

地震・津波被災を乗り越えた女川原子力発電所

小保内 秋芳*, 渡部 孝男 (東北電力)

Onagawa nuclear power station which have overcome the 3.11 earthquakes and tsunami disaster
Akiyoshi Obonai, Takao Watanabe (Tohoku Electric Power Company)

1. 概要

本稿では、2011年3月11日の地震・津波発生時に女川原子力発電所が、福島第一原子力発電所と同じ規模の地震や津波に見舞われたにも係らず冷温停止に至った主要な要因、背景、今後の安全対策等について主として述べる。

2. 地震・津波発生時の対応

2.1 プラント概要

女川原子力発電所は、太平洋岸の牡鹿半島に位置し(仙台から約70km)、敷地面積は約173万 m^2 である。1号機は、1984年に営業運転を開始、続いて2号機は1995年に、3号機は2002年に開始した。全号機とも沸騰水型軽水炉(BWR)で、原子炉格納容器の型は、1号機がマークIで2号機と3号機は改良型マークIである。また、発電所の敷地高さは海拔14.8mである。

地震が発生した時、約1,590人(社員約330人、協力会社約560人、プラントメーカー約680人、見学者約20人)が発電所構内で働いていた。

(1) 地震発生

2011年3月11日(以下、「3.11」と言う。),マグニチュード9.0の巨大地震が午後2:46に発生した。震源地は、発電所が位置する牡鹿半島から太平洋側に約130kmの地点であった(図1)。地震から約30分後に何波にも渡る最初の巨大津波が発電所に到達した。津波の最大高さは約13m(午後3:29)であった。

国土地理院によると、牡鹿半島一体が地震後約1m沈下したとのことから、津波が発電所に達したときは、敷地高さは約13.8mで有ったと推定される。それ故、津波は敷地を乗り越えてくることは無かった。

筆者は、地震発生時に事務棟で執務していたが、今までに経験したことの無い地震の大きさと長い揺れのため、地面の底が抜けるのではないかと感じた。筆者を始め緊急時対応メンバーは、地震の揺れが収まるとヘルメットをかぶり、事務棟3階の緊急対策室に集合した。椅子に座ると直ちに、大津波警報発令(午後2:49)の確認、そして、原子炉自動停止、火災、浸水等の発電所情報を収集した。この時の通信手段は、社内通信電話(マイクロ波と光ケー

ブルから構成される)と衛星電話のみであった(固定電話と携帯電話は地震発生後まもなく通信不可となった)。そこで、発電所の情報を本店に伝え、本店は国や自治体等の機関に通報連絡を実施した。



図1. 震源地と女川原子力発電所の所在地
Fig.1. Location of Onagawa NPS and the epicenter

また、女川町に通じる道路も地震と津波で被害を受け寸断され、発電所は孤立状態になった。発電所周辺の住民も家屋等に被害を受け、発電所に避難を求めてきた。最初は、PR(広報)センターに、次は、発電所の事務棟に受け入れたが、どんどん人数が増えたため最後は発電所の体育館に受け入れた。数日後、避難者の数は更に増え360人を超え、約3ヶ月間共に過ごした(図2)。



図2. 避難者の体育館での様子
Fig.2. Photo of the evacuees in the gymnasium of the site

本店は、これらの避難者や発電所構内の人員に、食料、水、毛布等を提供するためにヘリコプターを手配し、最初のヘリコプターは翌日午前7：44に物資を積み発電所に到着した。

また、大津波警報が解除されるのを待って、発電所側から道路の復旧に取り掛かり3月15日に町へ通じる道路を部分的に通すことが出来た。このため、翌日から発電所員の一部が車両で帰宅できるようになるとともに、自衛隊によって陸路の支援物資補給が開始出来た。

(2) 冷温停止に向けての主要な時系列

1号機は、地震発生前は定格出力で運転中のところ、地震加速度大の信号により原子炉自動停止し2台の非常用ディーゼル発電機(以下、「DG」と言う。)が自動起動した。午後2：55に起動用変圧器が停止したため、DGからの電力供給が開始された。これは、常用系の高圧電源盤焼損により起動用変圧器が停止し、非常用の高圧母線の電圧が低下したためと推定される。原子炉水位の制御は原子炉隔離時制御系により、原子炉の減圧は逃し安全弁により行われ、3月12日0時58分に冷温停止した。

2号機は、定期検査後の原子炉起動中(午後2：00)であり、地震加速度大の信号で原子炉停止し直ちに冷温停止になった(午後2：49)。3台のDGは自動起動したが、外部電源が利用可能であったため待機状態を維持した。津波の襲来により、原子炉補機冷却系(以下、「RCW」と言う。)(B)と高圧炉心スプレイ冷却系(以下、「HPCW」と言う。)(B)の機能が喪失し2台のDGが停止した。残りのRCW(A)が正常だったため、もう一台のDG(A)は利用可能であった。

3号機も1号機と同様定格出力で運転中のところ、地震加速度大の信号で原子炉自動停止した。津波襲来の後、タービン補機冷却系は停止したが、RCWは影響を受けなかったため、原子炉の減圧と冷却は成功裡に行われ、3月12日午前1：17に冷温停止になった。

3. 主要設備被害

3.1 被害概要

3基とも安全に停止したが少なからぬ被害があった。1号機は、津波による重油タンクの倒壊と常用系の高圧電源盤の短絡による焼損が発生。2号機は、RCWポンプ(B)とHPCWポンプ等が設置されている原子炉建屋付属棟が津波により一部浸水し2基のDGが停止した。

(1) 重油タンクの倒壊。

1号機補助ボイラー用の重油タンクは海拔約2.5m(地盤沈下約1mを考慮した値)の位置に設置されていたため津波によって倒壊し重油が港湾に流れた。津波襲来前の残

油量は約600キロリットルであったと推定される。環境への影響を最小限にするために、大津波警報が解除された後、オイルフェンスや油吸着マットを敷く等の対策を講じた。

(2) 遮断器焼損

午後2：57に火災警報が1号機中央制御室に鳴り響いた。直ちに、地元の消防署に通報したが、地震・津波被害により消防士は発電所へ向かうことは出来ないとの連絡があった。そのため、所内の消防隊が消防服を纏い現場確認に向かった。この消防隊は、社員と協力会社の10名で構成され、タービン建屋地下1階にある常用系の高圧電源盤が火元であり大量の煙を発生していることを確認した。粉末消火器を用いて消火し午後10：55に鎮火したことを確認した。

常用系高圧電源盤の遮断器は、吊り下げ型構造のため地震により激しく揺れ、アークが発生しケーブルの絶縁被覆を溶かし大量の煙が発生したものと推定される。この焼損した遮断器は既に耐震型に更新した。

一方、安全系の高圧電源盤は、耐震性を有する型で地震によって影響を受けなかった。

(3) 原子炉建屋付属棟地下3階の一部浸水

上記2で述べたとおり、敷地が津波より高かったために津波が敷地に乗り上げることは無かったが、2号機の原子炉建屋付属棟が一部浸水した。

最初に、強い押し波により海水ポンプ潮位計発信器のチューブボックスの蓋が壊れ海水ポンプ室(B)が浸水した。次に、この海水が配管とケーブルの貫通部隙間に流れ込みトレンチ(洞道)を通り、最終的に、RCWポンプ(B)とHPCWポンプ等が設置されている原子炉建屋付属棟地下3階が一部浸水した(図3)。

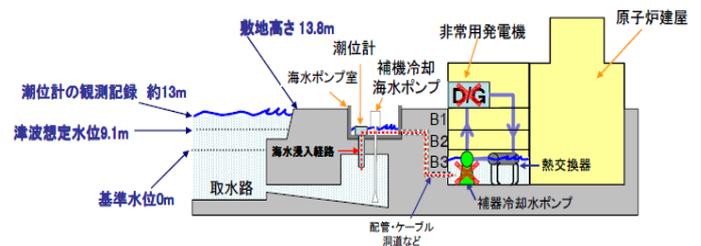


図3. 海水流入メカニズム

Fig.3. Internal flooding path of unit-2

このRCWとHPCWがDGの機関冷却に使われているため、2台のDGが使用不可となった。DGそのものは、原子炉建屋付属棟1階に設置されているため、津波の被害は受けなかった。

一方、RCW(A)はRCW(B)とは別のエリアに設

置され、かつ、水密ドアにより区画されていたので大きな被害を免れ、DG (A) は使用可能であった。

原子炉建屋付属棟地下3階のRCWポンプ (B) とHP CWポンプが設置されている部屋は床面から最大約2.5 mまで浸水した。8台の仮設ポンプを用いて、海水の放射能を測定し放射性物質が含まれていないことを確認してから、建屋の外に排水した。

4. 冷温停止の主要因

4.1 概要

最初に、電源が確保されていたことが挙げられる。各号機とも地震・津波後、DGが使用可能であり、また外部電源も1回線使用可能であった。

次に、敷地高さが最大津波高さより高かったこと、そして耐震裕度向上工事を適切に実施していたことが挙げられる。

(1) 敷地高さの決定経緯

1号機の設置許可を申請するに際して津波対策が重要課題との認識から土木工学等の大学教授を含む社内委員会を1968年に設置して議論を重ねた。当時は現在のような津波数値シミュレーション技術が未だ無かった時代でもあり、土木技術者が文献調査(1896年の明治三陸津波や1933年の昭和三陸津波等の過去の津波記録)や聞き取りをして調査した結果、最大津波は約3mであった。しかし、上記の社内委員会では、「明治三陸津波や昭和三陸津波よりも震源が南にある地震、例えば869年の貞観や1611年の慶長等の地震による津波の波高はもっと大きくなることもあろう」等の議論を踏まえて、敷地高さを14.8mに決定した。

更に、敷地高さを決定後も適宜津波高さの予測を行って、予測値が敷地高さを超えないことを確認してきた。1987年に2号機の設置許可を申請するときには、貞観津波の痕跡調査を仙台平野等で実施し、また、慶長津波等をモデルにした数値シミュレーション技術も適用した結果、予測評価値は9.1mであった。2002年には土木学会の手法による数値シミュレーションを行い、予測評価値は13.6mであった。これは、3.11の最大津波高さとは非常に近い値であった。

なお、1987年の津波予測評価値が9.1mとなった時、敷地の法面をコンクリートで補強した。この補強は、3月11日の津波でも有効で法面の崩れ等はなかった。

(2) 適切な準備

上記の要因に加え、事前に準備をしっかりとっていたことが大きく寄与したと考えられる。

まず、2005年8月16日に発生した宮城県沖地震の

知見を踏まえ安全確認地震動(最大加速度580ガル)を策定し施設の安全評価を実施した。また、2006年の耐震審査指針の改定や2007年の新潟県中越沖地震の知見を踏まえ、更なる信頼性向上のため、2008年から2009年にかけて安全上重要な設備に対して耐震裕度向上工事を実施した。具体的には、配管やケーブルのサポートの追加や改造を実施した。改造箇所は、1号機から3号機の合計で約6,600箇所になる。

次に、2007年に新潟中越沖地震が発生した時に、事務棟に設置された緊急対策室のドアが変形し発電所の所員が中に入れなかった教訓に学び、免震構造の事務新館の建設を2009年より開始した。

また、この事務新館の完成までに大きな地震が発生するリスクを考慮して既存の事務棟の耐震補強工事も行い2010年に終了した。そして、計算機や通信器具も地震に備えてしっかりと固定した。このため、3.11の震災時には、事務新館の完成前であったが、既存の事務棟内に設置された緊急対策室において適切に対応できた。(事務新館は2011年10月竣工)

更に、常日頃から訓練を定期的に行ってきたことも大きい。放射線管理区域で発生する火災対応訓練について地元の消防署と一緒に定期的に行ってきたこと、また、運転員は電源喪失訓練を始めとして各種事故対応を運転訓練シミュレータで行っていたこと等のお陰で、実際に火災や電源喪失が発生した際にも手順書に従い対応出来たと考えている。

5. 更なる安全対策

5.1 概要

3.11の地震と津波に対しては適切に対応できたが、更なる安全対策が必要である。女川の3.11での対応教訓や福島第一原子力発電所での事故教訓を反映して過酷事故を決して起こさないという決意のもと取り組んでいる。

以下にその概要を記す。

(1) 津波高さ・地震動の再評価と対策

3.11津波の知見を基にした津波高さの再評価と更なる裕度確保が必要であるが、これに対しては、津波波源としてプレート間地震やプレート内地震を考え、不確かさも考慮して再評価を行った。この評価結果から基準津波として海拔約23.1mの津波を想定するとともに、海拔約29mの防潮堤の建設を行っている(図4)。

また、3.11地震等での知見を踏まえ基準地震動(S_s)についても再評価し、プレート間地震を考慮した S_{s-1} (水平640ガル)と、海洋プレート内地震及び敷地周辺の活断層による地震を考慮した S_{s-2} (水平1000ガル)を設定した。この再評価結果に基づき、現在、更

なる耐震裕度向上工事を実施中である。



図 4. 防潮堤 (完成予想図)

Fig.4. Schematic drawing of new levee after completion

(2) 主要な安全向上対策

第 1 に、設計基準事象に対して更なる厚みを持たせた対策の実施である。具体的には、自然現象（竜巻、火山等）に対する対策の強化、発電所内で発生が想定される内部火災や内部溢水に対する適切な対策の実施等である。

第 2 に、過酷事故の発生防止対策及び仮に発生した場合の影響低減対策である。福島第一原子力発電所の事故の教訓として、電源の強化、冷却機能の向上、閉じ込め機能の向上等が主要な対策として挙げられる。

- ① 電源の強化としては、電源車（400kVA）、大容量電源装置（空冷式、5000kVA×3ユニット）の配備を実施すると共に、ガスタービン電源車（4500kVA×2ユニット）や直流電源装置の増強等を計画している。
- ② 冷却機能の向上としては、原子炉が高圧の時に注水可能なタービン駆動の冷却水ポンプの増強、原子炉が低圧の時に注水可能な注水ポンプの増強、そして原子炉の崩壊熱を除去するために既存の原子炉補機冷却系（RCW）等が使用不可の場合でも対応出来るように、可搬型の原子炉補機代替冷却熱交換器ユニット等を配備予定である。
- ③ 閉じ込め機能の強化としては、仮に原子炉の炉心に著しい損傷が発生したとしても周辺環境への放射性物質を最小限にするために格納容器フィルターベントを設置予定である。フィルターの除去効率は、粒子状放射性物質（セシウム等）については99.9%以上を目指して設計を進めている。

(3) 的確な訓練の実施

上記に述べたような設備を確保していたとしても、適切に使いこなせなければ非常時対応は適切に出来ない。今回の大震災を経験して「運転員のシミュレータ訓練はもとよ

り、緊急時通報訓練や火災対応訓練など、非常時に備えて様々な訓練を日々真剣に繰り返し行うことの重要性」をあらためて認識した次第である。「凡時の徹底」…そんな気持ちで、今後も訓練を適切に実施していく所存である。

(4) 継続的なリスク低減に向けた取り組み

3. 11の地震や津波を経て、上記のような安全向上対策を実施しているが、これらの対策がプラントシステム全体として適切にとられているか、未だ弱点は無いかなど常に確認して行く必要がある。このために、PRA(Probabilistic Risk Analysis)の実施に取り組んでいる。PRAは事故の確率評価だけでなく、プラントシステムの弱点を把握する為にも非常に有用である。PRAの実施によりいやがうえにも事故が起こる確率の存在が明らかになり事故に向き合わざるをえなくなるが、定量的信頼性、安全性を把握して改善を進める上で有益なツールである。

5. 結論

今回のような巨大地震、大津波に対しても原子力発電所の安全性を確保するために、また、東京電力福島第一原子力発電所のような苛酷事故を二度と起こさないためにも、我々は、種々の安全強化策に取り組み日々努力していく所存である。

謝辞

著者は、(敷地高さの決定や様々な安全設計など) 女川原子力発電所の計画・建設段階から携わって来られた大先輩方、またその後も(耐震裕度向上工事などの改善や様々な訓練の確実な実施など) 日々安全性向上対策に携わってこられた多くの先輩方に心から感謝申し上げる。

また震災当時、発電所で、ともに苦勞しながら、家族の安否などの不安を抱えつつ、一致協力して対応に当たった約1590人の仲間達に敬意を表するとともに、そんな我々を様々な面から支援していただいた社内外の多くの方々に心より御礼申し上げます。

文 献

- (1) 保安院報告書，“東北地方太平洋沖地震およびその後発生した津波に関する女川原子力発電所の状況について” (平成23年5月)
- (2) 渡部孝男, 小保内秋芳: “地震・津波を乗り越えた女川原子力発電所”, 2013年1月号 pp.7-10 (エネルギーレビューセンター発行)
- (3) Akiyoshi Obonai, Takao Watanabe, and Kazuo Hirata, “Successful Cold Shutdown of Onagawa: The Closest Nuclear Power Station to the March 11, 2011, Epicenter”, Nuclear Technology / Volume 186 / Number 2 / May 2014