

座学-Ⅲ(トピックス講座)

# 2007年新潟県中越沖地震と 原子力発電所の耐震安全性

福井工業大学  
安井 譲

# 木造建物の倒壊



聞光寺

# 地盤変状による被害



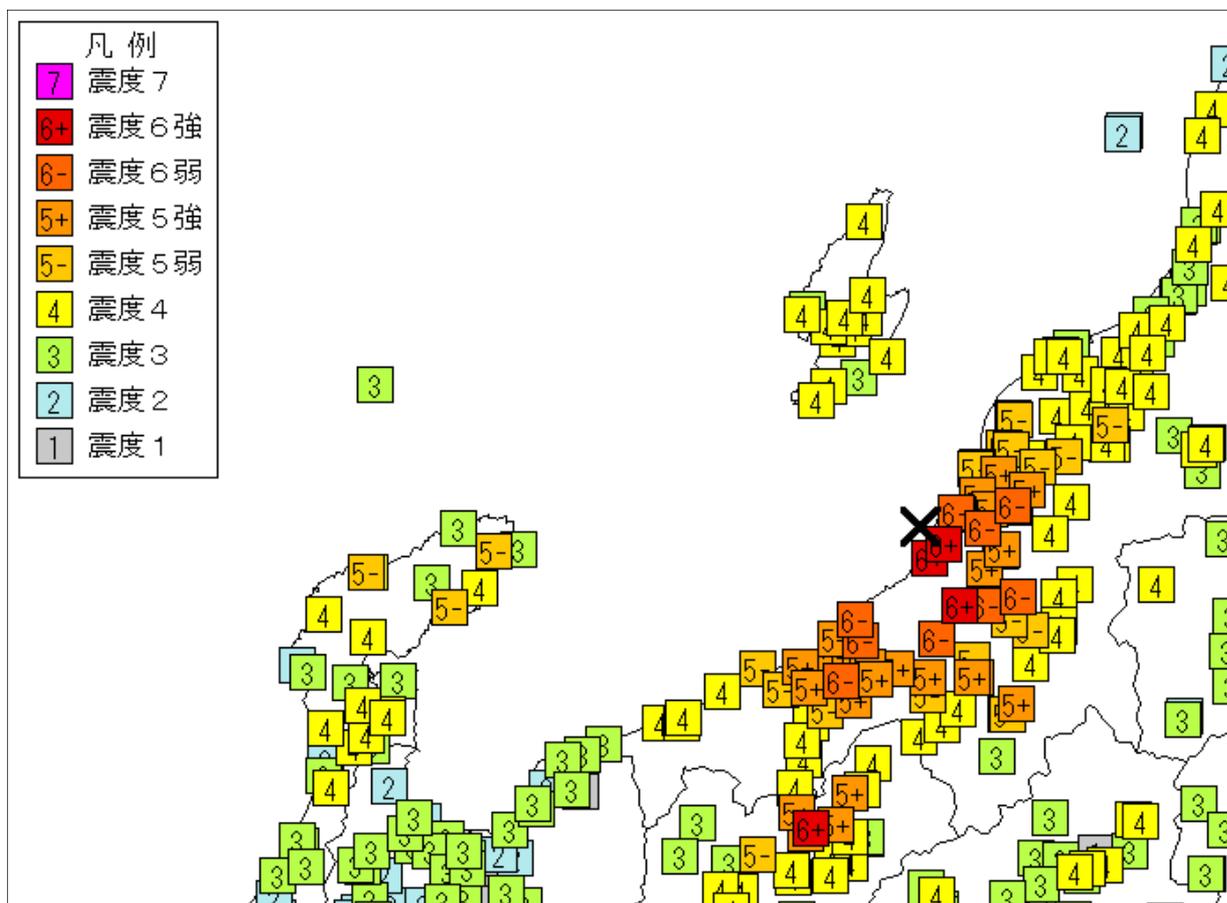
# 傾いた荒浜駅



# 鉄筋コンクリート(RC)造建物の 被害は無しか軽微



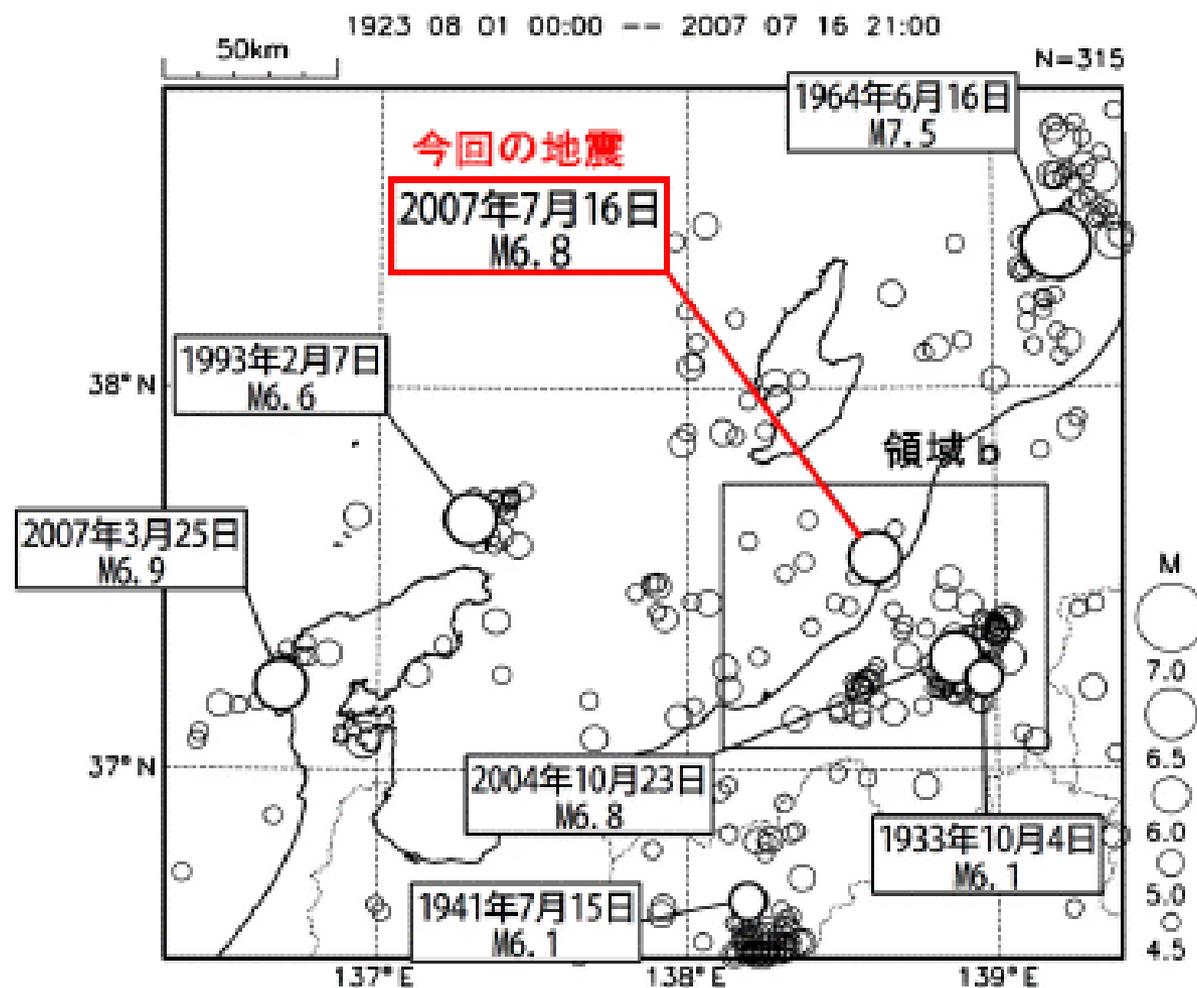
# 2007年新潟県中越沖地震 震度分布



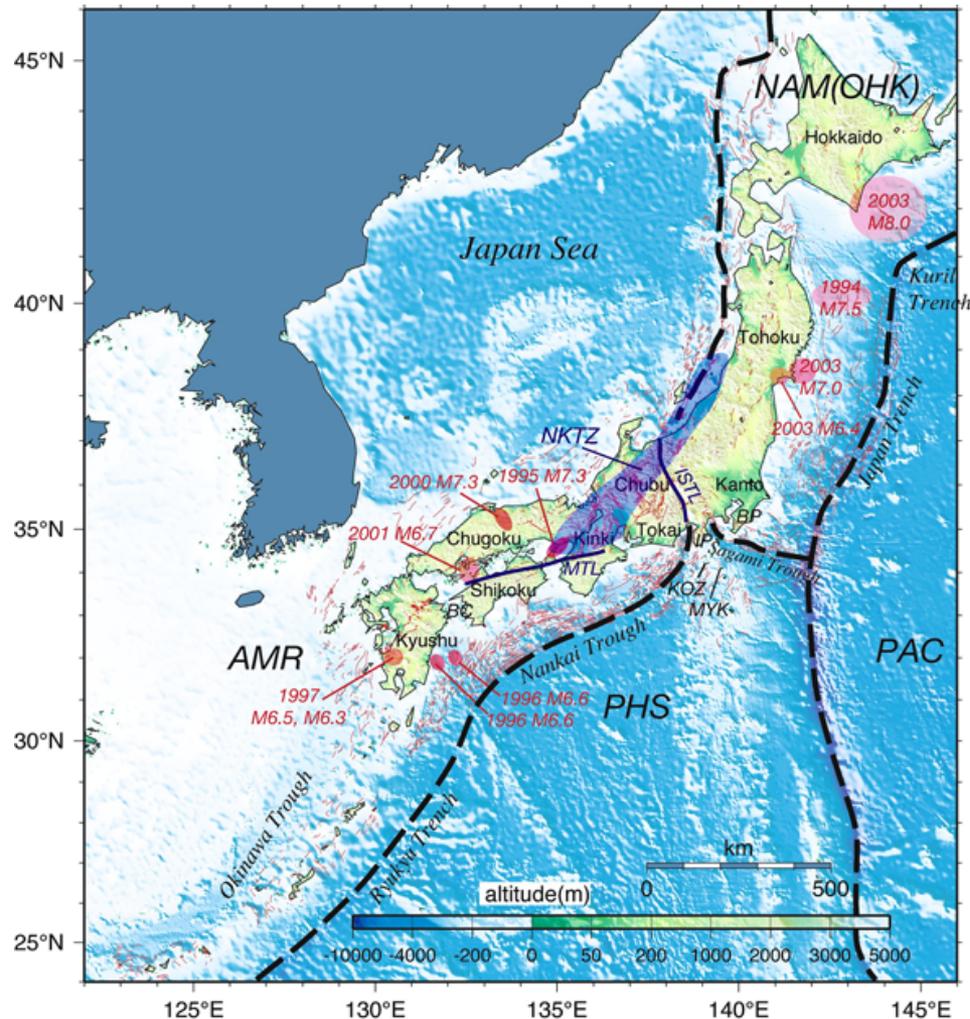
# 2007年新潟県中越沖地震 本震と最大余震の諸元

	発生日時	M	最大震度	北緯	東経	深さ(km)
本震	7/16 10:13:22.5	6.8	6+	37°33.4'	138°36.5'	17
最大余震	7/16 15:37:40.4	5.8	6-	37°30.2'	138°38.6'	23

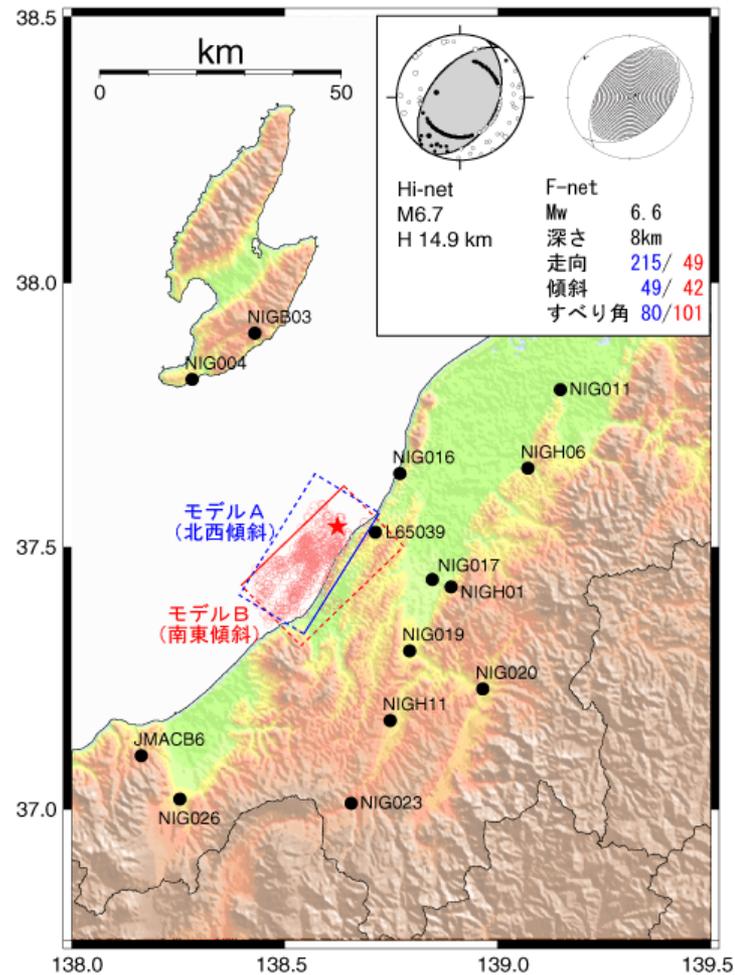
# 過去の地震状況



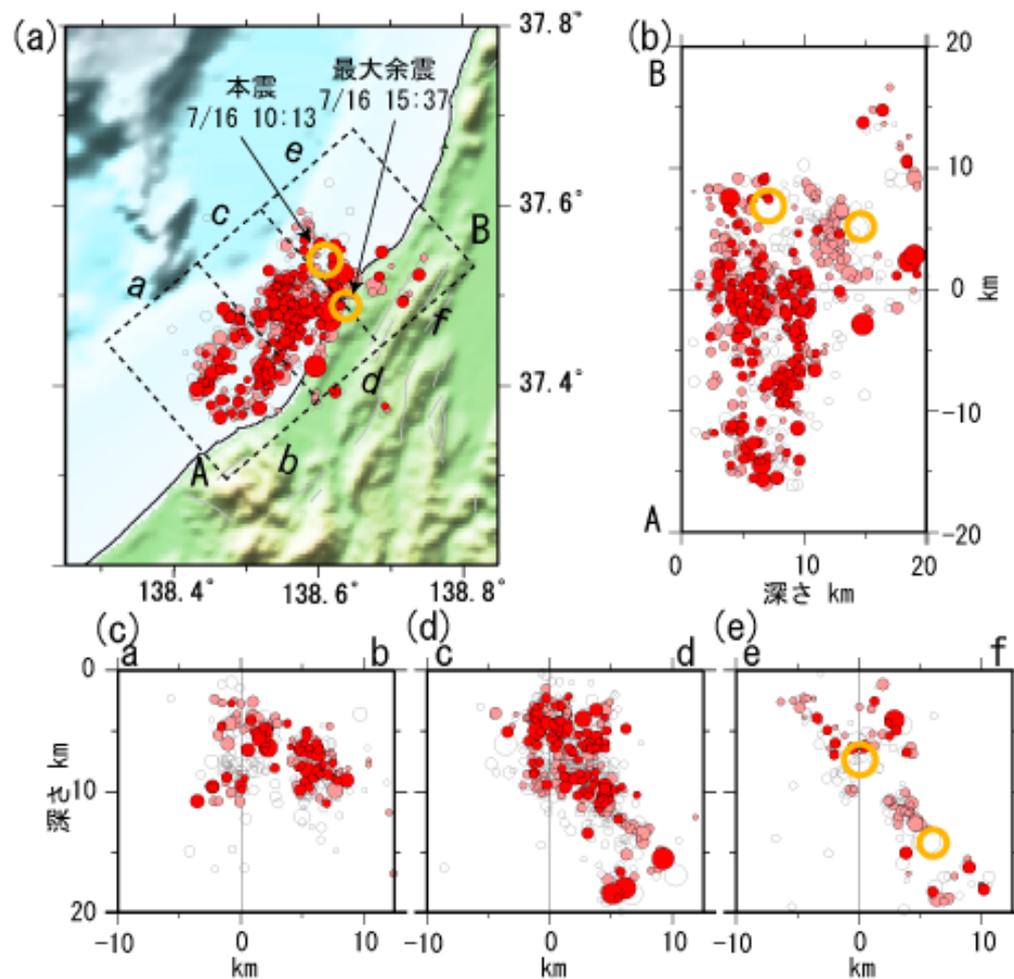
# ひずみ集中帯



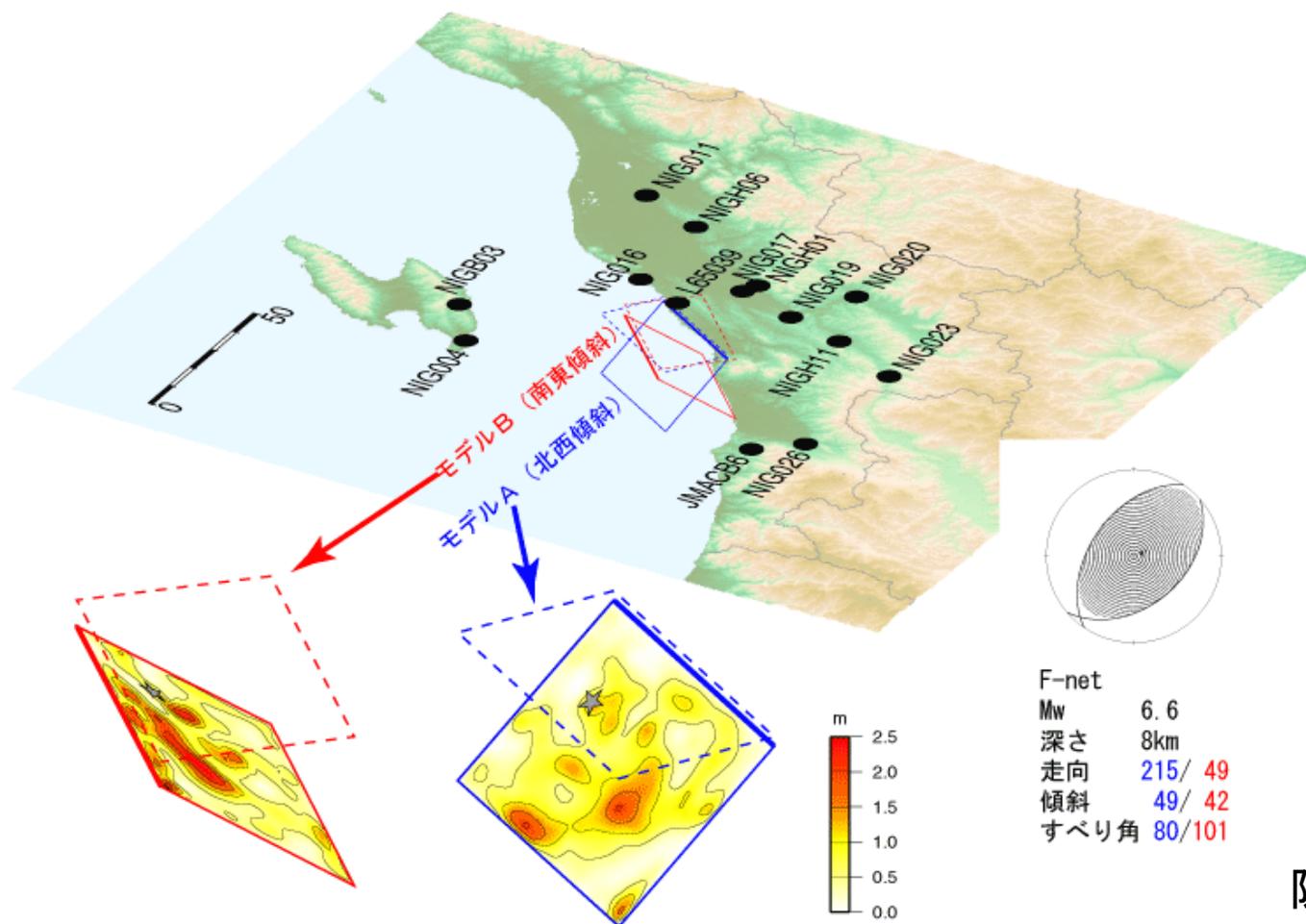
# 震源メカニズム



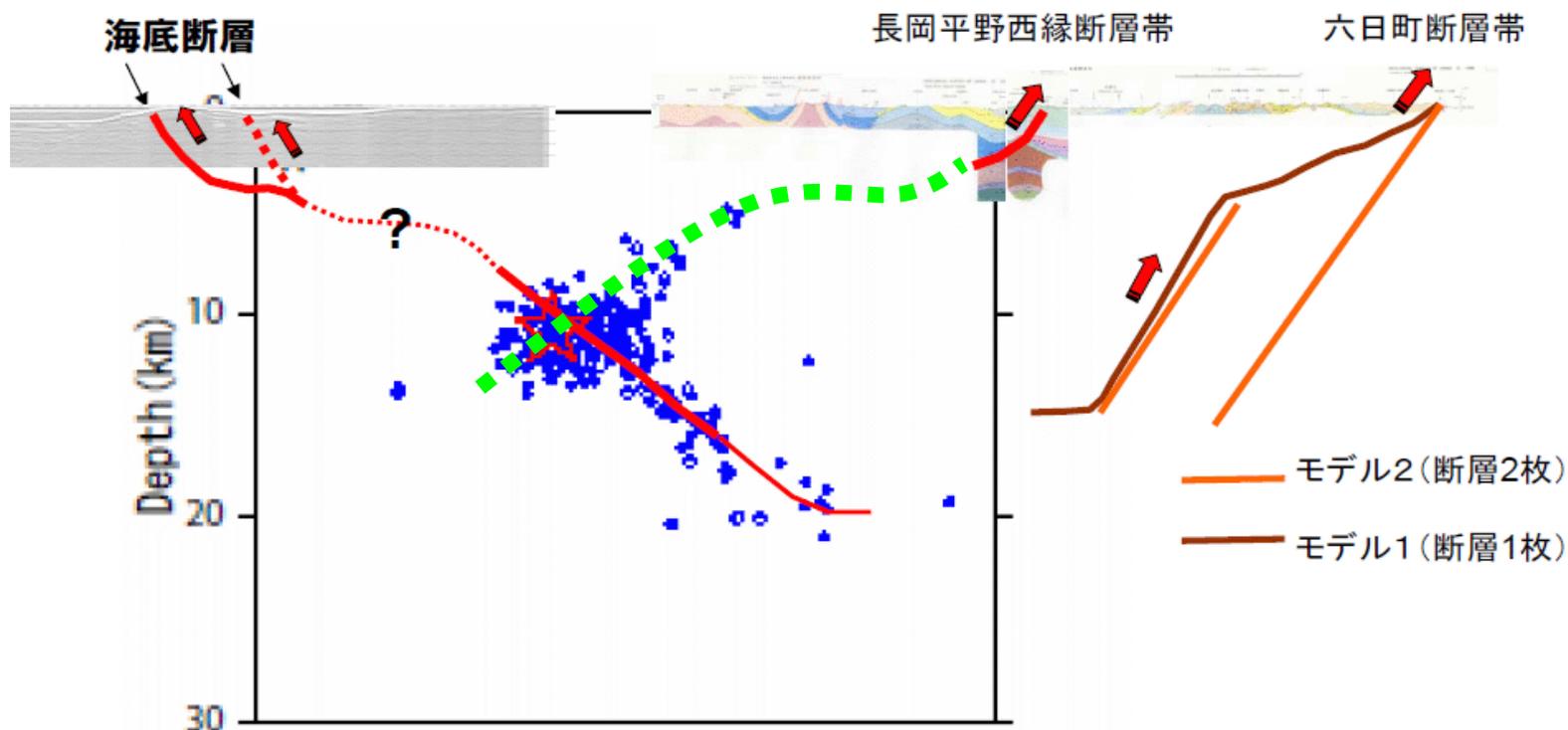
# 余震分布



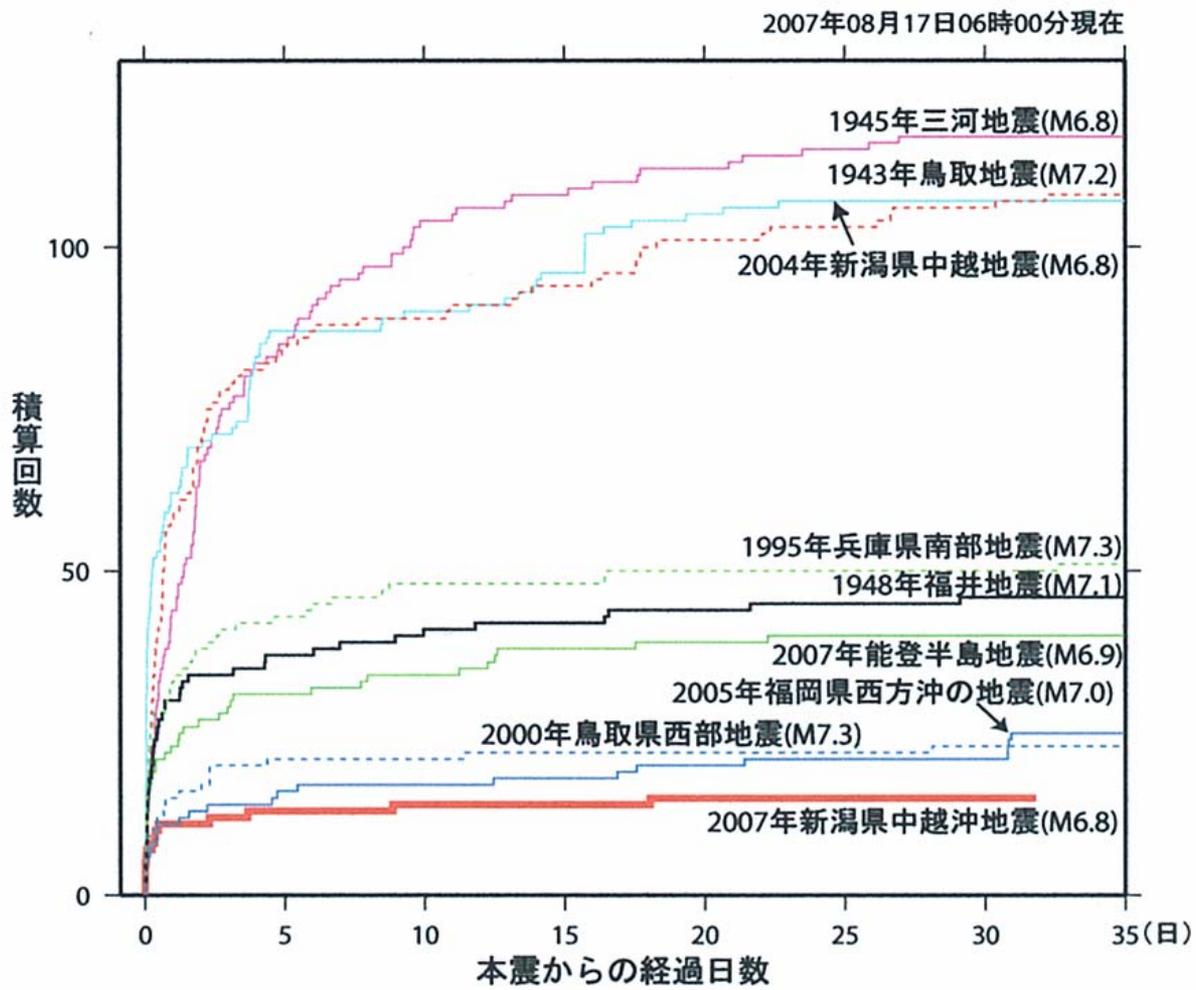
# 断層面とすべり分布



# 余震分布と既知の断層との関連

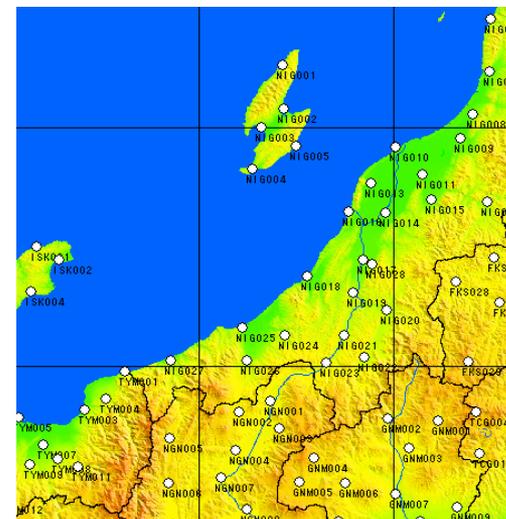


# 余震回数



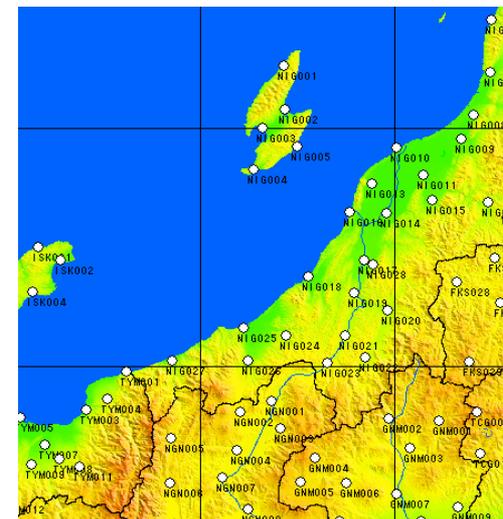


# 大きな加速度が 観測された地点



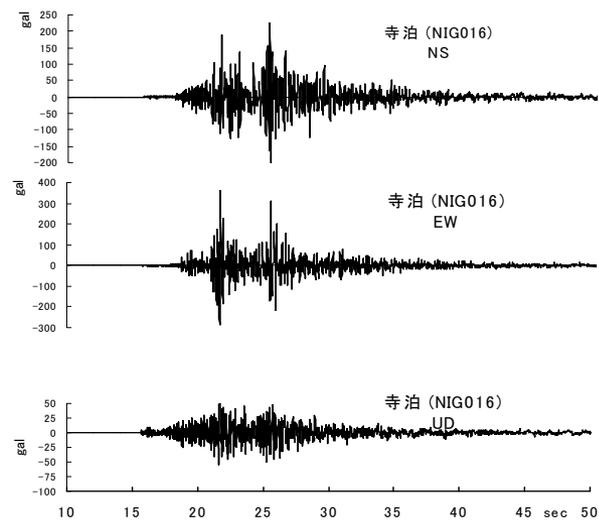
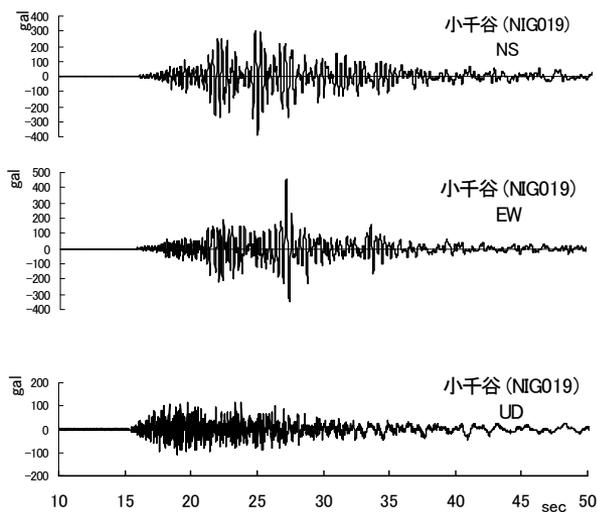
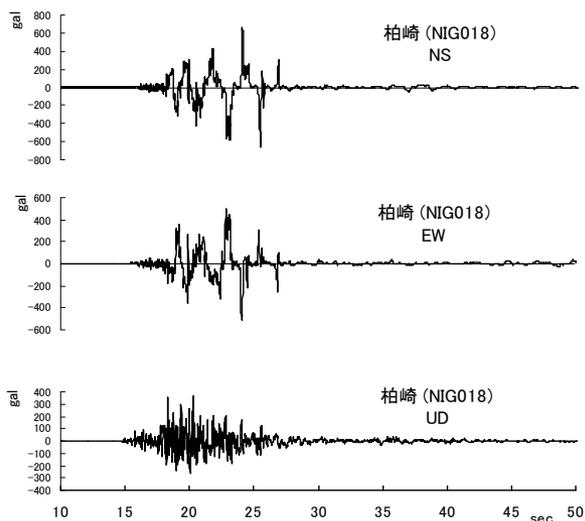
観測点名	緯度 (北緯)	経度 (東経)	震央距離 (km)	最大加速度(gal)				計測震度 (参考値)
				N-S	E-W	U-D	3成分合成	
柏崎(NIG018)	37.372	138.558	21	667	514	369	813	6.3
小千谷(NIG019)	37.306	138.79	32	391	455	116	527	5.5
寺泊(NIG016)	37.642	138.768	17	227	359	55	364	4.7
十日町(NIG021)	37.128	138.747	49	212	276	63	302	5
長岡(NIG017)	37.442	138.843	24	203	243	164	257	5
信濃(NGN002)	36.807	138.207	91	227	179	54	233	5
安塚(NIG024)	37.127	138.444	50	213	128	42	230	4.8
直江津(NIG025)	37.161	138.224	56	190	224	55	226	5.2
佐和田(NIG003)	37.998	138.323	55	167	144	89	207	4.1
松ヶ崎(NIG005)	37.92	138.498	41	127	156	54	202	3.9

# 兵庫県南部地震 神戸海洋気象台での 観測記録(神戸JMA波)との比較

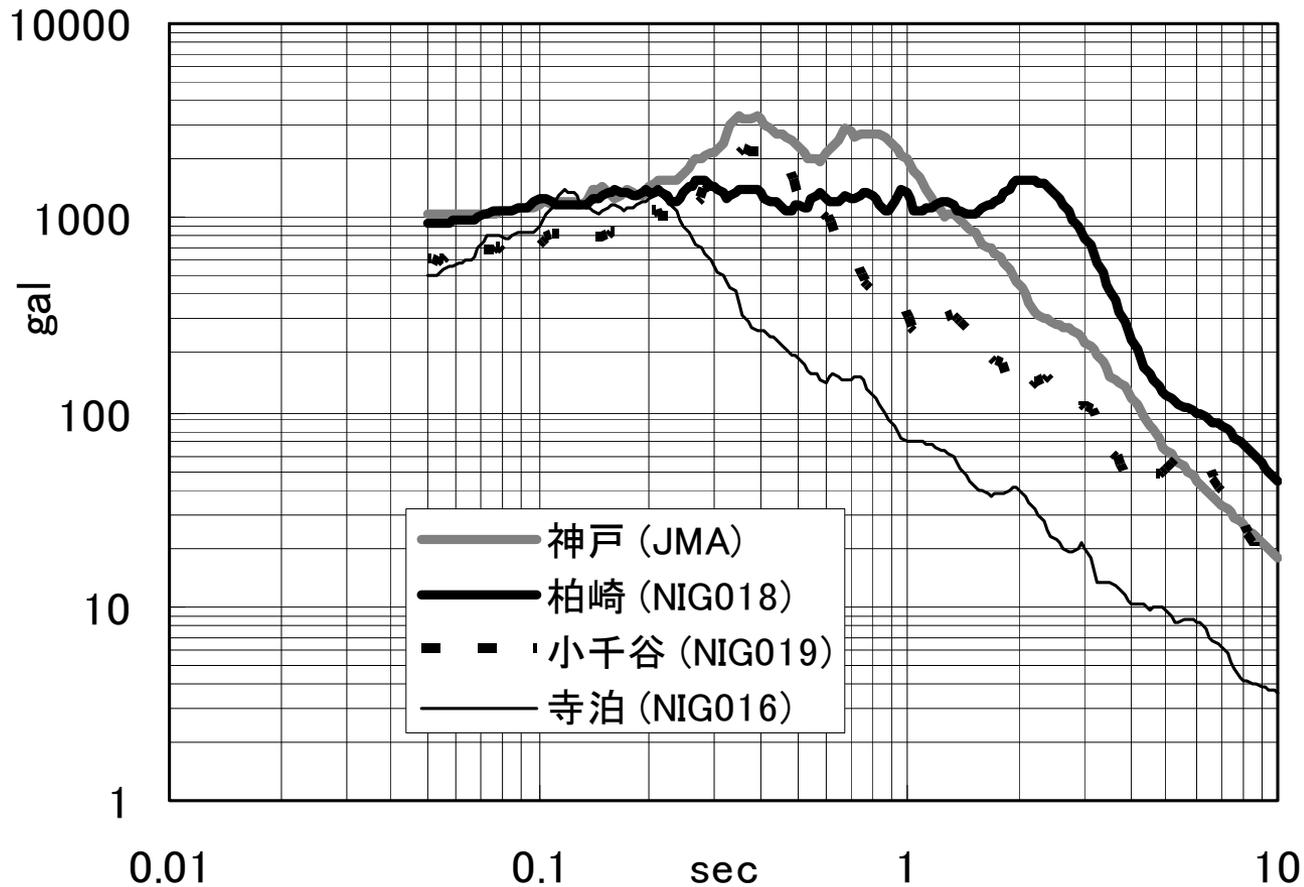


観測点名	最大加速度 [gal]				最大速度 [cm/s]			
	南北	東西	上下	3成分	南北	東西	上下	3成分
神戸JMA波	818	617	332	891	97	80	43	112
柏崎(NIG018)	667	514	369	813	110	84	27	127
小千谷(NIG019)	391	455	116	527	21	46	9	48
寺泊(NIG016)	227	359	55	364	7	15	3	15

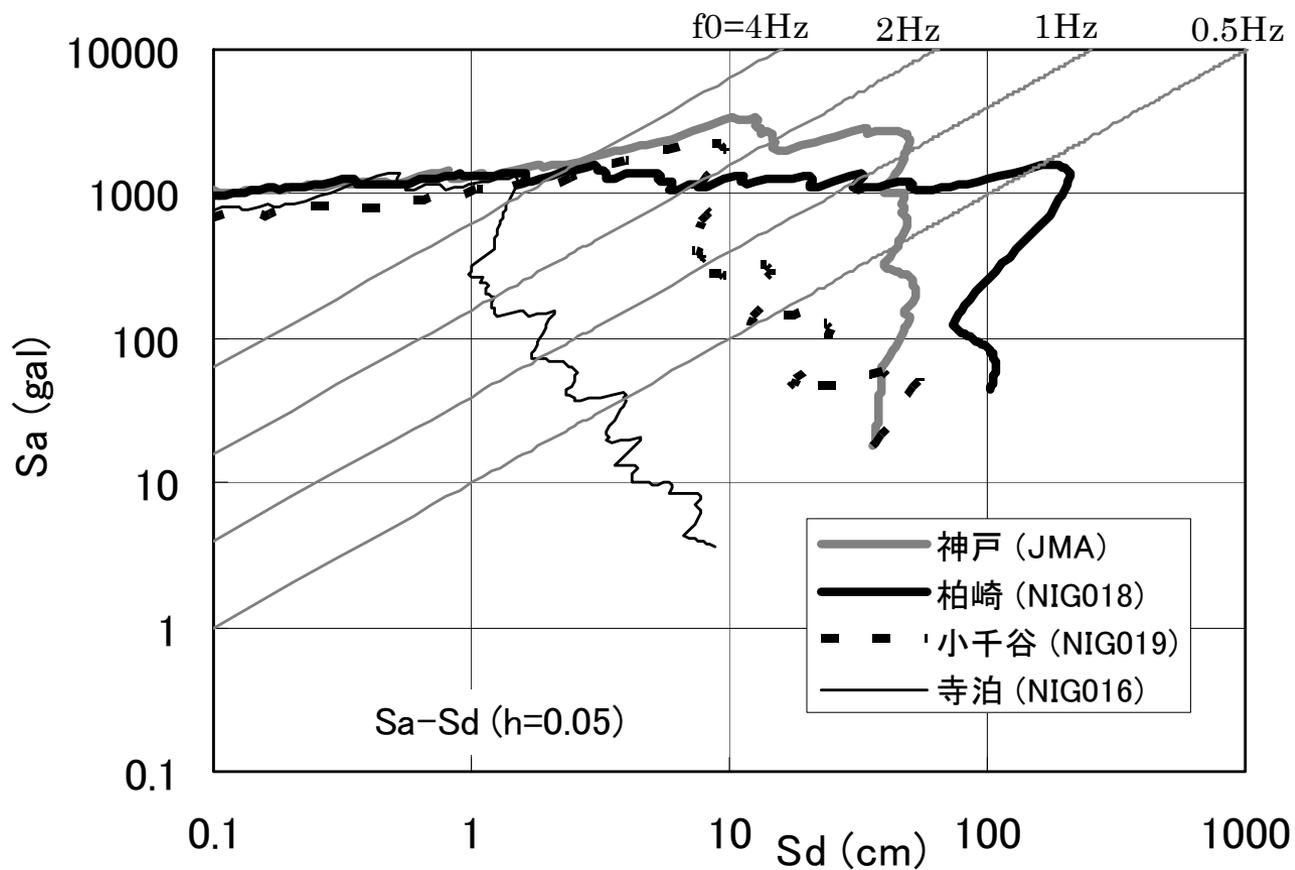
# 最大3地点の地震波形



# 加速度応答スペクトル



# Sa-Sd 曲線



# 柏崎刈羽原子力発電所



# 柏崎刈羽原子力発電所の位置



新潟県中越地震が発生  
そのとき

## 柏崎刈羽原子力発電所は・・・

- 運転中であつた3号機、4号機および7号機の原子炉が自動停止
- 起動中の2号機も同様に自動停止
- 1号機、5号機および6号機は定期検査で、停止中
- 3号機所内変圧器からの火災が発生するも、約2時間後、鎮火

# 原子炉施設が世界ではじめて 大地震に見舞われた

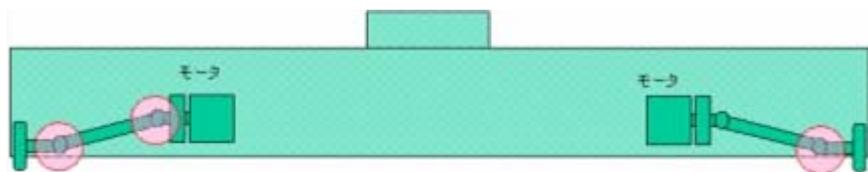
- 緊急停止、冷却、閉じ込める一連の機能は作動
- 設計値の3.6倍の最大加速度を記録した
- 63点の地震記録を失った
- 微量であるが放射能漏れを起こした
- 地震により火災を起こした
- クレーンが損傷した
- 主排気塔の継ぎ手部分が損傷した



# 3号機の変圧器の火災



# クレーン継ぎ手部分の破損

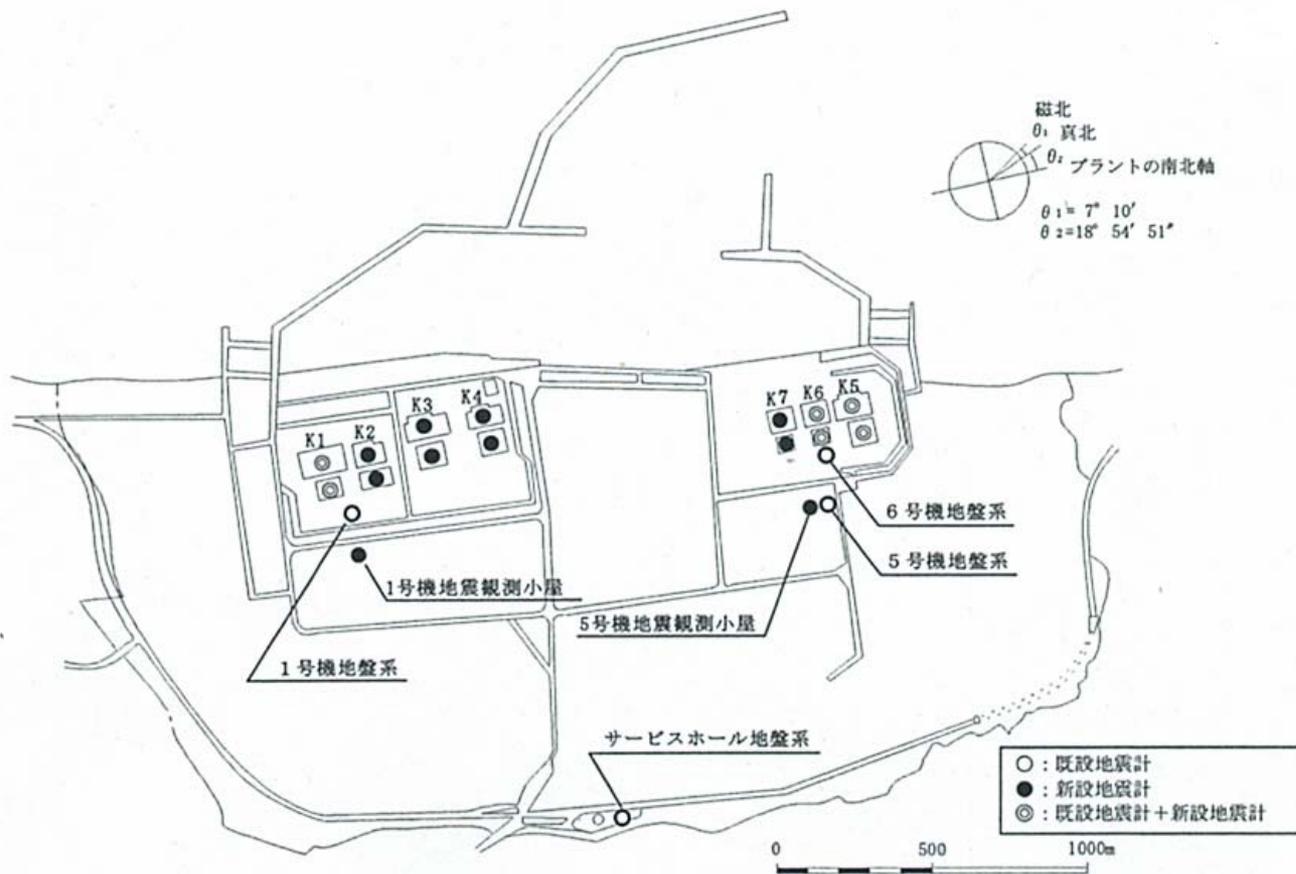


● 破損箇所

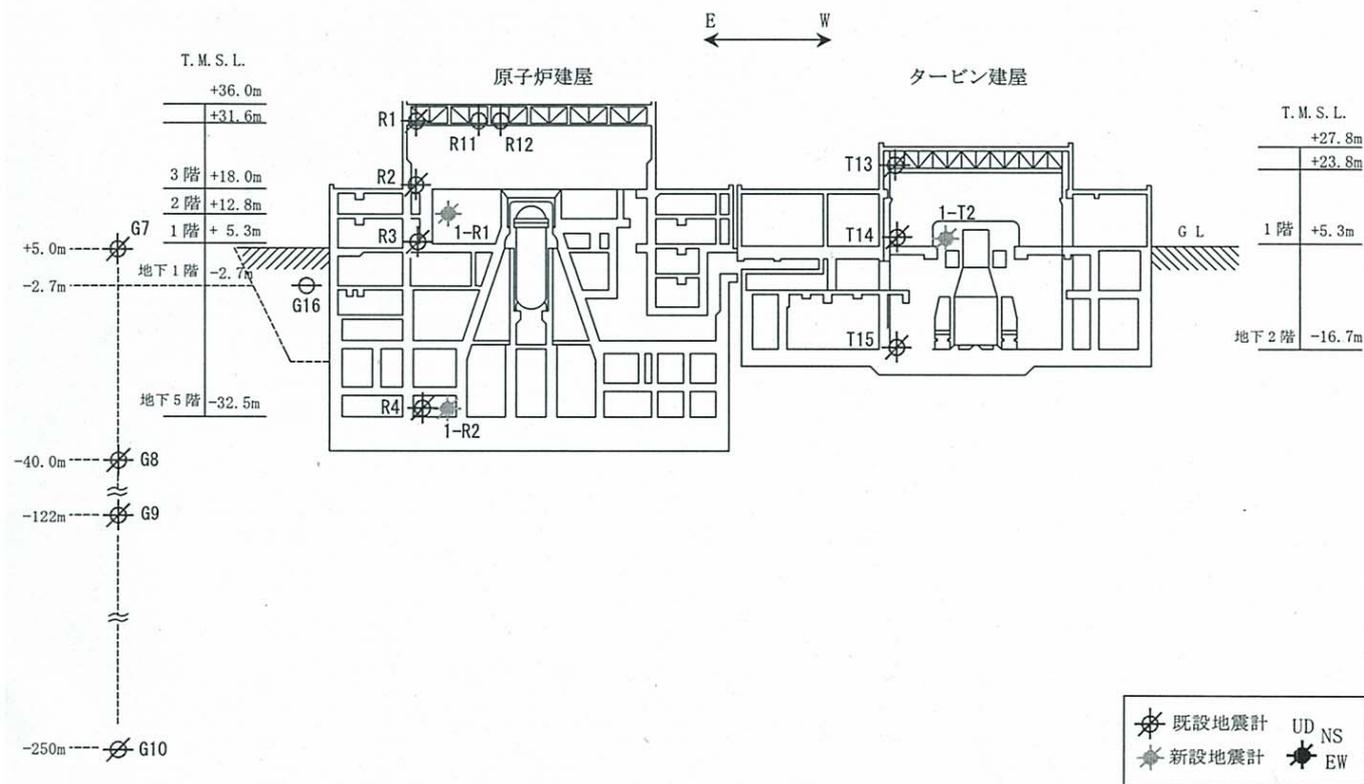
# 主排気塔の継ぎ手部分のずれ

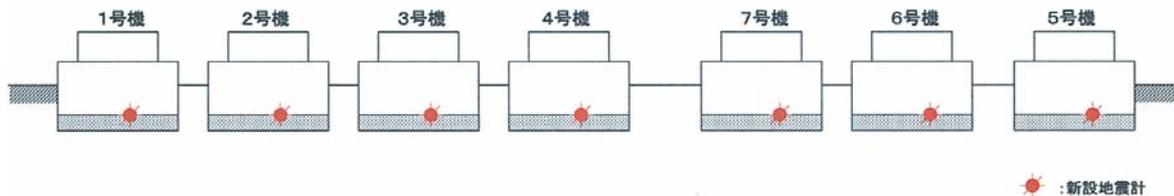


# 地震観測点の配置



# 地震計配置図(1号機)



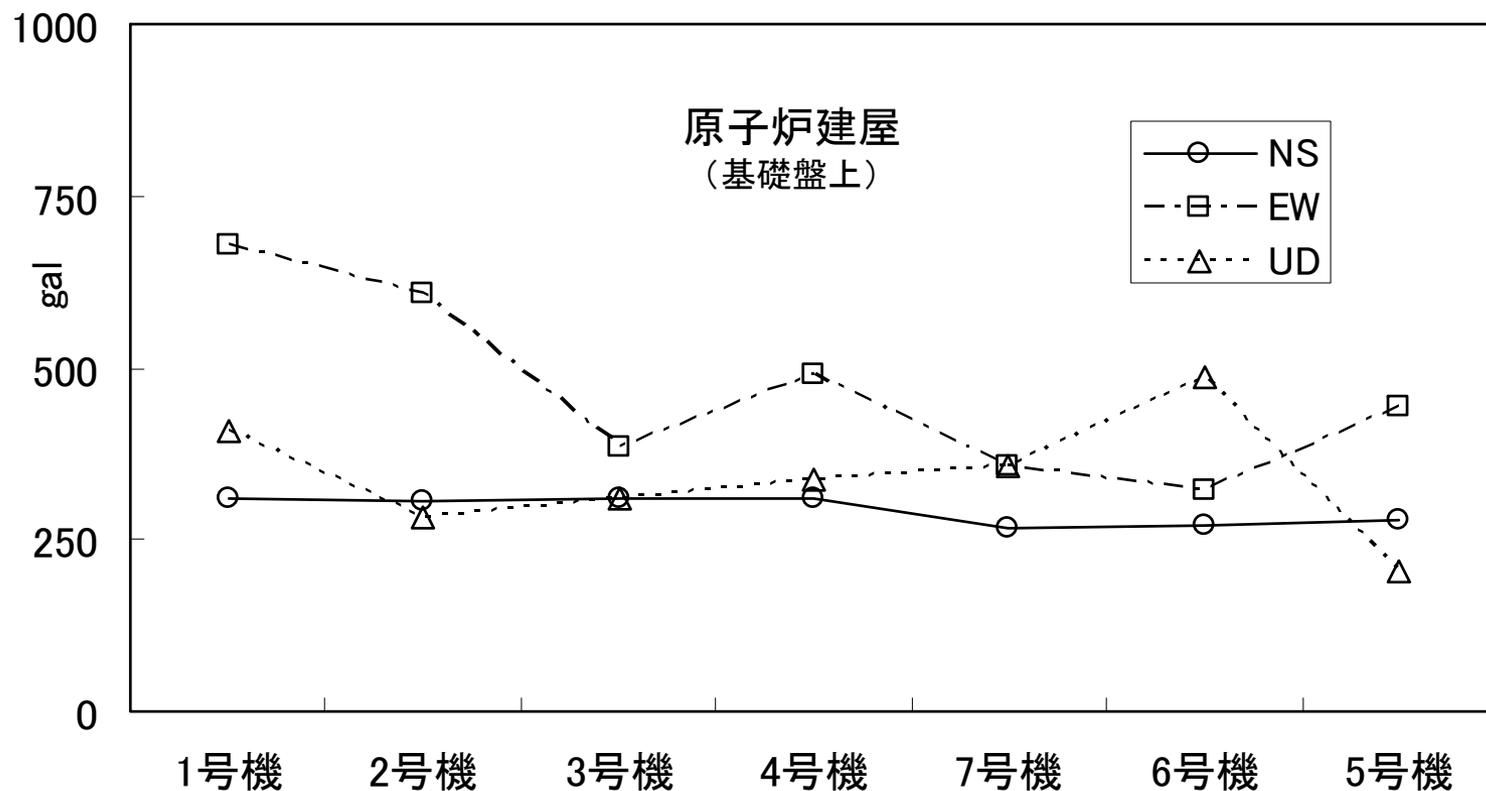


号機	観測階	方向	観測 (gal)	設計 (gal)	観測/設計
1	最下階(B5F)	NS	311	274	1.1
		EW	680	273	2.5
		UD	408	235	1.7
2	最下階(B5F)	NS	304	167	1.8
		EW	606	167	3.6
		UD	282	235	1.2
3	最下階(B5F)	NS	308	192	1.6
		EW	384	193	2.0
		UD	311	235	1.3
4	最下階(B5F)	NS	310	193	1.6
		EW	492	194	2.5
		UD	337	235	1.4
5	最下階(B4F)	NS	277	249	1.1
		EW	442	254	1.7
		UD	205	235	0.9
6	最下階(B3F)	NS	271	263	1.0
		EW	322	263	1.2
		UD	488	235	2.1
7	最下階(B3F)	NS	267	263	1.0
		EW	356	263	1.4
		UD	355	235	1.5

# 原子炉建屋の 最大加速度

- 最大加速度が設計値の3.6倍(2.5倍)になった
- 1号機と2号機のEW方向の観測値が他の号機と比べて大きい

# 原子炉建屋基礎盤上の最大加速度



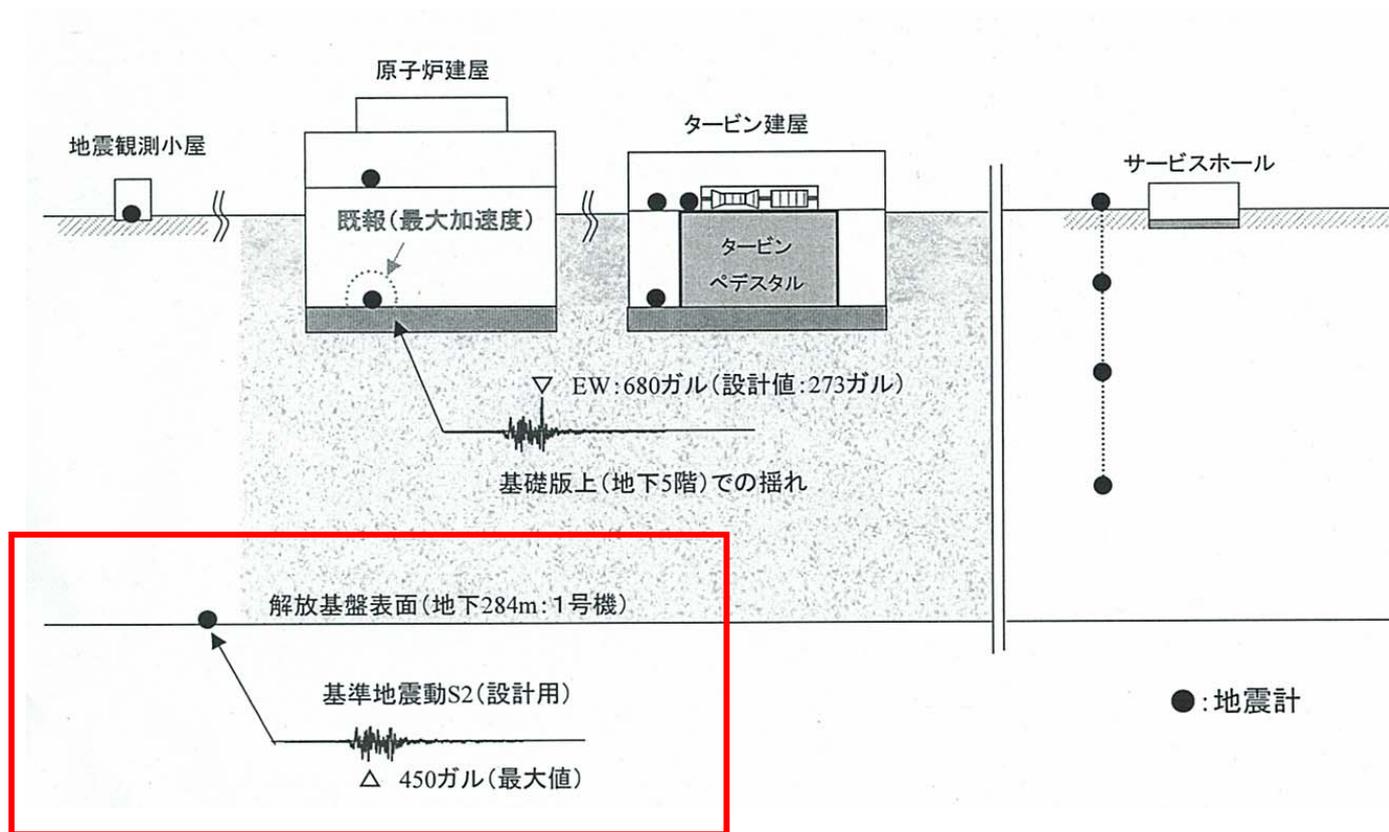
# 地盤系の最大加速度

- 1号機系: 993gal (GL-255m)
- 5号機系: 450gal (GL-300m)
- SH系: 728gal (GL-250m)

S2地震	450gal
設定深さ	GL-284m

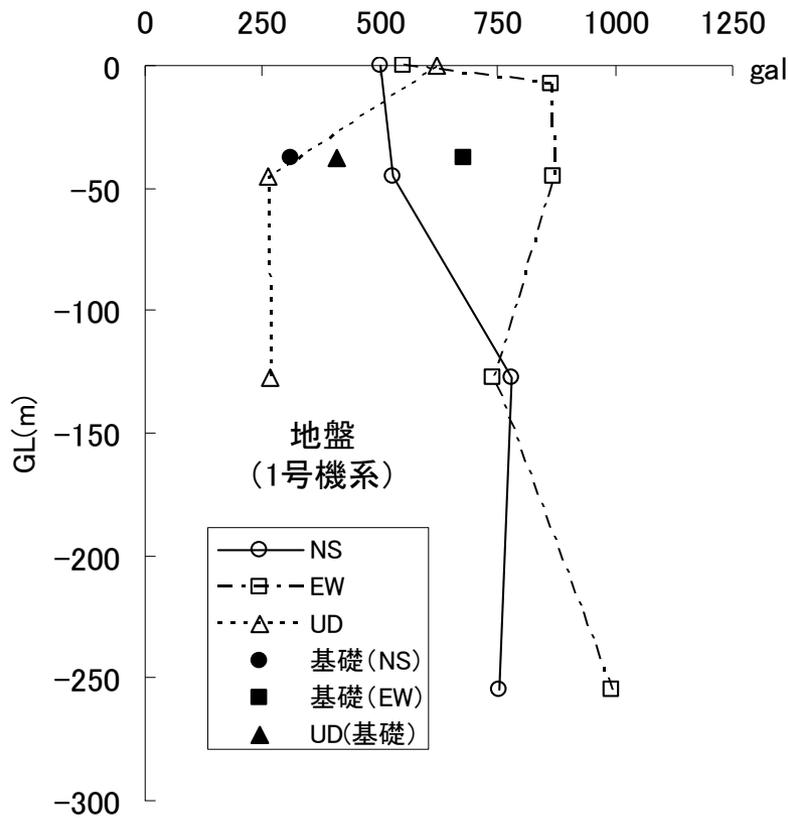
	測点	TMSL (m)	深度 (m)	NS (gal)	EW (gal)	UD (gal)
1号機系	G7	5	0	503	548	620
	G16	-2.7	-7.7	-	864	-
	G8	-40	-45	529	867	260
	G9	-122	-127	780	739	264
	G10	-250	-255	753	993	-
5号機系	G51	9.3	-2.7	685	737	308
	G52	-24	-36	415	388	166
	G53	-100	-112	396	586	226
	G54	-180	-192	419	407	146
	G55	-300	-312	407	450	187
6号機系	G61	-14	-26	300	343	285
	G62	-100	-112	352	-	225
SH系	SG1	65.1	-2.4	347	437	539
	SG2	16.7	-50.8	340	411	179
	SG3	-31.9	-99.4	403	647	174
	SG4	-182.3	-250	430	728	160

# 開放基盤表面での最大加速度(設計値)

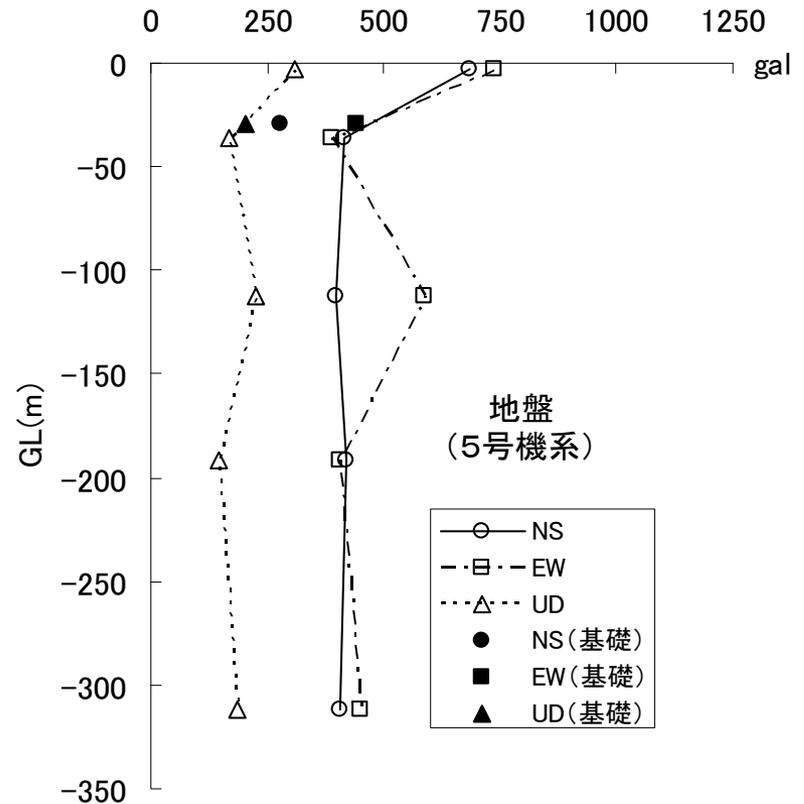


# 地盤系の最大加速度

## 1号機系地盤



## 5号機系地盤



# 地震観測波形と加速度応答スペクトル (1号機)

- 波形に3つのショックがみられる
- スペクトルの全域で設計値を上回っている

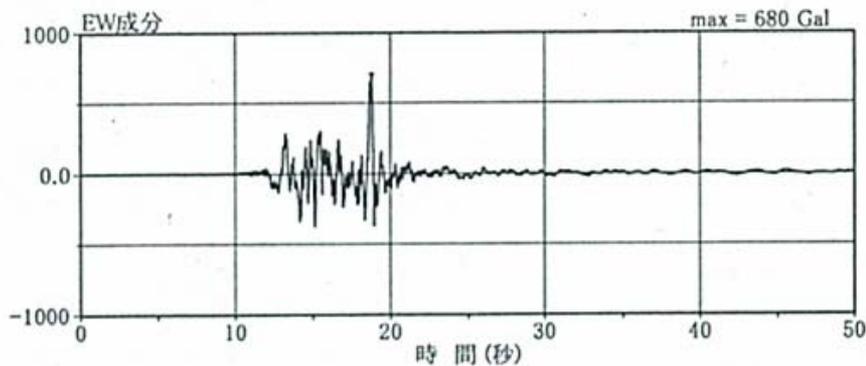


図 2-1 1号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

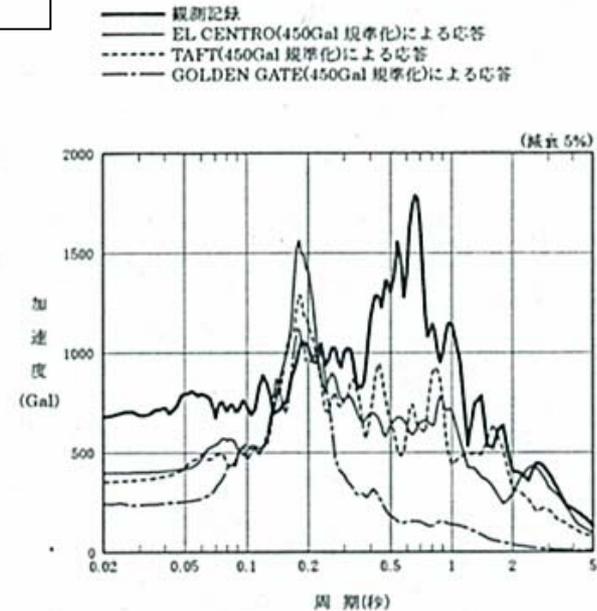


図 3-1 1号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

# 地震観測波形と加速度応答スペクトル (2号機)

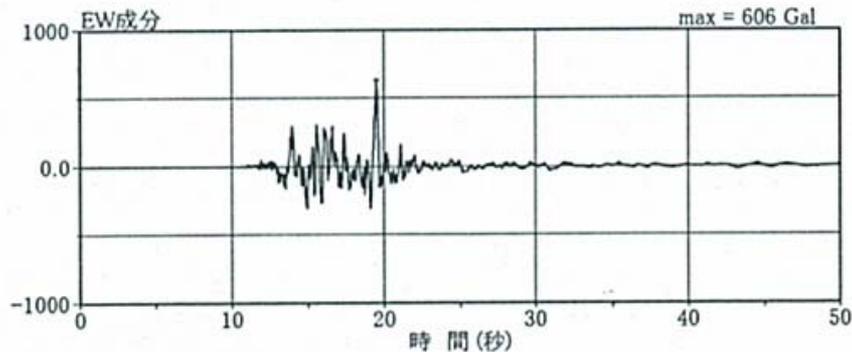


図 2-2 2号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

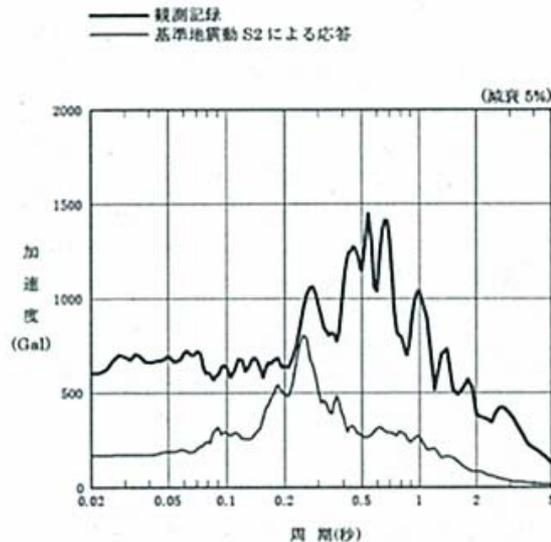


図 3-2 2号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

# 地震観測波形と加速度応答スペクトル (3号機)

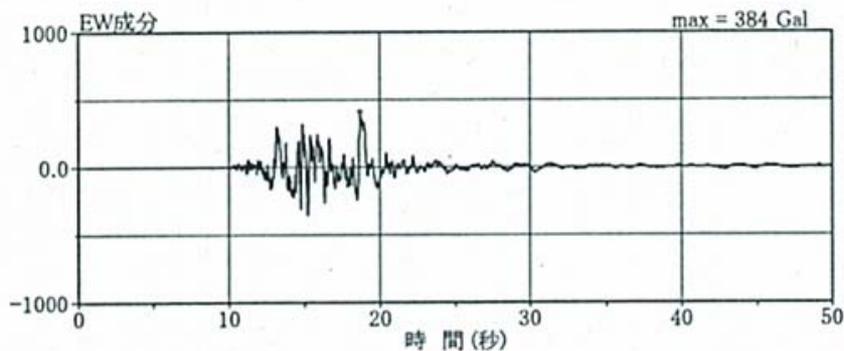


図 2-3 3号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

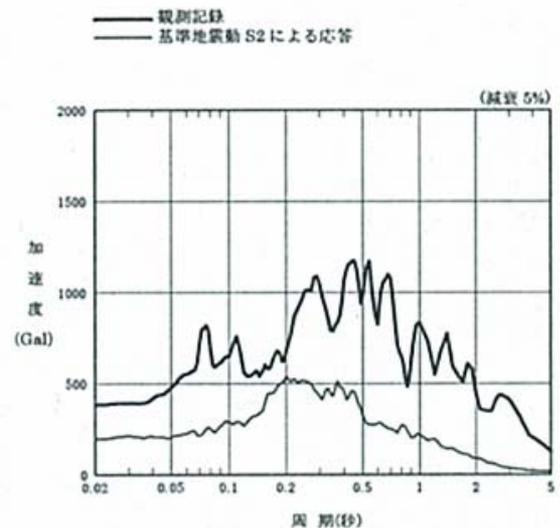


図 3-3 3号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

# 地震観測波形と加速度応答スペクトル (4号機)

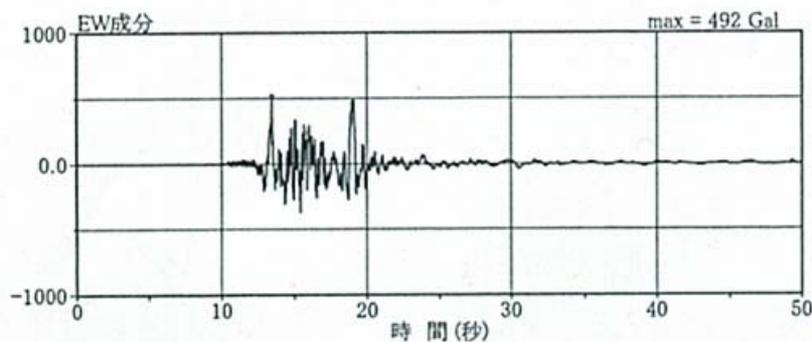


図 2-4 4号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

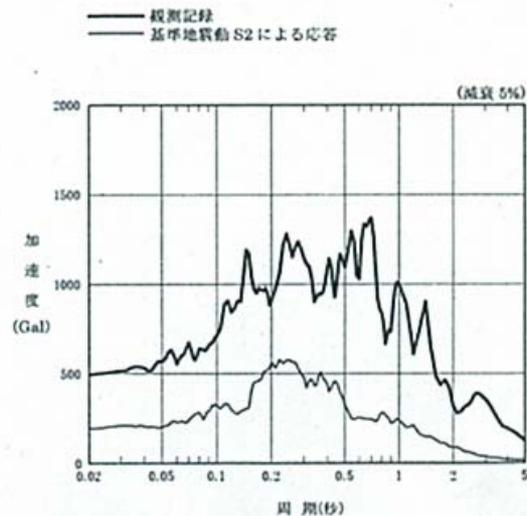


図 3-4 4号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

# 地震観測波形と加速度応答スペクトル (5号機)

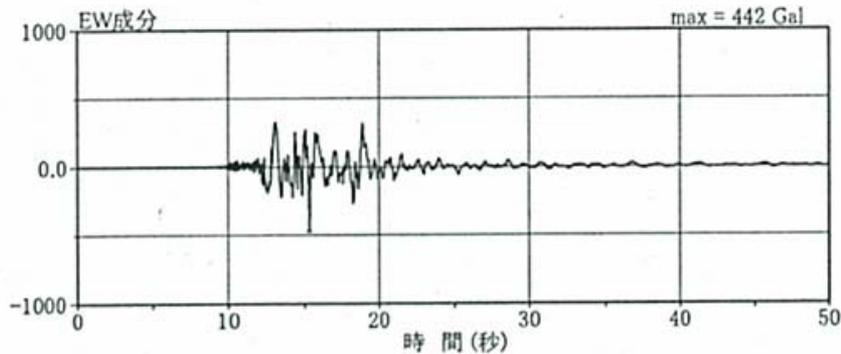


図 2-5 5号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

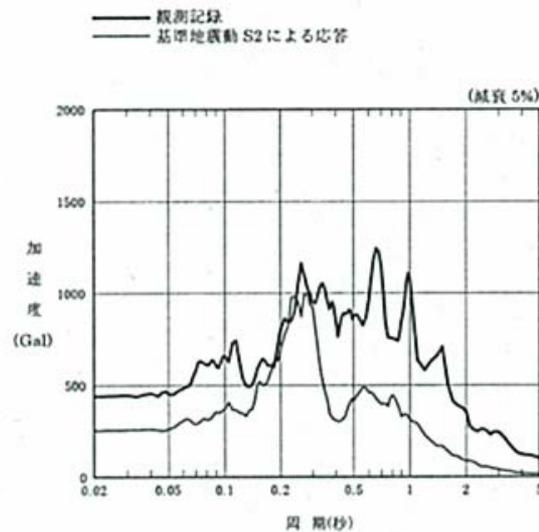


図 3-5 5号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

# 地震観測波形と加速度応答スペクトル (6号機)

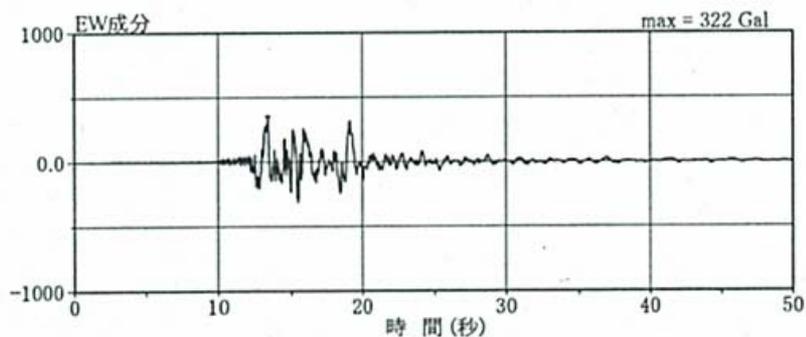


図 2-6 6号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

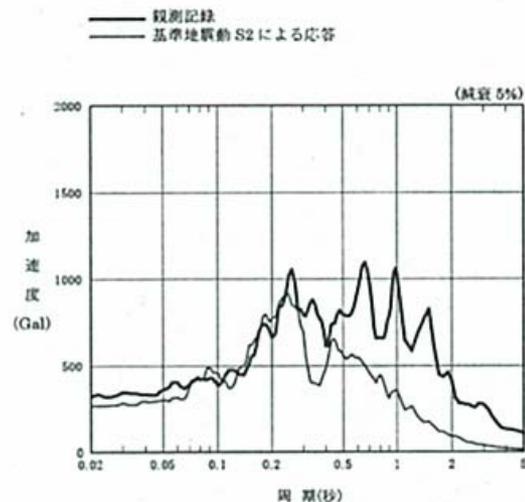


図 3-6 6号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

# 地震観測波形と加速度応答スペクトル (7号機)

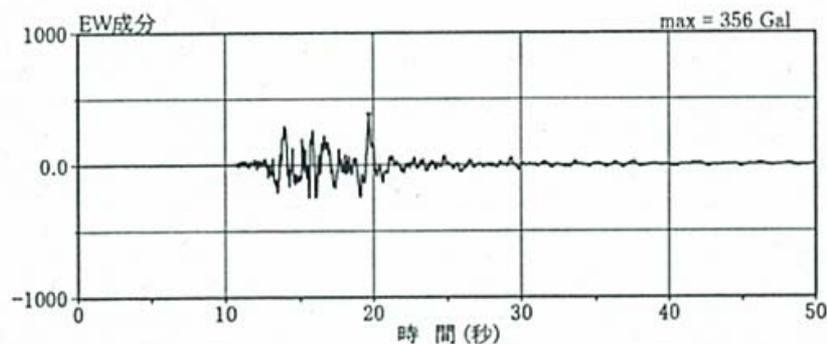


図 2-7 7号機原子炉建屋基礎版上の加速度時刻歴波形(東西方向)

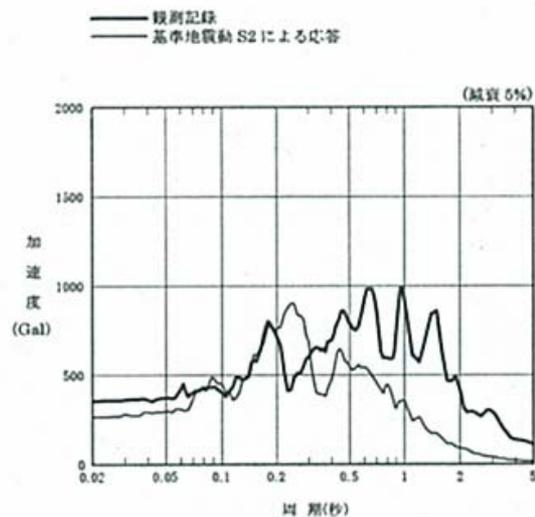
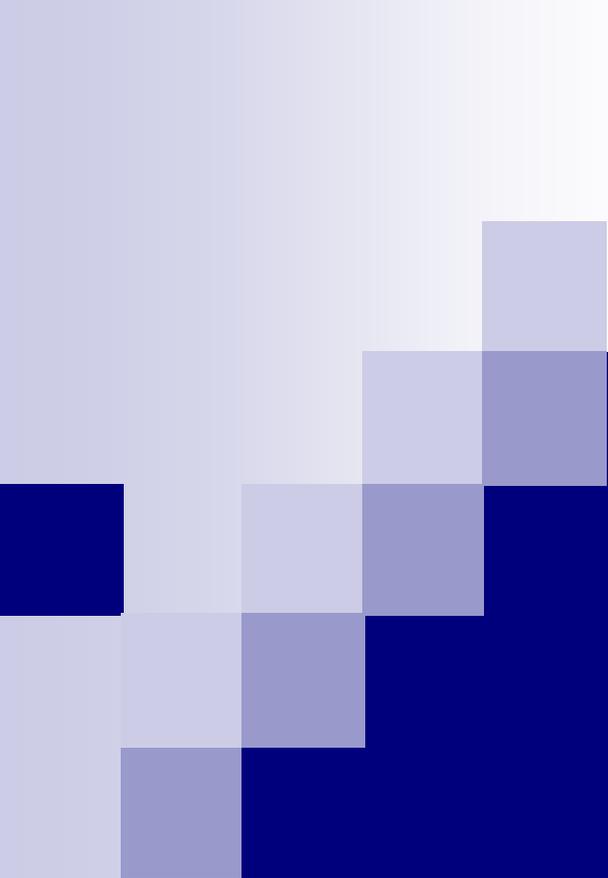


図 3-7 7号機原子炉建屋基礎版上の加速度応答スペクトル(東西方向)

# 2007年新潟県中越沖地震が示した特徴 (耐震設計)

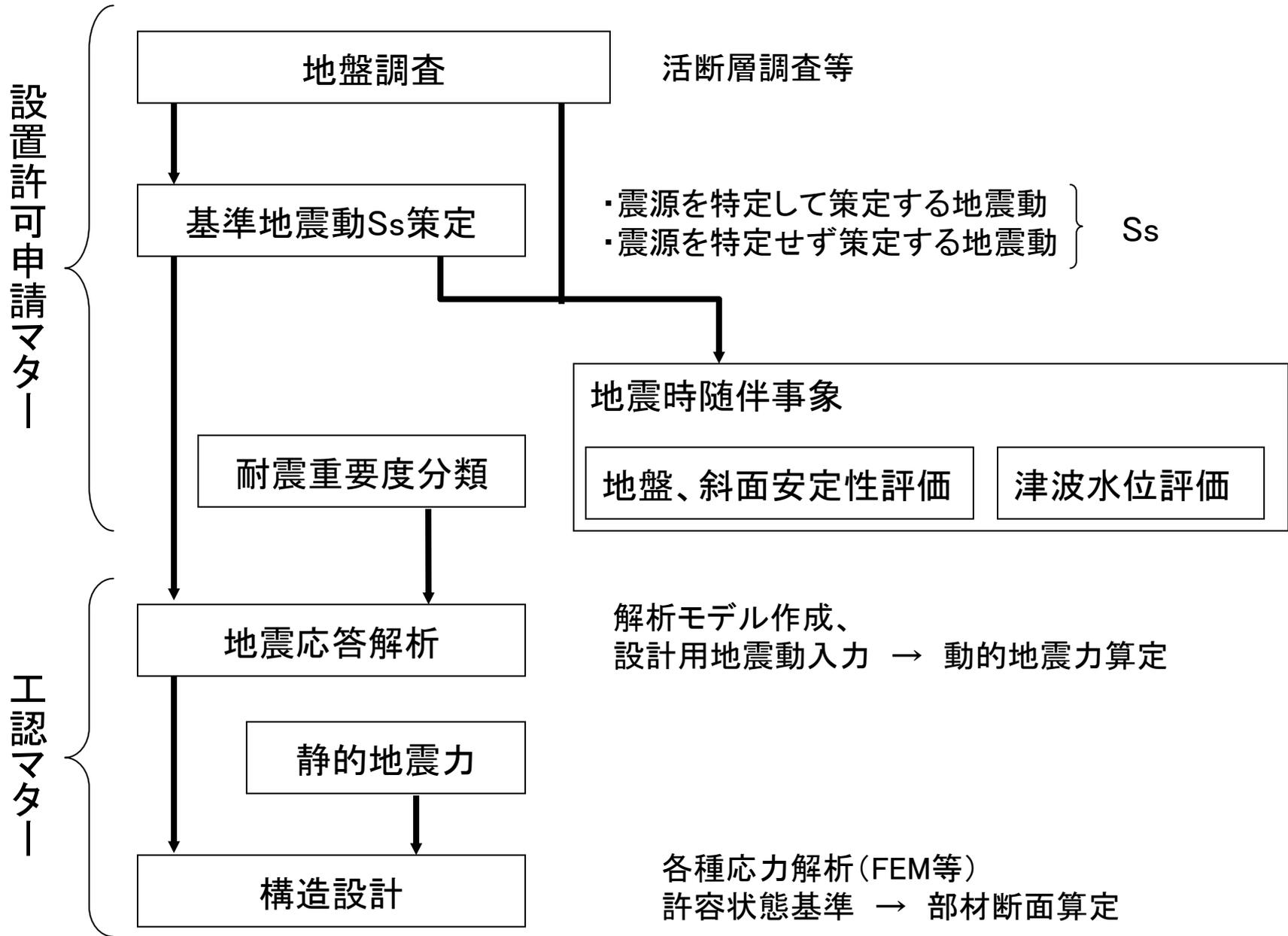
- 観測地震波には3つのショックが認められた
- 設計値(最大値、スペクトル)を大幅に上回った
- 1号機建屋と2号機建屋が特に大きく揺れた
- 1号機地盤系の基盤面深さで993galを記録した
- 5号機地盤系の基盤面深さで450galを記録した
- 地盤変状がもとで火災が発生した



これらの特徴はどのような課題を提起しているのか？

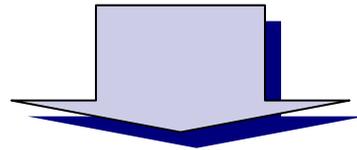
原子炉建屋の耐震設計法について概観してみる

# 耐震設計の概略フロー



## 耐震設計の概略フロー: 地盤調査

建設予定地点に活断層がないことを確認するとともに、敷地内の地盤の状態を詳細に把握する。

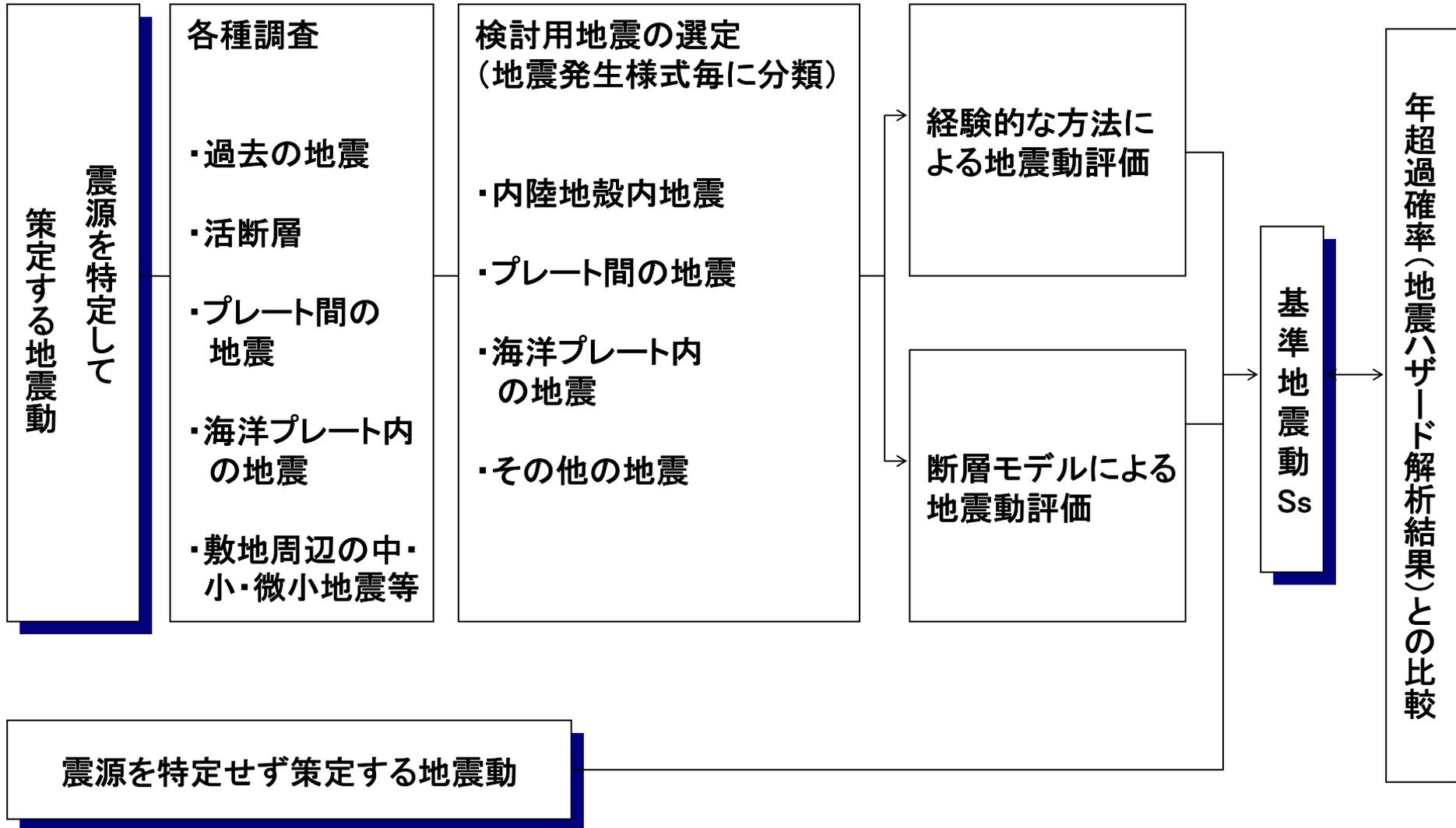


主に以下の調査を実施

- ボーリング調査
- 試掘坑調査
- 弾性波探査
- トレンチ調査

また、敷地の周辺の活断層及び過去の地震の調査を実施

# 基準地震動S<sub>s</sub>策定



## 耐震設計の概略フロー: 重要度分類

耐震設計の目的を合理的に達成させるために、各施設を安全上の観点から重要度分類し、各々に応じた設計を行う

**S**

自ら放射性を内蔵しているか又は内蔵している施設に直接関係しており、その機能喪失により放射性物質を外部に放散する可能性のあるもの、及びこれらの事態を防止するために必要なもの、並びにこれらの事故発生の際に外部に放散される放射性物質による影響を低減させるために必要なものであって、その影響の大きいもの

**B**

上記において、影響が比較的小さいもの

**C**

Sクラス、Bクラス以外であって、一般産業施設と同等の安全性を保持すればよいもの

# 耐震重要度分類例

耐震 クラス	主要設備	
	B W R	P W R
S	<ul style="list-style-type: none"> <li>(i) 原子炉圧力容器及び原子炉冷却材圧力バウンダリに属する機器・配管系</li> <li>(ii) 使用済燃料プール</li> <li>(iii) 制御棒, 制御棒駆動機構及び制御棒駆動水圧系(スクラム機能)</li> <li>(iv) 残留熱除去系(停止時冷却モード)</li> <li>(v) 非常用炉心冷却系</li> <li>(vi) 原子炉格納容器及び原子炉格納容器バウンダリに属する配管, 弁</li> <li>(vii) 非常用ガス処理系</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(i) 原子炉圧力容器及び原子炉冷却材圧力バウンダリに属する機器・配管系</li> <li>(ii) 使用済燃料ピット</li> <li>(iii) 制御棒クラスタ及び制御棒駆動装置(スクラム機能)</li> <li>(iv) 余熱除去系</li> <li>(v) 安全注入系</li> <li>(vi) 原子炉格納容器及び原子炉格納容器バウンダリに属する配管, 弁</li> <li>(vii) アニユラス空気浄化設備</li> </ul>
B	<ul style="list-style-type: none"> <li>(i) 廃棄物処理設備</li> <li>(ii) 蒸気タービン, 復水器, 給水加熱器</li> <li>(iii) 燃料プール冷却系</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(i) 廃棄物処理設備</li> <li>(ii) 使用済燃料ピット水浄化系</li> </ul>
C	<ul style="list-style-type: none"> <li>(i) 試料採取系, 床ドレン系等</li> <li>(ii) 主発電機・変圧器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(i) 試料採取系, 床ドレン系等</li> <li>(ii) タービン設備, 主発電機・変圧器</li> </ul>

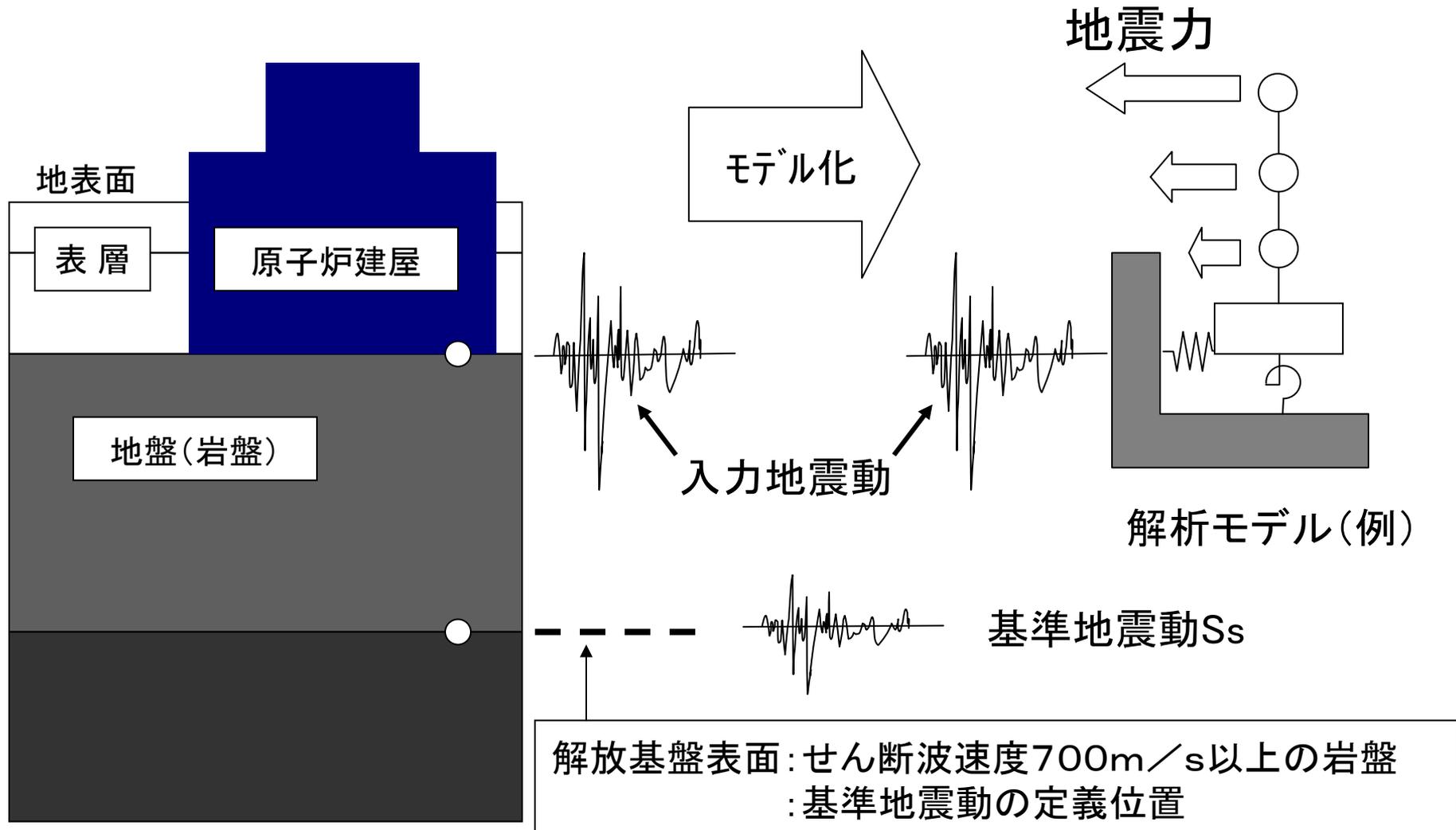
# 耐震設計の概略フロー：重要度分類と設計用地震力

	静的地震力	動的地震力	
		弾性設計用地震動Sd	基準地震動Ss
<b>S</b>	建物・構築物 ・水平：3Ci ・鉛直：Cv  機器・配管系 ・水平：3.6Ci ・鉛直：1.2Cv	・水平Sdによる地震力 ・鉛直Sdによる地震力	・水平Ssによる地震力 ・鉛直Ssによる地震力
<b>B</b>	建物・構築物 ・水平：1.5Ci  機器・配管系 ・水平：1.8Ci	— （ただし、共振のおそれのある施設について1/2・Sdで影響検討を行う）	—
<b>C</b>	建物・構築物 ・水平：Ci  機器・配管系 ・水平：1.2Ci	—	—

- ・Ciは建築基準法による層せん断力係数（標準は0.2）
- ・Cvは鉛直震度（標準は0.3とし、高さ方向に一定）
- ・静的地震力における水平地震力と鉛直地震力は、同時に不利な方向に組み合わせる

# 耐震設計の概略フロー:地震応答解析

地震応答解析により建物に加わる地震力(慣性力)を算定する

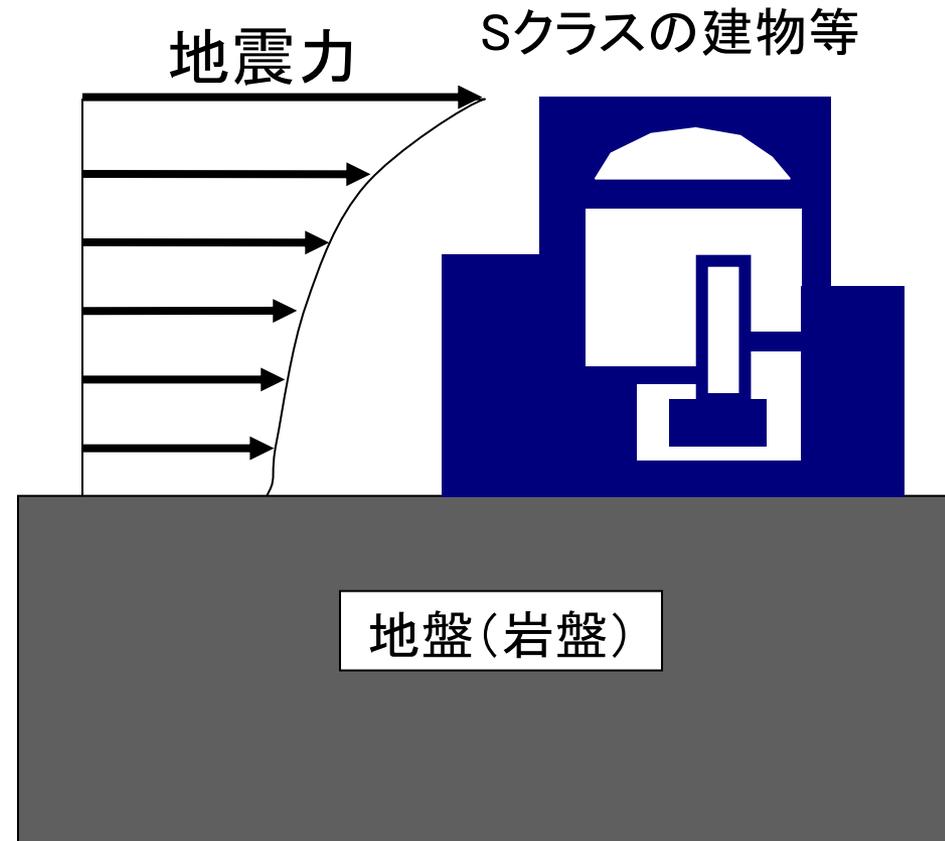
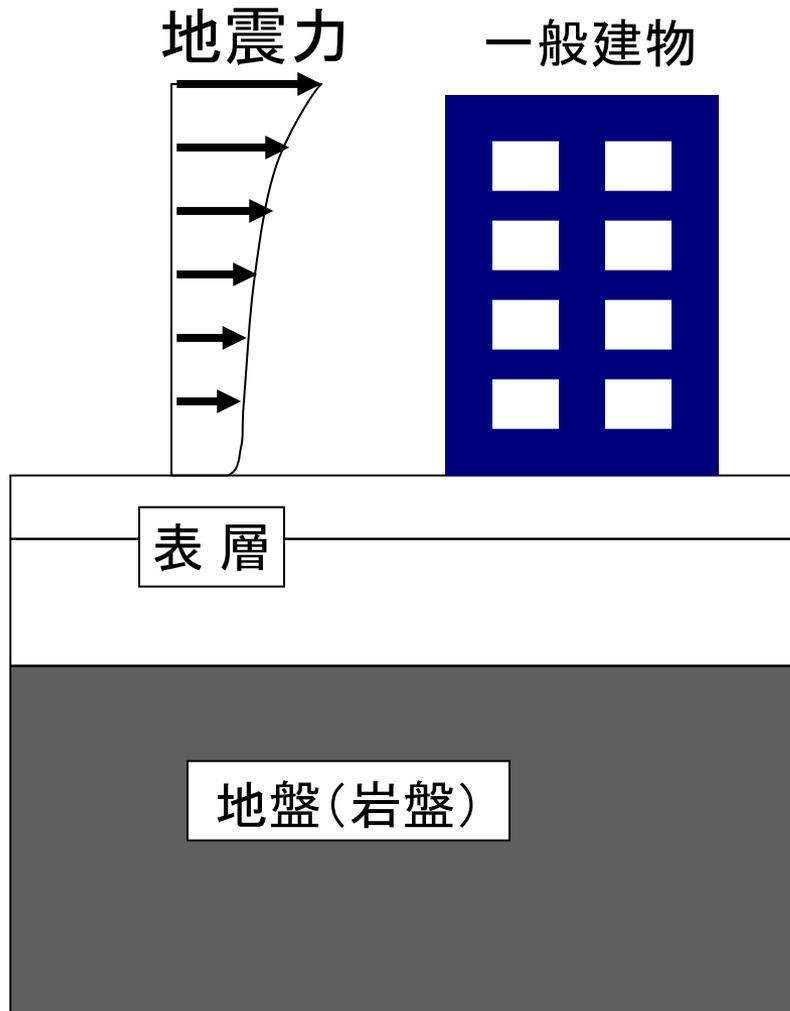


# 柏崎刈羽原子炉建屋の場合

- 開放基盤深さ：  
GL-284m(ただし1号機)
- S2(Ss)地震波の最大加速度：450gal
- GL-250mの観測加速度： 993gal
- 建屋基礎の加速度：  
 $273(\text{設計値}) \times 993 / 450 = 602\text{gal}$   
⇔ 観測680gal

# 耐震設計の概略フロー: 静的地震力

Sクラス建屋は建築基準法で定められている静的地震力の3倍の水平力に耐えることが要求されている。(Bクラスは1.5倍)



# 柏崎刈羽原子炉建屋の場合

- 静的地震力(3Ci)による加速度:

$$3 \times 0.2 \times 980 / 1.5 = 392 \text{gal}$$

- 観測値の最大加速度:

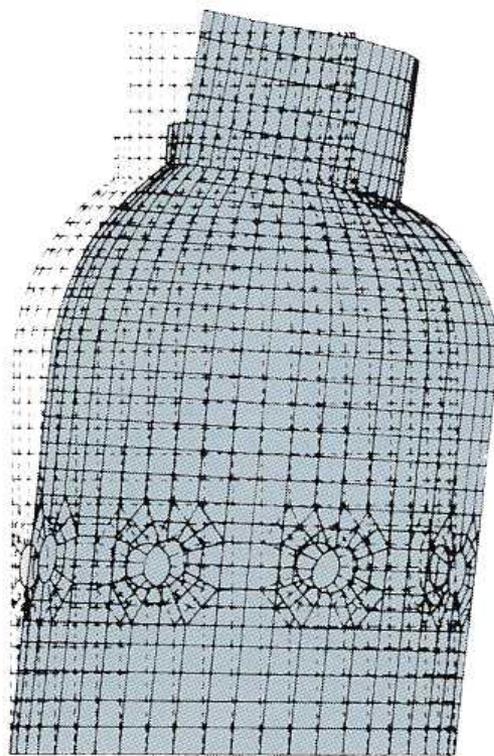
680gal

# 耐震設計の概略フロー: 構造設計

応力解析により、発生応力を求め、許容応力以下であることを確認する

## 応力解析(FEM等)

地震力



解析モデル(例)

METIパンフレットより

発生応力 < 許容応力

建物・構築物の許容応力(度):  
→ 建築基準法等による値

機器・配管系の許容応力:  
→ 電気事業法に定める「発電用  
原子力設備に関する技術基準」等  
による値

# 発電所の地震観測 その1

## 実施目的

原子炉保護用  
地震計



●大地震時のプラント自動停止機能

地震感震装置が大きな揺れを感知すると、感震器から原子炉を停止させる制御装置にトリップ信号を出力する

観測用地震計

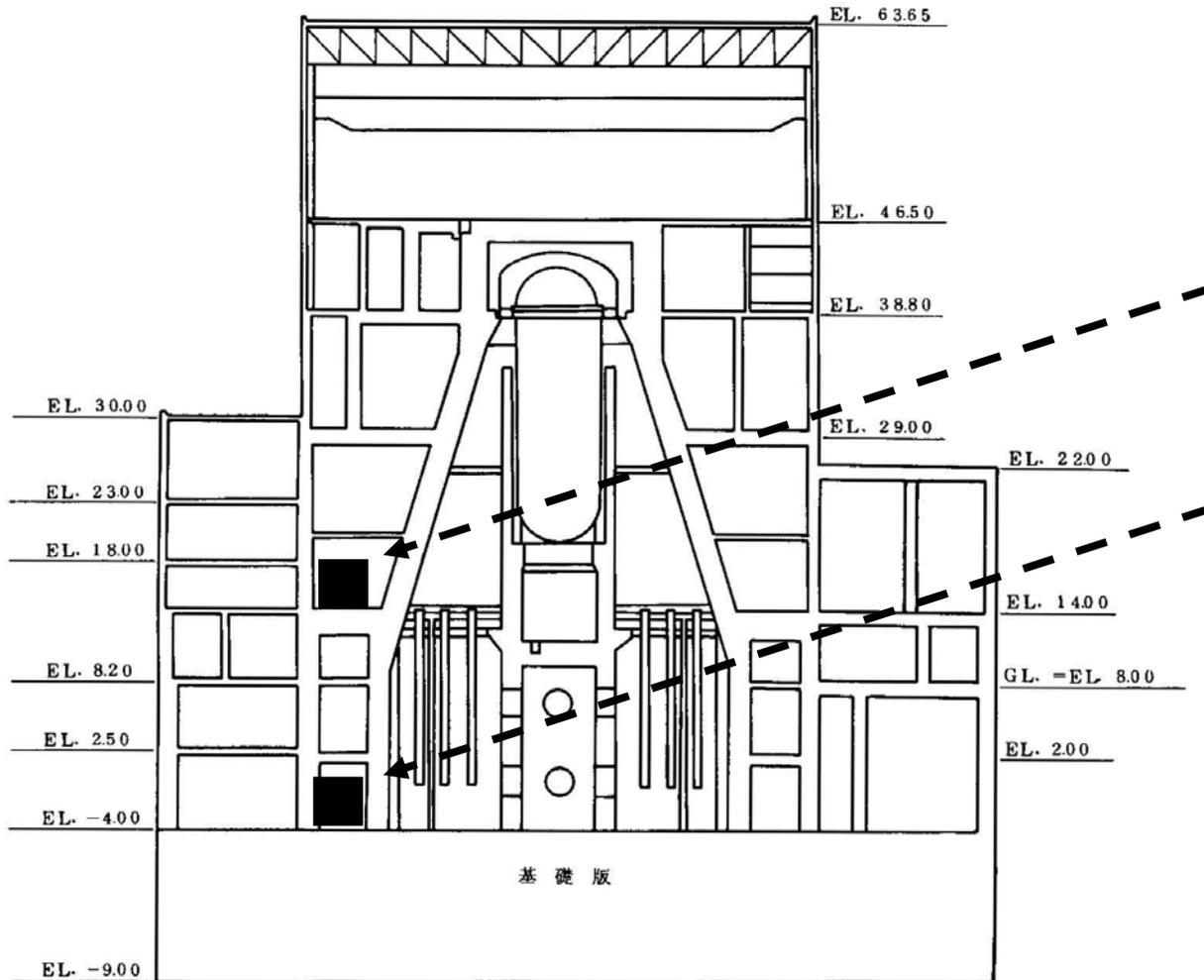


●安全審査との整合性チェック

- ・発電所で観測したそれぞれの地震が安全審査において想定されている地震の範囲内であるかなど安全審査結果との整合性チェック
- ・耐震設計の妥当性を確認
- ・観測諸元をMETIに報告（平成3年METI文書に基づく）

## 発電所の地震計 その3

### 原子炉保護用地震計：東海第二発電所

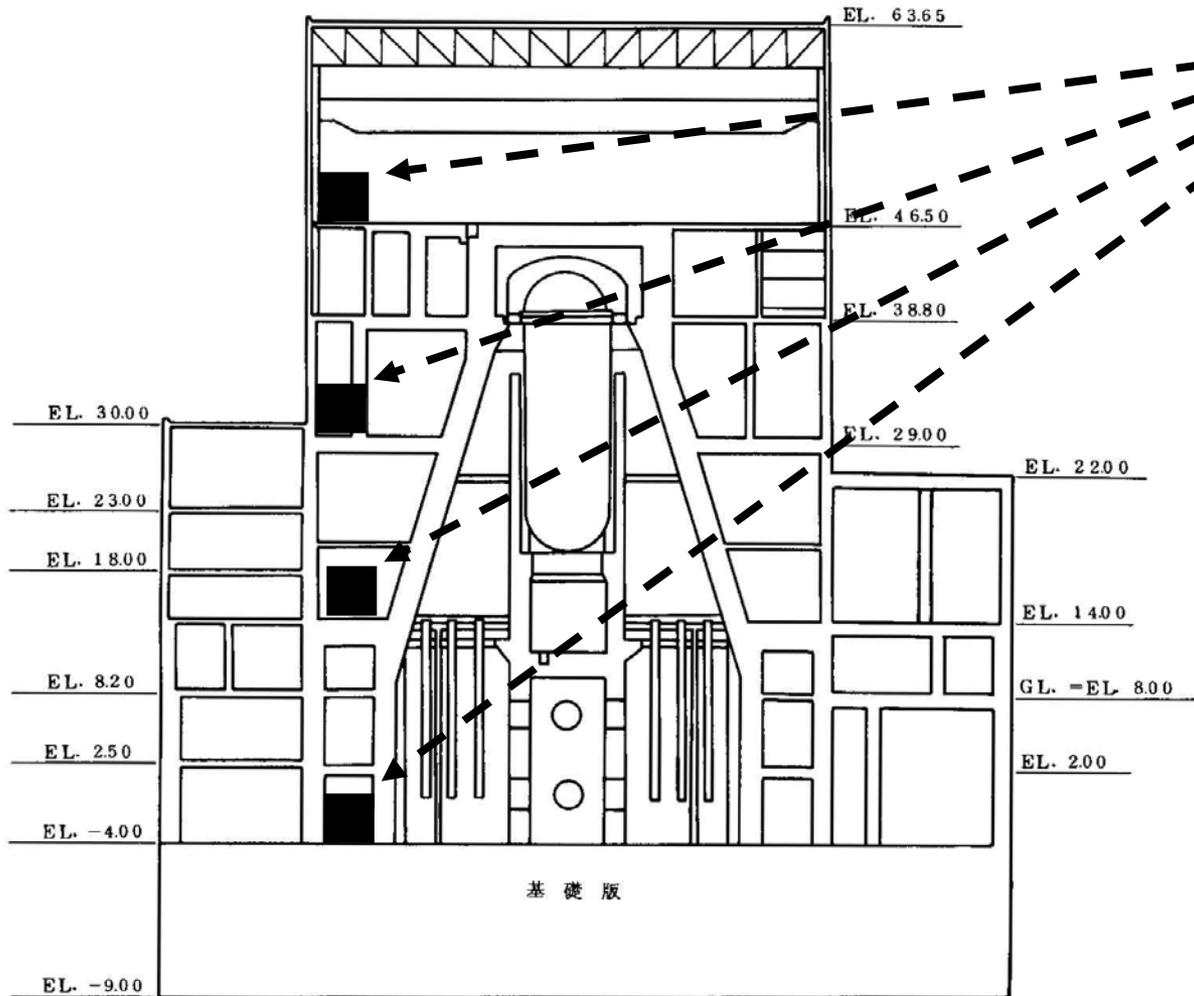


#### 設置位置及び トリップ設定値

- ・EL. 14m  
水平：300gal
- ・EL. -4m  
水平：250gal  
上下：120gal

# 発電所の地震計 その8

## 観測用地震計：東海第二発電所

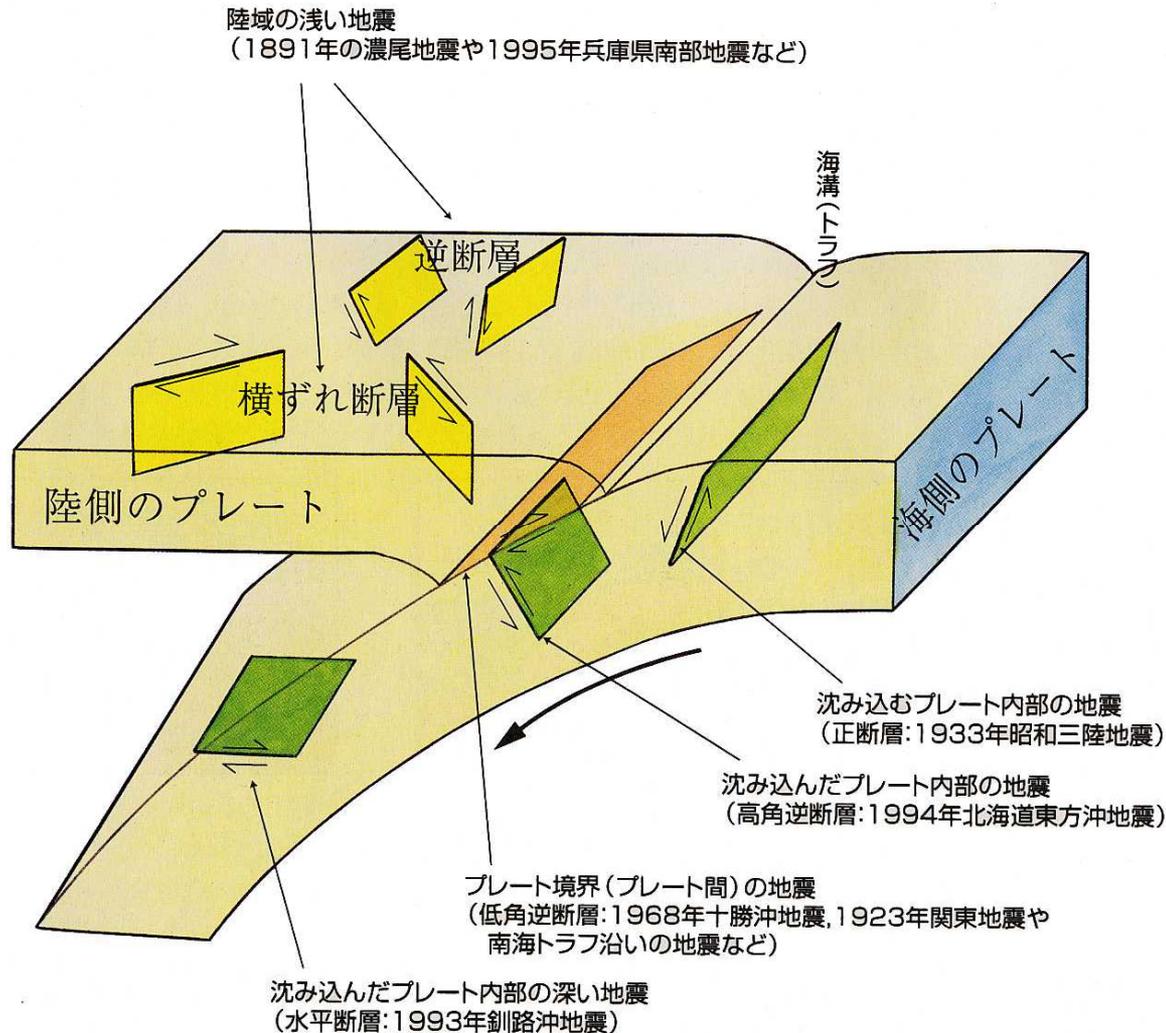


SMAC系地震計  
(ICカード記録)

他にタービン建屋、CST内、  
二重管管路内にも有り

# 地震の種類

日本列島周辺では、地震はプレート間とプレート内で発生



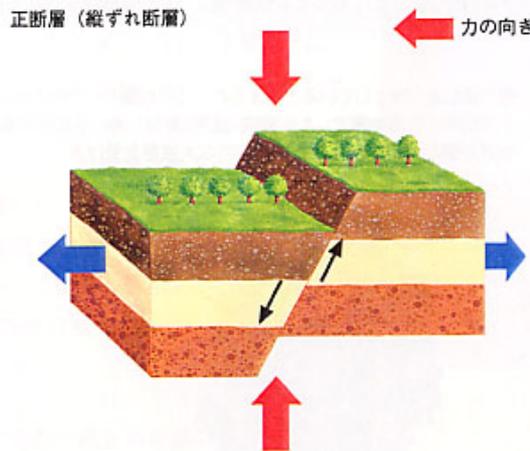
# 断層の定義

岩石・岩盤の破壊によって生じた不連続面のうち、面に沿った変位が認められるものと定義される。

〔相対的な変位が数mmのものから数km以上ものまで存在する。〕

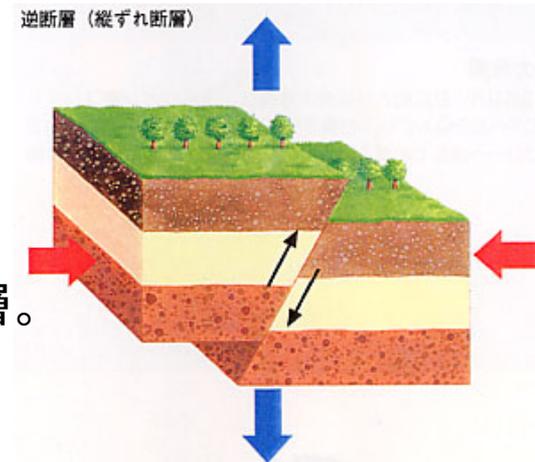
## a. 正断層：

断層面の傾斜方向に断層の上盤が相対的にずり落ちた断層。



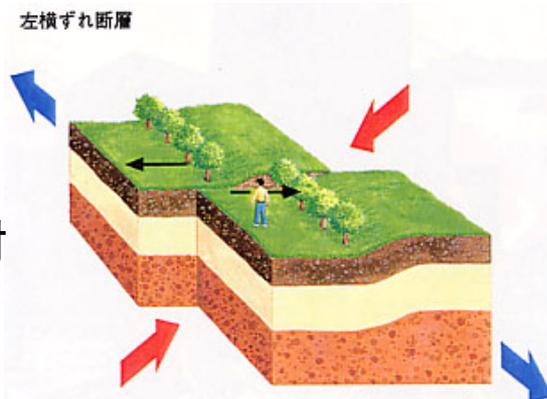
## b. 逆断層：

断層面の傾斜面の傾斜方向に上盤側が相対的にのし上がった断層。



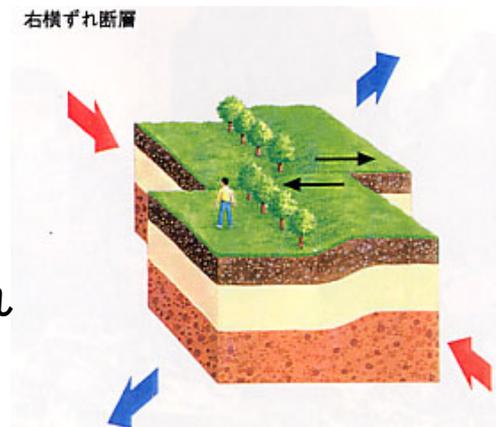
## c. 左横ずれ断層：

断層面を境として向こう側の岩盤が相対的に左にずれる断層。



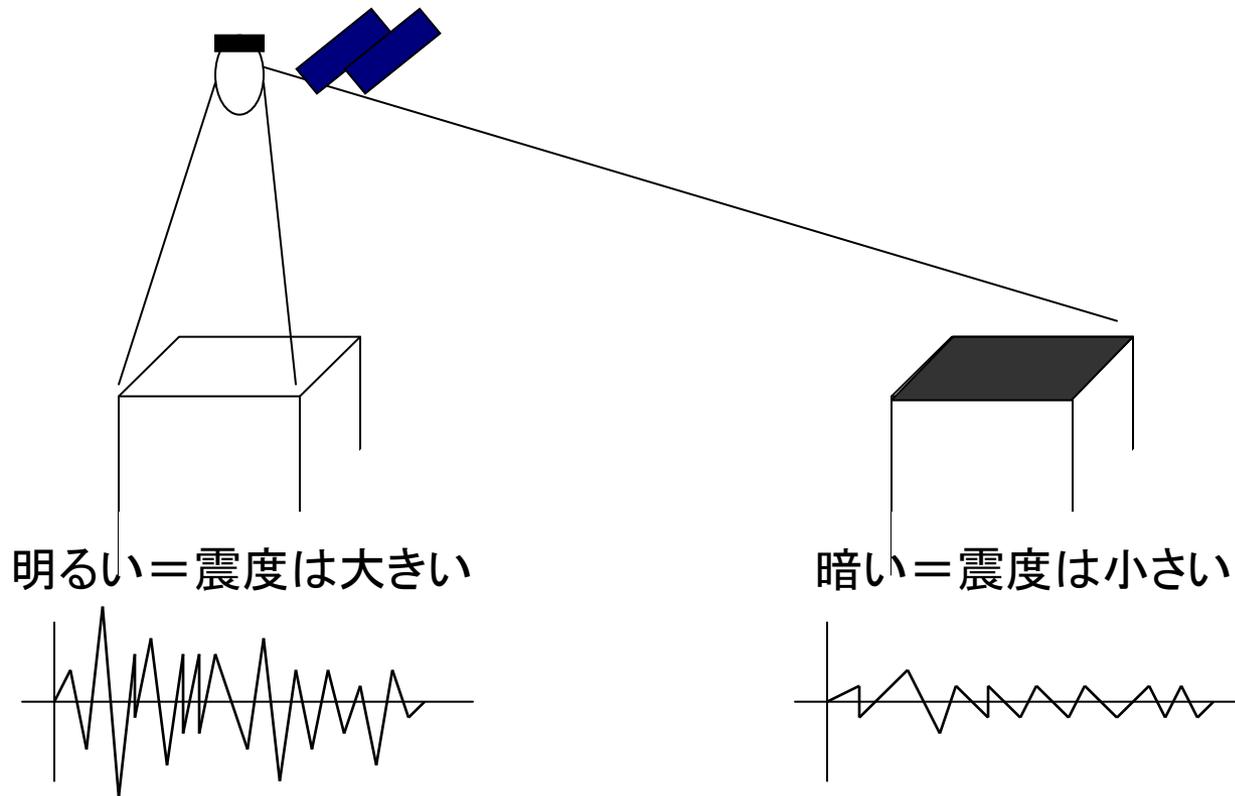
## d. 右横ずれ断層：

断層面を境として向こう側の岩盤が相対的に右にずれる断層。

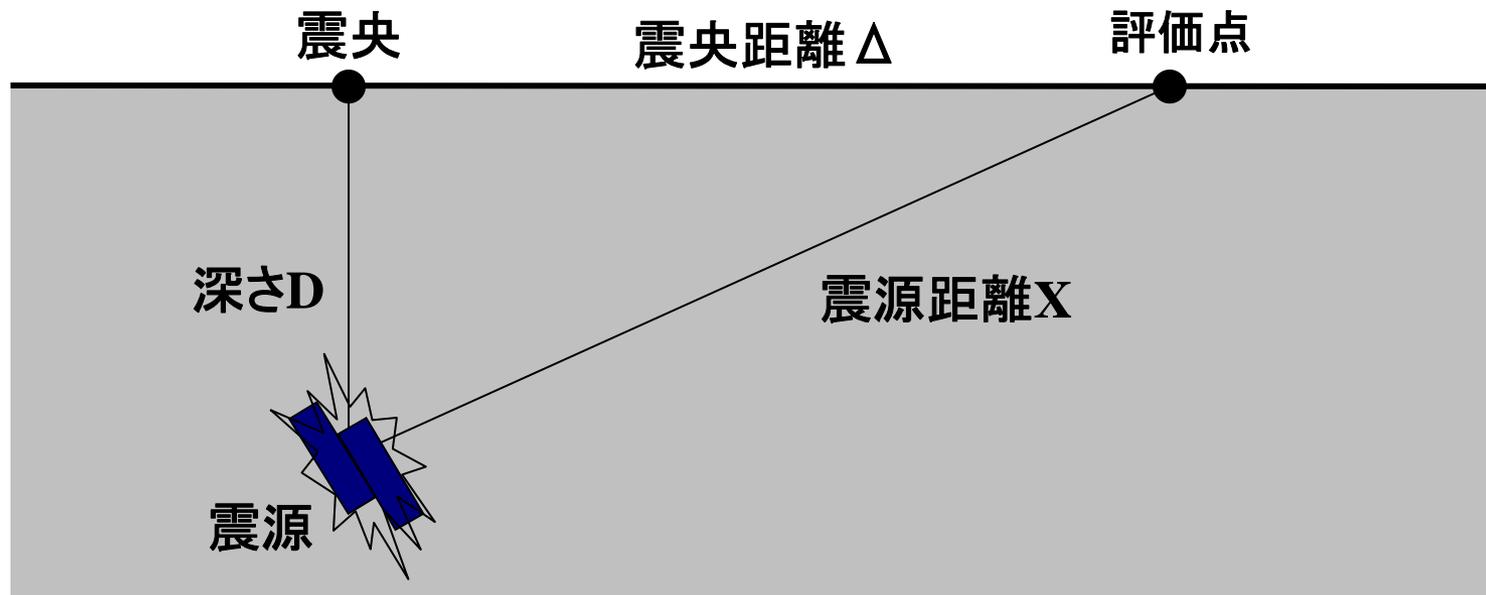


## マグニチュードと震度

光源(ワット) = 地震(マグニチュード)



## 震源距離と震央距離



エネルギー放出中心  
マグニチュードM

## 地震動評価の指標

一般に地震動評価の指標としては、

地動最大加速度  
地動最大速度  
地動最大変位  
応答スペクトル

などがある



原子炉施設の耐震設計では

応答スペクトル

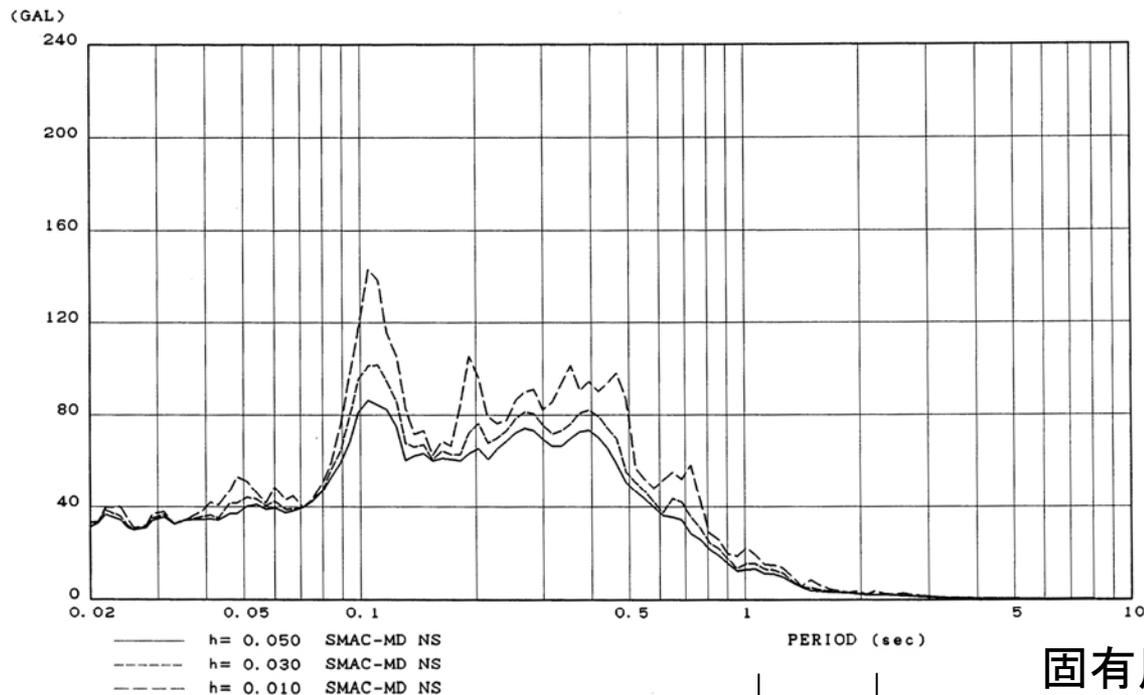
を地震動評価の指標とする

# 応答スペクトルとは？

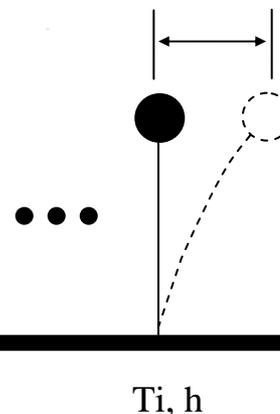
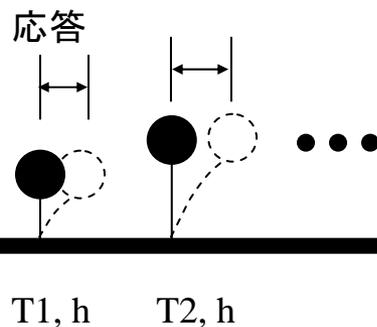
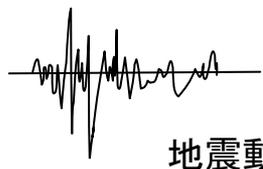
RESPONSE SPECTRUM (ACCELERATION)

1999.03.26 08:31 IBARAKIKEN-HOKUBU M4.9 T-2 R/B B2(EL-4.0)

応答

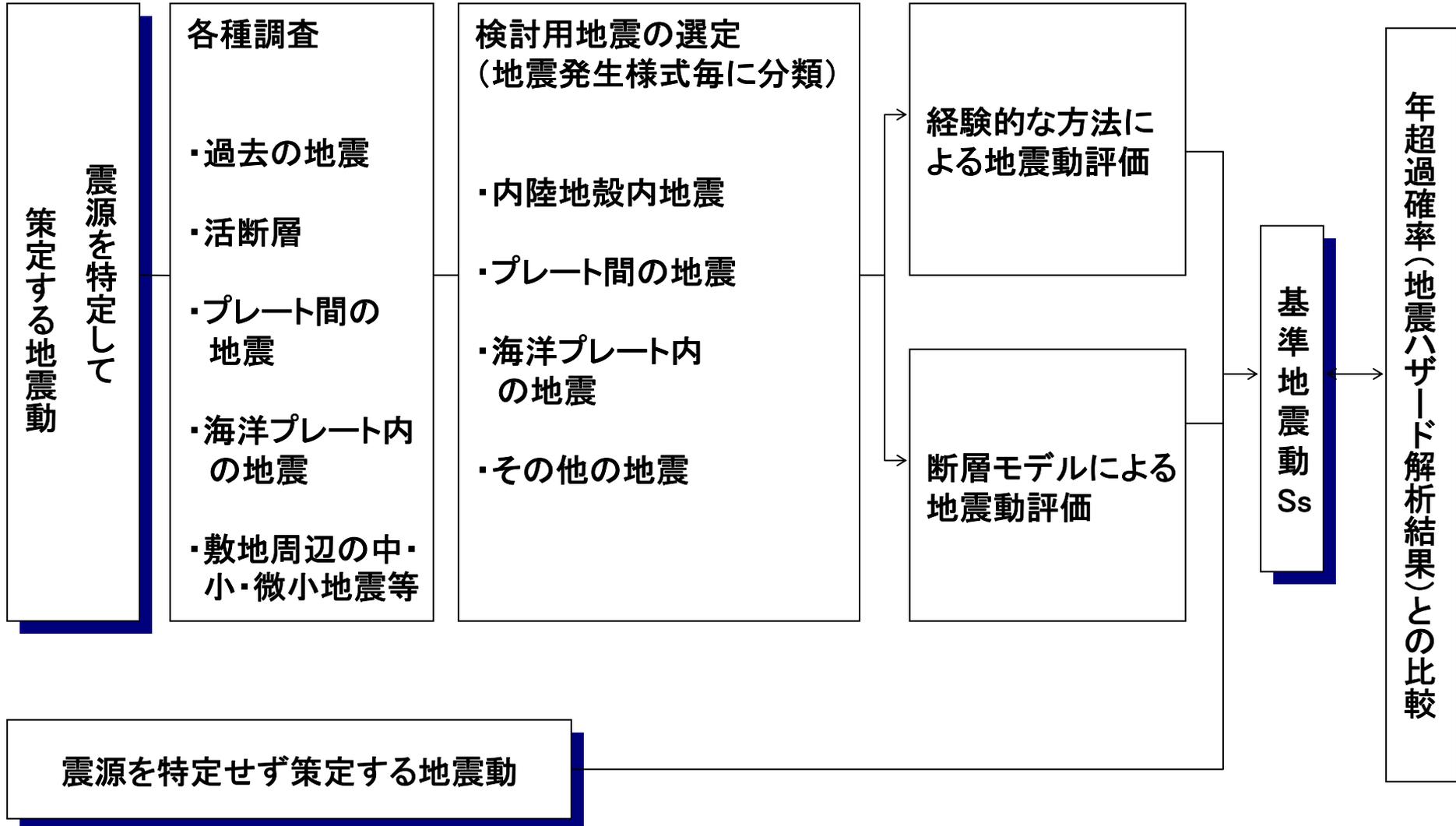


固有周期



$T_i$ : 固有周期  
h: 減衰

# 基準地震動S<sub>s</sub>評価フロー



# 各種調査(1)

## 過去の地震

建設予定地点周辺の過去に発生した地震について、各種文献を調べ、その地震の大きさ、震源位置、被害状況等を調査する

### 各種文献の例

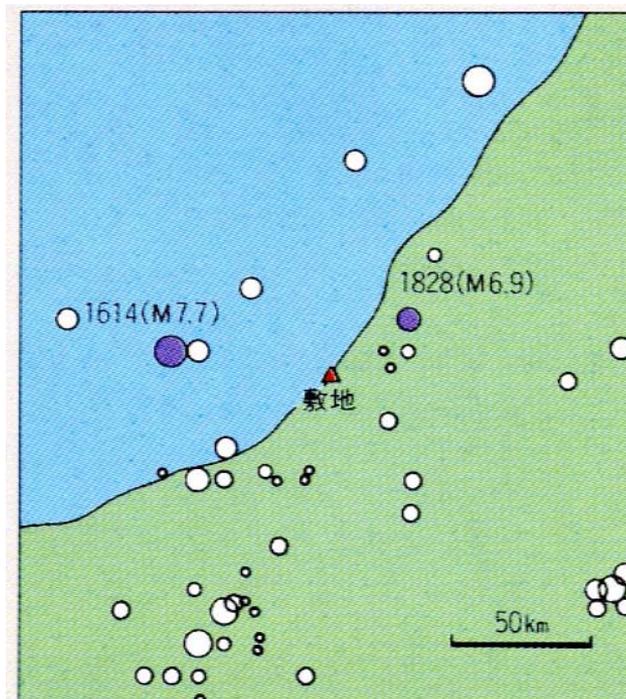
- ・「最新版 日本被害地震総覧416-2001」、宇佐美龍夫
- ・「日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表 1885年～1980年」、宇津徳治
- ・「地震火山月報」、気象庁
- ・古文書等



(防災専門図書館蔵)

〈 古文書 〉

METIパンフレットより



METIパンフレットより

〈 敷地周辺の地震発生状況 〉

## 各種調査(2)

### 活断層

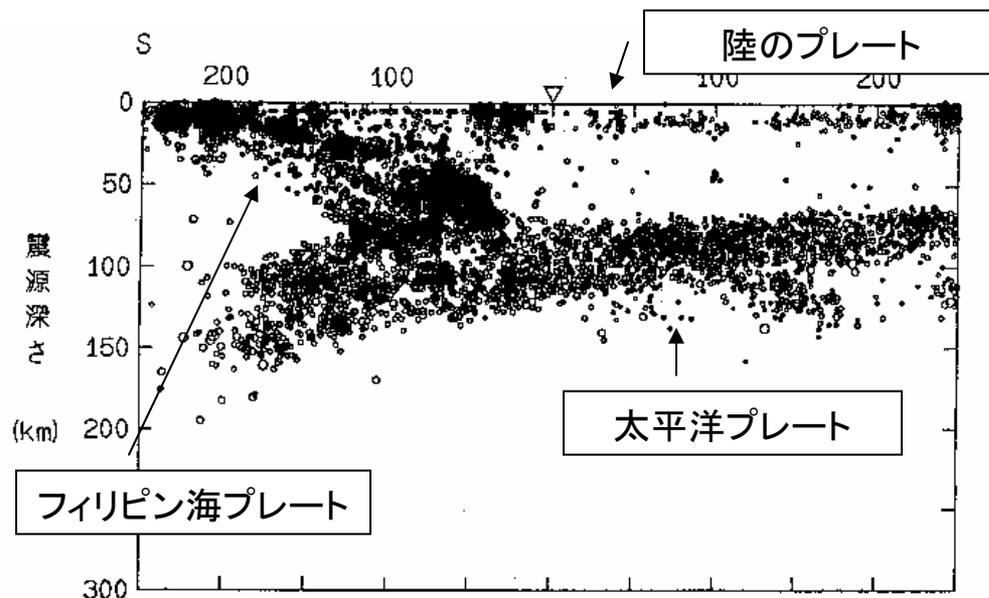
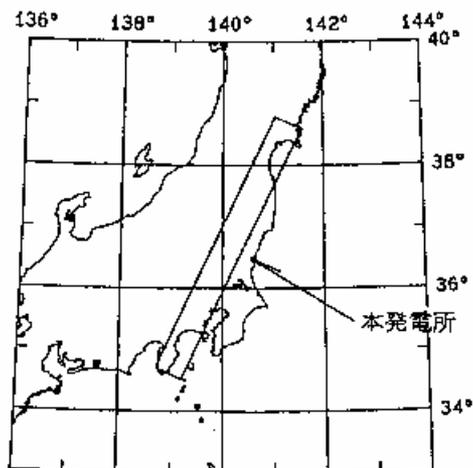
位置、長さ、形状、活動性などを把握

### プレート間の地震、海洋プレート内の地震

中・小・微小地震分布の分析や、各種文献等の知見収集

### 敷地周辺の中・小・微小地震等

- ・活断層との関連、地震発生層の検討
- ・プレート形状の検討



# 地質調査範囲(敦賀半島周辺)

## ◆追加調査

調査範囲: **陸域** **海域**

(平成17年5月調査開始)

## ◆新耐震指针对応

より入念な活断層調査  
(特に敷地近傍において  
精度の高い詳細な調査)

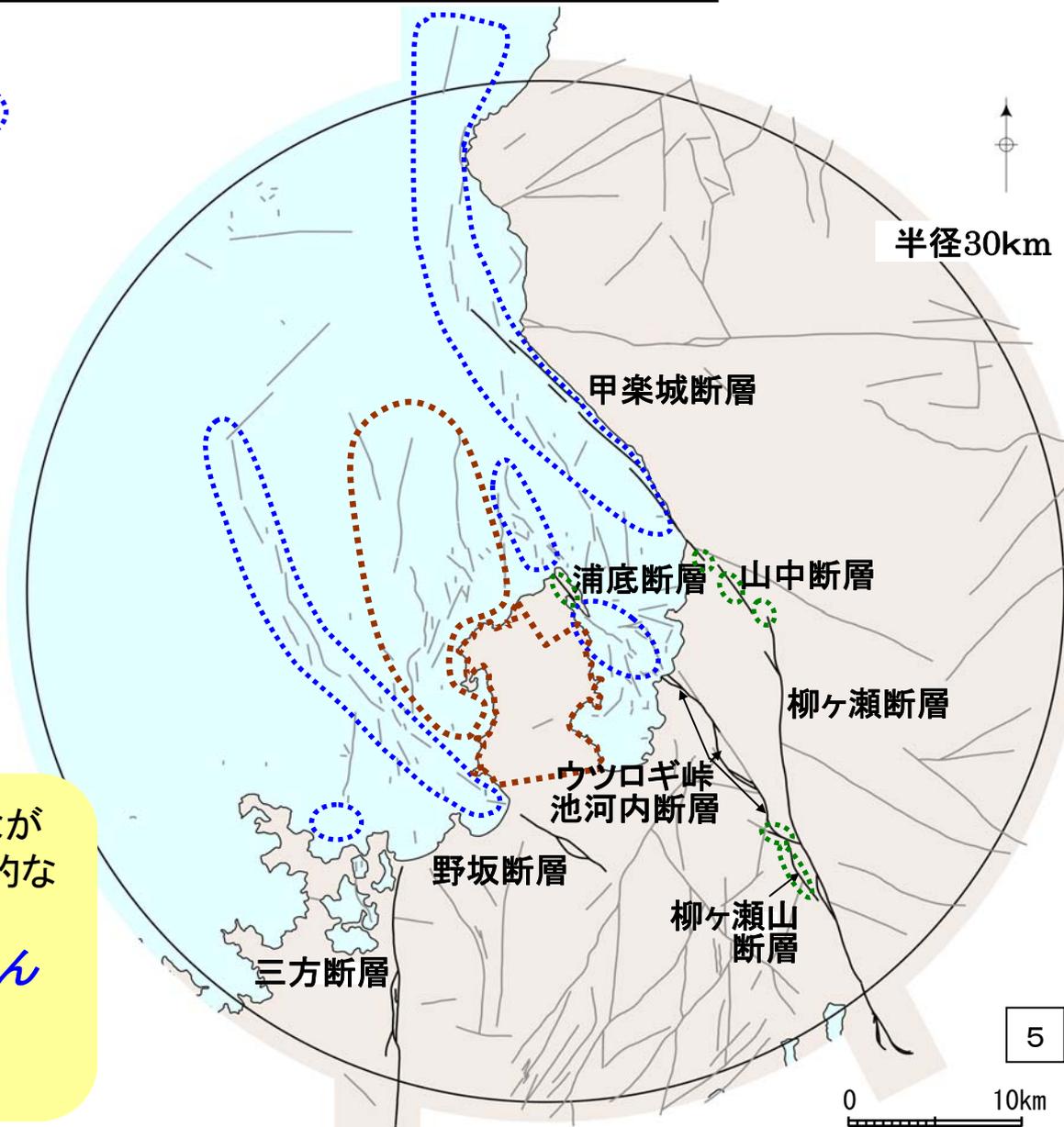
敷地近傍調査範囲:

(3社共同、平成18年9月調査開始)

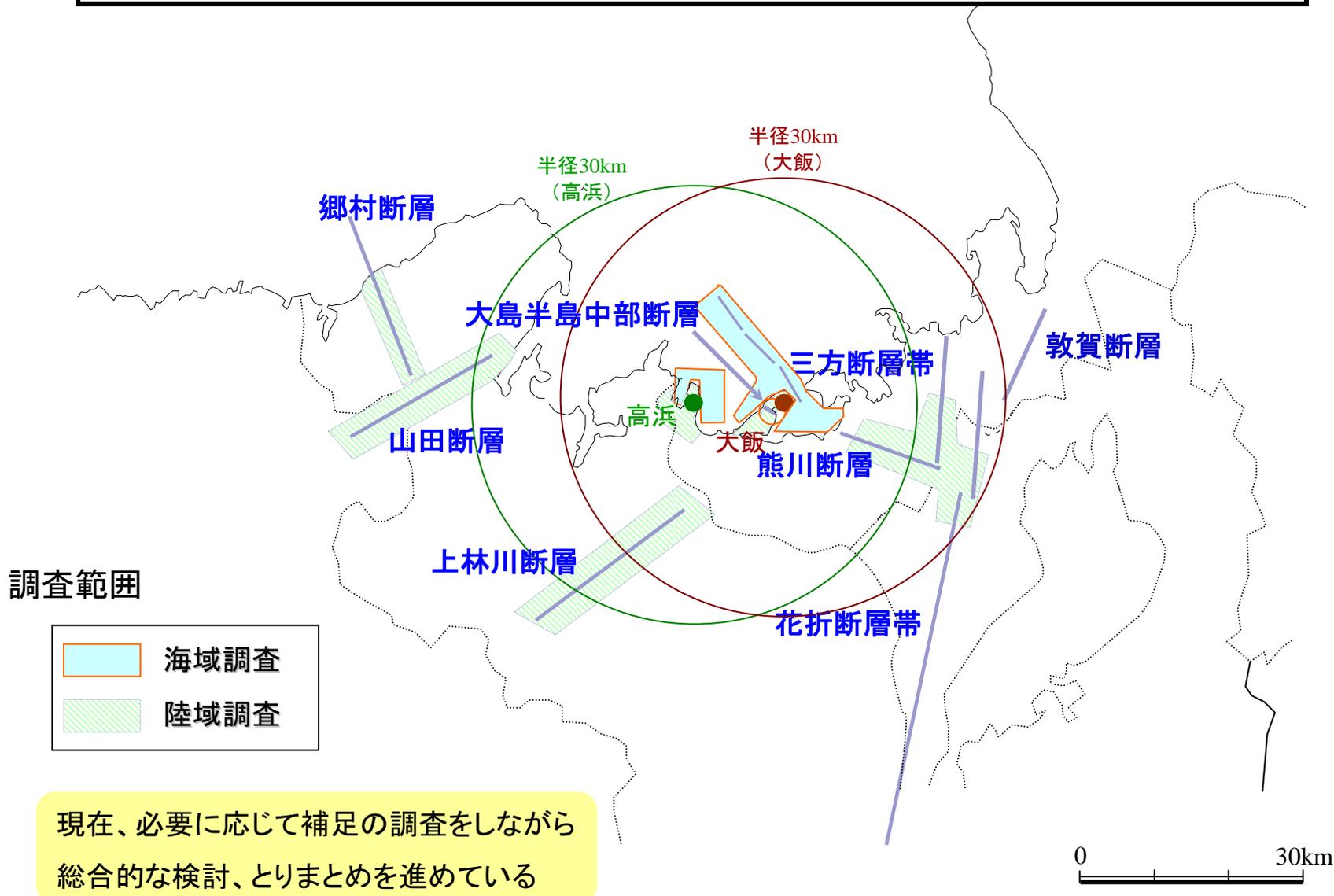
現在、必要に応じて補足の調査をしながら、追加調査と敷地近傍調査の総合的な検討・とりまとめを進めている

→調査結果は、3サイト(敦賀、もんじゅ、美浜)共通の知見

→バックチェックに反映



## 地質調査範囲(大飯・高浜)

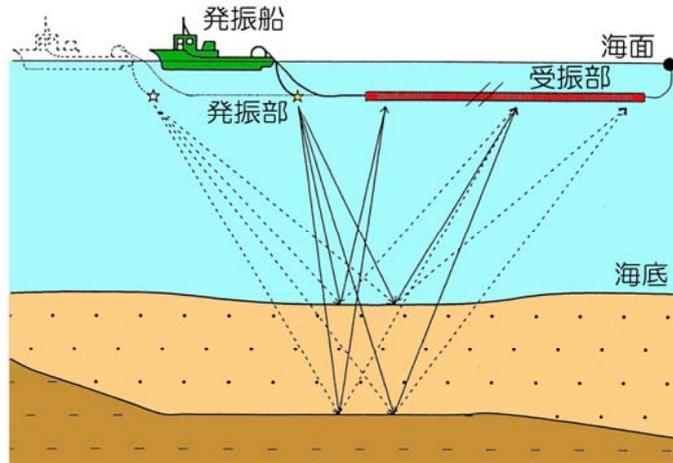


## 調査手法の例

最新の技術も導入し、データ精度をより向上

海上音波探査におけるジオパルス・マルチチャンネル受振方式(曳航式)※

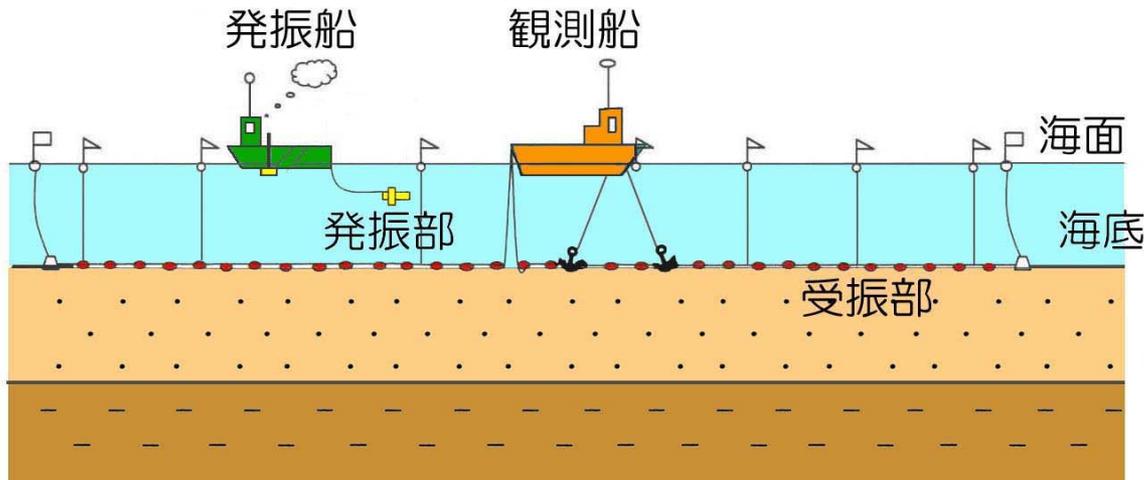
マルチチャンネル音波探査(曳航式)



※浅い海域での海底下浅部の地質構造を高分解能・高品質で明らかにすることができる。

- ・ 高い周波数の音源を用いて分解能が向上
- ・ 従来のシングルチャンネル受振と比較して、海底面や海底下の地層面の同じ地点からの反射音を複数の受振部でデジタル収録し、調査後のコンピュータ処理において反射音を重ね合わせることで、断面の質を向上

マルチチャンネル音波探査(定置式)



基準地震動策定に考慮している主な地震(現状)(敦賀半島周辺)

サイト	種別	規模(M)	震央距離(km)	考慮する地震	最大加速度(ガル)
敦賀発電所 (2号機)	設計用最強地震	8.0	55.0	「過去の地震」1891年濃尾地震	S <sub>1</sub> : 365
		6.9	23.2	「過去の地震」1963年越前岬沖地震	
		7.0	25.5	「活断層」柳ヶ瀬断層南部による地震	
	設計用限界地震	7.0	10	「活断層」甲楽城断層による地震	S <sub>2</sub> : 532
		7.2	22	「活断層」柳ヶ瀬断層による地震	
		7.2	17	「活断層」敦賀断層による地震	
		7.8	63	「地震地体構造」花折断層の位置	
直下地震	6.5	—			
美浜発電所 (H7バックアップ)	設計用最強地震	8.0	59	「過去の地震」1891年濃尾地震	S <sub>1</sub> : 270
		6.9	19	「過去の地震」1963年越前岬沖地震	
		7.0	26	「活断層」柳ヶ瀬断層南部による地震	
	設計用限界地震	6.9	10	「活断層」B断層系による地震	S <sub>2</sub> : 405
		7.0	14	「活断層」敦賀断層による地震	
		7.2	22	「活断層」柳ヶ瀬断層による地震	
		7.8	59	「地震地体構造」花折断層の位置	
直下地震	6.5	—			
もんじゅ	設計用最強地震	8.0	57.2	「過去の地震」1891年濃尾地震	S <sub>1</sub> : 280
		6.9	21.0	「過去の地震」1963年越前岬沖地震	
		7.0	25.0	「活断層」柳ヶ瀬断層南部による地震	
	設計用限界地震	7.0	11.5	「活断層」甲楽城断層による地震	S <sub>2</sub> : 466
		7.2	16.5	「活断層」敦賀断層による地震	
		7.2	21.0	「活断層」柳ヶ瀬断層による地震	
		7.8	60.0	「地震地体構造」花折断層の位置	
直下地震	6.5	—			

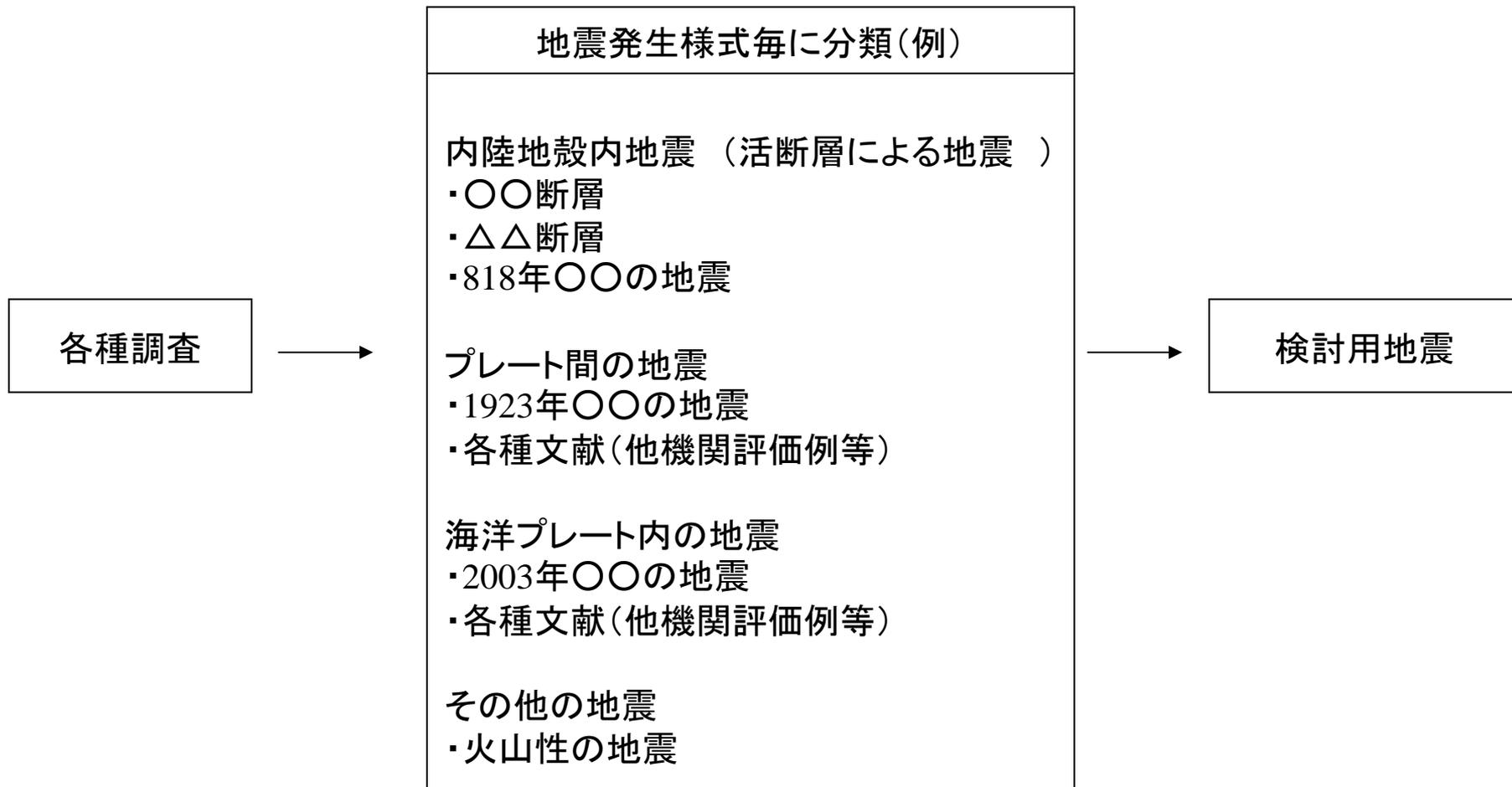
## ①原子炉施設の耐震安全性の確認

## 基準地震動策定に考慮している主な地震(現状)(大飯、高浜)

サイト	種別	規模 (M)	震央距離 (km)	考慮する地震	最大加速度 (ガル)
大飯発電所 (3, 4号機)	設計用最強地震	7.0	29	「過去の地震」701年大宝丹後の地震	S <sub>1</sub> : 270
		7.8	45	「過去の地震」1662年寛文近江の地震	
		8.0	86	「過去の地震」1891年濃尾地震	
	設計用限界地震	7.0	19	「活断層」熊川断層による地震	S <sub>2</sub> : 405
		7.8	44	「地震地体構造」花折断層の位置	
	直下地震	6.5	—		
高浜発電所 (3, 4号機)	設計用最強地震	7.0	23	「過去の地震」701年大宝丹後の地震	S <sub>K1</sub> : 270
		7.8	54	「過去の地震」1662年寛文近江の地震	
		7.9	99	「過去の地震」1891年濃尾地震	
		7.5	38	「過去の地震」1927年北丹後地震	
		7.0	35	「活断層」三峠断層による地震	
	設計用限界地震	7.0	31	「活断層」熊川断層による地震	S <sub>K2</sub> : 360
		7.8	49	「地震地体構造」花折断層の位置	
	直下地震	6.5	—		S <sub>N</sub> : 370

# 検討用地震の選定：地震発生様式の種類

検討用地震は、地震の発生様式に着目した分類により選定する。





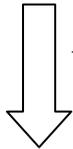
# 検討用地震の選定：内陸地殻内地震 その2

## マグニチュードの評価

各種調査



断層長さの評価



松田式

マグニチュード

## 松田式

・松田式は経験式

$$M = (\log L + 2.9) / 0.6$$

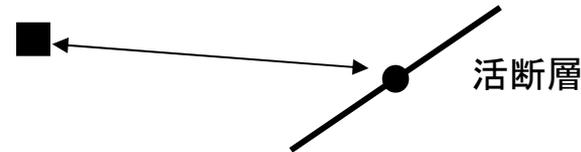
ここで、M: マグニチュード

L: 断層長さ

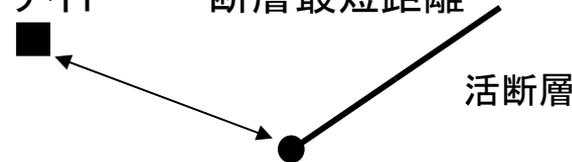
## 震源距離の評価

地震動評価に必要なデータである震源距離については、様々な算定方法がある。一般に、提案されている距離減衰式の中で、震源距離の算定方法が指定されていることが多い。以下に例を示す。

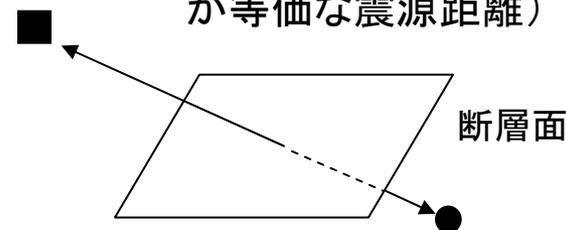
・サイト - 断層中心



・サイト - 断層最短距離



・サイト - 等価震源距離 (地震波エネルギーが等価な震源距離)



# 検討用地震の選定：プレート間で発生する地震

過去に同じ場所に繰り返し発生していることが多く、過去の地震の発生状況や、既往の研究成果を参照して設定することができる

プレート間地震に関する既往の研究成果の例（政府関連機関によるもの）

## 地震調査研究推進本部

- ・「三陸沖北部の地震を想定した強震動評価について」
- ・「宮城県沖地震を想定した強震動評価手法について」
- ・「南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について」
- ・日向灘の地震を想定した強震動評価について」

## 中央防災会議

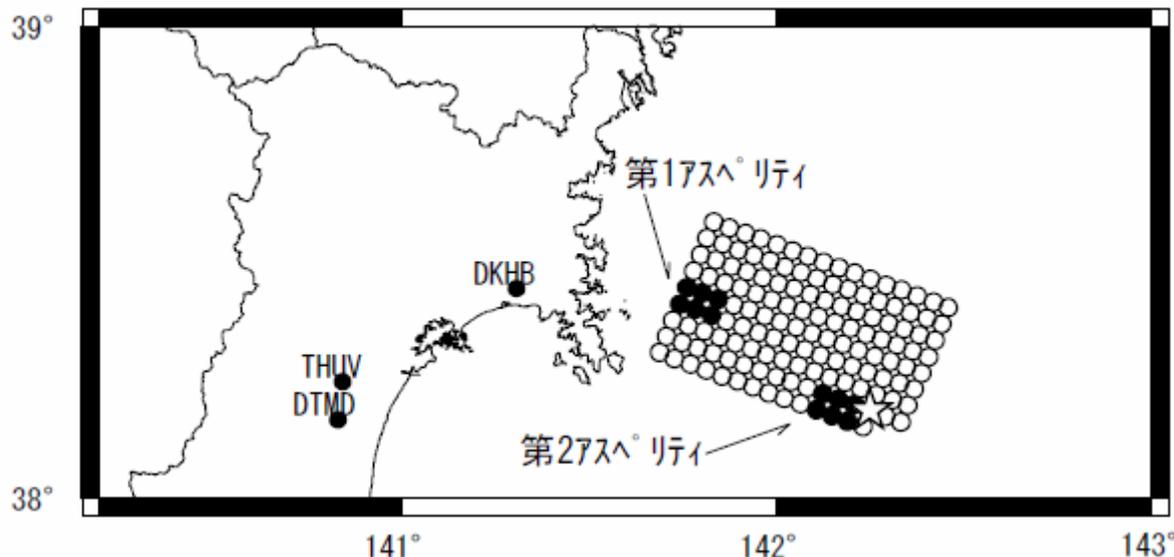
- ・「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」
- ・「首都直下地震対策専門調査会」
- ・「東海地震に関する専門調査会」
- ・「東南海、南海地震等に関する専門調査会」

他機関評価例：「三陸沖北部の地震を想定した強震動評価について」、地震調査研究推進本部

1978年宮城県沖地震のデータを  
を基に想定した断層モデル  
(ケースA1)

●●● : アスペリティ  
☆ : 破壊開始点

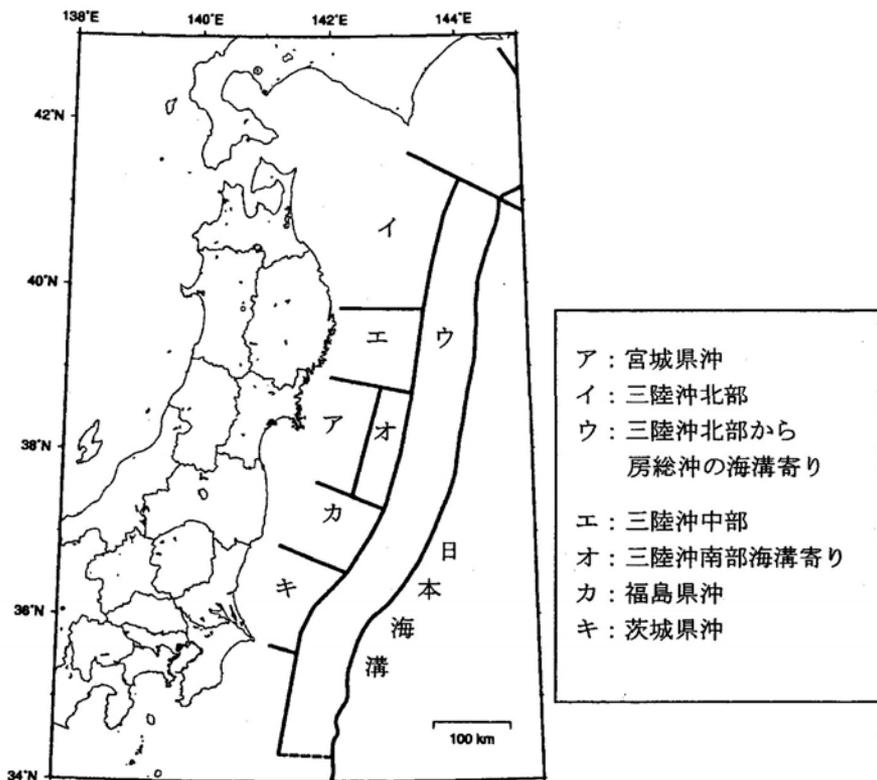
1978年宮城県沖地震の  
観測波形が得られた地点  
DKHB : 開北橋  
THUV : 東北大学  
DTMD : 樽水ダム



# 検討用地震の選定：海洋プレート内で発生する地震

- ・プレート間地震に比べ観測記録は少ない。
- ・地震波が減衰せず遠くまで伝わることもある、他のタイプの地震に比べ短周期成分が大きい、という特徴がある。
- ・地震の発生状況については規模や位置に関して地域的な特徴があることを示す知見があり、地震の設定にあたってはそれらを総合的に判断して設定することができる。

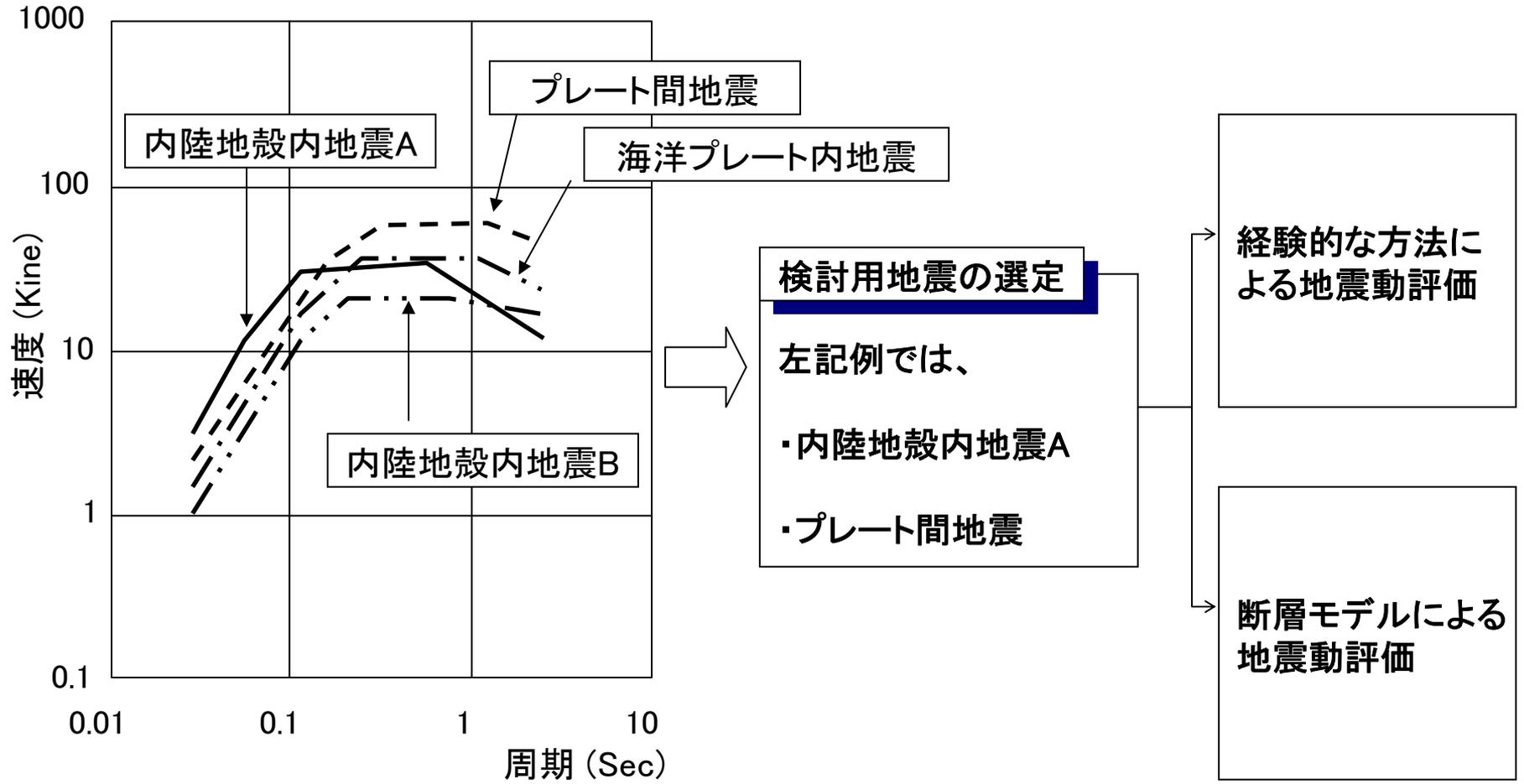
他機関評価例：「全国を概観した地震動予測値図」報告書，地震調査研究推進本部



上記報告書では左図の各領域において予想される地震のマグニチュード、位置等を評価しているが、“ウ”の領域では、マグニチュード8.2前後の海洋プレート内地震が、「領域内でどこでも発生する可能性がある」としている。（「」内は上記報告書抜粋）

# 検討用地震の選定

敷地に影響を与える地震による地震動を経験的な方法等で評価し、  
その中から検討用地震を選定する



敷地に影響を与える地震動の評価例

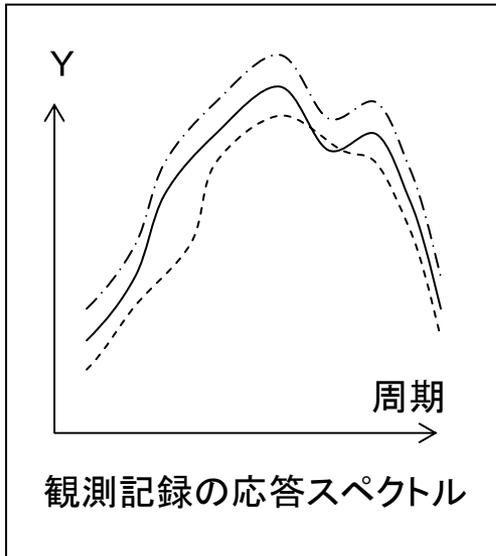
# 経験的な方法による地震動評価

## 応答スペクトルに関する回帰式

地震のマグニチュード:  $M$ 、震源距離:  $X$ と、その地震の応答スペクトルとの関係を回帰分析等により求めたもの。少ないパラメータで地震動の応答スペクトルを評価できる。複数の評価式がある。

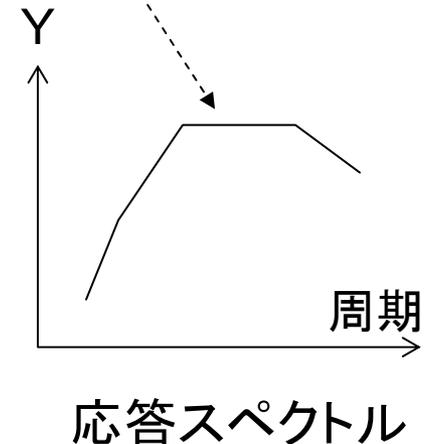
様々な地震観測記録の収集

- ・マグニチュード  $M$
- ・震源距離  $X$



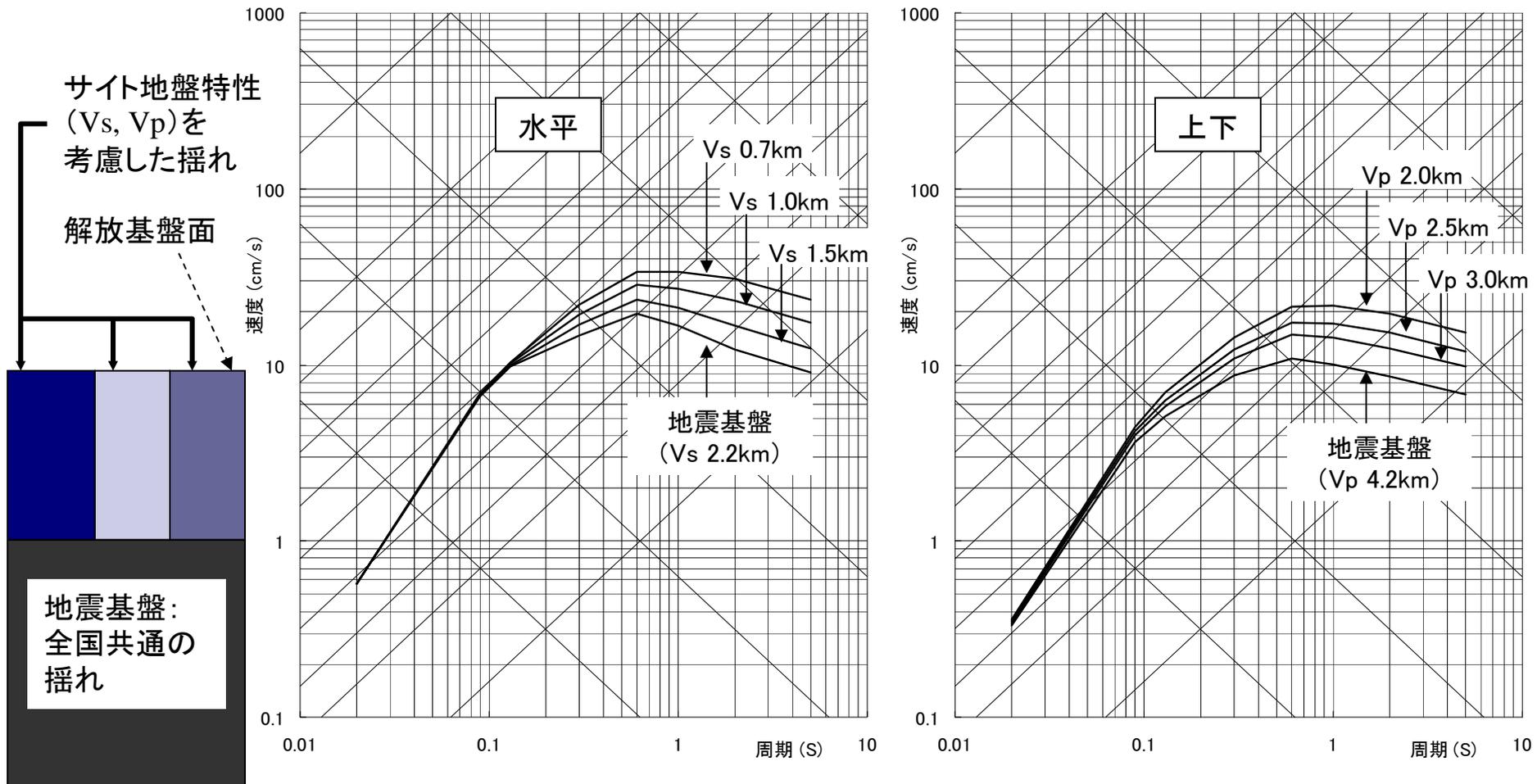
回帰分析

回帰式  
 $Y=f(M, X)$



# 経験的な方法による地震動評価 (Noda et al.(2002)の方法)

- ・基準地震動を定義する「解放基盤表面」(別途説明)に相当する地盤での観測記録に基づいている。
- ・敷地地盤の特性(具体的にはS波速度、P波速度)に応じた地震動の応答スペクトルを評価できる。
- ・水平動、上下動の評価ができる。

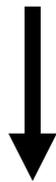


マグニチュード7.2, 等価震源距離30km の応答スペクトル図

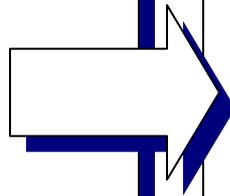
# 断層モデルを用いた方法による地震動評価

地震発生のメカニズムをモデル化し、時刻歴波形を直接評価

地震発生のメカニズム  
が解明



地震発生のメカニズムを反  
映した地震動評価法の誕生



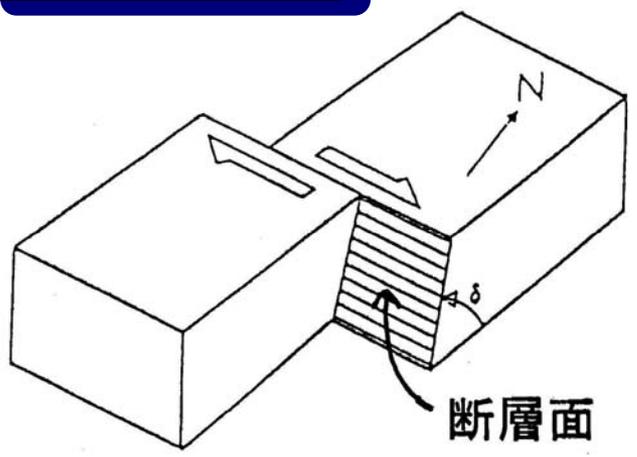
理論的な地震動評価手法  
である「断層モデル手法」  
の急速な発展



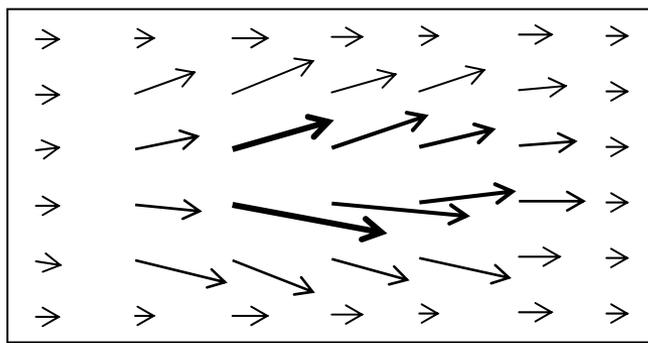
様々な評価手法が提案され  
ている。

# 断層モデルによる方法：地震発生メカニズム

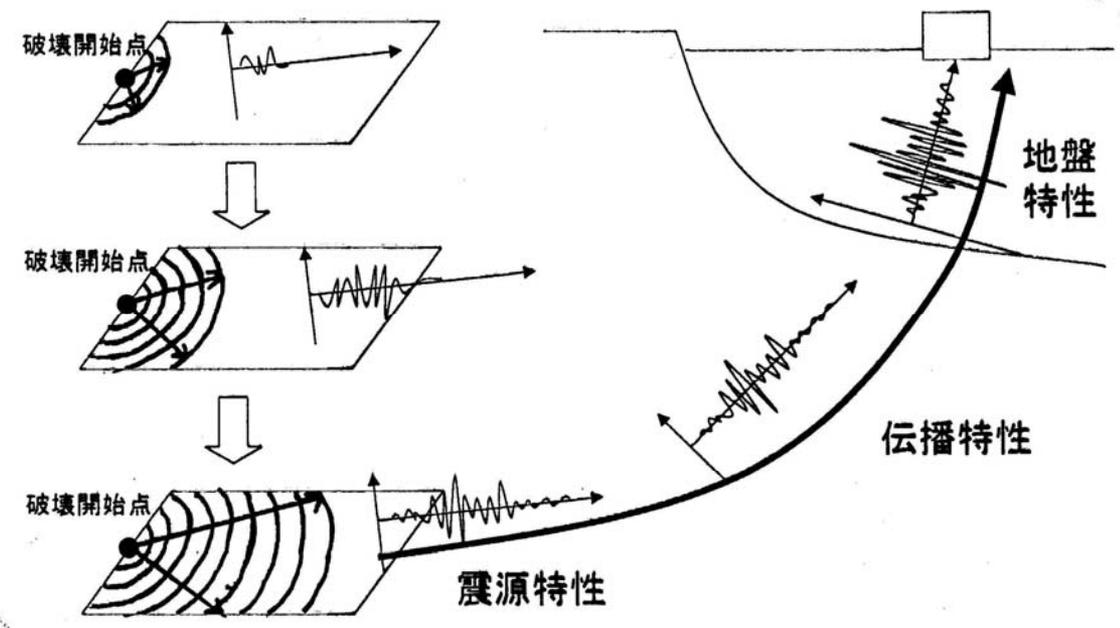
## 断層



## 断層面上のずれ量の分布



## 地震動を表現する3特性



# 断層モデルによる方法：経験的な方法との比較

## 経験的な方法

地震観測記録から  
統計的に処理した  
もの

点

無

マグニチュード  
震央距離

## 断層モデルによる方法

地震発生のメカニズム  
等、3特性をモデル化

面

有

地震モーメント  
断層面座標  
S波速度  
破壊伝播速度  
地盤条件  
その他

震源

破壊の移動効果

入力パラメーター

# 断層モデルによる方法：評価方法の分類

## 理論的手法：

地震波の発生・伝播を理論的に数式を用いて記述し、解析的あるいは数値的に計算する方法。主として地震動の長周期域を評価するのに用いられている。

## 半経験的手法：

### ・経験的グリーン関数法：

大地震による地震を再現もしくは予測する際に、想定する断層面付近で発生した中小規模の地震による記録を、経験的に得られたグリーン関数として波形を合成する方法。地震動の短周期域を評価するのに有用である。

### ・統計的グリーン関数法：

中小規模の地震観測記録が得られない場合、その代わりに統計的に評価された模擬地震動をグリーン関数として用いる方法。

## ハイブリッド法：

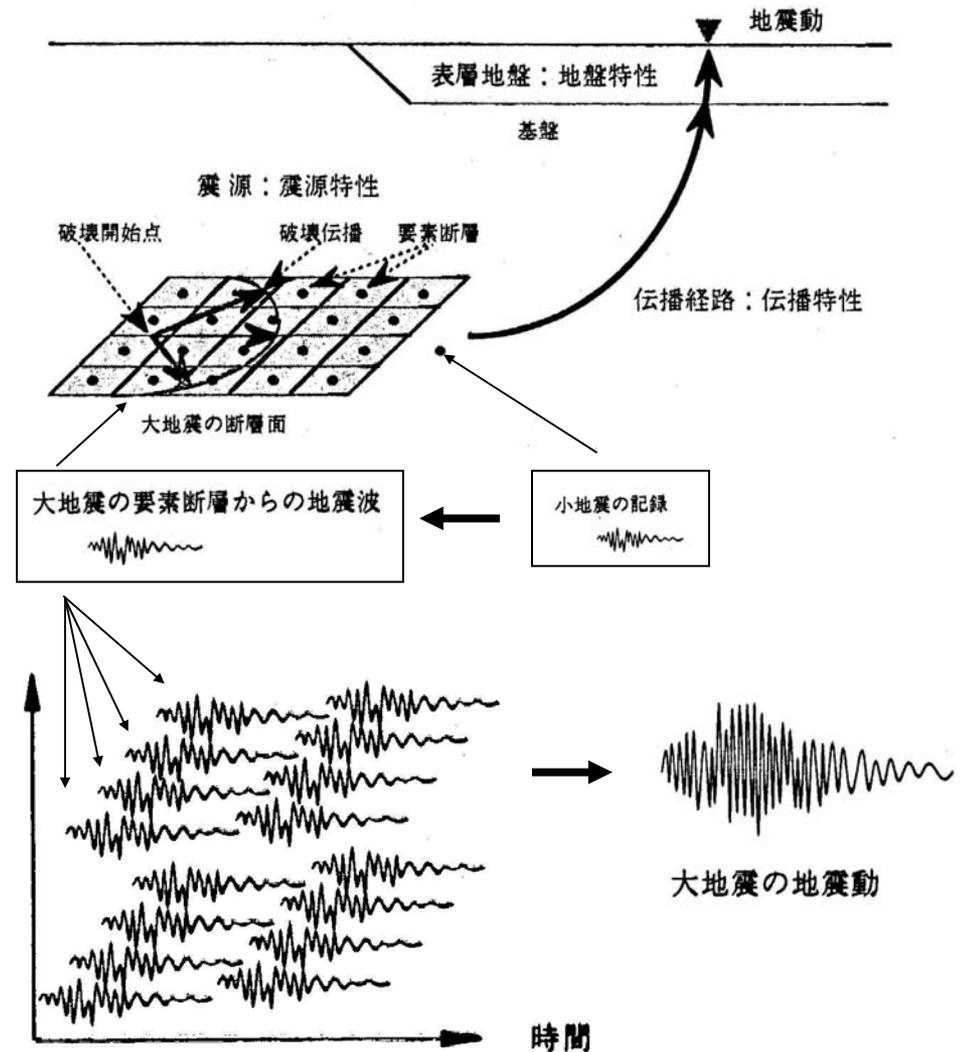
地震動の長周期域を理論的手法、短周期域を半経験的手法で評価し、それらを組み合わせて評価する方法。広帯域の地震動評価ができる。

# 断層モデルによる方法：経験的グリーン関数法

概要：小地震記録の重ねあわせ  
によって大地震の地震動を  
推定する方法である。

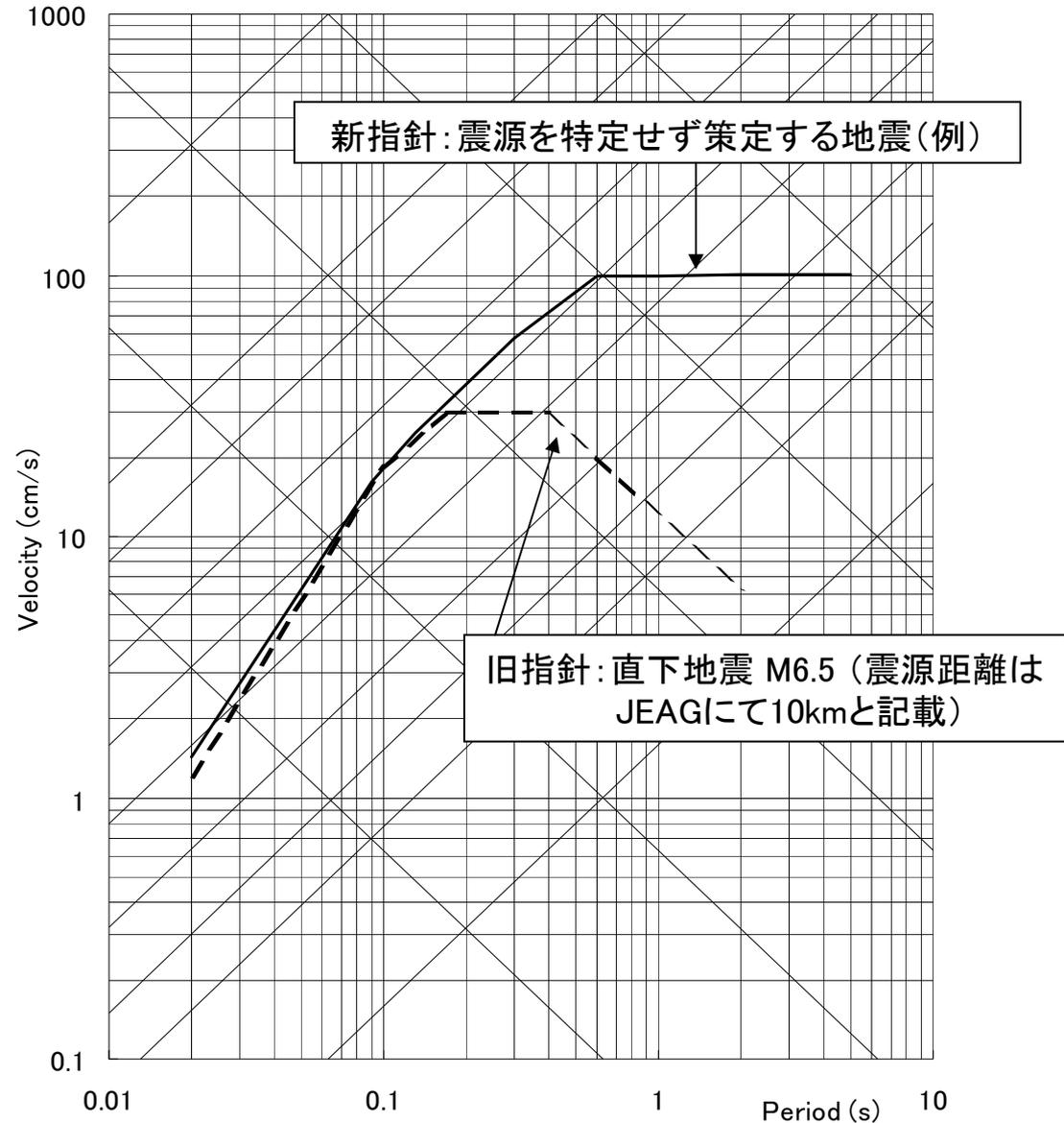
特徴：地震動の再現性が良い。  
：適切な小地震記録が必要。

出力：時刻歴波形

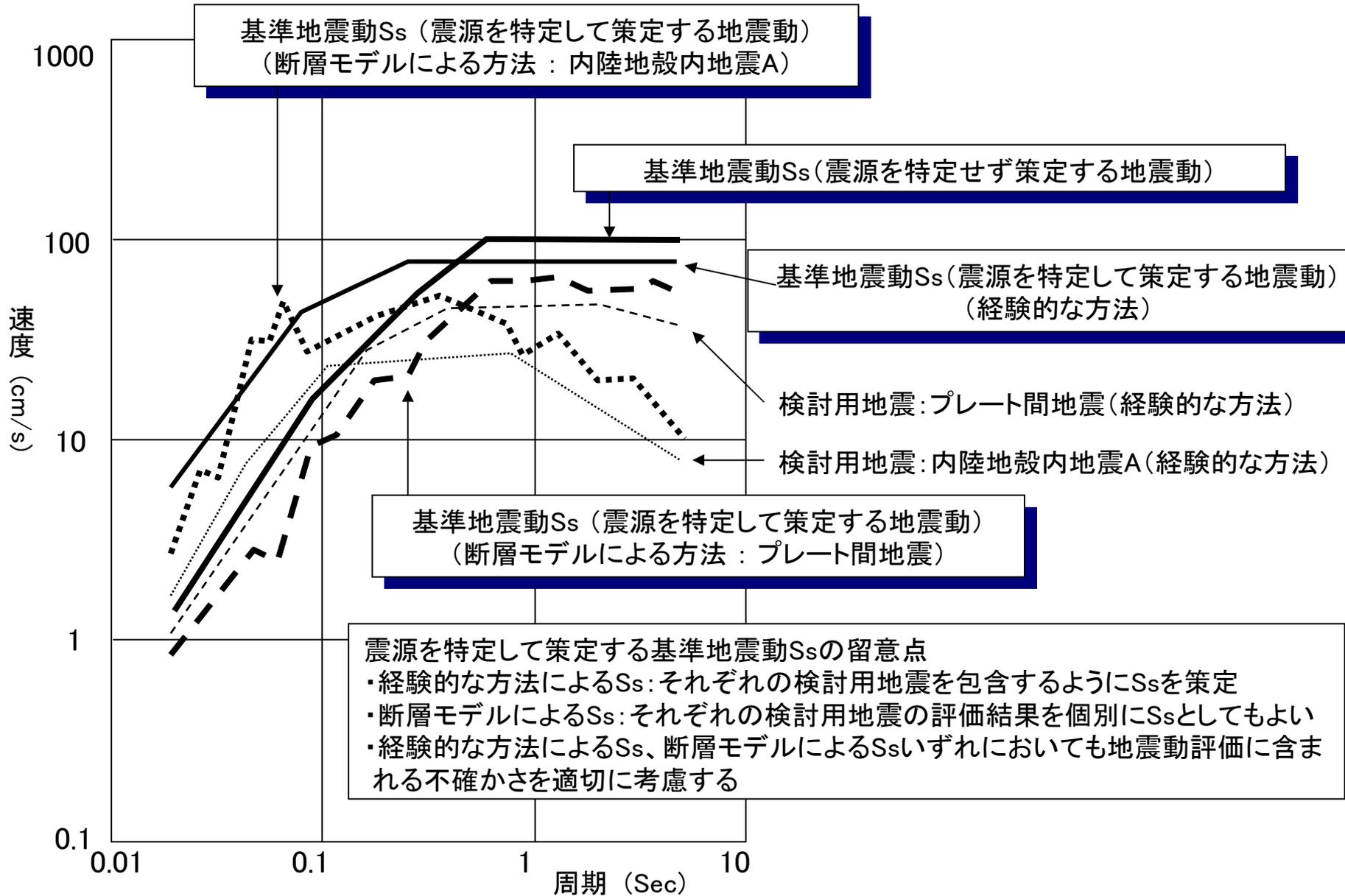


# 震源を特定せず策定する地震動

「震源と活断層を関連付けることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、これらを基に敷地の地盤物性を加味した応答スペクトルを設定し、これに地震動の継続時間、振幅包絡線の経時的変化等の地震動特性を適切に考慮して基準地震動 $S_s$ を策定することとする。  
(耐震設計審査指針抜粋)



# 基準地震動S<sub>s</sub>の策定例



# 解放基盤表面

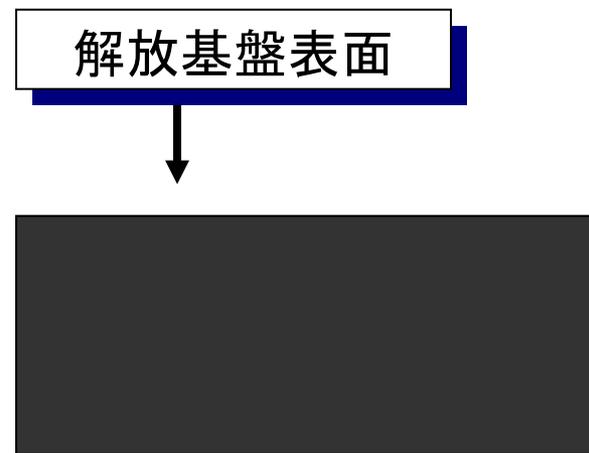
基準地震動 $S_s$ は解放基盤表面で定義する。



「解放基盤表面」とは、基準地震動を策定するために、基盤面上の表層や構造物が無いものとして仮想的に設定する自由表面であって、著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な広がりをもって想定される基盤の表面をいう。ここでいう「基盤」とは、概ねせん断波速度 $V_s=700\text{m/s}$ 以上の硬質地盤であって、著しい風化を受けていないものとする。  
(耐震設計審査指針より)

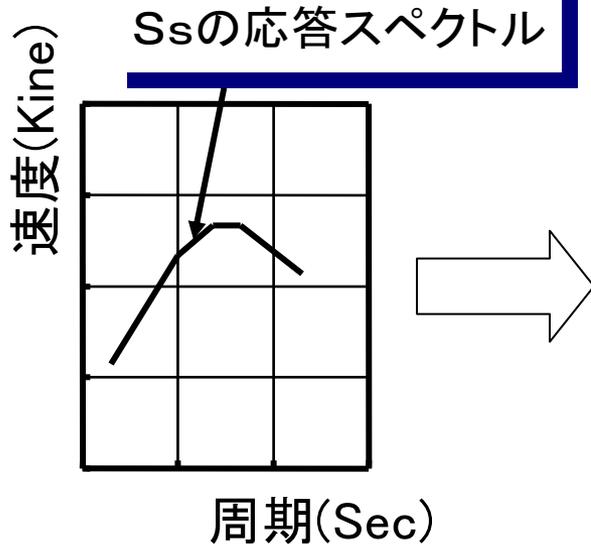
一般に、せん断波速度  
が大きければ地盤剛性  
も大きくなる関係にある

せん断波速度  
 $700\text{m/s}$ 以上の地盤



# 模擬地震波の作成 その1

設計用の応答スペクトルに適合するように基準地震動を作成する



$X(t)$ : 基準地震動  $S_s$

$$X(t) = E(t) \sum_{i=1}^N A_i \cdot \sin(\omega_i t + \phi_i)$$

$X(t)$ : 加速度波形

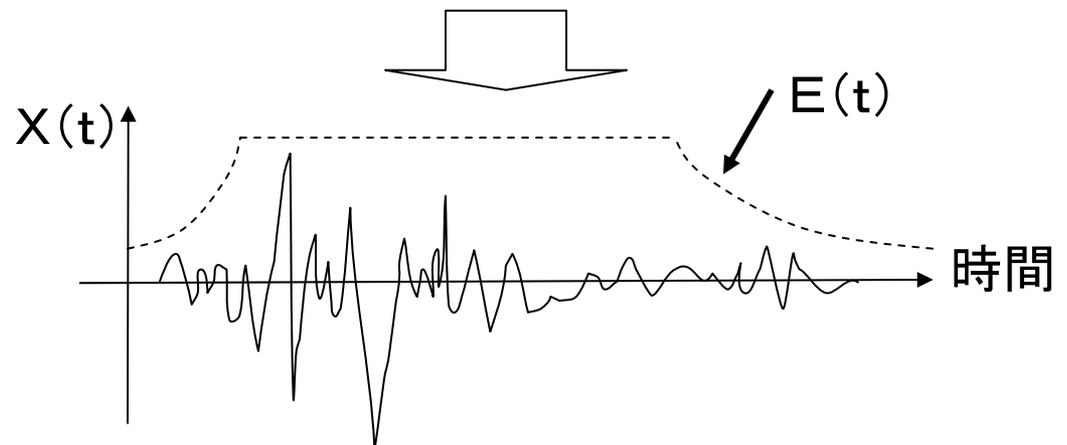
$\omega_i$ : 角振動数

$E(t)$ : 振動包絡線

$A_i$ : 各振動数成分の振幅

$N$ :  $A_i$ の重ね合せ個数

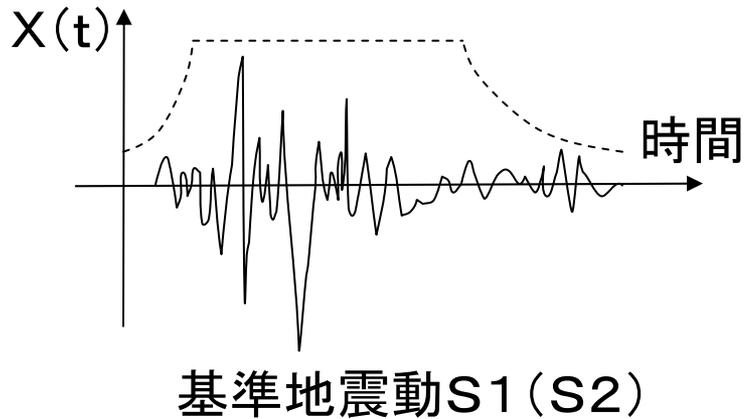
$\phi_i$ : 位相角



# 模擬地震波の作成 その2

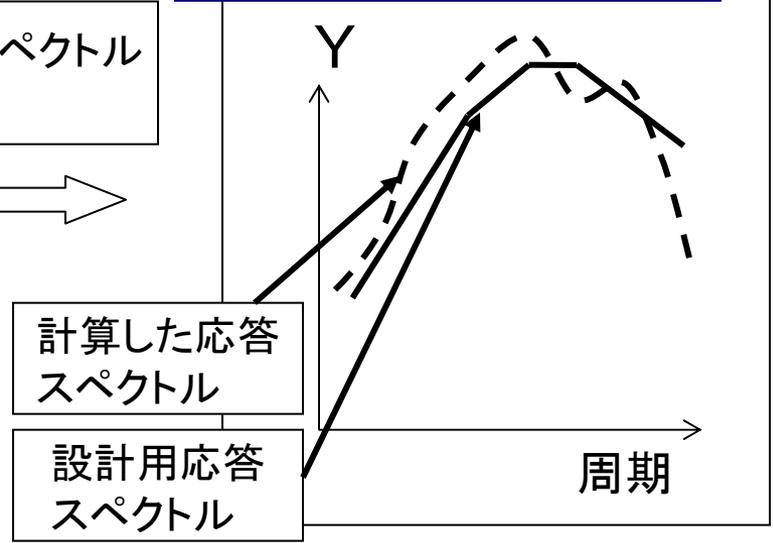
Ssの応答スペクトルに適合するまでAiを修正し繰り返し計算

$$X(t) = E(t) \sum_{i=1}^N A_i \cdot \sin(\omega_i t + \phi_i)$$



応答スペクトル  
の計算

設計用応答スペクトル  
との比較



Ai (各振動数成分の振幅)修正

適合度の判定

← NO

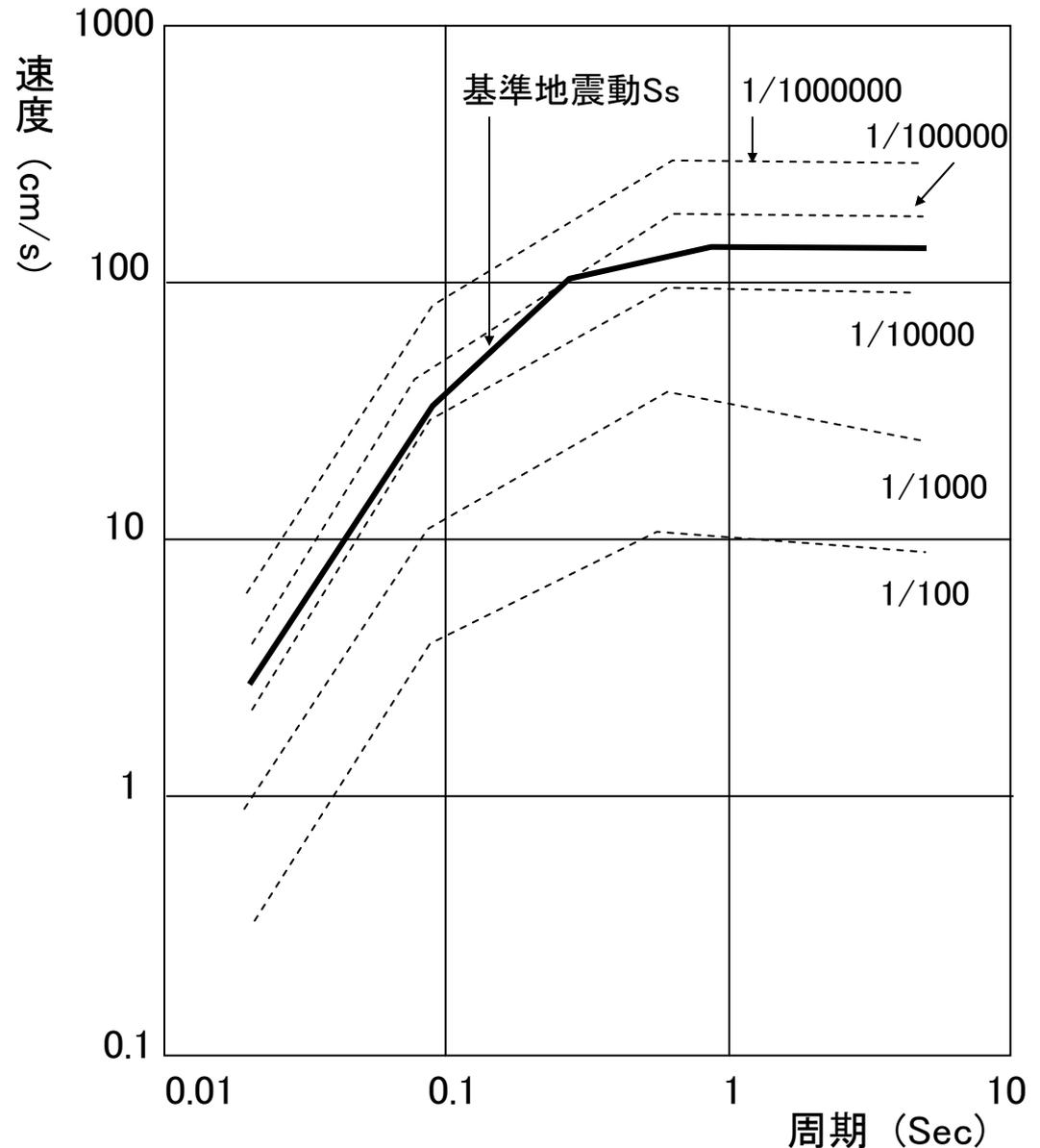
OK  
終了

# Ss超過確率の参照

「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動については、それぞれが策定された地震動の応答スペクトルがどの程度の超過確率に相当するかを把握しておくことが望ましいとの観点から、それぞれが対応する超過確率を安全審査において参照することとする。  
(耐震設計審査指針抜粋)



具体的には地震ハザード解析結果と比較し、基準地震動Ssの超過確率を把握する



# 弾性設計用地震動Sdについて

弾性設計用地震動Sdは、施設、もしくはその構成単位ごとに安全機能限界に対する入力荷重の比率を考慮して、工学的判断から求められる係数を基準地震動Ssに乗じて設定することとする。ここで、当該係数の設定に当たっては、基準地震動Ssの策定の際に参照した超過確率を参考とすることができる。

・ ・ ・ 比率(Ss/Sd)の値は、弾性設計用地震動Sdに求められる性格上、ある程度以上の大きさであるべきであり、目安として0.5を下回らないような値で求められることがのぞましい。

(耐震設計審査指針抜粋)



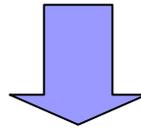
$$S_d = \alpha S_s \quad (\alpha \geq 0.5)$$

# 2007年新潟県中越沖地震が示した特徴 (耐震設計)

- 設計値(最大値、スペクトル)を大幅に上回った
- 観測地震波には3つのショックが認められた
- 1号機建屋と2号機建屋が特に大きく揺れた
- 1号機地盤系の基盤面深さで993galを記録した
- 5号機地盤系の基盤面深さで450galを記録した
- 地盤変状がもとで火災が発生した

# 2007年新潟県中越沖地震が提起した課題 (耐震設計)

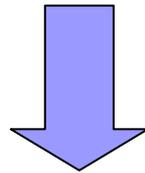
- 設計値(最大値、スペクトル)を大幅に上回った



- 活断層の位置、長さの正確な評価
- なぜ原子炉建屋が損傷を受けなかったのか?

# 2007年新潟県中越沖地震が提起した課題 (耐震設計)

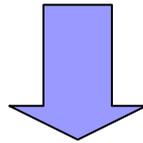
- 設計値(最大値、スペクトル)を大幅に上回った
- 観測地震波には3つのショックが認められた



- 活断層パラメータの適切な評価
- 断層モデルによる方法のグレードアップ⇒アスペリティの諸元は事前に推定可能か？

# 2007年新潟県中越沖地震が提起した課題 (耐震設計)

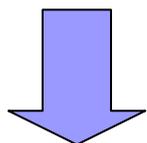
- 設計値(最大値、スペクトル)を大幅に上回った
- 1号機建屋と2号機建屋が特に大きく揺れた



- 地盤と建物との相互作用効果の検証

# 2007年新潟県中越沖地震が提起した課題 (耐震設計)

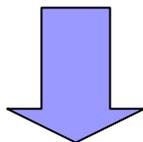
- 1号機地盤系の基盤面深さで993galを記録した
- 5号機地盤系の基盤面深さで450galを記録した



- 場所により大きく異なった原因の究明
- 開放基盤面の定義の再検討

# 2007年新潟県中越沖地震が提起した課題 (耐震設計)

- 地盤変状がもとで火災が発生した



- 重要度分類と耐震設計に関する考え方の再検討

## 原子力発電所の耐震設計の流れと新潟県中越沖地震での問題

地質・地盤調査  
過去の地震  
活断層の評価

基準地震動の策定

機器・建屋などの  
地震応答解析

耐震安全性  
の確認

新耐震設計審査指針に基づく安全性の評価(バックチェック)

- ・海域～陸域につながる活断層の評価が難しい
- ・断層評価(長さや傾きが問題)

- ・策定する地震動は妥当か？
- ・この地震動を超える地震は発生しないのか？

- ・今回の揺れで、機器の健全性評価は？
- ・耐震裕度は？

## 新潟県中越沖地震で柏崎刈羽発電所で発生した様々な事象等

### 1) 発電所での事象

- ① 運転中のプラントと定期検査中のプラント
- ② 所内変圧器での火災
- ③ 放射能を含んだ水や気体廃棄物の放出
- ④ 排気筒ダクトのズレ
- ⑤ 構内での地盤沈降 等

- ・火災や放出した原因は？
- ・ハードやソフト面での改善点は？

### 2) 発電所の対応

- ① プラントの安全確認
- ② 発生事象への対応  
自衛消防隊の機能
- ③ 対外機関への連絡と連携
- ④ 的確な情報提供 等

- ・実効的な改善策は？

### 3) 自治体等の対応

- ① 発電所の安全確認
- ② 環境の安全確認
- ③ 住民の安全と即応体制の確保
- ④ 関係機関(警察・消防等)との連携
- ⑤ 住民への情報提供 等

- ・安全の実体と安心確保に向けた教訓は？

### 4) 国の対応

- ① 安全の確認
  - ② 迅速な対応
- ・関係機関との情報共有
  - ・正確な情報の提供
  - ・適切な事実把握と

- ・国が前面に立って対応していたか？

新潟県中越沖地震で得た現象を合理的に説明するための試みは始まったばかりである

得られる成果は耐震設計法の大幅な改良に役立つものと期待される

# 謝辞

以下の資料を使用しました。記して謝意を表します。

- 日本原子力発電(株)総合研修センター:実務者のための耐震設計コース
- 防災科学技術研究所K-NET
- (株)東京電力ホームページ
- 気象庁ホームページ
- 名古屋大学鷺谷威ホームページ
- 東大地震研ホームページ
- 刈羽村ホームページ
- 第37回および第38回福井県原子力安全専門委員会資料