

## 原子炉内熱流動現象の推定

### — 福島第一原子力発電所 1号機の場合 —

東北大学 流体科学研究所 圓山重直

(2011/7/20 作成)

#### 概要

東北大学国際高等研究教育機構[http://www.iiare.tohoku.ac.jp/index\\_j.html](http://www.iiare.tohoku.ac.jp/index_j.html)の広報誌「クロスオーバー」<http://www.iiare.tohoku.ac.jp/crossover/index.html> 8月号に寄稿依頼された原稿を掲載する。

新規に解明された現象はないが、今まで発表したものを分かりやすく整理しているので参考にいただければ幸である。

## 原子炉内熱流動現象の推定

### — 福島第一原子力発電所 1号機の場合 —

東北大学 流体科学研究所 圓山重直

#### 著者略歴等

圓山先生の研究チームは本来の研究のかたわら福島原発事故に対して精力的に収束に向けた提言をされてきた。この詳細は参考資料をみていただくことにし、近々の事故解析を報告していただいた。

(1977年東北大学工学部卒業、専門分野は熱工学・流体工学。ロンドン大学インペリアルカレッジ修士、東北大学工学研究科博士(工学博士)、東北大学高速力学研究所助手、米国パデュー大学客員研究員、東北大学流体科学研究所助教授を経て、1997年より東北大学流体科学研究所教授(現職)。日本工学アカデミー会員、日本伝熱学会東北支部長、日本機械学会フェロー、米国航空宇宙学会アソシエイトフェロー 他。21世紀COEプログラム「流動ダイナミクス国際研究教育拠点」、グローバルCOE「流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点」代表。)

#### はじめに

著者らは、福島第一原子力発電所(以下原発という)の事故から各種の熱流動や事故の早期収束に向けた熱流動解析を行ってきた(文末の参考資料[1]参照)。この事故解析で、学部程度の熱力学や流体力学、各種保存則を応用することによって、かなりのことが推定できることが分かる。本事故解析は、未知の現象をどのように理解するかという研究者や大学院学生にとって重要な要素も含んでいる。

原子炉の早期収束のためには、現象の理解が重要である。原子炉での現象はエネルギー・水・放射能の保存則が成り立っており、計測誤差も含めて全てが合理的・定量的、もしくは少なくとも定性的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、これまで集めたデータが推定される事象の裏付けとなれば、それが過去に起きた現象である。本報告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早期収束のために、あえて不正確さの誹りを承知で原発事故を解析する。

東京電力は1号機メルトダウンのシナリオを発表した[2]。そこでは、全交流電源停止後4時間で燃料棒が完全露出するなど、急激に現象が進行している。同じ境界条件を使った同様な解析が原子力安全・保安員によって実施され、さらに急激な炉心崩壊が推定されている[3]。

原子炉の初期崩壊熱は時間とともに急速に減少するので、事故直後の初期現象で炉心崩壊の程度が左右される。本報告では、公開されたデータを総合的に評価して1号機の現象を推定するが、報告されている炉心メルトダウンよりかなり遅い炉心崩壊を予測している。

## 圧力容器（RPV）内水位の検証

1号機の水位計は、圧力容器（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なっている。従って、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上部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20日前後に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。

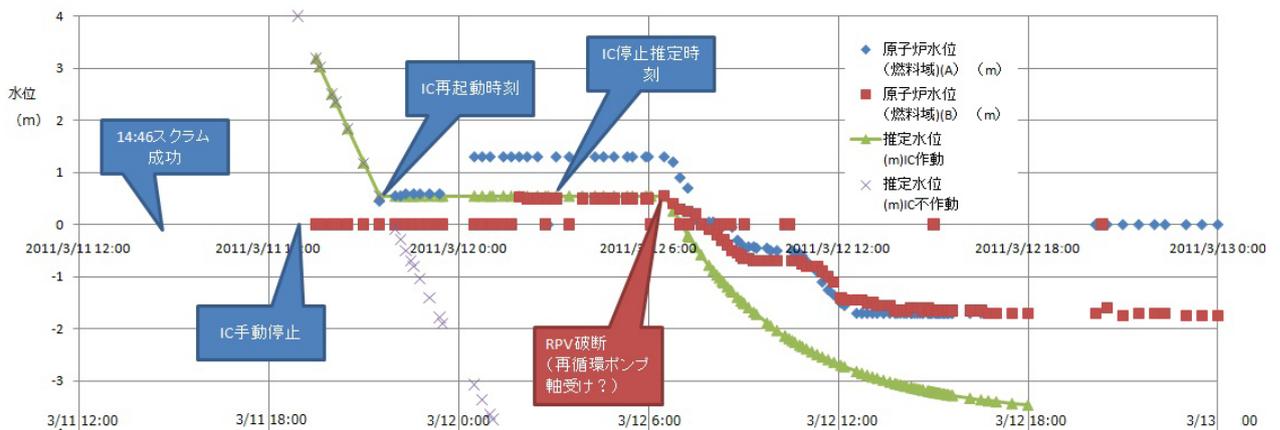


図1 1号機の圧力容器内水位の変化[Rep. 17. 2]

図1は、事故時から3月13日0時までの水位の変化を示している。崩壊熱は参考資料[1]のHTC Rep. 1.5(以後[Rep. 1. 5]と表記する)に従い計算している。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[Rep. 17. 2]。水位は燃料棒上端を0mとしている。記録ではスクラム（緊急停止）直後14:52に非常用冷却復水器系（IC）が作動して冷却を行った後、18:25に手動停止した。東京電力の推定[2]では、ICの再起動は無視している。実際は、IAEAへの政府レポート[4]にも記されているように、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[4]。本報では、ICが再起動した場合を想定している。圧力計や温度計も3月19日から21日に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。

事故初期の水位は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、逃がし安全弁（SRV）が自動開放し、蒸気を格納容器ドライウエル（D/W）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分後にSRVが初めて作動したと考えると、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。この頃、建屋内の放射線強度が上昇したという報告があり、SRVの作動でサプレッションチャンバー（S/C）内の水の温度が上がり、蒸気が直接D/Wに流れたことが推察される。1号機はS/Cの蒸気凝縮能力が十分でないという報告もある。これ以

後、D/W の圧力が上がり続け、12 日 4 時頃の D/W 破断に至ったことが想像される。詳細は[Rep. 19. 1]を参照していただきたい。

この時期の RPV 内圧力データが 12 日 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。

ここで、RPV の破損シナリオについて下記の 3 種類が考えられる。

**(ケース 1)** 12 日 6:30 に 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場合である。この破断圧力は原子炉の強度を考えると妥当であると思われる。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 の破断時刻と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[Rep. 1. 5]から推算して IC の停止時刻は 5:40 と推定された。

流体力学で教えるオリフィスの流量計測を応用し、隔壁前後の圧力差と[Rep. 1. 5]で算出される蒸気流量を用いた[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。この頃は、水面はちょうどシュラウドの上端近傍にあるので、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 内の圧力は一気に下がるが、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 1 を見ると、実測値の液面と推定値は比較的良く一致している。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。実測値は段階的に水位が減少しているが、これは、断続的に注入された水の影響であるとも考えられる。燃料棒が水面から出ると、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 D/W 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。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。実際の水位は、RPV の底から 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熔融を起こす。余剰水はすぐ排出されるので RPV 内に深さ 3.5m 以上の水を溜めることはできない。

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。これが正しいとすると、強い地震を受けた全ての沸騰水型原子炉の再循環ポンプは強度マージンが低下していることを示している。

**(ケース 2)** 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、水位が下がってドライアウトに至る場合を考える。これをケース 2 として、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水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 7MPa +  $\alpha$  であり、RPV が完全にドライアウトして溶けた燃料棒が RPV 底部に到達するまで RPV の破損は起こらず、圧力は維持される。その時の破損箇所は RPV 底部の制御棒の挿入スリーブ近傍の破損が疑われる。ケース 2 では、RPV が完全にドライアウトするまでは RPV 圧力が維持され、消防ポンプでは水が入らない。実際には 12 日 6:20 から 14:53 まで断続的に約 80t の水を注入しているので、矛盾することになる。さらに、破損箇所は制御棒挿入スリーブ近傍が予想され、ここは 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水が急激に排出される。この挙動では以後の炉心冷却データを説明しにくい。

ケース 1, 2 とともに、燃料棒が露出すると、ジルカロイ-水蒸気反応を起こして更に高温になる。水素も発生する。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。ケース 1 かケース 2 かは原子炉の破壊状況を把握するためには重要である。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。

**(ケース 3)** 東京電力の推定と同様に、IC が作動しない場合である。この場合の水位の推定も図 1 に示してある。本報ではジルカロイ反応による発熱は考慮していないので、実際の水位低下はこれより急峻になるので東京電力[2]や安全保安員[3]の推定に近くなる。

しかし、この仮定は、水位計、作業員の報告など全てのデータが正しくないと仮定した場合であり、多くの事象が説明できない。もし、ケース 3 の場合が実際に起きた場合は、炉心の崩壊熱が大きいので

炉心の大規模破壊やメルトスルーの可能性も否定できない。しかし、ケース2と同様に RPV 底部にケース2より大きな穴が開くので、注水による燃料冷却は難しい。

本報のケース1と2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。東京電力のレポート[2]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。

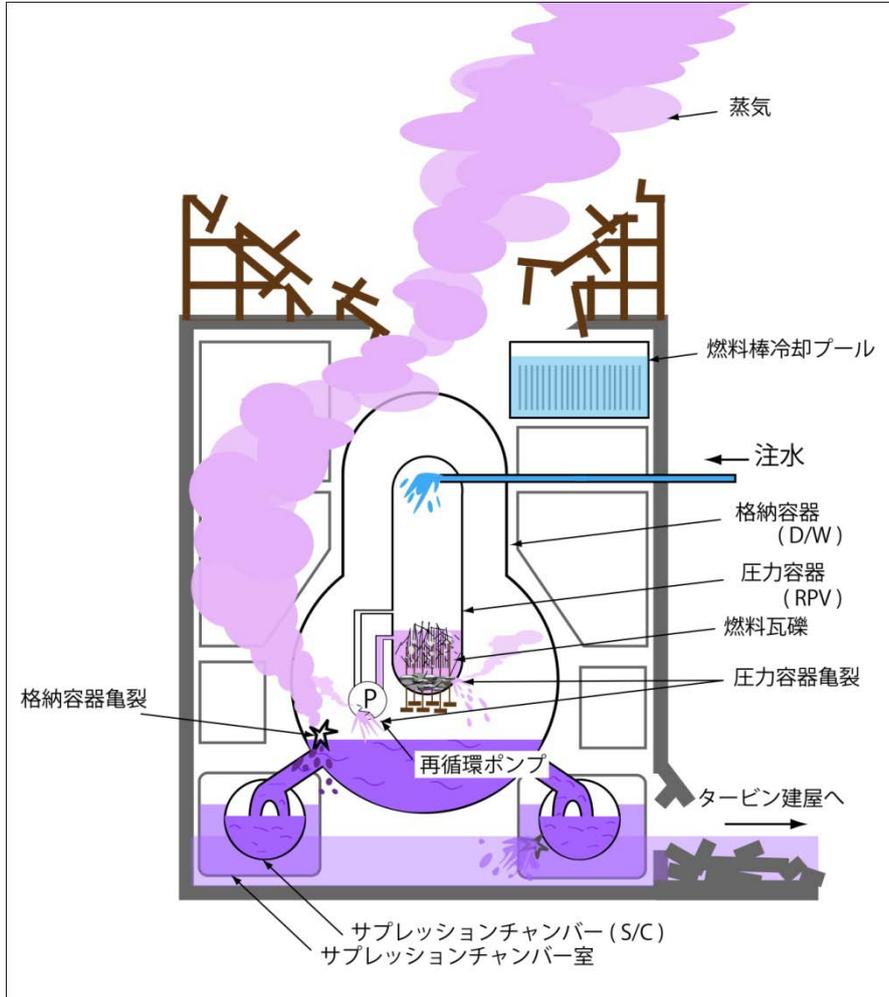


図2 1号機における現状の破損状況推定図

### 格納容器 (D/W) 破損の検証

格納容器のドライウエル (D/W) は SRV から放出された蒸気が溜まり 12日4:00頃破断したと推定される [Rep. 19.1]。この時間の前後で格納容器の圧力が下がり周囲の放射線量が急激に増大した。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で水素は発生していないと推定される。その破断面積の推定等価直径は約9cmである。1号機水素爆発の前後で破断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 D/W と S/C を繋ぐ円筒部との溶接箇所が疑われる。図2に現在の炉心破壊状況の推定図を示す。

図1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S/C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かったことが放

射線計測で明らかとなっている[Rep. 19. 1]。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。D/W は 12 日 4 時にすでに破壊しており、定期的に炉心からの蒸気と水素を放出し続けていたと推定される。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だろう。

## おわりに

原発は巨大で不気味な怪物である。我々はこれを収めなければならない。しかし、原発は戦争や自然災害と異なり、物理法則に基づいて反応する。また、原発は我々が作り出した物である。人間が相手の戦争や未知な現象が複雑に絡まる自然災害より制圧は容易なはずである。唯一の懸念事項は、原発を収めるのが色々なしがらみや思惑で動く我々人間であることだろう。

原発で起きている現象は物理現象の結果なので、正確なデータと適度な洞察力があれば、かなりの確度で原発の現象が推定できるはずである。本報の推定はこれまで、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。

著者らは、原発の早期収束に向けた提言を行ってきた [Rep. 6. 1]、[Rep. 3. 1-b]、[Rep. 10. 2]、[Rep. 15. 2]、[Rep. 15. 3]。実際は提言の通りには実施されていないが、電源復旧による本来の炉心冷却の断念 [Rep. 10. 1]、4 号機プールの燃料棒が崩壊していなかったこと [Rep. 7. 1]。水棺による冷却方法の断念 [Rep. 3. 1-b]、トレンチ排水の中止 [Rep. 10. 1]、汚染水の循環冷却 [Rep. 15. 1]（ただし本提案では汚染水をそのまま循環させる）、1-3 号機が RPV、格納容器ともに破壊している [Rep. 15. 2] など、ほぼ当方で提言した方向で事象は進んでいる。

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。今のほぼ 10 倍の汚染水を冷却しながら小さいループで循環させれば原子炉は「いわゆる冷温停止」する [Rep. 19. 1]。汚染水をそのまま循環させればフィルターの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。もうそろそろ、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。

## 参考資料

- (1) 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、圓山、小宮、岡島研究室、<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/~maru/atom/index.html>
- (2) 東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と影響強化について、東京電力株式会社、2011 年 5 月 23 日、[http://www.nisa.meti.go.jp/earthquake\\_index.html](http://www.nisa.meti.go.jp/earthquake_index.html)
- (3) 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る 1 号機、2 号機及び 3 号機の炉心の状態に関する評価について、原子力安全・保安院、2011 年 6 月 6 日、<http://www.meti.go.jp/press/2011/06/20110606008/20110606008.html>
- (4) 原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本政府の報告書-東京電力福島原子力発電所の事故について-、原子力災害対策本部、2011 年 6 月、[http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea\\_houkokusho.html](http://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html)