

どう受け止めるか福島原子力事故&gt;&gt;&gt;

## 原子炉工学の観点から

—東電の初動対応にまずさ—



宮崎 慶次

大阪大学 名誉教授・  
大阪科学技術センター 顧問

## はじめに

今回の事故は三月十一日に起きたM9・0の超巨大地震に伴う想定を越す津波で、死者・不明者二万三〇〇〇人超の自然災害の中での事象である。折角制御棒が入り核反応が停止した原子炉の残留熱除去に失敗し事故に至った大方の経緯は読者も周知のところだ。

原子炉の炉心の放射性物質による残留熱は、原子炉停止で七〇程度まで低下し、一時間後一・二%に低下するが、その後の減衰は緩慢で、一月後で〇・一%、一年後でも約〇・〇五%程度は残る。残留熱除去系(RHR)は非常用電源と海水冷却系の両方が喪失した結果、使用できず、原子炉三基が炉心溶融を起こし、使用済み燃料プールの四基が危機にさらされるといふ大事故となり、今なお明確な収束の見込みが立っていない。六月七日には、国は国際原子力機関(IAEA)に報告書を発表した。だが、事故の全容は不明の部分も多く、全ての情報が公開されているわけでもなさそうだ。

本稿では、アクシデント・マネジメント(AM)の観点から、主として交流電源喪失(SBO)ステーション・ブラックアウト)に対する初期対応に焦点を絞って、原子炉の炉心崩壊

や水素爆発は果たして回避可能であったかとの観点から検証を試み、他の沸騰水型原子力発電所(BWR)での再発防止に役立てたい。

## 二 アクシデント・マネジメント

七九年のスリーマイル島(TMI)事故および八六年のチェルノブイリ事故を踏まえて、八八年にIAEA傘下の国際原子力安全諮問グループは原子力発電プラントの基本的な安全原則(安全シリース75-IN SAG-3)をまとめ、安全文化の概念の提示とともに、深層防護のさらなる多層化を提案している。すなわち、多重防護を従来の第1レベル異常防止、第2レベル事故防止、第3レベル事故影響の緩和、に加えて、第4レベル過酷事故対策AM(アクシデント・マネジメントの防止と緩和)、第5レベル原子力防災を追加し一層の多重化を求めた。米国では、七五年のラスムッセン報告(WASH1400)で確率論的リスク評価が行われ、TMI後はより具体的に五基の米原子力発電プラントに対するシビアアクシデントのリスク(NUREG1150)評価が実施されている。わが国でも、旧原研・動燃やメーカーで研究が行われ、大学でも基礎研究、電力

でも検討が行われてきた。

九二年五月の原子力安全委員会決定としてAMの整備を強く奨励するとの声明を受けて、旧通産省は同年七月に電気事業者に対して軽水型原子力発電所の原子炉施設ごとに確率論的リスク評価(PSA)実施、どの部分に脆弱性があるかを見出し、現有施設の利用や小規模な改造、および手順書の整備等により、過酷事故の予防と影響緩和を検討させた。それを踏まえてAMの整備を実施し、結果報告を求めた。実質的な討論は(財)原子力安全研究協会の委員会で行われたが、二〇〇二年五月に各電力は整備報告書を提出。原子力安全・保安院は、総合資源エネルギー調査会原子力運転管理・防災小委員会の下に専門家からなる「アクシデントマネジメントワーキンググループ」(筆者も一員)を設置していたが、前記の整備報告を受けて、AMの実効性や有効性を検討、〇二年一〇月に評価報告書をまとめている。

旧通産省の指示で、「電力の自主的保安措置」との位置付けだが、設備改造や追設が既存の設備の安全機能を損なうことがないか国がチェックする形で対応をとった。例として、BWRの場合、別系統の制御棒の代替挿入や必要な時に制御棒が挿入できない過渡事象(ATWS)に対して、冷却ポンプ

を停止 (RPT) させて炉心の蒸気泡を増加させ、原子炉の核反応すなわち出力を下げておいて、中性子吸収の大きい硼酸水を注入して止めるなどである。また、冷却の方は後で詳しく説明する「代替注水手段」である。

### 三 全交流電源喪失 (SBO)

安全設計審査指針では、「長時間にわたる全交流電源の喪失は送電線の復旧または非常用交流電源の修復が期待できるので考慮する必要はない」となっており、安全審査の対象となる設計基準事故では確かに基準外である。だが、先述の IN S A G 3 では、「原子力発電所は、外部電源も内部 A C 電源も同時に喪失した場合 (SBO) でも、直ぐ (soon) に燃料損傷に至らないような設計とする」との原則が示されている。

確率論的安全評価の結果、日本の既存炉はいずれも I A E A が目標とする新設炉の炉心損傷目標 10 のマイナス 5 乗毎炉年より低い。だが、内容的には BWR の場合、中小冷却材喪失事故時に、注水の失敗で炉心損傷に至る確率が比較的高く、次いで、SBO となるが、これは内部事象を対象とした結果であって、地震や津波など外部事象も含めれば共通原因故障で電源が喪失する可能性が高まるので SBO の比

重が増すのは当然である。

### 四 代替注水手段と格納容器ベント

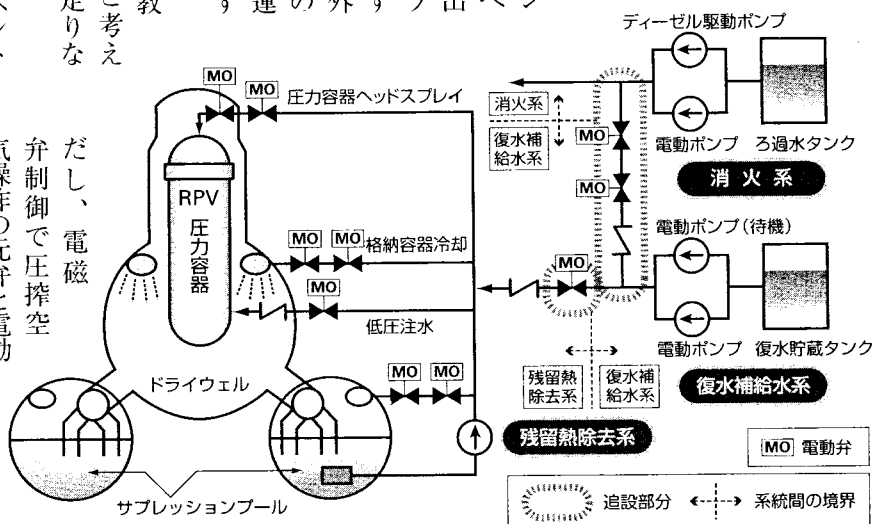
本来の原子炉注水系が機能しない場合に備えて、「代替注水手段」として、消火系の配管を残留熱除去系 (RHR) を介して緊急注水系 (ECCS) の配管に繋げて、外部から直接炉心と格納容器内に注水できるようにラインを追加した。現に、炉心に注水できているのは、これを利用して、消火系は濾過水タンクを水源とし、電動ポンプの他ディーゼル駆動ポンプを備えているので、SBO にも対応可能である。その旨、東京電力の A M 整備報告書にも記述されている。

とにかく、外部からでも注水できる設備対応さえしておけば、いざという場合には消防車などでの対応も可能となる。だが、通常 BWR は運転状態では原子炉圧力が七〇気圧ほどあるのて、吐出圧力が低い消火用ポンプで炉心に有効に注水するには原子炉圧力を一桁程下げる必要がある。原子炉は水位が下がると自動的に減圧弁 (SLV) が働いて蒸気が格納容器の圧力抑制プールに放出されるようにした。配管の中小破断事故では、水位低下が早い割には圧力低下が遅く炉心が露出する。元は水位低と格納容器圧力高の一致信号で自動減圧する仕組みであった

が水位低下のみで自動減圧とした。ただ、運転員は確認のため一〇分間は手を下さない「一〇分ルール」があるが、誤作動と判断すれば閉止できる。

原子炉の減圧は、当然プール水温が上昇し、格納容器圧力が高まる。そこで早めにベント弁を開放して過圧を防止すべきである。高温高圧の蒸気放出にも耐え得る耐圧強化ベントラインも追加した。炉心が損傷する前ならば、微量の放射能は外部に放出されるが、格納容器の健全性は確保される。だが、運転員にとつてはベントを躊躇する懸念がある。早期ベントの重要性は手順書と運転員の教育・訓練により理解されると考えた。その詰りが甘く議論が足りなかったと悔恨・反省している。

厄介なのは、炉心が損傷後にベント弁を開く必要が生ずる場合に、誰がどのタイミングで開く判断をすべきかという悩ましい問題に遭遇する。そこで、ラプチャー・ディスク (十字状切り込み入れたステンレス板で一定圧力で自動的に破裂して開放) を付けた。設定圧力で自動的に開くので誰の責任でもなく、格納容器が過圧破損を防止する術を用意しておいたのである。た

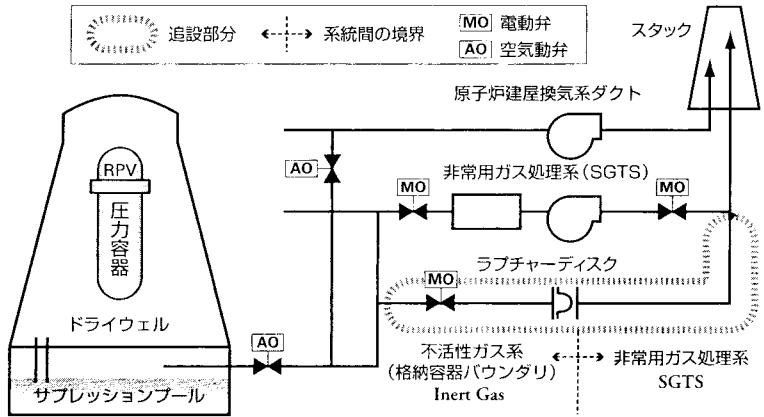


図一 代替注水設備 (2~5号炉、概念図)

だし、電磁弁制御で圧搾空気操作の元弁と電動機操作の弁を開けて置く必要がある。このように給水しながら蒸気を放出し蒸発熱で冷却することを「Feed and Bleed」と呼ぶが、全交流電源喪失では海水への放熱が不能となるので、これが唯一の成功シナリオであることを再確認すべきと思う。また、炉心損傷を回避する手段の多様性からしても重要である。

五 原子炉隔離時冷却系と復水冷却器

BWRには、原子炉の蒸気でタービンを駆動してポンプで炉心に給水する原子炉隔離時冷却系(RCIC)を備えているので、SBO状態でも直ぐに炉心損傷に至ることはない。RCICは常用機器ではある



図一 2 耐圧強化ベント設備 (1~6号炉、概念図)

が、非常用に高圧注水系としての機能を持つので高い給水能力を持っている。しかし、残留熱は徐々に減衰するので圧力が徐々に低下すると、蒸気の放出先が圧力抑制プールなので、残留熱除去系が機能していない状態では格納容器内圧力が徐々に上昇する。そのため、数日後には機能を喪失すると考えられる。

1号機にはRCICがなく、復水冷却器(IC)が付いていた。主蒸気管から分岐させた冷却コイル管を水タンクの中に入れ、水の蒸発潜熱で蒸気を凝縮させて給水系から原子炉に戻す簡単な可動部を持たない静的機器なので信頼性は高い。だが、二基合わせて二〇〇ト程度のタンク内の水が蒸発してしまつと冷却機能を失うので数時間しか持たない。

一方、残留熱は原子炉停止直後から数時間が大きいので炉心の冷却性は極めて厳しい。例えば、電気出力が一〇万キロワットの場合、熱出力は約三〇〇万キロワットなので数時間後の一%でも三万キロワットとなる。これを大気放出の蒸発潜熱(二二六〇キロワット/キログラム)で冷却するには毎時五〇トの注水が必要である。一か月後では毎時五トとなる。

六 炉心崩壊と水素爆発

原子炉水位が低下し炉心が露出すると、数時間で燃料棒被覆管温度が上昇し、一二〇〇℃を超えると、被覆管の材料であるジルコニウム(Zr)が水と酸化反応し水から酸素を奪うので水素ガスが発生、発熱で反応がさらに促進され、一八〇〇℃でZrが溶融。状況によつては、融点が二八〇〇℃の酸化ウランペレットも溶融させるか、または円柱状ペレットのまま崩れ落ちて下部炉心支持板上または炉底に留まって冷却される。BWRの燃料要素はチャンネルボックスと呼ばれる四角いZr合金製の筒で囲われている。被覆管が破損すると核分裂生成物のうち気体のキセノンやヨウ素と沸点が六八〇℃のセシウムなどが放出、燃料が溶融すればさらに大量の放射性物質が放出される。

当初伝えられたように炉心の半分程度の水位があれば、崩壊炉心の大部分は下部炉心支持板上に残っており、筆者の基礎実験ではベレット形状を保ち下部からの水の流入がある限り十分な冷却性が保持される。また、加圧条件下で蒸気爆発は起こらない。実際には、長時間冠水できて

いないので燃料溶融も進んで溶融落下していると思われるが、BWRでは压力容器の下部には制御棒駆動機構があり、一〇〇本前後の連結棒を通す管が林立しているため、シールが破壊され部分的に貫通する可能性が高い。だが、実情の推測は難しい。

格納容器内の圧力が高まれば、貫通部や上蓋のシールが緩んで水素やヨウ素などのガスが漏洩する。水素の燃焼条件は酸素五%以上と水素四%以上とされているが、空气中では酸素は二一%である。水素濃度が一〇%を超えると爆発領域に入り、濃度が増すにつれて爆発が激しくなる。格納容器内には運転中は窒素ガスが封入されており水素爆発はないとしても、1号機や3号機では、最高使用圧力四気圧の二倍近い過圧状態で漏れた水素が天井部に滞留し、爆発して原子炉建屋の上部が吹っ飛ばすような予期せぬ事態となった。

また、2号機は格納容器が圧力抑制プールで局所的な水素爆発が起きて部分破損しているとのことだが、酸素がない状況での水素爆発は不自然な感じがする。衝撃音があった頃には格納容器圧力は最高使用圧力の約二倍を記録している。格納容器が過圧破損し漏洩後に空気と混合し水素爆発したと考える方が自然である。

福島原発1号と3号機では漏れた水素が滞留し、爆発

いずれもベントの遅れが要因だ。電池や圧縮空気が先に消耗したようだ。正直に言って、多少の炉心損傷はあっても、これほど深刻な事故に進展するとは予測できず驚いた。

## 七 東電の対応について

初動対応のまずさが、事故とその影響拡大の全てと言っても過言ではないと筆者は考える。火事でも初期消火に失敗すると修羅場と化す。

1号機については、原子炉停止とタービン停止で原子炉隔離弁が閉じ、二台中一台のICが自動作動したが、一〇分後に運転員が手動停止している。これは压力容器保護の観点から時間当りの温度低下を五五℃に制限する基準と前述の一〇分ルールにも適っている。一時間後には津波が襲ったが、部分的に作動したかもしれない。しかし、津波後の電源復帰が困難と判断するや速やかに「代替注水手段」に方策を集中して、数時間後には実施するか、遅くとも日付が変わる前に注水とそのためベントをすべきであったし、できたはずだ。

2、3号機はRCCが付いている分だけ十分時間的余裕があったはずで、翌二日中には原子炉への注水をすべきだし、できたと思うが、1号機と同じ轍を踏んでいるのは「代替注

水手段」や「早期ベント」の意義がよく理解されていなかったと思われ誠に残念だ。また、使用済み燃料プールは、機転を利かせて事前に消防用ホースを入れておけば済んだ話で、完全に失態と言わざるを得ない。

炉の現況については、1、3号機とも真水の注水ができていたが、三月二〇日前後が最も厳しい状況であったようだ。その水は蒸気または高温水となって格納容器に溜まっていると推測されるが、その放射性物質を含んだ水を取り出して冷却して原子炉に再注入できる循環・冷却系ができれば、事故は比較的短期に収束に向かうと思う。本来的に設置されている残留熱除去系の復活が望ましいが、外付けでもよいので急いでほしい。放射線汚染の除去は装置が開始したよう期待したい。

## 八 加圧水型軽水炉のSBO

加圧水型軽水炉(PWR)でもPSAの結果、緊急注水を続けタンクの水が少なくなると、格納容器の底部にあるサンブと呼ばれる会所で集めた水を残留熱除去系で冷やして再使用するが、この再循環モードへの切り替えに脆弱性があるのでAMとしてループを強化するなどの対策がとられた。ただ全交流電源喪失に限って言えば、PWR型は原子炉系とタービン系で冷却系

統が分離されている。TMIの場合には蒸気発生器の位置が原子炉本体と同じ高さであるが、米国WHや日本やフランスのPWRは冷却器の役目をする蒸気発生器が原子炉よりも高い位置にあるので原子炉冷却系の自然循環冷却が成立する。従って、放射能を含まない二次系蒸気の逃し弁を開けるのに抵抗感はなく対応は楽で、タービンバイパスで直接蒸気を復水器に逃すなど多様な手段が採れる。

BWRのように直接原子炉に注水する必要はなく、AMでは消火系から格納容器スプレーができるようにした。PWRとBWRの仕組みなどの相違をよく検討する必要がある。それを水平展開と称して、一律に運転を差し止めたり、再開を遅らせたりするのは合理的ではない。社会生活や生産活動を制約するような電力の逼迫は避けなければならない。

## 九 原発稼働に必要な対策と課題

津波対策としては、長期的には防波堤の強化が大切だが、どの程度の高さが必要か議論もあろう。差し当たり建屋の水密性の強化などは直ぐにでも着手すべきであろう。全交流電源喪失も含めた過酷事故対策(アクシデント・マネジメント)は設備的には整備済みなので、手順書を今一度確認

徹底しておくことだ。加えて電源確保策の強化だ。現在設置されているディーゼル発電機の出力は数千キロワット級(AWRでは五〇〇〇キロワット級が三台)のものが必要で、電源車ではバッテリーの充電には有効でも、残留熱除去には十分ではない。常用(外部)電源施設、特に発電所周りの送電線や鉄塔の強化も必要であろう。私見だが、数万キロワット級のガスタービン発電機を近くに設置し、電力ピーク対応と非常用電源のバックアップ機能をもたせれば、常時も遊休設備とならず有用ではないかと思う。また、多量の真水を準備し、近隣の沢やダムから補給できるようにしておくことも不可欠である。

今後の検討課題としては、AMなど設計基準外事象も安全審査に準じた取扱いをすることが必要と考える。また、これまで電力の経営陣はお題目として安全確保の最優先を掲げてはきたが、電力自由化の流れの中で経済性重視の姿勢から脱していないのではないかと気がする。この際、頭を切り替えてほしい。また、一般論として、新型炉の方が過去の経験を取り入れているので、安全性も経済性も高い。これを契機に新型炉への交換を積極的に進めるべきだし、それが進まない原因を作っている設置県の知事にも理解を求めたい。(六月一六日記)