

## 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)

### 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、その後、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12日15時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日5時50分ごろ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6mm程度の亀裂が圧力容器(PRV)もしくはその配管で発生し、DWが12日12時頃もしくは13日9時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。その後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、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結合部のシール破損が疑われる。

### 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。

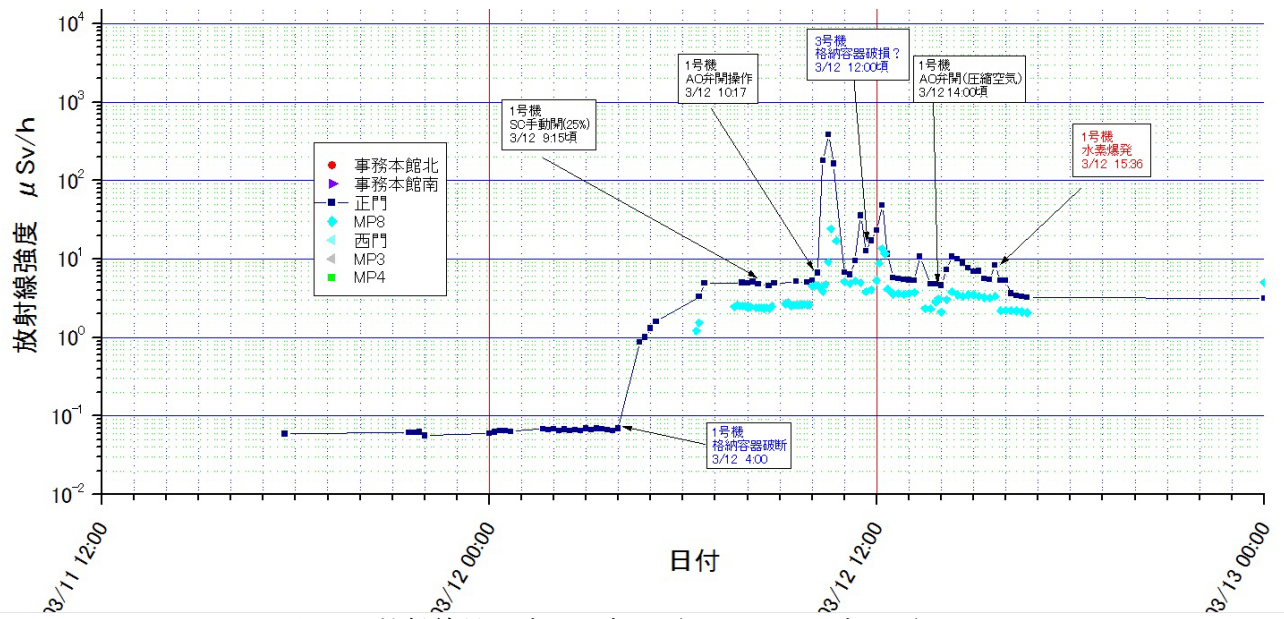


図1 放射線量の時系列変化 (3月13日0時まで)

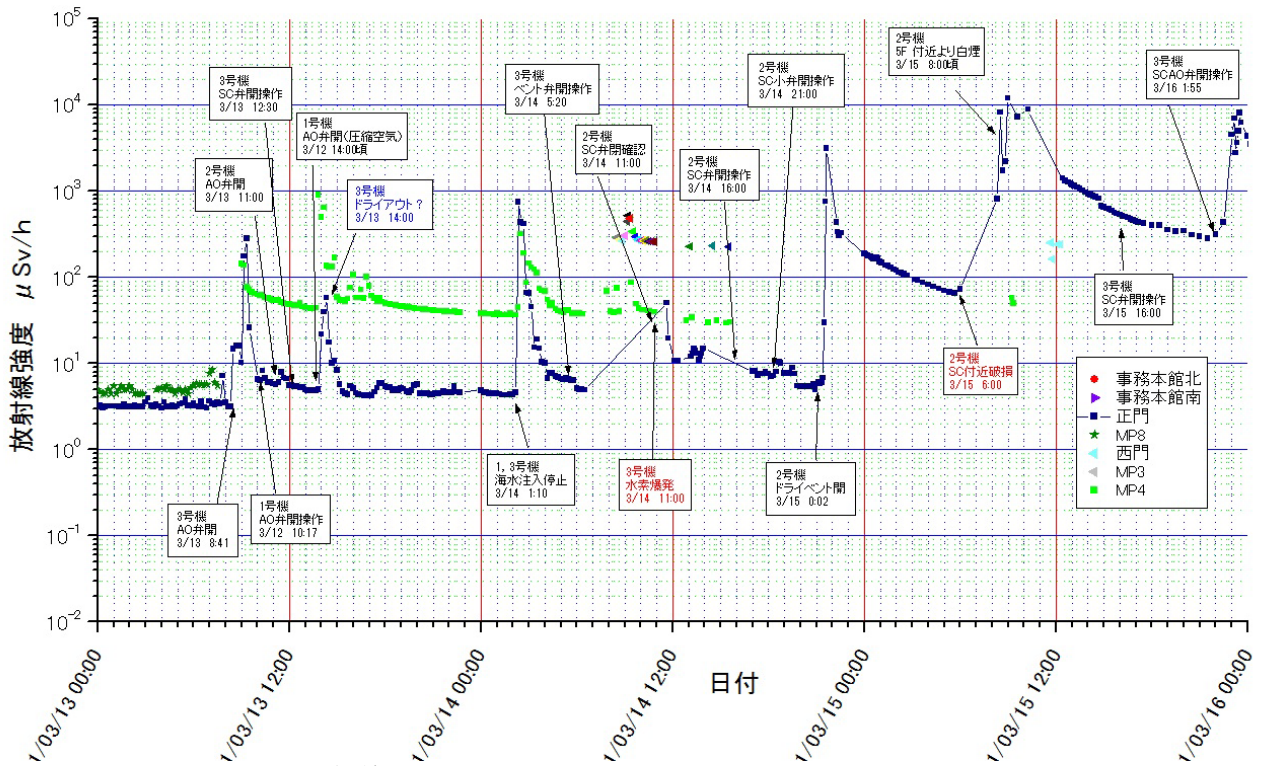


図2 放射線量の時系列変化 (3月13日0時~3月16日0時)



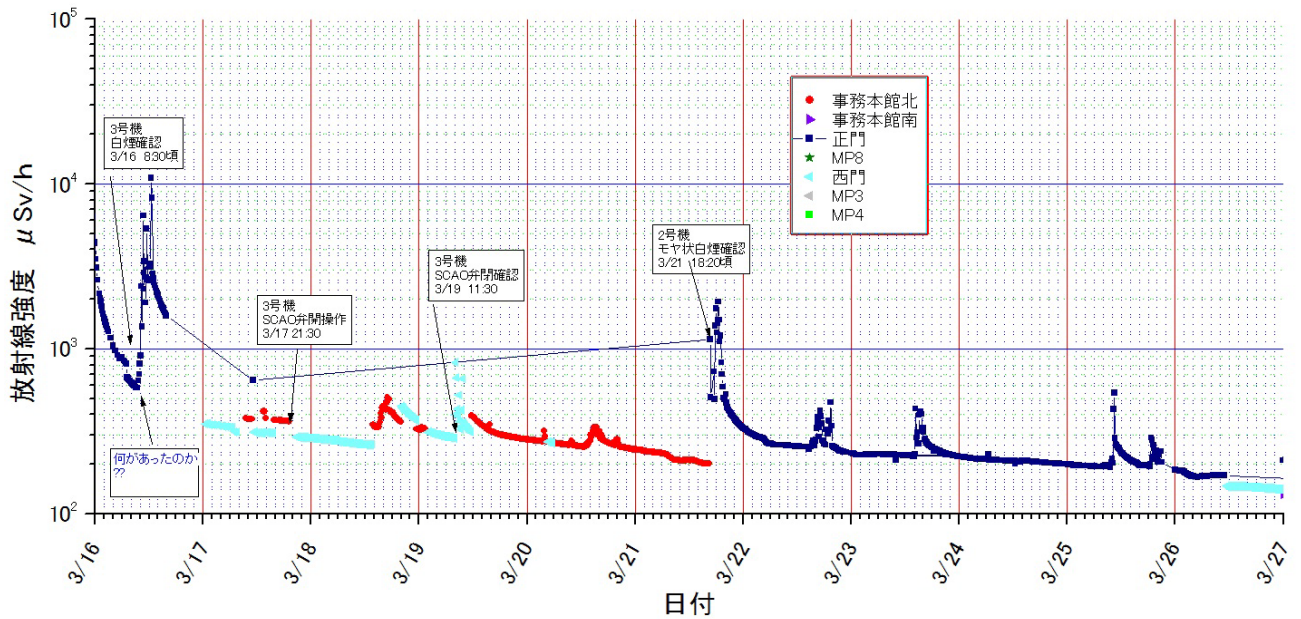


図3 放射線量の時系列変化 (3月16日0時~3月27日0時)

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

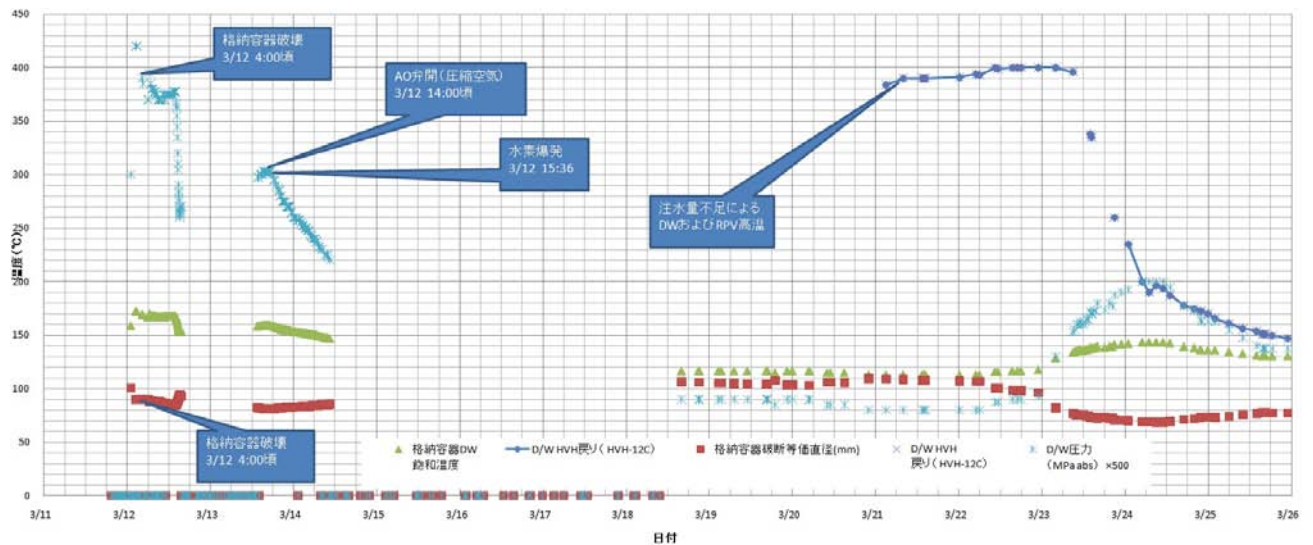


図4 1号機 DW 圧力と推定破損断面積の時系列変化

図1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。このことは、その時刻に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は完全に破損していないので推定直径の精度は定かではない。東京電力のシビアケースシミュレーションのように、このときすでにRPVが完全破壊していれば破断の等価直径は約9cmである。また、逃がし安全弁(SRV)が作動し上記がDWに放出される場合も図4のようになる。

後述するように、こ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。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。

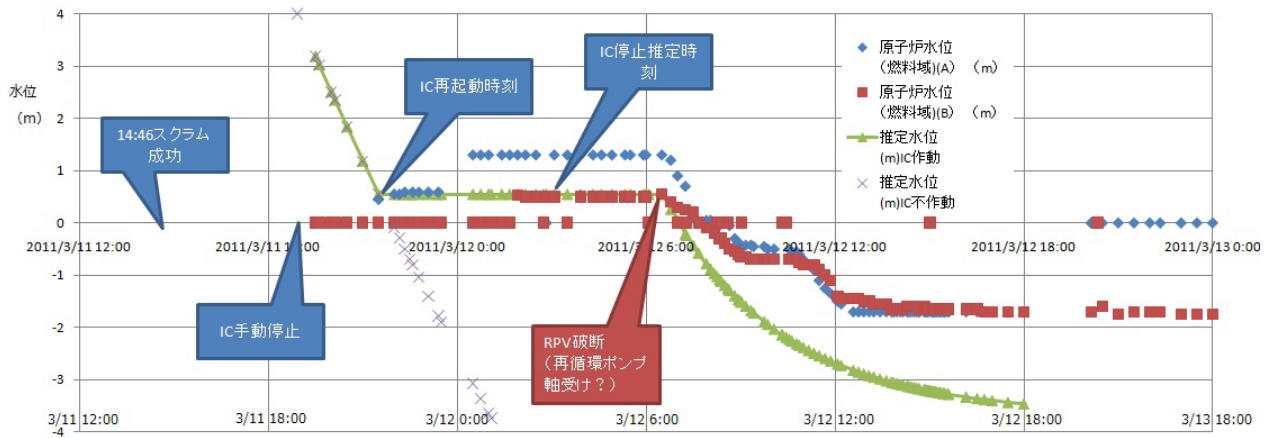


図5 1号機の圧力容器内水位の変化 (Rep. 15.2)

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、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。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。圧力計や温度計も原子炉が高温になる前は正しい値を示していたと考えられる。

ICが作動した場合の水位の変化を図5に示す(Rep. 15.2)。現象の詳細はRep. 15.2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の発熱しかないので、メルトスルーなどの現象は起きにくいと想像される。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。

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5より、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1から分かる。14時のベントによる放射線量は小さいので、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。DWは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、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想像される。

## 2号機の検証

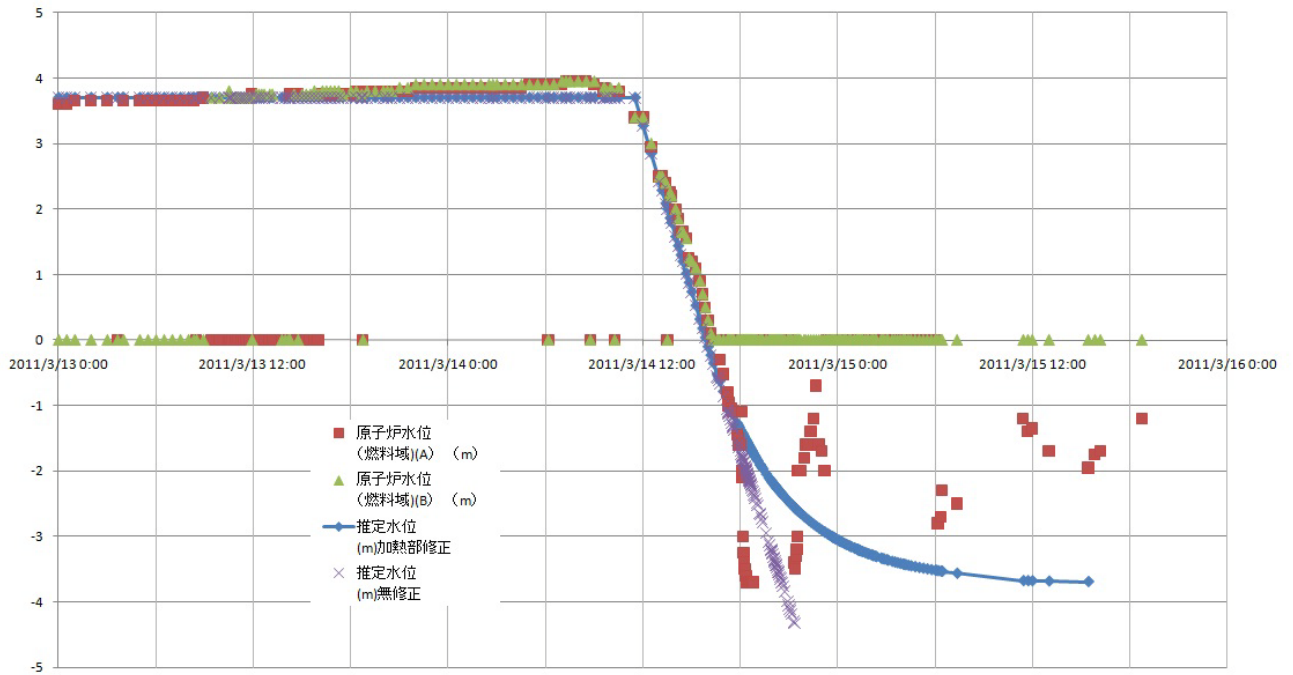


図6 2号機の圧力容器内水位の変化

図6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。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6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11時30分頃にSRVが開いて水位が低下すると計測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)以前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を一気に下げて水を注入している。その後燃料棒が完全露出しRPVが損傷したと推定される。

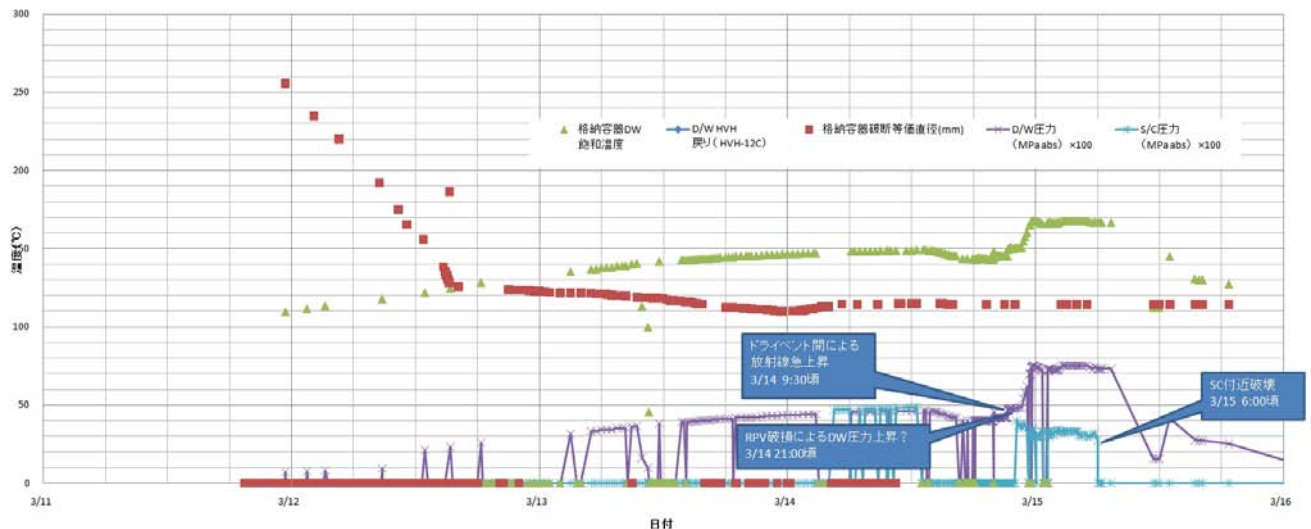


図7 2号機DW、SC圧力と推定破損断面積の時系列変化

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2から読み取れる。これは、21時のSCベントか15日0時2分のドライベントの先行実施に起因するものと推定される。この放射線量が多いので、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2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付近での破損が予想される。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破損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。

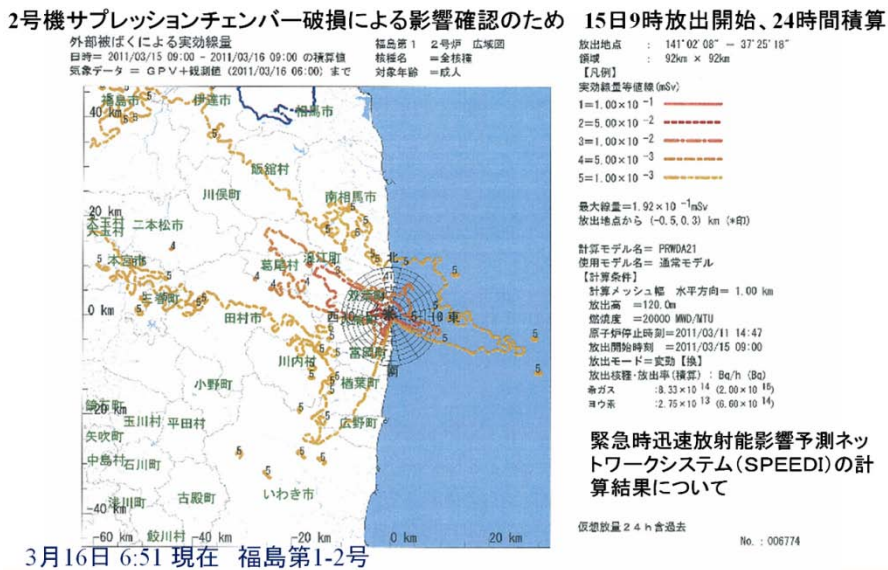


図8 SPEEDIによる放射線推計(2号機SC破損による放射線放出を仮定)(Rep.15.3)

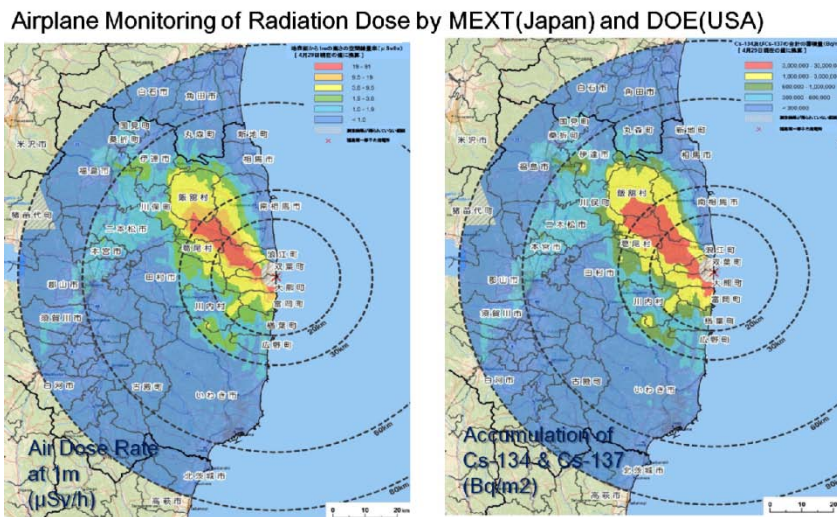


図9 航空機による放射線計測結果 (Rep.15.3)

2号機のSC破損とその後15日22時に実施されたと予想される3号機のベントが福島県の放射線汚染を決定づけた。それは、図8と9の比較によっても明らかである (Rep. 15. 3)。

### 3号機の検証

3号機は RCIC 稼働停止後高圧注水系（HPCI）が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。

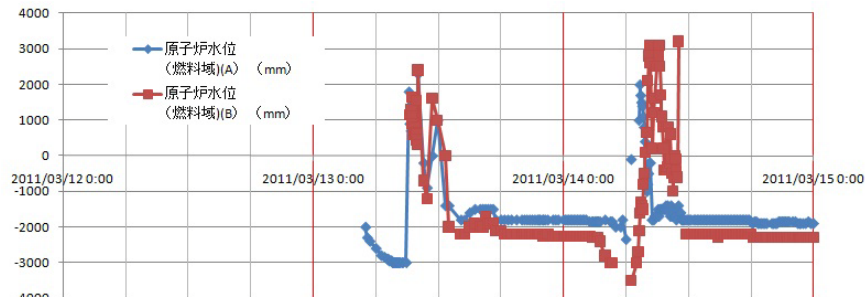


図 10 3号機水位（実測値）の変化

図 10 は水位の変化を示しているが、HPCI 作動時に水位が負の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が、炉心が一端空だきになると水位計の値は信用できなくなる。

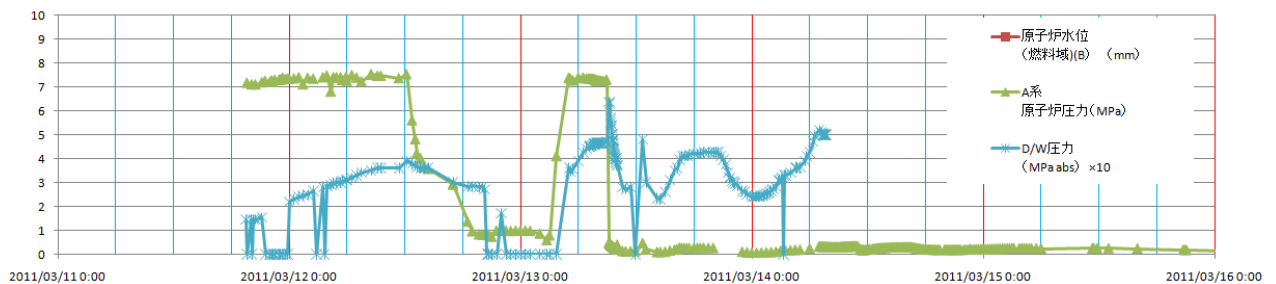


図 11 3号機圧力容器と格納容器の圧力変化

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る。しかし、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。

DWに関しては、スクラム直後から圧力が上昇し、12日12時頃に圧力が低下した。その後、13日9時8分のRPV圧力逃がし弁操作によって、9時13分頃に圧力が急上昇・降下した。RPVの初期漏洩が疑われるが、DW内の蒸気分圧上昇を蒸気流量と考えRPVの初期亀裂を推定したものが図12である。

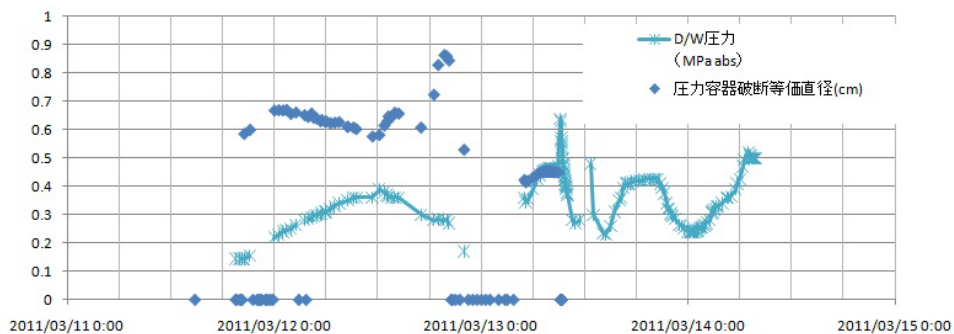


図 12 3号機圧力容器の初期亀裂推定

12日12時までは直径6mm相当の亀裂があるとつじつまが合う。しかし、SRVの蒸気放出によるDWの圧力上昇も否定できない。また、図11においてDWが13日9時に生じた圧力急上昇によって破損したことも考えられる。図2において、これらの破損推定時間において急激な放射線量の増加が観測されている。

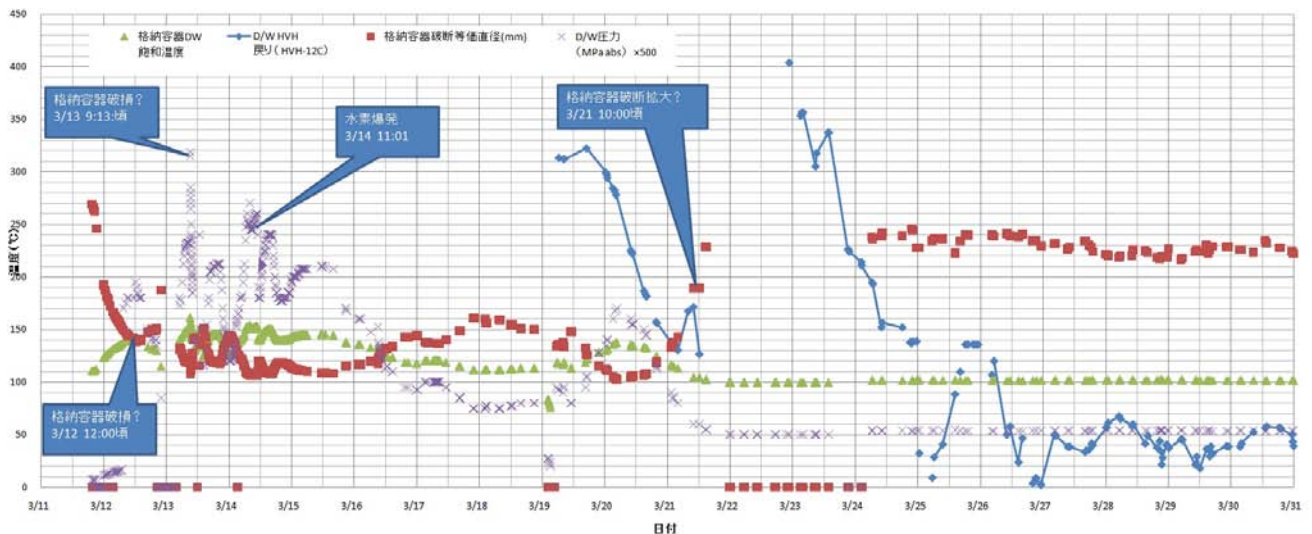


図13 3号機の格納容器圧力と破断面積推定

図13は、上記の事案を検討した格納容器圧力の破断時刻と大きさの推定である。格納容器は12日12時頃もしくは13日9時頃に破断し、その大きさは直径12cm相当程度である。その後、原子炉がドライアウトして破損し、水素を含む汚染水蒸気がDWから放出された。14時以後に放射線量の増大があり、その頃炉心が破壊したと推定される。東電のシミュレーションよりは若干遅い時刻である。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。

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。

その後、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4倍程度になった。このとき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。

## おわりに

これまで、公開されているデータを統合して、原子炉の破損状況を推定した。関係各位は、本シナリオに基づいた動的解析をコンピュータで行うことを推奨する。本解析は、電卓とエクセルレベルの準定常解析である。図3には、放射線量の急上昇と原子炉の事象が結びつかないものも幾つかあるが、これらも解明する必要がある。我々のレポートが原子炉の現象理解に役立ち、事故収束が早まることを期待する。

それぞれの原子炉は精々で東京ドームほどの熱しか出していない。臨界が停止しているので放射能は崩壊で減少するが増えていない。普通にやったら収束させるのは簡単なはずである。汚染水の浄化に苦勞しているようだが、汚染水をそのまま循環させればフィルター処理もしなくて良い。仙台ではタクシーの運転手さんでも「なぜ浄化して炉心に戻すのか」不思議がっていた。汚染蒸気が出ている建屋を気密性の建屋で覆うのは自殺行為である。トレンチの水しかり。

もうそろそろ、誰でも分かる無駄なことはやめて、本当の収束に向けた努力をしてもいい時期ではないだろうか。