

2号機破壊シナリオ

東北大学 流体科学研究所 圓山重直
(2012/3/26 作成)

概要

本日、2号機 D/W の水位が 60cm であることが報道された。著者は以前2号機 S/C が 15日 6時頃に破損したと予測した(HTC Rep.19.2, 2011/10/13)。しかし、データを詳細に解析した結果、2号機 D/W 下部が 15日 7時 40分頃に破損したと推定した。このシナリオだと本日の測定結果が説明できる。

本稿は、2号機の破壊状況を「いかにも見てきたような」ドキュメンタリー風に記述したものである。登場人物は架空だが原発の事象は正確に記述するよう努力した。

2号機破壊

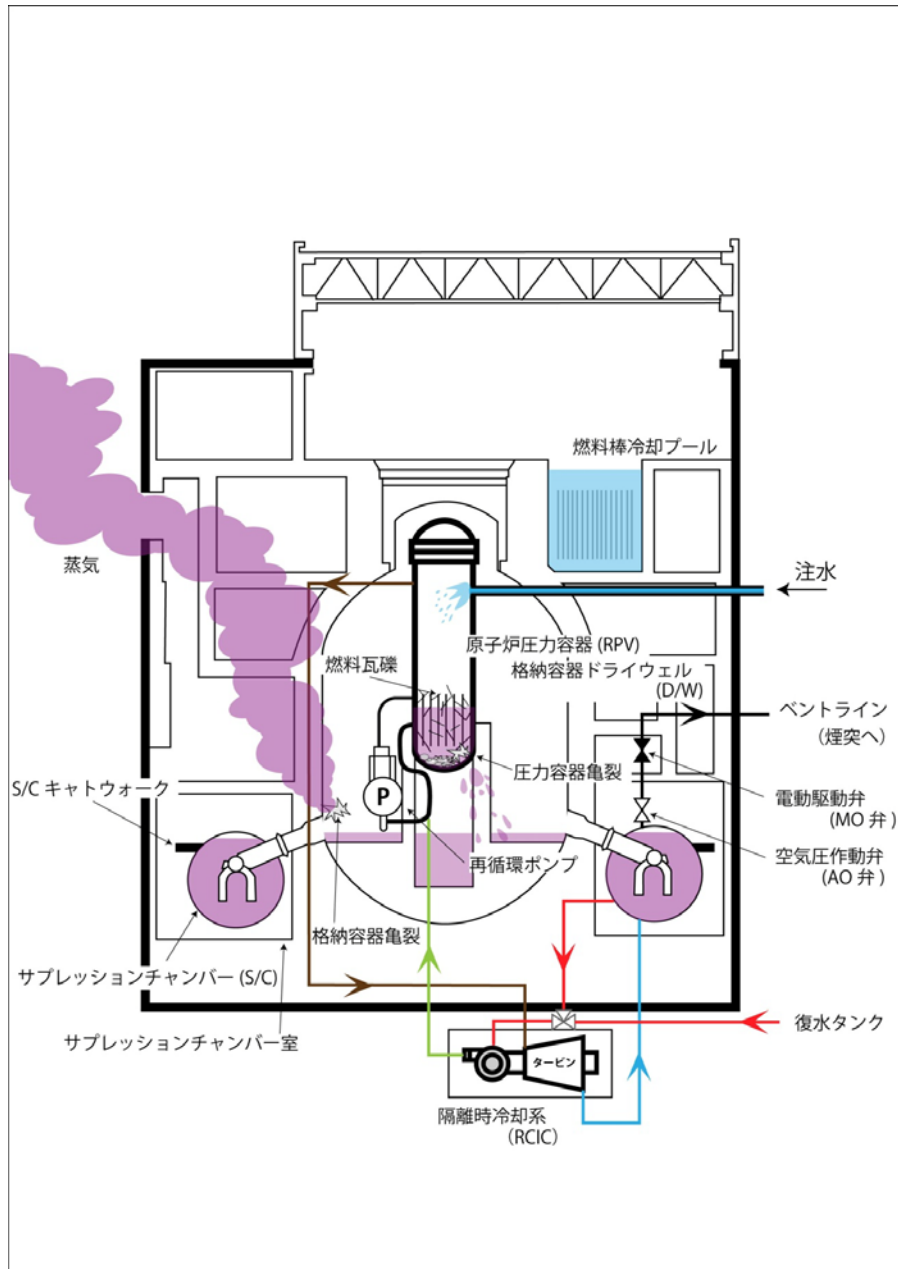


図1 2号機の冷却システムと破壊状況 (3月15日9時現在)

3月14日10時30分 隔離時冷却系 (RCIC) が作動して何とか冷却機能を保っていた2号機の崩壊熱吸収が限界となった。これまで、2号機は、燃料棒の崩壊熱を蒸気にしてそれをサプレッションチャンバー (S/C) で凝縮し、水にしなからタービンを動かして復水貯蔵タンクから注水を続けていた。(註: 本書では、12日4時に実施したと報告されている復

水タンクからサプレッションチャンバーへの水源の切り替えは実施出来なかったとしている。その方がエネルギー保存則の説明が付きやすい。)しかし、崩壊熱を吸収していたサプレッションチャンバー (S/C) が高温になり、これ以上エネルギーを吸収できなくなったのだ。また、復水貯蔵タンクからの注水で、最初 3900 トンの水を溜めていた容積約 6000m³ のサプレッションチャンバー (S/C) もほぼ満水状態となっていた。隔離時冷却系 (RCIC) の蒸気タービンは徐々に回転数を下げてついには停止した。それに伴い、注水が止まったことによって原子炉压力容器 (RPV) 内の圧力が徐々に上がり始めた。(註: 東京電力の報告書では RCIC 停止は 13 時 25 分と推定されている。)

11 時 30 分 压力容器内の圧力上昇のために逃がし安全弁 (SR 弁) が開き始めた。それによって、このときから原子炉水位が低下し始めた。

12 時 30 分 「2 号機のサプレッションチャンバーの温度 149.3℃、圧力 3.8 気圧です。」1/2 号機中央制御室から免震重要棟発電所対策本部に連絡が入った。「サプレッションチャンバーの熱吸収はもう限界ですね。これから原子炉を急減圧し炉内の蒸気をサプレッションチャンバー (S/C) に放出すると、蒸気が凝縮されずに格納容器に流れ込み、ドライウエル (D/W) の圧力急上昇で格納容器が破壊される可能性があります。」坂井がいった。「海水注入を行う前になんとしてもベントを実施する必要があります。」

13 時 05 分 3 号機タービン建屋付近では作業員たちが海水注入準備を文字通り「必死」で行っていた。周りには 1 号機と 3 号機の爆発で高強度の放射線を放つ瓦礫が散乱していた。作業員たちは、2 号機もいつ爆発するかも知れない恐怖に曝されていた。しかし、自分の家族と地域の人たちを守るために、自分たちの危険を顧みず、黙々と作業を続けていたのだ。原子炉近くにある逆洗弁ピット*は 3 号機の爆発で全て瓦礫に覆われていたため、海水のくみ上げが不可能となっていた。そのために、千葉火力から調達した新たな消防車を使って、海岸に設置された「物揚場*」と呼ばれる埠頭から消防車とホースを使った注水ラインを作っていた。

13 時 25 分 山本たちが 2 号機の現状について分析している。「坂井君、2 号機の現状はどうなっていると思うかね。」坂井がパソコンで計算したデータを基に解説した。坂井の周りには、桜井、下山、亜紀子たちが坂井のパソコンを見ていた。「今の水位データを見ると、水位低下が始まっているので、隔離時冷却系 (RCIC) は停止している可能性が高いと思います。もし、今隔離時冷却系 (RCIC) が止まったとすると、シミュレーションでは、16 時 30 分には水位が燃料棒上端 (TAF) に到達します。その後燃料棒のドライアウトが始まり、20 時 50 分頃には燃料棒下部まで水位が下がると思います。」(註: 実際には、RCIC が坂井たちの予想より早く停止しているため、TAF は 15 時 50 分、燃料下部まで水位が減少するのは、18 時 30 分頃と推定される。)
「桜井、この予想を本店と官邸に伝えてくれ。なんとしても、水位が燃料棒上端 (TAF) に達するまでにベントをする必要がある。燃料棒のドライアウトが始まると、ジルカロイと水蒸気の反応で 1, 3 号機と同じように水素が発生して爆発する。下山さん、本店に調達を頼んでいる可搬式コンプレッサーはまだ届かないのですか。」山本が下山に言った。「本店には随分前から何度も頼んでいるのですが、コンプレッサーが到着するのは、あと数時間かかる見込みです。」下山が答えた。

15 時 50 分 2 号機压力容器内の水位がとうとう燃料棒上端 (TAF) に到達した。(註: 東京電力の推定時刻 16 時 30 分より早い。) 水という守護神を失った燃料棒は水蒸気中で加熱を続け高温となり、ウラン燃料を覆っているジルコニウム合金 (ジルカロイ) が水蒸気と反

応して水素を発生する。高温になった燃料棒からは蒸気となった放射性セシウムやヨウ素が放出されていた。

16時00分 コンプレッサーの調達が遅れて、2号機のベント準備はまだ整っていなかった。山本たちは本店の東城社長と対策を協議していた。「2号機のベント準備に時間がかかっているようですね。そちらの推定では2号機はすでに水位が燃料棒上端（TAF）に達しているようじゃないですか。この際、原子力安全委員長のおっしゃるように、格納容器ベントに優先して炉内の強制減圧をしたらどうでしょうかねえ。」この指令は、総理の居る官邸5階の会議室から出されている。官邸の意見を無視するわけにはいかなかった。「分かりました、ベント作業と逃がし安全弁（SR弁）の強制減圧準備を同時に行います。どちらも直流電源と圧縮空気が必要ですから。ただし、強制減圧に必要な圧縮空気の量は比較的少なくて済みますが。」山本は東城の命令を受け入れることにした。

16時15分 「2号機と3号機に消防車から注水可能となりました。3号機への注水はもうすぐ開始します。」桜井が2階の緊急対策室に走り込んできて、注水班からの報告を山本に伝えた。「そうか。やっと海水注入が出来るようになったか。みんなもがんばってくれた。3号機注水担当のみんなにはお礼を言ってくれ。2号機は消防車のエンジンをかけて、炉内減圧とベントが出来次第注水ができるように準備をしてくれ。」山本が指示した。

16時20分 1/2号機中央制御室では、可動型コンプレッサーが配置されタービン建屋の配管から加圧を開始していた。やっとの事で2号機サブプレッションチャンバーのベントまでたどり着いたのだ。免震重要棟の山本たちも、ベントの報告を待ち受けていた。

「よし、準備が整いました。2号機のベント弁を開けてください。」当直班長の小宮が指示した。「空気作動弁（AO弁）起動の電磁弁開けます。」運転員が復唱してスイッチを入れた。ベント弁の開閉を示すランプは全閉を示すグリーンのままだった。「空気作動弁（AO弁）開きません。」運転員が報告した。制御室の所員は失望のため息をついた。期待が大きかっただけに落胆も大きい。ベントの失敗は山本たちに報告された。

16時34分 ベント失敗の報告を受けて、山本たちは逃がし安全弁（SR弁）を強制的に開けて原子炉の減圧をするよう指示した。1/2号機中央制御室の小宮たちは直ぐに準備に取りかかった。12Vの自動車用バッテリーを10個直列に繋いで電磁弁を動作させる電源を確保した。注水用消防車はエンジンをかけた状態でいつでも注水が始められるようにスタンバイしていた。スイッチを入れたが、原子炉圧力容器（RPV）の圧力が下がる兆候は見られなかった。「ともかくバッテリーを繋げ変えて、試してみよう。」落胆する係員たちを励ますように、小宮がみんなに声をかけた。

18時00分 2号機圧力容器内の水は燃料棒下部まで低下し、完全露出した燃料棒で加熱した蒸気が上部に溜まり、圧力容器上部が高温になってきた。その高温によって逃がし安全弁のバネがクリープ（高温になり材料が軟化変形すること）を始めた。それによって、16時34分から繰り返し行われてきた逃がし安全弁（SR弁）が開く条件が整ってきた。ついに、逃がし安全弁から蒸気が開放され、サブプレッションチャンバー（S/C）に流れ出た。

18時03分 「18時に70気圧だった圧力が60気圧に下がりました。今も急激に下がっています。SR弁による強制減圧が成功した模様です。」運転員が小宮当直班長に報告した。

18時40分 免震重要棟の山本たちは、2号機原子炉圧力容器（RPV）の強制減圧成功の報告を受けていた。「現在、5.3気圧まで下がっています。消防車で注水が可能です。」坂井

が山本に報告した。「それでは、待機させていた消防車で注水を始めてくれ。」山本がいった。免震重要棟は久しぶりに明るい報告を受けて、ほっとした空気が漂っていた。

その矢先、減圧の朗報を覆す報告が注水班から届いた。「消防車による注水が出来ません。原因は不明です。」「何だって、原子炉水位は 18 時 23 分に燃料棒最下端まで来ているのだ。これで注水できなかつたら燃料棒が溶け落ちて压力容器を溶かしてしまう。」坂井が叫んだ。山本が注水班に指示した。「とにかく注水不能の原因を突き止めてくれ。このままでは原子炉がメルトダウンする。」

19 時 20 分 2 号機の注水不能に陥り、絶望の淵にいた山本たちに、注水班から報告があった。「2 号機に注水できなかった原因は、海水注入のための消防車が燃料切れで停止していたためです。現在、燃料を入れて注水再開準備をしています。」現状は好転していないが、注水不可能の原因が分かり対策を打つことが出来る状態となったのだ。「これで、何とかなるかも知れない。」一縷の希望が山本たちに戻ってきた。

19 時 54 分 燃料を入れた消防ポンプが動き出した。2 号機の海水注入が始まったのだ。3 分後にはもう一台の消防ポンプも稼働して猛烈な勢いで海水注入を開始した。

海水注入直前の 2 号機原子炉压力容器の中はほとんど水がなくなり、2000°C 以上になった燃料の酸化ウランが溶けた状態で炉心にあった。しかし、ジルコニウム合金が酸化したジルコニア（酸化ジルコニウム）の薄い膜に覆われて何とか形だけは保っていた。そこへ大量の海水が投入され、熱衝撃によって燃料棒がバラバラの瓦礫となって炉心下部に溶け落ちていった。このときの蒸気発生によって、5.3 気圧まで圧力が下がっていた炉心は再び、10 気圧以上となって注水が不可能となった。炉心では、溶け出した燃料棒から蒸発した放射性セシウムや放射性ヨウ素が悪魔の使徒として外に飛び出す準備を始めていたのだ。

20 時 30 分 注水中断から 19 時間経って、漸く 1 号機の海水注入が再開された。注水中止で高温になっていた燃料棒に水が入ることによって、压力容器から蒸気が噴き出し、格納容器の割れ目から外に吹き出した。

21 時 00 分 「サブプレッションチャンバー（S/C）ベント弁が開きました。」2 号機の運転員が小宮当直班長に報告した。コンプレッサーの圧力が上がり、空気作動弁（AO 弁）が動作したのだ。そのことは直ぐ、免震重要棟会議室に報告された。「やっとベントの準備が整ったな。後は 2 号機のラプチャーディスクが破壊して、ベントを待つだけだね。今は、ドライウエルの圧力は 3.2 気圧であと 1 気圧の圧力上昇でベントが始まる。」山本が行った。この報告で安堵の空気が免震重要棟の緊急対策室に漂った。

21 時 18 分 溶け落ちた核燃料によって薄くなった原子炉压力容器（RPV）隔壁が 18 気圧の高圧に耐えきれなくなり、破損した。原子炉压力容器（RPV）の圧力が急激に下がると同時に、原子炉压力容器（RPV）の水蒸気と放射性物質が一気に格納容器のドライウエル（D/W）に噴出し格納容器の圧力を急上昇させた。これまで、ドライウエル（D/W）の水蒸気は、逃がし安全弁からサブプレッションチャンバー（S/C）の水を通して流入したので、放射性物質の濃度が比較的低かった。しかし、このときの噴出蒸気は水を通らずドライウエル（D/W）に直接噴出したので、放射線も高い強度を示した。21 時 35 分にはモニタリングポストの放射線量が $760 \mu\text{Sv/h}$ を観測した。（註： 2 号機の格納容器に放射性蒸気が充満しただけでは、この放射線強度は説明が付きにくい。20 時 30 分に再開した 1 号機注水によって、

放射性蒸気が放出されたこと、または、2号機のドライウエルの直接ベントがこの時点で実施された可能性もある。現状では原因がはっきりしない。21時20分に2号機逃がし安全弁（SRV）を2つの弁を開けて原子炉水位が回復してきたことを確認と東電報告書にはあるが、本書では触れていない。）

初めは半分ほどしか水が入っていなかったサプレッションチャンバー（S/C）は隔離時冷却系（RCIC）の長時間稼働で、復水補給タンクの水が凝縮し、7400m³の体積があるサプレッションチャンバー（S/C）は、高温の水でほぼ満水の状態になった。本来ならば蒸気が充填しているベント配管の入り口も水でふさがれてしまった。そのため、ドライウエル（D/W）が高温になってもラプチャーディスクの配管には圧力が伝わらない状態になっていた。さらに、大量に注水された海水がサプレッションチャンバー（S/C）とドライウエル（D/W）の通気パイプを塞ぐ形になった。（註：これは、12日4時に2号機RCICの水源を復水貯蔵タンクからサプレッションチャンバーに変更しないと仮定した設定である。）

22時50分 「ドライウエル（D/W）のゲージ圧力が4.4気圧でラプチャーディスク破壊圧力を超えましたが、サプレッションチャンバー（S/C）の圧力は2.8気圧でラプチャーディスクが破壊しないためベント出来ません。ドライウエル（D/W）圧力は徐々に上昇中です。」桜井が報告した。「どうなっているんだ。ドライウエル（D/W）とサプレッションチャンバー（S/C）は繋がっているんで、圧力はそんなに違わないはずなのだけど。」さすがの坂井も原因を掴みかねていた。隔離時冷却系（RCIC）は最長でも2日程度の動作しか考えていないので、2号機のようにRCICが3日近くも作動してサプレッションチャンバー（S/C）が満水になることは考慮されていなかった。原因不明のドライウエル（D/W）の高圧に誰しもが「2号機も助からない。」と思った。

このとき、1号機も3号機も圧力容器・格納容器ともに破壊されていたが、それを東電が認識するのは4月になってからである。誰もが、核燃料と放射性蒸気は格納容器内に留まっていると考えていた。しかし、1号機の格納容器は3月12日4時に破壊し、3号機の格納容器は3月13日9時08分に破壊していた。（註：この推定は東京電力と異なる。）

3月15日0時02分 1/2号機の中央制御室では、自動車用バッテリーのつなぎ替えを行い、2号機ドライウエルを直接ベントするための準備が整った。「これでドライベントするための準備が整った。ベント用の空気作動弁（AO弁）が動くといいのだが。」と当直班長の小宮が言って係員に指示した。スイッチを入れると弁が開いたことをしめす赤いランプがついたが数分後にはグリーンに戻ってしまった。「ドライウエルの圧力は6.4気圧で変化ありません。弁を開ける空気ポンベの圧力が足りないようです。」係員が小宮に報告した。（註：本店の了解を得る前に、この操作を3月14日21時30分頃に行ったと仮定すると14日21時35分にモニタリングポストの放射線量が760μSv/hを観測したことが説明できる。しかし、真相は不明である。）

圧力容器の下端が破損した2号機では、圧力が減少して大量の海水が注入されるとその海水で破損箇所がふさがり、崩壊熱によって内部の海水が蒸発して圧力が再び増大し、消防車による海水注入が出来なくなった。その蒸気圧で海水が押し出されると再び海水注入が可能となる不安定な冷却が続いていた。格納容器は海水と蒸気に満たされて6.4気圧前後の圧力を維持していた。

0時30分 震災直後から今まで眠りについていて、おとなしくしていた4号機が漸く悪魔の様相を見せ始めていた。3月11日14時の地震当時、4号機は定期点検中であり、原子炉

圧力容器には燃料棒はなかった。しかし、4号機の燃料プールにはこれまで使用が終わった燃料棒5万6千本の他に炉心から取り出して一時保管している燃料棒4万本が収納され、冷却装置によって冷やされていた。

4号機が電源喪失して、冷却装置が停止してから9万6千本の燃料棒が放出する崩壊熱でプールにある1425トンの水が加熱され100℃で沸騰した。以後、水は沸騰を続け、この時点で410トンの水が蒸発し、水位が3.4m下がっていた。しかし、深さ11.8mの燃料プールの底に置かれた長さ4mの燃料棒は未だに水中に没していたのだ。4号機の悪魔は水という門番に守られておとなしくしていた。

伏兵は3号機にいた。3月14日11時01分に発生した3号機の水素爆発で、4号機と繋がっているベントラインに管内衝撃波が走った。衝撃波は音速より速く伝わる圧力波である。この衝撃波でベント配管内部が破壊され、3号機と4号機原子炉建屋は実質的に繋がっていた。爆発後も3号機の炉心からはジルカロイと水蒸気の反応によって、水素が出続けていた。この水素が、ベント配管を通じて4号機原子炉建屋3階と4階に充満し始めたのだ。4号機原子炉建屋に溜まった水素が一部建物外に放出され何らかの火花で引火して青白い炎となった。この炎は、真っ暗な原子炉建屋に狐火のように不気味に漂っては消えた。この狐火は近くを通りかかった職員に目撃された。職員には、あたかも死神が原子炉にとりついているように見えた。しかし、3号機から放出された大部分の水素は4号機建物内に蓄積し、新たな反撃のチャンスをうかがっていたのだ。

6時02分 2号機のサプレッションチャンバー内の水が満水になり、圧力測定用の穴から水が侵入した。侵入した水は圧力センサーに達し半導体センサーの振動子を濡らした。その結果、圧力計の指示値がマイナス1気圧（真空状態、表示でゼロパスカル）を示した。

6時12分 4号機が漸く悪魔の牙を見せ始めた。3号機の炉心から放出され続けている水素が4号機5階に充満した。水素濃度が5%を越えて電気火花に引火した。「ズーン」鈍い音とともに屋上の屋根と4階の壁を吹き飛ばした。また、この爆発でベント配管に管内衝撃波が発生し、3月14日11時01分に起きた3号機爆発とは逆向きに衝撃波が管内を走った。この衝撃で、3号機と4号機のベント配管は更に繋がってしまった。この4号機原子炉建屋の爆発は、3号機の水素爆発ほどは大きくなかったが、3/4号機の中央制御室では大きな振動を感じた。「また爆発が起こったのか。」当直班長の岡島が山本たちにその振動を報告した後、運転員に指示した。「放射線量を確認しながら外の様子を見てきてくれ。」運転員が様子を確認に行った。暫くして、戻ってきた運転員が報告した。「さっきまで通行可能だった4号機原子炉建屋周りの道路が瓦礫で覆われています。4号機建屋の上部の壁も壊れています。」この報告は、8時11分まで山本たちに報告されることはなかった。

6時15分 「原子炉に何らかの爆発があった模様です。いま、3/4号機中央制御室から報告がありました。また、6時00分まで1.7気圧あった2号機サプレッションチャンバー(S/C)の圧力計がいま絶対圧でゼロ気圧を示しています。」桜井が山本たちに報告した。「ウーン、この爆発は2号機サプレッションチャンバー(S/C)かも知れませんね。サプレッションチャンバー(S/C)の圧力がゼロを示しているということは、チャンバーが壊れて大量の放射性水蒸気が放出されている可能性があります。計測では、圧力容器の水位は現在燃料棒上端から2.7m下にありますから、燃料が溶け落ちていることも考えられます。周囲の放射線量も高い値を示しており、非常に危険な状況です。」坂井がいった。坂井の分析に、免震棟会

議室の全員が絶望の色を隠さなかった。とうとう2号機の格納容器が破壊したのだ。炉心はほぼ露出している可能性があるので、大量の放射能が出ていると誰もが思った。1号機と3号機の格納容器は破壊されていないと思っている所員にとって、2号機の格納容器爆発という坂井の分析は絶望的な報告だった。しかし、実際は2号機の格納容器はまだしぶとく圧力に耐えていた。

7時40分 とうとう2号機の格納容器が破裂した。破壊部分の大きさは等価直径で9cmだった。1号機、3号機と同じドライウエル (D/W) とサプレッションチャンバー (S/C) を繋ぐパイプのベロー部 (蛇腹状の金属リング) だ。高温の水蒸気とともに放射性セシウムとヨウ素も放出された。2号機の悪魔の使徒は、3号機の爆発で吹き飛んだブローアウトパネルの開口部から環境に放たれた。この放出蒸気も水素を含んでいたが、2号機原子炉建屋には滞留せず水素爆発は起きなかった。しかし、大量の放射性物質が放出されていったのだ。

(註： 2号機格納容器は15日7時20分から8時25分の間に破損したと考えられる。) 2号機格納容器が破壊したとき、係員は誰も近くにいなかったもので、2号機は6時頃にサプレッションチャンバー (S/C) が破損したと誰しもが信じていた。この破裂で、8時25分に2号機原子炉建屋5階付近から、蒸気が出ていることが目撃された。この頃、付近の放射線強度が急激に上昇し、9時00分には1193 μ Sv/hが観測された。この放射線量は、一般人の1年間の許容放射線量1mSvを1時間で超えてしまう猛烈な放射能だ。(註： 実際、2号機格納容器のどこが壊れたかは疑問が残る。今後の検証が待たれる。)

福島原発に残った72名の作業員は、原子炉パラメータの計測、炉心への注水、ベント作業を淡々と行っていた。原子炉建屋に隣接する中央制御室は放射線が高いので、数時間ごとに当直員が免震重要棟から制御室に行き、データを取得した。注水班は消防車の燃料補給を行いながら注水を続けた。移動式コンプレッサーで加圧しているベント用空気作動弁 (AO弁) は、ポンベの空気圧が上昇した時点で断続的に実施された。人員が足りないので、SPEEDIなどによる風向きを見ながらのベントは行われなかったのだ。

極限環境のもとで、原発に残った作業員は半ば無表情で淡々と作業をこなしていた。しかし、炉心への海水注入や原子炉の計測を怠ると、自分たちが先ず死んでしまうことは十分認識していた。さらに、見えない放射能の恐怖が作業員の心に重くのしかかっていた。この文字通り必死の作業によって、原子炉が完全に破壊することをぎりぎりの状態で食い止めていたのだ。

9時38分 3号機から依然として供給されている水素によって、4号機原子炉建屋3階付近が再び爆発し火災が発生した。しかし、72名の所員ではどうすることも出来なかった。火災は2時間後に自然鎮火した。

依然として消防車による海水注入が続けられていたが、注入している海水が圧力容器破損部を塞ぐと内部圧力が上がり、その圧力で一気に海水が排出され、燃料がドライアウトするという不安定な冷却が続いていた。ドライアウトした高温の核燃料に海水が接触すると蒸気が環境に一気に噴き出した。この現象と繰り返されたベント操作によって、放射能が各原子炉から断続的に放出された。その放射能は15日23時30分で8080 μ Sv/hを観測するなど猛烈な強度だった。

3月15日7時には北風だった風向きも14時には東に方角を変え、18時頃からは南東の風に変化した。これまでのベント操作は放射能が海に流れる西風の時に行われたが、すでにベントが制御できなくなった原子炉から放出された大量の放射性物質は、内陸部に流れていっ

たのだ。

3月15日21時から16日明け方にかけて、福島地方に冷たい雨がシトシトと音もなく降った。南東の風に運ばれた放射性ヨウ素とセシウムは、この雨によって双葉町と飯舘村に大量に降下し、この地域を放射能で汚染した。一方、この雨は風下にある福島市の放射能汚染をある程度食い止めることにもなった。