福島第1原発事故の初期経過

大阪市立大学大学院医学研究科 木村政継

1. はじめに

福島第1原発事故は INES (International Nuclear Event Scale: 国際原子力事象評価尺度) 暫定評価7となり、チェルノブイリ原発事故と並んで世界的にも最悪の事態となった。

この事故の真の経過は原発事故調査委員会等で明らかにされ、環境汚染や生物影響などもそれぞれの専門家がより詳細な解析を今後提供すると思われるが、この最悪事故の全体像のあらましを掴み、どこにどのような問題点があったのかを考えるべく分析を試みる。情報は部分的だったり、後になって変更されたりするため、誤った解釈や判断が入る余地があるかも知れない。

2. 事故の展開のあらまし

詳細な経過は別として、今回の事故の展開は 次の3期に分けることができる。

第1期は3月11日から3月18日までである。 巨大地震発生後、1号機が最初に炉心溶融から 水素爆発という経過をたどったあと、事態は2-4 号機へと次第に拡大し、漏洩放射能と放射線線 量率も次第に上昇していった。作業員の立入す らできなくなれば収拾が不可能になる事態も想 定された事故拡大期が第1期である。

この負の連鎖を断ち切ったのは19日末明の東京消防庁による3号機燃料プールへの本格注水の成功である。これで敷地内の放射線線量率は

わずかながら下がり、以後の作業がやりやすく なってそれまでの場当たり的にみえる対応から、 積極的に介入して事故を収束させていく方向へ 切り替わった。外部電源も受電まで復旧し、早 期の収拾が期待された。原子炉は崩壊熱の除去 が唯一最大の問題であり、原子炉と核燃料プー ルを「冷却循環水を用いて冷温停止状態にする」 ことができたら一応の収拾となるが、それには、 交流電源を用いるECCS (Emergency Core Cooling System:緊急炉心冷却装置)など既存 の設備の活用が欠かせない。3月24日、これら 既存設備の配電盤に外部電源を接続しようとし て、タービン建屋地下に入った作業員が高放射 能汚染水に遭遇し、足の皮膚にβ線熱傷を引き 起こす被曝をした。これで配電盤の水没が明ら かとなり、既存の設備が使えないため早期復旧 は断念せざるを得ないことになった。即ち、第 2期は3月19日から24日までであり、事態は 着実に改善し、国民が早期復旧を期待した時期 である。

そして、3月24日以降が、超長期戦を覚悟する第3期である。原子炉から出る崩壊熱は大きいため、大がかりな除熱の設備(熱交換設備)や大がかりな高濃度汚染水の除染・再循環設備(6月20日頃本格稼働)等の新設工事のため長期化することになった。大量の地下汚染水の処理が残っているが、事故の進展は3月下旬で済んでおり、巨大な余震などの不測の事態がない限り収束は時期の問題である。

3. 原子炉の崩壊熱

火力発電は停止すると発熱も止まるのに対し、 原子力発電は核分裂停止後も残留熱が残る。残 留熱(崩壊熱)を適切に除去できるかぎり原子 炉は安全であるが、この崩壊熱の除去機能が一 時的に失われ燃料棒が過熱状態になった結果、 今回の事故となった。

原子炉は通常運転では、熱出力の 1/3 を電力に変え残り 2/3 (~67%) の熱を排熱として海水で冷やしている。原子炉を緊急停止して核分裂を止めても、原子炉内には生成された放射性物質による崩壊熱が残る。

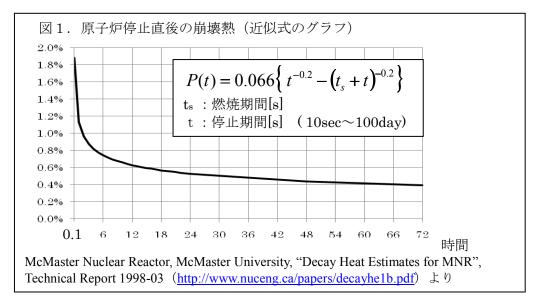
崩壊熱は、停止直後は熱出力の 5-10% といわれるが、初めの 1 日で 0.6%程度にまで減少する。一見少なく見えるが、元の発熱量が膨大であるためこれは小さい量ではなく、福島第 $1 \cdot 2$ 号機(熱出力 238 万 k W)の場合で 14000 k W、毎時 22 トンの水 $(100^{\circ}C1$ 気圧)の気化熱に相当し、冷房能力 2.8 k Wのエアコン $(8\sim12$ 畳目安)で除熱すると 5000 台必要である。

燃料棒は4mほどの高さの燃料集合体として 装荷され水中にあるが、何らかの原因で冷却喪 失が起こると原子炉は過熱して数時間で燃料集 合体が露出し、露出部分で燃料棒が 1000℃以上 位になると被覆しているジルコニウム合金(ジルカロイ)が酸化して水蒸気から酸素を奪い、水素ガスが発生する。温度がジルコニウムの融点(1850℃)を超えると、内部の核燃料ペレットが露出し落下する(炉心損傷の開始)。また、ハフニウム(融点 2230℃)が中性子を吸収する制御棒に使われ、核燃料ペレットは 2800℃位で溶融する(炉心溶融)。

崩壊熱の時間変化を、停止後 10 秒~100 日の 範囲で良く表す簡単な近似式がある(図1)。

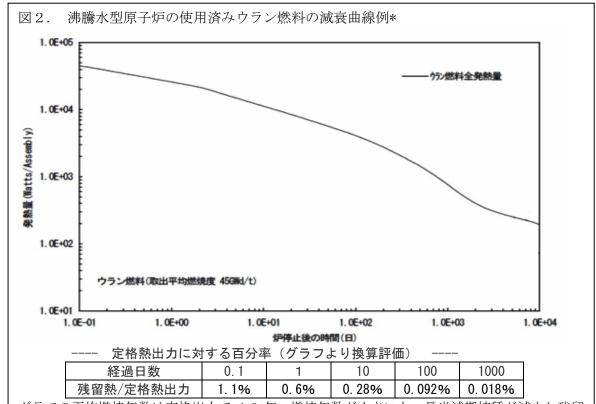
これによると、特に、停止直後から1日位までは発熱量が多く、この時間帯に冷却喪失した1号機はとりわけ過酷な条件に置かれたことになる。

崩壊熱の除去のために種々の緊急炉心冷却装置があるが、安定的に冷却するには、循環冷却水を除熱する2次冷却系と大きな交流電源が必要である。



なお、長期的な冷却曲線は、沸騰水型(BWR) について、典型的には次のグラフ(図2)で与え

られ、10 日目位までは比較的早く減衰するが、減衰は次第に遅くなる(両対数目盛に注意)。



グラフの平均燃焼年数は定格出力で 4.9 年。燃焼年数が小さいと、長半減期核種が減少し残留熱は多少早く減衰する。*島根原発 2 号機 (熱出力 243.6 万 kW, 燃料集合体数 560 体)の資料 (http://www.pref.shimane.lg.jp/genan/puru.data/fuzoku.pdf より、「図 3 - 1 MOX 燃料とウラン燃料の崩壊熱 出典:沸騰水型原子力発電所 MOX 燃料の貯蔵について:平成 11 年 8 月株式会社日立製作所」を改変した。

4. 地震による全外部電源の喪失

5月23日、東電が原子力安全保安院(以下、保安院)に提出した書類から、東北地方太平洋沖地震(2011.3.11 14:46)に伴って発生した津波でなく、地震そのものによって、全6系統すべての外部電源が喪失したという事実が明らかにされた。

鉄塔が倒壊し5号機と6号機の回線が不通となったほか、送電線の地絡で3-4号機用の回線が(1系統は工事中)遮断され、更に、新福島変電所の遮断器・断路器等の損傷で1号機と2号機の回線

が遮断された。これらは、外部電源を所内に引き 込むまでに 1 週間以上を要するほど大きな損傷で あり、津波の影響も重なって受電まで 10 日ほどを 要した。

同じように震度 6 強の地震に見舞われながら、福島第 2 原発と女川原発では全外部電源喪失に至らなかった。原子炉に設置された加速度計の示す最大加速度データ(表 1)では、福島第 2 は同程度、また女川はむしろ強い揺れを観測しており、福島第 1 が特に激しく揺れたわけではない。また、1985 年 9 月以降に運用された東電の柏崎刈羽原発

では、新潟県中越沖地震の際 680 ガル(東西)も揺れたが影響はなかった。

基準値との比較でみると、柏崎刈羽では想定の 2.5 倍もの激しい揺れであったが、福島第1では 想定をやや超えた程度の揺れであり、耐震基準が 福島第1で極端に甘かったわけではない。地震の 破壊力は、振動周期などのファクターも関係する ので詳細な分析を待ちたいが、運転開始が最も古 い福島第1は、外部電源設備の耐震性が最も低か ったと言えるだろう。古い原発の外部電源設備の 耐震性は再調査する必要がある。

表1 原発における東北地方太平洋沖地震の揺れと外部電源喪失

原発名	水平最大加速度 (炉·方向)/基準値	垂直最大加速度 (炉)/基準値	全体の外部電源	運転開始
福島第1	550 (2号·東西)/438	302 (2号)/420	全喪失	' 71–' 79
福島第2	254 (1号·南北)/434	305 (1号)/512	1回線残る	' 82–' 87
女川	607 (2号·南北)/594	439 (1号)/451	一部半日喪失	' 84–' 02
柏崎刈羽	680 (1号・東西)/273		問題なし	' 85. 9

いずれも原子炉建屋基礎での観測値。柏崎刈羽は2007.7.16新潟県中越沖地震の際の値 単位:gal (cf. 重力加速度=980gal、垂直に980gal以上なら物が飛び跳ねる)

数値は、政府 6/7 公表、原子力安全に関する I A E A 閣僚会議に対する日本国政府の報告書

(以下、「IAEA報告書」と略す) 表 III-2-1, III-2-2, III-3-1 より

5. 津波の影響

福島第1原発は13mという巨大津波に襲われ、 非常用発電機が冠水して、6号機を除いて全交流 電源喪失(SBO: Station Black Out)の状態となった。また、屋外に設置されていた2次冷却系海 水ポンプが破損して残留熱除去系(炉内残留熱の 除去)や補機冷却系(水冷式非常用発電機の冷却 など)が機能を失い、オイルタンクも流出した。

もし非常用発電機が、タービン建屋でなく、女 川や福島第2のように原子炉建屋内に置かれてい たら、水没を免れたとの報道もあったが、事はそ れほど単純ではない。

原子炉建屋でも貫通部から海水が浸入しうるので、福島第1の6号機では2台の水冷式非常用発電機が原子炉建屋内の地下1階に置かれていて冠水した(1台の空冷式が地上階に置かれて冠水せずSBOは免れた:IAEA報告書[表1の中に正式名称記載]のページIII-30、以下同様)。東海第2では海水ポンプ室の貫通部の封止工事を津波対策として行い、冠水を免れた(工事完了部分のみ:III

-50)。水冷式の非常用発電機は、本体が冠水を免れても、補機冷却系海水ポンプの浸水によって停止した(女川2号機:Ⅲ-47)ので、空冷式の方がより安心である。福島第1の5・6号機が、生き残った1台の空冷式非常用電源により事故に至らず回復したことから分かるように、交流電源の確保は大切である。

外部電源喪失と非常用発電機の冠水で SBO に至っても、炉心の冷却は隔離時冷却系(以下、RCIC)や非常用(隔離時)復水器(以下、IC)で行える。しかし、これ等の装置は弁の開閉や計器の計測にはバッテリー電源が必要で、使用時間に制限がある。この最後の砦であるバッテリー電源の一部が冠水により使えなくなった。一部は後に自然に復旧したようだが、津波直後にICが動かず、1号機が早くメルトダウン(炉心溶融)する引き金となった。

タービン建屋地下に置かれていた配電盤の水没 はさらに深刻な問題で、電動ポンプを使用する既 存の注水設備がまったく使えなくなったため、交 流電源が回復しても事故の収束に繋がらないこと になった。屋外に設置されていた 2 次冷却系海水ポンプが津波で破損してしまった (Ⅲ-30) ことも、大容量の熱交換器を新設するなどの必要性が生じ、超長期化の要因となった。

津波の威力は燃料タンクや露出した配管などを 破壊したが、建物を壊すほどではない。建屋に入 れて津波の破壊力を避け、更に、防水扉、配管貫 通部の封止、床面より高い所への設置などで、海 水が入らず、少し位入っても浸からないようにす ればかなりの津波対策になる。2次冷却系海水ポンプは建屋に収め、非常用発電機は空冷式を導入し、非常用発電機や配電盤は密閉性を高めた原子炉建屋の中の高い位置に置き、オイルタンクなど守るべき他の設備は水没しない高台に設置するなど時間のかかる施策もあるが、高い防潮堤は必須ではない。津波対策の主要部分は防水であり、発想さえあれば現状の原発でかなり改善できる。

表2. 福島第1原発・1-4号機の緒元

₹2. IIIII/// I	////	77 1000 0 2 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 1	
福島第1原子力	沸騰水型軽水炉 (BWR-Mark 1)		
発電所	1 号機	2-4 号共通	
熱出力(万 kW)	138	238. 1	
電気出力 (万 kW)	46	78. 4	
燃料集合体数	400 体	548 体	
ウラン装荷量	69 トン	94 トン	
圧力容器*全高	約 20m	約 22m	
同重量	440 トン	500 トン	
内径	ϕ 4.8m	$\phi \ 5.6 \mathrm{m}$	
格納容器全高	約 32m	約 33 m	
圧力抑制プール 水量	1,750トン	2,980トン	
全交流電源喪失 時の冷却*	IC HPCI ADS	RCIC HPCI ADS	
燃料貯蔵プール	1,020 m³	$1,425~\mathrm{m}^3$	

*交流電源喪失時の ECCS

IC 隔離時復水器 (非常用復水器) (Isolation Condenser) 圧力容器内の高圧蒸気を除 熱して水に戻し、炉心に戻す装置

RCIC 隔離時冷却系

(Reactor Core Isolation Cooling Sys.)圧力容器内の高圧蒸気を使ったタービン駆動ポンプで、除熱とともに水を炉心に注入する装置

HPCI 高圧注水系

(High Pressure Coolant Injection Sys.) 圧力容器内の高圧蒸気を使ったタービン駆動ポンプで水を炉心に注入する装置(福島第1のHPCIはタービン駆動)

ADS 自動減圧系

(Automatic Depressurization Sys.) 自動的にウエットウエル (圧力抑制プール液相) に逃がす、圧力逃がし弁 (SR弁: Safety Relief Valve)など

・IC、RCIC、HPCIは交流電源不要であるが、 弁の開閉等でバッテリー電源を必要とする。1号機と 2号機のHPCIはバッテリー冠水のため?動かず。

6. 福島第1原発事故・1号機の初期経過

福島第1原発事故は、重大事態に至らずに回復 したものを除くと、1号機から4号機までの事故 である。原子炉の緒要素は表2にまとめた。

今回の事故では、1号機が早期に原子炉の冷却能力を失ってメルトダウンし、3号機、2号機がそれに続き、そして、停止中だった4号機にも爆発が起こった。2、3号機は核燃料露出まで30時間以上の余裕があり、もし1号機の事故がなければ2-4号機の事故は回避できた可能性もある。この観点から、1号機で事故の初期経過を追う。

1号機は、3月11日14時46分の地震直後、自動でスクラム(緊急停止)に成功し、原子炉は核分裂を停止した。外部電源が止まったが非常用発電機で交流電源は維持されたので、交流電源を用いるECCSとして高圧炉心スプレー系などは使用できたが必要性がなく(起動条件に達せず)、やがて津波による全交流電源喪失で使用不能になった(配電盤の水没で使用不能継続)。

14:52 隔離時復水器(以下、IC)が自動で立ち上がった。1号機には他機にある隔離時冷却系(以下、RCIC)がなく、ICが備わっていた。ICは高圧蒸気を除熱し、復水した水を炉心に戻

すだけの装置で、炉心の水の維持はできるが増や せない。ICは津波の来襲まで正常に動いており、 炉心冷却が急すぎたので人為的に断続運転を行っ ていたところ、15:30 より閉状態になり、15:37 の津波による SBO (全交流電源喪失) と同時に操作不能となった。

地震直後の1号機原子炉圧力の記録チャート (図3)を見ると、IC作動中を示す右肩下がり の線が(午後)3時ちょうどに止まっている。

データ公表の記者会見(5月17日)で、この停止を誰が行ったか調査する必要があるなどと発言していたが、3時過ぎ(円内)同じ傾きの右肩下がり線が3本続いており、これは急冷を避けるためICが自動で(又は手動で)オンオフを繰り返していただけの正常な動きであるという推定が自然である。わざわざ問題視して、記者の関心をそらせていたとしか思えない。後日、ICのオンオフが手動で行われていたと発表された。



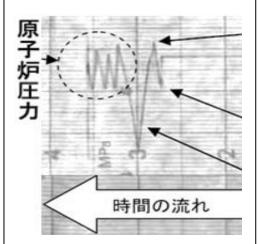


図3.1号機の地震直後の圧力記録 東電5/16公表:110516aa.pdfより抜粋

図 5.1 号機ICの操作実績(3 月 11-12 日)

10 自動起動

18:10	IC(A)系 2A. 3A.弁開/蒸気発生確認
18:25	1C (A) 系 3A 分開
21:19	ディーゼル駆動消火ボンブ(D/D-FP) からのラインナップ実施
21:30	IC 3A 弁開
21:3a	D/D-FP から供給中
01:48	D/D-PP を確認したところ、燃料切れ でなくポンプ不具合により供給停止

各種操作実績取り纏め(東電 5/16 公表: f1_7_Sousajisseki.pdf) p3 より抜粋

D/D-FP (ディーゼル駆動消火ポンプ) …

復水貯蔵槽(ICの動作で熱くなる)に水を補給 するポンプ

18:25 の操作…

14:52

2系統のICのうち1系統を閉じたもの

東電は5月16日に地震後の初期操作データを公表した(図4と図5)。図3には、15:34頃、ICの弁を閉じた状態で記録計がダウンした痕跡があ

るが、これ以降、ICも操作不能となってIC停止状態が続き、18時10(又は18)分まで3時間弱の冷却喪失となった(図4/図5)。原子炉停止直

後のこの3時間の原子炉発熱量は40万kWh(水65トンの気化熱相当)という膨大な量であり、自動圧力逃がし弁(SR弁)が働いて原子炉水位が低下し、燃料棒が18:00に露出した(東電のシミュレーション:図6左)。

18:10 (又は18) に I Cの弁を (バッテリーの 自然回復により?) 開き、蒸気発生が確認されて 原子炉の冷却が再開した。ICの放熱先の復水貯 蔵槽に水を補給するディーゼル駆動消火ポンプ (D/D-FP: Diesel Driven Fire Pomp) も作動し、 これが 12 日 1:48 まで動いていたので、18:10 ~翌日1:48 の間はそれなりに冷却が行われ、ま もなく冷却喪失となったというのが最も妥当な経 過と思われる。しかし、この場合の格納容器圧力 変動のシミュレーションが実測記録と著しく異な ってしまうため、これらの操作実績にも関わらず、 東電は「ICは津波到達以降、全く機能喪失して いた」とする仮説を最有力としている(政府6/7 公表: IAEA報告書·添付資料、p8)。燃料棒 全露出(計算値)は、19:30(ICが機能した場 合 24:00) となるが、冷却喪失時間が 14 時間と 長い(後述)のに原子炉損傷があまりひどくない ように見えるという疑問が出てくるので、ICが ある程度機能した可能性は捨てきれない。

1号機には、もう一つ、炉心の蒸気で起動する 高圧注水系(以下、HPCI)があったが、これ もおそらくバッテリーの水没が原因で使用できな かった。HPCIを使えば、炉心注水により間接 的に冷却ができた。 2,3号機においてはRCI CとHPCIが 70時間または 35時間動作してお り、もし、1号機にICでなくRCICが備わっ て正常動作していたら、炉心注水により燃料棒の 露出を遅らせることができただろう。ICもHP CIも動かなかったために、1号機で深刻な事態 が非常に早く進行することになった。

格納容器内圧(設計 4 気圧)が12 日午前2時現在で6 気圧(地震被害情報9報)、午前4時30分現在で8.4 気圧(同10報)と伝えられ、格納容器破壊の可能性が迫っていた。IAEA報告書・添付資料(図6)によると、12 日未明のこの頃、圧力容器圧力が、0.9Mパスカル=9 気圧(図6,中)を示して格納容器圧力に近くなっており、メルトダウンによる圧力容器損傷が起こり始めたと思われる(シミュレーションでは地震15時間後の12日6:00前に圧力容器破損)。

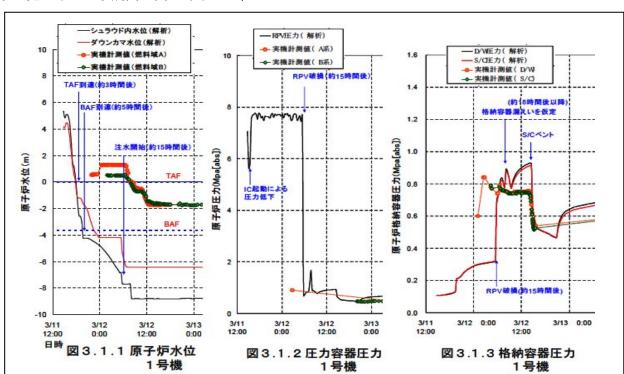


図6. 1号機の事故初期の計測値及びシミュレーションカーブ

実測値は \bigcirc 日 (水位計は誤動作)、東電の計算では、15 時間後に原子炉圧力容器 (RPV: Reactor Pressure Vessel) 破損となった。津波後 8-16 時間の間は実測値がないことに注意。東電によるシミュレーションの条件:津波後 I C機能せず、18h後の格納容器漏えい(ϕ 3 cm)。

政府 6/7 公表, IAEA報告書・添付資料(http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/pdf/app_full.pdf)抜粋

1号機ではすべての計測機器が一旦使用できなくなった後、21:21予備バッテリーへの切り替えによって原子炉水位の測定が再開したが、リアルタイムで発表された原子炉水位は実際より4-5 m高いものであった(図6,左)ため、多くの人が原子炉の状況をまだ深刻ではないと錯覚した。過熱状態の時に水位計が正しい水位を示さないなら、根本的な改善が必要である。

12 日未明には、すぐにもベント (Vent: 格納容 器圧を下げるため圧力抑制プールの気体を外部放 出する操作)をすべきとされたが、想定外の手動 操作のため図面の確認から始めなければならず、 ベントの実施(12 日 10:17 手動で弁操作を行い、 12 日 14:30 格納容器圧力低下を確認) はずっと遅 れたので、大量の放射性物質が放出された。一方、 注水機能回復へ向けた電源確保を目指して多数呼 び寄せた電源車はトラブル続きで、ケーブル繋ぎ こみ作業にも時間がかかったため、ようやく12日 5:46、消防ポンプによる注水が再開されたが、14 時間余りの冷却喪失となってしまい、圧力容器破 損を招いた(図6,中)。その後、淡水が枯渇(14: 53終了) するのに代えて海水を注入する決断も遅 く、5.5 時間の注水中断後の20:20 に漸く海水注 入が開始された。

12 日 15:36 に発生した水素爆発は、専門家で すら予見できなかったひとがいたが、燃料棒を被 覆するジルコニウム合金が高温の水蒸気から酸素 を奪うことで発生する水素が蓄積して、酸素と爆 発するもので、燃料棒露出が長時間続いた結果で ある。

時間をさかのぼって、12 日 8:49、保安院は福島第 1 から北北西 6.7 k m地点(浪江町大字高瀬字西原)で採取された空気からテルル 132 (半減期 3.2 日) が検出されたのに公表しなかった(6月 3 日公表)。テルル(Te) は酸素族の半金属元素で、ジルコニウムの燃料被覆が溶けないと出てこないが、T-131(Te0 は Te0 は Te0 も多い Te0 ないが、Te1 は Te0 も多い Te1 ないが、Te1 は Te1 は Te2 を Te3 を Te3 を Te4 を Te5 を Te5 を Te6 を Te7 を Te9 を

いたことになる。避難しつつあった住民に伝える べき重要な情報であった。

水素爆発の報道の経過を追加して、時系列的な 経過は打ち止めにする。3月12日15:36の水素 爆発の後、記者会見の質問でも東電側は、官邸に 問い合わせてからと言って口を濁し、何が起こっ たか事実を言わなかった。5時間の空白時間中に 個人的にはメルトダウンを確信し心配したが、12 日20:41になって枝野官房長官から原子炉に損傷 はないという発表がなされ一旦信用した。が、こ れは、現在からみれば情報隠しである。水素爆発 で炉心の追加損傷は確かになかったかもしれない が、炉心損傷が既に12日未明に始まったことを 現場は知っているはずであり、パニックの回避が 優先するあまり、メルトダウンはかなりのあいだ 隠されていた。

1号機の経過から見えてくるのは、現場がどんなにうまくマネージメントしても、破綻は防げなかっただろうということである。1号機は、炉心冷却の最後の砦であるICとHPCIの2つともが、(多分バッテリー電源の冠水で)動かなかった。他方、2号機はRCICだけが動き、3号機はRCICだけが動き、3号機はRCICとHPCIどちらも動いた。想像を絶する津波ではあったが、最も古い1号機が津波に対して最も脆弱で、新しくなるほどに深層防護が強化されていたといえる。

また、長時間の冷却喪失、電源車の繋ぎこみや冷却水注入の遅れ、ベントの遅れなどの経過を見ると、過酷事故に対する備えが全く無く、事故拡大防止に向けた対策が手際よく行われたとは到底言えない。水蒸気爆発や再臨界による小爆発が起こらなかったのがせめてもの救いである。

7. 2~4号機の連鎖は止められなかったか

3号機は燃料棒露出まで地震発生後約40時間、 2号機は燃料棒露出まで約75時間の時間的余裕 があったにも関わらず、HPCI或いはRCIC の停止直後に注水を開始することができなかった。 炉内は 0.5%の熱出力として毎時 19 トンの水の蒸発が必要であり、燃料集合体上部の水を 80 トン (内半径 2.8m高さ 4mの円柱: これの 8 掛けを仮定)とすると、冷却が停止すると単純計算で 4.2 時間後に燃料棒が露出することになる(東電の評価もこれに近い)。実際には注水再開まで両機とも 6 時間以上かかってしまった。東電が 6 月 18 日に公表した資料、「福島第一原子力発電所被災直後の対応状況について」(1106181.pdf)(以下では、東電 6/18 資料)で、経過を追う。

1号機に続く連鎖となった3号機では、RCI Cが12日11:36停止(稼働20時間)後、自動起動したHPCIが13日2:42(バッテリー切れで停止?)まで機能していたが、9:25に注水を開始するまで6時間43分間の注水停止があり、この間に燃料棒露出(13日7時頃露出、7:302.95m露出)と炉心損傷(13日9時頃)が始まった。

高圧注水系は復旧が間に合わず吐出圧力が低い消防車で注水するためには、圧力逃がし弁(SR弁)を開いて圧力容器圧(停止時所定、70 気圧)を下げる必要があるが、バルブを動かすためのバッテリー電源を、(通勤用自動車のバッテリーを集めて)準備するのに手間取った(9:08 SR弁開:東電6/18資料p33)。13 日9:25 より淡水注水(消化系ライン)を開始し13 日13:12 海水注入へ切り替えた。水素発生と燃料ペレットの溶融(メルトダウン)が起こったが、圧力容器損傷には至らなかった。14 日11:01 水素爆発で原子炉建屋上部が吹き飛んだ。

続いて2号機は、3月14日13:25にRCIC (稼働70時間、驚異的なバッテリー持続)が停止 するまで機能していたが、14日19:54より海水 注入するまでの6時間29分間の注水停止の間に、 14日燃料棒露出(14日18時頃或いは17:17)と 炉心損傷(露出の2時間後)が始まった。

東電 6/18 資料 (p 24-27) によると、2 号機は、 SLC (ホウ酸水注入) 系高圧注水用ポンプへの電源 ケーブルつなぎこみができていたが、12 日 15:36

の1号機建屋の爆発で破損し復旧しなかった(唯 一使用可だった高圧注水系がだめになる)。14日 11:01の3号機建屋の爆発では、準備していた注 水ラインが破損して使用不能となった。爆発後、 作業員は免震重要棟へ一時退避したが、(おそら くその間の) 14 日 13:25 に冷却喪失に至り、初 め高い格納容器圧を下げるためベント弁を開けて からということにしたがベント弁開に至らなかっ たので、16:00頃圧力容器減圧優先に変更し、バ ッテリーを部分追加して、18:00頃SR弁開とし た。しかし、格納容器圧が高いため減圧まで1時 間を要して19:03に6.3気圧になり、19:54に 消防車より海水注入開始となった(実際は 16: 34-19:20 の間消防車で海水注入するも、炉内が 高圧のため19時頃まで入らなかったよう。19: 20-19:54 油切れで一時停止)。

なお、格納容器のベントは、既にラプチャーデ ィスク(後述)以外は弁を開にして準備していた ところ、3号機建屋爆発でベント弁(AO弁: Air to Open Valve,空気弁)大弁の弁励磁回路が壊れ て閉じ、16:00-16:20 空気圧による開操作を失 敗し、14 日 21:00 にベント弁(AO弁) 小弁を 開けてラインナップが完成したものの、4.3気圧 で作動するラプチャーディスク(破裂板)が低圧 のため破壊されずベントされなかった。22:50、 格納容器 (3-4 気圧で安定) に対し圧力抑制室の 圧力が上昇する(異常)事態が発生し、15日0: 02 圧力抑制室のベントラインナップが完成したも ののラプチャーディスクが壊れず、7.5 気圧から 低下しなかった。そして、3月15日6:14(6:00-6: 10とも)、圧力抑制室で爆発が起こり、大気圧に 下がった。この爆発に伴って、今回の事故で最も 大量の放射性物質の拡散が起こり、原発から北西 方向が広範囲に汚染した。

4号機建屋の爆発は、原子炉は空であったから燃料プールが関係するが、燃料プールに多量に蓄えられていた燃料集合体(1331本)の発熱量は水の気化熱換算で90トン/日(200万 kcal/h と仮定:

朝日新聞 2011. 3. 19) に過ぎず、多くても 1 日 0.75 m (プール面 $10m \times 12m$) の水位低下であり、燃料 棒露出による水素発生は考えにくい。 3 号機で発生した水素が 4 号機に漏れたという東電の推定が 妥当なところのようである。即ち、 3 号機で燃料 棒露出がなければ 4 号機の爆発は無かっただろう。

1号機の水素爆発から3号機の燃料棒露出まで 15時間の猶予はあったが、恐らく、1号機の収拾 だけで大変なストレスのなか、爆発によって通路 はがれきで塞がれて空間線量率も上がり、また、 余震で作業がたびたび中断するなど大混乱をきた していたに違いない。オフサイトセンター(緊急 事態応急対策拠点施設:福島県原子力災害センタ 一の名称で原発から5キロ離れたところに立地) が壊れて、本部として全く機能しなかったのも混 乱に拍車をかけた。燃料棒露出をぎりぎり回避で きたかもしれないというのは後解釈であろう。さ らに、2号機については悪い偶然が重なっており 回避は恐らく難しい。

8.むすび

想定を超える巨大津波ではあったが、1979年までに建設された古い原子力発電所である福島第1(1-6号機)でのみ外部電源全喪失に見舞われたうえ、最も古い原子炉である1号機が、他の原子炉に比べて非常に早く冷却喪失状態に入ってメルトダウンし、溶けた燃料の一部は格納容器にまで達した(メルトスルー)。古い炉ほど、深層防護のゆとりがなく、想定外の事態で壊れやすかった。

1号機の事故がなければ、恐らく、2-4号機は 事故に至らず回復した可能性が高い。しかし1号 機は事故月で使用 40 周年を迎える古い炉である にも関わらず、更に10年の延長運転が認可されて いた(保安院H23.2.7)。古い炉は脆性破壊の問題 もあり、今後根本的な再検討が必要だろう。

津波の影響は研究されなかった訳ではない。 (独) 原子力安全基盤機構の報告書「平成 21 年度

地震に係る確率論的安全評価手法の改良=BWR の 事 故 シ ー ケ ン ス の 試 解 析 = 」 (http://www.jnes.go.jp/content/000117490.pdf)では、波高レベル 23mまでで解析し、「海水冷 却ポンプは、海岸の近くに位置しその設置レベル が相対的に低いため、津波による海水冷却ポンプ の機能喪失が炉心損傷頻度算出に重要なパスにな ることが分かった。」といった、今回の海水冷却ポ ンプ全壊の危険性を言い当てたような記述もある。 今回の事故の教訓から、津波に限らず広範囲の 対策が提案されている(例えば、 http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/9 22/235/110519_H23-1-No. 2-1, 0. pdf)。技術は失敗 を繰り返して信頼性を高めて来たという過去の歴 史はあるが、原発の失敗の影響はあまりに巨大で ある。今後は、行政や電力会社の姿勢が劇的に変 化し、安全性も高まるとは思われるが、想定=コ ストという問題がいつもつきまとう以上、国民の 間に広がった不安感を払しょくし、否定の流れを 引き戻すのは容易な道のりではない。

*参考資料:地震に係る確率論的安全評価手法の改良 -BWR の事故シーケンスの試解析-