

平成 2 3 年東北地方太平洋沖地震の知見を考慮
した原子力発電所の地震・津波の評価について

～中間取りまとめ（案）～

平成 2 4 年 2 月 6 日

経 済 産 業 省

原子力安全・保安院

目次

I. はじめに.....	1
1. 調査の目的.....	1
2. 調査・検討の対象及び進め方.....	1
3. 調査・検討の方法.....	2
II. 今回の地震及びそれに伴う津波.....	2
1. 概況	2
1.1 地震の規模.....	2
1.2 津波による被害.....	3
2. 原子力発電所を襲った地震と津波による被害.....	4
2.1 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所.....	4
2.1.1 地震観測結果.....	4
2.1.2 津波の観測及び調査結果.....	4
2.1.3 地殻変動量.....	5
2.1.4 津波等による被害の概要.....	5
2.2 女川原子力発電所.....	7
2.2.1 地震観測結果.....	7
2.2.2 津波の観測及び調査結果.....	7
2.2.3 地殻変動量.....	8
2.2.4 津波による被害の概要.....	8
2.3 東海第二発電所.....	9
2.3.1 地震観測結果.....	9
2.3.2 津波の観測及び調査結果.....	9
2.3.3 地殻変動量.....	10
2.3.4 津波による被害の概要.....	10
III. 今回の地震・津波の文献等における新たな知見.....	10
1. 当院による新たな科学的・技術的知見等の収集.....	10
2. 地震調査研究推進本部での議論.....	11
3. 中央防災会議の動き.....	11
IV. 地震動に関する評価.....	12
1. 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所における評価.....	12
1.1 今回の地震における地震動の観測記録.....	12

1.2	強震動シミュレーション解析結果と観測記録の比較.....	12
1.3	解放基盤表面における地震動の推定と分析.....	13
1.3.1	解放基盤表面における地震動の推定.....	13
1.3.2	基準地震動 S_s とはぎとり波の比較.....	14
1.3.3	はぎとり波の「福島第一南地点」、「福島第一北地点」及び「福島第二地点」の比較.....	14
1.3.4	プレート間の検討用地震動（仮想塩屋崎沖地震）とはぎとり波の比較...	15
1.4	福島第一原子力発電所及び第二原子力発電所における評価のまとめ.....	15
2.	女川原子力発電所における評価.....	16
2.1	地震における地震動の観測記録（3月11日及び4月7日）.....	16
2.1.1	3.11地震の観測記録.....	16
2.1.2	4.7地震の観測記録.....	16
2.2	強震動シミュレーション解析結果と観測記録の比較.....	17
2.2.1	3.11地震のシミュレーション解析.....	17
2.2.2	4.7地震のシミュレーション解析.....	19
2.3	解放基盤表面における地震動の推定と分析.....	19
2.3.1	解放基盤表面における地震動の推定（3月11日及び4月7日）.....	19
2.3.1.1	3.11地震時の地震動の推定.....	19
2.3.1.2	4.7地震時の地震動の推定.....	20
2.3.2	基準地震動 S_s とはぎとり波の比較.....	21
2.3.2.1	3.11地震が基準地震動 S_s を超過した要因.....	21
2.3.2.2	4.7地震が基準地震動 S_s を超過した要因.....	21
2.4	女川原子力発電所における評価のまとめ.....	22
3.	東海第二発電所における評価.....	23
3.1	今回の地震における地震動の観測記録.....	23
3.2	解放基盤表面における地震動の推定と分析.....	23
3.2.1	解放基盤表面における地震動の推定.....	23
3.2.2	基準地震動 S_s とはぎとり波の比較.....	24
3.2.3	検討用地震（プレート間地震）とはぎとり波の比較.....	24
3.3	東海第二発電所における評価のまとめ.....	25
4.	湯ノ岳断層の評価.....	25
4.1	経緯.....	25
4.2	現地調査.....	25
4.3	湯ノ岳断層の評価のまとめ.....	26
5.	地震動に関する評価のまとめ.....	26
V.	津波に関する評価.....	28

1. 福島第一及び第二原子力発電所並びに東海第二発電所における評価.....	28
1.1 浸水経路及び浸水による影響・分析.....	28
1.1.1 津波波源モデルの推定と再現計算.....	28
1.1.2 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所の津波の差異に係る分析	29
1.2 浸水経路及び浸水による影響・分析.....	30
1.3 津波波力の検討.....	30
2. 東海第二発電所における評価.....	31
2.1 波源モデルの推定と再現計算.....	31
2.2 浸水経路及び浸水による影響・分析.....	31
3. 女川原子力発電所における評価.....	31
3.1 波源計算と再現計算.....	31
3.2 浸水経路及び浸水による影響・分析.....	32
4. 独立行政法人原子力安全基盤機構によるクロスチェック結果.....	33
4.1 東北地方太平洋沖地震津波の特徴の分析.....	33
4.2 津波の再現と要因分析.....	33
4.3 津波の再現性についての考察.....	34
4.3.1 福島第一原子力発電所.....	34
4.3.2 福島第二原子力発電所.....	34
4.3.3 東海第二発電所.....	35
4.3.4 女川原子力発電所.....	35
4.4 各原子力発電所の評価結果の検証.....	36
4.4.1 4つの原子力発電所とJNESの推定波源モデルの相違点.....	36
4.4.2 各原子力発電所における再現性について.....	36
4.5 今後の展開.....	36
5. 津波に関する評価のまとめ.....	37
5.1 想定津波高さの考え方.....	37
5.2 波力評価の考え方.....	38
5.3 今後の対応.....	39

I. はじめに

1. 調査の目的

平成23年東北地方太平洋沖地震（以下「今回の地震」という。）とそれによって引き起こされた津波により、複数の原子力発電所に多大な影響を与えることとなった。特に、福島第一原子力発電所においては、我が国において未曾有の原子力災害を引き起こすこととなり、いまだに国民生活に、極めて広範かつ深刻な影響を及ぼしている。

原子力安全・保安院（以下「当院」という。）においては、このような事態を二度と繰り返さないために、科学的・技術的観点から、今回の地震・津波を徹底的に分析し、従来の地震・津波の安全審査や耐震バックチェックで想定していない今回の地震・津波に係わる知見を明らかにして、その教訓を原子力発電所の安全規制に反映させるために調査・検討を進めているところである。

本「平成23年東北地方太平洋沖地震の知見を考慮した原子力発電所の地震・津波の評価について～中間取りまとめ～」は、その調査・検討結果を中間的に取りまとめたものである。

2. 調査・検討の対象及び進め方

本調査・検討の対象及び進め方は次の通り。

- ① 今回の地震とそれに伴う津波による原子力施設への影響の検討に当たっては、福島第一及び第二原子力発電所、女川原子力発電所並びに東海第二発電所を調査・検討の対象とし、当院からの指示に基づく事業者から報告（指示内容及び事業者の報告内容については別添1参照）、現地調査等により、評価を取りまとめる。なお、女川原子力発電所については、余震として影響の大きかった4月7日の宮城県沖地震も対象とする。
- ② 今回の地震・津波に関する文献等による新たな知見の調査・検討に当たっては、平成23年9月2日に独立行政法人原子力安全基盤機構（以下「JNES」という。）及び事業者から報告のあった今回の地震に関する耐震安全性評価に係る新たな科学的・技術的知見等の収集結果及び関係機関（地震調査研究推進本部、中央防災会議）での議論を対象とし、JNES及び原子力事業者からの報告、関係機関の開催する委員会での議論等を分析し、今回の地震を踏まえた新たな知見を抽出する。
- ③ 地震・地震動の評価に当たっては、解放基盤表面における地震動（以下「はぎとり波」という。）の推定、基準地震動や検討用地震とはぎとり波との比較・検討等を行うことにより、今回の地震を踏まえた地震動に関する

知見を抽出する。また、湯ノ岳断層に係る現地調査による検討を踏まえた活断層の詳細調査に関する知見を抽出する。

- ④津波の評価に当たっては、浸水経路及び浸水による影響・分析、津波の再現計算等を行うことにより、今回の地震による津波を踏まえた津波に関する知見を抽出するとともに、想定津波高さの評価、波力評価等の今後の津波に関する評価の在り方について、取りまとめる。

3. 調査・検討の方法

当院は、平成23年9月30日、「地震・津波に関する意見聴取会」を開催し、福島第一及び福島第二原子力発電所、女川原子力発電所並びに東海第二発電所における地震動の解析・評価の検討を行うとともに、今回の地震に関する新たな科学的・技術的知見について整理し、原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項を検討することとした。

なお、「地震・津波に関する意見聴取会」とは別に、平成23年9月29日、「建築物・構造に関する意見聴取会」を開催し、前記の発電所における建物・構築物、機器・配管系の地震応答解析の評価等の検討を行うとともに、同様に今回の地震に関する耐震安全性評価に反映すべき事項を検討することとした。

両意見聴取会においては、主に別添資料で記述した当院による指示に基づき事業者から報告された内容等について、当院から説明し、各委員から意見等を聴取している（審議経緯については、別添2参照）。

また、JNESでは、事業者が実施した津波の再現計算に対してクロスチェックを行うことにより、当院に対して技術的支援を行った。

II. 今回の地震及びそれに伴う津波

1. 概況

1.1 地震の規模

今回の地震は、2011年3月11日14時46分、北米プレート（陸側のプレート）と太平洋プレート（海側のプレート）が沈み込む日本海溝沿いのプレート境界で発生し、広い範囲で破壊が起きたことにより発生した三陸沖を震源とするマグニチュード9.0の国内観測史上最大規模の地震であった。

気象庁は、震源位置について、西北西－東南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型、震源位置は北緯38度6.2分、東経142度51.6分、震源深さは24kmと発表、各地の震度について、宮城県栗原市築館で震度7、福島県大熊町下野上・双葉町新山・浪江町幾世橋・富岡町本岡・

檜葉町北田などで震度6強、宮城県石巻市桃生町、茨城県東海村東海等で震度6弱と発表している。また、文部科学省地震調査研究推進本部は、震源域等について、岩手県沖から茨城県沖までの長さ約400km以上、幅は約200kmで、最大の滑り量は20m以上であったと推定しており、震源領域は、三陸沖南部海溝寄り、三陸沖北部から房総沖の海溝寄りの一部と発表している。更に、この地震による地殻変動が広範囲で確認されており、国土地理院は、電子基準点「牡鹿」（宮城県石巻市）が東南東方向へ約5.3m動き、約1.2m沈下したと発表している。

今回の一連の地震活動について、気象庁は、本震－余震型で推移しており、余震活動は岩手県沖から茨城県沖にかけて震源域に対応する長さ約500km、幅約200kmの範囲に密集して発生しているほか、震源域に近い海溝軸の東側でも発生、福島県から茨城県の陸域の浅い場所では、M3～4程度の地震（震度3～4）も多発するなど、活動が継続していると発表している。また、これまでに発生した余震は、1月10日12時現在、M7.0以上は6回、M6.0以上は96回、M5.0以上は580回であり、最大震度4以上を観測した余震は219回と発表している。

1.2 津波による被害

今回の地震に伴う津波の浸水面積について、国土地理院は、青森、岩手、宮城、福島、茨城、千葉の6県62市町村の空中写真・衛星画像判読による浸水範囲面積の合計を561km²と発表している。また、津波の観測値について、気象庁は、宮城県石巻市鮎川で8.6m以上、福島県相馬で9.3m以上、茨城県大洗で4.0m以上など高い津波が東北地方及び関東地方の太平洋沿岸で観測されたと発表している。海外の検潮所においても津波が観測されており、アメリカの西海岸に位置するクレセントシティで津波高さ2.47m、チリのアリカで2.45mが記録されていると発表している。

この津波により、太平洋側に立地している原子力発電所においては、甚大な被害が生じており、特に東京電力株式会社（以下「東京電力」という。）福島第一原子力発電所（以下「福島第一原子力発電所」という。）、東北電力株式会社（以下「東北電力」という。）女川原子力発電所（以下「女川原子力発電所」という。）及び日本原子力発電株式会社（以下「日本原子力発電」という。）東海第二発電所（以下「東海第二発電所」という。）においては、津波が敷地内に遡上し、原子炉設備を冷却するための機器類等が大きく損壊したとしている。

2. 原子力発電所を襲った地震と津波による被害

2.1 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所

2.1.1 地震観測結果

福島第一原子力発電所においては、原子炉建屋基礎版上の観測記録のうち、2号機、3号機及び5号機において、耐震安全性評価で策定した基準地震動 S_s に対する最大応答加速度値(2号機: 438ガル、3号機: 441ガル、5号機: 452ガル)を上回り、それぞれ、2号機が550ガル、3号機が507ガル、5号機が548ガルであったとしている。

福島第二原子力発電所全号機において、原子炉建屋基礎版上の観測記録は、耐震安全性評価で策定した基準地震動 S_s に対する最大応答加速度値を下回ったとしている。

2.1.2 津波の観測及び調査結果

福島第一原子力発電所において、約4mの津波に続き、更に大きな波が到達し、測定範囲が-7.5~+7.5mの波高計が損傷したとしている。敷地前面で観測された波高記録では、最大値O. P. * +7.45mを記録しているが、その後、計測不能となっている。(図Ⅱ. 2. 1-1)

福島第一原子力発電所の敷地高さは1~4号機がO. P. * +10m、5号機及び6号機はO. P. +13mである。津波は敷地前面海域から襲来し、主要建屋設置敷地のほぼ全域が冠水したとしている。津波の浸水高は、O. P. 約+11.5m~O. P. 約+15.5m、南西部では局所的にO. P. 約+16m~17mであり、浸水深は約1.5m~5.5mであったとしている。(図Ⅱ. 2. 1-2-1)(図Ⅱ. 2. 1-2-2)

また、開閉所に接続する敷地外の送電線鉄塔が地震による周辺斜面の法面崩壊で倒壊する等、外部送電線からの受電ができない状態となったことから、各号機の非常用ディーゼル発電機が自動起動し、原子炉及び使用済燃料プールの冷却機能を維持したが、その後、到達した前述の津波により、非常用ディーゼル発電機等が水没し、6号機を除く全ての非常用ディーゼル発電機が停止し、1号機~5号機は、全ての交流電源が喪失する事態となったとしている。

福島第二原子力発電所においては、主要建屋設置エリア南東側から免震重要棟への道路に津波が集中的に遡上したとしている。福島第二原子力発電所の敷地高さはO. P. +12mであり、O. P. +4m

の海側エリアはほぼ全域が浸水、敷地高さO. P. + 1 2 mの1号機、2号機の建屋周辺及び3号機の建屋南側が浸水したが、4号機の建屋周辺の浸水はなかったとしている。遡上高は、主要建屋設置エリアの山側でO. P. 約+ 1 2 m～約+ 1 4. 5 m（浸水深約2. 5 m以下）であり、局所的にはO. P. 約+ 1 5～約+ 1 6 m（浸水深約3～約4 m）であったとしている。（図Ⅱ. 2. 1-3-1）（図Ⅱ. 2. 1-3-2）

この浸水により、主要建屋の地上の開口部や、敷地の地下に埋設されたトレンチ等の一部から海水が浸水し、1号機の主要建屋の地下階や3号機タービン建屋地下2階、全号機の海水熱交換器建屋等が津波により浸水したとしている。

※ O. P. : 小名浜港工事基準面

東京湾平均海面（T. P.）の下方0. 7 2 7 m

2.1.3 地殻変動量

今回の地震による地殻変動は、国土地理院によると、陸域においては、最大で水平方向に約5. 3 m、上下方向に約1. 2 mの変位量が観測されたとしている。東京電力による報告によると、GPS測量等を実施した結果、福島第一原子力発電所において、6号機のタービン建屋及び原子炉建屋の位置において約0. 5 8 m、1号機～4号機までの東側（海側）の地盤面においては、平均で約0. 6 6 mの沈下量が確認されたとしている。（図Ⅱ. 2. 1-4）（図Ⅱ. 2. 1-5）

福島第二原子力発電所において、1号機～4号機の主要な建屋において、約0. 6 2 m前後の沈下量が確認されたとしている。

2.1.4 津波等による被害の概要

福島第一原子力発電所において、主要建屋の周辺は、津波の遡上を受けほぼ全域が浸水した。この浸水により、主要建屋の地上の開口（建屋の出入口や機器搬入口（ハッチ）、給排気口（ルーバー））や、敷地の地下に埋設されたトレンチやダクトに接続する開口（ケーブルや配管の貫通口）の一部から海水が浸水した。建屋内への浸水は、通路や階段室等を介して地下の広い範囲が浸水したものと考えられる。1号機タービン建屋の東側（海側）を中心に、扉やシャッター等の一部が津波により損傷していることが確認されたが、主要建屋の外壁や柱等の構造躯体に有意な損傷は確認されていない。また、補機冷却用海水ポンプ施設は、津波によって全号機が冠水した。また、原子炉建屋や

タービン建屋の地下階に設置されている非常用ディーゼル発電機及び配電盤等の非常用電源設備（機器の冷却設備含む）は、津波によって1号～5号機すべてが機能喪失し、6号機ではB系を除き機能損失した。6号機については、3台ある非常用ディーゼル発電機のうち2台は、ディーゼル発電機本体は被水しなかったが、海水の冷却設備が使用不可となったことにより機能喪失した。1台は、ディーゼル発電機本体が被水せず、空冷式で海水冷却が不要であったこと、また、配電盤が被水しなかったことにより、非常用電源の供給が可能であったとしている。

福島第一原子力発電所の開閉所に接続する送電鉄塔については、鉄塔近傍の盛土の崩落により倒壊したと考えられるが、これは送電鉄塔自体の耐震性について評価していたものの、周囲の盛土の崩落を含めた総合的な耐震性評価の視点に欠けていたことが鉄塔倒壊につながったと考える。このことから、平成23年4月15日に、当院は各事業者に対し、鉄塔基礎の安定性に関する調査を含む外部電源の信頼性確保についての対応を指示し報告を求めた。これを受け事業者からは、鉄塔基礎の安定性評価について、適宜報告がなされているところであり、当該報告については、今後、当院として厳格に確認するとともに、必要に応じて対応を求めていく予定である。また、今回の地震により、福島第一原子力発電所1号機及び2号機の開閉所の遮断器及び断路器が損傷したと考える。このため、当院は、事業者に対し、外部電源の信頼性確保の観点から、開閉所の遮断機及び断路器等について、今後発生する可能性のある地震による耐震性の評価及び対策を求めたところである。

福島第二原子力発電所において、敷地高O. P. + 4 mの海側エリアはほぼ全域が浸水し、敷地高O. P. + 12 mの1号機、2号機の建屋周辺及び3号機の建屋南側が浸水したが、4号機の建屋周辺の浸水はなかった。この浸水により、主要建屋の地上の開口（建屋の出入口や機器搬入口（ハッチ）、給排気口（ルーバー））や、敷地の地下に埋設されたトレンチやダクトに接続する開口（ケーブルや配管の貫通口）の一部から海水が浸水したが、主要建屋の外壁や柱等の構造躯体に有意な損傷は認められなかった。1号機の主要建屋の地下階や3号機タービン建屋地下2階、全号機の海水熱交換器建屋等が津波により浸水した。これにより、1号機では、すべてのディーゼル発電機が水没し、高圧電源盤（M/C）のC系、H系が水没した。なお、同号機の高圧電源盤（M/C）のB系並びに他号機の高圧電源盤（M/C）

は被水を免れている。また、海水熱交換器建屋の非常用電源盤は3号機のD-2系電源盤を除いて機能喪失したとしている。

2.2 女川原子力発電所

2.2.1 地震観測結果

1号機、2号機及び3号機における原子炉建屋の基礎版上の観測記録のうち、各号機で観測された最大加速度は、1号機で水平方向587ガル、2号機で水平方向607ガル、3号機で573ガルであり、耐震安全性評価で策定した基準地震動 S_s に対する最大応答加速度値（1号：532ガル、2号：594ガル、3号：512ガル）を上回っていた。

2.2.2 津波の観測及び調査結果

女川原子力発電所においては、港内静穏域に常時観測用の潮位計と常時観測用の潮位計が欠測となった場合のバックアップ用の潮位計（メモリー式）を同一箇所に設置している。常時観測用の潮位計は津波の影響による測定不能となったものの、バックアップ用の潮位計はメモリーに観測値が保存されていた。観測の結果、最高水位は、O. P. ^{*}+13.78m（3月11日、15時29分）であり、最低水位は、O. P. -5.0m（3月11日、15時44分～15時46分）であった。なお、潮位計のデータサンプリング間隔は、60秒であることから、最高水位を観測した15時29分前後に、より高い水位を記録している可能性があるとしている。また、最低値については、潮位計の観測レンジがO. P. -5.0m以上であることから、O. P. -5.0m以下であったものと推定されるとしている。津波の遡上高について、東北電力は、痕跡調査により、主要な建屋が設置されている敷地前面における遡上高（敷地への津波の浸入痕の高さ）は、地殻変動量約-1.0mを考慮して、最大でO. P. 約+13.8mであり、津波は主要な建屋には及んでいなかったとしている。主要建屋の設置エリアよりも低い位置に設置されていた第1号機の重油貯蔵タンク等については、津波の影響により大きく損壊、また、第2号機海水ポンプ室に設置した循環水ポンプ自動停止用水位計の止水処理が不十分だったため、取水路より海水が流入し、第2号機の原子炉建屋地下3階の原子炉補機冷却水系熱交換機室（非管理区域）の一部が浸水したとしている。

（図Ⅱ. 2. 2-1）（図Ⅱ. 2. 2-2）（図Ⅱ. 2. 2-3）

※ O. P. : 女川原子力発電所工事用基準面

東京湾平均海面 (T. P.) - 0. 7 4 m

2.2.3 地殻変動量

国土地理院によれば、女川原子力発電所が位置する牡鹿半島の電子基準点「牡鹿」で約 1. 2 m の地盤沈下し、水平方向の変動量（東南東）は約 5. 2 m と報告されている。また、東北電力の報告によると、GPS 測量による地形解析を実施した結果、地震地殻変動により敷地は一様に 1 m 程度沈下したが、その変動量は敷地内で上下・水平方向に一様であり、地盤の傾斜は生じなかったとしている。（図 II. 2. 2 - 4）

2.2.4 津波による被害の概要

津波の来襲による砂の堆積は、発電所港湾内における泊地でおおむね 0. 5 m ~ 0. 6 m 程度、海底の浸食は東防波堤堤頭部で最大 5. 5 m 程度であった。そのため、津波に伴う堆砂により取水口が閉塞することはなく、原子炉補機冷却系海水ポンプに必要な海水が継続的に取水可能であったとしている。

女川原子力発電所 2 号機については、海水ポンプ室に設置した循環水ポンプ自動停止用水位計の止水処理が不十分だったため、津波の影響により取水路側から海水が流入し、女川原子力発電所 2 号機原子炉建屋地下 3 階の原子炉補機冷却水系熱交換器室等（非管理区域）の一部が浸水した。この浸水の影響により、原子炉補機冷却水系（B）系及び高圧炉心スプレイ補機冷却水系が機能喪失し、非常用ディーゼル発電機（B）及び（H）が自動停止したものの、外部電源は喪失しておらず、非常用ディーゼル発電機（A）は健全、原子炉補機冷却水系（A）系も被害がなく、非常用炉心冷却系が 2 系統維持されていたため、原子炉の冷却機能は維持されていたとしている。

その他、主要な施設（O. P. 約 + 1 3. 8 m）が設置されている敷地より低い位置に設置されている小屋等については、津波の浸水等による損傷を受けており、女川原子力発電所 1 号の重油タンクは、O. P. 約 + 2. 5 m に設置されていたため、底面からの 5 m 以上の津波水位による浮力により浮き上がり、倒壊している。

2.3 東海第二発電所

2.3.1 地震観測結果

原子炉建屋の基礎版上の観測記録のうち、最大加速度は、水平方向 225ガル、鉛直方向は189ガルであり、設計時の最大応答加速度や耐震安全性評価で策定した基準地震動 S_s に対する最大応答加速度値を下回っていた。

2.3.2 津波の観測及び調査結果

日本原子力発電は、東海第二発電所において、港内静穏域に潮位計を設置して連続測定を実施していたものの、今回の地震に伴う津波による最高水位及び最低水位が、潮位計の観測可能範囲である H. P. ^{※1、※2} + 3.89 m (標高 + 3.00 m) から H. P. - 1.11 m (標高 - 2.00 m) を超えていたことから、測定値を取得できず、また、3月11日16:40頃以降については、電源喪失のためデータが取得できなくなったとしている。東海第二発電所においては、東海港への船舶入出港管理用に東海港沖合（東側）約150mの位置に波高計を設置しており、今回の地震後、波高計の復旧作業を行う中で、地震発生当日の21時頃までのデータが保存されており、3月11日16:50頃に最大水位約 H. P. + 5.5 m (標高 + 4.6 m) が確認されている。東海第二発電所の主要建屋の設置レベルは、H. P. + 8.89であり、主要建屋には津波の遡上は確認されなかった。津波の痕跡高について、日本原子力発電は、痕跡高調査により、H. P. + 5.9 m (標高 + 5.0 m) ~ H. P. + 6.3 m (標高 + 5.4 m) であり、遡上高は、H. P. + 6.3 m (標高 + 5.4 m) 程度であったと推定している。また、東海港沖合約150mに設置した波高計では最大水位約 H. P. + 5.5 m が確認されている。この津波の遡上により、地上部に埋設されているケーブルピットの蓋の水密化工事が途中であった部分から海水が浸水し、また、蓋の浮き上がりを防止する基礎ボルト設置のため、ケーブルピット周辺を掘削していたことから、地盤が浸水し易い状況になっていたため、海水が従来から設置してある仕切り壁を乗り越え、当該非常用ポンプエリアを浸水した。(図Ⅱ. 2. 3-1、図Ⅱ. 2. 3-2)

※1 H. P. : 日立港工事用基準面

東京湾平均海面 (T. P.) + 0.89 m

※2 地殻変動による地盤の沈降は考慮していない。

2.3.3 地殻変動量

今回の地震による地殻変動は、国土地理院によると、陸域においては最大で水平方向に約5.3m、上下方向に約1.2mの変位量が観測されたとしている。また、日本原子力発電の報告によると、GPS測量及び航空レーザー測量による地形解析を実施した結果、敷地全体が東側に約1.2m、下側に約0.2m程度の変動が確認されたとしている。(図Ⅱ.2.3-3)

2.3.4 津波による被害の概要

今回の地震に伴う津波により、海水ポンプ室のうち北側非常用海水ポンプ室に海水が浸水し、3台ある非常用ディーゼル発電機用海水ポンプのうち1台が自動停止した。海水ポンプ室については、津波対策として側壁の嵩上げ工事(H.P.+5.80m(標高+4.91m)までであった側壁の外側にH.P.+7.00m(標高+6.11m)までの側壁を新たに設置)や、壁の貫通部の封止工事を実施してきており、側壁の嵩上げ工事は完了していたが、地震が発生した時点では壁の貫通部の封止工事については北側が実施中の状態であった。今回発生した津波については、遡上高がH.P.+6.3m(標高+5.4m)程度であり、H.P.+7.00m(標高+6.11m)の側壁は越えていないことから、北側ポンプ室に海水が浸水した原因は、封止工事が実施中であった貫通部を海水が通ったことによるものと考えられる。なお、主要建屋の設置レベルH.P.+8.89m(標高+8.00m)には津波は到達していない。3台設置してある非常用ディーゼル発電機用海水ポンプのうち、津波対策工事が終了していた2台については、津波による影響は無かったが、壁の貫通部から浸入した津波によって冠水してしまった1台は自動停止した。しかしながら、2機の非常用ディーゼル発電機用海水ポンプが正常に稼働したことにより、原子力発電所は冷温停止に至った。

Ⅲ. 今回の地震・津波の文献等における新たな知見

1. 当院による新たな科学的・技術的知見等の収集

平成23年9月2日に、JNES及び原子力事業者から、これまでの平成23年東北地方太平洋沖地震に関する耐震安全性評価に係る新たな科学的・技術的知見等の収集結果が報告された。両者の報告内容を当院として精査した結果、新たな知見として以下のものが該当すると考える。

(1) 海溝型地震における地震セグメントの連動等

海溝型地震として、従来の想定以上の断層すべり量であったことや、広範囲にわたるアスペリティ及び地震セグメントの連動等により、大きな地震動や津波が生じた。

(2) プレート間地震による津波と海溝軸付近の津波の重畳効果

プレート間地震による長周期の津波と、海溝軸沿いで発生した短周期かつ大震幅の津波との重畳によって津波波高が高くなった。

(3) 大規模な地殻変動で誘発される地震活動

非常に大きな地殻変動により、広域にわたって応力場に影響が及び、正断層型の地震も発生した。

2. 地震調査研究推進本部での議論

平成23年9月30日、地震調査研究推進本部は、「東北地方太平洋沖地震後の活断層の長期評価について」を公表し、3.11地震とそれ以降の地殻変動のデータを用いて、全国の主要断層帯への影響を各断層面にかかる力の変化の度合いに基づき評価し、その結果、福島県の双葉断層、神奈川県の上三浦半島断層群等の5断層については、地震後に断層面を押しつける力が小さくなり、断層面にかかる摩擦力が弱くなるという影響を大きく受け、地震前と比べると動きやすくなっている可能性がある」と判明したため、「地震発生確率が高くなっている可能性がある」としている。

また、平成23年11月25日、「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（第二版）について」を公表し、当該領域を対象とし、長期的な観点で地震発生の可能性、震源域の形態等について評価してとりまとめている。なお、その中で、この報告は、現時点での知見をとりまとめたものであり、今回の地震については、余震活動や余効活動が続いている上、調査研究も途上であり、今後この地震の調査観測等により知見が得られた後に「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価」を再度評価することとしている。

3. 中央防災会議の動き

今回の地震及び津波を調査分析し、今後の地震・津波対策を検討する「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門委員会」の設置が中央防災会議において決定され、平成23年5月28日第1回会合が開催され、議論が進められた。

9月28日に専門調査会としての報告がまとめられ、その中で、今後の想定地震・津波の考え方として、これを想定するためには、できるだけ過去に遡って地震・津波の発生等をより正確に調査し、古文書等の史料の分析、津

波堆積物調査、海岸地形等の調査などの科学的知見に基づく調査を進めることが必要であり、この調査・検討に当たっては、地震活動の長期評価を行っている地震調査研究推進本部地震調査委員会と引き続き十分に連携し実施する必要があるとしている。さらに、この場合、地震の予知が困難であることや長期評価に不確実性のあることも踏まえつつ、考え得る可能性を考慮し、被害が想定よりも大きくなる可能性についても十分に視野に入れて地震・津波を検討する必要があるとしている。

また、津波対策を構築するにあたってのこれからの想定津波高さの考え方が示され、基本的に二つのレベルの津波を想定する必要があるとしている。具体的には、「発生頻度は極めて低いものの、甚大な被害をもたらす最大クラス」「発生頻度は高く、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波」であり、前者は人命を守るためにソフト面を含めた総合的な津波対策の確立が必要とされ、後者は人命を守るとともに、生活、産業を守るために海岸保全施設等の整備を進めていく必要がある等としている。

なお、この専門委員会では、原子力発電所のような特別な重要な施設について、必ずしも念頭に置かれて議論されたものではないとしている。

IV. 地震動に関する評価

1. 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所における評価

1.1 今回の地震における地震動の観測記録

東京電力は、今回の地震の際、福島第一原子力発電所では、敷地地盤、各号機の原子炉建屋及びタービン建屋並びに地震観測室の計53箇所に、福島第二原子力発電所では同様に計43箇所に地震計を設置し観測が行われていたとしている。

今回の地震時に観測された各号機の原子炉建屋基礎版上における最大加速度と耐震安全性評価において策定した基準地震動 S_s の最大応答加速度を表IV. 1-1に示す。福島第一原子力発電所2号機、3号機及び5号機のEW方向で基準地震動 S_s の最大応答加速度を上回っていた。また、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所の原子炉建屋基礎版上における観測記録の応答スペクトルは、基準地震動 S_s の応答スペクトルをおおむね下回る結果が得られているが、一部の周期帯において、基準地震動 S_s を超過していたとしている。(図IV. 1-1、図IV. 1-2)

1.2 強震動シミュレーション解析結果と観測記録の比較

今回の地震については、これまでにGPS測量記録、津波観測記録、

強震観測記録、遠地地震観測記録を用いた種々の震源モデルが提案されている。東京電力は、これらのうち、原子力施設の耐震設計に重要な短周期成分を含む強震動を説明する震源モデルとして公開されている釜江・川辺（2011）（以下「釜江・川辺モデル」という。）及び入倉・倉橋（2011）（以下「入倉・倉橋モデル」という。）を用いた強震動シミュレーション解析結果から今回の地震の震源特性を把握していることを確認したとしている。（図IV. 1-3、表IV. 1-2、図IV. 1-4、表IV. 1-3）

両モデルのシミュレーション解析は、地震の観測記録が発電所で得られていることから敷地の地下構造による増幅特性が反映された要素地震波を用いた経験的グリーン関数法により行われ、解析の結果、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所については、敷地及び周辺観測点の応答スペクトルをおおむね再現したものであることを確認したとしている。（図IV. 1-5）

釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルが、今回の地震観測記録をおおむね説明できることから、これらの震源モデルの主要なパラメータと既往のスケーリング則を比較するとともに、基準地震動 S_s の策定に当たって考慮している検討用地震のパラメータも加え、地域性を含めた検討を行った。比較するパラメータは、地震調査研究推進本部（2009）による「震源断層を特定した地震の強震動予測手法」に示されている「強震動予測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（以下「短周期レベル」という）A」を対象としている。

釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルの各強震動生成域から推定される短周期レベルは既往のスケーリング則及び検討用地震の震源モデルから算定される短周期レベルと比較して、特異な値でないが平均的な値よりも大きなものであったことを確認したとしている。（図IV. 1-6～8）

1.3 解放基盤表面における地震動の推定と分析

1.3.1 解放基盤表面における地震動の推定

東京電力は、今回の地震と基準地震動 S_s を比較するため、解放基盤表面の深度（福島第一原子力発電所：O. P. -196m、福島第二原子力発電所：O. P. -168m）に最も近いO. P. -200mの地中観測記録（福島第一北地点、福島第一南地点及び福島第二地点）からはぎとり解析を実施している。解放基盤表面における地震動（以下「はぎとり波」という。）は、福島第一南地点のEW方向で最大

加速度は、675ガルと推定され、基準地震動 S_s による最大加速度である600ガルを上回ることを確認した。

また、はぎとり波による応答スペクトルは、一部の周期帯で基準地震動 S_s を上回っていることを確認したとしている。福島第二地点のNS方向で最大加速度は、427ガルと推定され、基準地震動 S_s による最大加速度である600ガルを超えていないことを確認した。

また、はぎとり波による応答スペクトルは、一部の周期帯で基準地震動 S_s を上回っていることを確認したとしている。(図IV. 1-9～11)

1.3.2 基準地震動 S_s とはぎとり波の比較

東京電力の提出した耐震安全性評価報告書(平成20年3月31日)によると、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所の基準地震動 S_s は、検討用地震の評価結果を包絡する応答スペクトルと加藤ほか(2004)に基づく「震源を特定せず策定する地震動」による応答スペクトルにより設定され、検討用地震の評価結果に余裕を見込んで策定している。このことから、はぎとり波は、基準地震動 S_s を大きく上回るものではないことを確認したとしている。(図IV. 1-12)

1.3.3 はぎとり波の「福島第一南地点」、「福島第一北地点」及び「福島第二地点」の比較

東京電力は、今回の地震で得られた原子炉建屋基礎版上での水平方向の最大加速度は福島第一原子力発電所で550ガル、福島第二原子力発電所で277ガルと大きく異なることから、その要因を検討するため3地点の地中観測記録のはぎとり波を比較したところ、最大加速度及び応答スペクトルの短周期成分において「福島第一南地点」は大きい、「福島第一北地点」と「福島第二地点」はおおむね同程度であることを確認したとしている(図IV. 1-13、図IV. 1-14)。

また、福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所で観測された過去の地震を比較するため敷地周辺において1976年から2010年3月までに発生したプレート間地震であって、マグニチュード5.5以上の40地震について、福島第二原子力発電所に対する福島第一原子力発電所の応答スペクトル比を比較したところ、今回の地震における両発電所の観測記録の差異は、おおむね過去の地震と同程度であることを確認したとしている。(図IV. 1-15)

福島第一北地点と南地点は、わずか1 km程度の離隔距離に位置しているが、応答スペクトルを比較すると長周期側のピークの出方が異なっていることが確認され、当院としては、敷地内の増幅特性の相違の有無や地震計の設置状況等について、今後、調査・検討が必要であると考えます。

1.3.4 プレート間の検討用地震動（仮想塩屋崎沖地震）とはぎとり波の比較

耐震安全性評価報告書において、1938年に塩屋崎沖で発生した3つのプレート間地震の波形記録を用いたインバージョン解析に基づき、プレート間の検討用地震の特性化震源モデルを設定している。また、地震動の不確かさとして、この3つの地震の連動をカスケードモデルで考慮し、マグニチュード7.9の仮想塩屋崎沖地震として評価している。（図IV.1-16）

仮想塩屋崎沖地震とはぎとり波の応答スペクトル比は、福島第一南地点では仮想塩屋崎沖地震に対して3倍程度大きく、福島第二地点では、仮想塩屋崎沖地震に対して2.5倍程度大きいことを確認したとしている。（図IV.1-17）

また、今回の地震の知見を踏まえ、1938年に塩屋崎沖で発生した3つのプレート間地震の連動を、基本震源モデルで考慮し、パラメータはスケーリング則を考慮して設定した震源モデルにより、塩屋崎沖地震の地震動について検討を行っている。不確かさとして福島沖の地域性を考慮し、短周期レベルを基本震源モデルの1.4倍で設定した場合の地震動評価は、短周期側でおおむね同程度になることを確認したとしている。（図IV.1-18、図IV.1-19、図IV.1-20）

1.4 福島第一原子力発電所及び第二原子力発電所における評価のまとめ

東京電力は、プレート間の検討用地震の設定においては、震源モデルの各パラメータを、1938年塩屋崎沖地震群の震源インバージョン結果に基づき設定するとともに、不確かさとして個々の地震の連動を、カスケードモデルで考慮していた。これまでプレート間地震は、同じレベルの地震が繰り返し起きると考え、不確かさについて、内陸地殻内地震のような考慮はされていなかったが、当院としては、今後は、プレート間地震の不確かさについても定量化した評価が必要であると考えます。

今回の地震動をおおむね説明できる釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルは、実際に取得された観測記録に基づき複数のアスペリティの配

置や短周期レベルを設定できたが、検討用地震の震源モデルと比較すると強震動生成域の大きさや位置及びモーメントマグニチュード等是对応しておらず、当院としては、既往の地震動評価手法では、検討用地震の震源モデルの設定の仕方に限界があった。このため、地震動計算方法自体は適切であることが確認できたものの、既往の地震動評価の考え方では、今回の揺れを想定することは困難な部分もあったと考える。

2. 女川原子力発電所における評価

2.1 地震における地震動の観測記録（3月11日及び4月7日）

東北電力の報告によると3.11地震及び4.7地震時に、女川原子力発電所では、敷地地盤、各号機の原子炉建屋及びタービン建屋、制御建屋等に計76箇所に地震計を設置し観測を行っている。

2.1.1 3.11地震の観測記録

3.11地震時に観測された各号機の原子炉建屋各階における最大加速度と耐震安全性評価において策定した基準地震動 S_s に対する最大応答加速度を比較したものを表IV.2-1に示す。3.11地震において、女川原子力発電所1号機では、屋上のUD方向、燃料取替床（5階）のNS方向、UD方向、基礎版上のNS方向、EW方向が、女川原子力発電所2号機では、屋上のUD方向、燃料取替床（3階）のNS方向、基礎版上のNS方向が、女川原子力発電所3号機では、基礎版上のNS方向が基準地震動 S_s に対する最大応答加速度を上回る観測記録が得られている。

敷地地盤の解放基盤相当位置の観測点（O.P.-8.6m）（図IV.2-1）の観測記録は、一部の周期帯（周期0.5秒付近）（図IV.2-2）において基準地震動 S_s を上回っているが、その他の周期帯ではおおむね基準地震動 S_s と同程度以下となっていることを確認した。

原子炉建屋の観測記録の応答スペクトル（図IV.2-4～図IV.2-7、図IV.2-11～図IV.2-14、図IV.2-18～図IV.2-21）は、基準地震動 S_s による地震応答解析結果を周期帯によって上回る箇所があるものの、おおむね基準地震動 S_s と同等以下となっていることを確認したとしている。

2.1.2 4.7地震の観測記録

4.7地震時に観測された各号機の原子炉建屋各階における最大加速度と耐震安全性評価において策定した基準地震動 S_s に対する最大

応答加速度を比較したものを表Ⅳ. 2-2に示す。4.7地震において、女川原子力発電所2号機では屋上のUD方向、燃料取替床（3階）のUD方向が、女川原子力発電所3号機では燃料取替床（3階）のUD方向が基準地震動 S_s に対する最大応答加速度を上回る観測記録が得られている。

敷地地盤の解放基盤相当位置の観測点（O. P. - 8. 6 m）（図Ⅳ. 2-1）の観測記録は、一部の周期帯（周期0. 04~0. 05秒付近）（図Ⅳ. 2-3）において基準地震動 S_s を上回っているが、その他の周期帯ではおおむね基準地震動 S_s と同程度以下となっていることを確認したとしている。

原子炉建屋の観測記録の応答スペクトル（図Ⅳ. 2-8~図Ⅳ. 2-10、図Ⅳ. 2-15~図Ⅳ. 2-17、図Ⅳ. 2-22~図Ⅳ. 2-24）は、基準地震動 S_s による地震応答解析結果を周期帯によって上回る箇所があるものの、おおむね基準地震動 S_s と同等以下となっていることを確認したとしている。

2.2 強震動シミュレーション解析結果と観測記録の比較

2.2.1 3. 11地震のシミュレーション解析

3. 11地震については、これまでにGPS記録、津波観測記録、強震観測規則、遠地地震観測記録を用いた種々の震源モデルが提案されている。東北電力は、これらのモデルのうち、原子力施設の耐震設計に重要な短周期成分を含む強震動を説明する震源モデルとして公開されている釜江・川辺モデル（図Ⅳ. 2-25）及び入倉・倉橋モデル（図Ⅳ. 2-26）を用いた強震動シミュレーション解析結果と観測記録との比較により再現性を検討している。

○釜江・川辺モデルを用いたシミュレーション解析結果

釜江らは、太平洋沿岸部における防災科学技術研究所の観測記録を用いて、強震動生成域のモデル化を行った結果、宮城県沖、岩手県南部沖、福島県沖、茨城県沖等の5箇所が強震動生成域を配置し、岩手県沿岸から茨城県沿岸にかけての観測点における特徴的な観測波形がほぼ再現できたことを確認したとしている。（図Ⅳ. 2-27~図Ⅳ. 2-29）

○入倉・倉橋モデルを用いたシミュレーション解析結果

入倉らは、防災科学技術研究所の観測記録を用いて、強震動生成域

のモデル化を行った結果、三陸沖南部、三陸沖中部、宮城県沖、福島県沖、茨城県沖に強震動生成域を配置し、合成された波形は、観測波形と良く一致していることを確認としたしている。(図IV. 2-30～図IV. 2-31)

各発電所におけるシミュレーション解析は、グリーン関数として用いた地震の観測記録が各発電所で得られていることから、経験的グリーン関数法により行われているが、女川原子力発電所については、宮城県沖に設定されている強震動生成域の影響が大きいことから、近傍の2つの強震動生成域のみ考慮したモデルにより解析を行っている。

釜江・川辺モデル及び入倉・倉橋モデルを用いた解析の結果、福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所及び東海第二発電所については、発電所及び周辺観測点の応答スペクトルをおおむね再現したものであることが確認されたが(図IV. 2-31)、女川原子力発電所については、発電所及び周辺観測点の応答スペクトルは、観測記録よりもやや過小となっている。特にNS方向の周期0.5秒付近が過小となっていることから、更に検討を進めることとしていた。

○浅野・岩田モデルを用いたシミュレーション解析結果

過小評価となっているNS方向の周期0.5秒付近の卓越した成分については、平成17年8月16日に発生した宮城県沖の地震(M7.2)(以下「H17宮城県沖地震」という。)でも同様の傾向が見られる(図IV. 2-32)ことから、検討にあたり要素地震は、H17宮城県沖地震を採用することとし、断層モデルについては、H17宮城県沖地震の断層モデル(Suzuki and Iwata(2007))で示されている強震動生成域が位置的に整合している浅野・岩田モデル(2011)を採用する(図IV. 2-33)こととして検討を進め、解析条件を以下のとおり設定し、解析を行っている。

- ・浅野・岩田モデルのうち宮城県沖の強震動生成域1、2を用いる。
- ・平成17年宮城県沖地震の観測記録のうち卓越する前半部を補正し用いることとし、補正は、西條・司ほか(2010)の手法による。
- ・要素地震の精度を考慮し、解析対象を0.4Hz以下とする。
- ・それぞれのO. P. - 8.6mにおける観測記録を比較する。

シミュレーション解析の結果、要素地震が前半部のみを用いていること等により、3.11地震における観測記録に比べ、継続時間が短くなっているが、最大加速度値はおおむね整合しており、応答スペクトルについても、シミュレーション解析結果の方が、観測記録と比較し、やや大きいものの全体的傾向を捉えている。NS方向の周期0.

5秒付近の傾向についても、他モデルと比較して再現性は良いことを確認したとしている。

当院としては、これら東北電力によるシミュレーション解析の妥当性については、要素地震としてH17年宮城沖地震を用いてシミュレーション解析を行うこと等、今後も確認すべき事項があることから、今後も検討が必要と考える。

2.2.2 4. 7地震のシミュレーション解析

4. 7地震についてもGPS記録、津波観測記録、強震観測規則、遠地地震観測記録を用いた種々の震源モデルが提案されている。東北電力は、4. 7地震についても基準地震動 S_s を超える観測記録が得られていることから、これらのモデルのうち、原子力施設の耐震設計に重要な短周期成分を含む強震動を説明する震源モデルとして、原田・釜江（2011）（以下「原田・釜江モデル」という。）が初期モデルとして提案されており、この原田・釜江モデルを用いた強震動シミュレーション解析結果と観測記録との比較により再現性を検討している。

防災科学技術研究所の観測記録を用いて、強震動生成域のモデル化を行った結果、4. 7地震の震源の北側と南側2箇所が強震動生成域を配置し、バイラテラルな破壊過程を考えることにより、震源の北側の観測点で見られる指向性パルスや継続時間が再現できていることを確認したとしている。（図IV. 2-34）

当院としては、シミュレーション解析の結果、女川原子力発電所及び周辺観測点の応答スペクトルをおおむね再現したものであることを確認した。また、原田・釜江モデルの強震動生成域から推定される短周期レベルは既往のスケーリング則及び検討用地震の震源モデルから算定される短周期レベルと比較して、特異な値でないが平均的な値よりも大きなものであったことを確認したとしている。（図IV. 2-35～図IV. 2-37）

今後、短周期成分（0.1秒より短周期側）を含め応答スペクトルとの適合性の向上を図る等の更なる高度化検討が必要と考える。

2.3 解放基盤表面における地震動の推定と分析

2.3.1 解放基盤表面における地震動の推定（3月11日及び4月7日）

2.3.1.1 3. 11地震時の地震動の推定

東北電力は、既往検討による大振幅時の地盤モデル（平成15

年5月26日宮城県沖の地震や平成17年8月16日宮城県沖の地震のはぎとり解析に策定した地盤モデル)の有効性を確認するため、3.11地震の観測記録(図IV.2-38~図IV.2-40)による伝達関数(水平、鉛直)と、既往検討による地盤モデル(図IV.2-41)による伝達関数を比較し、変化があるかどうかについて確認している。その結果、水平動については、既往地盤モデルの伝達関数よりも低周波側にシフトしており、表層部分での非線形化が見られることから、地層の層厚、減衰、表層のS波速度を最適化の対象として、非線形化を許容するような最適化解析を実施し、表層地盤のS波速度及び減衰定数を最適化した地盤モデルを用いて、解放基盤表面における地震動(以下「はぎとり波」という。)を推定している。鉛直動については、既往検討の地盤モデルによる伝達関数と3.11地震の観測記録による伝達関数の比較においても系統的に大きなずれがなく、おおむね対応していることから、既往検討の地盤モデルを用いて、はぎとり波を推定している。(図IV.2-42~図IV.2-44)

この地盤モデルを用いて、解放基盤表面(O.P.-14.1m)に最も近いO.P.-8.6mの地震観測記録からはぎとり波を推定した結果、3.11地震時の最大加速度は、EW方向で636ガルと推定され、基準地震動S_sによる最大加速度である580ガルを上回ることを確認したとしている。

また、はぎとり波による応答スペクトルは、基準地震動S_sによる応答スペクトルと比較し、一部の周期帯で上回っている(図IV.2-47~図IV.2-48)ことから、東北電力はその要因について検討を行っている。

2.3.1.2 4.7地震時の地震動の推定

3.11地震時ははぎとり波推定と同様に、東北電力は、4.7地震の推定に当たっても、地盤モデルの有効性を確認するため、4.7地震時に観測記録による伝達関数(水平、鉛直)と3.11地震時ははぎとり波を推定する際に用いた最適化した地盤モデルによる伝達関数を比較し、変化があるかどうか確認している。その結果、水平動、鉛直動いずれも系統的に大きなずれがなく、おおむね対応していることから、3.11地震を踏まえて最適化した地盤モデルを用いてはぎとり波を推定している。(図IV.2-45~図IV.2-46)

この地盤モデルを用いて解放基盤表面の深度（O. P. - 14.1 m）に最も近いO. P. - 8.6 mの観測記録からはぎとり波を推定した結果、4.7地震時の最大加速度は、EW方向で554ガルと推定され、基準地震動S_sによる最大加速度である580ガルを超えていないことを確認したとしている。

しかしながら、はぎとり波による応答スペクトルは、一部の周期帯で基準地震動S_sを上回っている（図IV.2-49～図IV.2-50）ことから、東北電力は、その要因について検討を行っている。

2.3.2 基準地震動S_sとはぎとり波の比較

2.3.2.1 3.11地震が基準地震動S_sを超過した要因

女川原子力発電所における検討用地震のうち、3.11地震と同じ海洋プレート間地震として考慮している地震は、連動型想定宮城県沖地震（M_w8.2）（統計的グリーン関数法）を設定している。この連動型想定宮城県沖地震の地震動と、3.11地震のはぎとり波を比較した結果、おおむね整合しているが、NS方向の周期0.5秒付近については、連動型想定宮城県沖地震の地震動が小さい傾向にあることを認めたとしている。

東北電力は、連動型宮城県沖地震と3.11地震時の断層モデル（浅野・岩田モデル）の比較を行った結果、アスペリティの位置や大きさに違いはあるものの、おおむね同じような位置に設定されており、短周期レベルもほぼ同じであるとしている。また、H17宮城県沖地震を要素地震とした強震動シミュレーションでは、NS方向の周期0.5秒付近の再現できることから、大地震時のサイトと震源の相対的な関係から卓越しているものと推察している。

当院としては、東北電力による考察の妥当性について引き続き確認する必要があると考えている。

2.3.2.2 4.7地震が基準地震動S_sを超過した要因

東北電力は、4.7地震が基準地震動S_sを超過した要因について検討している。女川原子力発電所における検討用地震のうち、4.7地震と同じ海洋プレート内地震として考慮している地震は、平成15年5月26日宮城県沖の地震（M7.1）が東北地方で発生した海洋プレート内地震として最大規模であったことから、

この地震動シミュレーションモデルを女川原子力発電所の敷地下方に想定したものを設定している。(図IV. 2-5 1)

東北電力は、この検討用地震(海洋プレート内地震)と4. 7地震は、地震の諸元(規模、震源距離等)はほぼ同等であるものの、地震動は有意に4. 7地震が大きかったことを確認したとしている(図IV. 2-5 2)。

また、検討用地震のベースとなった平成15年5月26日宮城県沖の地震と、4. 7地震それぞれで、各地で得られた観測記録の大きさを耐専スペクトルとの残差で評価した場合、4. 7地震が約2倍大きいことを確認したとしている(図IV. 2-5 3)。

平成15年5月26日宮城県沖の地震と、4. 7地震の短周期レベルの違いは、地震規模の違いを差し引いて算定した場合、4. 7地震が約1. 2倍程度の差であることを確認したとしている(図IV. 2-5 4)。

平成15年5月26日宮城県沖の地震の断層モデルでは、破壊開始点が太平洋プレートの地殻とマンツルの境界付近から始まり、破壊が主に下方のマンツルに広がっていったと考えられているのに対し、4. 7地震の断層モデルでは、断層の傾斜方向が陸側に向かってくる方向となっていること、また、破壊開始が太平洋プレートのマンツル内で始まり、上部と下部のマンツルに広がっていたと考えられるとしている(図IV. 2-5 5)。

これらの分析結果を踏まえ、東北電力は、4. 7地震が検討用地震(海洋プレート内地震)を超えた要因として、断層の走向や破壊方向などの破壊メカニズムの違いが主要因と推定している。当院としては、4. 7地震が地震規模に比べて比較的大きな揺れをもたらした要因について、今後も引き続き知見の収集に努めることが必要であると考えます。

2.4 女川原子力発電所における評価のまとめ

当院としては、今後、3. 11地震のシミュレーション解析や、3. 11地震が基準地震動 S_s を超過した要因分析については、更にその考え方等について更に確認が必要であると考えます。また、4. 7地震の関連では、検討用地震に選定する海洋プレート内地震については、4. 7地震を超える規模の地震が発生する可能性も否定できないため、M7. 5クラスを考慮すること、あるいは既往最大の海洋プレート内地震である釧路沖の地震(M7. 9)を考慮すること等、海洋プレート内地震に

ついでの不確かさについて整理していく必要があると考える。

さらに、東北電力による要因分析では、4.7地震は、断層の傾斜方向が陸側に向かっており、かつ、破壊方向が女川原子力発電所の方向に向いていることから、地震波の振幅が大きくなる、いわゆるディレクティブティ効果があったとしている。このことから、当院としては、ディレクティブティ効果を考慮した不確かさ、例えば、敷地から海洋プレート境界に垂線を降ろした場所に断層面を設定する等の検討が必要であると考える。

3. 東海第二発電所における評価

3.1 今回の地震における地震動の観測記録

日本原子力発電は、今回の地震時に、東海第二発電所では、敷地内の地盤系4箇所、原子炉建屋内8箇所、タービン建屋内1箇所、使用済燃料乾式貯蔵建屋内2箇所、復水貯蔵タンク基礎1箇所の計16箇所に地震計を設置し、観測が行われたとしている(図IV.3-1、図IV.3-2、表IV.3-1)。

今回の地震時に観測された地盤系の最大加速度を表IV.3-2に、原子炉建屋内で観測された最大応答加速度、当初の工事計画に基づいて原子炉建屋の弾性設計用に設定された地震動(以下「当初の弾性設計用地震動」という。)による最大応答加速度及び耐震安全性評価で策定された基準地震動 S_s による最大応答加速度を比較して表IV.3-3に示す。原子炉建屋で観測された最大応答加速度は、いずれの階においても、当初の弾性設計用地震動による最大応答加速度及び耐震安全性評価で策定された基準地震動 S_s による最大応答加速度値を下回っている。また、観測記録の応答スペクトルは、地下2階～6階において0.3秒より短周期側の一部で基準地震動 S_s による応答スペクトルを上回っている箇所が見られたが、当初の弾性設計用地震動による応答スペクトルをおおむね下回っているとしている。(図IV.3-3)

3.2 解放基盤表面における地震動の推定と分析

3.2.1 解放基盤表面における地震動の推定

日本原子力発電は、今回の地震により得られた地盤系の観測記録を用いて地盤構造モデルを同定し、解放基盤表面相当のはざとり波を推定し、基準地震動 S_s との比較を行っている。

地盤構造モデルの同定解析に当たっては、従来の中小地震により得られた最適地盤モデルの物性値を見直し、今回の地震による応答の再

現性の高い地盤モデルを作成して、はぎとり解析を実施している。

はぎとり解析によって求めた解放基盤表面相当位置(E. L. - 372 m)でのはぎとり波の加速度時刻歴波形を図IV. 3-4に示す。はぎとり波の最大応答加速度は、NS成分555ガル、EW成分450ガル、UD成分379ガルとなった。応答スペクトルは、一部の周期帯(0.05秒~0.2秒)で基準地震動 S_s-D の応答スペクトルを超えているものの、大きく上回るものでないことを確認したとしている。

3.2.2 基準地震動 S_s とはぎとり波の比較

日本原子力発電は、東海第二発電所の基準地震動 S_s として、応答スペクトルに基づく手法による S_s-D と、断層モデルを用いた手法により、プレート間地震である1896年鹿島灘の地震をもとに余裕を見込んで策定した S_s-1_H ①、 S_s-1_H ②(水平成分)、 S_s-1_V (鉛直成分)を設定している。断層モデルを用いた手法による基準地震動 S_s-1 の応答スペクトルは、 S_s-D の応答スペクトルを一部の周期帯(0.1秒~0.3秒)で上回るものとして設定している。

今回の地震観測記録からはぎとり解析によって求めた解放基盤表面相当位置(E. L. - 370 m)でのはぎとり波を推定した結果、NS方向で555ガルと推定され、はぎとり波の応答スペクトルは、一部の周期帯(0.05秒~0.2秒)で基準地震動 S_s-D の応答スペクトルを超えているものの、大きく上回るものでないことを確認したとしている。また、はぎとり波の応答スペクトルを断層モデルによる S_s-1 による応答スペクトルと比較しても、 S_s-D を超える周期帯の違いはあるが、ほぼ S_s-1 と同程度のレベルであったことを確認したとしている(図IV. 3-5)。

3.2.3 検討用地震(プレート間地震)とはぎとり波の比較

耐震安全性評価で策定された基準地震動 S_s-1 の設定に当たって検討用地震としたプレート間地震である1896年鹿島灘の地震と今回の地震によるはぎとり波と比較した。今回の地震の強震動生成域としてモデル化されている釜江・川辺モデル、入倉・倉橋モデルの南側の強震動生成域は、基準地震動 S_s-1 を求めるときに設定した断層モデルの不確かさを考慮したモデルとアスペリティ位置、短周期レベル等とほぼ整合しており、また、得られた地震動についても、189

6年鹿島灘の地震に不確かさを考慮したモデルの応答スペクトルの短周期成分についてはおおむね同程度であることを確認したとしている(図IV.3-6)。

3.3 東海第二発電所における評価のまとめ

当該サイトにおける基準地震動 S_s 策定における応答スペクトルによる手法では、地域性を生かすという観点から、詳細に地域的な断層パラメータの評価が行われており、その結果、1896年鹿島灘の地震の基本モデルのアスペリティの応力降下量が非常に低く設定されていたことが明らかとなった。専門家からも、10数年の地震観測記録だけから地域性を特定していることが、その要因のひとつとしての可能性を指摘されている。

当院としては、その地域性を考慮することによって平均的なレベルよりも大きくなる場合は、その知見を採用することとし、また、平均的なレベルを明らかに下回る場合には、その地域的な知見をどう取り扱うべきか、その基本的な考え方を検討する必要があると考える。

4. 湯ノ岳断層の評価

4.1 経緯

従来、地震活動のほとんど観測されていなかった場所においても今回の地震により誘発されたと考えられる地震活動が活発になり、4月11日に井戸沢断層及び湯ノ岳断層の周辺で地震(M7.0)が発生した。このうち井戸沢断層は活断層として評価されていた。一方で、湯ノ岳断層は、耐震設計上考慮すべき活断層として評価されていなかったが、地震に伴って断層沿いに地表地震断層が出現していることが確認された。

湯ノ岳断層に関する既往評価においては、敷地からの距離(福島第一原子力発電所から南西約50km、福島第二原子力発電所から南西約40km)、断層の長さの観点から敷地への影響が小さいため、「発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査の手引き(平成22年12月20日原子力安全委員会了承。以下「審査の手引き」という。)」に基づき、ボーリング調査等の詳細な地質調査は実施せず、①リニアメント延長部を横断する地形面の状況、②断層破碎部の性状に基づいて活動性の評価を行い、後期更新世以降の活動がないと判断していた(図IV.4-1)。

4.2 現地調査

敷地から30km以内の範囲にこのような断層があった場合、詳細な調

査を行うことにより、事前に活動性の有無が把握できるかどうかという観点から専門家とともに現地調査を行った。

断層が出現した4月11以降に実施した地質調査結果より、①複数地点においてM1面段丘堆積物基底面に累積変位があり、後期更新世以降の活動が認められること、②断層露頭の新鮮な断層面及び破砕部、ボーリングで採取した断層面のいずれにおいても軟質粘土が認められることから、当院としては、湯ノ岳断層については、事前に詳細な調査を行えば、耐震設計上考慮すべき活断層と判断したものとする。

(図IV.4-2、図IV.4-3、図IV.4-4、図IV.4-5)

4.3 湯ノ岳断層の評価のまとめ

今回の湯ノ岳断層の調査結果を踏まえ、今後、活断層に関する詳細調査については、以下のような点に注意すべきとする。

①審査の手引きには、変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査の3つの調査が記載されており、それぞれが信頼性のあるデータなので、例えば変動地形学的調査の結果を他の調査で否定できない場合には、活動性を否定できないこと等を念頭に調査を進めることが重要。

②審査の手引きでは、後期更新世の地形面や地層が無い場合は、さらに古い年代の地形面や地層の変形等総合的に検討すると書かれており、これを適切に実施することが必要。

また、湯ノ岳断層の評価に際して、活動性の判断のひとつとして例えば断層内物質の固結状況等があったが、これらについては更なる分析・評価を行い、今後、詳細調査の項目や内容を精査・再検討を行う必要があるとする。

5. 地震動に関する評価のまとめ

(1) 平成23年3月11日に発生した今回の地震については、余震等も含めて国内外で様々な調査・研究が行われている。現段階において、地震動に関する新たな知見として、海溝型地震について、想定以上の地震セグメントの連動等により、継続時間の長い大規模なすべり量となり、大きな地震動や津波が生じたことが挙げられる。強震動生成域の大きさや位置の設定などに問題があり、既往の地震動評価手法で今回の地震の揺れを事前に想定することは難しい部分があったと考えられる。今後、プレート間地震及びプレート内地震に係る基準地震動の設定方法や不確かさの考慮に関する考え方について、各方面の研究動

向を注視しつつ、検討を行うこととする。

なお、当院は、平成23年11月11日に海溝型地震による地震動が支配的なサイト（東北電力東通原子力発電所、中部電力株式会社浜岡原子力発電所）に対し、今回の地震の知見を踏まえた適切な地震動評価を行うよう指示した（今回の地震の影響を受けた福島第一及び福島第二原子力発電所、女川原子力発電所並びに東海第二発電所については、「本調査・検討」の中で評価を行っている。）。

- (2) (1) の検討に際しては、従来の基本ケースでどこまで検討が行われ、何が今回問題であったかを明確にし、その上でどのような不確かさの考慮が有効であったのか等を明らかにして分析を進めることが重要と考える。さらに、検討に際しては、「不確かさ」と「地域性」を区別した上で「不確かさ」の考え方を整理すべきである。
- (3) 今回の地震に伴う湯ノ岳断層の活動のように、非常に大きな地殻変動により、広域にわたって応力場に影響が及び、これまで活動性が低い断層の活動が誘発されたこと^{※1}並びに地震調査研究推進本部でも所謂5kmルールによらず、地形及び地質構造の形成過程（以下「テクトニクス」という。）の観点から連動を考慮していく方向性を示していること等を踏まえると、内陸地殻内地震については、これまで離隔距離が約5kmを超える断層等その連動性を否定していたものに関し、テクトニクス、応力の状況等を考慮して、連動の可能性について検討すべきである。

なお、本件については、平成24年1月27日に、当院は各事業者に対し、検討結果を報告するよう指示した。

- (4) 湯ノ岳断層の評価については、現地調査等による検討を踏まえ、断層の活動性に関する詳細調査に関するいくつかの知見（注意点^{※2}）が抽出されたが、今後、更なる分析・評価を行い、活断層の認定の仕方及び詳細調査の項目や内容を精査・再検討を行う必要がある。

※1 平成22年11月25日に地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会は、「活断層の長期評価手法（暫定版）」を同部会の報告書として公表した。同書中には、断層同士が5km以上離れていても、地質構造等の評価し、連続性を検討することが記載されている。

なお、地震調査研究推進本部では、当該暫定版を用いて、まず九州地域の地域評価を行っている。

※2 変動地形学的調査、地表地質調査及び地球物理学的調査は、それぞれが信

頼性のあるデータなので、例えば変動地形学的調査の結果を他の調査で否定できない場合には、活動性を否定できないこと等を念頭に置いて調査を進めることが重要である。また、後期更新世の地形面や地層が無い場合は、更に古い年代の地形面や地層の変形等総合的に検討することが必要である。

V. 津波に関する評価

1. 福島第一及び第二原子力発電所並びに東海第二発電所における評価

1.1 浸水経路及び浸水による影響・分析

1.1.1 津波波源モデルの推定と再現計算

東京電力は、北海道から千葉県にかけて広域の観測記録等が平均的に一致する広域再現モデルと発電所周辺の観測記録等がよく一致する発電所再現モデルに分けて検討している。(図V.1-1)

当院は、広域再現モデルの再現性は、以下に示す①痕跡高、②検潮記録及び③地殻変動量並びに④浸水域のとおり良好であることを確認した。

①痕跡高については、全痕跡高データ2,820点に対して再現性の評価指標が $K=1.04$ 、 $\kappa=1.40$ であり、土木学会による再現性の目安 $0.95 < K < 1.05$ 、 $\kappa < 1.45$ を満たしていること。

②検潮記録については、気象庁、国土交通省港湾局及び事業者の検潮記録等と広域再現モデルを比較した結果、全体として再現性は良好であること。

③地殻変動量については、国土地理院等による水平変位分布及び鉛直変位分布との比較を行った結果、広域でおおむね再現できていること。

④浸水域については、青森県から千葉県にかけての国土地理院及び事業者による浸水域の評価結果と広域再現モデルの浸水域を比較した結果、各地点の浸水域を網羅的に再現していること。

広域再現モデルによる発電所敷地内の再現性については、福島第一原子力発電所敷地内の痕跡19点に対して $K=1.15$ 、 $\kappa=1.11$ 、福島第二原子力発電所敷地内の痕跡71点に対して $K=0.98$ 、 $\kappa=1.19$ であり、福島第二原子力発電所についての再現性は良好であるが、福島第一原子力発電所は解析値が痕跡高よりやや小さいことを確認したとしている。

また、東海第二発電所においては、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所と同じ広域再現モデルを用いて検討しており、東海

第二発電所敷地内の痕跡19点に対して $K = 1.26$ 、 $\kappa = 1.09$ であり、福島第一原子力発電所と同様、解析値が痕跡高よりやや小さいことを確認したとしている。

このため、発電所再現モデルとして、広域再現モデルのすべり量を福島第一原子力発電所では1.23倍、東海第二発電所では1.3倍して検討を行っており、発電所再現モデルの再現性は、福島第一原子力発電所敷地内では $K = 1.00$ 、 $\kappa = 1.09$ 、東海第二発電所敷地内では $K = 1.08$ 、 $\kappa = 1.08$ となっており再現性は良好であることを確認したとしている。

発電所再現モデルは、発電所における建屋への浸水状況の分析を行うため、発電所の痕跡高の再現性が良いモデルを求めることを目標としたものであり、広域データの再現性は、広域再現モデルより低下しているが、発電所の痕跡高は良好に再現しており、当院としては、その目的は達成していると考ええる。

(図V.1-2、図V.1-3、図V.1-4、図V.1-5)

1.1.2 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所の津波の差異に係る分析

福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所の距離は約10kmであるが、津波シミュレーション解析による津波の高さは、福島第一原子力発電所で約13.1m、福島第二原子力発電所で約9.1mであるとしており、津波波高の差異に係る分析を行っている。

海底地形の影響については、敷地前面海域における等高線の間隔は比較的一定であることから、海底地形の違いにより両発電所間で津波高さが大きく変化することはないとしている。(図V.1-6)

浅海域における増幅特性の影響については、水深150m地点の沖合から沿岸にかけて津波の高さは2倍に増幅するが、両発電所の増幅率にほとんど差がないことから、沖合(水深150m地点)において両発電所の津波の差異が形成されていたものとしている。(図V.1-7)

波源から来る津波特性の影響を評価するため、広域再現モデルの解析結果において、両発電所沖合(水深150m地点)の津波高さのピークに寄与が大きい6つのブロックを抽出し、各ブロックから発生する津波波形では、波形そのものの相違の他に、ピークの重なり度合いの違いが認められるとしている。(図V.1-8、図V.1-9)

両発電所の津波の差異は、沖合から沿岸にかけての増幅の度合いに相違が認められなかったことから、宮城県沖及び福島県沖に想定されるすべり量の大きい領域から発生した津波のピークの重なり度合いの強弱が主な原因と考えられるとしている。

また、抽出したこのブロックをプレートの浅いところが波源となる三陸津波タイプとプレートの深いところが波源となる貞観タイプに分けて比較すると、以下のような傾向にあることを確認したとしている。

- ▶ 両発電所に対する伝播状況について、三陸津波タイプでは顕著な違いがないのに対し、貞観地震タイプでは福島第一原子力発電所に先行して到達すること。
- ▶ 三陸津波タイプの方が貞観地震タイプより水位変動量が大きいこと。
- ▶ 福島第一原子力発電所の方が、両タイプの波のピークの重なり度合いが強いこと。
- ▶ 両タイプの波のピーク時刻の重なりには、まだ時間差があることから、仮にピークが一致すれば、更に水位変動量が大きくなる可能性のあること。

1.2 浸水経路及び浸水による影響・分析

福島第一原子力発電所では、O. P. + 10 m (1～4号機) 及びO. P. + 13 m (5、6号機) の敷地にある主要建屋の周辺では、ほぼ全域が津波の遡上を受け浸水した。

福島第二原子力発電所では、O. P. + 4 mの敷地東側(海側)やO. P. + 12 mの敷地南側の主要建屋の周辺で浸水した。両発電所とも、浸水によって、主要建屋の地上の開口(建屋の出入口や機器搬入口(ハッチ)、給排気口(ルーバ))や、敷地の地下に埋設されたトレンチやダクトに接続する開口(ケーブルや配管の貫通口)の一部が建屋内への浸水経路になったと考えられるとしている。

1.3 津波波力の検討

津波波力の推定には、既存の波圧分布式 Asakura et. al. (2002) を適用し、水平波圧指標(遡上水深に相当する静水圧に対する倍率) α を波の入射方向を考慮したフルード数 F_r の関数「 $\alpha = 1.2 F_r + 1.0$ ($0.1 \leq F_r \leq 1.6$)」として求め、波力によって建屋外壁に作用する曲げモーメント M_d を算出している。Asakura et. al. (2002) では、 α の最大値は、3を提案している。評価対象箇所は、海側に面する福島第一原子力発電所のタービン建屋東面及び福島第二原子力発電所の海水熱交

換機建屋東面を選定し、その外壁の耐力 M_u を算出している。

これらの曲げモーメント M_d と耐力 M_u を比較すると、一部の箇所において M_d が M_u を上回っているが、外壁には津波によるひび割れ等の損傷は、現在までのところ確認されていないことから、実際には、津波による波力は、建屋外壁の耐力を上回ることはなかったと考えられる。
(図V.1-10)

2. 東海第二発電所における評価

2.1 波源モデルの推定と再現計算

日本原子力発電による広域の再現計算については、1.2.1で記述したとおり、福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所と同じ広域再現モデルを用いて検討しており、解析値が痕跡高よりやや小さいとしている。また、東海第二発電所敷地内及びその周辺の観測記録等がよく一致する発電所再現モデルは、1.2.1で記述したとおり、広域再現モデルのすべり量を1.3倍して検討し、再現性は良好であるとしている。

発電所再現モデルによる計算結果を見ると、海水ポンプ室周辺の津波高さは、最大 $H.P.+6.24$ mであり、ポンプ室の壁($H.P.+7.0$ m)を超えておらず、痕跡調査結果とも整合している。また、取水口前面での最低水位は $H.P.-4.34$ mであり、取水可能レベル($H.P.-4.53$ m)を上回っており、取水機能に影響を及ぼしていないことも確認したとしている。(図V.2-1)

2.2 浸水経路及び浸水による影響・分析

発電所再現モデルによる計算結果では、地震発生後49分20秒後に敷地内の海水ポンプ室南側に津波が到達し、その20秒後にポンプ室北側に、その後北側・南側から中央部に回り込んでいる状況を確認したとしている。

計算結果を見ると、海水ポンプ室周辺の津波高さはポンプ室の壁を超えていなかったにも関わらず、実際には、北側の非常用ポンプエリアに海水が浸水していたが、これは封止工事中での貫通部から海水が浸入したことによるものとしている。

3. 女川原子力発電所における評価

3.1 波源計算と再現計算

東北電力は、津波の再現計算に当たり、女川原子力発電所周辺における津波の再現性を重視し、女川原子力発電所に設置されている潮位計で

観測された津波波形と地盤変動量の整合性との確認結果から、独立行政法人建築研究所で公開されている藤井・佐竹（2011）の40枚断層モデルを津波波源モデルをベースとして選定（図V.3-1）し、試行錯誤的に小断層のすべり量を調整し、更に再現性を高める方法で、波源モデルを作成している。モデルの規模は、 $M_w 8.94$ であり、最大すべり量を20mとしている。すべり量については、独立行政法人防災科学技術研究所が公開している地震波インバージョンによるすべり量分布や、海上保安庁が公開している海底変位を参照している（図V.3-2～図V.3-3）。

当院は、当該波源モデルの再現性について、前述のとおり、女川原子力発電所における再現性を重視して作成されているものの、以下に示す①痕跡高、②検潮記録、③浸水域、④時刻歴波形のとおり、発電所における浸水状況の分析に用いる事について問題は無いと考えられるが、広域の再現性については、東京電力及び日本原子力発電が共同で策定した津波波源モデルよりも再現性は低いと考える。

①痕跡高については、女川原子力発電所近傍の津波痕跡高14点と波源モデルによる計算結果を比較した結果、再現性の評価指標 $K = 1.00$ 、 $\kappa = 1.04$ であり、土木学会による再現性の目安 $0.95 < K < 1.05$ 、 $\kappa < 1.45$ を満たしていること（図V.3-4）。また、女川原子力発電所周辺の津波痕跡高123点と計算結果を比較した結果、再現性の評価指標 $K = 1.15$ 、 $\kappa = 1.24$ であり、おおむね再現できていること（図V.3-5）。

②検潮記録については、北海道太平洋北部沿岸から千葉県房総半島沿岸の痕跡高データ2,820点と計算結果を比較した結果、再現性の目安 $K = 1.28$ 、 $\kappa = 1.49$ であり、再現性の目安は満たしていないものの、痕跡高さの傾向をおおむね再現していること（図V.3-6）。

③浸水域については、女川原子力発電所敷地内の現地調査から確認された浸水域と再現計算による敷地内の浸水域が整合的で良好な再現性であること（図V.3-7）。また、国土地理院による浸水域の評価結果と波源モデルによる浸水域を比較した結果、各地点の浸水域を網羅的に再現していること（図V.3-8）。

④時刻歴波形については、潮位計で得られた観測記録の位相、最高水位を良好に再現していること（図V.3-9）。

3.2 浸水経路及び浸水による影響・分析

女川原子力発電所において、2号機の海水ポンプ室に設置した循環水

ポンプ自動停止用水位計の止水処理が不十分であったため、取水路より海水が循環水ポンプ自動停止用水位計を経由して流入し、女川原子力発電所2号機原子炉建屋地下3階の原子炉補機冷却水系熱交換器室等（非管理区域）に配管トレンチの貫通部から海水が流入したとしている。

4. 独立行政法人原子力安全基盤機構によるクロスチェック結果

独立行政法人原子力安全基盤機構（以下「JNES」という。）は、当院の指示に基づき、東京電力、日本原子力発電及び東北電力が実施した、今回の地震により発生した津波の再現計算結果等に係るクロスチェックを実施している。

4.1 東北地方太平洋沖地震津波の特徴の分析

JNESは、津波の再現計算結果を検証する前段階として、今回の地震の特徴について、各機関における観測データから以下のように分析し、津波の再現計算等に係るクロスチェックに考慮している。

- ① 巨大な地震規模（ $M_w 9.0$ ）であったことや、複数震源域が空間的に連動したことに加え、独立行政法人防災科学技術研究所において観測地震動の記録を分析し、複数の震源域がわずかな時間差で連動した可能性が指摘されていることから、地震の時間差発生の傾向を考慮すること
 - ② 岩手南部沖で観測されている津波波形では長周期の波形と急激に上昇する短周期の波形が重なっていることから、異なる性質の波の重なり傾向を考慮すること
 - ③ 陸域及び海底の測地データ及び長周期地震動から各機関において推定された震源過程から、大きなすべり量が日本海溝付近に集中し、大きな津波を引き起こした可能性が高いとみられることから、日本海溝付近の大きなすべり量分布を考慮すること
- としている。（図V.4-1～図V.4-4）

4.2 津波の再現と要因分析

JNESは、4.1による分析結果を考慮し、4つの原子力発電所（福島第一、福島第二、女川、東海第二）における観測津波波形・痕跡高（図V.4-5）と、4つの原子力発電所以外の広域で観測された津波波形・痕跡高（図V.4-6～図V.4-8）を1つの波源モデルで再現する前提で検討を実施。観測データの収集・整理を行い、波源モデルの幾何形状の設定（図V.4-9）、断層破壊開始時間と継続時間を考慮できるよ

うなすべり量分布の時間推移の設定（図V. 4-10）、すべり量の設定等について解析を行い、4つの原子力発電所及び広域の観測津波波形の再現性が良好な波源モデルを確定したとしている（図V. 4-11）。

当院は、JNESが策定した波源モデルにより、広域で観測されている記録の再現性を確認した結果、広域の観測津波波形の第一波の最大波の波形（特に短周期の波形）が良好に再現されていることを確認した（図V. 4-12～図V. 4-15）。また、北海道から千葉県にかけて調査された津波痕跡（遡上高、遡上高）1, 272点に対する再現性の評価指標 $K=0.96$ 、 $\kappa=1.48$ が、土木学会による再現性の目安 $0.95 < K < 1.05$ 、 $\kappa < 1.45$ を満たしていることを確認するとともに（図V. 4-16参照）、各測地殻変動量の再現性についてもおおむね再現していることを確認した。

4.3 津波の再現性についての考察

当院は、JNESが策定したこの波源モデルにより、4つの原子力発電所における観測記録の再現性について以下のとおり考察した（図V. 4-17）。

4.3.1 福島第一原子力発電所

観測津波波形については、発電所における観測記録が一部しか得られていないが、計算波形では、観測津波波形の第一波の形状、波高を良く再現していることを確認した。

浸水範囲の再現性については、再現計算による浸水範囲は、発電所敷地内における調査結果を良好に再現していることを確認した。

発電所敷地内における津波痕跡19点に対する再現性の評価指標 $K=1.03$ 、 $\kappa=1.13$ であり、再現計算による津波高は、痕跡高を良好に再現していることを確認した。

（図V. 4-22～図V. 4-25）

4.3.2 福島第二原子力発電所

浸水範囲の再現性については、再現計算による浸水範囲は、発電所敷地内における調査結果を良好に再現していることを確認した。

また、発電所敷地内における津波痕跡71点に対する再現性の評価指標は $K=0.98$ 、 $\kappa=1.12$ であり、再現計算による津波高は、痕跡高を良好に再現していることを確認した。

（図V. 4-26～図V. 4-29）

4.3.3 東海第二発電所

観測津波波形の再現性については、観測波形、到達時間、波高を良く再現していることを確認した。

また、浸水範囲の再現性については、再現計算による浸水範囲は、発電所敷地内における調査結果を良好に再現していることを確認するとともに、発電所敷地内における津波痕跡13点に対する再現性の評価指標 $K = 1.03$ 、 $\kappa = 1.05$ であり、再現計算による津波高は、痕跡高を良好に再現していることを確認した。

(図V.4-30～図V.4-33)

4.3.4 女川原子力発電所

観測津波波形の再現性について、計算波形においては引き波が先行している部分については改善の余地があるが、全体の波形をおおむね再現しており、最大波高が良く一致していることを確認した。

また、浸水範囲の再現性について、再現計算による浸水範囲は、発電所敷地内における調査結果を良好に再現していることを確認するとともに、発電所敷地内における津波痕跡10点に対する再現性の評価指標は、 $K = 1.03$ 、 $\kappa = 1.02$ であり、再現計算による津波高は、痕跡高を良好に再現していることを確認した。(図V.4-18～図V.4-21)

当院は、以上4つの原子力発電所における津波高増幅特性及び発電所前面海域の海底地形の影響について検討し、それぞれの発電所における傾向は以下のとおりであることを確認した。(図V.4-34～図V.4-36)

- 福島第一原子力発電所及び第二原子力発電所の前面海域の波高増幅は理論式とほぼ一致し、特異な海底地形ではないと考えられる。
- 女川原子力発電所については、理論式から外れ、陸上遡上域での波高増幅が小さい、女川原子力発電所は、女川湾の入口付近に立地されており、女川湾の湾奥に比べ津波の勢いがそれる地形効果により波高増幅が抑えられたと考えられる。
- 東海第二発電所については、理論式から大きく外れ増幅率が大きくなっているが、理論式では反射を無視していることから、沿岸での反射波の影響があると考えられる。

4.4 各原子力発電所の評価結果の検証

4.4.1 4つの原子力発電所とJNESの推定波源モデルの相違点

東京電力及び日本原子力発電の波源モデルは、広域再現用と発電所再現用で異なっており、発電所それぞれで細かな調整を行った波源モデルを用いている。これに対し、JNESの波源モデルは、広域及び4つの原子力発電所の津波現象を1つの波源モデルで再現している。

また、東京電力、日本原子力発電及び東北電力が策定した波源モデルにおいては、複数の震源域が時間差をもって連動したことや、分岐断層の考慮をしていないが、JNESが策定した波源モデルは、これらを考慮し、観測津波波形の再現性を向上させている。

4.4.2 各原子力発電所における再現性について

当院は、東京電力及び日本原子力発電が共同で策定した広域再現モデルによる最大波を示す第一波の波形の再現が、JNESが策定した波源モデルによる解析波形と比較して再現性が十分ではないことを確認した。

また、当院は、東京電力、日本原子力発電及び東北電力が策定した4つの原子力発電所の発電所再現モデルによる解析波形について、発電所毎にすべり量当が調整されたものであり、観測波形を良く再現していることを確認した。

4つの原子力発電所の敷地内の痕跡高・浸水範囲及び津波の侵入ルート¹⁾の再現性について、当院は、各発電所再現モデルにより解析された結果は、それぞれの現地調査による発電所敷地内の痕跡高及び浸水範囲及び津波の侵入ルートをよく再現しているとともに、JNESが策定した波源モデルによる解析結果とも整合していることを確認した。

(図V.4-37～図V.4-43)

4.5 今後の展開

当院は、今回の地震により発生した津波について、福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所及び東海第二発電所並びに女川原子力発電所それぞれにおける津波波形、浸水範囲、敷地内の痕跡高等を再現することができ、かつ広域の観測記録とも整合している波源モデルを構築することができた。

今後、当院は、この波源モデルによる解析結果の検証を継続し、新たに得られる知見も踏まえ、更に精度を向上させ、4つの原子力発電所のみならず、全国の原子力発電所の津波水位等評価の検証に用いることを

考えている。

5. 津波に関する評価のまとめ

5.1 想定津波高さの考え方

今回の東北地方太平洋沖地震に係る津波については、

- ①海溝型地震について大きなすべり量や地震セグメントの連動等により、大きな地震動や津波を生じたこと。
- ②今回の津波は、やや長周期の波と短周期の波が重畳することにより津波の波高が高くなったと考えられること。

などが明らかになっており、これらの知見を踏まえた上で、原子力発電所における津波に対する安全性を確保する取組を行うことは極めて重要である。

一方、耐震設計審査指針において、津波に対する安全性については、地震随伴事象として取り扱われ、「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る」と想定することが適切な津波によっても、施設の安全機能が重大な影響を受けるおそれがないこと。」とされている。

しかしながら、今回の事故の原因となった津波による被害は、6月及び9月の国際原子力機関に対する日本国政府の報告書で明らかにしているように、津波の発生頻度や高さの想定が不十分であり、大規模な津波の襲来に対する対応が十分なされていなかったためにもたらされたものである。

このため、津波に対する安全性については、

- ①施設の安全機能への重大な影響を防止する観点から、再来周期を考慮した適切な発生頻度の津波を想定する。(以下、この津波を「設計基準津波」という。)
- ②その上で、設計基準津波による浸水で安全機能を有する設備に影響が発生することを防止する構築物等(防潮堤、防潮壁、水密扉等)の安全設計を、津波の破壊力、浸水高さ、浸水域、浸水時間等を考慮に入れて行う。
- ③なお、“引き波”や“海底砂移動”による建屋・機器等への影響については、冷却用の海水を確保できること等も考慮に入れて安全設計を行う。
- ④さらに深層防護の観点から、設計基準津波を上回る規模の津波が施設に及ぶことによるリスクの存在を十分認識して、敷地の冠水や遡上波の大きさを考慮しても炉心及び燃料プールの燃料の重大な損傷を防

止できる対策を講じる。

- ⑤また、津波による建屋の開口部からの浸水以外にも、海水面の上昇による圧力差により、取水設備関係、埋設した配線や配管関係設備から浸水する場合がある、これらの水密性を高め、継続的に点検することにより浸水量を下げる対策を講じる。さらに、安全機能を有する設備設置場所については、浸水した場合に備えて浸水対策を講じる。

等の対応が必要である。

さらには、今回の事故において、アクシデントマネージメント（以下「AM」という。）策が不十分であったことが明らかとなった。

このため、AM策については、事業者による自主保安という取組を改め、これを法規制上の要求とするとともに、確率論的評価手法も活用しつつ、設計要求事項の見直しも含めて、シビアアクシデントを効率的に防止できるAM策を整備することも必要である。

今回の再現性の解析結果や新たな知見なども考慮しつつ、想定津波高さの評価の考え方について、当院としては、引き続き検討することが必要であると考ええる。

5.2 波力評価の考え方

今回の地震・津波で得られた知見を踏まえ、当院として想定される津波に対する波力評価の考え方について検討した。

福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所の主要建屋における津波波力の検討において、建屋外壁に作用した曲げモーメント M_d と建屋外壁の耐力 M_u を比較したところ、 M_d/M_u の値はおおむね1以下の値、Asakura et. AL(2002)による流速を考慮した水平波圧指標 α の値は、1.1～2.0程度であり、3より十分小さく、流速に応じて算定したことを確認したとしている。このことから、想定する津波高さに対して3倍の静水圧分布を与え、波の入射方向を構造物鉛直方向として設計を行うことは波力の想定として十分に保守的なものと考えられるとしている。ただし、沿岸地形の傾斜状況や護岸の有無等によっては、過小評価になる場合もあることから、適用に際しては個別に評価する必要がある。

一方、既往文献において、3倍の静水圧分布を超える津波波圧が作用するケースが報告されている。

池野ら（2006）では、実験結果を含めてデータを整理・考察した結果、3倍の静水圧分布を超える津波波圧が作用するケースも認められるが、越流量（護岸前面水深と遡上した津波の水深の比）が小さい場合

に限定されていることから、全体波圧としては小さいとしており、設計において3倍の静水圧分布という波力を考慮することと調和的であるとしている。

国土交通省は、津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針を策定し、今回の地震における実際の建造物の被害状況を踏まえると、津波波力の評価は合理化が可能としている。

具体的には、従来は一律に静水圧の3倍としていたところ、

①堤防や前面の建築物等による軽減効果が見込まれる場合：2.0倍

②①のうち、海岸等からの距離が離れている場合（500m以遠）：1.5倍

③①、②に該当しない場合：3.0倍

に合理化が可能としており、当院の検討とも整合している。

5.3 今後の対応

原子力施設の地震・津波に対する安全性については、常に最新の科学的・技術的知見を取り入れ、さらなる安全性の向上に努めていくことが重要である。地震・津波関連分野に関しては、近年において急速に新たな知見が得られており、関連する学会等の動向を常に把握し、安全評価に資する知見を確実に獲得する必要がある。

また、津波に対する安全性に関し、「5.1 想定津波高さの考え方」及び「5.2 波力評価の考え方」について、引き続き調査・検討する際には、例えば以下の事項を念頭に置き進めるものとする。

①古文書等の史料や伝承等について詳細な調査・分析を行い、敷地周辺に襲来した可能性のある津波の年代、規模等について、可能な限り古い時代まで遡って把握すること。

②津波堆積物の調査においては、津波堆積物が残る地形である等の以下の条件が揃っている場所であることを示すこと。

・津波シミュレーション等によって、津波が浸水しやすい場所であること。

・津波堆積物が削剥されない安定した堆積環境であること。

・津波堆積物の供給源である砂等が前面の海岸又は海域に存在すること。

③津波波源から敷地周辺までの海域の地形に関して十分な調査をもと

に海底地形図を作成する。この場合、浅い海域の地形は、津波高さへの影響が大きいため、特に詳細な調査を行うこと。

- ④砂移動の評価を行うための底質（砂の粒径や比重等）に関する資料等に関して適切な調査を行うこと。
- ⑤今回の地震の余震として、過去に起こった1933年の昭和三陸津波地震のように、揺れは小さいが津波が大きいタイプの地震（アウトライズ地震）の発生の可能性も指摘されており、このような知見も踏まえ、余震に対する対応も適切に行うこと。