

大飯発電所 地下構造の把握について

平成25年9月18日
関西電力株式会社

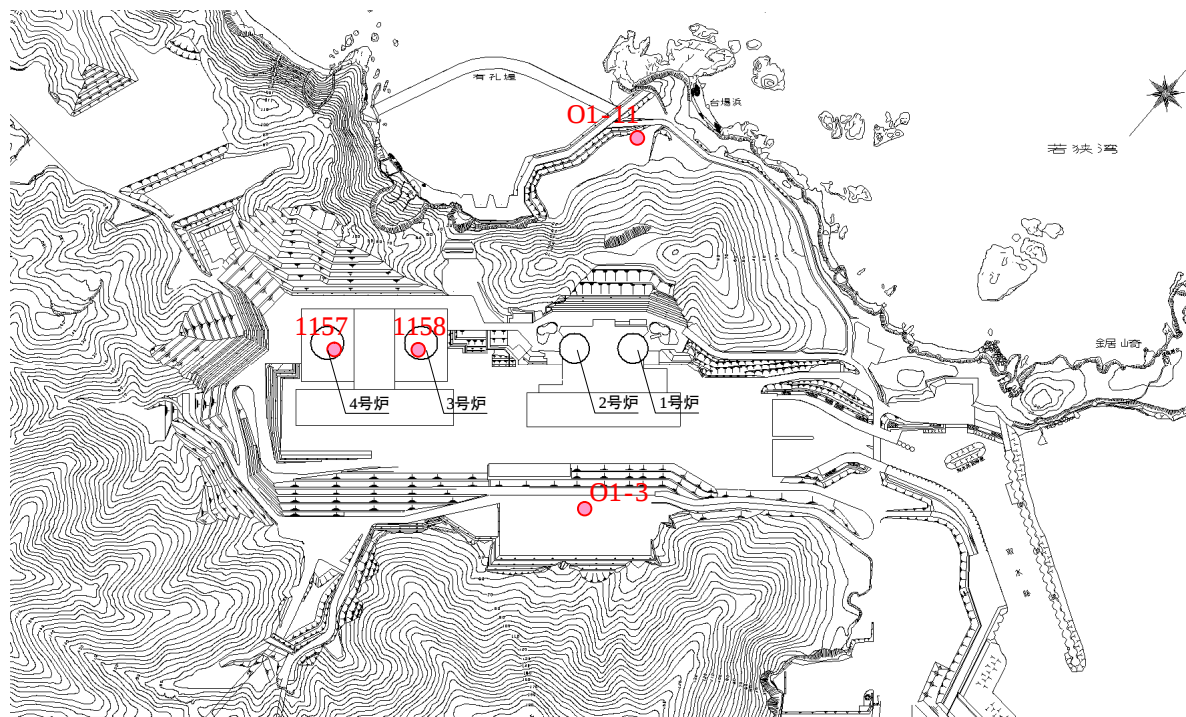
1. これまでに実施した調査結果について
 - 1－1 敷地内の地盤速度構造に関する調査
 - 1－2 表層部の減衰定数に関する調査
 - 1－3 敷地周辺の深部速度構造に関する調査
2. 地下構造把握のための追加調査計画について
 - 2－1 地下構造把握のための追加調査
 - 2－2 敷地内での微動調査
3. まとめ

1-1 敷地内の地盤速度構造に関する調査

2

■ 敷地浅部の地盤構造について(敷地内ボーリングデータ)

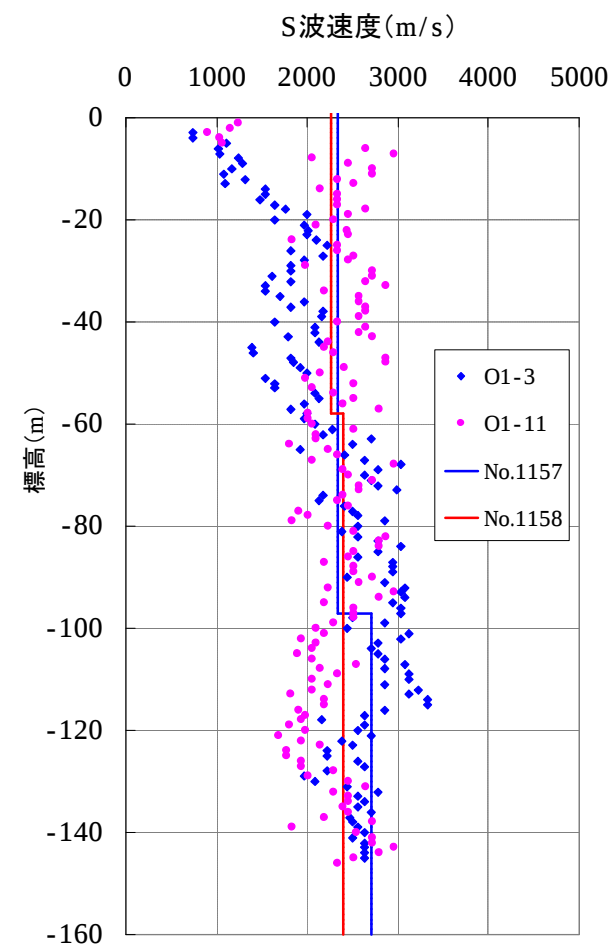
大飯3・4号機の現状に関する評価会合
第4回資料3-1再掲



大飯発電所 PS検層調査位置

敷地の速度構造を確認した結果、ごく表層部においては風化の影響等により、ややばらつきは見られるものの、ほぼ均質な地盤と考えられる。

⇒ 敷地内の浅部構造に特異な構造は見られない

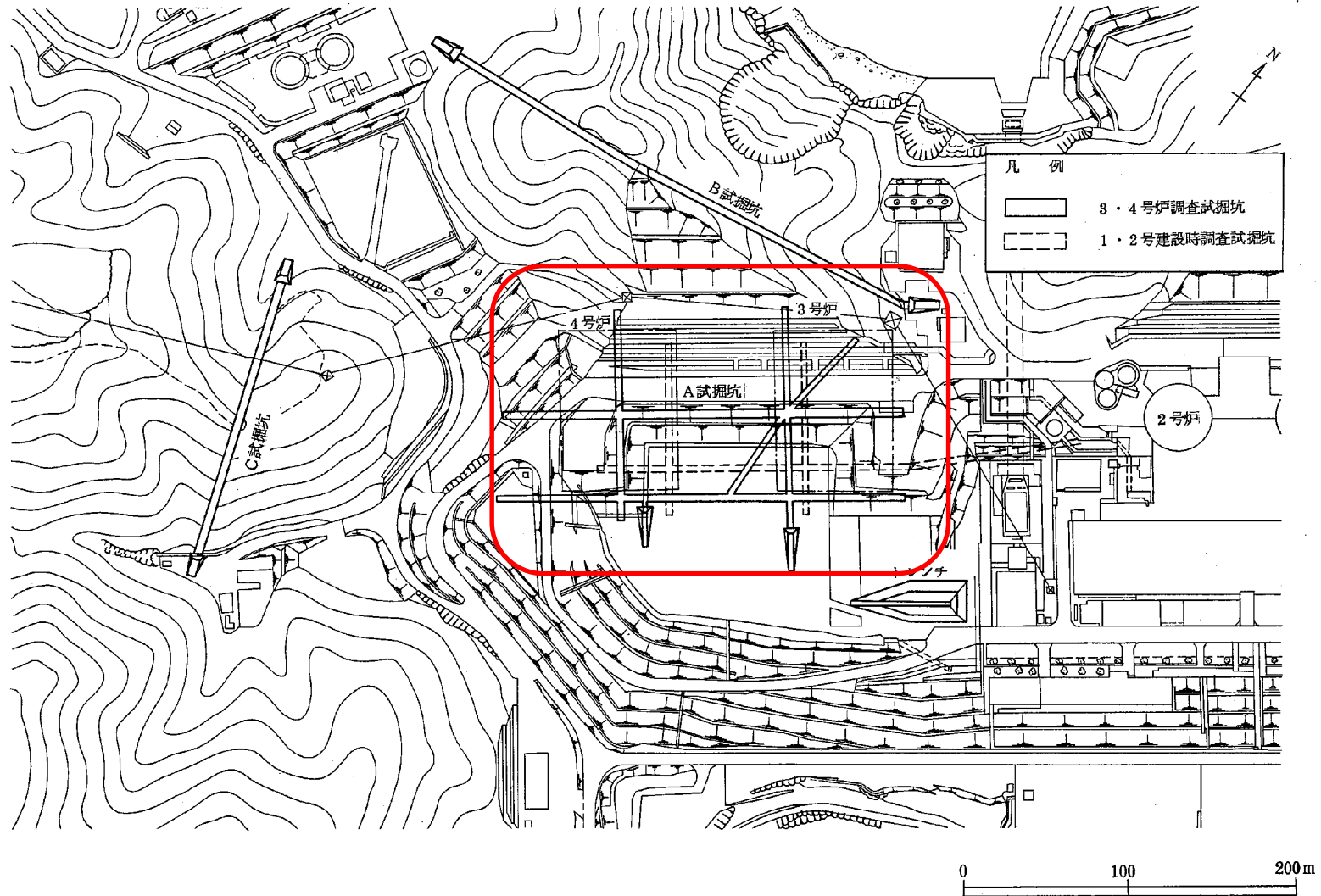


S波速度構造

1-1敷地内の地盤速度構造に関する調査

3

■大飯発電所3,4号炉試掘坑位置

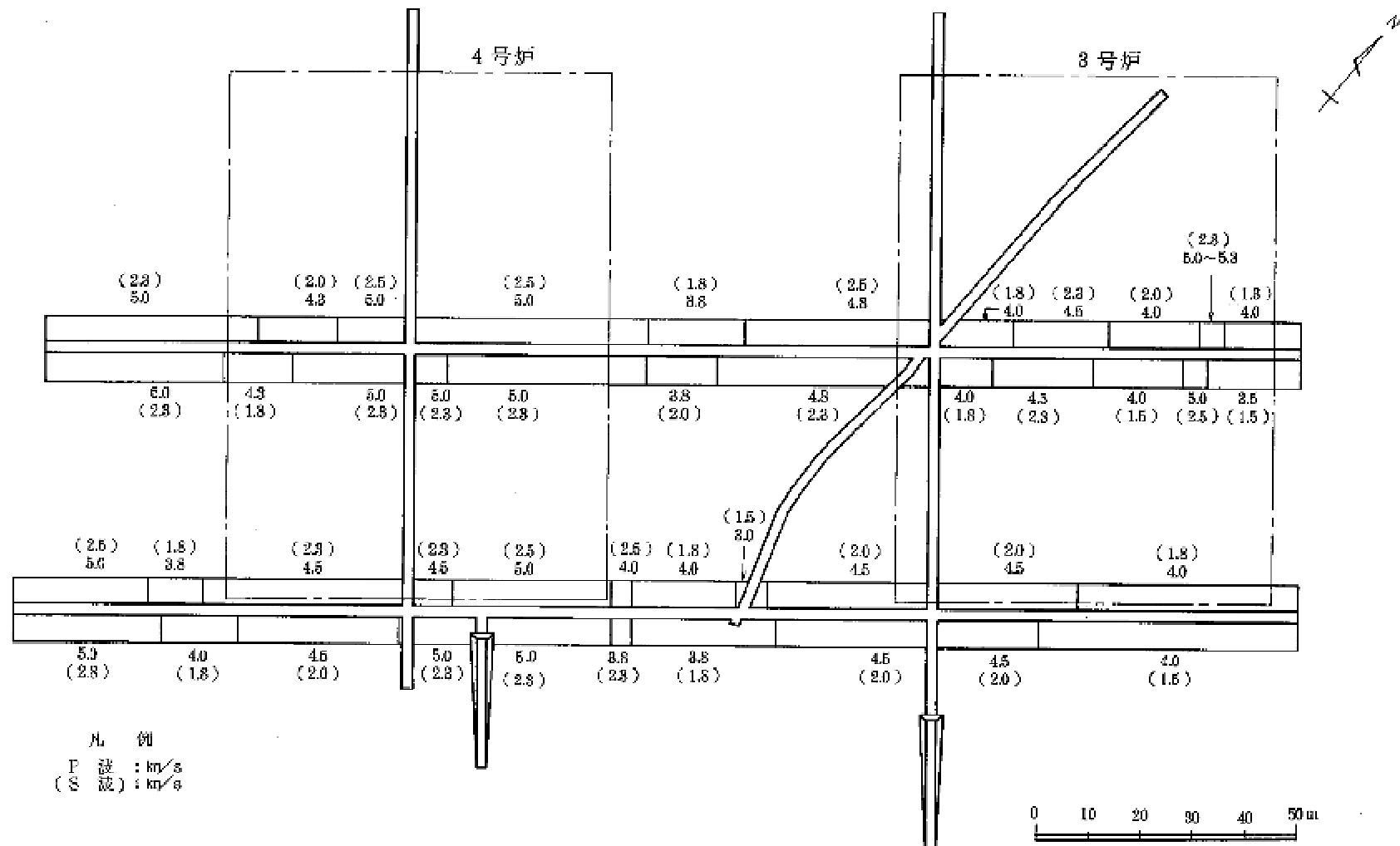


1-1敷地内の地盤速度構造に関する調査

4

■敷地内での試掘坑弾性波探査より、解放基盤のP波速度を4.3km/s、S波速度を2.2km/sと評価した。

大飯3, 4号機設置許可
申請書より



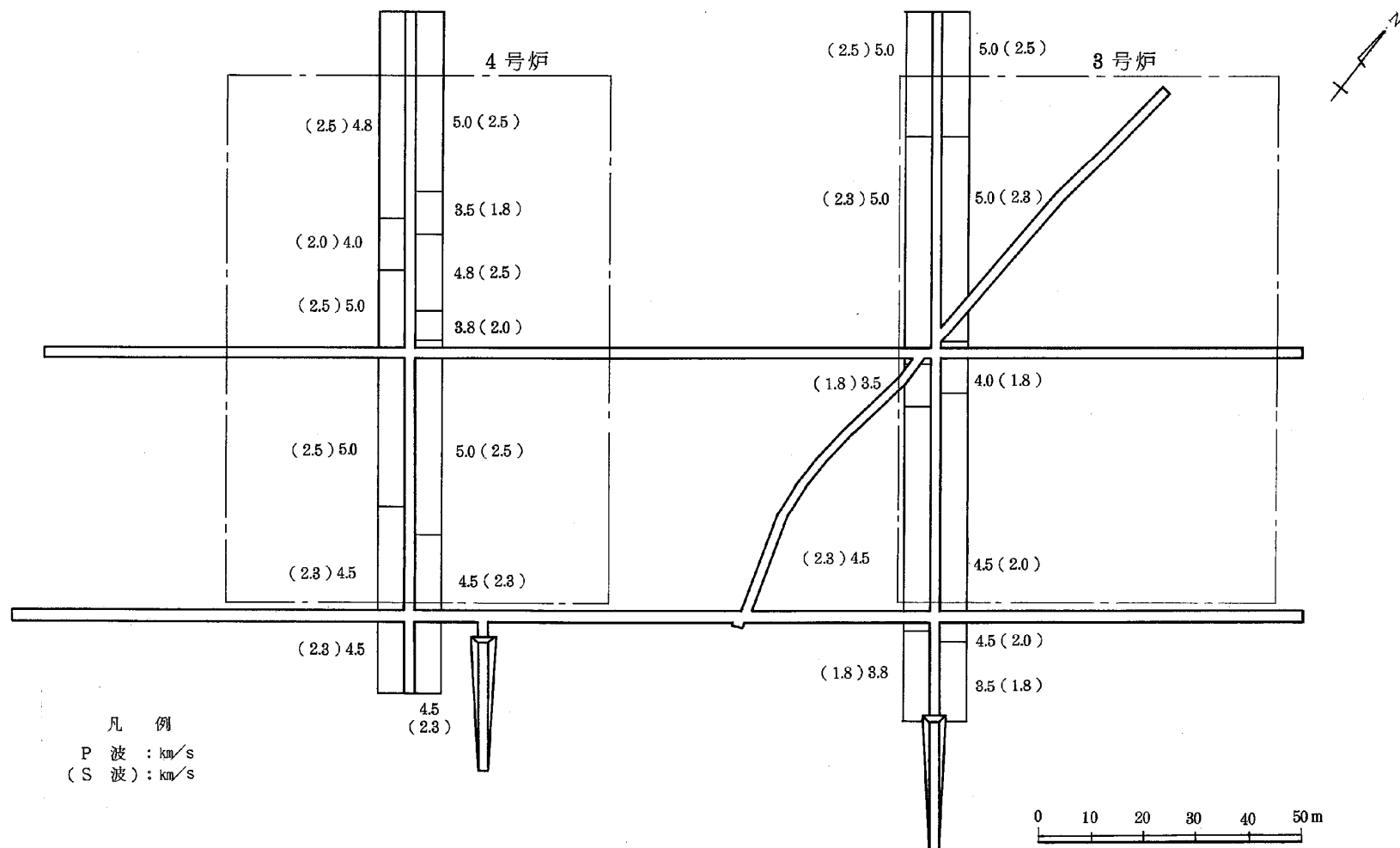
試掘坑内弾性波速度図(1) 本坑

1-1敷地内の地盤速度構造に関する調査

5

■敷地内での試掘坑弾性波探査より、解放基盤のP波速度を4.3km/s、S波速度を2.2km/sと評価した。

大飯3, 4号機設置許可
申請書より

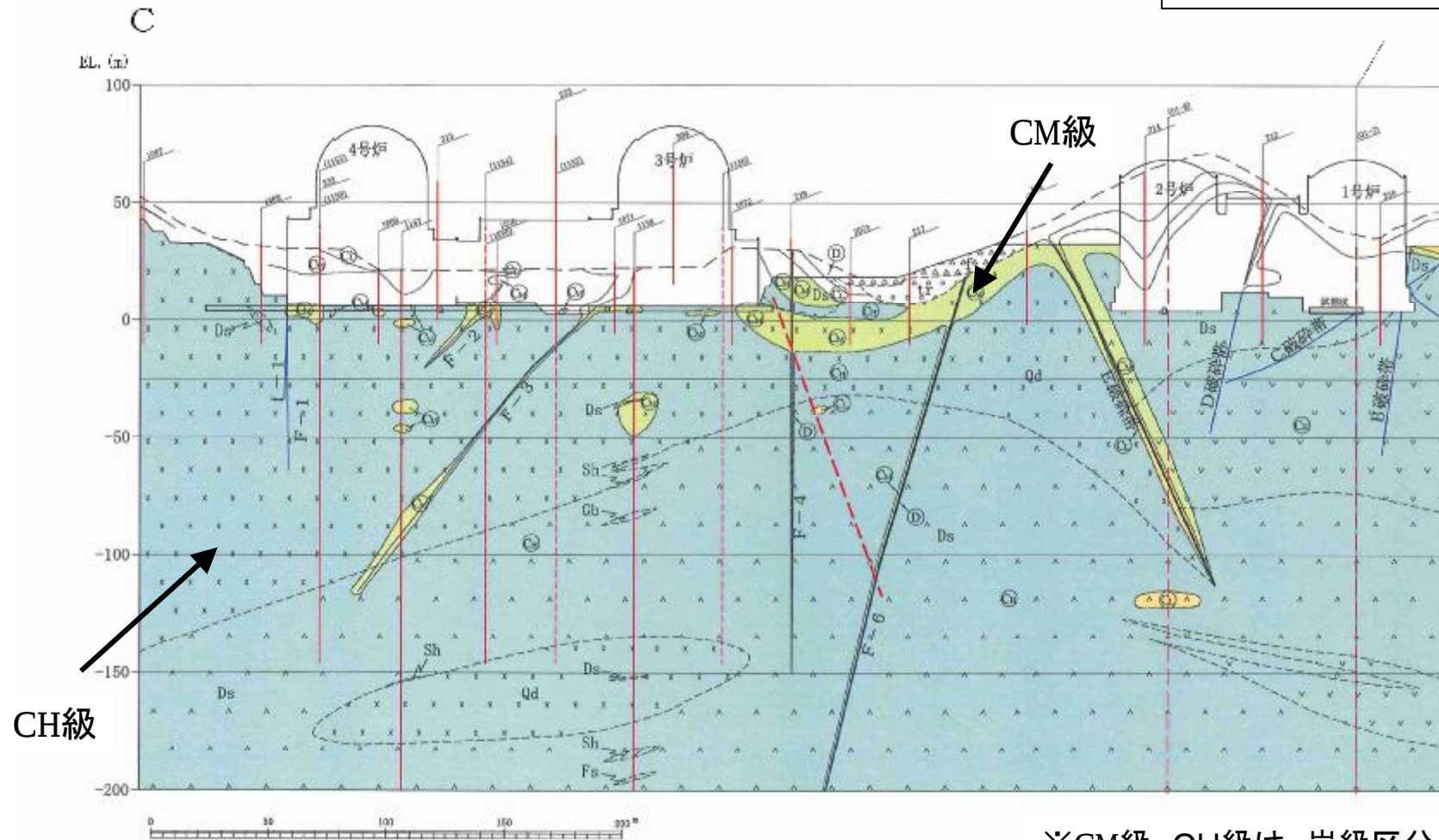


1-1敷地内の地盤速度構造に関する調査

6

■原子炉建屋基礎岩盤については、CM級以上の岩盤が基礎直下より確認されている。

大飯発電所敷地内破碎帯の調査に関する
有識者会合 第5回資料「大飯・現調6-1」
を加筆修正



※CM級、CH級は、岩級区分

3, 4号機直下の地質断面図

- 敷地内のボーリングデータ、PS検層結果や、試掘坑内での弾性波探査結果等から、敷地浅部にS波速度が2.2km/s程度の硬質な岩盤が広がっていることを確認した。

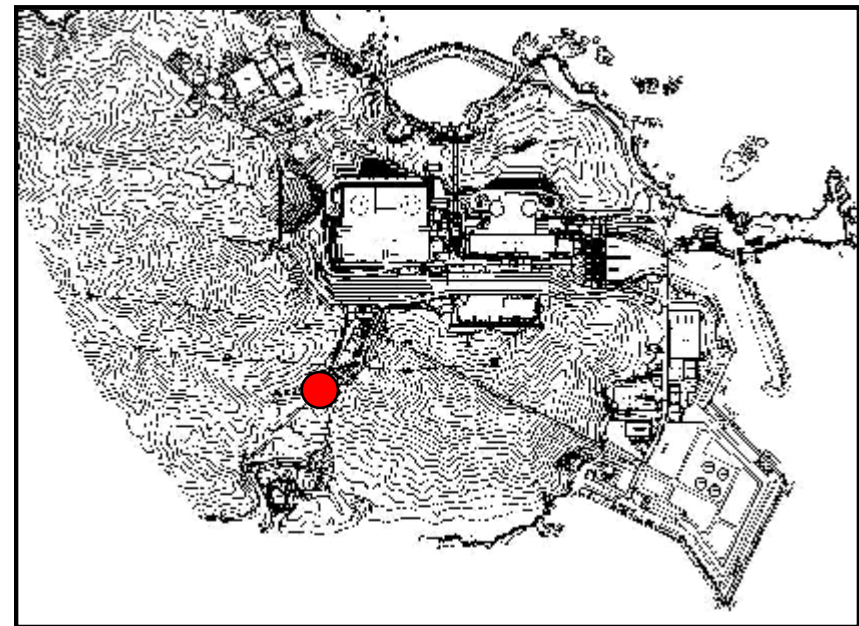
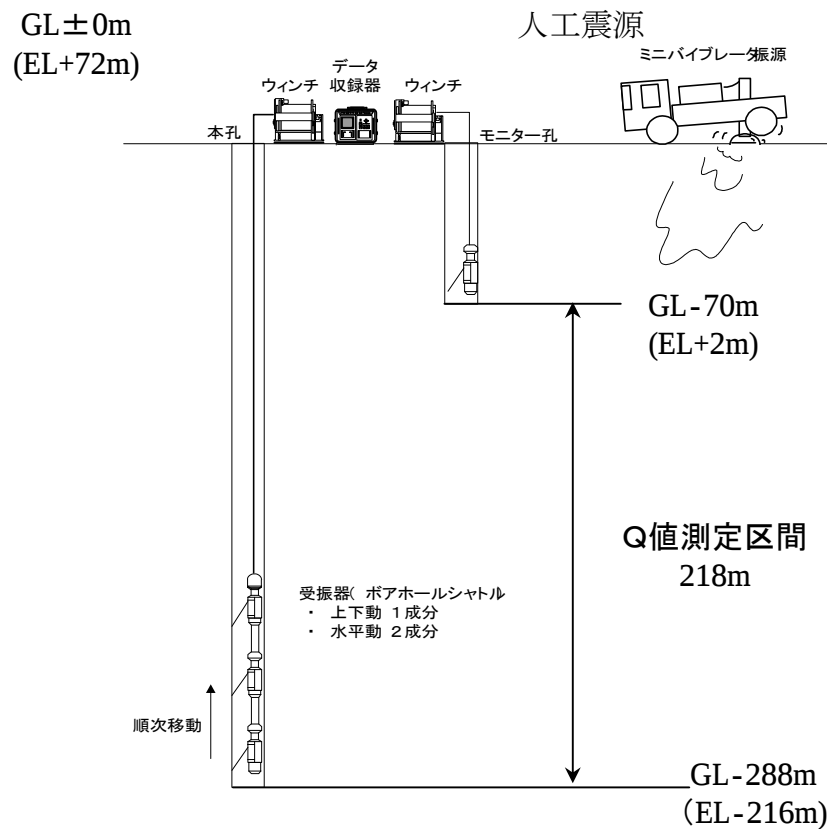
1-2表層部の減衰定数に関する調査

大飯3・4号機の現状に関する評価
会合 第4回資料3-1再掲

8

■敷地浅部の地盤構造について(ボーリング孔を用いたQ値測定)

ボーリング孔を用いて、ミニバイブおよび板叩き起振によるQ値測定を実施。



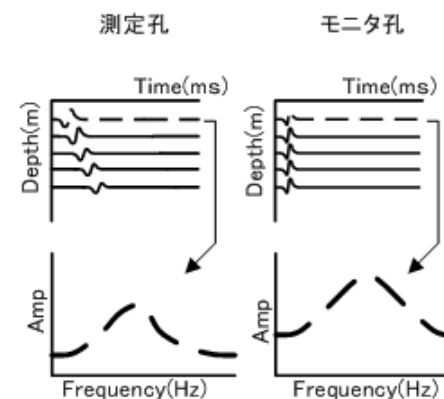
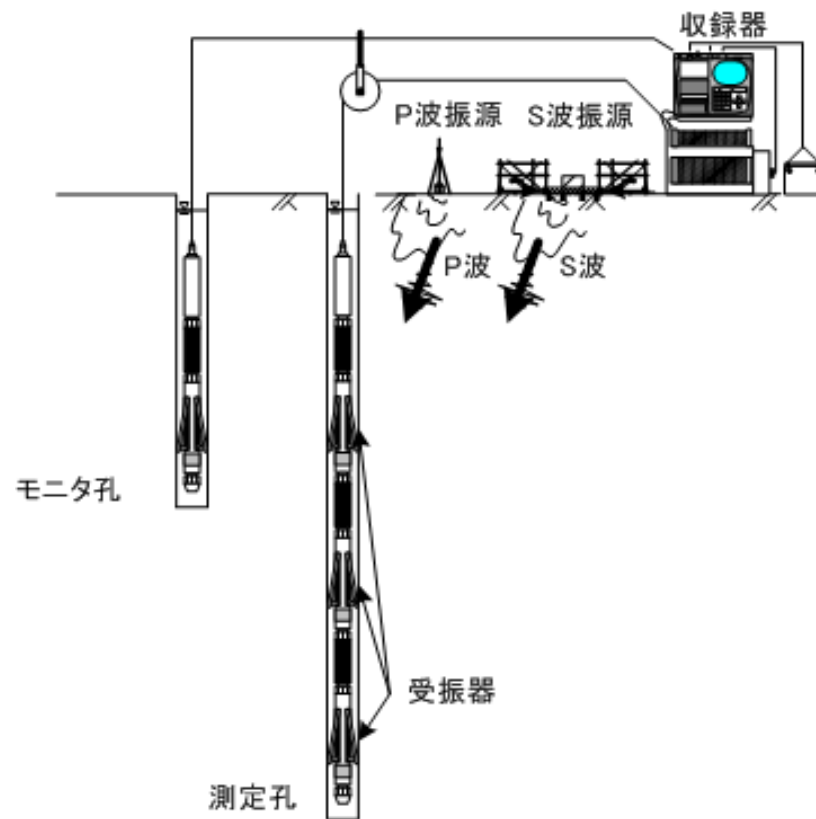
測定位置

1-2表層部の減衰定数に関する調査

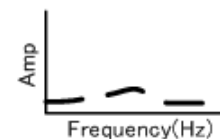
9

■Q値測定の概要

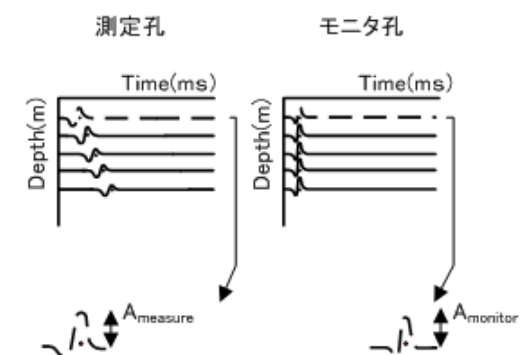
地表にて人工的に弾性波を発生させ、ボーリング孔内に設置した受信機で観測された波形データから振幅スペクトル法および最大振幅法によりQ値を求める。



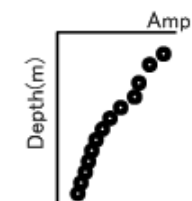
測定孔 / モニタ孔



振幅スペクトル法



測定孔 (A_{measure}) / モニタ孔 (A_{monitor})

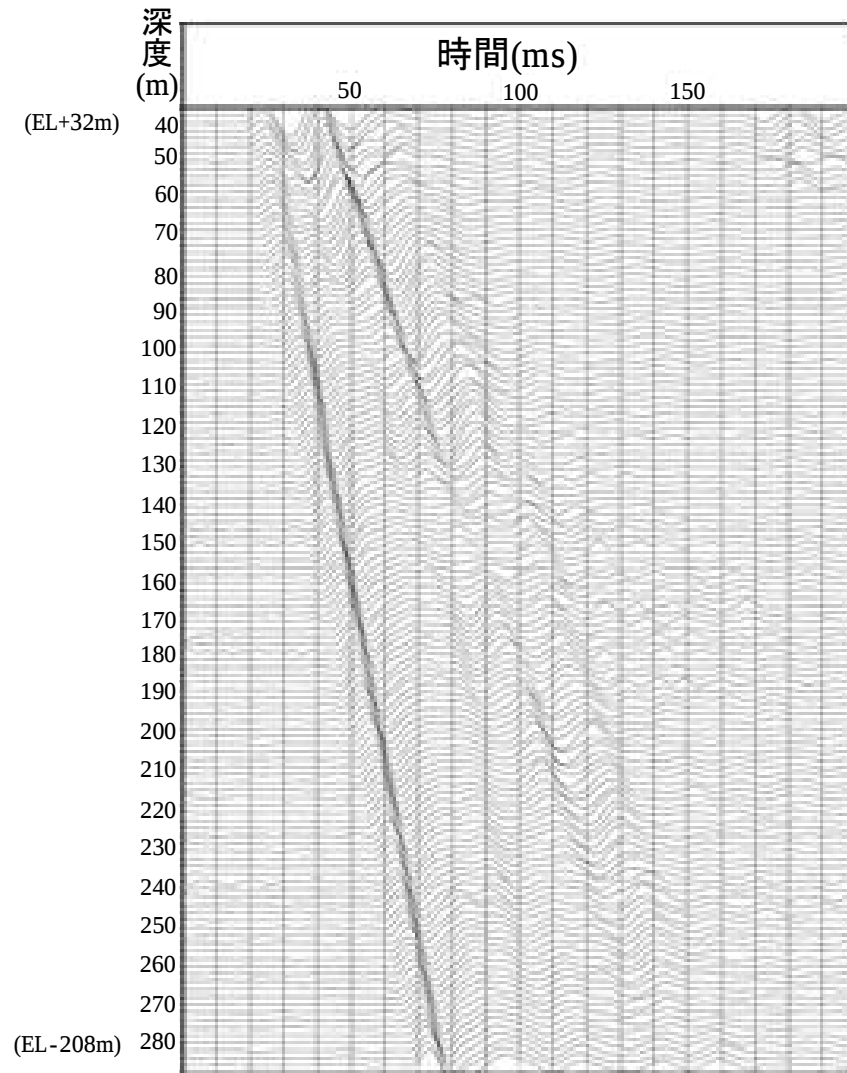


最大振幅法

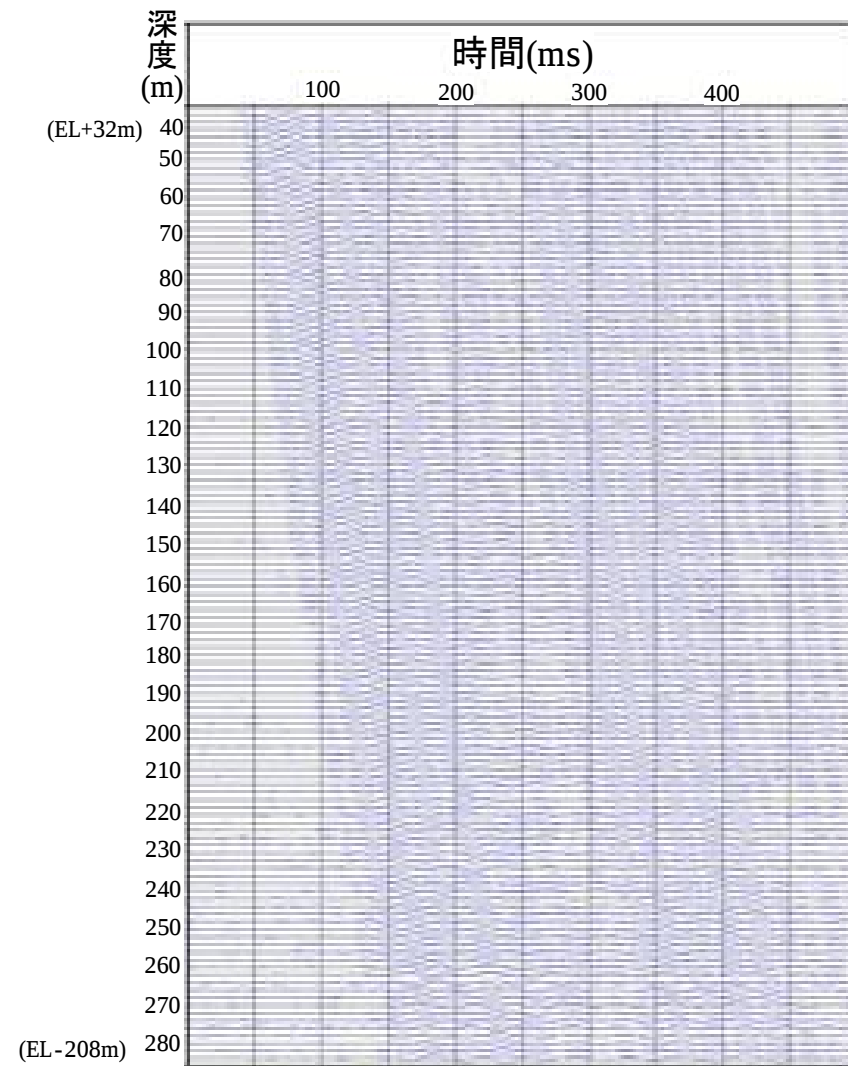
1-2表層部の減衰定数に関する調査

10

■観測波形



P波



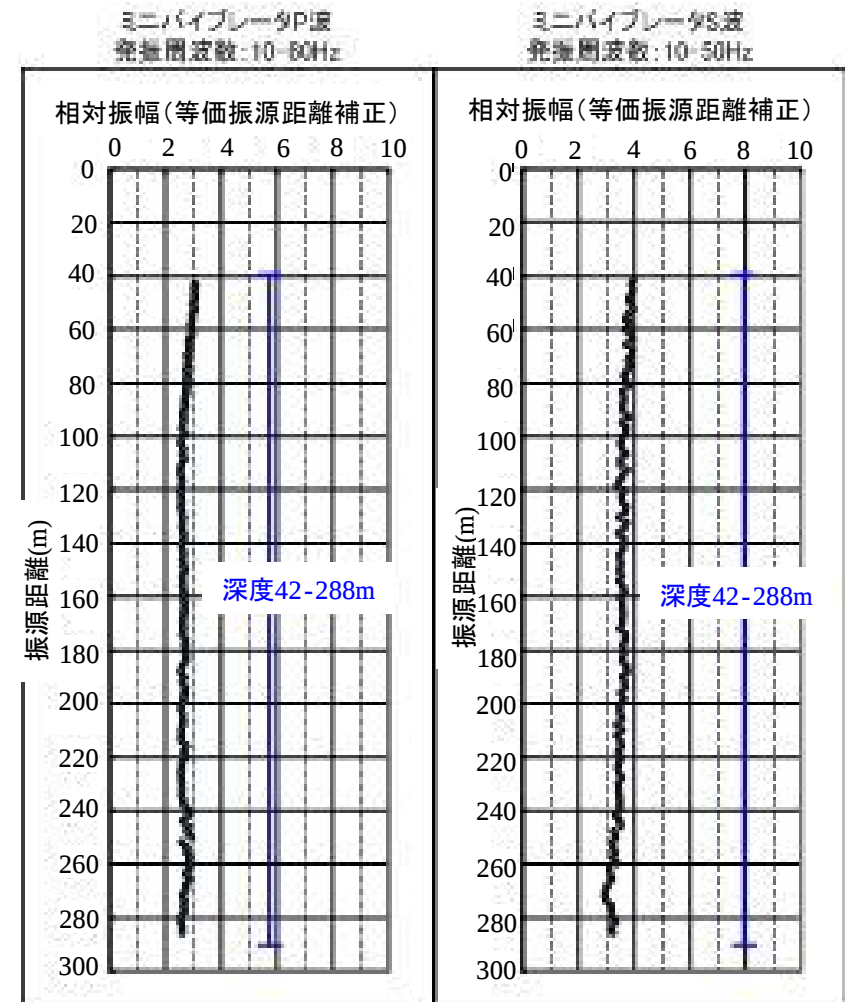
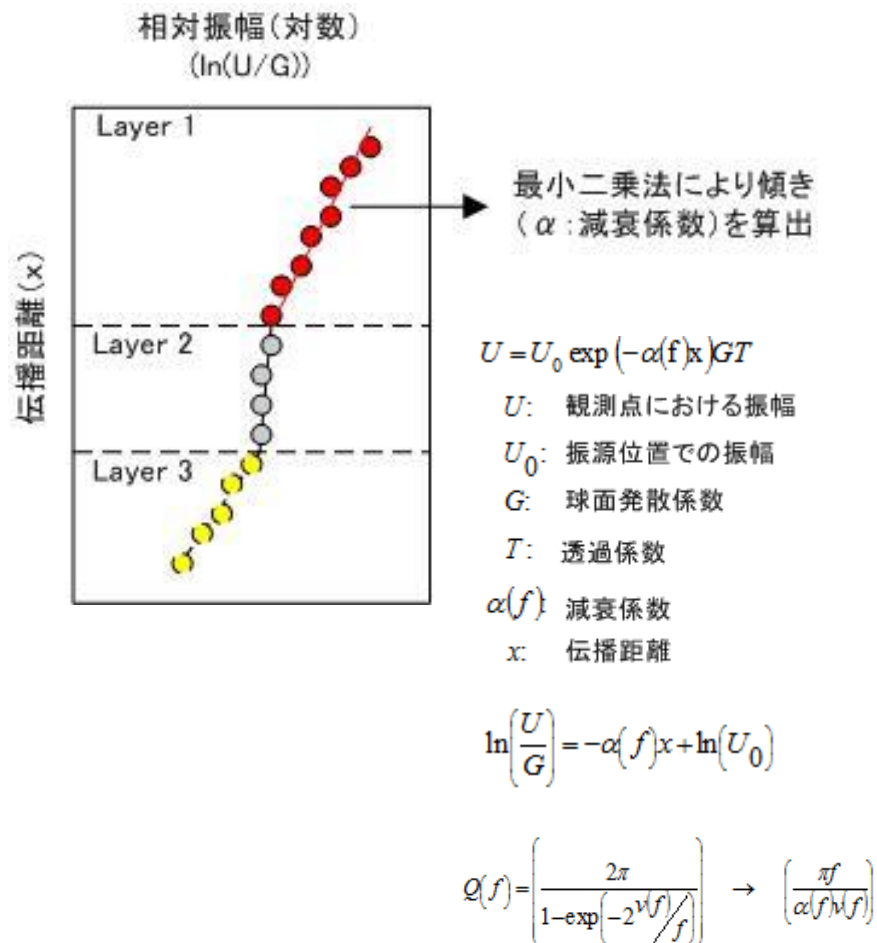
S波

1-2表層部の減衰定数に関する調査

11

■解析手法

深度ごとに観測された波形に対して球面波による幾何減衰を補正した後、補正した振幅値と伝播距離のグラフの勾配から減衰係数およびQ値を算定する。

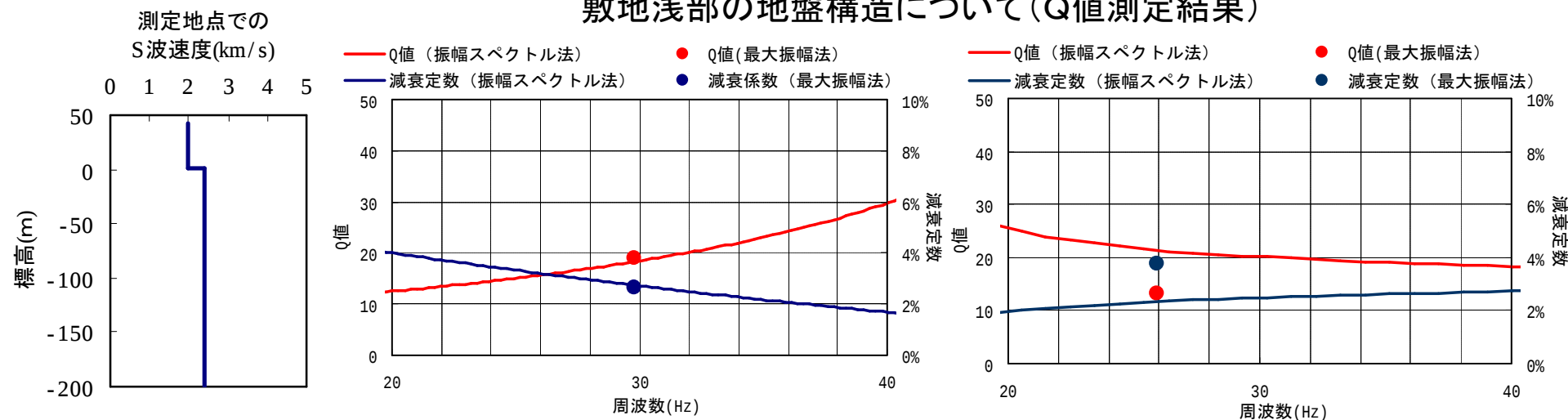


1-2表層部の減衰定数に関する調査

大飯3・4号機の現状に関する評価
会合 第4回資料3-1再掲

12

敷地浅部の地盤構造について(Q値測定結果)



S波・ミニバイブレータ

S波・板たたき

波種	起振源	解析深度区間 (m)	卓越周波数 (Hz)	Q値 (減衰定数(%))
S波	ミニバイブレータ	42～70	30.2	15.78(3.17)
		70～288	29.8	19.05(2.62)
	板たたき	42～70	29.7	7.42(6.74)
		70～288	25.9	13.21(3.79)

Q値測定結果は、設定した地盤モデルの減衰定数(3%)と概ね整合している。

■ Vs2000m/s程度の岩盤の減衰定数の下限値と速度構造の不均質性に関する知見

○佐藤(浩)・他(2007)による不均質性の統計的性質の推定方法

- a. 対象データとなる速度検層データ $V(z)$ に対して、(1)式をフィッティングすることにより深さ方向に増加する漸増(トレンド)成分($V_0 + V_1 \cdot z$)を推定する。

$$V(z) = V_0 + V_1 \cdot z + x_0(z) \quad (1)$$

- b. 検層データから漸増成分を除去して $\xi_0(z)$ を求め、平均速度で無次元化することにより、速度構造の不均質(揺らぎ)のデータ $\xi(z)$ を抽出する。

$$x(z) = \frac{x_0(z)}{(V_0 + V_1 \cdot z)} \quad (2)$$

- c. 不均質データ $\xi(z)$ のパワースペクトル $P(k)$ を求め、 $P(k) \propto k^{-\alpha}$ を仮定したフィッティングから傾き α を求め、更にHurst指数 ν を次式(3)から求める。

$$n = \frac{\alpha - 1}{2} \quad (3)$$

- d. 不均質データ $\xi(z)$ の自己相関関数を求め、(4)式で示すフォンカルマン型の自己相関関数 $N(r)$ を仮定してフィッティングすることにより、標準偏差 ε 、相関距離 a を求める。なお、Hurst指数 ν については、c.で求めた値を用いる。

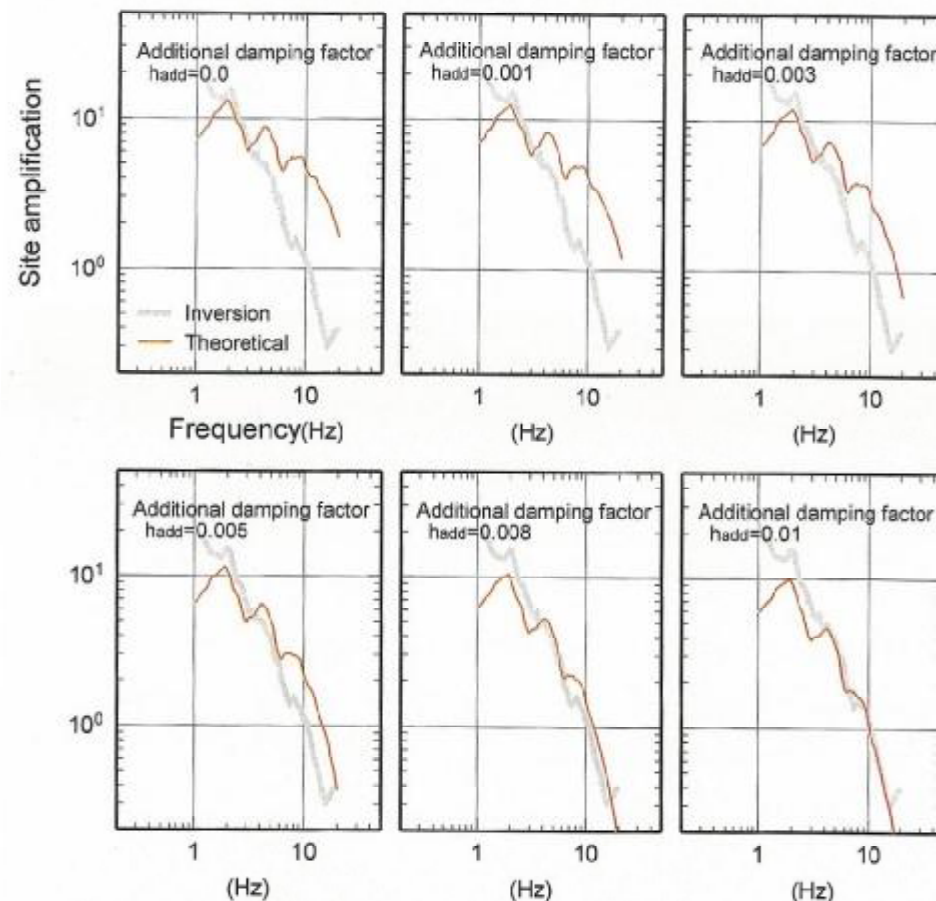
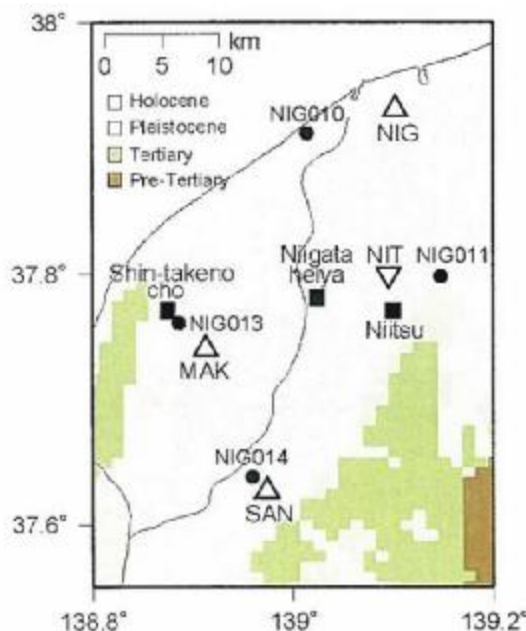
$$N(r) = \frac{e^2 2^{1-n}}{\Gamma(n)} \left(\frac{|r|}{a} \right)^n K_n \left(\frac{|r|}{a} \right) \quad (4)$$

ここに、 r は相対的な距離、 K_ν は ν 次修正ベッセル関数、 Γ はガンマ関数である。

■速度構造の不均質性と付加減衰に関する知見

- 佐藤(浩)(2009)では、速度構造の不均質性が地震波の減衰の要因の一つであることが指摘されていることから、新潟平野や関東平野の検層結果から求めた不均質強度と減衰定数の関係にも着目している。
- これによると、新潟平野地域の4地点におけるサイト増幅特性について、理論サイト増幅特性に速度構造の不均質性とそれと等価な効果をもたらす減衰定数の付加値を考慮すると、経験的サイト増幅特性と調和的なレベルとなるように改善されるとしている。

佐藤(浩)(2009)で対象とした石油公団による基礎試錐(■)、微動アレイ観測点(△)および地震観測点(●)の位置



NIG014における経験的サイト増幅特性(灰太線)と表層地盤を考慮したSANの深部地盤モデルの減衰定数を変化させたときの理論サイト増幅特性(赤線)の比較

※図は佐藤(浩)(2009)より抜粋

■速度構造の不均質性と付加減衰に関する知見(続き)

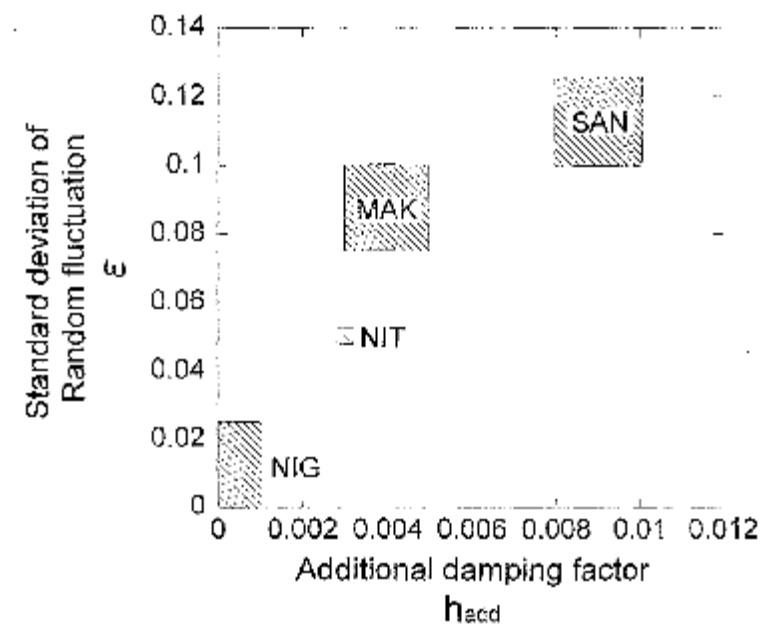
○また、不均質データの標準偏差 ε が不均質強度を支配しており、平均的な減衰定数に対して付加すべき減衰定数とその地点で考慮すべき不均質強度は比例しているとしている。

広帯域のサイト増幅特性で考慮すべき
不均質性の標準偏差(強度)の目安

	NIG (NIG010)	NIT (NIG011)	MAK (NIG013)	SAN (NIG014)
Standard deviation ε	0 ~ 0.025	0.05	0.075 ~ 0.1	0.1 ~ 0.125

広帯域のサイト増幅特性で考慮すべき
減衰定数の付加量

	NIG (NIG010)	NIT (NIG011)	MAK (NIG013)	SAN (NIG014)
Additional damping factor h_{add}	0 ~ 0.001	0.003	0.003 ~ 0.005	0.008 ~ 0.01



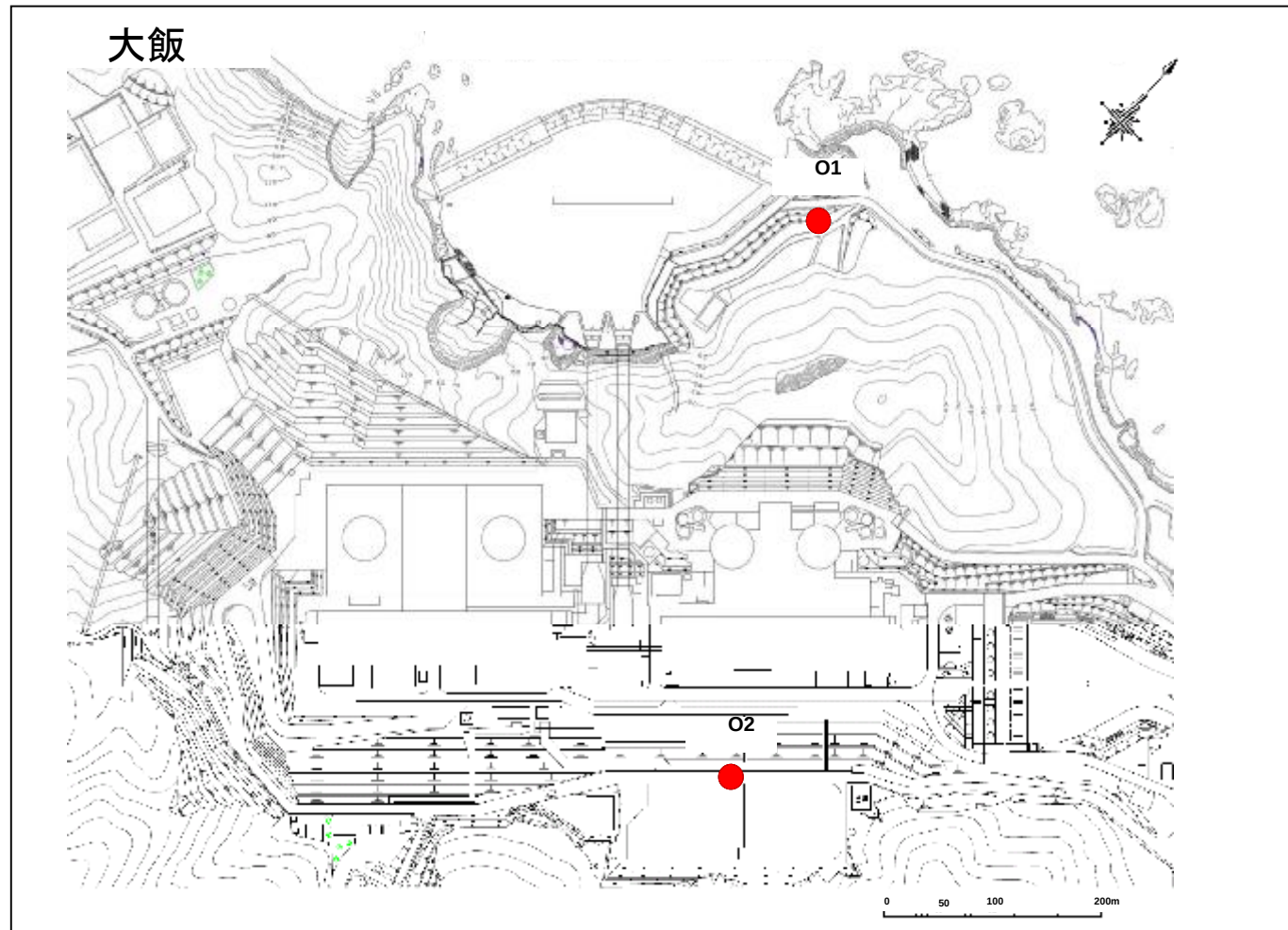
新潟平野地域での広帯域のサイト増幅特性評価において、
考慮すべき深部地盤の不均質性強度(標準偏差 ε)と
それと等価な効果をもたらす減衰定数の付加量 h_{add} の関係

1－2表層部の減衰定数に関する調査

大飯3・4号機の現状に関する評価
会合 第4回資料3－1再掲

16

- 地盤の速度構造の不均質性と減衰定数の関係について着目し、不均質強度を検討し、浅部(深さ200m以浅)の地盤の減衰定数を評価。



● : 不均質強度検討に使用したPS検層孔

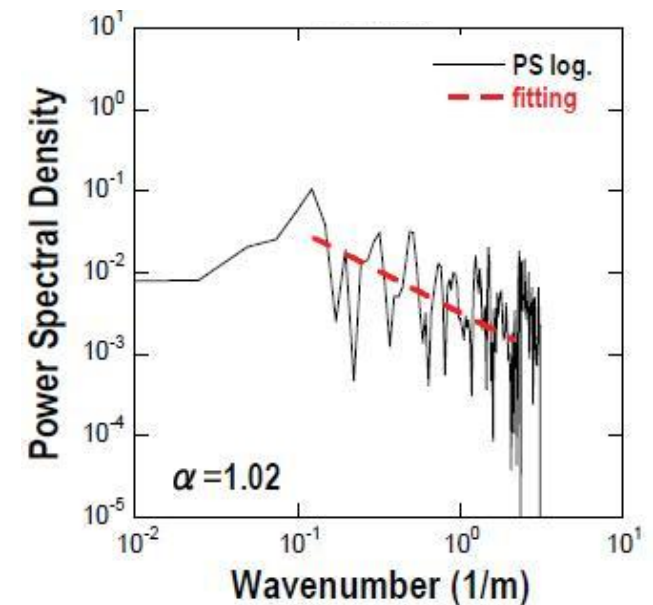
1-2表層部の減衰定数に関する調査

大飯3・4号機の現状に関する評価
会合 第4回資料3-1再掲

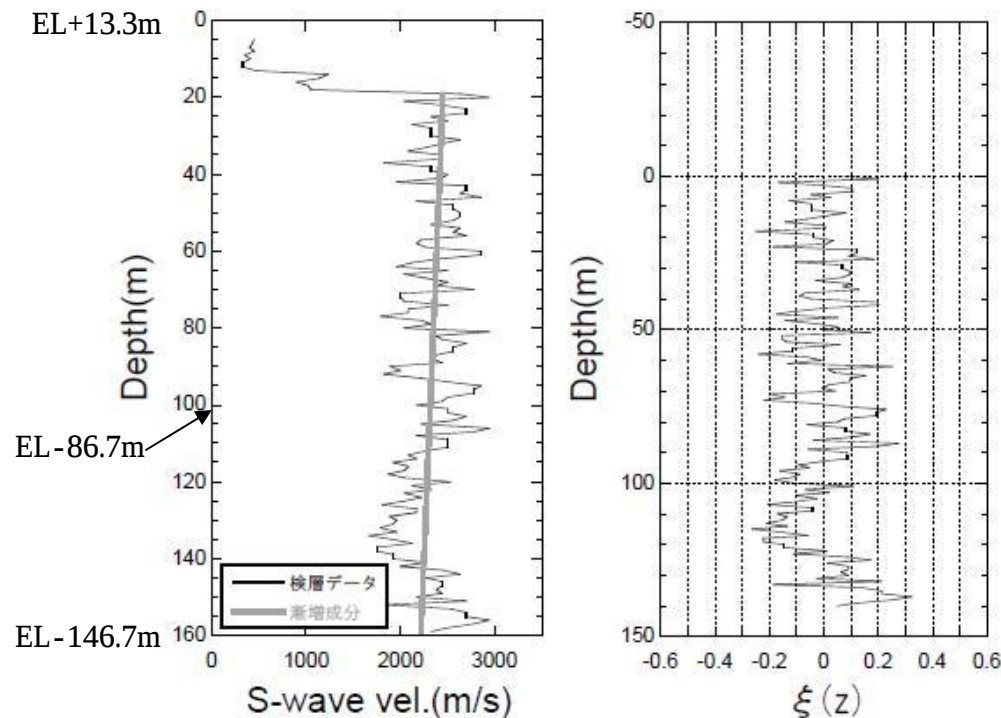
17

大飯発電所(○1孔)のPS 検層(S 波速度)による不均質性の統計的性質の推定結果

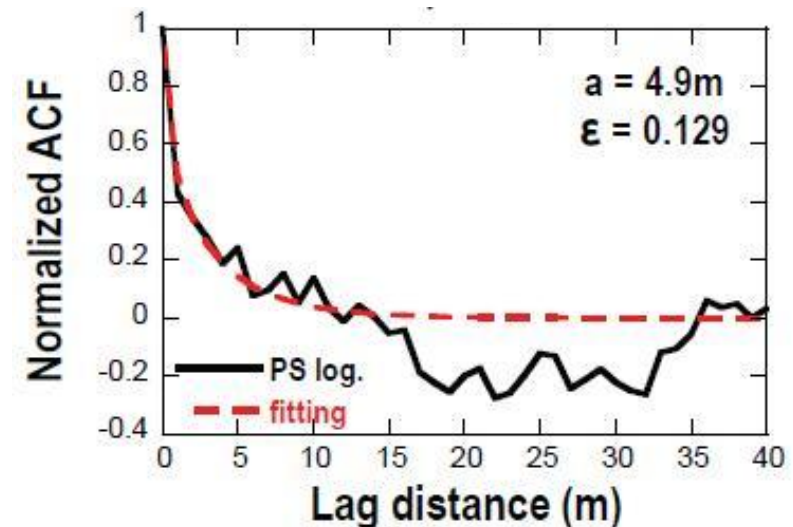
対象 データ 範囲(m)	平均S波 速度 (km/s)	漸増成分 の傾き (1/s)	相関 距離a (m)	Hurst 指数 ν	標準 偏差 ε
GL-19 ~-159	2.34	-1.67	4.9	0.21	0.129



不均質データのパワースペクトルと
フィッティング結果



検層データに対するフィッティング結果(左)と
(孔口標高EL+13.3m) 抽出された不均質データ $\xi(z)$ (右)



不均質データの自己相関関数とフィッティング結果

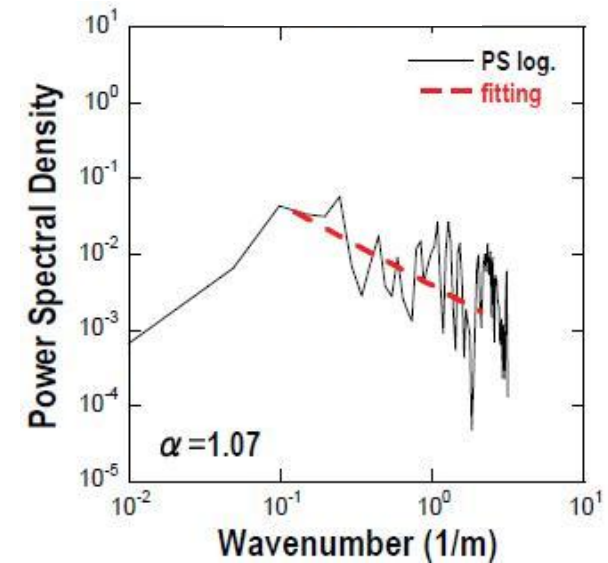
1-2表層部の減衰定数に関する調査

大飯3・4号機の現状に関する評価
会合 第4回資料3-1再掲

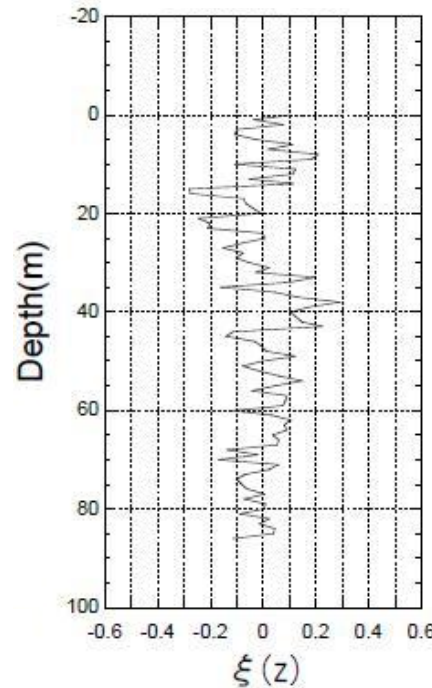
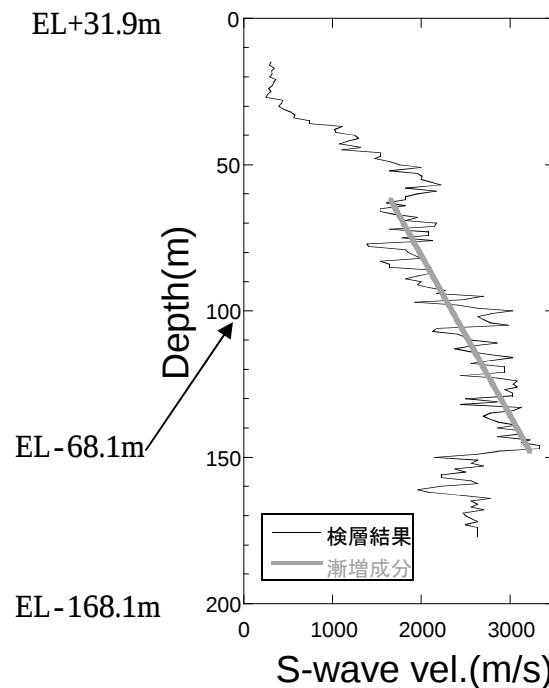
18

大飯発電所(○2孔)のPS 検層(S 波速度)による不均質性の統計的性質の推定結果

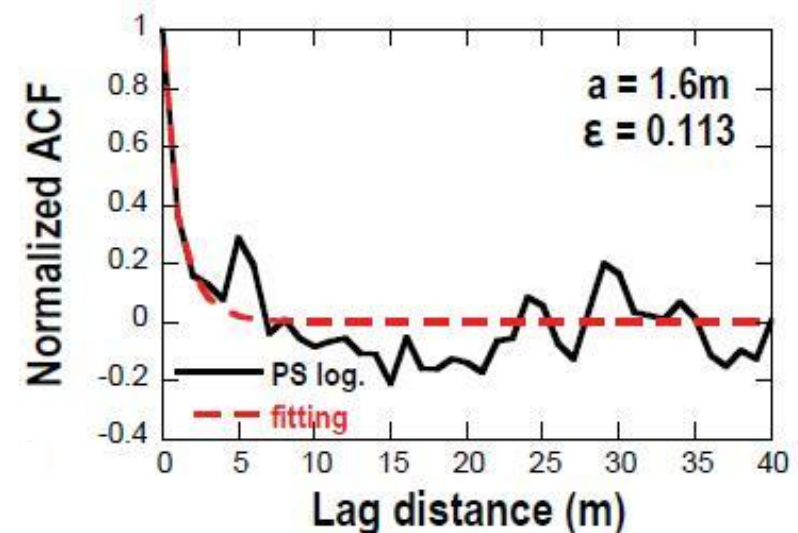
対象 データ 範囲(m)	平均S波 速度 (km/s)	漸増成分 の傾き (1/s)	相関 距離 a (m)	Hurst 指数 ν	標準 偏差 ε
GL-62 ~-148	2.44	18.29	1.6	0.21	0.113



不均質データのパワースペクトルと
フィッティング結果



検層データに対するフィッティング結果(左)と
(孔口標高EL+31.9m) 抽出された不均質データ $\xi(z)$ (右)



不均質データの自己相関関数とフィッティング結果

1-2表層部の減衰定数に関する調査

第5回審査会合資料4-2再掲

19

■速度構造の不均質性と付加減衰に関する考察

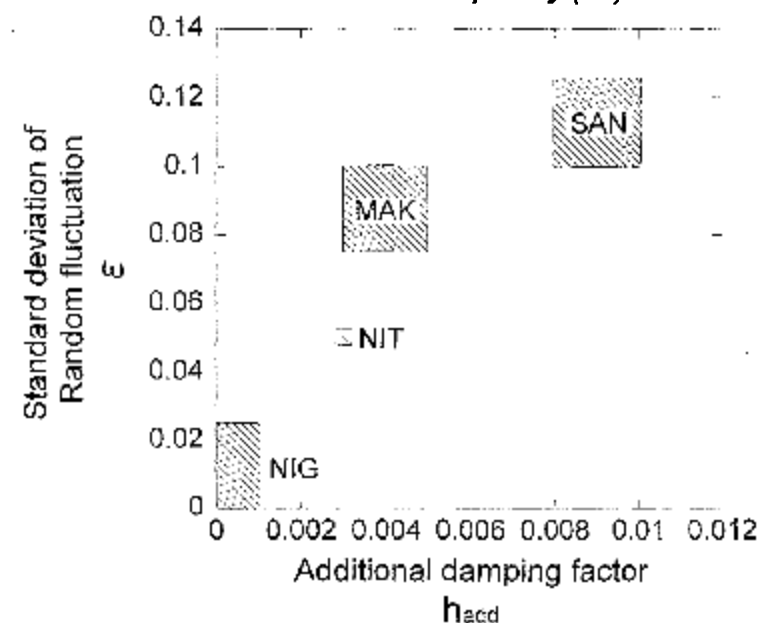
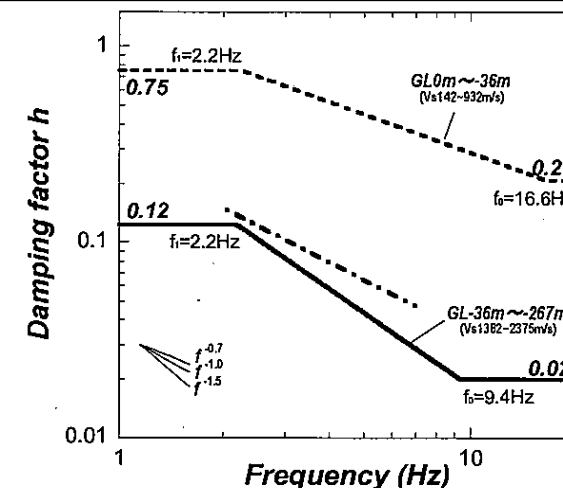
- 不均質強度(標準偏差)は0.11~0.13程度であり、佐藤・山中(2009)の指標を参考にすると、大きめの数字である。
- 佐藤・他(2007)による同等の速度構造の減衰定数の下限値と合わせて考えると表層の減衰定数は3%程度と考えられる。

広帯域のサイト増幅特性で考慮すべき
不均質性の標準偏差(強度)の目安

	NIG (NIG010)	NIT (NIG011)	MAK (NIG013)	SAN (NIG014)
Standard deviation ε	0 ~ 0.025	0.05	0.075 ~ 0.1	0.1 ~ 0.125

広帯域のサイト増幅特性で考慮すべき
減衰定数の付加量

	NIG (NIG010)	NIT (NIG011)	MAK (NIG013)	SAN (NIG014)
Additional damping factor h_{add}	0 ~ 0.001	0.003	0.003 ~ 0.005	0.008 ~ 0.01



新潟平野地域での広帯域のサイト増幅特性評価において、考慮すべき深部地盤の不均質性強度(標準偏差 ε)とそれと等価な効果をもたらす減衰定数の付加量 h_{add} の関係

敷地浅部の地盤構造について(減衰定数の評価)

- 地盤モデルの設定において、浅部地盤の減衰定数については、もんじゅサイトでの経験的サイト増幅特性の検討やそれに対応する地盤モデルを参照して、減衰定数3%と設定しているが、浅部(深さ200m以浅)の減衰定数が3%程度になることの物理的意味については、敷地内のボーリングデータから、地盤の速度構造の不均質性と減衰定数の関係について着目して不均質強度を評価し、妥当性を確認済。
- 基準地震動策定以降にも、地盤モデルの信頼性向上の観点から、敷地内において浅部地盤のQ値測定を実施し、減衰定数は3%程度であることを確認。

1-3 敦賀周辺の深部速度構造に関する文献調査

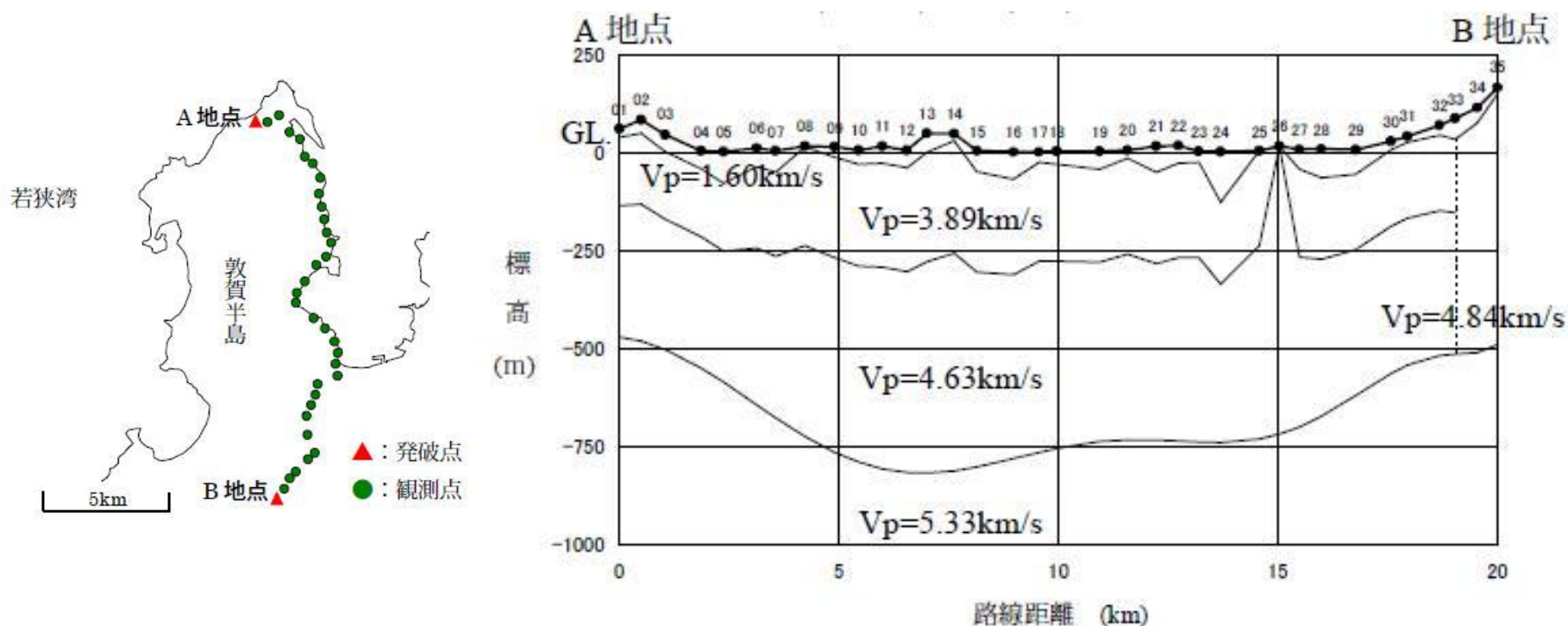
21

■ 屈折法探査

大飯3・4号機の現状に関する評価会合

第4回資料3-1再掲

敦賀半島を縦断する道路沿いに100～500m間隔で合計57観測点を設け、敦賀半島の北端と敦賀市南方の山間部の2箇所で発破が実施されている。



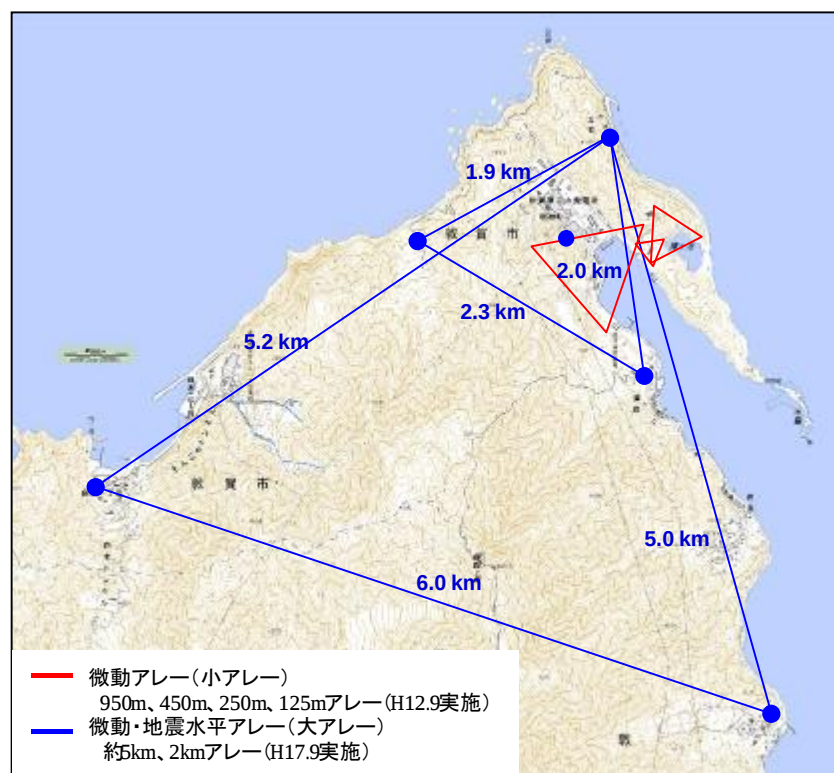
屈折法探査により得られたP波速度構造

1-3敷地周辺の深部速度構造に関する文献調査

22

■微動アレー探査、地震計水平アレー観測

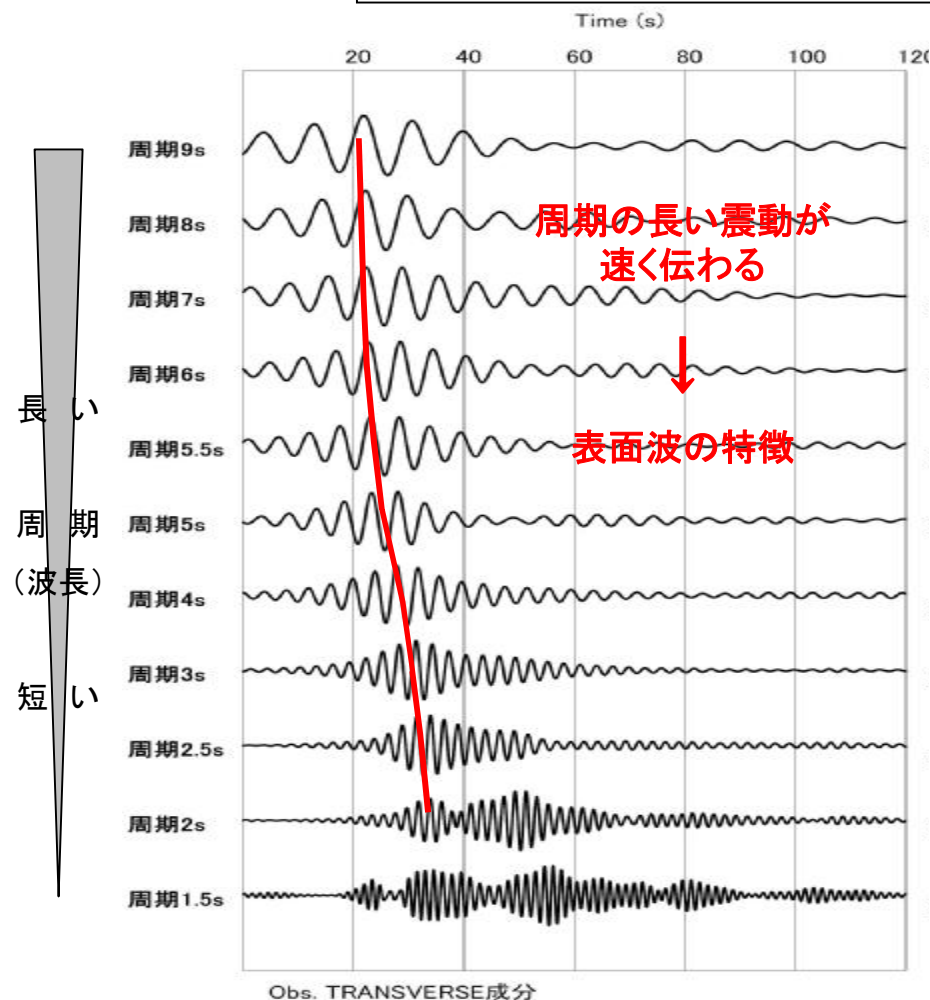
常時微動や自然地震による表面波を
観測、分析することにより、表面波が伝
播した地盤の速度構造を同定。



微動アレー及び地震計水平アレーの観測点

大飯3・4号機の現状に関する評価会合

第4回資料3-1再掲



地震観測例 石川県加賀地方の地震

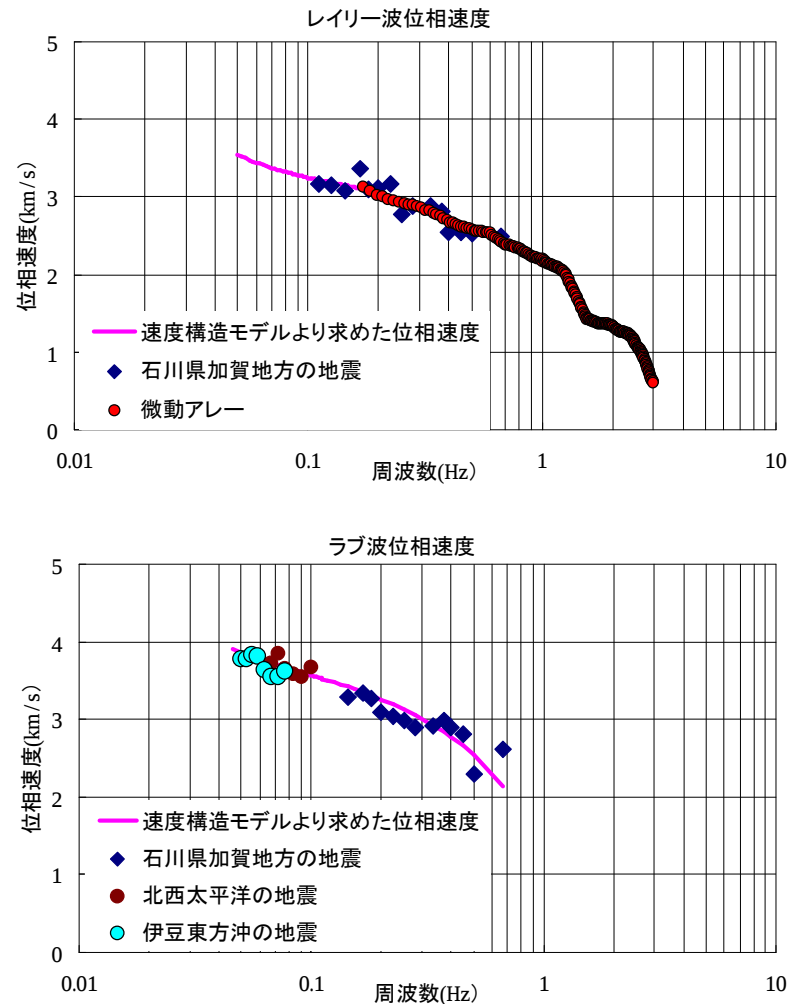
1-3 敷地周辺の深部速度構造に関する文献調査

23

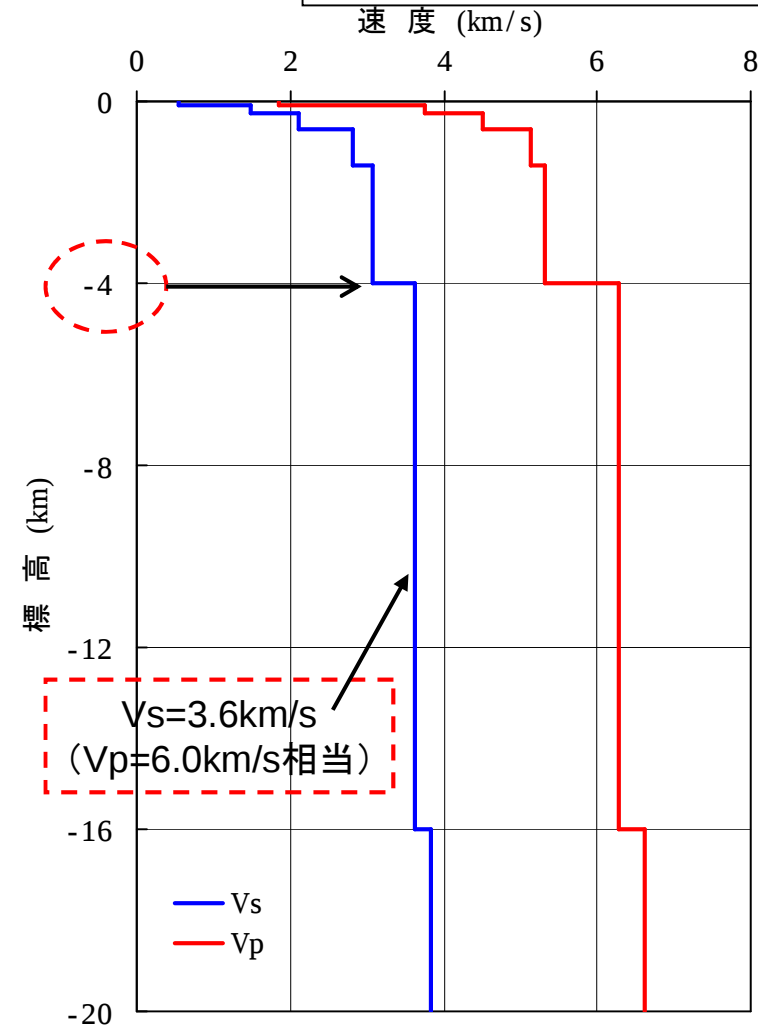
■ 微動アレー探査、地震計水平アレー観測

大飯3・4号機の現状に関する評価会合

第4回資料3-1再掲



速度構造モデル及び観測から求めた位相速度



表面波の位相速度で同定したS波速度構造

■ 地盤速度構造による地震発生層の検討

第5回審査会合資料4-2再掲

若狭周辺地域において、大都市大震災軽減化特別プロジェクト(大大特)による大規模な地下構造探査が実施されており、内陸地殻内地震が発生する上部地殻に相当する $V_p=6.0\sim 6.2\text{ km/s}$ 層は、深さ約 $6\sim 16\text{ km}$ であった。また、速度構造断面図に気象庁一元化カタログによる測線に沿う幅 20 km の範囲内の震源分布は、 $V_p=6.0\sim 6.2\text{ km/s}$ 層に対応している。

また、深部の地下構造に特異な不整形な構造は見られない。

○ 新宮-舞鶴測線(2004)の探査結果

○ 藤橋-上郡測線(1989)の再解析結果

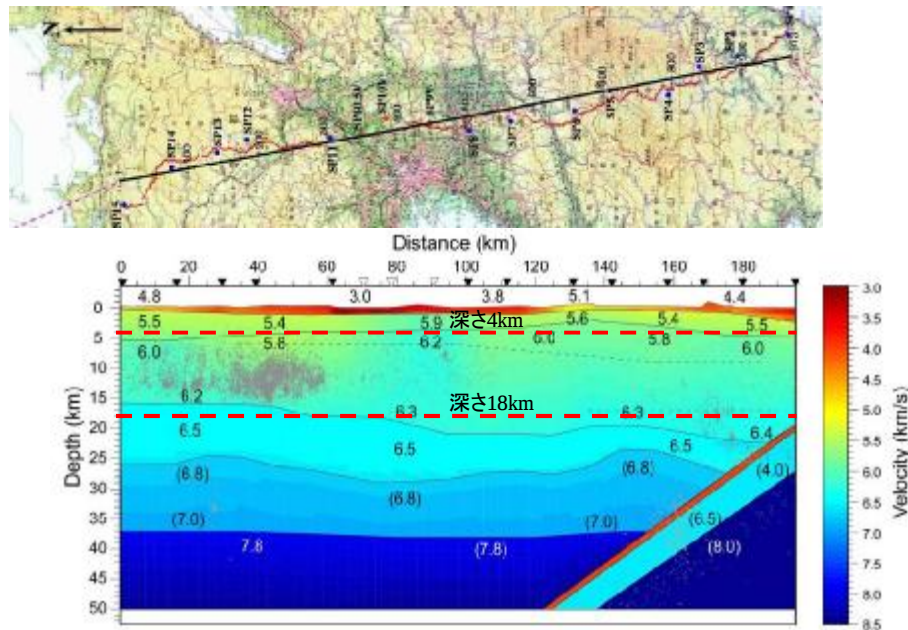


Fig. 9 P-wave velocity structure for the. Numerals show P-wave velocities in km/s. Parentheses show assumed velocity value. Small black and red dots (about 35-40km deep) show earthquakes and low-frequency earthquakes, respectively after Hirose and Ito (2007).

伊藤、他(2007)に一部加筆

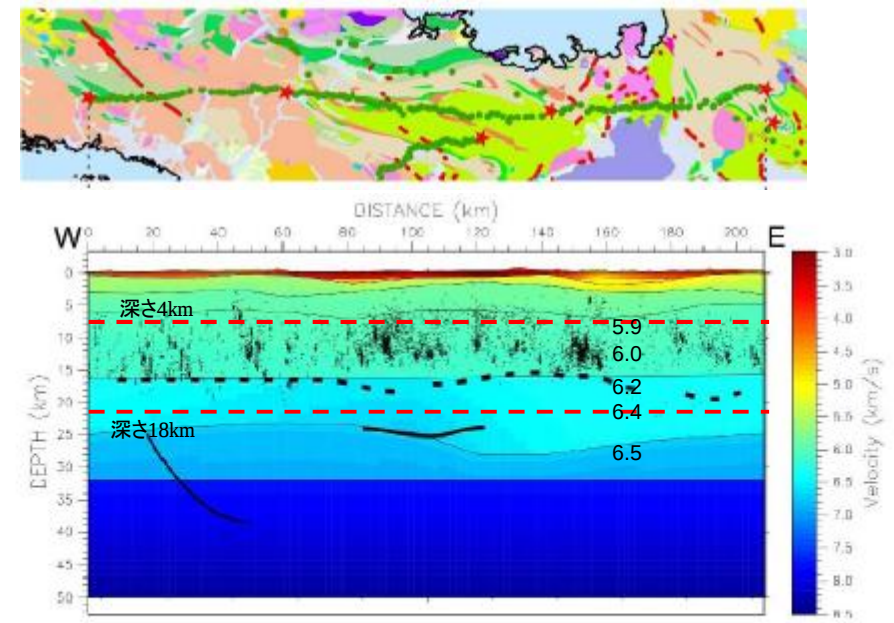


図 16 藤橋-上郡測線の地震波速度構造に、測線周辺の震源分布と反射法解析によって見出された反射面を重ねた。

伊藤、他(2006)に一部加筆

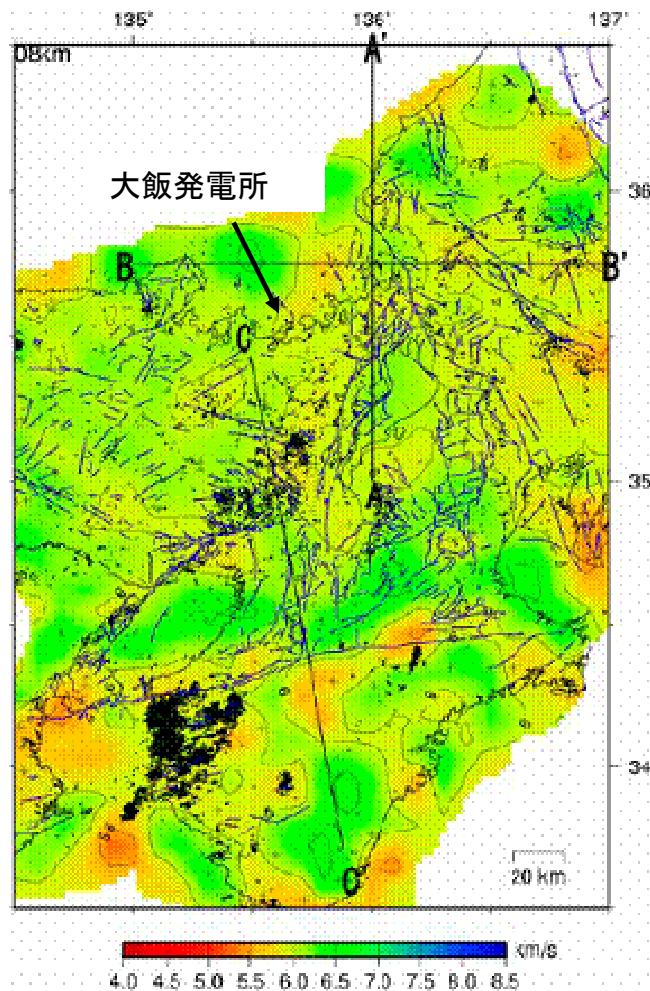
1-3 敷地周辺の深部速度構造に関する文献調査

25

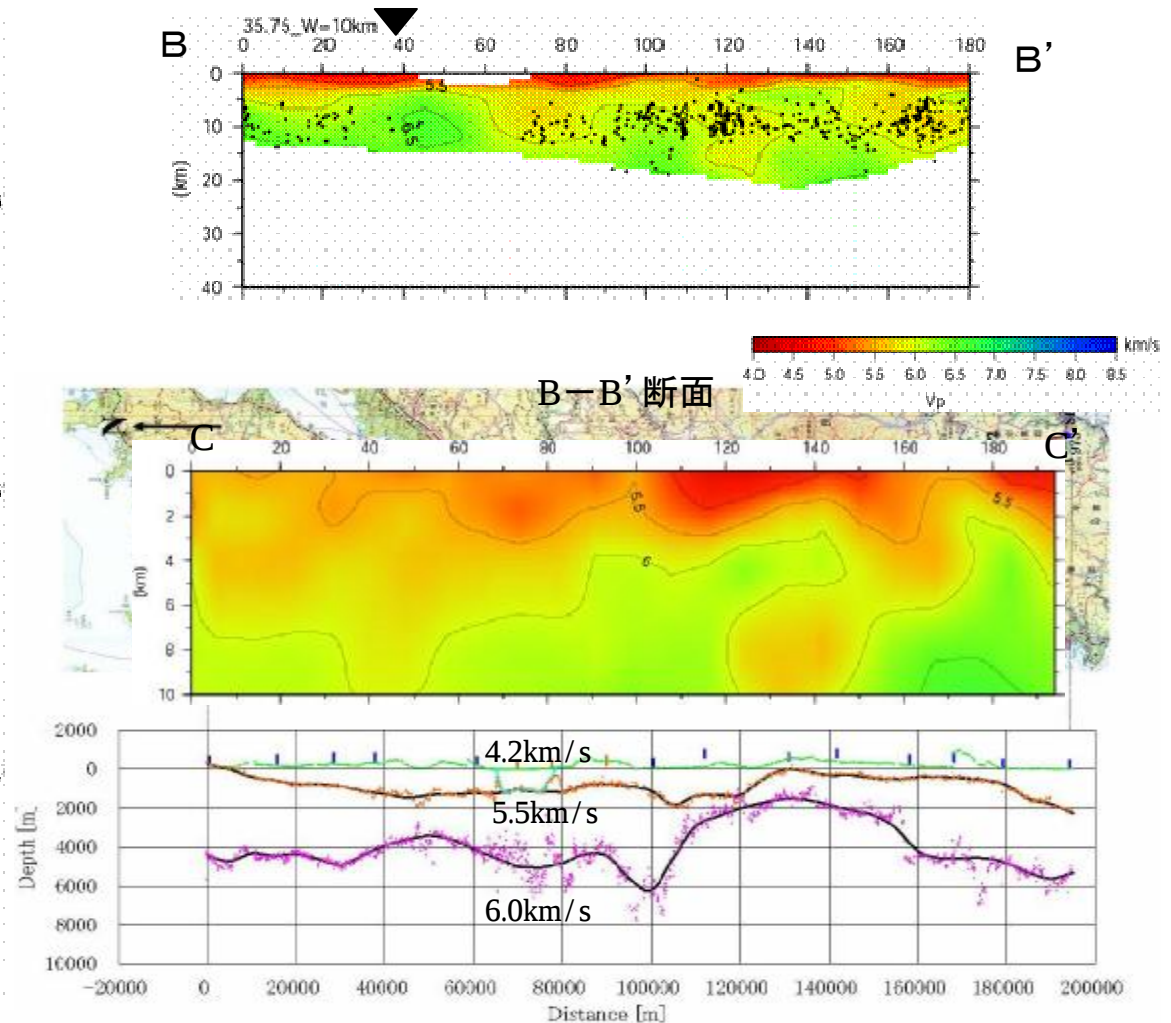
■ 地震波速度トモグラフィによる検討

第5回審査会合資料4-2再掲

川里・他(2007)による地震波トモグラフィ解析等の評価によれば、深部の地下構造に特異な速度構造は見られず概ね成層構造である。



川里・他(2007)に加筆



C-C' 断面(上)と大大特屈折法解析結果(下)の比較

【目的】

- 敷地の地下構造を三次元的に把握するため、以下のとおり追加調査を実施する。

【追加調査計画】

- 浅部の地下構造把握のため、発電所敷地内で稠密な微動観測を実施する。
- 深部(3~4km程度)の地下構造把握を目的として、敦賀半島でのアレイ探査と同様、敷地外における微動アレイ観測・地表面地震観測を実施する。
- 敷地外での微動アレイ観測データの結果の速報については、9月中を目途に報告し、地盤モデルについて評価する。
- 地盤構造を連続的に把握するため、敷地内における反射法探査を実施する。
- 更に、ボーリング調査、PS検層等の物理探査を追加すると共に、複数地点での鉛直アレイ地震観測を実施し、地下構造の把握に努める。なお、地震観測記録が得られた際には、観測点間や周辺のKiK-net観測点との比較や、解放基盤相当の基盤地震動評価を行う。

2-1. 地下構造把握のための追加調査計画

27

項目	目的	6月	7月	8月	9月	10月以降
敷地内での 稠密微動観測	既存ボーリング データ等と比較し、 浅部の地下構造 を把握する	▽調査		解析	▽今回報告	
敷地周辺での 地表面地震観測・ 微動アレイ観測	深部(3~4km程 度)の地下構造を 把握する			▽設置済	▽解析結果	継続観測 データ拡充
反射法地震探査	地盤構造を連続 的に把握する。				計画準備等	探査 解析結果▽ 解析
鉛直アレイ 地震観測	地震記録を収集し、 地盤増幅特性に 関するデータを拡 充する。	既設地震計 地表面地震計 鉛直アレイ地震観測 大深度地震観測		既設地震計データ回収	地震観測 地震計製作 計画準備・許認可等 ボーリング掘削	地震計設置 H26.2 観測開始

2-1. 地下構造把握のための追加調査計画

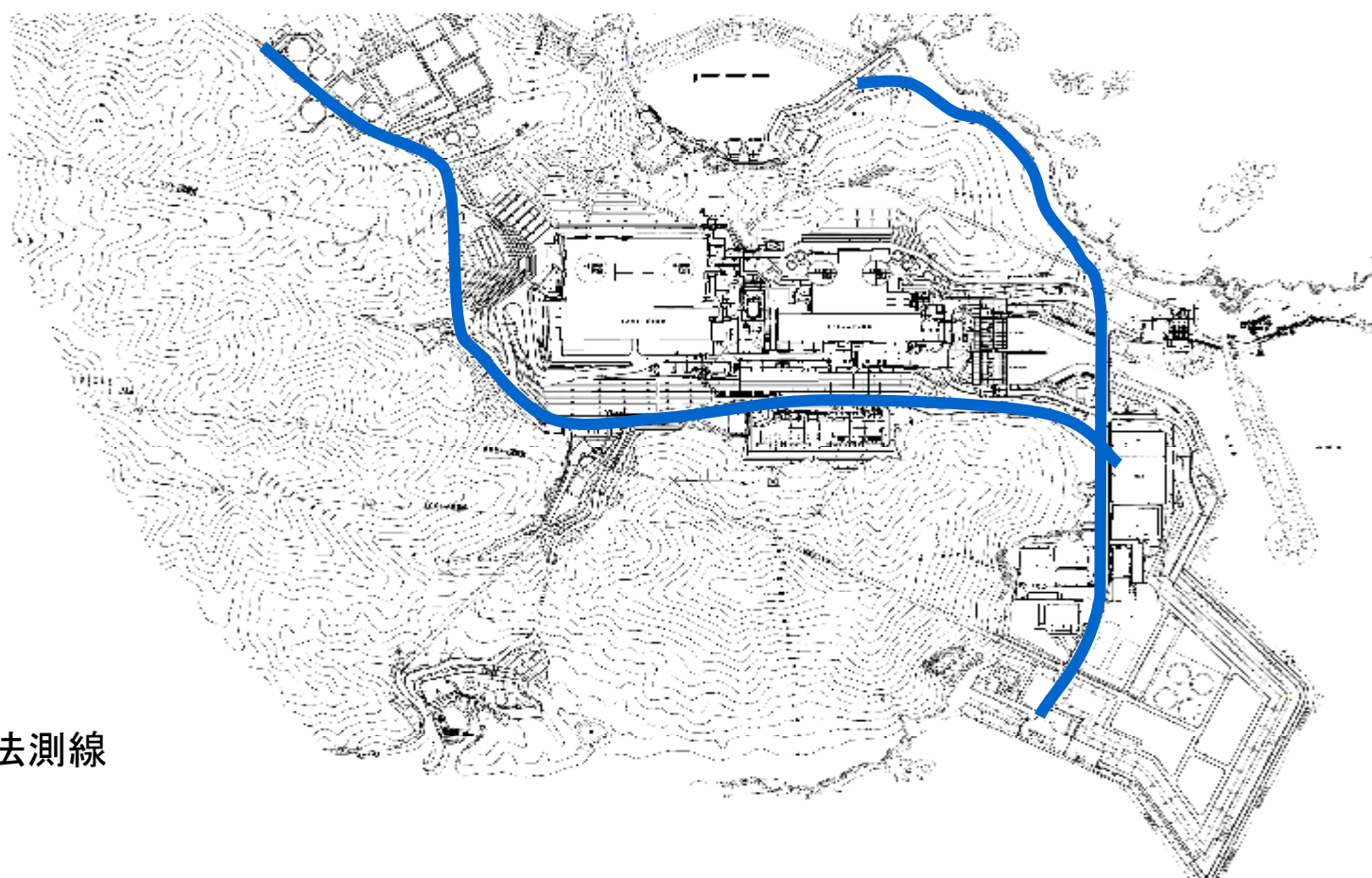
■より深部における速度構造把握のために敷地外数地点での地表面地震観測・微動アレイ観測を実施(観測中)。



2-1. 地下構造把握のための追加調査計画

29

- 極力長く測線を確保できる2測線(約1.3km、約1.7km)を選定した。
- 地盤構造を連続的に把握するため、敷地内2方向の反射法地震探査を実施する。
- 仕様については、高浜発電所での実施状況も踏まえて決定する。



— 反射法測線

2-1. 地下構造把握のための追加調査計画

30

■大飯発電所の反射法地震探査の結果については、11月末を目途に取りまとめて報告する。

(調査の状況を踏まえ、極力前倒しで工程を進めることとする)

項目	10月				11月			
反射法地震探査	測量	探査			解析			11月末 報告▽

2-1. 地下構造把握のための追加調査計画

31

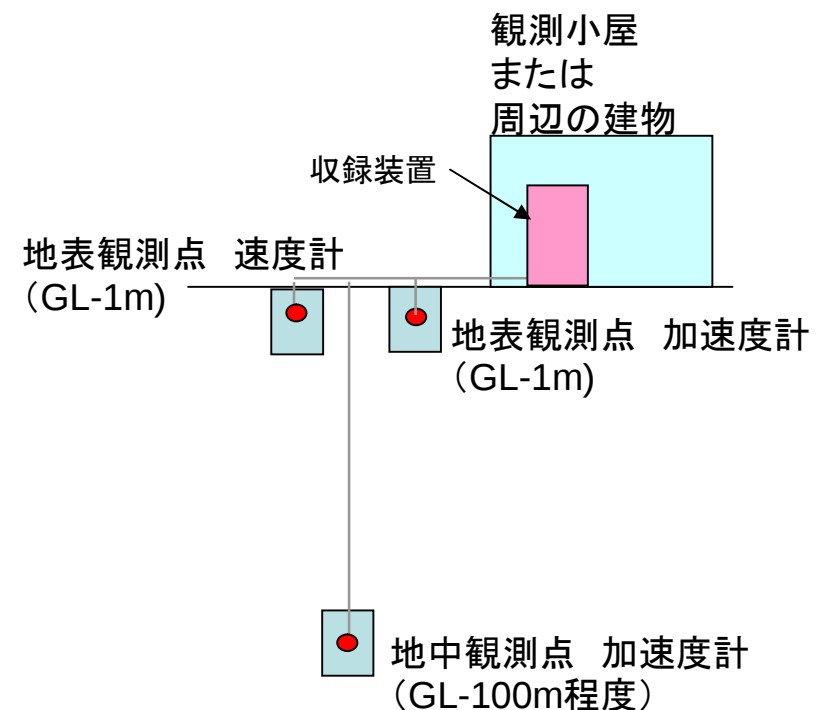
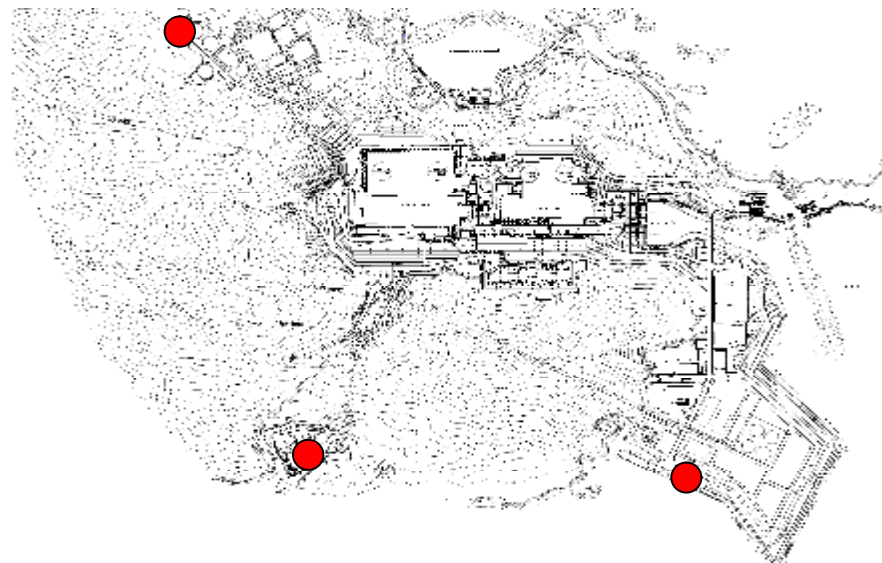
■2007年新潟県中越沖地震の知見を踏まえて設置していた敷地内の地表地震計の連続記録を収集して表層地盤の増幅特性等を評価すると共に、敷地内数箇所において深さ100m程度までの鉛直アレイ観測を実施する。

(地表面のみ、臨時の観測を9/10より開始)

■地表面および深さ約100m(解放基盤相当)での鉛直アレイ観測とあわせて、地表面における速度計を設置する。

■敷地内の複数箇所において地震観測記録を収集し、観測点間の比較や周辺のKiK-net観測点との比較に加えて、基盤地震動の評価を行う。

■微小な地震記録を用いた速度構造把握のためのデータ収集を行なう。

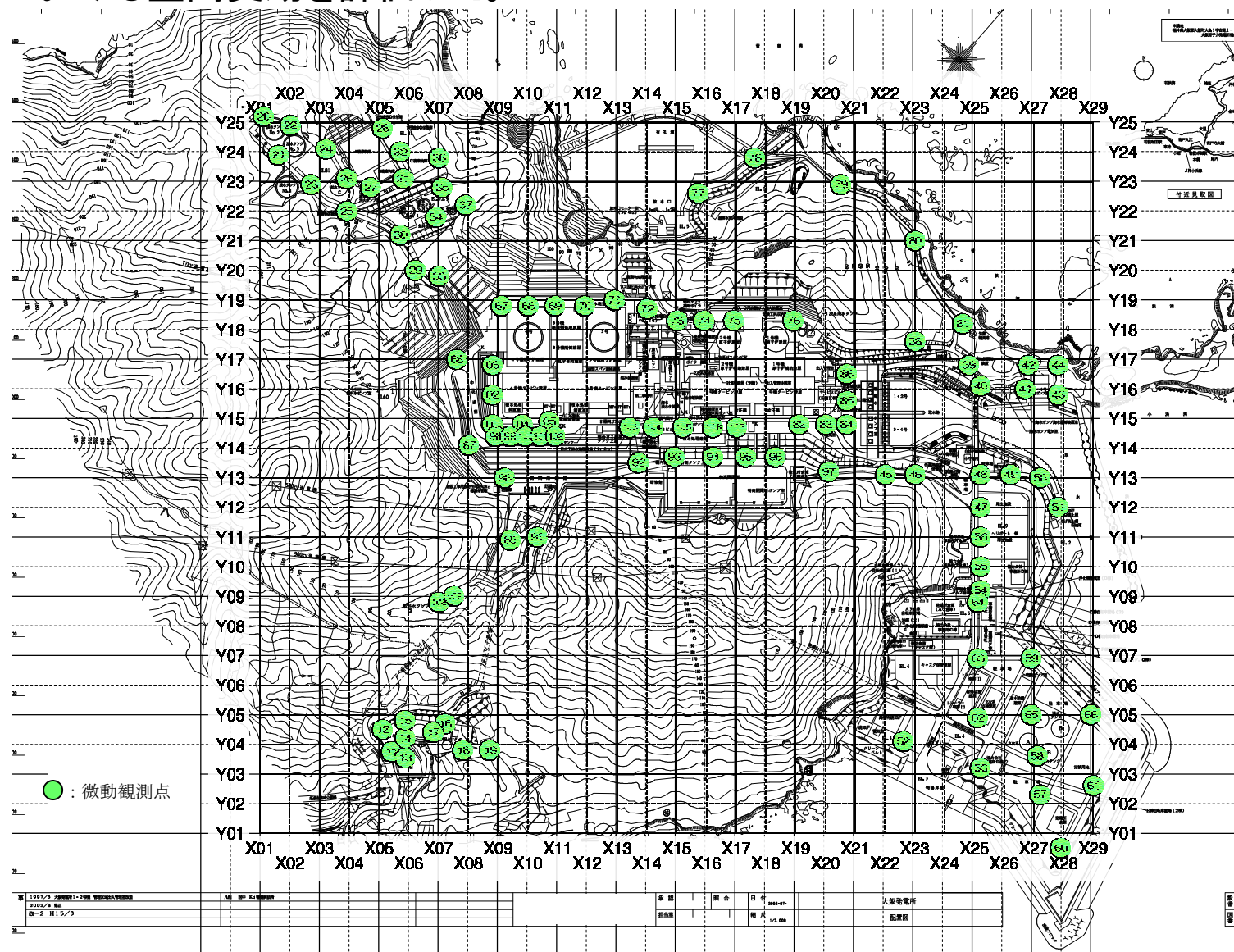


観測システム

2-2. 敷地内での微動調査

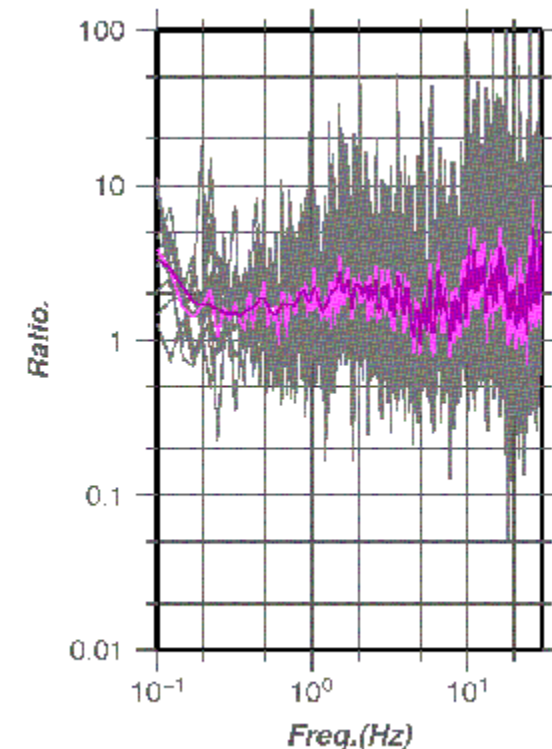
32

■大飯発電所敷地内において、約50m間隔の微動観測を実施してH/Vスペクトルを評価し、敷地内における空間変動を評価した。



■H/Vスペクトルの算定方法

- ①微動観測は1地点につき15分間とする。
- ②観測波形から目視によりノイズの影響の小さい区間を複数選択し、データセットを作成する。
1区間のデータ長は40.96秒とし、データセット数は10区間程度とする。
- ③各区間ごとにフーリエ変換を実施してH/Vスペクトル比を算定し、周波数領域で平均スペクトルを算出する。
さらに、得られた平均スペクトルに対して幅0.1HzのParzenウィンドウで平滑化を行う。
なお、H(水平成分)スペクトルは、2方向のベクトル和としたものとする。
- ④ H/Vスペクトルの評価においては、信頼性の観点から、1Hz～数Hzの周波数範囲に着目して評価を行う。



灰色: 各区間のH/Vスペクトル比

薄紫: 平均H/Vスペクトル比

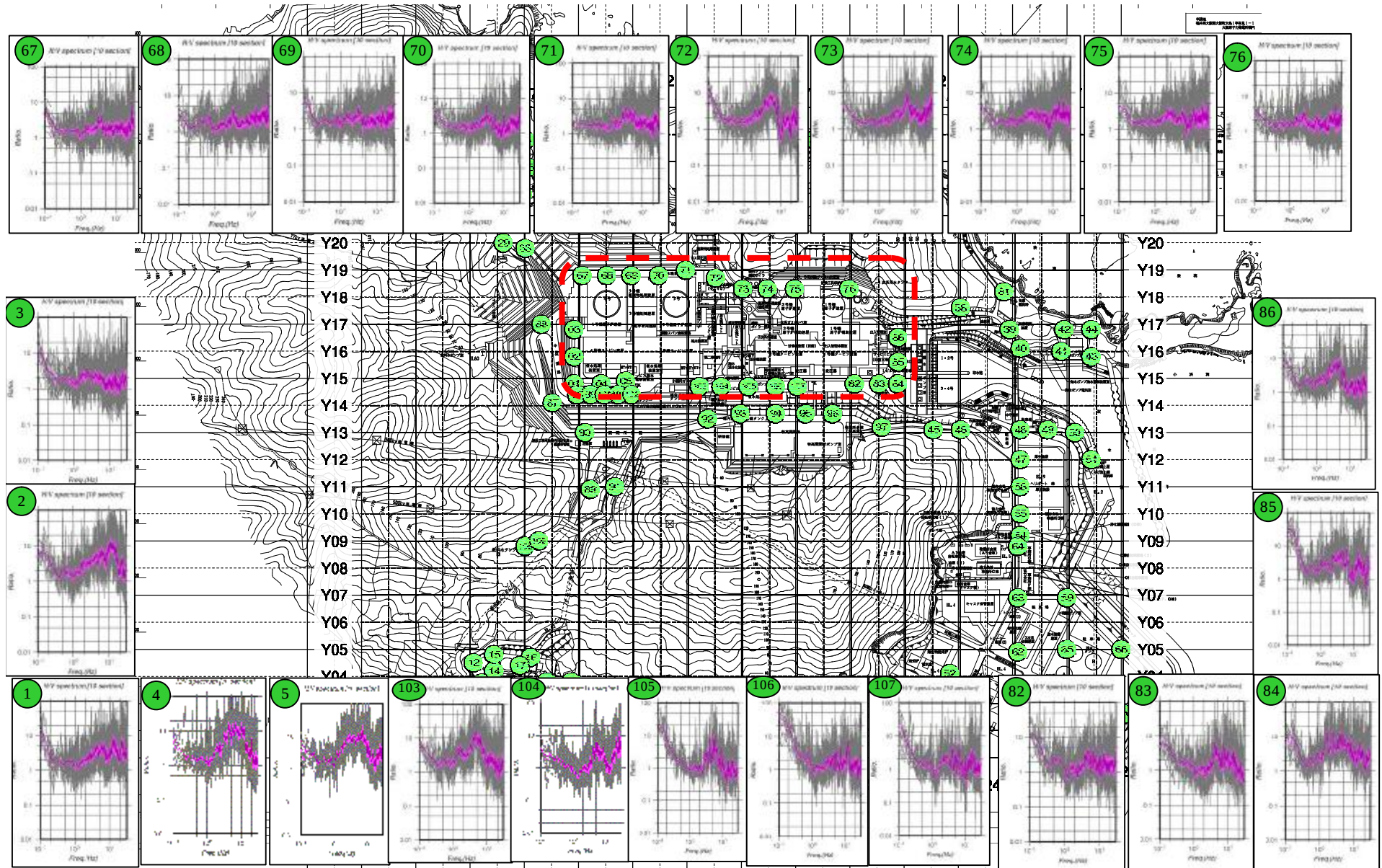
紫色: 平滑化されたH/Vスペクトル比

H/Vスペクトル比の例

2-2. 敷地内での微動調査

34

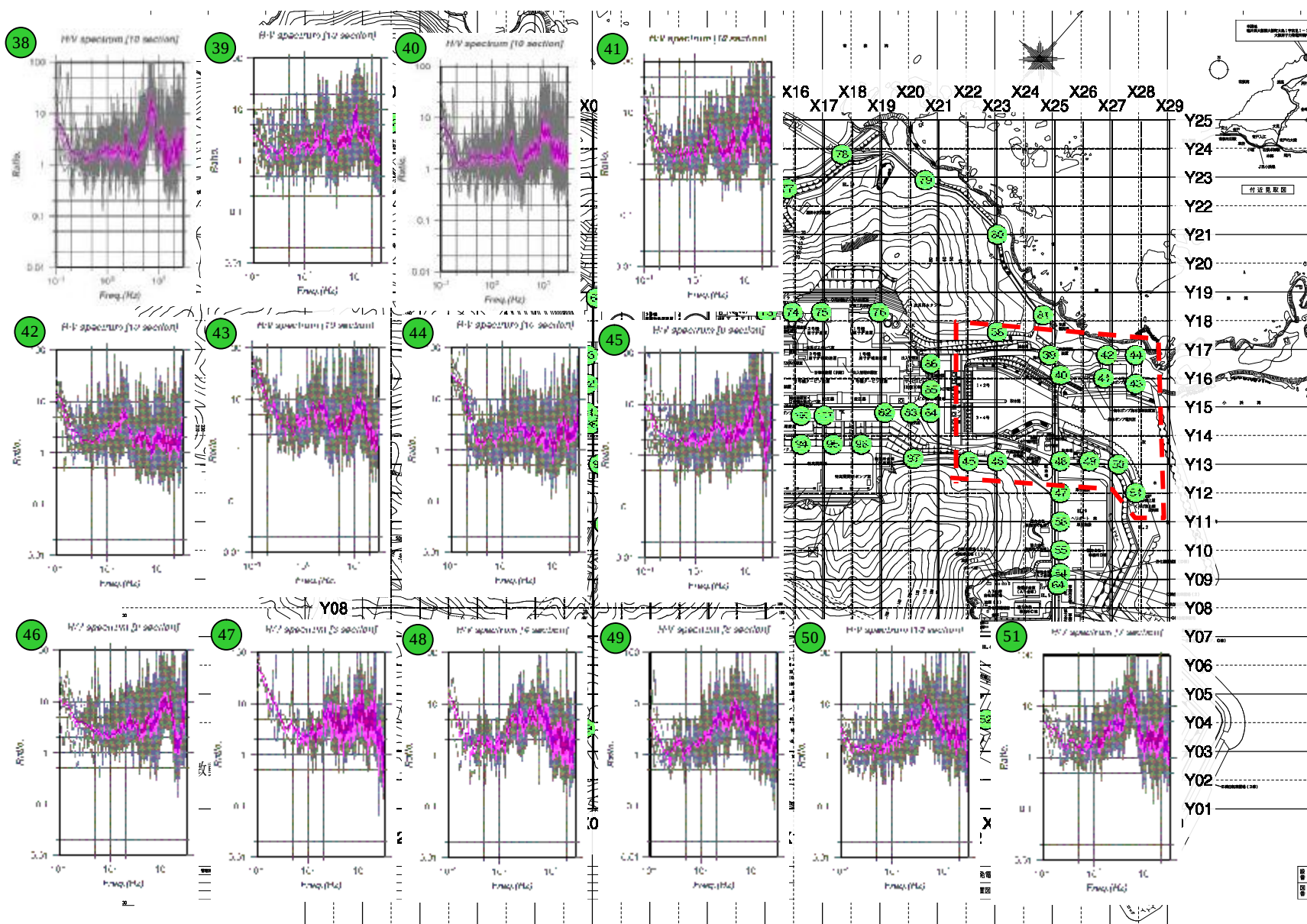
■原子炉建屋周辺観測点のH/Vスペクトル分布



2-2. 敷地内での微動調査

35

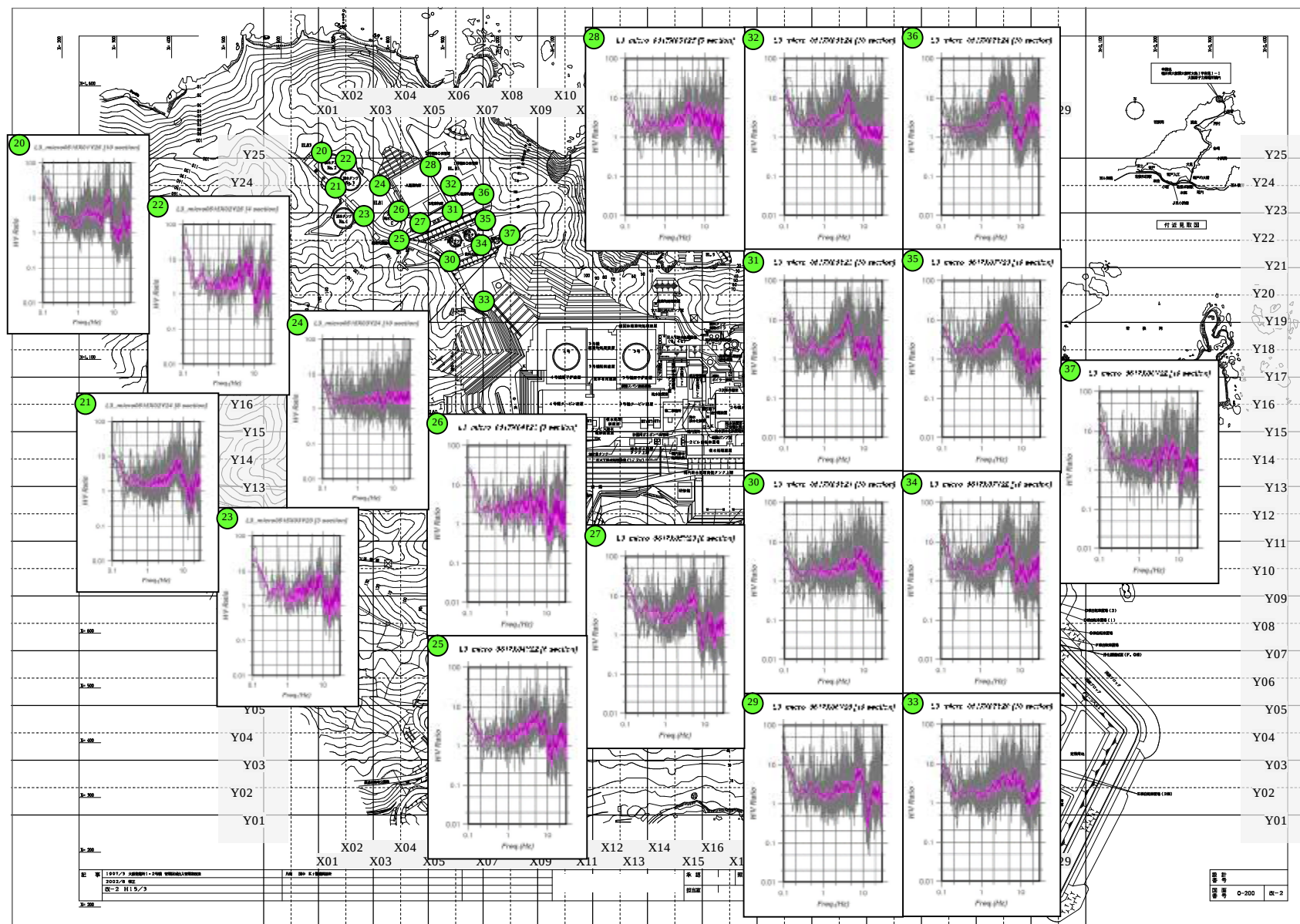
■ 取水口周辺観測点のH/Vスペクトル分布



2-2. 敷地内での微動調査

36

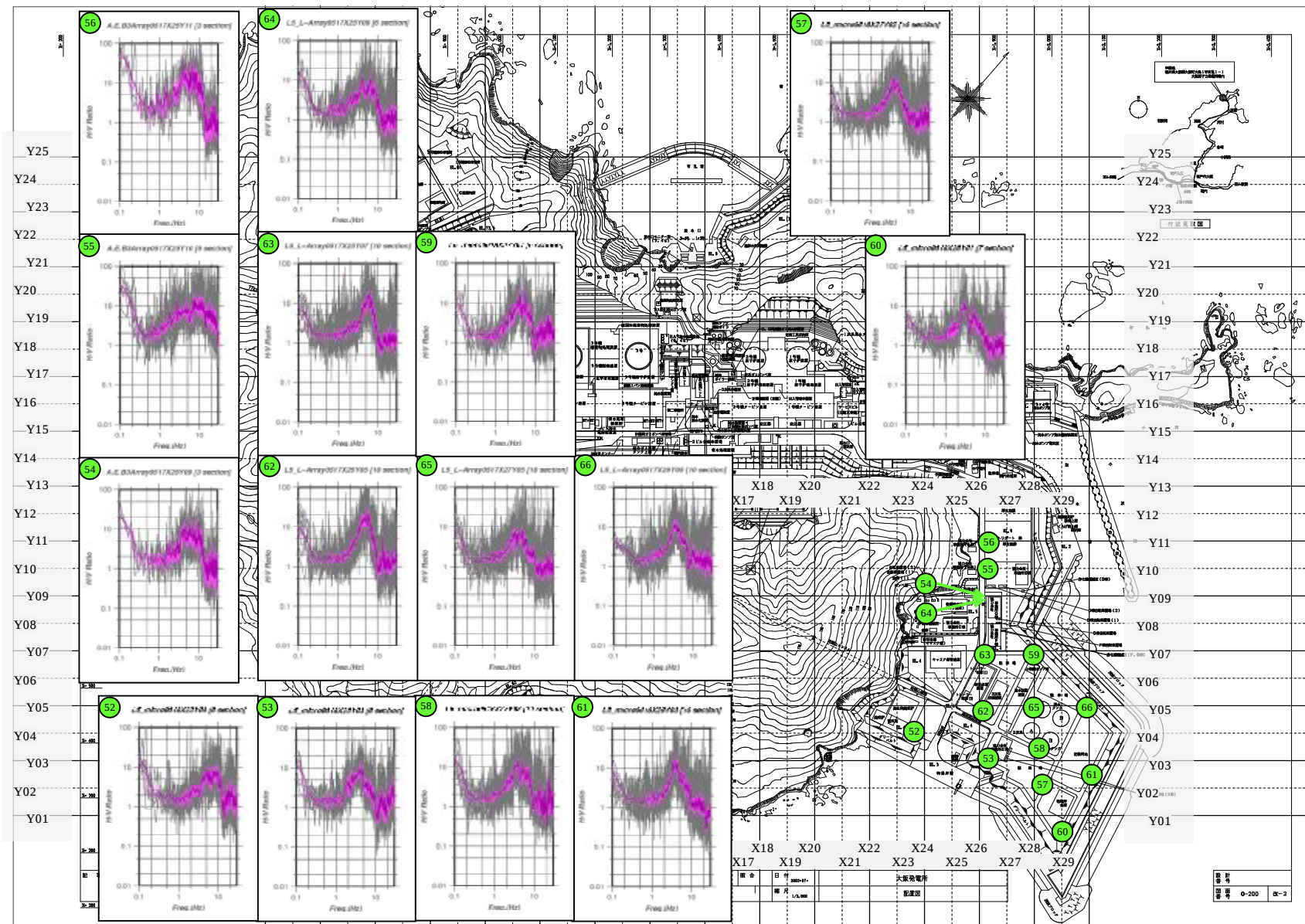
■ 敷地西側エリアのH/Vスペクトル分布



2-2. 敷地内での微動調査

37

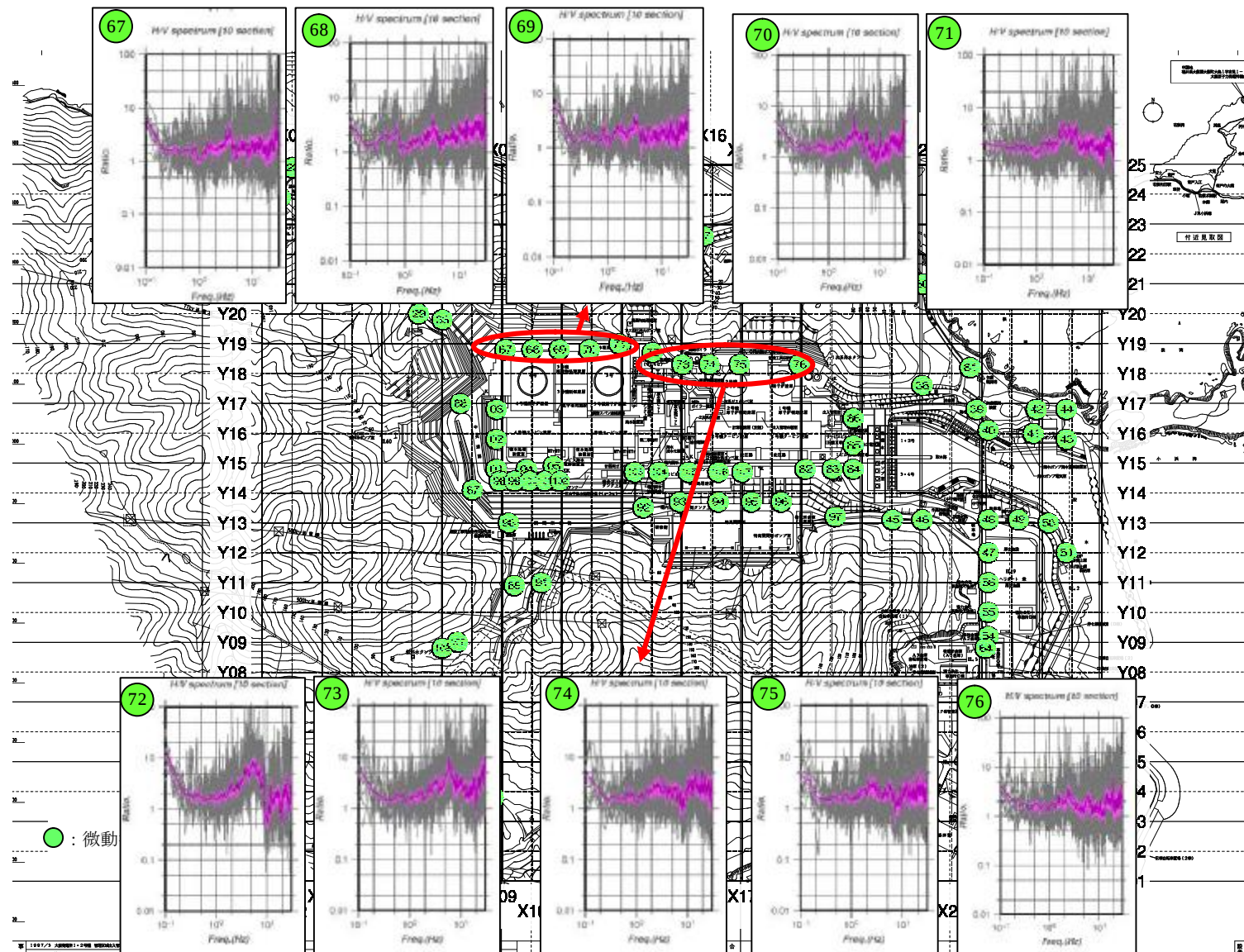
■ 敷地東側エリアのH/Vスペクトル分布



2-2. 敷地内での微動調査

38

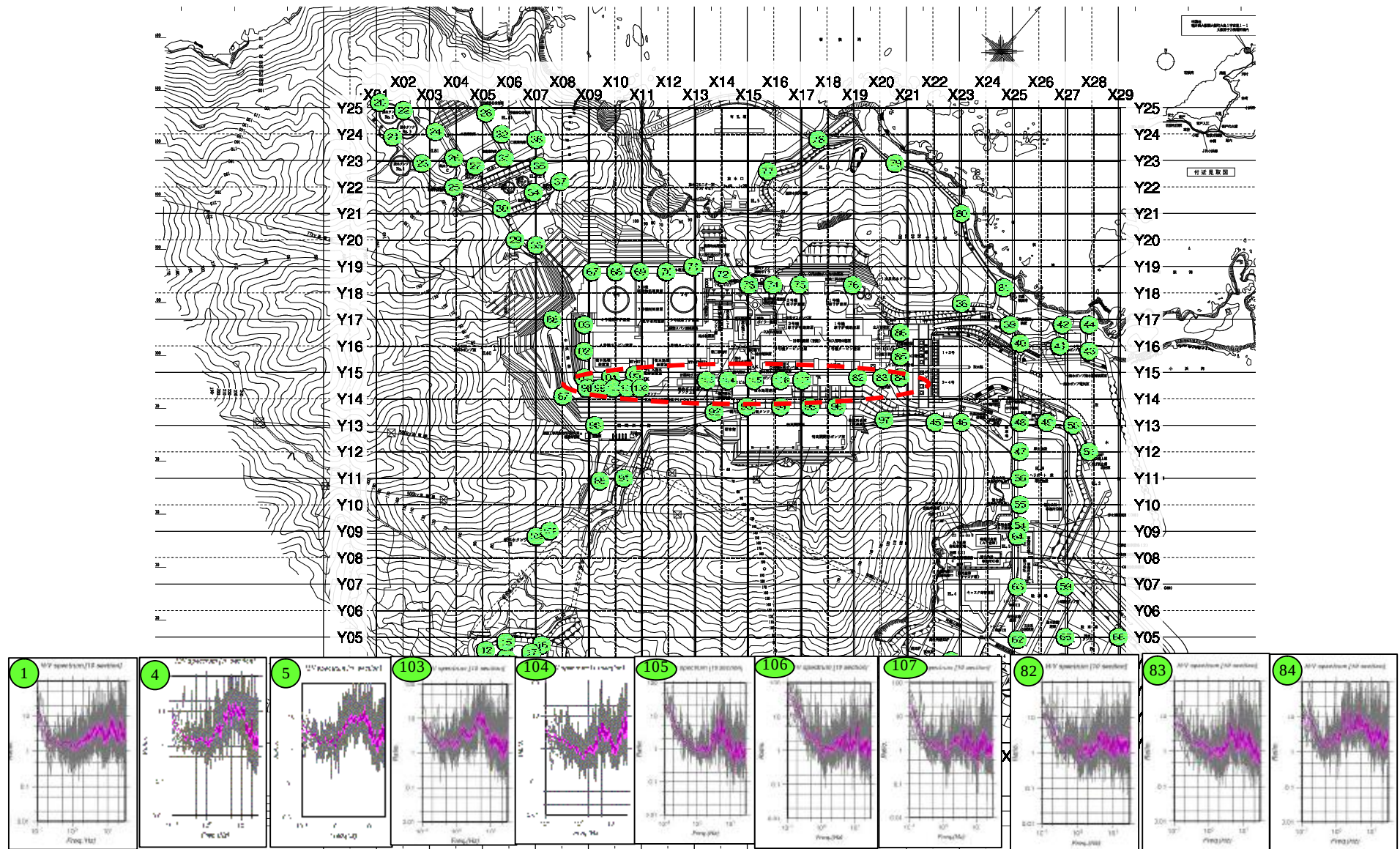
■背面道路では、72,73地点を除き、フラットなスペクトルであり特異なピークは見られない。



2-2. 敷地内での微動調査

39

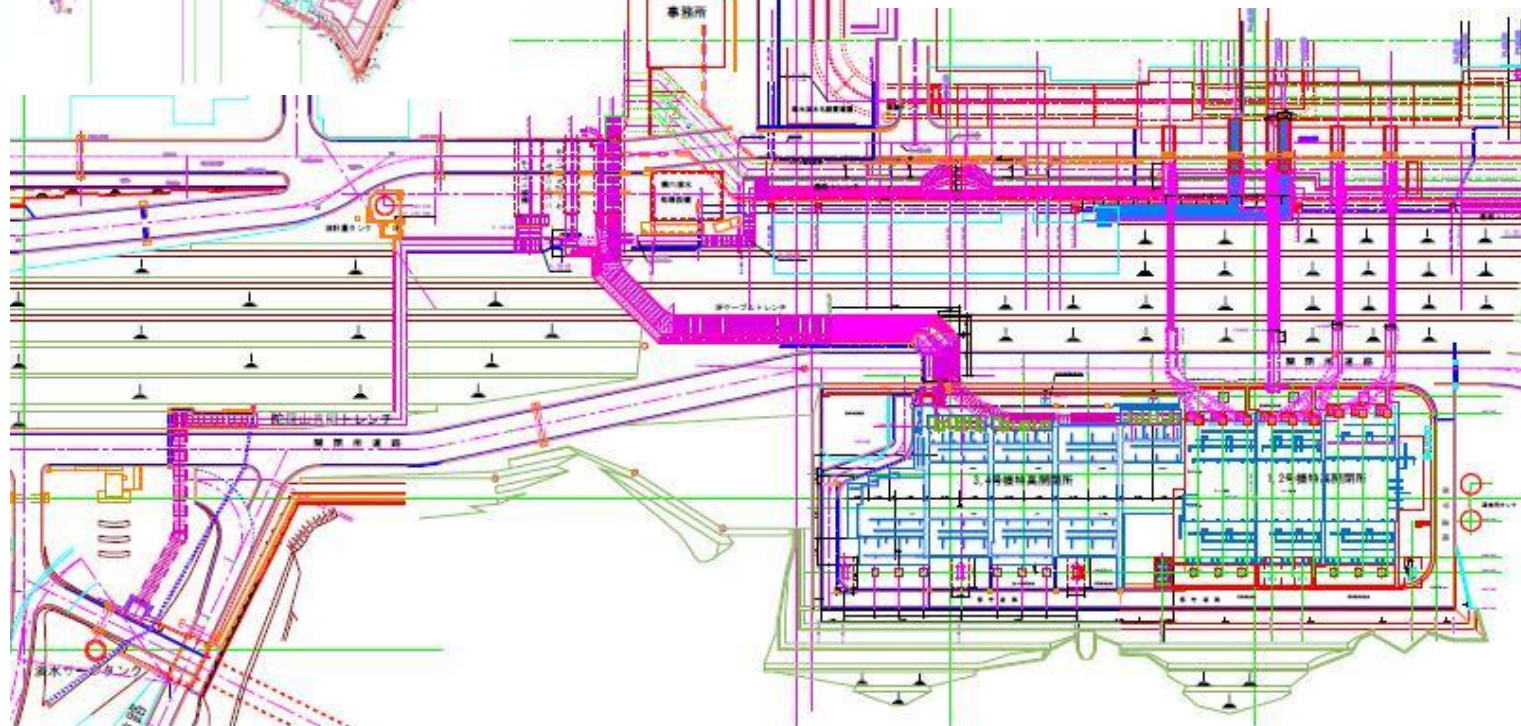
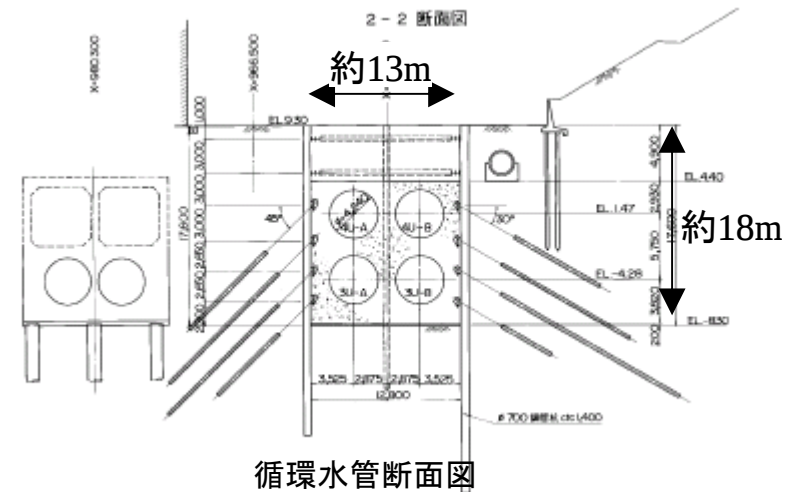
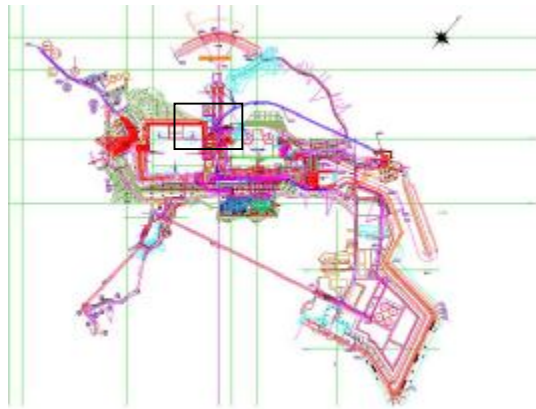
■ 前面道路上の観測点では、埋戻し土・埋設構造物等によるものと思われるピークが見られる。



2-2. 敷地内での微動調査

40

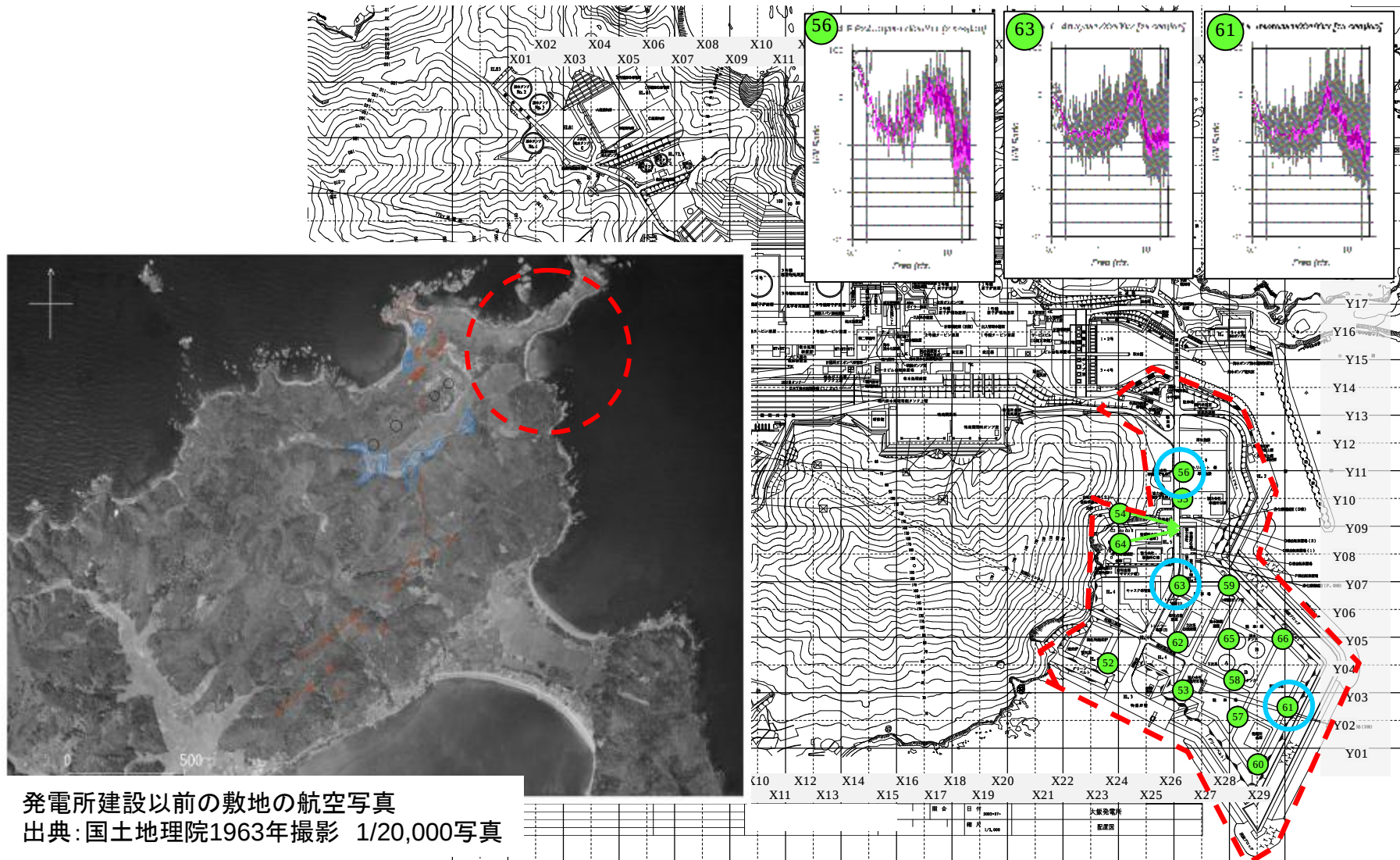
■ 前面道路周辺の観測点(103,104,105)におけるH/Vスペクトルのピークは、以下のような埋設構造物の影響によると考えられる。



2-2. 敷地内での微動調査

41

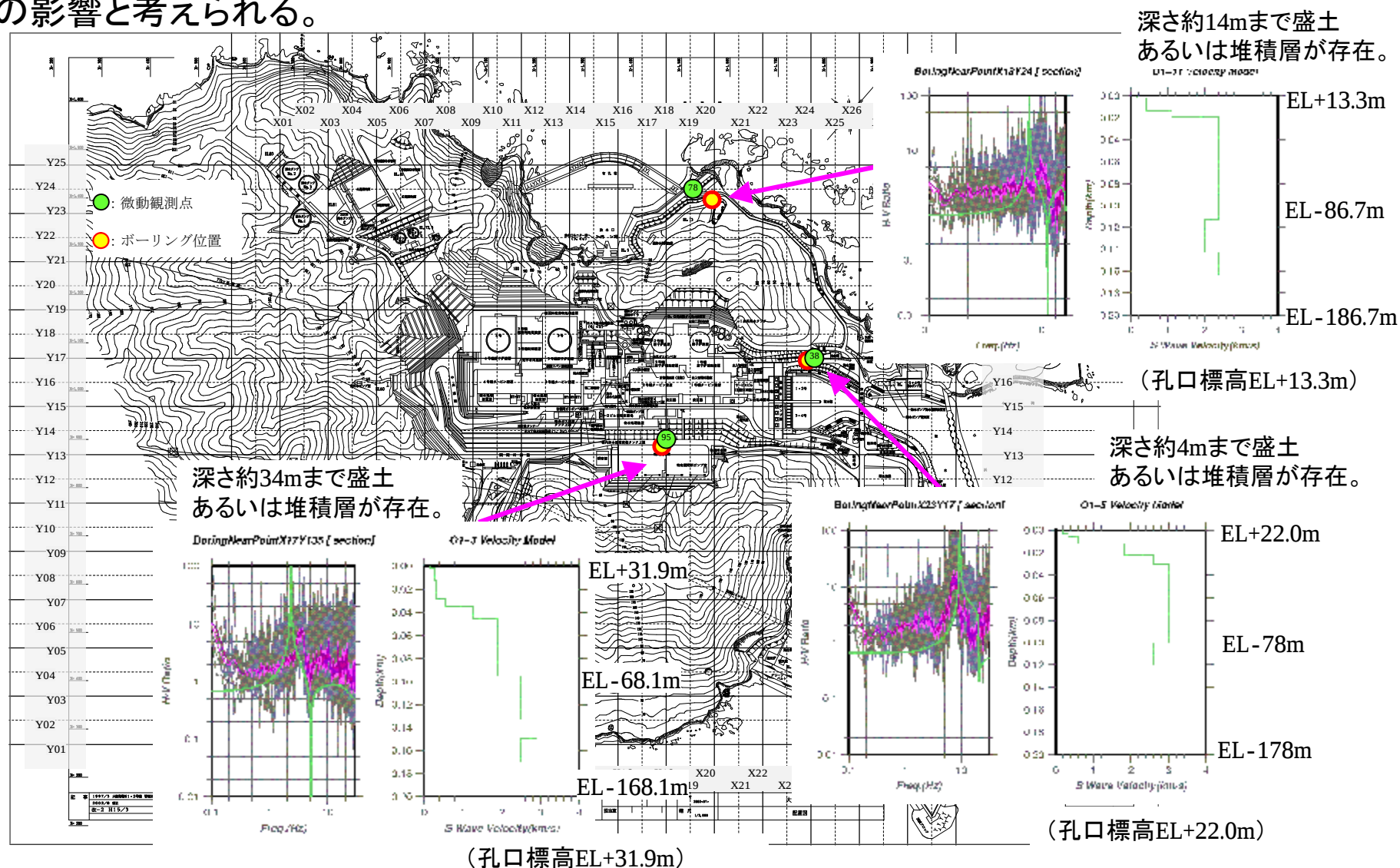
- 敷地東側エリアでは、各観測点に共通して5Hz付近にピークが見られ、埋立による表層の影響と考えられる。



2-2. 敷地内での微動調査

42

■既存のボーリングデータから算定したRayleigh波の理論H/Vスペクトルと観測スペクトルの比較により卓越周期は概ね一致する事から、数Hzに見られるピークは極表層の地盤の影響と考えられる。

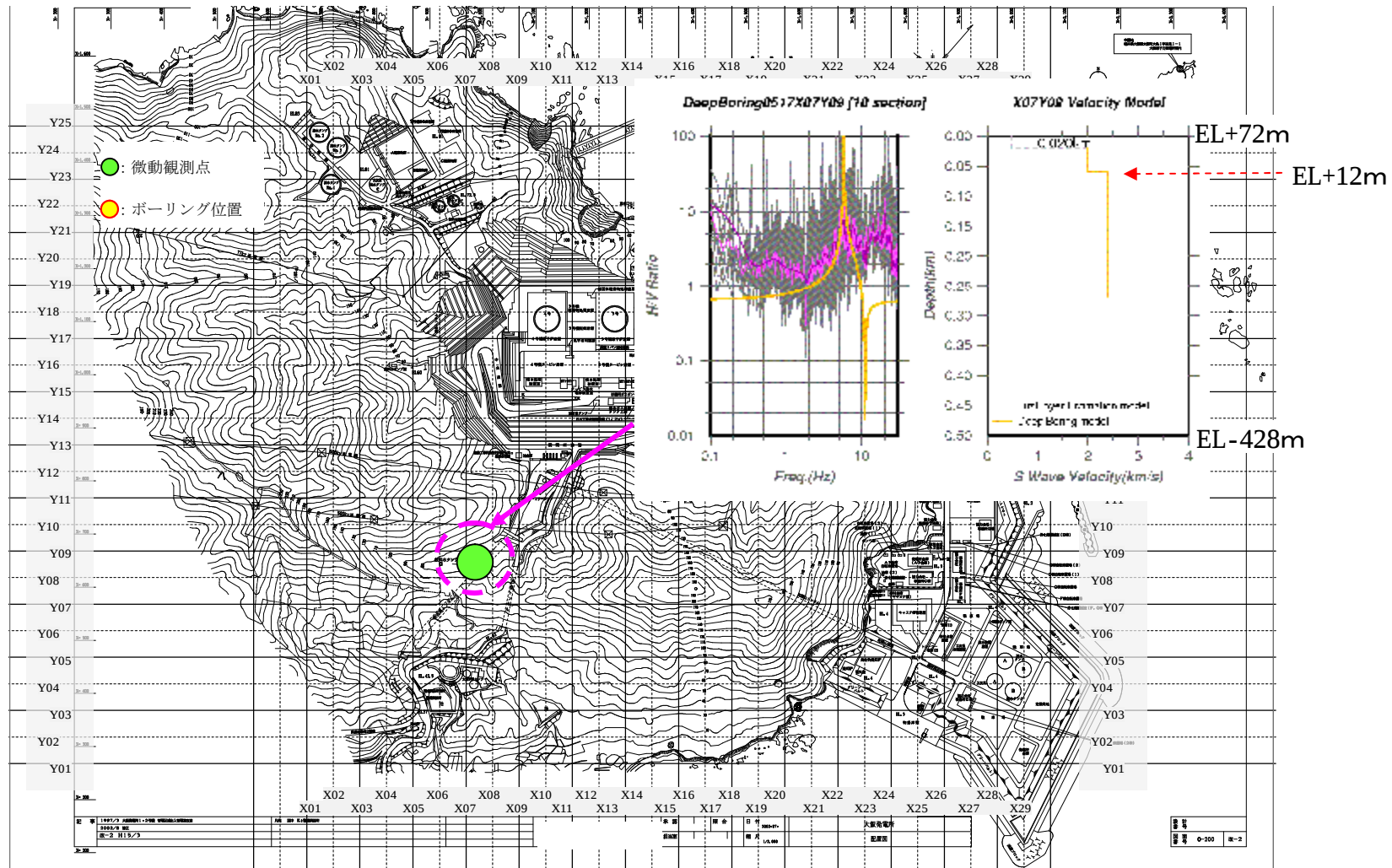


2-2. 敷地内での微動調査

43

■No.109地点におけるH/Vスペクトルについて、PS検層ではデータが採取されていなかったため、第1層目をVsを約500m/s※で仮定して理論H/Vが観測H/Vに合致するように層厚を推定したところ、第1層の層厚が約20mとなり、H/Vスペクトルのピークを概ね説明することができた。

※敷地内の各ボーリング孔のPS検層のうち、埋土層の平均Vs



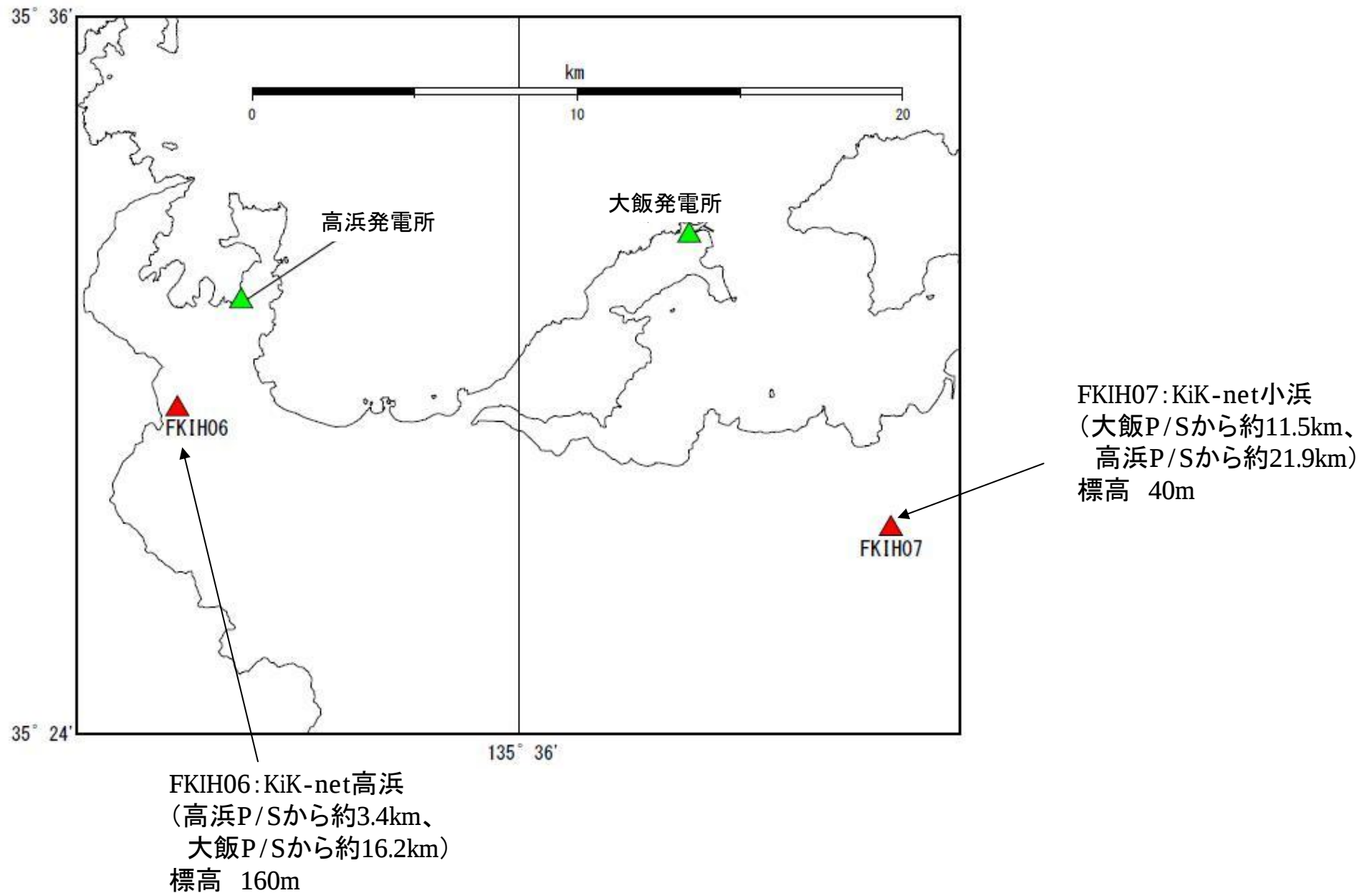
- 大飯発電所敷地内で、敷地の地盤増幅特性を評価するため50m間隔で単点微動観測を実施してH/Vスペクトルを評価し、発電所敷地内における空間変動を評価した。
- 1Hz～数Hzの周波数範囲に着目して評価した結果、比較的表層地盤の影響が少ないと考えられる背面道路付近における観測点においては、1～数Hzに特異なピークは見られなかったことから、敷地の地盤増幅特性に問題となるものはないと考えられる。
- 建屋周辺の道路や協力会社事務所棟付近の観測点においては、数HzにH/Vスペクトルのピークが見られたが、埋設構造物や埋立地盤の影響と考えられる。
- 更に、既存のボーリングデータから算定した理論H/Vスペクトルと該当する地点の観測スペクトルとの比較を行なったところ概ね一致したことから、数Hzにみられるピークは極表層地盤の影響によるものと考えられる。

⇒ 敷地内微動観測の結果、敷地の地盤増幅特性に問題の無いことを確認。

- 大飯発電所3, 4号機の地震動評価に用いる地盤モデルのうち、地表から深さ200m程度までは敷地内のPS検層やボーリング調査結果等を用いて $V_s=2200\text{m/s}$ とし、また、深さ200mより深い部分については若狭周辺地域で実施された屈折法探査や微動アレイ探査等の調査結果を参考にした。
- 深さ200mまでの減衰定数については、過去に実施したPS検層データを用いた不均質性の評価に加えて、敷地における深さ250mまでのボーリング孔を利用したQ値測定により妥当性を確認している。
- 敷地の地下構造を三次元的に把握するための追加調査計画を策定した。
- 発電所敷地内における稠密な微動観測を実施した。
- より深部の地下構造を把握するためのデータを得るために、発電所敷地外数箇所において地表面地震観測・微動アレイ観測を評価中。
- 更に、敷地内における反射法探査、ボーリング調査、PS検層等の物理探査を追加すると共に、複数地点での鉛直アレイ地震観測を実施し観測点間や周辺のKiK-net観測点との比較や、解放基盤相当の基盤地震動評価を行う。

【参考】発電所周辺のKiK-net観測点

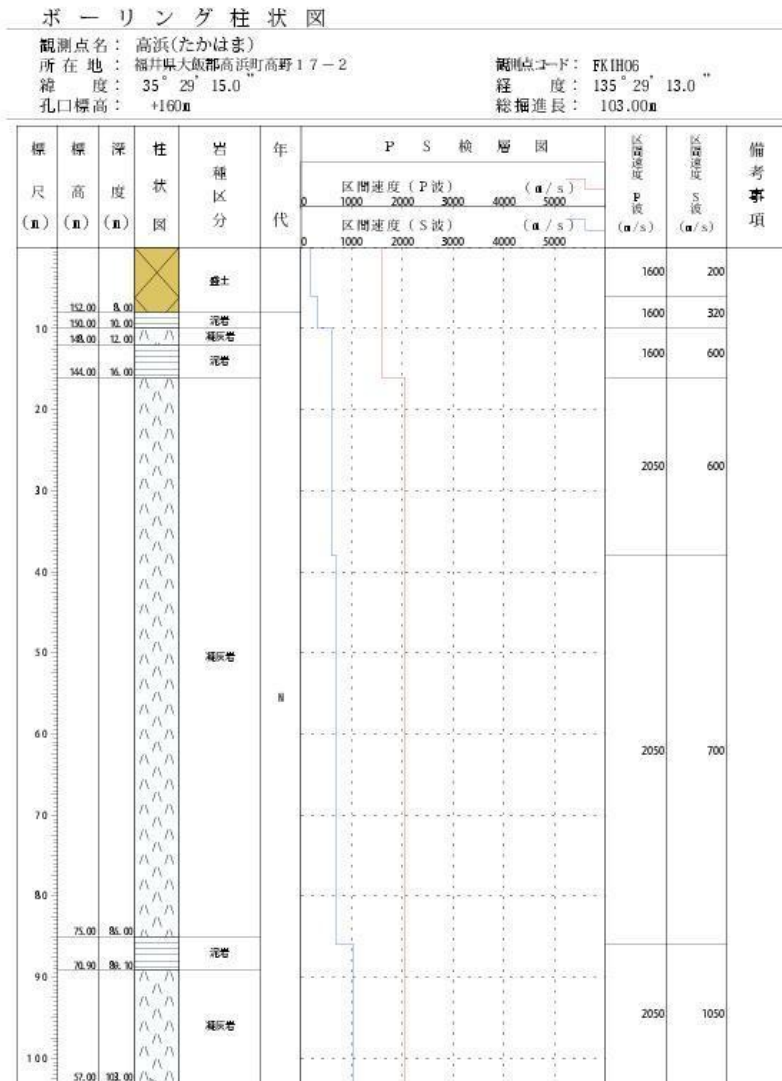
46



【参考】発電所周辺のKiK-net観測点

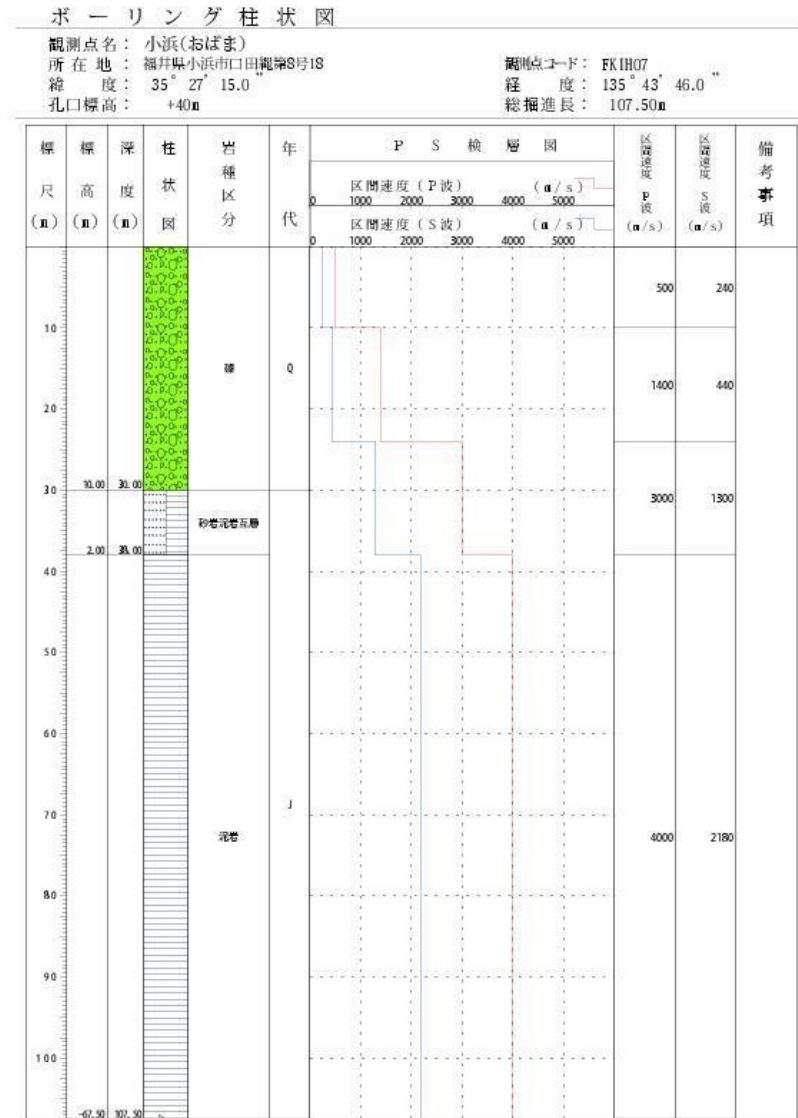
47

KiK-net高浜の柱状図



NIED 独立行政法人防災科学技術研究所
Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. All rights Reserved.

KiK-net小浜の柱状図



NIED 独立行政法人防災科学技術研究所
Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. All rights Reserved.

※発電所敷地内と比較して、表層のVsが小さい。