

由の短時間で広域に拡散する過程と、汚染海水が時間をかけて墨絵流しのように海洋に不均一に広がっていく過程を把握して、定量的な実態把握と予測が求められる。

4月上旬に福島沖で投入された漂流ブイ(アルゴフロート)の動きから、放射能汚染海水が沿岸域から離れ、一部は黒潮主流に乗って東に移動し、本州東方の広い海域に拡散している可能性が示唆される(図)。ブイの動きは必ずしも海水のそれとは一致しないものの、次

第に希釈されて低濃度となる海水中の放射性物質の動向を、大気からの沈着による寄与も含め、観測と数値モデルにより把握する必要がある。

海洋生物への放射能濃縮は、チェルノブイリ事故の後、海水放射能濃度が増加し、その後、約半年遅れて魚類に濃縮のピークが見られたという報告がある。生物地球化学的物質循環を考えると、海水濃度が低いから安全であるといった予断を許さない状況が続く。

(うえまつ みつお、東京大学大気海洋研究所)

自然科学書協会講演会

2011

「クニマスは生きている—伝説から科学へ—」

講師 中坊 徹次 京都大学 総合博物館 教授

「ロボットが環境適応能力を持つには」

—なぜ小さなアリが大きな蟻塚を作れるのか—

講師 大須賀 公一 大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 教授

9/18(日) ◎午後1時30分～4時30分(午後1時開場)

会場 阪急ターミナルスクエア・17 大阪市北区芝田1-1-4 阪急ターミナルビル17階(TEL 06-6373-5790)
主催 社団法人自然科学書協会 後援 文部科学省
受講料 無料(要事前申込/自然科学書協会ホームページにてお申し込みください)
お問合せ 社団法人自然科学書協会 事務局 (TEL 03-5577-6301) <http://www.nspa.or.jp/>

自然科学書フェア (ハンドブック・図鑑・事典・図鑑など)

会場 紀伊國屋書店梅田本店 大阪市北区芝田1-1-3 阪急三番街 TEL 06-6372-5821
フェア開催期間◎2011年9月9日(金)～10月10日(月・祝)

2011 大震災

福島第一原発1号機事故・

東電シミュレーション解析批判と、地震動による冷却材喪失事故の可能性の検討

田中三彦

サイエンスライター、元原発設計技師(1973～74年、東京電力福島第一原発4号機の原子炉圧力容器の詳細設計などに関わる)

科学的根拠なし、「地震による大きな損壊は確認されていない」

去る6月1日、重要な報告書が世界に向けて公表された。「原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書／東京電力福島原子力発電所の事故について」がそれである。和文と英文が出ているが、本文332頁、添付資料編381頁(いずれも和文の場合)の分厚い報告書の冒頭にはこう記されている——「本報告書は、事故報告書としては暫定的なもので、現在まで得られた事実関係を基に事故の評価や得られた教訓をとりまとめたものである。範囲としては、現時点までの原子力安全と原子力防災に関する技術的な事柄を中心としており、原子力損害賠償、社会生活への影響等についてまではとりあげていない」(傍点は筆者による)。

暫定的とはいえ、この報告書は日本国政府が世界に向けて出した東京電力(以下、東電)の福島第一、第二原発事故に関する歴とした「事故報告書」である。同じ政府による事故調査委員会(畑村洋太郎委員長)の初会合前という、早い段階でのIAEA(国際原子力機関)への事故報告書の提出だった。なぜそんなに早く。報告書冒頭の「概要」にはこうある——「現在、我が国は事故の収束に向けて英知を結集して取り組んでいるところであるが、福島原子力発電所で何が起り、それがどのように進展し、そして我が国が事故をどのように収束

させようとしているかについて、正確な情報を絶えず世界に伝えることは我が国の責任である。また、我が国がこの事故から何を教訓として汲み取っているかを世界に伝えることも我が国の責任であると認識している」(傍点は筆者による)。

正確な情報を絶えず伝えるべき相手は、世界やIAEAよりもまずこの日本で生活している住民であるはずだが、われわれは政府から、こうした系統だった報告書をじつはまだ一度も提示されてはいない。

このIAEAへの事故報告書は、「福島原子力発電所で何が起きたか」と地震との関係に関して、つぎのように記している。

「地震によって外部電源に対して被害がもたらされた。原子炉施設の安全上重要な設備や機器については、現在までのところ地震による大きな損壊は確認されていないが、詳細な状況についてはまだ不明であり更なる調査が必要である」¹⁾。

この報告書全体を通して、地震による被害として明記されているのはたった一つ、「外部電源」だけである。報告書は、福島第一原発を襲った地震動と、いわゆる「新・耐震設計審査指針」²⁾にもとづく基準地震動Ssとを比較して、両者は加速度的にそれほど大きくは違わなかったとし、まるでそれだから被害が外部電源に限られたかのようにつぎのように書いている。

「今回の地震において、福島第一原子力発電所の原子炉建屋基礎盤上で観測された地震動の加速度応答スペクトルは、耐震設計審査指針に基づく

基準地震動による応答スペクトルを一部で超えていたことが確認されている。ただし、現在のところ、地震による被害は外部電源系に係るものであり……」³

地震動に関して言えば、原発の重要な設備や機器にとっての“大敵”は加速度ばかりではない。『原発を終わらせる』(岩波新書)で石橋克彦氏が指摘しているとおり⁴、揺れの「継続時間」もそうだ。

「東日本大震災では全般に建物の振動被害が激しくなくて、本震の振動は、建物を壊しにくい短周期(1秒間の振動回数が多)が強かったと考えられている。しかし、原発の機器・配管類は一般に短周期に弱い。それとともに、地震動の継続時間が想定よりはるかに長かったことが、設備・機器の損傷をもたらしやすいかと思われる。基準地震動 S_s の強い揺れの時間はせいぜい 30 秒だが、本震の強い揺れは 130 秒くらい、とくに激しい部分だけでも約 60 秒もあった。これは、繰り返し荷重として構造物に激しく作用する」。

一方、『週刊朝日』2011 年 7 月 22 日号には、3 月 11 日以降、現場に詰めて作業に当たってきた「最高幹部」のつぎのような談話が載っている。

「……フクイチが地震と津波のどちらでやられたのかと言えば、まず地震で建屋や配管、電気系統など、施設にかなりの被害を受けたことは事実です。地震直後、「配管がだめだ」「落下物がある」などと緊急連絡が殺到しました。制御室からも「配管や電気系統がきかなくなった」などと、すさまじい状況で、多くの作業員が逃げ出した。耐震性に問題があったのは否めません」⁵。

「現在までのところ」という但し書きはあるにしても、「原子炉施設の安全上重要な設備や機器の地震被害は確認されていない」とする IAEA への政府見解と、この“最高幹部”の談話との間には、あまりにも開きがありすぎる。

力学的に考えても、現場の最高責任者の談話に照らしても、地震によって原発の中核構造に何か重大なことが起きなかったかを“まず”徹底的に調査・分析するのが科学的な態度だと思うが、政府も東電もこれまでそういう努力をしてきたよう

には見えない。ひたすら「現在までのところ」に甘え、政府見解に対する科学的根拠をまったく示そうとしなかったし、今後もそれは変わらないだろう。もし原子炉施設の安全上重要な設備や機器が津波ではなく地震によって損壊していたことがはっきりすれば、耐震設計審査指針の見直しは必至だろうし、地震国日本のすべての原発が、少なくとも当面は、運転できなくなる可能性が高くなるというのが、理由であるだろう。

しかし、本当のところはどうか？ 地震発生直後に福島第一原発で何か重大なことが起きなかったのか？ 1 号機が地震発生からわずか約 25 時間で水素爆発を起こしたのは、地震が深く関係していたからではないか。2 号機だけ圧力抑制室の外部で水素爆発らしきものが起きたのは、圧力抑制室が長く激しい地震動により、すでに破損していたからではないか。

大事故が起きてから 2 カ月以上経過した 5 月 16 日、東電は福島第一原発 1～6 号機、同第二原発 1～4 号機に関する大量のデータを一度に公表した⁶。それにより、大事故を起こした第一原発 1～3 号機の、地震発生直後から数十分間(この時間幅は、号機によってもデータの種類のによっても異なる)の運転状況などがようやく明らかになった。さらに、東電は 1 週間後の 5 月 23 日に、それらのデータに対する分析・評価報告書も公表した⁷。これらのデータや報告書はその後加筆、修正されていない。

以下では、それらにもとづいて、福島第一原発で何が起きたかを、とくに 1 号機に焦点を当てて再検討する⁸。1 号機に焦点を当てる理由は二つある。一つは、原子炉水位の降下の速さが、配管破損による冷却材喪失事故を想起させるに十分なほど速いこと、そしてもう一つは、あの原子炉建屋最上階の水素爆発までの時間がわずか約 25 時間と短く、その間、運転員による機器やシステムの手動操作が少なく、事故推移に対する現象論的分析や推論が他号機にくらべれば容易であることだ。

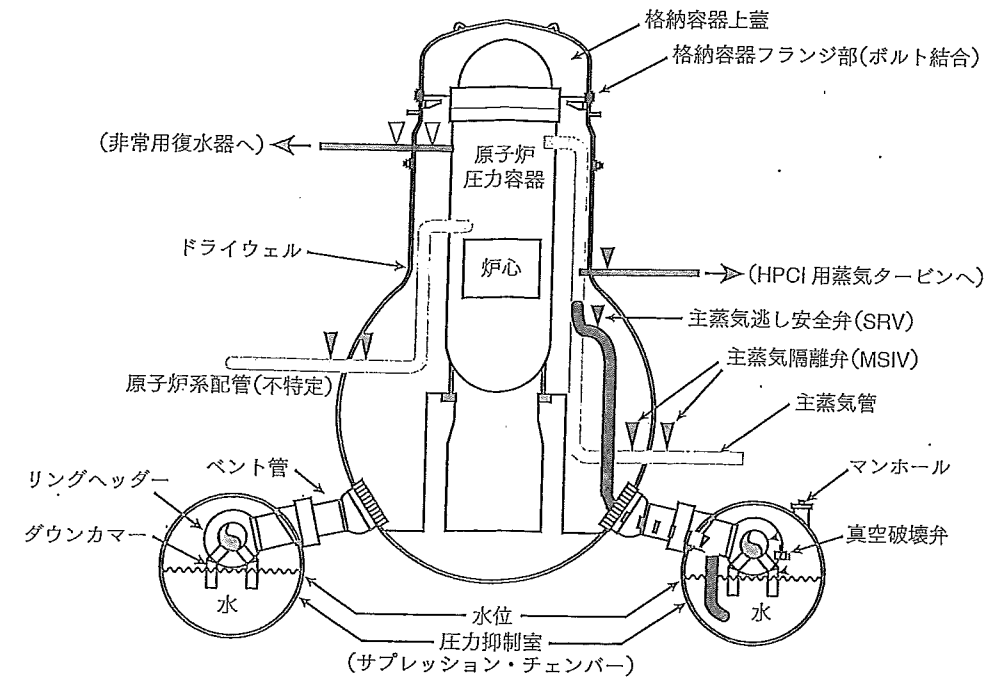


図1—隔離された1号機原子炉の模式図(図中、▽は閉じている弁、△は開いている弁を表している)

「非常用復水器」と「逃し安全弁」

1 号機の事故分析においてキーになる設備や機器はそう多くはない。本項で詳述する「非常用復水器」(IC)と「逃し安全弁」(SRV)、そして次項で述べる「原子炉格納容器」の 3 つである。

東電が公表した前述のデータや報告書にしたがうなら、1 号機においては、3 月 11 日午後 2 時 46 分に東北地方太平洋沖地震による強い地震動が感知されてスクラム信号(原子炉緊急停止信号)が発せられ、同 47 分には制御棒が全数自動的に挿入された。その直後、同じ 47 分に、合計 8 個ある主蒸気隔離弁(MSIV)がすべて閉じ、原子炉がタービンから隔離された。この状態を以後の事故分析の出発点とする。なお、隔離される直前の原子炉圧力は運転圧力約 7 MPa(約 70 気圧)、またその瞬間に原子炉の上部空間に充満していた蒸気の温度は、通常運転時の約 285℃ である。

図 1 は、その隔離された原子炉の状況を模式的に示したものである。事故と関係する構造やシ

ステムはすべてこの図に示されている。ただし、この図はあくまで模式的なもので、実際の配管の位置や経路や本数、弁の正確な位置や個数などを表してはいない。たとえば、この図には主蒸気管は 1 本しか描かれていないが、実際には 4 本ある。また、図中の「原子炉系配管」とは、この図に描かれている配管、描かれていない配管(再循環系配管、給水配管、等々)など、原子炉を出入りするすべての配管を象徴する意味で描かれており、何か特定の配管を意味しているわけではない。

ちなみに、なぜ MSIV が閉じたのか。MSIV 閉動作の前に、じつは“主蒸気管破断”などと関連する隔離信号が出ていたことが、公表された警報発生記録に記されている。これに関して東電は、実際に主蒸気管が破断したのではなく、「地震による外部電源喪失により計測器電源が失われ、フェールセーフで閉鎖信号が発せられた」からだとして説明している。2 号機、3 号機においても、地震直後に MSIV が同様に閉じていることから、東電の説明どおり、たぶん主蒸気管破断は起きていないと思われる。

非常用復水器は事故を起こしていないか？

緊急停止で制御棒が全数挿入されて核分裂反応は停止しても、核分裂生成物による「崩壊熱」によって原子炉内の冷却材(軽水)の蒸発は継続し、そのため原子炉圧力と温度が上昇しはじめる。とくにスクラム直後の崩壊熱はひじょうに大きいから、圧力上昇を放置すると原子炉圧力容器または出入りする配管が破壊する。しかし「福島第一原子力発電所原子炉設置変更許可申請書」(1992年4月)によると、1号機の場合は、原子炉圧力がある一定時間、「原子炉圧力高」でありつづけると、「非常用復水器」(Isolation Condenser/IC)が自動的に起動し、高い圧力の蒸気を原子炉外に取り出し、原子炉の約6~8m上に設置されている「復水タンク」に導き、原子炉圧力を下げるようになっている。

図2がその非常用復水器(以下、IC)の系統概略図だ。ICにはA、B、2つの系統がある。原子炉からの蒸気が復水タンクに導かれて冷却され水になると、体積凝縮が起きて原子炉圧力が下がる。またその水は、原子炉の最下部にある再循環系ポンプの入り口付近からふたたび原子炉内に戻り、それにより冷却材の温度も下がる。こうして原子炉圧力と冷却材温度がともに低下する。ただし、も

ちろんこうした減圧、減温のプロセスが永久につづくわけではない。蒸気を冷却する復水タンクの水が、高温になって蒸発するからだ。東電が国に提出している前述の申請書によれば、ICの作動時間は約8時間である。なお、非常用復水器は初期の原発で使われた冷却システムであり、日本の原発ではほかに敦賀原発1号機で使われているだけだ。

図2にあるように、A、Bいずれの系統にも合計4個の弁がある。そのうち3A弁、3B弁を除く3つの弁(A系統であれば1A、2A、4A、B系統であれば1B、2B、4B)は、非常時に備え、運転中“つねに”開いている。運転中閉じている弁は3Aと3Bだけだ。そして(たとえば崩壊熱のために)原子炉圧力が一定時間、圧力高の状態がつづくと、弁3A、3Bが自動的に開き、原子炉から蒸気を復水タンクへ導くようになっていく。

ICの最大の特徴は、こうした水と蒸気の流れを純粋に「自然循環」に頼り、ポンプや電力を使わずに、原子炉の減圧、減温を行うことだ。そういう意味では、地震発生直後からの外部電源喪失時はもとより、午後3時37分の津波襲来によって1号機が「全交流電源喪失」(ステーション・ブラックアウト/SBO)という最悪の状態に陥ってから、も

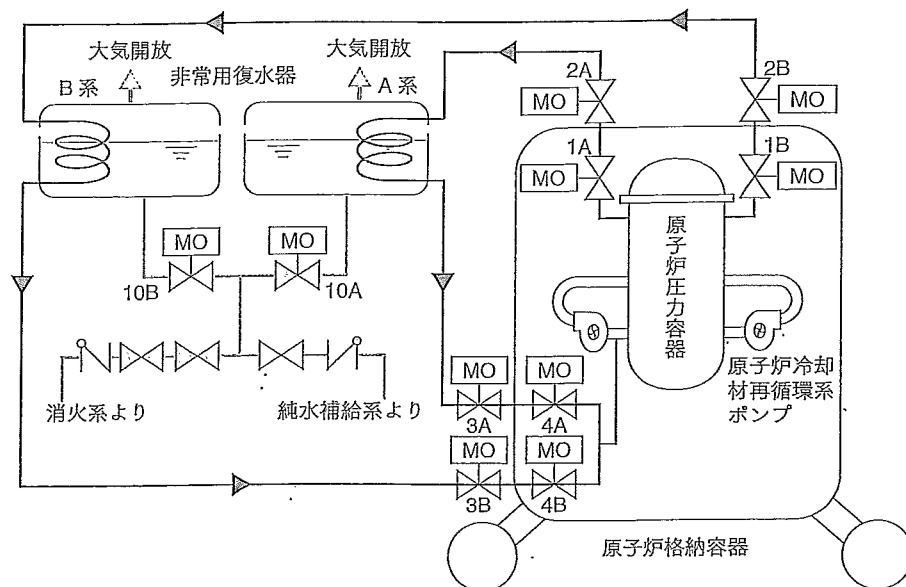


図2-非常用復水器(IC)の系統概略図

表1-東京電力福島第一原発1号機、地震発生から海水注水までの重要イベント

日時分	地震発生からの時間(hr)	イベント番号	重要イベント
2011/3/11 14:46	0.00	1	地震発生
2011/3/11 14:46	0.00	2	自動スクラム成功
2011/3/11 14:46	0.00	3	格納容器の温度、圧力、上昇開始
2011/3/11 14:47	0.02	4	主蒸気隔離弁閉
2011/3/11 14:47	0.02	5	非常用ディーゼル発電A、B起動
2011/3/11 14:52	0.10	6	非常用復水器(IC)A系、B系、自動起動(※1)
2011/3/11 15:03	0.28	7	IC 3A、3B 弁閉
2011/3/11 15:04	0.30	8	格納容器スプレイ系(B)起動(※2)
2011/3/11 15:11	0.42	9	格納容器スプレイ系(A)起動(※2)
2011/3/11 15:37	0.85	10	津波襲来、全交流電源喪失(SBO)
2011/3/11 17:50	3.07	11	IC 作業撤収。放射線モニタ指示値、上昇のため
2011/3/11 18:10	3.40	12	IC 2A、3A 弁開／蒸気発生確認(※3)
2011/3/11 18:25	3.65	13	IC 3A 弁閉
2011/3/11 21:19	6.55	14	ディーゼル駆動消火ポンプ(D/D-FP)のラインナップ実施
2011/3/11 21:30	6.73	15	IC 3A 弁開
2011/3/11 21:35	6.82	16	D/D-FP から水を供給中(※4)
2011/3/12 1:48	11.03	17	D/D-FP を確認したところ、燃料切れでなくポンプ不具合により供給停止(※5)
2011/3/12 5:46	15.00	18	消防ポンプによる淡水注水開始。同日 14 時 53 分まで断続的に 80 トン注水
2011/3/12 9:15	18.48	19	現場にてベントライン MO 弁手動開(25%)
2011/3/12 9:30	18.73	20	当該 AO 弁現場操作を試みるも高線量で断念
2011/3/12 10:17	19.52	21	中央操作室にて圧力抑制室側 AO 弁操作、失敗
2011/3/12 14:00	23.23	22	AO 弁駆動用仮設空気圧縮機を設置
2011/3/12 14:30	23.73	23	格納容器圧力低下を確認
2011/3/12 15:36	24.83	24	原子炉建屋最上部付近水素爆発
2011/3/12 20:20	29.57	25	海水およびホウ酸による注水開始

- (※1) A系、B系とも自動起動したことがアラームタイプに記録されているが、東電は5月24日の会見で、「B系はその後いっさい作動しなかった」ことを強調している。「1系列で十分な冷却能力があるから」と説明していたが、冷却が急務な緊急時にひどく不自然な話だ。
- (※2) 起動時刻は東京電力公表のグラフから読み取ったものなので、「分」には多少の誤差がありうる。
- (※3) IC2A弁を開いたと記されているが、この弁は本来「常時開」である。東電は津波襲来時にフェールセーフ機能により2A弁が閉じた、と説明している。一方、「蒸気発生確認」は、IC系統の配管から蒸気漏れが起きているという意味にとれるが、東電は、弁を開いたことでIC系統の配管の中を蒸気が流れはじめたという意味に解釈している。
- (※4) 東電の「各種操作実績取り纏め」を読むと、IC操作の項目にこう記述されているので、D/D-FPからの水の供給先はIC用のプールと思われる。
- (※5) これにより、ICはこのあとほとんど機能しなかったと思われる。実際、3/12午前4時発表の東京電力プレスリリースにも、「非常用復水器で原子炉蒸気を冷やしておりましたが、現在は停止しております」との記述がある。

っとも頼りにされるべきシステムはこのICだったはずである。しかし、どういうわけか実際にはそうではなかった。

表は、1号機の事故分析にとってとくに重要と思われるイベントを、5月16日に東電が公表した一連の文書をもとに作成したものである。この

表を見ると、地震発生から6分後の3月11日午後2時52分、ICがA、B、2系統とも自動的に起動した(イベント番号6)。しかしせっかく自動起動したICを、同3時03分、2系統とも手動で停止した(イベント番号7)。崩壊熱がもっとも大きいこの時期に、いったいなぜ2系統を手動停止したのか。

これについて東電は、「非常用復水器の操作手順書では原子炉压力容器温度低下率が55℃/hrを超えないことを求めている」から、運転員がそれに従って手動停止したと説明している。

常識ではまったく理解できない話だ。55℃/hrという温度低下率は、長い歴史をもつ欧米のボイラーなどで古くから使われてきた華氏による経験則「100°F/hr」を摂氏に換算したもの(100を1.8で除したもの)でしかない。この経験則は、構造物中に生じる温度差を小さくして熱疲労などを軽減し、機器をできるだけ長く大切に使うということを意図したもの。だから、確かに、原発でも起動・停止など「通常運転状態」では使われている。しかし、外部電源を喪失し、原子炉が隔離され、いまや崩壊熱によって原子炉圧力が急激に上昇しつつあるという“非常事態”のさなかに適用すべき規則でないことは、火を見るよりも明らかだ。もし本当にICの操作手順書にそのように書いてあるのだとすれば、それは欠陥手順書以外の何物でもない。付言すれば、緊急炉心冷却システムが起動したら高温の原子炉にいきなり冷水が注入される。

もともとこのICはGE社により設計されている。推測だが、GE社は当然、この設備を設計・設置するに際して、それを2系統同時に起動した場合、原子炉の圧力と温度がどのように変化するか、その「設備性能」を予め計算しているはずだし、そのうえでこれを非常時に2系統同時に自動起動させるようにしているはずだ。だから起動後に温度低下率が55℃/hrを超えたとしても、それは織り込み済みのことと考えねばならないし、運転員もそのIC性能を熟知していなければならぬ。百歩譲って、もしそれほど温度低下率が気になったのであれば、とりあえず1系統だけ停止するという判断もあったはずだ。

しかしたぶん、ICを停止した“本当の”理由は、もっと別の——おそらくきわめて深刻な——問題にあったのではないか。もしかするとこのIC系の配管が激しい地震の揺れで破損し、冷却材喪失事故のようなものを起こしていたのではないか。

原発事故の基本中の基本は冷やすことでありながら、なぜB系は最後の最後まで、おそらく復水タンクに大量の冷水をたたえたまま、使われなかったのか。東電は、弁の開閉状況の調査の中で、「非常用復水器の配管破断」信号が発信された可能性はあるものの、それはフェールセーフによるものと推測している。はたして本当にそうなのか。ICに関しては運転操作から破断信号まで、第三者により徹底的に調査される必要がある。

もう一つ、ICに関して疑問を提示しておきたい。それは、東電が作成して公表しているICの系統図(図2)についてだ。この図によれば、4A弁のラインと4B弁のラインが下流側で結合したあと、二つある再循環系配管のうちの一つの系統につながっている。しかし、前出の設置変更許可申請書によれば、4A、4Bのラインは結合せず、それぞれが別々の再循環系配管に入っている。この食い違いは、東電が問題にする温度変化率の話と直接関係しており、どちらが正しいかが明らかにされる必要がある。

はたして1号機の逃し安全弁は作動したか？

崩壊熱などにより原子炉圧力が異常に高まった場合、それを減じる別の装置もある。「逃し安全弁」(Safety Relief Valve/SRV)がそれだ(図1参照)。この模式図にあるようにSRVは主蒸気管から枝分かれした管に設置されている。主蒸気管は4本あるのでSRVも全部で4個ある。やはり前述の設置変更許可申請書によれば、それらの弁の「開」設定圧力は約7.5 MPa(約75気圧)である(厳密には、4個の弁の開設定圧力はほんの少しずつ異なる)。その申請書には「閉」設定圧力が明示されていないが、おそらくそれは、通常運転時の圧力より少し低い6.8 MPa(約68気圧)前後と推測される。

つまり、これら4個のSRVは原子炉圧力が7.5 MPaに達すると自動的に開く。SRVが開くと、そこから高温・高圧の蒸気が配管にガイドされて一気に格納容器の圧力抑制室(サブプレッション・チェンバー)の水の中まで導かれ(図1参照)、そこで水になり、体積凝縮が起き、原子炉圧力が低下する。そ

して6.8 MPaぐらいまで原子炉圧力が低下するとSRVが自動的に閉じる。

原子炉圧力の高まりの原因が崩壊熱である場合、いったん圧力が低下してもまたすぐ原子炉圧力が上昇するから、ふたたびSRVが開く。開くと圧力が低下するのでSRVは閉じるが、ふたたび圧力が上昇し……と、SRVの自動開閉動作が連続する。実際、東電が公表している原子炉圧力の記録を見ると、2号機、3号機の場合、地震発生後10分以内から、原子炉圧力がノコギリの歯のように鋭角的に変動しはじめている。これは明らかに、SRVが自動的に開閉動作を繰り返したからだ。

これに対して1号機の場合、SRVが自動的に作動したことを示唆するこうした典型的な鋭い圧力変動は、津波襲来直前まで一度も記録されていない(津波襲来以降は、圧力変動の記録そのものがない)。それはなぜなのか？ 地震発生から6分後にICが自動起動して11分間作動し(イベント番号6〜7)、さらにその後に関しても——東電公表の「各種操作実績取り纏め」には記されていないものの——津波襲来まで運転員がICの3A弁の開閉を手動で操作しつづけたと推定されるからだ、というのが東電の解釈である。しかし、あまり説得力がない。なぜなら、2、3号機の場合は、隔離時冷却系(RCIC)という、ICより優れた冷却システムが作動していたにもかかわらず、前述のごとく、SRVが自動的に開閉動作を繰り返しているからだ。

1号機の場合、SRVが作動するまで圧力が上昇しなかったのは、地震発生時に原子炉系配管(前出)が破損し、そこから圧力が“抜けていた”からではないか、という疑いが生じる。1号機のSRVは本当に作動したのか、慎重に調査されねばならない。後述するように、これは事故原因の特定と密接に関係する重要なことがらだ。

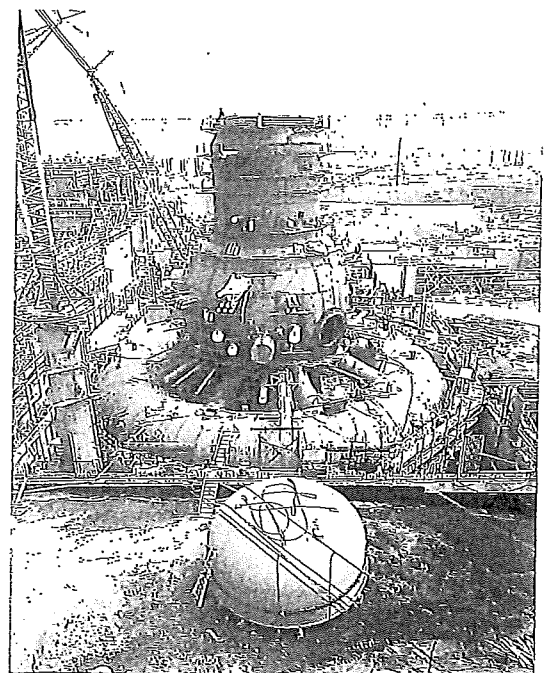
このほか1号機には、やはり交流電源を使わない「高圧注水系」(HPCI)がある(図1参照)。HPCIは、原子炉水位異常低下信号またはドライウエル圧力高信号で自動的に始動するようになっている。しかし地震直後から津波襲来までの間はその始動条件に達せず、また津波襲来後についてはバッテ

リーが海水に没したため、結局一度も作動しなかったとされている。

1号機事故推移、三つの特徴

写真は、福島第一原発の1〜5号機で使われているのと同型の、いわゆる「Mark I型(原子炉)格納容器」の全景である。この写真にあるように、格納容器は、大きくは「ドライウエル」と呼ばれるフラスコ形の大型構造物と、その構造物の底部を取り囲むこれまた大型の円形構造物「圧力抑制室」(サブプレッション・チェンバー、ウェットウエル、トーラス、とも呼ばれる)からなっている。ちなみに、圧力抑制室は、真上から見ると完全な円形ではなく、正16角形である。

ドライウエルと圧力抑制室は、熱膨張差を吸収するための「ベローズ」と呼ばれる蛇腹構造を介して、写真のように8本の太い「ベント管」で結合されている。一方、この写真において、手前の大きなお椀状の構造物がドライウエルの最上部を覆う上蓋である。上蓋とドライウエルとは、「フランジ」という平面状の構造物を介して多数



写真—福島第一原発1〜5号機で使われているのと同じMark I型原子炉格納容器(米国ブラウンズフェリー原発、建設中)

のボルトで結合されている。1号機の場合(そしてたぶん3号機も)、ボルトで結合されたこのフランジ部から、格納容器内部に溜まった水素ガスが原子炉建屋最上階のオペレーションフロアに漏れ出し、水素爆発が起きたものと、私は推測している¹⁰。

格納容器の唯一とも言える役割は、原子炉系配管(前出)が破断し、そこから冷却材が噴出するような「冷却材喪失事故」(Loss-Of-Coolant Accident/LOCA)が起きたときに、放射性物質が直接大気中に放出されないようにすることだ。またそのようなLOCA時に、格納容器内部で水素爆発が起きないように、運転中の格納容器内には窒素ガスが封入されている。なお、運転中の格納容器圧力はほぼ大気圧(1気圧)である。

さて、1号機の事故推移の中でもっとも注意を向けるべきものは、このMark I型格納容器(ドライウエル)の圧力の変化であると私は考えている。図3は東電が5月16日に公表したデータをもとに、1号機の原子炉水位、ならびに格納容器(ドライウエル)の圧力が、地震直後からどのように変化したかを図示したものだ。横軸は地震発生からの時間(hr)、左縦軸は原子炉水位(mm)、右縦軸はドライウエル圧力(MPa)である。

この図に関して2点注意がいる。一つは、原子炉水位。その基準は、核燃料の有効頂部(Top of Active Fuel/TAF)だ。もう一つは、ドライウエルの圧力の単位である。東電は、格納容器の圧力を「絶対圧」を使って公表している。絶対圧というのは、大気圧(約1気圧/0.1 MPa)を含んでいる真の圧力だ。一方、圧力容器や配管などの設計においては、通常、内外面の「圧力差」が問題なので、大気圧成分を除いた「ゲージ圧」が使われる。実際、原子炉圧力のデータに関しては、東電もゲージ圧を使って公表している。そこで混乱を避けるため、本稿の事故分析では、圧力の単位を「ゲージ圧」で統一した。したがって、格納容器の圧力に関しては、東電の公表データよりつねに約0.1 MPa(約1気圧)だけ少なくなっている。

図3から、1号機の事故の推移のいくつかの特徴が明らかになる。一つは、原子炉水位が短時間

に大きく降下していること。地震発生直前まで通常運転をしていた1号機の原子炉水位は、地震発生時、TAFよりおよそ5 m(5000 mm)上にあったと推定される。しかしこの図にあるように、地震発生から約6.7時間後(11日午後9時30分)に、原子炉水位はTAFの上わずか450 mmにあった。その間水位がどのように変化したかは、データが存在しないので不明だが、結果として、6.7時間で4 m半近く水位が降下したことになる(図中①)。原子炉の内径は約4.8 m。原子炉内にはいろいろな構造物が収められているので、どれほどの水が消えたかを正確に割り出すのは簡単ではないが、少なくとも50~60 トンの水が原子炉から“どこかへ”姿を消したことになる。

もう一つの特徴は、その水位がしばらく安定したあと、地震発生から約16時間後(12日午前7時ごろ)に、ふたたび急速に降下しはじめ、ついにTAFを横切り、最終的に合計3 mも降下していることだ。

しかし、図3でもっとも注目すべきことは、格納容器圧力が“異常上昇”していることだろう。これに関しても途中のデータがかなり欠損しているので、その間どのように圧力が上昇していったかは不明だが、結果的に、地震発生から約11.7時間で格納容器の圧力は(ゲージ圧で)0 MPaから0.74 MPa(約7.4気圧)まで上昇した(図中②)。0.74 MPaという値は常識では考えられないほど高い。きわめて異常である。1号機の格納容器の「設計圧力」は0.435 MPa(約4.3気圧)なので、0.74 MPaはそれを大幅に超えている。設計圧力をこれほど超えると、格納容器が一瞬にして大破壊を起こす危険さもある。だから、格納容器の圧力を下げるために、国は“ベント”を強行し、格納容器内に溜まっていた放射性物質や水素を含むガスを大気中に放出した。このベント強行の是非は別としても、しかしいったいなぜそれほどまでに格納容器の圧力が上昇したのか?

格納容器の設計圧力とは、原子炉系配管のうち最大口径の配管(具体的には、再循環出口配管)が一瞬にしてギロチン破断(配管が完全に両断されること)し、原

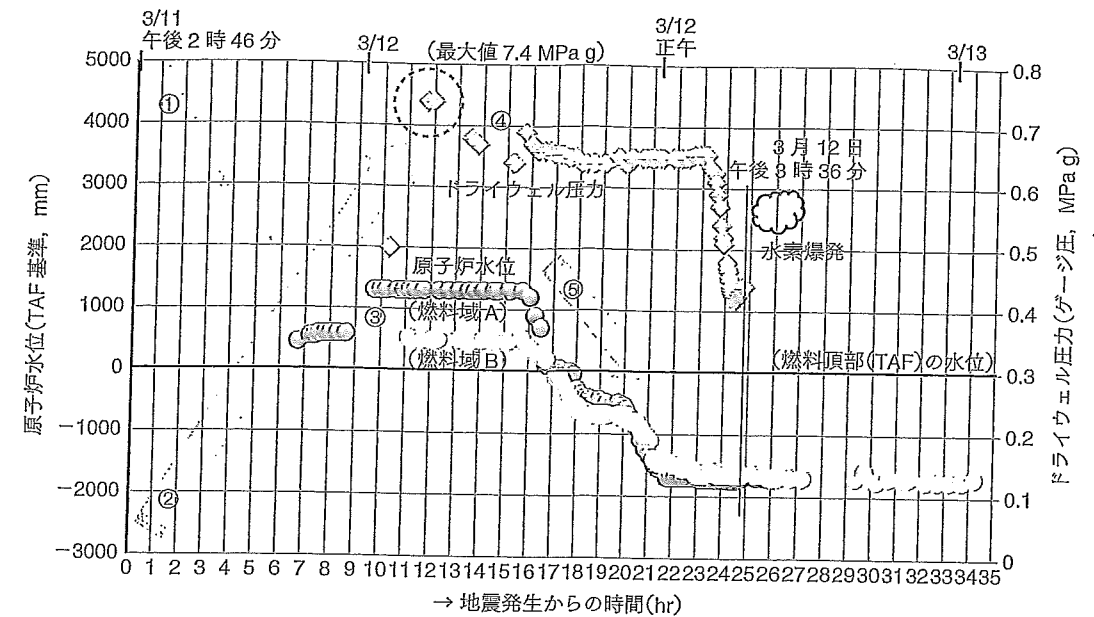


図3-1 号機、地震発生後の原子炉水位とドライウエル圧力の変化

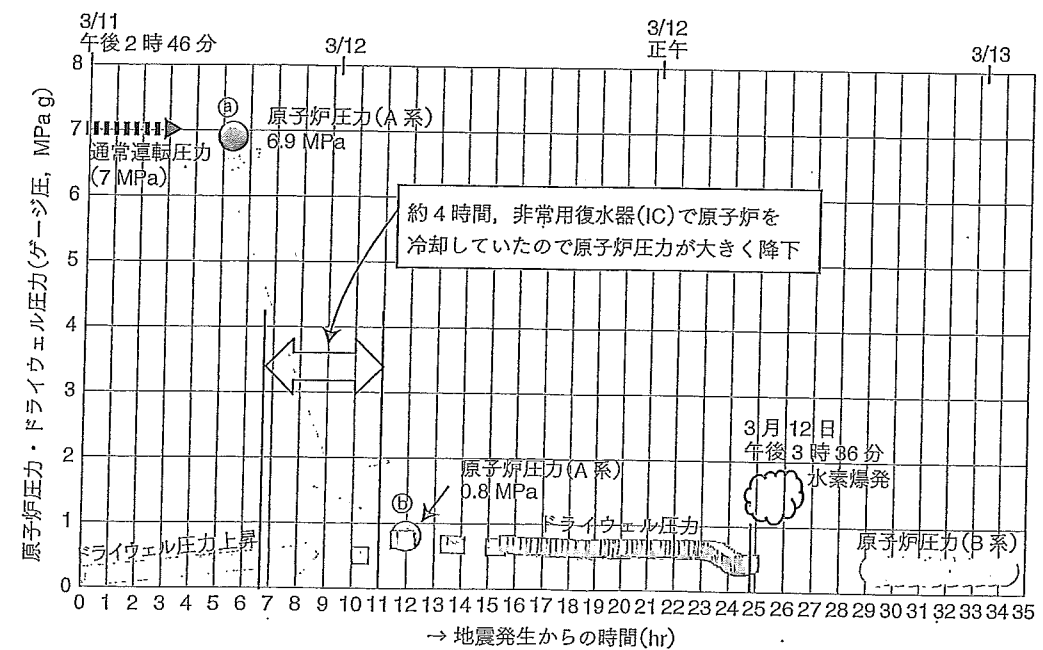


図4-1 号機、地震発生後の原子炉圧力とドライウエル圧力の変化

子炉の中の冷却材が短時間に格納容器に放出されるような事故が起きた場合に理論的に推測される最大過渡圧力に、なにがしかの裕度を加えたものである。言い換えれば、これ以上の最大過渡圧力は生じないとして設定されているのが、0.435 MPaという格納容器の設計圧力であり、格納容

器設計者はその設計圧力を用いて、格納容器という巨大構造物の各部分の構造や寸法を設計しているのだ。

今回の1号機事故において、再循環出口配管のギロチン破断のような大規模LOCAが起きていないことは明らかである。もしそのようなこと

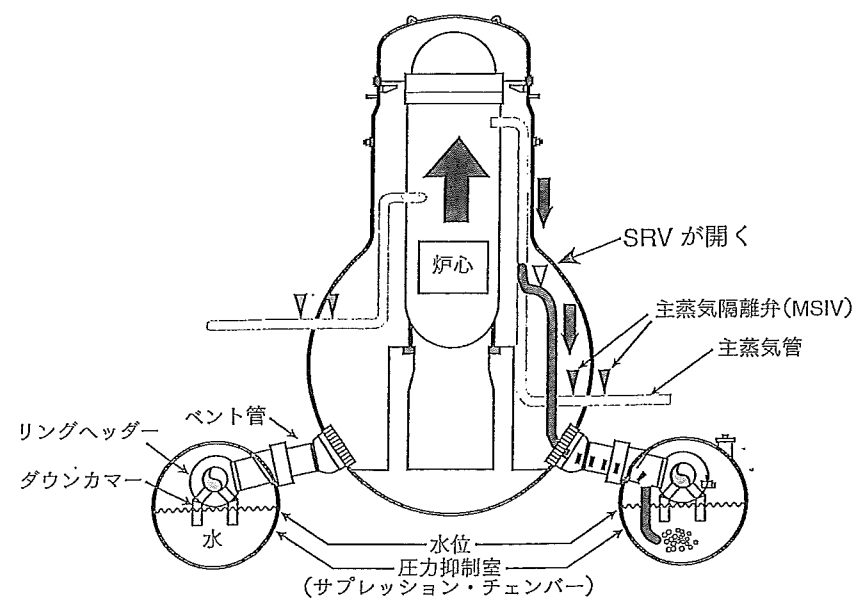


図5—逃し安全弁(SRV)の開閉動作に伴う原子炉水位低下

が起きていれば、原子炉水位がほとんど瞬間的に低下したはずだ。では、ふたたび、なぜ格納容器の圧力は0.74 MPaまで上昇したのか？

まさにこの問題を、他の関連データとの整合性をはかりながらできるかぎり合理的に説明することが、1号機の正しい事故原因を探り当てることにつながるのではないかと、私は考えている。

図4は地震発生後に原子炉圧力がどのように変化したかを、やはり東電が公表したデータをもとに示したものだ。この図には、すでに図3で示した格納容器(ドライウェル)の圧力も併せてプロットした(ただし、縦軸の圧力の単位が図3のそれより10倍大きいので、見かけ上は大きく異なっている)。

この図にも、合理的説明が求められる事故推移の特徴がある。原子炉圧力の短時間の急降下である(図中の④から⑤)。ただし、データは④と⑤のたった2点しかない。したがって、その間、実際にどのように原子炉圧力が降下したのかはまったく不明である。原子炉圧力のこの急降下に対する考えられる理由の一つは、この時間帯にICが長時間作動していたことだが、これについては次項で詳しく触れる。

福島第一原発1号機に対する事故分析

東電によるシミュレーション解析

前項で述べたように、1号機の事故推移の特徴の一つは、原子炉水位が短時間のうちに大きく降下していることだが、では、その降下分に相当する冷却材(水)はどこへどのようにして消えたのか。まず考えられるのは、前述の逃し安全弁(SRV)を経由し、専用の案内管に導かれ、格納容器の圧力抑制室の水の中へと消えたことだ(図5)。

つまり、原子炉緊急停止後、崩壊熱によって冷却材の蒸発が継続し、それにより原子炉圧力が上昇する。やがて原子炉圧力はSRVの開・設定圧力である7.5 MPaに達し、SRVが開き、原子炉内の大量の蒸気が配管に導かれて圧力抑制室内の水の中に流入し、ただちに蒸気は水になり、それにより体積凝縮が起きて原子炉圧力が低下し、SRVが閉じる。しかしその後すぐにまた崩壊熱により原子炉圧力が上がり、SRVが開き、大量の蒸気が圧力抑制室の水の中に流入し……ということを繰り返しながら、どんどん原子炉内の冷却材が失われていくというストーリーである。

しかしすでに詳しく書いたように、1号機にお

いては、地震発生以降、実際にSRVがそのような開閉動作を繰り返したことを示す客観的データはまったく存在しない。たとえば、地震発生後の原子炉圧力の変化を記録していたチャート式の記録計は、なぜか午後3時30分あたりに突然停止するが、そのチャートにSRVの開閉動作を示唆する圧力変動パターンは記録されていないし、その後も、東電によれば津波襲来による「信号自失」により、原子炉圧力の連続的な変化の記録そのものが存在しない。また東電が公表している「各種操作実績取り纏め」にも、SRVを手動で開閉操作したという記述はない。

しかし東電は、データがないだけで、津波襲来以降、原子炉圧力はSRVの自動開閉動作により適切に制御されていた、としている。そして津波襲来までは、運転員のIC手動操作により原子炉圧力は適切に制御されていた、としている(繰り返になるが、「各種操作実績取り纏め」にこのようなICの手動操作は記されていない。表参照)。この二つが、東電の“あの”シミュレーション解析における基本的前提である。

東電は5月15日日曜日の夜に記者会見を開き、MAAPという事故解析コードによる1号機事故のシミュレーション解析結果を公表した¹¹。その解析の詳細は、本稿の冒頭で述べたIAEAへの日本政府の報告書にも添付されている¹²。

15日の記者会見は“二つの意味で”日本中を驚かせた。一つは、東電がそのシミュレーション解析結果をもとに、その日はじめて、1号機でメルトダウンが起きたことを公式に認めたからだ。よく、メルトダウンという言葉は専門用語ではないと言われるが、それはともかく、記者会見で東電は、燃料が損傷して原子炉の下方に溶け落ちた状態、という意味でこの言葉を使っていた。それは巷間のメルトダウンのイメージとそう変わらない。にもかかわらず、日本中が東電のシミュレーション解析結果に注目したもう一つ別の理由は、東電の言うメルトダウンが、それまで誰も想像していなかったほどの“超特急”メルトダウンだったからだ。IAEAへの政府報告書に添付された文書に

は、図6(a)～(d)とともに、以下のようなシミュレーション解析結果が報告されている。

炉心露出開始時間 ……地震発生後約3時間
炉心損傷開始時間 ……地震発生後約4時間
原子炉圧力容器破損時間 ……地震発生後約15時間

津波襲来後、SRVが頻繁に開閉を繰り返す中、原子炉内の蒸気はどんどん圧力抑制室の水中へ消え、そのため原子炉水位は地震発生からわずか3時間でTAFを横切り、15時間後にはメルトダウンで原子炉圧力容器に穴が空いた、というのが東電のシミュレーション結果の要点だ。

このシミュレーション解析が真実に近いのかは、ひとえに解析結果と実機計測値との間にどれだけ整合性があるかにかかっているだろう。そこでまず気になるのが、すでに詳しく述べた格納容器の圧力の“異常上昇”が、このシミュレーション解析においてどう“実現”されているかだ。それに対する答えは図6(c)にある。この図において、格納容器圧力は、「RPV破損(約15時間後)」と記されたところで、突然ほぼ垂直に上昇している。これがあの異常上昇ということになる。なぜそのように上昇したのか。それは、原子炉圧力容器(RPV)が地震発生後約15時間で(メルトダウンして)破損したため、その破損箇所から、約2800℃のガス(図6(d)参照)が格納容器に一気に噴出し、そのため格納容器圧力が急上昇し、同時に原子炉圧力が急激に低下(図6(b)参照)した、というわけだ。

しかし図6(c)に関して、シミュレーション結果と実機計測値を比較してみると、圧力の上昇の仕方にも、最高圧力値にも、そして最高圧力値までの到達時間にも大きな乖離があり、格納容器圧力のあの異常上昇をうまく表現できているとはとても言いがたい。とくに最高圧力値までの到達時間が実機計測値のそれと比較して6時間も遅い。この時間的ずれを克服するには、さらなる超特急メルトダウンを実現しなければならない¹³。

問題はこれにとどまらない。原子炉水位に関するシミュレーション結果と実機計測値との乖離は致命的である(図6(a)参照)。まったく整合性がない。これに関して東電はIAEAへの政府報告書の中で

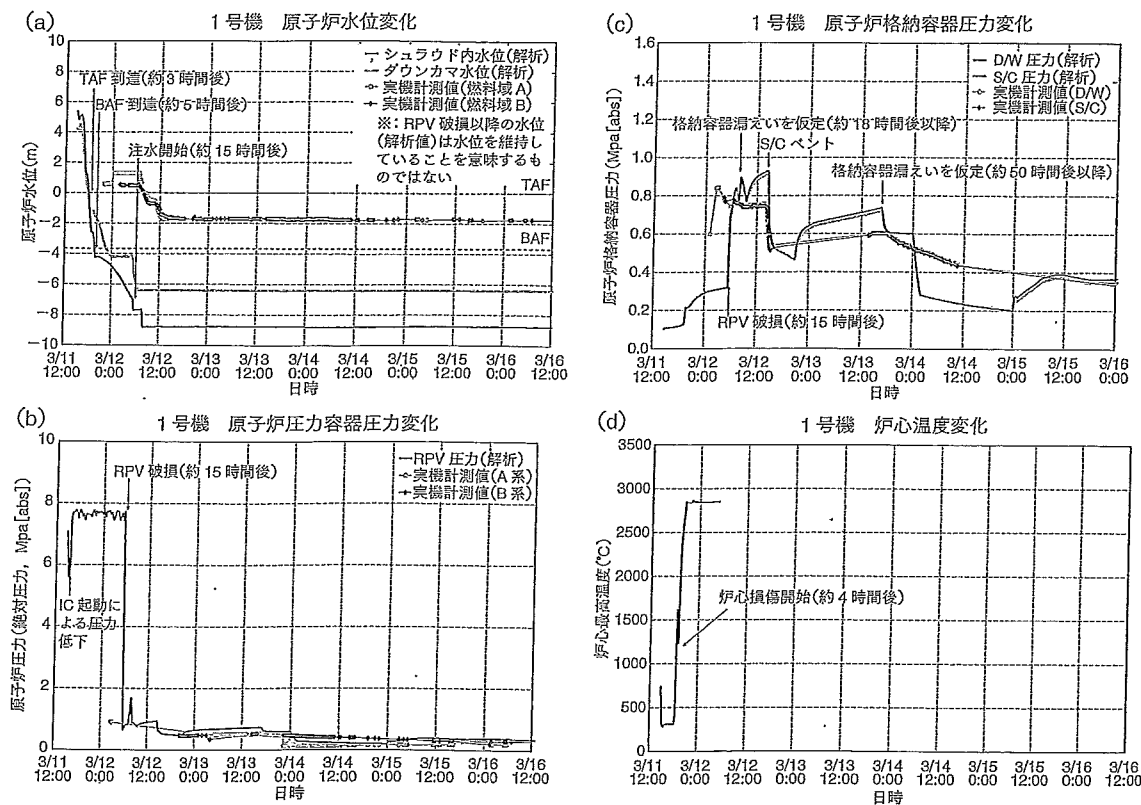


図6—東電シミュレーション解析結果

つぎのように書いている。

「地震発生以降、実際に計測された原子炉水位は燃料域内において推移している。解析結果とは大幅に異なるが、解析結果では原子炉圧力容器が破損するとの結果になっており、原子炉水位は原子炉圧力容器内において維持ができない。これに関しては格納容器内が高温になることで水位計内の水が蒸発し、正確な水位を示していない可能性がある。1号機についてはその後水位計を校正したところ、水位は燃料域未満であるとの知見が得られている」。

まったく説得力のない説明だ。もし本当に、格納容器内の温度が高温になって水位計の水が蒸発したというなら、3月12日の午前7時ぐらいから正午ぐらいにかけて、なぜ燃料域Aと燃料域Bの二つの水位計の値が、同時に、大きく低下しているのか。降下幅は約3mにも及ぶ。水がない水位計がなぜこんな変化を示すのか。

さらに、「その後水位計を校正した」とあるが、

水位計の校正のニュースがテレビや新聞で報じられたのは5月に入ってからのことである。その頃までには水位計が正確に機能なくなっているのも少しも不思議ではないが、いま問題にすべきことは、地震発生から半日または1日ぐらいの、きわめて短い時間範囲における水位計の信頼性についてである。シミュレーション結果をア prioriに「事実」としてしまい、それに合致しない計測値は信頼できないものとして切り捨てる。悪しきシミュレーションの典型である。

以上のように、東電が行ったシミュレーション解析結果は実機計測値との間にまったく整合性がなく、解析の前提条件が「事実」と根本的に相違しているのではないかと印象を与える。

もともと東電のシミュレーション解析は、シミュレーションの開始時間を地震発生時に置いてはいるものの、本質的には「津波以降」をシミュレーションしたにすぎない。つまり、継続時間の長い激しい地震動を受けたにもかかわらず、1号機

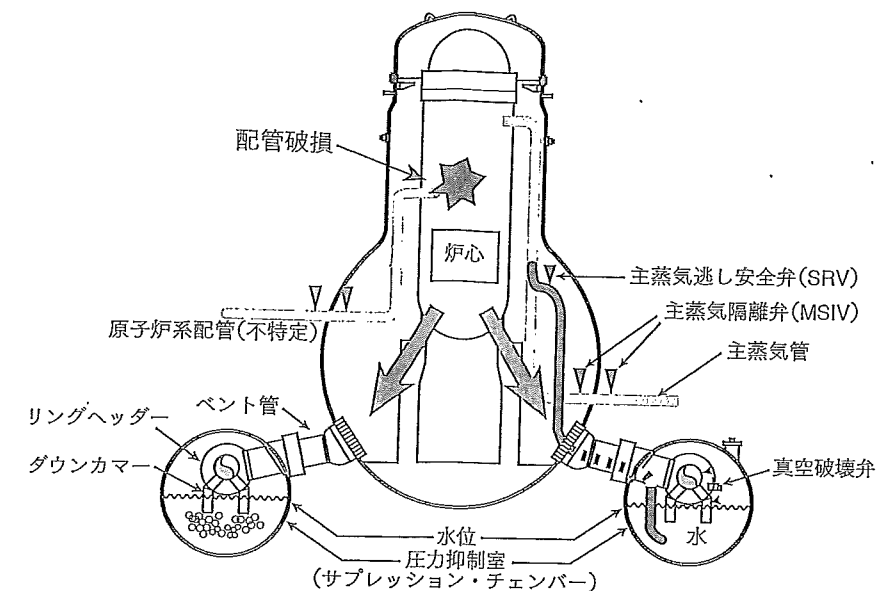


図7—配管破損によるLOCA時の蒸気の流れ

の設備や機器やシステムはあくまで健全で、その健全な原発が全交流電源喪失(SBO)という最悪の条件に突然放り込まれたらどうなるかという事故シミュレーションをただけである。このシミュレーションには、地震動による原子炉系配管の損傷という仮定も入っていないし、格納容器の圧力抑制機構が地震動によって損壊したり、機能喪失したり、といった仮定も入っていない。

地震時に原子炉系配管が破損しLOCAが起きなかったか：1号機耐震脆弱性の検討

東電のシミュレーション解析では、図5のような冷却材(水蒸気)の流れを前提にしている。しかしこれだけが、原子炉水位が低下する唯一のプロセスというわけではない。多くの原子炉系配管のうちのいずれかが、継続時間の長い激しい地震動を受けて破損し、そこから高温高压の冷却材が水または蒸気として噴出すれば、原子炉水位は低下する。すでに書いたように、これが配管破損(または破断)による冷却材喪失事故(LOCA)である。このようなLOCAが起きた場合、大量の蒸気がドライウエルから高速でベント管を通り抜けていったんリングヘッダーに入り、そこから多数のダウンカマーを通して圧力抑制室の水の中に入って、

水へと体積凝縮することに“なっている”(図7)。

1号機においては地震発生時にこのような配管破損によるLOCAが起きたのではないかと、私は考えている。ただし、私が想定している配管破損はギロチン破断のようなものではなく、ある程度の長さをもった貫通亀裂である。したがって、最初、そこからの冷却材の漏出量はさほどではなかったが、時間とともに亀裂がじょじょに拡大し、最終的にはそこからかなりの量の冷却材が格納容器(ドライウエル)に噴出するようになった可能性もある。実際、こうした配管の亀裂拡大現象は、ボイラーや化学プラントではよく見られることだ。では、仮にそのような小ないし中規模のLOCAが起きたとすると、図3(地震発生後の原子炉水位とドライウエルの圧力の変化)と、図4(地震発生後の原子炉圧力とドライウエル圧力の変化)とを、現象論的にどのように説明することができるだろうか。

まず、LOCAが起きているので、原子炉水位はじょじょに低下し、地震発生から約7時間後までに、水位がTAFの上450mmまで降下した(図3の①)。ただし、直線的に降下したのか、そうでなかったのかは、水位データが欠損しているので明らかではない。

一方、原子炉圧力だが、少なくとも地震発生か

ら約5時間過ぎまでは、6.9 MPa(図4⑥)と、ほぼ運転圧力に等しいレベルに維持されている。その理由を確定的に言うことはできないが、崩壊熱による圧力上昇分と LOCA による圧降下分がある程度バランスしていたからだろう。ただし、原子炉圧力が高くなるような形でバランスが崩れたときは、場合によって SRV が作動したかもしれないが、SRV が作動したとしても、基本的には LOCA によって圧力が“抜けている”から、それほど頻繁ではなかったにちがいない。また、スクラム直後、崩壊熱がもっとも大きいときは、IC が A, B, 2 系統が自動起動したことで、しばらくは IC によって圧力が適切に制御されたものと思われる。

データが2点しかないので、正確には地震発生から何時間後に原子炉圧力が低下しはじめたかを確定的には言えないが、地震発生から約5時間後に6.9 MPaあった原子炉圧力が、地震発生から約12時間後までには一気に0.8 MPa(図4⑥)まで低下しているのは、ちょうどこの時間帯にICが作動していたからだろう(前出の表のイベント番号15と17を参照)。ここで原子炉圧力(0.8 MPa)がドライウエル圧力とほぼ等しくなった。

そのため配管の損傷部からの冷却材漏出にブレーキがかかり、原子炉水位がほとんど変化しなくなる(図3⑥)。しかし、後で述べる原因により、ドライウエル圧力が0.74 MPa(図3)と、その設計圧力0.435 MPaを大きく超えたので、格納容器の最上部の上蓋とドライウエルのボルト結合部に隙間が生じ、そのため格納容器の圧力が下がりはじめた(図3④)。これによりバランスが崩れてふたたび配管破損部から冷却材が漏れはじめて原子炉水位が低下し(図3⑥)、ついには燃料が露出し、それにより水素が発生し、その水素が配管破損部からドライウエル上部へ向かい、ボルト結合部からオペレーションフロアへと漏出し、そこで水素爆発が起きた。

では、ドライウエルの圧力は“なぜ”設計圧力を超えて0.74 MPaまで“異常上昇”したのか？いくつか原因が考えられる。

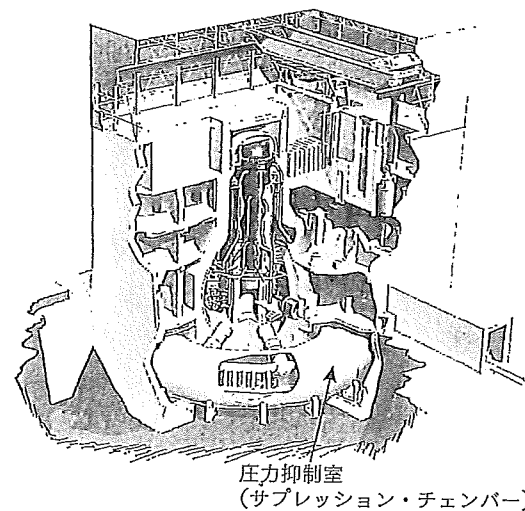


図8—圧力抑制室外観図

その一つは、格納容器の圧力抑制室の圧力抑制機構が、長く激しい地震の揺れと、圧力抑制室内の大量の水(1号機の場合は1750トン)の水が激しくスロッシング(sloshing/容器の中の水などがバシャバシャと揺れ動くこと)したために、部分的に損壊し、圧力抑制室に入った蒸気がうまく水の中まで導かれず、圧力抑制室の上部空間に噴出してドライウエルの圧力とバランスしてしまい、格納容器全体の圧力が異常上昇してしまったことが考えられる。圧力抑制機構の何がどのように損壊したかを確定的に言うことはできないが、ベント管とリングヘッダーとの結合部が損壊したのかもしれないし、ダウンカマーが多数破壊されたのかもしれない(図8)。圧力抑制室という大構造の大部分が工場溶接に比較して品質の悪い——それも1号機の場合は40年以上も前の——「現地溶接」であることも関係しているかもしれない。

これとは別の重要な指摘もある。元東芝の原子炉格納容器の設計技術者で、福島第一原発の3号機、5号機、東北電力・女川1号機、中部電力・浜岡1～3号機などの格納容器の設計に携わった渡辺敦雄氏(現・沼津高専特任教授)は、圧力抑制室に働く「水力学的動荷重」に注目する。

福島第一原発の1～5号機で使用されているような「Mark I 型」格納容器は、1960年代に米国

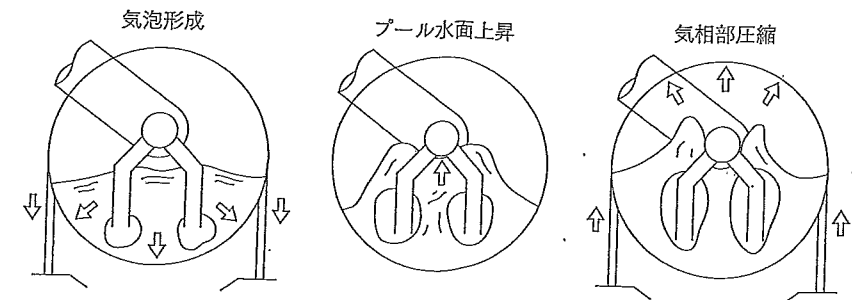


図9—LOCA発生時に圧力抑制室内で生じるプール・スウェル現象

GE社によって考案されたものだが、じつはオリジナルの設計では考慮されていない動的荷重がかかるという「未解決安全問題」(Unresolved Safety Issue/USI)を有していた。米原子力規制委員会(NRC)は、米国内のMark I型格納容器ユーザーグループの協力を得て、1980年7月にUSIに対する指針を提示した¹⁴。また、こうした米国の動きを受け、日本の原子力安全委員会も、遅まきながら1987年11月に「BWR・Mark I型格納容器圧力抑制系に加わる動荷重の評価指針」という原子力安全委員会決定を出した。

たとえば配管破断(破損)によるLOCAが起き、損傷部から噴出した蒸気がダウンカマーを通り最終的に圧力抑制室内の水(サブプレッション・プール)の中で凝縮する場合(図7参照)、下記のような「プール・スウェル現象」などの水力学的現象が起き、それによる動的な荷重がかかることが明らかになった。その動的な荷重にはたして圧力抑制室が耐えられるかどうか、これが未解決安全問題である。

LOCAが起これると、漏れ出した蒸気が猛烈な勢いでベント管に向かうが、このとき、格納容器に封入されていた窒素ガスが蒸気に圧縮され、ダウンカマーから圧力抑制室内の水(サブプレッション・プール)の中に押し出される。窒素ガスは水に溶けない。水の圧力はほぼ大気圧だから、圧縮されていた窒素ガスがダウンカマー出口で一気に膨張(スウェル)し、そのため水が急激に盛り上がる(図9)。これがプール・スウェル現象だ。

もし、福島第一原発1号機で、地震動によって配管破断によるLOCAが起きたとすると、このプール・スウェル現象が起きて、圧力抑制室内

の構造物が壊れ、そのため圧力抑制機構が失われた可能性がある。

渡辺氏は、その可能性のほか、プール・スウェル現象が起きて水面が激しく上下した際に、ダウンカマーの先端が水面の上に出てしまい、そのために大量の蒸気が水の中ではなく一瞬にして圧力抑制室の上部空間に吹き出してしまった場合や、そのプール・スウェル現象と同時に——あるいは別に——本震や余震による激しいスロッシング現象が起きて、やはりダウンカマーから圧力抑制室上部空間に蒸気が吹き出してしまった場合などを、論じている¹⁵。

たとえ配管破断によるLOCAが起きても、圧力抑制室の圧力抑制機構と関係する構造物が、長く激しい地震の揺れやプール・スウェル現象で損壊していなければ、そしてプール・スウェル現象や本震や余震時のスロッシング現象によりダウンカマーの先端が水面より上に飛び出してしまうということが起きなければ、蒸気はプール水により凝縮し、格納容器の圧力はほとんど上昇することにはなかったろう。しかし、格納容器の圧力が設計圧力を大きく超えるほど上昇したという事実は、圧力抑制機構がプール・スウェル現象や地震によるスロッシング現象により機能喪失を起こしたことを強く示唆しているように思える。とくに、福島第一原発1号機は運転開始が1971年という、製造技術、検査技術、品質管理体制などが十分でなかった時代の沸騰水型原発であることも考慮する必要があるだろう。

一方、福島第一原発2号機においては、圧力抑制室近傍で水素爆発らしきものが起きている。

この事実は——もし2号機ではLOCAが起きていないとすれば——Mark I 型格納容器の「圧力抑制室の耐震脆弱性」を強くほのめかす。なぜなら、LOCA が起きていなければ、燃料棒の損傷により原子炉内で生じた水素ガスはまず SRV を経由して圧力抑制室の水の中に向かい(図5参照)、つぎに、水に溶けない軽い気体の水素ガスはその後ドライウエル上部に向かったはずだが、圧力抑制室が激しい地震動により破損していたために、水素ガスがその破損部から圧力抑制室の外部に漏れ出し、そこで爆発し、圧力抑制室をさらに破壊したと合理的に推定できるからだ。破損部としては、円筒胴の現地溶接部、ドライウエルとベント管の接合部のベローズあたりが推定される。

地震国日本で Mark I 型格納容器は、福島第一原発を除き、なお10基の原発で使用されている。1987年の原子力安全委員会決定に対して福島第一原発が、そしてこれらの原発が、具体的にどのような対応してきたかを、政府が、そして事故調査委員会が、早急に精査する必要があることを、最後に提言しておく。

文献および注

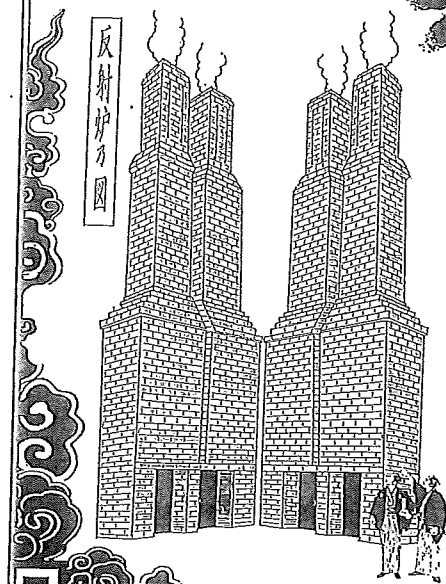
- 1—『原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書／東京電力福島原子力発電所の事故について』の「概要」の3, より
- 2—1981年に原子力安全委員会が決定した『発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針』を2006年に大幅改訂したもの
- 3—『原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書／東京電力福島原子力発電所の事故について』IV-103頁
- 4—石橋克彦編『原発を終わらせる』(岩波新書／2011年7月刊)122頁
- 5—『週刊朝日』2011年7月22日号, 138-139頁
- 6—『東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所プラントデータについて』(東京電力。2011年5月16日公表)。チャート、警報発生記録等データ、運転日誌類、プロセス計算機データ、過渡現象記録装置データ、各種操作実績取り纏め、プラント関連パラメータ、からなる
- 7—『東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と評価について』(東京電力。2011年5月23日公表)
- 8—『世界』(岩波書店)2011年5月号, ならびに『科学』(同)5月号において、筆者による暫定的な検討がなされている
- 9—『東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と評価について』(東京電力。2011年5月23日公表)の1F-1-3頁

- 10—『世界』(岩波書店)2011年5月号, ならびに『科学』(同)5月号において推測
- 11—『東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と評価について』(東京電力。2011年5月23日公表)の別紙「福島第一原子力発電所1〜3号機の炉心状態について」
- 12—『原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書／東京電力福島原子力発電所の事故について』の添付IV-1「福島第一原子力発電所1〜3号機の炉心状態について」
- 13—東電のシミュレーション解析結果に対する“クロスチェック”として、原子力安全基盤機構(JNES)がMELCORという別の事故解析コードを使ってシミュレーション解析を行い、その結果を同じIAEAへの報告書に記載している(添付IV-2)。このシミュレーション解析ではメルトダウンまでの時間がさらに早くなっているが、他の点での実機計測値との乖離が目立つ
- 14—“Safety Evaluation Report / Mark I Containment Long-Term Program,” July 1980
- 15—特定非営利活動法人・原子力資料情報室による Ustream 2011年6月10日放映(<http://www.ustream.tv/recorded/15284821>)

連載歴史小説

反射炉建設と大砲鑄造への挑戦

黒鉄の志士たち



反射炉の図

作植松三十里
画勢克史

流れ出す鉄

前回までのあらすじ／本島藤太夫は、大砲ができれば、落ちこぼれの次男に試射をさせようと考え、反射炉の火入れに誘ったが、結局、気ままな息子は見にも来ない。そして、いよいよ鉄が投入された。

鑄 口の小窓に近づくと、顔が火傷しそうに熱い。それでも本島藤太夫は中が気になって、のぞかずにはられない。

小窓の奥では、山盛りにされた鉄塊が、白い炎に反射して輝きつづける。その尖った角々が、かすかに丸みを帯びているように見えた。

「溶けているんじゃないか。あの辺りだ」
本島が指さすと、杉谷雍助がうなずいた。
「少し溶け始めているように見えますね」

杉谷が鑄口前の場所を譲ると、大銃製造方の男たちが熱さをものともせず、先を争うようにして、小窓をのぞき込む。そして目を輝かせて、口々に言った。

「溶けてる。確かに、溶けてますよッ」
最後に橋本新左衛門が小窓を見て断言した。
「溶け始めていますね。間違いありません」

鉄の専門家が太鼓判を押したことで、大銃製造方から、いっせいに歓声がわく。橋本は、もういちど小窓をのぞいて言った。

「ちょうど刀を鍛えるくらいの溶け具合には、なっていると思います」

本島は胸の高鳴りを抑えて、男たちに言った。
「うまくいきそうだ。もうしばらくしたら、流れ出すぞ。湯口の方の準備はいいナッ」

谷口弥右衛門が元氣よく応える。
「大丈夫です。いよいよ流れそうになったら、樋を温めますので」

湯口から鑄型までは、鉄製の樋が渡されている。こしき炉と同じように、樋の内側には、断熱のための粘土が張られている。鉄が流れ出す直前まで、そこに炭火を置いて、樋を熱しておかなければならない。

「さあ、いくぞッ」
本島が気合いを入れると、男たちの瞳が、目の前の炎に負けないほどに燃え上がる。焚き口からは、木炭が次々と投げ入れられる。