

公開シンポジウム
2014. 9. 17

日本学術会議
総合工学委員会
原子力事故対応分科会

「東京電力福島第一原子力発電所において発生した
事故事象の検討(その2)」

2号機から最も多くの放射性物質が 放出された理由

白鳥 正樹(日本学術会議連携会員、横浜国立大学名誉教授、
同安心・安全の科学研究教育センター客員教授)

調査の目的

1, 3, 4号機原子炉建屋が次々に水素爆発を起こす中で、2号機原子炉建屋の水素爆発は回避された。それにもかかわらず、環境中に放出された放射性物質の量は、2号機からのものが最も多いとされている。ここではその理由について検証する。

参考資料

- [1]国会事故調 [2]政府事故調 [3]民間事故調 [4]東電事故調
- [5]政府事故調技術解説 [6]東京電力に直接ヒアリング
- [7]石川迪夫著「考証福島原子力事故－炉心溶融・水素爆発はどうして起こったか－」日本電気協会新聞部

概要

- (1) 事故のおおまかな経緯
- (2) 原子炉隔離時冷却系(RCIC)の働き
- (3) ベントの遅れ
- (4) 代替え注水の遅れ
- (5) 炉心メルトダウン
- (6) 原子炉圧力容器/格納容器における
圧力の推移と放射性物質の漏洩
- (7) 15日6時10分ごろの爆発音
- (8) 2号機において水素爆発が起きなかった理由
- (9) 多号機事故の影響
- (10) まとめ

(1) 事故の大まかな経緯[5]

3月11日

- 14:46以前:定格出力運転中
- 14:46:地震発生:スクラム、外部交流電源喪失、非常用D/G自動起動炉心冷却開始(原子炉隔離時冷却系(RCIC)が作動:手動により弁を開く)
- 15:37ごろ:津波襲来
- 15:42ごろ:全電源喪失:実際にはRCICが作動し冷却が継続した(約70時間)が、現場ではこれが確認できず、かなりの危機感をもっていた。

3月12日

- 1時~2時55分:RCICの作動を確認
- 4:30ごろ:RCICの水源を切り替え(復水貯蔵タンク→圧力抑制室(S/C))
- 15:36:1号機原子炉建屋水素爆発→2号機復旧作業に影響
- 17:30:ベント準備指示

3月13日

- 10:15:ベント準備
- 18時過ぎ:コンプレッサーの手配
- 夕方:2号機も注水ライン完成

(1) 事故の大まかな経緯(つづき)

3月14日

- 11:01: 3号機水素爆発、ベントライン、注水ラインがダメージ
- 12:00～14:30: ベントが先か圧力容器減圧が先か議論
- 13:25: RCICの機能喪失と判断
- 14:43: 海水注水の遅れ
- 15時ごろ: ドライウェル(D/W)圧力が低下
- 16:00ごろ: ベント弁開かず
- 16:34分ごろ: 主蒸気逃し安全弁(SR弁)開かず
- 18:22: 燃料棒の全露出を認識
- 19:03: ようやくSR弁による原子炉の減圧に成功
- 19:20ごろ: 消防車燃料切れ
- 19:57: 2号機への連続注水開始、しかし不安定
- 23:35ごろ: D/Wベント実施を決定

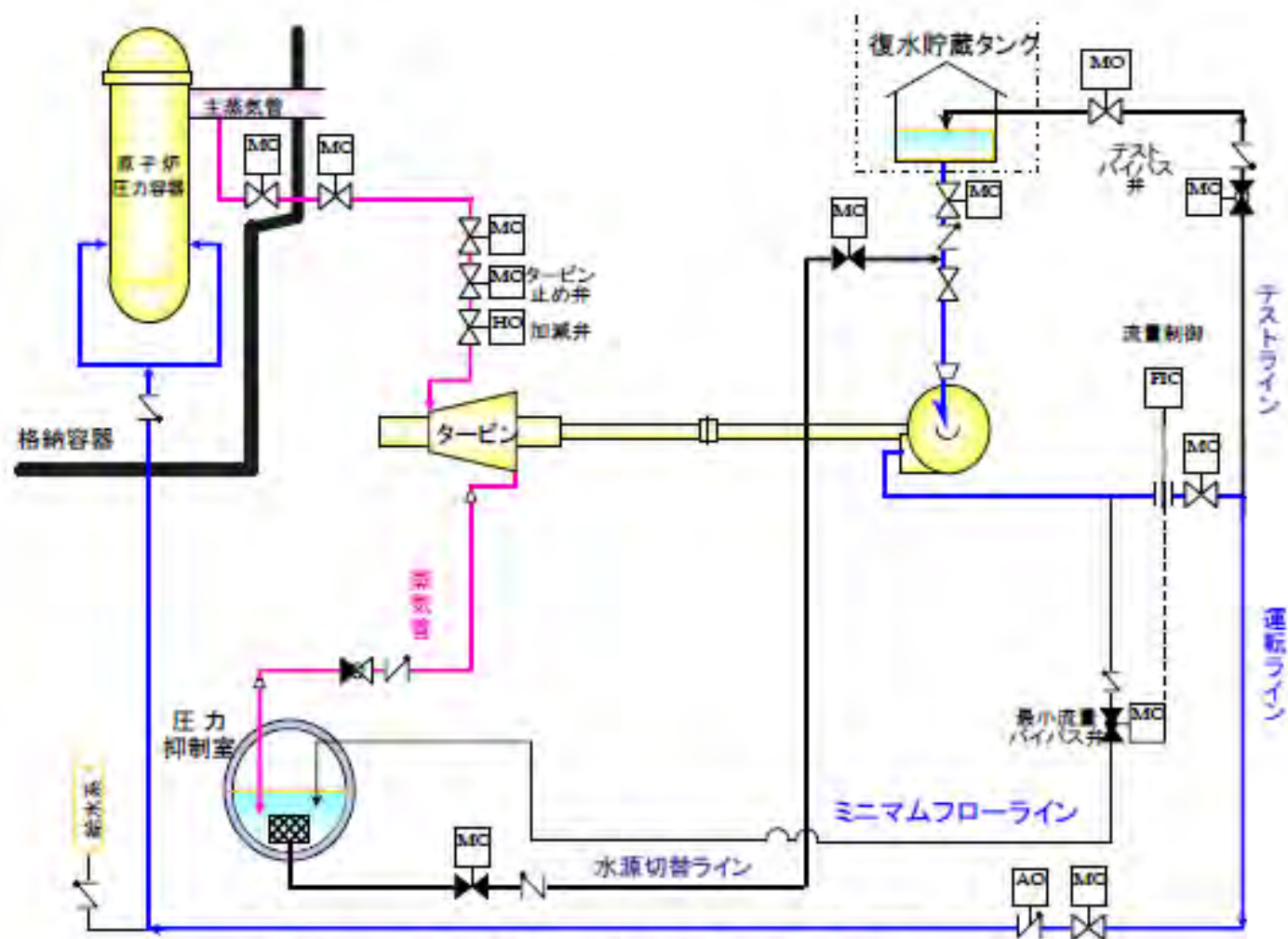
3月15日

- 0:16～1:11ごろ: 格納容器圧力上昇による危機的状況
- 6:00～6:10: 大きな衝撃音(実際には6:14)

(2) 原子炉隔離時冷却系(RCIC)の働き

2号機においては津波襲来後の全交流電源喪失(SBO)状態の下で原子炉隔離時冷却系(RCIC)が唯一の原子炉冷却系であり、津波襲来以前の状態、すなわち弁開の状態が維持されて約70時間働き続けた。

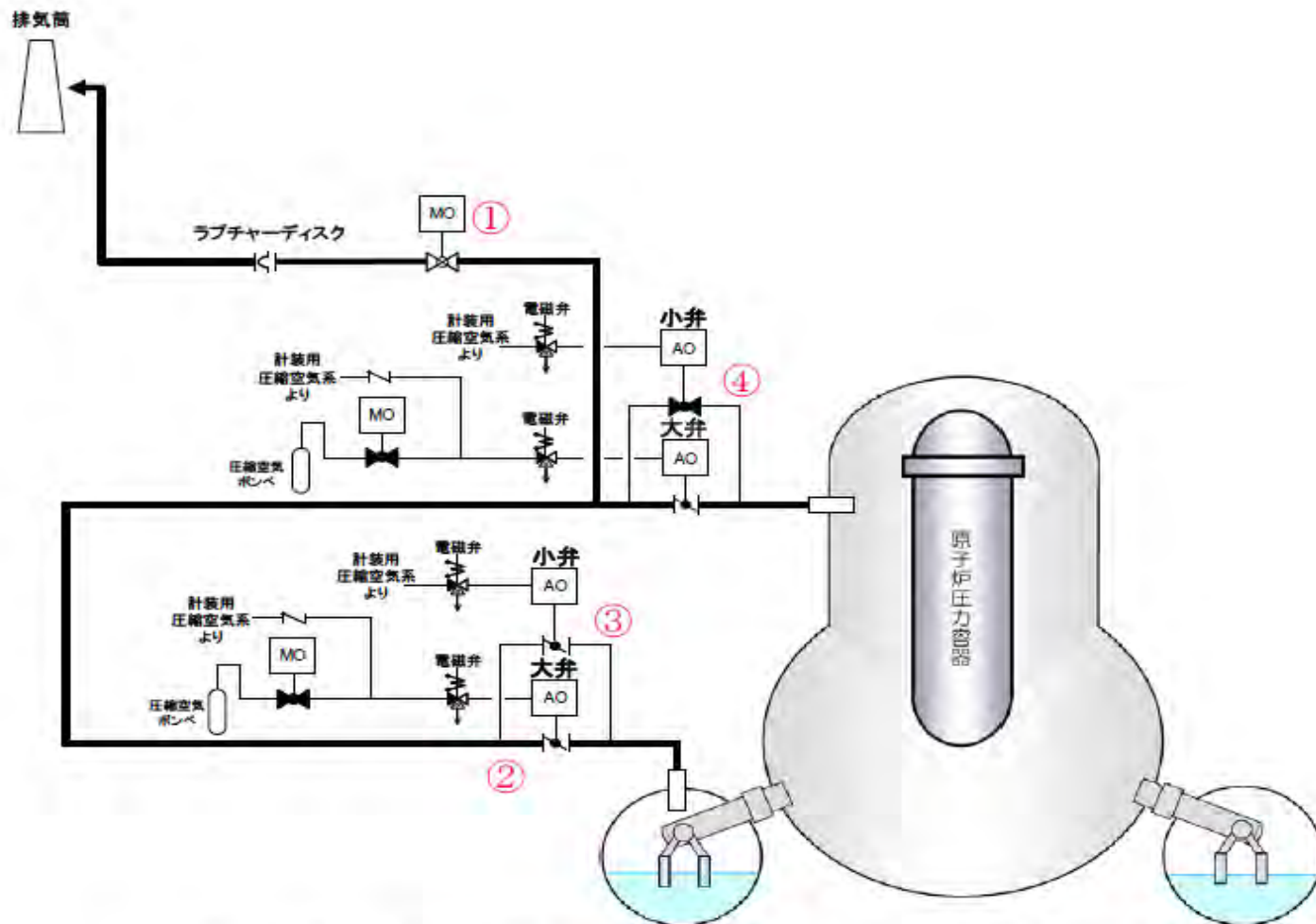
しかし、発電所対策本部および中央制御室では当初RCICが働いているという確認が取れず、かなりの危機感を持って(すなわち、1号機をはじめとする他号機の対策に優先して)2号機対策に取り組んでいた。



2号機 原子炉隔離時冷却系 系統概要図

(3) ベントの遅れ

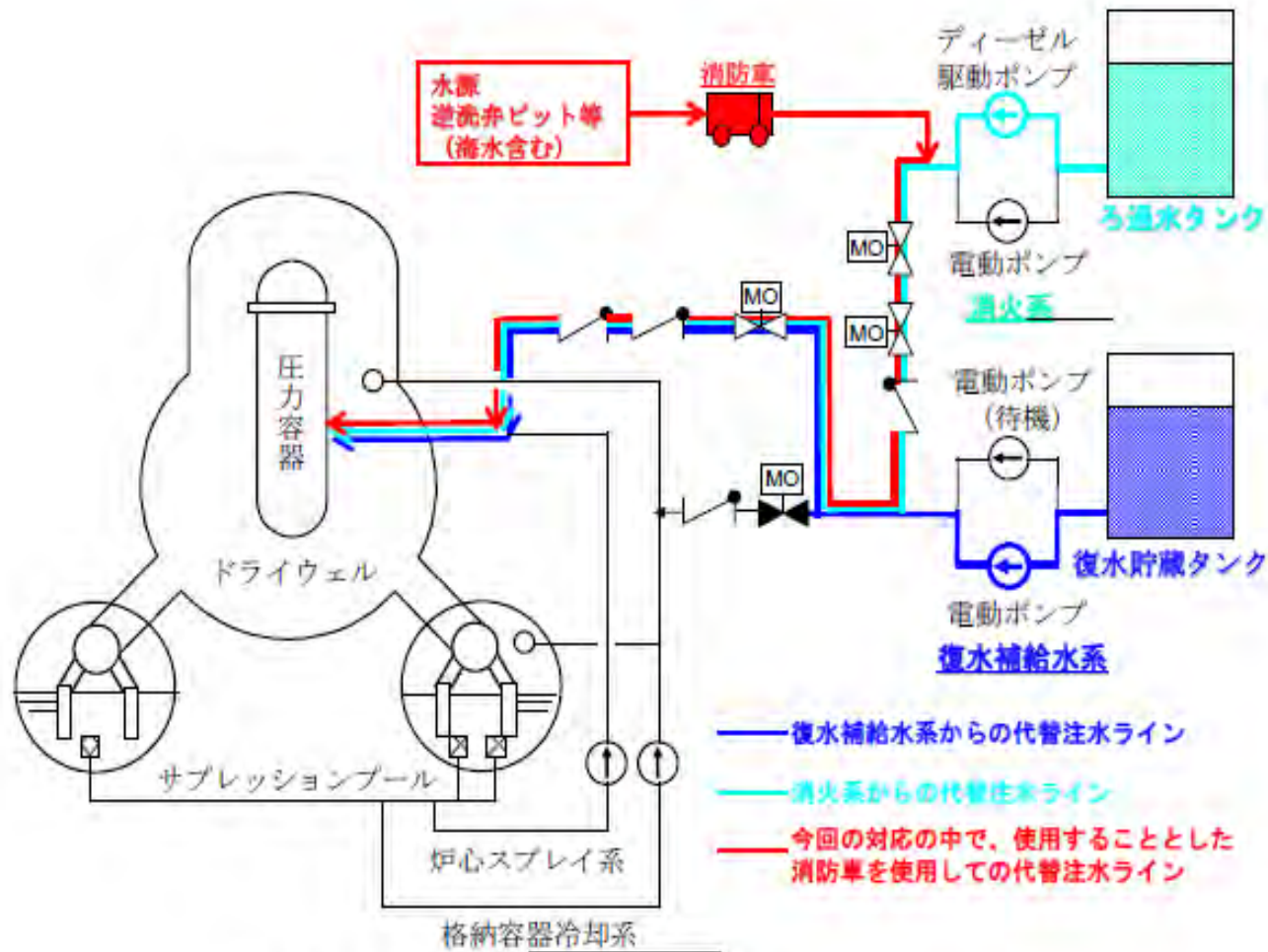
- 格納容器の圧力が上昇した場合、S/Cがベント実施の設定圧力(ラプチャーディスク作動圧力)を超えた段階でベントにより蒸気を格納容器の外に逃がして圧力を下げる必要があった。発電所対策本部および中央制御室ではこのことを予期して早くからS/Cベントの準備をしていた。しかし、14日11時01分に起きた3号機の水素爆発の影響でベントラインがダメージを受け、予め開けてあったベント弁が閉じてしまった。その後再度ベント弁開操作を試みたが、これがうまくいかず難渋した。
- その後14日23時35分ごろ、発電所対策本部は方針を変えて格納容器本体のドライウェル(D/W)からのベント*を試みたが、結果としてこれもうまくいかなかったようである。
- * S/CベントおよびD/Wベントはそれぞれウェットウェルベントおよびドライウェルベントと呼ばれることもある。後者はD/W内の蒸気が直接外部に放出されるのにたいして、前者はS/C内の水中を通った蒸気が外部に放出されるために、放射性物質が水に吸収されて外部に放出される放射性物質の量が大幅に緩和される。[5]



福島第一2号機 格納容器ベントのライン構成のために操作を行った弁

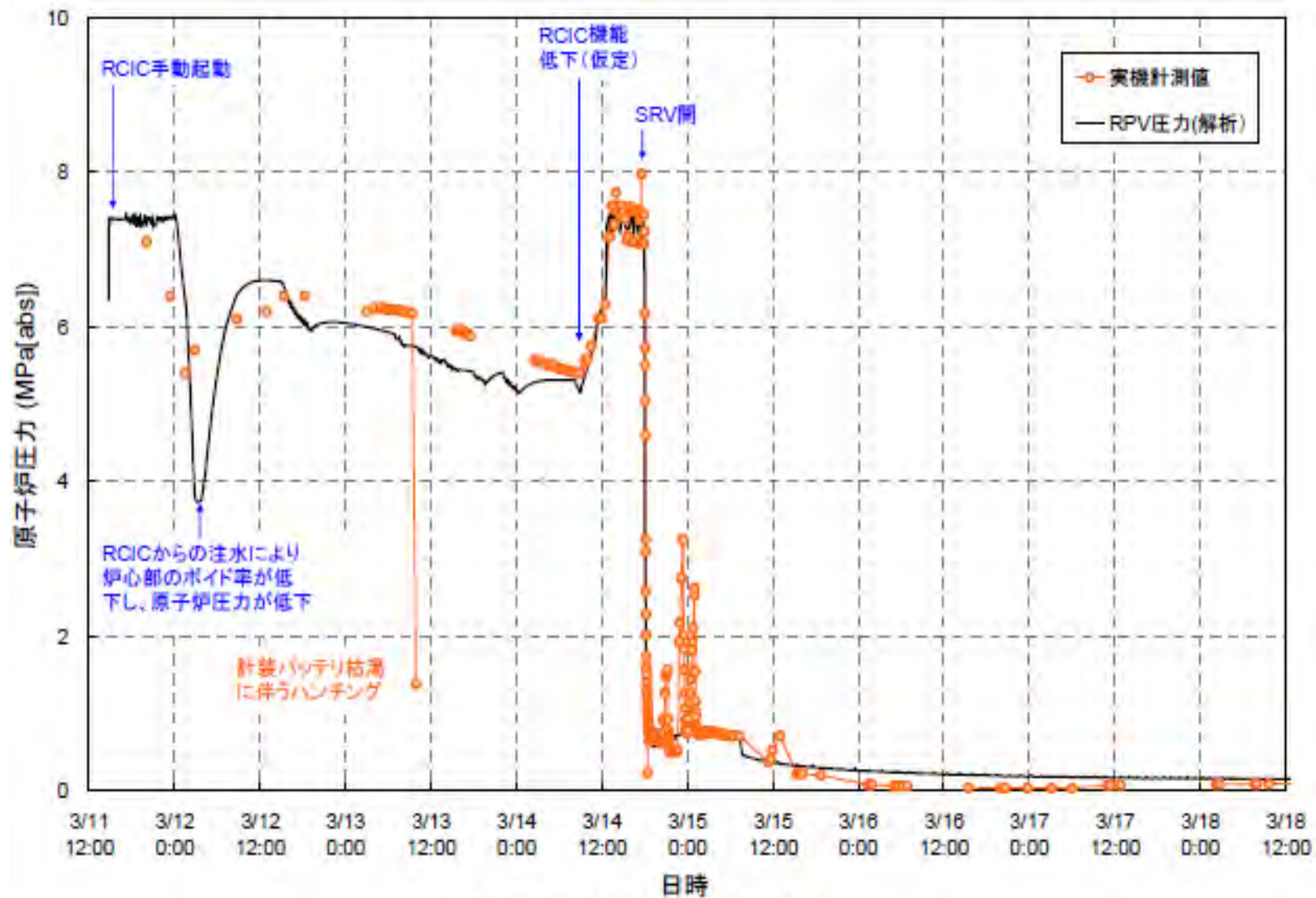
(4) 代替え注水の遅れ

- SBO状態でRCICが働かなくなった場合、それに代わる冷却の方法は消防車による原子炉压力容器への直接注水である。しかし、压力容器内の圧力は約7MPaと極めて高圧であるため、消防ポンプの吐出圧力(約1MPa)をはるかに超え、消防車による注水を有効にするためには、まず原子炉内の圧力を下げる必要がある。このためには主蒸気逃し安全弁(SR弁)を開にして、原子炉内の高圧の蒸気をS/Cに導くことが必要となる。この操作は減圧と呼ばれる。しかし、この操作により大量の熱(高温蒸気)がS/Cに移動するため、S/Cの冷却が出来ない状況の下ではS/C内の急激な温度および圧力の上昇を招くことになり、S/Cにおけるベントの体制を整えてから減圧を行なうことが求められる。
- 14日12時ごろから14時30分頃にかけてベントが先か減圧が先か議論を行なっている。はじめはベントが先と方針を定めてベントに取り組んだが、3号機水素爆発の影響を受けてベントラインの弁を開に出来ず、16時30分過ぎに方針を変えて減圧のためSR弁の開操作を行なったがこれもうまくいかなかった。
- その後、19時03分になってようやくSR弁開に漕ぎつけ注水を開始するも、19時20分には消防車の燃料切れにより注水は中断し、ようやく19時57分から連続注水が開始された。しかし、原子炉内の不安定な圧力変動の影響を受けて、注水作業も不安定な状態が続いた。

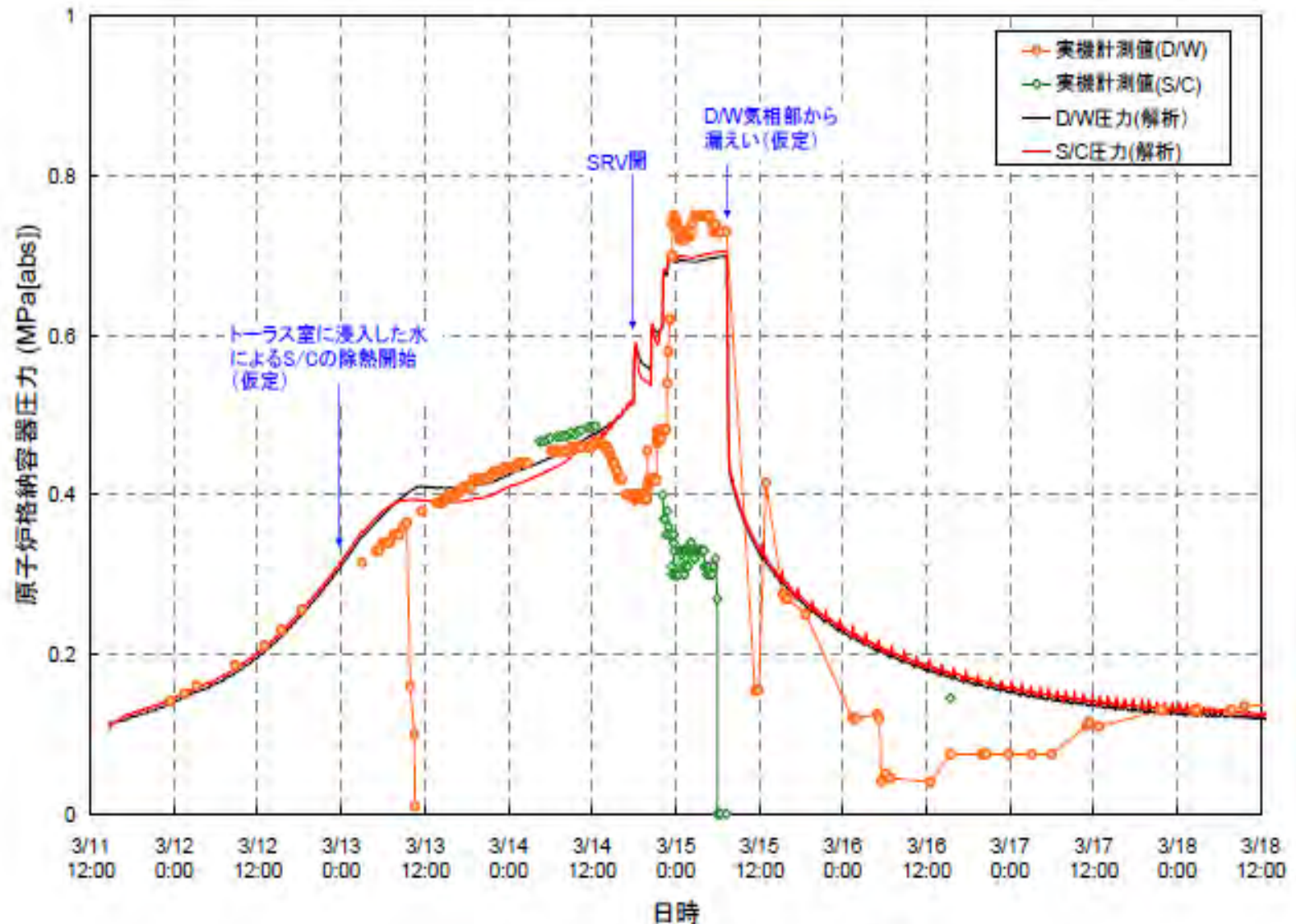


代替注水ライン（消防車による注水ライン含む）

	压力容器	格納容器 (Mark I 型)
設計圧力:	8.72MPa[abs]	0.48MPa[abs]
設計温度:	302°C	138°C
内径:	約5.6m	約20m(球部)、約10.9m(円筒部)
全高:	約22m	34.1m



2号機 原子炉圧力変化



2号機 格納容器圧力変化

東電事故調[4]

- 「14日20時頃～15日6時頃
- 格納容器(ドライウェル(D/W)、圧力抑制室(S/C))圧力に低下が見られない中、格納容器ベントラインの復旧を進め、**圧力抑制室側ラインの構成を14日21時頃に完了した**。しかし、その時点においてはベント実施の設定圧力*には至っていなかった。
- 格納容器圧力を監視していたところ、通常はほぼ同じ値であるはずが、ドライウェル圧力が上昇する一方、圧力抑制室の圧力はほぼ一定値を示した。ドライウェル側のベントラインの構成を試みたが、構成できず緊迫した状況が続く中、**15日6時14分頃**、大きな衝撃音と振動が発生、ほぼ同時に圧力抑制室の圧力指示値がダウンスケールを示し、発電所対策本部に0kPa[abs]と伝えられた。
- **圧力抑制室が破損した可能性が考えられたため、最小限の要員を除き、一時退避した。」**
- *この「設定圧力」は、ラプチャーディスクの作動圧力(破れる圧力)を指しており、2号機の場合、0.427MPa[gage](約0.528 MPa[abs])となる。ベントライン構成が完了した**14日21時ごろのD/W圧力は約0.42MPa[abs]であり、ラプチャーディスクの作動圧を下回っていた**。(東電ヒアリング資料[6]より)

民間事故調[3]

- 「2号機では、減圧操作と同時に、ベントのための努力も継続されていた。ドライウエルの圧力は上昇し、14日22時50分には0.540MPa[abs]となって、ラプチャーディスク作動圧を超えた。この頃には、圧力抑制室から出る2本のベントラインの一つが、わずかに使用可能な状態になったと思われた。
- しかしながら、ラプチャーディスク作動圧を超えた後も、ドライウエル圧力は上昇傾向を続け、23時35分には0.740MPa[abs]に達した。一方で圧力抑制室の圧力は、ドライウエル圧力が上昇するにつれて、逆に下降傾向を示した。そこで、圧力抑制室の代わりに、ドライウエルからラプチャーディスクに至るラインを構成し、ベントを実施することが決断され、ラインの構成が行われた。しかしながら、2号機のベントが結局実施されたか否かについては、今のところ明らかになっていない。」

東電ヒアリング[6]

質問

- 「S/Cからのウェットベントの準備が整い、かつ設定圧力を上回ったにもかかわらず、ラプチャーディスクが働かなかった（すなわちディスクのラプチャー（破断）が起こらなかった）理由は何か」

回答

- 「14日21時ごろにS/Cベント弁（小弁）を微開とすることで、ベントラインの構成が完了したが、その後もD/W圧力は上昇を続け、22時50分頃にラプチャーディスク作動圧を超えて、23時30分頃には約0.7MPa[abs]に達した。これは、一旦微開となったS/Cベント弁（小弁）が閉まっていたことが原因と考えている。なお、ラプチャーディスクが作動していたかどうかについては、現在も確認されておらず今後の検討課題となっている。」

原子炉格納容器のD/W とS/Cにおける圧力表示のミスマッチ

政府事故調[2]

(b) S/C圧力計が示す実測値との関係

- 2号機 S/C圧力計については、14日22時10分頃以降、D/W圧力計の上昇傾向に比して、全く数値が上がる傾向を示しておらず、計装用配管や圧力伝送器、電気システムで何らかの異常を来したことで誤計測、誤表示が始まっていたと考えられる。

分科会の見解

2号機においては十分な時間の余裕があったにもかかわらず、3号機建屋の水素爆発の影響を受けてベントラインが閉となり、S/CベントからD/Wベントへの切り替え等様々な試みを行なったにもかかわらず、結局ベントと代替え注水に失敗して、格納容器が設計基準を大きく超える高温、高圧に長時間晒されて損傷し、大量の放射性物質が外部に放出される結果となったことが伺える。

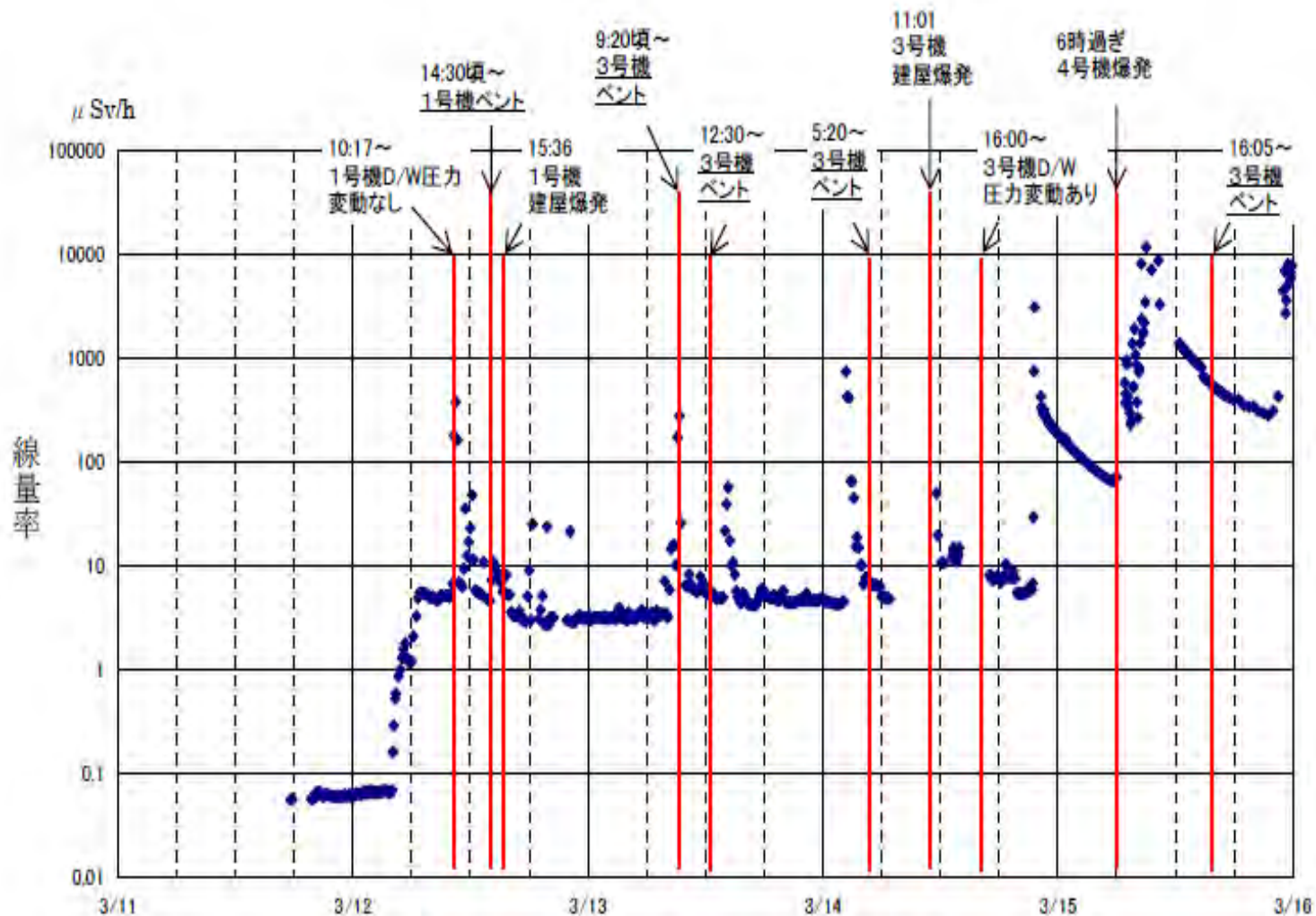
(5) 炉心メルトダウン(国会事故調[1])

- 「14日13時25分には、ここまで延々と原子炉を冷やし続けた2号機のRCICが停止した。原子炉水位は依然TAF+2400mmを維持していたが、16時30分までには炉心の露出が始まる可能性がある。それを知りつつも、作業は強い余震に阻まれて中断した。作業が再開された16時には、原子炉水位はTAF+300mmまでに低下していた。状況はそのまま回復に向かうことなく、炉心の露出が始まった。
- 18時22分、炉心が完全に露出した。原子炉圧力を下げるためSR弁を開いたが、格納容器の圧力には予想した上昇が見られない。そのため、格納容器から原子炉建屋への漏洩が生じていたものと推測される*。ようやく原子炉圧力を0.63MPaまで低下させたが、消防車の燃料切れで注水ができず、原子炉の空だき状態が続いている。20時30分頃から21時20分ごろまでの間、注水すると原子炉圧力が上昇して注水が停止し、再び原子炉圧力を下げてから注水すると再び原子力圧力が上昇するという現象が反復される。2台のSR弁を開くことで原子炉の減圧を加速し、これが功を奏して原子炉圧力容器への注水が進むようになり、22時にはTAF-1600mまで回復した。」

*この部分の記述については、格納容器S/Cの圧力は低下しているもののD/Wの圧力は予想通り急激に上昇している<参考資料3(3)図1(b)参照>。これは政府事故調が述べているように、S/Cの計測系に何らかのトラブルがあったためと考えられ、S/C圧力の低下が必ずしもこの段階から漏えいが始まった根拠になっているとは言い難い。

(5) 炉心メルトダウン(石川[7])

- 「14日夕刻(午後6時ごろ)までは、炉心はまだ溶融に至っていません。炉心溶融が始まるのはこれからです。
- 午後6時2分、逃し安全弁を開固定し原子力圧力を開放低下させます。
- 午後7時54分、消防車を使っての原子炉注水が始まります。
- この二つが、炉心溶融を起こした一連の操作です。」
- 「2号機の炉心溶融は、14日の夕刻から15日の朝にかけて、間歇的に3回にわたって進んだと考えられます」
- 「2号機は、減圧と同時に炉心注水を行っていたら、炉心溶融は起きなかったと考えられる」



福島第一原子力発電所 正門付近の線量率

(6) 放射性物質の漏洩

- 東電事故調報告は「15日7時20分頃からD/Wからの大量の放射性物質の漏洩があったのではないか」との推定を行っている。
- 14日夕刻から深夜にかけて炉心メルトダウンが始まり、圧力容器内に発生した高温・高圧の蒸気と水素ガスが大量に格納容器に放出された。それにもかかわらず、格納容器のベントがうまくいかず、ついに15日朝格納容器に損傷が発生して、そこから大量の放射性物質が大気に放出されたものと考えられる。
- これ以前の放射性物質の漏洩は1号機および3号機のS/Cベントに由来するものと考えられ、したがってその線量は比較的少ないが、2号機由来のものは圧力容器内の炉心熔融反応で発生した蒸気と水素が直接外部に放出されたため、その線量は桁違いに多くなった。

(7) 15日6時14分ごろの爆発音

RCICが停止して格納容器の圧力が設計圧力0.48MPa[abs]を大きく超えて上昇し、格納容器の崩壊が懸念されて緊迫した状況の中、15日6時14分ごろに大きな衝撃音と振動が発生、それとほぼ同時刻にS/Cの圧力がゼロになった。

国会事故調[1]

- 「RCICによる注水が停止した2号機の原子炉は、そのまま空焚き状態から脱することができず、さらにドライウェル圧力も上昇し、15日0時02分時点で、0.75MPa[abs]に達した。6時にはドライウェル圧力が0.73MPa[abs]となり、原子炉水位はTAF-2800mmを示した。
- このとき4号機の原子炉建屋で爆発が発生した。同じころ、2号機のトラス室(S/C)においても轟音が聞こえたとのことであり、その直後における放射線レベルが0.6mSv/h近くまで上昇している。
- 現場環境が悪化し、さらなる危険が予測できない状況となったため、大多数の作業員を福島第二原発まで避難させることを決定した。7時20分から11時25分にかけて、2号機の監視が中断していた間、格納容器の圧力が0.155MPa[abs]まで低下していることが確認された。これが格納容器ベントによるものでないことは明らかで、格納容器の破損を示唆するものと推測されている。」

東電事故調[4]

- 「<衝撃音の発生と、一部要員の退避>
- ・ 15日6時14分頃、大きな衝撃音と振動が発生した。ほぼ同時期に圧力抑制室の圧力がダウンスケールを示し、発電所対策本部に0(ゼロ)kPa[abs]と伝えられた。
- ・ 圧力抑制室が損傷した可能性を考え、プラントの監視、応急復旧作業に必要な要員を除き、一時的に福島第二原子力発電所へ移動することとした。退避直後は約70名が発電所対策本部に残留、その日の昼頃には中央制御室でデータ監視を行う運転員や、現場の放射線量測定や免震重要棟の出入管理を行う保安班、発電所への出入管理を行う警備誘導班などの要員が、同日夕方頃には爆発の瓦礫撤去への対応を行う復旧班(土木部門)の要員が、徐々に福島第一原子力発電所へ戻って復旧作業を再開・継続した。
- ・ 一方、ドライウェル圧力は15日7時20分時点で730kPa[abs]を維持していた。
- ・ 次の測定である15日11時25分時点でのドライウェル圧力は155kPa[abs]に低下した。この間に、正門付近のモニタリングカーでの測定値が大幅に上昇した。」
- 「14日夜から15日未明にかけて、2号機のドライウェル圧力が上昇し、15日6時14分頃に衝撃音と振動が発生し、その後に2号機圧力抑制室の圧力指示値が発電所対策本部へ「0」と報告されたことから、圧力抑制室が損傷した可能性があると考え(後日、衝撃音は「11. プラント爆発評価」に記載する通り2号機ではなく4号機であることを確認)、プラントの監視と復旧作業に必要な要員約70名を残し、約650名がバスや自家用車で福島第二原子力発電所へ一時退避した。」
- 「さらに、平成24年4月18日にロボットを用いてトーラス室内の状況確認を実施した。その結果、配管保温材の一部が落下していたものの、VTRにより確認された範囲で圧力抑制室(トーラス)、マンホール(2箇所)を含め、トーラス室内に大きな変形、損傷、漏えいは認められなかった。」

政府事故調[2]

「15日6時12分頃に確認された異音や衝撃の原因は、4号機R/B爆発によるものであったと考えられ、2号機R/B内で何らかの爆発的事象が生じた事によるものとは考え難い。」

東電ヒアリング[6]

質問:

- (ア)「D/WおよびS/Cの設計圧力はいくらか」
- (イ)「格納容器は設計圧力を大幅に超えて、最大0.75MPa[abs]程度まで上昇している。この時点で容器の破断が心配されたが、実際には大規模な破断は回避され、シール部などからの漏洩によって減圧されたとの理解でよいか。その場合、格納容器の破断が起きる終局強度(耐圧)は何MPa程度と考えておられるか、言い換えれば、設計圧力に対する安全裕度をどの程度に見積もっておられたのか。」

回答:

- (ア)「2号機のD/WおよびS/Cの設計圧力は0.38MPa[gage]となっている。なお最高使用圧力は0.427MPa[gage]である。」
- (イ)「当社としては少なくとも温度200°C、最高使用圧力の2倍程度の圧力であれば格納容器の耐性として確保できる範囲と考えている。福島第一原子力発電所の事故では、格納容器からの漏洩は、圧力よりも格納容器温度が主要因としてシール性能を喪失した可能性が高いと考えている。」

2号機格納容器の損傷

政府事故調報告[2, p34]

しかし、その後、同日 13 時 45 分頃以降、同日 18 時 10 分頃までの間、格納容器又はその周辺部に、その閉じ込め機能を損なうような損傷が生じていた可能性が十分認められ、それ以降も、更に大きな損傷が生じていった可能性が極めて高い。

- ③ かかる損傷が生じた箇所は、S/C 又はベント管のほか、格納容器フランジ部、電気配線貫通部、人の出入り用のエアロック、機器搬入用ハッチ等の気密性確保のために用いられるフランジガスケットやエポキシ樹脂といったシール材が高温で劣化して生じた可能性等、種々の可能性が考えられるが、現時点では現場確認ができないため、損傷箇所の特定は困難である。

したがって、今後、国及び事業者において、現場確認が可能となった段階で、損傷箇所を特定の上、その損傷原因や損傷時期を検証することが望まれる。

2号機格納容器の損傷 NHK「かぶん」ブログ

2012年03月27日 (火) 解説: 福島第一原発2号機に何が

- ・東京電力はこれまで水圧計などから水位は3メートルほどあると見ていましたが映像で確認したところ、60センチしかありませんでした。
- ・この水位は格納容器とその下の圧力抑制室をつなぐ「ベント管」の位置とほぼ同じで、東京電力では圧力抑制室などが壊れて建屋に水が漏れ出しているとみています。
- ・内藤正則部長:「損傷している場所はこれよりも下にあると感じる。この格納容器とのつなぎ目から漏れ出ている。一つの可能性です。もう一つは圧力抑制室のこの壁というか、これそのものが損傷してどこかで亀裂が生じた。」

[参考資料]「メルトダウン連鎖の真相」、NHKスペシャル「メルトダウン」取材班、2013.6

2号機格納容器の損傷

円山 重直、日本機械学会論文集(B編)、78-796 (2012-12)

- ・格納容器(PCV)破壊前後の挙動 図8は3月15日午前に格納容器が破壊した前後のD/WとPCVの圧力変化を示す。著者が(HTC Rep. 22.1, 2012/3/27)で報告しているように、第4・1節のシナリオでは、15日7時40分にD/W下部が破損し、放射性蒸気が外部環境に放出されたシナリオである。この時、PCVの減圧に伴いPCVにある約5000 tonの水が蒸気を発生する相平衡モデルを採用した。その時の推定破断面積は等価直径である。
- ・破損箇所は1号機、3号機と同様にD/WとS/Cを接続するベロ一部が疑われる。この箇所は、構造上脆弱だといわれている。
- ・さらに、2012年3月16日の観察で2号機D/Wの水位が当初の予想より遙かに低く、水位はD/W底部から60cm程度であったとされている。また、同年4月18日にロボットで観察した映像では、S/C上部で破損が見られなかったことなど、本報の破損箇所予測を裏付ける事例が出ている。

(8) 2号機において水素爆発が起きなかった理由

- ・ 2号機においても14日16時30分ごろまでに炉心の露出が始まり、18時22分には完全に露出しており、この時間帯から炉心のメルトダウンが始まっていたことがうかがえる。
- ・ したがって、この頃からジルコニウム－水反応により大量の水素が発生し、これが炉容器→格納容器→原子炉建屋へと漏洩していったことが推測される。
- ・ しかし、それにもかかわらず、2号機では1号機、3号機および4号機で起こった建屋の水素爆発は起こらなかった。
- ・ これについては、1号機水素爆発の影響を受けて2号機のブローアウト・パネルが脱落し、この経路を通して水素ガスが建屋の外部に放出されたためであると推測されている。
- ・ 本件に関しては事故調間で大きな見解の差はない。政府事故調技術解説[5, p112]ではこれを「ケガの功名」と評している。

(9) 多号機事故の影響

2号機では以下に示すように、様々な形で他号機の事故の影響を受けている。

- ・1号機原子炉建屋の水素爆発—>2号機ブローアウト・パネルの脱落
—>2号機原子炉建屋の水素爆発の回避
- ・3号機原子炉建屋の水素爆発—>2号機S/Cベントラインの損傷
- ・4号機原子炉建屋の水素爆発—>2号機格納容器の損傷と誤解され、作業員の一時避難を行なう

福島第一原発では、1～6号機が近接して設置されており、地震と津波の襲来により各号機においてさまざまな事故が同時並行的に進展していった。発電所対策本部は各号機における状況を十分に把握できないままに、緊急度の優先順位を判断するというむずかしい対応を迫られた。2号機におけるベントおよび代替注水の遅れは、このような状況の下に生じたものである。

(10) まとめ

- 地震発生直後、2号機はスクラムすると共に非常用D/Gが起動し冷却が開始された。また、手動で弁開の操作を行なってRCICを作動させた。津波襲来後は全電源喪失の状態となったが、幸いRCICはその後約70時間にわたって作動し続けた。
- この間に格納容器ベントおよび原子炉の減圧と消防車による代替注水が出来ていれば、原子炉の燃料メルトダウンは避けられた可能性がある。しかし実際には3号機水素爆発の影響を受けるなどしてベントおよび代替注水に思いのほか手間取り、炉心溶融を避けることは出来なかった。
- RCICが作動しなくなった後原子炉圧力が急上昇し、SR弁開により原子炉圧力容器から格納容器に高温・高圧の蒸気が放出されるとともに、さらに炉心溶融時のジルコニウム-水反応によって発生した高温・高圧の水素も格納容器に放出された。これによって格納容器の温度と圧力がさらに高くなり、損傷を受けた格納容器から、大量の放射性物質が大気に放出されたものと考えられる。
- 15日6時14分頃の爆発音は、当初2号機格納容器の爆発と考えられて作業員の避難も行ったが、後の地震波の解析によりこれは4号機建屋の水素爆発によるものであり、2号機格納容器の爆発によるものではないことが判明した。しかし、これは2号機から最も多くの放射性物質が環境に放出されたという事実を変えるものではない。
- 2号機原子炉建屋で水素爆発が起らなかった理由は、1号機建屋の水素爆発の折に2号機のブローアウト・パネルが脱落して、この経路を通して2号機に発生した大量の水素が外気に放出したためであると推測されている。