

川内原子力発電所1号炉、2号炉審査資料

資料番号

TTS-007

提出年月日

2022年5月11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：補足資料)

2022年5月11日  
九州電力株式会社

## これまでの審査会合におけるコメント

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
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
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 $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上に対し、 $V_s=2,150\text{m/s}$ 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。		TTS-006 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)	次回以降 説明予定
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。 ・ 15Hz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 ・ 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 ・ 地盤減衰の不確かさの考え方		(設定方針) P2～15 (コメント回答) TTS-005 にて説明
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 $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上の層に設定すること。		(設定方針) P2～15
10	乱數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

【コメントNo. 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。

- ・ 15Hz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
- ・ 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
- ・ 地盤減衰の不確かさの考え方

【コメントNo. 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 $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上の層に設定すること。



- ・ 最新の知見、観測記録を取り入れた地盤減衰及び速度構造の検討による新たな地下構造モデルの設定方針について説明。



# 1. 新たな地下構造モデルの設定方針(1/3)

## ◆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

・今回、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精緻化し、新たな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。
- ・標準応答スペクトルが定義される地震基盤相当面( $V_s=2200\text{m/s}$ 以上)を設定するため、速度構造を検討。
- ・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を設定。
- ・既許可の地下構造モデルを、新たな地下構造モデルへ見直し。

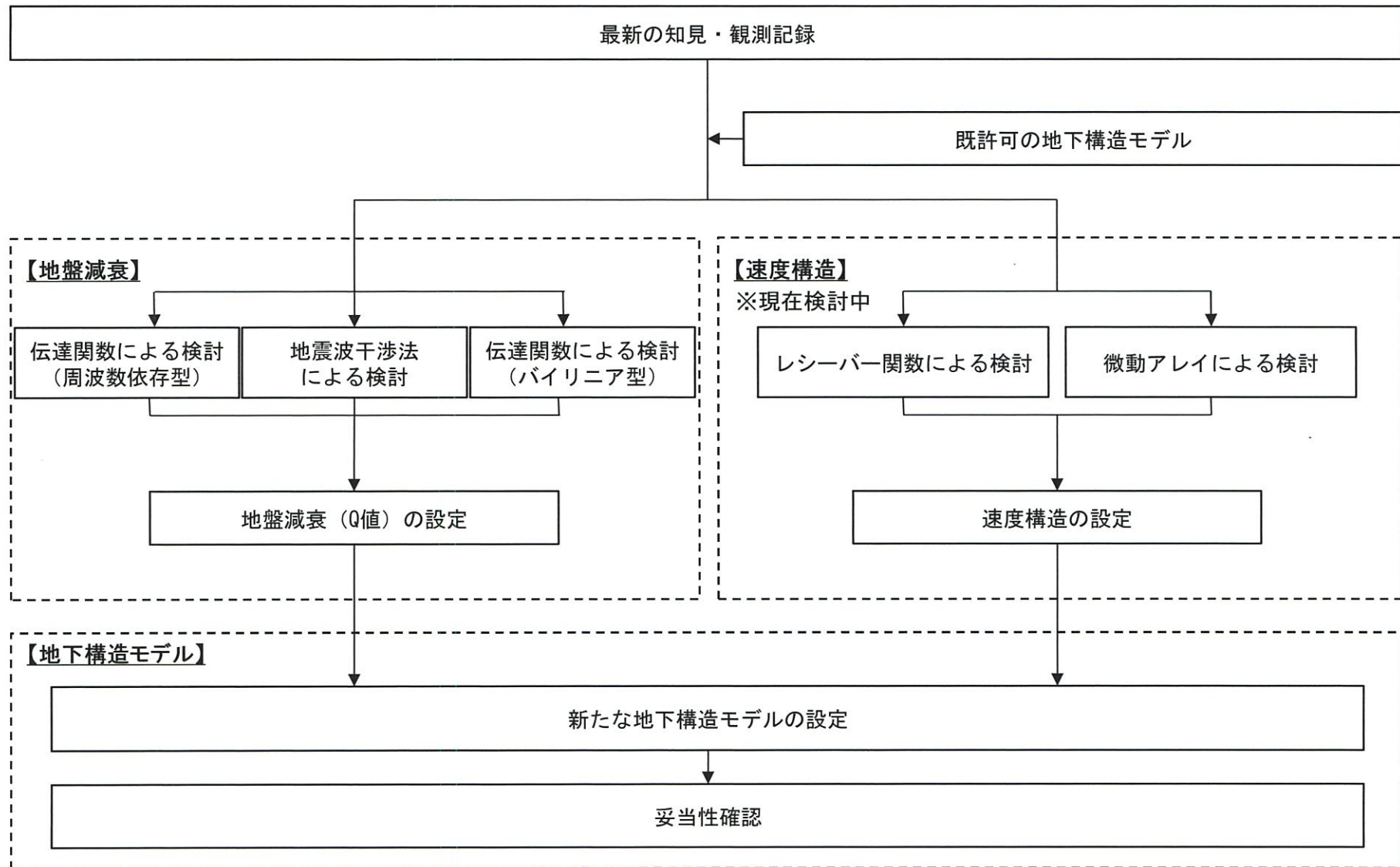
# 1. 新たな地下構造モデルの設定方針(2/3)

## ◆今回取り入れる新たな知見や考え方

項目	新たな知見	新たな考え方	新たな地下構造モデルの設定
地盤減衰	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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・地盤減衰(Q値)検討の多面化</li> </ul>
	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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・地盤減衰(Q値)検討の多面化</li> </ul>
	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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・より広帯域での地盤減衰(Q値)の検討</li> <li>・地盤減衰(Q値)検討の多面化</li> </ul>
	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妥当性を確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設定した地盤減衰(Q値)の確認の多面化</li> </ul>
速度構造	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レシーバー関数により速度構造を検討し、地震基盤相当面 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の層を設定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・レシーバー関数による検討</li> <li>・速度構造検討の多面化</li> </ul>
	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妥当性を確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設定した速度構造の確認の多面化</li> </ul>

# 1. 新たな地下構造モデルの設定方針(3/3)

## ◆新たな地下構造モデルの検討の流れ

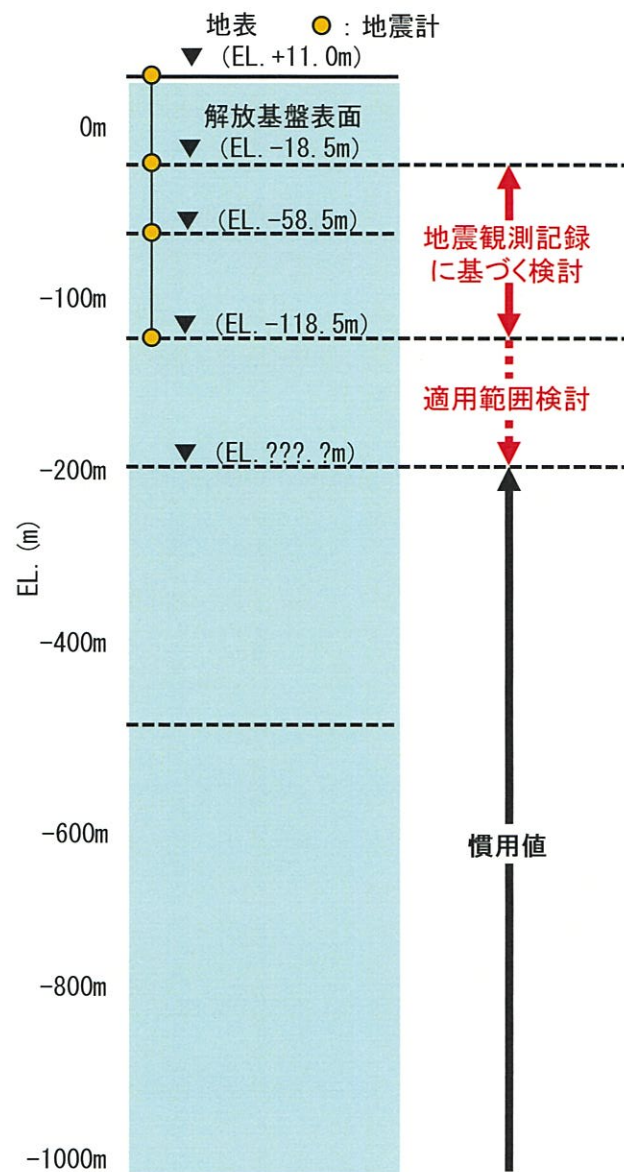




## 2. 新たな地下構造モデルにおける地盤減衰(Q値)の検討方針(1/2)

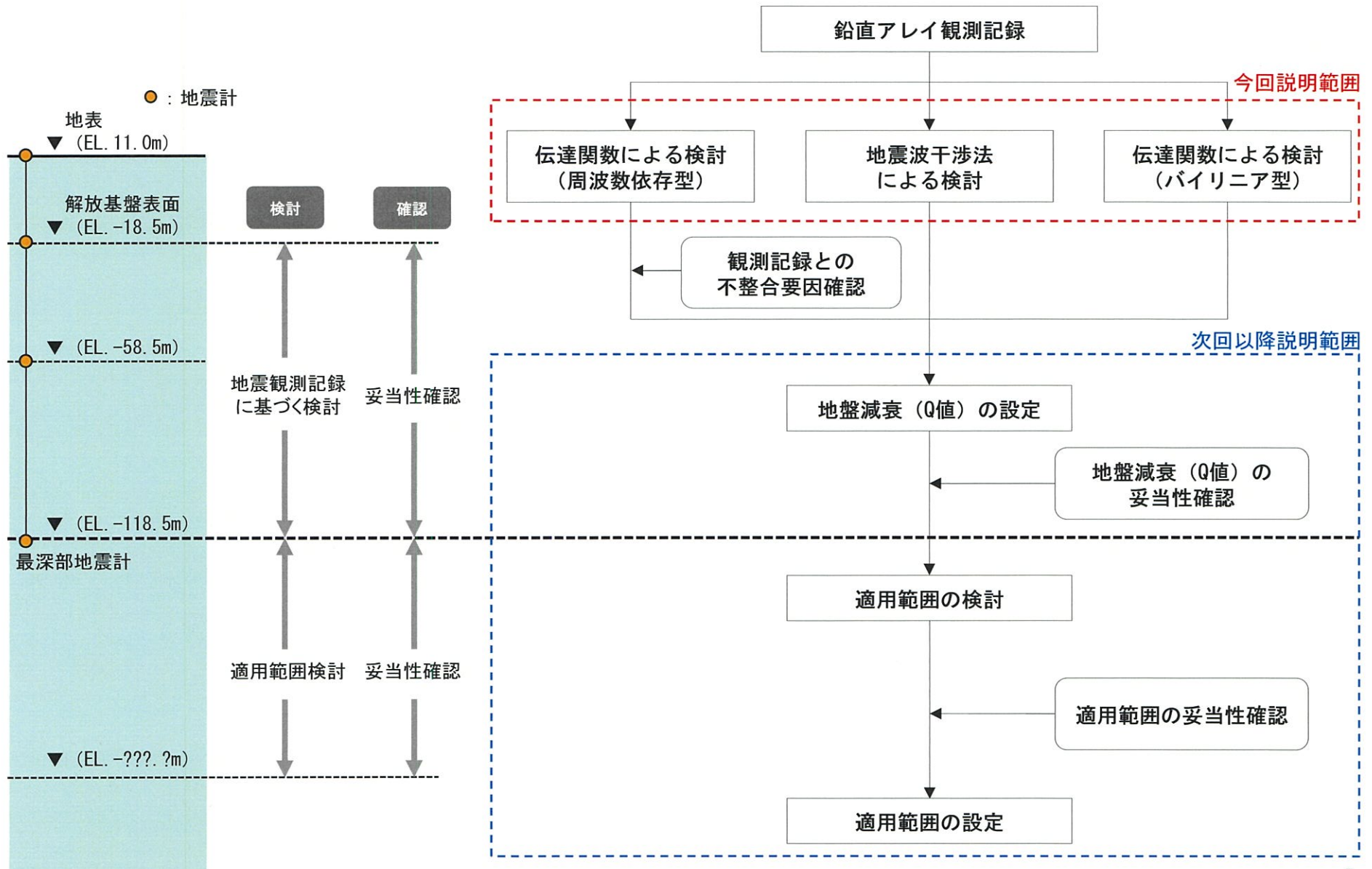
### ○標準応答スペクトルを考慮した評価に用いる地下構造モデル

- ・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ており、今回の地下構造モデルは、短周期帯も含む地震動評価への適用を目的に設定。
  - 一般的に短周期帯では、長周期帯に比べ地盤減衰(Q値)が地震動評価結果に与える影響が大きい。
- ・解放基盤表面から最深部地震計までの範囲について、蓄積された地震観測記録を用い、複数の手法により地盤減衰(Q値)を検討。
- ・複数の手法で算出した地盤減衰(Q値)に対して、それぞれの手法に含まれる不確かさを考慮し、地盤減衰(Q値)を設定。
- ・最深部地震計以深の地盤減衰(Q値)については、解放基盤表面から最深部地震計までの範囲で設定した地盤減衰(Q値)の適用範囲を検討し、設定。



## 2. 新たな地下構造モデルにおける地盤減衰(Q値)の検討方針(2/2)

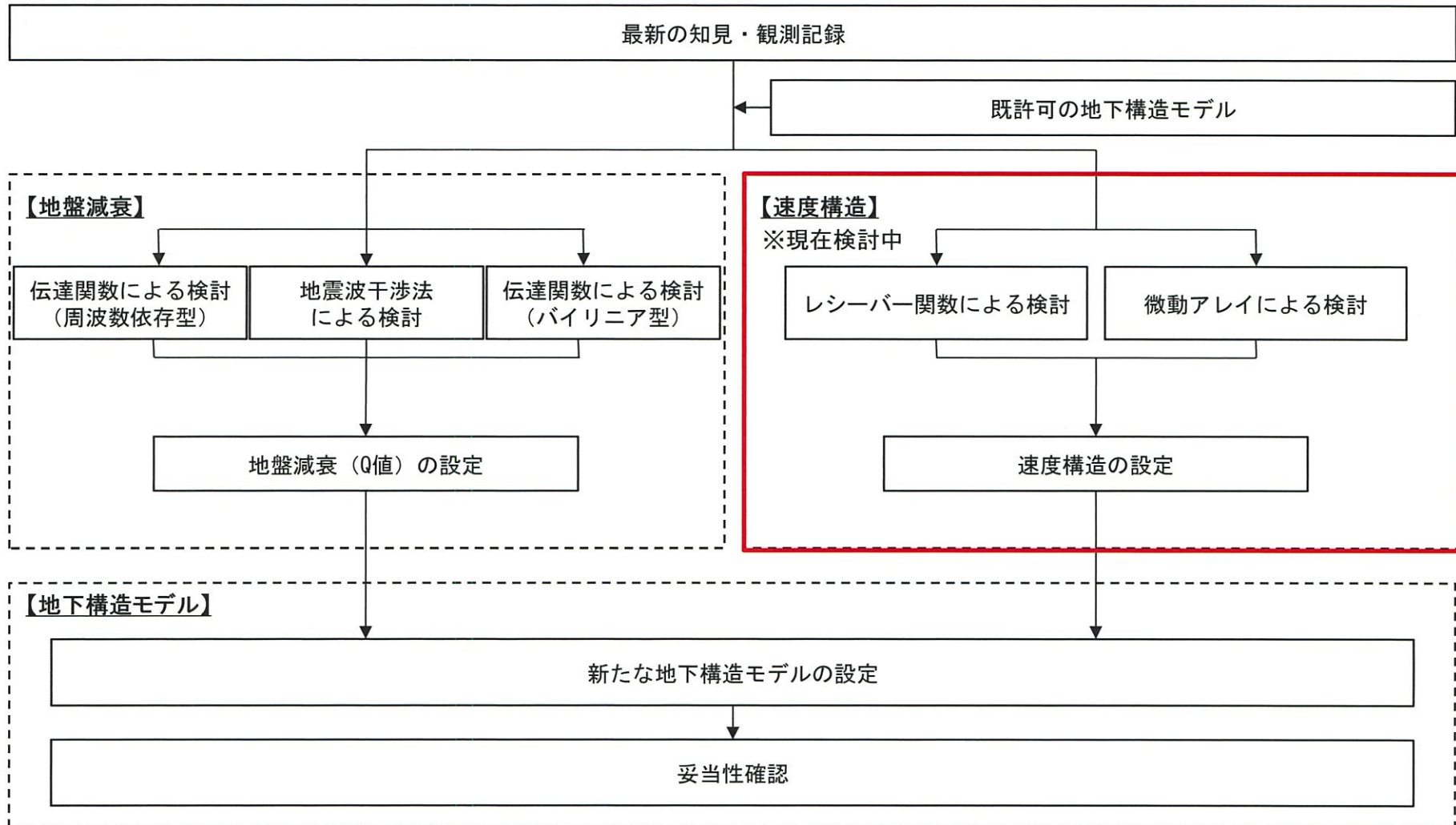
○地盤減衰 (Q値) の設定にあたり、以下のフローに従い検討を実施





### 3. 新たな地下構造モデルにおける速度構造の検討方針(1/4)

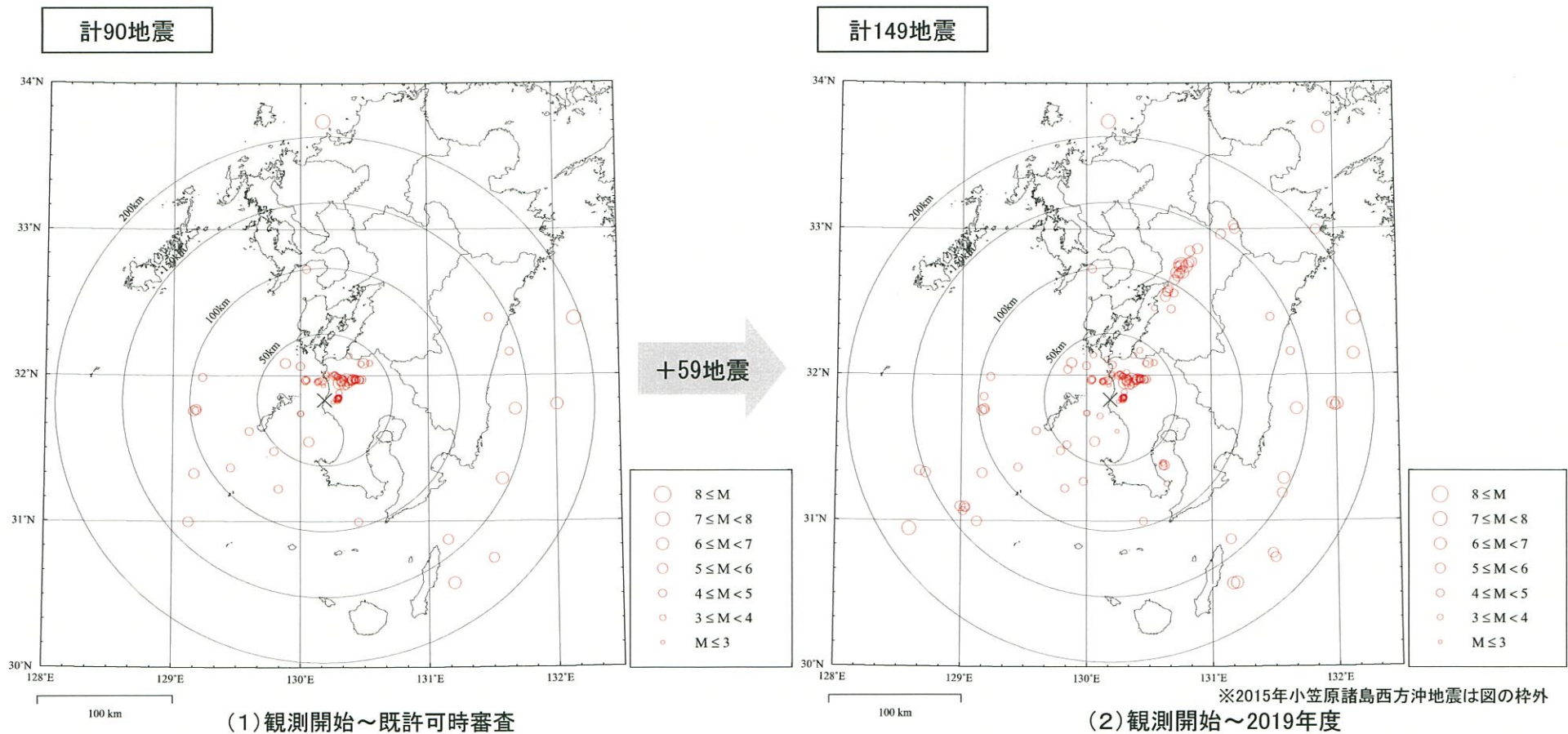
- ・標準応答スペクトルは、 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地震基盤相当面で定義されるため、速度構造を検討。
- ・検討にあたっては、既許可時審査以降に蓄積された地震観測記録を基に、浅部から深部地盤を対象にレシーバー関数を用いた検討を実施。
- ・微動アレイなどの既許可で実施した検討結果を踏まえて速度構造を検討。



### 3. 新たな地下構造モデルにおける速度構造の検討方針(2/4)

#### ◆既許可以降に取得した敷地地盤の鉛直アレイ観測記録

- ・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)
- ・敷地の浅部から深部地盤までの情報を含んだ地表の地震観測記録を用いてレシーバー関数による検討を実施。



※2015年小笠原諸島西方沖地震は図の枠外



### 3. 新たな地下構造モデルにおける速度構造の検討方針(3/4)

#### ◆レシーバー関数による検討に用いる地震の選定

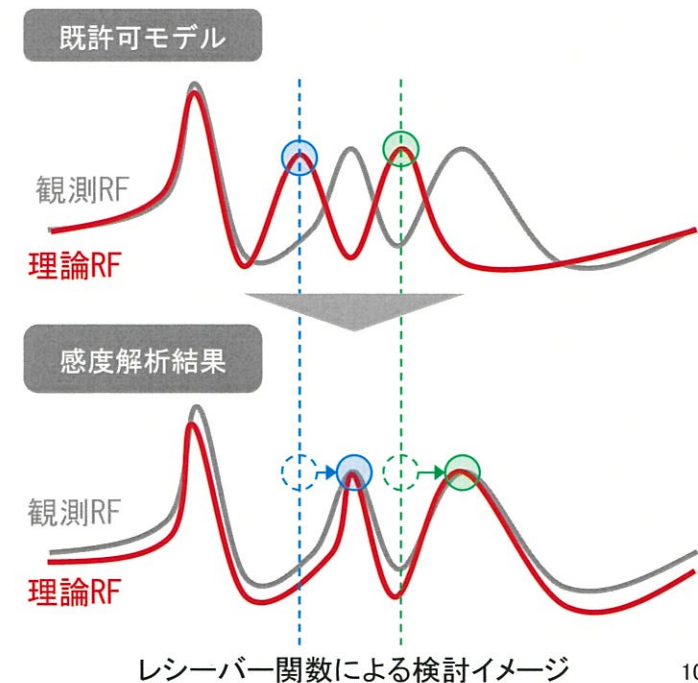
- ・ばらつきの少ない観測記録群の平均値をターゲットとすることで、精度の高い地下構造モデルを評価。
- ・検討対象地震については、敷地地盤における計149地震の地震観測記録の中から、下記の方針で選定する。

#### 【検討対象地震の選定方針】

- ・発生様式: 内陸地殻内地震
- ・震央距離: 記録の精度が確保できる地震
- ・地震規模: 記録の精度が確保できる地震
- ・発生位置: 入射角や到来方向等が概ね等しい発生位置の地震
- ・観測記録: P波初動が観測され、明確に確認できる地震、かつPS時間が確保された地震

#### ◆レシーバー関数による検討の諸条件

- ・検討対象地震は、上記の方針に基づき選定。
- ・速度構造の検討範囲は感度解析結果を基に設定。
  - 既許可の地下構造モデルを参照し、全層を対象とした感度解析を実施。
  - 感度解析結果と既許可の地下構造モデルを比較して、検討範囲を設定。
- ・探索パラメータの初期値は、既許可の地下構造モデルを参照して設定。
- ・設定した速度構造による理論地盤増幅率と友澤ほか(2019)<sup>1),2)</sup>に基づく地盤増幅率との比較から、設定した速度構造の妥当性を検証。

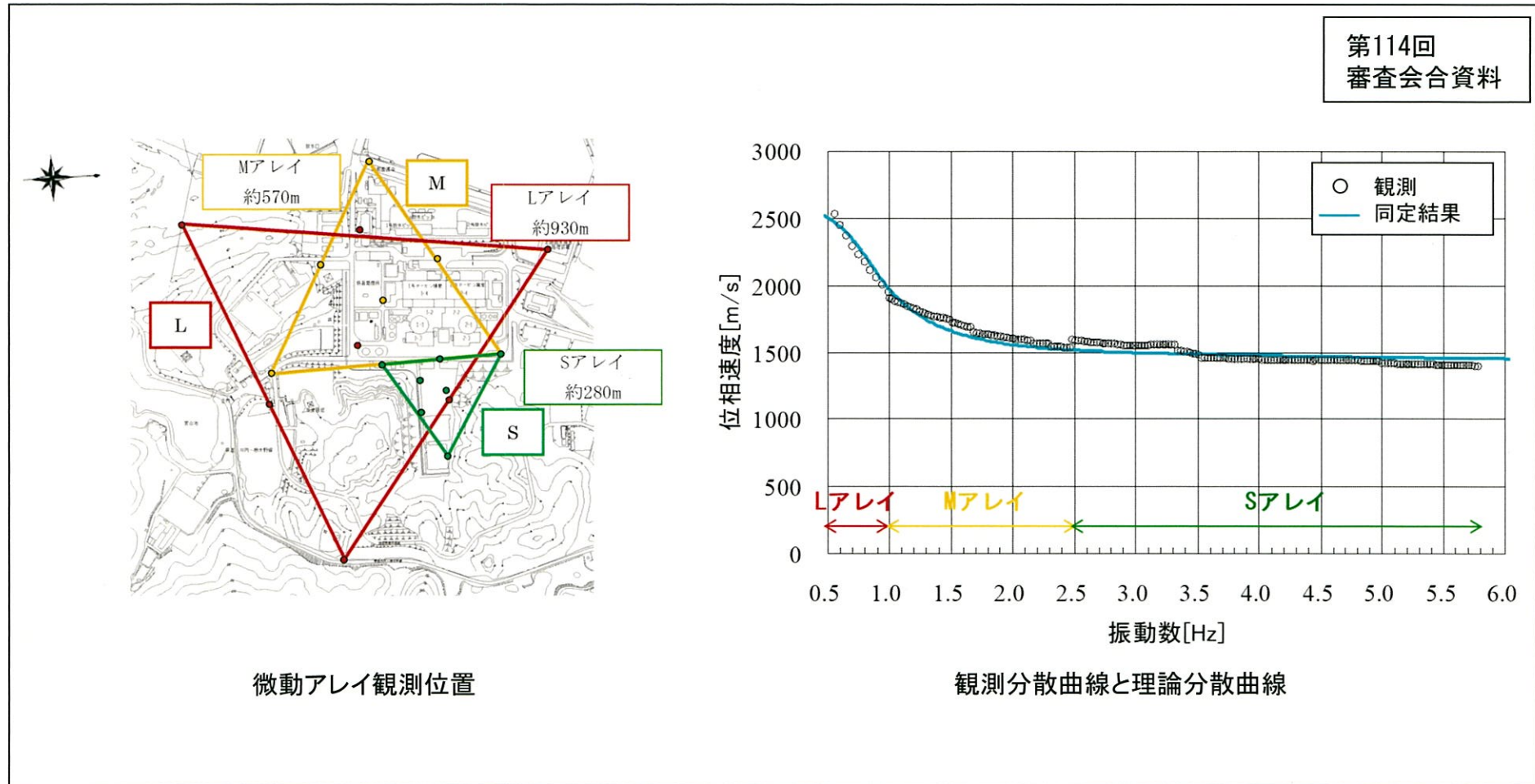




### 3. 新たな地下構造モデルにおける速度構造の検討方針(4/4)

#### ◆微動アレイによる検討

- ・レシーバー関数による検討に加えて、既許可において実施した微動アレイ観測の観測分散曲線との整合性を確認し検討。



## 4. 既許可の地震動評価について(1/2)

- 既許可では、「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 $S_s-1$ 及び「震源を特定せず策定する地震動」による基準地震動 $S_s-2$ を策定。また、免震構造施設を対象とした基準地震動 $S_s-L$ を策定。

### ◆「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」

- ・ 検討用地震の「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 $S_s-1$ を策定。
- ・ 基準地震動 $S_s-1$ 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 $S_s-1$ で代表。

#### ①【応答スペクトルに基づく地震動評価】

- ・ Noda et al. (2002)<sup>3)</sup>の手法により、解放基盤表面 ( $V_s=1500\text{m/s}$ ) 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。
- ・ 長周期帯は理論的方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方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。

### 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

#### ○ 応答スペクトルに基づく地震動評価

- ・ Noda et al. (2002)<sup>3)</sup>の手法

#### ○ 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方法)

- ・ ハイブリッド合成法  
(統計的グリーン関数法と理論的方法)

※朱書き部は既許可の地下構造モデルを使用

基準地震動 $S_s-1$   
(設計用応答スペクトル)



## 4. 既許可の地震動評価について(2/2)

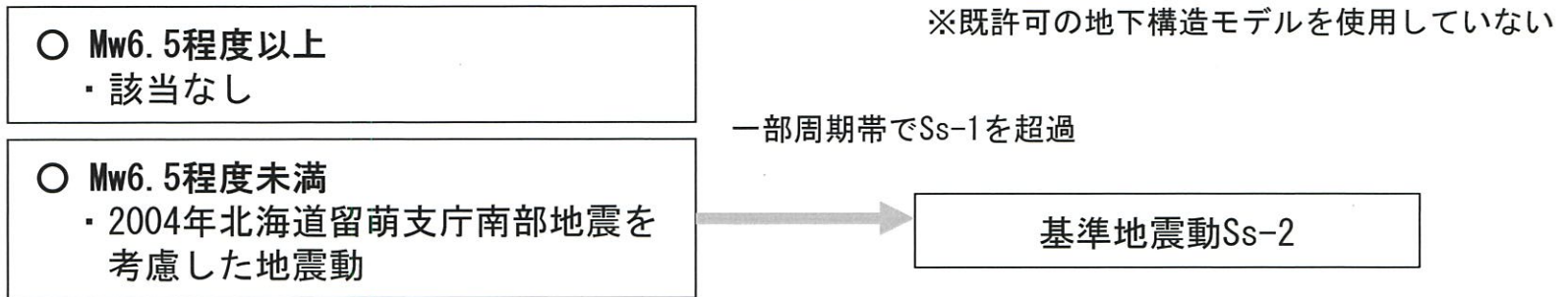
### ◆「震源を特定せず策定する地震動」

#### 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 ( $V_s=938\text{m/s}$ 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 ( $V_s=1500\text{m/s}$ ) 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。



### ◆「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方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。

・ 既許可における地震動評価で、地下構造モデルを用いた評価については、新たな地下構造モデルに見直し再評価を実施



## (参考) 既許可の地下構造モデル

既許可の地下構造モデル（長周期帯における理論的手法による評価で使用）

EL. 解放基盤表面	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠	
						Vs、Vp	Q値
-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	試掘坑内 弾性波試験	慣用値 (Vs/15~10)
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100	鉛直アレイ及び微動アレイ の速度構造を基に設定	
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200	微動アレイの速度構造を 基に設定	
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	宮腰ほか(2004) <sup>4)</sup>	
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300		
-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300	地震調査委員会 (2003) <sup>5)</sup>	
-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500		
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500		

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 宮腰研, PETUHKHIN A, 香川敬生(2004):地殻内地震のやや短周期まで精度のある震源モデルの推定—1997年3月鹿児島県北西部地震と1997年山口県北部地震—, 日本地震学会2004年秋季大会予稿集, P065
- 5) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2003):布田川・日奈久断層帯の地震を想定した強震動評価について