

目 次

第 1 章	総論	4
第 2 章	本件原子力発電所の基準地震動 S_s	5
第 1	はじめに	5
第 2	自然現象である地震の特性と本件原子力発電所敷地周辺で発生する地震	6
1	自然現象である地震の特性	6
(1)	地震における 3 つの特性 (一般論としての「法則」)	6
(2)	地域的な特性	7
(3)	地域的な特性によって特徴的な揺れが発現した例	13
2	本件原子力発電所敷地周辺で発生する地震	14
第 3	地震動策定手法の発展と被告九州電力の対応	15
1	玄海 3 号機及び 4 号機建設時の基準地震動の策定	15
(1)	策定方針	15
(2)	基準地震動 S_1 の策定	16
(3)	基準地震動 S_2 の策定	16
2	1995 年兵庫県南部地震を契機とした知見と耐震設計審査指針の改訂	17
(1)	1995 年兵庫県南部地震を契機とした知見	17
(2)	耐震設計審査指針の改訂	18
3	2011 年東北地方太平洋沖地震等の知見と新規制基準の施行	20
第 4	新規制基準を踏まえた基準地震動 S_s の策定	21
1	策定方針	21
2	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動	21
(1)	評価手法	21
(2)	地質・地震に関する調査・観測	22
(3)	検討用地震の選定	64
(4)	検討用地震の地震動評価における震源モデルの設定	68
(5)	応答スペクトルに基づく地震動評価	78

(6) 断層モデルを用いた手法による地震動評価	78
(7) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」による基準地震動の策定	79
(8) まとめ	84
3 震源を特定せず策定する地震動	84
(1) 策定方針	84
(2) 「震源を特定せず策定する地震動」による基準地震動の策定	85
(3) まとめ	92
4 基準地震動 S_s の策定	95
5 基準地震動 S_s の年超過確率	101
第3章 結論	103

第1章 総論

被告九州電力は、平成24年5月17日付「答弁書 第6章 第5 地震及び津波に対する安全性」において、本件原子力発電所の地震及び津波に対する安全性について主張した。その後、原子力規制委員会設置法の制定に伴う「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」の改正を踏まえ、平成25年7月12日、原子力規制委員会に対し、本件原子力発電所原子炉設置変更許可、工事計画認可、保安規定変更認可を一括して申請した。これを受けて、被告九州電力は、平成26年6月20日付「準備書面5 第2 地震に対する安全性の確認」において、平成25年7月時点における本件原子力発電所の地震及び津波に対する安全性について主張した。

本書面では、平成25年7月以降の国による審査及び最新の知見等を踏まえて、現時点における本件原子力発電所の地震に対する安全性について述べる。

具体的には、以下において、被告九州電力が策定した基準地震動の評価手法が合理的なものであること、被告九州電力が実施した調査の内容、基準地震動策定に至る経緯、基準地震動を十分な余裕をもって設定していることを主張し、基準地震動が十分なものであり、基準地震動を超過する地震動が発生する可能性が極めて低いことを明らかにする。

第2章 本件原子力発電所の基準地震動 S_s

第1 はじめに

原子力発電所の建設及び運転においては、地点毎に異なる地盤、想定される地震の規模等の自然的立地条件の把握が重要となる。このため、被告九州電力は、本件原子力発電所の建設時、さらには運転開始後においても、敷地及び敷地周辺について、過去の記録の調査や詳細な現地調査等を行い、地盤、地震等について地域的な特性を十分に把握したうえで、合理的に予想される地震力¹（基準地震動による地震力）に対して十分な安全が確保できるように設計及び管理している。

第2 自然現象である地震の特性と本件原子力発電所敷地周辺で発生する地震

1 自然現象である地震の特性

(1) 地震における3つの特性（一般論としての「法則」）

自然現象である地震による揺れ²は、図1のとおり、「① 震源特性³」、「② 伝播経路特性⁴」及び「③ サイト特性⁵」という3つの特性で把握できる。これらの3つの特性には、以下に述べるとおり、いかなる地域で発生する地震でも共通する一般論としての「法則」がある。

① 震源特性

地震の規模（マグニチュード⁶）が大きいほど、揺れが大きくなる。

② 伝播経路特性

震源からの距離が遠くなるほど、揺れが小さくなる。

③ サイト特性

地盤が硬いほど、揺れが小さくなる。

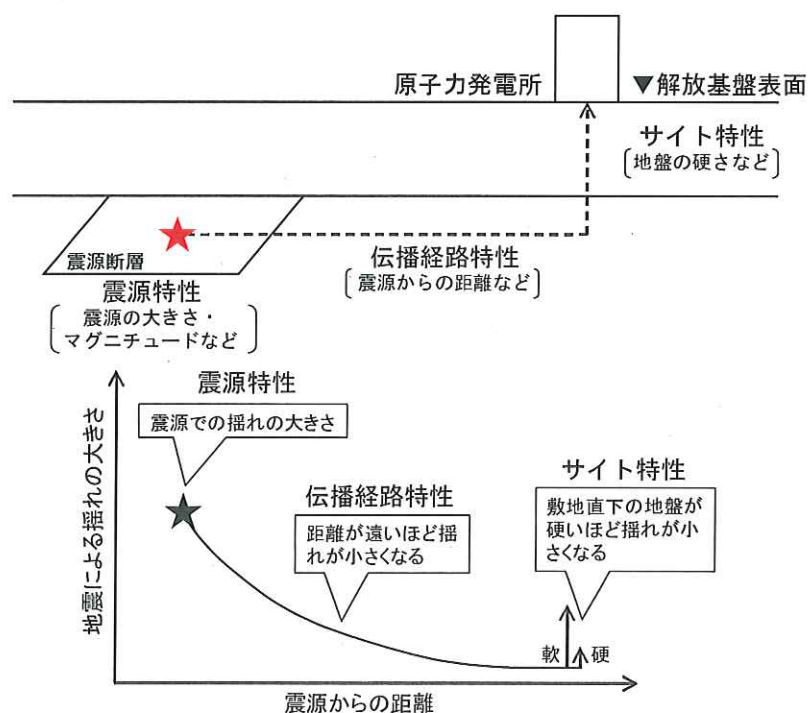


図1 震源特性・伝播経路特性・サイト特性のイメージ

(2) 地域的な特性

上記の3つの特性は、地域に応じて以下のような「地域的な特性」が存在する。「地域的な特性」は、その地域に特徴的な揺れをもたらす得るため、地震による揺れの評価を行う場合、この「地域的な特性」の考慮が重要である。

① 震源特性に係る地域的な特性

ア 一般に、プレートとプレートとの間の断層で発生する地震（プレート間地震：マグニチュード8～9クラス：2011年東北地方太平洋沖地震など）は規模が大きく、プレート内部の断層で発生する地震（内陸地殻内地震：マグニチュード7クラス：1995年兵庫県南部地震など、海洋プレート内地震：マグニチュード7クラス：2001年芸予地震など）は規模が小さい。

これは、地震の規模（マグニチュード）は、断層がずれ動く際の面積が大きいほど大きくなる場所、プレートとプレートとの間は地震が発生する領域が厚くずれ動く面積が大きくなるが、プレート内部は地震が発生する領域が薄いことからずれ動く面積が小さいためである（図2～図4）。

プレート間地震、内陸地殻内地震及び海洋プレート内地震のいずれの影響が大きいかは、その原子力発電所の立地する位置に関係し、地域によって異なる。

イ 内陸地殻内地震の断層型（発震機構解⁷）には、逆断層型、正断層型及び横ずれ断層型があり（図5）⁸、正断層型及び横ずれ断層型は、逆断層型よりも揺れの大きさが小さい傾向にある（図6）。

日本列島は、ユーラシアプレート、北米プレート、太平洋プレート、フィリピン海プレートの4つのプレート⁹が複雑に押し合う場所に位置しており（図2）、押し合いによって働く力の向きや大きさ¹⁰（応力場）の違いによって断層のずれ動き方にも違いがある。例えば、新潟県北部から中部地方北部を経由して近畿地方まで続く地域は、東西方向の圧縮応力場で、その周辺よりも大きくひずんでいて

「ひずみ集中帯¹¹⁾」と呼ばれているが、「ひずみ集中帯」においては、逆断層型の地震が起こりやすい。

このように、いずれの断層型が発生しやすいかは、地域によって異なる（図7）。

② 伝播経路特性に係る地域的な特性

震源からの距離が同じでも、地震波が伝播する過程における減衰が大きいほど揺れが小さくなる場所、減衰の大きさは、地域によって異なる（図8）。

③ サイト特性に係る地域的な特性

地盤（地層）の褶曲等がある地域では、揺れが大きく増幅する場所がある（図9）。

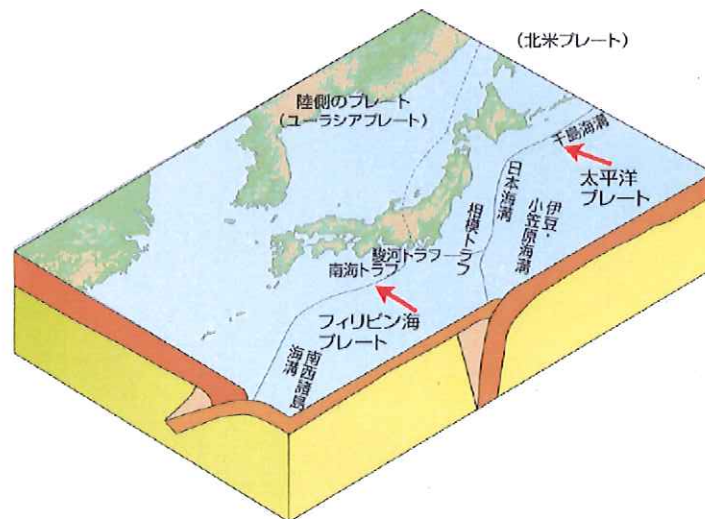


図2 日本周辺におけるプレートとその境界

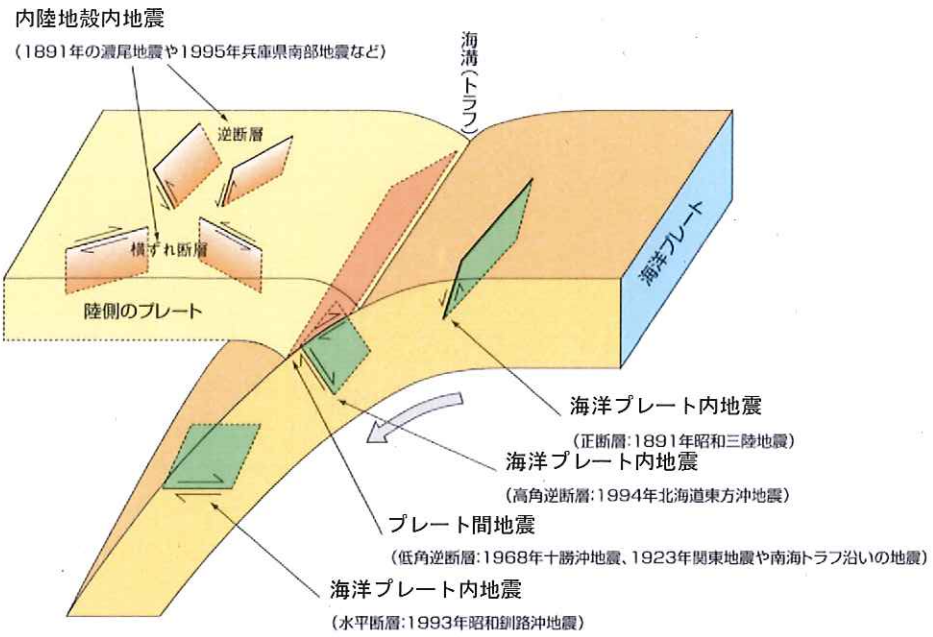
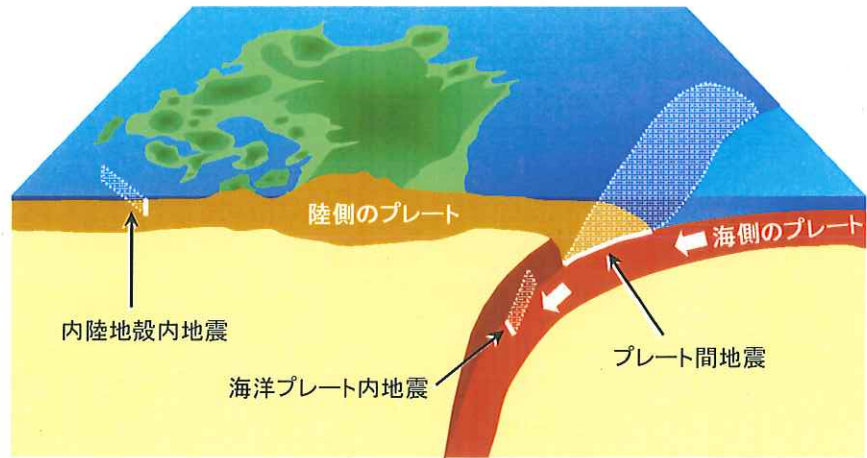
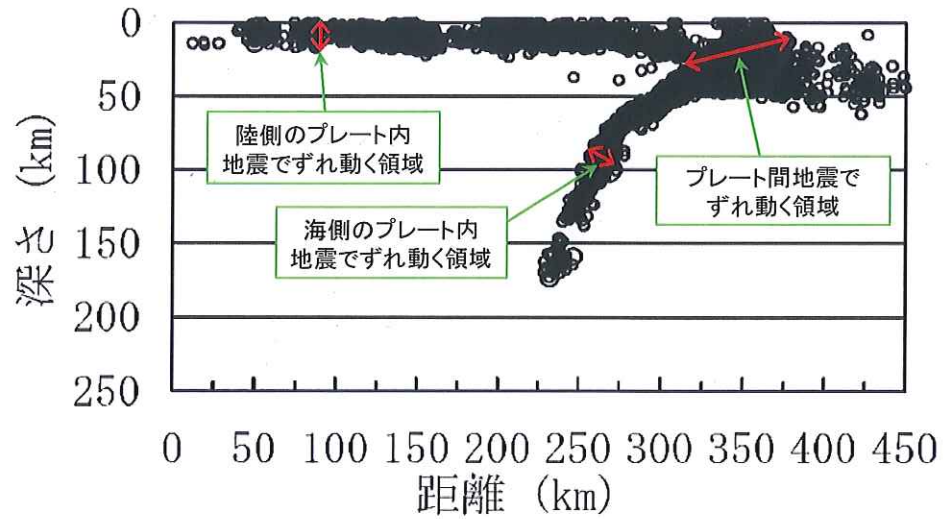


図3 地震の発生様式¹²

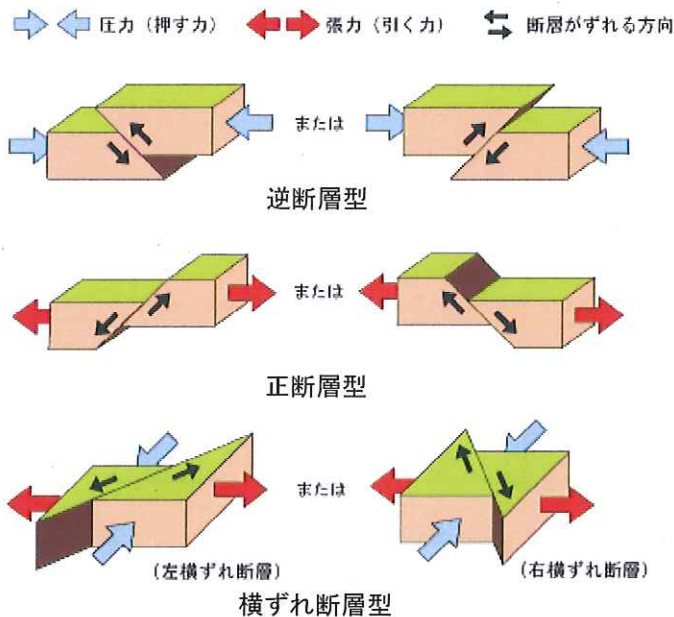


九州のプレート構造の模式図



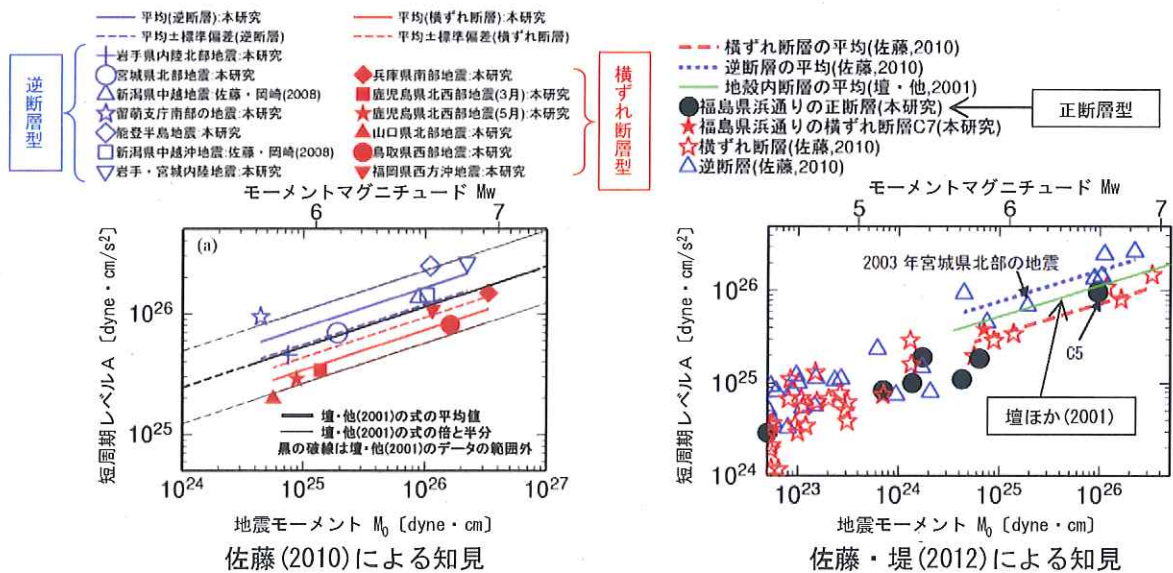
九州で発生する微小地震の鉛直分布

図4 九州のプレート構造と微小地震の鉛直分布



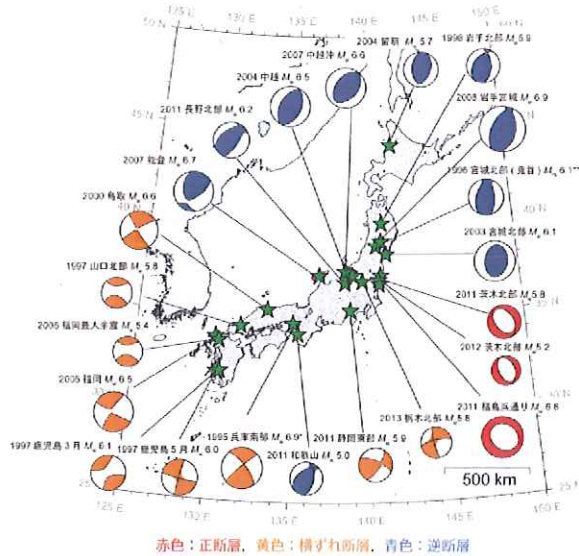
- 日本列島を囲む4つのプレートの押合いによって働く力の向きや大きさの違い (応力場) により、断層のずれ動き方 (断層型) にも違いがでる。
- 断層型は、逆断層型・正断層型・横ずれ断層型の3つの型に分けられる。

図5 逆断層型・正断層型・横ずれ断層型のイメージ



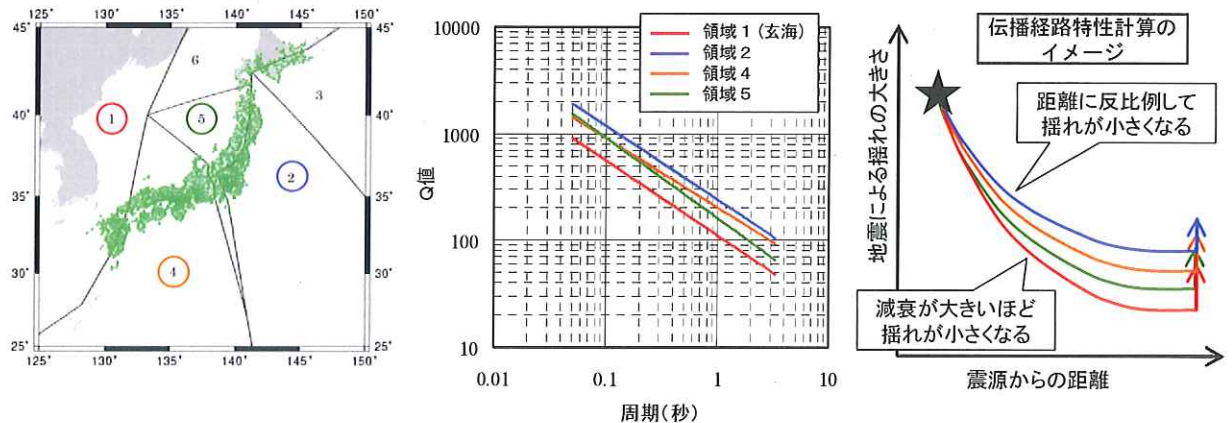
- 短周期領域での地震による揺れの大きさを表す短周期レベルAという重要な指標によると、正断層型・横ずれ断層型の地震は、逆断層型の地震より、地震による揺れが小さい傾向が見られる。

図6 断層型による揺れの大きさの違い



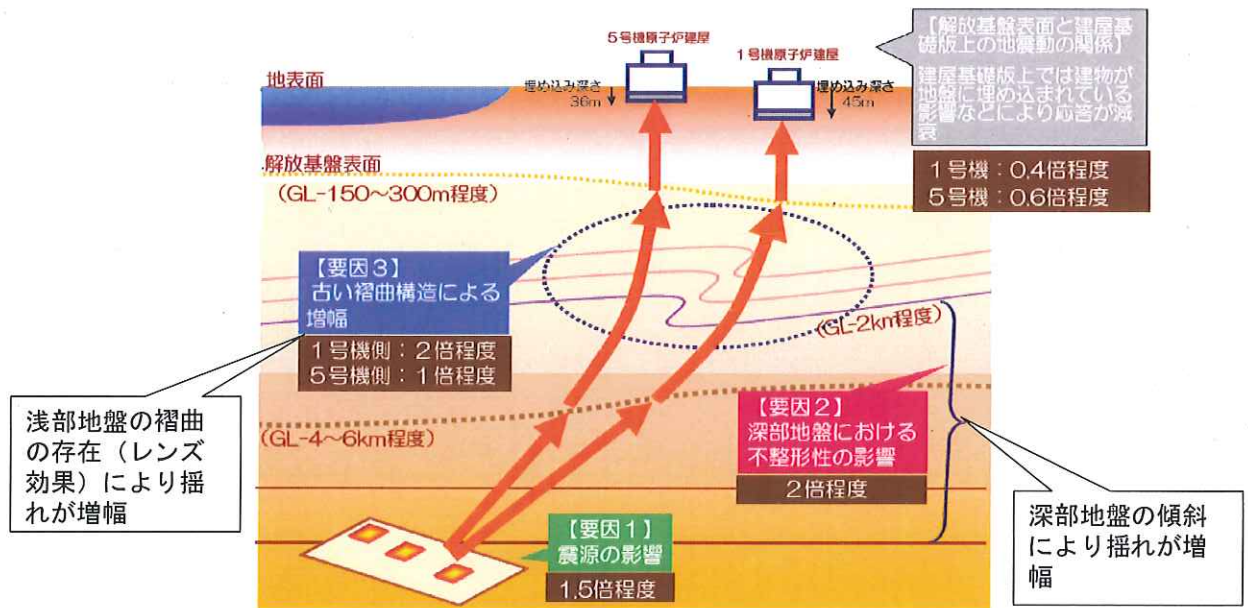
- 「発震機構解」とは、地震を起こした断層が地下でどのような動いているか、その断層がどのように動いたか、地震を起こす元となった力がどのようなであったか、を示すもの。
- 近年、日本列島で発生した内陸地殻内地震の発震機構解を見ると、概ね東北日本は逆断層型、西南日本は横ずれ断層型の地震に大別される。

図7 近年、日本列島で発生した内陸地殻内地震の断層型



- 一般的には、地震による揺れは震源からの距離に反比例して小さくなる。
- 伝播経路における減衰は、Q値という指標で表される。(Q値が大きいほど減衰が小さく、小さいほど減衰は大きい。)
- 距離が遠いほど、地震による揺れは小さくなる。
- 地震波が伝播する過程における減衰が大きいほど、地震による揺れは小さくなる

図8 伝播経路特性のイメージ



地震動が大きくなった要因の概念図

○ 深部地盤の傾斜や浅部地盤の褶曲の存在により、地震による揺れが増幅する場合があります。

図9 サイト特性のイメージ（東京電力柏崎刈羽原子力発電所の例）

(3) 地域的な特性によって特徴的な揺れが発現した例

1995年兵庫県南部地震においては、震源からの地震波の重なり合いや地盤の影響によって揺れが集中し、大きな被害を招くような「強震動パルス¹³」が発生した（図10）。これは、地域的な特性（震源特性・伝播経路特性・サイト特性）が影響したものである。

また、2003年十勝沖地震においては、石油タンクのスロッシング¹⁴による火災を引き起こすような「長周期」地震動が発生した（図11）。これも、地域的な特性（震源特性・伝播経路特性・サイト特性）が影響したものである。

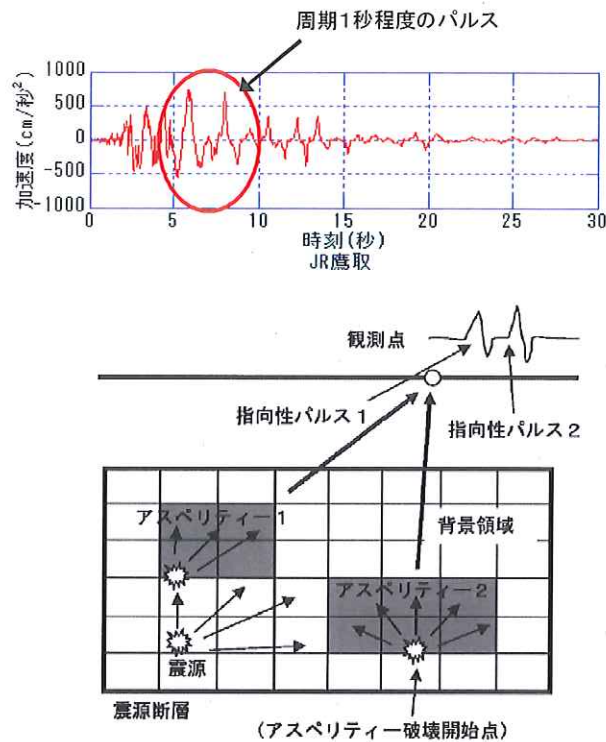


図 1 0 1995 年兵庫県南部地震における「強震動パルス」

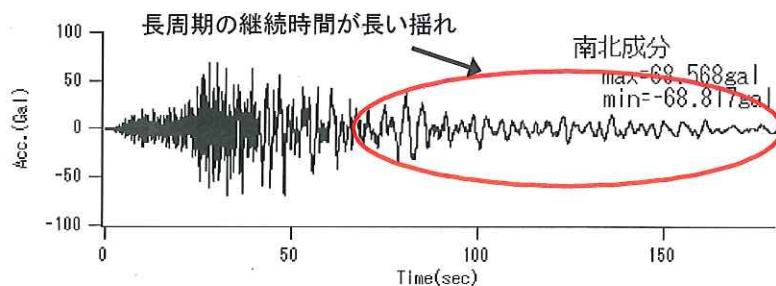


図 1 1 2003 年十勝沖地震における「長周期」地震動

2 本件原子力発電所敷地周辺で発生する地震

本件原子力発電所は、陸側のプレート上に位置しており、海側のプレートから 200km 程度以上離れているため (図 4)、海側のプレートに起因するプレート間地震や海洋プレート内地震による揺れの影響よりも、内陸地殻内地震による影響の方が大きい。実際に、本件原子力発電所敷地周辺において過去に発生し、文献や観測記録から確認できる最大の地震は、内陸地殻内地震である 1700 年壱岐・対馬の地震や 2005 年 3 月 20 日の福岡県

西方沖地震で、マグニチュード7程度である。

また、本件原子力発電所が位置する北部九州地方では、「ひずみ」がほとんど確認されず、実際に発生する地震の断層型も逆断層型より揺れが小さい横ずれ断層型が主である（図7）。

加えて、本件原子力発電所敷地周辺においては、地震波が伝播する過程における減衰が国内の他の地域に比べて大きい傾向にあり（図8：領域1）、地震の揺れを大きく増幅させるような地盤（地層）の褶曲等も見当たらない。

以上のとおり、本件原子力発電所敷地周辺は、地震動が大きくなるような地域的な特性がある。（詳細は第4の2（2）で述べる。）

第3 地震動策定手法の発展と被告九州電力の対応

1 玄海3号機及び4号機建設時の基準地震動の策定

（1）策定方針

玄海3号機及び4号機建設時は、昭和53年に制定された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（以下「旧指針」という。）に基づき、基準地震動 S_1 及び S_2 ¹⁵を策定して耐震設計を行った。玄海3号機及び4号機建設時の基準地震動 S_1 及び S_2 の策定フローは図12に示す通りであり、基準地震動 S_1 は「設計用最強地震」を考慮して策定し、基準地震動 S_2 は「設計用限界地震」及び「直下地震」を考慮して策定した。

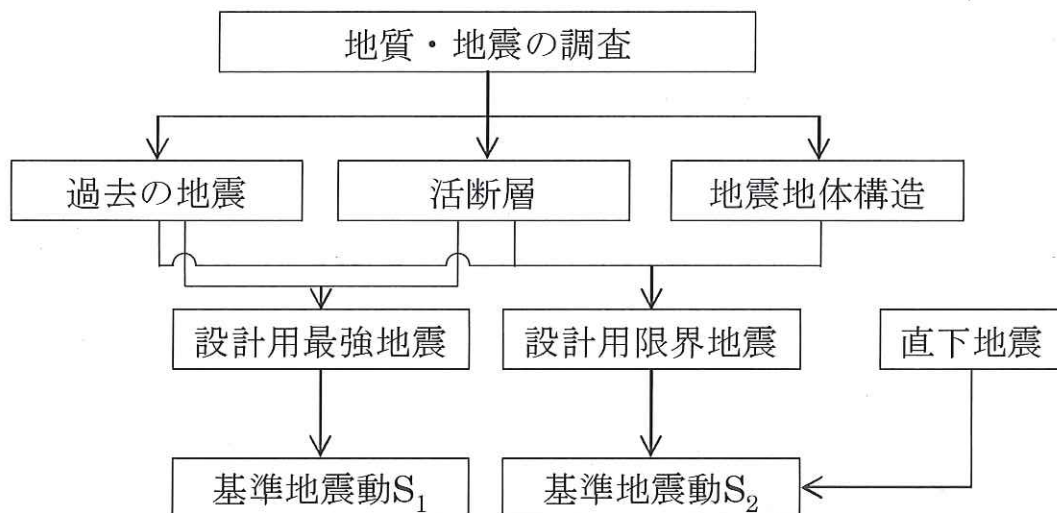


図 1 2 玄海 3 号機及び 4 号機基準地震動 (S₁, S₂) の策定フロー

(2) 基準地震動 S₁ の策定

ア 「設計用最強地震」は、i 歴史的資料から過去において敷地またはその近傍に影響を与えたと考えられる地震が再び起こり、敷地及びその周辺に同様の影響を与えるおそれのある地震、ii 近い将来敷地に影響を与えるおそれのある活動度の高い活断層¹⁶による地震のうちから最も影響の大きいものを想定するものとされ、被告九州電力は、地質調査及び文献調査の結果をもとに、1700 年壱岐・対馬付近の地震（マグニチュード 7.0、震央距離¹⁷35km）を設計用最強地震として考慮した。

イ この設計用最強地震から策定した基準地震動 S₁ の最大加速度¹⁸は 188 ガルであった。

(3) 基準地震動 S₂ の策定

ア 「設計用限界地震」は、地震学的見地に立脚し設計用最強地震を上回る地震について、i 過去の地震の発生状況、ii 敷地周辺の活断層の性質、iii 地震地体構造¹⁹に基づき工学的見地からの検討を加え、最も影響の大きいものを想定するものとされ、被告九州電力は、地質調査及び文献調査の結果をもとに、地震地体構造の見地から想定する地震（マグニチュード 7.5、震央距離 35km）を設計用限界地震として考

慮した。

イ また、実際に起きる地震との関連はないが、その程度の地震が発生したと仮定しても安全が保たれるように耐震設計を行っておくとの観点から、「直下地震」(マグニチュード 6.5, 震源距離 10km) も考慮するよう要求されていたため、これを考慮した。

ウ 以上の「設計用限界地震」及び「直下地震」から策定した基準地震動 S_2 の最大加速度は、それぞれ 275 ガル及び 370 ガルであった。

2 1995 年兵庫県南部地震を契機とした知見と耐震設計審査指針の改訂

(1) 1995 年兵庫県南部地震を契機とした知見

1995 年兵庫県南部地震では、日本で初めて震源近傍で強震動(被害をもたらすような強い地震動)が観測され、「震源特性」、「伝播経路特性」及び「サイト特性」が強震動やそれによる被害に大きく影響していることが明らかになった。これによって、将来の地震における強震動を高精度で予測するためには、それら 3 つの特性(地域的な特性)を考慮した地震動評価を行う必要があることが広く認識され、地震に関し様々な調査及び観測が行われた。その結果、地震学や地震工学等の新たな知見が急速に蓄積された。

具体的には、1995 年兵庫県南部地震では、震源となった断層の直上ではなくやや離れた所に「震災の帯」と呼ばれる被害の集中域が現れたメカニズムが詳細に分析された。その結果、この現象は震源における断層破壊の進行方向で地震動が大きくなる指向性と、地下構造による地震波の増幅との相乗効果によることが、種々の研究で明らかになった。この経験を契機として、文部科学省に地震調査研究推進本部が設置され、全国の基盤的観測網の構築と併せて、活断層調査、地下構造調査等が行われた。強震動観測網の充実で、大きな地震が起きると精度良い地震動が記録され、その解析により直ちに震源断層の破壊過程が断層モデルとして計算されることなどにより、「震源特性」に係る知見が蓄積された。その結果、「震源特性」のうち強震動に直接影響する短周期レベル A²⁰に

ついて、壇ほか（2001）²¹や佐藤（2010）²²等の知見により、日本海溝沿いの太平洋プレートで発生する宮城県沖のプレート間地震は他の地域と比べて短周期レベルAが大きいことや、内陸地殻内地震のうち横ずれ断層型・正断層型の地震は逆断層型の地震に比べて短周期レベルAが小さいことなどの地域的な特性が明らかになった。また、都市部の関東平野、濃尾平野、大阪平野を中心に地下構造調査が行われ、各地域の「伝播経路特性」及び「サイト特性」による影響が検討された。さらには、南海トラフ沿いの海域についても詳細な地下構造調査が行われた。

これらの知見の蓄積に伴い、地震動評価手法に関する研究が大きく進展し、断層モデルを用いた手法に関する研究が急速に進み、強震動予測レシピ等が整備された結果、「震源特性」、「伝播経路特性」及び「サイト特性」を地域的な特性を踏まえて詳細に考慮する地震動評価手法が確立し、一般的に用いられるようになった。

（2）耐震設計審査指針の改訂

上記（1）で述べた地震動評価手法の発展を踏まえて、平成18年に耐震設計審査指針（旧指針）が改訂された（以下「改訂指針」という。）。改訂指針では、旧指針と比べ基準地震動の策定に係る地震動評価手法が大幅に高度化され、震源を特定した地震動評価、すなわち地下の震源断層の位置、長さ、幅及び傾斜角等を具体的に設定して、「応答スペクトルに基づく地震動評価及び断層モデルを用いた手法による地震動評価の双方を実施すること」、「地震動評価に当たっては、地震発生様式、地震波伝播経路等に応じた諸特性（その地域における特性を含む。）を十分に考慮すること」、さらには「基準地震動 S_s^{23} の策定過程に伴う不確かさ（ばらつき）については、適切な手法を用いて考慮すること」が明記され、「震源特性」、「伝播経路特性」及び「サイト特性」を、詳細な調査に基づき、地域的な特性を踏まえて詳細に考慮することとされた。

さらに、前述の基準地震動の策定方法の高度化に加え、活断層評価年

代の拡張（12～13 万年前以降）及び地質調査等の高度化等が図られ，原子力事業者は，より入念な調査を実施し，より高度な手法によって，基準地震動を策定することとなった。改訂指針では，旧指針における基準地震動 S_1 及び基準地震動 S_2 が図 1 3 に示すとおり「基準地震動 S_s 」に一本化された。

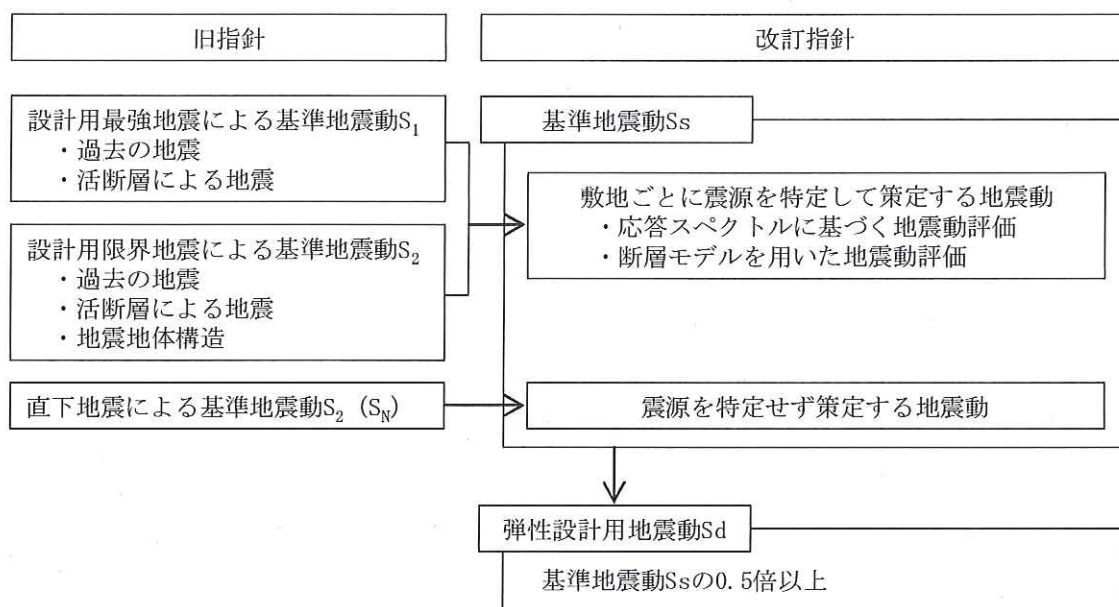


図 1 3 旧指針と改訂指針の比較

具体的には，基準地震動 S_2 をもたらず設計用限界地震の考慮の対象とされていた「活断層による地震」及び「地震地体構造による地震」は，設計用最強地震とともに「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の評価の中で考慮されることとなった。

一方で，旧指針の直下地震に対応するものとして，震源と活断層を関連付けることが困難な過去の内陸地殻内地震について得られた震源近傍の観測記録を収集し，これらを基に敷地の地盤物性等を加味して策定する「震源を特定せず策定する地震動」が定められた。すなわち「震源を特定せず策定する地震動」は旧指針の直下地震の考え方を踏襲して，さらに耐震安全性を確保するため耐震設計を行っておくとの観点から策定するものである。

以上の改訂指針を踏まえた耐震バックチェックにおいて、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」から策定した基準地震動 S_s の最大加速度は 540 ガルであった。

3 2011 年東北地方太平洋沖地震等の知見と新規制基準の施行

2011 年東北地方太平洋沖地震及びこれによる津波に起因した福島第一原子力発電所事故を受けて、原子力規制委員会により、新規制基準が制定され平成 25 年 7 月に施行された。この新規制基準は、改訂指針と同様に、多数の専門家による議論を尽くし、2007 年新潟県中越沖地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震で得られた最新の知見を反映したより厳格な基準として策定されている。新規制基準の地震動評価において、「震源特性」、「伝播経路特性」及び「サイト特性」について地域性を含めて詳細に考慮するという点は、改訂指針から変更されていないものの、プレート間地震や海洋プレート内地震、並びに地下構造による地震波の「伝播経路特性」及び「サイト特性」の考慮に関する要求水準が高度化したため、従来より詳細な調査や確認が必要となった。

具体的には、「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」という。）において、敷地及び敷地周辺の地下構造（深部・浅部地盤構造）などが地震波の伝播経路特性に与える影響を適切に評価することや、地震動の継続時間、振幅包絡線の経時的変化等の地震動特性を適切に評価することなどが要求されている。

被告九州電力は、「第 4 新規制基準を踏まえた基準地震動 S_s の策定」で詳述するように、新規制基準及び審査ガイドに基づき、過去に基準地震動を超過した地震から得られた知見等も取り入れ詳細な調査を実施し、多くの観測データを用いて地域的な特性を十分に把握した上で、安全側の地震動評価を行い基準地震動（最大加速度 540 ガルの S_s -1, 最大加速度 268 ガルの S_s -2, 最大加速度 524 ガルの S_s -3, 最大加速度 620 ガルの S_s -4, 最大加速度 531 ガルの S_s -5）を策定している。

第4 新規制基準を踏まえた基準地震動 Ss の策定

1 策定方針

新規制基準における基準地震動 Ss 策定のフローは図1-4に示す通りであり、基準地震動は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」を考慮して策定した。

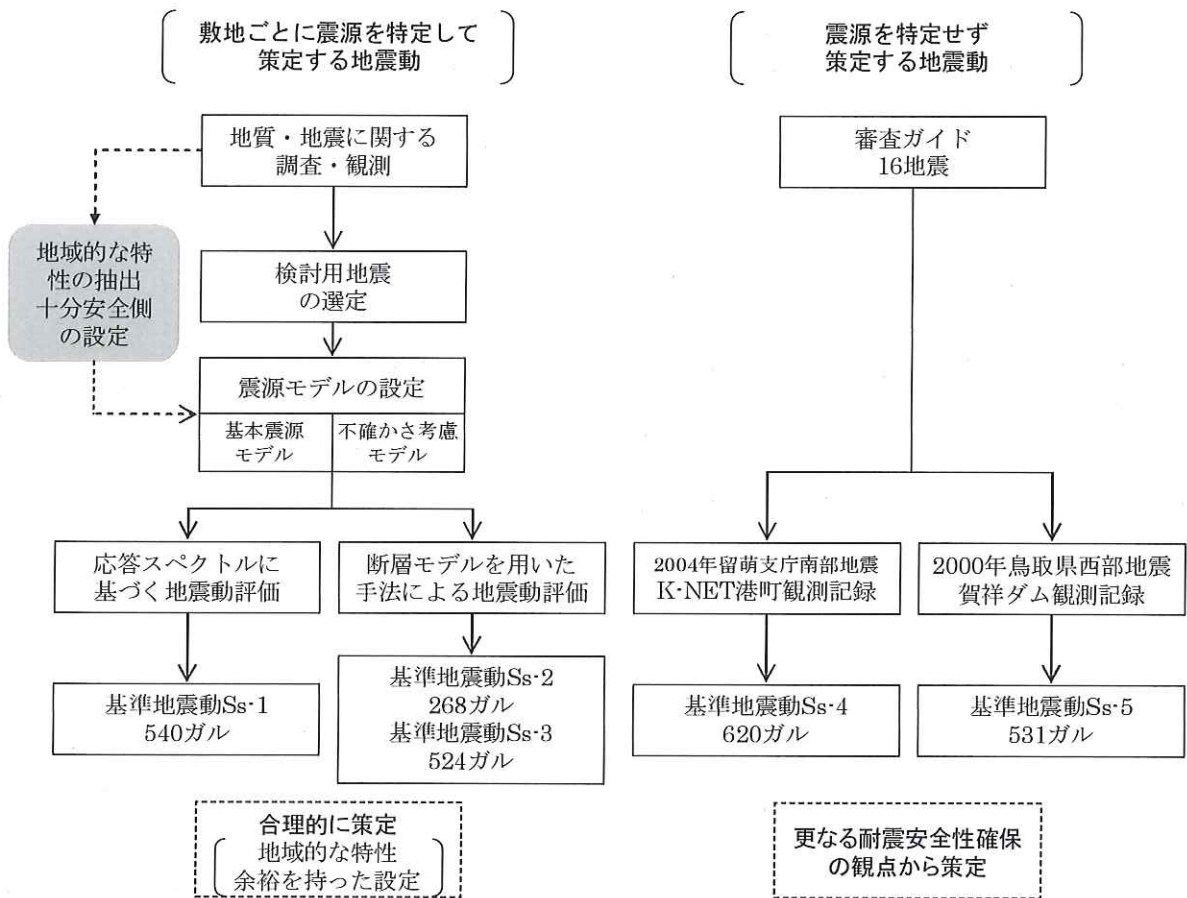


図1-4 基準地震動 Ss の策定フロー

2 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

(1) 評価手法

被告九州電力は、地質・地震に関する詳細な調査・観測結果を踏まえ、敷地に特に大きな影響を与えると予想される地震（以下「検討用地震」という。）を選定し、「応答スペクトルに基づく地震動評価」及び「断層

モデルを用いた手法による地震動評価」の前提となる「基本震源モデル」の設定を行った。その際には、地域的な特性を反映させ、安全側となるような設定を行っている。さらに、「応答スペクトルに基づく地震動評価」による地震動と「断層モデルを用いた手法による地震動評価」による地震動を考慮した上で、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」を策定した。

(2) 地質・地震に関する調査・観測

ア 概要

本件原子力発電所の敷地は、佐賀県東松浦郡玄海町北部の半島の先端部に属している。本件原子力発電所の基準地震動 S_s の策定にあたって、本件原子力発電所敷地周辺で発生する地震の地域的な特性（「震源特性」、「伝播経路特性」及び「サイト特性」）を把握するため、表 1 に示す、地質・地震に関する調査・観測を実施した。

表 1 地質・地震に関する調査・観測

調査・観測名	震源特性	伝播経路特性	サイト特性
イ 地震調査	○	—	—
ウ 地質調査	○	—	—
エ 地下構造調査	—	○	○
オ 地震観測	○	○	○

イ 敷地周辺の地震調査

本件原子力発電所の敷地周辺で発生する地震について、(ア) 地震発生様式、(イ) 地震発生状況、(ウ) 被害地震及び(エ) 断層型及び応力場に関する調査を以下のとおり実施した。

(ア) 地震発生様式

本件原子力発電所が位置する九州地方北部における地震は、陸域及び海域の浅いところで発生する内陸地殻内地震、太平洋側沖合の南海トラフから陸の方へ傾き下がるプレート境界付近で発生するプレート間地震、海洋プレート内で発生する海洋プレート内地震及びその他の地震に分けることができる。

内陸地殻内地震については、九州地方北部でマグニチュード 7 程度の地震が発生している。

プレート間地震としては、太平洋側沖合の日向灘周辺でマグニチュード 7 クラスの地震が、十数年から数十年に一度発生している。

海洋プレート内地震としては、海溝付近またはそのやや沖合の沈み込む海洋プレート内で発生する地震及び海溝よりも陸側の沈み込んだ海洋プレート内で発生する地震がある。陸側に深く沈み込んだプレート内では、稀に規模の大きな地震が起こることがある。

その他の地震としては、島原半島で雲仙岳の火山活動に伴った地震活動が見られる。

(イ) 地震発生状況

敷地周辺におけるマグニチュード 5 未満の微小地震の震央分布を図 1 5～図 1 7 に示す。微小地震分布の震源データは、「気象庁地震カタログ²⁴⁾」のうち 1997 年 10 月から 2012 年 12 月までの期間に、深さ 0～30km、30～60km 及び 60～90km で発生したものである。

これらの図から、以下のような微小地震活動の特徴が見られる。

敷地から半径 100km 以内において発生した微小地震は、2005 年福岡県西方沖地震の余震及び島原半島周辺に活動域が見られる(図 1 5)。

敷地から半径 100km 以遠では、熊本地方で深さ 30km 以浅の地震帯が見られる(図 1 5)。

深さ 30～60km (図 1 6) では日向灘の南北に沿って、深さ 60km 以深(図 1 7) では内陸部の南北に沿って震源が高密度に存在する。

これは、フィリピン海プレートの沈み込みに関連したプレート間地震及び海洋プレート内地震である。

敷地から半径 100km 以内では、深さ 30km 以深のフィリピン海プレートの沈み込みに関連したプレート間地震及び海洋プレート内地震は見られない（図 1 6 及び図 1 7）。

なお、微小震源の鉛直分布は図 1 8 及び図 1 9 に示すとおりであり、上記のプレート間地震及び海洋プレート内地震が発生する領域は、本件原子力発電所の敷地から十分に距離が離れている。

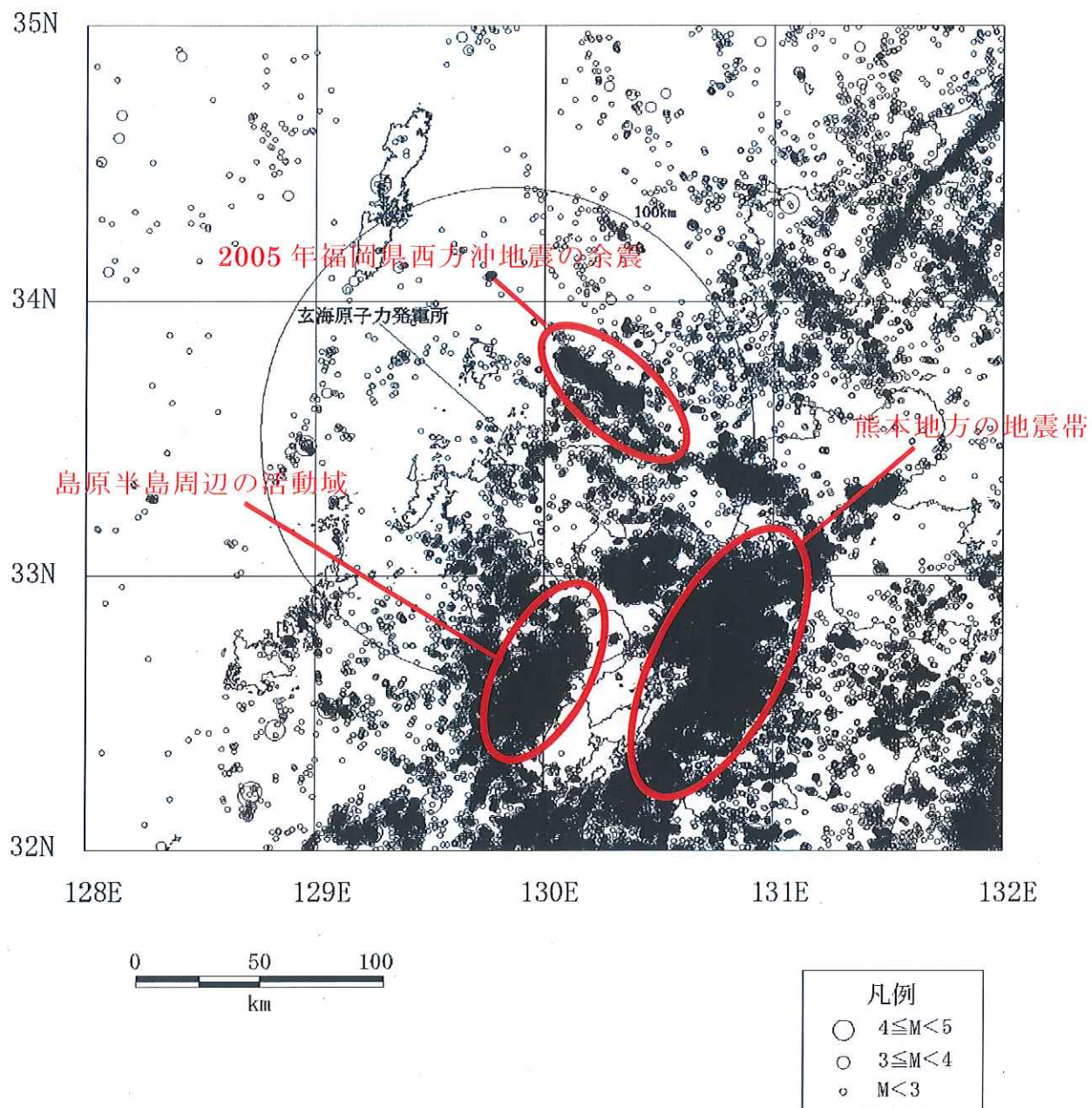


図15 気象庁地震カタログによる微小地震の震央分布（深さ0～30km）
（1997年10月～2012年12月）

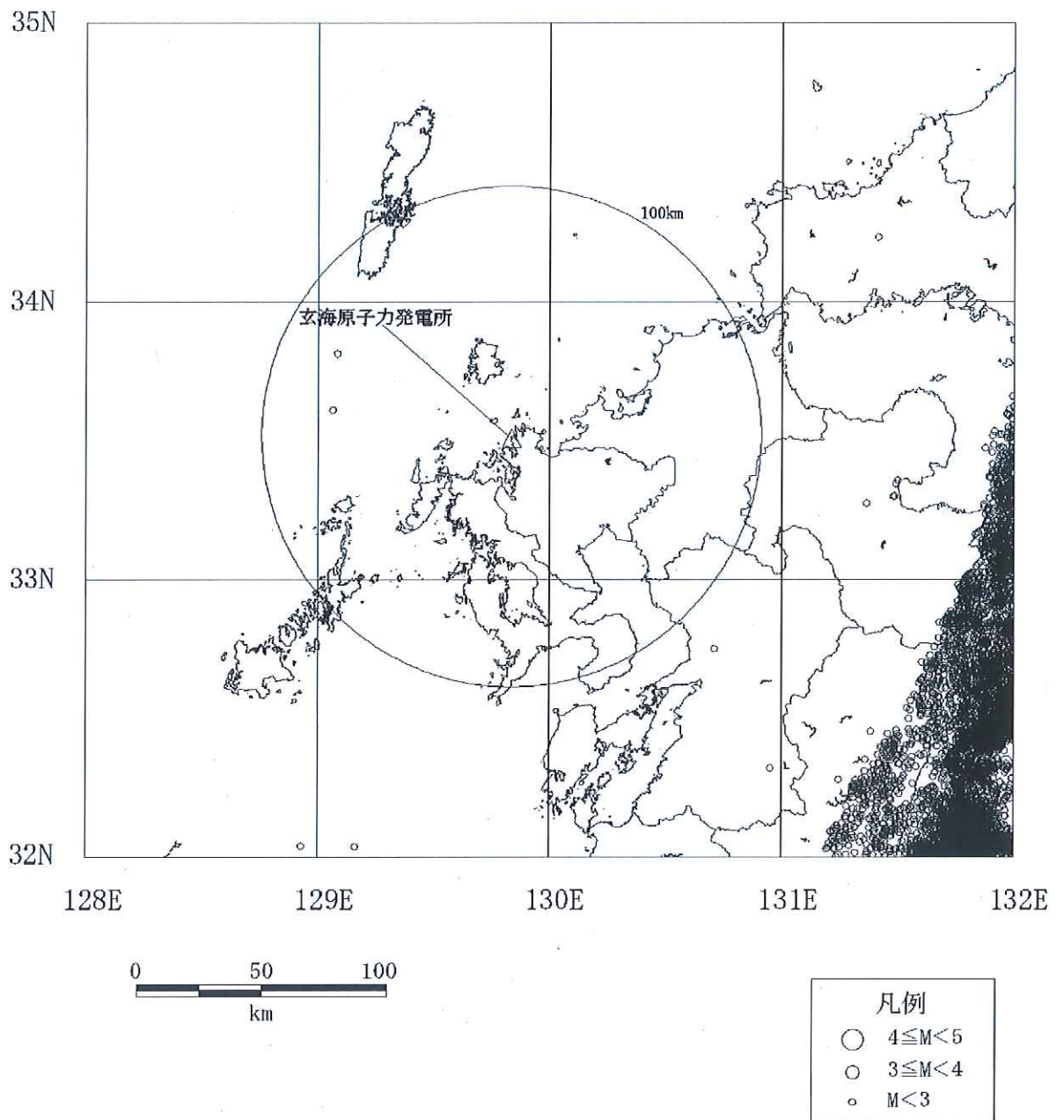


図16 気象庁地震カタログによる微小地震の震央分布 (深さ 30~60km)
(1997年10月~2012年12月)

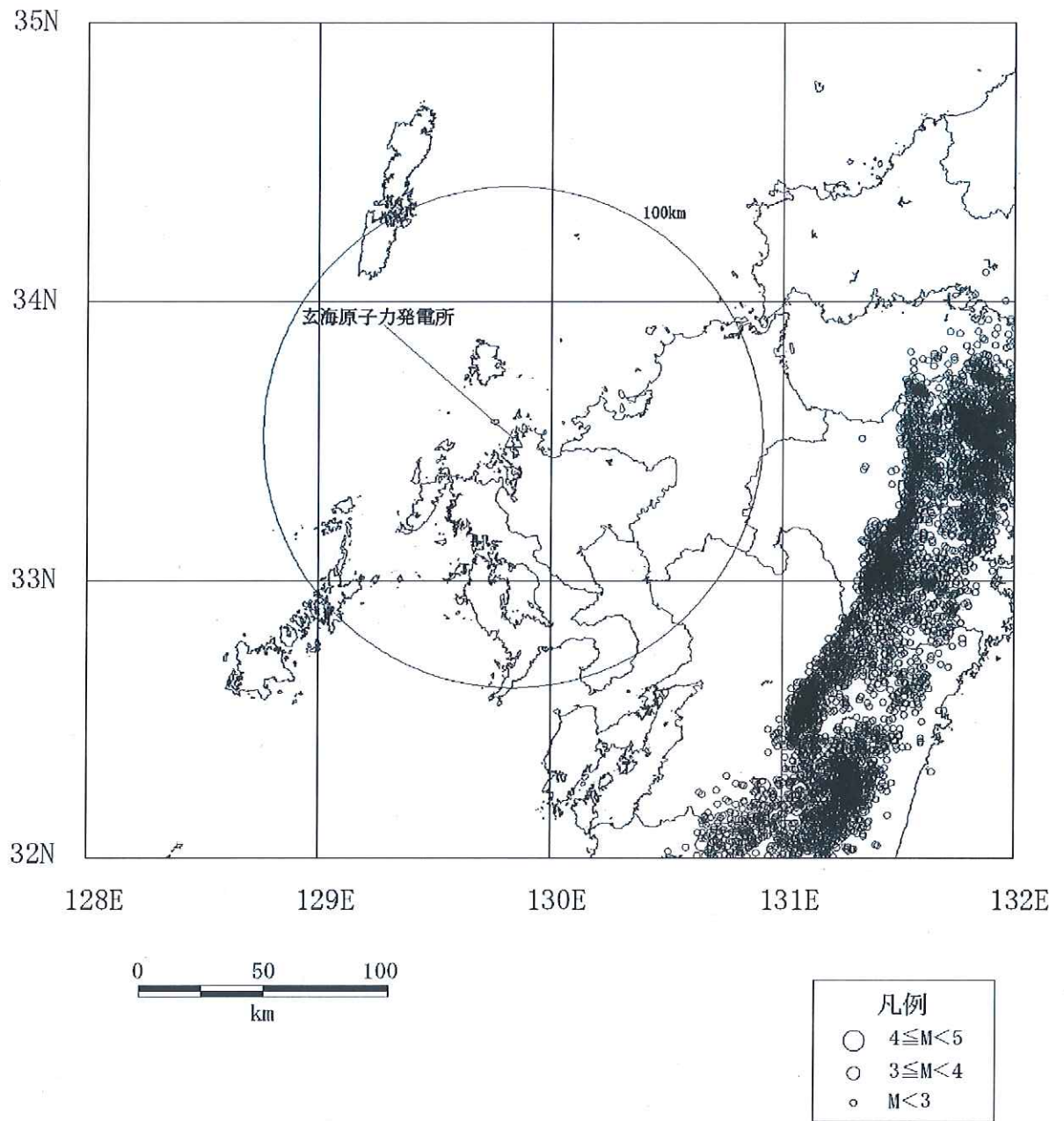


図17 気象庁地震カタログによる微小地震の震央分布（深さ 60~90km）
（1997年10月~2012年12月）

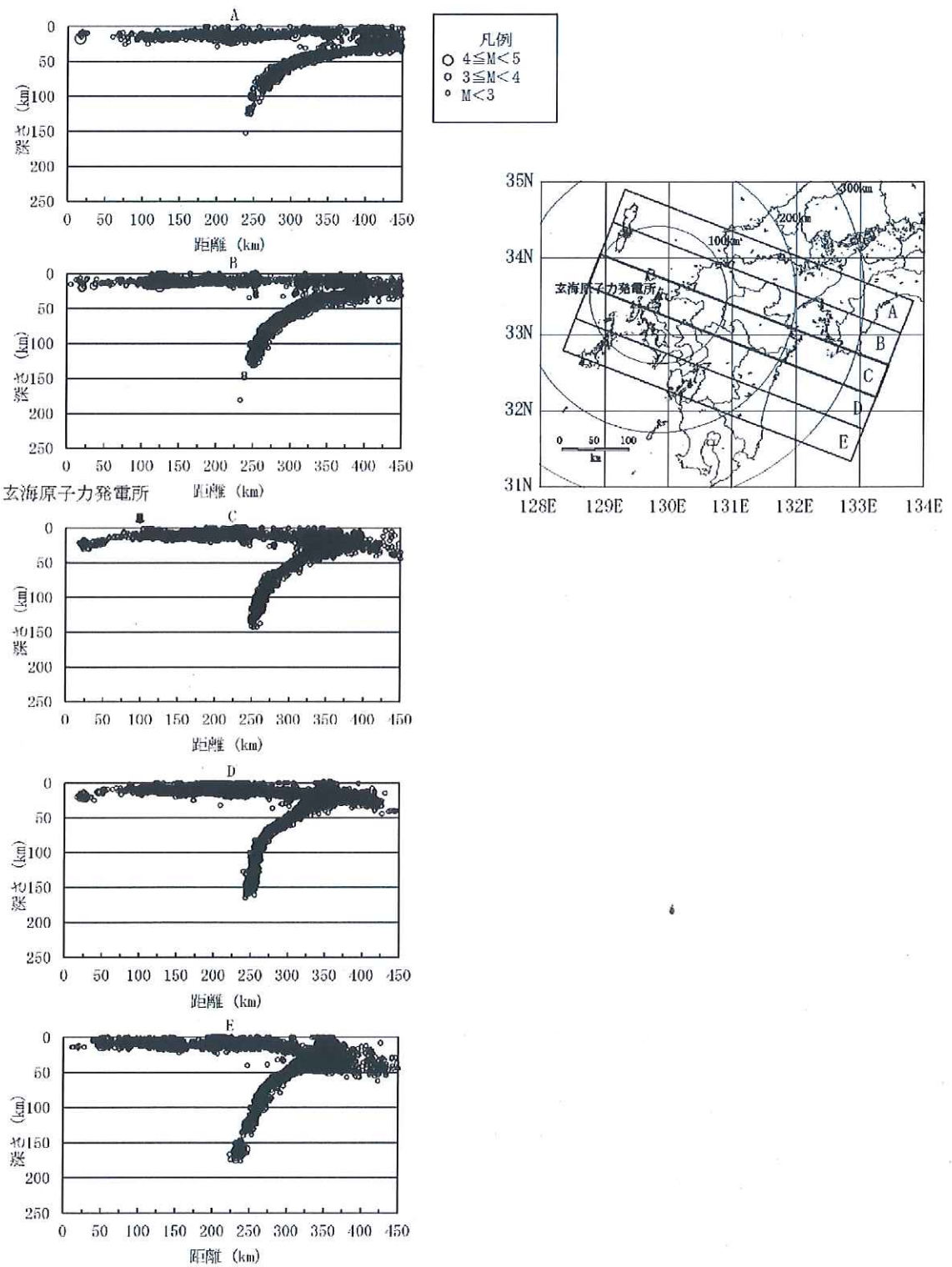
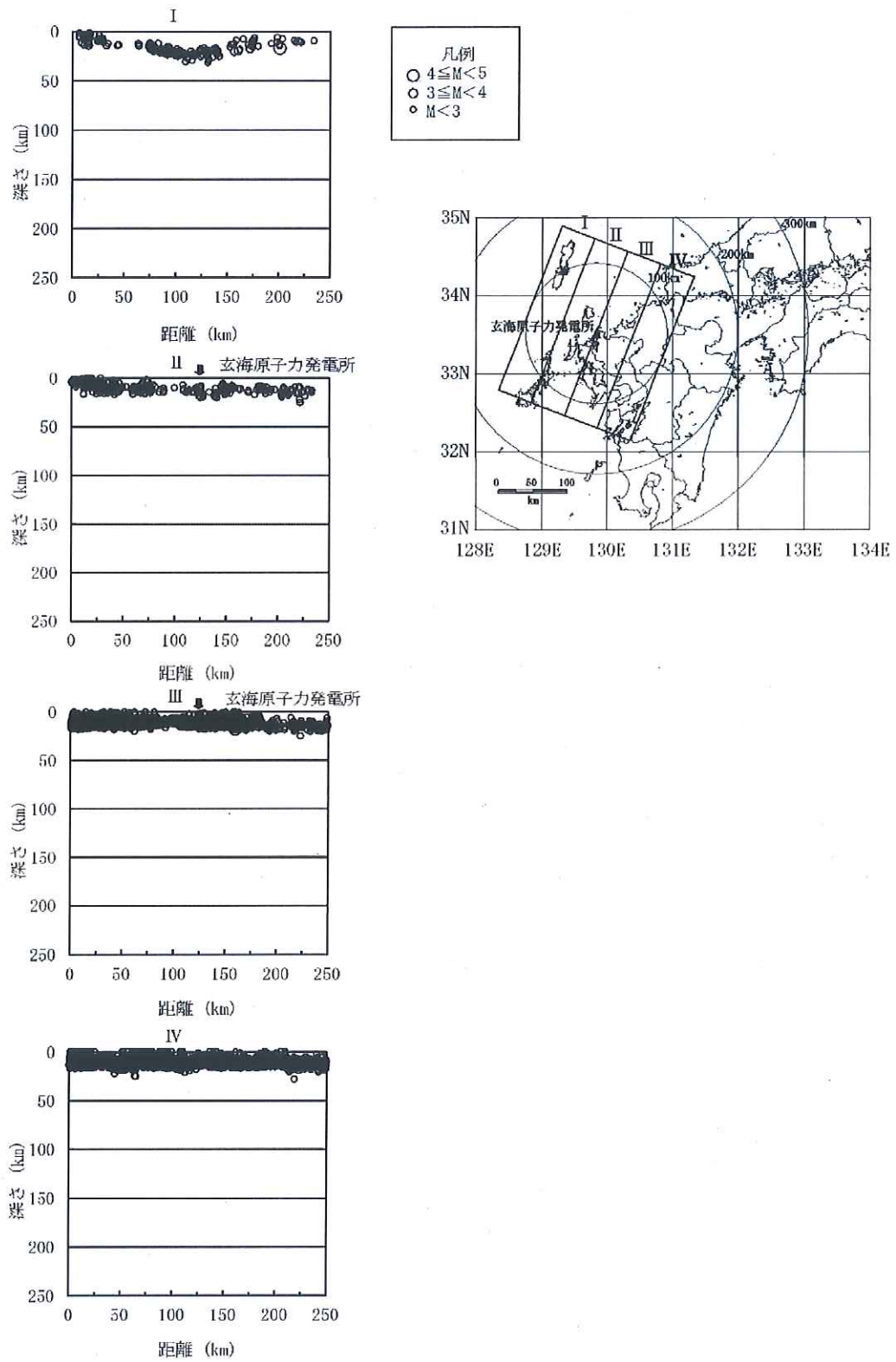


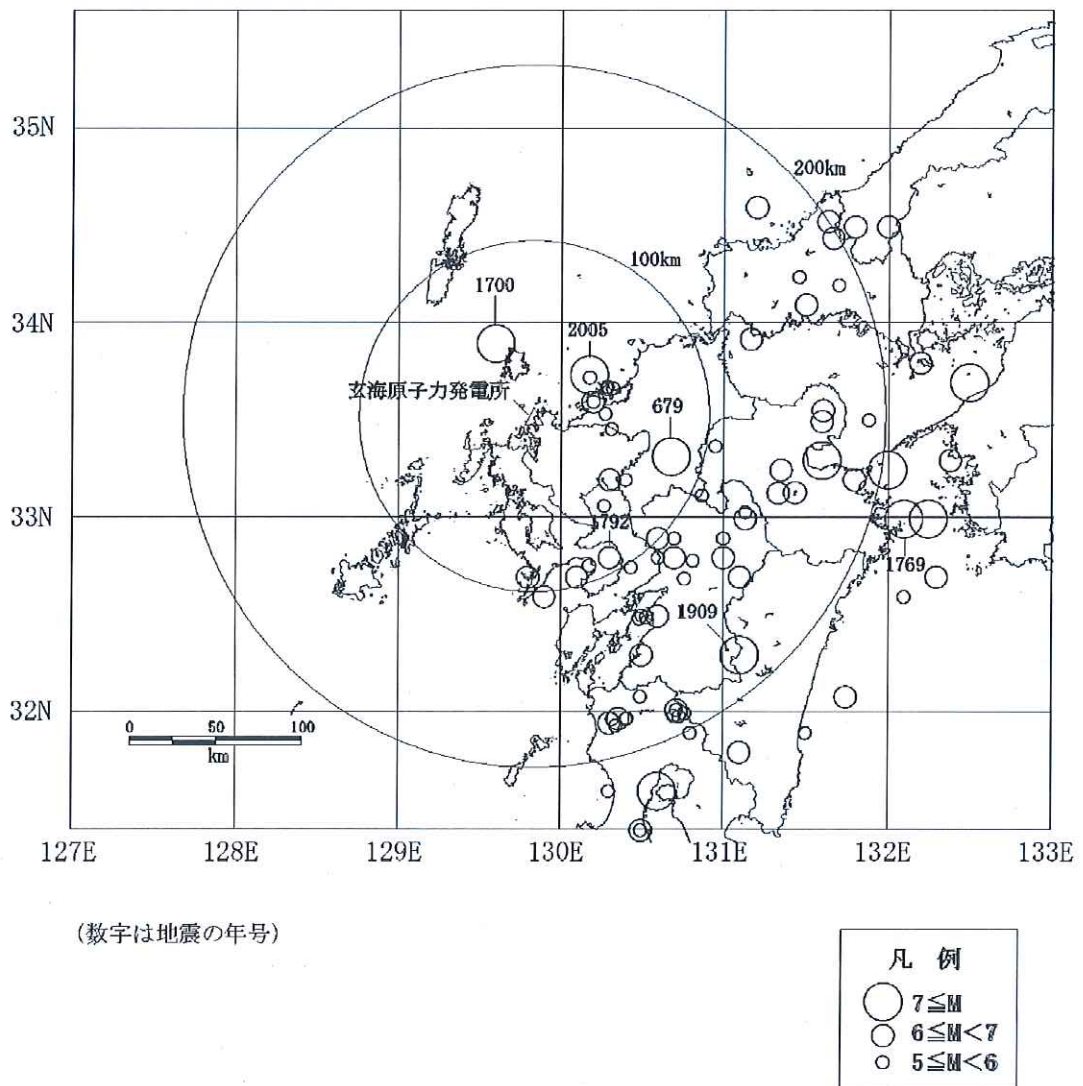
図18 気象庁地震カタログによる微小地震の震源鉛直分布 (1)
(1997年10月~2012年12月)



(1997年10月～2012年12月)

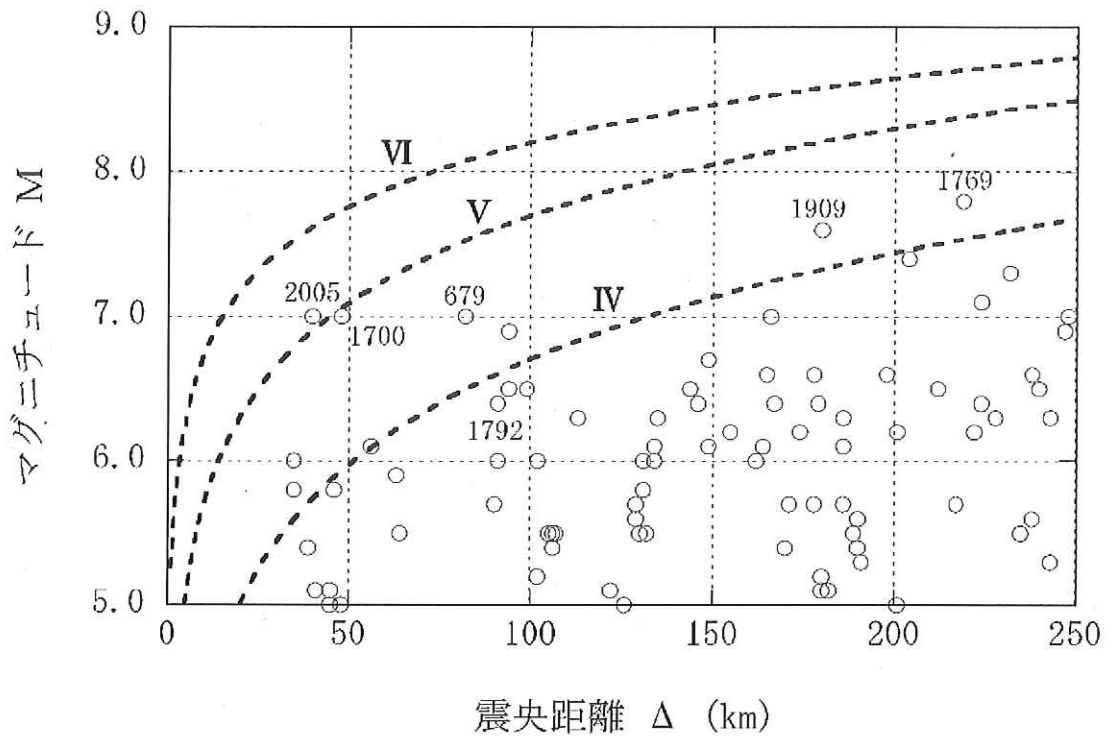
(ウ) 被害地震

日本国内の被害地震に関する地震史料や明治以降の地震観測記録を基に、主な地震の震央位置、地震規模等を取りまとめた地震カタログを用いた、敷地から 200km 程度以内の「敷地周辺の被害地震の震央分布」を図 20 に示す。図 20 に示した地震について、震央距離を横軸、マグニチュードを縦軸として描いたものが図 21 であり、敷地における旧気象庁震度階級区分も書き加えている。



※ 地震諸元に幅のあるものについては中央値を用いた。

図 20 敷地周辺の被害地震の震央分布 (679 年～2012 年 12 月)

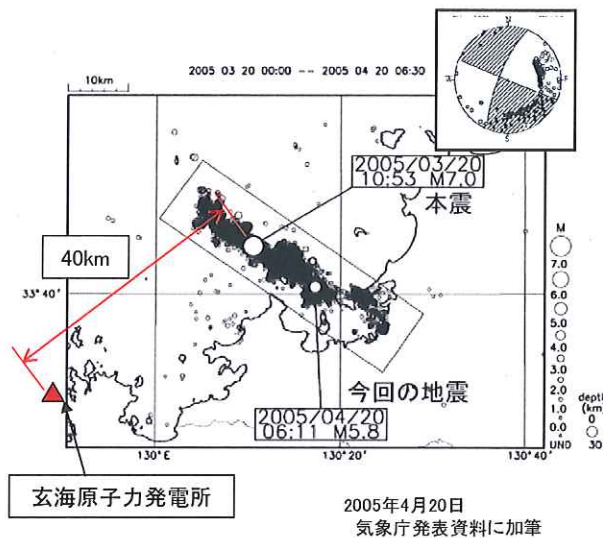


※ IV, V, VIは旧気象庁震度階級で、震度の境界線は村松(1969)及び勝又ほか(1971)による。
 ※ 地震諸元に幅のあるものについては中央値を用いた。

図 2 1 敷地周辺における過去の被害地震

図 2 0 によると、陸域及び海域の浅いところで発生する内陸地殻内地震として、敷地から半径 50km 以内において、1700 年壱岐・対馬の地震(マグニチュード 7.0)や 2005 年福岡県西方沖地震(マグニチュード 7.0)が発生している。2005 年福岡県西方沖地震の概要は図 2 2 のとおりであり、横ずれ断層型である。1700 年壱岐・対馬の地震及び 2005 年福岡県西方沖地震は、図 2 1 によると、敷地において、旧気象庁震度階級で震度 V (気象庁震度階級で震度 5 弱、以下「震度 5 弱」という。)程度以上と推定され、後述の検討用地震の選定対象とした。

2005年福岡県西方沖地震の概要

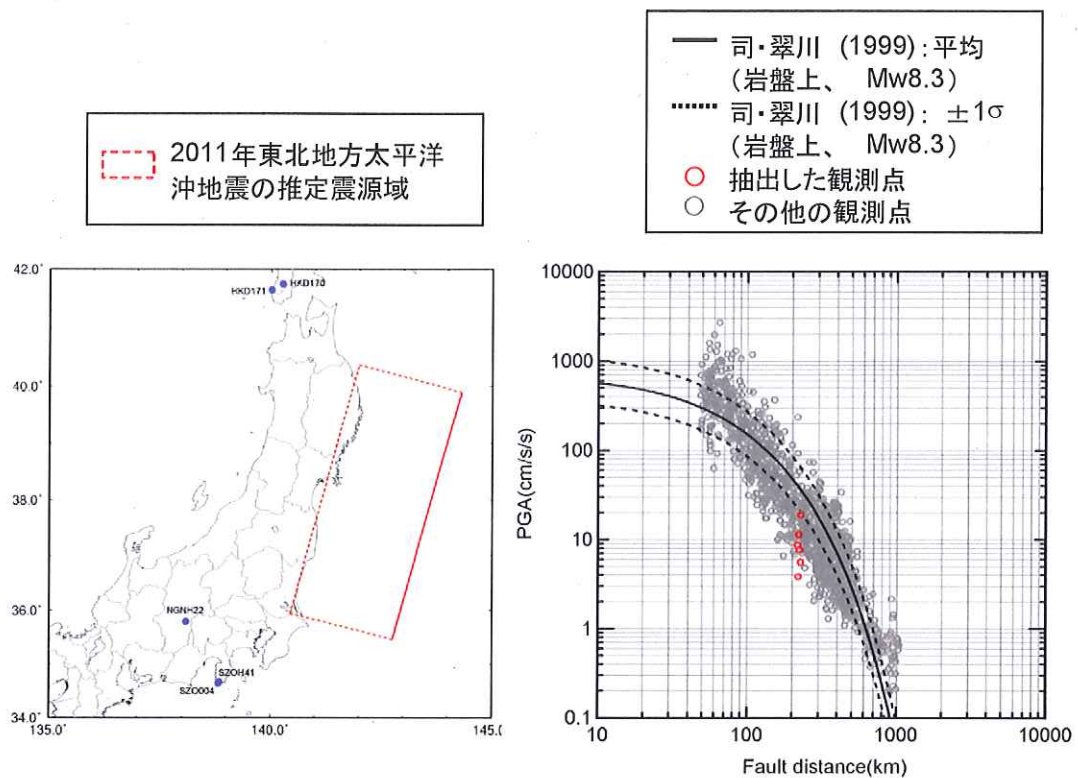


発生日時※	2005年3月20日 10時53分
マグニチュードM※	7.0
震源深さ※	9.24km
震央距離	40km
震源距離	41km
地震発生様式	内陸地殻内
断層タイプ	横ずれ

※気象庁発表値

図 2 2 2005 年福岡県西方沖地震の概要

図 2 0 によると、敷地からの震央距離が 200km 程度を超える日向灘周辺では、マグニチュード 7 クラスのプレート間地震が発生している。しかしながら、日向灘周辺で発生するプレート間地震は、その発生位置と敷地までの距離が十分に離れているため、敷地に大きな影響を与える地震ではない。プレート間地震として国内で最大規模の 2011 年東北地方太平洋沖地震（マグニチュード 9.0）で得られた観測記録のうち岩盤上の観測点からの距離と当該地震の震源からの距離が、本件原子力発電所とプレート境界との距離（200km 程度以上）とおおよそ同じ観測点における観測記録の最大加速度は、図 2 3 右図「距離減衰式²⁵による評価」のとおり、数ガル～20 ガル程度であり、本件原子力発電所の基準地震動 Ss-1（最大加速度 540 ガル）の方が明らかに大きい。なお、図 2 3 の右図の横軸は、2011 年東北地方太平洋沖地震の震源からの距離であり、縦軸は、各観測点における最大加速度を表している。



検討に用いる観測点
 ($X_{sh} \approx 220\text{km}$, $AVS30 \geq 500\text{m/s}$)

距離減衰式による評価

図 2 3 2011 年東北地方太平洋沖地震で得られた観測記録の検討結果

また、図 2 0 によると、敷地からの震央距離が 200km 程度の日向灘周辺から九州地方内陸部にかけて、海洋プレート内地震である 1909 年宮崎県西部の地震（マグニチュード 7.6）が発生している。しかしながら、海洋プレート内地震についても、その発生位置と敷地までの距離が十分に離れているため、敷地に大きな影響を与える地震ではない。

さらに、図 2 0 によると、その他の地震として、島原半島周辺の火山性の地震があるが、その発生位置から敷地まで約 100km であり、距離が十分に離れており、敷地に大きな影響を与える地震ではない。

(エ) 断層型及び応力場

九州地方の浅い陸域の地震（深さ 30km 以浅）を対象に、独立行政

法人防災科学技術研究所 広帯域地震観測網 F-net²⁶のデータを用い、1997年のF-net運用開始から2014年1月3日までの約16年間に発生した地震の発震機構解を図24に示す。これによると敷地周辺の浅い陸域の地震の発震機構解は、横ずれ断層型が多く、逆断層型や正断層型は少ないという特徴がある（図24の右下に見られる逆断層型の地震はプレート間地震）。数多くの観測記録を用いて、断層型毎に揺れの大きさを整理した知見（佐藤(2010)）によると、逆断層型の地震に比べ、横ずれ断層型の地震は、相対的に揺れが小さくなる（図25）。

また、全国のGPS観測結果（図26及び図27）によると、新潟県北部から中部地方北部を經由して近畿地方まで続く地域は、東西方向の圧縮応力場であり、その周辺よりも大きくひずんでおり、これらの地域は「ひずみ集中帯」と呼ばれている。九州地方のGPS観測結果（図28）によると、本件原子力発電所敷地周辺ではひずみがほとんど確認されず、「ひずみ集中帯」とは地域的な特性が異なる。

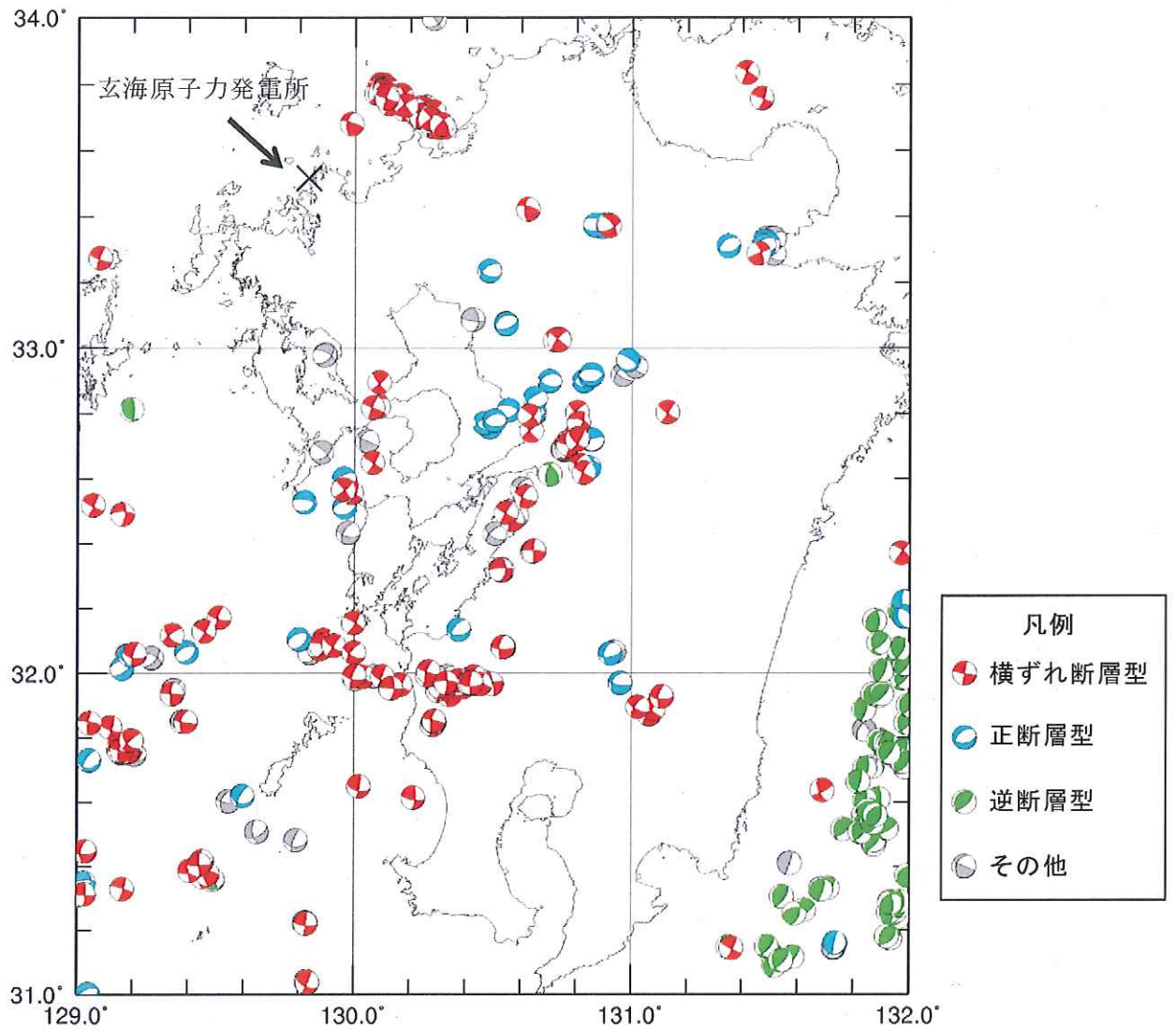


図 2 4 九州地域で発生した地震の発震機構解
 防災科学技術研究所 広帯域地震観測網 F-net
 (1997年 F-net 運用開始から 2014年 1月 3日, 深さ 30km 以浅)

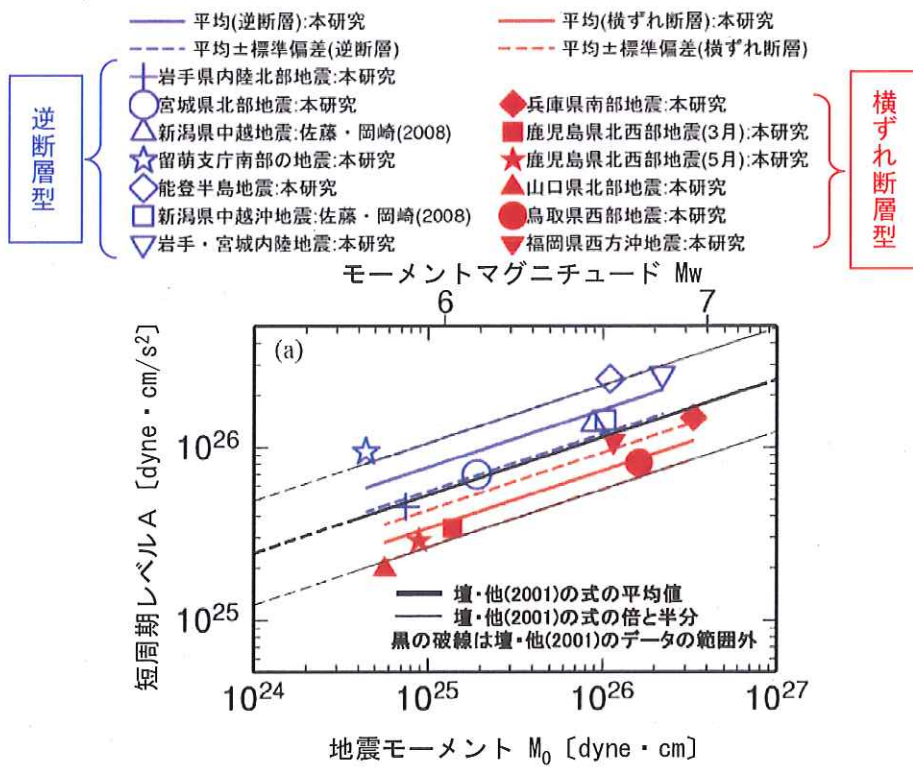


図 2 5 佐藤(2010)による知見

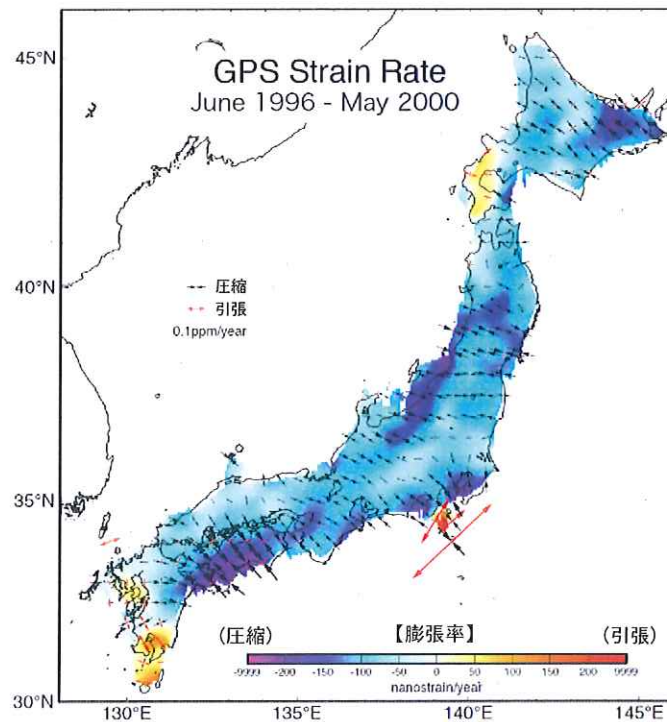


図 2 6 GPS Strain Rate (Sagiya(2004))

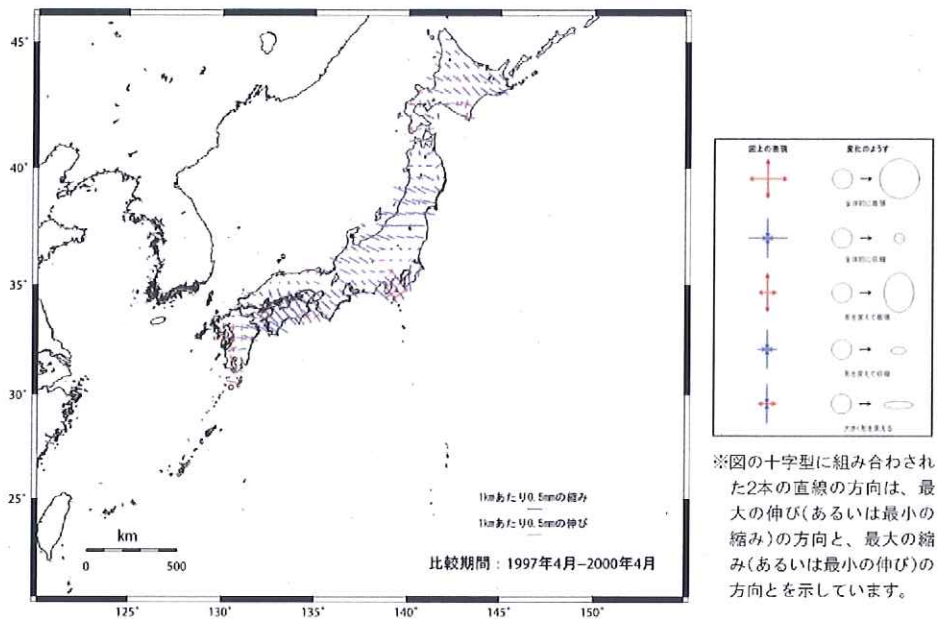


図2-11 GPSの観測から推定した日本列島の変形(1997年4月～2000年4月)
 [国土地理院のデータから作成]

図 2 7 GPS の観測から推定した日本列島の変形
 (全国, 1997 年 4 月～2000 年 4 月)

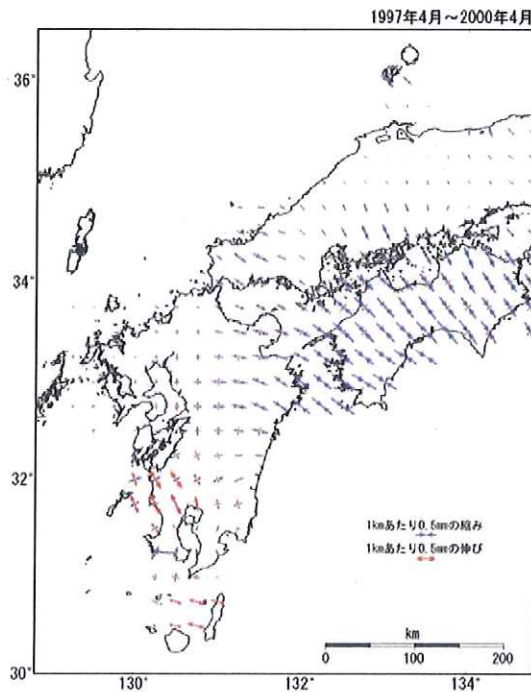


図 2 8 GPS の観測から推定した日本列島の変形
 (中国・四国・九州地方, 1997 年 4 月～2000 年 4 月)

ウ 地質調査

(ア) 敷地周辺及び敷地近傍の地質調査

① 概要

各種の調査及び観測等により、内陸地殻内地震等の震源として想定する「将来活動する可能性のある断層等（活断層等）」の位置、長さ等の評価が適切に行われている必要がある。

「将来活動する可能性のある断層等」については、後期更新世以降（約 12～13 万年前以降）の活動が否定できない断層等とした。

② 調査内容

敷地周辺及び敷地近傍の地質調査にあたっては、敷地からの距離に応じて、陸域及び海域について、文献調査、変動地形学的調査²⁷、地球物理学的調査²⁸、地表地質調査²⁹等の最新の手法による詳細な調査を実施し、既往調査結果や最新の知見も踏まえて検討を行い、断層の活動性や連続性を安全側に評価した。特に、敷地近傍については、より精度の高い詳細な調査を実施した。地質調査の概要を図 29 に示す。

a 陸域における地質調査内容

敷地を中心とするおおむね半径 100km 範囲の文献調査の結果を踏まえ、敷地を中心とする半径 30km の範囲及びその周辺陸域において、変動地形学的調査、地表地質調査及び地球物理学的調査を実施した。

変動地形学的調査としては、主に国土地理院で撮影された縮尺 4 万分の 1、2 万分の 1 及び 1 万分の 1 の空中写真並びに同院発行の縮尺 5 万分の 1 及び 2 万 5 千分の 1 の地形図を使用して、空中写真判読等を行い、活断層等に起因した変動地形の可能性のある地形（以下「リニアメント」という。）を抽出した。

地表地質調査としては、文献に示されている活断層、推定活断層及びリニアメント並びに空中写真判読によるリニアメントを対

象に地表踏査等を実施し、これらの調査結果に基づいて敷地周辺陸域の地質及び地質構造の検討を行った。

地球物理学的調査としては、重力探査³⁰を実施し、海域を含めた範囲の解析を行った。

また、敷地近傍における地質及び地質構造を詳細に把握するため、敷地周辺における調査結果を踏まえて、敷地を中心とする半径 5km の範囲において、変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査等を実施した。

b 海域における地質調査内容

敷地を中心とするおおむね半径 100km 範囲の文献調査の結果を踏まえ、敷地周辺海域については、敷地を中心とする半径約 30km の範囲の海域（以下「敷地前面海域」という。）において、シングルチャンネル方式³¹及びマルチチャンネル方式³²の音波探査を実施した。音波探査は、原則として汀線³³方向の測線については、約 5 km 間隔、汀線直交方向の測線については、約 2.5km 間隔で実施した。測線の総延長は約 1,620km である。

敷地前面海域に加え、敷地を中心とするおおむね半径 100km の範囲のうち敷地前面海域を除く範囲（以下「敷地周辺海域」という。）に分布する地層の地質時代を検討するため、シングルチャンネル方式及びマルチチャンネル方式の音波探査を実施した。測線の総延長は約 330km である。

敷地周辺海域のうち対馬北西海域から五島列島西方の海域（以下「対馬－五島西方海域」という。）では、文献に示されている断層にほぼ直交する方向の約 10km～約 20km 間隔の測線及びこれらを横断する測線で、シングルチャンネル方式の音波探査を実施しており、その測線の総延長は約 740km である。

また、地震調査委員会の「警固断層帯の長期評価について」（2007）を踏まえ、地震調査委員会が示す警固断層帯の北西延長海域（以下「福岡県西方海域」という。）において、シングルチャ

ンネル方式等の音波探査を実施した。その測線の総延長は約160kmである。

海上音波探査³⁴の概要及び調査測線を図30に示す。

③ 調査結果

敷地周辺の半径30km以内及び半径30km以遠の主な活断層分布を図31及び図32に示す。敷地周辺の主な活断層として、陸域については、竹木場断層、今福断層、城山南断層、楠久断層、国見断層、真名子-荒谷峠断層及び銚ノ木山リニアメントがある。海域については、F-h断層及び糸島半島沖断層群がある。半径30km以遠の主な活断層として、警固断層帯、佐賀平野北縁断層帯、日向峠-小笠木峠断層帯、宇美断層、西山断層帯、水縄断層帯、雲仙断層群、壱岐北東部断層群、対馬南方沖断層、対馬南西沖断層群、厳原東方沖断層群、宇久島北西沖断層群、沖ノ島東方沖断層、 F_{TW-3} 、 F_{TW-4} 、中通島西方沖断層群及び F_{TW-1} がある。

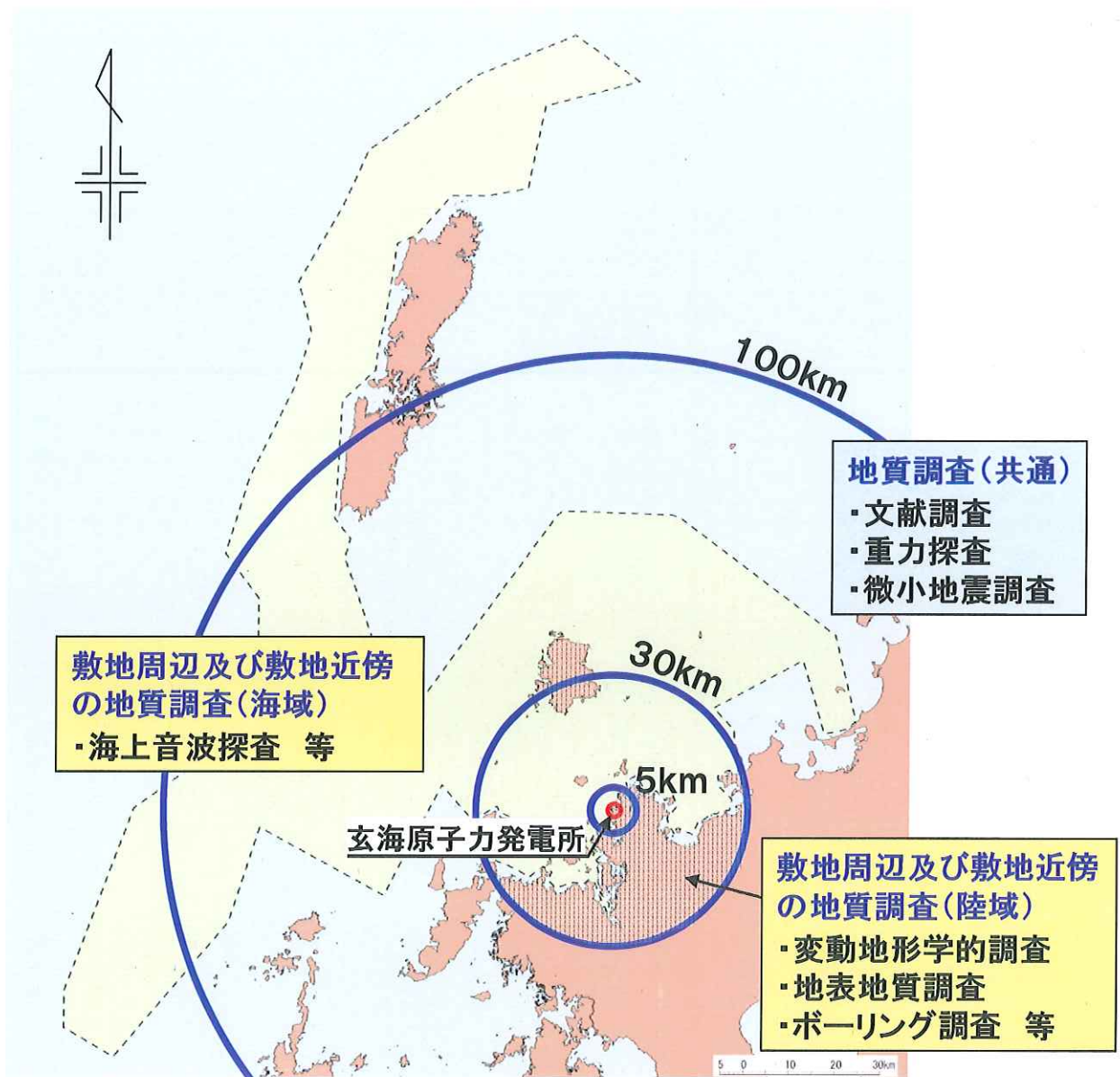


図 2 9 地質調査の概要

海上音波探査



- ・ 船から音波を発振し、その反射波を分析
- ・ 総延長約2,850kmにわたり実施

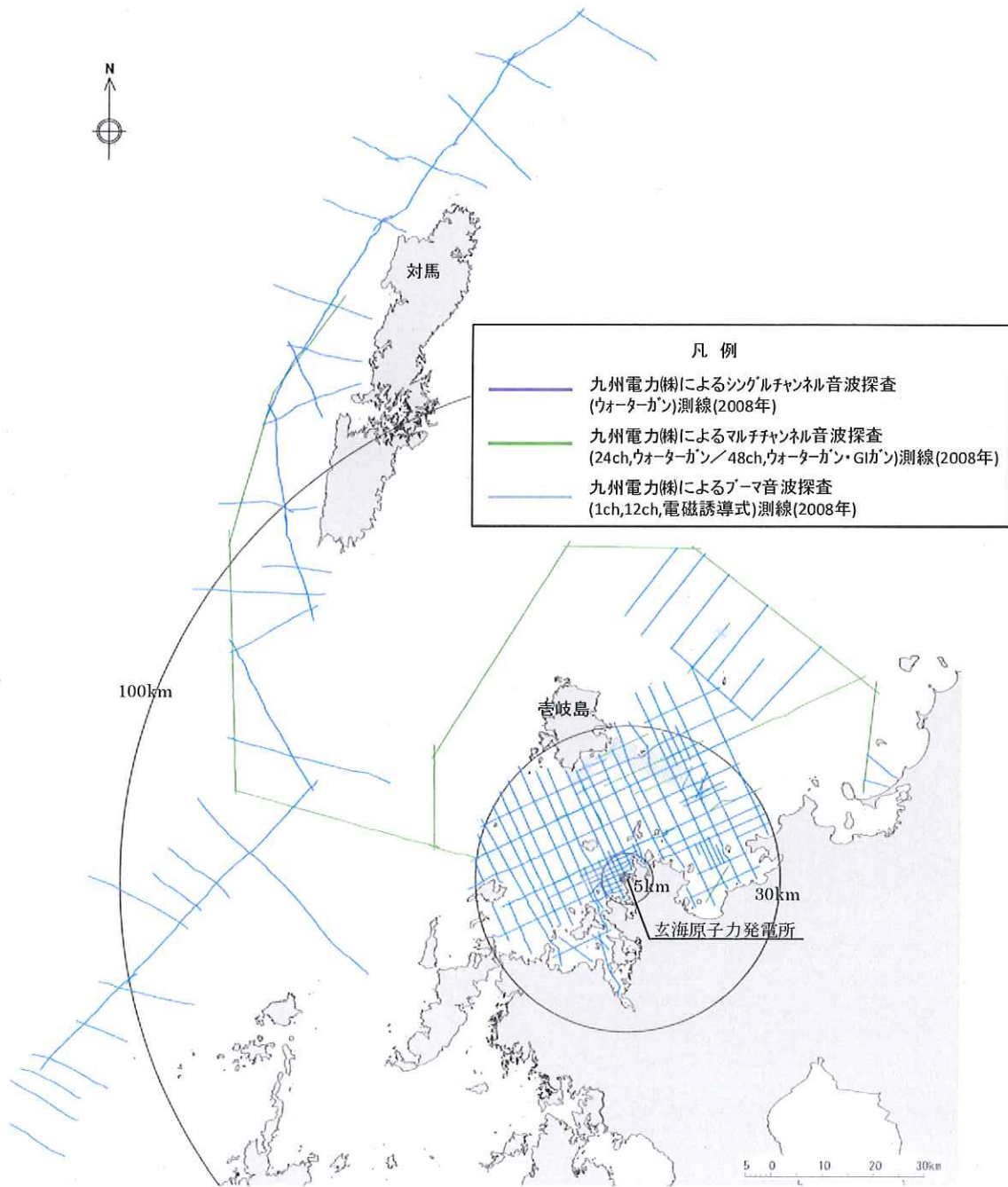


図 3 0 海上音波探査の概要及び調査測線

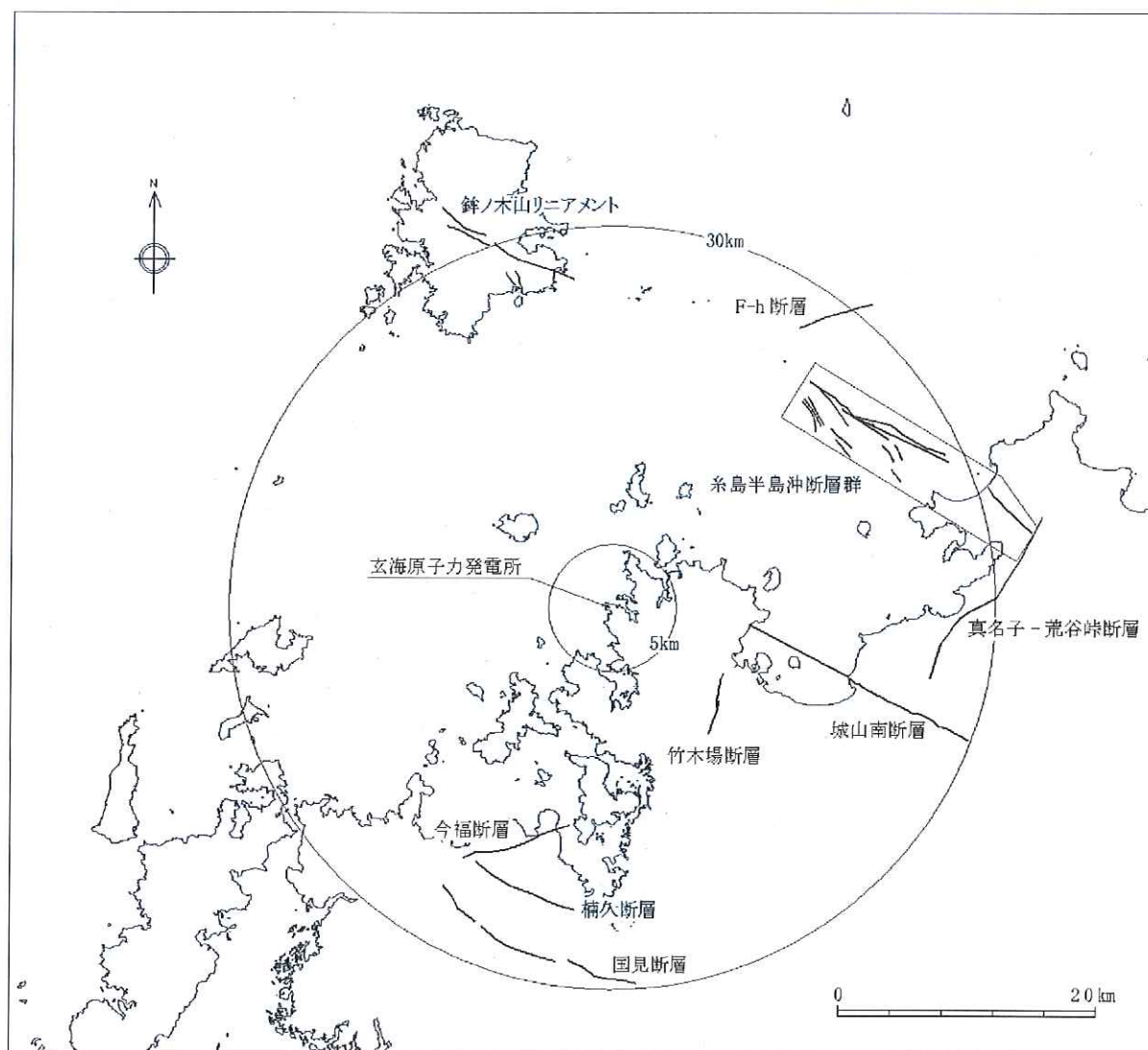


図 3 1 敷地周辺の主な活断層分布(30km 以内)

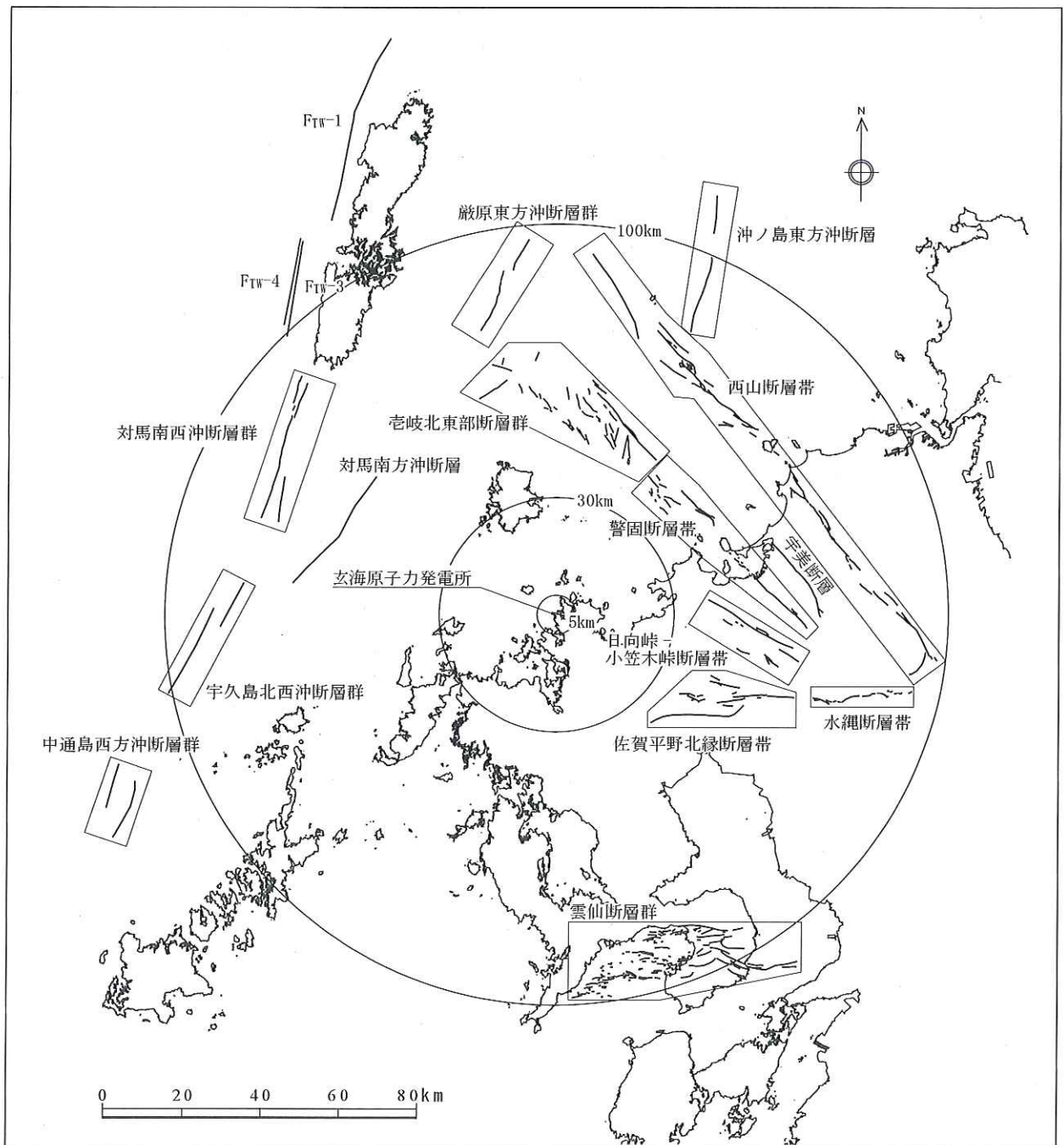


図 3 2 敷地周辺の主な活断層分布(30km 以遠)

(イ) 敷地内の地質調査

① 概要

安全上重要な原子炉施設が「将来活動する可能性のある断層等」の露頭がある地盤に設置された場合、その将来の断層等の活動による地震や地盤の変位等により安全機能に重大な影響を与えるおそれがあるため、安全上重要な原子炉施設を設置する地盤（以下「基礎地盤」という。）に、「将来活動する可能性のある断層等」の露頭が無いことを確認する必要がある。

「将来活動する可能性のある断層等」については、後期更新世³⁵以降（約 12～13 万年前以降）の活動が否定できない断層等とした。

② 調査内容

被告九州電力は、本件原子力発電所の敷地において、地表地質調査、ボーリング調査、試掘坑³⁶調査等の詳細な調査を実施し、基礎地盤の地質や断層の分布及びその活動性を検討した。被告九州電力が、敷地内において実施した地質調査位置を図 3-3 に示す。

ボーリング調査においては、272 孔、総延長約 19,300m を実施した。

また、地表地質調査、ボーリング調査等により得られた敷地の地質及び地質構造を直接確認するため、試掘坑調査を実施した。さらに、発電所建設時に基礎掘削面の地質観察を行い、基礎岩盤を構成する地質の分布、断層の走向、傾斜等を直接確認した。

③ 基礎地盤の性質

上記調査の結果、基礎地盤付近の地質は、古第三紀³⁷～新第三紀³⁸に形成された佐世保層群を基盤とし、これに貫入した玢岩³⁹と、これらを不整合に覆う八ノ久保砂礫層、東松浦玄武岩

類及び沖積層によって構成されていることが分かった。

このうち、基礎地盤を構成する主な地質は、砂岩⁴⁰及び頁岩⁴¹から成る佐世保層群であり、相当な拡がりをもって広く分布していることを確認した。

④ 断層の分布と活動性

3号炉及び4号炉の試掘坑で確認された断層は計4本（G-1断層，G-2・4断層，G-3断層，G-5断層）であり，位置を図34に示す。

また，1号炉及び2号炉の試掘坑で確認された断層は計7本（g-1断層，g-2断層，g-3断層，g-4断層，g-5断層，g-6断層，g-7断層）であり，位置を図35に示す。

試掘坑で確認された断層は，①佐世保層群の層理⁴²に走向がほぼ平行な断層（G-1断層，g-1断層，g-4断層，g-5断層，g-6断層，g-7断層），②佐世保層群の層理に走向がほぼ直交する断層（G-2・4断層，G-3断層），③佐世保層群に貫入した玢岩の岩脈⁴³に沿う断層（g-2断層，g-3断層）及び玢岩脈と同系統の断層（G-5断層）に区分した。

3号炉及び4号炉周辺で最も規模が大きいG-1断層は，3号炉及び4号炉南側の試掘坑（N坑，Y=425坑，S坑，G-1断層調査坑（Y=492坑，X=789坑））で確認された。本断層は佐世保層群の層理に走向がほぼ平行な逆断層で，破碎幅⁴⁴は最大45cmである。

1号炉及び2号炉周辺で最も規模が大きいg-1断層は，1号炉及び2号炉の試掘坑（連絡坑，中東横坑）及び1号炉基礎掘削面で確認した。本断層は佐世保層群の層理に平行な断層のため変位は確認できないが，破碎幅は最大40cmである。

G-2・4断層及びG-3断層は，いずれもその走向が佐世

保層群の層理にほぼ直交する高角度の正断層で、延長は短く破碎幅及び落差も小規模である。

3号炉及び4号炉の試掘坑で確認したG-5断層は、佐世保層群の地層と同走向であるが、傾斜は逆であり、近接する玢岩の岩脈と走向・傾斜が同系統であることから、玢岩の貫入に伴う局所的かつ小規模なものと判断した。また、1号炉及び2号炉の試掘坑で確認された玢岩の岩脈に沿う断層（g-2断層、g-3断層）は、No. 1横坑、連絡坑、中東横坑及び玢岩追跡坑（B）で確認され、約100m連続するが、その岩脈の延長であるNo. 2横坑では玢岩の岩脈と佐世保層群の境界は密着している。

G-1断層の活動性について検討するため、3号炉及び4号炉のN坑よりG-1断層の傾斜に沿ってG-1断層調査坑（Y=492坑）を掘削した。

その結果、本断層が基礎岩盤を被覆する東松浦玄武岩類中に延びていないことから、東松浦玄武岩類の噴出以前にその活動を終えたと判断した。

基礎掘削面地質観察結果によると、G-2・4断層の北西方向の延長部は本断層にほぼ直交する玢岩中に延びていないことから、G-2・4断層及び同系統のG-3断層は玢岩の貫入以前にその活動を終えたと判断した。

1号炉及び2号炉付近の佐世保層群に貫入している玢岩をトレンチ調査⁴⁵により追跡調査した結果、玢岩は東松浦玄武岩類に覆われていることから、玢岩の貫入時期は佐世保層群の堆積後から東松浦玄武岩類の噴出前の間であり、玢岩の岩脈に沿う断層及び同系統の断層の生成時期及び活動時期も同様と判断した。なお、3号炉及び4号炉の試掘坑においてG-1断層が幅

約 1.5m 及び約 3 m の 2 本の玢岩を変位させていることを確認しており，玢岩の貫入時期は G-1 断層の活動よりも古いと判断した。

以上より，基礎地盤付近に認められる断層の生成時期及び活動時期はすべて東松浦玄武岩類の噴出時期よりも古いと考え，少なくとも新第三紀鮮新世⁴⁶以降における活動はなく，基礎地盤に「将来活動する可能性のある断層等」はないと判断した。

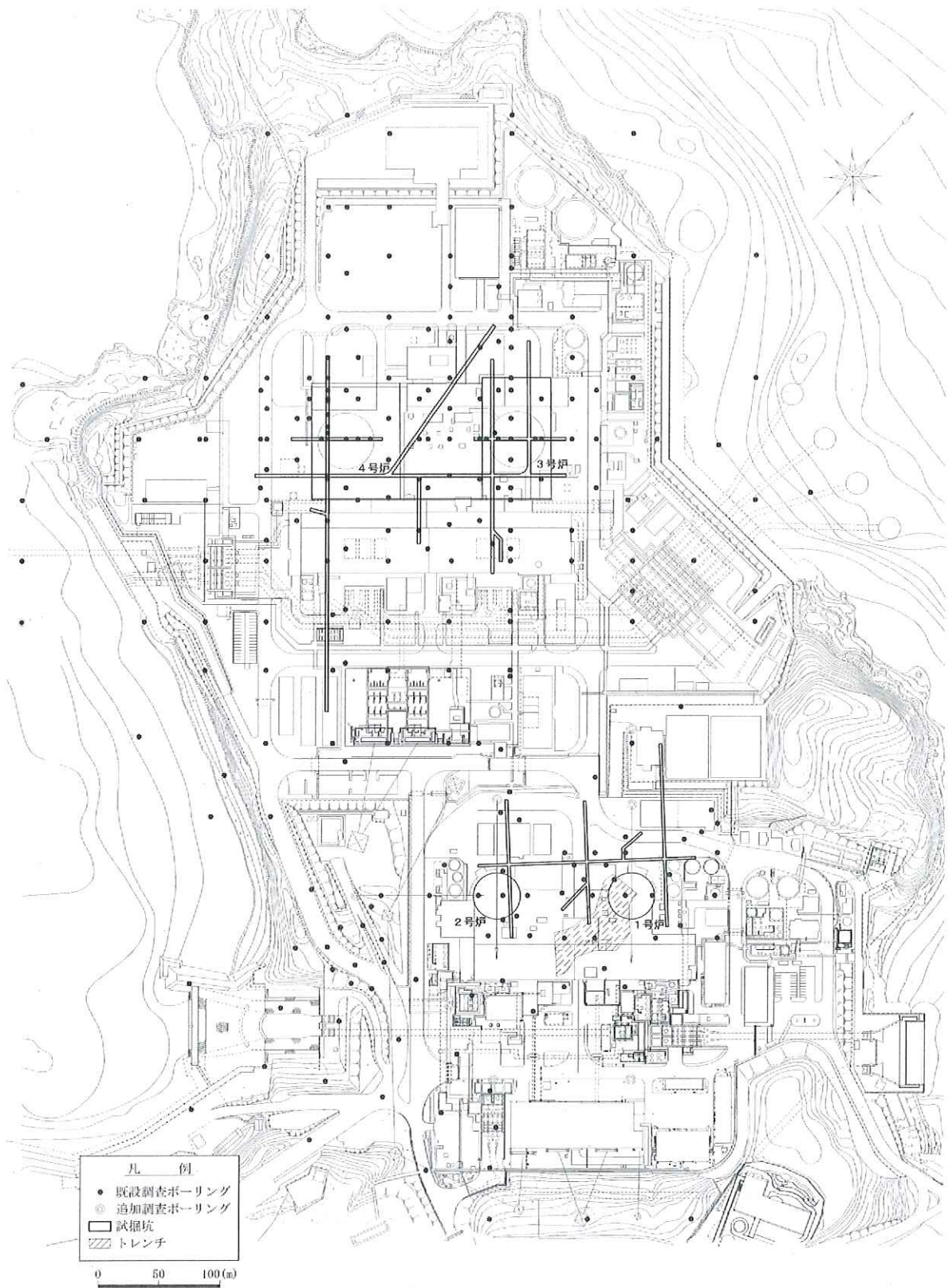


図 3 3 敷地内地質調査位置

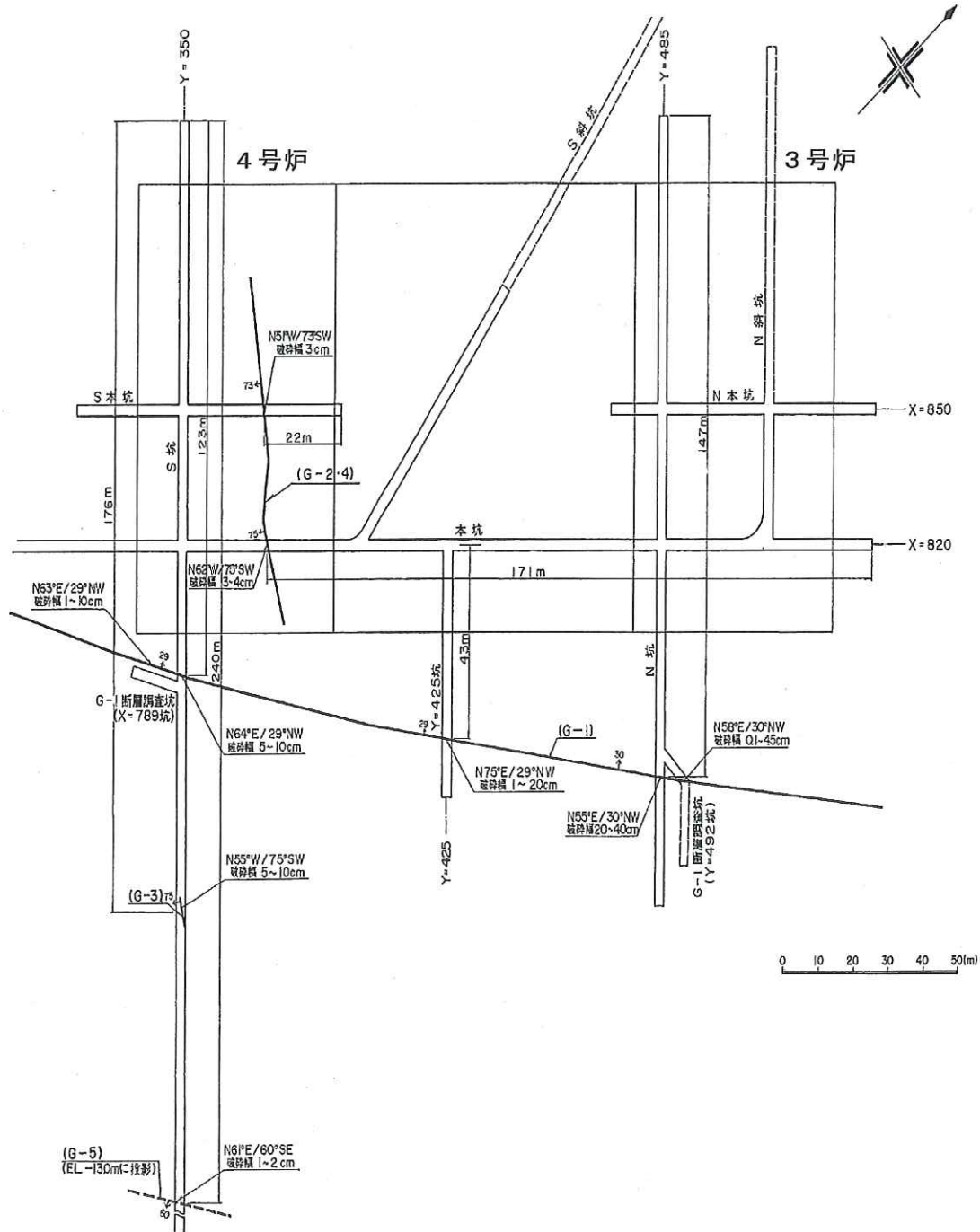


図 3 4 3号及び4号炉の試掘坑で確認された断層位置図

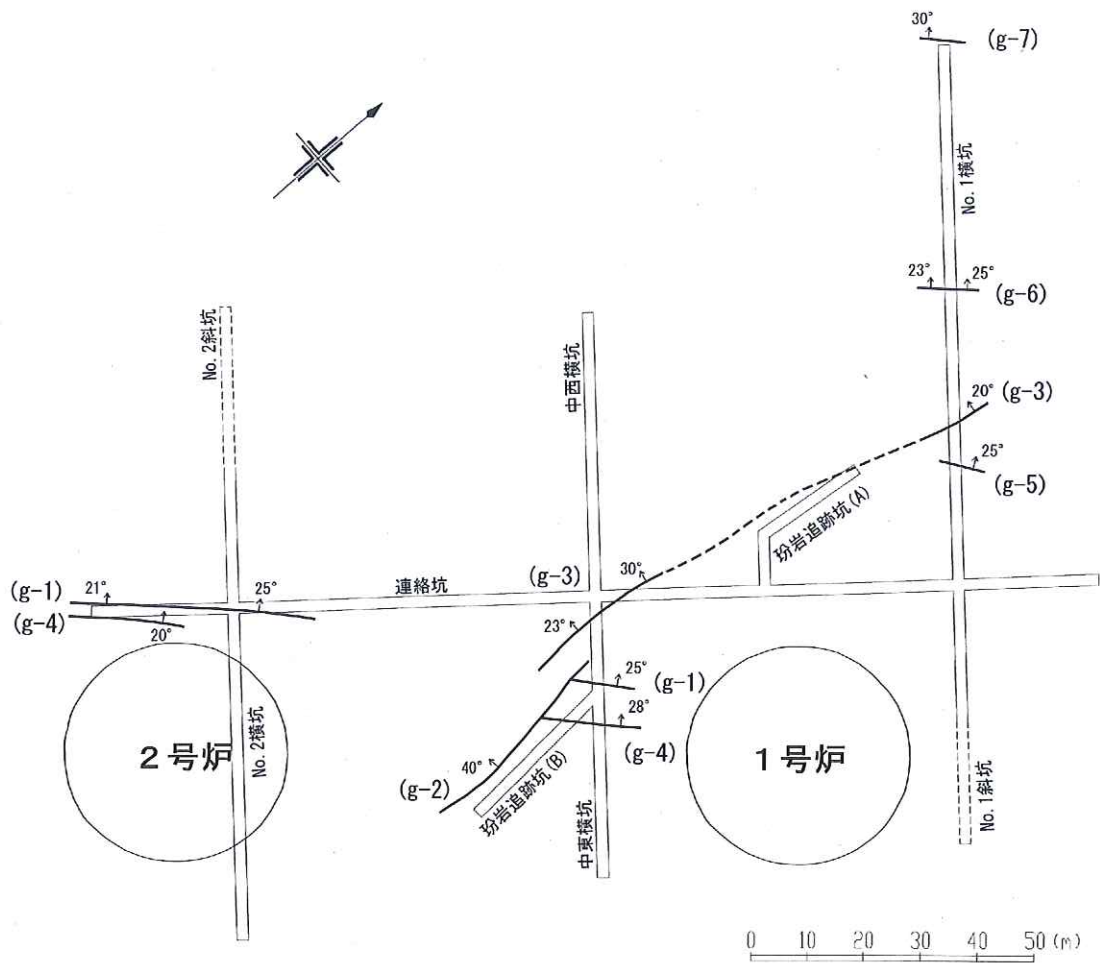


図 3 5 1号及び2号炉の試掘坑で確認された断層位置図

エ 地下構造調査

(ア) 敷地及び敷地周辺の地盤構造

敷地周辺においては、花崗岩類及び古第三紀～新第三紀の堆積岩類並びにこれらを不整合に覆って、鮮新世の東松浦玄武岩が分布する。敷地近傍の地質は、古第三紀～新第三紀の佐世保層群を基盤とし、同層群を新第三紀鮮新世の東松浦玄武岩類が不整合関係で覆う。

敷地近傍においては、地下浅部から佐世保層群が拡がりをもって分布している。

(イ) 敷地内調査

試掘坑内の弾性波試験⁴⁷結果によると、原子炉基礎岩盤における岩盤の弾性波平均速度値⁴⁸は、P波⁴⁹が約 3.0 km/s、S波⁵⁰が約 1.35km/s であり、良質の硬い岩盤といえる。地質調査の結果、この良質の硬い岩盤は相当の広範囲にわたり基盤を構成していることを確認した。

(ウ) 微動アレイ探査

敷地の地下構造の把握のため、一辺が約 1700m の LL アレイ、約 900m の L アレイ、約 500m の M アレイ、約 200m の S アレイ、約 50m の SS アレイについて、それぞれの頂点 3 点、重心位置の計 4 点で微動アレイ探査⁵¹を実施した。また、高振動数を補間するために単点微動測定時の 1 辺約 50m の L 字型の SS アレイのデータを利用した。微動アレイ探査の観測位置を図 3 6 に、微動アレイ探査結果を図 3 7、微動アレイ探査結果による同定結果を図 3 8 に示す。

微動アレイ探査により得られた観測分散曲線⁵²(図 3 7)を基に、敷地の地下のせん断波速度の同定を実施した。その結果(図 3 8)によると、表層から深くなるにつれ、せん断波速度は大きくなる。これは、上層よりせん断波速度が極端に小さい層が存在せず、特異な増幅がないことを意味する。

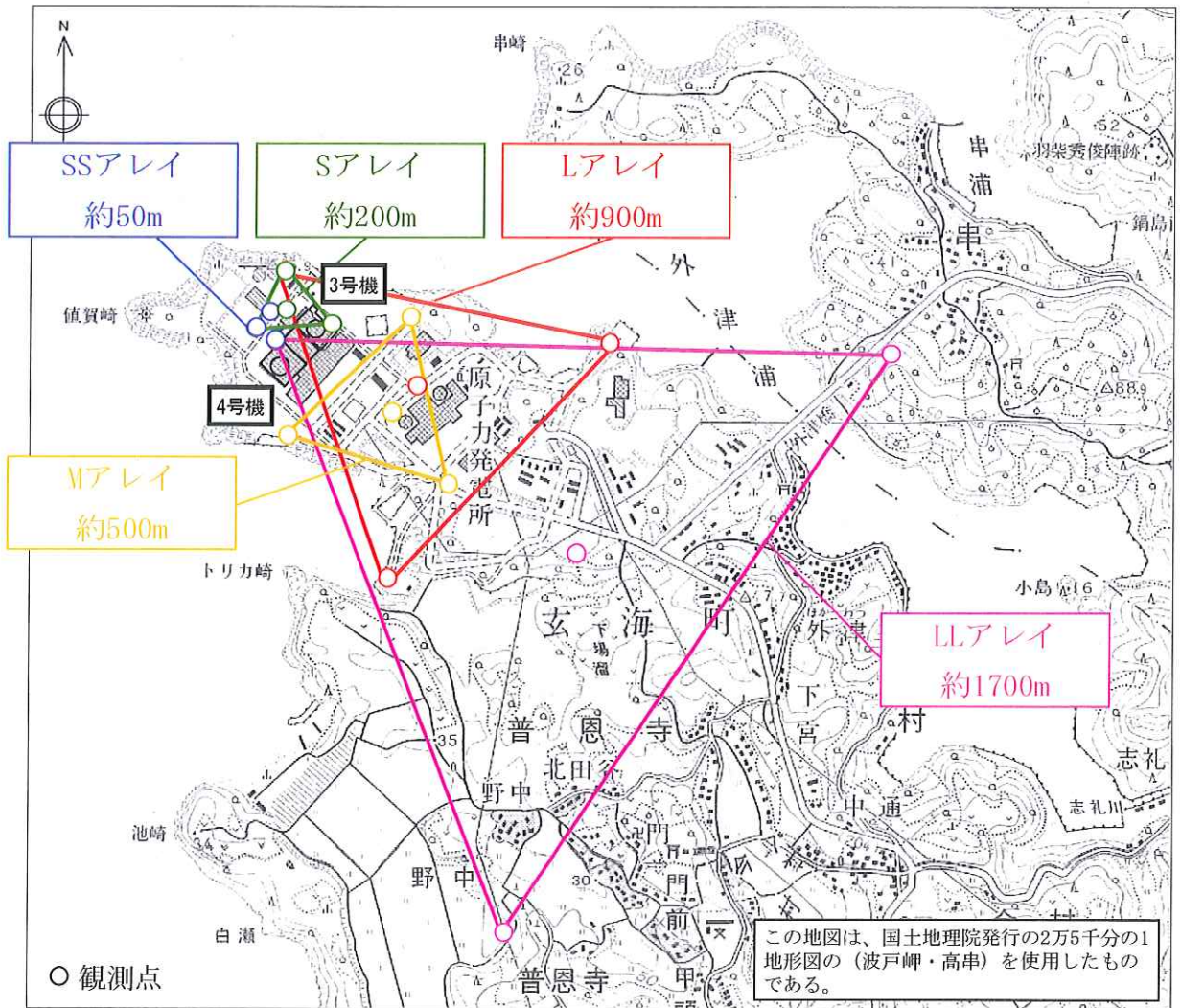


図36 微動アレイ観測位置

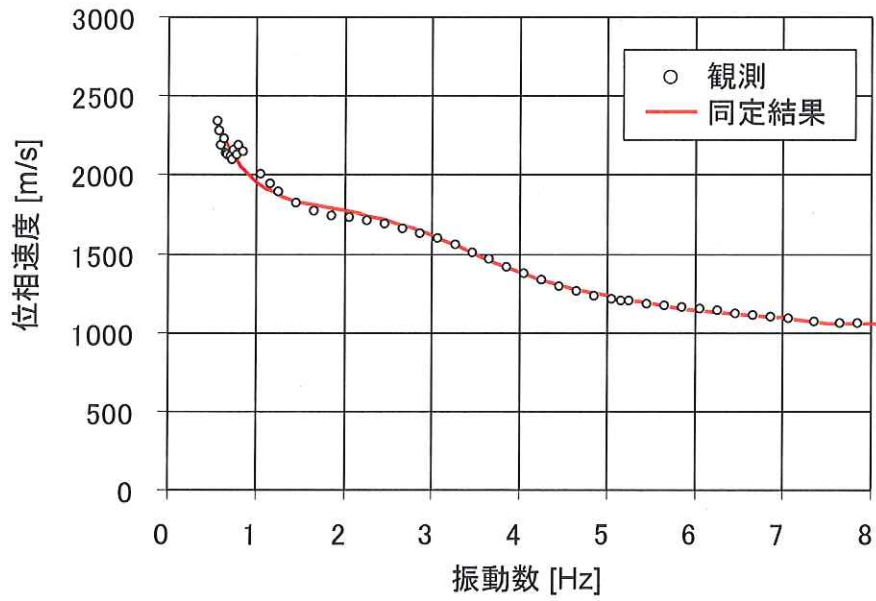


図 3 7 微動アレイ探査結果

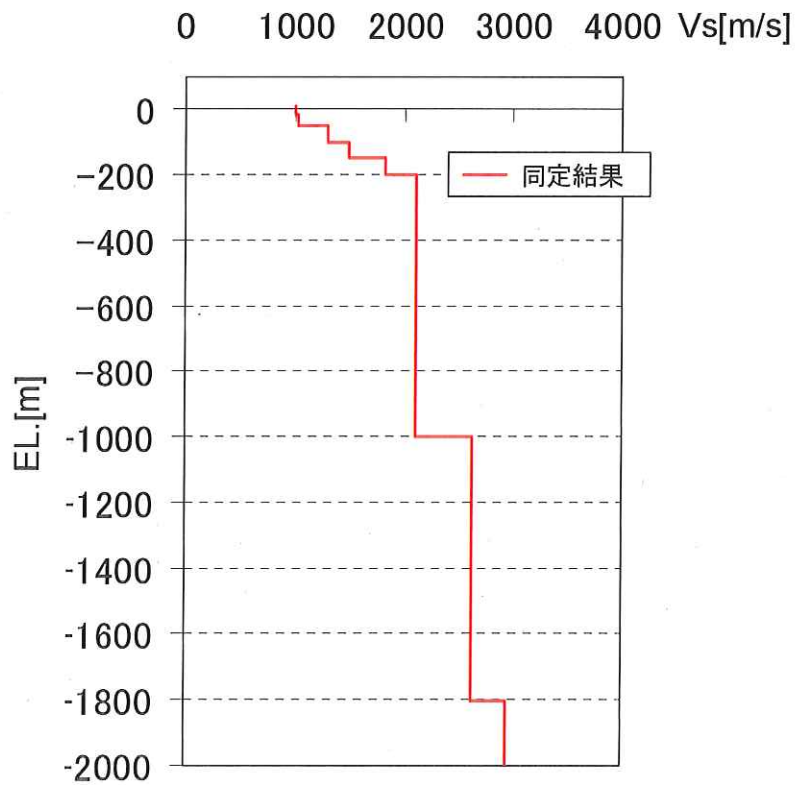


図 3 8 微動アレイ探査結果による同定結果

(エ) 単点微動観測

敷地の地下構造を把握するため、50m 間隔で単点微動観測⁵³を実施し、水平/上下のスペクトル比 (H/V) の卓越ピークの空間分布の評価を実施した。単点微動観測結果を図39に示す。短周期側では表層の影響が見られるものの、長周期側では明確な傾向が見られず、深部の地下構造による特異な増幅の影響は見られていない。

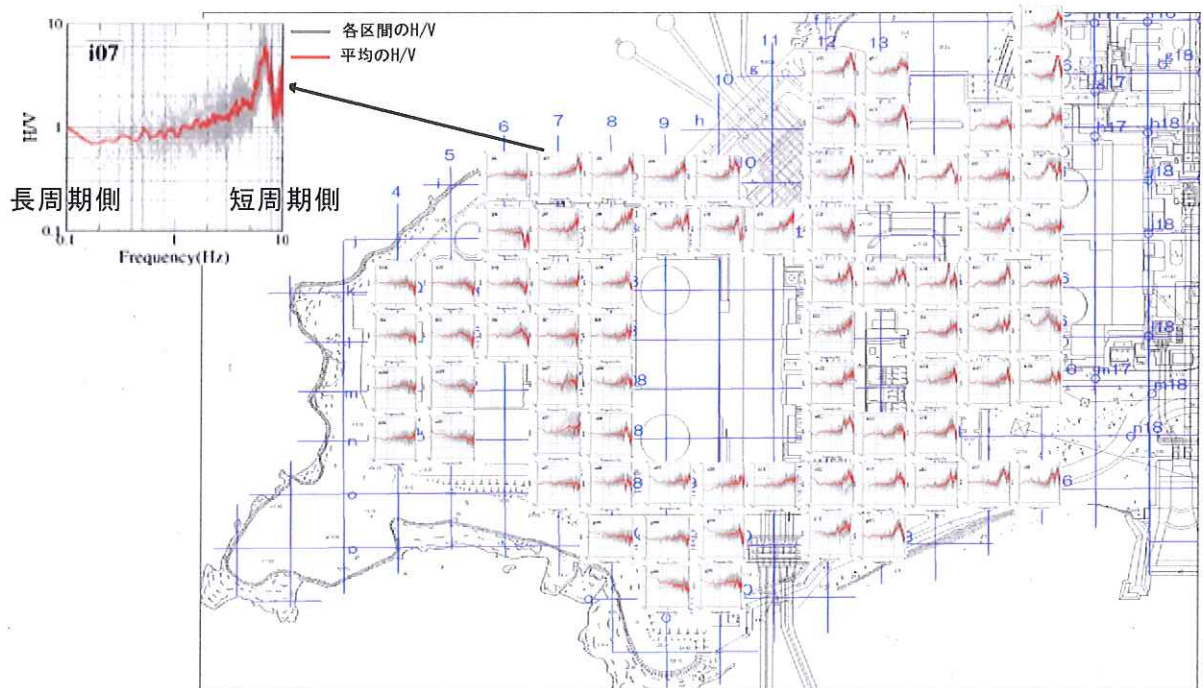
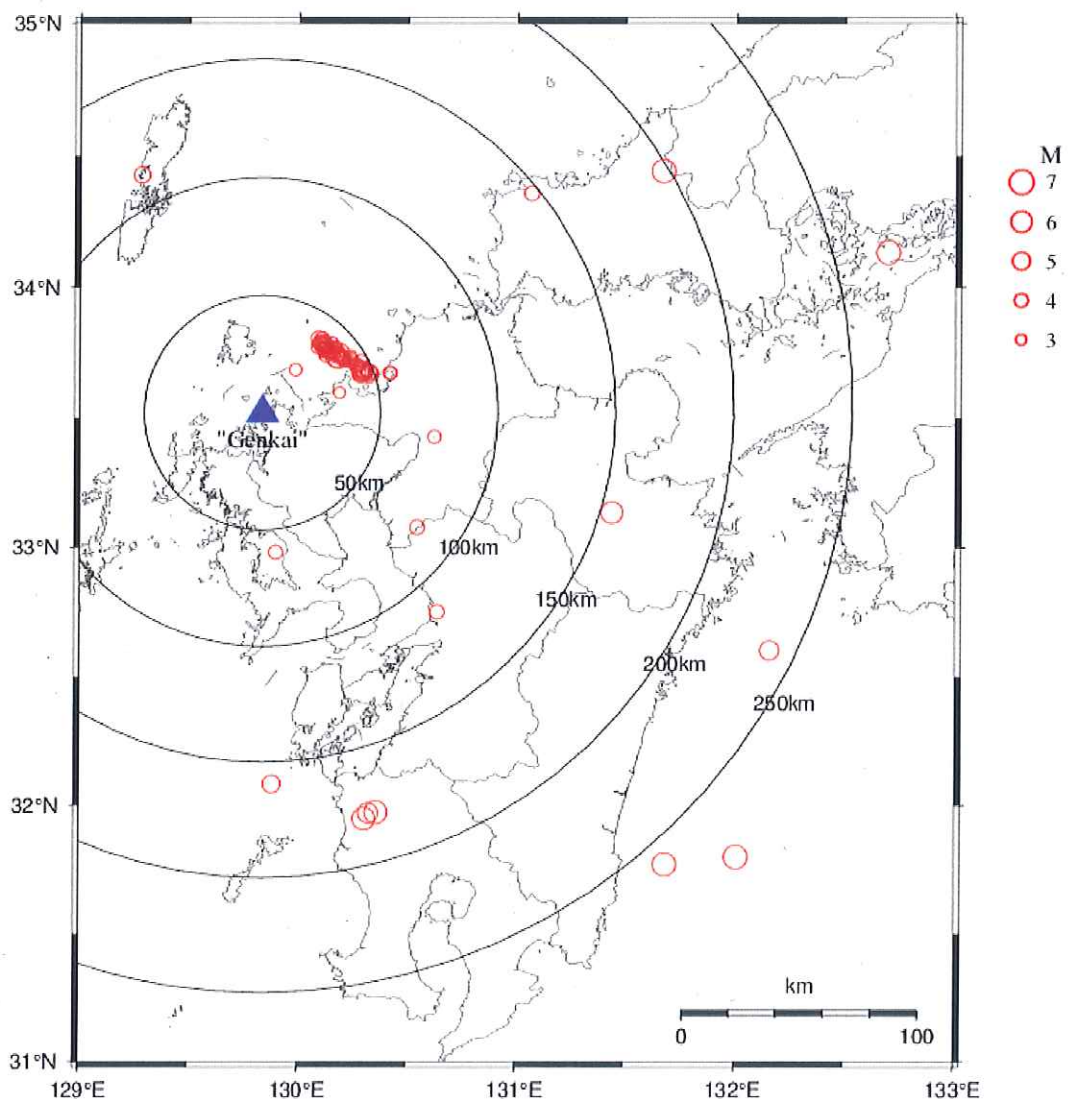


図39 単点微動観測結果

オ 地震観測

本件原子力発電所では、建設時から地震観測を開始し、継続的に地震観測を実施しており、H25年7月の設置許可申請時までに合計76もの地震の観測記録が得られている。観測記録が得られた76地震の震央分布を図40に示す。本件原子力発電所の基準地震動策定にあたり、かかる76地震の観測記録を用いた分析を行った。



※2000年鳥取県西部地震は図の枠外

図40 観測記録が得られた地震の震央分布

(ア) 観測記録の特徴

本件原子力発電所の敷地周辺の地震による揺れの地域的な特性を把握するため、本件原子力発電所で得られた 76 地震のうちマグニチュード 5.0 以上の地震による観測記録の応答スペクトルと「関東・東北地方の過去の地震動の平均像」(Noda et al.(2002)⁵⁴による手法)による応答スペクトルの比を算出し、検討を行った。この比が 1.0 を上回るということは、平均的な地震による揺れより大きい揺れであったことを示し、下回るということは小さな揺れであったことを示す。観測記録の応答スペクトルと Noda et al.(2002)による応答スペクトルの比を図 4 1 に示す。図 4 1 によると、上記の比は 1.0 を大きく下回る。

これは、本件原子力発電所の敷地地盤は堅固な岩盤であることによるものと考えられ、本件原子力発電所敷地周辺で発生する地震の揺れが「関東・東北地方の過去の地震動の平均像」(Noda et al.(2002))より小さいという地域的な特性の表れである。

なお、Noda et al.(2002)の手法では、敷地における地震観測記録に基づいて補正する(例えば図 4 1 の平均値を用いて 0.5 倍するなど)ことにより、地震の分類に従った震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を的確に把握することが可能であり、補正することで地震動評価において、本件原子力発電所の敷地周辺の地震による揺れの地域的な特性を反映することができる。しかしながら、被告九州電力は、本件原子力発電所における「応答スペクトルに基づく地震動評価⁵⁵」では、安全側の判断から、地震観測記録による補正は行わず、Noda et al.(2002)による方法をそのまま用いて評価している。

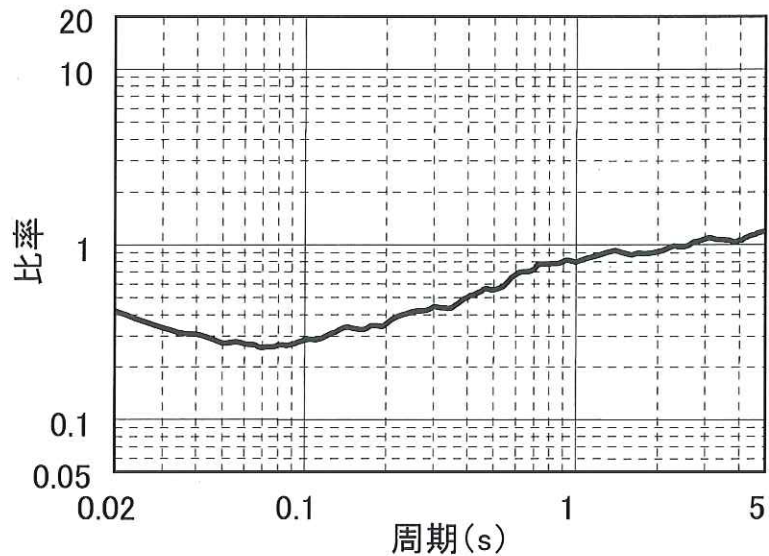


図 4 1 観測記録の応答スペクトルと「過去の地震動の平均像」
(Noda et al.(2002)による手法) による応答スペクトルの比

(イ) 特異な増幅特性の有無

本件原子力発電所敷地及び敷地周辺の地下構造が、地震波の伝播経路特性及びサイト特性に与える影響を検討するため、地震の到来方向による増幅特性の分析を行った。

まず、前述の合計 76 もの地震の観測記録のうちマグニチュード 5.0 以上の地震により得られた観測記録の応答スペクトル⁵⁶の Noda et al.(2002)による平均的な応答スペクトルに対する比を到来方向別に算定し、比較・検討した。この比が 1.0 を上回るということは、平均的な地震による揺れより大きい揺れであったことを示し、下回るということは小さな揺れであったことを示す。また、この比が地震波の到来方向によって、異なる傾向が見られた場合、地震の到来方向により地震波の増幅特性が異なることを意味し、敷地及び敷地周辺の地下に褶曲構造⁵⁷などの揺れを増幅させる要因があることを示す。図 4 2 に示すとおり、地震波の到来方向によらず、1.0 秒以

下の短周期側の比は概ね 1.0 を下回っている。

したがって、地震の到来方向による観測記録の増幅特性の差異は存在せず、本件原子力発電所敷地及び敷地周辺の地下構造には、特異な増幅を生じさせるものはないと判断した。

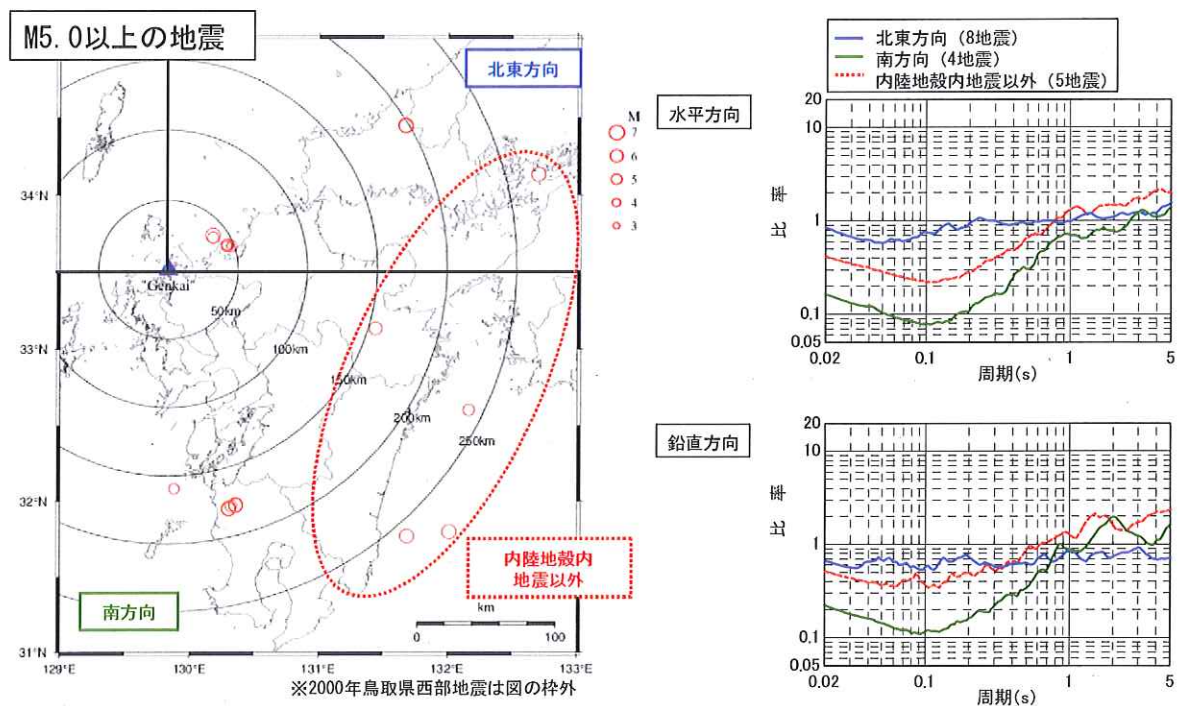


図 4 2 地震観測記録を用いた到来方向の検討 (マグニチュード 5 以上)

(ウ) 敷地と敷地周辺の地盤増幅率の差異

本件原子力発電所敷地及び敷地周辺の地下構造が、地震波のサイト特性に与える影響を検討するため、敷地における地盤増幅率と敷地周辺の K-NET 観測点⁵⁸及び KiK-net 観測点⁵⁹における地盤増幅特性について、比較・検討を実施した。

具体的には、本件原子力発電所における敷地地盤で得られた観測記録と敷地周辺の K-NET 観測点及び KiK-net 観測点で得られた観測記録を用いて、地震基盤⁶⁰からの地盤増幅率を算定した。地盤増

幅率の算定結果を図4-3に示す。図4-3は、縦軸に地盤増幅率、横軸に周波数を描いたものであり、これによれば、本件原子力発電所敷地における地盤増幅率は、周辺のK-NET観測点及びKiK-net観測点における地盤増幅率にと概ね整合しており、顕著な増幅傾向は見られない。

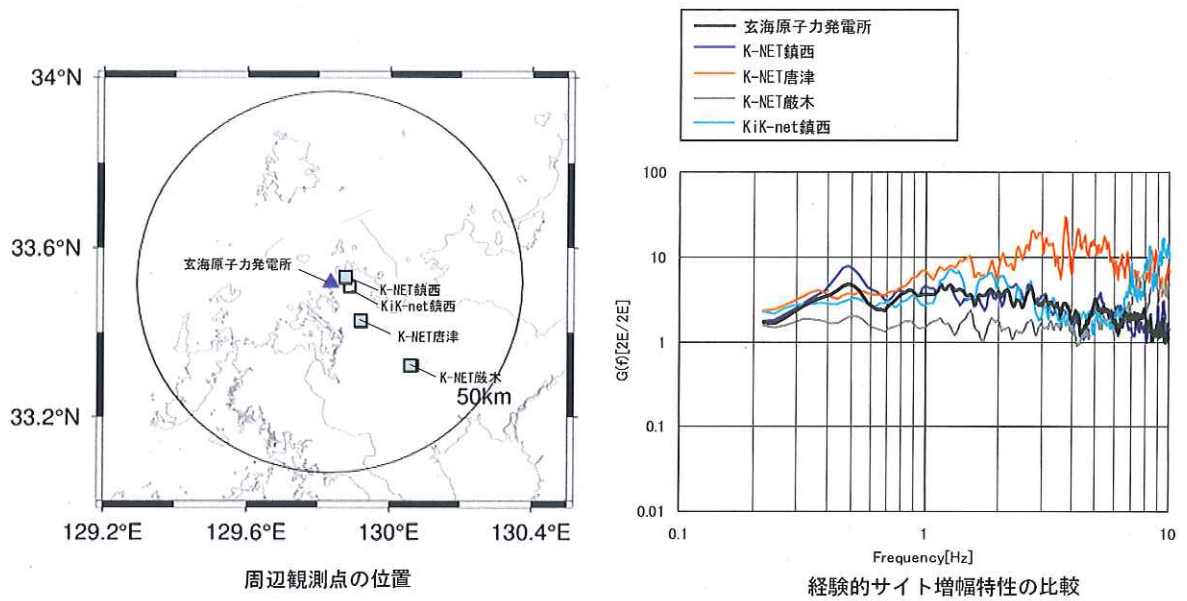


図4-3 本件原子力発電所敷地及び敷地周辺の地盤増幅率

(エ) 2005年福岡県西方沖地震の検討

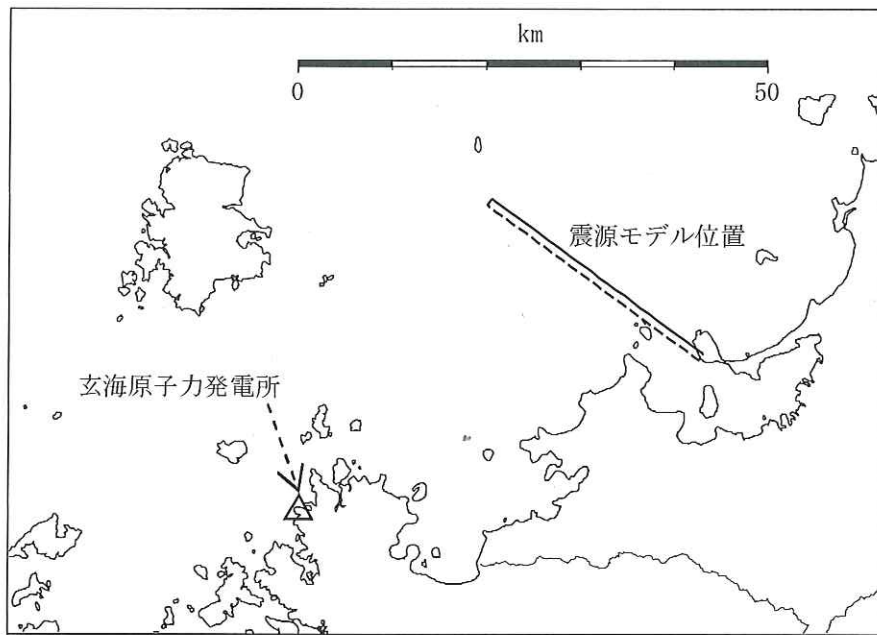
前述のとおり、本件原子力発電所の敷地地盤で合計 76 もの地震の観測記録が得られており、これらの観測記録のうち地震による揺れが最も大きかったものは、2005年福岡県西方沖地震による観測記録である。

このため被告九州電力は、本件原子力発電所敷地周辺で発生する地震の地域的な特性（震源特性）を調べるために、2005年福岡県西方沖地震による観測記録を用い、その震源特性について分析した。

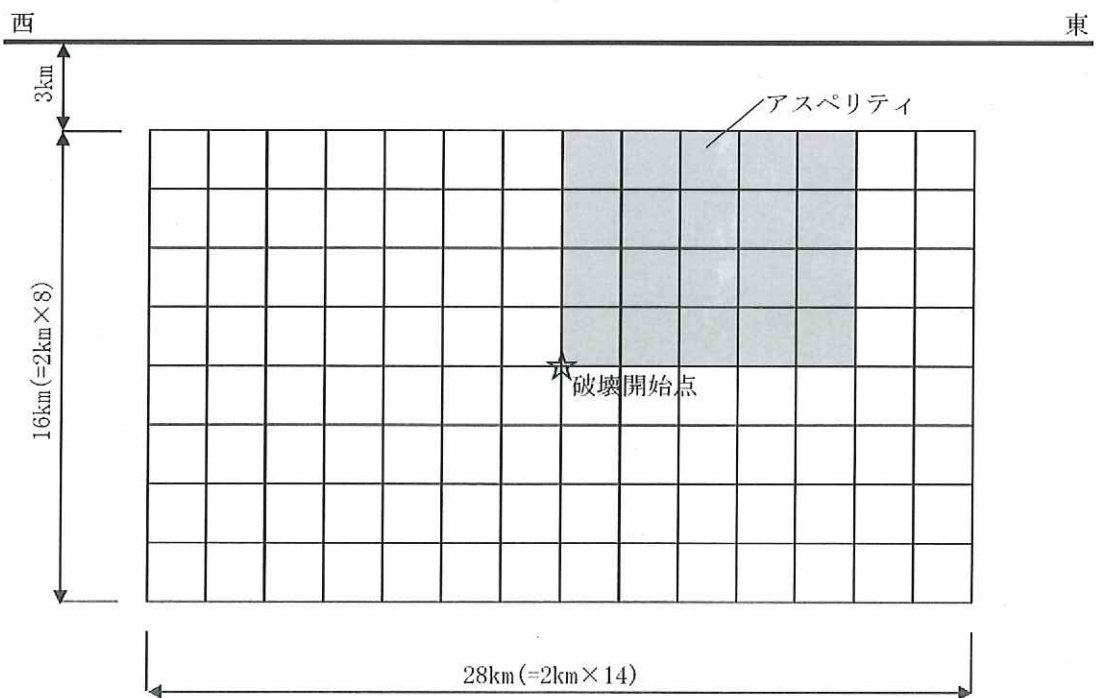
地震本部(2009)による強震動予測手法（以下「強震動予測レシピ⁶¹」という。）に基づいて、主な断層パラメータを設定し、図44に示す特性化震源モデル⁶²を構築し、経験的グリーン関数法⁶³による地震動評価を実施した。

その結果、図45に示すとおり、2005年福岡県西方沖地震で得られた本件原子力発電所敷地地盤の観測記録を概ね再現することができた。

以上を踏まえ、本件原子力発電所における検討用地震の地震動評価では、敷地周辺で発生した 2005年福岡県西方沖地震の検討結果を踏まえ、強震動予測レシピに基づき、断層パラメータ及び特性化震源モデルを構築するものとする。強震動予測レシピに基づく断層パラメータの設定方法を図46に示す。



(a) 断層配置図



(b) 断面図

図 4 4 2005 年福岡県西方沖地震の震源モデル

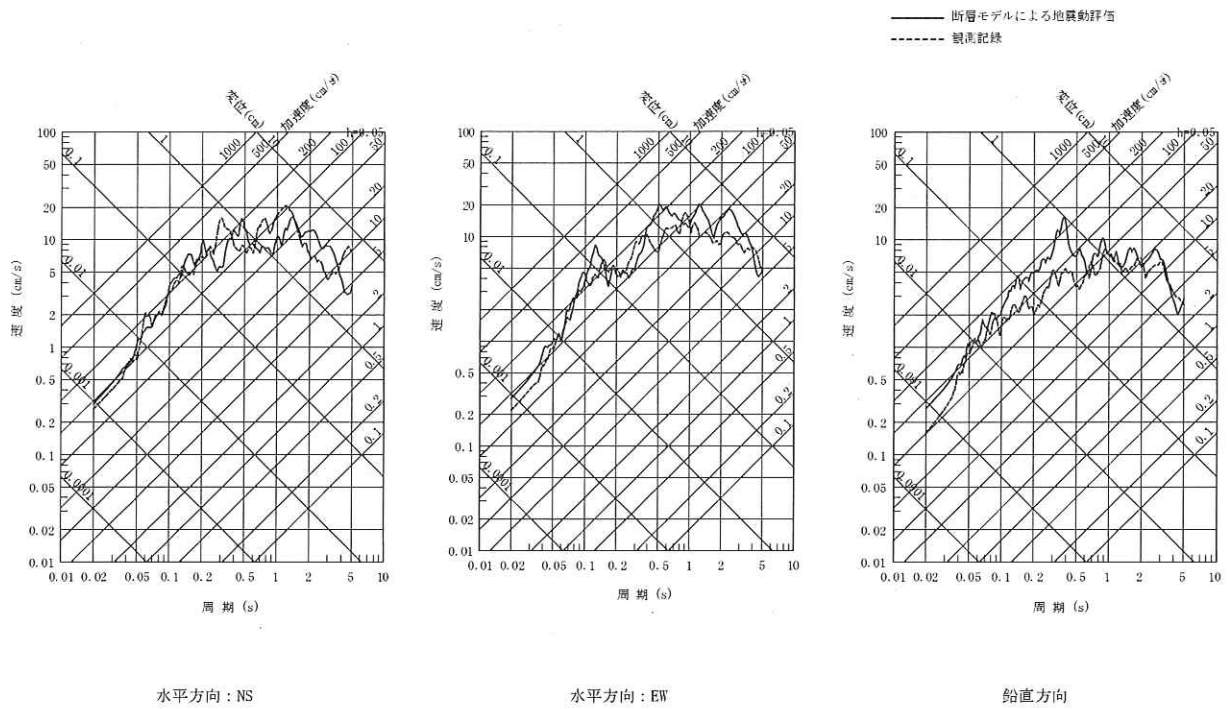


図 4 5 2005 年福岡県西方沖地震の地震動評価結果と観測記録の比較

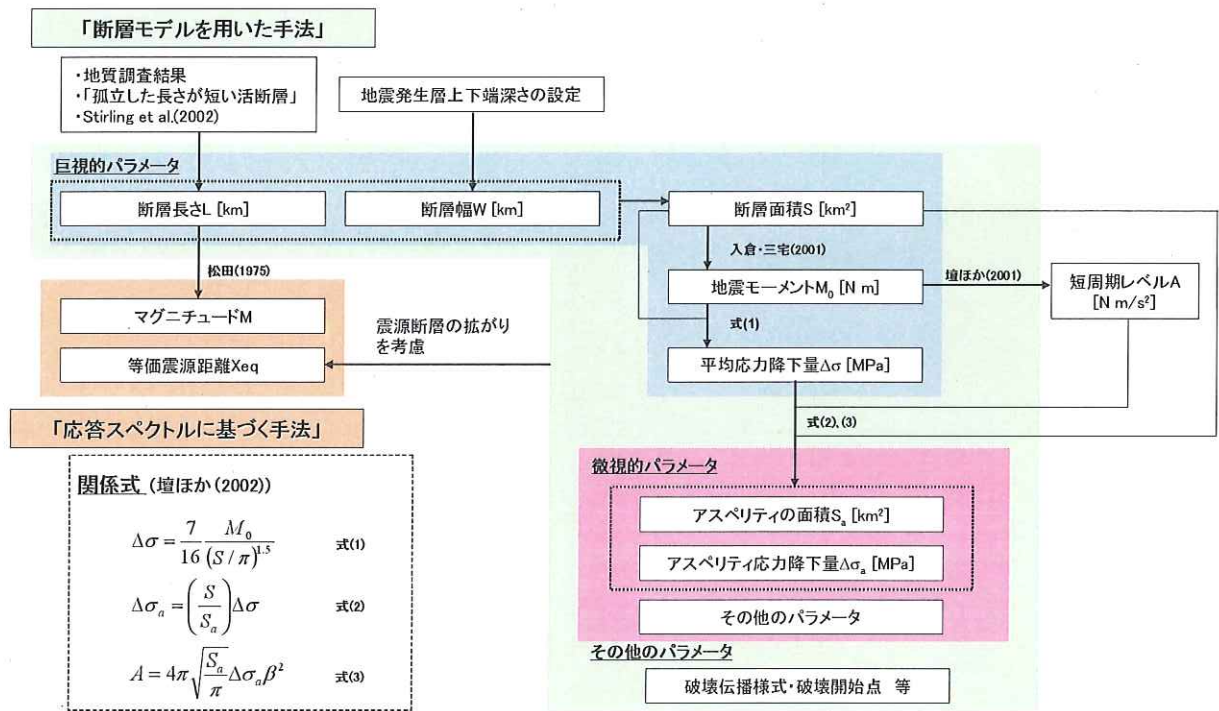


図 4 6 検討用地震のパラメータ設定方法

カ 本件原子力発電所の敷地周辺で発生する地震の地域的な特性

上記ア～オの結果，被告九州電力が把握した本件原子力発電所敷地周辺の「地域的な特性」は以下のとおりである。

(ア) 震源特性

- ① 敷地周辺で発生する地震の内，敷地に大きな影響を与える地震は「内陸地殻内地震」である。敷地に大きな影響を与える内陸地殻内地震として，活断層による地震及び過去の被害地震を抽出した。
- ② 海側のプレートに起因するプレート間地震及び海洋プレート内地震は，敷地から海側のプレートまでの距離が **200km** 程度以上離れており，敷地に大きな影響を与えることはない。
- ③ 敷地周辺で発生する内陸地殻内地震は，「逆断層型」よりも揺れの大きさが小さい「横ずれ断層型」が多い。
- ④ 敷地周辺は，ひずみがほとんど確認されず，過去に基準地震動を超過する地震動の原因となる地震（以下「基準地震動超過地震」という。）が発生した「ひずみ集中帯」のような圧縮応力場に位置しない。
- ⑤ 敷地及び敷地から半径 **5km** 範囲に活断層がない。

(イ) 「伝播経路特性」及び「サイト特性」

- ① 基盤（硬い岩盤）がある程度の広がりをもって比較的浅所に分布しているため敷地は揺れ難い。
- ② 敷地における揺れは，地震動の到来方向または周期帯によって特異な増幅はみられない。

(ウ) 敷地の観測記録の傾向

観測記録から敷地周辺で発生する地震による揺れは「関東・東北地方の過去の地震動の平均像」(Noda et al.(2002)) に比べて小さい。

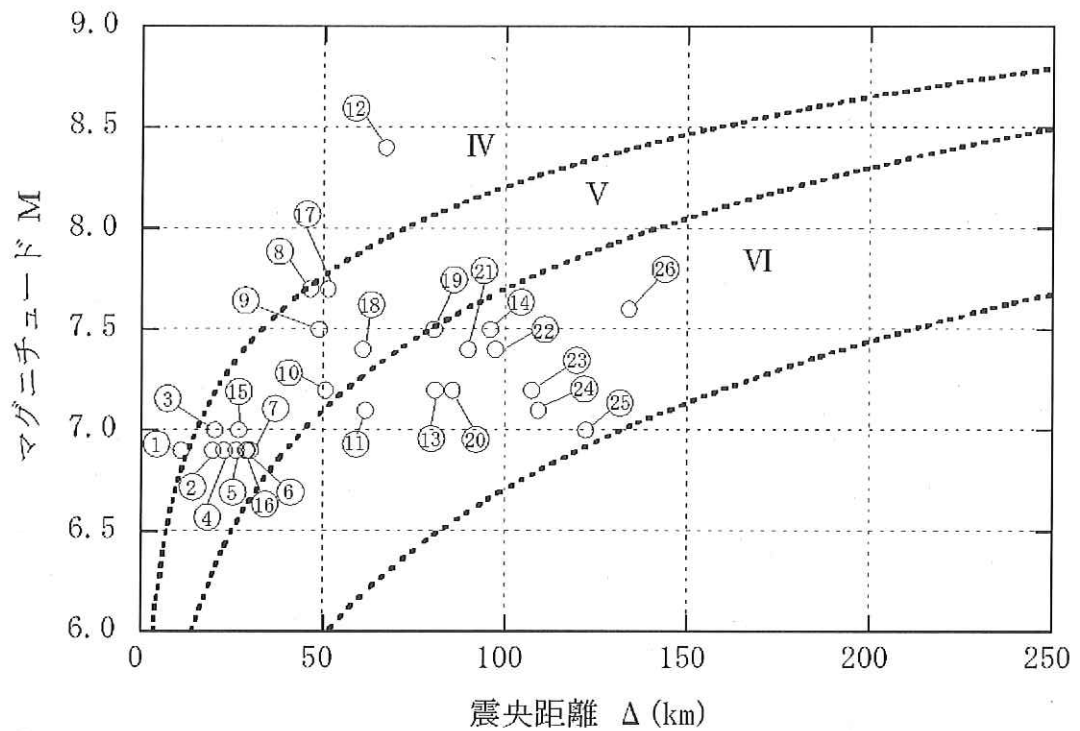
(3) 検討用地震の選定

上記「2 (2) ウ 地質調査」で示した活断層による地震について，

震央距離を横軸，マグニチュードを縦軸として，敷地における旧気象庁震度階級区分も書き加えたものを図47に示す。図47によると，敷地において，周辺の活断層から想定される地震による揺れは，宇美断層，水縄断層帯，雲仙断層群，巖原東方沖断層群，宇久島北西沖断層群，沖ノ島東方沖断層， $F_{TW}-3$ ， $F_{TW}-4$ ，中通島西方沖断層群及び $F_{TW}-1$ による地震を除き，震度5弱程度以上と推定される。

「2 (2) イ (ウ) 被害地震」及び上記を踏まえ，敷地に大きな影響を及ぼすと想定される震度5弱程度以上の18地震全てを Noda et al.(2002)の方法により算定した応答スペクトルを基に評価し，その中から検討用地震を選定した。

2005年福岡県西方沖地震（マグニチュード7.0），1700年壱岐・対馬の地震（マグニチュード7.0）及び敷地周辺の主な活断層による18地震の応答スペクトルの比較を図48に示す。この比較の結果，応答スペクトルの大小関係から，全周期帯において敷地に及ぼす影響が大きい「竹木場断層による地震」及び「城山南断層による地震」の2つを検討用地震として選定した。



※ IV, V, VIは旧気象庁震度階級で、震度の境界線は村松(1969)及び勝又ほか(1971)による。

No.	断層の名称	No.	断層の名称	No.	断層の名称
①	竹木場断層	⑩	日向峠-小笠木峠断層帯	⑲	対馬南西沖断層群
②	今福断層	⑪	宇美断層	⑳	巖原東方沖断層群
③	城山南断層	⑫	西山断層帯	㉑	宇久島北西沖断層群
④	桶久断層	⑬	水縄断層帯	㉒	沖ノ島東方沖断層
⑤	国見断層	⑭	雲仙断層群	㉓	F _{TW} -3
⑥	真名子-荒谷峠断層	⑮	糸島半島沖断層群	㉔	F _{TW} -4
⑦	銚ノ木山リニアメント	⑯	F-h断層	㉕	中通島西方沖断層群
⑧	警固断層帯	⑰	壱岐北東部断層群	㉖	F _{TW} -1
⑨	佐賀平野北縁断層帯	⑱	対馬南方沖断層		

図47 敷地周辺の主な活断層から想定される地震

- | | | | |
|-------|-----------------|-------|------------------|
| —— | 竹木場断層による地震 | ---- | 日向峠-小笠木峠断層帯による地震 |
| - - - | 今福断層による地震 | —— | 西山断層帯による地震 |
| | 城山南断層による地震 | - - - | 糸島半島沖断層群による地震 |
| - - - | 楠久断層による地震 | —— | F-h断層による地震 |
| —— | 国見断層による地震 | - - - | 老岐北東部断層群による地震 |
| - - - | 真名子-荒谷峠断層による地震 | —— | 対馬南方沖断層による地震 |
| | 銚ノ木山リニアメントによる地震 | - - - | 対馬南西方沖断層による地震 |
| - - - | 警固断層帯による地震 | —— | 1700年老岐・対馬の地震 |
| | 佐賀平野北縁断層帯による地震 | - - - | 2005年福岡県西方沖地震 |

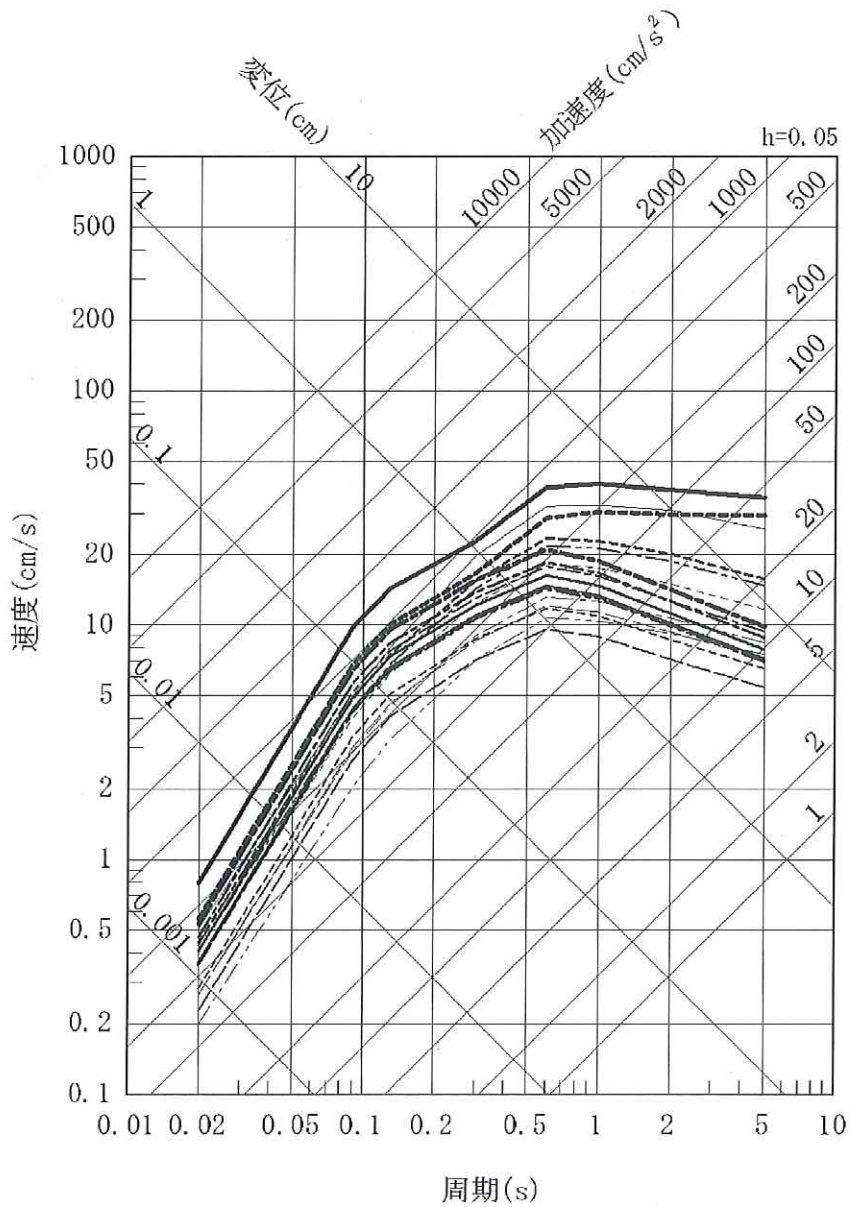


図 4 8 検討用地震の選定のための応答スペクトルの比較

(4) 検討用地震の地震動評価における震源モデルの設定

検討用地震の地震動評価では、「応答スペクトルに基づく地震動評価」及び「断層モデルを用いた手法による地震動評価」を行った。検討用地震の地震動評価の流れを図49に示す。

検討用地震の地震動評価に当たっては、まず、前述の調査結果及び観測記録に基づく分析等により十分に把握された地域的な特徴を踏まえ、基本とする地震の震源モデル（以下「基本震源モデル」という。）を十分安全側に構築した。

次いで、基準地震動の策定過程において、不確かさが存在することを念頭に置き、前述の調査結果及び観測記録に基づく分析等によっても、それでもなお十分には把握されていない、または、できないものについては、不確かさとして考慮し、不確かさを考慮したモデル（以下「不確かさ考慮モデル」という。）を構築した。

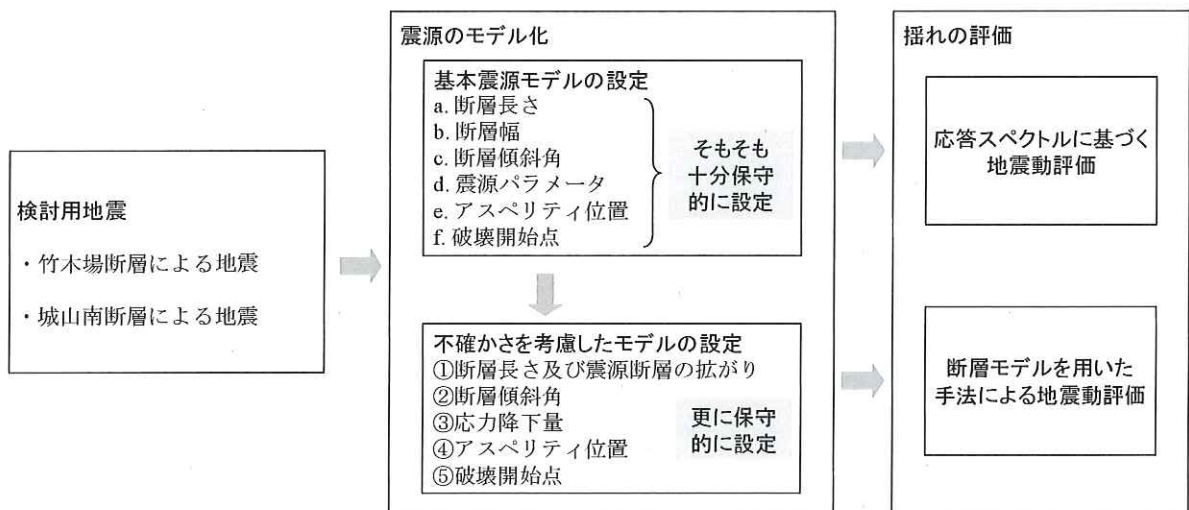


図49 検討用地震の地震動評価の流れ

ア 基本震源モデルの設定

「2(2) 地質・地震に関する調査・観測」における調査結果及び観測記録に基づく分析等に基づき、基本震源モデルの断層パラメータを設定した。「竹木場断層による地震」及び「城山南断層による地震」の2地震の基本震源モデルの断層パラメータの設定根拠を表2に示す。かかる検討用地震の基本震源モデルをそれぞれ図50及び図51に示す。基本震源モデルのパラメータは、地震本部(2009)による強震動予測レシピに基づき設定した。また、安全側に評価するため、アスペリティ位置は、敷地に最も近い位置とし、破壊開始点⁶⁴は、破壊の進行方向が敷地に向かう方向となるように、断層下端に設定した。

表2 パラメータの設定根拠（基本震源モデル）

パラメータ		基本震源モデルのパラメータ設定根拠	
巨視的 パラメータ	震源断層の 形状等	断層長さ	断層長さは、地質調査結果に基づき、設定する。ただし、「孤立した短い活断層」については断層傾斜角及び地震発生層を考慮した断層幅と同じ長さに設定する。
		震源断層の拡がり	震源断層の拡がりは、地質調査結果に基づき設定する。ただし、「孤立した短い活断層」については、地表トレースの中心から両端に均等に設定する。
		断層傾斜角	傾斜角は、原子力安全基盤機構(2005)によると九州地方は横ずれ断層が主体と考えられることから、強震動予測レシピに基づき、90度と設定する。ただし、「竹木場断層による地震」は断層露頭及び発生地震の傾斜角を参考に80度と設定する。
		地震発生層	地震発生層上下端深さは、2005年福岡県西方沖地震の臨時余震観測等を踏まえ、上端3km、下端20kmと設定する。地震発生層厚さは、17kmと設定する。
	マグニチュード	断層長さから松田(1975)に基づき、設定する。	
	地震モーメント	断層面積から入倉・三宅(2001)に基づき、設定する。	
微視的 パラメータ	アスペリティの位置、数	地表トレースの範囲内で敷地に最も近い位置の断層上端1箇所を設定する。	
	アスペリティの応力降下量、 平均すべり量	2005年福岡県西方沖地震の観測記録を用いた検討を踏まえ、強震動予測レシピに従い、経験式に基づき、設定する。	
	背景領域の応力降下量、 平均すべり量		
	すべり速度時間関数	短周期領域では用いていない。 長周期領域では中村・宮武(2000)に基づき、設定する。	
	高周波遮断特性	2005年福岡県西方沖地震の観測記録を用いた検討を踏まえ、設定する。	
その他 のパラメータ	破壊伝播速度	強震動予測レシピに従い、経験式に基づき、設定する。	
	破壊開始点	巨視的断層面の端部で破壊が敷地に向かうような位置に設定する。	
	破壊伝播様式	強震動予測レシピに従い、放射状の破壊伝播を設定する。	

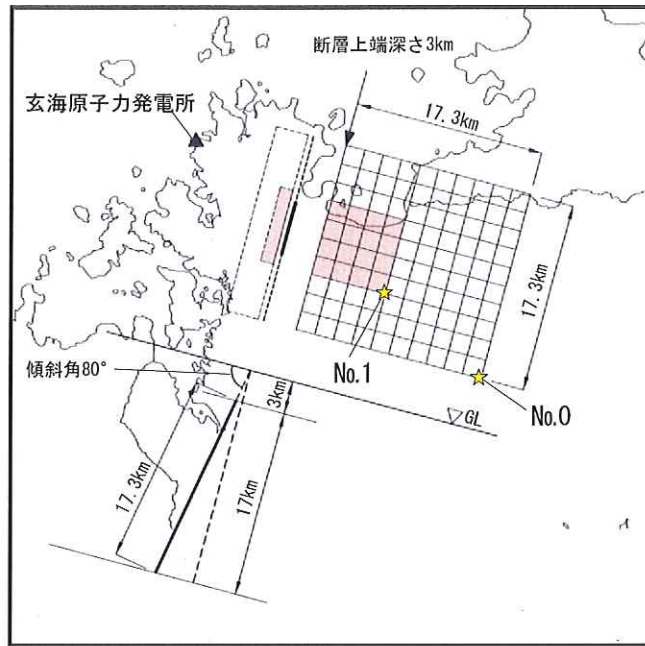


図50 竹木場断層による地震（基本震源モデル）

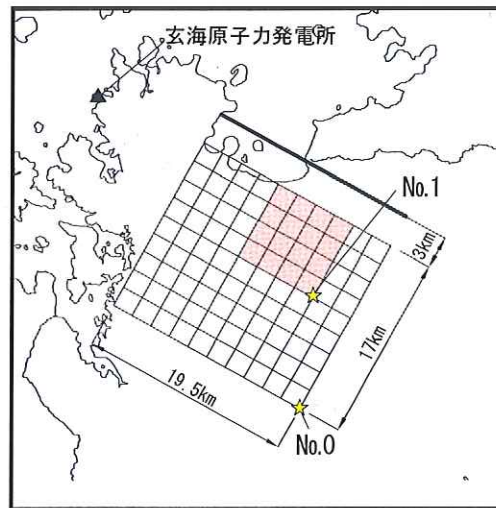


図51 城山南断層による地震（基本震源モデル）

イ 不確かさ考慮モデル

検討用地震について、基準地震動の策定過程における不確かさを考慮した場合の地震動評価を行った。不確かさの考慮の有無について、その根拠を整理したものを表3に示す。表3に示すとおり、不確かさを考慮するパラメータは、調査結果及び地震観測記録の分析から不確かさを考慮する必要のないパラメータを除き、①断層長さ及び震源断層の広がり、②断層傾斜角、③応力降下量、④アスペリティの位置及び⑤破壊開始点の5つとした。

図5-2に示すとおり、考慮する5つの不確かさを「地震発生前におおよそ把握できるもの」と「地震発生前に把握が困難なもの」に分類した。①断層長さ及び震源断層の広がり、②断層傾斜角及び③応力降下量については、地震発生前に、地質調査、敷地周辺の地震発生状況及び地震に関する過去のデータによる経験則からおおよそ把握できるものであり、①～③の不確かさについては、それぞれ独立して考慮した。また、④アスペリティの位置及び⑤破壊開始点については、地震発生前に把握が困難なもの（地震発生後に分析等により把握できるもの）であり、①～③の不確かさを考慮する際に、④及び⑤の不確かさを重畳させた。

不確かさを考慮するパラメータを表4に、検討ケースを表5～6に、不確かさ考慮モデルの震源モデルをそれぞれ図5-3～図5-4に示す。

応力降下量の不確かさは、基本震源モデルにおいて本件原子力発電所の地域的な特性を反映しているが、2007年新潟県中越沖地震（マグニチュード6.8）の知見を踏まえ、短周期レベルAに関する既往の経験式の1.5倍相当の値を考慮して、地震動評価を行った。

断層傾斜角の不確かさは、強震動予測レシピ等を参考に断層傾斜角を60度とし、地震動評価を行った。

断層長さ及び震源断層の広がり不確かさは、Stirling et al.(2002)⁶⁵による知見を踏まえ、断層長さを20kmとし、敷地に最も近い位置に震源断層面を想定したものを考慮して地震動評価を行った。

また、破壊開始点の不確かさは、敷地への影響の程度を考慮し、アスペリティの破壊が敷地に向かう方向となる複数ケースを選定し、地震動評価を行った。

なお、「応答スペクトルに基づく地震動評価」では、③応力降下量及び⑤破壊開始点の不確かさについて考慮できないものの、①断層長さ及び震源断層の拡がり、②断層傾斜角及び④アスペリティの位置については不確かさを考慮している。Noda et al.(2002)の方法では、震源断層面の拡がりや断層面の不均質（アスペリティの分布）を考慮して補正した等価震源距離を用いており、断層面の拡がりや不均質性による効果を考慮できる。特に④アスペリティの位置の不確かさを考慮したケースでは、アスペリティを敷地近傍に設定することによって、等価震源距離を短くし、敷地に厳しい地震動を与えるような評価を実施している。

表 3 パラメータの設定根拠（不確かさ考慮モデル）

パラメータ		不確かさ考慮の有無・根拠	
巨視的パラメータ	震源断層の形状等	断層長さ	断層長さは、Stirling et al. (2002)の知見によると、地表地震断層長さと震源断層長さの関係から地表断層長さが小さくなくても震源断層長さは約20km付近に漸近することから、20kmと設定する。
		震源断層の広がり	震源断層の広がり、地質調査による地表トレースを含む範囲内で敷地に近づく方向に震源断層面を設定する。
		断層傾斜角	強震動予測レシピ等を参考に、60度（敷地側に傾斜）と設定する。
		地震発生層	地震発生層上下端深さは、敷地周辺では、地震観測記録等の多くの情報が得られていることから、不確かさの考慮は行わない。
	マグニチュード	マグニチュードは、断層長さの不確かさを考慮することに伴い、不確かさを考慮する。	
地震モーメント	地震モーメントは、断層長さ又は断層傾斜角の不確かさを考慮することに伴い、不確かさを考慮する。		
微視的パラメータ	アスペリティの位置、数	地質調査結果で得られた地表トレースの範囲を超えて、敷地に最も近い断層上端1箇所に設定する。	
	アスペリティの応力降下量、平均すべり量	アスペリティ及び背景領域の応力降下量は、2007年新潟県中越沖地震を踏まえ、強震動予測レシピの1.5倍に設定する。アスペリティ及び背景領域の平均すべり量は、断層長さ又は断層傾斜角の不確かさを考慮することに伴い、不確かさを考慮する。	
	背景領域の応力降下量、平均すべり量		
	すべり速度時間関数	中村・宮武(2000)では、他のパラメータの不確かさで間接的に考慮されているため、不確かさの考慮は行わない。	
高周波遮断特性	2005年福岡県西方沖地震の観測記録を用いた検討により2005年福岡県西方沖地震の敷地地盤における地震記録を模擬できていることを確認していることから、不確かさの考慮は行わない。		
その他のパラメータ	破壊伝播速度	2005年福岡県西方沖地震の観測記録を用いた検討により強震動予測レシピの適用性を確認していることから、不確かさの考慮は行わない。	
	破壊開始点	敷地への影響が大きくなることを考慮して、破壊が敷地に向かうような位置に複数ケース設定する。	
	破壊伝播様式	敷地への影響が大きくなることを考慮して破壊開始点を設定しており、基本震源モデルで設定した放射状の伝播による影響が大きいと判断し、不確かさの考慮は行わない。	

不確かさを考慮するパラメータ

- ① 断層長さ及び震源断層の拡がり
- ② 断層傾斜角
- ③ 応力降下量
- ④ アスペリティの位置
- ⑤ 破壊開始点

地震発生前に、地質調査、敷地周辺の地震発生状況及び地震に関する過去のデータによる経験則からおおよそ把握できるもの

地震発生前に把握が困難なもの
(地震発生後の分析等により把握できるもの)



不確かさの重畳について

- ① 断層長さ及び震源断層の拡がり、② 断層傾斜角、③ 応力降下量については、地震発生前におおよそ把握できると考えられるため、①～③の不確かさについては、それぞれ独立して考慮する。
- ④ アスペリティの位置、⑤ 破壊開始点については、地震発生前に把握が困難であるため、①～③の不確かさを考慮する際に、④・⑤の不確かさを重畳させる。

図 5 2 不確かさを考慮するパラメータの基本的な考え方

表 4 不確かさを考慮するパラメータ

パラメータ	基本震源モデル	不確かさ考慮モデル
断層長さ及び震源断層の拡がり	地質調査結果に基づき、設定※1	Stirling et al.(2002)を踏まえ、20kmと設定し、地表トレースを含む範囲内で敷地に近づく方向に震源断層面を設定
断層傾斜角	九州地方は横ずれ断層が主体であることから、90度と設定※2	強震動予測レシピ等を参考に、60度(敷地側に傾斜)と設定。
応力降下量	敷地で得られた地震観測記録に基づく検討を踏まえ、強震動予測レシピにより設定	新潟県中越沖地震を踏まえ、強震動予測レシピの1.5倍に設定
アスペリティの位置	地表トレースの範囲内で敷地に最も近い位置に設定	敷地に近い位置に設定
破壊開始点	巨視的断層面の端部で破壊が敷地に向かう位置に設定	破壊が敷地に向かうような位置に複数設定

※ 1 : 孤立した短い活断層は17kmと設定し、地表トレース長さの midpoint から両端に均等に震源断層面を設定

※ 2 : 竹木場断層は断層露頭及び発生地震の傾斜角を参考に80度と設定

表5 不確かさ考慮モデルの検討ケース（竹木場断層による地震）

検討ケース	断層長さ及び震源断層の拡がり	断層傾斜角	応力降下量	アスペリティの位置	破壊開始点
基本震源モデル	17.3km	80度	強震動予測レシビにより設定	地表トレースの範囲内で敷地に最も近い位置に設定	巨視的断層面の端部で破壊が敷地に向かう位置に設定
不確かさ考慮モデル (断層長さ及び震源断層の拡がりの不確かさ)	20.0km	80度	強震動予測レシビにより設定	敷地に近い位置に設定	複数設定
不確かさ考慮モデル (断層傾斜角の不確かさ)	19.7km	60度	強震動予測レシビにより設定	敷地に近い位置に設定	複数設定
不確かさ考慮モデル (応力降下量の不確かさ)	17.3km	80度	新潟県中越沖地震を踏まえ、強震動予測レシビの1.5倍に設定	敷地に近い位置に設定	複数設定

不確かさを考慮して設定するパラメータ
 不確かさを重畳するパラメータ

表6 不確かさ考慮モデルの検討ケース（城山南断層による地震）

検討ケース	断層長さ及び震源断層の拡がり	断層傾斜角	応力降下量	アスペリティの位置	破壊開始点
基本震源モデル	19.5km	90度	強震動予測レシビにより設定	地表トレースの範囲内で敷地に最も近い位置に設定	巨視的断層面の端部で破壊が敷地に向かう位置に設定
不確かさ考慮モデル (断層長さ及び震源断層の拡がりの不確かさ)	20km	90度	強震動予測レシビにより設定	敷地に近い位置に設定	複数設定
不確かさ考慮モデル (断層傾斜角の不確かさ)	19.7	60度	強震動予測レシビにより設定	敷地に近い位置に設定	複数設定
不確かさ考慮モデル (応力降下量の不確かさ)	19.5	90度	新潟県中越沖地震を踏まえ、強震動予測レシビの1.5倍に設定	敷地に近い位置に設定	複数設定

不確かさを考慮して設定するパラメータ
 不確かさを重畳するパラメータ

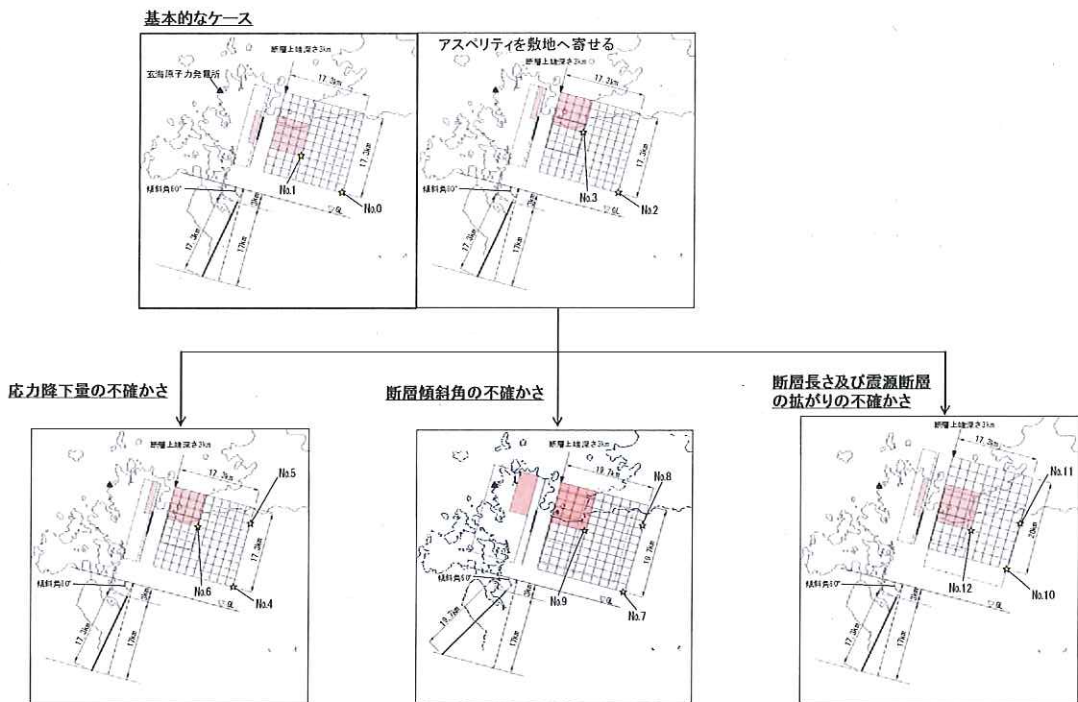


図 5 3 「竹木場断層による地震」の不確かさ考慮モデル

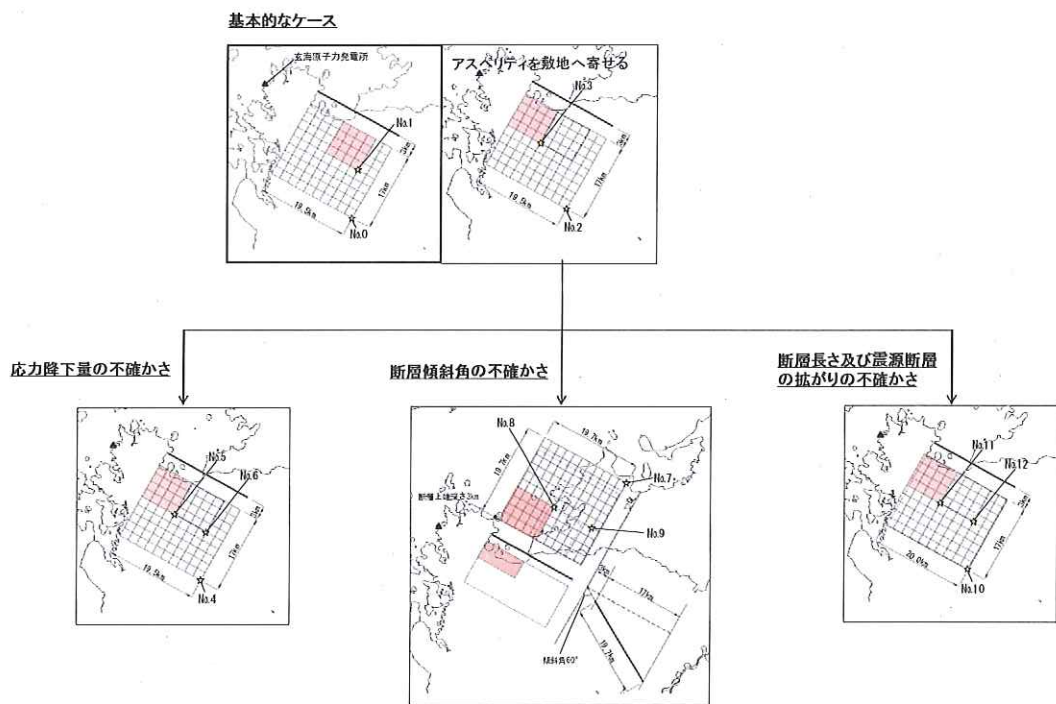


図 5 4 「城山南断層による地震」の不確かさ考慮モデル

(5) 応答スペクトルに基づく地震動評価

「応答スペクトルに基づく地震動評価」は、マグニチュードや等価震源距離などの数少ないパラメータから地震による揺れを「応答スペクトル」により評価するものである。

「応答スペクトルに基づく地震動評価」では、まず、「過去の地震動の平均像」に関する知見に基づいた地震動を評価（算出）した。具体的には、「関東・東北地方の平均像」を導き出す手法である Noda et al. (2002) による手法を用いて評価を実施した。Noda et al. (2002)の手法は、前述のとおり、岩盤における観測記録に基づいて提案された距離減衰式で、解放基盤表面⁶⁶における水平方向及び鉛直方向の地震動の応答スペクトルを予測することができる。

「応答スペクトルに基づく地震動評価」による地震動は、過去の地震動の平均像を地域的な特性を踏まえて、補正すること（実際の観測記録が小さいこと（図4-1）を踏まえ下方修正すること）も可能であったが、被告九州電力は、地震動評価がより安全側となるべく、補正を実施せず、実際の観測記録を上回る「関東・東北地方の平均像」を「応答スペクトルに基づく地震動評価」による地震動とした。

(6) 断層モデルを用いた手法による地震動評価

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価は、前述した「応答スペクトルに基づく地震動評価」に加え、「断層モデルを用いた手法による地震動評価」を実施する。「断層モデルを用いた手法による地震動評価」では、地域的な特性（震源特性、伝播経路特性及びサイト特性）を詳細に反映することが可能であり、「時刻歴波形⁶⁷」（主に加速度時刻歴波形）により評価するものである。

被告九州電力は、詳細に設定した基本震源モデルを基に、「伝播経路特性」や「サイト特性」を精度よく反映できる経験的グリーン関数法及び経験的グリーン関数法と理論的方法によるハイブリッド合成法を用いて精緻な評価を行い、本件原子力発電所敷地周辺の地域的な特性を反映し

た地震動（実像）を「断層モデルを用いた手法による地震動評価」による地震動とした。

その際、経験的グリーン関数法で用いる要素地震⁶⁸は、敷地までの地震波の伝わり方（伝播経路特性・サイト特性）の地域的な特性が反映されている適切な観測記録（2005年3月22日福岡県西方沖地震の余震、マグニチュード5.4）が敷地で得られていたため、これを用いた。

理論的手法で用いる地下構造モデルは、試掘坑内弾性波試験の調査結果、微動アレイ探査から推定されたせん断波速度構造及び既往の知見（宮腰ほか(2004)⁶⁹、地震調査研究推進本部(2003)⁷⁰）を参考に設定した。

(7) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」による基準地震動の策定

「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」による基準地震動の策定においては、敷地に大きな影響を及ぼす可能性があるとして選定した2つの検討用地震（「城山南断層による地震」及び「竹木場断層による地震」）それぞれについて、不確かさも考慮した上で、「応答スペクトルに基づく地震動評価」による地震動を求め、それらを全て包絡する「設計用応答スペクトル」を設定し、これを基準地震動 Ss-1（最大加速度 540 ガル）とした（図55）。

次に、それぞれの検討用地震について、「断層モデルを用いた手法による地震動評価」による応答スペクトルを求め、基準地震動 Ss-1（設計用応答スペクトル）と比較を行った（図56～58）。その結果、「城山南断層による地震」の断層傾斜角の不確かさを考慮した場合（破壊開始点3）及び「竹木場断層による地震」の断層傾斜角の不確かさを考慮した場合（破壊開始点2）の断層モデルを用いた手法による地震動評価結果が、一部の周期帯において基準地震動 Ss-1（設計用応答スペクトル）による応答スペクトルを上回ったため、前者を基準地震動 Ss-2（最大加速度 268 ガル）、後者を基準地震動 Ss-3（最大加速度 524 ガル）とした。

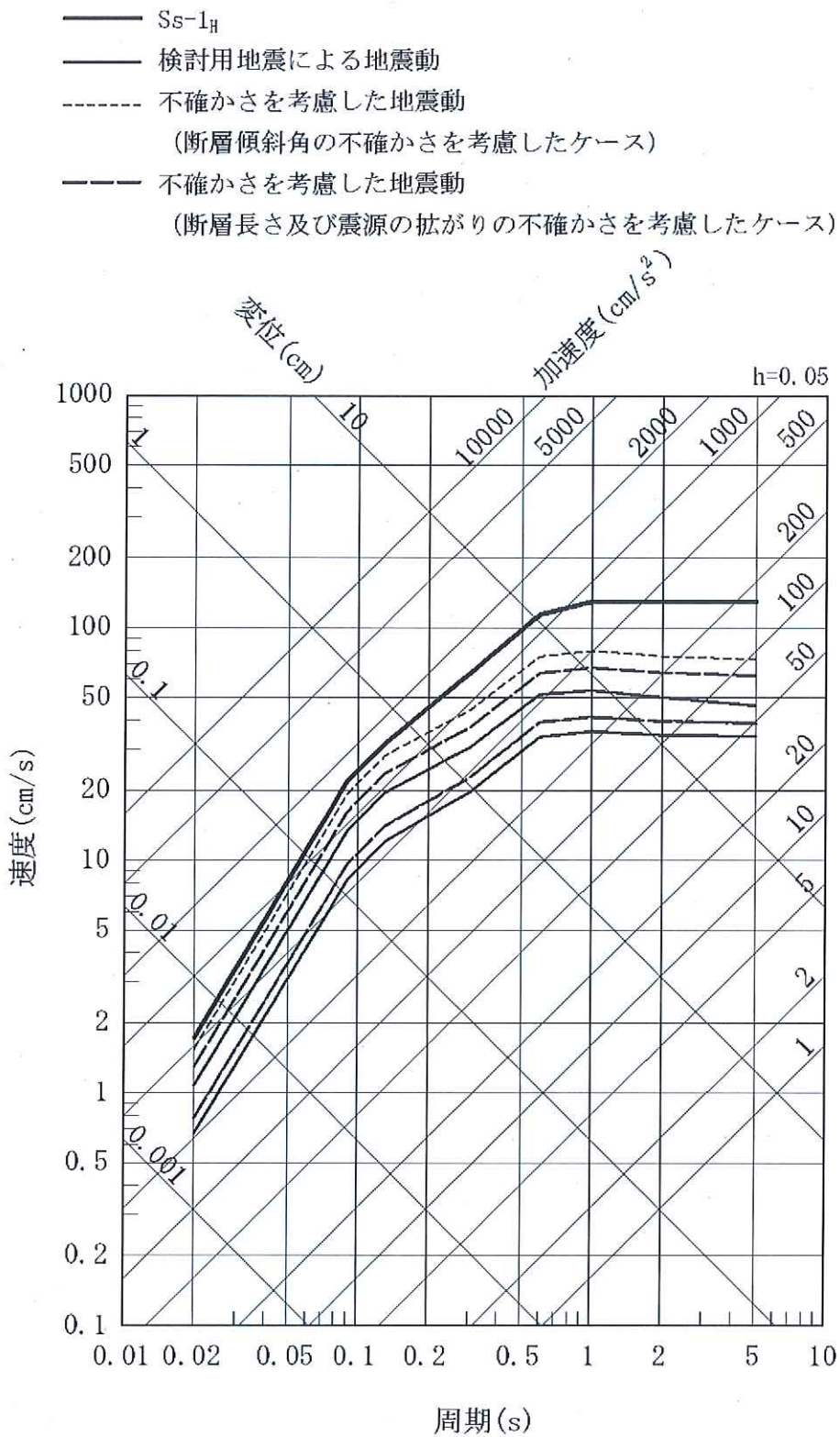


図 5 5 基準地震動 S_s-1 (設計用応答スペクトル) 及び検討用地震の応答スペクトル (応答スペクトルに基づく手法)

——— S_s-1_H
 - - - 検討用地震による地震動

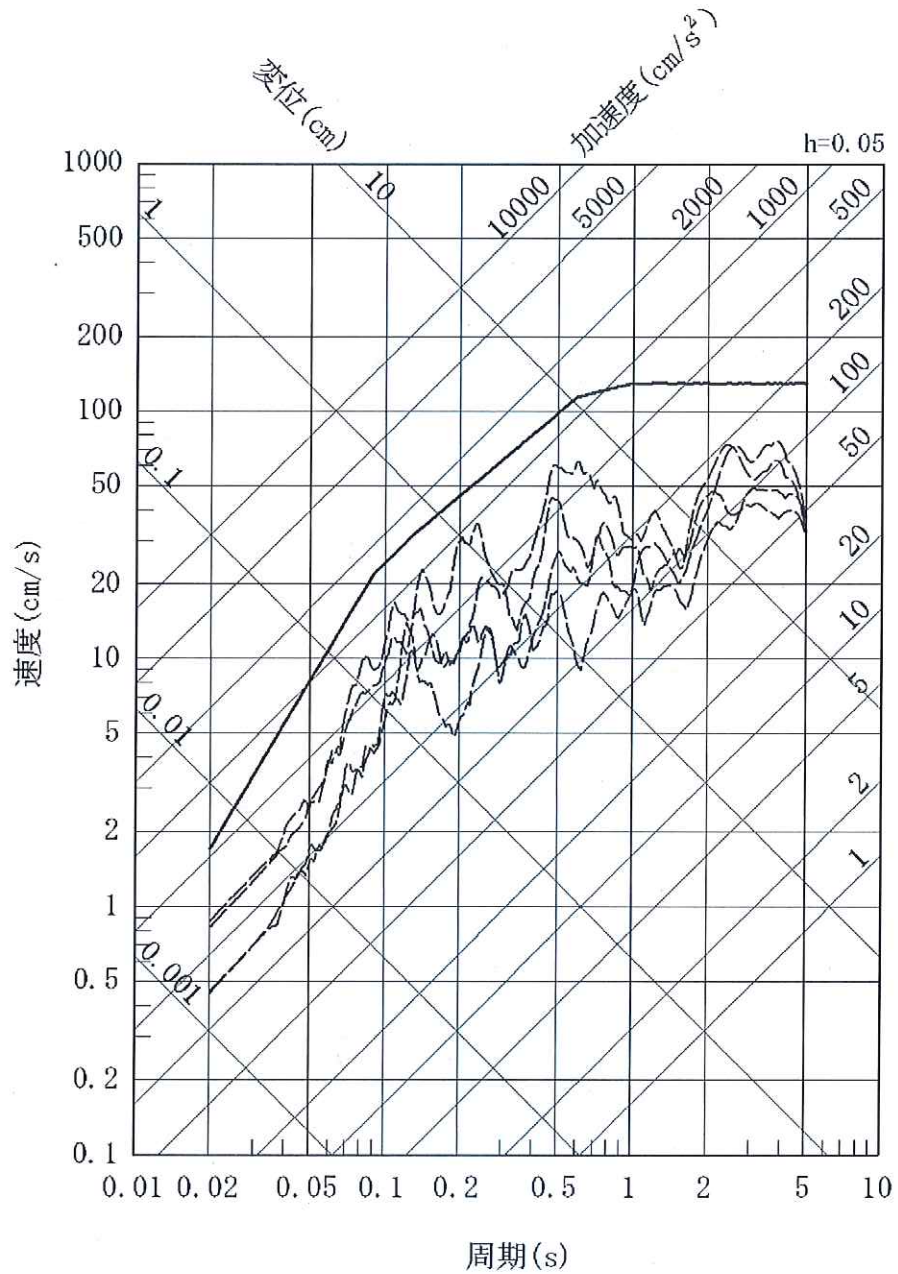


図 5 6 基準地震動 S_s-1 (設計用応答スペクトル) 及び検討用地震の応答スペクトル (断層モデルを用いた手法)

- Ss-1_H
- 断層モデルを用いた手法 竹木場断層による地震
(経験的グリーン関数法、断層傾斜角の不確かさを考慮したケース 破壊開始点2)
- 断層モデルを用いた手法 城山南断層による地震
(経験的グリーン関数法、断層傾斜角の不確かさを考慮したケース 破壊開始点3)
- 断層モデルを用いた手法 (経験的グリーン関数法、不確かさを考慮したケース)

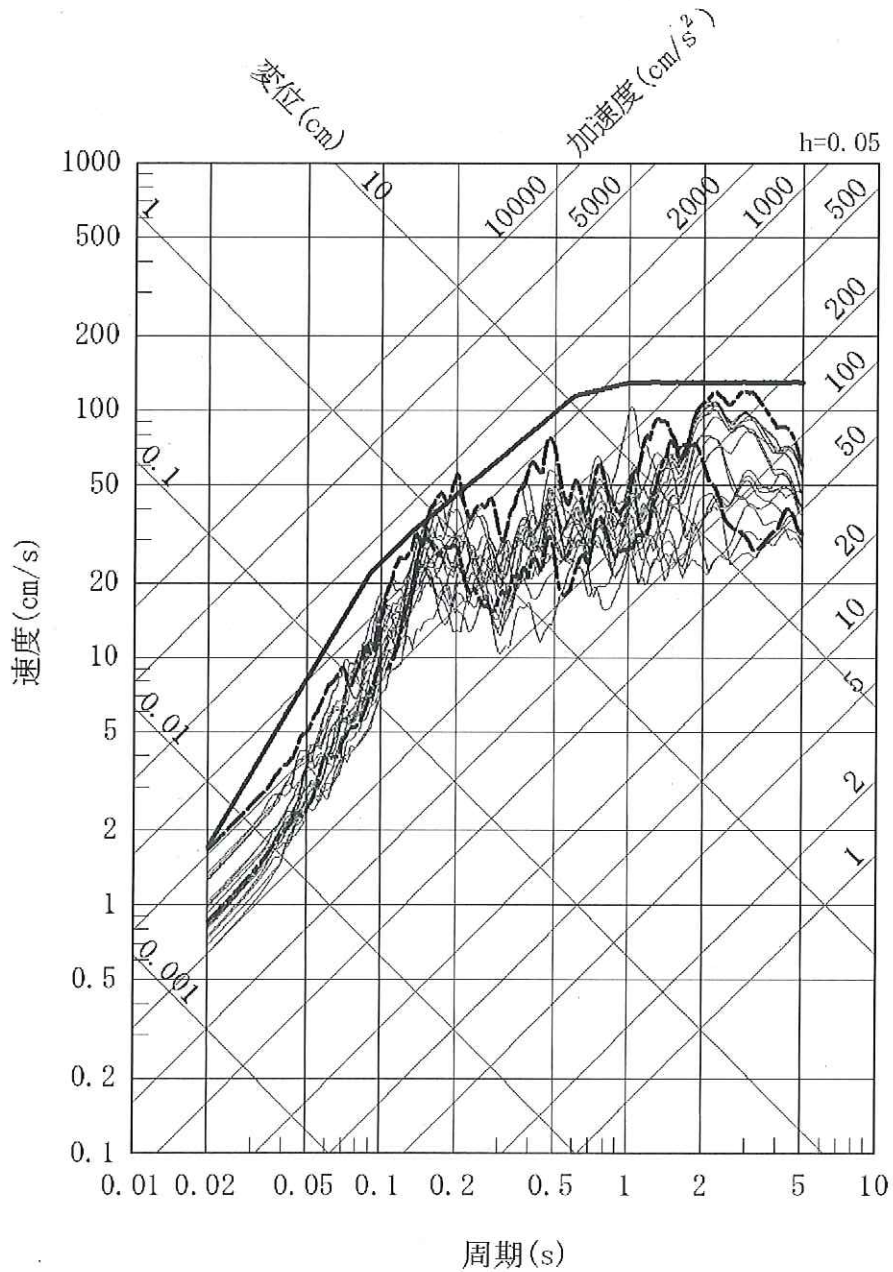


図 5 7 基準地震動 Ss-1 (設計用応答スペクトル) 及び検討用地震の応答スペクトル (断層モデルを用いた手法 : NS 方向)

- $Ss-1_H$
- 断層モデルを用いた手法 竹木場断層による地震
(経験的グリーン関数法、断層傾斜角の不確かさを考慮したケース 破壊開始点2)
- 断層モデルを用いた手法 城山南断層による地震
(経験的グリーン関数法、断層傾斜角の不確かさを考慮したケース 破壊開始点3)
- 断層モデルを用いた手法 (経験的グリーン関数法、不確かさを考慮したケース)

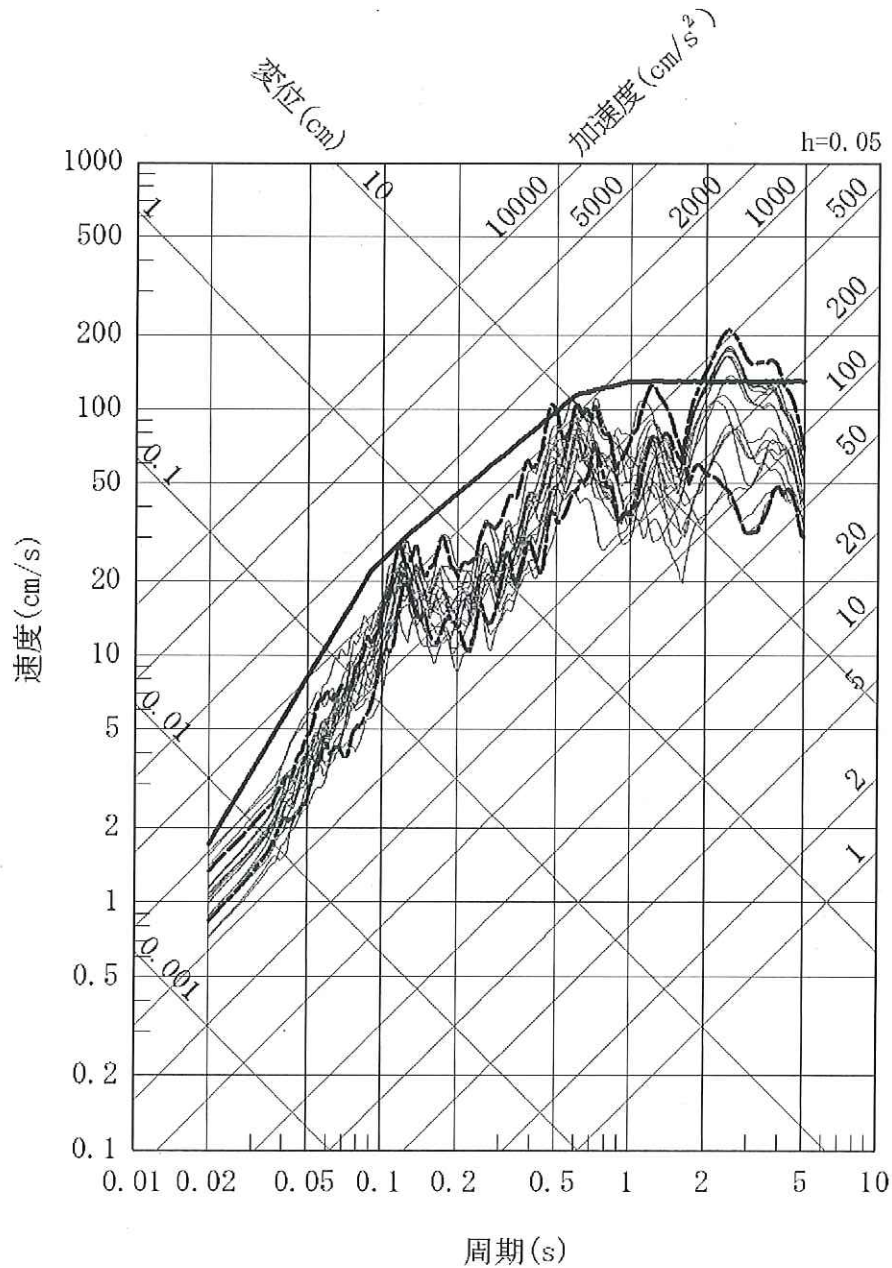


図 5 8 基準地震動 $Ss-1$ (設計用応答スペクトル) 及び検討用地震の応答スペクトル (断層モデルを用いた手法 : EW 方向)

(8) まとめ

以上のとおり、被告九州電力が「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」を評価して策定した基準地震動 Ss-1, Ss-2, Ss-3 は、地震動研究の知見を踏まえて発展し、精度も飛躍的に向上した地震動評価手法に基づき、地域的な特性（「震源特性」、「伝播経路特性」及び「サイト特性」）を踏まえて、安全側の評価となるよう「基本震源モデル」に十分な余裕を持たせた上で策定したものであり、その結果は妥当なものである。

3 震源を特定せず策定する地震動

(1) 策定方針

被告九州電力は、前述のとおり、本件原子力発電所の敷地及び敷地周辺において、文献調査、変動地形学的調査、地球物理学的調査、地表地質調査等の最新の手法による詳細な調査を実施し、特に、敷地においては、地表地質調査、ボーリング調査（272 孔、総延長約 19,300m）、試掘坑調査等、より精度の高い詳細な調査を実施している。その結果、本件原子力発電所の敷地及び敷地近傍において、本件原子力発電所の耐震安全性に影響を及ぼすような活断層がないことを確認している。さらに、基本震源モデルにおいて、地域的な特性（「震源特性」、「伝播経路特性」及び「サイト特性」）を踏まえ、十分安全側の設定をするとともに、不確かさを考慮すること等により、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」において、十分安全側に地震動を評価している。

したがって、本件原子力発電所の敷地及び敷地周辺においては、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」以外の敷地に影響を与える大きな地震動が発生する可能性はなく、敷地において発生し得る地震動は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」による地震動評価で十分であると判断した。しかしながら、審査ガイドにおいて、旧指針における「直下地震」と同じく、「震源を特定せず策定する地震動」の策定が求められていることを踏まえ、念には念を入れた耐震設計のために「震源

を特定せず策定する地震動」を策定することとした。

(2) 「震源を特定せず策定する地震動」による基準地震動の策定

ア 審査ガイドにおいて例示された地震

審査ガイドには原子力規制委員会及び多数の専門家による検討の結果、震源を特定せず策定する地震動において考慮すべき16地震(表7)が選定されており、被告九州電力は、これらの地震の観測記録を収集して検討した結果、2000年鳥取県西部地震における賀祥ダムの観測記録及び2004年北海道留萌支庁南部地震におけるK-NET港町観測点の観測記録を評価対象として選定した。

表7 審査ガイドに例示される16地震

No	地震名	日時	規模
①	2008年岩手・宮城内陸地震	2008/06/14, 08:43	Mw6.9
②	2000年鳥取県西部地震	2000/10/06, 13:30	Mw6.6
③	2011年長野県北部地震	2011/03/12, 03:59	Mw6.2
④	1997年3月鹿児島県北西部地震	1997/03/26, 17:31	Mw6.1
⑤	2003年宮城県北部地震	2003/07/26, 07:13	Mw6.1
⑥	1996年宮城県北部(鬼首)地震	1996/08/11, 03:12	Mw6.0
⑦	1997年5月鹿児島県北西部地震	1997/05/13, 14:38	Mw6.0
⑧	1998年岩手県内陸北部地震	1998/09/03, 16:58	Mw5.9
⑨	2011年静岡県東部地震	2011/03/15, 22:31	Mw5.9
⑩	1997年山口県北部地震	1997/06/25, 18:50	Mw5.8
⑪	2011年茨城県北部地震	2011/03/19, 18:56	Mw5.8
⑫	2013年栃木県北部地震	2013/02/25, 16:23	Mw5.8
⑬	2004北海道留萌支庁南部地震	2004/12/14, 14:56	Mw5.7
⑭	2005年福岡県西方沖地震の最大余震	2005/04/20, 06:11	Mw5.4
⑮	2012年茨城県北部地震	2012/03/10, 02:25	Mw5.2
⑯	2011年和歌山県北部地震	2011/07/05, 19:18	Mw5.0

イ Mw6.5 以上の 2 地震についての検討

審査ガイドに示される 16 地震（表 7）のうち Mw6.5 以上の 2 地震（①2008 年岩手・宮城内陸地震，②2000 年鳥取県西部地震）について，その発生した地震の震源域周辺と本件原子力発電所敷地周辺との地質・地質構造等について比較・検討を実施した。

その結果，2008 年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺はひずみ集中帯であり，主に逆断層型の地震が発生する地域であるが，本件原子力発電所敷地周辺はひずみ集中帯のようなひずみが集中する地域ではなく，主に横ずれ断層型の地震が発生する地域であり，両地域は地質学的・地震学的背景が異なるため検討対象から外した。

一方，2000 年鳥取県西部地震の震源域周辺と本件原子力発電所敷地周辺については，地質学的・地震学的背景が異なるものの，両地域は横ずれ断層型が主体であること，相対的にひずみ速度が小さいことなど共通性も見られるため，2000 年鳥取県西部地震を「震源を特定せず策定する地震動」の検討対象地震として選定した。2000 年鳥取県西部地震の震源近傍の記録としては，震源断層のほぼ直上に位置し，かつ，硬い岩盤上に設置されたダムの上（監査廊内）の観測記録である賀祥ダムの観測記録を選定した。なお，賀祥ダムの堰体基礎下の地盤の S 波速度は，本件原子力発電所の解放基盤表面の S 波速度 1.35km/s と同等であるため，賀祥ダムの観測記録を本件原子力発電所の解放基盤表面相当の地震動として扱い，これを「震源を特定せず策定する地震動」として策定した（図 5 9）。

- 2000年鳥取県西部地震を考慮した地震動（水平方向：NS）
- 2000年鳥取県西部地震を考慮した地震動（水平方向：EW）

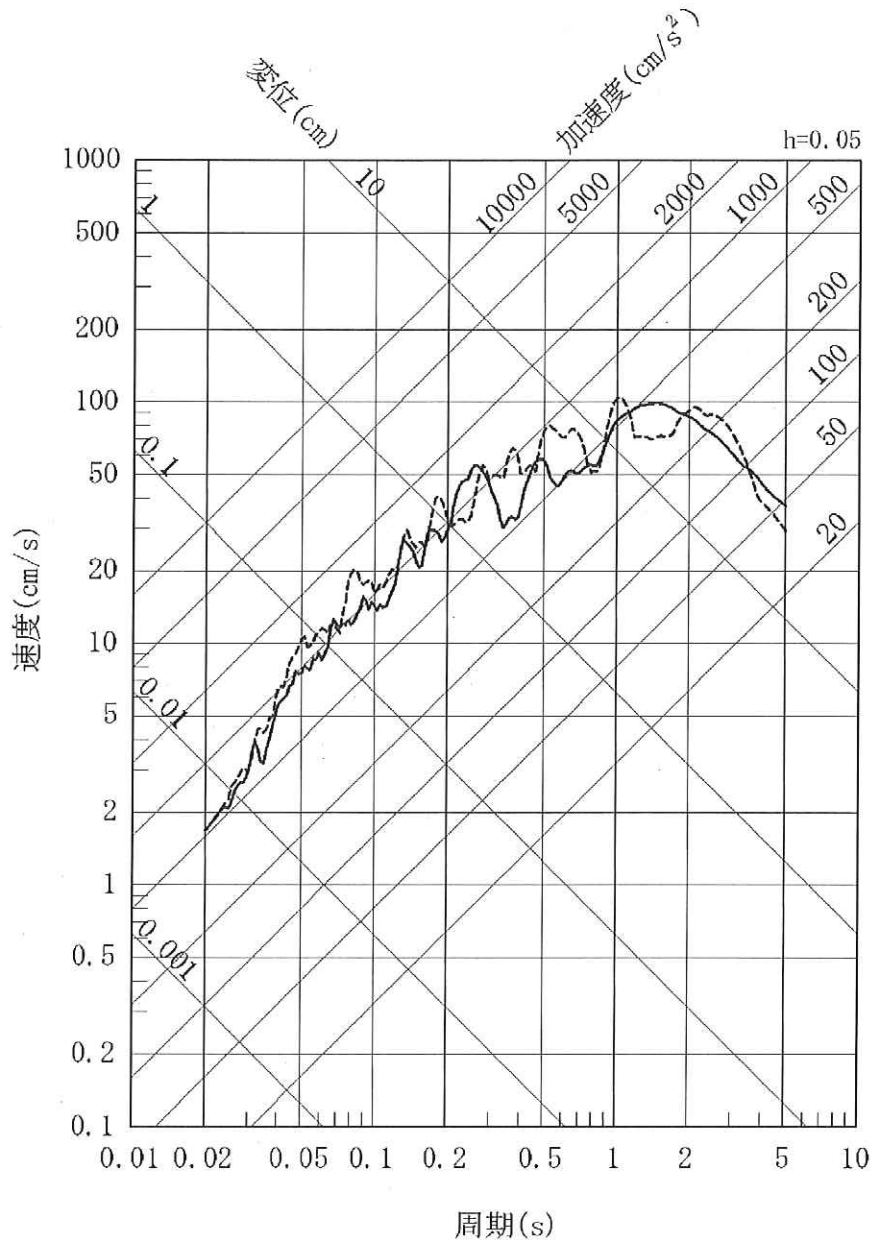


図 5 9 2000年鳥取県西部地震の観測記録を基に策定した「震源を特定せず策定する地震動」の応答スペクトル

ウ Mw6.5 未満の 14 地震についての検討 (図 6 0)

(ア) 審査ガイドに示される 16 地震のうち Mw6.5 未満の 14 地震については、まず、震源近傍 (震源距離 30km 以内) の観測点 112 地点における観測記録を収集し、そのうち地盤が著しく軟らかいと考えられる観測点を除外するため、地下 30m の平均せん断波速度が 500m/s 以上 ($AVS30 \geq 500\text{m/s}$) の観測点 46 地点における観測記録を抽出した。これらの観測記録のうち本件原子力発電所敷地に大きな影響を与える可能性のある地震を抽出するため、加藤ほか(2004)⁷¹による応答スペクトルとの比較・検討を実施した結果、③2011 年長野県北部地震の K-NET 津南、⑩2011 年茨城県北部地震の KiK-net 高萩、⑫2013 年栃木県北部地震の KiK-net 栗山西、⑬2004 年北海道留萌支庁南部地震 K-NET 港町、⑯2011 年和歌山県北部地震 KiK-net 広川の観測記録を抽出した。

抽出したこれら 5 つの観測記録は、本件原子力発電所の解放基盤表面より軟らかい地表の観測点もしくは地中の観測記録であることや地盤非線形を含んでいることから、本件原子力発電所の解放基盤表面相当での地震動を推定するにあたっては、ボーリング調査等による精度の高い地盤情報 (せん断波速度、減衰、非線形特性⁷²など) が必要である。これら 5 つの観測記録が得られた観測点において、上記のような精度の高い地盤情報が得られている観測点は、2004 年北海道留萌支庁南部地震の K-NET 港町観測点のみであったため、当該観測記録を選定した。

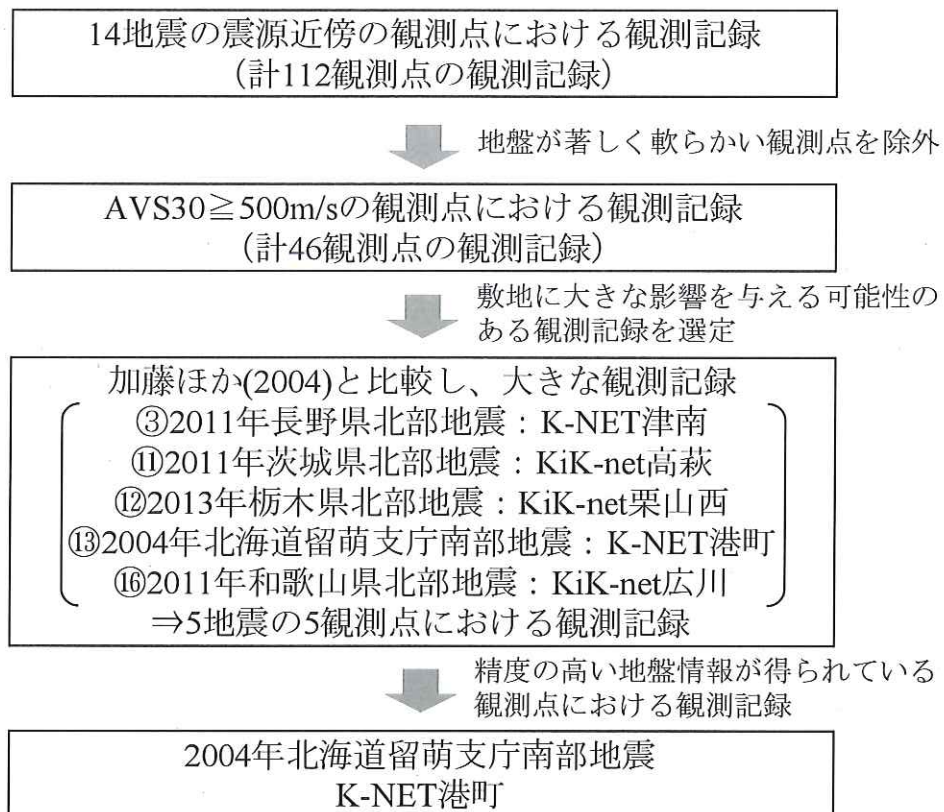


図60 K-NET 港町観測点の観測記録の選定フロー

(イ) 2004年北海道留萌支庁南部地震のK-NET 港町観測点における観測記録を用いた「震源を特定せず策定する地震動」の策定

K-NET 港町観測点においては、佐藤ほか(2013)によるボーリング調査やPS 検層などから、深さ-41mまでの地盤の物性値(せん断波速度など)が、また、室内試験により、深さ-6mまでの地盤の非線形特性(大きな揺れに伴うひずみの増加に応じたせん断波速度の低下や減衰の増加)に係る詳細なデータが得られており、地表から解放基盤表面までの精度の高い地盤データが直接把握できている(図61)。佐藤ほか(2013)の知見では、これらの精度の高い地盤データを基にはぎとり解析⁷³を実施し、深さ-41m(せん断波速度 $V_s=938\text{m/s}$)での解放基盤波(585ガル)が推計されている。被告九州電力は、この佐藤ほか(2013)の知見を基に、地盤の減衰定数のばらつき等を考慮し、解放基盤波(620ガル)を策定し、これを

— 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動

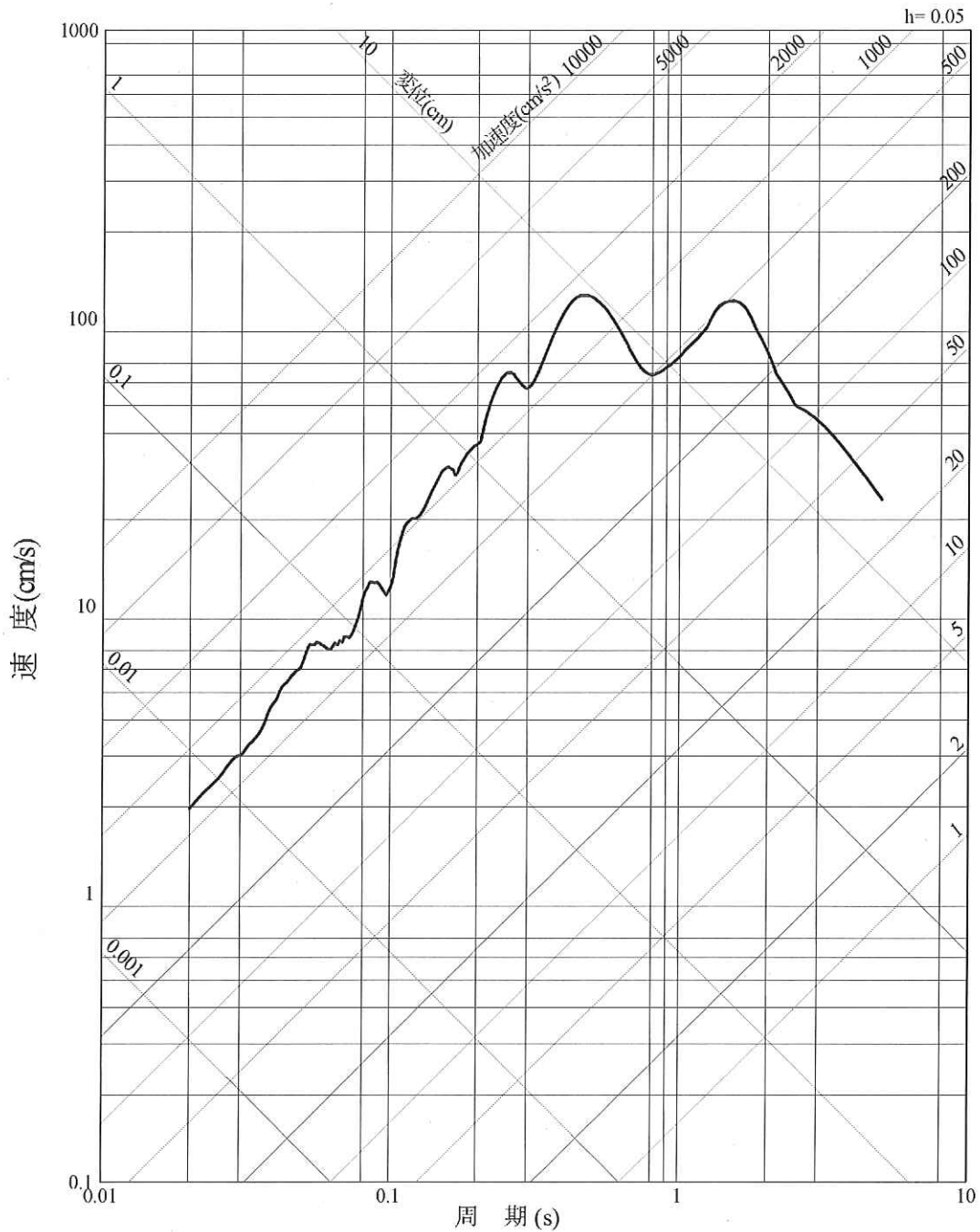


図 6 2 2004年北海道留萌支庁南部地震の観測記録を基に策定した「震源を特定せず策定する地震動」の応答スペクトル

エ 「震源を特定せず策定する地震動」による基準地震動の策定

前述のとおり、「震源を特定せず策定する地震動」は、観測記録（事実）を重要視するものであり、その波形には、実際に発生した地震の地震動の諸特性（周波数特性、継続時間、位相特性等）が含まれるものであるため、2000年鳥取県西部地震賀祥ダムの観測記録及び2004年北海道留萌支庁南部地震のK-NET 港町観測点のはぎとり解析によって求めた地震動をそのまま採用した。

「震源を特定せず策定する地震動」は、「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 Ss-1～3 と比較した結果、一部の周期帯で基準地震動 Ss-1～3 を上回ったため、基準地震動 Ss-1～3 とは個別に取り扱うこととし、2004年北海道留萌支庁南部地震のK-NET 港町観測点のはぎとり解析によって求めた地震動を基準地震動 Ss-4（最大加速度 620 ガル）として、2000年鳥取県西部地震賀祥ダムの観測記録を基に策定した地震動を基準地震動 Ss-5（最大加速度 531 ガル）として策定した（図63～64）。

(3) まとめ

以上のように、被告九州電力が策定した「震源を特定せず策定する地震動」に基づく基準地震動は、被告九州電力が実施した詳細な調査による活断層評価（敷地及び敷地近傍に存在しないこと）及び地域的な特性からは敷地及び敷地近傍では発生しない地震について、念には念を入れ、安全側の観点から考慮したものである。

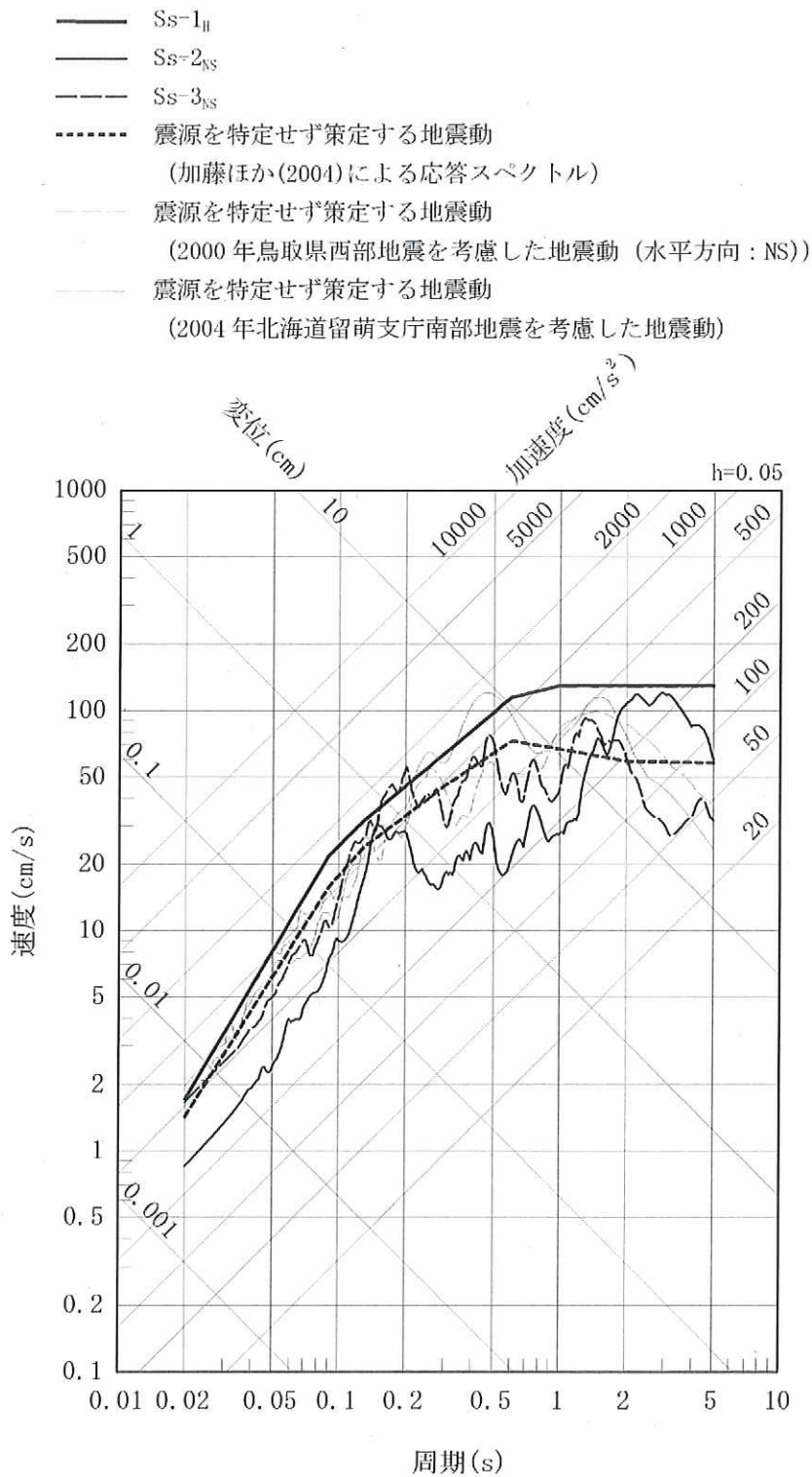


図 6 3 基準地震動 Ss-1~3 及び「震源を特定せず策定する地震動」の
 応答スペクトル (NS 方向)

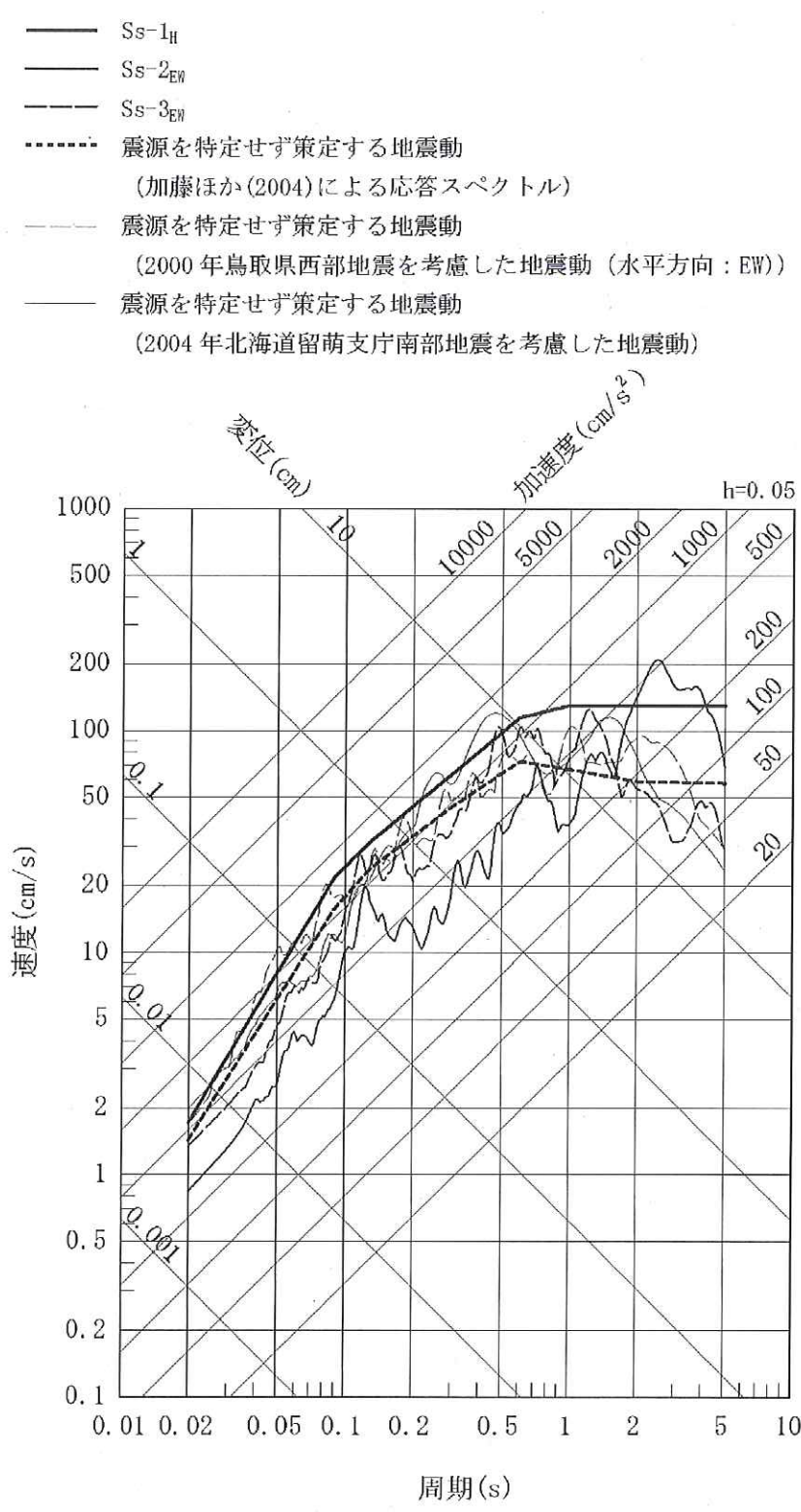


図 6 4 基準地震動 Ss-1~3 及び「震源を特定せず策定する地震動」の
 応答スペクトル (EW 方向)

4 基準地震動 S_s の策定

前述のとおり、基準地震動 S_s は、策定フロー（21 頁，図 1 4）に従い「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」の評価結果に基づき策定した。

基準地震動 S_s としては、S_s-1（最大加速度 540 ガル），S_s-2（最大加速度 268 ガル），S_s-3（最大加速度 524 ガル），S_s-4（最大加速度 620 ガル）及び S_s-5（最大加速度 531 ガル）を策定した。基準地震動 S_s の応答スペクトルを図 6 5 及び図 6 6 に，加速度時刻歴波形を図 6 7～図 7 1 に示す。

なお、本件原子力発電所敷地地盤において観測された既往最大の地震による揺れは、2005 年 3 月 20 日福岡県西方沖地震時における最大加速度 85 ガルであり，上記基準地震動 S_s と比べると著しく小さいものである。

- Ss-1_H
- Ss-2_{NS}
- - - Ss-3_{NS}
- Ss-4_H
- - - Ss-5_{NS}

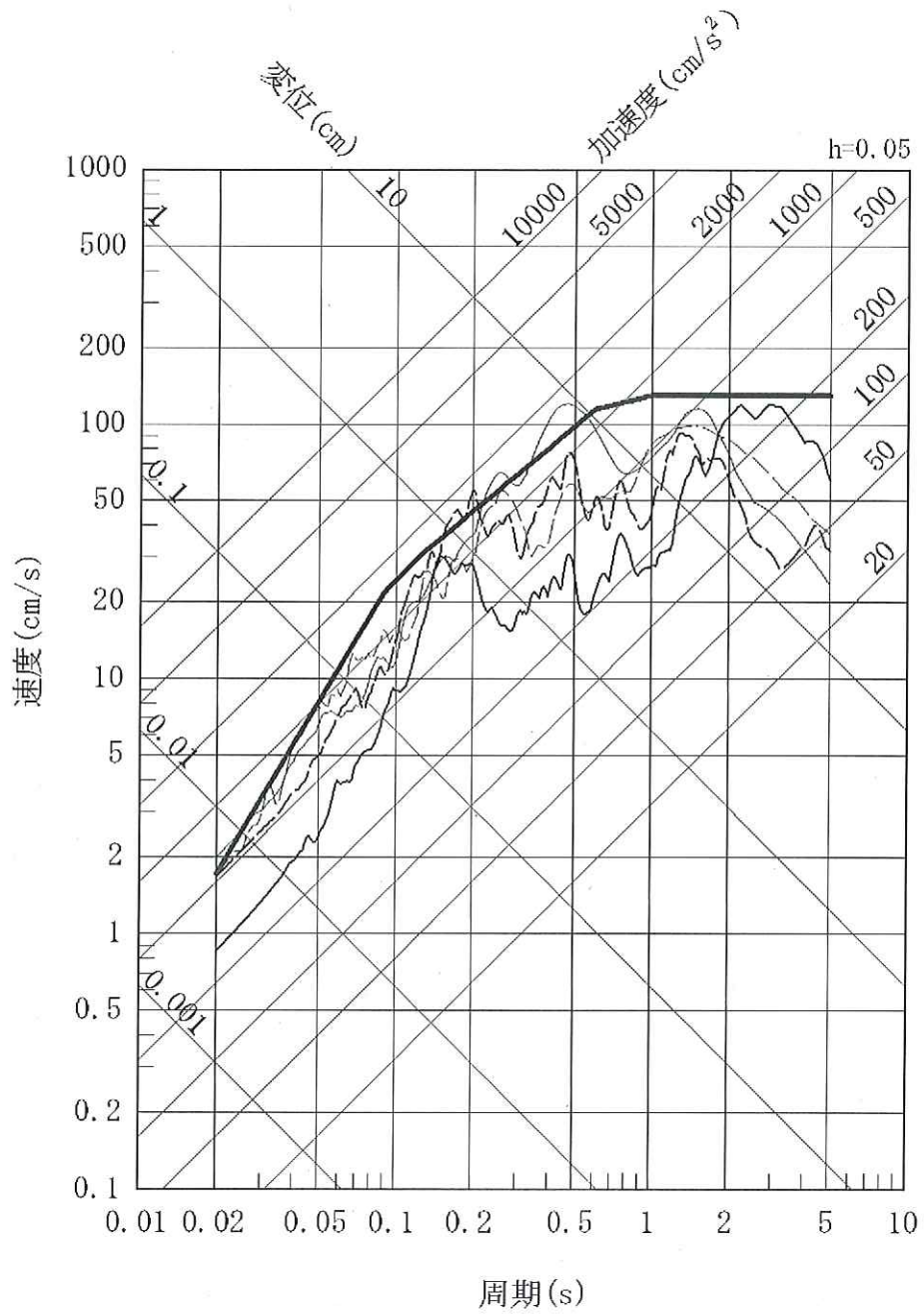


図 6 5 基準地震動 Ss の応答スペクトル (NS 方向)

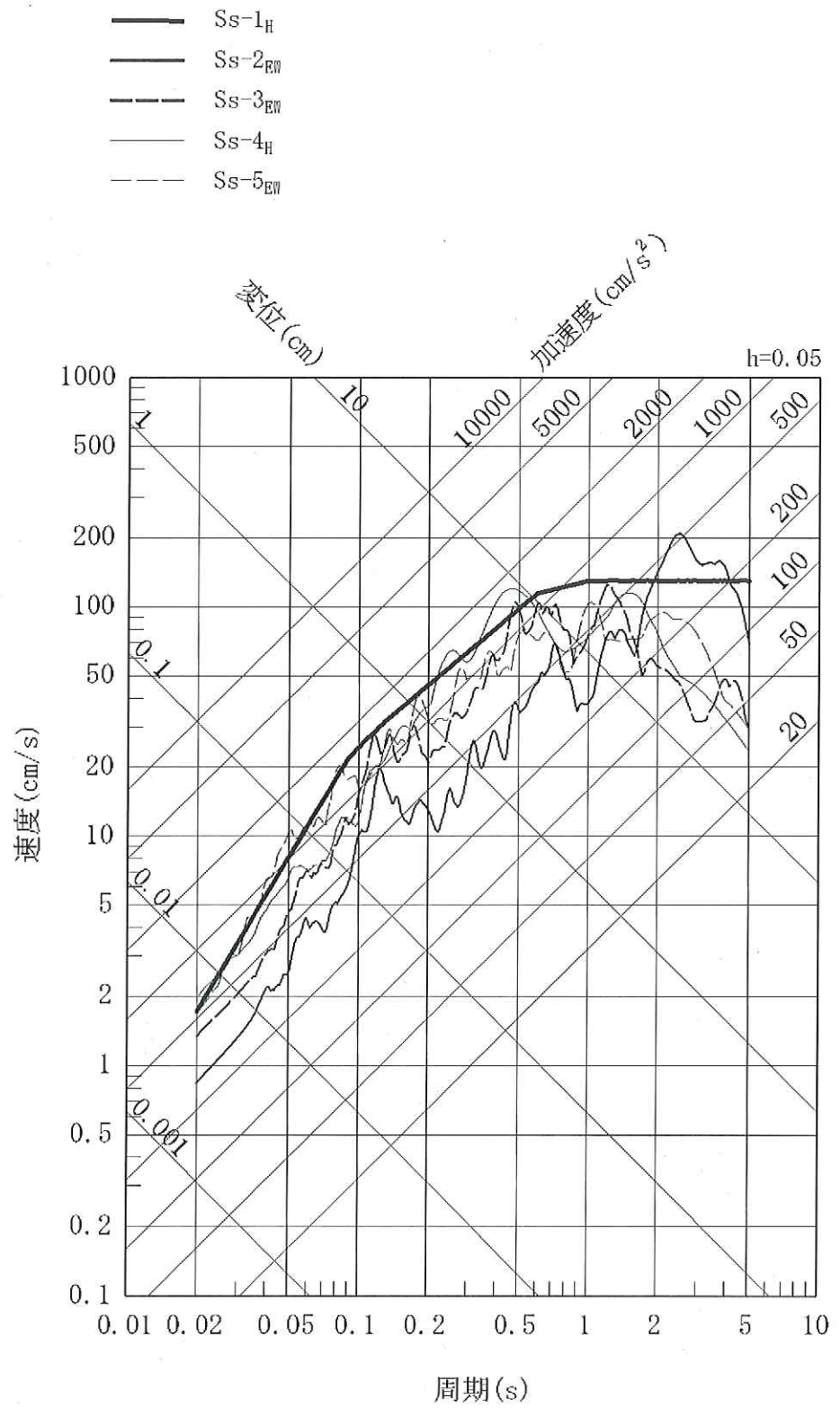


図 6 6 基準地震動 Ss の応答スペクトル (EW 方向)

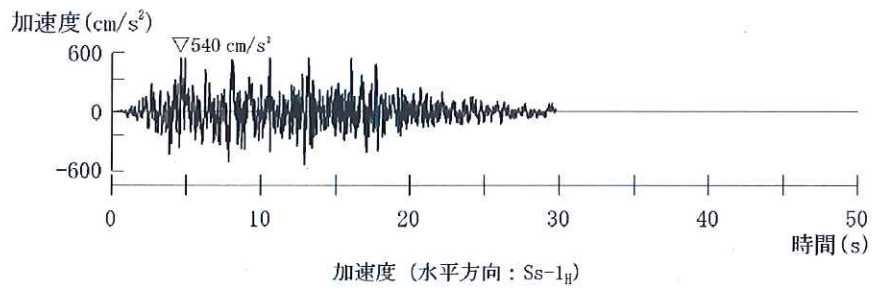


図 6 7 基準地震動 Ss-1 の加速度時刻歴波形 (水平動)

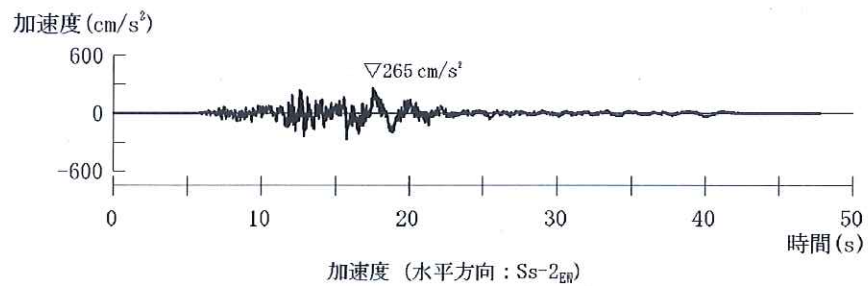
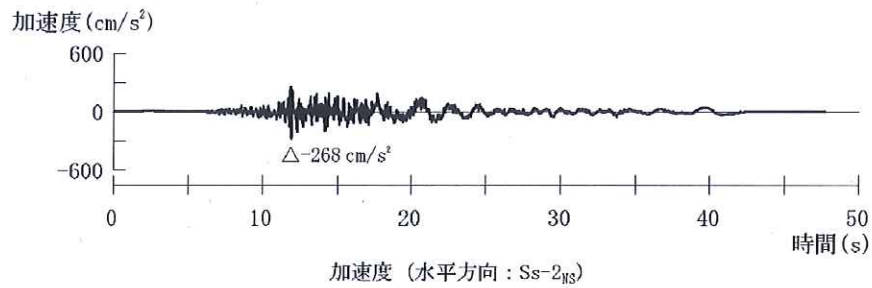


図 6 8 基準地震動 Ss-2 の加速度時刻歴波形 (水平動)

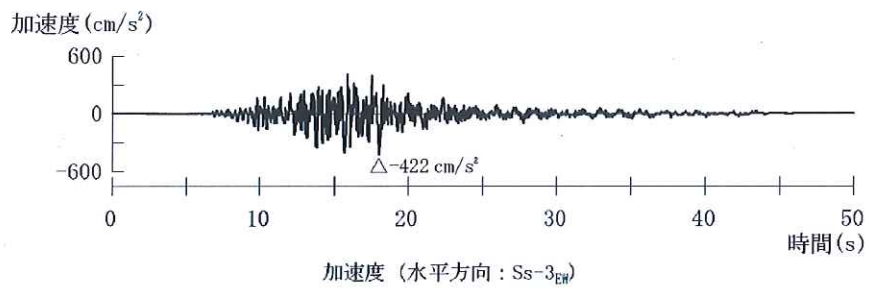
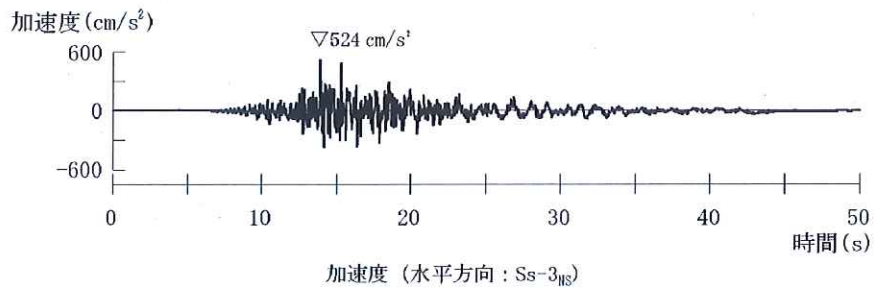


図 6 9 基準地震動 Ss-3 の加速度時刻歴波形 (水平動)

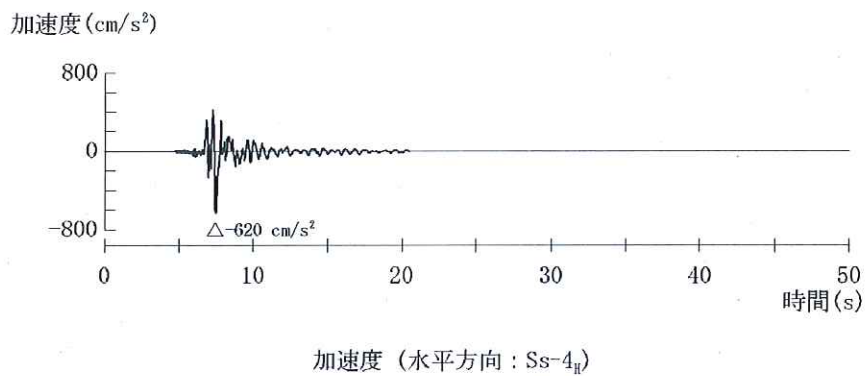
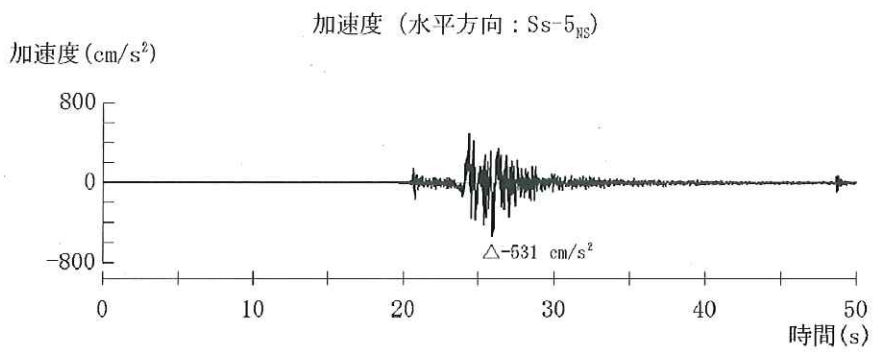
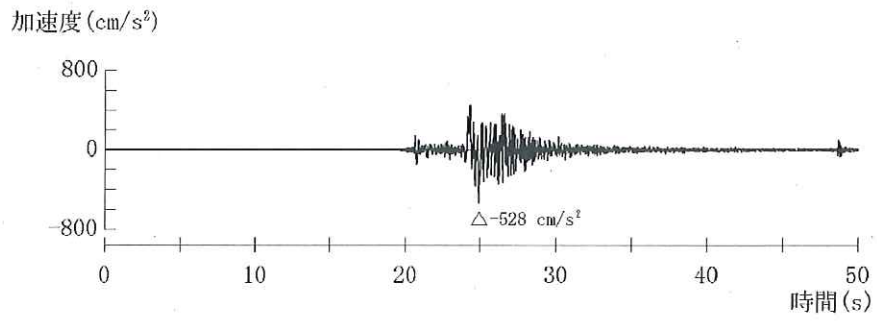


図 7 0 基準地震動 Ss-4 の加速度時刻歴波形 (水平動)



加速度 (水平方向 : Ss-5_{EW})

図 7 1 基準地震動 Ss-5 の加速度時刻歴波形 (水平動)

5 基準地震動 Ss の年超過確率

以上述べたとおり，被告九州電力が策定した基準地震動 Ss はそれ自体に十分な余裕を含んでおり，基準地震動を超過する地震動が発生する可能性は極めて低い。

ちなみに，原子力規制委員会の「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」に基づいて，基準地震動 Ss の年超過確率（1 年間にある値を超過する確率を表すもの）を算定した評価結果を図 7 2 に示す。本件原子力発電所における基準地震動 Ss-1（最大加速度 540 ガル），Ss-2（同 268 ガル），Ss-3（同 524 ガル），Ss-4（同 620 ガル）及び Ss-5（同 531 ガル）の年超過確率はそれぞれ縦軸の黒，青，赤，緑及び紫で表すところであり， 10^{-5} /年程度である。よって，本件原子力発電所における基準地震動 Ss の超過確率は，10 万年に 1 回程度となり，基準地震動を超過する可能性は極めて低いことが分かる。

なお，図 7 2 によると，最大加速度が大きくなれば，それを超過する確率は下がることになる。〔例えば，最大加速度 1,000 ガルを超過する確率は 10^{-6} /年（100 万年に 1 回程度）〕

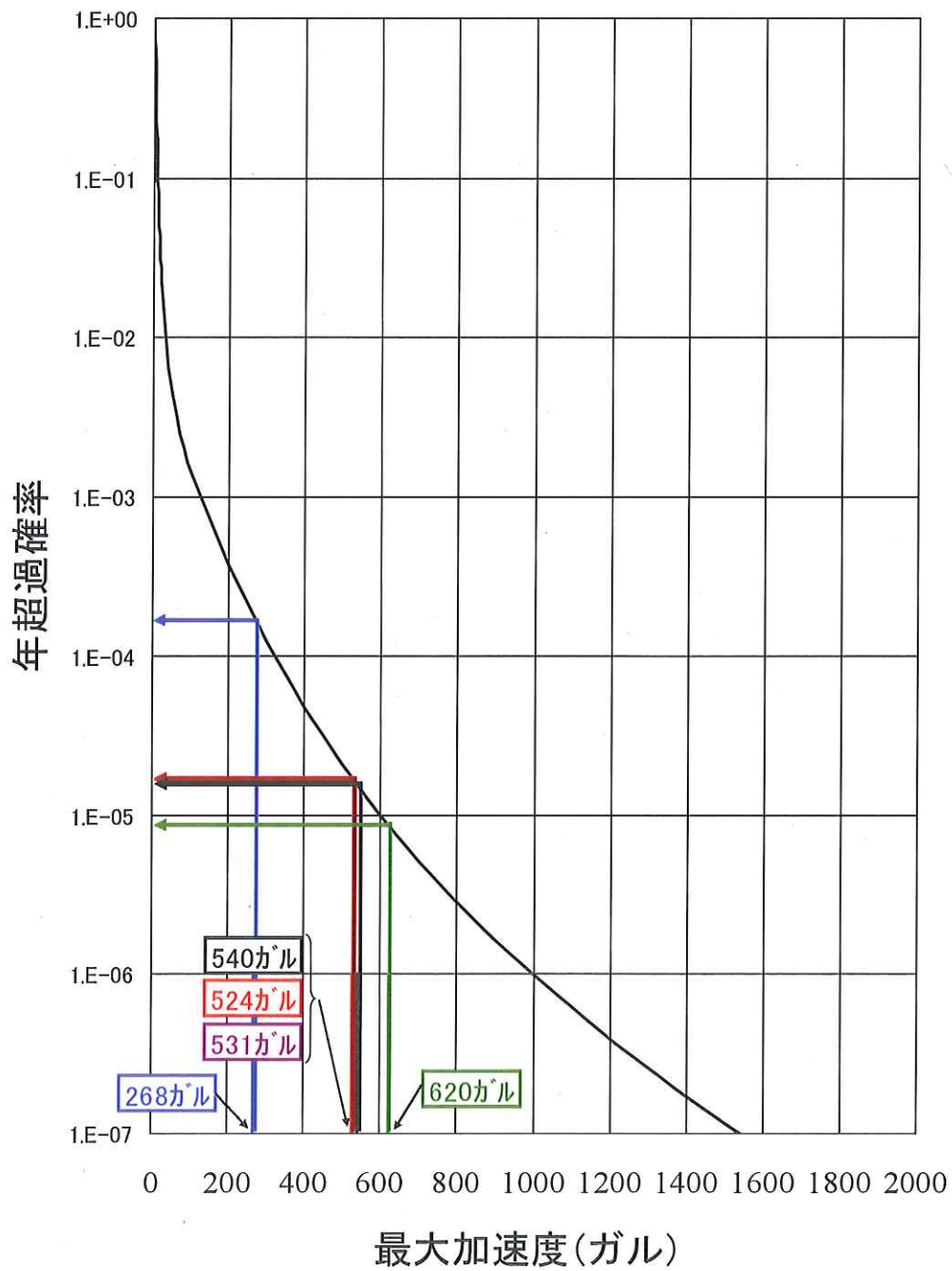


図 7 2 基準地震動の年超過確率 (ハザード曲線)

第3章 結論

以上述べたとおり，被告九州電力が，最新の知見を踏まえて，十分な調査・検討及び評価を行った上で策定した本件原子力発電所の基準地震動は妥当なものであり，基準地震動を超過する地震動が発生する可能性は極めて低いことは明らかである。

以 上

<用語説明>

1 地震力

地震時に建物等に作用する力。

2 地震による揺れ

地震による揺れは、図に示すとおり、断層のずれに伴う地震の揺れの特徴（震源特性）、震源からの揺れが伝わる特徴（伝播経路特性）及び敷地直下の地盤による揺れの増幅特性（サイト特性）によって規定される。

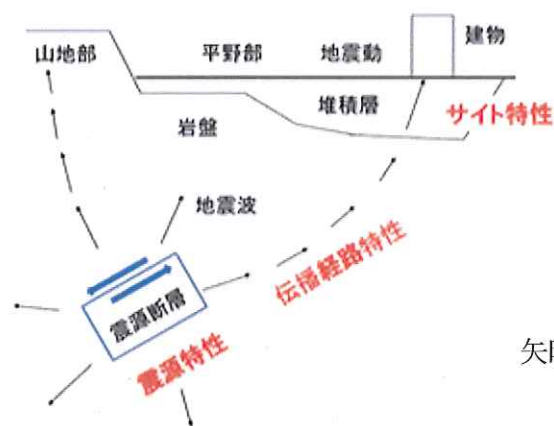


図 震源特性・伝播経路特性・サイト特性のイメージ

3 震源特性

震源特性については、一般的に震源断層が大きいほど、断層のずれが大きい
ため、大きな揺れを放出する。震源の大きさは、気象庁マグニチュード M_j 、
モーメントマグニチュード M_w や地震モーメント M_0 などによって表される。ただし、
震源断層が同じ大きさであっても、放出される揺れの大きさは、断層のずれ方
等による影響で必ずしも同じとは限らず、ばらつきを有することに留意しなけ
ればならない。

4 伝播経路特性

伝播経路特性については、震源断層からの距離が遠ければ遠いほど、震源か
ら放出された揺れは小さくなる。この、距離に応じて揺れが小さくなる現象を
距離減衰という。ただし、地下の深いところの傾き等によって、影響を受ける
ことがあるため留意しなければならない。

5 サイト特性

サイト特性については、地盤が軟らかいほど増幅し、硬いほど増幅しない。
地盤の軟らかい・硬いだけでなく、地盤の形状（整形・不整形）等によって増
幅する例も見られる。

6 マグニチュード

マグニチュード (M) とは、地震の際に放出するエネルギーを対数で表現したものをいう。マグニチュードには、日本で一般に用いられている気象庁マグニチュードのほか、モーメント・マグニチュード (M_w) 等がある。

7 発震機構解

地震は、一般的には地下で断層がずれ動いて発生するものである。「発震機構」とは、地震を起こした断層が地下でどのようになっているか（断層がどちらの方向に伸びているか、傾きはどうか）とその断層がどのように動いたかを示すものである。「発震機構」は地下の断層の状態を表すと同時に、地下で地震を起こす元になった力がどのようであったかも示す。これは、断層と地下の力の向きがある一定の幾何学的な関係にあることが分かっているためである。

8 断層のずれ動き方

内陸地殻内地震は、断層の動き方によって、正断層型・逆断層型・横ずれ断層型の大きく3つの型に分けられる。

【正断層】：断層面を境にして、上盤（上側の岩盤）が下盤（下側の岩盤）に対してずり下がる。

例) 2011年福島県浜通りの地震など

【逆断層】：断層面を境にして、上盤が下盤に対してのし上がる。

例) 2007年能登半島地震
2007年新潟県中越沖地震など

【横ずれ断層】：断層面を境にして、水平方向にずれる。

「右横ずれ断層」＝断層に向かって相手側のブロックが右に動いた場合

「左横ずれ断層」＝断層に向かって相手側のブロックが左に動いた場合

例) 1995年兵庫県南部地震
1997年鹿児島県北西部地震など

9 4つのプレート

地球の表面は、10数枚のプレート（巨大な岩石層の厚い板）で構成されている。そのプレートは長い年月をかけて少しずつ移動し、その際に、プレート境界やプレートの内部に大きな力が加わり、そこがずれるときに地震が発生すると言われている。この考え方をプレートテクトニクスと呼ぶ。

日本列島の周辺には4つのプレートが存在しており、陸のプレートはユーラ

シアプレートと北米プレート，海洋プレートは太平洋プレートとフィリピン海プレートと呼ぶ。海洋プレートは陸のプレートの下に潜り込むように移動している。日本列島の地震は，これら取り囲む4つのプレートの動きに起因する。

10 押し合いによって働く力の向きや大きさ（応力場）

応力場とは，地下にどのような力が加わっているかを示すもので，水平方向を基準にして押されていれば，圧縮応力場，引っ張られていれば引張応力場という。応力場の変化は，プレートの運動に関係している。この地下にかかっている力を直接測定することは難しく，代わりに，力がかかった結果，大地がどのようにひずんで変形したかを観測して，それから逆に広い範囲での地下にかかる力の様子を推定するという方法（GPS（全地球測位システム）による地殻変動の測定）がとられる。近年，宇宙測地技術が発達し，広範囲の大地の変形を高精度に効率的かつ連続的に測定することができるようになった。その代表的なものとして，人工衛星を用いた測量技術（GPS）がある。

図によると，日本列島の地下では一般的に東西方向に，場所によっては北西－南東方向に強い圧縮の力が加かっていると推定される。これは，発震機構解からも同様の傾向が得られている。さらに，地形や地質の調査結果によると，かなり以前（少なくとも数十万年前）から同様の力が地下にかかっていたと推定されている。

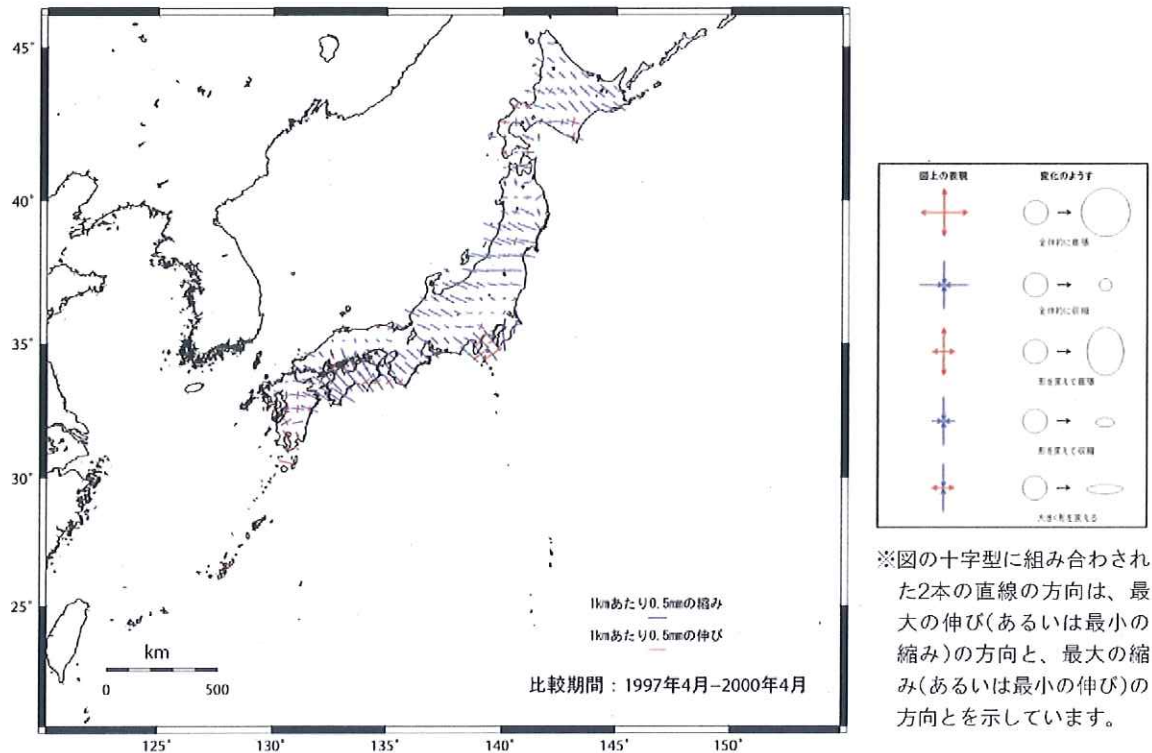


図2-11 GPSの観測から推定した日本列島の変形(1997年4月～2000年4月)
[国土地理院のデータから作成]

図 GPS観測から推定した日本列島の変形

11 ひずみ集中帯

北海道西部から東北日本の日本海側沖合（日本海東縁部）では、太平洋側のようなプレートの沈み込みは見られないが、図1に示すとおり大きな地震が帯状に連なって発生している。近年の調査研究から、この南北に延びる地震の帯には、ほぼ東西圧縮の圧縮力が働いていることが分かった。細かく見ると、この帯は何本かの断層帯からできており、新しい地質時代の地層が、南北に延びる「しわ」を作るように変形（褶曲）している。また、図2に示すとおりGPS観測の結果などからも、新潟県北部から中部地方北部を經由して近畿地方まで続く地域はその周辺よりも大きくひずんでいることが分かる。これらの地域は「ひずみ集中帯」と呼ばれている。

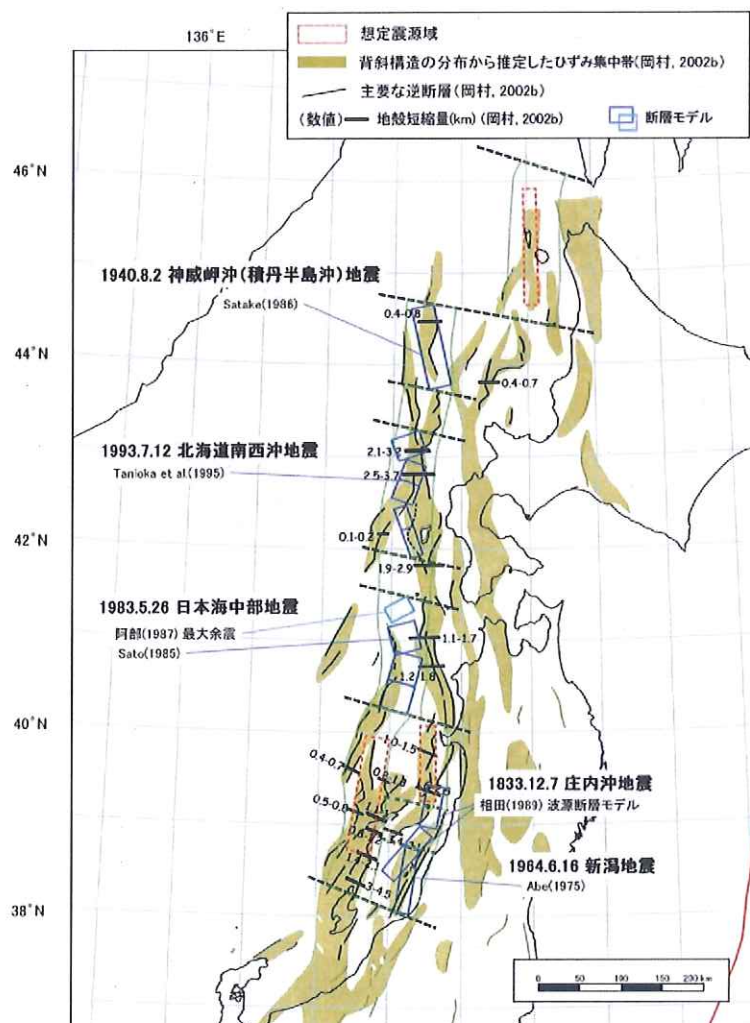


図2-18 日本海東縁部のひずみ集中帯 [岡村(2002b)を編集・加筆]
黄色の範囲がひずみ集中帯と考えられています。

図1 日本海東縁部のひずみ集中帯

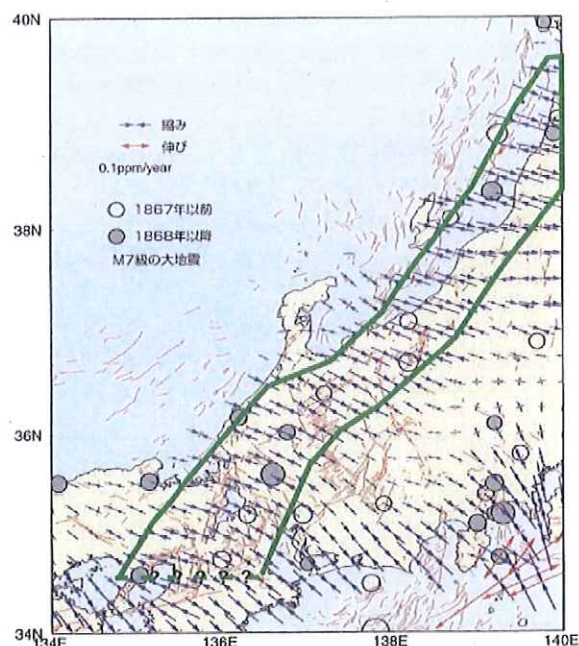


図2-19 新潟～神戸に延びるひずみ集中帯
 [鷺谷(2001)より]
 緑の線で囲った地域がひずみ集中帯と考えられています。

図2 新潟～神戸に延びるひずみ集中帯

12 地震の発生様式

地震は発生する場所によって、①内陸地殻内地震（活断層による地震）、②プレート間地震、③海洋プレート内地震に大別される。

プレートの動きによって蓄積されたひずみのエネルギーが限界を超えると、プレート境界部やプレート内の弱い場所がずれてエネルギーを解放して地震が発生する。

これまでに、世界で発生した規模の大きな地震は、プレート境界で発生している。

【近年日本国内で発生した地震の例】

①内陸地殻内地震	1995年兵庫県南部地震 1997年鹿児島県北西部地震 2007年能登半島地震 2007年新潟県中越沖地震 など
②プレート間地震	2005年宮城県沖地震 2011年東北地方太平洋沖地震 など
③海洋プレート内地震	2001年芸予地震 2009年駿河湾の地震 など

13 パルス

振幅の急峻な変化。1995年兵庫県南部地震では、建物等の固有周期と概ね同じ周期1秒前後の強震動パルスが観測され、これが建物等の被害を生じさせた原因であると考えられた。

14 スロッシング

容器内の液体が外部からの比較的長周期な振動によって揺動すること。この揺動により、構造が破壊されたり、液体が容器から溢れ出る被害などが問題となる。

15 基準地震動 S_1 , S_2

昭和53年に原子力委員会によって決定された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針(旧指針)」において、施設の耐震設計に用いるものとして策定することが求められていた基準地震動。

将来起こりうる最強の地震による地震動として、過去の地震及び過去1万年の間に活動した活断層による地震を対象に、それぞれ揺れの周期及び強さを評価し、これらを全て上回るように設定した地震動を、設計用最強地震による基準地震動 S_1 という。およそ現実的ではないと考えられる限界的な地震による地震動として、過去5万年の間に活動した活断層による最大の想定地震、地震地体構造から考えられる最大の地震、さらには直下地震を対象にそれぞれ揺れの周期及び強さを評価し、これら全てを上回るように設定した地震動を、設計用限界地震による基準地震動 S_2 という。

16 活断層

「最近の時代まで活動しており、将来も活動する可能性のある断層」というのが一般的な定義である。ここでいう最近については、厳密な規定はない。現代の地質・地形学の分野では、一般に第四紀(約260万年前から現在)または第四紀の後期(およそ数十万年前以降)を指す。

17 震央距離

震央から観測点までの距離。ここでは震央から発電所までの距離を示す。

18 最大加速度

時々刻々と変化する加速度時刻歴波形において、最大の加速度値を最大加速度という。最大速度も同様の考え方で定義される。

19 地震地体構造

地震の特性は地域毎に共通するものがあることが知られている。即ち、地下構造や応力場が同じとみなせる地域では、地震の規模と頻度の関係、震源深さの分布、震源メカニズムなどの地震の起こり方に共通性が認められる。このような共通性が認められる領域を区分したものを地震地体構造区分という。

20 短周期レベル A

短周期レベルとは、震源特性のうち強震動に直接影響を与える短周期領域における加速度震源スペクトルのレベルを表す値 ($N \cdot m / s^2$) をいう。なお、 N はニュートン、 m はメートル、 s は秒である。

実際に発生した地震の短周期レベルは、地震観測記録から伝播経路特性及び地盤増幅特性の影響を取り除くことにより震源特性の加速度震源スペクトルを求めることで知ることができる。

短周期レベルと強震断層モデルとの関係については、短周期レベル (A) は、強震動生成域の面積 (S_a) の平方根と強震動生成域の応力降下量 ($\Delta \sigma_a$) との積に比例する値として、強震動生成域を有する強震断層モデルについて以下の関係式で表される (壇ほか (2001))。

$$A = 4 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{S_a} \cdot \Delta \sigma_a \cdot \beta^2$$

ここで、 A : 短周期レベル

S_a : 強震動生成域の面積

$\Delta \sigma_a$: 強震動生成域の応力降下量

β : 媒質の S 波速度

21 壇ほか (2001)

過去に発生した地震の地震観測記録の分析により、短周期レベル A と地震モーメントとの相関が確認されており、以下の経験式 (内陸地殻内地震の平均値) が示され、確立されている。

$$A = 2.46 \times 10^{17} \times M_0^{1/3}$$

同じ地震モーメントを有する地震の場合、図の上に行くほど短周期レベル A の値が大きいこと、即ち、短周期側の地震による揺れが大きいことを意味する。

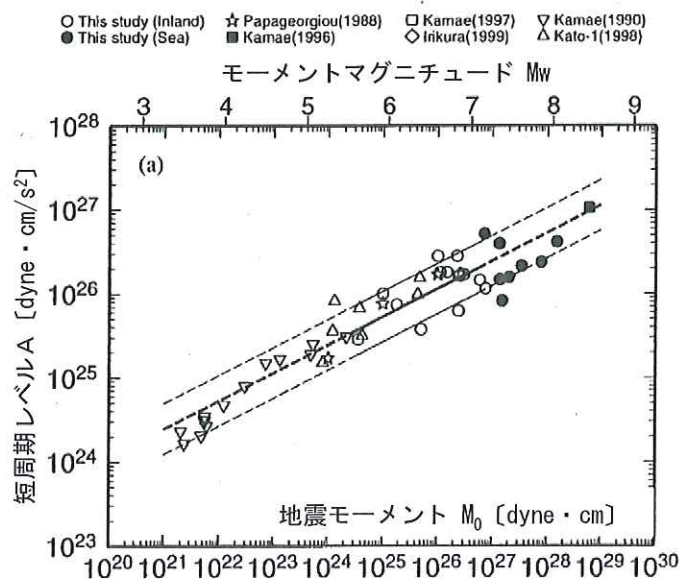


図 短周期レベルと地震モーメントの関係

22 佐藤 (2010)

逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第651号, 923-932

図のとおり, 地震モーメントと短周期レベルの既往の経験式の平均値 (壇ほか(2001)) に対して, 逆断層型の地震は大きく, 横ずれ断層型の地震は小さい傾向にある。

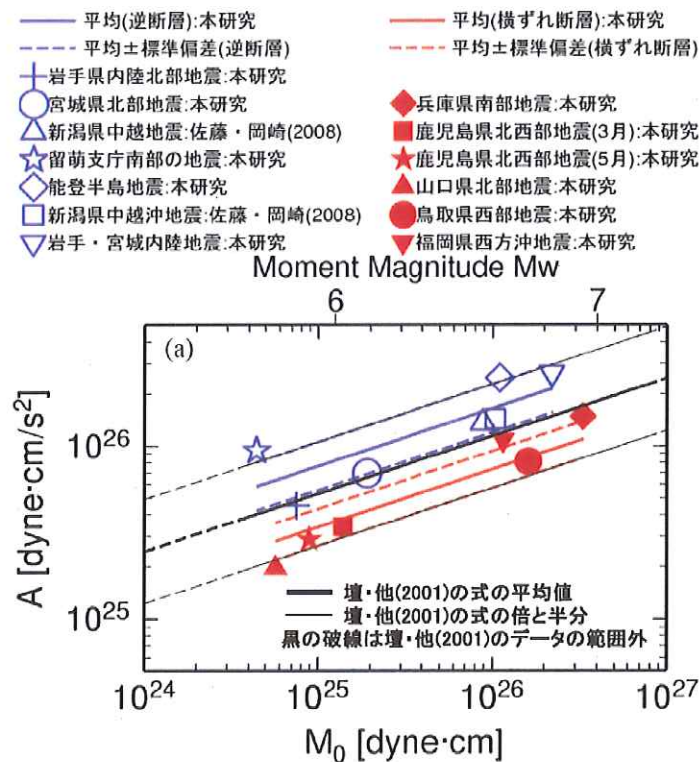


図 佐藤 (2010) による横ずれ断層・逆断層による地震の短周期レベルの知見

23 基準地震動 S_s

基準地震動 S_s は, 解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動として策定されるものである。ここで解放基盤表面を簡単に説明すると, 固い岩盤 (基盤) が, 一定の広がりを持って, その上部に地盤や建物が無くむき出しになっている状態のものとして仮想的に設定される表面のことである。即ち上部の地盤や建物の振動による影響を全く受けない状態を仮想的に設定した, 一定の広がりを持つる岩盤の表面のことを言う。

24 気象庁地震カタログ

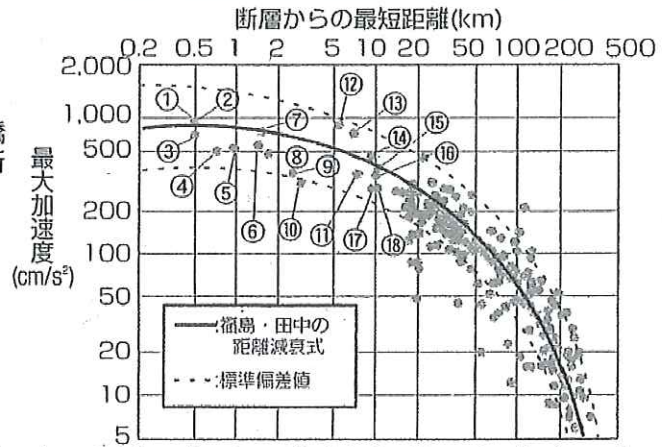
気象庁により作成された地震カタログのこと。地震カタログとは, 主な地震の震央位置, 地震規模等を取りまとめたもの。

25 距離減衰式

距離減衰式による地震動評価は、この性質を利用し、地震の規模と震源からの距離との関係により、想定される地震による揺れの最大加速度，最大速度や応答スペクトルを経験的に求める手法をいう。距離減衰式の例を図に示す。

距離減衰式と兵庫県南部地震の例

- ①: 気象台
- ②: 葺合
- ③: 鷹取
- ④: 六甲
- ⑤: 新神戸駅
- ⑥: 新神戸変電所
- ⑦: 神戸港第八突堤
- ⑧: 神戸港
- ⑨: ポートアイランド
- ⑩: 神戸大学
- ⑪: 谷上
- ⑫: 西宮
- ⑬: 宝塚
- ⑭: 尼崎港
- ⑮: 西明石
- ⑯: 北城
- ⑰: 尼崎高架橋
- ⑱: 尼崎発電所



出典：
Irikura K. and Fukushima Y.: Attenuation characteristics of peak amplitude in the Hyogo-ken Nanbu earthquake (J. Natural Disaster Science, Vol. 16, No. 3, 1995)

図1 距離減衰式（最大加速度）の例

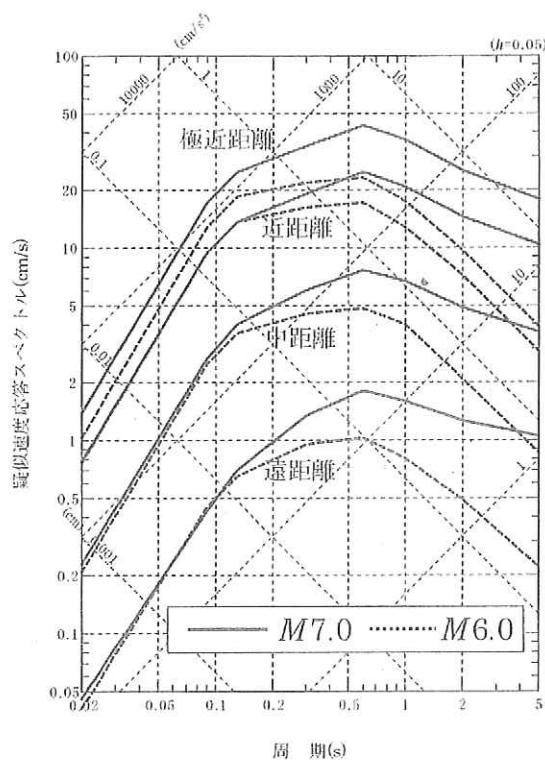


図2 距離減衰式（応答スペクトル）の例

26 F-net

F-net (Full Range Seismograph Network of Japan : 広帯域地震観測網)は、独立行政法人防災科学技術研究所による特別研究「地震素過程と地球内部構造に関する総合的研究」(フリージア計画 : Freesia = Fundamental Reserach on Earthquakes and Earth's Interior Anomaly) に基づいて、日本全国の約80箇所に整備された広帯域地震観測網のことである。

F-net は、広帯域地震計と(速度型)強震計からなり、その名の通り地震によって発生するほとんど全ての地震動を記録することが可能である。

27 変動地形学的調査

断層や褶曲等により動いた形跡のある地形のことを変動地形といい、特にこれに着目した空中写真判読等による調査。

28 地球物理学的調査

地盤中の振動の伝わり方や、場所毎に微小に異なる重力値等の物理的手段を用いて、地下構造を把握する調査のことで、海上で船から海底に向けて音波を発振し、海底からの反射波を受振する海上音波調査や場所毎の重力値を調べる重力探査がある。

29 地表地質調査

現地で地表観察や試料採取等を実施し、地表付近の地質状況を把握する調査。

30 重力探査

重力の主成分は地球を構成する物質に起因する万有引力であり、測定点に近い物質ほど引力として強い影響を与えるものであり、重力の測定値は測定点近傍の地下構造に左右される。

地下構造に起因する重力値の過大(小)を重力異常という。

31 シングルチャンネル音波探査

海上音波探査では、音波を発する振源を曳航しながら、受振器で海底地盤からの反射音をとらえて、海底地形、海底地盤の地質や断層等の地質構造等を探査する。シングルチャンネル音波探査は1つの受振器で探査を行う方法であり、浅部の地質構造等を精度よく探査できる。

32 マルチチャンネル音波探査

マルチチャンネル音波探査は複数の受振器を配列させ探査を行う方法。複数経路の反射波を重ね合わせて編集することができるため、深部の微弱な信号を強調したり、ノイズを打ち消したり等、海底下の深いところまでの地質構造等を探査できる。

33 汀線

海面と陸地との境界線のこと。

34 海上音波探査

海上音波探査とは、海中で音波を発生し、海底面や海底下の地層境界からの反射音波を観測して、海底下の地質構造を連続的に調べる方法をいう。具体的には、調査船により発振器を曳航しながら、発振器から出た音波が海底下の地層の境界等で反射し、戻ってきたものを受振器で検地することにより、地層の重なりや連続性を調査するものである。

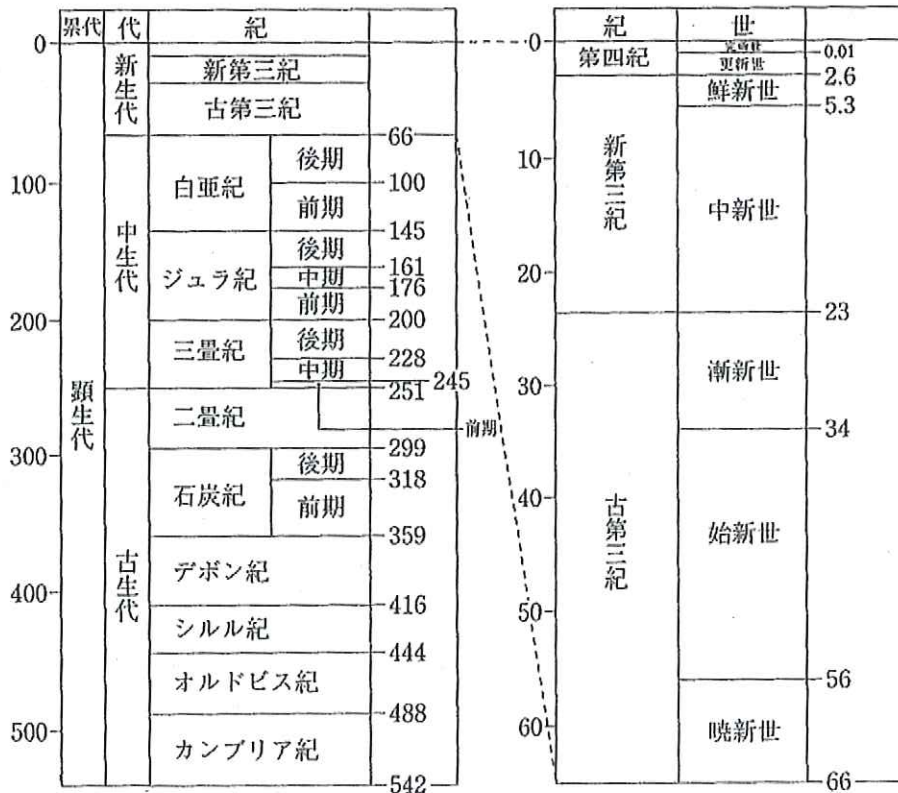
35 後期更新世

更新世とは、地質時代の最新の時代である第四紀の中のひとつであり、第四紀は更新世（約 260 万年～約 1 万年前の期間）とそれに続く完新世（約 1 万年前以降）に区別されている。

後期更新世は、一般に概ね 13～12 万年～約 1 万年前の期間とされている。

地質年代表

(単位：百万年)



(出典：国立天文台編「理科年表 平成26年」)

36 試掘坑

詳細な地質観察等を行うために掘削した、横坑や立坑といったトンネルのこと。

- 37 古第三紀：地質時代を表すもので、約 6,500 万年前～約 2,300 万年前の期間とされている。
- 38 新第三紀：地質時代を表すもので、約 2,300 万年前～約 260 万年前の期間とされている。
- 39 玢岩（ひんがん）：マグマが固結した岩石である火成岩の一種。
- 40 砂岩：主に砂が固結してできた岩石。
- 41 頁岩：主に砂よりも細粒な粒子が固結してできた岩石。
- 42 層理：砂岩、頁岩等の堆積岩の内部構造の一種で、堆積条件の変化等によって成層を呈する構造。
- 43 岩脈：垂直に近い角度で岩盤中に貫入したマグマが固結した板状の岩体。
- 44 破碎幅：断層運動に伴い破碎された岩石の厚さ。
- 45 トレンチ調査：現地で断層線（断層面）を横切る方向に細長い溝を掘削して地層を露出させ、断層の性状や過去の活動を把握するための地質調査。
- 46 鮮新世：地質時代の区分のひとつ。新生代第三紀の最後の期間で、約 530 万年前から約 260 万年前までの時代と定義されている。東松浦玄武岩類は約 300 万年前に噴出したもの。
- 47 弾性波試験
ハンマーの打撃などの方法で地盤に振動を与え、その振動源から地中を伝わる地震波の速度変化を受振器で受けて、その結果を解析して地層の厚さや硬さなどの状況を知る方法のこと。
- 48 弾性波平均速度値
弾性波試験によって、複数の場所で測定された地盤の硬さ（地震波が地中を伝わる速度で表される）の平均値のこと。
- 49 P 波
Primary wave（第一波）または Pressure wave（圧力波）の略。（頭文字が P ではないが）Compressional wave（疎密波）ともいう。進行方向に平行に振動する弾性波。固体・液体・気体を伝わる。速度は岩盤中で 5-7 キロメートル/秒、地震発生時最初に到達する地震波で、初期微動を起こす。海上の船舶においては、観測される海震はこれによる。

50 S波

Secondary wave (第二波) または Shear wave (ねじれ波, たわみ波もしくは剪断波) の略。進行方向と直角に振動する弾性波。固体を伝わる。速度は岩盤中で 3・4 キロメートル/秒, P 波に続いて到達し, 主要動と呼ばれる大きな揺れを起こす。

断層破壊では S 波の振幅が大きくなる傾向にあるが, 等方爆発では理論上 S 波は発生しない。

なお, P 波・S 波を「縦波」・「横波」と呼ぶことがあるが, あくまでも進行方向に対しての縦横であり, P 波で家が上下に揺れる, あるいは S 波で家が左右に揺れるとは限らない(この場合は, 「縦揺れ」・「横揺れ」)。ただし地震計での記録などを見ると, 震源が浅い地震における震央のごく近傍などを除き, 屈折により波の進行方向が地表面に対し垂直になるため, P 波は上下成分が, S 波は水平成分が卓越する傾向にある。

51 微動アレイ探査

微動探査とは, 地表付近で発生している微小な振動を測定し, 測定したデータを分析することで, 敷地の地下構造の確認を行う調査のこと。

微動アレイ探査は, 地表において複数の観測機器を群設置(アレイという)して実施する。

52 分散曲線

分散曲線とは, 地震波のうち地表に沿って伝播する表面波の波長(周波数)と伝播速度との関係を表す曲線をいう。表面波は分散現象(波長によって伝播速度が異なる現象)を示すという特徴を有しており, 表面波の波長はそれが伝播してくる地盤の速度構造と関係することから, 地盤の速度構造から分散曲線を算定すること, また, 逆に分散曲線から地盤の速度構造を推定することができる。

53 単点微動観測

1つの観測機器で微動観測(探査)を実施すること。

54 Noda et al.(2002)

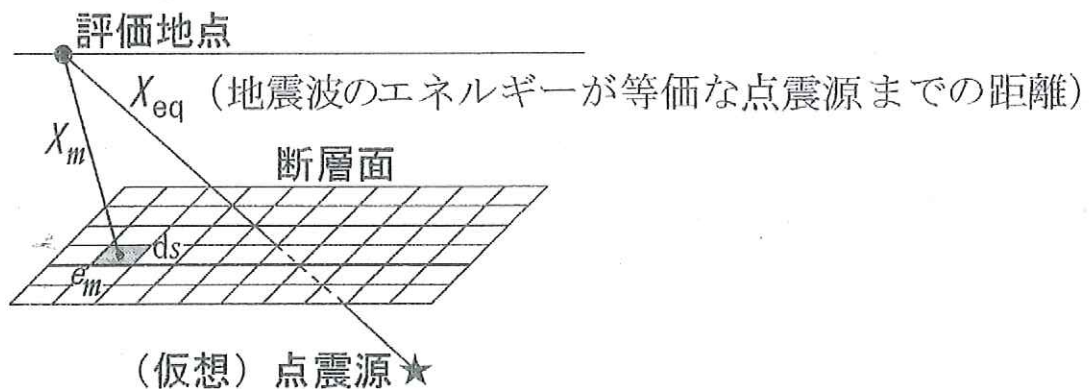
Noda et al.(2002)の方法については, 日本電気協会原子力発電耐震設計専門部会にて, 議論・検討されたことから, 「耐専スペクトル」もしくは「日本電気協会の手法」と呼ばれることがある。Noda et al.(2002)の方法は, 岩盤における観測記録に基づいて提案された距離減衰式で, 解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動の応答スペクトルを予測することができ, 敷地における地震観測記録に基づいて補正することにより, 地震の分類に従った震源特性, 伝播経路特性及びサイト特性を的確に反映することが可能である。また, 内陸地殻内地震に適用する場合には, 周期 0.02 秒~0.6 秒で 0.6, 周期 0.6 秒~5.0 秒までは周期 5.0 秒で 1.0 となるよう, 0.6 秒から徐々に大きくなる補正係数を

用いることができる。

解放基盤表面とは、基準地震動を策定するために、基盤面上の表層や構造物が無いものとして仮想的に設定する自由表面であって著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な広がりを持って想定される基盤の表面をいう。ここでいう「基盤」とは、概ねせん断波速度 $V_s=700\text{m/s}$ 以上の硬質地盤であって、著しい風化を受けていないものである。

Noda et al.(2002)による方法では、マグニチュードと等価震源距離等を用いて地震動の応答スペクトルを評価する。なお、等価震源距離とは、広がりを持つ震源断層面からの地震波エネルギーと同じエネルギーを持つ点震源までの距離であり、距離減衰式に等価震源距離を用いれば、震源断層面の広がりによる影響が大きい震源近傍の地震動を評価できる利点を有している。図1に等価震源距離の概念図を示す。

Noda et al.(2002)による方法は、図2及び3に示す地盤調査が十分なされた岩盤における観測記録（主に関東・東北地方）を用いて、図4に示す回帰分析により評価式が構築されている。また、地盤に関する情報について不確定な面は否定できないが、図5、6に示す、国内外の大地震に対する震源近傍の記録を用いて、大地震の震源近傍までの上記評価式の適用性が確認されている。さらに、図7のとおり、近年の地震の適用性についても確認されている。



$$X_{ep}^{-2} = \frac{\int e_m X_m^{-2} ds}{\int e_m ds}$$

X_m : 観測点から断層面の各微小領域 m への距離 (km)

e_m : 断層面上の各微小領域 m からの地震波エネルギーの相対的放出分布 (e_m が不明の場合には一様分布として与える。)

ds : 断層面の微小領域 m の面積 (km^2)

図1 等価震源距離の概念図

2) 高精度の地震観測記録によるデータベースの構築

◆条件

- $M \geq 5.5$
- $D \leq 60\text{km}$
- $X \leq 200\text{km}$
- $T_c \geq 5\text{s}$

◆結果

- 107地震地点
- 水平214波
- 上下107波



大Mは国内・海外の多地点記録で確認

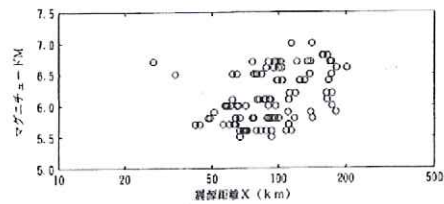
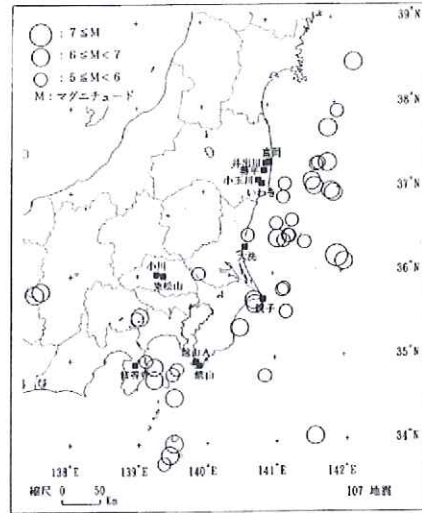


図2 Noda et al.(2002)による回帰分析に用いられたのデータベース

4) 観測点の地盤条件

- $V_s = 0.5 \sim 2.7\text{km/s}$: $V_p = 1.7 \sim 5.5\text{km/s}$

地点名	略号	観測位置	地盤速度(V_s)	記録成分数	データの補正
富岡	TMK	GL-100m	0.70km/s	30	はぎとり
井出川	IDG	GL	2.00km/s	6	無(絞り厚2.0m)
簗平	HKD	GL	2.70km/s	4	無(絞り厚6.9m)
小玉川	KDG	GL-10m	2.20km/s	20	地盤特性の補正
いわき	IWK	GL-21m	1.18km/s	38	はぎとり
大洗	OAR	GL-14m	1.00km/s	16	無
真松山	HMY	GL-58m	0.75km/s	18	はぎとり
小川	OGW	GL-10m	2.1km/s	6	無
鏡子	CHS	GL-18m	1.4km/s	32	はぎとり
館山	TTY	GL-43m	0.6km/s	12	無
館山A	TTA	GL	0.5km/s	10	無(絞り厚1.5m)
倭昔寺	SZJ	GL-36m	0.65km/s	22	はぎとり
合計				214	

図3 Noda et al.(2002)による回帰分析に用いられた観測点の地盤条件

2-3 解放基盤における地震動評価

1) 回帰分析

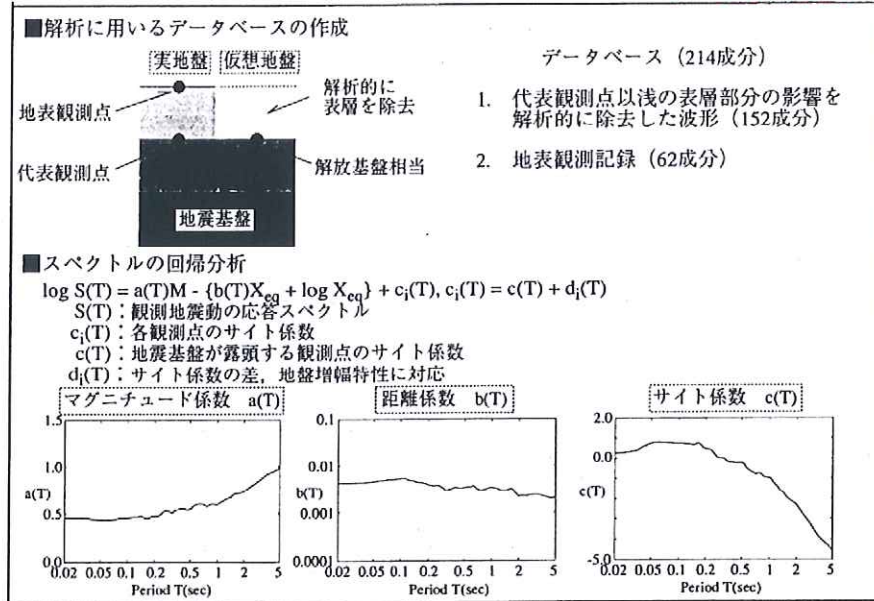


図4 Noda et al.(2002)による回帰分析の概要

6) 国内および海外の他地点の大振幅記録に対する適用性

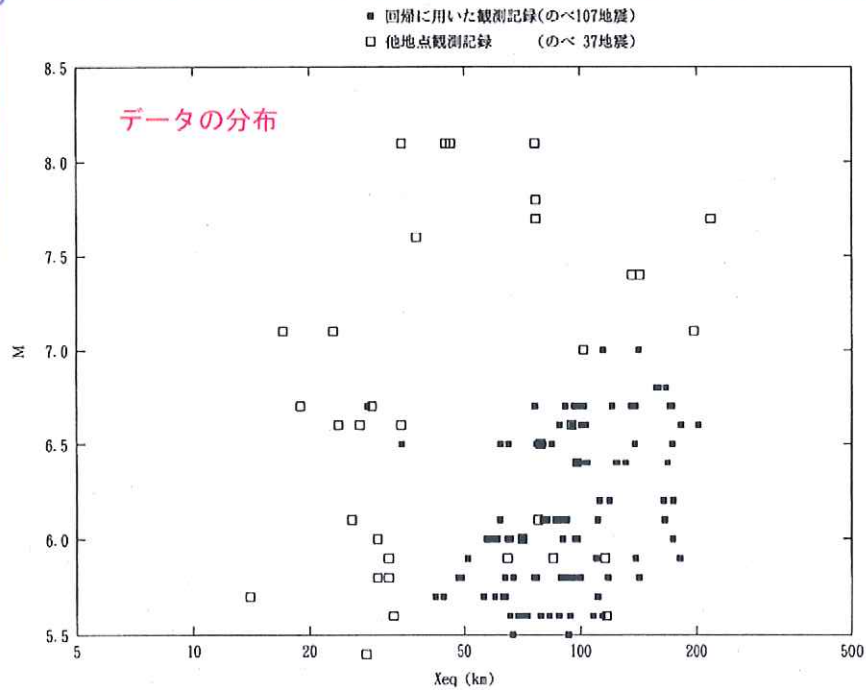


図5 Noda et al.(2002)の適用性検討に用いられたデータベース

3) 近年の地震による適用性の確認

対象とした内陸地殻内地震

年月日	Earthquake	Xeq計算に用いた震源モデル	Site	Mw (HRV)	Mj*1	Xeq (km)	*7 NFRD	Vs (km/s)	Vp (km/s)	Vs/Vp 出典		
日本	1995.1.17	兵庫県南部	神戸大*2	6.9	7.3	16	○	0.6	1.7	[16]		
	2000.11.6	鳥取県西部	磐梯ダム	6.8	7.3	6		2.2	4.2	推定		
			柏木*3	6.8	7.3	11		2.8		[17]		
米国	1971.2.9	San Fernando	Pacoima Dam *4	6.6	7.1	8	○	1.5	3.0	[18]		
	1979.8.6	Coyote Lake	Caltex Seism. Lab.	6.6	7.1	29		0.83	1.3	[17]		
			Griffith Park	6.6	7.1	25		0.75	1.75	[18]		
			Girloy #1	5.8	6.0	16		2.2	2.75	[20]		
	1984.4.24	Morgan Hill	Hartzell & Heaton [11]	Girloy #1	6.2	6.5	24		2.2	2.75	[20]	
	1989.10.18	Loma Prieta	Wald et al. [12]	Girloy #1	7.0	7.6	30		2.2	2.75	[20]	
				Lexington Dam	7.0	7.6	20	○	0.87	2.1	[21]	
	1994.1.17	Northridge	Wald & Heaton [13]	Pacoima Dam *5	6.7	7.2	21	○	1.5	3.0	[18]	
				Griffith Park	6.7	7.2	33		0.75	1.75	[18]	
				USC Sta.17	6.7	7.2	29		1.0	2.0	[18]	
	トルコ	1999.8.17	Kocaeli	Sakarya (SKR)	Gebze (GBZ)	7.4	8.1	33	○	0.78	2.13	[22]
					Sakarya (SKR)	7.4	8.1	22		1.05	2.57	[23]
台湾	1999.9.21	集集	Yagi & Kikuchi [15]	TCU052 *6	7.6	7.7	20	○	0.62		[24]	
				TCU065	7.6	7.7	23	○	0.72		[24]	
				TCU067	7.6	7.7	20	○	0.76		[24]	
				TCU068	7.6	7.7	24	○	0.58		[24]	
				TCU071	7.6	7.7	16		0.98		[24]	
				TCU072	7.6	7.7	16		1.22		[24]	
				TCU074	7.6	7.7	23		1.1		[24]	
				TCU075	7.6	7.7	24	○	0.98		[24]	
				TCU076	7.6	7.7	26	○	0.75		[24]	
				TCU102	7.6	7.7	26	○	0.93		[24]	

図6 Noda et al.(2002)の近年の地震による適用性検討に用いられたデータベース

近年の内陸地殻内地震による残差

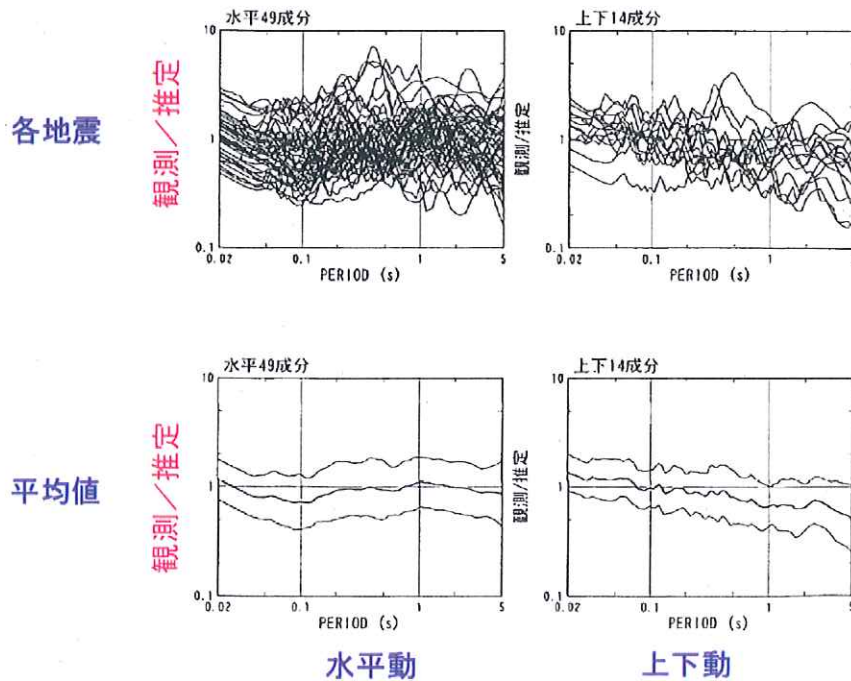
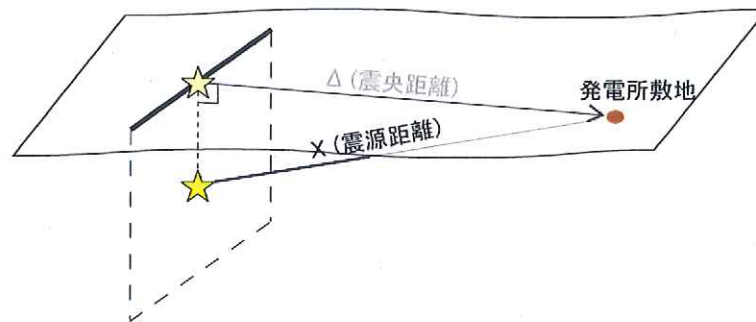


図7 Noda et al.(2002)の近年の地震による適用性検討結果

55 応答スペクトルに基づく地震動評価：

応答スペクトルに基づく地震動評価とは、上記の「距離減衰式による地震動評価」のひとつで、過去の地震記録から導かれた回帰式により地震動の応答スペクトルを作成する方法をいう。応答スペクトルに基づく地震動評価は、断層モデルを用いた手法による地震動評価と比較すると、地震規模や震源距離等のより少ないパラメータで地震動評価を行うことができる利点がある。



応答スペクトルに基づく地震動評価

図 応答スペクトルに基づく地震動評価の概念図

なお、本件原子力発電所における応答スペクトルに基づく地震動評価では、Noda et al.(2002)による方法を採用している。

56 応答スペクトル

建物等の周期毎の揺れの大きさを表すもの。地震動は様々な周期の波が含まれる複雑な波である。一方、建物等は、特定の揺れやすい周期を有しており、この周期と同じ周期を持つ地震動が到来すると、共振して大きく揺れる。応答スペクトルとは、いろいろな周期を有する建物等に対して、地震動がどのくらいの揺れを生じさせるかを、横軸に周期、縦軸に最大応答値をとって、わかりやすいように描いたものである。応答スペクトルを作成することにより、建物等の周期がわかれば、その地震動によって建物等に生じる揺れの大きさが把握できる。なお、加速度応答スペクトルの最も短い周期(0.02秒)の加速度応答スペクトル値は、地震動の最大加速度に一致する。

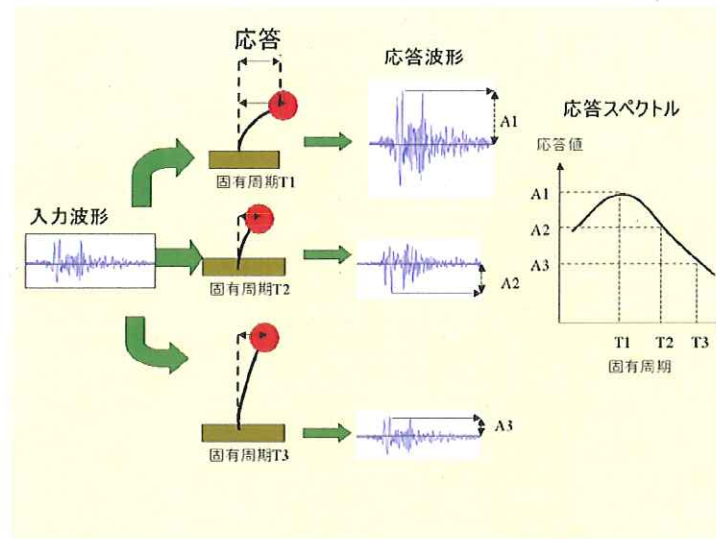


図 応答スペクトルの概念図

57 褶曲構造

層状構造をもつ岩石の場合によく識別される波曲状の変形形態。

58 K-NET

K-NET (Kyoshin Net : 全国強震観測網) は、独立行政法人防災科学技術研究所が運用する、全国を約 20km 間隔で均質に覆う 1,000 箇所以上の強震観測施設からなる強震観測網のことである。地震被害に直接結びつく地表の強震動を均質な観測条件で記録するために、各観測施設は、一部の例外を除き統一した規格で建設され、自由地盤上 (地表) に強震計が設置されている。

59 KiK-net

KiK-net (Kiban-Kyoshin Net : 基盤強震観測網) は、全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するために、政府の地震調査研究推進本部が推進している「地震に関する基盤的調査観測計画」の一環として、独立行政法人防災科学技術研究所が整備した強震観測網である。KiK-net の観測施設は、全国約 700 箇所に配置され、各観測施設には観測用の井戸 (観測井) が掘削されており地表と地中 (井戸底) の双方に強震計が設置されているのが特徴である。

60 地震基盤

震源から地表面に向けて地震波が伝播する際、地表面近傍の軟らかい地表で大きく増幅されることが観測記録等から知られている。この地層構成に依存する増幅特性を把握するための数値シミュレーションを行うとき、境界条件として設定する無限境界面を地震基盤と呼ぶ。

61 強震動予測レシピ

活断層に発生する地震や海溝域に発生する地震による強振動予測を目的として、地形・地質調査データ、歴史地震、地球物理学的調査に基づき震源断層を

想定したとき断層パラメーターを推定する手続きを系統的にまとめたもの。

62 特性化震源モデル

断層モデルは、震源（地震が発生した地下の場所）の断層面をモデル化したものであり、「震源モデル」もしくは「震源断層モデル」と呼ばれることがある。

断層モデルには、アスペリティと背景領域からなる特性化震源モデルや背景領域がなく、アスペリティのみからなるクラックモデルがある。

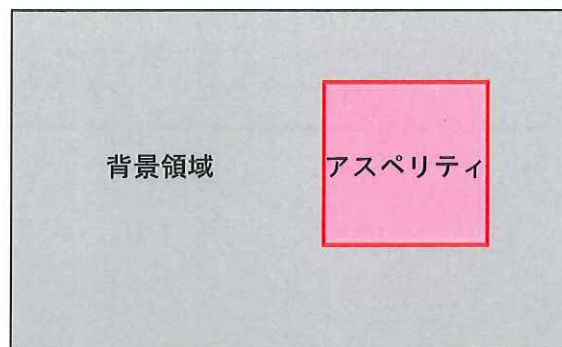


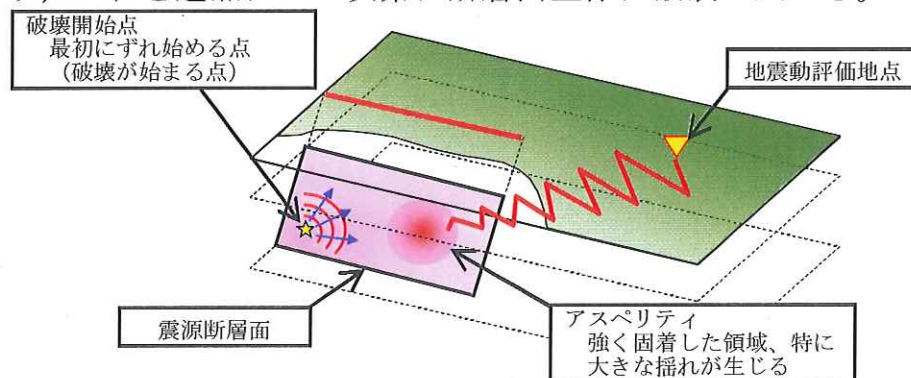
図 特性化震源モデルの概念

63 経験的グリーン関数法

断層モデルを用いた手法において、地震による揺れを計算する方法のひとつで、敷地における地震観測記録を要素地震とする手法。

64 破壊開始点

固着している断層面において、最初にずれ始める点（破壊が始まる点）のことであり、これを起点にして次第に断層面全体に破壊が広がる。



65 Stirling et al.(2002)

内陸で活断層に関係して発生した地震に関して、地表地震断層長さや地震規模や震源断層の長さの関係を整理したもの。

このデータに基づく分析では、地表断層長さ (L) が 20km よりも大きい地

震では、地表断層長さ (L) と震源断層長さ (Lsub) は比較的良く対応するが、L が 20km よりも小さくなると、両者は顕著にずれている。L が小さくなっても Lsub は約 20km 付近に漸近しそれ以上は小さくならないとされている。

66 解放基盤表面

基盤（概ね第三紀層及びそれ以前の堅牢な岩盤で、著しい風化を受けていないもの）面上に表層や構築物がないものと仮定した上で、基盤面に著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な広がりのある基盤の表面をいう。

67 時刻歴波形

時刻歴波形とは、時々刻々変化する地震の揺れを表す波形である。地震の揺れを表す波形として、「加速度時刻歴波形」、「速度時刻歴波形」、「変位時刻歴波形」があるが、これらのうち、耐震設計では、一般的に「加速度時刻歴波形」が用いられる。これは、加速度は、1秒あたりの速度の変化であり、速度が変化するという事は、物体に力が作用した、ということの意味しているためである。なお、加速度の単位は、gal (ガル) もしくは cm/s^2 と表されることもある。

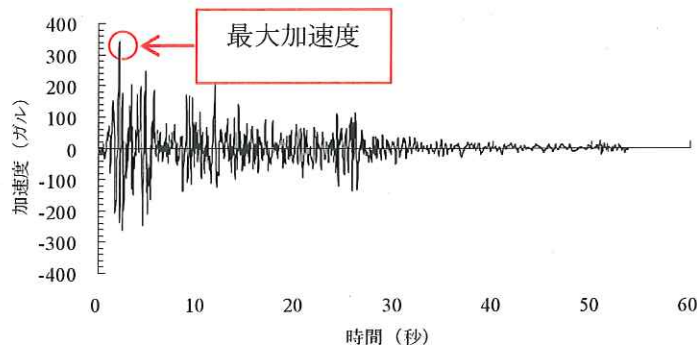


図 時刻歴波形の例

68 要素地震

断層モデルを用いた手法による地震動評価では、断層面全体を小断層面に分割し、破壊の進展に応じ、小断層面から発生する地震波形を重ね合わせて評価を実施する。要素地震は、小断層面からの生じる地震波形を作成するために各小断層に当てはめる地震のこと。

69 宮腰ほか (2004)

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

70 地震調査研究推進本部(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

71 加藤ほか(2004)

「震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル—地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討—」(加藤研一, 宮腰勝義, 武村雅之, 井上大榮, 上田圭一, 壇一男・日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, 46-86・2004年)

72 非線形特性

地盤の非線形挙動とは, 多くの材料と同様, 一定のひずみレベルを越えると, 剛性(せん断波速度)が低下し, 減衰が増加する現象である。非線形特性とは, このひずみの増加に応じた剛性(せん断波速度)の低下や減衰の増加を表す特性をいう。

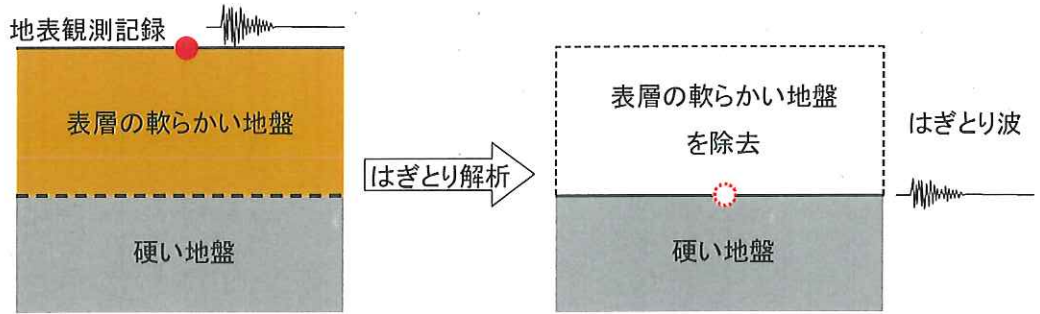
73 はぎとり解析

はぎとり解析とは, 地表もしくは地中で得られた地震観測記録から, 表層の軟らかい地盤の影響を取り除き, 硬い地盤の表面における地震動を推定する手法であり, 推定された地震動をはぎとり波という。これは基準地震動が上部地盤や建物の振動による影響を全く受けない岩盤の表面(解放基盤表面)で設定されるものであるため, 地表観測記録または地中観測記録と単純に比較することができないために行われるものであり, 一般的な手法である。

はぎとり解析には, 下図のとおり, ①地表観測記録と地盤調査により得られた表層の軟らかい地盤の情報(せん断波速度など)を基に硬い地盤の表面における地震動を推定する方法と, ②地表観測記録及び地中観測記録の関係性と地盤調査により得られた表層の軟らかい地盤の情報を基に地盤モデルを作成し, 地中観測記録から硬い地盤の表面における地震動を推定する方法とがある。なお, 地中観測記録は表層の軟らかい地盤の影響(表層の地盤を通して地表で反射した地震波の影響)が含まれるため, 地中観測記録をそのまま硬い地盤の表面での地震動とみなすことはできない。

被告九州電力が, はぎとり解析を行った2004年北海道留萌支庁南部地震のK-NET 港町観測点における観測記録(地表観測記録)については, 上記①のはぎとり解析手法を採用した。

地表観測記録と軟らかい地盤の情報を用いたはぎとり解析



地表観測記録及び地中観測記録と軟らかい地盤の情報を用いたはぎとり解析

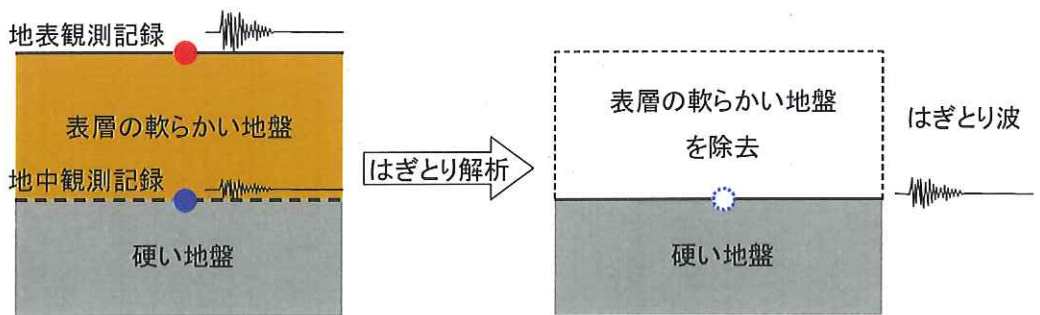


図 はぎとり解析のイメージ