

放射線データによる原子炉事象の検証

東北大学 流体科学研究所 圓山重直

(2011/6/20 作成)

(2011/10/13 改訂)

概要

放射線のモニタリングデータと原子炉パラメータを時系列で検証した。

1号機については、Rep.15.3で記したように、原子炉格納容器(DW)は事故のごく初期の3月12日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、水素爆発後もその大きさは大きく変わっていない。炉心破壊のタイミングも報道よりかなり遅く水位が燃料棒の上端分達したのは12日8時ごろと推定される。その後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、ベントで流入した水素とともに12日15時35分の水素爆発となった。水素爆発による放射能の放出とDWの破損は顕著ではない。

2号機は、14日11時半ごろから炉内の水位が低下し、15時50分頃に燃料棒の上端まで水位が低下した。15日6時にサブプレッションチャンバー(SC)が破損し大量の放射能が放出された、この放射能と15日22時頃の3号機のベントが飯館村などの福島県における汚染の主要原因となった。

3号機は、地震直後から等価直径6mm程度の亀裂が圧力容器(RPV)もしくはその配管で発生した。RPVは13日8時55分に破壊し、RPVの破損直径は16cm程度であると推定される。それによる蒸気放出でDWが9時10分頃に破損したと考えられるが、確定的ではない。その破壊場所はDW底部もしくはDWとSCを結ぶ円筒部と推定され破断等価直径は12cm程度である。14日11時に発生した水素爆発ではその大きさは変化していない。DWの破損は16日9時頃に拡大し、19日から22日の注水量減少によりRPVとDWの温度が上昇して21日10時頃にDWが再び破損しその等価直径が約2倍になった。DW上部結合部のシール破損が疑われる。

4号機は3号機で発生した水素が、ベント配管や3号機との接続部を伝わり原子炉建屋中層に蓄積し15日6時過ぎに爆発した。この時点での燃料棒貯蔵プールの蒸発による水位低下は3m程度であり、燃料棒は水没した状態だった。

Ver.2では6月20日作成のVer.1を分かりやすいように、改訂した。Ver.1の図4のダグの誤記を修正した。さらに、Ver.1以後に明らかになった幾つかのデータをもとに、解析結果の解説を加筆した。2, 3号機は詳しく解析して、詳細な破壊シナリオを提案した。

この解析では、1号機は東電や保安院、政府のレポートにあるように、原子炉燃料の大規模なメルトスルーは起こっておらず、燃料の大部分は溶けた瓦礫となって圧力容器内にとどまっていると考えられる。この推定が正しいかどうかは後日明らかになると思うが、原子炉の破壊状況の正確な推定は、原子炉の今後の処理においては重要であると考えられる。

放射線モニターと原子炉事象との関係

福島第一原子力発電所（原発）は、事故当初から全てのデータが得られているわけではないが、放射線モニターを行っている。その記録は各原子炉で何が起こったかを正確に記録している。放射線データは2種類の原因でセンサーに情報を与える。つまり、ヨウ素やセシウム、放射性瓦礫のように地域に放出・蓄積されたベースラインとも言うべき放射線量と、放射性物質がガス等として放出された瞬間に上昇する放射線量である。後者は、DW 破損やベント直後から上昇し放出ガスの形状や放射線強度によって急激に放射線量が増大する。放出ガスの量が減少すればその強度も減少する。後者の放射線量（ガンマ線）の上昇は、放射性物質から直接センサーに光速で到達するので、放射線物質放出の時間が正確に推定できる。これは、放射性ガスが対流や拡散で広がる大規模放射能汚染と異なることに注意する。つまり、全てのセンサーは放射性物質放出と同時に反応する。

筆者の専門は、放射性ガスや放射線ではなく、熱放射（いわゆる赤外線）なので、確定的なことは言えないが、放射性ガスの強度と量が放射線モニターからの逆問題として解析可能であると考えられる。これは、放射線の専門家の学術検証の題材となるだろう。

これまで得られている原子炉パラメータは不完全であり、特に事故初期の温度データは全くない。しかし、不完全な水位データと圧力データを見比べ、原子炉崩壊熱の時間推移を考え、原子炉の時系列現象を推定することはできる。その推定方法についてはこれまでのレポートで細述してきた。この推定事象と放射線量のモニター結果を照合することによって、より確度の高い推定が可能となる。

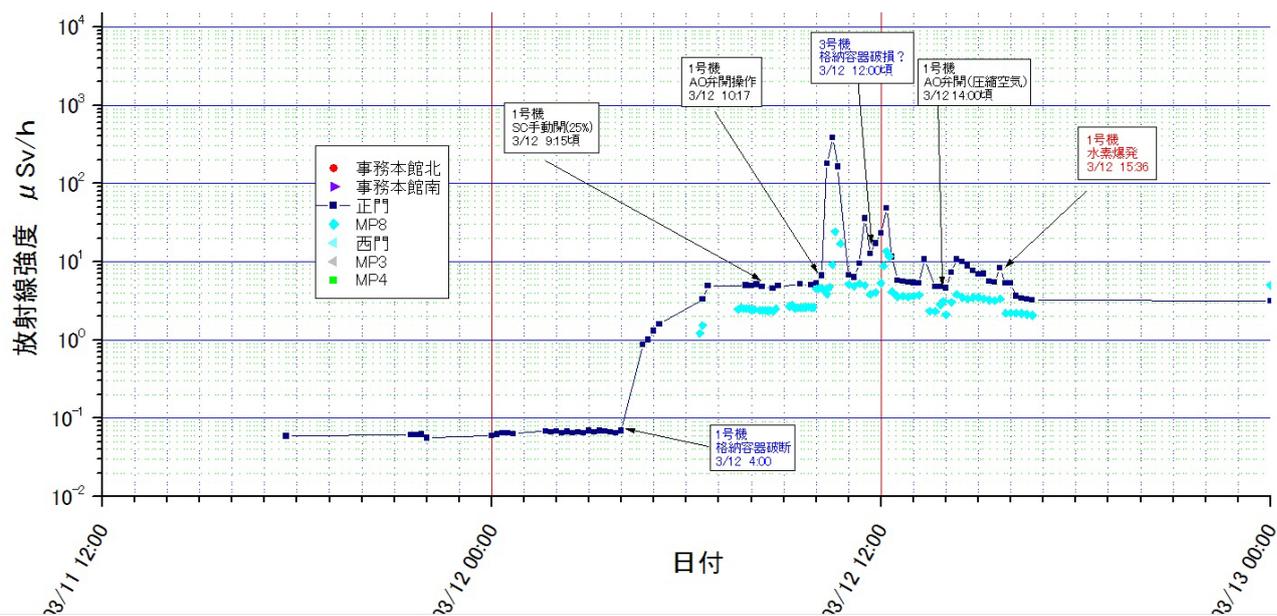


図1 放射線量の時系列変化 (3月13日0時まで)

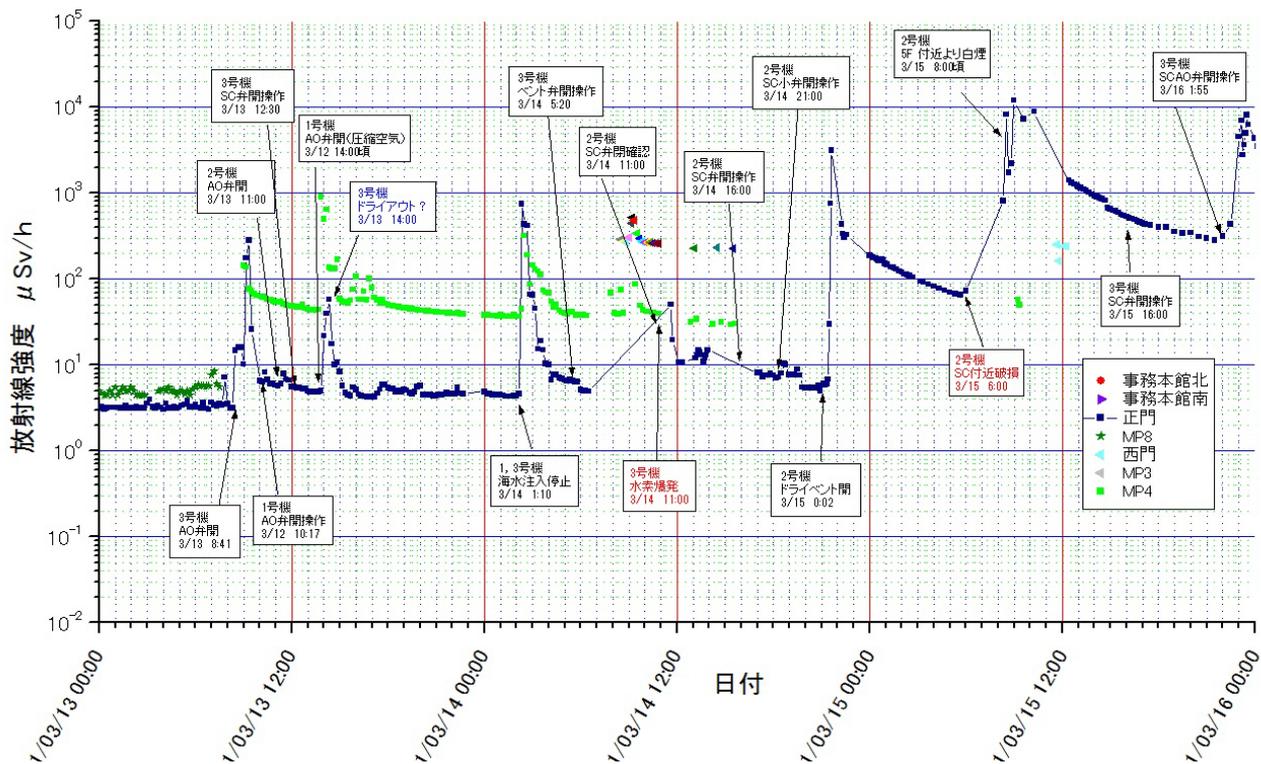


図2 放射線量の時系列変化 (3月13日0時～3月16日0時)

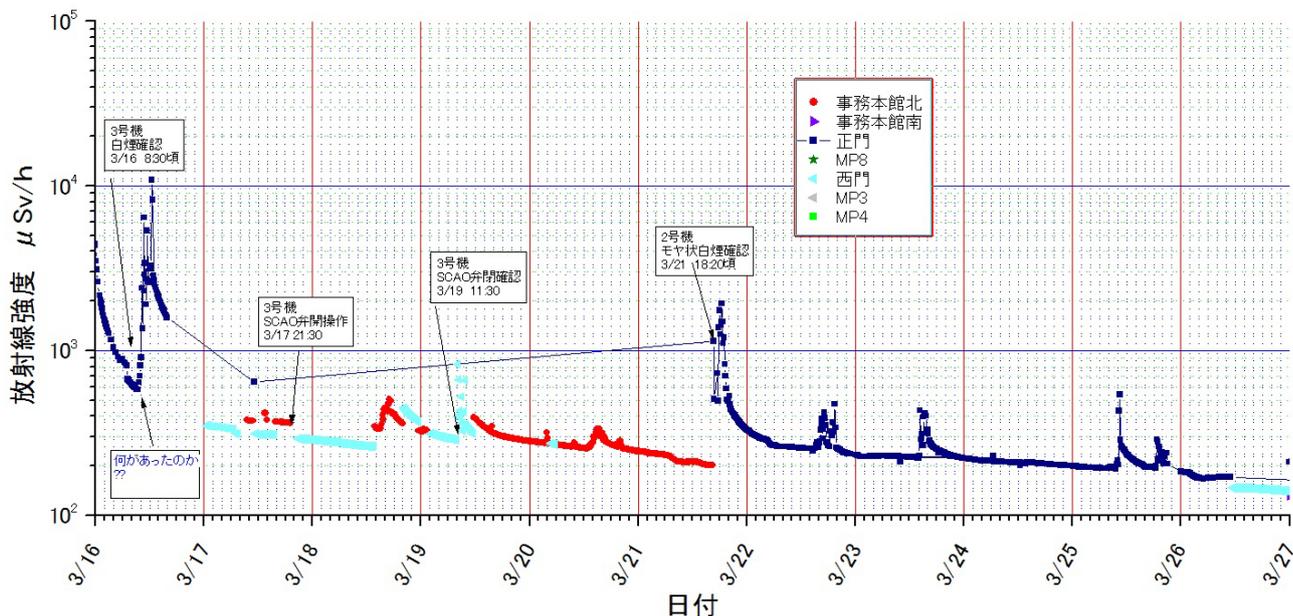


図3 放射線量の時系列変化 (3月16日0時～3月27日0時)

図1-3は各モニターポストで観測された放射線量の時系列変化を示している。図中には政府がIAEAに提出したレポートに記載されている原子炉の事象が記入されている。各事象と放射線量増加の立ち上がりは非常に良く一致している。幾つかの事象が作業記録と若干異なる場合もあるが、それは極限環境における作業上の問題だと考えられる。さらに、作業員がベント等を実施していない時に放射線量が急激に増大する場合がある。これと原子炉パラメータを照合することによって、原子炉内で何が起きているかをかなり正確に推定することができる。

以下に各号機の現象を検証する。

1号機の検証

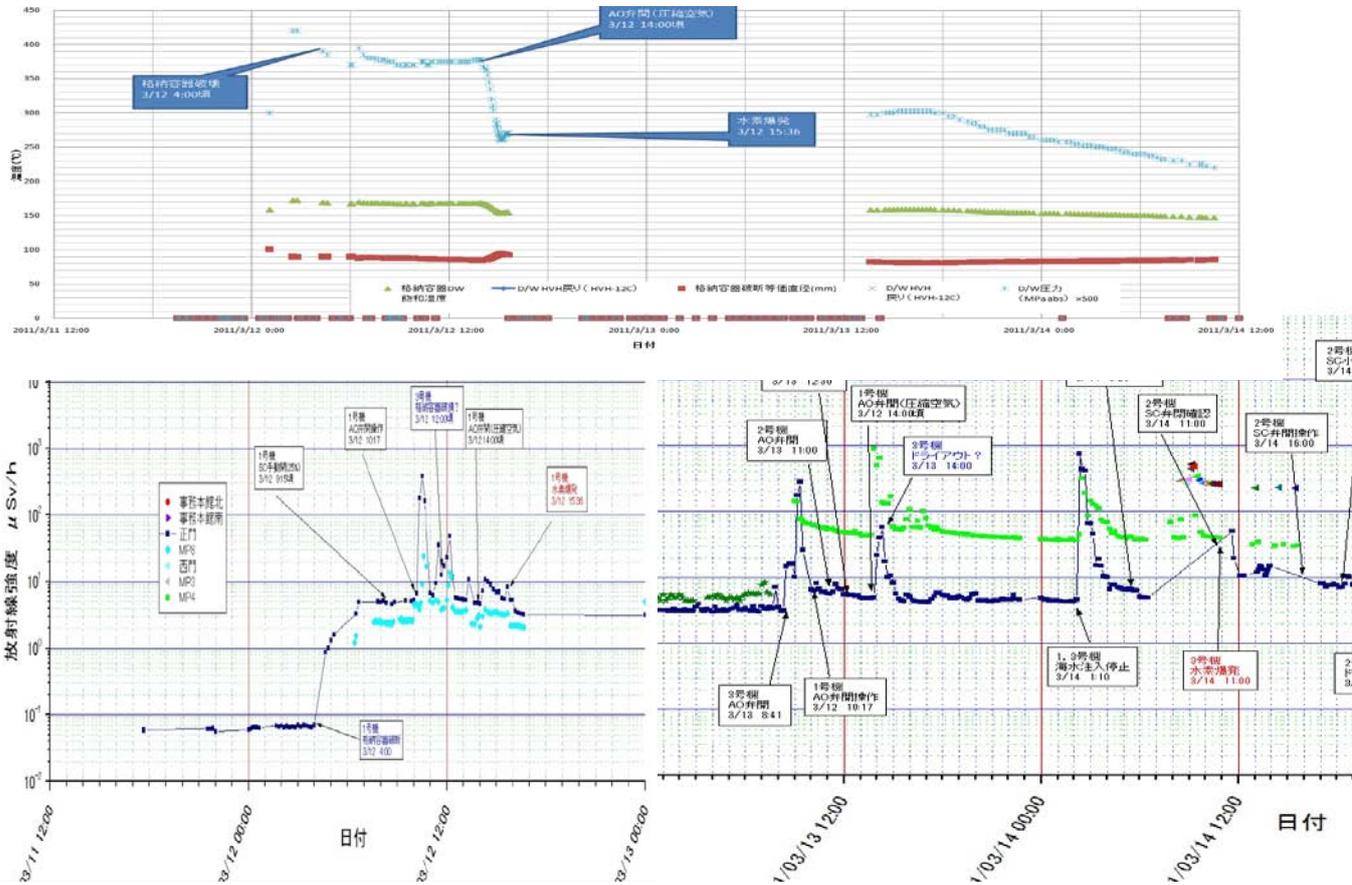


図4 1号機 DW 圧力と推定破損断面積の時系列変化と放射線強度の変化

断面A-B-Cでベルヌーイの式が成り立つとすると
ベルヌーイの式と連続の式から

$$P_A + \frac{1}{2} \rho w_A^2 = P_C + \frac{1}{2} \rho w_C^2, \quad \dot{V} = A_A w_A = A_C w_C$$

質量流速 m (kg/s) は

$$m = \rho A_C w_C = \rho A_C \sqrt{\frac{2(P_A - P_C) / \rho}{1 - (A_C / A_A)^2}}$$

$$= C A_B \sqrt{2(P_A - P_C) \rho}$$

$$\approx 0.6 A_B \sqrt{2(P_A - P_C) \rho} \text{ for } A_A \gg A_B$$

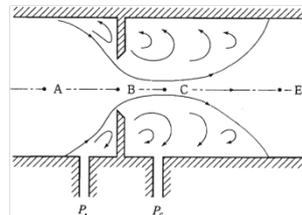


図5 ベルヌーイの式から算出される原子炉破断面積の計算

図4に示すように、12日4時に放射線量が急激に増大し以後しばらく一定になっている。これは、図4に示すDW圧力が0.8MPaから急激に減少した時刻と一致する。崩壊熱の時系列変化とそれによる水蒸気発生量 m 、隔壁内外の圧力差 $(P_A - P_C)$ が分かれば、図5の手法で破断面積 A_B が計算できる。蒸気発生量は崩壊熱の推定から算出できる(HTC Rep. 1.5 2011/05/27)。この手法で破断面積が時間的に変わらない場合は、破断

面のレイノルズ数が十分大きく、運動量支配の流体挙動を示していることになる。つまり、細かい亀裂が多数存在したり、シールの隙間から蒸気が漏れているようなダルシー則に従う漏れではないことを示している。つまり、破断面はある程度の大きさであることが分かる。

図4にはその破断面積を等価直径で表している。12日4時にDWが破損し、その断面積が大きく変化していないことを図4は示している。図1から1号機がベントするまで放射線量が一定であることから、一定量のガスが放出されていると推定される。この時点では、RPVは完全に破損しておらず、安全弁から水蒸気が放出されていると考えられる。その水蒸気発生量から破断の等価直径は直径9cmと推定される。

後述するように、12日4時の時点ではジルカロイ反応は起きておらず、放射性ガスも希ガス等のみと推定される、従って、図1に示すように放射線量の上昇は、炉心破壊が起きてから放出している2,3号機の場合と比べて格段に小さい。図4の12日12時と12日以後の破断面積を比較すると分かるように、1号機水素爆発の前後で破損面積の変化が認められないこと、および、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。なお、11日21時30分頃に1号機建屋の放射線が上昇したが、外部のセンサーには反応が現れていない。このことは、その時のガスの漏れが少なく屋内に限定されていることを示している。

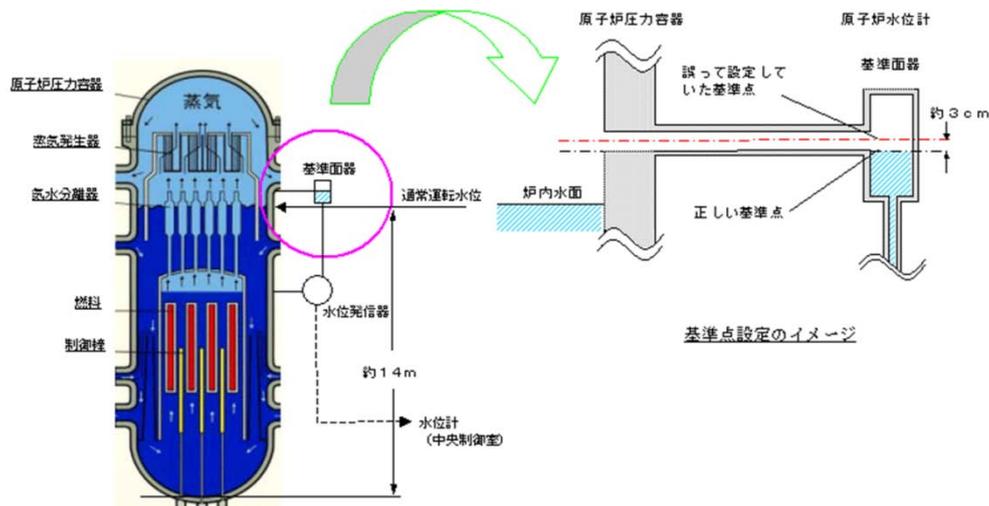


図6 炉心水位計の構造

図6は原子炉炉心の水位計の構造を示している。通常運転時には炉心から引き出された蒸気は基準面器で凝縮し、常に一定の水位を保っている。この基準水位から炉内の水面までの差圧水頭が圧力計で計測される。従って、原子炉上部が飽和蒸気で満たされている限り水面計は正しい値を与える。しかし、炉心の燃料棒が水面から露出し、上部が過熱蒸気で満たされると基準水位が減少し、水位計は正確な値を示さなくなる。著者は (HTC Rep.15.1, 2011/5/14) で水位計が壊れた場合の炉内の状態を推定し、 (HTC Rep.19.1, 2011/6/20) で各号機の破壊の大きさを推定している。ただし、燃料棒が水面下にある場合の水位計は正しい値を示していたと推定される。その結果は、2号機、3号機で解析結果と実測値との一致が示している。しかし、東電発表の1号機は11日早期の炉心破壊を予想し、水位計の値は「全く間違っていた」と言うシナリオになっている。IC（非常用凝縮器）の作動・不作動が炉心破壊シナリオに大きく影響するが、炉心パラメータの比較から、ICが作動し、原子炉内のドライアウトが東電発表のデータよりかなり遅く発生したと考える方が自然であると考えられる。

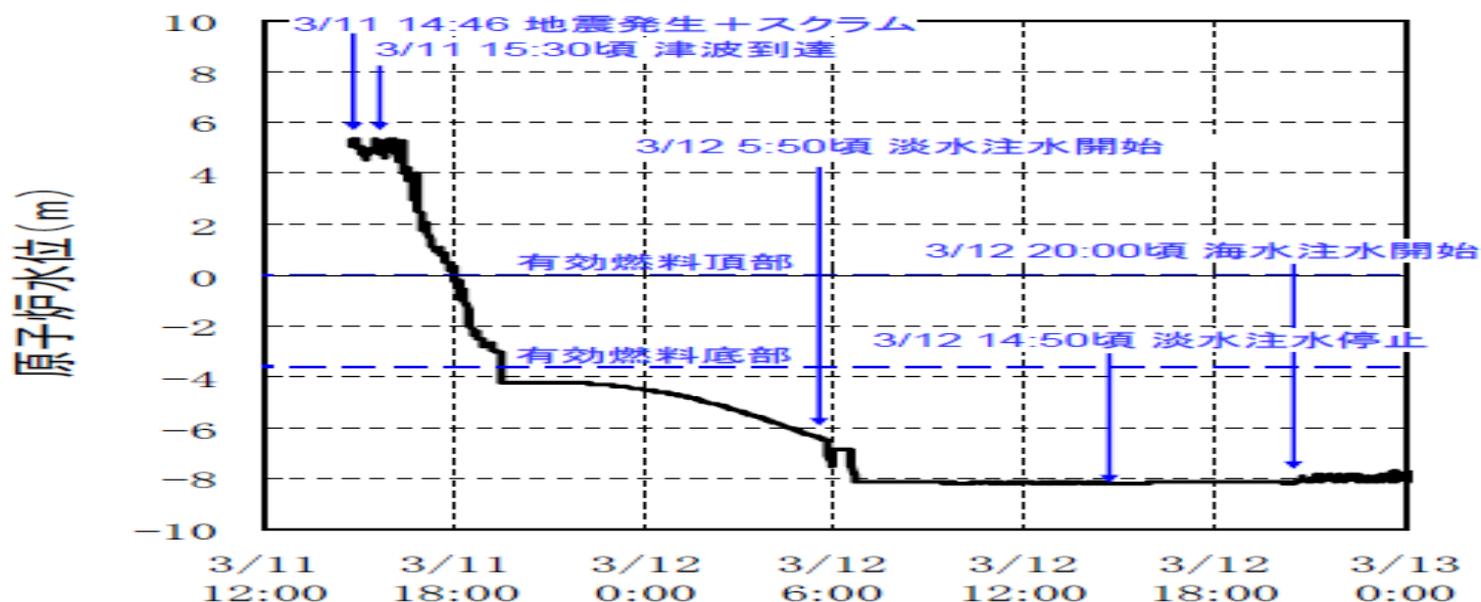
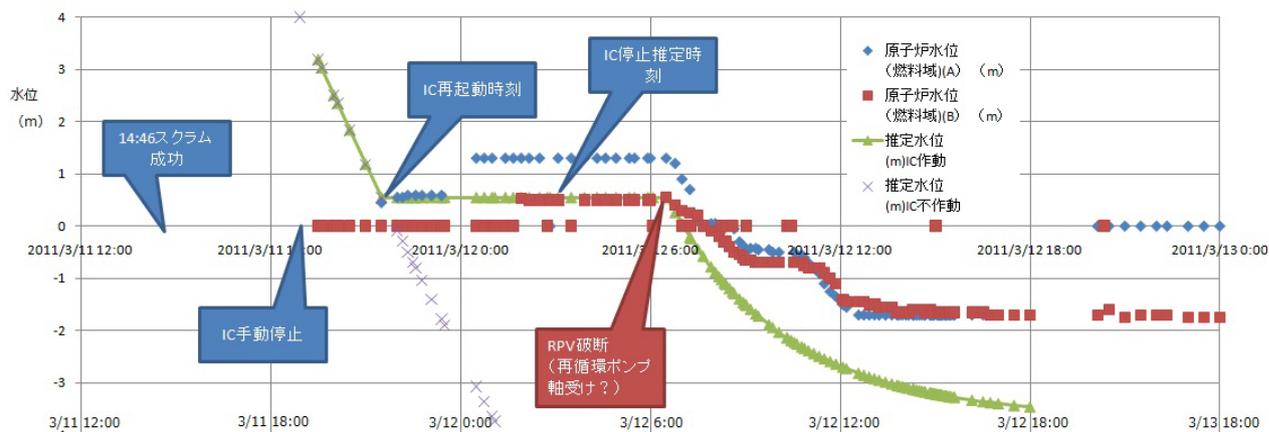


図7 1号機の圧力容器内水位の推定値と実測値の変化 (Rep. 17.2) (上) と東京電力福島第一発電所の炉心状態 (推定水位) について2011.5.15 (下)との比較

図7は、(HTC Rep.17.2, 2011/5/30)で推定した原子炉水位の推定と実測値の比較を示す。この場合、ICが作動し、IC停止後RPVの圧力が上昇し、12日6時30分頃に再循環ポンプベアリングの破断でRPVに等価直径5cmの穴が開いたシナリオである。ただし、このシミュレーションではジルカロイ反応による発熱と注水による水位上昇は考慮していない。東電のシミュレーションも付記するが、後者はICの作動を無視し、早期に炉心破壊が起きたシナリオである。破壊箇所はRPV底部も可能性があるが、その場合の考察は(HTC Rep.20.1, 2011/7/20)に記載されている。

再循環ポンプ破断の場合、その後破断面積が大きく変化していないことは、燃料崩壊後にRPVに新たな穴が開いていないことを示している。再循環ポンプの位置関係から、ほとんどの燃料はRPV内にとどまっていると考えられる。

IAEAへの政府レポートでも記されているように、1号機の非常用冷却復水器系(IC)は、18:25から3時間ほどの中断があったが、21:30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。また、水位計は、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 3 月 19-21 日に注水量が減少し原子炉が高温になるまでが正しい値を示していたと考えられる。9 月 8 日の報道で、「IC の作動が確認されていない」とされているが、かなりの事象が当初の報告書通りに IC が作動したことを示している。

図7に示した現象の詳細はRep. 17. 2に記載してある。このシナリオでは、ドライアウトは、早くとも3月12日12時頃で東電のシビア-ケースの11日19:30よりかなり遅い。その時間差は崩壊熱に影響し、本シナリオではシビア-ケースの2/3の発熱しかないと想像される。安全保安院の「クロスチェック」は東電のシビアケースと同じ境界条件を設定した「検算」である。東電のレポートでは、「ICの作動をあえて無視したシビアケースである」ことを明記しているが、報道では過激な部分のみ取り上げられている。(HTC Rep.15.1, 2011/5/22)でRPVの破断面積を解析しているが、RPV破壊後その面積は直径5cm相当で大きく変化していない。このことはメルトスルーのように大規模なRPV破断面が存在しないことを意味している。また、原子炉の注水冷却過程のRPV各部位の温度変化を見ても、燃料のほとんどはRPVに存在していることを示している。

1号機の破壊シナリオの詳細は(HTC Rep.17.2, 2011/5/30)に記載されているので参照されたい。RPVは破壊するまで高圧になっており水が入らない。自動減圧系(ADS)などを使用した、逃がし弁による強制減圧は電源喪失で作動していなかったと考えられる。図7を見ると、RPV破壊と注水成功の時間が一致するのはこのためである。つまり、電源喪失時の原子炉は炉心が破壊するまで水が外部から入らない構造になっていると考えられる。これは2, 3号機も同様である。

もし、メルトスルーが起きて燃料の大半がRPVの外にあると仮定すると、大きな穴が開いているので、RPVの蒸気発生量とRPV内外の圧力バランスが成り立たない。また、燃料が外にあれば注水量とRPV各点の温度の相関はこれまでの実測値と全く異なるものになる。燃料がRPVの中にあるか外に出ているかはこれからの原子炉解体作業に大きな影響を与える。正確なデータ解析が望まれる。最近、注水経路を変えることによって炉心冷却が改善した。これも燃料がRPVにあることを示している。(河村先生コメント)

これまで、事故の過小評価をして国内・国外で批判を浴びた結果、よりシビアな解析と評価を世界に発信することになったと想像される。必要以上に過大な評価を発信し、世界の民衆に誤解を与えることも、国益には沿わないと考えられる。本レポートに基づく詳細な解析を行い、それを現在の事象と照合して一致するか検証することを推奨する。また、**ころ合いを見計らって、正しい解析結果を発表することも必要だと考えられる。**

図4と図7を比較すると、12日8時以後は燃料棒が露出するので、ジルカロイ反応が起きて水素が発生する可能性がある。10時17分のSCベントで比較的大量の放射性物質が放出されている。その後、14時頃のベントを経て15時36分に水素爆発を起こしている。水素爆発自体による放射能の放出は小さいことが図4から分かる。14時のベントによる放射線量は小さいので、水蒸気の煙突からの放出は確認されているが、ベントの室内放出が疑われる。このときのベントは炉心破壊後であり多量の水素を含んでいる。放射線強度も原子炉建屋に水素が充満したときの放射線量が高く、爆発の瞬間は少し増大するが、直ぐ放射線量が下がったことから、爆発による放射能の放出は限定的であったことが推定される。DWは12日4時に破壊しており、定常的に炉心からの蒸気と水素を放出し続けており、これが、格納容器と建物の隙間を伝い建屋上層に蓄積されていたことが予想される。ベントが正常に実施されても水素爆発は回避できなかつたと考えられる。

2号機の検証

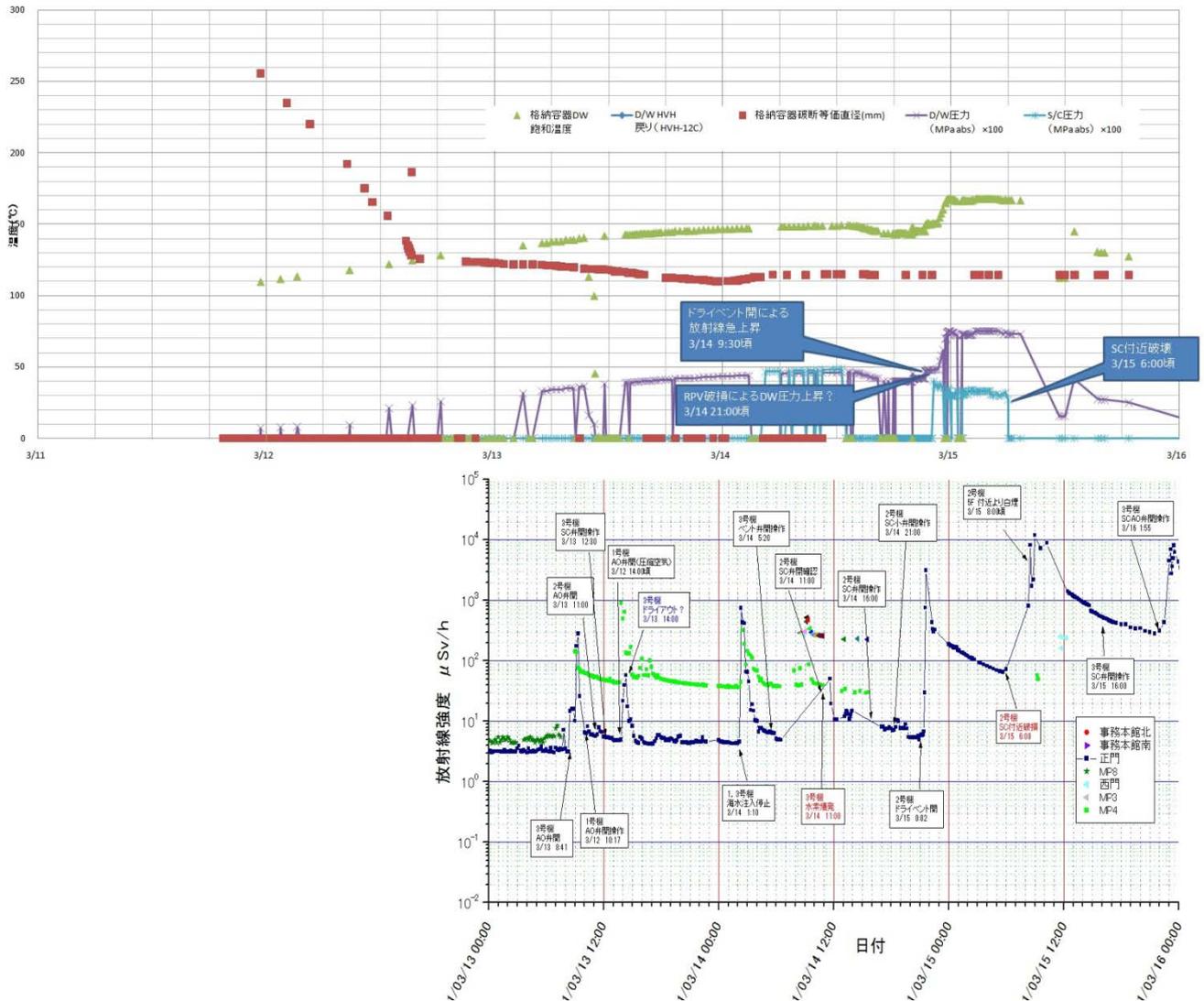


図7 2号機DW、SC圧力と推定破損断面積の時系列変化

図7はDWとSCの圧力変化を示している。14日21時頃RPVが破損し、蒸気がDWに溜まりDWの圧力が急上昇した。それまでは、SCとDWはほぼ同じ圧力である。この圧力上昇により弁を21:30頃に解放し急激に放射線量が上昇していることが図7から読み取れる。これは、21時のSCベントか15日0時2分のドライバントの先行実施に起因するものと推定される。この放射線量は多いので、炉心損傷後およびRPV破損後の蒸気放出である。その後DWの圧力が高いまま維持されている。

15日6時にSCまたはDWに破壊が起きたことが図7の放射線量から分かる。図7を見ると、DWの圧力低下タイミングは6時とは少しずれており、SC付近での破壊が予想される。特にSCのトラスとDWとの接続部破壊が疑われる。SCが破損した後、DWの汚染水蒸気が一気に環境に放出された。その時の水蒸気が8時25分に目撃されている。SC破壊後の圧力データが少ないので破断面積は定かでないが、3月16日15:30と3月27日1:00のSC圧力データで破断等価直径を計算するとそれぞれ17cmと13cmとなる。実際にはこれより大きいのではないだろうか。図7に示すDWの想定破断直径は、破損時刻との相関が取れないので、DWは健全であることが推察される。つまり、DWの圧力はSCから徐々に抜けてゆくため、SCに比べて圧力減少に遅れが生じている。最近報道されているように、これは水素爆発ではなく、内部圧力による破壊であると推定される。

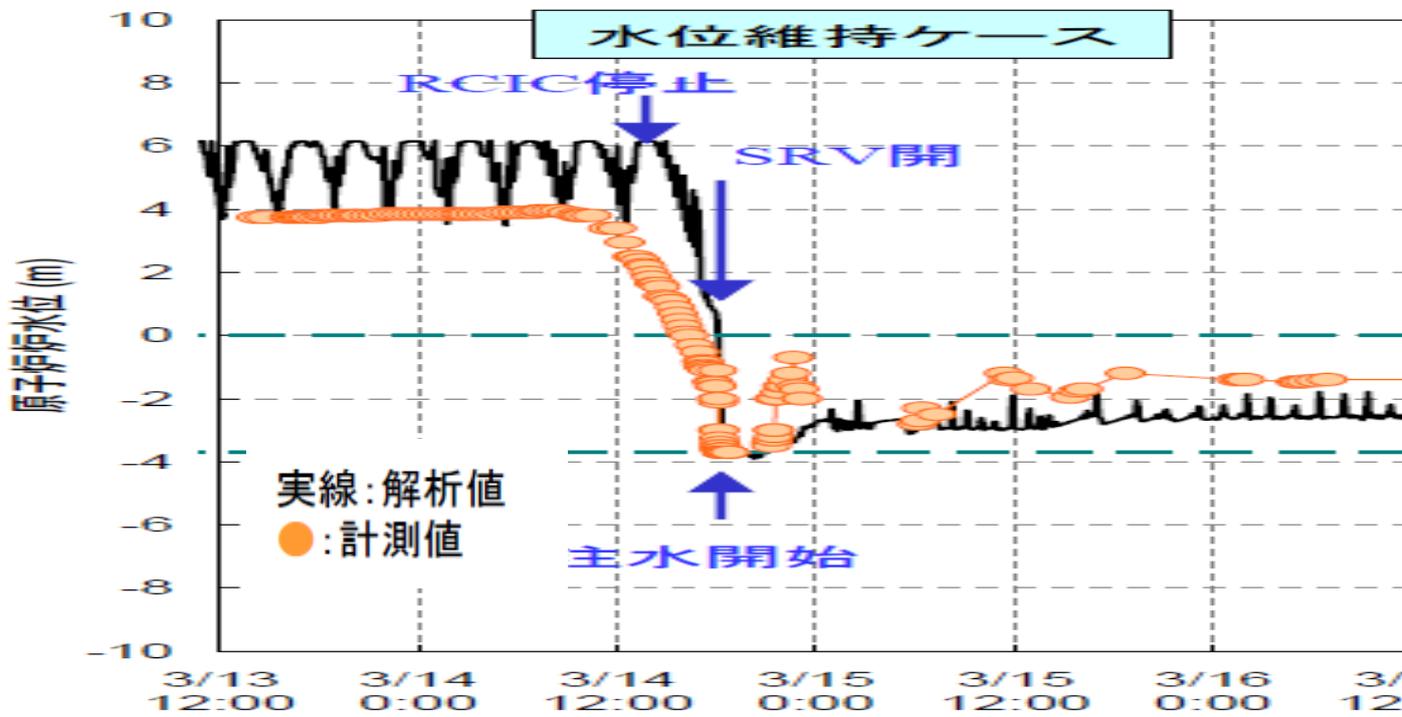
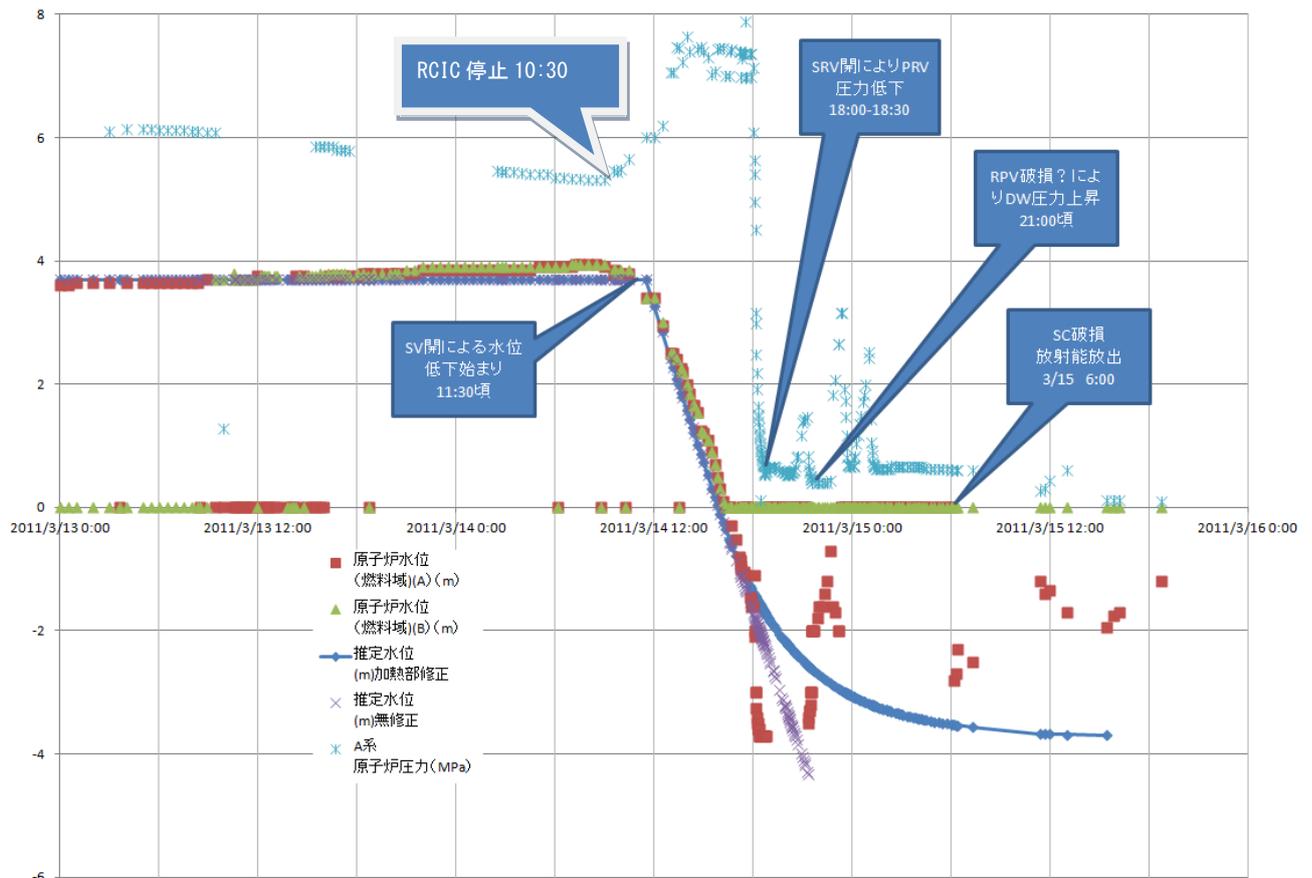


図8 2号機の圧力容器内水位の変化(上)と東電推測値(下)の比較

図8は、2号機RPV内の水位変化と、崩壊熱と蒸発の収支より推定した水位を示す。2号機はRCICが長期に作動し、RPVおよび格納容器の破壊は1号機よりかなり遅い。推定水位は、燃料棒が露出して伝熱

面積が減少した場合と、燃料棒が露出すると同時に燃料が崩壊し水没していく場合を想定した。本計算では、ジルカロイ反応による発熱や注水は考慮していない。

図8は東電が発表したシナリオと類似の結果となった。ただし、本ケースでは、隔離時冷却設備(RCIC)が停止し、圧力が上昇し、14日12時00分頃にSV(バネ式安全弁)が開いて水位が低下すると計測された水位と同じシナリオとなる。水位系は燃料棒が露出するまで正しい値を示していると考えられる。もし、この推定が正しければRCICは報告されている13時25分(推定停止時間)より以前の10時30分頃に停止したと考える方が妥当である。燃料棒が露出した後はジルカロイ発熱反応が起きるので推定よりも急峻に水位が低下している。16時34分にSRVを手動で開放し原子炉圧力を一気に下げて水を注入している。ただし、このときまでに電力が回復し、空気圧でSRVの強制減圧が出来た場合である。そうでなければこの時点でRPVが破壊したことになる。その後の注水にもかかわらず、燃料棒が完全露出崩壊し21時頃にRPVが損傷したと推定される。これと同時に、RPVの蒸気がDWに直接噴出するのでDWの圧力が急激に上がっていることが図7に示されている。このときのRPV破壊位置は底部にあると考えられる。図7より、15日2時50分から4時20分までのRPVとDWの圧力データが安定しているのでその時のRPV破断面積は等価直径で5.2cmとなる。東電のレポートでは16日2時頃のRPV破損を予測しているが、その理由については明らかでない。

2号機サプレッションチェンバー破損による影響確認のため 15日9時放出開始、24時間積算



図9 SPEEDIによる放射線推定(2号機SC破壊による放射線放出を仮定)(Rep.15.3)

Airplane Monitoring of Radiation Dose by MEXT(Japan) and DOE(USA)

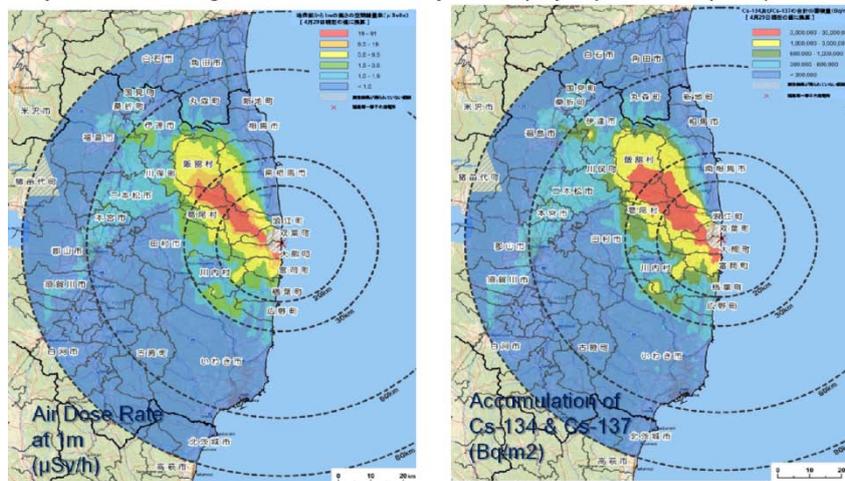


図10 航空機による放射線計測結果 (Rep.15.3)

2号機のSC破損とその後15日22時に実施されたと推定される3号機のベントが福島県の放射線汚染を決定的に下げた。それは、図9と10の比較によっても明らかである(HTC Rep.15.3, 2011/6/8)。

3号機の検証

3号機はRCIC稼働停止後高圧注水系(HPCI)が自動で作動しそれが停止するなど、現象が複雑でいまだ未確定な要素が多い。図11は3号機の水位や圧力の変化を示しているが、HPCI作動時に水位が負の状態(燃料棒露出状態)になっているので、HPCIが正常に作動したかが疑われる。もし、注水系のタンクとの接続だけで注水が行われないと炉心の蒸気は凝縮し圧力も急激に低下する。同時に炉心内の水も失われる。水位が減少し燃料棒が露出すると水位計の値は信用できなくなる。図11には、東電のレポートも併記してある。東電のレポートにHPCIが作動しているときに水位が高くなっているデータがあるが、東電発表の原子炉パラメータのデータにはそのような値を見つけることは出来なかった。また、東電のレポートでは12日以前にも3号機の水位データが存在するが、それも東電発表の原子炉パラメータには記載されていない。東電では、HPCIの配管に亀裂が存在し、蒸気が漏れたという仮定のシナリオを考えている。この場合、HPCIの作動時に水位が維持されるという図11上図のデータは説明がつきにくい。

本レポートでは、東電発表の原子炉パラメータ(HPCI作動時の水位不明)を仮定して解析を試みる。まず、RCIC設備(隔離時冷却設備)が何らかの理由で11時36分に停止した後、12時35分にHPCIが作動したと報告されている。このとき、バルブが開いたがHPCIの注水が不十分だった場合を考えると、HPCI配管の破断がなくてもRPV内の蒸気はサブプレッションチャンバー(SC)で急激に凝縮し一気に圧力が低下する。12日12時35分にHPCIが起動して13日2時42分にHPCIのバルブが閉鎖されるまでSCで蒸気が凝縮すると、(HTC Rep.17.2, 2011/5/30)の崩壊熱計算から、252トンの水が蒸発する。これはRPVの水位低下で10.3mに相当する。ただし、この値はRPVに燃料等が入っていない場合であるので、実際の水位低下はこれよりも大きい。つまり、HPCIが作動せずバルブが開いた状態では、この時点で炉心崩壊に至ることが予想される。

東電のレポートのように、HPCIの配管が破断しており、HPCI弁が開いたとき注水が行われず蒸気漏洩が起こった場合でも同様なシナリオとなる。この場合、漏洩蒸気でDWの圧力が上昇しなければいけないがDWの圧力はHPCI起動後の12時35分以後低下している。

もし、RPVが高圧状態の時にポンプが作動せず、12日19時にRPVの圧力が1MPaになったときにポンプが作動して注水ができたと仮定すると、その時の水の蒸発量は134トン、水位低下は5.4mとなる。それでも燃料棒は露出することになる。どちらの場合でも、燃料棒が露出するので以後水位計は正しい値を示さなくなる。

次にHPCIのバルブが13日2時42分に遮断され、圧力が上昇したときの水の量を推定する。原子炉パラメータから2時44分と3時44分の圧力は0.68MPaabsと4.2MPaabsであった。RPVの容積を490m³と見積もり、燃料や容器の熱容量を無視し、さらに燃料は崩壊しているが完全に水没して飽和状態であると仮定した場合のRPV内の水の量を推定する。この間、崩壊熱は37.633GJ発生している。各状態のエンタルピー、密度、エネルギーと質量の保存則より、2時44分時点で水(液体)は約70 m³存在したことになる。つまり、HPCIのバルブが開いてから注水が行われずに水がSCで凝縮し続けたシナリオと定性的に一致する。ただし、バルブを閉じてからRPV内の圧力が急上昇しているため、燃料は崩壊しているものの、この時点ではRPVは損傷していないと推定される。因みに、HPCI停止時にRPVに燃料棒以上に水が満たされている場合は、2時44分から3時44分の圧力上昇は説明できない。

圧力データによると、RPVは13日5時0分に安全圧力を超え、SVで蒸気を放出していると推定される。その後、8時55分に急速に圧力が低下した。この間の3号機の水蒸発量を(HTC Rep. 1.5 2011/05/27)で推定すると、63.4トンとなり、上記のHPCI停止時の水残量とほぼ一致する。このとき、DWの圧力もSVの蒸気放出によって徐々に増大していることが図11から分かる。これらを総合すると、RPVは13日8時55分に破損し、水素と放射能を含む上記をDW内に直接放出したことが考えられる。

RPVの破損による急激な蒸気放出でDWの圧力が急増している。その圧力増大が8時10分のDW破損の原因となったと考えられる。

上記の推定は、種々の仮定を用いているので一つの推定結果と考えていただきたい。しかし、詳細な

解析でこのシナリオと一致したデータが得られれば、13日9時8分頃のSRVの強制減圧の前に炉心は崩壊していることになる。同時に水素の発生も起きている。

図11に示す圧力変化では、3月12日12時35分にHPCIが作動するとRPVの圧力が急激に減少している。また、13日2時42分にHPCIが停止してバルブが閉じると圧力が急激に増大している。その後SRVが強制的に蒸気を逃がし、水位が低下して燃料棒のドライアウトが始まったと考えられていた。Ver.1でもそのような予想をしており、東電のレポートも同様である。Ver.2ではそれより早い炉心崩壊を推定している。何れにしても、HPCIの作動状況が把握できないために、実際の現象は不明な点が多い。図6に示すように、一端ドライアウトが発生すると水位計の表示は信頼できなくなる。実際にはRPV上部は過熱蒸気に満たされていたと推定される。

る。圧力データを見ると RPV の圧力は 8 時 55 分に急激に減少し、それと同時に DW の圧力が急激に増大し 9 時 10 分に 0.637MPa になった後圧力が減少している。このときに DW が破損したことが考えられる。図 12 の放射線強度は 9 時 10 分に急速に立ち上がっていることから、DW の破損が裏付けられる。

図 11 の考察が正しければ、このときすでに RPV は燃料棒が破壊しており、DW からの放出ガスは水素を含んでいる。この水素は格納容器と原子炉建屋の隙間を上昇し、屋上階に溜まっていると考えられる。3 号機は 14 日 5 時 20 分にベントを行っているが、その蒸気にも水素が含まれている。

3 号機の RPV 破損時間とその規模は不明な点が多い。もし、SRV の強制減圧の時間が正しければ、RPV はそれ以前に破損していることも考えられる。図 11 の考察で示したように、HPCI 停止時に RPV 内の水はほとんど蒸発していることが考えられるから。その後の弁の閉鎖と安全弁による蒸気放出で炉心が完全空だき状態になり、RPV 底部に穴が開いたことも考えられる。8 時 55 分以後、RPV、DW、SC はほぼ連動して圧力が変化していることから、3 号機の RPV は大きな穴が開いていることが予想される。ただし、場合によっては燃料がかなりの量漏れ出ていることも否定できない。後述の図 13 に示すように、3 月 21 日以後のデータで計算した RPV の破損部等価直径は 16cm 程度である。これは、1 号機 2 号機に比べてもかなり大きいことから、図 11 で述べた早期の RPV 破損が考えられる。

3 月 14 日以後は RPV の圧力が DW、SC よりも低くなっている。この現象を説明するために、著者らは (HTC Rep.14.1, 2011/5/8) で蒸気の間欠放出を仮定して机上実験を行っている。その後、より原子炉に近いモデルで実験したが 3 号機の圧力は模擬できなかった。燃料のかなりの部分が DW に落ちており、RPV の破損部が DW 内の水で満たされている場合は図 12 のような現象も可能であると考えられる。しかし、9 月 6 日の報道で RPV への注水経路を変えることによって効果的な冷却がなされていることから、燃料が RPV に留まっていることが推定される。原子炉燃料の位置は燃料撤去に大きな影響を与えるので、今後の検証が待たれる。東電は 3 月 14 日 10 時頃に RPV 破損を推定しているがその理由は不明である。

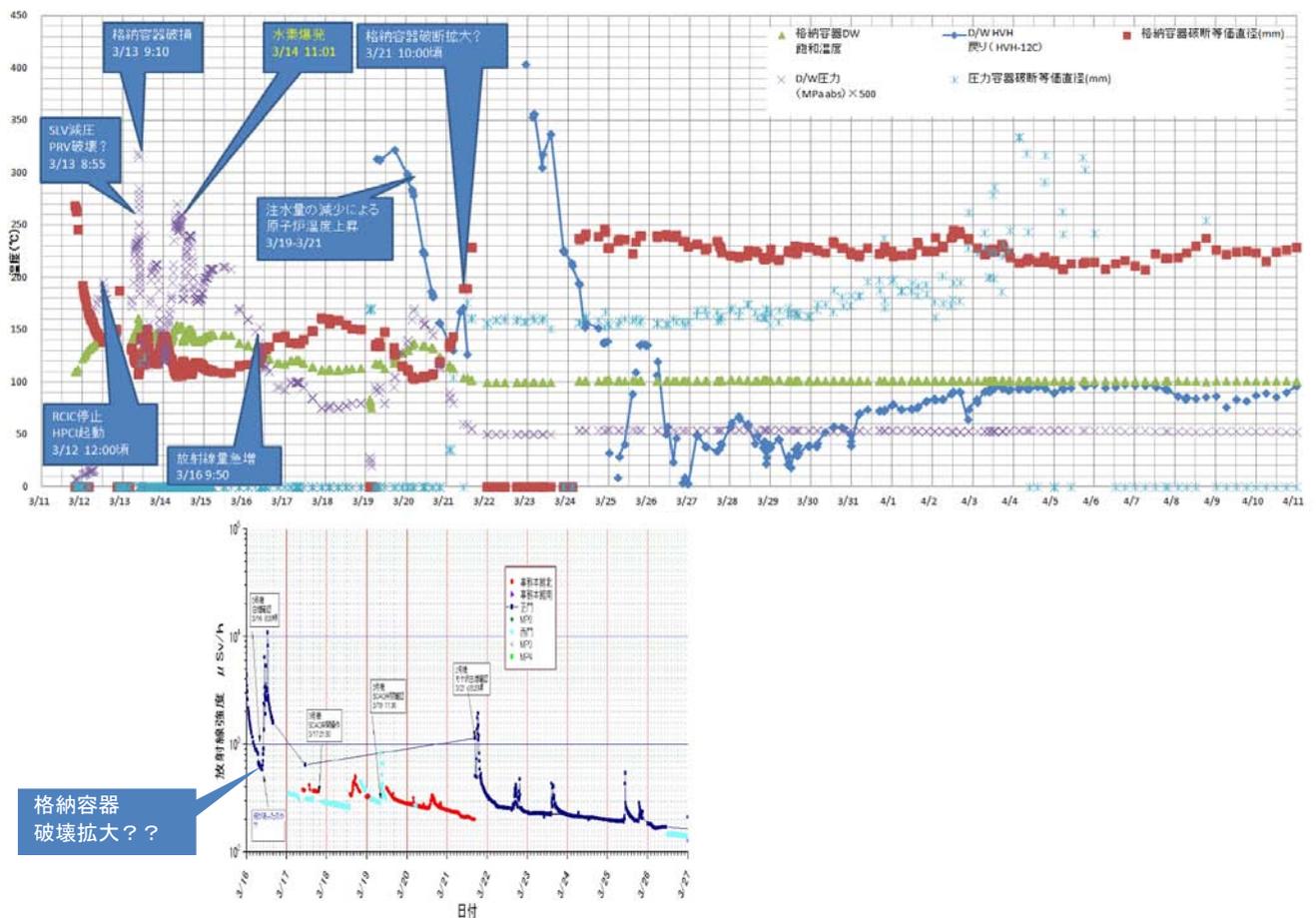


図 13 3 号機の格納容器圧力と破断面積推定

図 13 は、上記の事案を検討した格納容器 (DW) の破断時刻と大きさの推定である。格納容器は 13 日 9 時 10 分に破断し、その大きさは直径 12cm 相当程度である。このとき、燃料棒はすでに崩壊していると推定され、放射能の放出量も 1 号機格納容器が 12 日 4 時に破壊した場合に比べて桁違いに大きいことが分かる。Ver. 1 では、13 日 14 時以後の炉心破壊を予想していた。東電の炉心破壊は 14 日 10 時の推定でもっと後である。その後の水の漏洩状況から判断すると、破損部位は DW 下部で DW と SC の接続部が疑われる。図 12 のデータから、DW に水が溜まる構造になっているとも考えられるので、破損箇所は 1 号機より上部かも知れない。

14 日 1 時 10 分頃に 1, 3 号機の海水注入停止があり放射線量が急上昇した。5 時 20 分にベントした後、11 時 1 分に水素爆発を起こした。このベント作業により水素が建屋に充満し水素爆発を起こしたことも考えられるが、格納容器はすでに破損しており、そこから漏れ出た水素が上部に溜まり爆発した可能性も考えられる。3 号機の爆発前後で破損断面積が大きく変化していないことから、爆発による格納容器の大きな破壊は無かったと考えられる。

その後、原子炉がドライアウトして破損し、3 月 16 日 9 時 50 分頃に破断面積が増大したと予想される。同時期に放射能の放出が測定されている。このときの破断面の等価直径は 15cm 程度であると推定される。

3 月 19 日から 21 日に注水量が極端に少ない次期があり、RPV および DW が高温になった。その時、格納容器の破損が拡大し破損面積が最初の約 4 倍になり、等価直径が 23cm 程度になった。このとき RPV 上部ほど高温になったと考えられるので、DW 上部のシール部の破損も考えられる。僅かではあるが燃料の再融解による RPV 下部の損傷と燃料流出による DW の破壊も否定できない。いずれにせよ、図 5 の考察から、破損隙間はある程度の大きさであると考えられる。

この間、圧力容器 (RPV) の破損面積は等価直径で 16cm 程度であり、原子炉が高温になっても変化していない。ただし、冷却が進み DW の温度が蒸気の飽和温度に近くなると、破損面積の推定ができなくなることが図 13 からわかる。

9 月 9 日の報道では、19 日-21 日に注水量が極端に少ない時機があったのは間違いで実際は日量 1600 トンの冷却水が投入されたとあるが、原子炉温度や破壊状況を見る限りでは、この報道は正しくないと考えられる。もし、報道の通りの冷却が行われていれば、図 13 の挙動にはならない。むしろ、RPV と DW が高温になったことにより 21 日 10 時頃に DW 破損面積の増加があったと考えた方が自然である。

4 号機の検証

事故当初、4号機の爆発は燃料貯蔵プールの燃料が過熱してジルカロイ反応を起こし、その水素が15日6時から6時10分頃の爆発原因であると考えられていた。図14に示すように、著者らは早い内から燃料棒が完全空だきになった場合の最高温度を推定し、4号機プールではジルカロイ反応が起きないことを指摘した(HTC Rep. 7.1, 2011/4/8)。当時は、なぜ爆発が起きたかは不明であったが、後日、4号機燃料プールの燃料棒の健全性が証明された。

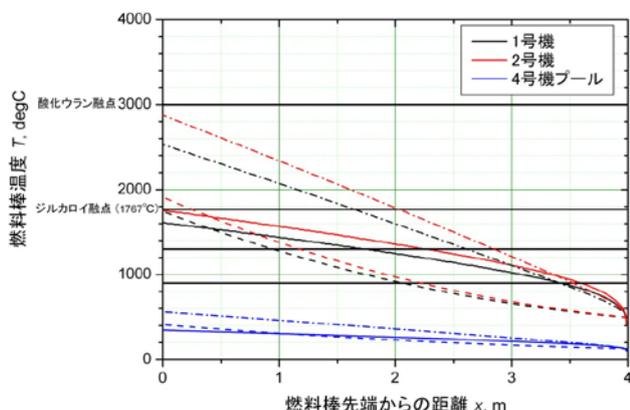
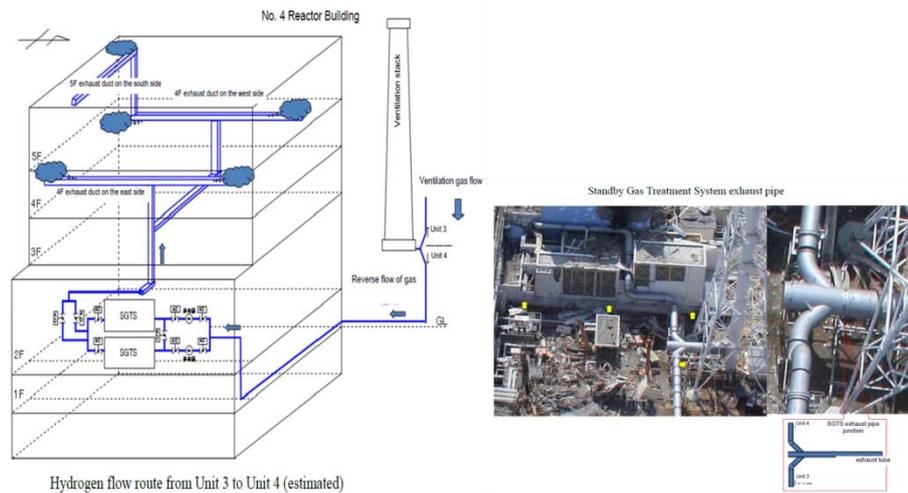


図 14 空だき時の各条件における燃料棒の軸方向温度分布(HTC Rep. 7.1, 2011/4/8)と燃料棒の現状 (2011 年 4 月 29 日 20 時 59 分 読売新聞)

3月15日6時現在において、燃料プール内の水の蒸発量を(HTC Rep. 1.5 2011/05/27)で推定すると、440トンであり、水位低下は3.5mであった。長さ4mの燃料棒は深さ11.8mのプールの底に置かれており、この水位低下では燃料棒は露出しない。



Report of the Japanese Government to the IAEA
-The accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations- June 2011

図15 政府および東電が推定する4号機原子炉建屋爆発の経緯

図15は、政府および東電が想定する4号機爆破のシナリオである。3号機が14日5時20分にベントした際、ベント配管を通じて4号機建屋に水素を含む蒸気が流入し、それが15日6時頃に水素爆発を起こしたとされている。著者の推定もほぼ同様であるが、下記に示す幾つかの疑問が残る。つまり、

(1) 図15では水素は最上階に溜まり、1, 3号機と同様に屋根を吹き飛ばすはずであるが、実際の爆発は建屋中層で起き、側面の壁が吹き飛ばされている。最上階のダメージは限定的である。水素は軽いので上に溜まることはあっても、下に流れることはない。

(2) 5時20分にベントをしてから4号機が爆発するまで約20時間の時間遅れがある。その間、3号機で新たなベントをした形跡はない。20時間の間、新たな水素供給がなければ水素は屋根から抜けることが考えられる。

一つの可能性として、修理に使う溶接用アセチレンガスボンベが地震で倒れ、空気より重いアセチレンガスが建屋中層に溜まって爆発したシナリオである。著者は爆発の素人だが、4号機建屋の破損状態を見ると、普通のガスボンベではこの爆発は規模が大きすぎるように感じられる。

他のシナリオは、3号機は14日11時1分の水素爆発の後でも水素を出し続け、それが4号機に蓄積して爆発したシナリオである。このとき、14日5時20分に流入した水素も4号機建屋中層に溜まっていた可能性がある。3号機の格納容器は13日9時10分に破損し継続的に水素を放出していたと考えられる。また、3号機と4号機の原子炉建屋は、ベント配管だけでなく各種トレンチや配管で繋がっていることが想像される。もし、3号機DW下部の破損口から3号機建屋に流入した水素がそれらの配管を伝って4号機建屋中層に溜まったとすると、15日6時頃の爆発は説明がつく。

4号機爆発の前に狐火のような物が目撃されたという情報がある。3号機の水素放出が続いてそれが何らかの形で爆発せずに着火すれば狐火のように見える可能性もある。水素火炎は不輝炎なので、狐火のように見えることも考えられる。図15の爆発シナリオは1および3号機の水素爆発に適用できるだろう。

2号機のサブプレッションチャンバー(SC)破裂と4号機の建屋爆発がほぼ同時期に起きた。15日6時頃に聞こえた爆発音は、2号機のSC破裂音ではなく4号機の水素爆発であると推定される。これは、報道でも公開されている。2号機の水素爆発は無かったと想像される。正確には、2号機の破裂はほぼ6時丁度であり、4号機の水素爆発はそれより若干遅れて発生したと考えられる。

各原子炉で起きた事象の総括

福島第一原子力発電所 1-4 号機の事象について、推定した解析を述べてきた。著者が得られる情報は、公開されているものに限られるので、正確さにかけるかも知れないが、できるだけ多くの現象が定量的または定性的に説明できるシナリオを考えたいつもりである。参考資料としては東電や保安院・政府から発表された各種レポート、操作記録、原子炉パラメータ、放射線記録を使用した。崩壊熱の推定は(HTC Rep. 1.5 2011/05/27)で述べたように、各原子炉の燃料棒の使用履歴を公開データから推定し、その値を使用した。各種新聞報道や原発に関する情報も活用している。

放射線測定値は時間とデータが正確なので、多くの現象の説明に役立つ。水位計は RPV が飽和蒸気で満たされている間は正しい値を与える。圧力計は、原子炉が高温になるまではある程度の信頼性があると考えられる。温度計に関しては、T 熱電対の場合は使用限界温度があるので注意が必要である。現場の所員が命がけで取得したデータは貴重である。初期のデータや操作記録は分単位では若干の誤差があるかも知れない。それらを総合し、物質とエネルギーの保存則を適用すると、原子炉で何が起こったか推定できる。その推定が諸種のデータと整合性があるか確認することによって、一定の現象が見えてくる。ただし、本解析はエクセルや電卓でできる程度のものなので、ダイナミックな数値シミュレーションは関係各位に確認していただきたい。

推定事象を纏めると表 1 のようになる。

表1 各号機で起きた事象の纏め

	1号機	2号機	3号機	4号機
圧力容器 (RPV)	12日5時40分頃：ICは東電の初期報告と同じに作動しているが同時刻に停止 12日6時30分頃：再循環ポンプ付近の破断でRPVに亀裂が生じた、その等価直径は5cm 燃料の大部分はRPV内に留まっている可能性有り	14日10:30頃：SCが飽和してRCICが停止 14日21時頃：ドライアウトによりRPV底部に等価直径5.2cmの穴が開く	11日14時37分：地震により配管部一部破損、破損直径6mm 12日12時35分：HPIC弁開によりRPV内の蒸気がSCで凝縮、水位低下 13日8時55分：燃料メルトダウンによりRPV底部が破断、その等価直径は16cm	定期点検作業中
格納容器： ドライウエル (DW)， サプレッションチャンバー (SC)	12日4時0分：DWが破損、SCとDWを接続する溶接部破損の可能性、等価直径9cm、 12日15時35分：水素爆発でも亀裂の大きさに変化なし	15日6時0分：SC破損、等価直径13-17cm、この崩壊で大量の放射能が放出され主な汚染を引き起こした	13日9時10分：DW破損、初期破損直径12cm 14日11時1分：水素爆発でもDWの亀裂に変化なし 16日9時50分：破損直径16cmに増加 21日10時30分頃：原子炉が再び高温になり破損直径25cmに増加	
原子炉建屋	12日12時頃：RPVメルトダウンにより水素発生、DWから漏れ出て建屋に充満 12日10時17分、14時30分：ベントにより建屋最上階に水素蓄積 12日15時36分：水素爆発	15日6時0分：SC破損により放射能放出、このときの放射能が内陸部に流れた 以後蒸気と放射能の放出が続く	13日9時10分：DW破損によりメルトダウンしたRPVよりの水素が建屋に充満 14日5時20分：ベントにより水素が建屋に充満 14日11時1分：水素爆発	14日5時20分：3号機ベントにより水素が建屋に充満以後DWが破壊した3号機より水素流入が続く 15日6時0分-10分：建屋中層で水素爆発 15日6時0分：燃料プール内の水位減少3.5m、燃料棒には大きな損傷無し

得られた推定シナリオは東電や政府の見解と異なるものもあるが、本レポートの方が公開されている計測結果を説明できていると考えられる。ただし、著者の知らない現場の作業、計測データ、原子炉の構造で全く異なった事故シナリオも考えられる。本解析は、限定的な情報による分析である。この解析は多くのモデル化や簡略化を行っている。そのため、数値的には正確性に欠けるものもあると考えられる。

今後、より精緻な解析モデルと数値シミュレーションを実施することによって、原子炉内の現状把握ができると考えられる。原子炉の現状把握はこれからの事故収束と原子炉解体または封鎖手順に大きな

影響を与える。また、正確な現状と解析結果を世界に発信し、今日本が直面している原発の風評被害や過剰な事故評価を是正する必要もあるだろう。

本解析の目的は、どのシナリオが正しいかを争うのではなく、各種の専門家が事実関係を基にして色々な解析を出し合っ、原発事故の収束と今後の対策に役立てるものである。その意味で、不正確さの誹りを受けることを承知であえて提案している箇所もある。

本レポートは、日本伝熱学会福島第1原発災害に関わる伝熱学会特別委員会の検証用に (HTC Rep. 19. 1, 2011/6/20) を基本にして作成した。

おわりに

著者らは事故直後から、原発事故の熱流動解析と早期収束に関する提言を行ってきた。東日本大震災に直面して、著者が行う社会貢献は、老骨にむち打って瓦礫処理のボランティアに参加することではなく、これまでの知識を活用し原発の事故解析と提言を社会に発信することだと思い、ライフラインが復旧しない仙台で情報を発信し続けた。研究室の職員・学生も研究や個人的な用事を犠牲にしてデータ解析に協力してくれた。

事故解析とデータ公開を6ヶ月以上行ってきて、それが社会にどのように貢献したかは未知である。しかし、この作業をしているうちに、40年前の高校生時代に科学朝日で読んだ山名正夫著「ロング・ベースナウ」というボーイング727の事故解析の記述を思い出して、1972年に出版された山名正夫著「最後の30秒 羽田沖全日空機墜落事故の調査と研究」朝日新聞社、を取り寄せて懐かしく読み返してみた。

本書は、1966年に起きた全日ボーイング727型機が羽田に墜落した事故の事故調査委員会委員として故山名氏が事故調査を行った成果を纏めたものである。山名氏は、非常に緻密で明快な観察と解析、実験を通してB727の構造的・空力的問題点を指摘して事故の詳細を再現した。その結果は、当時の事故調査委員会には全く無視され、山名氏は事故調査委員会を辞めることになる。事故の最終報告書は政府やボーイング（製造会社）にも差し障りのない内容で纏められ、事故当初にボーイングの技術者が指摘したシナリオ通りのパイロットの操縦ミスが強く示唆されたものとなった。

山名氏の事故解析は委員会では無視されたが、解析結果はボーイングがB727の改善に役立てた経過がある。もちろん、山名氏の解析を使ったとは明記していない。B727は、野心的な設計で個人的にも好きな飛行機であったが山名氏が指摘したように、旅客機としては幾つかの欠陥があったようである。そのことは、製造会社の改良にもかかわらず、B727の胴体を流用した凡庸な設計のB737が未だ生産されているのに比べて、B727が早期に製造中止になったことと関連づけるのは著者だけだろうか。委員会では無視されたが山名氏の提言が歴史に反映されたと考えたい。

山名氏は、緻密な解析と実験で事故原因のかなり真実に迫っていたと思われるが、「間違ったところ、欠けたところを是正補正していただく資料としていただきたい。」（前述著書あとがき）と記している。その後、これを題材にした小説はあるが、山名氏の解析を検証した研究を著者は知らない。

これまで著者が発信したレポートは、後日間違いと認識されたもの、シナリオが変わったものも多い。このレポートも完全なものとは到底言い難い。前述の山名氏の事故解析には、遠く及ばないことはもちろんである。しかし、不正確の誹りを恐れず種々のしがらみのない状態で、事故が進展している中、純粹な物理現象として原発事故を考えて、何が起こったかを検証しようとしてレポートを発信したことは確かである。今後の、関係各位の参考になれば幸である。

一連のレポート作成にあたり、研究室の教職員・学生はもとより伝熱学会の先生方、同僚の先生方、関係各位の多くの方々のご助力を頂いた。ここに記して謝意を表す。