

中越沖地震を反映した研究計画について

平成21年2月9日
東京電力株式会社



東京電力

本日のご説明内容

- 中越沖地震において、サイトで地震動が大きくなった要因について分析するとともに、柏崎サイトにおける被害状況の調査および耐震安全性評価を実施してきた。
- 上記の分析・調査等を踏まえ、今後事業者として実施を計画している以下の研究について説明する。

地震動関連

地質・地盤・地震随件事象関連

建物関連

機器・配管関連

} 【参考】

研究計画【建築，機器・配管関連】

研究課題		研究工程						
		H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27
建築 関連	1.耐震設計手法の高度化に関する研究							
	2.原子力発電所建屋の裕度明示化に関する研究							
機器 配管 関連	1.総合的な耐震余裕の評価							
	2.地震後の対応基準の策定							
	3.中越沖地震の知見反映							

青字：社内研究 赤字：電力共通研究

建築関連の研究課題

1. 耐震設計手法の高度化に関する研究

電共研

(背景)

新潟県中越沖地震では、基準地震動 S_2 による応答を上回る地震応答が観測された。

現在、点検および解析により、施設の健全性を評価しているところであるが、建屋応答をより精度良く再現するために、更なる検討の余地のあることがわかってきた。

(課題)

建屋の応答解析（地震応答評価精度の向上）

三次元的な効果を考慮した詳細モデルによる応答評価手法の
確立および鉛直動に対する地震応答解析手法の高度化

地盤の応答解析（非線形化への対応）

地盤の非線形化が著しく進行する場合の物性評価・モデル化

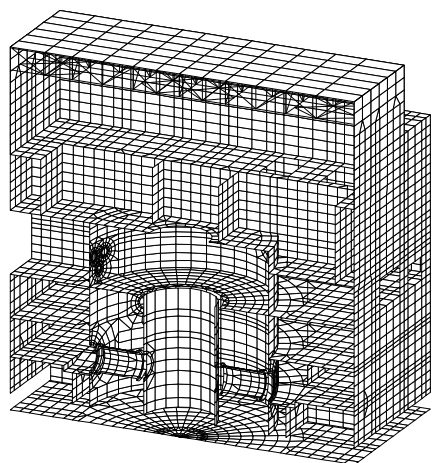
建屋地盤相互作用（地盤の拘束効果・非線形化への対応）

建屋側面埋込み部の回転拘束効果の取り込み

建築関連の研究課題

1. 耐震設計手法の高度化に関する研究（つづき）

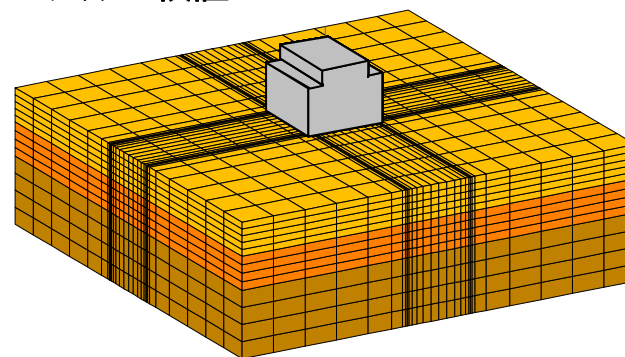
実現現象をより精度良くかつ合理的に評価できる地震応答解析手法の提案を目指すとともに、設計への取り込みについても併せて考慮することで耐震設計手法をより高度化することを目的とする。



- ・床柔性等の多自由度を考慮した質点系モデルによる応答評価
- ・建屋3次元モデルによる応答評価（鉛直動モデル含む）
- ・観測記録のシミュレーションによるモデルの検証

建屋の3次元モデル（例）

- ・2次元又は3次元FEMによる応答評価
- ・逐次非線形性の考慮
- ・観測記録のシミュレーションによるモデルの検証



地盤のFEMモデル（例）

建築関連の研究課題

2. 原子力発電所建屋の裕度明示化に関する研究

電共研

(背景)

新潟県中越沖地震では、基準地震動 S_2 を上回る地震動にみまわれたにも関わらず、主要建屋の耐震壁等には顕著な損傷は見られず、基本的な安全性は確認されつつある。

しかし、地震後に様々な状況が確認されるまで、一般社会において施設の安全性について懸念を抱かれたことは否定できない。

従って、原子力発電所の設計過程で施設に確保される裕度を適切に評価し、明らかにしておくことは一般社会の安心につながると考えられる。

(課題)

そこで、原子力発電所建屋の設計上の許容限界を超えた領域における機能維持状態について検討・把握するとともに、安全裕度を評価し、明示する方法について検討する。

建築関連の研究課題

2 . 原子力発電所建屋の裕度明示化に関する研究（つづき）

安全裕度の評価方法および明示方法に関する研究の主な検討項目を以下に示す。

- 現状の許容限界を超えた領域での機能維持に関する検討（実験）
- 建屋の安全裕度の評価法に関する検討（解析）
- 建屋の安全裕度の評価法の検証（実験）
- 建屋の安全裕度の明示方法の提案

The composite image is divided into three sections:

- 建屋の要求機能例 (Example of required building functions):** A schematic diagram of a building cross-section with arrows pointing to various functional levels. The levels are labeled: 負圧維持機能 (Negative pressure maintenance function), 漏えい防止機能 (Leakage prevention function), 支持機能 (Support function), and 漏えい防止機能 (Leakage prevention function). The support and leakage prevention functions are shown at multiple levels.
- 評価法検証（実験）のイメージ (Image of evaluation method verification (experiment)):** A photograph showing a large-scale experimental setup for testing building safety margins, featuring a blue structure on a platform.
- 安全裕度の明示化イメージ (Image of safety margin explicitation):** A graph showing acceleration (cm/s²) on the y-axis (0 to 2000) versus period (秒) on the x-axis (0.02 to 5). The graph includes three data series: a red dashed line for '安全機能確認レベル' (Safety function confirmation level), a black dashed line for '継続運転可能レベル' (Continuous operation possible level), and a solid black line for '観測記録' (Observation record). A vertical dashed line is drawn at a period of approximately 0.3 seconds, and a horizontal dashed line is drawn at an acceleration of approximately 1800 cm/s². The text '(h=0.05)' is noted in the top right corner of the graph area.

機器・配管系に関する研究課題

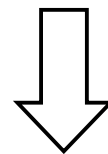
1. 総合的な耐震余裕の評価 電共研

(目的)

原子力設備の地震応答メカニズムを解明するとともに、総合的な耐震余裕を評価すること。

(既往の研究)

- ✓ 機器 / 配管単体による振動試験を実施し、動的機能維持、終局強度等を確認



(中越沖地震)

← 地震後の設備の状況からは、地震動に対する実際の設備応答は小さい可能性

(本研究)

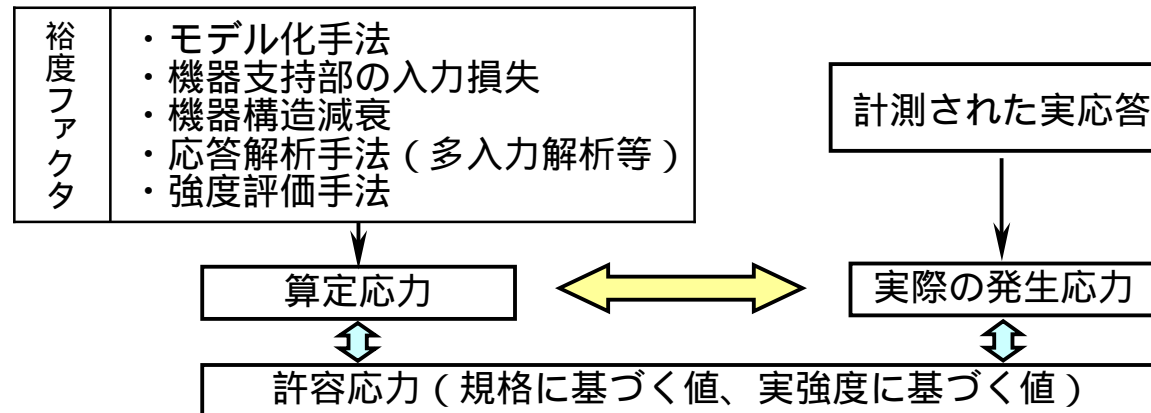
- ✓ 実際の設備設置状況（建屋 - 支持構造物 - 機器 - 配管等）を模擬した試験体の応答を確認する。
- ✓ 建屋から機器 / 配管系への支持構造物を介した入力の影響、他の機器との相互影響（応答メカニズム）について検討する。
- ✓ 設備の総合的な耐震余裕を評価する。

機器・配管系に関する研究課題

1. 総合的な耐震余裕の評価（つづき）

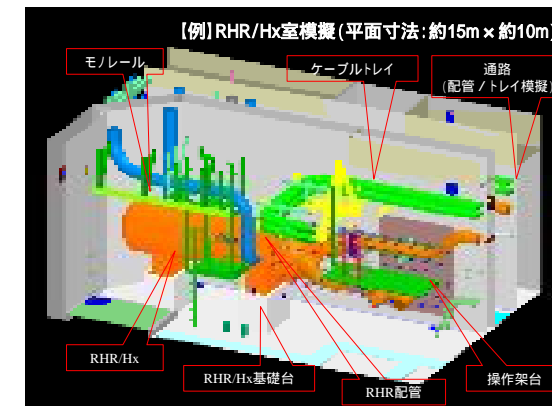
（内容）

地震波加振により直接計測した機器 / 配管系の実応答（加速度、ひずみ、変位等）と設計手法による算定値とを比較することにより、耐震余裕を直接的に評価する。



（期待される成果）

- ・ 建屋床からの入力損失の効果の解明
- ・ 設備各部位における応答メカニズムの解明
- ・ 設備各部位における実際の減衰定数の確認
- ・ 現行設計手法が有する設計余裕の説明性向上
- ・ B、Cクラス設備の実耐力評価への活用



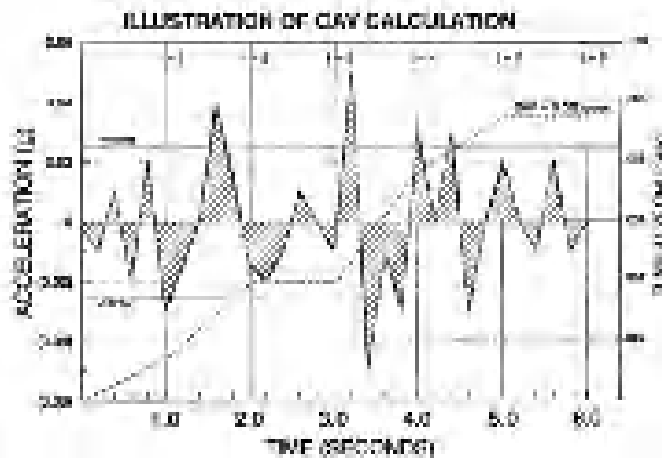
試験体のイメージ

機器・配管系に関する研究課題

2. 地震後の対応基準の策定 電共研

将来的な地震に備え、地震前の準備事項、地震後のプラントへの対応についての標準手法を策定することにより、地震後の設備健全性の確認等の諸手順の明確化を図る。

- ✓ 新潟県中越沖地震を受けた柏崎刈羽原子力発電所での対応における知見の取り込み
- ✓ IAEA Safety Report (地震後の対応基準) に基づく、日本版標準の検討
- ✓ 米国におけるプラント停止の目安である累積絶対速度 (CAV) 等、設備の損傷を代表できる評価パラメータの導入を検討



標準化CAV*値の概念模式図

* CAV :

Cumulative Absolute Velocity

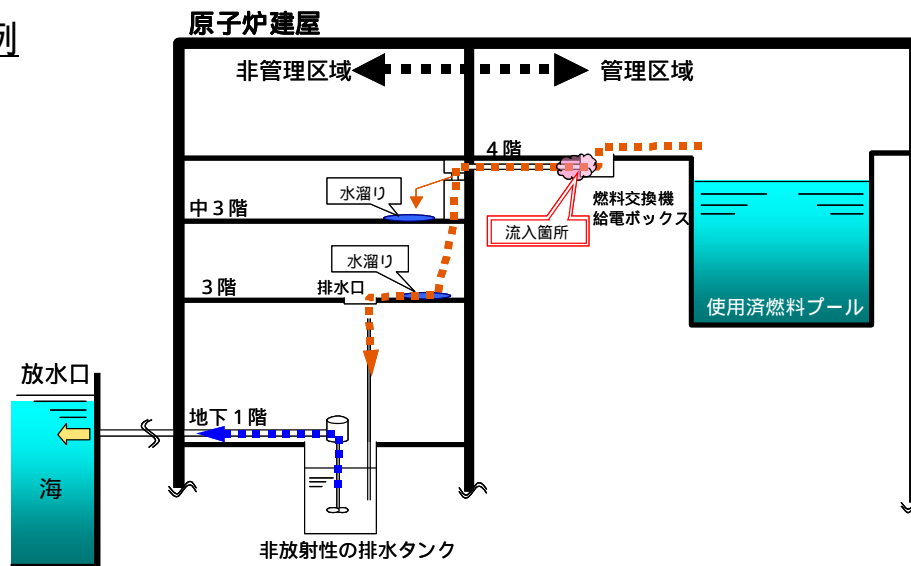
機器・配管系に関する研究課題

3. 中越沖地震の知見反映 電共研

地震による想定外の経路からの放射性物質の系外放出、火災に対する対応等の防災強化の観点から、特にシステム間及び設備間の影響を考慮するために、災害に対するシステム安全の向上を目指した対策方針・手順を検討する。

中越沖地震の被害状況例

- ・ 6号機使用済燃料プール水の外部への放出
- ・ 3号機所内変圧器の火災
- ・ 6号機原子炉建屋天井クレーン駆動軸継手破損等



例：6号機使用済燃料プール水の外部への放出

問題点

- ・ 使用済燃料プールのスロッシング
 - ・ 非管理区域への貫通部の止水処理が不十分
 - ・ 自動的に起動する排水設備から外部へ放出
- システム間の相互作用による系外放出

放射性物質系外放出イメージ図

**【参考】地震動関連，地質・地盤・
地震随伴事象関連の研究**

研究計画【地震動関連】

研究課題	研究工程						
	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27～
1. 柏崎サイトにおける地盤増幅特性評価	■			■			
2. 地震動の地盤増幅特性評価の高度化	■			■			
3. 柏崎サイトにおける地震動の伝播特性の分析	■			■			
4. 断層モデルによる地震動評価手法の高度化	■			■			
5. 応答スペクトルに基づく地震動評価手法の高度化	■	■			■		
6. 確率論的地震動評価手法の高度化	■			■			
7. 長岡平野西縁断層帯の地震活動性の解明	■			■			

青字：社内研究 赤字：電力共通研究

地震動関連の研究課題

1. 柏崎サイトにおける地盤増幅特性評価

自社研

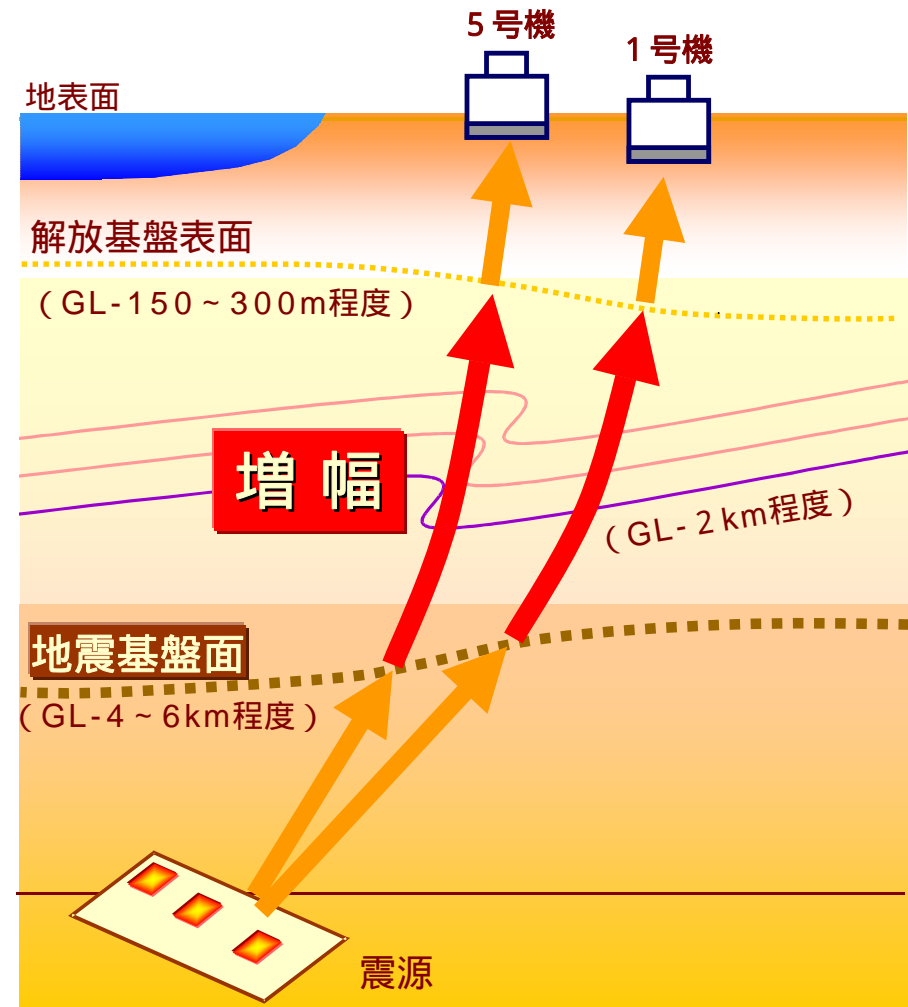
(背景)

柏崎サイトは堆積層が厚いため、中越沖地震において地震基盤以浅で地震動が大きく増幅したと考えられる

地下構造モデルを用いた解析的検討により、地震基盤以浅における地震動の増幅特性を確認した

(実施事項)

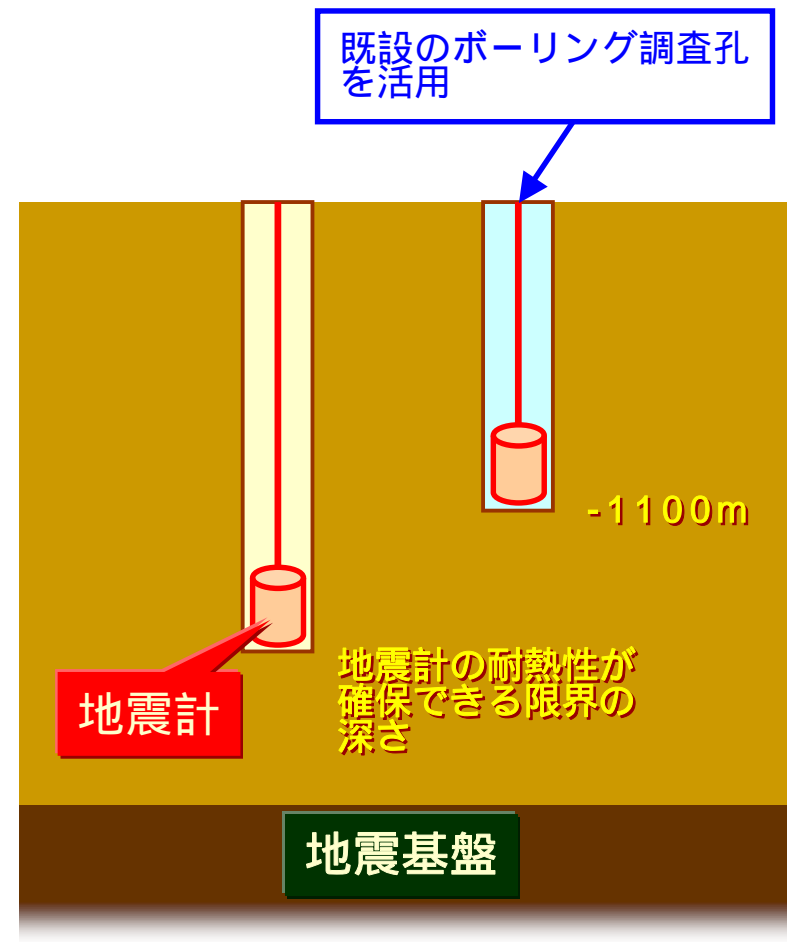
地下深部で地震観測を実施し、柏崎サイトの堆積層で地震動が増幅した原因について、更なる検証を進めていく



地震動関連の研究課題

地震観測の実施

- 堆積層が厚い当社の3原子力サイト（柏崎・福島第一・福島第二）において，地下深部の地震観測を実施する
- 柏崎サイトは地震基盤の位置が深いので，地震計の耐熱性が確保できる限界の深さにおける地震観測を計画する
- 福島第一・福島第二サイトは，地震基盤における地震観測を計画する



柏崎サイトにおける地震観測計画

地震動関連の研究課題

2. 地震動の地盤増幅特性評価の高度化

電共研

(背景)

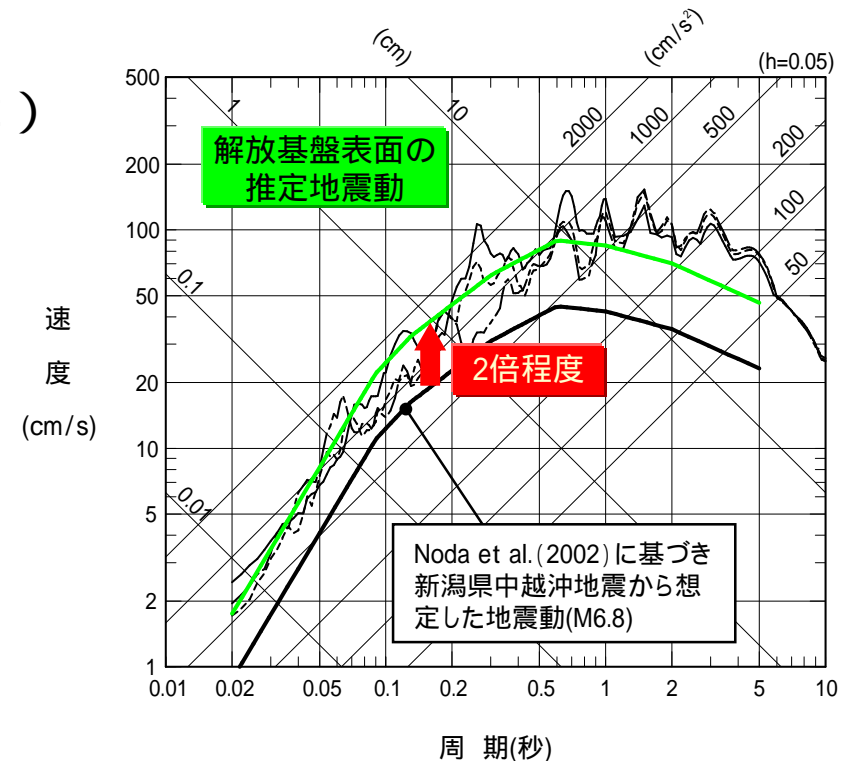
中越沖地震では柏崎サイトの深部地盤において地震動が増幅し、Noda et al. (2002)により評価される地震動に対し大きな地震動が観測された

深部地盤における地震動の増幅特性の評価は、堆積層の厚い原子力サイトにおける共通の課題である

一方、近年KiK-net等、地震基盤面における強震記録が全国で蓄積されてきている

(実施事項)

全国で観測された強震記録を活用し、堆積層が厚い場合における地震動の地盤増幅特性評価法を高度化し、地震動評価手法に反映させることを目指す



5～7号機で観測された中越沖地震の観測記録とNoda et al. (2002)に基づく手法による評価との比較

地震動関連の研究課題

3. 柏崎サイトにおける地震動の伝播特性の分析

自社研

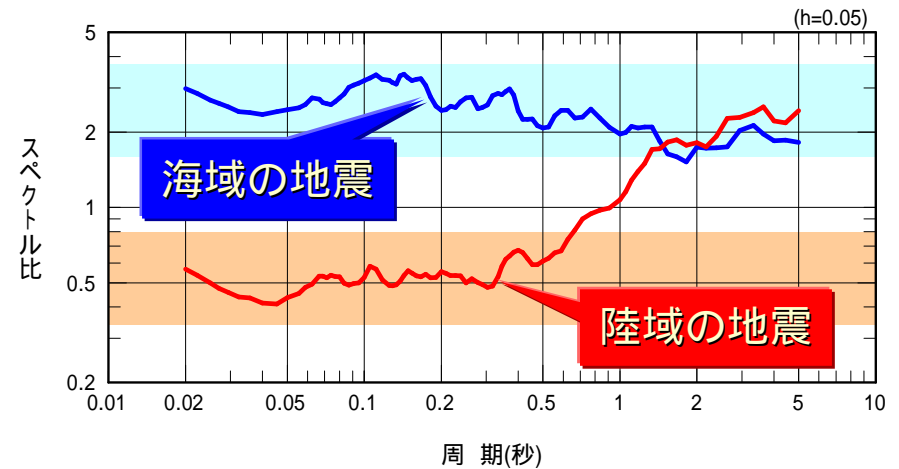
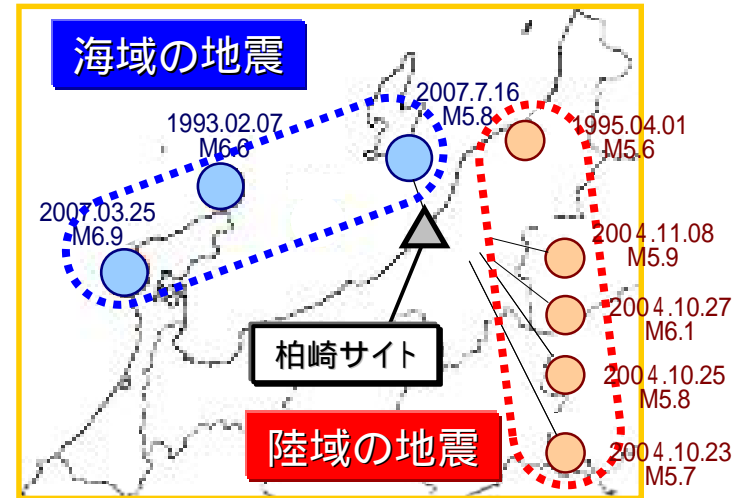
(背景)

柏崎サイトの地震観測記録では、海域より伝播する地震動が陸域より伝播する地震動に比べて大きいことが確認された

3次元的な広域地下構造が、地震波の伝播特性に影響を与えていると考えられる

(実施事項)

観測記録の分析とシミュレーション解析の両面から、伝播特性の更なる解明を進める



海域の地震と陸域の地震の耐専スペクトル比 (1号機)

地震動関連の研究課題

4 . 断層モデルによる地震動評価手法の高度化

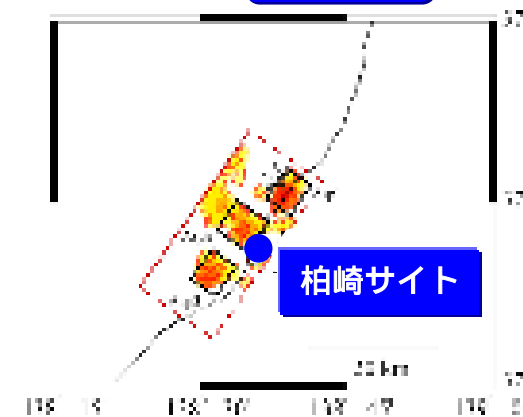
自社研

(背景)

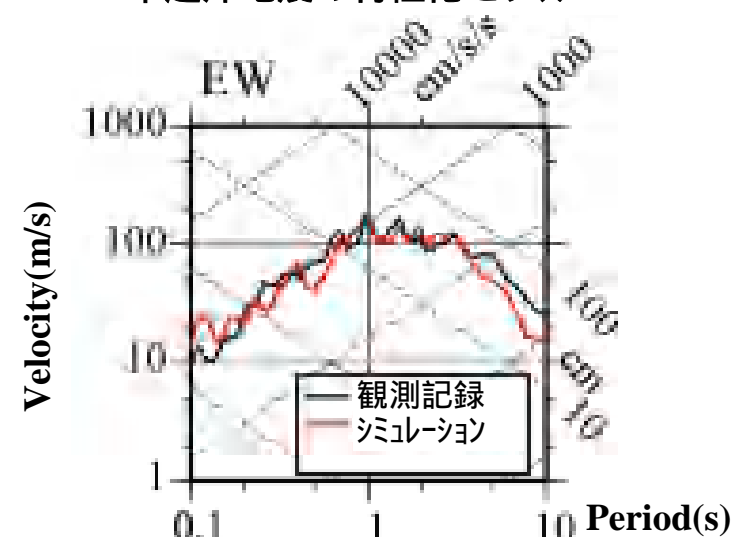
中越沖地震の分析では、震源インバージョン解析を実施し、特性化震源モデルに基づき地震動を評価し、観測記録を説明できることを確認した

(実施事項)

今後は中越沖地震の知見を踏まえ、強震動予測レシピの更なる高度化（断層パラメータの設定等）を指向する検討を実施していく



震源インバージョンに基づく
中越沖地震の特性化モデル



断層モデルによるシミュレーション結果
(5号機EW方向)

地震動関連の研究課題

5 . 応答スペクトルに基づく地震動評価手法の高度化 電共研

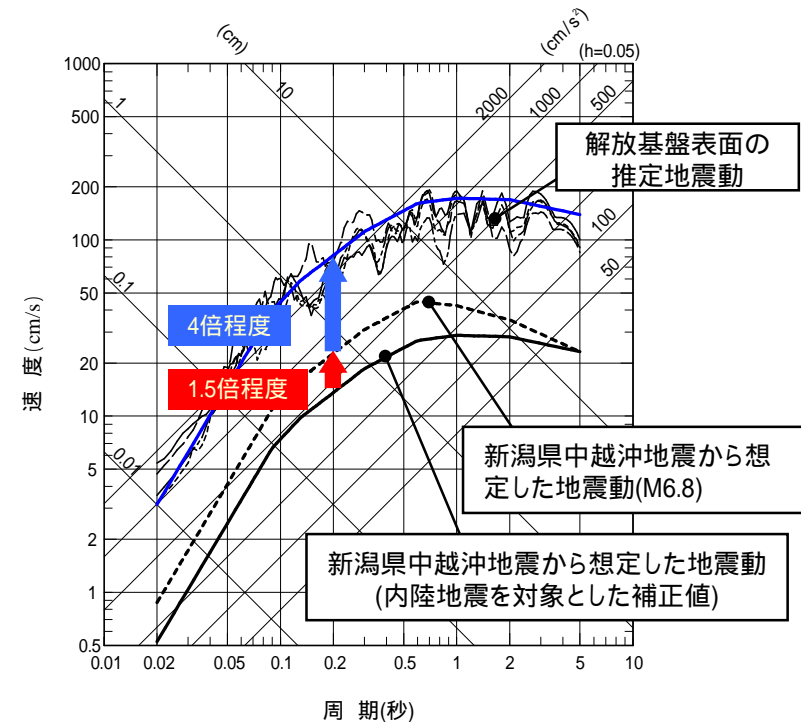
(背景)

中越沖地震では，震源近傍に位置する柏崎サイトにおいて，Noda et al. (2002) により評価される地震動に対し大きな地震動が観測された

近年K-NET・KiK-net等，震源近傍において強震動が観測されている

(実施事項)

近年得られた観測記録を応答スペクトルに基づく手法のデータセットに取り込み，震源近傍における適用性を向上させる



柏崎刈羽原子力発電所1～4号機で観測された中越沖地震の観測記録と応答スペクトルに基づく手法による評価との比較

地震動関連の研究課題

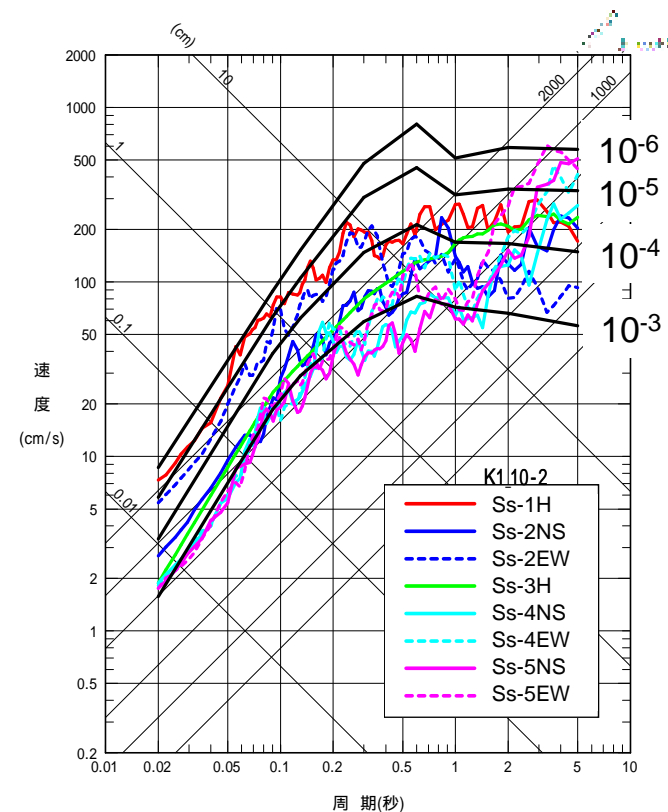
6 . 確率論的地震動評価手法の高度化

自社研

柏崎サイトの地震動評価においては、確率論的地震動評価も実施し、基準地震動Ssの超過確率を参照した

確率論的地震動評価に関し、地震動の強さのばらつきの扱い等について、更に詳細に検討していく

また、確率論的地震動評価の実施経験を蓄積し、評価手法の高度化を進めていく



柏崎刈羽原子力発電所1～4号機における
確率論的地震動評価

地震動関連の研究課題

7. 長岡平野西縁断層帯の地震活動性の解明

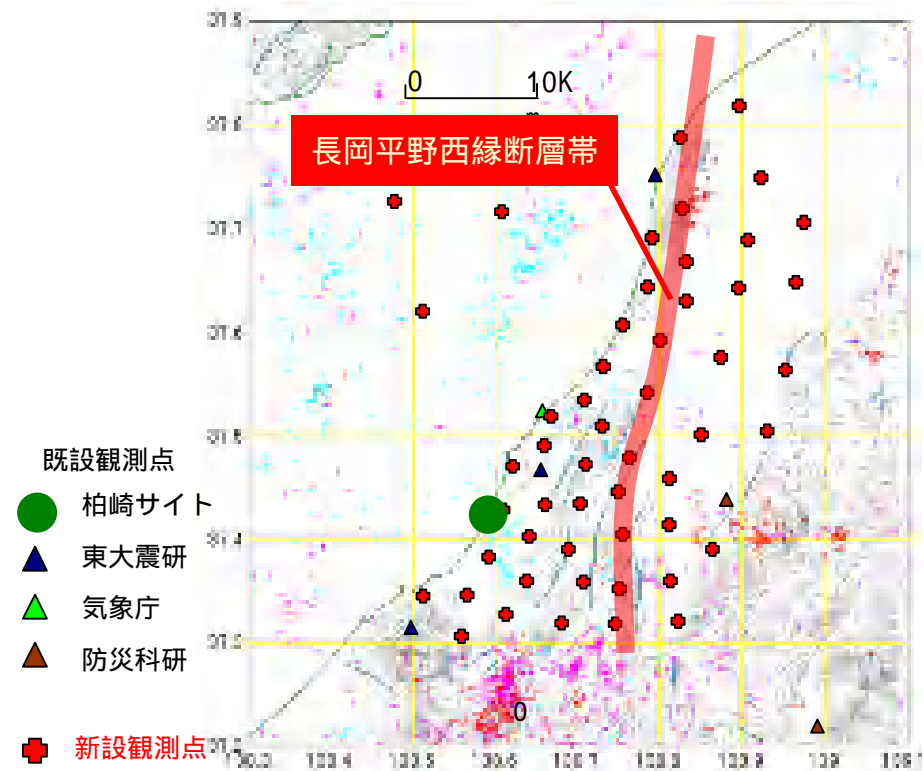
自社研

(背景)

柏崎サイトにおける長岡平野西縁断層帯による地震動評価では、連動の可能性・断層傾斜角等の不確かさを考慮した評価を実施している

(実施事項)

高密度地震観測や反射法探査を実施し、長岡平野西縁断層帯における地震活動性や地盤の速度構造について調査・検討することにより、より合理的な地震動評価を目指す



【長岡平野西縁断層帯周辺での地震観測のイメージ】

研究計画【地質・地盤・地震随伴事象関連】

研究課題	研究工程		
	H21	H22	H23
1 . 断層による地表変位の確率論 的な検討			
2 . 震源断層評価のための活構造 調査手法の確立に関する研究			
3 . 基礎地盤・斜面安定性評価に 関する検討			
4 . 津波評価技術の高度化研究			

青字：社内研究 赤字：電力共通研究

地質調査関連の研究課題

1. 断層による地表変位の確率論的な検討

自社研

- 「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」は決定論的アプローチを採用しており、地質調査においては、後期更新世以降活動した断層を、将来活動する「活断層」として、耐震設計で考慮している。
- 指針に基づいて「活断層ではない」と評価された断層は、二次的な断層も含めて、「将来活動しない」として扱われる。
- 一方、IAEAはSafety Guide “Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Installations (NS-G-3.3).”を現在改訂中であり、改定案によれば、「確率論的断層変位ハザード解析 (PFDHA)」の検討を要求している。
- 日本の耐震設計は、日本の耐震指針に基づいて行われるが、今後の参考とするため、PFDHAに関する研究を実施する。

確率論的地震ハザード解析 (PSHA)の手法

応用

Youngsほか (2003)の手法

超過確率

断層による変位(ずれ)量

地質調査関連の研究課題

2. 震源断層評価のための活構造調査手法の確立に関する研究

電共研

- 近年発生した中越沖地震などでは、事前に震源断層および地震動を想定するための活断層調査の在り方が議論となった。
- 近年は、地形調査、地質調査の精度向上に加え、地下構造探査、地震観測及び地殻変動観測など、地球物理学的手法による震源断層の解析手法の高度化が進められている。
- 震源断層評価の精度向上のため、精度の高い地形・地質調査、大深度弾性波探査、地震・測地データを総合的にもちいた評価手法を検討し、震源断層評価のための活構造調査手法の確立にむけた研究を行う。

地盤及び地震随伴事象関連（斜面）の研究課題

3 . 基礎地盤・斜面安定性評価に関する検討 電共研

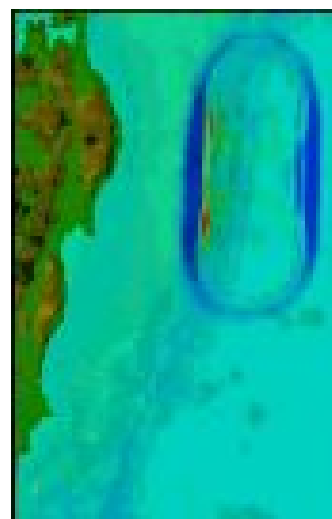
- 現行の安定性評価では、地盤材料の非線形特性を等価な線形特性に置換した動的解析（等価線形化法）から求まる瞬間的な力の釣り合いからすべり安全率（作用力 / 抵抗力）を算定し、安定性を照査している。
- 今後は、実現象をよりよく反映できる評価体系を構築するために、
 - 地盤の非線形特性や破壊をより適切に表現できる解析手法について検討する。
 - 斜面崩落の影響を評価できる解析手法について検討する。
 - 地盤材料の動的特性をより適切に評価するための試験法について検討する。

地震随伴事象関連（津波）の研究課題

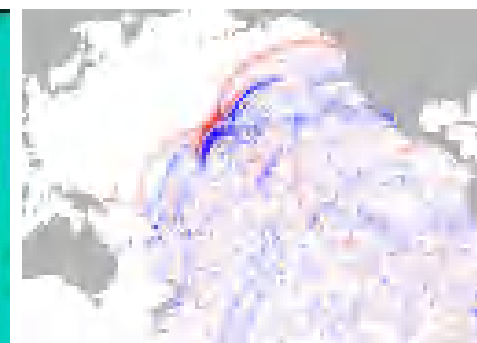
4 . 津波評価技術の高度化研究

電共研

- 津波に対する安全性については、土木学会が2002年に発表した「原子力発電所の津波評価技術」に基づいて評価している。
- 同評価技術に基づき、太平洋の日本海溝沿いの地震津波、日本海東縁部の地震津波、海域活断層による地震津波等を検討し、将来想定される津波が発電所に影響を与えるかどうか検討している。
- 昨今、地震発生様式、津波波源及び津波数値計算に関する知見が蓄積されつつあることから、知見の収集・整理・分析を実施し、最新知見に基づいた津波評価手法を検討する。



三陸沖の地震津波の計算例



南米チリ沖の地震津波の計算例