

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
模擬地震波の作成について
(コメント回答)

2022年12月 2日
九州電力株式会社

目次

1. 模擬地震波の作成方針について
 - 1.1 模擬地震波の作成方針
 - 1.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成
 - 1.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成
 - 1.4 解放基盤表面の地震波の比較
 - 1.5 申請時からの方針の変更点

1.1 模擬地震波の作成方針

■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる模擬地震波の作成方針

- 「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」（以下、「審査ガイド」とする。）では、下記のように示されている。

震源を特定せず策定する地震動による基準地震動は、設定された応答スペクトル（地震動レベル）に対して、地震動の継続時間及び振幅包絡線の経時的变化等の特性が適切に考慮されていることを確認する。また、設定された応答スペクトルに基づいて模擬地震動を作成する場合には複数の方法（例えば、正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法、実観測記録の位相を用いる方法等）により検討が行われていることを確認する。

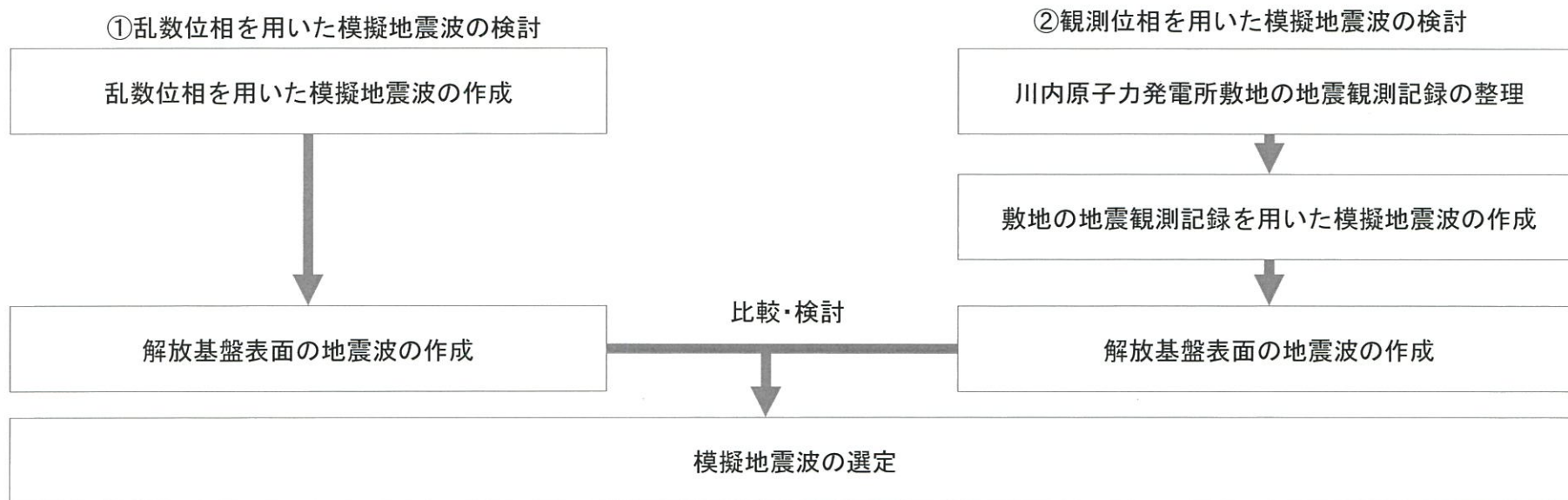
- 審査ガイドを踏まえて、以下の方針で模擬地震波を作成し、解放基盤表面における地震波を比較・検討した上で、「標準応答スペクトルを考慮した地震動」に用いる模擬地震波を設定する。

①正弦波の重ね合わせによる位相（乱数位相）を用いた模擬地震波（以下、乱数位相を用いた模擬地震波という。）

→Noda et al. (2002)の手法に基づき乱数位相を用いた模擬地震波を作成。

②実観測記録の位相を用いた模擬地震波（以下、観測位相を用いた模擬地震波という。）

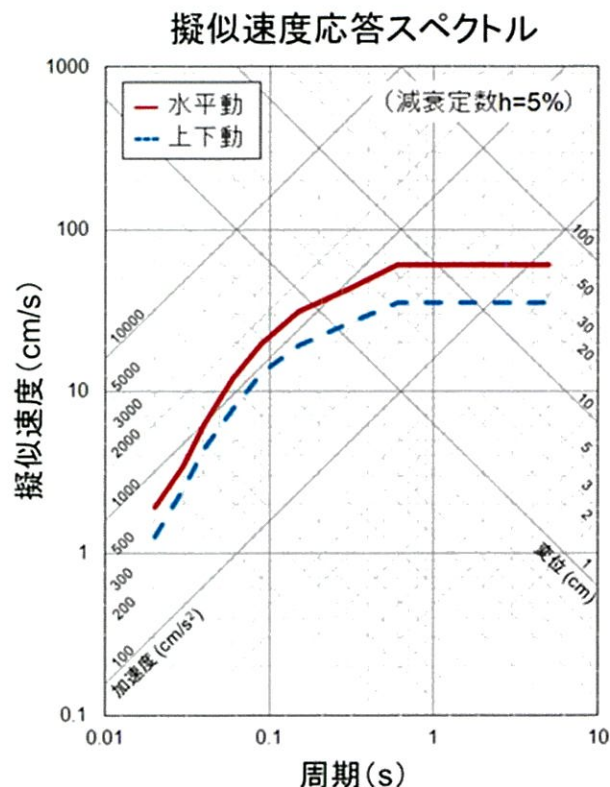
→川内原子力発電所敷地で得られた地震観測記録を整理し、実観測記録の位相を用いて模擬地震波を作成。



1.1 模擬地震波の作成方針

■ 地震基盤相当面における模擬地震波の作成

- 複数の手法による検討では、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」における標準応答スペクトルに適合する地震基盤相当面における模擬地震波を作成する。



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

地震基盤相当面における標準応答スペクトル
 (「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、
 構造及び設備の基準に関する規則の解釈」より抜粋)

1.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成

■ 乱数位相を用いた模擬地震波の作成

- 地震基盤相当面での乱数位相を用いた模擬地震波の作成にあたっては、Noda et al. (2002) による振幅包絡線の経時的变化を採用し、下記の条件でマグニチュードM及び等価震源距離 X_{eq} を設定した上で、一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせにより作成。

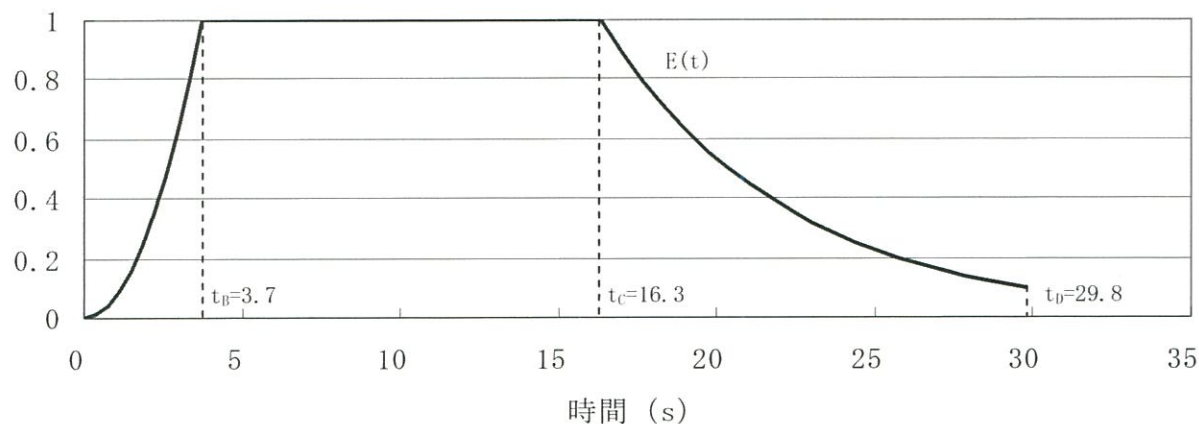
マグニチュード M:

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、Mw6.5程度未満と記載されている。武村(1990)の M_0 -M関係及びKanamori(1977)の M_0 -Mw関係によりMw6.5をMに換算するとM6.9となる。審査ガイドでは「Mw6.5程度未満」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。

等価震源距離 X_{eq} :

等価震源距離は震源近傍を想定し、 $X_{eq}=10\text{km}$ として設定。

模擬地震波	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時的变化(s)		
		t_B	t_C	t_D
水平	29.8	3.7	16.3	29.8
鉛直	29.8	3.7	16.3	29.8



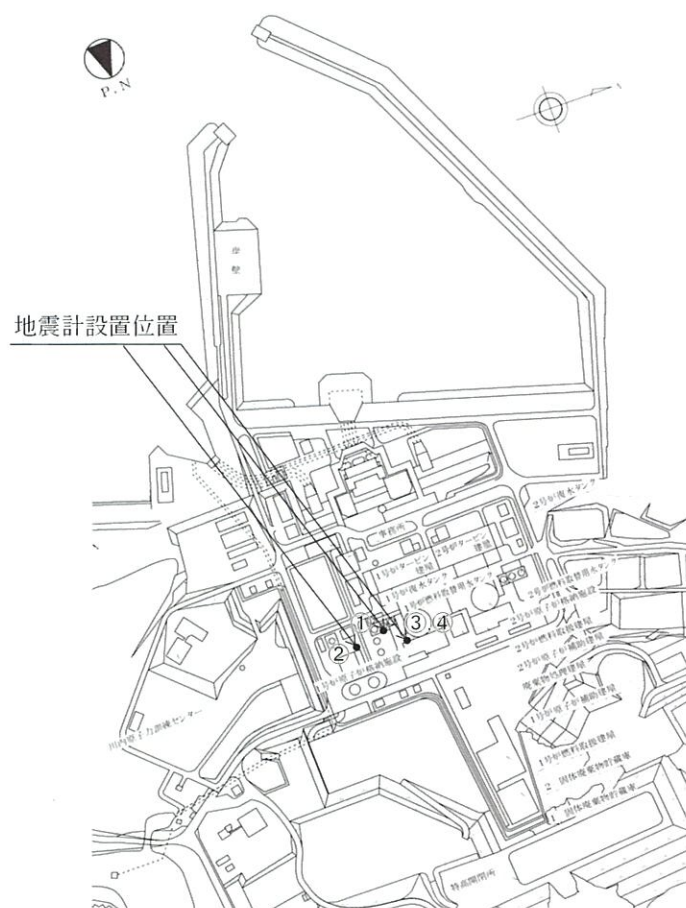
$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & (0 < t \leq t_B) \\ 1.0 & (t_B < t \leq t_C) \\ e^{\frac{\ln(0.1)}{t_D - t_C}(t - t_C)} & (t_C < t \leq t_D) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} t_B &= 10^{0.5M - 2.93} \\ t_C - t_B &= 10^{0.3M - 1.0} \\ t_D - t_C &= 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6} \end{aligned}$$

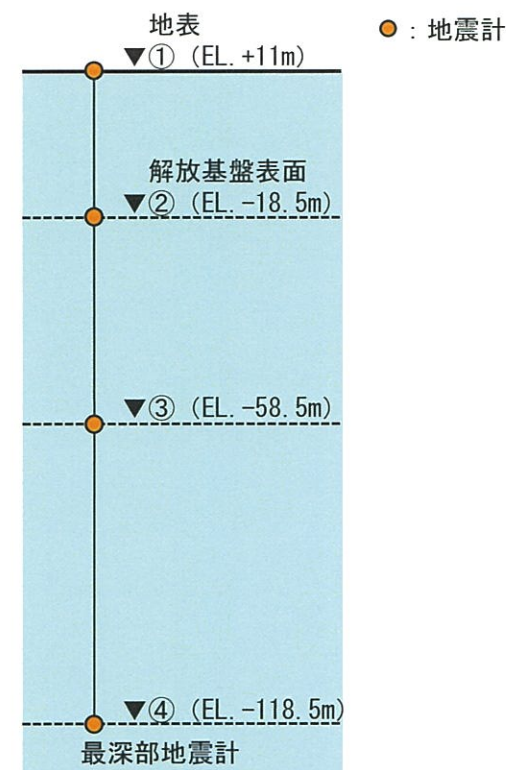
1.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 観測位相を用いた模擬地震波作成のための観測記録の収集条件（1 / 2）

- 川内原子力発電所の敷地地盤では、原子炉建屋周辺において、鉛直アレイ地震観測を実施している。
- 地震基盤相当面での観測位相を用いた模擬地震波の作成にあたっては、敷地の地震計で得られた観測記録（EL. +11m）を用いる。



敷地の鉛直アレイ地震計平面配置図

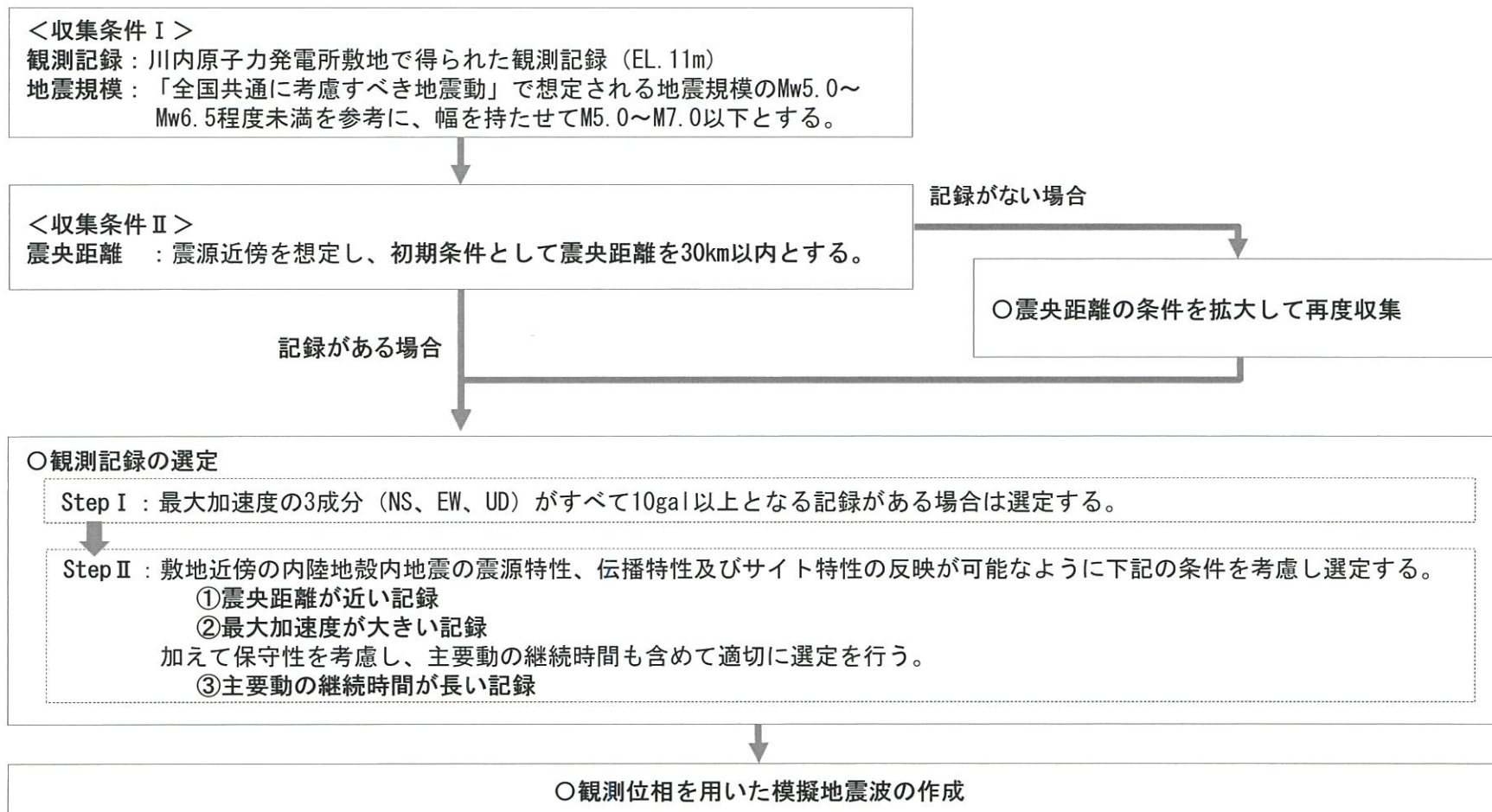


敷地の鉛直アレイ地震計断面位置

1.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 観測位相を用いた模擬地震波作成のための観測記録の収集条件（2 / 2）

- 観測位相を用いた模擬地震波は、下記のフローに従い川内原子力発電所の敷地地盤で得られた観測記録の位相を与えて作成する。
 - 観測位相を用いた模擬地震波には敷地地盤の振動特性を適切に反映することが必要と考えられることから、下記の条件により敷地近傍で発生した内陸地殻内地震の観測記録を収集する。記録が得られていない場合は、対象範囲を拡大した上で観測記録を収集する。
 - 収集した記録が複数ある場合には適切に選定し、観測位相を用いた模擬地震波を作成する。

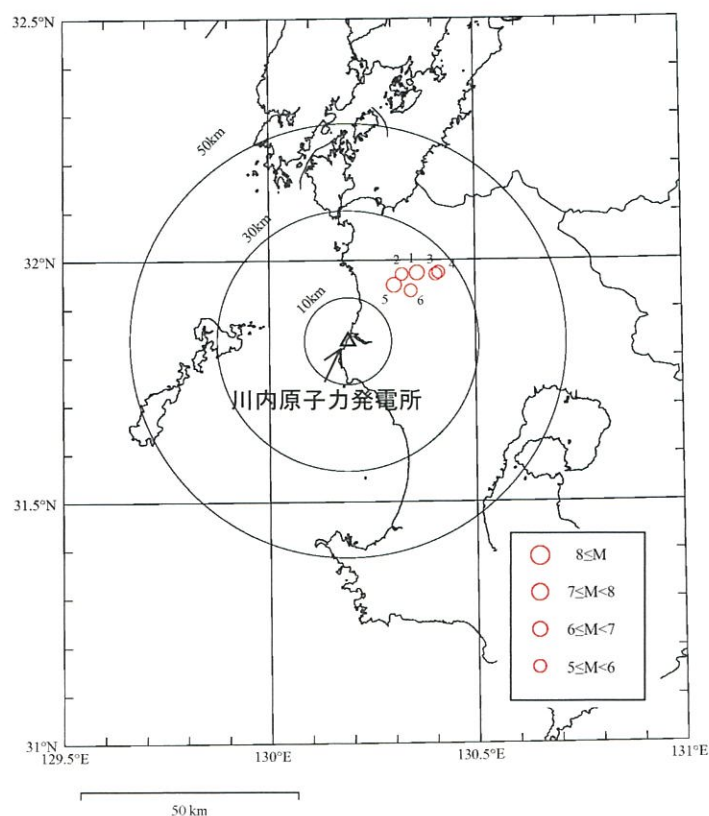


観測位相を用いた模擬地震波作成のための観測記録の収集・選定フロー

1.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 敷地における地震観測記録の収集及び選定 (Step I)

- 川内原子力発電所の敷地において、マグニチュード5.0以上で震央距離30km以内の内陸地殻内地震の観測記録は6地震得られている。6地震の震央分布図と諸元を示す。
- そのうちNS、EW、UD方向すべてが10gal以上となるの地震は3地震となる。
- なお、6地震の観測記録については、特異な位相特性をもつ記録がないことを確認。



収集した6地震の震央分布図

収集した6地震の諸元

地震 No.	発生年月日・時刻					地名	北緯		東経		震源 深さ (km)	M	震央 距離 (km)	最大加速度 (gal)			最大加速度 (3成分) 10gal以上 判定
	年	月	日	時	分		度	分	度	分				NS	EW	UD	
1	1997	3	26	17	31	鹿児島県北西部	31	58.37	130	21.54	11.9	6.6	22.2	90.1	69.4	39.4	○
2	1997	4	3	4	33	鹿児島県北西部	31	58.22	130	19.32	14.8	5.7	19.7	60.7	60.3	22.7	○
3	1997	4	5	13	24	鹿児島県北西部	31	58.21	130	24.22	12.0	5.2	25.3	11.4	11.3	4.7	除外
4	1997	4	9	23	20	鹿児島県北西部	31	58.41	130	24.66	10.5	5.1	26.0	12.3	7.8	4.6	除外
5	1997	5	13	14	38	鹿児島県北西部	31	56.90	130	18.16	9.2	6.4	16.6	102.3	98.0	66.7	○
6	1997	5	14	8	32	鹿児島県北西部	31	56.16	130	20.65	8.9	5.1	18.5	6.6	4.3	2.4	除外

1.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 敷地における地震観測記録の収集・選定 (Step II)

- Step I で選定された3地震について、①震央距離、②最大加速度、③主要動の長さについて比較・検討する。
- ①震央距離が最も近く、②最大加速度が最も大きいのは「No. 5 1997年5月13日 鹿児島県北西部の地震 (M6.4)」。
- ③主要動の継続時間は、NS、EW、UDの3成分で比較すると、「No. 1 1997年3月26日 鹿児島県北西部の地震 (M6.6)」がNo. 5の地震と大きく変わらないものの最も長い。
- 以上より、保守的な観点から「No. 1 1997年3月26日 鹿児島県北西部の地震 (M6.6)」及び「No. 5 1997年5月13日 鹿児島県北西部の地震 (M6.4)」の2地震を、観測位相を用いた模擬地震波に用いる記録として選定する。

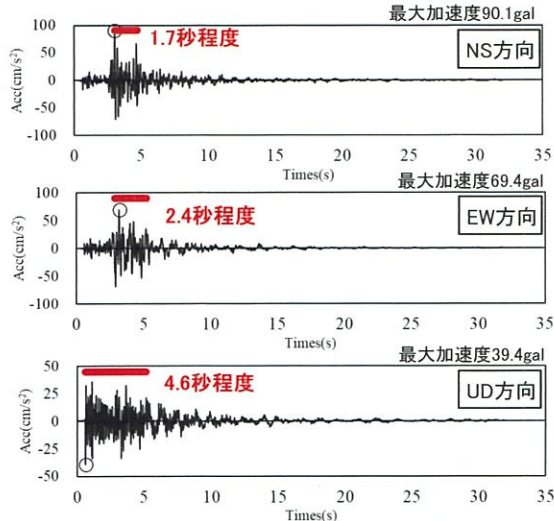
No.	地震名	地震規模 M	①震央距離 (km)	②最大加速度 (gal)	③主要動長さ※ (秒)			実観測位相の選定
					NS	EW	UD	
1	1997年3月26日 鹿児島県北西部の地震 (鹿児島県北西部地震 本震)	6.6	22.2	90.1	<u>1.7</u>	<u>2.4</u>	<u>4.6</u>	③主要動が最も長い
2	1997年4月 3日 鹿児島県北西部の地震 (鹿児島県北西部地震 余震)	5.7	19.7	60.7	0.6	0.6	1.1	③主要動の継続時間が短く、適切ではないと考えられる
5	1997年5月13日 鹿児島県北西部の地震 (鹿児島県北西部地震 本震)	6.4	<u>16.6</u>	<u>102.3</u>	1.5	1.5	3.5	①震央距離が最も近く、②最大加速度が最も大きい

※ここでは主要動の継続時間として、最大加速度の0.5倍以上の振幅の継続時間を示す。

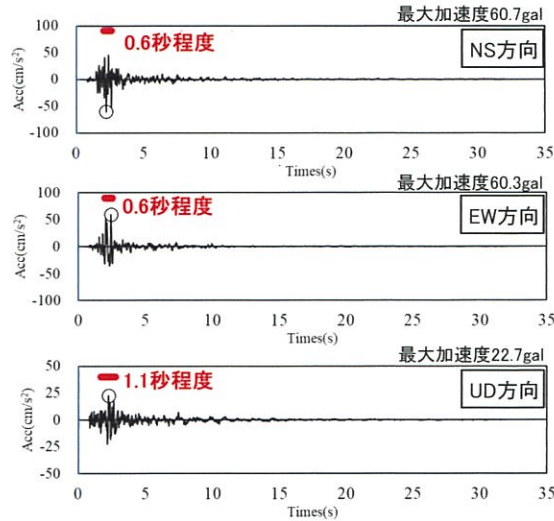
1.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 収集・選定された地震観測記録（加速度時刻歴波形・応答スペクトルの比較）

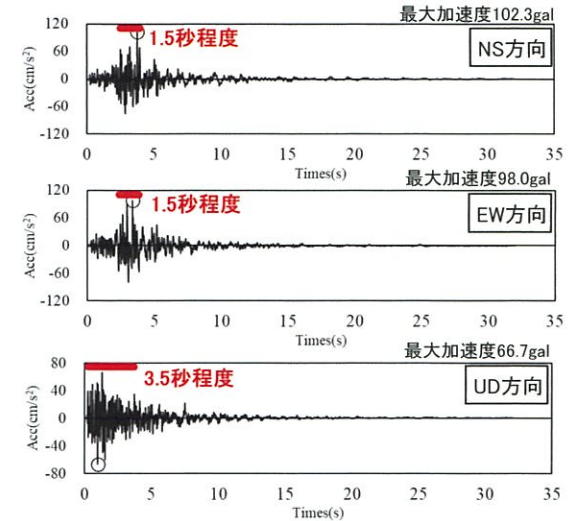
- 3地震の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを示す。主要動の継続時間は、最大加速度の0.5倍以上の振幅の継続時間を表示。



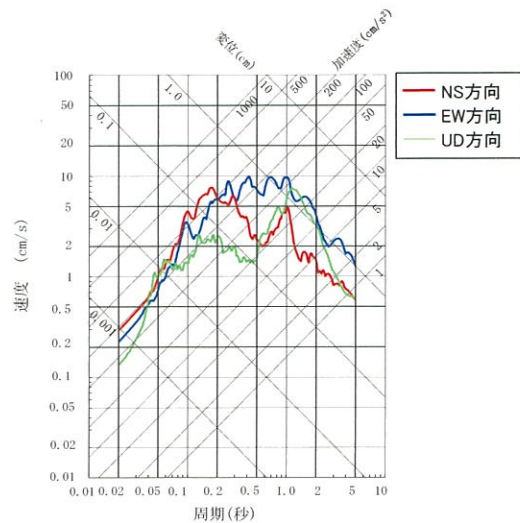
No.1 1997年03月26日 鹿児島県北西部 (M6.6)



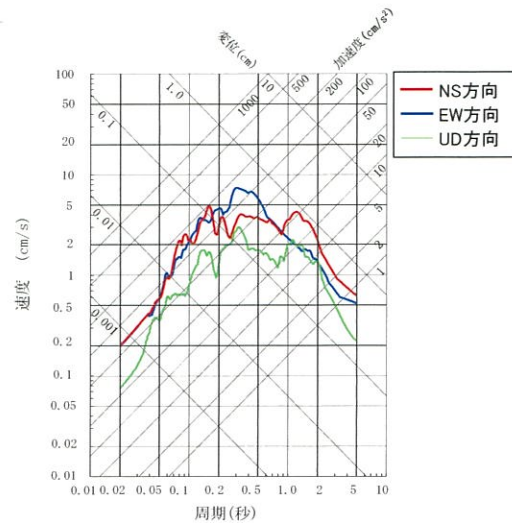
No.2 1997年04月03日 鹿児島県北西部 (M5.7)



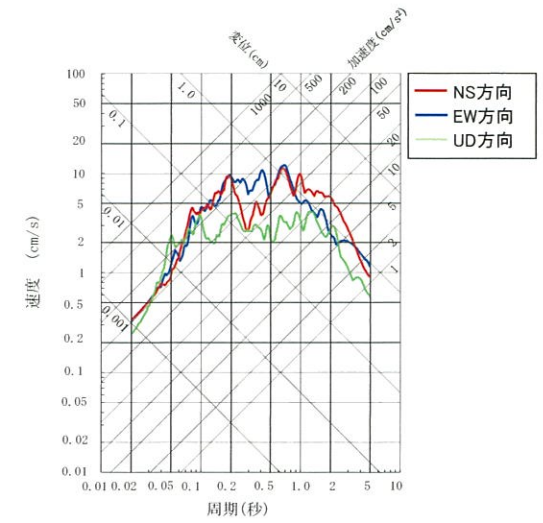
No.5 1997年05月13日 鹿児島県北西部 (M6.4)



No.1 1997年03月26日
鹿児島県北西部 (M6.6)



No.2 1997年04月03日
鹿児島県北西部 (M5.7)



No.5 1997年05月13日
鹿児島県北西部 (M6.4)

1.4 解放基盤表面の地震波の比較

■ 解放基盤表面の地震波の作成

- 地震基盤相当面における模擬地震波に対して、一次元波動論により、解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映し、標準応答スペクトルを考慮した解放基盤表面での地震動を作成する。解放基盤表面における地震動の検討は、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価のための地下構造モデルを用いる。

■ 解放基盤表面の地震波の比較

- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波について、下記のような着目点で比較を行い複数の手法による特徴の違いを確認した上で、標準応答スペクトルに基づく地震動評価に用いる模擬地震波を選定する。

比較・検討項目	着目点	概要
時刻歴波形	<ul style="list-style-type: none">最大加速度の大きさ強震部の継続時間の長さ	<ul style="list-style-type: none">解放基盤表面における時刻歴波形の最大加速度について比較解放基盤表面の時刻歴波形における強震部の継続時間について比較
応答スペクトル	<ul style="list-style-type: none">周期ごとの振幅の大きさ	<ul style="list-style-type: none">地震基盤相当面及び解放基盤表面の応答スペクトルの比較地震基盤相当面及び解放基盤表面の応答スペクトル比による増幅率の比較

1.5 申請時からの方針の変更点

- 模擬地震波の作成における申請時からの方針の変更点について下記の通り示す。

項目	該当箇所	申請時の方針	変更後の方針	変更理由
複数の方法からの模擬地震波の選定	P2、P10 変更前： 2021年6月11日 第983回審査会合 資料1-2 P56	地震基盤相当面の模擬地震波を比較検討（CAV値、地震入力エルギンスペクトル、弾塑性応答スペクトル）	解放基盤表面の地震波を比較検討（最大加速度、応答スペクトル、強震部の継続時間等）	<ul style="list-style-type: none"> 申請時は、模擬地震波そのものの位相特性の相違による施設への影響を確認するため、地震基盤相当面での模擬地震波の比較・検討により模擬地震波を選定。 今回、位相特性の相違を確認するとともに、施設への影響評価の観点から、解放基盤表面の地震波を比較・検討して模擬地震波の選定を実施。
複数の方法による模擬地震波の作成	P2 変更前： 2021年6月11日 第983回審査会合 資料1-2 P53	乱數位相を用いた模擬地震波、観測位相を用いた模擬地震波及び断層破壊過程を考慮した群遅延時間を与える方法を採用。	乱數位相を用いた模擬地震波、観測位相を用いた模擬地震波の2つの方法を採用。	<ul style="list-style-type: none"> 申請時は、「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム報告書」を参考に、3つの方法による模擬地震波を作成し地震基盤相当面での地震波の比較・検討を実施。 今回、解放基盤表面での直接的な比較・検討をした上で模擬地震波を選定する方針に変更。 解放基盤表面での検討においては、乱數位相を用いた方法の強震部の継続時間における保守性を有する傾向や、観測位相を用いた方法の観測事実を直接反映できる点を考慮し、乱數位相及び観測位相を用いた模擬地震波の2つの方法による評価結果の比較・検討により模擬地震波の選定を実施。
乱數位相を用いた模擬地震波の振幅包絡線の設定	P4 変更前： 2021年6月11日 第983回審査会合 資料1-2 P40	乱數位相を用いた模擬地震波の振幅包絡線を以下の条件で設定。 ・ M6.9 ・ $X_{eq}=10\text{km}$	乱數位相を用いた模擬地震波の振幅包絡線の設定条件のうちMを保守的に設定。 ・ M7.0 ・ $X_{eq}=10\text{km}$	<ul style="list-style-type: none"> 申請時は、審査ガイドでは「全国共通に考慮すべき地震動」の地震規模は「Mw6.5程度未満」とされていることから、Mw6.5と換算式を基にM6.9と設定。 今回、審査ガイドでは、「Mw6.5程度未満」と幅をもって示されていることから、Mw6.5と換算式から求められるMについても幅を持たせ、模擬地震波の強震部の継続時間が長めとなるよう保守的な設定を実施。
観測位相を用いた模擬地震波に用いる観測記録の選定	P6、P7、P8 変更前： 2021年6月11日 第983回審査会合 資料1-2 P53 (具体的な条件等は未説明)	敷地で収集された地震観測記録（M5～M7、 $\Delta 30\text{km}$ 以内、記録がない場合は震央距離を拡大）から、旧ガイドで例示されたMw6.5程度未満の14地震より、敷地近傍で発生し、最大加速度の大きな記録を選定。 ・ 1997年鹿児島県北西部地震 5月本震を選定	敷地で収集された地震観測記録（M5～M7、 $\Delta 30\text{km}$ 以内、記録がない場合は震央距離を拡大）から、敷地近傍で発生し、最大加速度が大きく、加えて主要動の継続時間が長い記録を選定。 ・ 1997年鹿児島県北西部地震 3月本震、5月本震を選定	<ul style="list-style-type: none"> 申請時は、観測位相を用いた模擬地震波の作成において、敷地で収集された地震観測記録から旧審査ガイドで例示された地震を対象として選定。 今回、対象を限定せず、敷地で収集された地震観測記録の全てから選定を実施。選定においては、保守性の観点で波形の主要動の継続時間の長さも考慮。

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, 399-408.
- 2) 武村雅之(1990): 日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震 第2輯, 第43巻.
- 3) H. Kanamori(1977): The Energy Release in Great Earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol.82, No.20, 2981-2987.