

一日も早い原発事故収束に向けた工程表

東北大学 流体科学研究所 圓山重直

2011/05/14 作成

2011/05/22 改訂

概 要

漸く 3 号機が膜沸騰から核沸騰に遷移し落ち着いてきた。後述するが、各炉で何は起きているか、また、破損状況はどうか、大まかな推定ができるようになった。しかし、汚染水は依然として増え続けており、これから予想される地震や津波に対しての脆弱要因となっている。また、放射能放出を工程表より早く収束することは可能である。これまで防戦一方だったが、早期終結に向けて原発に対して反撃する時が来た。

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。外部からの水投入を増やしているため、汚染水が増え続けている。
- (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。1-3 号機の燃料瓦礫は一応冷却されている。
- (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。新聞報道では 1 号機が完全に「メルトダウン」しており、2, 3 号機も同様の可能性ありとされている。我々の解析では炉心は燃料瓦礫となっているが、完全に溶け固まってはいない。圧力容器の融解はないか、もしくは、軽微と予想される。

東京電力から原子炉パラメータや事故直後のデータが 5 月 17 日に発表されたので、原発の熱流動がかなり明らかになってきた。その解析の詳細は後日改めて発表したい。**大外れの可能性もあるが**、原子炉の中を見ているような推定が可能である。今回は、各原子炉の現状について分析する。

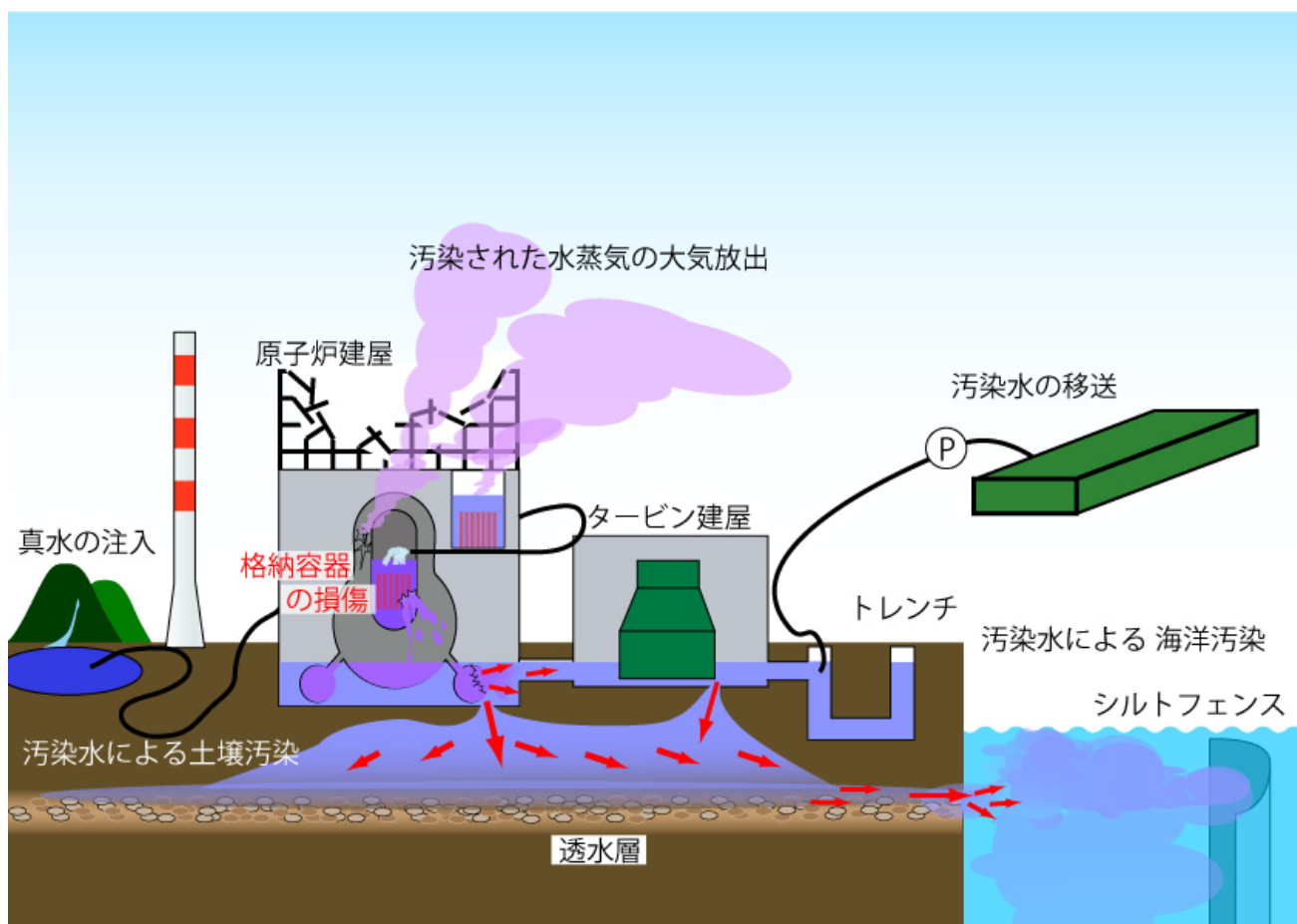


図1 放射能放出の現状(5月22日現在)

1号機の現状

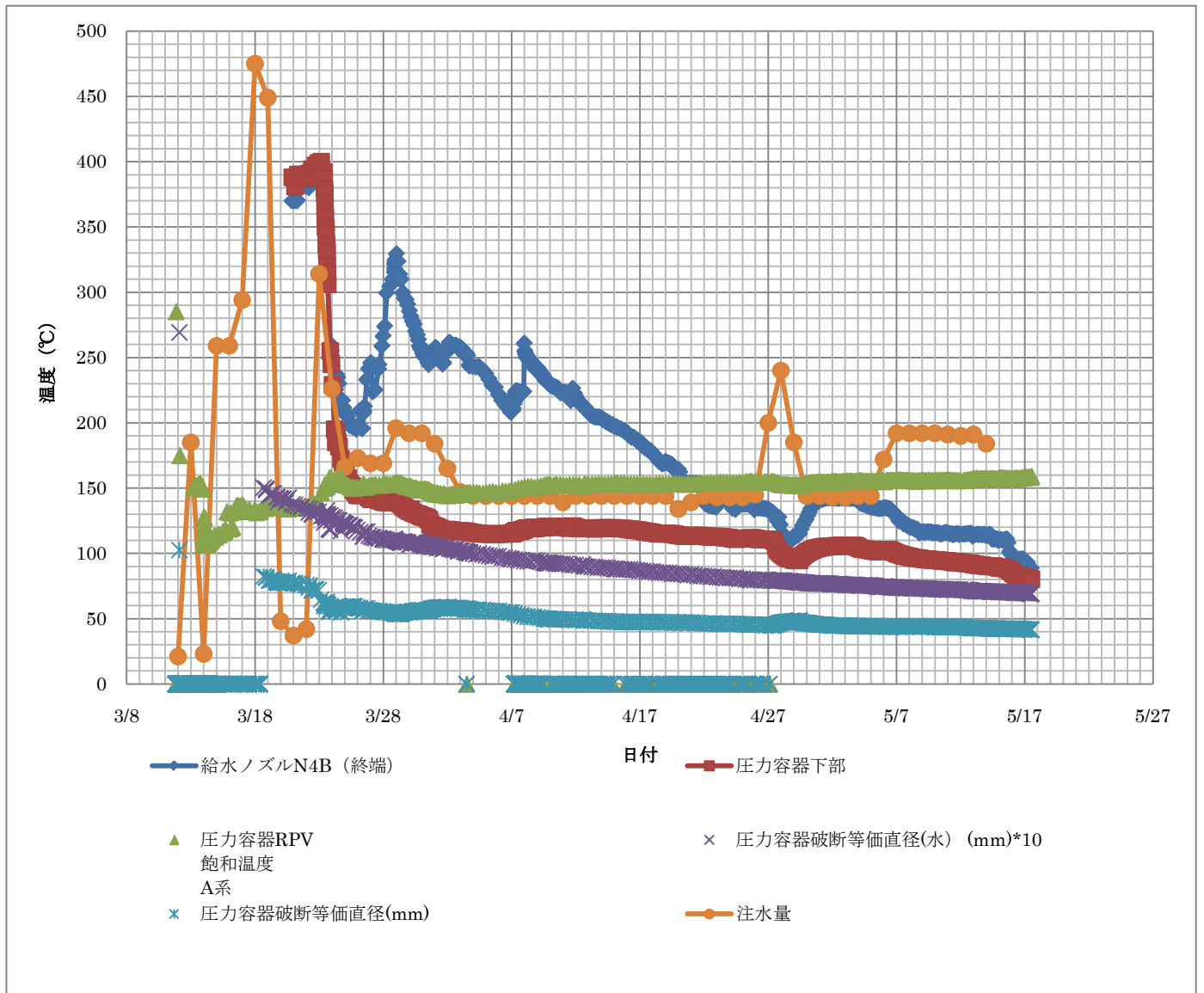


図2 1号機压力容器の温度と破損面積の推定

図2は、压力容器（RPV）の圧力から推定した原子炉内の飽和温度と RPV 下部および給水管の温度を比較したものである。圧力計が壊れていると予想されるので、飽和温度は正確ではないが、3月26日以後は RPV 底部には水があることが分かる。4月20日ごろまでは、燃料棒が一部露出して RPV 上部は過熱蒸気で満たされていると推定される。これは、燃料棒が完全に溶け落ちていないことを示す。4月20日以後、燃料瓦礫は一部を除いて水没していると予想される。

図2は、Rep.14.2で示した破損部の推定をして、各時間経緯においてその大きさを示している。蒸気の流路が等価直径で5cm程度、水の流路で1cm程度の穴が開いており、それは各条件での計算でもあまり大きく変化しないことから、その推定が裏付けられる。循環ポンプ軸受け部の破損が疑われる。少なくとも3月20日から24日は完全にドライアウト状態であり、過熱蒸気が流出しているので本解析では値がずれる。現在は穴の大きさには変化はないようだ。RPV内の圧力が正確でないので、値が徐々にシフ

トしていると考えられる。

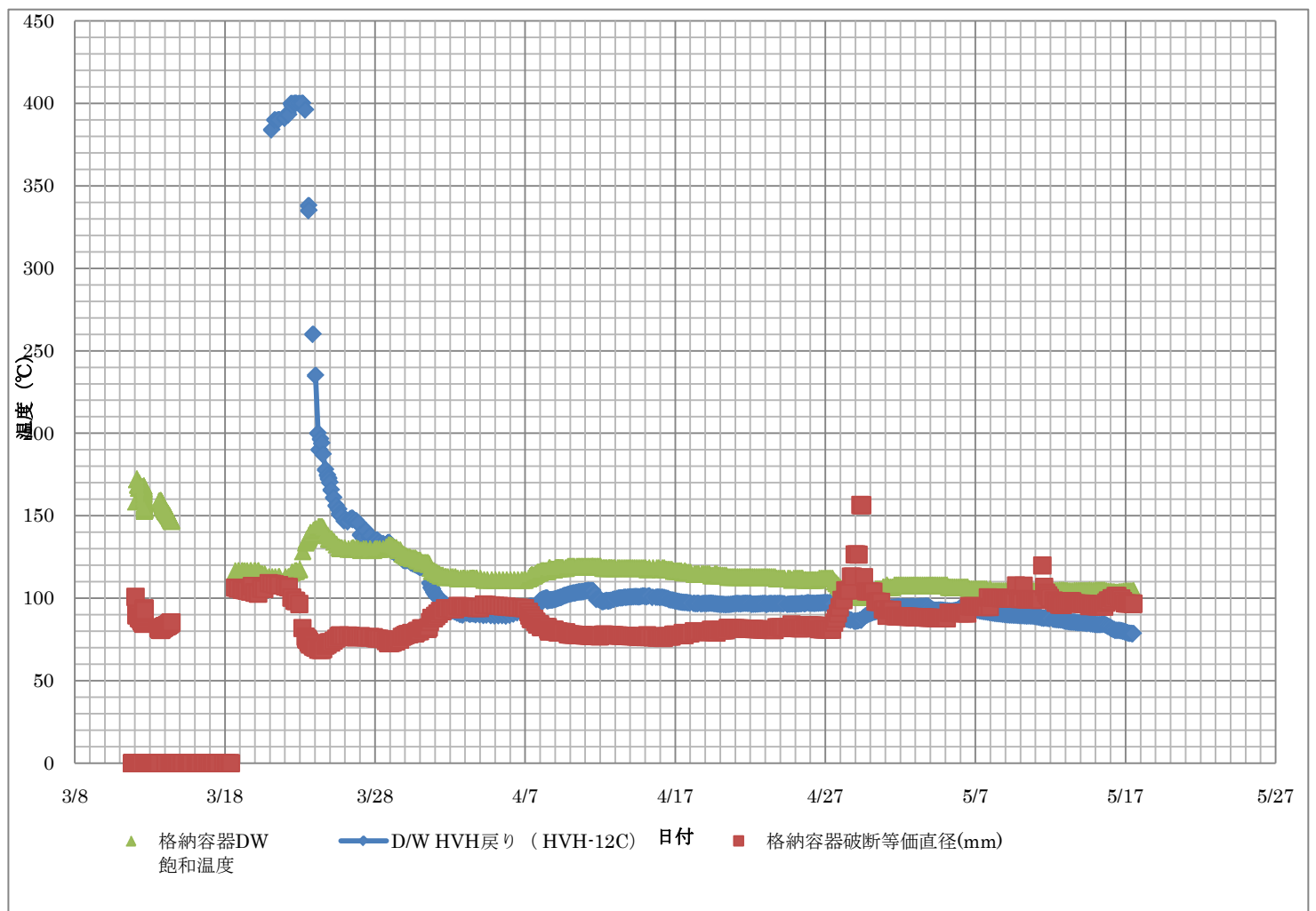


図3 1号機格納容器の温度と破損状況

図3より、3月28日以後はDWは飽和蒸気で満たされている。窒素を入れているが、量的に微々たるものなのであまり影響はないと考えられる。3月26日以前はDW内も高温になったので圧力計や各種計器が壊れたと予想される。水位計は基準水面が飽和状態で存在することが条件なので、1度ドライアウトするとその指示値は全くあてにならない。ドライアウトを起こしている2,3号機についても同様である。ただし、不正確なデータでも何らかの情報を出しているので今後の解析が待たれる。また、DWの高温で圧力計も信頼性がないので、5月11日?に直した(基準面の水を入れただけ?)水位計の信頼性も疑問である。

格納容器(DW)には10cm程度の穴が開いている。当初はDW上部の破損が疑われたが、水が漏れているのでSCとの接続部が破損している可能性もある。破損領域の推定値にばらつきがあるのは、その時点で流れの状態や条件が変わっているからと推定される。4月27日から実施した冷却水の増大がこの推定値に及ぼす影響は興味のあるところである。

2号機の現状

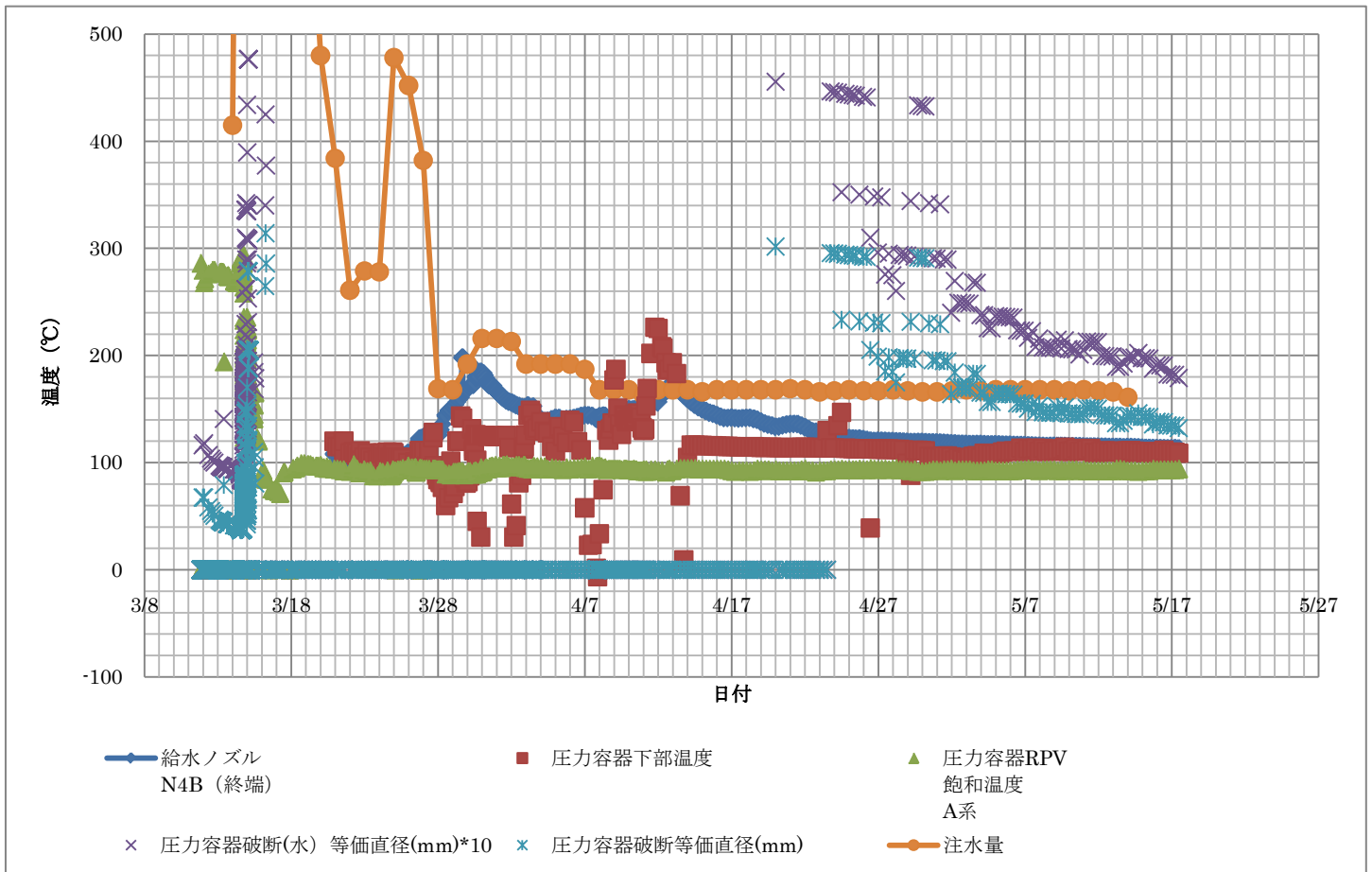


図4 2号機压力容器の温度と破損面積の推定

図4は、2号機のRPVの圧力から推定した原子炉内の飽和温度とRPV下部および給水管の温度を比較したものである。3月26日から4月20日ごろまでは、燃料瓦礫が水面に出ており、過熱蒸気となってRPV上部を過熱していた。その時のRPV下部温度が不安定なのは、DWの底に水が溜まっているのかもしれない。現在、燃料瓦礫はほぼ水没していると考えられる。

圧力計が正しければ、Rep.14.2で示したサイフォン効果で間欠的に蒸気が噴出しているので、RPVの破損面積は計算できなかった。値もバラバラで信頼性はない。現在はRPVの中は落ち着いていると推定される。

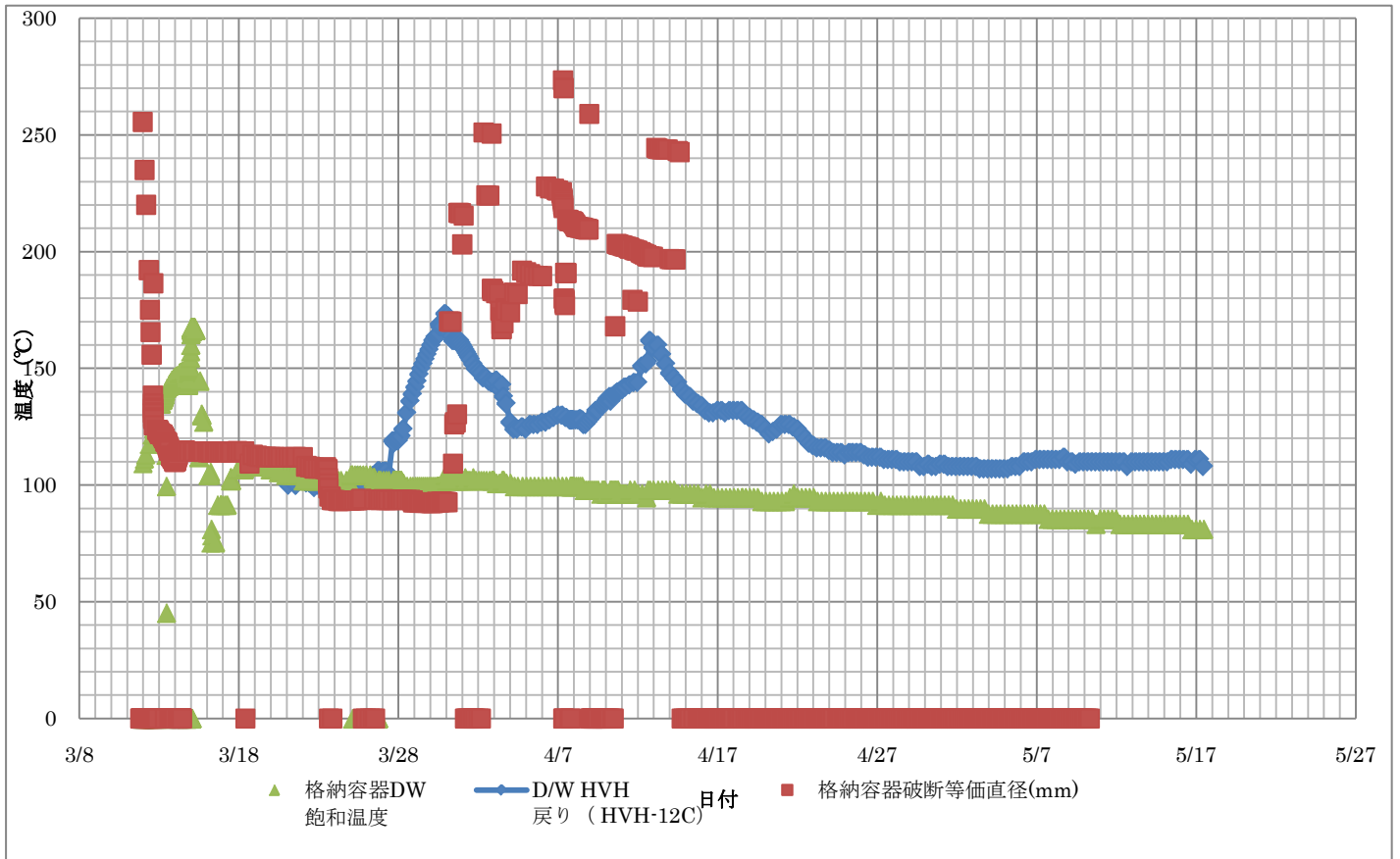


図5 2号機格納容器の温度とサブプレッシャーチャンバー破損状況

圧力計の計測値が正しければ、現在2号機は大気に対して負圧であり、サイフォン効果でサブプレッシャーチャンバー（SC）を介して蒸気を放出している。そのため、飽和温度が100°C以下になっている。この状態は長く続いており、関係各位が心配しているように外気が入って水素爆発が起きるならとうの昔に水素爆発が起きるはずである。実際は、以前のレポートでも述べているように、水素の濃度は十分低いので水素爆発は起きていない。放出蒸気の成分分析を推奨する。

RPVが過熱蒸気で満たされているとき、その炉壁で飽和蒸気が過熱され、DW上部が高温になっていたと推定される。現在、DW内はほぼ飽和状態である。

現在はサイフォン効果のため、破損領域の推定はできない。しかし、3月22日以前はDW下部を満たす水がないため、DWとSCは蒸気で繋がっていた（図4参照）。その時のデータは一定であることから、SCの破断面積は直径12cm程度と推定される。トラスとDWとの接続部破断が予想される。DWは健全であり漏れはほとんどない。

現在は、SCの破断部からSC格納室を通して外部に水蒸気が漏れている。SCの水温も他と比べて高い。その部屋の水温は1、3号機と比べて高温・多湿（かつ高汚染水蒸気が充満している）であり、今後作業員が建屋内に入る傷害となることが予想される。

3号機の現状

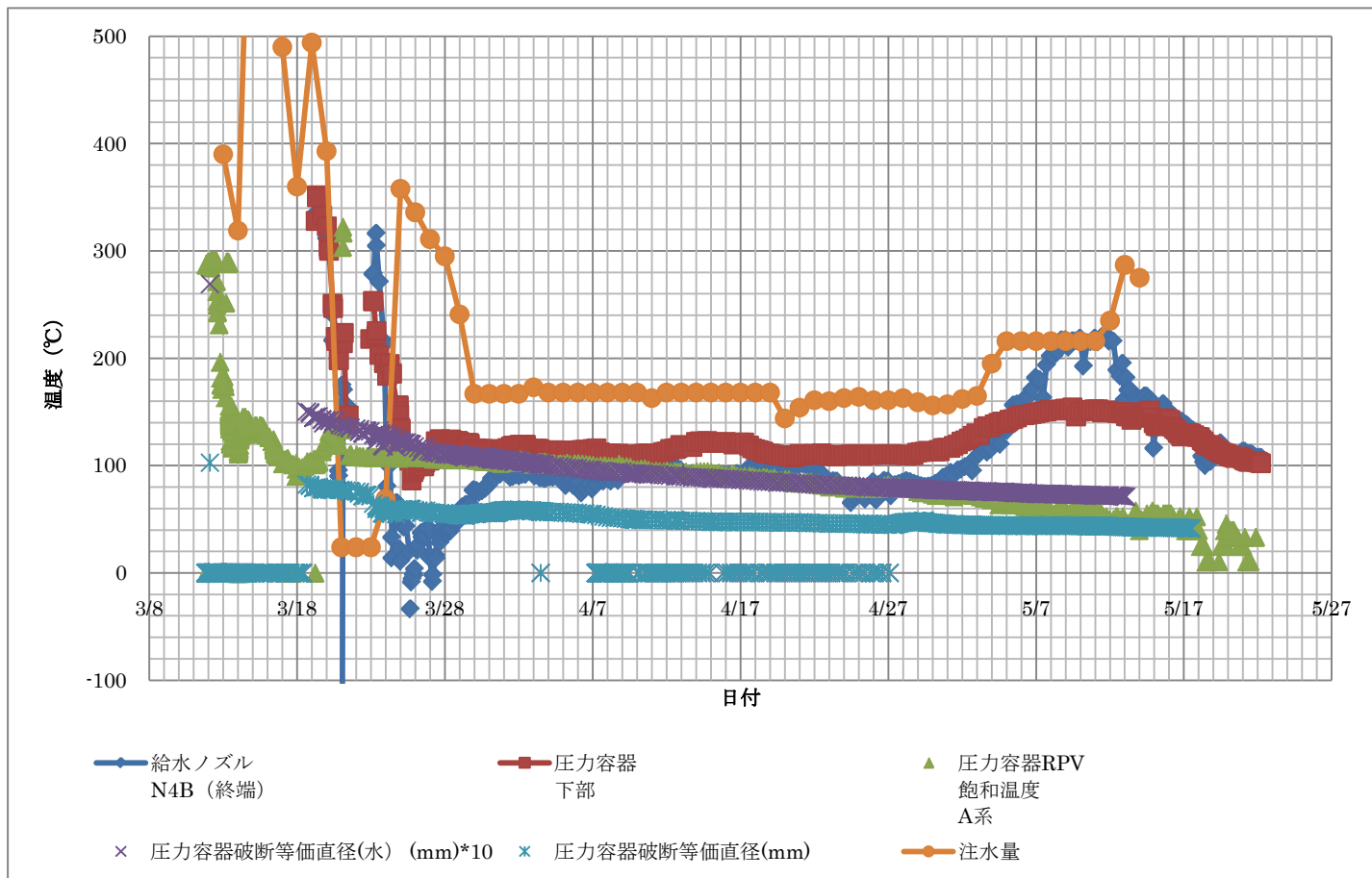


図6 3号機圧力容器の温度と破損面積の推定

図6は、3号機のRPVの圧力から推定した原子炉内の飽和温度とRPV下部および給水管の温度を比較したものである。給水が滞った3月21日から3月24日ごろまでは、完全空だきとなりRPVとDWが高温になった。このとき、計測器が幾つか壊れたことも推定される。また、この日以後、燃料瓦礫は完全に水没し、給水ノズルとRPV下部温度がほぼ同じになっている。このことから、3号機の燃料棒破壊の程度は1号機より著しいと推定される。圧力計が正しければサイフォン効果によりRPV内の圧力が低くなっている。

4月30日頃から水が行き渡らなくなり、核沸騰から膜沸騰に遷移し高温になった。そのメカニズムはRep.16.2参照。現在は水量を増やしたので核沸騰に戻っている。このままの水量を維持すると汚染水をいたずらに増やすので、そろそろ流量を絞っても良いと考えられる。

サイフォン効果が起きているとすると、RPVの破損面積は正しく推定されていない。それでも「それらしい」値になっているのは何か理由があるのかもしれないが現在は不明である。以前の高温で圧力計が壊れているのかもしれない。

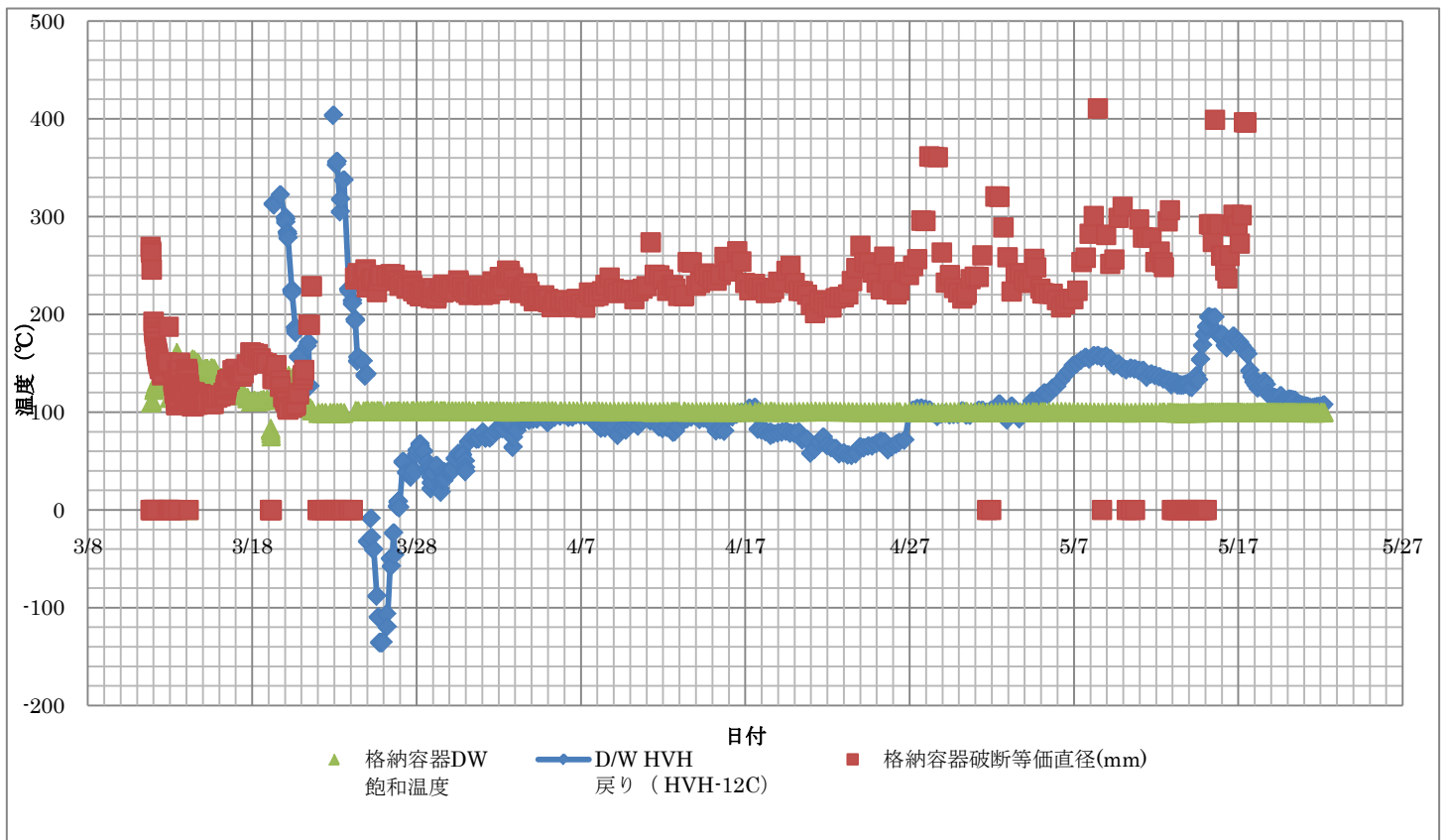


図7 3号機格納容器の温度と破損状況

図7より、3月28日以後はDWは飽和蒸気で満たされている。ただし、4月30日ごろの炉心過熱と膜沸騰によって飽和蒸気より高温の蒸気で満たされたときがあった。現在は飽和状態に戻っている。3号機SCは、水漏れはしているかもしれないが、大きな破損はないようである。DWはほぼ一気圧だが、DWからの水でパイプがふさがりその水頭でSCの圧力が高い状態で維持されている。DWは、SCとの接続パイプやそれより上部で破損し水と蒸気が漏れて建屋下部に溜まっている。3号機DWは爆発の影響が大きく等価直径22cmと1-3号機で一番破損が大きい。DW圧力もほぼ大気圧である。

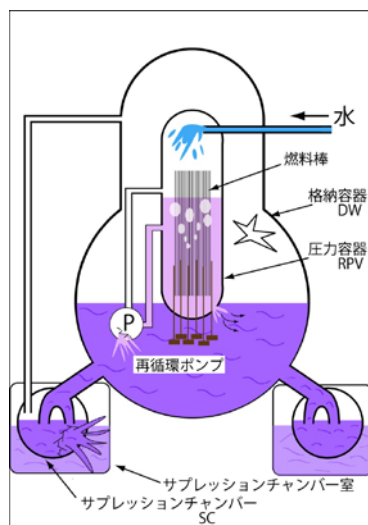


図8 原子炉の破損状況と蒸気流出箇所 の推定 (Rep. 14. 2, 2011/5/11)

一日も早い収束に向けた新工程表

言うまでもないが、原発を一日でも早く収束させることは我々の使命である。建築工事と異なり、工程表通りに仕事をするのではない。原発の収束が1日遅くなれば、そのために弱者が亡くなり、経済的・物質的損害も累積していく。

新幹線復旧のように、原発収束を迅速に行えば国民や国際社会から評価され、それで得た経験と技術は我が国の強みとして将来の発展に繋げることができるかもしれない。我々は、これまで原発にしてやられてきたが、敵の手の内も漸く分かりこれから人類が反攻に出るときだと思われる。

何度も述べているが、我々の「当面の」目的をもう一度整理する。

(目的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。

(目的2) 大気中・地中・海洋へ漏れ出る放射能を封じ込める。

(目的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。

(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。また、これまで述べてきたように炉心瓦礫の制御と原子炉の反応もある程度予測できる見込みが分かった。しかし、外部から導入する冷却水を増大させると、汚染水がますます増えて対処できなくなる。

炉心を100℃以下にする冷温停止は(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。また、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。例えば、90℃に加熱され湯気がもうもうと立ち上る肥だめの中身を湯船に満たした浴室に入る人がいるだろうか。建物のそばにも近づけない。現在原子炉建屋にある汚染水は肥だめより遙かに危険で汚いものである。しかし、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。

現在は、図1に示すように、全ての原子炉で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。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。外部からの水投入を増やしているため、汚染水が増え続けている。海への汚染水漏出も完全に止まっているとは言い難い。

そこで(目的2)について、3段階の収束法を提案する。その詳細については後述する。

(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。また、外部からの注水も続けて汚染水を増やすことは、津波や余震による新たな汚染水流出に繋がるので、汚染水の量は増やすべきではない。

放射能を閉じ込めるためのステップ1

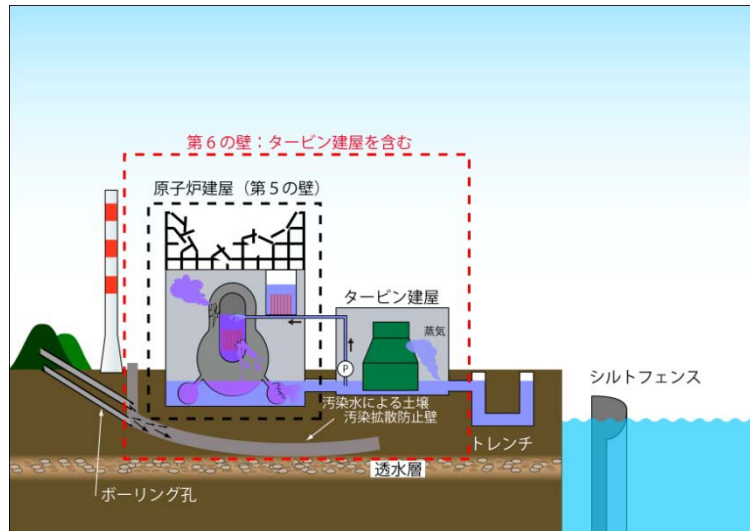


図9 原発収束のためのステップ1

私個人としては、格納容器の蒸気を凝縮させそれを炉心に戻す方法が一番効率的だと思っているが、水素爆発の呪縛から逃れられない関係各位が多いようなので、次善の策を展開する。

まず、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べきである。

何度も述べているが、トレンチの水くみ出しは不毛である。それだったら、逆にトレンチに真水（できれば温水）を上から流し込めば海水を含む汚染水は自動的にタービン建屋に戻っていく。真水と汚染水で濃度成層ができるのでトレンチ口の放射線量も真水の遮断でずいぶん下がる。

それと同時に、タービン建屋の汚染水を「そのまま」（ゴミぐらい取る）炉心に注入する。3月15日付けレポートでは、海水の炉心投入による危険性を指摘した。現状では真水に変えられているが、タービン建屋の汚染水は大半が海水である。しかし、現在と3月15日の時点では条件が全く違う。現在は投入水の半分は蒸発するが残りは漏れ出てタービン建屋に戻ってきている。塩の閉塞問題はほとんど考えられない。3月15日当時、原子炉は「压力容器」であり、高圧に対する破損や腐食が心配された。現在の原子炉はただの入れ物であり、圧力はほとんどかからない。腐食して壊れるところはすでに壊れている。従って、数ヶ月なら塩水を流しても大丈夫である。汚染水を増やすことの方が大きい。

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。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。

ステップ1の時点では、残念ながら、放射能蒸気は環境に出ている。また、投入水量を極端に増やすと高汚染の炉心水がタービン建屋を満たすので、投入水量は今の2倍程度にとどめるべきである。タービン建屋の水を2万トンとすると、日量200トンの汚染水が戻ってくることを考えて、ステップ1が実

施できるのは精々で 3 ヶ月であろう。タービン建屋の汚染水の温度も上がってくるので、ステップ 2 を実施する。

放射能を閉じ込めるためのステップ 2

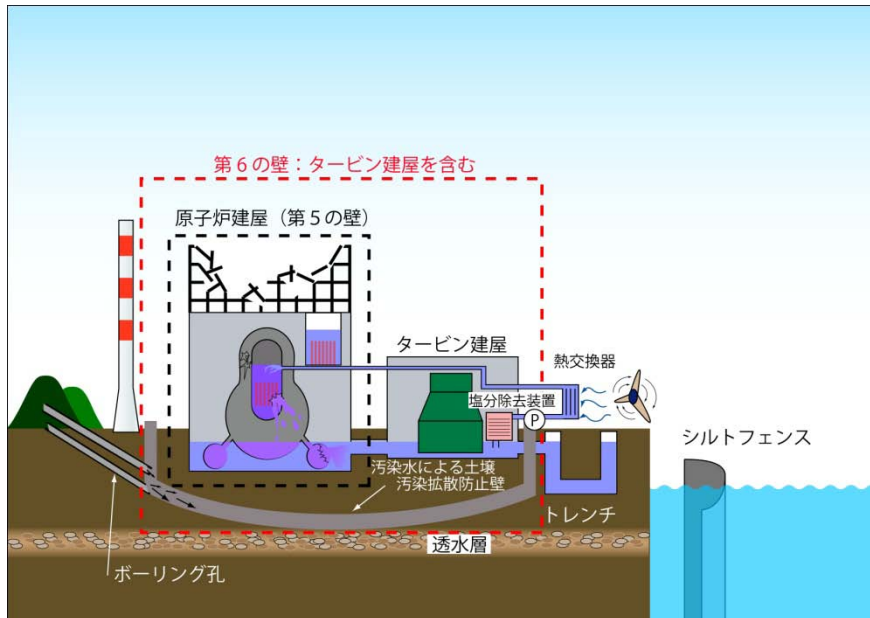


図 10 原発収束のためのステップ 2

次は、**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。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。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。

敵（放射能）を第 6 の壁まで侵入することを許すのだから、そこから先への放射能流出は避けなければならない。そのためにも高濃度汚染水の地下流出を食い止める作業は連続的に実施して行くべきである。もちろん津波や余震に対する放射能漏洩の防護措置は多重に実施する。

アレバの除染装置は日量 1200 トンと言われているので、3 台必要となる。汚染したフィルターの処理も問題だ。汚染水を浄化して炉心に流すことは、肥だめの水を飲むように浄化して、また肥だめに流すようなものだ。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。私は、高度汚染水をメガフロートに貯留する勇気はない。

放射能を閉じ込めるためのステップ3

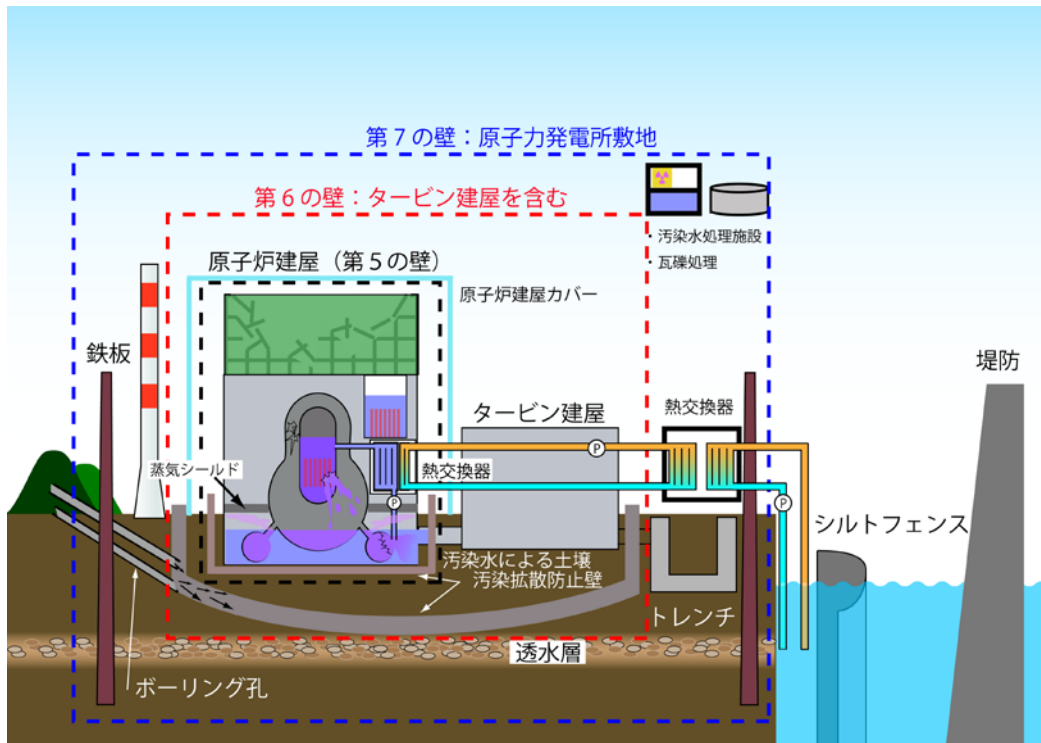


図 11 原発収束のためのステップ3

いよいよ「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。本プランのみでなく、幾つかのプランを同時並行で行い、可能性の高い方から実施してゆく。

我々が原発事故の早期収束に成功すれば、その技術力と努力は世界に評価される。それが、今後の日本の強みとなる可能性もある。しかし、面子や対面、種々のしがらみに捕らわれ、これまでのように後手後手の対策を取ったのでは、世界の笑いものになるだけだ。アポロ13の危機を乗り切った米国が、原発の警戒レベルを1つ下げた。想像するに、アメリカには技術アナリストが大勢いて、公開情報や種々のシミュレーションから比較的適切な判断をしているようにも思われる。