

3号機の原子炉圧力及び格納容器圧力の 挙動について

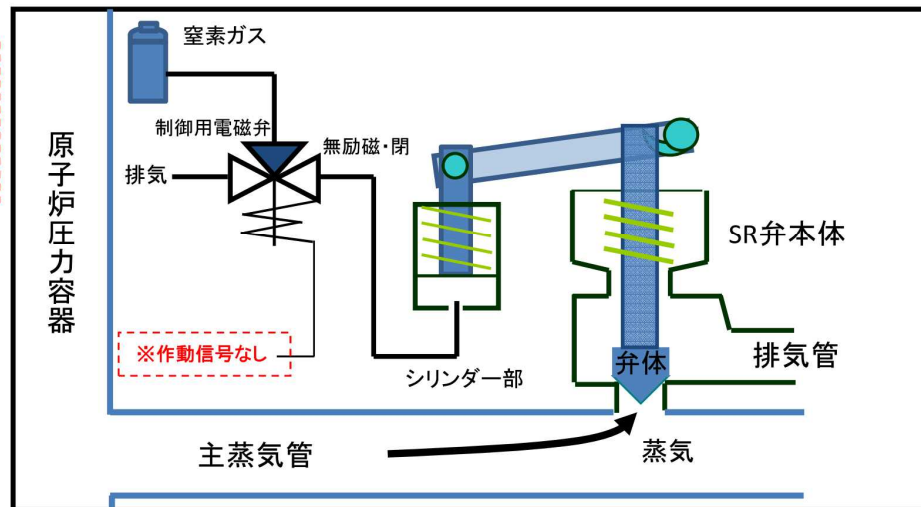
3号機の圧力挙動に関する主な論点

- 原子炉圧力容器
 - チャートに記録された細かな圧力振動はS/RVの挙動（逃し弁機能、安全弁機能）によるものか
 - 手動操作の有無、窒素の供給等、当時の状況は合理的に説明できるか
 - ADSが起動した場合、弁の開状態は維持されたか
- 格納容器圧力
 - PCVベントの成功回数： 3回目以降のベントは失敗していたか
 - ADSの起動によりPCV圧力がRD設定圧を超えたため、ベントが成功したのか
 - PCV圧力が増減した要因

逃し安全弁の作動原理

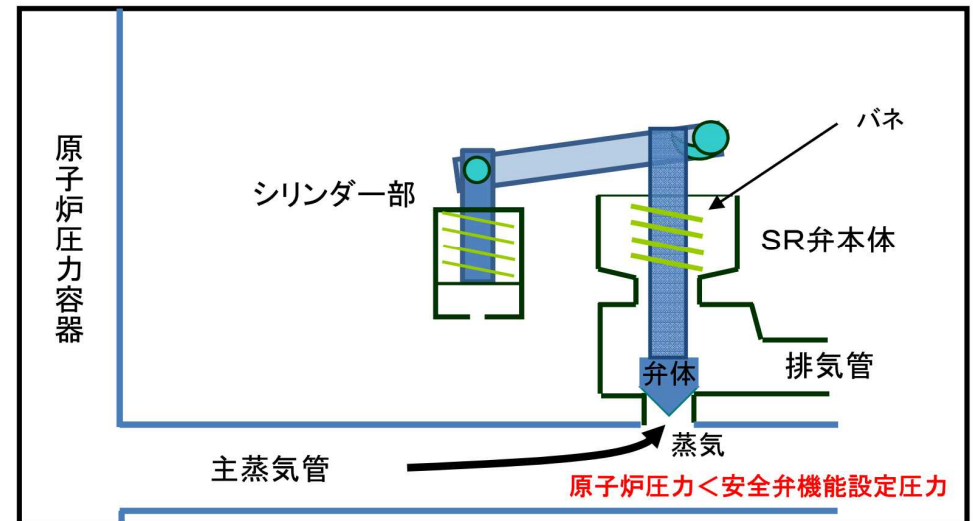
逃し弁機能

通常時

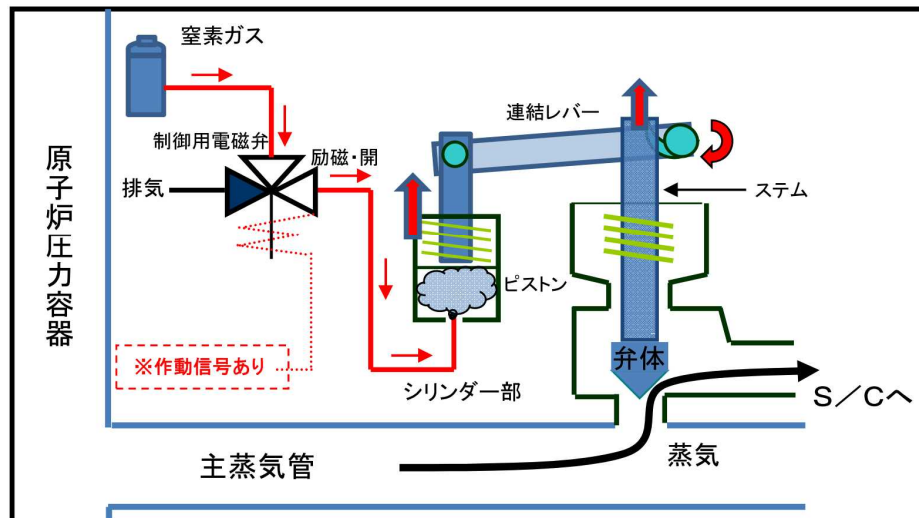


安全弁機能

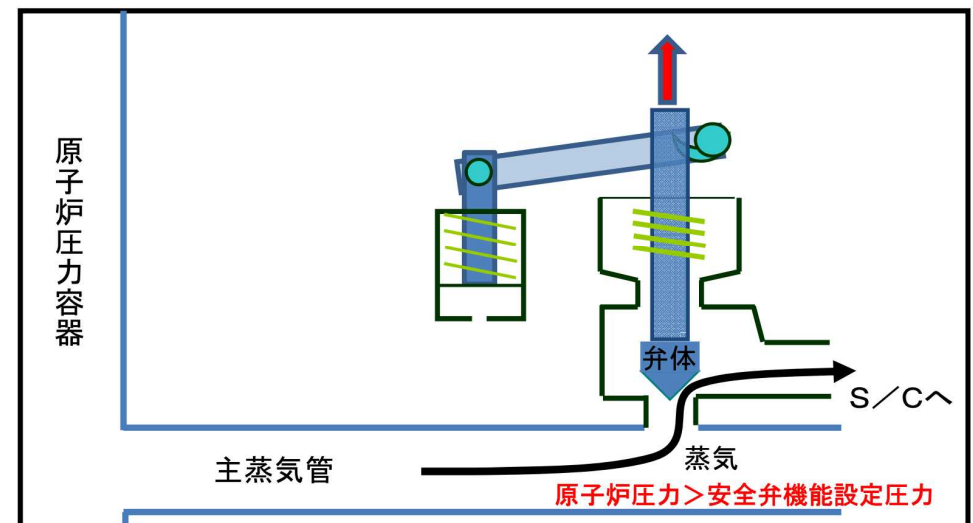
通常時



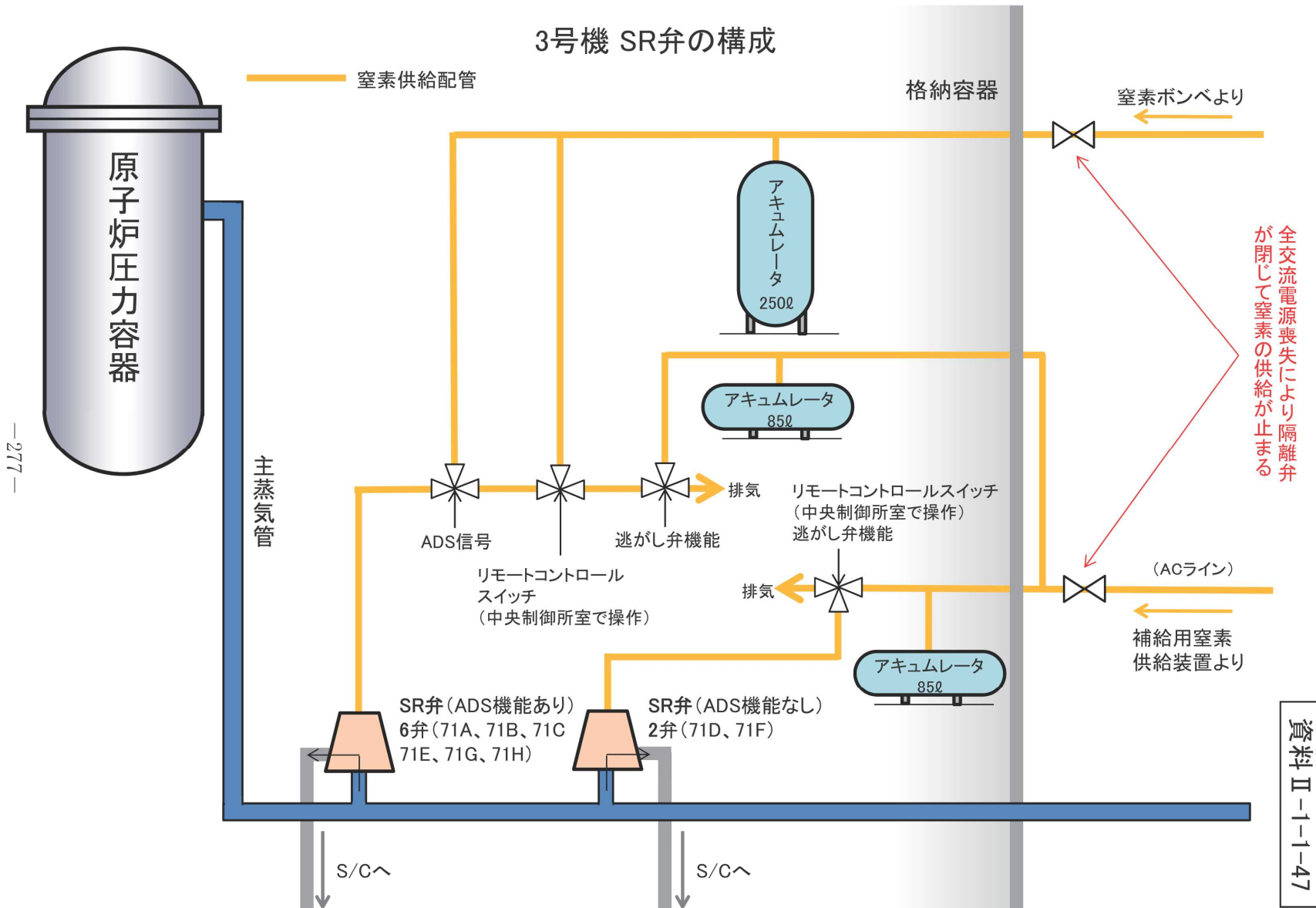
圧力異常上昇時／冷却材喪失事故時／遠隔手動操作時



圧力異常上昇時



S/RVへの窒素供給



— 277 —

3号機RPV圧力

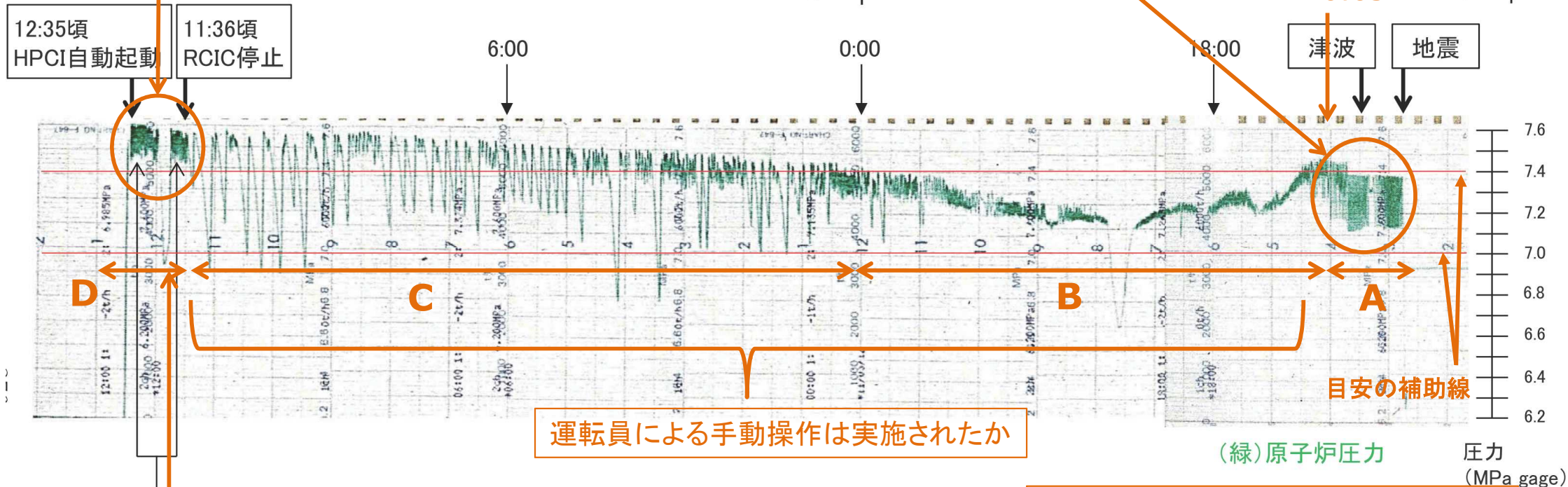
安全弁機能による動作か？

窒素の供給が復帰していれば、C弁が作動するのではないかな

逃し弁機能による動作

RCIC手動起動
16:03

3/11



運転員による手動操作は実施されたか

A、B、C及びDは便宜上の時間区分

SR弁の逃し弁機能の復帰値に至る前に原子炉圧力が上昇

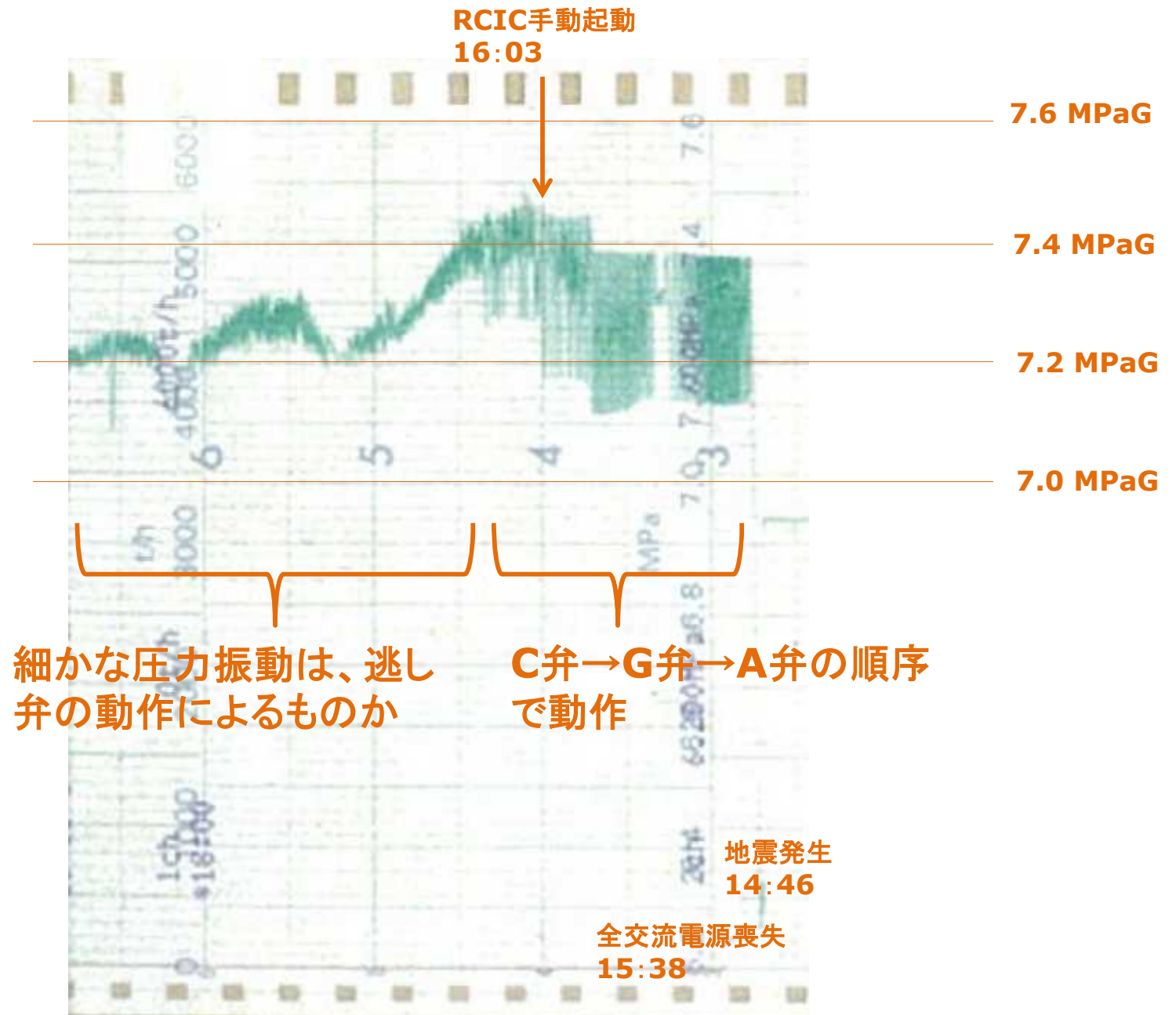
「中央制御室にてスタンバイ状態への弁のリセット操作後、再起動操作が試みられたが、起動後すぐにタービン蒸気止め弁のトリップ機構のラッチが外れ、弁が閉まり停止した。」ことによる減圧か？

表1 SRVの逃がし弁機能と安全弁機能の作動圧 単位: MPa[gage]

	A	B	C	D	E	F	G	H
逃がし弁機能	7.51	7.58	7.44	7.58	7.51	7.58	7.51	7.58
安全弁機能	7.71	7.78	7.64	7.71	7.64	7.78	7.71	7.78
ADS機能の有無	有	有	有	—	有	—	有	有

東電、未解明問題報告書(第5回)より抜粋

RCIC起動前後のRPV圧力挙動





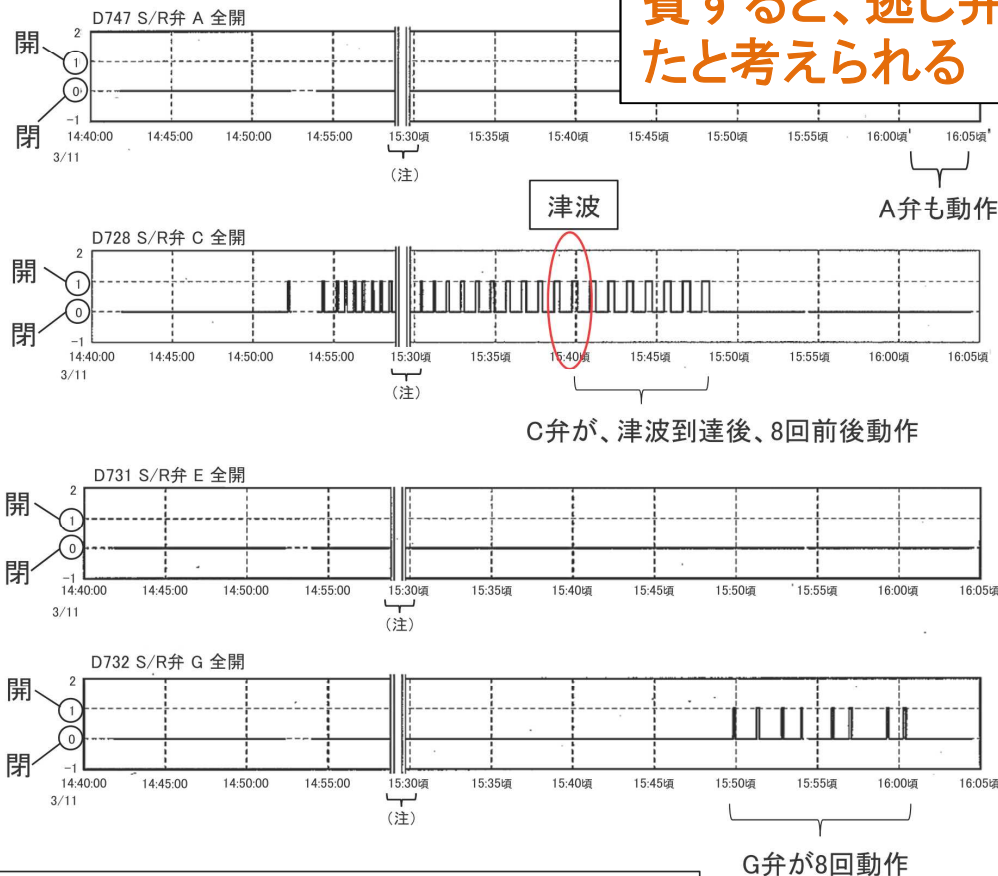
アキュムレータによる逃し弁の動作

逃がし安全弁Cの開閉記録

開閉回数	3/11時刻	逃し安全弁C 開	開閉回数	3/11時刻	逃し安全弁C 開
1	14:51:50	オン	28	15:07:58	オン
	14:51:55	オフ		15:08:05	オフ
2	14:52:29	オン	29	15:08:39	オン
	14:52:35	オフ		15:08:46	オフ
3	14:53:03	オン	30	15:09:55	オン
	14:53:11	オフ		15:10:03	オフ
4	14:53:56	オン	31	15:11:09	オン
	14:54:04	オフ		15:11:16	オフ
5	14:54:48	オン	32	15:12:01	オン
	14:54:56	オフ		15:12:07	オフ
6	14:55:21	オン	33	15:13:32	オン
	14:55:29	オフ		15:13:39	オフ
7	14:55:53	オン	34	15:14:43	オン
	14:56:01	オフ		15:14:49	オフ
8	14:56:26	オン	35	15:15:54	オン
	14:56:34	オフ		15:16:00	オフ
9	14:57:00	オン	36	15:17:17	オン
	14:57:07	オフ		15:17:22	オフ
10	14:57:33	オン	37	15:19:01	オン
	14:57:41	オフ		15:19:06	オフ
11	14:58:06	オン	38	15:25:58	オン
	14:58:14	オフ		15:26:03	オフ
12	14:58:39	オン	39	15:27:19	オン
	14:58:47	オフ		15:27:24	オフ
13	14:59:13	オン	40	15:28:17	オン
	14:59:21	オフ		15:28:23	オフ
14	14:59:47	オン	41	15:30:02	オン
	14:59:55	オフ		15:30:09	オフ
15	15:00:21	オン	42	15:30:51	オン
	15:00:29	オフ		15:30:58	オフ
16	15:00:56	オン	43	15:31:39	オン
	15:01:04	オフ		15:31:50	オフ
17	15:01:30	オン	44	15:32:32	オン
	15:01:38	オフ		15:32:45	オフ
18	15:02:04	オン	45	15:33:27	オン
	15:02:12	オフ		15:33:40	オフ
19	15:02:39	オン	46	15:34:23	オン
	15:02:46	オフ		15:34:37	オフ
20	15:03:12	オン	47	15:35:21	オン
	15:03:20	オフ		15:35:36	オフ
21	15:03:46	オン	48	15:36:19	オン
	15:03:54	オフ		15:36:36	オフ
22	15:04:21	オン	49	15:37:20	オン
	15:04:29	オフ		15:37:36	オフ
23	15:04:56	オン	50	15:38:20	オン
	15:05:03	オフ		15:38:40	オフ
24	15:05:30	オン	51	15:39:26	オン
	15:05:38	オフ		15:39:46	オフ
25	15:06:06	オン	52	15:40:33	オン
	15:06:14	オフ		15:40:54	オフ
26	15:06:42	オン	53	15:41:39	オン
	15:06:50	オフ		15:42:02	オフ
27	15:07:19	オン	54	15:42:48	オン
	15:07:26	オフ		15:43:12	オフ

(3号機アラームタイプに基づく)

3号機 SR弁の動作



津波到達後は、アキュムレータの窒素を消費すると、逃し弁モードは動作不能になったと考えられる

C弁→G弁→A弁の順で動作

東京電力「過渡現象記録装置データ」(平成23年5月)を基に作成

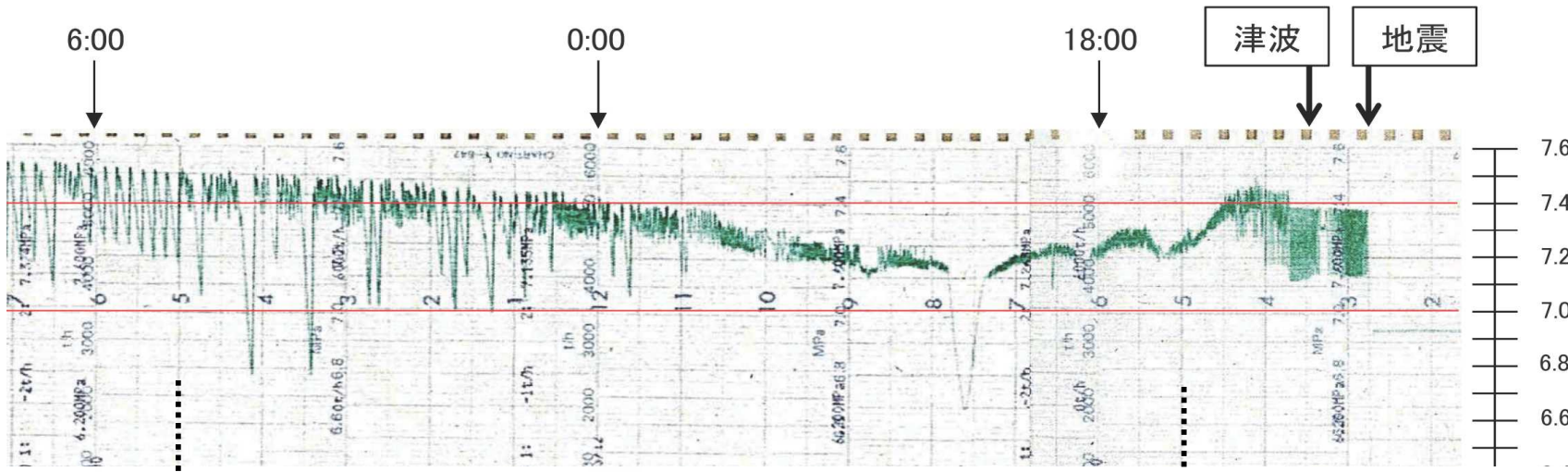
14:41:50～15:43:12、合計54回にわたりSR弁(C弁)の開閉が繰り返された(3号機アラームタイプに基づく)。
14:59頃から約30分間の過渡現象記録装置データが欠落しているが、その前後のSR弁の開閉動作に関する記録は、アラームタイプ上の記録と整合する。
なお、アラームタイプには、SR弁の開閉記録を含む接点Dデータが15:43:45までしかなく、15:50頃以降開閉動作を開始したG弁及びA弁の開閉に関する記録はない。

(※3号機の過渡現象記録装置データには、SR弁のA弁、C弁、E弁及びG弁の各弁の動作についてのみの記録されている。)

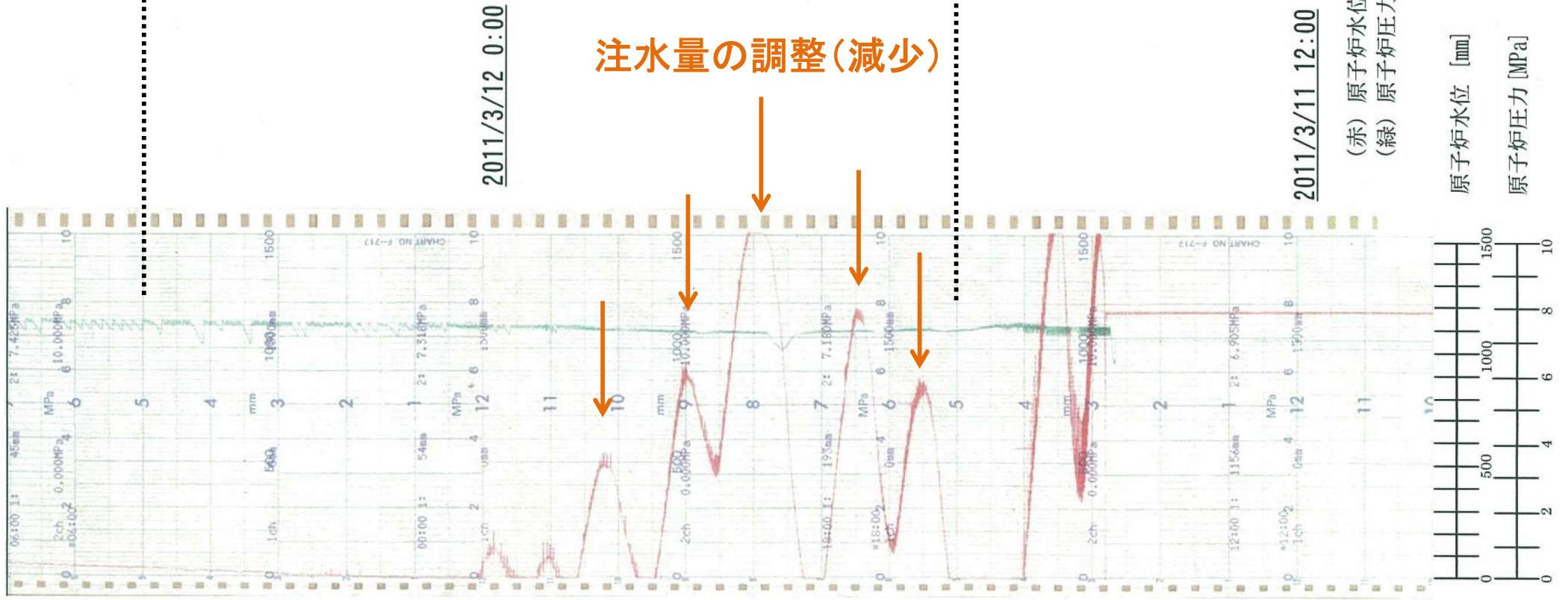
(注)東京電力は、3号機の過渡現象記録装置に記録されたデータにつき、他のチャート等の記録と照合した結果、平成23年3月11日14時59分頃から約30分間データが途切れていたとして、これ以降のデータの時刻を推定時刻としている。

資料Ⅱ-1-1-40

運転員によるRCICの操作



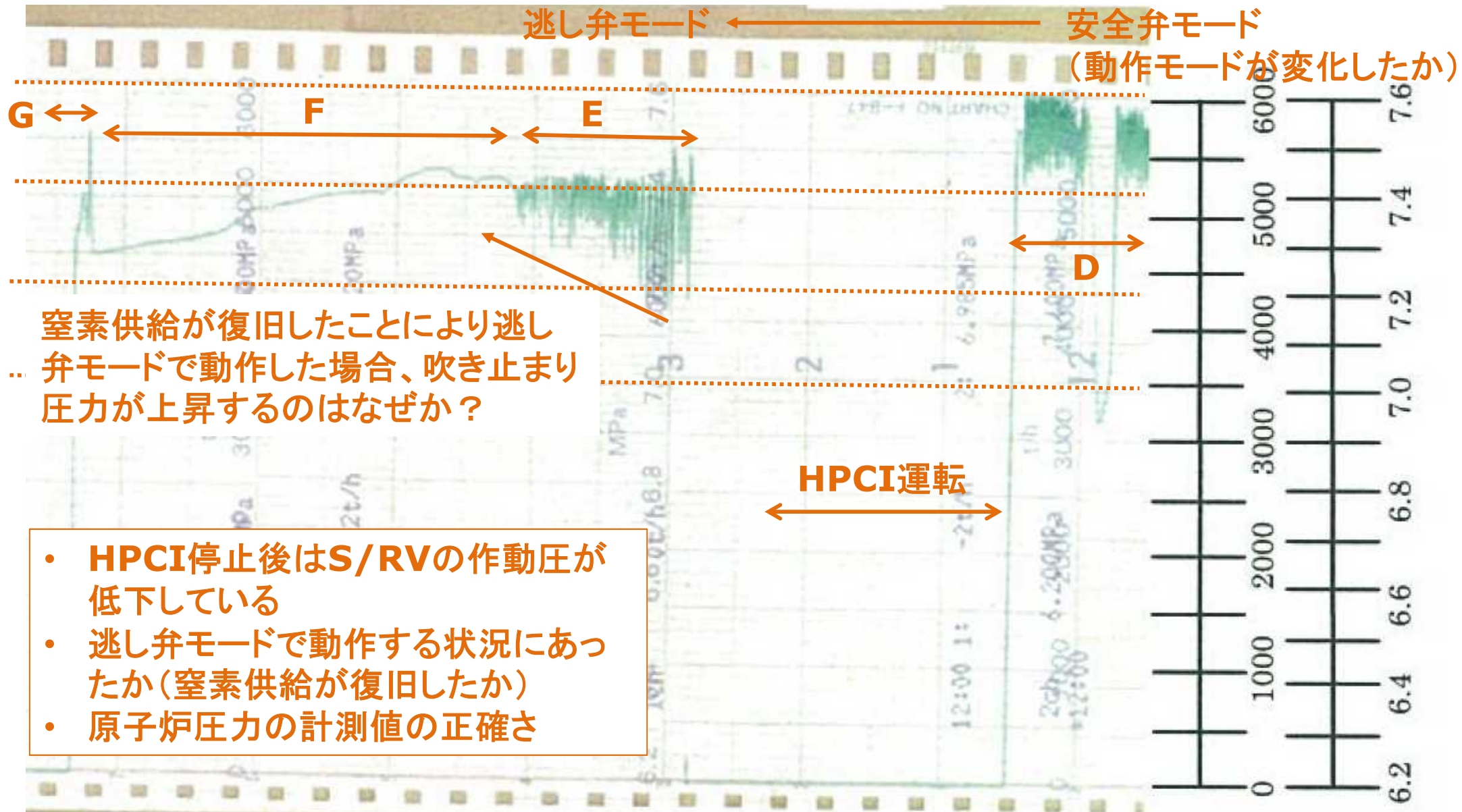
原子炉水位の変化から、概ね30分程度の間隔で注水量の調整をしていたのではないかと。
他方、圧力振動をS/RVの手動操作とするには時間間隔が短すぎるのではないかと。



(赤) 原子炉水位
(緑) 原子炉圧力

原子炉水位 [mm]
原子炉圧力 [MPa]

HPCI運転前後でのRPV圧力



D、E、F及びGは便宜上の時間区分

ADS作動ロジック

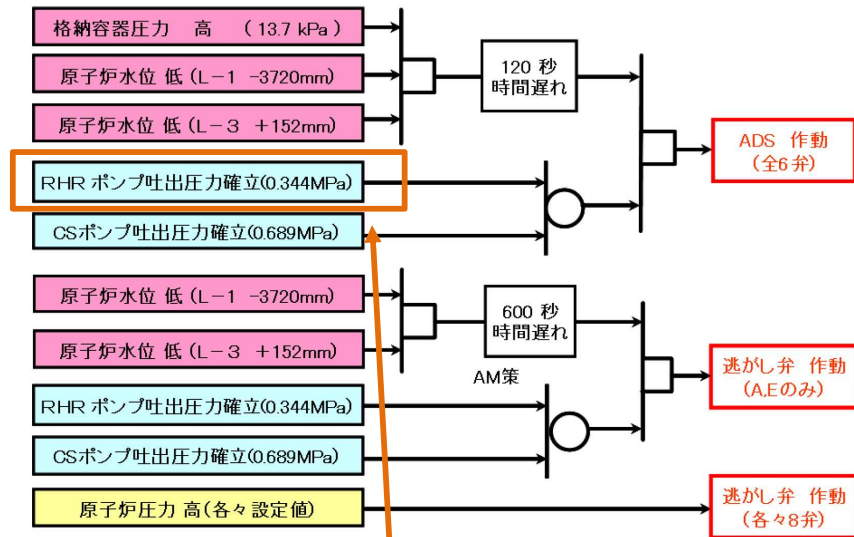


図 6 SEV の作動ロジック

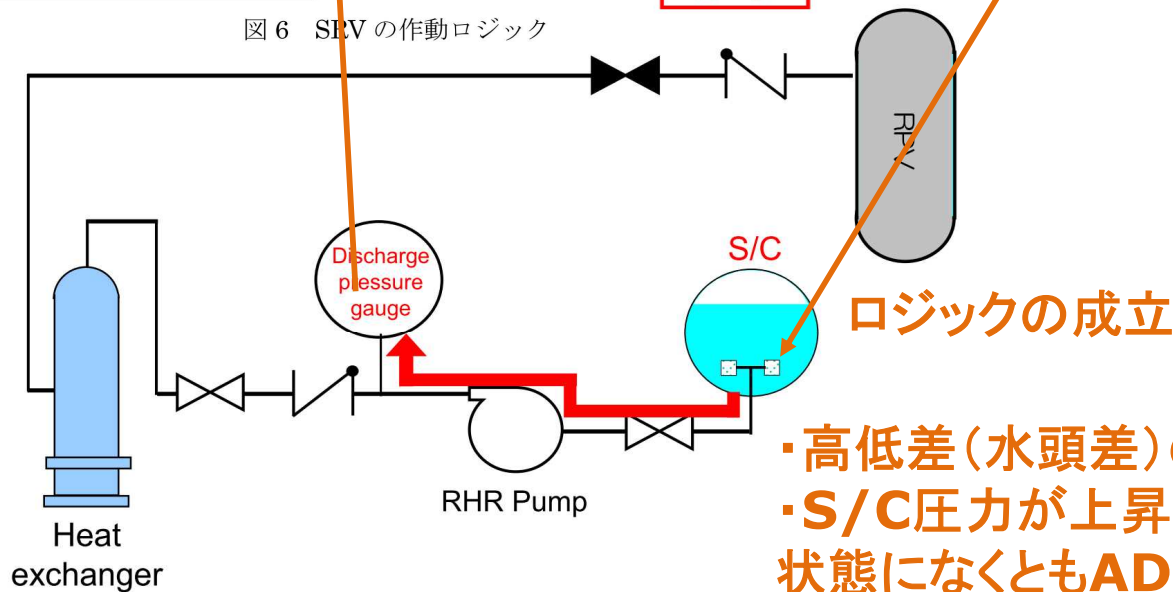


図 9 RHR の系統構成

水蒸気がS/Cへ移行

RPV圧力が低下

PCV圧力が上昇

ロジックの成立

- ・高低差(水頭差)の影響はあったか
- ・S/C圧力が上昇すると、RHRが待機状態になくともADSが作動してしまうか

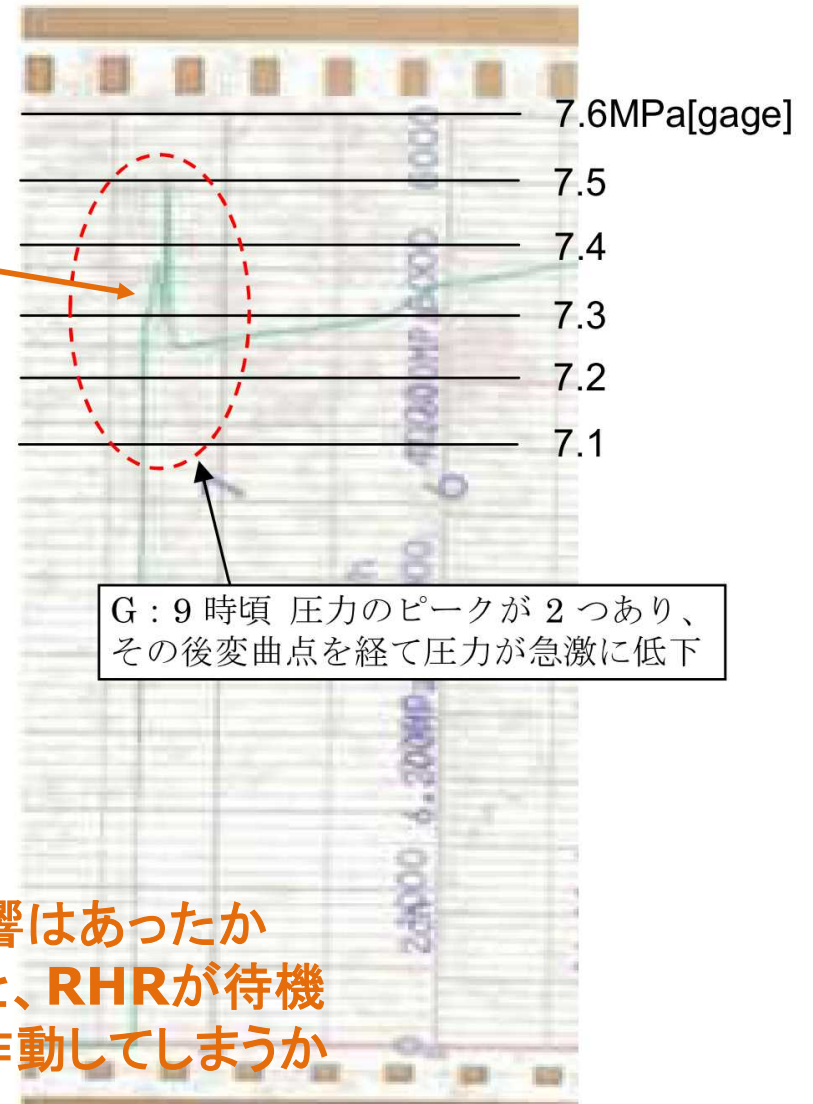
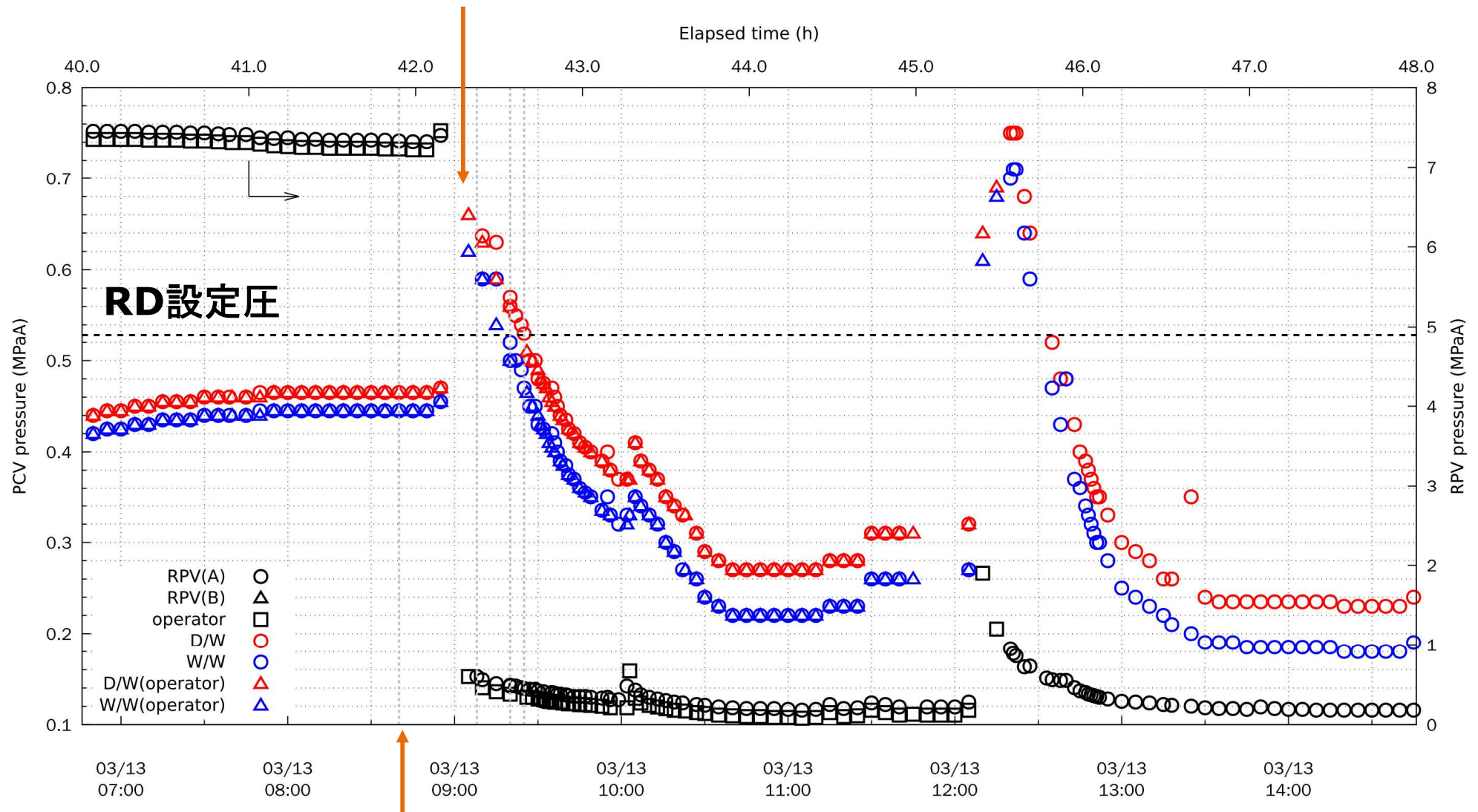


図 7 原子炉圧力チャート (狭帯域)

ADS作動によるRD破損

ラプチャーディスクの破損により格納容器の減圧開始

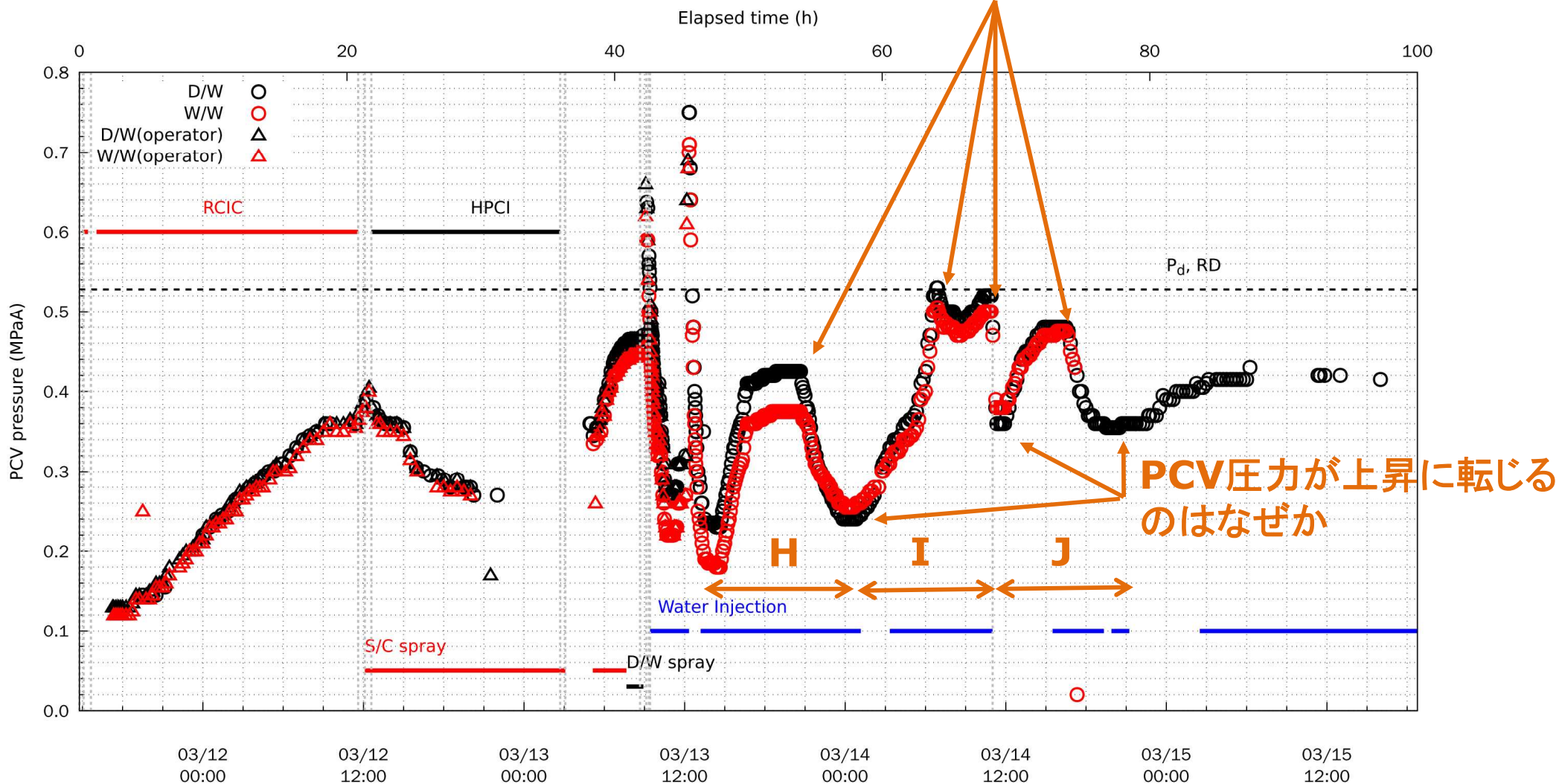


8:41
 ベントライン構成完了



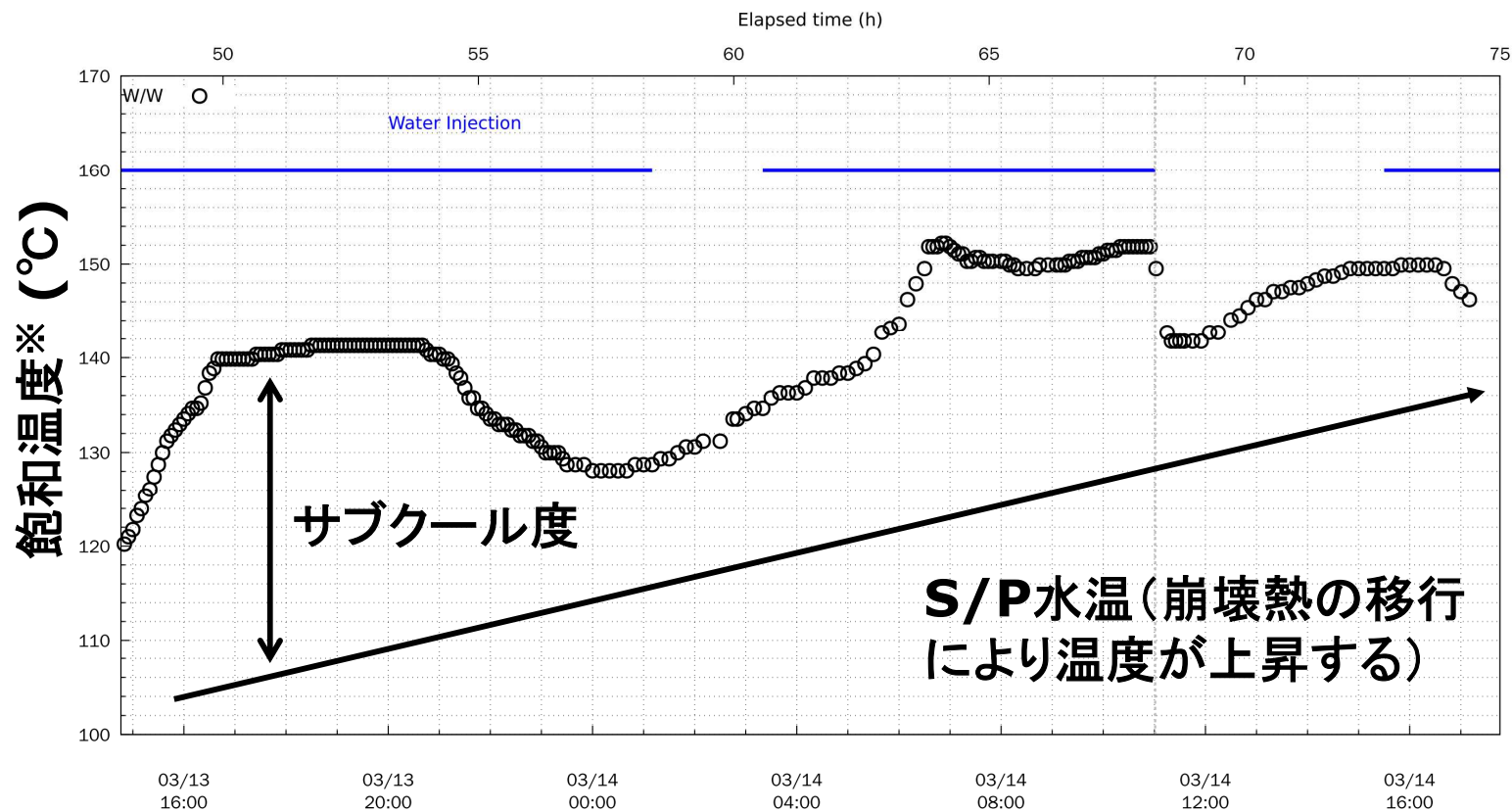
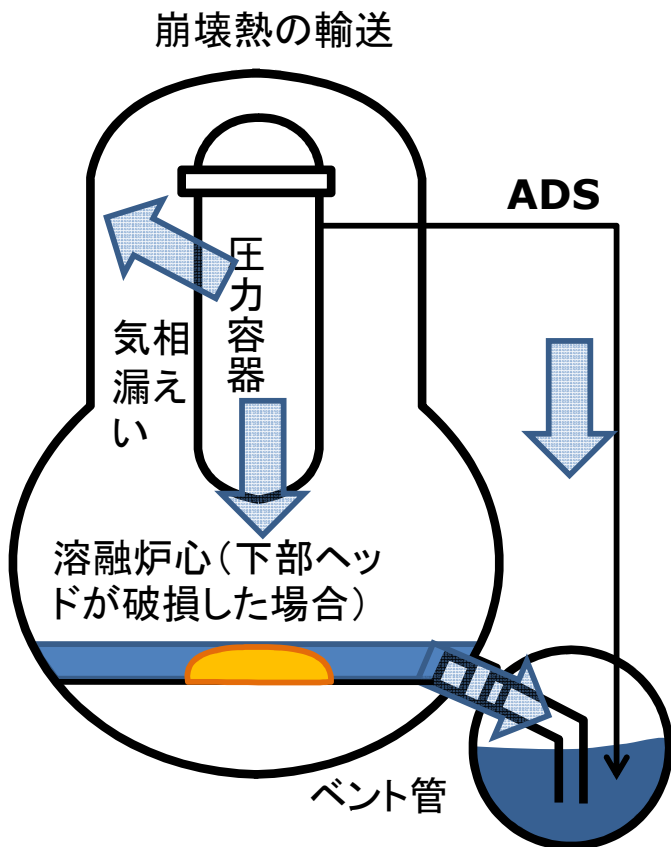
2回目のベント後の格納容器圧力

3回目以降のベントが失敗だった場合、
PCV圧力が低下した原因は？



H、I及びJは便宜上の時間区分

ベント後のS/Pの飽和温度

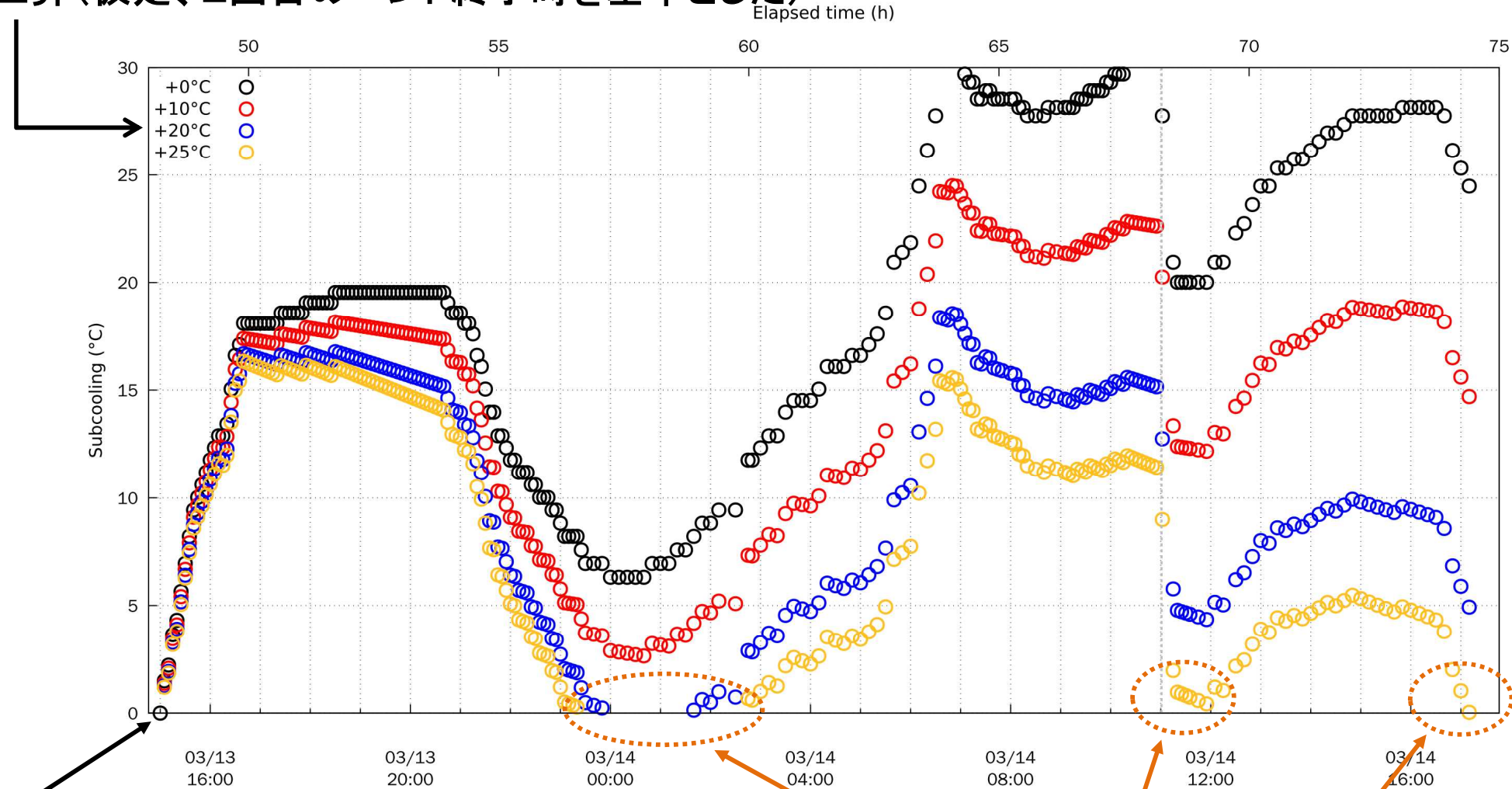


※W/W圧力の実測値から換算



ベント後のS/Pのサブクール

グラフに示す期間(3/13 15:00~3/14 17:00)での
S/P温度上昇(仮定、2回目のベント終了時を基準とした)



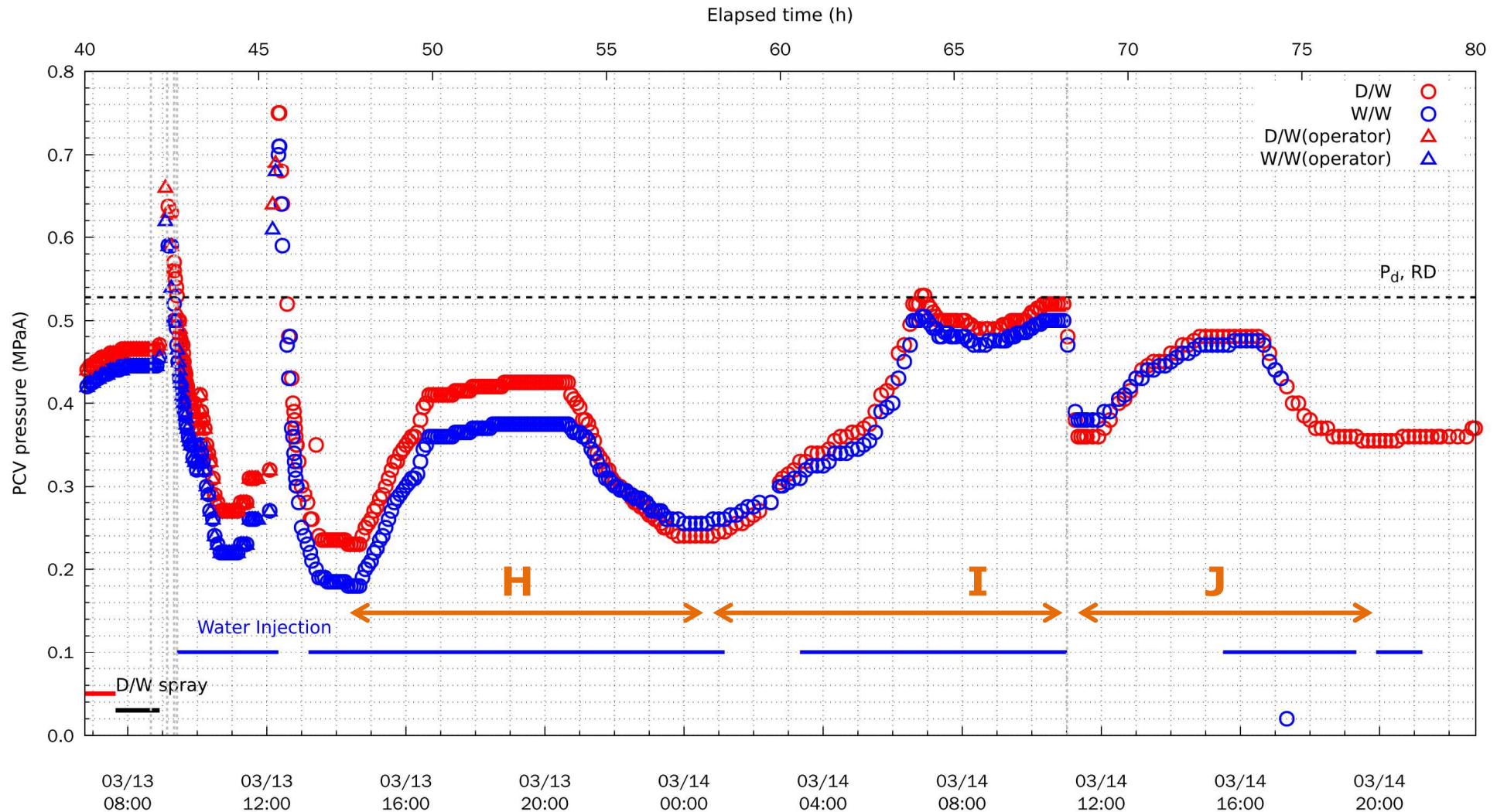
2回目のベント終了時
は飽和状態と仮定

S/P水温が一定速度
で上昇すると仮定

飽和状態に近く、減圧が停止

2回目のベント後の格納容器圧力

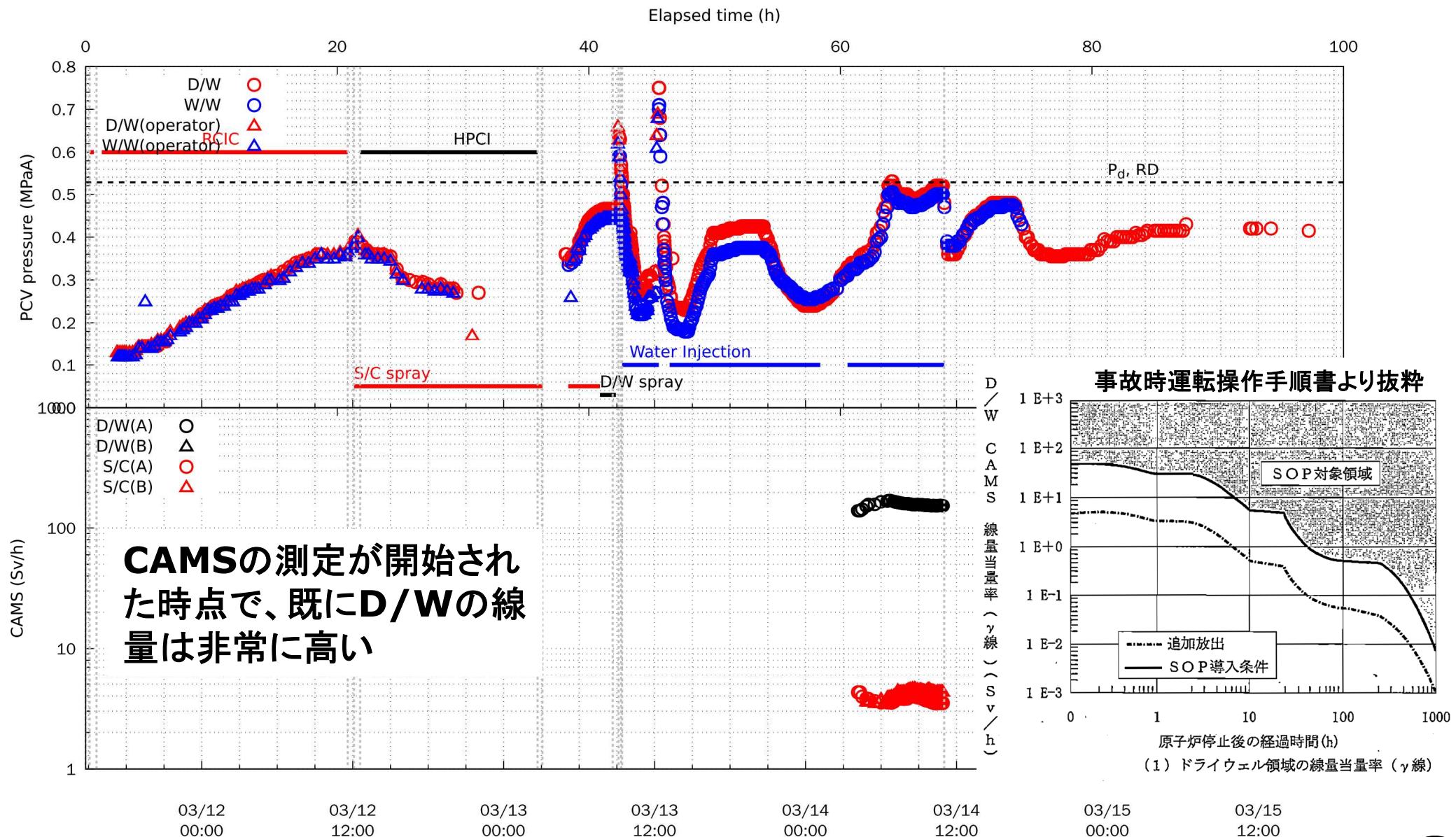
前出の図を一部拡大して再掲



H、I及びJは便宜上の時間区分

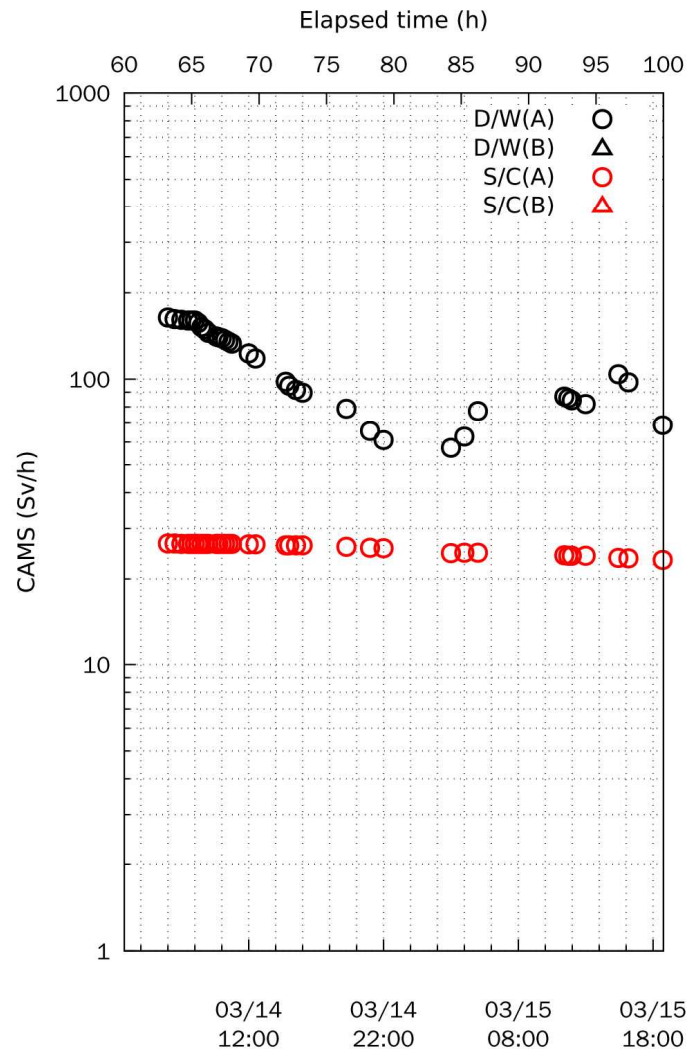
以下、参考図

PCV圧力とCAMSの比較

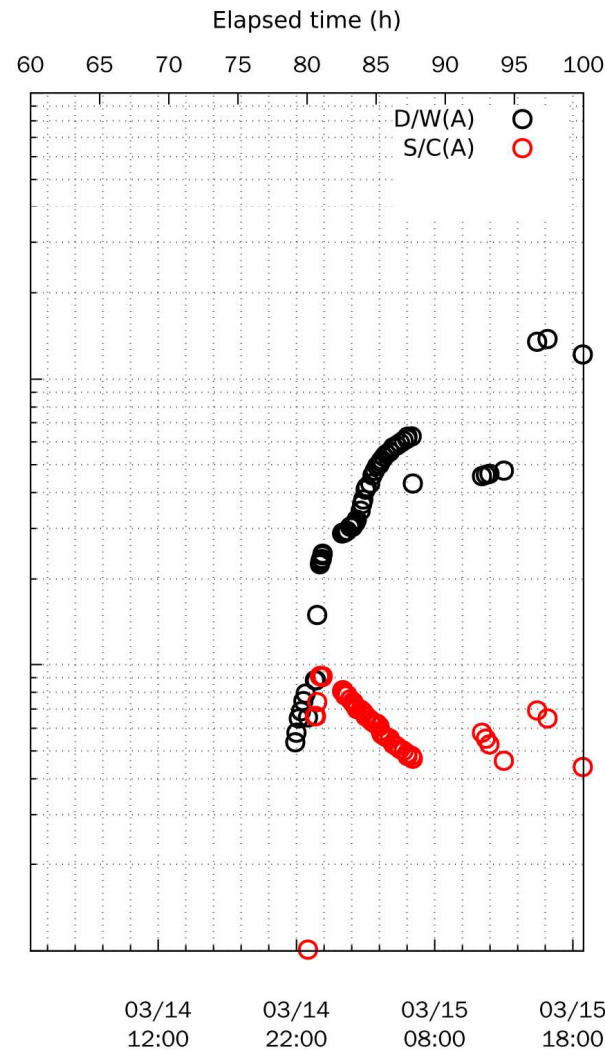


CAMS測定値の比較

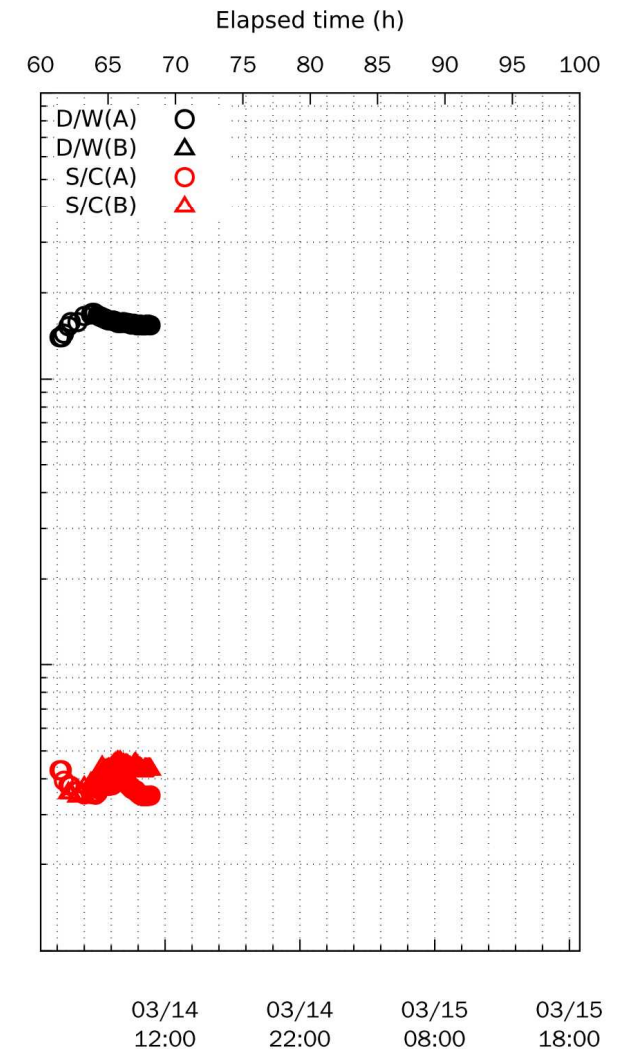
1号機



2号機



3号機



耐圧強化ベントにおける有効なベント回数に関する認識

○3号機における有効ベント回数の整理

3号機では、3月13日8時41分に圧力抑制室(S/C)ベントのライン構成が完了し、格納容器圧力が上昇した際に、S/Cベント弁(大弁・小弁)の開操作が実施され、D/W圧力は上昇と下降を繰り返していることが計測されている。

このうち、S/Cベント弁の開操作によるベントについて、東京電力ホールディングス株式会社は、『格納容器圧力の変化、福島第一ライブカメラや当時の現場の状況などから検討した結果、**13日9時、12時頃のベントは成功した**と考えられるものの、それ以降に実施したベントは成功していない可能性が高く、少なくとも15日の朝には格納容器の健全性を喪失し、放射性物質を放出する状態になっていたと考えられる。』(福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討第5回進捗報告)としている。

原子力規制庁では、3号機の原子炉圧力、D/W圧力、W/W圧力の推移から**3/13の12時までの2回が有効との前提**を置き、1号機と3号機のベント時のプラント状態の解析等を実施してきた。

【参考資料】

- ・福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討第5回進捗報告（平成29年12月25日東京電力ホールディングス株式会社）
- ・福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討第5回進捗報告 添付資料3－8（平成29年12月25日東京電力ホールディングス株式会社）
- ・3号機 現場対処及び計装機器が示す指示値の推移（平成24年7月23日東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会 最終報告）
- ・福島第一3号機の原子炉格納容器(PCV)ベントについて（平成24年7月23日東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会 最終報告）
- ・福島第一3号機 プラントデータ推移（平成24年6月20日福島原子力事故調査報告書）
- ・SGTSの配管設計等について（第12回会合 資料5－2）
- ・原子炉建屋内の排気ダクト配置について（第12回会合 資料5－3）

（未解明問題に関する検討第5回進捗報告より抜粋）

福島第一原子力発電所 1～3 号機の
炉心・格納容器の状態の推定
と未解明問題に関する検討
第5回進捗報告

平成 29 年 12 月 25 日

東京電力ホールディングス株式会社

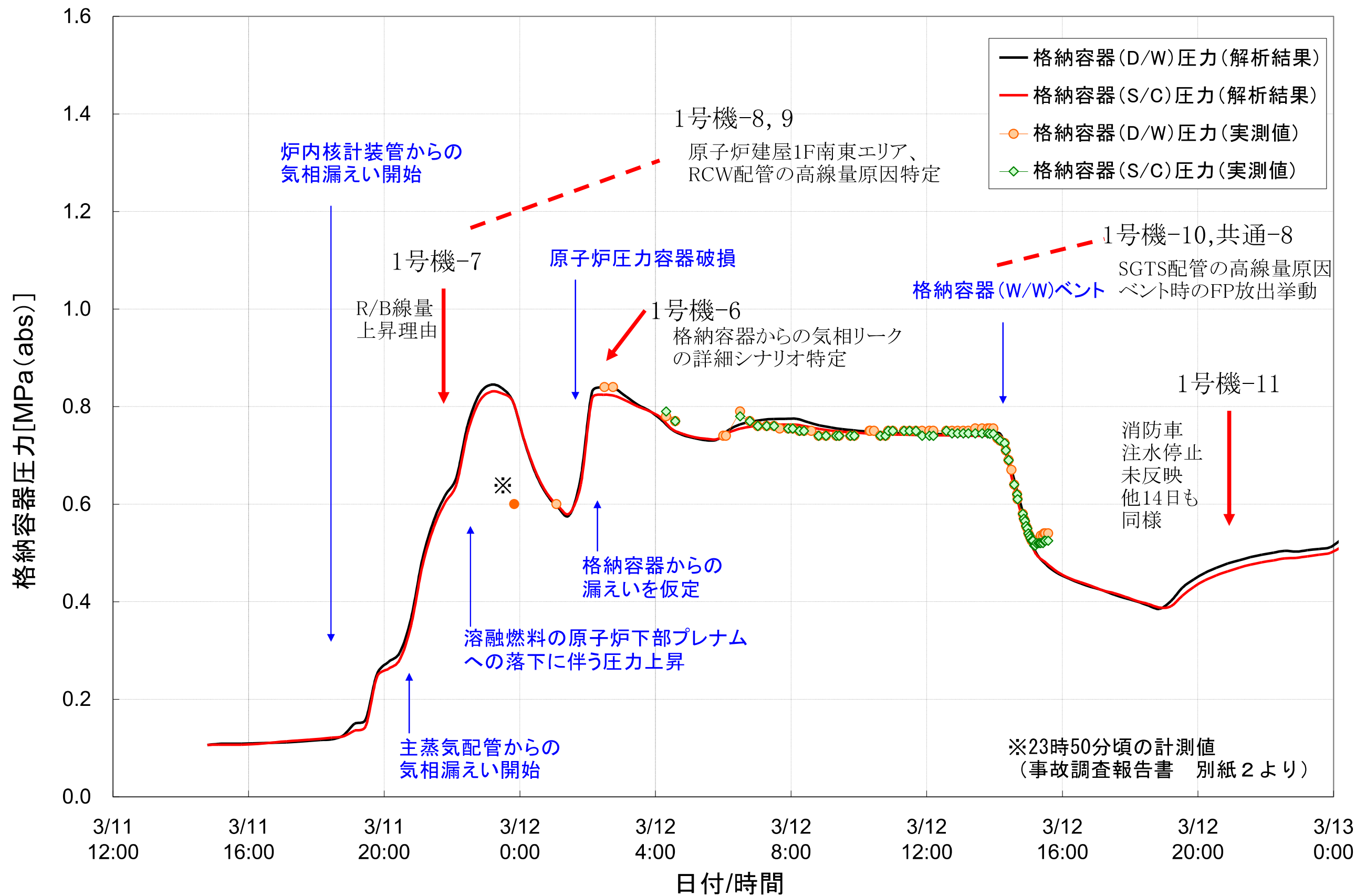


図 3.2.3 1号機の格納容器圧力挙動から抽出された課題

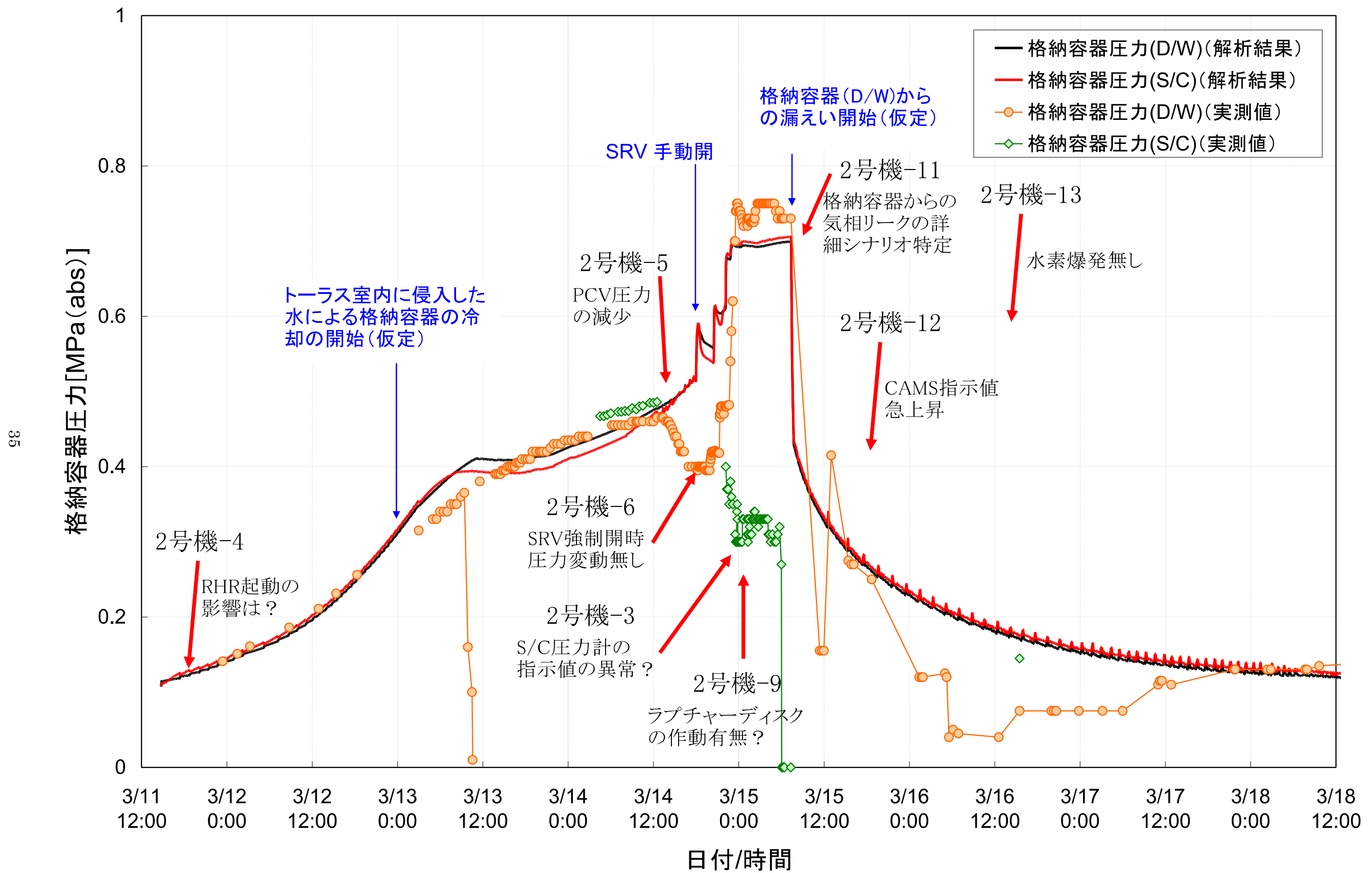


図 4.2.3 2号機の格納容器圧力挙動から抽出された課題

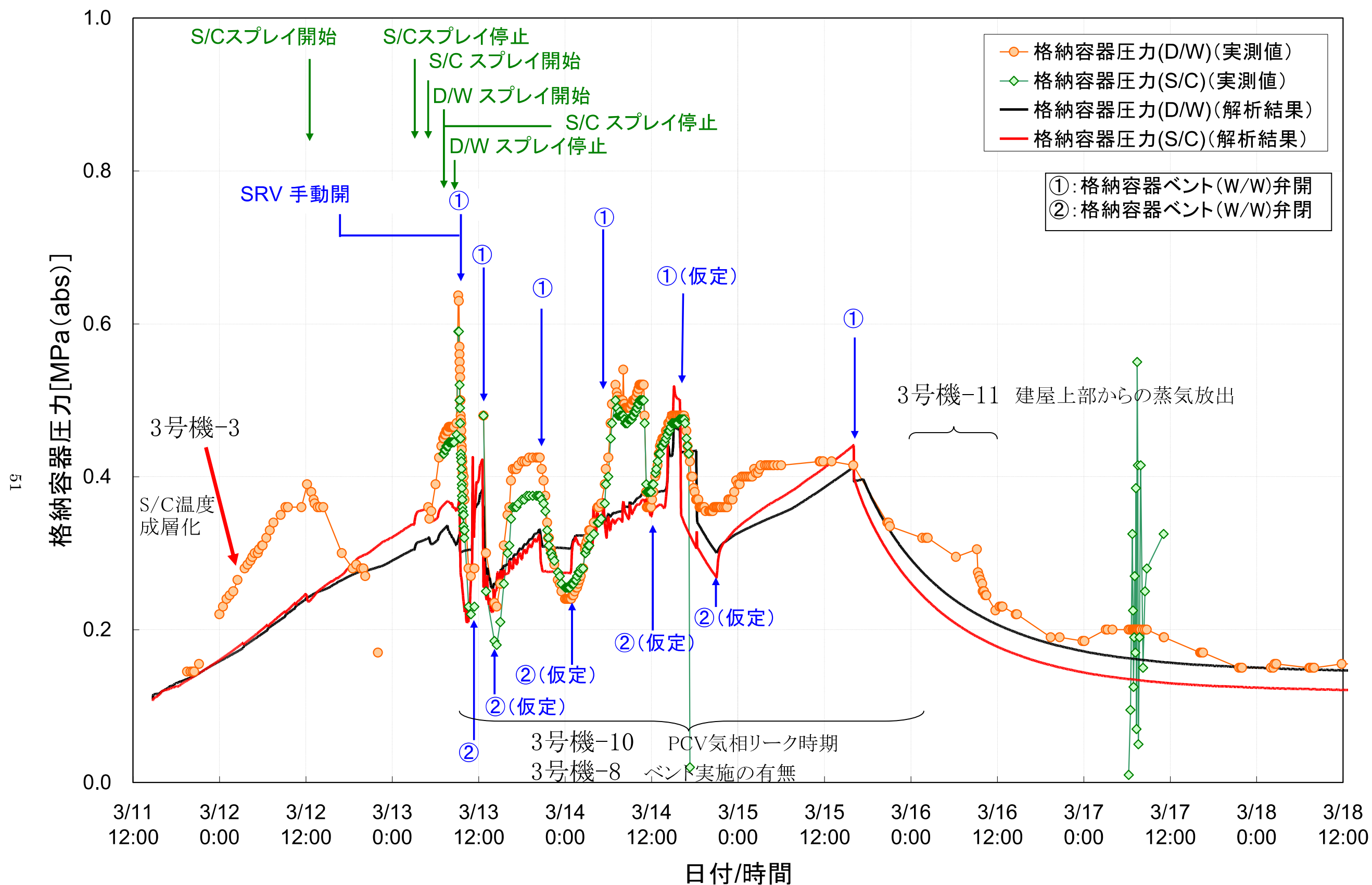


図 5.2.3 3号機の格納容器圧力挙動から抽出された課題

明らかに圧力上昇の要因があったためと考えられる。ドライウェルに圧力上昇の要因があった可能性については、原子炉圧力容器からドライウェルへの漏えいが起こっていたことが考えられるが、解析で格納容器圧力の上昇を再現するほどの大量の漏えいを想定した場合、3月12日12時過ぎから実施した圧力抑制室スプレイに伴う圧力の低下を再現できず、当該の可能性は低いと考えられる。一方、圧力抑制室プールの温度成層化の可能性について、RCICおよびSRVの排気口を模した排気試験においてそれぞれ温度成層化の傾向が確認できた。また、RCICの排気口はプール表層に位置していることからより温度成層化を促進すると考えられるが、3号機ではRCICが停止しないよう原子炉への注水量を調整し連続作動させていたため、温度成層化が促進されたと考えられる。したがって、3号機では圧力抑制室プールの温度成層化に伴い、格納容器圧力の上昇が早くなった可能性が高いことがわかった。

5. 3. 6. 3号機格納容器からの漏えいと大量の蒸気放出について

3号機では格納容器圧力を低下させるために複数回ベントを実施しているものの、建屋の水素爆発以降は建屋からの直接放出の状況も確認できる。ベントの成否も含めた放射性物質の放出挙動はお互いに関連していると考えられることから、課題3号機-8、3号機-10、3号機-11について、3月15、16日に着目し、当該の3課題について総合的に検討を行った。（添付資料3-8参照）

格納容器圧力の変化、福島第一ライブカメラや当時の現場の状況などから検討した結果、13日9時、12時頃のベントは成功したと考えられるものの、それ以降に実施したベントは成功していない可能性が高く、少なくとも15日の朝には格納容器の健全性を喪失し、放射性物質を放出する状態になっていたと考えられる。この原因となる漏えい口は継続的な格納容器からの放出を引き起こし、3号機は最終的には大気圧まで圧力が低下したと考えられる。したがって、着目した15、16日については、ベントではなく格納容器からの直接放出が環境汚染につながったと可能性が高いことがわかった。

5. 3. 7. 3号機の水位計挙動に基づく原子炉水位の推定

1号機、2号機と同様に、最終的に指示不良を起こしたと考えられる3号機の水位計の挙動に基づいて、原子炉内の状態に関する情報を得る課題、共通-3及び3号機-2について検討を実施した。（添付資料3-9参照）

3号機で炉心損傷・炉心溶融が進展した時期のうち、水位計指示値がほぼ一定値を示すまでの期間（3月13日4時～14時）に得られたプラントパラメータの実測値に着目し、原子炉水位の挙動を推定した。その結果、3号機では3月13日9時頃の原子炉減圧より前に、原子炉水位はすでにBAF付近まで低下し

（未解明問題に関する検討第5回進捗報告より抜粋）

添付資料 3-8

3号機格納容器からの漏えいと大量の蒸気放出について

1 はじめに

3号機では、3月13日8時41分に圧力抑制室（S/C）ベントのライン構成が完了し、13日9時24分にドライウェル（D/W）圧力の減少が確認されたことから、ベントが実施されたと発電所対策本部が判断している。その後、格納容器圧力が上昇した際に、S/Cベント弁（大弁・小弁）の開操作を実施している。

この間、計測されたD/W圧力は上昇と下降を繰り返しているが、時系列で整理されているベントタイミングと計測されたD/W圧力が低下するタイミングが一致していないものが多い。また、当時の状況はベント弁の開操作を実施したら、その開状態を維持していたが、仮設コンプレッサー使用によるベント弁駆動用空気圧の不足、ベント弁励磁回路の不具合、小型発電機の故障による電磁弁励磁維持の問題などにより意図せずベント弁が閉まってしまうような状況となり、開状態を維持することが非常に困難であったことが、当社福島原子力事故調査報告書 別紙2 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所における対応状況について（平成24年6月版）にて報告されている。D/W圧力は、注水による蒸気発生や水素発生、ベント操作等に応じて、増加・減少を繰り返したものの、3月21日に一時的に上昇した後、ほぼ大気圧で変動を示さなくなった。すなわち、最終的には格納容器からの気相漏えいが発生しているという説明がなされてきた。しかしながら、ベント開維持が難しかったとする一方で、どのベント操作が成功し、どのベント操作が失敗であったのかについては明らかにされていない。すなわち、ベント開操作の実施は必ずしもベントによる放出を意味しない場合があるが、公表された記録においては、ベント開操作時には必ずベントによる放出があったと誤解が生じる可能性がある状況であった。

なお、平成23年8月24日に実施した、原子炉建屋上部のダストサンプリングにおいて撮影された映像から、シールドプラグ縁辺部、歪みを生じたDSピットゲート周辺等から蒸気（湯気）の漏出が確認されており、格納容器からの主要な漏えいは、シールドプラグ直下にある格納容器上蓋のシール部の劣化により発生した隙間を漏えい経路としたものであると推定している。

本検討では、3月15日以降に観測された原子炉建屋の状況、ベント弁の開操作に対する格納容器圧力変化から、3号機のベントの成否、格納容器からの漏えい、観測されている建屋上部からの水蒸気放出の関係について検討を実施した（当該の内容は、3号機-8, 10, 11として課題設定している）。

本検討は、エネルギー総合工学研究所、株式会社東芝、日立 GE ニュークリア・エナジーの研究者・技術者との議論をふまえ取りまとめたものである。

2 3月15日以降に観測された原子炉建屋の状況

3月11日の地震発生後の記録は必ずしも十分ではないが、原子炉建屋等の状況を確認するうえでは、①ライブカメラの情報、②福島第一原子力発電所所員がデジタルカメラにて撮影した情報がある。ライブカメラの情報は時刻についてはほぼ正確であると考えられるが、遠方からの撮影であり、解像度はそれほどよくない。一方で、デジタルカメラの撮影は、原子炉建屋の至近から撮影しており解像度が高いものの、時刻情報はカメラ内部の時計を参照しており、この情報には不確かさがある。ただし、デジタルカメラの時刻情報は、電池切れ等により過去にリセットされてしまうような時間のずれを除けば、それほど大きなずれが発生することはないと考えられ、日付が概ねあっているのであれば、日オーダーでのずれが発生しているとは考えにくい。そのため、本検討ではライブカメラの時間はずれが無いものとし、デジタルカメラの画像については、ライブカメラの画像との比較も考慮して、大きなずれは無いことを確認して、評価に使用することとする。

2.1 ライブカメラの画像について

3月11日10時00分の画像

図1に3月11日10時00分の画像を示す。これは地震発生以前の画像であり、健全な状態の福島第一原子力発電所を捉えたものである。一番左の煙突状のものが5, 6号排気筒であり、その右側に見える煙突状のものが3, 4号排気筒であり、一番右側に見える煙突状のものがタービン建屋換気系排気筒である。この写真からは1, 2号排気筒が確認できないが、1, 2号排気筒は3, 4号排気筒のすぐ後ろにあり、重なってしまっていて見えていない。なお、余震による影響によるものか、ライブカメラの撮影角度が時間帯によって変わっているが、その角度によっては1, 2号機排気筒が見える場合がある。

タービン建屋換気系排気筒脇に見えている建物が廃棄物処理建屋である。3, 4号排気筒の後ろに見えている建物が、4号機の原子炉建屋であるが、原子炉建屋周辺拡大図からもわかる通り、ライブカメラからは1~4号機はほぼ一直線に並んでおり、1~3号機をライブカメラ映像から比較することは困難である。

3月13日10時00分の画像

図2に3月13日10時00分の画像を示す。3号機は同日9時20分頃にベ

ントが成功したものと判断されているが、この画像はそれから約 40 分が経過した後の画像である。3, 4 号機排気筒部分の拡大図からもわかる通り、ベントにより水蒸気が放出されていることが確認できる。一方で、原子炉建屋部分に特異的な状況は観測されない。

3 月 13 日 13 時 00 分および 3 月 13 日 15 時 00 分の画像

図 3 に 3 月 13 日 13 時 00 分および 3 月 13 日 15 時 00 分の画像を示す。記録上、11 時 17 分にベント弁が閉まってしまったことを確認し、12 時 30 分にベント弁開が確認されている（2 回目のベント操作）ことから、13 時 00 分のライブカメラ映像から確認できる水蒸気放出は、このベント操作が成功したことによるものと考えられる。15 時 00 分のライブカメラ映像では明確な水蒸気放出は確認できない。

3 月 14 日 7 時 00 分および 3 月 14 日 10 時 00 分の画像

図 4 に 3 月 14 日 7 時 00 分および 3 月 14 日 10 時 00 分の画像を示す。記録上、6 時 10 分にベント弁（小弁）の操作を完了（4 回目のベント操作）しているが、いずれの時間帯にもライブカメラの映像からは明瞭な水蒸気放出は確認できない。ただし、小弁操作のため、蒸気流量が小さく、ライブカメラでの映像からは確認できなかった可能性は残る。

3 月 15 日 7 時 00 分の画像

図 5 に 3 月 15 日 7 時 00 分の画像を示す。この時点では、3, 4 号排気筒からの水蒸気放出は確認できないが、原子炉建屋周辺の拡大図を見ると、どの号機からかは特定できないものの、原子炉建屋上部からと考えられる水蒸気放出が確認できる。

3 月 15 日 16 時 00 分の画像

図 6 に 3 月 15 日 16 時 00 分の画像を示す。この時点では、3, 4 号排気筒からの水蒸気放出は確認できないが、原子炉建屋周辺の拡大図を見ると、どの号機からかは特定できないものの、原子炉建屋上部からと考えられる水蒸気放出が確認できる。

3 月 15 日 17 時 00 分の画像

図 7 に 3 月 15 日 17 時 00 分の画像を示す。記録上、16 時 05 分にベント弁開操作の小型発電機の取り換えを実施し、ベント弁の開操作を実施（5 回目のベント操作）しているが、ライブカメラの映像からは明瞭な水蒸気放出は確

認できない。一方で、16時00分の映像と同様に、原子炉建屋上部からと考えられる水蒸気放出は確認することができる。

3月16日10時00分の画像

図8に3月16日10時00分の画像を示す。この時点でも、3、4号排気筒からの水蒸気放出は確認できないものの、原子炉建屋上部からと考えられる水蒸気放出は確認することができる。これまでの映像では、廃棄物処理建屋の形状が明確に見えていたが、この時間帯では放出された水蒸気により一部が隠れるような状態となっている。そのため、この時間帯の原子炉建屋からの水蒸気放出、すなわち、格納容器からの漏えいは、かなり大規模であったものと考えられる。

2.2 デジタルカメラにより撮影された映像について

撮影日情報 3月15日7時31分の画像

図9に3月15日朝に撮影された画像を示す。この時点で、3号機原子炉建屋の上部からの水蒸気放出は始まっていることが確認できる。また、ライブカメラにて撮影された3月15日7時00分の映像に水蒸気が放出されているところから確認されていることから、この撮影日情報は概ね正しいものと考えられる。

撮影日情報 3月15日8時58分の画像

図10に3月15日朝に2号機の原子炉建屋を撮影した画像を示す。2号機原子炉建屋のブローアウトパネルは、1号機の水素爆発時に開いたことがわかっており、水蒸気はこのブローアウトパネルから放出されている。当社福島原子力事故調査報告書 別紙2 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所における対応状況について（平成24年6月版）においても、8時25分に原子炉建屋5階付近壁より白い煙（湯気らしきもの）があがっていることを確認、との記載があり、この撮影日情報についても概ね正しいものと考えられる。

撮影日情報 3月16日9時51分の画像

図11に3月16日朝に撮影された画像を示す。3号機原子炉建屋の上部からの水蒸気放出が継続していること確認できる。また、蒸気放出量は前日より多くなっているように見受けられる。これは、ライブカメラにて撮影された3月16日10時00分の映像とも整合していることから、この撮影日情報は概ね正しいものと考えられる。

2.3 観測された画像からの考察

3号機のベントは、ライブカメラの画像からは3月13日の1回目、2回目のベントでのみ3, 4号排気筒からの水蒸気放出が確認できるため、この2回についてはベントが実施されていると判断できる。3回目のベント開操作は夜間の実施であったことから、ライブカメラによる確認はできない。また、3月14日早朝の4回目のベント開操作では、小弁の開操作であることから、ベント管に流れる蒸気流量が小さかったとの可能性が残るものの、ベントによる放出は確認できない。3月15日夕方の5回目のベント開操作においても、排気筒の映像からはベントによる放出は確認できない。また、3月16日未明の6回目のベント開操作は夜間であったため、ライブカメラによる確認はできていない。

デジタルカメラによる映像から、3号機は3月15日の朝には、原子炉建屋上部からの水蒸気放出が確認されており、この時点では、格納容器から漏えいした気体（水蒸気、放射性物質を含む）が直接環境に放出されるような状態になっていたものと考えられる。ただし、同じ3月15日朝に、2号機原子炉建屋のブローアウトパネルからも水蒸気が放出されていることが確認されており、添付資料2-9, 10の検討から、2号機からの放射性物質の放出もあったものとする。

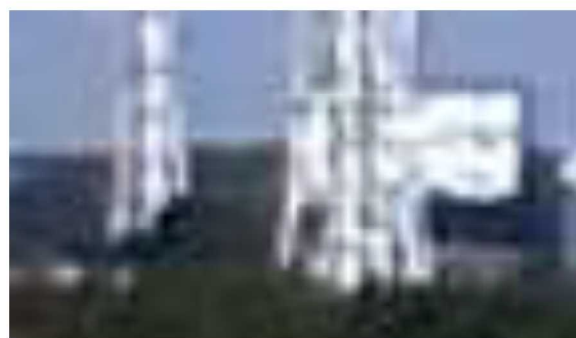


図1 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月11日10時）
上：ライブカメラ映像全体 下：原子炉建屋周辺拡大図

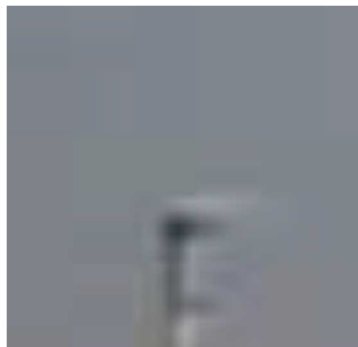


図2 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月13日10時）
 上：ライブカメラ映像全体 中： 3, 4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図

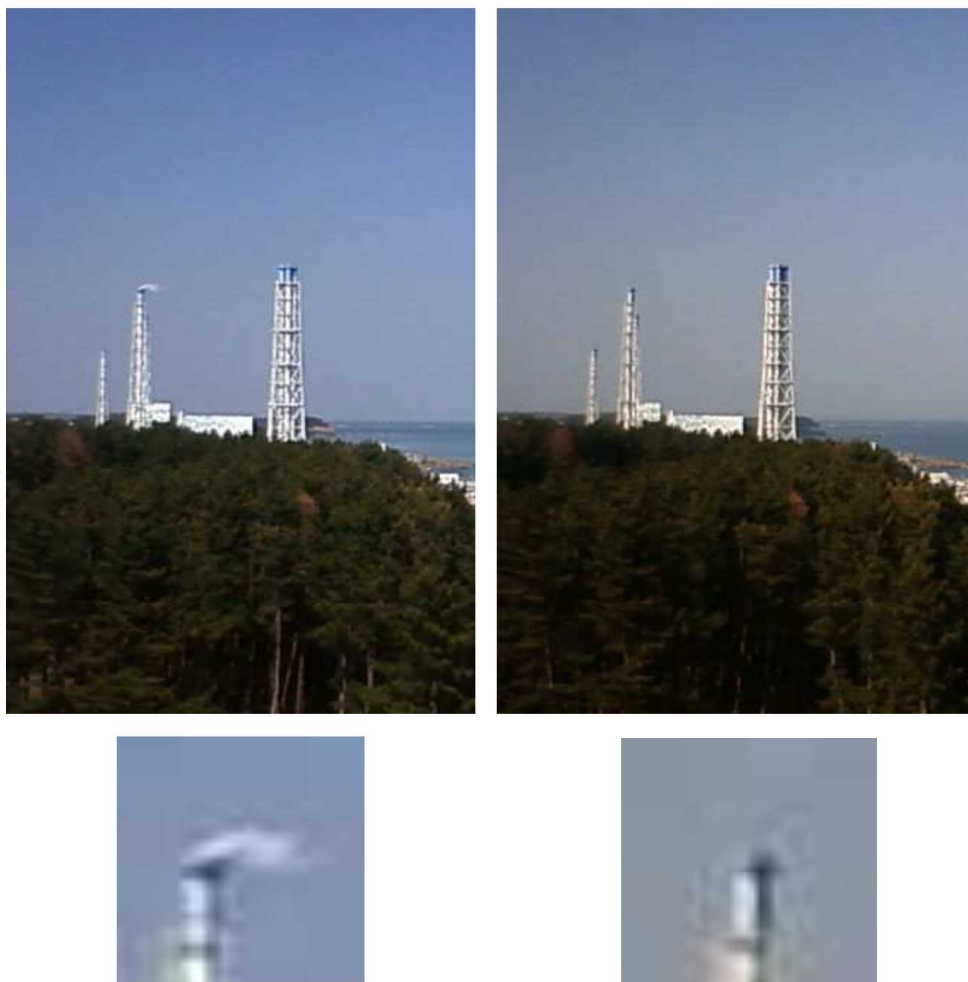


図3 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（抜粋）
 （撮影日 左：3月13日13時 右：3月13日15時）
 上：ライブカメラ映像（抜粋） 下：3,4号機排気筒拡大図



図4 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（抜粋）
 （撮影日 左：3月14日7時 右：3月14日10時）
 上：ライブカメラ映像（抜粋） 下：3,4号機排気筒拡大図

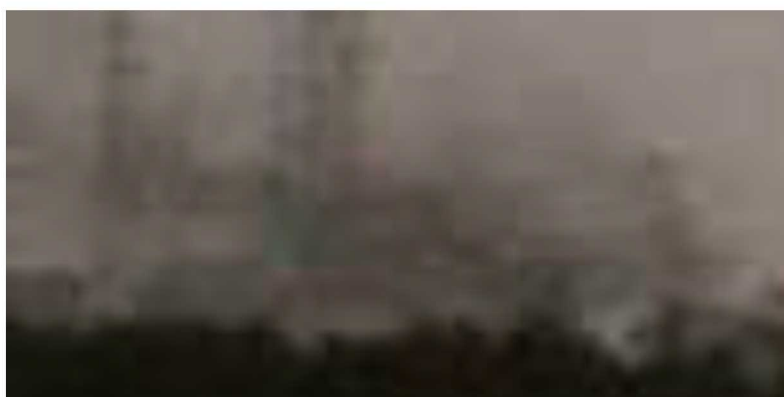
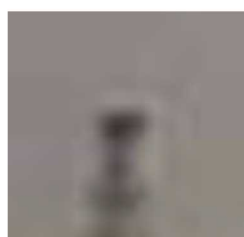


図5 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月15日7時）
 上：ライブカメラ映像全体 中： 3,4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図

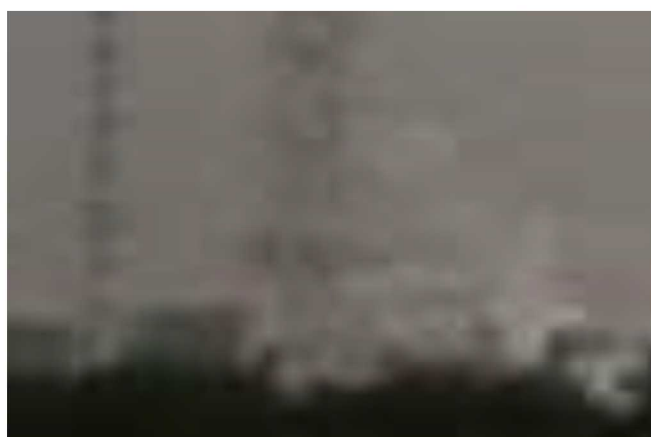
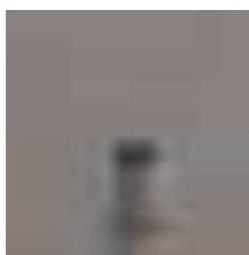


図6 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月15日16時）
 上：ライブカメラ映像全体 中： 3,4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図

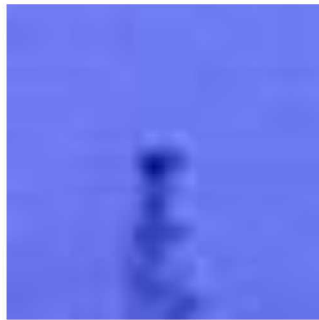


図7 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月15日17時）
 上：ライブカメラ映像全体 中： 3,4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図

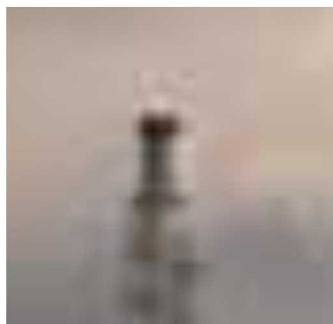


図8 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月16日10時）
 上：ライブカメラ映像全体 中： 3,4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図



図9 3号機からの蒸気放出の様子（撮影日情報 3月15日7時31分）



図 10 2号機からの蒸気放出の様子（撮影日情報 3月15日8時58分）



図 11 3号機からの蒸気放出の様子（撮影日情報 3月16日9時51分）

3 ベント弁の開操作に対する格納容器圧力変化に関する検討

前述の通り、ベント弁の操作は開く操作をした後は開状態を維持することを前提としており、意図的に弁を閉じるような操作は実施していない。一方で、開状態を維持することは困難であったとの報告もあり、ベントを実施しても格納容器圧力が下がらなかったとの報告もあるとおり、ベントの開操作の実施がすべてベントによる放出を意味している訳ではない。また、注意すべきであるのは、排気筒からの水蒸気放出が確認できている場合を除けば、直接的にベントの成否を判断することはできず、格納容器の圧力の上昇・下降でベント弁の開閉を判断していたことがあったことである。つまり、格納容器圧力が上昇している場合でも、ベント配管から放出できる気体の量と比べて、格納容器への気体の流入量および格納容器内での気体の発生量が多い可能性もあるし、格納容器圧力が下がっている場合でも、ベントに伴う排気筒経由の放出以外の経路からの漏えいにより格納容器内の気体が流出していることを捉えている可能性があるということである。

したがって、この検討では、確実にベントによる格納容器内気体が放出されている1回目、2回目のベント時の格納容器圧力の挙動をベースケースとして、その他のベント開操作時における挙動を検討することとする。

3.1 3月13日6時から3月14日9時までの格納容器圧力変化に関する検討

この時間帯の格納容器圧力の変化を図12に示す。3号機は、添付資料3-3にて判明したHPCIの注水機能がHPCIの手動停止よりも早い時間に喪失していたことから、3月13日の5時頃には炉心損傷に至り、大量の水素が発生していたと推定されている。そのため、9時前まで継続している格納容器圧力の上昇は、非凝縮性ガスである水素が格納容器に移行してきたことが原因であると考えられる。また、9時頃の原子炉減圧時には、原子炉圧力容器内に存在していた水素が一気に格納容器に放出されることで、格納容器圧力が上昇し、ラプチャディスクの設定圧に到達したことで、ベントが実施されたものである。

この1回目のベントにおける格納容器圧力の変化をみると、9時10分の0.637MPa(D/W)、0.590MPa(S/C)から10時40分の0.270MPa(D/W)、0.220MPa(S/C)と、1時間30分の間に約0.4MPa低下しており、比較的速い減圧が起こっている。

また、2回目のベント開操作については、原子炉圧力がチャートの読み値で3MPa程度まで急上昇した時間とほぼ同時期に格納容器圧力の低下からベント開が判断されている。その前に格納容器圧力が急激に上昇していることについて、これだけの原子炉圧力の急上昇があれば、ベント弁が開であっても格納容器圧力は上昇する可能性が高いと考えられるが、この時間帯にベント弁操作のた

めのボンベ交換作業が実施されたとの記録があるため、格納容器圧力が上昇している期間はベント弁が閉まっていた可能性も高い。いずれにしても、格納容器圧力の最大値と最小値がわかれば格納容器の減圧速度は評価可能であり、2回目のベント開操作時には、12時20分の0.750MPa(D/W)、0.700MPa(S/C)から13時35分の0.235MPa(D/W)、0.190MPa(S/C)と1時間15分の間に約0.5MPa低下するという、やはり比較的速い減圧が起きている。

このことから、ベントによる放出が実施された場合には、格納容器圧力の比較的早い減圧、すなわち、1時間当たり0.25MPa～0.4MPa程度の減圧が予想される。

この時間帯の半ばには、格納容器圧力の上昇が観測されたことに起因して、19時00分からベント弁操作のための仮設コンプレッサーのつなぎこみを実施している。その後、21時10分ごろにD/W圧力が低下したことにより、ベント弁が開となったとの判断がなされている（3回目のベント開操作）。この際の格納容器圧力変化は、20時40分の0.425MPa(D/W)、0.375MPa(S/C)から24時00分の0.240MPa(D/W)、0.255MPa(S/C)と3時間20分の間に約0.2～0.15MPaの低下であり、1回目、2回目のベントによる減圧と比較すると非常に減圧速度が遅い。

さらに注目すべきは、D/W圧力とS/C圧力の関係である。この時点では、発熱源はD/Wにあると考えられるため、D/W圧力>S/C圧力であることは妥当である。そのため、S/Cベントによる放出がある場合、D/WからS/Cに気体が行き、排気筒から放出されることになるが、その移行の際に、S/C内の水を押しのける必要があるため、ある程度の差圧が発生することになる。21時ごろまで、D/WとS/Cの圧力に0.05MPa程度の差があるのは、物理的には妥当な状況である。しかしながら、22時30分に0.285MPa(D/W)、0.290MPa(S/C)と圧力が逆転し、24時00分には0.015MPaだけS/C圧力の方が高いという状態になる。これがベントによる格納容器圧力低下であるとする、圧力が低いところから圧力が高いところに気体が流れることを意味するため、物理的にはあり得ない状況である。

そのため、3回目のベント開操作とされているところでは、圧力低下の要因はむしろD/W側にあると考える方が自然である。この場合の、D/Wからの漏えいとしては、高温条件でのシール部の劣化が考えられる格納容器上蓋部分からの漏えいが最も可能性が高いと考えられる。

この時間帯の後半には、4回目のベント操作が記録に残っている（14日6時10分に開操作完了）。このベント操作はベント弁（小弁）であり、弁が開いたとしても、その流路面積は小さく、排出可能な流量は小さくなる。そのため、この操作によって圧力低下がみられなかったことは、ベント弁が開かなかった可能

性とベント弁が開いたものの流量が小さく結果的に圧力が上昇した可能性の二通りが考えられる。しかしながら、3回目のベント操作が実施された頃にかけてしまっていた漏えい口は、閉まる理由がないためここからの漏えいは継続していたものと考えられる。

3.2 3月14日9時から3月15日12時までの格納容器圧力変化に関する検討

この時間帯の格納容器圧力の変化を図13に示す。この時間帯では、3月14日11時には3号機で水素爆発が発生している。これは、原子炉建屋内に水素が漏えいしていたことが原因であり、3回目のベント操作が実施された頃には格納容器から原子炉建屋への漏えいが始まっていたとする推定は、現実の事故進展とも整合している。

なお、この水素爆発の発生前後も格納容器圧力が大きく低下していることが確認されている。この圧力低下の原因は明確ではないが、この際もD/W圧力とS/C圧力の逆転が発生しており、漏えいが発生しているとしても、D/W側に漏えいの原因があると考えられる。

3.3 3月15日12時から3月16日18時までの格納容器圧力変化に関する検討

この時間帯の格納容器圧力の変化を図14に示す。この時間帯では、記録上、5回目のベント開操作が実施されている。この際の、当社福島原子力事故調査報告書 別紙2の記載を以下に転記する。

16:00, S/C ベント弁 (AO 弁) 大弁, 小弁の電磁弁の励磁に用いていた小型発電機の故障により, 同弁が閉になったことを確認。その後, 16:05, 小型発電機を取替え, S/C ベント弁 (AO 弁) 大弁の電磁弁を励磁し, 開操作実施。

開操作は実施されたものの、その成否については明確とはなっていない。実際、この時の格納容器の圧力低下についてS/C圧力は測定されていないが、16時00分に0.415MPa(D/W)から21時05分に0.335MPa(D/W)と5時間で0.1MPa弱とベントによる放出の際に予想される減圧速度と比較して小さい。2.にて示したように、3月15日の朝から3号機原子炉建屋上部からの水蒸気放出が継続的に確認されていることから、このような緩やかな格納容器圧力低下は、格納容器からの直接放出によるものである可能性が高いと考えられる。

3.4 格納容器圧力変化からの考察

3月13日から3月16日にかけての格納容器圧力の変化からは、ベントにより3, 4号排気筒経由で放出されたのは、1回目および2回目のベントのみであ

った可能性が高い。

また、原子炉への注水が安定的に実施されるようになったのは 3 月下旬であることから、3 月 16 日ごろの燃料デブリは良好な冷却状態にはなかったと推定されるため、ベントによる格納容器内の気体の放出ができなくなって以降は、過熱と格納容器漏えいのバランスで格納容器圧力が上昇したり下降していたりしたと考えられる。

ただし、3 回目以降のベント開操作が失敗していたとすると、4 号機の水素爆発は、1 回目および 2 回目のベントによって放出された水素が 4 号機に逆流*したことによって発生したことになる。したがって、この際の水素移動量が 4 号機の爆発を引き起こすのに十分であったかを検討する必要がある。

*:4 号機では、3 月 14 日 10 時 30 分頃 使用済燃料プールの状況確認に向かった当社社員が原子炉建屋内の放射線量が強く入域を断念したとの記録があり、また、その後の原子炉建屋の汚染状況から、この放射線は希ガス起因であると考えられる。希ガスはベントにより優先的に排出される非凝縮性ガスであることから、少なくとも、1 回目（および 2 回目）のベントにより 4 号機への逆流が起こっていることは確実であると考えられる。

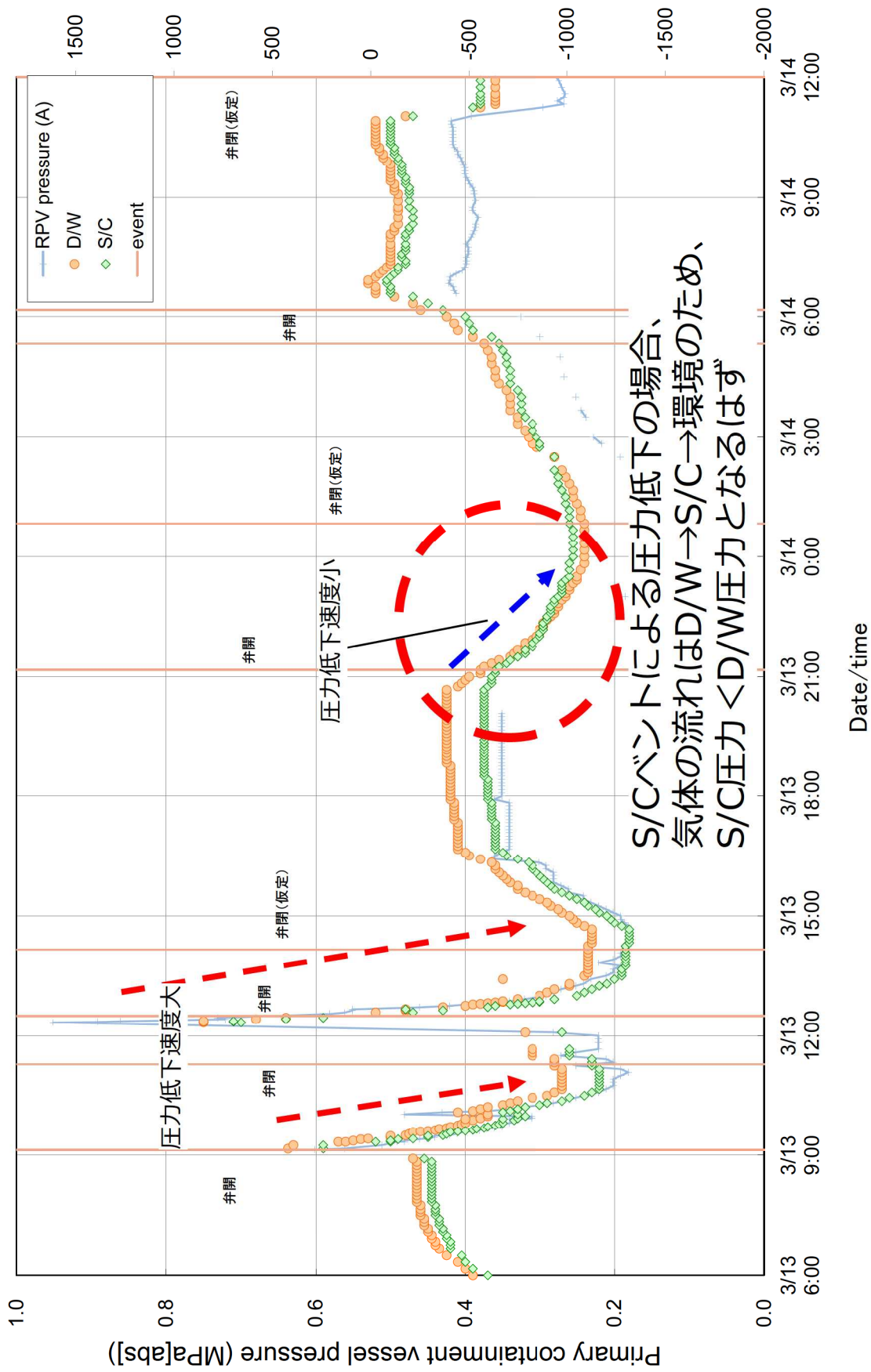


図 12 3 号機の格納容器圧力の変化 (3 月 13 日 6 時から 3 月 14 日 12 時)

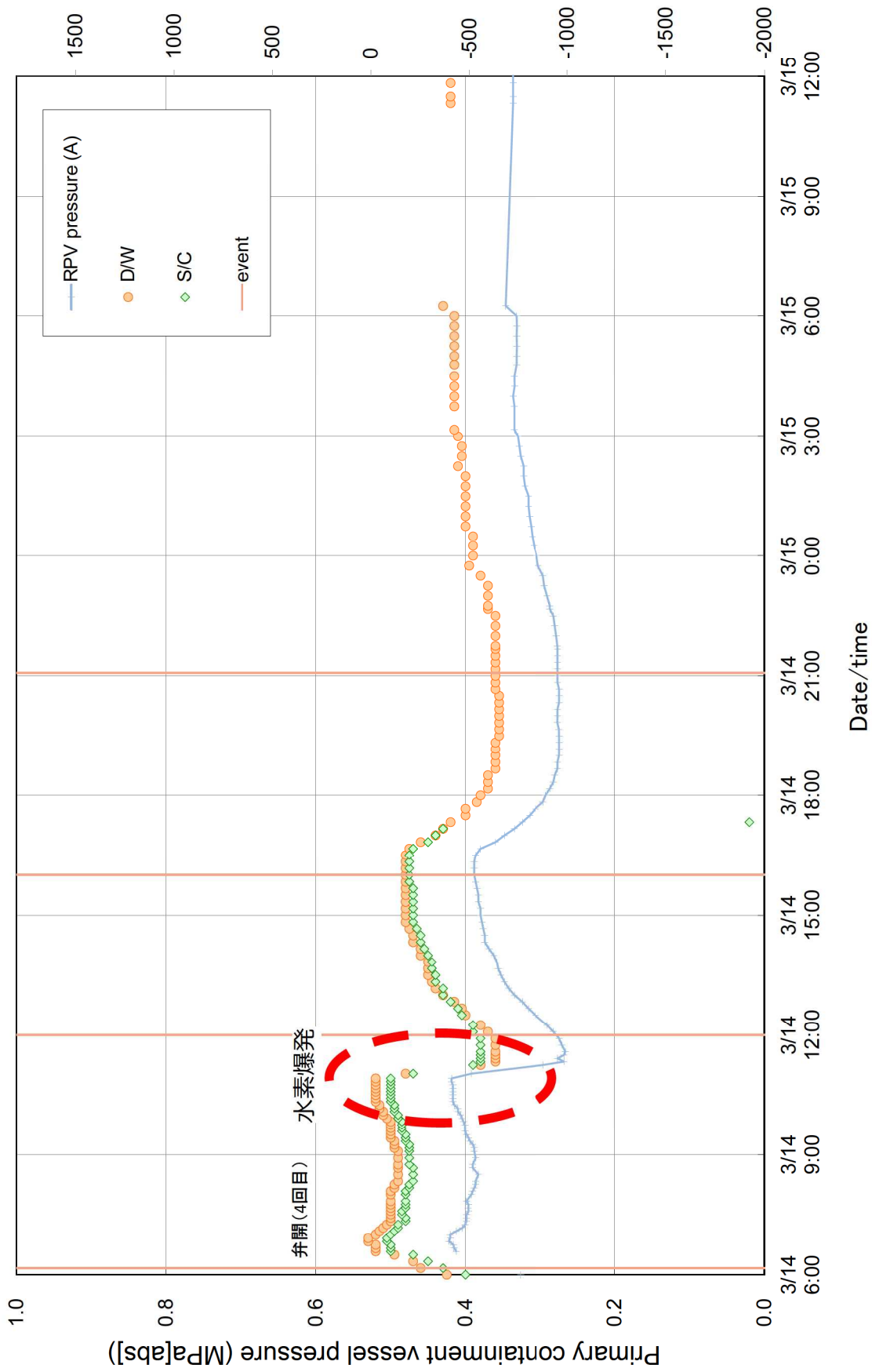


図 13 3 号機の格納容器圧力の変化 (3 月 14 日 9 時から 3 月 15 日 12 時)

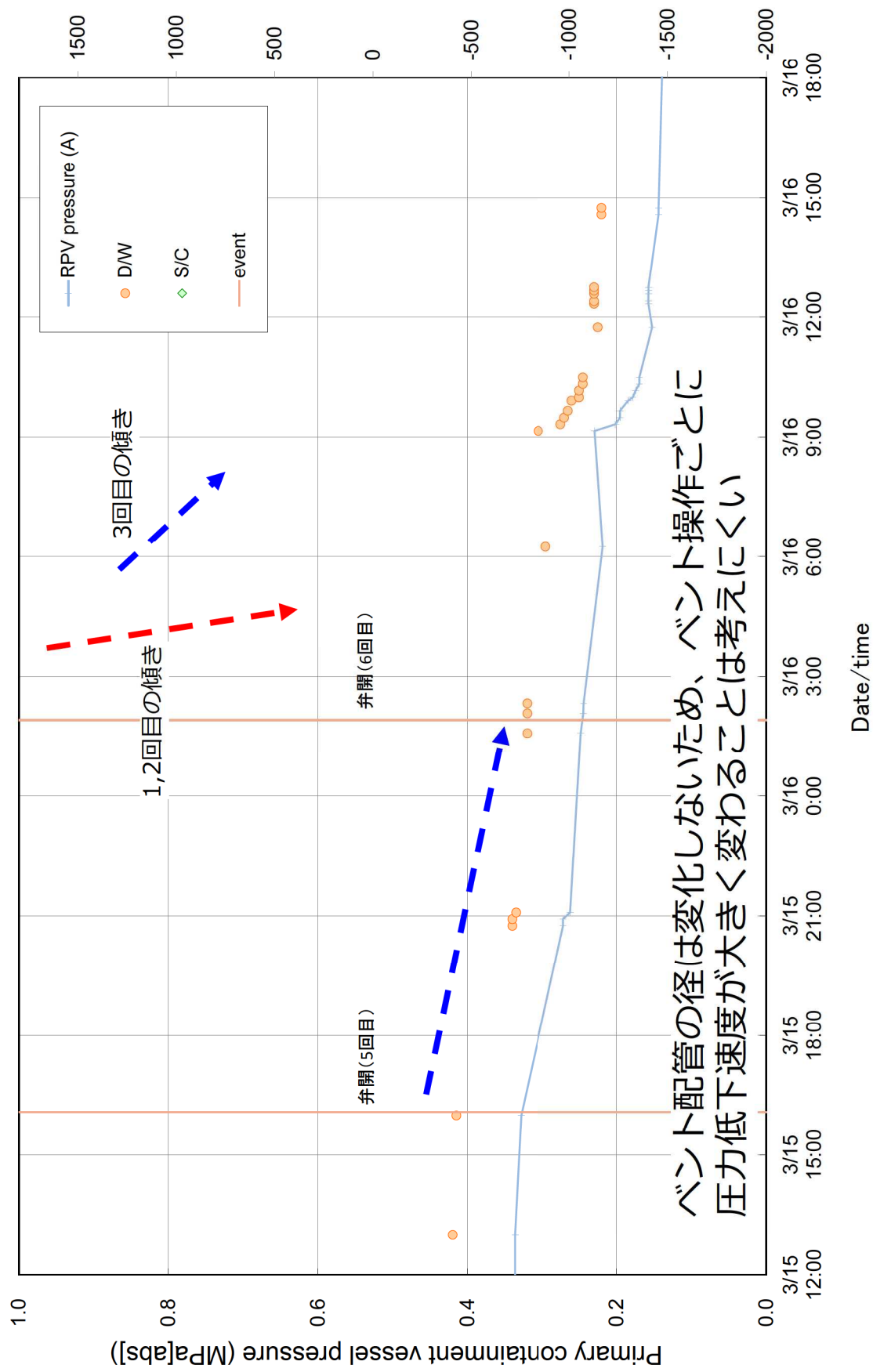


図 14 3 号機の格納容器圧力の変化 (3 月 15 日 12 時から 3 月 16 日 18 時)

4 まとめ

これまでの検討をまとめると、以下の通りとなる。

- ・ 3号機のベント開操作は、3月13日9時ごろの1回目、12時ごろの2回目のみが明確に成功している
- ・ 13日21時ごろの3回目のベント開操作時は、D/W圧力とS/C圧力の逆転が発生しており、ベントによる格納容器圧力の減少とは考えにくい
- ・ 3回目のベント開操作時には、D/Wから原子炉建屋への漏えいが発生していたとすると、3月14日11時に発生した水素爆発と整合する
- ・ 少なくとも3月15日の朝には、3号機の格納容器は漏えいにより環境に直接的に水蒸気・放射性物質を放出する状態になっていた
- ・ 3月15日の朝には、2号機も格納容器からの漏えいにより、ブローアウトパネルを通じて、環境に直接的に水蒸気・放射性物質を放出する状態になっていた（当社の推定では、環境汚染は2号からの放出が支配的）
- ・ 3月15日16時頃の3号機の5回目のベント時は、格納容器圧力の減少速度が緩やかであることから、格納容器からの漏えいによる圧力減少である可能性が高い
- ・ 写真等の情報からは、3月16日の3号機からの水蒸気放出はかなり大規模であった（この際の放出も15日に次ぐ規模と推定）

5 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策との関係

添付資料 3-6 でも同様の結果が示されているが、福島第一原子力発電所 1～3号機の各プラントの格納容器からはある程度定常的に放射性物質の漏出が起るような状態になり、ベントによる放出よりも支配的な放射性物質の放出経路となっていたと考えられる。従って、環境汚染を最小限にとどめるためには、格納容器の健全性を維持し、閉じこめ機能を確保することが重要である。

福島第一原子力発電所事故では、格納容器のトップヘッドフランジ、各ハッチのシール材（ガスケット）に使用しているシリコンゴムが高温蒸気に曝されるなど過酷な事故環境において劣化し、閉じこめ機能を喪失した可能性がある。そこで、柏崎刈羽原子力発電所では、当該ガスケット外側のフランジ面の箇所、より高温蒸気に耐えられるバックアップシール材を追加塗布した。なお、シリコン性のシール材は高温蒸気曝露で劣化が進む傾向があるため、より耐性に優れたシール材（改良 EPDM）に変更することも検討している。

また、格納容器エアロック均圧弁のシール材（フッ素樹脂）は重大事故環境下の放射線による影響で、シール機能が劣化することが考えられる。そこで、エアロック外側を貫通する均圧弁接続配管の原子炉建屋側の開放部に、環境耐性に優れたシール材をもつ閉止フランジを取り付け、重大事故環境下における健全

性維持を図っている。均圧弁については、フッ素樹脂よりも耐放射線性に優れ、耐高温性を有するシール材の適用も検討している。

1号機データ

1号機 現場対処及び計装機器が示す指示値の推移

東京電力福島第一原子力発電所における
事故の分析に係る検討会 第12回会合
資料4（参考）

12日 15:36頃
R/Bで水素ガス爆発発生

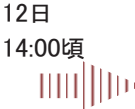
注水



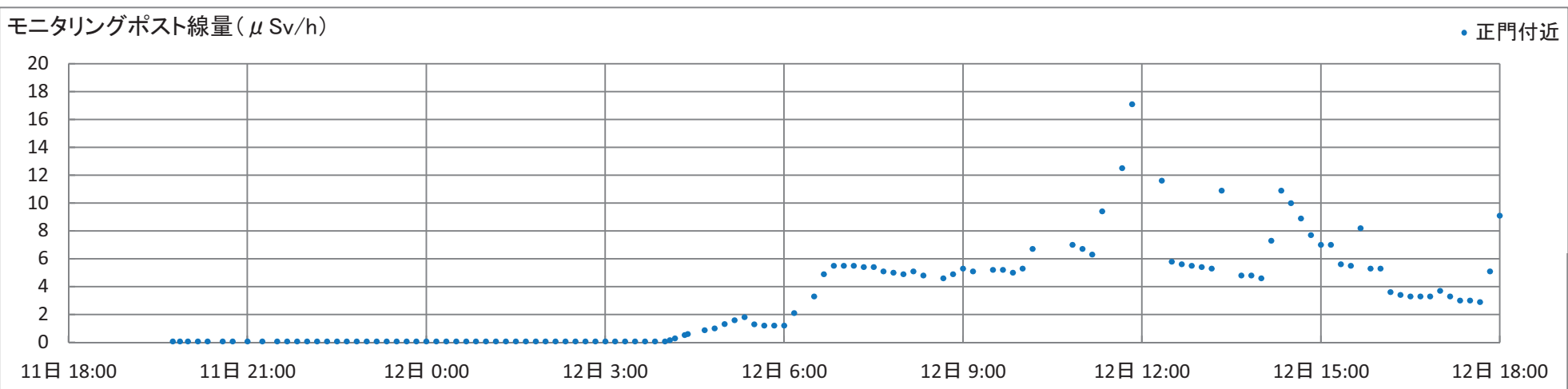
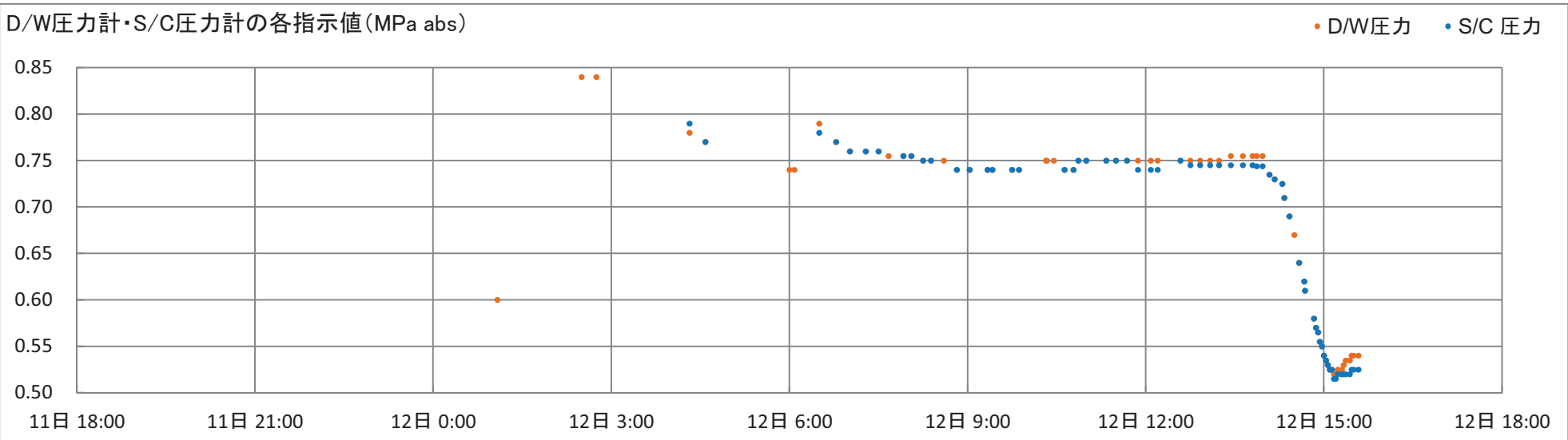
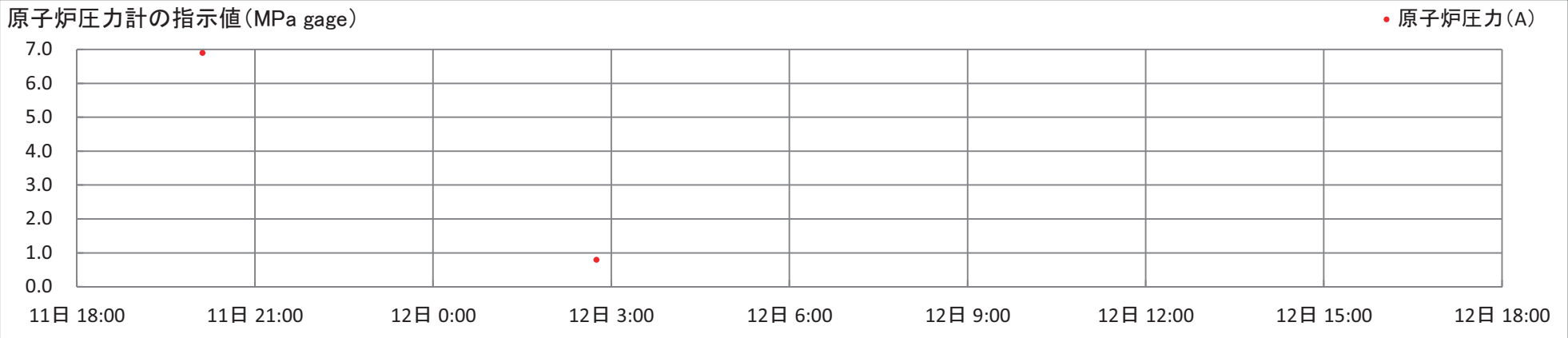
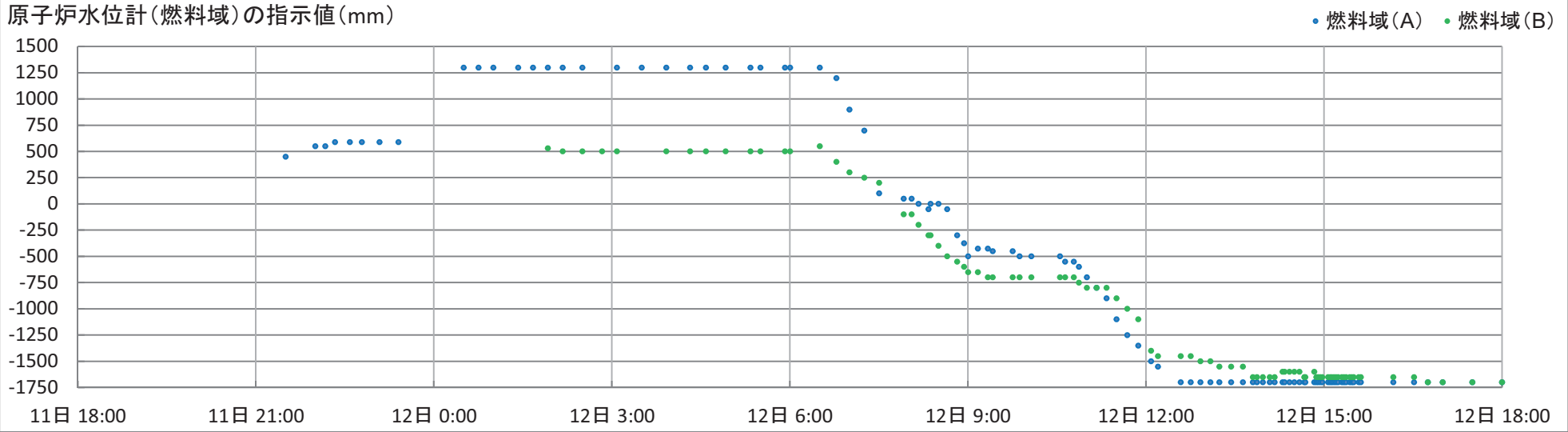
注水ラインが構成され、消防ポンプが作動していた可能性があることを意味する。
なお、実際に、原子炉に注水されたことまで意味するものではない。

SR弁の
手動開操作

格納容器ベント弁の
手動開操作



格納容器ベントに必要な弁の開操作を行った可能性があることを意味する。
なお、格納容器ベントの実施には、ベント弁の開操作に加え、弁の開状態が維持され、ラプチャーディスクが破壊される必要がある。

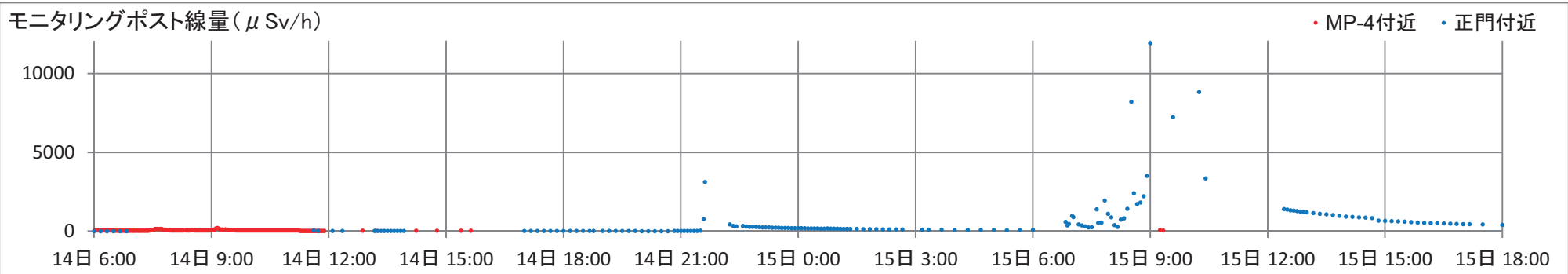
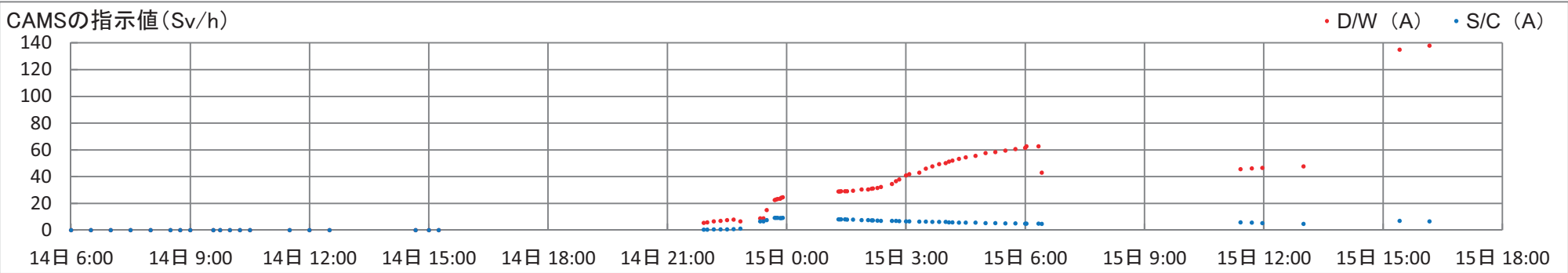
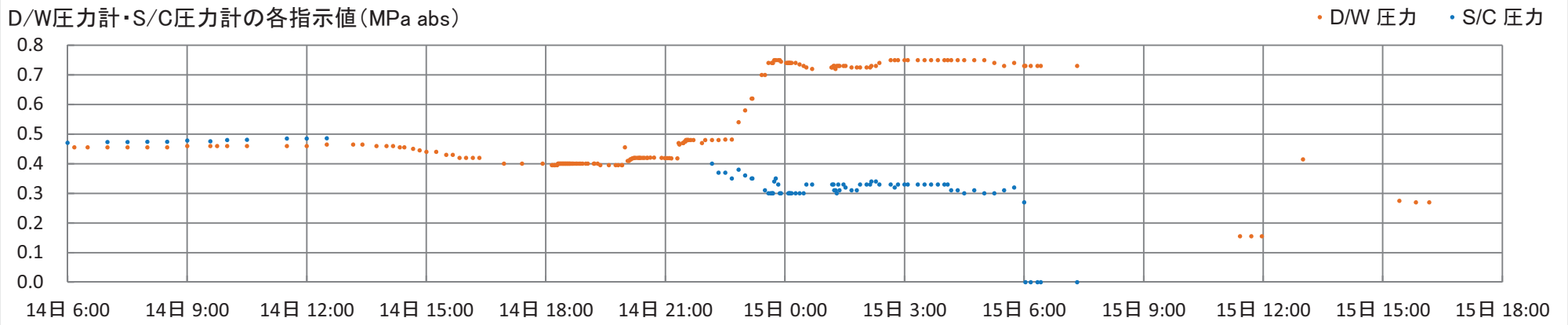
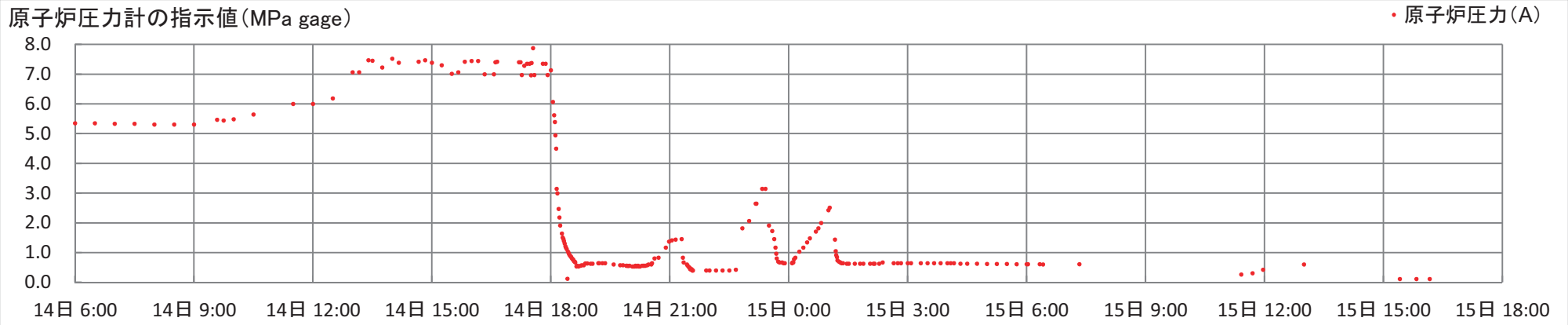
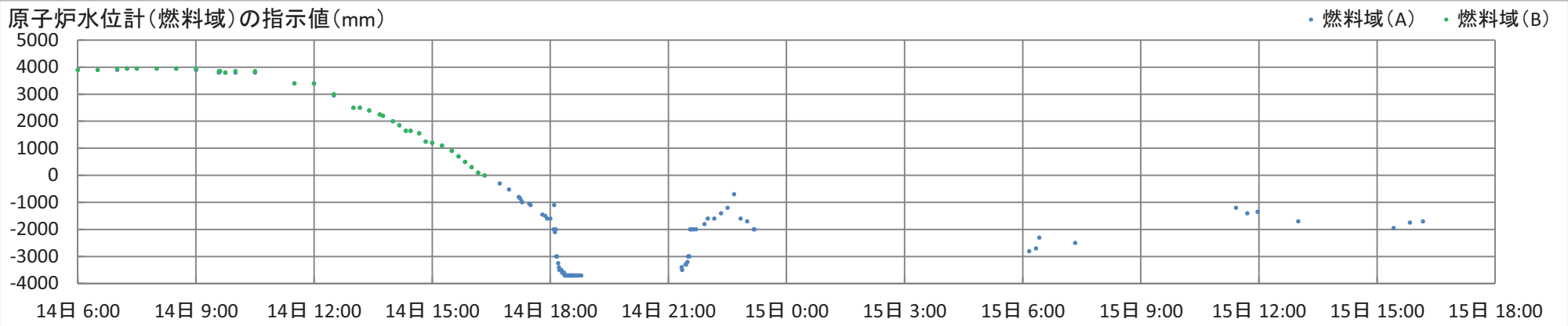
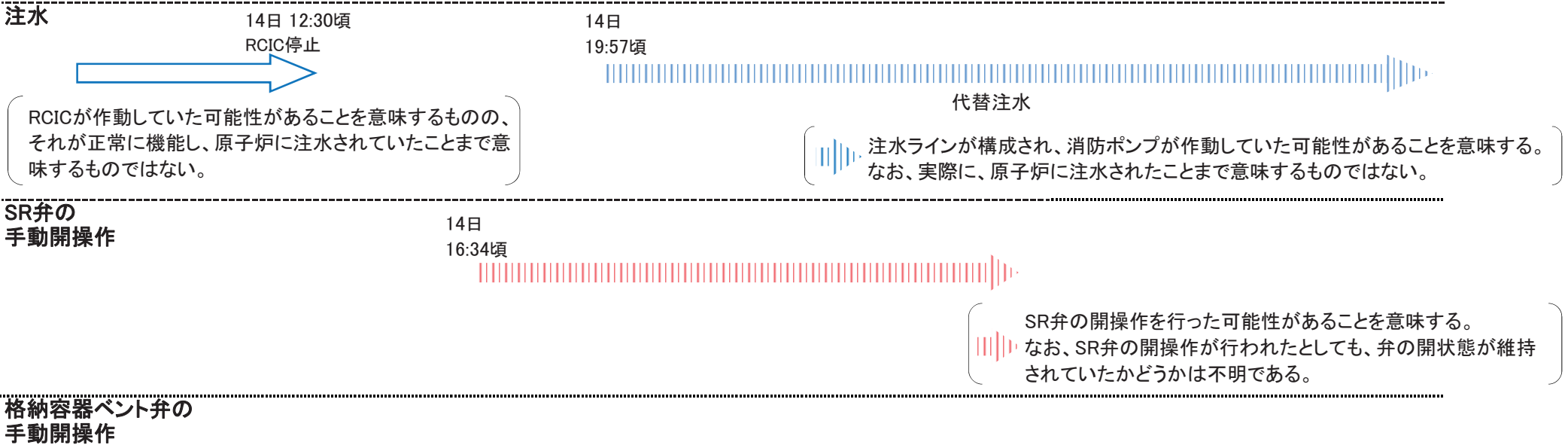


※次の線量も正門付近で計測されている。
3月12日 10:20 180.2、10:30 385.5、10:40 162.9、11:30 35.8、12:00 23.2、12:10 48.2(単位: μ Sv/h)

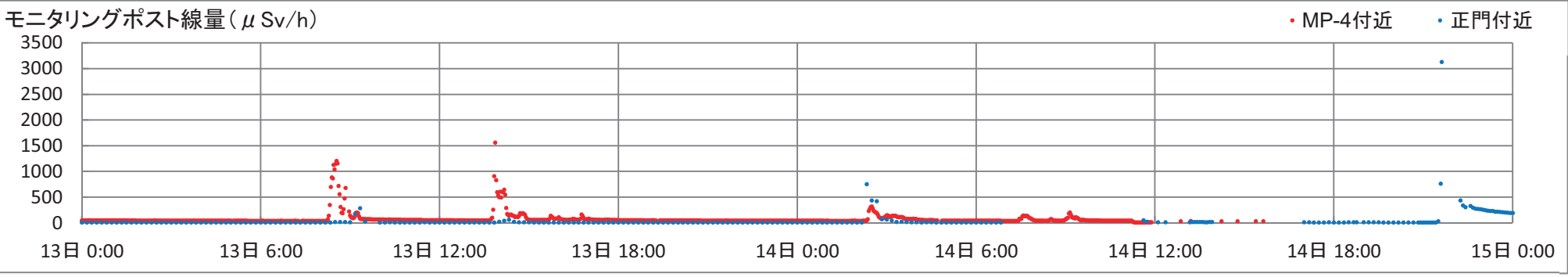
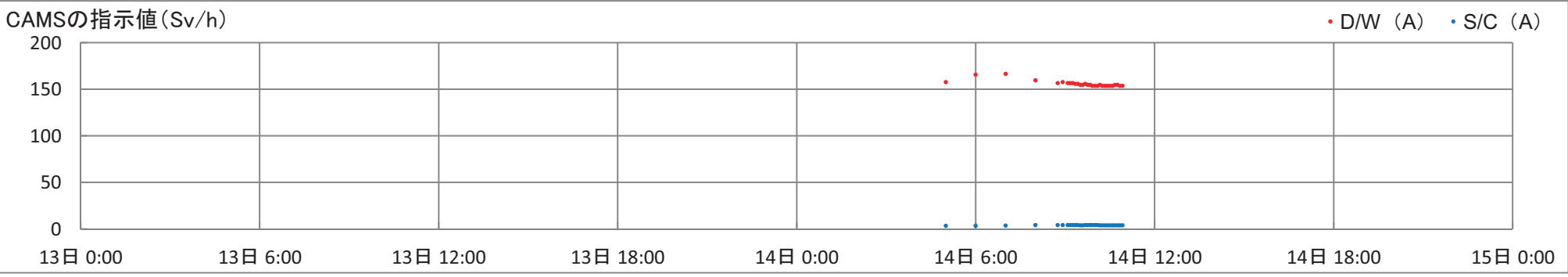
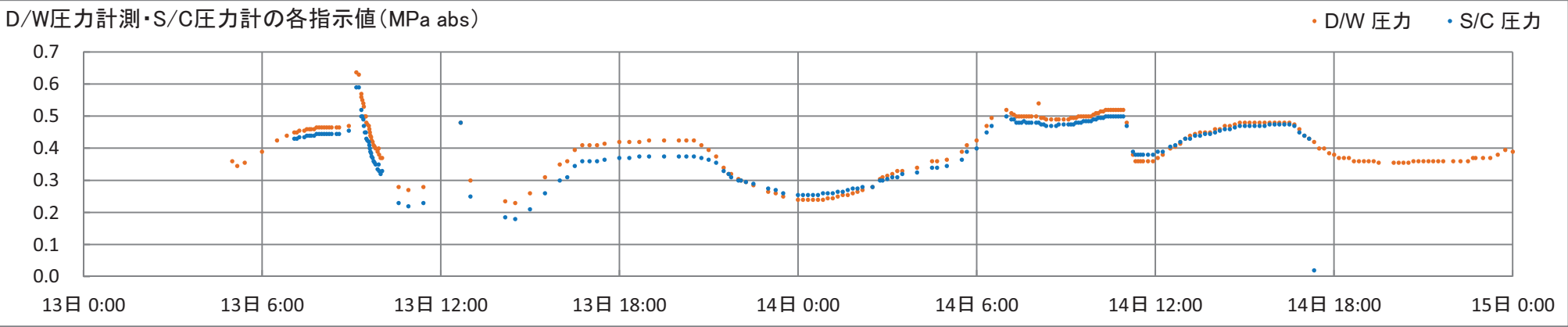
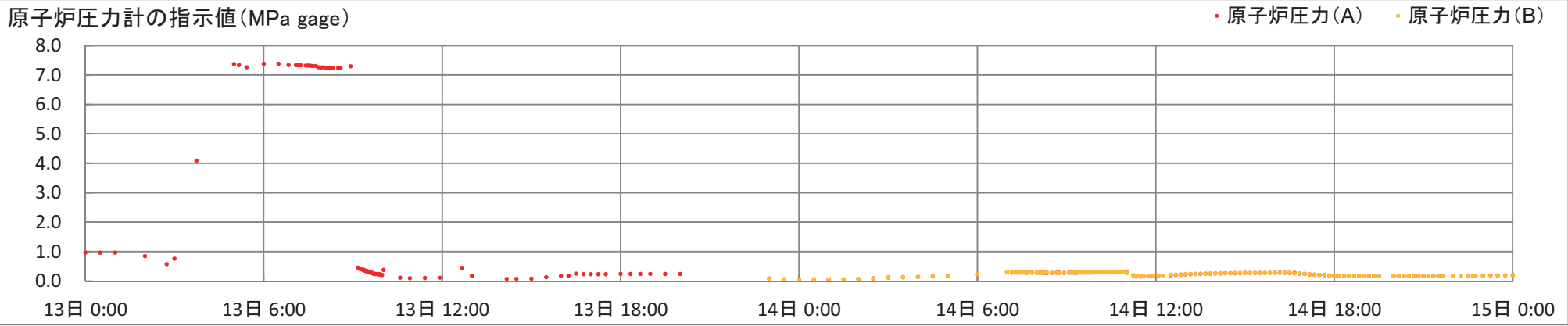
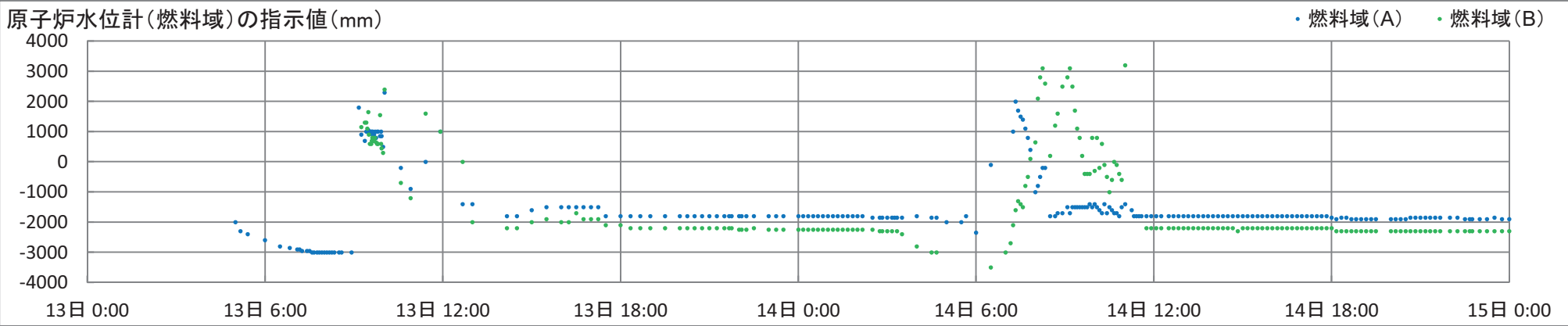
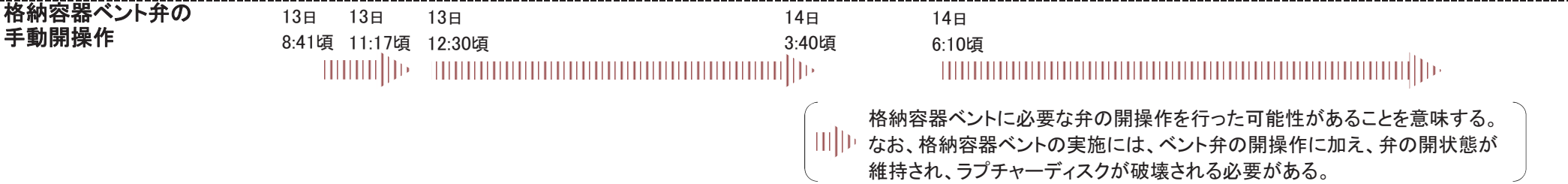
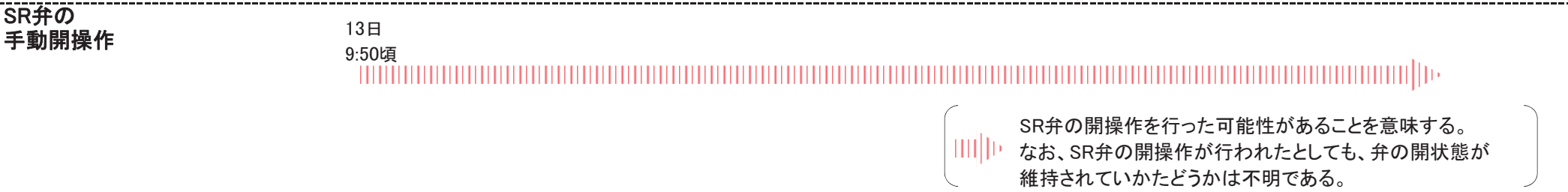
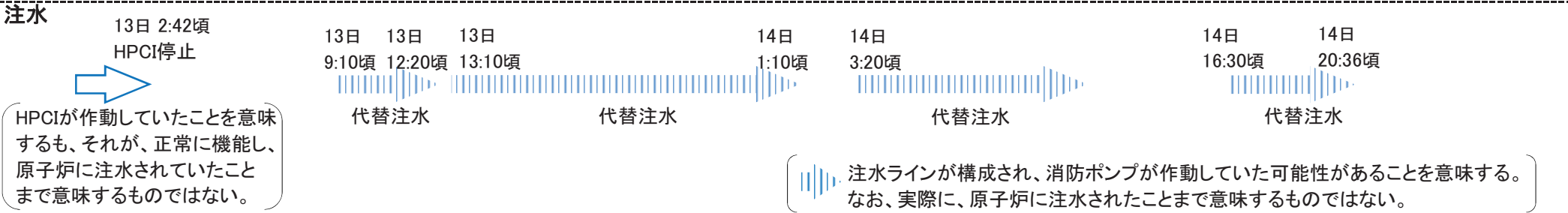
2号機データ

2号機 現場対処及び計装機器が示す指示値の推移

東京電力福島第一原子力発電所における
事故の分析に係る検討会 第12回会合
資料4（参考）



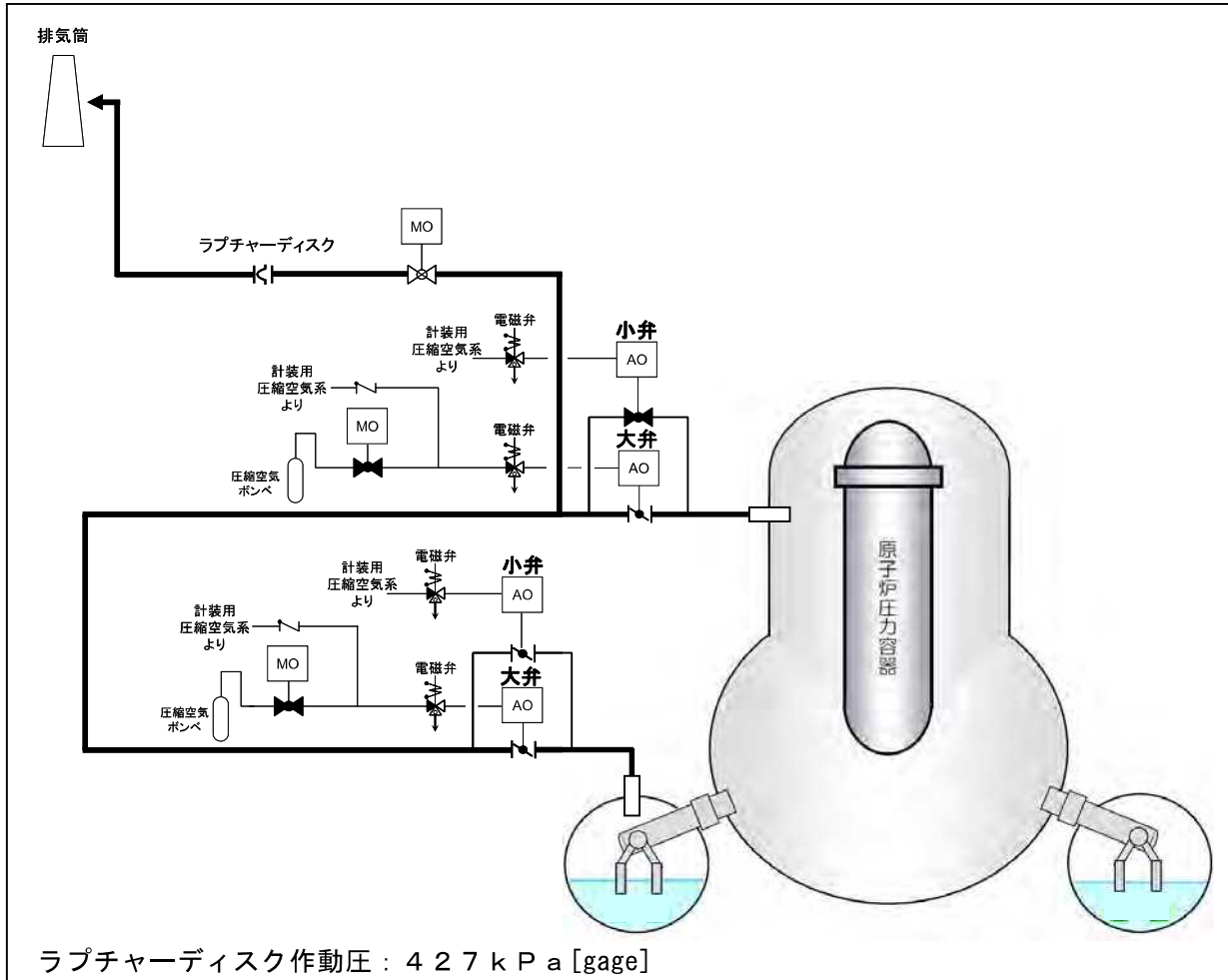
14日 11:01頃
R/Bで水素ガス爆発発生



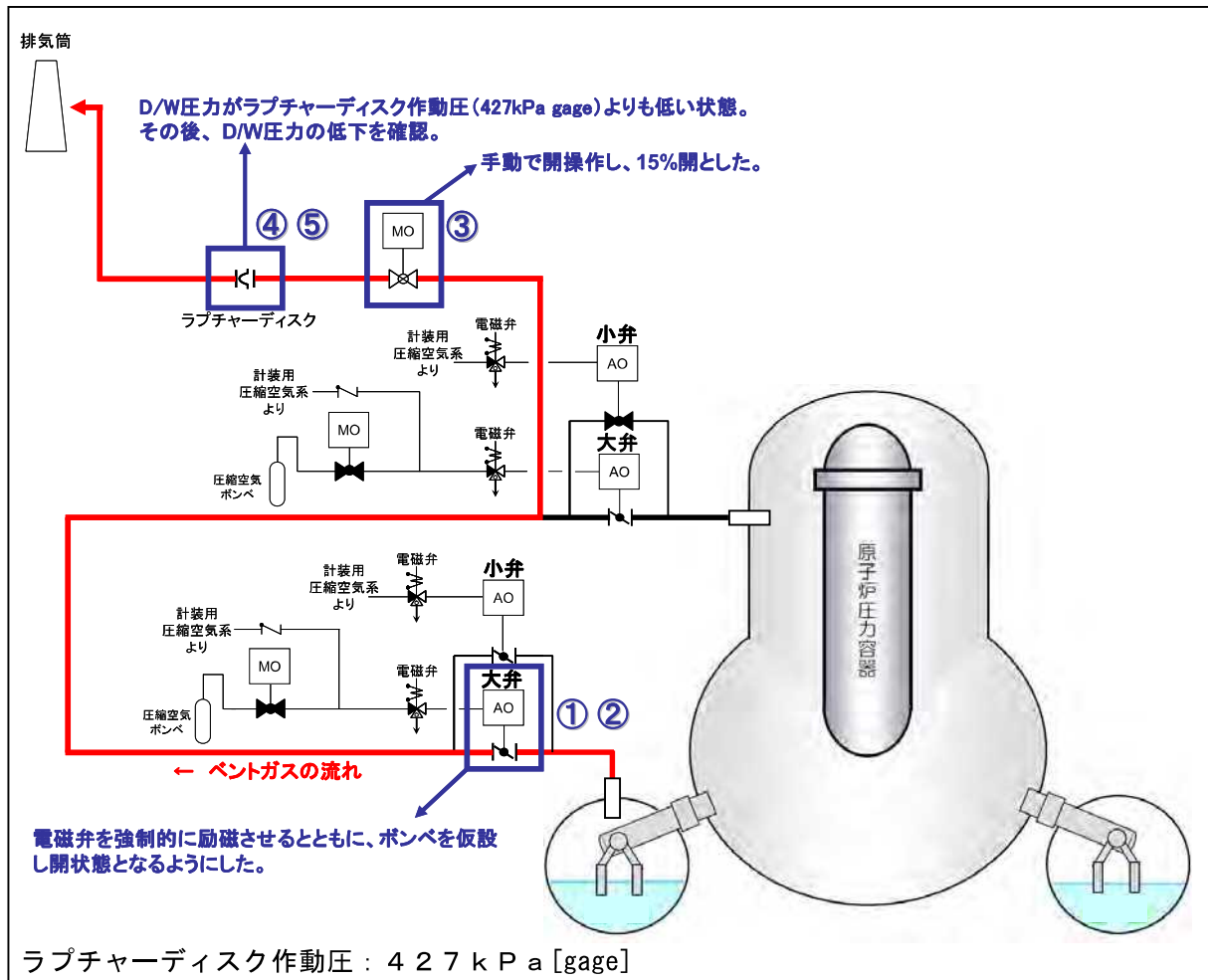
東京電力「プラント関連パラメータ」(平成23年5月)等を基に作成

福島第一 3号機の原子炉格納容器 (PCV) ベントについて

3月11日地震発生前



3月13日8時41分 PCVベントライン構成時



【ベントのラインナップ完成作業実施】

① 3月13日4時52分

S/C ベント弁 (AO 弁) 大弁を開けるために、小型発電機を用いて、電磁弁を強制的に励磁させたが、開度表示が閉であり、S/C ベント弁 (AO 弁) 大弁駆動用空気ポンプの充填圧力が0であった。

② 3月13日5時23分

S/C ベント弁 (AO 弁) 大弁の復旧作業開始。D/W 酸素濃度計の校正用ポンプを AO 弁駆動用空気のポンプと交換、健全であることを確認した。

③ 3月13日8時35分

ベント弁 (MO 弁) を手動で開操作し、15%開とした。

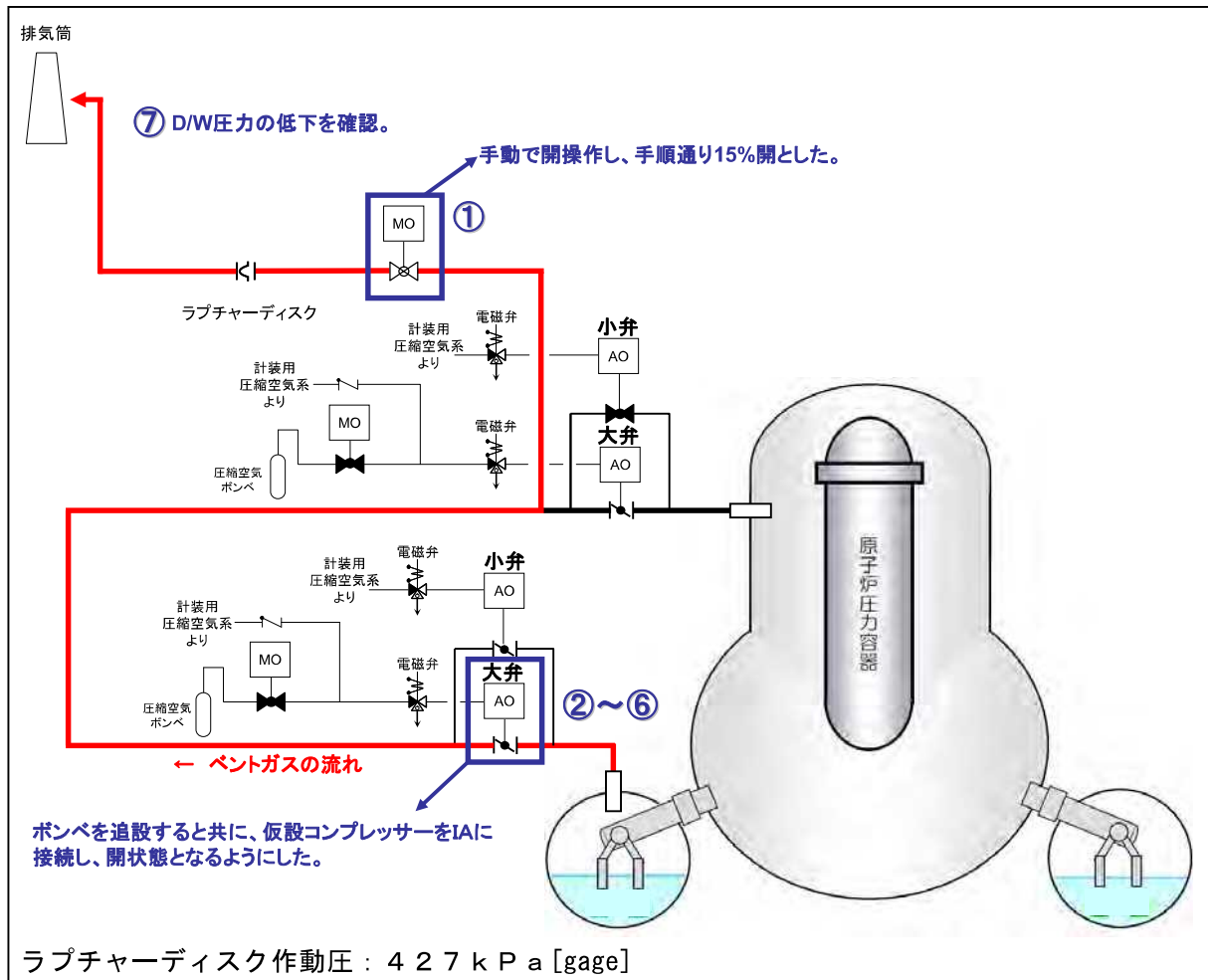
④ 3月13日8時41分

ベントラインの構成が完了したことが発電所対策本部に報告され、ラブチャーディスク破裂待ちとなった。

⑤ 3月13日9時24分

D/W 圧力が 637kPa[abs] (9:10) に上昇後、540kPa[abs] (9:24) まで減圧されたことを確認、発電所対策本部は 9:20 頃にベントが実施されたと判断した。

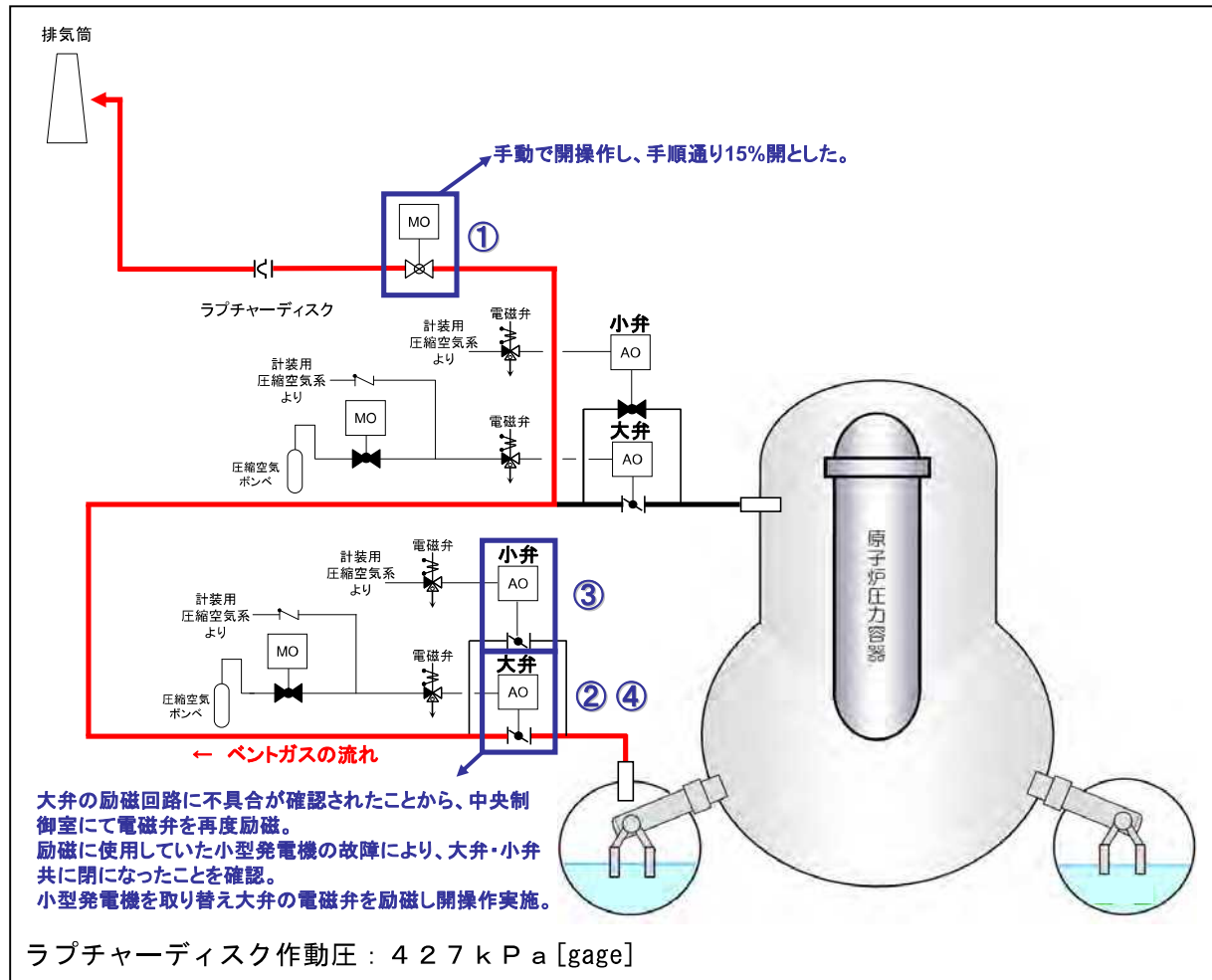
3月13日21時10分 PCVベントラインの維持継続



【ベントラインの維持継続】

- ① 3月13日8時35分
ベント弁（MO弁）を手動で開操作し、15%開とした。
- ② 3月13日9時28分
D/W圧力に一旦上昇傾向が認められた。S/Cベント弁（AO弁）大弁の駆動用空気ポンベの状況確認を行ったところ、接続部からリークが確認されたことから修理を実施。
- ③ 3月13日11時17分
ポンベ圧力抜けにより S/Cベント弁（AO弁）大弁が閉となったことから開操作を開始。
D/W酸素濃度計校正用ポンベへ駆動用ポンベを交換。
- ④ 3月13日12時30分
S/Cベント弁（AO弁）大弁の開を確認。その後、D/W圧力が低下し始めた。(480kPa[abs] (12:40) → 300kPa[abs] (13:00))
- ⑤ 3月13日15時05分
D/W圧力が再度上昇 (230kPa[abs] (14:30) → 260kPa[abs] (15:00)) したため、仮設コンプレッサーを設置することとした。
- ⑥ 3月13日19時00分頃
仮設コンプレッサーを IA ラインに接続して起動。
- ⑦ 3月13日21時10分
D/W圧力低下により S/Cベント弁（AO弁）大弁が開となったと判断した。

3 月 1 4 日 5 時 2 0 分 S / C 側小弁及び大弁使用時



【ベントラインの追加】

① 3 月 1 3 日 8 時 3 5 分

ベント弁 (MO 弁) を手動で開操作し、15%開とした。

② 3 月 1 4 日 3 時 4 0 分

S/C ベント弁 (AO 弁) 大弁の励磁回路に不具合が確認されたことから、中央制御室にて電磁弁を再度励磁させた。

③ 3 月 1 4 日 5 時 2 0 分

S/C ベント弁 (AO 弁) 小弁を開とするために電磁弁の励磁操作を開始。その後、6:10 に開操作完了。

④ 3 月 1 5 日 1 6 時 0 0 分

S/C ベント弁 (AO 弁) 大弁、小弁の電磁弁の励磁に用いていた小型発電機の故障により、同弁が閉になったことを確認。その後、16:05、小型発電機を取替え、S/C ベント弁 (AO 弁) 大弁の電磁弁を励磁し、開操作実施。

【その後の P C V ベント実施】

以降も、S/C ベント弁（A0 弁）大弁、小弁駆動用空気圧や空気供給ラインの電磁弁の励磁維持の問題から開状態維持が難しく、開操作が複数回実施された。

【S/C ベント弁（A0 弁）大弁】

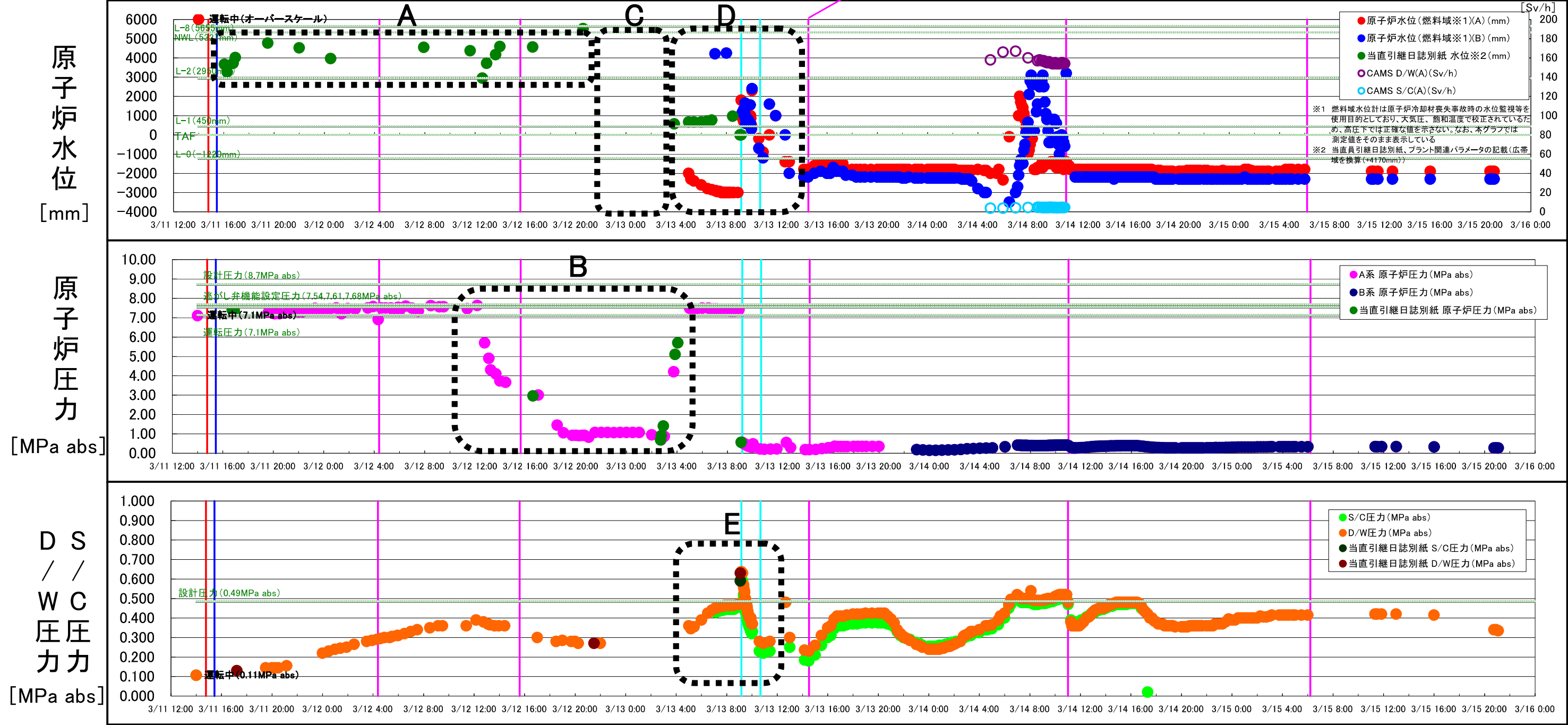
3 月 1 7 日	2 1 時 0 0 分	閉確認 →	同日	2 1 時 3 0 分頃	開操作
3 月 1 8 日	5 時 3 0 分	閉確認 →	同日	5 時 3 0 分頃	開操作
3 月 1 9 日	1 1 時 3 0 分	閉確認 →	3 月 2 0 日	1 1 時 2 5 分頃	開操作
4 月 8 日	1 8 時 3 0 分頃	閉確認			

【S/C ベント弁（A0 弁）小弁】

3 月 1 6 日	1 時 5 5 分	開操作
4 月 8 日	1 8 時 3 0 分頃	閉確認

福島第一3号機 プラントデータ推移

添付8-15
東京電力福島第一原子力発電所における
事故の分析に係る検討会 第12回会合
資料4 (参考)



高圧注水	RCIC	手動 自動 手動 起動 停止 起動 (15:05) (15:25) (16:03)	自動 停止 (11:36)
	HPCI		自動 起動 (12:35) 手動 停止 (2:42)
減圧	SRV		SRV急速 減圧開始 (9:08頃) SRVを開操作し減圧を維持
低圧注水	FP/DDFP	自動 手動 起動 停止 (11:13) (11:36)	S/C2フレイ 開始 (12:06) 停止 (5:08) D/W2フレイ 開始 (7:43) 停止 (7:39) S/C2フレイ 開始 (8:40~9:10)
	FP/消防車	所長 検討指示 (17:12)	注水ライン 構成完了報告 (3:05) ほう膜入り 淡水注水 開始 (9:25) 淡水注水 停止 (12:20) 海水注水 開始 (13:12) 海水注水 停止 (1:10) 海水注水 再開 (3:20) 海水注水 再開 (15:30頃)
格納容器ベント		所長 ベント準備 指示 (17:30)	所長 ベントライン MO弁 開操作 完成指示 (5:15) S/C大弁開・ ベントライン 構成完了 (8:35) D/W 圧力 低下確認 (8:41) S/C大弁 開確認 (11:17) S/C大弁 開確認 (12:30) 仮設 D/W圧力低下・ インジェクター 設置 (19:00頃) S/C大弁 開操作 (5:20) S/C小弁 開確認 (6:10)