

東海第二発電所における 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震時 に取得された地震観測記録を用いた検討

【ご意見】

・今回の地震と耐震安全性評価(バックチェック)との整合性はどうかであったのか。
基準地震動の見直しの可能性や必要に応じて更なる補強をしないといけない可能性がある。


平成23年12月26日

日本原子力発電株式会社



目 次

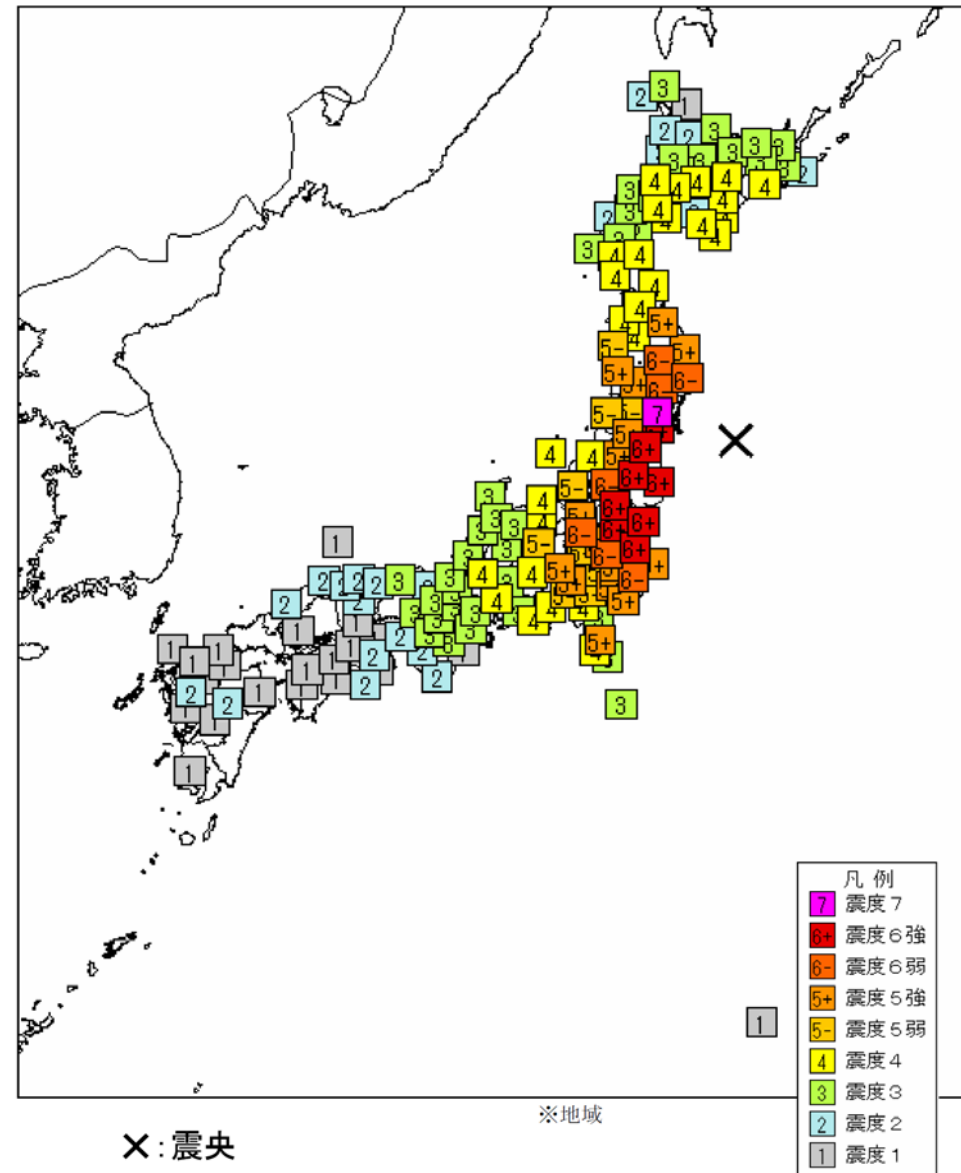
1. 東海第二発電所で観測された東北地方太平洋沖地震の記録について
2. 今回の地震観測記録を用いたはぎとり解析について
3. 東北地方太平洋沖地震の震源モデルを用いたシミュレーション解析について
4. はぎとり波と基準地震動 S_s との比較による今回の地震の要因分析について
5. 観測記録を用いた安全上重要な施設の評価について



1. 東海第二発電所で観測された東北地方太平洋沖地震 の記録について

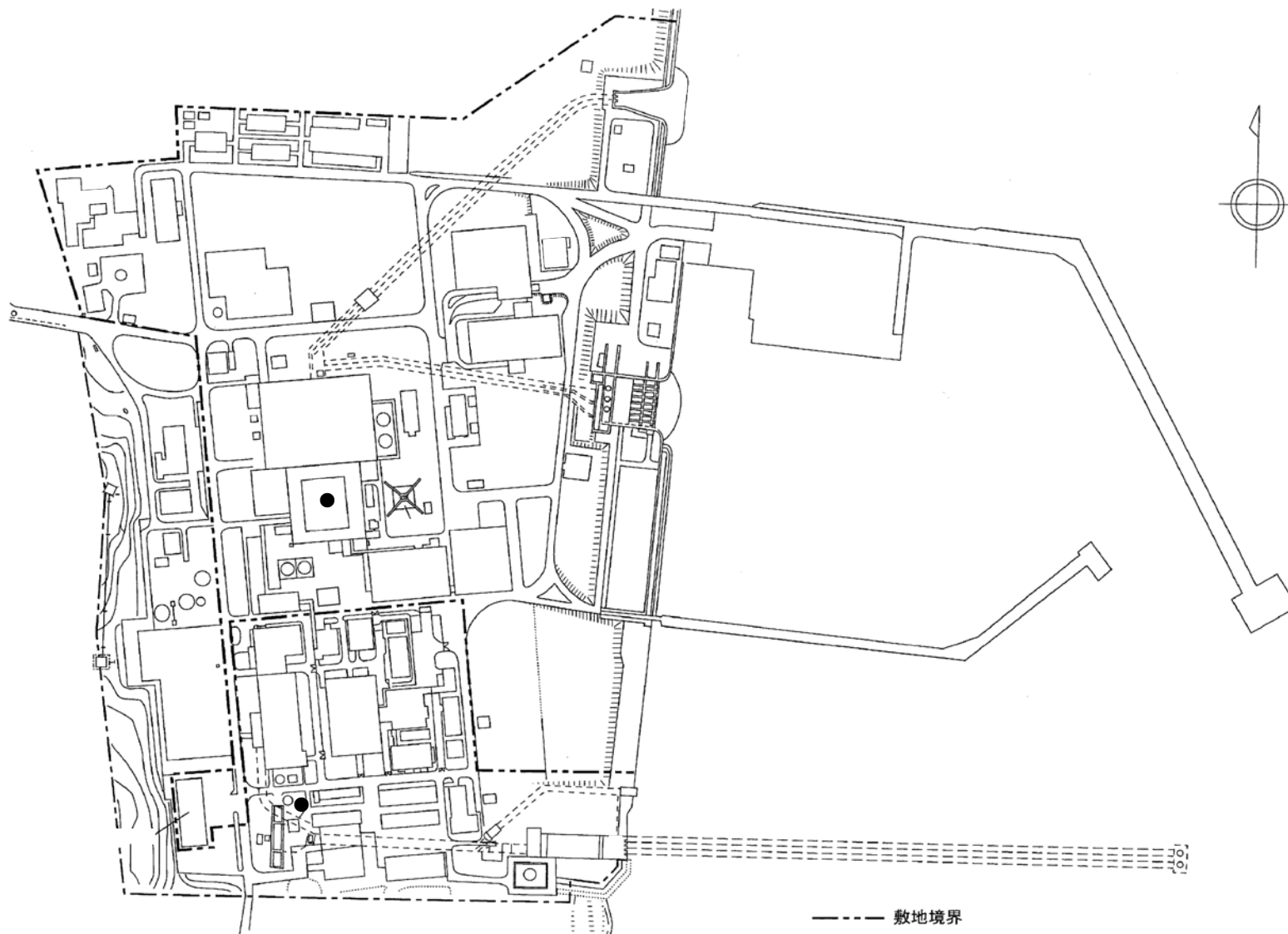
東北地方太平洋沖地震の概要

- 発震日時 :
2011年3月11日 14時46分頃
- 震源地 : 三陸沖
- 地震諸元 :
規模 Mw9.0
北緯 38度6.2分、東経 142度51.6分
深さ 24km
- 発電所敷地からの震央距離 : 270km



本震の震度分布図【気象庁による】

東海第二発電所における地震観測点配置



● : 地震計設置位置

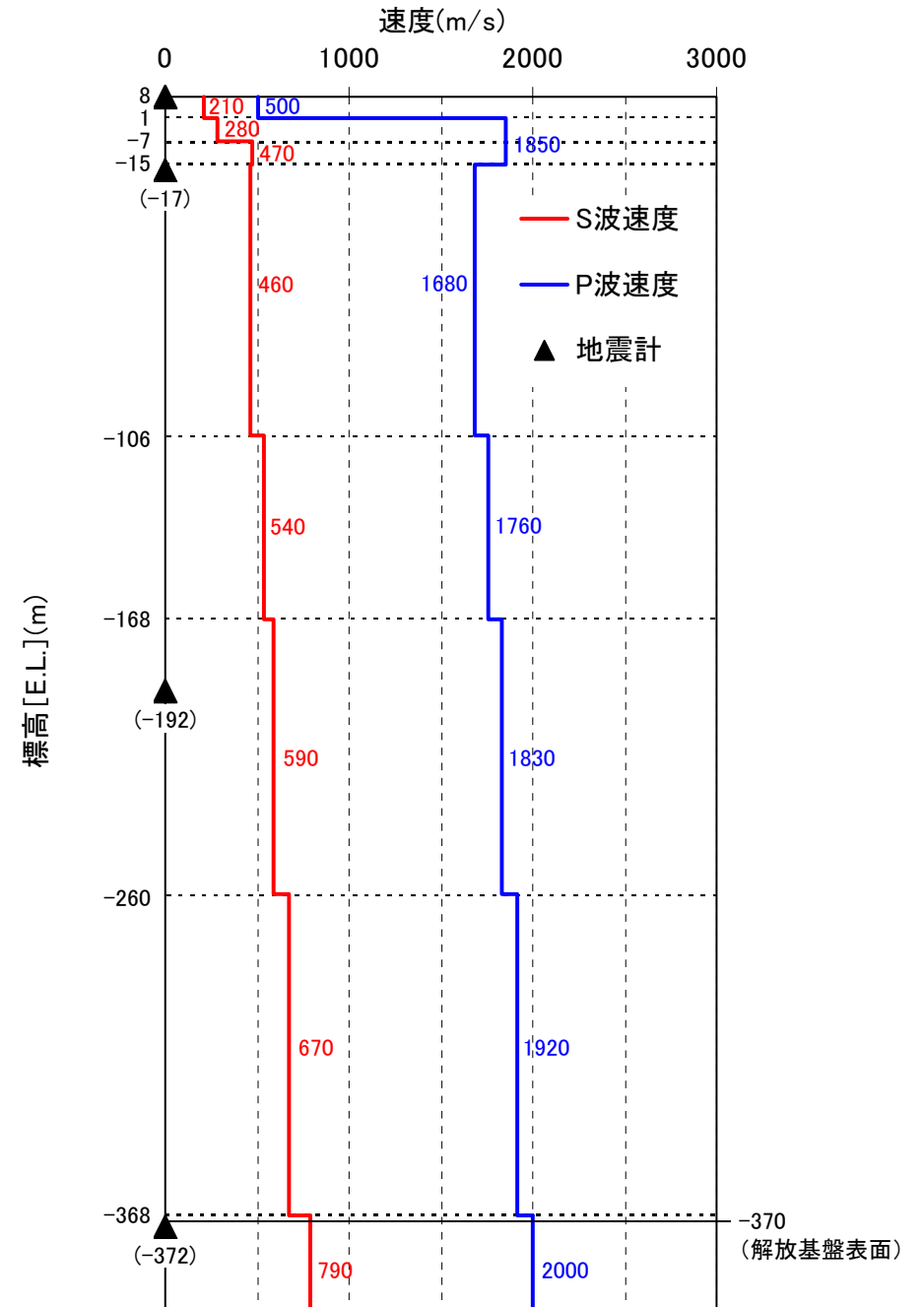
地盤系地震観測点の地盤の概要

地盤系地震観測点位置及び地盤物性値

E.L. (m)	地層 区分	地質 年代	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)
▲ 8.0	砂 砂礫 粘土 砂礫	第四紀	7.0	210	500	1.71
1.0			5.0	280	1850	1.66
-4.0			3.0			
-7.0			8.0	470	1850	1.82
▲ -15.0	砂質泥岩	第三紀	91.0	460	1680	1.69
▲ -106.0			62.0	540	1760	1.74
▲ -168.0			92.0	590	1830	1.78
▲ -260.0			108.0	670	1920	1.82
▽ -370.0			2.0	790	2000	1.85
▲ -372.0			2.0			
			—			

▲:地震計設置位置

▽:解放基盤表面

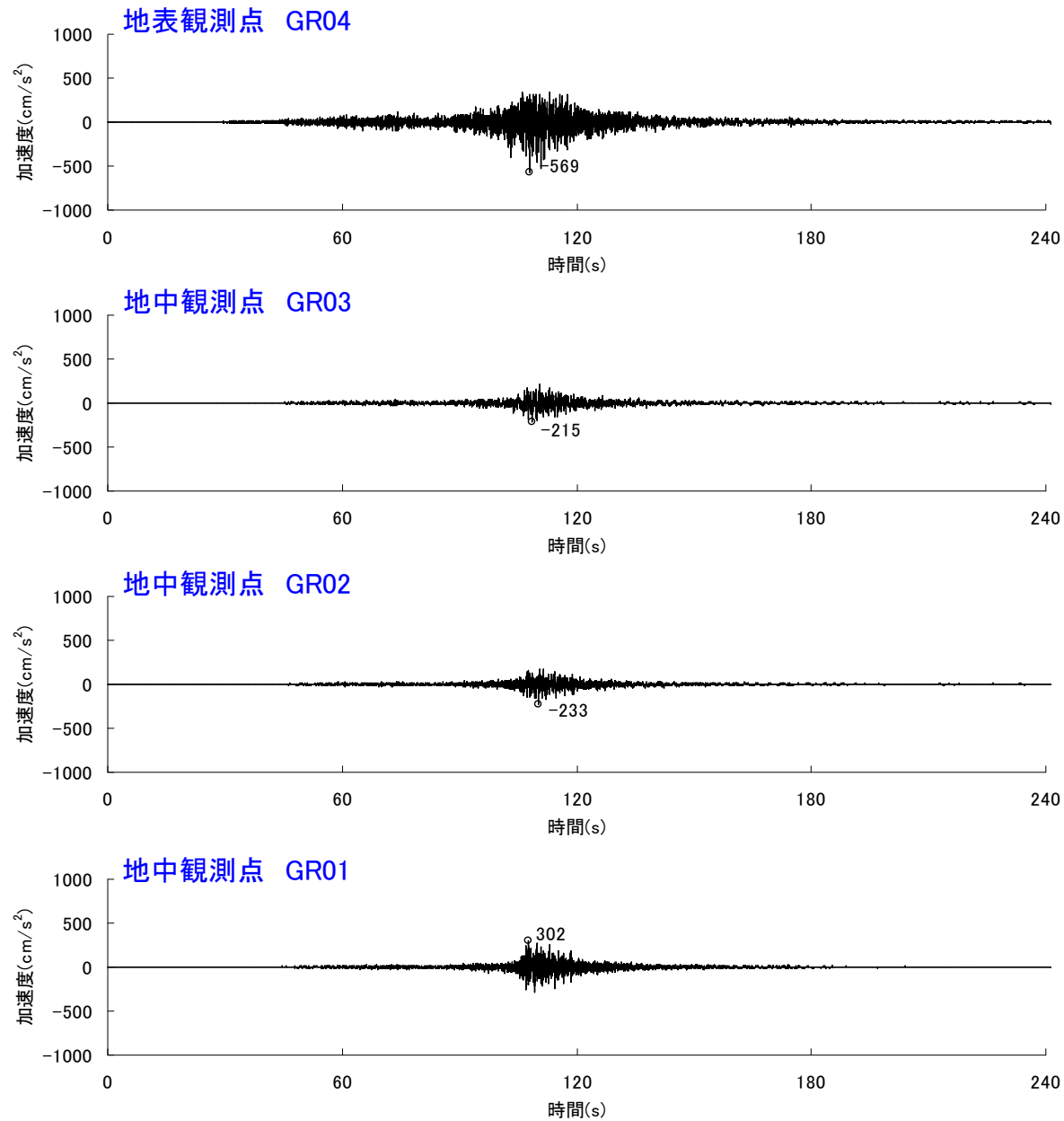


地盤系地震計における観測記録の最大加速度値

(単位: cm/s²)

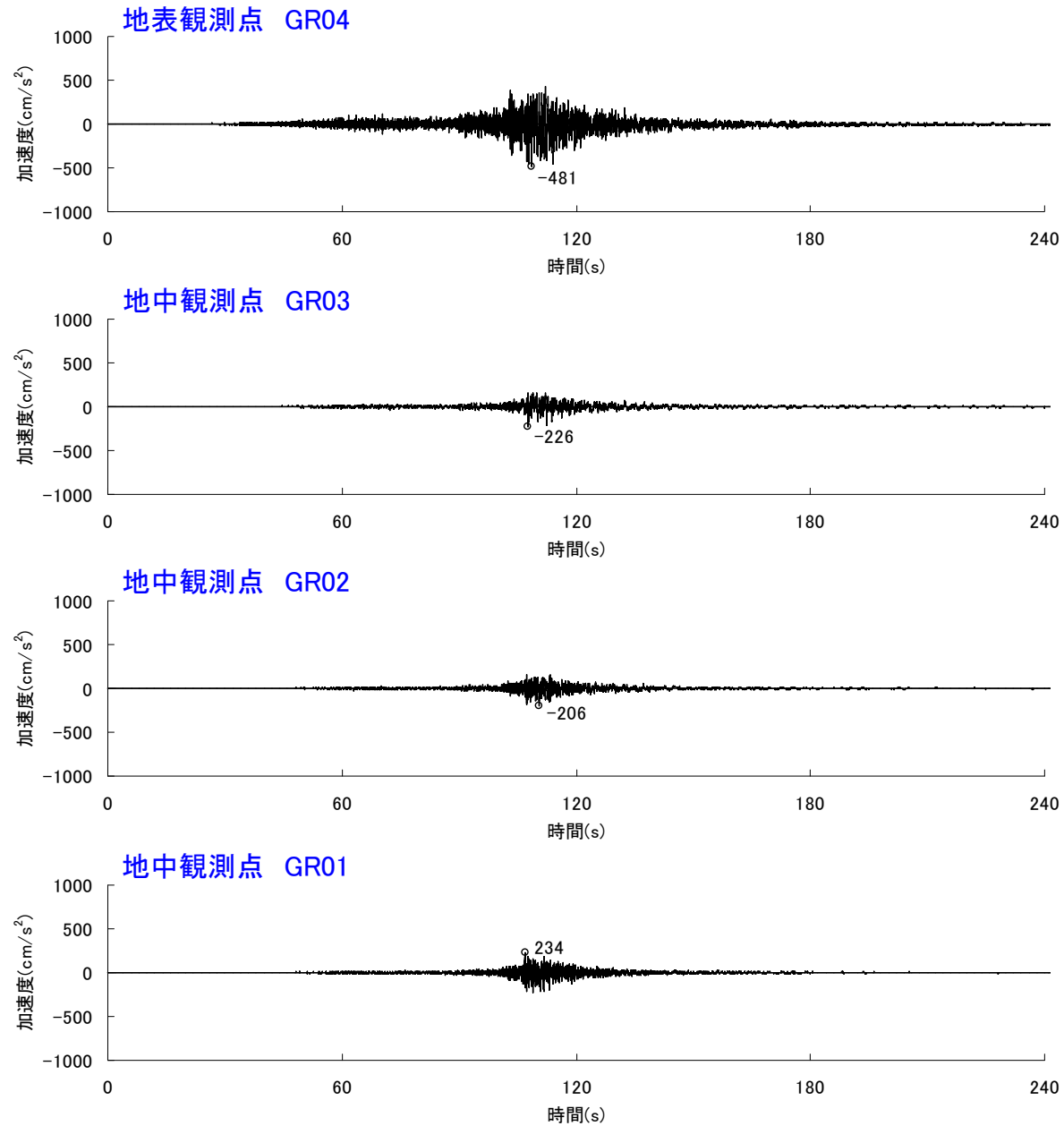
設置レベル			NS	EW	UD
地盤系	GR04	E.L. +8m	569	481	911
	GR03	E.L. -17m	215	226	195
	GR02	E.L. -192m	233	206	126
	GR01	E.L. -372m	302	234	178

加速度時刻歴波形（地盤系地震計: NS方向）

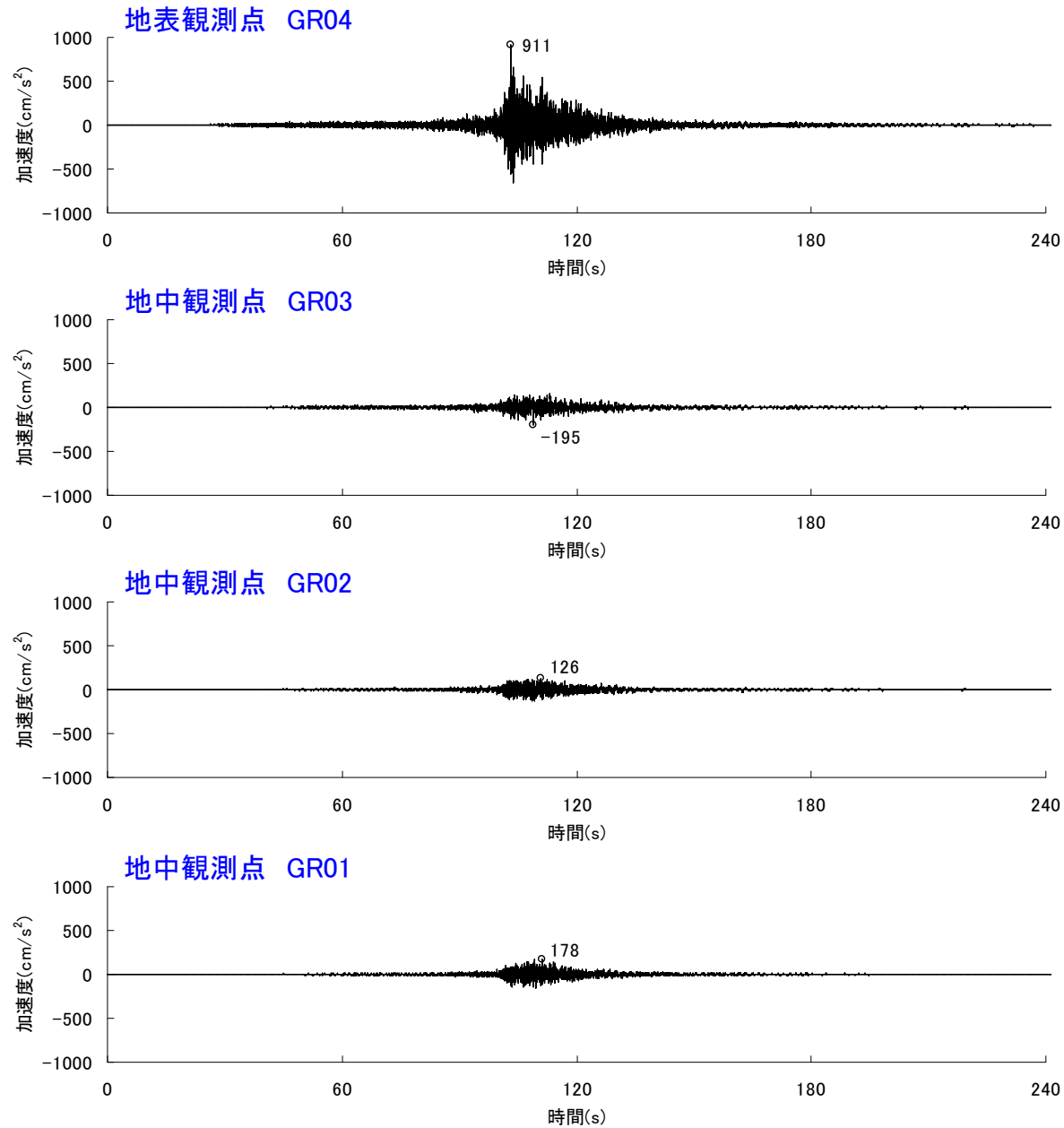


1. 東海第二発電所で観測された東北地方太平洋沖地震の記録について

加速度時刻歴波形（地盤系地震計:EW方向）

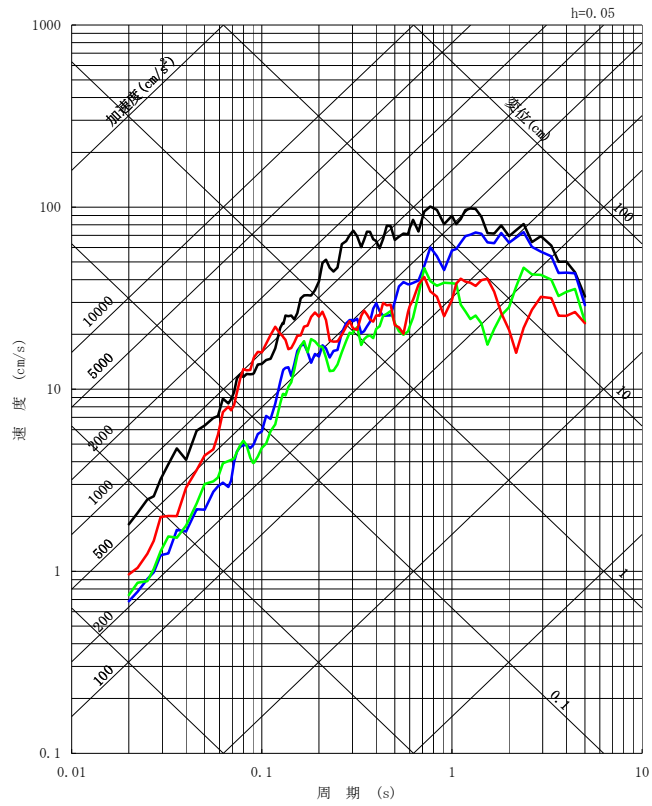


加速度時刻歴波形（地盤系地震計:UD方向）



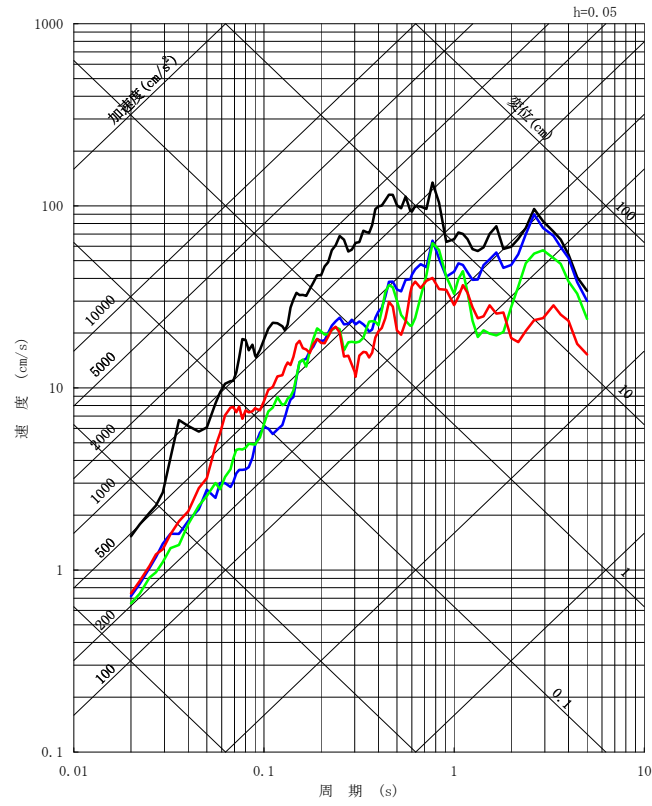
1. 東海第二発電所で観測された東北地方太平洋沖地震の記録について

地盤系地震計における擬似速度応答スペクトル



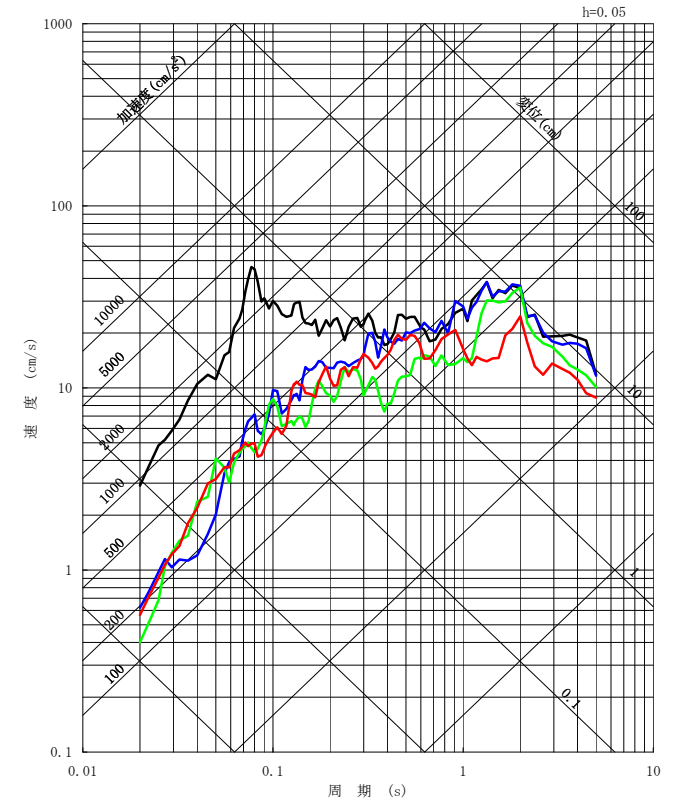
- GR04 E. L. +8m (NS)
- GR03 E. L. -17m (NS)
- GR02 E. L. -192m (NS)
- GR01 E. L. -372m (NS)

NS方向



- GR04 E. L. +8m (EW)
- GR03 E. L. -17m (EW)
- GR02 E. L. -192m (EW)
- GR01 E. L. -372m (EW)

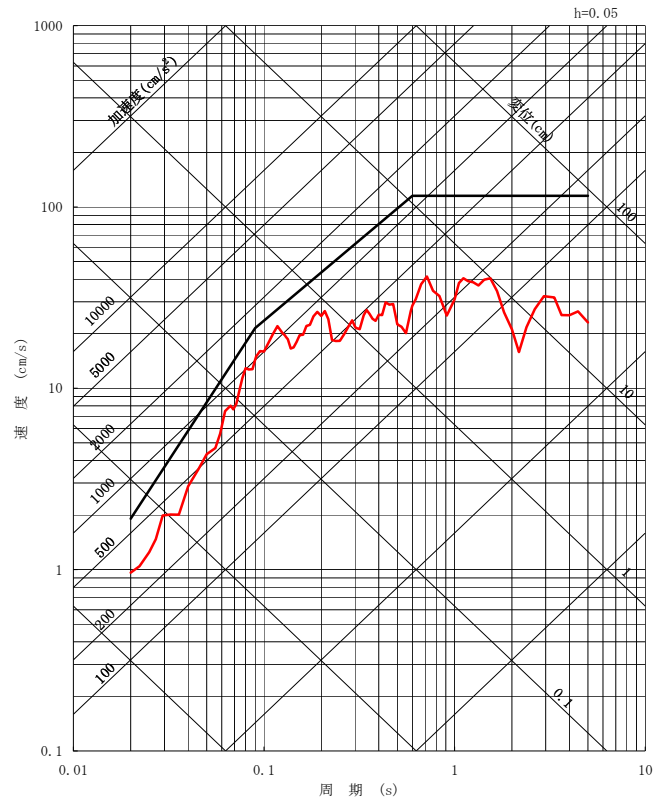
EW方向



- GR04 E. L. +8m (UD)
- GR03 E. L. -17m (UD)
- GR02 E. L. -192m (UD)
- GR01 E. L. -372m (UD)

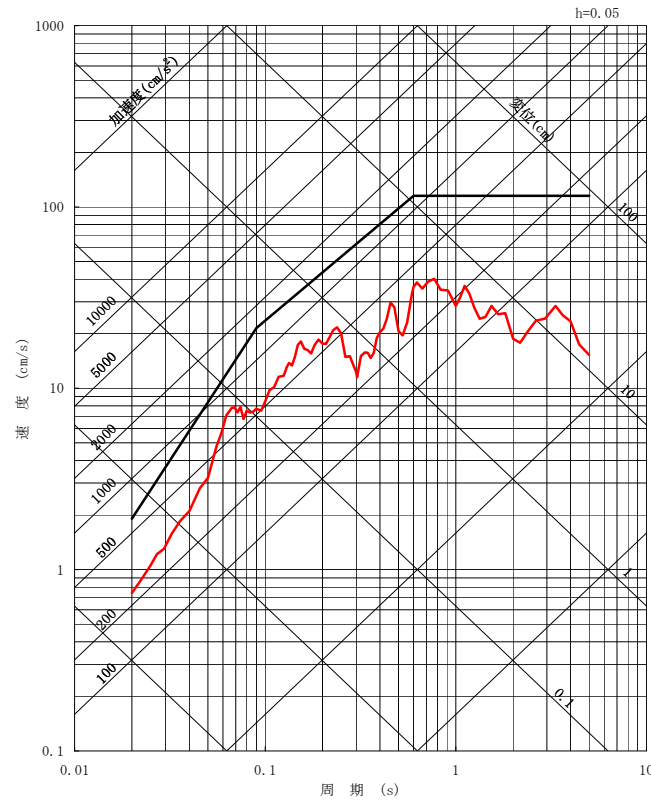
UD方向

解放基盤相当位置における擬似速度応答スペクトル



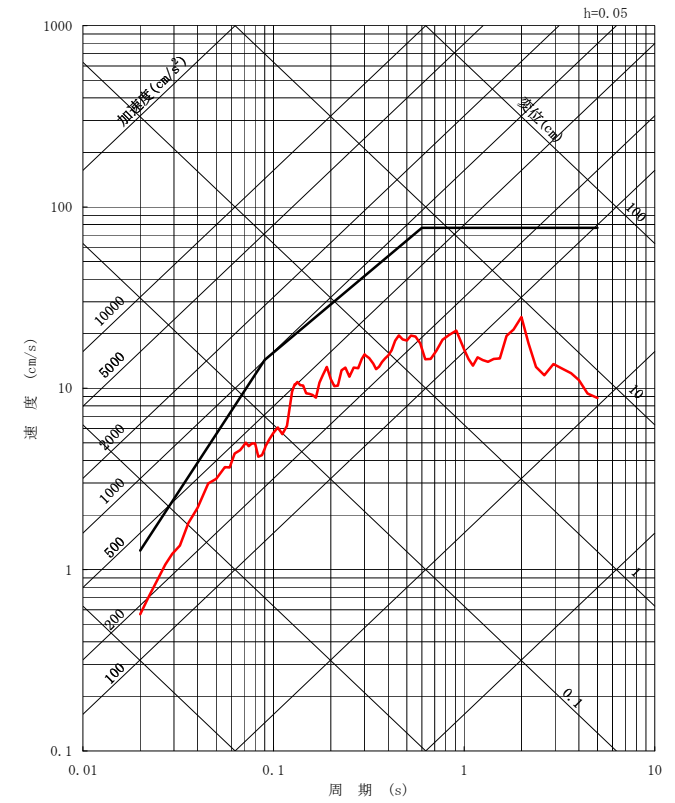
— G01 E. L. -372m (NS)
— Ss-DH

NS方向



— G01 E. L. -372m (EW)
— Ss-DH

EW方向



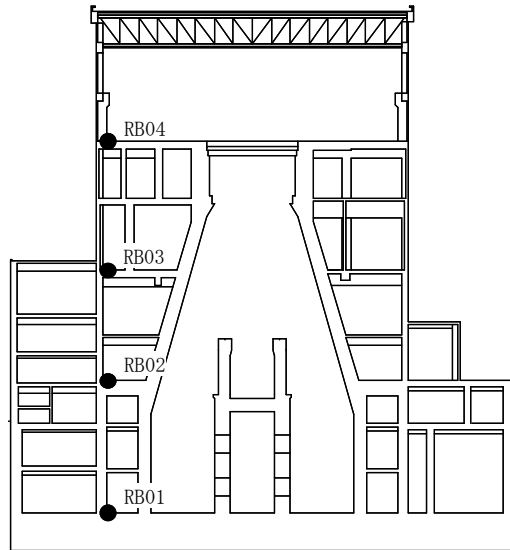
— G01 E. L. -372m (UD)
— Ss-DV

UD方向

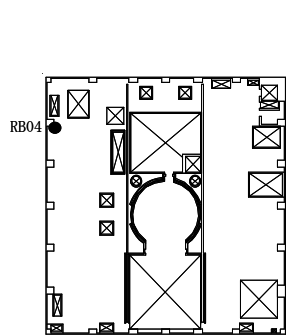
※ 解放基盤表面上で定義される基準地震動 S_s を併記している。

原子炉建屋における観測記録の最大加速度値

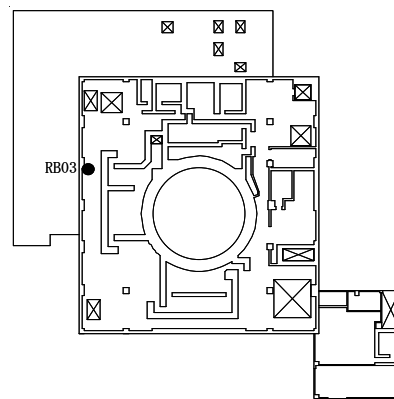
(単位: cm/s²)



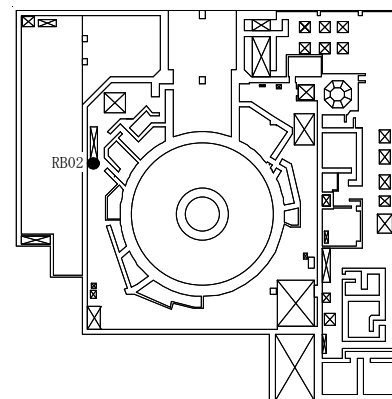
			地震観測記録			
			NS	EW	UD	
原子炉建屋	6階	RB04	492	481	358	
	4階	RB03	301	361	259	
	2階	RB02	225	306	212	
	地下2階	RB01	214	225	189	
	地下2階	北	RB11	204	217	169
		東	RB12	197	209	176
		南	RB13	209	220	181
		西	RB14	211	218	180



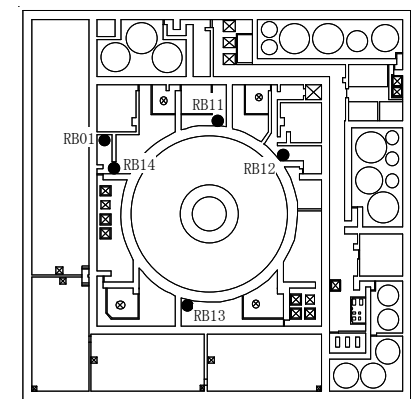
6階



4階



2階



地下2階

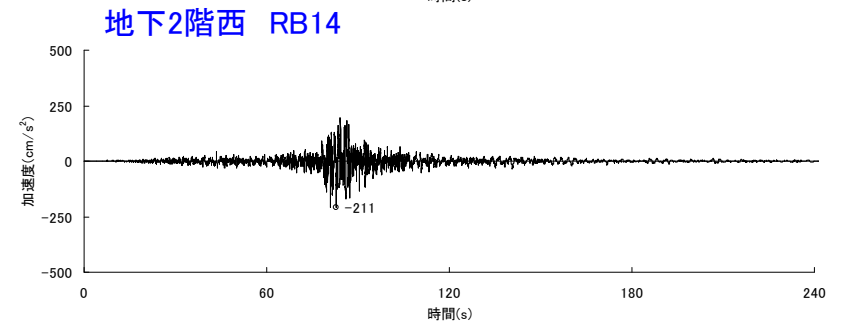
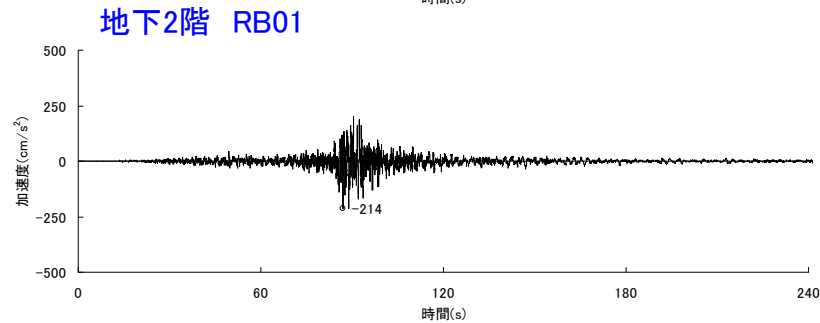
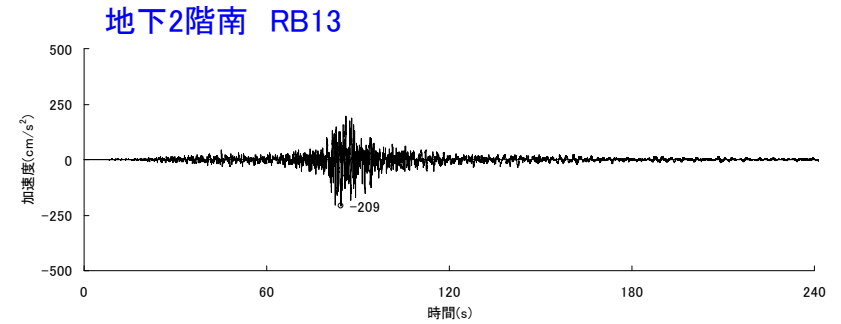
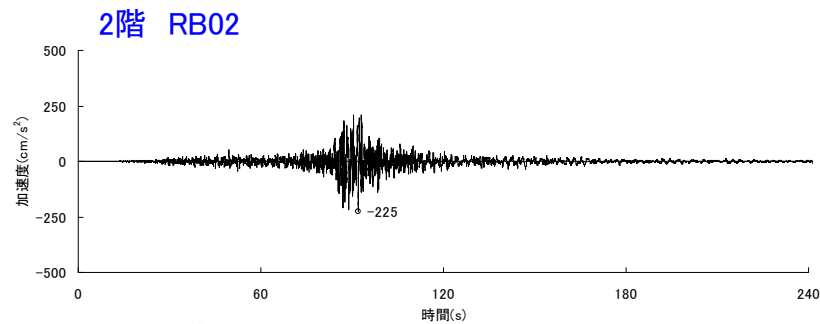
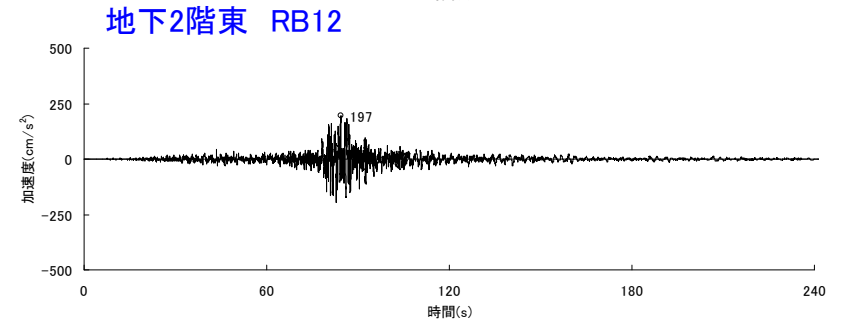
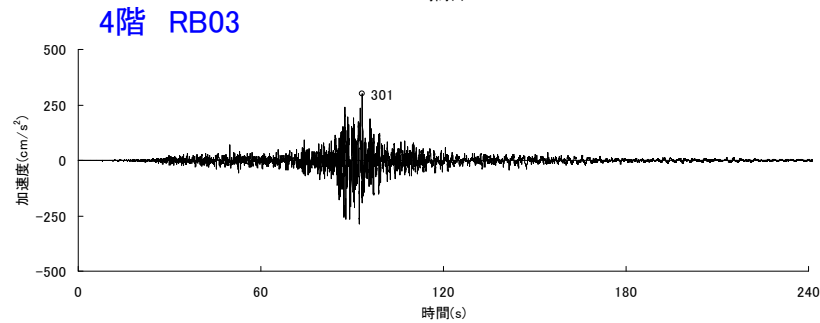
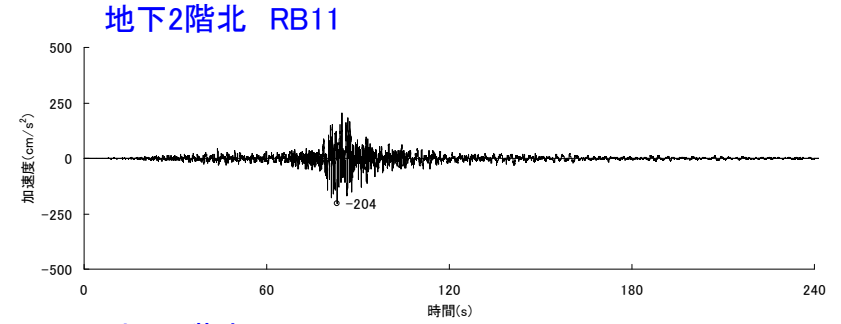
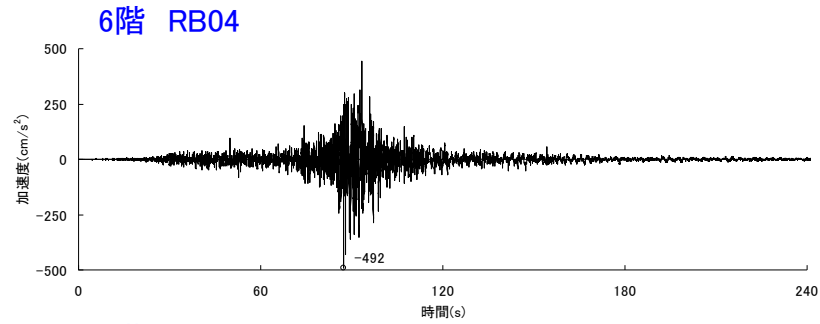
● : 地震計設置位置



地震計配置(原子炉建屋)

1. 東海第二発電所で観測された東北地方太平洋沖地震の記録について

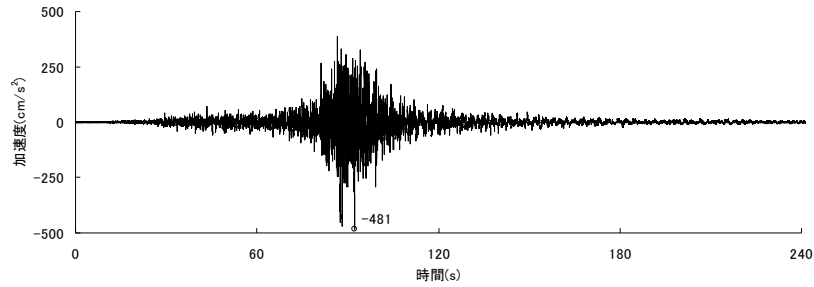
加速度時刻歴波形（原子炉建屋：NS方向）



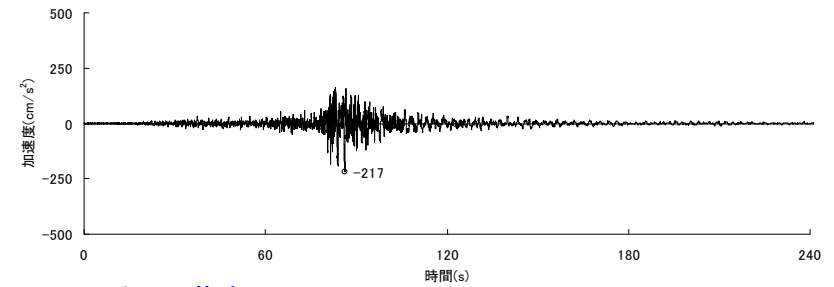
1. 東海第二発電所で観測された東北地方太平洋沖地震の記録について

加速度時刻歴波形（原子炉建屋：EW方向）

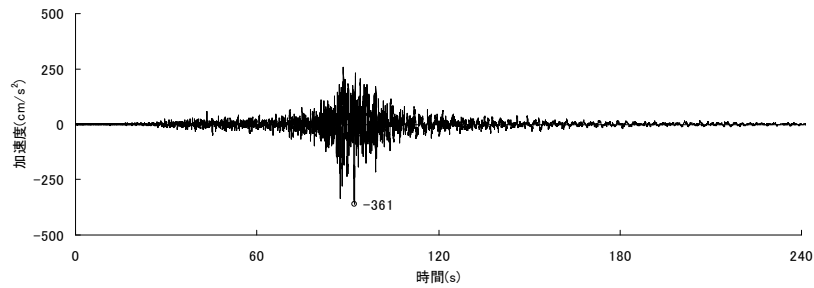
6階 RB04



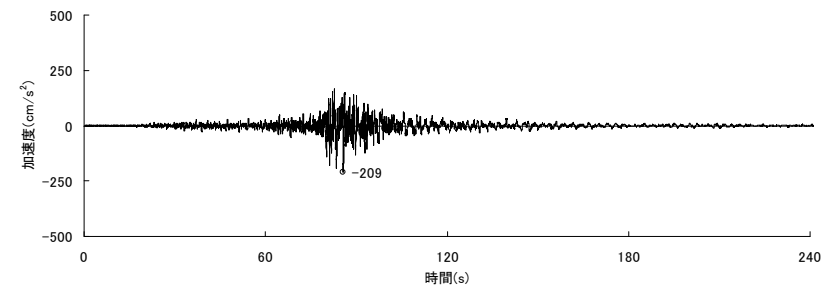
地下2階北 RB11



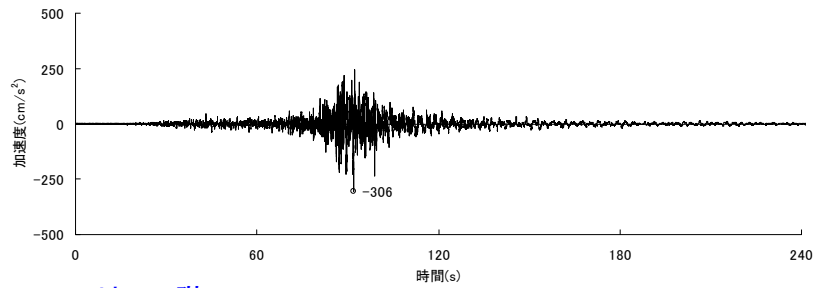
4階 RB03



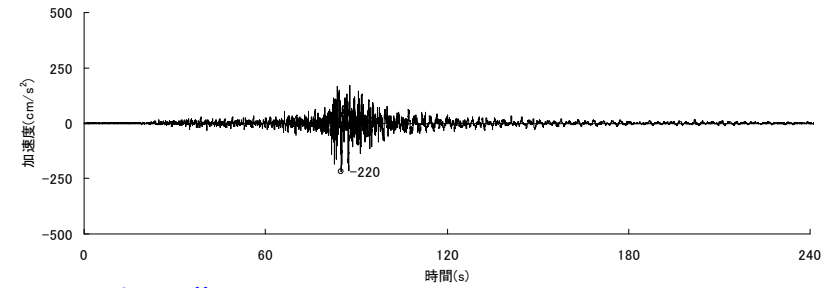
地下2階東 RB12



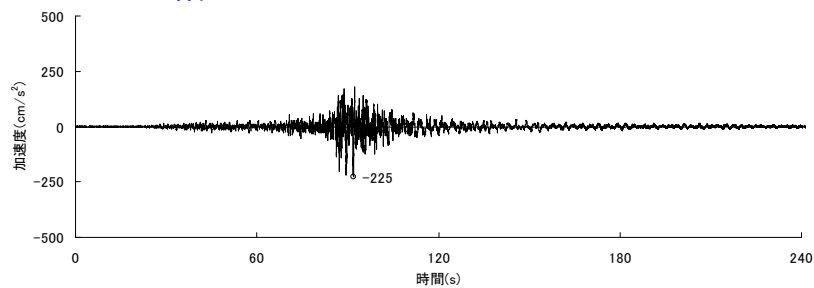
2階 RB02



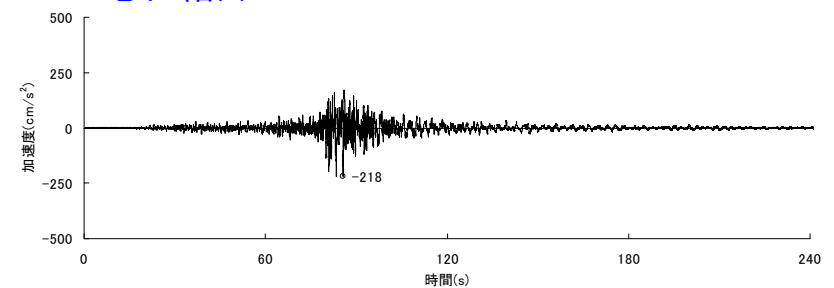
地下2階南 RB13



地下2階 RB01

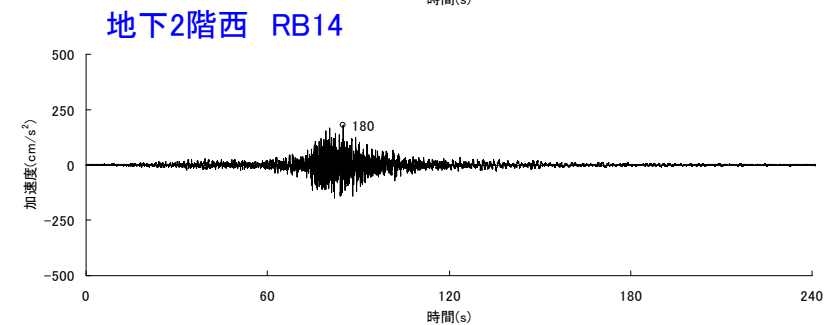
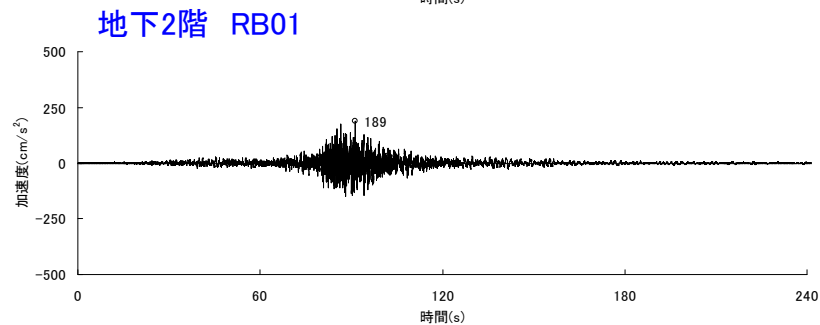
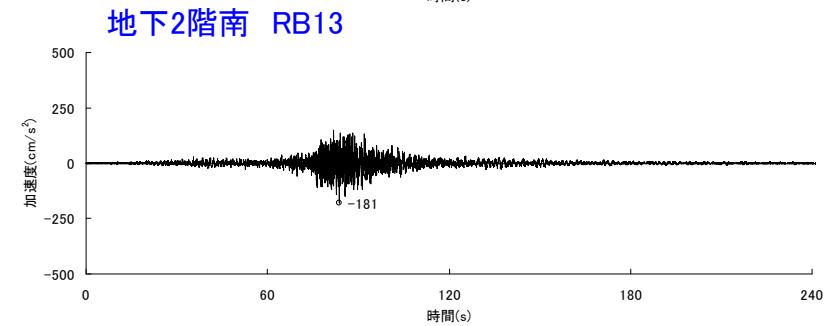
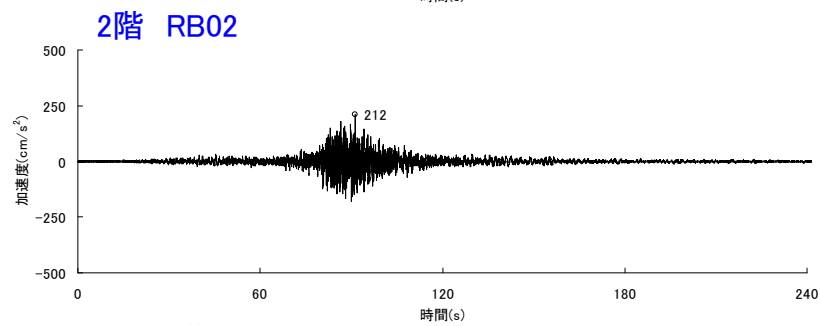
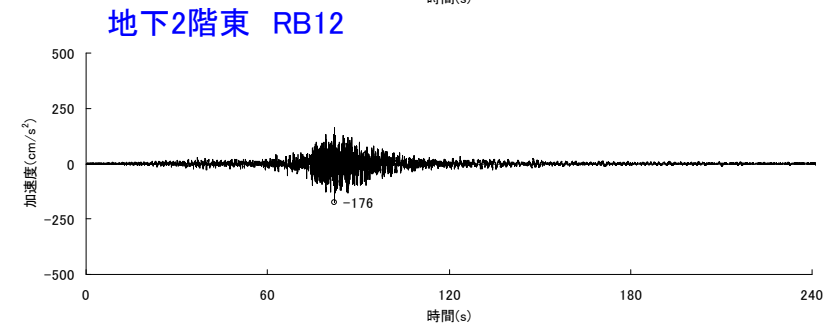
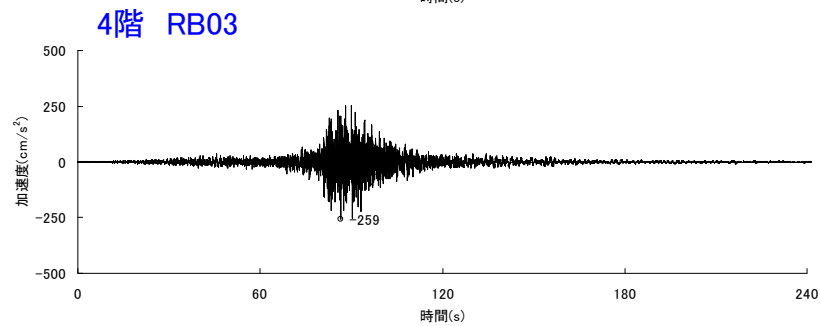
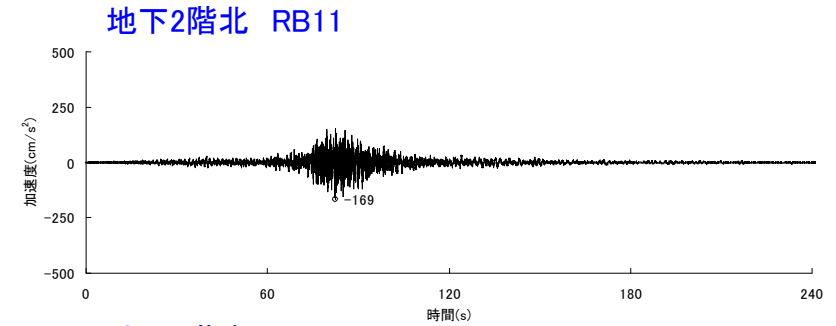
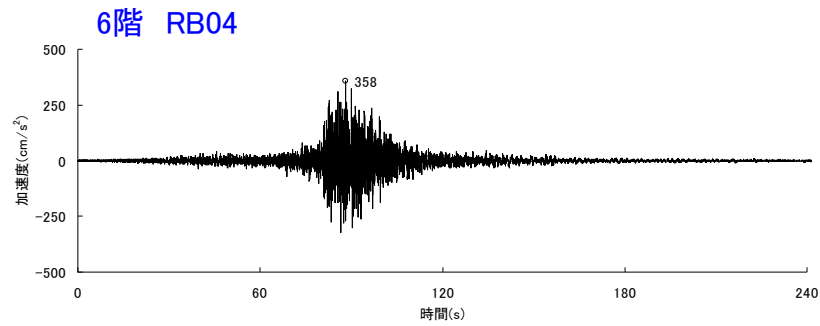


地下2階西 RB14



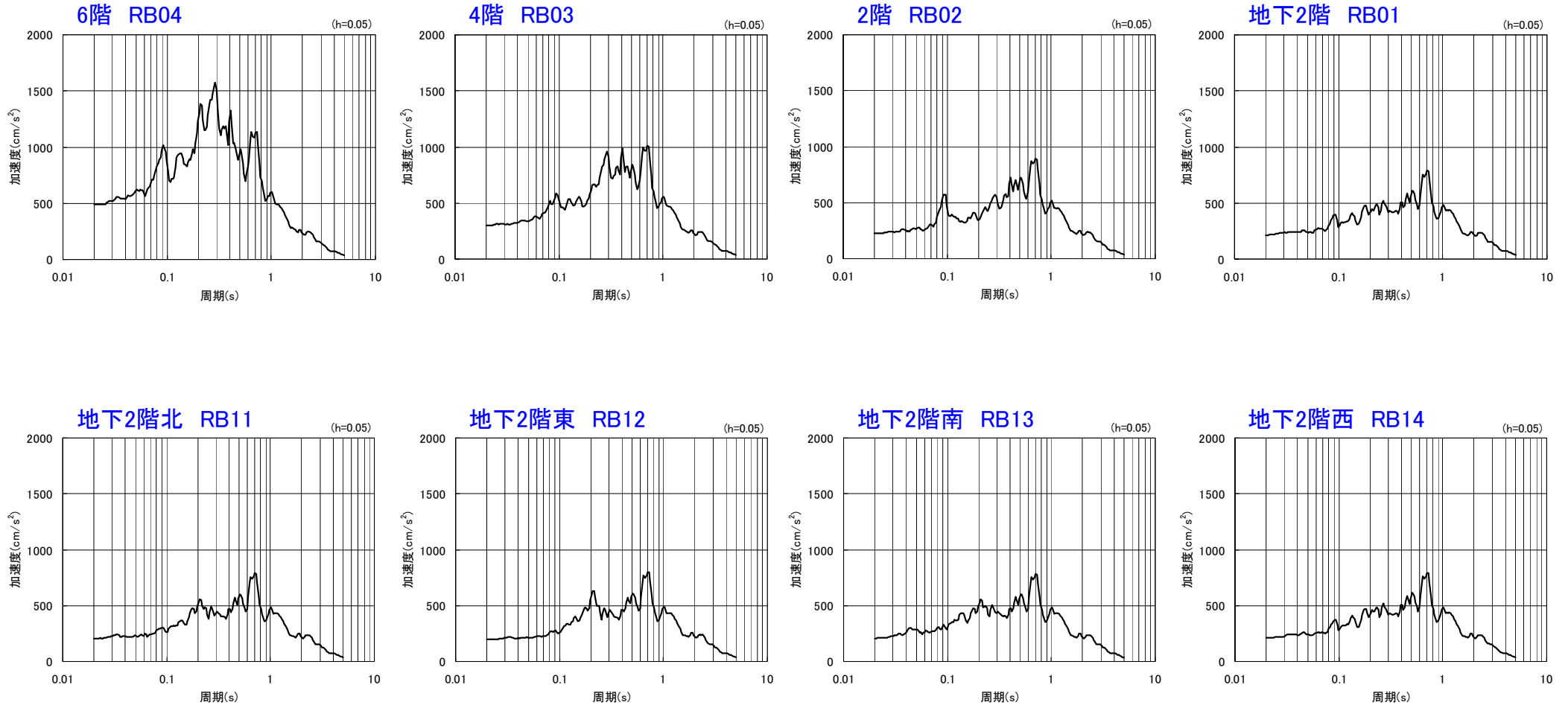
1. 東海第二発電所で観測された東北地方太平洋沖地震の記録について

加速度時刻歴波形（原子炉建屋:UD方向）



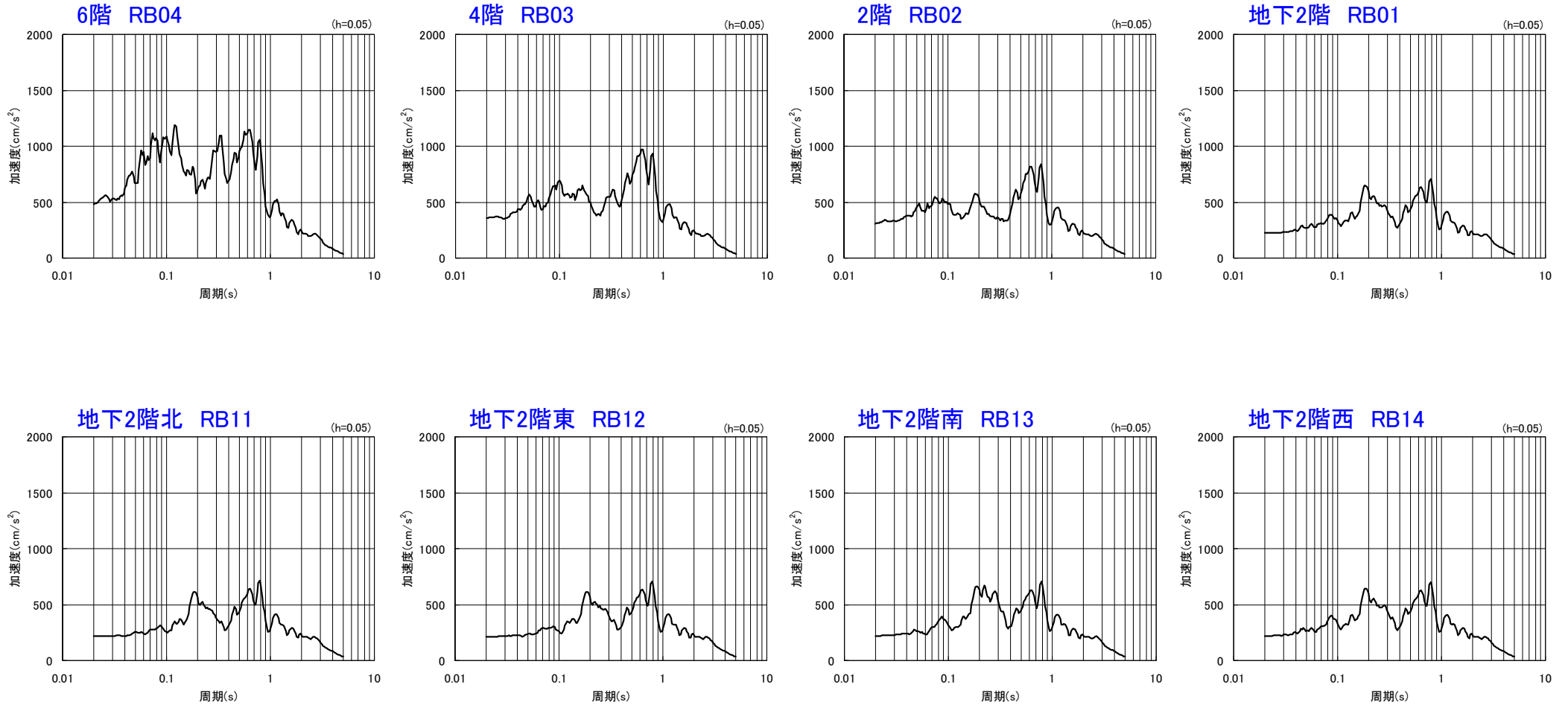
1. 東海第二発電所で観測された東北地方太平洋沖地震の記録について

加速度応答スペクトル（原子炉建屋: NS方向）



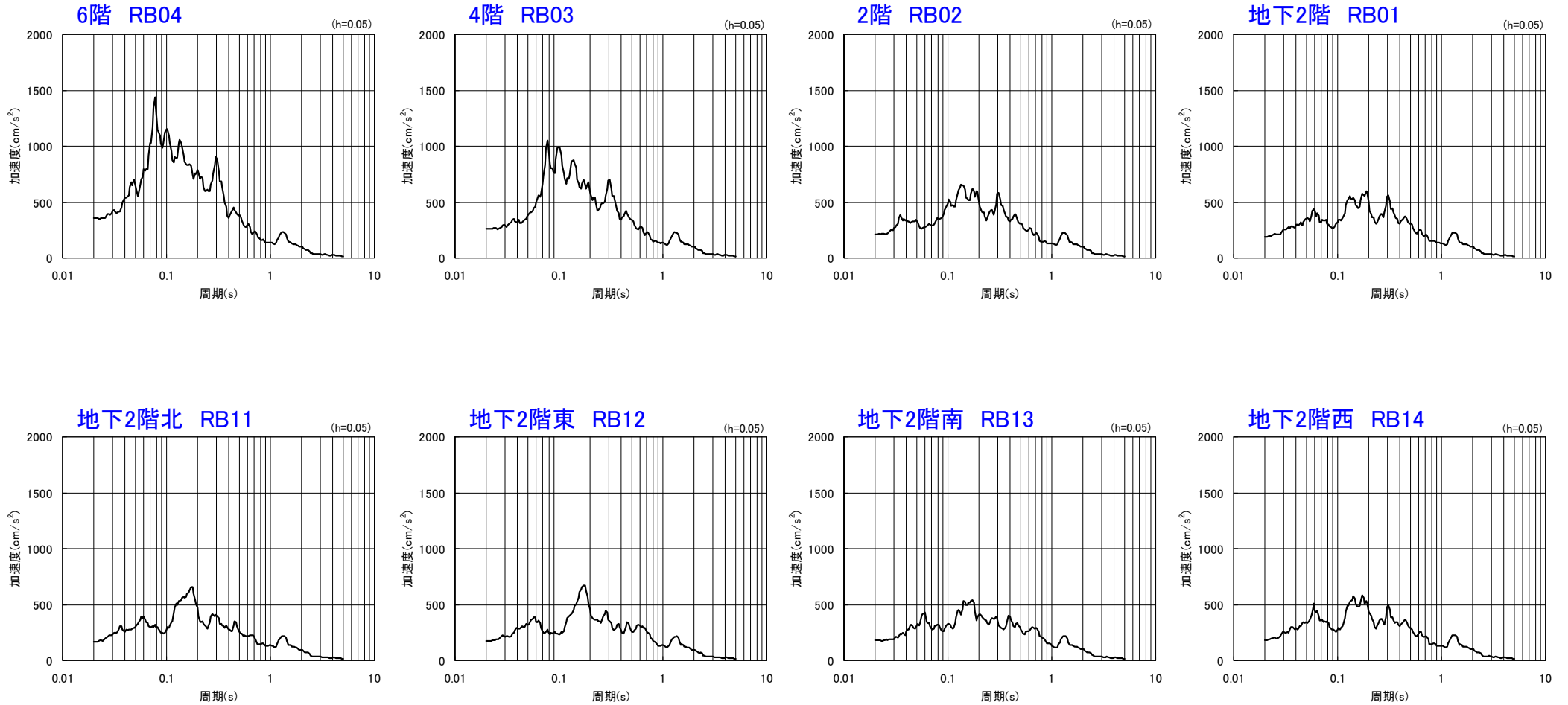
1. 東海第二発電所で観測された東北地方太平洋沖地震の記録について

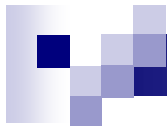
加速度応答スペクトル（原子炉建屋:EW方向）



1. 東海第二発電所で観測された東北地方太平洋沖地震の記録について

加速度応答スペクトル（原子炉建屋:UD方向）





2. 今回の地震観測記録を用いたはぎとり解析について



地盤モデルの同定結果(水平動)

- 一次元波動論に基づく理論伝達特性を当てはめる逆解析により同定
- 観測記録のNS成分とEW成分から石田(1992)の手法に基づき水平成分の伝達関数を設定
- 同定対象は、第四紀層のS波速度及び第四紀層と第三紀層に分割した減衰(層厚、密度及び第三紀層のS波速度は、既往の地盤同定結果で固定)
- 遺伝的アルゴリズムを用い、初期乱数を変えた5回の計算を実施し、計算結果の平均値を地盤モデルとして採用
- 探索範囲は以下の通り設定

【S波速度】

初期モデルの 0.5~1.5倍

【減衰】

$$h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$$

h_0 は 0.01~1.0

α は 0.0~1.0

地盤モデルの同定結果[水平動]

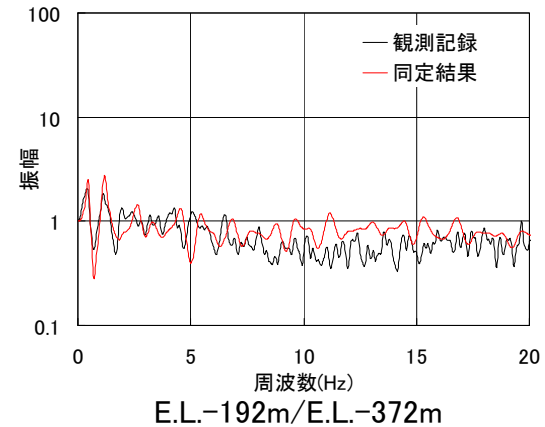
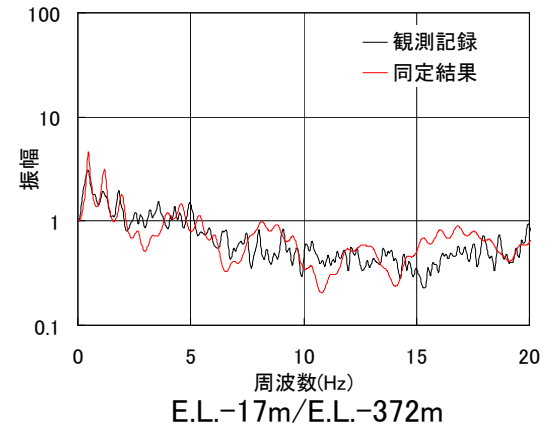
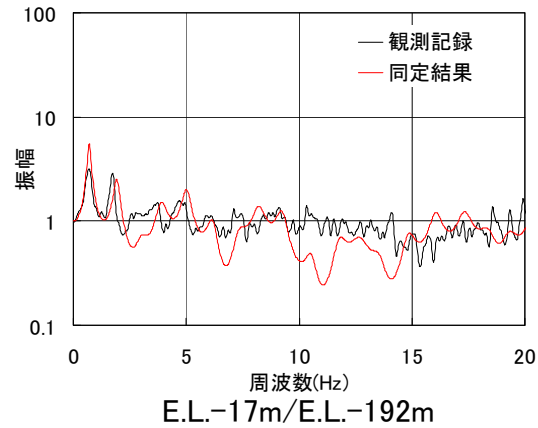
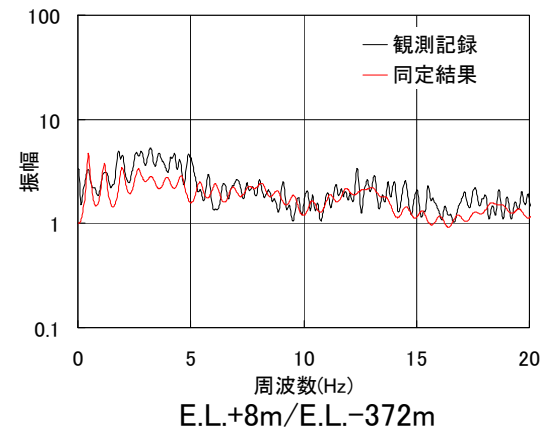
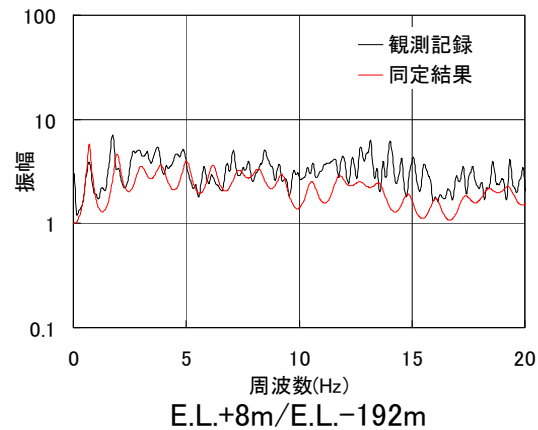
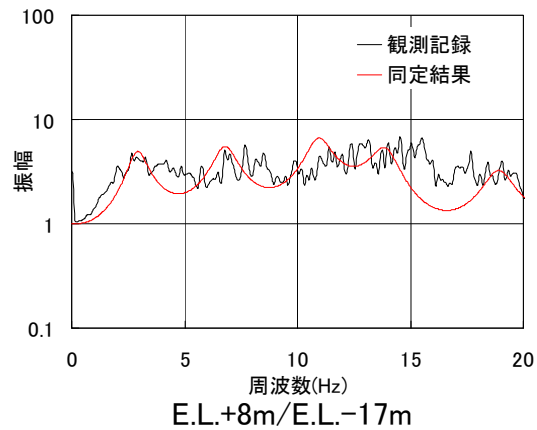
E.L. (m)	固定パラメータ			初期値	同定結果	
	層番号	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	S波速度 (m/s)	減衰 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$	
					h_0	α
▲ 8.0						
	1	2.5	1.71	130	102	0.38
5.5	2	4.5		169	132	
1.0	3	5.0	1.66	274	214	
-4.0	4	3.0		560	438	
-7.0	5	8.0	1.82	560	438	0.09
-15.0	6	2.0	1.69	477	477	
▲ -17.0	7	89.0		477	477	
-106.0	8	62.0	1.74	557	557	
-168.0	9	24.0	1.78	669	669	
▲ -192.0	10	68.0	1.78			
-260.0	11	108.0	1.82	756	756	0.67
-368.0	12	2.0	1.85	790	790	
▽ -370.0	13	2.0				
▲ -372.0		—				

▲: 地震計設置位置

▽: 解放基盤表面

2. 今回の地震観測記録を用いたはざとり解析について

地盤モデルの同定結果(水平動)



同定した地盤モデルの理論伝達関数(赤)と
観測記録による伝達関数(黒)の比較[水平動]

地盤モデルの同定結果(上下動)

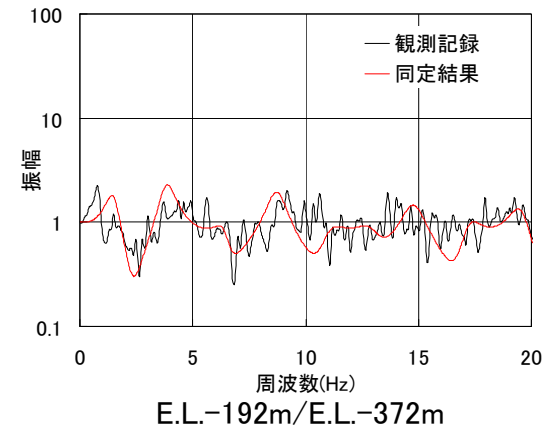
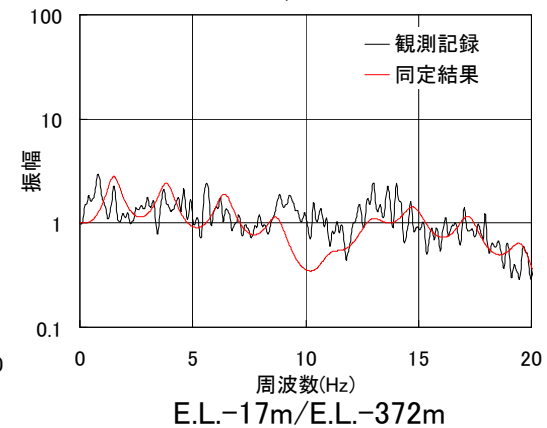
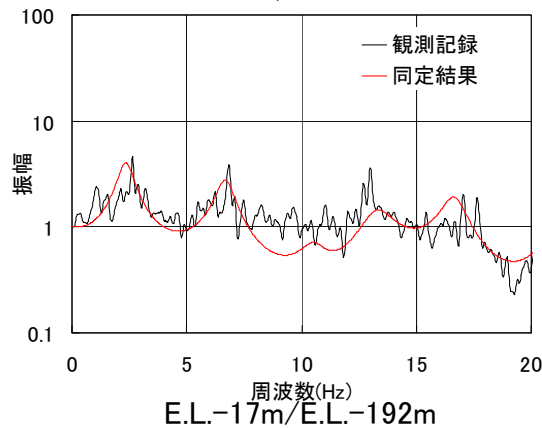
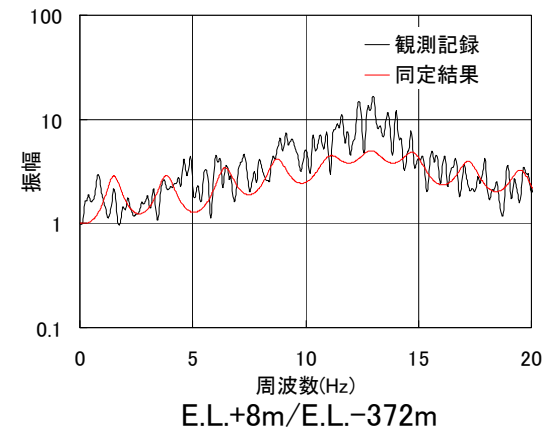
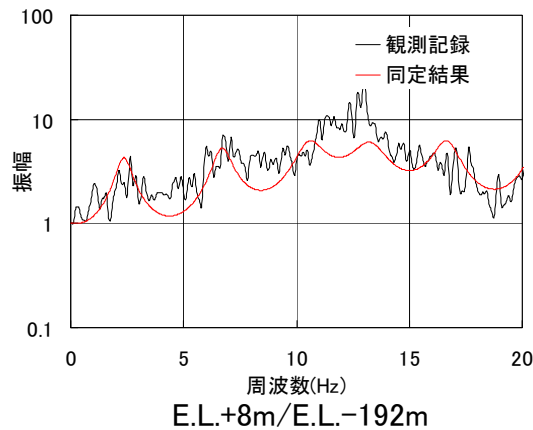
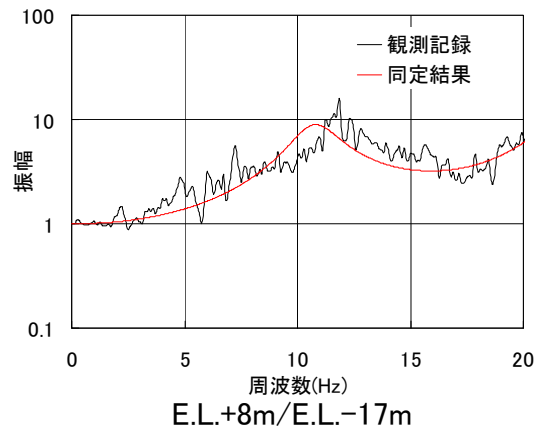
- 一次元波動論に基づく理論伝達特性を当てはめる逆解析により同定
- 同定対象は、第四紀層のP波速度及び第四紀層と第三紀層に分割した減衰(層厚、密度及び第三紀層のP波速度は、既往の地盤同定結果で固定)
- 遺伝的アルゴリズムを用い、初期乱数を変えた5回の計算を実施し、計算結果の平均値を地盤モデルとして採用
- 探索範囲は以下の通り設定
 - 【P波速度】
初期モデルの 0.5~1.5倍
 - 【減衰】
 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$
 h_0 は 0.01~1.0
 α は 0.0~1.0

地盤モデルの同定結果[上下動]

E.L. (m)	固定パラメータ			初期値	同定結果	
	層番号	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	P波速度 (m/s)	減衰 $h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$	
					h_0	α
▲ 8.0						
	1	2.5	1.71	280	255	0.38
5.5	2	4.5		403	368	
1.0	3	5.0	1.66	1589	1449	
-4.0	4	3.0		1509	1376	
-7.0	5	8.0	1.82	1753	1753	
-15.0	6	2.0	1.69	1742	1742	0.37
▲ -17.0	7	89.0		2067	2067	
-106.0	8	62.0	1.74	2256	2256	
-168.0	9	24.0	1.78	2000	2000	
▲ -192.0	10	68.0	1.78			
-260.0	11	108.0	1.82			
-368.0	12	2.0	1.85			
▽ -370.0	13	2.0				
▲ -372.0		—				

▲: 地震計設置位置
▽: 解放基盤表面

地盤モデルの同定結果(上下動)

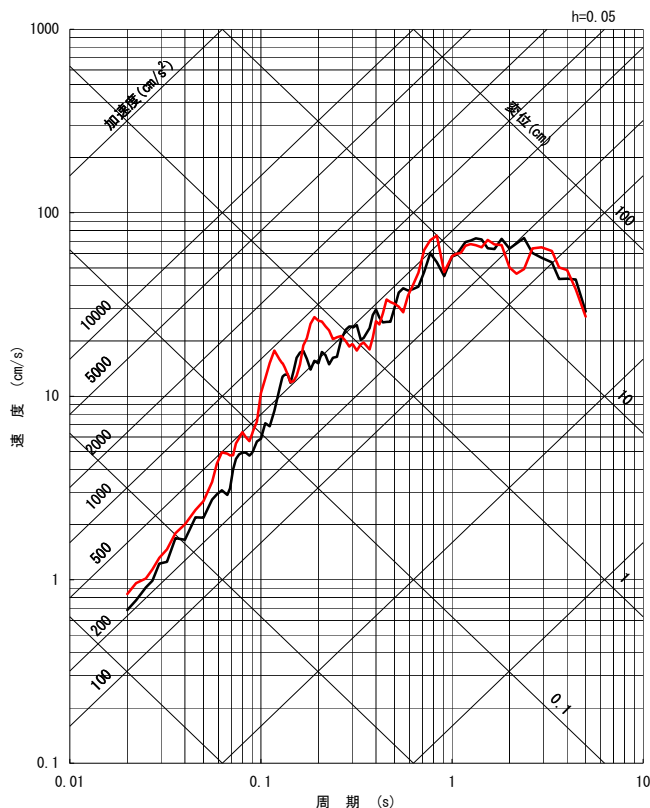
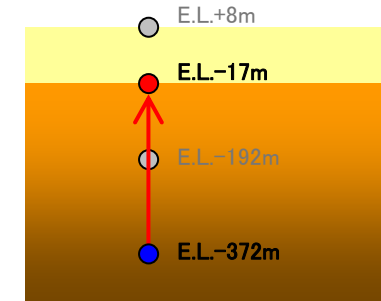


同定した地盤モデルの理論伝達関数(赤)と
観測記録による伝達関数(黒)の比較[上下動]

2. 今回の地震観測記録を用いたはざと解析について

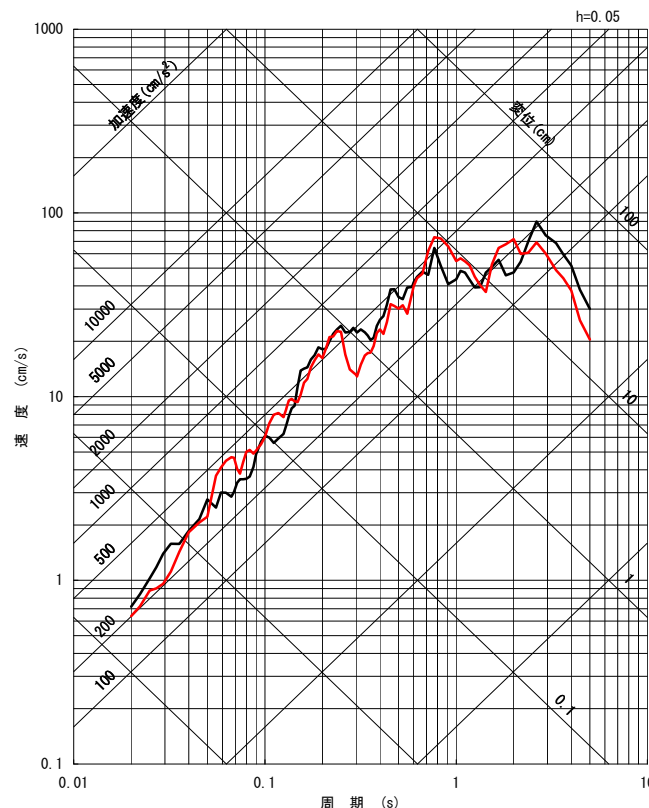
地震波シミュレーション結果

水平成分と上下成分の記録で同定した地盤モデルに、最深部の地震観測記録を入力し、E.L.-17m(岩盤上端、原子炉建屋基礎下端に相当する深さ)のシミュレーション結果と観測記録を比較する。



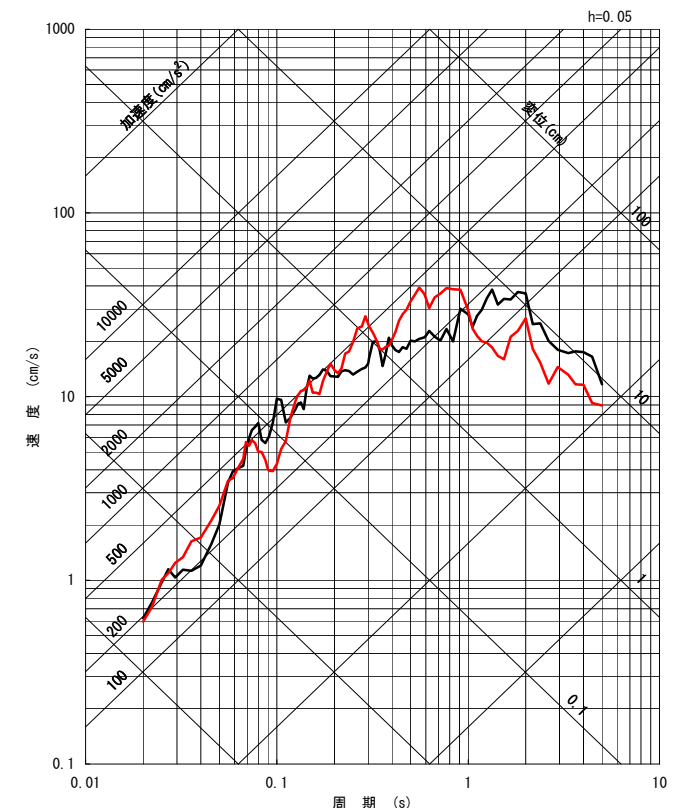
NS成分

—観測記録
—シミュレーション結果



EW成分

—観測記録
—シミュレーション結果



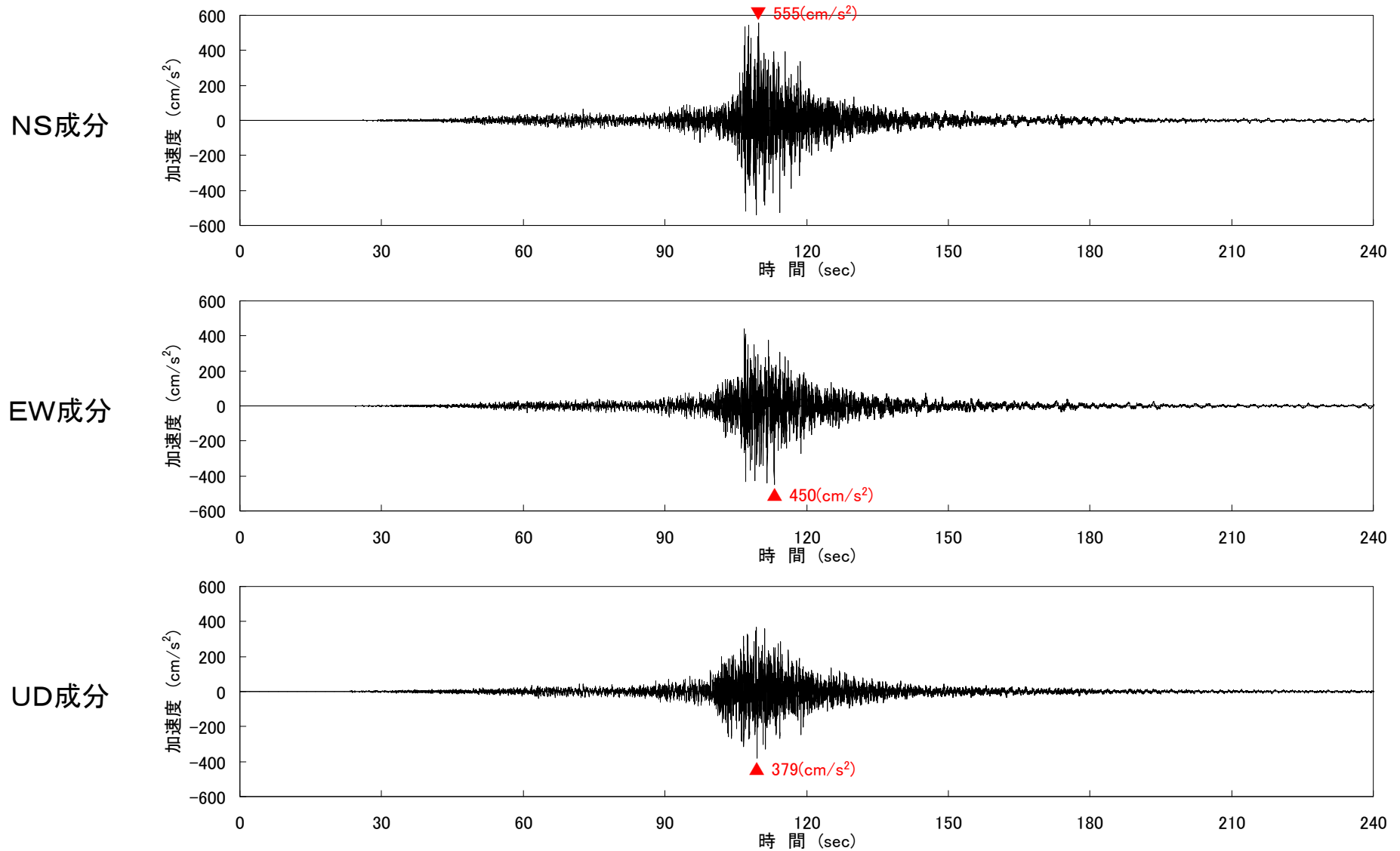
UD成分

—観測記録
—シミュレーション結果

同定した地盤モデルによる地震波シミュレーションの結果(E.L.-17m)

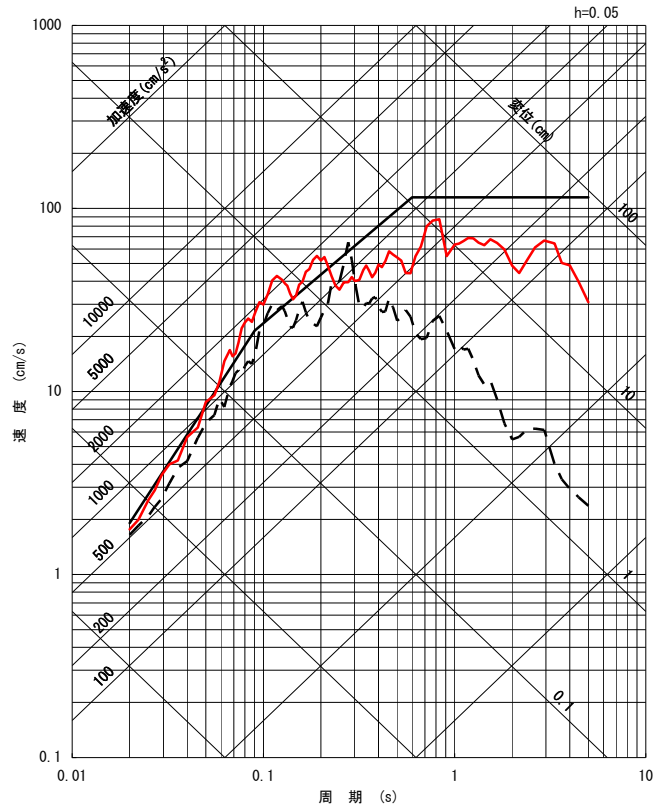
2. 今回の地震観測記録を用いたはぎとり解析について

解放基盤表面におけるはぎとり結果(加速度時刻歴波形)



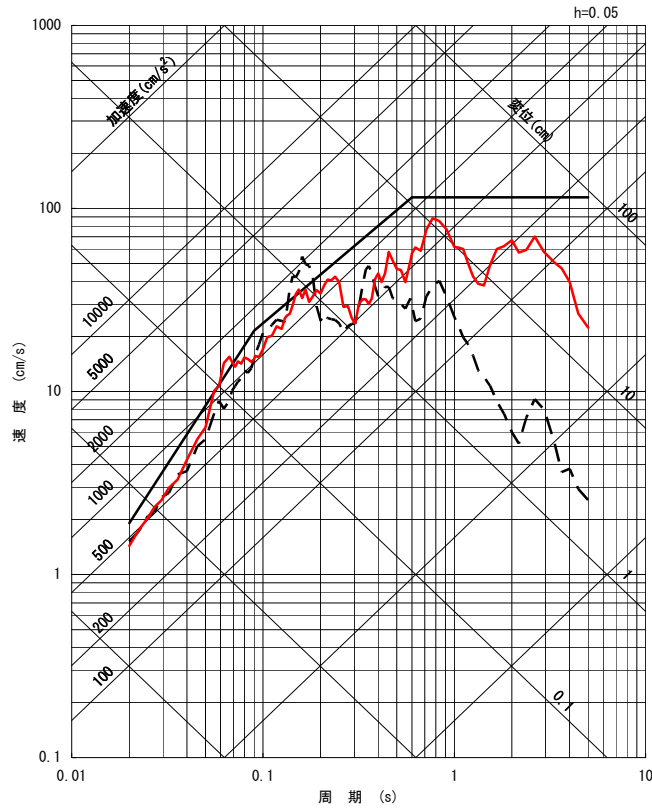
2. 今回の地震観測記録を用いたはぎとり解析について

解放基盤表面におけるはぎとり結果(擬似速度応答スペクトル)



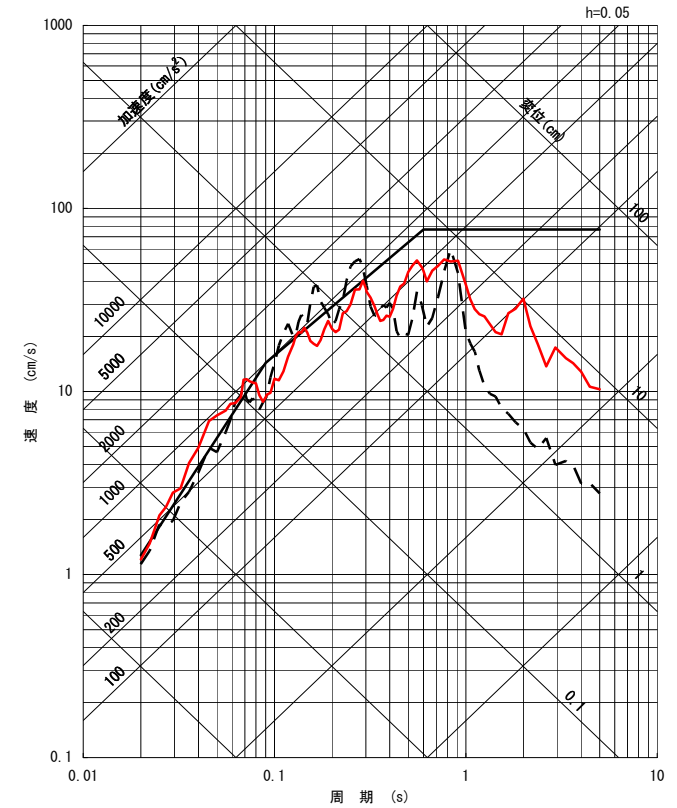
NS成分

— 基準地震動Ss-DH
 - - 基準地震動Ss-1H①
 — はぎとり波



EW成分


— 基準地震動Ss-DH
 - - 基準地震動Ss-1H②
 — はぎとり波



UD成分

— 基準地震動Ss-DV
 - - 基準地震動Ss-1V
 — はぎとり波

本震時に取得した地盤系の地震観測記録を用いて、地盤構造モデルを同定し、はぎとり解析を実施した。その結果、はぎとり波は一部の周期帯で基準地震動Ssを超えているものの、大きく上回るものではないことを確認した。



3. 東北地方太平洋沖地震の震源モデルを用いた シミュレーション解析について

- 平成23年東北地方太平洋沖地震(以下、「本震」という。)については、これまでにGPS 記録、津波観測記録、強震観測記録、遠地地震観測記録を用いた種々の震源モデルが提案されている。
- これらのうち、原子力施設の耐震設計に重要な短周期成分を含む強震動を説明する震源モデルとして、釜江・川辺(2011)(以下、「釜江・川辺モデル」という。)、入倉・倉橋(2011)(以下、「入倉・倉橋モデル」という。)等が提案されている。
- 本章は、本震の震源特性を把握することを目的として、釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルを用いた東海第二発電所の強震動シミュレーション解析について取りまとめたものである。

I. 釜江・川辺モデルを用いた強震動シミュレーション解析

釜江・川辺モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析

- 東海第二発電所のシミュレーション解析は、釜江・川辺モデルの検討でグリーン関数として用いた地震の観測記録が東海第二発電所の敷地で得られていることから、経験的グリーン関数法により行う。

※以下の評価結果は全て、釜江・川辺(2011)と同様、0.1~10Hzのフィルター処理を行っている。

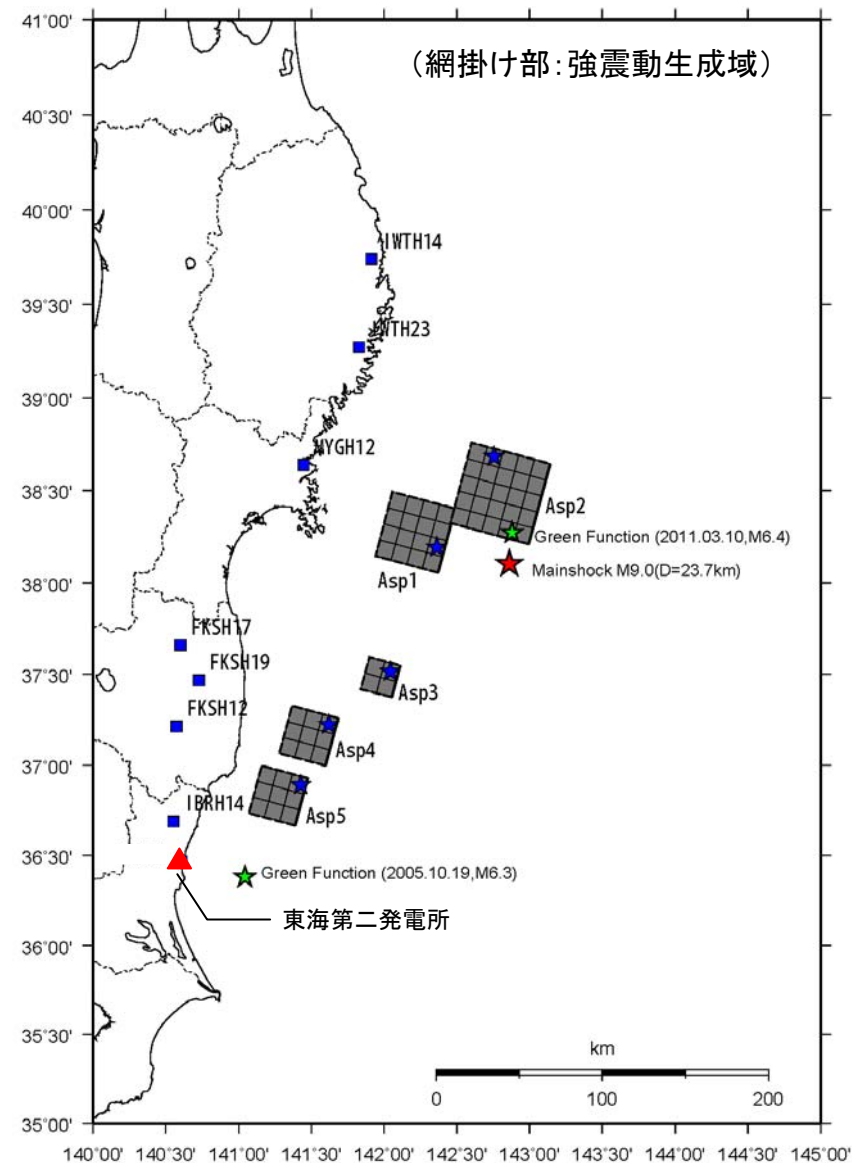
釜江・川辺モデルの要素地震の諸元

	要素地震A※3	要素地震B※3
発生日時※1	2005/10/19 20:44	2011/03/10 03:16
震源地※1	茨城県沖	宮城県沖
北緯(°)※1	36.382	38.271
東経(°)※1	141.043	142.879
震源深さ(km)※1	48.3	28.9
地震規模M※1	6.3	6.4
地震モーメントMo※2	3.18×10^{18}	1.10×10^{18}

※1: 気象庁による。

※2: F-netによる。

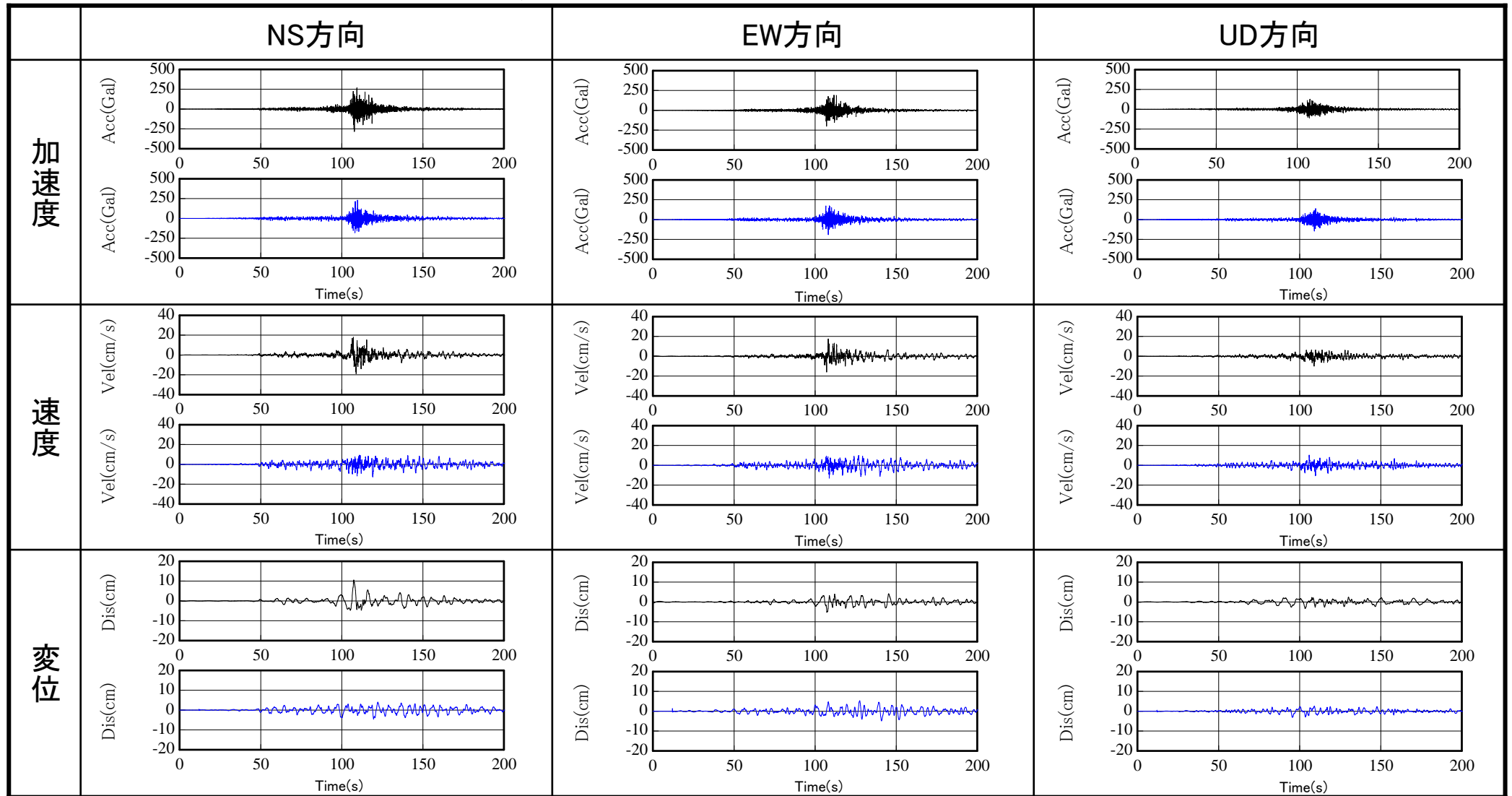
※3: 要素地震AはAsp5に、要素地震BはAsp1~4に用いている。



釜江・川辺モデルと東海第二発電所の位置関係

釜江・川辺モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果

■ 東海第二発電所の加速度・速度・変位時刻歴波形

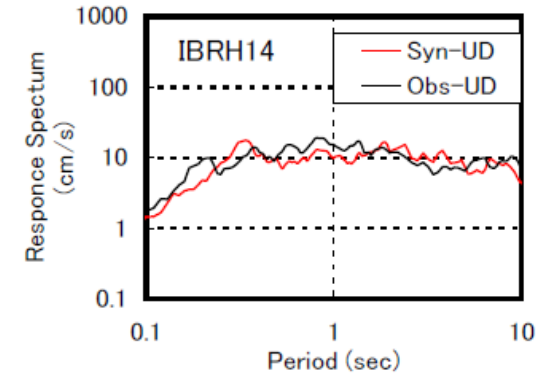
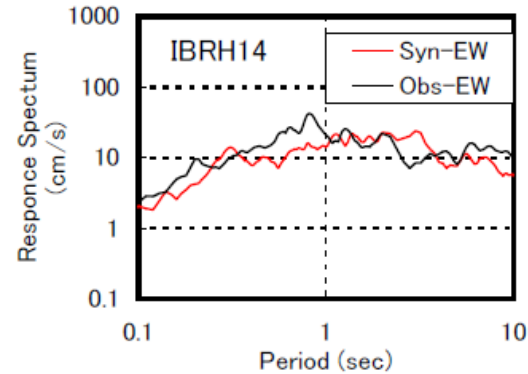
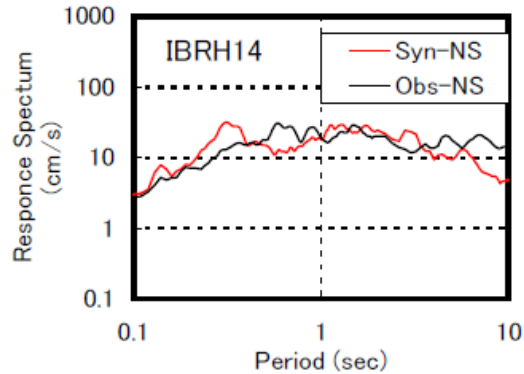


東海第二発電所GR01観測点(E.L.-372m)における
観測波形(黒線)とシミュレーション結果(青線)

釜江・川辺モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果

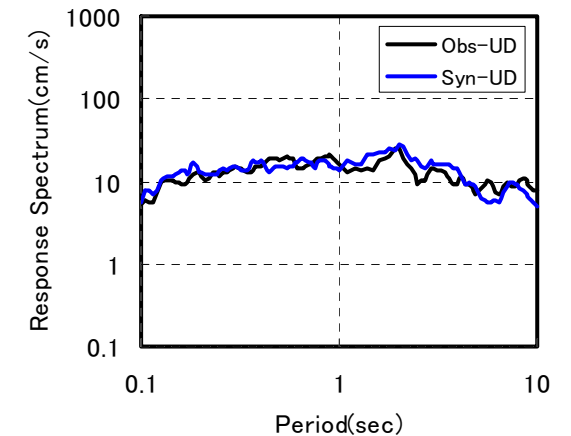
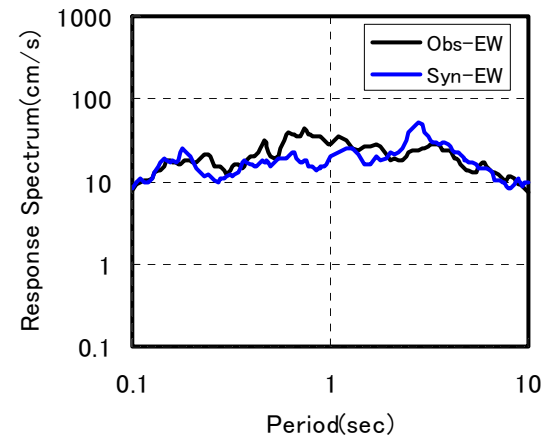
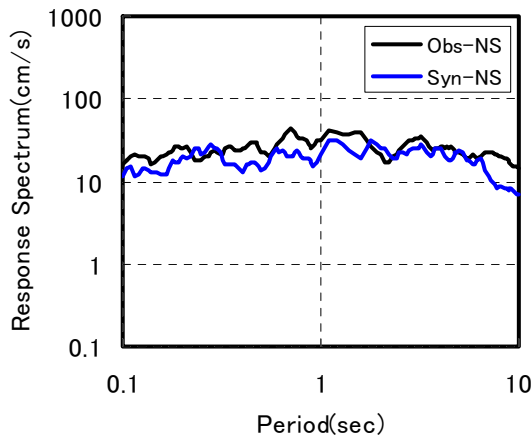
■ 周辺KiK-net観測点の応答スペクトル(h=5%) 【釜江・川辺(2011)より抜粋】

KiK-net
IBRH14(十王)
観測点



◇ 東海第二発電所の応答スペクトル(h=5%)

GR01観測点
(E.L.-372m)

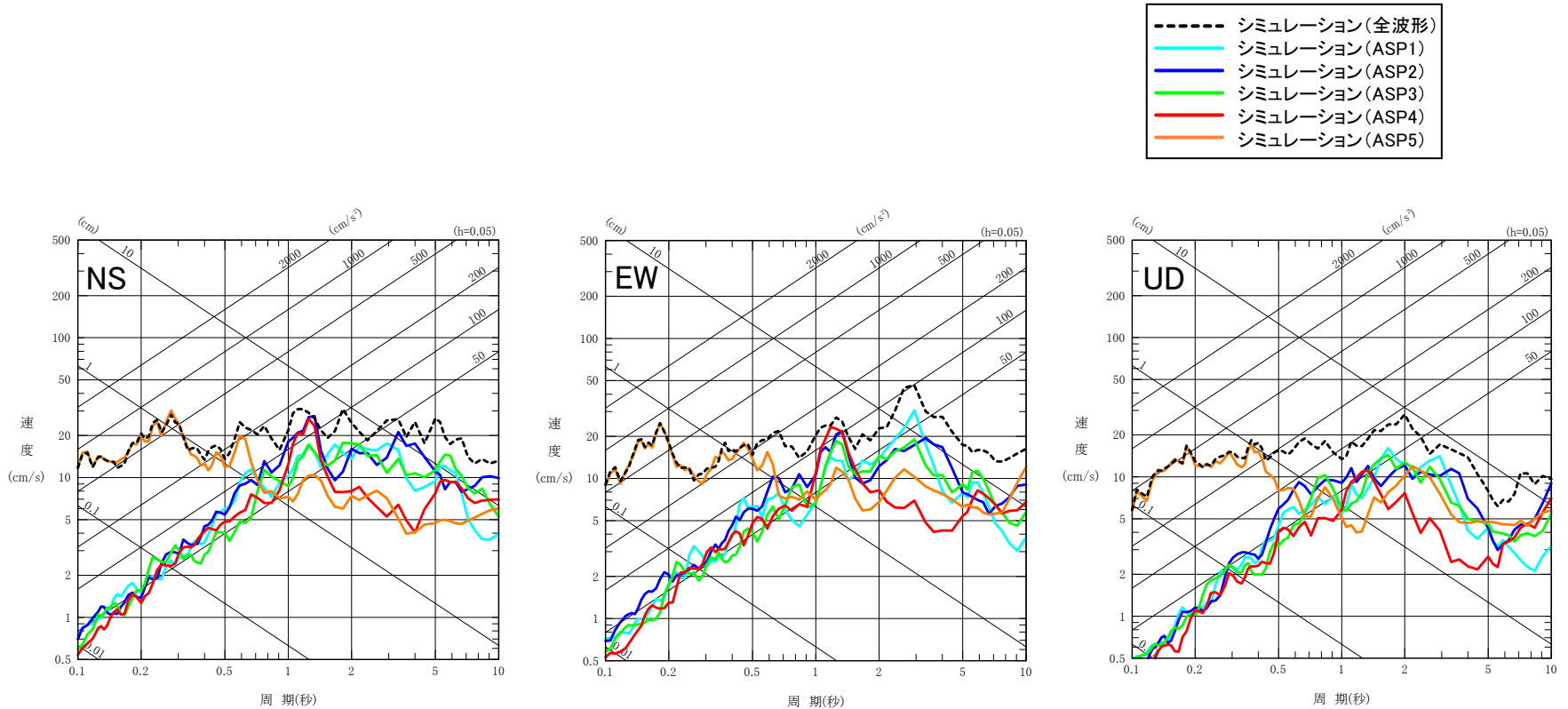


・シミュレーション結果は、東海第二発電所及び周辺観測点の応答スペクトルを概ね再現したものとなっているとして
いる。

釜江・川辺モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果

■各強震動生成域による応答スペクトルの比較 (h=5%)

GR01観測点
(E.L.-372m)



・短周期側(約0.5~0.6秒以下)では、敷地に最も近い強震動生成域であるAsp5の影響が支配的であり、それより長周期側ではAsp5以外の強震動生成域による影響を受けているとしている。

Ⅱ. 入倉・倉橋モデルを用いた強震動シミュレーション解析

入倉・倉橋モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析

- 東海第二発電所のシミュレーション解析は、入倉・倉橋モデルの検討でグリーン関数として用いた地震の観測記録が東海第二発電所の敷地で得られていることから、経験的グリーン関数法により行う。

※以下の評価結果は全て、入倉・倉橋(2011)と同様、0.1~8秒のフィルター処理を行っている。

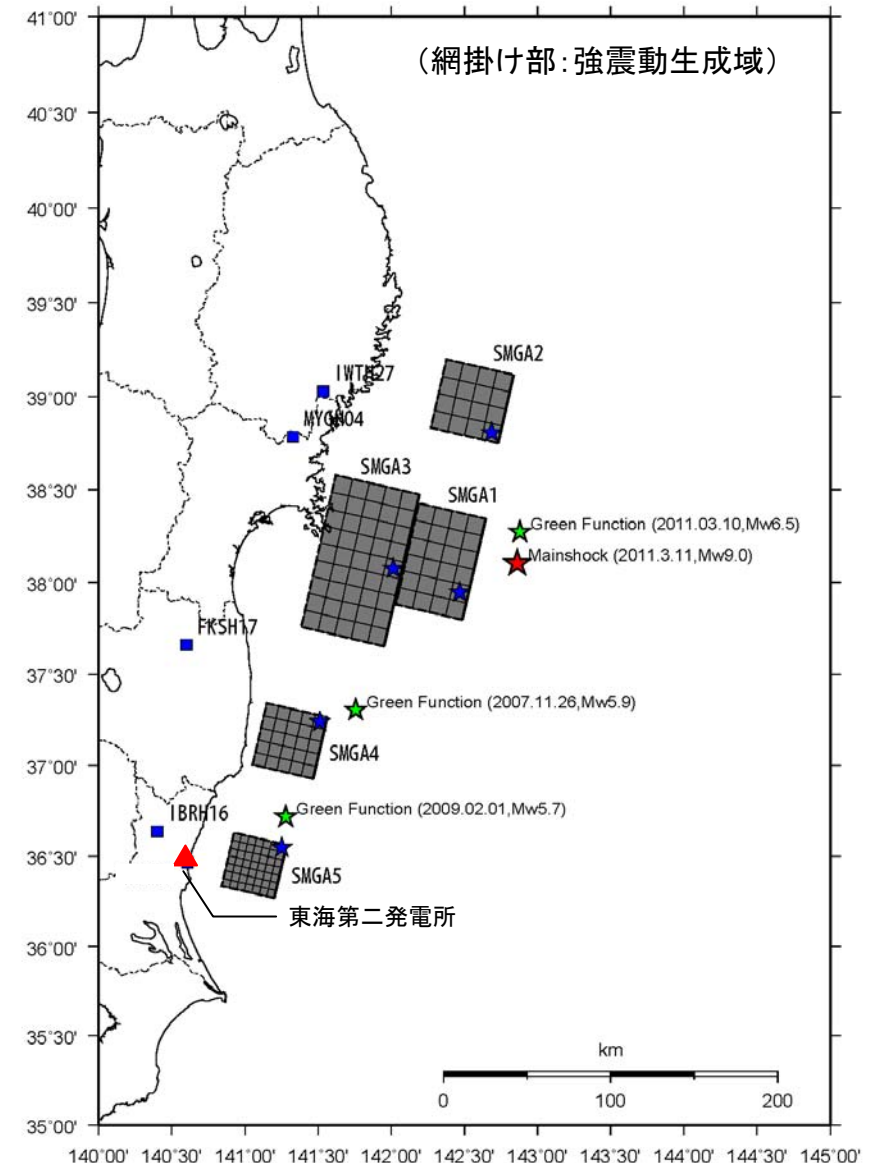
入倉・倉橋モデルの要素地震の諸元

	要素地震A※3	要素地震B※3	要素地震C※3
発生日時※1	2011/03/10 06:24	2007/11/26 22:51	2009/02/01 06:51
震源地※1	宮城県沖	福島県沖	茨城県沖
北緯(°)※1	38.172	37.304	36.717
東経(°)※1	143.045	141.757	141.279
震源深さ(km)※1	9.3	44.1	47.0
地震規模M※1	6.8	6.0	5.8
地震モーメントMo※2	5.51×10^{18}	7.66×10^{17}	4.65×10^{17}

※1: 気象庁による。

※2: F-netによる。

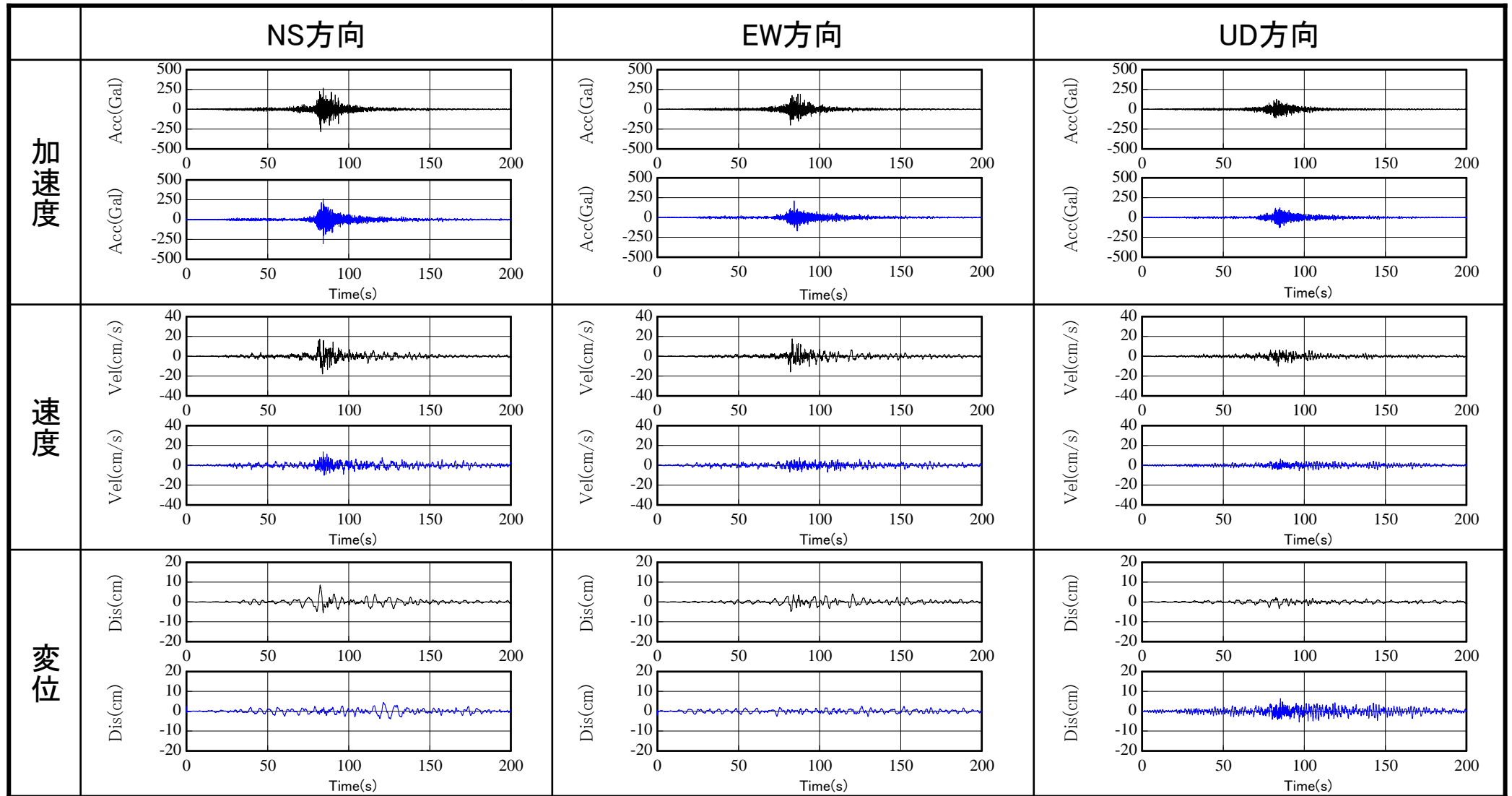
※3: 要素地震AはSMGA1~3に、要素地震BはSMGA4に、要素地震CはSMGA5に用いている。



入倉・倉橋モデルと東海第二発電所の位置関係

入倉・倉橋モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果

■ 東海第二発電所の加速度・速度・変位時刻歴波形

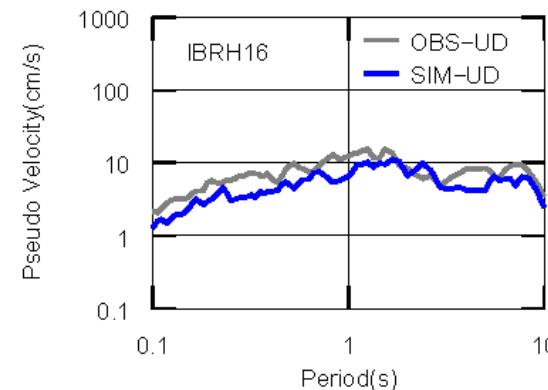
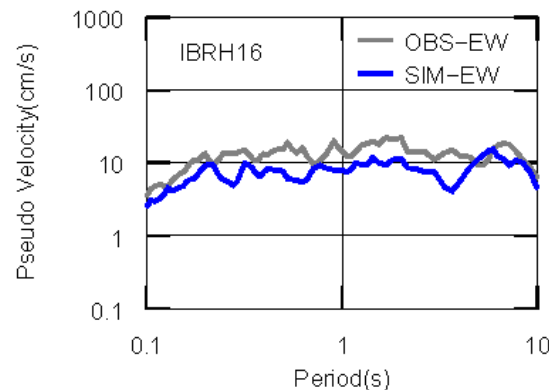
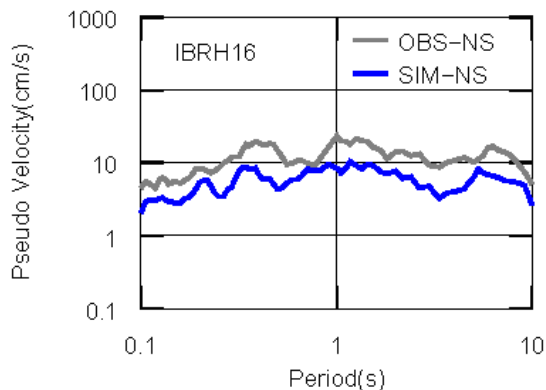


東海第二発電所GR01観測点(E.L.-372m)における
観測波形(黒線)とシミュレーション結果(青線)

入倉・倉橋モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果

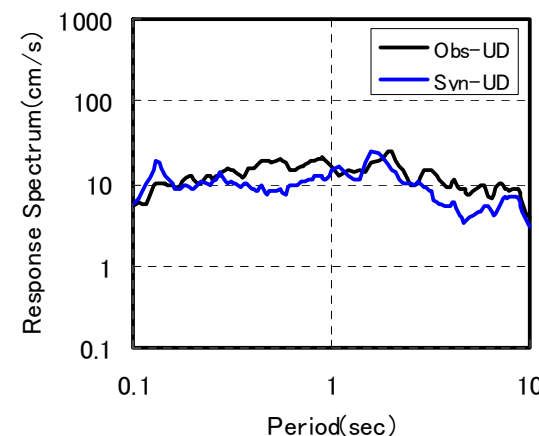
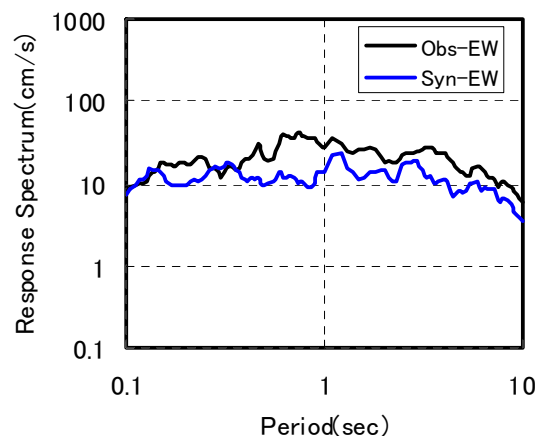
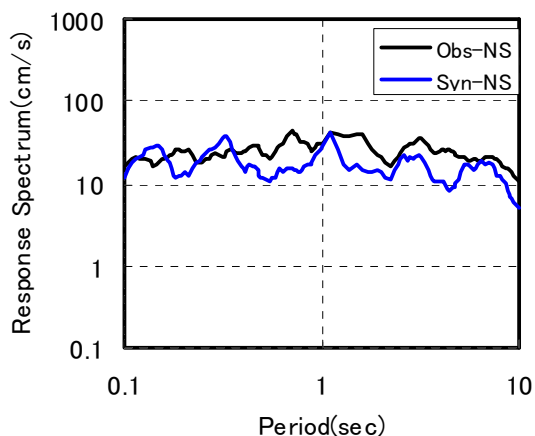
■ 周辺KiK-net観測点の応答スペクトル(h=5%) 【再現解析】

KiK-net
IBRH16(山方)
観測点



◇ 東海第二発電所の応答スペクトル(h=5%)

GR01観測点
(E.L.-372m)

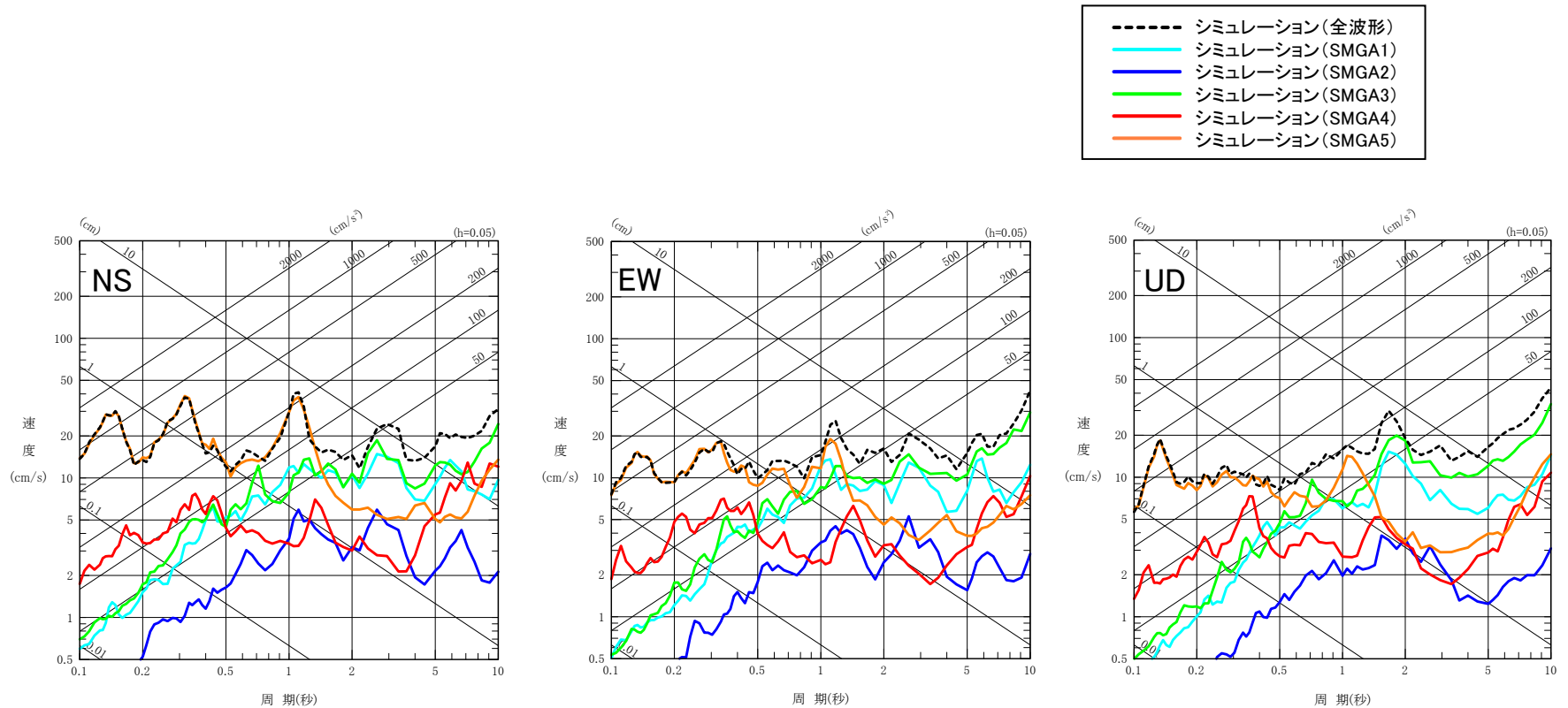


・シミュレーション結果は、東海第二発電所及び周辺観測点の応答スペクトルを概ね再現したものとなっているとして
いる。

入倉・倉橋モデルを用いた東海第二発電所のシミュレーション解析結果

■各強震動生成域による応答スペクトルの比較 (h=5%)


GR01観測点
(E.L.-372m)



・短周期側(約1秒以下)では、敷地に最も近い強震動生成域であるSMGA5の影響が支配的であり、それより長周期側ではSMGA5以外の強震動生成域による影響を受けているとしている。

まとめ

- 本震の強震観測記録を説明する震源モデルとしてこれまでに提案された釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルを用いた東海第二発電所の強震動シミュレーション解析を行った。
- その結果、いずれの震源モデルについても、シミュレーション結果は観測記録の応答スペクトルを概ね再現していること、東海第二発電所の敷地における地震動の短周期成分は敷地に近い強震動生成域による影響が支配的であることを確認したとしている。

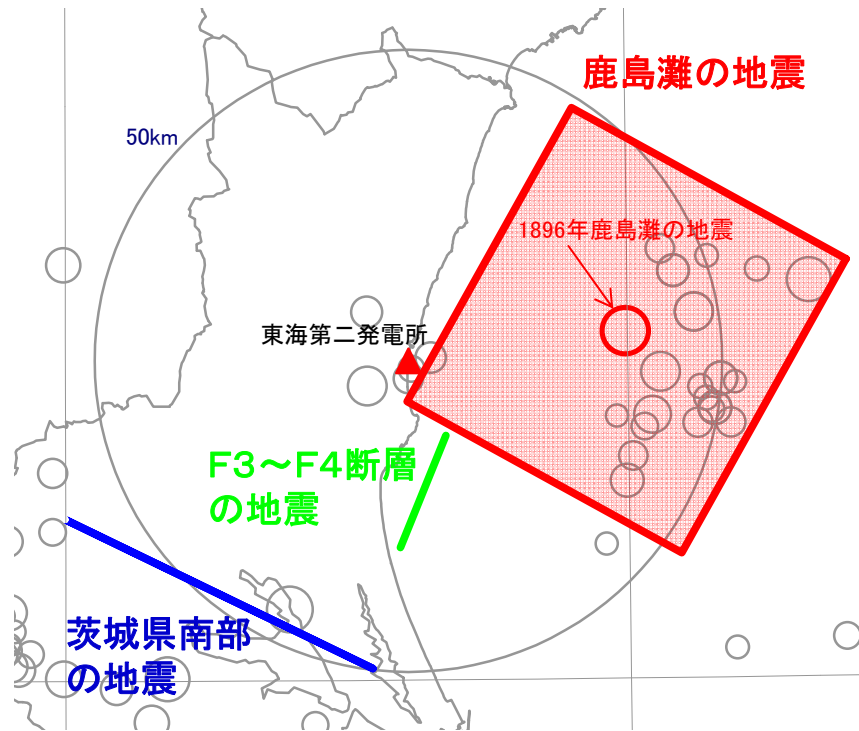


4. はぎとり波と基準地震動 S_S との比較による要因分析について

4. はぎとり波と基準地震動 S_s との比較による今回の地震の要因分析

はぎとり波と基準地震動 S_s との比較による要因分析

東海第二発電所における耐震安全性評価では、検討用地震のうち、プレート間地震である鹿島灘の地震の断層モデルによる結果(震源の不確かさを考慮したケース)を、基準地震動 S_s-1_H として設定している。今回の地震が基準地震動 S_s を超えた要因分析については、東北地方太平洋沖地震の学識者による震源モデルと鹿島灘の地震の断層モデルを比較検討する。



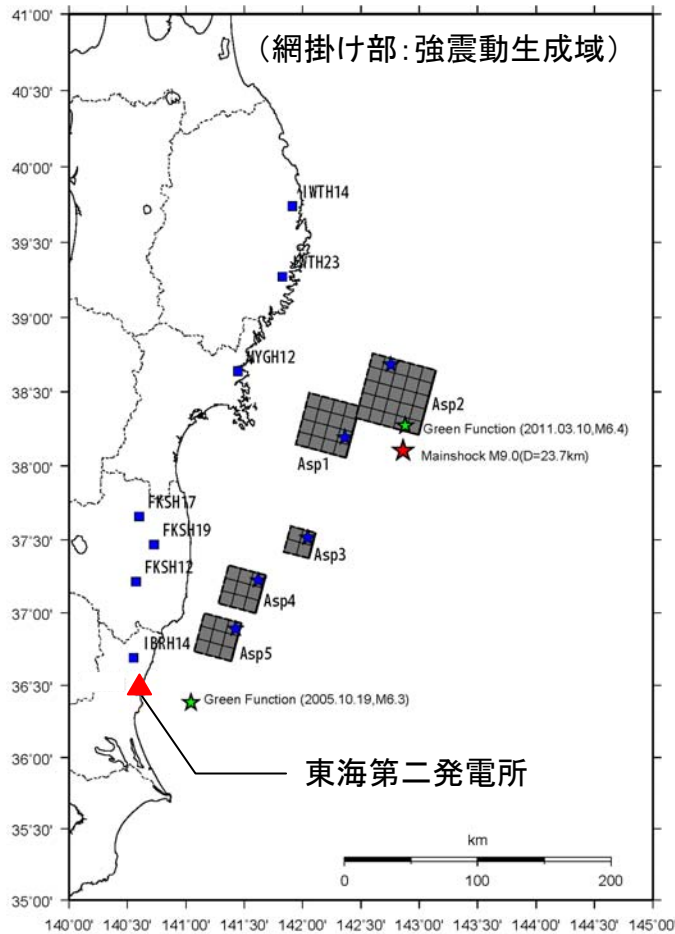
東海第二発電所の検討用地震

分類	検討用地震	地震規模 (M)
内陸地殻内地震	F3~F4断層による地震 (断層長さ16km)	M6.8
プレート間地震	鹿島灘の地震	M7.3
海洋プレート内地震	茨城県南部の地震	M7.3

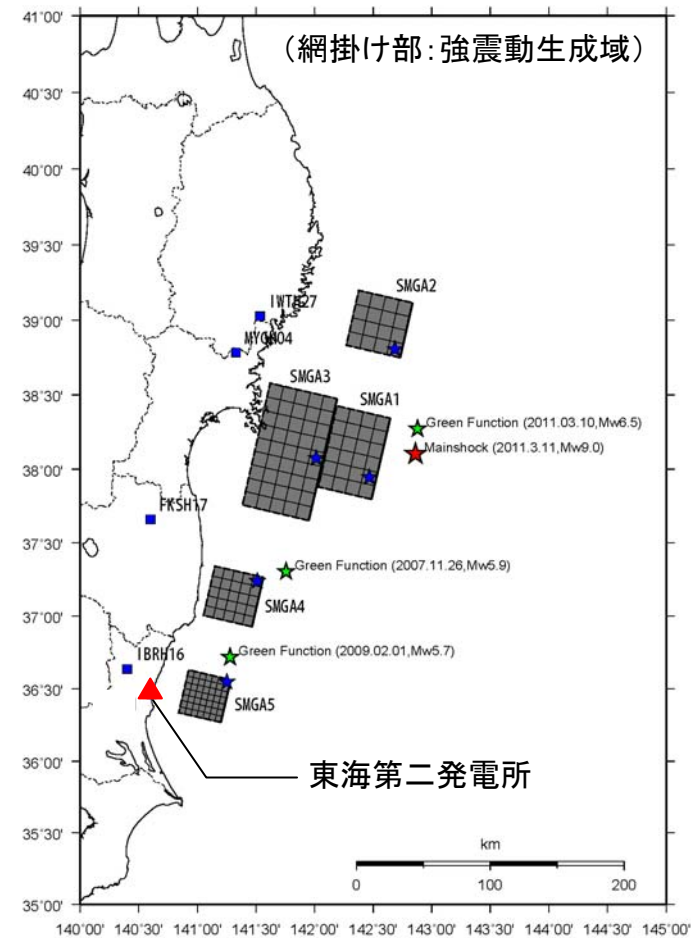
4. はざとり波と基準地震動 S_s との比較による今回の地震の要因分析

釜江・川辺モデルと入倉・倉橋モデル

- 釜江・川辺モデル、入倉・倉橋モデルとも5個の強震動生成域で構成される。
- 東海第二発電所は、いずれのモデルでも南端の強震動生成域近傍に位置し、釜江・川辺モデルではAsp5、入倉・倉橋モデルではSMGA5に最も近い。



釜江・川辺モデル

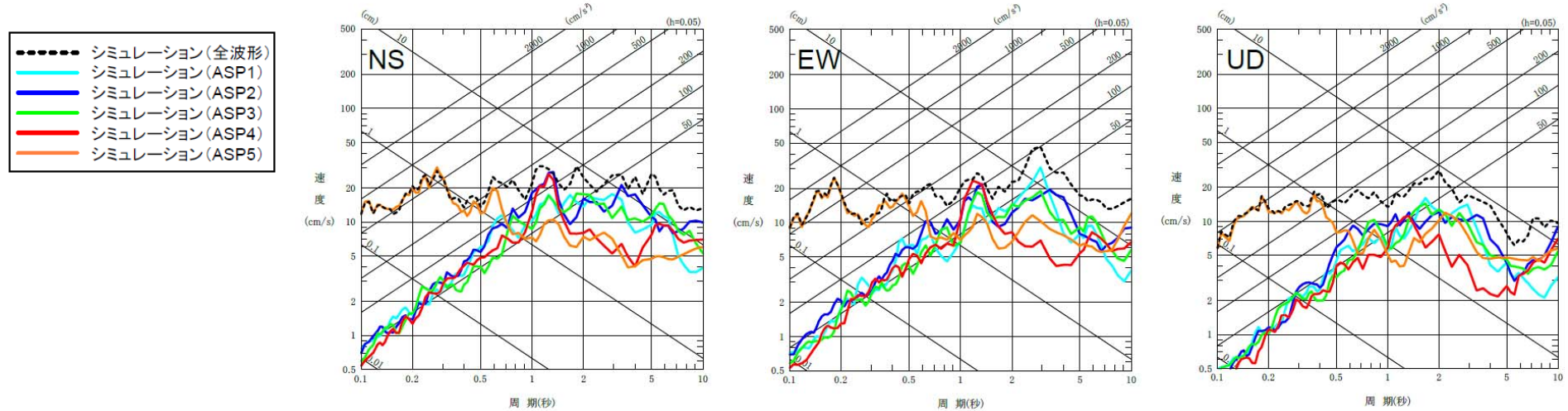


入倉・倉橋モデル

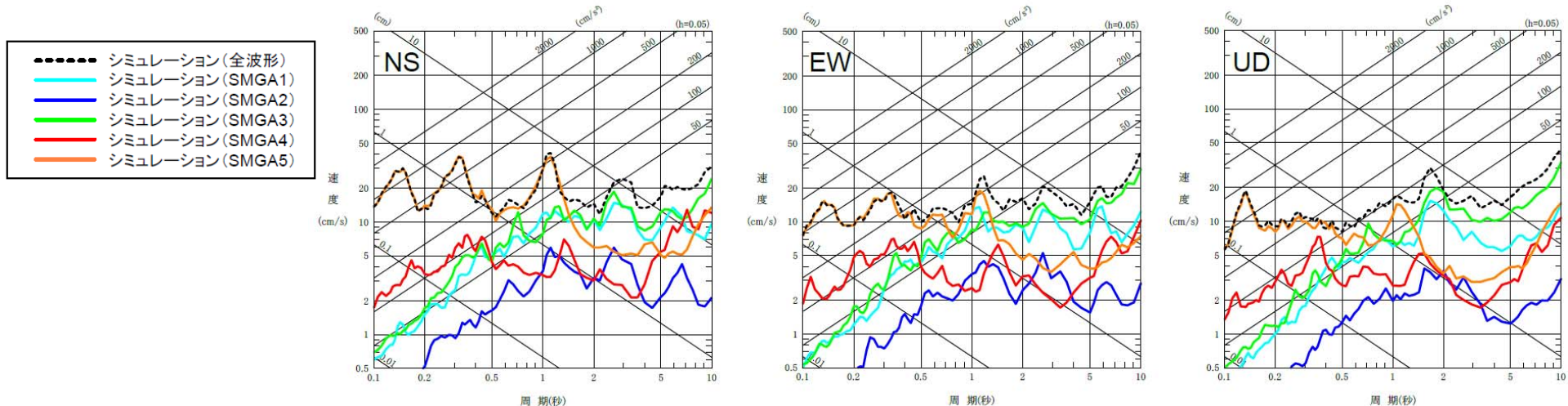
4. はざとり波と基準地震動 S_s との比較による今回の地震の要因分析

釜江・川辺モデルと入倉・倉橋モデルの各強震動生成域による東海第二発電所の応答スペクトル

釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルとも、短周期側では、敷地に最も近い強震動生成域の影響が支配的であり、長周期ではそれ以外の強震動生成域による影響を受ける。



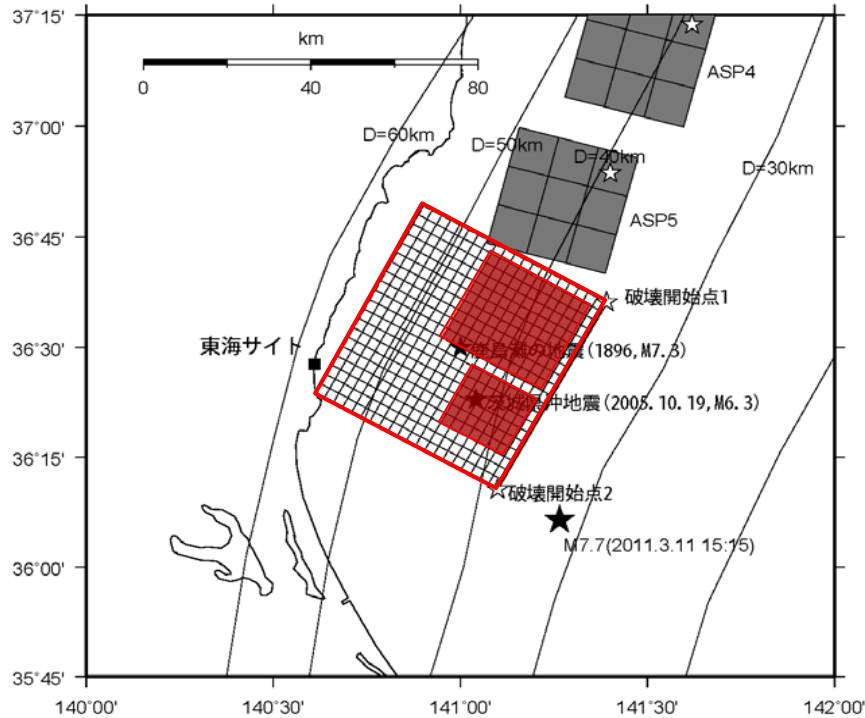
釜江・川辺モデルの各強震動生成域による東海第二発電所の応答スペクトル(GR01観測点:E.L.-372m)



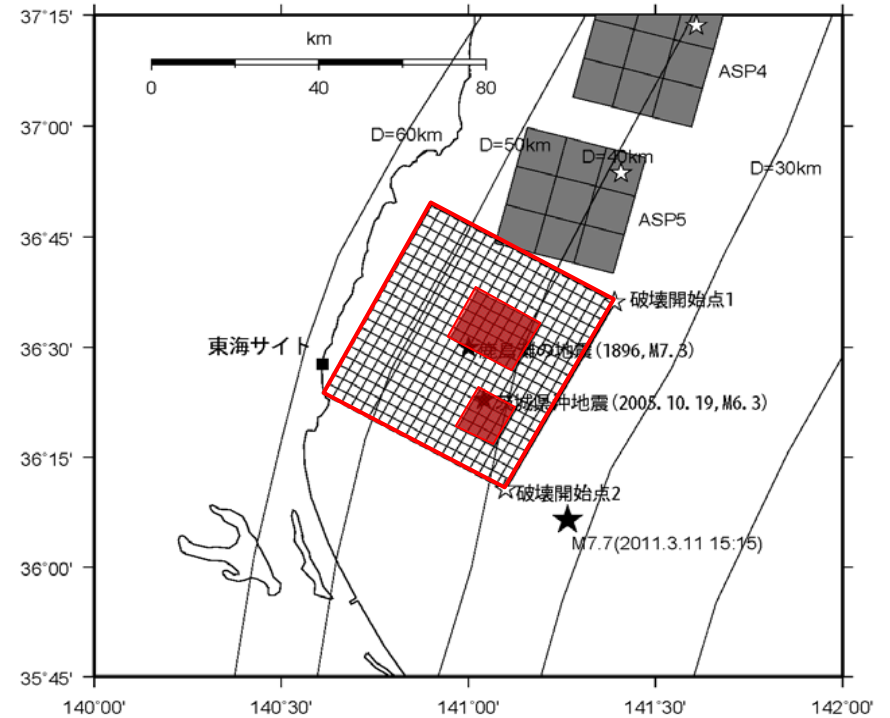
入倉・倉橋モデルの各強震動生成域による東海第二発電所の応答スペクトル(GR01観測点:E.L.-372m)

釜江・川辺モデルと鹿島灘の地震の断層モデル

赤線: 鹿島灘の地震の断層モデル(赤の塗りつぶし部はアスペリティを表す)



釜江・川辺モデルのASP5と鹿島灘の地震の断層モデル
(基本ケース)

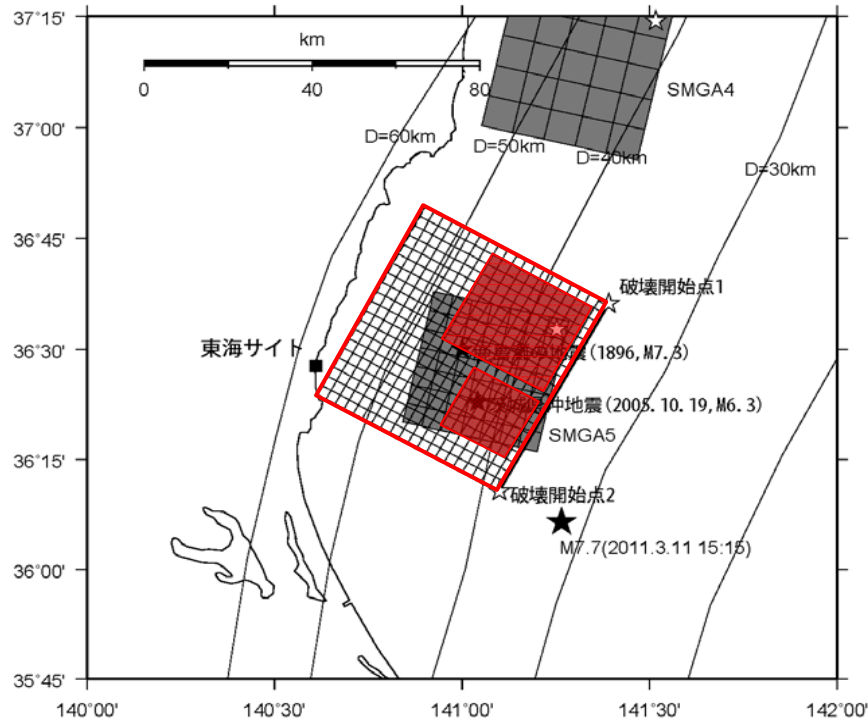


釜江・川辺モデルのASP5と鹿島灘の地震の断層モデル
(短周期レベルの不確かさを考慮したケース)

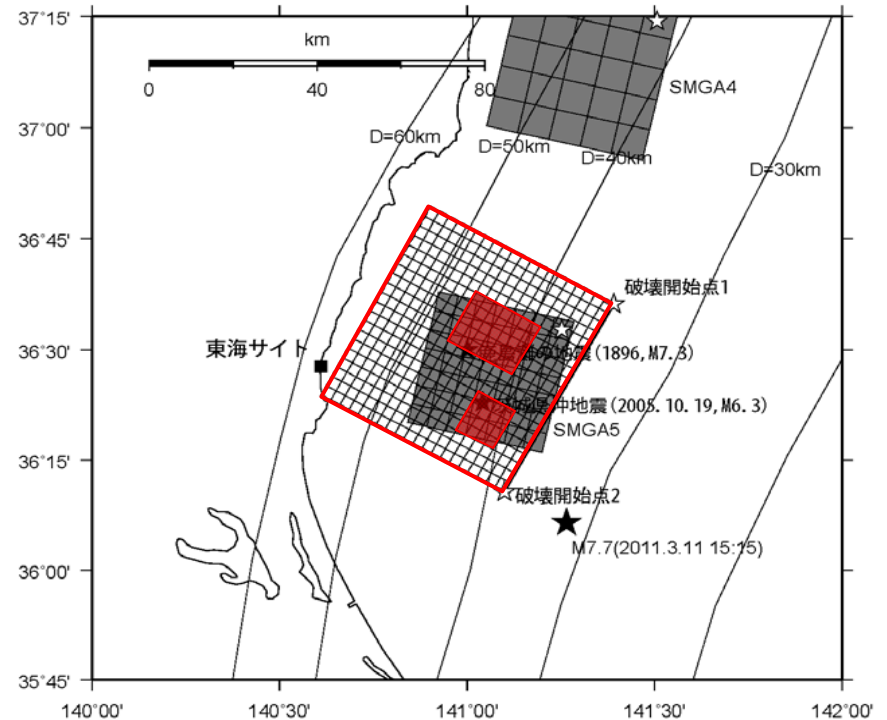
釜江・川辺モデルの強震動生成域のうち南側のASP5は、東海第二発電所の検討用地震である鹿島灘の地震の断層面付近に位置している。

入倉・倉橋モデルと鹿島灘の地震の断層モデル

赤線: 鹿島灘の地震の断層モデル(赤の塗りつぶし部はアスペリティを表す)



入倉・倉橋モデルのSMGA5と鹿島灘の地震の断層モデル
(基本ケース)

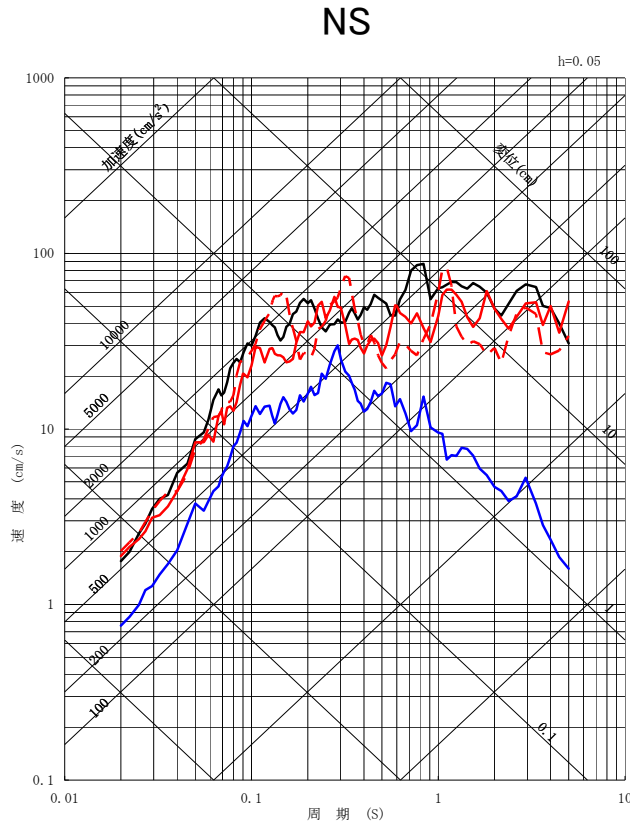


入倉・倉橋モデルのSMGA5と鹿島灘の地震の断層モデル
(短周期レベルの不確かさを考慮したケース)

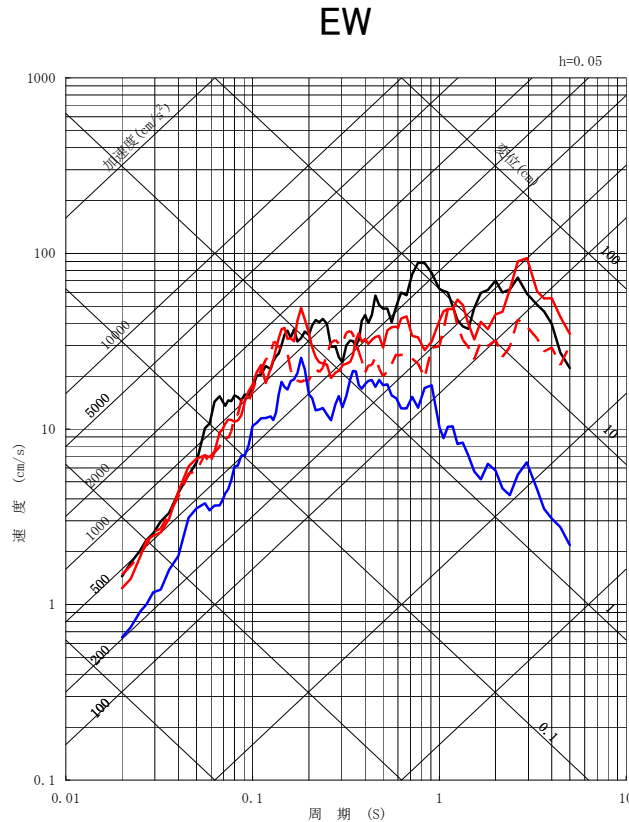
入倉・倉橋モデルの強震動生成域のうち南側のSMGA5は、東海第二発電所の検討用地震である鹿島灘の地震の断層面付近に位置している。

4. はざとり波と基準地震動 S_s との比較による今回の地震の要因分析

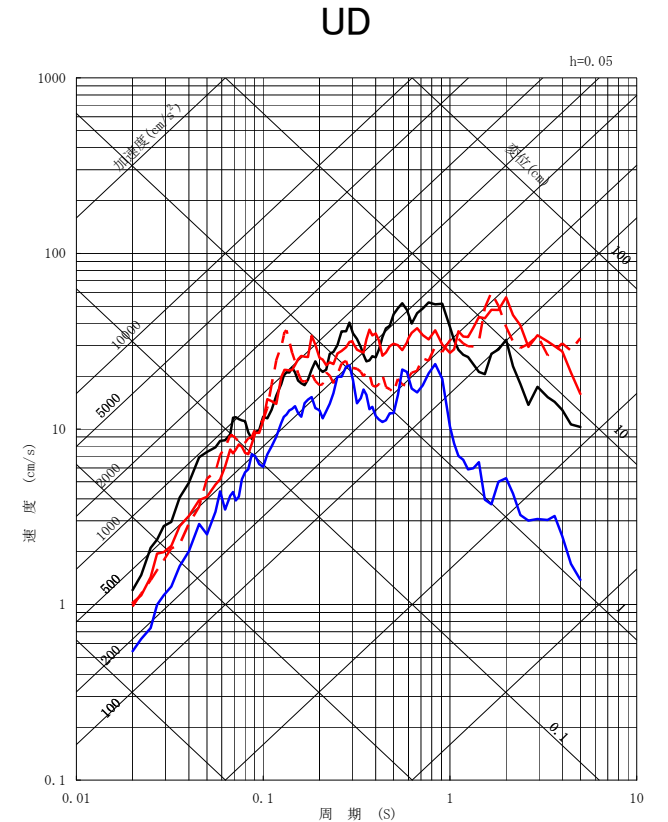
東北地方太平洋沖地震と鹿島灘の地震(基本ケース)



- 観測記録はざとり波 (NS)
- 釜江モデル (NS_ALL)
- - 入倉モデル (NS_ALL)
- 鹿島灘の地震 (基本ケース) NS



- 観測記録はざとり波 (EW)
- 釜江モデル (EW_ALL)
- - 入倉モデル (EW_ALL)
- 鹿島灘の地震 (基本ケース) EW



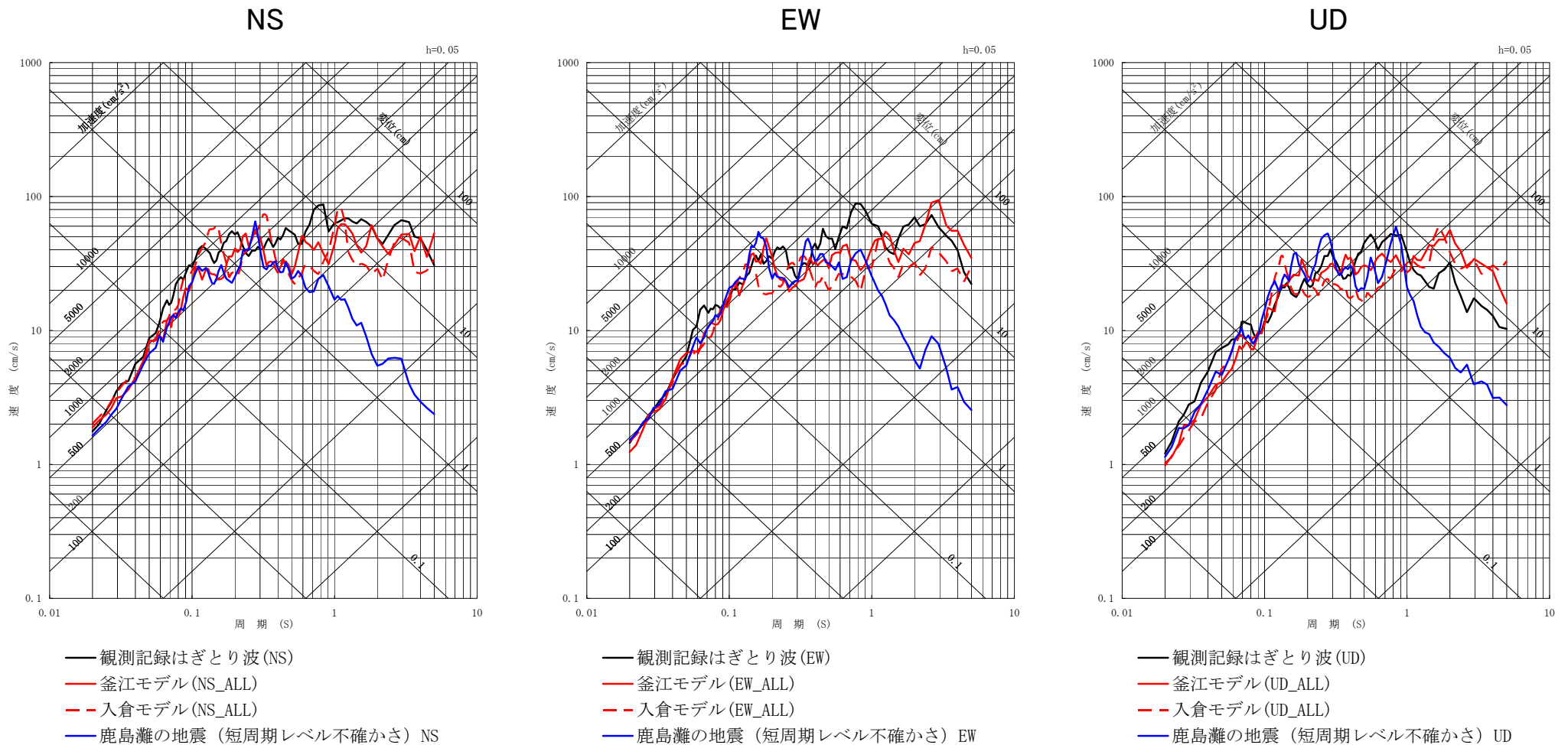
- 観測記録はざとり波 (UD)
- 釜江モデル (UD_ALL)
- - 入倉モデル (UD_ALL)
- 鹿島灘の地震 (基本ケース) UD

表示した応答スペクトルは全て解放基盤表面位置でののはざとり波

4. はぎとり波と基準地震動 S_s との比較による今回の地震の要因分析

東北地方太平洋沖地震と鹿島灘の地震(短周期レベル不確かさ)

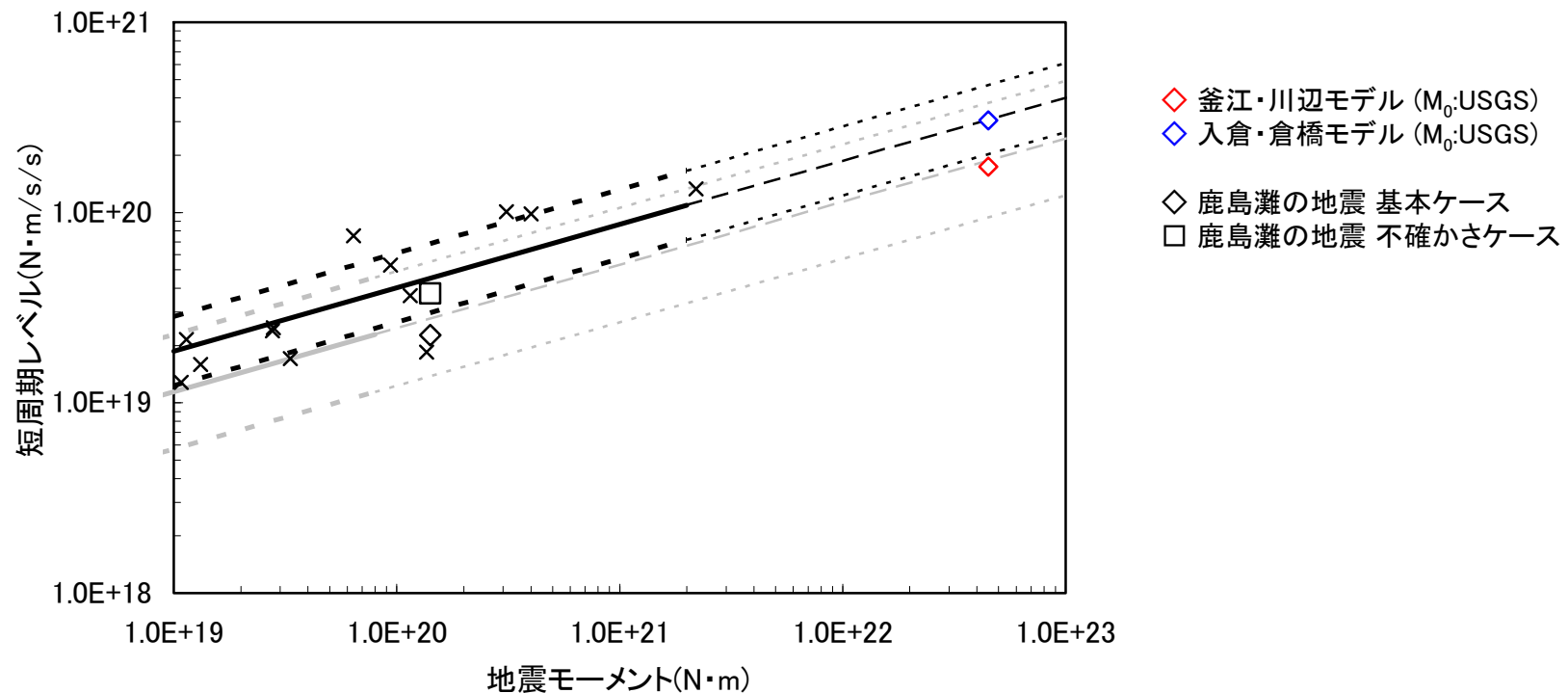
東北地方太平洋沖地震のはぎとり波と鹿島灘の地震の短周期レベルの不確かさを考慮した地震動(断層モデル)を比較すると、両者は短周期成分において、概ね同じレベルである。



表示した応答スペクトルは全て解放基盤表面位置でののはぎとり波

各震源モデルと鹿島灘の地震の震源パラメータの比較(断層面全体)

釜江・川辺モデル、入倉・倉橋モデルから推定される短周期レベルは、既往のスケーリング則及び鹿島灘の地震の震源モデルから算定される短周期レベルと比較して、特異な傾向を示していない。

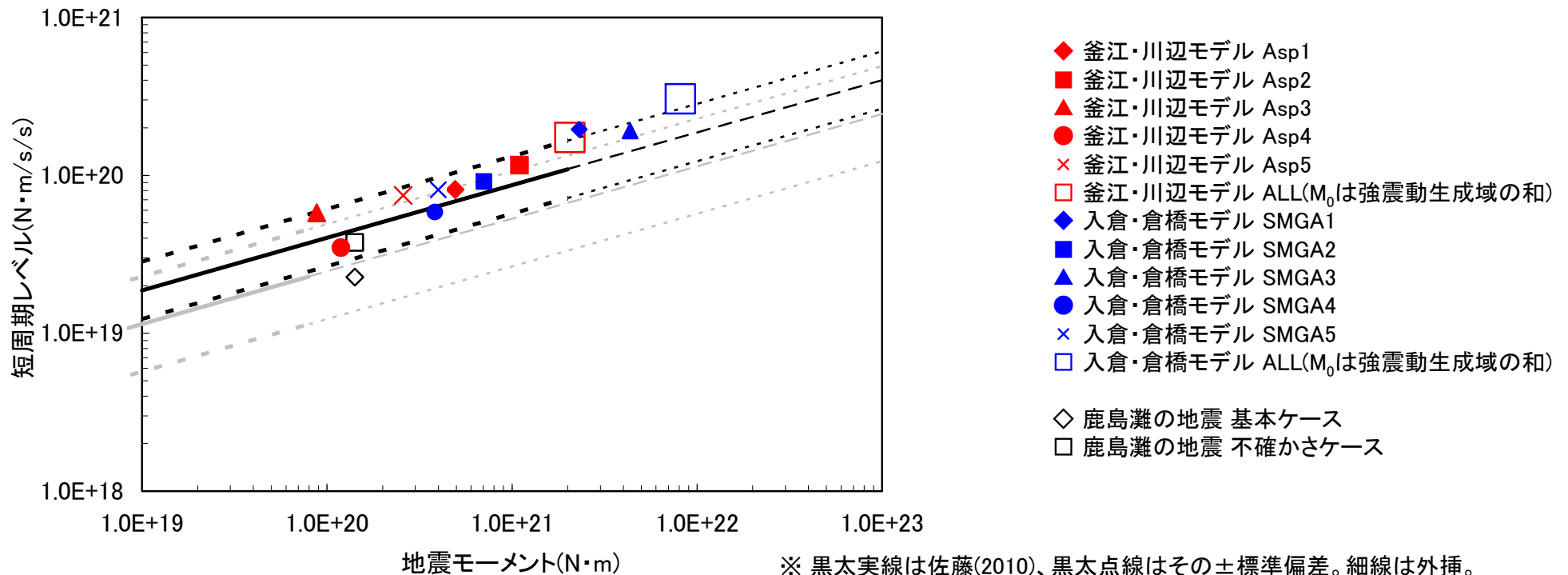


※ ×は佐藤(2010)で示されたプレート境界地震の値。黒太実線はその平均値、黒太点線はその±標準偏差。細線は外挿。
 ※ 灰色太実線は壇ほか(2001)、灰色太点線はその2倍と1/2倍。細線は外挿。

4. はざとり波と基準地震動 S_s との比較による今回の地震の要因分析

各震源モデルと鹿島灘の地震の震源パラメータの比較(強震動生成域)

- 釜江・川辺モデル、入倉・倉橋モデルを用いたシミュレーションの結果、地震動の短周期成分は敷地に近い強震動生成域による影響が支配的であることから、仮に各強震動生成域が個別の震源であると考え、各強震動生成域から推定される短周期レベルと鹿島灘の地震の震源モデルから算定される短周期レベルと比較した。
- 釜江・川辺モデル、入倉・倉橋モデルの各強震動生成域から推定される短周期レベルは、既往のスケールリング則及び鹿島灘の地震の震源モデルから算定される短周期レベルと比較して、特異な傾向を示していない。



※ 黒太実線は佐藤(2010)、黒太点線はその±標準偏差。細線は外挿。
 ※ 灰色太実線は壇ほか(2001)、灰色太点線はその2倍と1/2倍。細線は外挿。

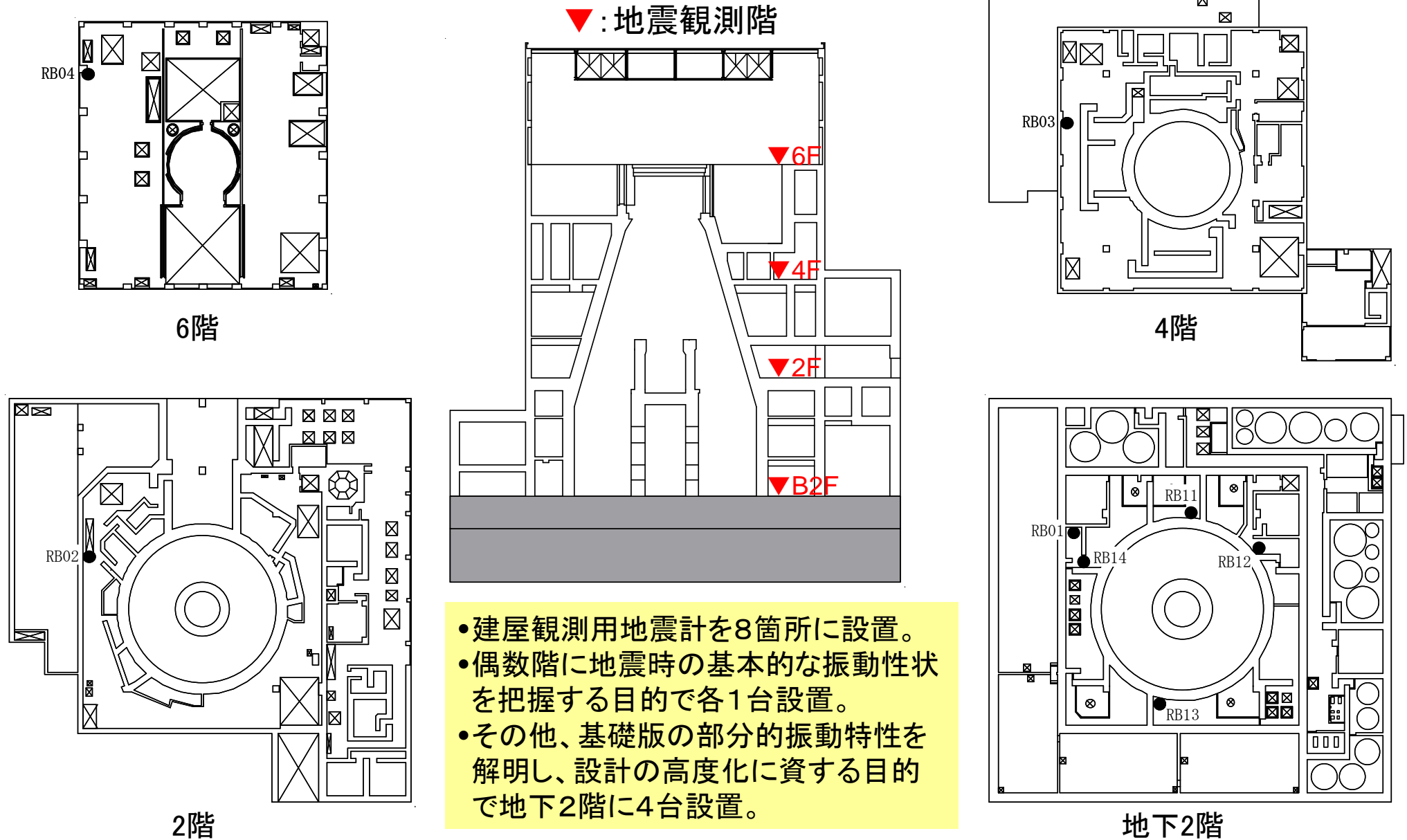
まとめ

- 東北地方太平洋沖地震について、釜江・川辺モデル、入倉・倉橋モデルを用いてシミュレーション解析を行った結果、東海第二発電所における地震動の短周期成分は敷地に近い強震動生成域による影響が支配的である。
- 釜江・川辺モデル、入倉・倉橋モデルとも、南側の強震動生成域(東海第二発電所に最も近い強震動生成域)は検討用地震である鹿島灘の地震の断層面付近に位置している。
- 釜江・川辺モデル、入倉・倉橋モデルに基づく東北地方太平洋沖地震の短周期レベルは鹿島灘の地震の短周期レベルと比較して特異な値ではない。
- 東北地方太平洋沖地震のはざとり波と鹿島灘の地震の地震動(断層モデル)を比較すると、両者は短周期成分において、概ね同じレベルである。



5. 地震観測記録による安全上重要な施設の評価について

原子炉建屋の地震計設置位置



原子炉建屋における観測記録と設計時及び耐震バックチェック時の最大応答加速度値の比較

最大応答加速度値の比較

(単位: cm/s²)

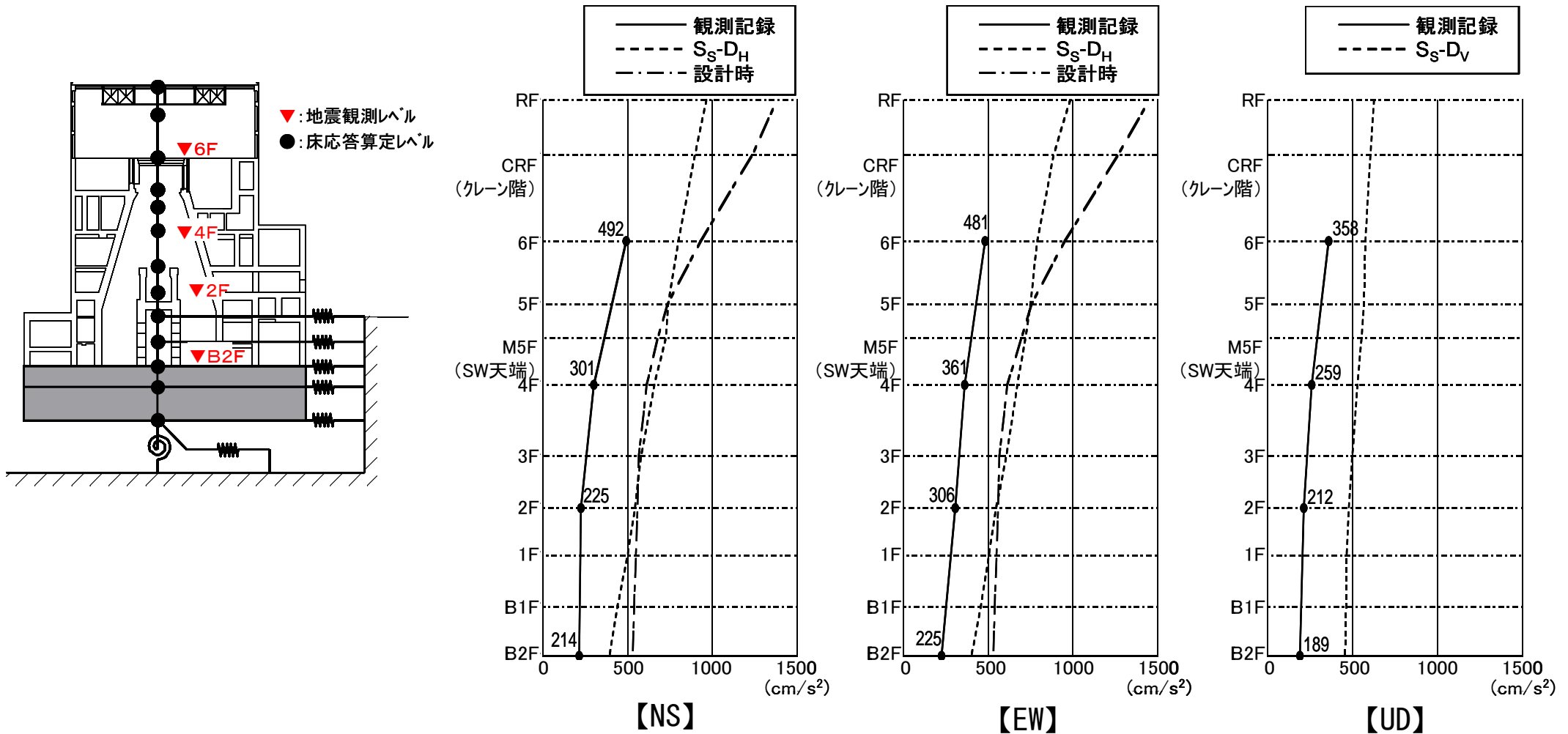
			地震観測記録			当初設計時		基準地震動S _s -D			
			NS	EW	UD	NS	EW	NS	EW	UD	
原子炉建屋	6階		RB04	492	481	358	932	951	799	789	575
	4階		RB03	301	361	259	612	612	658	672	528
	2階		RB02	225	306	212	559	559	544	546	478
	地下2階		RB01	214	225	189	520	520	393	400	456
	地下2階	北	RB11	204	217	169					
		東	RB12	197	209	176					
		南	RB13	209	220	181					
		西	RB14	211	218	180					

5. 地震観測記録による安全上重要な施設の評価について

原子炉建屋における観測記録と設計時及び耐震バックチェック時の最大応答加速度値の比較

※1：エルセントロ波やタフト波を180cm/s²に基準化した地震波で設計

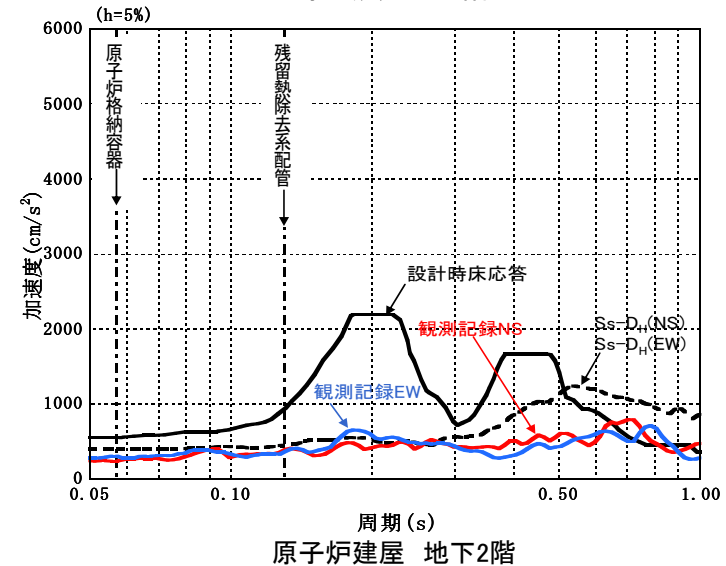
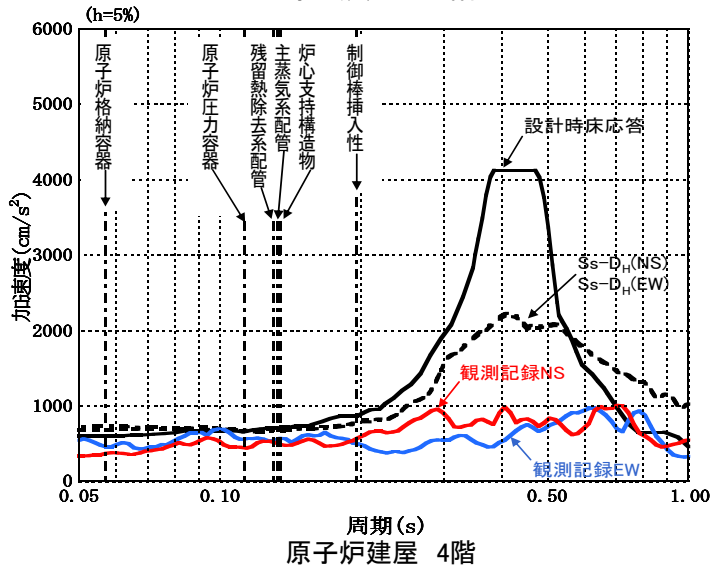
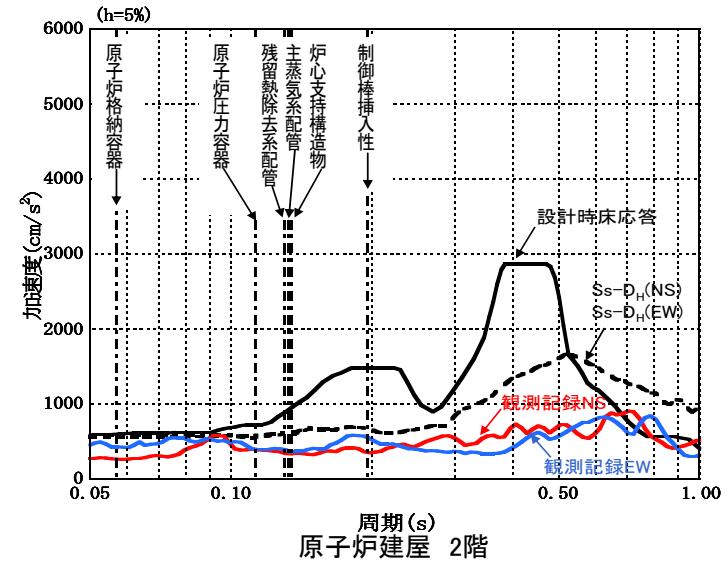
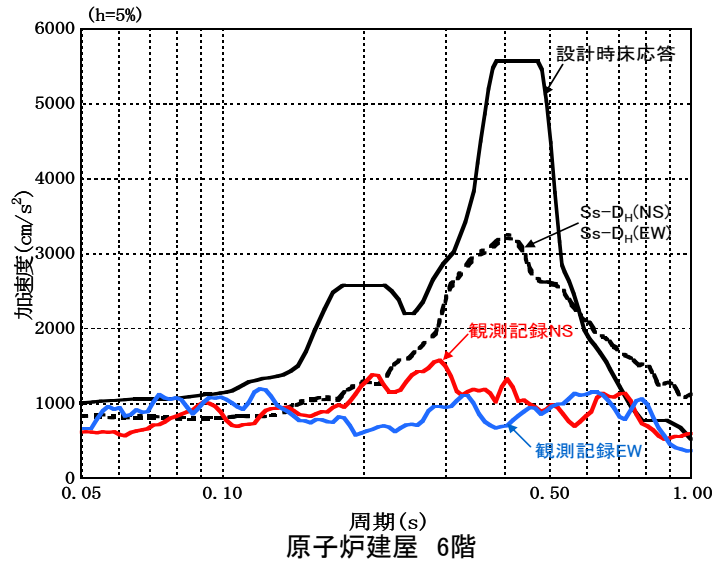
※2：新耐震指針の耐震バックチェックで策定(600cm/s²)



工認設計波※1及び基準地震動 S_S-D ※2による最大応答加速度を下回っていることを確認した。

5. 地震観測記録による安全上重要な施設の評価について

原子炉建屋における観測記録と設計時及び耐震バックチェック時の床応答スペクトルの比較



原子炉建屋における地震観測記録の床応答スペクトルは、地下2階～6階において一部の周期帯(約0.65秒～約0.9秒)で工認設計波による床応答スペクトル※を上回っているが、耐震設計上重要な機器・配管系のうち主要な設備の固有周期では、地震観測記録が工認設計波による床応答スペクトル以下であることを確認した。

※ 工認設計波の地震応答解析により得られた床応答スペクトルを機器・配管系設計用として拡幅

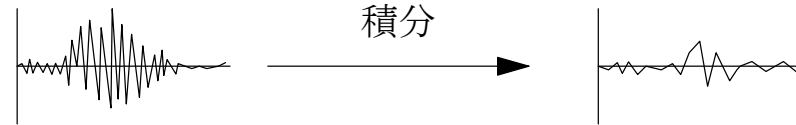
観測記録を用いた建屋応答評価の概要

(加速度波形)

(変位波形)

①観測点の加速度波形

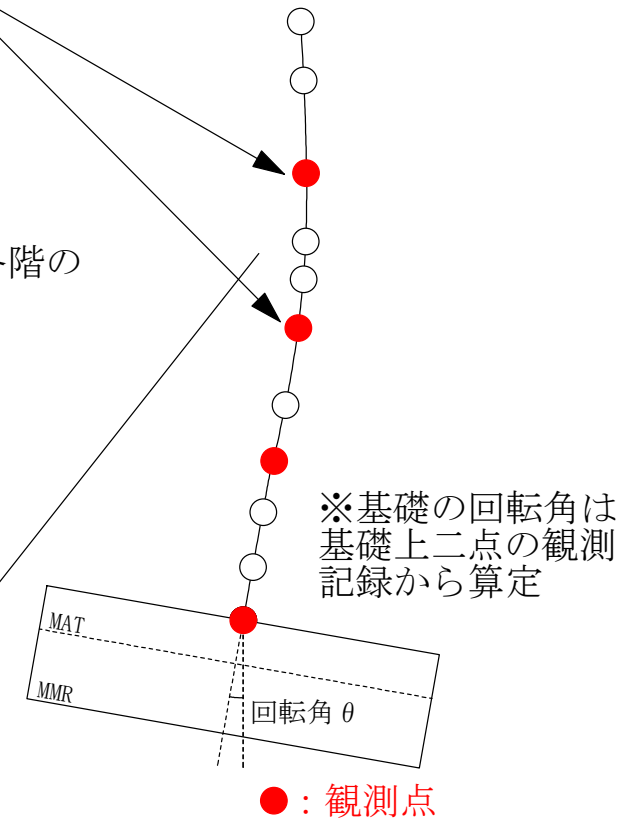
②観測点の変位波形



建屋の観測記録は、設計時及び基準地震動 S_s 応答に収まっており、床応答スペクトルにおいても概ね設計時及び基準地震動 S_s 応答に収まっているが、今回の地震による建屋の観測記録を用いて建屋応答を算出し、建屋健全性評価を実施した。

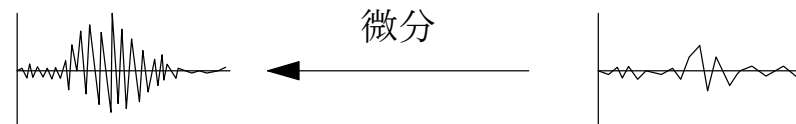
地震計設置階の加速度観測記録より変位波形を求め、その他の階の変位応答を補間により求めた。その際には基礎の回転角も考慮している。この変位波形より加速度波形を求め、質点に働く慣性力から部材のせん断力を算出した。このせん断力をQ- γ スケルトン曲線上にプロットしせん断歪みを算定している。

③補間により各階の応答を算定



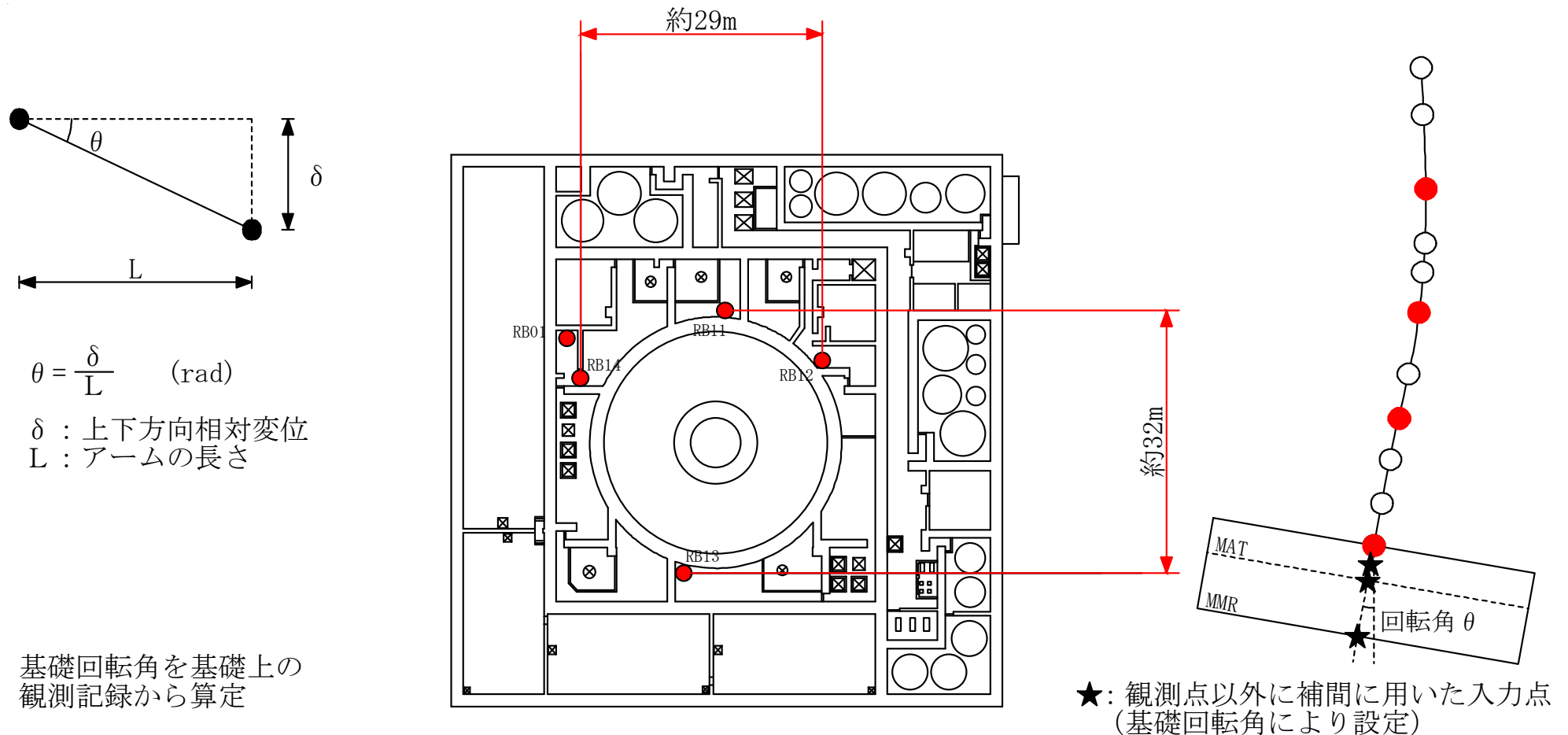
⑤各階の加速度波形

④各階の変位波形



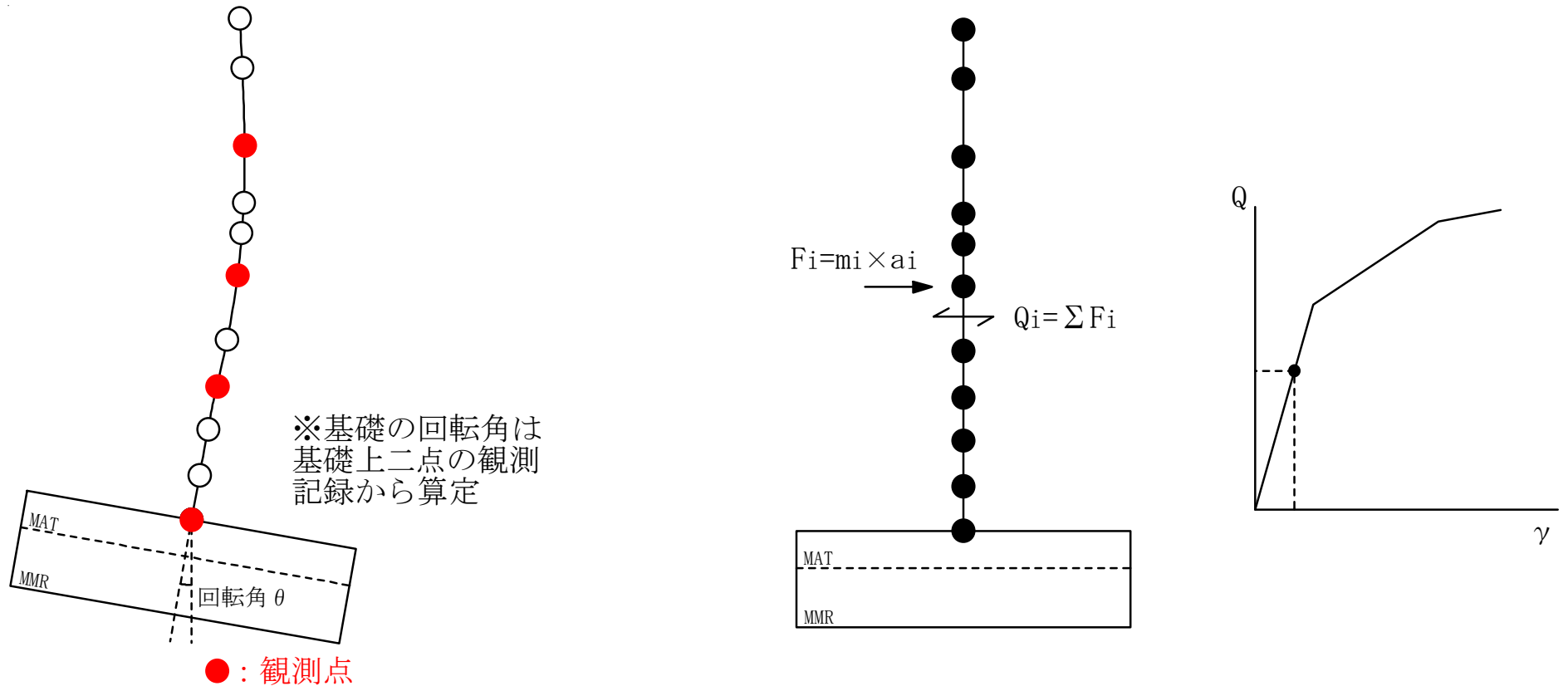
観測記録を用いた建屋応答評価(基礎の回転角の考慮の内容)

基礎版の部分的振動特性を解明し、設計の高度化に資する目的で設置された4台の地震計の観測記録より、基礎の回転角を算出している。



観測記録を用いた建屋応答評価(せん断歪みの算定方法)

各時刻毎の各階の加速度に質点質量を乗じて慣性力を算出し、求める部材より上部の慣性力を足し合せて各部材のせん断力を算出している。



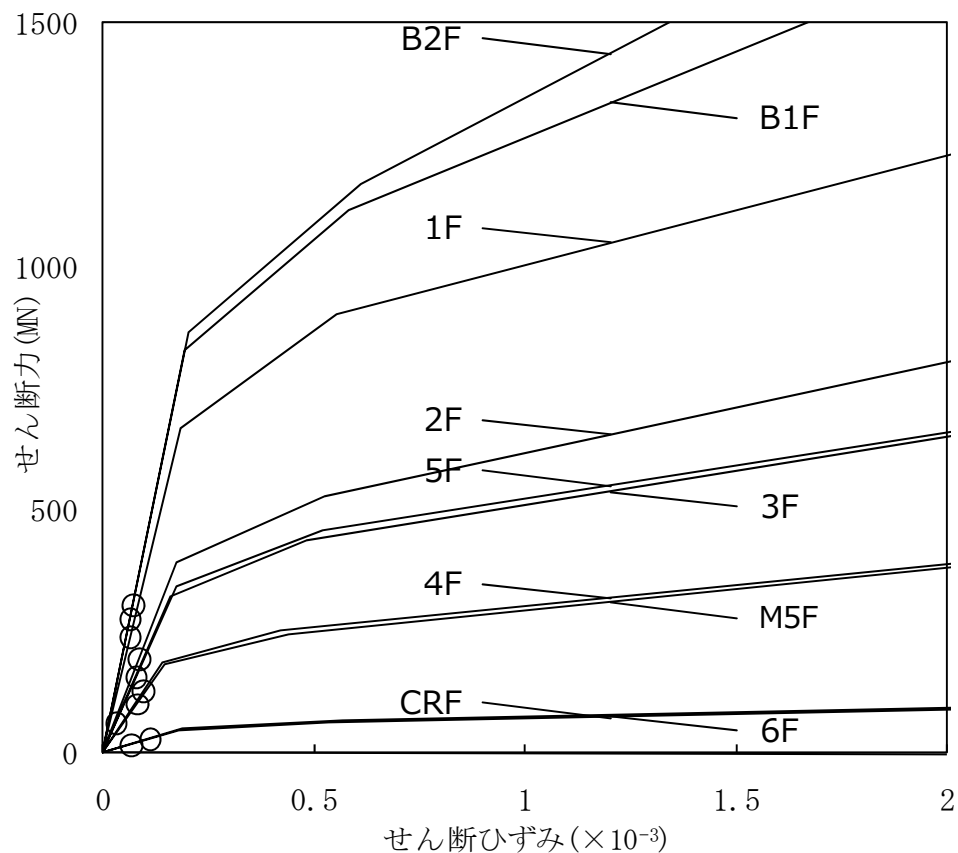
①観測記録より各階の
応答変位を求める

②変位波形を微分して
各階の加速度波形を
求める

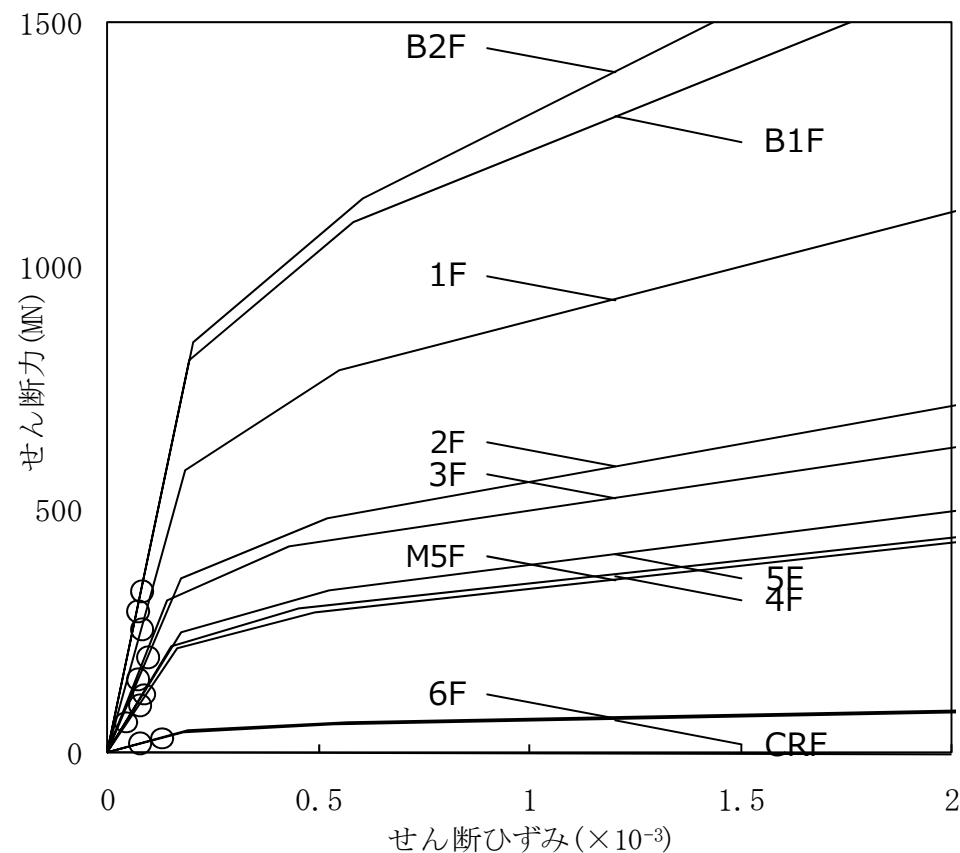
③質点に働く慣性力
より部材のせん断
力を求める

④Q- γ スケルトンよ
りせん断ひずみを
求める

観測記録を用いた建屋応答評価結果(せん断スケルトン上の最大応答値)



NS方向

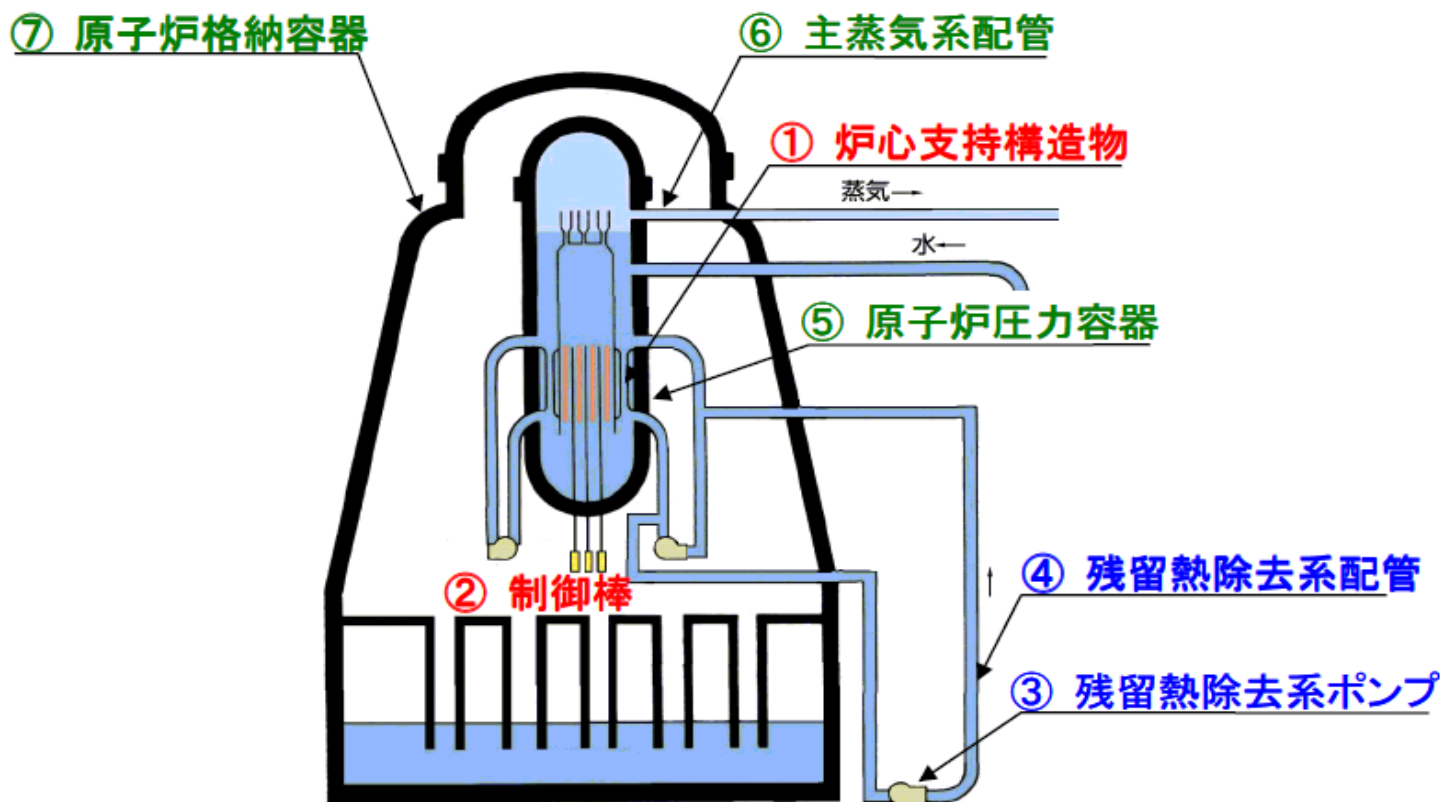


EW方向

各階の最大応答値はNS, EW方向ともに第一折れ点以下であり, 弾性範囲内の応答結果であった。なお、最大せん断ひずみは 0.127×10^{-3} (6階 EW方向)である。これより、今回の地震によっても原子炉建屋の機能が維持されていることが確認された。

安全上重要な機器・配管系の評価方針(評価対象設備)

評価対象施設は、原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する新耐震指針によるSクラスの7設備として、原子炉圧力容器、炉心支持構造物、主蒸気配管、残留熱除去系ポンプ、残留熱除去系配管、原子炉格納容器及び制御棒(挿入性)としている。



止める

- ①炉心支持構造物
- ②制御棒

冷やす

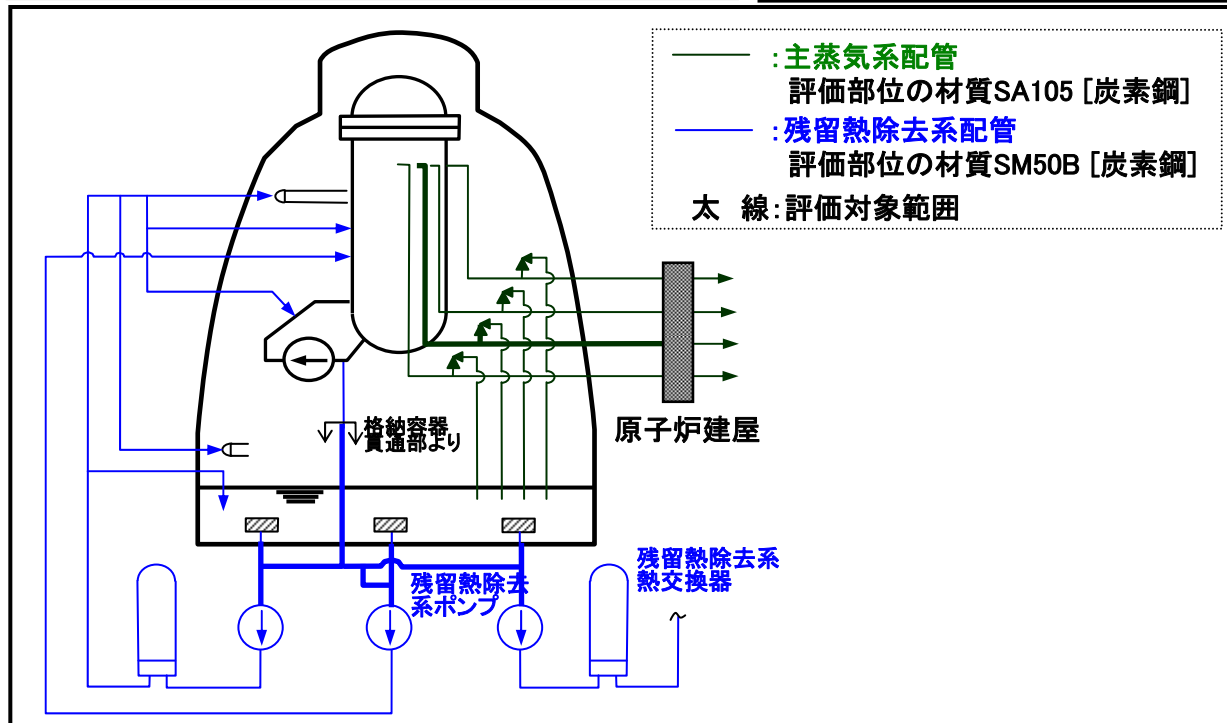
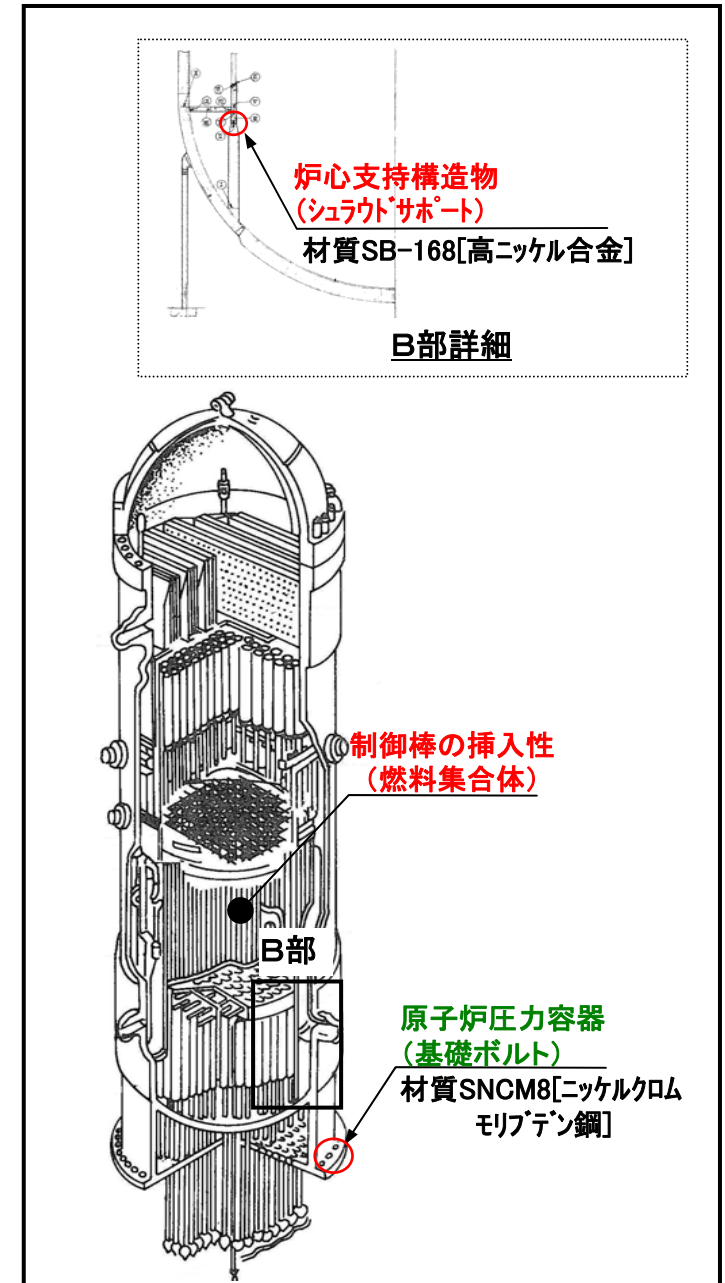
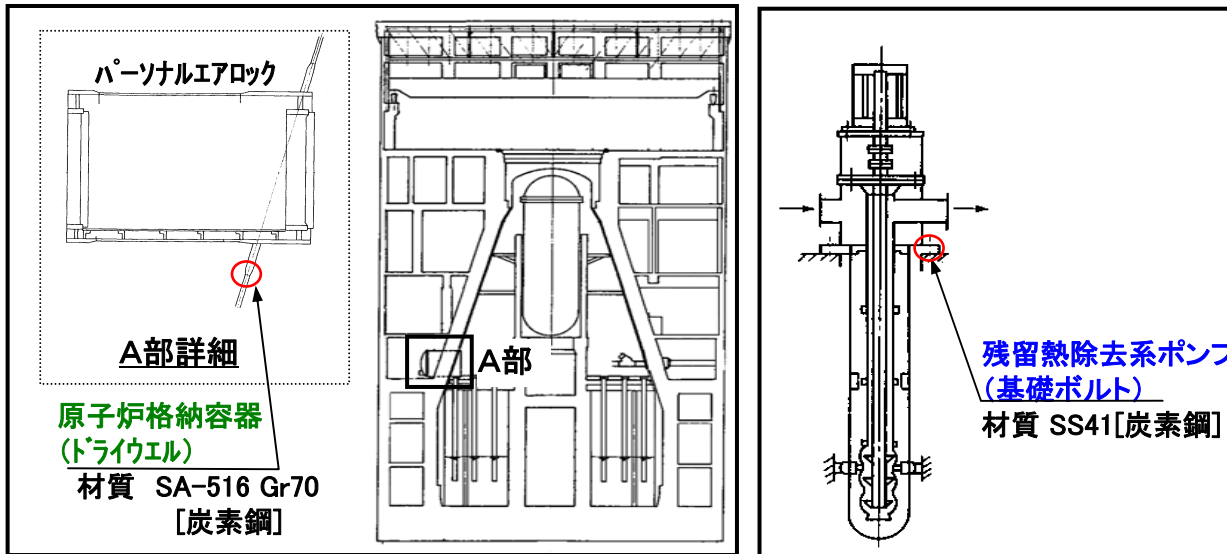
- ③残留熱除去系ポンプ
- ④残留熱除去系配管

閉じ込める

- ⑤原子炉圧力容器
- ⑥主蒸気系配管
- ⑦原子炉格納容器

5. 地震観測記録による安全上重要な施設の評価について

安全上重要な機器・配管系の評価方針(評価対象設備)



安全上重要な機器・配管系の評価方法(構造強度の評価方法)

構造強度に関する評価は、応答倍率法による評価，又は設計時と同等の評価手法を用いた評価(以下、「詳細評価」という。)により実施している。

○応答倍率法による評価

大型機器である原子炉格納容器，原子炉圧力容器，炉内構造物については，今回の地震による地震力(せん断力，モーメント及び軸力)と設計時における地震力との比を求め，設計時の応力に乘じることにより，発生値を算定し，評価基準値と比較している。

(評価対象設備として，炉心支持構造物のシュラウドサポート及び原子炉格納容器のドライウエルが該当する。)

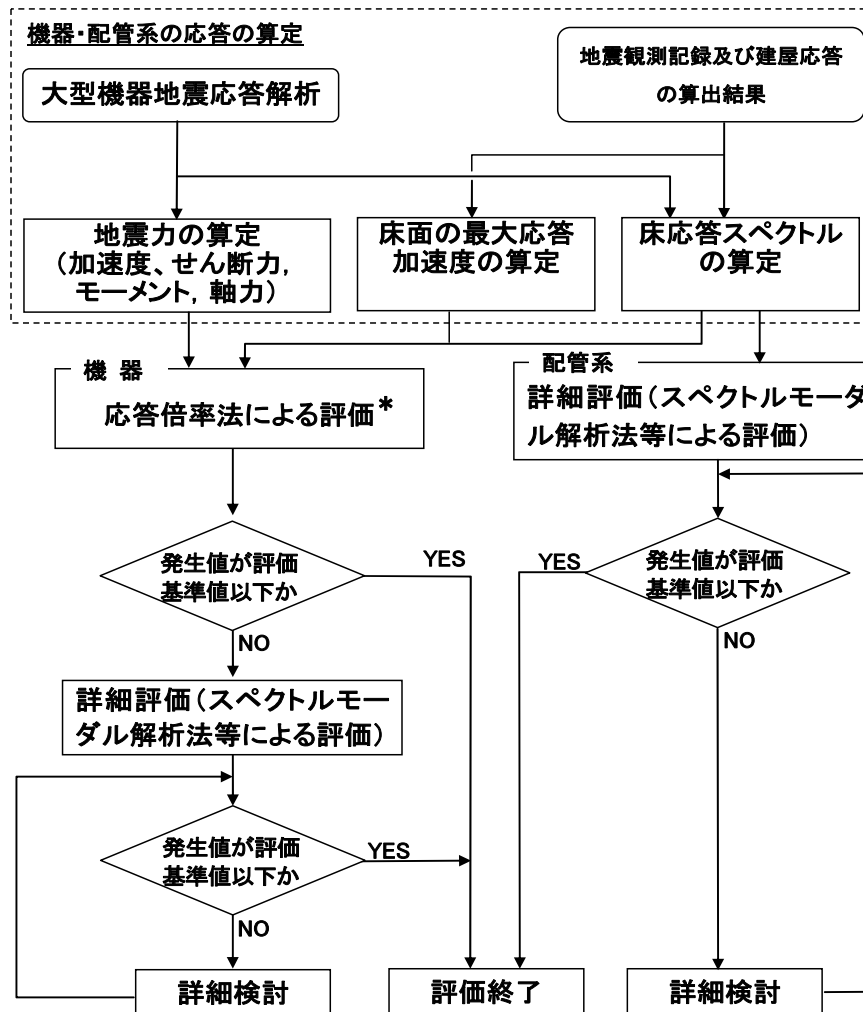
○詳細評価

配管系は，スペクトルモーダル解析法等による詳細評価を行い，発生値を算定し，評価基準値と比較している。

(評価対象設備として，主蒸気系配管及び残留熱除去系配管が該当する。)

また，比較的容易に詳細評価できる場合には，応答倍率法による評価を実施しないで詳細評価を実施している。

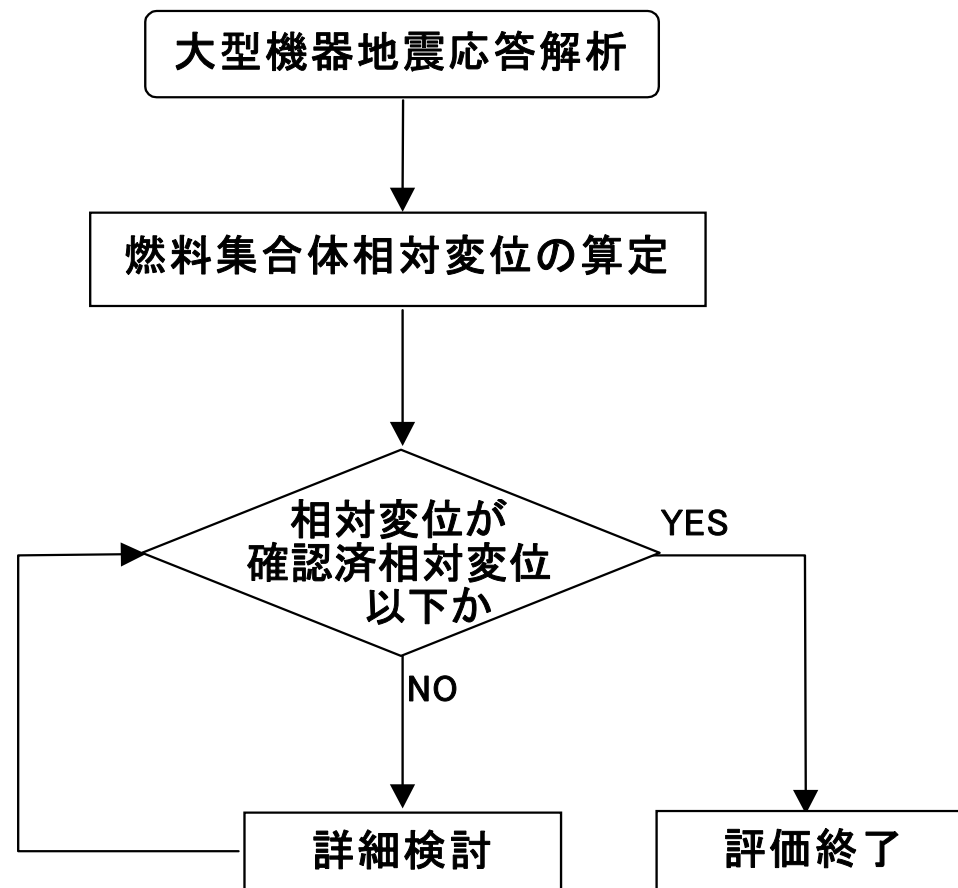
(評価対象設備として，原子炉圧力容器の基礎ボルト及び残留熱除去系ポンプの基礎ボルトが該当する。)



* 応答倍率法を実施しないで，詳細評価を実施する場合がある。

安全上重要な機器・配管系の評価方法(動的機能維持の評価方法)

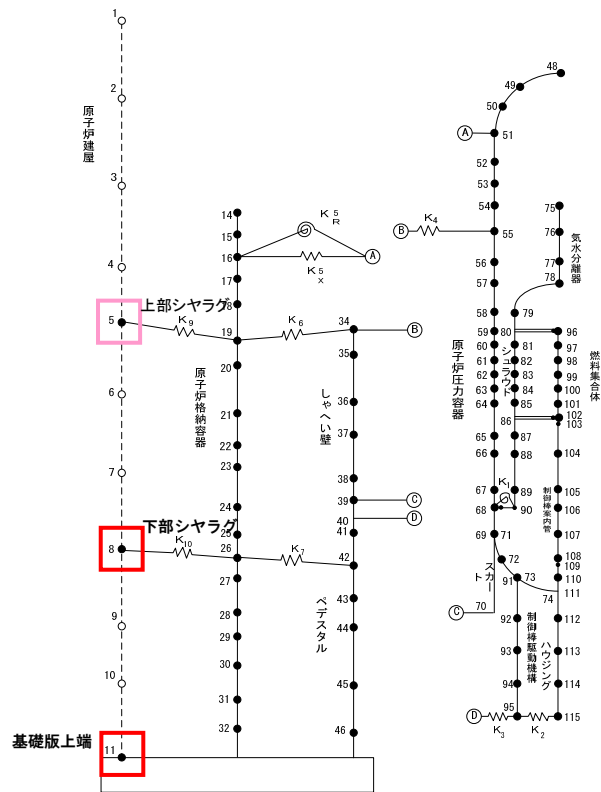
地震時の制御棒挿入については、大型機器地震応答解析結果から燃料集合体の相対変位を求め、試験で挿入が確認された評価基準値と比較している。



大型機器の地震応答解析(大型機器の地震応答解析モデル)

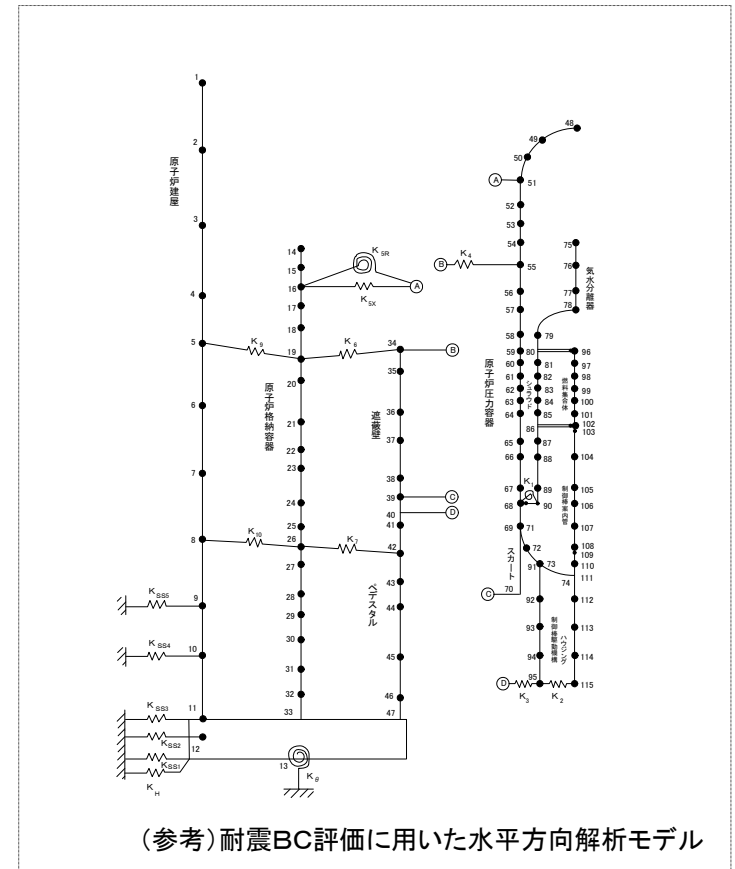
原子炉建屋内の大型機器(原子炉格納容器, 原子炉圧力容器, 炉内構造物等)の地震応答解析は, 建屋と大型機器とをモデル(大型機器地震応答解析モデル)化して行っている。

大型機器地震応答解析モデルによる地震応答解析は, 地震観測記録を用いて算定した建屋応答を入力とする時刻歴応答解析にて実施している。



- : 観測記録を入力
- : 補間した建屋応答を入力

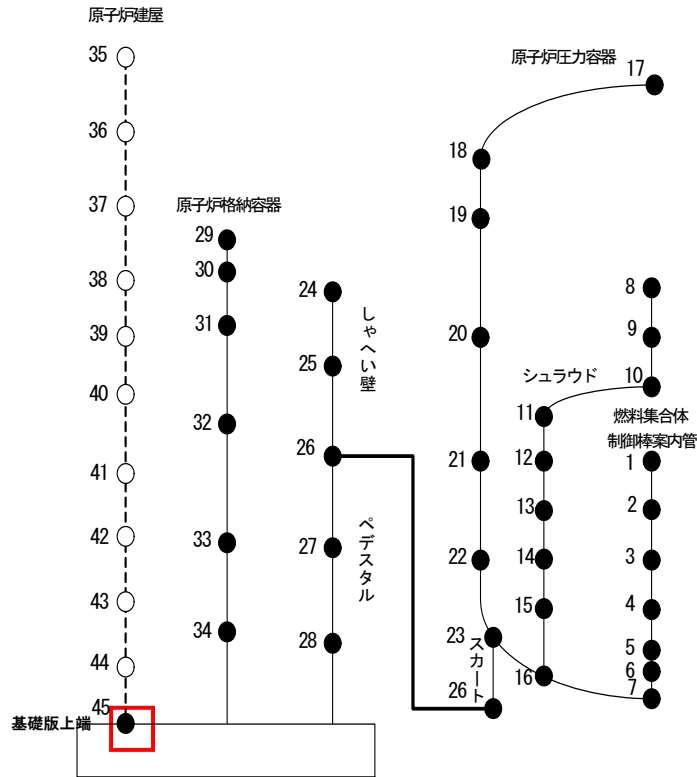
水平方向解析モデルへの建屋応答の入力は, 原子炉建屋からの応答が伝達される上部シヤラグ, 下部シヤラグ及び基礎版から行うことにより, 大型機器各部位の応答を算出している。



(参考)耐震BC評価に用いた水平方向解析モデル

大型機器地震応答解析モデル(水平方向)

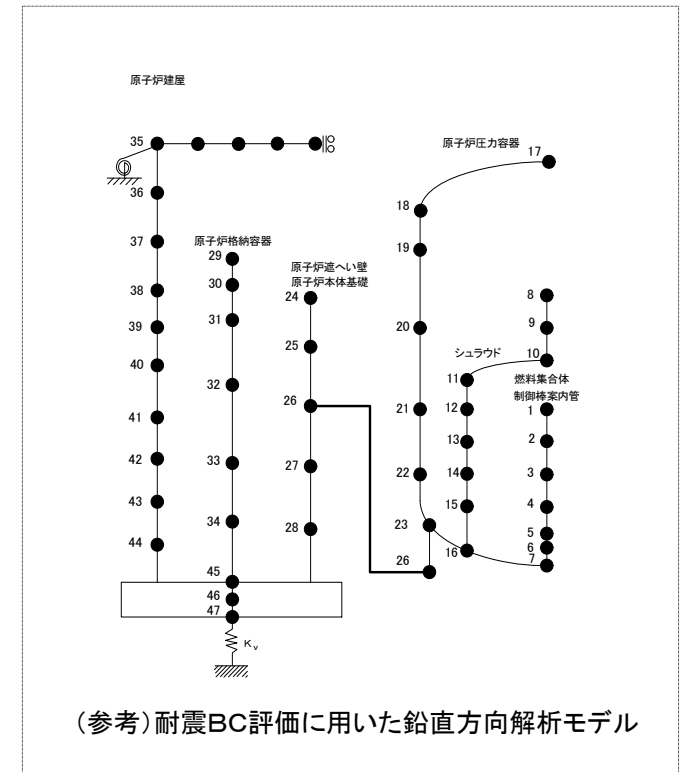
大型機器の地震応答解析(大型機器の地震応答解析モデル)



□ : 観測記録の入力

鉛直方向解析モデルへ
建屋応答の入力は原子
炉建屋からの応答が伝達
される基礎版から行うこと
により, 大型機器各部位
の応答を算出している。

大型機器地震応答解析モデル(鉛直方向)



地震応答解析(応答スペクトル, 減衰定数)

○床応答スペクトル

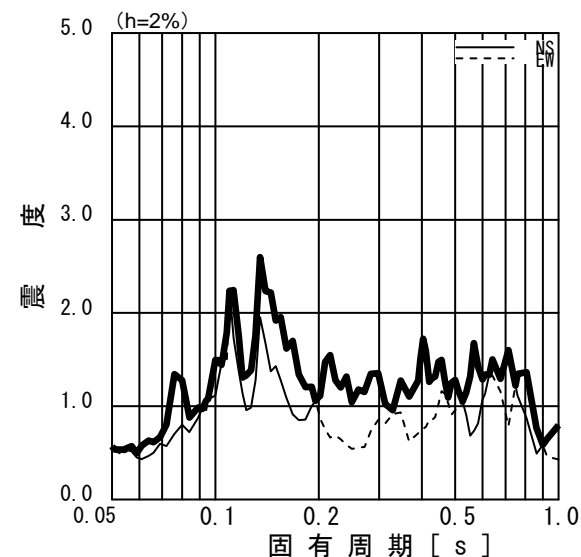
床応答スペクトルは, 建屋の応答, または大型機器地震応答解析モデルによる地震応答解析で得られた床応答時刻歴を用いて水平方向及び鉛直方向について算定している。

なお設計時の床応答スペクトルの作成においては, 地盤や建屋の物性等のばらつきが床応答に与える影響を考慮して, 周期軸方向に±10%の拡幅が行われるが, 本評価では地震観測記録に基づく応答を用いるため拡幅は行われていない。

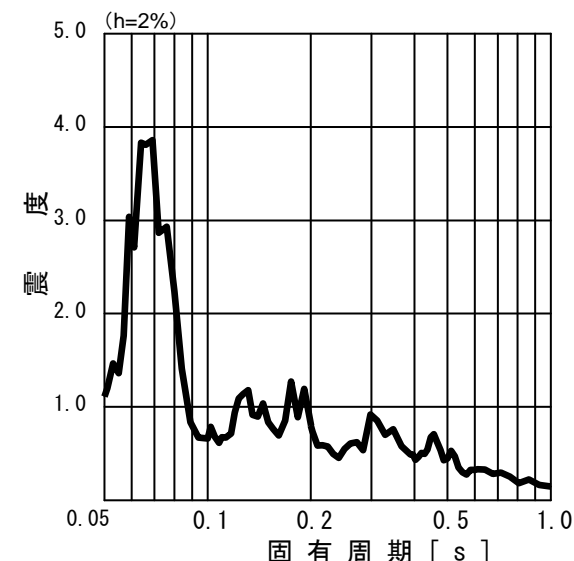
○減衰定数

減衰定数は, 原則として「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」に規定された値とし, 試験等で妥当性が確認された値も評価に用いている。

対象設備	減衰定数(%)	
	水平方向	鉛直方向
溶接構造物(原子炉压力容器等)	1.0	1.0
燃料集合体	7.0	1.0
配管系	0.5~3.0	0.5~3.0



応答スペクトル(水平方向)
—主蒸気系配管用—



応答スペクトル(鉛直方向)
—主蒸気系配管用—

表1 構造強度の評価結果

機器・配管系の評価結果のまとめ

○構造強度評価

今回の地震による評価対象設備の発生値は、いずれも評価基準値(Ⅲ_AS)以下であることを確認している。

評価対象設備		評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	評価基準値 Ⅲ _A S (MPa)	評価方法
止める	炉心支持構造物	シュラウドサポート	膜応力	171	246	応答倍率法
冷やす	残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	せん断応力	4	118	詳細評価
	残留熱除去系配管	配管	1次応力	191	225	詳細評価
閉じ込める	原子炉圧力容器	基礎ボルト	引張応力	9	499	詳細評価
	主蒸気系配管	配管	1次応力	175	258	詳細評価
	原子炉格納容器	ドライウエル	1次応力	75	344	応答倍率法

○動的機能維持評価(制御棒挿入性)

地震時の制御棒挿入性は、地震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であることを確認している。

なお今回の地震時において制御棒の挿入は確認されている。

表2 動的機能維持評価(制御棒挿入性)

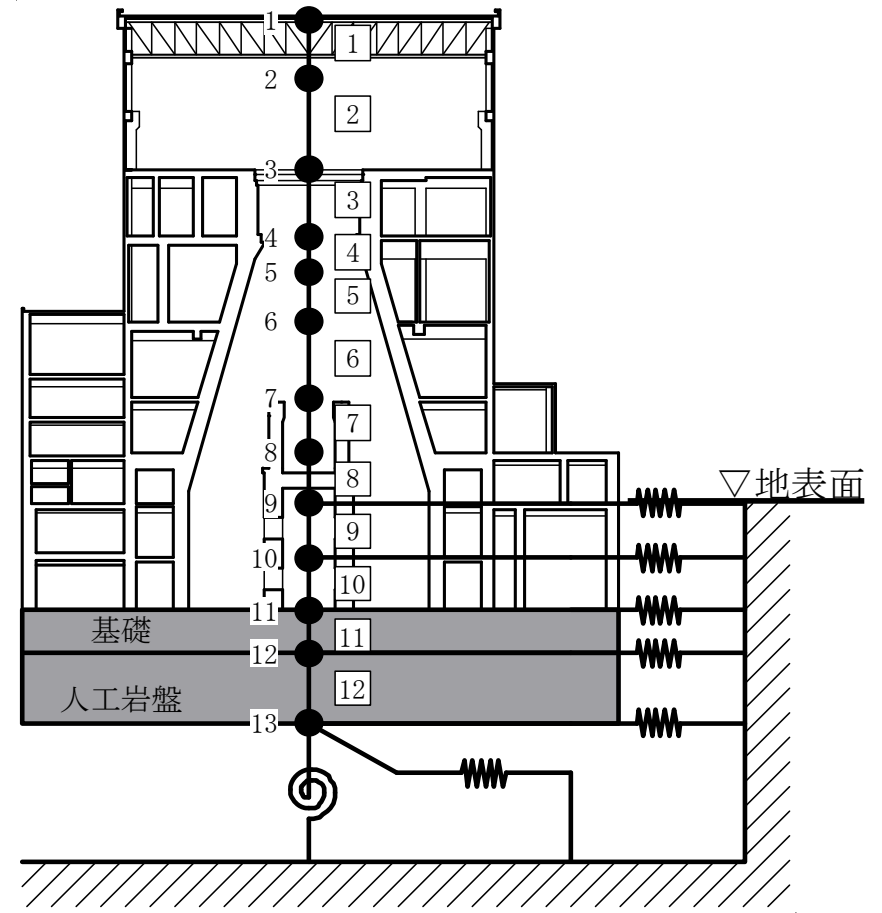
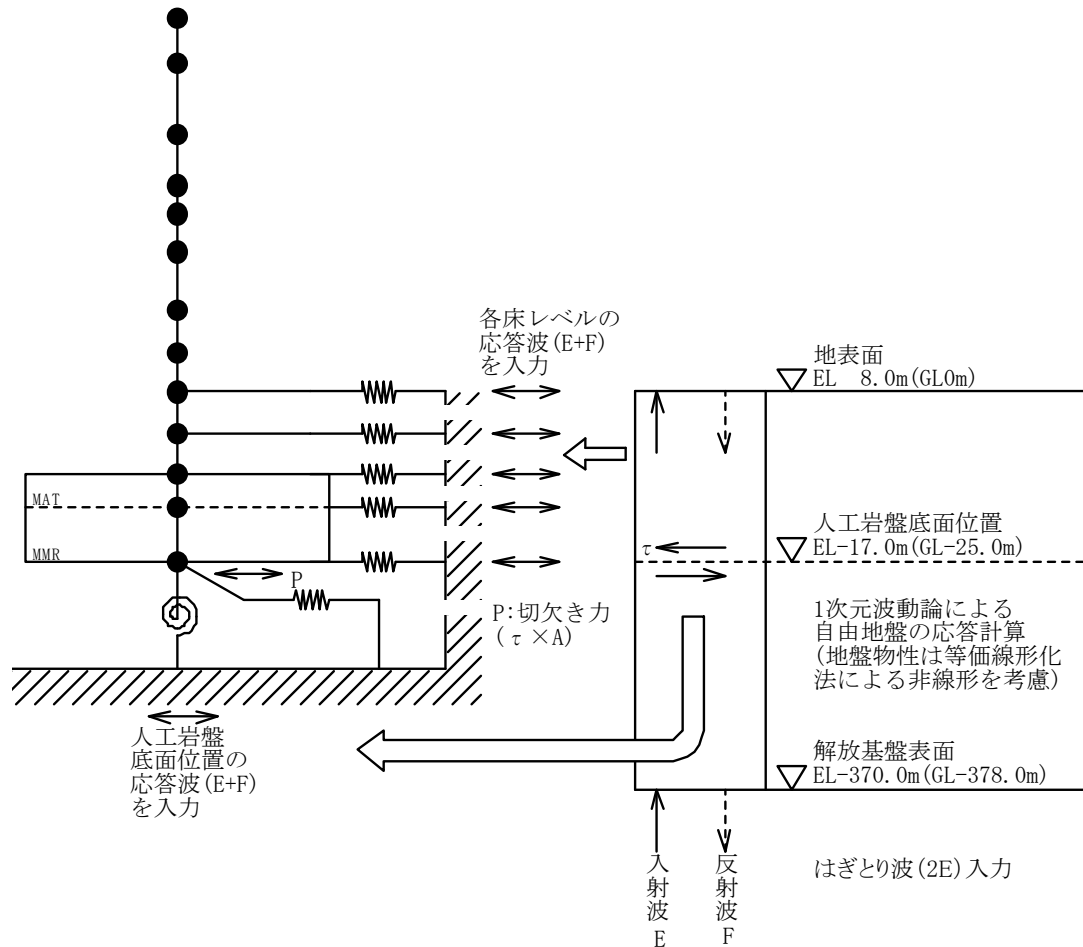
評価対象設備		地震による燃料集合体相対変位 (mm)	評価基準値 (mm)	評価方法
止める	制御棒(地震時挿入性)	8.6	40	詳細評価



(参考)はぎとり波を用いた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概要

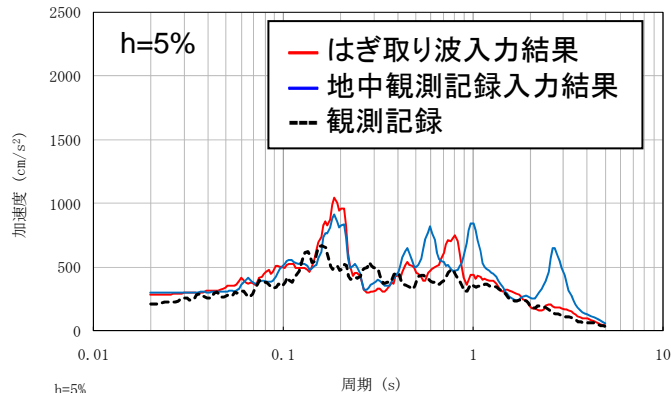
はぎとり波を解放基盤表面に2Eとして定義してシミュレーション解析を行い、地中観測記録入力結果との比較を行った。



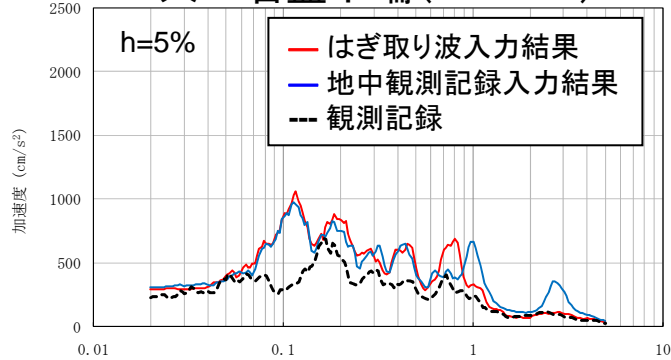
バックチェックモデルを用いたシミュレーション解析

原子炉建屋の地震応答解析モデル

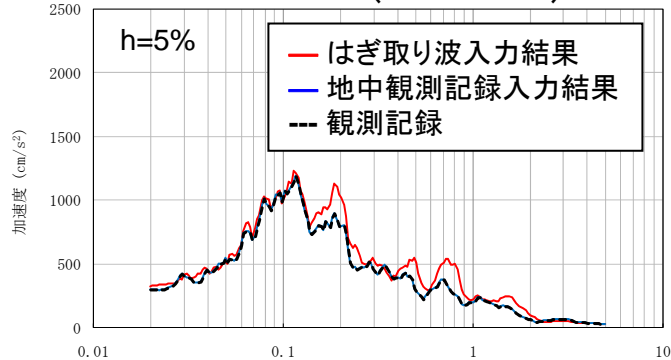
シミュレーション解析結果(地中加速度-NS方向)



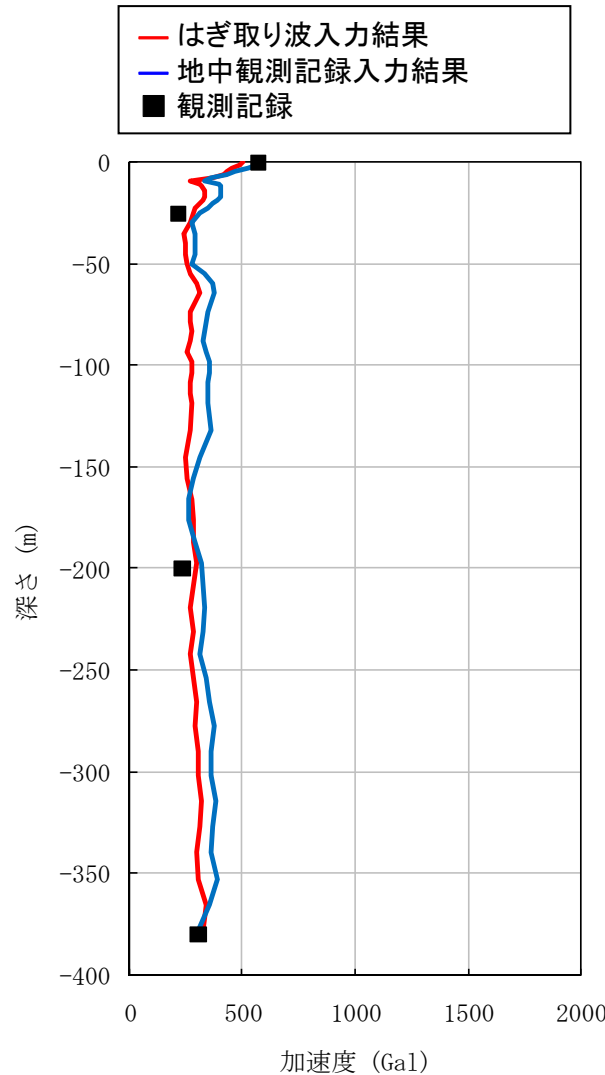
人工岩盤下端(EL-17m)



G.L.-200m(EL-192m)



解放基盤表面(EL-370m)

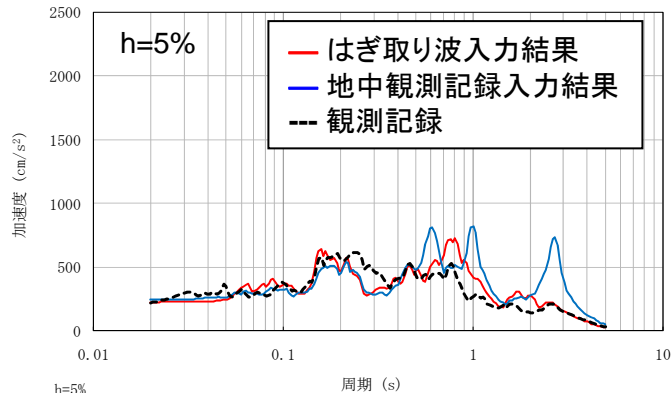


シミュレーション解析結果

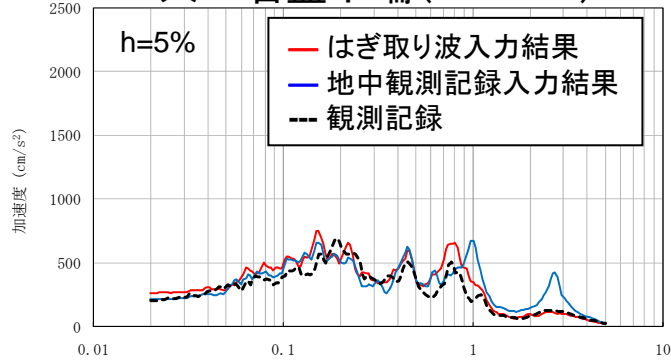
深さ m	入力：はぎ取り波NS		入力：地中観測記録NS	
	有効ひずみ γ_{eff} (%)	剛性低下率 G/G_0	有効ひずみ γ_{eff} (%)	剛性低下率 G/G_0
0.00				
-4.80	0.021	0.81	0.025	0.79
-6.00	0.035	0.78	0.041	0.74
-11.30	0.054	0.68	0.068	0.62
-22.60	0.015	0.72	0.020	0.68
-45.20	0.027	0.89	0.038	0.86
-68.80	0.031	0.88	0.042	0.85
-93.20	0.035	0.87	0.047	0.84
-118.70	0.039	0.86	0.054	0.82
-145.10	0.035	0.87	0.058	0.81
-165.60	0.034	0.87	0.061	0.81
-186.70	0.032	0.88	0.059	0.81
-208.40	0.032	0.88	0.053	0.82
-230.80	0.032	0.88	0.048	0.84
-253.80	0.031	0.88	0.047	0.84
-277.40	0.033	0.87	0.044	0.84
-301.80	0.033	0.87	0.043	0.85
-326.90	0.030	0.88	0.046	0.84
-352.80	0.027	0.89	0.050	0.83
-378.00	0.025	0.89	0.049	0.83
	-	-	-	-

はぎとり波入力の結果は、観測記録を地中波として入力した結果と比較し、0.6秒、1秒及び3秒付近のピークが低減し、より観測記録に近づいている。

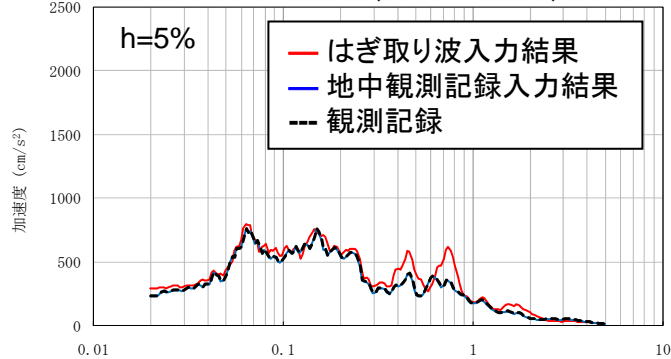
シミュレーション解析結果(地中加速度-EW方向)



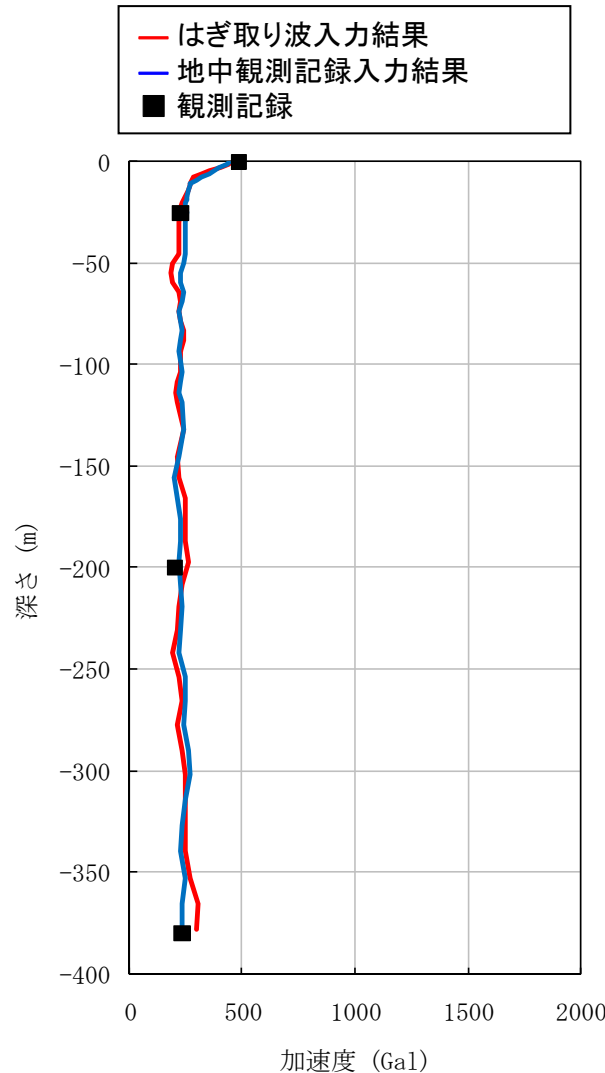
人工岩盤下端(EL-17m)



G.L.-200m(EL-192m)



解放基盤表面(EL-370m)



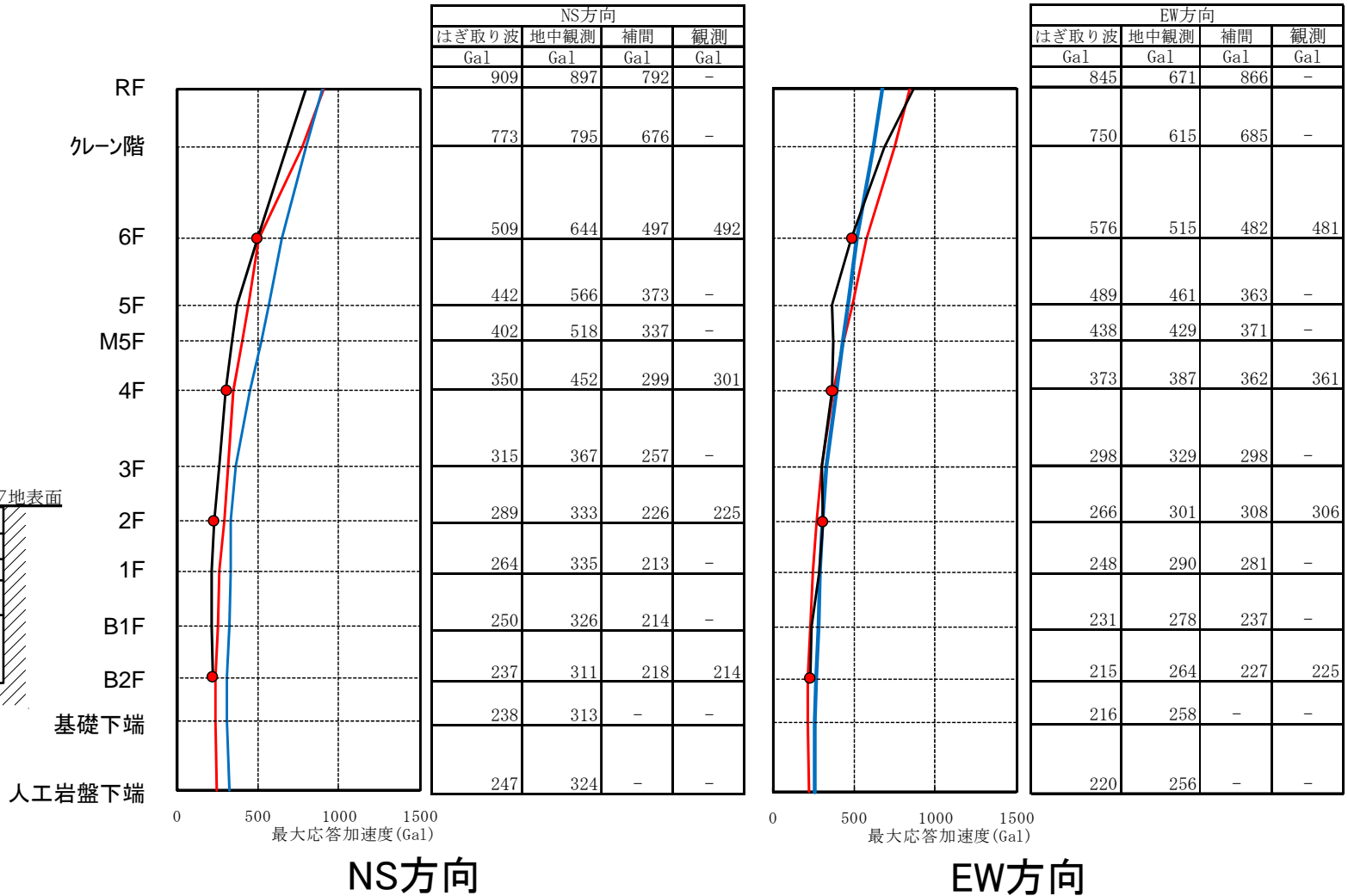
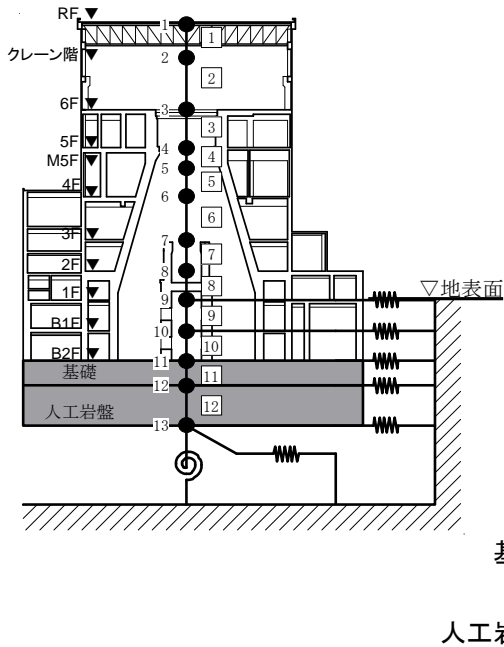
シミュレーション解析結果

深さ m	入力：はざとり波EW		入力：地中観測記録EW	
	有効ひずみ γ_{eff} (%)	剛性低下率 G/G_0	有効ひずみ γ_{eff} (%)	剛性低下率 G/G_0
0.00				
-4.80	0.019	0.83	0.019	0.83
-6.00	0.031	0.80	0.030	0.81
-11.30	0.047	0.71	0.047	0.71
-22.60	0.015	0.72	0.017	0.71
-45.20	0.027	0.89	0.033	0.87
-68.80	0.032	0.88	0.043	0.85
-93.20	0.032	0.88	0.048	0.84
-118.70	0.028	0.89	0.049	0.83
-145.10	0.025	0.89	0.047	0.84
-165.60	0.026	0.89	0.045	0.84
-186.70	0.027	0.89	0.045	0.84
-208.40	0.027	0.89	0.042	0.85
-230.80	0.028	0.89	0.041	0.85
-253.80	0.027	0.89	0.039	0.86
-277.40	0.027	0.89	0.038	0.86
-301.80	0.028	0.89	0.040	0.85
-326.90	0.027	0.89	0.042	0.85
-352.80	0.024	0.90	0.042	0.85
-378.00	0.021	0.91	0.040	0.85
	-	-	-	-

はざとり波入力の結果は、観測記録を地中波として入力した結果と比較し、0.6秒、1秒及び3秒付近のピークが低減し、より観測記録に近づいている。

シミュレーション解析結果(建屋最大応答加速度)

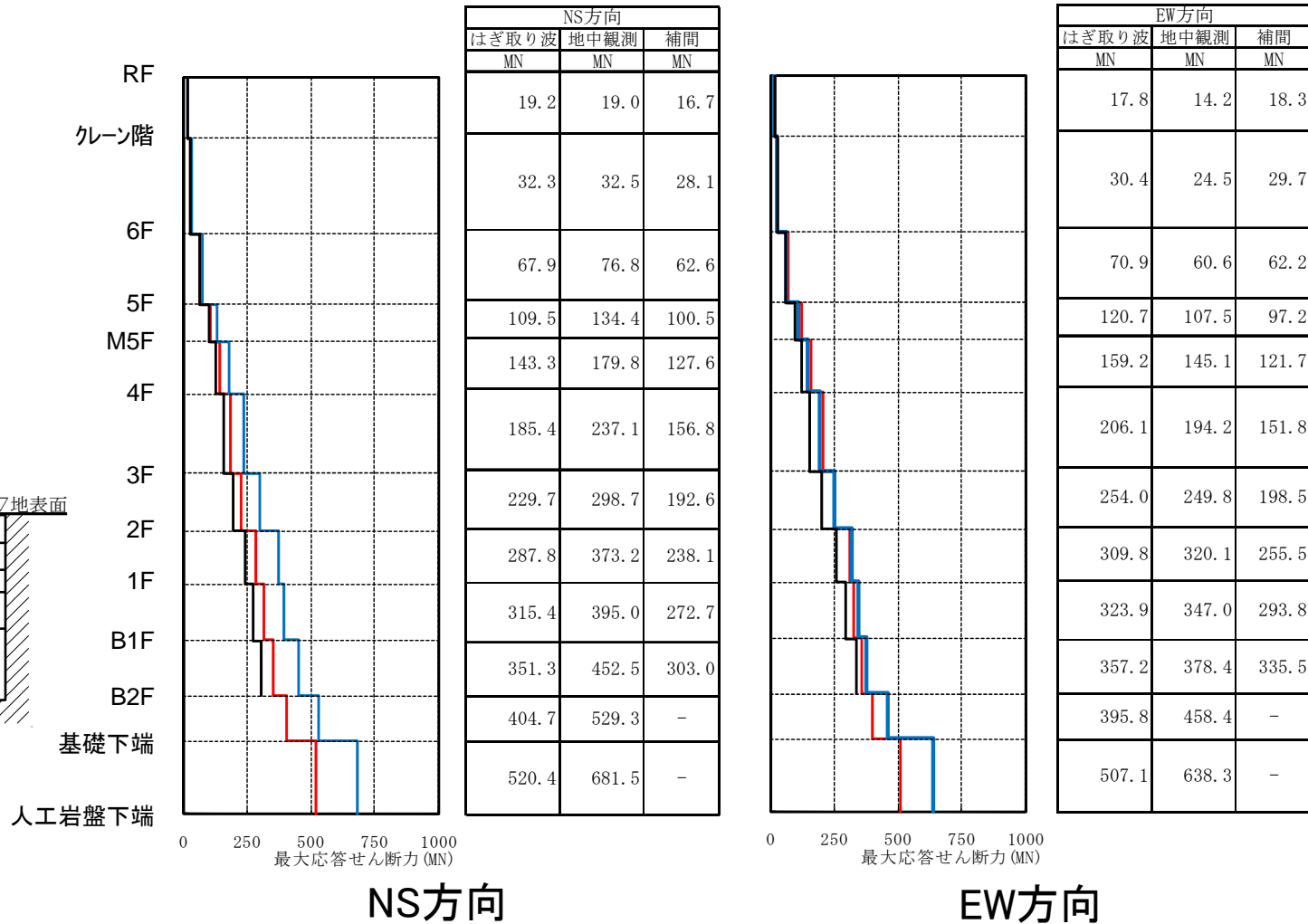
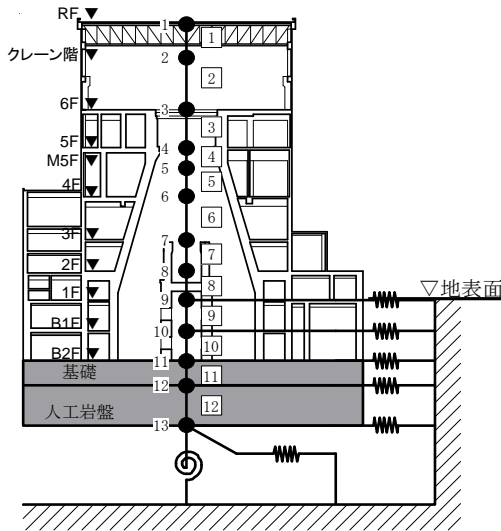
- 図中凡例
- はぎ取り波入力結果
 - 地中観測記録入力結果
 - 補間による建屋応答評価結果
 - 観測記録



はぎとり波入力の結果は、地中観測記録を入力した結果と比較して、観測記録との整合性が向上している。

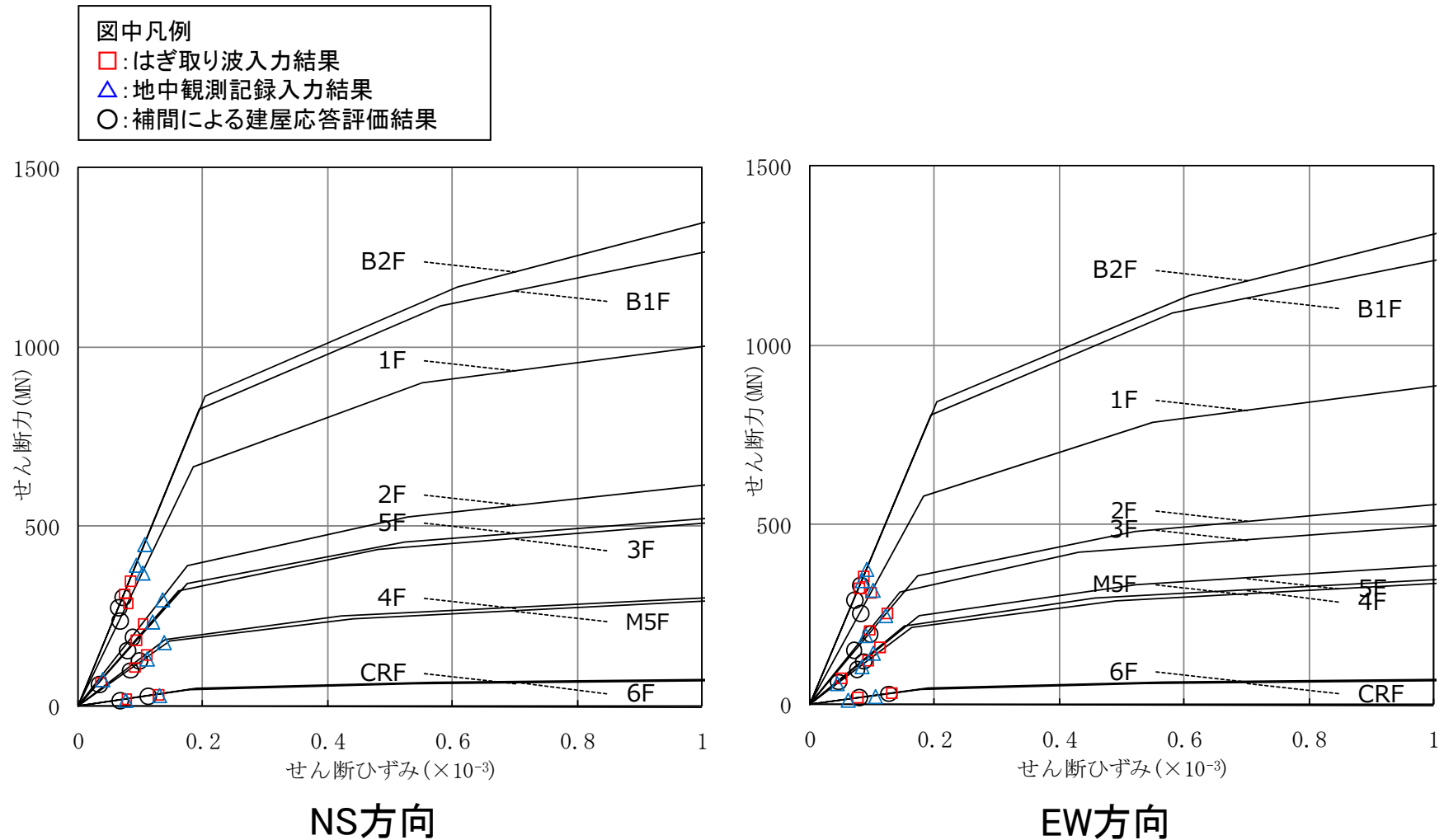
シミュレーション解析結果(建屋最大応答せん断力)

- 図中凡例
- はざとり波入力結果
 - 地中観測記録入力結果
 - 補間による建屋応答評価結果



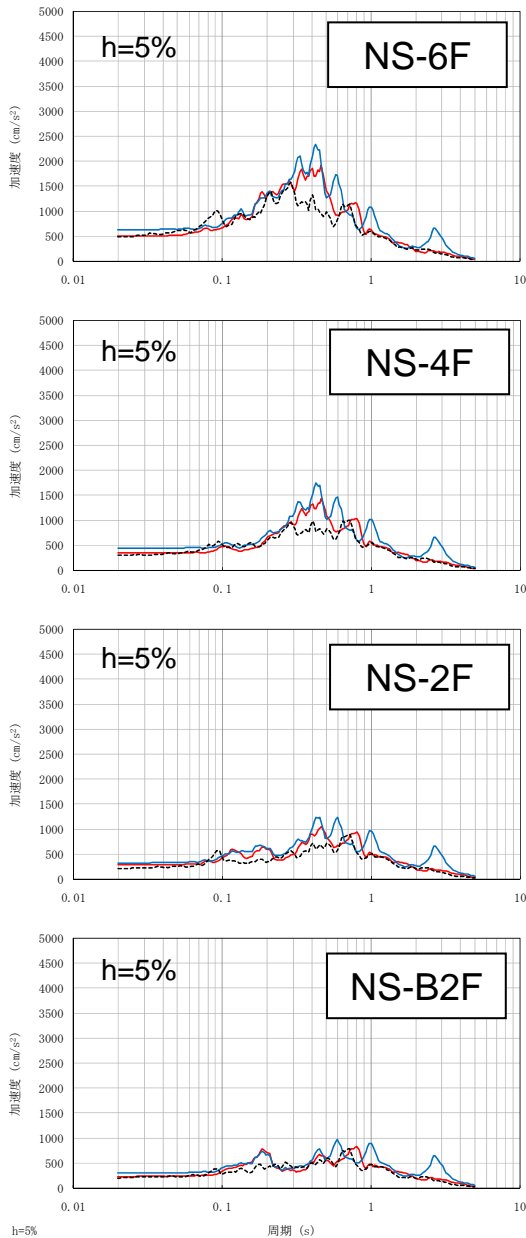
はざとり波入力の応答は、地中観測記録を入力した結果と比較して、NS方向は小さくなっており、EW方向はほぼ同等の結果となっている。

シミュレーション解析結果(せん断スケルトン上の最大応答値:Q- γ)



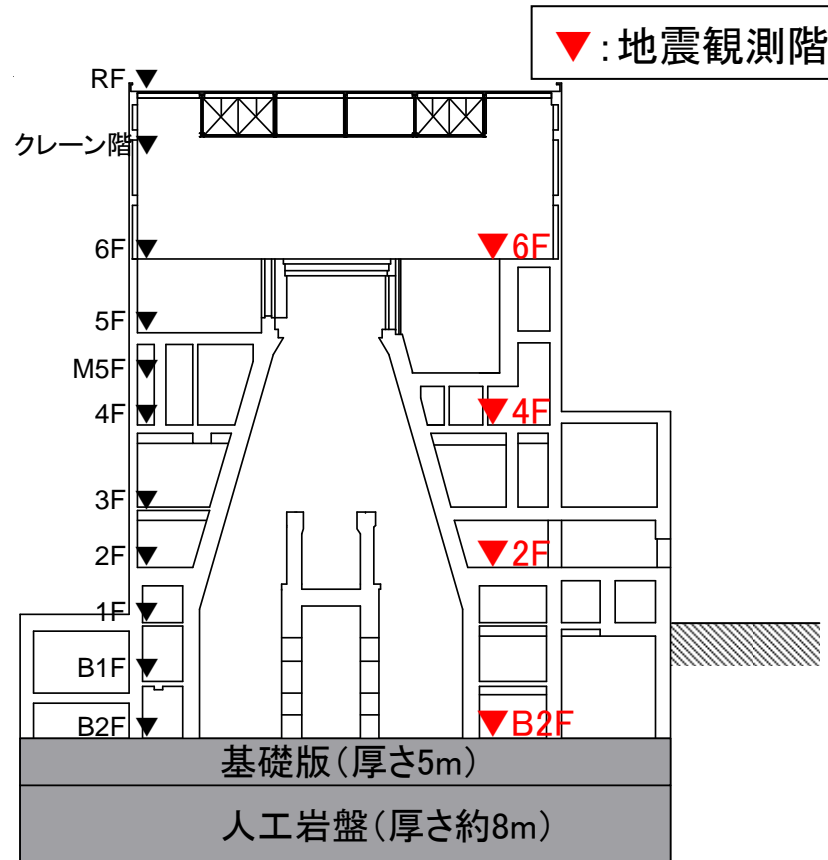
はぎとり波によるシミュレーション結果は、せん断スケルトン上において弾性範囲内である。

シミュレーション解析結果(床応答スペクトル)

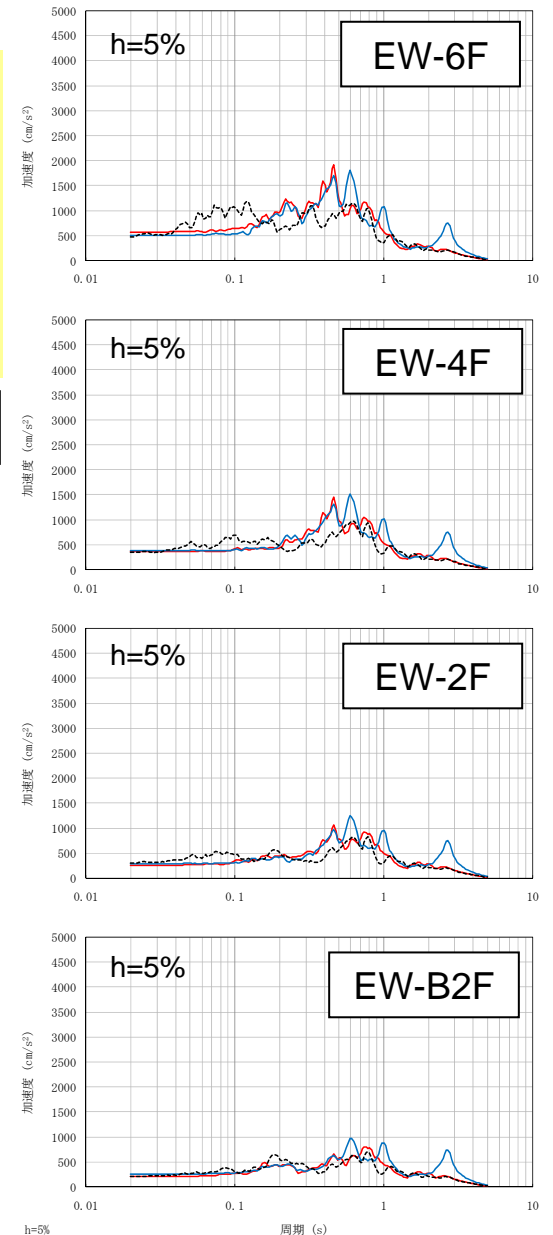


地震観測階における観測記録とシミュレーション結果の床応答スペクトルの比較を示す。
 はざとり波入力の結果は、観測記録を地中波として入力した結果と比較し、0.6秒、1秒及び3秒付近のピークが低減し、より観測記録に近づいている。

○

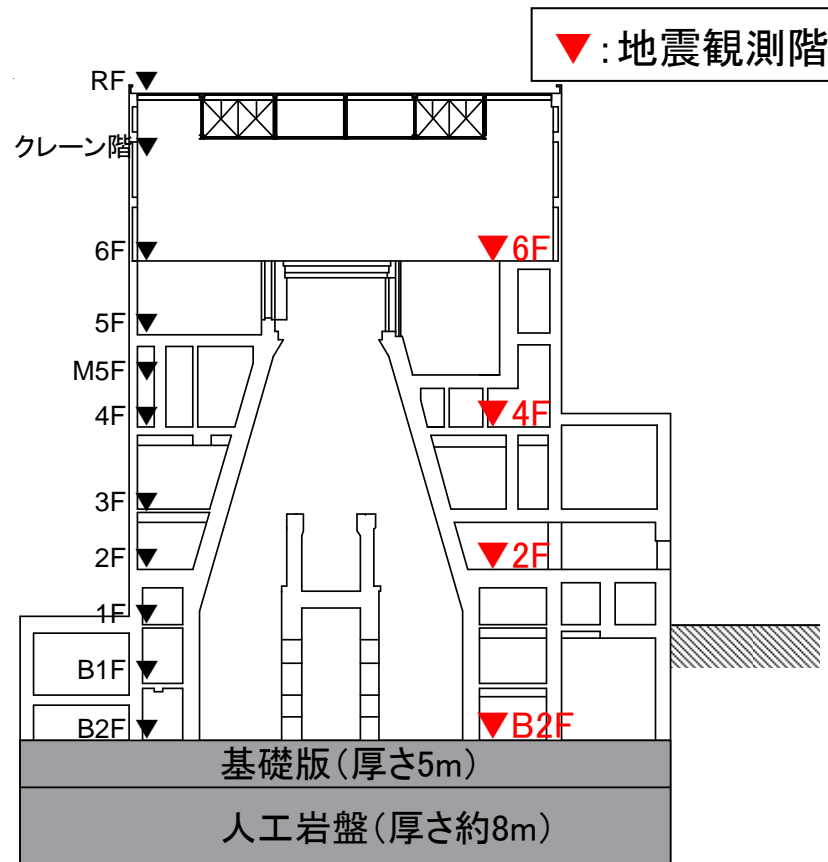
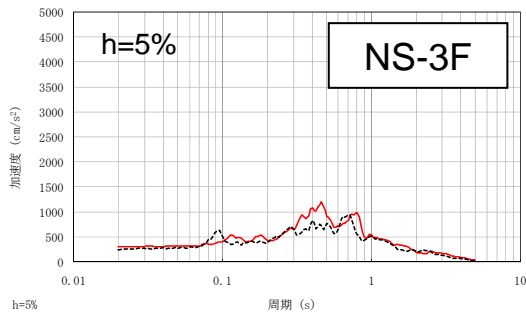
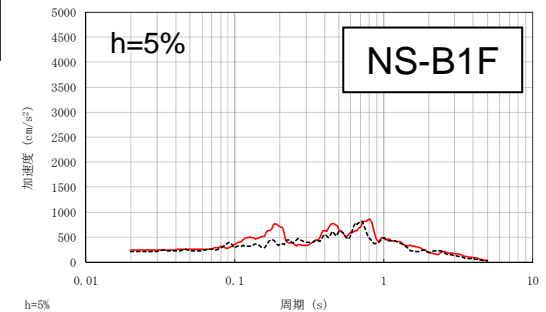
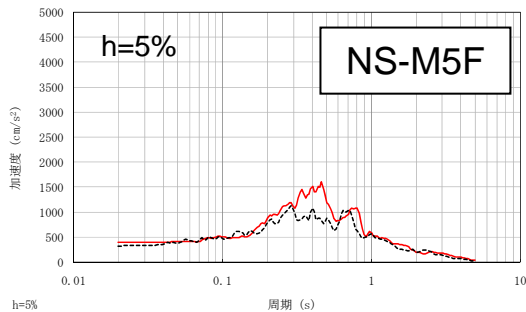
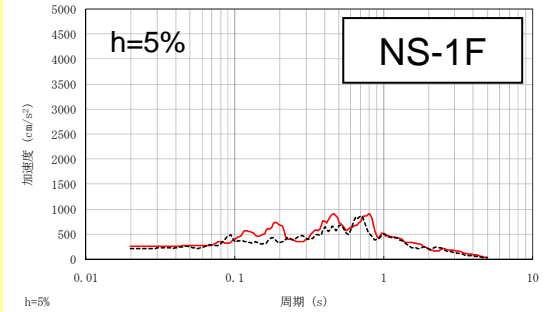
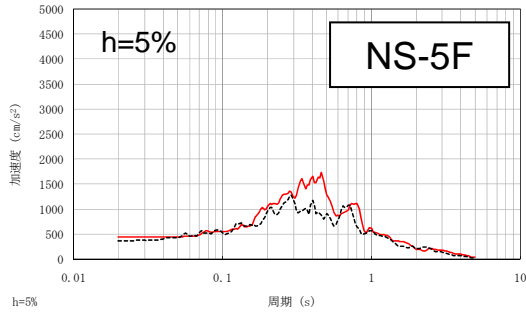


— はざとり波入力結果
 — 地中観測記録入力結果
 - - - 観測記録



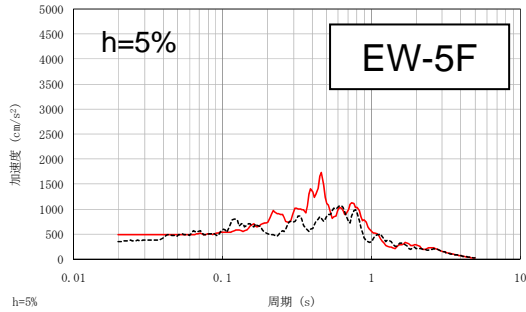
解析結果と補間による評価の比較(床応答スペクトル-NS方向)

地震観測階以外におけるはざ取り波によるシミュレーション結果と、補間による評価結果の床応答スペクトルの比較を示す。
NS方向のシミュレーション結果は0.5秒付近で補間結果に比べ若干大きいですが、整合性は良い結果となっている。

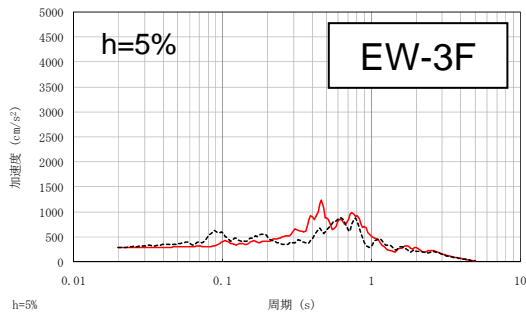
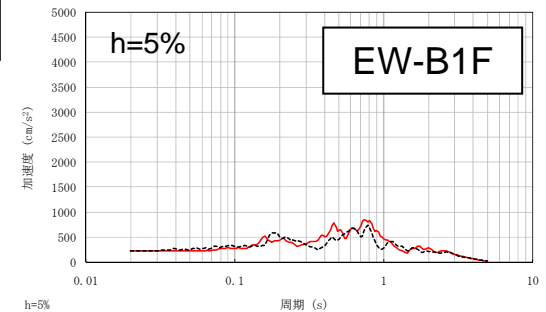
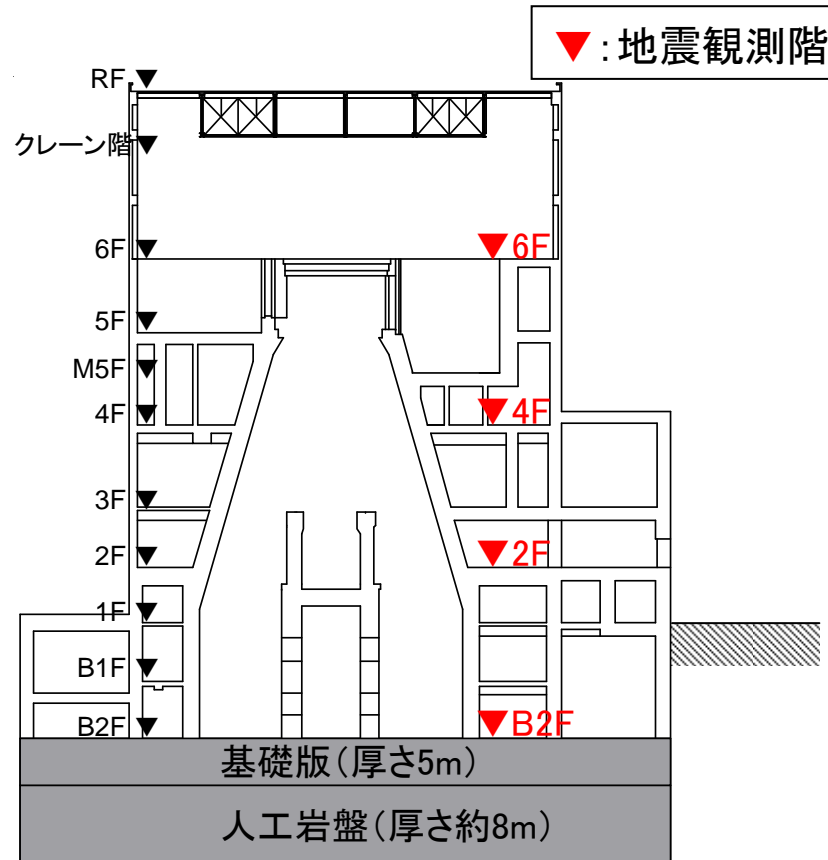
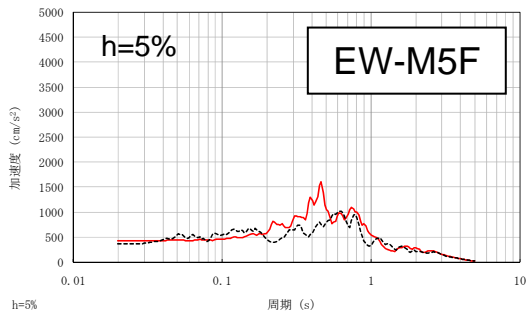
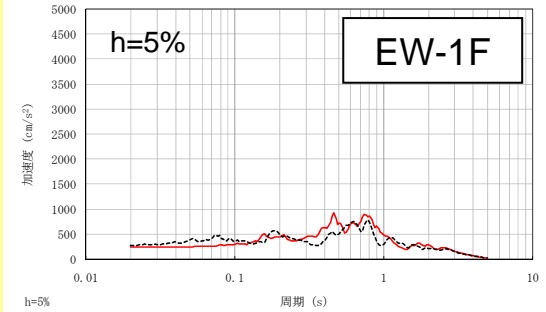


— はざ取り波入力結果
 --- 補間による建屋応答評価結果

解析結果と補間による評価の比較(床応答スペクトル-EW方向)



地震観測階以外におけるはざとり波によるシミュレーション結果と、補間による評価結果の床応答スペクトルの比較を示す。
EW方向のシミュレーション結果は0.2秒、0.5秒付近で補間結果に比べ若干大きい結果となっている。



— はざとり波入力結果
--- 補間による建屋応答評価結果