

# 玄海原子力発電所

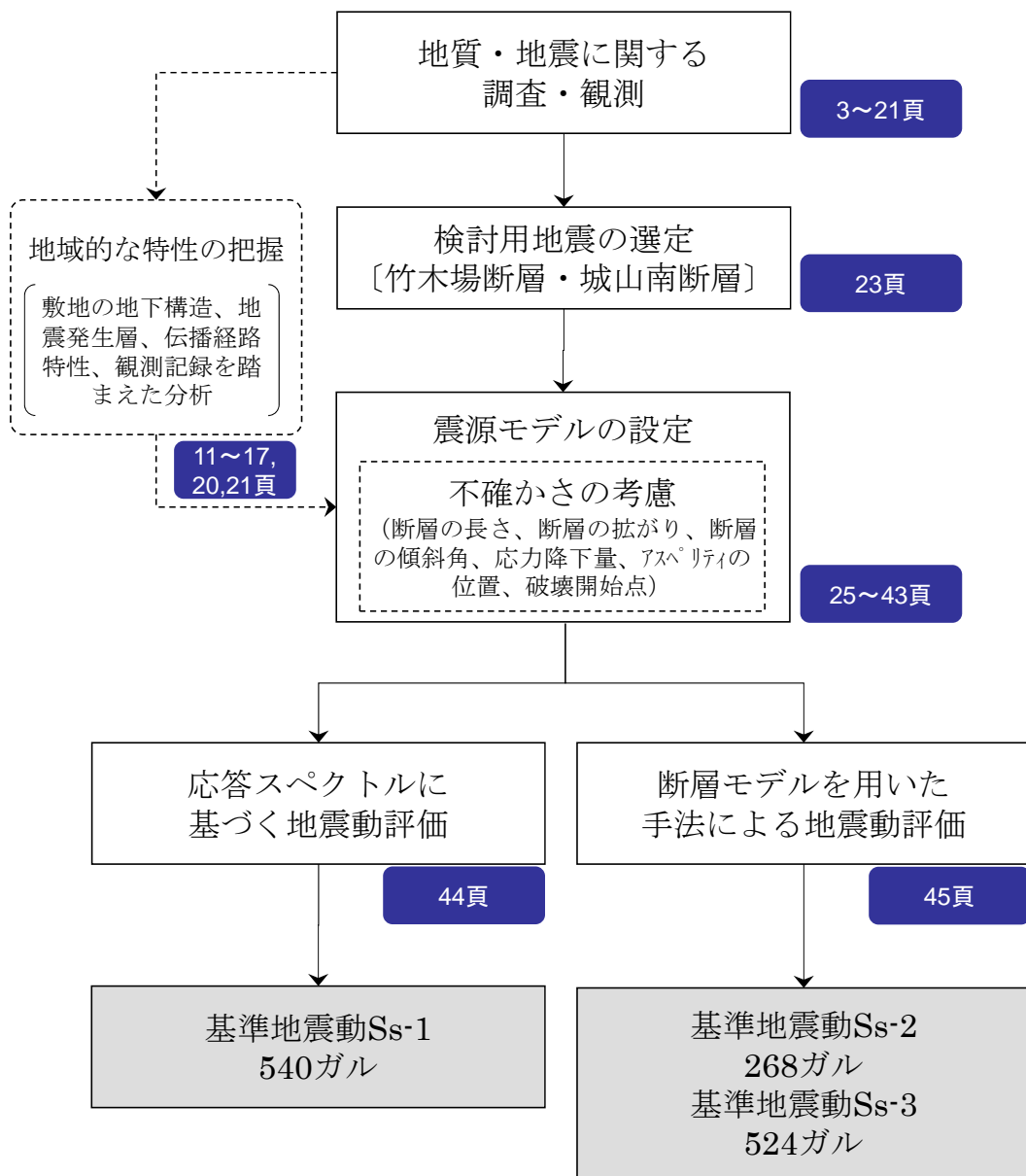
## 基準地震動について

平成29年1月19日

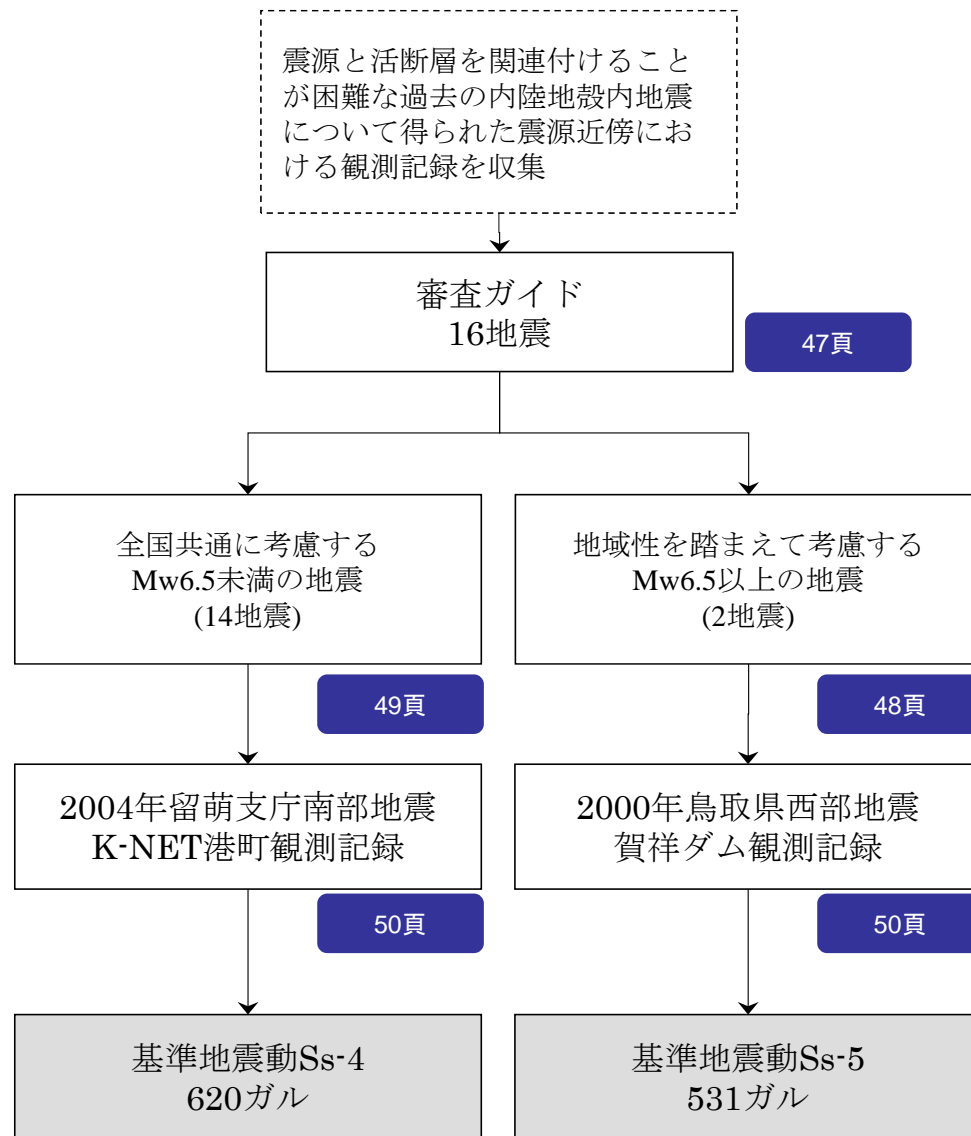
九州電力株式会社

# 基準地震動の策定フロー

## 敷地ごとに震源を特定して 策定する地震動



## 震源を特定せず 策定する地震動



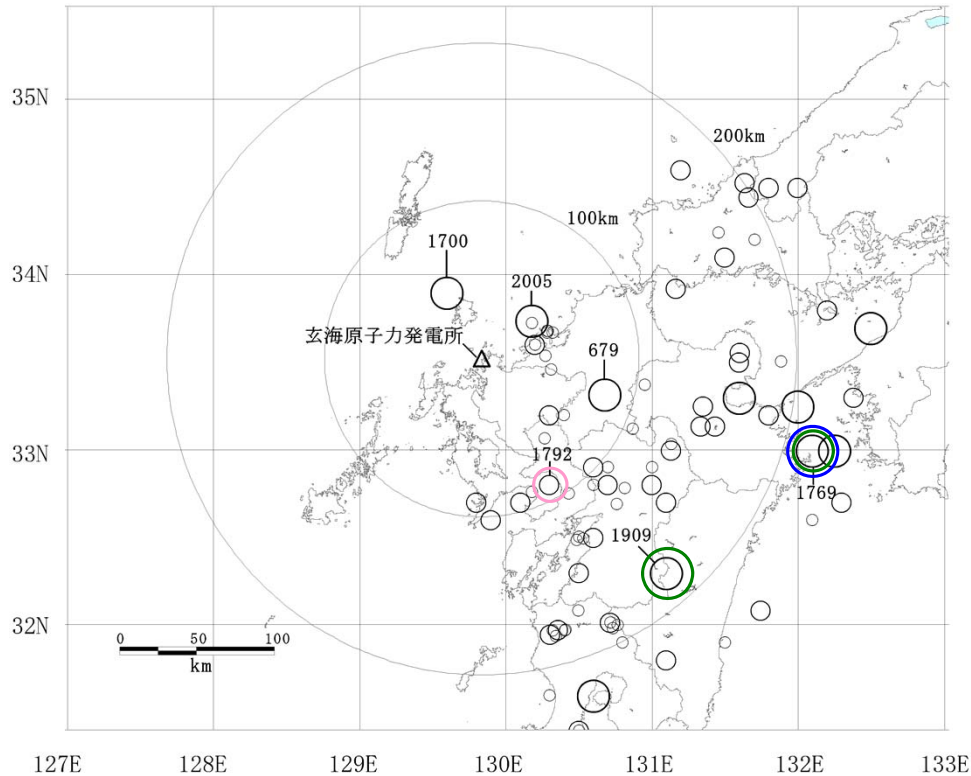
敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

地質・地震に関する調査・観測

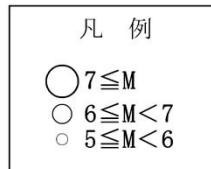
## 被害地震

○ 過去に九州周辺で発生した地震について調査

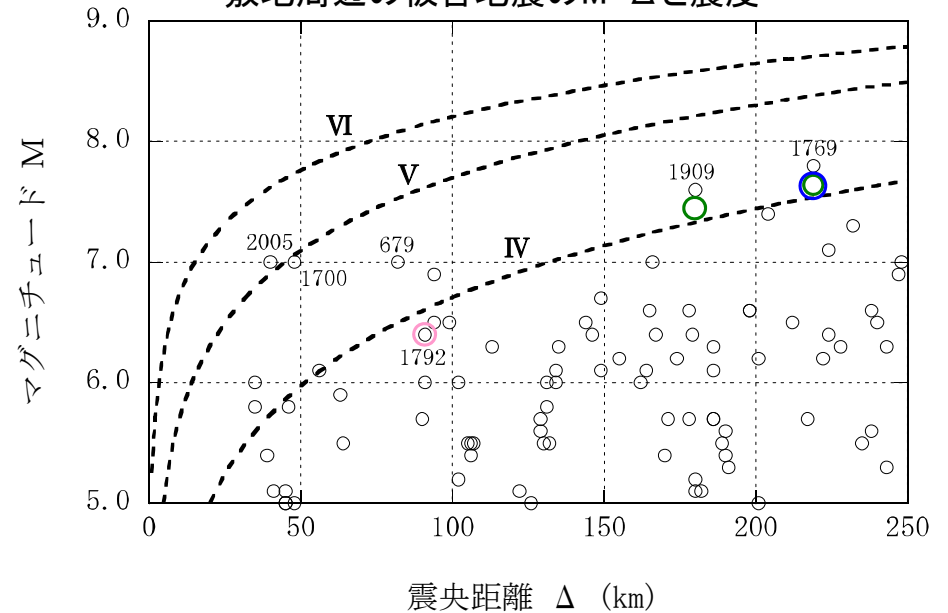
敷地周辺の被害地震の震央分布



～1884年: 日本被害地震総覧<sup>2)</sup>  
 1885年～1922年: 茅野・宇津カタログ(2001)<sup>3)</sup>  
 1923年～ : 気象庁: 地震年報(2012)<sup>1)</sup>



敷地周辺の被害地震のM-Δと震度



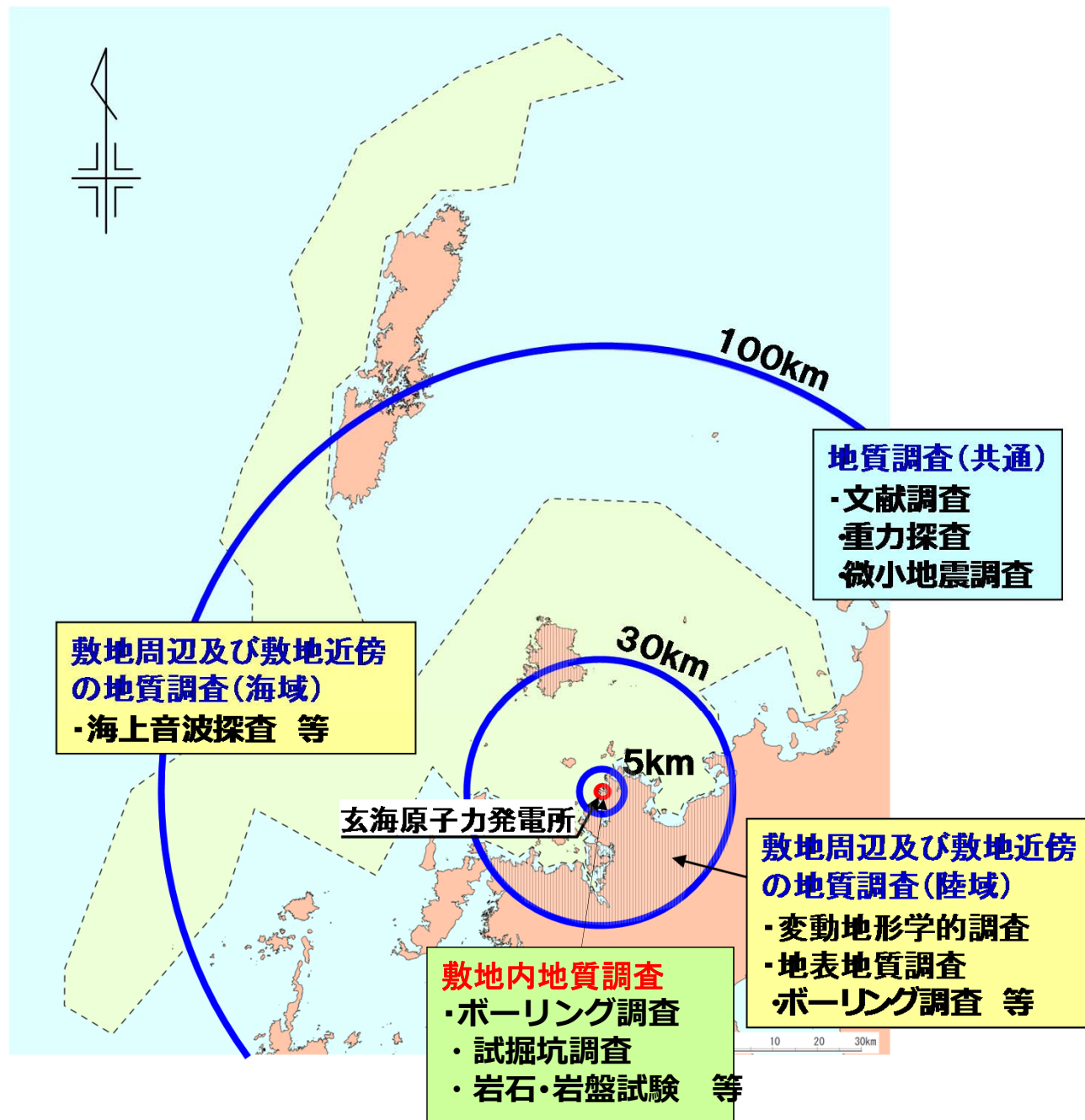
IV、V、VIは、旧気象庁震度階級で、震度の境界線は、村松(1969)及び勝又ほか(1971)による

○ 震度 V(震度5弱)程度以上の過去の被害地震から、内陸地殻内地震の影響が大きく、以下の2つの地震を抽出  
 [ 2005年福岡県西方沖地震(M7.0)、 1700年壱岐・対馬の地震(M7.0) ]

○ プレート間地震、海洋プレート内地震及びその他の地震は、その発生位置から敷地までの距離が十分離れているため、敷地に大きな影響を及ぼすものではない。

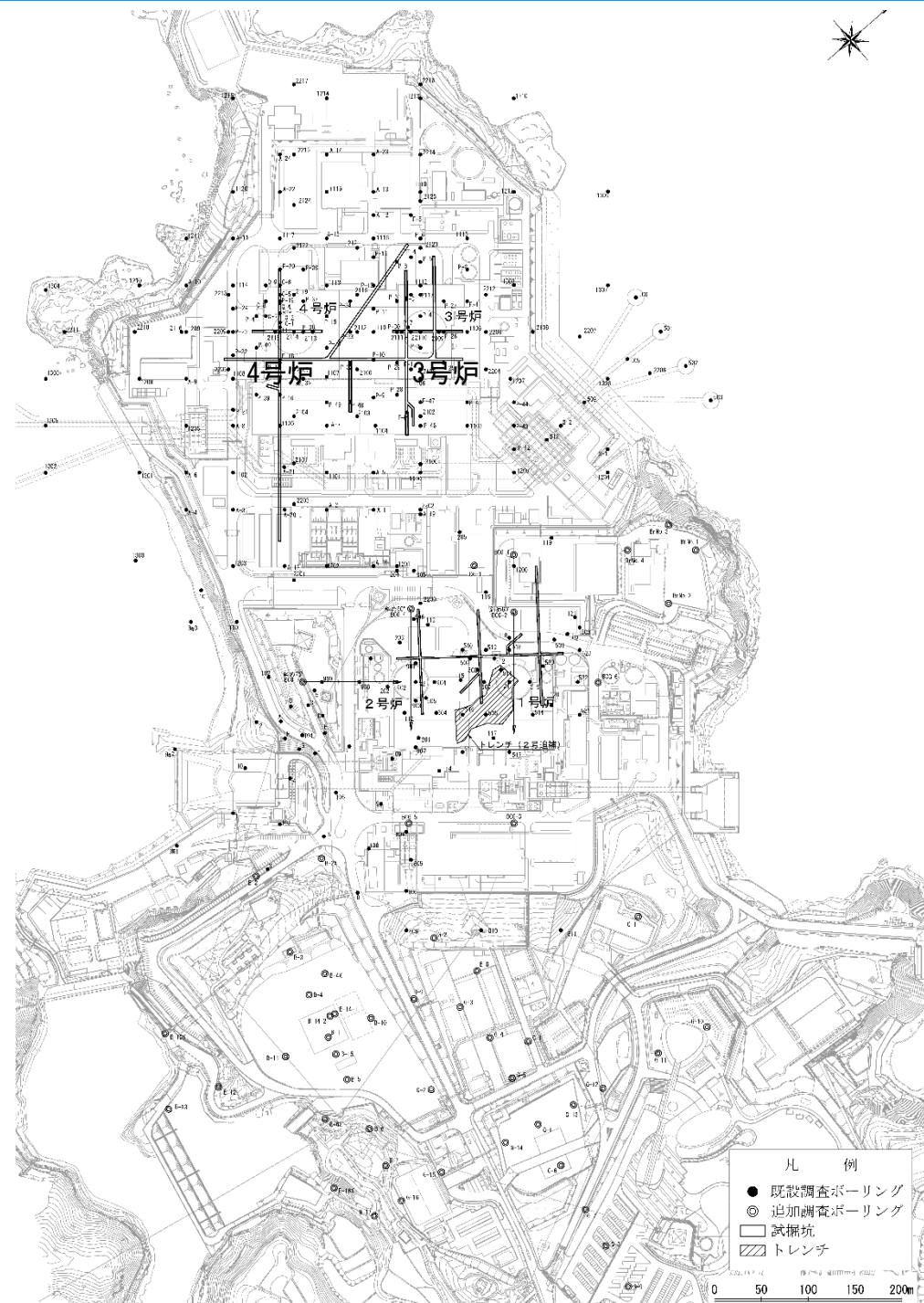
## 敷地周辺及び敷地近傍の地質調査

- 陸域及び海域について、敷地からの距離に応じて、複数の手法による詳細な調査を実施。
- 特に敷地近傍は、より精度の高い詳細な調査を実施。



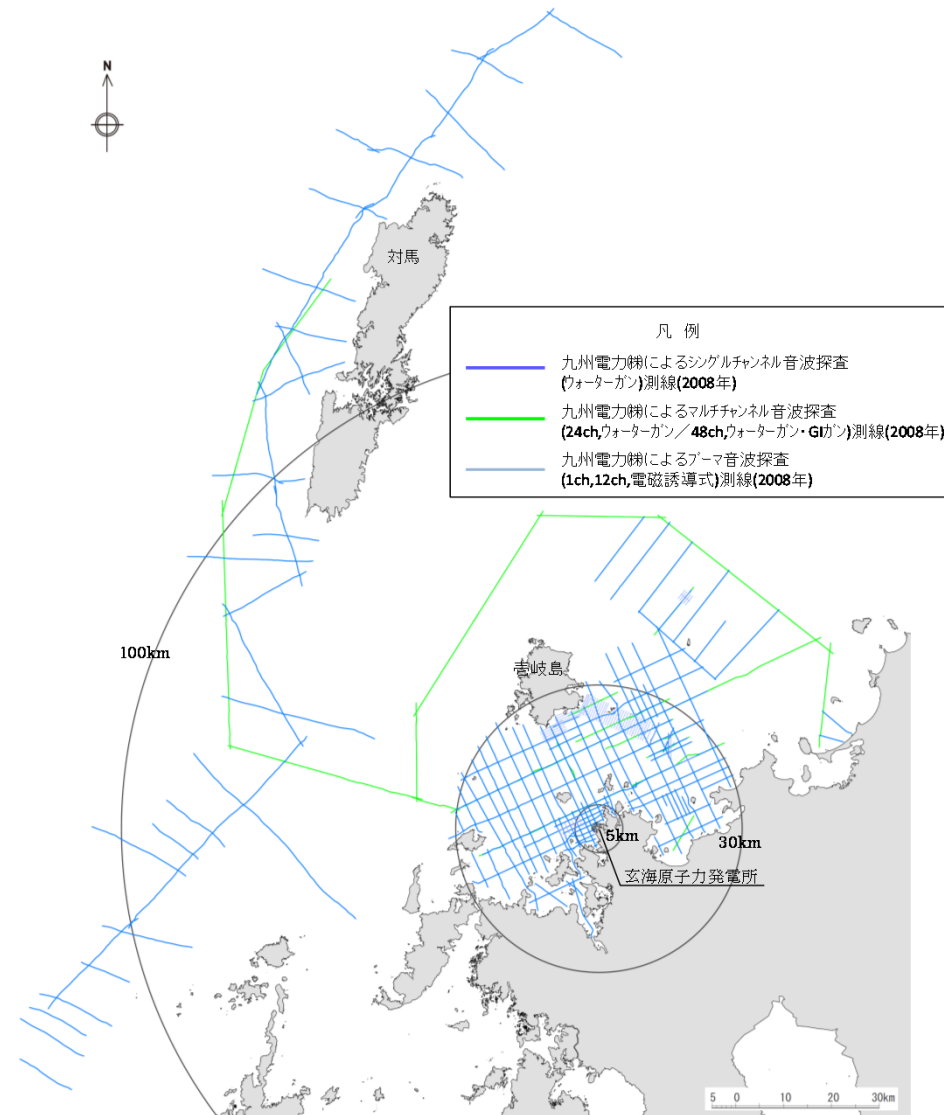
## 敷地内地質調査

- 地表地質調査、ボーリング調査、試掘坑調査等の詳細な調査を実施し、基礎地盤の地質や断層の分布及びその活動性を検討。
- ボーリング調査では、敷地の陸域部にて325孔、総延長約25,700m、掘削深度は最深で炉心付近の標高-200mまで実施。
- 地表地質調査、ボーリング調査等により得られた敷地の地質及び地質構造を直接確認するため、試掘坑調査を実施
- 発電所建設時に基礎掘削面の地質観察により基礎岩盤を構成する地質の分布、断層の走向・傾斜等を確認
- これらの結果、敷地内に活断層がないことを確認



## 敷地周辺及び敷地近傍の地質調査(海域)

- 敷地を中心とする概ね半径100km範囲の文献調査結果を踏まえ、海上音波探査等を実施。
- 敷地前面海域においては、シングルチャンネル（SC）方式及びマルチチャンネル（MC）方式の音波探査を約1km～約5km間隔の格子状の測線配置で実施。総延長約1,620km。
- 敷地前面海域以遠の海域においては、SC方式及びMC方式の音波探査をそれぞれ実施。総延長約330km。
- 対馬北西海域から五島列島西方の海域では、文献に示される断層にほぼ直交する方向の約10km～約20km間隔の測線及び横断する測線で、SC方式の音波探査を実施。総延長は約740km。
- 地震調査委員会「警固断層帯の長期評価について」を踏まえ、その北西延長海域についてもSC方式等の音波探査を実施。総延長は約160km。



### 海上音波探査



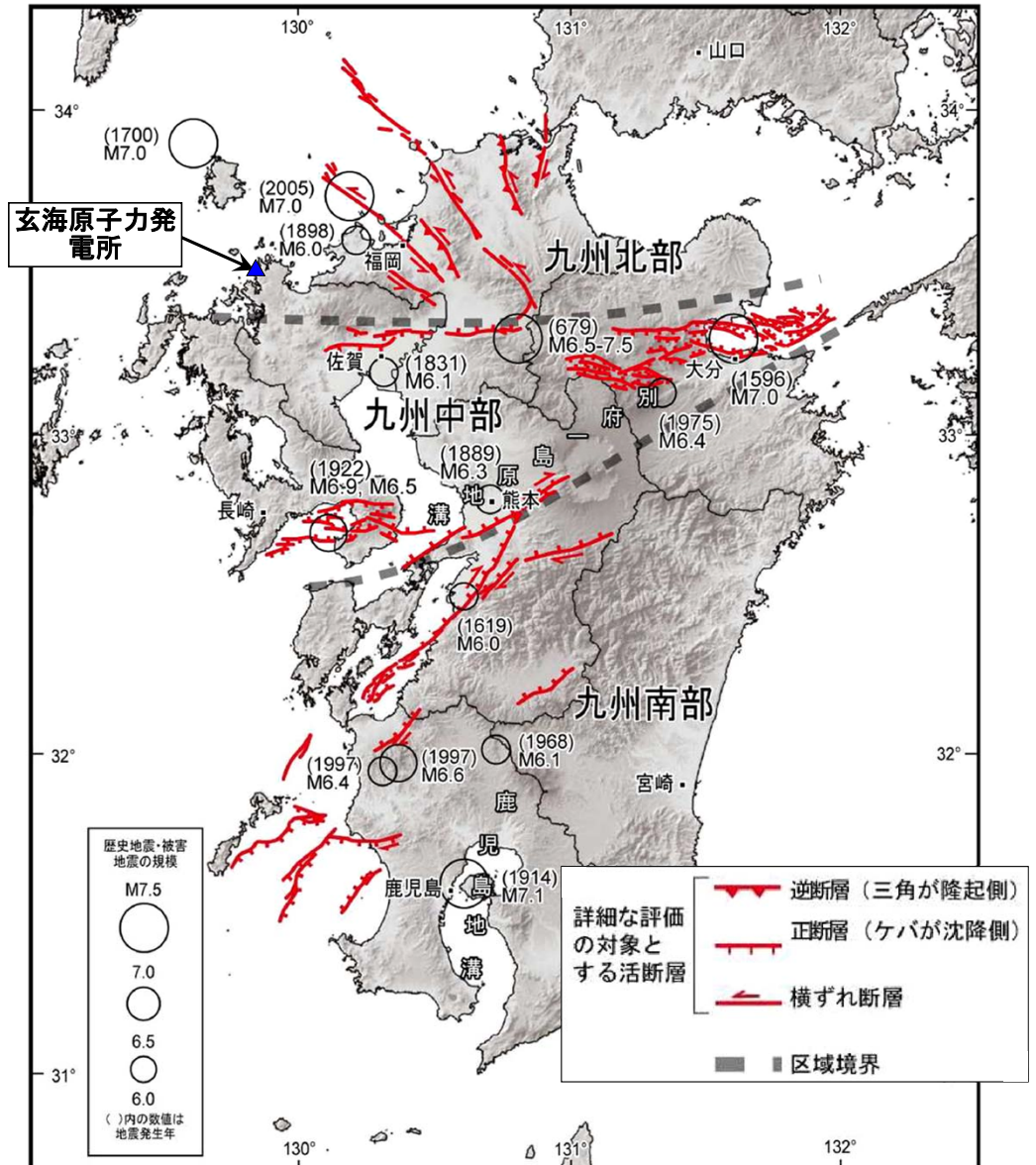
- ・ 船から音波を発振し、その反射波を分析
- ・ 総延長2,850kmにわたり実施

## 敷地周辺及び敷地近傍の地質調査(文献調査)

- 文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会による九州地域の活断層評価によると、玄海原子力発電所周辺では、敷地に大きな影響を及ぼす長大な活断層は認められない。

### ○地震調査委員会とは

- ・平成7年1月の阪神・淡路大震災を踏まえ、地震防災対策の強化、特に地震による被害の軽減に資する地震調査研究のために、文部科学省に設置された政府の機関である。
- ・地震調査推進研究本部の下部組織に地震調査委員会があり、地震に関する観測、測量、調査又は研究を行い関係行政機関、大学等の調査結果等を収集し、整理し、及び分析し、並びにこれに基づき総合的な評価を行う。

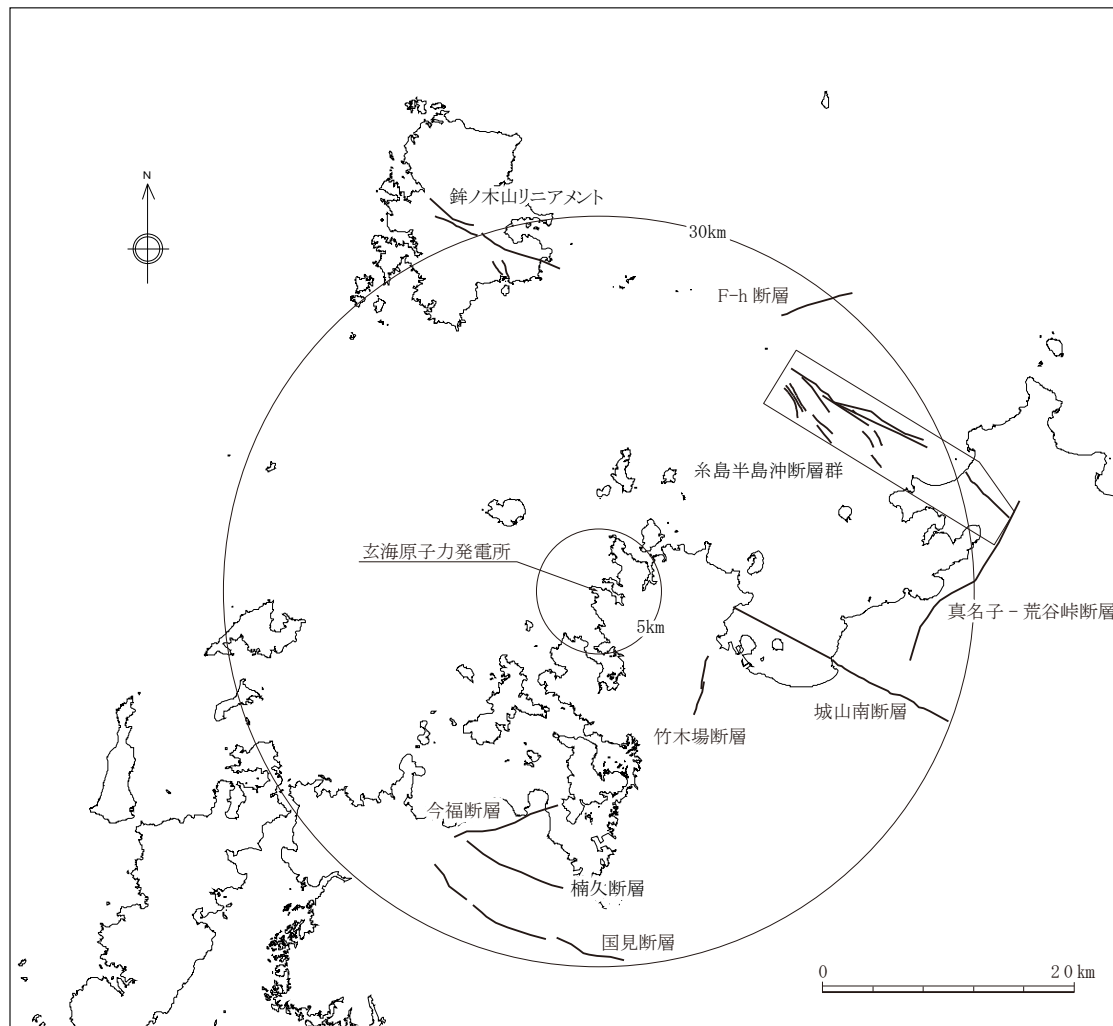


地震調査委員会 (2013) に加筆



# 敷地周辺の活断層分布（半径30km以内）

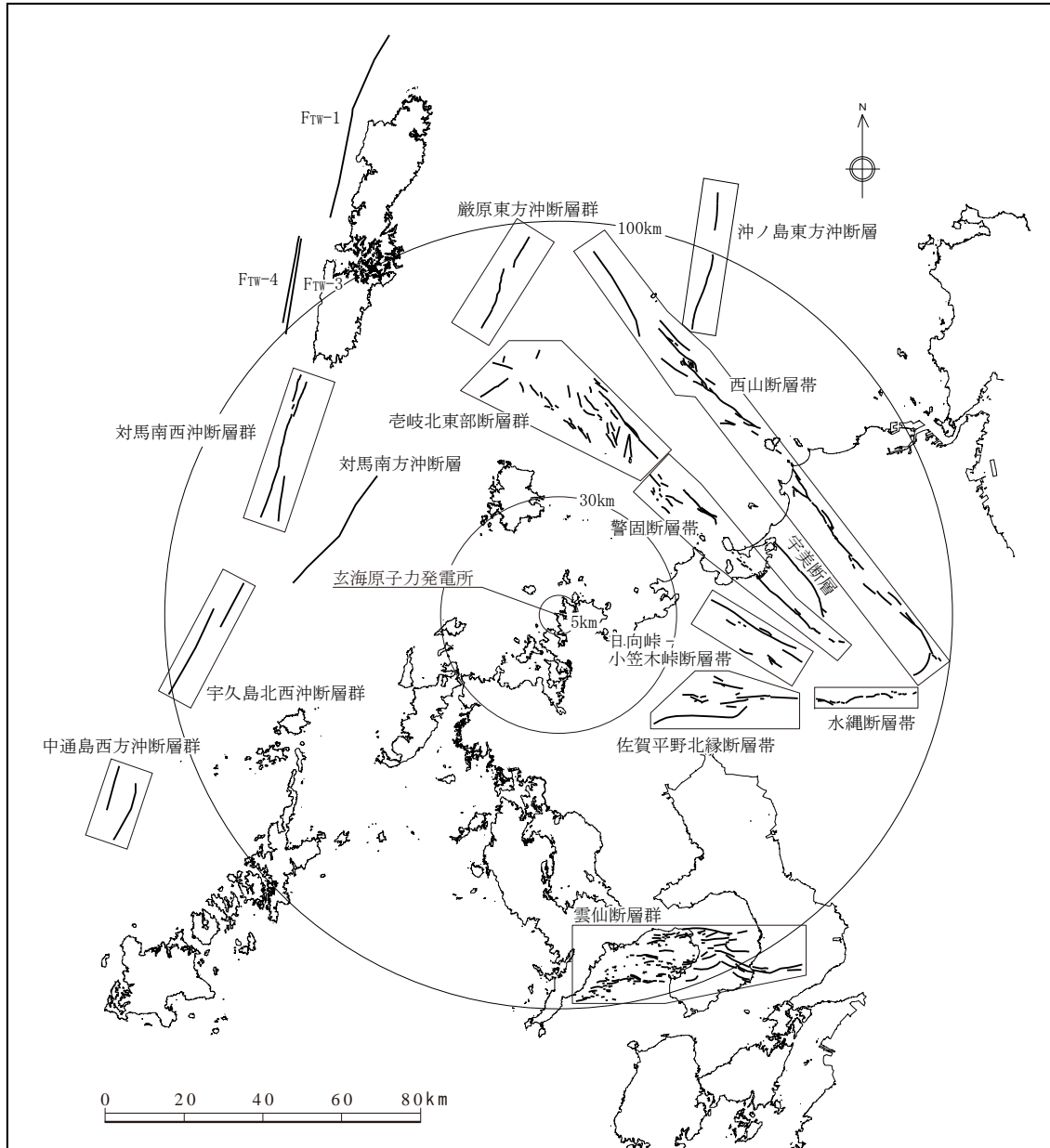
## 敷地周辺の活断層分布



断層の名称	断層長さ (km)	震央距離 (km)
竹木場断層	4.9	11
今福断層	8.7	20
城山南断層	19.5	20
楠久断層	8.6	23
国見断層	17.0	26
真名子-荒谷峠断層	15.5	29
鉾ノ木山リニアメント	11.9	30
糸島半島沖断層群	21.1	27
F-h断層	6.0	29

# 敷地周辺の活断層分布（半径30km以遠）

## 半径30km以遠の活断層分布



断層の名称	断層長さ (km)	震央距離 (km)
警固断層帯	65.3	50
佐賀平野北縁断層帯	38.0	49
日向峠—小笠木峠断層帯	27.8	51
宇美断層	22.6	62
西山断層帯	137.0	67
水縄断層帯	25.6	81
雲仙断層群	38.2	96
壱岐北東部断層群	50.8	51
対馬南方冲断層	34.6	61
対馬南西冲断層群	37.7	80
厳原東方冲断層群	26.3	86
宇久島北西冲断層群	34.1	90
沖ノ島東方冲断層	35.4	97
F <sub>TW</sub> -3	24.6	107
F <sub>TW</sub> -4	22.5	109
中通島西方冲断層群	18.8	122
F <sub>TW</sub> -1	48.8	134

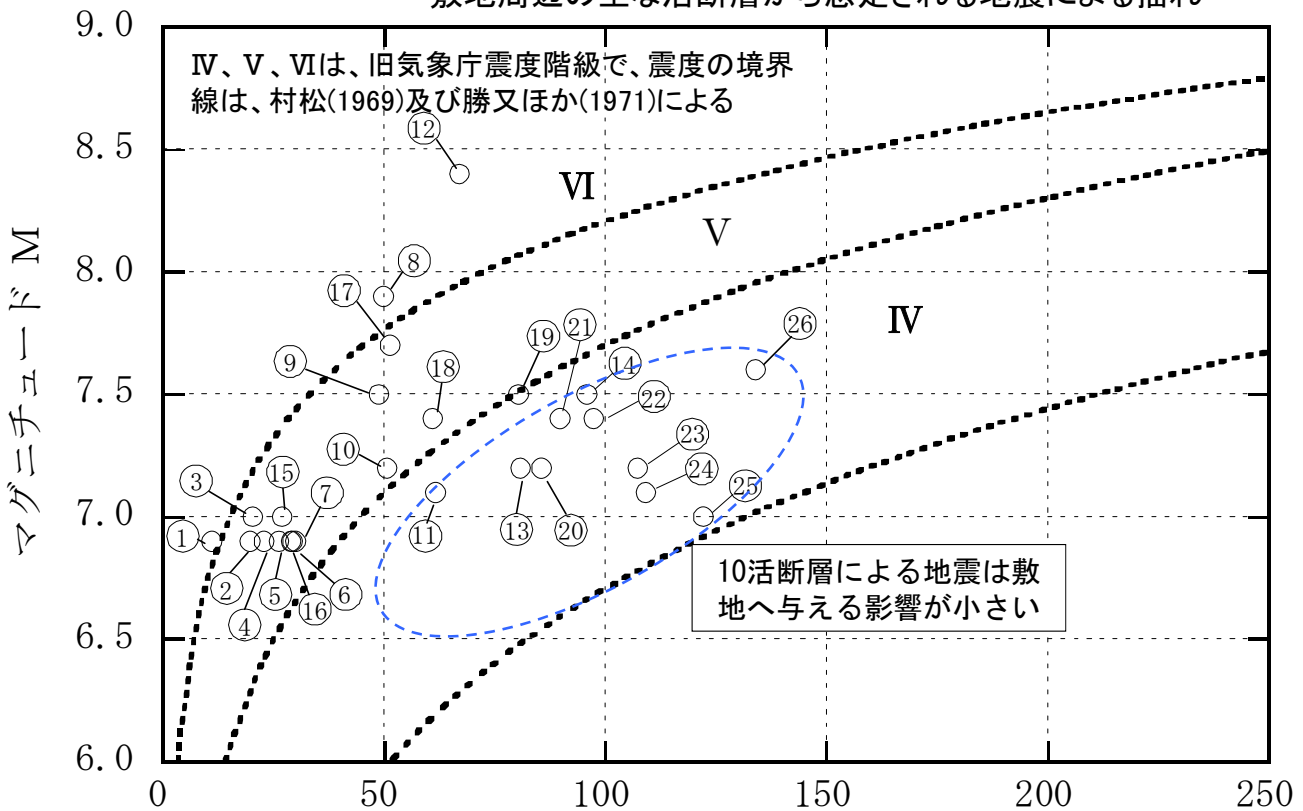
地震規模及び敷地からの距離を考慮して、警固断層帯、佐賀平野北縁断層帯、日向峠—小笠木峠断層帯、西山断層帯、壱岐北東部断層群、対馬南方冲断層、対馬南西冲断層群を抽出。

# 敷地周辺の主な活断層から想定される地震

## 敷地周辺の活断層から想定される地震の揺れ

敷地周辺の主な活断層から想定される地震による揺れ

- 地震規模及び敷地からの距離を考慮して、周辺の活断層からの揺れを想定。
- 宇美断層、水縄断層帯、雲仙断層群、巖原東方沖断層群、宇久島北西沖断層群、FTW-3、FTW-4、中通島西方沖断層群、FTW-1及び沖ノ島東方沖断層による地震を除き、震度5弱程度以上と推定。



敷地周辺の主な活断層

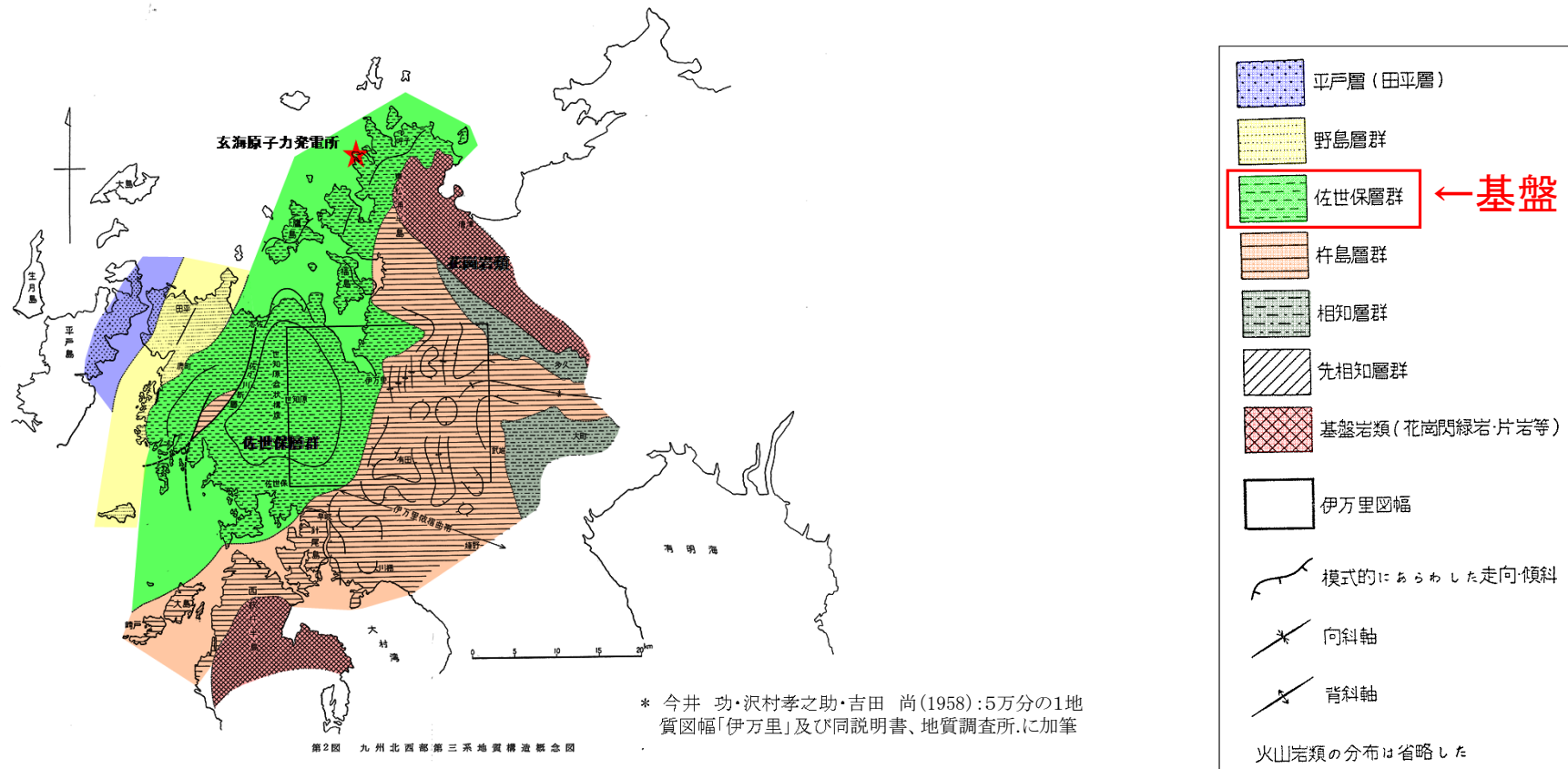
No.	断層の名称	No.	断層の名称	No.	断層の名称
①	竹木場断層	⑩	日向峠-小笠木峠断層帯	⑲	対馬南西沖断層群
②	今福断層	⑪	宇美断層	⑳	巖原東方沖断層群
③	城山南断層	⑫	西山断層帯	㉑	宇久島北西沖断層群
④	楠久断層	⑬	水縄断層帯	㉒	沖ノ島東方沖断層
⑤	国見断層	⑭	雲仙断層群	㉓	FTW-3
⑥	真名子-荒谷峠断層	⑮	糸島半島沖断層群	㉔	FTW-4
⑦	銚ノ木山リニアメント	⑯	F-h断層	㉕	中通島西方沖断層群
⑧	警固断層帯	⑰	壱岐北東部断層群	㉖	FTW-1
⑨	佐賀平野北縁断層帯	⑱	対馬南方沖断層		

敷地に与える影響が小さい断層

# 敷地及び敷地周辺の地下構造調査

- 敷地及び敷地周辺における地質調査結果によると、玄海原子力発電所敷地周辺においては、原子炉建屋等の重要な施設を支持する硬質な岩盤（基盤）は、拡がりをもって分布することが推定される。
- 基盤は、敷地付近においては比較的浅所に広く分布することを確認。

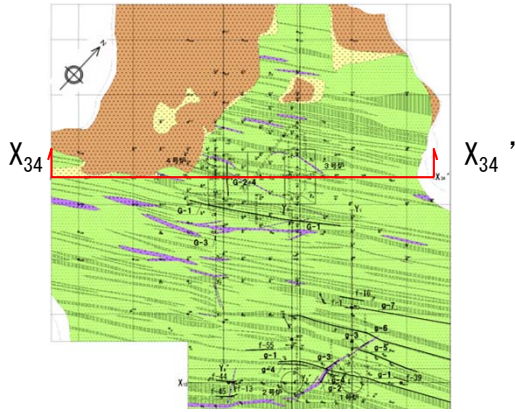
⇒敷地の基盤は、硬い岩盤が拡がりをもって分布している。



- 5万分の1地質図幅「伊万里」によると、佐世保層群（基盤）は相当な拡がりをもって分布する。
- 佐世保層群は、敷地においては少なくとも深さ方向に1km以上分布する。

# 敷地及び敷地周辺の地下構造調査

## 原子炉設置位置付近の地質断面図 (X<sub>34</sub>-X<sub>34</sub>' 断面)



○敷地では、佐世保層群が地下浅部に分布し、東松浦玄武岩類が不整合関係で覆う。

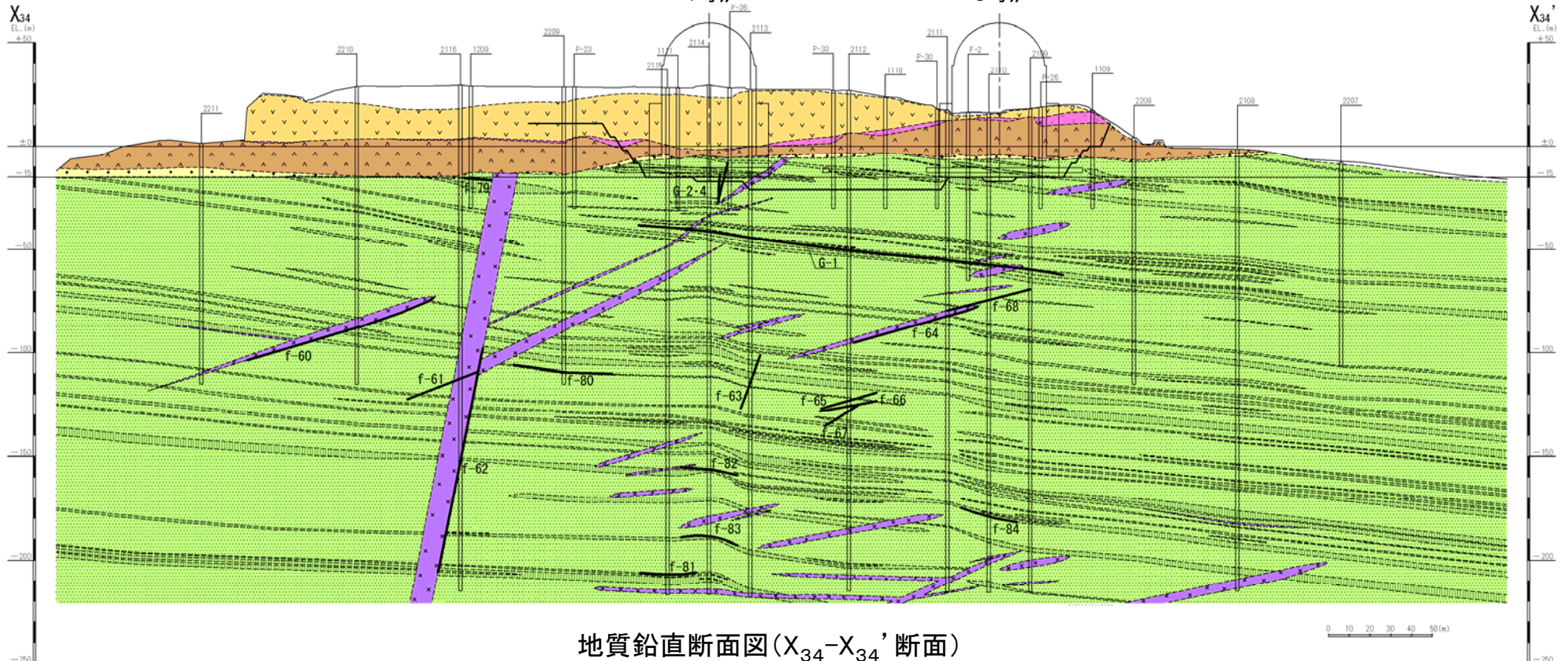
地質凡例

地質時代	地層名	地質
第四紀	沖積層	表土(盛土等を含む)
		無斑晶質玄武岩
新生代	鮮新世	東松浦玄武岩類
		凝灰岩
	新第三紀	かんらん石粗粒玄武岩
中新世	八ノ久保砂礫層	砂礫層
	肥前粗粒玄武岩類	玢岩
古第三紀	漸新世	頁岩
		砂岩

記号凡例

- (□) ボーリング孔(投影)
  - (□) 試掘坑(投影)
  - 岩種境界線
  - 断層
- (G- : 3,4号炉試掘坑で確認された断層)  
 (g- : 1,2号炉試掘坑で確認された断層)  
 (f- : 上記以外の断層)

地質水平断面図(EL.-15m)

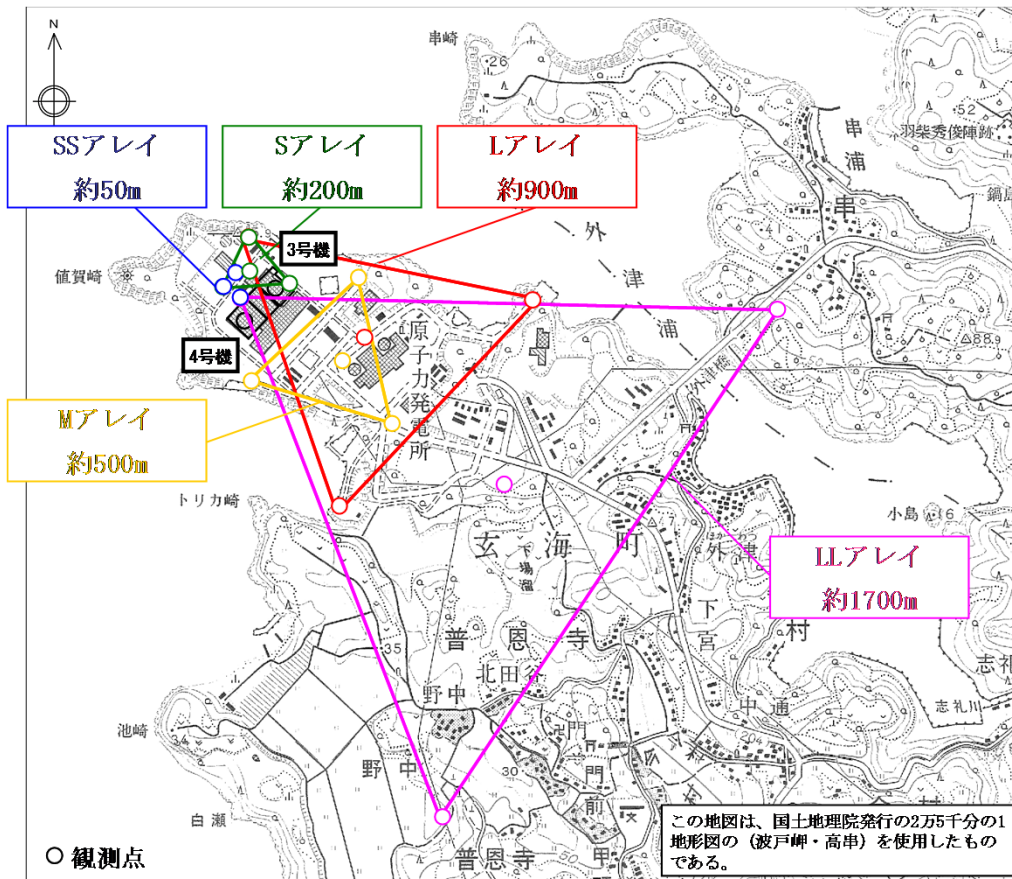


地質鉛直断面図(X<sub>34</sub>-X<sub>34</sub>' 断面)

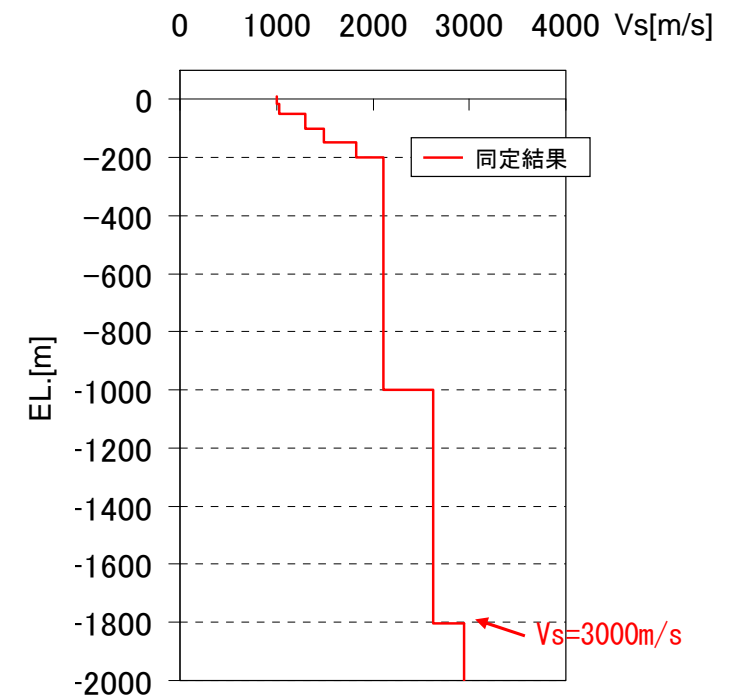
# 敷地及び敷地周辺の地下構造調査

- 敷地内調査結果（試掘坑内の弾性波試験結果）によると、原子炉基礎岩盤における岩盤のせん断波速度は平均1350m/sであり、堅固な地盤である。
- 敷地内において、微動アレイ探査を実施した結果、地下のせん断波速度は、表層から深くなるにつれ大きくなっており（標高約-1800mで約3000m/s）、比較的浅所に非常に硬い岩盤が存在することが分かる。

⇒敷地の地盤は硬くて揺れにくい



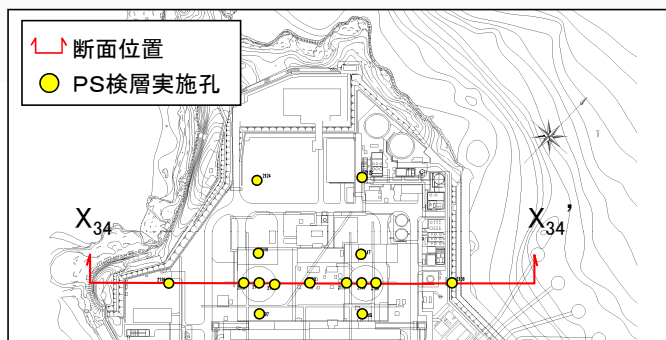
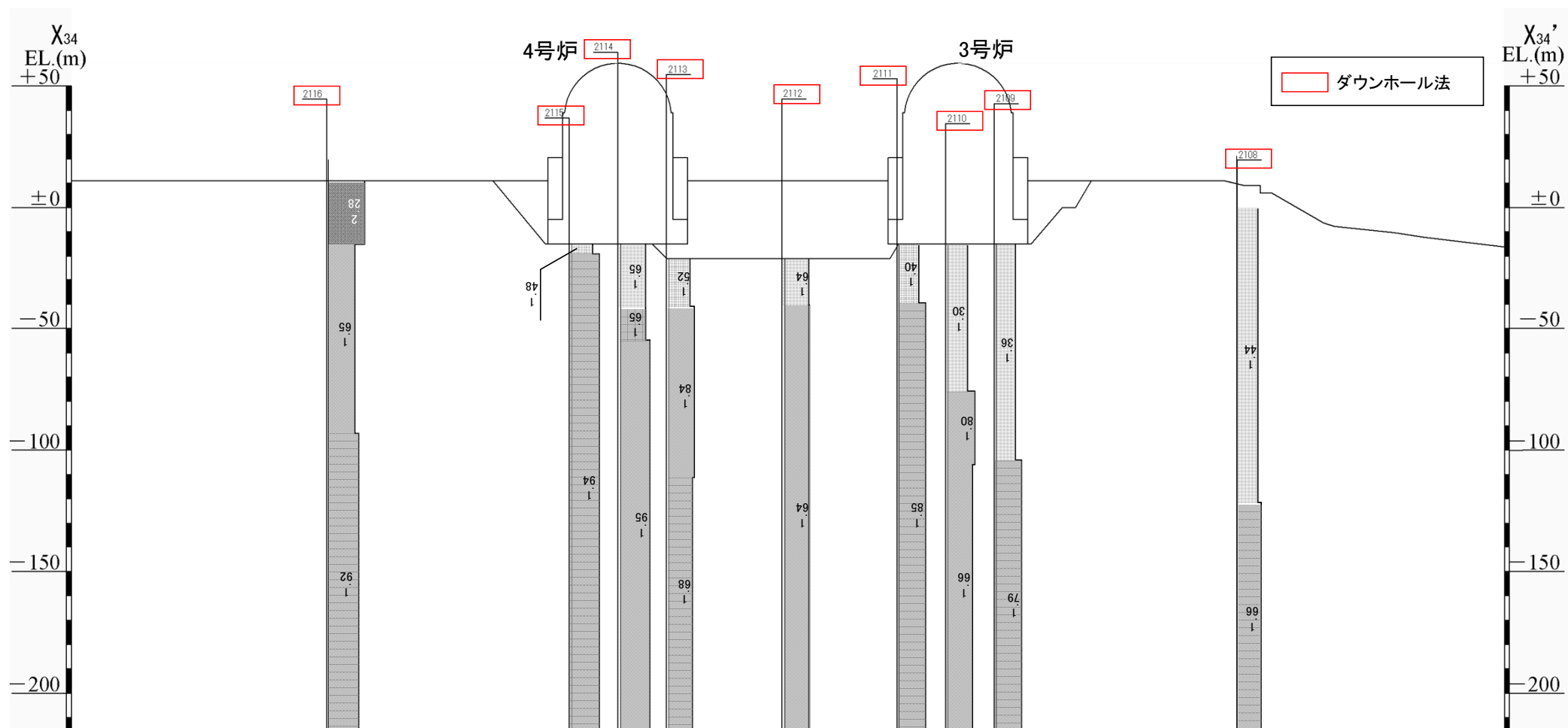
微動アレイ観測位置



せん断波速度の同定結果

# 敷地及び敷地周辺の地下構造調査

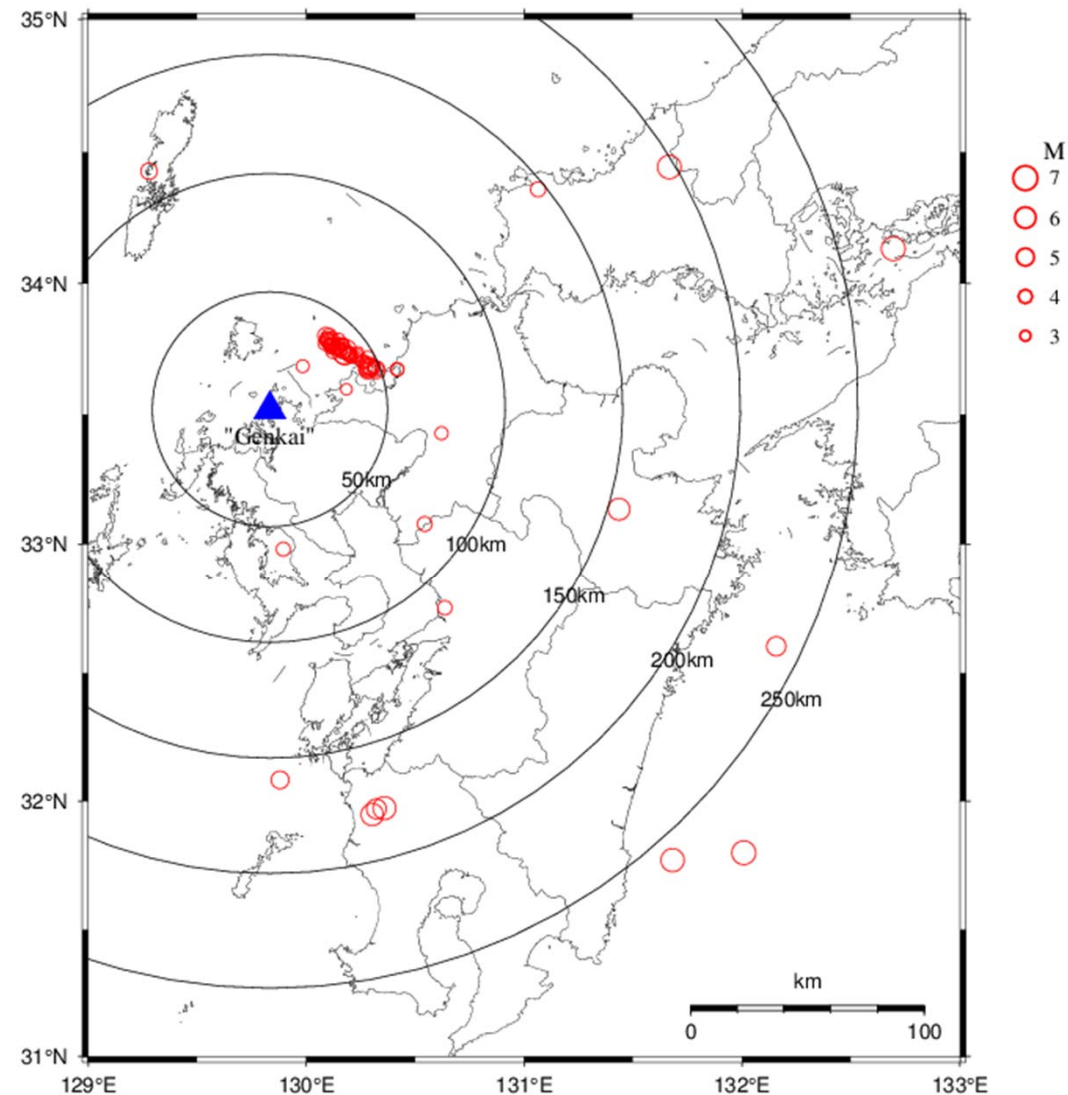
## 速度構造について (X<sub>34</sub>-X<sub>34</sub>'断面) (S波速度)



- 原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (Vs=約1.4~1.8km/s) を示す。
- 速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在しない。

## 玄海原子力発電所敷地地盤で観測記録が得られた地震

- 玄海原子力発電所では、地震観測を開始して以来、平成25年7月（設置変更許可申請時）までにM3.1～M7.3の合計76の地震の観測記録が得られている。
- 地震の観測記録のうち加速度が最も大きいものは、2005年3月20日福岡県西方沖地震（M7.0）による記録（敷地で85ガルを観測）である。
- 玄海原子力発電所の基準地震動策定にあたり、これら76地震の観測記録を用いた分析を行った。



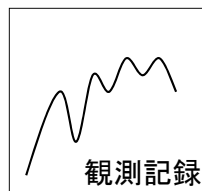
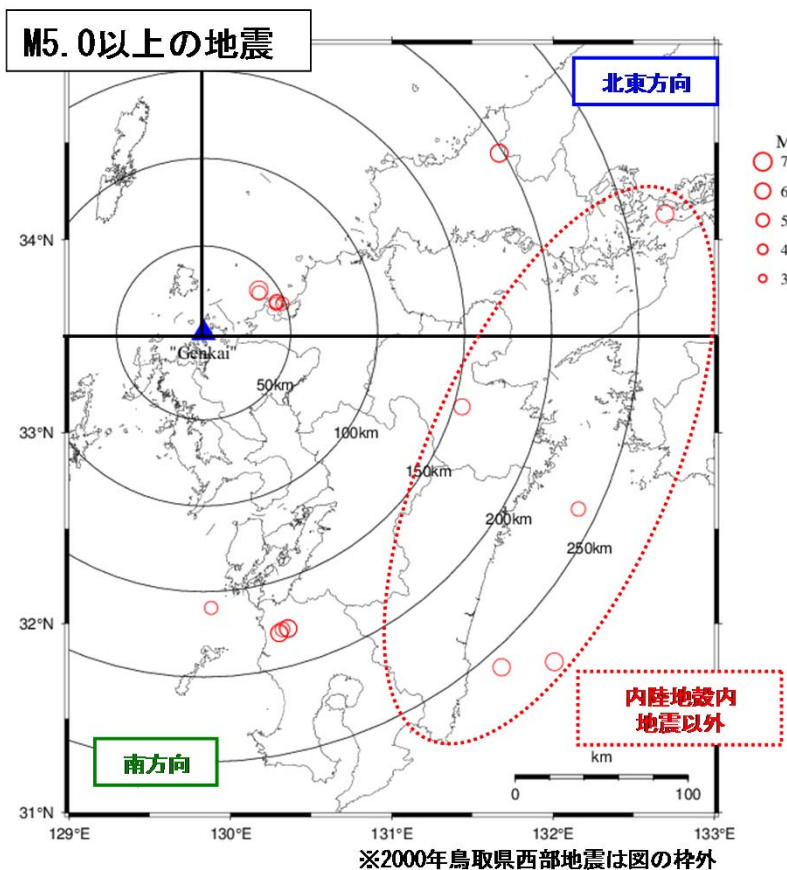
※2000年鳥取県西部地震は図の枠外



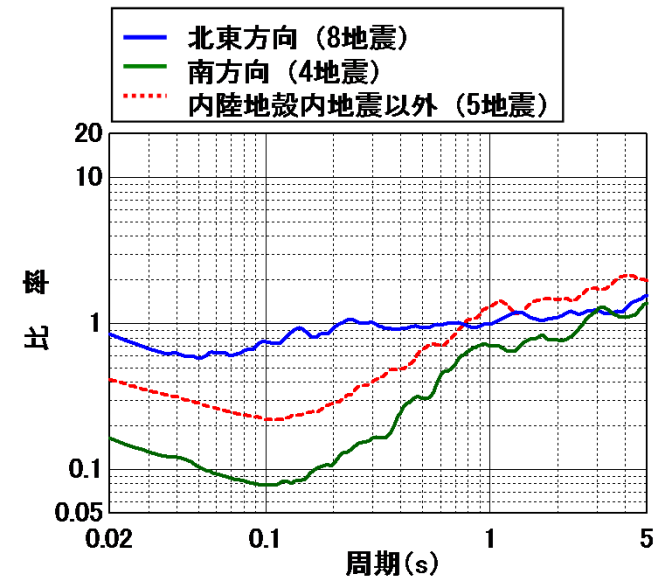
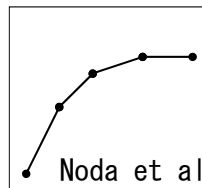
# 地震観測データに基づく分析

## 特異な増幅特性の有無

- 敷地及び敷地周辺の地下構造が、地震波の伝播経路特性、サイト特性に与える影響を検討するため、地震の到来方向による増幅特性の分析を実施。
  - 計76地震のうちM5.0以上の地震の観測記録の応答スペクトルとNoda et al. (2002)による平均的な応答スペクトルの比を到来方向別に算定し分析。
- ⇒ 玄海原子力発電所敷地は、地震波の到来方向によらず特異な増幅は見られない。



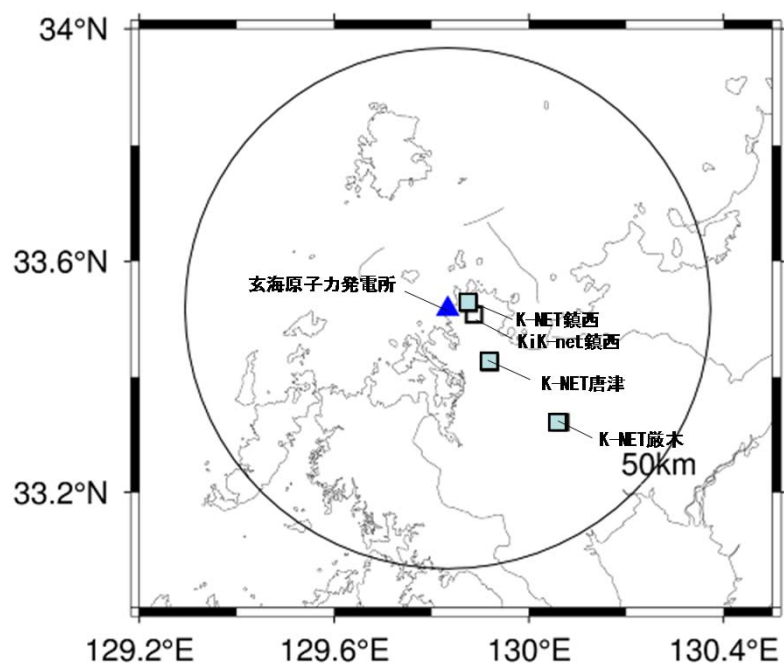
÷



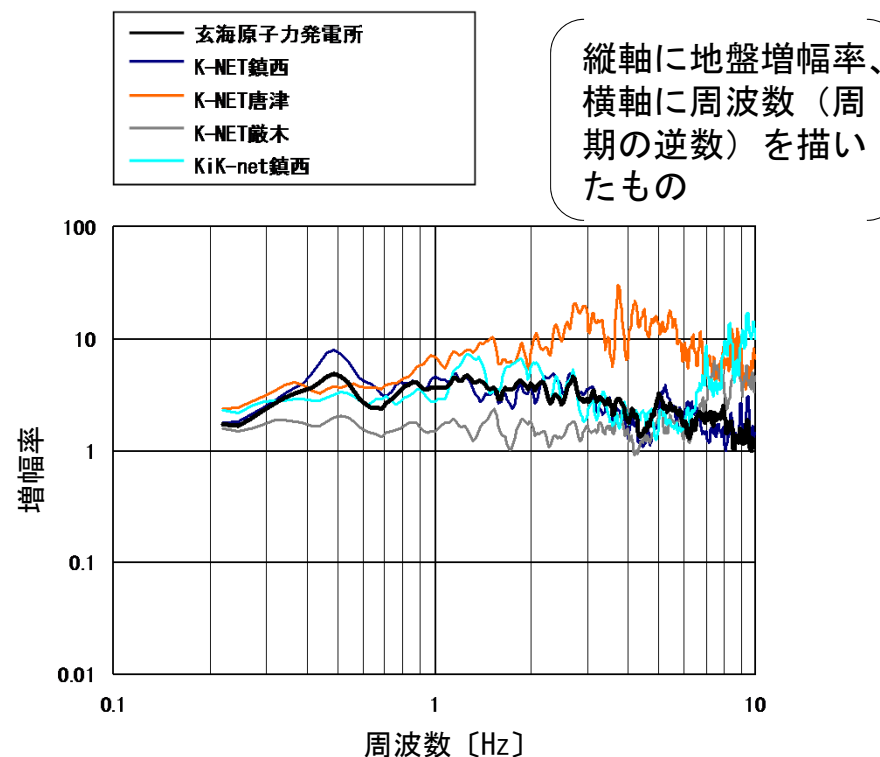
- ・ 上図は、横軸を周期、縦軸を観測記録とNoda et al. (2002)による応答スペクトルの比率を描いたもの。
- ・ 観測記録とNoda et al. (2002)の応答スペクトルの比が1.0を上回るということは、平均的な地震による揺れより大きな揺れであったことを示す。

## 敷地及び敷地周辺の地盤増幅率の差異

- 玄海原子力発電所敷地の地下構造が地震波のサイト特性に与える影響を検討するため、敷地における地盤増幅率と敷地周辺のK-NET及びKiK-net※観測点における地盤増幅率について、比較・検討を実施。  
※：防災科学技術研究所 強震観測網
- 右下図のとおり、敷地における地盤増幅率は、周辺の観測点の地盤増幅率と概ね同様の傾向があり、顕著に揺れが大きくなる増幅特性は見られない。  
⇒ 敷地地盤が堅固であり、揺れにくい。



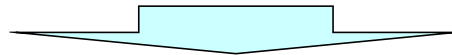
周辺観測点の位置



# 解放基盤表面の設定

## 解放基盤表面の定義

「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持って想定される基盤の表面をいう。ここでいう「基盤」とは、概ねせん断波速度が $V_s=0.7\text{km/s}$ 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をいう。



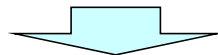
○ 敷地の地質は、古第三紀漸新世～新第三紀前期中新世の佐世保層群を基盤とし、これに貫入した肥前粗粒玄武岩類に属する玢岩と、これを不整合に覆う八ノ久保砂礫層、東松浦玄武岩類及び沖積層によって構成されている。

佐世保層群は、砂岩及び頁岩を主体として敷地内に広く分布し、相当な広がりをもっている。

○ 試掘坑内弾性波測定結果による岩盤の弾性波速度を踏まえて以下の通り設定する。

・ 3号炉及び4号炉： S波速度 1.35km/s

P波速度 3.0km/s



○ S波速度が平均 $0.7\text{km/s}$ 以上である3号炉及び4号炉原子炉周辺建屋基礎底板位置のEL. -15mに解放基盤表面を設定する。

○ 地震動評価上、解放基盤表面におけるS波速度は $1.35\text{km/s}$ と設定する。

# 理論的手法による地震動評価に用いる地下構造モデルの設定

○長周期帯における理論的手法による評価に用いる解放基盤表面以深の地下構造モデルについては、地質調査結果及び既往の文献により、一次元地下構造モデルを構築した。

玄海原子力発電所 一次元地下構造モデル

EL. (m)	層	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Q値	備考
解放基盤表面 -15m	1	0.0	2.35	3.00	1.35	100	試掘坑内 弾性波試験
-50m	2	-0.035	2.35	3.44	1.57	100	PS検層
-100m	3	-0.085	2.35	3.47	1.73	100	
-150m	4	-0.135	2.35	3.65	1.77	100	
-200m	5	-0.185	2.40	4.00	2.10	200	地震調査委員会 (2007a)
地震基盤 -1804m	6	-1.789	2.60	5.50	3.10	300	
-3015m	7	-3.0	2.70	5.90	3.50	300	地震調査委員会 (2003)
-20015m	8	-20.0	3.00	6.60	3.80	500	
-33015m	9	-33.0	3.30	7.60	4.30	500	

※EL. -15mからEL. -200mまでのQ値は、地震調査委員会(2007a)、地震調査委員会(2016)におけるせん断波速度とQ値の関係を参照し設定

# 地震発生層の設定

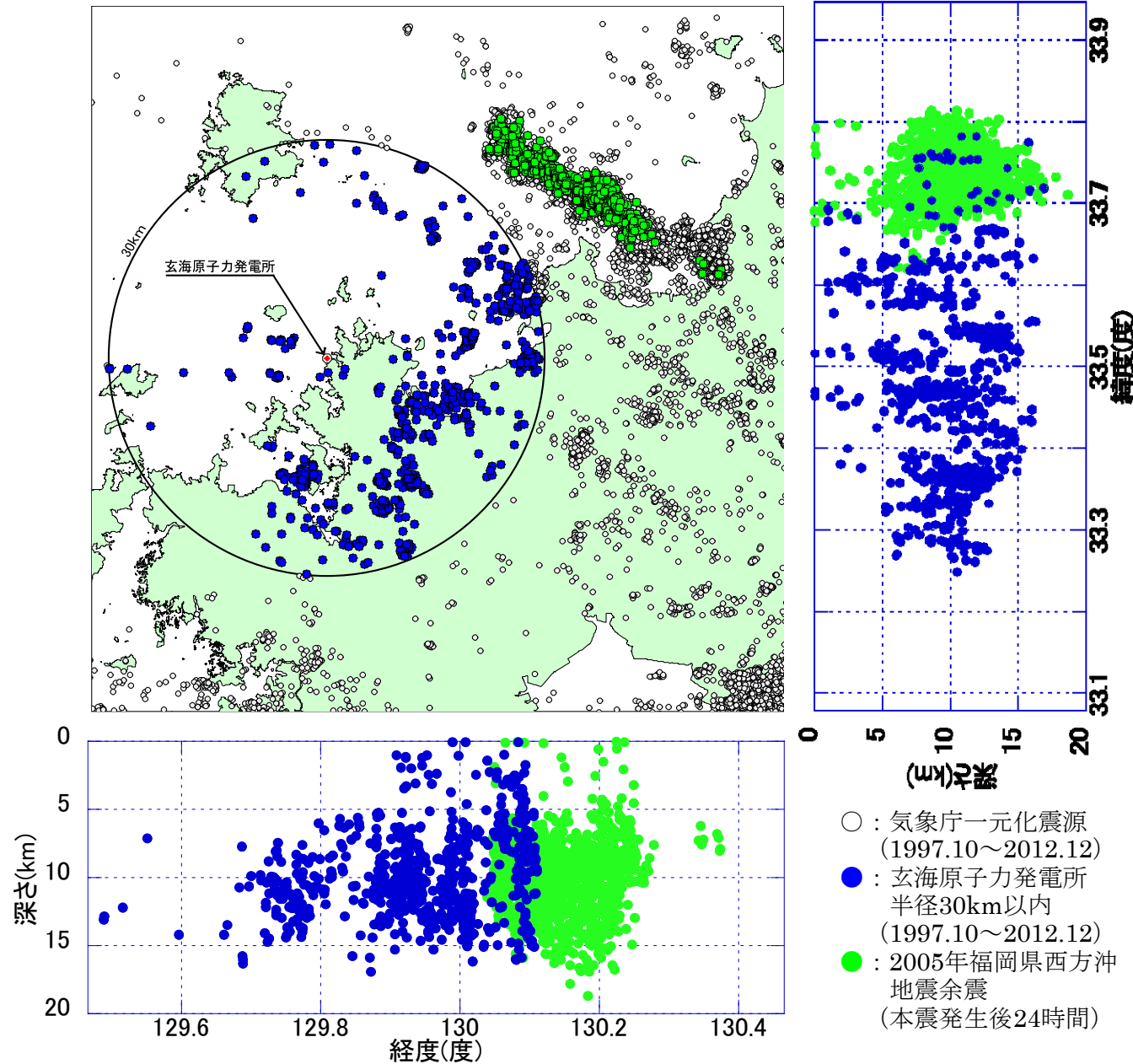
## 地震発生層の上下端深さの設定

### 各種検討による地震発生層の上端深さ・下端深さ・発生層厚さ

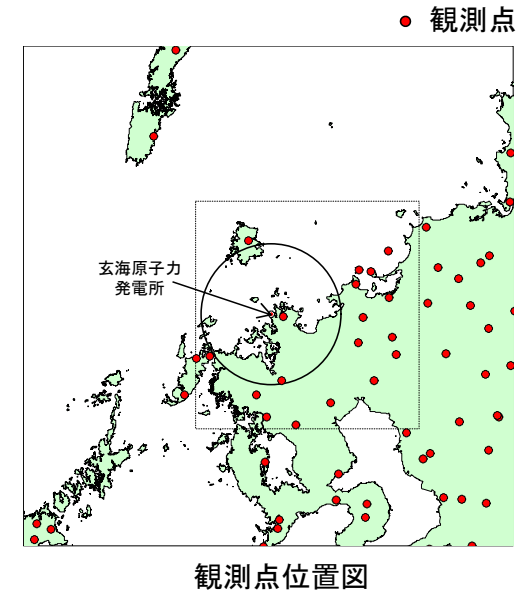
	上端	下端	発生層厚さ
(独)原子力安全基盤機構(2004)	7.2km	13.6km	6.4km
敷地周辺の微小地震分布	約6km	約13km	約7km
地震調査委員会(2007a)、(2008)	3km	19km	16km
2005年福岡県西方沖地震の余震分布 (気象庁)	3km	19km	16km
2005年福岡県西方沖地震の余震分布 (Uehira et al.(2006))	3km	15km	12km

以上を踏まえ、敷地周辺の地震発生層は、上端深さ3km、下端深さ20km、地震発生層厚さ17kmと設定。

## 敷地周辺の微小地震分布（気象庁一元化震源）



- 2005年福岡県西方沖地震の震源域周辺より、玄海原子力発電所周辺のほうが微小地震が発生する上限は深い傾向にある。
- また、微小地震が発生する下限は、浅くなる傾向にある。



敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

検討用地震の選定

# 検討用地震の選定

## 検討用地震の選定結果

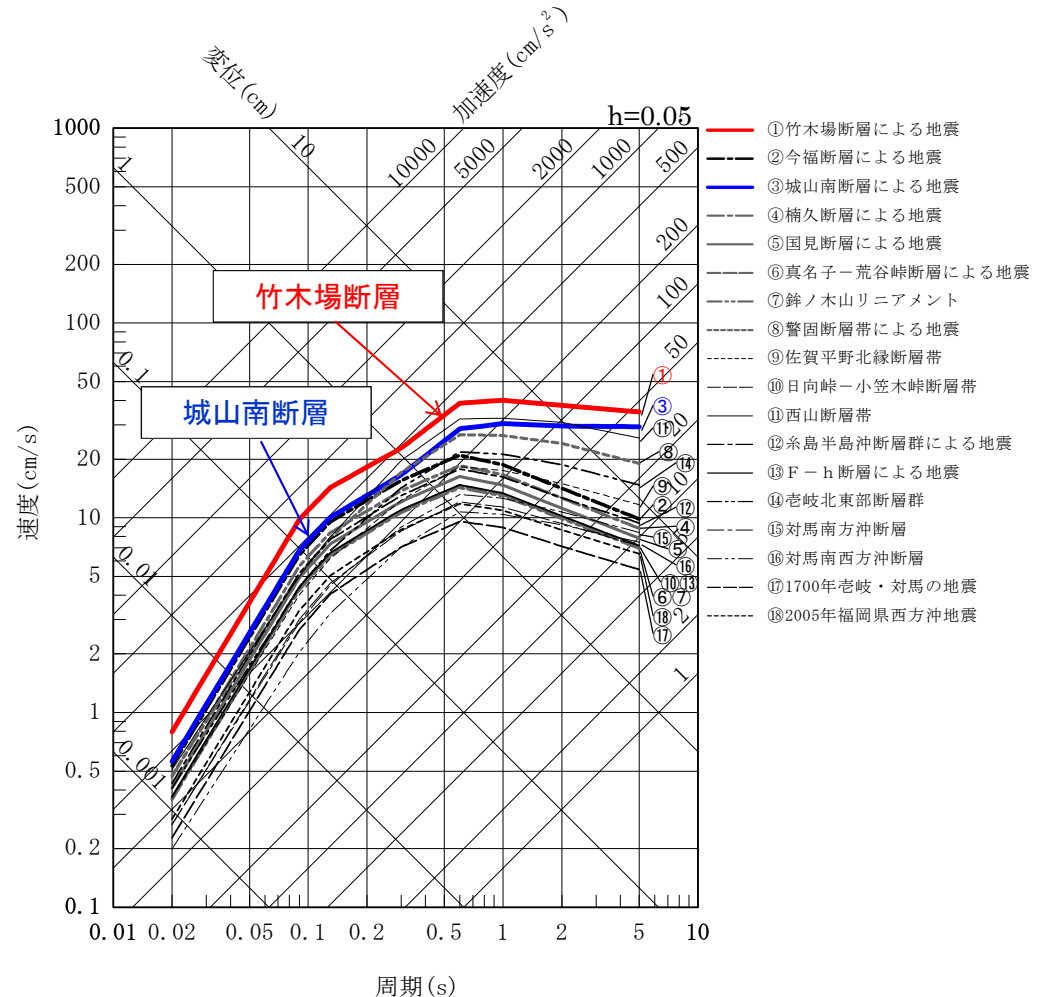
検討用地震選定のための地震の諸元

No.	断層又は地震の名称	マグニチュード M※1	等価震源距離 Xeq(km)
①	竹木場断層※2	6.9	17.9
②	今福断層※2	6.9	24.4
③	城山南断層	7.0	25.6
④	楠久断層※2	6.9	26.9
⑤	国見断層	6.9	29.8
⑥	真名子-荒谷峠断層※2	6.9	32.7
⑦	鉾ノ木山リニアメント※2	6.9	33.1
⑧	警固断層帯	7.9	63.2
⑨	佐賀平野北縁断層帯	7.5	55.4
⑩	日向峠-小笠木峠断層帯	7.2	54.1
⑪	西山断層帯	8.4	93.0
⑫	糸島半島沖断層群	7.0	31.1
⑬	F-h断層※2	6.9	32.2
⑭	壱岐北東部断層群	7.7	60.5
⑮	対馬南方沖断層	7.4	65.2
⑯	対馬南西沖断層群	7.5	84.6
⑰	壱岐・対馬の地震	7.0	50.3
⑱	福岡県西方沖地震	7.0	42.8

※1：マグニチュードは、松田(1975)による式に基づく。

※2：地表付近の断層長さが短く、震源断層が地表付近の長さ以上に拡がっている可能性も考えられる断層（以下「孤立した短い活断層」という。）については、安全評価上、震源断層が地震発生層の上限から下限まで拡がっているものとして、断層幅と同じ長さを持つ震源断層（長さ17km）を設定する。

Noda et al. (2002)による応答スペクトルの比較により、敷地に特に大きな影響を及ぼすと想定される地震を選定する。



- ・竹木場断層、城山南断層の応答が大きく、西山断層帯は一部の周期帯で城山南断層を僅かながら超える
- ・西山断層帯は、2断層と比較してサイトからの距離が極めて遠く、断層の走向は城山南断層のように破壊が敷地に向かう方向にない

竹木場断層及び城山南断層を検討用地震として選定



敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

震源モデルの設定  
(不確かさの考慮)

## 検討用地震の地震動評価手法

検討用地震の地震動評価は、「応答スペクトルに基づいた地震動評価」および「断層モデルを用いた手法による地震動評価」の双方を実施。

### 応答スペクトルに基づいた地震動評価

- ・解放基盤における水平及び鉛直方向の地震動評価ができること
- ・震源の拡がりを考慮できること
- ・地震観測記録を用いて諸特性が考慮できること



Noda et al.(2002)の方法を用いる。

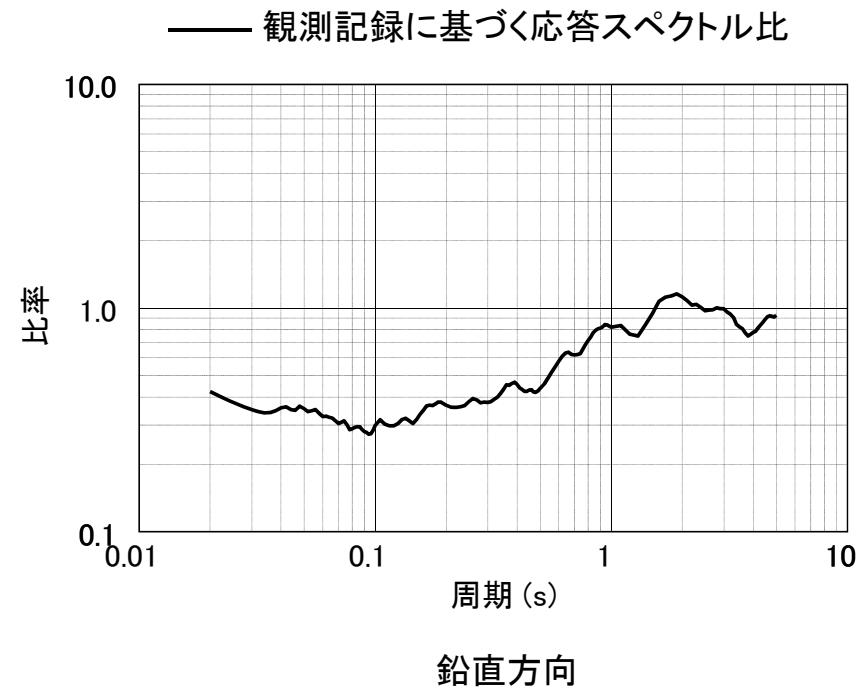
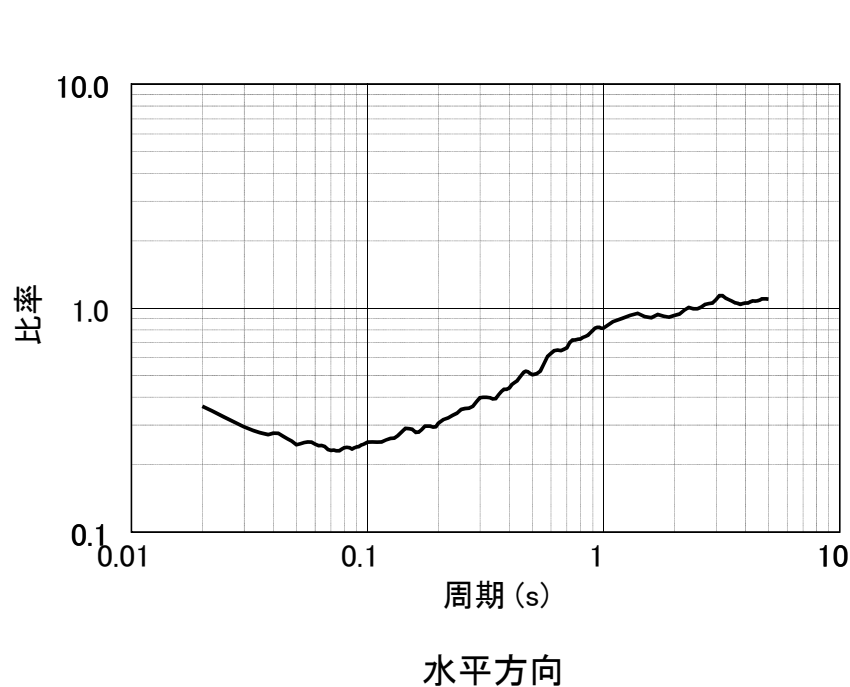
### 断層モデルを用いた手法による地震動評価

- ・要素地震として適切な観測記録が得られていることから「経験的グリーン関数法」(Dan et al.(1989))を実施
- ・さらに「理論的手法」(Hisada(1994))による地震動評価結果を組み合わせた「ハイブリッド合成法」も実施

## (1) 応答スペクトルに基づく地震動評価

■敷地地盤で得られた地震観測記録を用いた検討により特異な増幅がないことを確認の上、Noda et al.(2002)による地震動評価を実施。

- 敷地地盤で得られた内陸地殻内地震の地震観測記録(M5.4以上の7地震、地表面)を用いて、Noda et al.(2002)による応答スペクトルとの比(残差)を算定。
- 敷地地盤で得られた内陸地殻内地震の地震観測記録の残差は、ほとんどの周期帯で1.0を下回っている。
- 観測記録による補正係数は、地震動評価上適用しない。



## (2) 断層モデルを用いた手法による地震動評価

- 2005年3月22日福岡県西方沖地震余震(M5.4)による地震観測記録(地表面)を用い、Dan et al.(1989)に基づく『経験的グリーン関数法』により波形合成を実施し、解放基盤表面における地震動を評価

### ○経験的グリーン関数法の特長

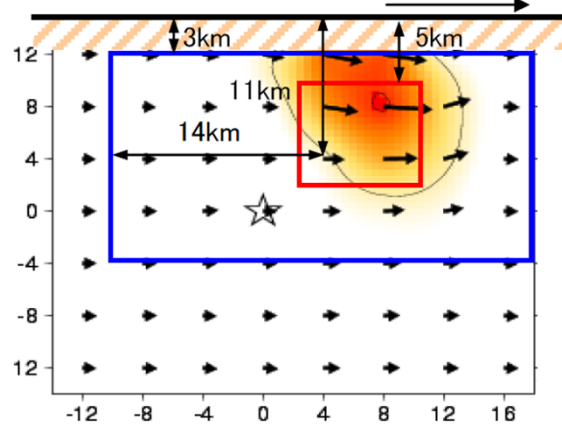
- 震源からの伝播特性や評価地点での地盤特性が、地震観測記録に既に含まれている。
- 地盤のモデル化が不要。

- なお、長周期帯においては、経験的グリーン関数法とハイブリッド合成法による結果を比較し、より大きな地震動となる経験的グリーン関数法による結果を採用

## 2005年福岡県西方沖地震における敷地地盤の地震観測記録を用いた検討 地震調査委員会(2007a)の知見

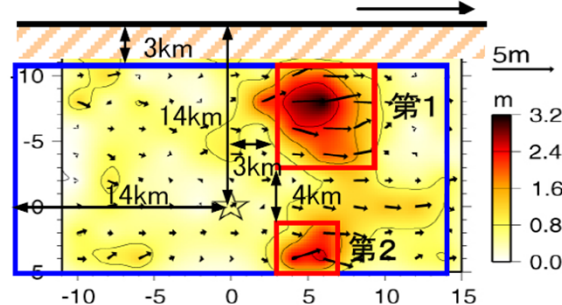
「2005年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づく強震動評価手法の検証について」では、既往の研究に基づく特性化震源モデルと「レシピ」による特性化震源モデルによる評価を実施し、「レシピ」による特性化震源モデルが、観測記録との相関が最も良好であることを確認。

ケース1 Kobayashi et al. より N123° →126° E



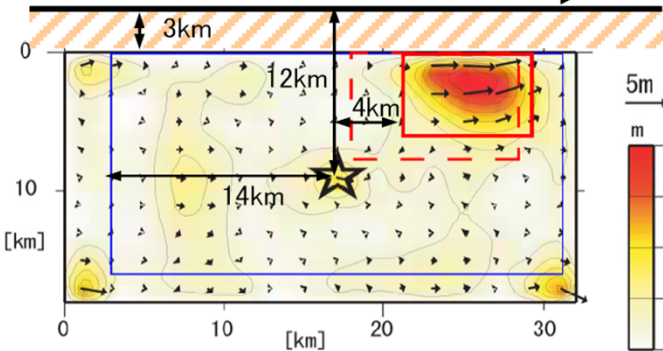
断層面積 32km × 28km → 28km × 16km  
アスペリティ 8km × 8km  $Da=1.60m$

ケース2 Asano and Iwata より N122° →126° E



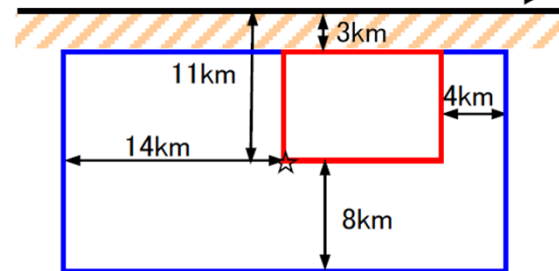
断層面積 26km × 18km → 28km × 16km  
第1アスペリティ 6km × 8km  $Da1=1.79m$   
第2アスペリティ 4km × 4km  $Da2=1.03m$

ケース3 Sekiguchi et al. より N126° E



断層面積 32km × 18km → 28km × 16km  
アスペリティ 8km × 6km  $Da=1.60m$

ケース4 「レシピ」より N126° E



断層面積 28km × 16km  
アスペリティ 10km × 8km  $Da=1.60m$

断層面積 $S$ [km <sup>2</sup> ]	448
地震モーメント $M_0$ [N·m]	$1.12 \times 10^{19}$
短周期レベル $A$ [N·m/s <sup>2</sup> ]	$1.18 \times 10^{19}$
平均応力低下量 $\Delta\sigma$ [MPa]	2.87
アスペリティ面積 $S_a$ [km <sup>2</sup> ]	80
アスペリティ応力低下量 $\Delta\sigma_a$ [MPa]	16.06

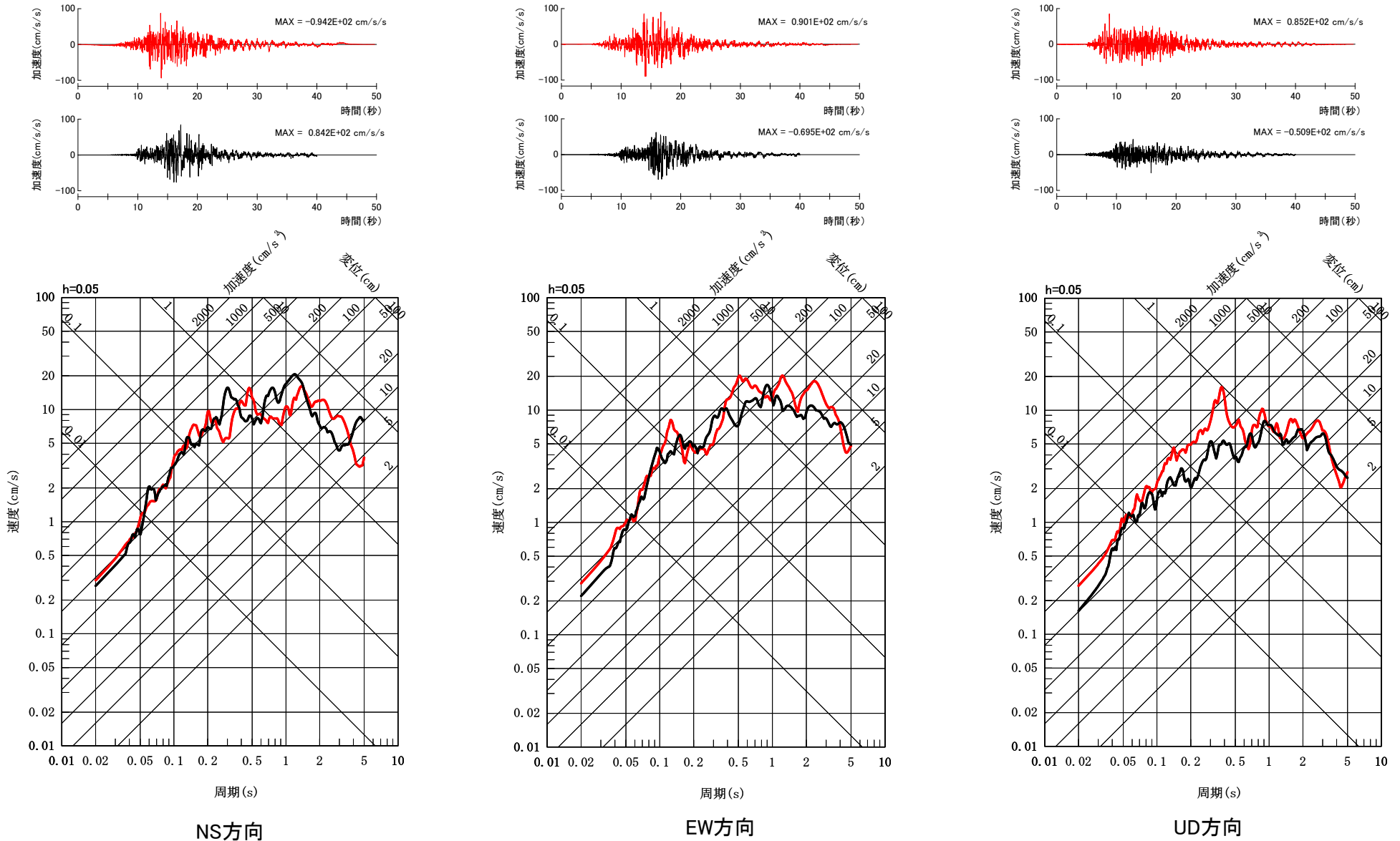
「レシピ」による特性化震源モデルにより、2005年3月22日余震観測記録を用いて、敷地における観測記録の再現を実施。

# 2005年福岡県西方沖地震の知見を踏まえた検討

## 2005年福岡県西方沖地震における敷地地盤の地震観測記録を用いた検討

「レシピ」による特性化震源モデルにより、2005年3月22日余震観測記録を用いて、発電所における本震観測記録を概ね再現できることを確認。

— 断層モデルによる地震動評価  
— 観測記録



## 断層パラメータの設定

地震調査委員会「レシピ」に基づき設定

地震調査委員会(2007a)による知見及び当社観測記録に基づく検討にて「レシピ」の適用性を確認

### 「断層モデルを用いた手法」

- ・地質調査結果
- ・「孤立した長さが短い活断層」
- ・Stirling et al.(2002)

地震発生層上下端深さの設定

#### 巨視的パラメータ

断層長さL [km]

断層幅W [km]

断層面積S [km<sup>2</sup>]

松田(1975)

マグニチュードM

等価震源距離X<sub>eq</sub>

震源断層の拡がりを考慮

入倉・三宅(2001)

地震モーメントM<sub>0</sub> [N m]

壇ほか(2001)

短周期レベルA  
[N m/s<sup>2</sup>]

式(1)

平均応力降下量Δσ [MPa]

式(2),(3)

### 「応答スペクトルに基づく手法」

#### 関係式 (壇ほか(2002))

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{(S/\pi)^{1.5}} \quad \text{式(1)}$$

$$\Delta\sigma_a = \left(\frac{S}{S_a}\right) \Delta\sigma \quad \text{式(2)}$$

$$A = 4\pi \sqrt{\frac{S_a}{\pi}} \Delta\sigma_a \beta^2 \quad \text{式(3)}$$

#### 微視的パラメータ

アスペリティの面積S<sub>a</sub> [km<sup>2</sup>]

アスペリティ応力降下量Δσ<sub>a</sub> [MPa]

その他のパラメータ

#### その他のパラメータ

破壊伝播様式・破壊開始点 等

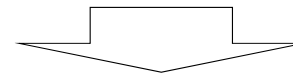
## 不確かさを考慮する断層パラメータの基本的な考え方

### 不確かさを考慮するパラメータ

- ① 断層長さ及び震源断層の拡がり
- ② 断層傾斜角
- ③ 応力降下量
- ④ アスペリティの位置
- ⑤ 破壊開始点

地震発生前に、地質調査、敷地周辺の地震発生状況及び地震に関する過去のデータによる経験則からおおよそ把握できるもの

地震発生前に把握が困難なもの  
(地震発生後の分析等により把握できるもの)



### 不確かさの重畳について

- ① 断層長さ及び震源断層の拡がり、② 断層傾斜角、③ 応力降下量については、地震発生前におおよそ把握できると考えられるため、①～③の不確かさについては、それぞれ独立して考慮する。
- ④ アスペリティの位置、⑤ 破壊開始点については、地震発生前に把握が困難であるため、①～③の不確かさを考慮する際に、④・⑤の不確かさを重畳させる。



## 不確かさを考慮する断層パラメータ

パラメータ	基本的なケース	不確かさを考慮したケース
断層長さ及び震源断層の 拡がり	地質調査結果に基づき、 設定※ <sup>1</sup>	Stirling et al. (2002)を踏まえ、20kmと設定し、地表 トレースを含む範囲内で敷地に近づく方向に震源断層 面を設定
断層傾斜角	地質調査結果、原子力安 全基盤機構(2005)による と、九州地方は横ずれ断 層が主体であることから 強震動予測レシピに基づ き90度と設定※ <sup>2</sup>	強震動予測レシピ等を参考に、60度（敷地側に傾斜） と設定。
応力降下量	敷地で得られた地震観測 記録に基づく検討を踏ま え、強震動予測レシピに より設定	新潟県中越沖地震を踏まえ、強震動予測レシピの1.5倍 に設定
アスペリティの位置	地表トレースの範囲内で 敷地に最も近い位置に設 定	敷地に近い位置に設定
破壊開始点	巨視的断層面の端部で破 壊が敷地に向かう位置に 設定	破壊が敷地に向かうような位置に複数設定

※1：孤立した短い活断層は17kmと設定し、地表トレース長さの midpoint から両端に均等に震源断層面を設定

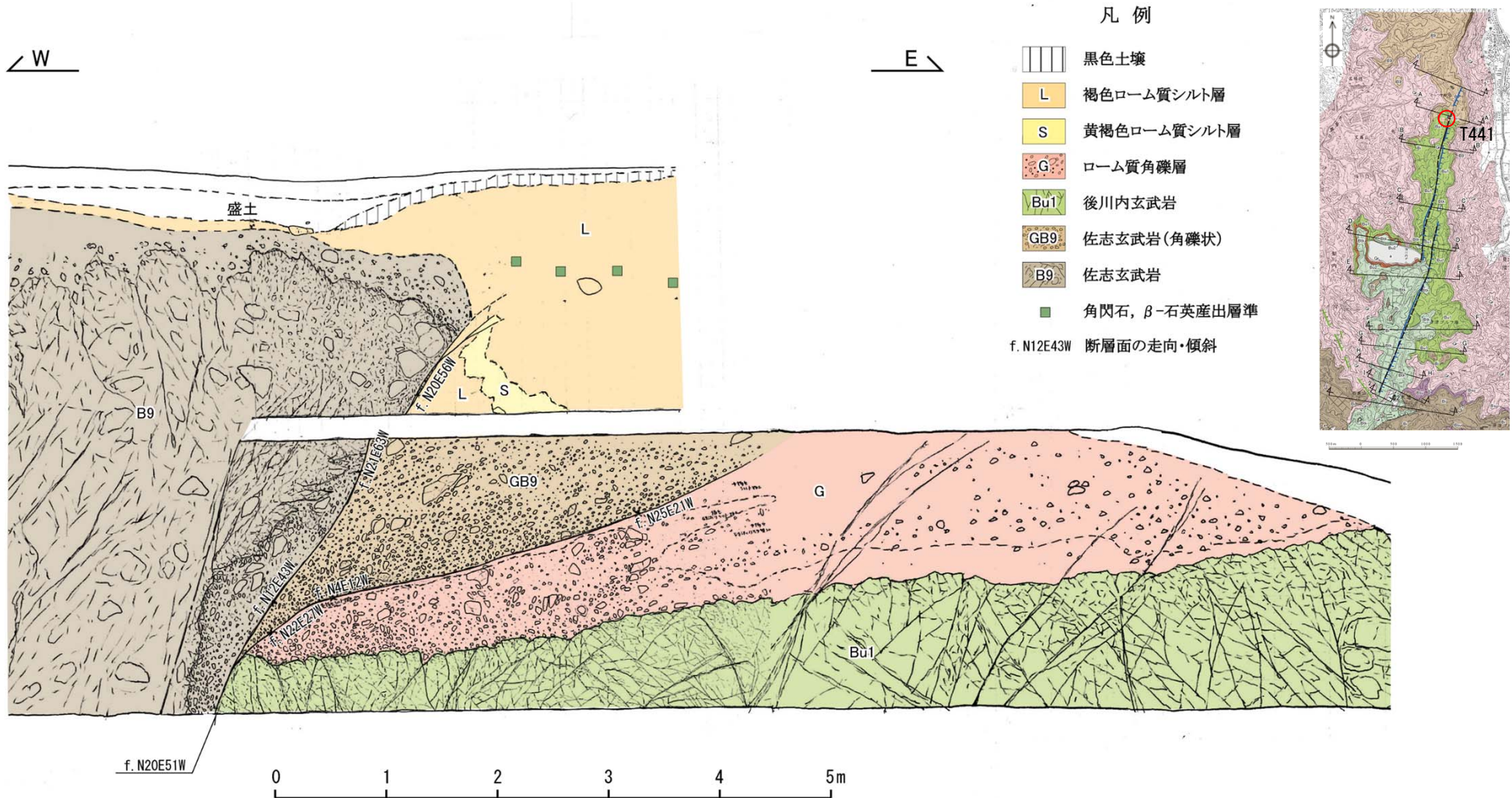
※2：竹木場断層は断層露頭及び発生地震の傾斜角を参考に80度と設定

### 「竹木場断層による地震」の基本的なケース（断層傾斜角）の考え方

- 「竹木場断層による地震」の基本的なケースの断層傾斜角の設定にあたり、断層露頭及び発生地震の傾斜角について整理した。
  - ・ 地質調査結果から断層露頭（3地点）では、西傾斜 $50^{\circ}$  ~  $60^{\circ}$ 、東傾斜 $80^{\circ}$ 、西傾斜 $75^{\circ}$ であり、西傾斜の傾向が見られる。
  - ・ 近年、日本で発生した大規模地震のうち横ずれ断層タイプの地震の震源メカニズム解から断層傾斜角を検討した結果、ほとんどの地震において、傾斜角 $85$ 度以上であり、5地震の平均では約 $84$ 度の震源断層面となっている。
- 以上を踏まえ、「竹木場断層による地震」の基本的なケースは、断層露頭の傾向から西傾斜に設定する。また、傾斜角については、近年、日本で発生した大規模地震のうち横ずれ断層タイプの地震の震源メカニズム解の傾斜角の平均値：約 $84$ 度から保守的に $80$ 度と設定する。

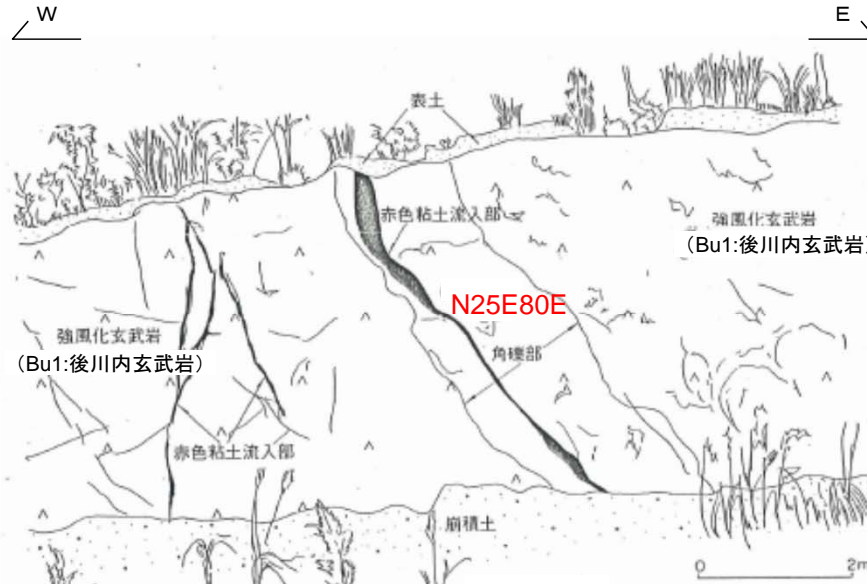
# 竹木場断層〔露頭スケッチ（Loc. T441：唐津市下戸西）〕

- 断層露頭は、リニアメントの位置及びセンスに対応しており、断層面の走向もリニアメントとほぼ平行である。断層面は大きく湾曲しているものの、 $50^\circ \sim 60^\circ$  の西傾斜であり、分岐断層を伴う。
- 断層面上には水平成分の卓越した南落ち $30^\circ \sim 33^\circ$  の明瞭な条線が認められ、断層が西上がりであることを考慮すると、断層は右横ずれ成分を伴うこととなる。
- 断層の変位は玄武岩類を覆うローム質シルト層の中部に及んでいるが、上部では断層の連続は確認されない。
- テフラの分析結果によると、ローム質シルト層の上部に阿蘇4テフラ起源の角閃石及び鬼界葛原テフラ起源の $\beta$ -石英の産出層準が検出され、同層準には断層を横断して不連続は認められない。

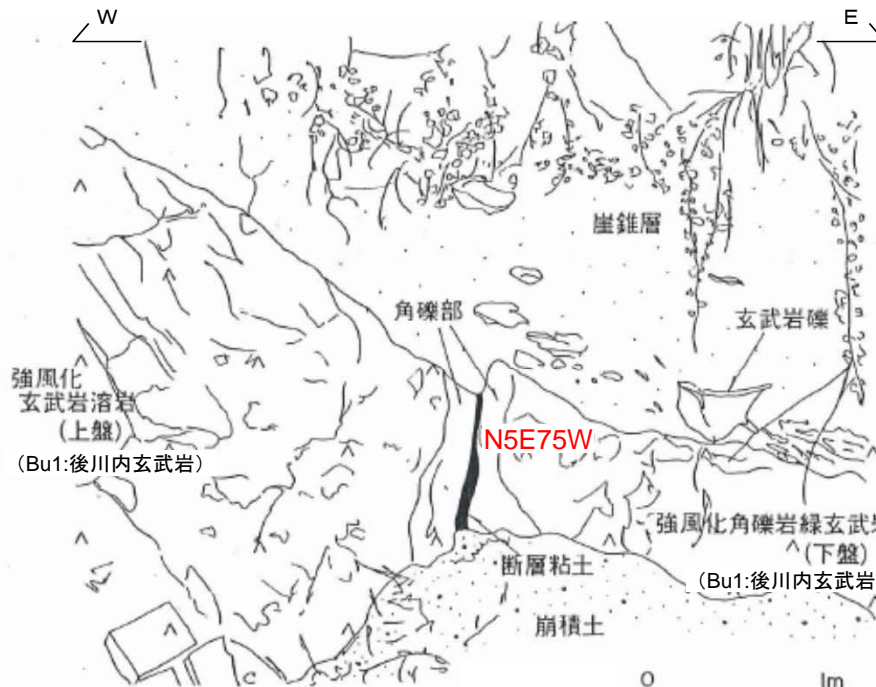


# 竹木場断層の露頭スケッチ〔3/4号炉申請時の調査結果〕

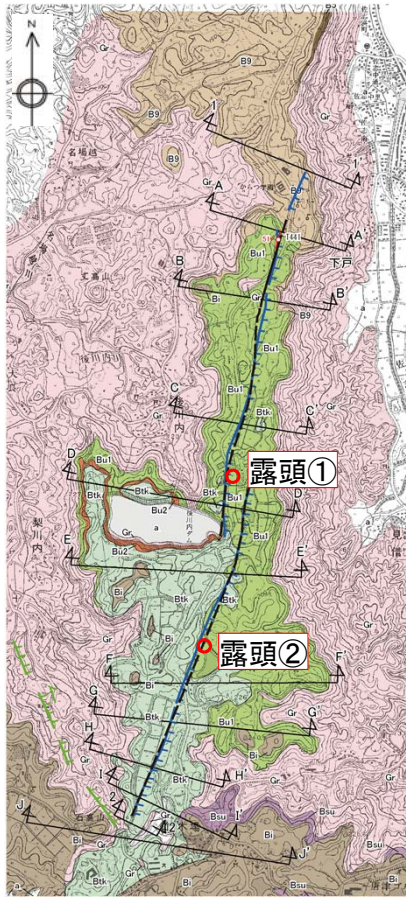
○ リニアメント沿いにおいて、東傾斜80°、西傾斜75°の高角度の断層露頭を確認。



露頭①における露頭スケッチ及び露頭写真 (安全審査時の現地調査資料に加筆)



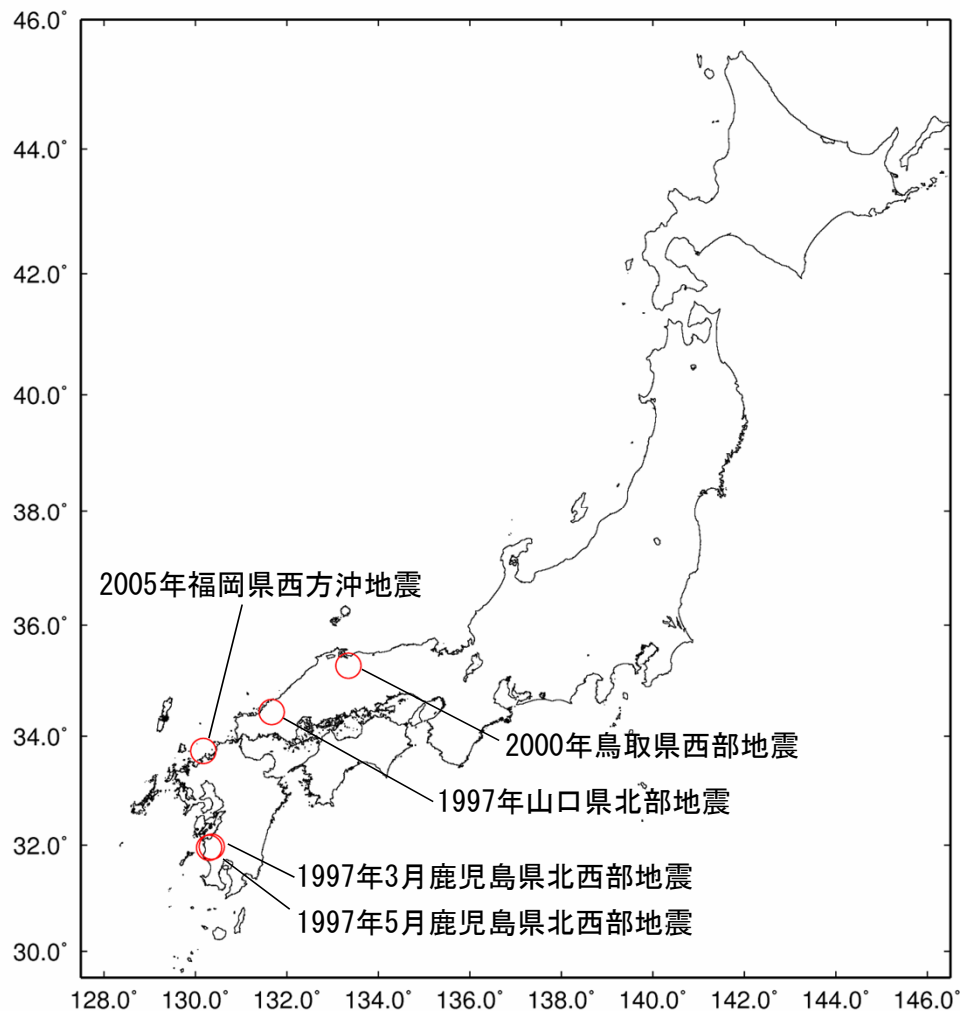
露頭②における露頭スケッチ及び露頭写真 (安全審査時の現地調査資料に加筆)



この地図は、国土地理院発行の2万5千分の1地形図(唐津)を使用したものである。

# 横ずれ断層タイプの地震の分析

○ 近年、日本で発生した大規模地震のうち横ずれ断層タイプの地震について、以下の図及び表に示す地震を選定し、余震分布や震源モデルなどから推定される走向の断層傾斜角について防災科学技術研究所広帯域地震観測網（F-net）における震源メカニズム解を用いて検討を行う。



近年発生した内陸地殻内地震(横ずれ断層タイプ)の地震諸元

発生日時	地震名	M	震源深さ
1997/03/26	鹿児島県北西部地震	6.6	11.9km
1997/05/13	鹿児島県北西部地震	6.4	9.2km
1997/06/25	山口県北部地震	6.6	8.3km
2000/10/06	鳥取県西部地震	7.3	9.0km
2005/03/20	福岡県西方沖地震	7.0	9.2km

近年発生した内陸地殻内地震(横ずれ断層タイプ)の震央位置

# 横ずれ断層タイプの地震の分析

## 近年、日本で発生した横ずれ断層タイプの断層傾斜角

発生日時	地震名	M※1	震源深さ※1	震源メカニズム解※2
1997/03/26	鹿児島県北西部地震	6.6	11.9km	 Strike=103 ; 193 Rake =-9 ; -178 Dip = <u>88</u> ; 81
1997/05/13	鹿児島県北西部地震	6.4	9.2km	 ※3 Strike=191 ; 101 Rake =-175 ; -2 Dip =88 ; <u>85</u>
1997/06/25	山口県北部地震	6.6	8.3km	 Strike=319 ; 229 Rake =14 ; 179 Dip =89 ; <u>76</u>
2000/10/06	鳥取県西部地震	7.3	9.0km	 Strike=150 ; 241 Rake =-9 ; -175 Dip = <u>85</u> ; 81
2005/03/20	福岡県西方沖地震	7.0	9.2km	 Strike=122 ; 213 Rake =-11 ; -177 Dip = <u>87</u> ; 79

※1 : 気象庁、※2 : F-net、※3 : 震源は東西セグメントと南北セグメントからなるが、東西セグメントが主断層面と仮定  
 ※4 : 青色で示した節面は、余震分布や震源モデルなどから推定される断層面に対応する節面

○ 近年、日本で発生した大規模地震のうち横ずれ断層タイプの地震について、防災科学技術研究所広帯域地震観測網 (F-net) における震源メカニズム解から断層傾斜角を検討した結果、ほとんどの地震において、傾斜角85度以上であり、5地震の平均では約84度の震源断層面となっている。


## 竹木場断層による地震の基本的なケースと不確かさを考慮したケース

検討ケース	断層長さ及び震源断層の拡がり	断層傾斜角	応力降下量	アスペリティの位置	破壊開始点
基本的なケース	17.3km ※1	80度	強震動予測レシピにより設定	地表トレースの範囲内で敷地に最も近い位置に設定	巨視的断層面の端部で破壊が敷地に向かう位置に設定
断層長さ及び震源断層の拡がりの不確かさを考慮したケース	20.0km ※2	80度	強震動予測レシピにより設定	敷地に近い位置に設定	複数設定
断層傾斜角の不確かさを考慮したケース	19.7km ※1	60度	強震動予測レシピにより設定	敷地に近い位置に設定	複数設定
応力降下量の不確かさを考慮したケース	17.3km ※1	80度	新潟県中越沖地震を踏まえ、強震動予測レシピの1.5倍に設定	敷地に近い位置に設定	複数設定

※1：地表トレース長さの midpoint から両端に均等に設定

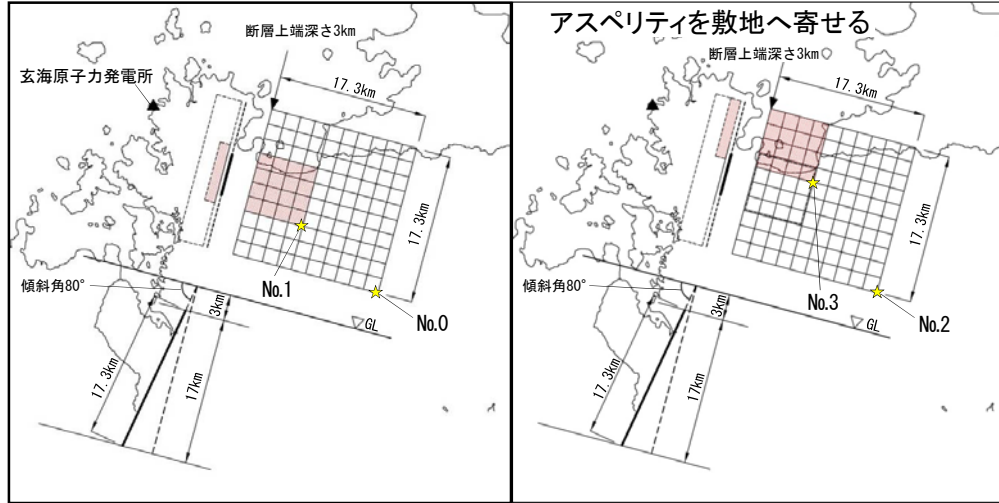
※2：地表トレースを含む範囲内で敷地に近づく方向に震源断層面を設定

 不確かさを考慮して設定するパラメータ

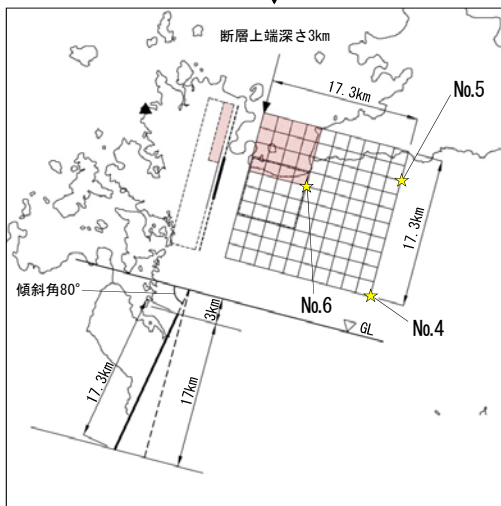
 不確かさを重畳するパラメータ

## 竹木場断層による地震の基本的なケースと不確かさを考慮したケース

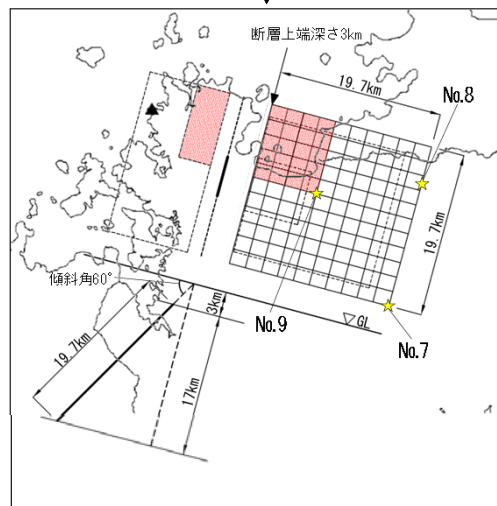
### 基本的なケース



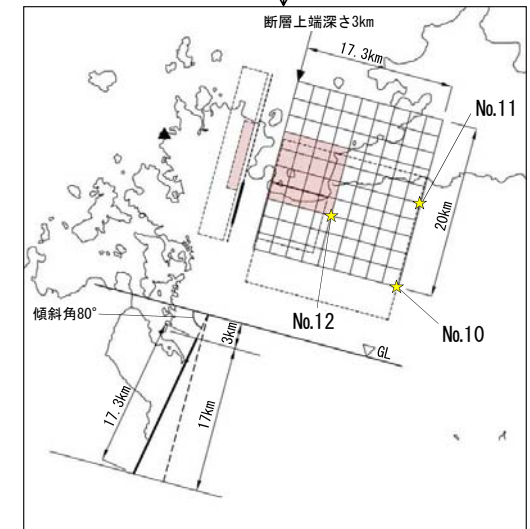
### 応力降下量の不確かさ



### 断層傾斜角の不確かさ



### 断層長さ及び震源断層の拡がりの不確かさ







## 城山南断層による地震の基本的なケースと不確かさを考慮したケース

検討ケース	断層長さ及び震源断層の拡がり	断層傾斜角	応力降下量	アスペリティの位置	破壊開始点
基本的なケース	19.5km ※1	90度	強震動予測レシピにより設定	地表トレースの範囲内で敷地に最も近い位置に設定	巨視的断層面の端部で破壊が敷地に向かう位置に設定
断層長さ及び震源断層の拡がりの不確かさを考慮したケース	20.0km ※2	90度	強震動予測レシピにより設定	敷地に近い位置に設定	複数設定
断層傾斜角の不確かさを考慮したケース	19.7km ※2	60度	強震動予測レシピにより設定	敷地に近い位置に設定	複数設定
応力降下量の不確かさを考慮したケース	19.5km ※1	90度	新潟県中越沖地震を踏まえ、強震動予測レシピの1.5倍に設定	敷地に近い位置に設定	複数設定

※1：地質調査結果

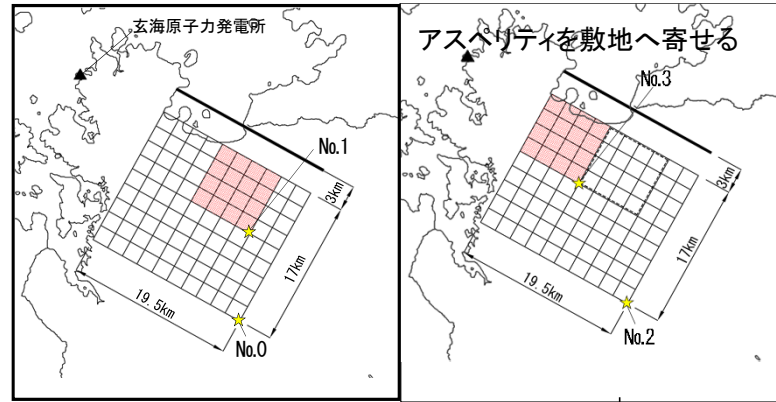
※2：地表トレースを含む範囲内で敷地に近づく方向に震源断層面を設定

 不確かさを考慮して設定するパラメータ  
 不確かさを重畳するパラメータ

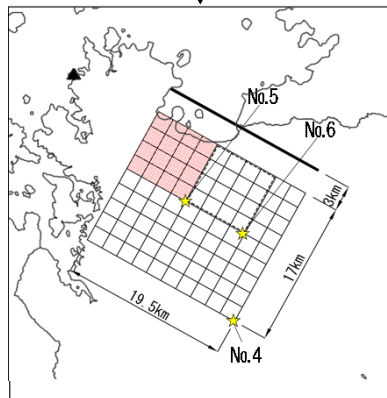
# 検討用地震の地震動評価

## 城山南断層による地震の基本的なケースと不確かさを考慮したケース

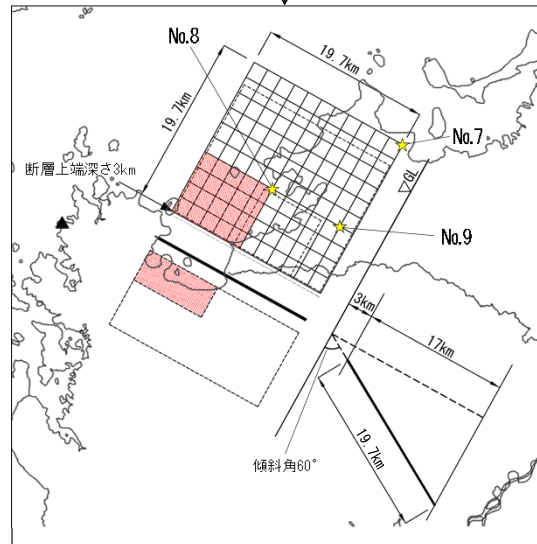
### 基本的なケース



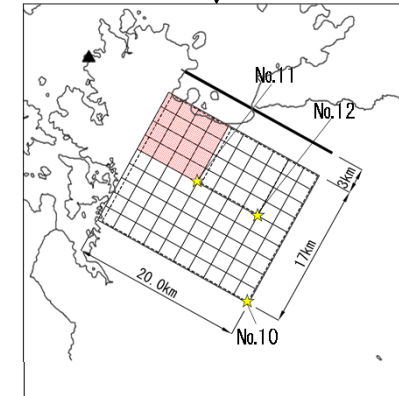
### 応力降下量の不確かさ



### 断層傾斜角の不確かさ



### 断層長さ及び震源断層の拡がりの不確かさ



# 要素地震の候補となる観測記録の選定

## 要素地震としての条件を満たす観測記録の抽出

- 敷地における地盤系の観測記録(76地震)のうち、検討用地震である竹木場断層及び城山南断層に用いる要素地震としての適切性の観点から、以下のフローにより、2005年福岡県西方沖地震の3余震記録(3月22日、4月20日(6:11、9:09))を抽出した。

### 地震の規模

- ・ 検討用地震の規模(M7程度)に対して、適切な規模(M5程度)の地震

### 地震の発生様式

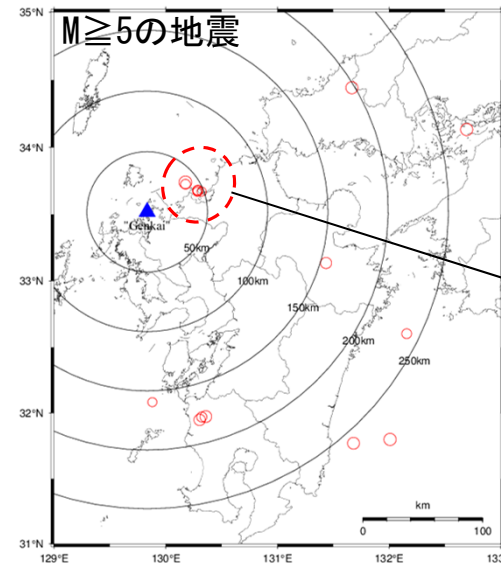
- ・ 検討用地震と同じ、横ずれ断層タイプの地震

### 地震の到来方向

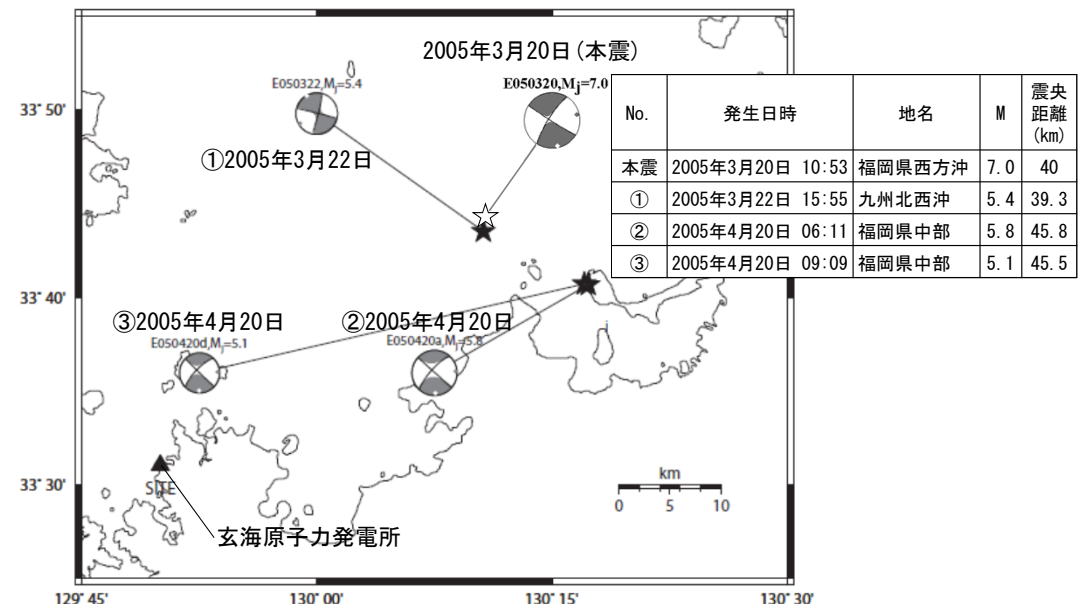
- ・ 検討用地震と同様に東方から到来し、震央距離が極端に離れていない地震

- ・ 2005年福岡県西方沖地震の3余震を候補として抽出

- ① 2005年3月22日 15:55の余震 M5.4
- ② 2005年4月20日 06:11の余震 M5.8
- ③ 2005年4月20日 09:09の余震 M5.1



・ 2005年福岡県西方沖地震の余震が候補となる

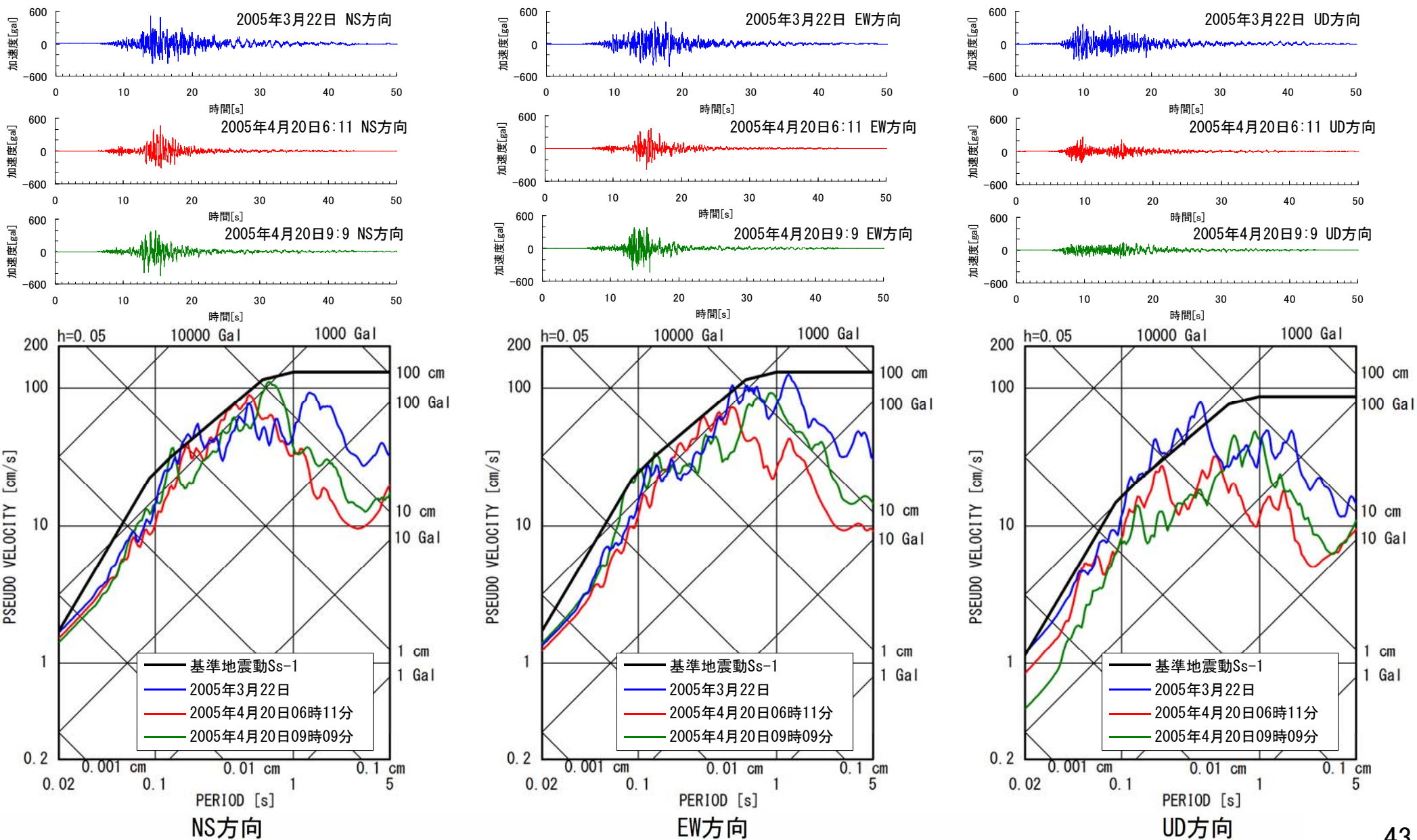


要素地震の候補とした2005年福岡県西方沖地震の3余震

# 敷地の観測記録に基づく余震の震源パラメータの設定

## 余震の震源パラメータ推定の試みと波形合成結果の比較

- 推定を試みたパラメータにより、経験的グリーン関数法による地震動評価を行い、比較を行った結果、水平方向については、地震動レベルはほぼ同等であるが、3月22日の余震では、4月20日の2つの余震より、主要動の継続時間が長く保守的な結果となっており、上下動については、3月22日の余震では、4月20日の2つの余震より、地震動レベル及び主要動の継続時間においても、保守的な結果となっていることが確認される。



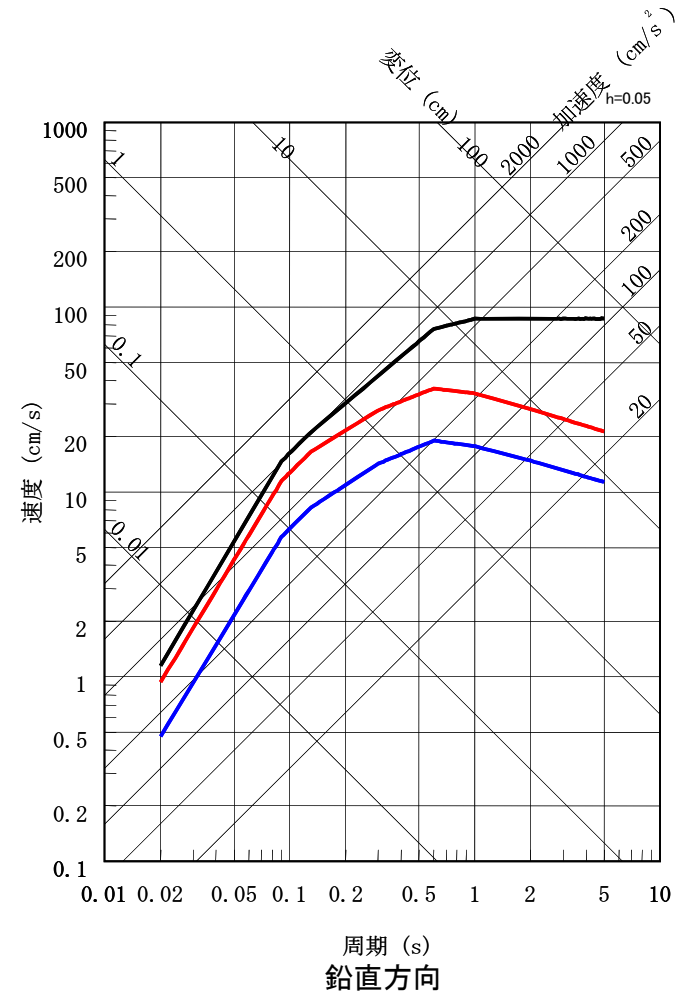
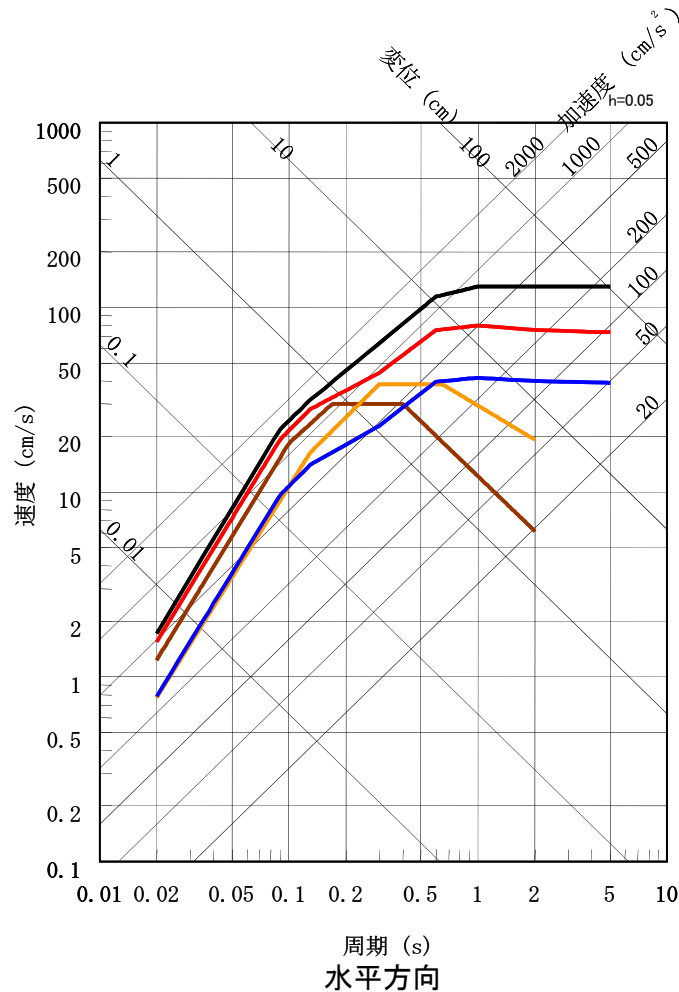
# 応答スペクトルによる手法に基づく基準地震動 $S_s$ の策定結果

○水平方向の基準地震動 $S_s-1_H$  は、検討用地震の応答スペクトルによる評価結果、及び旧耐震指針に基づく基準地震動 $S_2$ を包絡した応答スペクトルとして設定。

○鉛直方向 $S_s-1_V$  は、水平方向の $2/3$ として設定。

- 基準地震動 $S_s-1_H$
- 基準地震動 $S_2(S_N)$
- 基準地震動 $S_2(S_{k2})$
- 不確かさを考慮したケース（傾斜角）竹木場断層による地震
- 不確かさを考慮したケース（傾斜角）城山南断層による地震

- 基準地震動 $S_s-1_V$
- 不確かさを考慮したケース（傾斜角）竹木場断層による地震
- 不確かさを考慮したケース（傾斜角）城山南断層による地震

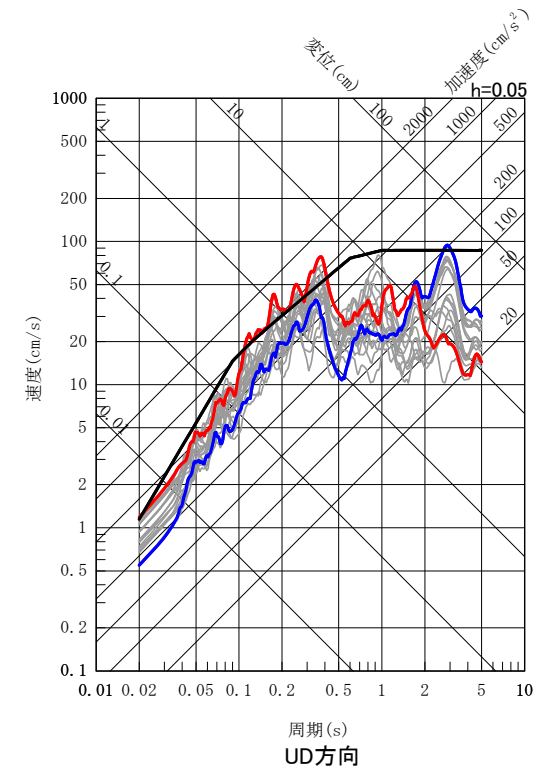
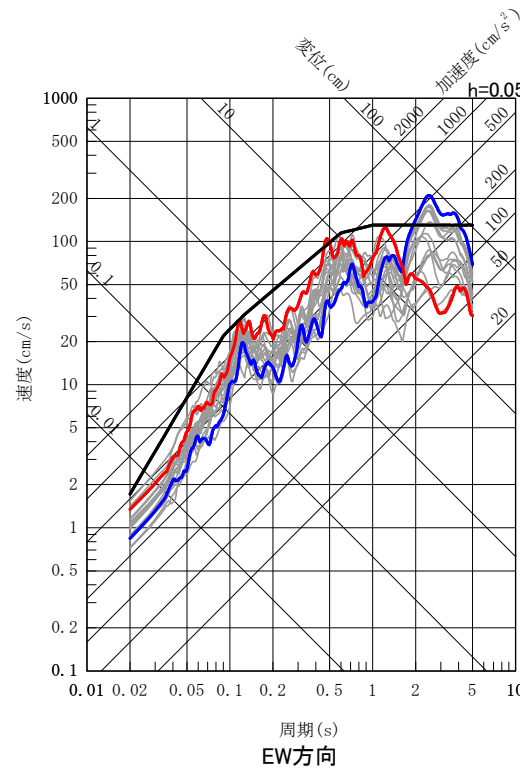
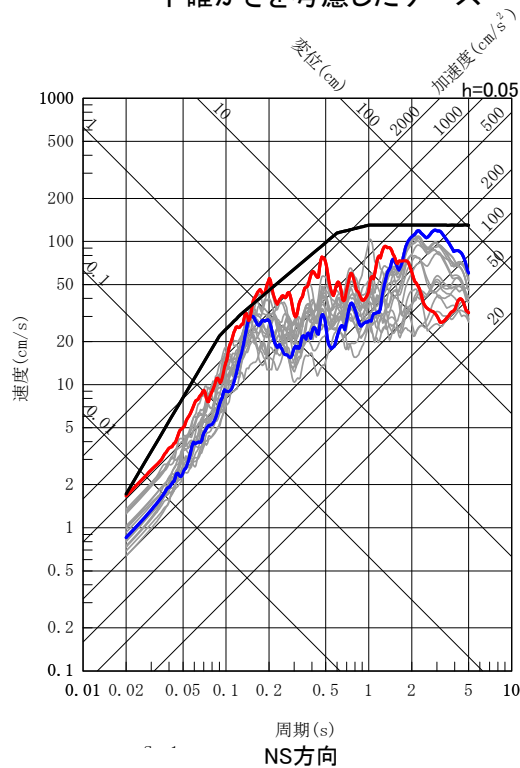
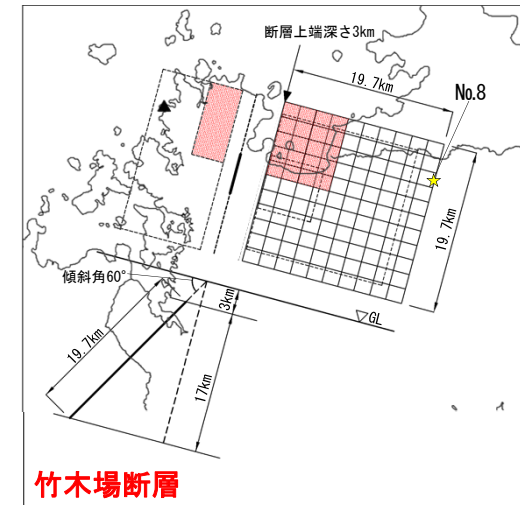
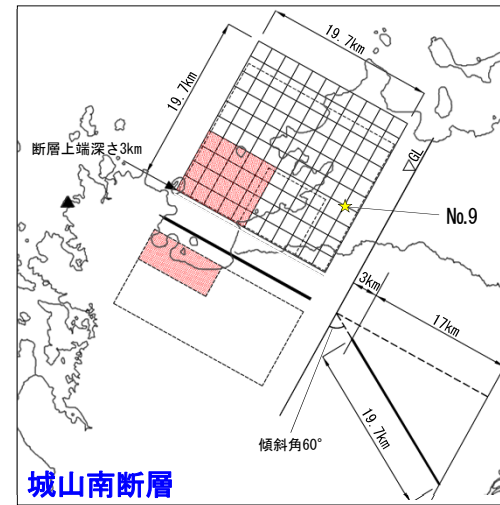


# 断層モデルを用いた手法に基づいた基準地震動Ssの策定結果

○「城山南断層による地震」の評価結果のうち、基準地震動Ss-1を一部の周期で上回るものとして、不確かさを考慮したケース(No.9)を、基準地震動Ss-2と設定。 ⇒下図中**青線**

○「竹木場断層による地震」の評価結果のうち、基準地震動Ss-1を一部の周期で上回るものとして、不確かさを考慮したケース(No.8)を、基準地震動Ss-3と設定。 ⇒下図中**赤線**

- Ss-1
- Ss-2
- Ss-3
- 不確かさを考慮したケース



## 震源を特定せず策定する地震動

# 震源を特定せず策定する地震動の評価方針

- 「震源を特定せず策定する地震動」は、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する。
- 観測記録の収集では以下の2つの観点で審査ガイドに示された16地震を対象に整理を行う。
  - ① 震源断層がほぼ地震発生層の厚さ全体に広がっているものの、地表地震断層としてその全容を表すまでには至っていないMw6.5以上の地震
  - ② 断層破壊領域が地震発生層内部に留まり、国内においてどこでも発生すると考えられる地震で、震源の位置も規模もわからない地震として地質学的検討から全国共通に考慮すべきMw6.5未満の地震

表-1 収集対象となる内陸地殻内の地震の例

No	地震名	日時	規模
1	2008年岩手・宮城内陸地震	2008/06/14, 08:43	Mw6.9
2	2000年鳥取県西部地震	2000/10/06, 13:30	Mw6.6
3	2011年長野県北部地震	2011/03/12, 03:59	Mw6.2
4	1997年3月鹿児島県北西部地震	1997/03/26, 17:31	Mw6.1
5	2003年宮城県北部地震	2003/07/26, 07:13	Mw6.1
6	1996年宮城県北部(鬼首)地震	1996/08/11, 03:12	Mw6.0
7	1997年5月鹿児島県北西部地震	1997/05/13, 14:38	Mw6.0
8	1998年岩手県内陸北部地震	1998/09/03, 16:58	Mw5.9
9	2011年静岡県東部地震	2011/03/15, 22:31	Mw5.9
10	1997年山口県北部地震	1997/06/25, 18:50	Mw5.8
11	2011年茨城県北部地震	2011/03/19, 18:56	Mw5.8
12	2013年栃木県北部地震	2013/02/25, 16:23	Mw5.8
13	2004北海道留萌支庁南部地震	2004/12/14, 14:56	Mw5.7
14	2005年福岡県西方沖地震の最大余震	2005/04/20, 06:11	Mw5.4
15	2012年茨城県北部地震	2012/03/10, 02:25	Mw5.2
16	2011年和歌山県北部地震	2011/07/05, 19:18	Mw5.0

○ 審査ガイドでは、Mw6.5以上の地震は、「事前に活断層の存在が指摘されていなかった地域において発生し、地表付近に一部の痕跡が確認された地震」とされている。

○ 審査ガイドでは、「活断層や地表地震断層の出現要因の可能性として、地域によって活断層の成熟度が異なること、上部に軟岩や火山岩、堆積層が厚く分布する場合や地質体の違い等の地域差があることが考えられる」とされている。

○ 震源域周辺と玄海原子力発電所周辺の地質・地質構造等について整理する。

○ Mw6.5未満の地震は、全国共通に考慮すべきとの観点から、震源近傍の観測記録を適切に収集し、敷地の影響の観点から整理を行う。



# 震源を特定せず策定する地震動

## Mw6.5以上の地震

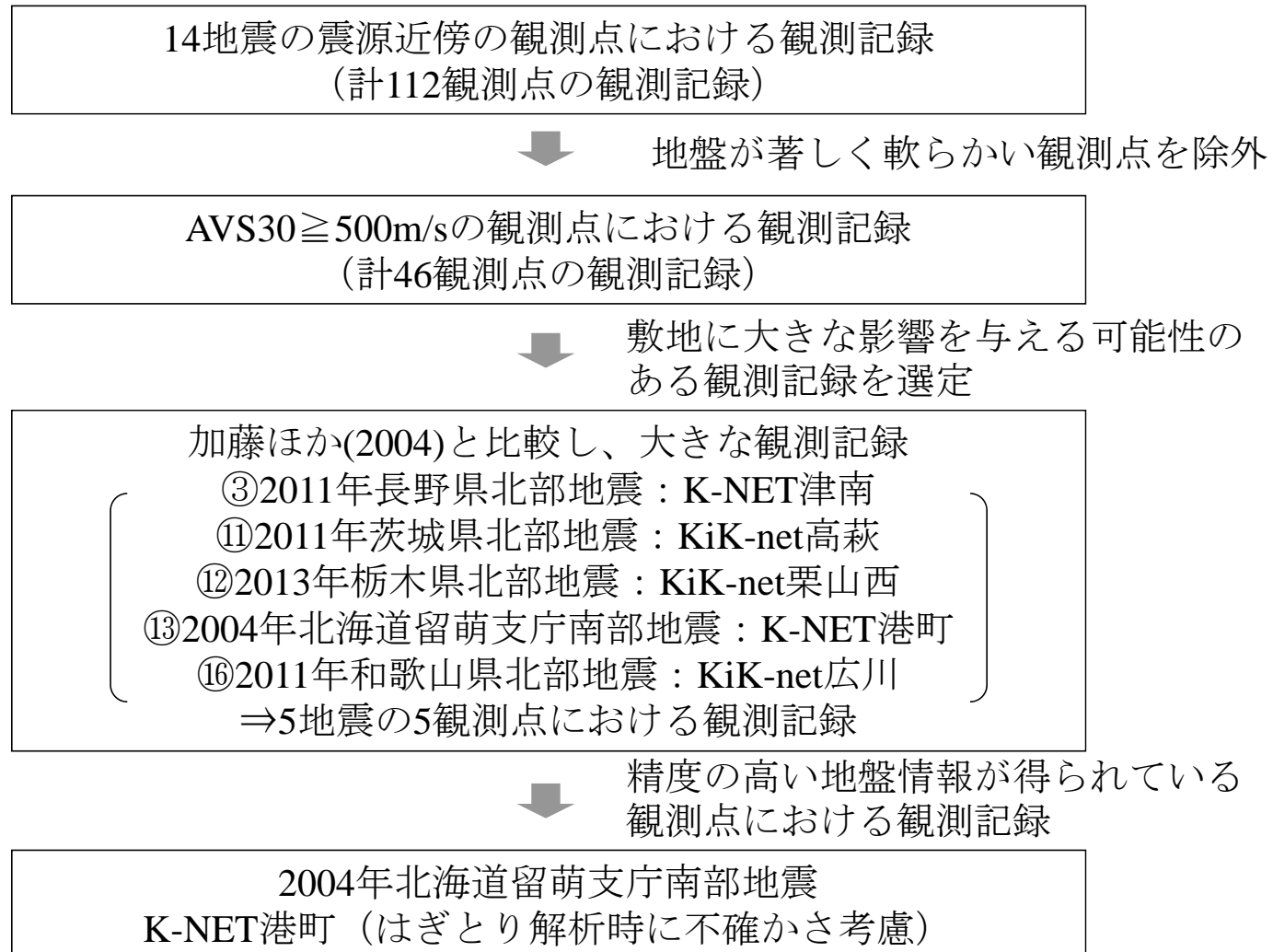
- Mw6.5以上の2008年岩手・宮城内陸地震・2000年鳥取県西部地震の2地震について、玄海原子力発電所周辺と震源域周辺の地域性を比較。
- その結果、2008年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺と玄海原子力発電所周辺は地質学的・地震学的背景が異なるため検討対象外とし、2000年鳥取県西部地震は、地質学的・地震学的背景が異なるものの、共通性も見られるため、検討対象。
- 鳥取県西部地震の観測記録のうち、岩盤上の記録として賀祥ダムの観測記録を選定。

	玄海原子力発電所	岩手宮城内陸地震	鳥取県西部地震
地質学的背景	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 顕著な褶曲・撓曲構造はない</li> <li>・ 断層は概ね成熟</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 火山岩・堆積岩が厚く複雑に堆積し、顕著な褶曲・撓曲構造</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 未成熟な断層</li> </ul>
地震学的背景	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ひずみ速度小さい</li> <li>・ 横ずれ断層タイプの地震</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ひずみ集中帯</li> <li>・ 逆断層タイプの地震</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ひずみ速度小さい (局所的に大きい)</li> <li>・ 横ずれ断層タイプの地震</li> </ul>
		共通性なし	共通性あり
検討対象	—	対象外	対象

# 震源を特定せず策定する地震動

## Mw6.5未満の地震

- Mw6.5未満の14地震について、下記のフローに基づき、敷地に大きな影響を及ぼす可能性のある地震観測記録を選定。
- その結果、解放基盤相当の地震動を推定するための精度の高い地盤情報が得られている2004年北海道留萌支庁南部地震のK-NET港町の観測記録に不確かさを考慮した地震動を選定。



# 震源を特定せず策定する地震動

○ 震源を特定せず策定する地震動として、加藤ほか(2004)による応答スペクトルに加えて、2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動及び2000年鳥取県西部地震の賀祥ダム(監査廊)の観測記録を考慮する。

----- 加藤ほか(2004)による応答スペクトル

— 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動

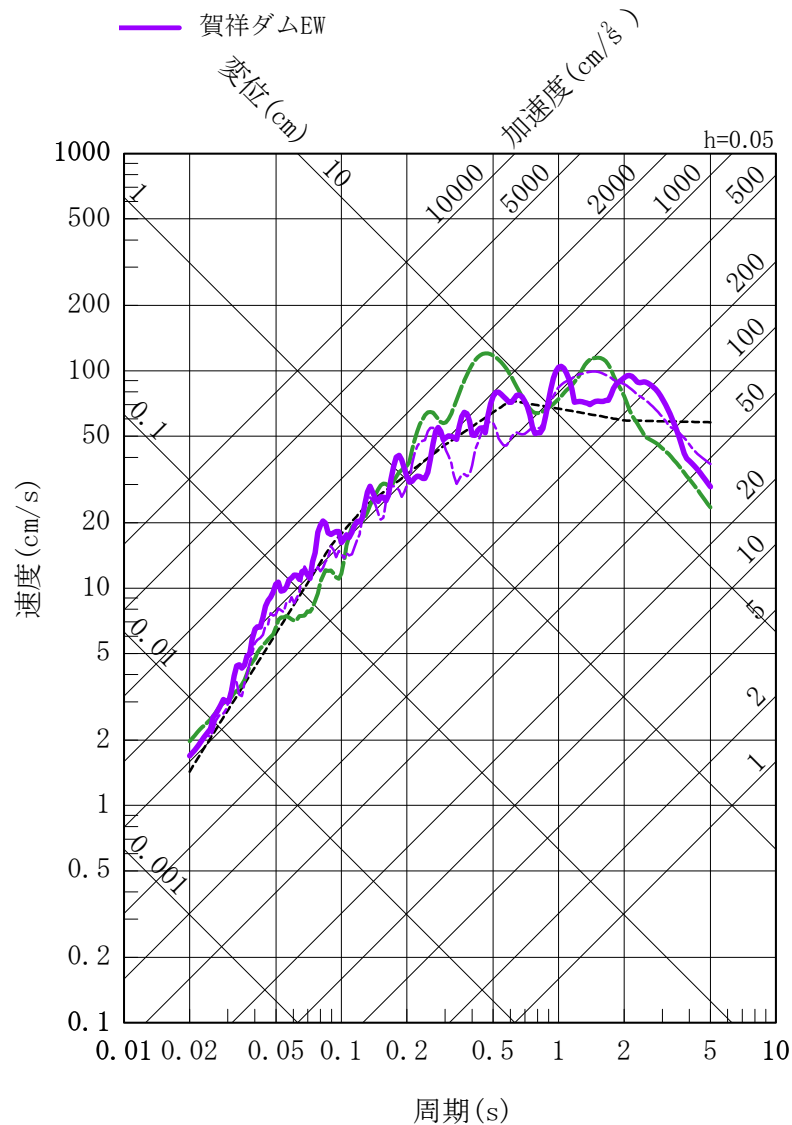
— 賀祥ダムNS

— 賀祥ダムEW

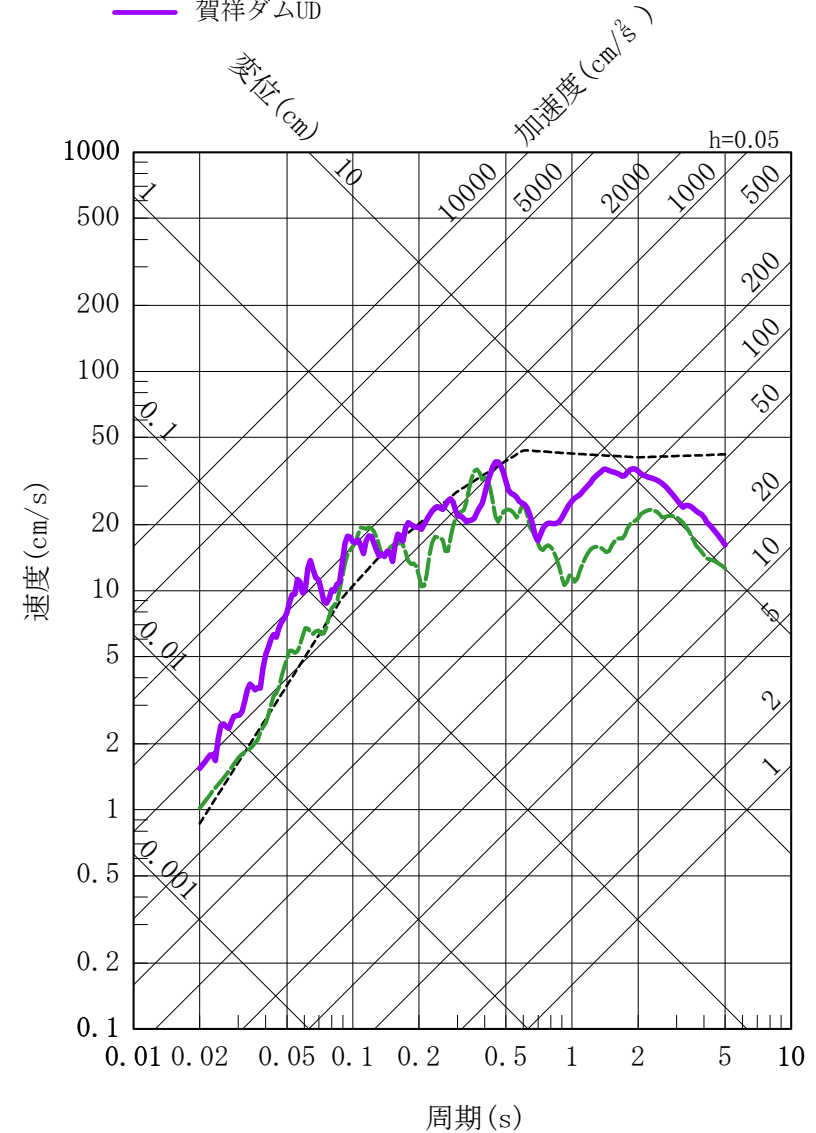
----- 加藤ほか(2004)による応答スペクトル

— 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動

— 賀祥ダムUD



水平方向



鉛直方向

震源を特定せず策定する地震動の応答スペクトル

## 基準地震動の策定結果

# 基準地震動の策定結果

○ 新規制基準を踏まえ、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」として、以下のとおり、基準地震動 $S_s-1$ ～ $S_s-3$ を策定。

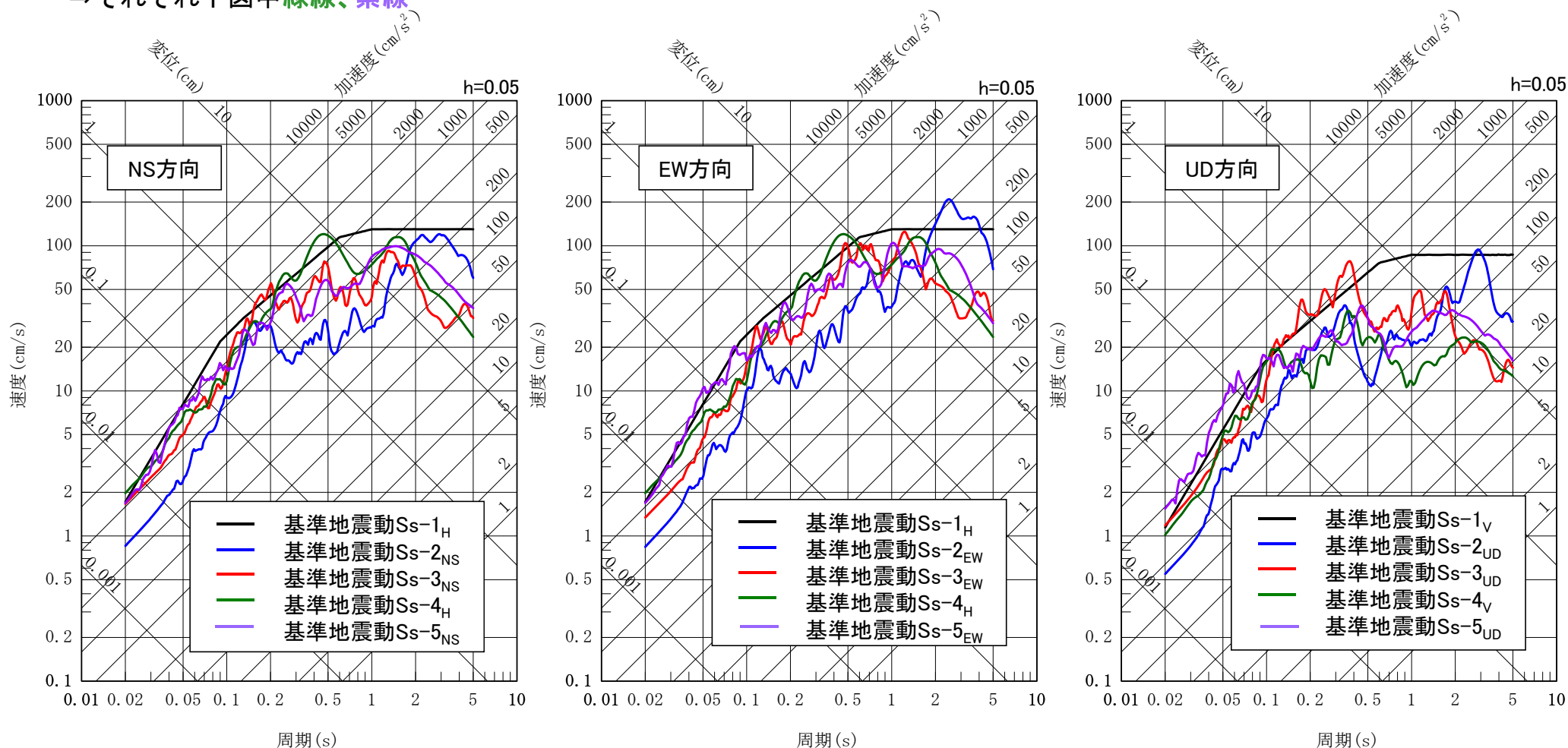
- ・ 基準地震動 $S_s-1$ は、検討用地震の応答スペクトルによる評価結果、及び旧耐震指針に基づく基準地震動 $S_2$ を包絡して設定。

なお、鉛直方向の基準地震動 $S_s-1_v$ は、水平方向の基準地震動 $S_s-1_H$ の $2/3$ として設定。⇒下図中黒線

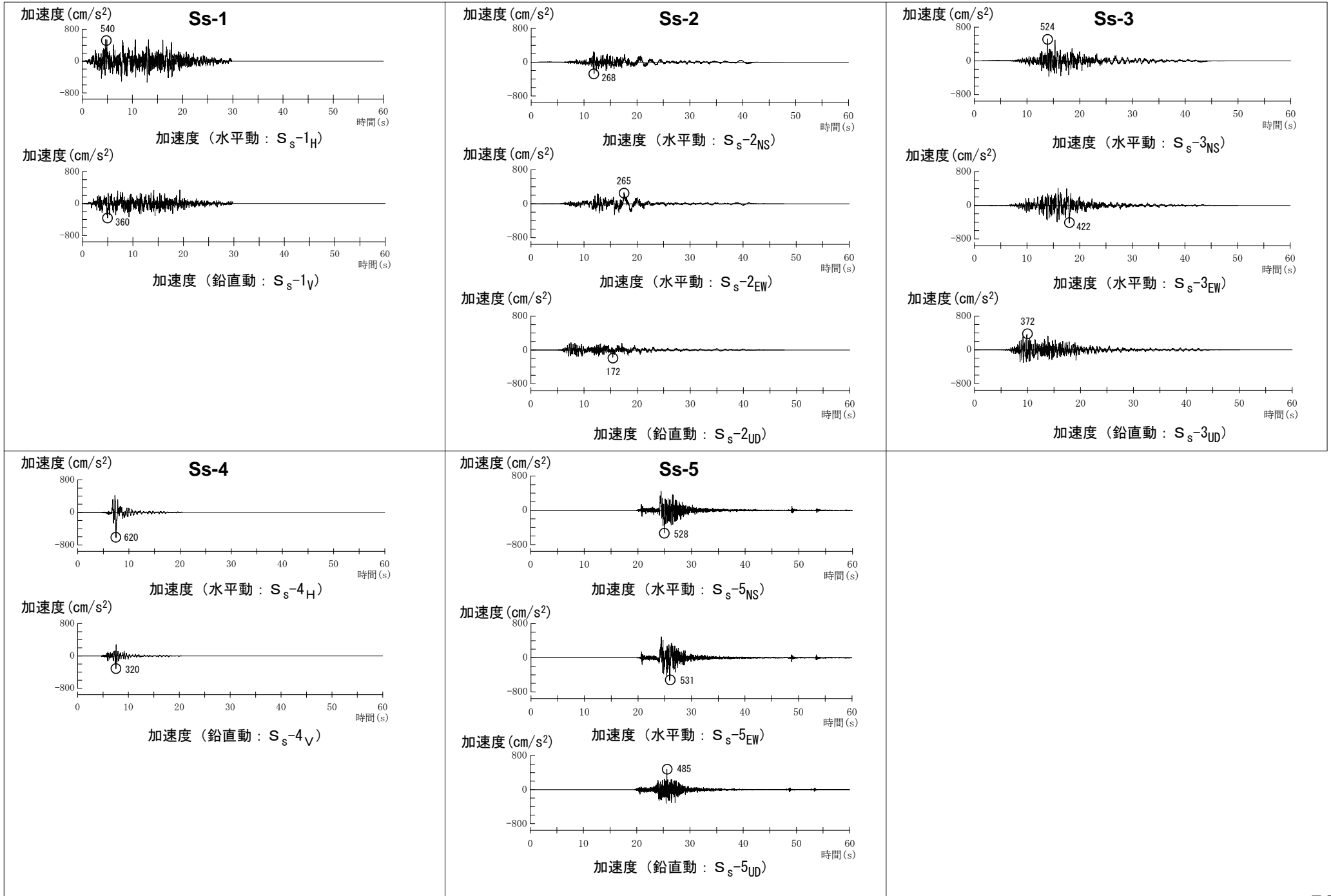
- ・ 「城山南断層による地震」及び「竹木場断層による地震」の評価結果のうち、基準地震動 $S_s-1$ を一部の周期で上回るものとして、断層傾斜角の不確かさを考慮したケースを、それぞれ基準地震動 $S_s-2$ 、基準地震動 $S_s-3$ と設定。⇒下図中青線、赤線

○ 上記の基準地震動 $S_s-1$ ～ $S_s-3$ に加え、「震源を特定せず策定する地震動」として、2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動を $S_s-4$ 、2000年鳥取県西部地震の賀祥ダム基礎上の観測記録を基準地震動 $S_s-5$ として考慮。

⇒それぞれ下図中緑線、紫線



# 基準地震動の加速度時刻歴波形



# 基準地震動の最大加速度

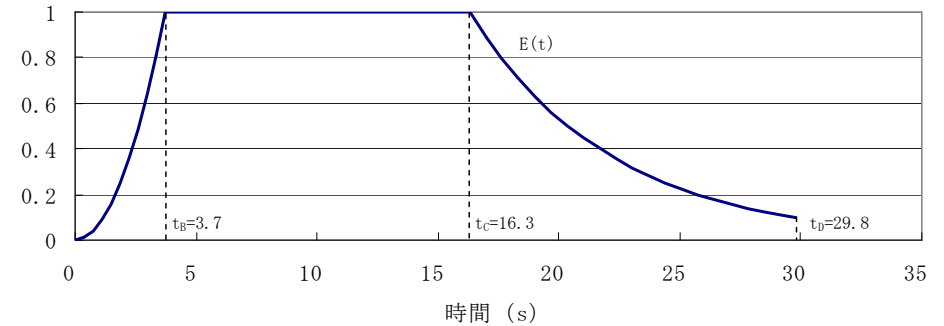
基準地震動				最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )
基準地震動 S <sub>s</sub> -1	設計用模擬地震波	水平成分	S <sub>s</sub> -1 <sub>H</sub>	540
		鉛直成分	S <sub>s</sub> -1 <sub>V</sub>	360
基準地震動 S <sub>s</sub> -2	城山南断層による地震	水平NS成分	S <sub>s</sub> -2 <sub>NS</sub>	268
		水平EW成分	S <sub>s</sub> -2 <sub>EW</sub>	265
		鉛直UD成分	S <sub>s</sub> -2 <sub>UD</sub>	172
基準地震動 S <sub>s</sub> -3	竹木場断層による地震	水平NS成分	S <sub>s</sub> -3 <sub>NS</sub>	524
		水平EW成分	S <sub>s</sub> -3 <sub>EW</sub>	422
		鉛直UD成分	S <sub>s</sub> -3 <sub>UD</sub>	372
基準地震動 S <sub>s</sub> -4	2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動	水平成分	S <sub>s</sub> -4 <sub>H</sub>	620
		鉛直成分	S <sub>s</sub> -4 <sub>V</sub>	320
基準地震動 S <sub>s</sub> -5	2000年鳥取県西部地震の賀祥ダム観測記録	水平NS成分	S <sub>s</sub> -5 <sub>NS</sub>	528
		水平EW成分	S <sub>s</sub> -5 <sub>EW</sub>	531
		鉛直成分	S <sub>s</sub> -5 <sub>UD</sub>	485

# 【参考】基準地震動Ss-1の設計用模擬地震波の作成

○基準地震動Ss-1の模擬地震波は、設計用応答スペクトルに適合（応答スペクトル比、SI比）するよう、一様乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせによって作成し、振幅包絡線の経時変化は、Noda et al. (2002)に基づき設定

## ＜模擬地震波の振幅包絡線の経時変化＞

基準地震動	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時変化 (s)		
		$t_B$	$t_C$	$t_D$
Ss-1				
Ss-1 <sub>H</sub>	29.8	3.7	16.3	29.8
Ss-1 <sub>V</sub>	29.8	3.7	16.3	29.8

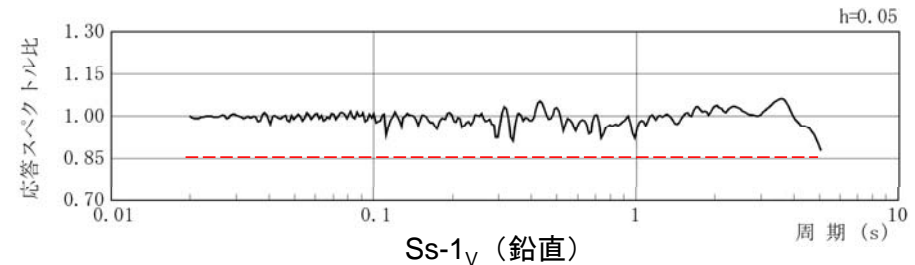
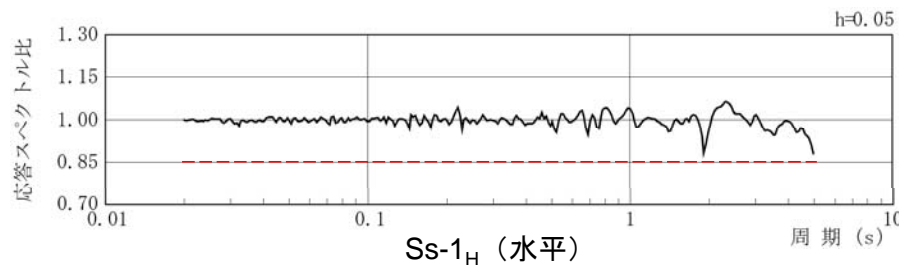


$$\text{振幅包絡線: } E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & 0 < t \leq t_B \\ 1.0 & t_B < t \leq t_C \\ e^{\frac{\ln(0.1)}{t_D-t_C}(t-t_C)} & t_C < t \leq t_D \end{cases}$$

$$\begin{aligned} t_B &= 10^{0.5M-2.93} \\ t_C - t_B &= 10^{0.3M-1.0} \\ t_D - t_C &= 10^{0.17M+0.541\log X_{eq}-0.6} \\ M &= 7.0, X_{eq} = 10 \text{ (km)} \end{aligned}$$

## ＜模擬地震波の設計用応答スペクトルへの適合＞

- ・設計用模擬地震波の設計用応答スペクトルに対する応答スペクトル比が0.85以上であることを確認



$$\text{応答スペクトル比 } R(T) = \frac{S_{V1}(T)}{S_{V2}(T)} \geq 0.85$$

ここで、T：周期 (s)

$S_{V1}(T)$ ：模擬地震波の応答スペクトル値

$S_{V2}(T)$ ：目標とする応答スペクトル値

- ・SI（応答スペクトルの強さ）の比が1.0以上であることを確認

基準地震動	SI比
Ss-1	
Ss-1 <sub>H</sub>	1.01
Ss-1 <sub>V</sub>	1.00

$$\text{SI比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_V(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_V(T) dt} \geq 1.0$$

$S_V(T)$ ：模擬地震波の応答スペクトル(cm/s)

$\bar{S}_V(T)$ ：目標とする応答スペクトル(cm/s)

T：固有周期 (s)