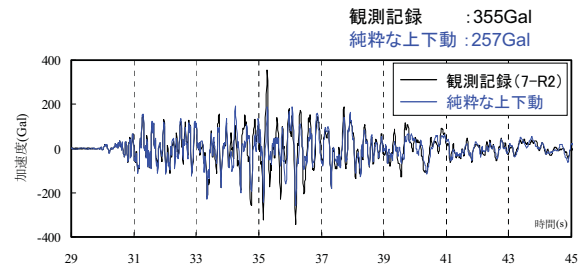
下式を用いて、ロッキング振動による上下動成分の除去を行った。

$$\text{純粋な上下動} = \text{観測記録} + \ddot{\theta}_{NS} \cdot L_{NS} - \ddot{\theta}_{EW} \cdot L_{EW}$$

(N方向、E方向、D方向を正とする)

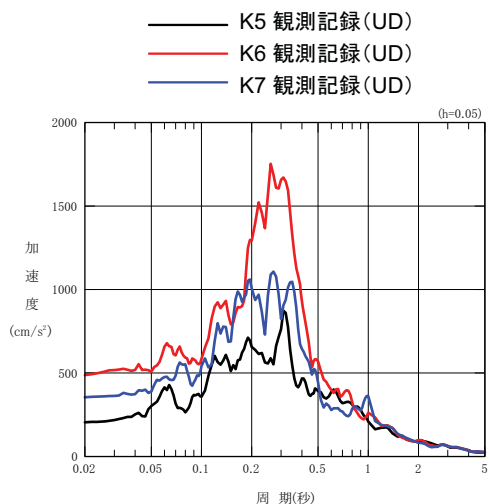


- 7号機の場合は、ロッキング振動による上下動成分を除去すると地震動が小さくなる

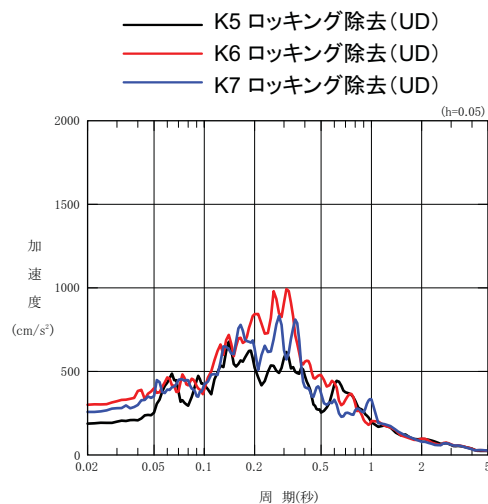


# 検討1：本震記録による検討（5～7号機の純粋な上下動の比較）

- 以上の検討で抽出された純粋な上下動成分について、5号機、6号機、7号機の加速度応答スペクトルの比較を行った。



オリジナルの観測記録



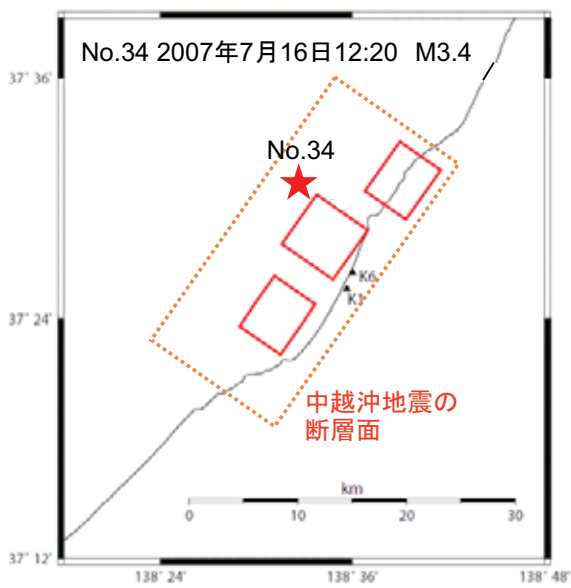
純粋な上下動応答

- ロッキングによる上下動成分を取り除くことにより、5号機～7号機での差異はかなり小さくなる

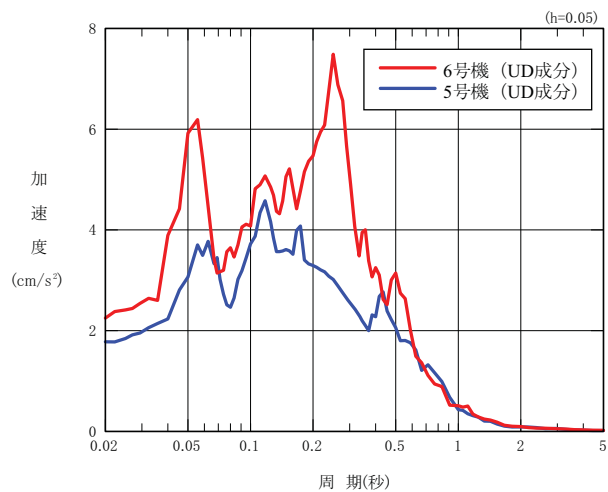
## 検討2：余震記録を用いた検証（対象記録）

### ■ 対象とした地震記録

5号機と6号機の基礎版上の上下動記録の差が大きい地震



対象地震の震央位置



No.34 2007年7月16日12:20 M3.4

基礎版における上下動記録の応答スペクトル

12

## 検討2：余震記録を用いた検証（6号機の検討概要）

### ■ 検討概要

6号機基礎版上の4点(R64,R67,R68,R69)の記録を用いて以下の検討を行う。(余震記録では新設、既設地震計とも記録が取れている。)

#### ① 純粋な上下動成分の抽出

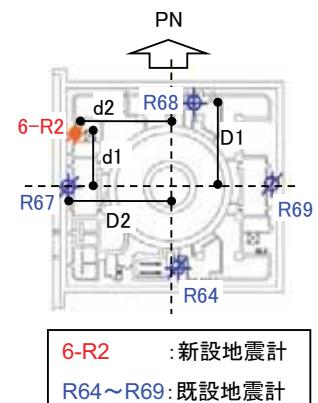
$$\left. \begin{array}{l} \text{純粋な上下動 (NS)} \quad U_{ns} = (R64+R68) / 2 \\ \text{純粋な上下動 (EW)} \quad U_{ew} = (R67+R69) / 2 \end{array} \right\} \rightarrow \text{剛体であれば} U_{ns} \text{と} U_{ew} \text{は同じ値になる}$$

#### ② 6-R2地点のロッキング振動による上下動成分の計算

$$\begin{array}{l} \text{NS方向のロッキング振動による上下動成分} : R_{ns} = (R68 - U_{ns}) \times d1 / D1 \\ \text{EW方向のロッキング振動による上下動成分} : R_{ew} = (R67 - U_{ew}) \times d2 / D2 \end{array}$$

#### ③ 6-R2地点の上下動応答の推定及び観測記録との比較

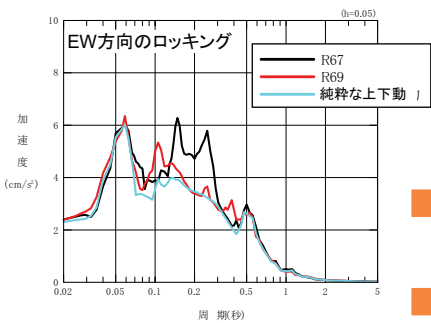
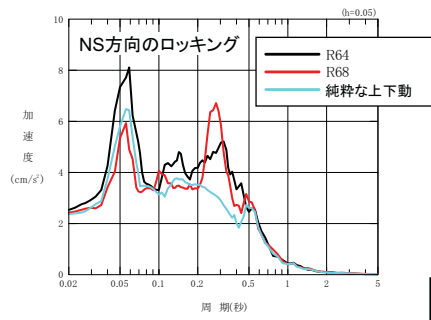
$$\begin{array}{c} \text{6-R2} \\ \uparrow \\ \text{観測値} \end{array} \Leftrightarrow \begin{array}{c} U_{ns} + R_{ns} + R_{ew} \\ \uparrow \\ \text{推定値} \end{array} \rightarrow \text{既設地震計記録から推定した6-R2地点の上下動} \\ \text{(} U_{ns} + R_{ns} + R_{ew} \text{)が、実際に観測された6-R2の記録} \\ \text{と一致すれば、剛体仮定が正しいと言える}$$



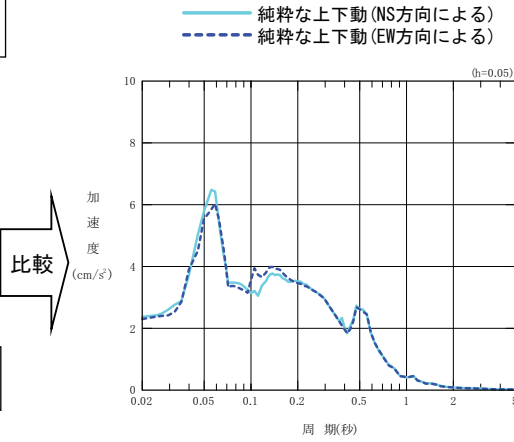
13

## 検討2：余震記録を用いた検証（6号機の検討）

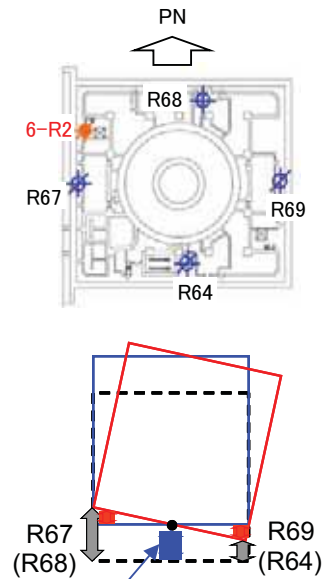
### ① 純粋な上下動成分の算定



加速度応答スペクトル



- 観測記録からロッキング成分を除去した純粋な上下動は観測記録より小さい。
- NS記録から求めた純粋な上下動とEW記録から求めた純粋な上下動はほぼ等しいことから、剛体仮定に矛盾はない。



① 純粋な上下動

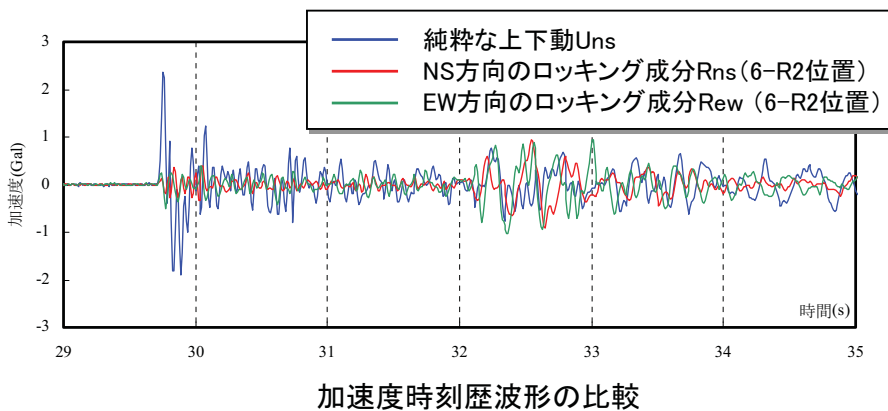
$$U_{ew} = (R67 + R69) / 2$$

$$U_{ns} = (R68 + R64) / 2$$

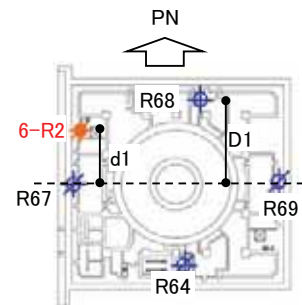
14

## 検討2：余震記録を用いた検証（6号機の検討）

### ② 6-R2地点のロッキング振動による上下動成分の算定



- 32秒以降でロッキングによる上下動成分が大きい
- NS方向のロッキングとEW方向のロッキングは同程度である



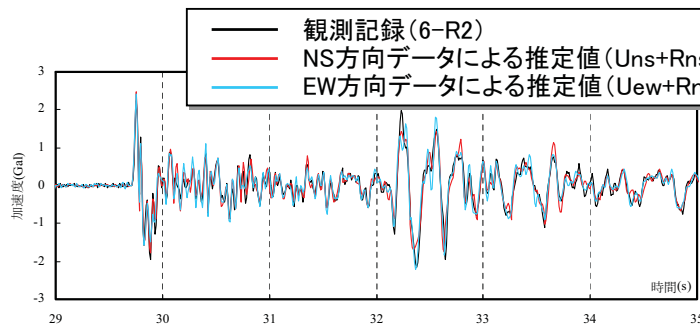
① 純粋な上下動  $U_{ns}$

② ロッキングによる上下動  $R_{ns} = (R68 - U_{ns}) \times d1 / D1$

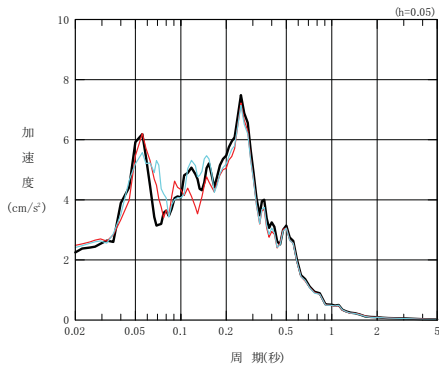
15

## 検討2：余震記録を用いた検証（6号機の検討）

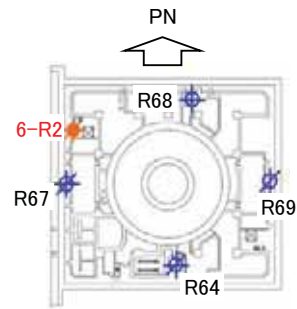
### ③ 6-R2地点の上下動応答の推定及び観測記録との比較



加速度時刻歴波形の比較



加速度応答スペクトルの比較



- 余震記録を対象として、既設地震計 (R64, R67, R68, R69) の記録から新設地震計 (6-R2) の上下応答を精度良く推定できた。
- すなわち、剛体仮定がほぼ成り立つことを確認した。
- したがって、6-R2の記録にはロッキング振動により上下動が大きくなったものと考えられる。

16

## 検討2：余震記録を用いた検証（5号機の検討概要）

### ■ 検討概要

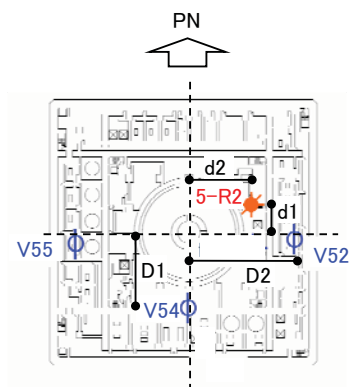
5号機基礎版上の3点 (V52, V54, V55) の記録を用いて以下の検討を行う。

#### ① 純粋な上下動成分の抽出

$$\text{純粋な上下動 (EW) } U_{ew} = (V52 + V55) / 2$$

#### ② 5-R2地点のロッキング振動による上下動成分の計算

$$\begin{aligned} \text{NS方向のロッキング振動による上下動成分} &: R_{ns} = -(V54 - U_{ew}) \times d1 / D1 \\ \text{EW方向のロッキング振動による上下動成分} &: R_{ew} = (V52 - U_{ew}) \times d2 / D2 \end{aligned}$$



5-R2 : 新設地震計  
V52~V55 : 既設地震計

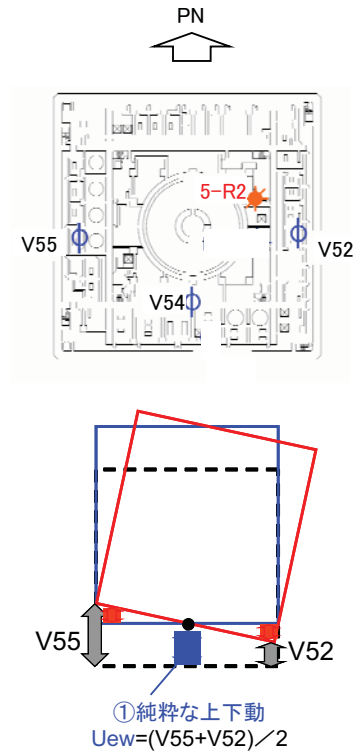
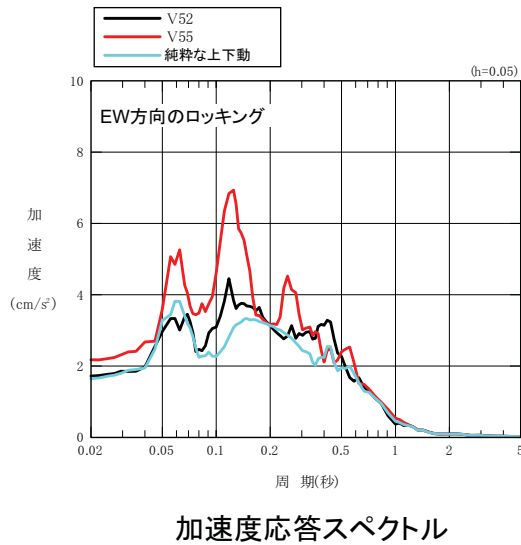
#### ③ 5-R2地点の上下動応答の推定及び観測記録との比較

$$\begin{array}{ccc} \text{5-R2} & \leftrightarrow & U_{ew} + R_{ns} + R_{ew} \\ \uparrow \text{観測値} & \text{比較} & \uparrow \text{推定値} \end{array} \rightarrow \text{既設地震計記録から推定した5-R2地点の上下動 (U}_{ew} + R_{ns} + R_{ew}) \text{が、実際に観測された5-R2の記録と一致すれば、剛体仮定が正しいと言える}$$

17

## 検討2：余震記録を用いた検証（5号機の検討）

### ① 純粋な上下動成分の抽出

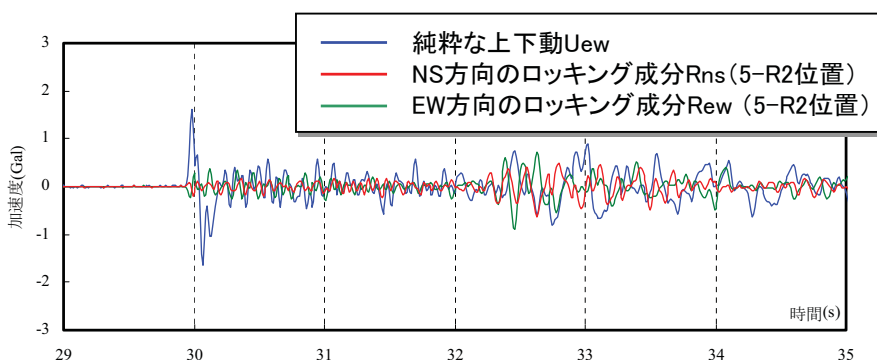


- 5号機の場合もロッキングによる上下動成分を取り除いた純粋な上下動成分は小さくなる。

18

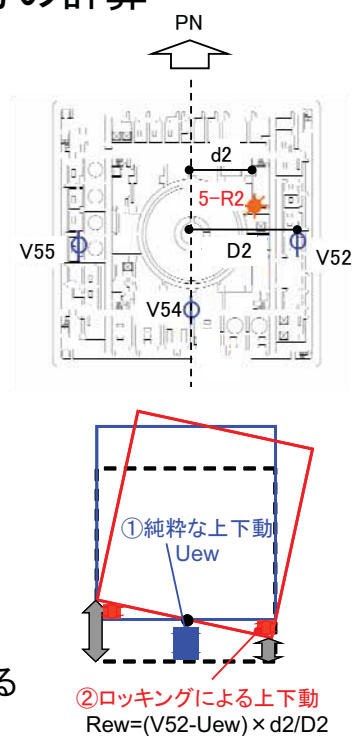
## 検討2：余震記録を用いた検証（5号機の検討）

### ② 5-R2地点のロッキング振動による上下動成分の計算



加速度時刻歴波形の比較

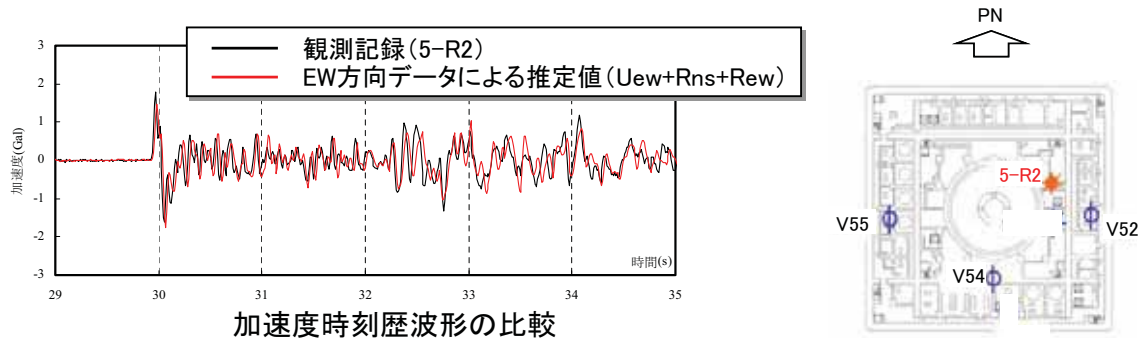
- 32秒以降でロッキングによる上下動成分が大きい
- NS方向のロッキングとEW方向のロッキングは同程度である



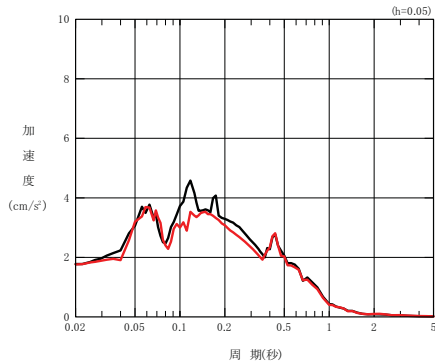
19

## 検討2：余震記録を用いた検証（5号機の検討）

### ③ 5-R2地点の上下動応答の推定及び観測記録との比較



加速度時刻歴波形の比較



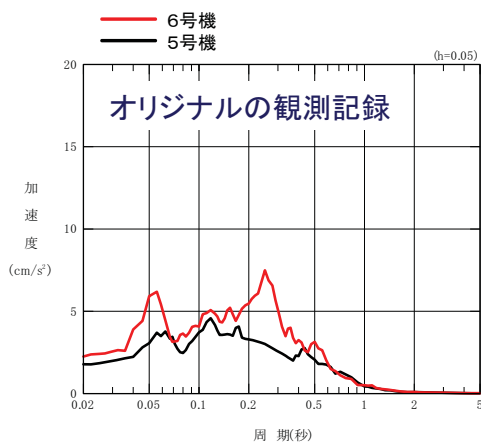
加速度応答スペクトルの比較

- No.34地震を対象として、既設地震計（V52,V54,V55）の記録から推定した新設地震計（5-R2）の上下応答は、6号機の場合と同様に精度良く推定できた。
- すなわち、5号機においても剛体仮定がほぼ成り立つことを確認した。

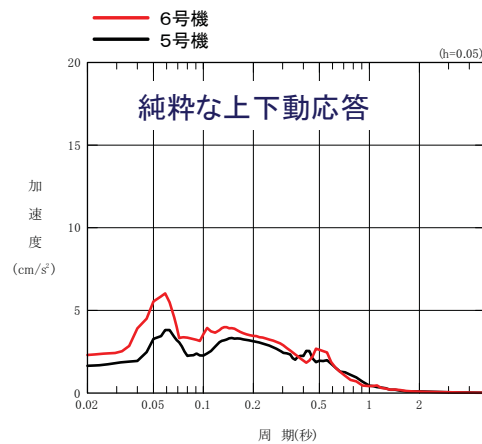
20

## 検討2：余震記録を用いた検証（5号機と6号機の比較）

- 以上の検討で抽出された純粋な上下動成分について、5号機と6号機の加速度応答スペクトルの比較を行った。



オリジナルの観測記録



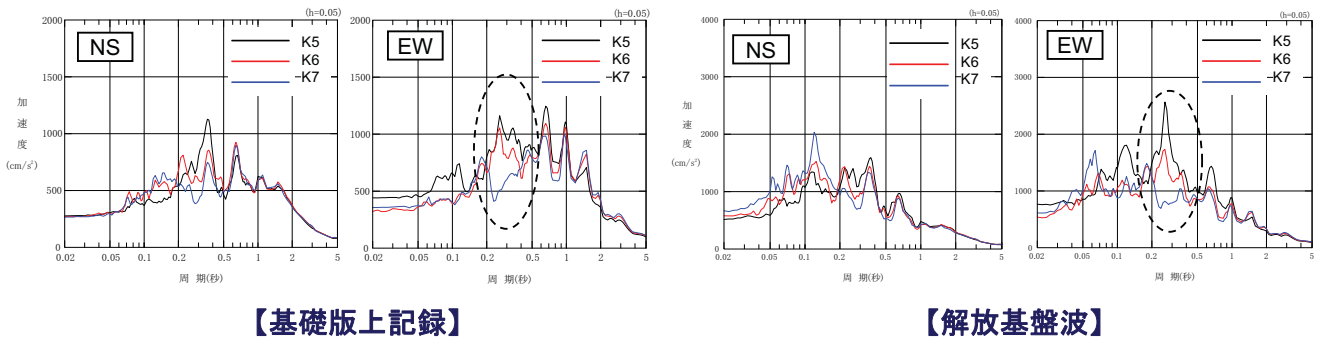
純粋な上下動応答

- ロッキングによる上下動成分を取り除くことにより、0.3秒付近の応答が5号機と6号機でほぼ一致する。
- すなわち、6号機の0.3秒付近が大きいのは、ロッキングによる上下動成分によるためと推定される。

21

### 検討3：入力地震動が号機間で異なる要因分析

#### ■ 応答スペクトルの比較（基礎版上の記録・解放基盤波）



- 基礎版上記録・解放基盤波ともに、0.3秒付近については、5号機と6号機のEW成分が大きい

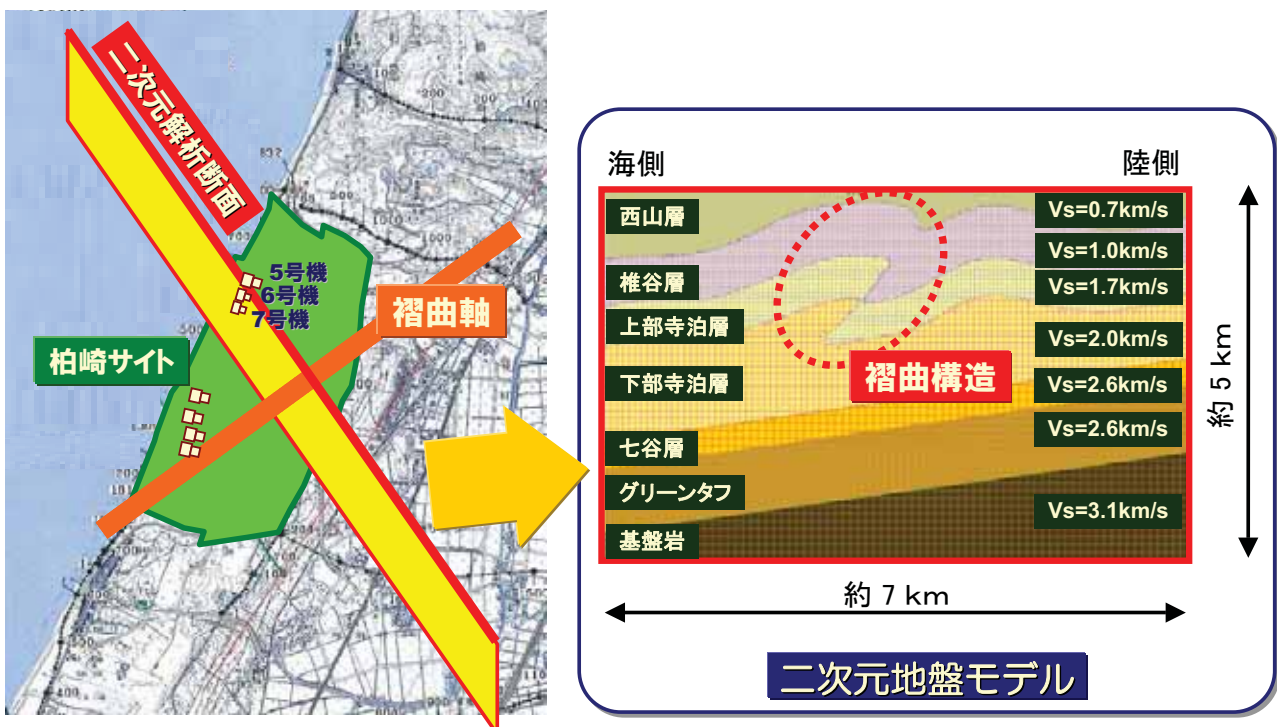


解放基盤波が5/6号機で大きくなる要因について、  
2次元地盤モデルによるFEM地震動シミュレーションにより検討

### 検討3：入力地震動が号機間で異なる要因分析

#### ■ 2次元地盤モデルによるFEM地震動シミュレーション解析

5号機を通り、敷地内の褶曲軸と直交する方向に2次元地盤モデルを作成





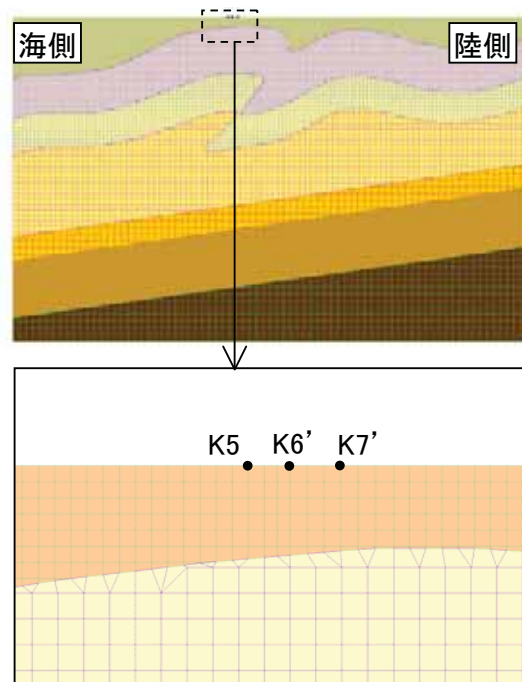
### 検討3：入力地震動が号機間で異なる要因分析

#### ■二次元地盤モデルによるFEM地震動シミュレーション解析

【二次元解析断面と評価地点との関係】



二次元解析断面と評価地点

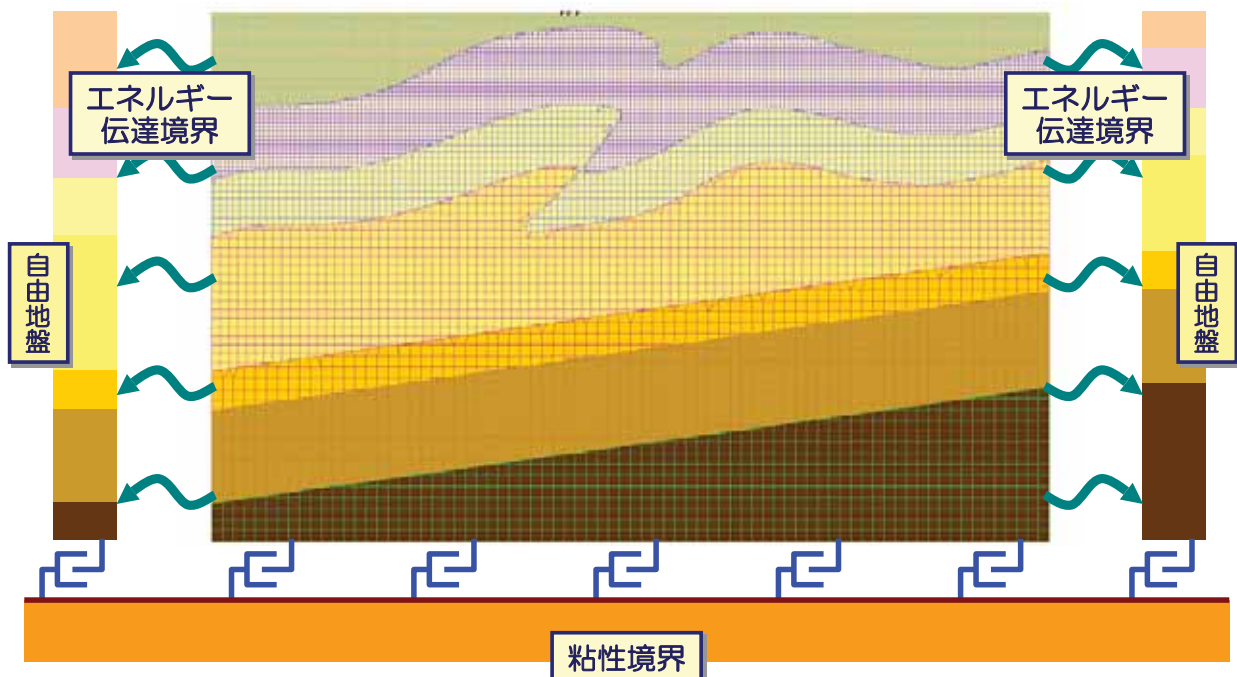


FEMメッシュと評価地点

### 検討3：入力地震動が号機間で異なる要因分析

#### ■二次元地盤モデルによるFEM地震動シミュレーション解析

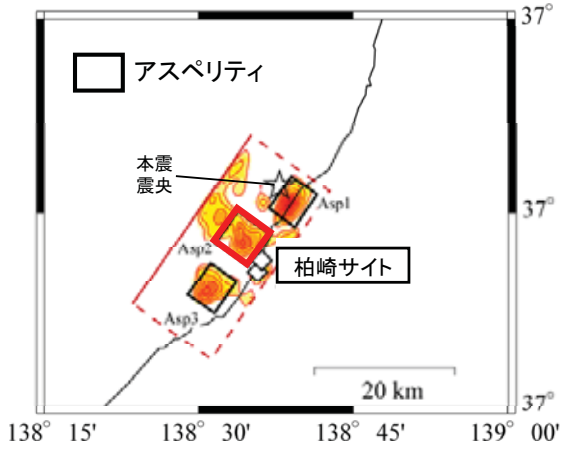
【FEMモデルの境界条件】



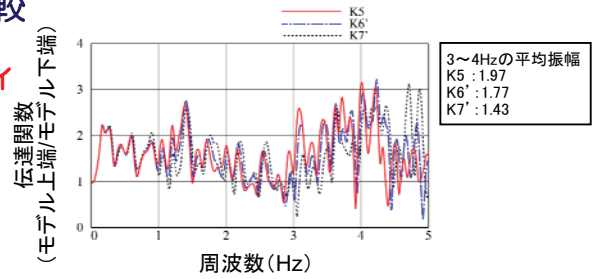
### 検討3：入力地震動が号機間で異なる要因分析

#### ■ 5、6、7号機投影点の伝達関数の比較

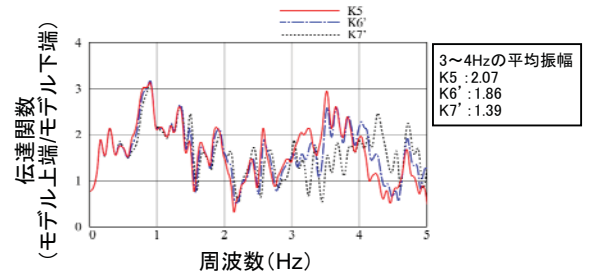
▲上下動の振幅を支配した**第2アスペリティ**からの地震波を想定



中越沖地震  
第2アスペリティ (Asp2)からの斜め入射



(a) SH波入射・断面直交方向の応答 →NS成分に相当

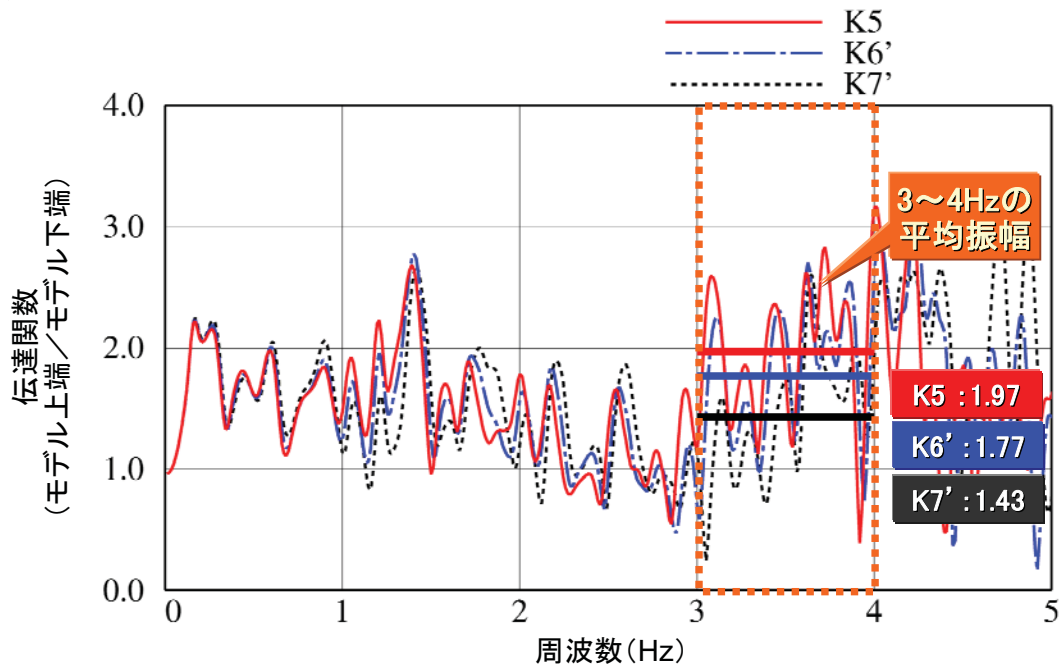


(b) SV波入射・断面平行方向の応答 →EW成分に相当

- 3～4Hz付近では7号機の応答が小さい。特にEW方向の成分。
- 5号機と6号機は大差はない → 顕著ではないが観測事実に整合的

### 検討3：入力地震動が号機間で異なる要因分析

#### ■ 3地点の伝達関数の比較 (SH波入射 断面直交方向の応答)

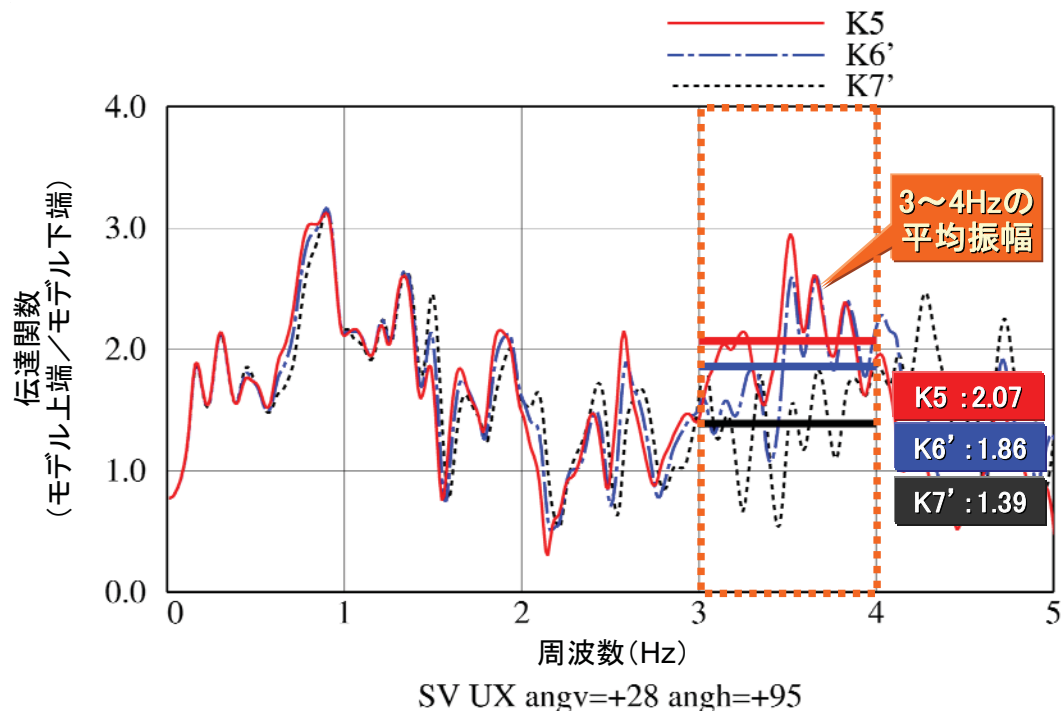


SH UY angv=+28 angh=+95

中越沖地震 第2アスペリティからの斜め入射

## 検討3：入力地震動が号機間で異なる要因分析

### ■ 3地点の伝達関数の比較（SV波入射 断面平行方向の応答）



中越沖地震 第2アスペリティからの斜め入射

28

## まとめ（その1）

- (1) 本震時の原子炉建屋の基礎版上の上下動の最大加速度を比較すると、6号機が最も大きかった。応答スペクトルでは、特に周期0.3秒付近に大きなピークがあった。
- (2) これは、周期0.3秒付近が卓越したEW方向の水平動によるロッキング振動の影響によるものではないかという仮説を立てて、以下の3項目の検討を実施。
  - ① 本震の上下動の観測記録から、シミュレーション解析から推定されるロッキング振動を除き、純粋な上下動を推定し比較する。
  - ② 余震記録を用いて、シミュレーション解析を介さずに実際の記録により①の検討が妥当なものかを検証する。
  - ③ なぜ固有周期0.3秒付近のEW成分の入力が、7号機に比べ5/6号機で大きかったのかということについて、地下構造の影響による可能性について検討する。

29

## まとめ（その2）

### （3）①及び②についての確認

観測された上下動記録から、解析モデルに基づき推定されるロッキング振動による上下動を除去したところ、5～7号機の上下応答の差異は小さくなった。

### ③についての確認

解放基盤における地震動を比較した結果、0.3秒付近の水平動は、解放基盤で既に7号機に比べ5／6号機が大きかった。また、二次元FEM解析によると、Asp2からの入射波に対し、7号機の3～4Hzの応答が6号機よりも小さい結果となった。

### （4）検討結果による推測

○地下構造の影響により、EW方向の入力地震動が5／6号機において大きかった。

○そのうち、建屋の外壁近傍に地震計が設置されている6号機において、ロッキング振動の影響を強く受けたことにより、記録としての上下動が大きくなった。

## 柏崎刈羽原子力発電所6/7号機

# 建屋のロッキング振動に関する 機器・配管系の耐震安全性評価に対する考察

### 検討の背景

- 新潟県中越沖地震の観測記録のうち、6号機の上下動成分が他号機と比較して大きかった要因について、ロッキング振動の影響との仮定の下、分析および考察を行った。

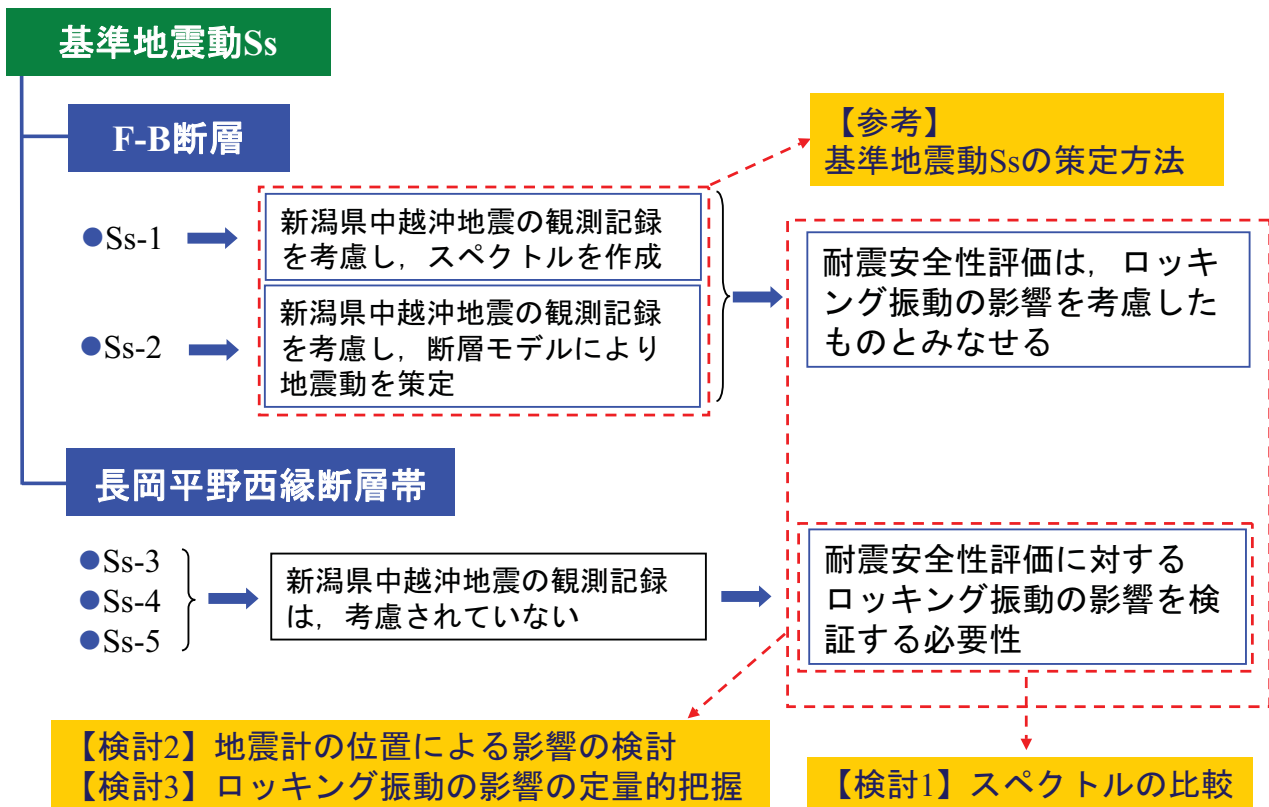


- ✓ 5～7号機において観測された上下動記録から、推定されるロッキング振動による上下動を除去したところ、プラント間で上下応答の差異は小さくなった。
- ✓ 5～7号機の上下動の分析の結果、0.3秒の固有周期を持つロッキング振動により、上下動が増幅された可能性（6号機におけるロッキング振動の影響が顕著）。



機器・配管系への耐震安全性評価の妥当性について検証

# 基準地震動Ssとロッキング振動の影響検討



# 基準地震動Ssとロッキング振動の影響検討

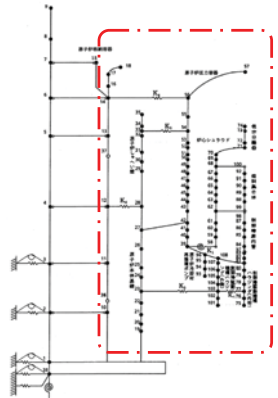
## 【検討1】 スペクトルの比較

✓ Ss-3~5について、水平動より算出したロッキング振動による上下動を加味した場合の、耐震安全性評価への影響について、スペクトルの比較により検討する。

## 【検討2】 地震計の位置による影響の検討

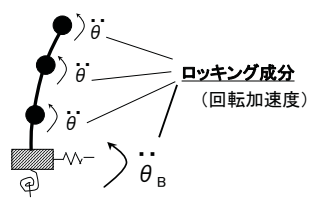
✓ スペクトルの比較により、ロッキング振動による機器・配管系評価の妥当性への影響は小さいものと判断できるが、念のため、その程度を検証。

✓ ただし、建屋-機器連成モデルで評価する大型機器については耐震安全性評価において既にロッキング振動が考慮されていることから検証は行わない（下図参照）。



- 大型機器の耐震評価の流れ
- 左図を例とした建屋と連成させた地震応答解析モデルで地震荷重を算定する。
  - それら地震荷重を用いて個別の部位の構造強度評価を行う。
- <荷重を用いて評価を行う設備の例>
- 原子炉圧力容器
  - 炉内構造物
  - 炉心支持構造物 など

水平地震動によって励起される各質点及び原子炉基礎版の回転自由度が解析に含まれるため、ロッキング振動は解析上、考慮されている。



大型機器地震応答解析モデル例

# 基準地震動Ssとロッキング振動の影響検討

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討（つづき）

- ✓ Ss-1及びSs-2の策定には、原子炉建屋に設置された地震計により観測された新潟県中越沖地震の観測記録を用いているが（ロッキング振動の影響を加味しているが）、地震計よりも建屋外周側に位置する機器・配管系については、より大きなロッキング振動が加わるものと仮定して、その影響について検証する。

## 【検討3】ロッキング振動の影響の定量的把握

- ✓ 一般的検証の一例として、代表設備を選定し、ロッキング振動の地震応答解析への寄与について詳細解析（スペクトルモーダル解析、時刻歴解析）により定量化して検証、考察する。

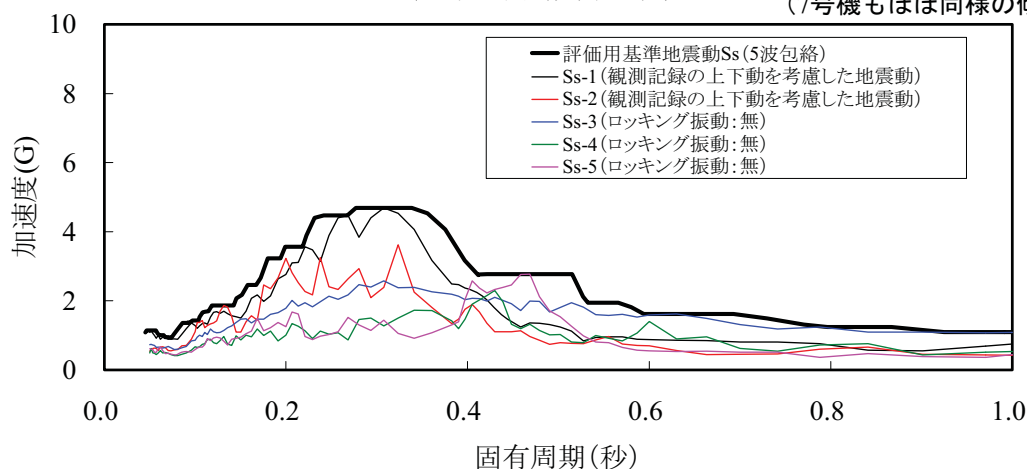
4

## 【検討1】スペクトルの比較

### ■ 評価用基準地震動Ssの床応答スペクトルと基準地震動Ss-1～5の床応答スペクトルの特徴

6号機 原子炉建屋基礎版上の床応答スペクトル  
(上下方向:減衰2.0%)

(7号機もほぼ同様の傾向)



- ✓ 機器・配管系は、評価用基準地震動Ss（Ss-1～5の10%拡幅を包絡）により評価
- ✓ 機器・配管系の固有周期帯（～0.4秒）ではSs-1が、長周期側ではSs-3が支配的

※ 減衰2.0%：配管系の解析において平均的に用いられる減衰定数

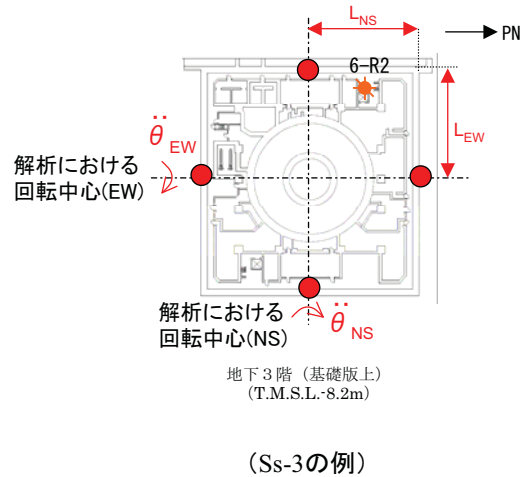
5

# 【検討1】スペクトルの比較

## ■基準地震動Ss-3～5におけるロッキング振動の考慮

- ✓ 基準地震動Ss-3～5による，原子炉建屋のNS，EW方向の地震応答解析結果から得られる回転加速度から算定したロッキング振動による上下動成分を，原子炉建屋の上下方向の地震応答解析結果に加算し，建屋外壁部の鉛直加速度を算定した。

- ケース1 NS+ 端部上下(回転考慮) = 上下応答 +  $\ddot{\theta}_{NS} \cdot L_{NS}$
- ケース2 NS- 端部上下(回転考慮) = 上下応答 -  $\ddot{\theta}_{NS} \cdot L_{NS}$
- ケース3 EW+ 端部上下(回転考慮) = 上下応答 +  $\ddot{\theta}_{EW} \cdot L_{EW}$
- ケース4 EW- 端部上下(回転考慮) = 上下応答 -  $\ddot{\theta}_{EW} \cdot L_{EW}$

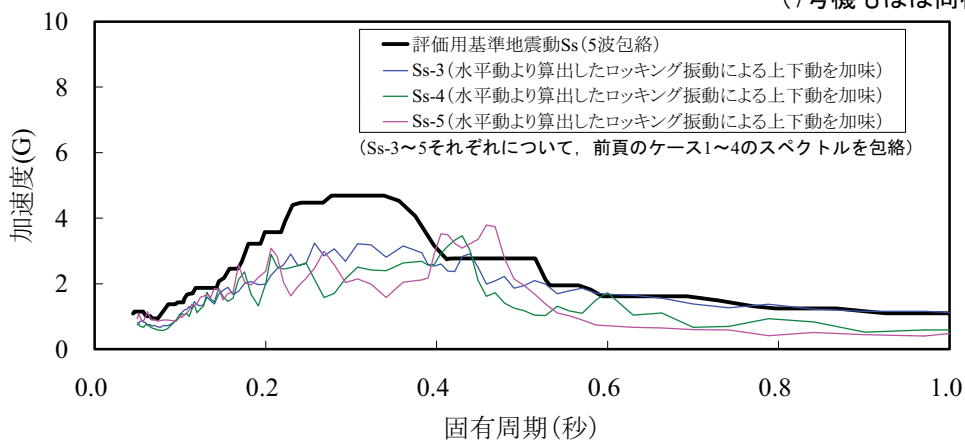


# 【検討1】スペクトルの比較

## ■基準地震動Ss-3～5におけるロッキング振動の考慮

6号機 原子炉建屋基礎版上の床応答スペクトル  
(上下方向:減衰2.0%)

(7号機もほぼ同様の傾向)



- ✓ 機器・配管系の固有周期帯（～0.4秒）では評価用基準地震動Ssがロッキング振動を考慮した基準地震動Ss-3～5を包絡
- ✓ Ss-3～5にロッキング振動を考慮しても，機器・配管系の耐震安全性評価に対する影響は無い。

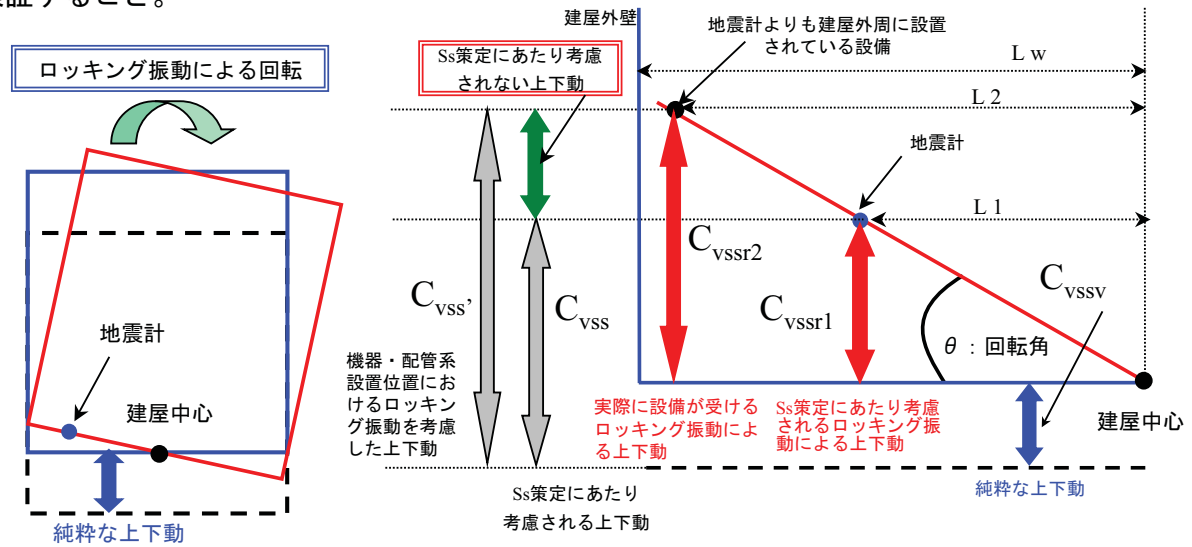


## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

- 基準地震動 $S_s$  ( $S_s-1, 2$ ) は、ロッキング振動の影響が含まれる新潟県中越沖地震の観測記録を考慮して策定したが、地震計よりも建屋外周に設置されている設備に対しては、ロッキング振動の影響が小さく見積もられていることから、地震計よりも建屋外周に設置される設備への入力地震動はより大きくなることが考えられる。

### ■ 検討の目的

地震計よりも建屋外周に設置されている設備への、ロッキング振動を考慮した場合の影響を検証すること。

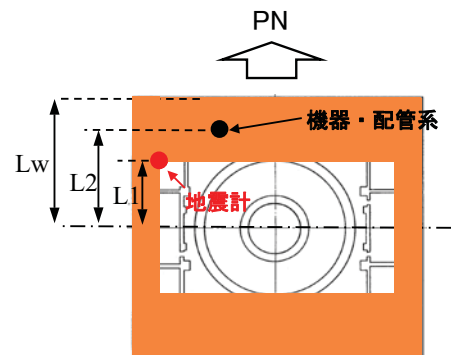


8

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

### ■ 検討方法

- (1) ロッキング振動による上下動の増分を考慮した床応答加速度
  - $S_s-1$ による上下動を純粋な上下動成分とロッキング振動による上下動成分に分解。
  - 機器・配管系設置位置と地震計の設置位置の関係 ( $=L2/L1$ ) をロッキング振動による上下動成分に乗じて、地震計より外周側に設置される機器・配管系におけるロッキング振動の増分 (上下動の床応答加速度) を算定 (下式)。



○ 機器・配管系設置位置におけるロッキング振動を考慮した上下動の床応答加速度 ( $S_s-1$ )  $C_{vssr2}$

$$= \underbrace{S_s-1 \text{による純粋な上下動の床応答加速度}}_{C_{vssv}} + \left[ \underbrace{S_s-1 \text{による上下動の床応答加速度}}_{C_{vss}} - \underbrace{S_s-1 \text{による純粋な上下動の床応答加速度}}_{C_{vssv}} \right] \times \frac{L2}{L1}$$

ロッキング振動による上下動成分  $C_{vssr1}$

機器・配管系の設置位置による増分を考慮したロッキング振動による上下動成分  $C_{vssr2}$

$L_w$  : 建屋中心軸から建屋最外周までの距離,  $L_1$  : 建屋中心軸から地震計までの距離  
 $L_2$  : 建屋中心軸から個別の機器・配管系設置位置までの距離

- 耐震安全性評価に一定の余裕がある場合には、簡便のため、 $L2/L1$ に替えて $L_w/L1$ として評価を実施

9

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

### (2) 機器・配管系の評価（簡易評価）

- 原子炉建屋の床面に設置されている設備のうち、地震計の建屋外周側に設置されている設備を抽出。
- 前項の $C_{vss}'$ を用いて機器・配管系の地震応答解析を行うことで、発生応力等が算出できるが、ここでは、簡便のため、上下動の増加割合と耐震安全性評価の裕度を比較することにより、検証を行う。

$$\text{耐震安全性評価の発生値に対する評価基準値の倍率} (\alpha) = \frac{\text{耐震安全性評価における評価基準値}}{\text{耐震安全性評価における発生値}} \geq \frac{C_{vss}'}{C_{vss}} \text{ (上下動増加率} (\beta))$$

- 上記により検証が困難な場合には、 $C_{vss}'$ を用いて地震応答解析を実施する。

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

### ■ 検討結果

#### (1) 上下動増加率

(6号機)

T.M.S.L. [m]	床応答加速度 [G]		$\beta$
	$C_{vss}$	$C_{vss}'$	
49.7	0.98	1.27	1.30
38.2	0.95	1.24	<u>1.31</u>
31.7	0.92	1.20	1.30
23.5	0.90	1.17	1.30
18.1	0.88	1.14	1.30
12.3	0.85	1.11	<u>1.31</u>
4.8	0.83	1.09	<u>1.31</u>
-1.7	0.81	1.06	<u>1.31</u>
-8.2	0.80	1.04	1.30

● 本表の $C_{vss}'$ は $L_w/L_1$ を用いて算出

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

(1) 上下動増加率

(7号機)

T.M.S.L. [m]	床応答加速度 [G]		$\beta$
	Cvss	Cvss'	
49.7	0.96	1.25	1.30
38.2	0.93	1.21	1.30
31.7	0.90	1.18	1.31
23.5	0.88	1.15	1.31
18.1	0.86	1.12	1.30
12.3	0.85	1.11	1.31
4.8	0.83	1.08	1.30
-1.7	0.81	1.05	1.30
-8.2	0.79	1.04	1.32

●本表のCvss'はLw/L1を用いて算出

12

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (6号機) (1/4)

評価対象設備			耐震安全性評価					本検討	
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価 基準値 (MPa)	$\alpha$	$\beta$	検討 結果
計測制御系統設備	駆動系 制御棒	水圧制御ユニット	フレーム	組合せ応力	40	276	6.90	1.31	○
	ほう酸水 注入系	ほう酸水注入系 ポンプ	ポンプ 取付ボルト	せん断応力	48	146	3.04		○
		ほう酸水注入系貯蔵 タンク	基礎ボルト	引張応力	72	207	2.88		○
	放射線 計測装置 管理	燃料取替エリア 排気放射線モニタ	検出器 取付ボルト	引張応力	8	207	25.88		○
	盤	原子炉系(I系) 計装ラック	取付ボルト	引張応力	7	207	29.57		○

13

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (6号機) (2/4)

評価対象設備			耐震安全性評価					本検討	
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	$\alpha$	$\beta$	検討結果
原子炉冷却系統設備	残留熱除去系	残留熱除去系熱交換器	胴板	一次応力	161	408	2.53	1.31	○
		残留熱除去系ポンプ	原動機台 取付ボルト	引張応力	38	444	11.68		○
	原子炉隔離時冷却系	原子炉隔離時冷却系ポンプ	基礎ボルト	引張応力	78	202	2.59		○
		原子炉隔離時冷却系ポンプ駆動用蒸気タービン	基礎ボルト	引張応力	61	202	3.31		○
	高圧炉心注水系	高圧炉心注水系ポンプ	原動機台 取付ボルト	引張応力	36	455	12.64		○

14

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (6号機) (3/4)

評価対象設備			耐震安全性評価					本検討	
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	$\alpha$	$\beta$	検討結果
格納施設 原子炉	可燃性ガス濃度制御系	可燃性ガス濃度制御系可搬式再結合装置	取付ボルト	せん断応力	94	350	3.72	1.31	○
		可燃性ガス濃度制御系可搬式再結合装置プロウ	ブレース	圧縮応力	14	209	14.93		○
放射線管理設備	非常用ガス処理系	非常用ガス処理系排風機	基礎ボルト	引張応力	36	202	5.61		○
		非常用ガス処理系乾燥装置	基礎ボルト	引張応力	52	202	3.88		○
		非常用ガス処理系フィルタ装置	取付ボルト	せん断応力	146	342	2.34		○

15

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (6号機) (4/4)

評価対象設備			耐震安全性評価					本検討	
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	$\alpha$	$\beta$	検討結果
附帯設備	非常用発電設備	ディーゼル機関	基礎ボルト	せん断応力	62	225	3.63	1.31	○
		空気だめ	胴板	一次一般膜応力	91	262	2.85		○
		燃料ディタンク	スカート	座屈	0.24	1.00	4.17		○
		発電機	機関側軸受台下部ベース取付ボルト	引張応力	101	205	2.03		○

16

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (7号機) (1/4)

評価対象設備			耐震安全性評価					本検討	
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	$\alpha$	$\beta$	検討結果
計測制御系統設備	駆動系	水圧制御ユニット	フレーム	組合せ応力	107	253	2.36	1.32	○
	ほう酸水注入系	ほう酸水注入系ポンプ	ポンプ取付ボルト	せん断応力	47	146	3.11		○
		ほう酸水注入系貯蔵タンク	基礎ボルト	せん断応力	52*	159	3.06		○
	放射線管理	燃料取替エリア排気放射線モニタ	検出器取付ボルト	せん断応力	4	159	39.75		○
	盤	原子炉系(I系)計装ラック	取付ボルト	せん断応力	4	159	39.75		○

※ 詳細評価による値。

17

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (7号機) (2/4)

評価対象設備			耐震安全性評価					本検討	
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	$\alpha$	$\beta$	検討結果
原子炉冷却系統設備	残留熱除去系	残留熱除去系熱交換器	胴板	一次応力	288※	408	1.42 ※	1.32	○
		残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	せん断応力	14	350	25.00		○
	原子炉隔離時冷却系	原子炉隔離時冷却系ポンプ	基礎ボルト	引張応力	87	455	5.23		○
		原子炉隔離時冷却系ポンプ駆動用蒸気タービン	タービン取付ボルト	引張応力	57	444	7.79		○
	高圧炉心注水系	高圧炉心注水系ポンプ	基礎ボルト	せん断応力	20	350	17.50		○

※ 残留熱除去系熱交換器の発生値288MPaは応答倍率法による値であり、実際の $\alpha$ の値は1.42よりも大きくなる。  
また、 $\beta$ の算出においては建屋最外周の距離を用いていることから(P9, 12参照)、実際の $\beta$ は1.32よりも小さくなる。

18

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (7号機) (3/4)

評価対象設備			耐震安全性評価					本検討	
			評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	$\alpha$	$\beta$	検討結果
放射線管理設備	非常用ガス処理系	非常用ガス処理系排風機	排風機取付ボルト	引張応力	67※	177	2.65	1.32	○
		非常用ガス処理系乾燥装置	取付ボルト	せん断応力	108	341	3.16		○
		非常用ガス処理系フィルタ装置	取付ボルト	せん断応力	141	341	2.42		○

※ 詳細評価による値。

19

## 【検討2】地震計の位置による影響の検討

(2) 評価結果 (7号機) (4/4)

評価対象設備		耐震安全性評価					本検討		
		評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	$\alpha$	$\beta$	検討結果	
附帯設備	非常用ディーゼル発電設備	ディーゼル機関	基礎ボルト	せん断応力	58	225	3.88	1.32	○
		空気だめ	胴板	一次応力	92	262	2.85		○
		燃料ディタンク	スカート	座屈	0.23	1.0	4.35		○
		発電機	機関側軸受台下部ベース取付ボルト	引張応力	86	205	2.38		○

20

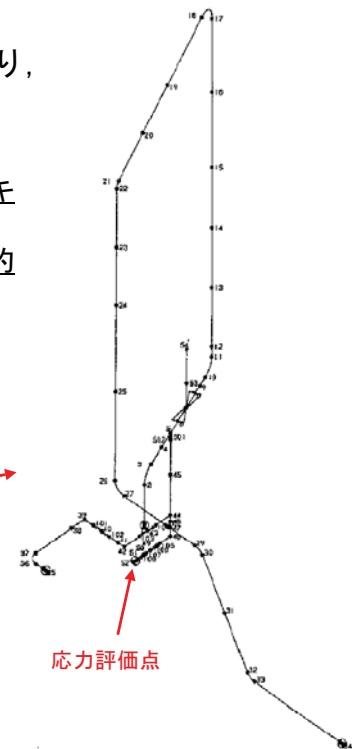
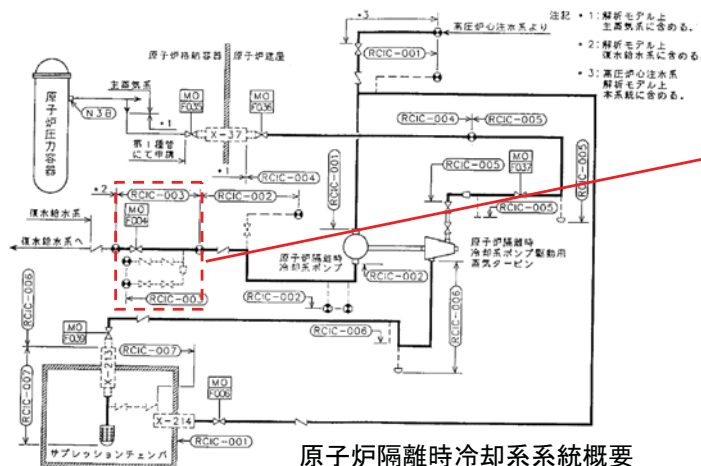
## 【検討3】ロッキング振動の影響の定量的把握

### ■ 検証対象設備の選定

ロッキング振動に対する定量的な検証を実施するにあたり、原子炉隔離時冷却系配管を代表として選定

【選定理由】

- ✓ 原子炉建屋内で外壁近傍にまで広がるモデルであり、ロッキング振動による影響を受けやすい。
- ✓ 固有周期が大きく、また、上下動に対する刺激係数が比較的大きいため、ロッキング振動による影響を受けやすい。



検証対象配管鳥瞰図

21

# 【検討3】 ロッキング振動の影響の定量的把握

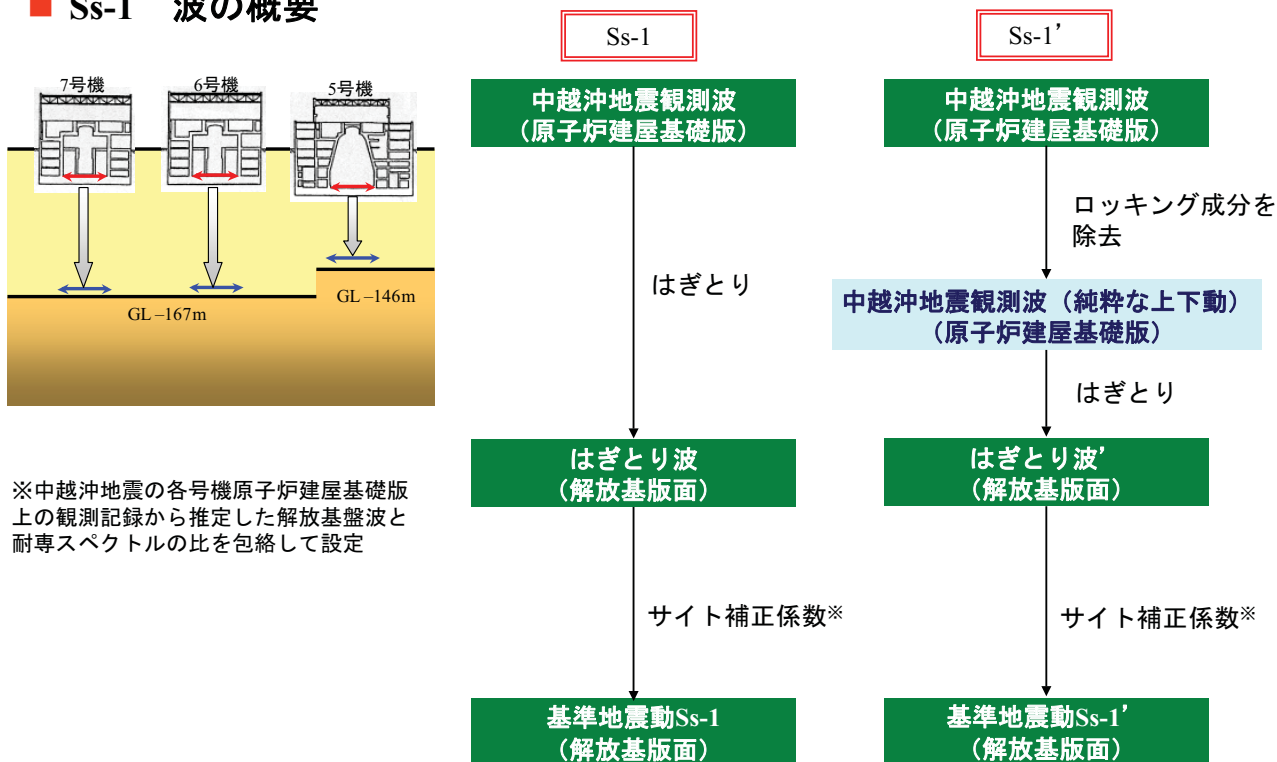
## ■ 原子炉隔離時冷却系配管の検証解析ケース

検証ケース	入力条件	機器・配管系の評価に用いる入力波の特徴	
① 報告書記載値 (スペクトルモーダル解析)	評価用 基準地震動Ss	中越沖地震観測記録の上下動を考慮したSs-1の他、Ss5波による建屋応答解析結果より得られる床応答スペクトルを包絡	ロッキング 振動考慮
② スペクトルモーダル解析	Ss-1 (スペクトル)	中越沖地震観測記録の上下動を考慮し策定したSs-1による建屋応答解析結果より得られる床応答スペクトル	ロッキング 振動考慮
③ スペクトルモーダル解析	Ss-1' (スペクトル) (次頁参照)	Ss-1からロッキング振動による上下動成分を除去したSs-1'による建屋応答解析結果より得られる床応答スペクトル	ロッキング 振動除去
④ 時刻歴解析	Ss-1 (時刻歴波)	中越沖地震観測記録の上下動を考慮し策定したSs-1による建屋応答解析結果より得られる時刻歴波形	ロッキング 振動考慮
⑤ 時刻歴解析	Ss-1' (時刻歴波) (次頁参照)	Ss-1からロッキング振動による上下動成分を除去したSs-1'による建屋応答解析結果より得られる時刻歴波形	ロッキング 振動除去

※スペクトルモーダル解析においてはスペクトルに±10%の拡幅を考慮

# 【検討3】 ロッキング振動の影響の定量的把握

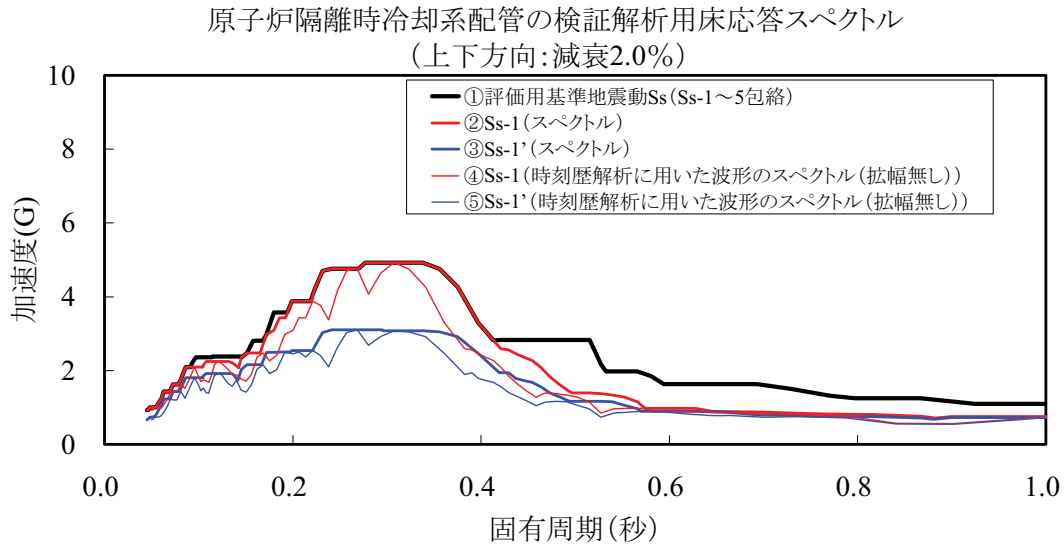
## ■ Ss-1' 波の概要





## 【検討3】 ロッキング振動の影響の定量的把握

### ■ 入力条件の比較



24

## 【検討3】 ロッキング振動の影響の定量的把握

### ■ 検証解析結果

検証ケース	入力条件	評価部位	応力分類	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]	備考
①報告書記載値 (スペクトルモーダル解析)	評価用 基準地震動Ss	配管 本体	一次 応力	185	324	—
②スペクトルモーダル解析	Ss-1 (スペクトル)			178		※1
③スペクトルモーダル解析	Ss-1' (スペクトル)			158		※2
④時刻歴解析	Ss-1 (時刻歴波)			143		
⑤時刻歴解析	Ss-1' (時刻歴波)			128		

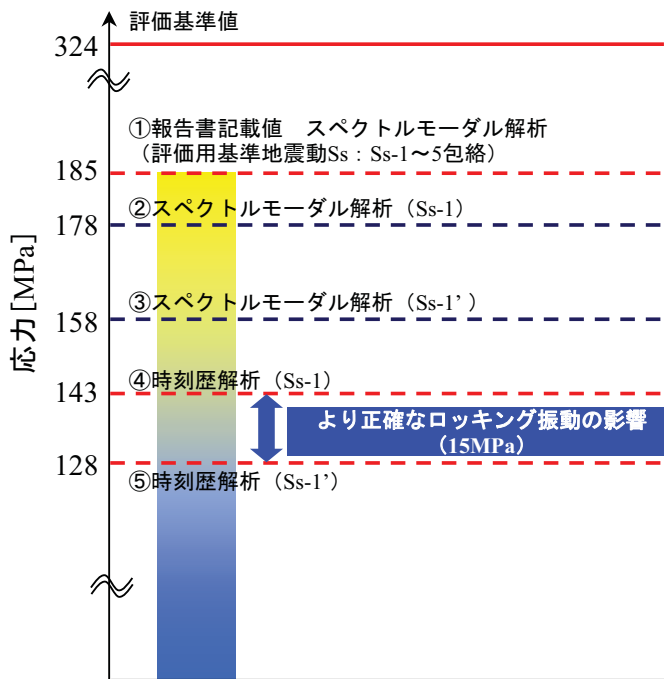
※1 スペクトルモーダル解析によるロッキング振動の影響把握

※2 時刻歴解析による、より正確なロッキング振動の影響把握

25

## 【検討3】 ロッキング振動の影響の定量的把握

### ■ 考 察



- ✓ 自重、内圧等の地震以外の応力、水平地震動による応力を含む全体の発生応力に対して、ロッキング振動（上下地震動）による影響は比較的小さい。
- ✓ 時刻歴解析（④、⑤）を用いて、ロッキング振動の有無による影響を検証した結果、報告書記載値（①）に対して影響は軽微であることを確認。
- ✓ ロッキング振動を考慮した時刻歴解析結果（④）は、ロッキング振動を考慮しないスペクトルモーダル解析結果（③）より小さな値となり、スペクトルモーダル解析の有する保守性に包絡される結果。

26

## まとめ

- ✓ 機器・配管系の固有周期帯（～0.4秒）では、評価用基準地震動 $S_s$ による床応答スペクトルがロッキング振動を考慮した基準地震動 $S_{s-3\sim5}$ による床応答スペクトルを包絡していることから、長岡平野西縁断層帯に対してロッキング振動を考慮しても、機器・配管系の耐震安全性評価への影響は無い。
- ✓ 基準地震動 $S_s$ が中越沖地震の観測記録に基づき策定されていることに鑑み、地震計よりも外側に配置される設備への影響を検証した結果、影響は軽微であることを確認した。
- ✓ ロッキング振動の定量的把握を目的として、原子炉隔離時冷却系配管を用いた検証解析を実施した結果、ロッキング振動の有無による影響は、これまで実施した耐震安全性評価の結果に対して軽微であるとともに、スペクトルモーダル解析の有する保守性にも包絡される程度であることを確認した。
- ✓ 機器・配管系の耐震評価にあたっては、ロッキング挙動の正確な把握やこれに対する評価手法等、なお一層の知見の収集や研究による中長期的な検討が必要であるものと考えられるが、現時点においては、ロッキング振動が、機器・配管系の耐震安全性評価の妥当性を損なう影響を与えないものと判断できる。

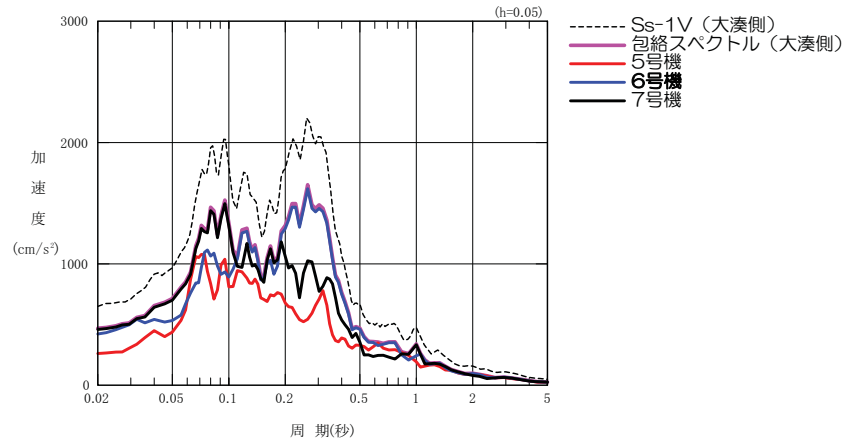
27

## 【参考】 基準地震動Ssの策定方法

### ■ 基準地震動Ss-1

- 新潟県中越沖地震の観測記録を元に評価された解放基盤波を考慮
- 上下動の最も大きかった6号機のスペクトルも包絡したスペクトルを元に策定

➡ 観測記録にはロッキング振動の影響が含まれているため、Ss-1にもロッキング振動の影響が含まれている



中越沖地震の解放基盤波の包絡スペクトル(大湊側:上下動)

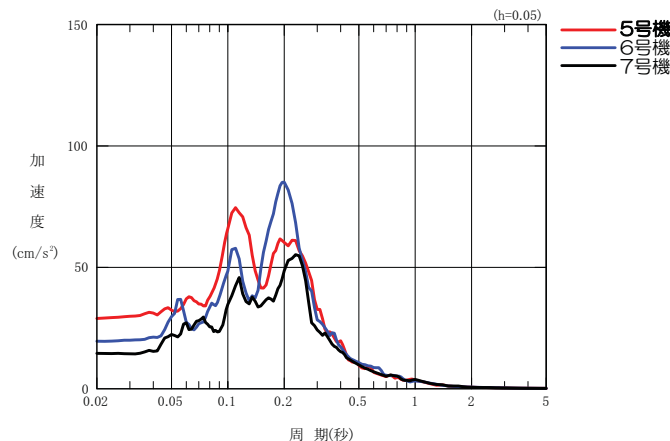
28

## 【参考】 基準地震動Ssの策定方法

### ■ 基準地震動Ss-2

- 新潟県中越沖地震の余震を要素地震として経験的グリーン関数法にて評価を実施
- 機器・配管系への影響が最も大きいと考えられる5号機の基礎版上の観測記録を基に解放基盤波を評価し、経験的グリーン関数として採用

➡ 観測記録にはロッキング振動の影響が含まれているため、Ss-2にもロッキング振動の影響が含まれている



要素地震の基礎版記録の応答スペクトル(大湊側:上下動)

29

## 参考解析：配管系における地震計の位置の影響

検証ケース	入力条件	評価部位	応力分類	地震 [MPa]	地震以外 [MPa]	発生値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
①報告書記載値 (スペクトルモーダル解析)	評価用 基準地震動Ss	配管 本体	一次 応力	119	66	185	324
②スペクトルモーダル解析	Ss-1 (スペクトル)			112	66	178	
③スペクトルモーダル解析	Ss-1' (スペクトル)			92	66	158	

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 (MPa)
原子炉隔離時冷却系 配管本体	配管本体	一次 応力	192	324

- ✓ スペクトルモーダル解析により推定したロッキング振動による一次応力成分：20 MPa (112 - 92)
- ✓ 6号機の上下動増加率（建屋最外周）：1.31
- ✓ 配管系が建屋最外周に存在したと仮定した場合のロッキング振動による一次応力成分：27 MPa (20 × 1.31 = 26.2)
- ✓ 耐震安全性報告書記載値にロッキング振動による一次応力増加分を加算：192 MPa (185 + 27 - 20)