

福島第一原子力発電所及び 福島第二原子力発電所の 耐震安全性について

平成21年7月
原子力安全・保安院

目 次

1. 耐震設計の基本的考え方と
耐震バックチェックについて
2. 原子力安全・保安院の評価結果

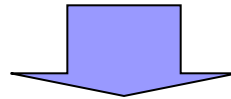
1. 耐震設計の基本的考え方と 耐震バックチェックについて

原子力発電所の耐震設計の基本的考え方

原子力発電所の耐震設計は、原子力安全委員会が定めた「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」に従い設計

その基本的考え方は、

大きな地震があっても、発電所周辺に放射性物質の影響を及ぼさない



安全上重要な「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」機能が確保されるように設計

耐震設計の基本方針を実現するために

徹底した調査

- ・活断層調査、過去の地震等の調査



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
- ・震源を特定せず策定する地震動
(旧耐震指針のマグニチュード6.5の直下地震に代わるもの)



重要度に応じた耐震設計

- ・Sクラス(原子炉圧力容器など) 止める、冷やす、閉じ込める機能 基準地震動に対して安全機能保持 建築基準法の3.0倍※
- ・Bクラス(廃棄物処理設備など) 建築基準法の1.5倍※
- ・Cクラス(発電機など) 建築基準法の1.0倍※

※機器・配管は更に2割増し

自動停止機能

- ・一定以上の大きな揺れに対し、自動的に安全に停止

耐震設計審査指針の改訂について

原子力発電所の耐震安全性

福島第一・福島第二原子力発電所をはじめ全国の原子力発電所については、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」(昭和56年7月原子力安全委員会決定。いわゆる「旧耐震指針」)を踏まえ、耐震安全性評価を行うとともに、原子力発電所の設置許可後に生じた地震等から得られる科学的知見を踏まえ、耐震安全性についての確認を適宜行っており、原子力発電所の耐震安全性は十分確保されている。

耐震設計審査指針の改訂

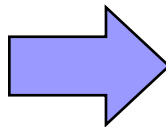
最近の地震学や耐震工学の成果など最新の知見を取り入れ、発電用原子炉施設の耐震安全性のより一層の向上に資するとの観点から、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」(平成18年9月原子力安全委員会決定。いわゆる「新耐震指針」)が策定された。

新耐震設計審査指針のポイント

旧耐震指針

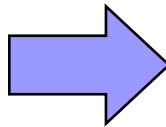
- ・考慮すべき活断層の活動時期の範囲
:5万年前以降
- ・マグニチュード6.5の「直下地震」の想定

より厳しい水準



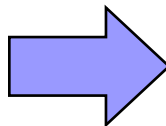
- ・文献調査、空中写真判読、現地調査等による活断層調査を実施

より入念な調査



- ・水平方向について、基準地震動を策定
- ・地震規模と震源からの距離に基づき経験式による地震動評価(応答スペクトル評価式)

より高度な手法



新耐震指針

最新知見を考慮した基準地震動の策定を要求

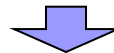
- ・考慮すべき活断層の活動時期の範囲
:12~13万年前以降に拡大
- ・マグニチュード6.5の直下地震に代えて、国内外の観測記録を基に、より厳しい「震源を特定せず策定する地震動」を設定

- ・従来の調査に加え、不明瞭な活断層を見逃さないよう、変動地形学的手法等を用いた総合的な活断層調査を実施

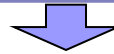
- ・水平方向に加え鉛直方向についても、基準地震動を策定
- ・応答スペクトル評価式に加え、地震発生メカニズムを詳細にモデル化できる断層モデルを地震動評価手法として全面的に採用

耐震設計審査指針の改訂に伴う対応

- ◆新耐震指針は、最近の地震学や耐震工学の成果に立脚
 - ⇒ 一層の耐震安全性の向上



新耐震指針に照らした耐震安全性評価(バックチェック)が重要



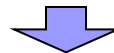
- バックチェック手法、確認基準の策定



- バックチェックを指示(平成18年9月20日)



- 新潟県中越沖地震を受け、実施計画の見直しを指示(平成19年7月20日)



- 事業者の中間評価^(注)結果報告(平成20年3月)
 - ⇒ 原子力安全・保安院として厳正に妥当性を確認

(注) 中間評価とあるが、基準地震動の策定、安全上重要な設備に関する耐震安全性の評価であり、発電所の基本的な耐震安全性の確認を行うもの

バックチェックの方法(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

① 検討用地震の選定

- 発生様式毎に選定
- プレート間地震
- 内陸地殻内地震
- 海洋プレート内地震

②

応答スペクトルに基づく
手法による地震動評価

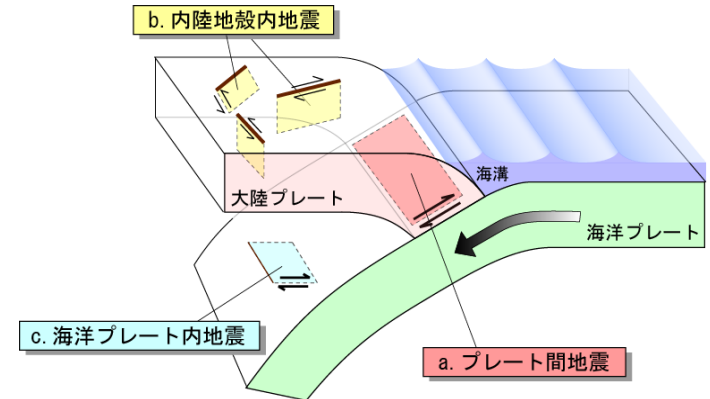
断層モデルを用いた手法
による地震動評価

震源を特定せず策定
する地震動

(③地震動評価の不確かさを考慮)

④ 基準地震動(S_s)

(地震発生様式)



バックチェックの方法(耐震安全性評価)

基準地震動 S_s を策定し、下記の施設等の耐震安全性評価を実施。

安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価
(原子炉建屋)

安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

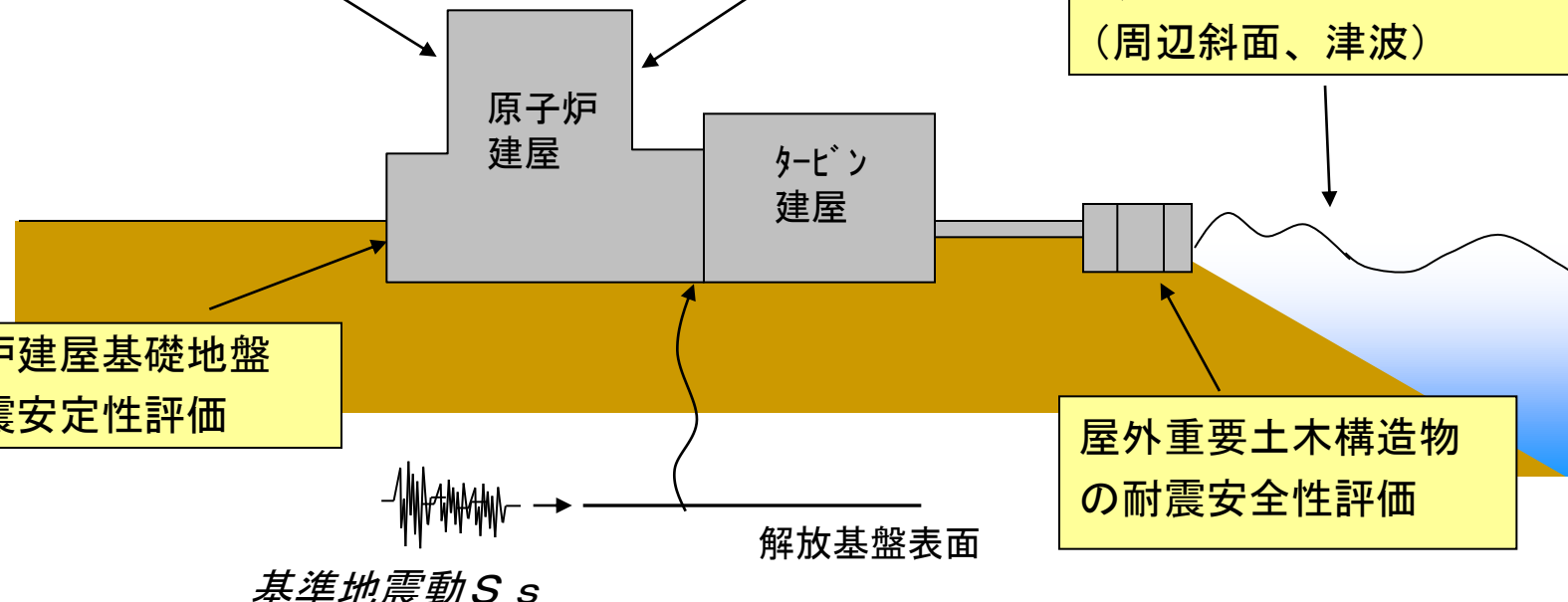
地震随件事象に対する考慮
(周辺斜面、津波)

原子炉建屋基礎地盤
の耐震安定性評価

屋外重要土木構造物
の耐震安全性評価

基準地震動 S_s

解放基盤表面



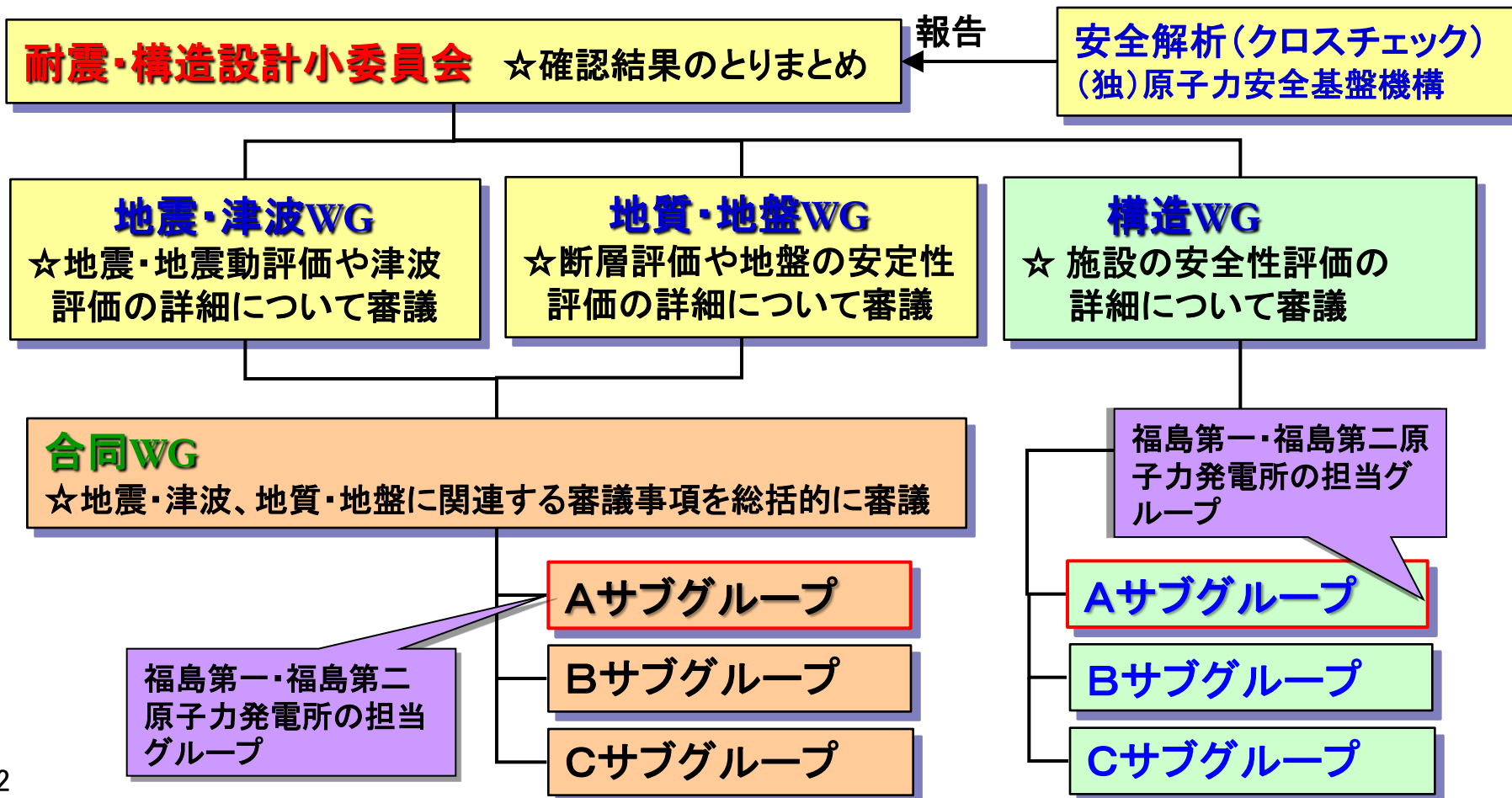
今回は で困った設備のうち重要なものについて評価

2. 原子力安全・保安院の評価結果※

※ 専門家による審議に基づく原子力安全・保安院の評価結果については、平成21年7月21日、東京電力に通知するとともに、HP(<http://www.nisa.meti.go.jp/>)にて公表済み

バックチェック結果の審議体制

原子力安全・保安院は、事業者が実施したバックチェック結果について、耐震・構造設計小委員会、各ワーキンググループ及びサブグループにおいて、関連する分野の専門家(約40人)による審議を踏まえ厳正に確認することとしている。



審議実績及び審議に当たって特に注意したこと

- ◎ 審議実績(合計46回の会合(全て公開)を開催し、厳正に審議)
 - 基準地震動 S_s の策定結果:合同WG及び同Aサブグループで合計24回審議
 - 主要な設備の評価結果:構造WG及び同Aサブグループで合計22回審議
- ◎ 審議に当たって特に注意したこと
 - (1) 地質調査、活断層の評価
 - 双葉断層, 相馬断層の活動性及び連続性
 - 敷地前面海域に認められる断層の評価
 - 福島第一原子力発電所の深部に認められる断層の評価
 - (2) 基準地震動 S_s の策定
 - 敷地に影響を与える地震の地震動評価に際して、解析手法、パラメータの設定が妥当か、また、不確かさの考慮が適切になされているか(中越沖地震の知見の反映を含む)
 - (3) 施設の耐震安全性評価
 - 強度の評価方法などがあらかじめ定めたルールに従って行われているか
 - 評価結果は、安全基準を満足しているか

発電所敷地周辺等の現地調査の実施

(1)実施期間:平成20年9月26日(金)～9月27日(土)

(2)出席委員:地震・津波、地質・地盤合同WG Aサブグループ委員等6名

(3)実施概要

- ・双葉断層, 相馬断層について、地形の状況、断層露頭、ボーリングコア等を確認。
- ・福島第一・福島第二原子力発電所について、サイト内大深度ボーリングコア等の状況を確認。

(4)主な指摘内容

- ・双葉断層及び相馬断層について、活動性を検討している区間の南方及び北方を含め、広範に詳細な地形データを取得すべき。(ほぼ全域にわたる航空レーザ測量を実施)
- ・双葉断層の南端及び北端の評価や、相馬断層を否定することについては、より強い根拠が必要。(南端における火山灰分析等及び相馬断層9地点のより詳細な検討)



双葉断層(角田市島田)の断層露頭調査

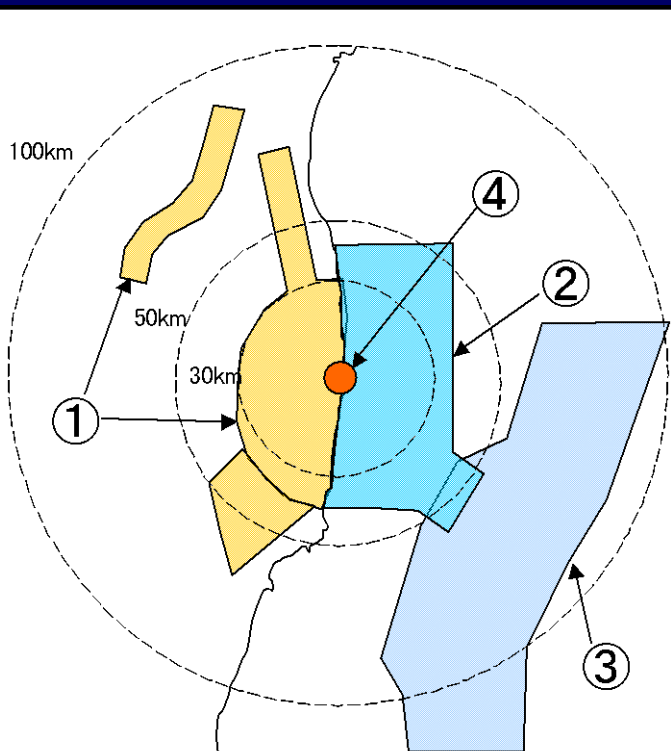


サイト内大深度ボーリングコアの状況確認

東京電力が行った地質調査方法などの評価

福島第一・福島第二原子力発電所周辺では、敷地からの距離に応じて、既往の文献の調査、変動地形学的調査、地表地質調査及び地球物理学的調査等が実施されており、その内容が、**原子力安全委員会などが定めたルールに従って行われ要求事項を満足していることから、基本的に必要な調査が実施されていると判断した。**

調査・解析範囲※(新耐震指針)



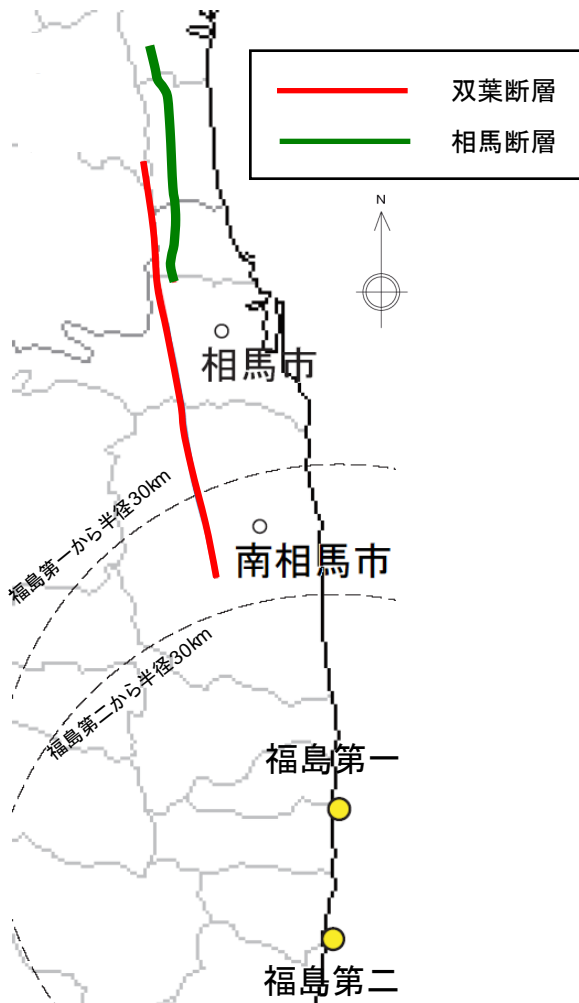
※ 福島第一原子力発電所について例示

分類	調査項目	範囲	
変動地形学的調査	空中写真判読	①	
	航空レーザー計測※	主要断層	
地表地質調査	地表地質踏査※	①, ④	
	ボーリング調査	主要断層	
地球物理学的調査	反射法地震探査(P波震源)	主要断層 ④	
	反射法地震探査(S波震源)	主要断層	
	海上音波探査	既存記録再解析	②, ③
		ベイケーブル探査	④
		マルチチャンネル音波探査	②

※ 双葉断層、相馬断層に関しては、原子力安全・保安院における審議が終了するまで継続的に調査が実施された。

双葉断層・相馬断層の評価

地震調査研究推進本部地震調査委員会による双葉断層の評価も踏まえ、活動性を考慮している区間のみならず、活動性を考慮していない区間も含めて広域にわたって東京電力が実施した地質調査結果(合計20地点)について、集中的かつ慎重に検討。



双葉断層の評価

双葉断層の北端及び南端については、航空レーザ測量データに基づく詳細な地形分析結果や地表地質調査結果等により、それぞれ M_1' 段丘堆積物、 M_2 段丘堆積物に断層による変位・変形が認められないことを確認した。さらに、断層の活動性に関する検討結果として、活動性を考慮している3地点では低位面に変位が認められるのに対し南端及び北端を含む他の8地点では M_1' もしくは M_2 面に変位・変形が認められないこと等を確認した。

以上のことから、双葉断層の耐震設計上考慮する長さを、島田地点から馬場地点までの約37kmと評価していることは妥当なものと判断した。

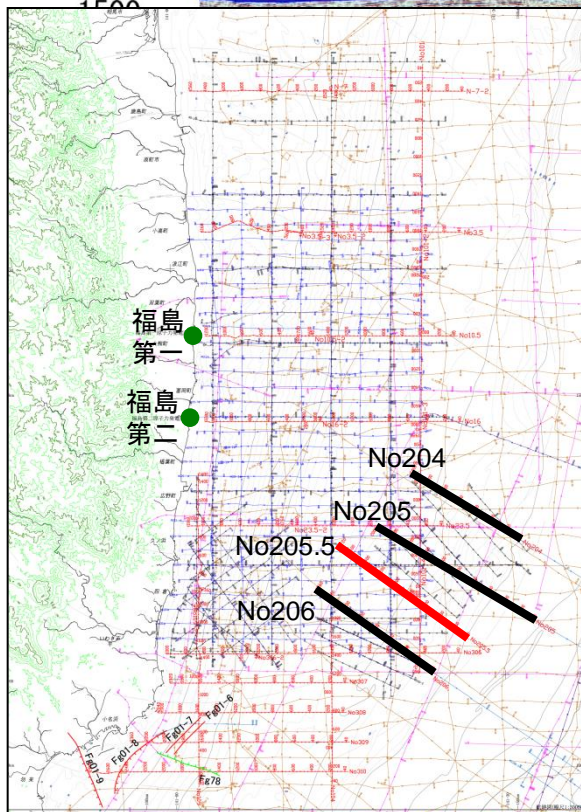
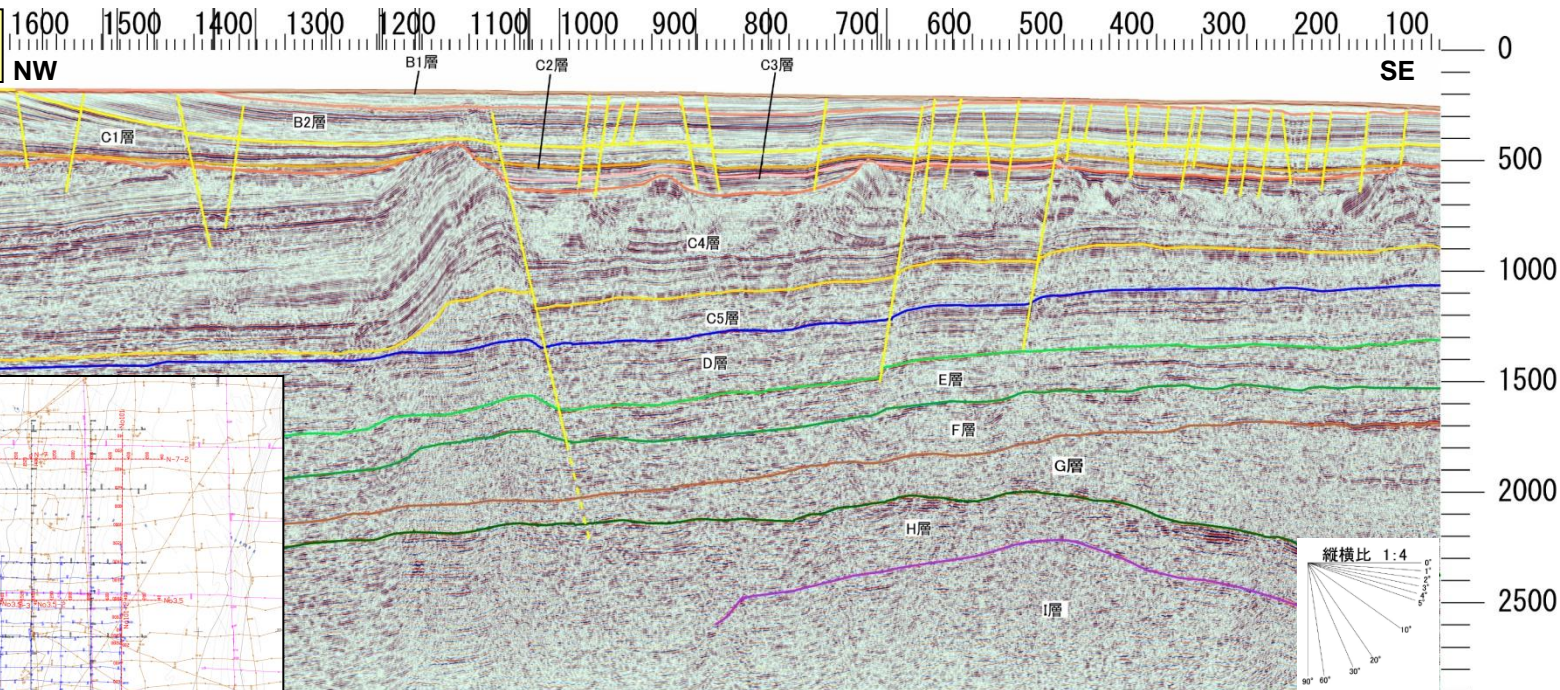
相馬断層の評価

空中写真により判読されたリニアメント等は、多数の地点で岩質の差を反映した侵食地形であると判断されること、撓曲構造に対応して分布する中位から高位の地形面(合計9地点)に変位・変形が認められないことを確認したことから、相馬断層について後期更新世以降の活動はないと評価していることは妥当なものと判断した。

※ なお、双葉断層による地震動評価については、耐震バックチェック中間報告が提出された当初の長さ約47.5kmの暫定評価に対する検討結果に基づき、評価の妥当性を判断した。

敷地前面海域に認められる断層の評価

No205.5測線



敷地前面海域に認められる断層の評価

敷地前面部に認められる正断層については、深部へ連続しないか、又は深部への連続が不明瞭であっても更新統以浅に変位、変形を与えていないこと、逆断層については、更新統以浅に変位、変形を与えていないこと、敷地南東部に認められる断層については、大部分のものは深部へ連続せず、深部への連続が不明瞭な断層については正断層の形態を示し、更新統以浅にインバージョンによる変位、変形を与えていないことを確認した。

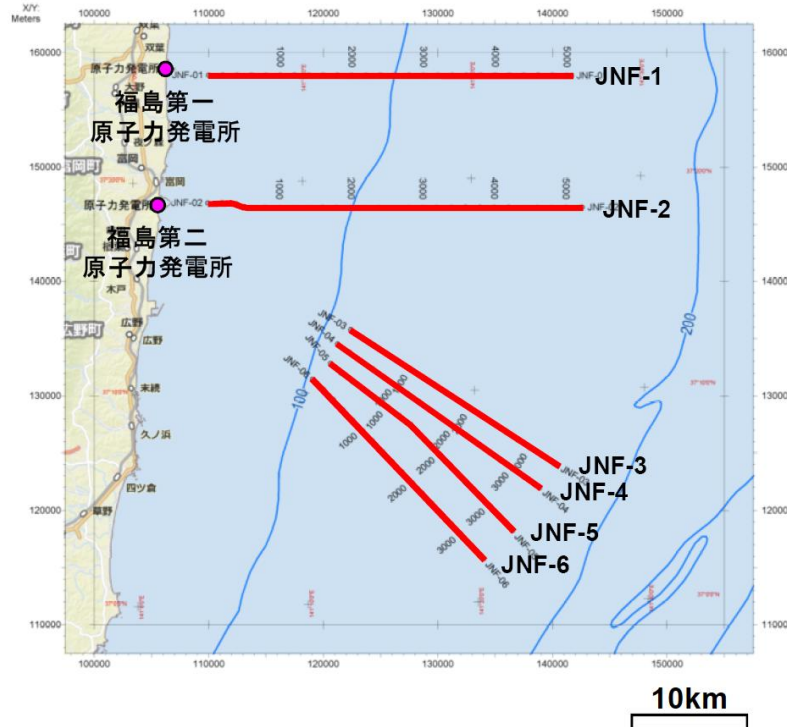
以上に加え、原子力安全・保安院による海上音波探査の結果(18、19ページ)も踏まえた上で、敷地前面海域に認められる断層が、いずれも活断層ではないと評価していることは妥当なものと判断した。

原子力安全・保安院による海上音波探査の実施

原子力発電所の耐震設計に必要な活断層等の調査は、事業者が実施することが大前提であるが、今般の新潟県中越沖地震を踏まえ、耐震安全性について厳格に検証を行うため、事業者による調査を念のためチェックする観点から、原子力安全・保安院として海上音波探査を実施した。

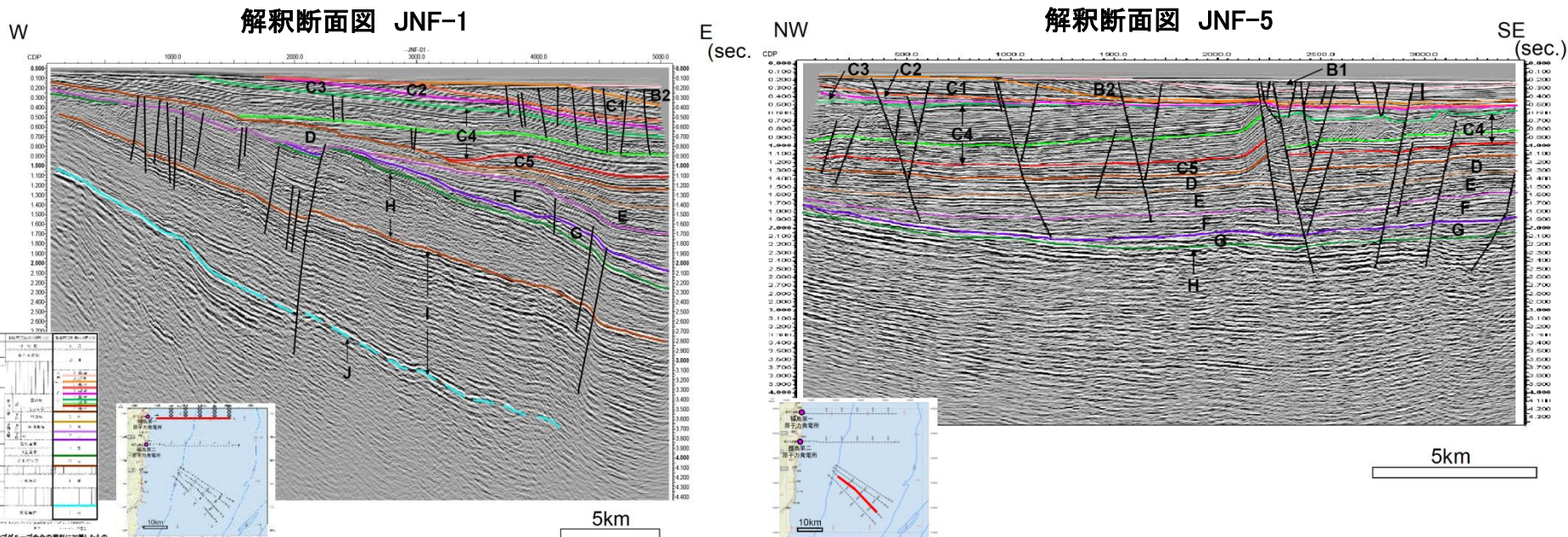
【調査内容】

福島第一・福島第二原子力発電所前面部及び南東部に認められる断層の活動性をチェックするため、海上音波探査を実施。

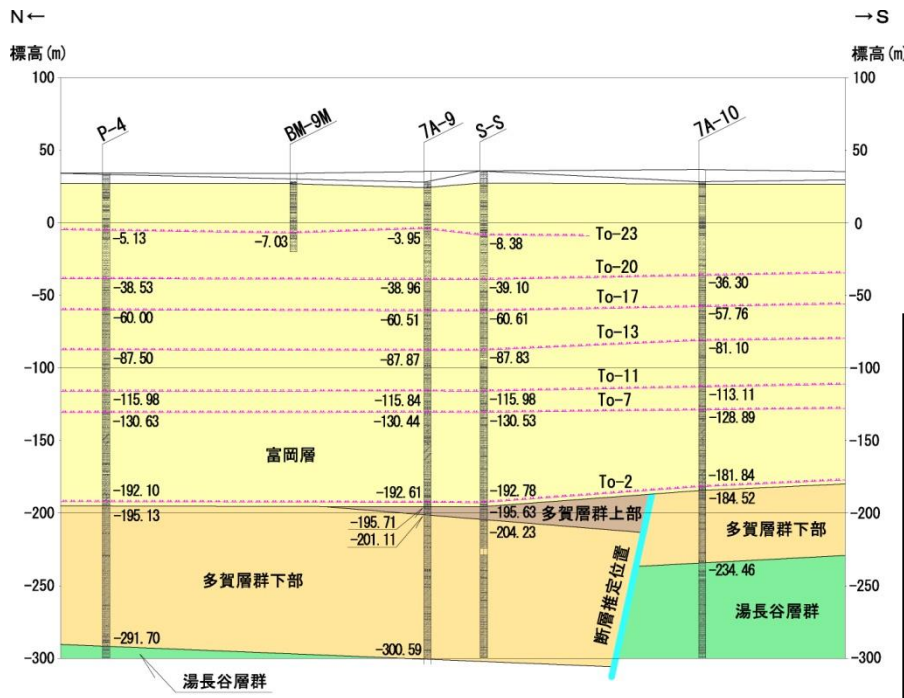
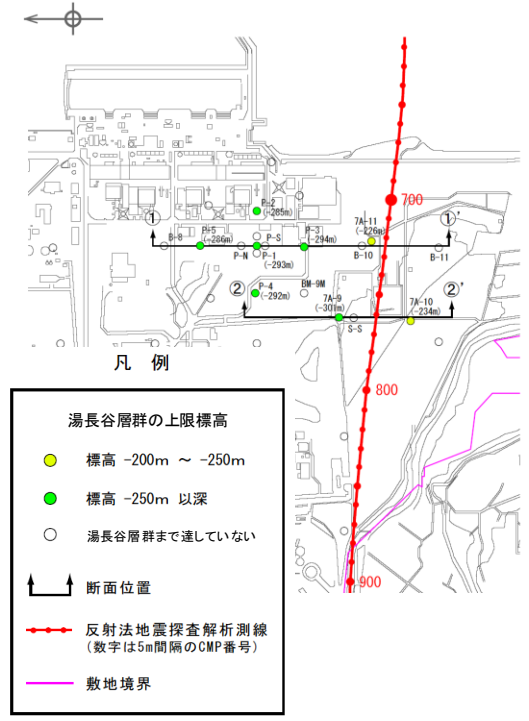
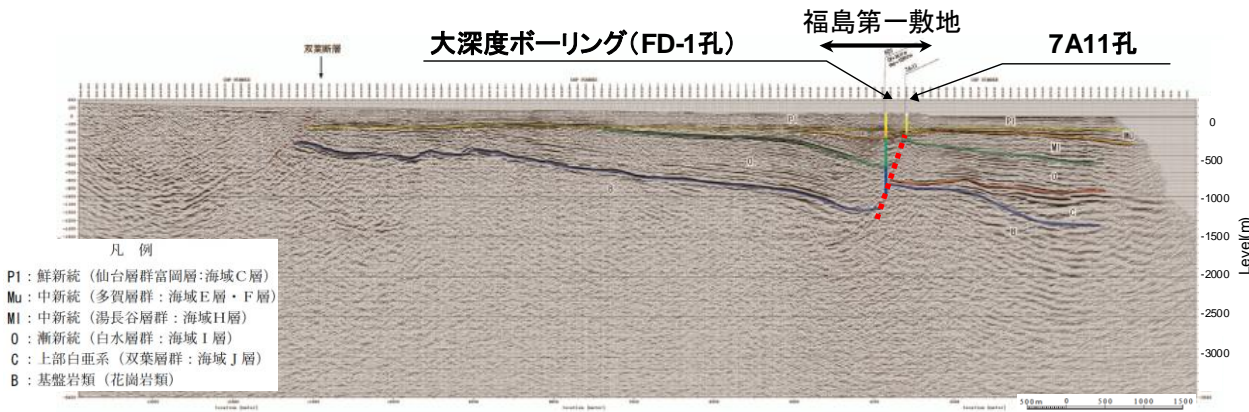


原子力安全・保安院による海上音波探査について

- 海底下深部まで解釈可能な記録が得られたことから、深部の地質構造を把握することができた。
- 本調査により、以下の点が主に確認できた。**調査結果は東京電力の評価と整合的であった。**
 - > 敷地前面海域の各測線において、多くの正断層及び1条の逆断層が認められる。正断層は、浅部のC4層(上部鮮新統)以浅のみに認められるものと主として深部のD層(下部鮮新統)以深のみに認められるものがある。このうち深部に認められるものはC4層より浅部に変位・変形を与えていない。逆断層は、C3層(上部鮮新統)より浅部に変位・変形を与えていない。
 - > 敷地南東海域において、多くの正断層が認められる。大部分の断層は、地下深部へ連続しない。また、一部の断層は深部で反射波が不明瞭となるが、全て正断層の形態を示す。
- **本調査範囲において、東京電力の調査結果は概ね妥当と判断した。**



福島第一原子力発電所の深部に認められる断層の評価

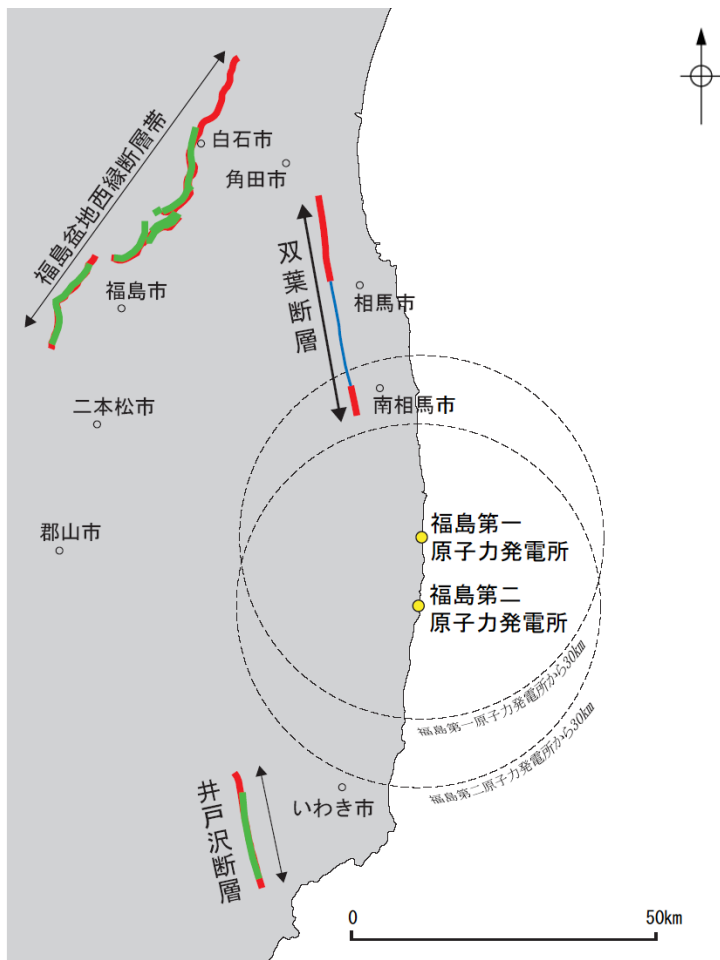


福島第一原子力発電所の深部に認められる断層の評価

反射法地震探査結果から、福島第一原子力発電所の深部に正断層が確認されたが、従来より海域から伸びる古い正断層の存在が認識されていた。この正断層については、原子炉建屋の設置岩盤を含む鮮新統(富岡層)はほぼ水平に堆積し、富岡層中の鍵層の標高は断層を挟んで同程度であることから富岡層堆積以降の活動が認められないことを確認している。したがって、**古い時代の断層であり活断層ではないと評価していることは妥当と判断した。**

活断層の評価(まとめ)

敷地周辺の活断層



双葉断層及び敷地前面海域に認められる断層等を主に検討するとともに、畑川断層、大坂－芦沢リニアメント、福島盆地西縁断層帯及び井戸沢断層等についても一通り検討した上で、**敷地周辺の陸域及び海域の活断層の評価は、妥当なものと判断した。**

	新耐震指針における評価			設置許可申請書記載の断層長さ
	断層名	長さL	M	
陸域	① 双葉断層	37 km	7.4	18 km
	② 福島盆地西縁断層帯	57 km	7.8	—(※1)
	③ 井戸沢断層	19.5 km	7.0	—(※2)

※1) 地震地体構造上想定する地震としてM7.5の地震を想定

※2) 断層の長さと同敷地からの距離を考慮すると敷地への影響は小さいと評価

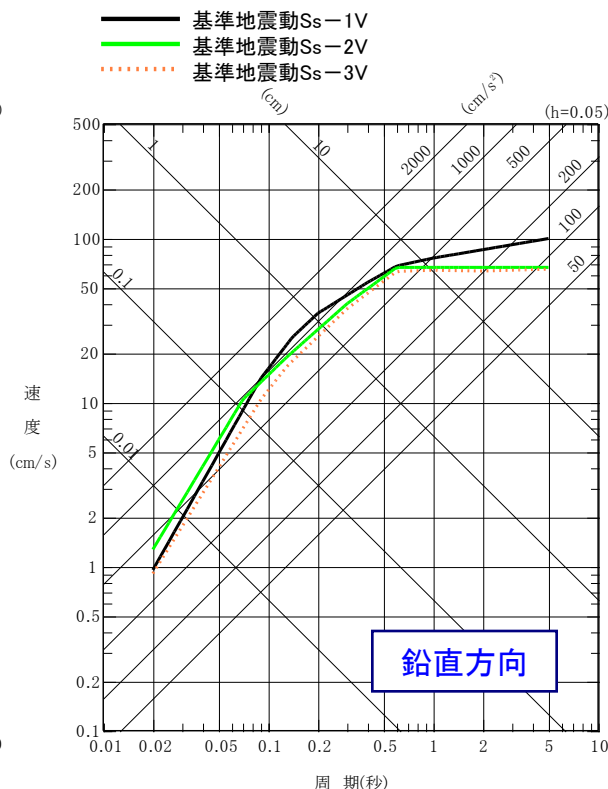
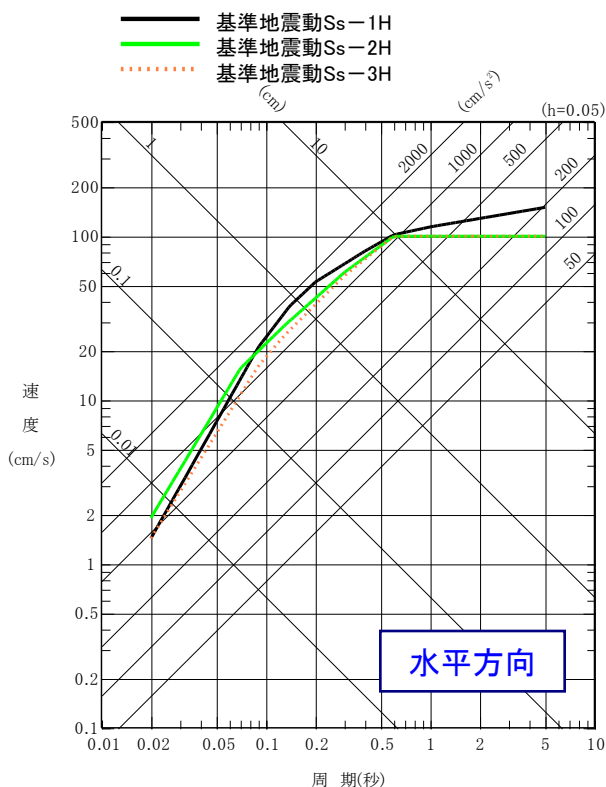
- 従来評価※ (地質調査に基づく評価)
- 従来評価※ (文献調査に基づく評価)
- 新耐震指針に照らした評価

※福島第一原子力発電所1～6号炉施設変更許可時

基準地震動Ssの評価

主に以下について確認し、基準地震動Ssは妥当なものと判断した。

- ・ 検討用地震の選定は、地震の発生様式ごとに適切に行われており、また、震源の想定に当たっては、不確かさが適切に考慮されている。
- ・ 検討用地震の地震動評価(応答スペクトル、断層モデル)に当たっては、中越沖地震の知見を踏まえ、敷地の地下構造特性が適切に考慮されている。
- ・ 「震源を特定せず策定する地震動」は、地域性も考慮の上、適切に想定されている。



基準地震動の最大加速度値*

	水平方向	鉛直方向
Ss-1	450Gal	300Gal
Ss-2	600Gal	400Gal
Ss-3	450Gal	300Gal

※ Ss-2の応答スペクトルは福島第一・福島第二原子力発電所で異なるものの、最大加速度値は両サイト同一の値となっている。

基準地震動S_sの評価(補足)

[中越沖地震の知見反映について]

「新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」(平成20年9月4日、原子力安全・保安院)に基づき、以下について確認した。

- ・**震源特性**について、震源モデルのパラメータの不確かさを適切に考慮しており、また、**応力降下量の不確かさとして1.5倍を考慮していること。**
- ・**地下構造特性**について、サイトの地震観測記録を用いて、震央の方位毎に地震動特性を評価した結果、富岡観測点に対する応答スペクトル比の平均値が震央の方位により大きく変化することはなく、**サイト周辺の地下構造が地震動特性に及ぼす影響は小さいこと。**

[震源を特定せず策定する地震動の地域性について]

以下について確認し、加藤ほか(2004)に基づく地震動レベルを「震源を特定せず策定する地震動」として設定していることは妥当なものと判断した。

- ・地震調査研究推進本部(2006)による敷地を含む領域の「陸域の震源断層を予め特定しにくい地震」の最大規模はM6.7程度とされていること、及び敷地を含む領域において震源と活断層を関連付けることが困難な地震の最大規模はM6.5であること。
- ・地震発生層から推定される地震の規模は、断層傾斜角の地域性を考慮し傾斜角90°～60°とした場合M6.1～M6.5程度、仮に傾斜角45°としてもM6.6～M6.8程度であること。
- ・加藤ほか(2004)においては、これらと同等の規模の地震をスペクトル設定時の検討対象に加えていること。

施設の耐震安全性の評価

基準地震動Ss-1、Ss-2及びSs-3による施設の耐震安全性評価等に対する保安院の検討結果は、以下のとおりである。

(1) 建物・構築物

原子炉建屋の地震応答解析モデル、解析手法等は妥当なものと判断するとともに、その解析結果は耐震壁の機能維持が確保されるせん断ひずみに余裕をみて設定された基準値以下であることを確認し、**福島第一原子力発電所5号機及び福島第二原子力発電所4号機の原子炉建屋の耐震安全性が確保されると判断した。**

(2) 機器・配管系

機器・配管系の評価に主に用いられた手法は、これまで工事計画認可等において用いられた実績のあるものであり、それらの手法により行った構造強度評価結果は、評価基準値以下であることを確認した。また、制御棒挿入性に関する評価については、燃料集合体の相対変位が、評価基準値以下であることを確認した。

以上より、**福島第一原子力発電所5号機及び福島第二原子力発電所4号機の耐震安全上重要な機器・配管系の耐震安全性が確保されると判断した。**

福島第一・福島第二原子力発電所の耐震安全性

以上のことから、原子力安全・保安院は、**新耐震指針に照らした基準地震動に対しても、福島第一原子力発電所5号機及び福島第二原子力発電所4号機の安全上重要な「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」機能が確保されると判断した。**

また、**福島第一原子力発電所1～4、6号機及び福島第二原子力発電所1～3号機**の**中間報告**については、それぞれ平成21年6月19日、同年4月3日に提出があり、基準地震動Ssは福島第一5号機及び福島第二4号機と同様に策定され、安全上重要な「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」機能は確保されるとしている。原子力安全・保安院は、これらの内容について、**今後、専門家による審議を踏まえ厳正に確認**することとする。



福島第一原子力発電所



福島第二原子力発電所

東京電力HPから

用語解説

【用語解説】(本資料中に使われていない用語も含めて解説)

「変動地形学的調査」

空中写真判読により、地形の成因を考慮して活断層の可能性のある地形を抽出する調査である。崖や谷、山の尾根などの地形的な特徴が直線的にまたは緩やかな曲線状に続く地形だけではなく、段丘面の傾きや河川や尾根の屈曲などに着目し、活断層の可能性のある地形として判読するものである。

「地球物理学的調査」

地下の地質構造などを地震波、電磁気、重力などを利用して調査する方法である。主なものとして、陸上で行う反射法地震探査、電気探査、重力探査、海上で行う海上音波探査がある。

「空中写真判読」

調査対象範囲を上空から撮影した写真を観察することにより、地形を立体的に見て、変動地形やリニアメントなどの地形を読み取る方法である。

「航空レーザ計測」

航空機(飛行機またはヘリコプター)から地上に向けて多数のレーザパルスを発射し、地表面や地物で反射して戻ってきたレーザパルスから、高密度な三次元デジタルデータを取得する新しい測量技術である。

「トレンチ調査・表土剥ぎ調査」

トレンチとは溝のことで、活断層が通過する地点に調査溝を掘り、表土はぎ調査とは活断層が通過する地点の表土をはぎ取り、岩盤を露出させ、断層やその周辺の地層断面を詳細に観察する方法である。

「ボーリング調査」

地盤を構成する岩石などを棒状のコアとして連続的に採取し、これを観察して地質状況を調査する方法である。

「高密度重力探査」

重力探査は、地盤を構成する土や岩の密度差を利用して地下構造を調査する方法である。柔らかい堆積層に比べて固い岩盤は密度が大きいため、岩盤が浅い場所は重力値が大きく、深い場所には重力値が小さくなる。このため、観測された重力値の変動(重力異常)を基に地盤構造を推定することができる。

「反射法地震探査」

地面を人工的に振動させて弾性波と呼ばれる波を発生させ、その反射波を捉えて、地下の地質構造を調査する方法である。

「微動アレー探査」

微動アレー探査とは、常に地表付近で発生している微小な振動(常時微動)を、地表に設置した複数の地震計で同時に測定し、測定したデータを解析することで地下の速度構造を推定する調査手法である。

「海上音波探査」

海上において実施される反射法地震探査の一種で、海底下の地層の境界で反射してくる弾性波を利用して、海底下の地質構造を明らかにするものである。

「リニアメント」

谷や尾根の傾斜急変部、屈曲等の地形的特徴が直線ないしそれに近い状態で配列している場合、その線状の地形をいう。

「変動地形」

地震や火山活動による地殻の変動に起因する特徴的な地形をいい、地形の切断、屈曲、撓曲、傾動、逆傾斜として確認される。

【用語解説】(本資料中に使われていない用語も含めて解説)

「基準地震動Ss」

基準地震動Ssとは、施設の耐震設計において基準とする地震動で、敷地周辺の地質・地質構造(地層の立体的な分布や相互関係)ならびに地震活動性等の地震学および地震工学的見地から、施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与える恐れがあると想定することが適切な地震動をいう。

なお、地震動とは地震波がある地点に到達することによって生じる地盤の揺れをいう。地震の発生によって放出されたエネルギーは、地震波として震源から地殻内のあらゆる方向に伝わっていき、これがある地点に到達すると、その地盤を揺らす。地震動は、加速度時刻歴、応答スペクトル等によって表される。

「応答スペクトル法に基づく地震動評価」

地震のマグニチュードと震源からの距離などの関係をもとに、断層モデルによる手法より少ない変数で簡易的に地震動を評価する方法である。

「断層モデルを用いた地震動評価」

断層モデルとは、震源の断層面を地震動を求める計算手法として用いるためにモデル化したものをいう。従来は、震源を点として考え、その震源までの距離およびマグニチュードによって地震動の計算を行っていた。しかし、震源が近く、その震源断層面の広がりや形状を考慮することがより適切であると考えられる場合には、その断層の形状および破壊形式を考えて地震動を計算する方がより合理的である。このため、地震の原因となる断層をモデル化して地震動を計算する手法がいくつか提案されている。

「アスペリティ」

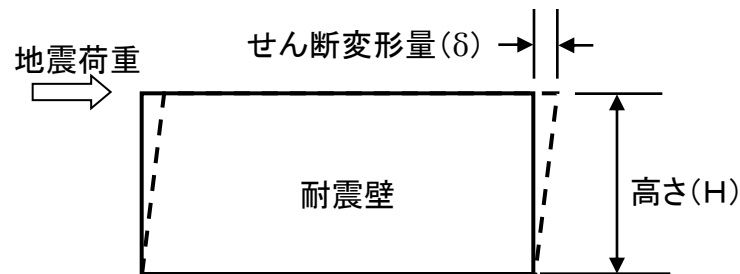
断層面におけるすべりの大きい部分、つまりアスペリティ以外の部分に比べ放出されるエネルギーが大きい部分のこと。

「応力降下量」

断層が破壊すると、そこに蓄えられていたエネルギーが解放されるため、岩盤中の応力が降下する。応力降下量とは、断層破壊(地震)の直前の応力と直後の応力との差をいう。

「せん断ひずみ」

地震等の外力を受けた際に、そのせん断力(部材をずらそうとする力)によって発生するひずみのこと(下図参照)。なお、単位はrad(ラジアン)で表される。



$$\text{せん断ひずみ} = \text{せん断変形量}(\delta) \div \text{耐震壁の高さ}(H)$$