

Ⅲ. 東北地方太平洋沖地震とそれによる津波の被害

1. 地震と津波による我が国の被害

(1) 東北地方太平洋沖地震の概要

①地震の諸元及び発生メカニズム

日本列島は、図 III-1-1 に示す北米、ユーラシア、太平洋、フィリピン海の 4 つのプレートからなる。同列島は、太平洋プレート及びフィリピン海プレートの沈み込みにより 2 方向から強い圧縮力を受けている。

東北地方太平洋沖地震(以下、今回の地震という。)は、2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に、図 III-1-1 中に示す日本海溝沿いの北米プレートと太平洋プレートとの境界部で発生した。気象庁は、地震の震源は三陸沖約 130km で、震源深さは 24km、地震規模はモーメントマグニチュード¹(Mw)9.0 と推定している(気象庁第 16 報)。また、地震調査研究推進本部(以下、「地震本部」という。)は、今回の地震の震源域が岩手県沖から茨城県沖までに及び、震源の長さは、図 III-1-2 のように約 400km 以上、幅約 200km と推定している。地震の発生メカニズムは、西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であった。(地震本部地震調査委員会:東北地方太平洋沖地震の評価(4 月 11 日発表))

今回の地震の震源は、図 III-1-2 に示す宮城県沖領域内にあり、地震本部の発表資料等によると、プレートの破壊は宮城県沖領域の震源から開始され、北方の岩手県沖、南方の福島県沖及び茨城県沖へと連動しながら伝播したと推定されている。震源となった宮城県沖領域は、図 III-1-2 に示すように A 及び B の 2 つの震源領域から構成される。今回の震源は領域 B 内にあり、破壊は領域 B で発生した後、西側の領域 A へ連動し、更に領域 B の東側の領域まで拡大連動したと推定されている。これらの震源域の破壊を断面で示すと、破壊は、図 III-1-2 中の a-a'断面に示す領域 B 内(深さ 24km 付近)で始まり、プレート境界深部の領域 A へ伝播するとともに、領域 B の東側領域の浅部へと伝播したと推定されている。滑り量が大きい領域は、三陸沖南部海溝寄り及び三陸沖北部から房総沖の海溝寄りの一部であり、最大すべり量は約 20m 以上と推定されている。

¹ モーメントマグニチュード: 地震を起こす断層運動のエネルギーから地震の規模を表す指標値。大きな地震の規模を正確に評価できる。

②地殻変動と震源過程及び津波の波源過程の分析例

国土地理院は、図 III-1-3 に示すように GPS 観測に基づき解析した地殻変動の発生状況を公開している。同図から、顕著な地殻変動は宮城県から福島県沿岸域で発生し、沈降量は 0.5m～1.2m(平均沈降約 0.8m)である。宮城県牡鹿観測点では、東南東方向の水平変位量が約 5.3m、上下方向の変位量は約 1.2m である。

気象庁は、防災科学技術研究所の K-NET と KiK-net の観測記録及び気象庁加速度計の波形を用いて、今回の地震の震源過程²を分析し、図 III-1-4 に示すようなすべり分布を公開した[III1-1]。気象庁は、解析条件として断層の長さ約 450km、幅約 150km としている。解析の結果、モーメントマグニチュード(M_w)9.0、破壊の継続時間は約 170 秒となっている。また、プレートの滑り(破壊)は、破壊開始点(震源：北緯 38.10 度、東経 142.86 度、深さ 23.7km)付近で徐々に拡大した後(0～60 秒)、南北方向に分かれて進行している。大きな滑り領域は、破壊開始点の東から北東側(震源よりも浅い部分)の領域で発生し、最大滑り量は約 30m である。大きな滑りが発生する領域は、国内外の研究機関の報告結果でほぼ一致している。

例えば、藤井・佐竹(2011)は、気象庁や他機関の津波観測記録を用いて、津波波形インバージョン解析³を行い、津波波源を分析した(図 III-1-5 参照)[III1-2]。これによっても、大きな滑り領域は、破壊開始点から北東側(図中の黒色の部分)に分布しており、上記の気象庁の結果とほぼ一致している。

これらのすべり分布の状況と、藤井・佐竹(2011)の津波解析結果から、破壊開始点(震源)東側の浅いプレート境界における大きな滑りが、大津波を引き起こした要因である。

③地震本部における地震発生長期評価との関係

地震本部では、海溝型地震を対象に、図 III-1-6 に示すような地震の規模や一定期間内に地震が発生する確率を予測したものを公表し、今後 10、30、50 年以内の地震発生確率を示している。その中で、図 III-1-6 中に示すように宮城県沖地震の 30 年以内の発

² 震源過程：震源における理論的な破壊モデルを仮定した上で、観測地震動の時刻歴波形データを用いて、同データに整合するように、断層破壊面における変位の食い違いの量を解析するプロセス。

³ 津波波形インバージョン解析：観測された津波の時系列データ等を用い、震源過程を解析するプロセス。

生確率を 99%、地震規模をマグニチュード(M) 7.5 と評価し、注意を促していた。今回の地震の破壊開始点(宮城県沖領域)、同領域内の 2 つの震源領域 A 及び B の連動破壊の想定、及び発生時期はほぼ地震本部の評価通りであった。しかしながら、震源域の範囲が、三陸沖中部、宮城県沖、福島県沖、茨城県沖の広範囲に連動したこと、及び地震規模が M9 に達したことは、想定外であったとしている(地震本部地震調査委員会:東北地方太平洋沖地震の評価(3月11日発表))。さらに、破壊が震源からプレート境界の浅い部分に広がり、滑り量が 20m 以上であったことについては、これまで、宮城県沖における日本海溝沿い浅部のプレート境界が、ずるずると滑っている領域で、大きなひずみが蓄積されていないと推定されていた。しかし、実際には、その領域が固着されていたようで、その結果、長期間にわたりひずみが蓄積され、宮城県沖領域での破壊が引き金となって今回の地震が発生したとする専門家もいる。

(2) 東北地方太平洋沖地震による地震動及び津波高

①地震動の発生状況

女川原子力発電所、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の周辺地域で観測された防災科学技術研究所の K-NET と KIK-net 観測点での加速度波形(水平 2 成分、上下成分)を図 III-1-7 に示す。

震源に近い女川原子力発電所付近の観測点(MYG011:震央距離 127km)での加速度波形には、地震発生から 30 秒と 80 秒付近に大きなピークが発生している。福島第一原子力発電所付近の観測点(FKS011:震央距離 176km)での加速度波形にも同様のピークが見られるが、第 2 のピークは第 1 のピークよりも大きい。これら 2 つのピークは、震源領域 A 及び B 付近の破壊によるものと考えられる。

一方、東海第二発電所付近の観測点(IBR007:震央距離 274km)での加速度波形には 120 秒後に 1 つのピークだけが発生している。その理由として、東海第二発電所付近では、上記宮城県沖領域内の震源領域 B 及び A の破壊による地震動が減衰し、福島県沖から茨城県沖の震源域の破壊による地震動の影響が大きくなったことによると考えられる。敷地の地震動に大きな影響を及ぼす要因は、広範な震源域の中で、敷地近傍の震源域であり、そこでの破壊特

性及び連動の仕方等の可能性がある。これに対し、津波の水位に大きな影響を及ぼす要因としては、地震規模、震源域の広さ、すべり量、破壊の連動の仕方等の可能性がある。これらの要因の違いについては、今後、国内外の研究機関での解明が期待される。

東日本の震度分布を図 III-1-8 に示す。宮城県栗原市では最大震度 7 であった。震度 5 以上の地域は、東北地方から関東地方までの広い範囲に及んでいる。女川原子力発電所、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の周辺地域の震度は、5 強～6 強であった。

②津波の発生状況

独立行政法人港湾空港技術研究所による岩手県釜石市沖合における GPS 波浪計の観測津波波形を図 III-1-9 に示す。津波の観測最大水位は、地震発生 14 時 46 分の約 26 分後の第 1 波の 6.7m であった。津波の襲来周期は、第 1～3 波において不規則で明瞭でないが、第 4～7 波では約 50 分である。第 1 波の特徴は、6 分後に 2m、続く 4 分後に 6.7m へと 2 段階で上昇していることである。

東日本沿岸地域における気象庁による観測津波水位を図 III-1-10 に示す。観測津波水位は、宮古地点で 8.5m 以上、石巻市鮎川地点 8.6m 以上、相馬地点 9.3m 以上等であった。津波はカナダ、米国、中南米等太平洋沿岸でも観測され、チリでは最大 2m であった。

佐竹によると、津波水位は、貞観地震(869 年)のようなやや深部での滑りによる長周期の波と、明治三陸沖地震(1896 年)のような浅部でのものによる短周期の高い津波が重畳したと推定している(図 III-1-11 参照) [III1-3]。そのため、短周期での高い津波が沿岸域に到達・遡上した後、長い周期の津波が長時間にわたり繰り返し押し寄せ、遡上域を増大させたと推定されている。最大遡上高さは、土木学会の調査によると、岩手県宮古市姉吉地区で 38.9m である [III1-4]。三陸地方での遡上高さは、明治三陸沖地震(1896 年)及び昭和三陸沖地震(1933 年)を上回った(図 III-1-12 参照)。

③余震及び誘発地震の発生状況

余震の積算回数は、5 月 6 日現在、M5 以上が 444 回、M6 以上 76 回、M7 以上 5 回である。最大余震は、3 月 11 日 15 時 15 分

に発生し、地震規模は M7.7 であった。その他の主な余震として、同日 15 時 25 分の宮城県はるか沖の地震（深さ約 34km、M7.5）、4 月 7 日 23 時 32 分に宮城県沖（深さ約 40km、M7.0）の地震が発生した。4 月 7 日の余震は、牡鹿半島の東約 40km で発生し、女川原子力発電所で大きな地震動が観測された。

誘発地震の発生状況を図 III-1-13 に示す。誘発地震は、長野県、秋田県、静岡県富士宮、福島県と全国各地で発生している [III1-5]。原子力発電所周辺では、3 月 12 日に柏崎原子力発電所から南東約 50km の長野県北部の十日町断層帯付近において M6.7 の地震が発生した。また、福島第一原子力発電所から南西約 50km の井戸沢断層付近において、4 月 11 日に地震 (M7.1) が発生した。この地震は、プレート内の浅い場所で発生した西南西—東北東方向に張力軸を持つ正断層型であった。東北地方は逆断層の活断層が卓越し分布する地域であり、正断層型の地震断層が確認されたのは初めてである [III1-6]。

これに伴い、原子力安全委員会は、4 月 28 日に、原子力安全・保安院に対して、「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。以下「新耐震指針」という。）に照らした既設発電用原子炉施設等の耐震安全性確認（以下、「耐震バックチェック」という。）を進めるにあたり、以下のような意見を示し、保安院に検討を求めている。4 月 28 日に、原子力安全・保安院は各事業者に対して同様の指示を出している。

- ・今回地震によって地震活動が活発でなかった場所において地震が確認されている場合や耐震設計上考慮する活断層でない断層近傍で地震が発生している場合には、その地震の評価を行うこと。
- ・上記検討を踏まえて、敷地に影響を与える可能性がある断層がある場合には、地震動評価を行うこと。

(3) 東北地方太平洋沖地震による主な被害状況

① 気象庁の緊急地震情報（警報）とそれに係わる自治体の対応

a 緊急地震情報（警報）の発表手順及び津波情報の内容

気象庁は、津波による災害が予想される場合、地震が発生してから約 3 分を目標に、「津波警報」または「津波注意報」を発表する。地震及び津波に関する情報の発表手順を図 III-1-14 に、津波警報及び津波注意報の内容を表 III-1-1 に示す。

b 気象庁の津波警報の発表時刻と実際確認された内容

東日本太平洋沿岸地区の気象庁による津波警報の発表時刻毎の予想到達時刻及び高さの確認結果との比較表を表 III-1-2 に示す。気象庁では、14時46分の地震発生後、津波警報あるいは津波注意報を14時49分(地震発生3分後)、15時14分(地震発生28分後)、15時30分(地震発生44分後)の3回発表した。以下に、主な内容を示す。

- ・第一回の発表時(地震発生3分後の14時49分)では、宮城県に6m、福島県に3mの津波が到達すると発表した。
- ・第二回の発表(地震発生28分後の15時14分)では、青森県、岩手県、宮城県、福島県において既に到達を確認した。また、予想津波高を岩手県で6m、宮城県10m以上、福島県で6mと修正した。しかし、岩手県宮古市、釜石市、大船渡市では、発表の4分あるいは7分後に、最大津波8m以上が既に到達した。宮城県鮎川でも、12分後に最大波8.6m以上が既に到達した。
- ・第三回の発表(地震発生44分後の15時30分)では、青森県、岩手県、宮城県、福島県、千葉県において到達を確認し、茨城県では到達と推定した。また、予想津波高を、青森を除く全県で10m以上と修正した。岩手県宮古市、大船渡市、宮城県鮎川で既に最大波が到達していた。

気象庁は、第三回の発表(地震発生44分後の15時30分)において、予想津波高を8mや10m以上としたが、岩手県及び宮城県では最大波が発表の約10~12分前に既に到達していた。

c 気象庁の津波警報を受けた各自治体の避難状況

気象庁の【津波警報(大津波)】は、岩手県及び福島県(宮城県は最初から6mの予想)では当初3m程度と発表した。30分後には6m、更に15分後には10m以上と訂正された。このような津波警報に基づく各自治体の避難状況について、朝日新聞社ホームページ(2011年4月20日)に基づき、岩手県山田町、釜石市、大船渡市、陸前高田市、宮城県南三陸町、気仙沼市の例を表 III-1-3 に整理した。

市町村の防災行政無線による津波警報の放送内容は、表に示すように、被災した沿岸自治体ごとに違っている。一部の市町

村では、停電のため続報を受信できず、最初の「3m 程度」と放送し続けた。このため、高い山ではなく、2 階に避難すればよいと判断し被災した人が多い自治体もある。「3m」という数字が一人歩きして、的確な避難を遅らせた可能性がある。予想された津波高を知らせず、「とにかく逃げて」と訴えて功を奏した自治体もある。

d 気象庁の津波警報の改善策

気象庁は、今回の地震・津波に対して、現有の技術の中で、最大限の努力をして情報を発表した。しかしながら、M9.0 の巨大地震に対応した津波情報のあり方については、しっかりと点検し、今後に備える必要性を認識した。そこで、気象庁は、平成 23 年 5 月 19 日に、今回の地震および津波の経験や教訓を踏まえて、津波情報の改善を着実に進めていくことを公表した。

具体的内容は次の通りである。(1)今回発表した津波警報の内容・タイミングについての検証、(2)技術的な点についての検証(当初マグニチュード M7.9 で、順次時間が経つにつれて再評価を行って、M を上げたが、できるだけ早く適正な M を迅速に分析できる技術の検討)、(3)今後どのような課題があるかの整理。

気象庁は、津波警報の改善に向けて、大学、研究機関等の有識者、関係防災機関等からなる勉強会を設置し、第 1 回会合を 6 月 8 日に開催すると公表した。そして、有識者からの意見を整理したうえで、今年秋頃を目途に、今後の津波警報の改善の方向性について取りまとめることも公表した。

更に、気象庁は、発表情報について、国民が実際に利用できる形に具体的化していくと述べた。この場合、気象庁単独でなく、政府関係機関や自治体等様々な機関とも連携して進める。津波については、教育という観点も重要であるので、周知啓発にも努めるとも述べた。

② 一般被害状況

津波による浸水面積は、国土地理院の調査によると、宮城県が最も大きく 327km² で、次いで、福島県 112km²、岩手県 58km² 等となっており、全浸水面積は 561km² に及ぶ(国土地理院：津波による浸水範囲の面積(概略値)について(第 5 報))。家屋の被害は、

全壊、半壊、一部破壊及び浸水を合わせて約 475,000 棟である。公共建物や文教施設等の被害は約 18,000 件に上る。

ライフライン関係では、道路被害約 4,000 箇所、鉄道被害約 7,280 箇所(その内津波による被害約 1,680 箇所)、ガスの停止約 460,000 戸、電気の停電約 4,000,000 戸、電話不通 800,000 回線等である(緊急災害対策本部発表：5月30日16時、JR東日本：4月17日現在、日本ガス協会公表：3月12日現在、経済産業省発表：4月12日、緊急災害対策本部発表：3月12日12時等からピーク時被害状況を集計)。

土砂崩れ、斜面崩壊、地盤変状等の土砂災害は、岩手県、宮城県、福島県、栃木県、茨城県の広い地域で120箇所以上発生している(防災科学研究所5月19日現在)。福島県では、ダムが決壊し、数名の行方不明者が出ている。千葉県では、浦安市や幕張市等湾岸地域や九十九里平野等で、大規模な地盤の液状化が発生した(千葉県環境研究センター(第2報)、4月15日掲載)。

今回の地震による全死亡者・行方不明者は、24,769名となっている(緊急災害対策本部5月30日17時現在)。

③ 港湾施設周辺の防波堤及び防波堤等の被害

津波による一般港湾施設の防波堤及び防波堤や付帯設備の被害調査結果に基づき、津波による施設の洗掘⁴や波力の影響について示す。

防潮堤及び防波堤は、図 III-1-15 に示すように、基礎周辺地盤が津波の押し・引き波によって洗掘され、基礎が転倒しているものが多くみられた。また、防潮堤・防波堤のコンクリート覆工部分(防潮堤内部の岩や地盤を覆うコンクリート部分)は基礎下端からえぐり取られ、覆工の役割を果たしていなかった。これらの状況から、津波対策として、砂丘の堤防やコンクリート防波壁を設置する場合、津波が砂丘をいったん超えると、押し波・引き波の洗掘によって砂丘が崩壊したり、防波壁も洗掘され倒壊する可能性がある。そこで、各種の対策工に対し、技術指針が整備されるべきである。

防潮堤の付帯施設は、図 III-1-15 に示すように、津波の強い波

⁴ 洗掘：津波により、海岸や海底の土砂が機械的に削り取られる現象のこと。今回の津波では、押し波と引き波により、堤防の基礎周辺の地盤が洗い削られ、基礎が支持力を失って、堤防が倒壊した。

圧によって薙ぎ倒されている。波圧の取り扱いについて、土木学会津波評価部会・津波評価技術(2002年)では、波圧算定式におけるソリトン分裂波の波圧分布特性等に関する高度化の必要性を指摘している。そこで、同部会の津波評価技術(2007年)の算定式は、水槽試験を実施し、得られたデータを用いて改良されている。同式を今回の津波による被害に適用し検証すると共に、一層の評価技術の高度化が重要である。

岩手県宮古市田老地区の防潮堤は、地元では“万里の長城”と呼ばれ、高さ10mの威容を誇っていたが、15m以上の津波により倒壊し、図III-1-16(写真左)に示すように、防潮堤内で多大の被害が発生した(朝日新聞社、3月20日記事)。これに対し、岩手県普代村太田部地区では、古の教訓に基づく村長の強い意志によって、図III-1-16(写真右)中に示す15.5mの防潮堤が設置された。この防潮堤は、今回の15mの津波を跳ね返し、防潮堤内の被害を阻止した(読売新聞社、4月3日記事)。これらの地域は、リアス式海岸地域であり、明治三陸津波(1896年)や昭和三陸津波(1933年)等15m級の津波によって古くから甚大な被害を被り、“15m程度の津波に備えよ”との教訓が伝聞されていた(読売新聞社、3月30日記事)。今回の津波では、伝聞を守った太田部地区と田老地区とで明暗が分かれた。

岩手県宮古市姉吉地区には、上記の両津波による遡上の教訓から、図III-1-17(写真左)に示すように、集落の入り口(標高60m)に「石碑：此処より下に家を建てるな」が設置されている。この教訓を遵守していたために、津波は図中(写真右)に示すように集落近くまで遡上(遡上高さ38.9m)したものの、今回の津波において一人の犠牲者も出なかった。

参考文献

- [III1-1] 気象庁気象研究所, "「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の断層すべり分布の推定—近地強震波形を用いた解析—." [Online]. <http://www.mri-jma.go.jp/>
- [III1-2] 佐竹健治, 藤井雄士郎(2011), "2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源(暫定結果, Ver.4.0)." [Online]. http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html
- [III1-3] 佐竹健治, "東北地方太平洋沖地震の津波について:過去の津波

との比較も含めて," 防災科学技術研究所「緊急報告会 —東日本大震災への対応—」配布資料. [Online].

<http://www.bosai.go.jp/>

- [III1-4] 土木学会,"東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる速報値," 2011年5月10日.

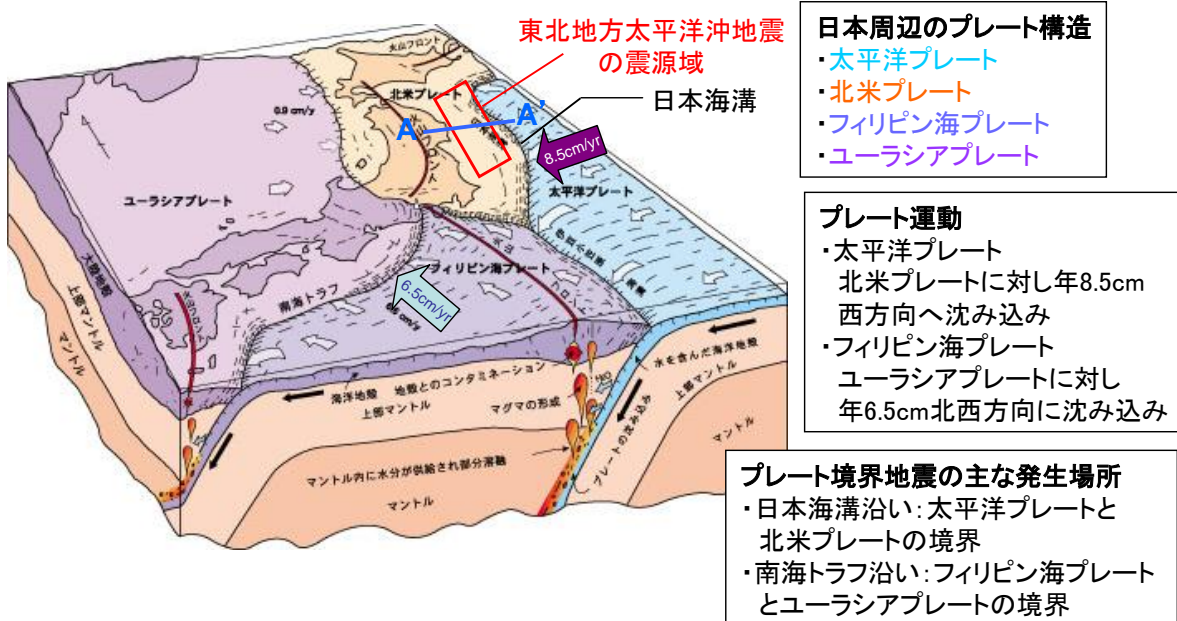
[Online]. <http://www.coastal.jp/ttjt/>

- [III1-5] 防災科学技術研究所,"東北地方太平洋沖地震について(速報)," 平成23年3月25日. [Online].

http://www.bosai.go.jp/news/oshirase/20110323_01.pdf

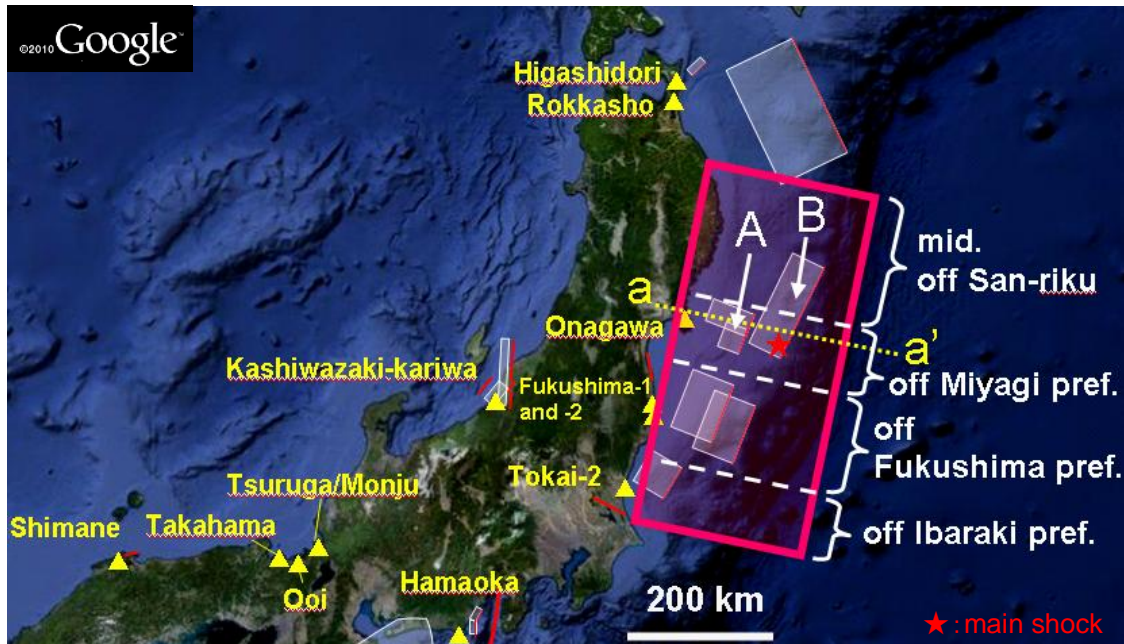
- [III1-6] 東京大学地震研究所,"2011年4月11日の福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層について(第1報)." [Online].

http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/fukushimahamadoori/

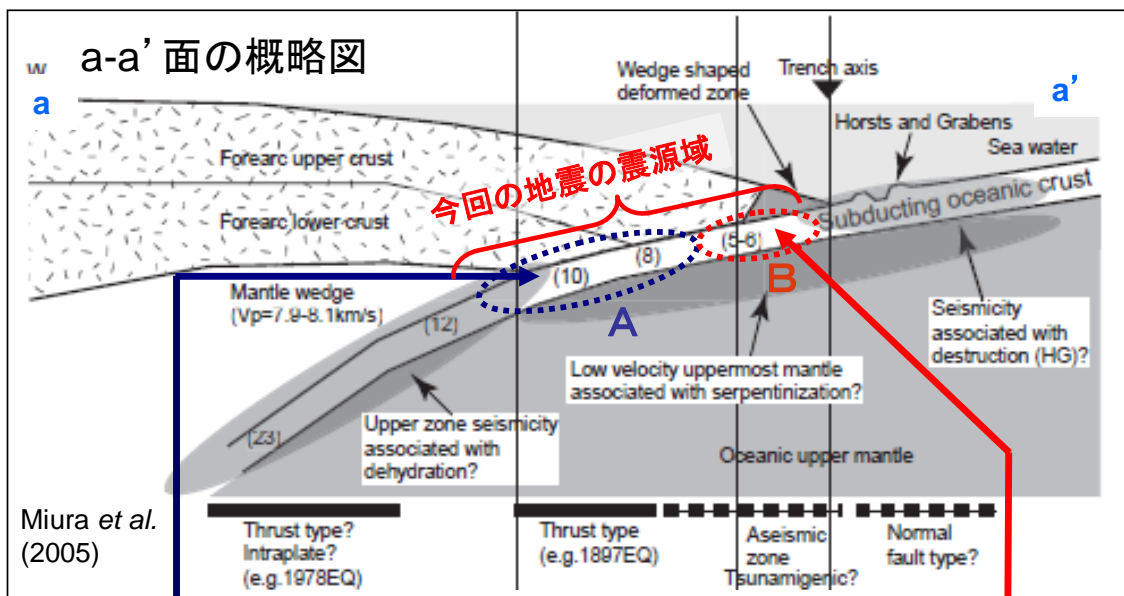


© 引用文献: (社)全国地質調査業協会連合会 HP「プレートテクトニクスからみた日本列島」に JNES が一部加筆 [Online]. <http://www.zenchiren.or.jp/tikei/index.htm>

図 III-1-1 日本列島周辺のプレート構造



© Goole マップに JNES が一部加筆

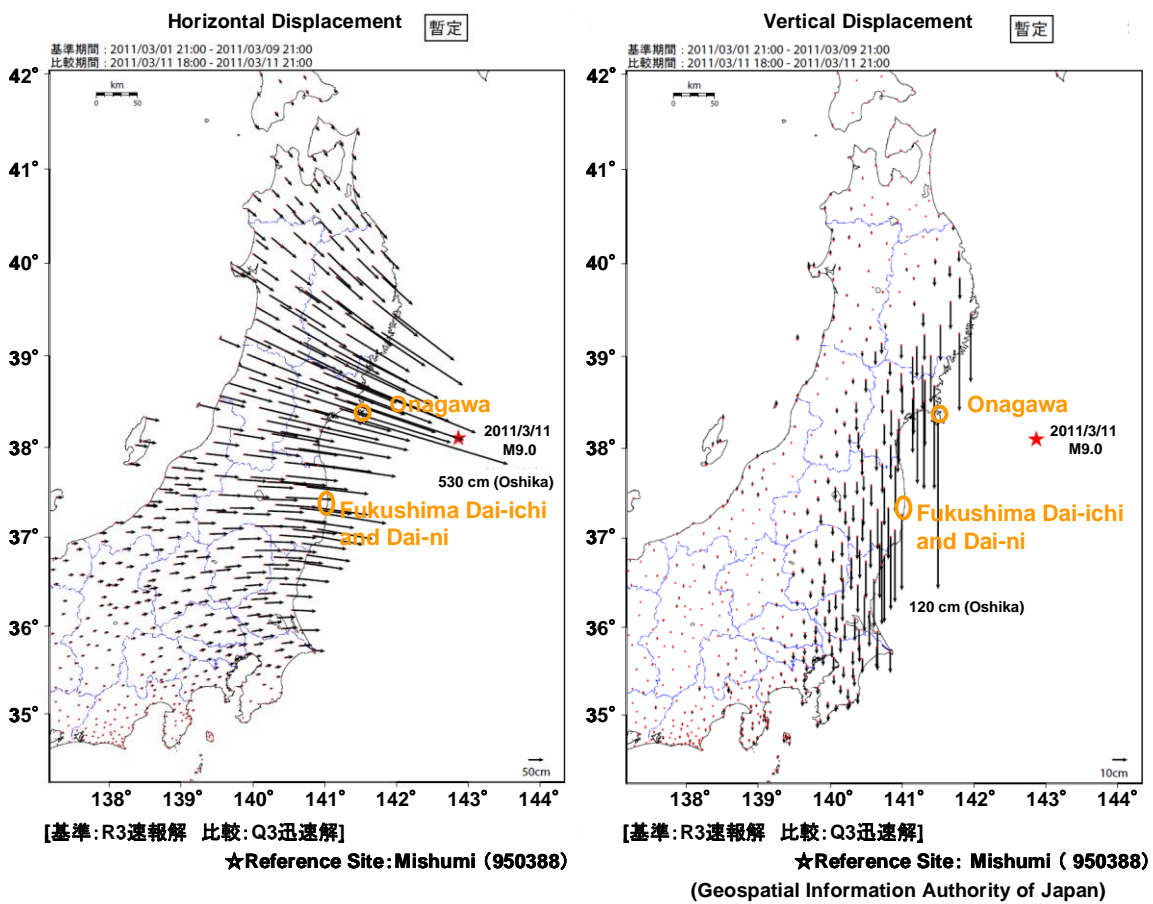


プレート境界の深部:浅部に比べ相対的にすべりが小さく、陸域に近いため強い地震動を発生させた

プレート境界の浅部:20m以上のゆっくりにした大きなすべりで、巨大津波を発生させた

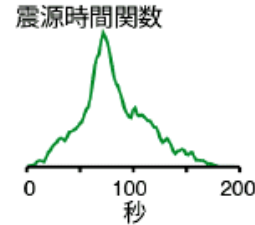
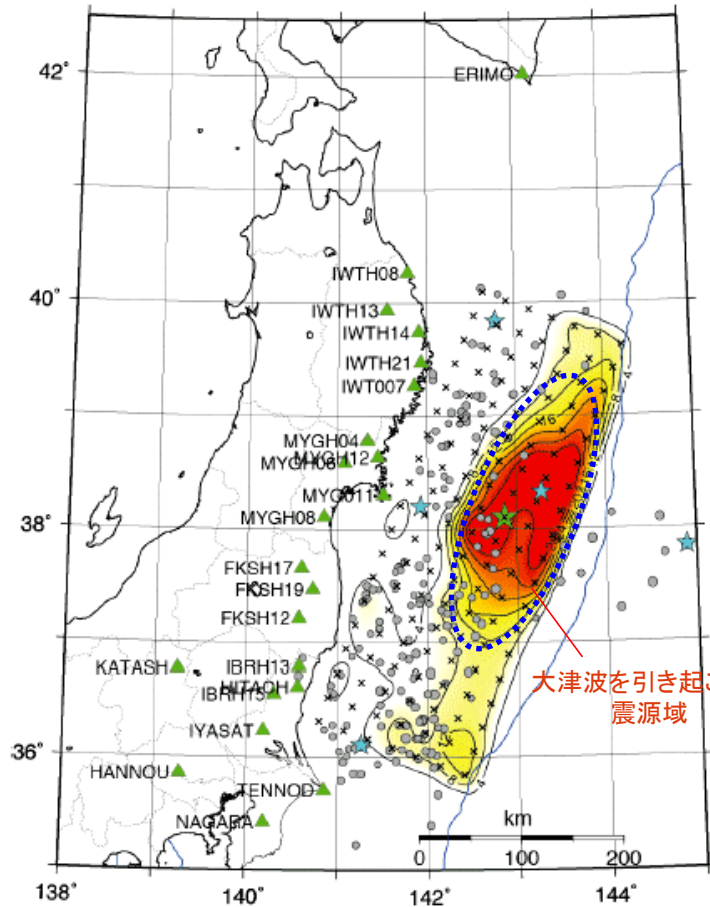
© 引用文献 : Miura et al.(2005; Tectonophysics, Vol.407)に JNES が一部加筆

図 III-1-2 東北地方太平洋沖地震の震源域と破壊の連動



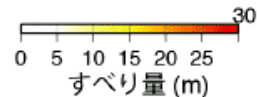
©引用文献: 国土地理院「GPS 連続観測から得られた電子基準点の地殻変動・3月11日の本震(M9.0)に伴う地殻変動」に JNES が一部加筆 [Online]. <http://www.gsi.go.jp/>

図 III-1-3 東北地方太平洋沖地震による地殻の変動
(国土地理院 3 月 11 日速報値)



- ★ 本震の破壊開始点
- ★ 3月9日以降のM7以上の地震の震央
- 本震発生から1日間のM5以上の地震の震央
- × 各小断層の中心点
- ▲ 解析に用いた観測点
- — JNES加筆

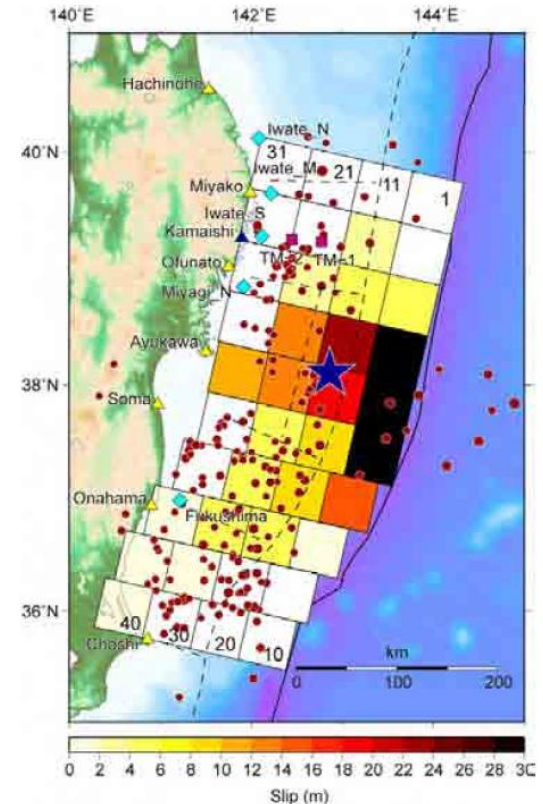
$M_0 = 3.4 \times 10^{22} \text{ Nm (Mw9.0)}$



大津波を引き起こした震源域

©引用文献：気象庁気象研究所「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の断層すべり分布の推定—近地強震波形を用いた解析—にJNESが一部加筆

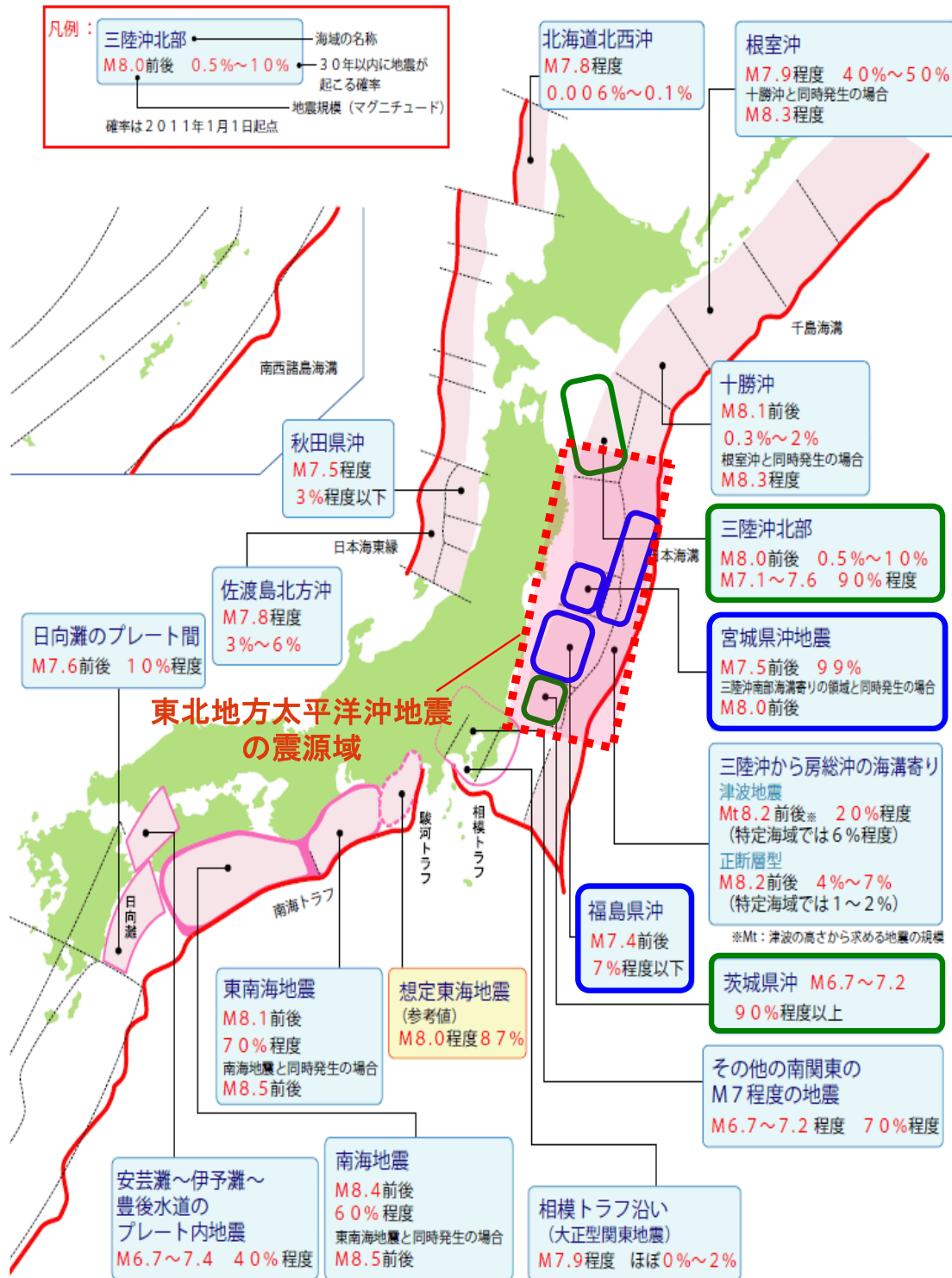
図 III-1-4 東北地方太平洋沖地震の震源断層の推定



©引用文献：藤井・佐竹「津波波源モデル (Ver. 4.0)」にJNESが一部加筆[Online].
http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html

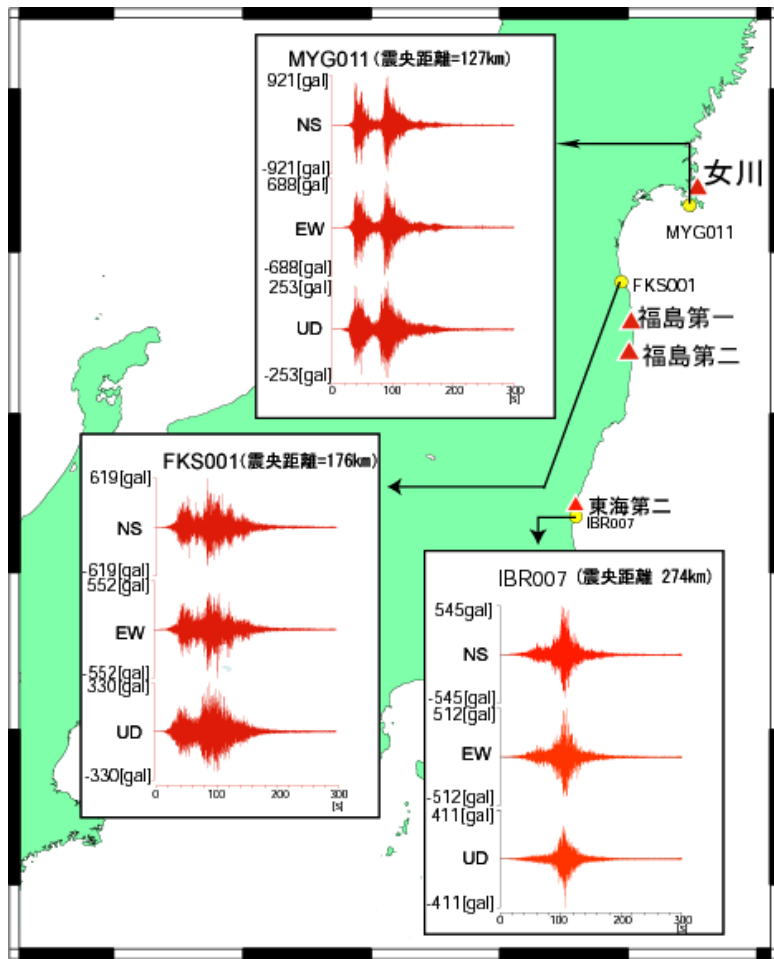
図 III-1-5 東北地方太平洋沖地震の津波インバージョン解析結果

2011年1月11日現在

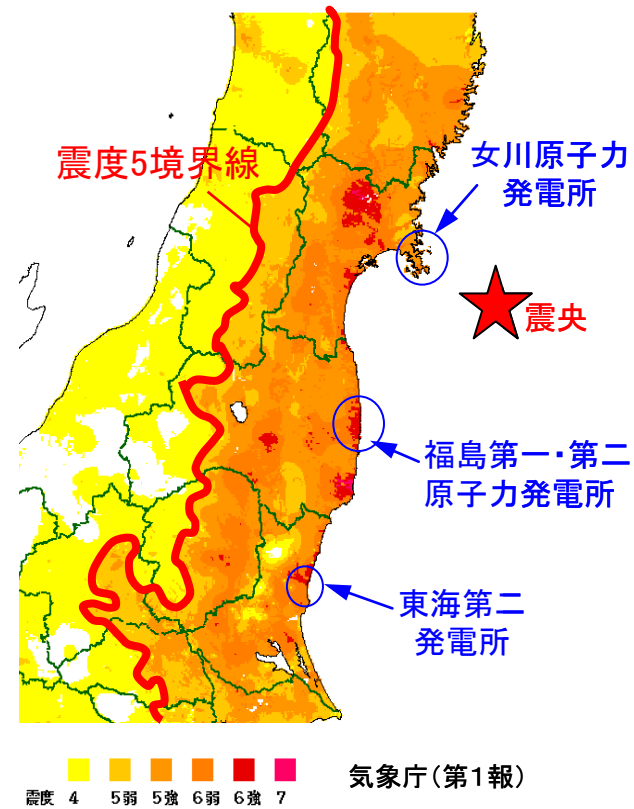


◎引用文献：地震調査研究推進本部・地震調査委員会「主な海溝型地震の評価結果」にJNESが一部加筆 [Online]. <http://www.jishin.go.jp/main/>

図 III-1-6 地震調査研究推進本部で想定していた地震と東北地方太平洋沖地震の比較



図III-1-7 原子力発電所の付近で観測された加速度波形



◎引用文献：気象庁「『平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震』について (第 1 報)」に JNES が一部加筆 [Online]. <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

図III-1-8 東北地方太平洋沖地震による地震動の震度分布

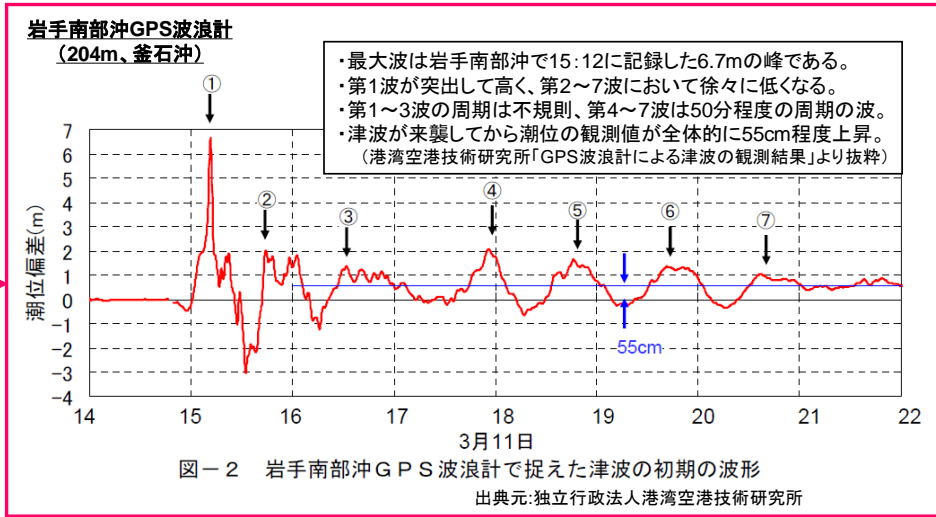
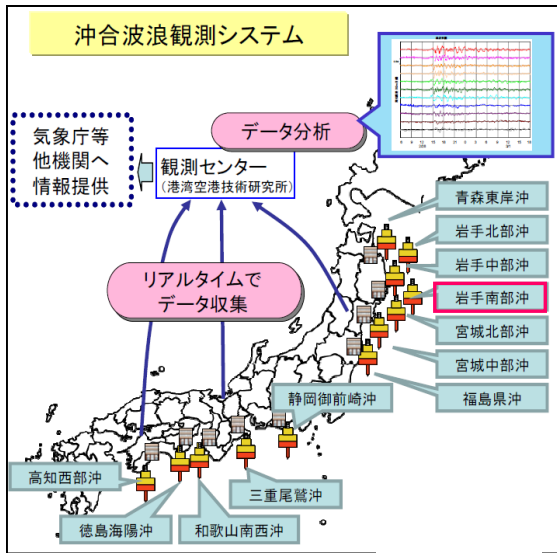


図 III-1-9 岩手県南部沖で観測された津波波形

津波観測状況

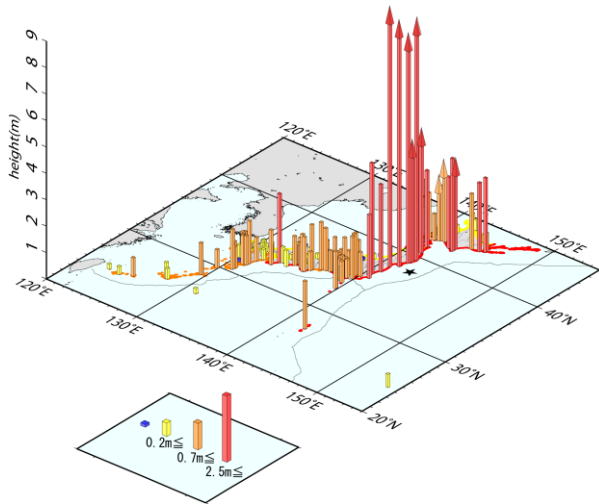


図 III-1-10 津波の観測状況 (中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とする専門調査会議第1回資料より)

観測地点	第一波	最大波
相馬	11日14時55分 押し0.3m	11日15時51分 9.3m以上
宮古	11日14時48分 押し0.2m	11日15時26分 8.5m以上
大船渡	11日14時46分 引き0.2m	11日15時18分 8.0m以上
石巻市鮎川	11日14時46分 押し0.1m	11日15時26分 8.6m以上
大洗	11日15時15分 押し1.8m	11日16時52分 4.2m
釜石	11日14時45分 引き0.1m	11日15時21分 4.1m以上
むつ市関根浜	11日15時20分 引き0.1m	11日18時16分 2.9m
根室市花咲	11日15時34分 引き微弱	11日15時57分 2.8m
十勝港	11日15時26分 引き0.2m	11日15時57分 2.8m以上
浦河	11日15時19分 引き0.2m	11日16時42分 2.7m

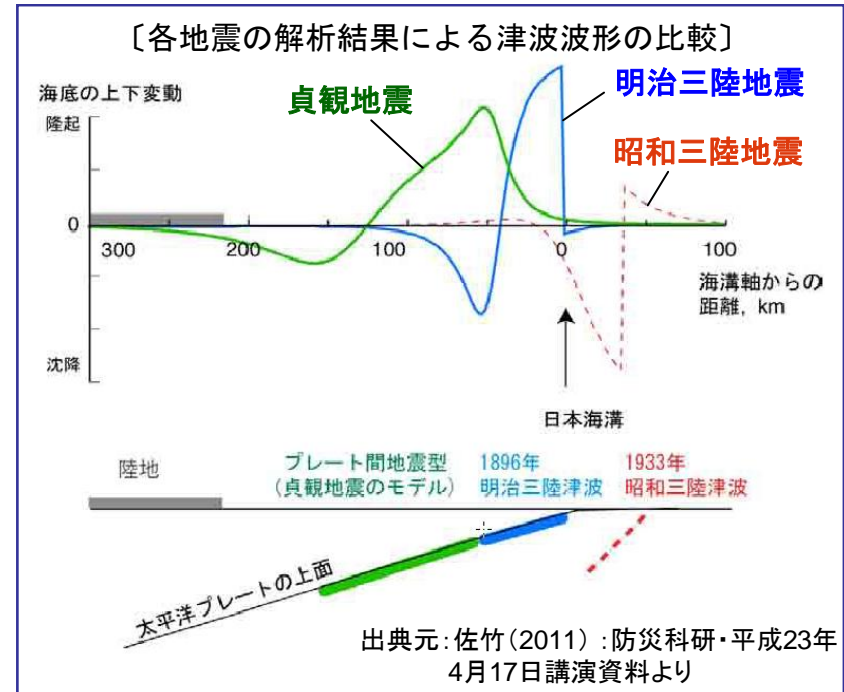
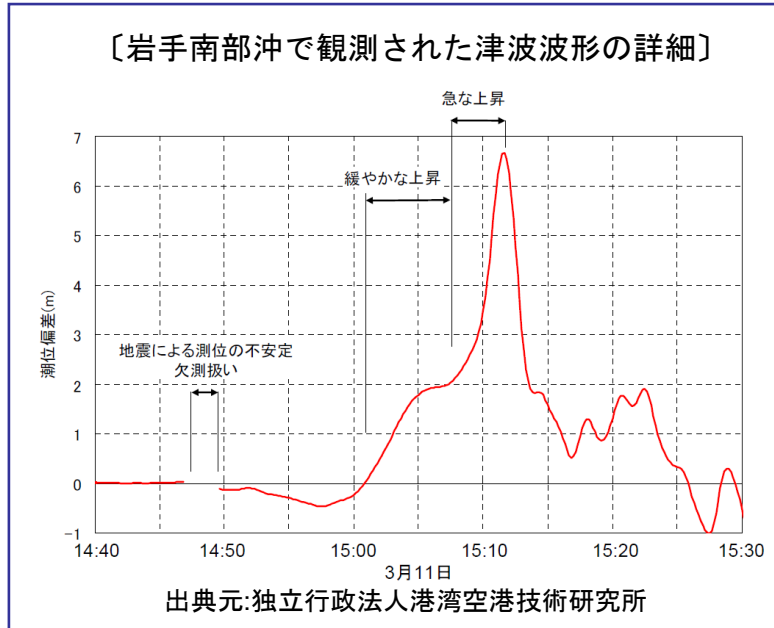
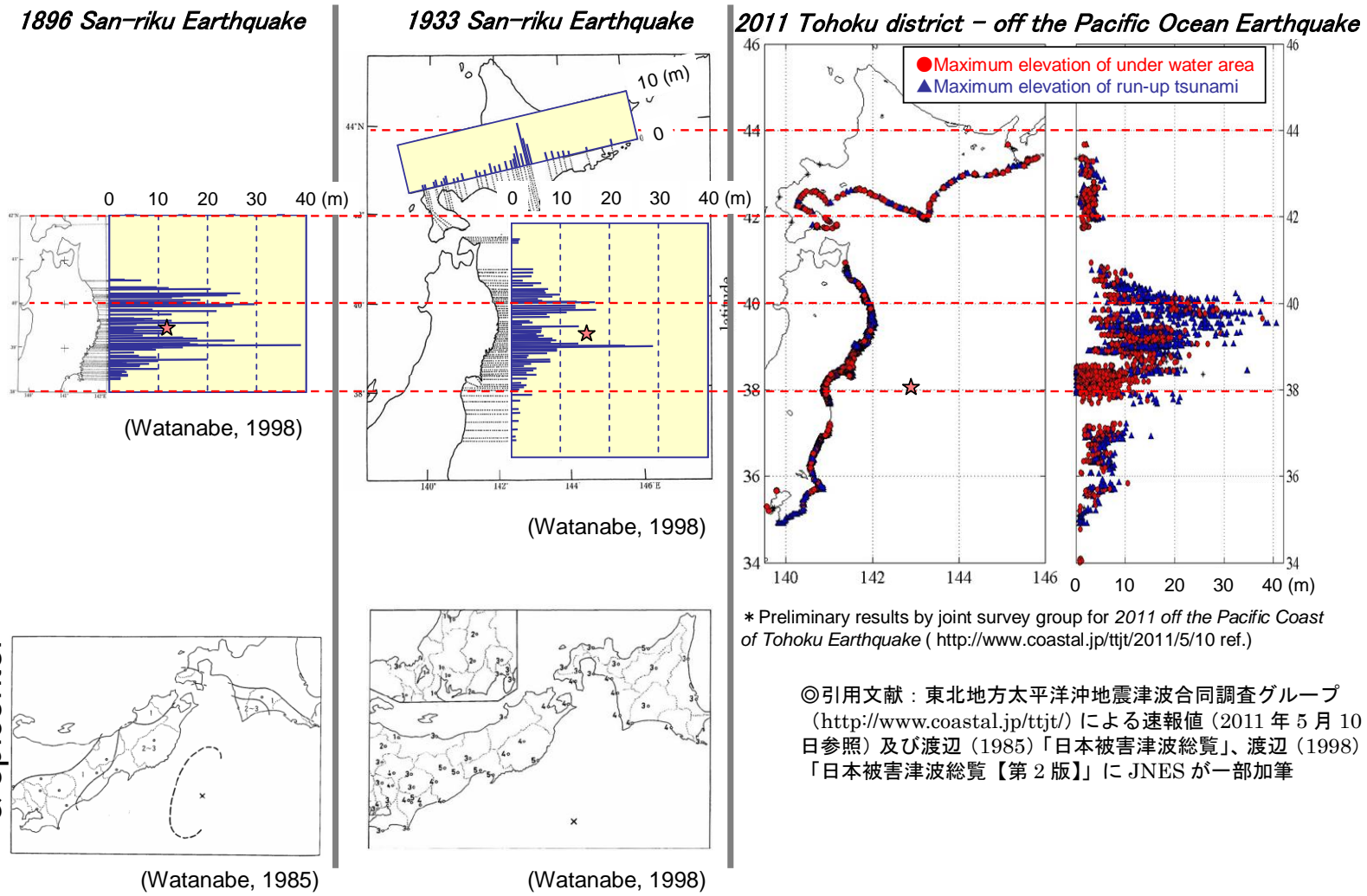


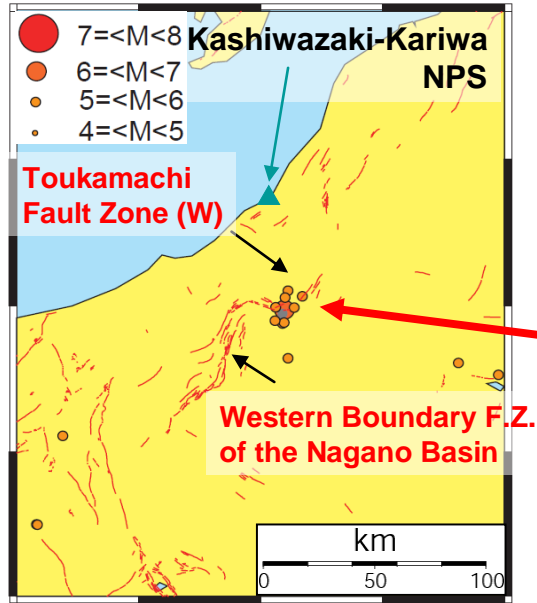
図 III-1-11 東北地方太平洋沖地震で観測された津波波形の特徴

Seismic intensity (JMA) & epicenter
Observed tsunami height

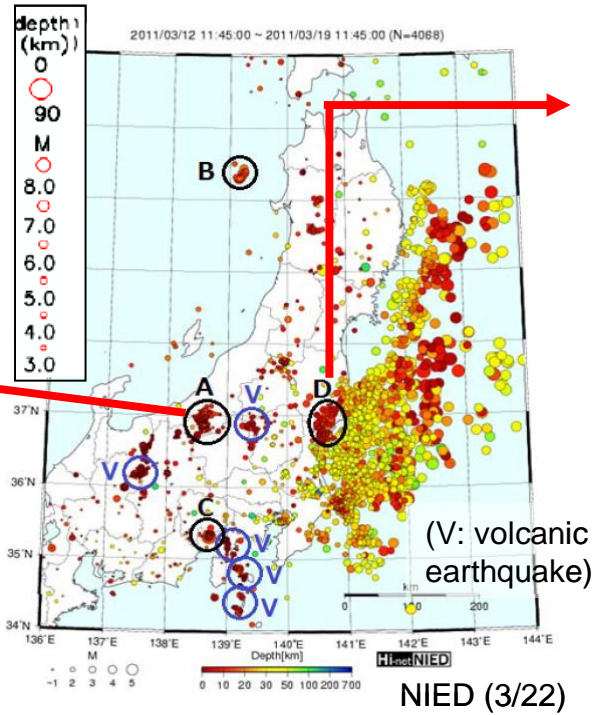


図III-1-12 東北地方太平洋沖地震による津波と過去の地震の各地の遡上高さの比較

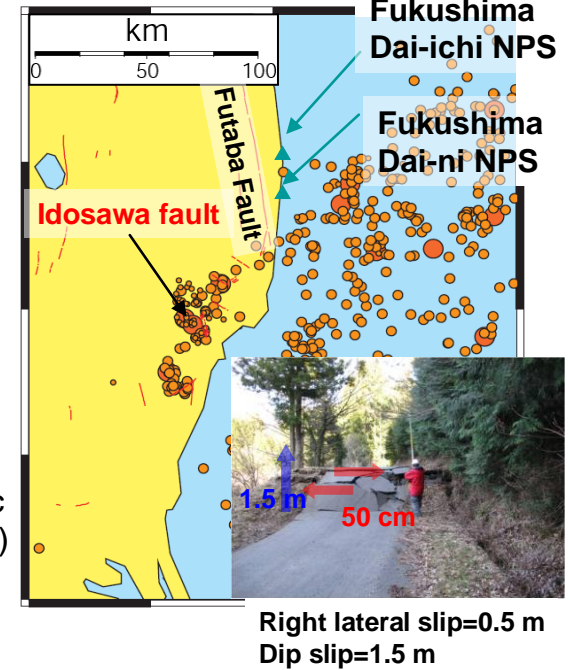
Earthquake near the border between Nagano and Niigata Pref. (M_J6.7, Mar. 12, 2011)



Induced earthquakes



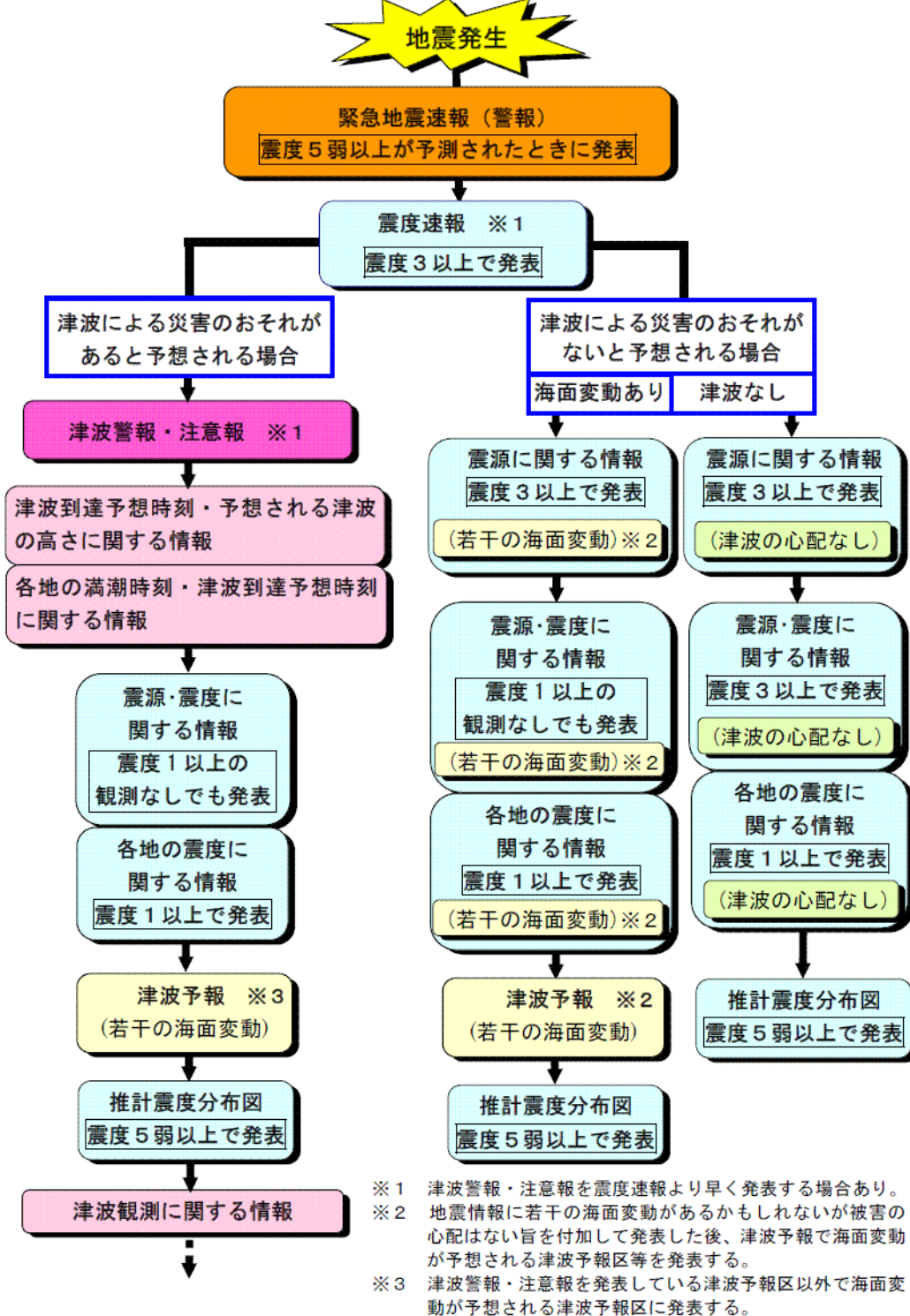
Earthquake in Hamadori, Fukushima Pref. (M_J7.1, Apr. 11, 2011)



©引用文献:防災科学技術研究所「東北地方太平洋沖地震について(速報)」にJNESが一部加筆

図 III-1-13 東北地方太平洋沖地震後に発生した主な誘発地震

地震及び津波に関する情報



◎引用文献: 気象庁「津波警報・注意報、津波情報、津波予報について」
 (http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/index_tsunamiinfo.html)

図 III-1-14 気象庁の地震及び津波の情報発信の手順

表 III-1-1 気象庁の津波警報・注意報及び津波の情報発信の内容

津波警報・注意報の種類

種 類		解 説	発表される津波の高さ
津波警報	大津波	高いところで3m程度以上の津波が予想されますので、厳重に警戒してください。	3m、4m、6m、8m、10m以上
	津波	高いところで2m程度の津波が予想されますので、警戒してください。	1m、2m
津波注意報		高いところで0.5m程度の津波が予想されますので、注意してください。	0.5m

※日本近海で発生し、緊急地震速報の技術によって精度の良い震源位置やマグニチュードが迅速に求められる地震

津波情報の種類

種 類	内 容
津波到達予想時刻・予想される津波の高さに関する情報	各津波予報区の津波の到達予想時刻や予想される津波の高さを発表します。
各地の満潮時刻・津波の到達予想時刻に関する情報	主な地点の満潮時刻・津波の到達予想時刻を発表します。
津波観測に関する情報	実際に津波を観測した場合に、その時刻や高さを発表します。

◎引用文献:気象庁「津波警報・注意報、津波情報、津波予報について」
(http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/index_tsunamiinfo.html)

表 III-1-2 津波の到達時刻と高さ (気象庁の予測及び観測結果の比較)

都道府県	津波警報の発表時刻と津波の予想到達時刻及び高さ						津波第一波及び最大波の確認到達時刻及び高さ			
	14:49 発表 (地震発生 3 分後)		15:14 発表 (地震発生 28 分後)		15:30 発表 (地震発生 44 分後)		第一波		最大波	
	予想時刻	予想高さ	予想時刻	予想高さ	予想時刻	予想高さ	確認時刻	確認高さ	確認時刻	確認高さ
青森県 (太平洋沿岸)	15:30	1m	津波到達を 確認	3m	津波到達を 確認	8m	八戸 15:22	引き 0.8m	八戸 16:57	4.2m 以上
岩手県	既に到達と 推測	3m	津波到達を 確認	6m	津波到達を 確認	10m 以上	釜石 14:45 宮古 14:48 大船渡 14:46	引き 0.1m 押し 0.2m 引き 0.2m	釜石 15:21 宮古 15:26 大船渡 15:18	4.1m 以上 8.5m 以上 8.0m 以上
宮城県	15:00	6m	津波到達を 確認	10m 以上	津波到達を 確認	10m 以上	鮎川 14:46	押し 0.1m	鮎川 15:26	8.6m 以上
福島県	15:10	3m	津波到達を 確認	6m	津波到達を 確認	10m 以上	相馬 14:55	押し 0.3m	相馬 15:51	9.3m 以上
茨城県	15:30	2m	15:30	4m	既に津波到達 と推測	10m 以上	大洗 15:15	押し 1.8m	大洗 16:52	4.2m
千葉県 (九十九里・外房)	15:20	2m	15:20	3m	津波到達を 確認	10m 以上	銚子 15:13	押し 0.5m	銚子 17:22	2.4m

◎引用文献：気象庁「津波情報：津波到達予想時刻と予想される津波の高さに関する情報（平成 23 年 3 月 11 日 14 時 50 分発表）」
 [Online]. http://www.jma.go.jp/jp/tsunami/info_04_20110311145026.html
 気象庁「津波情報：津波到達予想時刻と予想される津波の高さに関する情報（平成 23 年 3 月 11 日 15 時 14 分発表）」
 [Online]. http://www.jma.go.jp/jp/tsunami/info_04_20110311151439.html
 気象庁「津波情報：津波到達予想時刻と予想される津波の高さに関する情報（平成 23 年 3 月 11 日 15 時 31 分発表）」
 [Online]. http://www.jma.go.jp/jp/tsunami/info_04_20110311153109.html
 気象庁「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」について（第 14 報）」
 [Online]. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13a/kaisetsu201103130900.pdf>
 気象庁「「宮古」、「大船渡」の津波観測点の観測値について」
 [Online]. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/23b/stn03231400.pdf>
 気象庁「「石巻市鮎川」の津波観測点の観測値について」
 [Online]. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/29c/201103291900.pdf>
 気象庁「「相馬」の津波観測点の観測値について」
 [Online]. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/13a/201104131600.pdf>
 気象庁「「八戸」の津波観測点の観測値について」
 [Online]. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1105/27b/kaisetsu201105271730.pdf>
 気象庁「「石巻市鮎川」の津波観測点の観測値について（続報）」
 [Online]. http://www.jma.go.jp/jma/press/1106/03b/tsunami_ayukawa2.pdf

*注) 表中の気象庁による津波警報の発表時刻と引用文献の発表時刻に若干のずれがある。

表 III-1-3 各自治体の防災無線による津波に係わる情報の放送状況

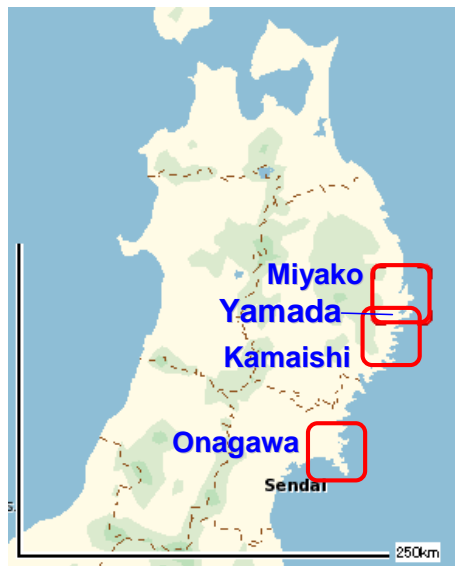
■岩手県における防災行政無線の放送状況

(朝日新聞4月20日オンライン記事より引用)

	防災行政無線の放送状況	実際の津波	避難状況
山田町	「3メートル以上」と放送した。その後、予想される津波の高さが6メートルに切り替わったことをテレビで確認し、放送の準備をした。しかし、消防署庁舎から津波が見えて、全員が屋上に避難し、放送できなかった。	・記事に記載なし	「3メートル程度の津波と思い込み、自宅の2階に避難した人が大勢いる。堤防を越える津波を見て慌てて逃げた」と話す。
釜石市	14時50分に気象庁が発表した予想に基づき、「高いところで3メートル程度の津波が予想されます。海岸付近の方は直ちに近くの高台か避難場所に避難するよう指示します。」と市内96カ所のスピーカーで放送した。気象庁は津波予想を、15時14分に6メートルと切り替え、同31分に10メートル以上とした。しかし、市は停電で気象庁情報を伝えるメールを県から受け取ることができなくなっていた。この間、避難を指示する放送を6回繰り返した。	釜石港には約9メートルの津波が押し寄せたとされる。	<ul style="list-style-type: none"> ・市民の中には「津波は3メートル」と思い込み、2階へ避難すれば大丈夫と判断した人が多かった。 ・2階建ての同市鶉住居（うのすまい）地区の防災センターには周辺住民150～200人が駆け込んだが、2階まで被災し、生存者は約30人だった。 ・避難した市民は「もっと高い津波と知っていたら山に逃げた」と話す。漁師は、立派な防潮堤があるので、3メートルの津波なら避難しなくていいだろうと思ったという。 ・同市の死亡・行方不明者は1300人を超えた。
大船渡市	当初から津波の高さを言わず、大津波警報の発令と高台への避難のみを呼びかけた。	大船渡港を襲った津波は約9.5メートルとされる。	・同市の死亡・行方不明者は約500人。
陸前高田市	資料がすべて流されてしまったため、どんな放送をしたか分かっていない。	・記事に記載なし	・記事に記載なし

■宮城県における防災行政無線の放送状況

	防災行政無線の放送状況	実際の津波	避難状況
南三陸町	気象庁は当初から6メートルの大津波警報が出ており、南三陸町では、地震直後から「6メートルの津波が来ます」と防災無線で呼びかけた。	・津波は15メートルを超えた。	<ul style="list-style-type: none"> ・無線を聞いて高台に避難した町民も多かった。 ・3階建ての防災対策庁舎が水にのまれて、多くの町職員が犠牲になった。
気仙沼市	気仙沼市の対策本部によると、当日は、気象庁の大津波警報が出た時点で防災無線を使って避難を呼びかけた。具体的な津波の高さを明示して注意を促したかどうかは記録が残っていないが、「とにかく高台に避難を、と徹底的に呼びかけた」という。	・記事に記載なし	・記事に記載なし



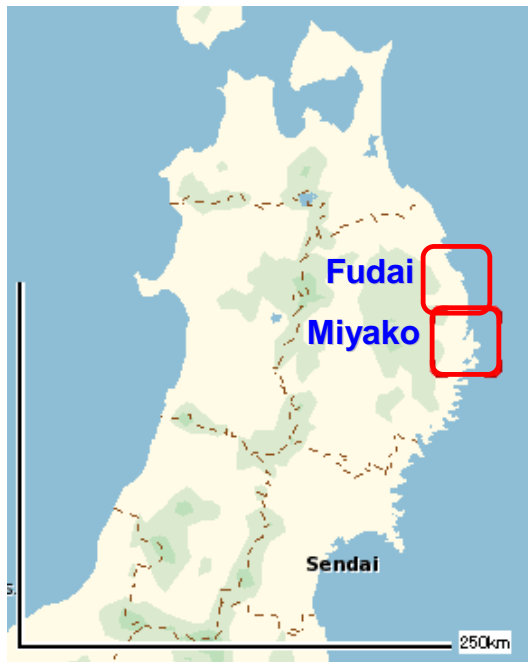
〔津波の洗掘による防潮堤の倒壊〕



〔押し波の波圧による施設の薙ぎ倒し〕



図III-1-15 津波による防潮堤及び施設の被害状況



〔田老地区の10m防潮堤の倒壊〕



Miyako

〔太田部地区の15.5m防潮堤の健全性〕



Fudai

図III-1-16 岩手県宮古市田老地区及び普代村太田部地区における津波に対する防潮堤の堅牢の違いによる被害の明暗

〔 姉吉地区入り口の石碑(標高60m) (集落から海岸方向へ写す) 〕



Miyako

〔 姉吉集落近くまで到達した津波遡上 (海岸から集落方向へ写す) 〕



Miyako

図III-1-17 岩手県宮古市姉吉地区の石碑と津波遡上の状況

2. 福島原子力発電所を襲った地震と津波による被害

(1) 福島第一原子力発電所で観測された地震動及び津波高

① 地震動関連

a 地震動観測システム及び観測記録

福島第一原子力発電所の地震動観測システムは、図 III-2-1 に示すように、原子炉建屋の地下 1 階及び地上 2 階に設置した地震計及び敷地内の南と北の 2 箇所⁵の地下鉛直アレー観測用地震計(それぞれ 5 か所)と観測記録装置から構成される。地震計は、水平 2 成分、上下成分の加速度時刻歴波形を観測する。

福島第一原子力発電所では、地震計が 53 箇所設置されている。地震動はこれらのうち 29 箇所⁵で記録された。しかし、東京電力の調査によれば、7 箇所の地震計の加速度時刻歴波形の記録が、130～150 秒程度で中断していた。東京電力の調査で、原因は、記録装置のソフトウェアの不具合であることがわかった。

原子炉建屋基礎版上の水平方向(東西・南北)及び上下方向の計 3 成分の観測地震動の最大加速度の一覧を表 III-2-1 に示す。水平方向での最大加速度は、2 号機の 550Gal(東西方向)、上下方向は 2 号機の 302Gal であった。

b 基準地震動 S_s と観測地震動との関係

基準地震動 S_s (S_{s1} ～ S_{s3})は、耐震バックチェックにおいて、福島県沖のプレート境界地震、敷地下方のスラブ内地震⁵、敷地周辺の活断層及び震源を特定せず策定する地震を対象として、これらによる地震動を包絡するように策定されている。

建屋内地下 1 階基礎版の地震計設置位置での基準地震動 S_s に対する最大応答加速度を表 III-2-1 に示す。表から、観測最大加速度の多くは基準地震動 S_s に対する最大応答加速度より小さい。しかし、2 号機、3 号機及び 5 号機の東西方向の観測最大加速度は、基準地震動 S_s に対する最大応答加速度より大きい。図 III-2-2(a)に、2 号機の東西方向の加速度時刻歴波形を示す。

2 号機、3 号機及び 5 号機の原子炉建屋基礎版上の観測記録の応答スペクトルと基準地震動 S_s を原子炉建屋基礎版に入力

⁵ スラブ内地震：深く沈み込んだ海洋性プレートの内部が破断を生じるようなタイプの地震のこと。

した場合の建屋基礎版の応答スペクトルとの比較図を図 III-2-2(b)に示す。同図から、2号機、3号機及び5号機の観測記録の応答スペクトルは、0.2秒から0.3秒程度までの周期において、 S_s に対する建屋基礎版上の応答スペクトルを超過している。

c 確率論的地震ハザード評価と基準地震動 S_s の超過確率

耐震設計審査指針は2006年に改定された。新耐震指針では、基準地震動 S_s を超える地震動の可能性が否定できないとの観点から「残余のリスク」の存在を認知し、基準地震動 S_s の超過確率を参照することとした。保安院は、新耐震指針を踏まえて、事業者に耐震バックチェック(基準地震動 S_s の妥当性及び施設の安全性評価)の実施を指示した。事業者は、耐震バックチェックの一環として、基準地震動 S_s の超過確率を日本原子力学会地震 PSA 実施基準[III2-1]の地震ハザード評価手順に基づき評価し、保安院へ報告している。

福島第一原子力発電所の超過確率別応答スペクトル地震ハザードを図 III-2-3に示す。図中には、 S_s -1H 及び S_s -2H の応答スペクトルも示している。図から、基準地震動 S_s の超過確率は、 10^{-4} ~ 10^{-6} /年の範囲にある。

② 津波関連

a 潮位観測システム及び観測記録

潮位観測システムは、潮位計及び観測記録装置からなる。潮位計は、港内静穏域、潮位観測記録装置はデータ中継装置建屋に設置されている。東京電力の記者会見(4月9日)によると、津波の最初の大きな波は、15時27分頃(地震発生41分後)に到達し、水位は約4mであった。次に大きな波は、15時35分に到達した波であり、潮位計が損傷したため水位は不明である。潮位計の測定範囲は7.5mである。

福島第一原子力発電所の敷地高さは1~4号機が10m、5号機及び6号機は13mである。これらの敷地には、津波が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。東京電力は、浸水時の痕跡調査結果に基づき浸水高を報告している。報告結果を図 III-2-4中に示す。1~4号機の原子炉建屋、タービン建屋等の海側の敷地の浸水高は、図中 H~K 地点にお

いて、O.P.約+14～15 m(O.P.:小名浜港工事基準面)である。今回の地震による津波水位について、専門家は、東京電力より公開された津波の防波堤(10m)の越流状況の写真(図 III-2-5 参照)に基づき、10m 以上と推定している。

今回の地震では、宮城県から福島県の沿岸域の平均的な沈降は約 0.8m となっているが、津波の襲来時には地盤の沈降により、敷地高さが変化することもあることを考慮する必要がある。

b 設計津波水位と観測津波水位との関係

設置許可申請書では、図 III-2-6 に示すようにチリ地震(M9.5、1960 年)を対象波源とし、設計津波水位を 3.1m としている。2002 年に、東京電力は、土木学会原子力土木委員会津波評価部会の「原子力発電所の津波評価技術(2002 年)」(以下、津波評価技術という。)[III2-2]に基づき、図 III-2-6 中に示す福島県沖地震(M7.9、1938 年)を自主的に M8.0 として設計津波水位を評価し、各号機の水位を 5.4m から 5.7m とした。この評価結果に基づき、6 号機非常用ディーゼル発電機の海水系ポンプの電動機部分の据付け高さを 20cm、同じく高圧炉心スプレー用の海水ポンプの電動機部分の据付け高さを 22cm かさ上げした。

上記の土木学会の津波評価技術は、IAEA の津波技術基準 DS417[III2-3]にも反映されている。しかしながら、この評価法は、津波の再来周期を特定していない。

地震関連の審査のために開催された第 32 回耐震・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(2009 年 6 月 24 日)において、869 年貞観地震による津波について、産業技術総合研究所や東北大学の調査報告が出ているが、この津波の原因となった地震について触れられていないとの指摘があった。これに対して原子力安全・保安院は、第 33 回合同ワーキンググループ(2009 年 7 月 13 日)において、貞観地震による津波について新たな知見が得られた場合、設計用津波水位の評価に貞観地震を考慮するよう事業者に求めた。

c 確率論的津波ハザード評価と設計津波水位の超過確率

土木学会津波評価部会は、確率論的津波ハザード解析手法について検討を進めている。検討の一環として、津波ハザード評価手法や津波の超過確率の試評価結果(図 III-2-7)が既に発表

されているが[III2-4～III2-6]、完成には至っていない。その他の津波ハザードの試評価も発表されている[III2-7]。

③ 被害関係

a 外部電源関係

福島第一原子力発電所の外部電源の送電網とその被害状況を、図 III-2-8(a)及び図 III-2-8(b)に示す。同図に示すように、新福島変電所からの大熊線 1L 及び 2L(275kV)が 1、2号機用の開閉所を經由して、1号及び2号機の常用高圧配電盤に、さらに、東北電力からの東電原子力線(66kV)が 1、2号機用の開閉所を經由して1号機常用高圧配電盤に接続されていた。3、4号機は同様に大熊線 3L 及び 4L(275kV)が 3、4号機用の開閉所を經由して、3、4号機の常用高圧配電盤に接続されていた。5、6号機も同様に夜の森線 1L 及び 2L(66kV)が 5、6号機常用高圧配電盤に接続されていた。

また、1号常用高圧配電盤、2号常用高圧配電盤及び3、4号機常用高圧配電盤は相互に接続されており、電力融通が可能な状態であった。地震当日の送電状況は、3、4号開閉所内の大熊線 3L 用開閉施設が工事中だったため、結果として福島第一原子力発電所には合計6回線の外部電源が接続されていた。新福島変電所は、敷地から約8kmの位置にあり、今回の地震による震度は6強と予想されている。

地震により、1、2号機の開閉所の遮断器が損傷し、東北電力からの東電原子力線についても、原因は推定できないが、ケーブルが損傷した。3、4号機は、工事中的の大熊線 3Lに加え、新福島変電所側の 3L 及び 4L の遮断器等が損傷した。また、5、6号機は、開閉所に接続する送電鉄塔1本(#27鉄塔)が倒壊した。結果として1号機から6号機までの全ての外部電源が失われた。

b 海水系ポンプ及び非常用電源系

福島第一原子力発電所の補機冷却用海水ポンプ施設(高さ5.6～6m)は、図 III-2-4に示すように、津波によって全号機が冠水した。津波の波力によって損傷したかは確認中である。また、原子炉建屋やタービン建屋の地下階(高さ0m～5.8m)に設置されている非常用ディーゼル発電機及び配電盤が、6号機を除き冠水し、非常用電源の供給が失われた。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、原子炉建屋の地下 1 階に設置されていて冠水したが、1 台は、ディーゼル発電機建屋 1 階に設置されていたので冠水せず、非常用電源の供給が可能であった。

(2) 福島第二原子力発電所で観測された地震動及び津波

① 地震動関連

a 地震動観測システム及び観測記録と観測地震動

福島第二原子力発電所の地震動観測システムは、基本的に前述の 2.(1) 福島第一原子力発電所と同様である。福島第二原子力発電所には、地震計は 43 箇所設置されている。これら全地震計で本震による地震動の加速度時刻歴データが収録された。しかし、福島第一原子力発電所と同様に、記録装置のソフトウェアの不具合が原因で、11 箇所の地震計の記録が 130～150 秒程度で中断している。

原子炉建屋基礎版上の水平方向 2 成分(東西・南北)及び上下方向の計 3 成分の観測記録の最大加速度の一覧を表 III-2-2 に示す。水平方向の最大加速度は 3 号機の 277Gal(南北方向)、上下方向は 1 号機の 305Gal であった。

b 基準地震動 S_s と観測地震動との関係

基準地震動 S_s (S_{s1} ～ S_{s3}) は、耐震バックチェックにおいて、福島沖のプレート境界地震、敷地下方のスラブ内地震、敷地周辺の活断層及び震源を特定せず策定する地震を対象としており、これらによる地震動を包絡するように策定されている。原子炉建屋内地下 1 階基礎版での基準地震動 S_s に対する最大応答加速度を表 III-2-2 中に示す。表から、全号機の観測記録の最大加速度は S_s に対する最大応答加速度より小さい。

水平方向の加速度が最も大きかった 3 号機の建屋基礎版上の観測地震動の応答スペクトル及び時刻歴波形を図 III-2-9 に示す。同図には、基準地震動 S_s を原子炉建屋に入力した場合の建屋基礎版の応答スペクトルを併せて示す。この図から、観測記録による応答スペクトルは、基準地震動 S_s に対する建屋基礎版上の応答スペクトルを下回っていることがわかる。

c 確率論的地震ハザード評価と基準地震動 S_s の超過確率

福島第二原子力発電所の超過確率別速度応答スペクトル地震ハザードを図 III-2-10 に示す。図中には、S_s-1H 及び S_s-2H の応答スペクトルも示している。同図から、基準地震動 S_s の超過確率は、10⁻⁴～10⁻⁶/年の範囲にあるとわかる。

② 津波関連

a 潮位観測システム及び観測記録

福島第二原子力発電所の潮位観測システムは、基本的に前述の 2.(1) 福島第一原子力発電所と同様である。東京電力の記者会見(4月9日)によると、最初の大きな波は、15時23分頃(地震発生37分後)に到達し、その後、15時35分に次の大きな波が到達した。その後の状況は不明である。

潮位計が損傷したため、観測記録は保存されなかった。そのため、津波水位の時刻歴波形や最大水位は不明である。

東京電力は、前述の 2.(1) 福島第一原子力発電所と同様に、浸水時の痕跡調査結果に基づき浸水高を報告している。報告結果を図 III-2-11(a) に示す。福島第二原子力発電所は、海水ポンプ等が設置されている海側エリアと、原子炉建屋、タービン建屋等が設置されている一段高い山側エリアからなる。津波は、敷地前面の海側エリアから浸水し、その後、図に示すように、山側エリアのうちの 1 号機南側と斜面間の狭隘部から浸水し、山側エリアの背後まで達した。この狭隘部以外からの浸水はなかった。海側エリアの浸水高は O.P.約+6.5～7m(O.P.:小名浜港工事基準面)、山側エリアでは O.P.約+14～15m であった。

b 設計津波水位と観測津波水位との関係

設置許可申請書では福島第一原子力発電所と同様チリ地震(M9.5、1960年)を対象波源として、各号機の設計津波水位を 3.1m～3.7m としている。前述の土木学会の津波評価技術(2002年)に基づく評価では、福島第一原子力発電所と同様に福島県沖地震(M7.9、1938年)を M8.0 として評価し、各号機の設計津波水位を 5.1m～5.2m としている。

③ 被害関係

a 外部電源関係

福島第二原子力発電所の外部電源の送電網は、1～4号機が供

用で敷地内超高圧開閉所と敷地外の富岡線 1、2 号 (500kV) の 2 回線、岩井戸線 1、2 号 (66kV) の 2 回線の計 4 回線があり、これらは 8km 上流の新福島変電所に繋がり、更に約 40km 上流の新しいわき開閉所へ繋がっている。そのうち、岩井戸線 1 号は点検中で、送電を停止していた。

新福島変電所周辺地域における地震動の強さは、震度 6 強と推定されている。福島第二原子力発電所 1~4 号機への 500kV 富岡線 2 号線と 66kV 岩井戸線 2 号線が変電所側機器の地震による故障のため送電を停止した。しかし、富岡線 1 号が送電可能であったことにより、1~4 号機の電源供給は継続された(図 III-2-8(a) 参照)。

b 海水系ポンプ及び非常用電源系

補機冷却用海水ポンプ施設(高さ 6m)のうち、3 号機のもは、津波による冠水を免れ、機能を確保したが、他の号機は、冠水し機能を喪失した。

原子炉建屋地下階(高さ 0m)に設置の非常用ディーゼル発電機のうち、3 号機及び 4 号機のもは機能を確保したが、その他の号機は冠水により機能を喪失した(図 III-2-11(b) 参照)。

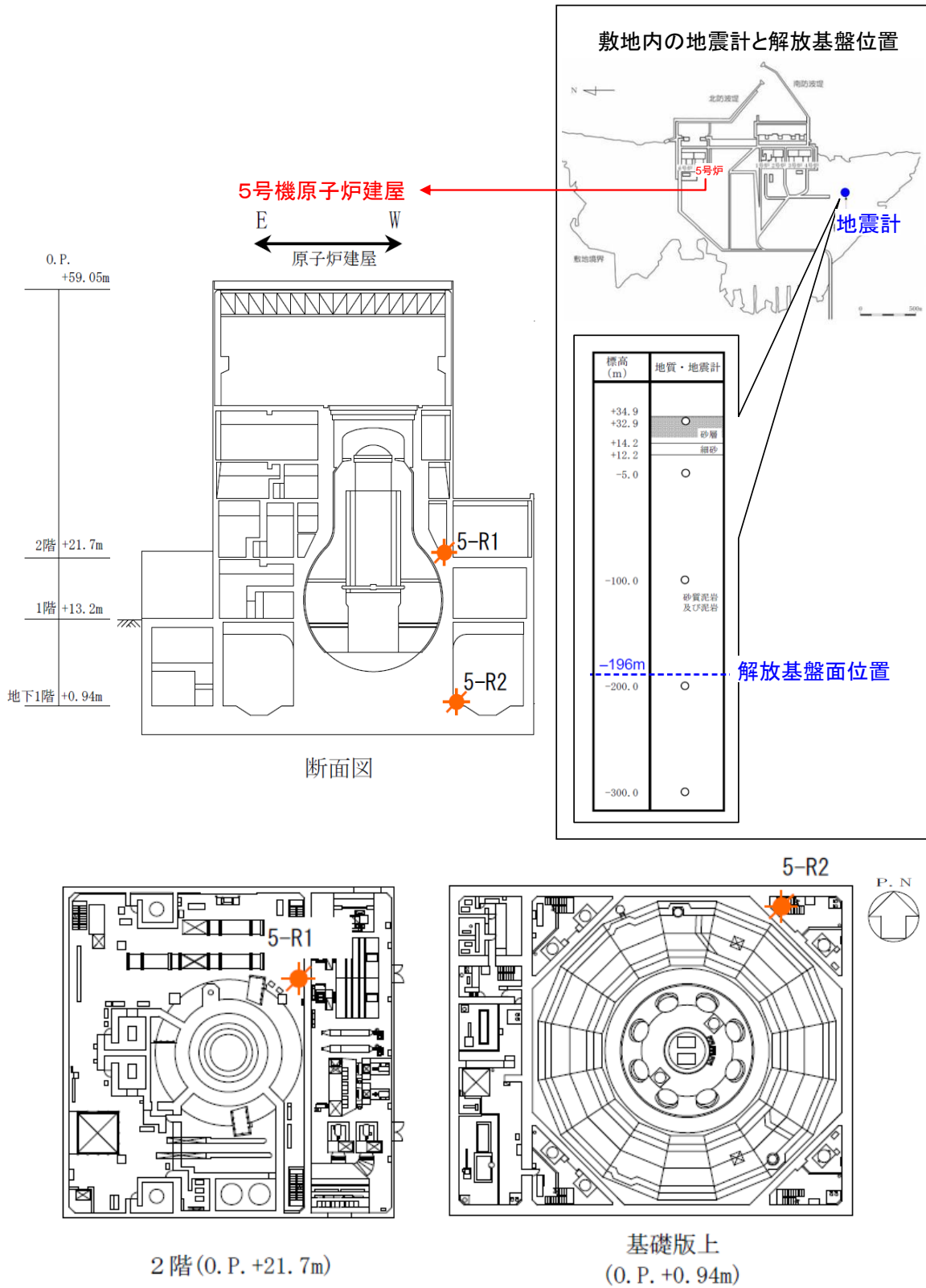
このように 3 号機だけが、補機冷却及び非常電源の機能が確保された。

参考文献

- [III2-1] 日本原子力学会, "原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準, 日本原子力学会標準, 2007, " AESJ-SC-P006 : 2007, 2007 年 9 月.
- [III2-2] 土木学会 原子力土木委員会津波評価部会, "原子力発電所の津波評価技術," 2002 年 2 月.
- [III2-3] IAEA, *IAEA Safety Standards: Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*, DRAFT SAFETY GUIDE, DS417.
- [III2-4] 安中正, 佐竹健治, 榊山勉, 柳沢賢, 首藤伸夫, "確率論的津波ハザード解析の方法," 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, No.0013, pp.158-161, 2006.
- [III2-5] T. Sakai, T. Takeda, H. Soraoka, K. Yanagisawa and T. Annaka, "Development of a Probabilistic Tsunami Hazard

Analysis in Japan," 14th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE14-89183, pp.69-75,2007.

- [III2-6] 原子力土木委員会津波評価部会,"津波評価手法の高精度化研究－津波水位の確率論的評価法ならびに分散性と砕波を考慮した数値モデルの検討－," 土木学会論文集 B,Vol.63,No.2, pp.168-177,2007.
- [III2-7] 杉野英治,岩淵洋子,国司清生,坂上正治,蛭沢勝三,"南海トラフの地震発生の変動性が地域別津波ハザードに及ぼす影響,"第13回日本地震工学シンポジウム, 2010.



図III-2-1 福島第一原子力発電所敷地内及び原子炉建屋（5号機）の地震計配置図

表 III-2-1 福島第一原子力発電所・原子炉建屋基礎版上の最大加速度

観測点 (原子炉建屋最地下階)		観測記録 (暫定値 ^{※1})			基準地震動 Ss に対する 最大応答加速度値 (ガル)		
		最大加速度値 (ガル)			南北方向	東西方向	上下方向
		南北方向	東西方向	上下方向			
福島第一	1号機	460 ^{※2}	447 ^{※2}	258 ^{※2}	487	489	412
	2号機	348 ^{※2}	550 ^{※2}	302 ^{※2}	441	438	420
	3号機	322 ^{※2}	507 ^{※2}	231 ^{※2}	449	441	429
	4号機	281 ^{※2}	319 ^{※2}	200 ^{※2}	447	445	422
	5号機	311 ^{※2}	548 ^{※2}	256 ^{※2}	452	452	427
	6号機	298 ^{※2}	444 ^{※2}	244	445	448	415

※1：これらの記録については暫定値であるため、今後の検討により変更となる可能性がある。

※2：記録開始から約130～150秒程度で記録が終了

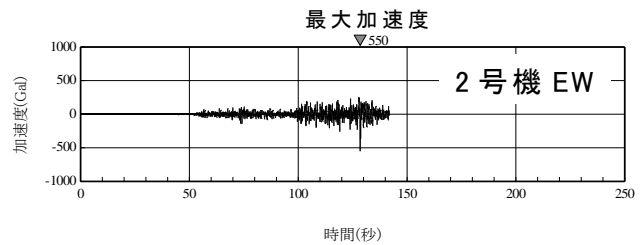
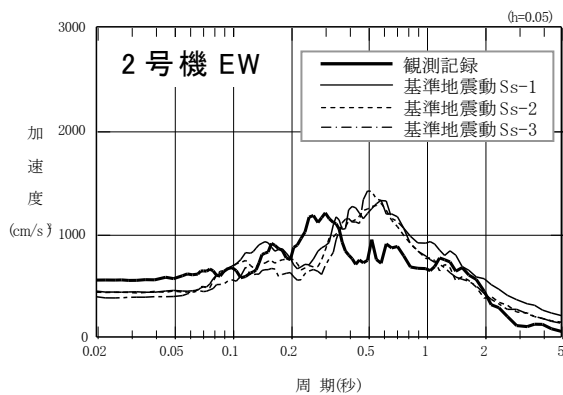


図 III-2-2 (a) 福島第一原子力発電所・原子炉建屋基礎版上の加速度記録

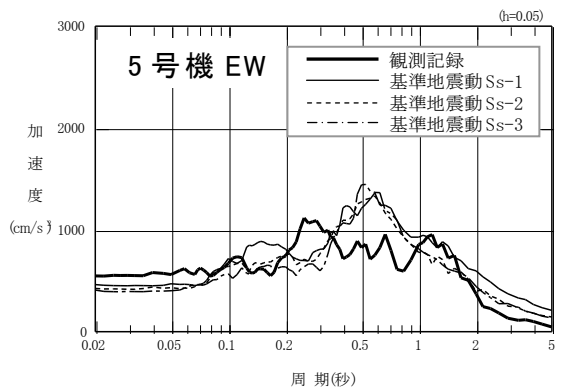
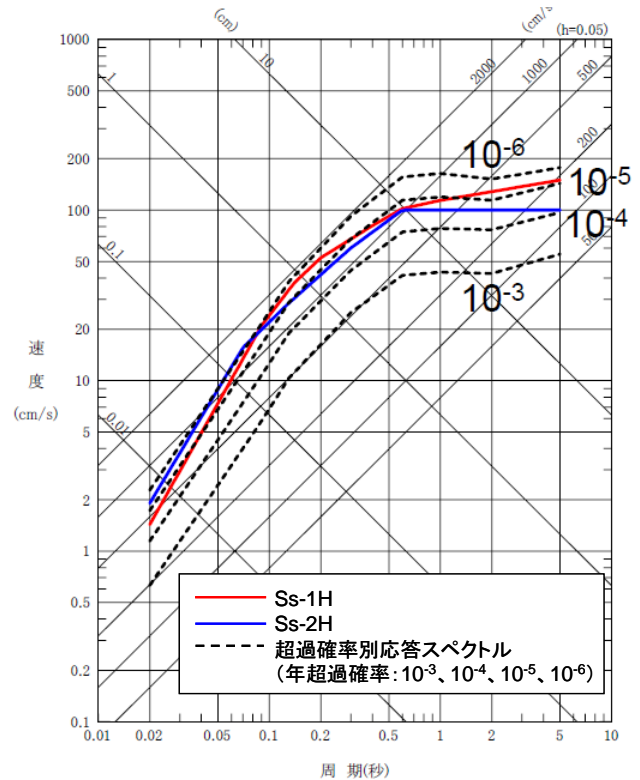
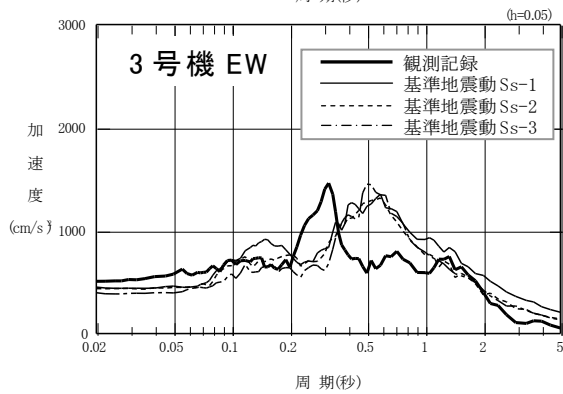
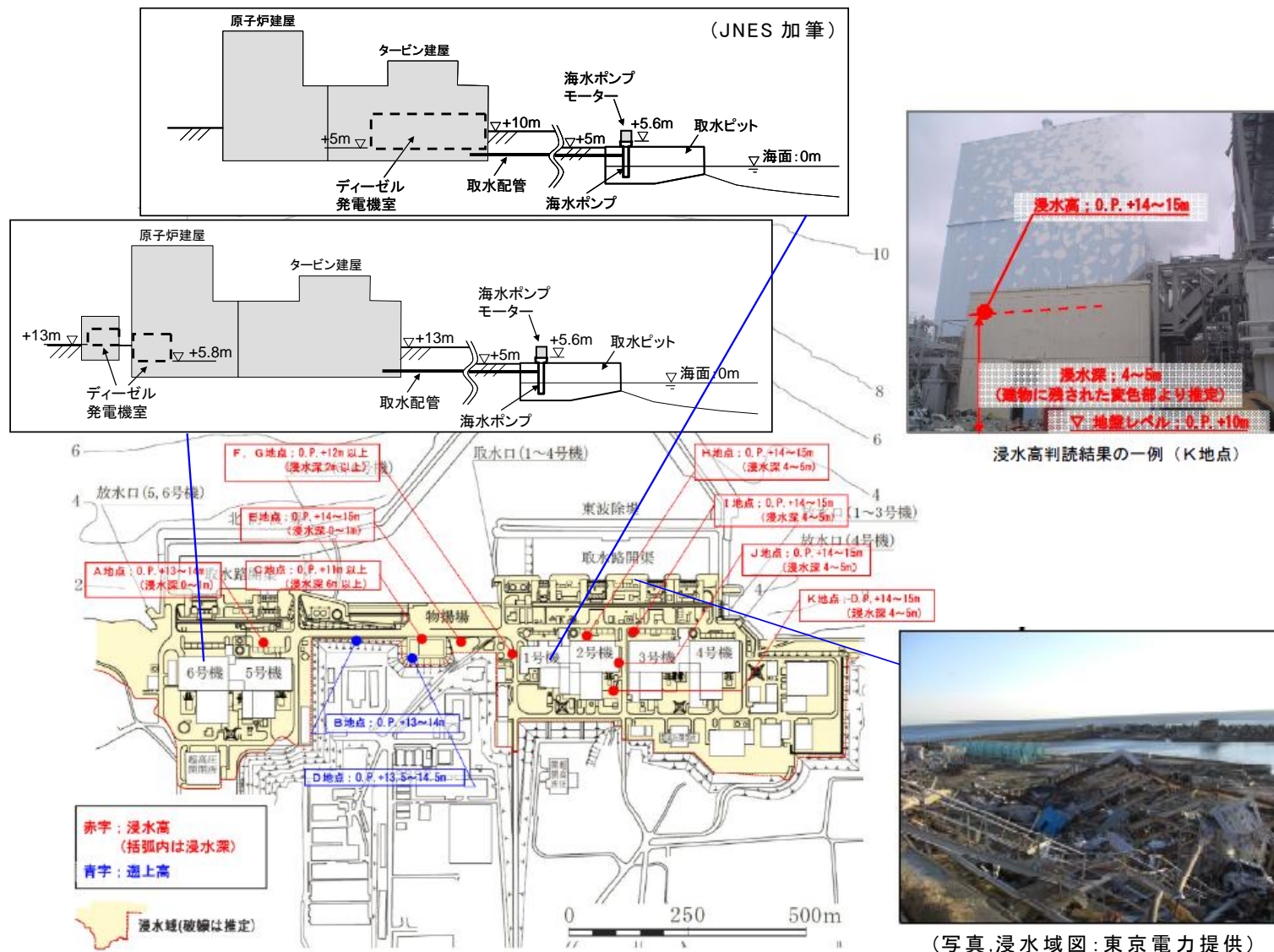


図 III-2-2 (b) 福島第一原子力発電所・原子炉建屋基礎版上の応答スペクトル

図 III-2-3 福島第一原子力発電所の基準地震動 Ss の超過確率

(各図表：東京電力提供)



図III-2-4(a) 福島第一原子力発電所の津波による被害状況(1)



【福島第1原発 津波来襲状況 2011年3月11日 固体廃棄物貯蔵庫東側のり面(5号機の近傍(南側)から東側を撮影)＝東京電力提供】

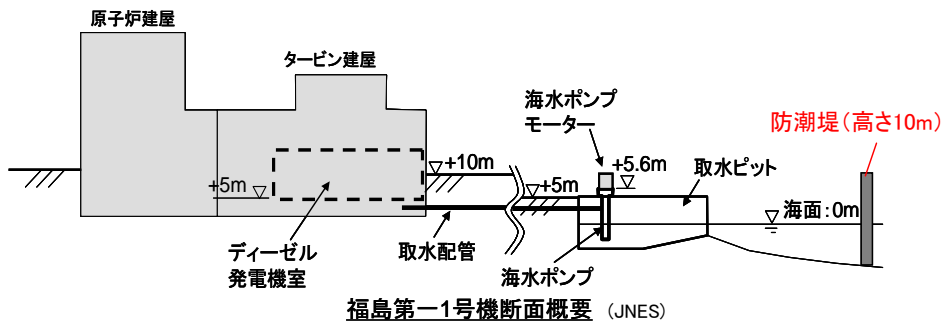


【福島第1原発 津波来襲状況 2011年3月11日 固体廃棄物貯蔵庫東側のり面(5号機の近傍(南側)から東側を撮影)＝東京電力提供】



【福島第1原発への津波来襲状況 2011年3月11日 廃棄物処理建屋4階から北側を撮影】午後3時43分ごろ(2)＝東京電力提供】

図III-2-4 (b) 福島第一原子力発電所の津波による被害状況 (2)



【福島第1原発 津波来襲状況 2011年3月11日 固体廃棄物貯蔵庫東側のり面(5号機の近傍(南側)から東側を撮影)＝東京電力提供】

図III-2-5 福島第一原子力発電所の防潮堤を越流する津波の状況

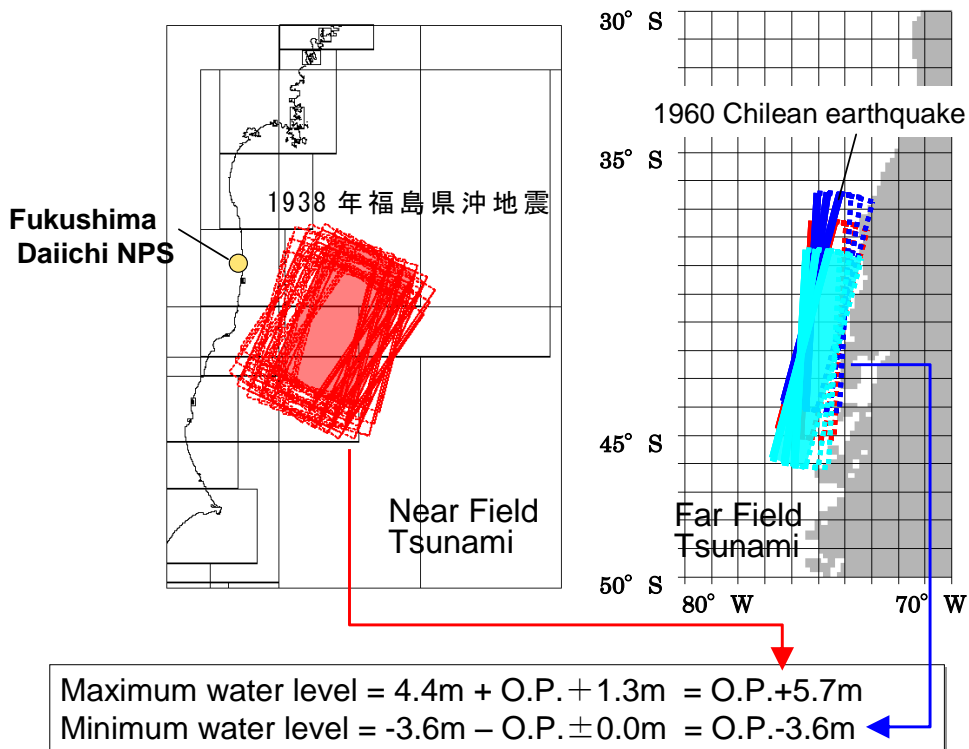
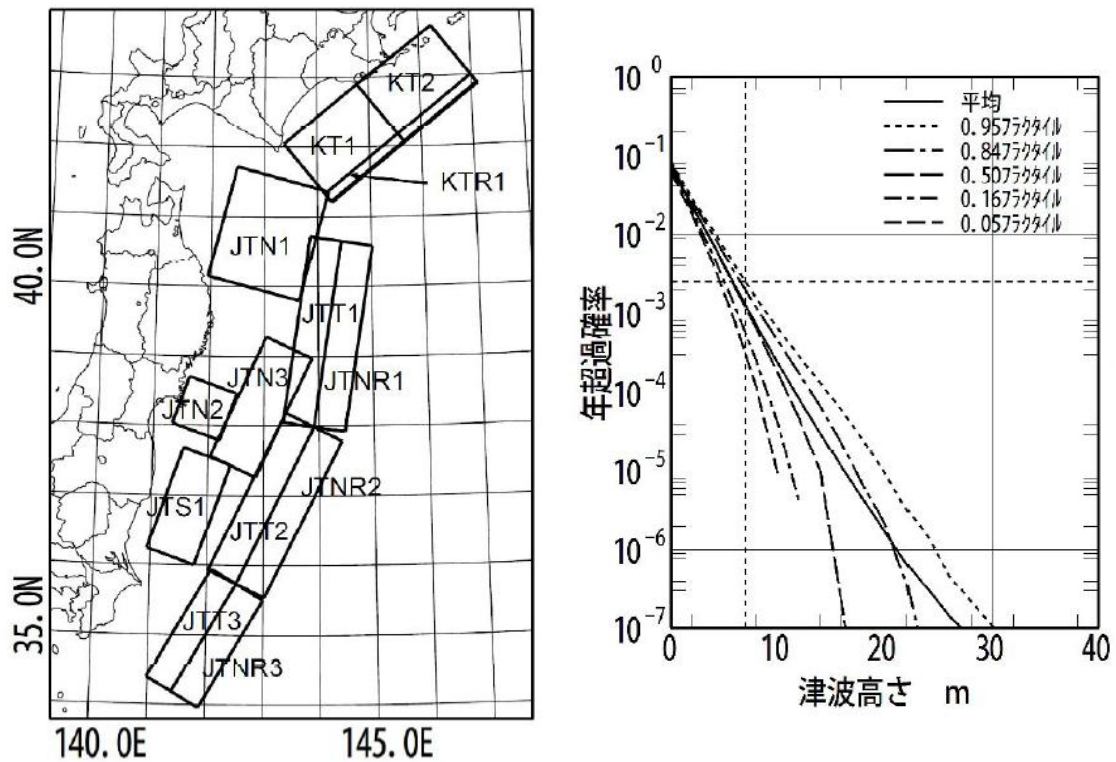


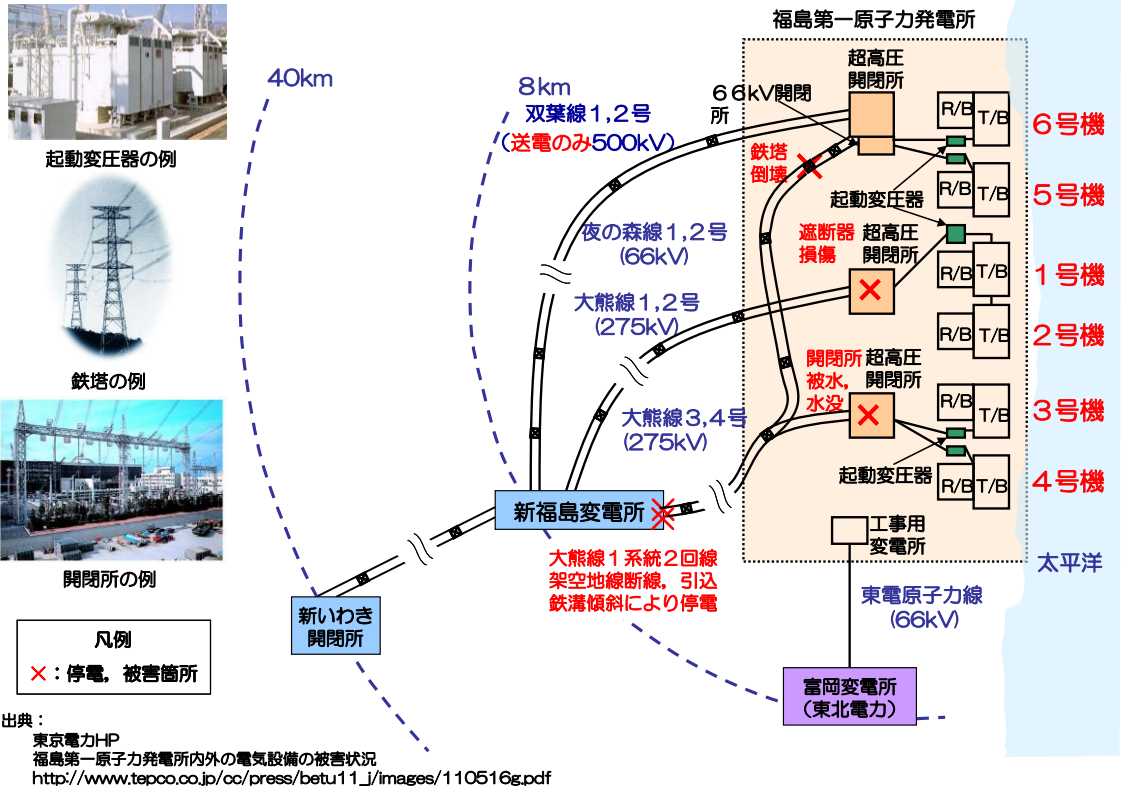
図 III-2-6 東京電力が評価した福島第一原子力発電所の設計津波水位
 (高尾/東京電力; 第1回柏崎国際原子力耐震安全シンポジウム 2010、発表資料より引用)



[文献 III2-6] 原子力土木委員会津波評価部会, 土木学会論文集より引用

図III-2-7 土木学会・近地及び遠地の津波波源を考慮した津波ハザード
 試算結果(評価サイト: 岩手県山田町)

〔福島第一原子力発電所〕



〔福島第二原子力発電所〕

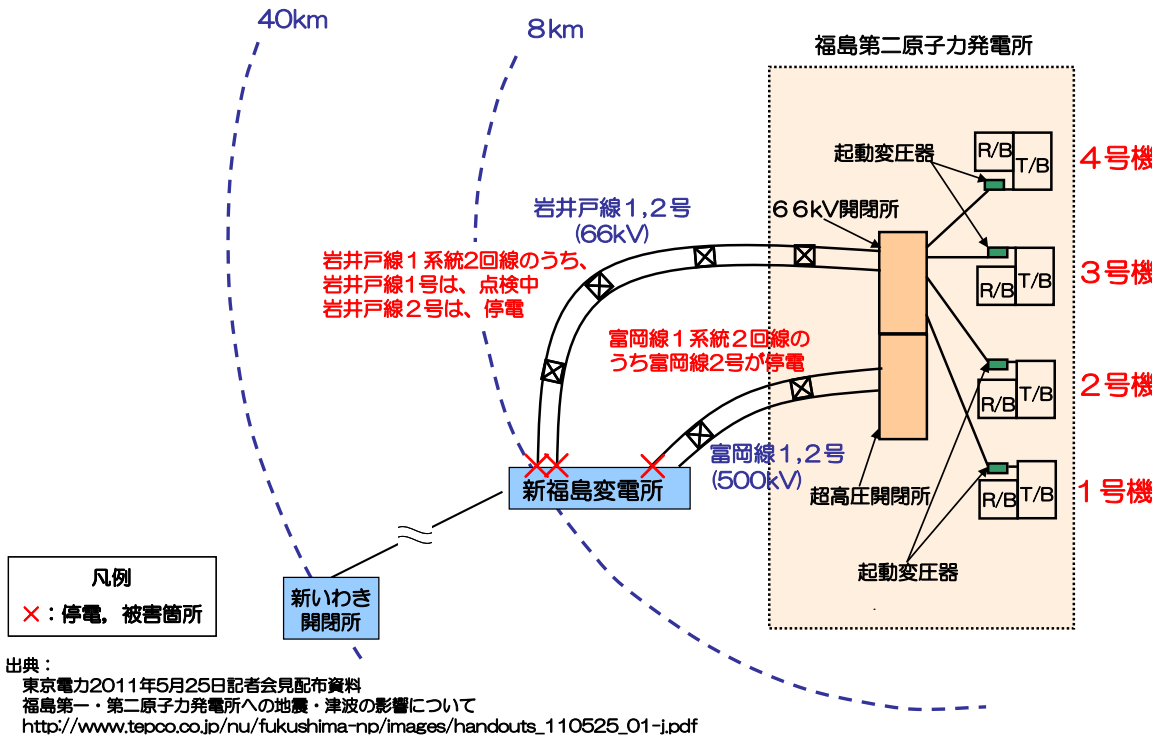


図 III-2-8(a) 福島第一・第二原子力発電所の外部電源施設の被害状況(1)



撮影：東京電力株式会社 H23.3.23

写真 大熊線 1L 遮断器損傷状況



撮影：東京電力株式会社 H23.3.23

写真 大熊線 2L 遮断器損傷状況



撮影：東京電力株式会社 H23.3.12

写真 大熊線 3L 架空地線断線状況



撮影：東京電力株式会社 H23.3.11

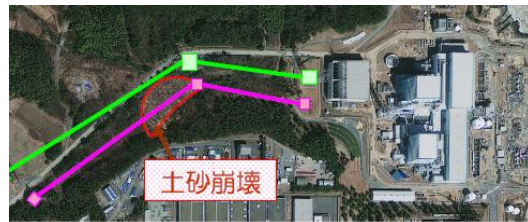
写真 大熊線 3L, 4L 引込鉄溝 傾斜状況



撮影：東京電力株式会社 H23.3.12

撮影：東京電力株式会社 H23.3.12

写真 新福島変電所 夜の森線 構内ケーブル付近 陥没状況
(写真左 1L, 写真右 2L)



©GeoEye

写真 福島第一原子力発電所法面の土砂崩壊



撮影 東京電力株式会社 (H23.4.12撮影)

写真 土砂崩壊 (法面崩壊箇所) 全景



撮影 東京電力株式会社 (H23.3.18撮影)

写真 土砂崩壊による夜の森線鉄塔の倒壊

(写真：東京電力提供)

図 III-2-8(b) 福島第一・第二原子力発電所の外部電源施設の被害状況(2)

表 III-2-2 福島第二原子力発電所・原子炉建屋基礎版上の最大加速度

観測点 (原子炉建屋最地下階)		観測記録 (暫定値 ^{※1})			基準地震動 Ss に対する 最大応答加速度値 (ガル)		
		最大加速度値 (ガル)			南北方向	東西方向	上下方向
		南北方向	東西方向	上下方向			
福島第二	1号機	254	230 ^{※2}	305	434	434	512
	2号機	243	196 ^{※2}	232 ^{※2}	428	429	504
	3号機	277 ^{※2}	216 ^{※2}	208 ^{※2}	428	430	504
	4号機	210 ^{※2}	205 ^{※2}	288 ^{※2}	415	415	504

※1：これらの記録については暫定値であるため、今後の検討により変更となる可能性がある。

※2：記録開始から約130～150秒程度で記録が終了

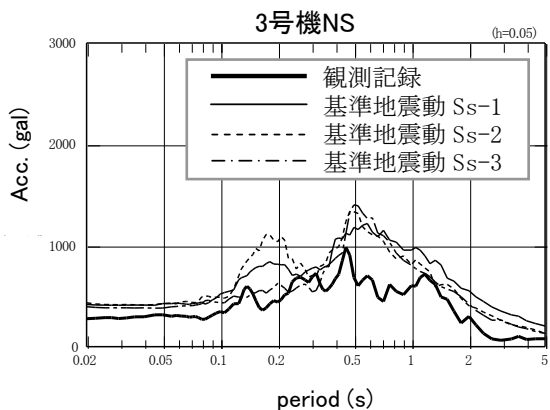
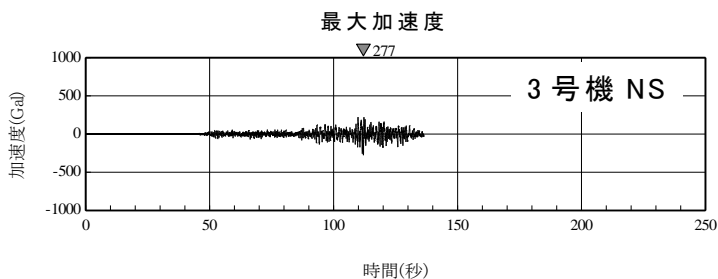
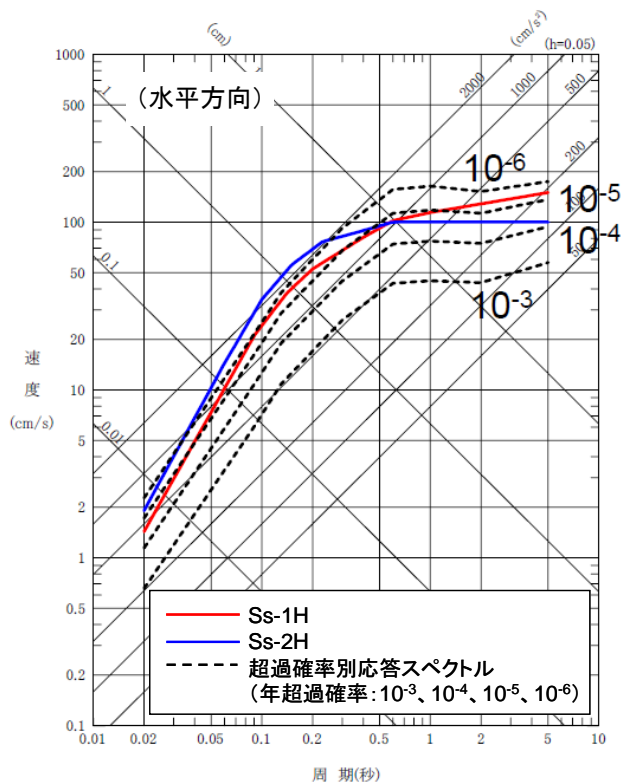


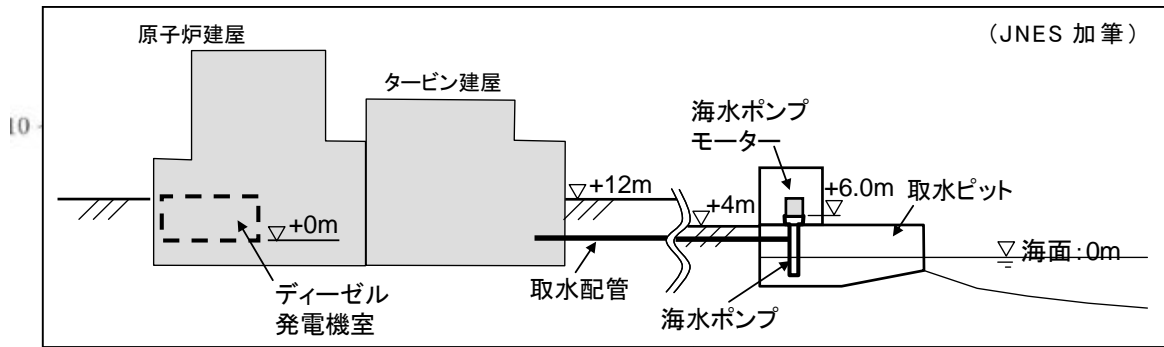
図 III-2-9 福島第二原子力発電所・原子炉建屋基礎版上の応答スペクトル (3号機)

(各図表：東京電力提供)

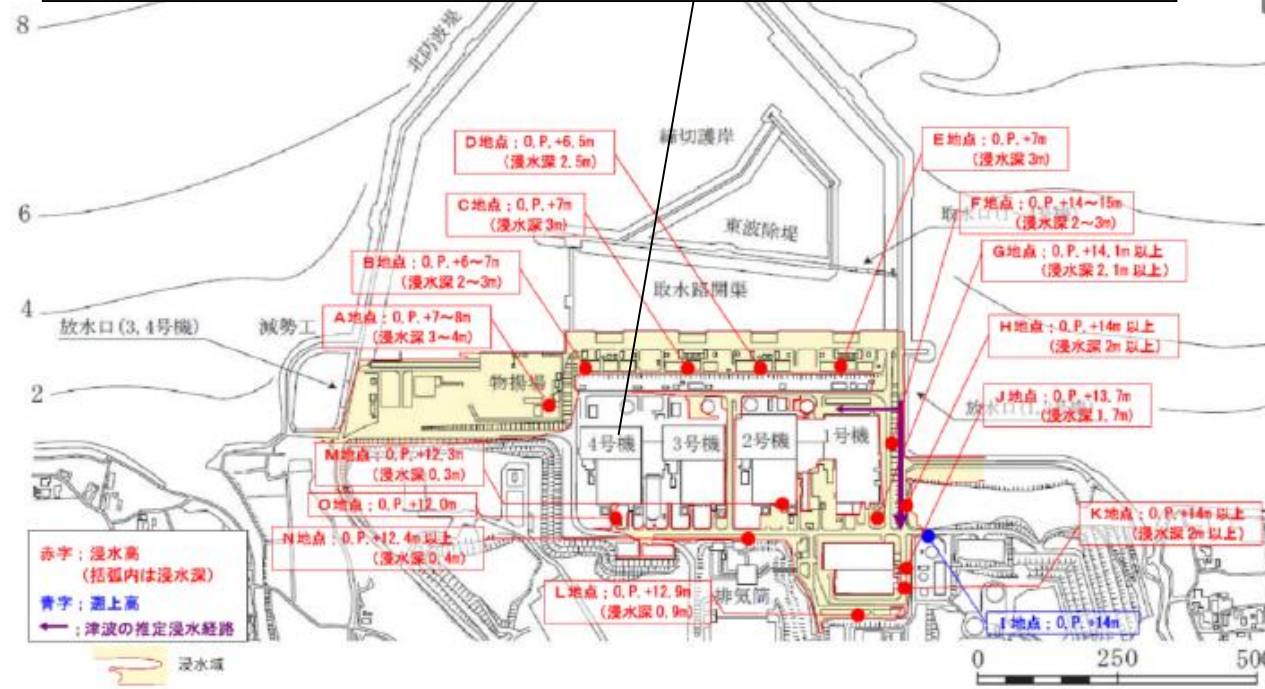


(水平方向)

図III-2-10 福島第二原子力発電所の基準地震動Ssの超過確率



浸水深判読結果の一例 (E地点)



(写真, 浸水域図: 東京電力提供)

図III-2-11(a) 福島第二原子力発電所の津波による被害状況(1)

〔熱交換器建屋及び熱交換器の被害状況(1号機)〕



〔原子炉建屋及び非常用ディーゼル発電機の被害状況(1号機)〕



(写真:東京電力提供)

図III-2-11(b) 福島第二原子力発電所の津波による被害状況(2)

3. その他の原子力発電所を襲った地震と津波による被害

(1) 女川原子力発電所で観測された地震動及び津波高

①地震動関連

a 地震動観測システム及び観測記録と観測地震動

地震動観測システムは、地震計及び観測記録装置からなる。地震計は、1号機では原子炉建屋の4か所(屋上、燃料取り替え床(5階)、1階、基礎版上)、2号機では原子炉建屋の4か所(燃料取り替え床(3階)以外1号機と同じ)、3号機は、2号機と同じである。地震計は敷地内の岩盤(解放基盤相当)上部にも設置されている。地震計では、水平2成分、上下成分の加速度時刻歴波形を観測する。

原子炉建屋基礎版上の水平方向2成分(東西・南北)及び上下方向の計3成分の観測記録の地震動の最大加速度の一覧を表III-3-1に示す。基礎版上での水平方向での最大加速度は、2号機の607Gal(南北方向)で、鉛直方向では、1号機の439Galであった。

b 基準地震動 S_s と観測地震動との関係

基準地震動 S_s (S_s -B、 S_s -D、 S_s -F)は、耐震バックチェックにおいて、連動型想定宮城県沖地震、敷地直下のスラブ内地震、敷地周辺の活断層及び震源を特定せず策定する地震を対象として、これらによる地震動を包絡するように策定されている。

建屋内の地震計設置位置での基準地震動 S_s に対する最大応答加速度を表III-3-1に示す。表から、観測記録の最大加速度の多くは基準地震動 S_s に対する最大応答加速度より小さい。しかし、1号機(東西・南北方向)、2号機(南北方向)、3号機(南北方向)の基礎版上での観測記録の最大加速度は、基準地震動 S_s に対する最大応答加速度より幾分大きい。また、鉛直方向の各号機の基礎版上での観測記録の最大加速度は、基準地震動 S_s に対する最大応答加速度より小さい。

敷地内の岩盤上部で観測された地震動の応答スペクトルと基準地震動 S_s の応答スペクトルとの比較図を図III-3-1に示す。観測地震動の応答スペクトルは、周期0.2秒～1.0秒の範囲で、基準地震動 S_s による応答スペクトルを上回っている。

c 確率論的地震ハザード評価と基準地震動 S_s の超過確率

女川原子力発電所の超過確率別応答スペクトル地震ハザードを図 III-3-2 に示す。図中には、 S_s-D_h の応答スペクトルも示している。 S_s の超過確率は、 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ /年程度の範囲にある。

② 津波関連

a 潮位観測システム及び観測記録

潮位観測システムは、潮位計及び観測記録装置からなる。潮位計は、港内静穏域に、津波観測記録装置は、建屋に設置されている。

潮位計で記録された津波時刻歴波形を図 III-3-3 に示す。この潮位計の記録から、津波の最初の大きな波は、15 時 29 分頃(地震発生 43 分後)に到達した。観測された最大水位は、O.P. 約 13m (O.P.:女川原子力発電所工事用基準面)であり、最大水位は、敷地高さ O.P.13.8m (敷地高さ 14.8m に地殻変動による沈降約 1m (国土地理院速報値)を考慮)を超えなかった(図 III-3-4 参照)。海側の敷地で海水が浸入した跡が認められたが、主要な建屋には到達しなかった。

b 設計津波水位と観測津波水位との関係

設計津波水位は、設置許可申請書では慶長三陸地震(M8.6、1611 年)での 9.1m、前述の土木学会の津波評価技術(2002 年)に基づく評価では明治三陸地震(M8.3、1896 年)での 13.6m となっている。上記の設計津波水位は、上記観測津波水位より大きい。

③ 被害関係

a 外部電源関係

1～3 号機は、敷地から約 25km 離れた石巻変電所より 275kV1 系統 2 回線、約 65km 離れた宮城中央開閉所より 275kV1 系統 2 回線及び女川原子力変電所より 66kV1 系統 1 回線の外部電源用の送電網により電力の供給を受けるシステムとなっている。

今回の地震による石巻変電所周辺地域における地震動の強さは、震度 6 強、宮城中央開閉所では 6 弱と推定される。地震動によって 275kV2 系統 3 回線及び 66kV1 系統 1 回線の送電が停

止した。発電所敷地内の受電設備のうち、1号機起動変圧器が故障し、受電不可となった。3月12日に起動変圧器が復旧し、外部常用電源(275kV)へ切り替えられ、通常の電源系統に復帰した。

b 海水系ポンプ及び非常用電源系

補機冷却系の取水口、海水ポンプ、海水ポンプ室、熱交換器室の設置状況を図 III-3-5(a)及び図 III-3-5(b)に示す。海水ポンプ室は、図に示すように、海岸から約100m離されていると共に、敷地14.8mの高い場所に設置され、津波遡上による冠水を防ぐ構造となっている。海水ポンプ室内には、水位計が開口部を設け設置されている。同水位計は津波の引き波による海水不足の状態を想定し、海水ポンプの自動停止用のものであり、工夫がなされている。

観測された津波水位は13mであり、地盤沈降があったものの津波による海水ポンプ室(沈降約1mを考慮した場合の敷地高さ13.8m)への直接の冠水はなかった。しかし、津波水位が上昇するにつれ、図 III-3-5(b)中に示す地下取水ピットの水位もサイホン現象によって上昇し、海水が水位計の開口部から海水ポンプ室へ溢れでた。その後、海水は同ポンプ室から原子炉建屋地下階へトレンチを經由して伝わり、地下2階の補機冷却系熱交換器室が浸水した。2号機の補機冷却系ポンプも浸水したことにより、非常用ディーゼル発電機の冷却機能が失われ、同発電機3台のうち2台が停止した。

東北電力は、海水ポンプ室からトレンチへの配管貫通部及びケーブルトレイ貫通部に対し浸水防止策を行った。今後、海水ポンプ室内の水位計を取り外し、浸水防止を考慮した場所に移設し、更に、海水ポンプ室周辺に防潮壁を設置すると公表した。

④ 本震及び余震による原子炉建屋の健全性評価

a 本震の場合

解放基盤表面相当位置での観測記録の応答スペクトルは基準地震動 S_s に対する応答スペクトルを、一部周期帯において上回った。

原子力安全・保安院では、東北電力に対し、各号機ごとに機器・配管の「点検・評価に関する計画書」を作成し、点検・評

価を実施することを指示した。

東北電力は、原子炉建屋の健全性評価を中越沖地震(2007年7月)における柏崎刈羽原子力発電所の建屋構造健全性評価手順と同様の手順に基づき行った。1号機から3号機の原子炉建屋の応答解析は、建屋基礎版上の観測加速度記録を入力地震動として行われた。各号機の建屋各階別のせん断ひずみ及びせん断力を図 III-3-6 に示す。図から、各階のせん断ひずみは、JEAG4681-2008 の評価基準値 (2.0×10^{-3}) を下回り、せん断力も弾性限耐力を下回った。評価基準値と各階のせん断ひずみ結果との比は、約 2.5~5.6 である。

原子力安全基盤機構は、中越沖地震を対象とした柏崎刈羽原子力発電所 1、5、6、7 号機の原子炉建屋の健全性評価を行った。それらの評価基準値とせん断ひずみの比は、上記と同等以上であった。

b 余震の場合

女川原子力発電所周辺での4月7日の余震は、地震規模 M7.1、震源深さ約 66km で、スラブ内で発生したと推定される。原子力安全・保安院は、東北電力に対して、4月13日付けで、同余震時に取得された地震観測データの分析を行うと共に、安全上重要な設備の耐震安全性の確認を指示した。東北電力は、4月25日付けで、上記地震観測データの分析結果を報告した。同報告には、2号機原子炉建屋(3階、屋上)及び3号機原子炉建屋(3階)での鉛直方向の観測最大加速度は、基準地震動 S_s による最大応答加速度を上回っていること、観測記録の応答スペクトルが基準地震動 S_s による水平応答スペクトルの一部周期帯で上回っていること、原子炉建屋の機能が維持されていることが記述されている。

(2) 東海第二発電所で観測された地震動及津波高

① 地震動関連

a 地震動観測システム及び観測記録と観測地震動

地震動観測システムは、地震計及び観測記録装置からなり、原子炉建屋 8 か所(6階、4階、2階に各 1 箇所、地下 2 階基礎版上 5 箇所)に設置されている。地震計は、水平 2 成分、上下成分の加速度時刻歴波形を観測する。

原子炉建屋で観測された水平方向および鉛直方向の最大加速

度を表 III-3-2 に示す。原子炉建屋基礎版上での観測地震動の水平方向の最大加速度は、214Gal(南北方向)、鉛直方向は 189Gal であった。

b 基準地震動 S_s と観測地震動との関係

基準地震動 S_s (S_s -D、 S_s -1) は、耐震バックチェックにおいて、鹿島灘のプレート間地震、茨城県南部のスラブ内地震、敷地周辺の活断層層及び震源を特定せず策定する地震を対象として、これらによる地震動を包絡するように策定されている。

観測地震動の最大加速度は、工事認可申請書における基準地震動(以下、工認設計波という。)及び耐震バックチェックにおける基準地震動 S_s による最大応答加速度より小さかった。観測地震動の床応答スペクトルは、地下 2 階～6 階において、一部の周期帯(約 0.65 秒～約 0.9 秒)で工認設計波による床応答スペクトルを上回っていた。しかし、耐震設計上重要な機器・配管系の主要な設備の固有周期の付近では、観測地震動のスペクトルが工認設計波によるものより小さかった。

c 確率論的地震ハザード評価と基準地震動 S_s の超過確率

東海第二発電所の超過確率別応答スペクトル地震ハザードを図 III-3-7 に示す。図中には、 S_s -D_H の応答スペクトルも示している。図から、基準地震動 S_s の超過確率は、おおむね 10^{-4} ～ 10^{-5} /年程度である。

② 津波関連

a 潮位観測システム及び観測記録

潮位観測システムは、潮位計及び観測記録装置から構成されている。潮位計は、港内の静穏域に設置していたが、本津波が潮位計の測定可能範囲を超えていたこと、3 月 11 日 16 時 40 分以降は、電源喪失したことにより、潮位計の記録は保存されていない。したがって、当該発電所の海岸線における津波水位は不明である。津波の最初の大きな波は、15 時 15 分頃(地震発生 30 分後)に到達し、その水位は 5.4m であった。

日本原子力発電は、発電所敷地内における津波の痕跡高を調査している。調査結果を図 III-3-8 に示す。津波痕跡高は、H.P.+5.9m(標高 +5.0m、H.P.: 日立港工事基準面)～

H.P.+6.3m(標高+5.4m、暫定値)であった。これらの結果から、津波の遡上高は、H.P.+6.3m(標高+5.4m)程度(暫定値)であったと推定されている。津波は、主要建屋の設置レベルH.P.+8.9m(標高+8m)へは到達していない。

b 設計津波水位と観測津波水位との関係

設置許可申請書には設計津波水位は、記載されていない。土木学会による津波評価技術(2002年)に基づく評価では房総沖地震(M8.2、1677年)でのH.P.+5.8m(標高+4.9m)が求められている。

③ 被害関係

a 外部電源関係

東海第二発電所は、敷地から約15km離れた那珂変電所より275kV1系統2回線、及び約8km離れた茨城変電所より東海発電所開閉所を経て、外部予備電源154kV1系統の外部電源の供給を受けている。

那珂変電所周辺地域の地震動の強さは、震度6強、茨城変電所では6弱と推定されている。地震直後に、那珂変電所及び茨城変電所が地震動の影響によって停止し、全ての回線の送電が止まった。敷地内の受電設備のうち、主変圧器・起動用変圧器から絶縁油漏れが生じた。3月13日に外部予備電源154kV1系統1回線が復旧した。3月18日に外部常用電源(275kV1系統)への切り替えがなされ、通常状態に復帰した。

b 海水系ポンプ及び非常用電源系

津波は、図 III-3-8 に示す海水ポンプ室内の北側非常用海水ポンプエリアに浸水した。そのため、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ3台のうち1台が冠水し、非常用ディーゼル発電機3台のうち1台が停止した。他の2台の非常用ディーゼル発電機は稼働し、非常用電源を確保することができた。

北側非常用海水ポンプ室は、地震時に津波対策として側壁の嵩上げ工事中であった(H.P.+5.8m、標高+4.9m)。この工事では、側壁の外側にH.P.+7.0m(標高+6.1m)までの側壁を新たに設置したが、壁の貫通部(電気ケーブル等を通すための小さな穴)の封止(浸水を防ぐ)工事は完了していなかったため、貫通部

からポンプ室に海水が浸水した。

津波による遡上高は、H.P.+6.3m(標高+5.4m)程度であり、H.P.+7.0m(標高+6.1m)の側壁は越えていない。

④ 本震による原子炉建屋の健全性評価

観測地震動の床応答スペクトルは、工認設計波及び基準地震動 S_s を一部の周期帯において上回った。前述 3.(1)④の女川原子力発電所での原子炉建屋の健全性評価と同様の手順で、建屋健全性の評価が行われた。

(3) 東通原子力発電所の地震時の状況

東通原子力発電所は、今回の地震時に定期点検中で、原子炉は、停止中であつた。発電所において、地震動や津波による被害は報告されていない。原子炉建屋で観測された地震動は 17Gal であつた。この地震により地震直後に外部電源(むつ幹線及び東北白糖線)の電源供給が停止したが、非常用ディーゼル発電機が作動し、電源を供給した。その後、同日 23 時 59 分に東北白糖線の供給が復旧し、使用済み燃料貯蔵プール等の冷却が外部電源で可能となった。

表 III-3-1 女川原子力発電所・原子炉建屋基礎版上の最大加速度

観測位置		観測記録			基準地震動Ssに対する最大応答加速度値(ガル)		
		最大加速度値(ガル)			最大応答加速度値(ガル)		
		南北方向	東西方向	鉛直方向	南北方向	東西方向	鉛直方向
1号機	屋上	2000 ^{*6}	1636	1389	2202	2200	1388
	燃料取替床(5階)	1303	998	1183	1281	1443	1061
	1階	573	574	510	660	717	527
	基礎版上	540	587	439	532	529	451
2号機	屋上	1755	1617	1093	3023	2634	1091
	燃料取替床(3階)	1270	830	743	1220	1110	968
	1階	605	569	330	724	658	768
	基礎版上	607	461	389	594	572	490
3号機	屋上	1868	1578	1004	2258	2342	1064
	燃料取替床(3階)	956	917	888	1201	1200	938
	1階	657	692	547	792	872	777
	基礎版上	573	458	321	512	497	476

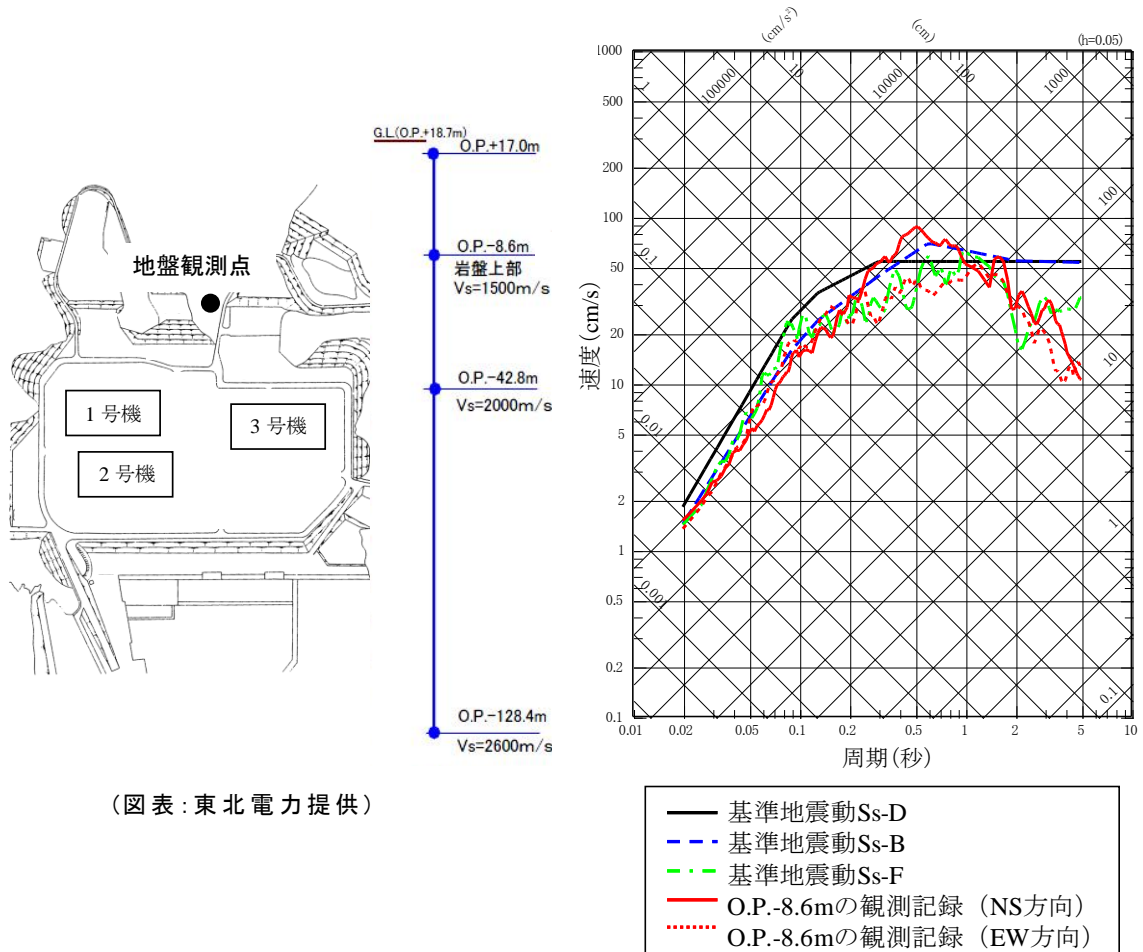
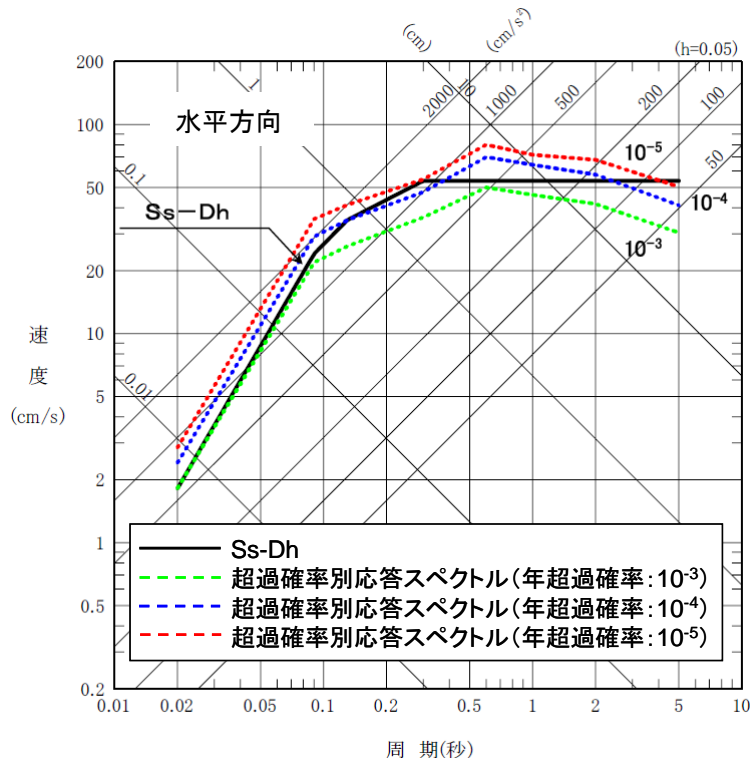


図 III-3-1 女川原子力発電所・岩盤上部の観測記録の応答スペクトル



図III-3-2 女川原子力発電所の基準地震動Ssの超過確率

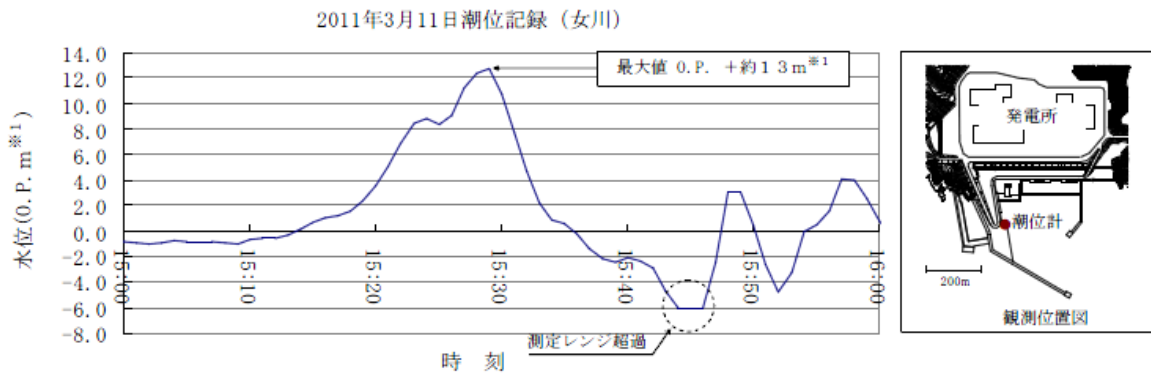


図 III-3-3 女川原子力発電所で観測された津波の時刻歴波形

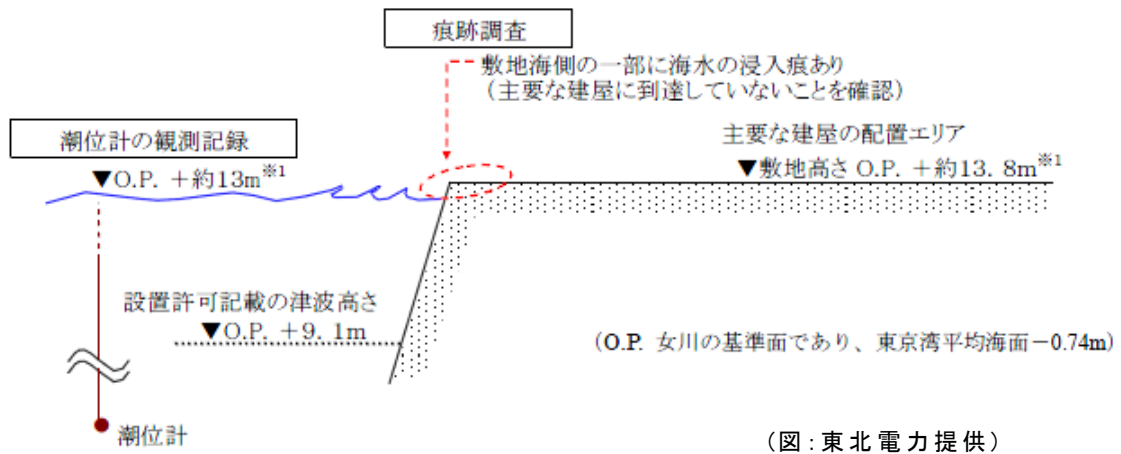
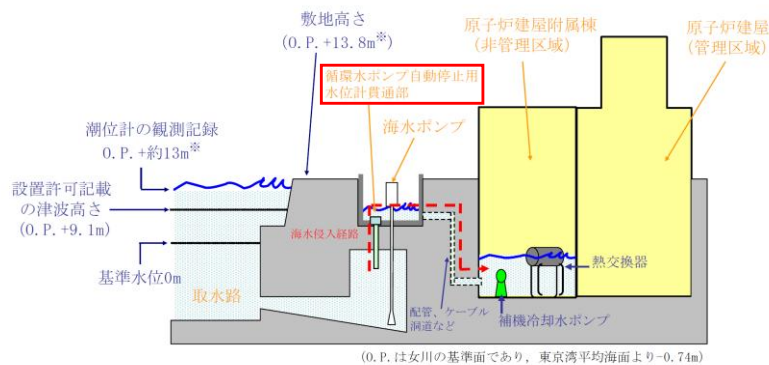


図 III-3-4 女川原子力発電所に襲来した津波の状況



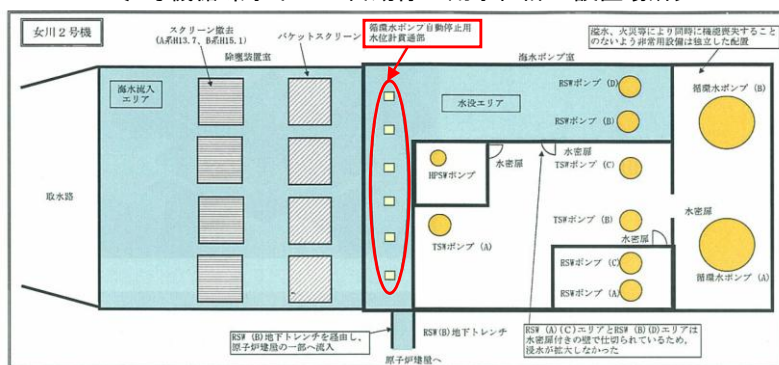
図 III-3-5(a) 女川原子力発電所の津波による補機冷却系熱交換器室の浸水状況(1)

〔原子炉補機冷却系熱交換器（B）室等への浸水経路（イメージ図）〕

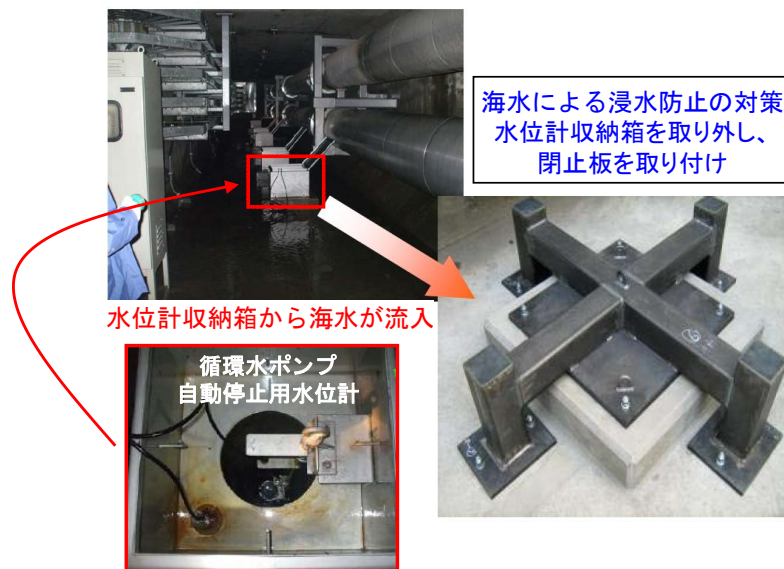


※ 今回の地震発生後に公表された国土地理院による女川原子力発電所周辺の地殻変動（一約1m）を考慮した値。

〔2号機循環水ポンプ自動停止用水位計の設置場所〕



〔循環水ポンプ自動停止用水位計と当該水位計の対策〕



◎引用文献：原子力安全・保安院 「東北電力(株)女川原子力発電所における法令報告対象事象の報告（続報）の受理について」にJNESが一部加筆 [Online] <http://www.meti.go.jp/press/2011/05/20110530001/20110530001.pdf>

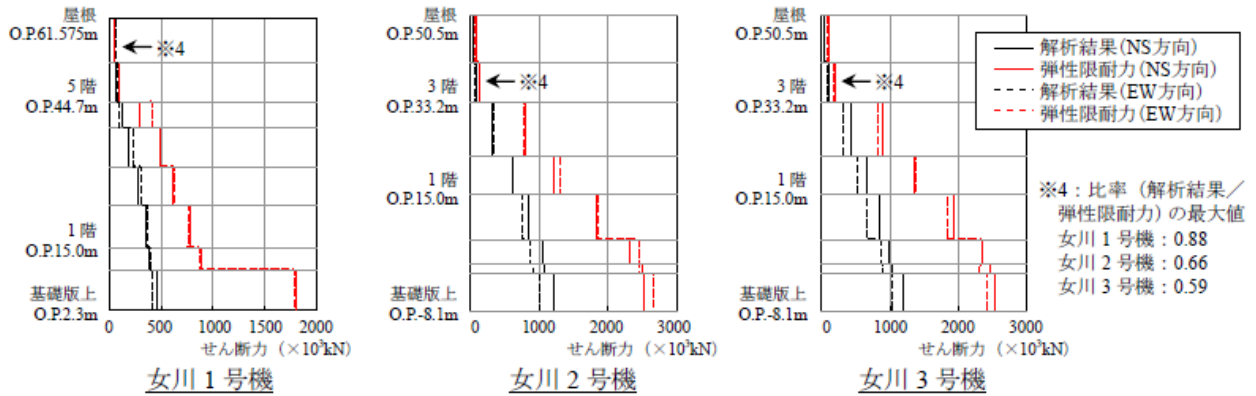
図 III-3-5 (b) 女川原子力発電所の津波による補機冷却系熱交換器室の浸水状況 (2)

原子炉建屋耐震壁の最大応答せん断ひずみ

		解析結果	評価基準値 ^{※3}	(参考) 基準地震動 Ss
女川1号機	NS方向	0.36×10^{-3}	2.0 $\times 10^{-3}$	0.65×10^{-3}
	EW方向	0.35×10^{-3}		0.56×10^{-3}
女川2号機	NS方向	0.49×10^{-3}		1.15×10^{-3}
	EW方向	0.28×10^{-3}		0.55×10^{-3}
女川3号機	NS方向	0.81×10^{-3}		0.99×10^{-3}
	EW方向	0.18×10^{-3}		0.41×10^{-3}

※3 評価基準値は、日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601-2008)」に定められており、鉄筋コンクリート造耐震壁の終局せん断ひずみに2倍の安全率を持たせたもの。

原子炉建屋の各階毎の耐震壁に作用したせん断力

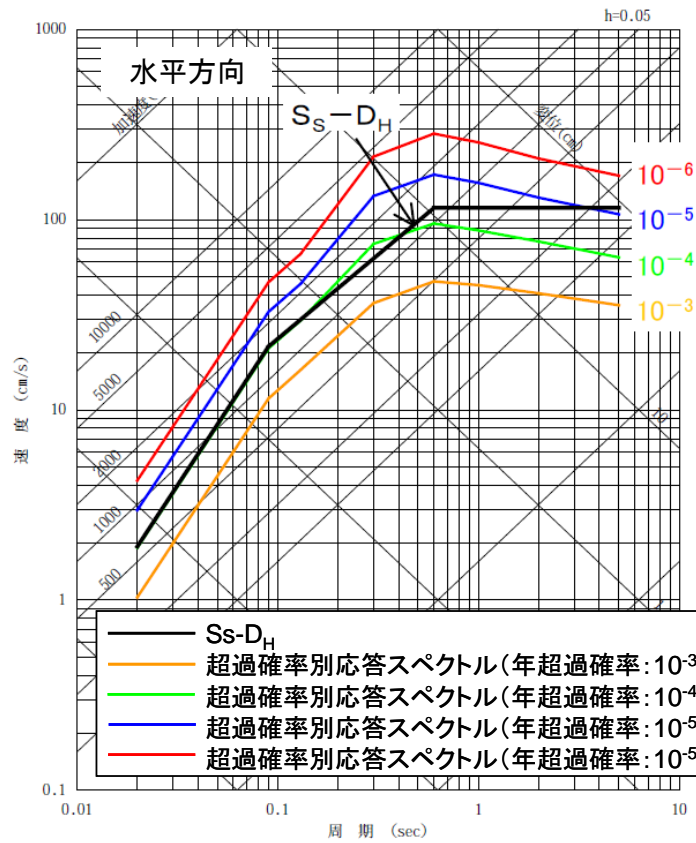


(図表: 東北電力提供)

図 III-3-6 女川原子力発電所・原子炉建屋の各階毎の耐震壁のせん断ひずみ及び耐震壁に作用したせん断力の確認

表 III-3-2 東海第二発電所・原子炉建屋基礎版上の最大加速度

観測位置		地震観測データ			建設時の最大応答 加速度値 (ガル)		基準地震動 S_s に対する 最大応答加速度値 (ガル)		
		最大加速度値 (ガル)			南北 方向	東西 方向	南北 方向	東西 方向	上下 方向
		南北 方向	東西 方向	上下 方向					
原子炉 建屋	6階	492	481	358	932	951	799	789	575
	4階	301	361	259	612	612	658	672	528
	2階	225	306	212	559	559	544	546	478
	基礎版上 (地下2階)	214	225	189	520	520	393	400	456



図III-3-7 東海第二発電所の基準地震動 S_s の超過確率

(図表: 日本原子力発電提供)

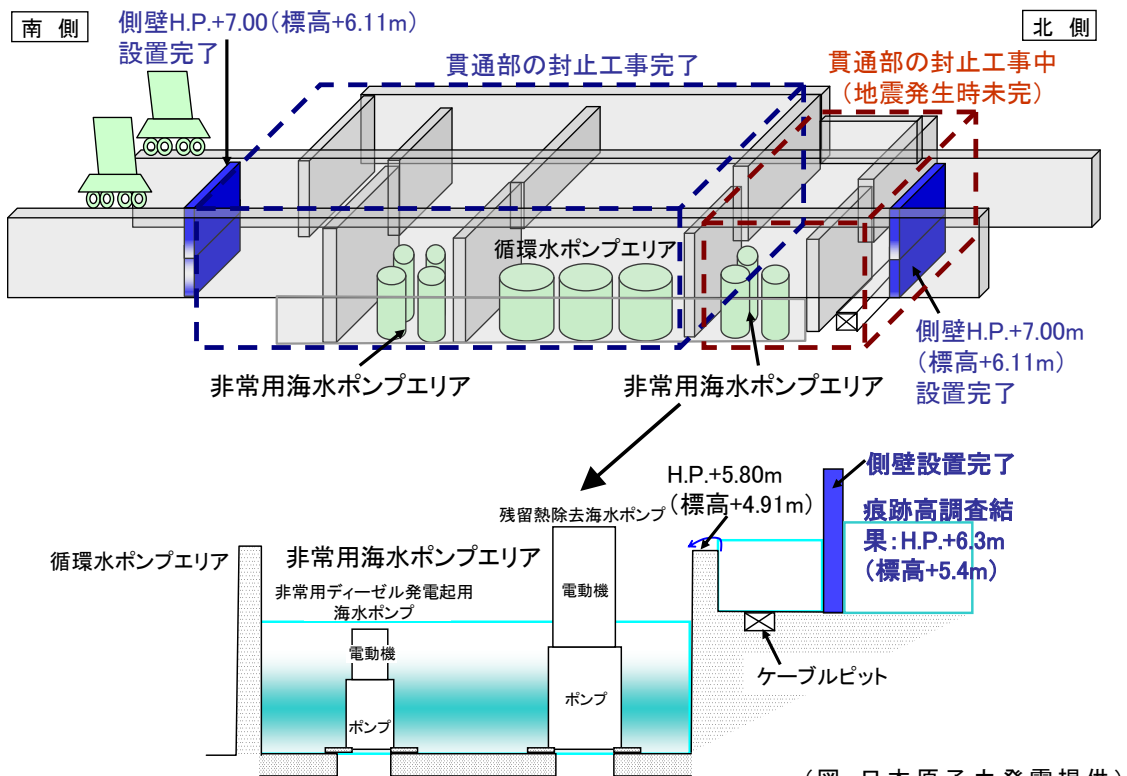
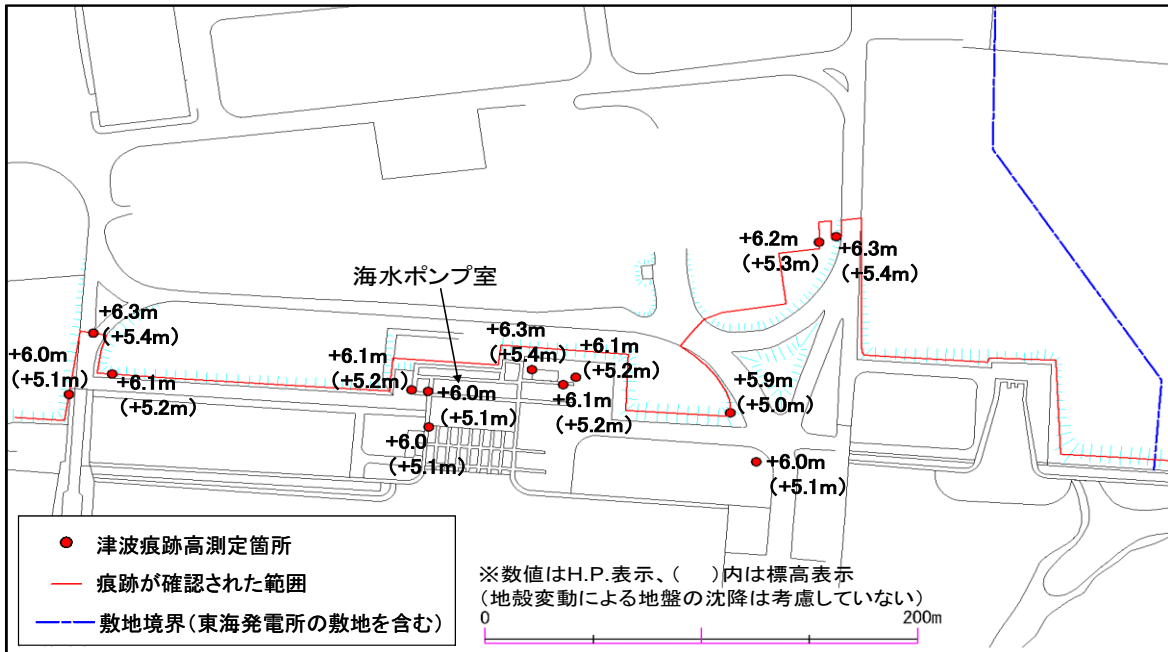


図 III-3-8 東海第二発電所における津波の痕跡高及び痕跡が認められた範囲

4. 地震及び津波による被害に関する評価

(1) 複数の震源領域の連動破壊の分析の重要性

今回の地震は、宮城県沖の震源領域における破壊が北方の岩手県沖領域へ連動すると共に、南方の福島県沖、茨城県沖領域へと連動したもので、マグニチュード Mw9.0、震源長さ約 400km 以上、幅約 200km の極めて大規模なものであった。このことから、基準地震動の策定において、複数の震源領域の連動破壊の可能性を考慮することの重要性が改めて認識された。また、これに随伴する津波の規模を推定する際にも、こうした連動現象が発生し得ることを考慮するべきであることも認識された。

(2) 設計地震動、設計津波の超過確率の設定と、深層防護設計、残余のリスクの評価の重要性

今回の地震では、一部の原子力発電所において、一部周期帯で基準地震動を超える地震動が観測された。耐震設計審査指針では基準地震動を超える地震動の発生は否定できないとしているが、この事実を踏まえて、現在の基準地震動策定プロセスで得られる基準地震動の超過確率が、達成すべき安全目標との関係で適切であったかについて検討するべきである。

女川原子力発電所は、土木学会の 2002 年の評価技術の求める不確実性を考慮しても、海水ポンプ系に対する津波対策が適切であると確認した。東海第二発電所は、不確実性に対する配慮の結果、海水ポンプ系に対する津波対策を講じた。一方、福島第一原子力発電所は、そのことに配慮して、海水ポンプ等の嵩上げ対策を講じた。結果として、今回の津波の来襲を受けて、前の二つのプラントは、冠水の程度がわずかであったことも幸いして最終ヒートシンクの全喪失を免れ、同じく福島第二原子力発電所においても 3 号機は最終ヒートシンクの全喪失を免れた。一方、福島第一原子力発電所は、津波対策を超える冠水となり、これを全て喪失した。このことから、津波対策の在り方には検討の余地が大きいことを踏まえる必要があるが、深層防護を確保することの重要性が認識された。

すなわち、耐震設計審査指針に則って、確率論的津波ハザード評価の結果を踏まえて、達成すべき安全水準から判断して十分長い再来周期を有する津波を設計基準津波として、津波防護設計を行うとともに、深層防護の観点からこれを超える津波の来襲に備える取組を行っ

た上で、残余のリスクを評価し、達成すべき安全水準の観点からこれが妥当なものになっていることを確認することの重要性も確認された。

（３）多様性の重要性

今回の津波被害を見ると、冗長構成の安全系のうち、多様性を備えた安全系が津波の襲来に耐えて使命を果たすところがあった。冗長構成によって安全系を構成する場合に多様性を追求することの重要性が改めて強く認識された。

（４）津波の洗掘及び波力に対する対策の重要性

今回の津波では、一般港湾施設の基礎地盤が押し波、引き波によって洗い削られ（洗掘）倒壊した。港湾施設本体も強い波力によって薙ぎ倒された。これから、海岸構築物によって原子力発電所を設計津波から防護する場合には、その設計において波力や洗掘の破壊力の大きさを考慮することの重要性を知らされた。また、設計津波を超える津波による浸水や冠水を防止する際にも、遡上する津波の破壊力を十分に考慮する必要があることも強く認識された。

（５）地震動及び潮位観測システムの対策強化

今回の地震では、一部の原子力発電所の加速度時刻歴波形の記録が130～150秒程度で中断し、確保できなかった。原子力発電所の地震動観測システム機能の不備は中越沖地震においても発生しており、同システムの機能維持に関する調査を徹底すべきであった。

一方、潮位観測システムについても、観測水位の計測範囲が不十分であり、同様にシステムの機能維持に関する調査を徹底すべきである。