

土木学会 東日本大震災 原子力安全土木特定テーマ委員会 視察報告

原子力安全を支える土木技術について — 中部電力浜岡原子力発電所の 耐震・耐津波施設・設備の視察を踏まえて —

木原直人（正会員 電力中央研究所）

現地調査の実施

東日本大震災フォローアップ委員会／原子力安全土木技術特定テーマ委員会（表1）では、東日本大震災を踏まえた原子力発電所の地震・津波安全にかかわる土木工学的課題について検討を行っている。本委員会では、研究活動の一環として、中部電力（株）浜岡原子力発電所の耐震・耐津波施設・設備の視察を

2012年7月12日に行った。本稿では、現地視察を踏まえて、原子力発電所の安全を支える土木技術について得られた知見を報告する。

浜岡原子力発電所での 地震・津波対策

（1）東日本大震災以前の状況
浜岡原子力発電所における基準地震動 S_s は、この地域に最も影響が

大きかったとされる1854年安政東海地震の震度分布を再現する中央防災会議（2003）の断層モデルを基本とし、東海・東南海・南海地震の連動など不確かさを考慮して算定されており、岩盤上の揺れの大きさととして800Galとされている。中部電力（株）では、常に最新の知見を踏まえて施設の耐震裕度をさらに向上させていくため、耐震設計審査指針で定められる基準地震動と

表1 原子力安全土木技術特定テーマ委員会委員名簿

委員長	当麻 純一	電力中央研究所	副委員長	吉田 郁政	東京都市大学
幹事長	大友 敬三	電力中央研究所	委員	青柳 恭平	電力中央研究所
委員	秋山 充良	早稲田大学	委員	蛭沢 勝三	原子力安全基盤機構
委員	澤田 純男	京都大学防災研究所	委員	庄司 学	筑波大学
委員	高島 賢二	原子力安全基盤機構	委員	高橋 智幸	関西大学
委員	東畑 郁生	東京大学	委員	中島 正人	電力中央研究所
委員	中村 晋	日本大学	委員	能島 暢呂	岐阜大学
委員	樋口 義弘	清水建設	委員	松尾 豊史	電力中央研究所
委員	松山 昌史	電力中央研究所	委員	室野 剛隆	鉄道総合技術研究所
委員	米山 望	京都大学防災研究所	幹事	木原 直人	電力中央研究所



(a) 建設中の防波壁
T.P.+18mの高さで設計されている。基礎は深さ10～30mに到達しており、岩盤部に根入れされている



(b) 原子炉建屋大物搬入口の水密扉
十分な水密性・強度を確保するため、2重の防水構造となっている



(c) がれき除去のための重機
敷地内が浸水した際に作業環境を確保するための重機で、高台に配備されている



(d) 災害対策用発電機
原子炉建屋の屋上に設置されている

写真1 浜岡原子力発電所の津波対策

は別に耐震裕度向上の目標地震動（約1000 Gal）を自主的に設定し、施設の耐震性を評価して必要な耐震裕度向上工事を進めてきた。工事を実施した施設は排気筒、配管ダクト、配管・電路類サポート、などであ

る。一方、想定津波は、東海・南海・南海地震が連動したとされる1707年宝永地震津波や安政東海地震津波などを踏まえて、中央防災会議（2003）の断層モデルを基本とし、発電所敷地に最も影響を及

ぼしたとされている安政東海地震津波の再現性や、すべり量および海域活断層の連動など不確かさを考慮して算定されており、最大津波遡上高は満潮時でT.P.（東京湾平均海面）+8 m程度とされている。これに対して、浜岡原子力発電所の海側前面には、津波遡上高を上回るT.P.+10～15 mの砂丘堤防がある。また、引き波による最大水位低下量は取水塔付近において干潮時でT.P.マイナス9 m程度とされている。このような水位低下が生じた場合には、取水塔を通しての海水の取水が5分間程度できない状況になると想定されるものの、取水槽には、原子炉機器冷却に必要な非常用取水を20分間以上継続できる海水を貯水可能な構造となっている。

（2）東日本大震災以後の状況

東北地方太平洋沖地震津波（以下では、3・11地震・津波）により、福島第一原子力発電所へ想定津波の最大水位を超える津波が来襲し、敷地内が浸水した。そして、非常用電源の損失、および、外部電源の損失等により原子炉の冷却機能が維持できなくなり、炉心損傷という深刻な被害が生じた。この事故を機に、津波に対する原子力発電所の安全性

の再検証、および、さらなる津波対策が求められており、発生頻度が低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす巨大な津波に対しても原子力発電所の安全性を確保できる対策が急務となっている。

浜岡原子力発電所では、津波対策として、3段階に分けた対策が検討・実施されている。まず、「①発電所敷地内への浸水を防止するための対策」であり、発電所敷地海側での防波壁（写真1（a））や海水取水ポンプエリア周りの防水壁の設置等が挙げられる（図1）。次に、敷地内が浸水した場合においても「②重要建屋内への浸水を防止するための対策」であり、緊急時海水取水設備（EWS）の新設や防水扉等による重要建屋の浸水防止対策（写真1（b））が挙げられる（図2）。最後に、たとえ福島第一原子力発電所において発生した全外部電源の喪失、および、海水冷却機能の喪失が発生したとしても確実かつ安全に原子炉を冷温停止するため

の「③緊急時対策の強化」であり、がれき撤去のための重機の高台への設置（写真1（c））や、災害対策用発電機の建屋屋上への設置（写真1（d））、および、水源多様化などの注水設備対策等が挙げられる（図3）。

浜岡原子力発電所の 対策から得られる知見

(1) 防波壁の役割について

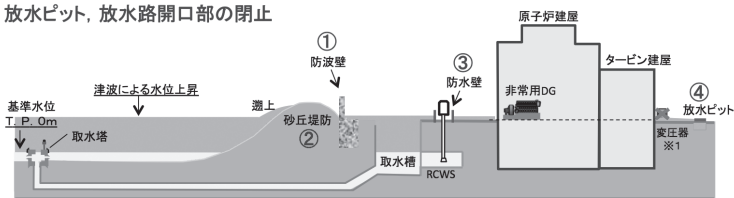
浜岡原子力発電所敷地海側に建設中の防波壁は、T.P.+18mの高さで設計されている。砂丘堤防の高さや3・11地震・津波による福島第一原子力発電所での津波遡上高約15mに

「浸水防止」としては、津波が発電所敷地内へ浸入すること自体を防止するため、

- ① 発電所敷地海側へ防波壁(天端高さT.P.+18m)の設置
- ② 発電所敷地前面の砂丘堤防および東側西側盛土の嵩上げ

「溢水対策」として、

- ③ 海水取水ポンプエリアへの防水壁(高さ:1.5m)の設置
- ④ 放水ビット、放水路開口部の閉止



※1 屋外変圧器は敷地への浸水により、使用不可能となるものとし、外部電源が復旧したとしても屋外変圧器からの早期受電は期待しない。

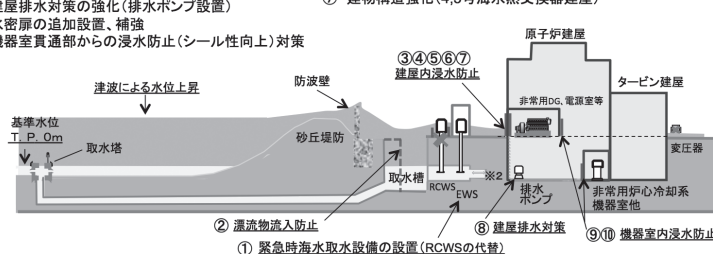
図1 発電所敷地への浸水防止対策(中部電力プレス発表、2011年7月22日)

(1) 海水冷却機能の維持

- ① 緊急時海水取水設備(EWS)の設置
(原子炉機器冷却海水系(RCWS)の代替)
- ② 取水槽への漂流物流入防止対策
- (3) 機器室内浸水防止
- ⑧ 建屋排水対策の強化(排水ポンプ設置)
- ⑨ 水密扉の追加設置、補強
- ⑩ 機器室貫通部からの浸水防止(シール性向上)対策

(2) 建屋内浸水防止

- ③ 建屋外壁の防水構造扉の信頼性強化
- ④ 建屋外壁の給排気口(開口部)からの浸水防止対策
- ⑤ 建屋貫通部からの浸水防止(シール性向上)対策
- ⑥ 地下配管ダクト点検口、入口扉等閉止
- ⑦ 建物構造強化(4.5号海水熱交換器建屋)



※2 他号機の取水槽連絡トンネルと接続

図2 重要設備・建屋への浸水防止対策(中部電力プレス発表、2011年7月22日)

(1) 注水設備対策(淡水)

- ① 高圧注水系を運転可能とするための機器冷却の代替確保(空冷式熱交換器設置)
【電源は非常用交流電源装置より供給】
- ② 可搬式動力ポンプの確保
- ③ 取水源の多様化(新野川からの取水)
- ④ 水源の多様化(水タンクの増設等)
- ⑤ 補給水系等の耐震強化、注水配管の追加設置

(2) 除熱設備対策

- ⑥ 格納容器ベント弁操作用空室
- ⑦ 格納容器ベントの遠隔操作化
- ⑧ 原子炉機器冷却海水系(RCWS)、原子炉機器冷却水系(RCCW)、余熱除去系(RHR)ポンプおよび電動機の予備品確保
- ⑨ 仮設水中ポンプの確保(RCWSポンプの代替)

(3) 電源設備対策

- ⑩ 非常用交流電源装置(ガスタービン発電機)の高台設置
- ⑪ 災害対策用発電機の建屋屋上への設置
- ⑫ 予備蓄電池の確保
- ⑬ 電源盤および配電盤の上層階または高台への設置
- (4) その他
- ⑭ ブルドーザ等の重機の配備
- ⑮ 緊急時用資機材倉庫の高台設置

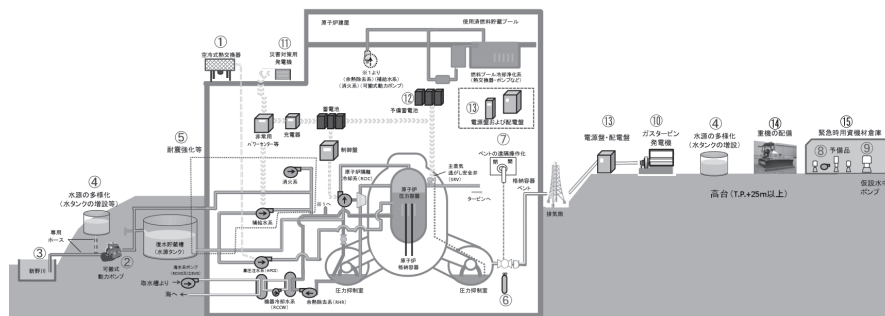


図3 緊急時対策の強化(中部電力プレス発表、2011年7月22日)

余裕を持たせることにより、この高さは決定されたことである。防波壁の構造としては、基礎は岩盤から鉄筋コンクリート製の地中壁を立ち上げ、壁部は鋼材を主体としたI型壁の構造であり、越流や洗掘に対しても粘り強い構造となるよう配慮がなされている。防波壁に作用する津波流体力は、内閣府における『津波

避難ビル等に係るガイドライン』(内閣府、2005)で引用されている朝倉ら(2000)を参考とし、余裕をもつて設計されている。この朝倉ら(2000)では、水理実験データに基づいた経験式が提案されており、対象構造物が設置されていない条件での進行波高から、構造物に作用する最大流体力が推定される。ただ

ここで、防波壁の役割について整理する。防波壁は高さT.P.+18mであるため、最大遡上高さT.P.+18m以下の津波は、防波壁を乗り越えない。しかしながら、その場合でも、取放水設備を通じた発電所敷地への海水流入が想定される。防波壁は、敷地の海側境界からの海水流入を阻止することにより、敷地内の浸水深を低下さ

し、近年の現地調査や実験により、津波流体力がフルード数や海岸線からの距離により変化することが示されており(中村、2011)、より精度良く、また、サイトに合わせた設計をする上で、これらの知見を盛り込んだ新たな津波流体力推定手法が今後必要であろう。なお、浜岡原子力発電所の防波壁設計に関しては、朝倉ら(2000)の式を用いた評価に加えて、水理模型実験を実施することにより、防波壁の津波に対する設計の妥当性が確認されている(松山ら、2012)。

せる役割を持ち、さらに、津波の運動エネルギーを敷地内へ流入させないことにより、重要建屋内への浸水リスクが大幅に低減される。なお、防波壁を越流しない津波により、取放水設備から敷地へ海水流入が生じたとしても、取水槽付近での浸水深が1m程度であることが、取水塔と取水槽を結ぶ海底トンネル内の流れを考慮した数値計算により推定されている。

また、防波壁を越流する大規模な津波に対して、防波壁は、敷地の海側境界からの海水流入量を抑制し、さらに、敷地へ流入する津波の運動エネルギーを減衰させる役割を持つ。これにより、浸水に対するリスクだけでなく、敷地上の重要建屋へ作用する津波流体力や漂流物衝突に対するリスクも低減される。すなわち、防波壁の役割は「①敷地への浸水防止対策」だけでなく「②重要建屋内への浸水防止対策」でもある。このことは、3.11地震・津波において越流・破損した釜石港湾口防潮堤によって、防潮堤背後地域において減災効果が見られたという報告からも支持される。

内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」(内閣府、2011)によつて、「現在の科学的知見の下で、今回推計し設定する最大クラスの地

震・津波の発生確率、そしてその発生時期の予測をすることは不可能に近い」という前置きの下で2012年3月31日に公表された津波高の推計結果(第一次報告)によると、浜岡原子力発電所が立地する御前崎市において最大21mとなっている。また、2012年8月29日には第二次報告として、最新の地形データを用い、より高解像度の数値計算により推計された津波高が公表されており、御前崎市において最大19mとなっている。これらはいずれも防波壁を越流する高さである。このような津波に対して防波壁は海水流入量および運動エネルギー低減効果を果たし、その他の「②重要建屋内への浸水防止対策」と組み合わせることにより、原子炉を守る役割を担う。

一般に、津波対策の基本は、最大級の津波に対しては防波壁のような海岸防護施設のみで防ぐのではなく、その他のあらゆる実行可能な手段と組み合わせるべきことである(土木学会津波推計・減災検討委員会報告書、2012年6月、<http://committees.jsce.or.jp/2011quake/node/134>)。海岸防護施設に過剰な期待をかけず、東日本大震災で失敗した教訓(宮古市田老地区など)を

活かし、津波推計には大きな変動があり、越流するものであるという前提で、防護施設の粘り強い構造の適用や、浸水に対する防護・防水措置の実現が望まれる。この点において土木学会の役割は非常に大きい。

(2) 耐震重要度分類、耐津波重要度分類について

3.11地震津波による福島第一原子力発電所事故からの教訓として、シビアアクシデントマネジメント(SAM)における格納容器ベント操作の重要性が指摘されている。原子力発電所の設備は重要度に応じて分類されており、クラス別に耐震設計上で用いる地震力が異なり、格納容器ベントは耐震Cクラスに位置づけられており、この場合の地震力は震度0.2相当である。すなわち基準地震動相当の地震力よりも小さい地震力による設計の設備であった。今後、耐震設計審査指針や日本電気協会技術指針JEEAGにおけるSAM対策に必要な施設・設備の耐震重要度分類の見直しが必要である。また、耐震重要度分類により耐震に関しては設計方針が規定されているものの、津波やその他の自然事象に対する設計に関しては事業者による自主的な検討に依存している。そのため、

耐震設計だけでなく、津波やその他の自然事象に対する重要度クラス別の設計方針の設定、たとえば耐津波重要度分類の設定についても今後議論が必要であろう。

参考文献

- (1) 朝倉良介ら…護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究、海岸工学論文集、vol.47, 911-915頁、2000年
- (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」、321頁、2002年
- (3) 内閣府中央防災会議事務局…「資料3 中央防災会議 東南海、南海地震等に関する専門調査会(第16回)東南海、南海地震の強震動と津波の高さ(案)」、19頁、2003年
- (4) 内閣府中央防災会議事務局…「資料3 中央防災会議 東南海、南海地震等に関する専門調査会(第16回)東南海、南海地震の強震動と津波の高さ(案)図表集」、81頁、2003年
- (5) 内閣府津波避難ビル等に係るガイドライン検討会…「津波避難ビル等に係るガイドライン」、68頁、2005年
- (6) 中埜良昭編…平成23年度建築基準整備促進事業「40津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」、国土交通省中間報告書その2、東京大学生産技術研究所、2011年
- (7) 松山昌史ら…盛土を越流する津波に対する防波壁の効果に関する実験、土木学会論文集B2(海岸工学)、2012年(投稿中)