

日本活断層学会「2009年度秋季学術大会」 2009年11月7日:東洋大学 1号館

平成19年(2007年)新潟県中越沖地震2周年シンポジウム

# 活断層評価と重要構造物の耐震安全性

入倉孝次郎

愛知工業大学

# 今日の話

## 1. はじめに

原子力発電所が強震動の直撃を受けたのは国内のみならず、国際的にも初めてのケース。

## 2. 2007年7月16日中越沖地震がもたらした新たな衝撃

## 3. 原発の耐震設計審査指針および活断層の手引きの改訂

## 4. 新指針に基づく既存原子炉施設のバックチェック

## 5. まとめ

# 2007年新潟県中越沖地震 (Mjma 6.8, Mw 6.6)

Kashiwazaki-Kariha 柏崎刈羽原子力発電所

震度6強

柏崎刈羽原子力発電所  
午前11時15分ごろ



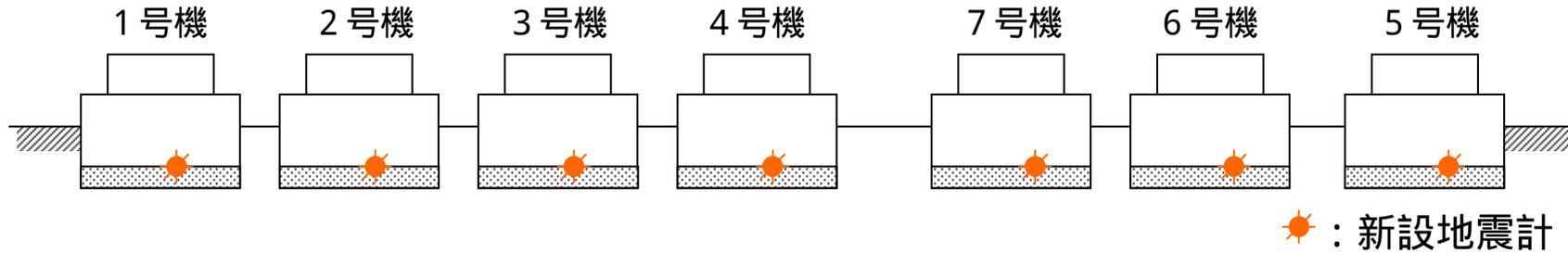
## 2 . 2007年新潟県中越沖地震がもたらした衝撃

- この地震は世界で最大の出力をもつ柏崎刈羽原子力発電所の極近傍域に発生した。発電所の建物・施設が震度7の強震動の直撃を受けた。
- 原子力発電所の被害として、変圧器の火災、貯蔵庫内のドラム缶の転倒、極微量ではあるが放射性物質の放出などはあった。
- 国際原子力機関、原子力安全・保安院、原子力安全委員会などの調査で、原子炉や原子炉建屋など安全上重要な設備には目立った損傷はなかったことが確認されている。

柏崎刈羽原子力発電所の被害については、本シンポの西川報告参照。



# 地震観測記録(基礎版上)



観測された最大加速度 (単位: ガル)

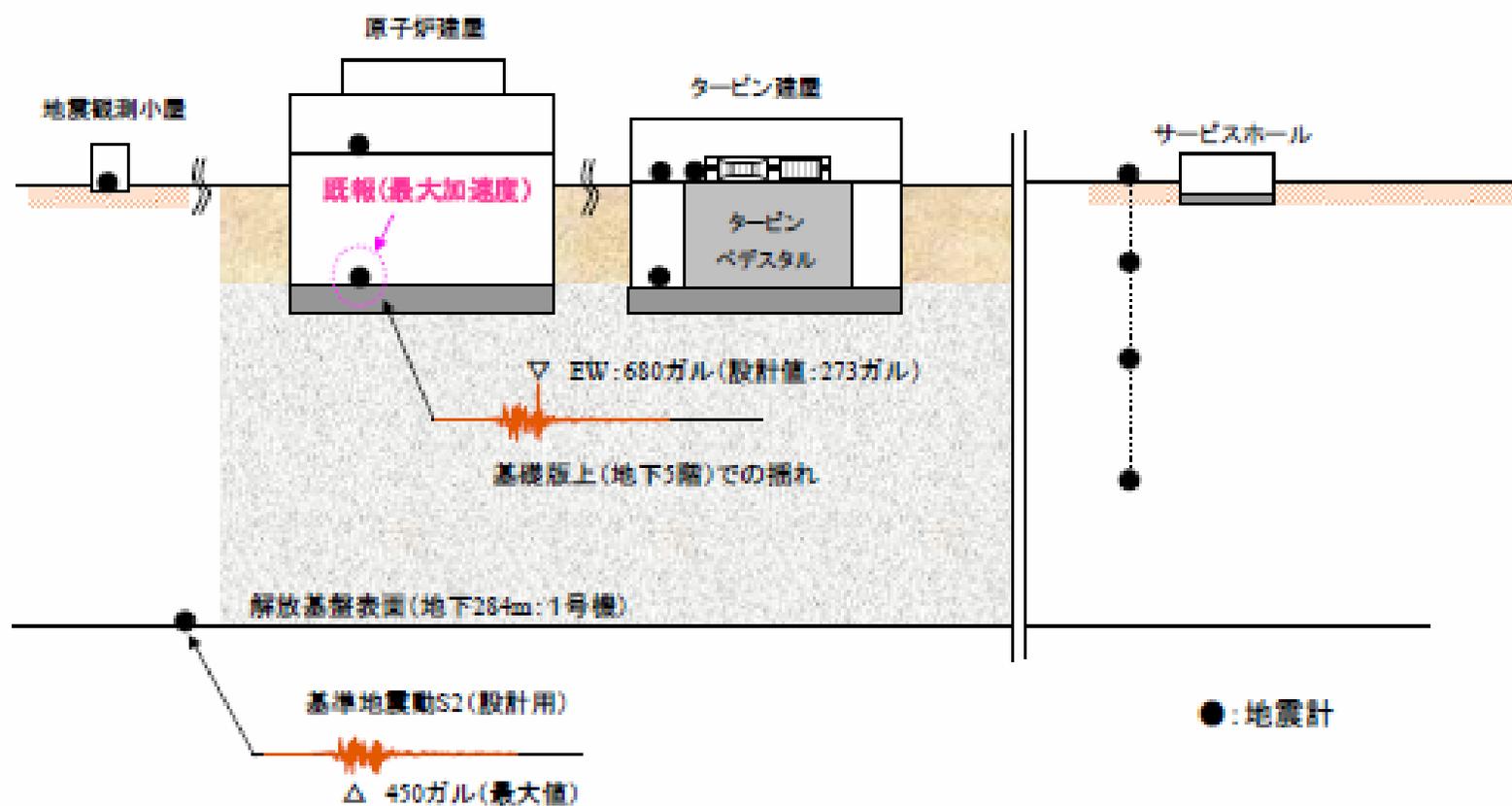
設計時 ( 1 ) の加速度応答値 (単位: ガル)

観測値		南北方向 NS	東西方向 EW	上下方向 UD
1号機	最下階(B5F)	311	680	408
2号機	最下階(B5F)	304	606	282
3号機	最下階(B5F)	308	384	311
4号機	最下階(B5F)	310	492	337
5号機	最下階(B4F)	277	442	205
6号機	最下階(B3F)	271	322	488
7号機	最下階(B3F)	267	356	355

解析値		南北方向 NS	東西方向 EW	上下方向 UD 2
1号機	最下階(B5F)	274	273	(235)
2号機	最下階(B5F)	167	167	(235)
3号機	最下階(B5F)	192	193	(235)
4号機	最下階(B5F)	193	194	(235)
5号機	最下階(B4F)	249	254	(235)
6号機	最下階(B3F)	263	263	(235)
7号機	最下階(B3F)	263	263	(235)

- 1 設計時の基準地震動S2 ( 1号機についてはEL CENTRO等 ) による応答値
- 2 上下方向については、 ( ) 内の値を静的設計で用いている

## 地震観測記録について(波形データが取得できている観測点:地震計33台分)



## この地震の地質学的および地震学的特徴

- この地震はプレート境界と考えられている日本海東縁部の延長に位置し、活褶曲構造調査 (岡村, 2002) やGPS観測によって日本海西岸・新潟から南西方向に延びるひずみ集中帯の中で起こった(鷲谷, 2007)。
- この地震の気象庁マグニチュードは6.8、遠地地震データのインバージョンから推定されたモーメント・マグニチュードは約6.6であった。
- 本震の発生機構は北西 南東方向に圧力軸をもつ逆断層型であった。
- 震源断層面は、当初余震分布の精度が悪く決まらなかったが、海底地震計による余震観測に基づき推定された地下構造モデルを用いて再決定の結果、南東傾斜の断層の存在を示唆(地震調査推進本部, 2008)。
- 強震動を生成した3つのアスペリティは南東傾斜の震源断層にある(瀧瀬: 本シンポ講演, 2009)。

# 新潟県中越沖地震の経験から学ぶこと

1. 耐震安全審査の時点で特定されてなかった活断層に起こった地震：
  - ・考慮すべき活断層が見逃されていた。
2. 耐震安全設計のための地震動をはるかに超える強震動。
  - ・この地震に関係する可能性のある活断層の存在は、2000年頃に専門家により指摘されていたが、して旧指針に従って評価された地震動は建設時点の設計用地震動のレベルを超えないと結論づけた。
3. 安全余裕をもった耐震安全設計。
  - ・旧指針で定められていた静的地震力、基準地震動S1およびS2による耐震安全性評価の多重性並びに各施設の地震応答評価がもつ保守性により、設計用地震力に対して設計段階の耐震裕度により、施設の安全性が確保された。

## 設置許可申請時の活断層評価に関する要求事項

---

- 「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」  
(昭和53年9月, 昭和56年7月一部改訂)
- 「原子力発電所の地質, 地盤に関する安全審査の手引き」  
(昭和53年8月)

(考え方) 基準地震動S1, S2の設定にあたって, 敷地周辺の活断層による地震を考慮すること

- S1: 1万年前以降活動した, 活動度の高い活断層を考慮
- S2: 5万年前以降活動した, 活動度は低いが敷地に大きな影響を与える可能性がある活断層を考慮

(要求事項) 敷地の中心から半径30kmの範囲について以下の調査を要求

- 陸域: 文献調査, 空中写真判読, 地表踏査
- 海域: 文献調査, 海上音波探査

[補足]

- S1 (設計用最強地震): 同地震に対してAsクラス(原子炉圧力容器など) およびAクラス(非常用炉心冷却系) 構造物/建物の弾性挙動を維持
  - S2 (設計用限界地震): 同地震に対してAsクラス構造物の安全機能を保持
-

## 活断層の評価（陸域）

敷地から30km範囲における活断層

■ 気比ノ宮断層 (S1)

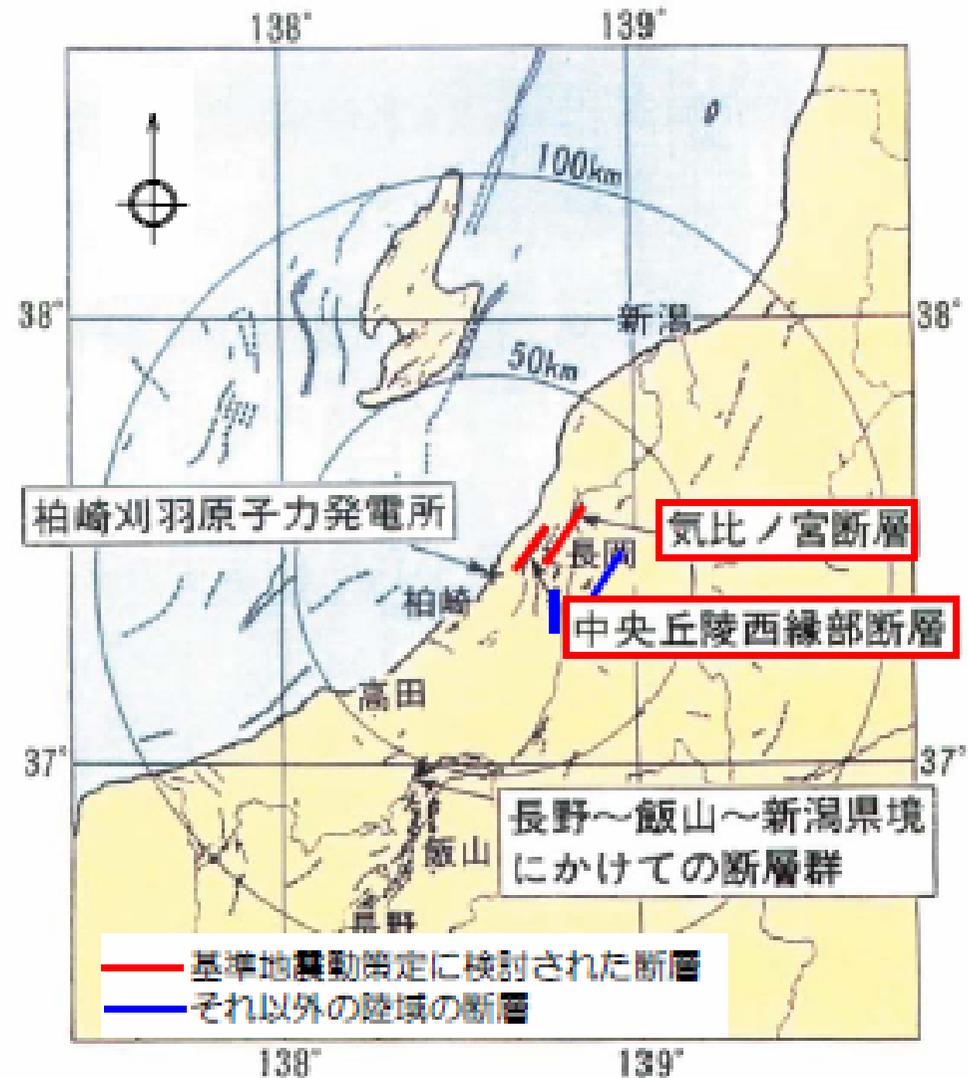
M6.9, L=17.5km, Δ=20km

■ 中央丘陵西縁部断層 (S2)

M6.7, L=12.5km, Δ=12km

■ 片貝断層 L=10km

■ 悠久山断層 L=10km



## 活断層の評価（海域）

### 海域の活断層

#### ■発電所周辺の海域

F-C 断層：L=1.5km,  $\Delta$ =21.5km

#### ■遠方の海域

##### 佐渡島周辺

佐渡島北方断層：

M7.7, L=52km,  $\Delta$ =109km

佐渡島棚東縁部断層：

M7.2, L=27km,  $\Delta$ =61km

佐渡島棚西縁部断層：

M7.4, L=36km,  $\Delta$ =78km

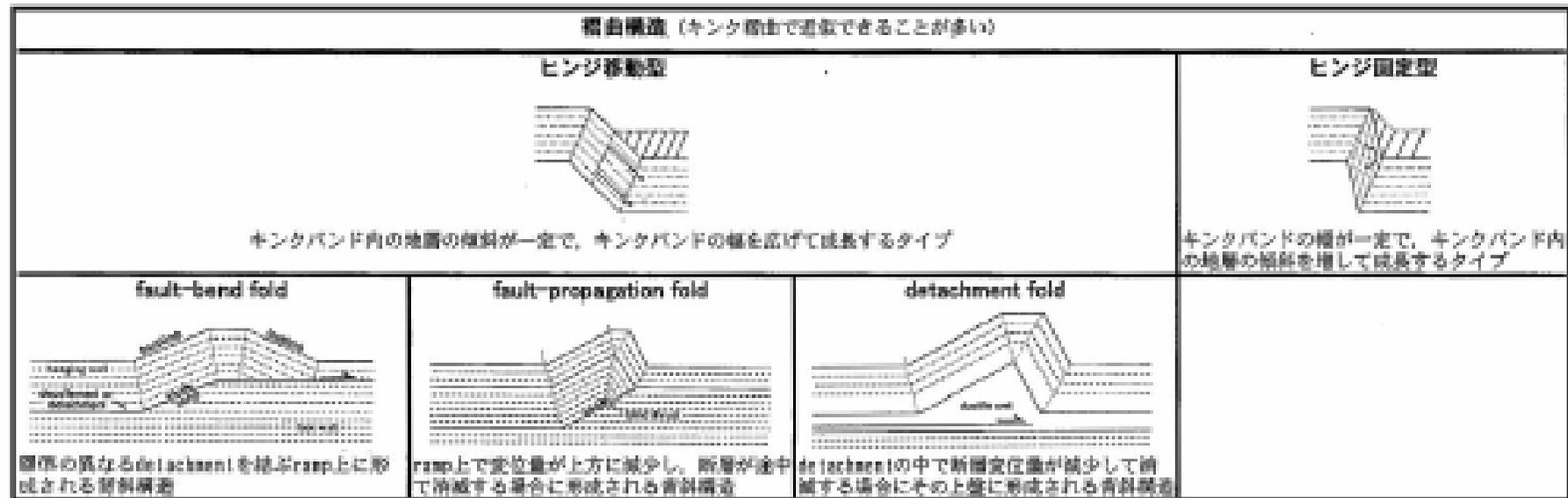
##### 高田沖

高田沖断層：M7.3, L=29km,  $\Delta$ =58km



## K-6/7設置許可取得後の新たな文献（2）

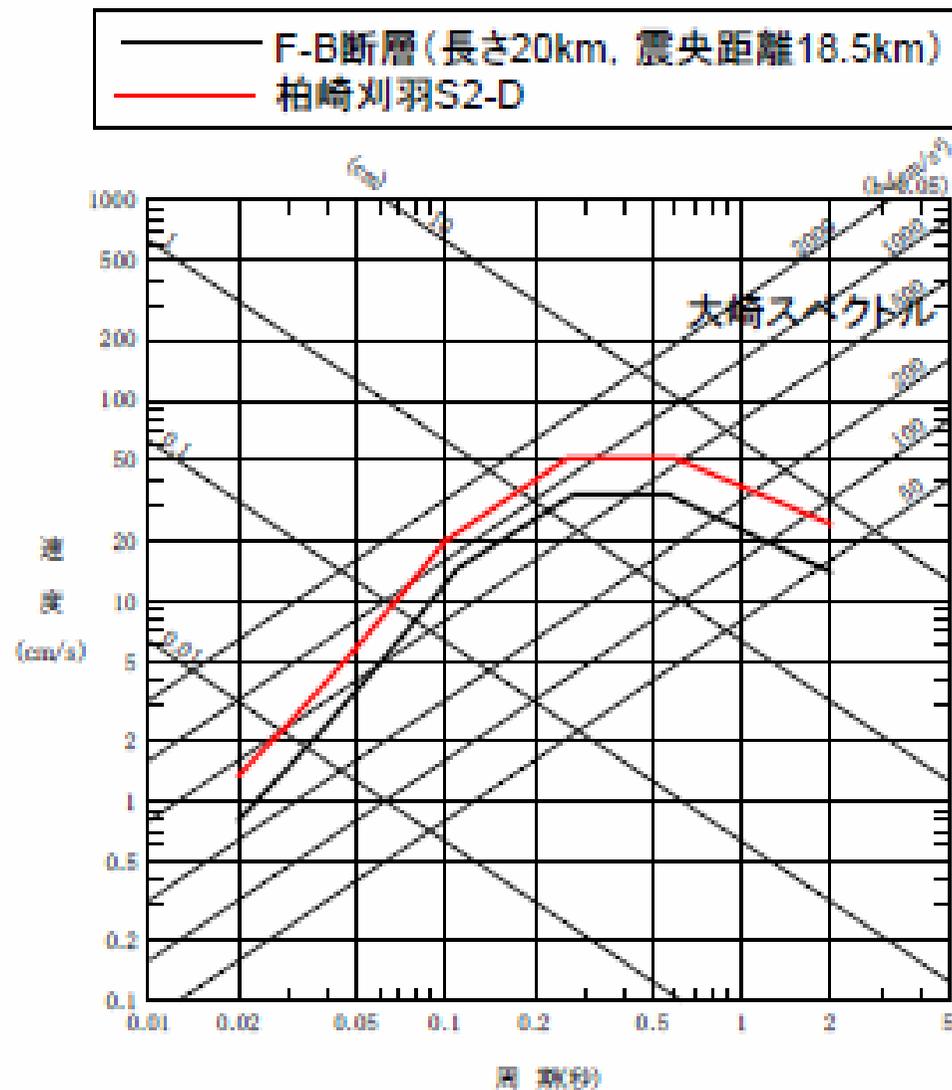
○岡村(2000)



褶曲の形態から断層の形態と運動の情報が得られると指摘

東京電力(2008)

## 評価結果 (F-B断層：大崎スペクトル)



○H15年当時は大崎スペクトルによる評価により、S2を上回らないと判断

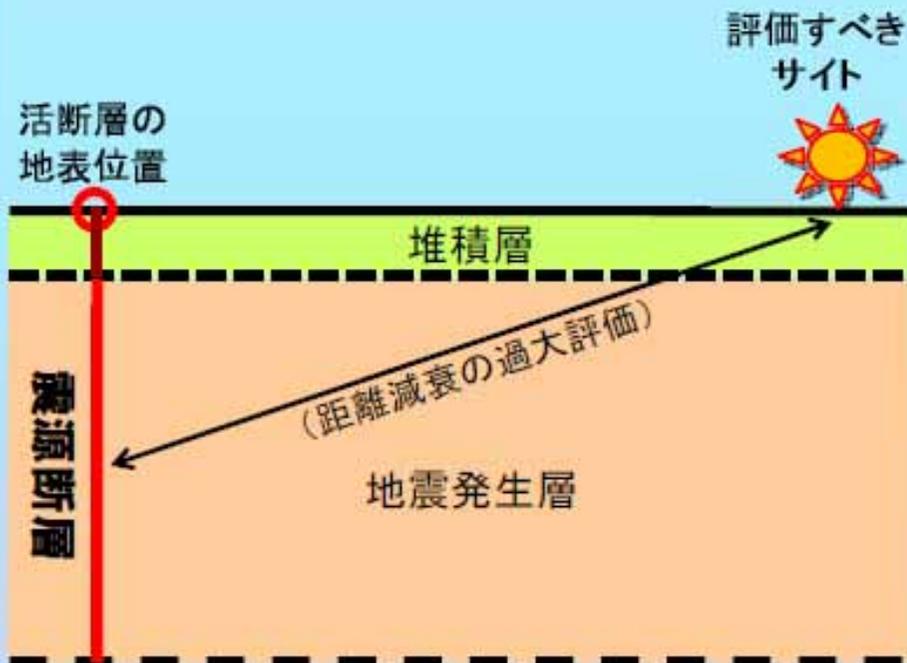
○その後、耐震設計審査指針が改訂され、変動地形学的調査等の要求、活断層の認定基準(年代)の変更等が行われた

○上記改訂指針に対するバックチェック報告を念頭に、他地点の安全審査の状況も踏まえて、海域活断層の再評価を継続的に進めていた

## “不適切な”地震動評価

~~断層の傾斜方向  
(と角度)の情報~~

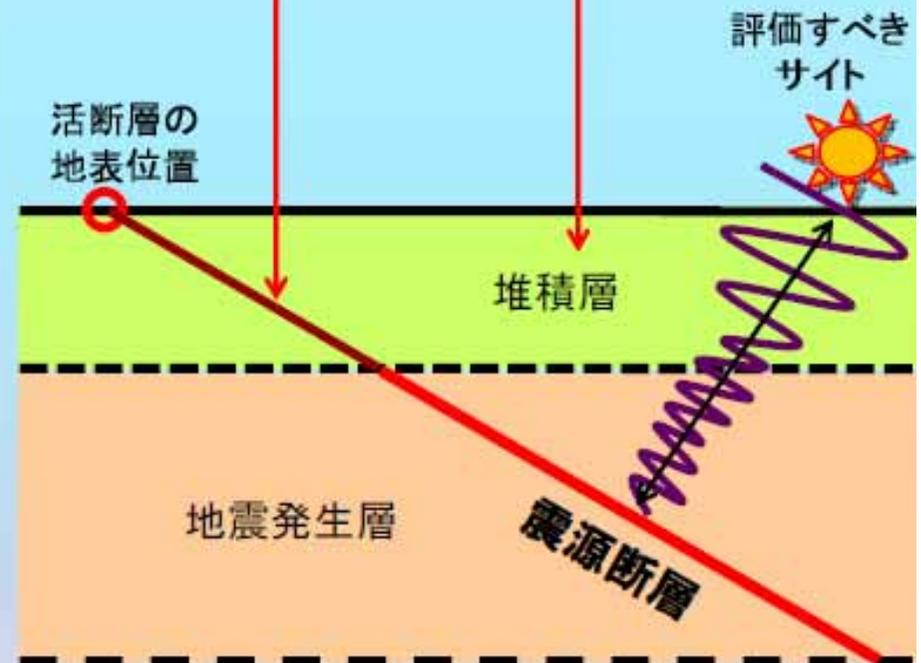
~~堆積層の厚さ(とS波  
速度構造)の情報~~



## “適切な”地震動評価

断層の傾斜方向  
(と角度)の情報

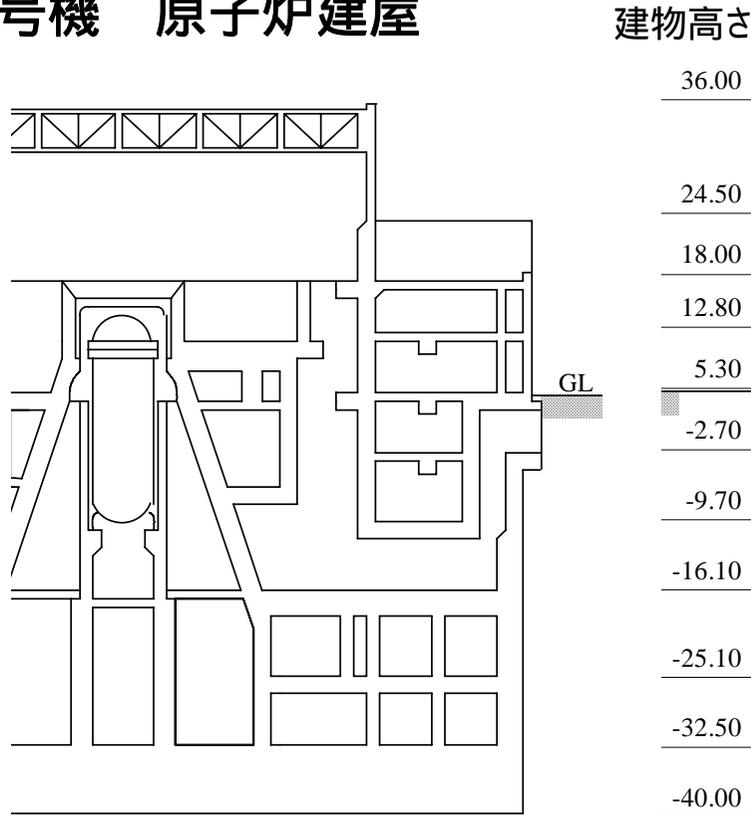
堆積層の厚さ(とS波  
速度構造)の情報



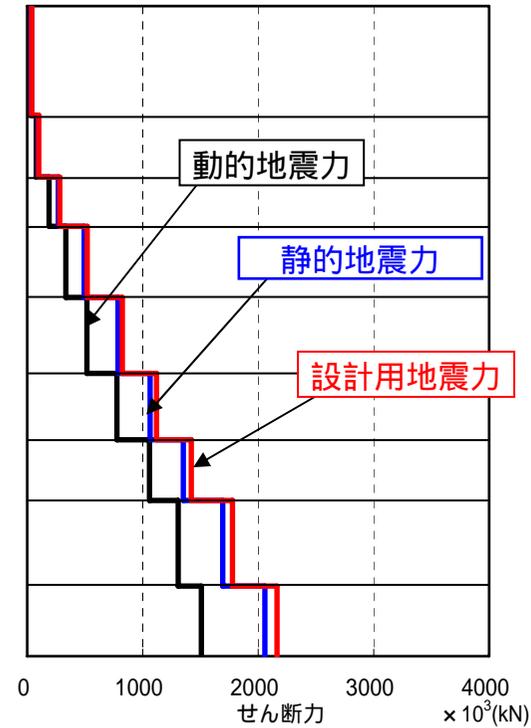
- 震源断層の位置と形状の適切な設定
- 厚い堆積層による地震動の増幅の適切な評価

# 柏崎刈羽原子力発電所—設計用地震力

## 1号機 原子炉建屋



- 動的地震力 (EL CENTRO等, 300Gal 規準化)
- 静的地震力 (建築基準法の3倍)\*
- 設計用地震力\*\*



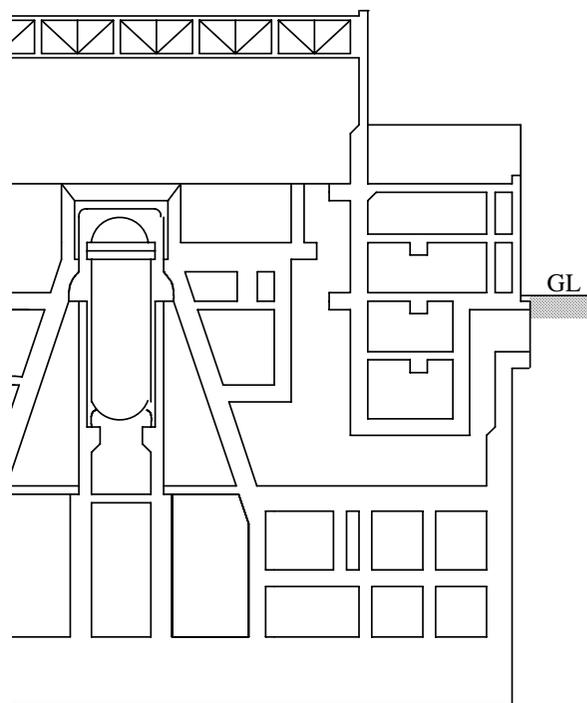
原子炉建屋の設計においては、動的地震力のほか、**建築基準法の3倍の静的地震力**を包絡して、**設計用地震力**を定めている。

\* 静的地震力：基礎上基準で算定 ( $3C_H$ )

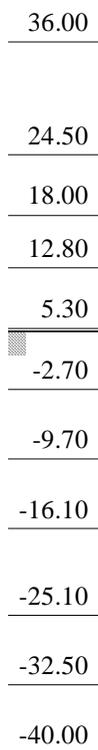
\*\* 設計用地震力：静的地震力に5%マージンを考慮して設定

# 柏崎刈羽原子力発電所—設計用地震力と観測記録の比較 (応答せん断力)

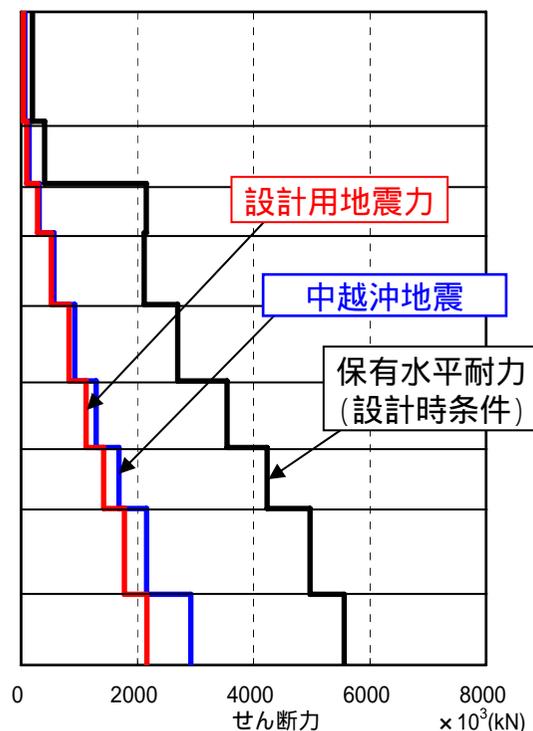
## 1号機 原子炉建屋



建物高さ (m)



- 中越沖地震によるせん断力\*
- 設計用地震力
- 保有水平耐力 (設計時条件)



中越沖地震による原子炉建屋のせん断力は、原子炉建屋の設計用地震力と同程度かやや大きいレベルであった。  
また、**保有水平耐力に対しては大きな余裕がある**結果となっている。

\* 中越沖地震によるせん断力は、耐震壁及び補助壁を耐震要素として考慮した解析に基づき算定。

### 3. なぜ耐震設計審査指針を改訂する必要があったのか？

#### 改訂の背景

旧指針は1981年(昭和53年)当時の最先端の知見(活断層調査、応答スペクトルによる地震動評価、静的地震力の算定法など)に基づいて定められた。

1981年(昭和56年)から現在まで(25年間)に、  
地震学および地震工学に関する新たな知見の蓄積。  
原子炉施設の耐震設計技術の改良および進歩。

#### 1995年兵庫県南部地震の経験：

原子力施設に特段の影響を及ぼしたものはなかったが、断層の活動様式、震源破壊過程と地震動特性、構造物の耐震性、等に係わる貴重な知見が得られた。  
原子力施設の耐震安全性に対する信頼性の向上に上記の新たな知見の反映させる必要があるとの認識が高まる。  
原子力発電所の耐震安全性について社会的説明責任の声が高まる。

海外、とくに米国で原子力耐震設計にPSA(確率論的安全評価)評価を取り入れる動きに合わせて、日本でも一部の研究者からPSAを導入すべきとの強い意見が出されるようになった。

# 新耐震設計審査指針（新指針）の特徴と意義

信頼性の高い詳細な地形・地質調査等に基づく活断層に起因する地震、及び地震テクトニック・文献等の調査に基づく海溝型地震、を認定し、検討用地震を選定。

**考慮すべき活断層**：旧指針では、5万年前以降に活動したもの 新指針では、後期更新世以降の活動が否定できないもの。

基準地震動 $S_s$ の評価は、従来の応答スペクトルを用いた経験的な手法に加え断層モデルによる手法、で行う。

経験的手法は限られたデータで作られるため、震源近傍域で精度が十分ではない可能性がある。

断層パラメータの設定で、不確実さを適切に考慮することが要求されている。

$S_s$ を超える地震動の可能性を認識して「残余のリスク」を評価（解説で努力すべきものとして記載）

十分な調査を行って基準地震動を策定してもそれを上回るレベルの地震動に襲われる可能性は否定できない。「残余のリスク」を可能な限り小さくするための努力を求める。

## 新指針に基づく既存原発のバックチェック

- ・耐震設計審査指針の改訂(2006年9月)を受けて、原子力安全委員会は、行政庁に原子力事業者に対して既設も含めて原子力施設の耐震安全性の評価の実施とその結果の速やかな報告を指示。
- ・原子力安全保安院は、原子力施設について新耐震指針に照らした耐震安全性の評価(バックチェック)を原子力事業者に要請。それを受けて原子力事業者は、耐震安全性の評価の実施計画書を行政庁に提出、既設原発の耐震安全性の評価のために地形・地質調査と基準地震動の評価の検討を開始した。

そのような状況の中で、2007年7月16日新潟県中越沖地震(M 6.8)が起こった。

新指針による審査を行うために、手引きの策定の必要なことが認識され、原子力安全委員会は2007年12月に地質・地盤に関する安全審査の手引き検討委員会を設置し、手引き改訂のための審議を開始した。

# 地質・地盤に関する安全審査の手引き検討委員会の設置について

平成19年(2007年)12月27日

原子力安全委員会耐震安全性評価特別委員会

## 1. 設置目的

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」(平成18年9月19日原子力安全委員会決定)を踏まえ、原子力発電所の地質・地盤調査等のあり方について、専門的かつ効率的な調査審議に資するため、地質・地盤に関する安全審査の手引き検討委員会を設置する。

## 2. 検討事項

委員会においては、以下の事項について検討する。

(1)「原子力発電所の地質、地盤に関する安全審査の手引き」(昭和53年8月23日原子炉安全専門審査会)の見直しも含め、原子力発電所における地質・地盤調査等のあり方に関する事項

(2)その他

地質・地盤に関する安全審査の手引き検討委員会の構成（主査、副主査）

伊藤 洋	財団法人電力中央研究所
入倉孝次郎	愛知工業大学
上田 圭一	電力中央研究所
岡村 行信	産業技術総合研究所活断層・地震研究センター
奥村 晃史	広島大学大学院文学研究科
釜江 克宏	京都大学原子炉実験所 附属安全原子力システム研究センター
川瀬 博	京都大学防災研究所
隈元 崇	岡山大学大学院自然科学研究科
笹谷 努	北海道大学大学院工学研究科
杉山 雄一	産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター
鈴木 康弘	名古屋大学大学院環境学研究科
高橋 智幸	秋田大学工学資源学部土木環境工学科
谷 和夫	横浜国立大学大学院工学研究院
佃 栄吉	産業技術総合研究所
徳山 英一	東京大学海洋研究所
中田 高	広島工業大学環境学部
翠川 三郎	東京工業大学大学院総合理工学研究科
宮下由香里	産業技術総合研究所 活断層研究センター
山岡 耕春	名古屋大学大学院環境学研究科
山崎 晴雄	首都大学東京大学院都市環境科学研究科
山中 佳子	名古屋大学大学院環境学研究科

## 手引き策定に当たっての問題提起

- 当初設計時の想定を上回る地震動の観測や当初設計時に考慮されていない活断層の指摘  
過去の審査の妥当性についての懸念
- 安全審査の信頼性の一層の向上が必要
- 検討の視点
  - 高度な科学的知見を有する専門家にバランスよく参加(専門性)      最新知見をどう反映するか？
  - 専ら科学的・技術的見地から検討(中立性)      利益相反は防止
  - 情報公開と説明責任(透明性)      公開の範囲をより広げる

## 新手引きの特徴

敷地中心から概ね100km以内を対象に既存文献や観測・調査資料の収集により、広域の地震テクトニクスを把握して、当該地域に発生する可能性のある地震を洗い出し、つぎに敷地中心から少なくとも30 kmの範囲について、検討すべき活断層の3次元形状の把握し、地域特性を考慮した基準地震動を評価するための震源断層モデルの構築を行う。新手引きのポイントとして4点が挙げられる。

1. リニアメント重視から地形発達過程(地形の成因を含む)重視への移行: 成因を重視した変動地形学的調査、地表地質調査及び地球物理学的調査を総合、活断層に加え、活撓曲や活褶曲等についても十分に調査する。
2. 各手法による調査結果の総合的な検討の重要性: 各手法で調査結果が異なる場合はそれらの結果を相互比較して妥当性を検証し、総合的に判断する。
3. 断層の三次元的形状の把握の重要性: 三次元弾性波探査等を使用し、活断層の三次元構造を可能な限り把握する。
4. 一貫した考え方にもとづく活断層の認定: 活断層の認定については、一貫した認定の考え方により判断する。



# 4. 新指針の基づく既存原子炉施設のバックチェック

新潟県中越沖地震を踏まえた耐震安全性評価に反映すべき事項

(A) 地質調査実施・活断層の評価

(B) 基準地震動の $S_s$ の策定

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

震源を特定せず策定する地震動

検討用地震の選定\*

応答スペクトルに基づく手法による地震動評価

断層モデルを用いた手法による地震動評価

\* 孤立した短い断層がある場合は別途評価

基準地震動 $S_s$

参照

地震動の超過確立

耐震重要度分類

(C) 施設の耐震安全性評価

原子炉建物基礎地盤の安全性評価

安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

屋外重要土木構造物の耐震安全性評価

地震随件事象に対する考慮  
(原子炉建物周辺斜面の安定性)  
(津波に対する安全性)

解析結果等

解析結果等

安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

## 4 - 1 . 検討に当たっての基本的考え方 - 検討に当たって重視した点 -

### 1. 新耐震指針<sup>1</sup>

変動地形学的調査など最新の調査手法に基づく活断層調査  
敷地ごとに震源を特定して策定する地震動の評価  
震源を特定せず策定する地震動の評価  
基準地震動策定過程における不確かさ（ばらつき）の考慮

### 2. 新手引き<sup>2</sup>

地形発達過程（地形の成因を含む）を重視した調査  
既存文献の調査、変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的  
調査等の各手法による調査結果の総合的な検討  
断層の三次元形状の把握  
一貫した活断層の認定の考え方  
必要に応じ調査原資料に立ち返った審査の必要性

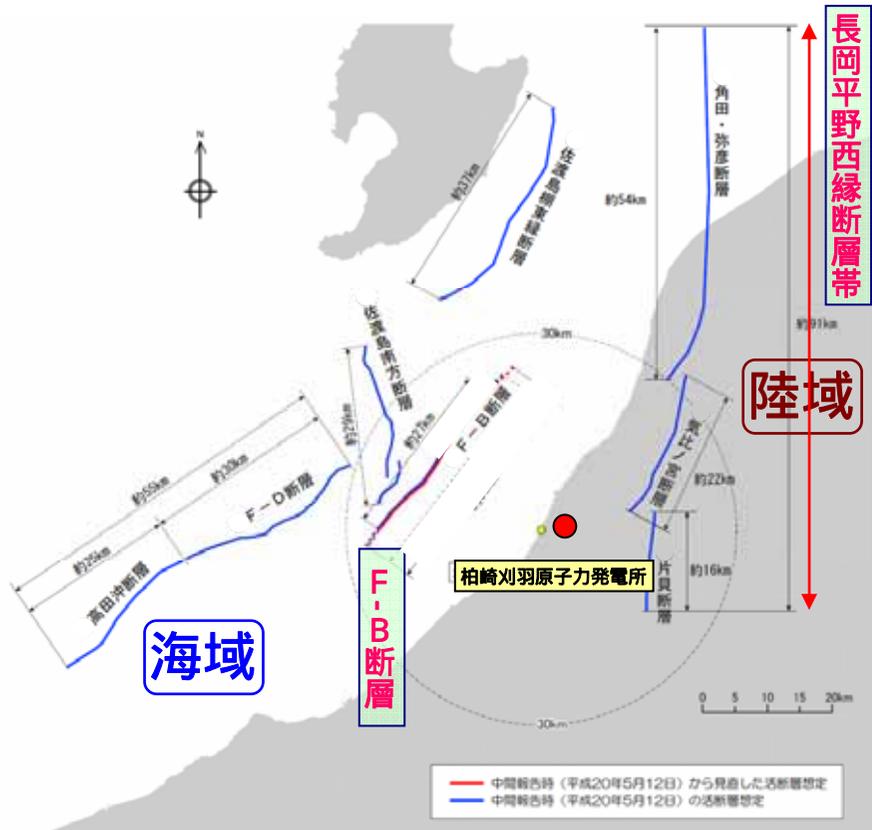
### 3. 新潟県中越沖地震の知見の反映

1 新耐震指針：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（平成18年9月19日原子力安全委員会決定）

2 新手引き：活断層等に関する安全審査の手引き（平成20年6月20日原子力安全委員会了承）<sup>26</sup>

## 4 - 2 . 基準地震動の保安院の評価結果（概要）

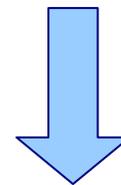
- 柏崎刈羽原子力発電所周辺海域及び陸域において，基準地震動を策定する上で敷地への影響が最も大きいとして選定した活断層



検討用地震として選定した活断層

	断層名	断層長さ	考慮すべき断層長さ
陸域	角田・弥彦断層	54km	3つの断層の連動を想定した、長岡平野西縁断層帯 91km
	気比ノ宮断層	22km	
	片貝断層	16km	

	断層名	断層長さ	考慮すべき断層長さ
海域	F - B断層	36km	36km



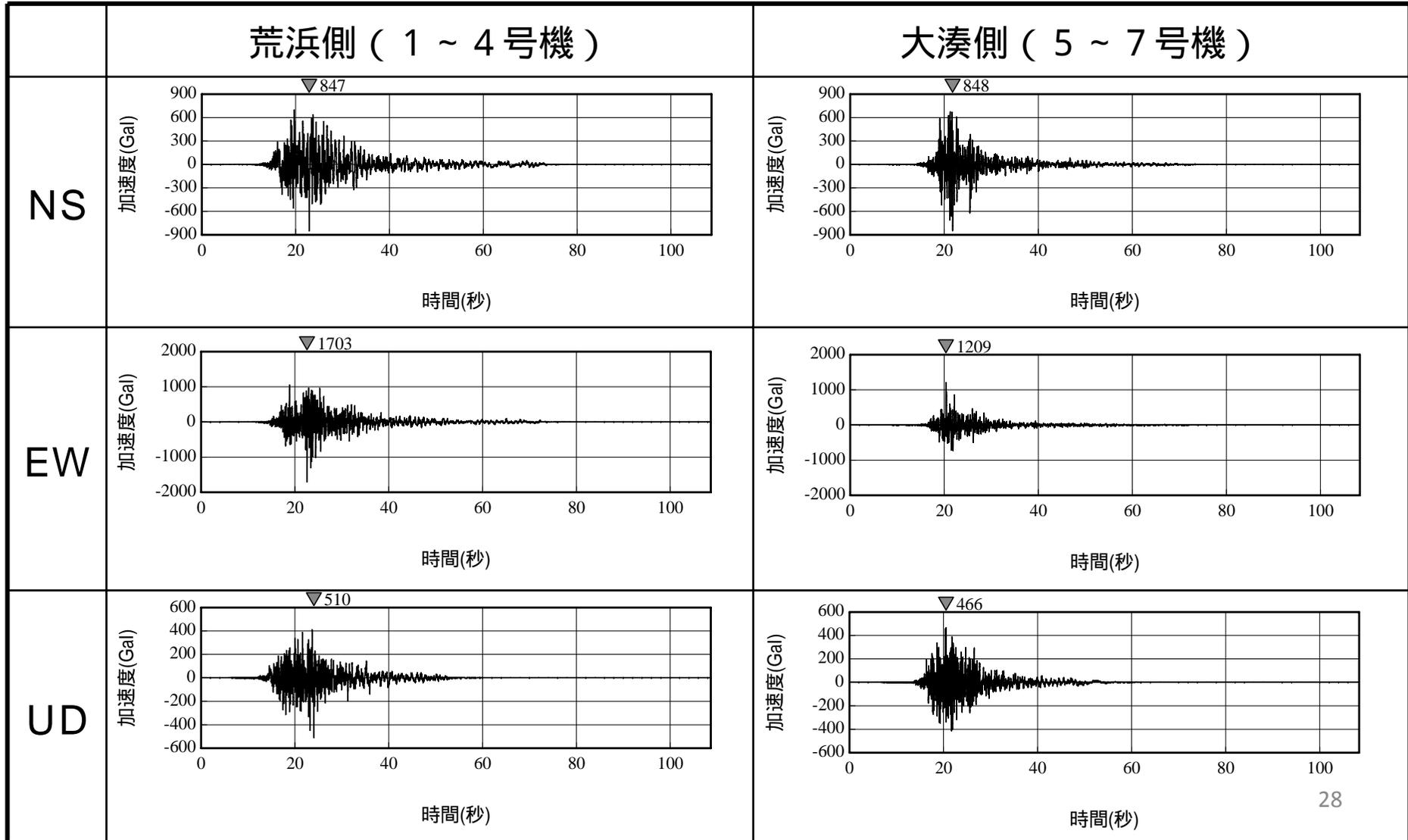
長岡平野西縁断層帯、F - B断層をもとに基準地震動を評価

基準地震動の最大加速度	(単位：ガル)	
	1～4号機	5～7号機
基準地震動Ss	2300	1209
旧指針に基づく基準地震動S2	450	

# 4 - 3 . 検討結果(1)

## - F - B断層の評価結果 -

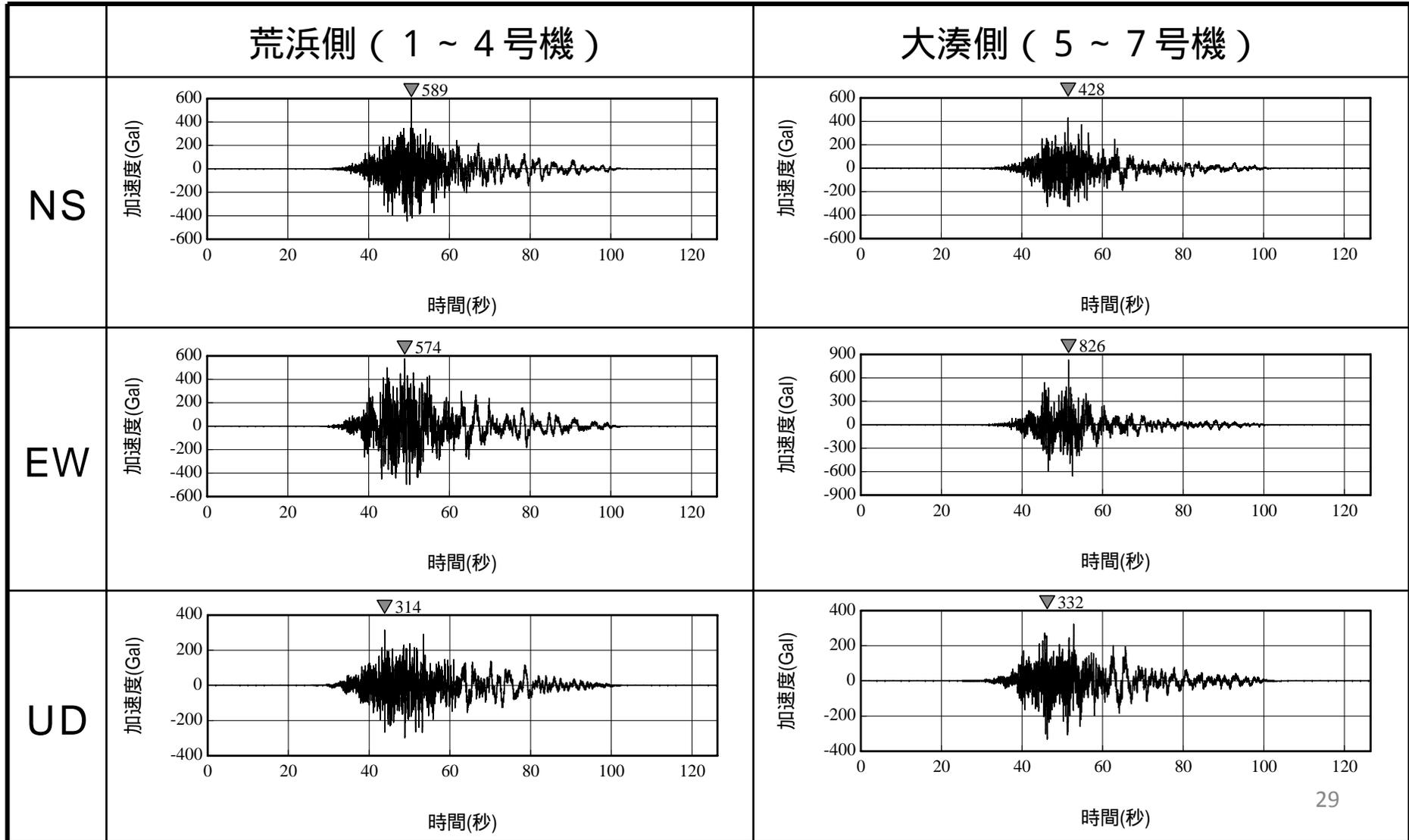
### 断層モデルによる加速度時刻歴波形



# 4 - 3 . 検討結果(2)

## - 長岡平野西縁断層帯の評価結果 -

### 断層モデルによる加速度時刻歴波形



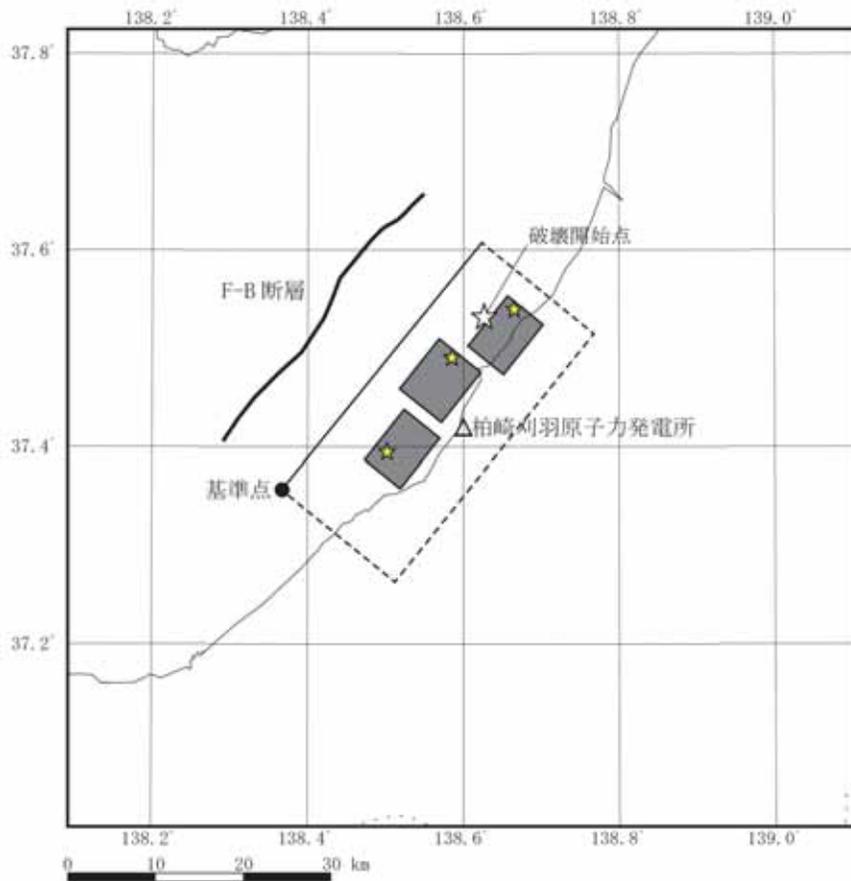
## 4 - 4 . 検討結果のまとめ

(単位：Gal)

基準地震動	荒浜側 ( 1 ~ 4号機 )	大湊側 ( 5 ~ 7号機 )
Ss - 1 ( F-B断層・応答スペクトル )	水平：2300 鉛直：1050	水平：1050 鉛直：650
Ss - 2 ( F-B断層・断層モデル )	NS：847 EW：1703 UD：510	NS：848 EW：1209 UD：466
Ss - 3 ( 長岡平野西縁断層帯・応答スペクトル )	水平：600 鉛直：400	
Ss - 4 ( 長岡平野西縁断層帯・断層モデル )	NS：589 EW：574 UD：314	NS：428 EW：826 UD：332
Ss - 5 ( 長岡平野西縁断層帯・断層モデル )	NS：553 EW：554 UD：266	NS：426 EW：664 UD：346
S2 ( 旧耐震指針の基準地震動 )	水平：450 鉛直： - 旧指針 ( S2 ) では水平のみ	

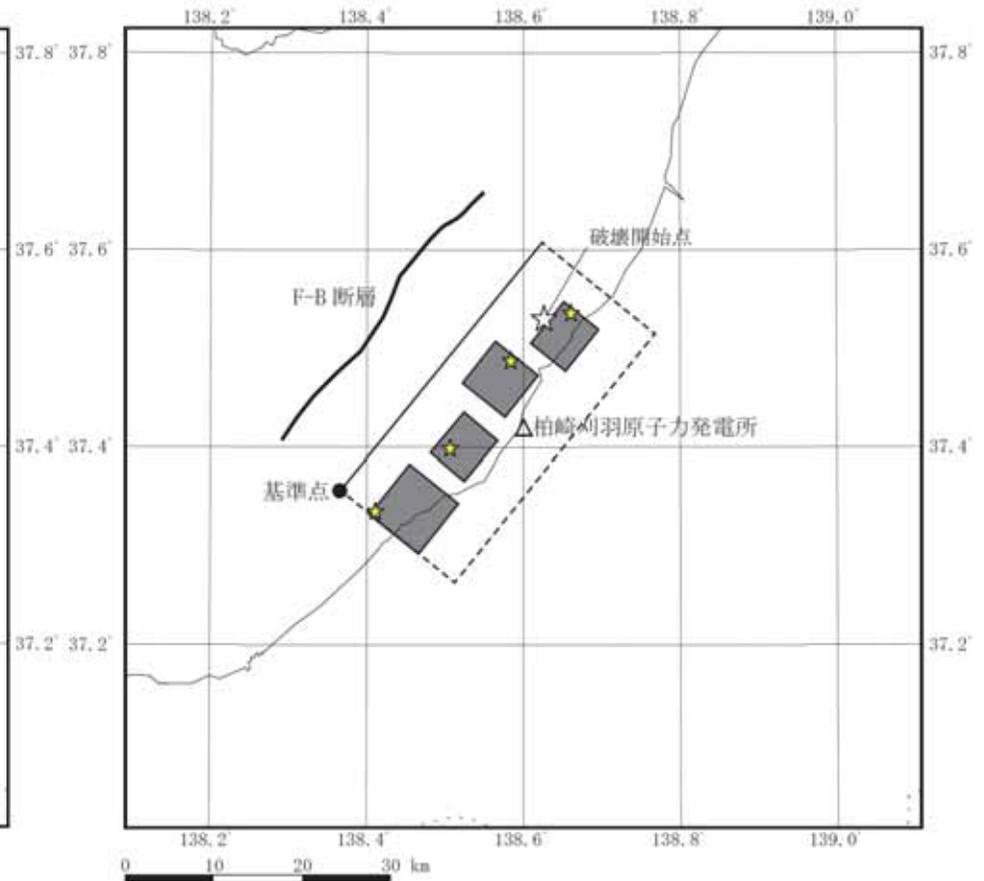
# 4 - 5 . 原子力安全委員会の要請事項(1) - 確認用地震動の策定 -

## 基準地震動Ss策定用の断層モデル



(地震モーメント:  $1.7 \times 10^{19} \text{Nm}$ )

## 確認用地震動の断層モデル



(地震モーメント:  $2.9 \times 10^{19} \text{Nm}$ )

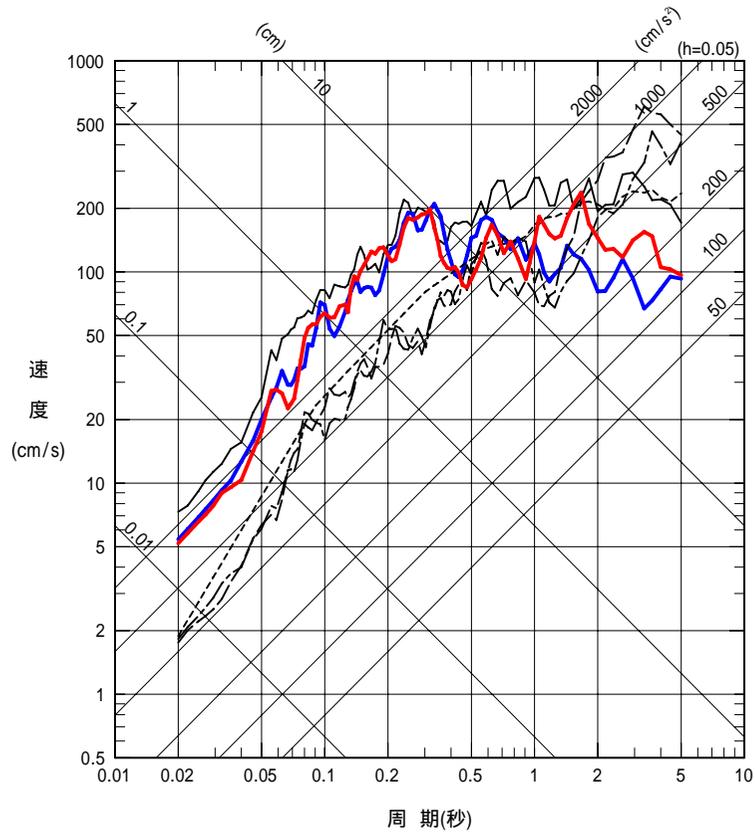
# 4 - 5 . 原子力安全委員会の要請事項(1)

## - 確認用地震動の策定 -

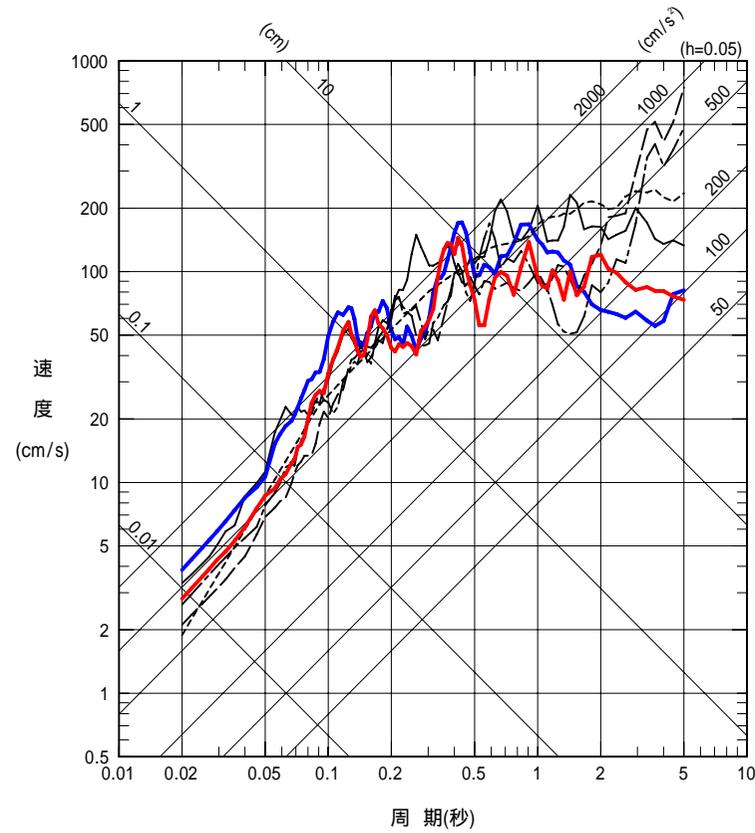
— 基準地震動Ss-2EW  
— 確認用地震動・EW方向

— 基準地震動Ss-1H (参考)  
 - - - 基準地震動Ss-3H (参考)  
 - · - 基準地震動Ss-4EW (参考)  
 - - - 基準地震動Ss-5EW (参考)

参考



荒浜側(1~4号機)

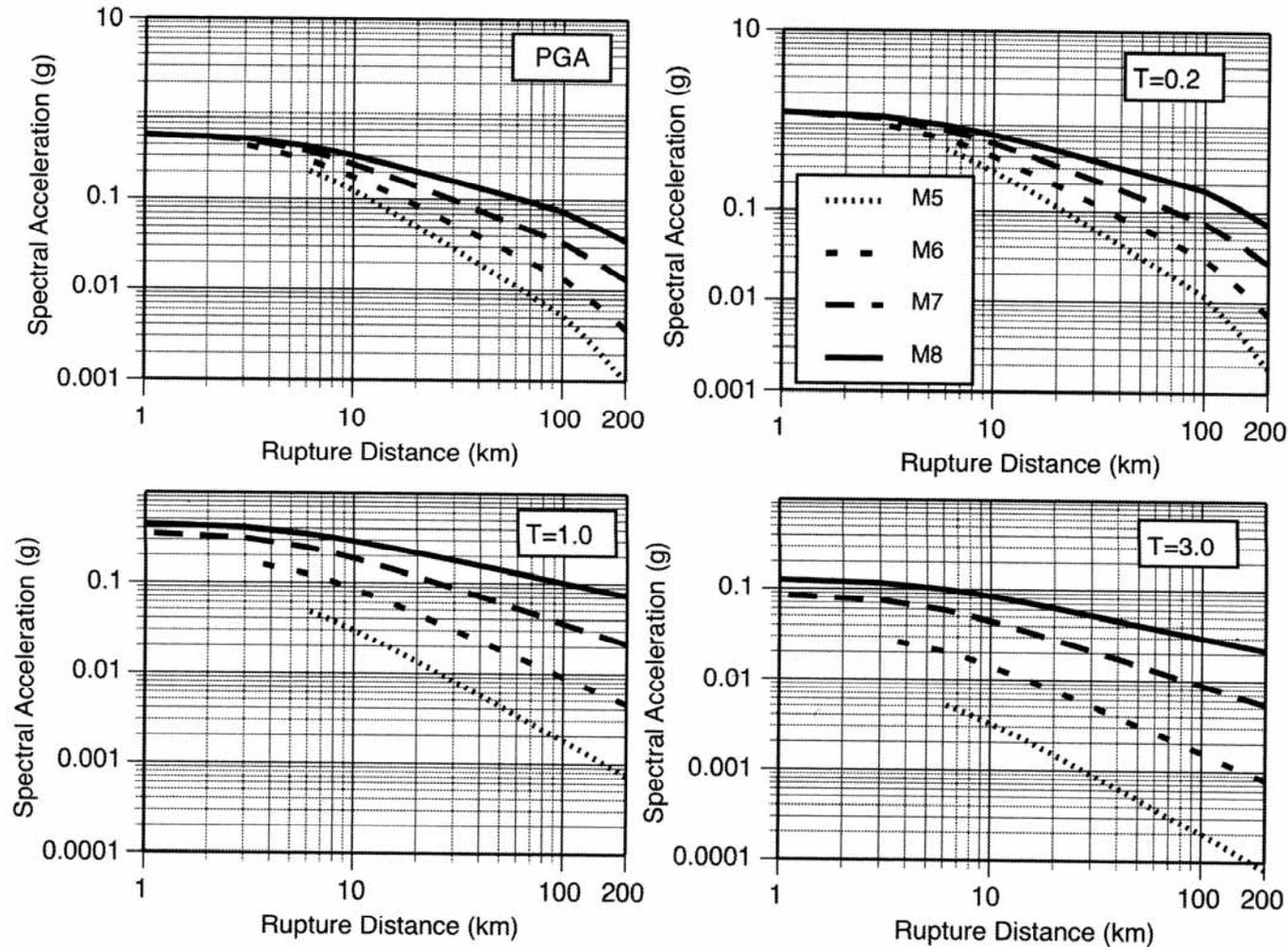


大湊側(5~7号機)

## 4 - 5 . 参考

### - 内陸地震の応答スペクトルの経験的距離減衰 -

#### 地震規模による応答スペクトルの距離減衰の変化 (Abrahamson et al.,2008)



近距離地域では短周期の地震動は地震規模が大きくなっても大きくなり  
ない。(長周期の地震動は地震規模によって変化する。)

## まとめ

1. 原子炉施設の耐震安全性の向上のため、新耐震指針が2006年9月25年ぶりに改訂された。原子力安全委員会は新耐震指針に照らした原子力施設(既設も含む)の耐震安全性の評価を関係機関に指示した。
2. 2007年7月16日新潟県中越沖地震(Mj 6.6)が柏崎刈羽原子力発電所の極近傍に発生し、同発電所の建物・施設が設計用地震動レベルを大きく超える強震動の直撃を受けた。同発電所は変圧器の火災、周辺地盤の沈下、極微量の放射能漏れなどの被害を受けたが、原子炉施設は「止める」「冷やす」「閉じ込める」という重要な安全機能は確保された。
3. 新耐震指針は敷地に影響する広域における地震テクトニックスの把握と変動地形学を重視した活断層調査等により検討用地震の選定および基準地震動の策定を行い、それに基づき施設の耐震安全性を評価することを定めている。
4. 新耐震指針に基づいて原子力施設の耐震安全性を評価するためには、活断層の調査・認定に関してより詳細な規定が必要との認識で、原子力安全委員会は「活断層等に関する安全審査の手引き」検討委員会を設置した。「新手引き」は2008年6月に策定された。
5. 柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性についても、新指針に基づいてバックチェック現在行われている。