解説

東日本大震災に伴う原子力発電所の事故と災害 福島第一原子力発電所の事故の要因分析と教訓

北海道大学 奈良林 直, 杉山憲一郎

今回の福島原発事故は、マグニチュード9.0の巨大地震と津波に端を発し、複数プラントでの過酷事象が同時進行するという未曾有の大事故である。その状況はマスメディアで逐一報道され、多くの国民は原子力事故の凄まじさと放射能汚染の恐怖を身をもって味わうこととなった。原子力関係者は深層防護の観点から、いかなる災害に対しても、発電所の周辺住民に迷惑をかけないという固い決意を持って原子力発電所の安全設備を総点検すべきである。この反省の基に我が国の原子力の復興を期待する。

I. はじめに

東北地方太平洋沖地震は、2011年(平成23年)3月11日14時46分18秒、日本の太平洋三陸沖を震源として発生したマグニチュード9.0の巨大地震である。この地震は、地震のみならず、北海道から千葉県に至る太平洋沿岸に大きな津波を発生させ、東日本を中心に甚大な被害をもたらした。東日本大震災と命名された。この沿岸に立地する火力発電所、原子力発電所の多くは何らかの影響を受け、運転停止した。なかでも、東京電力・福島第一原子力発電所の1号機から4号機においては、(1)外部電源および非常用電源がすべて失われたこと、(2)炉心および使用済燃料貯蔵プール内の燃料の冷却および除熱ができなくなったことが大きな要因となり、燃料が損傷し、その結果として放射性物質が外部に放出され、周辺に甚大な影響を与える事態に至った。原子力発電所の事故のみならず、地元から首都圏の水がめまで放射性物質で汚染するという深刻な原子力災害を引き起こした。

商業用の原子力発電所で起こってはならない重大な事故であり、津波の被災に加えて強制退避が追い打ちを与える形で避難された方々、野菜や牛乳、漁業に与えた汚染と風評被害、さらには生き残った家畜の殺処分といった耐え難い状況が報道されるなか、原子力の安全研究、シビアアクシデントの研究を行ってきた著者らも、事故の早期収束を願い、事故の推移を追い、データ分析を行った。今後、詳細な事故調査・原因分析が行われ、今回と同様の事態に至らないための安全対策を緊急に講じる必

要がある。本解説は、現時点までの調査・分析結果に基づき、取りまとめたものである。

II. 福島第一原子力発電所の事故の概要

1. 震災の概要

今回の震災では、マグニチュード9.0の地震で太平洋沿岸に大きな津波が発生し、東日本沿岸に立地する多数の大型火力発電所、原子力発電所(第1図)が運転停止した。これが広域の外部電源喪失につながった^{1,2)}。

これらの沿岸の原子力発電所は耐震補強工事が実施されていたため、耐震Aクラスの原子炉建屋、炉内機器は健全で、外部電源喪失後は、直ちにスクラム、非常用ディーゼル発電機が起動し、ECCSが作動した。しかし、その約1時間後に太平洋岸を襲った津波が深刻な事態をもたらした。なかでも、東京電力・福島第一原子力発電所の1号機から4号機においては、(1)外部電源および非常用電源がすべて失われたこと、(2)炉心および使用済燃料貯蔵プール内の燃料の冷却および除熱ができなくなったことが大きな要因となり、燃料が損傷し、その結果と

第1図 東日本大震災の影響を受けた原子力発電所¹⁾

Fukushima 1 st NPPs Accidents and Disaster Caused by the Pacific Coast Tsunami of Tohoku Earthquake; Lessons from evaluation of the Fukushima 1st NPPs accidents: Tadashi NARABAYASHI, Kenichiro SUGIYAMA.

(2011年 5月6日 受理)

して放射性物質が外部に放出され、周辺に甚大な影響を与える事態に至った^{3), 4)}。

2. 福島第一原子力発電所の地震と津波の影響

まず、今回の大きな特徴である津波の影響について解説する。平成14年改訂の想定津波最高水位は海水基準面に対し+5.7mであり、津波に対する対策工事は完了していた。しかし、今回の津波は主要建屋エリアのほぼ全域を海水基準面+14~15mの津波が襲い、タービン建屋が約4~5m浸水した。このため地上に開口がある屋外トレンチやタービン建屋大物搬入口も一部損傷を受け、建屋内への海水経路となった。原子炉建屋への海水浸入は原子炉建屋の気密機能により海水の浸入はある程度阻止されたと考えられるが、今後の現場調査が待たれる。4号機南側の廃棄物集中処理施設付近への海水の浸入も見られる。第2図(a)の写真によれば、設備関係では、1号機取水口付近に設置されていた重油タンク2基のうち1基は津波によってさらわれ、残り1基は1号機北側道路上にまで流された。復水貯蔵タンクや非常用ディーゼル発電機燃料の軽油タンクなどの耐震クラス上位のものは損傷を免れた一方、海水ポンプエリアの損傷は甚大である。例えば、4号機定期検査中の海水ポンプ部品が2号機海水ポンプ付近にまで流されている。

第2図(b)は福島第一と第二発電所で、津波の浸水あ

(a) 福島第一原子力発電所の全景(水素爆発後)
(エア・フォート・サービス社撮影)

(b) 津波の浸水・遡上範囲(福島第一・福島第二)¹⁾

第2図 福島第一、第二発電所の津波による被害

第3図 地震と津波による全交流電源喪失¹⁾

るいは遡上が見られた範囲を比較したものである。第一サイトの方が浸水領域が広く、第3図に示す模式図のように、外部電源喪失と海水の浸水による非常用ディーゼル発電機の停止による全交流電源喪失に至った。

淡水の供給源としては復水貯蔵タンク、廃棄物処理タンクの余剰水等の利用が検討されたが、大部分の淡水は原子炉への注水に使われていた。一方、第一発電所を建設する際に発電所で使用する水源とするために建設された第4図に示す坂下ダム⁵⁾には、284万tの水がある。敷地内の沈殿槽まで淡水の供給導管があり、この水の利用が最も有効と考えたが、地震により導管が破損し、自衛隊が修理に当たっていた。このダムの水が利用可能になったのは海水注入後10日以上経ってからで、この間、米軍のバジ船が真水を満載して救援に来るなど、常に真水の確保が重要課題であった。

3. 福島第一原子力発電所の安全系と建屋配置

BWR/4の非常用炉心冷却系(ECCS)の系統構成を第5図に示す。ECCSはコアスプレイ(CS)と低圧注水系(LPCI)×2の構成で2系統、おのにおに非常用ディーゼル発電機(DG)が接続されており、外部電源喪失でDGが自動起動する。また、蒸気タービンで駆動される高圧注入系(HPCI)と、非常用系の隔離時注水系(RCIC)が備えられている。1号機はBWR/3で、RCICの代わりに隔離時復水器(IC:Isolation Condenser)が設置されてお

第4図 坂下ダム(貯水量284万t)⁵⁾

り、プール水を沸騰させながら原子炉の蒸気を凝縮させて炉心に戻す。ICが作動すると、しばらくしてプールから発生する水蒸気が建屋から噴出する。高圧系での注水ができなくなった場合は、主蒸気逃がし安全弁(SR弁)を強制開として第6図に示すドーナツ状のトラスと呼ばれる圧力抑制室(Suppression Chamber)に蒸気を排出し、原子炉の圧力を低下させ、低圧炉心注水系で注水する。格納容器は圧力抑制室のほか、フラスコ状のドライウェルと、両者を接続するベント管と呼ばれる配管で接続されている。ベント管の先端はヘッダーと多数の分岐配管が取り付けられ、分岐配管はプール水の中に水没して、噴出した蒸気を凝縮する。蒸気中に含まれるヨウ素やセシウムもこのプール水でこし取られる。

第7図は福島第一原子力発電所3号機の原子炉建屋レ

第6図 Mark-I型格納容器¹⁾

第7図 福島第一原子力発電所3号機の原子炉建屋レイアウト^{7),8)}

イウトである。残留熱除去系(RHR)などの原子炉の崩壊熱を最終的に海水冷却系を介して最終ヒートシンクである海に捨てるための設備は、原子炉建屋地下1階のトラス室の四隅の三角コーナーに設置されている^{7),8)}。

第8図にタービン建屋を含む3号機全体配置鳥瞰図⁹⁾を示す。非常用ディーゼル発電機はタービン建屋の地下1階に配置され、中央制御室(中央操作室)は原子炉建屋に隣接するコントロール建屋内最上階に配置されている。原子炉建屋1階の大型搬入口は、原子炉建屋最上階の運転床(Operating Floor)からキャスクに収めた燃料を吊り降ろし、トレーラーに積載するために用いる。地下1階は海水基準面-2.0m、1階床が10.2m、原子炉建屋頂部が55.7mである。第9図は3号機の原子炉建屋内機器配置図¹⁰⁾である。原子炉压力容器(RPV)は、ドライウェルの底に敷設した鉄筋コンクリートの上に伸びるベDESTALと呼ばれる円筒状の台座の上に据え付けられている。

原子炉内の燃料を交換する場合は、格納容器の上方の運転床と同じ高さの遮蔽ふた(Shield Plug)をクレーンで取り外し、さらに格納容器の上部蓋を取り外し、原子炉压力容器上部の原子炉ウェルから使用済燃料プール(燃

第8図 福島第一発電所3号機全体配置鳥瞰図⁹⁾

(3-R1, 3-R2は加速度計)

第9図 3号機の原子炉建屋内機器配置¹⁰⁾ (注: 当時の慣習として「建屋」を「建家」と表記)

燃料貯そう)までを水で満たして燃料交換機を使って水中で燃料を交換する。使用済燃料プールは水深11 m。使用済燃料はラック内の仕切り内に収められ、ラックはプール底部にアンカーボルトで固定され、自然対流のため各燃料位置(仕切り)の底部には穴が開いている。アクティブな燃料部分は、燃料下部タイプレートとを考慮すると、プール底部から約50 cm、燃料頂部から水面までは約7 m(作業員用の遮蔽)となる。プール水量は、燃料体積を差し引くと、4号機の場合約1,200 m³である。

4. 福島第一原子力発電所の事故の推移

以下、福島第一原子力発電所1号機から4号機までの事故の経過を説明する。

(1) 1号機

BWR/3型の原子炉で、ECCSには低圧炉心注水系がないが蒸気タービン駆動の高圧炉心注水系(HPCI)と隔離時復水器(IC)がある。第10図(a)に示すように、地震でスクラム、外部電源が喪失して直ちに非常用ディーゼル発電機(DG)が起動し、海水冷却のヒートシンクも確保。非常用復水器が起動して炉内の蒸気を凝縮して崩壊熱を除去した。蒸気タービン駆動のHPCIも起動し、「止める」「冷やす」が開始された。ここまでは順調であった。約1時間後に高さ14~15 mの大きな津波が第一原子力発電所を襲った。HPCIのタービン制御に用いる制御盤の電源が外部電源喪失に加えてバッテリーも津波で浸水していたため、作動しなかった。このため、第10図(b)に示すようにすべての注水系が作動不能となり、全注水機能喪失となった。次いで、正7.1 MPaで自動起動する隔

原子炉水位維持の取組み

(a) 津波直後の全交流電源喪失時のICによる炉心冷却非常用復水器の冷却能力喪失のため原子炉水位が下がり、続いて、炉心が露出

(b) IC 作動停止後の炉心露出と水素発生

第10図 1号機の炉心冷却機能の喪失と炉心露出¹⁾

離時復水器を使って崩壊熱除去と減圧を行った。スクラム後、約1時間経っているため減圧・減温が速く、約10分で隔離時復水器は手動停止したとされる。その後、原子炉圧力は再び上昇し、主蒸気逃し安全弁の安全弁モー

ドで蒸気を圧力抑制プールに排出した。一方、格納容器の圧力は3月12日の0:00を過ぎてから上昇を続け、3:00には設計圧力の約2倍のピーク圧力750 kPaに達している(第11図参照)。その後、6:00には約670 kPaに低下していることから、格納容器上部蓋のフランジ等から蒸気とともに核分裂生成物の揮発成分の漏洩が開始したと推定され、同時刻から第12図に示す敷地内の空間線量率が急上昇している。また、水蒸気中に水・ジルコニウム反応による水素が混入していると考えられ、遮蔽ふたの外周にある隙間(幅約20 mm)から運転床のある原子炉建屋最上階に水素が上昇し、蓄積を開始したことになる。

一方、1号機では、アクシデントマネジメント(AM)に定められた過酷事故緩和対応措置が実行に移された(第13図参照)。福島第一は、電源車と消火ポンプを用いた炉心注水である。津波による多量の瓦礫を避けながら消火水槽を水源として消火系配管に接続される炉心スプレー系によってまず淡水の注入が行われた。この際、消火ポンプの吐出圧力では8 MPaに近い原子炉には注水できないため、自動減圧系(ADS)として用いられる主蒸気逃がし安全弁(SR弁)により、原子炉の減圧操作を行う必要がある。全交流電源喪失で、中央制御室の制御盤はもとよりエレベータや照明が使えないなか、運び込んだバッテリーをSR弁本体に取り付けてある電磁弁に接続し、SR弁のアクチュエータのシリンダに窒素を供

第13図 1号機における過酷事故対応緩和措置¹⁾

給してSR弁の弁棒を吊り上げ、SR弁を強制開とした。この操作により原子炉圧力は800 kPaに低下し、淡水が注入されて炉水位が1,300 mmに回復したが、淡水の水源が枯渇し、以後、原子炉水位は燃料の上部が露出する-1,700 mm(TAF基準)まで大きく低下した。3月12日の10:17に既に建屋の線量が上昇するなか、電動弁を手動で開ける等の操作をしてベント操作を開始し、14:30過ぎから、格納容器の圧力が低下し始めた。このタイミングで第12図に示す敷地(正門ゲート)の空間線量率が①のピーク400 μ Sv/hまで急上昇した。そして、マスコミの中継が行われているなか、15:36に1号機の運転床部分のコンクリートパネルが吹き飛ぶ水素爆発が発生した。AM上は淡水が確保できない場合は、海水を注入することになる。津波に加え、放射性物質の付着した瓦礫の隙間を縫って海水ホースが海岸まで手作業で敷設された。水素爆発による緊急避難などもあり、大変な困難を伴う作業であったと思われるが、この間、首相官邸からの指示も出て、20:20に消火ポンプを用いてコアスプレイから海水が炉心に注水された。この海水注入に伴い、一部熔融していた炉心では水蒸気が発生し、第12図②のように、敷地内の空間線量が再び上昇した。

3月14日朝時点での、CAMSと呼ばれる格納容器内のガンマ線モニタによるドライウェルとウェットウェルのガンマ線の線量比から、炉心熔融率が70%と推定された。以上、3月14日朝までの短期の事故の推移を第1表にまとめる。これ以降、海水注水が継続されている間、コアスプレイの流量は減り続けて2 t/hにまで減少し、消火系から給水系ラインに切り替えて3月25日から坂下ダムの導管復旧による淡水注入。3月29日には東北電力の送電線から敷設した外部仮設電源の復旧により、電動ポンプによる注水に切り替え、流量を約6 t/hにて注水を継続し、一時約400℃まで過熱していた原子炉压力容器や格納容器内温度も次第に低下した。4月7日には格納容器内に窒素を注入した。格納容器が負圧になって空気を吸い込むと酸素が格納容器内に流入し、水素爆発の可能性があるのである。なお、事象の大部は公開データを基に作成したものであり、正確を期すには、今後さ

第11図 1号機の事故後の推移¹⁾

第12図 敷地内の空間線量率²⁾

第1表 1号機の地震後の事故の推移(短期)

日時	原子炉	注水量	格納容器	建屋	建屋外
3/11 14:46	地震 外部電源喪失、スクラム (C起動)			換気系停止	
15:42	全交流電源喪失、HPCI使用不能				
16:36	逃がし安全弁で圧力制御 炉水位低下始まる (最初の評価では炉心露出) 炉水位低確認(+450)				
21:30	炉水位上昇(+1300)				
23時頃	ADS手動開による減圧操作				
3/12 0:30	炉水位上昇(+1300)				
0:49	同上(保安院資料)				
1:20	炉圧0.8MPa				
2:30	IC停止(METI発表)				
4:00	炉水位再度低下を始める。				
6:00	炉水位0(炉心頂部)				
6:17	炉水位再度低下を始める。				
8:30	炉水位0(炉心頂部)				
10:17					
12:35	水位JP吸込口(以後一定)				
14:30	以後炉心部水位不明確				
15:36					
20:20	海水・ボウ酸注入開始(CS注入) 以後炉水位の回復指示は無し。 炉圧:0.36MPa付近で一定	2m3/h			
3/13 15:00	炉圧:0.415MPa				
3/14 7:00	融解率70%(CAMS)

第15図 3号機の事故後の推移¹⁾

らに事故の検証を待って追加・修正する必要がある。

(2) 2号機(第14図参照)

2号機は、津波後も蒸気タービン駆動の隔離時注水系が作動を続け、3月14日の11:00頃まで注水が継続されていた。しかし、隔離時注水系の機能停止後、原子炉内の水位は急激に低下した。16:34に海水を注入開始したが、消防ポンプの燃料切れに気づかず、この間、炉心下端まで水位が低下し、燃料棒がすべて露出した。海水注入を再開して圧力抑制プールに水素を含む蒸気を放出したところ格納容器の圧力は急上昇し、3月14日24:00前にドライベントを実施した。これに伴い、敷地内の線量率が上昇し、第12図⑤のピークに達した。朝6:14には圧力抑制室付近で破裂音と共に格納容器圧力が一気に大気圧まで低下した。3月15日9:00には白煙が上がり第12図⑥の10,000 $\mu\text{Sv/h}$ のピークに達し、大気へ揮発性の核分裂生成物が多量に放出される事態となった。

(3) 3号機(第15図参照)

3号機は、津波後も蒸気タービン駆動の隔離時注水系と高圧注入系が作動を続けた。しかし、淡水源の関係から、3月13日の5:00には注水不能となった。海水注入が13:00であることから、この間に-3,000 mmまで水位低下したが、ADSの減圧操作でその後一時的に水位が回復した。圧力抑制室の圧力が、3月12日の13:00

第14図 2号機の事故後の推移¹⁾

には約780 kPaに達しており、格納容器の上部フランジの変形が生じて、水素を含む水蒸気が約2日間にわたりリークし、原子炉建屋上部に蓄積していたと推定される。3月14日11:01に、黒煙が吹き上がる激しい水素爆発を発生し、原子炉建屋上部が吹き飛び、運転床の壁面と屋上の鉄骨が原型を留めないほど変形した。それ以降、原子炉圧力とドライウェル圧力は並行にほぼ同じ圧力カーブで推移している。ドライウェル圧力は、水素爆発の衝撃で指示値にドリフトが生じたと推定される。これらの計器については、原子炉建屋内に点検に入れるようになったら校正し、事象分析の精度を向上させることが必要である。

(4) 4号機

定検に合わせてシュラウド交換作業が行われていたため、原子炉内のすべての使用済燃料1,331体と今回装荷

第2表 1～4号機の事故時対応

	1号機	2号機	3号機	4号機
出力	46.0万kW	78.4万kW	78.4万kW	78.4万kW
営業開始	1971年3月	1974年7月	1976年3月	1978年10月
プラントメーカー	GE	GE/東芝	東芝	日立
プールの燃料本数	済292体、新100体	済587体、新28体	済514体、新52体	済1331体、新204体
プールの燃料いつから	2010年3月	2010年9月	2010年6月	2010年11月30日
原子炉建屋の損傷	×水素爆発	△穴?	×水素爆発	×水素爆発と火災
ディーゼル発電	×	×	×	×
炉内の燃料棒	70%損傷	33%損傷	MOX燃料炉内に2010年9月から32体装荷	なし
3/11(金)	自動停止、ECCS不全	自動停止、ECCS不全	自動停止、ECCS不全	定期点検中
3/12(土)	15:36水素爆発 原子炉建屋吹っ飛び 10:17ウエントベント 20:20海水注入			
3/13(日)		11:00ウエントベント	冷却システム停止 08:41ウエントベント 13:00海水注入	
3/14(月)	13:25冷却機能喪失 16:34海水注入 ・壁に穴が開け検計(せず) 18:22燃料棒全露出 (ポンプ燃料切れ気づかず)		08:17ウエントベント 11:01水素爆発	使用済みプール水温 AM04:00に84℃ (これは再データなし)
3/15(火)	00:02ドライベント(数分間) 06:14圧力抑制室損傷 06:28圧力抑制室圧力ゼロ		10:00山崩で 400mSv/h検出	06:14水素爆発? (8m四方の穴2個 (4階～5階) 09:38確認 11:00ころ火災)
3/16(水)			08:30自衛隊 10:40数値急上昇退避 11:30誤報と判明再開 100feet 250mSv	05:45再び出火 放射線量高3近づく 消火断念も鎮火 自衛隊ヘリ空爆
3/17(木)			09:48自衛隊ヘリ水投下 7.5t×4回 300feet 87.7mSv 1000feet 4.13mSv プール容積365m ³ 9.8m×12.2m×11.3m 18:05機動隊放水車失敗 19:35自衛隊特殊消防隊 5台成功30t	21:45プールに 水が入っている動画公開
3/18(金)	外部電源の準備 明日通電の計画 タービン建屋内でたまり水 発見線量測らず	外部電源の準備 22:00外部送電線から予備電 源確保で発電完了 明日通電の計画 海水注水5600t/m 明日、水素対策で穴を開けるかも 10:30頃 500mSv/hを記録し ていた (3月23日発表)	13:55自衛隊消防車6台の放水 ・約40t/米軍放水車の放水 ・約4t 24:30東京消防庁ハイパース キュー放水開始～25:10/ 1200tの放水 明日より一週再度実施 海水注水2500t/m 20日までに外部電源確保	仮設予備電源盤を搬入 20日までに外部電源確保
3/19(土)	2号機のワウーセンター経由で 外部電源接続 事務所本館北 3443 μSv (14:00) 3078 μSv (17:00) 2906 μSv (21:00)	配電盤に外部電源接続 1.5kmのケーブル敷設終了 冷却系の受電は明日以降	東京消防庁の放水 なんと2400t 7時間の手立ても(一時無人) 19日14:05～20日3:40 大阪(17:25)消防隊出発	配電盤にMC車からケーブル 敷設の作業

予定の新燃料204体が使用済燃料プール中のラックに挿入されていた。3月15日6:14に水素爆発して原子炉建屋の3階、4階の耐震Aクラスの原子炉建屋壁(厚さ50cmの鉄筋コンクリート)と5階および屋上のコンクリートパネルも吹き飛んだ。しかし、格納容器の上部フランジの黄色い塗料、燃料交換機の緑色の塗料は焦げておらず、極めて短時間に衝撃波が通過するデトネーション(爆轟)が発生したと推定される。使用済燃料プールの水は事故後に燃料が冠水するだけの水量があったことが確認されており、第16図のような状態にあったと推測されるがまだ定量的に説明できていない。原子炉ウエルや機器ウエルも満水で、使用済燃料ウエルと原子炉ウエルの間のゲート(仕切板)を押していた治具が水素爆発の衝撃で外れて、原子炉ウエルから使用済燃料ウエルに水が流れ込んだという説があるが、地震後、約3日間に使用済燃料プールの水が、燃料が露出するまで蒸発するかどうか、今後の燃料棒表面の検査や検証が必要である。

第16図 使用済燃料プールの外部電源喪失時の懸念¹⁾

第17図 4号機と3号機の原子炉建屋の破損状況
(エア・フォート・サービス社撮影)

Ⅲ. スリーマイル島2号機とチェルノブイリ4号機の事故の教訓

1. スリーマイル島原子力発電所 2 号機の事故¹⁾

1979年3月28日未明に、米国のペンシルバニア州にあるスリーマイル島(以下TMIと略す)原子力発電所2号

機(電気出力96万 kW)で、炉心が大規模に損傷する事故が発生した。TMI 原子力発電所の原子炉は、バブコック&ウィルコックス(B&W 社)製の PWR で、蒸気発生器の保有水容量が小さく、また蒸気発生器で過熱蒸気をつくる点に特徴がある。以下、第18図¹²⁾を参照して説明する。

事故は、復水器の水を蒸気発生器へ送る主給水ポンプの停止によって始まった。ただちに補助給水ポンプが自動起動し、30秒後には定格出力で回転した。しかし、補助給水ポンプの出口にある2つの弁が閉じていたため、水は蒸気発生器へ送られなかった。このとき、制御室の弁操作スイッチには「閉めきり」というフダが下がっていた。これは保守作業後、「開」に戻すべきところを、巡視点検で気づかれていなかった。運転員が気づいて弁を開けたのは事故から8分後のことであった。

原子炉の方は、蒸気発生器に水が来なくなったため1次系の温度と圧力が上がり、加圧器の上部についている圧力逃し弁が自動的に開き、制御棒が炉心に挿入された。これで原子炉は設計通り停止した。しかし、圧力逃し弁は自動的に閉まらず(パイロット弁の破損による開固着で再閉止不能)、1次系冷却水の噴出が続き、圧力が下がりました。この信号で非常用炉心冷却装置(ECCS)が自動起動し、原子炉容器に冷却水を注入し始めた。ところが運転員は事故発生4分後に1系統、10分後にもう1系統とすべてのECCSの弁を止めてしまった。この理由は、加圧器についている水位計が満水になっているような指示を出しており、この値を信じた運転員は加圧器が満水になり圧力調整ができなくなることを恐れたからであった。しかし12分後になって、運転員は冷却経路がないことに不安を覚えてECCSを再起動した。それでもやはり原子炉容器が満水になり圧力が上がってくることを恐れ、注入量を極端に絞っていたので、外に漏れ出ていく水のほうが多く、原子炉内の水位は次第に下がり、一方、開いたままの圧力逃し弁を通して格納容器内に噴出した蒸気は、凝縮して水となり、加圧器逃しタンクにたまった。その後このタンクが満水となり、溢れて格納容器の底にあるサンプ(水貯め)にたまりはじめた。このサンプの水位が上がってきたため、放

第18図 米国スリーマイル島2号機の事故¹²⁾

射能を含んだ水が移送ポンプにより補助建屋に送り出されてしまった。さらに、その先の系統に漏れがあったため、送られてきた水に含まれていたヨウ素131を含む気体状のFPがこの漏れ箇所から建屋の中に漏れ出て、補助建屋の換気系を通して外に出ていった。

また、ECCSを再起動後、運転員は1次冷却材循環ポンプに振動が出たため、このポンプを止めた。その結果、いままではわずかだが冷却水が循環して炉心の温度が小康状態を保っていたが、これがなくなったため、炉心を浸していた水が蒸発し、水位が下がったので炉心が露出して燃料棒が過熱し、被覆管の破損が進みはじめた。そして被覆管のジルカロイが高温下で水蒸気と反応し、酸化して大量の水素を発生させた。この水素は気体状のFPなどと一緒に大きな不凝縮性気体のかたまりとなって、原子炉压力容器の上の方にたまり始めた。

一方、酸化して脆くなった燃料の被覆管は、くずれ落ちて炉心の中央上部に大きな空洞ができた。空洞の底には碎片が厚く積もり、冷却障害が進行し、過熱した燃料の一部は溶けて流れ、压力容器底部へ落下した。この頃になってようやく運転員は逃し弁からのリークに気付く、元弁を閉じてECCSの流量を増加させたので、炉心溶融のこれ以上の進展は阻止できた。しかし、压力容器の上方に貯まった気体が邪魔して蒸気発生器を通して冷却材が流れず、1次系では冷却ができないので、ECCSを引き続き使用して冷却を続けた。そこで再び逃し弁の元弁を開けて系統を減圧し、再び弁を閉じて1次冷却水ポンプの一つを起動した。これにより循環が生じて異常な温度を示していた炉心出入口の温度計は常識的な値に戻り、炉心を通して冷却水が流れ始め、炉心で加熱された水が蒸気発生器で冷やされるようになった。こうして炉心の安定した冷却が確保できたのは事故が起きてから16時間後のことであった。

事故自体は28日の夜には終息したが、30日になってスタック(排気筒)から高い放射能が放出されているとの誤った測定結果が米国原子力規制委員会(NRC)に伝えられ、さまざまな可能性が論じられたため、ペンシルバニア州知事は最悪の事態に備えて5 mile 圏内の妊婦と就学前児童の待避を勧告した。週末ということもあり隣が退避を始めれば自分もということで、結局10 mile 圏内の住民の40%が圏外に待避した。この間、道路は車であふれ、一方、街はゴーストタウンのようになった。この事故による公衆の被ばく線量については、当時の原子力安全委員会委員長は4月4日の議会で周辺の生活環境における放射線レベルについて証言し、「発電所から0.6 mile のところに数日立ちつづけていても被ばく線量当量は最大で80 mrem (1 mrem=0.01 mSv)、つまり胸のエックス線検査1~2回分に相当する線量である。」と述べている。また、発電所の周囲80 km 以内に住む200万人の住民の受けた被ばく線量当量は平均1.5 mrem と

評価され、公衆の放射線被ばくは実質上なかったといっている。

教訓は、社会の混乱とパニックに陥った住民の精神的な影響であった。この事故のために設立された大統領特別調査委員会の報告書は、「事故の重大性」のところで、「事故の健康への影響に関する我々の調査に基づけば、発電所のあの重大なダメージにもかかわらず、大部分の放射性物質は閉じこめられ、その放出による個人の肉体的健康への影響はとるに足らないというのが結論である。事故の健康への大きな影響は精神的ストレスであった。」と述べている。

この事故について、NRC が事故の直後に原因究明のため事故調査委員会を発足させ、徹底した原因究明に乗り出した。一方、事故の社会的影響の大きさに鑑みて、カーター大統領は事故から2週間後の4月11日、ダートマス大学の学長ジョン・J・ケメニー氏を委員長とする大統領特別調査委員会を発足させた。これは、州知事、各界の学識経験者及び住民代表を含む12人で構成され、技術的な原因以外に背後要因も含めて徹底的な調査を行った。この委員会は半年間に150人以上から公式証言や個人面談を行い、積み上げると100 m にも達する多数の資料を収集したといわれている。この委員会は調査結果と改善策を大統領に提出した。「多年にわたる原子力発電所の運転経験を経て、原子力発電所は全く安全であるという考え方が固定観念(Mindset)としてでき上がっていて、これがいろいろな面で適切な措置をとることを妨げた」と述べている。わが国でも原子力安全委員会が直ちに国内の原子力発電所の総合的な再点検を実施し、運転中の大飯発電所については、このような事故の起きる心配のないことを確認できるまで運転を中止することを勧告した。また、同委員会は特別調査委員会を設けてこの教訓を様々な角度から検討し、これをもとに「設計に係わる事項」と「運転管理に係わる事項」に分けて、その後の安全確保対策に反映させるべき事項を決定した。

この最も重要な教訓も福島第一発電所では生かされていなかった。すなわち、米国での配置設計を基本としていたため、非常用ディーゼル発電機がタービン建屋地下1階に設置され、津波に対して無防備となっていた。この点を世界の著名な原子力安全規制の専門家16名による声明文「ネバーアゲイン」¹³⁾では、「史上まれに見る巨大地震プラス歴史的な大津波が全電源を喪失させた。低確率の事象があり得ない形で同時発生したが、福島のサイトではその危機感がなかった」と指摘し、当初の安全基準を満たしているだけで満足するのではなく、常に最新の知見と緊張感を持って安全確保の努力を継続・強化していかなければならないと訴えている。すなわち、固定観念(Mindset)による油断を厳しく戒めている。

また、研究開発面でも、(1)炉心損傷時の原子炉の振舞いについての知見を深める研究、(2)人間と機械との関係

マンマシンインターフェースの研究, (3)運転員の操作を支援するシステムの研究, さらには, (4)事故時に人に代わって作業ができるロボットの開発, などが重点的に実施されることが要求された。さて, これらの研究開発の成果が今回の事故進展の理解と収拾にどれだけ役立ち, 何が不足であったかを学会として検証すべきと考える。

2. チェルノブイリ原子力発電所 4 号機の事故¹¹⁾

1986年4月26日, いまのウクライナ共和国(当時ソ連)の首都キエフから約100 km 離れたところにあるチェルノブイリ原子力発電所 4 号機において, 原子力事故が発生した。事故は深夜午前1時23分に起きた。制御室の運転員は1回目の爆発音に続いて2, 3秒後に2回目の爆発音を聞いたという。1度目の爆発は燃料が溶融破損して溶融した二酸化ウランが微粒子になって圧力管内に拡散され, 水蒸気爆発を起こしたためとされ, 2回目の爆発は, 様々に解釈されているが, 発生した水素や一酸化炭素の爆発という意見が有力とされている。この結果, 炉心の4分の1が炉外へ放出され, 原子炉建屋は, その役を果たせるような形を留めないほど著しく損壊した。

第19図¹²⁾に示すように, この原子炉は黒鉛減速軽水冷却沸騰型炉(RBMK 型)で, 旧ソ連が開発したものである。炉心は大きな黒鉛の塊の中に太い圧力管を多数(1,700本)垂直に通し, そのそれぞれの中に燃料集合体を挿入してある。この中に冷却水を通して加熱・沸騰させて蒸気をつくる。その蒸気は気水分離器(蒸気ドラム)で水分と分離され, 集められてタービンに送られる。この原子炉は熱中性子炉なので, 中性子の減速材が必要であり, これを黒鉛が担当している。圧力管の中で燃料の回りを流れている軽水はもっぱら熱輸送の役をしているわけである。この原子炉のように「減速は黒鉛, 冷却は軽水」という考え方で炉心を設計すると, わが国の発電に用いられている「減速も冷却も軽水」という軽水炉の体系と違って低出力時にボイド発生により正のフィードバックが生じる恐れがあった。この対策として, 出力の

大きさと増加割合を計測器で監視しており, 異常信号で200本以上の制御棒を自動挿入するスクラム装置が付いていた。出力20~30%でタービンの機械的回転エネルギー(慣性)を利用して所内電力を得る試験を行う予定であったが, キセノン効果で出力が1%まで低下してしまった。このため20%以下の出力での定常運転を禁じる規則(運転手順)になっていたにもかかわらず, 安全装置を外して, 多くの制御棒を引き抜いて出力を回復しようとした。この結果, 出力約7%でボイド発生に伴う炉心の核的不安定が発生し, 制御不能に陥った。この状態で制御棒を挿入すると一時的に出力が上がる特性となっていたため, スクラムボタンを押して数秒にして, 定格出力の約10倍に相当する30 GW の核分裂エネルギーに達し, 炉心が核的に暴走した。前述のとおり, 2, 3秒の間の2回の爆発を経て, 核的な暴走と蒸気爆発, 高温のグラファイトと水が反応してできた水素と一酸化炭素が爆発的に燃焼し, 放射性物質を成層圏まで吹き上げ, ウクライナからヨーロッパにわたる広い範囲に放射性物質を降下させた。周辺のベラルーシ・ウクライナ・ロシアの放射能汚染のレベルは深刻で, 人的な被害が多く発生した。しかし, その多くは事故の危険性を知らされず, 防護服やマスクなしに緊急対応させられた作業員や, 野菜や牛乳を飲んだ子供たちが犠牲になった。この具体的根拠として, チェルノブイリ事故時に緊急時対応した237名の情報, ベラルーシ・ウクライナ・ロシアの被曝被災者の情報が参考になる。

大規模な黒鉛火災の鎮火のため, 消防隊員を含めた緊急時対応作業員は, 防護マスク・防護服も着用せずこの緊急事態に対処させられた。その結果, 16 Gy から2.2 Gy の放射線を浴びた93人のグループから, 28人が約3ヶ月の間に死亡した(第3表)¹⁴⁾。20人以上の死亡の主因は火傷・呼吸障害であった。すなわち, 防護マスク・防護服なしの作業であったため, 多量に放出されたベータ線放出核種の皮膚付着および吸入・摂取による体外・体内での火傷が死亡の主因であった。また, 急性放射線障害として, 1人を除いて骨髄障害が生じ, 大部分の死亡者に腸障害が生じた。放射性物質の放出量に加え, 死者数・死亡原因でも, 福島第一原子力発電所の場合とは大きく異なっている。

国連原子放射線影響科学委員会の UN SCEAR 2000レ

第19図 チェルノブイリ原子力発電所の事故の要因¹²⁾

第3表 チェルノブイリ事故時の緊急事態作業員の容態¹⁴⁾

急性放射線病の程度	放射線被曝線量(Gy)	入院治療した人数*	死者の数	生存者の数
軽度	0.8 ~ 2.1	41	0	41
中程度	2.2~4.1	50	1	49
重症	4.2~6.4	22	7	15
極端重症	6.5~16	21	20	1
合計		134	28	106

*注:この他103人の緊急事態作業員に急性放射線障害は認められなかった

ポート¹⁴⁾によれば、事故から14年後の時点で広島・長崎の被爆者に早い時期から現れた白血病の増加は、緊急事態に対応した245名も含め、汚染地域の被爆者に認められていない。広島・長崎では、瞬時の強い放射線により感受性が高い造血器官の機能が損傷し、その後の機能不全により白血病が生じたと推定できる。一方、チェルノブイリ事故の汚染地域のように、弱い放射線の長期被ばくでは、人体の修復・免疫機構が機能し、障害が現れないことを示唆している可能性がある。同様に、被災地でのがんの増加の傾向は確認されていない。今後の推移を見守る必要があるが、広島・長崎で瞬時に1 Gy以上の被ばくをした生存者では10年後からがんによる死亡者が増えた。この事象も人体の修復・免疫機能に損傷が生じ、加齢と共にその損傷が蓄積されたためと推定できる。汚染地域の被ばくレベルが人体の修復・免疫機能が正常に動くレベルであれば、今後がんの増加が有意に観察されない可能性があり、今後、長期にわたる調査が必要である。

チェルノブイリ事故では、事故の発生が周知されていなかったため、放射性物質で汚染された広い地域で牛乳や野菜を摂取して放射性ヨウ素を体内に取り込んだ子供が多数いた。このため、UN SCEAR 2000レポート¹⁴⁾の発行時点で子供の甲状腺がんは、1,800症例が報告されており、その後も増えている。ガンマ線被ばくによる甲状腺腫瘍では通常10年以上の潜伏期間があるが、チェルノブイリ事故では5年後から急増しており、大陸内部の恒常的なヨウ素不足に起因する潜在的腫瘍もカウントしているとする専門家もいる。事故後の徹底した検診とその回数の増加により症例数が増加したとする見方である。日本人は十分にヨウ素を取っており、福島第一原子力発電所の事故では、ヨウ素中和剤の用意に加えて、震災直後にもかかわらず避難が早期に行われた。チェルノブイリ事故のような放射性ヨウ素による健康被害は現れないと推定される。

放射性セシウムについては、550 kBq/m²以上の放射性セシウムに汚染された強制移住地域の外に、移住せず住み続けている住民や戻ってきた住民も含めて、健康被害が現れていない。この理由として、対外に排泄されやすい放射性セシウムの生物学的半減期が100日程度であること、加えて、放射性セシウムは体内にある放射性カリウムも含めたカリウムと同様な挙動で体内の筋肉部分に均質に分布し、特定の重要な器官に対して集中的な影響を与えないことが挙げられる。

第20図に示すように、25年を経たチェルノブイリ発電所は石棺の老朽化に伴い、放射性物質が漏れ出ていることが指摘されているが、観光ツアーが可能なレベルまで線量が下がってきた。半径400 km以上に及ぶチェルノブイリ事故の汚染地域の情報に基づき、半径約40 km以内の低汚染の福島の25年後が予測できる。加えて、汚染

第20図 25年経ったチェルノブイリ原子力発電所¹⁵⁾

レベルが高い校庭の土壌入替えや、放射性セシウムが茎・根などへ濃縮しやすい植物の積極的な栽培等により、より好ましい未来へと復興することを祈念する。

被爆後、既に66年を経た広島・長崎の被爆者の健康への影響調査結果も貴重なデータである。1950年の時点での被爆生存者86,572人の固定集団に対して、1961年以降、死亡率の追跡調査が行われている。爆心から10 km以内から選ばれた集団であり、約10%の8,500人は1～6 Svを被ばくし、半数以上が爆心から2.5 km以内の生存者であった。実質被ばくしなかったと見なせる5 mSv以下と評価された36,459人を比較対象集団として、放射線被ばくした集団との相違が時間経過で検討・評価されている。1997年までの追跡により放射線被ばくによるがん死亡は450人と評価されており、この結果に基づき86,572人全員死亡時での被ばくによるがん死亡は800人と予想されている。第21図は被爆生存者86,572人の平均死亡時年齢の調査結果である。データは3 Gyまでの生存した被ばく者グループの寿命の中央値である¹⁶⁾。0.8 Gy以内の被ばくグループでは、最短寿命者では線量依存性が見て取れるが、中央値・最長寿命者では被ばくゼロと見なせるグループとの差は実質ないといえる。現時点でこ

Japanese atom bomb survivors, life expectancy with dose

The data of the joint Japanese/US study show no significant difference among groups from 0 to 0.8 Gray at median age of life span. No genetic effects were caused by radiation in the children born to the survivors.

第21図 被爆生存者86,572人の平均死亡時年齢¹⁶⁾

れ以上の詳細情報は持ち合わせていないが、次のことはいえる。瞬時の強い放射線に対して人体が耐えられれば、時間の経過と共に人体の機能は回復する。ただし、高線量被ばく者では、加齢と共に残されていた障害の蓄積が進み、いわゆる晩発効果が生じがんで寿命を終えるケースが増える。この結果、寿命の中央値で被ばくゼロのグループと被ばく3 Gyのグループとで約5歳の差が生じた。

福島第一原子力の事故では、広島・長崎のような瞬時の高線量被ばくはない。また、チェルノブイリ事故に比べ十分低い被ばく線量である。福島第一原子力発電所の計画避難区域や飯館村など線量が比較的高い地域において、放射線障害による住民の健康被害が出ないことはもとより、広島の被爆者を精神的に苦しめた差別や偏見、風評被害の発生防止が極めて重要な課題である。

最近、iPS細胞の研究の進展に伴い、DNAの修復メカニズムが明らかになりつつあり、日本経済新聞の特集記事がある¹⁷⁾。〈p53遺伝子〉が「ゲノムの守護神」と呼ばれ、がん細胞を抑制する遺伝子で、DNAの損傷があると遺伝子は修復したり、細胞を増殖させる〈p21遺伝子〉に働きかけ、がん化を防止する。〈p53遺伝子〉が活性化されることで、がん細胞の増殖が抑制される。DNAが1本切断された場合の修復率は99.99%修復、2本切断は90%修復、修復できない細胞は消滅する。年齢と共にこの機能が低下するとがんが発生すると考えられており、今後の研究の進展が期待される。このように生物が進化の過程でDNAレベルの修復・がん化防止メカニズムに基づけば、適切に管理されていれば、事故による放射線の影響で将来がんになる住民・作業員は極めて少ないと見るのが妥当である。

3. ヨーロッパでの過酷事故対応緩和措置

福島第一の事故の最大の教訓は、ひとたび大事故が発生すれば、賠償金、除染・放射性物質や建屋の撤去費用、風評被害保証金等の災害に伴う金銭的負担が極めて大きくなることである。

軽水炉では万一事故が発生しても、それが拡大するのを防ぐために、いくつもの多様な機器が何重にもバックアップとして設計され設置されている。しかしスリーマイル島事故や今回の福島第一原子力発電所の事故もそうであるが、機器の故障や津波をきっかけに、いくつかの不具合が重なり、その結果、設計で考えられる範囲を超え、最終的に炉心の溶融など大きな損傷に至る事態が発生する可能性がある。このような事態を、特に「シビアアクシデント(過酷事故)」と呼ぶ。原子炉格納容器は、スリーマイル島の事故では、最後の「砦」として大きな威力を発揮した。格納容器がないチェルノブイリ事故では放射性物質を世界中にまき散らした。

しかし、福島第一原子力発電所では内圧上昇により

リークや破損が生じた。例えば、格納容器の圧力が高くなって大破損に至る前に、フィルタを通して放射能を除去してからベント(Filtered Vent)で圧力を下げて破損を防止する¹⁸⁾とか、崩壊熱で格納容器の圧力が過度に上昇しないように格納容器を水や空気です静的冷却系などの方策が必要であった。過酷事故の拡大を防いだり、事故の影響緩和に積極的に取り組むこと、それらのために必要な方策を準備することを過酷事故対応緩和措置(AM: Accident management)と呼ぶ。

以下に述べるスイスのベツナウ発電所(PWR)ではTMI-2事故後に第4表に示す11項目の安全性・信頼性向上プロジェクトを実施した¹⁹⁾。この中のFiltered Containment Venting Systemがヨーロッパ諸国でチェルノブイリ事故の後、原子力発電所の運転再開の切り札となった。第22図に示すフィルタ付ベントシステムである。国民投票の国の住民として、このような一連の対策に対する検討と合意の上で、住宅地周辺にある原子力エネルギーの積極利用を進めている。第23図はこの発電所のフィルタ付ベント設備の系統図である。シビアアクシデントが発生しても格納容器圧が設計圧を超える前に、電力なしで高効率な放射性物質除去機能があるこの装置を作動させる。避難不要なレベルで放射性物質を大気中に放出できれば、格納容器の健全性が維持できると

第4表 TMI-2事故後の安全性・信頼性向上プロジェクト¹⁹⁾

- New reactor pressure vessel relief system (Post TMI)
- Thermal H₂-recombiners inside containment (Post TMI)
- Replacement of refueling water storage tanks
- Compact simulator
- Provision of a full-scope simulator located offsite in the USA
- Bunkered emergency heat removal system (NANO project)
- Seismic requalification of mechanical/electrical equipment
- Filtered containment venting system (SIDRENT project)
- Analysis for pressurized thermal shock of RPV
- Separation of station load transformer area
- Additional emergency feed water system (ERGES project)

第22図 フィルタ付きベントシステム¹⁸⁾

第23図 スイスのフィルタ付きペントシステム¹⁹⁾

共に、避難することなしに周辺住民の健康被害と環境被害を防止できる。万一事故が起こっても地元には迷惑をかけない。これが原子力発電所の究極の安全設計の目標であるべきと思う。

第24図にスイスベツナウ発電所と周辺の住宅地を示す²⁰⁾。365 MWeの原子炉2基が設置されている。この発電所では、第25図に示す原子力地域熱供給事業も行っている²¹⁾。日本の緊急避難地域より狭い、発電所から半径5 km 圏の約2万人が冬場の暖房、通年の給湯にこの

第24図 スイスのベツナウ発電所の地域共生²⁰⁾

原子力地域熱供給主配管ネットワーク: 一般住宅、公共施設、商業施設、工場、研究所そして温室として農場が利用
約9km X 11kmの約1.8万人が利用:
主配管長 35km

第25図 ベツナウ発電所からの地域熱供給²¹⁾

システムを利用している。利用契約者の80%が一般家庭である。学校などの公共施設、商業施設、研究所・工場、農場施設(大規模温室)も地域の経済活性も視野に入れて積極的に利用している。1815年から中立国を維持し、第一次大戦、第二次大戦に巻き込まれることなく平和を維持しているスイス国民は、シビアアクシデントへの対策・心構えも議論した上で、エネルギー安全保障・環境・二酸化炭素低減対策にも配慮して原子力を選択している。

4. INESの暫定評価レベル7の判定について

原子力安全・保安院は、福島第一の事故の評価を国際原子力事象尺度(INES)で最も深刻なレベル7に引き上げた。チェルノブイリ事故では、原子炉が爆発で破壊され大規模な黒鉛火災が生じたため、ヨウ素、セシウムに加えて3~4%のウランなどの燃料を含む多量の放射性物質がヨーロッパ諸国も含め広い地域にばらまかれた。ヨウ素やセシウムなどの揮発性の放射性核種ではチェルノブイリ事故の約1/10、INESで規定している全核種での評価を行えば、ウランなどの燃料の環境への放出がない福島では約1/50と推定され、INESの基準を定めたIAEAからもINESのレベル7に異論が出た。ロシアのロスアトム社は、原子力安全・保安院のレベル7の評価は過剰との見解を示した。すなわち、レベル7は、周辺の住民の健康に深刻な被害が及ぶような事故のレベルであり、発電所で復旧作業に従事している作業員の被ばく線量も許容線量限度に達しておらず、健康被害は生じない。炉心の損傷状況からレベル5、最大でも6が妥当との判断である¹³⁾。チェルノブイリと同じレベル7と判定されたことで、例えば、会津若松市では修学旅行や観光客が減ったり、海外からの留学生が激減するなど、周辺市町村での風評被害などが報告されている。

IV. 福島第一発電所の事故の要因分析 と今後の対策

1. 事故の要因分析

今後、詳細に調査・分析は必要であるが、深層防護の観点から、現時点での公表データから今回の事故を分析すると、事故の主な要因は、以下の通りと考えられる。

(1) 長時間の外部電源喪失: 青森県から茨城県に至る東日本沿岸に立地する広域の原子力発電所や火力発電所が地震あるいは津波によって、運転停止となり、福島第一発電所敷地内の送電線の鉄塔の地震による倒壊もあり、外部電源の復旧に長時間を要し、この間に制御盤やタービン動高圧給水ポンプのバッテリーも上がってしまったこと。

(2) 海水のみに依存した冷却系の共倒れ: 敷地高さを4~5mを超えて流入した津波により、タービン建屋内に海水が浸入し、多くの電気機器、非常用ディーゼル

発電機が冠水して機能停止したほか、海水冷却系のポンプモータなども冠水して故障したこと。

(3) 炉心冷却喪失事象の発生： 全交流電源喪失および隔離時復水器やタービン動高圧注入ポンプの機能停止により、炉心への注水冷却手段が一時的に喪失し、高温になった燃料被覆管と水の化学反応により大量の水素が発生し、さらに燃料ペレットの一部溶融に伴いヨウ素やセシウムなどの核分裂生成物の揮発成分も格納容器内に放出され、シビアアクシデントの発生である。

(4) 過酷事故対策の炉心注水の遅れ： シビアアクシデントマネジメント(過酷事故緩和対応措置)として速やかに炉心に注水すべきであったが、敷地内の淡水の長時間注水による枯渇、水源とするダムからの導管の損傷などによる淡水の確保の遅れから海水注入となったが、電源車の確保や津波による瓦礫を避けて消火ポンプへのホースの敷設に時間がかかり、炉心注水喪失時間が数時間に及んだこと。

(5) 格納容器過圧と水素対策不足： 格納容器の内圧破損を防ぐための格納容器のベントあるいは、格納容器の一部破損により、(3)で発生したヨウ素やセシウムと多量の水素が放出され、水素爆発の原因になったと考えられること。非常用水素処理系が電源喪失により機能しなかったこと。

(6) 使用済み燃料プール冷却： 使用済み燃料プールの水位確保ができず、使用済み燃料プールの燃料被覆管も一部損傷した可能性があること。

2. 安全対策の基本的な考え方

原子炉は、潜在的に炉心に核分裂生成物を閉じこめているため、地震や津波などの外的事象に対しても①炉心の冷却を確保する、②仮に異常が起きても事故にさせない、③仮に事故が起きてもその影響をできるだけ小さくする、という考え方(深層防護あるいは多重防護)に基づき、安全対策を何重にも行う必要がある。

上記の事故の要因分析に対して、深層防護の観点から対策を取るとすれば、上記の深層防護の考え方に沿って安全対策を講じる必要がある。具体的にまとめると、下記の6点である。

(1) 長時間の外部電源喪失対策： 長時間の外部電源喪失に対する備えを強化する。水力や小型火力なども含めて複数の電源を確保する。敷地内の鉄塔を含む架線の地震・津波対策を取る。

(2) 海水のみに依存した冷却系の共倒れ防止： 敷地内や炉心冷却を確保する上で重要な施設や電源盤などへの海水の浸入を防ぐ堤防または防水壁・防水ドアなどの設置を行うと共に、海水以外のヒートシンクとして空冷の非常用電源や電源車、崩壊熱除去系を準備する。

(3) 炉心冷却喪失事象の発生防止： 仮に重要な設備が壊れて、電源や冷却機能が失われたとしても、蒸気ター

ビン駆動ポンプによる注水により、燃料の損傷を起こさないようにする。蒸気タービンには小型の発電機を取付け、制御用のバッテリーを充電可能とする。深層防護の観点からは地震による配管破断(LOCA)と外部電源喪失・ヒートシンク喪失の両方の観点から対策をとること。

(4) 迅速な過酷事故対策による炉心注水： 可搬式電源車の確保と非常用電源へのケーブル接続部の一部常設化、消火ポンプ・送水ポンプ・消防ホースなどの保管とアクシデントマネジメントの手順に従った注水訓練の実施。一部注水配管の常設化すること。蒸気発生器や炉心への注水訓練を実施し、問題点の抽出と対策を取っておくこと。

(5) 格納容器過圧防止と水素対策： 揮発性のヨウ素やセシウムを除去する機能を強化するとともに、水素爆発防止対策を取る。欧州で採用になっているフィルタードベントや格納容器内に設置する触媒式再結合器などの採用を抜本的な安全対策として中長期的に取り組むべきと考える。

(6) 使用済み燃料プール冷却： 複数の注水手段の確保と共に空冷式の冷却器や触媒式再結合器の設置などを中長期的に取り組むべきと考える。

V. まとめ

今回の福島原発事故は、複数プラントでの過酷事象が同時進行するという想定をはるかに超えた未曾有の事故であり、この状況はマスメディアで逐一報道され、多くの国民は原子力事故の凄まじさと放射能汚染の恐怖を身をもって味わうこととなった。しかし、冷静に各発電所の事態を分析してみると、希望の光が見える。敷地高さ14.8mの女川原子力発電所は、市内が津波による大きな被害を受けたにもかかわらず、津波の被害を軽微に食い止め、冷温停止を達成した。津波は海水の浸入であり、これを物理的に食い止めることは可能であると考えられる。福島第二サイトも非常用DGが原子炉建屋内に設置されていて、さらに浸水した海水ポンプモータも交換することにより冷温停止を達成した。

シビアアクシデント時に格納容器圧が設計圧力を超える前に、電力なしで高効率な放射性物質除去機能があるフィルタ付きベントシステムを作動させる。避難不要なレベルで放射性物質を大気中に放出できたとすれば、格納容器の健全性が維持できると共に、避難することなしに周辺住民の健康被害と環境被害を防止できる。地震・津波などの外部事象対策として、このような設備が日本ですでに設置されていたとしたら今回の災害の推移はどう変わっていただろうか。原子力災害は軽微で済んでいた可能性が高い。深層防護の観点から、いかなる災害に対しても、たとえ炉心が損傷しても、発電所の周辺住民にご迷惑をかけないという固い決意を持って原子力発電

所の安全設備を総点検すべきである。原子力災害軽減・防止の観点から、この固い決意を持って安全性強化のための各種の検討を原子力学会として早急に進めるべきである。この反省のもとに地元の信頼を回復し、世界に通用する次世代の原子炉が生まれ、我が国の原子力が復興することを期待したい。

最後に、3月11日の地震直後から未曾有の事態のなかで、原子力発電所の復旧作業に当たっている現地の皆様に心から深謝すると共に、津波の被災に加えて原子力発電所の事故によって長期の避難をされ、生活の基盤を失われてしまった皆様に対し、原子力の安全研究を推進してきた者として、心からお悔やみとお見舞い申し上げます。今後は全力を挙げて原子力発電所の安全性の向上と社会に対する信頼回復、将来の地球環境保全と人類のエネルギー確保の解決に向けて邁進する所存である。

なお、事象分析に当たり、益田恭尚、角南義男、林喜茂、栢田康夫、川合将義、藤井靖彦、佐藤修彰、金氏顕氏をはじめとする原子力学会シニアネットワーク有志による福島復興チームFからの提言を3月28日付にて公開した²²⁾。また、テレビ朝日原発班の松井康真氏からは福島第一原発のプレス事項の時系列一覧をいただいた。ここに謝意を表する。福島第一原発のプレス時系列一覧を、(株)エアフォートサービス社からは高精細な航空写真の掲載許諾をいただいた。ここに謝意を表する。

— 参考資料 —

- 1) NISA, JNES, 「2011年東北地方太平洋沖地震と原子力発電所に対する地震の被害」, (2011.4.4).
- 2) NISA, JNES, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Pacific Earthquake and the seismic damage to the NPPs.
- 3) 東京電力, 「東日本大震災における原子力発電所の影響と現在の状況について」 「東日本大震災における原子力発電所の影響と現在の状況」 (2011.4.15).
- 4) 東京電力, 「東日本大震災における原子力発電所の影響と現在の状況」 (2011.4.26).
- 5) 坂下ダム: http://metalwings05.fc2web.com/dam/07_fukushima/sakashita/index.html
- 6) Y. Oka, "TEPCO's Nuclear Power Plants suffered from big earthquake of March 11", (2011.3.23).
- 7) 東京電力, 「福島第一原子力発電所3号機, 新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」 (2010.6.17).
- 8) 東京電力, 「福島第一発電所3号機, 安全上重要な建物・構築物及び機器・配管系の耐震安全評価」 (2010.7.16).

- 9) 小林敏夫, 山口菊雄, 清水洋二, “東京電力株福島第一原子力発電所3号機の建設”, 東芝レビュー, 31[12], (1976).
- 10) 一本忠治, “BWR 発電所の配置計画”, 東芝レビュー, 24[1], (1969).
- 11) 原子力学会編, 「原子力がひらく世紀」, (2004).
- 12) 日本原子力文化振興財団, 原子力・エネルギー図面集, (2011).
- 13) 原子力産業新聞, 第2571号, (2011.4.21).
- 14) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Vol. II: Effects, http://www.unscear.org/unscear/publications/2000_2.html
- 15) Wikipedia: <http://ja.wikipedia.org/wiki/チェルノブイリ原子力発電所事故> (2011).
- 16) D. Lawson, Engineering Disasters-Lesson to be learned, ASME Press, New York, (2005).
- 17) 日本経済新聞, 「iPS細胞がん化を防げ」, iPS細胞特集記事, (2009年9月20日朝刊).
- 18) M. Gavrilas, et al., Safety Features of Operating Light Water Reactors of Western Design, CNES, (2000).
- 19) NOK AG, Beznau NPP Information Package, 2006 Edition.
- 20) REFUNA AG, REFUNAパンフレット, 1994 Edition.
- 21) 杉山憲一郎, 他, 「原子力地域熱供給, スイスの実績」, 日本原子力学会誌, 48[2], (2006).
- 22) 原子力学会シニアネットワーク有志, 「福島復興チームFの提言」, <http://www.soc.nii.ac.jp/aesj/snw/メニュー福島発電所震災関係>.

著者紹介

奈良林 直(ならばやし・ただし)
北海道大学大学院工学研究院
(専門分野/関心分野)気液二相流, BWR
安全研究, パッシブ機器, 保全工学

杉山憲一郎(すぎやま・けんいちろう)
北海道大学大学院工学研究院
(専門分野/関心分野)シビアアクシデント, 水蒸気爆発, 溶融燃料 IVR