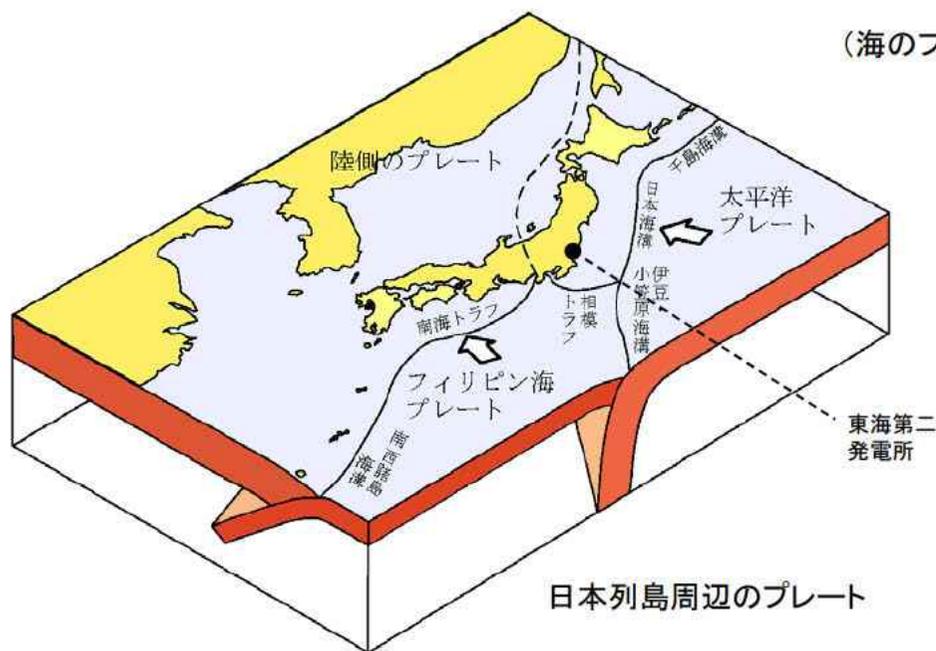
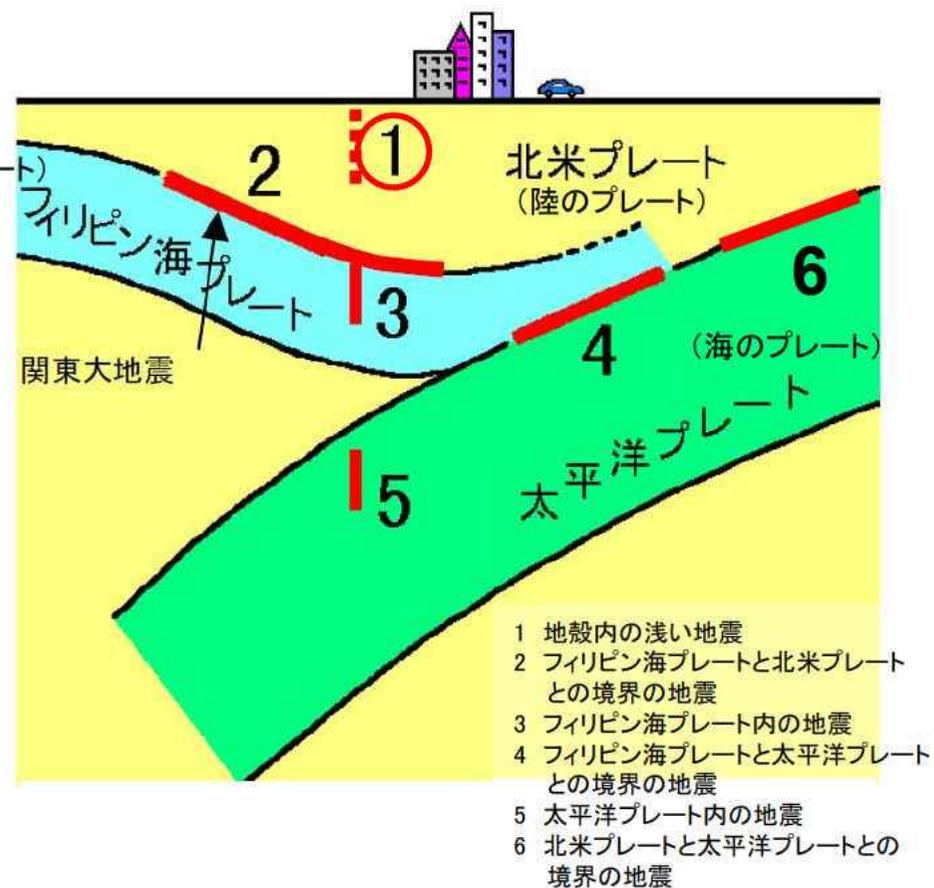


5. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動のうち 内陸地殻内地震について



日本のプレートテクトニクスモデル概念図
(防災科学技術研究所)



南関東地域で発生する地震のタイプ
(中央防災会議に一部加筆)

- 内陸地殻内地震は陸のプレートの内部で発生する地震で、図の1のタイプである。
- プレート間地震は異なるプレートの境界で発生する地震で、図の2, 4, 6のタイプである。
- 海洋プレート内地震は海のプレートの内部で発生する地震で、図の3, 5のタイプである。

■内容

- 検討用地震(敷地に最も大きな影響を与える地震)としてF1断層, 北方陸域の断層の連動(長さ44km, M7.6)を選定
- 地震動評価ケース
 - ・基本ケース
 - ・不確かさケース 短周期レベル(基本ケースに対して1.5倍) → 基準地震動Ss-1(788gal)に選定

■ポイント

- アスペリティ位置の妥当性
- 破壊開始点位置の妥当性

震源モデルの見直し

断層長さの見直し: 44km→58km

(「敷地周辺及び近傍の地質・地質構造」で審議)

■反映事項

- 破壊開始点位置を追加(どの評価ケースでも共通に考慮)するとともに, アスペリティ位置の不確かさをケースを追加(青字)
- ・基本ケース
- ・不確かさケース1 強震動生成域の位置(敷地最短位置に設定)
- ・不確かさケース2 短周期レベル(基本ケースに対して1.5倍)
- ・不確かさケース3 傾斜角(基本ケースの60度に対して45度)
- ・不確かさケース4 **アスペリティ位置(断層端部に配置)**

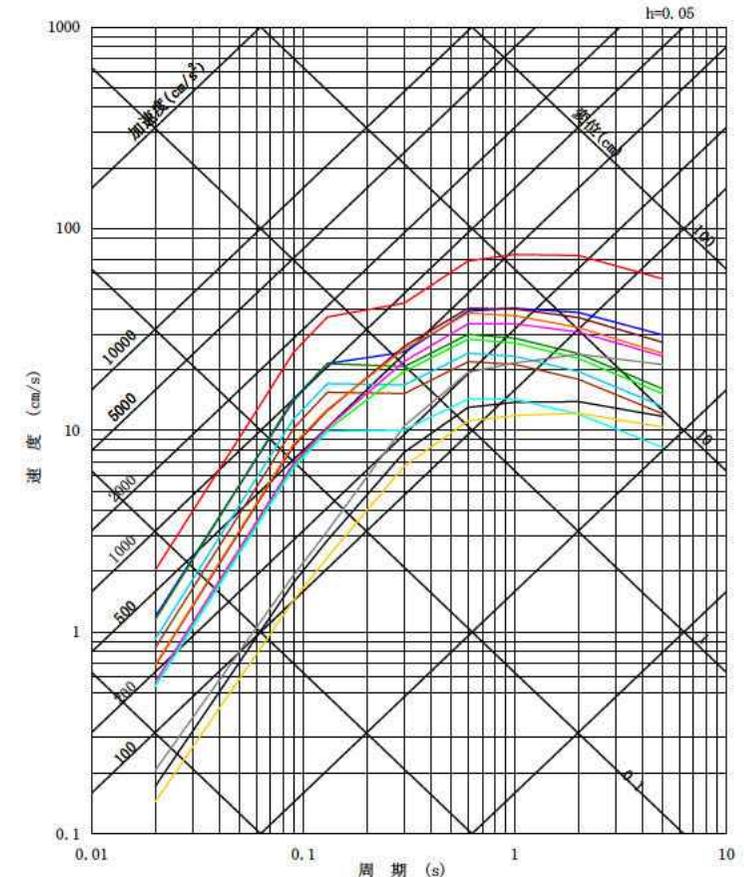
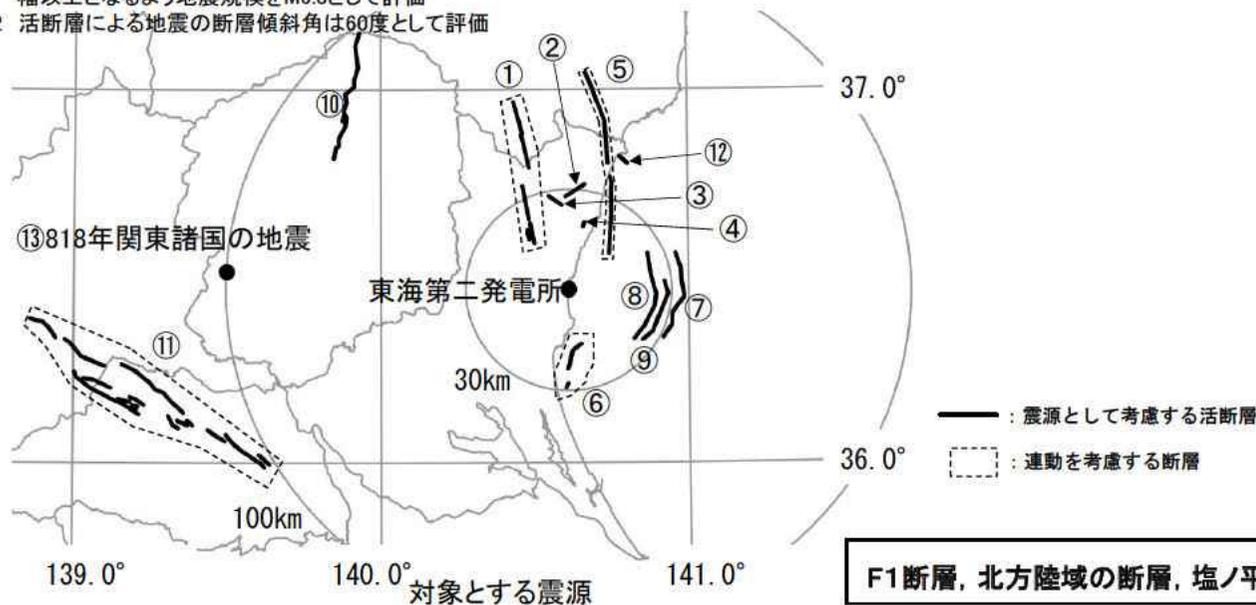
検討用地震の選定

■敷地で震度5程度以上となる活断層及び過去の被害地震を抽出する。

地震名		長さ (km)	地震規模 M	断層上端深さ (km)	等価震源距離 (km) ^{※2}	補正係数
活断層による地震	① 棚倉破砕帯東縁断層, 同西縁断層の連動	42	7.5	3	37	考慮
	② 関口-米平リニアメント	6	6.8 ^{※1}	3	27	考慮
	③ 堅破山リニアメント	4	6.8 ^{※1}	3	25	考慮
	④ 宮田町リニアメント	1	6.8 ^{※1}	3	21	考慮
	⑤ F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動	58	7.8	3	31	考慮
	⑥ F3断層, F4断層の連動	16	6.8	5	22	
	⑦ F8断層	26	7.2	5	26	
	⑧ F16断層	26	7.2	5	30	
	⑨ A-1背斜	20	7.0	5	22	
	⑩ 関谷断層	40	7.5	5	92	
	⑪ 関東平野北西縁断層帯	82	8.0	5	130	
	⑫ F11断層	5	6.8 ^{※1}	3	38	考慮
被害地震	⑬ 818年関東諸国の地震	—	7.5	—	102	

※1 長さの短い断層については、地表で認められる断層長さが震源断層の長さを示さない可能性を踏まえ、震源断層の長さが断層幅以上となるよう地震規模をM6.8として評価

※2 活断層による地震の断層傾斜角は60度として評価



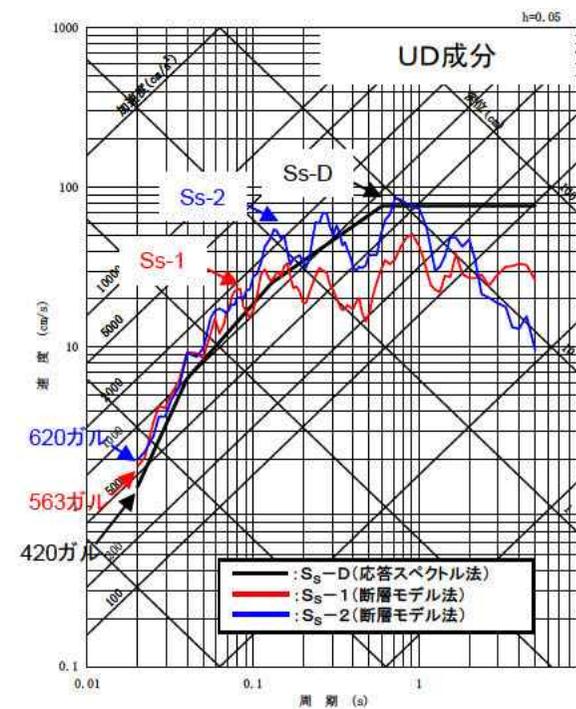
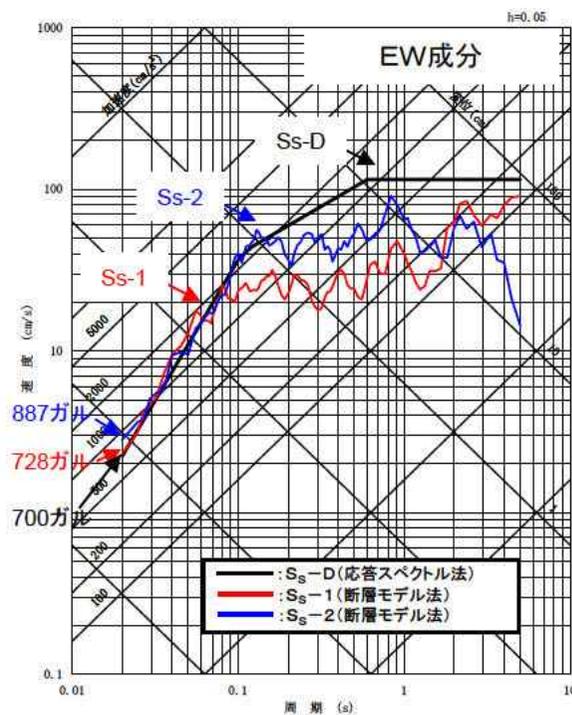
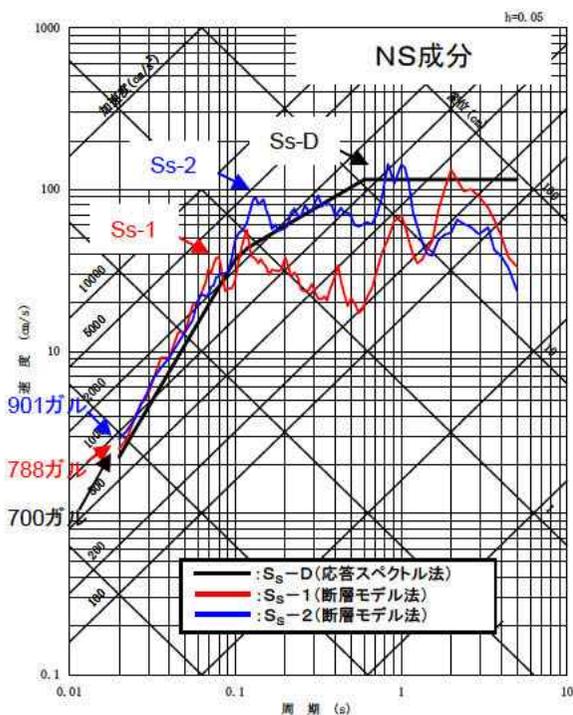
- ① 棚倉破砕帯東縁断層, 同西縁断層の連動, M7.5, Xeq=37km
- ② 関口-米平リニアメント, M6.8, Xeq=27km
- ③ 堅破山リニアメント, M6.8, Xeq=25km
- ④ 宮田町リニアメント, M6.8, Xeq=21km
- ⑤ F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動, M7.8, Xeq=31km
- ⑥ F3断層, F4断層, M6.8, Xeq=22km
- ⑦ F8断層, M7.2, Xeq=26km
- ⑧ F16断層, M7.2, Xeq=30km
- ⑨ A-1背斜, M7.0, Xeq=22km
- ⑩ 関谷断層, M7.5, Xeq=92km
- ⑪ 関東平野北西縁断層帯, M8.0, Xeq=130km
- ⑫ F11断層, M6.8, Xeq=38km
- ⑬ 818年関東諸国の地震, M7.5, Xeq=102km

内陸地殻内地震の地震動の応答スペクトル (Noda et al.(2002)の手法に補正係数を考慮)

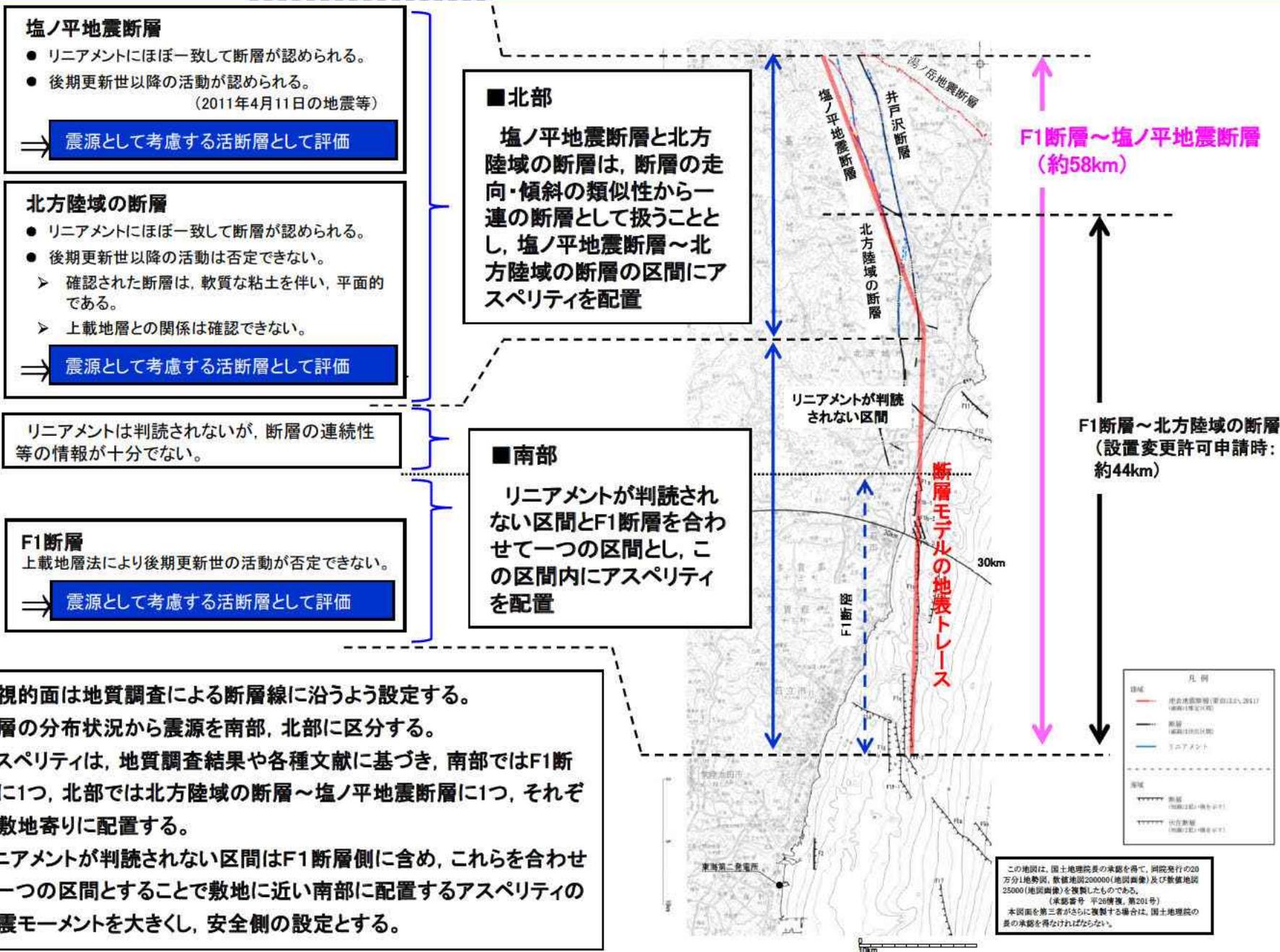
F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震を検討用地震として選定した。

■敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動 S_s

地震発生様式	検討用地震	地震規模	応答スペクトルに基づく手法による基準地震動	断層モデルを用いた手法による基準地震動
内陸地殻内地震	F1断層, 北方陸域の断層の運動による地震	M7.6	$S_s-D_H(700ガル)$ $S_s-D_V(420ガル)$	$S_s-1_{NS}(788ガル)$ $S_s-1_{EW}(728ガル)$ $S_s-1_{UD}(563ガル)$
プレート間地震	2011年東北地方太平洋沖地震	Mw9.0	(すべての検討用地震を包絡させて設定)	$S_s-2_{NS}(901ガル)$ $S_s-2_{EW}(887ガル)$ $S_s-2_{UD}(620ガル)$
海洋プレート内地震	茨城県南部の地震	M7.3		他の基準地震動に包絡されるため設定していない。



断層長さの見直しに伴う震源モデルの検討(1/4)



塩ノ平地震断層

- リニアメントにほぼ一致して断層が認められる。
- 後期更新世以降の活動が認められる。
(2011年4月11日の地震等)

⇒ 震源として考慮する活断層として評価

北方陸域の断層

- リニアメントにほぼ一致して断層が認められる。
- 後期更新世以降の活動は否定できない。
- 確認された断層は、軟質な粘土を伴い、平面的である。
- 上載地層との関係は確認できない。

⇒ 震源として考慮する活断層として評価

リニアメントは判読されないが、断層の連続性等の情報が十分でない。

F1断層

上載地層法により後期更新世の活動が否定できない。

⇒ 震源として考慮する活断層として評価

■北部

塩ノ平地震断層と北方陸域の断層は、断層の走向・傾斜の類似性から一連の断層として扱うこととし、塩ノ平地震断層～北方陸域の断層の区間にアスペリティを配置

■南部

リニアメントが判読されない区間とF1断層を合わせて一つの区間とし、この区間内にアスペリティを配置

- 巨視的面は地質調査による断層線に沿うよう設定する。
- 断層の分布状況から震源を南部、北部に区分する。
- アスペリティは、地質調査結果や各種文献に基づき、南部ではF1断層に1つ、北部では北方陸域の断層～塩ノ平地震断層に1つ、それぞれ敷地寄りに配置する。
- リニアメントが判読されない区間はF1断層側に含め、これらを合わせて一つの区間とすることで敷地に近い南部に配置するアスペリティの地震モーメントを大きくし、安全側の設定とする。

この地図は、国土地理院長の承認を得て、同院発行の20万分1地勢図、数値地図200000(地図画像)及び数値地図25000(地図画像)を複製したものである。
(承認番号:平20第2種、第201号)
本図面を第三者がさらに複製する場合は、国土地理院長の承認を得なければならない。

断層長さの見直しに伴う震源モデルの検討(2/4)

■地質調査結果や2011年福島県浜通りの地震から得られる知見を参考に基本震源モデルを設定する。

【断層形状、断層タイプ】

- 断層長さについては、新規制基準適合性審査第381回会合に基づき、F1断層から塩ノ平地震断層までの同時活動を考慮した約58kmとする。
- 地震動評価におけるセグメント区分については、断層の分布状況から震源を南部と北部に区分する。その際、リニアメントが判読されない区間はF1断層側に含め、これらを合わせて一つの区間とすることで敷地に近い南部区間の地震モーメントを大きくし、安全側の設定とする。
- 地震のタイプについては、2011年福島県浜通りの地震が正断層であることや福島県から茨城県にかけての領域は正断層応力場とする知見(例えば青柳・上田(2012))、さらにF1断層における音波探査結果から正断層センスのずれが認められることを踏まえ正断層とする。
- 断層傾斜角については、F1断層における音波探査結果や2011年福島県浜通りの地震の震源インバージョンモデルでの傾斜角(57~73度)を参考に西傾斜60度とする。
- 断層幅については、断層上端深さを3km、下端深さを18kmとして断層傾斜角60度を考慮した17.3kmとする。

【アスペリティ位置】

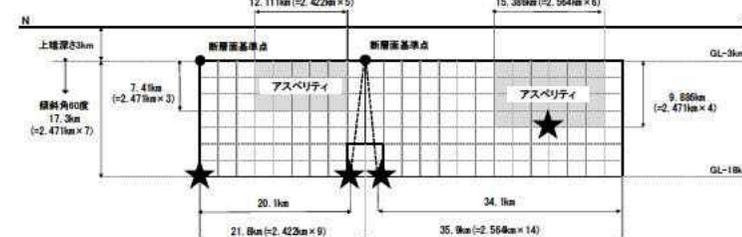
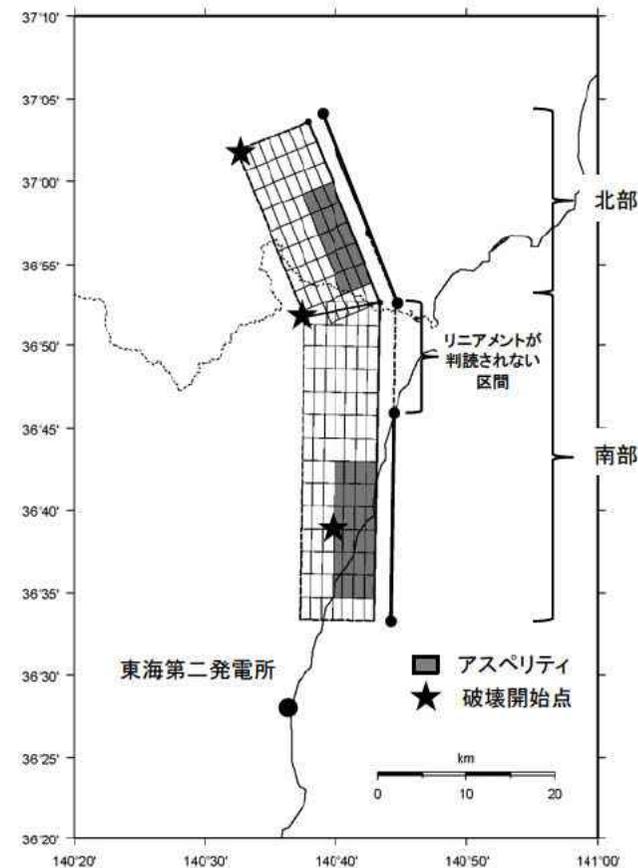
- アスペリティの位置については、地質調査結果に基づき、南部区間のうち調査でわかっているF1断層に1つ、北部では北方陸域の断層~塩ノ平地震断層に1つ、それぞれ敷地に近くなるように配置する。
- 断層長さ方向の配置については、Manighetti et al.(2005)等の知見を踏まえるとアスペリティのように大きなすべりが生じる領域とすべりが無い領域が隣接することは考えにくいことから、断層端部との間に1マス分背景領域を設定する。断層幅方向の配置については、すべりに追随する表層(地表から断層上端までの強震動を出さない層)が存在するので安全側に断層上端にアスペリティを配置する。
- なお、リニアメントが判読されない区間をF1断層側に含め、これらを合わせて一つの区間とすることで、敷地に近い南部に配置するアスペリティの地震モーメントを大きくし、安全側の設定とする。

【破壊開始点位置】

破壊開始点については、強震動予測レシピ、糸井ほか(2009)、平田・佐藤(2007)を踏まえ、アスペリティ下端や断層下端のうち敷地への影響の大きい位置に複数設定する。

【破壊伝播速度Vr】

破壊伝播速度については、強震動予測レシピで用いられているGeller(1976)より、 $V_r=0.72V_s$ とする。ただし、2011年福島県浜通りの地震における破壊伝播速度の各知見と比較の上、妥当性を確認する。



基本震源モデル

■主要なパラメータの設定

下記4個の断層パラメータを与条件として与え、アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_a$ については、Madariaga(1979)の関係式を用いて算定する。

・断層面積 $S(\text{km}^2)$

断層長さと同層幅より算出

・地震モーメント $M_0(\text{N}\cdot\text{m})$

入倉・三宅(2001)より $M_0 = \{S / (4.24 \times 10^{-11})\}^{2.0} / 10^7$

・平均応力降下量 $\Delta\sigma$ (MPa), アスペリティ面積比 S_a/S

Boatwright(1988), 壇ほか(2001)からアスペリティ面積を算出すると30%を超えるため、与条件として平均応力降下量をFujii and Matsu'ura(2000)より3.1MPa, アスペリティ面積比をSomerville et al.(1999)より0.22と設定する。

Madariaga(1979)の関係式

$$\Delta\sigma_a = (S / S_a) \cdot \Delta\sigma$$

ここで,

S_a : アスペリティ総面積 (km^2)

$\Delta\sigma_a$: アスペリティの応力降下量(MPa)

$\Delta\sigma$: 平均応力降下量(MPa)

佐藤・堤(2012)では、正断層の地震である2011年福島県浜通りの地震の短周期レベルは、内陸地殻内地震の平均的な値であると推定されている。

断層長さの見直しに伴う震源モデルの検討(4/4)

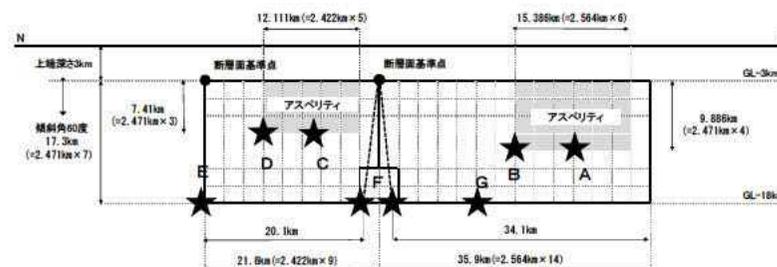
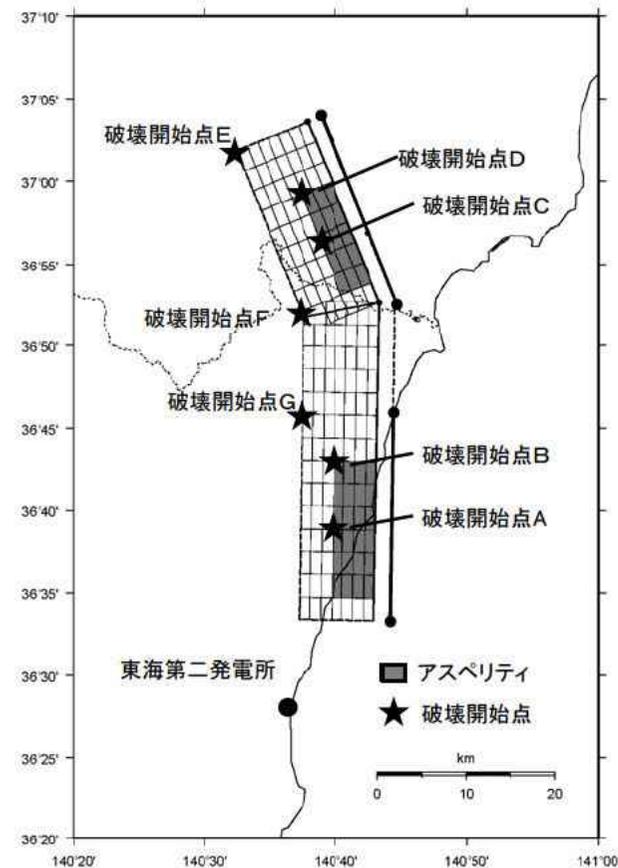


■断層パラメータ(基本震源モデル)

項目	設定値			設定方法	
	全体	北部	南部		
断層上端長さ(km) 断層下端長さ(km)	57.7 54.2	21.8 20.1	35.9 34.1	活断層調査結果による位置を基に設定	
断層傾斜角(度)	60(西傾斜)	60(西傾斜)	60(西傾斜)	活断層調査結果や2011年福島県浜通りの地震の震源インバージョン解析モデルを参考に設定。海上音波探査記録からはF1断層は西側落下の高角な断層であると考えられるものの、傾斜角60度と設定する。	
断層上端深さ(km) 断層下端深さ(km)	3 18	3 18	3 18	断層上端深さは、2011年福島県浜通りの地震の震源域における微小地震分布等の知見を考慮し3kmと設定している。震源モデルの南部では3kmよりも深いと想定されるが、保守的に3kmとする。 断層下端深さは、広域の微小地震分布を考慮し18kmと設定している。震源モデルの北部ではそれよりも浅いと想定されるが、保守的に18kmとする。	
断層幅W(km)	17.3	17.3	17.3	地震発生層と断層傾斜角から設定	
断層面積S(km ²)	967.9	362.4	605.5	断層面より算定	
破壊伝播様式	同心円状	同心円状	同心円状	—	
地震モーメントM ₀ (N・m)	5.21E+19	1.65E+19	3.56E+19	$M_0 = [S / (4.24 \times 10^{-11})]^2 / 10^7$ 全体の地震モーメントを断層面積の1.5乗比で分配	
剛性率(N/m ²)	3.50E+10	3.50E+10	3.50E+10	$\mu = \rho \beta^2$, $\rho = 2.7g/cm^3$, $\beta = 3.6km/s$ (β は敷地周辺を対象にした地震波速度トモグラフィ、 ρ は地震本部による「全国1次地下構造モデル(暫定版)」を参考に設定)	
平均すべり量D(cm)	153.9	130.1	168.1	$D = M_0 / (\mu S)$	
平均応力降下量 $\Delta \sigma$ (MPa)	3.1	3.1	3.1	Fujii and Matsu'ura(2000)による	
破壊伝播速度Vr(km/s)	2.59	2.59	2.59	$Vr = 0.72 \beta$ (Geller,1976による)	
短周期レベルA(N・m/s ²)(参考)	1.98E+19	—	—	$A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$	
ア ス ペ リ テ ィ	面積S _a (km ²)	212.9	79.7	133.2	$S_a = 0.22S$
	平均すべり量D _a (cm)	307.7	260.1	336.2	$D_a = 2D$
	地震モーメントM _{0a} (N・m)	2.29E+19	7.26E+18	1.57E+19	$M_{0a} = \mu S_a D_a$
	応力降下量 $\Delta \sigma_a$ (MPa)	14.09	14.09	14.09	$\Delta \sigma_a = \Delta \sigma \times S / S_a$
	短周期レベルA(N・m/s ²)(参考)	1.89E+19	1.16E+19	1.49E+19	$A = 4 \pi r_a \Delta \sigma_a \beta^2$
背 景 領 域	面積S _b (km ²)	755.0	282.7	472.3	$S_b = S - S_a$
	平均すべり量D _b (cm)	110.5	93.4	120.7	$D_b = M_{0b} / (\mu S_b)$
	地震モーメントM _{0b} (N・m)	2.92E+19	9.24E+18	1.99E+19	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
	実効応力 $\Delta \sigma_b$ (MPa)	2.82	2.82	2.82	$\Delta \sigma_b = 0.2 \Delta \sigma_a$

■破壊開始点の設定位置については、下記の方針で検討する。

- ・破壊開始点について、強震動予測レシピ、糸井ほか(2009)、平田・佐藤(2007)を踏まえアスペリティ下端及び断層下端に設定する。
- ・設定に際しては、破壊が敷地に向かう位置に複数設定する。具体的には各アスペリティ下端(中央及び北)と断層下端(中央及び北)に設定する。また、物理的観点から、ひずみの差が生じる可能性のあるF1断層の断層下端にも設定する。
- ・基本震源モデルを対象に、経験的グリーン関数法により評価を実施し、影響の大きい破壊開始点を代表として選定し今後の地震動評価を行う。



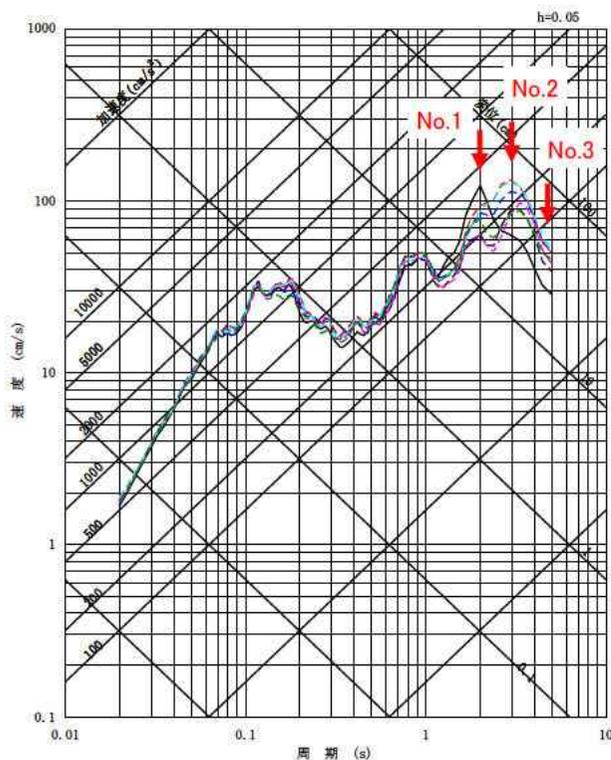
基本震源モデル

破壊開始点の検討(2/2)

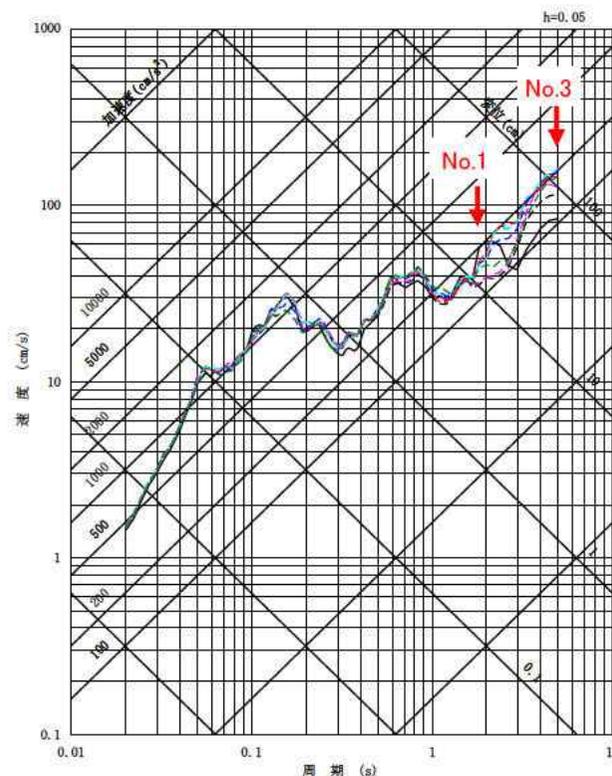


■各破壊開始点による地震動評価結果(平均応答スペクトル)

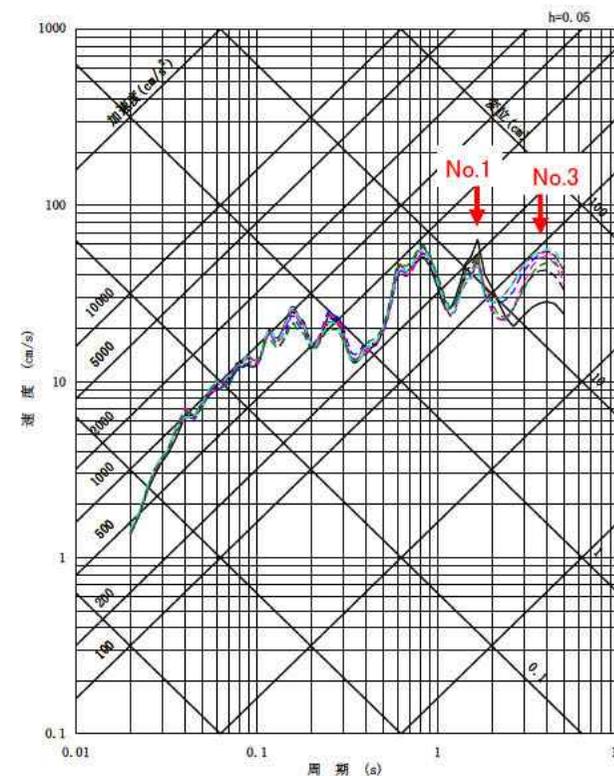
- 破壊開始点A(破壊開始点1)
- - - 破壊開始点B
- - - 破壊開始点C
- - - 破壊開始点D
- - - 破壊開始点E(破壊開始点2)
- - - 破壊開始点F(破壊開始点3)
- - - 破壊開始点G



NS成分



EW成分



UD成分

短周期側においては、各破壊開始点の地震動評価結果は同様の傾向を示している。長周期側においては破壊開始点A, E, Fの影響がやや大きい。断層モデルを用いた手法による地震動評価の破壊開始点は、破壊開始点A, E, F(以降、それぞれ破壊開始点1, 2, 3と表記)で代表させる。

不確かさの考慮について

■ 主要な断層パラメータについて、認識論的不確かさと偶然的不確かさに分類し、敷地での地震動に大きな影響を与えるパラメータを不確かさとして考慮する。

【認識論的不確かさ】：事前の詳細な調査や経験式などにに基づき設定できるもの ⇒ それぞれ独立させて考慮する。

【偶然的不確かさ】：事前の詳細な調査や経験式からは設定が困難なもの ⇒ 重畳させて考慮する。

評価ケース	認識論的不確かさ					偶然的不確かさ
	断層上端 深さ※1	断層下端 深さ※2	断層 傾斜角	短周期レベル	アスペリティ位置	破壊開始点
基本震源モデル	3km	18km	60度 (西傾斜)	強震動予測レシピの 平均	敷地に近い位置に配置	複数設定
短周期レベルの 不確かさ	3km	18km	60度 (西傾斜)	強震動予測レシピの 1.5倍	敷地に近い位置に配置	複数設定
断層傾斜角の 不確かさ	3km	18km	45度 (西傾斜)	強震動予測レシピの 平均	敷地に近い位置に配置	複数設定
● アスペリティ位置 の不確かさ	3km	18km	60度 (西傾斜)	強震動予測レシピの 平均	断層端部に配置	複数設定

※1 2011年福島県浜通りの地震の震源域以外では断層上端深さは3kmよりも深いことが推定されるが、震源モデルの全域にわたり保守的に3kmに設定した。

※2 2011年福島県浜通りの地震の震源域では断層下端深さは浅いことが推定されるが、震源モデルの全域にわたり保守的に18kmに設定した。

 不確かさを考慮して設定するパラメータ

●: コメントNo.2を踏まえ、追加したケース

 基本震源モデルの段階で予め不確かさを考慮して設定するパラメータ

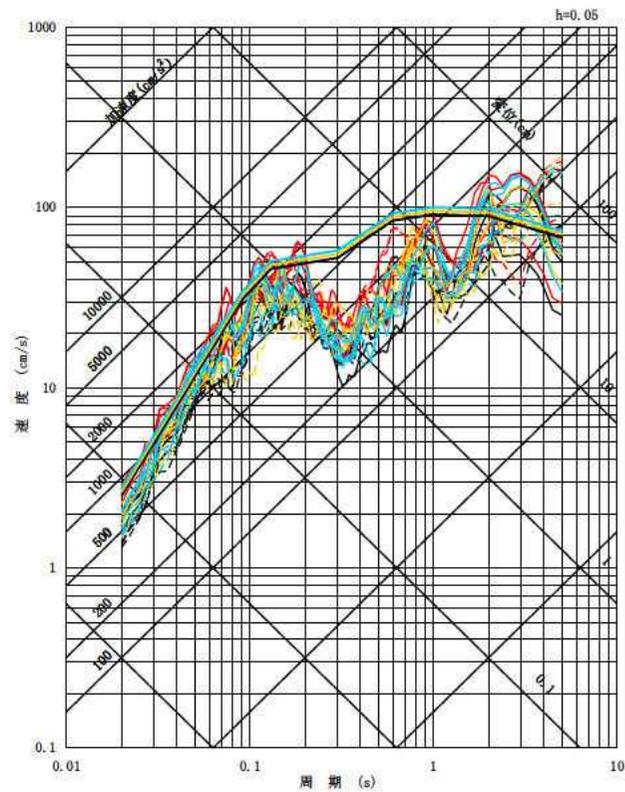
■応答スペクトル手法と断層モデル手法の各評価結果

【応答スペクトル手法】

- 基本震源モデル
- 断層傾斜角の不確かさ
- アスぺリティ位置の不確かさ

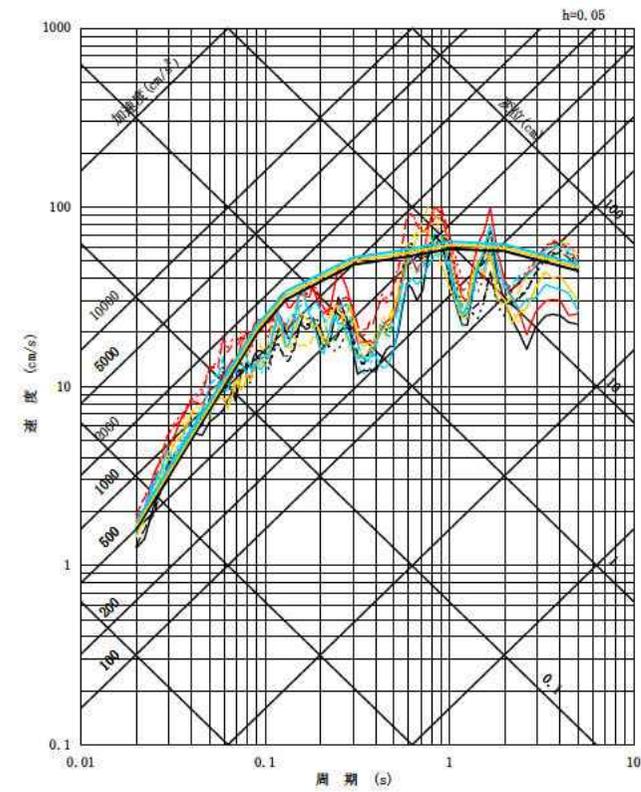
【断層モデル手法】

- 基本震源モデル(破壊開始点1~3)
- 短周期レベルの不確かさ(破壊開始点1~3)
- 断層傾斜角の不確かさ(破壊開始点1~3)
- アスぺリティ位置の不確かさ(破壊開始点1~3)



水平成分

実線: NS成分
破線: EW成分



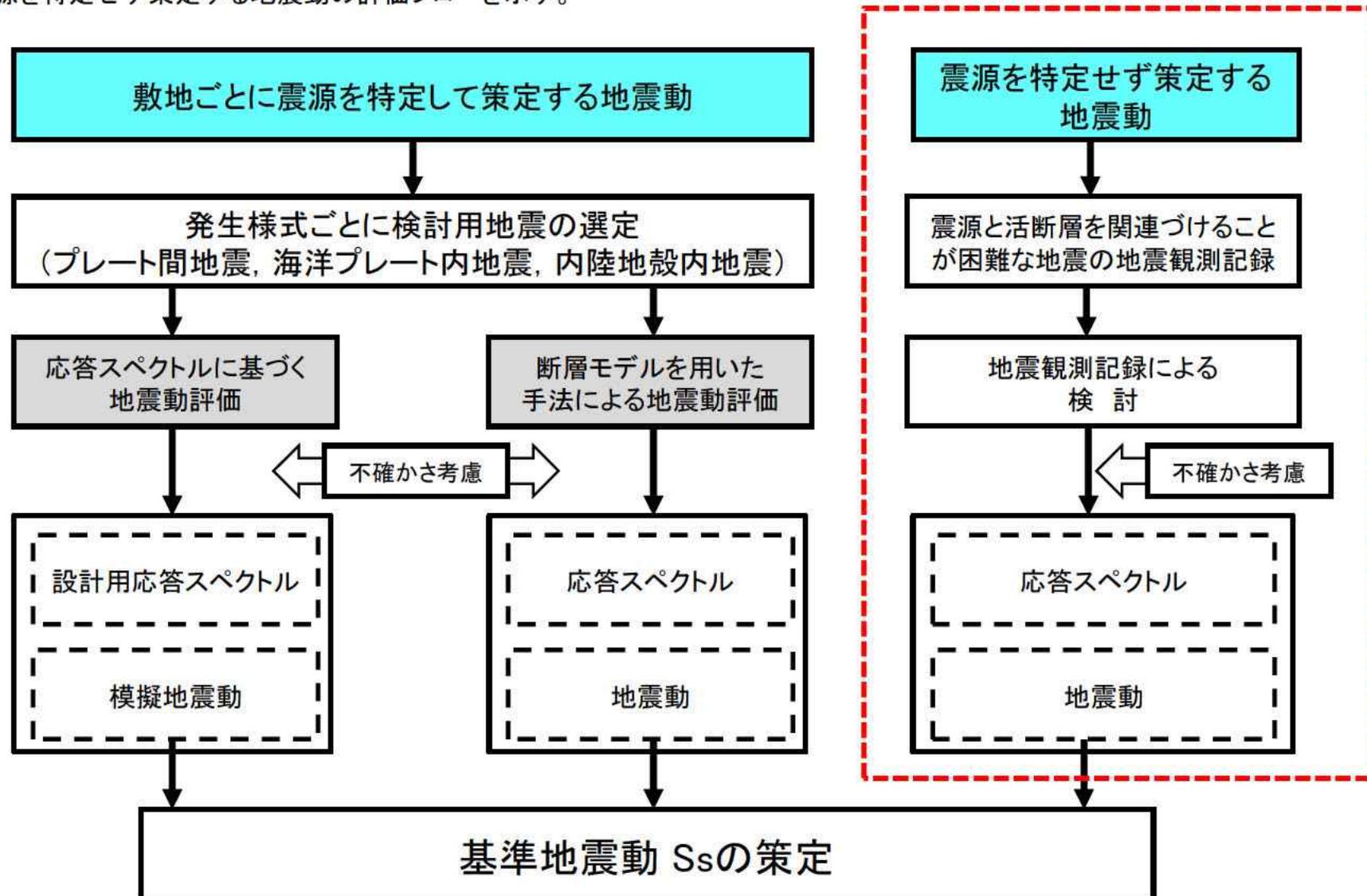
鉛直成分

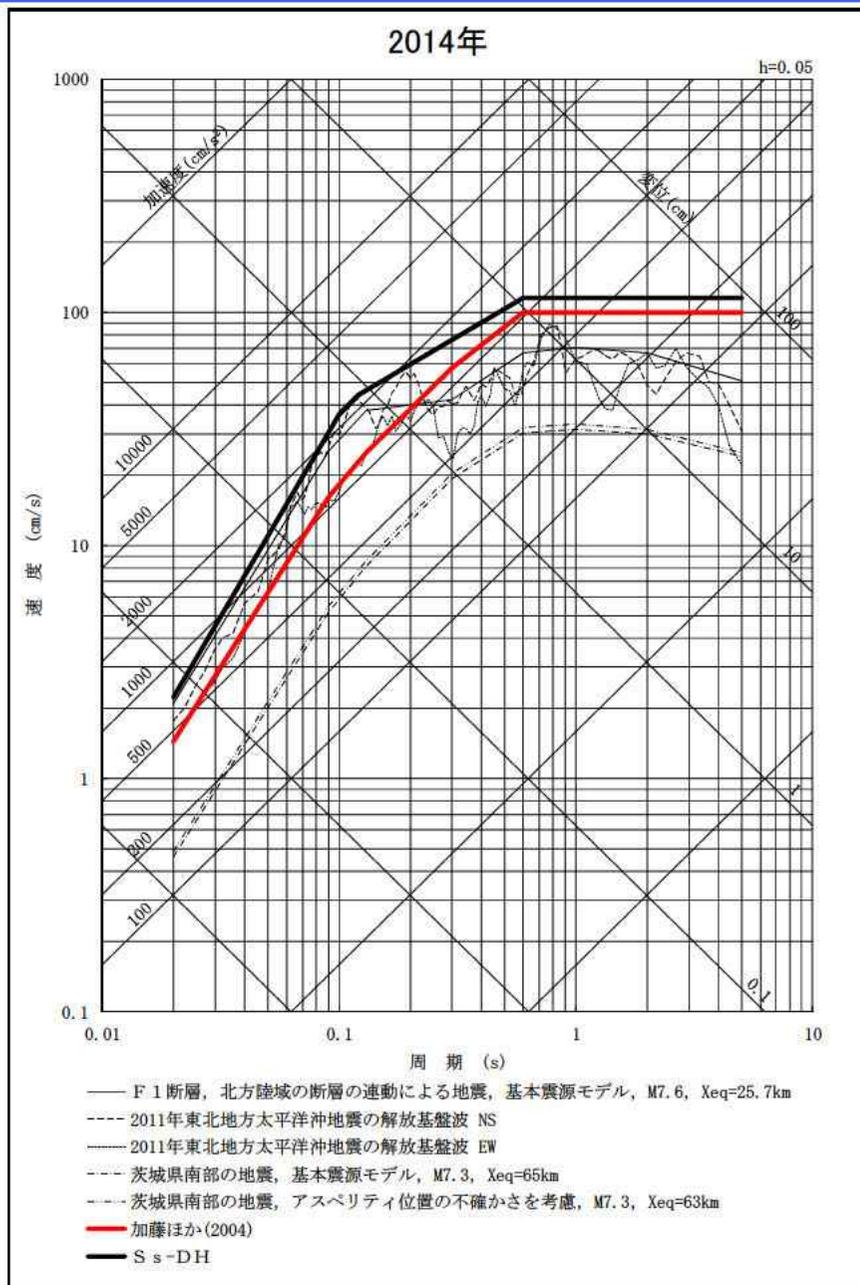
6. 震源を特定せず策定する地震動

(1) 標準応答スペクトルの評価前

■「震源を特定せず策定する地震動」は、敷地周辺の状況等を十分考慮した詳細な調査を実施しても、なお敷地近傍において発生する可能性のある内陸地殻内の地震の全てを事前に評価しうるとは言い切れないことから、震源と活断層を関連づ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の観測記録を収集し、それらが敷地直下で発生したと仮定して評価を行う。

■震源を特定せず策定する地震動の評価フローを示す。





収集対象となる内陸地殻内の地震の例

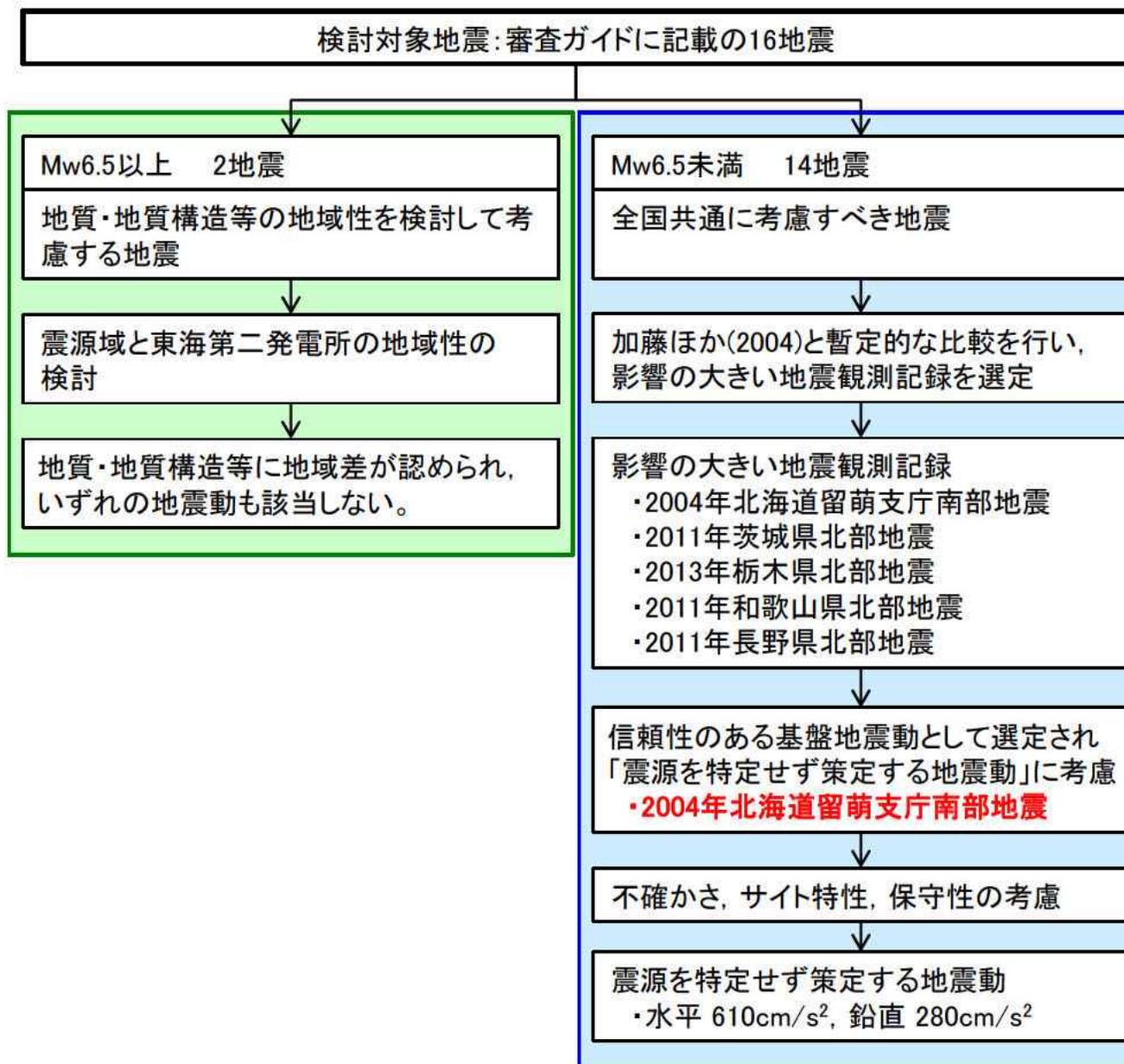
No	地震名	日時	規模
1	2008年岩手・宮城内陸地震	2008/06/14, 08:43	Mw6.9
2	2000年鳥取県西部地震	2000/10/06, 13:30	Mw6.6
3	2011年長野県北部地震	2011/03/12, 03:59	Mw6.2
4	1997年3月鹿児島県北西部地震	1997/03/26, 17:31	Mw6.1
5	2003年宮城県北部地震	2003/07/26, 07:13	Mw6.1
6	1996年宮城県北部(鬼首)地震	1996/08/11, 03:12	Mw6.0
7	1997年5月鹿児島県北西部地震	1997/05/13, 14:38	Mw6.0
8	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

原子力規制委員会(2013)

地震動の評価

- 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の検討結果に保守性を考慮した地震動

*:設置変更許可申請時から変更無し



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年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

原子力規制委員会(2013)「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」より抜粋

2008年岩手・宮城内陸地震と東海第二発電所の比較

【凡例】○類似性あり, △:類似性低い～一部あり, ×:類似性なし

項目	比較結果	2008年岩手・宮城内陸地震震源域	東海第二発電所
地質	△	・ 震源域近傍には、主に中新統から鮮新統の堆積岩・火山岩等、第四系の火山岩類が分布する。	・ 敷地近傍には、中新統の堆積岩、鮮新統の堆積岩、更新統の段丘堆積物等、完新統の沖積層及び砂丘砂層が分布する。
地質構造	×	・ 震源域近傍には、中新世以降に形成された褶曲構造が認められる。 ・ カルデラが密集することから、地質構造が複雑である。	・ 敷地近傍に広く分布する鮮新統(久米層)及びこれを不整合に覆う上部更新統はほぼ水平に分布している。 ・ 敷地近傍にカルデラは分布しない。
変動地形等	×	・ 下記の観点より、震源域近傍は変動地形等の検出が難しい地域である。 - 震源域は山間部に位置し、近傍に河成段丘が一部分布するのみであり、指標となる地形が少ない。 - 大規模地すべりを含めた地すべりが密集している。 ・ 田力ほか(2009)によると、柷木立付近には短いながら明瞭な断層変位地形があり、低位段丘礫層堆積期以降に複数回、比較的活発な活動を繰り返していることが明らかとなった。	・ 下記の観点より、敷地近傍は変動地形等が検出しやすい地域である。 - 陸域には後期更新世以降に形成された段丘面が広く分布している。 - 地すべりが認められない。 - 海域には堆積層からなる鮮新統及び下部更新統が水平に広く分布している。 ・ 変動地形学的調査の結果、敷地近傍陸域に変動地形は認められない。
火山	×	・ 火山フロントに近接する。	・ 火山フロントの遠方に位置する。
地震地体構造	×	・ 東北日本弧内帯(8C)	・ 東北日本弧外帯(8B)
応力場	×	・ 防災科学技術研究所(2013)において、ひずみ集中帯と指摘されている。 ・ 東西圧縮の逆断層型が卓越	・ ひずみ集中帯と指摘している文献はない。 ・ 敷地周辺の茨城県北部では南西-北東引張の正断層型が卓越

- 2008年岩手・宮城内陸地震の震源域と東海第二発電所における地質・地質構造等を整理した結果、地域の特徴が異なっていることから、当該地震の観測記録は収集対象外とする。

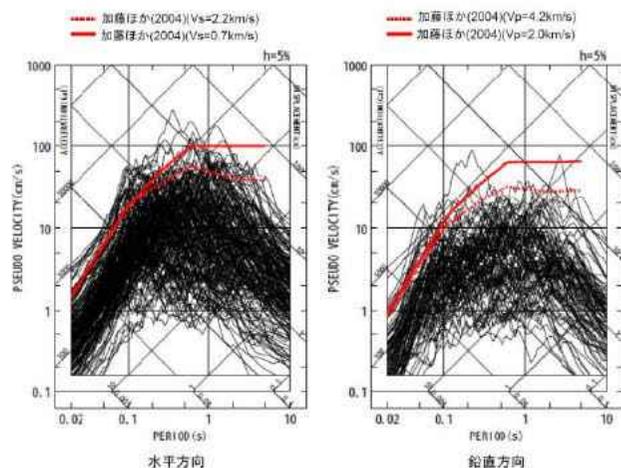
2000年鳥取県西部地震と東海第二発電所の比較

【凡例】○類似性あり, △:類似性低い～一部あり, ×:類似性なし

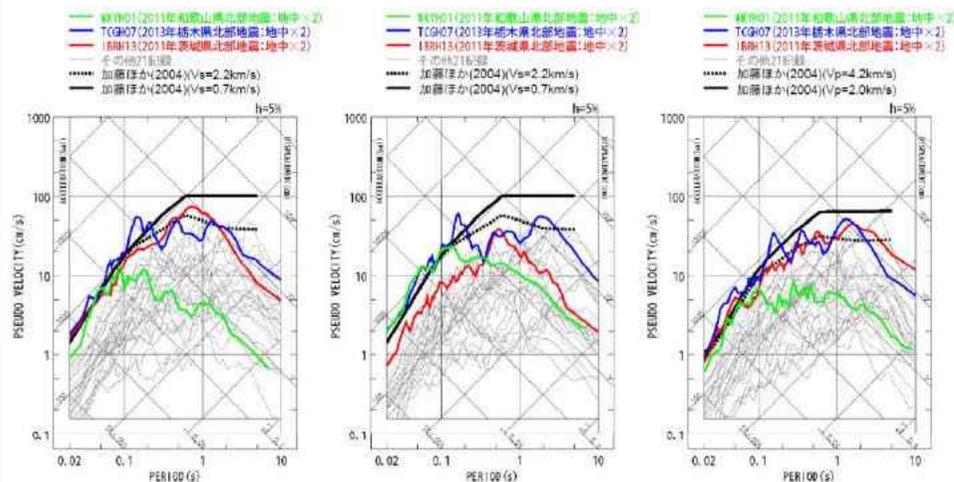
項目	比較結果	2000年鳥取県西部地震震源域	東海第二発電所
地質	×	・ 震源域近傍には、主に白亜系～古第三系の花崗岩及び中新統の安山岩～玄武岩の岩脈が分布する。	・ 敷地近傍には、中新統の堆積岩、鮮新統の堆積岩、更新統の段丘堆積物等、完新統の沖積層及び砂丘砂層が分布する。
地質構造	×	・ 第四紀中期以降に新たに断層面を形成して、断層が発達しつつあり、活断層の発達過程としては初期ないし未成熟な段階にある。	・ 敷地近傍に広く分布する鮮新統(久米層)及びこれを不整合に覆う上部更新統はほぼ水平に分布している。
変動地形等	×	<ul style="list-style-type: none"> ・ 下記の観点より、震源域近傍は変動地形等の検出が難しい地域である。 - 岡田(2002)によると、震源域近傍の活断層の特徴として、第四紀中期以降に新たな断層面を形成して断層が発達しつつあり、活断層の発達過程としては初期ないし未成熟な段階にある。 ・ 震源域に震源断層の方向とほぼ一致する短く断続するリニアメント群が判読されるとともにリニアメント沿いで水平に近い条線をもつ断層露頭が多く確認され、これらの断層は横ずれ断層に伴うフラワー構造を呈して地下では1本の断層に収斂すると推測されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 下記の観点より、敷地近傍は変動地形等が検出しやすい地域である。 - 陸域には後期更新世以降に形成された段丘面が広く分布している。 - 地すべりが認められない。 - 海域には堆積層からなる鮮新統及び下部更新統が水平に広く分布している。 ・ 変動地形学的調査の結果、敷地近傍陸域に変動地形は認められない。
火山	×	・ 火山フロントに近接する。	・ 火山フロントの遠方に位置する。
地震地体構造	×	・ 中国山地・瀬戸内海(10C5)	・ 東北日本弧外帯(8B)
応力場	×	<ul style="list-style-type: none"> ・ 西村(2014)において、ひずみ集中帯と指摘されている。 ・ 東西圧縮の横ずれ断層型が卓越 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ひずみ集中帯と指摘している文献はない。 ・ 敷地周辺の茨城県北部では南西―北東引張の正断層型が卓越

● 2000年鳥取県西部地震の震源域と東海第二発電所における地質・地質構造等を整理した結果、地域の特徴が異なっていることから、当該地震の観測記録は収集対象外とする。

観測記録の選定例



14地震の観測記録(地表)の応答スペクトル



14地震の観測記録(地中×2)の応答スペクトル



選定結果

●KiK-net観測点における基盤地震動が、加藤ほか(2004)の応答スペクトルを上回ると想定される3記録(下表の②~④)、及びK-NET観測点の観測記録で、特に影響の大きいと思われる2記録(下表①、⑤)を観測した5地震を検討対象地震として選定し、以降で詳細に検討する。

Mw6.5未満の検討対象地震

No.	地震名 (発震日時)	観測点
①	2004年北海道留萌支庁南部地震 Mw5.7(2004/12/14, 14:56)	HKD020 (港町)
②	2011年茨城県北部地震 Mw5.8(2011/3/19, 18:56)	IBRH13 (高萩)
③	2013年栃木県北部地震 Mw5.8(2013/2/25, 16:23)	TCGH07 (栗山西)
④	2011年和歌山県北部地震 Mw5.0(2011/7/5, 19:18)	WKYH01 (広川)
⑤	2011年長野県北部地震 Mw6.2(2011/3/12, 3:59)	NIG023 (津南)

●以下に、Mw6.5未満の地震のうち、影響の大きいと考えられる5記録について整理した結果を示す。

	2004年 北海道留萌支庁南部地震	2011年 茨城県北部地震	2013年 栃木県北部地震	2011年 和歌山県北部地震	2011年 長野県北部地震	
地盤モデル	使用モデル	・佐藤ほか(2013)のボーリング結果に基づく地盤モデル	・KiK-net観測記録に基づく地盤同定モデル	・KiK-net観測記録に基づく地盤同定モデル	・KiK-net観測記録に基づく地盤同定モデル	・地盤情報が少なく、地盤モデルを構築できない
	既往の知見との整合性	・微動探査による地盤データと整合 ・知見で指摘されている非線形性を考慮	・観測記録の伝達関数及びKiK-net地盤データと整合しない。 ・知見で指摘されている減衰の影響が不明	・KiK-net地盤データと整合しない ・知見で指摘されている減衰、方位依存性の影響が不明	・KiK-net地盤データと整合しない ・知見で指摘されている減衰の影響が不明	・地盤モデルに関する既往の知見がない
		○	×	×	×	×
	更なる知見収集・検討事項	—	・地盤モデルの改良 ・知見で指摘されている特性に係るデータの取得と影響度合いの評価	・地盤モデルの改良 ・知見で指摘されている特性に係るデータの取得と影響度合いの評価	・地盤モデルの改良 ・知見で指摘されている特性に係るデータの取得と影響度合いの評価	・地質調査、微動探査等による地盤情報の取得
はざとり解析	解析手法	・非線形性を考慮した等価線形解析	・線形解析	・線形解析	・線形解析	・地盤モデルが構築できないため、解析できない
	精度	・観測記録と整合	・はざとり解析の適用性が不明	・はざとり解析の適用性が不明	・はざとり解析の適用性が不明	・はざとり解析の適用性が不明
		○	×	×	×	×
	更なる知見収集・検討事項	—	・地表及び地中観測記録の再現解析	・地表及び地中観測記録の再現解析	・地表及び地中観測記録の再現解析	・地表観測記録の再現解析
結果の信頼性	○	×	×	×	×	



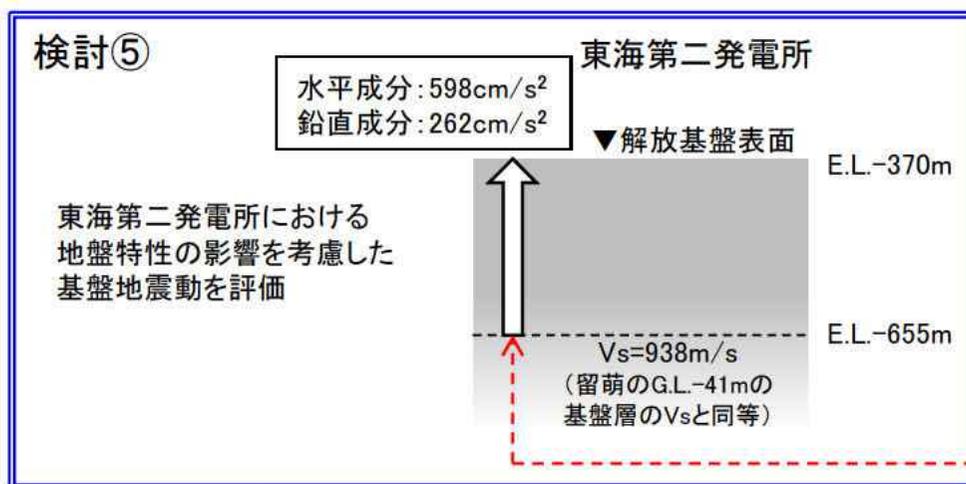
2004年留萌支庁南部地震のHKD020(港町)の観測記録については、信頼性のある基盤地震動が評価できたと考えられることから、震源を特定せず策定する地震動として考慮する。

2004年北海道留萌支庁南部地震として考慮する地震動の策定



- 2004年北海道留萌支庁南部地震のK-NET HKD020(港町)観測点における基盤地震動はS波速度938m/sの基盤層において評価されているため、東海第二発電所の地盤モデルにより地盤特性の影響を考慮した解放基盤表面における地震動を評価する。

	佐藤ほか(2013)		検討①	検討②	検討③	検討④
	水平成分	鉛直成分	水平成分	水平成分	鉛直成分	鉛直成分
G.L. 0m ~ G.L.-6m	室内試験結果を考慮した等価線形解析	体積弾性率一定と仮定した線形解析	室内試験結果を考慮した等価線形解析	室内試験結果を考慮した等価線形解析	表層部のPS検層を再実施し、地盤モデルに反映	地下水位の状況を踏まえポアソン比一定とした線形解析
G.L.-6m ~ G.L.-41m	減衰定数を一律1%とした線形解析			減衰定数を一律3%とした線形解析		
最大加速度	585 cm/s ²	—	561 cm/s ²	609 cm/s ²	—	—
	—	296 cm/s ²	—	+	306 cm/s ²	262 cm/s ²

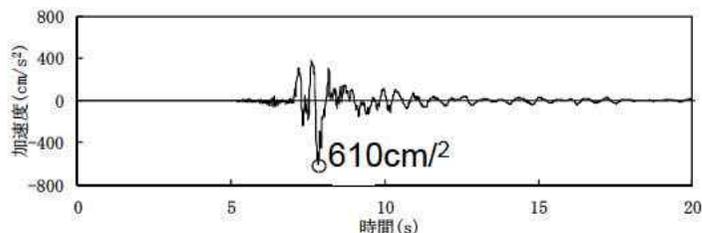


※ 地盤物性の影響を評価するにあたり、はざとり解析の不確かさ等を考慮して、最も大きい最大加速度値の検討結果を考慮することにより、保守的な設定とする。

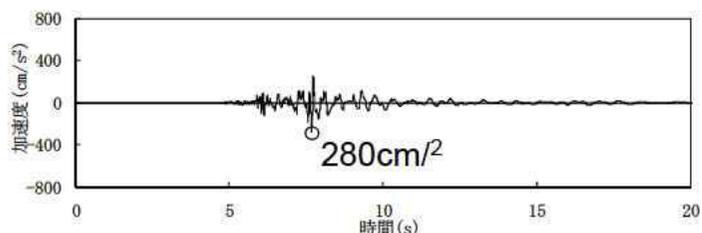
「震源を特定せず策定する地震動」として考慮する地震動



- 加藤ほか(2004)による応答スペクトル, 及び, 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果(水平成分: 598cm/s^2 鉛直成分: 262cm/s^2)に保守性を考慮した, 水平成分 610cm/s^2 , 鉛直成分 280cm/s^2 の地震動を, 震源を特定せず策定する地震動として考慮する。



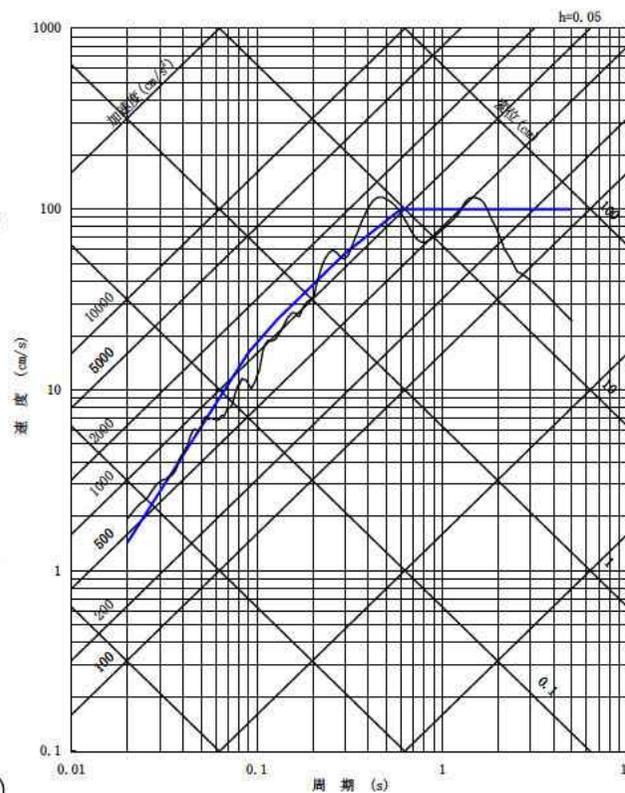
水平成分



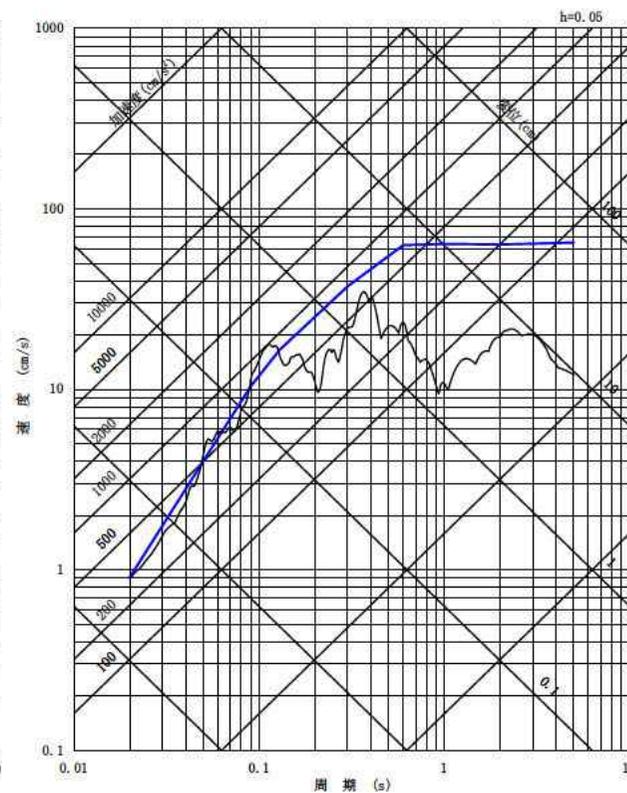
鉛直成分

加速度時刻歴波形

〔2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動〕



水平成分



鉛直成分

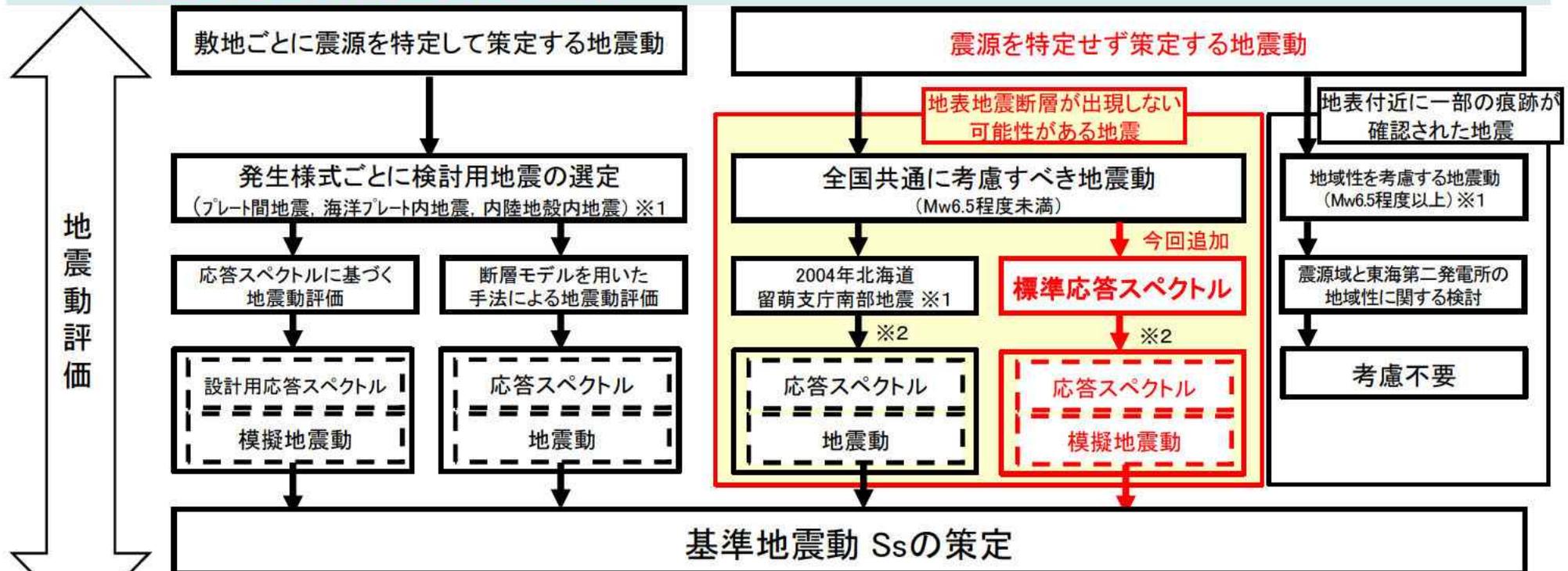
擬似速度応答スペクトル

6. 震源を特定せず策定する地震動

(2) 標準応答スペクトルの知見を用いた評価

基準地震動Ssの策定フロー

- これまで基準地震動Ssは「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」について評価し、8波の基準地震動Ssを策定していた。
- このうち、「震源を特定せず策定する地震動」は、全国共通に考慮すべき地震(Mw6.5未満の地震)として、2004年北海道留萌支庁南部地震をもとに基準地震動Ssを策定していた。
- 2021年4月21日の基準規則の解釈の改正により、標準応答スペクトルの知見を用いることが定められたため、標準応答スペクトルに基づく地震動評価を行った。
- 標準応答スペクトルに基づく地震動評価を行った結果、**基準地震動Ssを一部周期帯で上回ることから、新たに基準地震動Ssを追加した。**

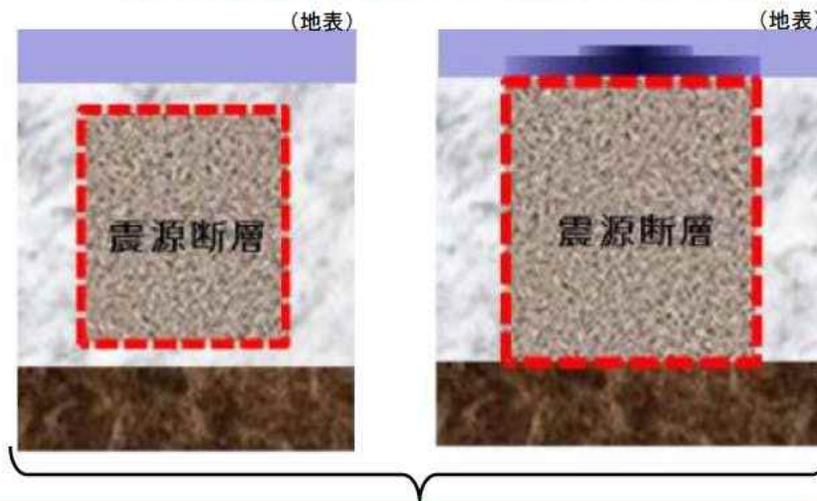


※1 プレート間地震, 海洋プレート内地震に係る地震動評価は, 第4回ワーキングチームで説明しており, 内陸地殻内地震, 2004年北海道留萌支庁南部地震, 地域性を考慮する地震動に係る地震動評価は, 第5回ワーキングチームで説明している。
 ※2 地盤物性の違いを考慮して評価

震源を特定せず策定する地震動とは

- 震源を特定せず策定する地震動とは、全ての敷地において考慮する地震動である。
- これらの地震動には、「**地表地震断層が出現しない可能性がある地震**」と「**地表付近に一部の痕跡が確認された地震**」がある。
- 事業者による震源を特定せず策定する地震動の評価にあたっては、震源と活断層とを関連付けることが困難な過去の内陸地殻内地震の震源近傍における観測記録を基に、各種の不確かさを考慮して、敷地の地盤物性に応じた応答スペクトルを設定して策定する。

地表地震断層が出現しない可能性がある地震



全国共通に考慮すべき地震 (Mw6.5程度未満の地震)

断層破壊領域が地震発生層の内部にとどまり、国内においてどこでも発生すると考えられる地震で、震源の位置及び規模が推定できない地震

地表付近に一部の痕跡が確認された地震



地域性を考慮する地震 (Mw6.5程度以上の地震)

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、地表地震断層としてその全容を表すまでには至っておらず、震源の規模が推定できない地震

基準規則の解釈

【改正前】

➤ 原子力規制委員会

震源を特定せず策定する地震動のうち、「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」について、審査ガイドの14地震を対象に検討を行うことを求めた。

➤ 原子力事業者

審査ガイドの14地震の観測記録を収集し、敷地に及ぼす影響の大きい地震動として5地震を選定し、そのうち、信頼性のある基盤地震動が推定できた「2004年北海道留萌支庁南部地震」を検討・評価していた。



【改正後】

➤ 原子力規制委員会

「地表地震断層が出現しない可能性がある地震」については、地表地震断層が出現しない可能性がある地震(Mw6.5程度未満)の内陸地殻内地震のうち、震源近傍の地震動記録を統計的に処理を行って定めることとした。

これを、全国標準的な応答スペクトル(標準応答スペクトル)として策定し、検討を行うことを求めた。

➤ 原子力事業者

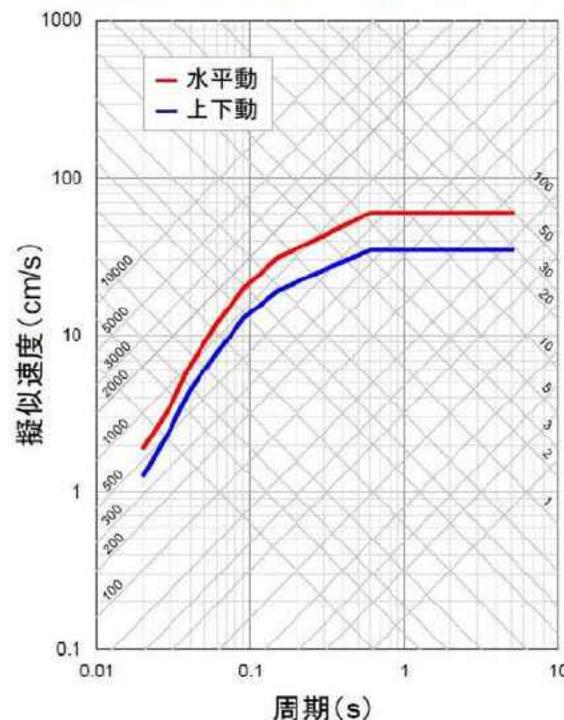
「2004年北海道留萌支庁南部地震」に加え、「標準応答スペクトル」を検討・評価することとなった。

- 標準応答スペクトルは、原子力規制委員会が**地表地震断層が出現しない可能性がある過去の内陸地殻内地震**の地震動観測記録の収集・分析を行い、これら地震動記録について統計的な手法を用いた処理を行うなどして策定された**全国標準的な応答スペクトル**である。
- 標準応答スペクトルは全国共通に考慮すべき地震動であることから、地域的な特徴を極力低減させて普遍的な地震動レベルを設定するために、地震基盤相当面(地震基盤と同等とみなすことができる地盤の解放面(せん断波速度Vs2200m/s以上の地盤)。地震基盤とは、地盤による影響を受けず、震源からの距離がほとんど同じであれば、地震動の増幅がほとんど同じとなる基盤(Vs3,000m/s以上。))で定義されている。

地震観測記録の収集条件

期 間	2000年～2017年の18年間
地震規模	Mw5.0～6.6
震源深さ	20km以浅
観測記録	震央距離30km以内のKiK-net観測地点における地表・地中地震計の地震観測記録(NS, EW, UD成分)
対象地震	89地震

擬似速度応答スペクトル(h=5%)



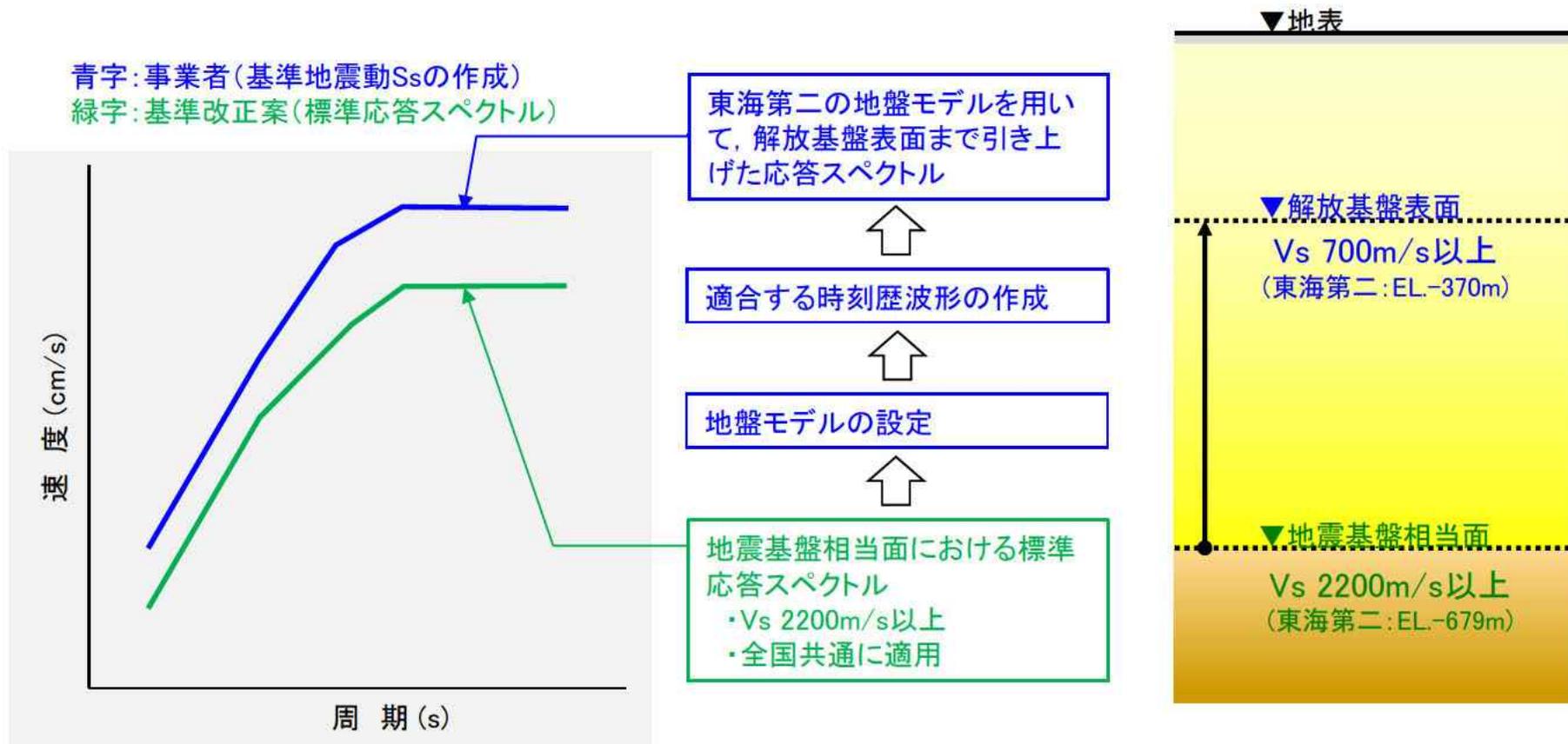
コントロールポイント

周期 (s)	水平動	上下動
	擬似速度 (cm/s)	擬似速度 (cm/s)
0.02	1.910	1.273
0.03	3.500	2.500
0.04	6.300	4.400
0.06	12.000	7.800
0.09	20.000	13.000
0.15	31.000	19.000
0.30	43.000	26.000
0.60	60.000	35.000
5.00	60.000	35.000

(原子力規制委員会(2021))

地震基盤相当面における標準応答スペクトル

- 標準応答スペクトルに基づく地震動評価のため、地震基盤相当面で定義された標準応答スペクトルをもとに時刻歴波形を作成した上で、東海第二発電所の地盤モデルを用いて、解放基盤表面(著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な拡がりを持って想定され、基準地震動 S_s を策定するための基盤の表面(V_s 700m/s以上))での地震動評価を行った。



①地盤モデルの設定

下記により速度構造，減衰定数を設定し，地盤モデルを作成する。

(1) 速度構造と地震基盤相当面位置の設定

大深度ボーリング調査結果を含めた地下構造調査結果に基づき，検討に用いる速度構造と地震基盤相当面位置を設定する。

(2) 減衰定数の設定

大深度地震計の地震観測記録を用いた伝達関数の逆解析により，地震基盤相当面から解放基盤表面までの区間を含め，地震基盤相当面以深から地表までの減衰定数を設定する。

②地震基盤相当面位置における模擬地震波の検討

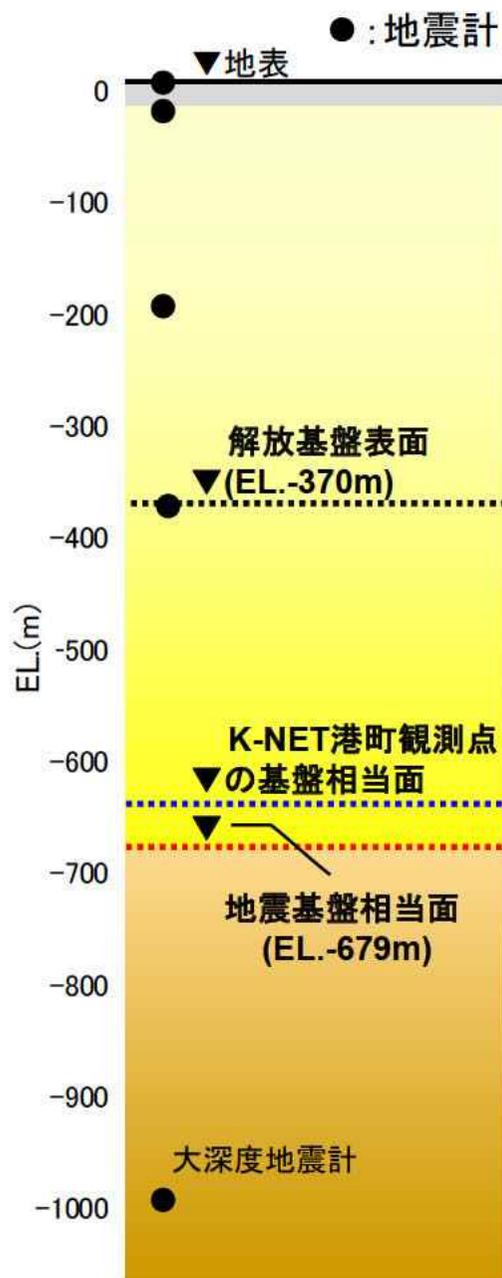
標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を複数の手法により検討する。

③解放基盤表面の地震動評価

地震基盤相当面位置から解放基盤表面までの地盤増幅特性を考慮した地震動を評価する。また，複数の手法により検討した地震動評価結果について比較検討を行う。

④基準地震動 S_s の策定

既許可の基準地震動 S_s -D1(応答スペクトルに基づく地震動評価により策定した基準地震動 S_s)との比較より，基準地震動 S_s を策定する。



■ 敷地における地盤増幅特性の考慮

敷地における解放基盤表面は $V_s 700\text{m/s}$ 以上となる $\text{EL.}-370\text{m}$ 位置に設定している。一方、標準応答スペクトルが地震基盤相当面($V_s 2200\text{m/s}$ 以上の地層)で定義されていることを踏まえ、標準応答スペクトルを解放基盤表面において評価するうえでは、地震基盤相当面から解放基盤表面までの増幅特性を考慮する。

■ 地盤モデルの新規設定

- ・ 既許可の留萌用地盤モデルの検討では、K-NET港町観測点の基盤に相当する層が $V_s 938\text{m/s}$ の層であったことから、地震基盤相当面以浅に着目していた。
- ・ 一方、今回の検討では、標準応答スペクトルが $V_s 2200\text{m/s}$ 以上となる地震基盤相当面で定義されていることから、地震基盤相当面以深まで掘削している大深度ボーリングデータや地震観測記録を精査する必要があると考え、既許可審査以降も蓄積されている地震観測記録等を活用し、標準応答スペクトルに基づく地震動評価のための地盤モデルを新たに設定する。

左図： 東海第二発電所敷地地盤のイメージ図

下記により速度構造, 地震基盤相当面位置, 減衰定数を設定し, 地盤モデルを作成する。

(1) 速度構造及び地震基盤相当面位置の設定

大深度ボーリング調査結果を含めた地下構造調査結果に基づき, 検討に用いる速度構造を設定する。その際, **EL.-679m以浅**と**EL.-679m以深**とで**速度構造が大きく異なるため**, **EL.-679m以浅**と**以深に分けて**, **速度構造を設定する**。

・EL.-679m以浅の速度構造の設定

複数のボーリング調査結果より求めた標高依存式を用いて, EL.-679m以浅の速度構造を設定

・EL.-679m以深の速度構造の設定

大深度ボーリングのサスペンション法の結果を用いて, EL.-679m以深の速度構造を設定

・地震基盤相当面位置の設定

EL.-679m以浅と以深の速度構造を基に, $V_s 2200\text{m/s}$ 以上の地震基盤相当面位置を設定

(2) 減衰定数の設定

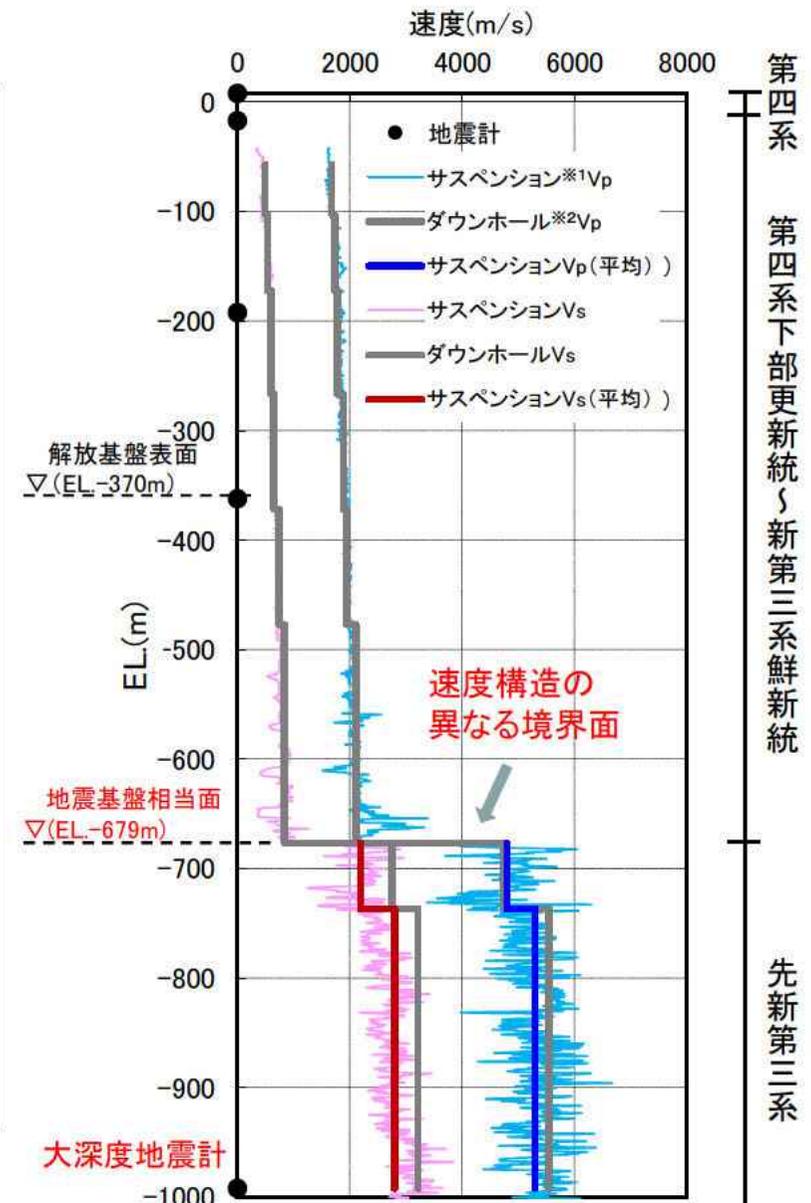
大深度地震計の地震観測記録を用いた伝達関数の逆解析により, **地震基盤相当面以深から地表までの減衰定数を設定する**。

※1 サスペンション

起震と受信が一体となった機器をボーリング孔内に挿入し, 孔内に設置された2つの受信器により孔壁周辺の地盤を伝わる波動の速度を測定する手法

※2 ダウンホール

地表で弾性波(P波, S波)を発生させ, ボーリング孔内に設置した受振器により地盤を伝わる波動の速度を測定する手法

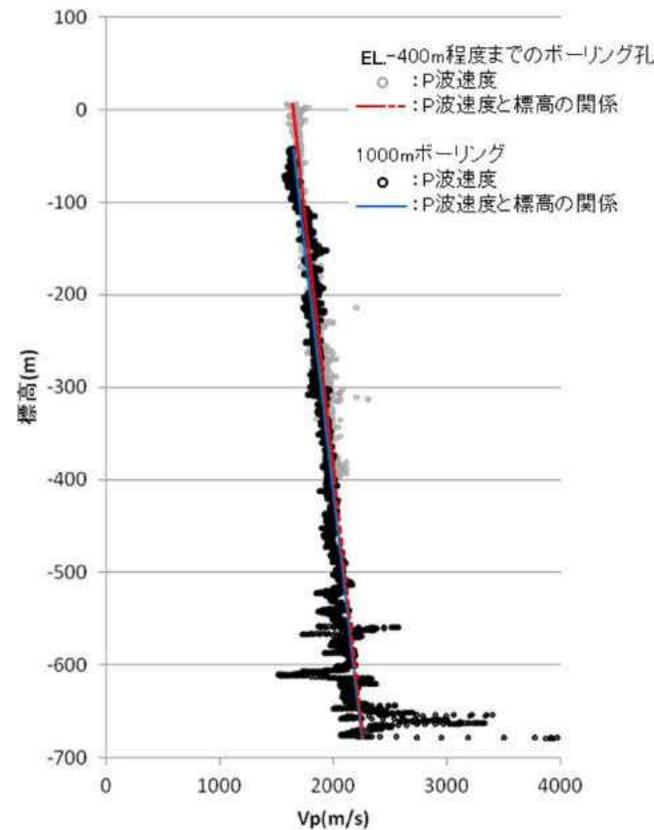
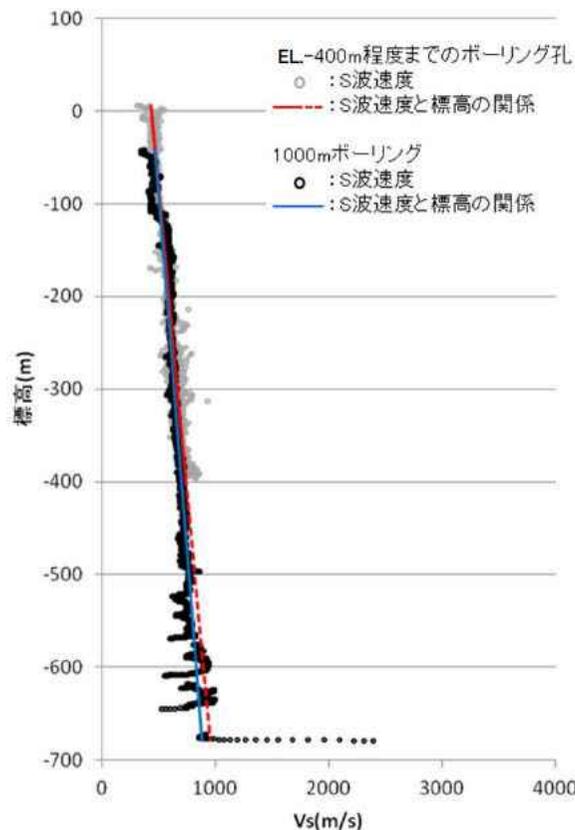


大深度ボーリングのPS検層結果の例

地盤モデルの設定 速度構造 地震基盤相当面(EL.-679m)以浅

■EL.-679m以浅(解放基盤表面～新第三系鮮新統下端)

- ・Vs, Vpとも深くなるにつれ値が漸増する構造であり, また複数の調査結果と整合していることから, 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討においては, 解放基盤表面からEL.-679m(新第三系鮮新統下端)までの速度構造を標高依存式により設定している。
- ・標準応答スペクトルによる地震動の検討に際しても, 解放基盤表面からEL.-679m(新第三系鮮新統下端)までの速度構造は, 既許可の2004年北海道留萌支庁南部地震の検討で用いたものを採用する。



久米層における
地盤速度と標高の関係

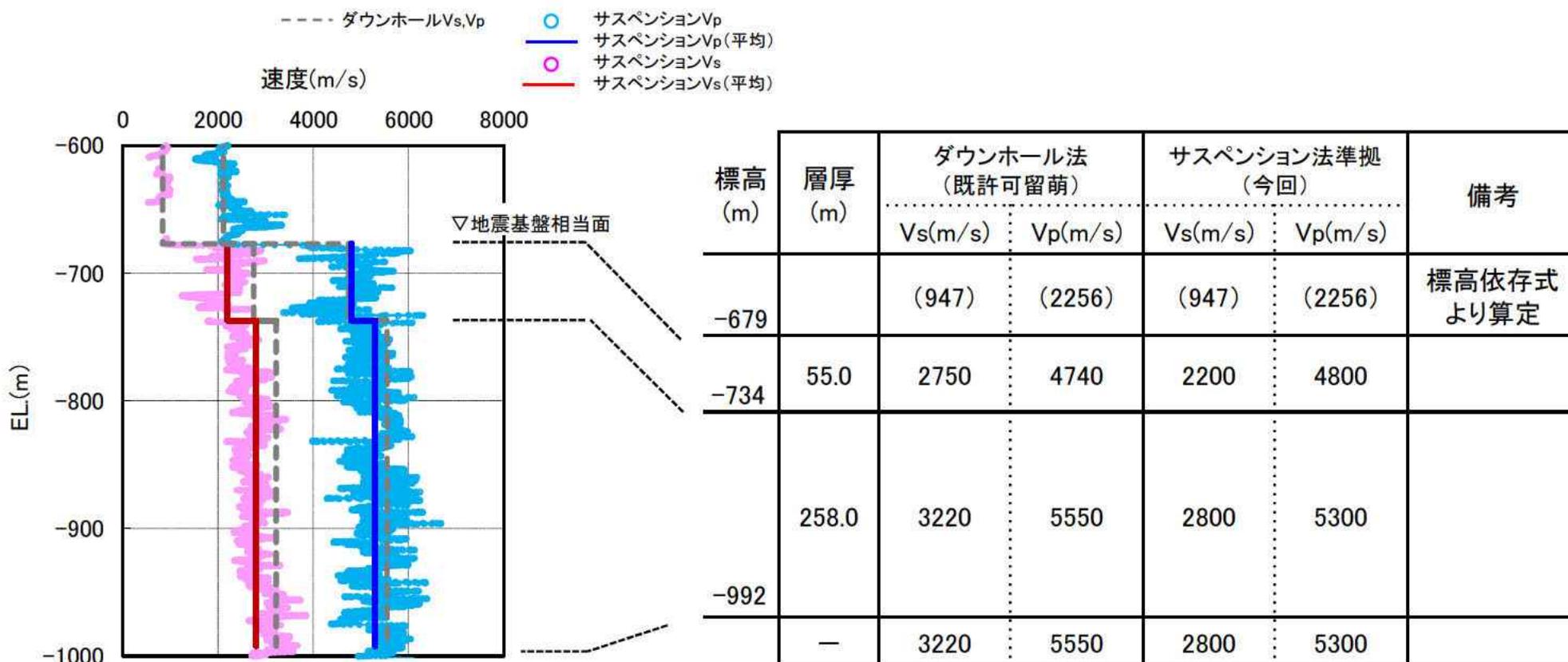
$$V_s = 0.433 - 7.71 \times 10^{-4} \cdot Z$$

$$V_p = 1.65 - 9.09 \times 10^{-4} \cdot Z$$

ここで, Vs: S波速度(km/s)
Vp: P波速度(km/s)
Z: 標高(m)

■EL.-679m以深(先新第三系)

- 地震基盤相当面以深では、大深度ボーリングのダウンホール法とサスペンション法との結果で差が生じていることから速度構造を再検討する。今回は、サスペンション法に準拠して速度構造を設定する。具体的には、ダウンホール法における同一層内で、サスペンション法のVs、Vpをそれぞれ平均して求めた値を用いる。
- 地震基盤相当面位置は、Vs2200m/s以上に相当する敷地での層の上面としてEL.-679m(Vs2200m/s)に設定する。



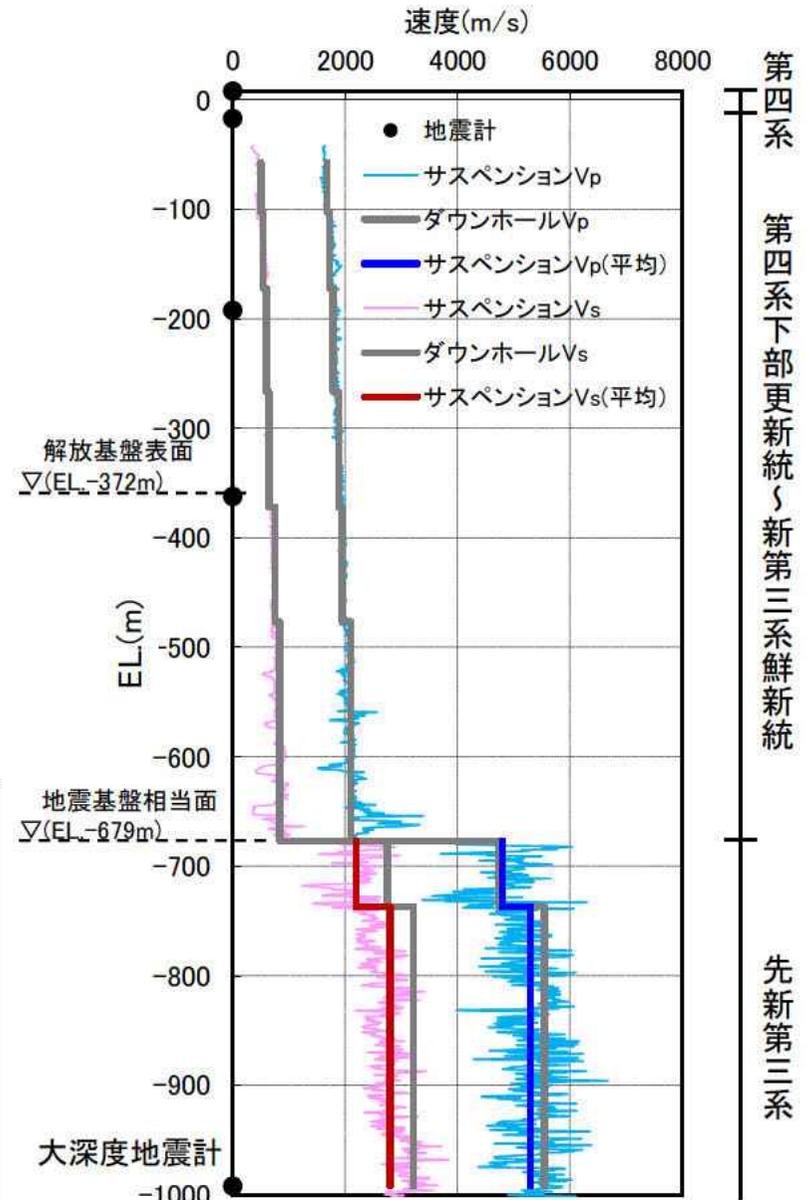
地盤モデルの設定 減衰定数

■大深度地震計を含む鉛直アレイ地震観測記録を用いて減衰定数を設定する。

- ・大深度地震計は地震基盤相当面より深い位置(EL.-992m)に設置されており、他の鉛直アレイ地震観測記録と併用することで、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地震波の伝播の状況を直接調べることができる。そこで、**大深度地震計を含めた鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数の逆解析により、地震基盤相当面以深から地表までの減衰定数(Q値)を求める。**
- ・伝達関数の逆解析による減衰定数(Q値)の同定範囲は地表面からEL.-992mの範囲とする。
- ・地盤の減衰定数 h は一般に振動数依存が認められ、高振動数になるほど減衰定数 h が低下する性質があるが、それには下限が存在すると考えられることから(例えば佐藤他(2006))、減衰定数 h の同定に際しては、減衰定数 h の下限を考慮する。

参考 評価方法との比較

項目		2004年北海道留萌支庁 南部地震の検討	本検討
設定 方法	地表～ 解放基盤表面	EL.-372m以浅の地震観測記録による同定解析	大深度地震観測記録を含めた同定解析
	解放基盤表面～ 地震基盤相当面	上記結果のうち、第四系下部更新統～新第三系鮮新統の値を設定	
	地震基盤相当面 以深	大深度地震観測記録を含めた同定解析	
減衰定数 h のモデル		振動数依存 (下限考慮なし)	振動数依存 (下限考慮あり)

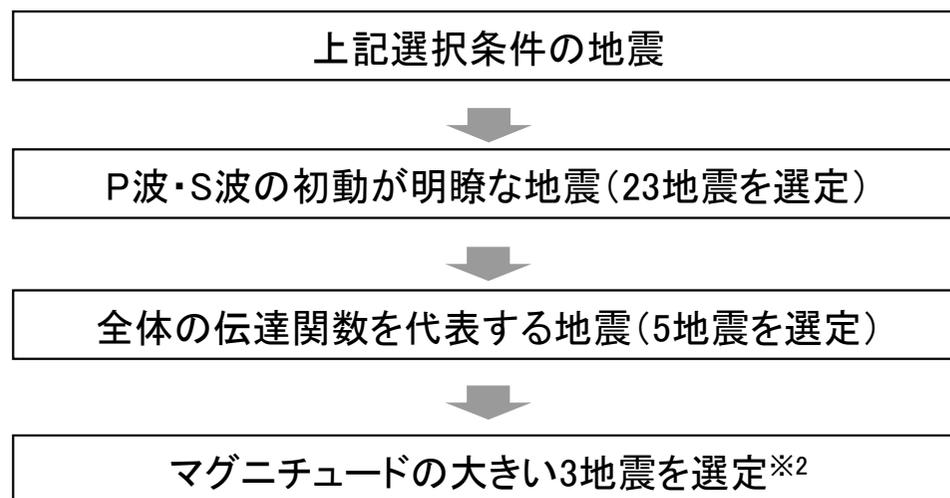


大深度ボーリングのPS検層結果の例

- 地盤同定解析に用いる検討対象地震については、標準応答スペクトルの策定において対象とされた地震同様、内陸地殻内地震とし、具体的には下記に示す手順に従って選定する。

【検討対象地震の選定条件】

- ・地震発生様式 : 内陸地殻内地震
- ・対象期間^{※1} : 2012年8月～2019年1月
- ・震源深さ : 25km以浅

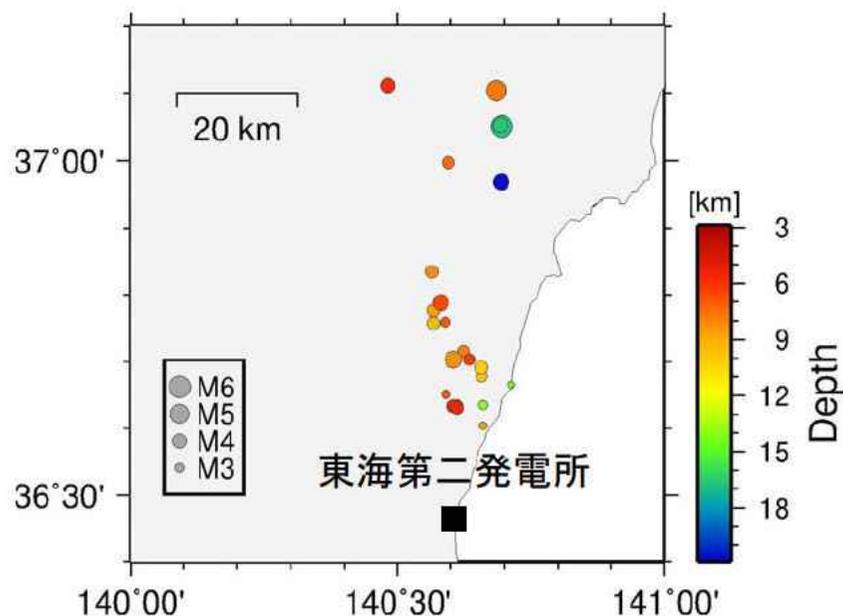


地盤同定解析に用いる地震の選定フロー

※1 検討対象とした地震記録は、大深度地震観測開始時期の2012年から地盤同定解析を開始した2019年までのものとした。

※2 比較的規模の大きい地震を選定することで、振幅が大きく、また広帯域の振動数成分が含まれることになる。その結果、S/Nが大きくなり、地盤同定解析に用いる伝達関数の精度が高まる。

■2012年8月～2019年1月に観測した地震から、ノイズや機器の不具合による影響のないデータを選定し、P波・S波の初動が明瞭に見られた下記に示す23地震を選定する。



選定した23地震の震央分布図

23地震の諸元

No.	発震日時		震央位置		マグニチュード	震源深さ (km)	震央距離 (km)
			緯度(度)	経度(度)			
1	2012/08/10	07:18	36.7590	140.5900	3.2	7.2	32.6
2	2012/11/12	00:12	36.6350	140.6600	3.0	13.9	19.4
3	2013/01/13	02:54	36.6510	140.5910	3.1	7.0	20.6
4	2013/01/15	09:08	36.6040	140.6600	2.9	8.8	16.1
5	2013/01/31	23:53	36.7030	140.6040	4.7	8.4	26.0
6	2013/02/24	13:55	36.9680	140.6940	4.5	20.6	56.0
7	2013/04/25	16:16	37.1110	140.4820	4.2	6.0	72.5
8	2013/06/04	13:09	36.7580	140.5670	3.7	9.6	32.6
9	2013/07/12	03:18	36.7760	140.5670	3.8	8.7	34.6
10	2013/07/23	12:02	37.1040	140.6850	5.2	7.8	71.2
11	2013/08/14	09:45	36.6330	140.6040	3.8	6.3	18.6
12	2013/08/14	14:31	36.6330	140.6100	4.1	6.3	18.6
13	2013/08/19	11:22	36.6310	140.6120	3.8	5.7	18.3
14	2013/09/20	02:25	37.0510	140.6950	5.9	16.7	65.0
15	2013/09/26	14:44	36.7160	140.6230	3.6	8.0	27.8
16	2013/09/27	07:37	37.0530	140.6920	4.2	16.7	65.6
17	2013/11/12	03:28	36.7030	140.6338	3.6	6.4	26.4
18	2014/01/09	04:08	36.7885	140.5810	4.6	6.6	35.9
19	2014/03/27	14:20	36.8345	140.5643	3.8	8.3	41.1
20	2014/04/01	01:15	36.6780	140.6570	3.6	10.0	24.0
21	2014/07/03	07:57	36.6910	140.6560	4.0	10.2	25.4
22	2014/08/08	03:47	36.6660	140.7130	2.5	14.6	24.2
23	2014/11/17	08:59	36.9970	140.5950	3.8	7.5	59.0

地盤モデルの設定 減衰定数 地盤同定解析に用いる地震(3/3)

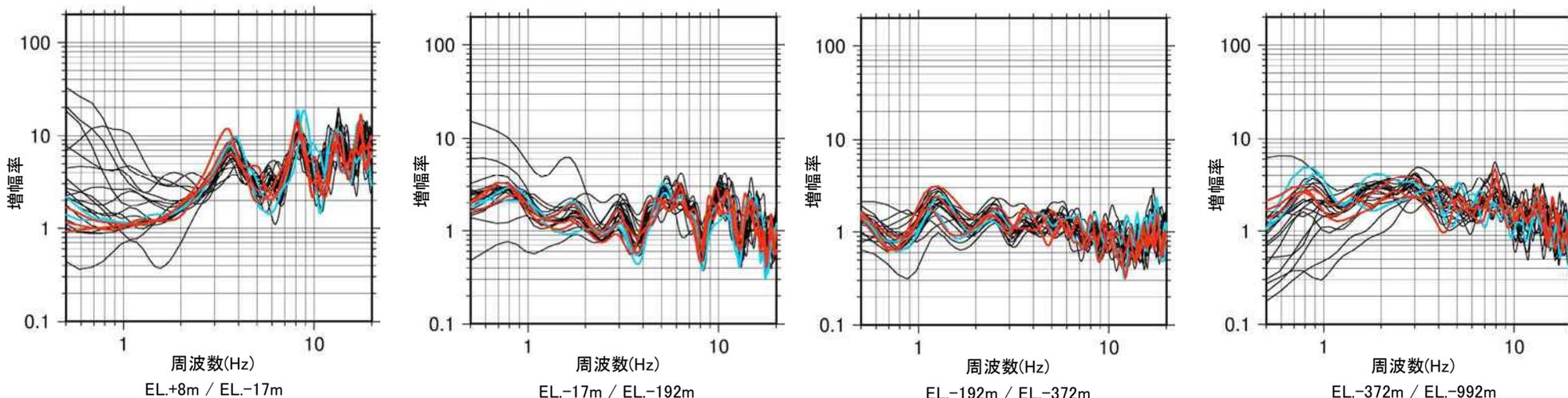
■P波・S波の初動が明瞭に見られた23地震の伝達関数を比較して、全体の伝達関数を代表する地震を5地震選定し、このうちマグニチュードが大きい3地震を地盤同定解析に用いる地震に選定する。

伝達関数を代表する5地震

No.	発震日時		震央位置		マグニチュード	震源深さ (km)	震央距離 (km)
			緯度(度)	経度(度)			
5	2013/01/31	23:53	36.7030	140.6040	4.7	8.4	26.0
6	2013/02/24	13:55	36.9680	140.6940	4.5	20.6	56.0
14	2013/09/20	02:25	37.0510	140.6950	5.9	16.7	65.0
18	2014/01/09	04:08	36.7885	140.5810	4.6	6.6	35.9
21	2014/07/03	07:57	36.6910	140.6560	4.0	10.2	25.4

網掛け：地盤同定解析に用いる3地震

— 選定した5地震のうち、地盤同定解析に用いる3地震
 — 選定した5地震のうち、地盤同定解析に用いない2地震
 — 残りの18地震



備考
 伝達関数は、0.5HzのParzen windowで平滑化。

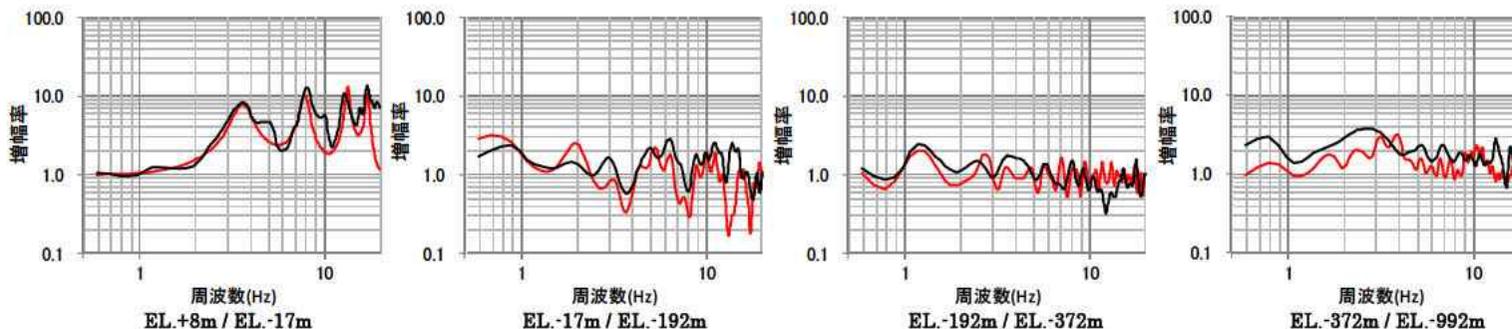
23地震の伝達関数(Transverse方向)

- ・P波・S波の初動が明瞭に見られた23地震の伝達関数については、3Hz以下の周波数帯では、イベント毎のばらつきが大きいものの3Hz以上の周波数帯では小さくなっている。
- ・全体の伝達関数を代表するよう5地震を選定した段階で、3Hz以下も含めた全周波数帯において伝達関数のばらつきは小さくなり、地盤同定解析に用いる3地震と他の2地震の伝達関数に大きな差はない。

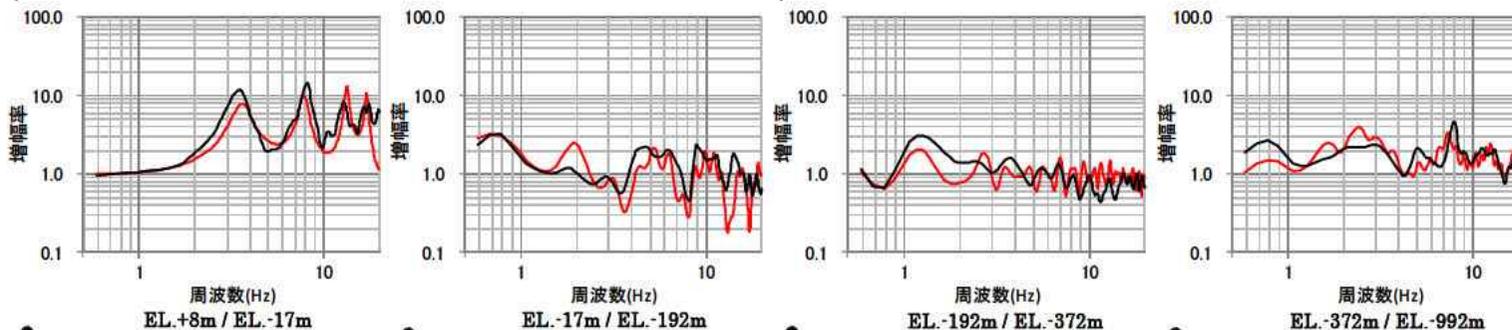
■地盤同定解析により推定した地盤モデルの伝達関数は、観測記録の伝達関数と整合している。

— 同定結果
— 観測記録

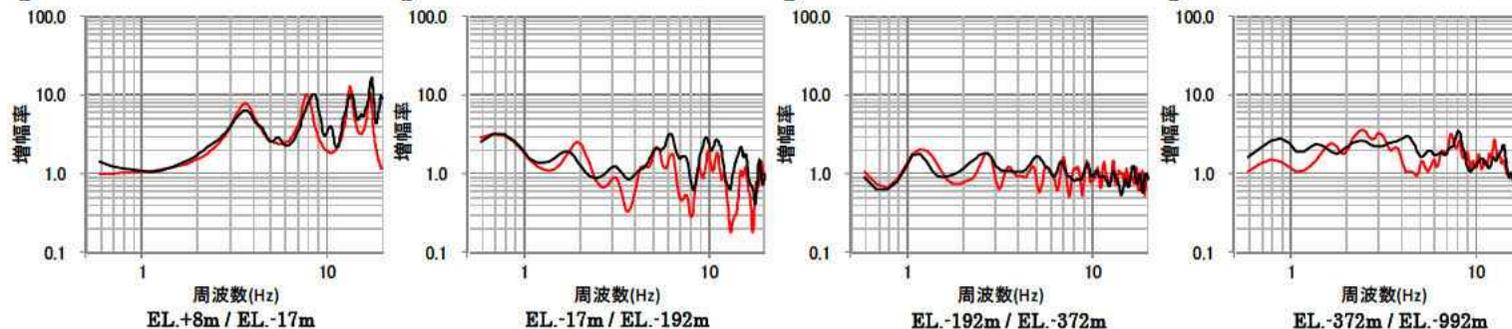
2013年1月31日
入射角: 55.63°



2013年9月20日
入射角: 30.22°



2014年1月9日
入射角: 34.30°



観測記録の伝達関数と同定結果の伝達関数

対象周波数は、0.5~20Hzをプロットした。
地震観測記録の伝達関数は、0.5HzのParzen windowで平滑化した。

地盤モデルの設定 地盤モデルの設定結果

■地盤同定解析に基づき新たに地盤モデルを設定し、地震基盤相当面から解放基盤表面の地盤増幅特性を考慮して地震動を推定した。

新たに設定した地盤モデル (減衰定数hは $Q=1/(2h)$ の関係より算定)

固定パラメータ						同定結果(f:周波数(Hz))																	
EL. (m)	層厚 (m)	地層	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	$Q=(V_s/n)(f/f_0)^{\alpha}$			$Q=(V_p/n)(f/f_0)^{\alpha}$			減衰定数h(f)											
						水平			鉛直			水平	鉛直										
						n	α	f ₀	n	α	f ₀												
● 8.0	2.5	第四系	130	280	1.71	5	1.32	18.74	44	0.91	19.45	0.921f ^{-1.32} (f≤18.74)	1.170f ^{0.91} (f≤19.45)										
												0.019 (f>18.74)	0.079 (f>19.45)										
5.5												0.793f ^{-1.32} (f≤18.74)	0.813f ^{0.91} (f≤19.45)										
												0.017 (f>18.74)	0.055 (f>19.45)										
1.0												0.389f ^{-1.32} (f≤18.74)	0.206f ^{0.91} (f≤19.45)										
	0.008 (f>18.74)	0.014 (f>19.45)																					
-7.0	8.0		308	1589	1.66							0.250f ^{-1.32} (f≤18.74)	0.217f ^{0.91} (f≤19.45)										
												0.005 (f>18.74)	0.015 (f>19.45)										
-15.0	8.0		478	1509	1.82																		
● -17.0	2.0	第四系 下部更新統 ～ 新第三系鮮 新統	477	1753	1.69	13	1.05	6.78	28	1.05	31.74	0.102f ^{-1.05} (f≤6.78)	0.301f ^{-1.05} (f≤31.74)										
	0.014 (f>6.78)											0.008 (f>31.74)											
-106.0	89.0																						
	62.0												557	1742	1.74							0.087f ^{-1.05} (f≤6.78)	0.303f ^{-1.05} (f≤31.74)
																						0.012 (f>6.78)	0.008 (f>31.74)
-168.0	24.0																						
● -192.0	68.0		669	2067	1.78							0.072f ^{-1.05} (f≤6.78)	0.256f ^{-1.05} (f≤31.74)										
												0.010 (f>6.78)	0.007 (f>31.74)										
-260.0	108.0		756	2256	1.82							0.064f ^{-1.05} (f≤6.78)	0.234f ^{-1.05} (f≤31.74)										
												0.009 (f>6.78)	0.006 (f>31.74)										
▽解放基盤表面	2.0		790	2000	1.85							0.061f ^{-1.05} (f≤6.78)	0.264f ^{-1.05} (f≤31.74)										
												0.008 (f>6.78)	0.007 (f>31.74)										
	2.0											0.061f ^{-1.05} (f≤6.78)	0.264f ^{-1.05} (f≤31.74)										
												0.008 (f>6.78)	0.007 (f>31.74)										
● -372.0	104.0		790	2000	1.85							0.061f ^{-1.05} (f≤6.78)	0.264f ^{-1.05} (f≤31.74)										
												0.008 (f>6.78)	0.007 (f>31.74)										
-476.0	90.0		835	2124	1.89							0.058f ^{-1.05} (f≤6.78)	0.249f ^{-1.05} (f≤31.74)										
												0.008 (f>6.78)	0.007 (f>31.74)										
-566.0	89.0		904	2205	2.00							0.054f ^{-1.05} (f≤6.78)	0.240f ^{-1.05} (f≤31.74)										
												0.007 (f>6.78)	0.006 (f>31.74)										
-655.0	24.0		947	2256	2.07							0.051f ^{-1.05} (f≤6.78)	0.234f ^{-1.05} (f≤31.74)										
												0.007 (f>6.78)	0.006 (f>31.74)										
-679.0	55.0	先新第三系	2200	4800	2.65	53	0.21	1.31	20	0.23	16.46	0.013f ^{0.21} (f≤1.31)	0.004f ^{0.23} (f≤16.46)										
																		0.012 (f>1.31)	0.002 (f>16.46)				
-734.0	258.0			2800	5300							2.78							0.010f ^{0.21} (f≤1.31)	0.004f ^{0.23} (f≤16.46)			
												0.009 (f>1.31)	0.002 (f>16.46)										
● -992.0	-		2800	5300	2.78																		

●: 地震計位置

地震基盤相当面位置における模擬地震波の検討 模擬地震波の作成

- ・審査ガイドでは、設定された応答スペクトルに基づいて模擬地震波を作成する場合、複数の方法により検討を行うことを求めている。
- ・敷地の地下構造に関しては、標準応答スペクトルが定義されている地震基盤相当面位置(EL.-679m)と解放基盤表面位置(EL.-370m)が異なることから、地震動の位相の違いが地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播の特性に与える影響を検討するため、模擬地震波作成に用いる位相について複数考慮する。
- ・考慮する位相としては、既許可の模擬地震波作成において使用実績のある乱数位相と実現象を評価に反映することができる実観測記録の位相とする。
- ・地震動評価結果を比較した上で、標準応答スペクトルに基づく地震動評価に用いる位相を採用する。

地震動評価位置	乱数位相による地震動評価 (地震動の計算に必要な位相をランダムに発生させて設定したもの)	実観測記録の位相による地震動評価 (地震動の計算に必要な位相を地震観測記録の分析に基づいて設定したもの)
解放基盤表面 (EL.-370m)	新しく設定した地盤モデルを用いて解放基盤表面の地震動を評価する。	新しく設定した地盤モデルを用いて解放基盤表面の地震動を評価する。
地震基盤相当面 (EL.-679m)	<ul style="list-style-type: none"> ・乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせによって模擬地震波を作成する。 ・Noda et al.(2002)に基づき振幅包絡線を設定する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・実観測記録の位相を与えて模擬地震波を作成する。 ・用いる観測記録については、敷地における適切な記録があればこれを用いることとするが、そのような記録がない場合には敷地周辺における観測点の記録を用いる。

地震動の位相の違いが地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播の特性に与える影響を検討し、
標準応答スペクトルに基づく地震動評価に用いる位相を採用

地震基盤相当面位置における模擬地震波の検討 乱數位相による模擬地震波の作成

■乱數位相を用いた模擬地震波は、乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせによって作成する。振幅包絡線の経時的変化については、Noda et al.(2002)の方法に基づき設定することとし、その設定に必要なMとXeqを設定する。

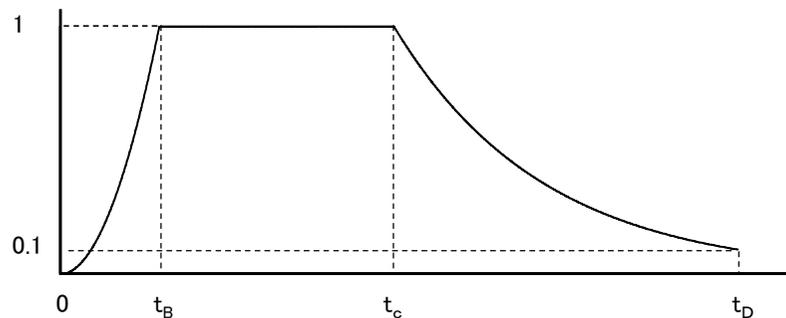
【M（速度波形または変位波形の最大振幅を基に気象庁が発表するマグニチュード）の設定】

原子力規制委員会の審査ガイドにおける「全国共通に考慮すべき地震動」の地震規模は、Mw(断層の面積・剛性率・すべり量から計算されるマグニチュード)6.5程度未滿と記載されており、武村(1990)のMo-M関係及びHanks and Kanamori(1979)のMo-Mw関係によりMw6.5をMに換算すると6.9となる。ここで、審査ガイドでは「Mw6.5程度未滿」と幅をもって示されていることから、換算式から求められるMについても幅を持たせ、模擬地震波の特に強震部の継続時間が長めとなるよう保守的にM7.0として設定する。

【Xeq（面震源から受けるエネルギーと等価なエネルギーを受ける点震源からの距離）の設定】

震源近傍で発生する地震を想定したうえ、継続時間が長めとなるようXeq10kmとして設定する。

模擬地震波	最大加速度 (cm/s ²)	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時的変化(s)		
			t _B	t _C	t _D
水平方向	600	29.80	3.72	16.31	29.80
鉛直方向	400	29.80	3.72	16.31	29.80



振幅包絡線

$$t_B = 10^{0.5M - 2.93}$$

$$t_C - t_B = 10^{0.3M - 1.0}$$

$$t_D - t_C = 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6}$$

$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & 0 \leq t \leq t_B \\ 1 & t_B \leq t \leq t_C \\ \exp[(\ln 0.1)(t - t_C)/(t_D - t_C)] & t_C \leq t \leq t_D \end{cases}$$

- 実観測記録の位相を用いた模擬地震波は、実観測記録の位相を与えて作成する。用いる観測記録の候補としては、敷地に近い位置(震央距離10km以内)で発生した内陸地殻内地震の敷地における観測記録が考えられるが、そのような記録がない場合には、応力場が敷地と類似する周辺の領域における地震基盤相当面($V_s 2200\text{m/s}$ 以上)の観測記録とする。
- 敷地に近い位置(震央距離10km以内)で発生したMw6.5程度未満の内陸地殻内地震の敷地で得られた観測記録(Mj: 5.0~7.0)を収集・整理した結果、そのような観測記録は得られていなかった。
- そこで、敷地と同じ応力場である福島県浜通りから茨城県北部にかけての領域で発生した内陸地殻内地震の揺れを震源近傍で観測した記録(震央距離: 10km以内, Mj: 5.0~7.0)を収集・整理した結果、2011年茨城県北部地震の揺れを震央距離約1kmの地震基盤相当面で観測したKiK-net観測点IBRH13(高萩)の観測記録を用いる。
- 2011年茨城県北部地震のKiK-net観測点用IBRH13(高萩)の観測記録について、佐藤他(2019)により下降波の影響を除去した露頭基盤波が推定されているため、露頭基盤波の位相を用いて実観測記録の位相を用いた模擬地震波を作成する。

2011年茨城県北部地震の概要

発生日時: 2011/03/19 18:56

地震規模: Mj6.1 (Mw5.8)

深さ : 5km

タイプ : 正断層型

震度5強: 茨城県日立市

5弱: 茨城県常陸太田市,

高萩市, 笠間市,

ひたちなか市

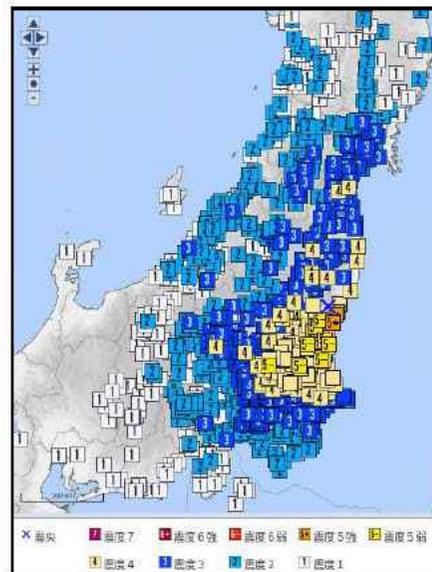
(東海第二発電所周辺は震度4)

KiK-net観測点IBRH13(高萩)の概要

観測点名 : 高萩

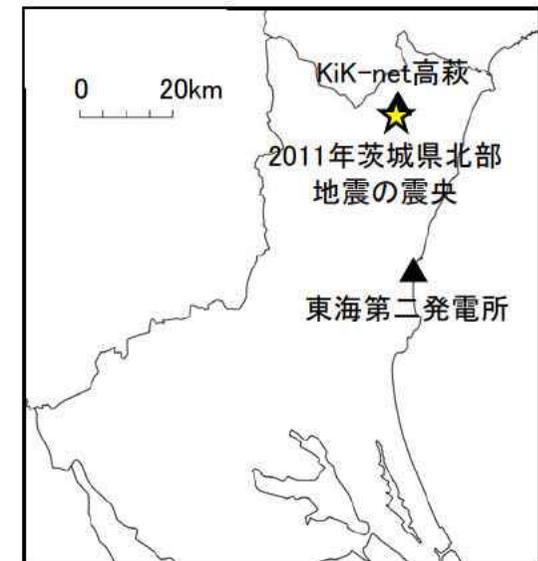
所在地 : 茨城県高萩市大字上君田

地中観測点位置: 深さ100m位置 ($V_s 3000\text{m/s}$)



震度分布図

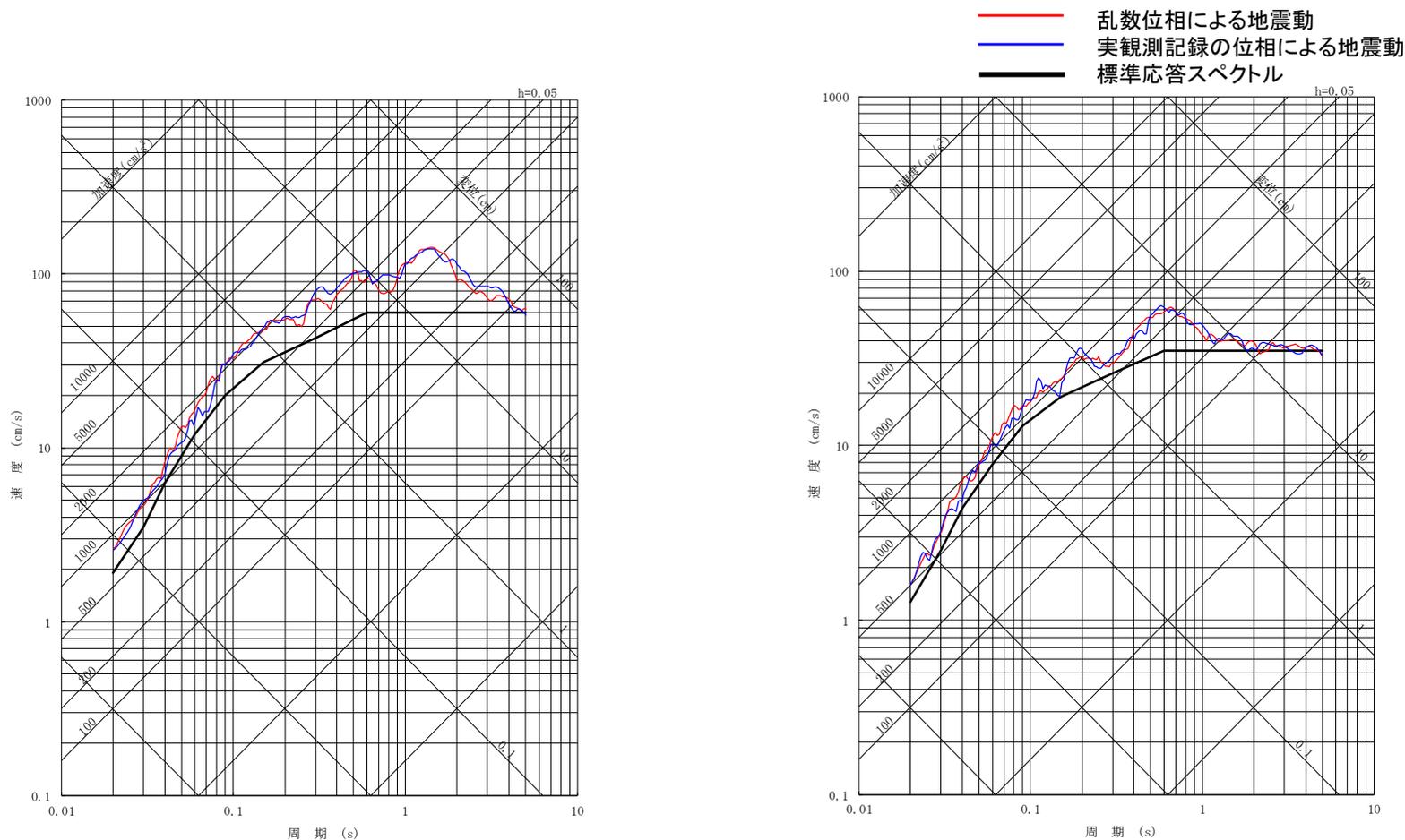
気象庁HPより抜粋・加筆



震央と観測点位置

解放基盤表面の地震動評価 標準応答スペクトルに基づく地震動評価に用いる位相の採用(1/2)

- 乱数位相, 実観測記録の位相による地震動評価結果を比較し, 位相の違いが地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播の特性に与える影響を検討する。
- 乱数位相, 実観測記録の位相による地震動について, 解放基盤表面における応答スペクトルを比較したところ, **両者は同程度であり, 全周期帯において有意な差が生じていないことを確認した。**



水平方向

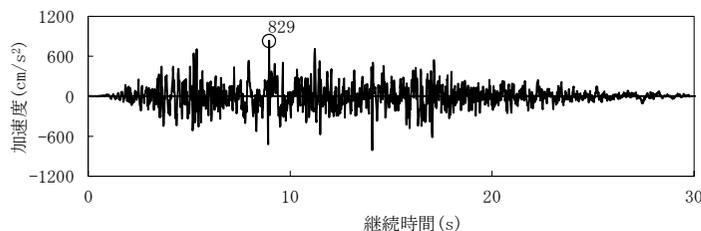
鉛直方向

擬似速度応答スペクトル

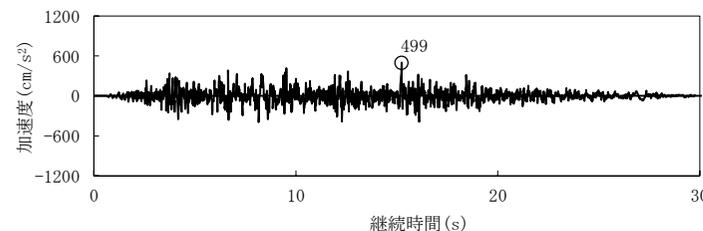
- 乱數位相, 実観測記録の位相を用いた模擬地震波を解放基盤表面まで伝播させ, 時刻歴波形を比較したところ, 強震部の継続時間については, 乱數位相による時刻歴波形の方が長いことを確認した。

【採用】

【解放基盤表面】



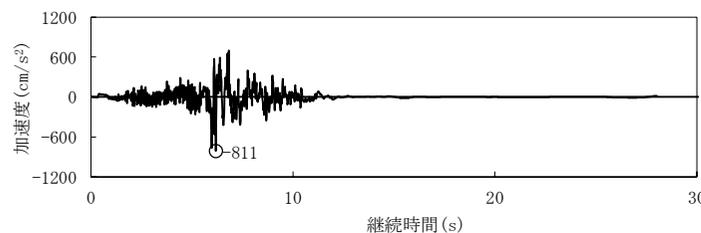
水平方向



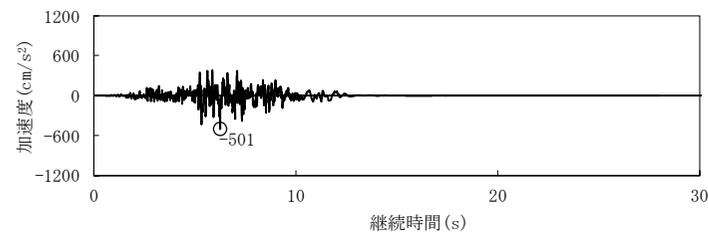
鉛直方向

乱數位相による時刻歴波形

【解放基盤表面】



水平方向



鉛直方向

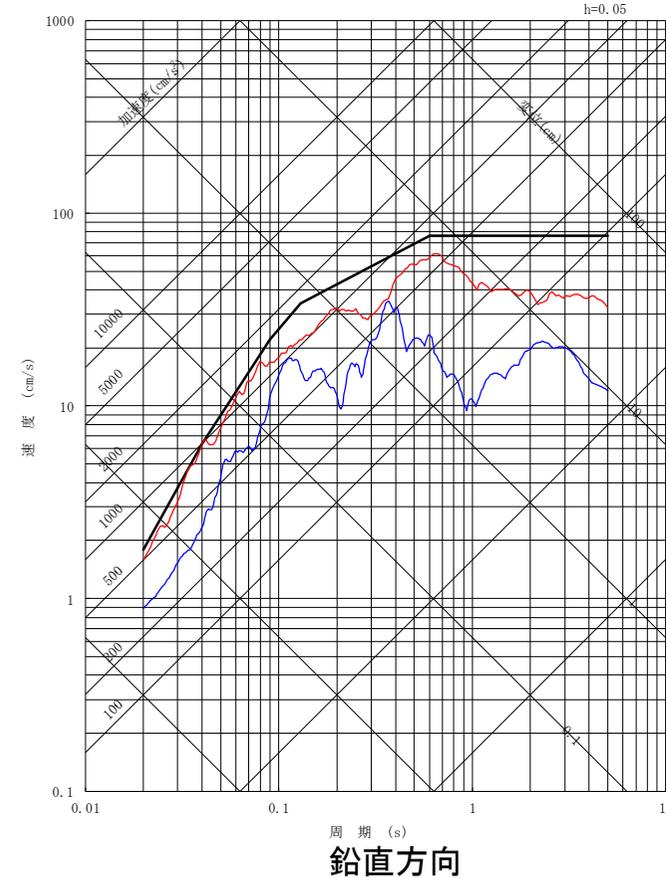
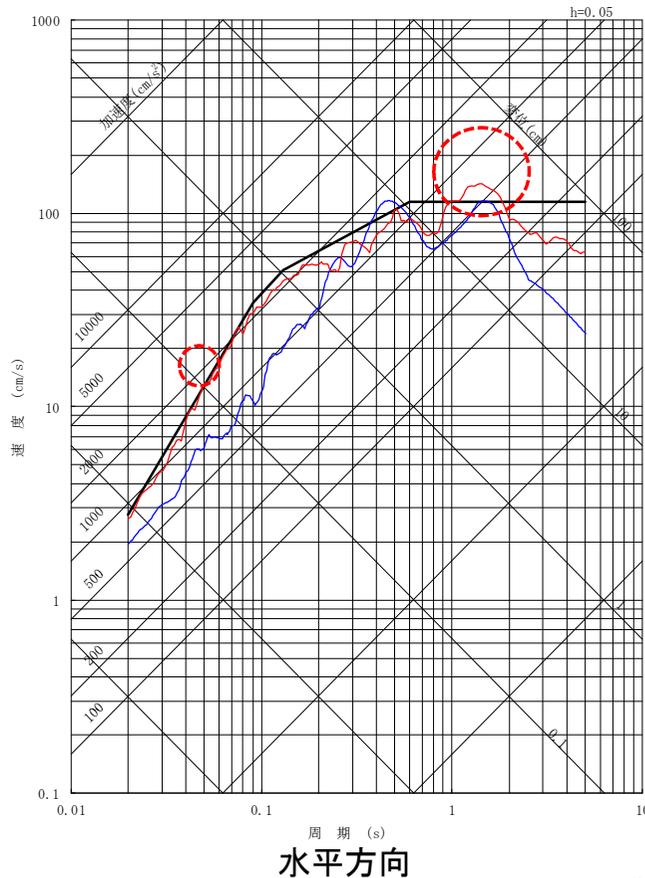
実観測記録の位相による時刻歴波形

乱數位相, 実観測記録の位相による地震動は, 応答スペクトルでは差が生じないが, **時刻歴波形では乱數位相の方が強震部の継続時間が長いことから, 標準応答スペクトルに基づく地震動評価に用いる位相として, 乱數位相を採用する。**

基準地震動S_sの策定(1/3)

- 審査ガイドでは、断層モデル手法による基準地震動S_sは、応答スペクトル手法による基準地震動S_s-D1との関係を踏まえて策定することが求められており、基準地震動S_s-11～S_s-31は、基準地震動S_s-D1との比較により策定している。
- このため、標準応答スペクトルに基づき策定した地震動に対しても、基準地震動S_s-D1との比較により基準地震動を策定する。
- 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動と既許可の基準地震動S_s-D1を比較した結果、一部の周期帯において、基準地震動S_s-D1を上回るため、基準地震動S_sとする。

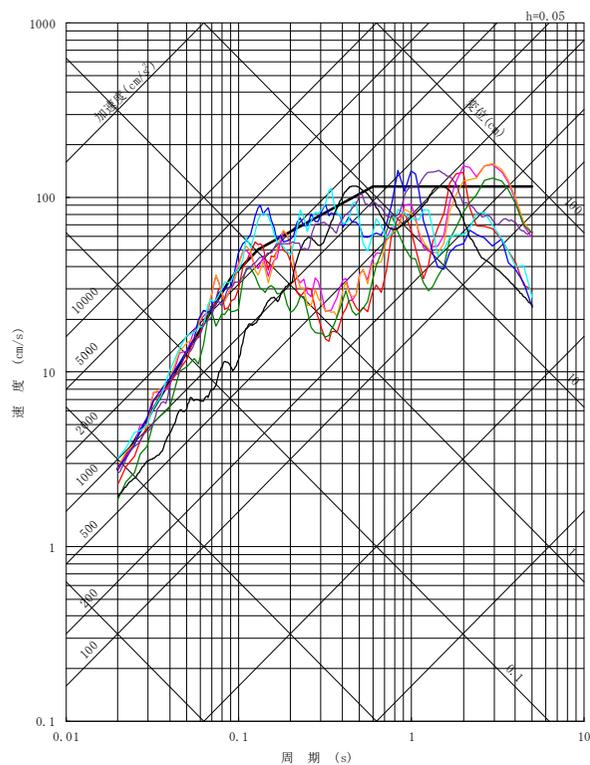
- 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動
- S_s-31(2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動)
- S_s-D1



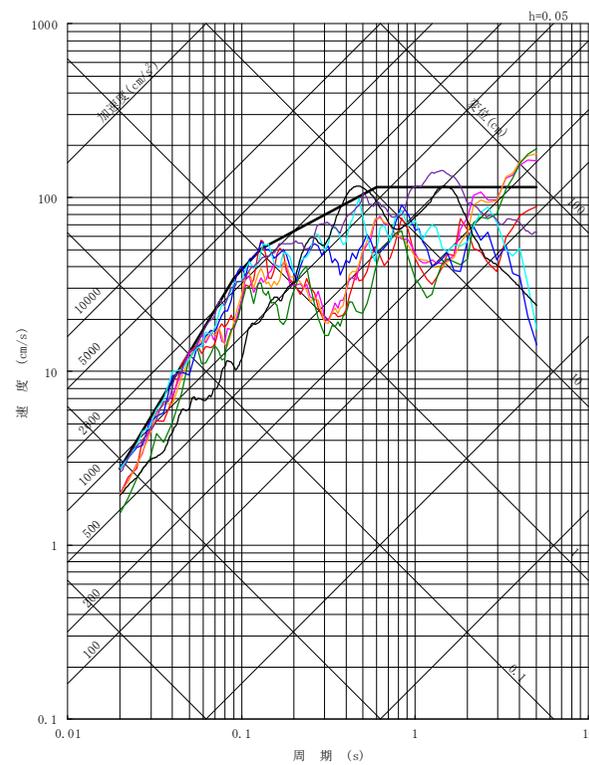
基準地震動S_sの策定(2/3)

■ 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動を基準地震動S_s-32として追加する。

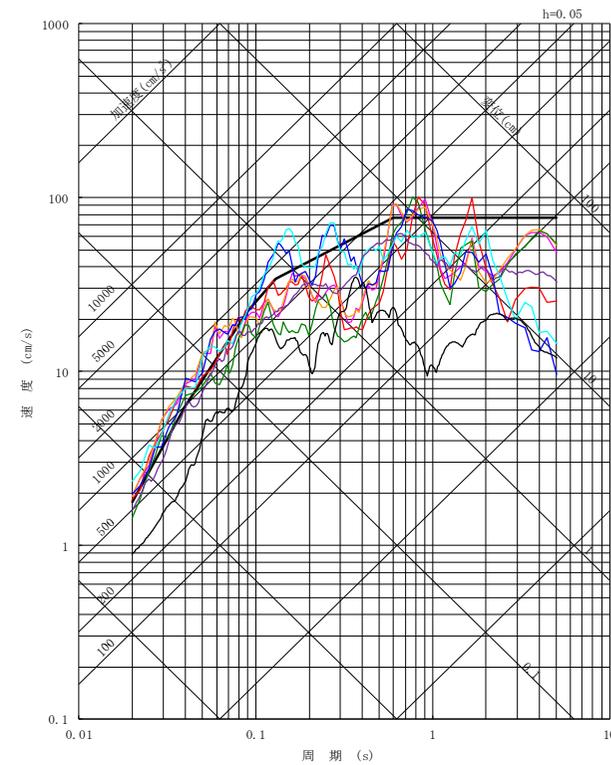
- S_s-D1 応答スペクトル手法による基準地震動
- S_s-11 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- S_s-12 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-13 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- S_s-14 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-21 2011年東北地方太平洋沖型地震(短周期レベルの不確かさ)
- S_s-22 2011年東北地方太平洋沖型地震(SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- S_s-31 2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動
- S_s-32 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動



NS方向



EW方向



UD方向

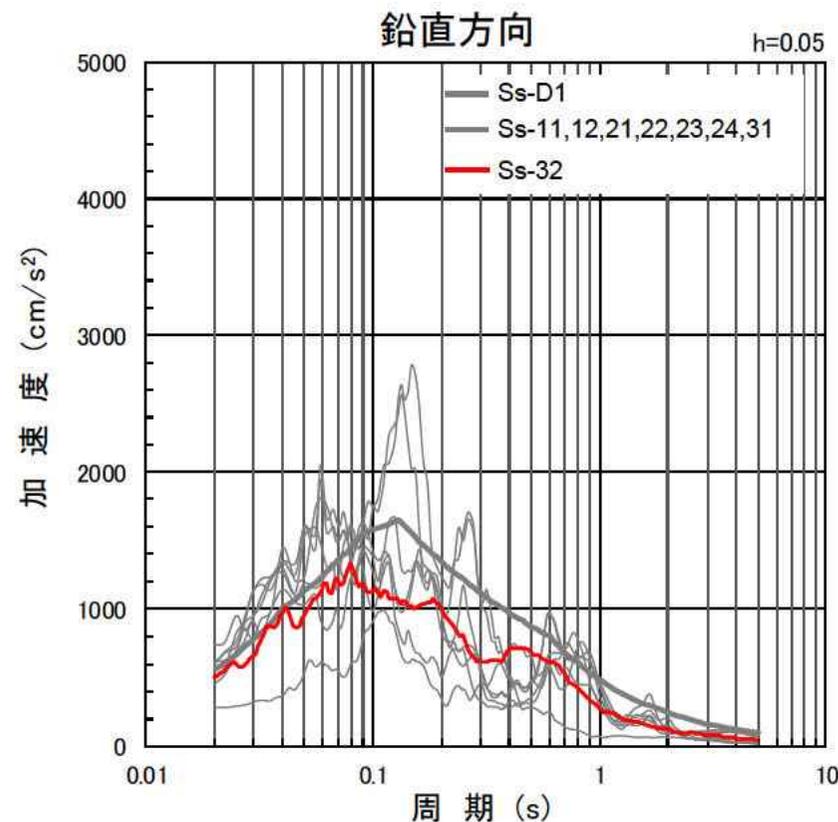
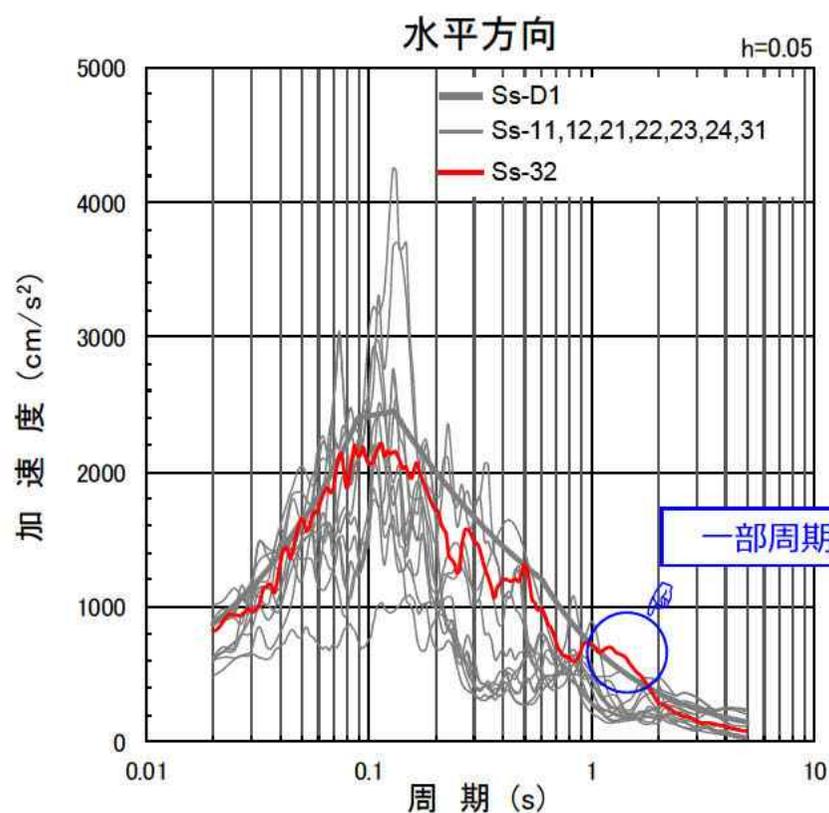
- 追加した基準地震動Ss-32(標準応答スペクトルに基づく地震動)の最大加速度は, 829cm/s²である。
- 基準地震動Ssは8波から9波となるが, 最大加速度1,009cm/s²は変更とならない。

地震動	地震動の評価		最大加速度(cm/s ²)	
			水平方向	鉛直方向
震源を特定して策定する地震動	断層モデルを用いた手法による地震動(6波)	内陸地殻内地震(4波): 基準地震動Ss-11~14	903	602
		プレート間地震(2波): 基準地震動Ss-21,22	1009	736
	応答スペクトルに基づく地震動(1波): 基準地震動Ss-D1		870	560
震源を特定せず策定する地震動(全国共通に考慮すべき地震動)	北海道留萌支庁南部地震に基づく地震動(1波): 基準地震動Ss-31		610	280
	標準応答スペクトルに基づく地震動(1波): 基準地震動Ss-32		829	499

今回追加

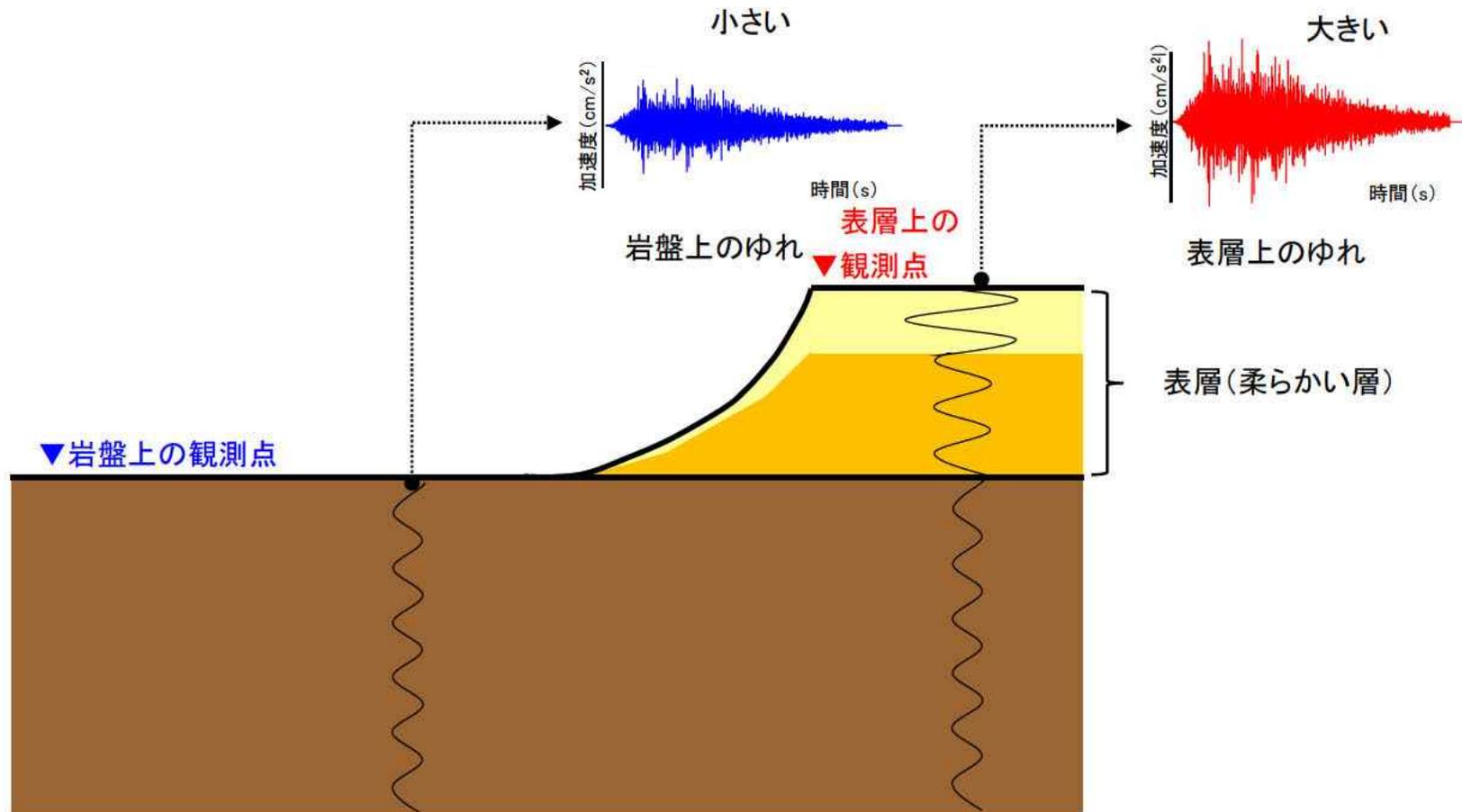
■ Ss-32に対する施設等の耐震性の詳細評価を実施中であるが、施設等への影響確認を行った結果、**機能維持への影響はないものと考えている。**

- ・ 応答スペクトルの比較において、Ss-32は許可済のSsに対して水平方向の長周期帯の一部(1秒から2秒)で超えるため、当該位置に固有周期を有する施設等について、影響確認を行った。
- ・ その結果、常設代替高圧電源装置について、地震による機能維持のために実施した加振試験結果に影響があることを確認したため、Ss-32を考慮した加振波を用いて加振試験を行い、**機能維持に問題ないことを確認した。**
- ・ その他の施設等については、許可済のSsでの評価結果に包絡されるか、または評価結果に包絡されなくても**耐震裕度内に収まるものと想定している。**



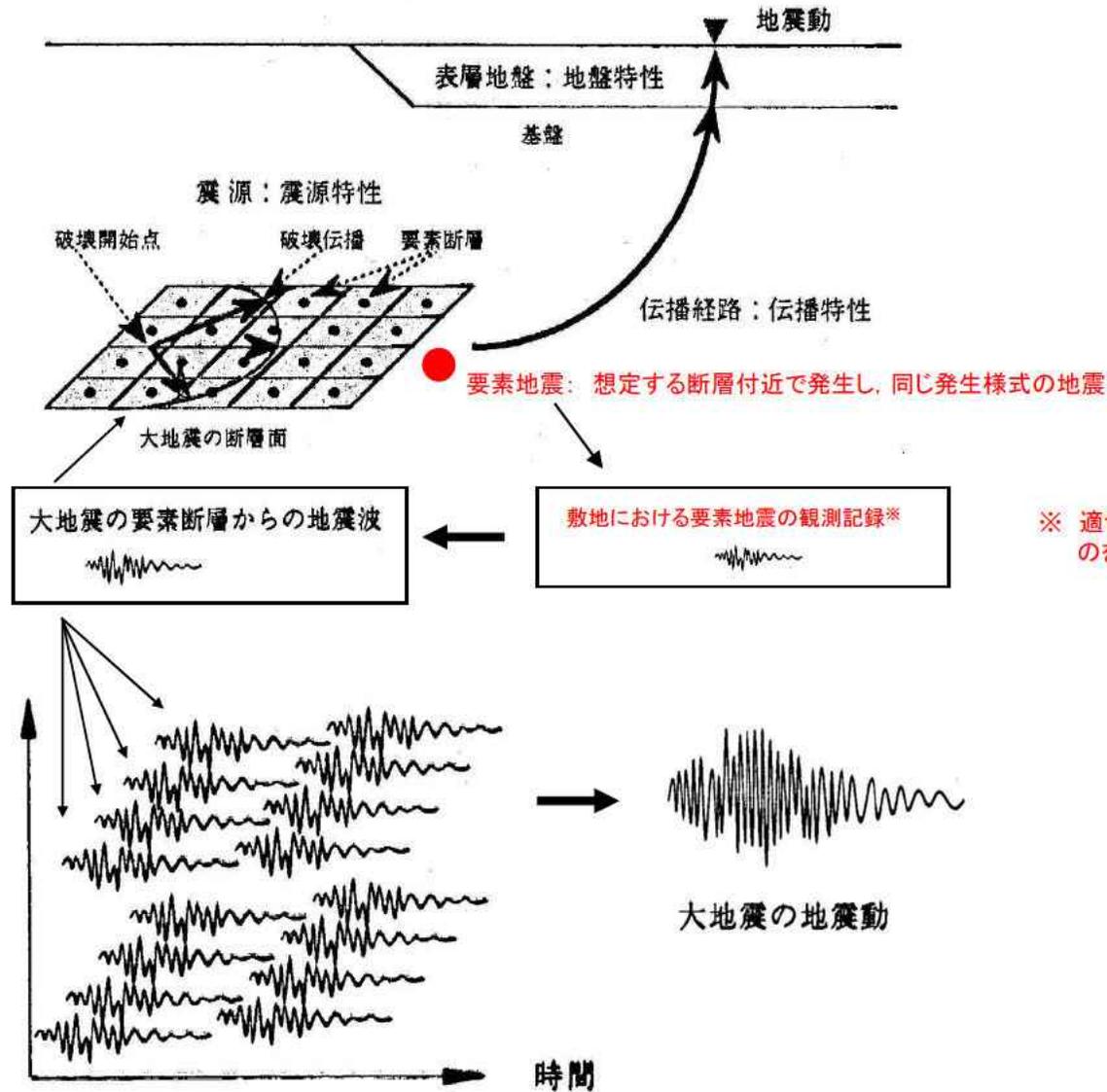
(参考) 岩盤上のゆれと柔らかい表層上のゆれの違い

- 岩盤から表層に地震動が伝播する際、表層の地盤が柔らかいため、地震動が増幅する。
- このため、震源からの距離が同じでも、柔らかい表層の方がゆれが大きくなる。
- 複数の観測点間のゆれを比較する際は、地盤条件の違いの有無を考慮する必要がある。



参考

断層モデル手法に用いる要素地震
地震動評価結果の整理



要素地震の選定フロー(プレート間地震)



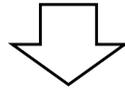
■要素地震は下記のフローで選定する。

発生位置

想定断層面付近で発生しており、震源から到来する伝播経路特性が反映されている地震



宮城県沖、茨城県沖のSMGA付近から選定する。

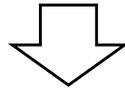


規模

要素地震として適切な規模の地震



クラック破壊を想定した ω^{-2} モデルが適用できるM5~M6程度を目安とする。

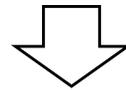


震源メカニズム

震源メカニズムが明らかである地震のうち、放射特性が同様であり、想定地震と同様の震源メカニズムを有する地震



低角逆断層(プレート間地震)を選定する。

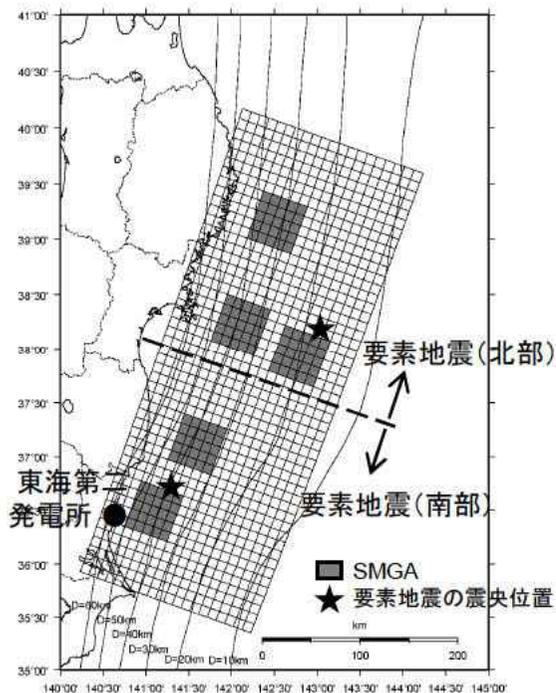


2011年3月10日の地震(M6.8), 2009年2月1日の地震(M5.8)を用いることとする。

各種文献で示された要素地震の震源パラメータについて、東海第二発電所及び敷地周辺の観測記録により妥当性を確認する。

■要素地震の選定方法

- ・要素地震の選定においては、設定した断層モデルと同じ震源メカニズムを有する地震とした。
- ・震源断層が広域になることから、北部の領域と南部の領域からそれぞれ要素地震を選定した。
- ・断層面の北半分については要素地震(北部)を、断層面の南半分については要素地震(南部)をそれぞれ用いた。



要素地震の震央位置

要素地震(北部)



要素地震(南部)



要素地震のメカニズム解(下半球)

※1 気象庁による。
 ※2 F-netによる。

要素地震の選定フロー(海洋プレート内地震)



■要素地震の選定のフロー

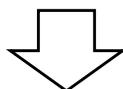
1996年9月以降に東海第二発電所で観測された記録を対象とする。

発生位置

想定断層面付近で発生しており、震源から到来する伝播経路特性が反映されている地震



茨城県南部の深さ約40km~80kmで発生した地震の中から選定する。

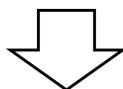


規模

要素地震として適切な規模の地震



クラック破壊を想定した ω^{-2} モデルが適用できるM5程度を目安とする。

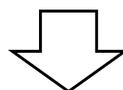


震源メカニズム

震源メカニズムが明らかである地震のうち、放射特性が同様であり、想定地震と同様の震源メカニズムを有する地震



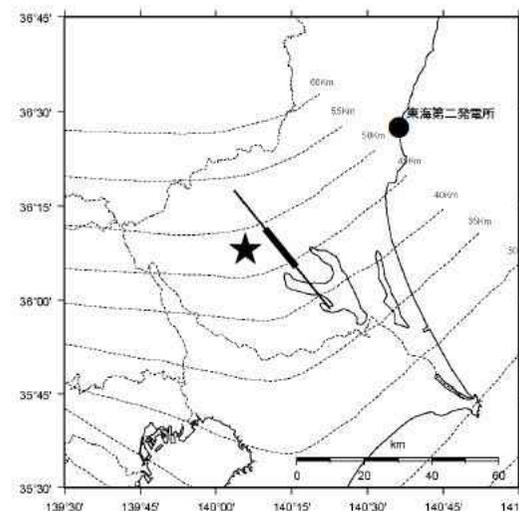
想定地震と同様の震源メカニズムを有する地震を選定することが望ましいが、その地震がない場合は放射特性係数を補正して用いる。



2014年11月12日の地震(M4.8)を用いることとする。

■要素地震の選定結果

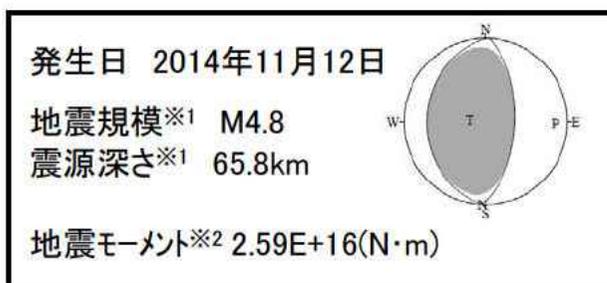
基本震源モデル及び不確かさを考慮した各モデルの断層面と地震波の到来方向がほぼ等しく、伝播特性とサイト特性が共通であると考えられる2014年11月12日の地震(M4.8)を要素地震として選定する。なお、この要素地震は、想定する断層面と震源メカニズムが異なるため、合成に際しては放射特性係数の補正の必要性について検討したうえで使用する。



★ 要素地震の震央位置
— アスペリティ

基本震源モデルの断層面と
要素地震の震央位置との関係

震源メカニズムの比較



要素地震のメカニズム解(下半球)

※¹ 気象庁による。
※² F-netによる。

地震	メカニズム解			放射特性係数	
	走向(度)	傾斜(度)	すべり(度)	F _{SV}	F _{SH}
要素地震(2014.11.12, M4.8)	4	64	88	0.54	0.20
茨城県南部の地震(Mw7.3)	140.7	90	0	メッシュごとの方位角, 射出角を用いて算定 (参考)-0.10※ ³ (参考)-0.66※ ³	

※³ アスペリティの中心位置(方位角約45度, 射出角約137度)で算定した場合

要素地震の選定フロー(内陸地殻内地震)



■要素地震の選定のフロー

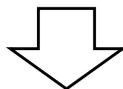
1996年9月以降に東海第二発電所で観測された記録を対象とする。

発生位置

想定断層面付近で発生しており、震源から到来する伝播経路特性が反映されている地震



東北地方太平洋沖地震の発生後福島県から茨城県にかけて発生している内陸地殻内地震の中から選定する。

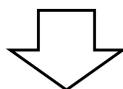


規模

要素地震として適切な規模の地震



クラック破壊を想定した ω^{-2} モデルが適用できるM5程度を目安とする。

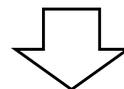


震源メカニズム

震源メカニズムが明らかである地震のうち、放射特性が同様であり、想定地震と同様の震源メカニズムを有する地震



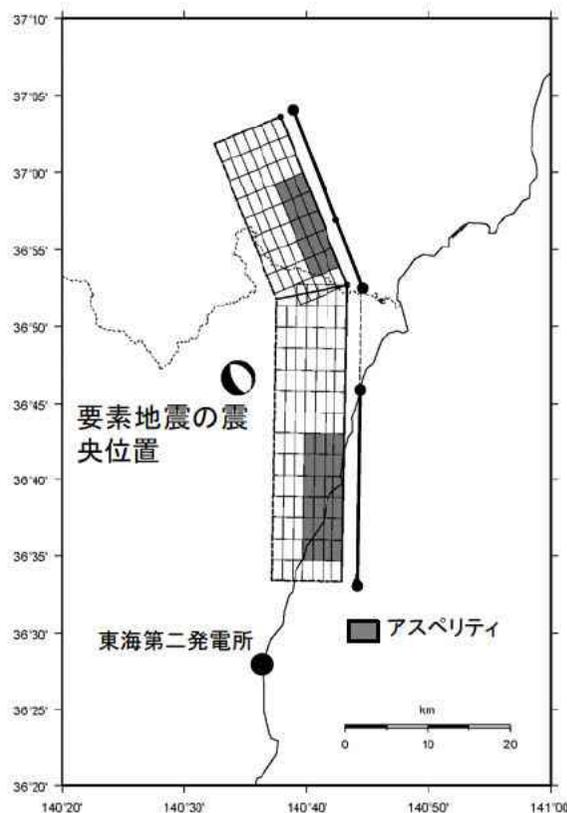
想定地震と同様の震源メカニズムを有する正断層のメカニズムの地震を選定する。



2011年4月14日の地震(M5.1)を用いることとする。

■要素地震の選定結果

設定した断層モデル近辺で発生した同じ断層タイプ(正断層)の地震で、規模がM5程度である2011年4月14日の地震(M5.1)を選定する。



要素地震の震央位置



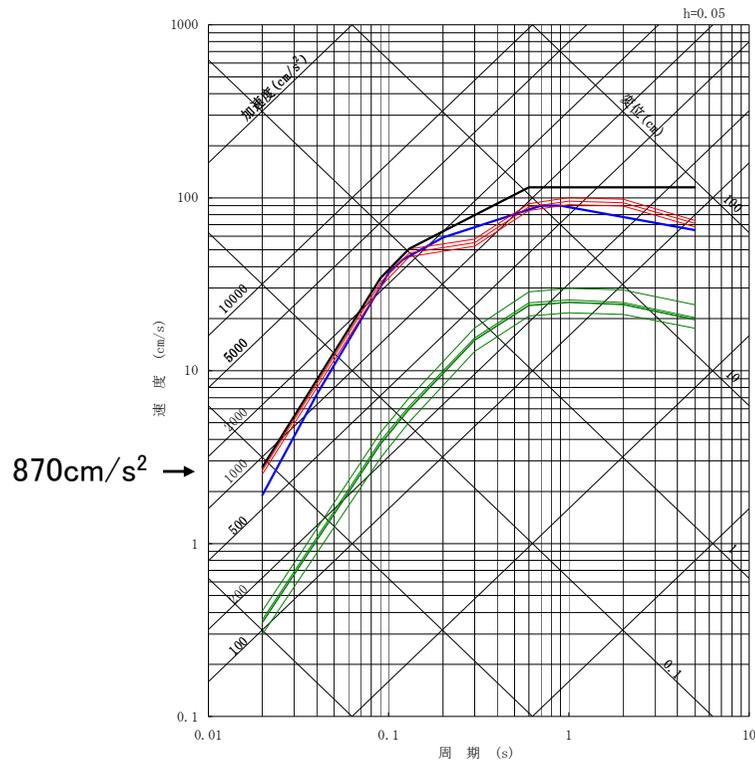
要素地震のメカニズム解(下半球)

※1 気象庁による。
※2 F-netによる。

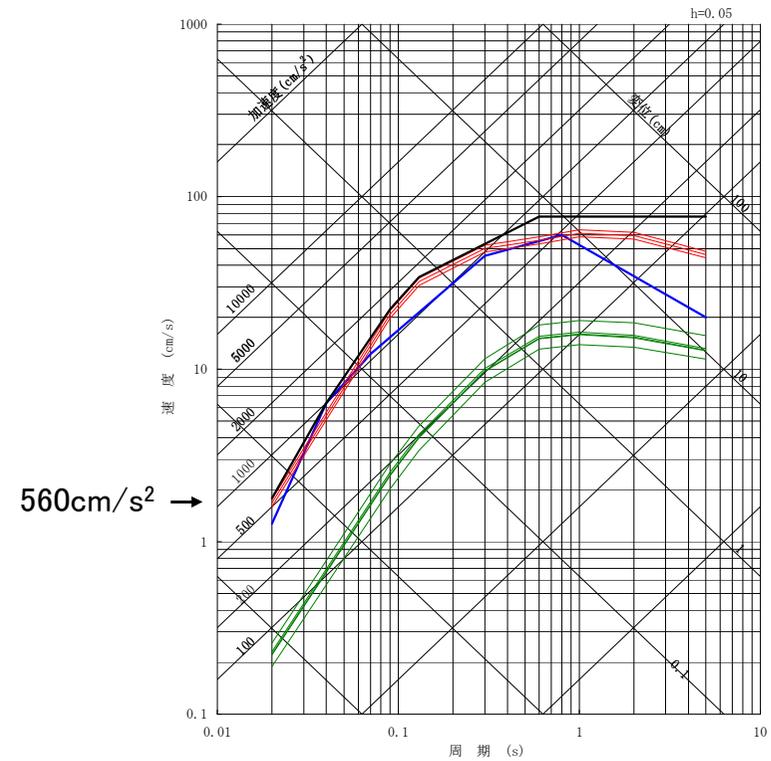
敷地ごとに震源を特定して策定する地震動 応答スペクトル手法

■ 応答スペクトル手法による地震動評価結果をすべて包絡するよう基準地震動Ss-D1のコントロールポイントを設定する。

- 基準地震動Ss-D1
- プレート間地震による評価
- 海洋プレート内地震による評価
- 内陸地殻内地震による評価



水平成分



鉛直成分

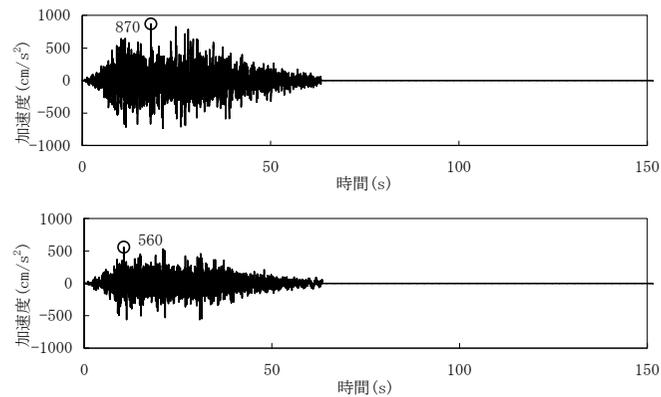
応答スペクトル		コントロールポイント				
		A	B	C	D	E
Ss-D1H	周期(s)	0.02	0.09	0.13	0.60	5.00
	速度(cm/s)	2.77	34.38	50.69	115.00	115.00

応答スペクトル		コントロールポイント					
		A	B	C	D	E	F
Ss-D1V	周期(s)	0.02	0.04	0.09	0.13	0.60	5.00
	速度(cm/s)	1.78	6.37	22.20	34.14	76.67	76.67



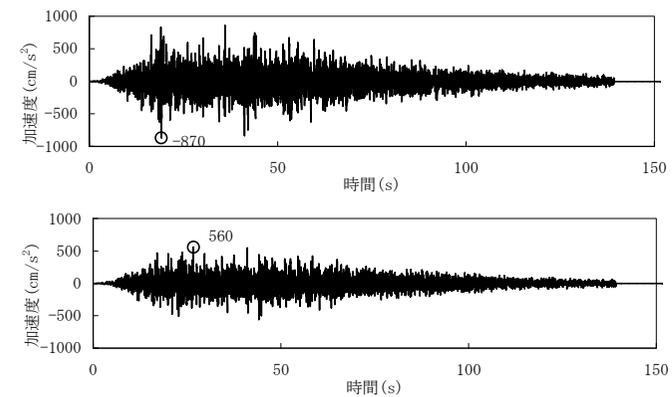
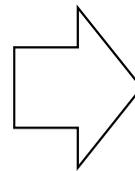
○ 2014年頃の模擬地震波

- ・応答スペクトルで支配的な内陸地殻内地震の諸元(M7.8, $X_{eq}=28\text{km}$)より継続時間を63.38秒と設定



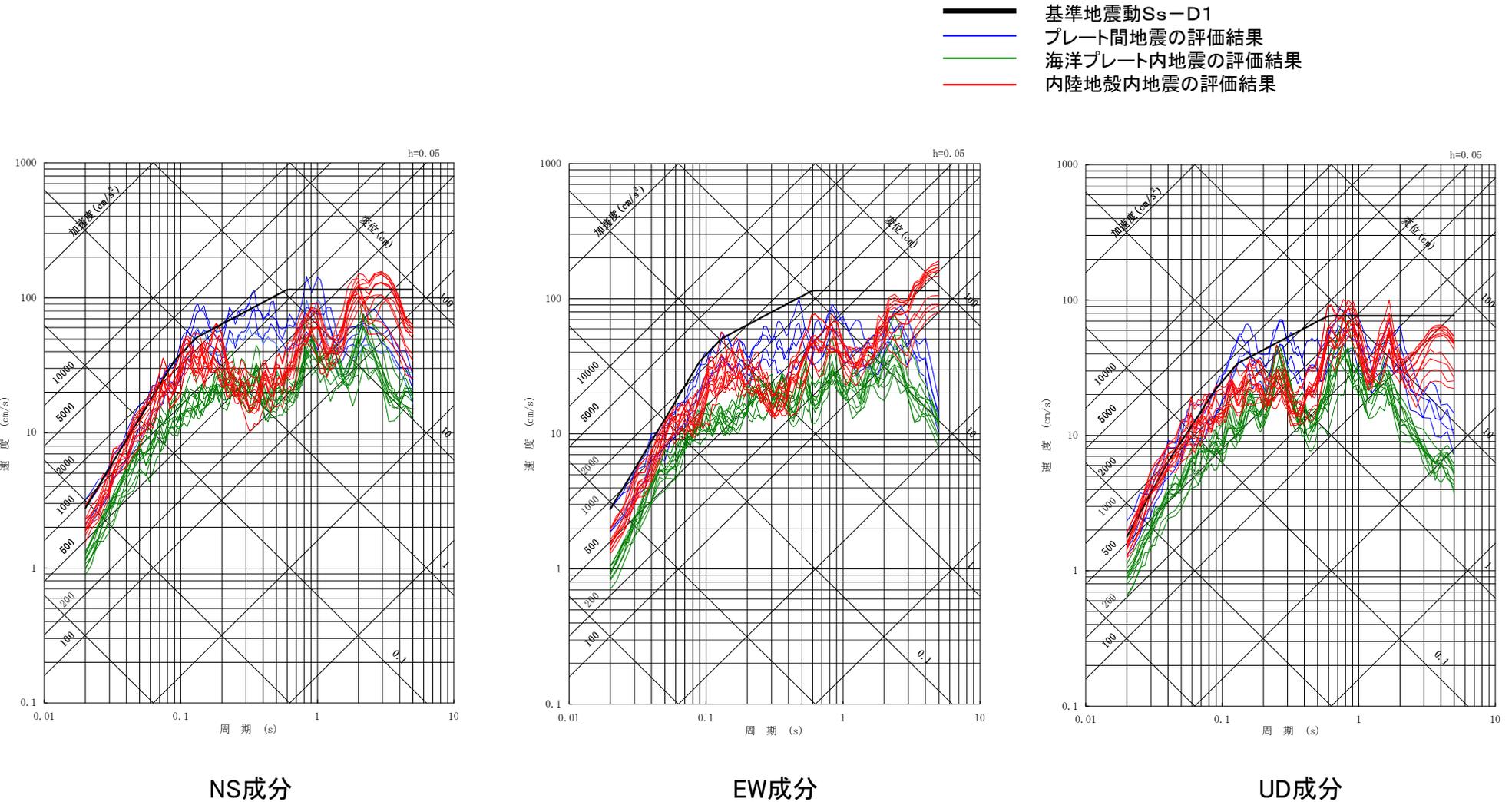
○ 検討を反映した模擬地震波

- ・2011年東北地方太平洋沖地震はMw9.0であるものの、地震動レベルからはM8.3程度との知見よりM8.3, X_{eq} は2011年東北地方太平洋沖地震の断層面より135.8kmとして、継続時間を139.28秒と設定



敷地ごとに震源を特定して策定する地震動 断層モデル手法(1/2)

■各地震発生様式における断層モデル手法の地震動評価結果(全ケース)と基準地震動S_s-D1を比較する。

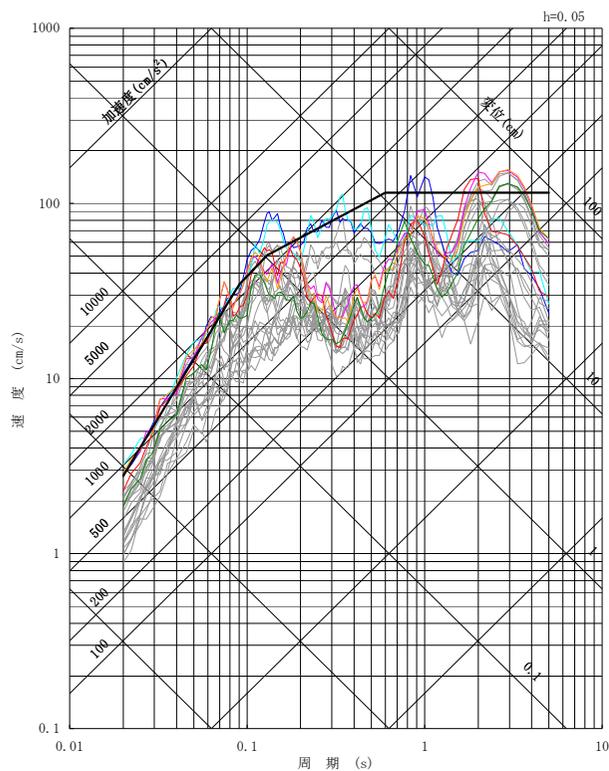


断層モデル手法による各地震動評価結果のうち、プレート間地震及び内陸地殻内地震の評価結果が基準地震動S_s-D1を一部の周期帯で上回る。なお、海洋プレート内地震の地震動評価結果は、基準地震動S_s-D1に包絡されている。

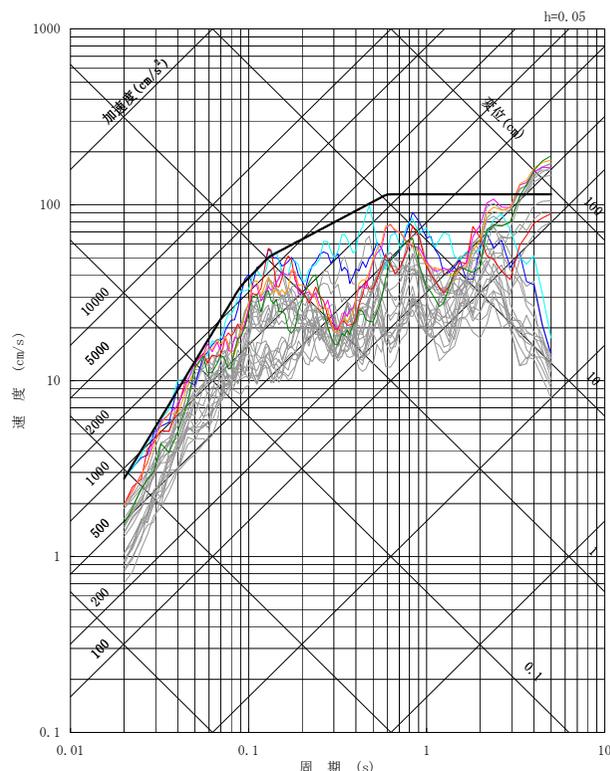
敷地ごとに震源を特定して策定する地震動 断層モデル手法(2/2)

■各地震発生様式における断層モデル手法による地震動評価結果のうち、一部周期帯で基準地震動Ss-D1を上回るケースを示す。

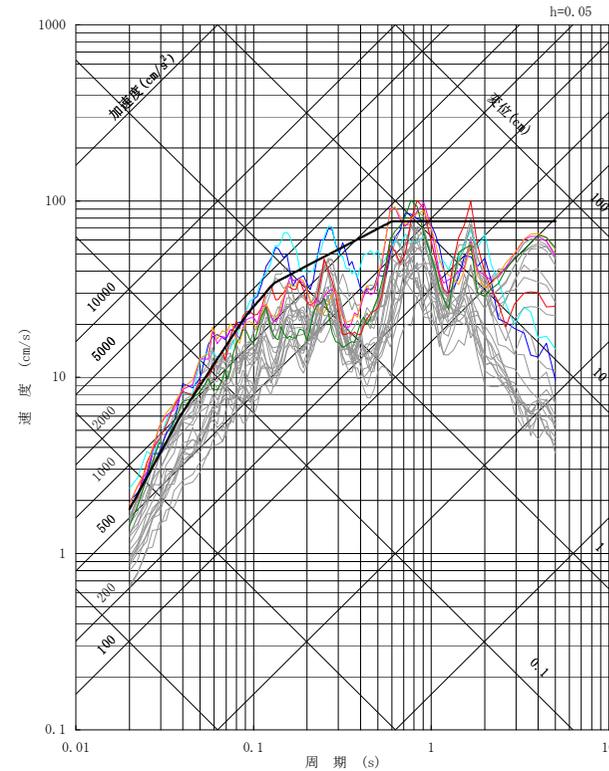
- Ss-D1 応答スペクトル手法による基準地震動
- Ss-11 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- Ss-12 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- Ss-13 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- Ss-14 F1断層, 北方陸域の断層, 塩ノ平地震断層の連動による地震(断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)
- Ss-21 2011年東北地方太平洋沖型地震(短周期レベルの不確かさ)
- Ss-22 2011年東北地方太平洋沖型地震(SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- 断層モデル手法の各評価結果



NS成分



EW成分

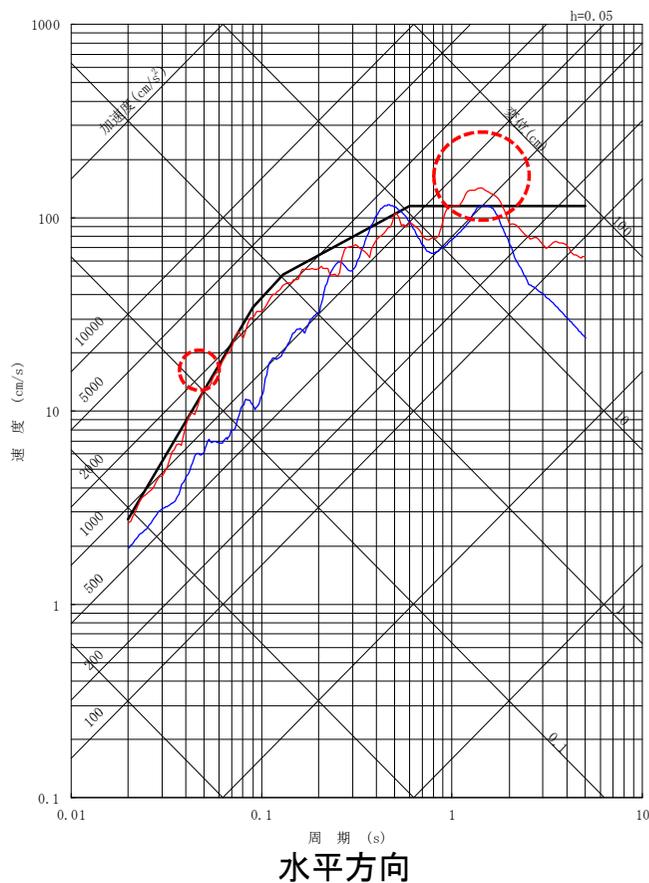


UD成分

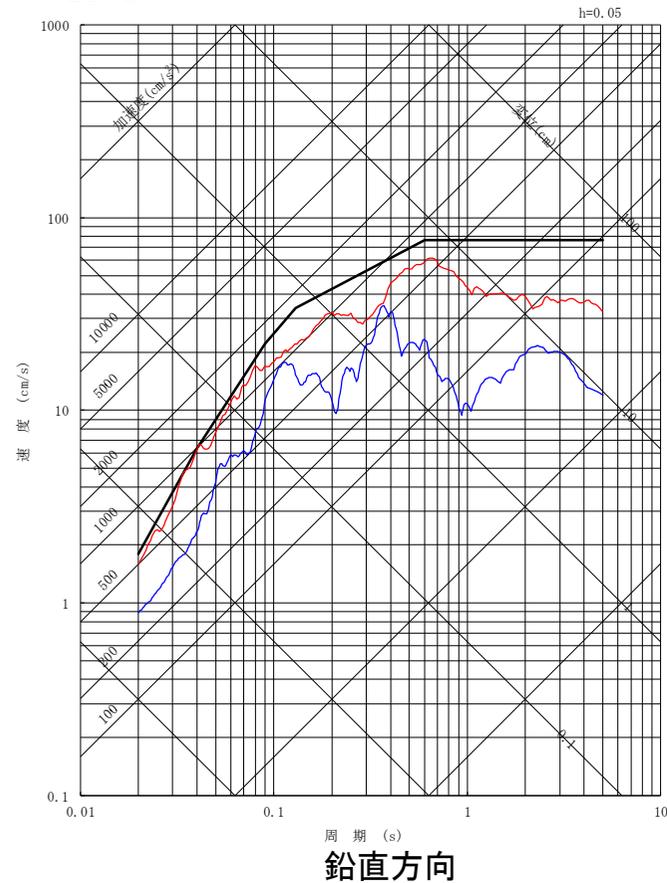
各地震発生様式の断層モデル手法による地震動評価結果のうち、一部周期帯で基準地震動Ss-D1を上回る6ケースを断層モデル手法による基準地震動に選定し、それぞれSs-11, Ss-12, Ss-13, Ss-14, Ss-21, Ss-22とする。

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基準地震動 S_s-D1 を比較する。



- 標準応答スペクトルに基づき策定した地震動
- S_s-31 (2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動)
- S_s-D1



擬似速度応答スペクトル

2004年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動及び標準応答スペクトルに基づき策定した地震動は、一部周期帯で基準地震動 S_s-D1 を上回るため、基準地震動に選定する。

地震動評価 補足説明資料



1. 発電所真下又はサイトから最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合	306
2. アスペリティや破壊開始点等の評価の前提条件に係る保守性の考え方	323
3. 内陸地殻内地震における不確かさを重ねた場合の地震動評価結果 及び施設や地盤等への影響評価の結果	330
4. 茨城県地震被害想定の見直し(2018年12月)を踏まえた評価	338
5. 基準地震動の代表性及び策定時における他地域の地震の考慮	355
6. 地震調査研究推進本部 活断層 及び海溝型地震の長期評価(2019年2月公表)を踏まえた評価	360
7. 基準地震動策定の保守性	365
参考 用語の定義	373

第16回

1993年釧路沖型地震(深さ100kmモデル)

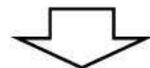
- ・敷地周辺の沈み込んだプレート内地震の発生状況から、敷地周辺では基準地震動策定で考慮したM7.3を超える規模の海洋プレート内地震は発生していないことを確認した。
- ・沈み込んだプレート内地震の発生状況の探索範囲を北海道まで広げると、同じ太平洋プレートの沈み込んだプレート内地震として、1993年釧路沖地震(M7.5)が発生している。そこで、この地震と同じ規模であるM7.5の地震が敷地下方で発生することを想定する。
- ・深さの設定に際しては1993年釧路沖地震(M7.5)を参考に沈み込んだプレートの下面で発生することを想定し、深さ100kmとする。

1993年釧路沖型地震(敷地最短位置)

- ・震源モデルのパラメータは深さ100kmモデル(第5回ワーキングチームで説明)と同様とし、敷地からの距離が最短となる位置に震源を想定する。断層傾斜角やプレート境界からの深さについては茨城県地震被害想定調査報告書(平成30年12月)による設定値を参考に設定する。

1993年釧路沖型地震(敷地最短位置+短周期帯1.5倍の影響確認)

- ・さらに敷地に厳しい条件で地震が発生した場合の影響確認として、1993年釧路沖型地震(敷地最短位置)に対し、原子力施設にとって重要な短周期帯0.02秒から0.5秒の応答スペクトルを1.5倍する。



第20回

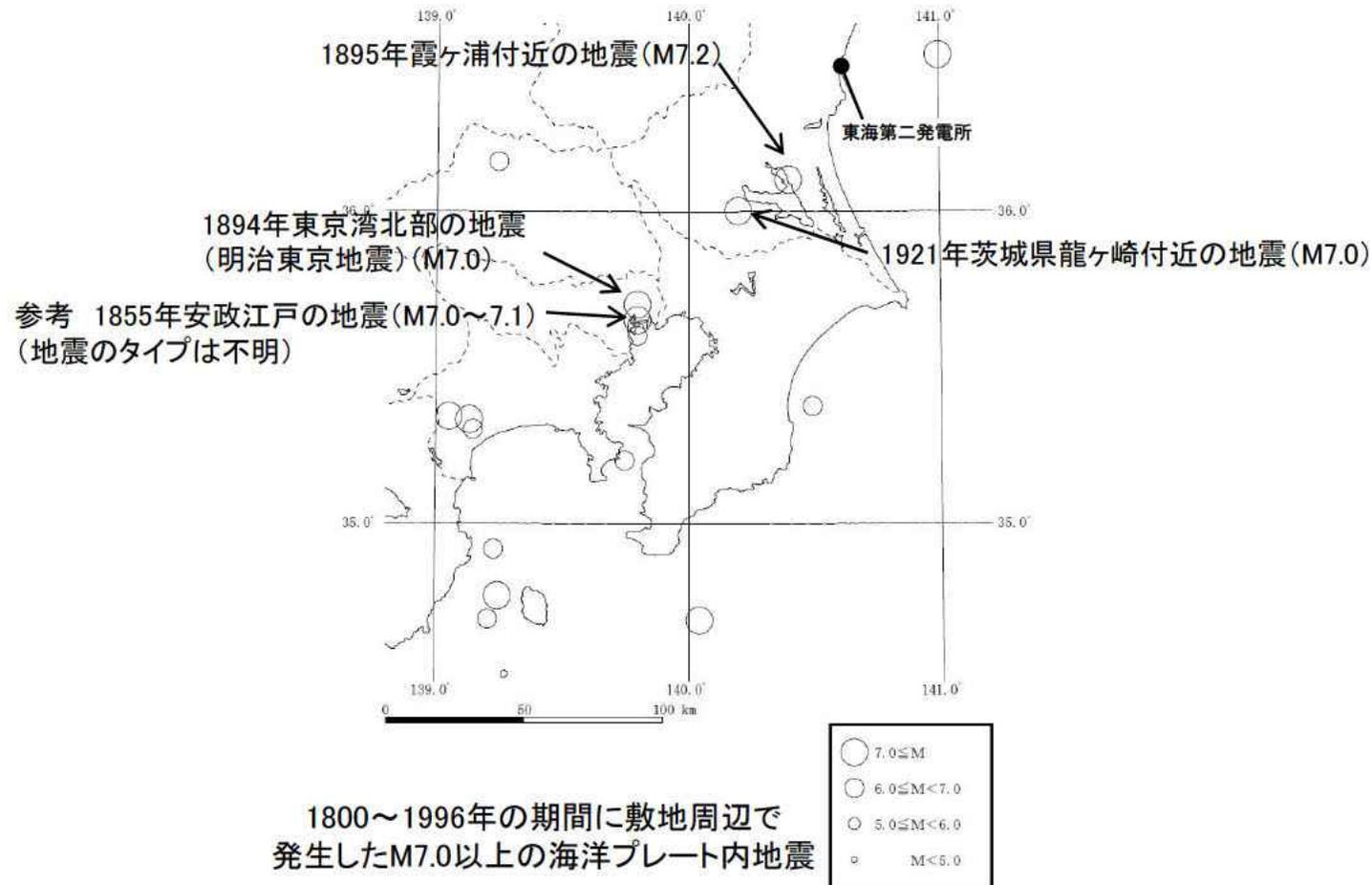
1993年釧路沖型地震(敷地最短位置+応力降下量1.5倍の影響確認)

- ・0.02秒から0.5秒という限定された周期帯ではなく全周期帯で影響確認を行うこととし、1993年釧路沖型地震(敷地最短位置)に対し、応力降下量を1.5倍とした震源モデルを設定して地震動を再評価しても、発電所の安全性が確保されることを確認した。

敷地周辺における海洋プレート内地震の発生状況(1800年代後半～1996年)



■地震のタイプを分類するには、地震観測記録の分析が重要である。そこで1800年代後半～1996年の期間に敷地周辺で発生したM7.0以上の地震のうち、観測記録の分析がなされた近年の研究成果により海洋プレート内地震と推定された地震を下図に示す。



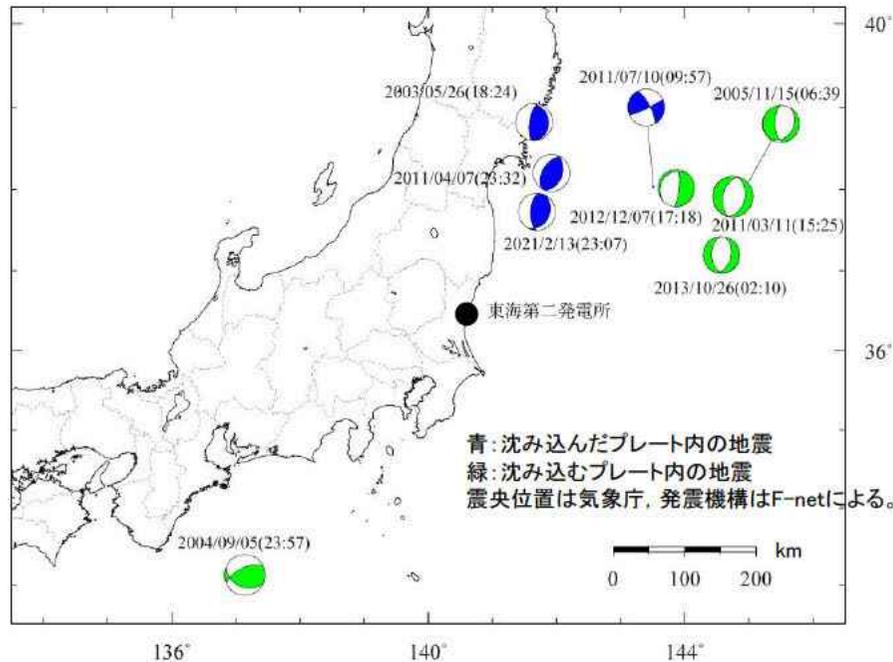
- 1800年～1996年の期間に敷地周辺の海洋プレート内で発生した地震の最大規模は、1895年霞ヶ浦付近の地震(M7.2)とされている。この地震は太平洋プレート内地震の可能性が示唆されている。
- フィリピン海プレート内で発生した地震の最大規模は、1921年茨城県龍ヶ崎付近の地震(M7.0)である。

敷地周辺における海洋プレート内地震の発生状況(1997年以降)



■1997年以降(気象庁による一元化震源以降)に発生した海洋プレート内地震の抽出(東北地方から紀伊半島まで)

気象庁地震カタログを用い、1997年から2014年3月までの期間に東北地方から紀伊半島までの範囲で発生したM7.0以上の海洋プレート内地震と推定される地震を抽出した。青色は沈み込んだプレート内の上面の地震、緑色は沈み込むプレート内の地震を示す。



M7.0以上の海洋プレート内地震の震央位置及び震源メカニズム

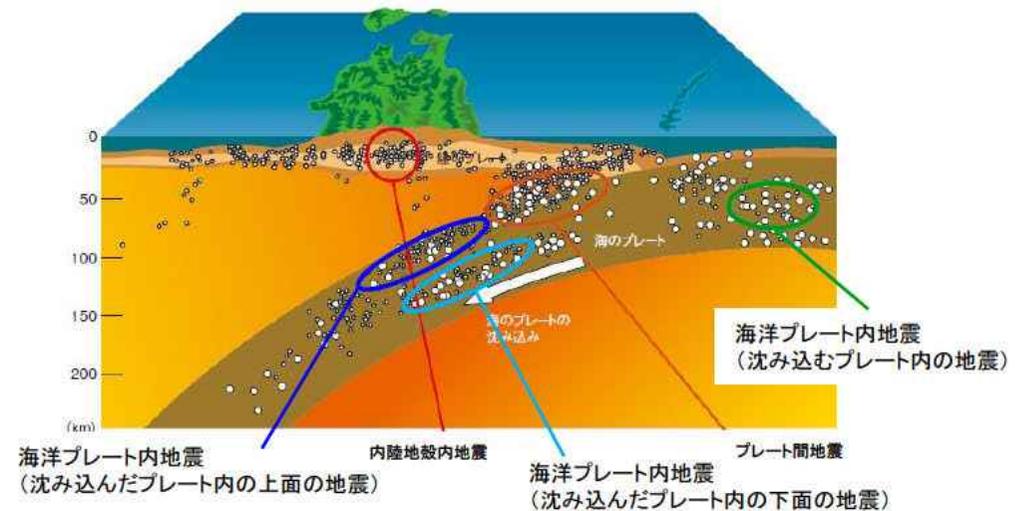
1997年以降に東北地方以南で発生した沈み込んだ太平洋プレート内の地震の最大規模は、宮城県沖、福島県沖で発生したM7.3である。

敷地周辺では基準地震動策定で考慮したM7.3を超える規模の海洋プレート内地震は発生していない。

M7.0以上の海洋プレート内地震の諸元

発生日	時刻	M	深さ(km)	分類
2003.5.26	18:24	7.1	72	沈み込んだ太平洋プレート内の上面
2004.9.5	23:57	7.4	44	沈み込むフィリピン海プレート内
2005.11.15	06:38	7.2	45	沈み込む太平洋プレート内
2011.3.11	15:25	7.5	11	沈み込む太平洋プレート内
2011.4.7	23:32	7.2	66	沈み込んだ太平洋プレート内の上面
2011.7.10	09:57	7.3	34	沈み込んだ太平洋プレート内の上面
2012.12.7	17:18	7.3	49	沈み込む太平洋プレート内
2013.10.26	02:10	7.1	56	沈み込む太平洋プレート内
2021.2.13	23:07	7.3	55	沈み込んだ太平洋プレート内の上面

※気象庁地震カタログや震源メカニズムなどを参考に海洋プレート内地震を抽出した。

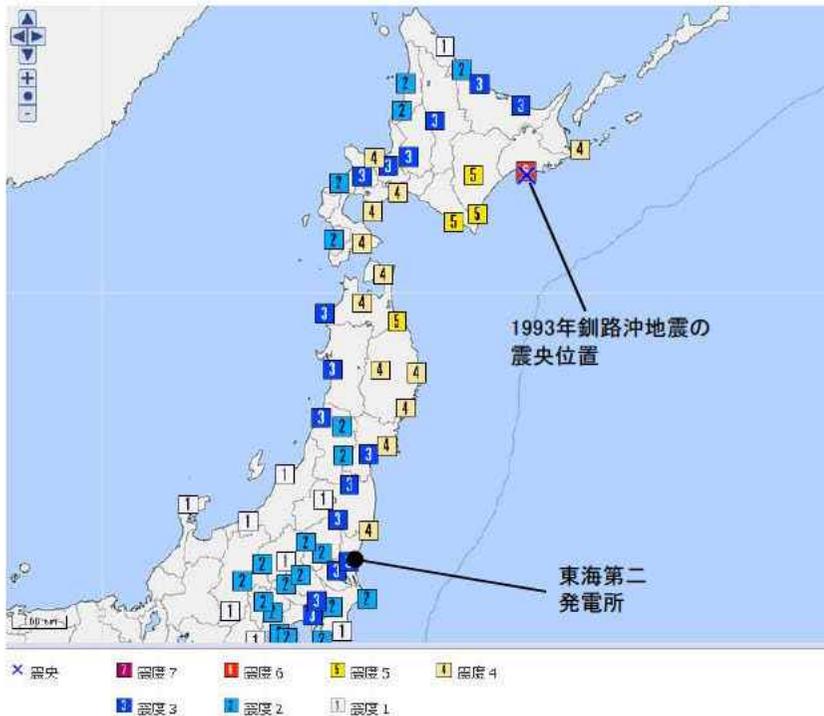


地震の発生様式の模式図(東北地方での例)
(地震調査研究推進本部に一部加筆)

1. 発電所真下又はサイトから最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合

1993年釧路沖地震の概要

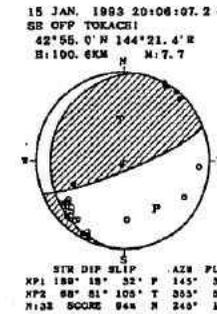
- ・沈み込んだプレート内地震の発生状況の探索範囲を北海道まで広げると、1993年釧路沖地震(M7.5)が発生している。
- ・宮城県沖で発生する沈み込んだプレート内地震はその上面で発生することが多いのに対し、1993年釧路沖地震(M7.5)は沈み込んだプレート内の下面で発生し、震源深さは約100kmである。



1993年釧路沖地震(M7.5)の震度分布(気象庁)

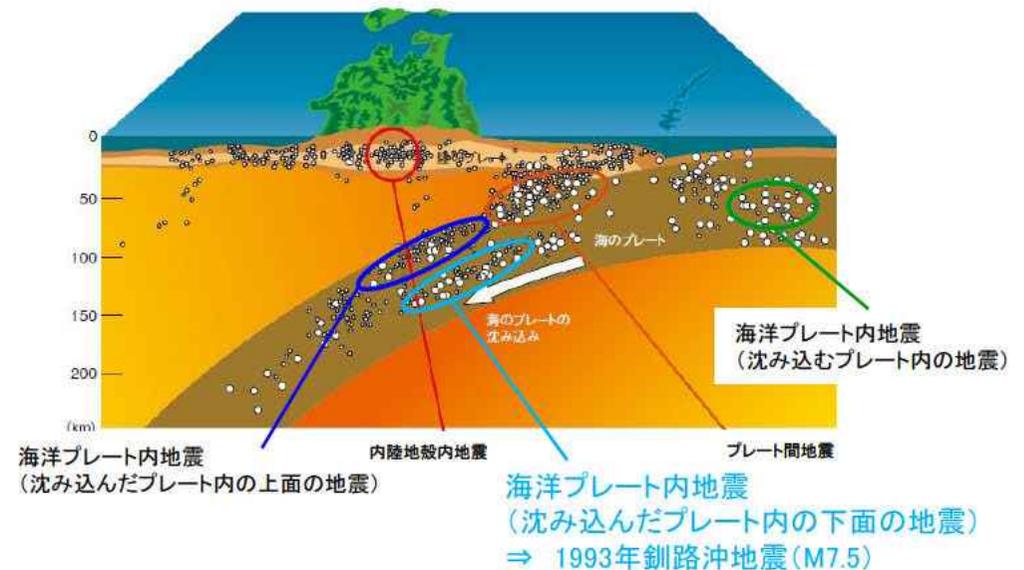
1993年釧路沖地震(M7.5)の諸元

発生日時	1993年1月15日20時6分
震源地	釧路沖
北緯	42° 55.2′
東経	144° 21.2′
震源深さ	101km
地震規模	M7.5



中村ほか(1994)より抜粋

震源メカニズム



地震の発生様式の模式図(東北地方での例)
(地震調査研究推進本部に一部加筆)

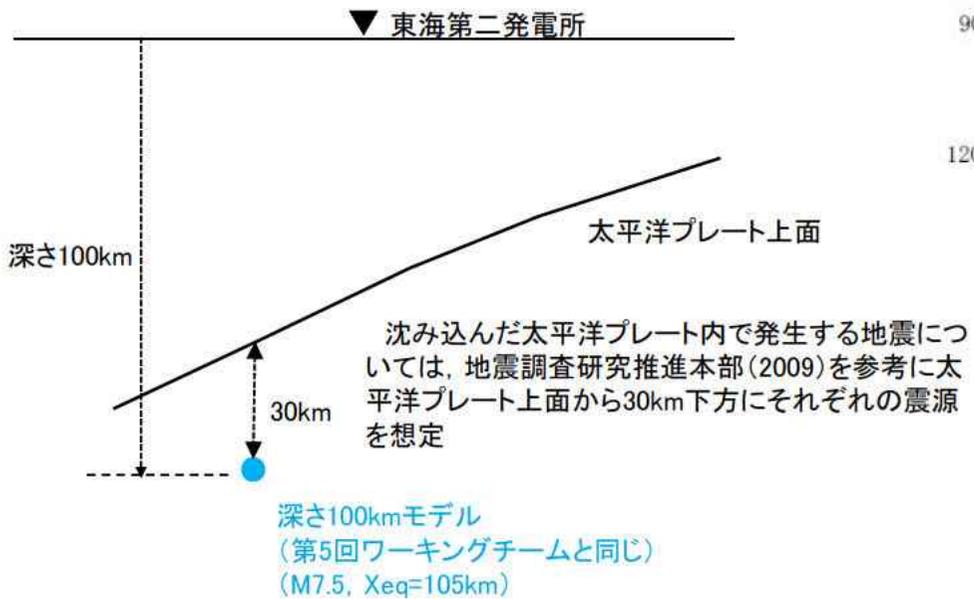
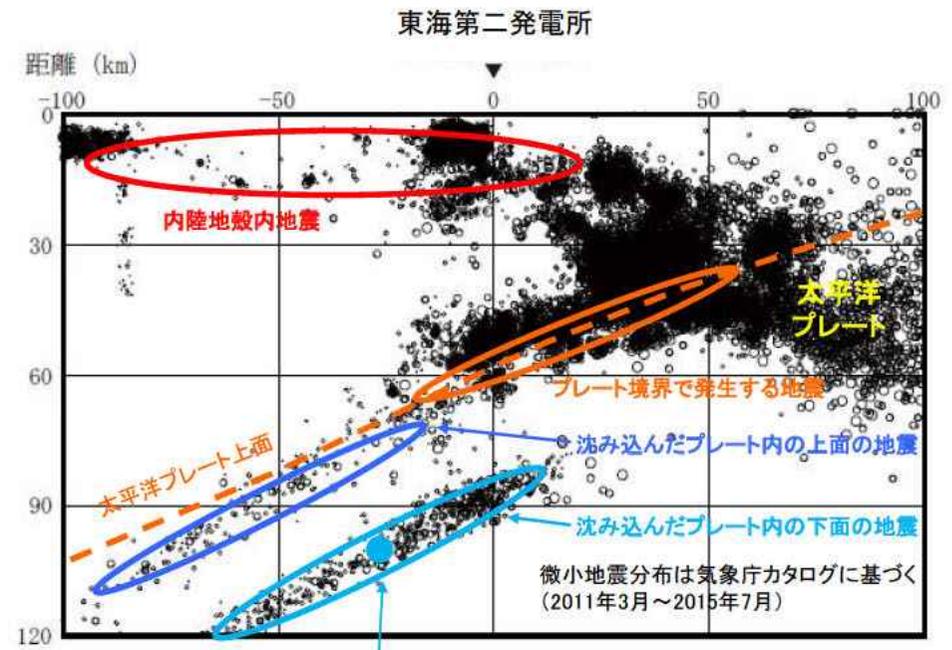
中村他(1994)によると、「この断層はもぐり込んでいる太平洋プレートの二重深発面の上面と下面の間にあり上面にはとどいていないように思われる。二重深発地震面の下面においては、down-dip extension型の地震が発生する傾向があることが知られているが、この地震は二重深発地震面の下面の地震としては、典型的な発震機構をもつ地震であると言える。」とされている。

1993年釧路沖型地震(深さ100kmモデル)の想定

■震源を想定する位置

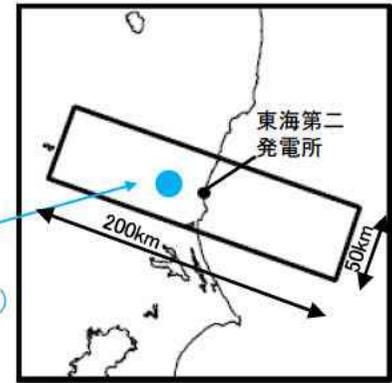
- ・同じ太平洋プレートの沈み込んだプレート内地震として、1993年釧路沖地震(M7.5)が発生している。そこで、この地震と同じ規模であるM7.5の地震が敷地下方で発生することを想定する。
- ・前述のとおり、1993年釧路沖地震(M7.5)は沈み込んだプレート内地震の下面で発生しており、深さ約100kmで発生している。
- ・そこで、深さの設定に際しては1993年釧路沖地震(M7.5)を参考に沈み込んだプレートの下面で発生することを想定し、深さ100kmとする。

参考：敷地周辺で発する地震には、陸のプレートの内部で発生する内陸地殻内地震や陸のプレートと海洋プレート(太平洋プレート、フィリピン海プレート)の境界で発生する地震、海洋プレートの内部で発生する地震というように様々なタイプがある(右図)。基準地震動の策定にあたっては、上記タイプ毎に調査を行い、タイプ毎に敷地に影響の大きい地震を選定してそれらについて詳細評価を行っている。



- 3.0 ≤ M < 4.0
- ◻ 2.0 ≤ M < 3.0
- △ 1.0 ≤ M < 2.0
- ◇ 0.0 ≤ M < 1.0

深さ100kmモデル
(第5回ワーキングチームと同じ)
(M7.5, Xeq=105km)



太平洋プレート内地震の震源の設定位置(模式図)

1. 発電所真下又はサイトから最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合 1993年釧路沖型地震(敷地最短位置)の想定



■震源モデルのパラメータは深さ100kmモデル(第5回ワーキングチームで説明)と同様とし、敷地からの距離が最短となる位置に震源を想定する。断層傾斜角やプレート境界からの深さについては茨城県地震被害想定調査報告書(平成30年12月)*による設定値を参考に設定する。

※以降、茨城県(2018)という

【主要パラメータ】(第5回ワーキングチームと同じ)

・地震規模はTakeo et al.(1993)による1993年釧路沖地震の地震モーメントより与える。

$$M_0 = 3.30 \times 10^{20} (\text{N} \cdot \text{m})$$

・強震動予測レシピ(笹谷ほか(2006)のスケーリング則)に基づき算出する。

【断層面の位置・形状】

・断層傾斜角は茨城県(2018)に基づき0度及び90度とする。

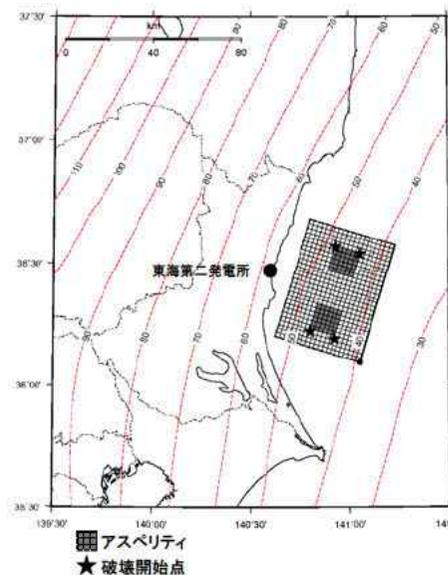
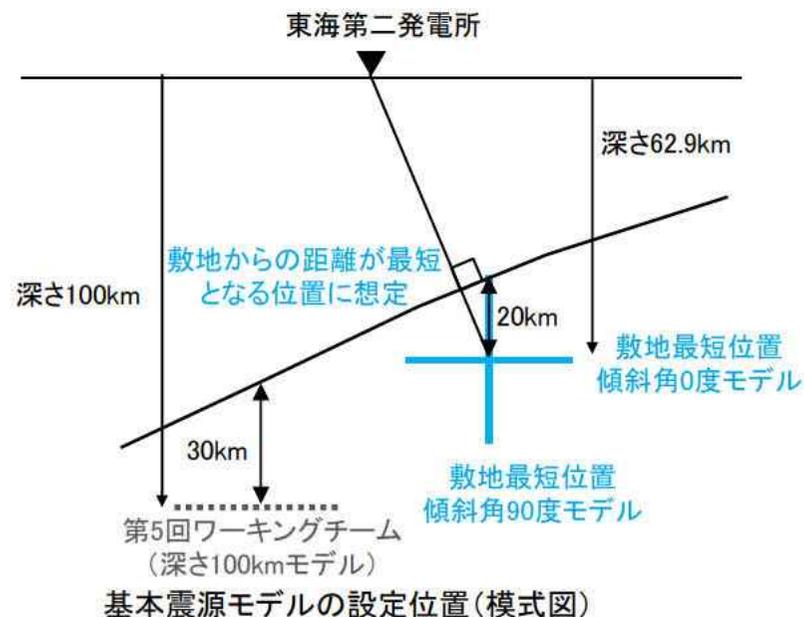
・断層面は敷地からの距離が最短となる位置に設定し、プレート境界からの深さは、茨城県想定を参考に20kmとする。

・アスペリティ位置

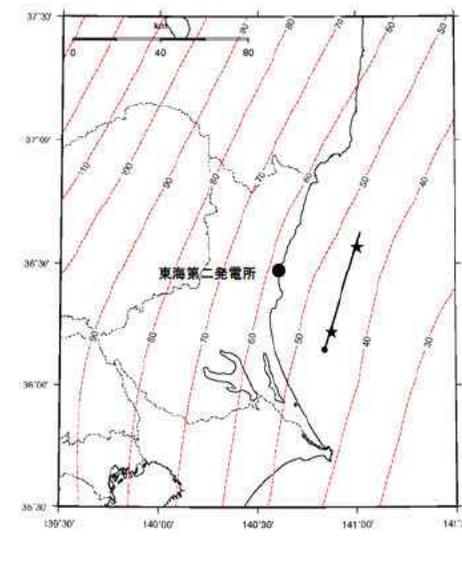
断層面の中央に2箇所設定する。

・ずれの種類

逆断層と設定する。



敷地最短位置
傾斜角0度モデル

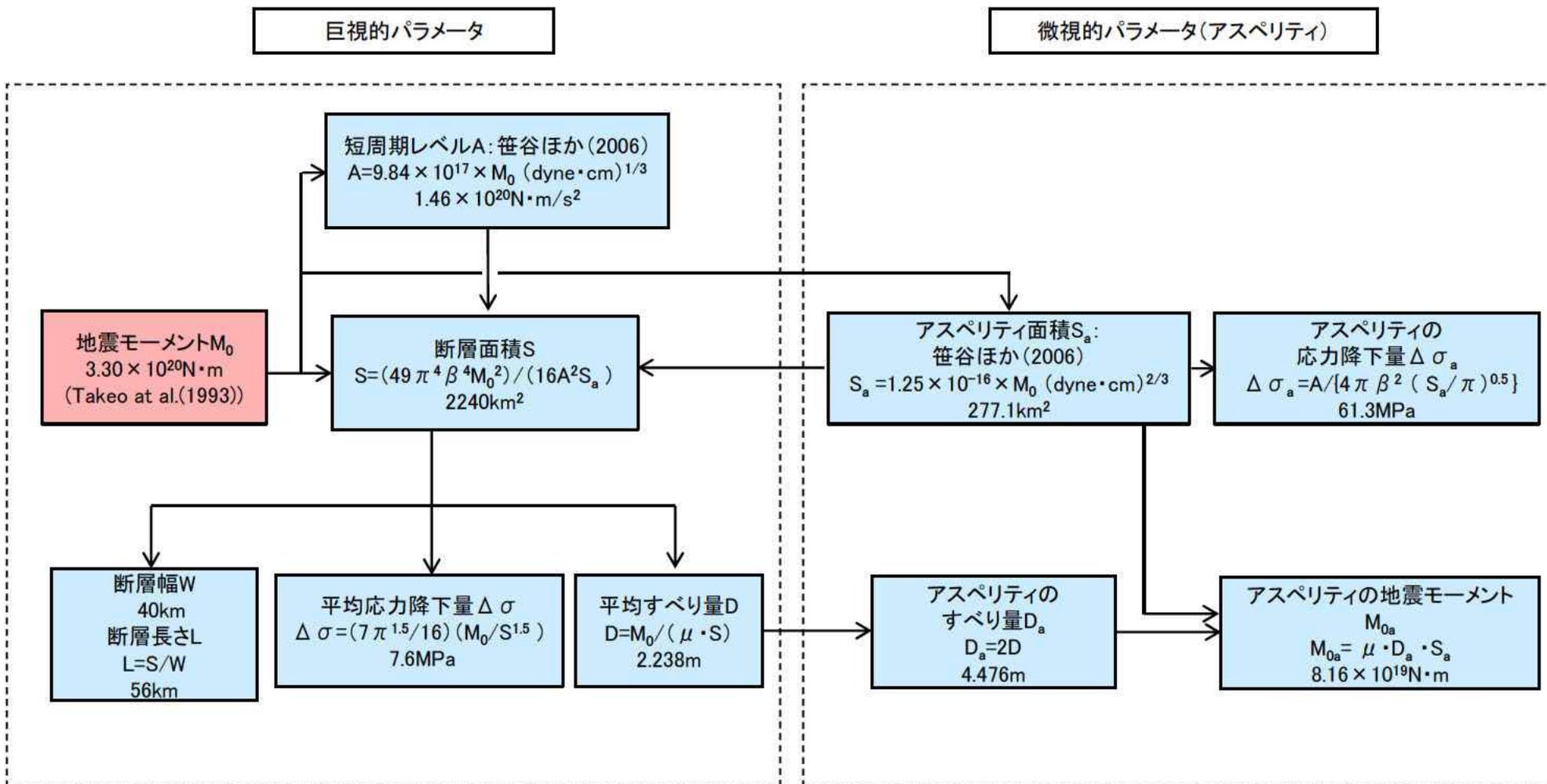


敷地最短位置
傾斜角90度モデル

1993年釧路沖型地震(敷地最短位置) 断層パラメータの設定フロー



■震源モデルのパラメータについて、強震動予測レシピ(2016)(笹谷ほか(2006))に基づき設定する。地震モーメントについては1993年釧路沖地震に関する知見(Takeo et al.(1993))に基づき設定する。断層パラメータの設定フローを下記に示す。



1993年釧路沖地震に基づき、与条件とした項目
 与条件から強震動予測レシピ(笹谷ほか(2006))に基づき設定

1. 発電所真下又はサイトから最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合

1993年釧路沖型地震(敷地最短位置+応力降下量1.5倍の影響確認) 断層パラメータ

項目		設定値	設定方法
断層上端深さ	h(km)	0度: 62.9 90度: 42.9	断層面は敷地からの距離が最短となる位置に設定し、プレート境界からの深さは、茨城県想定を参考に20kmとする
気象庁マグニチュード	Mj	7.5	1993年釧路沖地震
モーメントマグニチュード	M _w	7.6	logM ₀ =1.5M _w +9.1
地震モーメント	M ₀ (N・m)	3.30E+20	Takeo et al.(1993)
走向	θ(度)	17	プレート境界等深線より設定
傾斜角	δ(度)	0, 90	茨城県(2018)
ずれの種類	—	逆断層	—
すべり角	λ(度)	90	—
平均応力降下量	Δσ(MPa)	7.6	Δσ=(7π ^{1.5} /16)(M ₀ /S ^{1.5})
断層面積	S(km ²)	2240	S=(49π ⁴ β ⁴ M ₀ ²)/(16A ² S _a)
断層長さ	L(km)	56	L=S/W
断層幅	W(km)	40	1993年釧路沖地震(Morikawa and Sasatani(2004))
密度	ρ(g/cm ³)	3.25	地震調査研究推進本部(2004)
せん断波速度	β(km/s)	4.5	地震調査研究推進本部(2004)
剛性率	μ(N/m ²)	6.58E+10	μ=ρβ ²
平均すべり量	D(m)	2.238	D=M ₀ /(μS)
破壊伝播速度	V _r (km/s)	3.2	V _r =0.72V _s (Geller,1976)
短周期レベル	A(N・m/s ²)	1.46E+20	A=9.84×10 ¹⁷ ×M ₀ ^{1/3} [dyne・cm] (笹谷ほか(2006)のM ₀ -A関係)
高周波遮断係数	f _{max} (Hz)	13.5	地震調査研究推進本部の海溝型地震

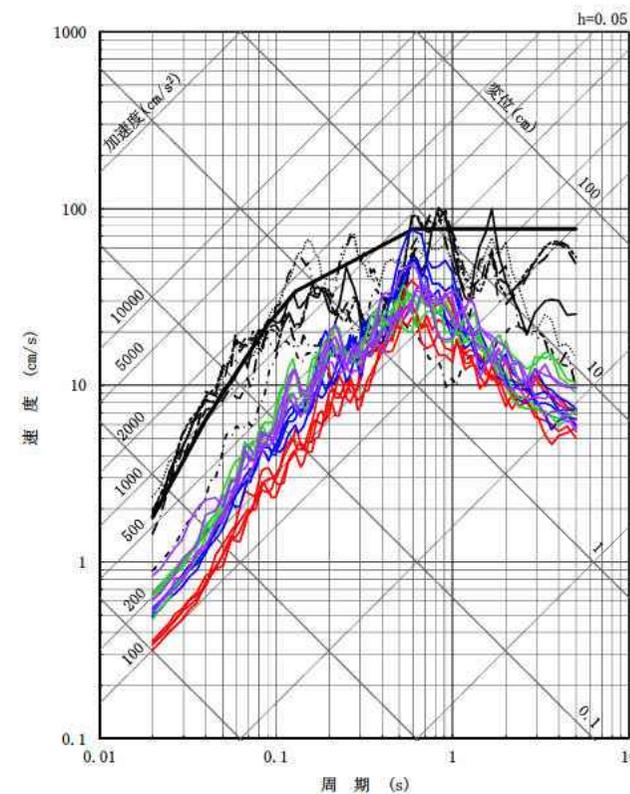
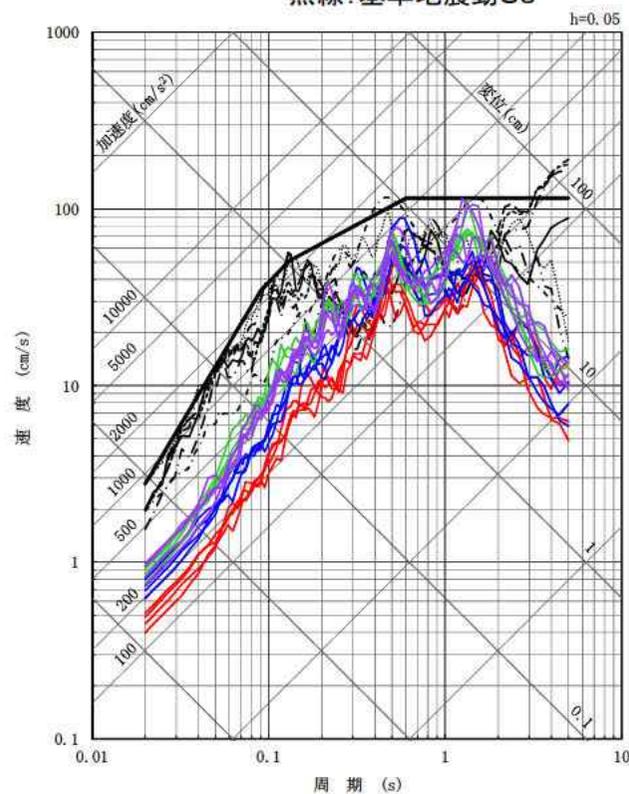
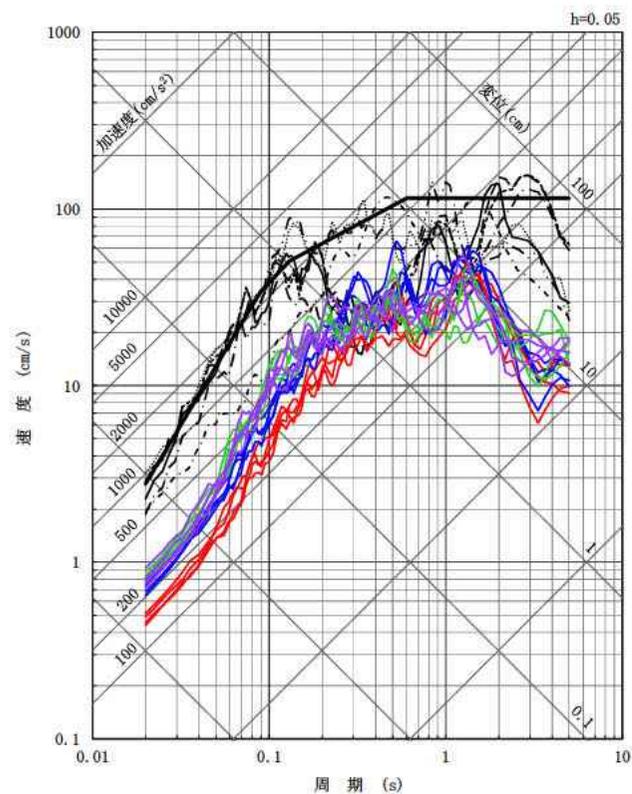
項目		設定値	設定方法	
アスペリティ全体	面積	S _a (km ²)	277.1	S _a =1.25×10 ⁻¹⁶ M ₀ ^{2/3} [dyne・cm] (笹谷ほか(2006)のM ₀ -S _a 関係)
	すべり量	D _a (m)	4.476	D _a =2D
	地震モーメント	M _{0a} (N・m)	8.16E+19	M _{0a} =μD _a S _a
	応力降下量	Δσ _a (MPa)	92.0	Δσ _a =1.5×A/(4πβ ²)/(S _a /π) ^{0.5}
各アスペリティ	面積	S _{a1} (km ²)	138.5	S _{a1} =S _a /2
	すべり量	D _{a1} (m)	4.476	D _{a1} =D _a
	地震モーメント	M _{0a1} (N・m)	4.08E+19	M _{0a1} =μD _{a1} S _{a1}
	応力降下量	Δσ _{a1} (MPa)	92.0	Δσ _{a1} =Δσ _a
背景領域	面積	S _b (km ²)	1963.2	S _b =S-S _a
	すべり量	D _b (m)	1.922	D _b =M _{0b} /(μS _b)
	地震モーメント	M _{0b} (N・m)	2.48E+20	M _{0b} =M ₀ -M _{0a}
	実効応力	Δσ _b (MPa)	11.8	Δσ _b =(D _b /W _b)/(D _a /W _a)Δσ _a W _a =12km
Q値	Q	110f ^{0.69}	佐藤他(1994)	

1. 発電所真下又はサイトから最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合
断層モデルを用いた手法による評価結果(敷地最短位置)



■統計的グリーン関数法による地震動評価結果

- 深さ100kmモデル(破壊開始点1~4)
 - 深さ100kmモデル+ $\Delta\sigma$ 1.5倍(破壊開始点1~4)
 - 敷地最短位置 傾斜角0度モデル(破壊開始点1~4)
 - 敷地最短位置 傾斜角90度モデル(破壊開始点1~4)
 - 黒線: 基準地震動Ss
- } 第5回ワーキングチーム
 } 第16回ワーキングチーム
 } 追加ケース



敷地からの距離が最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合の地震動評価を行い、
 基準地震動Ssを下回っていることを確認した。

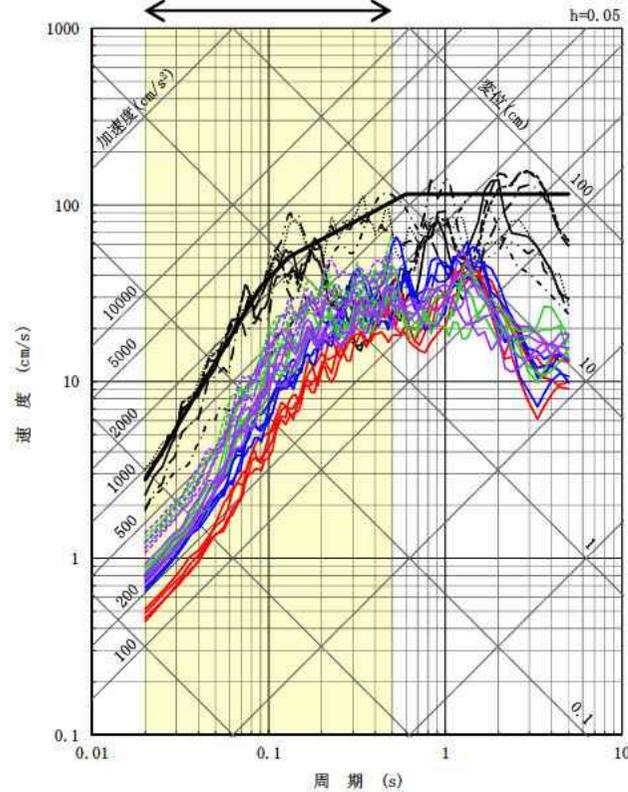
■統計的グリーン関数法による地震動評価結果

- 深さ100kmモデル(破壊開始点1~4)
- 深さ100kmモデル+ $\Delta\sigma$ 1.5倍(破壊開始点1~4)
- 敷地最短位置 傾斜角0度モデル(破壊開始点1~4)
- 敷地最短位置 傾斜角90度モデル(破壊開始点1~4)
- - - 敷地最短位置 傾斜角0度モデル 短周期帯1.5倍(破壊開始点1~4)
- - - 敷地最短位置 傾斜角90度モデル短周期帯1.5倍(破壊開始点1~4)
- 黒線: 基準地震動Ss

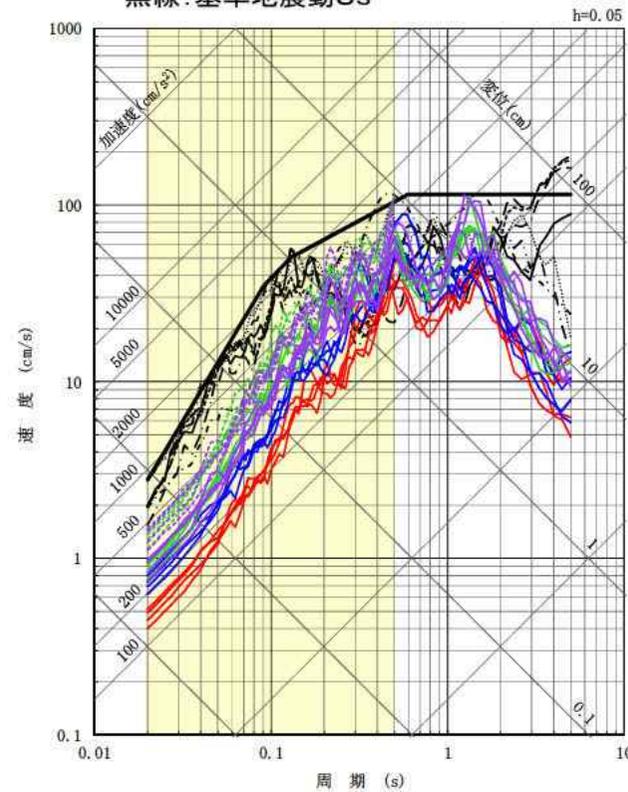
第5回ワーキングチーム

第16回ワーキングチーム
追加ケース

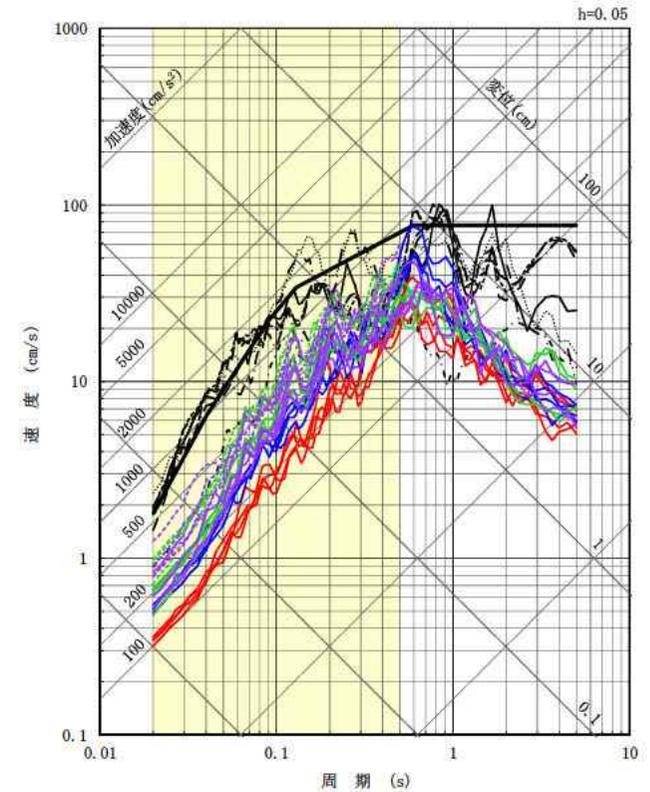
原子力施設にとって
重要な短周期帯
(0.02s~0.5s)



NS方向



EW方向



UD方向

さらに敷地に厳しい条件で地震が発生した場合の影響確認として、敷地からの距離が最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合の地震動評価に対し、原子力施設にとって重要な短周期帯0.02秒から0.5秒の応答スペクトルを1.5倍(基本震源モデルの応力降下量1.5倍に相当)にしても、基準地震動Ssを下回っていることを確認した。

1. 発電所真下又はサイトから最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合
 参考 断層モデルを用いた手法による評価結果(敷地最短位置+短周期帯1.5倍の影響確認)



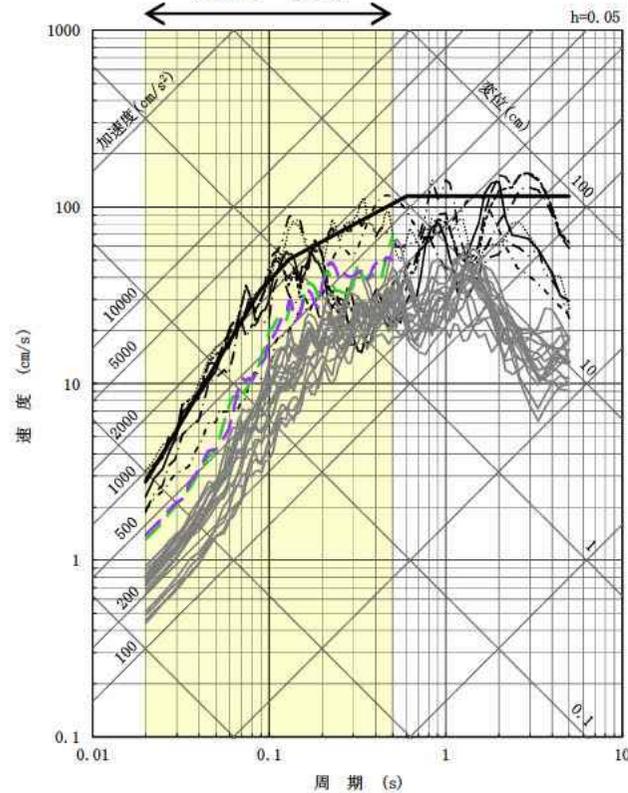
■統計的グリーン関数法による地震動評価結果

- 深さ100kmモデル(破壊開始点1~4)
- 深さ100kmモデル+ $\Delta\sigma$ 1.5倍(破壊開始点1~4)
- 敷地最短位置 傾斜角0度モデル(破壊開始点1~4)
- 敷地最短位置 傾斜角90度モデル(破壊開始点1~4)
- 敷地最短位置 傾斜角0度モデル 短周期帯1.5倍(破壊開始点1~4の包絡線)
- 敷地最短位置 傾斜角90度モデル短周期帯1.5倍(破壊開始点1~4の包絡線)
- 黒線: 基準地震動 S_s

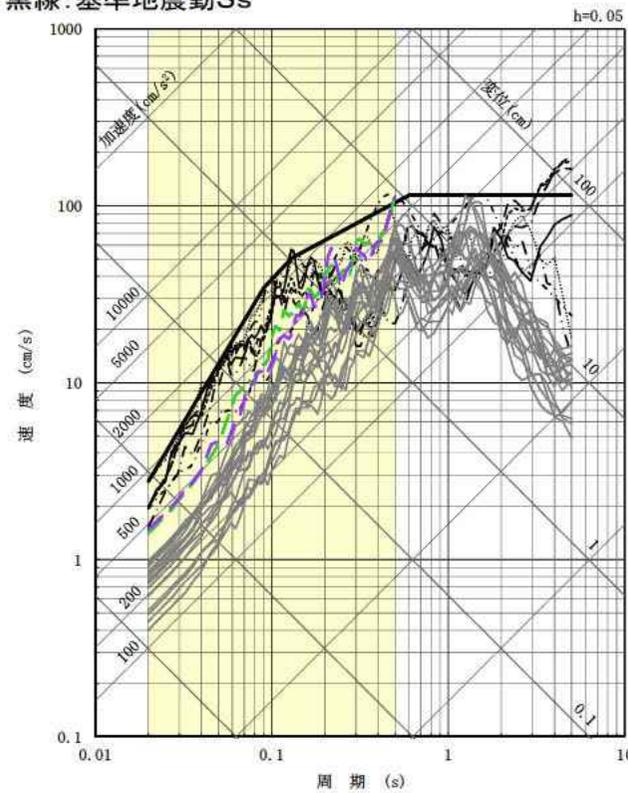
第5回ワーキングチーム

第16回ワーキングチーム
追加ケース

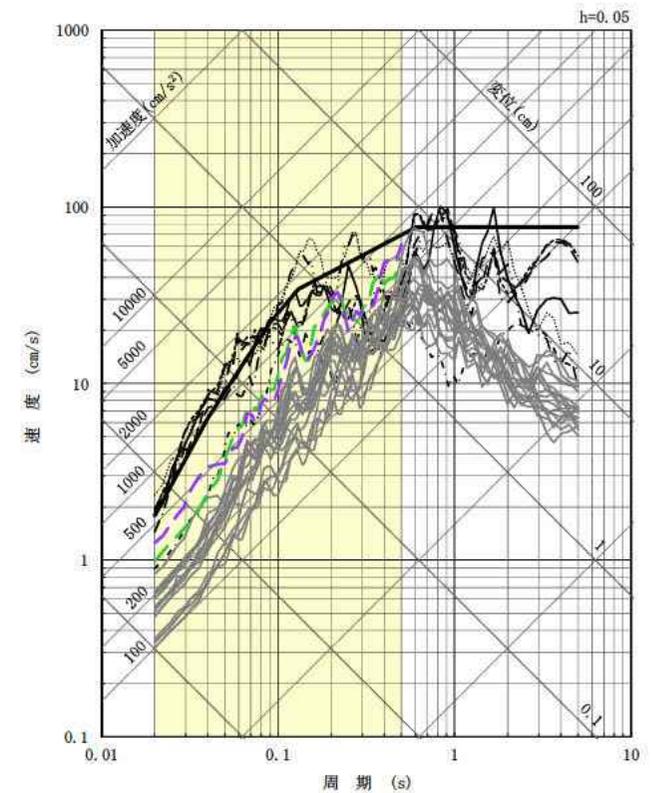
原子力施設にとって
重要な短周期帯
(0.02s~0.5s)



NS方向



EW方向



UD方向

1. 発電所真下又はサイトから最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合
断層モデルを用いた手法による評価結果(敷地最短位置+短周期帯1.5倍(詳細)の影響確認)

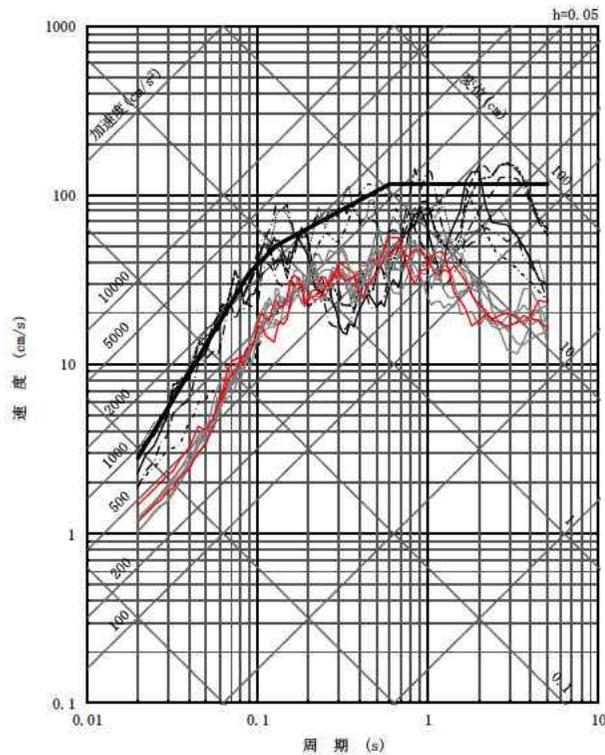


■統計的グリーン関数法による地震動評価結果

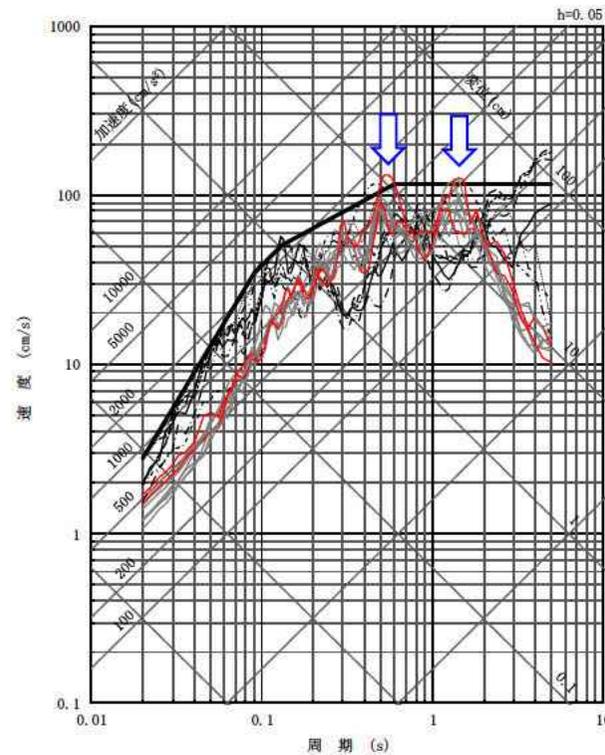
- ・1993年釧路沖型地震(敷地最短位置+応力降下量1.5倍(詳細)の影響確認)は、一部の周期帯で基準地震動 S_s を超過した(傾斜角 0° 破壊開始点2, 傾斜角 90° 破壊開始点1,2,3)。
- ・これらのうち、影響が大きいと考えられる傾斜角 90° 破壊開始点2,3を代表として選定し、施設への影響評価を行う。

— : 1993年釧路沖型地震(敷地最短位置+応力降下量1.5倍(詳細)の影響確認) 施設影響検討ケース
— : 1993年釧路沖型地震(敷地最短位置+応力降下量1.5倍(詳細)の影響確認) その他のケース
 黒実線, 黒破線 : 基準地震動 S_s

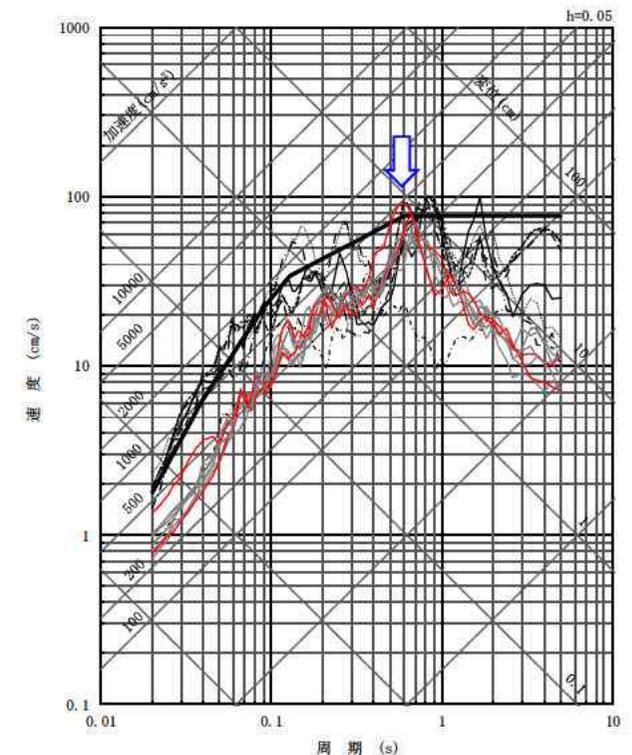
(青矢印は S_s 超過の個所を示す)



NS成分



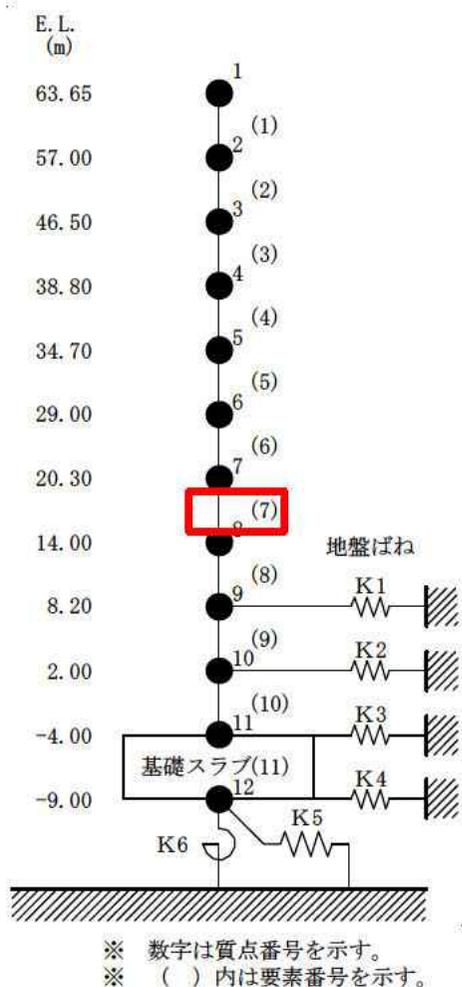
EW成分



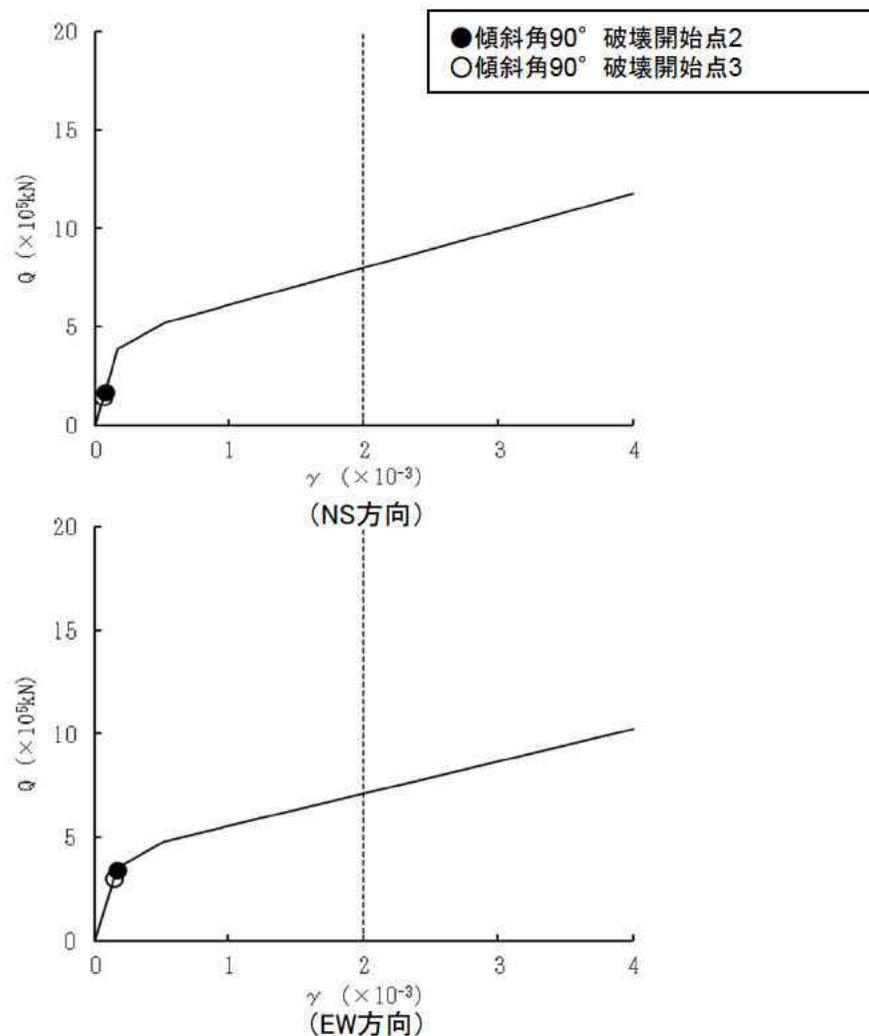
UD成分

■ の耐震評価結果

- ・ 1993年釧路沖型地震(敷地最短位置+応力降下量1.5倍の影響確認)を入力とした の地震応答解析を実施し、耐震壁のせん断ひずみを算出した結果、耐震壁の最大せん断ひずみが最も大きくなるのは要素番号(7)の 0.166×10^{-3} であり、許容限界(2.0×10^{-3})を超えないことを確認した。



地震応答解析モデル(水平方向)



せん断スケルトン曲線上の最大応答値(要素番号(7))

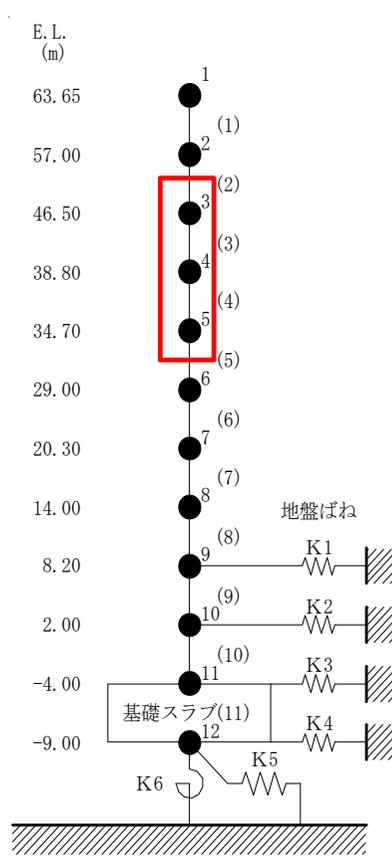
1. 発電所真下又はサイトから最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合 施設影響検討(2/4)



■ 設備の影響検討結果

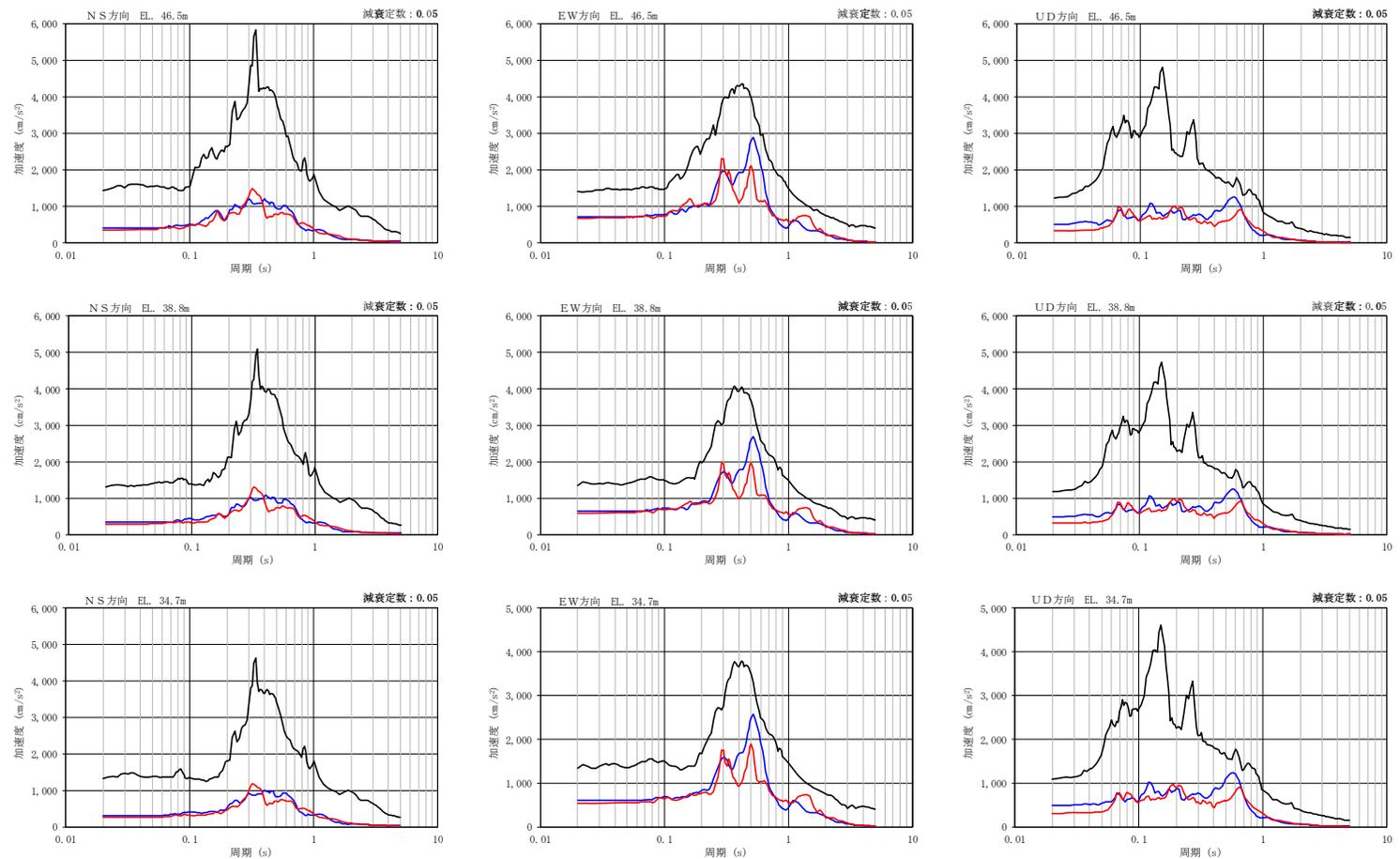
1993年釧路沖型地震(敷地最短位置+応力降下量1.5倍の影響確認)を入力とした の地震応答解析の応答を用いて作成した床応答スペクトルと、設備設計に適用した基準地震動Ss8波を用いた床応答スペクトルとを比較した。下図に示すとおり**設備設計に適用した床応答スペクトルは、1993年釧路沖型地震(敷地最短位置+応力降下量1.5倍の影響確認)による床応答スペクトルよりも大きいことを確認した。**

— 傾斜角90° 破壊開始点2 — 傾斜角90° 破壊開始点3 — 設備設計用床応答スペクトル(Ss8波包絡)



 :FRS比較箇所

地震応答解析モデル(例:水平方向)

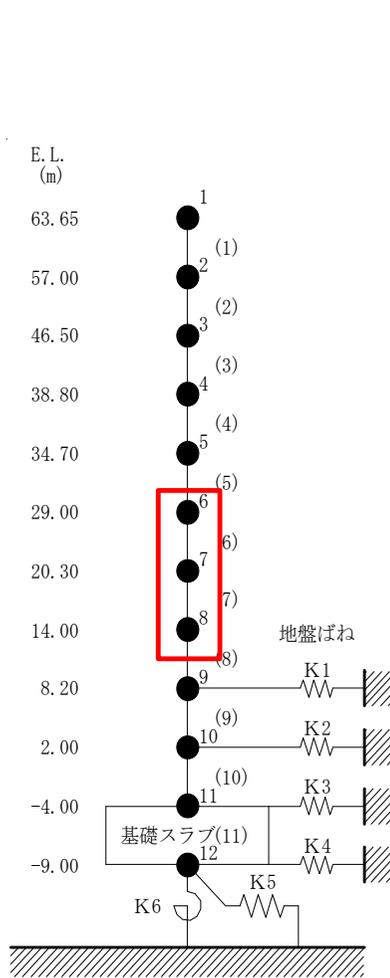


床応答スペクトル比較図

1. 発電所真下又はサイトから最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合 施設影響検討(3/4)

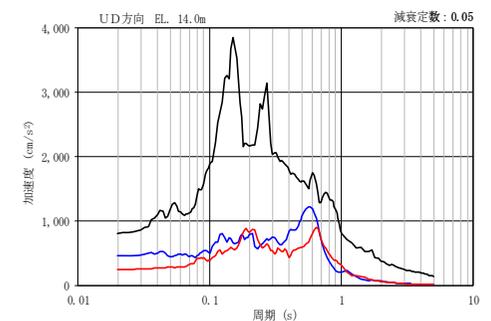
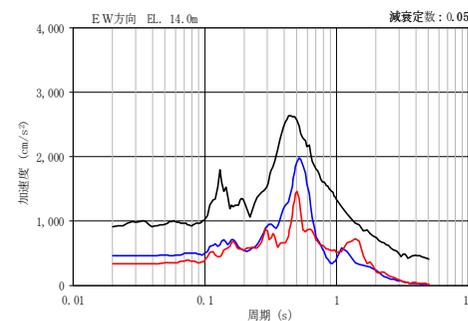
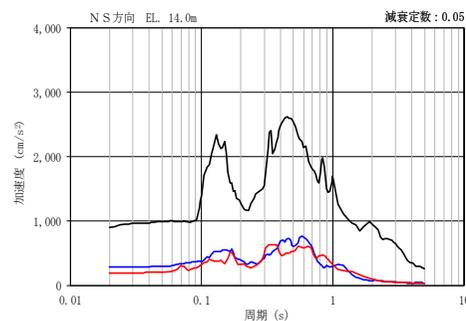
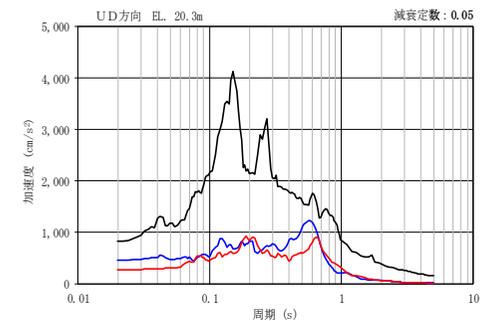
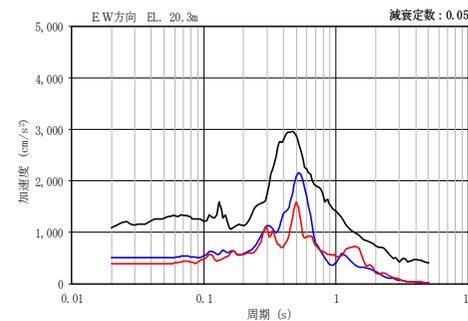
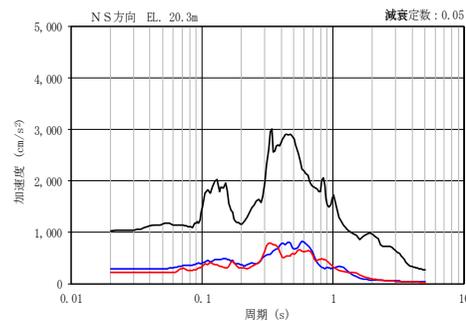
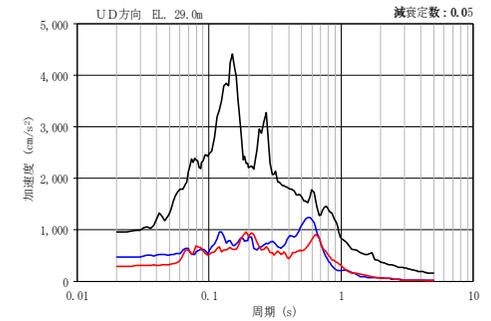
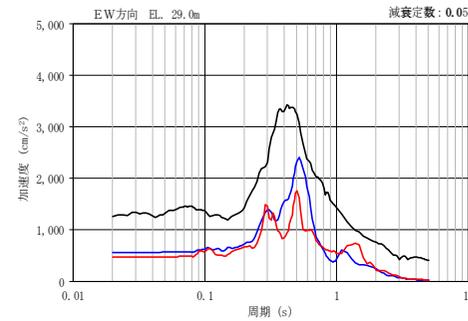
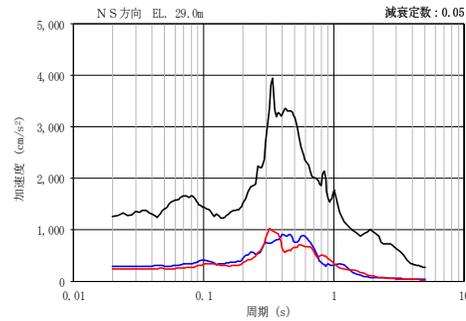


— 傾斜角90° 破壊開始点2
 — 傾斜角90° 破壊開始点3
 — 設備設計用床応答スペクトル(Ss8波包絡)



 :FRS比較箇所

地震応答解析モデル(水平方向)

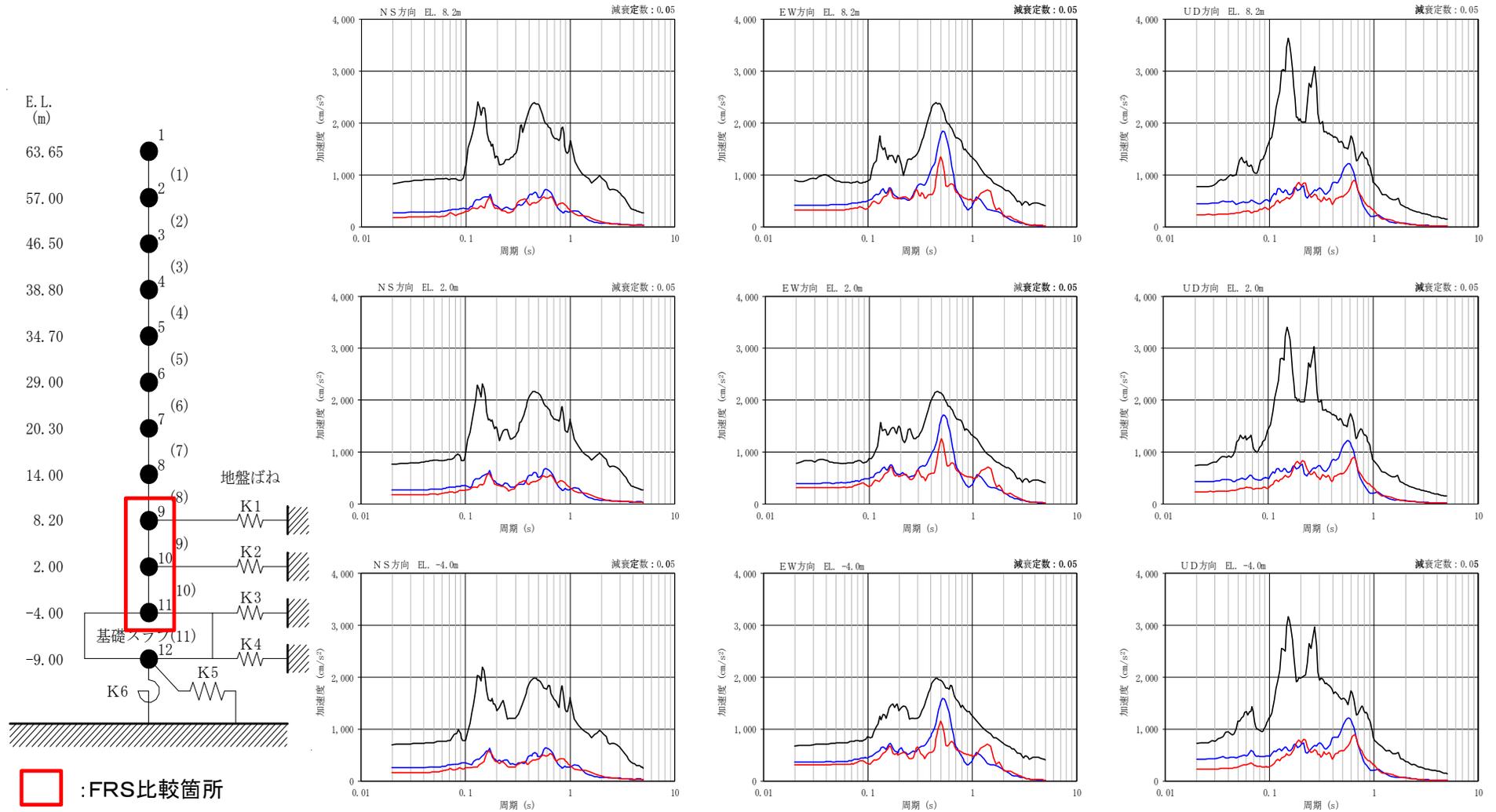


床応答スペクトル比較図

1. 発電所真下又はサイトから最も近くなる位置の太平洋プレート内に震源を置いた場合 施設影響検討(4/4)



— 傾斜角90° 破壊開始点2
 — 傾斜角90° 破壊開始点3
 — 設備設計用床応答スペクトル(Ss8波包絡)



:FRS比較箇所

地震応答解析モデル(水平方向)

床応答スペクトル比較図