

福島第一原子力発電所事故の分析と今後に向けて

大阪大学 山口 彰

福島第一原子力発電所の事故の被害と影響を最小限にとどめるには何ができたであろうか。2011年6月に日本国政府の報告書と東京電力の報告書が公表された。What-if?を問うことは、今の段階では早すぎるかもしれないが、想定をはるかに超える外部事象に対する危機管理と備えを考えることこそ重要であると思い、現場の状況を整理・分析する。

I. はじめに

2011年6月には、福島原子力発電所の事故に関する政府の報告書¹⁾と東京電力の被災直後の状況に関する報告書²⁾が発表された。政府報告書には、我が国の原子力安全規制等の仕組み、東北地方太平洋沖地震とそれによる津波の被害、福島原子力発電所等の事故の発生と進展がまず記載されている。さらに、原子力災害への対応、放射性物質の環境への放出、放射線被ばくの状況などの環境影響と続く。そして、国際社会との協力、事故に関するコミュニケーション、今後の事故収束への取組みなどを述べ、最後に得られた事故の教訓が示されている。東京電力の報告書は、発表当時に得られていた情報や関係者の証言を基に、東京電力が事実関係を取りまとめたものである。

いまだ事故が収束していない段階での報告書であり、既に確認された事実、ならびにそれに基づきつつも不明の部分は仮定を与えることによる分析と推定がなされている。また、内外から指摘される課題と教訓を網羅的に列挙している。事故の進展についてもなお事実確認が進められているし、何より、まだ事故が収束していない。示された教訓は、必要かつ十分であるのか、現実的な解決策を与えうるか、安全確保に反映するときにこれらを検証しなければならない。日本原子力学会も教訓³⁾を提示しており両者に共通点は多い。事故の収束と現地の修復、原子力安全確保のための諸々の活動、国内および国際社会に継続的に発信することが求められる。

事故進展と対応では何が分岐点であったか、いつだったか、それは本質的なのかを考察しなければならない。本稿では、上記報告書などに基づき時系列を並べながら、これらを念頭に現地の状況を振り返ってみたい。事故の教訓を実効的に反映するにはWhat-if?を問わざるを得ない。そのために役立つであろうと考えた。

Close Look at the Accident in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant and What-if: Akira YAMAGUCHI

(2011年7月12日 受理)

II. 原子炉と燃料プール：13日間に起きたこと

事故当時は、その対応に現地対策本部には相当の混乱があったはずである。地震発生直後から3月12日までは国の緊急災害対策本部、3月13日からは緊急災害対策本部と原子力災害対策本部の連名で「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震について」が発表された。東京電力もプレスリリースを公表し始めた。12日午前5時現在のプレスリリースで初めてモニタリングカーにより発電所構内(屋外)の放射性物質(ヨウ素等)の測定値が通常値より上昇したこと、モニタリングポスト1カ所での測定値が通常値より上昇したこと、隔離時冷却系による注水状況が不明であることを示唆する内容が発表された。原子力安全・保安院の発表は7月11日時点で地震被害情報196報に上る。6月には先に述べた国と東京電力の報告書が公開されている。

きわめて制御困難な状態に陥った福島第一原子力発電所で起きたことは、稀有な特別なできごとであった。それについてさまざまな推定と解釈が伝えられている。本誌にこれまで連載された解説記事は、公表されている情報に基づきかなり正確な分析と推定をしていると思う。しかし、未確定な部分も少なくないし、今後も新たな事実が明らかになるかもしれない、修正される可能性もある。推定と事実と混同することなく、先入観なく明らかになった事実を分析する必要がある。以下に、福島第一原子力発電所で起きていることの時系列を追ってみたい。

3月11日：地震と津波の発生

3月11日14時46分、地震により福島第一原子力発電所の運転中のすべての原子炉(1号機から3号機)が自動停止し、外部電源が喪失するも非常用ディーゼル発電機が起動した。15時27分に津波第一波が襲来し、15時37分に1号機、38分に3号機と4号機、41分に2号機のディーゼル発電機が停止し、電源融通もできず全交流電源喪失状態となった。また、いずれの原子炉も崩壊熱除去機能

が喪失し、崩壊熱を最終ヒートシンク(海水)に移行できなくなった。さらに1号機は直流電源のバッテリーが津波により喪失、2号機と3号機は数時間後にバッテリーが枯渇したため、プラントパラメータの確認ができなくなった。1,2号機では原子炉水位も注水状況も不明となり、15時36分に15条通報(非常用炉心冷却装置注水不能)がなされた。こうして、原子炉の水位、注水状況などが把握できず、照明、通信設備も失われ、文字通り手さぐり状態での事態収拾を強いられる、きわめて過酷な事故が始まった。

1,2号機では炉心の状態を把握することが最優先とされ、構内企業からバッテリーやケーブルを収集、凶面の確認を行い、接続を行った。3号機は、直流母線が被水を逃れたため、バックアップ用蓄電池により長時間にわたり隔離時冷却系や記録計を動作させることができた。そこで、3号機と4号機では、交流電源がなくとも作動する隔離時冷却系と高圧注水系のために、バッテリーをできるだけ長く維持できるように、必要のない負荷を落とす作業が行われた。電源は重要であった。

東京電力は、津波直後から電源車を確保すべく奔走する。すでに外部電源の早期復旧は困難であるとの判断がなされ、非常用ディーゼル発電機が水没したことから他に選択肢はない。後にわかることだが、1号機と3号機は電源盤がすべて水没し、電源車がたとえ到着してもすぐには繋ぎ込めない状況であった。2号機は電源盤(パワーセンタ)が一部使用可能であり、優先して電源車を接続すべくケーブル敷設を開始した。この時点で、特に1号機は、相当に厳しい状況との認識があったはずである。

2号機は15時39分に隔離時冷却系を手動起動するが、原子炉水位が確認できなくなったため、17時12分にはアクシデントマネジメント対策である消火系ラインと消防車を使用した注水方法を検討、その後、ディーゼル駆動消火ポンプを起動するが停止してしまう。21時2分、注水状況が確認できず現地本部は燃料露出を懸念する。

3号機は16時3分に隔離時冷却系を手動起動し冷却が確保された。20時49分には1,2号機の、21時58分に3号機の中央制御室に仮設照明が設置された。そして1号機の液位が燃料頂部から+200 mm(21時19分)および+550 mm(22時)、2号機が+3,400 mm(21時50分)に液面があることを確認した。原子炉水位が維持され、炉心冷却がなされているわけで、厳しい中にも明るい情報ももたらされ、安堵したに違いない。

後に行われた解析により、1号機は、3月11日の夕刻(地震発生後2~3時間)には燃料が露出し、その1時間後に炉心損傷が始まり熔融炉心が下部プレナムに落下したと発表された。それは以下を仮定した解析に基づく：(1)非常用復水器は全交流電源作動して喪失以降は作動していない、(2)地震発生後18時間から格納容器に直径3 cm

の漏えい口が空き、50時間後に直径7 cmに拡大した。これらは、格納容器圧力を実測値とある程度合わせるための仮定である。全交流電源喪失の後、非常用復水器の弁開度の時系列が不明で非常用復水器がどの程度冷却に寄与していたかはわからず、解析結果は液位の測定結果と整合していない。

1号機では21時51分に原子炉建屋の線量が上昇し入域禁止に、23時にはタービン建屋の線量が短時間のうちに1.2 mSv/hまで上昇した。この時点で炉心が損傷し放射性物質が放出されたことを認識したはずで緊張感につつまれるとともに、ベントや海水注入などの手段が現実味を帯びてきたに違いない。

3月11日深夜から12日未明にかけて電源車が順次到着する。建屋内では暗闇の中、約40名が人海戦術で4~5時間かけて1トン以上のケーブル敷設を実施した。障害物の散乱、度重なる大津波警報で退避をしながらの作業である。電源盤へのつなぎこみ作業も困難を極めた。このとき、通信設備も使えないため、発電所対策本部との連絡も手間取っていた。

炉心の損傷を認識し、しかも電源がすぐには回復できないであろうこともわかっていた。電源がない状態で果たしてベントができるのか、これが次の焦点となる。夕刻から凶面をとりに行き、ベント弁の型式・構造を確認した。その結果、手動でベントが可能であると判断された。11日深夜23時50分、望まざる情報が得られた。バッテリーをドライウェル圧力計につなげたところ、1号機の格納容器圧力が設計値の1.5倍(600 kPa)に達したとわかったことである。それ以前は格納容器圧力の記録は発表されていないのは、電源喪失のために測定ができなかったのであろう。いよいよ格納容器ベントが喫緊事となった。

3月12日：1号機の水素爆発

1号機では、12日0時6分にはベント準備の指示とともに、800 kPaから100 kPaに圧力が低下した際に放出される放射性物質量の検討がなされた。0時30分に3 km以内の住民避難を確認、0時49分には1号機で2回目の15条通報(格納容器圧力異常上昇)が出された。格納容器のベントに注目が集まり、5時14分まで格納容器圧力は継続的に測定されている。2時30分には設計値の約2倍である840 kPaに達した。原子炉建屋や圧力抑制室の線量がきわめて高い上に暗闇の中、懐中電灯に頼りながらの作業が続く。この間、4時30分には余震による津波の可能性から現場操作禁止が指示されるなど多くの困難を伴った。なお、4時15分以降は、圧力は低下傾向と報告されている。4時23分の発電所構内のモニタリングで、20分前と比較して正門付近の放射線量が約10倍に上昇していることが報告された。つまり、放射性物質は建物の外にまで広がったこと、それも急速に、が確認されたの

である。

2時55分には津波が発生する恐れがある中、2号機の隔離時冷却系が運転していることを現場で確認した。冷却ができていた2号機よりも、1号機の対応を優先的に実施することになる。その後しばらく、2号機の操作などの記録はない。

1号機の炉心の冷却は不十分なままである。5時46分には消防ポンプによる代替注水を開始している。6時50分に手動によるベントの実施命令が経済産業大臣からあった。2時間をおいて9時を目標にベントを行うよう発電所長は指示する。空白の2時間である。9時15分に電動弁を手動で25%開度としたが、直列につながる空気作動弁の開操作はできなかった。線量が高すぎたためである。10時17分に計装用圧縮空気系の残圧を期待してベント弁操作を試みるがその成否は不明であった。14時に仮設の空気圧縮機を設置してベント操作を実施、14時30分に格納容器圧力低下によりベント成功と判断した。上述した解析においても格納容器の圧力時系列は再現されず、今なお不確かなところもある。水源枯渇のため、14時53分に淡水の炉心注入が終了する。80トン注入された。引き続き海水注入実施の指示があった。12日の午後には、格納容器のベントにも成功し、代替注水の準備も進んでいた。重大な危機は乗り越えたという認識が現地対策本部にあったかもしれない。放射性物質の放出は既であったとしても。

水素爆発が発生(15時36分)したのは、電源車による電源復旧により、ホウ酸水注入系からの注水準備が完了したときであった。1号機は原子炉建屋が著しく損傷し、ホウ酸水注入系の電源設備や海水注入のために準備していたホースも損傷し使用不能となった。結局、19時4分に消火系ラインから消防車による海水注入を開始することになる。放射性物質の放出については、国の報告書は、解析条件、解析モデル、および事象進展の不確実性がゆえに参考値にすぎないとしている。

水素爆発は、1号機原子炉建屋を損壊させただけでなく、事故収束のためになされていた準備を水泡に帰した。さらに、放射性物質を含む瓦礫を散乱させ作業員のアクセス性も著しく劣化した。水素爆発が発生しなければ、その後の進展は大きく異なっていたと思う。水素爆発を防げなかったことは最初の重要な分岐点である。

1号機の水素爆発により、現地の対応は2号機と3号機に重点が移っていく。1号機の水素爆発の後、17時30分に2号機のベント操作の準備指示が発電所長からあった。2号機の水素爆発は何としても防がなければならず、早期のベントが必須であった。

隔離時冷却系が起動していた3号機では、12時36分に同系がトリップするが、11時35分には炉心水位低により高圧注入系が自動起動した。3号機でも17時30分に格納容器ベントの準備指示が出る。3号機は炉心の冷却がな

されていたので余裕があると考えられていたのである。そうであるにしても、2号機と同様、水素爆発は何としても阻止しなければならない。

3月13日：原子炉冷却確保に手間取る

2号機では、13日11時ごろに圧力抑制室からのウェットベントライン構成が完了した。しかし、格納容器圧力がラプチャディスクの作動圧よりも低く、ベントされない。やむを得ず、しばらく圧力の監視を継続することになる。12時5分には発電所長から海水使用準備の指示がある。

3号機では、2時42分に高圧注入系が停止した。隔離時冷却系による原子炉注水ができなかったため、5時10分に原子炉冷却機能喪失と判断、15条通報に至った。これは、1,2号機より2日遅かった。5時15分には発電所長がベントライン構成の指示を出し、8時41分にベントライン構成が完了する。9時8分に逃し安全弁により原子炉の急速減圧を実施した。これにより格納容器の圧力が上昇してベントされること、そして原子炉圧力容器の圧力が低下することにより小さな駆動圧で原子炉に注水できるようになる。9時20分にはドライウェルの圧力低下を確認しており、ベントに成功した模様である。9時25分には消火系ラインにより淡水注入を開始する。しかし、水量は十分でなく、なお原子炉水位は低下し続けた。発電所長は10時30分に逆洗弁ピット^{a)}から海水を取水して注入することを指示、いまだ余震が続き、そのたびに退避を余儀なくされる中、準備が進められたがはかどらない。そうするうちに、12時20分に防火水槽の淡水が枯渇した。消火系ラインから消防車による海水注入が始まるのは1時間後の13時12分であった。

3月14日：3号機も水素爆発

3号機では海水も不足するという事態を招いていた。逆洗弁ピットに海水を補給するため、1時10分から海水注入を停止する。3時20分ようやく逆洗弁ピットから消防車による海水注入を再開する。未明から格納容器圧力が徐々に上昇し始め、5時20分に圧力抑制室からのウェットベントを行っている。ベント、海水注入が行われたのであるが、注水量は毎時10トン強と不足していた。炉心の損傷が進んでいるのであろう。決定的な事態、水素爆発が発生したのは11時1分であった。原子炉建屋ならびに廃棄物処理建屋が損壊する。11名の負傷者を数え、全員避難。消防車やホースの損傷、高線量の瓦礫が散乱、逆洗弁ピットも使用不能になる。こうした混乱した状況の中、消防車を物揚場付近に移動して2,3号機に海水を送るラインを再構築し、16時30分に海水注入を

^{a)}復水器細管を洗浄するとき、細管内の海水を逆流させるための弁が設置されているピット。タービン建屋と取水設備の間にある。

再開した。

3号機の水素爆発により、現場の関心は2号機へと移っていく。3号機の水素爆発は2号機にも重大な影響を与えることになる。ベント弁が閉となり開けることができなくなった。また、海水注入のために用意していた消防車やホースが使用不能になった。こうして津波襲来70時間後の14日の13時25分になって2号機の原子炉水位が低下し始めたことから、原子炉冷却機能喪失の判断(15条通報)がなされた。ベント弁が直ぐには使えず、16時頃に海水注水のために逃し安全弁で原子炉圧力容器の減圧を試みる。それに必要なバッテリーは構内の車両からかき集められた。ようやく18時頃に減圧に成功する。17時17分に燃料の露出が始まり、18時22分に燃料全体が露出したと判断された。19時54分によりやく海水注水を開始することにより冷却が復帰した。ようやく、各号機への海水注水が開始したことになる。

3号機の爆発時に2号機のブローアウトパネルが開いたことにより2号機の水素爆発が防がれたとの指摘もあるが、その真偽は確かではない。また、いずれの報告書にもその記載はない。翌15日の8時25分に2号機5階からの白煙を確認し、同9時16分には5号機と6号機の原子炉建屋外側の壁パネルの開放が検討されている。情報が錯そうする中、現地対策本部ではそのように考えていたのかもしれない。東京電力は19日になって、燃料プールからの水素対策のために5号機と6号機の原子炉建屋の屋根に3か所ずつの穴をあける。

2号機の海水注入が始まると、注目は注水からベントに移っていく。2号機でも水素爆発が起きないか心配されたはずである。その理由は定かではないが、2号機の原子炉建屋のブローアウトパネルが開口し、原子炉建屋に漏出していたであろう水素の排出、水素爆発の回避に至った。21時にはベントライン構成を完了するが、ドライウエルの圧力が上昇しているにも関わらず圧力抑制室の圧力がラプチャディスク作動圧よりも低くウェットベントができなかった。そこで、水を通さずにドライウエルベントを行う方針が深夜23時35分ごろに決定される。

事故後3日目になって1号機、3号機は炉心溶融と水素爆発に至った。2号機は、炉心全露出、そして格納容器の圧力上昇という過酷な状況が続く中で対策が急がれた。

3月15日：2号機の格納容器破損

2号機では15日0時2分にベントがなされたが格納容器の圧力は750 kPaから低下しなかった。その後、原子炉には注水が続けられたが格納容器圧力は高いまま、6時ごろに圧力抑制室で水素爆発と見られる大きな衝撃音が発生、圧力抑制室の圧力が0 MPaを指した。

結局、地震時に運転していたすべての号機で爆発が起き、いずれの原子炉の冷却も完全な制御ができない異常事態に進展した。この後は、原子炉の冷却を休むことな

く続けることが必要であり、当面、それ以上になす術がなかった。7時には、監視と作業に必要な要員70名を残して650名が福島第二原子力発電所に一時退避することになる。

3号機は、原子炉に燃料が装荷されていない4号機にも重大な影響を与えていたようである。水素爆発後に4号機の原子炉建屋の5階屋根付近の損傷が、そして8時11分には原子炉建屋の損傷を確認、9時38分に同3階北西角で火災が発生、11時ごろに自然鎮火を確認している。4号機の建屋で起きたことは、現場の要員が少なかったこともあるかもしれないが、詳細は不明である。

23時5分には、正門付近で4,548 $\mu\text{Sv/h}$ というきわめて高い線量が計測される。

3月11日に遡るが、全交流電源喪失直後から、1号機から4号機で燃料プールの冷却不全に陥っていた。しかし、原子炉の対応に多くの資源を割かざるを得ず、燃料プールの冷却確保は後回しになった。最初の指示は、15日22時に経済産業大臣の4号機のプールへの注水命令である。これは、14日11時1分の3号機の水素爆発、15日6時ごろの2号機の圧力抑制室付近の爆発、4号機の原子炉建屋の著しい損傷の後である。

大量の放射性物質が放出されたのは15日から16日にかけてであった。その定量評価は解析によるものが発表されている。1号機の評価はすでに述べた条件で行われた解析である。2号機は、地震発生から21時間後に直径10 cmの穴がドライウエルに、衝撃音が発生した時点から圧力抑制室に直径10 cmの穴が開いたと仮定している。3号機は原子炉水位を計測値に合わせ、燃料域内に水位を維持できていないという仮定の解析である。放射性物質の放出量はこの仮定による推定値であると理解しておかなければならない。

3月16日：原子炉の燃料プールの冷却始まる

1号機から3号機まで海水注水が継続し、原子炉の状態は安定していた。冷却は順調になされているようであった。16日からは、燃料プールの冷却が始まる。最初に対策がとられたのは3号機である。3号機の燃料プールに自衛隊のヘリコプターによる放水が行われた。原子炉冷却は安定しており、懸案であった燃料プールへの対応が開始した。事故収束への光明を見出したという意味で、二つ目の分岐点であったと思う。

第1表に示すように、燃料プールに貯蔵される燃料の発熱は十分に低く、燃料上端が露出するまでの時間は最短の4号機でも12日間である。1号機は278日とほとんど何も手を施さなくともよい状況である。つまり、10日間程度は冷却しなくとも問題はない。まず1号機から3号機の原子炉への対応に集中したことは、妥当な選択であったと思う。4号機はプールの燃料の露出が当初から指摘されていたが、ヘリコプターからの目視により4号

第1表 燃料プールの冷却余裕日数

	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	共用プール
燃料集合体数(本)	292	587	514	1331	946	876	6300
プール水の量(m ³)	1020	1425	1425	1425	1425	1497	3828
崩壊熱(Mcal/h)	60	400	200	2000	700	600	1000
除熱水量*(kg/day)	2500	16300	8200	81500	28500	24500	40800
余裕時間**(Day)	278	58	117	12	33	41	63

*水の温度を50℃とする

** 4 mの液位に低下する日数

機のプールに水面が見えたとの証言があったとのこと、建屋の損傷が激しく天井が損壊し、放水が可能な3号機プールの冷却を優先したのかもしれない。

3月17日：3号機燃料プールの安定冷却

3号機では17日より放水車、消防車により淡水および海水の放水が行われた。相当の冷却効果が確保され、放水はしばらく継続された。その後、3月29日よりコンクリートポンプ車による海水放水、4月26日より燃料プール冷却材浄化系を用いた淡水注入がなされた。

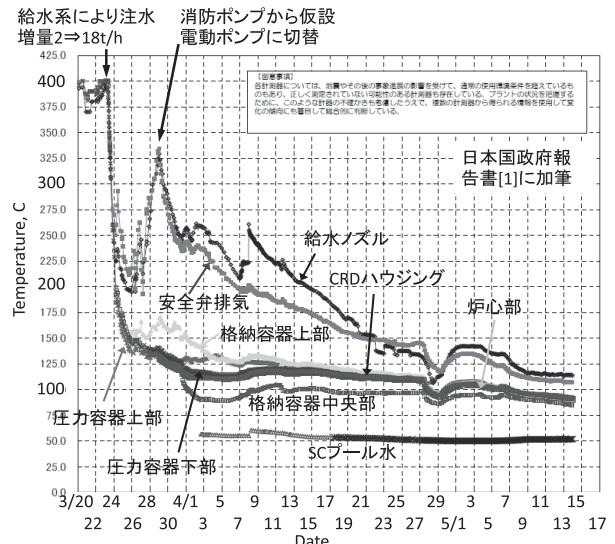
3月20日：燃料プール冷却の見通しがたつ

2号機は、20日より燃料プール冷却材浄化系を用いて海水注入を始めた。そして、3月29日より淡水注入をした。4号機は3月20日より放水車と消防車により淡水放水、3月22日よりコンクリートポンプ車による海水注水、3月30日より淡水注水を行った。1号機は、3月31日よりコンクリートポンプ車による淡水注水した。

1号機の対応は若干遅れたが、それは第1表に示す通り、冷却に十分な余裕があったからである。1号機から4号機までは、燃料プールへの海水注入が安定的にでき、燃料プールの冷却の見通しがたった。原子炉も燃料プールも冷却が可能となり、さらなる放射性物質の大量放出のリスクは回避された。いまだ多くの問題は残るにせよ、当初の緊迫した状態は脱した。

3月23日：原子炉の安定冷却確立

1号機から3号機の原子炉には、海水注入が続けられた。第1図に1号機の原子炉と格納容器まわりの温度を示す。3月23日未明まで原子炉压力容器の温度は400℃弱程度で推移している。原子炉圧力は3月15日からゲージ圧で0.2 MPaまで低下し、ほぼ一定値を示している。燃料が冠水しているとすればこの圧力では水は100℃強でなければならない。計測値が正しいとすれば、注入した水が蒸発、露出した燃料により過熱されていることを意味する。3月23日2時33分に消防ポンプにより消火系から海水を注水していたところに加えて海水系を用いて海水の外部注水を開始した。これにより、注水量は毎時2トンから毎時18トンに増やされた。すると原子炉温度



第1図 1号機の原子炉及び格納容器周りの温度推移

はみるみる低下し200℃程度に低下した。

この段階になって、現場ではすべての原子炉と燃料プールで状態が落ち着いたという認識を持ったのではない。それから後の対応は着実かつ確であり、状態は徐々に改善していく。1号機の原子炉温度が低下する少し前、3号機では22日深夜22時46分に中央操作室の照明が復帰した。24日11時30分には1号機の中央操作室の照明も復帰する。26日には2号機の中央操作室の照明が復帰した。3月23日は、三番目の分岐点であり、これを境に重要な関心が原子炉と燃料プールの冷却から、汚染水の処理に移行していくのである。

3月24日以降：放射性物質放出抑制に向けて

3月24日以降は、原子炉の冷却と燃料プールの冷却が維持される。25日は1号機と3号機、26日には2号機の原子炉注水を海水から淡水に切り替える。その後、消防ポンプによる海水注水から仮設電動ポンプによる淡水注入に切り替える。そして、タービン建屋地下の滞留水の移送も開始する。4月6日にピットから漏れいていた高レベル汚染水の対策が取られた。1号機では4月7日に窒素ガス注入が開始された。燃料プールの水は分析され、燃料の大部分が健全と判断された。また、酸化防止のためヒドラジンを注入した。

焦点は水素爆発の予防や汚染水の処理などの2次的なリスク管理に移った。4月17日には、事故収束までの工程表が東京電力から発表された。最重要の当面の課題は汚染水の処理である。本稿執筆時点で冷却水を除染・循環するシステムが動き出し、汚染水を増やさずに冷却ができるようになった。

Ⅲ. 防災に関する問題(INESの評価とSPEEDI)

放射線防護、住民の方々の避難と的確な情報提供の間

題がある。原子力安全・保安院は、国際原子力事故尺度 (INES) の評価を実施する責務を負う。まず3月11日に1号機と2号機について冷却不能とし INES のレベル3と発表した。翌12日には1号機のベントと原子炉建屋の水素爆発を受け、レベル4とした。3月18日には2号機、3号機でも炉心損傷が発生しているとの判断からレベル5と引き上げ、4号機の燃料プールについては補給水と冷却機能の喪失によりレベル3とした。これをもってスリーマイルアイランド事故と同等と解釈されることになる。

およそひと月後の4月12日に INES の評価をレベル7に引き上げた⁴⁾。原子炉から大気中への放射性物質の総放出量がヨウ素換算で37万 TBq とした解析に基づき、それがモニタリング測定結果からの逆算とも整合すると判断した。レベル7の目安はヨウ素131換算で5万 TBq であり、それを超えている。これにより、国際社会はチェルノビル事故と同程度と解釈をした。この放出された放射性物質量は INES のレベル7の基準に達したという理由であるが、先に述べたいくつかの仮定をおいた解析などによっている。また燃料プールからの放出、海洋への放出については評価されていない。一方で原子炉は、安定化に向かっており、放射性物質の放出も減少傾向にある。

IAEA の INES マニュアル⁵⁾の冒頭に、“INES 尺度は、放射エネルギーという観点から、事象の安全上の意味を公衆とコミュニケーションするために、即座にかつ首尾一貫して、用いる”と述べている。そして、INES は専門家とメディア、公衆のコミュニケーションツールであると定義している。したがって、メディアと公衆が事象の理解について混乱しないためにも INES の事故スケールは迅速に発表することが大切である。

福島第一原子力発電所事故の際に、以下のように避難指示が出された。

3月11日には、避難区域：3 km、屋内退避区域：3～10 km とした。翌3月12日には避難区域：10 km、そして同日20 km と変更された。さらに、3月15日に屋内退避：20～30 km とされた。したがって、3月18日にレベル5に引き上げた時点では、住民の避難は完了していた。

このように、当初の INES のレベルの発表は、住民の避難と照らし合わせ、迅速で適切であると思う。また、18日の時点で引き上げたことは、避難が完了している状況ではあるが、15日から16日にかけての放射性物質放出の深刻さを伝えるメッセージとなっている。

INES がコミュニケーションツールであるとするならば、緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI) を活用すべきであることは言うまでもない。気象条件と放射性物質拡散の情報が、3月12日のベントの時点から発表されていれば、そして、各自治体(市町

村)にその情報が迅速に伝わり、それを理解して活用して防災対応を行っていれば、INES の情報と合わせて放射線防護に相当役立ったのではないかと思う。

4月12日のレベル7の再評価は早計であったと思う。なぜなら、新たな放射性物質の放出はないからである。INES マニュアルは、レベル7の5万 TBq の目安の数字そのものには意味はないと述べている。INES 尺度は、防災の観点から事故の重要性を語る物差しであることを前提として迅速な評価がなされるべきである。一方、事故の安全工学上の意味合いの評価は、十分な分析がなされた後でも構わない。結果的に、INES 尺度が、風評被害のトリガーになった面があるかもしれない。INES 尺度は、原因究明が行われ再発防止対策が確定した後に正式に評価される。公衆の放射線安全という観点から専門的な検討が行われること、過酷事故に対して INES のレベル分類は適切だったか、複数基の炉心損傷に対してどのように適用すべきか、事故のタイプ(例えば核暴走型と除熱喪失型)による放出形態と組成の違いをどのように考慮するのかなどの課題が明らかになったと思う。

IV. 過去の教訓に学ぶ

Accident Sequence Precursor (ASP) 分析という手法がある。これまでに経験した深刻な事故につながるかもしれない予兆事象を調査し、その事象が炉心損傷に至るとすれば、どのようなシーケンスになるかを分析する方法である。米国原子力規制委員会 (USNRC) は ASP プログラムを1979年から実施し、実際に発生した異常や事故が原子力安全にとってどのような意味を持つかにつき、貴重な考察と知見を米国の原子力産業に与えてきた。リスク評価 (PRA) 手法の開発と相まって、ASP プログラムは成熟した。ASP とリスク評価は教訓を学ぶ両輪である。

米国で最初の PRA 研究は、1975年に実施された Reactor Safety Study (WASH-1400) である。USNRC は、WASH-1400 のクロスチェック評価を実施すべく、ルイス委員会を組織した。1978年の報告書に示された多くの提言の一つが原子力発電所のリスクを評価するために運転データを活用するというものであった。潜在的に重要な事故シーケンスと予兆事象が発生した場合には PRA で検討したシナリオと照らし合わせて分析すべきと指摘した。この提言を受けて、USNRC のリスク解析部は1979年夏に ASP を開始する。奇しくもスリーマイルアイランド事故の直後であった。ASP の最初の報告書⁶⁾は1982年に発行された。重要なポイントはプラント固有の評価であり、USNRC はプラント固有の PRA モデルの開発を始めた。

洪水による外部電源喪失の事例⁷⁾を挙げる。フランスの La Blayais 発電所は900 MWe の PWR でボルド北西

のジロンド川河口近くの湿地に立地している。数十年間の洪水水位の記録を外装して設計洪水水位は5.02 mとされた。1999年12月27日に洪水が襲った時には1号機、2号機、4号機は定格出力運転中、3号機は燃料交換が終了したところであった。暴風と満潮が重なり設計洪水水位を大きく超え、19時30分から22時20分まで2号機と4号機の外部電源が喪失、原子炉停止した。洪水は19時30分から開始し満潮は21時30分であった。敷地の北西から浸水し、特に1号機と2号機は重大な被害を受けた。電気室、海水ポンプ室、燃料建屋などに浸水し、崩壊熱除去機能、補機冷却機能、電気系などが喪失した。

原子力安全のために行うべきであったこと、重要なことは、各国で発生している前兆事象やニアミスをしっかり分析して教訓を抽出すること、我が方のプラントであればどうなったかを考え固有の評価を行うこと、もしも脆弱性があればそれを自発的に強化する姿勢である。

V. おわりに

全交流電源喪失による計器不良と照明、通信機能の喪失、高い放射線量によるアクセス性劣化の中、発電所対策本部の対応は極限の状態に相当のことをこなしている。あの津波では全電源喪失やヒートシンクの喪失はやむを得ないと思う。事故の経緯を見ると、何らかの手段を講じる可能性があるとするれば唯一、12日0時6分のベント準備指示から14時30分のベント成功までである。2時55分時点で2号機と3号機は冷却されていることがわかった。すべての資源を1号機に注ぎたはずである。この間、格納容器ベントと代替注水が試みられるが功を奏さない。ベント成功操作がなされたのは14時である。そして、15時36分に水素爆発が発生した。最初の分岐点と思う。もし、水素が原子炉建屋に漏出する前にベントが行われていれば水素爆発はなく事故収束に向けて様々な策をうてたはずである。

結局、3月15日までは対応が後手に回り続けた。1号機から3号機までの原子炉と1号機から4号機までの燃料プールが重大損傷した。一方で、消防ポンプを用いた海水注入による原子炉の冷却を16日までには確立した。燃料プールの冷却にも取り掛かった。二度目の分岐点である。その後、20日には燃料プールの安定冷却のめどが立った。最後の分岐点は23日である。いまだ高かった原子炉温度、さらなる放射性物質の放出もあり得た。給水系により注水量を増やし、十分な冷却を確立した。原子炉温度は直ちに低下した。津波発生から13日間にわたる必死の対応は一段落した。いずれかで異なった対応をしていればどうなったか、what-if分析をしてみると、現場の状況は極限状態といえるほど厳しい。

事故進展の分岐点と考えられるのは3月12日(水素爆発による悪化)、16日(炉心冷却の維持)、23日(炉心とプールの安定冷却)である。1号機でベントが速やかに行わ

れ水素爆発がなければ、このような事態には至らなかったであろう。しかし、電源も照明も通信もなく瓦礫が散乱し、たびたびの余震と津波警報が続く中で、それが可能であったかは不明である。津波の脅威は凄まじいと言わざるを得ない。

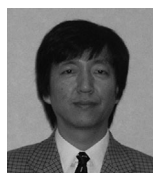
この事故では重大な放射性物質の放出があった。住民の方々の避難を適切に迅速に行うという意味で、INESの事故尺度とSPEEDIの活用はキーポイントであったと思う。INESの事故尺度はこの事故では必ずしも効果的に機能しなかった。課題と改善策について我が国からの発信を期待したい。また、SPEEDIなどの情報が十分活用できず、国、事業者、自治体が連携した体制がとれなかった。実効的な方策を議論する必要がある。

世界各国の運転経験を探れば、似たようなニアミスが見つかるはずである。過去の教訓に学ぶ姿勢を忘れることなく、安全向上に反映する仕組みを用意すべきと思う。いくら、安全対策を施しても我々の想像力の網をすり抜けるようなシナリオは発生しうる。しかし、最初は予兆事象やニアミスとして現れる。こうして顕在化した問題を、芽の段階でしっかり分析し、個々のプラントに当てはめてそれぞれの脆弱性を見出し、リスク管理を行うという地道な努力が大切であり、現実的かつ有効なアプローチである。

—参考文献—

- 1) 原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について、原子力災害対策本部、平成23年6月。
- 2) 福島第一原子力発電所 被災直後の対応状況について、東京電力。
- 3) 日本原子力学会 <http://www.aesj.or.jp/information/fnpp201103/chousasenmoniinkai.html>
- 4) 東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の事故・トラブルに対するINES(国際原子力・放射線事象評価尺度)の適用について、経済産業省ニュースリリース、平成23年4月12日。
- 5) INES, *The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual 2008 Edition*.
- 6) *Precursors to Potential Severe Core Damage Accidents: 1969-1979, A Status Report*(NUREG/CR-2497, Volume 1), June 1982.
- 7) A. Gorbachev, *et al.*, Report on flooding of Le Blayais power plant on 27 December 1999.

著者紹介



山口 彰(やまぐち・あきら)
大阪大学
(専門分野)原子炉工学、システム工学