

東北電力(株)女川2号機及び3号機原子炉建屋 建屋シミュレーション解析について (コメント回答)

平成24年1月20日
原子力安全・保安院

目次

- 1.減衰定数の傾向分析 p 2
- 2.バックチェックモデルに観測記録を入力した地震応答解析結果 p 7
- 3.記載の修正 p20

1. 減衰定数の傾向分析

○コメント内容

第4回建築物・構造に関する意見聴取会（平成23年11月17日）

【建築物・構造4－3－1】 P27の観測記録による固有振動数の傾向分析では、評価方法としてARXモデルを用いているのであれば、固有振動数だけでなく、減衰についてもデータを示してほしい。解析を行う際の減衰定数の条件設定に資すると思う。

○コメント回答

ARXモデルを用いる方法では、観測記録から固有振動数と減衰定数を同時に評価できる。表に固有振動数と減衰定数を示す。

なお、観測記録から伝達関数を求めて卓越する振動数および減衰定数を評価する手法の場合、一般的に卓越する振動数は減衰定数に比べて精度よく評価できる。これは、卓越する振動数は、伝達関数のピーク振動数が不明瞭な場合でも位相の90度遅れにより判断し易いが、減衰定数は、伝達関数のピーク高さが不明瞭な場合は位相の90度遅れ付近の勾配により判断するが、この勾配は減衰定数の変動に対して感度が低いためである。

1. 減衰定数の傾向分析

建築物・構造4-3-2 p.12 一部修正

■観測記録による固有振動数および減衰定数の評価方法（ARXモデル）

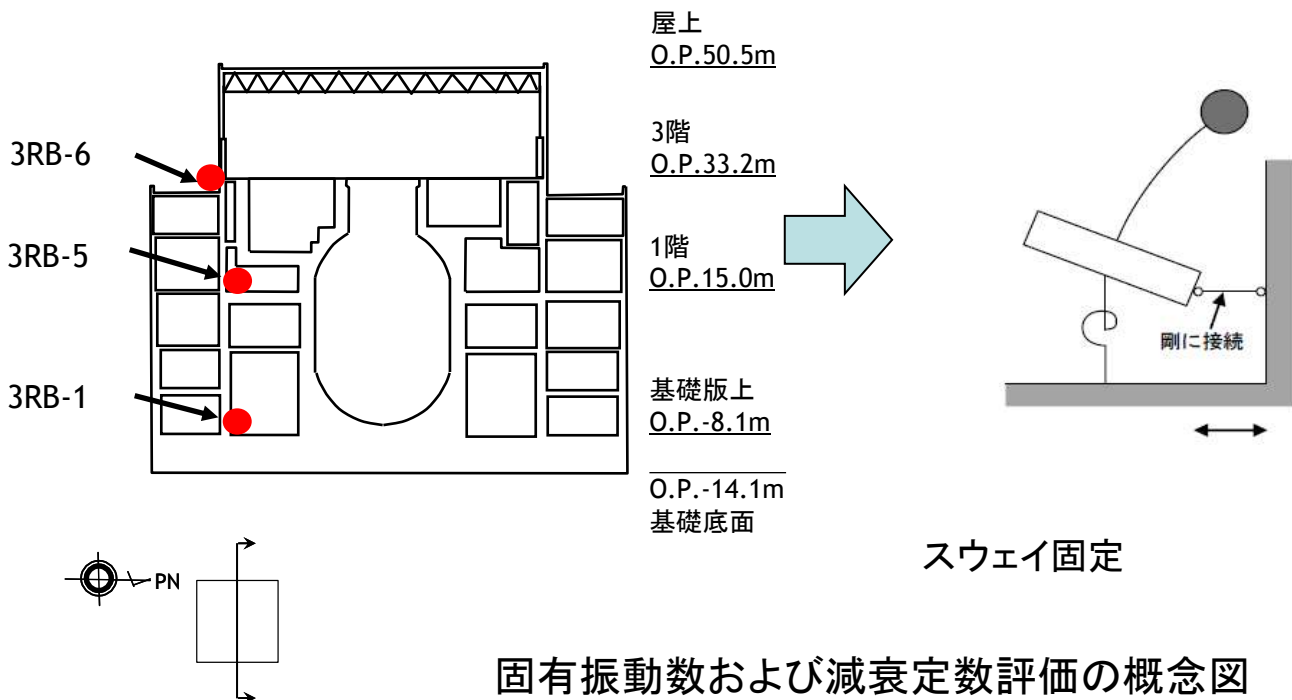
建屋の1次周期に相当する固有振動数および減衰定数の算定は、以下の手順で実施している。

①2つのレベルの観測記録から線形補間して1質点系等価高さの加速度波形を算定。

NS方向出力: 3RB-6と3RB-5の線形補間、EW方向出力: 3RB-6と3RB-5の線形補間

②観測記録による伝達関数に対して再帰的ARXモデルにより同定して固有振動数および減衰定数を求める。

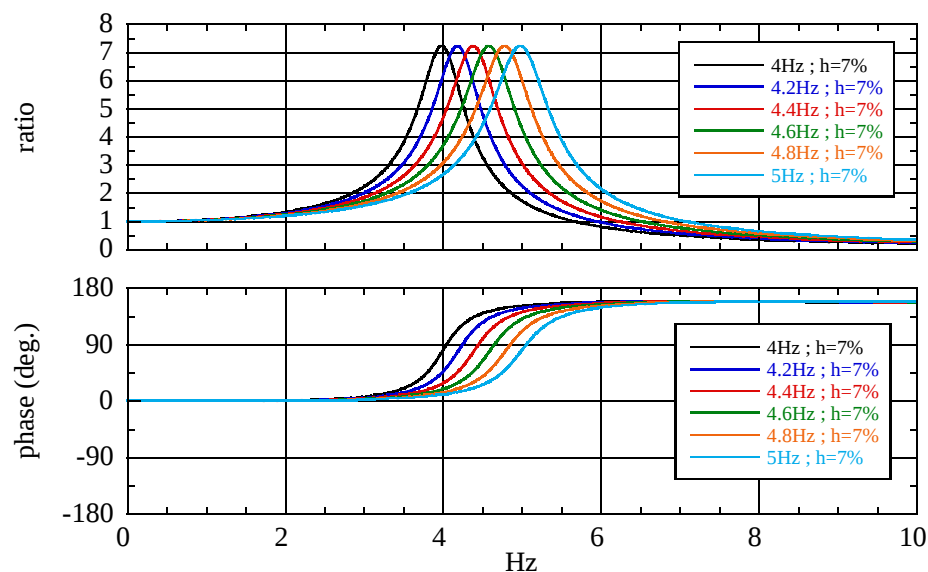
NS方向入力: 3RB-1、EW方向入力: 3RB-1



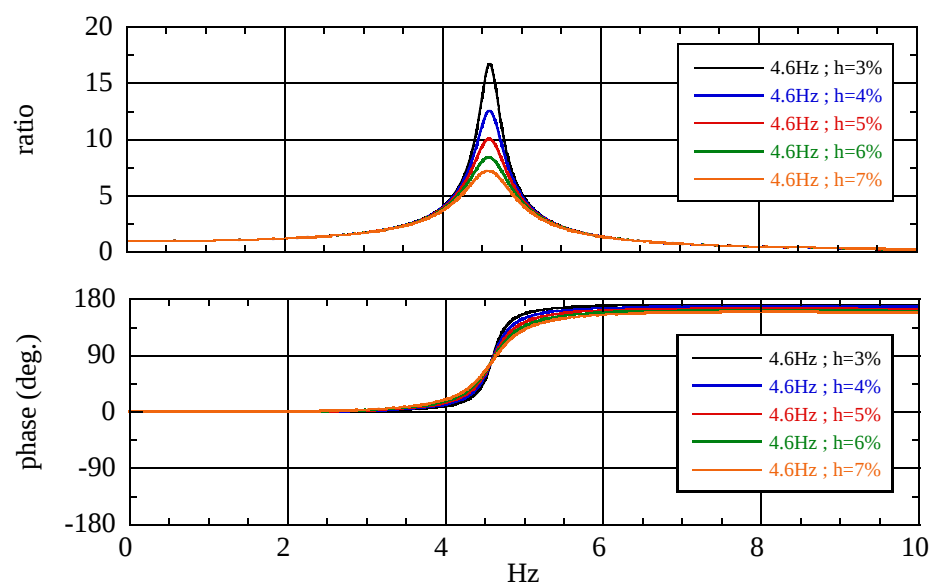
1. 減衰定数の傾向分析

(参考) 伝達関数を用いた卓越する振動数および減衰定数の評価する場合の感度

- 理論伝達関数により、卓越する振動数と減衰定数について、感度を比較。
- 比較する観測記録の伝達関数のピーク位置や高さが不明瞭な場合は、位相により判断することになる。
- 卓越する振動数を変動させた場合は、位相の90度遅れの振動数の変動も大きい。
- 減衰定数を変動させた場合は、位相の90度近傍の勾配の変動は大きくない。



卓越する振動数による理論伝達関数の推移



減衰定数による理論伝達関数の推移

1.1 女川2号機原子炉建屋

【事前検討】観測記録による固有振動数と減衰定数の傾向分析

建築物・構造4-3-1 p.27 一部修正

事前検討結果の評価(事業者評価)

過去の主要な地震の観測記録も含め、ARXモデルにより固有振動数及び減衰定数を算定、傾向分析を行った。

- ① 固有振動数は建設当初に比べて地震ごとに低下している傾向がみられる。
- ② 3.11地震および 4.7地震の固有振動数はバックチェックモデル(スウェイ・ロッキングモデル)の1次固有振動数より低い。
- ③ 3.11地震と4.7地震では、加速度レベルは3.11地震が大きいですが、固有振動数は概ね同程度の値となっている。

女川2号機原子炉建屋 固有振動数と減衰定数の傾向

地震名	NS方向			EW方向		
	基礎版上加速度 2RB-6(cm/s ²)	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※ -	基礎版上加速度 2RB-6(cm/s ²)	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※ -
1994.10.04 22:22 北海道東方沖 マグニチュード8.2 震央距離758km	15	6.74 1.31	1.40 -	15	6.50 3.73	1.32 -
2003.05.26 18:24 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離48km	112	5.55 7.77	1.15 -	168	5.29 4.01	1.08 -
2005.08.16 11:46 宮城県沖 マグニチュード7.2 震央距離73km	230	5.44 6.30	1.13 -	206	5.24 4.63	1.07 -
2011.03.11 14:46 東北地方太平洋沖 マグニチュード9.0 震央距離123km	501	4.42 6.88	0.92 -	461	4.43 5.87	0.90 -
2011.04.07 23:32 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離43km	358	4.31 8.08	0.89 -	367	4.36 7.19	0.89 -

※比率はバックチェックモデルの1次固有振動数に対する比で示す。 バックチェックモデル 1次固有振動数 NS方向:4.83Hz EW方向:4.92Hz

※女川2号機営業運転開始日: 1995.7.28

1.2 女川3号機原子炉建屋

建築物・構造4-3-1 p.6 一部修正

【事前検討】観測記録による固有振動数と減衰定数の傾向分析

事前検討結果の評価(事業者の評価)

過去の主要な地震の観測記録も含め、ARXモデルにより固有振動数及び減衰定数を算定、傾向分析を行った。

- ① 固有振動数は建設当初に比べて地震ごとに低下している傾向がみられる。
- ② 3.11地震および 4.7地震の固有振動数はバックチェックモデル(スウェイ・ロッキングモデル)の1次固有振動数より低い。
- ③ 3.11地震と4.7地震では、加速度レベルは3.11地震が大きい、固有振動数は概ね同程度の値となっている。

女川3号機原子炉建屋 固有振動数と減衰定数の傾向

地震名	NS方向			EW方向		
	基礎版上加速度 3RB-1(cm/s ²)	振動数(Hz)	比率※	基礎版上加速度 3RB-1(cm/s ²)	振動数(Hz)	比率※
		減衰定数(%)	—		減衰定数(%)	—
2001.12.02 22:02 岩手県内陸南部 マグニチュード6.4 震央距離112km	33	6.23	1.25	35	5.75	1.17
		4.29	—		5.25	—
2003.05.26 18:24 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離48km	129	5.78	1.16	189	5.31	1.08
		3.95	—		4.51	—
2005.08.16 11:46 宮城県沖 マグニチュード7.2 震央距離73km	222	5.55	1.11	188	5.20	1.06
		3.78	—		5.57	—
2011.03.11 14:46 東北地方太平洋沖 マグニチュード9.0 震央距離123km	545	4.72	0.94	458	4.58	0.93
		6.03	—		7.00	—
2011.04.07 23:32 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離43km	373	4.57	0.91	398	4.48	0.91
		5.27	—		7.66	—

※比率はバックチェックモデルの1次固有振動数に対する比で示す。 バックチェックモデル 1次固有振動数 NS方向:5.00Hz EW方向:4.92Hz

※女川3号機営業運転開始日:2002.1.30

2. バックチェックモデルに観測記録を入力した地震応答解析結果

○コメント内容

第4回建築物・構造に関する意見聴取会（平成23年11月17日）

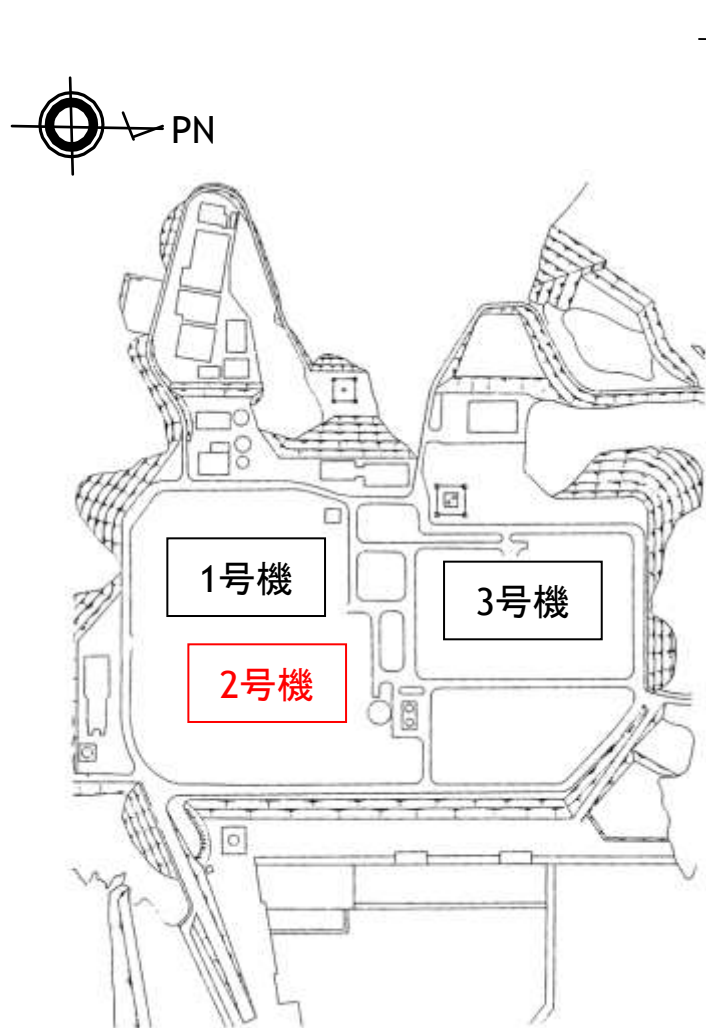
【建築物・構造4-3-2】 参考資料P7やP8の女川3号機原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較に、例えば、地震計3RB-6のEW方向の観測記録がない。多くのデータを比較して検討すべき

○コメント回答

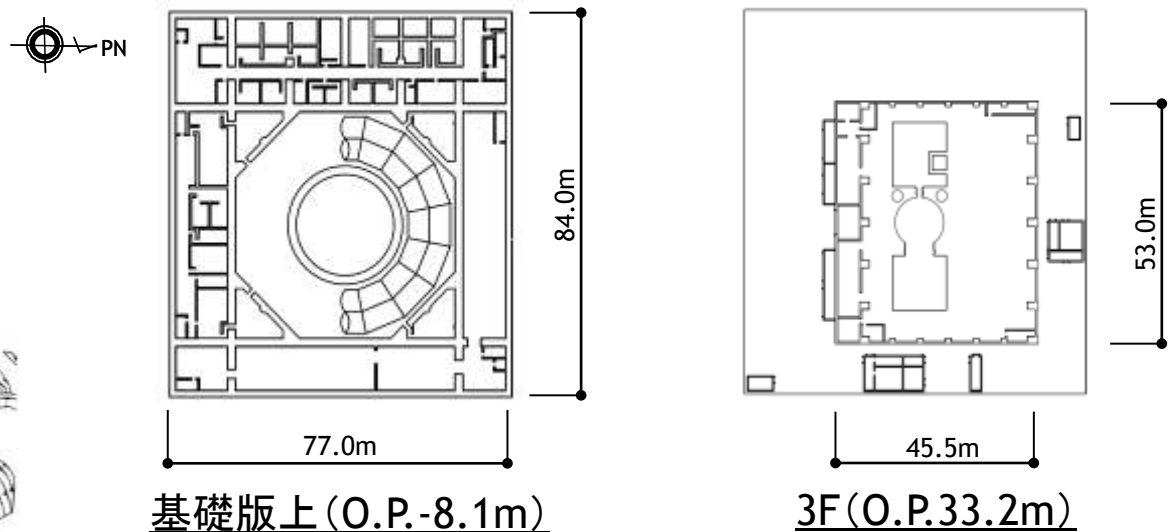
女川2号機原子炉建屋および女川3号機原子炉建屋について、バックチェックモデルに観測記録を入力した地震応答解析による加速度度応答スペクトルを全ての観測記録と比較して示す。

2. 1 女川2号機原子炉建屋

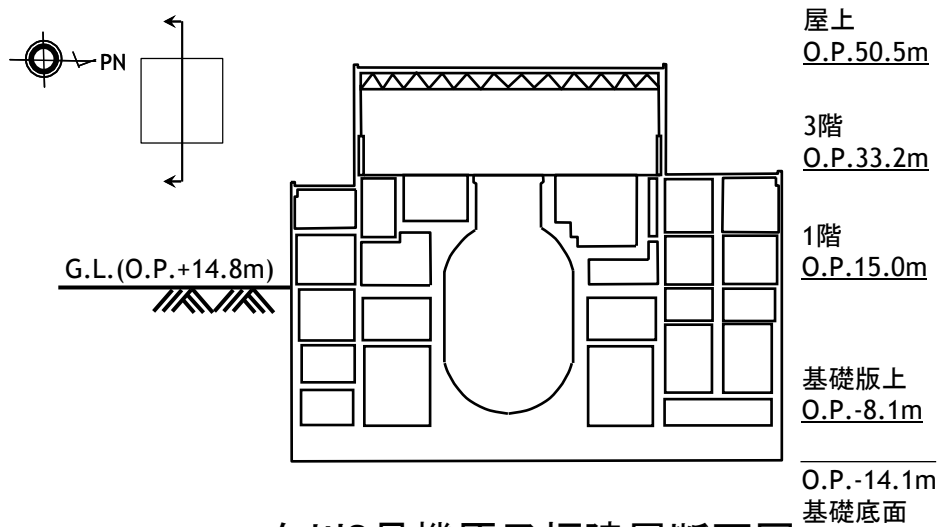
■女川2号機 配置図、原子炉建屋平面図・断面図



女川原子力発電所配置図



女川2号機原子炉建屋平面図



女川2号機原子炉建屋断面図

基礎版厚 6.0m

$V_s = 1300 \text{ m/s}$ (等価 $V_s = 1820 \text{ m/s}$)

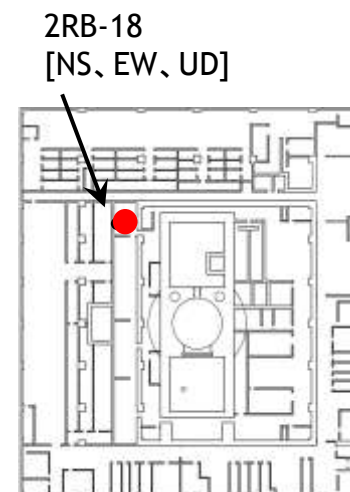
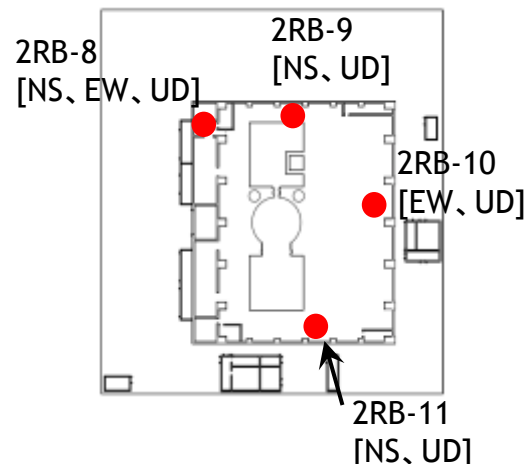
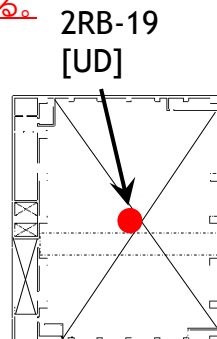
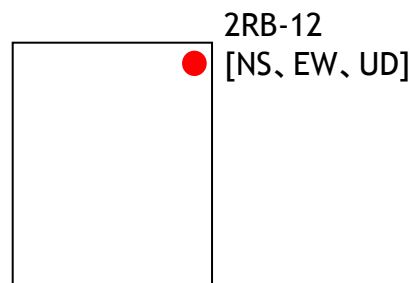
2. 1 女川2号機原子炉建屋

■女川2号機原子炉建屋地震計位置図



※2RB-19はセンサーが機械的に壊れたため、シミュレーション対象外とする。

※2RB-8(NS方向)はエレベータ室付近に設置されており、ローカルな影響があるか余震記録を分析中である。

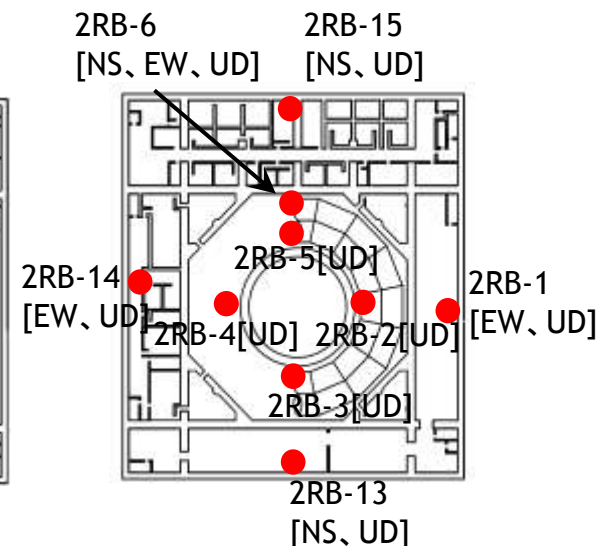
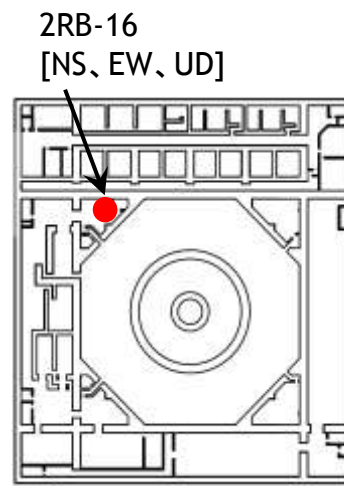
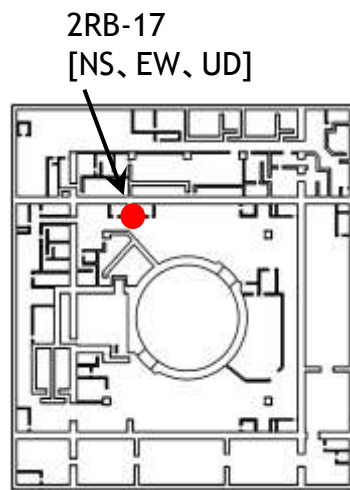
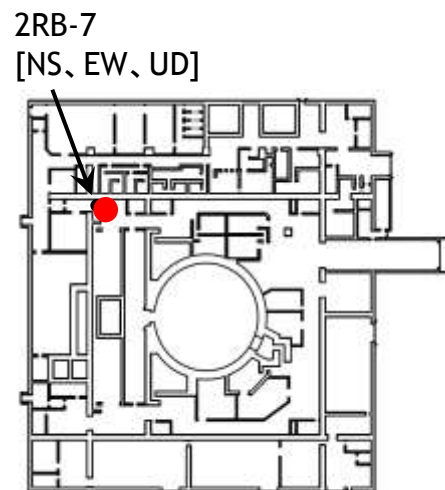


RF (O.P.50.5m)

屋根トラス (O.P.46.95m)

3F (O.P.33.2m)

2F (O.P.22.5m)



1F (O.P.15.0m)

B1F (O.P.6.0m)

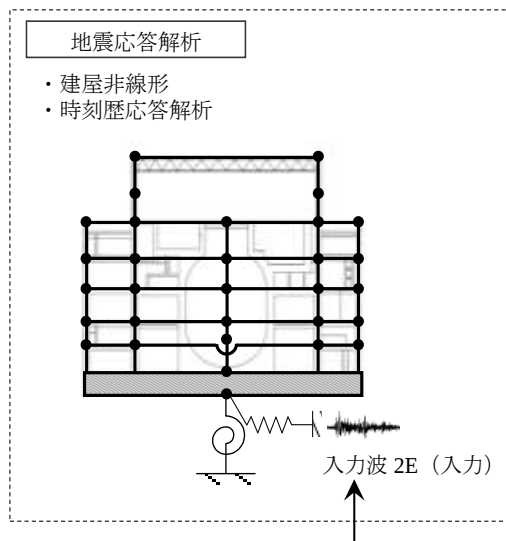
B2F (O.P.-0.8m)

基礎版上 (O.P.-8.1m)

2. 1 女川2号機原子炉建屋

■女川2号機原子炉建屋 耐震バックチェックモデルに基礎版上の観測記録を用いた地震応答解析の概要

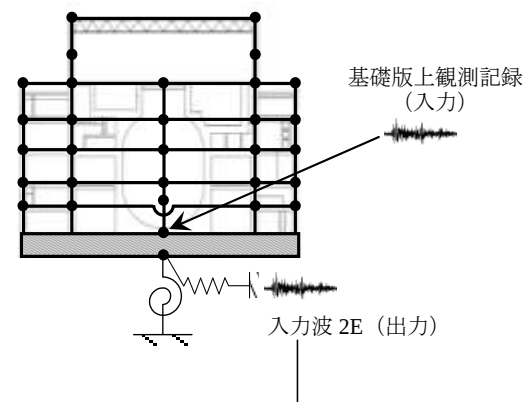
項目		地震応答解析	入力地震動の算定
応答計算法		時刻歴応答解析	周波数応答解析
入力地震動		入力地震動の算定（右欄）で求めた基礎底面ばね外における入力波 2E	基礎版上端観測記録
入力規定位置		基礎底面ばね外	基礎上端
剛性評価	コンクリート強度	設計値 女川1号機：22.1 N/mm ² (225 kgf/cm ²) 女川2号機：32.4 N/mm ² (330 kgf/cm ²) 女川3号機：32.4 N/mm ² (330 kgf/cm ²)	同左
	ヤング係数	設計値 女川1号機：2.06×10 ⁴ N/mm ² (2.10×10 ⁶ tf/m ²) 女川2号機：2.65×10 ⁴ N/mm ² (2.70×10 ⁶ tf/m ²) 女川3号機：2.65×10 ⁴ N/mm ² (2.70×10 ⁶ tf/m ²)	同左
	考慮範囲	耐震壁	同左
減衰定数	鉄筋	5%	5%
	コンクリート	(歪エネルギー比例型)	(複素減衰：一定減衰)
解析モデル	建屋-地盤相互作用	スウェイ・ロッキングモデル	同左
	建屋モデル	質点系多軸モデル	同左
	地盤ばね	JEAGによる近似法	JEAGによる近似法と等価な複素ばね
解析手法		非線形解析	線形解析



入力地震動の算定

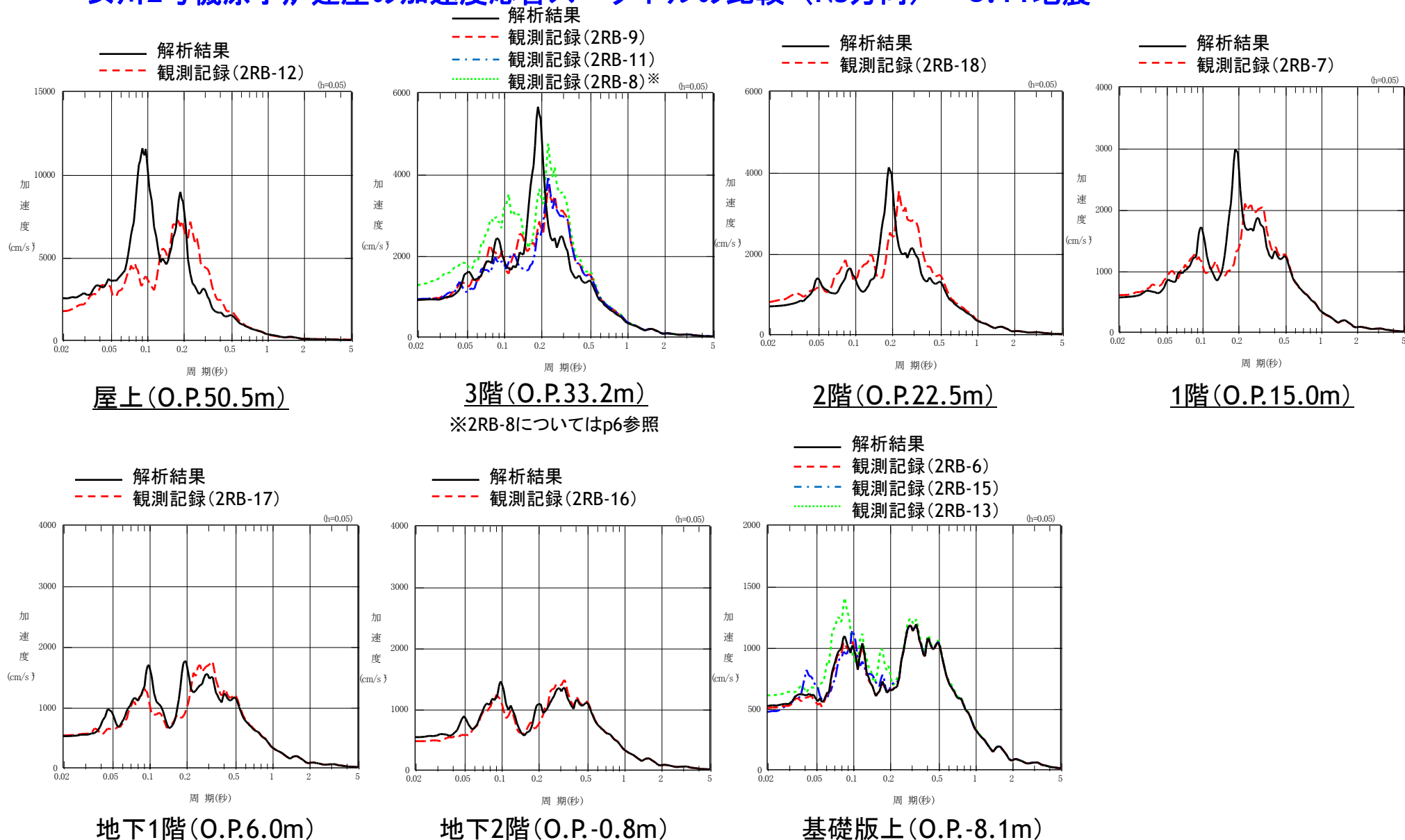
- ・建屋線形
- ・周波数応答解析

※表中の女川1号機、3号機は参考として記載



2. 1 女川2号機原子炉建屋

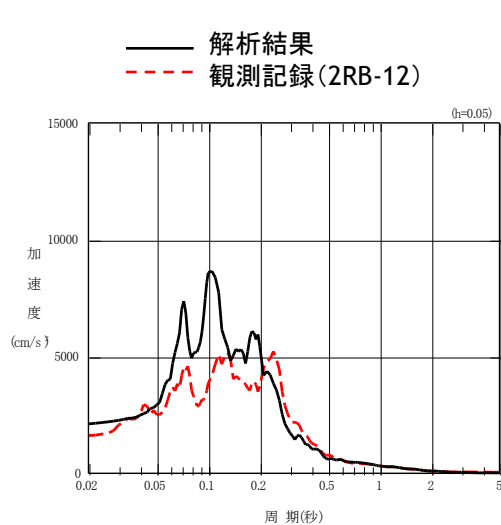
■ 女川2号機原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較（NS方向） 3.11地震



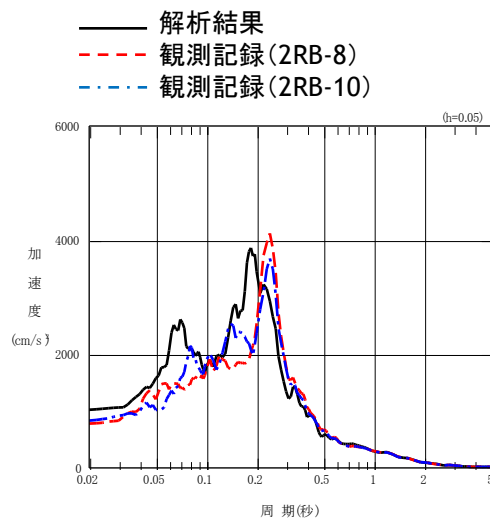
NS方向

2. 1 女川2号機原子炉建屋

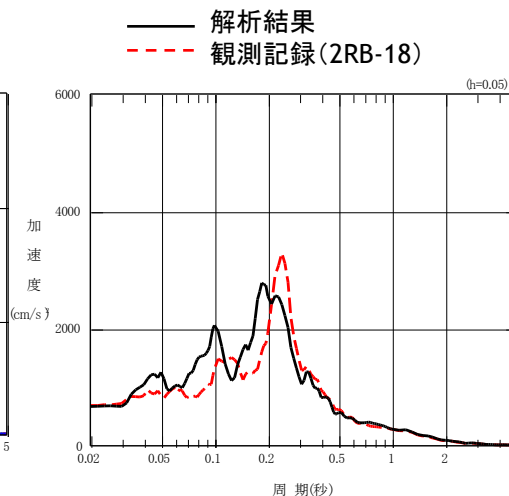
■ 女川2号機原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較（EW方向） 3.11地震



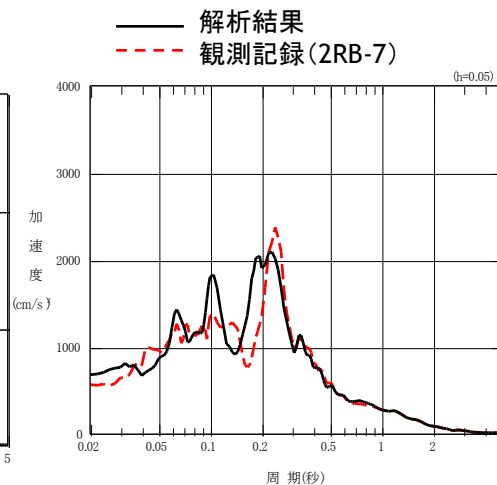
屋上(O.P.50.5m)



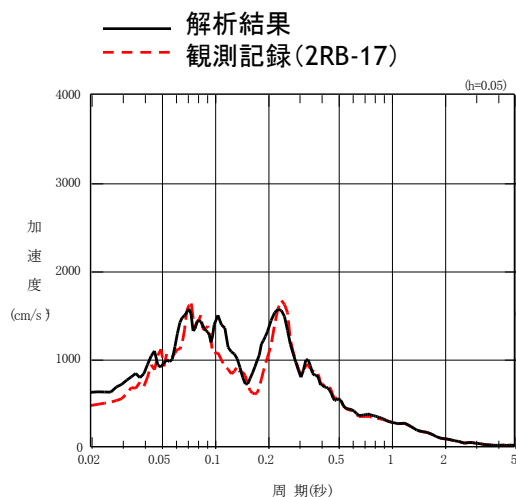
3階(O.P.33.2m)



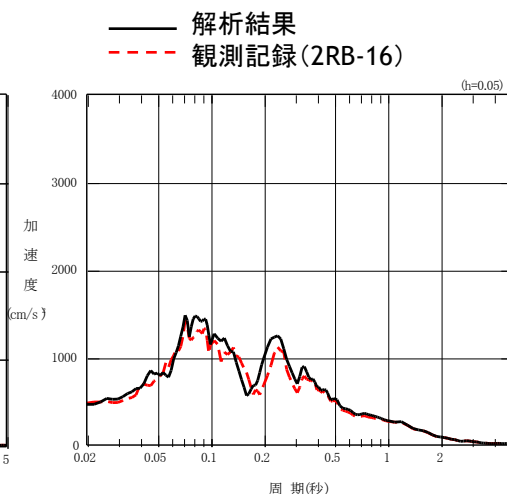
2階(O.P.22.5m)



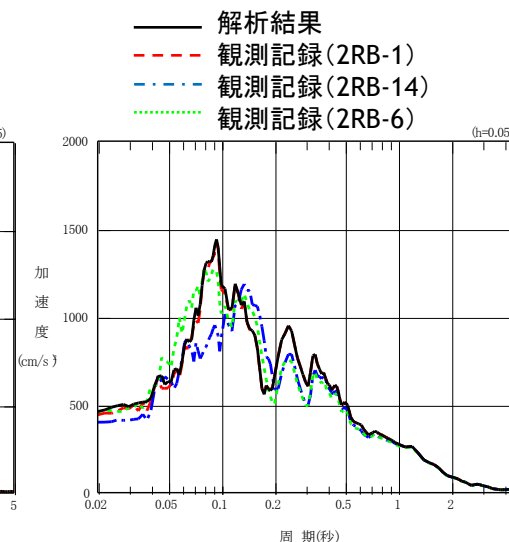
1階(O.P.15.0m)



地下1階(O.P.6.0m)



地下2階(O.P.-0.8m)

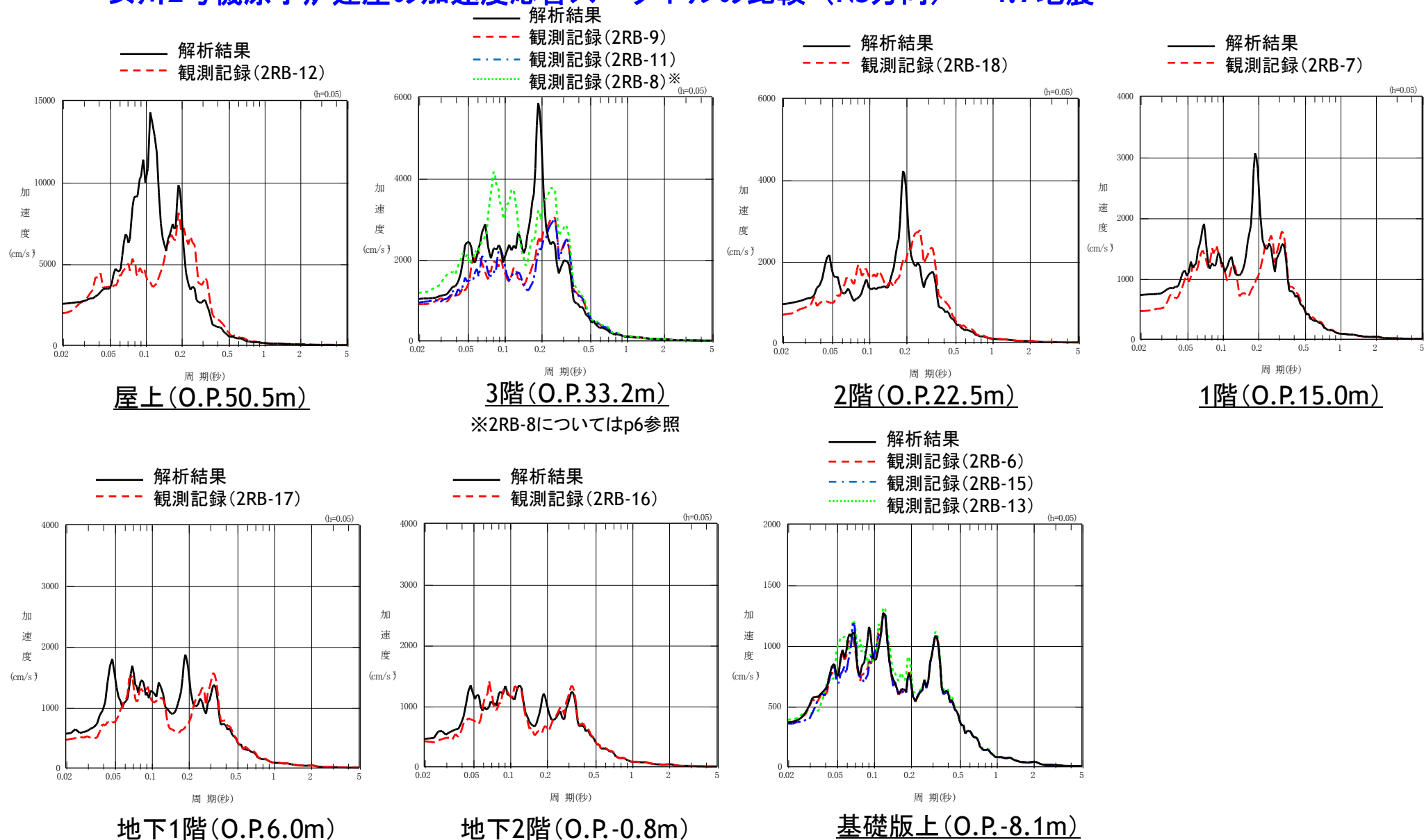


基礎版上(O.P.-8.1m)

EW方向

2. 1 女川2号機原子炉建屋

■ 女川2号機原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較（NS方向） 4.7地震



NS方向

2. 1 女川2号機原子炉建屋

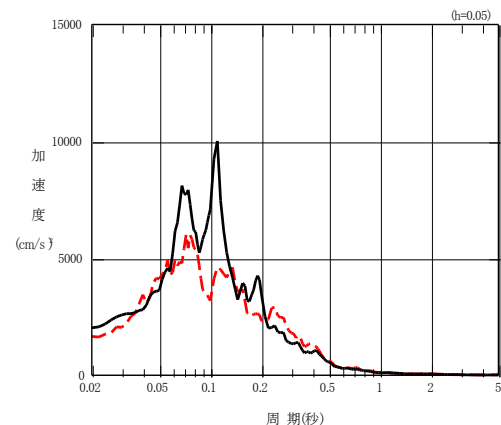
■ 女川2号機原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較（EW方向） 4.7地震

—— 解析結果
 - - - 観測記録(2RB-12)

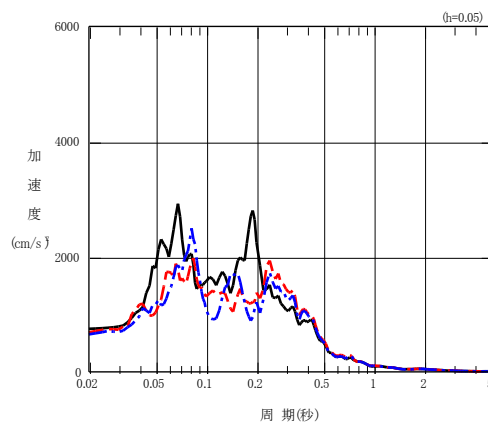
—— 解析結果
 - - - 観測記録(2RB-8)
 - . - . 観測記録(2RB-10)

—— 解析結果
 - - - 観測記録(2RB-18)

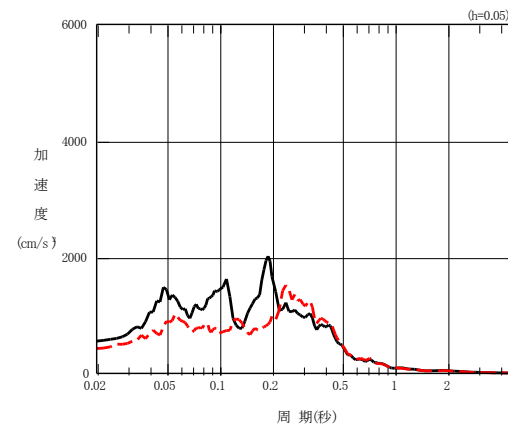
—— 解析結果
 - - - 観測記録(2RB-7)



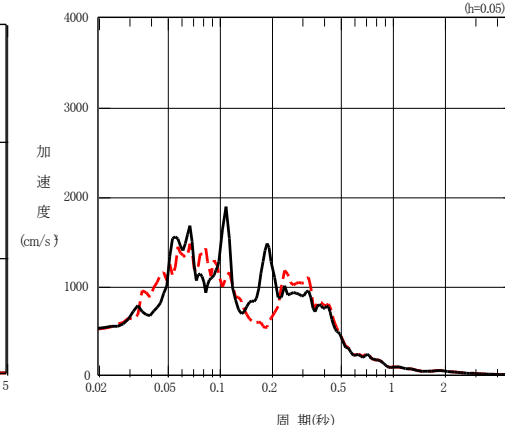
屋上 (O.P.50.5m)



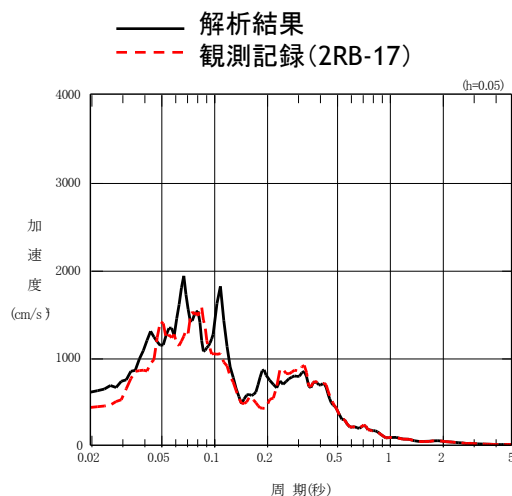
3階 (O.P.33.2m)



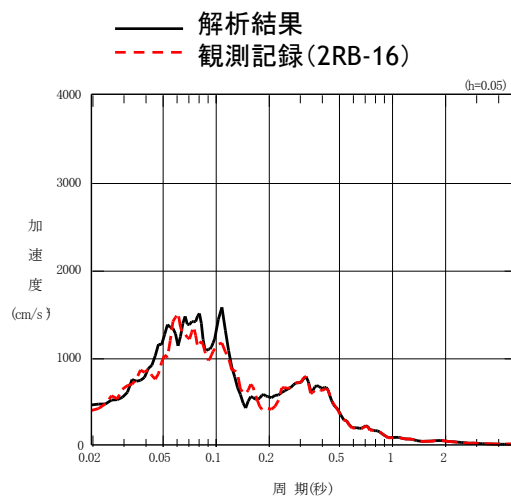
2階 (O.P.22.5m)



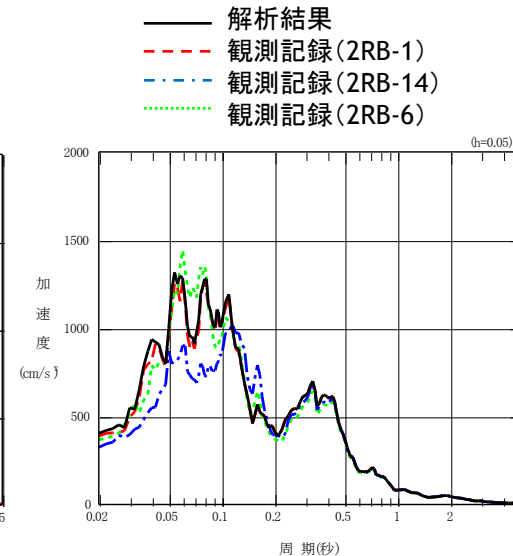
1階 (O.P.15.0m)



地下1階 (O.P.6.0m)



地下2階 (O.P.-0.8m)

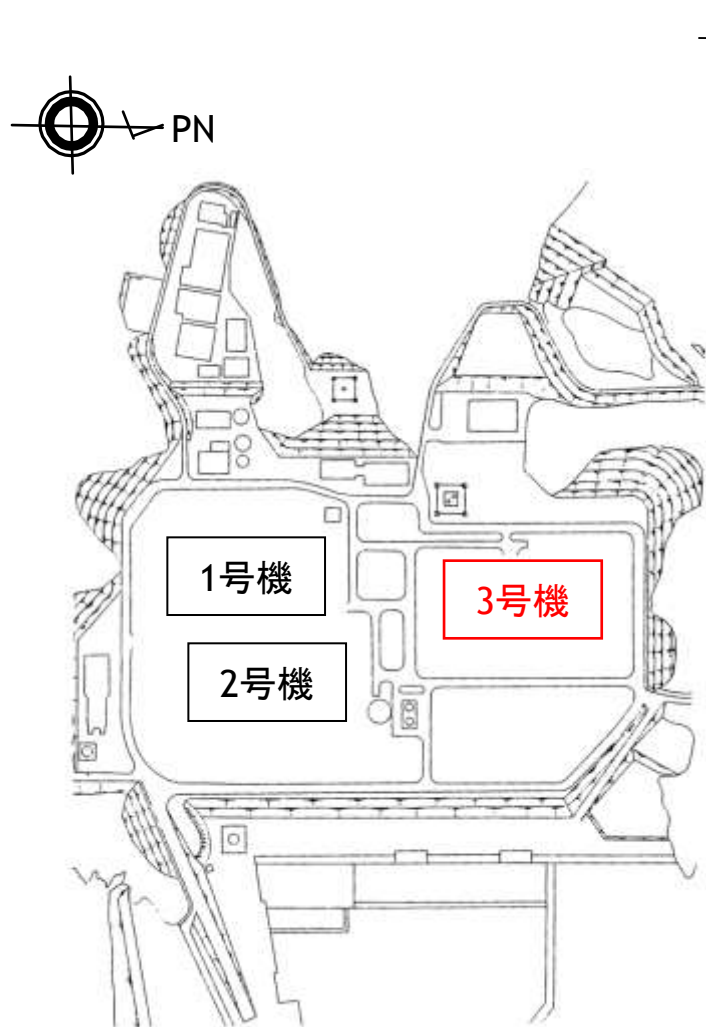


基礎版上 (O.P.-8.1m)

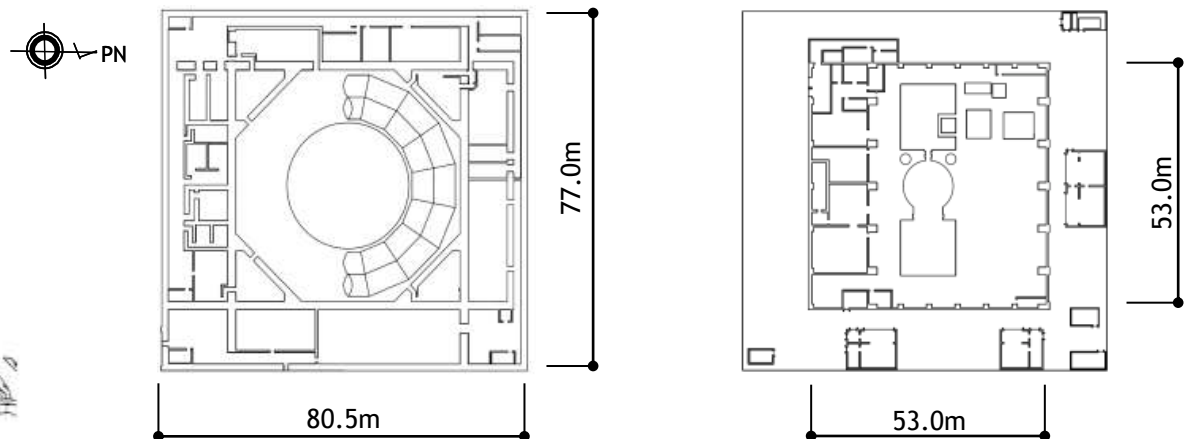
EW方向

2. 2 女川3号機原子炉建屋

■女川3号機 配置図、原子炉建屋平面図・断面図



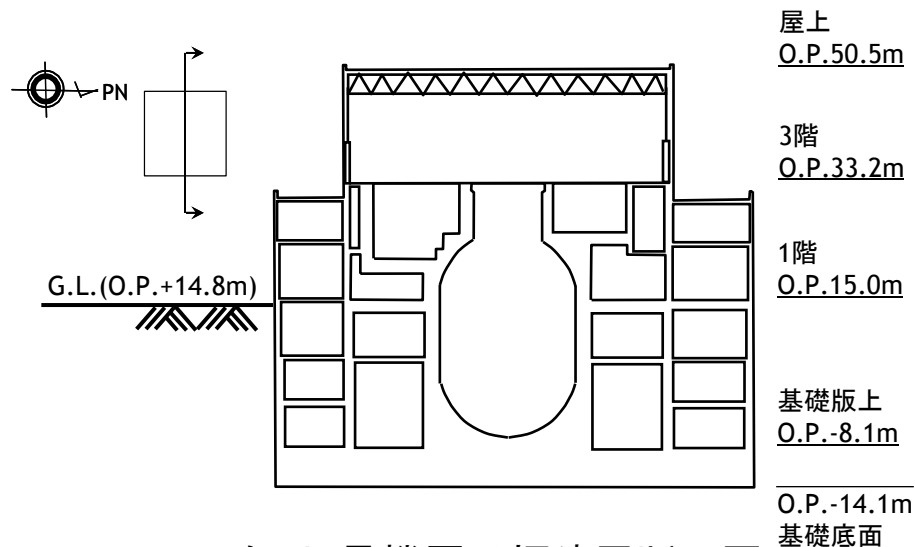
女川原子力発電所配置図



基礎版上 (O.P.-8.1m)

3F (O.P.33.2m)

女川3号機原子炉建屋平面図



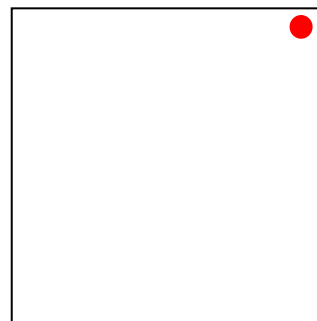
女川3号機原子炉建屋断面図

基礎版厚 6.0m

$V_s=1360\text{m/s}$ (等価 $V_s=1820\text{m/s}$)

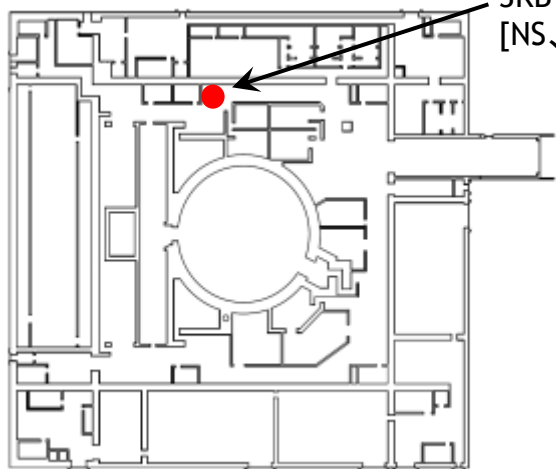
2. 2 女川3号機原子炉建屋

■女川3号機原子炉建屋地震計位置図



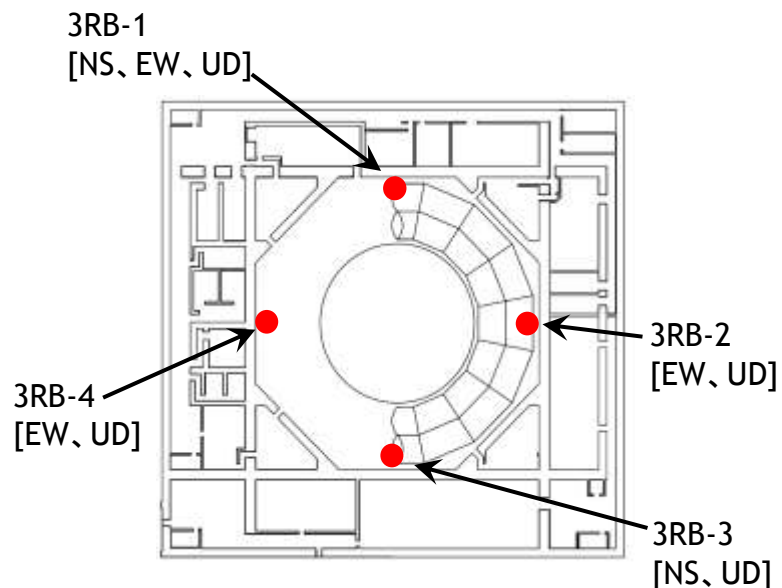
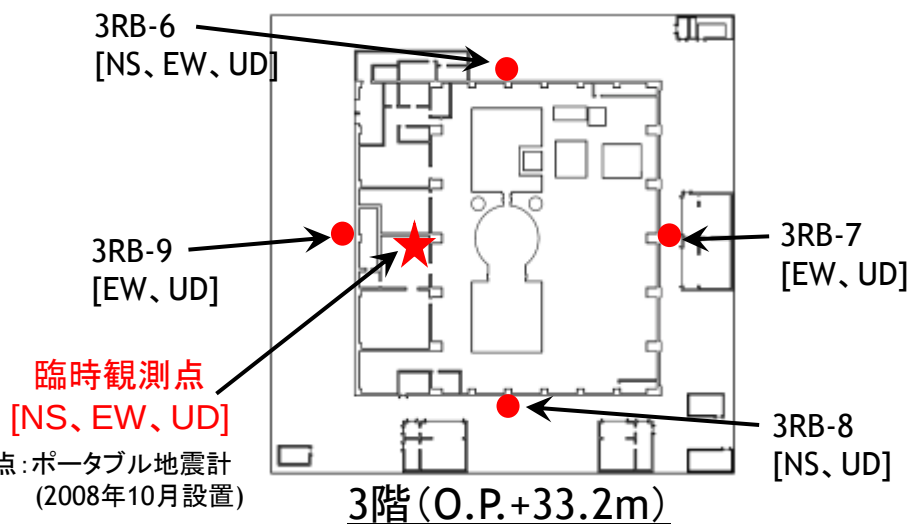
3RB-10
[NS、EW、UD]

屋上(O.P. +50.5m)



3RB-5
[NS、EW、UD]

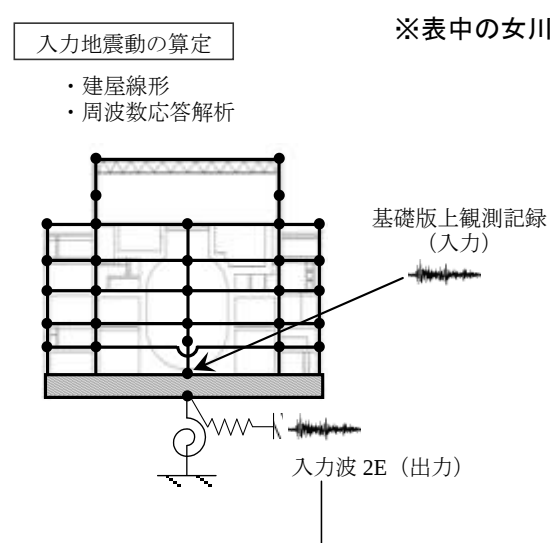
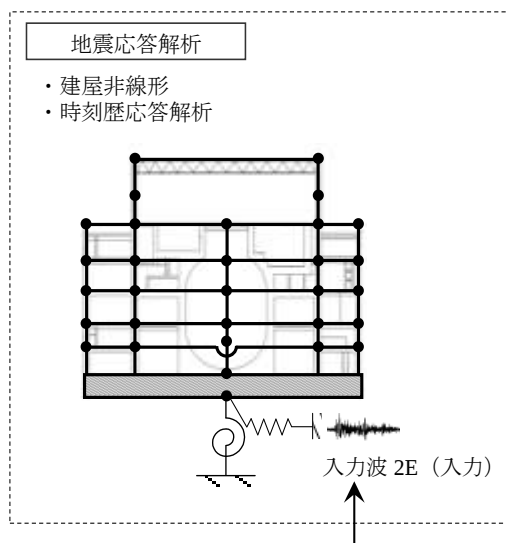
1階(O.P.+15.0m)



2. 2 女川3号機原子炉建屋

■女川3号機原子炉建屋 耐震バックチェックモデルに基礎版上の観測記録を用いた地震応答解析の概要

項目		地震応答解析	入力地震動の算定
応答計算法		時刻歴応答解析	周波数応答解析
入力地震動		入力地震動の算定（右欄）で求めた基礎底面ばね外における入力波 2E	基礎版上端観測記録
入力規定位置		基礎底面ばね外	基礎上端
剛性評価	設計値 コンクリート強度	女川1号機：22.1 N/mm ² (225 kgf/cm ²) 女川2号機：32.4 N/mm ² (330 kgf/cm ²) 女川3号機：32.4 N/mm ² (330 kgf/cm ²)	同左
	設計値 ヤング係数	女川1号機：2.06×10 ⁴ N/mm ² (2.10×10 ⁶ tf/m ²) 女川2号機：2.65×10 ⁴ N/mm ² (2.70×10 ⁶ tf/m ²) 女川3号機：2.65×10 ⁴ N/mm ² (2.70×10 ⁶ tf/m ²)	同左
	考慮範囲	耐震壁	同左
減衰定数	鉄筋	5%	5%
	コンクリート	(歪エネルギー比例型)	(複素減衰：一定減衰)
解析モデル	建屋-地盤相互作用	スウェイ・ロッキングモデル	同左
	建屋モデル	質点系多軸モデル	同左
	地盤ばね	JEAGによる近似法	JEAGによる近似法と等価な複素ばね
解析手法		非線形解析	線形解析

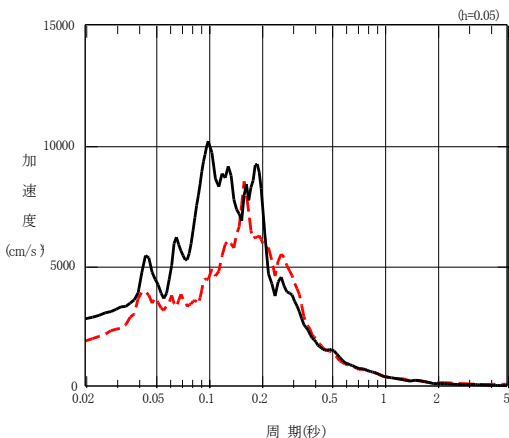


※表中の女川1号機、2号機は参考として記載

2. 2 女川3号機原子炉建屋

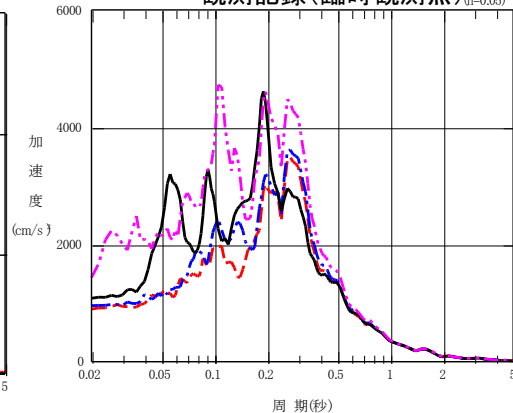
■ 女川3号機原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較 3.11地震

—— 解析結果
 - - - 観測記録(3RB-10)



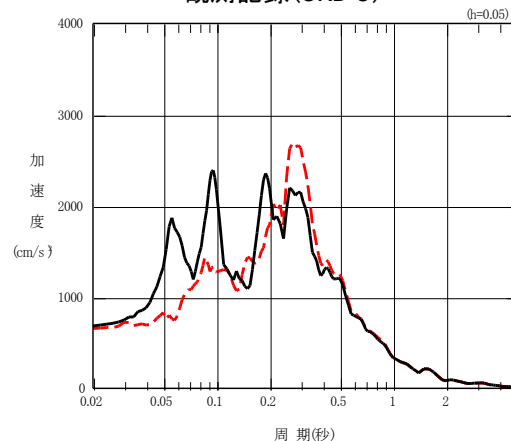
屋上(O.P.50.5m)

—— 解析結果
 - - - 観測記録(3RB-6)
 - . - 観測記録(3RB-8)
 - - - 観測記録(臨時観測点)



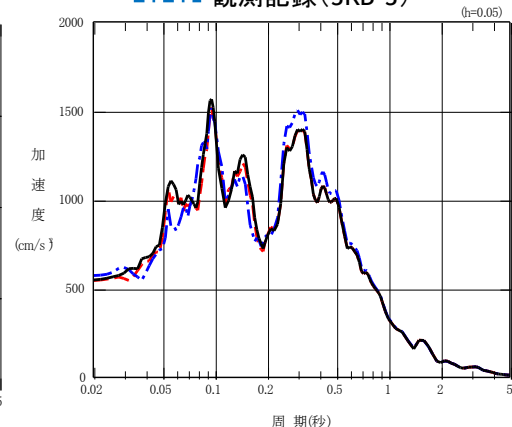
3階(O.P.33.2m)

—— 解析結果
 - - - 観測記録(3RB-5)



1階(O.P.15.0m)

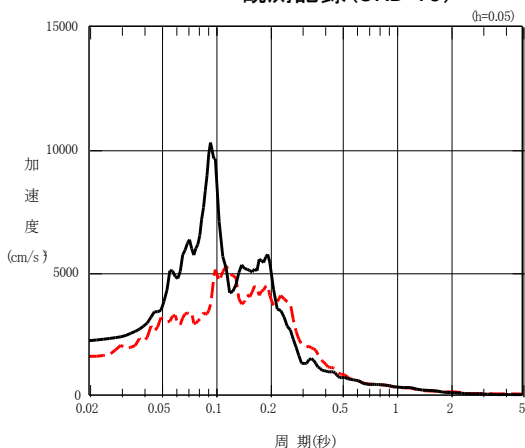
—— 解析結果
 - - - 観測記録(3RB-1)
 - . - 観測記録(3RB-3)



基礎版上(O.P.-8.1m)

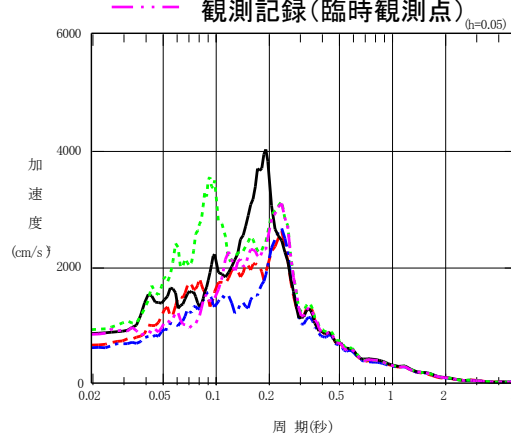
NS方向

—— 解析結果
 - - - 観測記録(3RB-10)



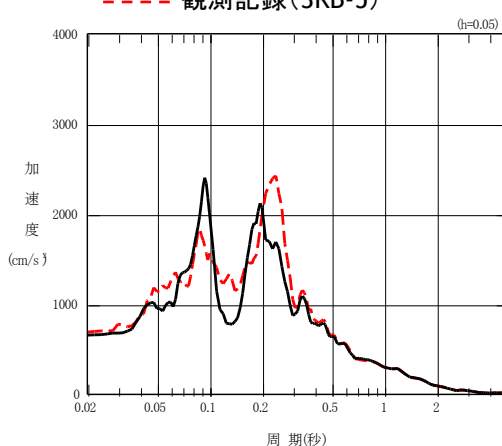
屋上(O.P.50.5m)

—— 解析結果
 - - - 観測記録(3RB-7)
 - . - 観測記録(3RB-9)
 - . . 観測記録(3RB-6)
 - - - 観測記録(臨時観測点)



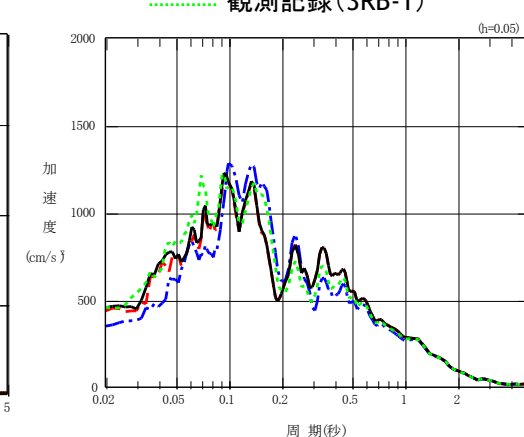
3階(O.P.33.2m)

—— 解析結果
 - - - 観測記録(3RB-5)



1階(O.P.15.0m)

—— 解析結果
 - - - 観測記録(3RB-2)
 - . - 観測記録(3RB-4)
 - . . 観測記録(3RB-1)

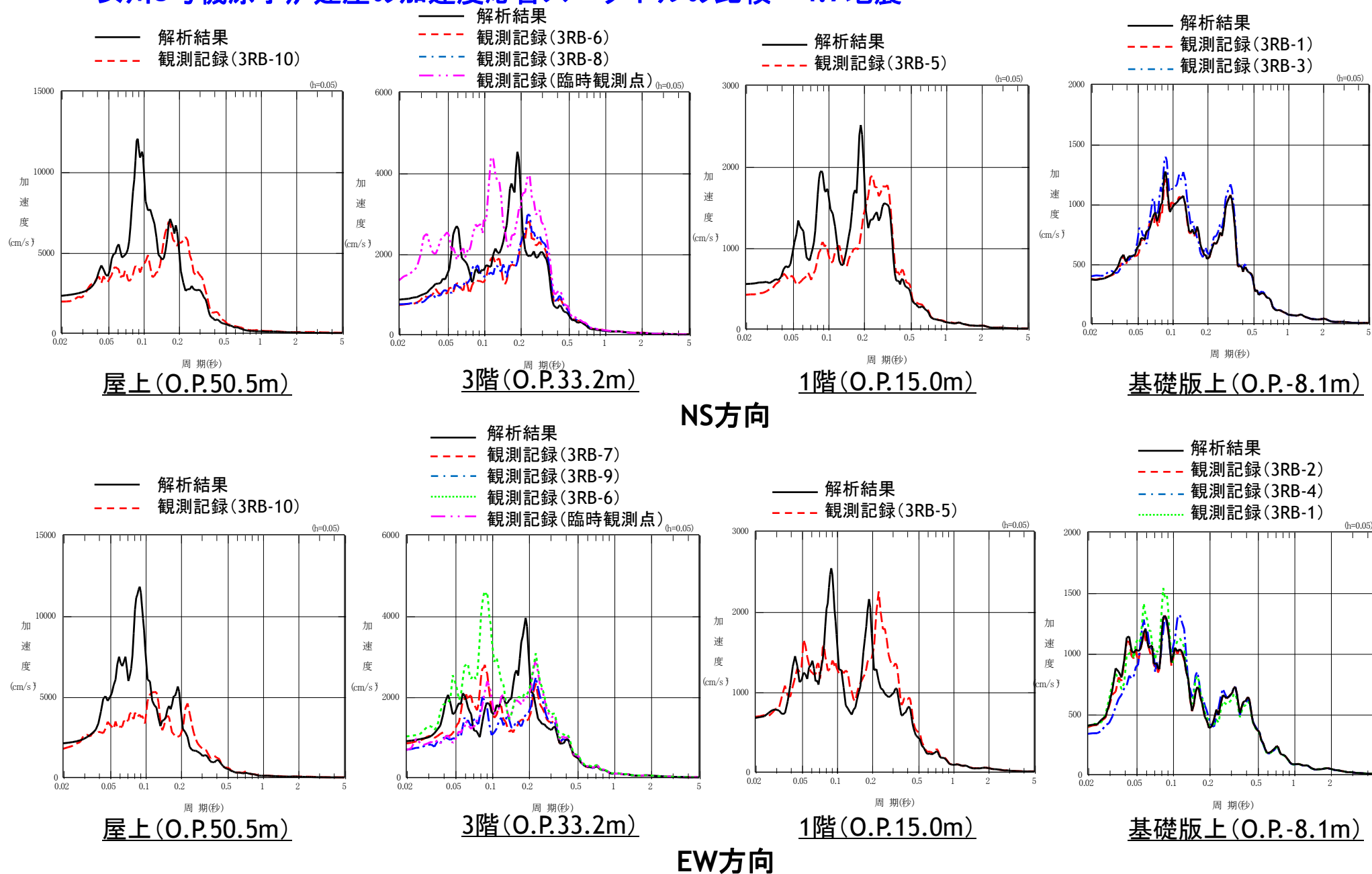


基礎版上(O.P.-8.1m)

EW方向

2. 2 女川3号機原子炉建屋

■ 女川3号機原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較 4.7地震



3. 記載の修正

○コメント内容

第4回建築物・構造に関する意見聴取会（平成23年11月17日）

【建築物・構造4-3-1】 P40の女川2号機原子炉建屋耐震壁の最大応答せん断ひずみの評価結果には、「オペフロ階(3階)以下は最大で $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ であり、概ね弾性範囲であった。」とあるが、このモデルは剛性低下させたスケルトンを用いており、弾性範囲はもっと小さいはず。「オペフロ階(3階)以下は最大で $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ であった。」とすべきではないか。

○コメント回答

コメントを踏まえて、建築物・構造4-3-1 P20の女川3号機、P40の女川2号機について記載を次頁のとおり修正する。

なお、修正前は、オペフロ階(3階)以下の耐震壁については剛性低下させているものの、最大応答せん断ひずみが $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ (既往実験結果によるせん断初ひび割れが発生する値:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説1999)程度であれば、概ね弾性範囲と考えて記載した。

3. 1 女川2号機原子炉建屋

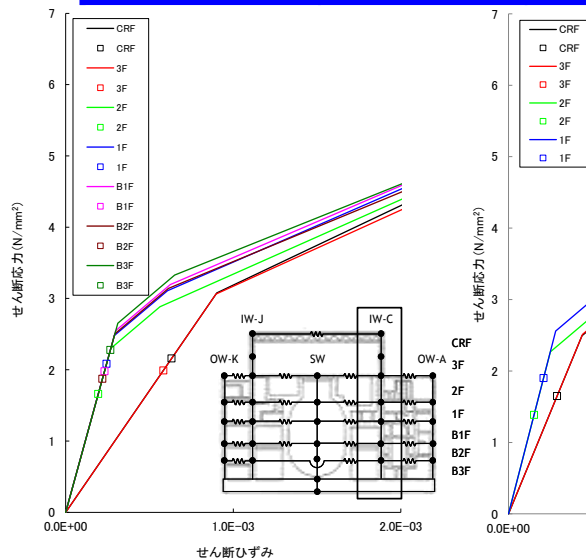
建築物・構造4-3-1 p.40再掲 一部修正

■ 女川2号機原子炉建屋 耐震壁の最大応答せん断ひずみ 事業者の評価

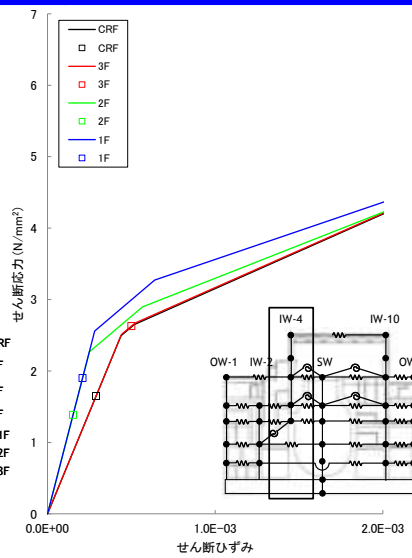
耐震壁の応答は、オペフロ階(3階)以下は最大で $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ であった。オペフロ階(3階)以上でひずみが大きくなるが、終局耐力に対し妥当な安全余裕を有し、機能保持限界との対応も考慮された評価基準値以下であった。

原子炉建屋耐震壁の最大応答せん断ひずみ

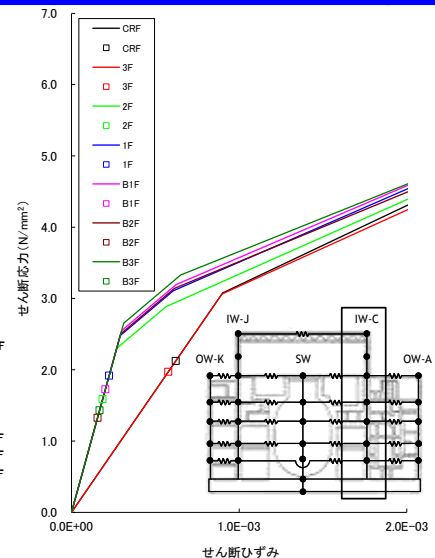
		シミュレーション解析結果		評価基準値 (JEAC4601-2008)
		最大応答せん断ひずみ	部位	
3.11地震	NS方向	0.63×10^{-3}	IW-C CRF	2.0×10^{-3}
	EW方向	0.50×10^{-3}	IW-4 3F	
4.7地震	NS方向	0.62×10^{-3}	IW-C CRF	
	EW方向	0.32×10^{-3}	IW-4 3F	



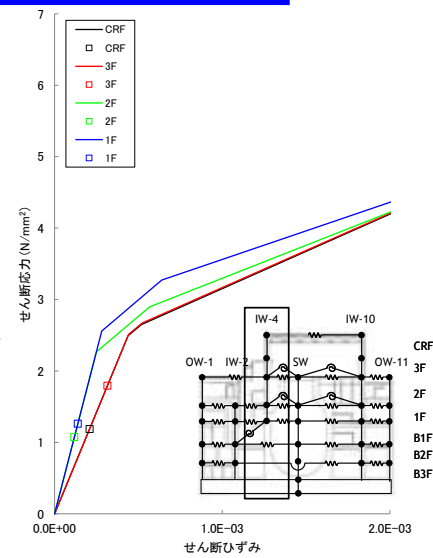
NS方向、IW-C



EW方向、IW-4



NS方向、IW-C



EW方向、IW-4

3.11地震

4.7地震

女川2号機原子炉建屋 せん断スケルトン上の最大応答値

3. 2 女川3号機原子炉建屋

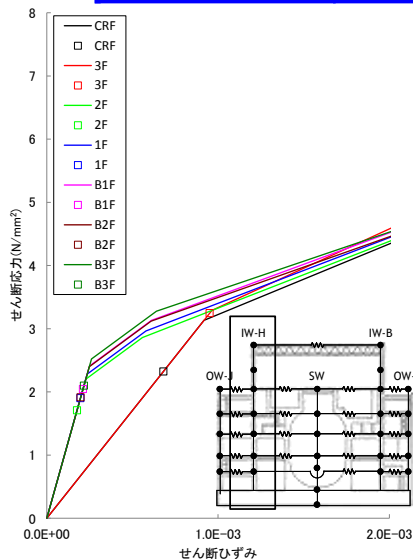
建築物・構造4-3-1 p.20再掲 一部修正

■ 女川3号機原子炉建屋 耐震壁の最大応答せん断ひずみ
事業者の評価

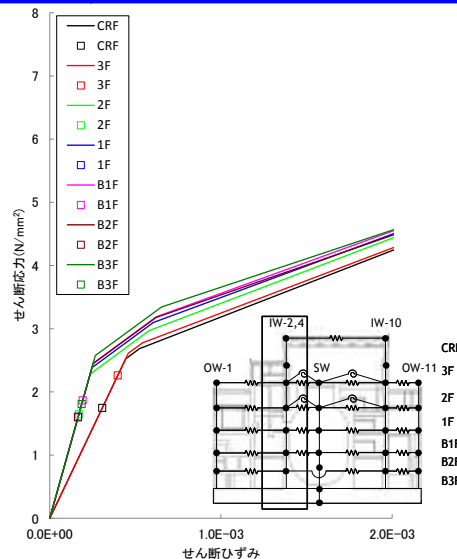
耐震壁の応答は、オペフロ階(3階)以下は最大で $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ であった。オペフロ階(3階)以上でひずみが大きくなるが、終局耐力に対し妥当な安全余裕を有し、機能保持限界との対応も考慮された評価基準値以下であった。

原子炉建屋耐震壁の最大応答せん断ひずみ

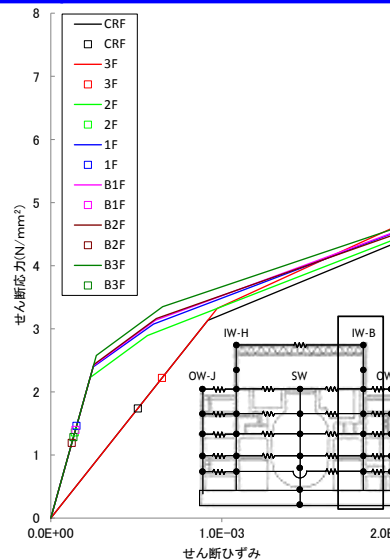
		シミュレーション解析結果		評価基準値 (JEAC4601-2008)
		最大応答せん断ひずみ	部位	
3.11地震	NS方向	0.95×10^{-3}	IW-H 3F	2.0×10^{-3}
	EW方向	0.40×10^{-3}	IW-2、4 3F	
4.7地震	NS方向	0.65×10^{-3}	IW-B 3F	
	EW方向	0.31×10^{-3}	IW-2、4 3F	



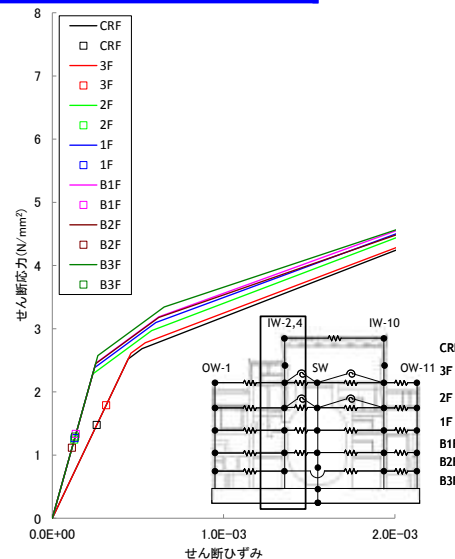
NS方向、IW-H



EW方向、IW-2、4



NS方向、IW-B



EW方向、IW-2、4

3.11地震

4.7地震

女川3号機原子炉建屋 せん断スケルトン上の最大応答値