

福島原発炉心で何が起きたか：1号機の場合

東北大学 流体科学研究所 圓山重直

(2011/5/29 作成)

(2011/5/30 改訂)

概要

これまで発表されたデータをもとに、事故直後 1 号機原子炉で何が起きたか検証した。情報が少ない中でも定量的解析を行い、幾つかの不確定要素を含みながらも比較的納得のいく説明ができた。本格的な検証は後日明らかになるだろう。

原子炉格納容器は事故のごく初期の 3 月 12 日午前 4 時頃に破損した。その大きさは等価直径で 9cm 程度であり、その後、大きさは大きく変わっていない。12 日午後に起きたドライアウトとジルコニア-水蒸気反応で生じた水素はその隙間から放出され 12 日 15 時の水素爆発となった。報道されている大規模なメルトダウンは起きておらず、燃料は瓦礫状態で压力容器下部に堆積している。炉心破壊のタイミングも報道よりかなり遅いが、1 号機の炉心破壊は 12 日でほぼ修了し、後は水冷却を続けている。海水の注入時期やベントのタイミングなどは 1 号機の事故に本質的な影響を及ぼしていない。現場の職員はよく検討した。シビア-アクシデントの本格的な訓練とマニュアルがなかったと推定されるので初動で事故を押さえることができなかった。

Ver2 では、Ver.1 についてご意見を頂いた、北海道大学 奈良林先生と日本保全学会 青木氏のコメントにより、若干の補正を加えた。つまり、再循環ポンプに関する記述の変更と、再循環ポンプが壊れない場合でも本シナリオと同様な現象が起こることが判明したので補足説明を加えた。当方の放射線データ処理に誤りがあり、訂正した。しかし、現象の本質には大きな変化はない。

時系列事象

時刻は 2011 年なので年は省略する。() 付きの時刻は推定値である。**断定的な表現が使われているが、あくまでも限られて情報を基にした推定である。**推定される数字をあえて出しているが、精度は高くない。本節では Ver. 2 で検討した、再循環ポンプが壊れないケース（ケース 2）については記述していない。

3 月 11 日

04:04 発電機出力 459MW、熱出力 1.377GW 定格で運転中。炉心圧力 7.0MPa

14:46 地震発生。自動スクラム（緊急停止装置）作動成功。制御棒が挿入され核反応停止。送電線の

倒壊により、外部電源遮断。非常用ディーゼル発電機による電力供給。

- 14:52 非常用冷却復水器系 (IC) 自動起動。外部の水を蒸発させることにより、炉心の水を凝縮循環させる装置が作動した。炉心は急激に冷却され、炉内圧力も低下。
- 15:42 津波によりタービン建屋冠水、約 2 万トンの水が機器搬入シャッターから侵入。補助電源装置停止。全交流電源が停止。ただし、バッテリーにより制御室の電源は維持 (推測)。原子炉建屋地下にも津波の海水が侵入。原子炉建屋内の残留熱除去設備 (RHR 設備) 停止。圧力容器 (RPV) 内の温度圧力が徐々に上昇。IC を中心とする非常用緊急炉心冷却装置 (ECCS) 作動中。徐々に RPV 温度減少。この時点での原子炉の崩壊熱による発熱量 26.5MW (HTCRep. 1.5)。RPV 内の水量 200 トンと仮定し、RHR 設備停止時の炉内温度 200°C、1.55MPa と仮定すると、昇温速度 106°C/h。
- HTC Rep. は<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/maru/atom/>に掲載。以後Rep. と略記する。
- 16:36 IC 作動停止。再び炉心温度が上昇する。崩壊熱発熱量 22.6MW。
- 18:10 IC 手動起動。蒸気発生確認。再び炉心温度と圧力が急激に低下する。
- 18:25 圧力の急速低下により、作業員が手動で IC を停止する。再び炉内圧力上昇。
- 18:26 (報道) 地震のため、両機とも運転を停止したが、原子炉を冷却するシステムが復旧しないという。同本部によると、2～3日は問題ない見通し。
- (19:30) 圧力が約 7.2MPa になり、逃がし安全弁 (SRV) が自動的に開き炉心の蒸気が格納容器のドライウエル (DW) に放出される。弁の解放は断続的に行われた。蒸気の大部分はサブプレッションチャンバー (SC) の水に吸収された。この蒸気放出により圧力容器 (RPV) 内の水は急速に失われていく。液面の降下速度 1.38m/h。
- 21:30 IC を再び手動起動。蒸気発生確認。このときの液面は燃料棒上端を基準として 500mm。以後 IC の凝縮循環によりこの液面が維持される。A 系の液面計が 1300mm を示しているのは、プール沸騰による液体膨張が偏っているためと推測される。
- 22:54(報道): 水を注入して冷却する「緊急炉心冷却装置 (ECCS)」、除熱装置を停電時に稼働させる非常電源が故障するトラブルが発生した。ECCSは、制御棒を挿入し核分裂を止めて緊急停止した後に、原子炉が壊れたり、炉心の温度や圧力が上昇したりした時に水を入れて冷やす装置。現在、同原発1号機、3号機では水位が低下していないが、除熱装置が作動できない状態が続いている。

12 日

- 02:27(報道) 東京電力福島第一原子力発電所 (福島県大熊町、双葉町) 1～3号機で、地震によって運転が自動停止した後、水を注入して冷却する「緊急炉心冷却装置 (ECCS)」、除熱装置を停電時に稼働させる非常電源が故障するトラブルが発生した。12日未明には1号機の原子炉の圧力が設計値の1.5倍に上昇し、同社は圧力を外部に逃がす操作を行う方針。微量の放射性物質が環境中に出る可能性がある。
- 02:45 IC による冷却で RPV 内圧力 0.9MPa (絶対圧)、飽和温度 175°C。この温度で炉内がしばらく維持され、水位も 500mm で維持される。
- 04:01(報道) 東京電力が記者会見し、格納容器内の蒸気を、高さ120メートル排気筒を通じて屋外に放出するのは1～3号機が対象になりうることを明らかにした。放出の時期、順序は未定。1号機の格納容器の放射線が上昇したのは、原子炉圧力容器から蒸気が漏れ出したためとみられる。
- (04:00) DW 内圧力が 0.88MPa となり、格納容器が破損した。その破損面積の等価直径は約 9cm。その大きさはこれ以後大きな変化はなかった。HTCRep. 15.2 参照。最初は DW 上部の破損が疑われたが、その後の漏水状況や水素爆発の影響が少ないことから、DW と SC を繋ぐ円筒との溶接面破壊が疑

われる。この破損により、それまで、 $0.06 \mu\text{Sv/h}$ レベルだった正門の放射線量が急速に増大し、この時以後 $5 \mu\text{Sv/h}$ のオーダーに増大する。その値は 10:20 のベントまでほぼ一定である。このことも DW の定常的な破損を裏付けている。この時点では、燃料棒の放射性ガスの放出が主であり、放射能放出はその後の 2 号機、3 号機に比べると格段に小さい。また、この時点ではジルカロイ反応は起きておらず、水素の放出はほとんどない。

- (05:40) 供給水枯渇により IC が自動停止。再び RPV 圧力と温度が上昇する。発熱量 13.9MW、燃料体とその上部の水を 69t と見積もり、温度上昇速度 150°C/h 。
- 5:46 消防ポンプ注水開始 14:53 まで断続的に 80t 注水。この間に崩壊熱による水の蒸発量は 105t で徐々に水が減っていることが推定される。
- (6:30) RPV 圧力が 8MPa に達し、再循環ポンプ付近から破損が予想される。破損は隙間であると考えられるが、破損断面の等価直径約 5cm (HTCRep. 14.2 参照)。この頃は、B 系の水面計の指示値が A 系に比べて低いので、B 系近傍にある再循環ポンプの破損が疑われる。水面はちょうどシュラウドの上端近辺にあるので、シュラウドからジェットノズルの隙間を通して先ず水が逆流し、その後蒸気が逆流し蒸発と DW への放出が続いた。そのメカニズムは Rep. 14.1 の説明ビデオ参照。
- 6:20 RPV の破損により、炉内圧力が低下して仮設消火ポンプでの注水がようやくできるようになった。注入開始の注水量約 1t。
- 8:20 RPV 内圧力は急激に減少し、水の蒸発が再循環ポンプ出口から逆流することにより外部に放出される。それにより液面が減少し燃料棒が露出した。このときまでは、水面計は正しい値を示していると考えられる。理由は後述する。しかし、これ以後の水位計の精度は低下し続けた。
- 10:00 水の注入がないと仮定した場合の水面推定位置は、 -2.0m 。水位計の指示値は -0.5m と -0.7m 。水位計上部の温度が上昇し、測定値が不正確になる。Rep. 2.2 によると、燃料棒の崩壊熱比 0.5% で燃料棒の露出が 2m の場合、上端温度は 1500°C と推定され、ジルカロイ-水蒸気反応が始まる。現在の崩壊熱比は 0.53% なので、水素が出始めている。
- 10:17 DW ベント開始。DW 圧力低下。高さ 120 メートル排気筒を通じて屋外に放出したが、可能性として煙突への弁が停電のために閉鎖されており、ベント蒸気が逆流し原子炉建屋に充満した可能性も否定できない。または、室内側のブローオフバルブを開けて室内が原子炉ガスで充満した可能性もある。ベントにより周囲環境の放射能強度が上昇。しかし、SC の水を通した後の放出と考えられ、DW 破損時の放射能より低い値。しかし、実際は 12 日 04:00 頃に起こった DW の破損によりすでに水蒸気が連続的に放出されて建屋内に充満している。
- 10:37(報道) 東電によると、緊急時に水を注入して炉心を冷やす緊急炉心冷却装置 (ECCS) が電源も含めて停止。くみ上げた冷却水 (海水) を回すポンプも止まった。ポンプ停止の原因は、福島第一の場合、1~6 号機の非常用ディーゼル発電機計 13 機がすべて、地震約 1 時間後に故障停止したことだった。想定では、地震が起きても各基が非常用発電機を融通しあって復旧するとしていたが、全滅した。
- 12:00 炉心内の水位低下が続く。水投入がない場合の推定水位 -2.7m 、実測値 (値は不正確) -1.5m と -1.4m 。DW の破損口より水素と水蒸気が建屋内に流入。ジルカロイ反応 (発熱反応) と水素放出が進む。燃料棒が高温になり、そこに水を投入するために熱応力で燃料棒がバラバラになって堆積する。シュラウド上部は融解し形状が保てない。3 月 18 日付け電気新聞石川氏の記述参照。燃料ペレットの一部が融解している可能性あり。ただし、全部がドロドロに溶けている状態ではない。断続的に水投入が続けられる。
- 12:57(報道) 異常に上昇した原子炉格納容器内の圧力を下げるため、容器内の蒸気を、逃がし弁を通じて建屋外に放出する作業に着手した。建屋内に入った作業員が弁を手動で開けようとしたが、放射線量が多く、作業は難航している。格納容器内に仮設消防用ポンプで水を注入して温度を下げる試みも続いている。原発施設内の放射線量も一時上昇し、炉内の水位低下で燃料棒の一部が露出していると見られるなど、不安定な状態が続いており、過熱や圧力上昇で炉心に何らかのトラブルが起きている可能性もある。1 号機の中央制御室では、通常の 1000 倍に上る毎時 150 マイクロ・Sv の線量を記録した。

- 13:21(報道) 12日午前2時半に、格納容器内の圧力は、通常時の2・1倍の840キロ・パスカルに達していたことが確認された。現時点では放射線量は少なく、燃料の損傷を示すような異常は検知されていない。すぐに炉心溶融につながる最悪の事態(過酷事故)に発展はしないものの、放射性物質の漏えいの原因につながるような内圧の上昇、何らかの燃料棒の損傷や異変が起きている可能性がある。燃料棒が損傷して露出し、水蒸気と反応して爆発するような事態になれば、大量の放射性物質が外部に放出されることになる。1979年の米スリーマイル島原発事故と同様の最悪のケースになる恐れもある。
- 14:18(報道) 1号機の原子炉内で、核燃料をまとめた炉心の一部に溶融が起きている可能性が高いと発表した。周辺2か所の放射能監視で、ウランの核分裂によって生じるセシウム137などが検出された。冷却水の水位が下がり、燃料棒が露出、空だきのような状態になり、過熱が進んだ可能性がある。
- 14:10 AO 弁操作。SC を介してベント開始。DW の圧力低下。このベントは SC の水を通したので、周囲への放射能放出は極めて少なかった。DW 破損開口より水蒸気と水素の放出続く。ベントにより見かけ上の破損開口部面積が増大した。
- 15:36 水素爆発。爆発による放射線量の増加なし。爆発前後の DW 漏れ量の変化から爆発による亀裂部の更なる破壊はほとんどなかった模様。
- (17:00) 燃料棒下部まで水位低下、燃料及びシュラウドが破壊され、RPV 下部に瓦礫となって堆積する。水の投入により、完全破壊の時間はもっと遅くなっていたかもしれない。燃料瓦礫が下部に脱落した場合、水位は再循環ポンプ突出口の上部と下部の水位で自動調節される。メカニズムは Rep. 14. 2 参照。実際の水位は、RPV 底から 3. 5m 程度であると推定される。これより多い注水量は、自動的に排出され、少ないとドライアウトを起こす。炉心の発熱量 11. 4MW、蒸発熱に相当する水の必要量 18t/h。もし、水投入がない場合、1 時間で約 1m の水位低下が起こる。この時点で、炉心底部の損傷は軽微かもしくは全くないことが予想される。
- 19:04 海水注入開始。以後、冷却水を絶え間なく投入することによって燃料瓦礫の冷却が達成される。海水注入のタイミングによる原子炉建屋水素爆発やその後の収束に対する影響は限定的であった。ただし、この時点で水投入を長時間中断すると、圧力容器のメルトダウンを誘発する危険性があった。

13 日

- 01:05(報道) 1号機は原子炉内が過熱しており、経済産業省原子力安全・保安院は、炉心が溶融した可能性を指摘。東電は、運転再開が困難となる海水の注入に踏み切った。12日午後3時36分頃、福島第一原子力発電所1号機建屋付近で、ドーンという大きな爆発音とともに白煙が上がり、原子炉建屋が骨組みを残して吹き飛んだ。同日夜、記者会見した枝野官房長官は「格納容器と建屋の間にたまった水素による爆発で原子炉建屋の壁が崩壊した」と語った。

その後 Rep. 15. 2 および Rep. 13. 2 に記したように、14 日以後の海水大量投入により、炉心は一時安定化した。その後、19-21 日に投入水量が著しく減少し、RPV および DW が 400℃となり、完全空だき状態となった。このとき、幾つかの圧力計等が損傷した。しかし、解析データから DW および RPV の破損箇所は大きく変化しなかったと予想される。現在は、燃料瓦礫の安定な冷却が続いているが、崩壊熱蒸発分以上の水投入が必要であり、汚染水の増加が懸念される。これに対する対策は、Rep. 15. 2 参照。

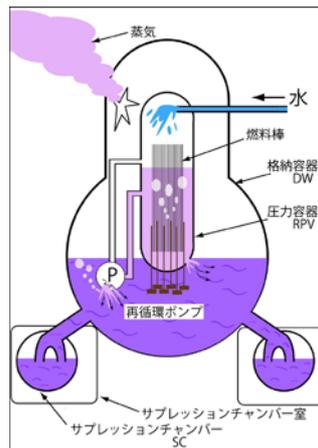


図1 1号機の破損状況模式図

(本図は概略で破損状況を正確には記述していないことに注意されたい。)

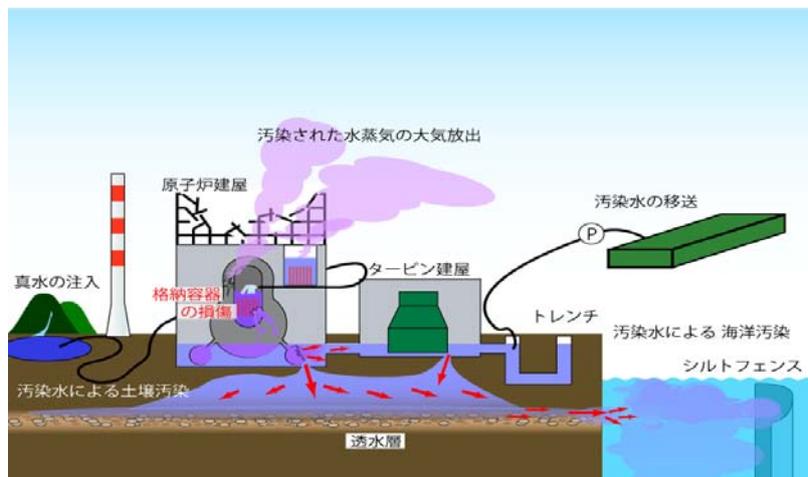


図2 放射能放出の現状(5月22日現在) (Rep.15.2)

現在は、図2に示すように、全ての原子炉で相変わらず汚染水と汚染水蒸気を放出している。特に汚染水はプルトニウムやストロンチウムを含んでいる可能性が高い。原子炉建屋地下に溜まった水が配管や地下の透水層を介してタービン建屋や海に漏出している。外部からの水投入を増やしているので、汚染水が増え続けている。海への汚染水漏出も完全に止まっているとは言い難い。

なお、原発事故直後1-3号機から立ち上る湯気は、燃料プールからではなく、炉心の水蒸気が凝縮して湯気になったものが大部分であった。気温が高くなり、湯気は見えなくなったが、放射能を含む蒸気は依然として出続けている。

1号機崩壊シナリオの検証

原子炉の安全な早期収束のためには、現状の理解が重要である。そのためにも、事故当初何が起きたかを検証することは不可欠となる。そこで、上記のシナリオを定量的に検証する。Rep. 15.1で記したように、原子炉でどんなことが起きてもエネルギー・水・放射能の保存則は成り立つ。計測誤差も含めて全てが「少なくとも」合理的・定性的（もちろん定量的がベター）に説明されなければならない。その意味では、事故当初からの不正確なデータも含めて、これまで関係各位が集めたデータが事象の裏付けとなれば、それが過去に起きた現象である。本レポートの推定が正しかったかどうかは、約10年後に原

子炉を解体する時に明らかとなるであろう。しかし、原発事故は現在進行中であり、不正確さの誹りを承知で、原発事故を推定する。

そこで、まず5月15日に報道された1号機メルトダウンのシナリオを検証する。本レポートの目的は、過去のシミュレーションを否定や批判することではなく、より正確な現象理解によって一日も早い原子炉収束を目指すものである。

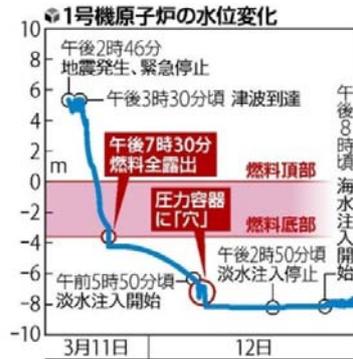


図3 5月15日報道のメルトダウンシナリオ (5月15日読売新聞)

図3は、5月15日に報道された1号機のメルトダウンシナリオである。(1)津波発生直後から冷却機能が全停止し、(2)炉心の崩壊熱によって压力容器 (RPV) の圧力が上昇し、(3)逃がし安全弁 (SRV) が自動作動して蒸気を放出する。そのため、(4)崩壊熱相当分の炉内水が失われ燃料棒の露出が始まる。(4)炉内が高熱になるとジルカロイ-水蒸気反応で燃料棒が溶解する。その間も水が蒸発し、(5)炉心が完全空だき状態となる。(6)溶解した燃料棒は压力容器に穴を開け、いわゆるメルトダウンを起こす。電源停止後4時間で燃料棒が完全露出など、急激に現象が進行している。

これは、もっともシビアなケースを想定したワーストケースと考えられる。実際の原子炉でこの現象が起こったのだろうか。もし、このシナリオ通りの現象が起きたとすると、溶けた燃料が格納容器に落ちていることになる。燃料溶解時に水が存在しないので、压力容器の融点を超えるからだ。当時の水注入力では初期の崩壊熱を吸収することは不可能であった。いわば「焼け石に水」である。

実際は、スクラム (緊急停止) 直後に非常用冷却復水器系 (IC) が作動して冷却を行っている。また、3時間ほどの中断があったが、18:30には再びICを起動して、作動確認の蒸気放出を確かめている。図3の解析モデルでは、水位計や圧力計は全て壊れている前提で計算していると思われる。後述するが、水位計は燃料棒が露出し RPV 内が高熱蒸気で満たされるまでは正常に動作していると考えられる。圧力計も3月20日前後の高熱になる前はかなりの確率で正しい値を出していると推定される。

その前提でメルトダウンシナリオを検証する。SLVの蒸気放出のみで水位低下が起こったとすると、炉心溶解が起こるまではRPV内は7MPaを維持していると考えられる。実際はRPV内に水が存在するのに圧力が急激に低下している。これは、RPVもしくはRPVと繋がっている他の部位が破損したことを示している。完全に炉心がドライアウトした状態では、核反応初期で発熱量の大きい燃料ペレットが堆積すると、いわゆるチャイナシンドロームが起こる。この場合は、RPVの穴はもっと大きく、かつ、一番下に穴が開いているので水が溜まらない。その条件では、Rep. 16.1で解説したその後の炉心の挙動が説明できない。

炉心内水位の検証

1号機の水位計は、RPV上部と下部がパイプで繋がっており、上部は炉内の水が凝縮して溜まり、常に一定の水位を保つように作ってある。上下パイプの接続部に圧力計が設置され、その差圧で水位を測定する仕組みである。従って、上の基準水位面が蒸発して低下すると何を計っているか分からなくなる。しかし、燃料棒が水没しRPVが飽和蒸気で満たされている限りは正確な水位を示していたと考えられる。圧力計や温度計も原子炉が高熱になる前は正しい値を示していたと考えられる。

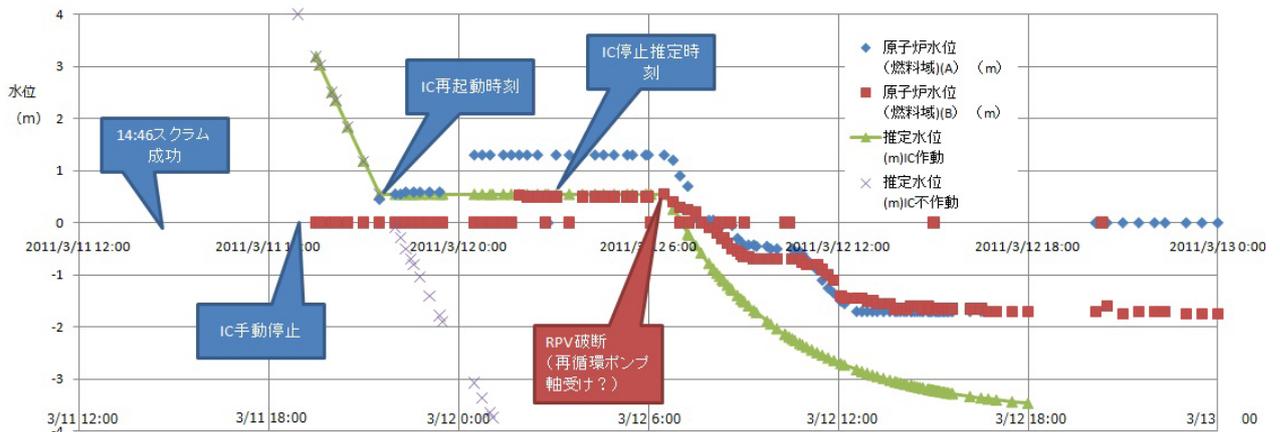


図4 1号機の压力容器内水位の変化

図4は、事故時から13日0時までの水位の変化を示している。図中には、著者の原子炉破損シナリオに基づいてシミュレーションした推定水位の値も併記してある。水位は燃料棒上端を0mとして示してある。事故初期の水位データはないが、2号機の水位データを見ると4m程度あったと推定される。ICの手動停止により、一端RPV内温度と圧力が上昇し、SLVが自動開放して蒸気を格納容器ドライウエル(DW)に放出し直線的に水位が下がる。18:25にICを手動停止してから30後にSRVが初めて解放されたと考えられると、崩壊熱と蒸発の関係からIC再起動の21:30には水位が0.5mとなり実測値と一致する。

この時期の炉内圧力データが2:45に1点だけ有り、絶対圧で0.9MPaであった。その時の飽和温度は175°Cである。ICはこの温度で運転されていたと仮定した。その後、供給水が枯渇してICが停止する。再び温度と圧力が増大する。水位の変化から6:30頃にRPVのどこかが破断したと考えられる。その時RPV圧力が8MPaに達し、再循環ポンプの軸受け部から破損したと考えた。この破断圧力は原子炉の強度を考えると妥当である。再循環ポンプ軸受けは強度的にも弱いところであり、かつRPV底部より更に下に設置されているので水の静圧も余分にかかる。破断後はB系の水面計の指示値がA系に比べて低いので、B系近傍にある再循環ポンプの破損が疑われる。

RPVの破断時刻、その時の飽和水温度295°Cと175°Cとのエンタルピー差、崩壊熱から推算してICの停止時刻は5:40と推定された。

Rep. 14.2の解析手法によると、破損断面の等価直径は約5cmと推定される。Rep. 15.2で示したように、この大きさは破断後大きな変化はない。Rep. 14.2に示したように、この直径はあくまでも等価直径であり、破損断面積の合計を示している。破損部は複数でも良いし円形である必要はない。むしろ円形の穴が開いているわけではないことに注意されたい。この頃は、水面はちょうどシュラウドの上端近辺にあるので、シュラウドからジェットノズルの隙間を通して先ず水が逆流し放出され、その後蒸気が逆流し蒸発が続いたと推定される。この場合、RPV内の水は一挙に放出されず、蒸発熱とバランスして減少していく。

図4を見ると、実測値の液面と推定値はよく一致している。ただし、推定値は水の投入がない場合を仮定しており、実際の水面降下より多めに見積もっている。実測値は段階的に液面が減少しているが、これは、断続的に注入された水の影響であると考えられる。水投入時間との相関性の検証が待たれる。燃料棒が水面から出ると、液面下の燃料棒のみが水の蒸発に関与し、上部の発熱は蒸気の加熱に使われる。図4は水面下の燃料棒蒸発のみを考慮している。そのため、RPV上部は高温の加熱蒸気で満たされ、液面計の基準水が蒸発し測定精度が次第に不正確になっていく。上部の高温蒸気のためにジルカロイ-水蒸気反応によって水素が生成され破損断面からDWに放出される。本解析では、ジルカロイ反応による発熱は考慮していない。

燃料が完全に露出する頃にはシュラウドも崩壊し、炉底部に溜まっている水に燃料瓦礫が水没する。その時の温度データが全くないが、RPV内圧力から推定して炉内温度は150°C程度であったと推定される。これは、水が投入されドライアウトが起きない限り信頼できるデータである。

燃料瓦礫が下部に脱落した場合、水位は再循環ポンプ突出口の上部和下部の水位で自動調節される。メカニズムはRep. 14.2参照。実際の水位は、RPV底から3.5m程度であると推定される。これより多い注水量は、自動的に排出され、少ないとドライアウトを起こす。この時期、長時間注水を停止すると炉心

が溶融を起こす。余剰水はすぐ排出されるので RPV 内に水を溜めることはできない。しかし、1 時間程度の給水停止は RPV の健全性に影響を与えていないと考えられる。燃料瓦礫の上部が水面から出ていると、上部の蒸気が加熱蒸気となり格納容器上部の温度が上昇する。そのメカニズムは Rep. 15.2 参照。

これまでのシナリオでは、RPV は再循環ポンプを除き、穴が開いている状況ではないと推定される。しかし、3月20日前後に発生した RPV, DW の高温により原子炉がかなりダメージを受けたことも予想される。

上記は、再循環ポンプ付近が損傷した場合であるが、この問題設定において、ポンプ近傍が 8MPa で破損する仮定を設定している。SRV は作動していない。このことは考えにくいので、7MPa でポンプが破損したとすると、IC 停止時間が若干遅くなることが分かる。しかし、この仮定では、強度な地震を受けた再循環ポンプは強度マージンが低下することを示している。他の起こりうる過程として、IC 停止後 SRV が自動的に解放し水位が下がった場合を考える。これをケース 2 として、図 4 に示すケース 1 と対比して以下で論証する。

その場合、約 7MPa 下での蒸発となるため蒸発潜熱が減少し液面降下速度が若干速まるが基本的メカニズムは同様である。ただし、RPV 内の圧力は $7\text{MPa} + \alpha$ であり、消防ポンプでは水が入らない。実際には 6:20 から 14:53 まで約 80t の水を注入しているの、矛盾することになる。今後の検証が待たれる。

さらに経過すると炉心がむき出しになり、ジルカロイ反応を起こし更に高温になる。そこに水をかけるため燃料棒が崩壊し下に溜まっている水に落下する。ついには炉心底部の水も蒸発して RPV の底部が高温の燃料によって破壊する。このとき、初めて RPV の圧力が低下する。さらに、破損箇所は制御棒挿入スリーブ近傍が予想され RPV の最下部なので水が溜まる余裕がない。つまり、余剰水が溜まると破損穴を塞ぎ圧力が上昇することによって急激に排出される。燃料瓦礫が高温になると膜沸騰となり熱流束が減少するので更に高温になる。これ以後の原子炉の挙動を考えるとこれは考えにくい。

以上、ケース 1 とケース 2 を比較したが、どちらが実際の現象に近いかは今後の検証を待たなければならない。

格納容器ドライウエル圧力の検証

格納容器ドライウエル (DW) の圧力の変化を図 5 に示す。図中には、正門における放射線強度の時間変化と Rep. 14.2 に示した、DW 破損面積の推定しも示した。この時点での DW 圧力計は正常に作動していると判断される。

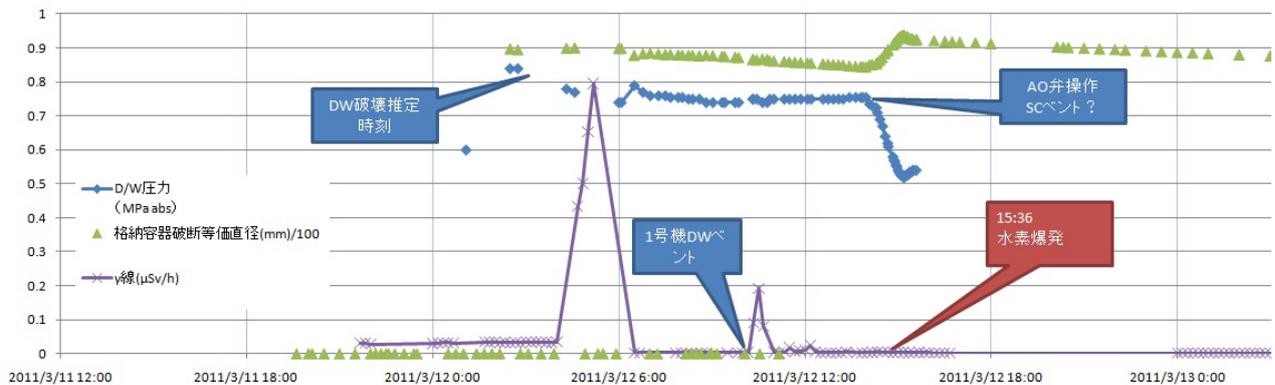


図 6 圧力容器ドライウエル内の圧力の変化と破断開口部面積 (ただし 12 日 5:00 以前の放射線強度はグレイ表示)

逃がし安全弁 (SRV) の自動開放によって DW の圧力は徐々に上昇している。DW 圧力が 0.84MPa から 0.74MPa に減少したときに、DW が破損したと考えられる。このとき、図 6 に示すように、周囲の放射線強度が著しく上がっていることから、破損時刻は 12 日 4 時と推定される。図 6 では、急激な上昇が見られているが、これは 5:10 以前のデータがグレイで標記されているためであり、実際はこの 1/1000 の値となる。つまり、4:00 以前は約 $0.065 \mu\text{Sv/h}$ だった放射線量がこのときから $5 \mu\text{Sv/h}$ に急上昇し、10:07 のベントまでほぼ一定の値となっている。このことは、4:00 以後から一定の水蒸気放出が続いていたことを示しており、4:00 破損の裏付けとなっている。Rep. 14.2 の手法により、破損断面積を計算すると等価直径が約 9cm である。Rep. 16.1 に示したように、この大きさは、現在まで大きな変化はないことから、

原子炉格納容器の破損は事故のごく初期に発生した。4:00 以前にも放射線強度が増えたようで 11 日 21 時に 1 号機立ち入り禁止となった。その原因については不明である。

5 月 28 日の報道では、格納容器の破損は地震発生から 18 時間後の 12 日 08:40 頃に起きたとされている。このときの格納容器圧力や周囲の放射線データには変化が無いので、この報道の根拠は不明である。原子炉の水位計（A 系）の水位が 0m となるが、これが格納容器破壊の原因とは考えにくい。また、開口部面積の大きさと時系列変化も本レポートとは異なっている。今後の検証が待たれる。

ただし、4:00 から 8:00 頃の時点で、RPV 内はジルカロイ反応が起きていないことから、放出放射能は放射性希ガスなどが主体であったと推定される。この間、放射線強度が一定値を示していることから証明される。この放射線強度は、後日起きる 3 号機のベントや 2 号機のサプレッションチャンバー破損の放出に比べて格段に低い。著者は、放射能の専門家ではないので定量的な検証は今後の課題である。

10:07 に DW のベントを行った。その作業で周囲の放射線強度が上昇している。しかし、なぜか DW の圧力は変化していない。少量のガスをサプレッションチャンバーの水を通さずに放出したことも考えられる。この頃、格納容器の破損部から水素を含んだ水蒸気が放出され続けている。

14:10 に A0 を弁操作して、SC を介してベント開始し、DW の圧力が低下した。このベントは SC の水を通したので、周囲への放射能放出は極めて少なかった。開口部から DW より水蒸気と水素の放出が続く。ベントにより見かけ上の破壊開口部面積が増大した。

15:36 原子炉建屋水素爆発。図 6 を見ると、この衝撃でも DW 開口部の面積は変化していない。また、放射線強度も全く変化していないことが分かる。今後の検証が待たれるが、水素爆発の爆圧はそれほど大きくなかったのかもしれない。このことから、DW の開口部は爆発の影響が受けにくい箇所で発生していることが想像される。また、後日、水棺作業において格納容器の水漏れが発覚し、1 号機の漏水が格納容器下部にあることが明らかとなったことから、破損部は DW と SC を繋ぐ円筒部との溶接箇所が疑われる。

12 日午後には RPV 内が半空だき状態になり、水素が発生した。その水素が建屋に充満して爆発したことが考えられることから、ベント作業は爆発に直接起因しなかった可能性も考えられる。その後、20 日前後の高温で追加の水素発生が懸念されるがそれ以後の水素発生は考えられない。

まとめ

これまで、公開されているデータをほぼ説明できる 1 号機原子炉の崩壊プロセスを提示した。事故直後で得られるデータは少ないが、それらを統合し、矛盾が生じないシナリオとしての熱流動現象の説明は定量的にできていると考えられる。しかし、入手可能なデータが非常に制約されているために、その精度や確度は限定的である。

原子炉破損場所や位置などは、様々な状況証拠に基づく推測であり、外れている可能性も大きい。定量的な数値も電卓で計算できる範囲なので、今後コンピュータを用いたシミュレーションでより精度の高い現象解析が実施されるであろう。

最近、海水注入のタイミングの是非が報道等で行われている。原子炉は事故直後で破壊し、それ以後は状況に大きな変化が無いと推定される。当初疑われた爆発による大規模破壊も格納容器と圧力容器に限って言えば限定的であった。全電源喪失の場合、初動で原子炉を押さえられなければ、その後どのようにしても炉心破壊は避けられないようだ。この件に関しては 2 号機 3 号機も同様である。更なる大規模炉心破壊を押さえるために、現場の技術者等は最善を尽くしていると思われる。

これまで、報道されてきた原子炉破損シナリオと異なっているが、本シナリオの方が現象の記述には矛盾が少ない。関係各位は著者より多くのデータと人員を有しているので、そちらの方が正確かもしれない。しかし、このレポートの目的はどちらが正しいかを判定することではなく、原子炉の現状を理解して一日も早い収束を目指すものである。

今後、2 号機 3 号機の熱流動解析と事故シナリオについても実施してゆく予定である。現状では、1 号機と全く異なる壊れ方をしていると考えている。

謝辞

原子炉の熱解析をこれまで実施するに当たり、東北大学流体科学研究所 高木敏行教授、日本保全学会特別顧問 青木孝幸氏をはじめ、多くの方々のご助力とご指導を頂いた。特に青木氏には原子炉の構造や運用方法など、一般には知られていない有益なご助言と情報の提供を頂いた。東北大学流体科学研究所 小宮敦樹准教授、岡島淳之介助教、守谷修一技術職員や圓山・小宮・岡島研究室の職員・学生には、震災直後の困難な状況下でも献身的に協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。