

# 熱力学モデルによる福島第一原子力発電所 1 号機 非常用凝縮器 (IC) 挙動の推定 (それでも IC は動いていた)

Behaviour of isolation condensers (ICs) in accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant,  
Unit 1, based on thermodynamic model  
(And yet, the IC was working after Tsunami arrival)

東北大学

円山 重直

Shigenao MARUYAMA Member

**Abstract** In order to investigate the process of Accident of Fukushima Nuclear Plants, an accident scenario of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Unit 1 is analyzed from the data open to the public. Phase equilibrium process model and adiabatic expansion model were introduced. Original data reported in the first stage of the accident were examined to clarify the behaviour of the isolation condensers (ICs) which are generally believed unfunctional after the arrival of Tsunami and station blackout. The original data and observation reports verified that the so called “fail safe” system to close the valves in IC did not work properly due to the shutdown of AC power. The reports also showed the evidence that the operators injected water to the storage tank of IC.

**Keywords:** Nuclear Power Plant, Accident, Isolation Condenser, Fukushima Daiichi Unit 1

## 1. はじめに

著者らは、東京電力福島第一原子力発電所の事故発生当初から、事故解析と早期収束の提言を行ってきた<sup>(1)</sup>。さらに、それらの事故解析を分かりやすく記述した小説も出版した<sup>(2)</sup>。

東京電力株式会社 (TEPCO) では事故当初から現在まで、非常用復水器 (IC) が津波の後全く作動しなかったという前提で事故解析を行っている<sup>(3)</sup>。また、政府事故調、及び民間事故調等でも IC は動いていなかったとしている。

IC が動作しない事故シナリオは、当時の計測データや証言と比べると多くの矛盾が存在する。著者は IC が作動していたという仮定で解析を行い、事故当時の測定結果と矛盾しない事故シナリオを構築した<sup>(4)</sup>。さらに、2号機の熱力学解析モデルを1号機に適用して、事故当時の水位や圧力変化をほぼ記述できることを明

らかにした<sup>(5)</sup>。

本報では、まず原発事故当時の資料を見直して IC の挙動や原子炉パラメータの再検討を行う。さらに、TEPCO が IC が動いていないとする理由を再検証する。それらを踏まえて、1号機の事後シナリオを再構築し、そのシナリオに従って、熱力学モデルによる事故解析を行う。

## 2. 非常用復水器 (IC) 挙動の検証

本章では、IC の挙動について事故直後のデータを基にした再検証を行う。図 1 は、1号機の IC と逃がし安全弁 (SRV) の概要を示したものである。通常運転では、RPV と IC を接続する 4 つのモータ駆動弁 (MOV) のうち MOV-3 のみを閉じて後の 3 弁は開いた状態である。これらの弁は、電源が停止すると、その時の弁位置で停止する。1号機は、2系統の IC を備えており、スクラム直後 AB2 系統の MOV-3 が開き IC が自動起動した。その後、圧力容器 (RPV) の温度低下が毎時 55°C(100F)以上となったため、2つの IC を起動 10 分後に停止した。その後作

連絡先: 円山重直、〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1,  
東北大学流体科学研究所  
E-mail: maruyama@ifs.tohoku.ac.jp

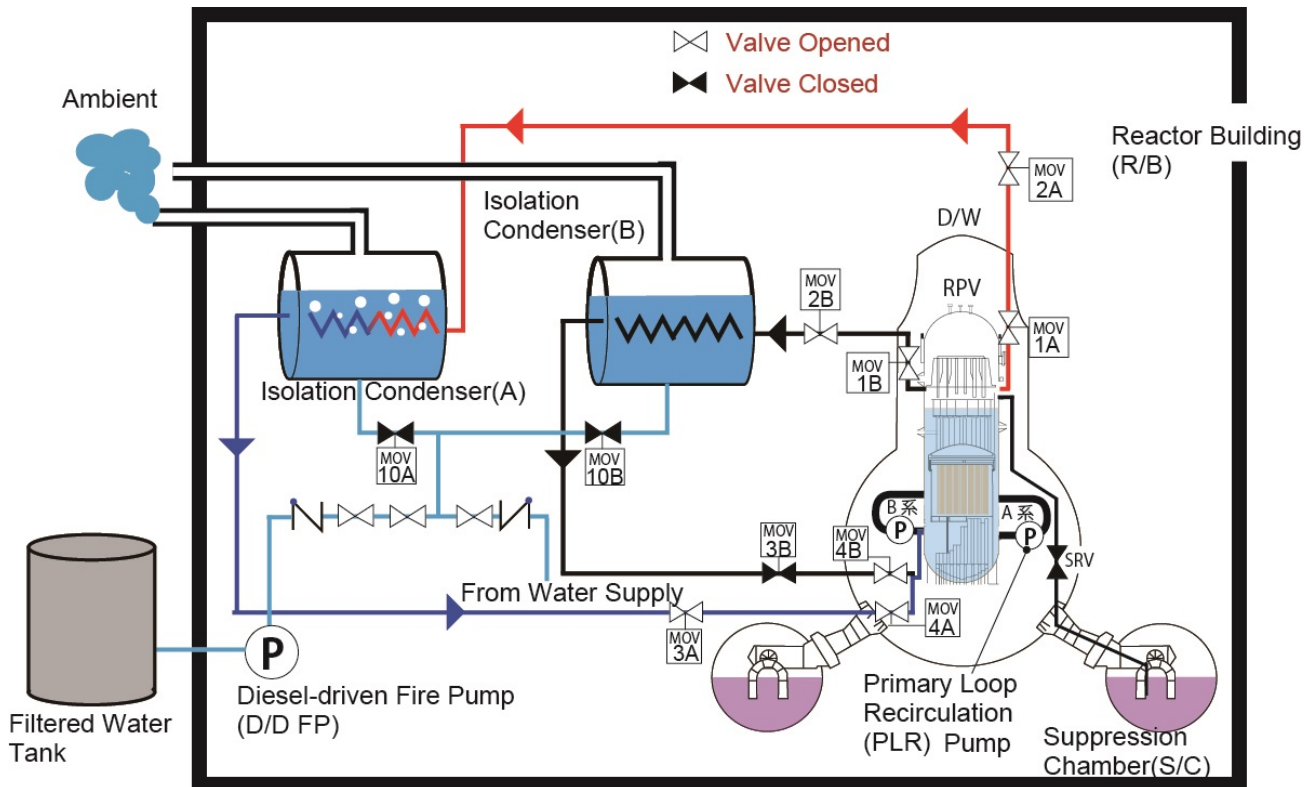


Fig. 1 Structure of isolation condensers (ICs), safety release valves (SRVs) and their valve arrangement in Unit 1 as of 2011, 3/11 18:20<sup>(9)</sup>.

業員が MOV-3B を閉じて A 系だけの MOV-3A のみの操作で、炉心を安定化させようとしていた。津波の直前はこの MOV-3A は閉じられていた。

津波が来たとき、政府事故調等では交流電源と直流電源が遮断され直流電源の停止と同時に 4 弁が電動モータにより遮断されたと記述されている。压力容器 (PCV) 内側の弁は交流駆動であり、外側は直流駆動弁である。前者は全閉までに 20 秒、後者は 15 秒かかるとされている。最近の TEPCO の記録調査によると、ディーゼル発電機が停止する以前で津波到達直後の 14 時 36 分 59 秒に交流電源が遮断されたことが明らかとなっている。この停電は津波による配電盤損傷が疑われる。直流電源はいつ停止したか不明であるが、直流電源が停止し「フェールセーフ信号」が出る前に交流電源が停止した結果、事故直後は MOV-1 と MOV-4 は開いていた可能性がある。直流電源がいつ停止したかは現時点では正確な情報がない。しかし、直流電源は低電のバッテリーなので、津波到来と共に瞬時に停電したとは考えにくい。事故直後の報告によると、直流電源が完全に遮断されておらず、15:42 時点でも HPCI の制御板がわずかに点灯していたという証言がある。15:50 頃に直流電源が枯渇して原子炉水位が計

測できないという記述がある。以上からフェールセーフ信号が出て、交流電源の停止により MOV-1A と MOV-4A の閉鎖が間に合わなかった可能性が高い。

その後の TEPCO による 1 号機内部の観測で、2A 弁と 2B 弁が全閉であることが明らかとなっている。当時の新聞報道によると 2011 年 3 月 20 日から 24 日に中央制御室の電源が復旧したとされる。このことから、フェールセーフ信号が出たままの弁がその時の電源復旧で閉鎖した可能性も考えられる。事故当時交流モーター駆動弁 MOV-1A と MOV-4A が開いていたとすると、作業員が自動車用バッテリーを繋ぐなどして直流電源を確保して MOV-3A の操作をしていたので、A 系の IC が動作していた可能性が高い。

次に、A 系 IC の残留していた冷却水が、津波初期で停止した場合と一致する件について検証する。当時の原子力安全・保安院が TEPCO の資料を公開した。この資料に事故当時のファックスやプラントパラメータ原簿が掲載されている。この資料は、全てが公開されていないようであるが、3/12 0:30 のプラント関連パラメータ原簿<sup>(6)</sup>で、「IC 動作中 IC(A)胴側に消火系で給水中」という記述がある。また、初期の政府報告<sup>(7)</sup>でも、「3/11 21:19 ディーゼル駆動消火ポンプ(D/D FP)

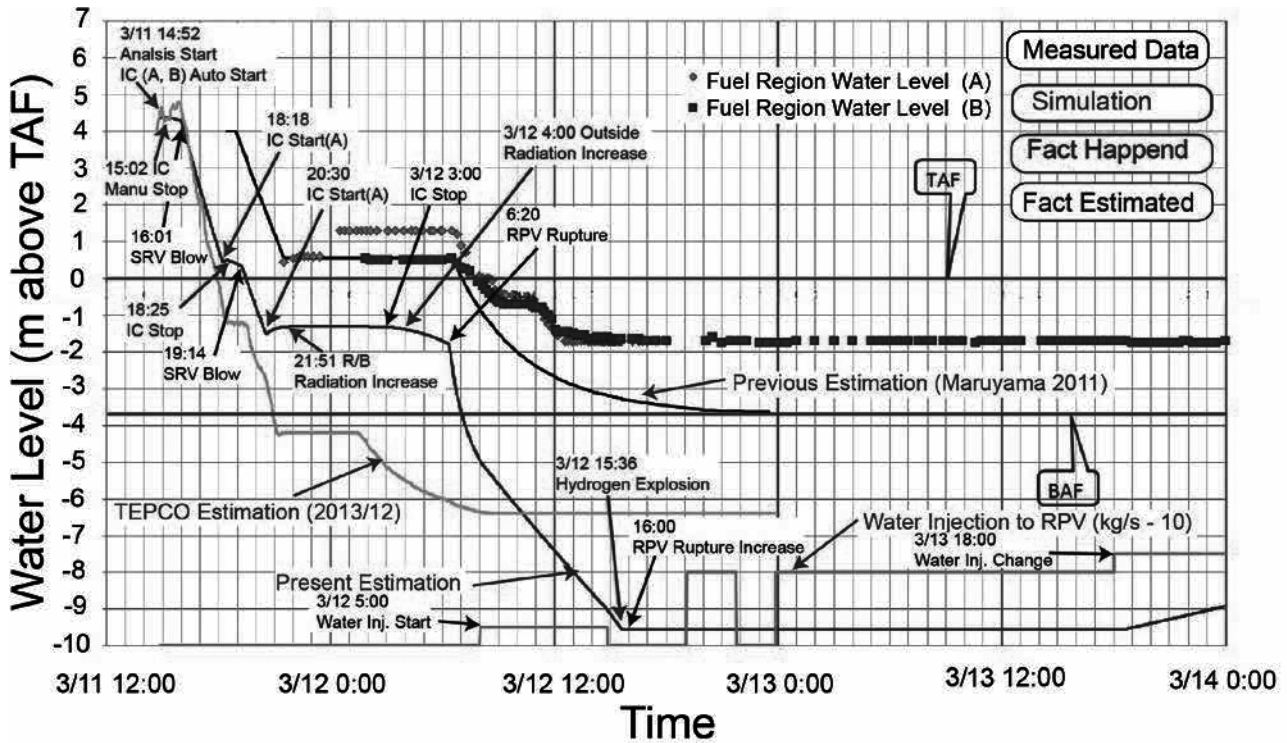


Fig. 2 Estimated water level in RPV according to the present scenario compared with measurements<sup>(9)</sup>, previous report<sup>(4)</sup> and TEPCO's estimation<sup>(3)</sup>.

から IC への供給準備, 「21:35 D/D FP から IC へ供給中」, 「3/12 0:30 IC(A)胴側に消火系で給水中」とある。つまりこのとき, 図 1 に示す消火系から, A 系の冷却水が給水されていた可能性が高い。そうだとすると, 3/12 4:15 現在の報告で「IC(A)胴側に消火系給水は停止中」とされる時以前まで給水が継続していた可能性が高い。TEPCO が想定した, IC (A) 胴側の冷却水量が IC が初期に停止した推定と一致したことは偶然の一致だった可能性も考えられる。

一方, 後日の政府事故調や国会事故調の聞き取りでは, この IC への給水が東電幹部に認識されていなかったと言われている。この様な, IC への給水記録が多数存在するのに, 事故調の調査でこれらの事実が無視されている理由については明らかでない。また, 上記パラメータ原簿<sup>(6)</sup>にも IC が稼働中であったことや, 当時の作業員の目撃証言, 特に 3/11 21:30 の IC 動作確認では, 蒸気と音を免震重要棟からも確認していること<sup>(3)</sup>から, IC は事故当初の報告通りに作動していた可能性が高い。

政府事故調では, 免震重要棟の所長らが, IC が停止していたことを認識しなかったことを問題視しているが, IC からの蒸気発生確認証言や IC 胴部への給水が報告されている状態で IC が止まっていると考えるほ

うが難しかったと考えられる。また, 政府事故調では IC には全く給水していなかったとしている。これは, 事故当時の記録<sup>(6)</sup>や初期の政府報告<sup>(7)</sup>と矛盾する。

TEPCO は, IC が正常に作動していなかった証拠として, MAAP などの解析と, 3/11 21:51 頃の原子炉建屋 (R/B) 内の放射線の増加や, 水位計の誤動作を挙げているが, それらについては, 別報<sup>(8)</sup>で議論されているように IC が動いていたとしても, 説明がつくことが明らかとなった。むしろ IC が作動していた方が, 当時の水位計等の計測データを記述できることが別報の検証で明らかとなっている。

### 3. 本報の事故シナリオによる解析

図 2 と図 3 は, 本報の事故シナリオを仮定した場合の, 熱力学モデルによる RPV と PVC の推定圧力と水位を当時の計測データと比較したものである。図 3 中には, TEPCO の推定値<sup>(3)</sup> (シュラウド外側水位) と著者の前報(円山, 2012a)で示した簡単なエネルギーバランスで計算した推定水位も記載している。本報の事故シナリオは, 地震直後から RPV に小さな漏洩が生じ, 3/12 3:00 に PCV が, 3/12 6:20 に RPV が破損したと仮定したものである。事故当初の記録<sup>(6)</sup>に基づき, 20:30 には IC が動作したと仮定した。図 2 を見ると,

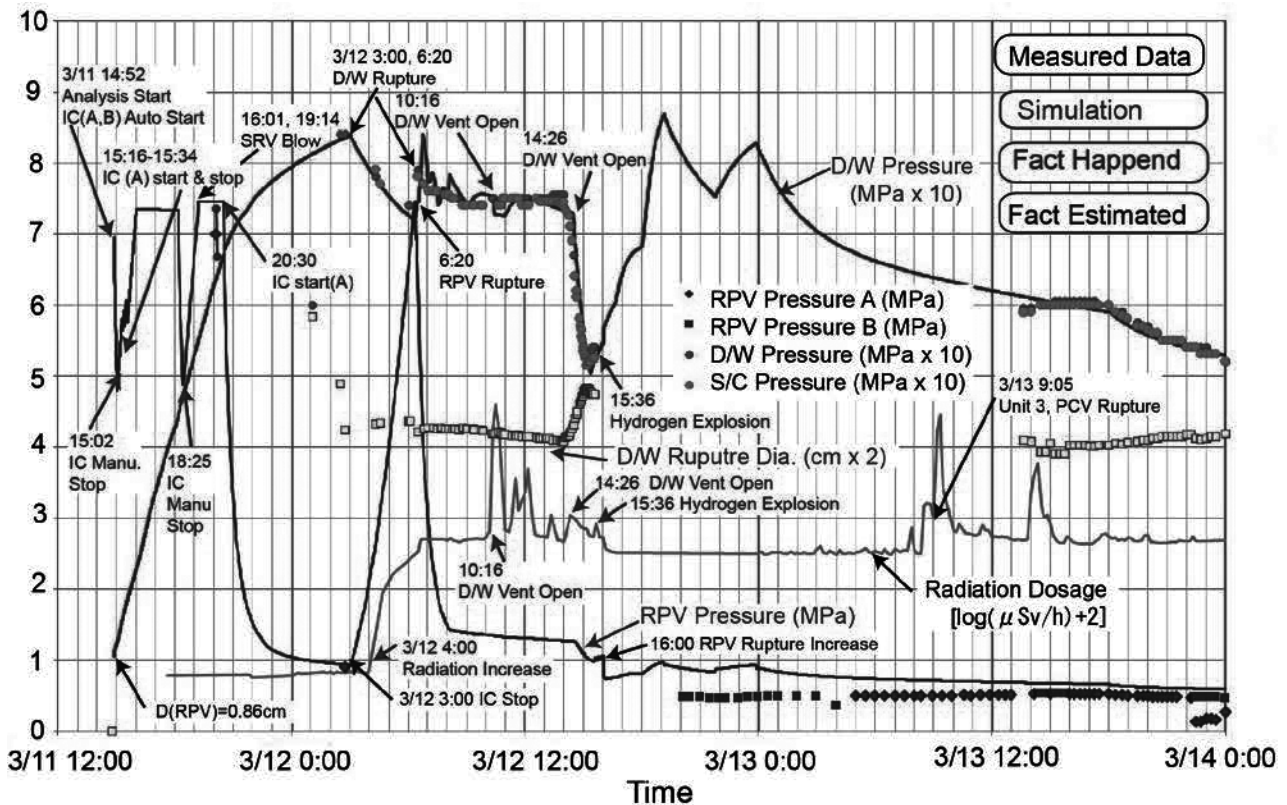


Fig. 3 Measured and estimated vessel pressures according to the present scenario<sup>(9)</sup>.

本シナリオは3/12 1:05のD/W圧力データ以外は良くあっている。この3/12 1:05の圧力データは、事故当初のプラント関連パラメータ原簿<sup>(6)</sup>（では見つけられなかった。この関連パラメータ原簿は全て公開されていないようなので、全てのデータが公開されることが望まれる。

図2を見ると、RPVの初期漏洩は直径0.86cm相当の亀裂を仮定するとPCVの圧力計測値と良く一致する。PCVは、3/12 3:00に直径2.5cm相当の亀裂が生じたとした。後にRPVの破損に伴い内部の水蒸気がPCVに直接放出されるため、PCVの亀裂が直径約8cmに拡大したとすると計測値と良く合う。別報<sup>(8)</sup>の推定では、この破損箇所はSRVと併設されている安全弁が疑われる。この安全弁が破損するとRPVの水蒸気は直接PCVに噴出する。3/12 3:00のRPV破損直後はPCVに過熱蒸気が吹き出すので、飽和蒸気を仮定した本モデルは適用できない。RPVの破損直径が約8cmとするとD/Wの圧力計測値と整合する。図2中には、前報<sup>(4)</sup>と同様に放出蒸気量から算出したPCV破損直径推定値も記載しているが、3/11 3:00以後、ベント時以外はその大きさは変化していない。3/12 14:26のベントにより開口面積が直径10.5cmに増加した後で破断面積が元に戻ったとすると計測値を良く模擬する。15:36の水

素爆発前後でも破断面積が変わらないことから、PCV破損部位は下部に存在すると推定される。

RPVに高圧蒸気がある起動初期のICの熱交換量は大きい。しかし、RPV圧力が下がる（飽和蒸気温度が低下する）とともにICの蒸気放出量は急激に低下する。このことは、IC起動後暫くすると蒸気が見えなくなった（見えにくくなった）こととも符合する。本シナリオでは、3/12 3:00にジルコニウムから放出された水素等で凝縮が阻害され、ICが停止したと仮定した。プラントパラメータ原簿<sup>(6)</sup>に「IC(A)胴側への給水は停止中」とある。それより以前にIC胴部への給水がD/Dポンプ故障で止まっている。解析によると、3/12 3:00までのIC(A系)の累計消費水量は約175tであり、ICの基準水量106tを越えているので、資料に記載の給水がなければ、本報のシナリオは成立しない。後日のIC水位計の計測でA系は65%の水量が残っているとTEPCOによって報告された。図3に示すように、本解析ではIC再起動の時すでに水位はTAF-1.3m程度になっており、燃料が一部蒸気中に露出している。このため、燃料棒から放出された放射性ガス（希ガス等）やジルカロイ反応の水素が、凝縮管に溜まり水蒸気が伝熱面に供給されなくなった結果、IC胴部に冷却水が残っているのにICが停止した可能性もある。ICの挙動

については、更なる検討と検証が必要である。

3:00 に IC が停止すると、RPV 圧力は急激に増大する。TEPCO の記録によると 4:00 または 5:45 頃に RPV に注水したとある。図 3 の RPV 圧力では注水しても水は入らない。しかし、最新の TEPCO の検証<sup>3)</sup>では、その水はバイパスし RPV に入らなかった可能性がある。

6:20 に RPV が破損すると急激に水位が低下する。この水位低下は計測値の水位低下時期と一致する。図 2 によると、この頃 RPV 内の蒸気は高压になっている。また水位が TAF 以下になっているので蒸気はかなり高温になっていた可能性がある。また、この時間の RPV 破損を仮定すると、以後の PCV の圧力変化が説明できる。

PCV は 3/12 3:00 に内部の圧力上昇によって破損したと仮定した。それにもない、4:00 に正門付近の放射線量が急激に増大したことの説明がつく。また、報道によると 4:00 に中央制御室の放射線が急激に増大したと伝えられている。前報<sup>4)</sup>のように、4:00 に RPV が破損した可能性もある。6:20 以後、RPV の水位が急激に低下するので燃料棒のジルコニウム反応と燃料の融解が進み、反応した水素が PCV 下部の割れ目から放出し、PCV と R/B の隙間 (5cm 程度と言われている) を伝い、各種配管と建物の隙間を経由して R/B 上層階に蓄積した可能性が考えられる。この蓄積水素が 15:36 に水素爆発したと考えられる。

図 2 によると、10:16 のベントは PCV 圧力変化には寄与していないと考えられる。しかし、周囲の放射線量が急増したことから、ある程度の蒸気放出はあったと考えられる。図 5 に示すように、このベントをした時、燃料棒は完全に破損しているので水素や放射性ヨウ素・セシウムなどが大量に放出されたと推定される。従って、ベント蒸気量は少なかったが、放射能放出は多かったと考えられる。14:26 のベント終了後 D/W 圧力が上がっているが、この時給水が停止し、RPV がドライアウト状態になっていたと考えられる。この状態では RPV の相平衡モデルは適用できないので注水停止中の D/W 圧力推定は正確ではないことに注意されたい。

図 3 の水位変化は、TEPCO<sup>3)</sup>と前報<sup>4)</sup>の水位推定の中間に位置している。IC の停止に伴い RPV 内部の圧力が上昇し、逃がし安全弁 (SRV) が作動することによって水位が段階的に減少し、3/11 19:30 頃に TAF に達している。さらに、20:30 の IC 再稼働時には、

TAF-1.3m 程度であり放射性ガスやヨウ素などが地震直後の漏洩箇所を通じて PCV に貯まったことが考えられる。一部の燃料棒ではジルコニウム反応も考えられる。この時期は、21:51 に原子炉建屋の放射線が増大し入室禁止になった次期と符合する。IC が作動すると水位は一定となり、RPV が破損する 3/12 6:20 まで、水位は一定を保っている。この水位変化は計測値と同様な傾向である。別報<sup>8)</sup>によると、この時、燃料集合体内部の燃料棒によって沸騰が起これ、沸騰気泡が管路を埋め尽くすため、水面から 1.3m 程度露出した燃料棒は気泡と接触していた可能性がある。従って、基準面器は水位低下した後で、その水位をある程度の保っていたことも考えられる。別報では、図 3 の水位計計測結果の挙動を本シナリオに基づいて説明することができた。IC が作動しているとき、RPV の圧力は低くなっているため、図 4 の 3/12 2:45 の RPV 圧力データも説明できる。

本報では、3/12 6:20 に RPV が破損したと推定しているが、この時 RPV 内には水が存在している。別報によると、RPV 上部の蒸気温度はかなり高温になっているので、蒸気の高温と図 2 の高压で RPV 上部とつながっている安全弁が破損した可能性がある。

本報では、8:00 に RPV の圧力が下がり、RPV の注水が出来たと推定した。ただし、消防車による注水の大部分はバイパスし<sup>9)</sup>、一部のみが注水されたとした。別報の解析によるとその水量は 0.5kg/s 以下であった。その後、16:00 頃に RPV が空だき状態になるので、新たに RPV の破損面積が増大したとした。この時の新しい破損面積の等価直径は 7cm 程度で、破損箇所は RPV 下部と推定される。そのために、RPV より燃料が漏れ出たと推定した。それに伴い、RPV の開口面積も増大したと仮定すると、その後の圧力を模擬できる。TEPCO は炉心にほとんど燃料が残っていない推定している<sup>9)</sup>が、本報では、この時の燃料流出は、TEPCO の推定に比べて少ないと推定している。このことは、3号機に比べて 1号機 R/B の放射線量が少ないことも符合する。

## 4. おわりに

本稿執筆現在、1号機の内部状況は不明である。本論文

は公開データを基にしているので、著者の知り得ない種々のデータや目撃証言があると推察される。当時の計測データや証言を説明できる事故シナリオは多数考えられる。著者の知らないデータや事象によって、より確実な事故シナリオが存在する可能性もある。しかし、ICの挙動を含めて原子炉事故で起きた事実はただ1つである。多くの研究者・技術者が自由な立場で議論し、原子炉事故の真相に迫り、今後の事故防止に資することが我々の使命であると考えられる。

なお、本稿の詳細は日本機械学会論文集<sup>9)</sup>に投稿中である。

## 参考文献

- [1] 圓山, 小宮, 岡島研究室, 福島第一原子力発電所事故の熱解析と収束プランの提案, 東北大学流体科学研究所, available from < <http://www.ifs.tohoku.ac.jp/~maru/atom/index.html>>, (2011-2014),
- [2] 圓山翠陵, 小説 FUKUSHIMA, (2012), 養賢堂.
- [3] TEPCO (東京電力株式会社), 福島第一原子力発電所 1~3 号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第 1 回進捗報告”, 東京電力株式会社, 平成 25 年 12 月 13 日 (2013).
- [4] 円山重直, 福島第一原子力発電所 1 号機事故の熱流動現象の推定—非常用復水器が作動していた場合—, 保全学, Vol.11, No.3 (2012a), pp. 93-99.
- [5] 円山重直, 福島第一原子力発電所 1 号機事故の熱流動現象推定 (熱力学モデルによる事故シナリオの検証), 第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. I, (2013), pp.106-107.
- [6] 原子力安全・保安院(NISA), プラント関連パラメータ原簿, 東京電力株式会社から送付された原子力災害対策特別措置法第 10 条に基づく通報資料等の公表について, 原子力安全・保安院, 2011 年 6 月 24 日 (2011).
- [7] 日本政府, 原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について—, 平成 23 年 6 月, 原子力災害対策本部, (2011).
- [8] 円山重直, 福島第一原子力発電所 1 号機事故の熱流動現象推定 (熱工学モデルによる水位計の挙動), 第 51 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, A221, (2014).
- [9] 円山重直, 福島第一原子力発電所 1 号機事故の熱流動現象推定 (熱力学モデルによる非常用凝縮器 (IC) の挙動)、日本機械学会論文集, (2014), (投稿中).