川内原子力発電所1号炉、2号炉審査資料	
資料番号	TTS－009
提出年月日	2022年9月21日

川内原子力発電所１号炉及び２号炉

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価における地下構造モデルの設定について（コメント回答）

2022年9月21日

九州電力株式会社

目　次

1. これまでの審査会合におけるコメント

2. 地下構造モデルの位置づけ

【参考①】既許可における地震動評価

3. 地盤減衰に係る追加調査及び今後の審査スケジュール

3.1 地盤減衰に係る追加調査の概要

3.2 地盤減衰に係る追加調査の進捗状況

3.3 今後の審査スケジュール

【参考②】第1057回審査会合（2022年7月1日）におけるスケジュール

【参考③】追加調査結果の検討イメージ

1. これまでの審査会合におけるコメント

1. これまでの審査会合におけるコメント（1/2）

No.	コメント	指摘場所	対応状況
1	地下構造モデルの地盤減衰の設定について、既許可からの変更点の妥当性を説明すること。その際、EL.-28.5m～EL.-480mの層を分割していること、また、地盤減衰の設定根拠としている地震観測記録が得られていない範囲（EL.-118.5m～EL.-200m）の地盤減衰の設定の妥当性についても併せて説明すること。	第983回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 （令和3年6月11日）	第1026回会合にて説明 次回以降改めて説明予定
2	地下構造モデルの変更に伴う既許可の基準地震動への影響について説明すること。		第1026回会合にて説明 次回以降改めて説明予定
3	地震基盤相当面について、設置許可基準規則解釈別記2のVs=2,200m/s以上に対し、Vs＝2,150m/sの層上面（EL.-480m）に設定したことの妥当性を説明すること。		第1026回会合にて説明
4	模擬地震波の作成について、複数の方法から一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせを採用した妥当性を説明すること。		次回以降説明予定
5	既許可以降の観測・調査・分析などについて説明すること。		適宜反映
6	変はんれい岩類について、地質層序と地質図の凡例の記載の考え方を説明すること。		第1049回会合にて説明
7	既許可の地下構造モデルと新たに設定した地下構造モデルの位置づけの記載を充実すること。	第1026回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 （令和4年1月21日）	今回説明（P5～9）
8	新たに設定した地下構造モデルについて、以下を踏まえ、地盤減衰の設定の考え方、根拠を明確にし、説明すること。 ①15Hz程度までの範囲で評価した地盤減衰の高周波数帯への適用性 ②地震観測記録が得られていない深さにおける地盤減衰の設定 ③地盤減衰の不確かさの考え方		コメント回答①: 第1049回会合にて説明 次回以降改めて説明予定 コメント回答②③: 次回以降説明予定
9	地震基盤相当面は、設置許可基準規則解釈別記2の定義に従いVs=2,200m/s以上の層に設定すること。		第1057回会合にて説明
10	乱数位相を用いた模擬地震波の作成について、継続時間の設定を含め検討し、説明すること。		次回以降説明予定

1. これまでの審査会合におけるコメント（2/2）

No.	コメント	指摘場所	対応状況
11	地震動評価にあたって、どのような地下構造モデルを使うのか方針を示すこと。	第1049回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 （令和4年5月20日）	第1057回会合にて説明
12	全体スケジュールを考慮した上で、地下構造モデル設定、地震動評価及び全体方針を示すこと。		第1057回会合にて説明
13	審査全体を見通した上で、スケジュールを示すこと。	第1057回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 （令和4年7月1日）	今回説明（P19）
14	今回地下構造モデルの方針を変更していることから、説明済みとなっているコメントに関しても、改めて説明すること。		コメントNo.1,2,8について 次回以降改めて説明予定
15	新たなボーリング調査から得られる結果を踏まえ、設定した地下構造モデルの妥当性を示すこと。		次回以降説明予定

2. 地下構造モデルの位置づけ

2. 地下構造モデルの位置づけ（1/4）

■ 地下構造モデル評価の基本スタンス

【当社の基本スタンス（第114回審査会合資料より抜粋）】

① 最新の技術的知見やデータ、観測事実に基づき、評価の精度・信頼性を向上させること

② ①によっても、なお評価に幅が存在する場合は、敷地への影響の観点から安全側に判断すること

③ ①、②の取り組みは、現在のみならず今後とも継続的に進め、常に安全性・信頼性の向上を図ること

- 既許可（平成26年9月10日許可）では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において、長周期帯の理論的手法による評価を対象とした解放基盤表面以深の地下構造モデル（以下、既許可の地下構造モデル）を設定。
- 今回、既許可の地下構造モデルをベースに、最新の知見・観測記録を取り入れ、精度・信頼性を向上させた評価により、地盤減衰を精緻化した地下構造モデルを設定。

■ 今回新たに設定する地下構造モデル

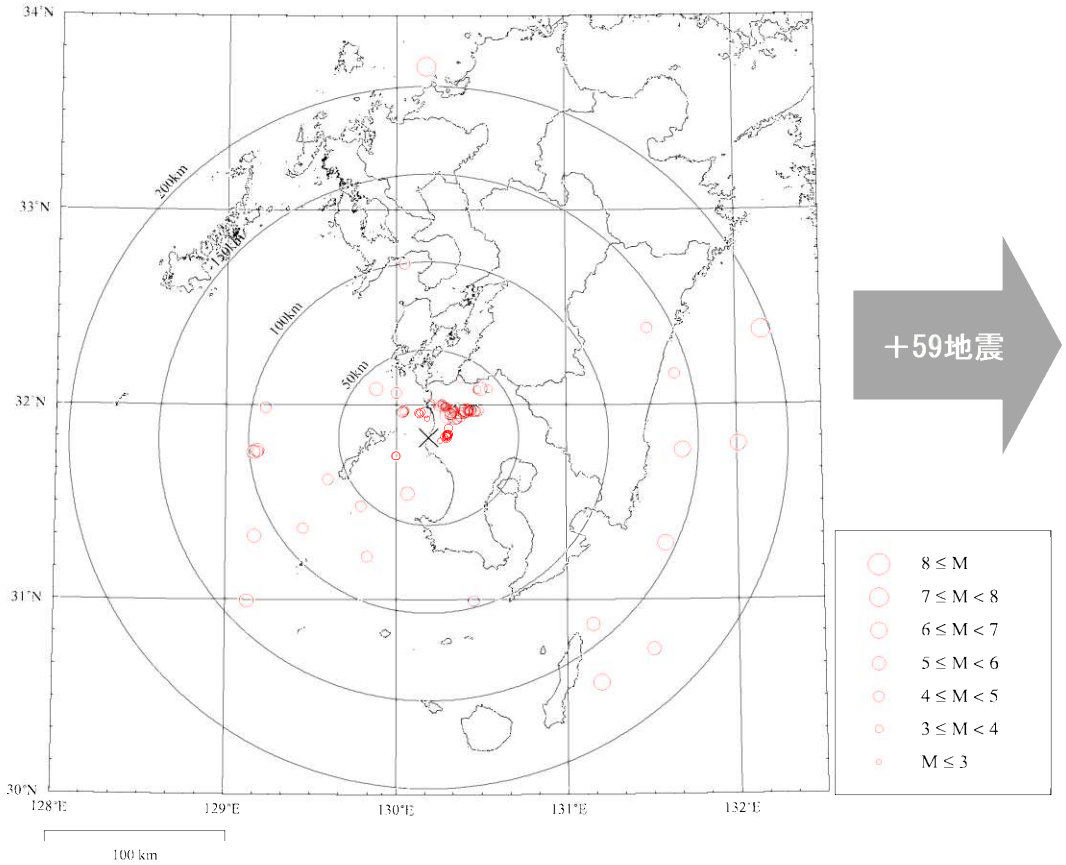
- 標準応答スペクトルは、周期0.02秒から5秒までの応答スペクトルで定義されるが、既許可の地下構造モデルは、長周期帯における理論的手法による評価を目的として設定していたため、短周期帯も含む地震動評価を目的として、地盤減衰を検討。
- 今回の検討では、次頁に示す既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録や最新の知見を整理して取り入れ精緻化し、新たな地下構造モデル（以下、標準応答スペクトル用モデル）を設定。
- 追加実施したボーリング調査結果等を基に、標準応答スペクトル用モデルの妥当性を確認。

2. 地下構造モデルの位置づけ（2/4）

■ 敷地内の鉛直アレイ地震観測記録

- 既許可時審査以降、川内原子力発電所の敷地地盤における鉛直アレイによる地震観測を継続して実施しており、新たに、2016年熊本地震を含む59地震の観測記録を取得。（計149地震の観測記録）

計90地震

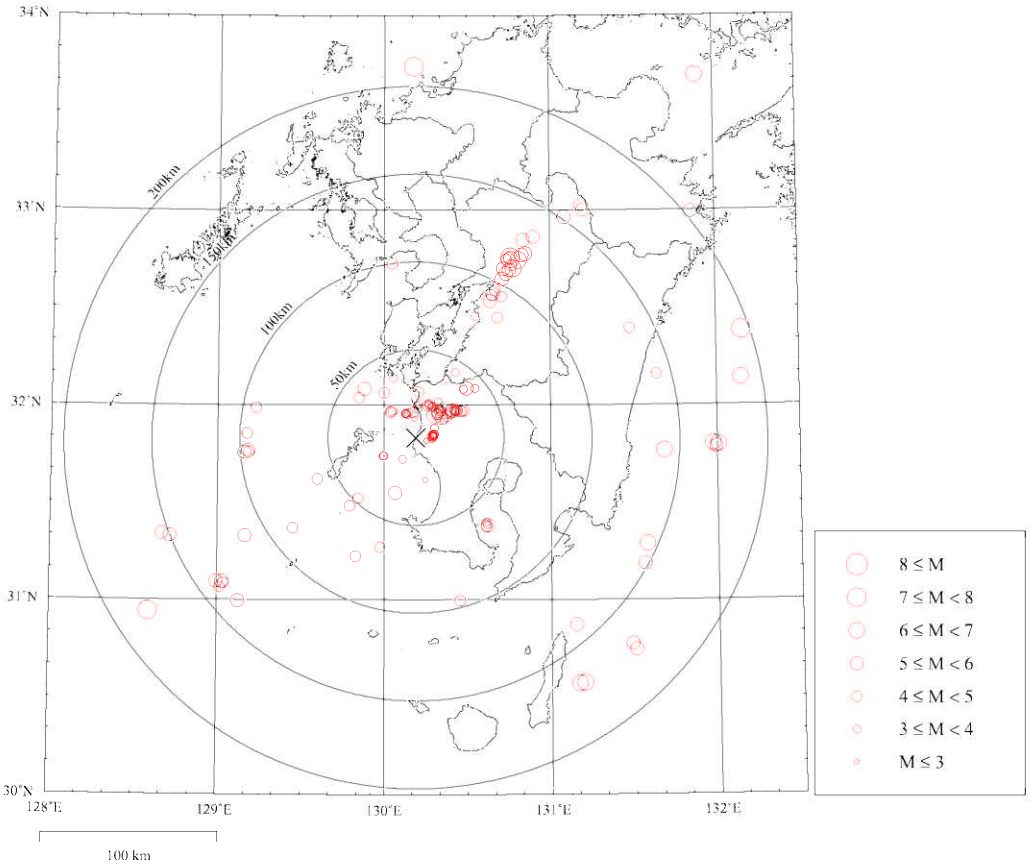


敷地地盤における観測地震の震央分布
（観測開始～既許可時審査）

＋59地震

計149地震

※2015年小笠原諸島西方沖地震は図の枠外



敷地地盤における観測地震の震央分布
（観測開始～2019年度）

2. 地下構造モデルの位置づけ（3/4）

■ 今回取り入れる新たな知見や考え方

新たな知見	新たな考え方	新たな地下構造モデルの設定
敷地における 地震観測記録の蓄積	蓄積した鉛直アレイ地震観測記録を用いた伝達関数により、地盤減衰（Q値）を検討	・伝達関数による地盤減衰（Q値）の検討に用いる観測記録数の増加 ・地盤減衰（Q値）検討の多面化
地震波干渉法	蓄積した鉛直アレイ地震観測記録を用いた地震波干渉法により、地盤減衰（Q値）を検討	・地下構造モデルに依存しない手法での地盤減衰（Q値）の検討 ・地盤減衰（Q値）検討の多面化
地盤減衰（Q値）の上限を示す評価事例の蓄積	蓄積した鉛直アレイ地震観測記録を用い、上限値を考慮した伝達関数による同定により、地盤減衰（Q値）を検討	・より広帯域での地盤減衰（Q値）の検討 ・地盤減衰（Q値）検討の多面化
不均質減衰構造を考慮したブロックインバージョン解析に基づく地盤増幅率	設定した地下構造モデルを用いた理論増幅率との比較から地盤減衰（Q値）の適用範囲を検討、及び設定した地下構造モデルの妥当性を確認	・地盤減衰（Q値）検討の多面化 ・設定した地下構造モデルの確認の多面化
敷地内追加ボーリング調査・減衰測定	追加ボーリング調査孔内による減衰測定結果から地盤減衰（Q値）の妥当性を確認 追加ボーリング調査結果から設定した地下構造モデルの妥当性を確認	・設定した地盤減衰（Q値）の確認の多面化 ・設定した地下構造モデルの確認の多面化
岩石コアを用いた減衰測定	岩石コアを用いた減衰測定結果から地盤減衰（Q値）の妥当性を確認	・設定した地盤減衰（Q値）の確認の多面化

2. 地下構造モデルの位置づけ（4/4）

■2つの地下構造モデルの位置づけ

- 既許可の地下構造モデルと標準応答スペクトル用モデルは、検討の目的に応じてそれぞれ設定。
- 既許可の地下構造モデルは、長周期帯のみの地震動評価への適用を目的に、解放基盤表面から地震基盤以深まで設定し、断層モデルを用いた手法のうち理論的手法による長周期帯の評価に用いている。
- 標準応答スペクトル用モデルは、短周期帯も含む地震動評価への適用を目的に、解放基盤表面から地震基盤相当面を含む層まで設定し、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる。

長周期帯の理論的手法による
地震動評価に用いる地下構造モデル

EL.	層上面 (km)	密度ρ (g/cm³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
解放基盤表面					
−18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100
−28.5m					
−200m	−0.01	2.70	1600	3700	100
−480m					
−1018.5m	−0.462	2.70	2150	4400	200
−2018.5m	−1.0	2.70	3010	5200	200
−3018.5m	−2.0	2.70	3240	5600	300
−17018.5m	−3.0	2.70	3500	5900	300
−33018.5m	−17.0	3.00	3800	6600	500
	−33.0	3.30	4300	7600	500

標準応答スペクトルを考慮した
地震動評価に用いる地下構造モデル

層上面 (km)	密度ρ (g/cm³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
0.0	2.70	1500	3200	12.5
−0.01	2.70	1600	3700	12.5
−0.182	2.70	1600	3700	100
−0.462	2.70	2150	4400	200
−1.0	2.70	3010	5200	200

【参考①】既許可における地震動評価（1/2）

■「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」

① 応答スペクトルに基づく地震動評価

- Noda et al.(2002)[1)]の手法により、解放基盤表面（Vs=1500m/s）における地震動を評価。
- 「応答スペクトルに基づく地震動評価」においては、地下構造モデルを使用していない。

② 断層モデルを用いた手法による地震動評価

- 敷地地盤で得られた観測記録を要素地震として用いた経験的グリーン関数法により解放基盤表面における地震動を評価。
- 長周期帯は理論的手法により解放基盤表面の地震動を評価を実施し、短周期帯の経験的グリーン関数法による地震動評価結果を周期0.8秒で接続したハイブリッド合成法による評価を実施。

（経験的グリーン関数法の妥当性検証として統計的グリーン関数法の評価を実施）

- 長周期帯における理論的手法への適用を目的に設定した解放基盤表面以深の地下構造モデルを使用。

- 検討用地震の「応答スペクトルに基づく手法」による地震動評価結果を包絡して、基準地震動Ss-1を策定。
- 基準地震動Ss-1は、「断層モデルを用いた手法」による地震動評価結果を上回ることから、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の基準地震動は、基準地震動Ss-1で代表。
- **基準地震動Ss-1は、地下構造モデルを使用していない。**

① 応答スペクトルに基づく地震動評価
・Noda et al.(2002)[1)]の手法

② 断層モデルを用いた手法による地震動評価
・経験的グリーン関数法
・ハイブリッド合成法（経験的グリーン関数法と**理論的手法**）

・ハイブリッド合成法（**統計的グリーン関数法**と**理論的手法**）

→ 基準地震動Ss-1
（設計用応答スペクトル）

※朱書き部は既許可の地下構造モデルを使用

【参考①】既許可における地震動評価（2/2）

■「震源を特定せず策定する地震動」

① Mw6.5程度以上

- 2000年鳥取県西部地震及び2008年岩手・宮城内陸地震の2つの地震の震源域周辺は、川内原子力発電所周辺と地質学的・地震学的背景が異なり、同様の地震は発生しないと考えられるため、該当なし。

② Mw6.5程度未満

- 2004年北海道留萌支庁南部地震の震源近傍のK-NET港町観測点の解放基盤波に当社独自の検討から余裕を持たせた地震動を設定。設定した地震動が、一部の周期帯で基準地震動Ss-1を上回ることから、基準地震動Ss-2として策定。
- K-NET港町観測点の解放基盤波（Vs=938m/sにおけるはぎとり波）を、川内原子力発電所の解放基盤表面（Vs=1500m/s）の地震動として採用。
- 「震源を特定せず策定する地震動」においては、地下構造モデルを使用していない。

- **基準地震動Ss-2は、地下構造モデルを使用していない。**

① Mw6.5程度以上
・該当なし

② Mw6.5程度未満
・2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動

一部周期帯で
Ss-1を超過

※既許可の地下構造モデルを使用していない

基準地震動Ss-2

■「免震構造施設を対象とした地震動」

- 免震構造施設を対象とした基準地震動について、免震構造の周波数特性に着目した地震動評価を実施し基準地震動Ss-Lを策定。今後、免震構造施設を設置する際に使用。
- 琉球海溝におけるプレート間地震を対象に、「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において統計的グリーン関数法及び理論的手法による地震動評価結果をハイブリッド合成法により評価。
- 「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において解放基盤表面以深の地下構造モデルを使用。
- 基準地震動Ss-Lは、「断層モデルを用いた手法」による地震動評価結果を上回る。

- **基準地震動Ss-Lは、地下構造モデルを使用していない。**

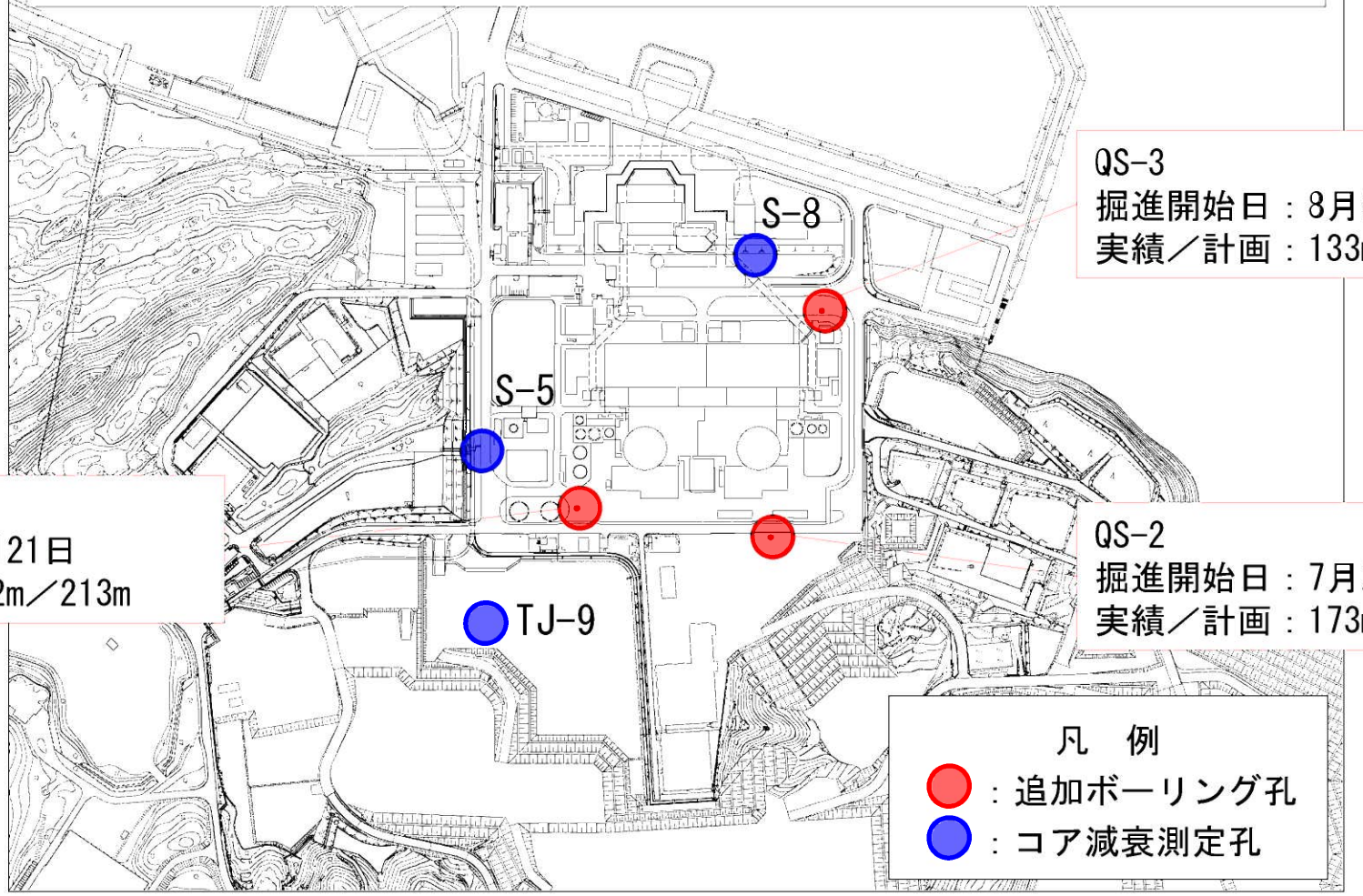
3. 地盤減衰に係る追加調査及び今後の審査スケジュール

3.1 地盤減衰に係る追加調査の概要（1/3）

■川内原子力発電所　追加ボーリング位置・進捗、岩石コア採取位置

※9/15時点実績

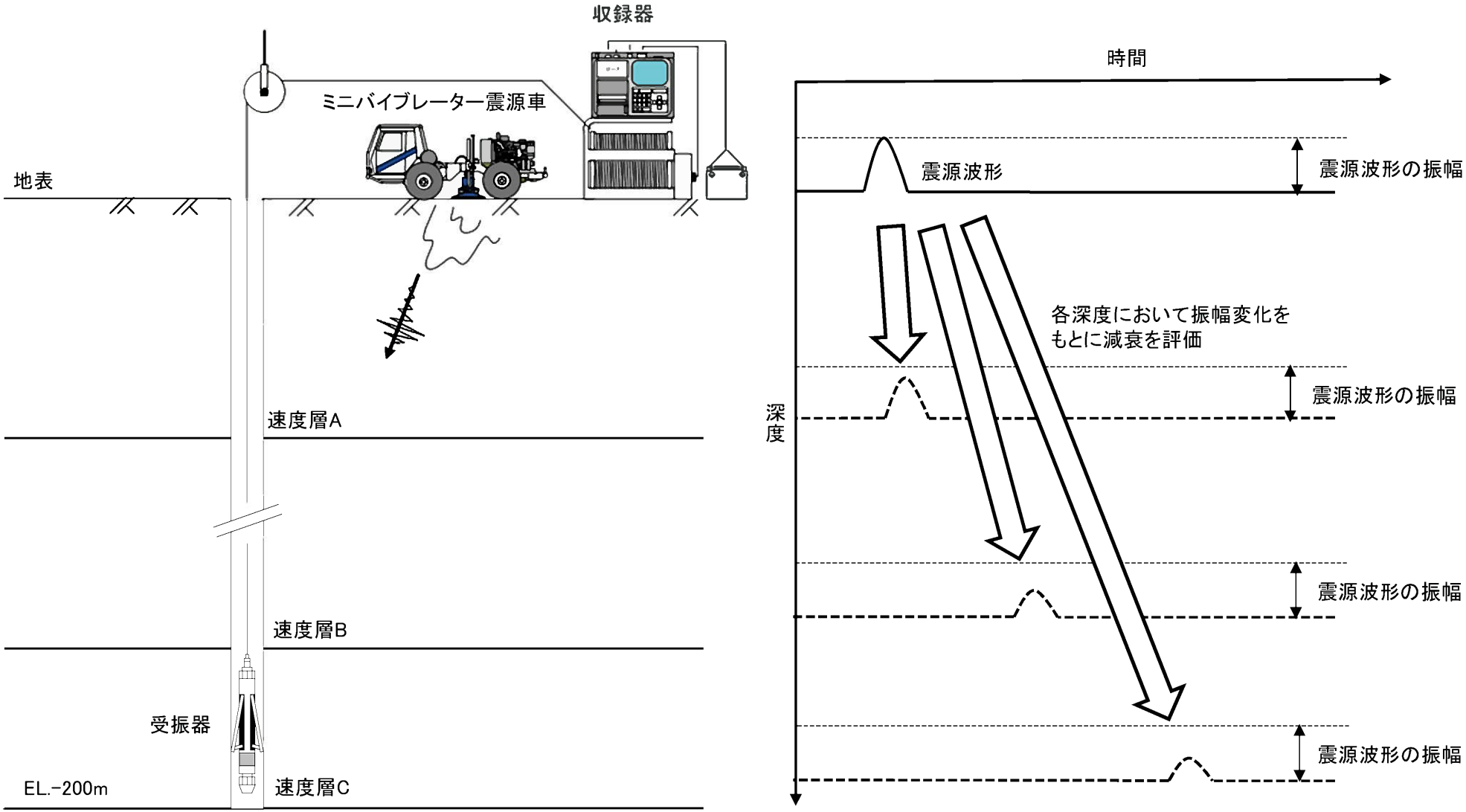
○ 発電所構内において、200m程度の追加ボーリング調査を3箇所で実施。
○ 追加ボーリング調査孔内において、地盤減衰（Q値）を測定。
○ 既存ボーリング孔における岩石コアを用いて、地盤減衰（Q値）を測定。



3.1 地盤減衰に係る追加調査の概要（2/3）

■ボーリング孔内における減衰測定

- 地表にて震源車を用いて人工的に励起した振動を追加ボーリング孔内に設置した受振器で観測し、震源位置の波形の振幅と孔内受振器の波形の振幅の関係から速度層区間ごとのQ値を測定する。

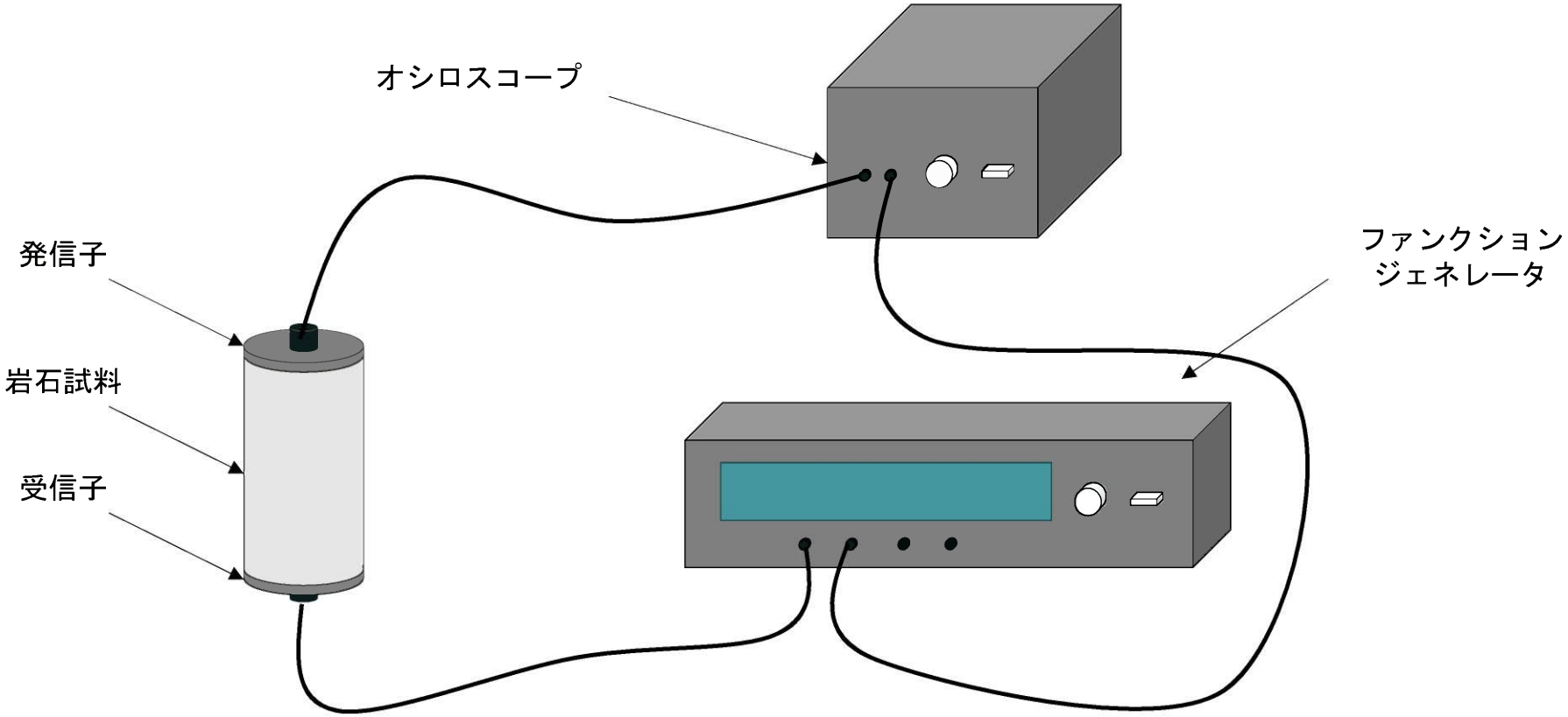


減衰評価イメージ図

3.1 地盤減衰に係る追加調査の概要（3/3）

■岩石コアを用いた減衰測定

- 敷地内で過去に実施したボーリング調査により得られた岩石コアを用いた超音波試験に基づき、地盤減衰（Q値）を測定。



超音波計測に用いる観測システムイメージ

余　白

3.2 地盤減衰に係る追加調査の進捗状況（1/2）

■ボーリング孔内及び岩石コアのQ値測定に関する当初計画及び現在の進捗状況

〔当初計画〕

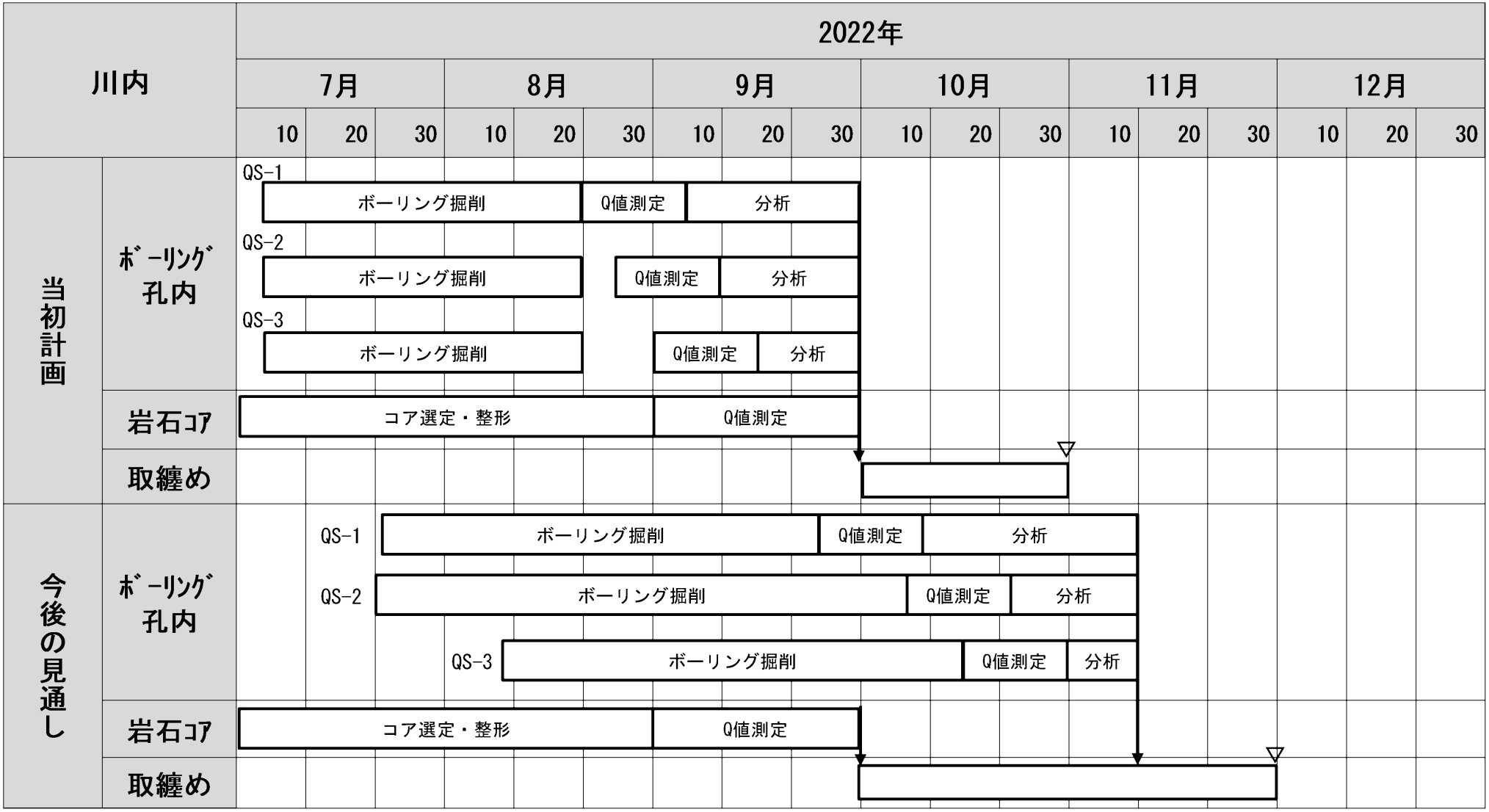
- 7月上旬から3孔同時にボーリングを開始し、9月下旬までにQ値を測定。
- 岩石コア試験によるQ値測定は、7月上旬から9月下旬までの3か月で実施。
- 取纏めについては、ボーリング孔内及び岩石コアのQ値分析結果が揃う10月上旬から1か月で実施。

〔進捗状況〕

- ボーリングは、7月下旬から8月上旬にかけて段階的に着手（他社現場での追加作業発生）。現状、3孔ともボーリング掘進中。Q値の分析は11月上旬完了予定。
- 岩石コアのQ値測定については、当初計画通り9月下旬に完了予定。
- 取纏めについては、ボーリング及び岩石コア試験の進捗を踏まえ、10月上旬より随時実施し、11月下旬完了予定。

3.2 地盤減衰に係る追加調査の進捗状況（2/2）

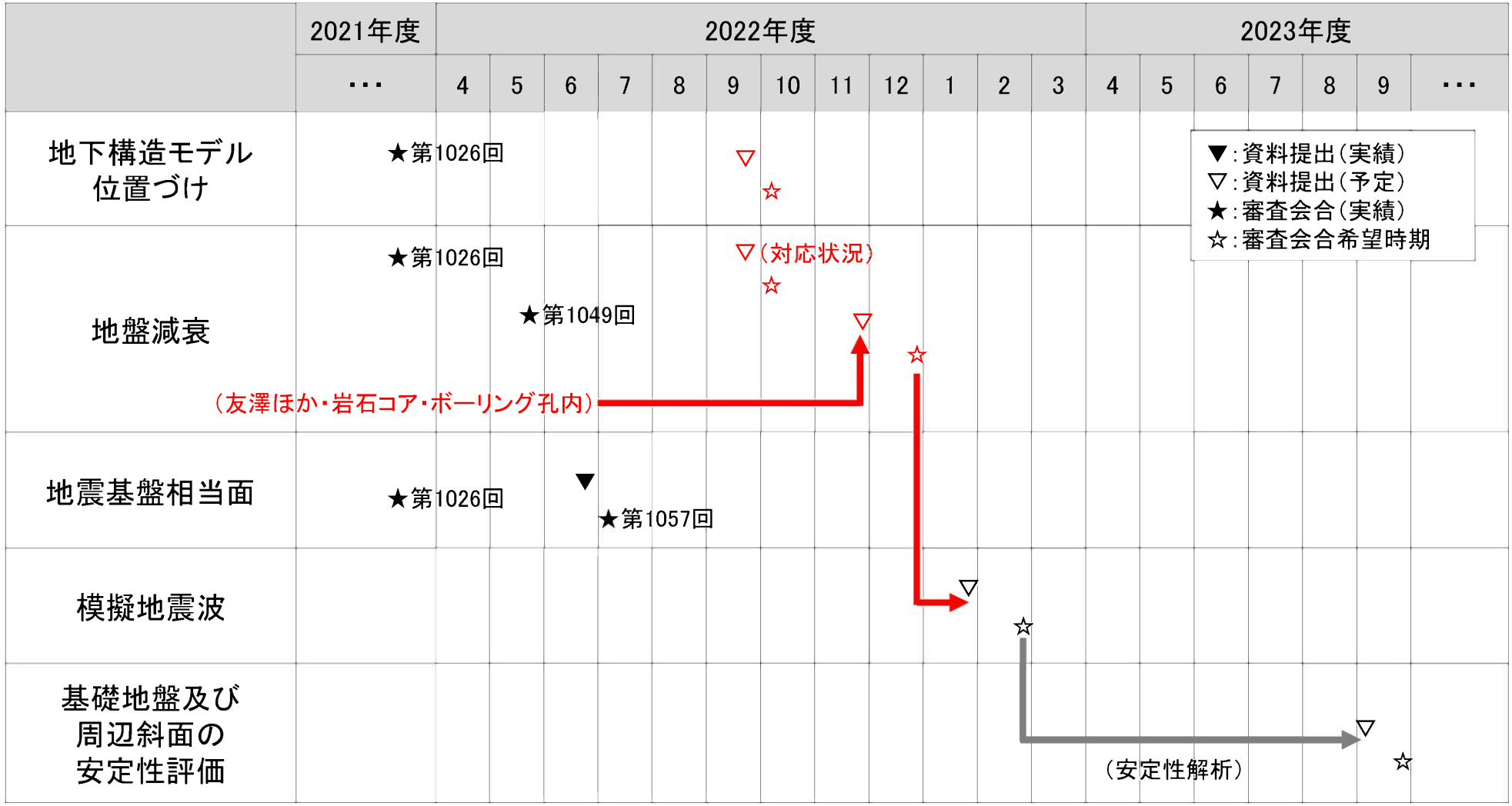
- ボーリング着手の遅れ（他社現場で追加作業発生）及び掘進の遅れ（孔曲がり防止・安全最優先作業）により、全体取纏めは11月下旬完了予定。



3.3 今後の審査スケジュール

- 11月下旬に、調査結果を踏まえた地下構造モデルに関する全体説明資料を提出。

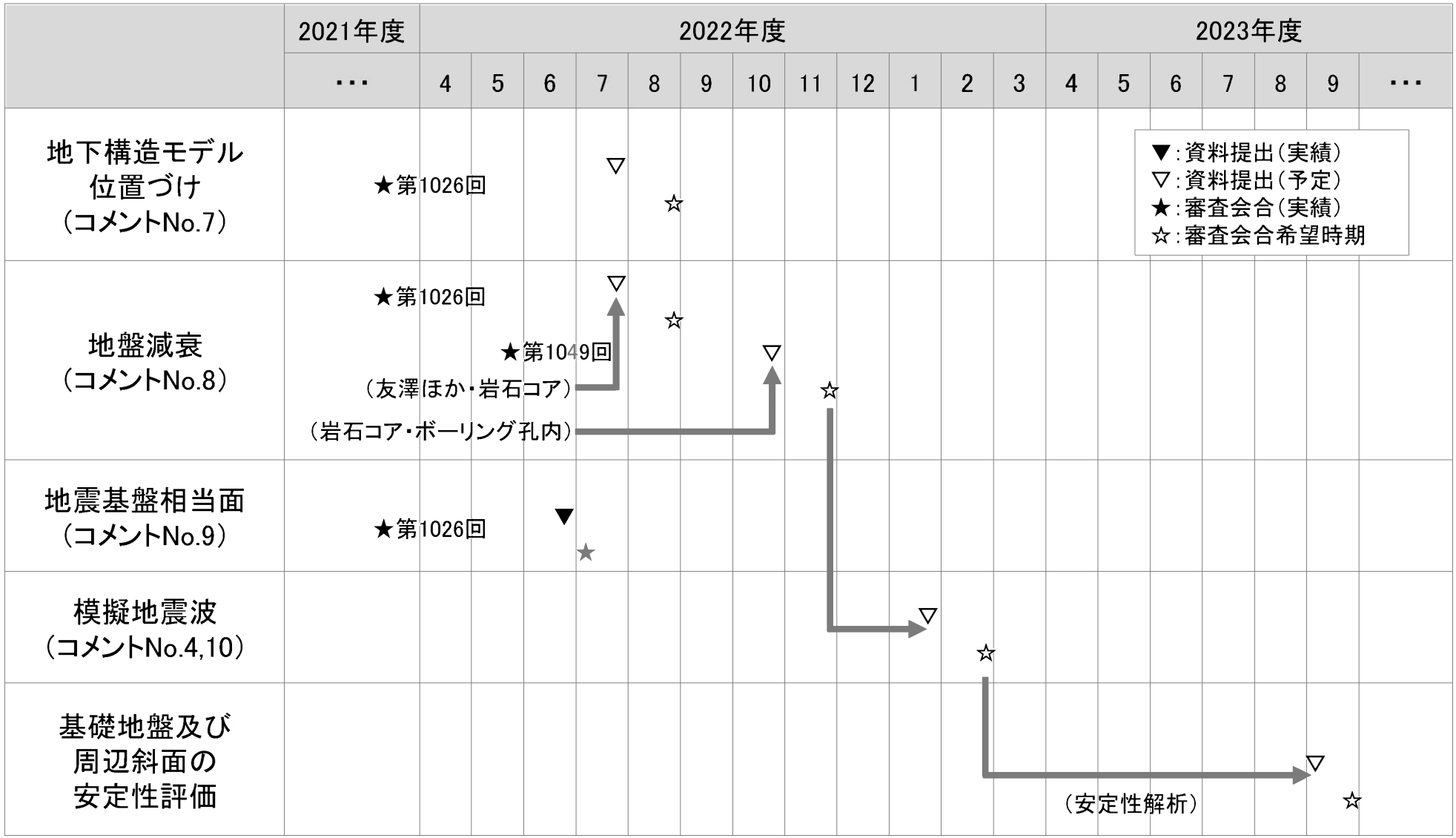
◆今後のスケジュール



※朱書き部は第1057回審査会合からの変更箇所

【参考②】第1057回審査会合（2022年7月1日）におけるスケジュール

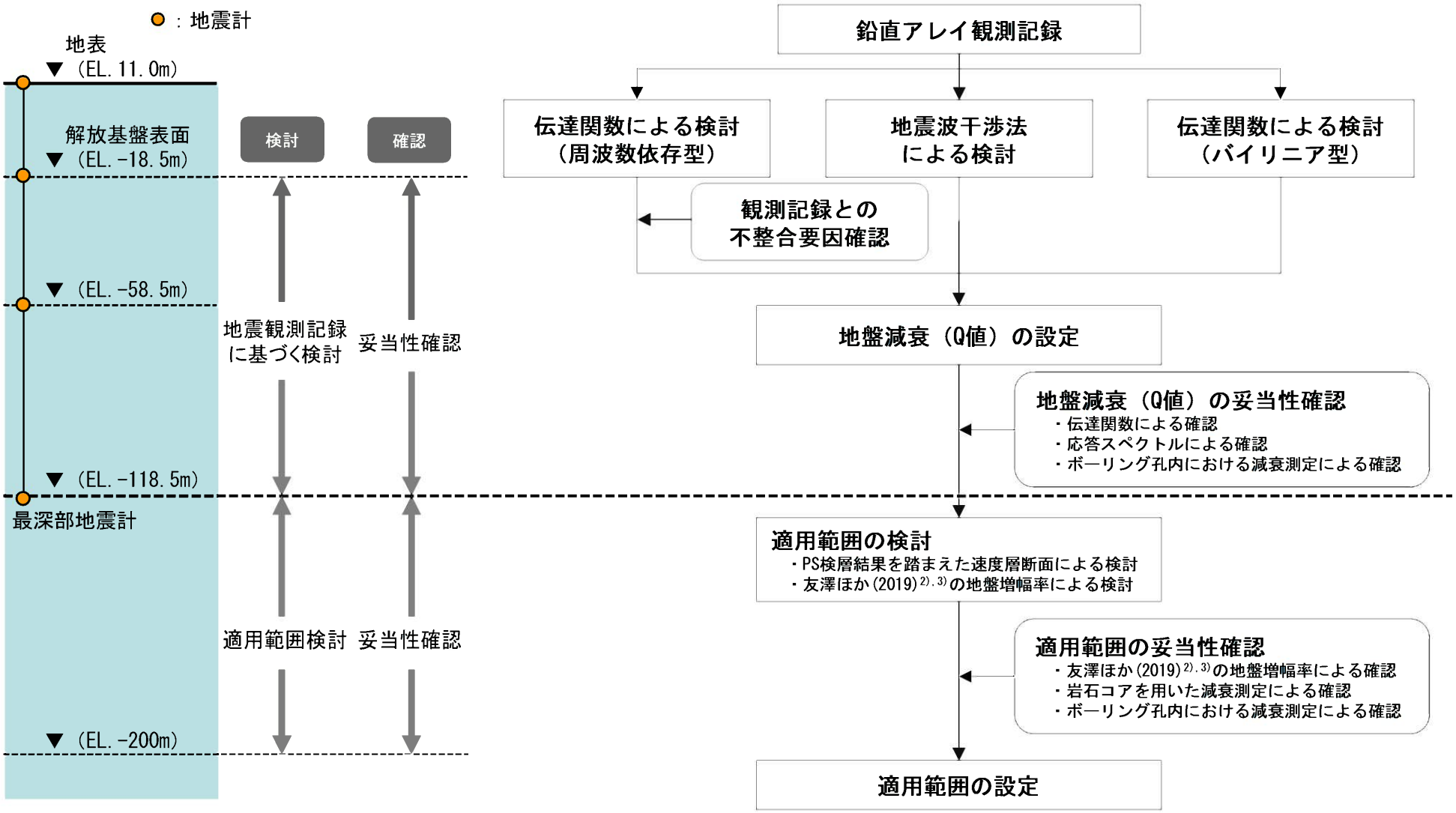
◆今後のスケジュール



【参考③】追加調査結果の検討イメージ（1/3）

(1) 地盤減衰（Q値）の適用範囲の妥当性確認

- 最深部地震計以深の地盤減衰（Q＝12.5）の適用範囲の妥当性確認のため、岩石コアを用いた減衰測定による確認及びボーリング孔内における減衰測定による確認を実施。



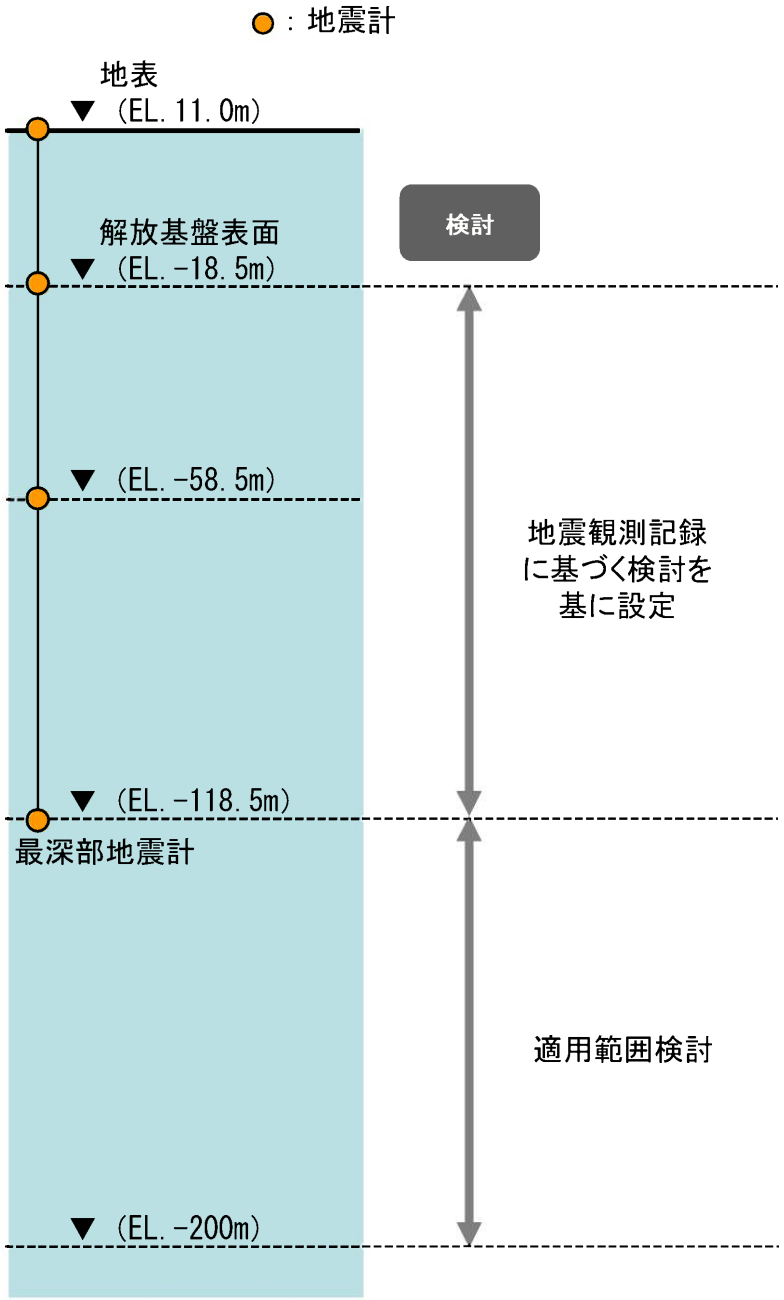
【参考③】追加調査結果の検討イメージ（2/3）

■ボーリング孔内減衰測定

- ボーリング孔内における減衰測定により、EL.-200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）を測定。
- 解放基盤表面から最深部地震計までの範囲と最深部地震計からEL.-200mまでの範囲における、それぞれの地盤減衰（Q値）の傾向を分析。

■岩石コア減衰測定

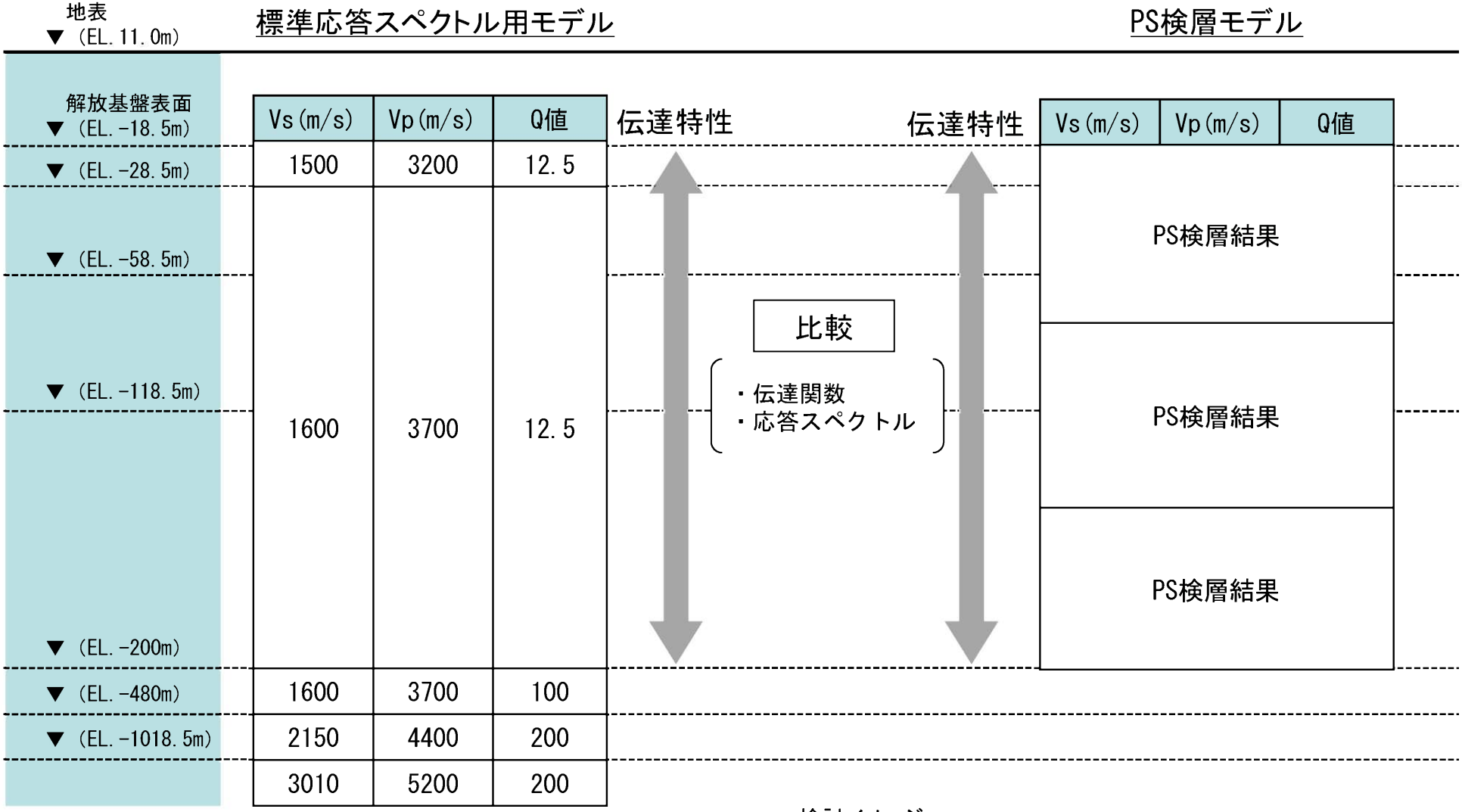
- 岩石コアを用いた減衰測定により、EL.-200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）を測定。
- 解放基盤表面から最深部地震計までの範囲と最深部地震計からEL.-200mまでの範囲における、それぞれの地盤減衰（Q値）の傾向を分析。
- 岩石コア試験によるQ値には、岩盤の不均質性による減衰が含まれないことに留意した検討を実施。



【参考③】追加調査結果の検討イメージ（3/3）

(2) 地下構造モデルの妥当性確認

- 追加調査により得られた層厚、Vs、Vp、Q値を基に、PS検層モデルを設定。
- 標準応答スペクトル用の地下構造モデルとPS検層モデルによる伝達特性（伝達関数、応答スペクトル）の比較により、標準応答スペクトル用モデルの妥当性を確認。



検討イメージ

参考文献

1) S. Noda, K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo and T. Watanabe (2002) : RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering, Oct. 16-18, pp. 399-408.

2) 友澤裕介，加藤研一，中尾隆，本村一成，赤司二郎(2019)：九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定，（その１）ブロックインバージョン解析に基づく不均質減衰構造の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，21238，2019年9月.

3) 中尾隆，本村一成，赤司二郎，友澤裕介，加藤研一(2019)：九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定，（その２）距離減衰特性の方位性、サイト増幅特性、震源特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，21239，2019年9月.