

INPO 11-005 追録
2012年8月

福島第一
原子力発電所における
原子力事故から得た教訓

利用上の注意：本参考和訳は原子力発電運転協会（INPO）の特別報告書を、日本原子力技術協会（JANTI）が INPO の許可を得て翻訳したものです。INPO は本参考和訳についても著作権を有しており、売買や商用目的の使用はできません。JANTI、INPO、INPO 会員、INPO 参加者、及びそれらを代表して行動する人物はいずれも、本参考和訳に記載されている情報の正確性、完全性、または有用性について、もしくは本参考和訳で開示する情報、装置、方法、またはプロセスの使用が、他人の権利を侵害しないことについては、明示または黙示を問わず、保証しません。また本参考和訳で開示する情報、装置、方法、またはプロセスの使用について、もしくは使用に起因する損害についても、責任を負いません。

目次

セクション	ページ
1.0 序文.....	1
2.0 エグゼクティブサマリー.....	4
3.0 事象の概要.....	6
3.1 福島第一.....	6
3.2 福島第二.....	7
4.0 教訓.....	8
4.1 想定外に対する備え.....	8
4.2 運転上の対応.....	12
4.3 事故対応.....	17
4.4 設計と設備.....	26
4.5 手順書.....	28
4.6 知識と技能.....	30
4.7 運転経験.....	32
4.8 原子力安全文化.....	33

1.0 序文

福島第一への訪問者は同サイトから 20km (12 マイル) にある厳重に警備され管理された避難区域に入ると、すぐに何かが大きく違っていることに気づく。道路は、サイトを行き来する車とトラックを除くとがらがらで、同区域内で見かける人の大部分は汚染防護服と紙マスクまたは呼吸器を着用した人たちだけである。

訪問者を乗せた発電所に向かうバスの車内にほとんど会話はなく、窓越しに農村地帯が通り過ぎるなか静かに物思いにふけるだけである。以前はきちんと管理されていた村落と水田は放棄され、草に覆われている。地震と津波による民家や商業ビル、その他の建造物の損傷は修復されていない。地震による道路の損傷はその場しのぎで補修されたものであるため、バスは時々減速しなければならなかった。被害のない民家は空き家であり、手入れされずに放置している様相を見せ始めている。商業用の建物は商品に依然として手が付けられないまま、2011 年 3 月 11 日とまったく同じ状態で残されている。

福島県では、地震と津波により約千人もの住民が命を落とし、また、福島第一 4 号機では勤務中の運転員二人が建物内への浸水により殉職した。続いて発生した原子力事故により避難を余儀なくされている県民は 14 万人以上にのぼる。

福島第一では、3 月 11 日の事象以来、状態は大きく改善している。津波と爆発後に放置されていた建屋の瓦礫や設備及び車両はほとんど取り除かれており、今後の津波対策として、大規模な防潮堤が建造されている。その一方で、残されたポンプやクレーン、建物、大型機器の残骸が、サイトを直撃した津波の威力を思い起こさせる。

「原子力の専門家が、原子力安全の確保に対する誓いを新たにすることなく、福島第一のサイトを訪れることはできない。」 ジョン・コンウェイ、
PG&E エネルギー供給部門上級副会長

2011 年 3 月 11 日の未明には様子が違っていた。福島第一にある 6 機の沸騰水型原子炉のうち 3 機が全出力で運転していた。それ以外は定期検査と燃料交換のために停止していた。約 10 キロ離れたところでは、福島第二の 4 機が全出力で運転していた。これらのプラントは、定検状態であっても設備の保守が行き届き、作業スペースの整理整頓も行き届いた良好な状態にあった。その日が終わるまで、大規模な地震と津波が発生するとは誰も予想しておらず、備えができていなかった。

長年にわたり世界の原子力発電所事業者は、確実に規制に従い、プラントを設計基準の範囲で運転するとともに、スリーマイルアイランド (TMI) 原子力発電所とチェルノブイリ原子力発電所における炉心損傷事象からの教訓への取り組みをはじめとして、世界中の運転経験やベストプラクティスに基づいて安全性を高めることにより、プラント安全性の継続的改善に注力してき

た。各組織はまた、プラントのプログラム、プロセス、及び人員のパフォーマンスの継続的改善に努めてきた。

パフォーマンスの改善は、想定された事故シナリオのもとで、炉心と公衆の健康と安全を守る能力に対する高いレベルの信頼をもたらした。しかしながら、福島第一・福島第二原子力発電所の事象は、想定外（設計基準を上回る状況を含む）にも備える必要があることを明らかにした。プラントの運転・保守がいかに優れていようと、常に想定外の重大な結果をもたらす状況が生じる可能性がある。振り返ってみると、東京電力株式会社（東京電力）及び広く原子力産業界は、福島第一で直面した極端な状況下において、重要な安全機能を維持するための、あるいは効果的な緊急時対応手順と事故管理計画を実施するための準備が出来ていなかったことは明白である。

本報告書は、INPO 11-005『福島第一原子力発電所における原子力事故に関する特別報告書（*Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*）』に対する追録である。福島事故の結果からすでに確立された対応計画に併せて原子力発電所事業者が検討すべき教訓を示すものである。この追録は、事象や緊急時対応における困難につながった可能性のある規制や政府にかかわる要因について述べるものではない。これらの要因は、日本政府やIAEA、及び東京電力等により作成された他の報告書に詳しい。

米国原子力発電運転協会（INPO）は、INPOの通常のプロセスとは異なり、公開することを念頭に置いてこの追補版の報告書を作成した。その目的は、原子力安全の裕度を向上させる活動に貢献するため、福島第一事故についての情報を広く原子力発電産業界で共有することである。この報告書は、世界原子力発電事業者協会（WANO）や米国原子力規制委員会（NRC）、米国エネルギー省（DOE）、米国原子力エネルギー協会（NEI）といったINPO加盟メンバー以外の組織にも提供されている。このように、広く教訓を共有することは、この報告書が持つ独特な性質を反映しており、秘密情報の配布や管理のためのINPOの原則ルールはこの報告書に対して適用されない。

そうした教訓と裏付けとなる詳細は、2011年3月に発生した福島第一の事象、及び類似の事象ではあるが、結果がより軽微な福島第二の事象をINPOがレビューすることにより得られたものである。このレビューは、商用原子力発電に幅広い経験を有する米国の原子力発電業界であるINPO、及びWANOの担当者を含む9人のチームによって行われた。チームは、東京電力及び日本政府が提出した報告書を含む最新報告書を精査した。チームメンバーはまた、東京電力本店と福島第一・福島第二発電所において、緊急時対応を支援した本店及び発電所職員、ならびに事象の初期段階で重要な任務を果たしたプラント運転員へのインタビューを含むレビューを実施した。

この独立のレビューは東京電力の要請により行われたものであり、東京電力管理層には、主要人物にインタビューを受けさせ、プラントサイトへの訪問

を調整するとともに、チームを後押しし、原子力産業界ならびに公衆と共有できる組織的及びそれ以外の教訓を明らかにするなどして、今回のレビューに協力していただいた。東京電力管理層は本追録の正確さについては確認したが、産業界に向けた教訓に関してチームの結論に影響を及ぼすことはしていない。

レビュー期間中、チームは、福島第一・福島第二原子力発電所における事象への対応にかかわった管理職ならびに作業員が示したプロ意識、勇気と熱意、及び一人一人の責任感に最大限の敬意を払わせていただいた。想定外かつ複雑で多大なストレスを伴う状況にあって、発電所職員は、津波以降、重要な安全機能を復旧する作業において、個人の重大な責務、状況を回復しようとする力（resilience）、創意工夫を示した。地震と津波によって広範に荒廃し死亡者がでたにもかかわらず、家族の安否が不明確だったことをはじめとして、悪天候、休息・食料・水の不足といった困難な状況下でこれらの対応が行われた。

この報告書の実事と結論は事故後 15 ヶ月にわたる調査を通して得られた情報や見識が反映されている。事後に判明した情報は文脈から切り離されるべきでは無く、福島第一の事象の結果は、運転員及び緊急時対応要員が異なる対応をしていれば完全に防止することができたことを黙示する形で使うべきでない。本報告書の目的は、取られた行動に対して間違いを見つけることではなく、このような事象の発生可能性を小さくする方法を特定すること、及び将来同様な状況に直面した場合に対応できるようにより良い備えをすることにある。

ここで示される教訓は、全ての原子力事業者に広く適用可能と考えられる。多くの面において、福島第一及び第二の過酷事故への対応と備えの程度は、2011 年 3 月以前に世界中の他の多くの発電所で見られたそれと同様であった。本レポートにより議論されている分野の幾つかは、様々な国で既に実施されているレビューで改善の必要性が認識されている。しかしながら、本報告書は、既に取りられた対策において、それほど考慮されていない可能性のある新しい教訓を含んでいる。したがって、運転組織は十分にこのレポートをレビューし、過酷事象に対するバリアのさらなる強化のためにその教訓を如何に使用できるかを検討することが望まれる。

今回の事象のレビューを行った時点では、東京電力はまだ独自の最終調査を終えておらず、日本政府は独立した調査委員会を開き、事象の評価を続けているところであった。そうした調査の結果は、原子力安全をさらに高めるための新たな考察と教訓をもたらすであろう。

2.0 エグゼクティブサマリー

2012年4月、INPOは、WANOと共に、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震及び津波によって引起された福島第一原子力発電所の原子力事故について独自の事象レビューを実施した。レビューは、東京電力の依頼に基づき、運転及び組織についての教訓を同定し、それらを他の原子力運転事業者と共有するために行われた。

本報告書は、INPO11-005「福島第一原子力発電所における原子力事故に関する特別報告書（Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station）」の追録であり、特別報告書の情報を基に、レビューチームは調査活動を行った。また、この追録の作成にあたっては、福島第二原子力発電所における同時発生事象も運転の教訓の情報源としてレビューされた。

次に挙げる良好事例は、事故時における東京電力の対応に大きく寄与したものである。

- ・ 福島第一及び第二原子力発電所の免震重要棟におかれた緊急時対策本部は、緊急時対応要員を防護するために、また事故時におけるサイトへの立入りを確保するために重要な役割を果たした。
- ・ 緊急時対応要員は、重要な安全機能及びプラントの監視能力の再構築に関し革新的にかつ臨機応変に対応した。特に福島第二原子力発電所における電源及び除熱能力の復旧に関する対応は注目すべきことである。
- ・ 事故時また、事故後における東京電力職員の対応には、高いプロフェッショナルリズム、勇気、懸命さ、及び責任感が表れている。

次に挙げる事例は、事故からの最も重要な教訓と考える。

- ・ 定期的なレビューや新しい知見により、安全マージンを大きく引き下げるか、現在の設計想定を超える状況となる可能性が示された場合、実質的な影響が出る可能性をタイムリーに、規則にのっとり、かつ包括的に評価する必要がある。プラントウォークダウンを伴う中立かつ様々な分野にまたがる安全レビューも原子力安全にかかわる事項を理解するために実施されなければならない。その結果に重要な安全系の共通モード故障が含まれる場合、補償措置または対策を遅滞なく確立するべきである。
- ・ 緊急時及び事故時対応戦略及びその実施活動は炉心冷却の維持を最優先とすべきである。緊急時対策本部（ERC）は、炉心冷却の状況を常に意識すべきである。炉心冷却の方法の変更は、代替冷却方法の構築についての明確な戦略とともに、慎重に実施されるべきである。そして、炉心冷却に関する情報について特性や有効性について疑義が生じる際には、冷却方法が

確立されていることを確実にするため、慎重な作業が速やかに実施されるべきである。

- 対応計画書には、事象発生後の最初の数時間にすぐに必要な緊急時対応のための要員、機材及び設備についてはもちろん、長期にわたる対応能力の必要性について記述する必要がある。加えて、対応計画書には、事象中に必要な支持、支援を得るために、国内外の原子力産業界と関係を結ぶ方法について記載しなければならない。
- 訓練及び定期演習は、運転員と緊急時対応要員が、自然災害により引き起こされる原子力事故を含む、複数号機の原子力事故の際に起こりうる状況に対応し、切り抜けられるようにすべく、十分に能力が試されかつ現実的であるべきである。
- 設計基準を超える事象において事象初期の具体的な事象進展は不明なことから、緊急時対応戦略は、深層防護のアプローチを用いた頑強なものとし、また、重要な安全機能を維持し構築するため、複数の方法を策定すべきである。
- 最善の事故対応戦略とそれに関連する実施手順（例えば緊急時運転手順や事故時対応ガイドラン）は、原子力発電所の運転事業者及び原子炉メーカーと間のコミュニケーション、議論、情報交換を通じて制定されるべきである。これらの戦略や手順から逸脱する場合は、元々の基準の考え方や意図しない結果が起きる可能性を考慮した、厳格な技術的かつ独立した安全評価の後になされるべきである。
- 甚大な外的事象のための緊急時対応戦略は、その事象に対応する要員や指揮者のトラウマ的な人的影響も考慮すべきであり、また、訓練、助勢や緊急時対応策も提供されるべきである。
- 原子力の運転組織は、福島第一の事故から安全文化の意味を理解し、問いかける姿勢、意思決定、原子力技術の特異で固有の性質、及び組織的な学習に関連した安全文化の原則を強化することに注力すべきである。

3.0 事象の概要

3.1 福島第一

福島第一は沸騰水型原子炉（BWR）6機からなる。1号機はBWR3、2から5号機はBWR4、6号機はBWR5である。1号機から5号機はMark I型格納容器、6号機はMark II型格納容器を有する。日本の東海岸の沖合112マイル（180km）にマグニチュード9.0の地震が発生した2011年3月11日の昼過ぎ、1号機・2号機・3号機は全出力で運転中であり、4号機・5号機・6号機は燃料交換又は保守のため停止していた。運転中の号機はすべて、地震による原子炉保護系のトリップにより自動的に緊急停止した。地震は遮断器と送電鉄塔を損壊し、サイトに至る外部電源がすべて失われた。用意されていた非常用ディーゼル発電機（EDG）が自動的に起動して、非常用系統に交流電源を供給した。地震から3分後、気象庁が、少なくとも3メートルの高さに達する津波の可能性を示す大津波警報を出した。作業員にはこの警報が伝えられ、運転員には制御室に集合するよう指示が出される一方で、不必要な人員は高台に避難させられた。

地震から41分後、7波の津波のうち第一波がサイトに到達した。サイトを襲った津波の高さは最大46～49フィート（14～15メートル）と推定されている。これは設計基準の津波の高さ18.7フィート（6.1メートル）を超えており、1～4号機ではサイト地盤面である32.8フィート（10メートル）を超えていた。EDGと電源盤室が浸水した時点で1～5号機の交流電源がすべて喪失した。海水取水構造物が深刻な損傷を被り、機能しなくなった。1号機・2号機・4号機では全DC電源が喪失する一方で、3号機ではいくつかのバッテリー群が浸水を免れたためバッテリーのDC電源が一部機能した。空冷式非常用ディーゼル発電機1台が機能しつづけ、6号機に、その後5号機にも電源を供給し、原子炉と使用済み燃料の冷却を維持した。

崩壊熱を除去する炉心冷却がない状態で、1号機では事象当日から炉心損傷が始まった。2号機・3号機の原子炉に冷却水を供給するために蒸気駆動式注水ポンプが使われたが、これらのポンプは最終的に動作を停止した。不十分な炉心冷却の結果、2号機・3号機においても燃料損傷が発生した。津波により発生した瓦礫を移動した後、注水を再開するために消防車が配置されプラントの系統に接続された。接続箇所は防火手順を支援するために予め設置されたものであったが、瓦礫が存在したことや図面が更新されていなかったことから、作業員は当初接続箇所を発見することが困難であった。

本事象において、長い間原子炉格納容器圧力が高い状態にさらされたことが格納容器からの水素漏洩に寄与し、低圧系を用いた原子炉への注水を阻害した。

原子炉内で損傷した燃料から発生した水素が（ベント操作中またはそれ以外の漏洩により）原子炉建屋に蓄積し、それに着火して、1号機・3号機の原子炉建屋の爆発を来たし、対応を著しく困難にしたと考えられる。3号機で発

生じた水素は4号機の原子炉建屋に移動し、その後の爆発と損傷の原因になった可能性がある。一次・二次格納施設の健全性が喪失したことが地表面での放射性物質の放出を招いた。事象から4日目の4号機の爆発と2号機における異常な兆候を受けて、所長は安全のため不必要な人員全員に一時的避難を指示し、事象を管理するために70人程度を現場に残した。

福島第一の事象は、国際原子力事象評価尺度（INES）ではレベル7と評価された。日本の原子力安全委員会は、3月11日から4月5日の間にヨウ素131換算で約1700万キュリー（ 6.3×10^{17} ベクレル（Bq））の放射性物質が空気中に、12万7000キュリー（ 4.7×10^{15} Bq）が海に放出されたと推定している。INES評価でレベル7とされた原子力事故は、ほかには1986年のチェルノブイリ原子力発電所4号機の事故しかない。国際原子力機関（IAEA）によると、チェルノブイリの事故は結果的に約3億7840万キュリー（ 1.4×10^{18} Bq）の放射性物質を環境に放出している。¹

3.2 福島第二

福島第二は、Mark II型格納容器を備えたBWR5原子炉4機からなる。発電所から115マイル（185km）の沖合でマグニチュード9.0の地震が発生した。2011年3月11日には、4機はすべて全出力で運転していた。これらの原子炉は、地震による原子炉保護系のトリップにより自動的に緊急停止した。外部電源は1系統以外すべて喪失した。地震後間もなく、気象庁が、少なくとも3メートルの高さに達する津波の可能性を示す大津波警報を出した。福島第一と同様に、運転員が制御室に招集され、不必要な作業員は高台に避難した。

地震から36分後、津波の第一波がサイトに到達した。浸水高は発電所の海側で最大23フィート（7メートル）、主な建屋がある区域では49フィート（15メートル）と推定されている。これは設計基準の津波の高さ17.1フィート（5.2メートル）を超えており、発電所の海側では地盤面である13.1フィート（4メートル）、主要建屋では39.4フィート（12メートル）を超えていた。

3号機では、EDG2台、海水ポンプ3台、残留熱除去（RHR）ポンプ2台が動作可能な状態で存続していた。また、4号機ではEDG1台が、高圧炉心スプレイポンプについては両号機で動作可能な状態で存続していた。しかし、それ以外のEDGと海水ポンプは津波により動作不能になった。また、浸水により、安全関連のポンプ数台と関係する開閉器が動作不能になった。福島第一と異なり、福島第二は全号機において外部交流電源あるいはDC電源を失わず、制御室の計装制御装置には概して被害はなかった。

当初、原子炉隔離時冷却系（RCIC）が作動し、すべての原子炉の炉心冷却が行われた。その後、緊急時運転手順やアクシデントマネジメントガイドに従い1～4号機全ての原子炉が減圧され、復水補給水系（MUWC）を使用して

¹ チェルノブイリの遺産：健康・環境・社会経済学的影響（Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts）。チェルノブイリ・フォーラム 2003-2005 第2版。

代替冷却注水を確立した。1号機では、このために津波後電源を失った電動弁の手動操作が必要であった。翌日、4号機原子炉への炉心冷却がMUWCから高圧炉心スプレイ系（HPCS）に変更された。その後、HPCSの起動・停止により4号機の原子炉水位が制御された。

3号機については残留熱除去系が運転可能で、炉心や格納容器の冷却に使用された。しかしながら、1号機・2号機・4号機では、どの冷却手段も利用可能な状態ではなかったため、格納容器の温度と圧力が上がり始めた。運転員は定期的に減圧を促すため、数回にわたり補給水ポンプを使って、ドライウェルと圧力抑制プールのスプレイを行った。設計制限に達した場合に備えて、格納容器をベントする準備も行われた。

冷却能力を復旧するには、新しい海水ポンプモーターと大量の仮設ケーブルを至急調達する必要があった。本店のサポート組織は、冷却復旧の緊急性を認識していた。担当者が交換用の海水ポンプモーター、適切なケーブルとほかの必要な資材の供給源を見つけた。地震により一部の道路が損傷していたこともあり、輸送が困難であったにもかかわらず、津波の翌日、ヘリコプターとトラックでモーターとケーブルをサイトに輸送する手配が行われた。その時点から36時間にわたって約200人の作業員が新しいモーターの設置と5.6マイル（9,000メートル）の仮設ケーブルの敷設にあたった。

3月14日の未明、格納容器ベントを実施する基準に達する前に、1号機のRHR冷却が復旧し、格納容器の圧力が下がり始めた。ほかのユニットの冷却もつづいて復旧し、日本標準時3月14日の15時42分までに、すべての原子炉のRHRが作動した。3月15日には、4機の原子炉すべてにおいて冷温停止が実現した。

4.0 教訓

4.1 想定外に対する備え

教訓： 定期的なレビューや新しい知見により、安全マージンを大きく引き下げるか、現在の設計仮定条件を超える可能性が示された場合、実質的な影響が出る可能性をタイムリーに、規則にのっとり、かつ包括的に評価する必要がある。プラントウォークダウンを伴う、独立した様々な分野にまたがる安全レビューも原子力安全にかかわる事項を理解するために実施されなければならない。そうした影響に重要な安全系の共通モード故障が含まれる場合、補償措置または対策を遅滞なく確立するべきである。

福島第一サイトの耐用期間中、東京電力の担当者は津波の高さに関する設計基準の仮定を少なくとも5回にわたり再評価し、そのうち2回で、段階的に巨大化する津波に備える対策が講じられた。当初の設計基準は、1960年のチリ大地震が引き起こした津波を基準として、海水面プラス3.1メートルに設定された。これは福島の海岸で発生した、記録に残る最大の津波であった。この津波を設計基準とすることはその当時の標準的評価手法であった。津波

の高さの仮定は、2002年には海水面プラス 5.7メートルに、さらに2009年には海水面プラス 6.1メートルに引き上げられたが、設計基準が正式に変更されることはなかった。こうした引き上げは、どちらも土木学会（JSCE）の地震と津波の専門家が開発した改良型評価手法に基づいた計算値の不確かさに対処するために行われたものである。JSCEは、地震と津波の設計基準を定める権威を有すると認識されており、日本の全ての原子力組織はJSCEの方法に従っている。これに応じて、新たに想定された津波が発生した時に海水ポンプが浸水するのを防ぐため、ポンプの高さが2002年と2009年にも引き上げられている。

東京電力の技術者及び管理者は、JSCEの方法は保守的な評価結果を与え、海水ポンプのかさ上げにより、可能性のあるいかなる津波に対しても十分な余裕があると考えていた。しかしながら、二つの異なる情報源から得られた地震と津波の可能性についての追加的な情報は引き続いて検討された。一つは869年の貞観地震と津波であり、もう一つは、日本の東海岸沖の日本海溝沿いのいずれの場所においてもマグニチュード 8.2の地震が発生するという地震研究推進本部（HERP）の提言である。

2008年には、東京電力の技術者は、貞観地震に関する至近に公表された研究を用いて福島第一と福島第二における9mの想定津波高さを計算した。東京電力による計算は、貞観に関する論文に記載された場所及びパラメーターを用いており、また、マグニチュード 8.4の地震を想定した。研究における波源モデルは、仙台平野及び石巻平野における堆積物調査に基づくものであったが、その波源の場所及び大きさは未検証であった。計算結果は2009年9月及び2011年3月に原子力安全・保安院（NISA）に提示された。東京電力及び他の電力は、貞観津波に対する波源モデルの適用性についてJSCEに審査を依頼した。

貞観に関する研究の仮定の妥当性は未知であった。大津波の可能性をさらに理解するために、東京電力は、2009年及び2010年、福島第一及び福島第二近くの5カ所で堆積物調査を実施した。5カ所は、津波に対してもっとも感受性の高い海岸が選ばれた。内3カ所の地質データでは津波による堆積物が見つからなかった。一カ所では、堆積物は貞観地震による0.5メートルの津波を、別の一カ所では3メートル～4メートルの津波が発生したことを示した。このため、巨大（10メートル超）な津波の歴史的証拠は、発電所近くでは発見されなかったことになる。

また、2008年に東京電力は、福島沖を含む日本海溝沿いのどこにおいても巨大な地震が発生するというHERPの提言に基づく巨大津波の可能性について調査を行った。この提言は、より具体的なガイダンスで補足されることはなく、JSCEはこの可能性を反映するためにその基準を修正することはなかった。加えて、国の中央防災会議や福島県が防災計画で取り組む巨大地震や津波に対する可能性の計算の入力条件として考慮されることはなかった。

HERP が津波の波源を確定していなかったこと、さらに計算のためのモデルとして用いる福島沖における地震の記録が無かったことから²、技術者は 1896 年の明治三陸沖地震（マグニチュード 8.3）と類似の特性を持つ波源モデルを仮定した。この地震は岩手県沖で発生し、38 メートル(125 フィート)の津波を引き起こし、2 万 7 千人以上の死者をだした。この様な仮定を用いた計算は、福島第一において最大津波高さ 15.7 メートルの津波を示す結果となった。

これらのプラス 10 メートル級の分析結果は、東京電力本店の上級管理層及びサイトの管理層と 2008 年後半と 2009 年前半に共有されている。この議論の中で、この大きさの津波は海水ポンプを動作不能にすることが認識された。緩和策の必要性が決定された際、仮想的な前提に基づいた計算結果の信頼性が低いことから、それ以外の影響、例えば、AC・DC 電源の共通モード喪失を来すようなサイト建屋への浸水の可能性は考慮されなかった。

上級管理職層は、この試算の妥当性を確認する措置を講じるよう指示した。この計算方法は 2009 年に JSCE と共有され、JSCE は、波源モデルの妥当性、及びそれによって基準の改訂が必要か否かについて審議を依頼された。2011 年 3 月 11 の時点では、これらの問いかけは依然として JSCE によりレビュー中であった。

2010 年東京電力は、JSCE が同様な計算結果となる波源モデルを確立した場合に備えて、巨大津波から福島第一を守る上で考えられる対策を決定するために、対策グループを設けた。このグループは、2011 年 3 月の地震が発生した時点ではその作業は完了していなかったが、作成中の推奨対策は、非常に大きな津波から海水ポンプを守る方法を組み合わせるといったものだった。インタビューによれば、原子力安全の意味合いを完全に理解するためのプラントウォークダウンを伴う詳細な安全解析は未実施であり、原子炉施設での溢水の可能性を減ずるための対策は検討されていなかった。

福島の沖合で発生した 3 月 11 日の地震はマグニチュード 9.0 であった。今回の地震は、それまでのどの計算あるいは評価で仮定されていたものよりもマグニチュードが大きく、多数の断層と震源域がかかわり、位置も異なっていた。地震の約 41 分後、一連の津波が福島第一サイトを襲い、津波高さが約 15 メートル（45 フィート）の高さに達した。津波は海水ポンプを破壊し、屋外タンクやその他の施設を損壊し、地表面の出入り口と換気用ルーバーを通じて原子炉・タービン建屋を浸水させた。非常用ディーゼル発電機、バッテリー、開閉器をはじめとする安全関連設備が浸水し、全 AC・DC 電源（3 号機は限られた DC 電源を維持した）及び最終的ヒートシンクの喪失を来した。東京電力と原子力産業界にとって想定外が発生したのである。どちらも、この設計基準をはるかに上回る事象の影響について、十分な備えができていなかった。

² チームは、福島第一・第二サイトの近くにおける「津波石碑」の報告を裏付ける事実がないことが分かった。（将来の居住者に対して警告をするために、過去の最大津波高さが石碑に刻印されていたと言われている。）いくつかの津波石碑は、巨大津波が起こった領域である、日本の東北地方にあるリアス式海岸（三陸海岸）で見つかった。

教訓：プラント特有の設計と運転手順書だけでは、設計基準をはるかに上回る事象をもたらすリスクを十分に軽減できない。そうした事象が起こる場合に備えて、それに対応するために追加の備えをしなければならない。

長年にわたり、東京電力は、炉心損傷事象のリスクを軽減するための能力を改善するため、幾つかの変更を実施してきた。空冷式のディーゼル発電機、電源母線の相互接続や冷却水系のプラント改造、防火のための消防車の追加、緊急時対応のための免震重要棟の建設等である。こうした改善の多くは、津波後の対応に欠かせないものであったが、しかし、今回の事象を防ぎ、その影響を十分に軽減するには不十分であった。

設計基準を超える事象へ対応するために要求される戦略、設備及び訓練は、長期間の AC・DC 電源の喪失に直面した時、深層防護の層を厚くするために整備されていなかった。この報告書に記載した多くの教訓は、想定外に対する備えを考えなければならない分野を示している。例えば、通常電源や他の手段が使えなくなった時に運転員が必須の作業を実施できるようにするための設計や手順書の変更、事象発生時の緊急時対応活動の助けとなる十分な人員配置、施設、手順及び訓練などである。

教訓：企業の全社的リスク管理プロセスは、炉心損傷をもたらす所外に放射性汚染を拡散させる恐れのある低確率だが影響の大きい事象に関するリスクを検討すべきである。

東京電力の全社的リスク管理プロセスは、多くの大企業が用いているものと似ている。様々な脅威を組織内で特定し、発生する可能性と影響を基準に分類した上で、管理職で構成される委員会が年 2 回精査している。発電・送電施設に対する脅威は、リスクマトリックスに含まれているものの、重視されているのは、発電能力が喪失する可能性、電気設備の寸断、及び設備の修理費用である。確率が低くあるいは影響の小さいと考えられていた他のリスクのいくつかは、リスク管理マップの中に含まれていなくとも、各部門の中で用いられるプロセスと管理によって十分に対処されていると考えられていた。

原子力部門は、仮定と手法の不確かさのために、巨大津波によって引き起こされる原子力事故の脅威をリスクマップに加えなかった。さらに、プラント特有の設計がそうしたリスクを軽減すると想定されていた。

福島第一・福島第二の事象からの教訓に基づき、確率は低いですが、影響の大きい脅威に一層の注意が必要であることが今では認識されている。例えば、外的脅威に対する防御の妥当性に関して疑問が生じた場合、リスクの軽減手法に本店幹部の注意が向けられるよう、東京電力幹部は管理職がこの情報をリスク管理委員会へのインプットに含めることを期待するといった具合である。

4.2 運転上の対応

4.2.1 炉心冷却

教訓：炉心冷却状態が最優先事項として常に明確に把握されていること、及び炉心冷却の連続性を確実に維持する上で、冷却状態の変化がコントロールされていることを確実にする。もし原子炉冷却が不確実であれば、炉心冷却を確実にする状況を確立するために、直接かつタイムリーな行動が取られるべきである。

原子力と他の形態の発電との主要な違いの一つは、炉停止後も冷却を継続する必要があるということである。全ての状況下で炉心冷却を継続することは不可欠である。運転員及び緊急対応の指揮者は、炉心冷却状況を完全に把握する必要がある。この様な意味から、炉心冷却のために使用中の系統の状況を把握し、また深層防護の観点からどの系統が使用可能かを示すため、多くの組織では状況ボード（status board）を各制御室や ERC に表示している。福島第一の事象への対応の間、このレベルの状況把握と制御はなされなかった。

福島第一では、炉心冷却系の状況と制御に関する誤解が最初の数日の意思決定や優先順位付けに悪影響を与えたかもしれない。この誤解についてはたくさん要因がある。制御室で計器指示が不足したこと、IC に関する訓練が不足していたこと、現場環境が劣悪であったこと、複数号機で同時に緊急対応をする必要があったこと、制御室とサイト ERC の間の通信が 2 本のホットラインに限られたことなどである。

福島第一 1 号機

津波の後、1 号機の炉心冷却状況が関係者全員に明確に伝えられておらず、運転状態が十分に確認されていなかった。津波の前は、非常用復水器（IC）が原子炉压力容器内の圧力上昇を受けて自動的に起動した。運転員は、冷却率の制限を超えないように、通常の運転手順に従い適切に IC の運転・停止を繰り返した。IC の AC 及び DC 駆動の電動弁は、設計上、全閉又は全開のみの制御しか出来ないシール・イン制御回路であったため、中間開での流量制御が出来なかった。事象調査の一環として確認されたチャートの記録によれば、AC 及び DC 電源が失われた時点で IC は停止中であった。しかしながら、制御室の照明が失われ、建屋の浸水が発見され、制御室の計器の指示値を読み取れなかったなどした混乱の中であって当直は IC の状況が分からなかった。

状況を確認するのに用いられる制御室の計装は使用不能であった。初期の行動には、仮設バッテリーを用いて原子炉水位計や格納容器圧力を復旧するための行動が含まれていた。現場で状況を確認するために、制御室から運転員が派遣されたが、適切な放射線防護の装備がなかったことや不十分な照明や瓦礫による人身安全上の問題、引き続き発生する余震が IC への到達を妨げることとなった。IC の排気管を主制御室から見るができなかったので、運転員は、IC の状態を特定する際に ERC の支援を要請した。ERC の職員は、

蒸気が IC の排気口から出ていたことを報告した。（しかしながら、後の情報によると、ICはこの時実際には運転状態ではなかったかもしれない。）

IC の入口、出口の格納容器隔離弁は蒸気管破損の際には閉止するよう設計されている。DC 制御電源が失われた場合、隔離信号が発生する設計であった。AC と DC が喪失するタイミングに依存して、津波襲来後、当初開であった電動弁のいくつかが隔離信号を受け、少なくとも途中まで閉まるということはあり得ることである。

電源喪失から約 3 時間後、非常用復水器の 1 系統の電動弁の弁位置表示が短時間点灯し、運転員は電動弁が閉じている表示を確認した。運転員は IC を作動させようとして、弁の開操作を行った。運転員は IC の排気口から蒸気が出ているのを見た。そして本店及びサイト ERC には IC が作動中であることが伝えられた。しかしながら、その後すぐに蒸気が見えなくなった。IC が実際に運転を再開したのか、それ以前の動作による残留蒸気であったのかは未だに不明である。運転員は、復水器の水位が低くなっている可能性を考えたこと、及び配管が破裂し放射性物質が放出される可能性を懸念した。このため、運転員は IC を隔離するために弁を閉じた。ひとたび IC が隔離されると、原子炉から崩壊熱を除去する方法はなく、原子炉の水位は不明のままになった。事故後に行った東京電力による解析によると、この時までには、燃料は露出していたかもしれず、炉心損傷が発生しつつあったことが示されている。

津波後の最初の数時間、発電所及び本店 ERC の職員の何人かは IC の一系統は運転中で炉心を冷却していたと推測した。制御室運転員が、先に述べたように IC を停止するために隔離弁を閉じた後、この情報はサイト ERC の発電班まで伝達された。しかしながら、IC を停止したという事実は明確には理解されなかった。それ故に、発電所及び本店 ERC の上層部に対して伝達されなかった。ディーゼル駆動消火ポンプ（DDFP）による炉心冷却の増強のための準備は進行中であった。しかし、2 号機の RCIC の状況が確認されていなかったことから、サイト ERC は、1 号機が IC により冷却されているという間違った想定に基づいて 2 号機の炉心冷却により多くの関心を払うことになった。実際には 1 号機に対して最も緊急に関心を払われなければならない状況であった。

福島第一 2 号機

津波の前、2 号機では RCIC が作動していたが、津波後は、運転員は RCIC の状態を把握できず、原子炉の水位の表示もなかった。浸水をはじめとする現場の悪条件により、運転員が現場で RCIC の状態を確認するのが妨げられた。数時間後、運転員は原子炉建屋の計装ラックで、原子炉圧力と RCIC ポンプ吐出圧力を確認することができ、実際に RCIC が作動中であることを確認した。翌日にかけて、状態が悪化しつづけ、RCIC の故障が予測された。

減圧と低圧注水に向けた準備が進んでいたが、余震とその避難により作業員が継続的に現場作業をすることが妨げられた。さらに AC・DC 電源がない状

態で原子炉を減圧するための戦略が策定される必要があった。3号機原子炉建屋の水素爆発により、圧力抑制室をベントし、消防車で注水するために用意されていた機器の大半が損壊した。約2時間後、原子炉水位計の指示がRCICはもはや運転しておらず、炉心注水が失われたことを示した。その時点で、注水ラインを準備する作業が進められていたが、逃がし安全弁（SRV）を開き、原子炉を減圧する作業がまだ始まっていなかった。

福島第一3号機

地震と津波の後、高圧注水系（HPCI）とRCICはどちらも注水のために使用可能であった。最初にRCICを作動させ、翌日同系統が突然停止するまで作動しつづけた。RCICによる注水喪失から1時間後、原子炉水位低低でHPCIが自動的に起動した。

HPCIは数時間作動しつづけ、原子炉圧力容器（RPV）圧力の減圧と炉心冷却が効果的に行われていた。HPCIが停止した後に、ディーゼル駆動消火ポンプを注入に使う計画はサイトのERCと制御室の人員の間で議論され、同意された。しかしながら、消火系の圧力が通常値の約半分だけであったため、HPCIからディーゼル駆動消火ポンプへの移行は遅らされた。この消火系の圧力値は系統のどこかで何らかの問題があったことを示していた。この劣化した性能では、消火系の圧力は原子炉圧力容器に注水するのに十分ではなかった。その後、HPCIポンプがキャビテーション／振動リスク領域で運転してポンプが損傷する可能性があったことや、タービンが減速してポンプの吐出圧力が実質原子炉圧力と同程度になったことを懸念し、運転員はHPCI系を停止することを決めた。ポンプを停止することは運転員の訓練や手順書に適合するものであり、ポンプはRPVにそれほど大量の注水をしていなかったかもしれない。しかしながら、事故条件下で安全系機器が重要な安全機能（崩壊熱除去）を維持するために必要とされる場合には、「壊れるまで運転する（run-to-failure）」という対応を検討することは重要である。

その時点で炉圧は低かったが、DC電源が失われつつあった。この問題とそれに伴うHPCIを停止するという決定が、中央制御室、及びサイトERCにおける運転部門の実務グループ内で検討された。ただし、サイトERC内の主要意思決定者は、この議論に参加しておらず、ポンプ停止及び低圧注水に関する最良の移行方法の助言を提供する機会がなかった。

減圧及び低圧系を用いて注水する能力は、HPCIが停止される前には確認されていなかった。運転員は、SRVのランプが当初は点灯していたことから、HPCIを停止した直後にSRVを開いて、原子炉を減圧できると考えていた。ところがその後、DC電源の喪失により、SRVを開けられないことが判明した。HPCIが停止された時点で、系統の除熱機能が喪失したため、原子炉圧力が急上昇し、低圧系統による注水ができなくなった。

福島第二

先に述べたとおり、福島第二における津波の被害は深刻度がより低かった。AC及びDC電源は利用可能であり、プラントパラメーターは制御室及びERCで監視可能であった。しかし、海水ポンプへのダメージにより4基のうち3基では原子炉格納容器からの除熱ができない状態であり、除熱能力の復旧のための適時の対応が必要とされた。

教訓：事象への対応の初期の段階において、炉心冷却と復旧活動のための明確な戦略が策定され、制御室及びERC職員に伝達されるべきである。加えて、指揮者は、この戦略が効果的に実践されるよう、明確な優先順位付けを行い、指示・監督を行うべきである。

津波後、発電所及び本店職員の幾つかの行動は炉心冷却を維持し除熱能力を確立するために効果的であった。これらの行動は以下の通り要約される。

- ・ 発電所幹部は、原子炉を減圧しAC駆動の補給水ポンプにより炉心を冷却する戦略を決定した。この戦略は、制御室及びERC職員に明確に伝達された。
- ・ 発電所幹部の何人かは電源系に深い知識を有していた。これらの幹部は、他の職員と協働しながら、海水ポンプモーターの交換や津波被害を受けていない建物の配電盤からポンプへの仮設ケーブルを敷設するための計画の策定にあたった。
- ・ 本店ERCは、必要な仮設発電機、海水ポンプの交換用モーター、及び電気ケーブルの手配を行い、これらを津波後速やかに発電所に輸送した。
- ・ 労働力を適切に分配するよう管理層による継続的な監視、指示が行われ、現場活動も監督された。
- ・ 発電所職員及び協力会社職員は、困難な状況の下、格納容器ベントが必要な圧力に到達する前に、モーターやケーブルを設置し除熱能力を回復させた。

4.2.2 格納容器のベント

教訓：緊急時・事故時手順書は、格納容器のベントにより、健全性を維持し、水素をパージし、低圧システムによる注水を促進するためのガイダンスを示すべきである。また、手順書は、ベント弁がある場所での電源喪失や高レベルの放射線や高温といった状況下におけるベント実施のためのガイダンスを示すべきである。

概して、日本の電力会社が1980年代以来用いている原子炉格納容器(PCV)のベント計画は、放射性物質の放出を避けるため、できるだけベントを遅らせるよう考えられている。この戦略に沿って、ベントラインには、格納容器

圧力が最高運転圧力³に達するまで破裂しないように設計されているラプチャーディスクが備えられている。燃料損傷が発生した場合、アクシデントマネジメントガイドでは、原子炉格納容器（PCV）の最高運転圧力の2倍に達すると予測され、格納容器スプレイの復旧が見込めず、注水量がトーラスベントラインに及んでいない場合には、ベントが許されるということが記載されている。格納容器のベントには発電所長の許可が必要である。

比較として、米国のBWRは、一般的に早期ベントを妨げるラプチャーディスクは備えておらず、非常時の運転手順では格納容器の設計圧力に到達する前にベントを開始することが要求されている。燃料損傷が起こった場合には、手順書ガイダンスにのっとり、PCV内での爆発の可能性を減らすため、格納容器内の水素濃度に基づき早期ベントが要求されている。サイトERCと相談し助言をもらった上で、当直長によってベント開始が決定される。

日本のBWRでは、米サンディア国立研究所で実施された格納容器の健全性試験の結果の検討により、ベント実施前に格納容器圧力が設計圧の2倍に達することを許すような手順ガイダンスが決められた（NUREG/CR-6906/SAND2006-2274 [2006年7月発行]を参照）。この研究では、スケールモデルを用いた試験により、定格値の2倍を超えるまで格納容器は壊れないことが示された。日本の事業者と原子炉ベンダーは個々の機器が同程度の高圧でも破損せずに耐えられることを確認するために詳細な計算を行った。しかしながら、ベントを遅らせる戦略を採用することが決定された際、格納容器圧力が高い状況下での水素漏洩量の増加の可能性については十分に対処されなかった。

福島第一の事故は、格納容器が長時間高圧にさらされることを防ぐために行動を取ることの重要性を示している。原子炉格納容器からの漏洩が、水素や他の気体の二次格納容器（原子炉建屋）内での蓄積を引起こし、それが1・3・4号機の爆発の原因となった。加えて、事故状況下での低圧注水の有効性を減ずるかもしれない。したがって、手順ガイダンスには燃料損傷の事故の後、早期にベントを開始する内容が盛り込まれるべきであり、AC・DC電源喪失や圧縮空気の喪失といった不測の状況下におかれた場合であっても対処が可能なように実行手順書と必要な機器を準備しておくべきである。

福島事故の際、電源喪失や津波被害といった要因が格納容器ベントの取り組みを著しく妨げることとなった。11日の夜中頃、計器が復旧し格納容器圧力が高いと判断された際、所長は1号機の格納容器ベントを実施する決定を下した。1号機の格納容器ベントの準備が始まっていたが、電源がない状況でベント弁を操作する手順書を作成するため、担当者が配管・計装図面、事故管理手順書、弁図面を確認する必要があった。PCVを手動でベントする計画は作成されていたが、トーラス室の高線量率のため、運転員がこの戦略を実施するのが妨げられた。ベント弁を遠隔操作で開くアプローチも用意され、実施された。事象の開始から約24時間後に、ベント弁が開いて、格納容器の

³ 最高運転圧力は他の国々では時に格納容器設計圧力と呼ばれる。

ベントが始まった。ベントの前に表示された格納容器圧力は、設計圧力の約2倍の 122 psia (0.84MPa abs) に達していた。ベントの直後に原子炉建屋内で水素爆発が発生した。

1号機と同様に、原子炉の水位が特定できず、注水状況が不明になった時点で2号機をベントする準備が行われた。こうした準備には、担当者による手動ベント計画の作成とベント弁位置の確認が含まれていた。運転員は、当該エリアの線量が低い間にベント弁を手動で開く予定であったが、ベントラインアップが整った時点で、表示された格納容器圧力は、ラプチャーディスクが破裂し、ベントされるために必要な圧力を下回っていた。そのため、ラプチャーディスクは破壊せず、ベントはされなかった。2号機 PCV は、格納容器圧力がラプチャーディスクのセットポイントを超える約 109 psia (750 kPa abs) に達した後も、ベントは成功しなかった。ドライウエルの圧力は3月15日の朝に低下し、格納容器の破損の可能性が示された。

3号機をベントする準備も行われたが、空気作動のベント弁を開けるのに十分な空気圧がなかったため、PCV をベントする当初の試みは失敗に終わった。仮設のエアポンペを設置し、数時間後、格納容器のベントが行われたが、格納容器圧力が 92.4 psia (0.637 MPa abs) に達する前ではなかった。

1号機の原子炉と格納容器内の圧力が 122 psia (0.85 MPa abs) で等しくなった3月12日の早朝、消防車から炉心を冷却するためのラインが構成された。同様に、2号機では RCIC が停止し原子炉が格納容器にベントされた後、14日の夕方には炉心への注水に消防車が使用され始めた。その後14時間にわたって、断続的に注水が続けられた。この時期、圧力抑制室の圧力は、43 psia から 58 psia (0.3 MPa abs から 0.4 MPa abs) までの間で安定していたが、ドライウエルの圧力は上昇し続け、早朝までに 106 psia (0.73 MPa abs) に到達した。

東京電力の分析によると、原子炉と格納容器の圧力が比較的高い状態で維持されていたにも関わらず、福島第一で使用された消防車は十分な冷却水を原子炉圧力容器に注水する能力があった。しかしながら、発電所に備えられているディーゼル駆動消火ポンプは、低い吐出圧力、ポンプと原子炉圧力容器の間の高低差による問題、長い配管の引き回しによるラインの圧力喪失のため、こういった状況では十分な注水を行うのに適さなかった可能性がある。

4.3 事故対応

教訓：原子力事業者は、過酷な事故状況に効果的に対応し、炉心損傷を軽減するとともに、炉心損傷が発生した場合には、原子炉を安定させる上で必要なインフラを確立しなければならない。このインフラには、複数の原子炉に影響を及ぼし、長時間継続する、設計基準を超える事象がきっかけで起こると考えられる事象への対応に必要な人員、設備、訓練、裏付けとなる手順書が含まれる。影響を受けた原子力運転組織をサポートするため、本店及び産業界が効果的に対応できるように準備をすべきである。

福島第一を襲った地震と津波は、発電所の事故対応能力を超える被害をもたらした。発電所の緊急時対応組織では、そうした複数プラントへ影響を与えた事象に対応する上で、必要な設備、手順書、教育訓練を整備していなかった。

発電所の作業員は、原子炉の安定化に多大なイニシアティブと創意工夫を発揮した。このことが、複数の作業員が示した勇気と相まって、事故の悪化を防いだのである。原子炉を安定化するために講じられた措置、及び作業員が直面した課題を精査したところ、原子力産業界にとって、複数の教訓を得る機会が明らかになった。以下のセクションに、原子力事故に対応するのに必要なインフラの確立に関連する教訓を示す。

4.3.1 人員配置

教訓：複数の原子炉がかかわる事象の初期段階において、迅速に運転員、その他重要な職位及びサイト・本店緊急時対応組織に人員を配置するとともに、長時間に及ぶ事象対応に応じた人員配置の計画を確立する。

複数の原子炉がかかわり、高度なストレスを伴う長時間に及ぶ事象に対応するために、制御室とサイトと本店の ERC の両方に十分な人員を確実に配置する戦略が不可欠である。この戦略は、過酷事故対応に取り組む上で必要とされる人員のローテーション及び適切な人数と技能を提供する必要がある。追加要員としては、情報の収集、重要なパラメーターの監視、事象の進展分析にあたる当直長及び副当直長を補佐する人員が含まれる。

幸いにも、2011年3月の津波は、福島第一・福島第二に多くの人員がいる平日の日勤時に発生した。バックシフトと週末に通常出所している人員では、事象発生直後の数時間の対応には不十分であったと思われる。こうした欠点を認めて、東京電力はすべてのシフトで運転員を支援するため40～50人の追加人員を確保する決定を下している。これら勤務に就く人員は、非常事態の発生時に運転員を支援するため、保守点検や放射線防護の経験を有する人員を含んでいる。

地震と津波が発生した際、福島第一の緊急時対応組織は直ちに、約6,800人のサイト作業員の安全を確保するとともに、様々な緊急状態にあった6機の原子炉を安定させる責任を引き受けた。同時に、本店 ERC は、同じく津波による被害を受け、アクシデントマネジメント手順の実施が必要となった福島第二の4機に支援を提供した。本店と発電所の体制は、共通原因事象の影響を受ける恐れのある、それだけの数の原子炉を支援するようには考えられていなかった。

福島第一における運転部門の人員配置は、複数の原子炉に対する何日にも及ぶ事故対応を支援する上で、十分ではなかった。当直運転員は3日間不眠で勤務し、その多くは家族の状況すら把握していなかった。また、ERCの人員

は、何週間にもわたり、限られた休憩時間だけで、任務にとどまった。ERCにいた発電所管理職員とのインタビューにより、なかには椅子に座ったまま意識を失い始めるまで、36時間も眠らずに事象に対応していた者もいたことが明らかになった。一部の管理職員は、ERCで数週間を過ごしてはじめて建物を出て、シャワーと食事を済ませた後、すぐにERCに戻っている。がれきの撤去、仮設ホース・ケーブルの設置などの現場作業の物理的な要求は労働力への負担となり、自衛隊は、必要なリソースの提供を支援するためにサイトに入った。長時間に及ぶ事象に対応するのに十分な人員、引き継ぎ、支援を行う上で十分な体制があらかじめ定められていなかったのである。

サイト及び本店の緊急時対応組織には、運転上の意思決定を促すのに必要な運転部門の知識と経験、及びプラント過渡解析に関する技術的な知識と経験をもつ人員が含まれる必要がある。さらに、緊急時対応要員は事故対応に必要な特別な知識と経験を持つ人（例えば、放射線防護の専門家、原子炉ベンダーや建築設計要員など）と連絡がとれる必要がある。

4.3.2 人的制限

教訓： 自然災害や原子力事故の発生時に、意思決定に影響を及ぼし、人員の能力を低下させる感情的な問題に対処する上で、人員の助けとなる緊急時対応策、訓練、ガイダンスを確立する。

高度なストレスを伴う長時間に及ぶ事象が人員の健康、士気、意思決定能力に与える影響を認識するとともに、それによる影響を軽減する対策を設けなければならない。インタビュー対象者が、「中央制御室も現場も暗く、自分の家族が安全かどうか、また外の状況は大丈夫なのかどうかについて、不安でいっぱいだった」と話したとされている。別のインタビュー対象者は、「放射線量が3秒毎に0.01 mSv (1 mrem) 上昇し始めるなか、中央制御室を離れることができず、そのときは自分の一生がこれで終わるのだと思った」と述べている。作業員が放射線の問題に対処するための緊急時対応策がなく、また、地域の電源が喪失したことから所員の家族の居場所や状況を確認する上で助けとなるように構築したインターネットや電話ベースのシステムが敷地内で利用できなかった。

ある当直長は、地震と津波の直後、非常用復水器の状態を確認するために至急運転員を原子炉建屋に派遣しなければならないことを認識していたと述べている。電源の喪失と余震がつづいていたため、それが生死を分ける決断であり、自分にはそのための覚悟ができていなかったことを認めている。

一般的に、産業界の緊急時対応の訓練は上記のような環境下で個人が意思決定するもしくは指示を与えなければならないような訓練は含まれていない。このような訓練により、必要に応じ正しい意思決定をするための準備をしておいた方が良いであろう。

4.3.3 緊急時への備え

教訓：重要なプラントパラメーターと緊急時対応機能をモニターするため、主要及び代替の方法が用意されていることを確実にする。緊急時対応要員が利用可能な監視ツールや手法を使用できることを確実にするために、訓練・演習を活用する。

地震と津波を受けて、安全パラメーター表示システム（SPDS）をはじめとする、複数の表示が失われた。発電所 ERC は、外部放出の判断、及び炉心冷却状態をはじめとする、重要な安全機能の状態の追跡管理を含む一定の重要機能に関して、SPDS を使うことを期待していた。所員は、SPDS が使えない状態では訓練をしておらず、SPDS が使用不能になった場合、そうした機能を復旧する緊急時対応策を用意していなかった。こうしたことが、炉心冷却状態の追跡管理、及び格納容器のベント操作時における外部放出の判断を著しく困難にすることとなった。

使用済燃料プールの水位及び温度、サイト内外の線量率に関する情報がなかったことも、混乱がおこり、かつ ERC の要員の対応すべき課題を増やすことになった。例えば、建屋爆発による SFP への水を運ぶのにかなりの努力が費やされた。プールの健全性が疑わしく、水位が監視できなかつたため、ヘリコプターや消防車や他の機器をつかってプールに水を運ぶためにかなりのリソースをあてた。もし SFP のパラメーターが遠隔で監視できたならば、多くの努力を当てる必要はなかった。

教訓：緊急時対応活動を調整するために必要な所内・所外施設は、自然災害及び／または原子力緊急事態が発生した場合でも機能しつづけるよう、設計・装備すべきである。

東京電力と政府の活動を調整する上で重要な役割を担うことになっていたオフサイトセンターが設計どおり機能しなかった。地震や津波の被害で、さまざまな組織からの代表者が当該エリアに集まることに困難をきたしたため、オフサイトセンターに全員が参集することはなかった。常用電源が失われ、バックアップの電源も起動しなかった。さらにその設備はフィルターを通じた換気が行える設計になっておらず、線量率と汚染水準が上がったため、使用が断念された。

センターが使用できなくなった場合にオフサイトセンターを移動させたり、その他の対応を実施したりするための緊急時対応策がなかった。事故後の最初の数日間は、通常はオフサイトセンターで行われていた種々の調整作業が東京電力の本店や国の政府の事務所で行われていた。このことが本店 ERC の人員の労働量を増やすことになり、事業者と地方、国の政府組織との間のコミュニケーションの効率を悪化させた。

サイト ERC は、予備電源とフィルターを通じた換気設備を備え、耐震設計が施された新しい建屋に収められていた。一般に免震重要棟と呼ばれるこの建

屋は、東京電力の柏崎刈羽原子力発電所の緊急時対応施設を損傷させた 2007 年の地震に対する是正処置として建設されたものである。この免震重要棟は、地震と津波の後も機能を保った福島第一で数少ない管理棟のひとつであった。ERC は、指揮統制に関して所内の中心に残っており、建屋はなお放射線障害に対する重要な避難場所として存続している。この免震重要棟がなければ、事故対応活動の調整及び管理をする発電所職員の能力が大きく阻害され、内部被ばくと身体汚染事象の件数は、さらに大幅に膨らんでいたはずである。

免震重要棟はそうした事象に対処する能力に大きく寄与したが、事象対応時に必然的に居住することとなった大人数の作業員を収容する設計にはなっておらず、またそのための備えもできていなかった。不足したのものには、食料、水、トイレ、シャワー、睡眠場所があった。また、入口のドアにはエアロックエリアがなく、建屋の床はカーペット敷きであった。そのため、作業員が建屋を出入りする際に、汚染の侵入を防ぐことができなかった。カーペットは汚染したため、最終的に撤去されている。

教訓：特殊な事故対応設備を操作する知識を持つ人員が確保され、過酷事故に対応できる備えがなされていることを確実にする。これについては、外部契約を通じて確保すること、あるいはそうした役割を果たす発電所緊急時対応要員を育成し、認定することで達成できると考えられる。

いくつかの原子力発電事業者と同様、東京電力はプラントの保守業務の実施から発電所に対するディーゼル燃料の供給に至るまで、多数の日常業務の実施を協力企業に依存している。そのため、東京電力は事象発生時に必要とされる業務を実施する上で、協力企業に支援を要請するか、発電所員を訓練しなければならなかった。原子力緊急事態発生時、請負業者による支援に関する合意は定められていたが、事故対応中に追加の準備を行わなければならない負担や混乱を減らす上で効果的ではなかった。

地震と津波の直後、道路を修理するとともに津波による瓦礫の撤去を支援するために、協力企業には重機の運転が求められた。協力企業はまた、事故対応を促す上で必要な可搬型発電機と消防車の運転についても、支援を提供している。しかしながら、放射線状態が劣化するなかで、協力企業の作業員は、損傷した原子炉の近辺での支援を渋ることもあった。

これを克服するため、東京電力は一部の重要な事故対応機能を果たせるよう、職員を供給するとともに訓練を行わなければならなかった。例えば、発電所の職員は原子炉への注水を支援するために、消防車の使い方について、また電力を復旧するために使われた一部の可搬型発電機の運転方法について訓練を受けなければならなかった。東京電力の職員は免震重要棟の非常用発電機（1日あたりタンカートラック約2台分の燃料を消費する）に安定した燃料供給を維持するため、燃料タンカーの操作方法を学ばなければならなかった。

さらに、ケーブルの接続や終端処理といった作業は協力企業にまかされていたので、発電所の職員は、ケーブルの接続や終端処理といった、一部の重要

な復旧作業を実施する訓練を受けていなかった。必要とされている知識と技能を備えている協力企業の作業員がほとんどいなかった。このことが復旧作業の妨げとなり、少数の熟練担当者の負担を増すこととなった。

4.3.4 役割と責任

教訓：効果的な事故後コミュニケーションと意思決定を確実にするために、緊急時対応要員の役割と責任を明確に定め、伝達する。

指揮統制体制、及び制御室、サイト ERC、本店 ERC、並びに政府機関に割り当てられた役割と責任が、今回の複雑で長時間に及ぶ複数の原子炉にかかわる事象の発生に際して、計画どおり機能しなかった。

福島第一における全体的対応管理の責任は、運転部長、当直長、及び副当直長とともに、所長に割り当てられていた。復旧措置の相対的優先順位の決定や格納容器のベント時期の判断といった一定の高度な意思決定は所長の責任であった。ただし、シビアアクシデントマネジメントのアプローチでは、制御室の運転員が緊急時・事故時管理手順書を実施する上で必要な決定ができるという前提に基づいて、ほとんどの意思決定責任を制御室の運転員に割り当てるといったものであった。

この意思決定アプローチは、組織内のほかのグループによる独自の申し立てやダブルチェックを定めていなかった。例えば、サイト ERC は制御室の運転員が 1 号機の IC を隔離したり、3 号の HPCI を停止したりする意思決定をする前に独立的なレビューやフィードバックの提供を行わなかった。さらに、本店 ERC は計画や戦略の立案を助け、助言をし、必要な設備と支援の確保に助力したが、このグループは自らの役割がサイトの意思決定や対応を独立して監督することでは考えていなかった。

複雑な事象の発生時には、情報を共有し、外部からの質問に答える、独立したコミュニケーターを指名することで、当直長の混乱を最小限にとどめるとともに、タイムリーで正確かつ連続的な情報の流れを確保することができるはずである。このアプローチは、当直長を運転員の監督に集中させるものである。

制御室の運転員には、重要な安全機能に対する独立した見解を保ち、炉心冷却、インベントリー管理、格納容器圧力の制御を確実に維持し、最適化するための一連の措置について制御室管理層に助言する専任担当者が含まれていなかった。一部の国々では、運転員には、事象が発生した場合に、さらなる深層防護をもたらす上で、事故シーケンスと事故管理の技術的専門知識と訓練経験を有する担当者が含まれている。シフトテクニカルアドバイザー（当直への技術アドバイザー）のような人員の必要性は、TMI 原子力発電所事故の教訓の一つである。

4.3.5 コミュニケーション

教訓：コミュニケーションの方法と設備は、正確かつタイムリーな情報交換、首尾一貫した明確な公衆とのコミュニケーション、電力会社と政府間の情報共有を促すものであるべきである。

プラント状態の正確な状況把握をサポートする継続的な情報伝達フローを確保するには、複数の多様な通信手段が必要である。そうした手段は、中央制御室と緊急時対応組織間の継続的コミュニケーション、及び現場作業員と中央制御室間の継続した連絡を可能にするものである。

福島第一では、現場・サイト ERC・中央制御室間で連絡を取る能力が極めて限定的であり、事象発生時に作業員の安全と正確な情報の迅速な流れが損なわれた。通常の通信機器は、津波とそれにつづく電源喪失によって失われていた。予備の通信機器は用意されていたが、一部の事例では中央制御室・サイト ERC 間の通信回線は 2 回線しか使えなかった。

長時間に及ぶ、複数の原子炉がかかわる事象発生時に提供される、膨大な量の情報を受け取り、整理し、共有するための戦略とインフラも必要である。例えば、ある担当者は、サイト ERC のテーブルを囲む人員の負担はあまりにも大きく、疲労困憊していたため、仕事をつづけられないと考えていたとしている。サイトと本店の ERC 間で共有する情報の流れと正確さの問題も、本店要員がサイトで何が起きているのかを十分に把握する能力の妨げとなった。手順書、情報を整理する方法、及び通信プロトコルを整備し、要員訓練の一環として定期的にこれらを使用しなければならない。

国・地元・電力会社のレベルで伝達する情報の整合性を確保するため、まとまったメッセージを公衆に伝達するための冗長手段を用意する必要がある。差し迫った避難指示と避難指示解除を明確に伝達するには、追加の戦略も必要である。オフサイトセンターが避難区域内にあったため、プレスセンターとしては機能できなかった。当初、プレス会見は（東京電力と中央政府、及び地方自治体が並行して）別々に開かれていた。後日これが変わり、メッセージの整合性を確保するために、東京で東京電力と政府間の共同会見が行われるようになった。

電力会社と政府間で情報を伝達する上で、複数のタイムリーな方法が必要である。さらに、制御室の人員に負担をかけることなく、政府からの質問や要請に対処する計画を整備し、これに従わなければならない。福島第一の事象の最初の時期は、得られる情報は非常に少なく、METI や東京電力本店から首相官邸へ届けられる情報は、プラント状況と復旧活動を理解してもらうには不十分であった。結果として官邸の補佐官が緊急時に情報を収集するため、直接所長に電話する必要があると考えた。

4.3.6 放射線防護

教訓：放射線防護（RP）要員は、緊急時対応処置をサポートするため、確立された手順書、設備、人員を備えていなければならない。

RP 機材と測定器は、様々な場所に保管し、起因事象による被害から保護されているとともに、対応要員、とりわけ中央制御室の運転員が容易に利用できるようにしておくべきである。RP 機材と人員の不足が、事象対応初期の重要な数時間にわたり、重大な障害になった。警報付個人線量計（APD）と防護具をはじめとする RP 機材の大半は、津波によって破壊された。さらに、呼吸器及びそれ以外の防護具も中央制御室には保管されておらず、制御室運転員は通常線量計を着用していなかった。そのため、運転員は当初、防護具や線量率を見積もる汚染計測器の使用なしで 1 号機の原子炉建屋に入ることが出来なかった。

事象発生後に必要とされる多数の作業員をサポートするために、十分な緊急時対応関連の機材を備蓄しておくべきである。本発電所では、最小限の緊急時対応組織、約 50 人をサポートするのに十分な、事前に整備された緊急時対応機材を用意していた。しかしながら、初期事象対応には 500 人以上がかかわっていた。

サイトで交流電源が喪失した際、被ばく線量記録を更新するのに使われていたコンピューターが失われた。さらに次の利用者へ APD を渡す前に APD の指示をゼロに手動でリセットする必要があったが、何人かの作業員はその装置をリセットしなかった。その後は手動システムが被ばくの記録と追跡に使われたが、この方法が作業員の線量データベースに多くのエラーを来した。こうしたエラーは、線量が正しく発電所作業員に割り当てられていたことを確認するために、修正するのに多大な努力を要した。その後、作業員の線量を記録するのにバーコードリーダーが採用され、エラーの数は減少した。

教訓：発電所の緊急時対応計画は、安全停止を確立または維持するのに必要な運転員の対応を、放射線管理が迅速にサポートできるようにするとともに、そうした対応を促す上で必要な柔軟性を持たせるべきである。

発電所の避難計画では、事象発生後の運転を支援するために、RP 技術者とそれ以外の要員の必要性を考慮すべきである。福島第一では、RP 技術者はサイトを避難した作業員のサーベイを行うため、地震後、集合場所に集まった。RP 技術者は、津波による浸水が引き、追加津波警報が経過するまで、集合場所に足止めされた。このことが、事象の重要な最初の数時間における放射線管理のサポート不足をもたらした。この問題に対して考えられる解決策は、事故の早い時期において RP 要員を確保できるように、放射線管理メンバーを緊急時対応組織に配置することであろう。あるいは、運転員が独自に線量を監視し事故状況下でサーベイを行えるよう、訓練を施したり必要な機材の提供を受けることも可能である。

教訓：線量限度は、事故状況発生時に必要な対応が行われるようにある程度の柔軟性を認めるべきである。さらに、作業員は、そうした高い急性被ばく線量に伴う関連リスクについて、教育訓練及び説明を受けるべきである。

被ばく線量の限度が、事象対応における柔軟性を認めていなかった。事故前にはサイト作業員全員に対して、10 rem (100 mSv) の線量限度が定められていたが、必要に応じてこの限度を超えるためのガイダンスは存在しなかった。このことが、運転員が格納容器ベント弁にアクセスする妨げとなり、長時間にわたり格納容器が高い圧力に保たれる直接的要因となったと同時に、原子炉への注水を妨げることとなった。事故後間もなく、政府は緊急時線量限度を 25 rem (250 mSv) に変更した。この変更は作業員には十分伝えられず、作業員・管理層・政府間に信頼の喪失を招く原因となった。

全てのサイト作業員は、10 rem (100 mSv) を大きく超える実放射線被ばくがもたらす生物学的影響について、教育訓練を受けていたと東京電力は述べた。しかしながら、サイト作業員は、事故の初期段階で入る必要のあったプラントの現場が、燃料損傷により通常より高い線量率になって通常線量率が引き上げられた際のリスクについて説明を受けなかった。通常の作業被ばく限度を超えた被ばくを受ける高い放射線エリアで作業を行う際、知識があり、理解力のある作業志願者を得るためには、そのようなリスクについて正確に且つタイムリーに意思疎通することが重要である。

4.3.7 オフサイトからの支援

教訓：オフサイトからの人材と支援は、外部電源の喪失といった重大事象を受けて、優先的に提供されるべきである。緊急時対応計画やそれ以外の本店指針文書には、緊急状況が発生した場合、原子力発電所に必要なものは最優先で与えることを明記すべきである。

東京電力の本店組織は、福島第一・福島第二が必要とした機材と人材を提供するために積極的に対応した。ほかの原子力事業組織もプラント事象の発生時には同様の支援を提供するよう備えるべきである。例えば、福島第一における全ての外部電源とほとんどの所内電源の喪失は、本店により緊急対策を必要とするものとして直ちに認識された。東京電力内部及び近隣のサービスエリアの電力他社から、仮設非常用発電機とケーブルを調達し、輸送を手配するために、本店の人員が活用された。

福島第二では、津波で損傷した海水ポンプ用のモーターを至急取り替える必要があった。別の建屋にある使用可能な電源盤からそれらのモーターに仮設電源を供給するには、大量のケーブルも必要であった。本店の調達担当者は、東芝の工場や柏崎刈羽原子力発電所でモーターを見つけ、必要なケーブルの供給源を特定するとともに、サイトへの緊急輸送を手配した。

本店工務部は、福島第一・福島第二サイトへの外部電源を再構築するために優先的に取り組んだ。例えば、福島第二では、送電系統全体に大きな被害があったにもかかわらず、約 36 時間以内に福島第二の送電線が復旧している。

原子力産業界の技術支援と援助が組織され、復旧活動へ機能するまでに、数日経過していた。日本国内の原子力産業界や国際的な原子力プラントの事業者やベンダーは、支援を提供するのに必要な計画やインフラを有していなかった。東京電力社員は事象の対応にすっかりかかりきりで、支援が提供されたときに援助を引き受ける準備が出来ていなかった。事故の重大性が明らかになった後、原子力プラントの事業者やベンダーによる取り組みが国際的に組織され、これらの組織からの代表者が援助の取り組みを調整し始めた。もしタイムリーで効果的な方法で産業界の支援を得られるようにするために地域的もしくは国際的なレベルであらかじめ協定もしくは計画を作れたらならば、将来起こる事故への対応が強化されるだろう。

4.4 設計と設備

教訓：長期に及ぶ全 AC・DC 電源の喪失、及び最終ヒートシンクの喪失に対応する上で欠かせない設備は、必要な場合はいつでもすぐ使えるように準備し、保護し、整備しておくべきである。

今回の事象により、全 AC・DC 電源の喪失といった設計基準を超える状況を含めた緊急状況下においても、重要な任務が果たせるように、設備と方法をあらかじめ整備しておく必要性が明らかになった。福島第一・福島第二の事象において確認された具体的な機器のニーズのいくつかを以下に示す。

- ・ 全 AC・DC 電源の喪失（圧縮空気の喪失を含む）と同時に、運転員が現場において重要パラメーターを監視するとともに、手作業で重要な処置が行えるようにする手順と機器が必要である。発電所には、重要パラメーターに関する機械式圧力・差圧・温度モニター、重要な弁やその他の機器を現場で操作する電源運搬車（カート）や機器が用意されていなかった。
- ・ 通常の AC・DC 電源が喪失した場合に備えて、中央制御室と主要建屋の通路に独立したバッテリー式の非常灯が必要である。福島第一では、非常用照明が発電所のバッテリーから電源供給を受けていたため、バッテリーが浸水した時点で 1 号機の照明がすべて失われることとなった。本発電所では、中央制御室と安全停止に必要な経路上に独立したバッテリー式の照明を用いていなかった。運転員その他が使えるように、懐中電灯と電池も用意しておく必要がある。
- ・ 電源喪失時にも使用可能なバッテリー式中継器を備えた無線機やそれ以外の通信機器も用意しておく必要がある。事象発生時には、現場・サイト ERC・中央制御室間の通信能力が極端に制限され、作業員の安全、正確な情報の迅速な流れ、事象対応に悪影響が出た。

- ・ 燃料油やその他の消耗品は、事故対応に必要な仮設及び常設の設備を継続的に運転させるために、利用可能、入手可能であるべきである。今回の事象に対応する間、可搬型空気圧縮機、ディーゼル駆動の発電機とポンプ、消防車、及び様々なバッテリー（駐車場の車から取り外したものを含む）が使われた。免震重要棟の非常用発電機も燃料補給及びメンテナンスが必要であった。

教訓： AC・DC 電源と最終的ヒートシンクの喪失につながる、複数の原子炉での事象の発生時に維持できる重要な安全機能を確保するため、プラント改修が必要になる場合もある。

- ・ 重要な安全システムを使用不能にする恐れのある自動隔離回路の必要性は再検討されるべきである。福島第一の事象では、隔離ロジックへの DC 電源の喪失が 1 号機非常用復水器出入口弁の自動閉止信号を発生させた。DC 駆動外側電動弁はおそらく全 DC 電源が喪失する前に、もしくは電源が部分復旧したときに閉じられていた。AC 駆動内側電動弁は交流電源が喪失する前に部分的に閉じられていて復水器を通る流れを妨げた可能性がある。原子炉建屋の状況が悪化していたため、運転員は弁を手動操作することができなかった。RCIC と HPCI を含む他の系統についても、同様の隔離ロジックが存在しているかもしれない。事象発生時に安全系が自動隔離されることから、この防護回路は、高エネルギーラインの破損といった他の想定事象に対する防護として最善のオプションとは言えないかもしれない。
- ・ プラント設計では、空冷式非常用ディーゼル発電機や緊急時に AC・DC 電源、淡水・海水、圧縮空気系統を号機間共有できるように相互の接続を考慮すべきである。福島第一 5 号機・6 号機、及び福島第二の各号機間における、機械系統と電源を相互接続する能力は、津波発生後の運転員の対応を著しく向上させた。
- ・ プラント設計は、電源及び圧縮空気等の原動力が喪失した場合でも、原子炉格納容器のタイムリーなベントを支援すべきである。1 号機・2 号機・3 号機におけるサクセスパスは、原子炉圧力容器から原子炉格納容器に減圧し、燃料からの崩壊熱を除去して、炉心への低圧注水を可能にすることであった。格納容器圧力が上昇するなか、強化ベントを通じたベントが必要になった。ところが、電源や圧縮空気がない状態で、ベント弁を開くのに数時間を要すことや、極めて危険な状況での作業が必要となり、運転員は 2 号機をベントすることができなかった。さらに、ラプチャーディスクの設定（原子炉格納容器圧力の 1.2 倍）が高すぎて、最初に設計圧力を超えることなくベントすることは不可能であった。
- ・ 格納容器内への受動的水素再結合器の設置は事故発生時に水素の蓄積を防止することができるかもしれない。さらに、蓄積した可能性がある水素をベントするために、各原子炉建屋に手動式ベントを設置することは良策かもしれない。

4.5 手順書

教訓：最適なアクシデントマネジメント戦略や関連する実施手順書（緊急時運転手順（EOP）及びアクシデントマネジメントガイドライン（AMガイド）など）は、原子力事業者や原子炉ベンダー間の連絡、交渉、情報交換を通じて策定されるべきである。これらの戦略や手順書と異なるものを採用する際には、元々の考え方や意図しない結果の可能性を考慮した安全レビューを実施するべきである。

福島事故からの教訓や設計基準を超える他の事象への備えに必要な事項を考慮して最適な戦略、手順ガイダンスを特定するためには、国際的な協力及び共有が必要なのは明白である。

1980年代以降、日本の事業者及びベンダーが米 BWR-OG で作成されたアクシデントマネジメント戦略から外れる意思決定を行った。この決定は、技術的解析結果や異なる戦略の関連リスクに対する異なる見方に基づいている。たとえば、燃料損傷が起こった場合、原子炉格納容器圧力が最高運転値の2倍になると予想されない限りベントを実施しないというように日本の格納容器ベントに対するアプローチは、米 BWR-OG ガイダンスとは異なっている。この早期ベントに関する米 BWR-OG の戦略からの逸脱は、希ガスを含む放射性物質を早期に放出することを防止するためになされた。

手順では、爆発の可能性を減ずるために水素ガス制御に可燃性ガス制御系の運転を実施することになっているが、この系統は電源がなかったので運転できなかった。EOP でも AM ガイドでも水素制御のための PCV ベントといった他のアプローチは含まれていなかった。他の国々の BWR で使っている手順では、低い格納容器圧力で格納容器の水素を大気へベントすることができる。ベントを遅らせることは、PCV における水素爆発の可能性を大きくすることに加え、（例えば、高圧で漏洩しやすいドライウェルのガスカートなどを通して）原子炉建屋への水素漏洩量を増加させ、炉心に注入できる低圧注水量を減らすとともに、大気への崩壊熱放出を減少・遅延させ、大きな漏えいを伴う原子炉格納容器の損傷の可能性を増加させる。

東京電力の EOP と AM ガイドはともに、福島第二における熱除去能力喪失への対応を促すのに十分であった。しかしながら、電源（圧縮空気を含む）と計器指示がすべて失われた福島第一の状況下で、RPV 圧力の減圧及び格納容器のベントといった対策を実現する方法を取り上げた実施レベルの手順書は存在しなかった。このことが、RPV を減圧し原子炉格納容器をベントするという対策に遅延を来す要因になったのである。

全交流電源の喪失は 30 分以上継続せず、発電所の蓄電池を使って対応時間を 8 時間まで延長できるという仮定に基づいて、手順書が作成されていた。この想定は、複数の外部送電線があること、予備のディーゼル発電機が利用できること、各号機間で電源を相互接続し共有する広範な機能を備えていることに基づいている。後から考えると、それよりも長時間に及ぶ交流電源の喪

失に対処する緊急時対応策が用意されていなかったことと、広範な損害軽減指針がなかったことが相まって、本発電所は結果的に、重要な安全機能を維持するのに必要な設備を現場で操作するための計画的な代替手段を持ち合わせていなかった。

所員の安全及び被ばく線量低減に関する通常の作業規則から、高線量率かつ危険度が高い状況が存在する事故状況に滞りなく移行する手順書が存在していなかった。そのため、人身の安全や想定外の放射線状況に関する不安から数回にわたり1号機原子炉建屋に入る試みが中止されることとなった。このうちのいくつかは、状況がさらに大きく悪化してから実施しなければならなかった。全体での影響は、作業員の被ばく線量と安全上のリスクが増加しただけでなく、原子炉格納容器のベントといった作業の準備に遅延を来したことである。

1号機非常用復水器及び2号機 RCIC の動作を確認し、代替低圧注水の手はずを整えるとともに、SRV と原子炉格納容器のベント弁を開くために仮設電源を供給するには、手順書が必要であった。さらに、制御室の表示と SPDS の喪失を補うためにも手順書が必要であった。このことが、タイムリーな対応を計画する能力の妨げとなり、意思決定に遅延を来す要因になった可能性がある。機器・通信・表示の幅広い喪失に対応した手順書がなかったことにより、複数の原子炉にかかわる事象への対応が複雑化したのである。

教訓：自然災害または内部プラント事象の発生時及びその後の状態は、プラント運転員その他が対応し必要な対策を講じる能力を著しく妨げ、遅延をもたらす恐れがある。そうした遅延の可能性については、時間的制約を受ける運転員の対応に関する手順書と計画を定める際に考慮されるべきである。

福島第一・福島第二の事象発生時、地震と津波の再来の警報により、最初の津波後の長い時間の間、運転要員その他は、プラント内に入り現場点検や設備状態を確認することが出来なかった。福島第一では、電源と照明の喪失（その後は水素爆発による被害）により、復旧努力も大きく妨げられた。以下にその例を示す。

- ・ 事象発生後もマグニチュード 5.0 以上の地震 300 回を含め、地震が発生しつづけた。津波警報が数時間にわたって発令され、結果的に多くの津波がサイトを襲った。こうした状況で運転員が制御室を離れることは危険であり、高台に避難した作業員たちは、人員の安全が懸念されたため、数時間にわたって現場に戻るのを認められなかった。
- ・ 福島第二では、最初の津波から約 2 時間にわたって、危険な状態により運転員がプラントに入ることができず、6 時間にわたって、プラントの損傷エリアのいくつかはアクセスすることができなかった。
- ・ 福島第一では、津波警報の発令後、ほとんどの運転員が制御室に集合した。所内全交流電源喪失が発生した時点で、懐中電灯を探し、電源喪失の範囲

を調査するのに時間が費やされた。非常用ディーゼル発電機が喪失した原因がわからず、現場運転員が濡れた着衣のまま制御室に入り、低い場所が浸水していることを報告するまで、津波が襲来したことにも気づいていなかった。

その後、運転員その他がプラントに入るのを認められた時点では、通常照明の喪失、通路の瓦礫や移動した資材により、建屋内での移動が危険な状態であった。低い場所は部分的に浸水しており、運転員が主要機器にたどり着けず、状況を確認できなかった。

- ・ 地震による道路の損壊、水素爆発による瓦礫、さらに線量率と汚染レベルが上昇したことにより、危険な状態がもたらされ、復旧活動が大幅に遅れることとなった。

4.6 知識と技能

教訓：当直員とオンサイト及びオフサイトの緊急時対応要員は、過酷事故に効果的に対応する上で、詳細なアクシデントマネジメントの知識と技能を身につけている必要がある。体系的なアプローチを用いて、教材を整備し、教育訓練を実施するべきである。

今回の事象は既存の手順書やそれ以前の経験をはるかに上回っていたことから、役職に応じた原子炉と発電所の基礎に関する専門的知識や技能は、健全な意思決定と効果的な対策には欠かせなかった。福島第一及び第二発電所で実施した多くの対応をみると、所員が必要とされる知識と技能を有していたということを示している。しかしながら、運転員と緊急時対応要員の津波の影響への対応において、改善の余地があることが確認された。そうした知識不足の大半は、教育訓練に対する体系的なアプローチを用いずに作成した教材と教育訓練のあり方にさかのぼることができる。

事故後評価の一環として、電力会社管理層は、今回の事象発生時に経験した状況に対処する上で、緊急時計画の教育訓練が十分現実的でなかったと結論づけている。例えば、複数の原子炉における同時被災に対する教育訓練が行われていなかった。緊急時計画の演習は、常に利用できるとは限らない情報源（SPDS など）、機材、施設を除外することで、定期的に対応者に対し難易度の高い作業の訓練をするものになっていなかった。演習には、ERC 要員の問いかける姿勢、チームワーク、診断能力を試す方法として、意図的に不正確な、あるいは誤った情報を伝えることが組み込まれていなかった。

アクシデントマネジメントの教育訓練は、コンピューターを利用した学習を通じて行われていた。教材の範囲は十分に広がったが、事故状況下における測定器の限界を認識するなど、重要なパラメーターの評価に対する問いかける姿勢を引き出すのに必要な深さと詳細を欠いていた。例えば、教材は RPV 水位計の基準面器の沸騰に関する基礎的知識の詳細を示していなかった。コ

ンピューターベースの教育訓練環境と低頻度の再訓練（3年毎）に依存したことで、知識を保持するとともに理解を深める上での脆弱性がもたらされた。

サイト及び本店 ERC の技術チームのメンバーはともに、観察されたプラント対応と予測されたプラント対応を比べる計算を行う責任を負っているが、こうした任務に関する具体的な教育訓練を受けていなかった。

全 AC・DC 電源喪失及び圧力・水位計が喪失した後、IC に関する詳細な知識の不足が、IC が適切に運転しているか否かの診断を困難にした可能性がある。同系統を運転したり、運転しているところを見たりしたことのある者はほとんどいなかった。知識不足とそれに至る要因の例を以下に示す。

- 何人かの対応要員は、AC 駆動内側隔離弁と DC 駆動外側隔離弁が、DC ロジック系統の電源喪失時に閉止することを認識していなかった。さらに、何人かの運転員は、復水器タンクに十分な水があり、補給せずに 10 時間程度運転できることを理解していなかった。当直長はタンクの容量を認識し、当直員にこの情報を共有していたが、蒸気が排気口から見えなくなった際に、当直員から IC を隔離する提案がありそれに同意した。この決定は、何らかの理由で十分な冷却水がなかったかもしれず、冷却水がない状態で IC を運転することにより IC 内部が破損し、原子炉の冷却水が環境へ放出する経路を作ってしまう懸念があったことからなされたものであった。
- 福島第一 1 号機の運転員は、BWR 運転訓練センターで、IC を含まない異なる設計の 4 号機を標準にしたシミュレーターを用いて訓練を受けていた。また、シミュレーター訓練が行われる場合、4 号機の全交流電源喪失手順書が使われている。それ以外の訓練は、福島第二 2 号機をモデルにした福島第二サイトのシミュレーターで行われていた。

IC についての 1 号機運転員の訓練は、座学と OJT に大きく依存していた。レビューチームは、系統訓練用教材の内容では、DC 電源の喪失に対する IC の応答を理解するのに必要な深さの知識を身につけることはできないと結論づけている。

所内全交流電源喪失及び DC 電源の喪失を受けて、IC を作動させることができたかは不明であるが、同系統の運転状態の不透明さが、正確なプラント状態に基づいていない優先順位の設定と意思決定につながった。（いくつかの重要な点で実際の制御盤と異なる、ベンダーの制御室シミュレーターを用いた運転員の訓練が、1979 年の TMI 原子力発電所事故の要因のひとつであった。）

- 運転員が実際に IC を運転した経験はわずかだった。IC 系統弁は定期的にテストされていたが、事故調査時に経歴 25 年のベテラン当直長は、IC が作動しているのを見たことがなく、自分の経歴中に運転されたことはないと思うと述べている。

4.7 運転経験

教訓：国際機関やフォーラムに積極的に参加し、共有されている情報を最大限に利用する。

国際的なオーナーズグループの活動やその他のフォーラムに積極的に参加していれば、東京電力や日本のほかの電力会社にとって自社の緊急時対応・アクシデントマネジメント戦略に対する代替策の認識が促されていたかもしれない。さらに、これらのフォーラムにおける AM やその他のトピックスに対する日本のアプローチの議論は、多様な見方及び観点を持つ人々からの質問や、建設的な反論を提供してくれたかもしれない。日本以外の電力会社も、日本の電力会社が提供できる運転経験から利益を享受できただろう。

教訓：国際的な事象から得た重大な運転経験情報の適用性を検討する際、事象の原因と過渡変化の起因事象のみならず、それ以外の原因により同じ結果を経験する可能性についても検討する必要がある。そうした脆弱性に対する対応を強化するため、タイムリーな措置を講じること。

東京電力は自社のすべての発電所で、2007年に柏崎刈羽原子力発電所で発生した大規模地震後に、自社の運転経験から教訓に対処する大規模な措置を講じている。免震重要棟を各発電に建設し、消火システムを充実させるとともに、消防車を原子炉への代替注水源として利用するための改造が行われている。2007年の地震を受けたサイト避難計画の拡充は、福島第一の6機の原子炉から約6,700人の作業員を無事避難させるのに役立った。こうした改善、特に免震重要棟は、津波後の対応に欠かせないものであった

逆に、国際的な運転経験に基づいて溢水に耐える能力を高め、緊急時対応を改善する機会を逃している。インタビューでは、複数の管理職員が、運転経験報告書に記載されている事象の直接原因が東京電力の発電所には存在しないと考えられる場合、当該報告書は対策の必要なしとして処理されていたと述べている。彼らは、後から考えると、東京電力も他社も、運転経験報告書を幅広く活用することで、恩恵を受けられていたはずだとしている。例えば、たとえ管理層がよそで発生したのと同じ原因を伴う事象を経験することはないと考えていたとしても、ほかにどのような原因が同じ結果をもたらしかを検討すべきである。国際的な運転経験に基づいて対応を強化する上で、こうした大局的な考え方がいかに活用できたかについての例を以下に示す。

フランスのルブレユ原子力発電所で、溢水により4機の原子炉のうち2機について、低圧安全注水及び格納容器スプレーが全系統使用不能になった。この溢水は、解析で想定されていない風と河川の状態が原因であった。WANOはルブレユからの教訓を記述する2つのレポートを発行しており、そのうち、一つのレポートではすべての原子力運転組織が検討すべき具体的な推奨項目が記載されている。福島第一の所員は、福島第一のサイトは海に面しており、強風は設計基準と規制要件により、すで

に解析され、対処されていることから、これらのレポートは福島には該当すると考えなかった。

レビュー時に、ルブレイユにおける溢水の結果を考慮した大局的なアプローチが用いられていたならば、ルブレイユの是正処置（浸水に対する抵抗力を高めるためのケーブル坑道と電線貫通部の改造、溢水の侵入を食い止める防水ドアの増設）の実施が福島においても検討されていたかもしれない。

4.8 原子力安全文化

教訓：福島第一事故の前及び最中の行動は、原子力安全文化のいくつかの側面を強化する必要があることを明かにした。この事故に関して自らの慣習や行動を確認すること、及び安全文化の原則と特質について注意を高めるためにケーススタディや別のアプローチの手法を行うことは、すべての原子力発電所の運転組織にとって有益であろう。

商用原子力発電所における事故とその前兆事象は、運転組織の中で共有された想定、価値、信念における欠点を反映した一連の意思決定と行動に起因することを歴史が示してきた。たとえば、TMI 事故は加圧器を満水にさせないことの重要性に関する間違った想定が関係しており、結果として、運転員が炉心冷却に必要な安全注入ポンプを停止させることとなった。チェルノブイリ事故は、原子力技術（特に反応度制御）に特有の側面に対する認識、及び設計基準や運転手順書に従ってプラントを運転することの重要性についての認識が欠けており、結果として、特殊試験のために重要な安全系を使用不能にする意思決定が行われた。デービスベッセ原子力発電所では、乾燥したほう酸は原子炉圧力容器の上蓋の材料を腐食させないという誤った想定が、上蓋材を損耗させることになった。

過去 10 年間の東京電力の対策は、組織における原子力安全文化のいくつかの側面を強化する上で役立っている。2002 年に記録改ざん問題が発覚した後、東京電力の指導者は、是正処置プログラムや品質マネジメントシステムなどを取り入れることにより、マネジメントのプロセスと管理を強化した。2008 年には、WANO が用いる原則と特性に基づいた一連の東京電力安全文化原則が策定された。原子力安全文化を推進し、監視するための追加業務も整備されている。こうした業務には次の事項が含まれている。

- ・ 事象から学んだ安全文化への影響を共有するために「アラート」報告書を出す。
- ・ 是正処置プログラムで報告された問題が安全文化に影響する場合、当該問題を広く伝達する措置を講じる。
- ・ 毎年、社外の専門家が参加する安全セミナーを開く。
- ・ 安全文化の傾向を追跡管理するために、安全文化パフォーマンス指標を用いる。

- ・ 職員の安全文化意識調査を毎年実施する。
- ・ 各サイトの原子炉主任技術者が、それぞれの原則に対する安全文化の状態を毎年評価する。

これらの活動やその他の活動は、原子力安全文化の強化に役立ったが、福島事故は、健全な安全文化についてさらなる注意が必要となることを示すいくつかの側面を明らかにした。他の原子力組織も、これらの分野で、自身の文化について詳細に調査及び議論することは有益であろう。以下の原子力安全文化の原則や関連する質問は、これらの議論を進行する上で手助けとなり得る。

- ・ 重要な原子力安全文化の原則に、問いかける姿勢や仮定条件に疑いを持つ姿勢を養うことが含まれている。振り返ってみると、プラントの溢水を引き起こす可能性のある巨大津波が起こらないという仮定条件に対して、東京電力は追加的な問いかけや検証を実施していれば事態を改善できたかもしれない。加えて、コミュニケーションに困難を来し、またプラントについて信頼できる情報が得られなかった福島事故において、問いかける姿勢や仮定条件に対する疑いの念があれば炉心冷却の維持に役立ったかもしれない。

原子力安全に影響を与えうる意思決定を行う際、「グループシンク（集団浅慮）」や確信の持てない仮定条件を受け入れることをどのように回避するのか？

複雑な事象の発生時に原子炉冷却と格納容器の健全性が保たれることを確実にするために、前提条件に疑問を持ち、問いかける姿勢を組織としてどのように求めるか？

重要な決定を比較的早く下さねばならないとき、事象発生時にどんな追加的なアプローチを利用するか？

プラントの安全性または信頼性に影響を及ぼす恐れのある問題を検討する際、「起こりうる最悪の事態」について考慮することはどれくらい効果があるか？

- ・ 問いかける姿勢の原則と密接に関係しているのが、安全第一の考え方を反映した意思決定の必要性である。東京電力は、数年間にわたり津波計算の精度向上に取り組んできた。しかし、不完全なデータに基づいた前提による仮定を用いた結果が JSCE の基準を用いて特定された結果を大きく上回る津波高さを示した際、潜在的な結果についての十分な検証や補償的措置や対策を行うことなく他者にその問題のレビューを委ねた。他の機関は、不完全なあるいは結論が出ていない情報を含んでいる同様の状況に直面した際、原子力安全に潜在的に影響を与える問題をより厳しくレビューすることで、事態を改善できるかもしれない。

情報が不完全あるいは結論が出ておらず、プラントに対して考えられる影響が十分に理解されていない場合に、原子力安全に潜在的に影響を与える問題を特定・解決するための、もしくは保守的な措置を講じるためのアプローチはどの程度綿密なものであるか？

起こり得る原子力安全問題に対し、問題の解決を外部組織や規制機関に委ねるのではなく、状況に即して当事者意識を高めているか？

原子力安全に影響を与える可能性のある問題の議論はどのように行っているのか？また企業の事業計画や予算の作成時に安全への影響はどの程度検討されているか？

- 原子力技術の持つ特殊かつ独特な側面が、原子力安全文化の重要な要素として認識・検討されなければならないことが広く認められている。東京電力は設備故障や人的過誤を含む様々な事故シナリオに対する準備を実施していたが、設計基準を上回る津波によって引き起こされた事故への対処には十分ではなかった。結果として、冷却系の状況に関して幾つかの混乱が生じ、代替冷却へ切り替える取り組みが十分計画、準備されなかった。加えて、運転員や緊急対応要員には、事故時の状況下で原子炉格納容器ベントを行うための手順、装備や訓練が備えられていなかった。他の原子力事業者も同様の事故に直面した場合に明らかになる脆弱性を有しているかもしれない。

福島第一が経験した状況下で、炉心冷却と核分裂生成物のバリアに必要とされる注力をどのように維持するのか？

作業員は、そうした状況下での判断と対応を可能にする、原子炉と発電所の基礎知識を、いかに効果的に習得しているのか？

重大事故後の効果的な緊急対策を実施するために必要な設備や手順、訓練が提供されていることをどのように確認しているのか？

- もうひとつの重要な原則には、組織的学習が関係している。東京電力の上層部は、今考えると運転経験を共有し、アクシデントマネジメント戦略の差異について批判的に議論される場である国際フォーラムにもっと頻繁に参加していれば事態を改善できたかもしれないと述べている。同様に彼らは、プラントの事故が発生する潜在性を小さくするためには、海外運転経験情報をもっと活用する必要があると指摘した。

原子力安全を高めるための情報共有を行う国際フォーラムにどのように関与していくのか？

他の原子力運転組織とかけ離れた、望ましくない、もしくは意図しない潜在的な重大事項を把握するための手法についてどのようにレビューしているか？

海外運転経験情報のレビューを実施する際に、どのようにして傍観者意識を捨て、「ここでも起こりうる」という姿勢を養っているのか？

INPO[®]

***Institute of
Nuclear Power
Operations***

*Suite 100
700 Galleria Parkway, SE
Atlanta, GA 30339-5957
770-644-8000
FAX 770-644-8549*