

推理小説 福島原発で何が起きたか、そして、今（予告編）

東北大学 流体科学研究所 圓山重直
2011/5/8 作成

はしがき

これまで、我々のグループでは、福島第一原子力発電所（以下「原発」と略記）で起きている現象の推定と原発収束への提言を行ってきた。すでに我々のグループで発信し URL <http://www.ifs.tohoku.ac.jp/maru/atom/>に掲載しているHeat Transfer Control Lab. Report No. 10, Ver. 1-b (2011/5/4) (以下「Rep.10.1-b」と略記)でも報告しているように、原発は巨大で不気味な怪物で我々はこれを納めなければならないが、戦争や自然災害と異なり、相手は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。

原発収束のためには、相手を知ることが一番重要である。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。原発事故が収まってから、各種機関や学会で検討される「事故調査」では、全てデータが出そろい、現象も収束した段階で正確な分析が行われるはずである。最終的には、原子炉解体時あるいは封印時の事故調査で全てが明らかになるはずである。しかし、**原発事故は今現在進行しており**、現象が終わってから原因を明らかにしても遅きに失することになる。

そこで、現在入手可能な公開データとこれまでの解析結果を用いて、原子炉で起こったことの推定と、現在の状態の把握を行うことにした。限られたデータと、さらにもっと限られた時間と労力から推定される**現象の正確度は非常に限定的である**。しかし、洞察力を働かせるとかなり色々なことが推定できる。そこで、「推理小説」として、原子炉の現状を出来るだけ定量的に推定した。さらに、原子炉内で何が起きているかを想像した。この「想像」がどのくらい正確であるかは、約10年後の炉心調査を待たなければいけない。想像を織り込んだ事象予測は、小説家ではない研究者として好ましくないかもしれない。また、著者自身の知識の不足や、時間の制限から不正確なデータを出すことになる。しかし、原発の一日も早い収束を願い、この「小説」を公開することにした。

現場の当事者は、私たちより遙かに膨大なデータと現象の記録を持っているはずである。さらに、多数の現場エンジニア、現象解析チームやこれまでのシミュレーションツールも保有しているはずである。この小説を基にして現象のより正確な把握と今後の原発対策に役立てていただきたい。

2. なぜ注水量を変えても水位が変わらないのだろうか？

原子炉破損後、圧力容器への注水が行われている。最初は原子炉設備内の冷却水を注入したが、その後海水を注入し、現在(5月5日)は近郊のダムから引いた真水を注入している。圧力容器破損後水の量を変化させても水位はあまり変わらなかった。4月29日には1号機の注水量を倍にしたが、水位はあまり

変わらなかった。この原因を考えてみよう。

詳しい図面の入手が出来ないため詳細は不明であるが、RCIC 設備が停止し、原子炉压力容器内の圧力が上昇したとき、まず、原子炉再循環ポンプが破損したと考えられる。想像であるが、このポンプは燃料棒の中程と下部の配管を介して接続しており、压力容器より下部の格納容器（Dry Well, DW）に設置されている。通常は下部の配管から取水し、上部配管より压力容器へ注水する。ポンプの軸受け等が破壊されると高圧になった炉心の水が DW へ放出され、水位が一気に減少する。このときは、崩壊熱による蒸発と水面低下のバランスは取れない。その後、燃料棒上部がドライアウト状態になり、原子炉停止直後では、ジルカロイ-水蒸気反応が起きる場合がある。

炉心に水を入れると一部は蒸発し、上部の配管を通りポンプの破損部から蒸気として放出される。過剰な水を入れると余剰水は上部配管より上に滞留することになる。崩壊熱の蒸気は压力容器上部に溜まるが、逃げ場がないので圧力が上昇し余剰水をポンプ破損部から急速に排出することになる。従って、**崩壊熱以上の水を入れても無駄である**ことが分かる。しかし、投入水量が少ないと水位が減少しドライアウト領域が多くなり压力容器上部温度が上昇する。3号機の水を絞ったとき発生した格納容器上部の温度上昇はこれが原因であると推定される。手元に燃料棒と再循環ポンプ配管の詳細な位置関係が無いのでこれは、推定である。もし、この推定が正しければ、1-3号機压力容器の主な破損箇所は再循環ポンプであると思われる。

現在は、燃料棒の発熱密度が小さくなっている（Rep. 1.4）、燃料棒上部が空だきになっても下部に水がある限り炉心溶融やジルカロイ-水蒸気反応は起きていないと予想される（Rep. 2.2）。ただし、完全空だきになると炉心温度が急上昇する（Rep. 7.1）。現状は、ドライアウト時の高温で、燃料棒が破壊され一部溶解していると予想される。また、かなりの燃料は、ドライアウト後の注水でばらばらになり、ペレットの状態で压力容器下部の水の中でスプーのように沸騰していると考えられる。この状態が維持されている限り、炉心の水素発生の可能性は低いと考えられる。ただし、压力容器下部で沸騰した飽和蒸気は、乾いている燃料棒上部で加熱され加熱蒸気となっている。そのため、压力容器上部の温度は下部より高くなっている。压力容器内の温度分布については、水面から上方に行くに従って上昇するが、水面上部の燃料棒の状態（どのくらい水面から出ているか）や、压力容器を介した熱交換によって異なるものと考えられるが、シミュレーションは可能であろう。

3. なぜ外側より圧力の低い容器から蒸気が放出されるのだろうか？

3号機では、压力容器の圧力が格納容器より低いにも関わらず蒸気が放出されている。また、2号機では、格納容器が外部より圧力が低いにもかかわらず蒸気が外部環境に放出されている。なぜだろうか？放出されている蒸気が全て水となればこの関係は成り立つが、Rep. 10.1 および 10.2 に述べたように、エネルギーの保存則から、蒸気の潜熱を原子炉内の水の顕熱で吸収することは不可能である。つまり、炉内で発生した蒸気は蒸気として出ているのだ。

先ず最初に疑うべきは、圧力計が正しく表示していない可能性がある。この場合、以下の推論は無意味となる。しかし、5月3日の原子炉の圧力温度「福島第1原子力発電所プラント関連パラメータ、5月3日6:00現在」（東京電力発表）では、2号機は压力容器で-0.2気圧（ゲージ圧）格納容器（DW）で-0.3気圧を与えている。さらに、3号機は格納容器がほぼ大気圧なのに压力容器が-0.8気圧を与えている。測定精度はともかく、これらが全て計測器の誤作動とは考えにくい。

圧力の値がほぼ正しいとすると、圧力の低いところから高いところに蒸気が流れるという、この大いなる矛盾はどこから来るのであろうか。この説明には、大いなる想像力と洞察力が必要である。私は、ある一つの可能性を見いだした。実際の現象とは異なるかもしれないが、限られたデータの考察から下記に示す現象が実際の炉内で起きている可能性はあると思われる。

圧力容器と格納容器との関係に着目し、現象を整理してみる。圧力容器には外部から水が連続的に注入されている。また、燃料体は崩壊熱を発生し原子炉内の水を沸騰させさらに、燃料棒上部の乾燥域で一部加熱蒸気となっている。再循環ポンプが破損している。可能性として圧力容器下部の制御棒挿入部も破損している可能性がある。これまで注入した余剰の水が圧力容器破損部より漏れ出て、格納容器に溜まり圧力容器下部は水につかっていると予想される。

内外の容器が繋がっている場合、圧力容器の水面に比べて格納容器の水面が低いとサイフォン効果によって内部の圧力は低くなる。しかし、内部からは蒸気が生成されるので圧力が上昇してしまう。この謎を解く鍵の一つが「ヘロンの噴水」ではないかと考えた。

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%98%E3%83%AD%E3%83%B3%E3%81%AE%E5%99%B4%E6%B0%B4>

これは水の位置エネルギーを使って水面より高く水を噴射させる装置である。この逆で蒸気を低圧から高压に場所に噴き出すことが出来るかもしれない。しかし、これは難しい。

このパラドックスを解く秘密は、水の漏れと注入水の動的な挙動と、さらに蒸気の非定常噴出にあった。つまり、圧力容器下部は破損しかつ水につかっているために格納容器に対して負圧になっている。さらに、再循環ポンプの上部配管の入り口は蒸気となっている。燃料棒の発熱で蒸気圧が一時的に上昇するとその圧力で上部配管の水を押し下げ蒸気が格納容器に噴出される。圧力が下がると再び管内に水が入りサイフォン効果で圧力が下がる。圧力容器が高压になると水も格納容器に漏れるが、蒸気と水では粘土と密度が大幅に異なるので水の漏れは僅かである。さらに、圧力容器には水の漏洩分の給水が常に行われているので、圧力容器の水位はほぼ一定に保たれる。

以上から、**炉心への給水量は蒸発量より若干多くないと水位が維持できないこと、圧力容器の圧力は非定常に変動していることが想像される。**この推定が実測値とあっていたら、「ビンゴ」である。

上記の推定を、簡単な実験装置で検証した。**本レポートと同時に実験動画を発信するのでご覧いただきたい。**「百聞は一見にしかず」「論より証拠」である。このビデオでは、容器の底に人為的な漏れを作り水に浸ける。さらに、蒸気発生を模擬した息を吹き込むことによって水面がほとんど変わらずに蒸気が外部に噴出する。蒸気噴出が停止すると容器内部の水面は元に戻り負圧が維持される。

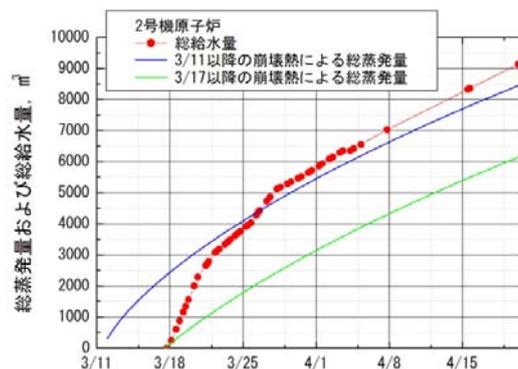


図 2 2号機原子炉への供給総水量と総蒸発量(Rep.13.1)

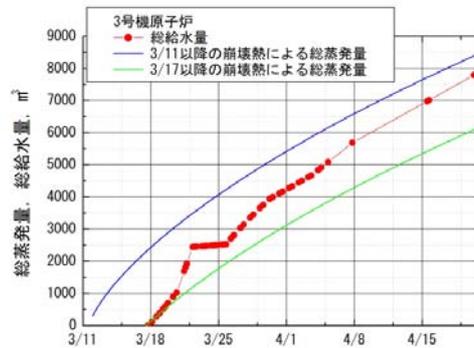


図 3 3号機原子炉への供給総水量と総蒸発量(Rep.13.1)

このことから、格納容器内に溜まった水の量が推定される。5月3日の時点では、2号機圧力容器と格納容器の負圧が0.1気圧（水頭で1m）なので、格納容器内の水面は圧力容器水面とあまり変わらないと予想される。しかし、3号機は大幅に減圧しているので水面の落差は8m以上あると想定される。本推定には、圧力の動的挙動が考慮されていないので1mと8mの落差は最低値であり、実際にはこれより大きな水位差がついていることが予想される。図2, 3は、これまで投入した水の未蒸発量を示している。2号機の方が3号機より余剰水が多いことから上記の水面の推定量が定性的に裏付けられている。

2号機は格納容器圧力が外気圧より低い。これも同様な推定が可能である。2号機はサブプレッションチャンバー（SC）の破壊が予想されている。格納容器内には水が溜まっており、管路を通じてSC内の水と繋がっている。ここに格納容器内上部とSC内の水を接続する管路があれば、圧力容器と格納容器との関係と全く同じ現象が起こりうる。このとき、格納容器への上記の水は圧力容器から供給される。格納容器内の水面とSC内の水面差は5月3日時点で3m以上あると考えられる。SCは破損してSC収納室に水が充満しその水面がSCの水位と等しいと考えられる。また、配管を通じてSC内の水に噴出された蒸気の一部は凝縮するが、その周囲は飽和温度の水になっていると考えられるので、蒸気として環境に放出される。2号機SCの水温度が、1, 3号機に比べて高いことも、この現象を裏付けている。ただし、格納容器の空間は大きいので、圧力容器に比べると圧力変動の周期は大幅に大きくなると考えられる。そのような圧力変動が2号機格納容器に存在するかどうかは公開されたデータのみでは分からない。

1号機の圧力容器は高圧になっている。そのデータは2つの圧力計で大きく異なり、4.5気圧と125気圧を示している。水の飽和蒸気圧温度に換算すると、それぞれ147℃と189℃になる。一方給水ノズル温度142℃に対応する蒸気圧は3.8気圧となる。いずれにしても格納容器に比べてかなり高圧であり、内部圧力が4.5気圧と仮定すると、その蒸気は循環ポンプ破損部を通じて格納容器に直接噴出している。また、制御棒挿入部などの圧力容器下部を介して比較的大量の水が漏出している。そのため、**1号機は原子炉発熱量が少ないにもかかわらず多量の水を注入する必要がある。**

4. 容器の破壊開口部面積の簡易推定法 5 1-3号機の原子炉で何が起きたか

まだ執筆途中なので続編は後日報告します。