

熱力学モデルによる福島第一原子力発電所 3号機高圧注水系（HPCI）挙動の推定

Behaviour of high pressure coolant injection system (HPCI) in accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Unit 3, based on thermodynamic model

東北大学

円山 重直

Shigenao MARUYAMA Member

Abstract In order to clarify the process of Accident of Fukushima Nuclear Plants, an accident scenario of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Unit 3 is analyzed from the data open to the public. Phase equilibrium process model was introduced in which the vapor and water are at saturation point in the vessels. The present accident scenario assumes that the high pressure coolant injection system (HPCI) did not worked properly, but the steam in the reactor pressure vessel (RPV) leaked through the turbine of HPCI to the suppression chamber since 12/3/2011 12:35. It is assumed that the Tsunami flooded the torus room where the suppression chamber was placed. Proposed accident scenario agrees with the data of the plant parameters obtained just after the accident. If the present scenario is correct, the behavior that operators in the plant stopped HPCI at 13/3 2:42 did not affect seriously on the RPV rupture.

Keywords: Nuclear Power Plant, Accident, high pressure coolant injection system, Fukushima Daiichi Unit 3

1. はじめに

東京電力（TEPCO）の報告書や政府事故調では、高圧注水系(HPCI)が手動停止されるまで原子炉压力容器（RPV）内は正常な水位を保ち、それを原発作業員が手動停止させたことが3号機の破壊を決定づけたとしている。

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⁽¹⁾⁽²⁾。著者は前報⁽³⁾でHPCIは3月12日18:30頃に機能不全に陥り注水が停止したにもかかわらず蒸気が逆流し水位が低下したと推定した。もしそれが正しければ、作業員がHPCIを手動停止してもしなくても原子炉破壊のシナリオは大きく変わらなかった可能性があるとして指摘した。しかし、前報⁽³⁾では、HPCI手動停止時のRPV水位については比較的簡単な熱力学計算で導出しているため、事故シナリオの記述に曖昧な点もあった。

本報では、HPCIの挙動を詳細に検討し、HPCIのタービンが停止したときに、RPVの蒸気が停止しているタービンを経由してサブプレッションチャンバー（S/C）

で凝縮するというシナリオを設定し、事故当時の事故シナリオが記述できることを示した。この場合でも、前報⁽³⁾と同様に、TEPCOの作業員がHPCIを手動停止させたことは原子炉破壊の決定的要因ではないことが示された。

2. HPCIの構造と挙動推定

3号機HPCIの挙動を検討する前に隔離時冷却系(RCIC)とHPCIの一般的挙動について検討する。図1は、2011年3月12日12:30現在の3号機の現状とHPCIの概要を示したものである。なお、RCICも図1のHPCIと同様な構造である。どちらもRPVの高圧蒸気でタービンを回し、その動力で復水貯蔵タンク(CST)またはS/Cの水を高圧ポンプでRPV内に注入するシステムである。タービンを駆動した蒸気は、S/Cで凝縮し水となるため、S/Cの温度が上昇する。HPCIもRCICもスクラム（原子炉緊急停止）直後以外は、注水能力は崩壊熱発生量より多いために水位が上昇し、RPV水位高の信号により全ての直流モーター駆動弁が閉鎖される。その後、RPV内圧力が上昇し7.37 MPa以上で、逃がし安全弁（SRV）が作動し蒸気をS/Cに放出するため

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

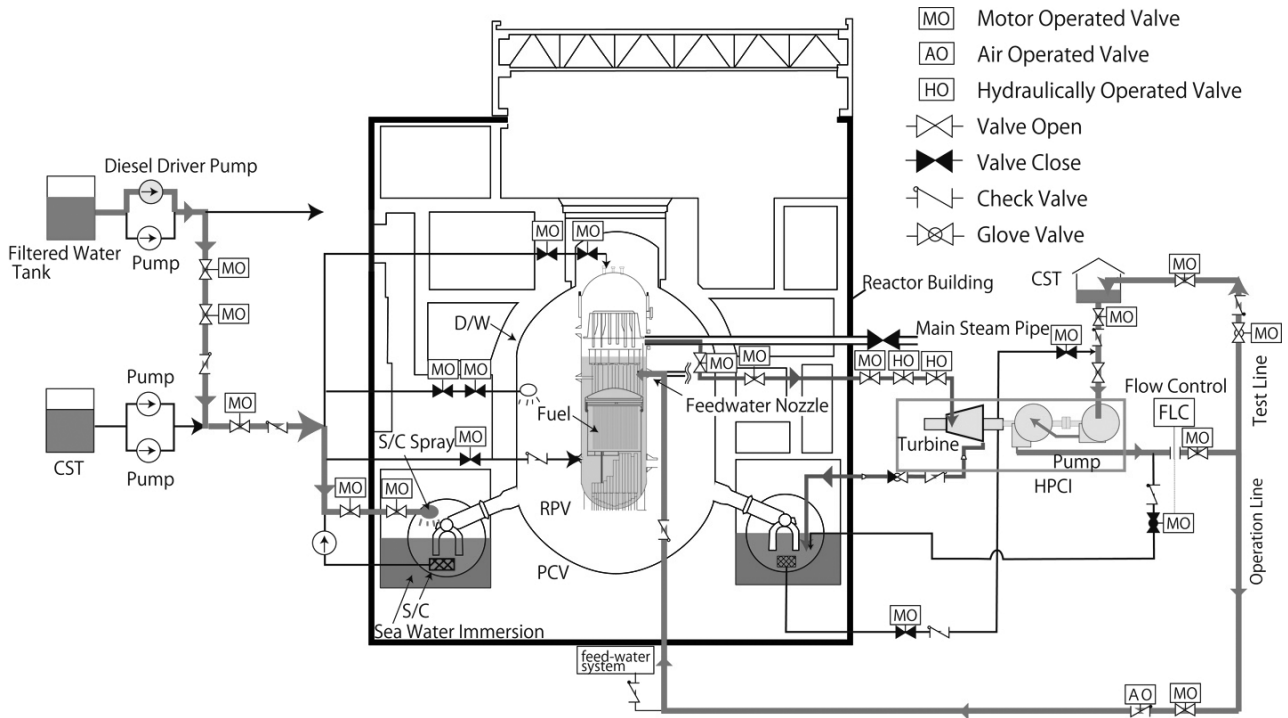


Fig. 1 Schematics of High Pressure Coolant Injection System (HPCI) and Suppression Chamber (S/C) Spray System of Unit 3, as of March 12, 2011, 12:30⁽⁵⁾.

に、水位が低下する。RPV 内水位が有効燃料頂部 (TAF) より TAF+2.95m で HPCI が自動起動するように設定されている。つまり、直流電源が正常なときの緊急冷却は RCIC または HPCI の間欠運転と SRV の作動によって炉心を冷却する。高温になった S/C 内の水は、通常時は残留熱除去系 (RHR) により海水で冷却されて、原子炉を安定状態に導く。しかし、事故当時は津波で RHR の海水ポンプが破壊されたことと、交流電源の遮断で RHR が作動しなかった。

HPCI と RCIC は共に RPV と格納容器 (PCV) の圧力差 1.03MPa から 7.74MPa で動作するよう設計されている。HPCI の注水能力は初期崩壊熱に対応できるよう十分な能力を持っている。つまり定格注水能力は RCIC で毎時 97 トン、HPCI で毎時 965 トンである。特に HPCI の注水能力は RPV の水位を 1 時間で約 40m 上昇させるもので、本来 HPCI は事故後かなりたってからの運用は想定されていないようである。3 号機の場合、RCIC、HPCI 共に RPV への水源は復水貯蔵タンク (CST) から供給されていた。

2011 年 3 月 11 日 15:37 に津波が到達したとき、3 号機の交流電源は停止したが、直流電源のバッテリーは冠水をのがれ正常に作動していた。津波後は同 16:03 に RCIC

を手動起動した。つまり、RPV 内の水位高(TAF+5.653m)で RCIC が自動停止すると全てのモーター駆動バルブが自動で閉じる。その後 RPV 圧力が上昇することから SRV が作動して水位が低下する。この自動間欠運転が 3 月 12 日 11:36 まで継続したと考えられる。このとき崩壊熱による全てのエネルギーは S/C に放出される。しかし、RHR が作動しなかったため、S/C 内の温度と圧力は上昇し続けた。この RCIC は何らかの理由で 12 日 11:36 に停止した。直流電源の枯渇と考えられる。その後、RPV の圧力が上昇し、水位低下により HPCI が同 12:35 に自動起動した。

11:36 に RCIC が停止したとき、RCIC の自動開閉が止まるほど直流電力は低下していたと考えられる。そこで RCIC の約 10 倍の能力のある HPCI が起動したことにより、それを駆動する直流モーター駆動弁 (MOV) が電力を急速に消耗したことは十分に考えられる。その後 RPV の水位が高くなり HPCI が停止しても関連バルブが開いたままになっていたことが想定される。この HPCI と RCIC に使用されているバルブは直流モーター駆動弁である。このバルブは、電源が枯渇すると、その時の弁開度で停止するものである。一般に HPCI のタービン側のバルブは蒸気用バルブであり、同ポンプ側の水用バルブに比べると大型で電力の消費も激しいため、タービン側のバルブが早期に動作不能になったことも考えられる。

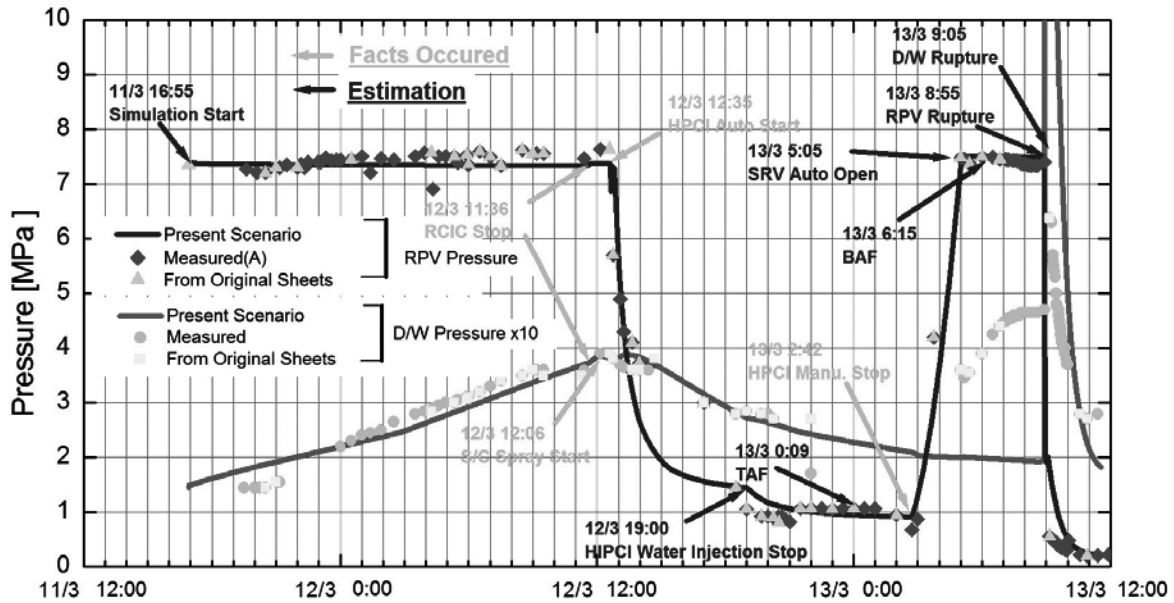


Fig. 2 Accident analysis of vessel pressures based on the scenario of Table 3, and comparison with measured pressure data of RPV and PCV⁽⁵⁾.

図2に示すように、HPCI起動直後にRPVの圧力は急激に低下している。この状態ではSRVは動かないので、HPCIは正常な作動をしていないと考えられる。つまり、HPCIが作動しポンプによるRPV注水により水位が上昇すると、HPCIは停止するが、バルブは開いたままなので蒸気はSRVではなく、HPCIのタービン経由でS/Cに流れたと考えると当時の水位データと圧力データの説明ができる。

HPCIはRPVとPCVの圧力差1.03MPa以下での動作は設計外である。前報⁽⁶⁾では、HPCIが動作圧不足で停止したと推定される3月12日19:00からHPCIの逆流が発生したと仮定した。3月11日12:35現在の水位と主蒸気バルブ、給水パイプの位置関係を示す図1を参照すると、HPCI起動時は水位が高いので、ポンプからRPVに水を供給する給水パイプはその時水没しており、蒸気が逆流することができないことが明らかになった。

この矛盾を解決するために、本報では、HPCIとポンプが停止したと予想される3月12日19:00から、HPCIのタービン系統のバルブが開いたままS/Cに蒸気が漏れ続けたと仮定した。この仮定は、12:35にHPCIが起動した後でもタービン側のバルブが開いたままになっていて、SRVが動かなくとも圧力が低下した事実と矛盾しない。このときには、ポンプは停まっているのでRPV水位は低下を続けることになる。

政府事故調の最終報告書によると、3号機はS/Cへ

水を注入するスプレイ冷却を3月12日12:06から実施したとしている。この時間におけるスプレイの実施は、初期のTEPCO事故報告書⁽⁴⁾には全く記載されていなかった。このスプレイの記述は、著者の知る限り政府事故調中間報告書の記述に初めて現れる。後述する図2のPCV圧力の計測データに示されるように、S/Cスプレイ直後からPCVの圧力は下がり始めるので、本報ではTEPCOや政府事故調の後日の聞き取り調査の結果を信用し、非常用ディーゼルポンプによるスプレイ冷却を実施したと仮定した。S/Cスプレイが正常に働いた場合の水量は53kg/sであり、十分大きいので、比較的大量の水がPCVに注入されたとした。

TEPCOによると、S/Cスプレイは3月12日12:06に開始され、3月13日3:05に停止されたとされている。その後同5:08に再開され同7:43に停止した。また、D/Wへのスプレイ冷却がS/Cスプレイが停止する直前の同7:43に開始され8:40に停止したとされている。

3. 本報の事故シナリオによる熱流動解析

図2は、本報の事故シナリオに基づくRPVとPCVの圧力変化を実測値と比較したものである。実測値には東電発表のプラントパラメータ(図中の記号Measured)の他に原子力・安全保安員が公表したプラントパラメータ原簿(以後「プラントパラメータ原簿」と

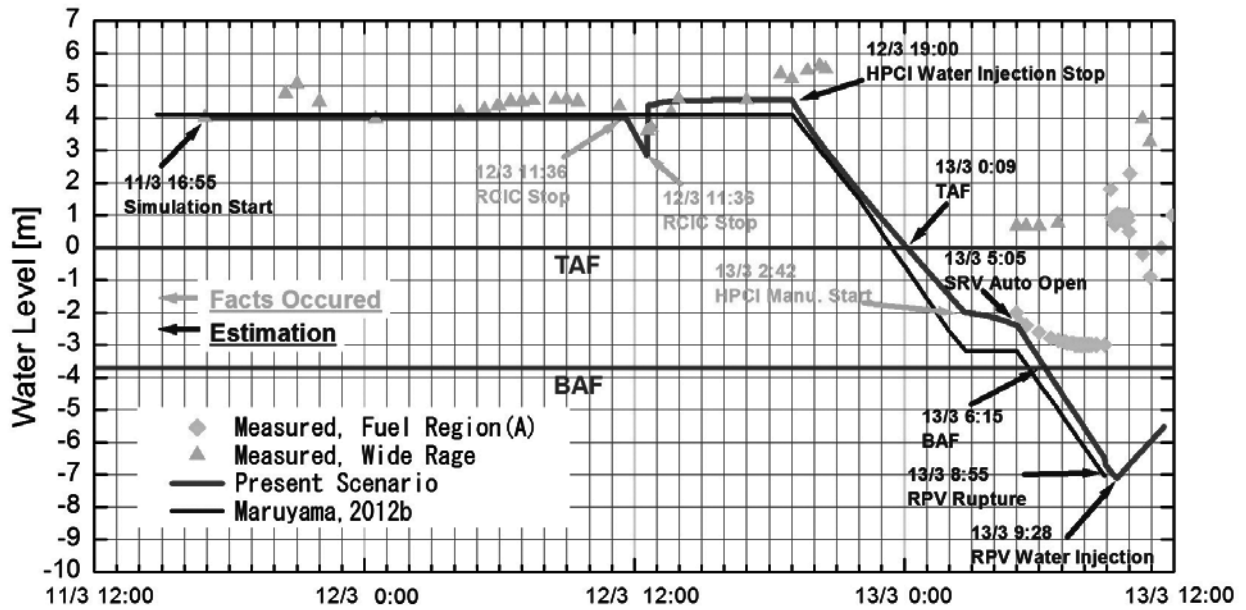


Fig. 3 Accident analysis of water level of RPV based on the scenario⁽⁵⁾, and comparison with measured data and the previous estimation⁽³⁾.

記す)からデータを拾い集めて加えてある(図中の記号 From Original Sheets). 図中の3月12日22:00におけるD/W圧力データは2点あるが、どうも低い方の圧力データは書き間違いだったようで、3月13日未明に訂正されている。当時の混乱でデータの書き間違い等もあったと推察される。図を見ると、本報の解析は計測データと良く一致することが分かる。

図2を見ると、RCICが動作しているときは海水のトラス室への海水流入を仮定することによって3月12日12:00頃までのPCV圧力データを良く記述している。本解析では、3月12日9:30頃には津波によるトラス室の海水は沸騰していたことになる。3月12日12:35にHPCIが起動した後HPCIが間欠的に作動し、RPVに注水しているが、HPCIのポンプによる注水停止時にMOVが閉まらないために蒸気がタービンから漏れてRPVの圧力は急激に減少する。このときHPCIの等価開口直径を $d_{HPCI} = 6.5 \text{ cm}$ とするとRPVの計測データと良く一致する。3月12日19:00にHPCIのタービンが停止すると、そこから蒸気が定常的に漏れ続けるのでRPVの圧力はさらに低下する。その時の等価開口直径を 9.0 cm とすると計測値と良く一致する。3月13日2:42にHPCIが手動停止され、全てのバルブが閉鎖されRPVが隔離されると圧力が急上昇する。その変化は実測値と良く一致する。5:05にRPVが高圧となりSRVから蒸気が放出されRPV水位が低下する。

この変化も実測圧力データと一致する。

本解析では、3月13日8:55にRPVが破壊したと仮定した。その時破壊した開口直径を $d_{RPV} = 18 \text{ cm}$ とすると、破壊直後の圧力データと比較的良好に一致する。前報で示したように、当時の放射線強度の変化とも矛盾しない。TEPCOが仮定しているようにSRVが9:08に作動したとするシナリオでは、RPVの計測データを記述できない。RPV破壊後の解析は、前報⁽³⁾と同様の断熱膨張モデルを使用した。ただし、この時点ではRPV水位は有効燃料棒底部(BAF)より下がっており、放出蒸気は高温の過熱蒸気となっているため、飽和蒸気の放出を仮定したモデルはRPV圧力変化を過小評価することに注意する。

3月12日12:06にS/Cにスプレイを開始した。この流量を $\dot{m}_{SPRAY} = 35 \text{ kg/s}$ とすると、PCVの実測データと一致する。このとき、トラス室の海水とS/C間の熱交換とS/CスプレイによりPCVの圧力は徐々に低下している。HPCI停止後3月13日4:55にSRVが作動し、蒸気がS/Cに吹き込むとPCV圧力が増大するが、その推測値は実測データと異なっている。このとき炉心の核燃料はむき出しになっており、放出蒸気は飽和蒸気でなく、かなり高温の過熱蒸気だったと推定される。そのため、相平衡を仮定している本報の熱力学的モデルはPCVの圧力上昇を過小評価しているとも考えられる。

図3は、RPV内水位の変化について本報の事故シナリオと計測データを比較したものである。図中には前報⁽³⁾で示した崩壊熱と水の蒸発による簡単なエネルギーバランスで推定した水位の変化も記入してある。

東電発表のプラントパラメータには燃料域(図中 Measured, Fuel Region (A))の水位計データのみが記載されているので13日5:00時以後のデータしかない。そこで、プラントパラメータ原簿から広帯域水位計の水位データ(図中 Measured, Wide Range)を拾い集めて燃料域水位に換算して加えてある。広帯域水位計の下部圧力孔はTAFに設定してあると推定されるためTAF近傍またはTAF以下の水位データは信用できないと考えられる。3月13日5:00以後のプラントパラメータによる3号機の燃料域水位データは、図3に示すようにTAFに達してからかなり時間がたった後の水位データなので、基準面器の水が蒸発することにより正しい値を示していないと考えられる。その時刻の広帯域水位計の値も正しい値を示していない。

本解析と、RCIC停止直後の水位データは比較的良く一致する。RCIC停止直後からHPCIの自動起動までに水位が低下しているが、本報の推定ではHPCI起動時の水位はTAF+2.8mである。これは、TAF+2.95mで自動的に起動するよう設定しているHPCIの動作と良く一致する。

HPCIが給水を停止する3月12日18:30頃からRPVの水位は急速に低下する。この時の推定水位と実測値は一致していない。このときは、直流電源低下で測定が不安定だったと報告されている。当時の当直引き継ぎ日誌別紙によると、20:37に水位計の直流電源が完全に枯渇し、直前の計測値は、燃料域(A系)水位計でTAF+400mm、また広帯域水位計ではTAF+5.52mと報告されており、不安定な値だったとも推測される。3月12日18:30以後の水位データと本解析の不一致は今後の検証が必要である。

3月13日2:42にHPCIが手動停止されRPVが隔離された後、RPVの圧力は急激に上がり、4:55頃にRPV圧力高によりSRVが作動するが、図4に示す本解析モデルはこれを良く記述している。このときHPCI起動時に288tonあったRPV内の水は130tonに減少していると推定される。

図3の水位推定が正しければ、政府事故調で3号機破壊の原因とされたHPCIを手動停止した行為は、結果的にRPVの破壊を2時間程度遅らせたことになる。

もしHPCIを手動停止しなければRPVはもっと早くに水位低下が起こり、もっと早期にRPV破壊を起こしたと考えられる。つまり、HPCIの手動停止は3号機の破壊に決定的な影響は与えなかったと考えられる。

図3に示すように、前報⁽³⁾で推定したRPV破壊時刻の3月13日8:55頃にはRPV内の水は約4.7tonで、ほとんど水は残っていなかったと推定される。このとき、溶け落ちた燃料でRPVが破壊し、その燃料がRPV外に流出したことは十分考えられる。従って、RPVの破壊位置はRPV底部と推定され開口面積も3機の原子炉の中で一番大きいと予想される。この推定は前報⁽³⁾と同様である。このことは、2013年10月現在で、3号機周りの放射能汚染が激しく原子炉に近づけないことも符合する。TEPCOの推定⁽⁴⁾では、3号機のRPV損傷は14日8:40頃で、燃料はほとんどRPV内にあると予想したが、この予想は3号機の現状や本解析とは異なっている。2012年7月23日に発表された政府事故調の最終報告書では、3月13日6:30~9:10にRPVが破壊した可能性を指摘しているが、具体的な解析データを示していない。著者が8:55に破壊を予想した論文⁽⁵⁾は、2012年5月4日に投稿されている。また、この論文の基本となる考え方は2011年10月に公開されている⁽¹⁾。

4. おわりに

福島第一原子力発電所3号機について、容器内の蒸気と水が相平衡を維持するとした熱力学的モデルを構築し、原子炉内の熱流動現象の推定を行った。以下に得られた結果の概要を述べる。

- (1) 2011年3月11日15:37の津波到来時に原子炉建屋地下にあるS/Cが設置されているトラス室が浸水し、S/Cと侵入海水とが熱交換を行っていたと仮定すると、格納容器の圧力データが説明できる。
- (2) 3月12日12:35にHPCIが自動起動したとき、タービン側のMOVが開いたままになっており、RPV内の蒸気がS/Cに凝縮し続けていたとすると、HPCI起動後の圧力データが説明できる。
- (3) HPCIが設計動作圧を外れる19:00頃にHPCIの注水が止まり、RPV内の水位低下が始まったとすると、その後の原子炉挙動が説明できる。

なお、本稿の詳細は日本機械学会論文集⁽⁵⁾に掲載予

定である。

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, < <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] 円山重直, 福島第一原子力発電所 3 号機事故の熱流動現象の推定—高圧注水系 (HPCI) が途中で止まった

場合—, 保全学, Vol.11, No.3 (2012), pp. 100-109.

- [4] TEPCO (東京電力株式会社), 福島原子力事故調査報告書 (中間報告書), 東京電力株式会社, 平成 23 年 12 月 2 日 (2011).
- [5] 円山重直, 福島第一原子力発電所 3 号機事故の熱流動現象推定 (熱力学モデルによる高圧注水系 (HPCI) の挙動), 日本機械学会論文集, (2014), (掲載予定).

