

# 原子炉冷却法の比較

東北大学 流体科学研究所 圓山重直

2011/04/11 作成

## 概要

電源復旧による本来の冷却法(プラン A)、我々の提案している压力容器内の蒸気凝縮 (プラン B,C)、格納容器を水で満たし外部熱交換器で冷却する方法 (上原案)

<http://www.saga-s.co.jp/news/saga.0.1865228.article.html>、格納容器を水で満たし格納容器外部から冷却する方法 (格納容器外部冷却) 等が提案されている。

これまで、原子炉で起こっている現象を整理して、各冷却手法の長所短所を検討する。

ただし、本予測は入手できるデータと幾つかの仮定をした解析結果を基にしている。そのため、実際の事象とは異なる可能性も大きいことに注意して頂きたい。

## これまで 1-3 号機で起きている事象の推定

NPO 日本の将来を考える会<http://ioj-japan.com/xoops/>が詳細な現状分析を行っている。我々も現象の理解を検証し、公表されたデータとともに近日中に配信予定である。その結果と、我々が実施してきた熱解析等を踏まえて、原子炉内で何が起こったか推定する。

- (1) **物質バランス**： HTCRep.1.3-b を検討すると、各原子炉への投入水量は、崩壊熱と同等 +  $\alpha$  で投入しているものと考えられる。ただし、初期はかなり大量の海水を投入したと予想されるので、崩壊熱で蒸発したもの以外はタービン建屋等に漏洩していると考えられる。
- (2) **エネルギーバランス**： HTCRep.1.3 によると、事故発生後 30 日で、2, 3 号機で 1.5TJ、1 号機で 0.8TJ の熱を放熱している。このエネルギーは水の蒸発潜熱でそれぞれ、7000 トン、4000 トンに相当する。このエネルギーを温度差 50°C の顕熱で冷却できているとすれば、それぞれ 7 万トン、4 万トンの水が必要になる。もし、1, 3 号機の投入水が蒸気から水に戻したとすると 4-7 万トンの吸収熱源が必要である。これは、あり得ないので、1-3 号機から出た崩壊熱の大部分は、蒸気として環境に放出され続けていると考えた方が自然である。
- (3) **1 号機の事象予測**： 停止 24 時間後に空だきとなり、HTCRep.7.1 に示すように、炉心の燃料棒はかなりの部分が損傷している想像される。原子炉ガスの 12 日 10 時のベントガスが建屋に充満し、爆発、水素爆発で格納容器上部が破損の可能性あり、压力容器もドライアウトで損傷していると予想されるが、外気との貫通度が少ないので、原子炉圧力 B に示すように、炉心の温度圧力が上昇している可能性あり。水から出ている燃料棒部分の加熱が压力容器上部の水蒸気加熱に寄与している。そのため、压力容器下部が 100°C でも、上部は 200°C 以上となっている。燃料が形を保っていても蒸気の自然対流で高温になりにくいと予想される (HTCRep.2.2)。ただし、燃料ペレットはばらばらになっていることが予想されるが、ペレットが水につかっていたら高温にならない。压力容器下部はほぼ 100°C のプール沸騰状態と想定される。圧力 A と B の差異の原因は不明。DW と圧力 A は関連しており、圧

力容器がどこかで格納容器につながっている可能性あり。炉心圧力と DW 線量の相関 (4/2-4/3) をみると、DW と圧力容器は何らかのつながりがあるが SC は独立しているかもしれない。

- (4) **2号機の事象予測：** SC が飽和し格納容器圧力上昇 (3月15日、格納容器圧力 7.5 気圧) のため SC その他の場所で破損。3日後にドライアウト燃料棒損傷。たぶん圧力容器下部で貫通している可能性あり。損傷下部から漏れた水が DW 下部に溜まり、貫通部を塞ぐことによって、サイフォン効果で圧力容器の圧力が大気圧より減少している可能性もある。これが圧力容器の負圧の原因かもしれない。格納容器内で生成された蒸気は DW 経由で環境に漏れている可能性もある。圧力容器内の余剰冷却水が破損している SC 格納室に充満し、それが配線当の隙間を解してタービン建屋に漏洩。この水が異常に線量が高いことから、炉心の水と推定できる。2号機タービン建屋の水をかい出しても、炉心から高線量の炉心水が漏洩する可能性あり。DW も 3月15日発生の高圧のために上部が損傷し炉心の蒸気が直接漏れている可能性あり。原子炉建屋とタービン建屋を結ぶ地下ケーブルや各種配管等のピット内にコンクリートミルクや水ガラスを地上から大量に注入し、漏水を止める必要があるかもしれない。燃料棒下部は約 100°C のプール沸騰、空だき上部燃料棒により圧力容器温度が 100°C 以上の高温になっている。DW は大気とほぼつながっており、炉心の水蒸気が放出。DW の線量を見ると、3機の中で一番線量が高いので大量の水が DW もしくは SC に溜まっている可能性あり。
- (5) **3号機の事象予測：** 3月13日炉心ドライアウト後、14日にベントした水素により建屋爆発。この爆発で格納容器圧力容器と圧力容器が損傷し、大気とつながっている可能性あり。DW と圧力容器の圧力相関から両者は完全に貫通している可能性が高い。投入水で現在水位は半分程度に保たれているが炉心蒸気はそのまま外気へ放出。3号機の圧力容器の各部温度が低いので、3月23日以後、燃料棒は破壊され圧力容器下部の水中にあり、水面上部に出ている燃料棒はない可能性がある。3号炉の爆発はかなり大規模だったことから、建物の床や壁に損傷があり格納容器から漏れ出した汚染水が、配管などの地下ピットを経由してタービン建屋に流れ込んだことが否定できない。ただし、2号機と異なり、SC が破壊されていないために漏洩液の量は比較的少ないと予想され、タービン建屋内の汚染水の線量も 2号機に比べて少ないと予想される。DW は圧力容器とつながっているが、SC は健全。24日以後、燃料棒が全て水につかっているため、DW 内の線量は比較的少ない。

## これまで提案されている冷却法の検証

各炉心で起こっている現象を検証し、①本来の冷却法(プラン A)、②圧力容器内の蒸気凝縮 (プラン B,C)、③外部熱交換器で冷却する方法 (上原案)、④格納容器を外部から冷却する方法 (格納容器外部冷却) について、上記の事象を考慮しつつ、その長所と短所を列挙してみる。それぞれの方法には一長一短があるが、全て可能性があるため、同時並行で可能性を検証し、実施準備を行うべきであると考え。途中で不可能になったり不要になったりする方法があっても、準備を進めることを提案する。他の方法がだめになってから実施準備をしたのでは間に合わない。

- (1) **プラン A の長所：** 本来の炉心冷却のシステムを稼働させることは依然として最優先課題である。もしこれが稼働すれば安定した長期冷却が可能となる。現在、このプラン実施について最大限の努力がなされており、今後も着実に進めるべきである。
- (2) **プラン A の短所：** なんとと言っても時間がかかる。その間、原子炉は放射線を蒸気の形で出し続け、地域社会に致命的ダメージを与える。タービン建屋の汚染水を除去して、電気設備のチェックを行う

時間が必要。さらに、主要機器は炉建屋の地下に入っており、これが津波で冠水していない保証はない。特に2号機ではSC破損に基づく高汚染水（タービン建屋汚染水の少なくとも10倍）で冠水していると手の打ちようがなくなる。設備が復旧しても、炉心を循環する冷却水は炉心が破損した高汚染水である。冷却システムが海水と接するので、炉心冷却水の漏洩には十分注意する必要がある。

- (3) **プラン BC の長所：** 炉心の蒸気を直接凝縮させて圧力と温度を下げるので、比較的短時間に実施可能である。そのためには、主蒸気バルブや他の炉心に到達している配管路から蒸気を吸引する。炉心の圧力を下げるために漏水など他の汚染も防ぐことが出来る。蒸気は炉心の水と異なり比較的汚染度が低いと考えられる。
- (4) **プラン BC の短所：** この作業には、蒸気バルブを開いて主蒸気パイプから外部または既存の凝縮器への配管が必要となる。炉心の汚染蒸気をタービン建屋に導くことは抵抗がある。どのようなガスが炉内にあるかは、例えば、注水パイプから逆流させて分析することも可能である。しかし、この蒸気はすでに環境に放出されている可能性が高い。格納容器が破壊されているために外部空気を吸い込む可能性が否定できない。現在は水素が出ている可能性は少ないが、システムの抜気とその処理も行う必要がある。1号機の圧力容器は高圧であり、蒸気を抜くときに突沸を起こす可能性があるため、実施には注意が必要である。
- (5) **上原案の長所：** 配管系が見つかれば短期間で実施可能である。報道によれば熱交換器はすでに準備されている。格納容器を水で満たせば圧力容器温度は格納容器の冷却水の10°C程度上昇ですむ可能性がある。炉心の冷却水を直接循環するわけではないので、漏洩による汚染の可能性は若干低い。ただし、格納容器の冷却水取り出し投入口は容器上部に接続しないと、格納容器内に温度成層が形成され上部を全く冷やせなくなるので注意が必要である。
- (6) **上原案の短所：** 圧力容器はすでに破損している可能性が大きく、その水が格納容器内の水と混合し、高濃度汚染水となる。格納容器は破損しており(特に、2号機が著しいと予想される)、中の汚染水が外部に漏れる可能性が大きい。格納容器にある程度蒸気だめを作っておかないと、温度成層等で容器冷却が不可能になったときに大爆発を起こす。格納容器上部に蒸気を抜く管路が確保されていることが必要である。しかし、上部空間を大きくとりすぎて圧力容器下部のみを水で浸しても上部蒸気を冷却できない。1号機圧力容器上部は高温になっており、急激な水導入は熱ひずみなど新たな問題を起こす可能性あり。格納容器を水で満たすことは、4月7日のような大規模余震が発生すると強度に不安がある。耐震性について、我々は素人であるが、格納容器と構造コンクリートとの間には50mmほどの隙間があり、構造的に堅牢でないことが予想される。余震で格納容器が壊れると5千トン程度の高濃度汚染水が放出され大規模汚染が広がる。
- (7) **格納容器外部冷却の長所：** 本方法は格納容器を水で満たし、何らかの方法で格納容器の外部から水を流して冷却する方法である。格納容器と建屋コンクリートの間は50mm程度の隙間があるようなので、うまく上から水をかければ圧力容器の温度を100°C以下にすることが可能である。ただし、冷却水が下に溜まるのでそれを回収して冷却し循環させる必要がある。本方法は、圧力容器内の蒸気や格納容器内の水を取り出す必要がないので、汚染の危険度は軽微である可能性がある。また、圧力容器を水没させるので、そこから出る蒸気は格納容器内の水で冷却され環境には出にくいと考えられる。水の熱容量が大きいのでこのシステムは時定数の長い系の温度制御となることが予想される。
- (8) **格納容器外部冷却の短所：** 格納容器を水で満たすことでの短所は、上原案と同じである。格納容器

が破損している可能性があり、そこから漏れ出た高濃度汚染水が、格納容器冷却水と混合し汚染化する可能性が大きい。何らかの方法で格納容器内の汚染水と冷却水が混じらないようにすることが必要である。格納容器の下部を冷却しても温度成層を作り上部が高温高圧になり格納容器破損（爆発）につながる。水は上からかける必要がある。