

## 原発収束第 2 ステップに向けた提言

東北大学 流体科学研究所 圓山重直

2011/08/18 作成

### 概 要

7月19日に工程表が改訂された。8月17日に「福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋」の進捗状況が公表された。東電によると、工程表の第1ステップはほぼ達成され、第2ステップに向けた指針が示された。8月17日の報告では、著者らが提言している地下隔離も漸く始まったようだ。

7月19日の改訂では、第2ステップの具体的な方策は示されていないが、原子炉については「循環注水冷却を継続し、圧力容器温度等を管理し「冷温停止状態」に持ち込む」ことになっている。循環注水冷却システムは不安定で水漏れ（つまり放射能漏れ）を起こしている。本レポートで示すように、現行のシステムを続けている限りでは放射性水蒸気を放出し続けるため、「いわゆる」冷温停止状態に持ち込むことは出来ない。

本稿では、原子炉の収束を一日も早く実現し、今後10年間安定に炉心を冷却するための指針を提言する。

### これまでの経緯

図1は、事故当初の原子炉の状態を示す。著者らのグループが発信している事故解析と提言のレポート、<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/maru/atom/> Heat-Transfer Control Lab. Report No. 19, Ver. 1 (HTC Rep.19.1, 2011/6/20),(以下 Rep.19.1 と記す)にも示されているように、1-3号機は原子炉の圧力容器と格納容器は事故の早い時期に破壊された。以後炉心からは汚染水蒸気が放出され、地下と海水には大量の汚染水が放出された。図1の時点では、冷却水に海水を利用していた。4月末までは、関係各位は1, 3号機からの水蒸気は燃料プールから出ていると考えていたようだが、1-3号機の蒸気の大半は炉心から出ている(Rep.10.1, 2011/04/16)。図1の時点では、電源回復による本来の炉心冷却システムを復旧する涙ぐましい努力とトレンチの水のくみ出しがなされていたが、我々が指摘したように(Rep.10.1, 2011/04/16)それらの努力は無駄になっている。

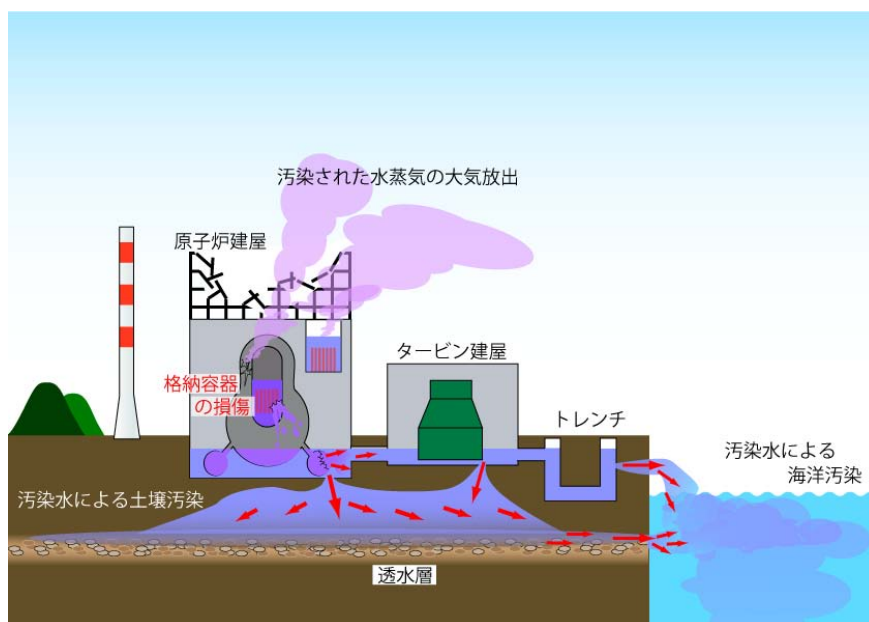


図1 放射能放出の現状(HTC Rep.10.1-b, 2011/04/21)

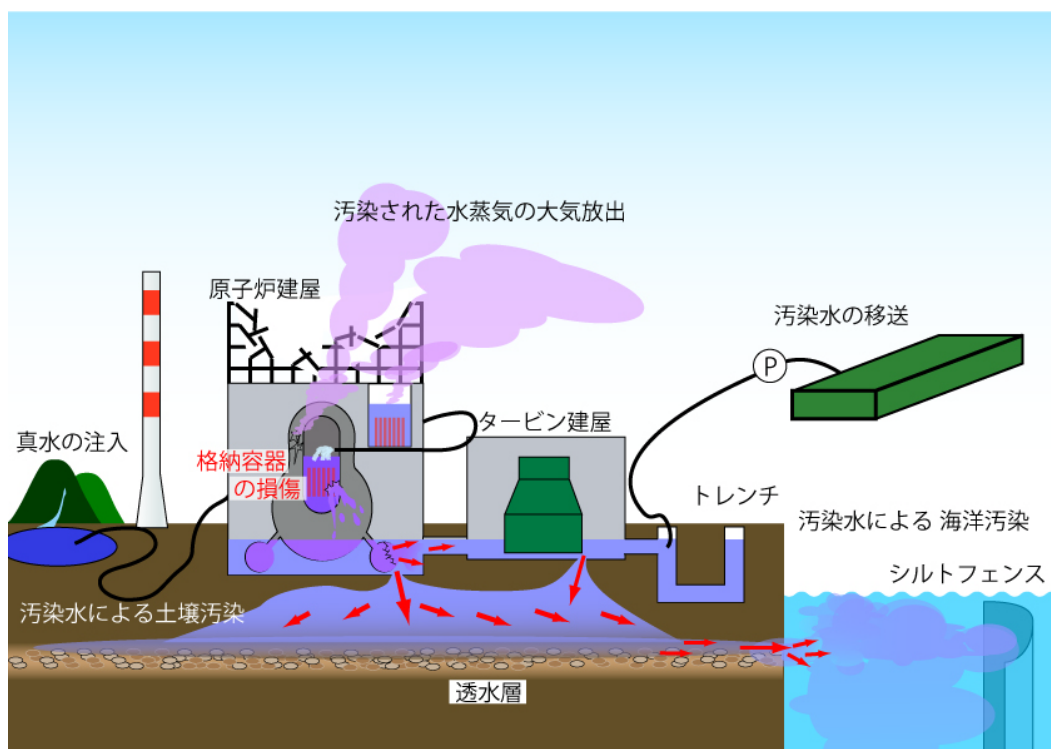


図2 放射能放出の現状(5月22日現在)(HTC Rep.15.2, 2011/5/22)

図2は5月時点での原子炉の状態を示す。この頃には、近郊のダムから水を引いて真水を投入することが出来るようになった。しかし、崩壊熱による水の蒸発より多くの水を注入する必要があり、その水はタービン建屋に流れ込んで汚染水の増大を招いた。Rep.14.2では、压力容器と格納容器の圧力差と放出水蒸気量から、压力容器および格納容器の破断面積とその計時変化について推定している(Rep.14.2, 2011/5/11)。翌日炉心に数センチの穴が開いていることが報道され、5月25日の報道では我々とほぼ同じ

値の亀裂大きさが発表された。(Rep.14.2, 2011/5/11)および(Rep.15.2, 2011/5/22)では、破断面積を分かりやすくするために等価直径で表しているが、報道発表も偶然まったく同じ表現を使っていた。なお、(Rep.15.1, 2011/5/14)では、水位計が壊れている場合の炉内解析を行ったが、同様な解析が5月22日に報道発表されている。

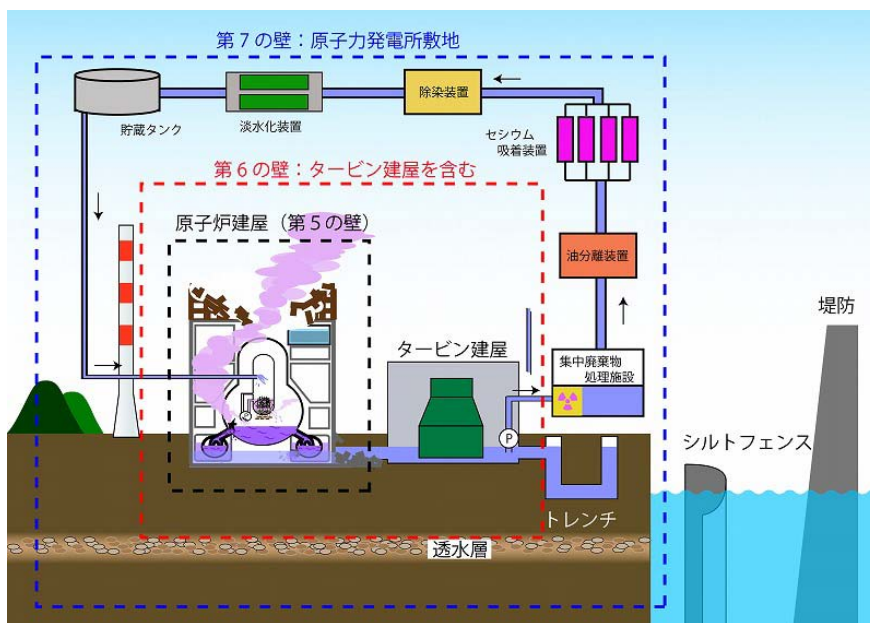


図3 現在(8月19日)の原子炉の現状

**滞留水の抑制** 循環注水冷却（2）水処理装置全体の水の流れ

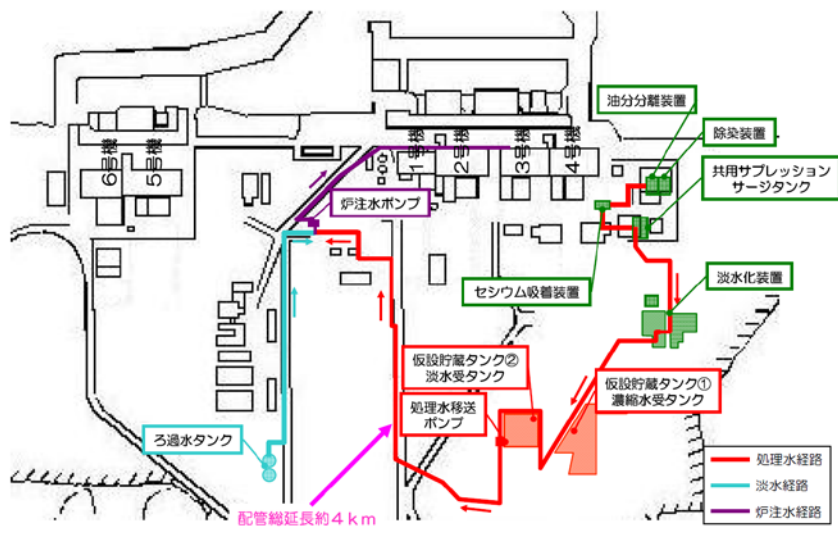


図4 循環水冷却の配管経路（東京電力、事故の収束に向けた道筋（2011年8月10日掲載）、<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/index-j.html>）

図3は原発の現状を示している。漸く、汚染水を浄化して再び炉心に戻す経路が構築された。後述する著者らの定義では、第7の壁に放射能を封じ込めようとしている。ただし、現在では地下のシールド

は未完成で、放射性蒸気は依然として環境に放出しているので工程表の第2ステップ達成にはほど遠い。図4は、その循環システムの配管経路であるが、全長4kmにも及ぶ長大なもので、敷地内には津波等に無防備な除染システムとタンクが屋外に設置されている。これは、仮設設備としては適当かも知れないが、10年以上恒久的に原子炉を冷却する設備としては極めて不十分である。著者は、以前から汚染水を除染しないで大量に循環させる手法を提案しているが、こんな長い管路では怖くて汚染水は循環できない。実際に、この管路系で非常に多くの漏水が起きており、作業員を危険にさらしている。土壌汚染および海水汚染を招いていることも否定できない。

この収束過程について原発を相手にした戦争と考えると、あえて戦線を長大にしてそこに膨大な兵力を薄くつぎ込む戦法である。名将の参謀だったら間違ってもこのような戦法は取らない。戦線はなるべく短くして、そこに集中的に機材と人員を投入し短期間で片付ける。

後述するが、仮にこのシステムがフル稼働して日量1200トンの水を循環させても、原子炉は「いわゆる」冷温停止状態にすることは出来ない。現在の循環冷却システムはあくまでも仮のものと考え、関係各位は恒久的な設備の準備をしていると信じたい。何度も述べているが、1号機の水蒸気放出を止めないで覆い建屋を設置し密閉することは自殺行為である。

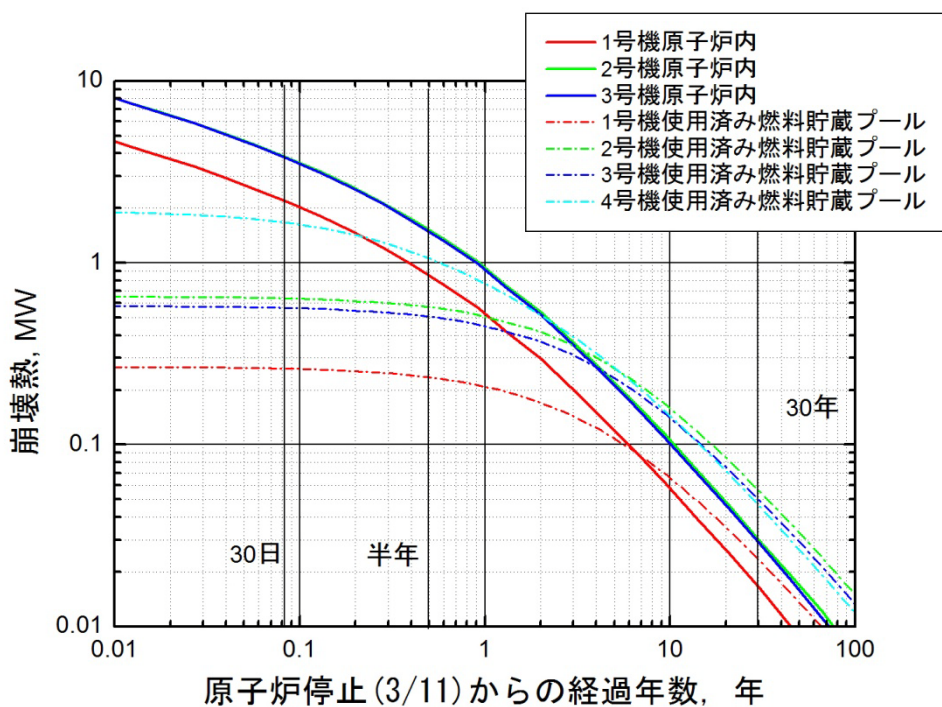


図5 長期間にわたる崩壊熱の経時変化(HTC Rep. 1.5 2011/05/27)

図5は(Rep. 1.5 2011/05/27)に記載した、各原子炉の発熱量を示している。このデータは5月26日の東電の推計より2, 3号機の発熱量を若干多めに見積もっている。ただし、8月17日の東電発表の発熱量補正では我々のデータとほぼ同じ値に修正された。事故発生からほぼ半年がたっているので、原子炉の発熱量は減少し、1号機炉心は4号機プールの発熱より小さくなっている。4号機プールは熱交換器で冷却できているので、1-3号機の原子炉も冷却することはそんなに難しい技術ではないことが分かる。もちろん

ん放射能については万全の考慮が必要である。

(Rep. 1.5 2011/05/27)に記載のエクセル計算プログラムを用い、1-3号機の8月1日と2011年12月31日における水の累計水蒸発量を計算すると、表1となる。ここでは、水の顕熱分は考慮していない。もし、12月31日まで冷温停止が達成できないで環境中に汚染水蒸気を放出し続けると、約2万トンの汚染水が「蒸発」することになる。しかし、7月6日時点で汚染水は12万トンあり、原発で全ての汚染水を蒸発減容することは難しいことが分かる。現在の除染システムは原子炉の放射性物質を濾し取る装置なので、原子炉内の大変危険な放射能を大量に原子炉外に持ち出していることになる。

表1 原子炉の累積エネルギーを水の蒸発量で換算した値 (単位万トン)

日付	1号機	2号機	3号機	合計
8月1日	0.99	1.74	1.72	4.45
12月31日	1.44	2.54	2.51	6.49

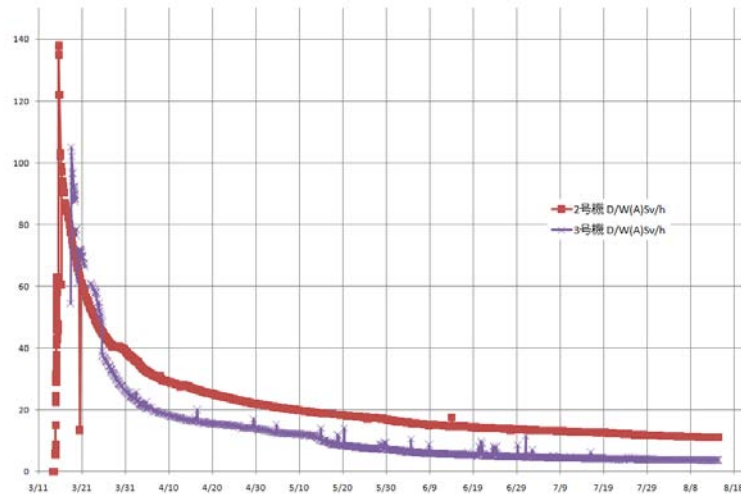


図6 格納容器内の放射線強度の変化

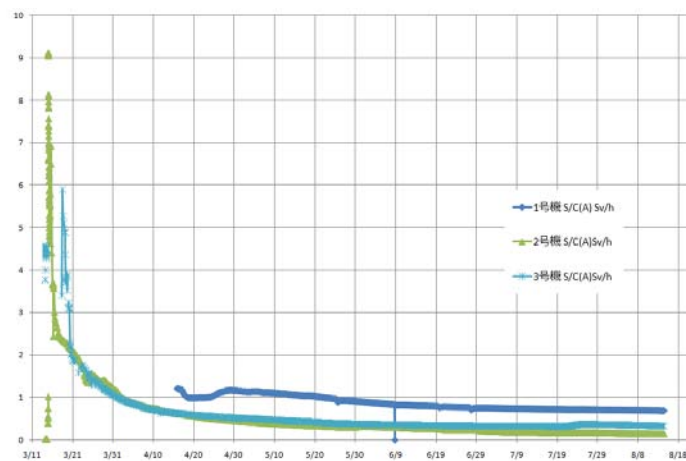


図7 サプレッションチャンバー内の放射線強度の変化

図 6 と 7 は、原子炉内の放射線強度の変化を表している。格納容器ドライウエル (DW) は放射線強度が強いが徐々に減少している。本来、放射能の強度はベクレルで議論されるべきであるが、ここでは、Sv/h を使っている。その傾向はサプレッションチャンバー (SC) も同様であるが放射線強度は十分の程度である。DW の線量が大きいので燃料が一部漏れて DW に溜まっている可能性がある。また、炉心に注入した水は炉心で加熱され蒸気水で DW に溜まるのでそれが原因であるとも考えられる。何れにしても、汚染水の放射線強度はどんなに高くても 10Sv/h 程度である。2号機は SC を介して汚染水が流出しているの、その強度は 1Sv/h 以下である。もちろんこれは、致命的な強度である。

最初の一月程度の放射線の主役は半減期 8 日のヨウ素であると推定される。ヨウ素の放射線はほとんど消滅しているので、現在の主原因はセシウムである。セシウムの半減期は 30 年なので、もし放射能が原子炉内にとどまっていれば、最近の 2 ヶ月では炉内の放射線強度は変わらないはずである。しかし、放射線強度は減少していることから、汚染水や放射性蒸気として原子炉から放射能が以前漏れ出ていることが分かる。つまり、汚染水を漏出しそれを浄化装置で除染して炉内に投入しているの、放射能の保存則から結果的に原子炉内の放射線強度が減少している。放射能浄化装置は、原子炉内の放射能を濾し取る装置であって放射能を消滅させる装置ではない。

## 原子炉収束のためのこれまでの提言

原発事故以来、著者らは原発の熱解析だけでなく原発早期収束のための提言を行ってきた。その幾つかを紹介するので、今後の第 2 ステップの参考にしていただければ幸である。

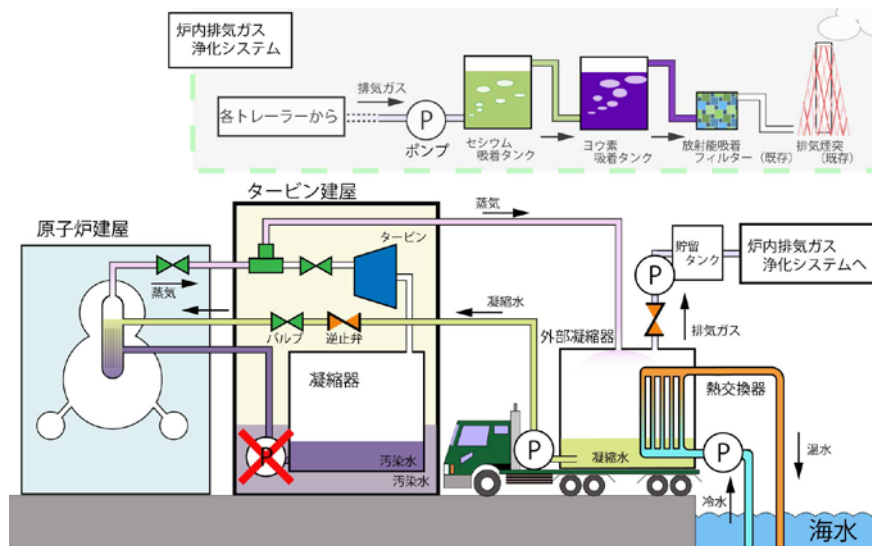


図 8 放射能拡散防止の方策プラン B (外部熱交換器を使用する場合) の概略(HTC Rep. 6.1, 2011/4/8)

図 8 は、東電が従来の炉心冷却システムの復旧 (プラン A と称する) に努力していたとき、提案した炉内の蒸気凝縮と凝縮水の循環による炉心冷却のシステムを示している(Rep. 6.1, 2011/4/8)。このシステムでは早期に放射性水蒸気的环境放出を止めることが出来、汚染水の問題も無いと考えた。関係各位は

水蒸気爆発の危険正等で採用していない。4月の時点では原子炉のジルカロイ-水蒸気反応は終わっていると推定され、水蒸気爆発の危険は少ないと考えられる。炉内の放出水蒸気の水素分析を勧めたが、未だに実施されていない。原子炉はすでに破壊されており水蒸気が直接環境に放出されている。アメリカの指導で現在実施されている窒素注入は放出水蒸気量に比べて桁違いに注入量が少なく、注入された窒素は水蒸気で希釈され炉外に出ているので実質上ほとんど意味のない対策であると考えられる。

このプランBは、炉心の破壊が顕著でないという仮定で提案された。実際には蒸発量以上の冷却水を循環する必要があるため、結果的にこの提案に余剰の水を投入することが必要であったと考えられる。しかし、環境への水蒸気放出は止められる。

著者らは、これまで言われてきた放射能を封じ込める5段階の壁に加えて、図9に示すような第6の壁と第7の壁を提案し、放射能の封じ込めを提案した(Rep.10.2-b, 2011/04/24)。

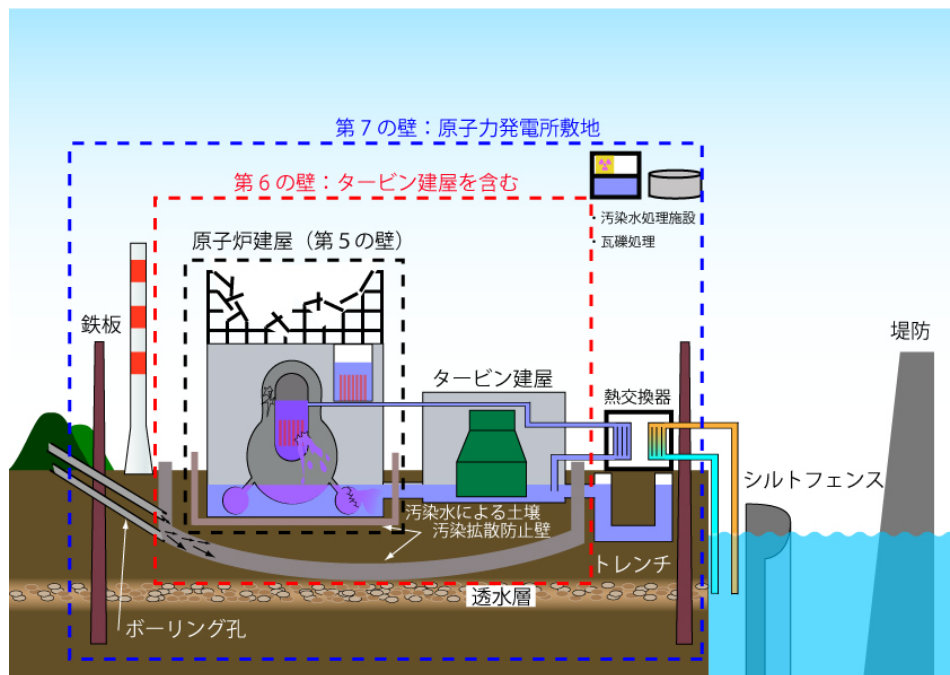


図9 原子炉を封じ込める第6と第7の壁(HTC Rep.10.2-b 2011/04/24)

原発事故の前は「原子炉の中で、ウランが核分裂してできる放射性物質は、発電所の外へ影響を与えないように、5つの壁で閉じこめられている」と言われてきた。この「神話」が今回の事故でもろくも崩れ去ったのは、承知の通りである。第5の壁が崩壊してタービン建屋に汚染水が流入している現在、第6の壁とも言える放射能の防衛ラインは原子炉建屋とタービン建屋とするべきだと考えた。つまり、タービン建屋の汚染水の処理と平行して放射能防衛ラインに汚染を封じ込める努力を早急に進めるべきである。(Rep.10.2-b, 2011/04/24)では、当時検討されていた水棺による原子炉冷却の評価も行っている。詳しくは、レポートを参照されたい。

現状では、図3に示すように、放射能防衛ラインを第7の壁まで後退させ、4kmの配管で汚染水を循環冷却している。本来取り出さなくともよい放射能を除染過程で原子炉の外に取り出している。

原子炉の破壊状況が明らかとなり (Rep.14.2, 2011/5/11)、原子炉の現状を考慮した収束方法を示した (Rep.15.1, 2011/5/14)。ここでは、原子炉の収束条件を以下のように整理した。

- (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)の崩壊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℃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。

(Rep.15.1, 2011/5/22)では、100℃以下の目標は、健全な原子炉に適用できるのであって、破壊した燃料棒から汚染物質をどんどん出している本ケースには当てはまらないことを指摘した。実際に破壊された原子炉の放射能を完全に封じ込めるには、放射性蒸気の蒸気圧をかなり小さくする必要がある。

さらに、(Rep.15.1, 2011/5/22)では、放射能を封じ込める3段階のステップを提案している。その過程を図10～12に示す。

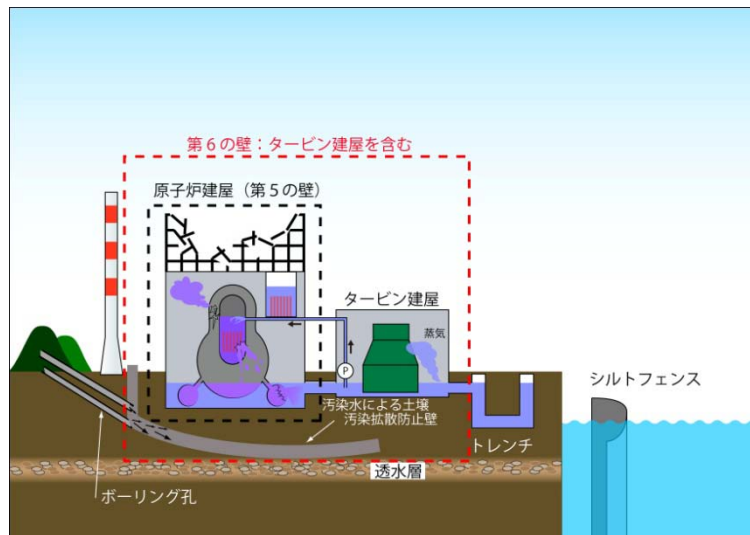


図 10 原発収束のためのステップ 1 (HTC Rep.15.2, 2011/5/22)

ステップ 1 では、現状のように汚染水を循環し炉心を冷却している。ただし、除染はしない。現状は、第 7 の壁まで汚染領域を広げ汚染水を除染して炉心に投入冷却している。



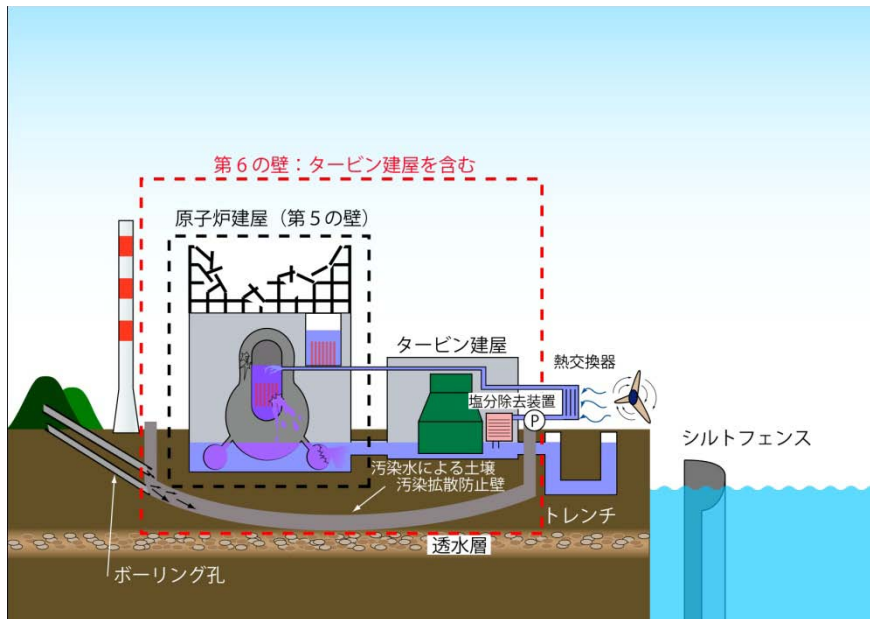


図 11 原発収束のためのステップ 2 (HTC Rep.15.2, 2011/5/22)

ステップ 2 は、第6の壁に放射能を閉じ込める方策である。質量保存の法則に従い、漏出し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。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。外部から導入した水は必ずどこかに漏れる。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。ただし、蒸気の放出を防ぐために大量の水を循環させる。

5月22日現在、2号機で日量99トンの水が蒸発している。これを、温度差40℃の水の顕熱で吸収させるためには、日量1300トンの水を循環させる必要がある。さらに、これから夏場に向けて空気熱交換器は温度効率の点からかなり大型の熱交換器が必要となると考えられる。それでも、炉心から出た水の温度は90℃程度になる。タービン建屋の漏水を隔離してなるべく小さなループで循環させることが必要である。ステップ2で、蒸気が止まると、住民の帰省に向けた一定の指針を示すことができる。

現在用いている、アレバの除染装置は日量1200トンと言われているので、5月22日当時で、除染して炉心に水を投入すると、1-3号機の冷却で3セット必要となる。それも稼働率ほぼ100%で、長大な管路の水漏れを無くしながら除染と注入を行う必要があるので事実上不可能に近い。アレバの装置は、現在の汚染水を浄化して、メガフロートなどに貯留するために使うと有効だと思われる。最終的には除染装置で現在の汚染水を高度に浄化して環境に放出することになるだろう。炉心の放射能を全て濾し取るためにはこのシステムは高価すぎる。

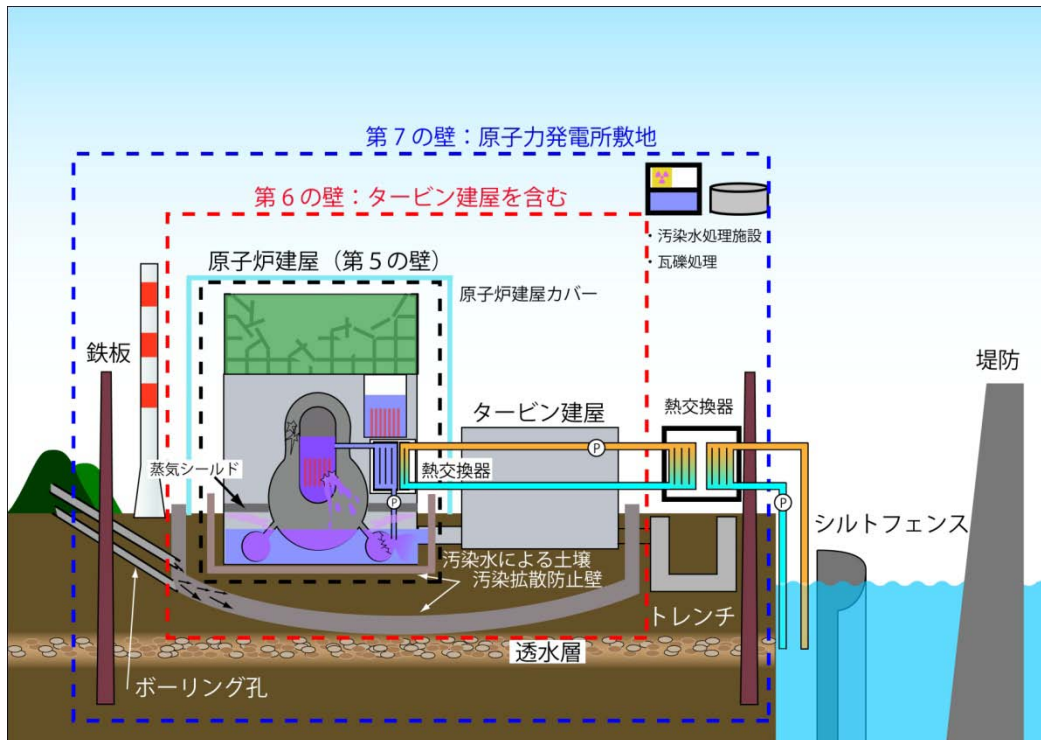


図 12 原発収束のためのステップ 3 (HTC Rep.15.2, 2011/5/22)

ステップ3は、「当面の」収束目標である第5の壁に放射能を閉じ込める作業だ。原子炉建屋に水-水熱交換器（たぶんシェルアンドチューブ熱交換器）を設置して、SC格納室に溜まっている汚染水を循環させ炉心に投入する。もちろん除染はしない。この頃には、ステップ2で塩抜きした水を流しているので、炉内の塩分は少なくなっている。

その熱交換器に、真水の二次冷却水を循環させる。これは、長期にわたり運用するために万が一汚染水が漏れたときにその被害を最小限にする手段だ。温度効率の観点から、二次冷却水は海水による冷却が適当であると考えられる。二次冷却水の津波対策は十分に行う。しかし、放熱量が原発の場合に比べて格段に少ないので対策は簡単である。

原子炉建屋の汚染水は今以上に高濃度汚染となり、100℃以下ではあるが蒸気圧は高い。すくなくとも風呂の温度よりは高くなる。その状態では中に作業員が入れなくなるので、汚染水の貯留室と上部で蒸気を遮断するシールドが必要である。それらの施工がすんでから、原子炉建屋カバー（覆い建物）を設置して本格的な収束作業に入る。

## 原子炉長期安定隔離に向けた提言

これまで、東電から比較的多くのデータが発表され、それを解析することによって炉心の破損状況や位置が曲がりなりに推定できるようになった(Rep.19.1, 2011/6/20)。図13は1号機の破壊状況推定を示す(Rep.20.1, 2011/7/20)。燃料棒プールは熱交換器の導入によって、安定的に冷却できる目処がついてきた。図5に示すように、4号機の燃料プールの発熱量は1~3号機の炉心の発熱量と同じレベルだ。これが冷却

できるのだから炉心の冷却と放射性水蒸気の放出は押さえることが出来るはずである。

8月17日の報道では放射能の放出が非常に小さくなり、冷温停止に近づいたという報道がされている。しかし、依然として炉心から放射性水蒸気は放出されている。放射性水蒸気が炉心から出ている限り、住民も国際社会も原子炉がいわゆる「冷温停止」になったとは見なさない。

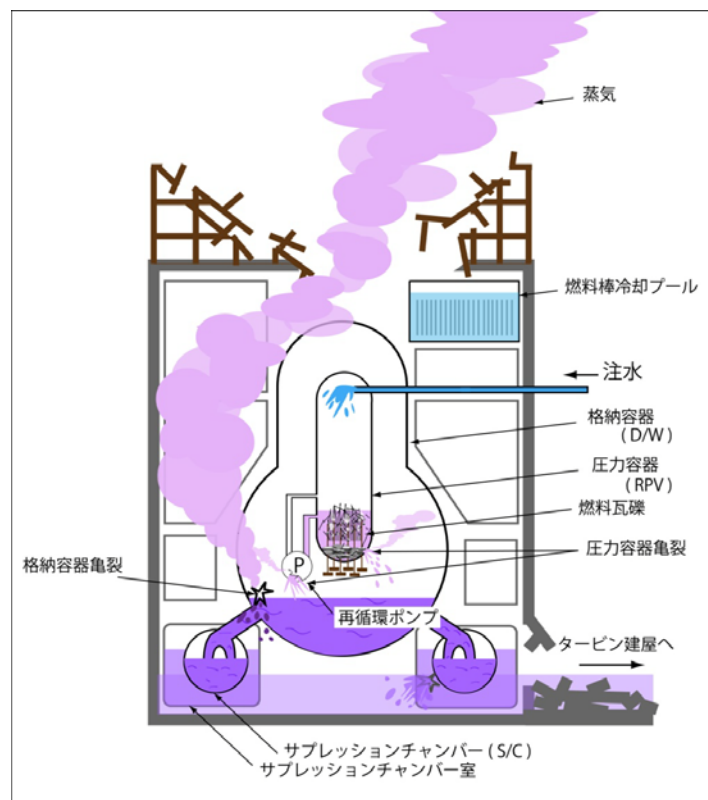


図 13 1号機における現状の破損状況推定図(HTC Rep.20.1, 2011/7/20)

7月19日の工程表の進捗状況では、ステップ2の目標・達成時期として3-6ヶ月後に「原子炉に循環注水冷却を継続し、圧力容器温度等をしっかり監視し、「冷温停止状態」に持ち込む」となっている。

まず、前節のステップ2(図11)でも示したように、現在の循環注水冷却の継続では原子炉の循環水を100℃以下にして放射性蒸気の排出を止めることは出来ない。また、「ステップ1までの取り組みを継続し、放射線量を低減する」としているが、原子炉から放射性蒸気が出ている限りでは、国際社会及び住民は原子炉が収束したと見なさない。

(Rep.15.1, 2011/5/14)では、原子炉収束の目標を整理し以下の3条件を提示した

- (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)の崩壊が起きないようにする。

特に、(2)はいわゆる「冷温停止」の条件であるが、すでに破壊された原子炉は炉心の温度を100℃より十分低くしないと放射能は放出される。さらに、放射能の閉じ込め範囲を小さくして効率的な原子炉隔離を今後10年にわたり安定に実施することが求められる。そこで、図14に示す原子炉の安定冷却を提案する。具体的には図12で示したレポート(Rep.15.2, 2011/5/22)のステップ3の拡張型である。

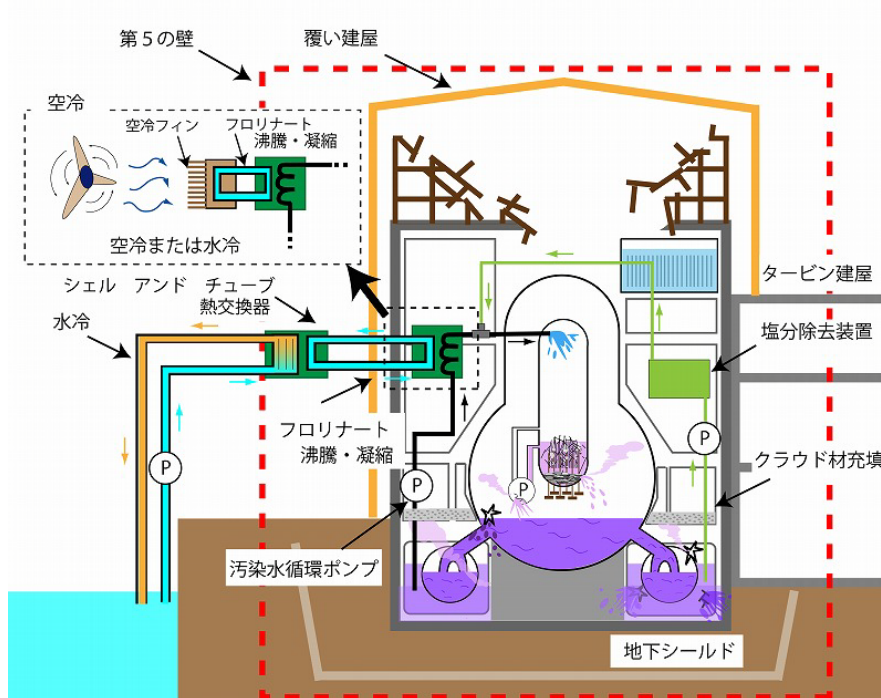


図 14 原子炉長期安定隔離に向けた提案

図 14 は工程表の第 2 ステップを実現するための提案である。つまり、原子炉内の放射能を第 5 の壁に封じ込め、10 年の長期にわたり安定に冷却しつつ放出放射能を完全に封じ込める方策である。中心となる設備はサプレッションチャンバー (SC) もしくは SC 格納室に漏れ出た炉心の水を熱交換器で冷却し、大量に循環させるシステムである。炉心の循環水は、炉心の循環水はフロリナート等の冷媒を介して、外部の海水または空気熱交換器で冷却される。補助的なシステムとして、炉心内の塩分を除去する小型のシステムを運転し、徐々に原子炉内の塩分を除去して恒久的な炉心冷却システムとして構築する。塩分除去システムで取り出された放射能は、それを分離して炉心に戻してやるのが望ましい。

原理炉建屋の周りを完全に水密構造にするために地下シールドを設ける。図 12 の第 7 の壁を地下に作り放射能を完全隔離するためには膨大な経費がかかる。つまり、原発の敷地全域の地下をシールドするために、1 兆円以上の経費がかかるとも試算されている。しかし、図 3 を見ると明らかなように、原子炉建屋自体が原発の用地に占める土地は僅かなので、ここを集中的に地下隔離することによって経費の大幅削減ができる。さらに、原子炉は地下の安定岩盤までコンクリートで固めてあるので、それを有効活用して原子炉建屋周辺を完全にシールドすることは容易であると考えられる。原発敷地内に展開された長大な管路は必要ないので漏水や作業員の被爆等は最小限に抑えられると考えられる。

これまでの事故解析によると(Rep.19.1, 2011/6/20)、1 号機は格納容器ドライウエル (DW) の下部、2 号機はサプレッションチューブ (SC)、3 号機は DW 下部が損傷していると推定される。3 号機は 3 月 21 日以後の原子炉が高温 (再ドライアウト) になったことにより、DW の上部 (DW 蓋部分?) の損傷が推定される。炉心の漏洩水はこれらの亀裂から水蒸気とともに漏出し、地下 2 階 (最下階) の SC 格納室に漏洩していると考えられる。地下 2 階の汚染水と建屋を完全に隔離するために地下 1 階のフロアに大量のコンクリートもしくはクラウド材を敷き詰め、地下階からの放射性蒸気を遮断する。そこに鉄板もしくは鉛板を敷いて地下の放射線を止めることも必要かも知れない。地下のケーブル等でタービン建屋と繋

がっている汚染水経路も完全に遮断する。

放射性水蒸気の放出が完全に止まれば、現在計画されている覆い建屋の建設も可能である。その後、1号、3号機の屋根瓦礫の撤去と1-4号機燃料プール内の燃料棒取り出しを、時間をかけて実施すればよい。

関係各位は工程表の達成を気にしているようだ。また、工程表を変えるとマスコミに色々と指摘されるのを避けているようにも見える。原子炉収束は関係各位の面子のためではなく、近隣住民の帰宅を早め国民や世界の人々が安心して暮らせる環境に戻す行為であるから、必要とされる変更はどしどし行うべきである。しかし、関係各位に配慮すると、初期の工程表の対策に「対策 13: 原子炉の熱交換機能の回復（熱交換器の設置）も検討」とあり、工程表の説明図にも記入してあるので、これを拡張して実施すればよい。

炉心循環水の冷却は直接外部環境と行わず、冷媒を介して外部の海水または大気と熱交換を行う。これは、フロリナート等の冷媒の沸騰・凝縮を使って高効率に外部との熱交換を行うだけでなく、万が一炉心循環水が漏れてもフロリナート側に汚染水が漏れ出ないようにするためである。フロリナートの熱交換部分は実質的にヒートパイプの役割を担うが、凝縮したフロリナートはポンプで輸送する。熱交換器が漏れても汚染水が環境に出ないように、使用するフロリナートは5°Cで大気圧以上の飽和蒸気圧を有するものが適当である。原子炉建屋の熱交換器はシェルアンドチューブ型熱交換器を使用し、信頼性を上げる。もし、炉心循環水をもっと低温にしたければ冷媒回路にヒートポンプを組み込むことも可能であるが、今回は必要ないと思われる。

## 炉心水循環システム

炉心に水を循環するシステムについて、より詳しい検討を行う。本システムは、冷却水を原子炉建屋の中で冷却循環させるシステムで、必要流量は現在の注水量に比べて5倍程度多い。また、循環汚染水は高度に放射化しているためにその循環水運転流は経路には作業員は近寄れない。隔離時冷却系（RCIC）、残留熱除去系（RHR）、高圧炉心スプレイ系（HPCS）、定圧炉心スプレイ系（LPCS）のいずれかで、SCと炉心を結ぶ管路系が使用できれば、その管路に熱交換器のバイパスを取り付けて使用する。ポンプは、地下3階にある既存のものが使えれば良いが、冠水していたり流量があわなかったりで使用は難しいかも知れない。

1, 3号機はDW破損箇所からSC格納室に直接漏水している可能性があるので、地下2階の床に穴を開けて、汚染水をくみ出し・循環するポンプを設置する必要があるかも知れない。この場合、ポンプ入り口の吸い込み圧が小さくなるので、縦型の軸流ポンプや投げ込み型ポンプで地下3階の水たまりから2階に水を汲み上げ、さらに遠心ポンプで昇圧することが考えられる。

次に、循環水の必要流量について試算する。工程表のステップ2の達成期限である。7月19日の3ヶ月後の10月19日における2号機の発熱量は $Q=1.3\text{MW}$ である。この時点の炉内をいわゆる「冷温停止」に持ってゆくための循環流量を見積もる。

冷却後の循環水の温度は、真夏時に空冷熱交換器を使用した場合では、 $T_{in}=50^{\circ}\text{C}$ 程度であろう。冬場は $20^{\circ}\text{C}$ 程度になるだろうし、海水を使う場合は真夏でも冷却した循環水の温度を $30^{\circ}\text{C}$ 程度に維持することは可能である。炉心冷却後の循環水温度は最大でも $T_{out}=90^{\circ}\text{C}$ とする。このときの水の飽和蒸気圧は $72\text{kPa}$

であり、101.3kPaの大気圧と比べても大きい、ともかく蒸気分圧は大気圧以下に維持できる。

熱力学的平衡状態を仮定した場合には、水の比熱を  $c_p$  として、必要循環水量  $m$  は次式で表される。

$$m = Q / (T_{out} - T_{in}) / c_p$$

2号機では7.7kg/sまたは670トン/日である。1-3号機全てでは1625トン/日の循環が必要となる。これは、8月15日現在の冷却水投入量400トン/日の4倍である。2号機の循環水量は、直径10cmのパイプを用いても循環水の秒速は1m/sなので、小型の循環システムで十分であることがわかる。

このシステムの管路長は長くても100mで、その多くは既存の配管である。つまり、このシステムは現在の4kmに及ぶ管路と膨大な装置を駆使している循環冷却システムに比べて遙かに小型でコンパクトとなる。このことは、作業員の被爆を最小限にして小型装置に集中的に投資することから、原発収束の戦術的にも優れていると考えられる。価格も安い。

上記の見積もりは、系が熱力学的に平衡状態にある系として扱った。しかし、燃料棒と冷却水は同じ温度ではなく温度差が生じている。そこで、伝熱学的見地から必要循環水量を見積もる。

著者らの解析によると(Rep.19.1, 2011/6/20)、1-3号機の燃料棒の大半は圧力容器(RPV)内に存在し、ドロドロの溶けた固まりとはなっていないと推定している。また、一部の燃料は溶けて固着しているが大部分は燃料瓦礫としてRPV底部に存在していると仮定する。2号機には直径11mm、長さ4mの燃料棒が4万本存在した。これらは、14日のドライアウトで崩壊し、バラバラになった状態でいわゆる多孔質状になっていると仮定した。燃料の一部は融解し固まりとなって存在すると思われる。また、一部の燃料はRPVを透過してDWに存在する可能性もあるが、本解析では均質な燃料瓦礫としてRPV底部に存在し水で冷却できる状態であると仮定した。

燃料瓦礫の表面積は燃料が健全の時と変わらないとして、 $A=5530 \text{ m}^2$ 、その実質体積は  $V=15.2 \text{ m}^3$  とした。制御棒の及び崩壊したシュラウド・その他の装置は考慮していない。燃料瓦礫は空隙率  $\varepsilon=0.5$  の均質多孔質体として扱うと、多孔質瓦礫の水力直径は以下で表される。

$$d_h = \varepsilon V / (1 - \varepsilon) / A$$

これを用いて多孔質体の熱伝達率は、(Incropera & De Witt, Introduction to Heat Transfer)より、次式で表される。

$$Nu = 2.06 Re^{0.425} Pr^{1/3} / \varepsilon, \quad Nu = h d_h / k$$

ここで、熱伝達率は  $h$ 、水の熱伝導率は  $k$  である。

燃料瓦礫の最下流の壁面温度を  $T_w=100^\circ\text{C}$  とするために必要な循環水量は、次式で求められる。

$$m = \frac{Q}{[T_w - T_{in} - Q / (Ah)] c_p}$$

これを、2号機の場合で計算すると、日量540トン/日必要になる。つまり、熱力学的平衡状態で水温を90°Cに保つには670トン/日流しているから、同じ量を流せば、燃料表面に沸騰を起こさず冷温停止できることが分かる。

ただし、この伝熱解析に使用した相関式はレイノルズ数もプラントル数も相関式の範囲からずれているために信頼性は極めて悪い。また、不均一な多孔質体は伝熱性能が極めて悪くなるという報告もある(Maruyama & Aihara, Experimental Thermal and Fluid Science, (1994), Vol.8, pp.128-134)。そこで、熱伝達率を

1/100 として再計算すると、必要循環量は 640 トン/日となることより、670 トン/日の循環量で十分冷温停止が可能であることが分かる。炉心から蒸気は全く出ない。また、大量の冷却水循環で燃料棒の温度が低下し、炉心暴発の危険性や放射性物質の放出も低減できることから、炉心の安定性も格段に増す。

以上の計算は、燃料が瓦礫となってその間に水が流れている場合である。燃料が溶けてひとかたまりになっている場合や、DW に溶解している場合は上記の計算は当てはまらない。しかし、熱力学的平衡計算は同じなので、燃料の表面温度を気にしなければ、2 号機は約 700 トン/日の水循環で「いわゆる」冷温停止状態を維持できることになる。

## おわりに

以上、1～3 号機の原子炉炉心をいわゆる冷温停止する方策の提案を行った。10 月 19 日の時点で、2 号機は 3 千世帯分の熱しか出していない。コンパクトな炉心水循環冷却を行えば原子炉の収束は可能である。現在の除染システムは原子炉の放射性物質を取り出し保管しているに過ぎず、吸着した放射能の最終処分も決まっていない。

政府や関係各位は、一日も早く原子炉からの放射能放出を完全に止めて、政府はそのことを世界に発信しなければならない。独りよがりの冷温停止では世界は納得しないし、近隣住民の帰宅や復興が早まることもない。

原子炉の第 2 段階の収束が終わったら、10 年後もしくはそれ以後の「完全収束」を目指して、瓦礫の分類と高放射化瓦礫の隔離、汚染水の完全除染と環境放出、タービン建屋の解体と汚染物質の隔離、プールの燃料棒搬出と保管、原子炉建屋の隔離と安定冷却の継続、今後の津波や地震に対する設備の堅牢化と多重防備、を計画的に進める必要がある。

そのためには、一日も早い原子炉収束を目指して、4 月 17 日に作った工程表に捕らわれず、早期に解決できるのならあらゆる可能性を検討すべきである。日本人は律令制を千年以上尊重し、戦後に作った憲法を 60 年も改正しない面白い民族である。しかし、法律を柔軟に運用して社会の変化に対応させてきた。自分の作った工程表に縛られ、何も出来ない国や企業ではないはずである。