

耐特委第4-1号

柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に
取得された地震観測データの分析及び基準地震動に係る報告等について

平成20年5月29日
原子力安全・保安院

平成20年5月22日、東京電力株式会社から、柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動に係る報告が別添概要のとおりありました(別添資料1参照)。また、原子力安全・保安院は、同様の分析を独立行政法人原子力安全基盤機構(JNES)に依頼して検討を行ってきたところであり、同日、その結果について報告がありました(別添資料2参照)。

原子力安全・保安院としては、東京電力からの報告内容について、今後、JNESの分析結果や専門家の意見を聴きながら、厳正に評価することとします。

平成20年5月22日
経済産業省
原子力安全・保安院

「柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動に係る報告書」について

新潟県中越沖地震（以下「今回の地震」という。）において観測された柏崎刈羽原子力発電所の揺れが、設計時に想定した揺れを上回った要因の分析結果及び活断層から想定される基準地震動の策定に係る報告書が、東京電力株式会社より原子力安全・保安院（以下「当院」という。）へ提出されましたので、お知らせします。

1. 今回の地震を受け、平成19年7月16日、当院より、東京電力株式会社に対して、地震観測データの分析及び安全上重要な設備の耐震安全性の確認について報告をするように指示しました。（平成19年7月16日発表済み）
2. これを受け、平成19年7月30日及び同年8月22日、今回の地震時に取得された地震観測データに係る報告書が同社より当院へ提出されました（平成19年7月30日及び同年8月22日発表済み）。
3. その後、同社は、柏崎刈羽原子力発電所周辺の地質・地質構造に関する調査などを進め、その内容について当院としては、耐震・構造設計小委員会や同委員会のワーキンググループの場で専門家の意見を聴取し、検討を進めてきました。
4. こうした検討を踏まえ、平成20年5月12日、「柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺の地質・地質構造中間報告書」が同社より当院へ提出されました。（平成20年5月12日発表済み）
5. 加えて本日（平成20年5月22日）、同社から、今回の地震による柏崎刈羽原子力発電所の揺れが設計時に想定した揺れを上回った要因の分析結果や、それを踏まえた基準地震動の策定に係る検討結果が盛り込まれた報告書が当院に提出されました。
6. 本日、同社より提出された報告書の概要は別添のとおりです。当院としては、今後、その内容について、独立行政法人原子力安全基盤機構の分析結果や専門家の意見を聴きながら、厳正に評価してまいります。

（本発表資料のお問い合わせ先）
原子力安全・保安院原子力発電安全審査課
担当者：森山、川原
電話：03-3501-1511（内線 4861）
03-3501-6289（直通）

柏崎刈羽原子力発電所における平成 19 年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動に係る報告書の提出について

平成 20 年 5 月 22 日
東京電力株式会社

当社は、平成 19 年 7 月 16 日に発生した新潟県中越沖地震を踏まえ、経済産業省原子力安全・保安院から柏崎刈羽原子力発電所の安全確保に関する指示*¹を受け、安全上重要な設備の耐震安全性の確認作業を進めております。

このたび、平成 20 年 5 月 12 日に同院へ報告した同発電所敷地周辺における地質調査結果の中間報告書の内容と、これまでに実施してまいりました今回の新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析の結果を踏まえた同発電所の基準地震動を策定し、本日、同院へ報告書を提出いたしましたので、お知らせいたします。

1. 報告内容

(1) 地質調査結果から基準地震動の策定において考慮した活断層

基準地震動を策定するにあたり考慮する活断層としては、安全評価上の不確かさを考慮しつつ、発電所敷地周辺の主な活断層として、F-B 断層 (34km、M7.0)、それぞれ単独で活動する断層と評価した角田・弥彦断層、気比ノ宮断層、片貝断層が同時活動する場合を想定した長岡平野西縁断層帯 (91km、M8.1)、F-D 断層と高田沖断層の同時活動 (55km、M7.7) 等を考慮いたしました。

(2) 地震観測データの分析結果

新潟県中越沖地震に関しては、同じ規模の地震と比べ大きめの地震動を与える地震であったこと、周辺地盤の堆積層の厚さと傾きの影響で地震動が増幅したこと、発電所敷地下にある古い褶曲構造*のために地震動が増幅したことなどから、発電所敷地への影響が大きくなったものと評価いたしました。

また、発電所敷地内において、1～4号機側と5～7号機側では、発電所敷地下にある古い褶曲構造の影響により地震動の増幅に違いがあり、1～4号機側の方が5～7号機側に比べ、2倍程度地震動が大きくなるものと評価いたしました。

※褶曲構造とは、地層がたわんだり、曲がった状態。

(3) 基準地震動の策定

基準地震動の策定にあたっては、1～4号機側と5～7号機側での地震動の増幅の違いなど、地震観測データの分析結果から得られた地震動の増幅に関する知見を考慮し、発電所敷地に与える影響が大きいF-B断層、長岡平野西縁断層帯による地震により解放基盤表面における基準地震動を策定いたしました。その結果、1～4号機の解放基盤表面における基準地震動の最大加速度は2,280ガル、5～7号機の解放基盤表面における基準地震動の最大加速度は1,156ガルとなりました。

これをもとに、解放基盤表面から原子炉建屋に地震動が伝わる間の減衰を考慮して、最終的に主要な安全設備に影響を与える原子炉建屋基礎版上の地震動を評価した結果、1～4号機側の最大加速度は約660～830ガル、5～7号機側の最大加速度は約540～660ガルとなりました。

当社は、今後、施設の耐震安全性の向上を図るため、1～7号機の全てに対して原子炉建屋基礎版上で1,000ガル*の揺れに耐えられるよう工事を実施してまいります。

※基準地震動から評価した各号機の原子炉建屋基礎版上における地震動のほかに、新潟県中越沖地震で観測された原子炉建屋基礎版上における地震動をかさ上げしたものを考慮し、1,000ガルを耐震安全性向上の観点から設定した。この地震動レベルは、新潟県中越沖地震で観測された各号機の原子炉建屋基礎版上の全号機での最大加速度の1.5倍に相当する。

2. 今後の対応

今回策定した基準地震動については、経済産業省原子力安全・保安院の審議会*2等でご審議いただくものと考えております。当社は、この審議の状況を踏まえつつ、柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性の確認作業を進めるとともに、耐震安全性の向上を図る工事についても、同院の審議会等での審議の状況を適切に反映してまいります。

当社といたしましては、本件についても新潟県にご説明し、ご議論いただくとともに、立地地域をはじめ社会の皆さま方に、耐震安全性の向上を図る工事の状況を含めた中越沖地震後の柏崎刈羽原子力発電所の対応状況について、引き続きお伝えしてまいります。

以上

○別添資料

- ・柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動に係る報告書（概要）

* 1 柏崎刈羽原子力発電所の安全確保に関する指示

「柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び耐震安全性への影響評価について」

(平成19年7月16日付平成19・07・16原院第1号)

1. 今回の地震時に取得された地震観測データの分析
2. 今回の地震に対する安全上重要な設備の耐震安全性の確認

「平成19年新潟県中越沖地震を受けた柏崎刈羽原子力発電所の安全確保について」

(平成19年7月16日付平成19・07・16原院第2号) 抜粋

今回の地震時に取得された地震観測データの分析及び安全上重要な設備の耐震安全性の確認を進めること。

* 2 経済産業省原子力安全・保安院の審議会

総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 耐震・構造設計小委員会 地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ

柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動に係る報告書（概要）

1. はじめに

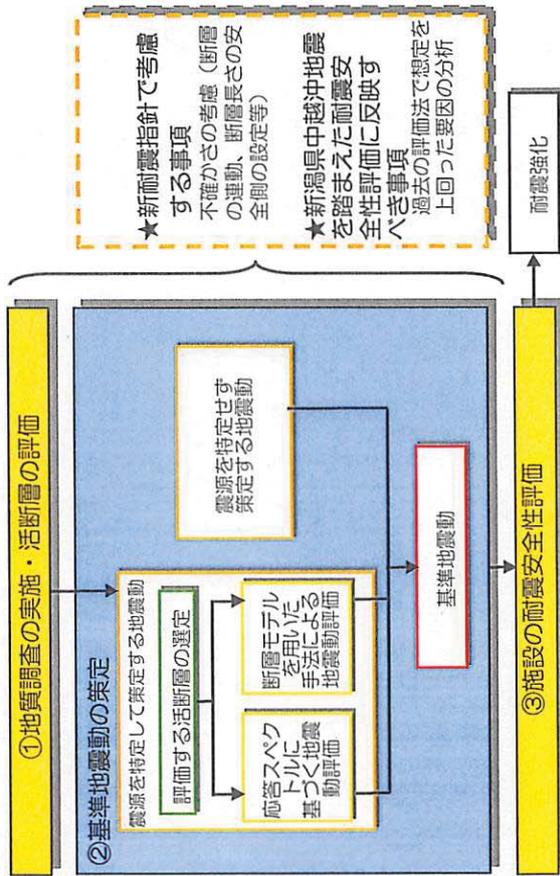
■ 柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析を実施し、地震動の増幅の要因を評価した。

■ また、以下を考慮し、基準地震動の策定を行った。

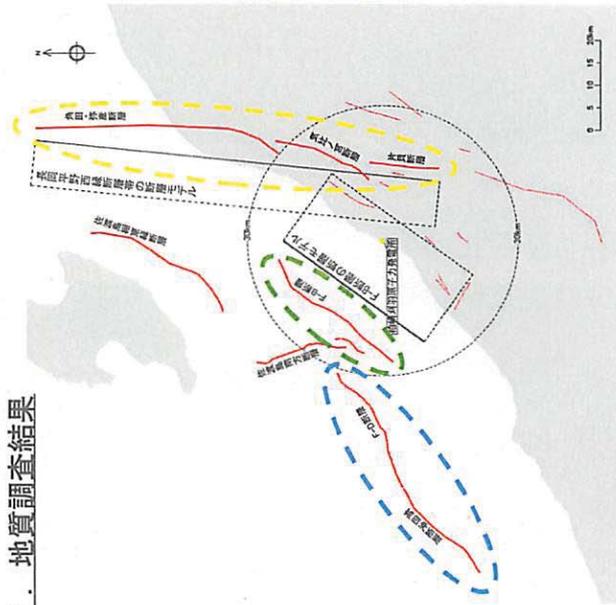
① 平成18年9月19日に改訂された発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（以下「新耐震指針」）に基づき、断層の運動、断層長さ等の不確かさを考慮する。

② 新潟県中越沖地震の地震観測データの分析結果から得られた知見を地震動評価に反映する。

2. 基準地震動の策定の流れ



3-1. 地質調査結果



主な活断層

断層名	断層長さ
佐渡島裾東縁断層	約37km
F-B断層	約34km
佐渡島南方断層	約29km
F-D断層	約30km
高田沖断層	約25km
角田・弥彦断層	約54km
氣比ノ宮断層	約22km
片貝断層	約16km

3-2. 活断層評価結果

■ 基準地震動を策定するにあたり、考慮する地震は以下のとおり。

活断層	断層長さ	地震規模※1	傾斜角※2	備考
F-B断層	約34km ※3 (約27km)	M7.0	南東傾斜 35°	安全評価上、全長を約34kmと評価
長岡平野 西縁断層帯	角田・弥彦断層	約54km	西傾斜 50°	安全評価上、同時に活動することを考慮
	氣比ノ宮断層	約22km		
	片貝断層	約16km		
F-D断層	約30km	M7.7	南東傾斜 35°	安全評価上、同時に活動することを考慮
高田沖断層	約25km			

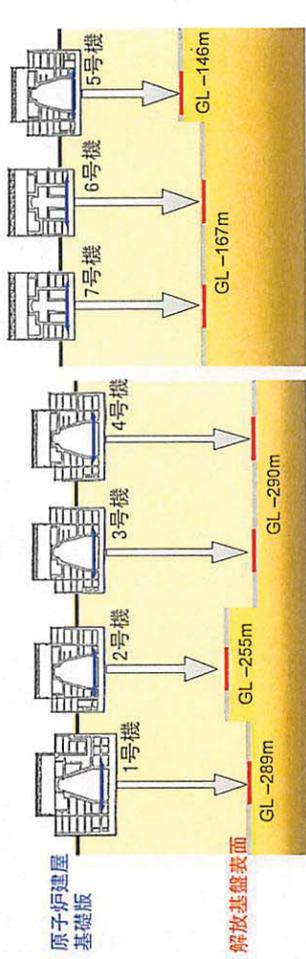
※1: F-B断層については、新潟県中越沖地震の震源断層面積と地震規模の関係に基づき、マグニチュード(M)を想定している。その他の断層については、地表断層の長さから松田(1975)による式を用いてマグニチュード(M)を設定している。

※2: 傾斜角: 断層面の水平面からの傾き。

※3: 当社調査結果に基づく断層長さは約27kmであるが、安全評価上全長を約34kmと評価。

4. 新潟県中越沖地震時の各号機解放放基盤表面における地震動の推定

- 1号機から7号機で観測された地震観測記録に基づき、設計時の解放放基盤表面と原子炉建屋基礎版上の関係を参照して、解放放基盤表面における地震動の推定を実施した。
- 本震時には原子炉建屋周辺の地震計で地中の記録が得られていないこと、建屋と地盤が大きく揺れた影響が含まれていること等の条件を考慮して、各号機の計算結果が原子炉建屋基礎版上の観測記録と整合するよう地盤の応答解析を実施した。

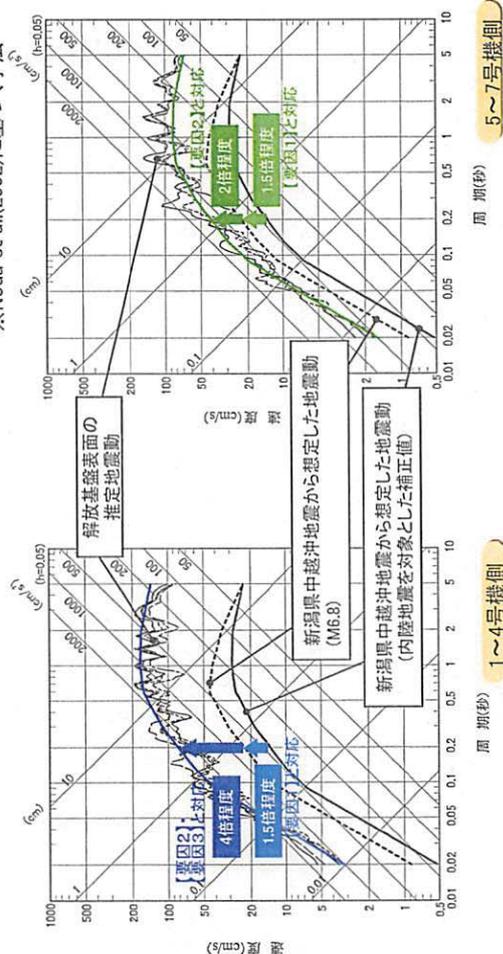


数値は水平(東西)の値	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	7号機	
原子炉建屋基礎版上での観測記録 (Gal)	680	606	384	492	442	322	356	
推定された解放放基盤表面での加速度 (Gal)	1,699	1,011	1,113	1,478	766	539	613	
(S _z : 450Gal)に対する倍率	2.3~3.8						1.2~1.7	

5. 観測記録の分析(敷地における中越沖地震の増幅特性)

- 解放放基盤表面における推定地震動の応答スペクトルと、「応答スペクトルに基づく地震動評価※1(新潟県中越沖地震に対する規模と距離から算定される応答スペクトル(M6.8))」を比較すると、1~4号機側で4倍程度、5~7号機側で2倍程度増幅している。

※Noda et al.(2002)に基づく手法

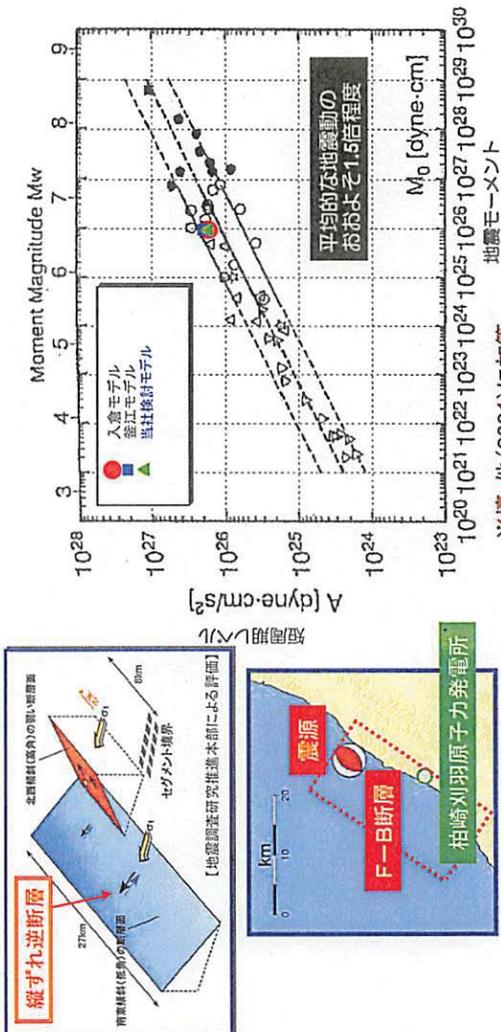


1~4号機側

5~7号機側

6-1. 【増幅の要因1】震源の影響

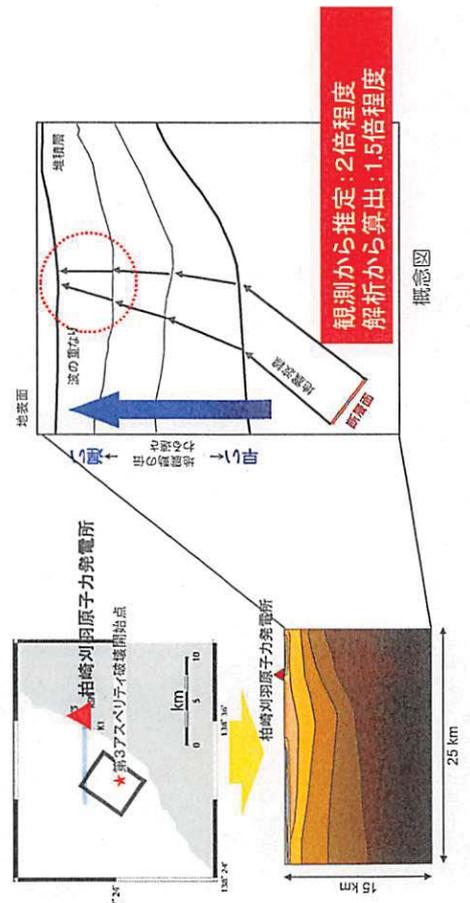
- 新潟県中越沖地震の震源断層モデルは、海域の主に南東傾斜からなる逆断層とされている。
- 新潟県中越沖地震について、観測された地震動を再現する震源断層モデルを仮定し、震源における地震動レベルを推定し、経験的に得られている地震規模と地震動の大きさの関係と比較した結果、新潟県中越沖地震は震源において通常より強い揺れを生じる地震であったことが認められた(1.5倍程度「5.と対応」)。



※壇・他(2001)に執筆

6-2. 【増幅の要因2】深部地盤における不整形性の影響

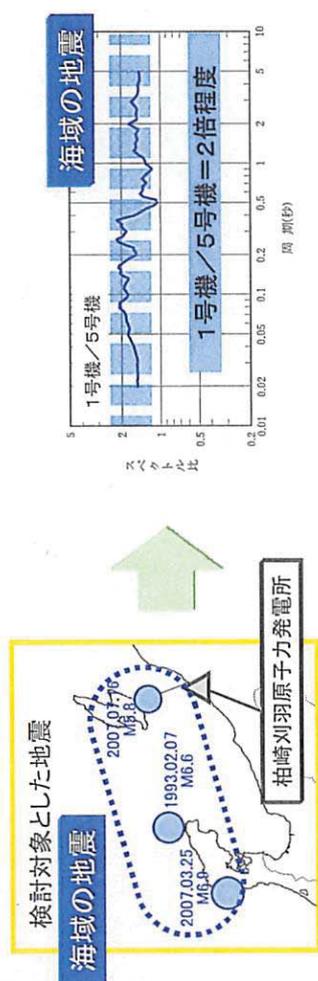
- 震源から解放放基盤表面までの深部地盤の地震波の伝わり方を評価した。
- 深部地盤の不整形性を反映した3次元地盤モデルを用いて地盤応答解析を実施したところ、地震波が屈折して集まる効果により、柏崎刈羽原子力発電所では増幅傾向が認められた(観測に基づく推定値: 2倍程度、解析結果から得られた値: 1.5倍程度)。



概念図

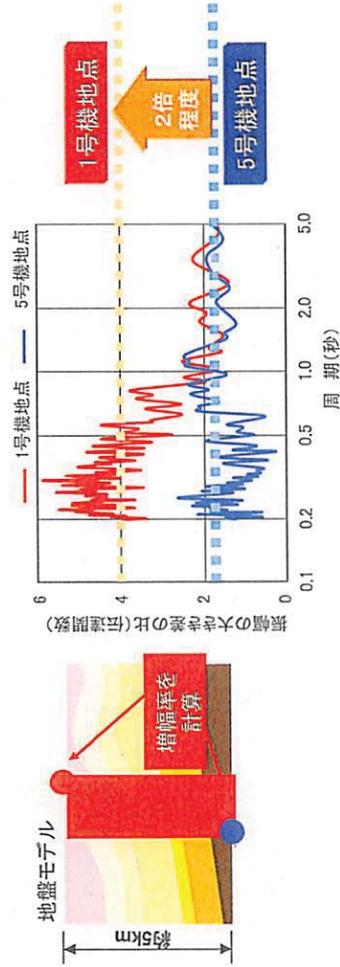
6-3. 【増幅の要因3】古い褶曲構造による増幅 その1: 観測記録の分析

- 新潟県中越沖地震の観測記録から推定した1号機と5号機の解放基盤表面での地震動を比較すると1号機の方が5号機より大きくなることが確認された(1号機/5号機=2倍程度)。
- 新潟県中越沖地震を契機に、これまで得られていた地震の発生場所を分類して敷地での観測記録を比較したところ、海域で発生した地震の場合、1号機の方が5号機より大きくなることが確認された(2倍程度)。

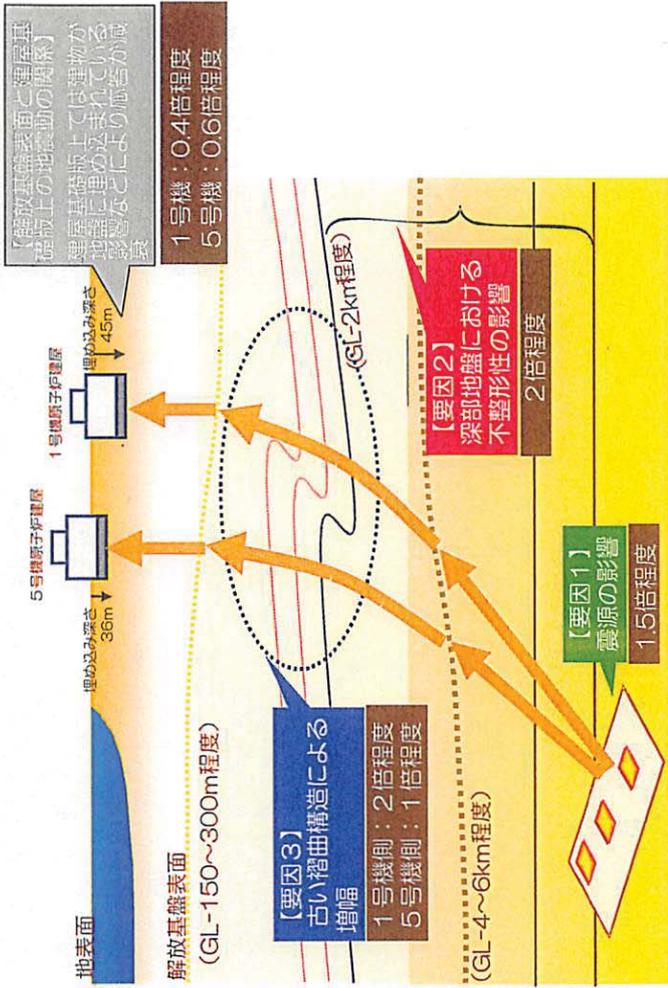


その2: 解析的検討

- 観測記録の分析により判明した増幅特性について、発電所敷地下の古い褶曲構造を反映した地盤モデルを用いて地盤応答解析を実施したところ、1号機側が5号機側に比べて増幅することを確認した(2倍程度)。



【地盤モデル底部から解放基盤表面までの増幅率】



地震動が大きくなった要因の概念図

7. 新潟県中越沖地震の分析のまとめ

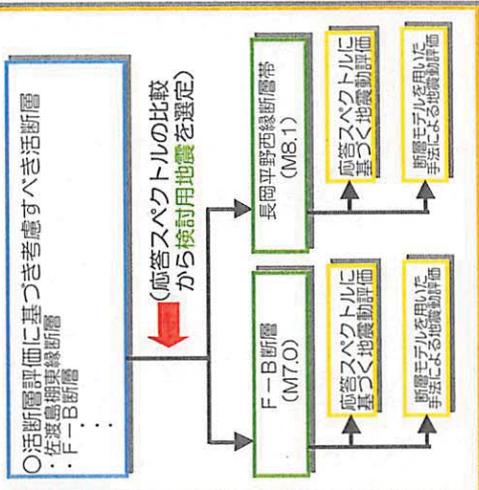
- 新潟県中越沖地震で敷地において地震動が大きくなったのは、以下の要因があげられる。
 - 【要因1】同じ地震規模の地震と比べ大きめの地震動を与える地震であったこと
 - 【要因2】周辺地盤深部の堆積層の厚さと傾きの影響で地震動が増幅したこと
 - 【要因3】発電所敷地内にある古い褶曲構造のために地震動が増幅したこと
- 発電所敷地内において、1~4号機側と5~7号機側では、発電所敷地下にある古い褶曲構造の影響により地震動の増幅に違いがあり、1~4号機側の方が5~7号機側に比べ、2倍程度、地震動が大きくなると評価した。
- 柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動の策定にあたっては、【要因1】~【要因3】の知見を、新潟県中越沖地震の観測記録に基づき倍率を用いることにより反映する。

8. 基準地震動策定のための検討用地震と地震動評価で考慮する事項

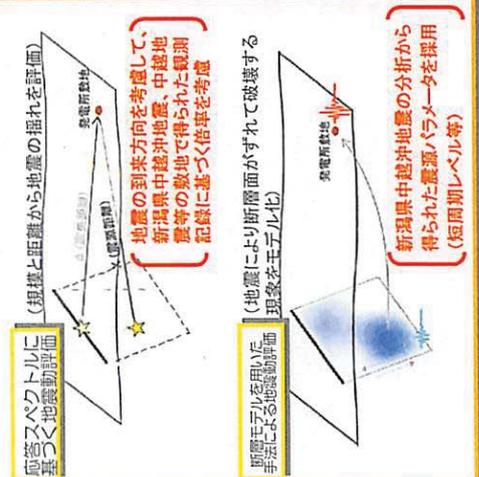
■検討用地震と地震動評価

活断層調査の結果を基に、応答スペクトルに基づく地震動評価の比較から影響の大きな地震
 ①F-B断層による地震、②長岡平野西縁断層帯による地震を検討用地震として選定し、新潟
 県中越沖地震の知見を反映した地震動評価を実施した。

■検討用地震の選定



■地震動評価法と新潟県中越沖地震の知見の反映



※「震源を特定せず策定する地震動」は策定した基準地震動Ssの影響を下回る

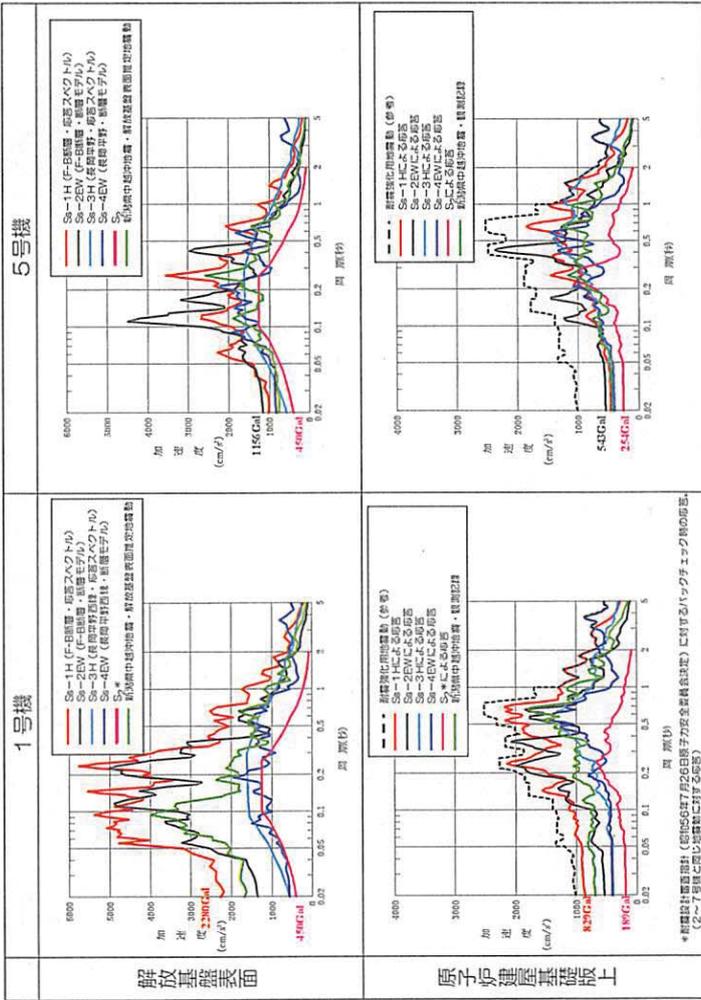
9. 基準地震動の策定

■検討用地震の地震動評価結果を基に、基準地震動Ssを策定した。

数値は水平(南北、東西)のうち大きい値(単位:Ga)

対象とする地震動	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	7号機	
新潟県中越沖地震 (観測値)	680	606	384	492	442	322	356	
基準地震動Ssによる応答 (原子炉建屋基礎版上)	829	739	663	699	543	656	642	
基準地震動Ssの最大値 (解放基礎表面)	2,280							1,156

各号機における地震動評価結果(水平)



1号機と5号機における基準地震動応答スペクトル

10. 今後の取組み (一層の耐震安全性向上のために)

- 新潟県中越沖地震の分析・評価結果ならびに得られた知見を反映した基準地震動は、今後、経済産業省原子力安全・保安院の審議会等で審議いただくものと考えている。
- 基準地震動の策定状況を踏まえつつ、柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性をより一層向上させる観点から、1～7号機の原子炉建屋基礎版上で1,000ガルの揺れに耐えられるよう、施設の工事を実施していく。
- この審議の状況を踏まえつつ、耐震安全性評価を進めるとともに、耐震安全性の向上を図る工事についても、同院の審議会等での審議の状況を適切に反映していく。
- 一層の耐震安全性向上の観点から、大深度地震観測などの実施に向けた検討を行う。

以上

平成 20 年 5 月 22 日

2007 年新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所
発生した地震動の分析・概要

独立行政法人 原子力安全基盤機構

■ 概 要

2007 年 7 月 16 日に発生した新潟県中越沖地震(Mj6.8)により、柏崎刈羽原子力発電所で観測された地震動が設計用地震動を大きく上回った要因について、特に大振幅のパルス波(説明図 1 参照)の発生に着目し、震源断層モデルと敷地周辺の 3 次元地下構造モデル(説明図 2 参照)を作成して解析的に分析した。その結果、以下のような要因が明らかになった。(以下、下線部分は用語解説参照)

(1) 震源特性の影響

- ① 中越沖地震では、3つのアスペリティが破壊し、敷地でパルス波を伴う強い地震動が発生した。特に敷地近傍のアスペリティによる強い地震動の放射と、その破壊過程が 1 号機側で大きなパルス波を発生させた要因になったと推定される。(説明図 3 参照)
- ② 今回の地震により発生した地震動は、同規模の地震と比べて平均的に 1.5 倍程度大きかったと推定される [短周期レベル約 1.5 倍]。(説明図 3 参照)

(2) 深部地盤の影響

- ① 1 号機波形後半の大きなパルス波は、上記アスペリティから放射された地震動が、3 次元的不整形性を持つ厚い堆積層を伝播する過程で成長し、地盤の固さが大幅に低下する解放基盤付近の堆積層で大きく増幅したと推定される。(説明図 4 参照)
- ② 1 号機側と 5 号機側のパルス波の大きさの違いは、上記の震源と深部地盤の不整形性による地震動の伝播効果、解放基盤付近の堆積層での地震動増幅特性の違い等により発生したと推定される。
- ③ 1 号機周辺で深部地盤の 3 次元効果による地震動の増幅が大きく、最大で 50% 程度の増幅であったと推定される。

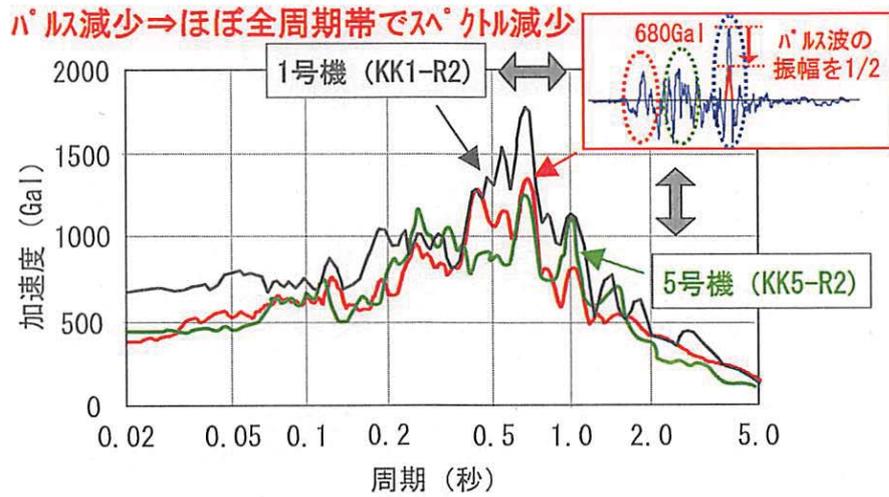
(3) 設計用基準地震動との比較による要因の整理

- ① 本震と余震の地中観測記録を用いてはぎ取り解析で推定したサービスホールの解放基盤面上の地震動の最大加速度は約 1200 ガルで、旧指針による設計用基準地震動の約 2.5 倍、耐専スペクトルで評価した地震動の 5.5 倍程度と推定される。
- ② 解析結果から推定される地震動(0.5 秒以上の長周期成分)の差の内訳は、震源特性で約 1.5 倍 [上記要因 (1)②]、深部地盤の影響で 2.5 倍程度 [上記要因(2)①]、その他要因が 1.5 倍程度と推定される。(説明図 5 参照)

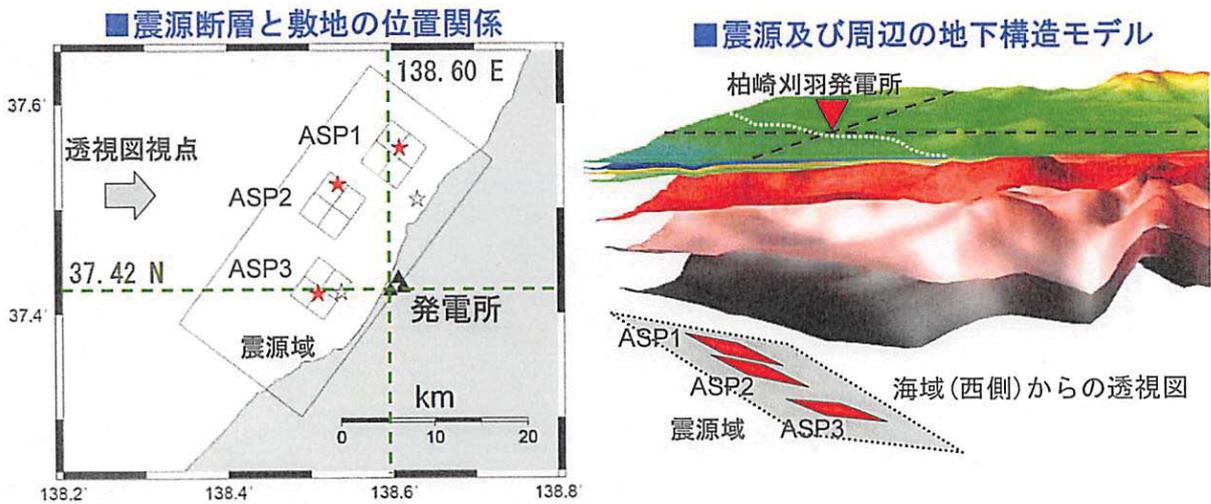
(4) 基準地震動策定において反映すべき事項の整理

上記の要因分析の結果を、震源特性の影響と敷地条件に依存する要因(深部地盤

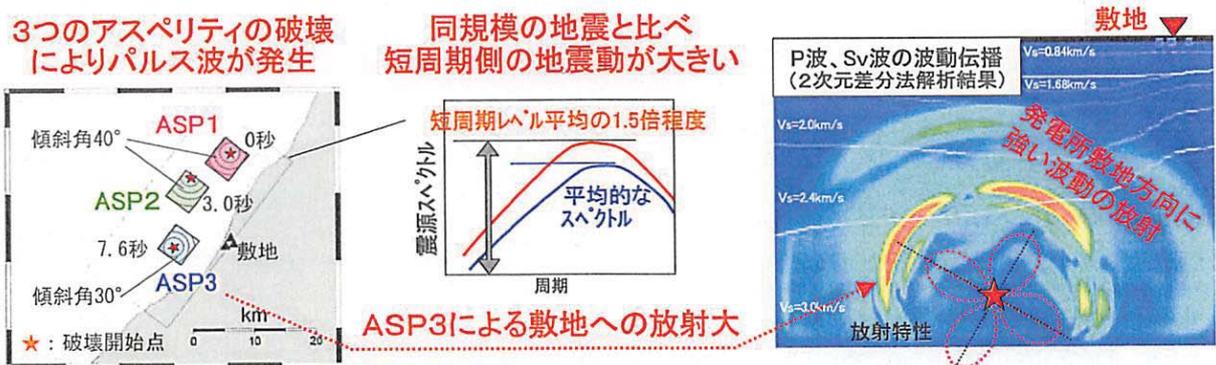
の影響)に分類し、新耐震指針との対応と、設計用基準地震動の策定において、他サイトで考慮すべき事項を整理した。



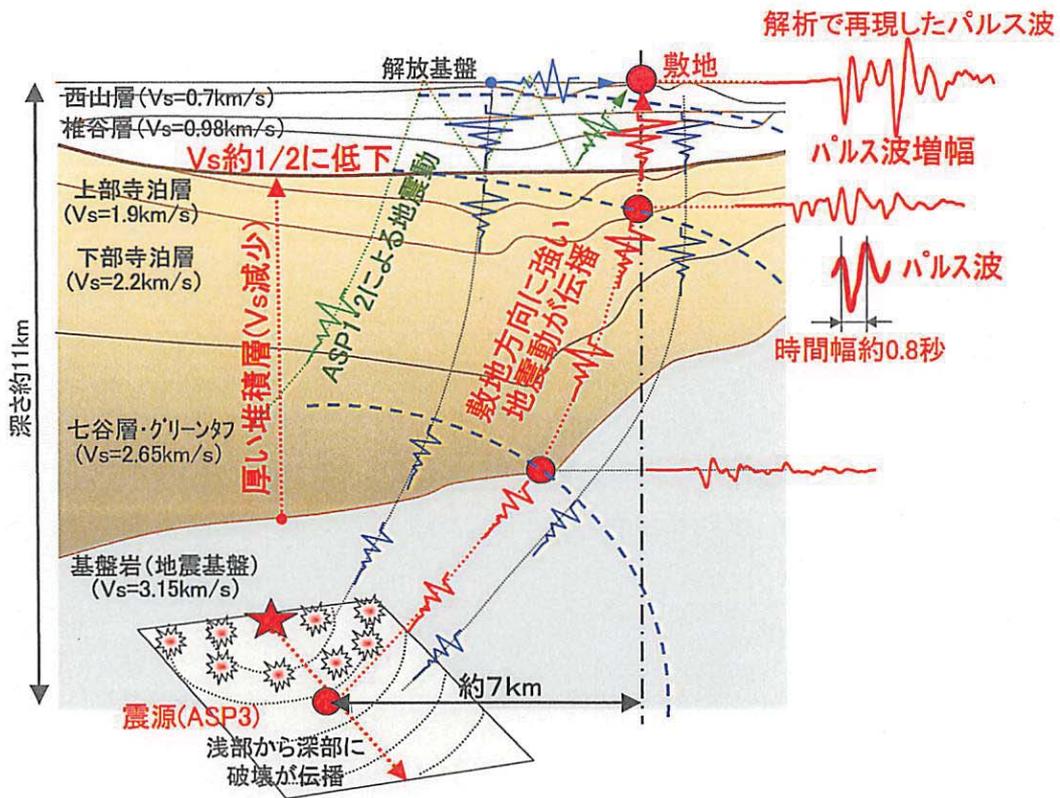
説明図1 原子炉建屋1号機と5号機の基礎版上観測記録の応答スペクトルの比較とパルス波の影響の検討



説明図2 新潟県中越沖地震の震源断層と敷地周辺の地下構造

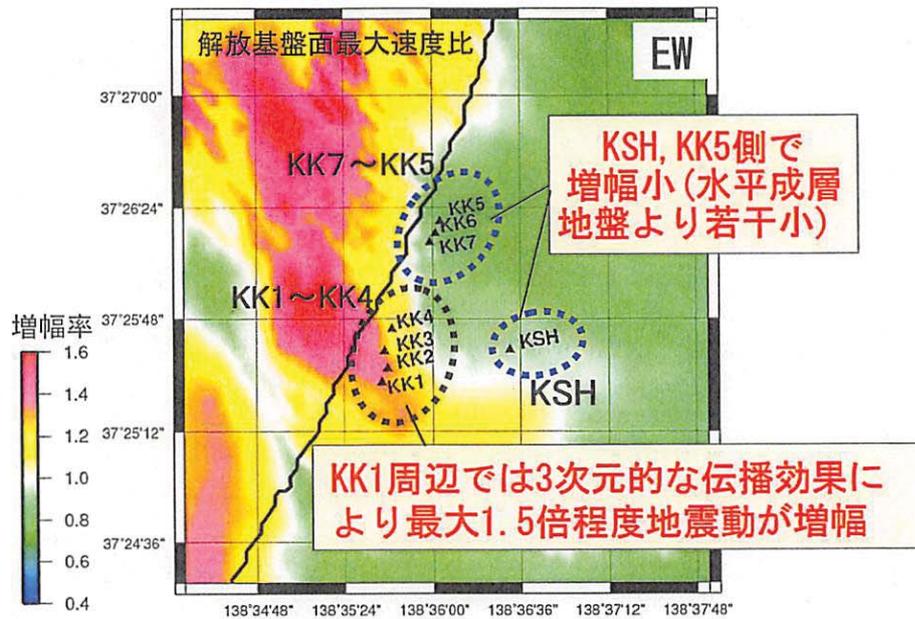


説明図3 震源特性の影響



説明図4 深部地盤の地震動伝播におけるパルス波の増幅

〔3次元地盤モデルの最大速度/水平成層地盤の最大速度〕



説明図5 深部地盤の不整形性による敷地周辺の地震動の増幅

震源特性・地震動評価に係る用語の解説

地震動の強さに大きな影響を与える震源の特性

- 短周期レベル、応力降下量及びそれらのパラメータで特徴付けられるアスペリテイの特性は、地震動の大きさや特徴に大きな影響を及ぼす。

短周期レベル

震源から放射される地震動の加速度スペクトルの強さを規定するパラメータ。応力降下量と比例関係にある。

$$A = 4\pi \cdot r \cdot \Delta\sigma_a \cdot \beta^2$$

$$r = \sqrt{\frac{S_a}{\pi}}$$

S_a : アスペリテイの総面積

β : 震源域における岩盤のS波速度

$\Delta\sigma_a$: アスペリテイの応力降下量

応力降下量 ($\Delta\sigma$)

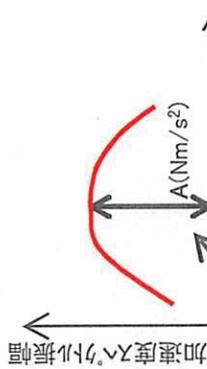
断層の破壊で、蓄えられていた歪みエネルギーが解放されることで、降下する応力の大きさを表す物理量。同じ規模の地震でも、応力降下量が大きいと短周期の波がより強く放射される。

アスペリテイ

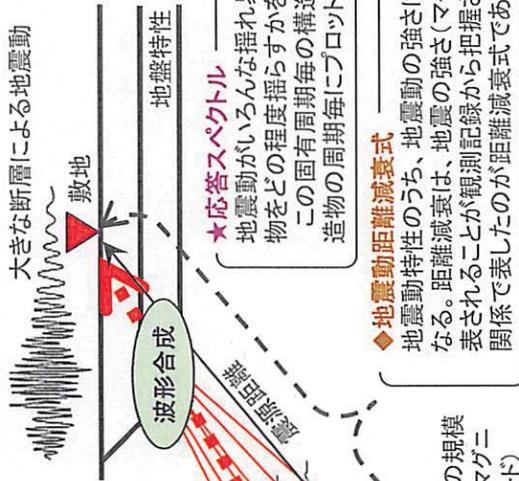
震源断層面のうち、断面間が強く固着し、ひずみが生じている領域のこと。ここから周囲と比べて強い地震波が放出される。

ハイブリッド法

地震動の短周期成分を経験的または統計的グリーン関数法で、長周期成分を理論解析で求め、両者を合成して広周波数帯域の地震動を算定する方法

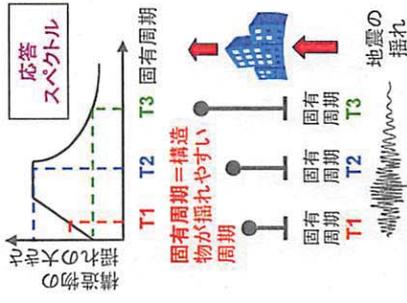


波形成法
大地震の断層の広がりと、地震動の伝わり方を模擬し、大地震の地震動を重ね合わせて、大地震の地震動を推定する手法。



地震動の強さの評価手法

- 新耐震指針では、地震動の強さの評価手法として、断層モデルと距離減衰表が用いられている。それらの手法や関連する用語について解説する



地震動
活断層を境界とする地盤がずれることにより発生する揺れを地震動という。揺れの強さは加速度や速度、震度等の物理量で表されている。

★応答スペクトル

地震動がいろんな揺れ易さの性質(固有周期)を持つ構造物をどの程度揺らすかを表す指標。
この固有周期毎の構造物の地震時の揺れの最大値を、構造物の周期毎にプロットしたものが応答スペクトルである。

◆地震動距離減衰式

地震動特性のうち、地震動の強さは震源から遠くなるにつれて小さくなる。距離減衰は、地震の強さ(マグニチュード)と震源からの距離で表されることが観測記録から把握されており、距離と地震動の強さの関係で表したのが距離減衰式である。

★耐震スペクトル

岩盤上の応答スペクトルを算定する距離減衰式の一つ。新耐震指針によるSs策定において、応答スペクトルに基づく手法に用いられている。

■三次元差分法

地震動の長周期成分を理論的に評価する手法の一つ。地盤を弾性体とみなし、地震動の伝播を解析する。三次元解析では、不整形な地盤形状を水平方向、鉛直方向に立体的にモデル化し、空間的、時間的な地震動の伝播の広がりを評価する。

●経験的グリーン関数法

小地震として、活断層の周辺で起こった地震の観測記録を用いる方法。

●統計的グリーン関数法

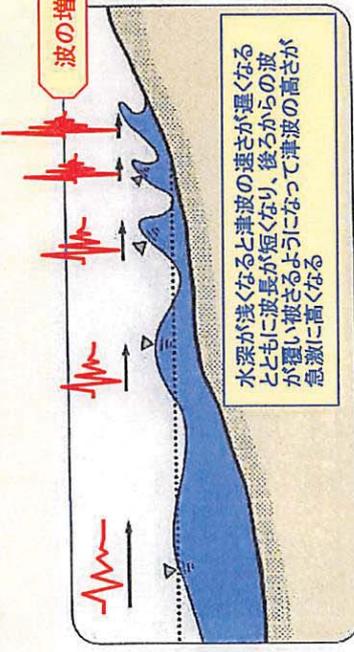
適切な観測記録が得られない場合に有効な手法で、過去に発生した地震の地震動の統計的性質に基づき小地震を作成する方法

■ 地震動の伝播に伴う「増幅」と「減衰」の解説

【柏崎刈羽原子力発電所で発生した地震動】

今回の地震により柏崎刈羽原子力発電所で発生した地震動は、震源から放射されたパルス波を伴う地震波が、厚い堆積層を伝播する間に大きな振幅を伴う強い地震動に増幅したものと推測される。当該地震波が地中で伝播する間に生じる増幅や減衰のメカニズムは以下のとおり。

地震波の伝播に伴う増幅は、津波にみられる増幅現象と同じように考えることができる



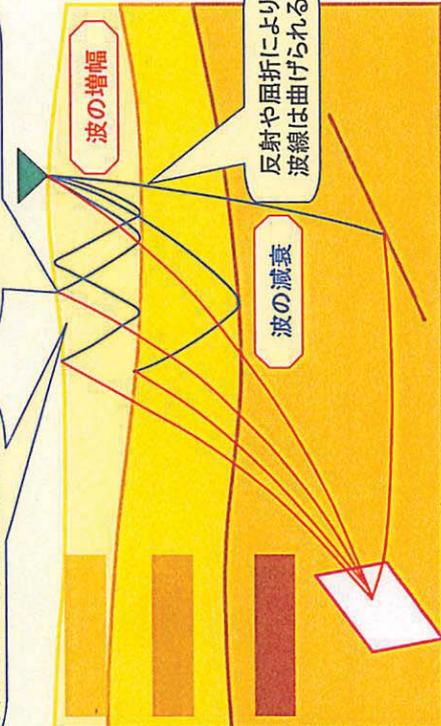
津波の伝播に伴う津波高の増幅(日常にみられる例)

【増幅の効果】

地下の深い方から次々と後続の地震波が入ってくると、地中に閉じこめられた地震波と重なり合って、地震波は増幅する

【減衰の効果】

地震波が地中を伝播すると、地下の不均質な構造等の影響により複雑な反射や散乱が起こり、地震波は減衰する



地震波の伝播に伴う地震動の増幅と減衰

【地中を伝播する地震波の性質】

地震波は伝播の途上で吸収、反射、屈折、散乱され、さまざまな地震動の「増幅」と「減衰」が引き起こされる

