

石橋克彦

1944年神奈川県に生まれる
1968年東京大学理学部地球物理学科卒業
1973年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了
東京大学理学部助手、建設省建築研究所国際地震工学
部室長、神戸大学都市安全研究センター教授を経て、
現在一神戸大学名誉教授
専攻一地震テクトニクス
著書一『大地動乱の時代一地震学者は警告する』(岩波新書)
『阪神・淡路大震災の教訓』(岩波ブックレット)
『地震の事典』(共著、朝倉書店)
『南の海からきた丹沢一プレートテクトニクスの
不思議』(共著、有隣堂) など

原稿を終わらせる

岩波新書(新赤版)1315

2011年7月20日 第1刷発行

編者 いしはしかつひこ
石橋克彦

発行者 山口昭男

発行所 株式会社 岩波書店
〒101-8002 東京都千代田区一ツ橋 2-5-5
案内 03-5210-4000 販売部 03-5210-4111
<http://www.iwanami.co.jp/>
新書編集部 03-5210-4054
<http://www.iwanamishinsho.com/>

印刷・理想社 カバー・半七印刷 製本・中永製本

© Katsuhiko Ishibashi 2011
ISBN 978-4-00-431315-1 Printed in Japan

執筆者紹介(執筆順)

石橋克彦(いしはしかつひこ) 奥付参照

田中三彦(たなかみつひこ) 1943年生。バブコック日立で原子炉
圧力容器の設計に携わる。1977年退社。以後、科学に関わる翻
訳・執筆に従事。『原発はなぜ危険か』(岩波新書)など。

後藤政志(ごとうまさし) 1949年生。博士(工学)。芝浦工業大学
非常勤講師。東芝で柏崎刈羽原発3、6号機、浜岡原発3、4号機、
女川原発3号機の原子炉格納容器の設計に携わり、2009年退社。

鎌田 遼(かまたじゅん) 1972年生。大学非常勤講師。都市計
画・アメリカ先住民研究。『ネイティブ・アメリカン』(岩波新書)、
『「迎撃」の抵抗』(御茶の水書房)など。

上澤千尋(かみさわちひろ) 1966年生。原子力資料情報室。
『MOX 総合評価』(共著、セツ森書館)、『老朽化する原発』(共著、原子
力資料情報室)、『検証 東電原発トラブル隠し』(共著、岩波書店)など。

井野博満(いのひろみつ) 1938年生。東京大学名誉教授。金属材
科学。『徹底検証 21世紀の全技術』(佐伯康治との責任編集、藤原書店)、
『「循環型社会」を問う』(藤田祐幸との責任編集、藤原書店)など。

今中哲二(いみなかてつじ) 1950年生。京都大学原子炉実験所助
教。原子力工学。『チェルノブイリ事故による放射能災害』(編、技
術と人間)、『原発の安全上欠陥』(共著、第三書館)など。

吉岡 斉(よしおかひとし) 1953年生。九州大学副学長・同大学
大学院比較社会文化研究院教授。科学技術史。『原子力の社会史』
(朝日新聞社)、『通史 日本の科学技術』(共編著、学陽書房)など。

1 原発で何が起きたのか

田中三彦

想定外の大津波の襲来さえなければ福島第一原発事故は起きなかった——これが今日、社会に形成されつつある基本認識であるかもしれない。いや、すでに堅固な認識になっているのかもしれない。しかし本当にそうなのか。この先、地震国日本と原発という大きな問題を議論していくかねばならないときに、われわれが注意を向けるべきことは大津波だけなのか。《想定外》ということですべて片が付くのか。たぶん、そうではない。

一号機の、異常な、原子炉水位降下

三月十一日午後二時四六分の地震発生の翌日、一二日の午後三時三六分、福島第一原発一号機の原子炉建屋の最上部にあるオペレーションフロア(サービスフロアとも呼ばれる)が、水素爆

発で吹き飛んだ。その翌々日の一四日の昼前、今度は三号機でも同様の、しかしより激しい水素爆発が起きた。このときは、官房長官のいわば安全宣言付きの爆発予告までであった。さらに翌日の一五日の早朝には四号機で火災が起き、またそれとほぼ同時刻に二号機の圧力抑制室付近で水素爆発らしきものが起きた。

これら一連の爆発や火災の中でもっとも気になったのは、地震発生から二五時間足らず、早々に水素爆発を起こした一号機だった。全交流電源を喪失した原発が水素爆発を起こすまでのプロセスはある程度思い描けたが、それにしても速すぎた。爆発までのあの速さはいったい何を物語るのか？ 少なくとも一号機には何か特別なことが起きなかったか？

私の記憶違いでなければ、ある程度まとまった形で各号機の圧力や水位などが示されるようになったのは、原子力災害対策本部が三月二〇日過ぎあたりから首相官邸ウェブサイトにアップしはじめた「平成三年（二〇一一年）福島第一・第二原子力発電所事故について」という事故日報のような文書に附帯する「別添一」においてではなかったかと思う。その別添一に列記されていた一号機の「運転パラメータ」（原子炉水位、原子炉圧力、格納容器圧力など）を見て私は驚愕した。たとえば原子炉水位。地震が起きて一二時間しか経っていない一二日深夜二時四五分に、原子炉水位がなんと核燃料棒最上部まで「わずか」一メートル三〇センチのところまで

下がっていた。

原発技術者たちは核燃料最上部を「有効燃料頂部」と呼ぶ。あるいは、それに対する英語の略記「TAF」を使う。通常、原子炉水位はTAFより約五メートルも上にあるから、一号機の場合、地震が起きて一二時間のうちに、高さにして約三メートル七〇センチぶんの水（冷却材）が原子炉外へ消えたことになる。原子炉内部にはけっこういろいろな物が入っているから、水位の変化だけで消えた水の量を正確に割り出すことは難しい。しかし原子炉の直径は約四・八メートルもある。おそらく二三〇トンぐらいの水が、どこかへ消えたはずだ。

そればかりではない。その後も原子炉水位は下がりつづけ、一二日の朝の八時にはついにTAFから四〇センチ下まで降下し、水素爆発が起きる約二時間前の一二日午後一時半過ぎには、なんとTAFから一メートル七〇センチも下にあった。燃料棒の長さはおよそ四メートルだから、そのとき燃料棒の全長の四〇％強が水面から上に出ていたことになる。なぜ一号機はこれほど速く原子炉水位が降下したのか。

別添一には二号機、三号機の運転パラメータも記されていた。二号機、三号機の水位の変化もけつして「正常」ではなかった。とくに三号機のそれはかなり異常だった。しかし二号機も三号機も、少なくとも一二日に原子炉水位がTAFを切ることはなかった。

1 原発で何が起きたのか

運転中の冷却材圧力は約七・〇メガパスカル(約七〇気圧)、原子炉压力容器の中で生み出される蒸気の温度は二八五度である。原子炉压力容器の大きさは原発の出力などによって異なる。電気出力四六万キロワットの一号機の原子炉压力容器の内径は約四・八メートル、高さは約二〇メートル、七八・四万キロワットの二、三号機のそれは内径が約五・六メートル、高さが約二二メートルだ。なお、似た言葉に「原子炉」がある。原子炉は厳密には容れ物ではなく、装置を意味している。しかし実際には、原子炉压力容器という容れ物の意味で使われることも少なくない。

原発の原理そのものは比較的単純だ。沸騰水型の場合、まず、原子炉压力容器の下方に収められている核燃料が連鎖的に核分裂反応を起こし、その際発生される莫大な熱エネルギーによって原子炉压力容器内の水(冷却材)の一部が沸騰して蒸気になる。その蒸気がタービンを回し、タービンと連結している発電機が回転し、電気が生み出される。一方、仕事をした蒸気は復水器の中で海水によって冷却されて水に姿を変え、給水ポンプの力を借りてふたたび原子炉压力容器へ戻る。

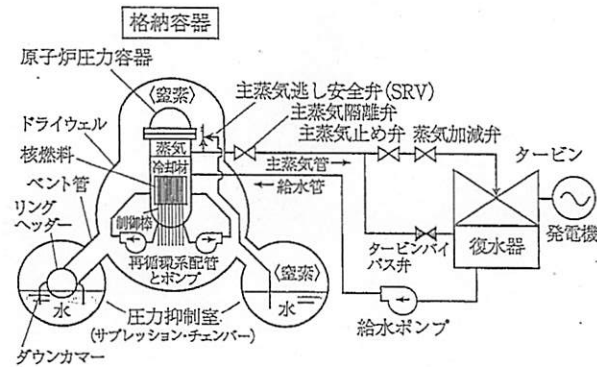


図1 東電福島第一原子力発電所1号機 水・蒸気概略系統図

原発の基本的な仕組み

図1は福島第一原発一―五号機の、運転中の水と蒸気の流れの概略を示している(六号機もほぼ同じだが、格納容器の形が大きく異なる)。この種の概略系統図は新聞やテレビでも再三登場していたが、見るときに一つ注意がある。こうした図は実際の配管の本数をあらわしていないし、配管や弁や機器の正しい位置関係をあらわしていないわけでもない。たとえば、この図には主蒸気管が一本しか描かれていないが、実際には四本ある。再循環系配管にいたってはタコ足のようによくの配管で構成されている。また原子炉压力容器の上部から出た蒸気がそのまま水平にタービンに向かうように思えるが、実際には、原子炉压力容器を出た水蒸気は原子炉压力容器の壁に沿うように、まず真下に降りる。

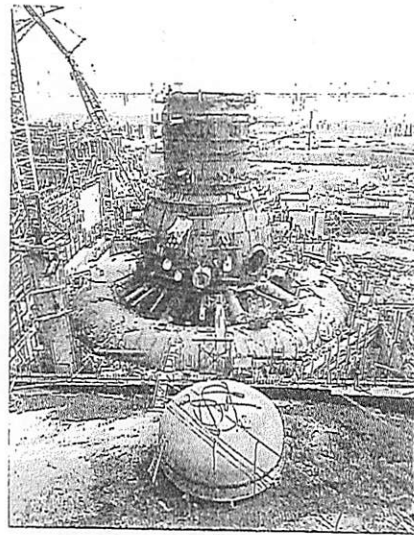
Mark I型格納容器とその圧力抑制機構

後の重要な議論のために、図1に描かれているもう一つの重要な容器、「格納容器」について少し詳しく説明しておきたい。格納容器は大きくは二つの部分からなる。一つは、巨大なフラスコのような形の「ドライウエル」、もう一つは、そのドライウエルの底部をぐるりと取り囲んでいる巨大なドーナツのような形の「圧力抑制室」である。圧力抑制室には多数の呼称があり、「ウェットウエル」、「サプレッション・チェンバー」と呼ばれたり、その形から「トール」(円環体と呼ばれたりもする。しかし厳密には円環状構造物ではない。一六個の円筒を互いに少しづつ角度を付けて現地で溶接しながら組み立てた構造物で、上から眺めると全体として正一六角形になっている。ドライウエルと圧力抑制室とは、「ベローズ」という蛇腹状の柔い構造を介して、八本の太い「ベント管」で結合されている。ベローズを使うのは、ドライウエルと圧力抑制室の温度差に伴う相対的な変位(動き)を吸収するためだ。

格納容器は、原子炉圧力容器を出入りする配管(以後これを「原子炉系配管」と呼ぶ)が破断したり破損したりして冷却材が漏出してしまふような事故——冷却材喪失事故(それに対する英語は「Loss of Coolant Accident」の頭文字をとって「LOCA」とも記される)——が起きたときに、放射性物質が外環境にまき散らされないようするために存在する。また、そのような事故時に内部で水素

爆発などが起きないように、原発の運転中、格納容器には不燃ガスである窒素が封入されている。なお、原発が正常に運転されているとき、格納容器の圧力は、われわれの生活空間とほぼ同じ一気圧(厳密に言えば、一気圧よりほんのわずかに少ない圧力)である。

格納容器は、大小さまざまな原子炉系配管のうち最大径の配管が完全破断した場合——すな



福島第一原発1～5号機で使われているのと同じMark I型格納容器(米ブラウンズフェリー原子力発電所建設中)、手前のお椀状のものが格納容器の上蓋
出所: Tennessee Valley Authority ホームページ(<http://www.tva.com/>)

わち、冷却材が最大流量で放出されるような冷却材喪失事故——を想定し、そのときの最大過渡圧力と過渡温度に耐えられるように構造設計される。福島第一原発の一―五号機で使われている格納容器は、Mark I型と呼ばれる古い格納容器で、設計圧力は〇・四メガパスカル(約四気圧)前後、

設計温度は一四〇度前後だ。

仮に最大径の配管が完全破断した場合、ドライウエルには一気に大量の蒸気が噴出するだろう。その蒸気は猛烈な勢いでベント管を通り抜け最終的に圧力抑制室内の大量の冷水——サブレーション・プール——の中に導かれて水になり、体積凝縮が起こる。こうして、ドライウエルの圧力は四気圧以下に抑制される。格納容器の設計圧力が〇・四メガパスカルとはそういう意味だ。

しかし、後述するように、福島第一原発一号機においてはドライウエルの圧力が短時間のうちに設計圧力を大きく超え、一気に〇・七四メガパスカル(約七・四気圧)まで上昇した。それはいったいなぜか？ 最大径の原子炉系配管が完全破断しても四気圧を超えないはずなのに、七・四気圧まで上昇したとはどういうことか？ 圧力抑制機構が少しも期待どおりには機能しなかったように私には見える(これについては、この先の一号機事故経過分析の中で再度取り上げる)。確かにこれだけ圧力が高くなると巨大な格納容器全体が一瞬で大破壊して飛散する可能性が出てくるから、国は「ベント」(ガス放出)を強行した。新聞やテレビがこのベントに伴う放射性物質の大気放出に注意を向けたのは当然のことだが、なぜ設計圧力を大幅に超える圧力が格納容器に生じたかに目を向けるメディアは皆無だった。

ステーションブラックアウト、またはSBO

東電の公表資料にしたがうなら、三月二一日午後二時四六分、福島第一原発は東北地方太平洋沖地震による激しい揺れに襲われた。それにより、運転中だった一―三号機はただちに自動的に緊急停止した。つまり、燃料棒を何本も束ねた燃料集合体の間に制御棒が自動的に挿入され、各号機の核分裂反応が停止した。

一方、同じ午後二時四六分に「外部電源」が喪失した。緊急時に使われるいくつかのポンプ類は発電所の外部から供給される電力に頼っている。福島第一原発の場合、一―四号機は東電・新福島変電所からの「大熊線」経由で供給される電力に、五、六号機は「夜ノ森線」経由で供給される電力に、それぞれ頼っているが、地震発生と同時に大熊線からの所内受電設備が損傷したり、夜ノ森線からの受電鉄塔が倒壊したりするなどして、結局、福島第一原発全体として外部電源喪失に陥った。しかし、外部電源喪失に陥るとすぐ——正確には午後二時四七分に——一―三号機にそれぞれ二台ずつ設置されている非常用ディーゼル発電機が自動的に起動した(地震時に定期検査中だった四―六号機の非常用発電機も自動起動しているが、詳しい説明は省略する)。

1 原発で何が起きたのか

しかしその約五〇分後、あの「想定外」の出来事が起きた。福島第一原発に大津波が襲来し、東電の報告書によれば、非常用ディーゼル発電設備または関連機器が「被水または水没」により使用不可になった。かくして二一日午後三時三七分に一号機が、同三八分には三号機が、そして同四一分には二号機が、すべての交流電源の使用不可を意味する「全交流電源喪失」(ステーションブラックアウト、SBO)という危機的状態に陥ったとされている。

冷却材喪失事故は起きなかったか

あくまで福島第一原発事故はこのSBOからはじまった、とするなら、それは「すべては大津波による」という表明である。しかし、SBOより前に何か重大なことが起きてはいなかったかという考え方も、当然ある。いや、あるというより、なければならぬ。

なるほど、東電が五月一六日に公表した一連のデータ(後述)からは、地震発生直後に原発は正常に緊急停止し、外部電源喪失直後には非常用ディーゼル発電機が正常に起動したように読み取れる。たぶん、それはそうなのだろう。しかしそうだとすると、それによって、あの長時間の激しい揺れ(II-4章参照)の中で原子炉系配管の一つ(またはいくつか)が破断したり破損したりした可能性が否定されるわけではない。二つはまったく別の話である。福島第一原発事故

の開始点をSBOとするか、それともそれより前とするかで、原発の安全性(あるいは危険性)に対する見方は根本的に違ってくる。

すでに書いたように、原子力災害対策本部は三月二〇日過ぎあたりから福島第一原発の「運転パラメータ」を首相官邸ウェブサイトにアップするようになった。私は、そのパラメータ(原子炉水位、原子炉圧力、格納容器圧力などを「エクセル」に入力し、いろいろなグラフをつくりながら、なぜ一号機の原子炉水位が急速に降下したかをあれこれ考えた。そして最終的に、一号機では原子炉系配管が長時間の激しい揺れに耐えられずに破損し、原発事故の中でもっとも恐れられてきた仮想事故——配管の破断や破損による冷却材喪失事故(LOCA)——が起きた可能性が高いと推断した。そしてそれをまず月刊誌『世界』五月号に、ついで『科学』五月号に書いた。それぞれの原稿締切時点で公表されていた運転パラメータや関連情報がいかに限定的だったから、どちらにおいても科学的に十分説得力をもった推論を展開できたわけではなかった。しかしその推論の重要な柱の一つである「格納容器最上部のフランジ部からの蒸気漏出」(後述)を、最近東電も想定しているし、いまでは誰もが疑わない一号機のメルトダウンや、それに伴う制御棒貫通孔溶接部分の破損なども推測しており、論述の方向そのものに大きな過誤はなかった。

改めて、LOCA仮説を検証する

私が提起している原子炉系配管破損による冷却材喪失仮説にとって不可欠とも言わなければならない基本的な情報は、地震が起きる直前から地震発生後五、六時間ぐらいたままでのさまざまな運転パラメータだが、とくにそれらはいまほとんど公表されていない(そういうデータが存在するのかしないのか、東電はその点を明確に説明していない)。

とは言え、関連する情報に関して大きな前進があった。福島第一原発事故発生から二カ月以上過ぎた五月一六日、東電は、地震発生直前から大津波襲来の前後あたりまでの「過渡現象データ」や「警報発生記録等データ」、中央制御室内のホワイトボードのメモ、運転日誌、各種の弁や機器類の操作実績などを公開した。またそれらと合わせて第一原発一・二・三号機の「運転パラメータ」の改訂版を公開した。

そこで、公開されたそれらの情報をもとに一号機で原子炉系配管の破断または破損によるLOCAが起きたかどうかを検証し直してみた。なお、私がここで言う「破断」は配管が完全に断ち切られた状態を、「破損」は配管に部分的に貫通亀裂や開口部が生じている状態を、それぞれ意味している。

(1)原因はLOCAか、SRV開閉か

さて、図2は地震発生後の「原子炉水位」と「格納容器の圧力」の変化である。そのうち原子炉水位に関してまず目に付くのは、地震発生後約六・七時間(正確には三月二一日午後九時三〇分)での水位の低さだ。TAFまで四五センチしかない。すでに述べたように、通常は約五メートルだから、六時間四四分で約四五メートルも水位が低下したことになる。なぜこれほど速く水位が低下したのか? 考えられることは、大きくはつぎの二つである。

一つは、長く激しい地震動による原子炉系配管破損によるLOCAが起きたということ。具体的には、主蒸気管、再循環系配管、そして後述する非常用復水系配管などの破損が頭に浮かぶが、特定することは不可能だ。まったく別の配管かもしれない。

またLOCAと言っても、はじめのうち、その程度はそれほど大きくはなかったかもしれない。しかし七・〇メガパスカル(約七〇気圧)という高圧の冷却材が破損部から流出(噴出)しつづけるうちに破損部がなめられて、次第に大きく口を開け、それに伴って流出量も増えるというのは、火力発電や化学プラントの圧力配管の破損でもよく見られること。つまり、はじめのうちには小規模LOCAで、時の経過とともに中規模LOCAへと移行したかもしれない。

ある値(筆者の推定では約六・九メガパスカル≒約六九気圧)まで下がると自動的に閉じるようになっている。

もし S R V が自動的に作動していたなら、つぎのように作動したにちがいない。まず緊急停止後しばらくして崩壊熱により原子炉圧力が高まり、やがて七・五メガパスカルに達する。すると四個の S R V が自動的に開き、かなりの量の蒸気がその先の太い配管に吸い込まれるようにして圧力抑制室の水中まで導かれる。その結果、体積凝縮によつて原子炉圧力が低下し、やがて六・九メガパスカルになり、四個の S R V が閉じる。しかし S R V が閉じるとふたたび崩壊熱により原子炉圧力が高まり、七・五メガパスカルまで上昇し、S R V が開き、大量の蒸気が圧力抑制室の水の中まで導かれ……と、同じパターンが何度か繰り返される。その結果、最

核分裂生成物による「崩壊熱」によって原子炉圧力容器の中では蒸気の発生が継続する。しかし緊急停止後すぐに主蒸気隔離弁が作動し、タービンへ向かう蒸気ラインを閉じてしまう。その結果、行き場を失った蒸気のために原子炉圧力が上昇していく。したがってそのまま放置すると、原子炉圧力容器そのものが大破壊を起こす危険性が出てくる。その危険性を回避するために、SRVがある。SRVは四本の主蒸気管それぞれについている。一号機の場合、公的資料を調べるとSRVは原子炉圧力が約七・五メガパスカル(約七五気圧)に達すると自動的に開き、ある値(筆者の推定では約六・九メガパスカル≒約六九気圧)まで下がると自動的に閉じるようになっている。

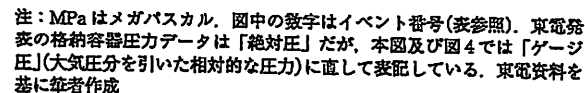


図2 原子炉水位と格納容器の圧力

いずれにしても、原子炉系配管の破損によって、図2中の大きい矢印のような原子炉水位の急速な降下があったかもしれないと考えることに、大きな妨げはないだろう。

二つ目は、地震発生直後から約六時間の間、「主蒸気逃し安全弁」(以下、S.R.V)が自動的に、そしてもしかすると頻繁に、開閉動作をしたかもしれないということ(付け加えれば、原子炉水位がかなり低い状態では「自動減圧」装置としてS.R.Vが作動した可能性もある)。

地震発生直後の緊急停止で核分裂反応が停止しても、よく知られているように

表 地震発生から海水注水までの重要イベント(福島第一原発1号機)

日時分	地震発生からの時間(HH)	イベント番号	重要イベント
3.11 14:46	0.00	1	地震発生
14:46	0.00	2	自動スクラム成功
14:46	0.00	3	格納容器の温度、圧力、上昇開始
14:47	0.02	4	主蒸気隔離弁開
14:47	0.02	5	非常用ディーゼル発電 A、B 起動
14:52	0.10	6	非常用復水器(IC) A 系、B 系、自動起動(※1)
15:03	0.28	7	IC 3A、3B 弁開
15:04	0.30	8	格納容器スプレイ B 系起動(※2)
15:11	0.42	9	格納容器スプレイ A 系起動(※2)
15:37	0.85	10	津波襲来、全交流電源喪失(SBO)
17:50	3.07	11	IC 作業撤収、放射線モニタ指示値、上昇のため
18:10	3.40	12	IC 2A、3A 弁開/蒸気発生確認
18:25	3.65	13	IC 3A 弁開
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
21:30	6.73	15	IC 3A 弁開
21:35	6.82	16	D/D-FP から水を供給中(※3)
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(※4)
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
9:15	18.48	19	現場にてベントライン MO 弁手動開(25%)
9:30	18.73	20	当該 AO 弁現場操作を試みるも高線量で断念
10:17	19.52	21	中操にて圧力抑制室側 AO 弁操作、失敗
14:00	23.23	22	AO 弁駆動用仮設空気圧縮機を設置
14:30	23.73	23	格納容器圧力低下を確認
15:36	24.83	24	原子炉建屋最上部付近水素爆発
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パに記録されているが、東電は5月24日の会見で、「B 系はいっさい作動しなかった」ことを強調している。(※2) 起動時刻は東電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) 東電の「各種操作実績取りまとめ」を照ると、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 用のタンクと思われる。(※4) 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月12日午前4時発表の東電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。

最終に大量の冷却水が原子炉から圧力抑制室に流出し、そのぶん原子炉水位は降下する。もし地震発生直後あたりから約六時間半の間に、このような S R V 自動開閉動作が何度か繰り返されたのであれば、六時間半後、原子炉水位が T A F の上四五センチまで降下していても不思議ではない。しかし、東電が五月一六日に公開した過渡現象記録をはじめとする一連のデータは、このような S R V 自動開閉動作が起きなかったことを強く示唆している。つきにそれについて述べる。

(2) 一号機原子炉圧力が上昇した形跡がない

ここに掲げた表は、一号機に何が起きたかを推測する上で重要と思われるイベントを、東電公開データから私が主観的に選んでまとめたものである。この表のイベント 6、7、12、13、15、17 は、一号機にだけ備えられている「非常用復水器」(Isolation Condenser 以下、I C) と呼ばれる、かなり原始的な「崩壊熱除去」装置の動作あるいは操作状況だ。そして図 3 はその I C による崩壊熱除去の仕組みを説明したものである。

I C には A、B 二系列ある。どちらの系にも合計四個の弁(1 A、4 A、1 B、4 B)があつて、そのうち 3 A と 3 B を除くすべての弁が「常時」開いている。そして今回のように原発が緊急

1 原発で何が起きたのか

ではなぜ止めたのか。圧力の高まりがほとんどなかったのでICを、いま、作動させる必要はないと判断し、停止させたと考えるのが自然だろう。ICを長時間作動させると復水器の水温が上がり、やがて冷却機能が失われる。ICは八時間以上作動しないことを熟知している運転員が、その後、起こるかもしれない非常事態に備えてとりあえずICを止めたと考える

も作動させられなくなる。

核反応の緊急停止直後で崩壊熱がもつとも大きく、それによる原子炉圧力の急激な上昇がもつとも心配される時間帯に、運転員がICを二系列とも手動で停止してしまう——この事実は何を意味するだろうか。なぜ止めたのかについて、東電は、ICの冷却効果が大きかったので運転員は「一時間につき五五度以上の温度変化を起こしてはならない」という運転規則にしたがって停止させた、などといういろいろな場で説明しているが、もつともらしい出鱈目の説明と言わざるを得ない。一時間に五五度(セ氏)という温度変化率は、一〇〇年以上前から今日まで世界中のボイラーで使われ、原発の通常運転時や通常の起動停止時にも使われている、機器の熱疲労防止のための経験則であるカ氏一〇〇度/時を、日本用にセ氏に変換したものでしかない。したがって、外部電源喪失という「緊急事態」に従うべき運転規則などではない。もし緊急時にもそんな悠長な規則を護らねばならないということになったら、ECCS(緊急炉心冷却装置)も作動させられなくなる。

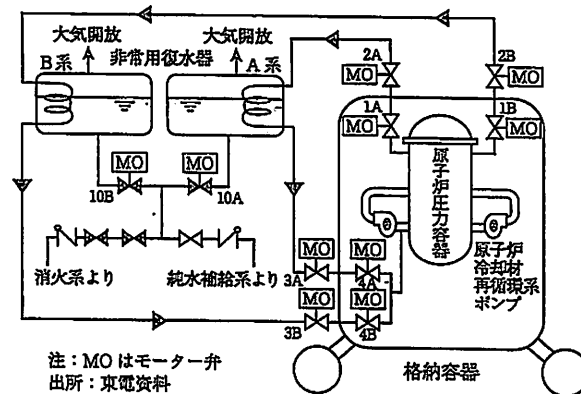


図3 非常用復水器系統図

停止し、崩壊熱で原子炉圧力が上がりはじめると、それを感じて弁3A、3Bが自動的に開き、水と蒸気の自然循環がはじまる。原子炉圧力容器から出た蒸気はICのタンクに向かい、そこで冷却されて水になって体積凝縮し、原子炉圧力が下がる。つぎにその水は、原子炉圧力容器の下部の再循環系配管を経由して原子炉圧力容器に戻る。このように、ICが起動すると崩壊熱で高まった原子炉圧力が減じられるだけでなく、温度の低い水が原子炉に戻ってくるので、冷却材の温度も下がる。

さて、表を見ると、地震発生から六分後にA、B二系列のICが自動起動していることがわかる（イベント6）。ところがその二分後、なぜか運転員は手動で3A、3Bの弁を閉じ（イベント7）、ICを二系列とも停止した。

のが妥当だ。

その後、運転員は午後六時一〇分にICを再起動するが(イベント12)、起動してわずか一五分後にふたたびICを停止し(イベント13)、午後九時三〇分まで、一度も起動させていない。結局、地震発生から午後二時四六分から午後九時三〇分までの六時間四分で、ICが動作した時間の合計はわずか二六分だ。それだけではない。B系列のICは地震直後に自動起動したものの、一一分後に停止され、その後はまったく動いていない。

こうしたことは、地震発生から午後九時三〇分まで、ICを動作させねばならないような原子炉圧力の大きな高まり(上昇)はほとんどなかったことを意味するだろう。そしてもしそうであるなら、七五気圧で自動的に作動するようになっていたSRVが繰り返し作動するようなことはなかったと考えられるだろう。

「いや、SRVを運転員が手動で操作してはいないか？」と問われる読者のために付言しておけば、東電の公表資料「各種操作実績取り纏め」には、一号機のSRVを手動で操作した実績は「なし」と明記されている。

では、なぜ大量の崩壊熱が発生していきながら圧力がそれほど上がらなかったのか、というこ

とになるが、いまやその答えは自明に思える。地震直後に原子炉系配管のうちのいずれか一本(または複数本)が破損し、そこから圧力が抜けていたということだろう。大口径の配管が破断したのであれば(つまり、大規模のLOCAであれば)原子炉圧力は急激に下がるが、中規模あるいは小規模のLOCAなら、崩壊熱による圧力上昇分があるので、ただちに目に見えるほど原子炉圧力が低下することはないだろう。ただし、すでに書いたように、はじめは小LOCAでも、徐々に破損部位が拡大して、圧力と水位の低下が顕著になってくる可能性はある。

(3) ICの再起動が原子炉圧力を急激に降下させた？

原子炉圧力と格納容器(ドライウエル)の圧力の変化を図4に示す。地震発生後五時間を少し過ぎた時点の原子炉圧力六・九メガパスカル(約六九気圧)と、地震発生後一二時間の原子炉圧力〇・八メガパスカル(約八気圧)の落差が目立つ。比較的短い時間のうちになぜこのような圧力降下が生じたのか。おそらくそれはICの操作と深く関係しているよう。

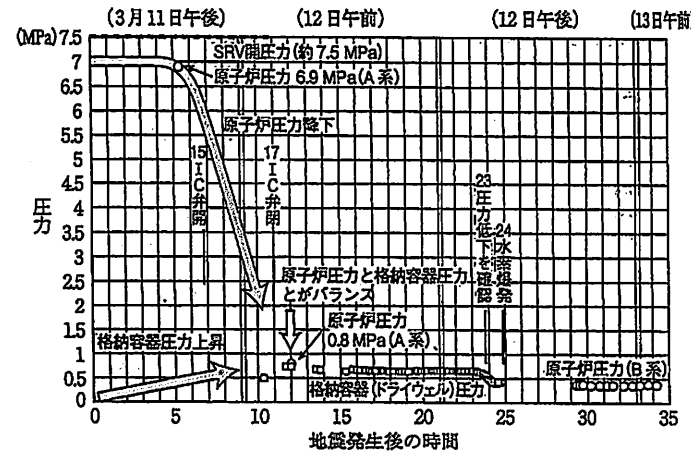
運転員は午後九時三〇分(地震発生後約六・七時間)、三時間以上停止していたICを再起動した(イベント15)。いっそうに下がらない圧力を気にしたのか。それとも圧力が少しずつ上向きになりはじめたのか。しかしこの頃にはすでに水位がTAFのすぐ近くまで下がっていたから

1 原発で何が起きたのか

(4) 格納容器上部フランジからのガスの漏出
その変化しなかった原子炉水位が、一六時間後頃からふたたび急速に低下しはじめる。原因は何だろうか。私が注目するのは格納容器の圧力だ。前述のように、格納容器圧力は一二時間後あたりで〇・七四メガパスカル(約七・四気圧)まで上昇してきている。設計圧力(約四気圧)を大きく超える異常な圧力だ。そしてそのために、格納容器上部にある巨大な上蓋(前掲の写真とその説明文を参照)と格納容器本体とを多数のボルトで結合しているフランジが高い圧力に耐えられずに微少だが変形し、そのためフランジ部に隙間が生じ、そこから格納容器内のガスが漏れはじめたと思われる。図4において、一二時間後あたりから一五時間後にかけて格納容器圧力が突然低下傾向に入っているのは、そのためだろう。

こうして、原子炉圧力と格納容器の圧力バランスが崩れる。そしてそのために、ふたたび原

(約七・四気圧)まで上昇していることだ。言い換えると、この頃に原子炉圧力と格納容器圧力がほぼ等しくなりはじめている。両者の圧力がバランスすると、原子炉系配管の破損部からの冷却材漏出はほとんど止まるにちがいない。実際、図2にあるように、このあたりから原子炉水位は約五時間、ほとんど変化していない。



注：図中の数字はイベント番号(表参照)。東電資料を基に筆者作成

図4 原子炉圧力と格納容器(ドライウェル)圧力

(図2)、原子炉圧力容器の上半分以上が高温高圧の蒸気で満たされていた。そのような状態でICを起動しはじめたから、圧力が効果的に除去されはじめた。ディーゼル駆動の消火用ポンプ(D/WP)の不具合によりICが停止したのは一二日未明の午前一時四八分(イベント17)。ICは連続四時間以上動作していたことになる。記録が欠如しているので原子炉圧力が正確にはいつ〇・八メガパスカル(約八気圧)まで降下したかは不明だが、図4から、それは地震発生後一二時間以前だったことがわかる。

さて、図4にはもう一つ注目すべきことがある。それは同じ頃(地震発生後約一二時間)格納容器の圧力が〇・七四メガパスカル

子炉系配管の破損部から冷却材が漏出しはじめたと推測される。

(5)なぜ格納容器の圧力が異常上昇したか

すでに何度も書いたように、福島第一原発一～五号機で使われているMark I型格納容器の設計圧力は約四気圧である。この設計圧力は、最大口径の原子炉系配管が完全破断した場合を想定し、それをもとに設定されている。では、その設計圧力を大幅に超え、最大七・四気圧まで上昇してしまったのはなぜか？

そもそも格納容器の圧力が上昇した原因が何かと言えば、「時間的に長く激しい地震動による原子炉系配管の破損による冷却材喪失事故」にあったと私は考えている。実際、その傍証とも言える事実がある。それは、前出の表に記したイベント8と9の「格納容器スプレイ系起動」である。どちらも「地震発生後、半時間以内」、つまり、津波襲来以前のことだが、この格納容器スプレイ系こそ、「冷却材喪失事故」が発生したときに格納容器の温度と圧力を減じするために自動的に起動する設備なのだ！

地震発生から約一八分後に、A、B二系列ある「格納容器スプレイ」のうちまずB系列が、ついでその七分後にA系列が、それぞれ起動していることがわかる。そして以後、A、B両系

列合わせて毎秒四〇〇リットルという猛烈な量の水が格納容器内に噴霧されつつづけている(記録がないので、いつまで噴霧されつつたかは不明である)。

これに関して東電は、「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影響評価について」という文書(五月二三日公表)の中で、格納容器スプレイは「圧力抑制室プール水の冷却を行うために起動したものと推定される」と、自動起動ではなく運転員が意図的に手動で起動したかのような説明をしている。しかし運転記録をよく調べてみると、そのときの圧力抑制室の水の温度は二〇度だ。二〇度の水を冷却するとはいったいどういうことか？ 東電の説明は意味不明である。

さらに、地震直後から一号機の格納容器の温度と圧力が突然上昇しはじめているが、この事実を東電は、外部電源喪失による「格納容器空調停止に伴う温度上昇」と説明する。たとえば、はじめの一七分間はそうだとすると、その後、格納容器スプレイが二基起動し、大量の水を格納容器内にばらまいていたのだから、空調停止で温度が上昇したという東電の説明はとも受け入れられるものではない。大量の水を噴霧してもなお、格納容器の温度が上昇していく理由を別に探す必要がある。

1 原発で何が起きたのか

問題を元に戻して、なぜ格納容器の圧力は七・四気圧まで上昇したのか。格納容器について

の説明のところですので詳しく述べたように、冷却材喪失事故が起きた場合、噴出した冷却材は蒸気となって圧力抑制室内の水(サプレッション・プール)の中に入り、そのため格納容器の圧力の上昇が抑制されることになっている。しかし、もし蒸気がサプレッション・プールまでうまく導かれなかったらどうなるか。蒸気が水にならないから、体積凝縮が起こらず、そのため格納容器の圧力がどんどん上昇していくだろう。

長く激しい地震動により、圧力抑制室の中にあるリングヘッダー(以後図1参照)やリングヘッダーとベント管との接合部などが破損し、その結果、抑制機構がほとんど機能しなくなったのかもしれない。

別の重要な指摘もある。元東芝の格納容器設計技術者で、福島第一原発の三号機、五号機、東北電力・女川^{おんながわ}一号機、中部電力・浜岡^{はまの}一―三号機などの格納容器の設計に関わった渡辺敦雄氏(現・沼津商専特任教授)は、余震の際に、サプレッション・プール(水)が激しく揺れ動き(スロッシング現象、そのため、ドライウエルからベント管を通り抜け圧力抑制室に入ってきた大量の蒸気を水の中まで誘導するためのダウンカマールの先端が水面から上に出てしまい、そこから蒸気が圧力抑制室上部に噴出して滞留し、その結果、格納容器の圧力が異常に高くなったのではないかとみている。このように指摘する渡辺氏もまた、一号機では配管破断が起きたた

ではないか、と述べている(渡辺氏の見解の詳細は、二〇一一年六月一〇日の原子力資料情報室配信のUstreamで知ることができぬ)。

もともと、福島第一原発の一―五号機で使用されているようなMark I型格納容器の圧力抑制機構は、冷却材喪失時に猛烈な勢いでドライウエルから流れ込んでくる蒸気すでに述べたが格納容器の中には常時窒素が封入されていると蒸気の動的な荷重に耐えられるのか、地震時のスロッシングにはどうか、といった「未解決問題」を抱えていた。一九八〇年、米原子力規制委員会(NRC)はこの未解決問題に対する安全評価報告書をまとめた(NUREG 0061/Mark I Containment Long Term Program)。そしてつづい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一九八七年一月に「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」なる原子力安全委員会決定を出した。東電はこの指針を、六〇年代半ばから七〇年代前半にかけて設計された福島第一原発の古い格納容器に具体的にどう反映したのか、とくに地震時に対してどう評価していたか、このことが徹底的に調査される必要がある。

東電は、「格納容器の圧力が異常に高くなったのは、圧力抑制室の水を海水で冷却するシステムが津波で使えなくなり、水温が上昇したから」などと記者会見などで説明しているようだが、ナンセンスである。原子炉から圧力抑制室に回った冷却材の総量はせいぜい数十トン、そ

1 原発で何があったのか

れに対して圧力抑制室内の水の総量は一七五〇トンもある。大雑把な計算だが、崩壊熱を考慮しながら圧力抑制室の水温上昇を試算してみると、せいぜい五〜一〇度である。その時点では、冷却などまったく必要がない程度の温度上昇だ。一方、これも大雑把な計算だが、圧力抑制機構が働かなかったとするとドライウエルの圧力は八・四気圧になり、記録された圧力とだいたい一致する。

(6) 水素爆発

最後に、水素爆発についても簡単に触れておきたい。図2にあるように、皮肉なことに、淡水注入(イベント18)直後から原子炉水位が再下降し、TAFを横切った。そのため燃料棒表面(燃料被覆管)のジルコニウム合金が高温になり、炉内の水蒸気と反応して水素が継続的に発生した。その水素は、原子炉系配管の破損部から蒸気とともに漏出した。水素は軽いので格納容器最上部へ向かう。そして、すでに蒸気の漏出がはじまっていたフランジ部から、オペレーションフロアに入る。三月のオペレーションフロアの室温は低い。オペレーションフロアに入った蒸気はそこで水になる。こうして湿度が下がり、水素爆発の環境が整う。そして大爆発が起きた。

紙幅の関係で詳しくは書けないが、三号機の水素爆発も、基本的には同じようにして起きたのだろう。ところが、二号機は圧力抑制室の「外」で水素爆発が起きたと考えられている。では、なぜ「外」での爆発なのか。二号機の場合、たぶん主蒸気逃し安全弁経由で水素が圧力抑制室に回ったと思われる。ところが、たとえば圧力抑制室とドライウエルとの結合部のベローズが、あるいはトラスの現地溶接部が、地震発生直後に、長くて激しい地震動で破損していたため、そこから水素が外に漏出し、爆発したものと推定される。

本章では、東電が公表した最新の文書やデータにもとづき、東電・福島第一原発一号機が、津波によってではなく地震動によって原子炉系配管が破損し、冷却材喪失事故を起こした可能性について論じた。また一号機の格納容器の圧力が設計圧力を大幅に超えて異常に上昇した現象、ならびに二号機の水素爆発が圧力抑制室の外で起きたことについてもざっと検討した。結論として、

・ 一号機においては、地震発生直後に、なにがしかの原子炉系配管で小規模ないし中規模の冷却材喪失事故が起きた可能性がきわめて高い。

・ 一号機の圧力抑制室の一部が地震発生直後に破損したか、激しいスロッシングが起き

たために圧力抑制機構が有効に作用しなかった可能性が高い。

。二号機において、圧力抑制室の外で水素爆発が起きたのは、地震直後に圧力抑制室が損傷したためと推測される。

なお、本章では二、三号機についてはほとんど触れなかったが、それはあくまで紙幅によるもので、「地震による問題はなかった」という意味ではない。本章はあくまで一号機をおしての「耐震脆弱性」の指摘である。

追記 悪しきシミュレーションについて

福島原発事故に対する原子力災害対策本部は、二〇一一年六月のはじめに、同月二〇日から開かれるIAEA閣僚会議に提出する事故報告書(「東京電力福島原子力発電所の事故について」)を提出した。すでに本章の原稿を書き上げたあとなので十分なスペースをとって議論することはできないが、その報告書に記されている福島第一原発一号機に関するシミュレーションについて、ごく簡単に触れておきたい。

シミュレーションはMARPと呼ばれる事故解析コードを使ってなされている。そのシミュレーション結果が衝撃的だったからか、ひとたびそれがテレビや新聞で報道されるや、多くの人が仰天しながらも、早くもそれを「事実」として受け入れはじめてるように思える。報告書に記されているシミュレーション結果の要点を記すと、地震発生後約三時間で炉心露出、同約四時間で炉心損傷開始、同約一五時間で原子炉圧力容器破損、である。いわば超特急メルtdownである。

どんなシミュレーションであれ、その結果は、ひとえにどのようなデータを入力したにかかっている。このシミュレーションの担当者らは、おそらく、どうすれば格納容器の圧力を設計圧力より高い七・四気圧に上昇させることができるかに苦心したはずだ。彼らは、私が本章で論じたような、地震動による圧力抑制機構の破壊や機能喪失という問題を提起してしまうからだと選択しなかった。それを選択すると、原発の耐震脆弱性という問題を提起してしまうからだ。同じ意味で、配管破断という条件も論外だった。そういうものはすべて排除し、あくまで、長く激しい地震動にもビクともしない健全な原子炉圧力容器、健全な格納容器、健全な配管、健全な弁を初期状態とする健全な原発が、津波で全交流電源を喪失した場合に、格納容器の圧力が必然的に、しかも早期に、七・四気圧まで上昇するような入力条件を探し求めたということではない。具体的には、できるだけ早期にメルtdownを起こさせて原子炉圧力容器に穴をあけ、そこから高温高圧のガスを噴出させることで、格納容器の圧力を異常に高くするモデ

ルを模索したに過ぎない。

しかし、今回のシミュレーション結果は度し難い問題を抱えている。それは、シミュレーションによる水位変化が、実測された水位変化とまったく一致しないことだ。これに関して報告書は、「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」と、実測された水位データを信用できないものとしてバツサリ切り捨てている。では、水位計の水が蒸発しているというなら、図2で、A、B二系列の水位計のデータが同じ下降傾向を示していることをどのように説明するのか。

シミュレーションで再現できない都合の悪いデータはすべて誤りとして切り捨て、都合のよいデータだけをことさらに強調する。これは、典型的な悪しきシミュレーションと言わねばならない。

文責はもちろん私自身にあるが、「柏崎刈羽原発の閉鎖を訴える科学者・技術者の会」の仲間たちの鋭い洞察力なしに、本章を書き上げることはできなかった。皆様に感謝。