

新工程表に向けて：水位計が壊れた前提での予測と現状分析

東北大学 流体科学研究所 圓山重直

2011/05/14 作成

概 要

1号機で水位計が壊れており、炉心がメルトダウンしているとの発表があった。また、5月17日に向けて新しい工程表の議論がされているようである。熱工学的視点から原子炉の現状分析と一日も早い原発事故収束の提案をする。新工程表作成の参考にしていただければ幸である。

現 状

- (1) 1-3号機は全て、相変わらず汚染水と汚染水蒸気を放出している。特に汚染水はプルトニウムやストロンチウムを含んでいる可能性が高い。
- (2) 1-3号機全てが、圧力容器、格納容器ともに破損している。2号機はSCが破損している。しかし、これらの容器は、とんでもなくメチャクチャに壊れているわけではない。
- (3) 原子炉建屋地下に溜まった水が配管や地下の透水層を介してタービン建屋や海に漏出している。
- (4) 水位計が壊れていて、1号機の水位が極端に低くなっている。2, 3号機の水位計も壊れている可能性が高い。特に3号機は完全空だきの状態と想定される。1号機より状態は深刻である。
- (5) 5月11日に発表したHTCRep.14.2の翌日に圧力容器が破損していることが発表された。直径数センチの穴が幾つか開いていることが予想された。



図1 放射能放出の現状(4/24 現在、Rep.10.2-b)

5月11日のHTCRep.14.2は、水位計が「ある程度」正しい値を示している前提で推測している。現在の水位計が正しい値を示していないのは、2号機、3号機も同じであると考えられる。幾つかの計器もその計測精度に疑問がある。それを前提に現状分析を試みる。筆者は、5月以前で、事故後の詳しいデータを全く持っていないので、**早期のデータ公開が望まれる**。特に、事故直後に取得されたデータで計測器の中に保存されているデータが重要である。14日現在、東電の詳しいデータ（以前のもの）は、依然として発表されていない。

筆者は計測器の詳しい構造を知らないので、計測器の不具合の原因が分からない。しかし、測定器も物理現象の一つなので、誤作動している原因が必ずあるはずである。本レポートの手法により、過去のデータを詳細に検討することによって、計測器がいつまで正確な値を出していたか推定することは可能である。また、いつ壊れたかが分かれば、その時原子炉で何が起こったかも推定できる。

Rep.10.1に記したように、どんなことが起きてもエネルギー・水・放射能の保存則は成り立つ。魔術でも使わない限り（戦争や政治は時として使う場合があるが）、水がどこかに消えて無くなることもないし、放出したエネルギーや放射能は外部環境に吸収されるまで、原子炉内にある。計測誤差も含めて全てが「少なくとも」合理的・定性的（もちろん定量的がベター）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、これまで関係各位が集めたデータが事象の裏付けとなれば、それが過去に起きた現象である。そこで、まず各炉心で共通に起きた事象を検証する。

これまで1-3号機で起きている現象の推定

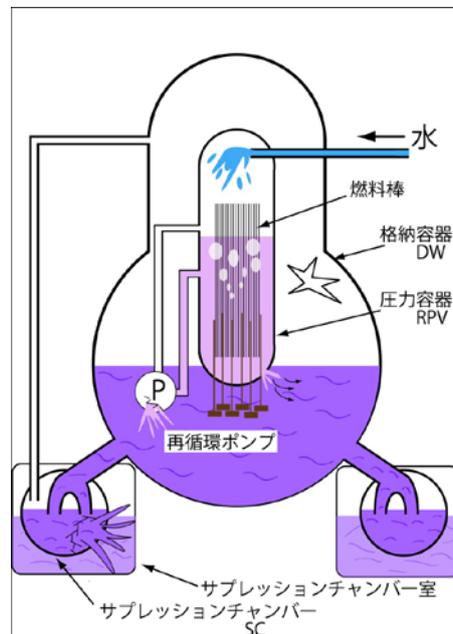


図2 原子炉の破損状況と蒸気流出箇所の推定 (Rep. 14. 2, 2011/5/11)

どの炉でも隔離時冷却設備が停止してから、かなり早い段階で圧力容器 (RPV) 内の圧力が急上昇し、再循環ポンプと予想される破損部から急速に水が格納容器 (DW) に放出され「半空だき」の状態になっ

た。このときは、核反応停止後からあまり時間がたっていないので、ジルカロイ-水蒸気反応が起きて水素が発生した。しかし、メルトダウンまでは行っていないと考えられる。その後、RPV 内の水が完全に蒸発し、完全空だき状態が続いた。このとき、1-3 号炉がメルトダウンを起こしたと推測される。完全空だき状態の時期と時間は機器によって異なる。このとき、多くの機器が破損したことも予想される。RPV 下部の制御棒挿入部分が破損した可能性もある。さらに、各号機の対処によって再び「完全空だき」の状態が1度はあったと推定される。

1号機はその後、21日-24日頃に水の投入量が少なくなり、RPV 温度が400℃に上昇した。その時以後、圧力計のA系とB系が徐々に異なる値を示しているため、この高温が計器に影響したことが予想される。もちろん、このときも1号機は「完全空だき」状態となっていた。3号機も現在空だき状態になっていると推定される。

最近、東電から発表された、RPV と熱電対の位置の概略図から推定すると、1-3 号機 RPV の水位は再循環水入り口か出口の水位と考えられる。(詳しくは Rep.14.2 参照) 各号機の RPV および DW は水蒸気で満たされている。1号機は若干の窒素を注入しているが量的には僅かである。放射性ガスや水素の濃度は十分小さいと考えられる。従って、容器内に水と水蒸気が共存する領域では、容器の圧力はその温度における飽和圧力となる。しかし、水面の上部にドライアウトした燃料棒があるとそれによって加熱された過熱蒸気によって、飽和温度以上の温度となることがある。同様に DW でも水面では飽和温度となるが、過熱された RPV がある場合はそれによって加熱された蒸気によって水面上部の温度は飽和温度以上となる。

以上の知識と手法で、各時間でどこまで水が来ているか、どの計器がいつ壊れたか、原子炉の状態はどうなっているかが推定できる。筆者は詳しいデータを持っていないので、関係各位はこの解析をしていただきたい。参考に、水の飽和温度から飽和圧力を推定する計算と飽和圧力から飽和温度を推定するエクセルファイルを添付したので利用していただきたい。ただし、データベースの数値が粗いので精度は高くない。

以下に、13日現在のプラントパラメータを基にした原子炉の現状を分析する。

1号機の現状

5月14日現在、発熱量1.54MW、水の蒸発量2.57トン/h。1号機の水位がかなり低いことが報告されているが、筆者は完全メルトダウンになっているとは考えにくいと考えている。間違っていくかもしれないが、水位も報告されている燃料棒から-500cmではなくもう少し上に来ていると思われる。その中にバラバラになった燃料ペレットが発熱している。一部溶融しているものもあるかもしれない。もし、燃料棒が完全に溶けて固まりとなって RPV に固着していると RPV の温度がかなり上がるはずである。現在の、RPV 計測温度は給水ノズル (N4B 終端) を除いてほぼ同様であることから、燃料はほとんど水没し、核沸騰が起きていると考えられる。ごく一部の燃料が蒸気側にあり、給水ノズルの温度を上げている可能性もある。

圧力容器下部の温度が91℃であることから、予想される RPV 内圧力は0.0733MPaA である。シース温度計が著しく壊れていることは考えにくいので、圧力計が誤作動を起こしている可能性が高い。Rep.14.2 に示したように、間欠的に蒸気が DW に流れている。DW は1気圧以上で飽和温度は100℃以上となるが、DW 温度はそれより若干低い。これが壁面温度を示しているのなら、壁面が外気で冷却され若干温度低下

を起こしている可能性がある。DW の圧力 0.1204MPa に相当する飽和温度は 104.5°C で想定とほぼ一致する。こちらの圧力計は正常に作動していると考えられる。

余剰の水は DW と SC 内に溜まっていると考えられる。SC にはまだ若干の余裕があると考えられる。ただし、現在 SC の圧力はほぼ大気圧なので、SC が破損している場合は原子炉建屋地下に漏水しているいずれにしても過去の圧力と漏洩水量からどのくらい破損しているか推定できる。詳しくは Rep.14.2 参照。

2号機の現状

5月14日現在、発熱量 2.71MW、水の蒸発量 4.52 トン/h。2号機の場合、2つのケースが考えられる。一つは RPV 圧力計が正しい値を出している、飽和圧 0.08MPaA、93°C で上部にドライアウト部が存在し、過熱蒸気のため RPV 上部は 114°C 程度になっているケース。この場合、DW へは間欠的に蒸気が噴出する。詳しくは Rep.14.2 参照。

もう一つのケースは、圧力計が壊れている場合、RPV 内は飽和状態で 114.2°C、0.167MPaA となる。この場合、DW より圧力が高いので1号機と同じメカニズムで蒸気が DW に流出する。プラントパラメータ「圧力容支持スカーブ部」が圧力容器底部を意味するのであればこちらの推定の方が正しい可能性がある。DW の圧力計が壊れる可能性は小さいが、もし DW 温度が正しいとすると、DW 内温度は 0.143MPaA となり、その蒸気が SC に漏れていることになる。

後者の場合は、Rep.14.2 で示した、破損開口部の推定計算はやり直す必要がある。また、後者の場合は、RPV 温度が一樣であることから、燃料はほとんど水没していることが考えられる。

SC は初期の高圧で隔壁が破損し、さらに水素が SC 格納室に充満して爆発した可能性もある。もし、初期の高圧のみで壊れたのなら、外側にめくれ上がり、外部の水素爆発なら内側に曲がっているはずである。SC 内は発火源が考えにくいので SC 内で爆発した可能性は、Rep.14.2 で記した。浜岡原発1号機の水素爆発の例があるので可能性はあるが、海水に溶解する酸素があっても引火の可能性は高くないかもしれない。SC 内には、炉心からの水蒸気が充満して 90°C 前後になっている。ただし、SC は外気と繋がっており、中には空気が混ざっているため水への凝縮は少なく、水温は 65°C である。

3号機の現状

5月14日現在、発熱量 2.67MW、水の蒸発量 4.46 トン/h。3号機は比較的安定していたが、現在は完全空だき状態だと想定される。3月22日から25日まで炉内への注水が減少し温度が上昇している。これが何らかの影響を及ぼしたことも考えられる。

RPV 内の圧力計が正しいとすると、0.01MPaA に対応する飽和温度は 50°C 以下である。その場合、注入水は全て過熱蒸気となり、飽和蒸気は燃料によって加熱され圧力容器をその過熱蒸気で加熱する。

圧力計が誤作動していると仮定すると、RPV 底部温度は 142.7°C なので飽和圧力 0.392MPaA となり、その蒸気が加熱されて胴フランジ下部を加熱する。RPV 底部ヘッド上部が 224°C と高温になっているのは、溶解した燃料棒がここに付着して局所的に加熱していることも考えられる。いずれにしても RPV 内はほぼ完全空だき状態と言える。

DW の圧力が正しいとすると、低温の蒸気が高温の RPV で加熱され温度が高くなっていることが想像される。

圧力計が誤作動している場合、DW の温度 127.8°C の飽和圧力は 0.254MPa で SC の圧力 0.1839MPa より大きくなる。この場合、Rep.14.2 で推定した破損開口部の面積はかなり小さくなる。

以上、5月13日のプラントパラメータのみを使って、現状解析を行ったが、同様な解析は事故の全時系列について可能である。また、各仮定に基づく開口部面積の算出も可能なので、それらを比較すると、原子炉で何が起こったかある程度推測することが出来る。いずれにしても、筆者にはデータと時間がないので、これ以上の解析は現状では難しい。関係各位はデータも人手もあるので、上記を参考にして解析をお願いしたい。そうすると、原子炉が何をやっているのか分かってくると思われる。近似的には、添付エクセルシートも活用できる。

新工程表に向けて

我々の当面の目的をもう一度整理する。

- (1) 原子炉が水素爆発や水蒸気爆発を起こして、大規模な放射能汚染を起こさないようにする。
- (2) 大気中・地中・海洋へ漏れ出る放射能を封じ込める。
- (3) 今後起こるかもしれない津波や大規模余震で上記(1)、(2)が起きないようにする。

冷温停止は目的(2)のための手段であって、冷温停止そのものが目的ではないことを再確認する。環境に水蒸気を出さないことが冷温停止を目指す本来の目標である。従って、炉内が 100°C 以上でも放射能を一切出さなければ目的は達成できるし、住民や世界も原発は収束したと見なす。

目的(1)については、大規模蒸気爆発は、各原子炉の放熱量が小さくなっている所以その危険性は回避できていると考えられる。いずれにしても炉心を冷却し続ける必要がある。水素については、全部の炉心が「完全空だき」となりジルカロイ-水蒸気反応が終わっているので水素はこれ以上出ないと推定される。炉心温度はもう著しく高温にはならないので、かりにジルコニウムが残っていても水素の発生はない。しかし、核反応に伴う水素は発生しているが、それは ppm オーダーと推定される。水素がアキュムレートして浜岡原発 1 号機の水素爆発の可能性は否定できないが、それは限定的であると推定される。

目的(2)については、下記の手法が考えられる。

- (1) 先ず、トレンチやタービン建屋と繋がっている比較的浅い透過水層の遮断を実施すべきである。コンクリートミルクの注入はすぐ出来る。トレンチや縦坑の排水はその後にやっても十分だ。海側の地中に矢板鋼板を連続的に打ち込みその内側にコンクリートを注入することによって海洋への放射能汚染を防止できる。炉心からの汚染水は、ヨウ素やセシウムだけでなく、プルトニウムやストロンチウムを含んでいる可能性が高いので大変危険である。応急措置を行い、時間をかけて恒久的な地下防御を実施するべきである。
- (2) 質量保存の法則に従い、漏出シタービン建屋に溜まった海水を簡単に塩抜きして、炉心に再注入する作業を急ぐべきである。少し塩分が残っていても良いし、放射能物質も除染せずそのまま炉心に戻してやる。これも、先のコンクリートミルク注入と同じ既存技術である。外部から導入した水は必ずどこかに漏れる。例え地中を隔離してもどこかにあふれることになる。放射能は炉心

から出たのであるから、それを炉心に戻しても何の差し障りもない。漏水による汚染水増加を気にする必要がないので、注水量を増やし炉心を安定化できる。注水ポンプは無人操作となるが難しいことではない。現に汚染水をポンプで輸送している。

- (3) 上記を実施しても、汚染水蒸気は依然として放出される。これが止まらなると、住民の帰宅もままならない。「水棺」可能であれば良いが現状では難しい。特に2, 3号炉はほとんど不可能である。これを打開するためには、水蒸気を導き凝縮して炉心に戻すことである。現状では窒素注入管路からDW内の水蒸気を吸引し凝縮させて水にする。凝縮圧力は大気圧以下なので吸引するためのポンプはいらない。ただし、常に蒸気の成分モニターをして水素が検知されたら作業をやめる。圧力計が正しければ2号機DWはすでに負圧になっており、すでに空気を吸い込んでいることになる。これを実施する前に、蒸気を窒素注入管路から抽出し水素分析を行うことが必須である。
- (4) DWやSCの漏れ位置が確定されればそこから空気と一緒に蒸気を吸引し、外部凝縮器で水にする方法もある。この場合は、吸引用のポンプが必要であること、吸引した空気の除染が大規模になることなど、難しい技術課題が多い。
- (5) 第三の方法として、格納容器の漏水箇所もしくは原子炉建屋の漏水が溜まっている箇所から水をくみ出し、冷却した後で注水系から投入するやり方がある。格納容器から漏れてもお構いなしに循環させる。この場合、崩壊熱による蒸発相当分の約10倍の水を流す必要がある。水をジャブジャブかけるので結果的に炉心は冷温停止する。ただし、高汚染水を循環することになるので、原子炉建屋地下の汚染水遮断は完全に行う必要がある。この方式は、2号機と3号機に適しているかもしれない。

目的(3)については、**原発敷地を第7の壁と考え**、海水中のフェンスや新たな堤防、敷地内の漏水箇所の補修、汚水タンクの破損などで万が一漏洩水があった場合の堤防や鋼板矢板で地中を隔離する地中フェンスなどを設置する。特に、海水に漏れ出る汚染水の防御は多重にする。今後、余震で津波が来るとも考えられる。

敷地内に多量の汚染水をプールなどに保管することは、津波に対する防災上でも脆弱になる。まず、汚染水の量をこれ以上増やさないことである。そのためにも上記手法の(1)と(2)は早急に実施することが望ましい。

当然のことであるが、現在計画されている1号炉建屋に覆いをかける作業は、目的(2)の汚染水蒸気放出が止まってからでないと実施できない。汚染水蒸気が出ている状態で覆いをかけると内部が高汚染となり、人間は金輪際入れなくなる。放出された水蒸気を覆い内で除染することは、水蒸気の量(約 $3\text{m}^3/\text{s}$)を考えると現実的ではない。

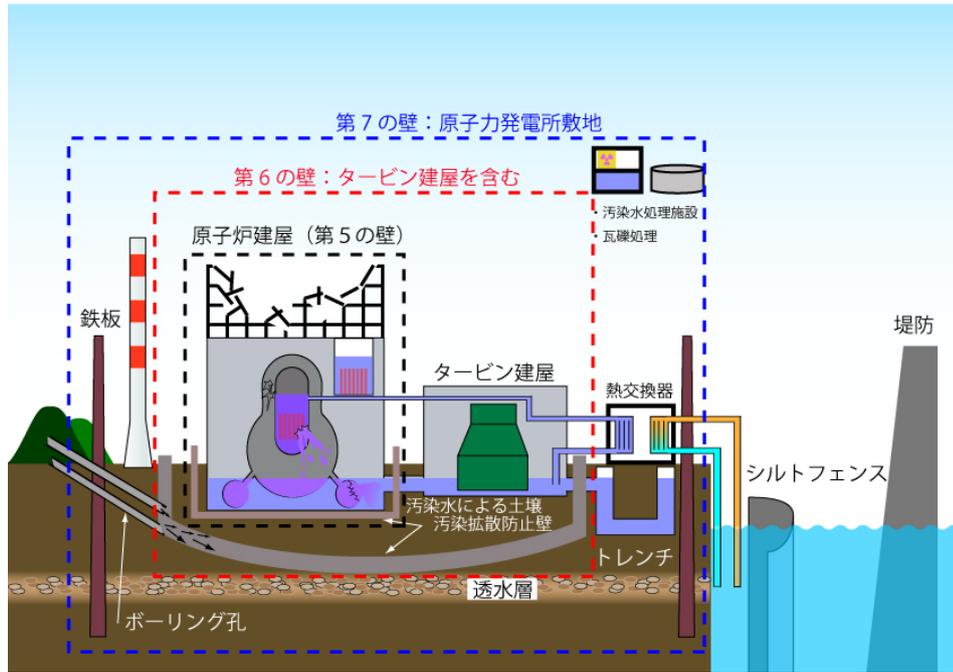


図3 原子炉を封じ込める第6の壁(4/24 現在、Rep.10.2-b)

長期的な原子炉事故収束の提案はこれまで多くやってきたのでそれらを参照されたい。我々は、利害を超えて英知を集結し、原発収束を一日も早く達成すべきである。