

伊方発電所3号炉
震源を特定せず策定する地震動
— 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 —

令和4年10月17日

四国電力株式会社

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要 | 2 |
| 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定 | 5 |
| 3. 基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成 | 11 |
| 3.1 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 | 13 |
| 3.2 実観測記録の位相を用いた模擬地震波 | 17 |
| 3.3 基準地震動Ss-3-3の模擬地震波 | 19 |
| 4. まとめ | 21 |
| | |
| 【参考資料】 | |
| 基準地震動Ss-3の超過確率の参照 | 24 |

-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. 基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成
 - 3.1 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
 - 3.2 実観測記録の位相を用いた模擬地震波
 - 3.3 基準地震動Ss-3-3の模擬地震波
 4. まとめ

震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要

- 2021年4月21日、設置許可基準規則の解釈※1及び審査ガイド※2が改正され、「震源を特定せず策定する地震動」に係る記載内容が改正された。
- このため、伊方発電所3号機の基準地震動評価のうち、震源を特定せず策定する地震動評価について、改正後の設置許可基準規則第4条に適合していることを、設置許可基準規則の解釈に準拠し確認した。

設置許可基準規則

第4条3項

▶ 基準地震動

※1 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
 ※2 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド

設置許可基準規則の解釈（別記2） 関連改正箇所

第4条5項の三

上記の「震源を特定せず策定する地震動」は、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こと。なお、上記の「震源を特定せず策定する地震動」については、次に示す方針により策定すること。

②上記の「全国共通に考慮すべき地震動」の策定に当たっては、震源近傍における観測記録を基に得られた次の知見をすべて用いること。

- ・2004年北海道留萌支庁南部の地震において、防災科学技術研究所が運用する全国強震観測網の港町観測点における観測記録から推定した基盤地震動

平成27年7月15日付け設置変更許可にて確認済

- ・震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面（地震基盤からの地盤増幅率が小さく地震動としては地震基盤面と同等とみなすことができる地盤の解放面で、せん断波速度 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地層をいう。）における標準的な応答スペクトル（以下「標準応答スペクトル」という。）として次の図に示すもの

本資料において確認

③上記の「地域性を考慮する地震動」の検討の結果、この地震動を策定する場合にあっては、事前に活断層の存在が指摘されていなかった地域において発生し、地表付近に一部の痕跡が確認された地震について、震源近傍における観測記録を用いること。

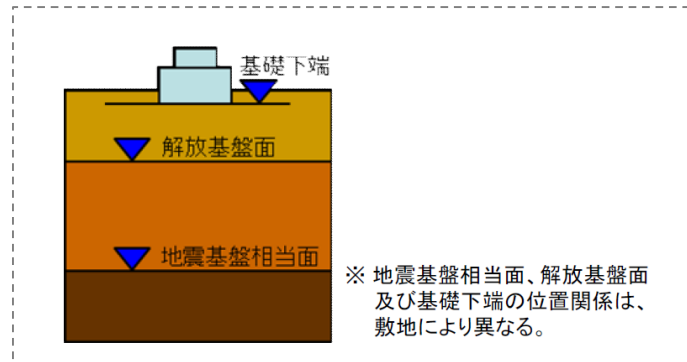
平成27年7月15日付け設置変更許可にて確認済

④解放基盤表面までの地震波の伝播特性を必要に応じて応答スペクトルの設定に反映するとともに、設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続時間及び経時的変化等の特性を適切に考慮すること。

本資料において確認

伊方発電所における標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

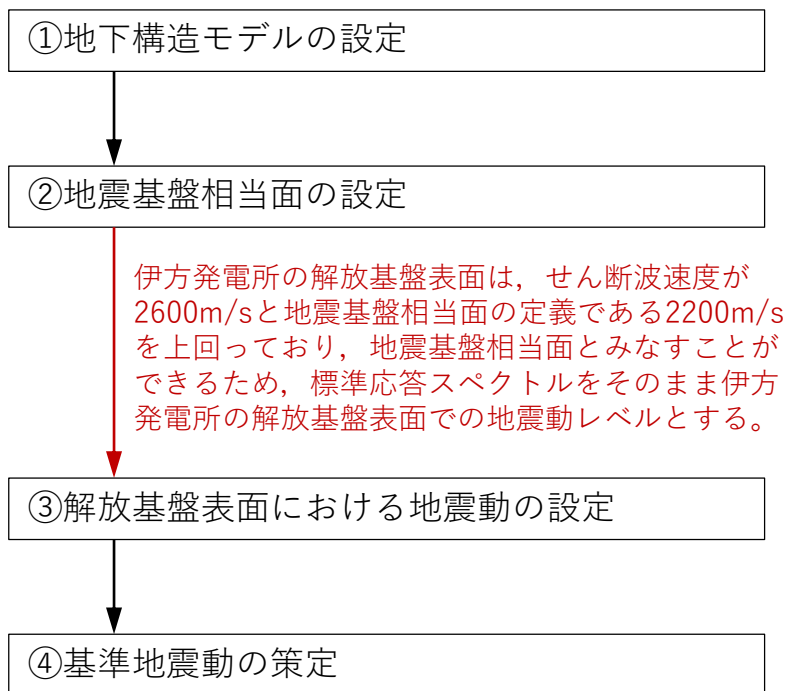
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価にあたっては、地震基盤相当面と解放基盤表面の位置関係によっては、地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播特性を考慮する必要があるが、以降に示すとおり、伊方発電所の解放基盤表面 ($V_s=2600\text{m/s}$) は地震基盤相当面とみなすことができる。
- これを踏まえ、伊方発電所における標準応答スペクトルを考慮した地震動評価は、以下のとおり、標準応答スペクトルをそのまま解放基盤表面での地震動として基準地震動を策定し、基準地震動に適合する模擬地震波を作成する。



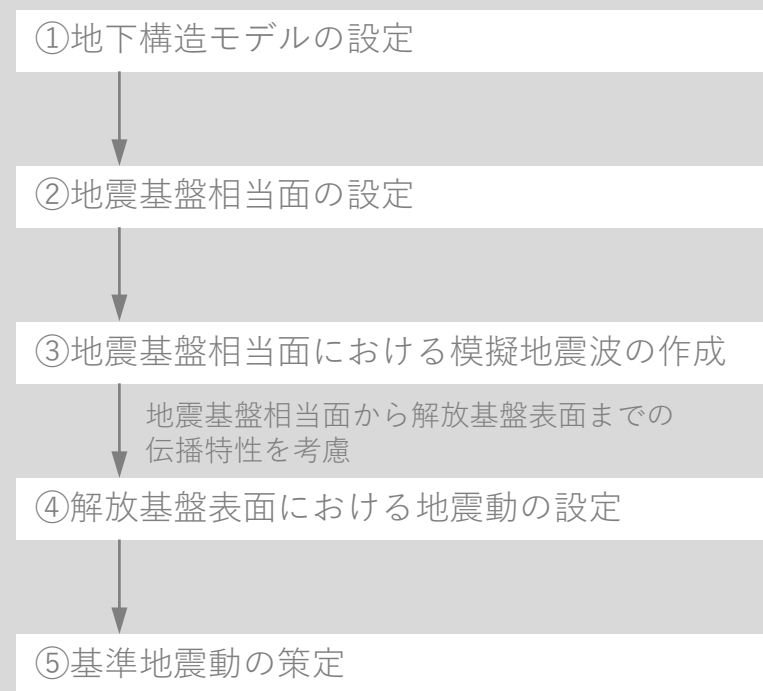
全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書より抜粋

■標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

伊方発電所（地震基盤相当面＝解放基盤表面）の場合



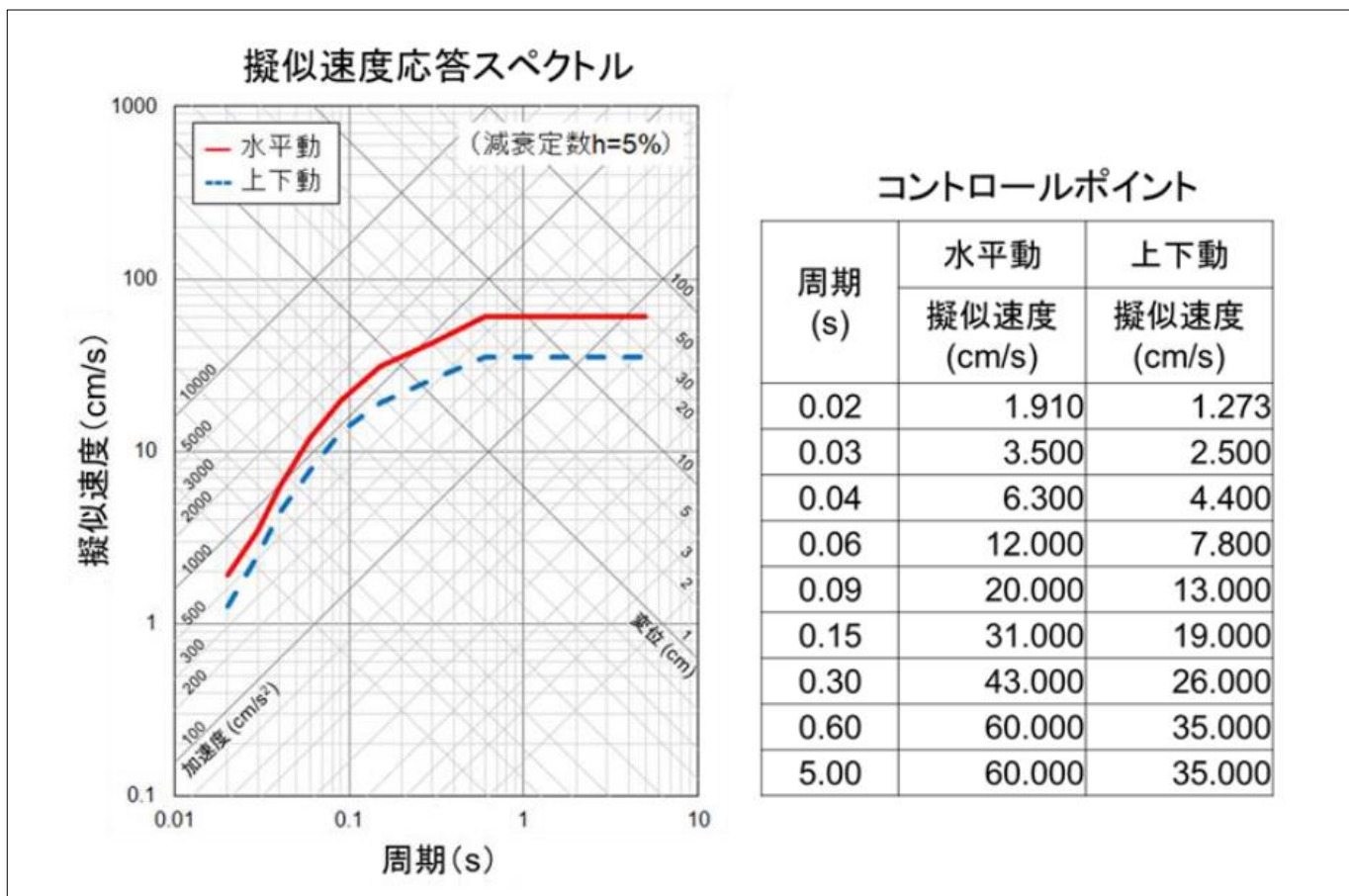
地震基盤相当面と解放基盤表面とが異なる場合



-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. 基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成
 - 3.1 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
 - 3.2 実観測記録の位相を用いた模擬地震波
 - 3.3 基準地震動Ss-3-3の模擬地震波
 4. まとめ

震源を特定せず策定する地震動の標準応答スペクトル

- 標準応答スペクトルは、「震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面（地震基盤からの地盤増幅率が小さく地震動としては地震基盤面と同等とみなすことができる地盤の解放面で、せん断波速度 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地層をいう。）における標準的な応答スペクトル」と定義されている。



地下構造モデル及び地震基盤相当面の設定

- 伊方発電所の地下構造モデル（既許可評価）を下に示す。
- 伊方発電所の解放基盤表面は、敷地の標高位置（EL.+10m）で定義されている。また、せん断波速度が2600m/sと地震基盤相当面の定義（ $V_s=2200\text{m/s}$ ）を上回っており、**地震基盤相当面とみなすことができる。**

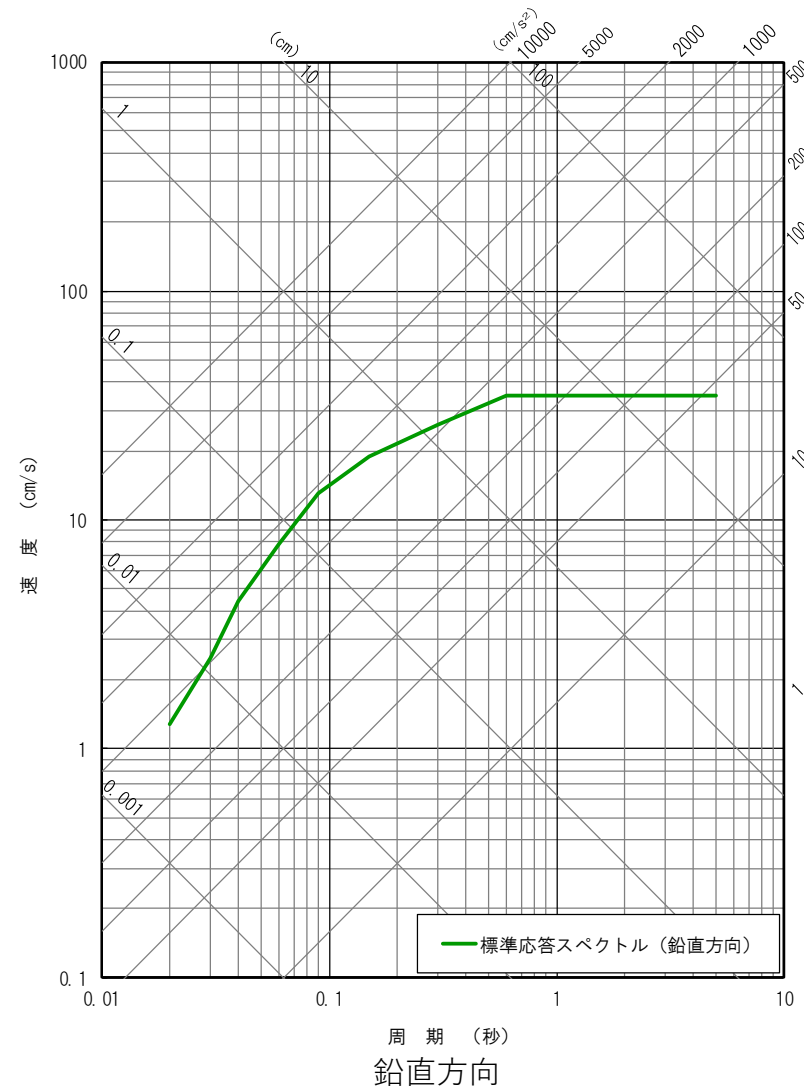
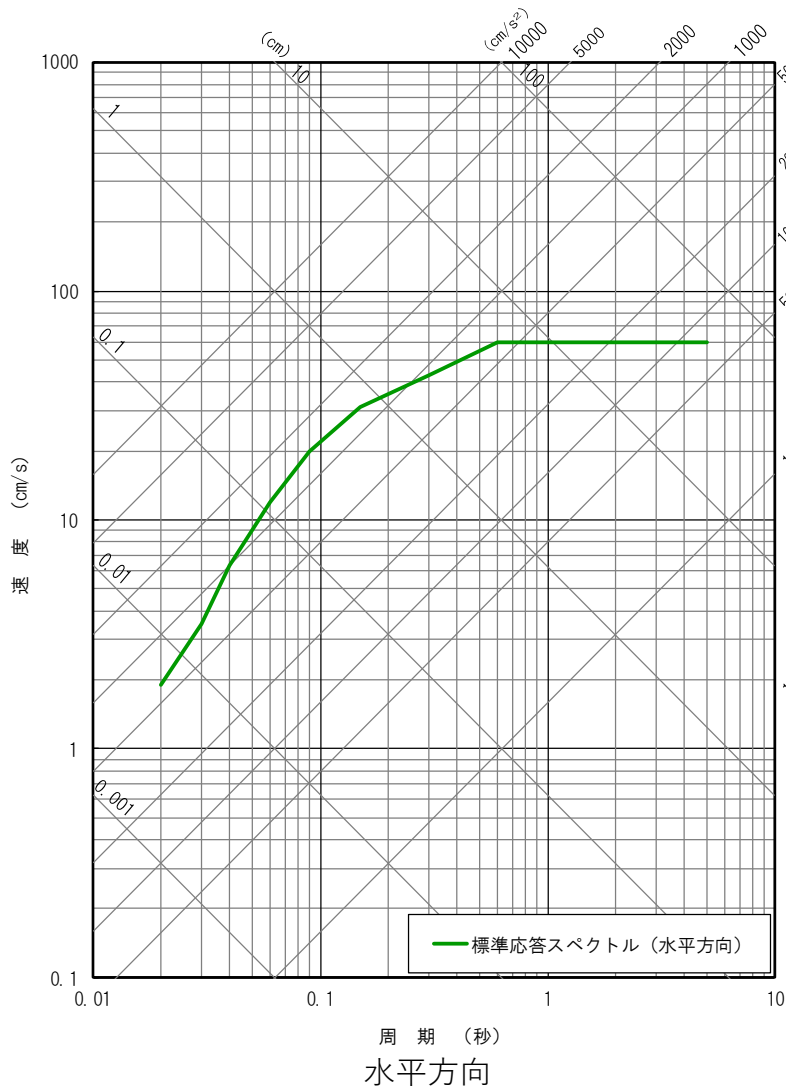
| EL. (m) | GL. (m) | S波速度 (m/s) | P波速度 (m/s) | 密度 (g/cm^3) | Q値 |
|------------|------------|---------------|---------------|---------------------------|-----|
| 10 | 0 | 2600 | 5300 | 3.0 | 50 |
| 0 | -10 | 2700 | 5500 | 3.0 | 50 |
| -340 | -350 | 2600 | 4700 | 2.7 | 100 |
| -790 | -800 | 3000 | 5200 | 2.7 | 100 |
| -1490 | -1500 | 3300 | 5500 | 2.7 | 220 |
| -1990 | -2000 | 3500 | 6100 | 2.7 | 230 |

解放基盤表面（=地震基盤相当面）

地震基盤

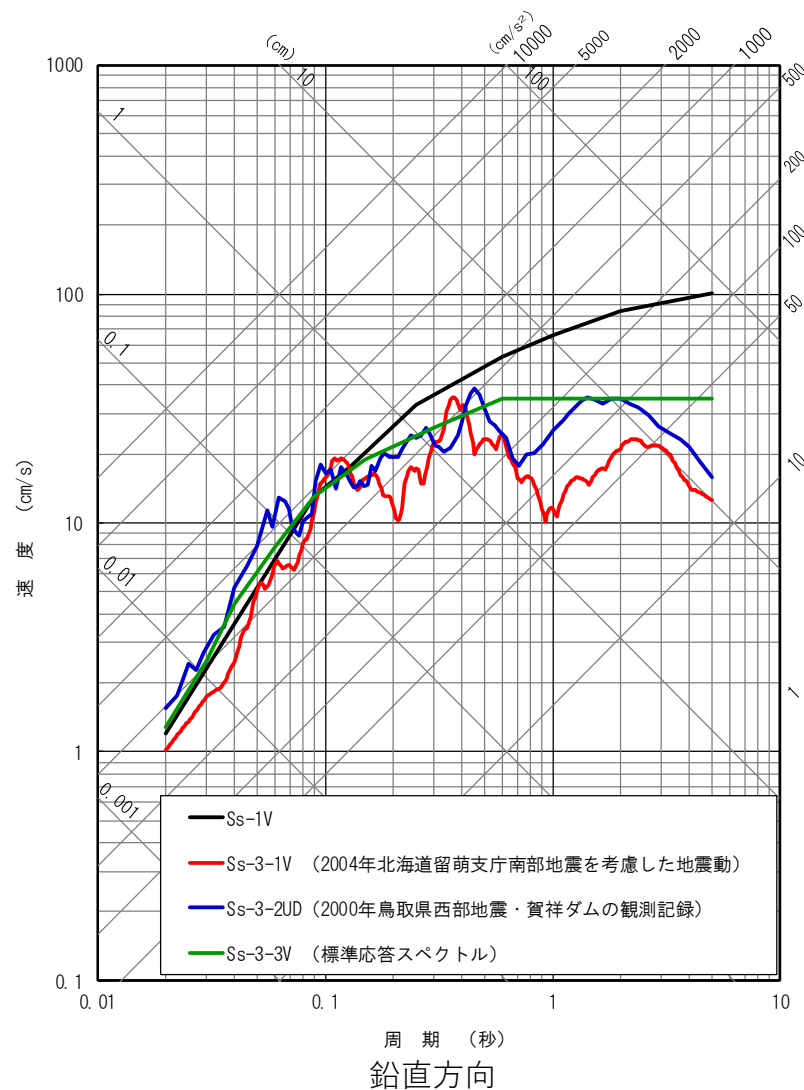
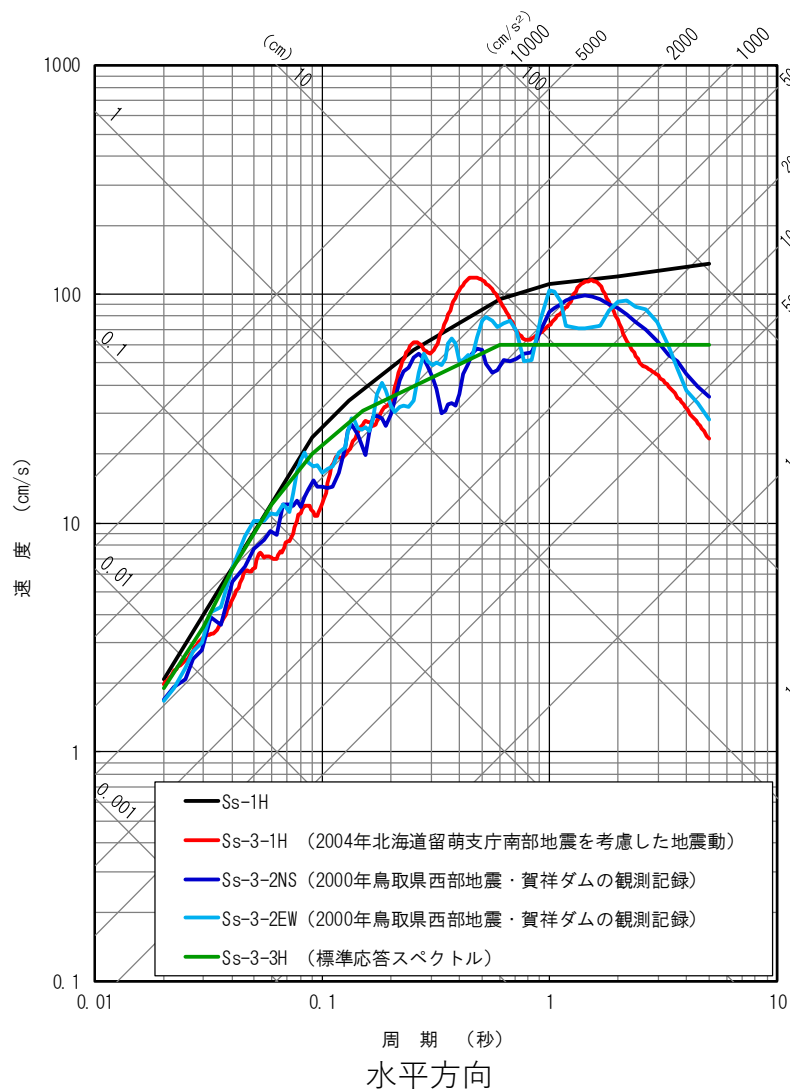
解放基盤表面における震源を特定せず策定する地震動の応答スペクトルの設定

- 伊方発電所においては、敷地の解放基盤表面のせん断波速度が $V_s=2600\text{m/s}$ であり地震基盤面に相当することを踏まえ、標準応答スペクトルをそのまま震源を特定せず策定する地震動の設計用応答スペクトルとして考慮する。

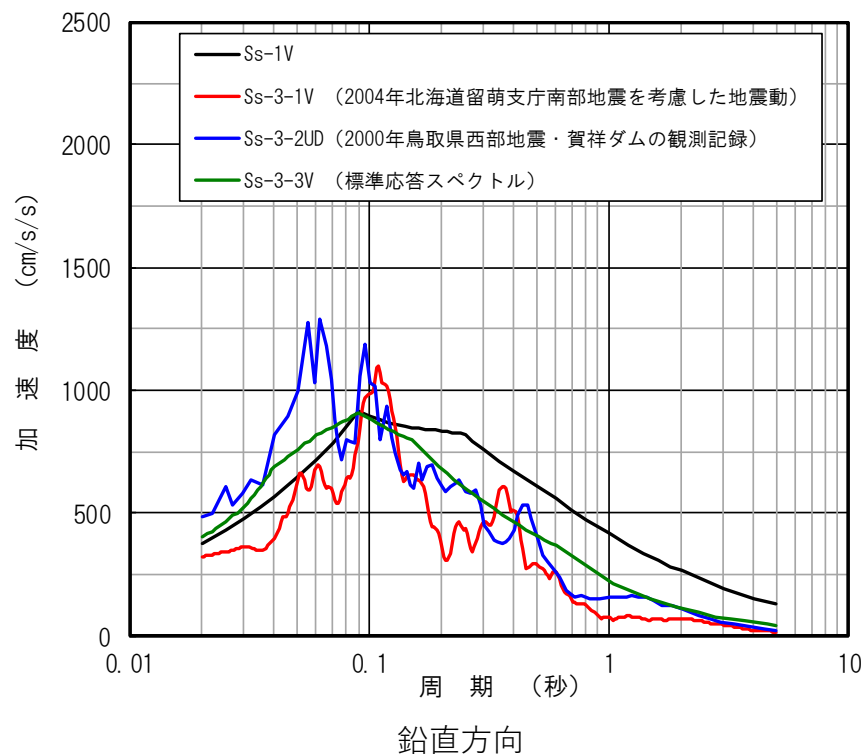
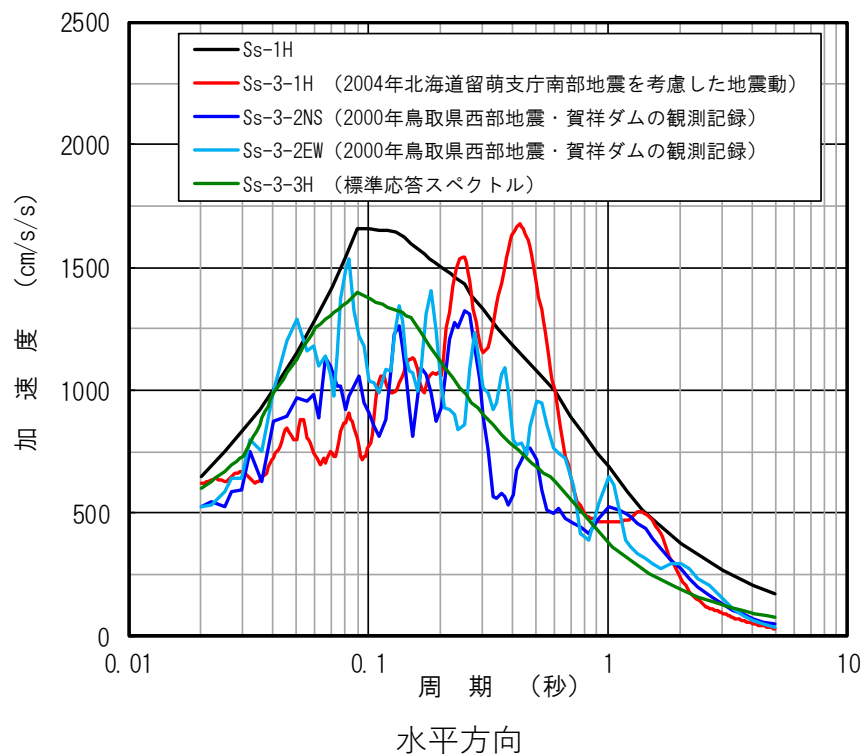


基準地震動Ss-3-3の設定

- 標準応答スペクトルについて、伊方発電所における既存の基準地震動と比較すると、水平方向は全周期帯で基準地震動Ss-1に包絡され、鉛直方向は0.1秒程度以上の周期帯で基準地震動Ss-1に包絡されるものの、鉛直方向の0.1秒程度以下の短周期側で既存の基準地震動を超過するため、**基準地震動Ss-3-3として設定**する。



基準地震動Ss-3-3の設定



-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. **基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成**
 - 3.1 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
 - 3.2 実観測記録の位相を用いた模擬地震波
 - 3.3 基準地震動Ss-3-3の模擬地震波
 4. まとめ

検討概要

- 審査ガイドでは、模擬地震波の作成に関して、下記に例示する複数の方法による検討が要求されている。
 - ①正弦波の重ね合わせによる位相（乱數位相）を用いた模擬地震波
 - ②実観測記録の位相を用いた模擬地震波
- これを踏まえ、**Noda et al.(2002)の手法に基づき乱數位相を用いた模擬地震波**を作成した。また、伊方発電所において模擬地震波の作成に用いることが可能な観測記録の有無について確認したが、**実観測記録の位相を用いた模擬地震波の検討に用いることが可能な観測記録は見つからなかった**ため、参考検討として、観測記録の回帰分析に基づく他の手法による模擬地震波についても検討を加えた。
- ここで、伊方発電所の解放基盤表面は、敷地の標高位置（EL.+10m）で定義されており位置が浅いととも、せん断波速度が2600m/sと地震基盤相当面の定義である2200m/sを上回っており、地震基盤相当面とみなすことができ、**地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播特性の影響を考慮するために観測記録の位相を用いる必要がないサイト**である。
- 以上のように、複数の方法による検討を行ったうえで、伊方発電所の解放基盤表面の特性を踏まえ、基準地震動Ss-3-3の模擬地震波は、**Noda et al.(2002)の手法に基づき作成した乱數位相を用いた模擬地震波を採用**する。

■設置許可基準規則の解釈及び審査ガイドの記載を踏まえた検討内容

設置許可基準規則の解釈（別記2）第4条5項の三

- ④解放基盤表面までの地震波の伝播特性を必要に応じて応答スペクトルの設定に反映するとともに、設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続時間及び経時的变化等の特性を適切に考慮すること。

| 審査ガイドの記載 | 検討内容 | 説明頁 |
|---|--|------------------|
| 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。 | ・乱數位相を用いた模擬地震波を作成し、継続時間及び経時的变化について確認する | 13～16頁 補足説明資料 |
| | ・観測位相を用いた模擬地震波の検討として、伊方発電所周辺の観測記録を確認する | 17～18頁 補足説明資料 |
| | ・伊方発電所の解放基盤表面の設定を踏まえ、 基準地震動Ss-3-3は乱數位相を用いた模擬地震波を採用 する | 19～20頁 |

-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. **基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成**
 - 3.1 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
 - 3.2 実観測記録の位相を用いた模擬地震波
 - 3.3 基準地震動Ss-3-3の模擬地震波
 4. まとめ

基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成諸元

- 基準地震動Ss-3-3（標準応答スペクトル）に適合する模擬地震波について、周波数-振動特性と一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせによって作成する。
- 振幅包絡線の経時変化については、Noda et al.(2002)に基づき設定する。なお、振幅包絡線の設定条件の保守性については、補足説明資料に記載している。

| 設計用 模擬地震波 | 地震規模 M | 等価震源距離 Xeq(km) | 継続時間 (s) | 振幅包絡線の経時的变化 (s) | | |
|--------------------|-----------|-------------------|-------------|-----------------|----------------|----------------|
| | | | | T _b | T _c | T _d |
| Ss-3-3H Ss-3-3V | 7.0 | 10.0 | 29.80 | 3.72 | 16.31 | 29.80 |

※地震規模は、武村(1990)のMo-M関係及びKanamori(1977)のMo-Mw関係から導かれる経験式($M_w=0.78M+1.08$)と、全国共通に考慮すべき地震動の地震規模($M_w6.5$ 程度未満)との関係から、 $M_w6.5$ の場合のMは約6.9となるが、地震規模に幅があることを踏まえ、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を設定。また、等価震源距離は、敷地近傍(半径10km程度以内の領域)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10kmと設定。

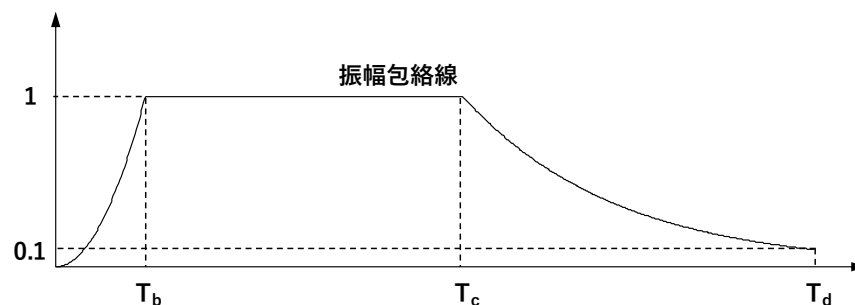
$$E(T) = \begin{cases} (T/T_b)^2 & (0 < T \leq T_b) \\ 1.0 & (T_b < T \leq T_c) \\ e^{\frac{\ln(0.1)}{T_d - T_c}(T - T_c)} & (T_c < T \leq T_d) \end{cases}$$

ここで、

$$T_b = 10^{0.5M - 2.93} \quad (\text{立ち上がり部の継続時間})$$

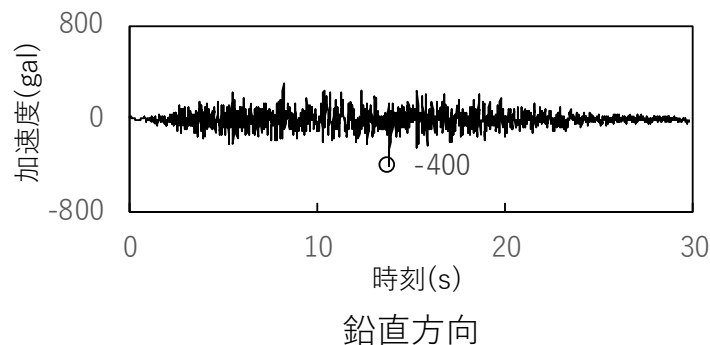
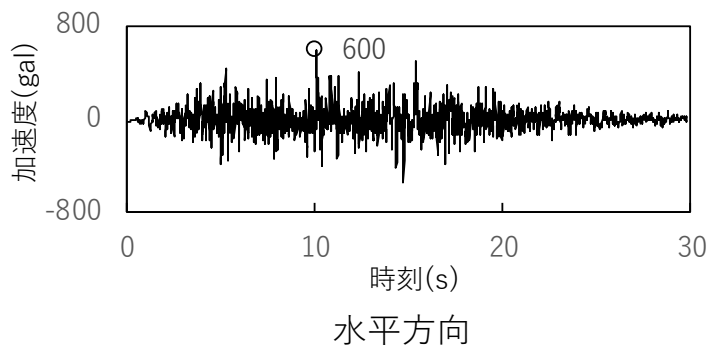
$$T_c - T_b = 10^{0.3M - 1.0} \quad (\text{強震部の継続時間})$$

$$T_d - T_c = 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6} \quad (\text{減衰部の継続時間})$$



模擬地震波の作成結果（1/2）

■ 模擬地震波の作成結果

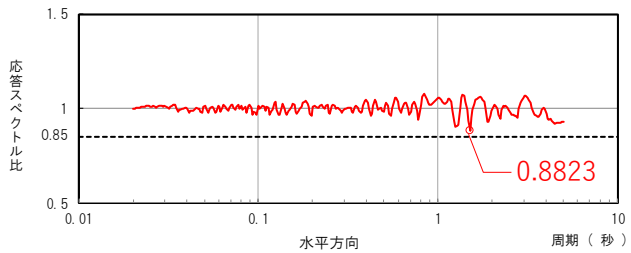
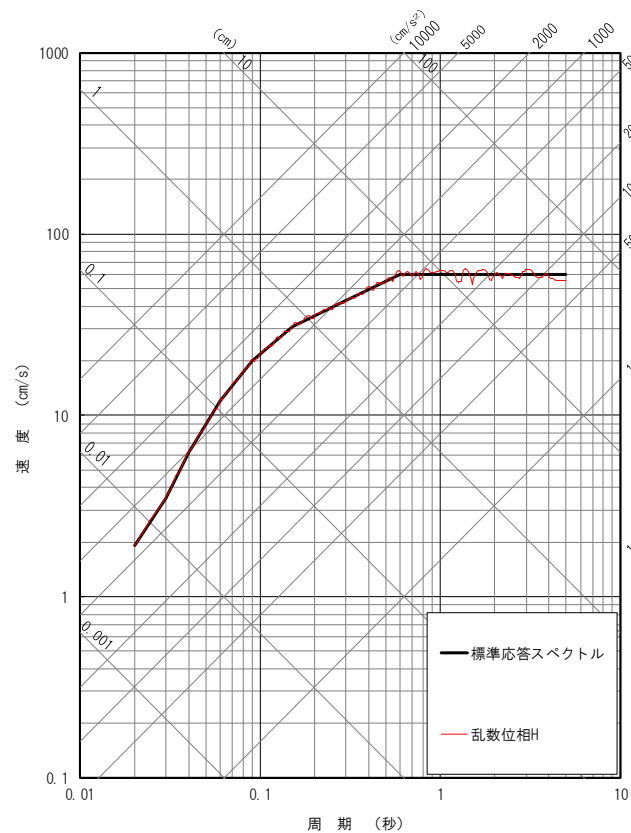


■ 適合度確認（スペクトル比は全周期帯の適合度のうちの最小値を示している）

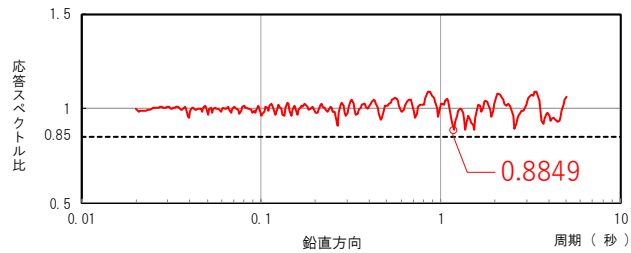
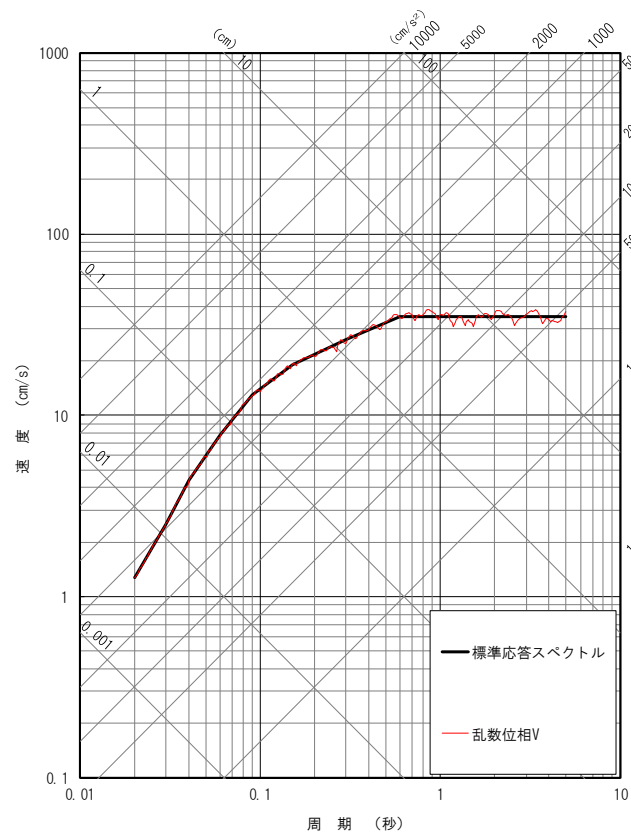
| | スペクトル比(R) (≥ 0.85) | スペクトル強度比(SI比) (≥ 1.0) |
|------|---|---|
| 水平方向 | 0.8823 | 1.0070 |
| 鉛直方向 | 0.8849 | 1.0068 |
| 判定式 | $R = \frac{S_{V1}(T)}{S_{V2}(T)} \quad (0.02 \leq T)$ <p>$S_{V1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値 $S_{V2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値 T : 固有周期</p> | $SI比 = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_V(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_V(T) dt}$ <p>$S_V(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値 $\bar{S}_V(T)$: 目標とする応答スペクトル値 T : 固有周期</p> |

模擬地震波の作成結果 (2/2)

■ 模擬地震波の応答スペクトルと応答スペクトル比



水平方向



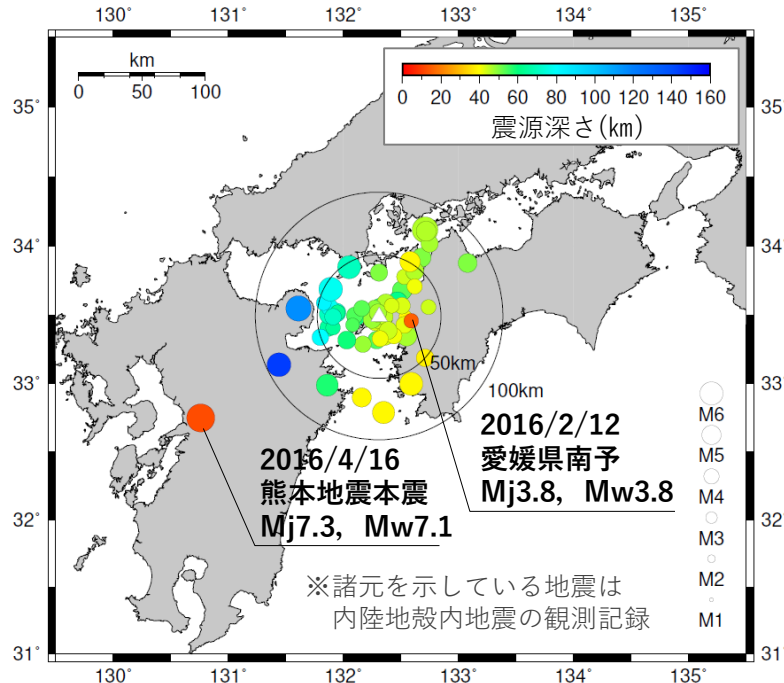
鉛直方向

-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. **基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成**
 - 3.1 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
 - 3.2 実観測記録の位相を用いた模擬地震波
 - 3.3 基準地震動Ss-3-3の模擬地震波
 4. まとめ

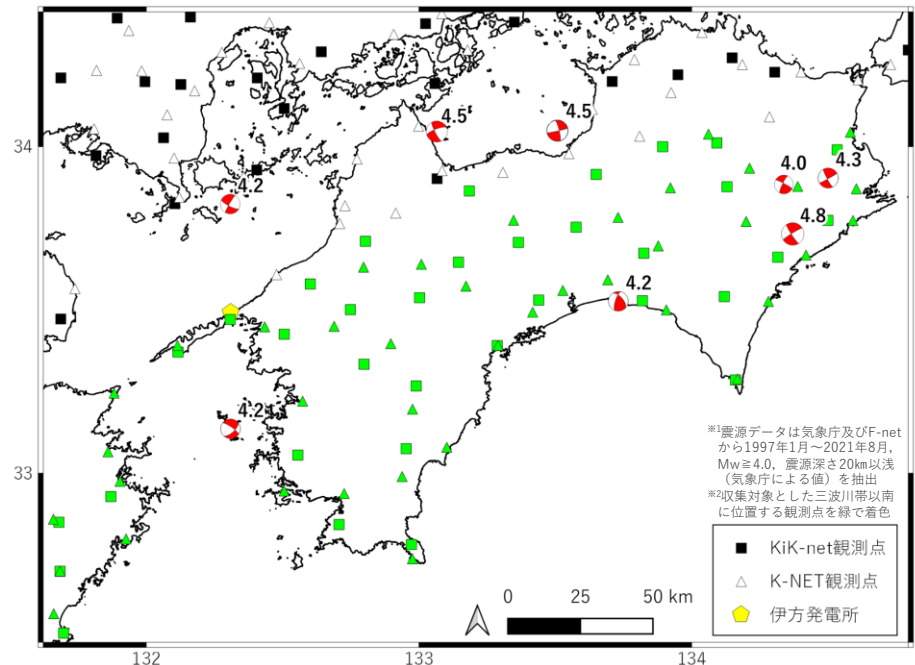
伊方発電所及び伊方発電所周辺における観測記録の収集（概要）

- 実観測記録の位相を用いた模擬地震波の検討にあたって、伊方発電所及び伊方発電所周辺における観測記録の収集を行い、模擬地震波作成に用いることが可能な観測記録の有無について確認した。
- その結果、以下のとおり、模擬地震波作成に用いることが可能な観測記録は見つからなかった。
 - ・伊方発電所における観測記録については、内陸地殻内地震の観測記録は最大振幅が10ガル未満と小さい2地震のみ（その他は海洋プレート内地震の観測記録）であり、いずれの記録も適切ではない。
 - ・伊方発電所と地盤特性が同程度として収集・整理した伊方発電所周辺における内陸地殻内地震の観測記録は、最大振幅が10ガル未満と小さいこと、継続時間が短いことなどから、いずれの記録も適切ではない。
- このため、参考検討として、観測記録の回帰分析に基づく模擬地震波作成手法である佐藤・岡崎(2013)による群遅延時間を考慮した模擬地震波を作成した。作成した模擬地震波について、乱数位相を用いた模擬地震波と周波数特性等の比較を行い、乱数位相を用いた模擬地震波の方が振幅の大きい波の継続時間が長いことを確認した。
- なお、これらの詳細は補足説明資料に記載している。

■伊方発電所の地震計で観測された地震の震央分布



■伊方発電所周辺におけるMw4.0以上の地震の震央分布

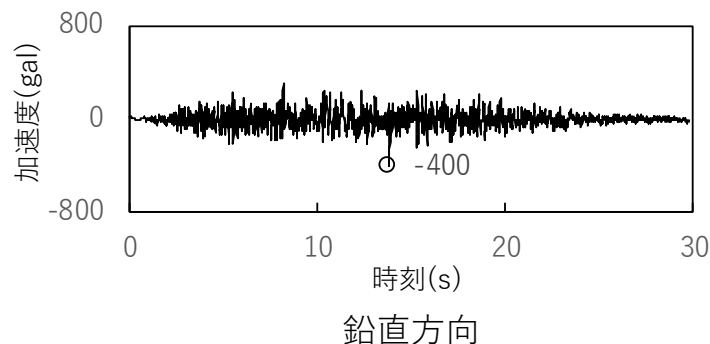
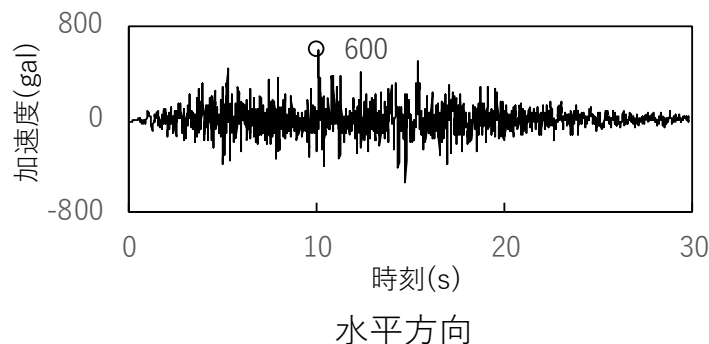


-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. **基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成**
 - 3.1 正弦波の重ね合わせによる位相（乱数位相）を用いた模擬地震波
 - 3.2 実観測記録の位相を用いた模擬地震波
 - 3.3 **基準地震動Ss-3-3の模擬地震波**
 4. まとめ

基準地震動Ss-3-3の模擬地震波（乱數位相を用いた模擬地震波）

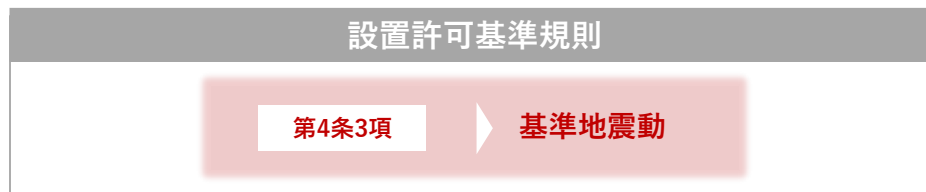
- 伊方発電所の解放基盤表面については、敷地の標高位置（EL.+10m）で定義されており位置が浅いととも、せん断波速度が2600m/sと地震基盤相当面の定義である2200m/sを上回っている。
- これを踏まえれば、伊方発電所の解放基盤表面は地震基盤相当面とみなすことができることから、伊方発電所は、**地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝播特性の影響を考慮するために観測記録の位相を用いる必要がないサイト**である。
- このような伊方発電所の解放基盤表面の特性を踏まえ、**基準地震動Ss-3-3は乱數位相を用いた模擬地震波を採用する。**

■ 模擬地震波（Ss-3-3H, Ss-3-3V）の加速度時刻歴波形（乱數位相を用いた模擬地震波）



-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. 基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成
 - 3.1 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
 - 3.2 実観測記録の位相を用いた模擬地震波
 - 3.3 基準地震動Ss-3-3の模擬地震波
 4. まとめ

○震源を特定せず策定する地震動評価について、改正後の設置許可基準規則※第4条に適合していることを確認した。



設置許可基準規則の解釈（別記2） 関連改正箇所

第4条5項の三

上記の「震源を特定せず策定する地震動」は、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こと。なお、上記の「震源を特定せず策定する地震動」については、次に示す方針により策定すること。

②上記の「全国共通に考慮すべき地震動」の策定に当たっては、震源近傍における観測記録を基に得られた次の知見をすべて用いること。

- ・2004年北海道留萌支庁南部の地震において、防災科学技術研究所が運用する全国強震観測網の港町観測点における観測記録から推定した基盤地震動
- ・震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面（地震基盤からの地盤増幅率が小さく地震動としては地震基盤面と同等とみなすことができる地盤の解放面で、せん断波速度 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地層をいう。）における標準的な応答スペクトル（以下「標準応答スペクトル」という。）として次の図に示すもの

③上記の「地域性を考慮する地震動」の検討の結果、この地震動を策定する場合にあっては、事前に活断層の存在が指摘されていなかった地域において発生し、地表付近に一部の痕跡が確認された地震について、震源近傍における観測記録を用いること。

④解放基盤表面までの地震波の伝播特性を必要に応じて応答スペクトルの設定に反映するとともに、設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続時間及び経時的变化等の特性を適切に考慮すること。

※ 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(解釈含む)

基準地震動Ssの最大加速度振幅

| 基準地震動Ss | | | | 最大加速度振幅(cm/s ²) | | |
|--|--------------------------|----------------------|--|-----------------------------|------------|-----|
| 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手法 | 設計用模擬地震波 | | 水平動 | Ss-1H | 650 |
| | | | | 鉛直動 | Ss-1V | 377 |
| | 断層モデルを用いた手法 | 敷地前面海域の断層群(中央構造線断層帯) | 480km連動・壇の手法・ $\Delta\sigma$ 20MPa・西破壊 | 水平動NS | Ss-2-1NS | 579 |
| | | | | 水平動EW | Ss-2-1EW | 390 |
| | | | | 鉛直動UD | Ss-2-1UD | 210 |
| | | | 480km連動・壇の手法・ $\Delta\sigma$ 20MPa・中央破壊 | 水平動NS | Ss-2-2NS | 456 |
| | | | | 水平動EW | Ss-2-2EW | 478 |
| | | | | 鉛直動UD | Ss-2-2UD | 195 |
| | | | 480km連動・壇の手法・ $\Delta\sigma$ 20MPa・第17スベリティ西破壊 | 水平動NS | Ss-2-3NS | 371 |
| | | | | 水平動EW | Ss-2-3EW | 418 |
| | | | | 鉛直動UD | Ss-2-3UD | 263 |
| | | | 480km連動・F&Mの手法・ $\Delta\sigma$ 1.5倍・西破壊 | 水平動NS | Ss-2-4NS | 452 |
| | | | | 水平動EW | Ss-2-4EW | 494 |
| | | | | 鉛直動UD | Ss-2-4UD | 280 |
| | | | 480km連動・F&Mの手法・ $\Delta\sigma$ 1.5倍・中央破壊 | 水平動NS | Ss-2-5NS | 452 |
| | | | | 水平動EW | Ss-2-5EW | 388 |
| | | | | 鉛直動UD | Ss-2-5UD | 199 |
| | | | 480km連動・F&Mの手法・ $\Delta\sigma$ 1.5倍・東破壊 | 水平動NS | Ss-2-6NS | 291 |
| | | | | 水平動EW | Ss-2-6EW | 360 |
| | | | | 鉛直動UD | Ss-2-6UD | 201 |
| 54km・入倉・三宅の手法・ $\Delta\sigma$ 1.5倍・中央破壊 | 水平動NS | Ss-2-7NS | 458 | | | |
| | 水平動EW | Ss-2-7EW | 371 | | | |
| | 鉛直動UD | Ss-2-7UD | 178 | | | |
| 480km連動・壇の手法・ $\Delta\sigma$ 20MPa・中央破壊・入れ替え | 水平動NS | Ss-2-8NS | 478 | | | |
| | 水平動EW | Ss-2-8EW | 456 | | | |
| | 鉛直動UD | Ss-2-8UD | 195 | | | |
| 震源を特定せず策定する地震動 | 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動 | | 水平動 | Ss-3-1H | 620 | |
| | | | 鉛直動 | Ss-3-1V | 320 | |
| | 2000年鳥取県西部地震賀祥ダムの観測記録 | | 水平動NS | Ss-3-2NS | 528 | |
| | | | 水平動EW | Ss-3-2EW | 531 | |
| | | | 鉛直動UD | Ss-3-2UD | 485 | |
| | 標準応答スペクトル | | 水平動 | Ss-3-3H | 600 | |
| 鉛直動 | | | Ss-3-3V | 400 | | |

【参考資料】

基準地震動Ss-3の超過確率の参照

基準地震動Ss-3の超過確率の参照

- 基準地震動Ss-3-1～Ss-3-3の応答スペクトルを、既許可で評価した内陸地殻内地震の領域震源モデルによる一様ハザードスペクトルと比較する。
- 内陸地殻内地震の領域震源モデルによる一様ハザードスペクトルと比較した結果、**震源を特定せず策定する地震動Ss-3-1～Ss-3-3の年超過確率は 10^{-4} ～ 10^{-7} 程度**である。

