

3号機の原子炉圧力及び格納容器圧力の 挙動について(2)

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室
星 陽崇

目次

1. 原子炉隔離時冷却系(RCIC)運転中の逃し安全弁(S/RV)の挙動について P. 2
2. 高圧注水系(HPCI)停止後のS/RVの挙動について P. 11
3. 3号機ベント後の事故進展の推定 P. 17
 1. 主蒸気管貫通部からの漏えいについて P. 20
 2. ADSの閉止時期について P. 25
 3. D/W床面への溶融炉心落下時期 P. 35
 4. MCCIについて P. 44
 5. 可燃性ガスの発生について P. 46
 6. RPVとD/Wからの漏えいについて P. 50

1. RCIC運転中のS/RVの挙動について

- 逃し安全弁(S/RV)の実際の動作
 - 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
 - 原子炉圧力低下時に、S/RVの閉信号が出されたか
 - 原子炉圧力が開設定圧に復帰するまでに、それ以前と同様の圧力振幅が継続するのはなぜか
- 設計から推定されるS/RVの動作
 - S/RVに対して出されるべき信号
 - 開/閉信号に対して、窒素供給が遮断された場合のS/RVの応答

3号機RPV圧力

3号機

閉信号が出されれば、炉圧はS/RV開の設定圧まで上昇するのではないか

逃し弁機能による動作

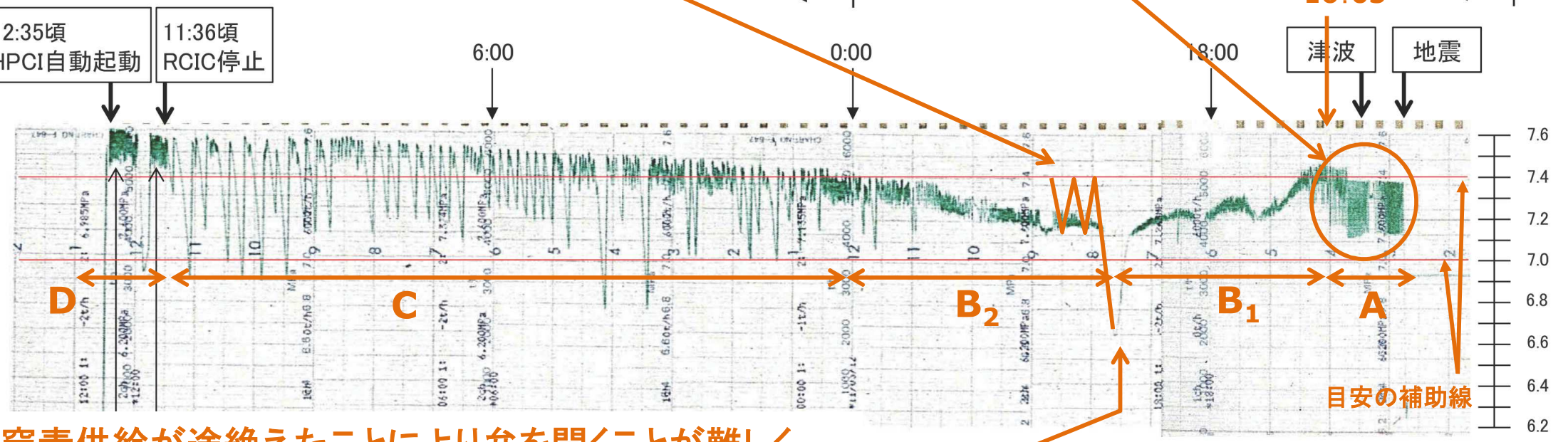
RCIC手動起動
16:03

3/11

3/12

12:35頃
HPCI自動起動

11:36頃
RCIC停止



窒素供給が途絶えたことにより弁を開くことが難しくなっても、他方、弁を閉じることには支障はないと考えられる

A、B₁、B₂、C及びDは便宜上の時間区分

3月11日19:頃に原子炉圧力は大きく低下している
 ・この時点で明らかにS/RVの閉止圧より炉圧が低下していることから、閉止信号が出ているはず。
 ・B₂の期間では、炉圧はS/RVの開圧力まで上昇せずに振幅を繰り返している。

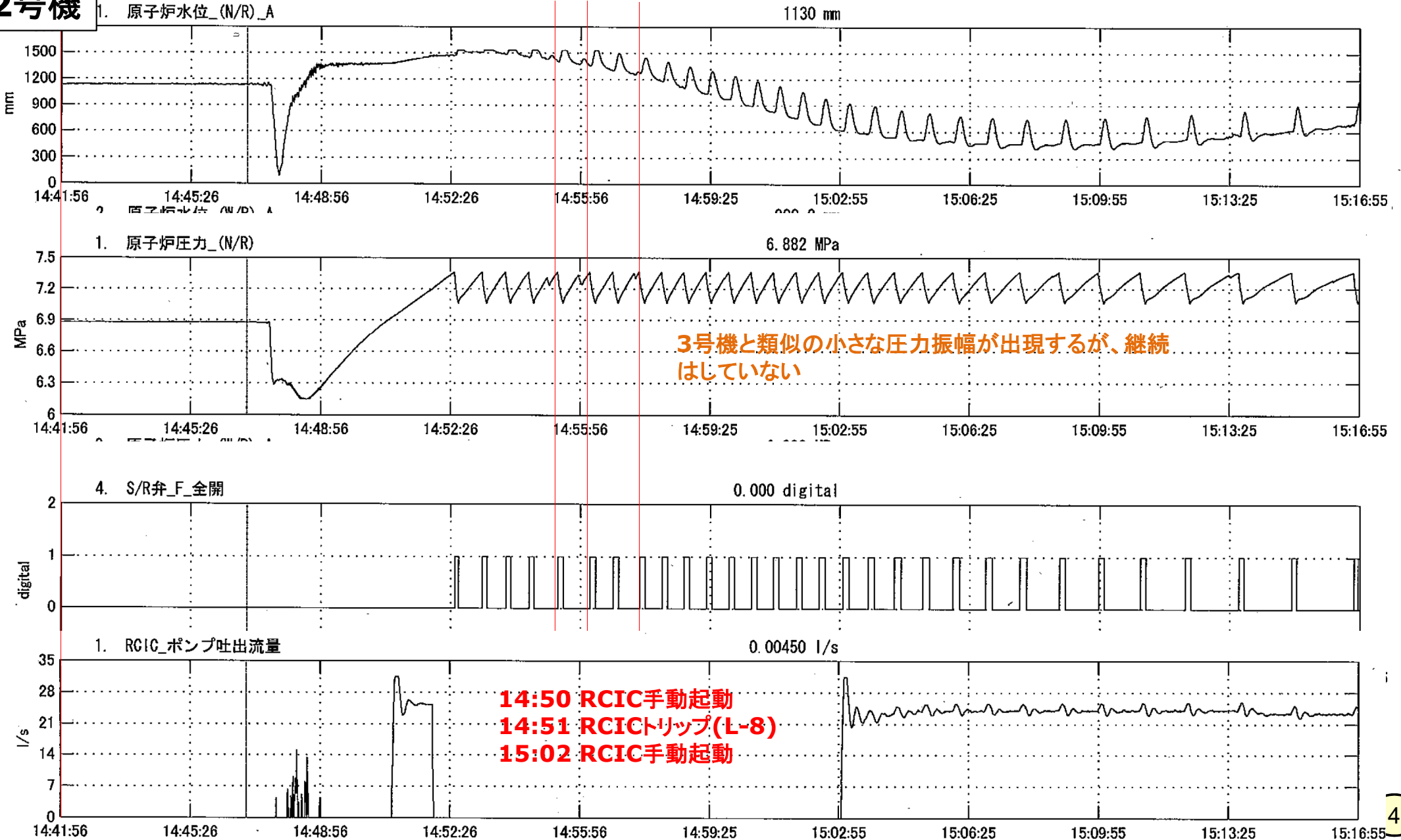
表1 SRVの逃がし弁機能と安全弁機能の作動圧 単位: MPa[gage]

	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

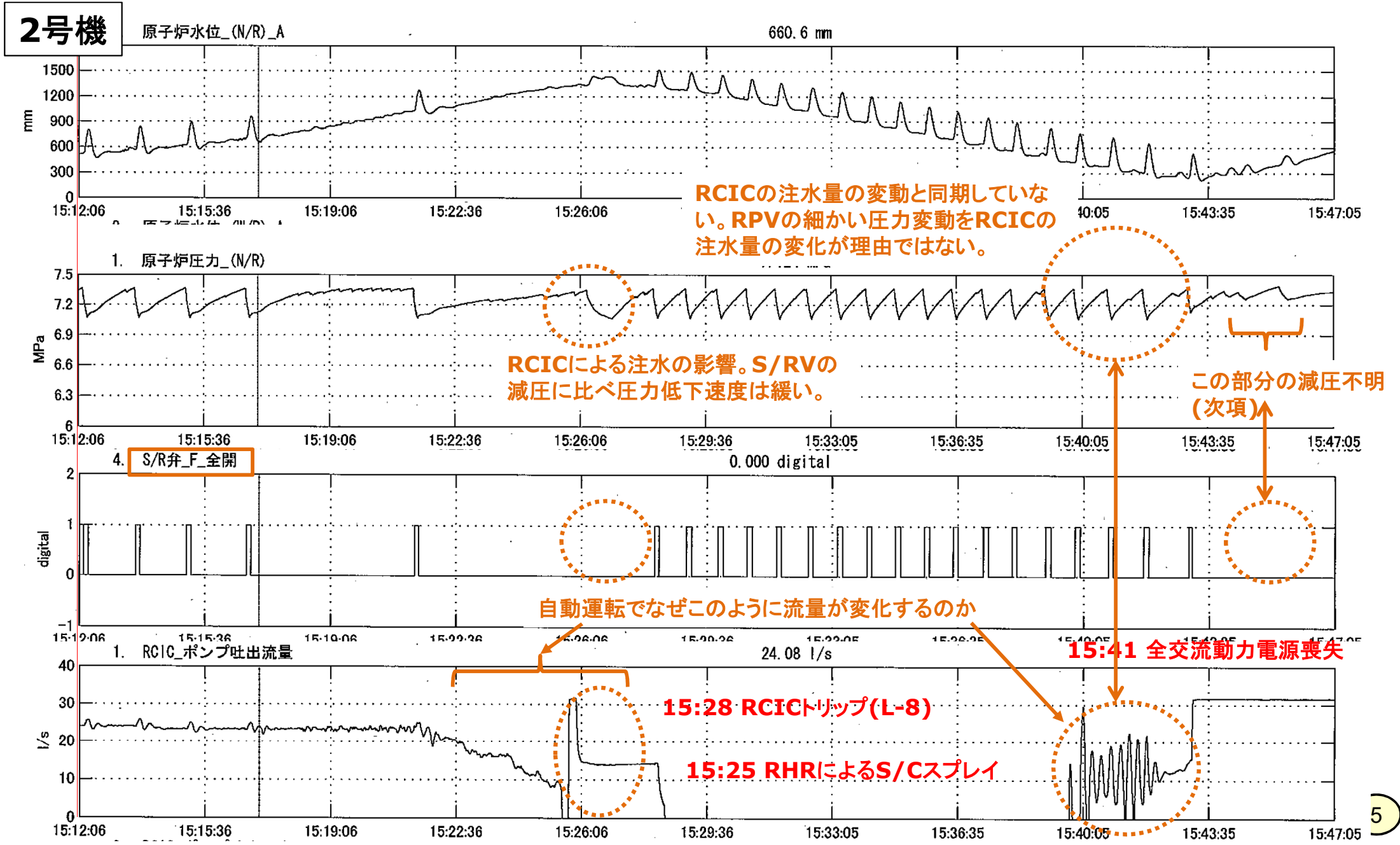
東電、未説明問題報告書(第5回)より抜粋

比較として2号機でのS/RVの動作を確認

2号機



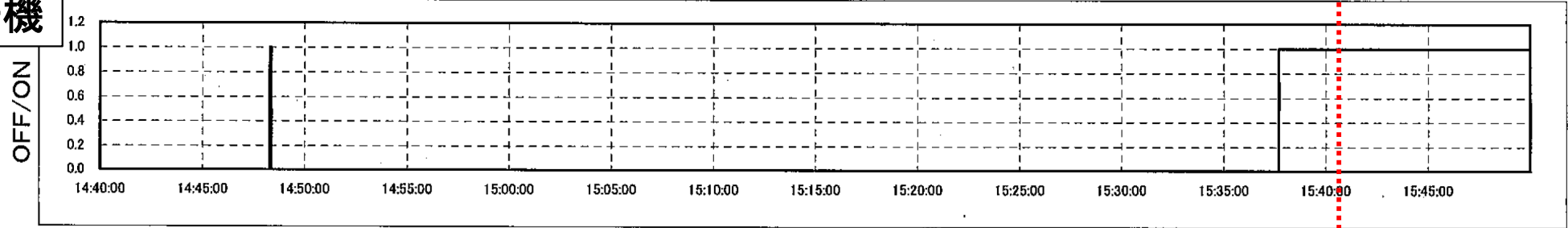
炉圧とRCIC注水量との相関



2号機SBO後にみられるS/RVの中間開

2号機

D680 6. 9KV 母線 2C 電圧喪失



2C母線電圧喪失 15:37:40

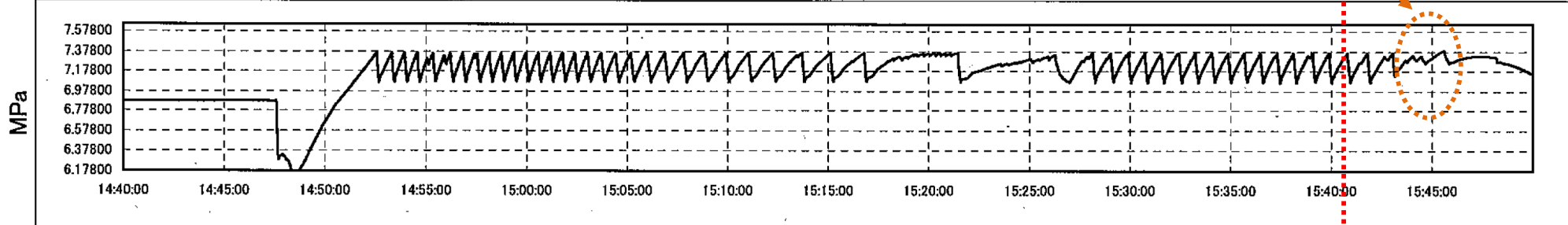
4. D681 6. 9KV 母線 2D 電圧喪失



3号機と同様に、窒素供給停止による中間開の様な状態と考えられる

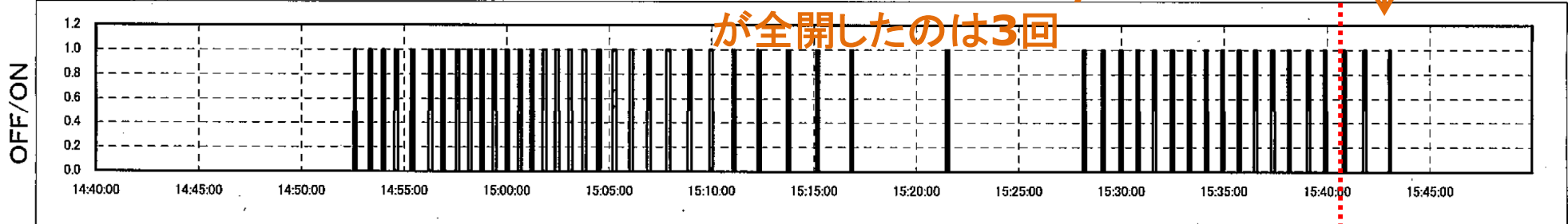
2D母線電圧喪失 15:40:38

1. P600 原子炉圧力 (N/R)



交流電源喪失後にS/RVが全開したのは3回

2. D628 逃し安全弁 F 開

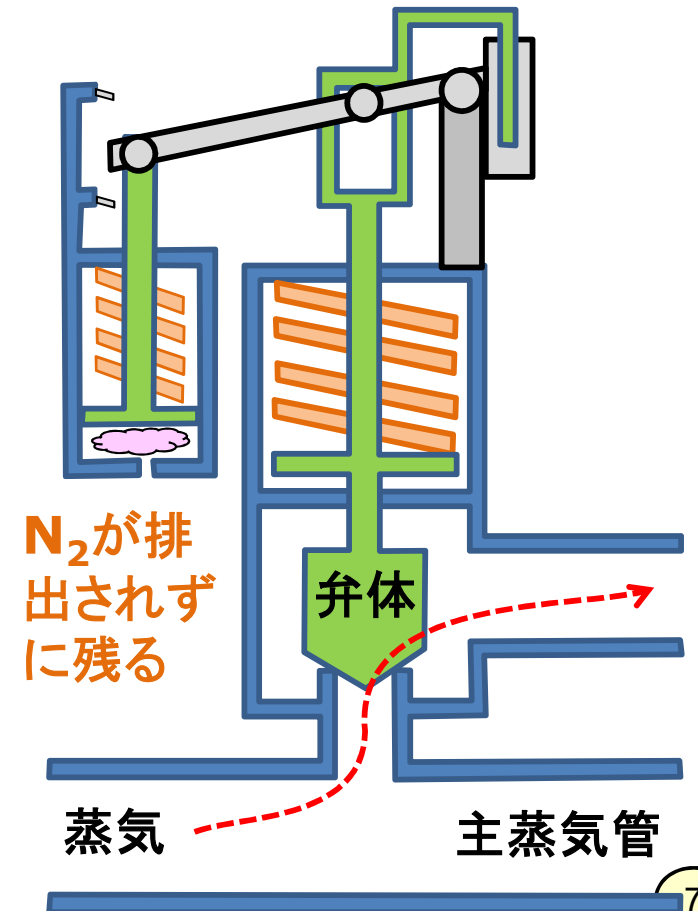
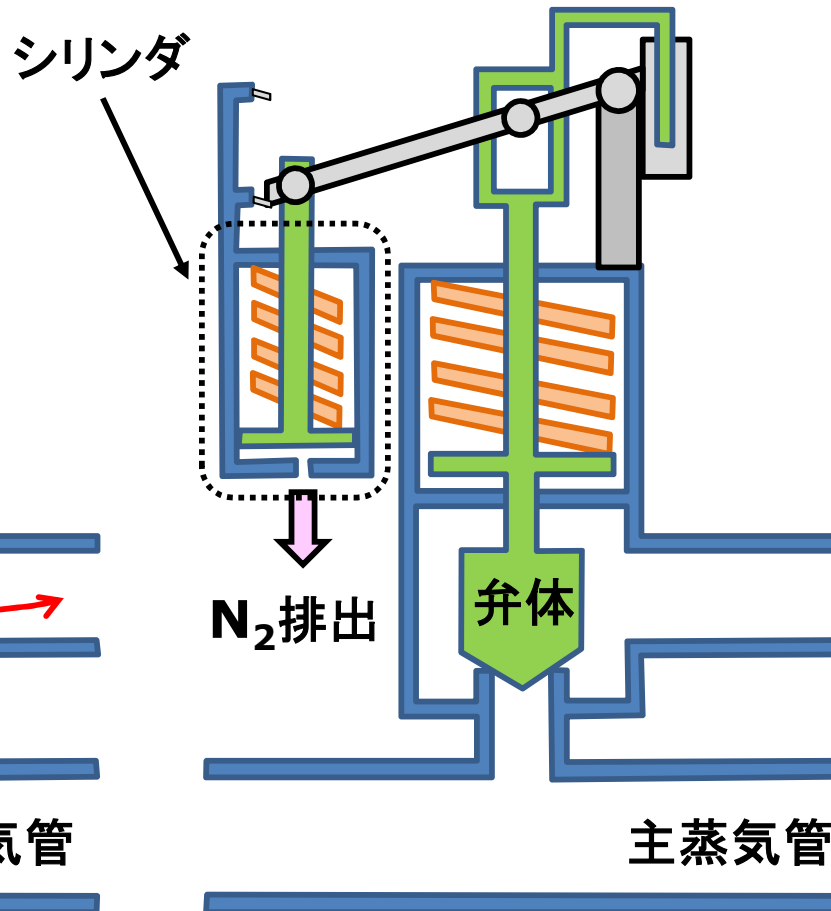
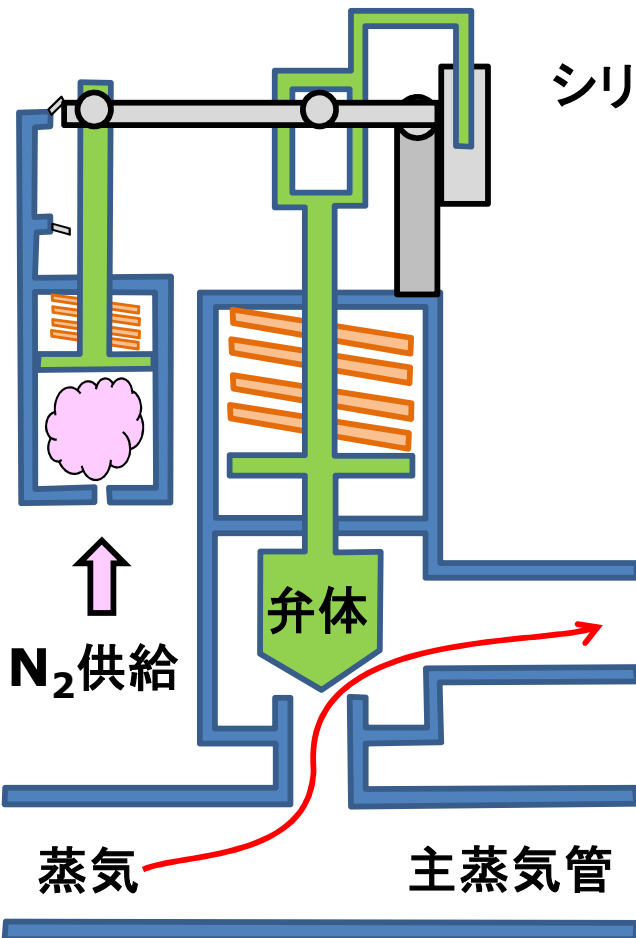


B-1の区間で生じるS/RVの中間開状態

開
窒素ガスがシリンダに供給され、弁体が持ち上げられる

閉
シリンダから窒素ガスが排出され、弁体がバネで押し付けられる

中間開
窒素ガスがシリンダに不十分に供給され、弁体を上方へ押し上げる力がかかる。その後、シリンダから窒素ガスが排出されないと、弁体を上方へ押し上げる力がなかった状態が維持される。

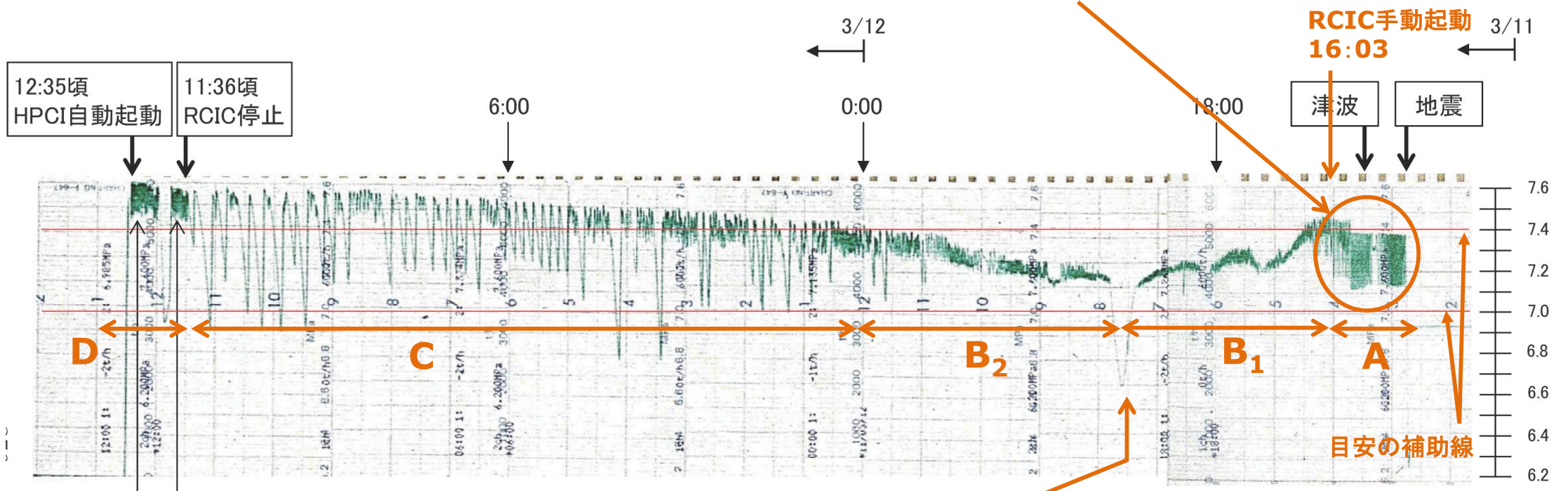


再掲

3号機RPV圧力

3号機

逃し弁機能による動作



- 実態として、S/RVIは一旦全開されないと炉圧が設定圧を下回っても開信号が解除されない(あるいは閉信号が出ない)と考えられる
- そのため、窒素供給を喪失した弁を閉止できていないと考えられる
- 2号機においても類似の挙動が見られることから、窒素供給切れになったS/RVIに共通する挙動と考えられる

A、B₁、B₂、C及びDは便宜上の時間区分

表1 SRVの逃がし弁機能と安全弁機能の作動圧 単位: MPa[gage]

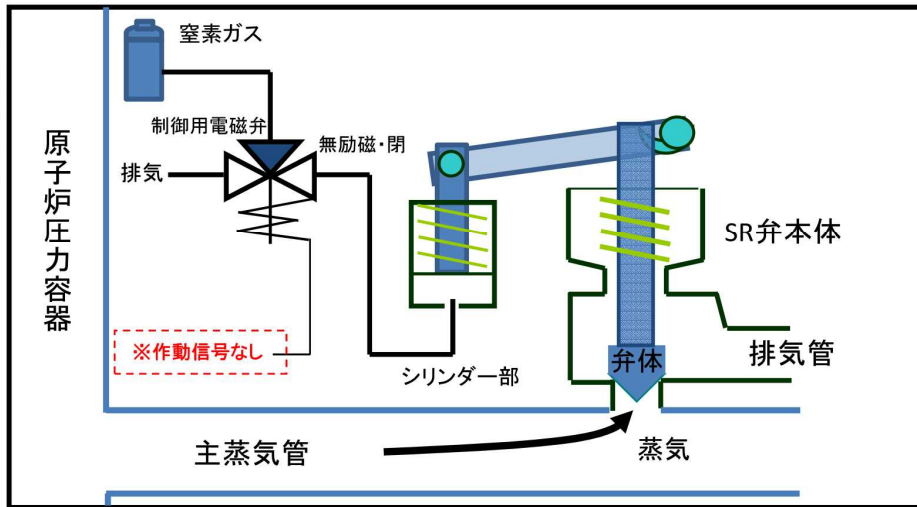
	A	B	C	D	E	F	G	H
逃がし弁機能	7.51	7.58	7.44	7.58	7.51	7.58	7.51	7.58
安全弁機能	7.71	7.78	7.64	7.71	7.64	7.78	7.71	7.78
ADS機能の有無	有	有	有	—	有	—	有	有

東電、未説明問題報告書(第5回)より抜粋

逃し安全弁の作動原理

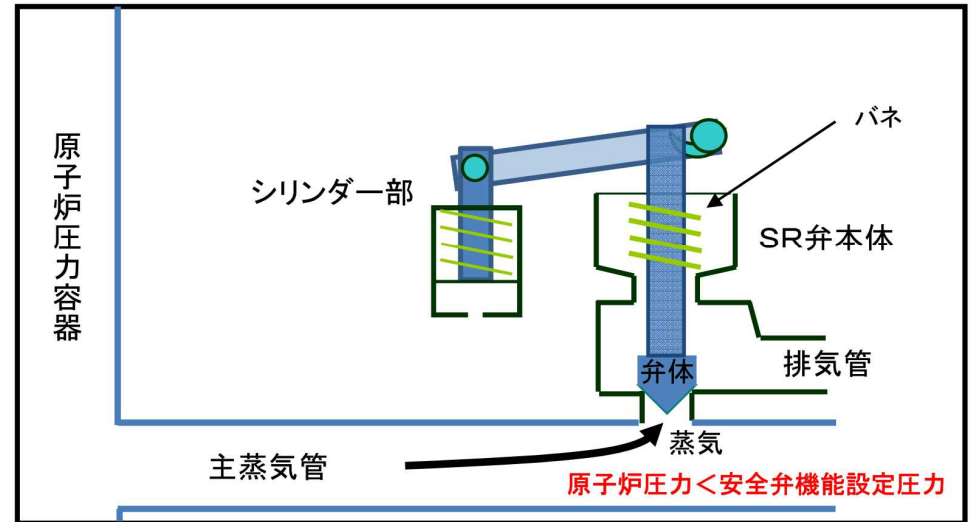
逃し弁機能

通常時

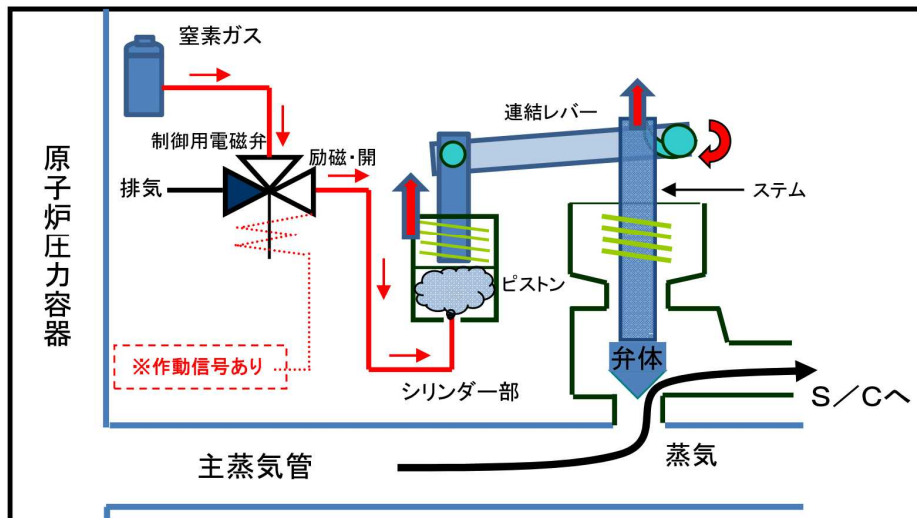


安全弁機能

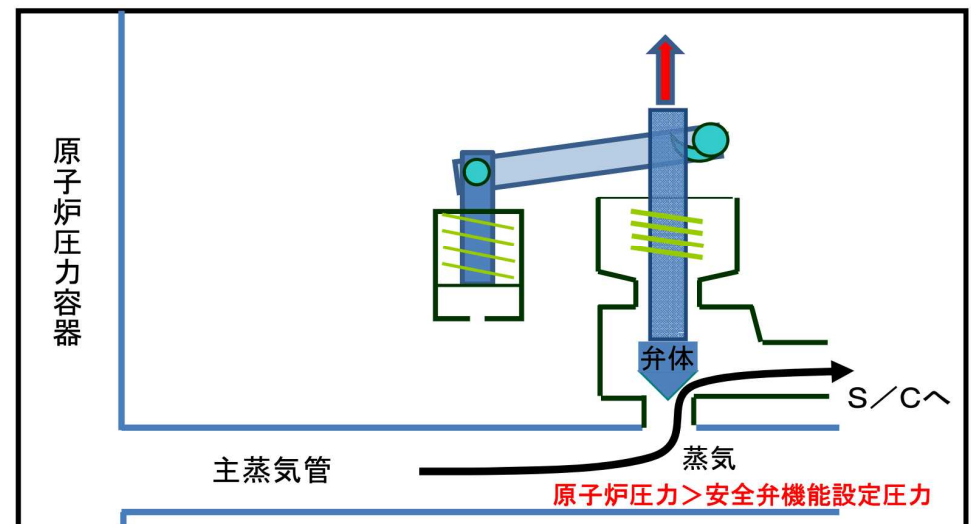
通常時



圧力異常上昇時 / 冷却材喪失事故時 / 遠隔手動操作時



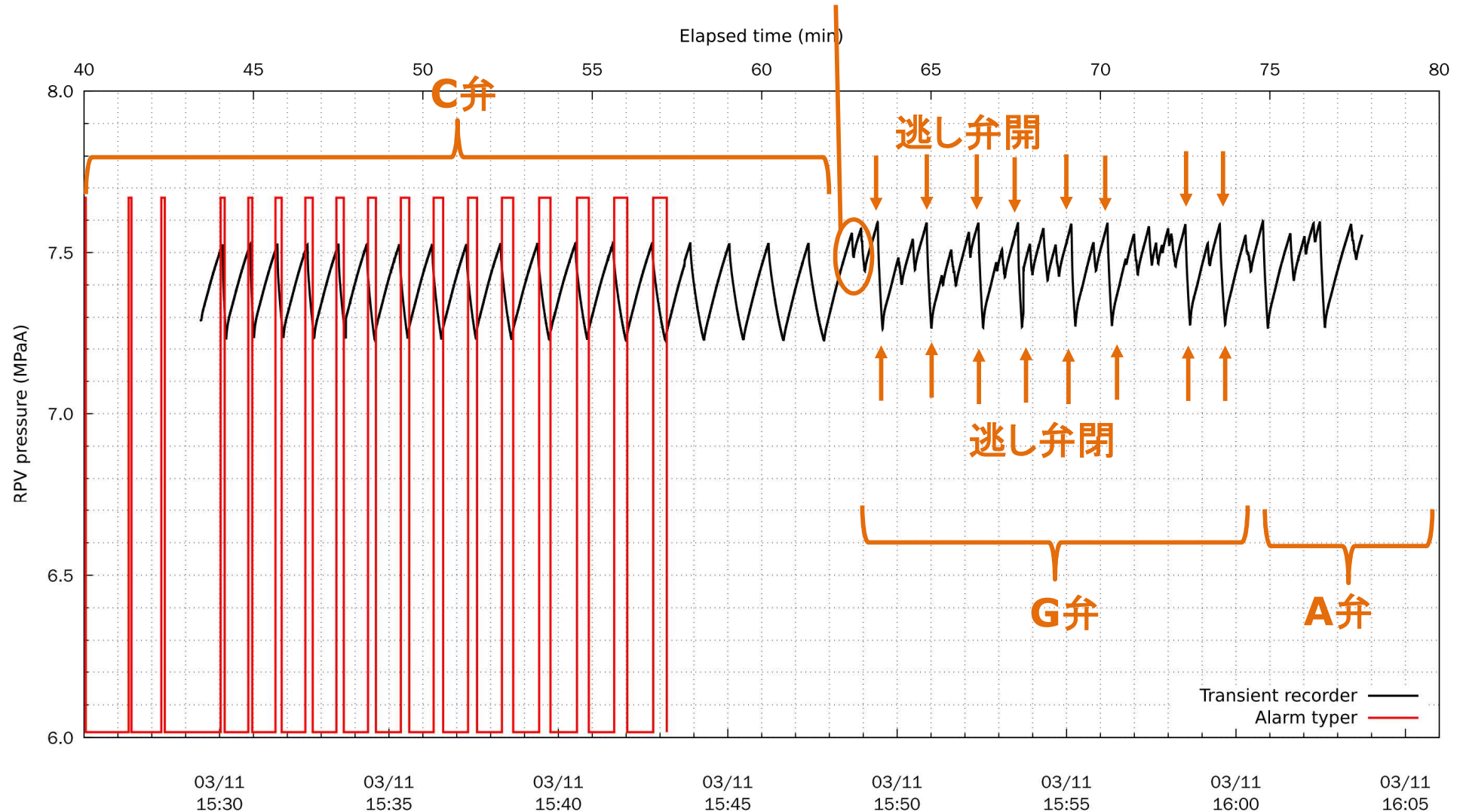
圧力異常上昇時



参考 SRV動作と考えられる細かい圧力振動

3号機

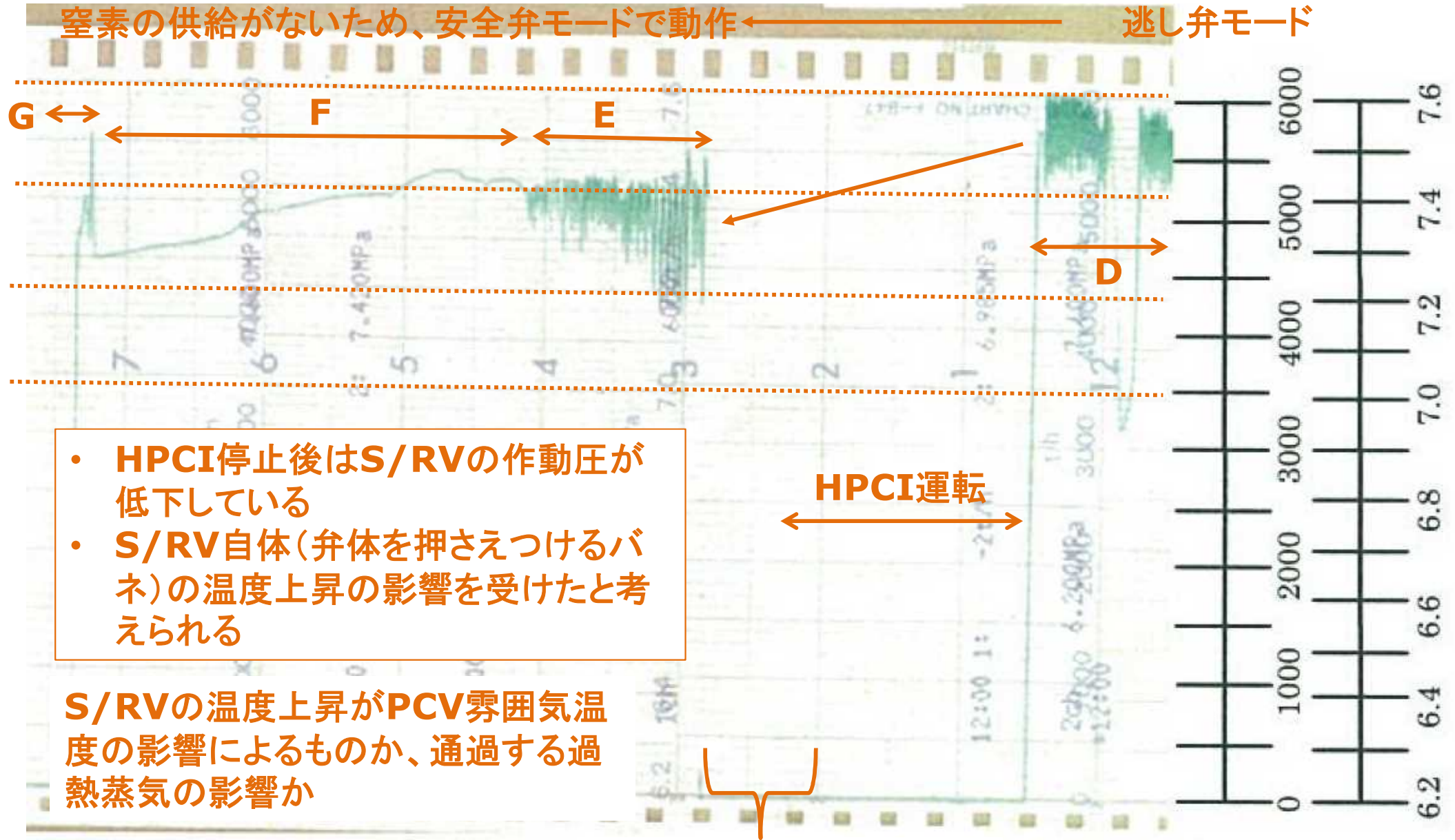
C弁が残圧で中間開状態になっていると考えられる



2. HPCI停止後のS/RVの挙動について

- 炉心損傷後は、過熱蒸気によってS/RV自体の温度が上昇したと考えられる
 - 主蒸気管を通過する蒸気温度の上昇によってS/RV自体(ばね部)の温度が上昇
 - S/RVの温度は格納容器の雰囲気温度よりも高温になると考えられる
- S/RV自体の温度が上昇した場合の影響
 - ばねによる弁体の押し下げ力の低下
 - 設定圧よりも低い炉圧での安全弁としての動作

HPCI運転前後でのRPV圧力



- HPCI停止後はS/RVの作動圧が低下している
- S/RV自体(弁体を押さえつけるバネ)の温度上昇の影響を受けたと考えられる

S/RVの温度上昇がPCV雰囲気温度の影響によるものか、通過する過熱蒸気の影響か

D、E、F及びGは便宜上の時間区分

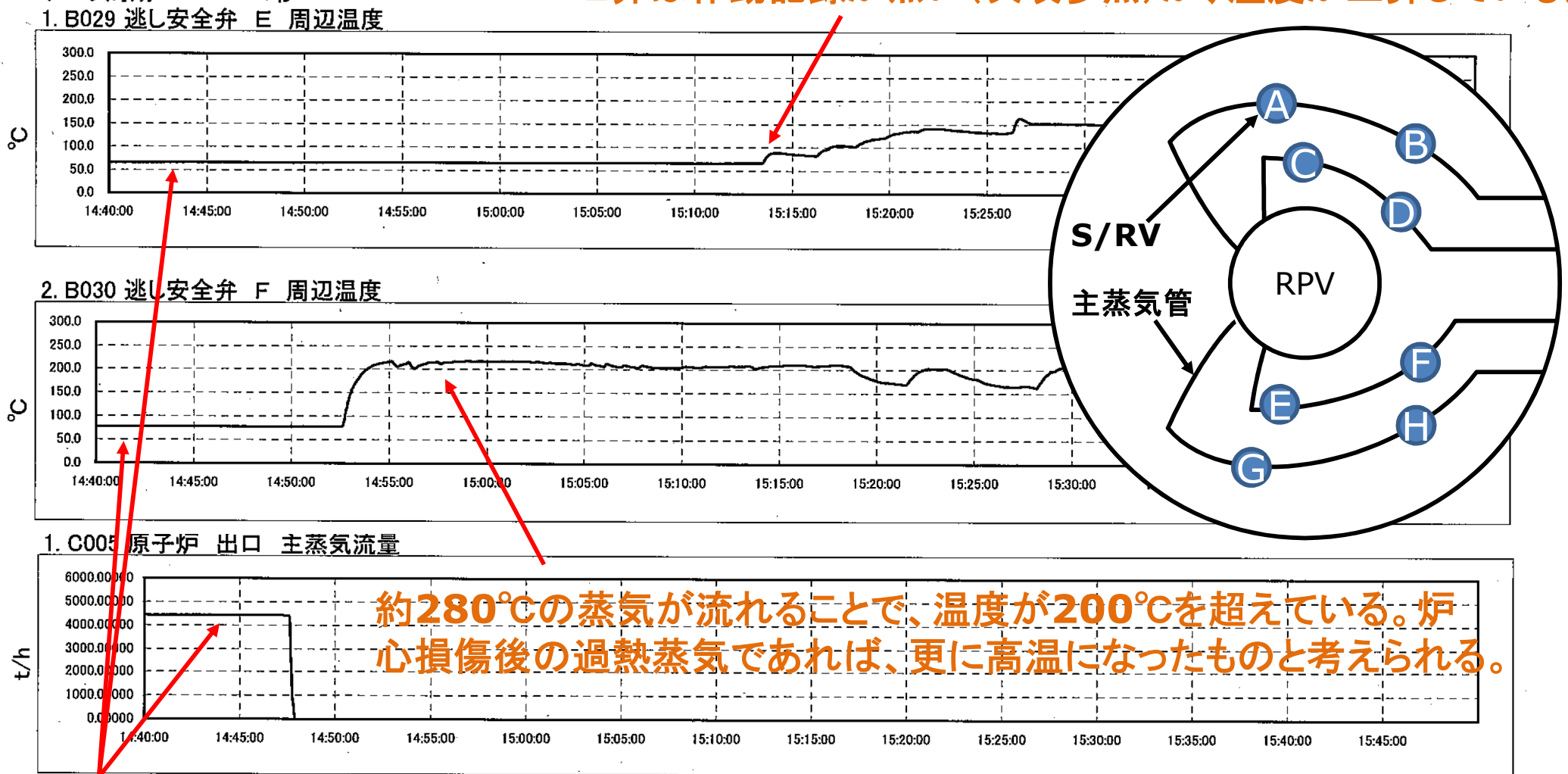
(注) 欠測期間が存在する

2号機でのS/RV周辺温度

2号機

E弁及びF弁は同一主蒸気管上に設置

E弁は作動記録が無い(次項参照)が、温度が上昇している。

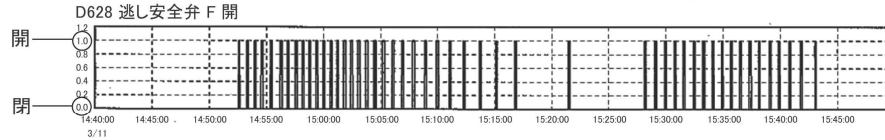


通常運転時の蒸気流量でも、主蒸気管を蒸気が流れているだけでは、温度は上昇していない

2号機 S/RVの動作記録

2号機 SR弁の動作

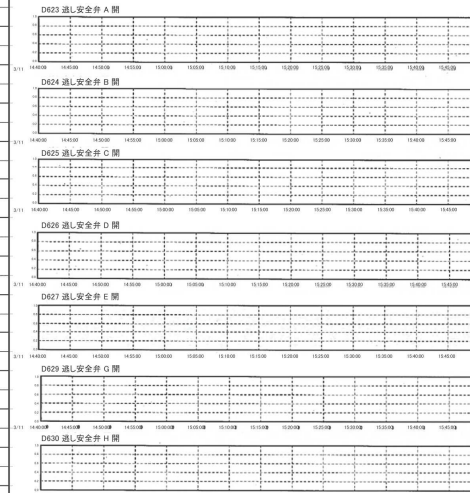
資料Ⅱ-1-1-24



逃がし安全弁Fの開閉記録

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

※SR弁のA弁～E弁、G弁及びH弁の動作記録なし



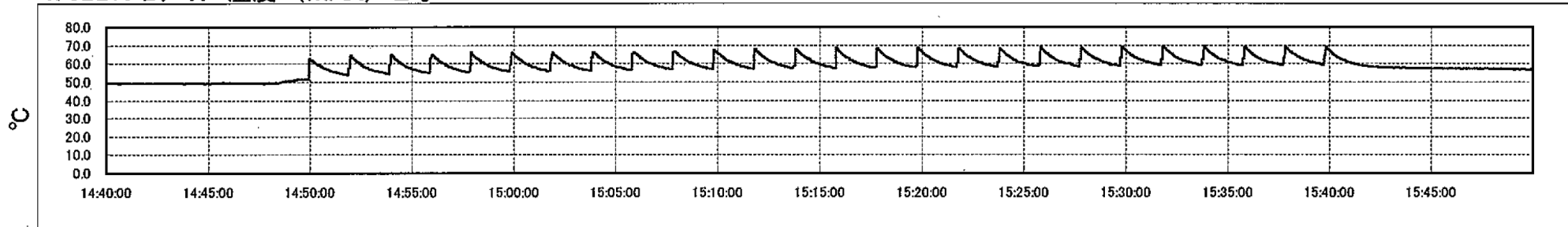
東京電力「プロセス計算機履歴データ」
(平成23年5月)を基に作成

14:52:33～15:43:07、合計49回にわたり、SR弁(F弁)の開閉が繰り返された(2号機アラームタイパ等に基づく)。

2号機のD/W温度

2号機

1. 0B210 D/W 温度 (MAX) 2号



D/W温度は極端には上昇していない。

上記グラフの温度は、ある時刻における複数の温度計の最大値を示しているため、D/Wのどの部位か、連続して同一の部位の温度を示しているかは不明。

D/W温度は60°C前後で推移しており、前項のS/RV周辺温度よりも低い。

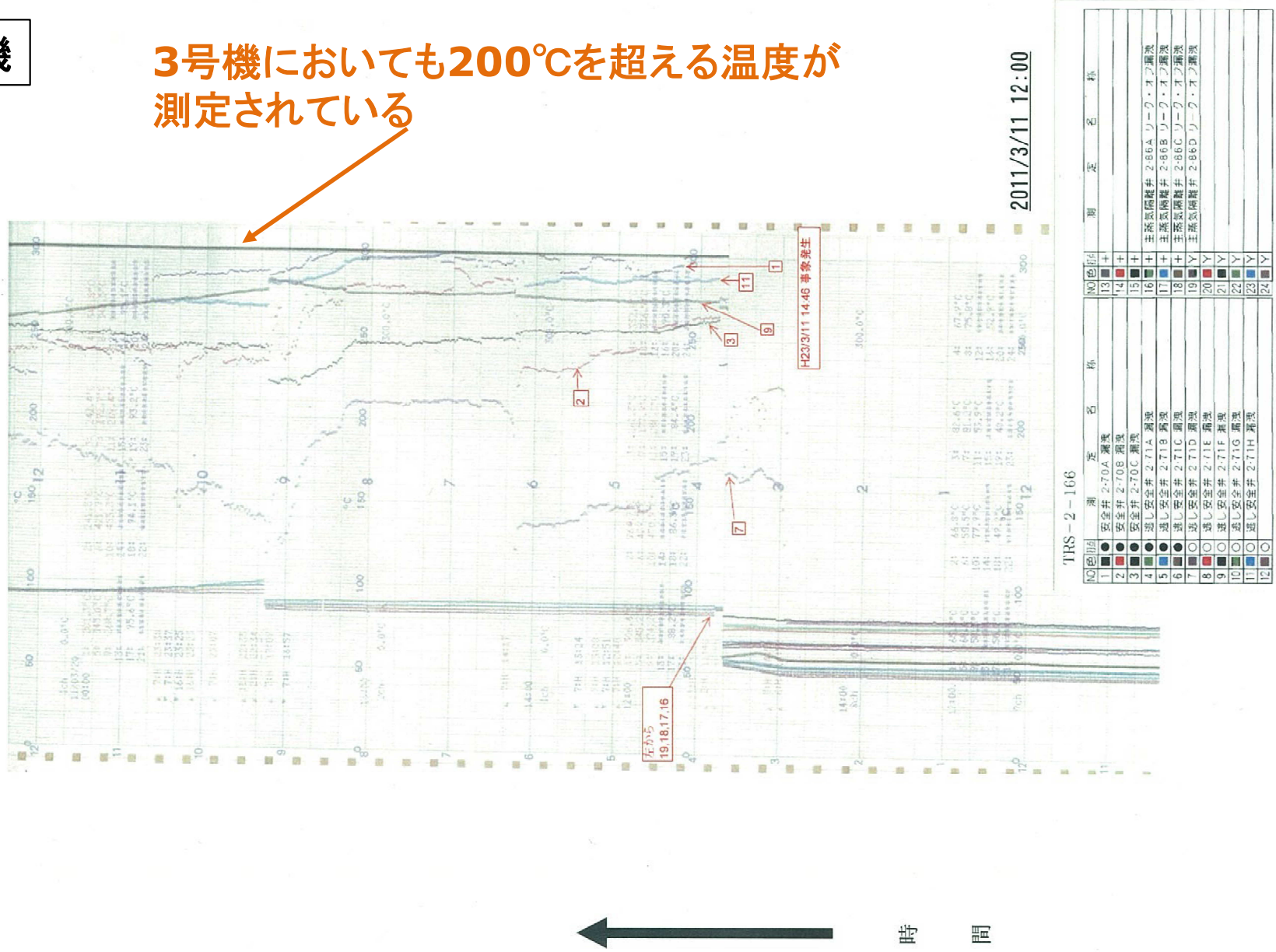
2号機の記録から、炉心が冷却されていた状態においても、S/RV周辺の温度は200°Cを超えている。3号機においてHPCIが停止して炉心損傷が生じる時期では、非常に高温の過熱蒸気がS/RVを通過すると考えられることから、S/RVの温度が上昇し、弁体を押しさえつける力(ばね力)への影響が生じたと考えられる。

参考

S/RVの温度

3号機

3号機においても200℃を超える温度が測定されている



3号機 安全弁・逃し弁・漏洩温度 (2/2)

3. 3号機ベント後の事故進展の推定

- ベント実施前からD/W圧力がS/C圧力よりも高い状態で推移していたことから、RPVからD/Wへの漏えい経路がベント実施以前に形成されていたと考えられる
- PCVスプレイ等の注水によりS/P水位は通常水位よりもかなり高い位置にあった
- D/WとS/Cの圧力の上下関係が逆転することで、S/P水がD/W床面へ引き上げられたり押し下げられたりした
- PCV内の水位の変動に伴いPCV内での蒸気発生量が変動したことがPCV圧力変動の大きな要因と考えられる
 - S/Pの減圧沸騰による圧力低下の抑制
 - D/W床面に水位が形成されるため、床面に落下したデブリにより蒸気が発生し圧力が上昇

ベント実施後の事故進展の推定手順

- 圧力挙動等から拘束条件を検討
 - PCV内での水蒸気及び非凝縮性ガスの合理的な発生量を検討
 - RPV、D/W及びS/C圧力の上下関係の整合性を考慮
- 事故シナリオの推定
 - PCVからの漏えい発生時期、溶融燃料の落下時期等の推定
 - 単純な体系及び単純な仮定に基づき解析を実施し、実測値と比較することで実現性を確認

この後で示すグラフでは、原子炉圧力を黒色、**D/W**圧力を赤色、**S/C**圧力を青色で示す。

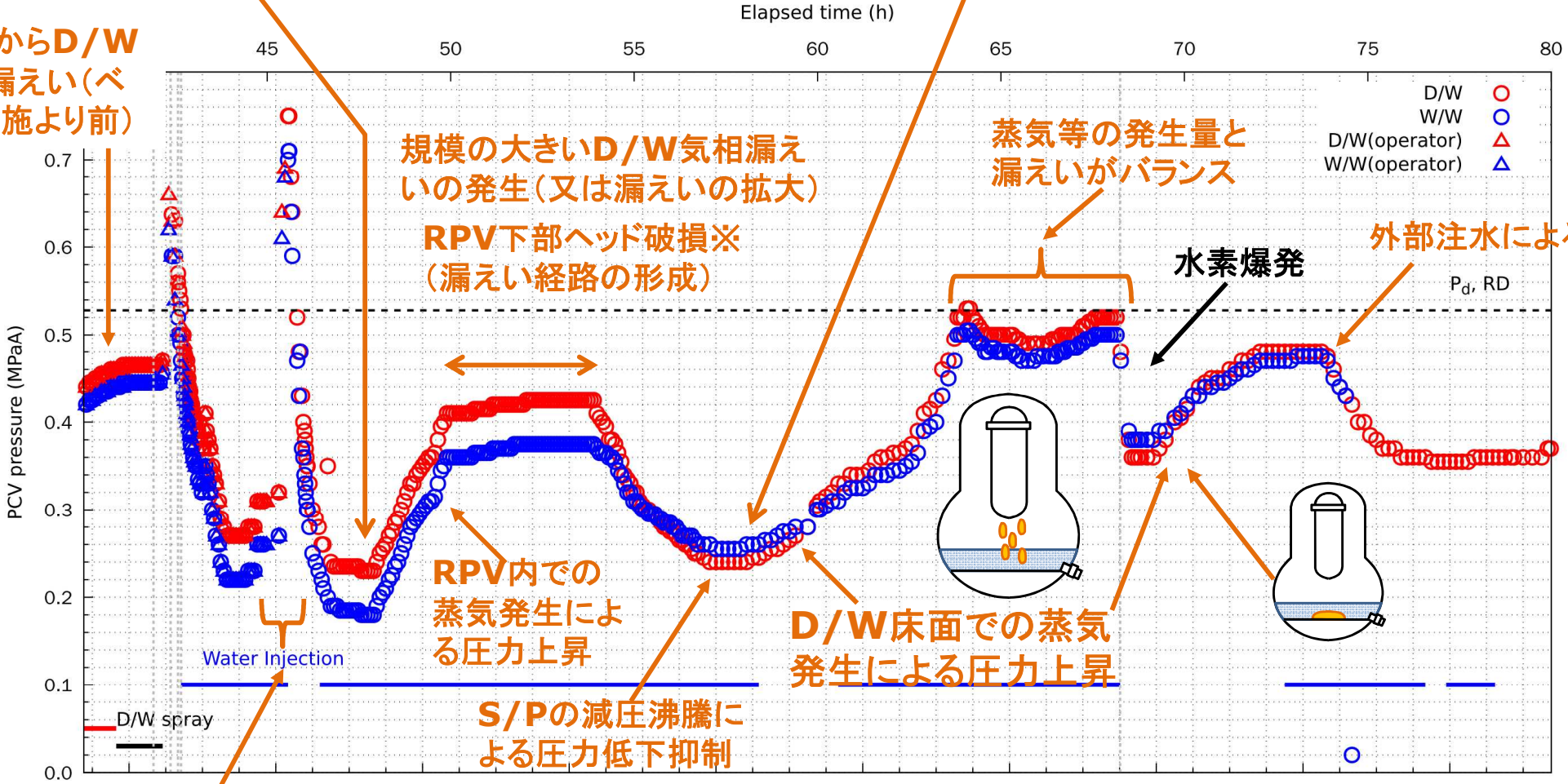
事故進展の推定

※BWRのRPV下部構造の複雑さから、RPV下部ヘッド破損とD/W床面への溶融炉心の落下には時間差が生じると想定している

S/P水のD/Wへの逆流
D/W床面への溶融燃料の落下

PCVベント閉止

RPVからD/Wへの漏えい(ベント実施より前)



主蒸気管貫通部近傍からの小規模な漏えい開始



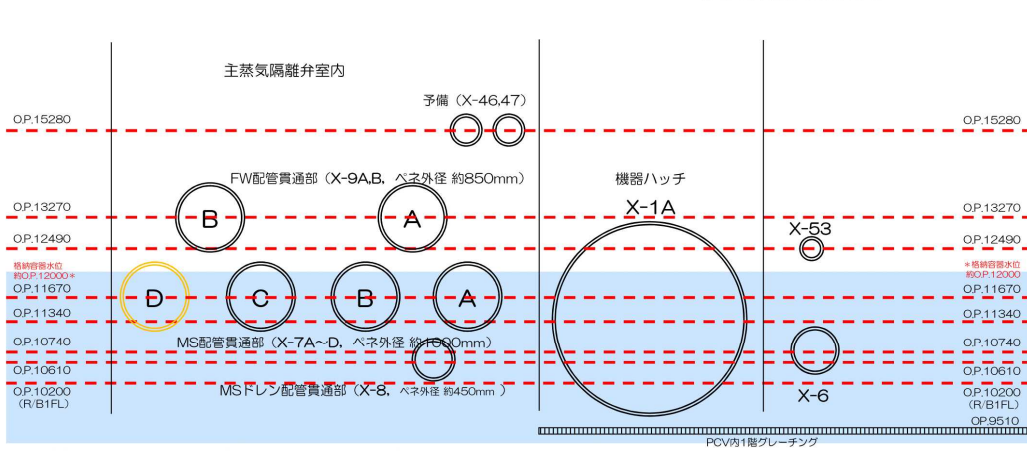
3.1 主蒸気管貫通部からの漏えいについて

- 現在、3号機は主蒸気管貫通部から漏水が確認されており、過温により漏えいが発生したと考えられる P. 21
- 3月13日に3号機原子炉建屋で高線量が測定され、「白いモヤモヤ」が観測されていることから、ベントの逆流又はPCVからの漏えい発生が考えられる P. 23
- 1号機でも同様の高線量及び「モヤモヤ」が観測されているが、これは1号機のベント実施前であることから、PCVからの直接漏えいの影響と考えられる。 P. 23
- 1号機で推定された建屋内線量と3号機で測定された線量はほぼ同レベルである。 P. 24
- 線量及び状況が1号機と類似していることから、3号機においてもPCVからの直接漏えいにより高線量と「モヤモヤ」の状態が観測されたと考えられる。 P. 24
- 3号機で測定された線量は建屋北側が南側よりも高いが、MSIV室には北側に開口部が存在し、線量測定場所と距離が近く、線量の南北の異方性とも整合する。 P. 21
- したがって、3月13日のお昼ごろまでには主蒸気管貫通部で漏えいが開始したと考えられる

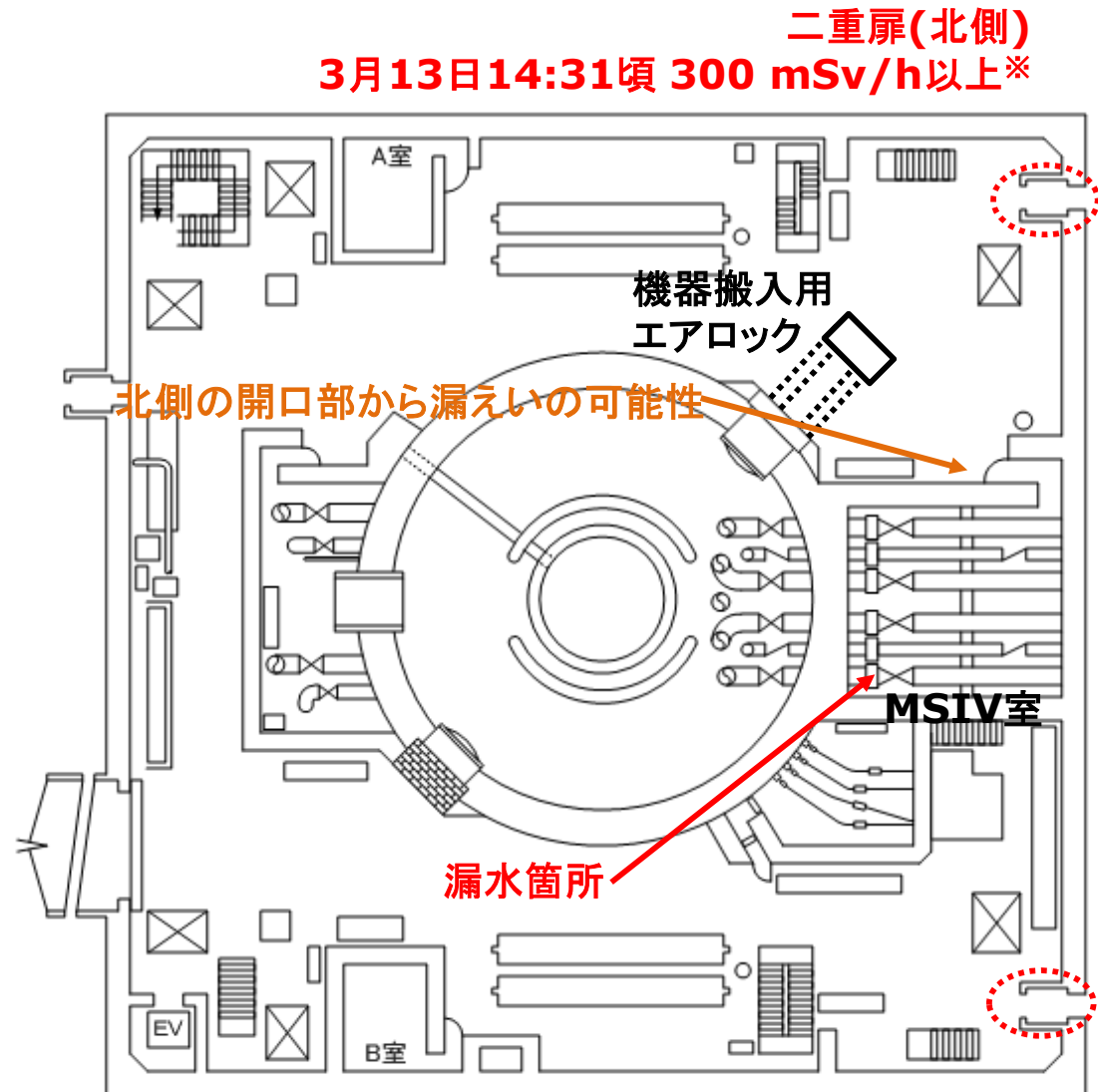
3号機格納容器からの漏えい



(PCV外側から見た図)



■ 現状、3号機ではMS配管 (D) 貫通部ベローズに漏えいが確認されている。

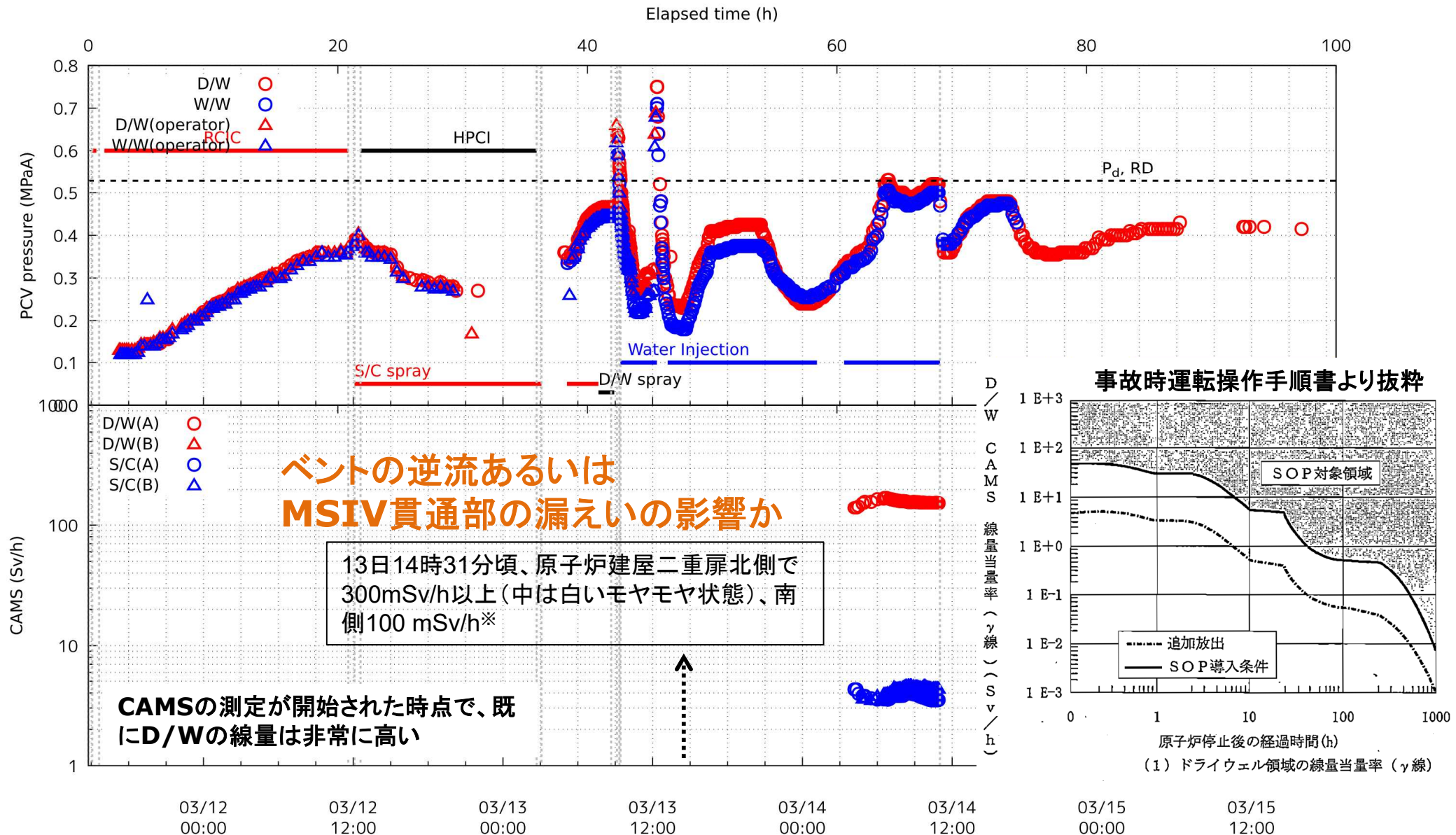


東京電力資料及び政府事故調報告書より抜粋一部加工

3月13日14:31頃 100 mSv/h*

※原子力災害対策本部、「国際原子力機関に対する日本国政府の追加報告書 -東京電力福島原子力発電所の事故について- (第2報)」、平成23年9月

CAMS等の線量



関連する現場状況

- 全面マスク等の装備やヨウ素剤の服用など準備を行い、13日10:00頃、現場作業を開始した。(中略)4号機P/C(4D)から3号機原子炉建屋二重扉まで低圧側ケーブルを敷設し、二重扉内側にあるMCCまで敷設するために二重扉を開けたところ、白いもやがかかっている状況を確認。(中略)その先の作業を中断することとし、13日昼頃、入口にケーブルを丸めて仮置きした。
- (1号機)12日3:44、(中略)発電所では、保安班が原子炉建屋の線量測定のために同二重扉を開けたところ、白い“もやもや”が見えたため、すぐに扉を閉鎖。(ベント実施前の状況)
- (3号機)13日14:45、原子炉建屋二重扉の向こう側で放射線量が300 mSv/h程度ある状況から、発電所対策本部では、1号機と同様に原子炉建屋内に水素が溜まり爆発の可能性があると考え、中央制御室及び屋外の現場の作業員を一旦退避させることとした。

文字の着色及び着色されたかっこ書きは著者

引用:東京電力株式会社、福島原子力事故調査報告書、平成24年6月20日

1号機との比較

- 1号機では3月11日23:00に北側の二重扉前で1.2 mSv/h、南側の二重扉前で0.52 mSv/h
 - 建屋1階の北側の線量が高い類似性
 - 東京電力は建屋内部の線量を300 mSv/h 程度と予想※
 - ベント(3月12日14:30)前に漏えいしている
- ベント実施前の1号機で予想された建屋内線量と同程度
- 観測された水蒸気と思われる「もやもや」の状況からも、ベントの逆流ではなく、PCVからの直接漏えいの影響と考えられる
- 3号機PCVからの漏えい開始は13日昼頃よりも前と推定される

3.2 ADSの閉止時期について

- ADSが開状態を維持している場合は、RPV圧力とS/C圧力にはTクエンチャーの水深に相当する静水頭相当以上の圧力差が生じる P. 26
- RPV圧力とS/C圧力を比較する際に、RPV圧力は炉圧計の基準水喪失による測定値の誤差を考慮する必要がある P. 27
- RPV圧力はD/W圧力以上となる関係が成立することを考慮すると、3月12日頃には基準水をほぼ全量喪失したと考えられる P. 31
- 補正したRPV圧力とD/W圧力を比較すると、RPV圧力低下速度の減少等により、3月13日12:00頃から15:00頃にADSが閉じたと考えられる P. 32
- ADSが閉じる原因として、過熱蒸気が通過することでS/RVが高温になり、シリンダ部から窒素が漏えいすることが考えられる P. 33
- S/RVが高温になる場合には、S/RVが設置されている主蒸気管自体も同様に温度が上昇すると考えられる P. 33
- 主蒸気管の温度上昇は、前述の主蒸気管貫通部の漏えいが発生した要因と考えられる P. 33
- 炉心からの距離を考慮すると、ADSの閉止後に主蒸気管貫通部の漏えいが生じたものと考えられる P. 34

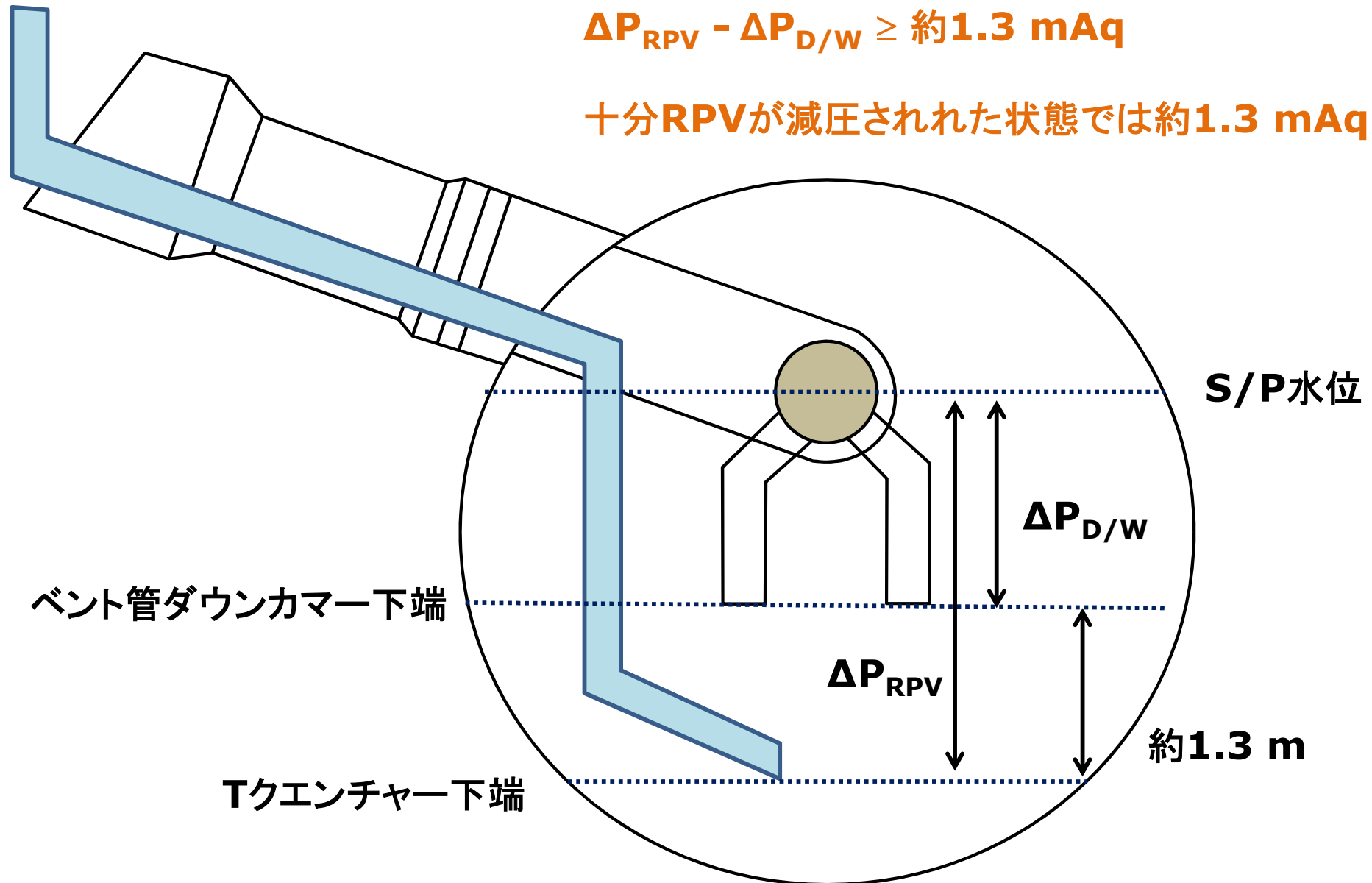
ADS動作時の圧力と水位

S/RV

ADSが開状態の場合

$$\Delta P_{RPV} - \Delta P_{D/W} \geq \text{約} 1.3 \text{ mAq}$$

十分RPVが減圧された状態では約1.3 mAqとなる



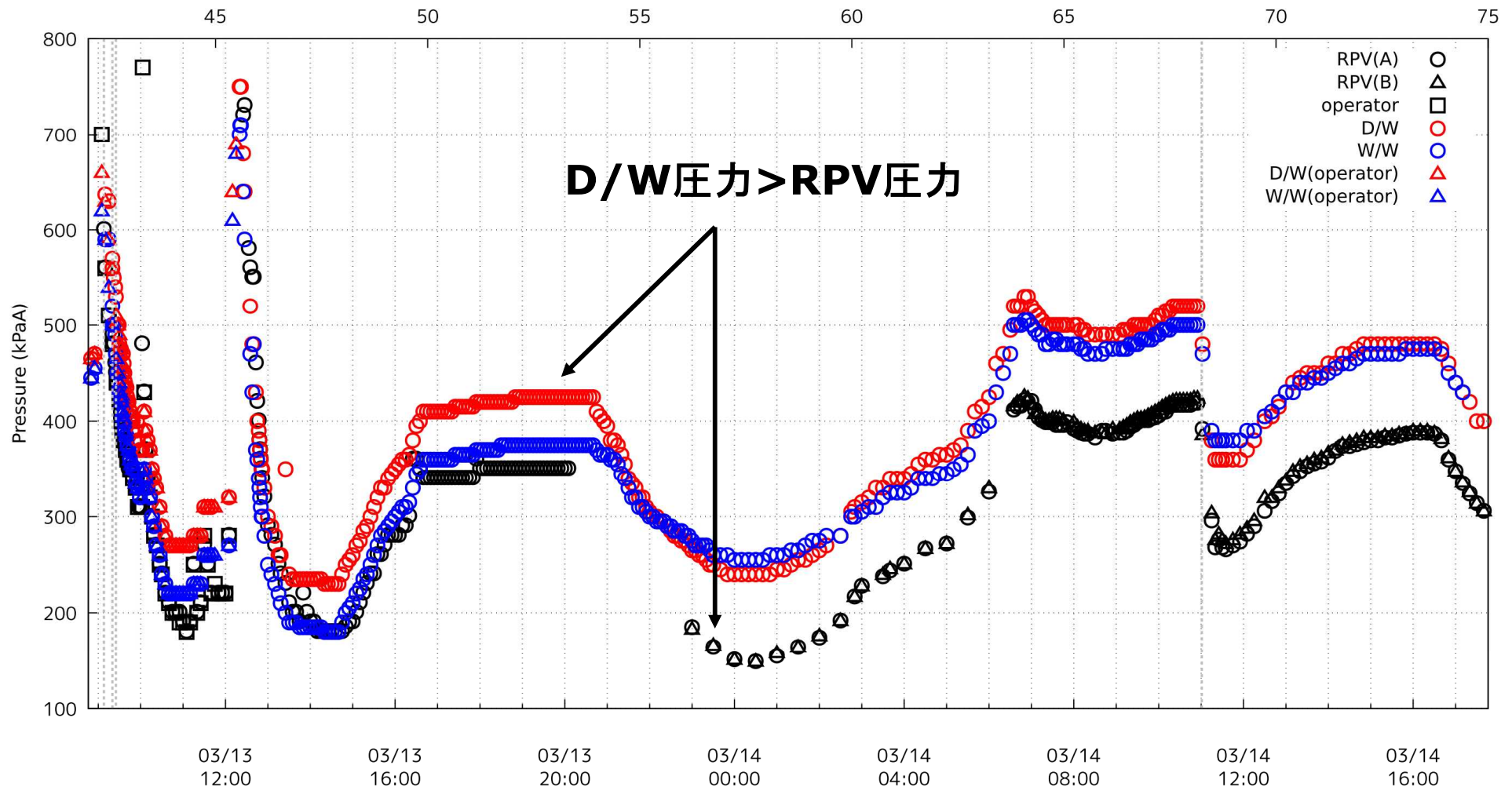
圧力測定値の信頼性

実測値は、原子炉圧力よりもD/W圧力が高いが、

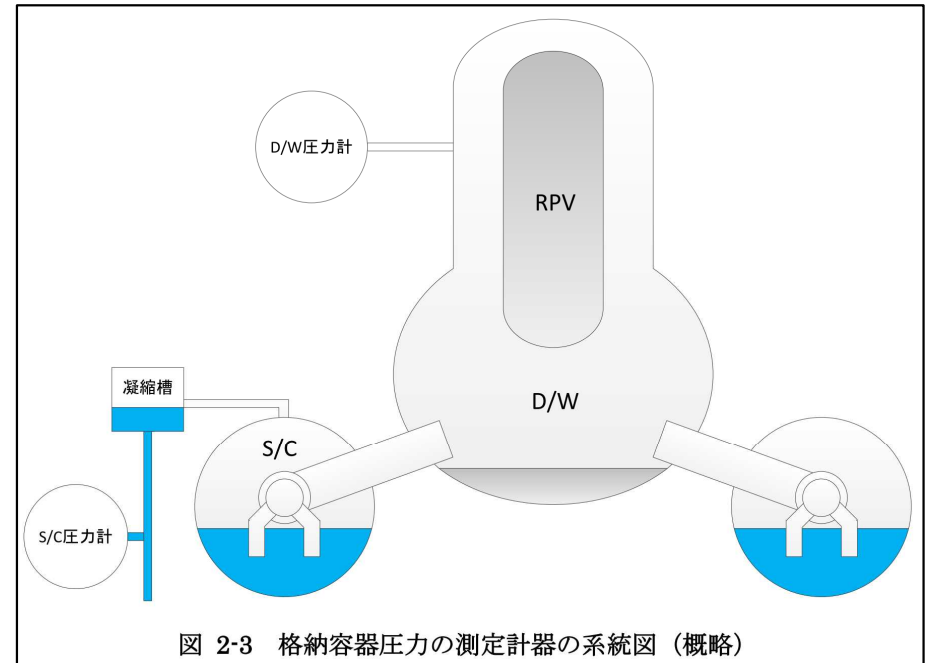
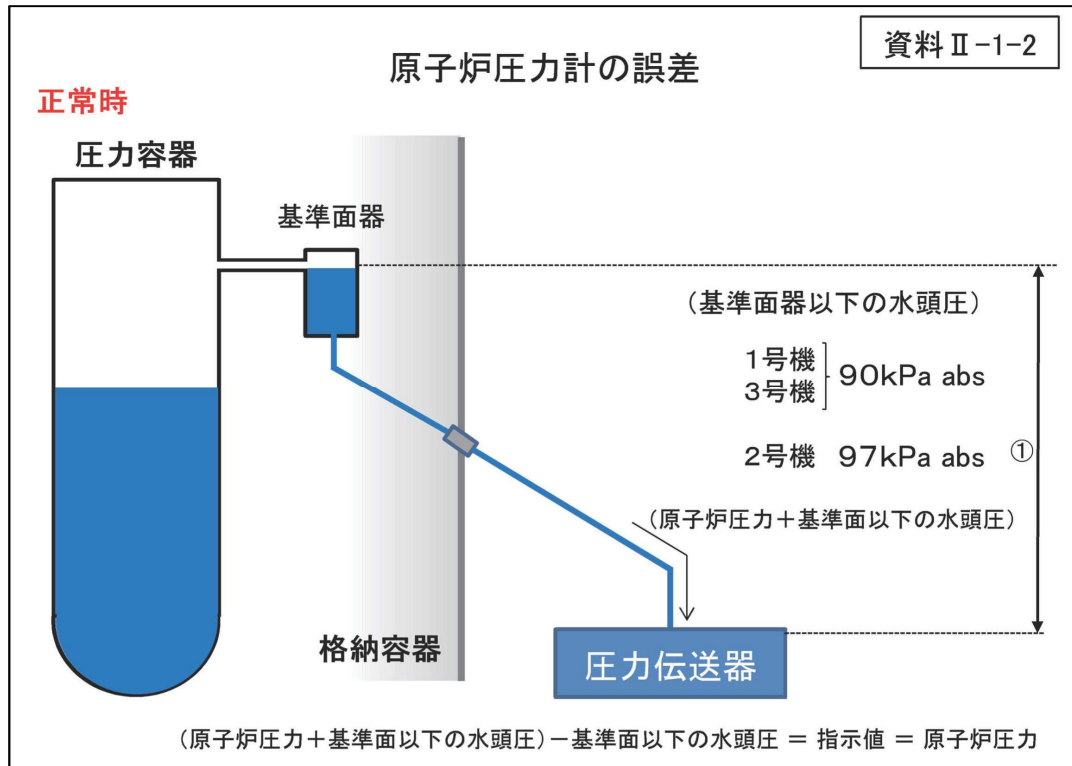
下部ヘッドが健全→RPV圧力>D/W圧力

下部ヘッドが破損→RPV圧力~D/W圧力

のいずれかであり RPV圧力 \geq D/W圧力 の関係にある



原子炉圧力測定値の補正



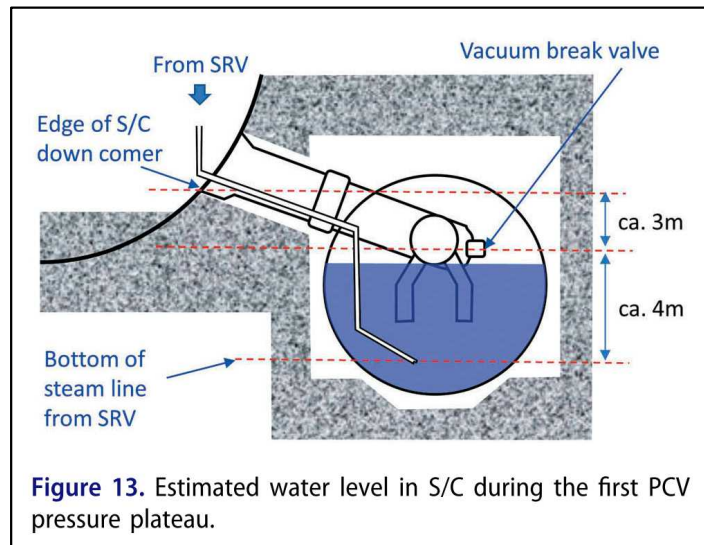
東京電力未解明問題報告書から抜粋

政府事故調報告書から抜粋

「RPV の圧力計は水位計配管の先にある圧力計で測定されており、基準面器側配管内の水位が低下すると、その水頭分(最大 1 気圧程度)RPV 圧力を過小評価することが分かっている」※
ことから、実際の原子炉圧力の取りうる範囲(実測値+90 kPa; ゲージ圧から絶対圧に変換しているため、都合+190 kPa)をグラフに示す(次々項)

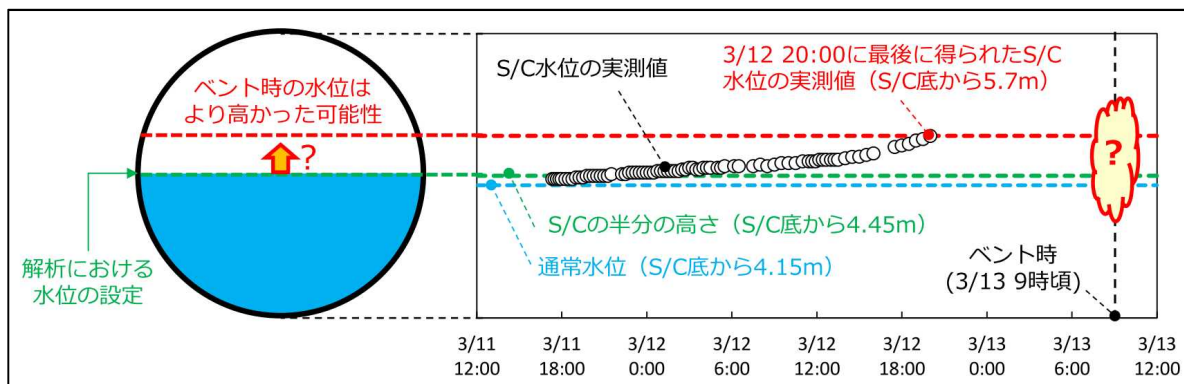
S/C圧力測定値の補正について

参考文献1



- 参考文献1ではS/C圧力計の水柱がベントによってフラッシングした可能性が指摘されている
- 補正された圧力に基づきベント後のS/Cの水位が推定されている(左図)
- 一方、参考文献2での評価にもあるように、3月12日22:00の時点で真空破壊弁程度まで水位が上昇したことが確認されている
- 最後のS/C水位の測定後もスプレイ注水等が継続されており、参考文献1でのS/C水位の推定は実測値よりも低いと考えられる
- ここではS/C圧力計の実測値の補正は実施していない

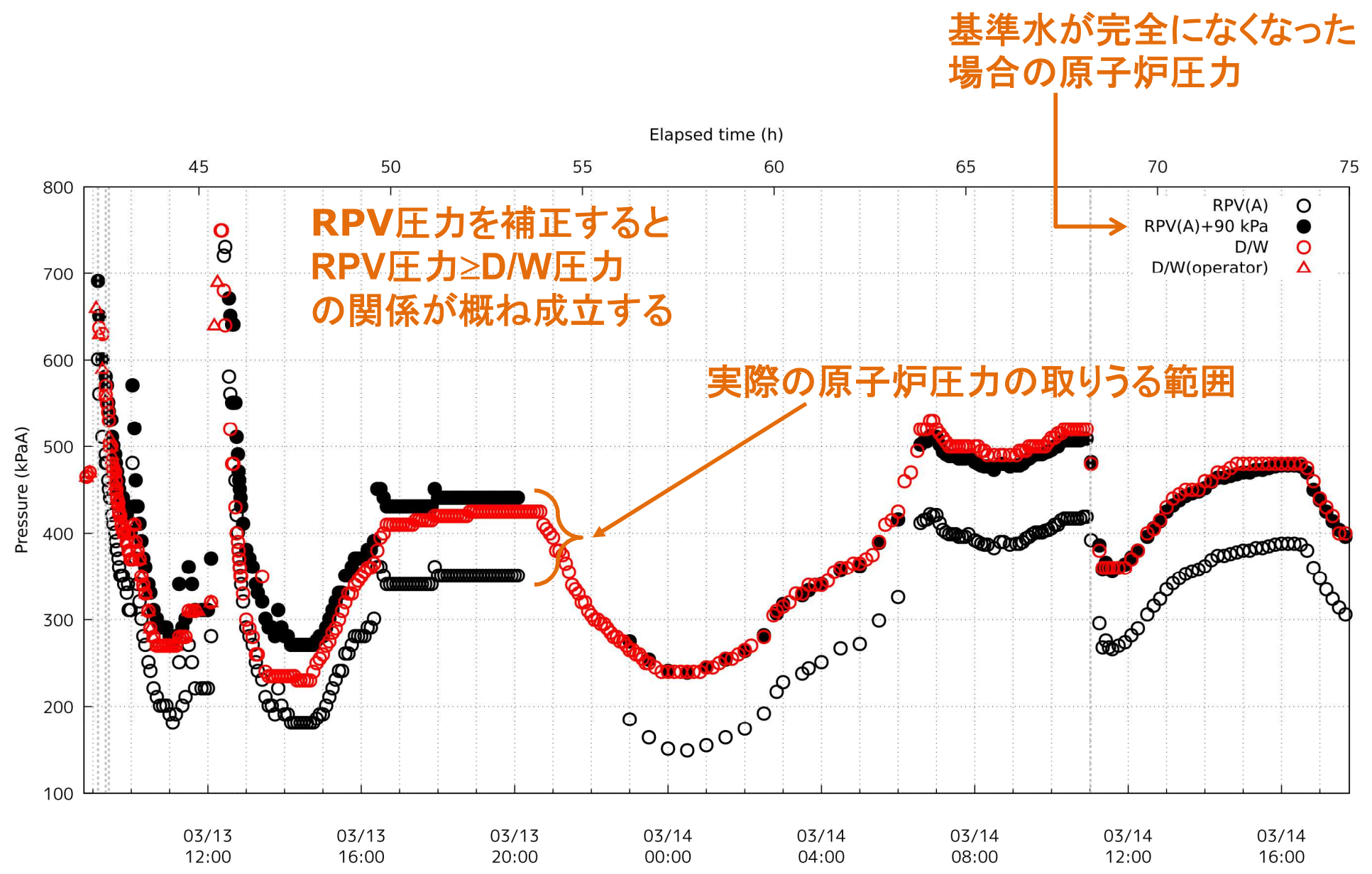
参考文献2



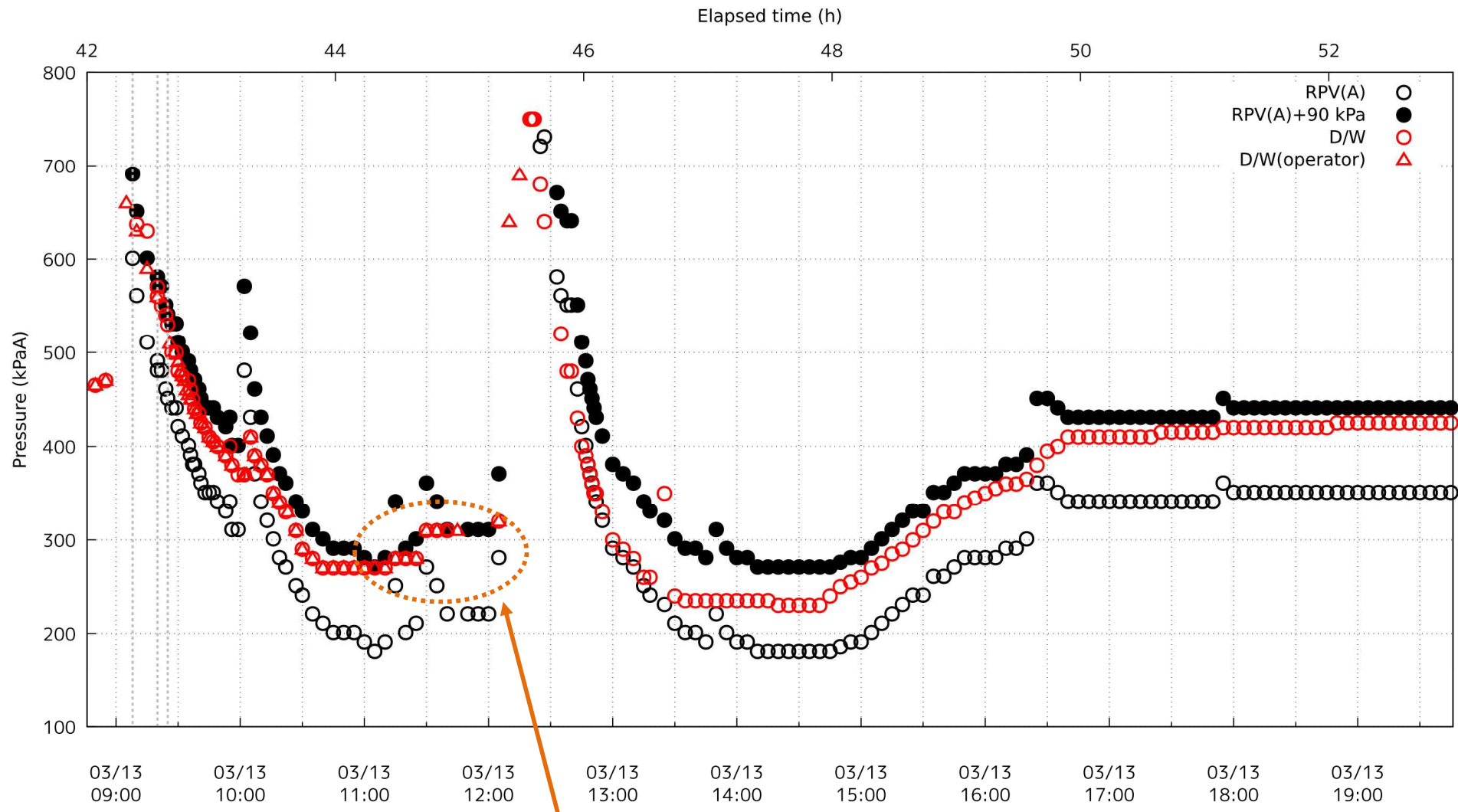
参考文献1: I. Sato, "An interpretation of Fukushima-Daiichi Unit 3 plant data covering the two-week accident-progression phase based on correction for pressure data," J. Nucl. Sci. Technol., 56(5), 394-411 (2019)

参考文献2: 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」、平成29年12月25日

原子炉圧力とD/W圧力の比較



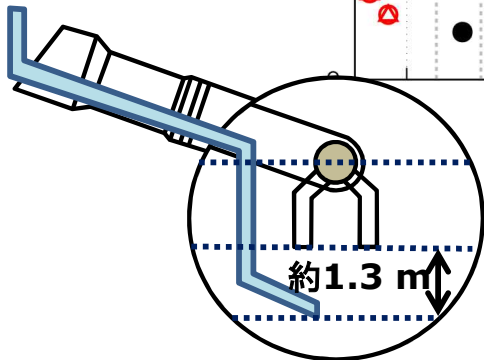
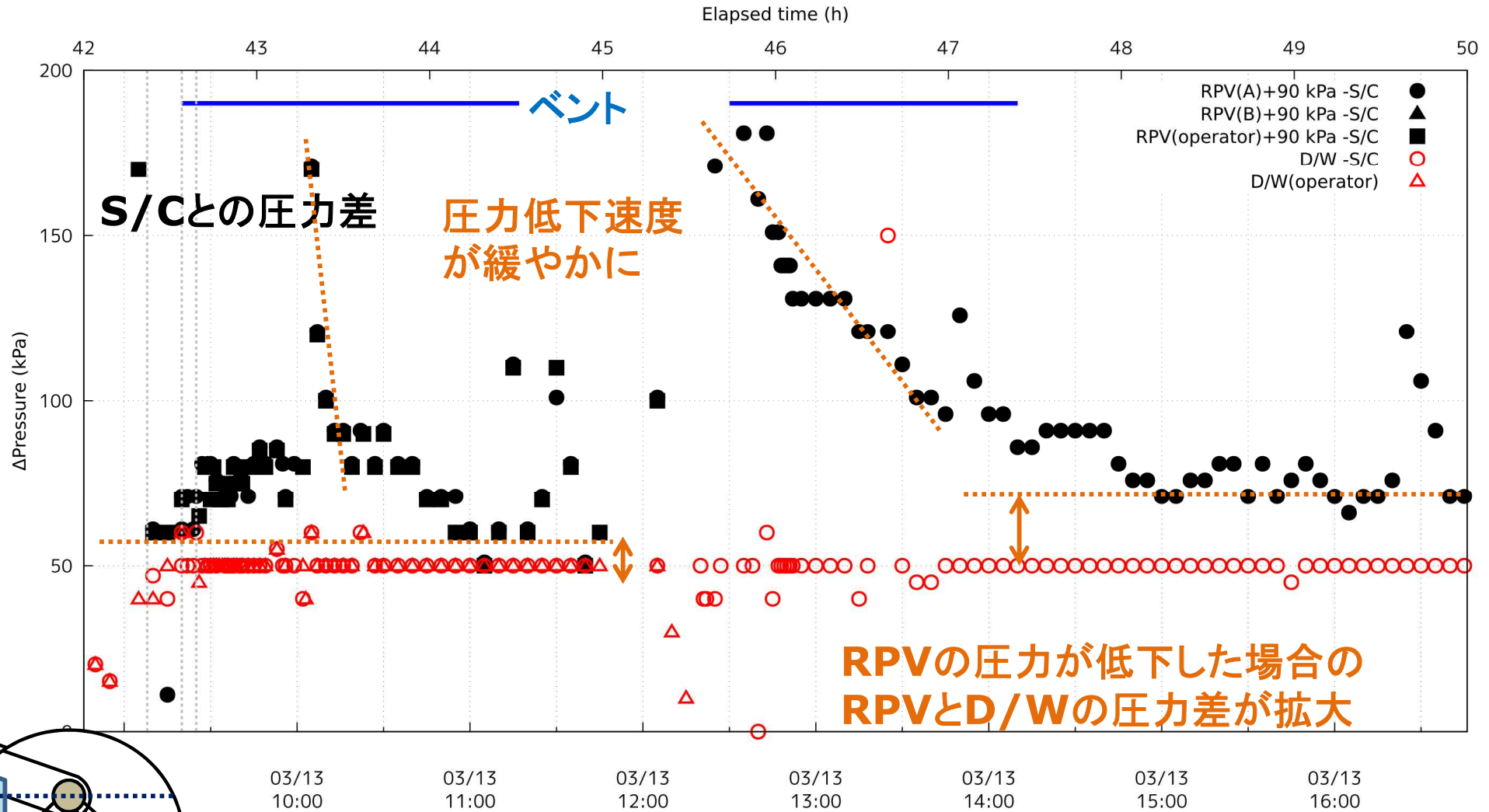
原子炉圧力計の基準水の喪失時期



基準水がほぼ完全に喪失したことを想定しないと $P_{RPV} > P_{D/W}$ の関係が成立しない
 → 3月13日12時頃までには炉圧計の基準水をほぼ全量喪失している

ADSの状態の推定

S/Cの圧力を基準として、RPV圧力とD/W圧力を比較



RPV圧力が下げ止まった場合の圧力差

← ADSが閉じた可能性がある →

S/RV近傍の過温について

- 前述のように、ADSは3月13日12:00頃から15:00頃の間に関じた可能性がある
 - 高温下では窒素をシリンダに保持できない可能性
- 主蒸気管貫通部は過温により13日14時31分頃までには漏えいが生じた可能性がある。
- 漏えいが発生しているのは、主蒸気管Dのみであることから、PCVの雰囲気が増したのではなく、主蒸気管の温度が増したと考えられる
- 主蒸気管Dに接続されたS/RVも過温により閉止したと推定される
 - より炉心に近いS/RVが先に影響を受けたと考えられる

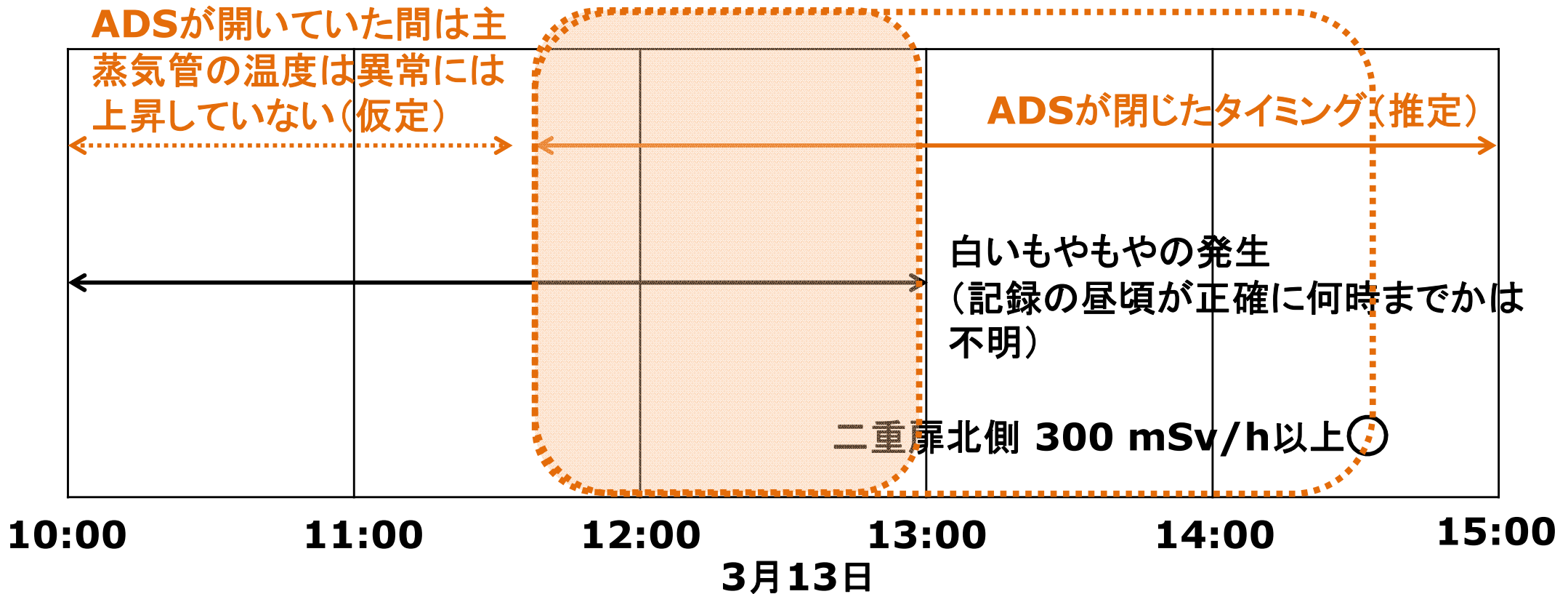
ADSが閉じたタイミングについて

炉心から流れる過熱蒸気によってS/RV及び主蒸気管が高温になり、ADSの閉止及びPCV貫通部からの漏えいが生じたと仮定した

炉心に近いS/RVがPCV貫通部よりも先に高温の影響を受けたと推定

ADSの閉止※及びPCVからの漏えい発生

→3月13日の12時前後、遅くとも14:31まで

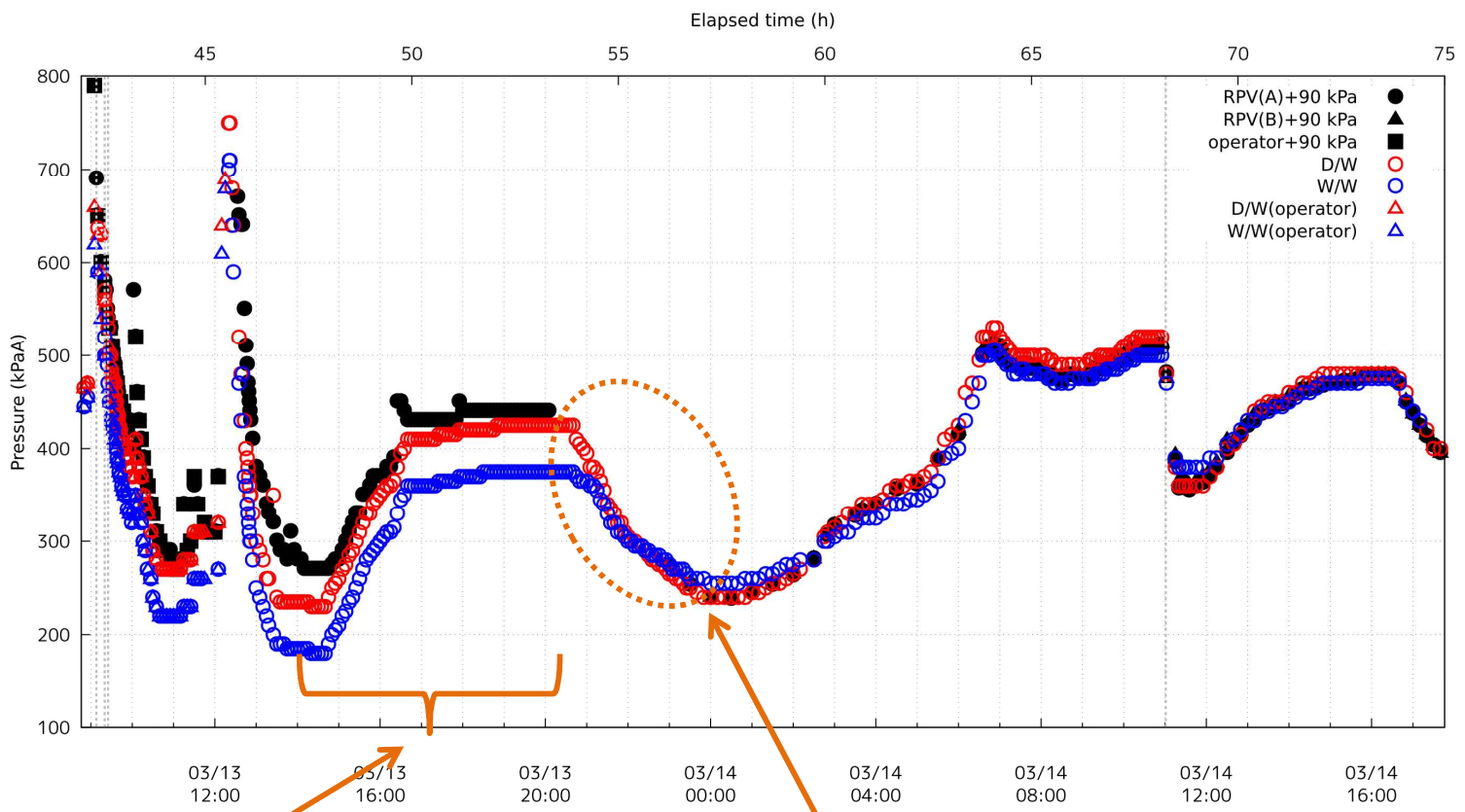


※漏えいが確認されている貫通部は、主蒸気管4本の内1本のみであるから、ADS機能がある6弁のうちの一部の弁の可能性はある

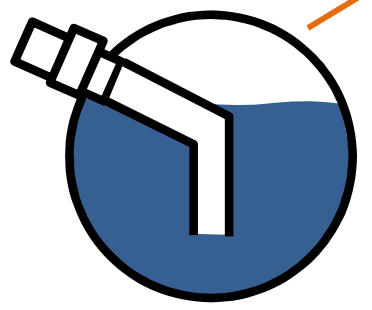
3.3 D/W床面への溶融炉心落下時期

- 格納容器外部からの継続的な注水によりS/P水量が増加しているため、D/W圧力がS/C圧力より低くなると、S/P水がD/W床面へ逆流する P. 36
- D/W床面に溶融炉心が存在すれば、S/P水が逆流することで水蒸気が発生し、PCV圧力が上昇すると考えられる P. 41
- 3月13日23時頃にはD/W床面に水位が形成されると推定されるが、PCV圧力は3月14日1時頃から上昇している P. 41
- 3月14日1:10から3:20の間は注水が中断されており、D/W床面に逆流した水が蒸気源と考えられる P. 41
- D/W床面で蒸気が発生させるには、PCV圧力が上昇し始める3月14日1時頃には溶融炉心がD/W床面に落下していたと考えられる P. 41

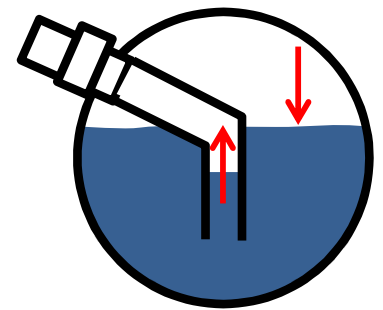
3号機：2回目ベント後のPCV圧力挙動



2回目のベント後はD/W
圧力>S/C圧力となるの
で、主たる加圧源は
D/W側にある

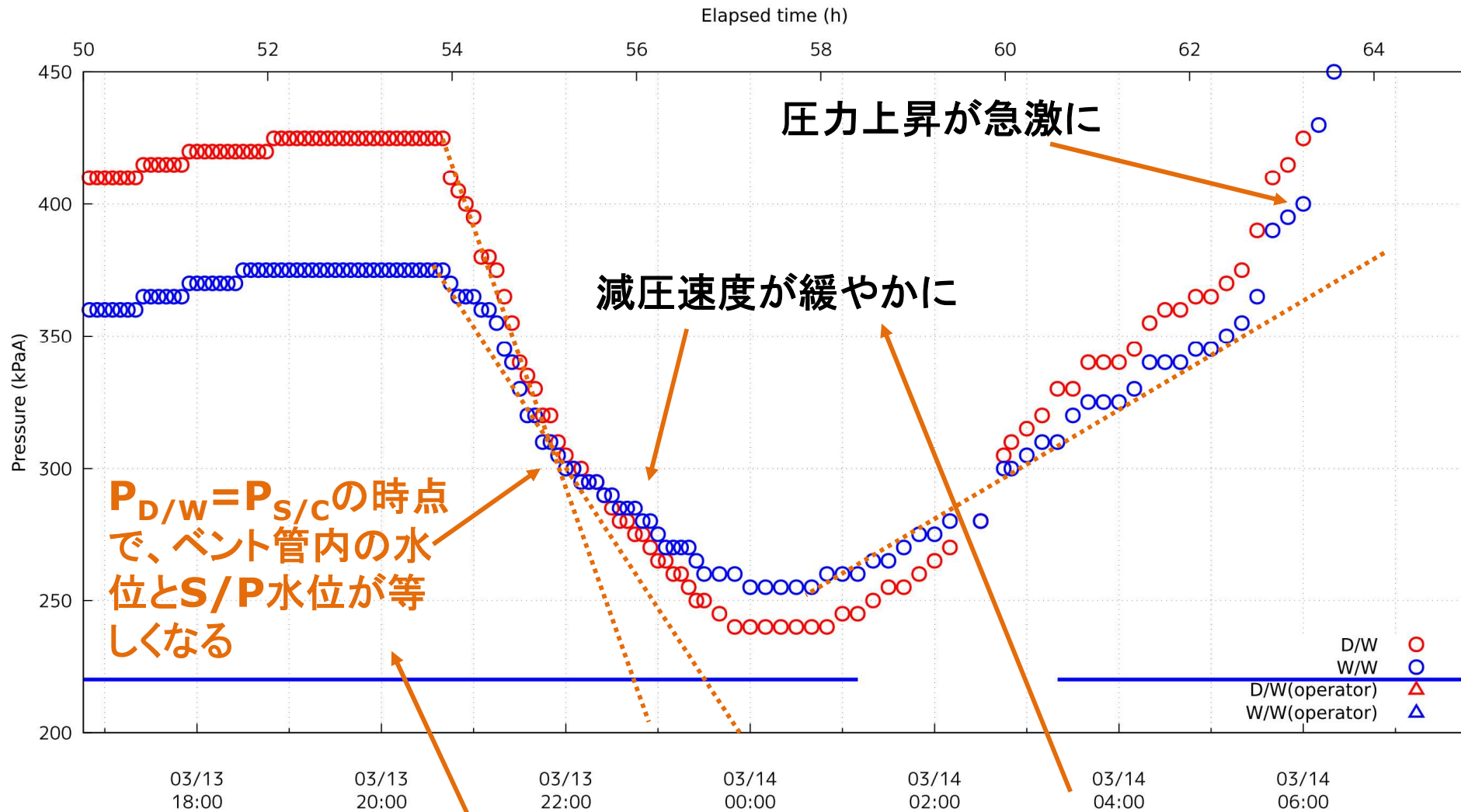


静水頭分だけD/W圧力がS/C
圧力より高い



D/W圧力が低下す
るとベント管内の水
位が上昇し、S/Cの
水位は低下する

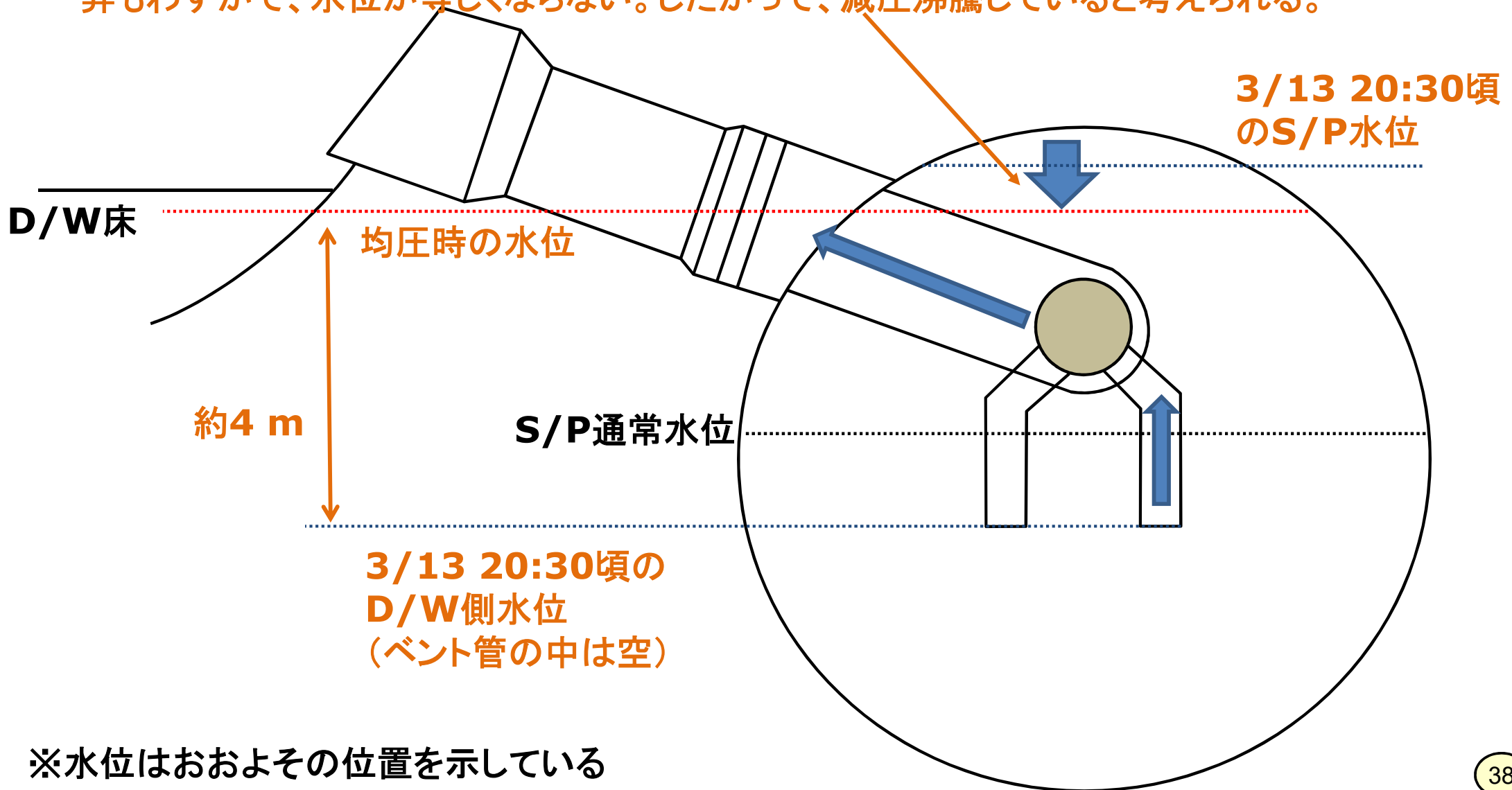
格納容器圧力からの水位の推定



均圧まで、S/Cはわずかに75 kPaの低下。後ろで示すS/P水位が正しければ、等温の場合、40 m³程度しか体積が増えない。その場合、ベント管内の水位上昇もわずかで、水位が等しくならない。

D/WとS/Cが均圧するまでの水位

均圧まで、S/Cはわずかに75 kPaの低下。後ろで示すS/P水位が正しければ、等温の場合、 40 m^3 程度しか体積が増えない(水位低下は10 cm程度)。その場合、ベント管内の水位上昇もわずかで、水位が等しくならない。したがって、減圧沸騰していると考えられる。



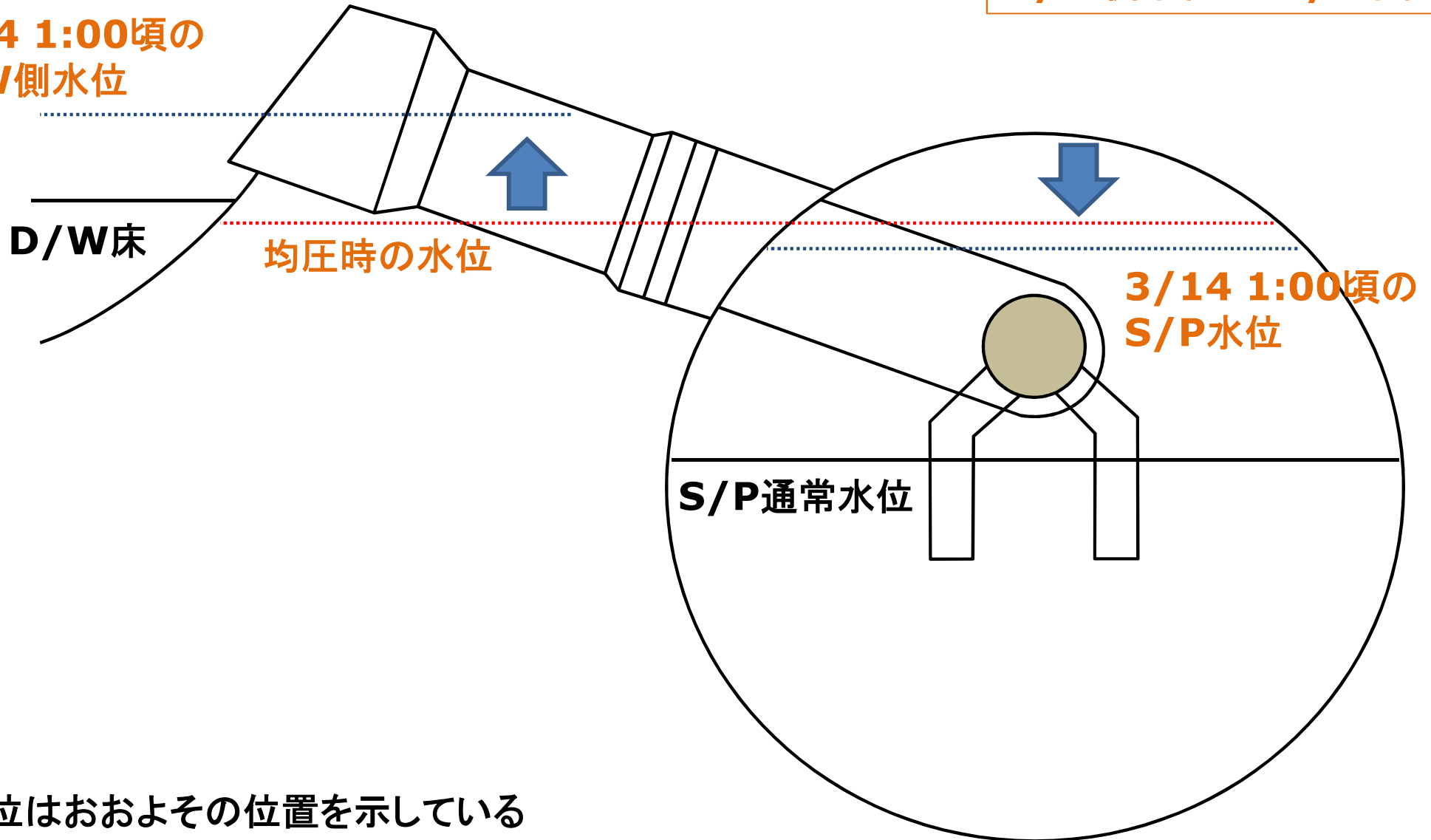
※水位はおおよそその位置を示している

D/WとS/Pが均圧した後の水位

D/W床の高さ程度までベント管内の水位が上昇する

水位が逆転
D/W側水位 > S/P水位

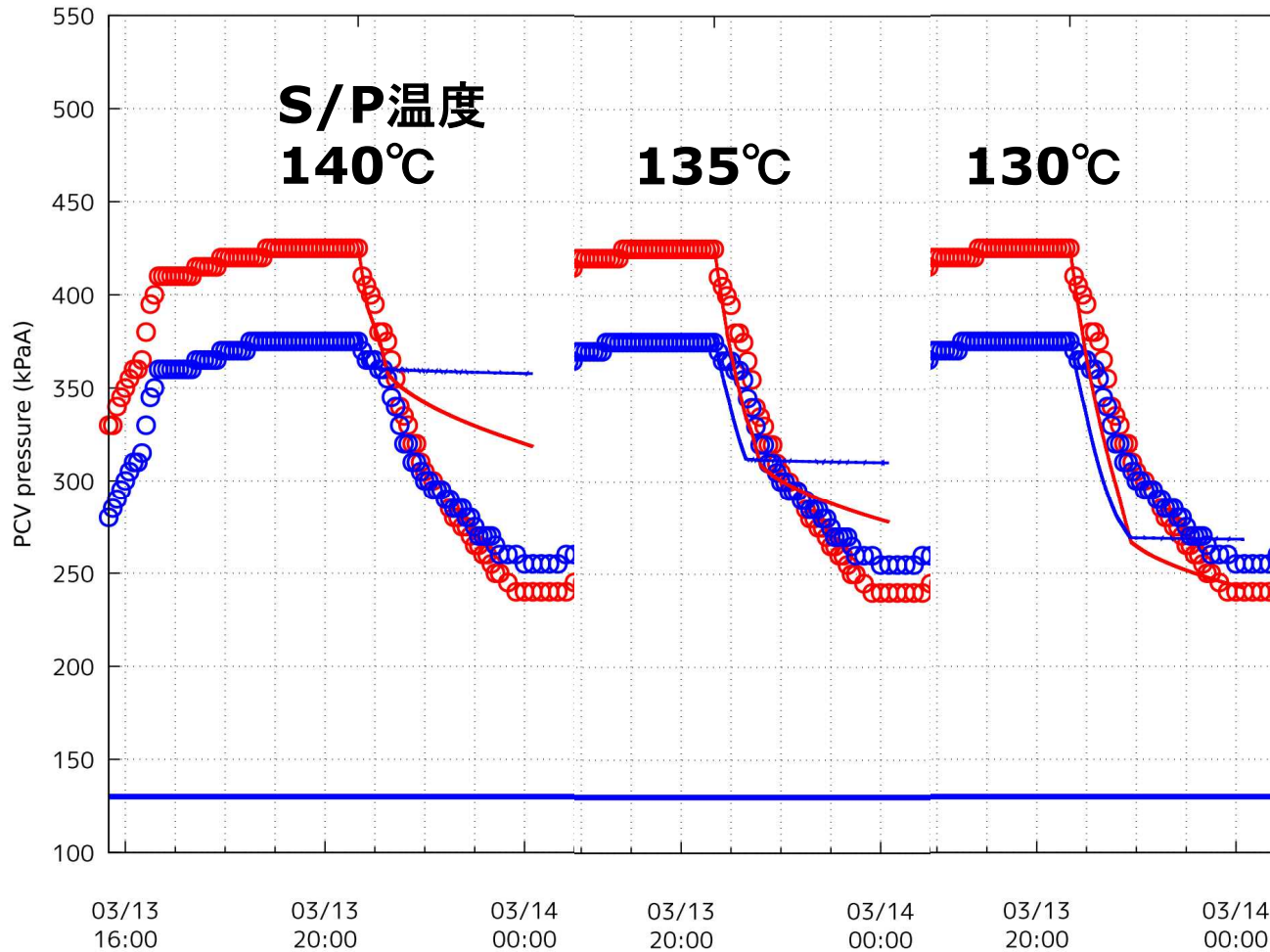
3/14 1:00頃の
D/W側水位



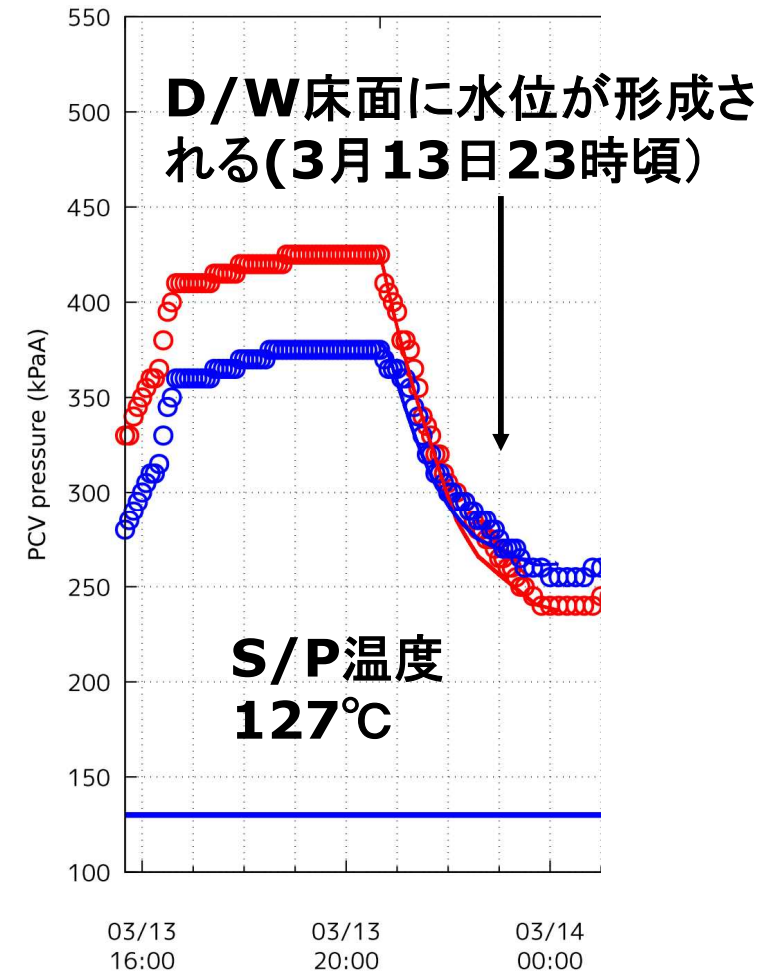
※水位はおおよその位置を示している

PCV減圧とS/P水温

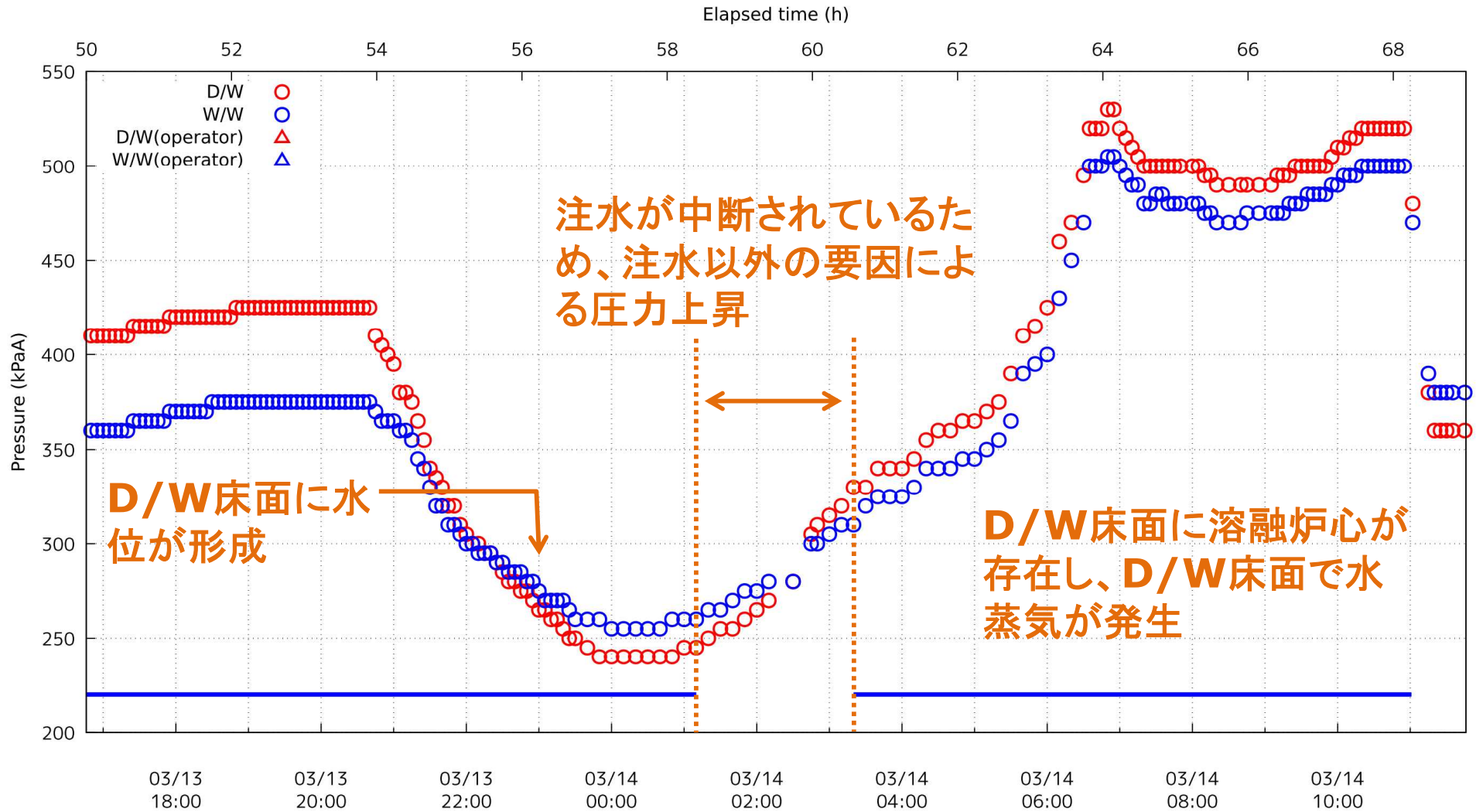
S/P水温を変化させた場合の計算結果(直線)との比較



D/Wからの漏えい量を調整



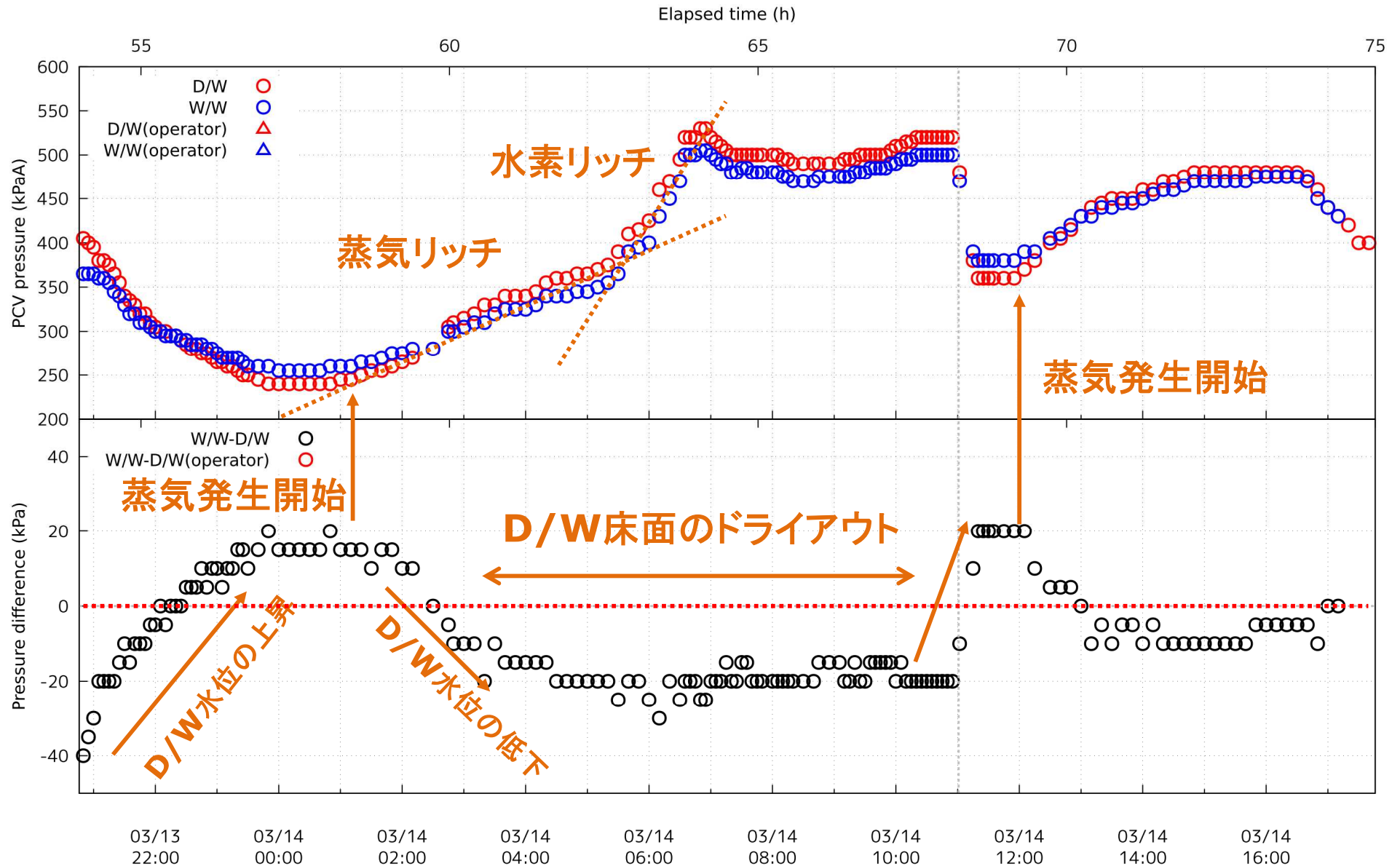
D/Wでの水位形成後の圧力上昇



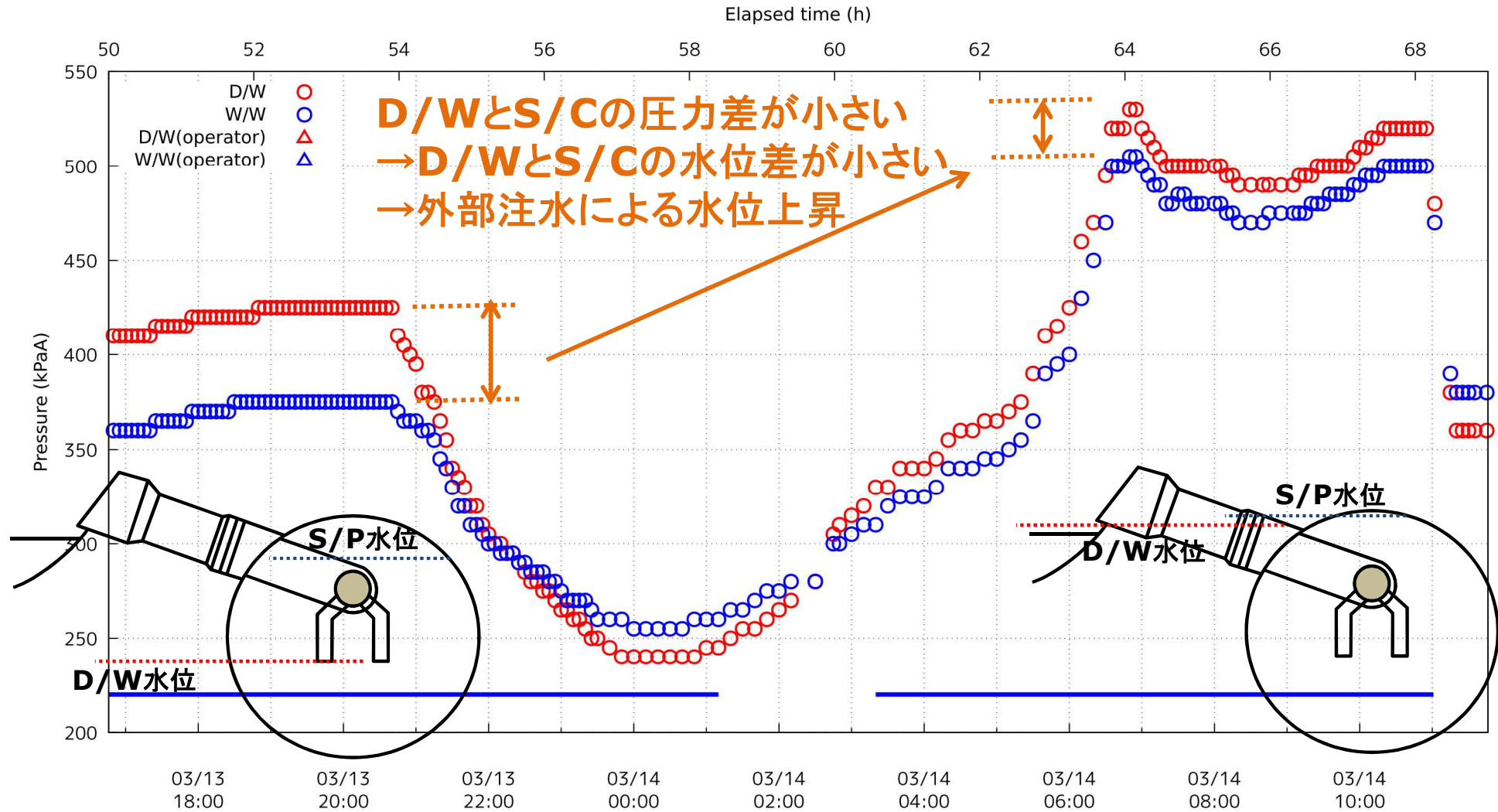
引用: 原子力災害対策本部、「国際原子力機関に対する日本国政府の追加報告書 -東京電力福島原子力発電所の事故について- (第2報)」、平成23年9月

14日1時10分に逆洗弁ピット内の海水が残りなくなったことから、一旦消防車を停止し、消防車を逆洗弁ピットに寄せてホースの吸い込み位置を深くするなど取水位置の調整を行ったところ、海水を引くことができ、14日3時20分に海水注入を再開した。

D/Wの水位の変動と蒸気の発生



外部注水による水位上昇



3.4 MCCIについて

- D/W床面がドライアウトする間にMCCIが進行し、水素等の発生により急峻なPCV圧力上昇が生じたと考えられる P. 42
- 1号機ではサンドクッションドレン管からの漏水が確認されているが、3号機では確認されていないことから、1号機と比較するとコンクリート侵食は少なかったと考えられる P. 45
- これは、前述のようにS/P水がD/W床面に逆流したことでコンクリート侵食が緩和されたためと考えられる P. 45
- 一方、3月14日1時頃からの圧力上昇は、水蒸気の発生に加え、非凝縮性ガスが発生したと考えられる P. 65
- 非凝縮性ガスの発生はMCCIに加え、RPV下部構造物等の金属成分の寄与も考えられる

コンクリート侵食の緩和について

- 1号機では、D/W内にある機器ドレンサンプから原子炉補機冷却系(RCW)の熱交換器へ核分裂生成物(FP)が移行した可能性が指摘されている※
- 1号機では外部注水がわずかであったため、D/W床面がドライな状態で溶融炉心が落下したと推定される
- 3号機では、1号機と比較して、RCWの熱交換器近傍の線量が高くない
- 1号機ではサンドクッションドレン管からの漏えいが確認されている※
- 一方、3号機ではそのような漏えいは確認されていない
- 3号機ではD/W床に水位が形成されていたことによってコンクリート侵食が緩和されたと考えられる

3.5 可燃性ガスの発生について

- 水素爆発時に黒煙が観測されていることから、炭素化合物の不完全燃焼が推測される P. 48
- MCCIにより一酸化炭素が発生することが考えられるが、玄武岩系のコンクリートではその発生量は限られる P. 48
- 一方、機器ハッチの塗膜喪失等から格納容器内は有機物の溶解等が生じる程度の高温になったと想定される P. 48
- そのような高温環境下において、PCV内表面の塗装、ケーブル被覆材等の熱分解により炭素化合物等が生成され、原子炉建屋へ漏えいしたものと考えられる P. 48

水素爆発との関係

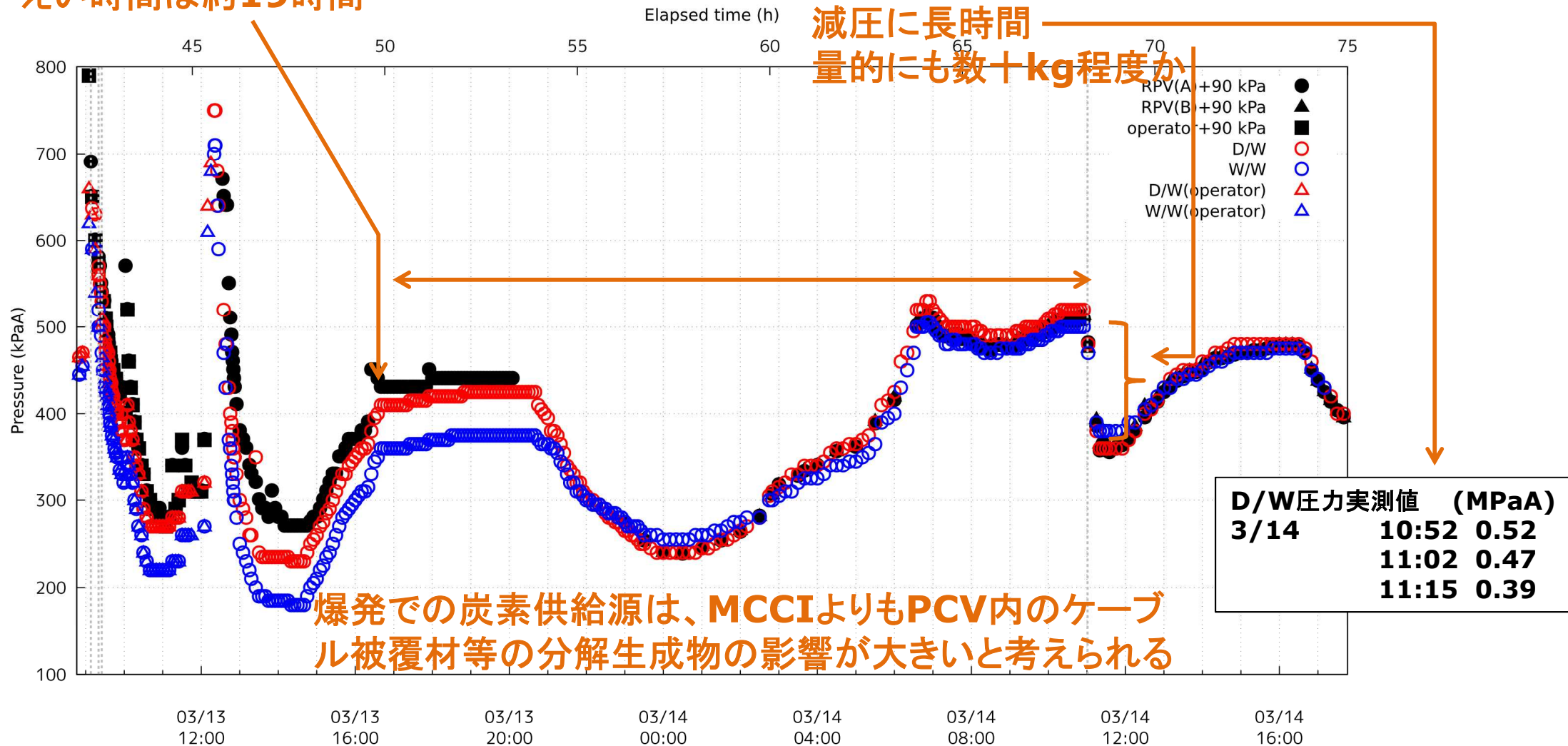
この時点からD/Wの気相漏えいが開始したと仮定すると、水素爆発までの漏えい時間は約**19時間**

オペフロが爆発によって、ヘッドフランジが開いた可能性

オペフロへの水素の追加供給の可能性は低い

減圧に長時間

量的にも**数十kg程度か**



水素爆発に伴って生じた黒煙等について

- 3号機の水素爆発時に有色炎及び黒煙が観察された
- 炭素化合物の燃焼又は不完全燃焼によって生じたと推定される
- 多量の炭素化合物の発生源
 - 溶融炉心-コンクリート(MCCI)反応では量的には不足する
 - PCV内部が高温になり、PCV内表面の有機塗料又はケーブル被覆材の熱分解生成物が発生
 - 機器ハッチ塗膜が落ちていることが確認されている※
 - シリコンを含む有機物の熱分解生成物は、通称「セシウムボール」の生成要因となる可能性がある

3月下旬に発生した黒煙について

- 3月21日及び23日に確認された煙も分解生成物がFPを伴いPCVから漏えいしたと考えられる
- 3月19日 8:10 正門付近で830.8 $\mu\text{Sv/h}$ を測定しており、PCVからの漏えいが継続していた可能性がある

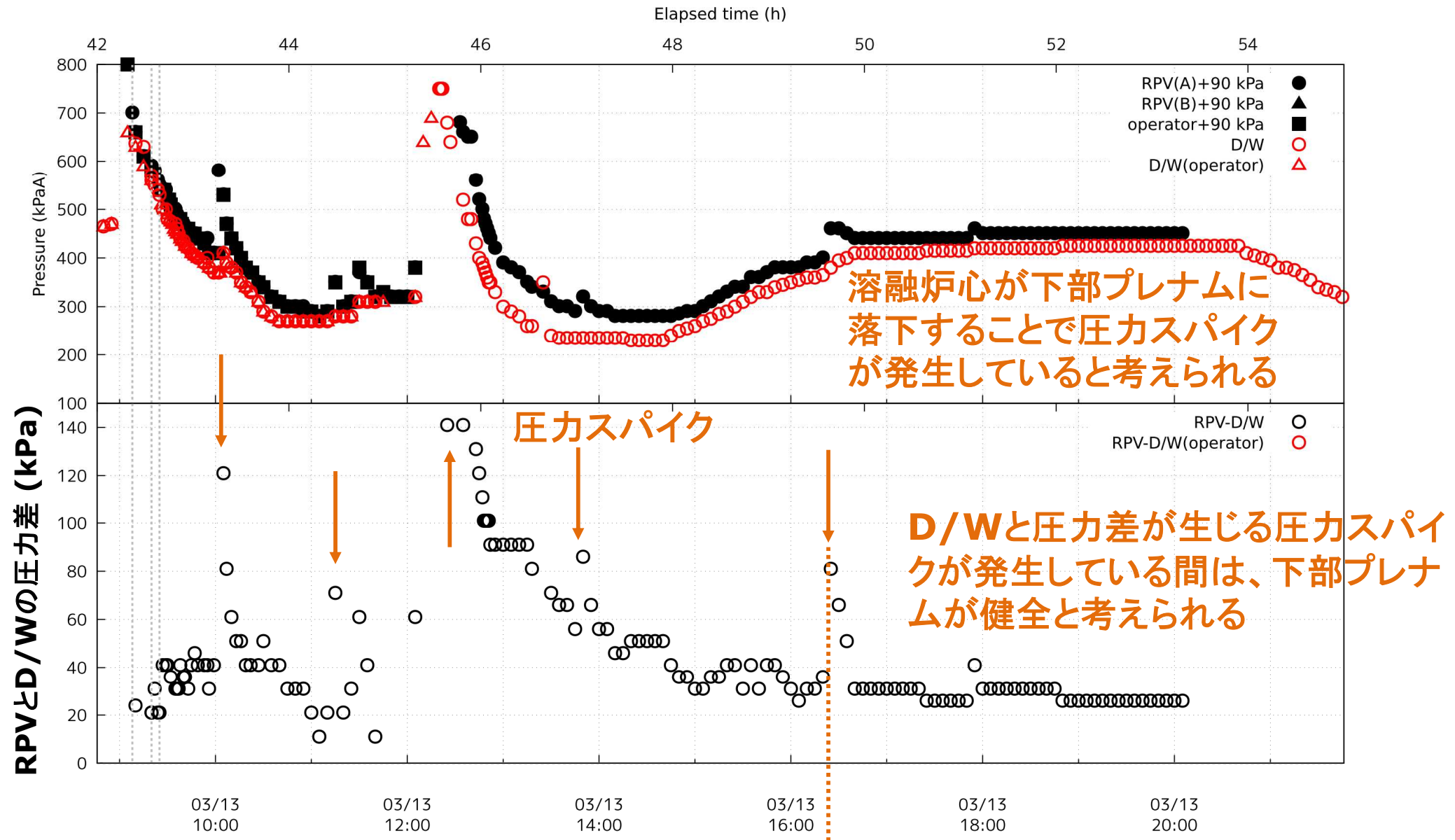
3/21	3:58 使用済燃料プール冷却への東京消防庁消防救助部隊による放水を終了、約1,137t 15:55頃 原子炉建屋、屋上南東側より、 <u>やや灰色がかった煙が発生</u>
3/22	10:36 非常用低圧配電盤(パワーセンター(P/C)4D)受電 15:10 使用済燃料プールへの東京消防庁消防救助部隊による放水開始 15:59 使用済燃料プールへの東京消防庁消防救助部隊による放水終了、約150t 22:28 計測用主母線盤受電 AC120V 22:46 中操照明復旧
3/23	11:03 使用済燃料プールへの燃料プール冷却浄化系(FPC)からの海水注水を開始 13:20 使用済燃料プールへのFPCからの海水注水終了、約35t 16:20頃 原子炉建屋付近より、 <u>やや黒煙が発生</u>

引用:原子力災害対策本部、「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—」、平成23年6月

3.6 RPVとD/Wからの漏えいについて

- ベント実施前からD/W圧力がS/C圧力よりも高い状態が継続されていることから、RPVからD/Wへの漏えい経路は形成されていたと考えられる
- 3月13日16時頃まではRPVの小さな圧カスパイクが見られることから、RPVの下部プレナムには冷却材が残っており、溶融燃料の落下によるものと考えられる P. 51
- 一方、前述のように溶融燃料は3月14日の1時頃にはD/W床面へ落下したと考えられるため、RPV下部ヘッドはそれ以前に破損したと考えられる P. 41
- RPVの下部ヘッドが破損すると、注水流路が変化し、蒸気発生量も変化するため圧力挙動に変化をもたらすと考えられるので、3月13日16:30頃又は3月13日20:40頃に生じる圧力変曲点が候補と考えられる P.52
 - この2か所の圧力変曲点はD/Wからの漏えい発生の候補にもなる

溶融炉心の落下によるRPVの圧カスパイク



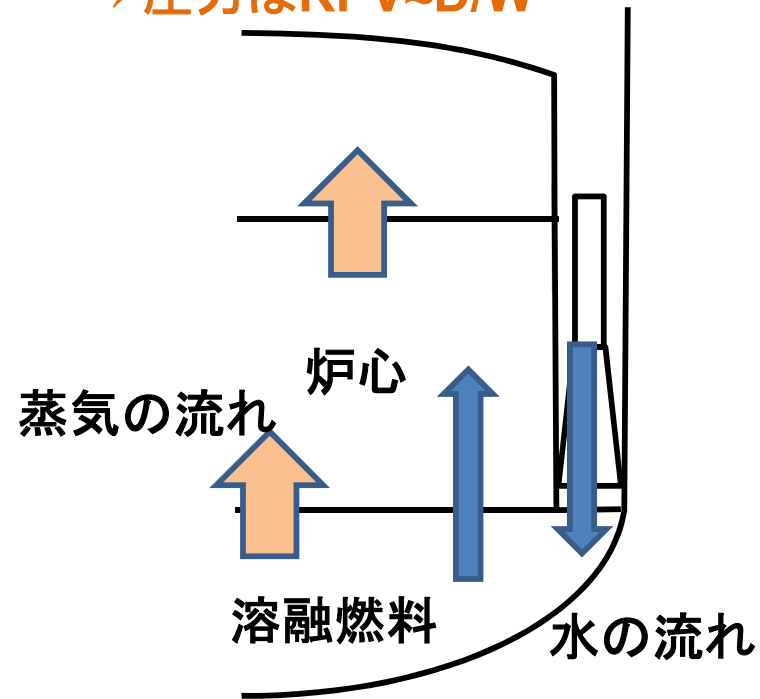
下部ヘッドが健全 →

PCV圧力への注入水の流路変化の影響

下部ヘッドが健全な場合

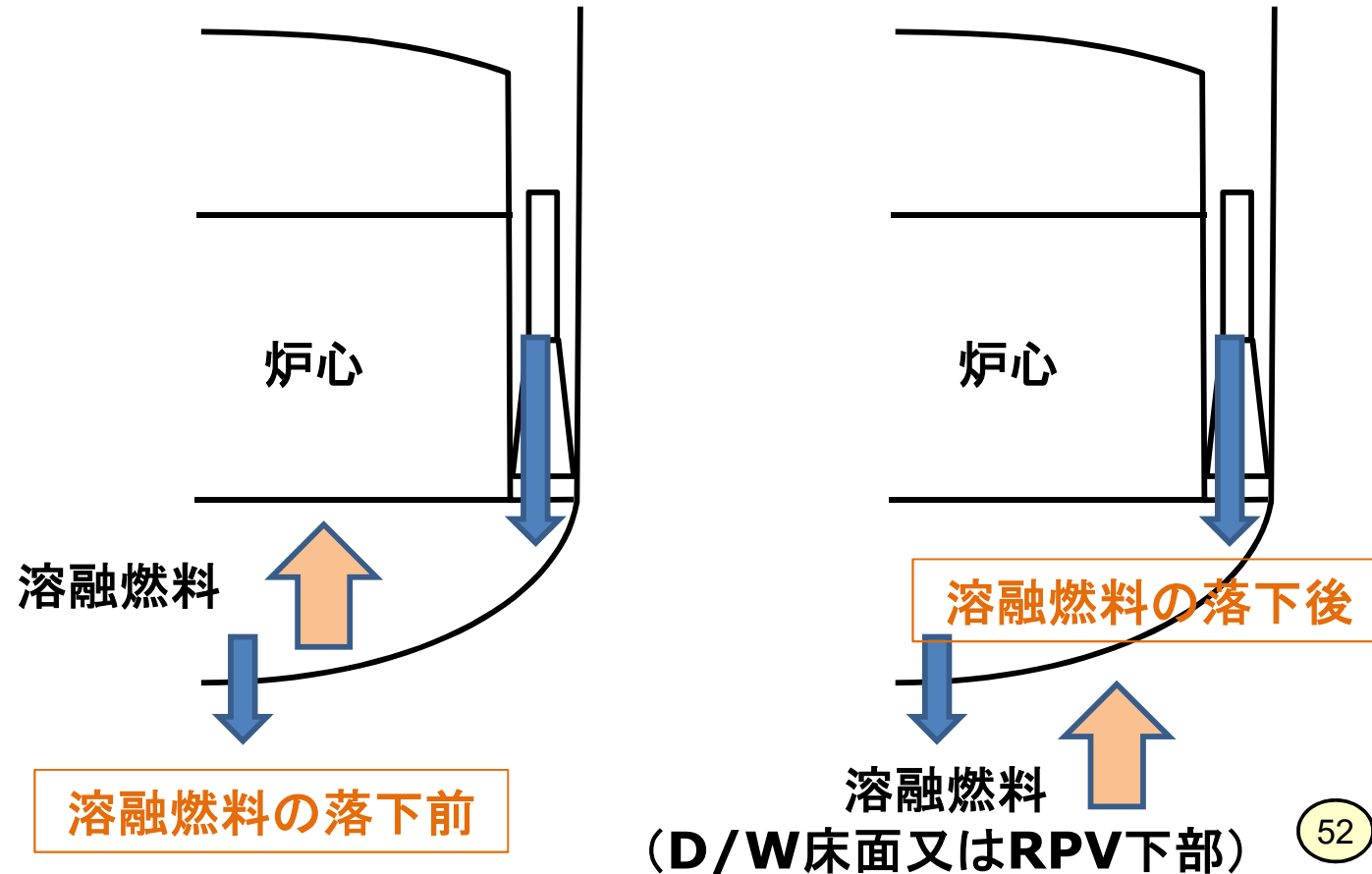
圧力 $RPV > D/W$ の場合、
主たる蒸気発生源はRPV内

D/W への漏えい面積小
→ 圧力は $RPV > D/W$
 D/W への漏えい面積大
→ 圧力は $RPV \approx D/W$



下部ヘッドが破損した場合

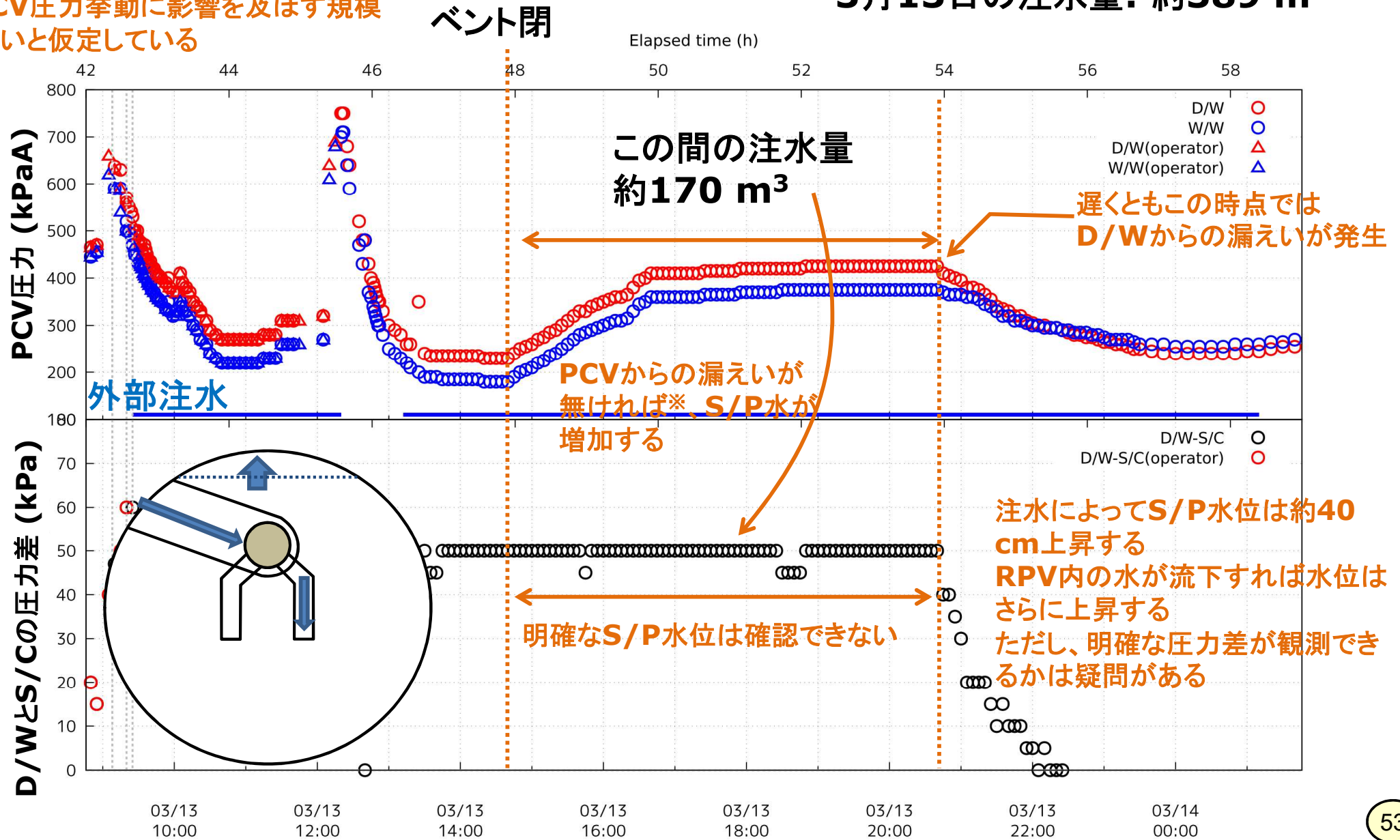
注入された水は炉心へ回らない
下部ヘッドの破損口でD/Wと連通するため、圧力は $RPV \approx D/W$
下部ヘッド破損、溶融燃料の落下によって蒸気発生量は変化する
なお、BWRのRPV下部構造の複雑さから、RPV下部ヘッド破損とD/W床面への溶融炉心の落下には時間差が生じると想定している



外部注水によるS/P水位の変化

※PCVからの小さな漏えいは生じているが、PCV圧力挙動に影響を及ぼす規模ではないと仮定している

3月13日の注水量: 約389 m³

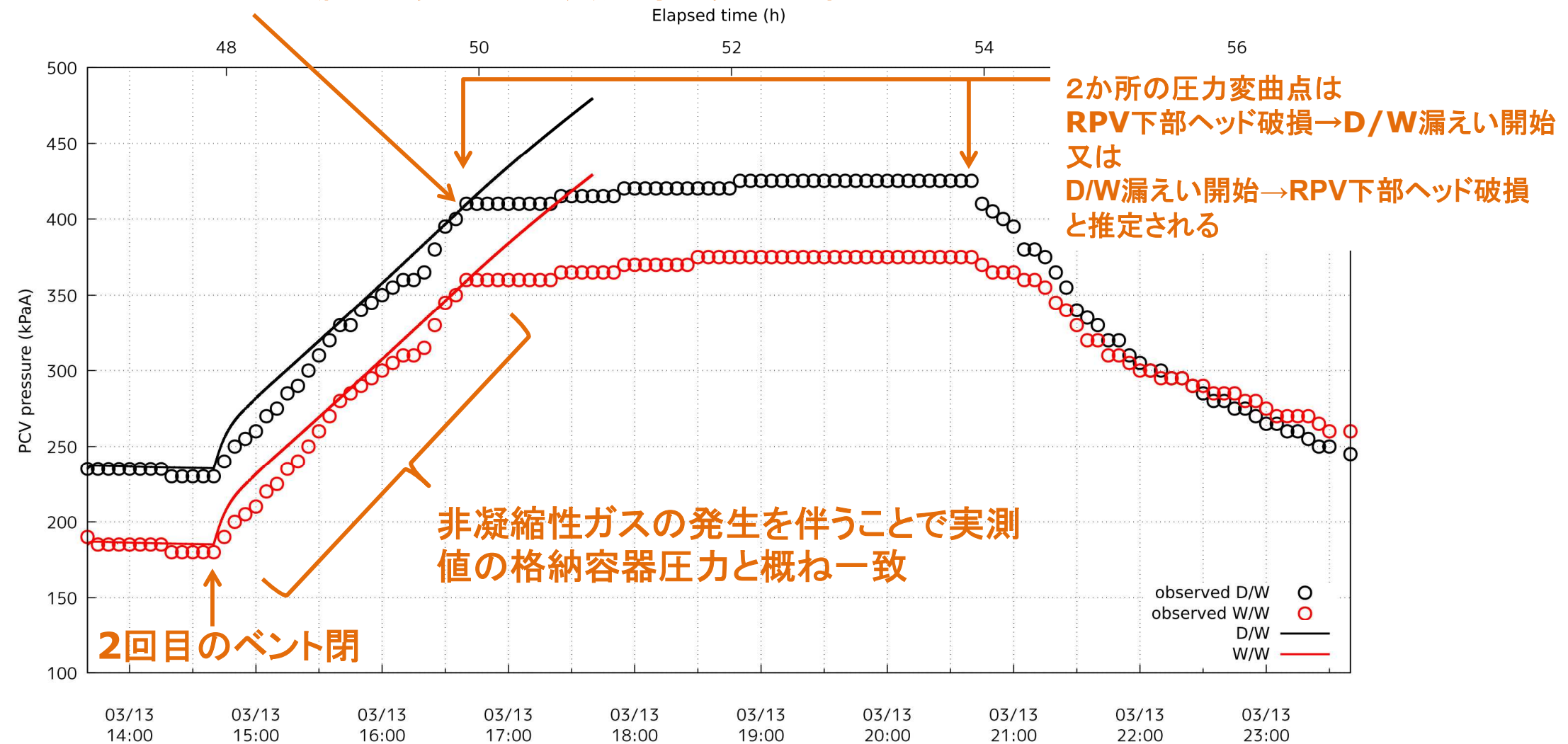


非凝縮性ガス発生を伴う場合の圧力上昇

水蒸気等の発生量に変化が無ければ格納容器圧力は上昇し続ける。

一方、実測値は圧力上昇がほぼ停止している。

→PCVからの漏えい発生又は蒸気等の発生量低下



直線は蒸気等の発生を仮定した計算結果

再掲

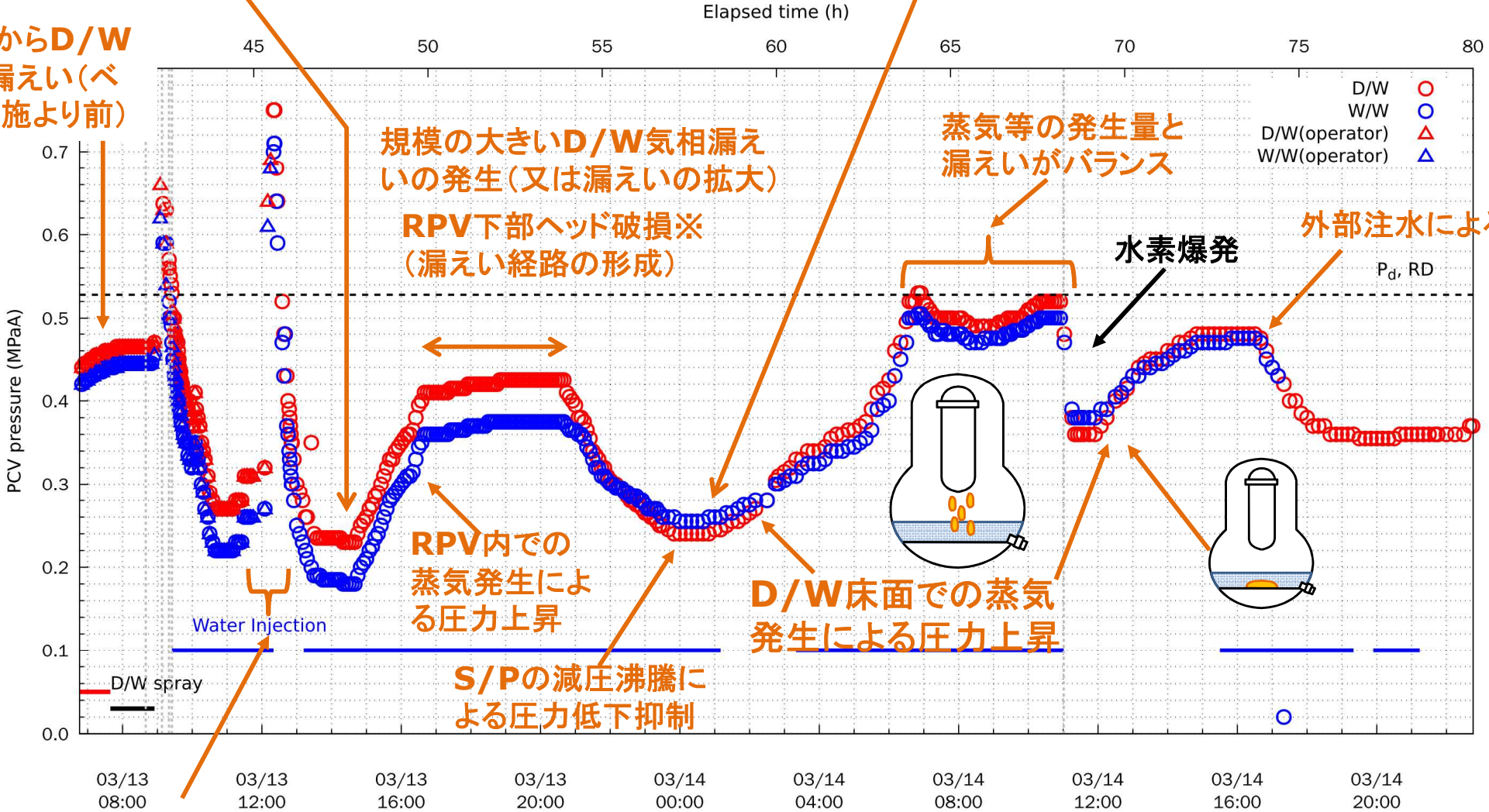
事故進展の推定

※BWRのRPV下部構造の複雑さから、RPV下部ヘッド破損とD/W床面への溶融炉心の落下には時間差が生じると想定している

S/P水のD/Wへの逆流
D/W床面への溶融燃料の落下

PCVベント閉止

RPVからD/Wへの漏えい(ベント実施より前)



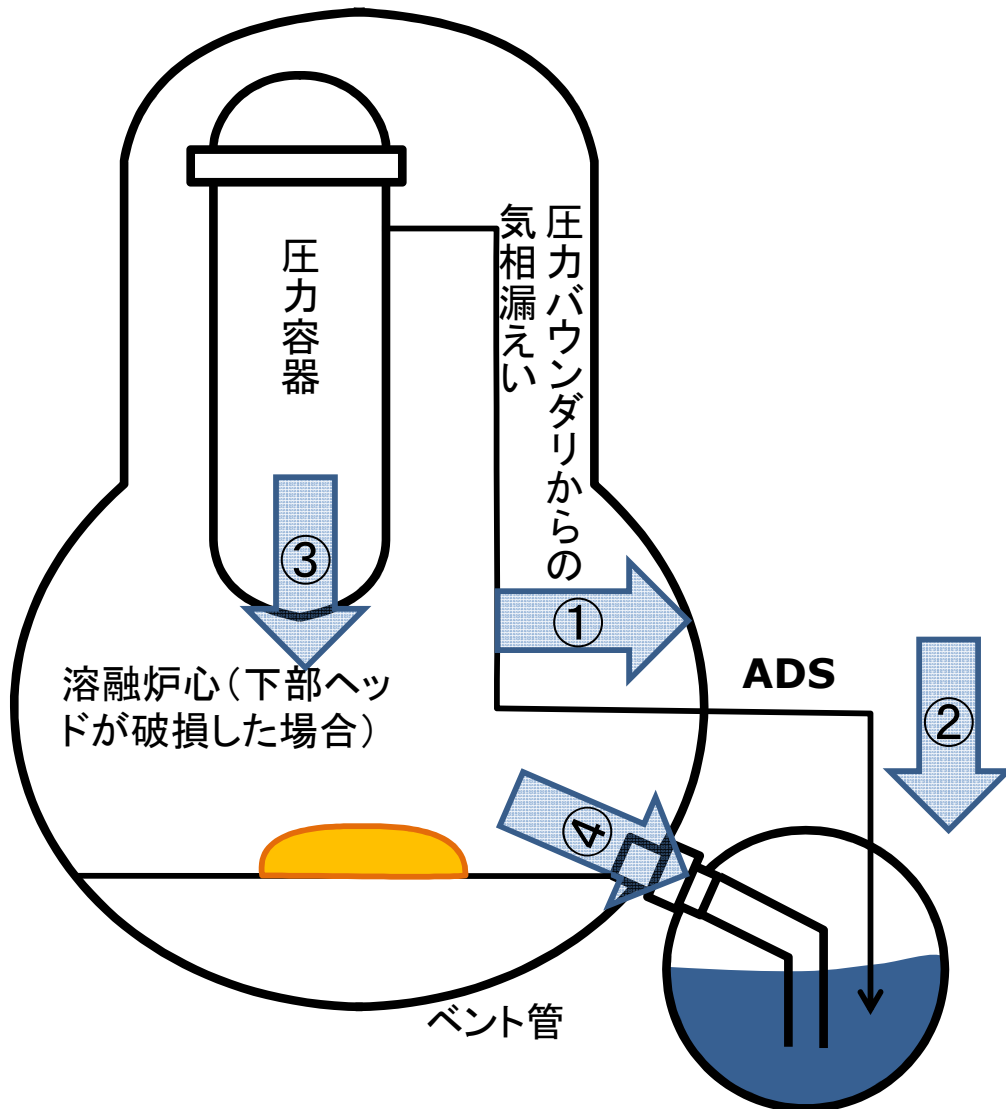
主蒸気管貫通部近傍からの小規模な漏えい開始

継続

以下、参考図

蒸気による崩壊熱の輸送

崩壊熱の輸送



- 下部ヘッド破損前
 - D/W圧力 > S/C圧力なので①→④の経路が支配的
 - ADSが開状態を維持していれば②の経路も
 - 今回は②の経路を無視
- 下部ヘッド破損後
 - ③(又はD/W内での蒸気発生)→④の経路が支配的
 - RPV内部での蒸気発生は限定的か

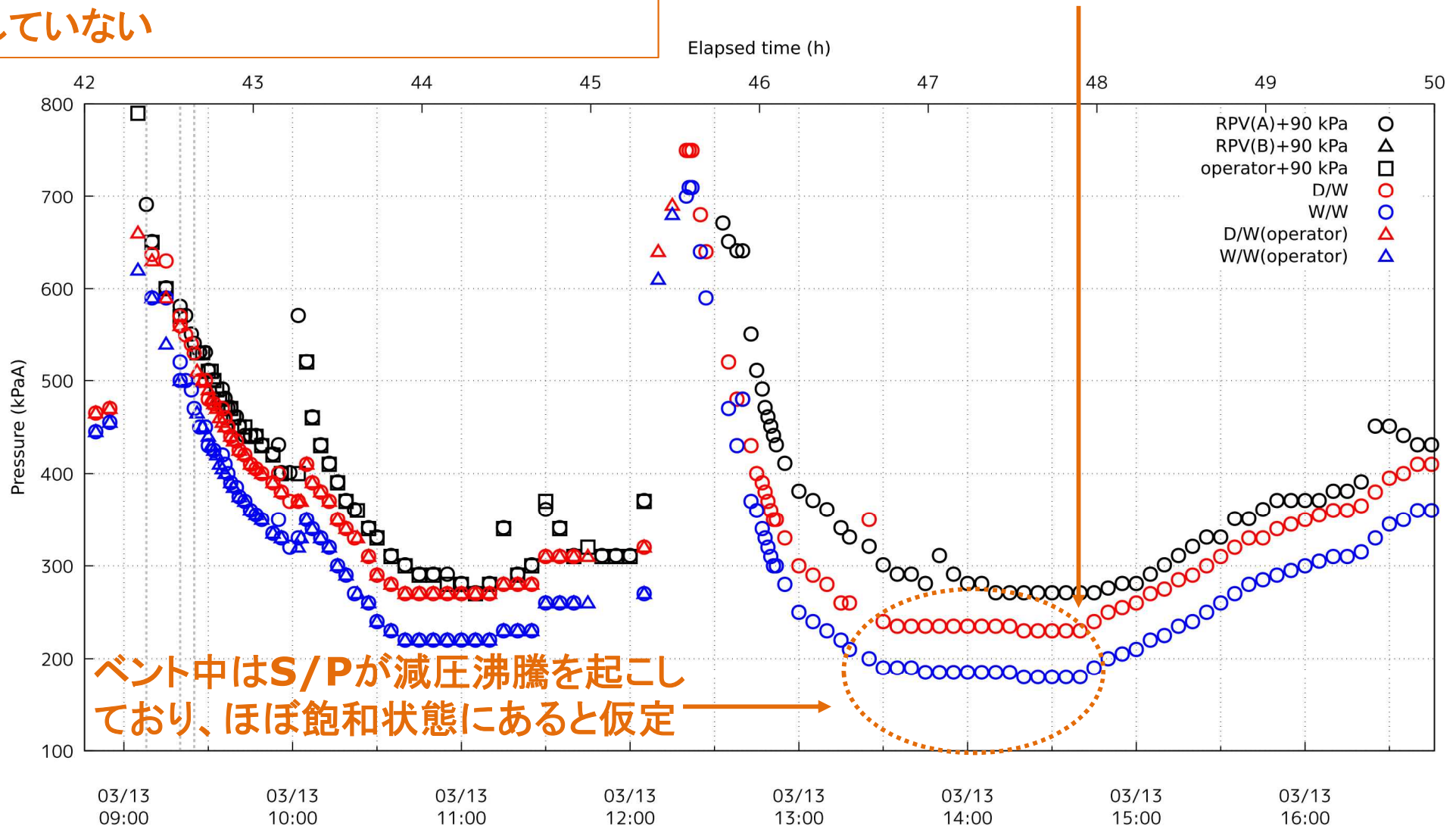
解析方針

- ここでは、ADSが閉じた前提の解析を実施
 - 前述の崩壊熱の輸送経路②を無視
 - 問題を単純化(シンプルなノーディング)
- PCV圧力挙動を評価するには自由体積の設定が必要
 - PCV外からの注水によって自由体積が減少
 - S/Pの水位を推定(実測値は3月12日20:00まで)
- PCV内部でケーブル被覆材等の分解生成物として可燃性ガスが発生した可能性があるが、解析では水素で代表させた

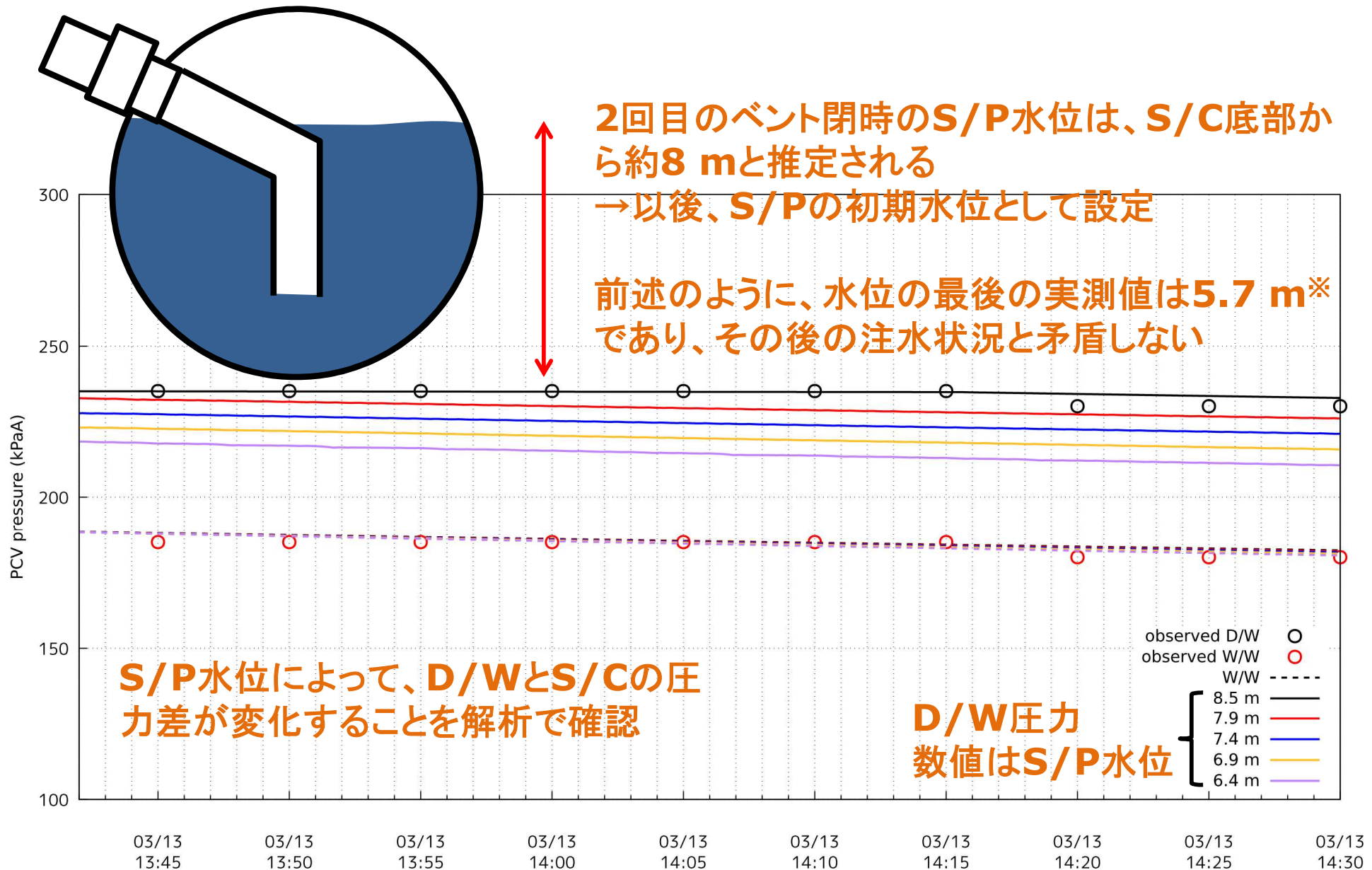
ベント後の圧力挙動についての解析方針

解析では、水蒸気及び水素の発生量のみを仮定した。
燃料及び溶融燃料の配置及び輻射は考慮していない

- ベント閉の時点でのプラントの状態を推定
- S/Cの水位(D/WとS/Cの圧力差)
 - RPV(D/W)での蒸気等の発生量(S/Cの圧力)



2回目のベント閉時点のS/P水位の推定



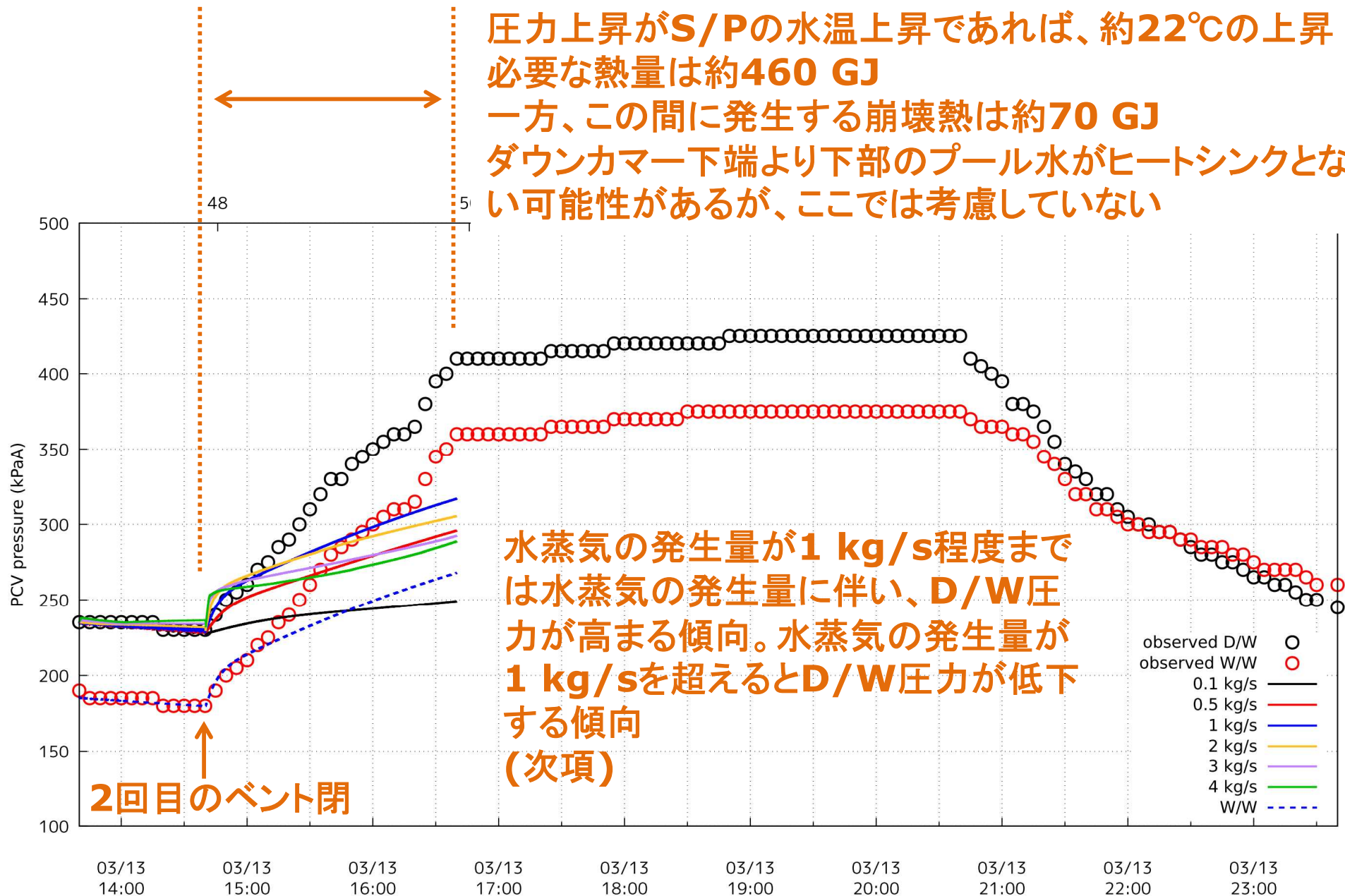
※東京電力ホールディングス株式会社、「福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未説明問題に関する検討 第5回進捗報告」、平成29年12月25日

水蒸気による圧力上昇

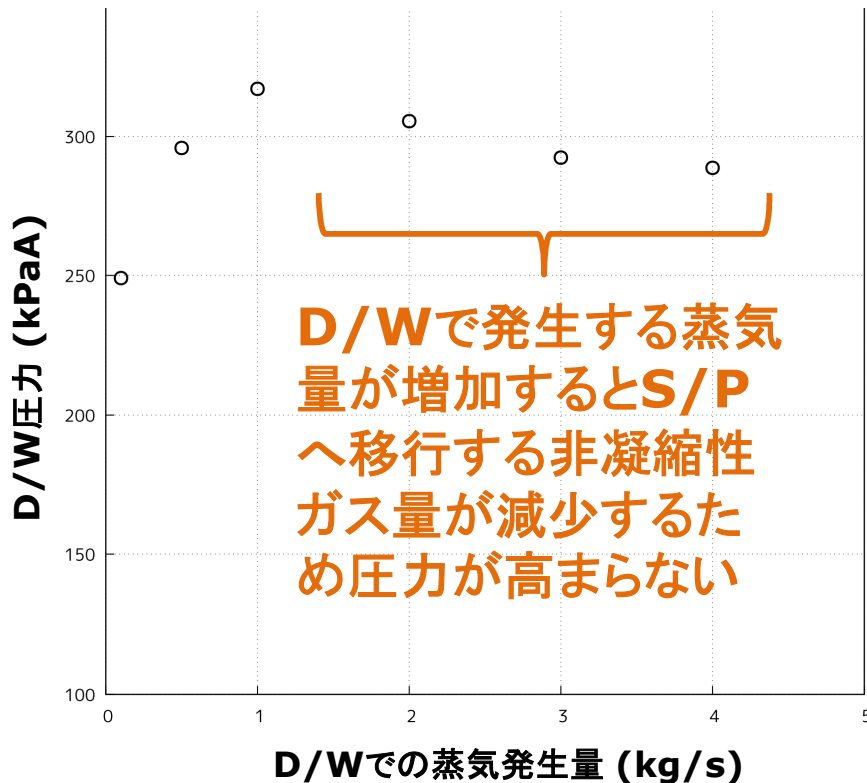
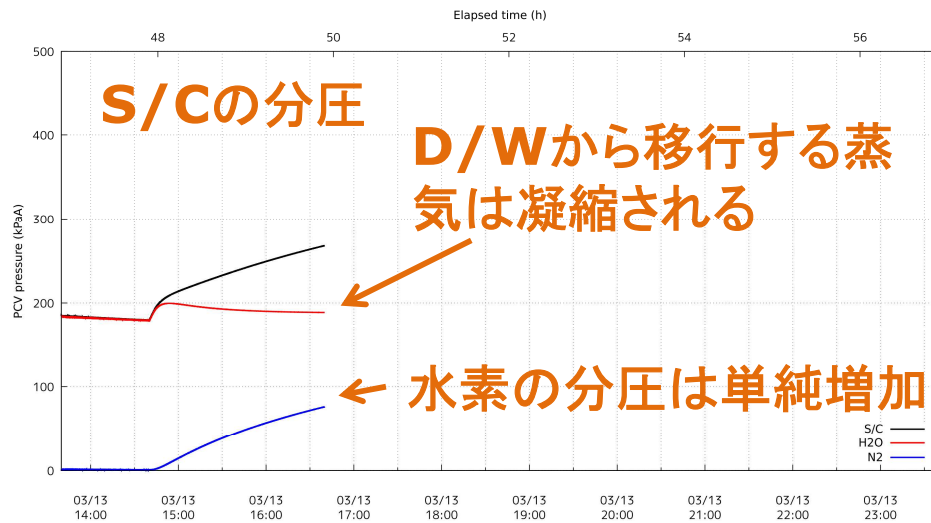
圧力上昇がS/Pの水温上昇であれば、約22°Cの上昇
必要な熱量は約460 GJ

一方、この間に発生する崩壊熱は約70 GJ

ダウンカマー下端より下部のプール水がヒートシンクとならない
可能性があるが、ここでは考慮していない



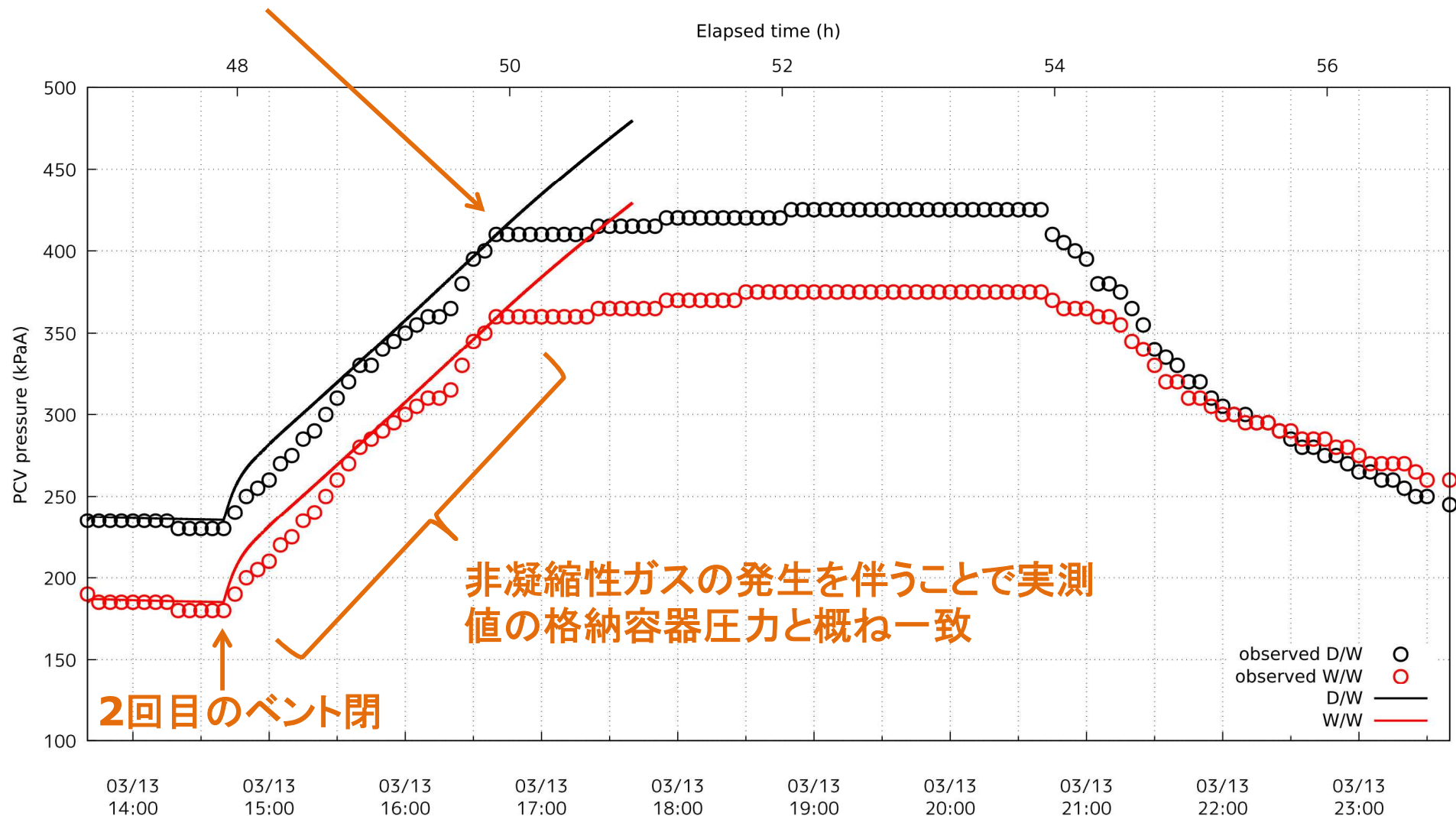
非凝縮性ガスの移行による圧力上昇



- D/Wで発生した蒸気はS/Pで凝縮される
- D/Wでの蒸気発生量が増え、S/Pへ移行する非凝縮性ガスが減少し、圧力上昇が緩やかになる
- D/Wでの蒸気発生量が少なすぎる場合もS/Pへ移行する非凝縮性ガスが減少し、圧力上昇が緩やかになる
- RPV又はD/W内で水素等の非凝縮性ガスが発生していると考えられる

非凝縮性ガス発生を伴う場合の圧力上昇

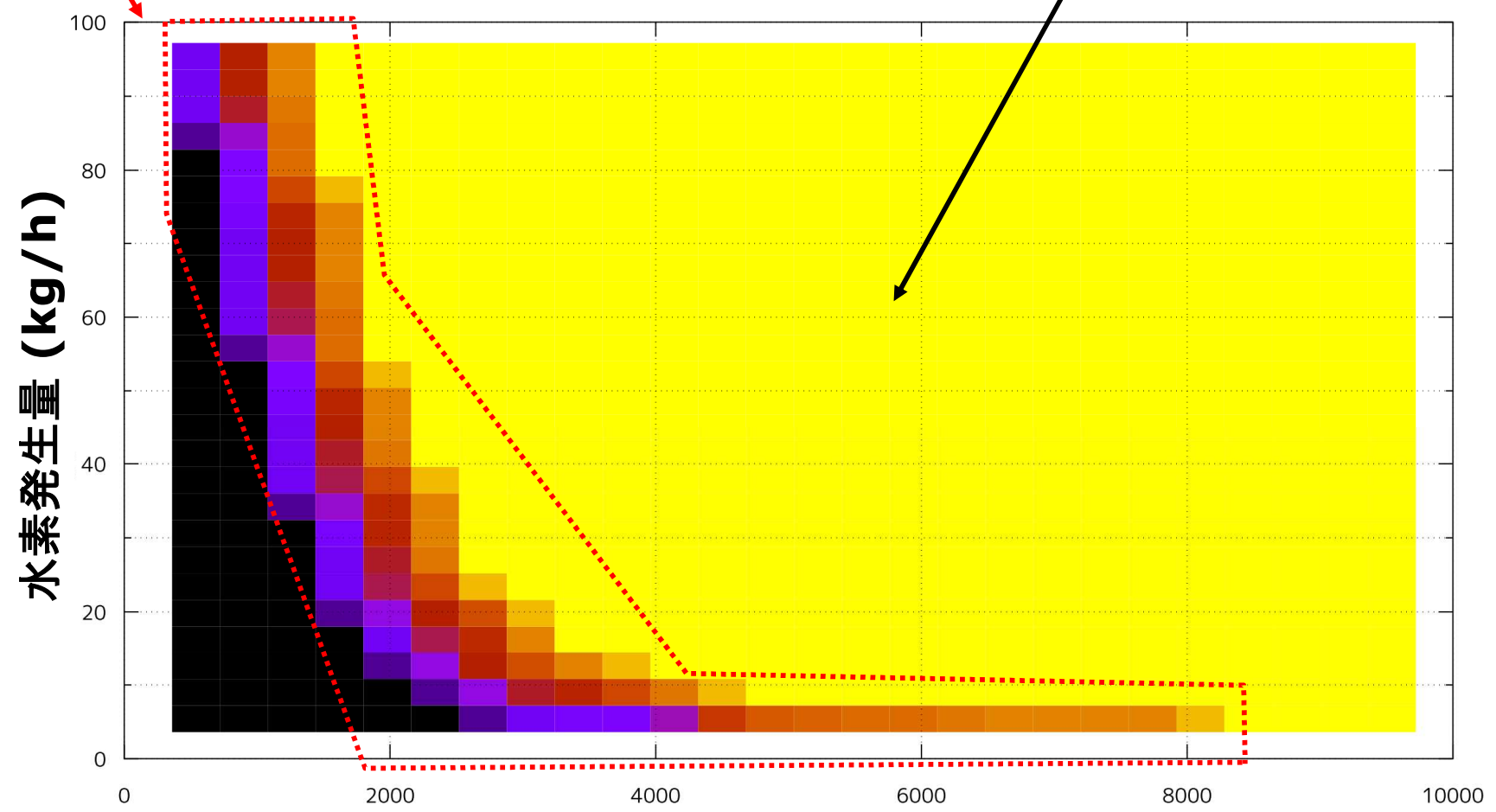
水蒸気等の発生量に変化が無ければ格納容器圧力は上昇し続ける。
一方、実測値は圧力上昇がほぼ停止している。
→PCVからの漏えい発生又は蒸気等の発生量低下



水蒸気と非凝縮性ガスの発生量(1)

3月13日16:30頃までのPCV圧力
上昇が実測値と概ね一致する領域

ガスの発生量が多すぎるため、実測値よりも
格納容器圧力が高くなる(黄色の範囲)



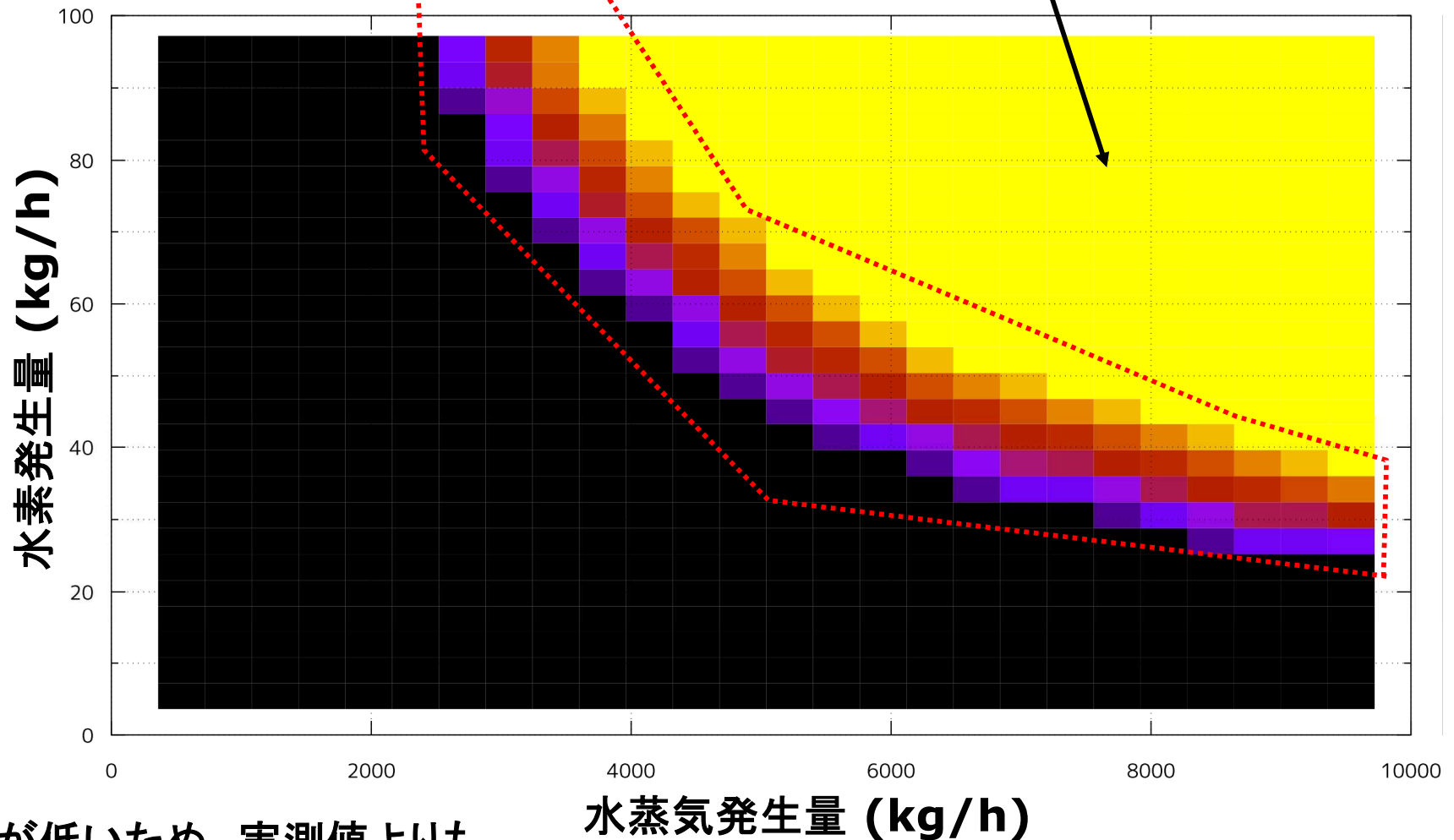
ガスの発生量が低いため、実測値よりも
格納容器圧力が低くなる(黒色の範囲)

水蒸気発生量 (kg/h)

水蒸気と非凝縮性ガスの発生量(2)

3月14日7:00頃までのPCV圧力上昇が実測値と概ね一致する領域

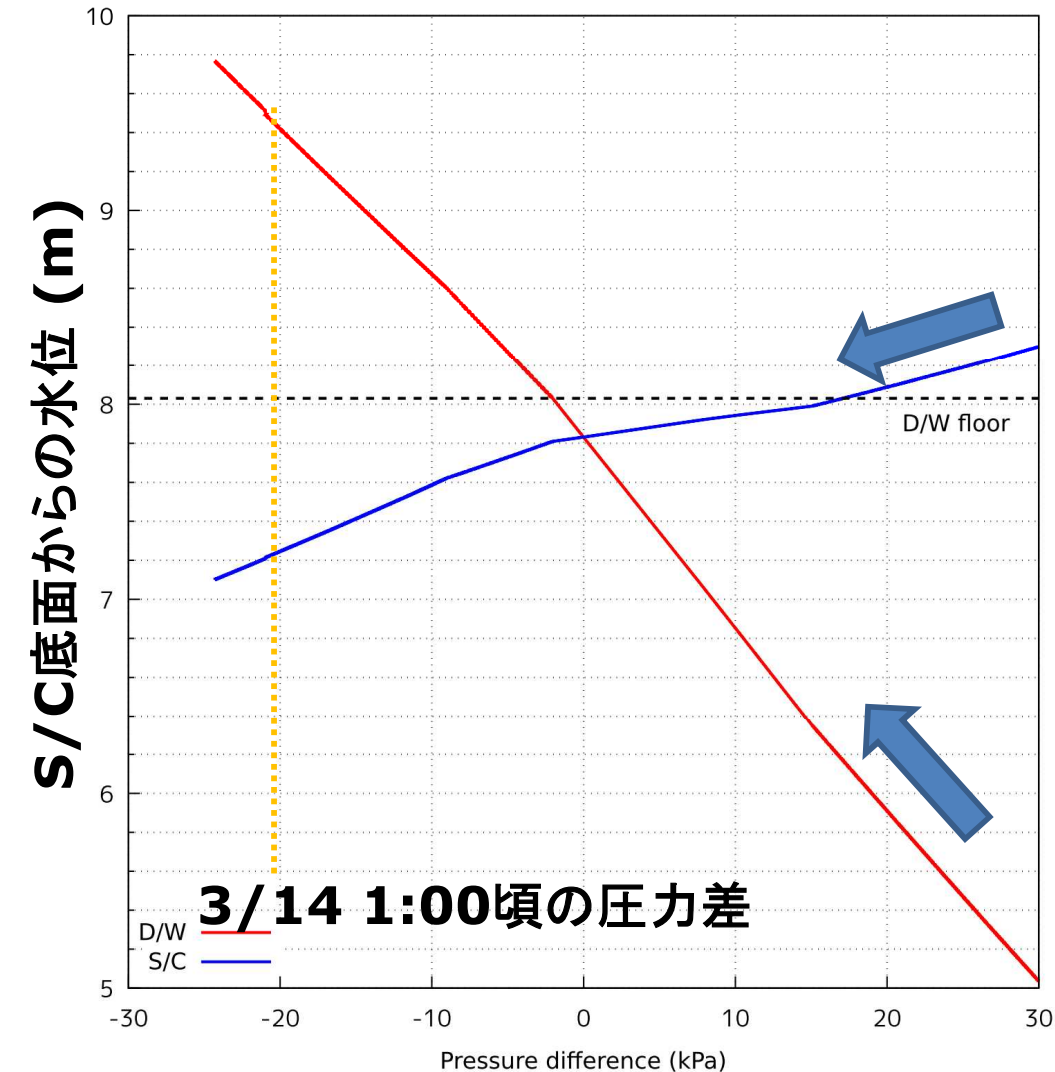
ガスの発生量が多すぎるため、実測値よりも格納容器圧力が高くなる(黄色の範囲)



ガスの発生量が低いため、実測値よりも格納容器圧力が低くなる(黒色の範囲)

前項の検討とは異なり、PCVからの漏えいの仮定の影響を受ける

PCV内水位の変動

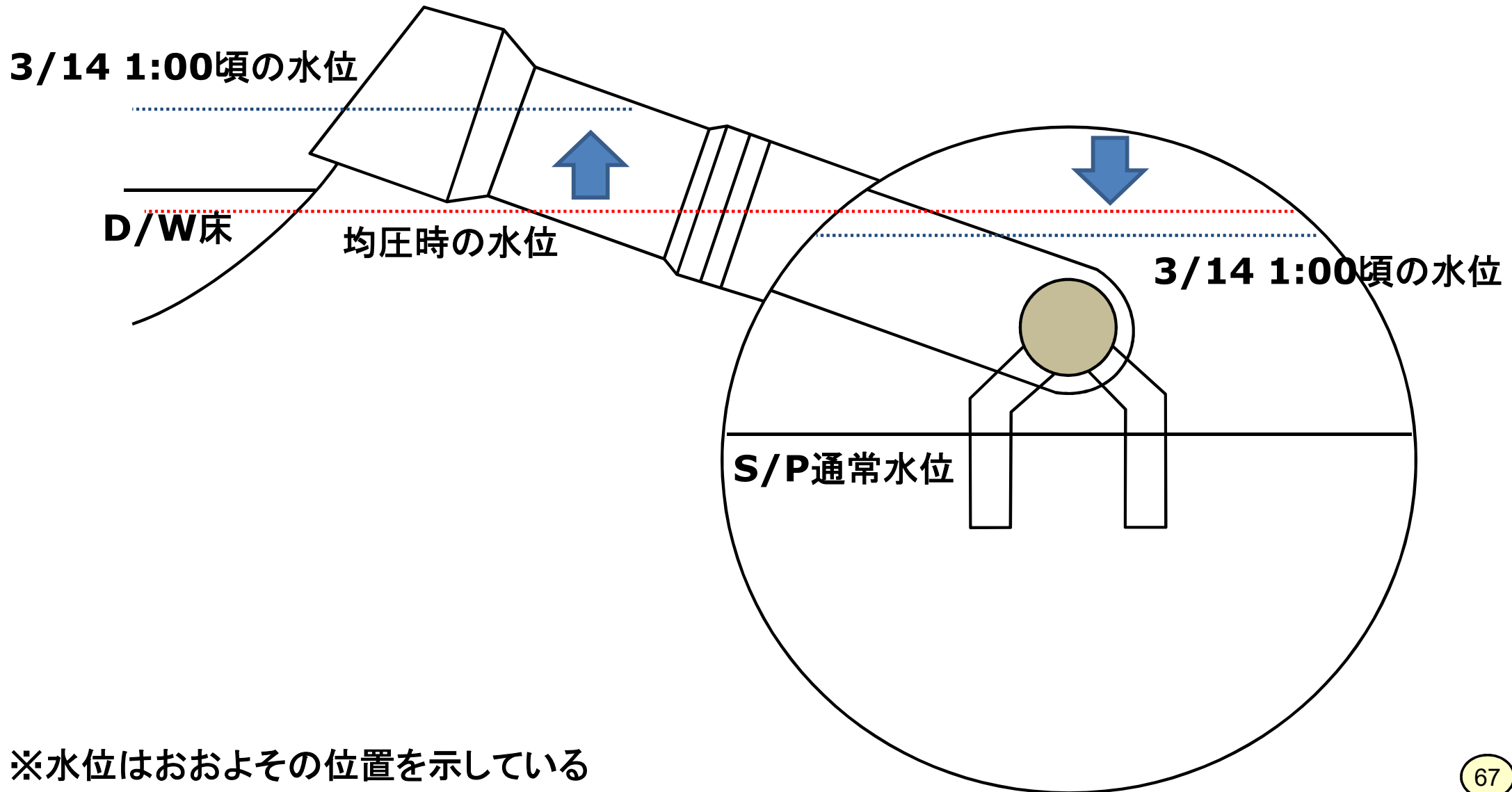


低 ← D/W圧力 → 高

- D/W圧力が低下すると、S/Cの水位が低下し、ベント管内の水位が上昇する。
- D/WとS/Cの圧力が逆転した後は、D/W床上に水位が形成された可能性がある。
- 3/14 1:00頃には最大で1 mを超える水位が一時的にD/Wで形成されたか。

D/WとS/Cが均圧した後の水位

D/W床の高さ程度までベント管内の水位が上昇する

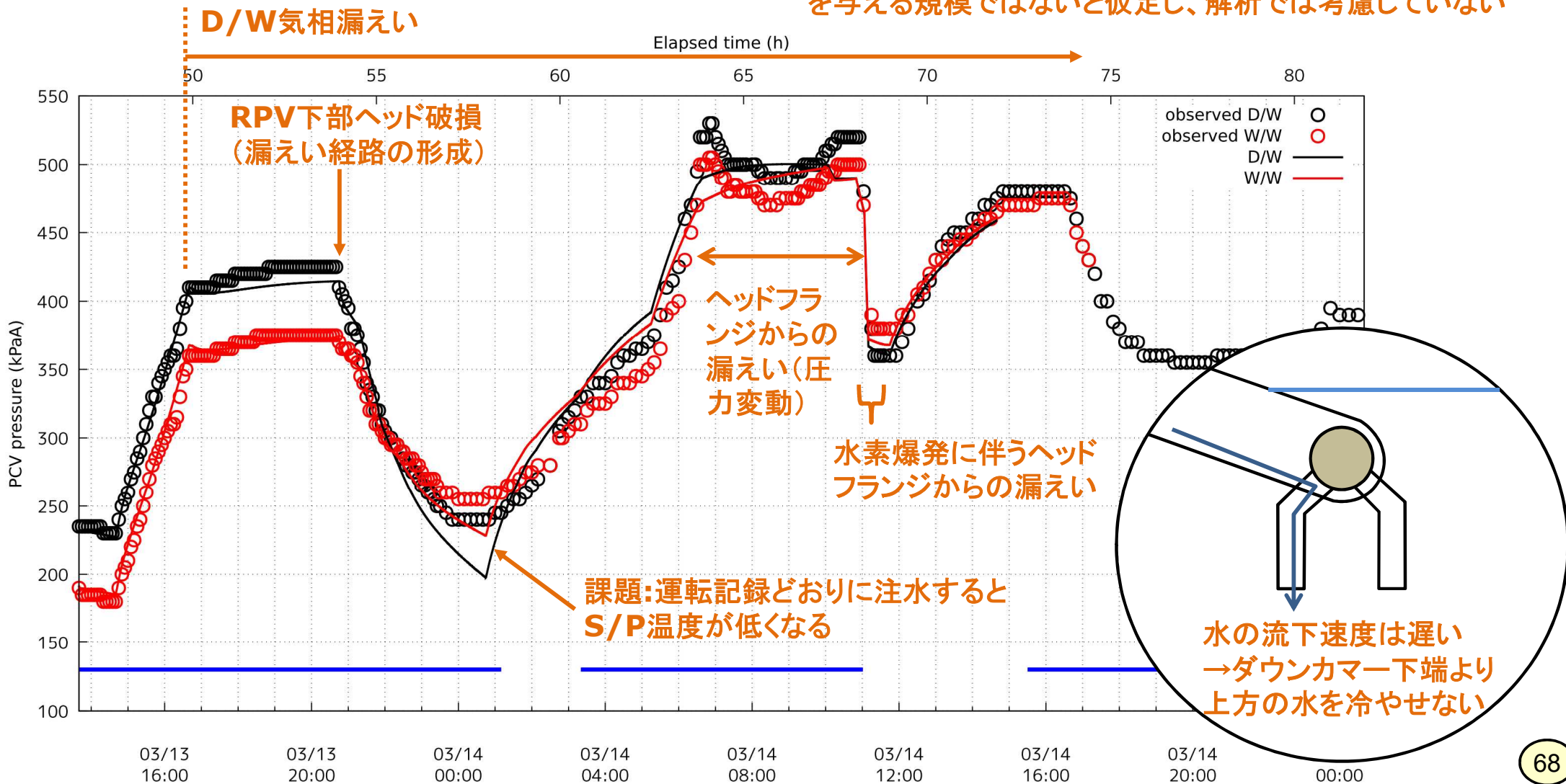


※水位はおおよその位置を示している

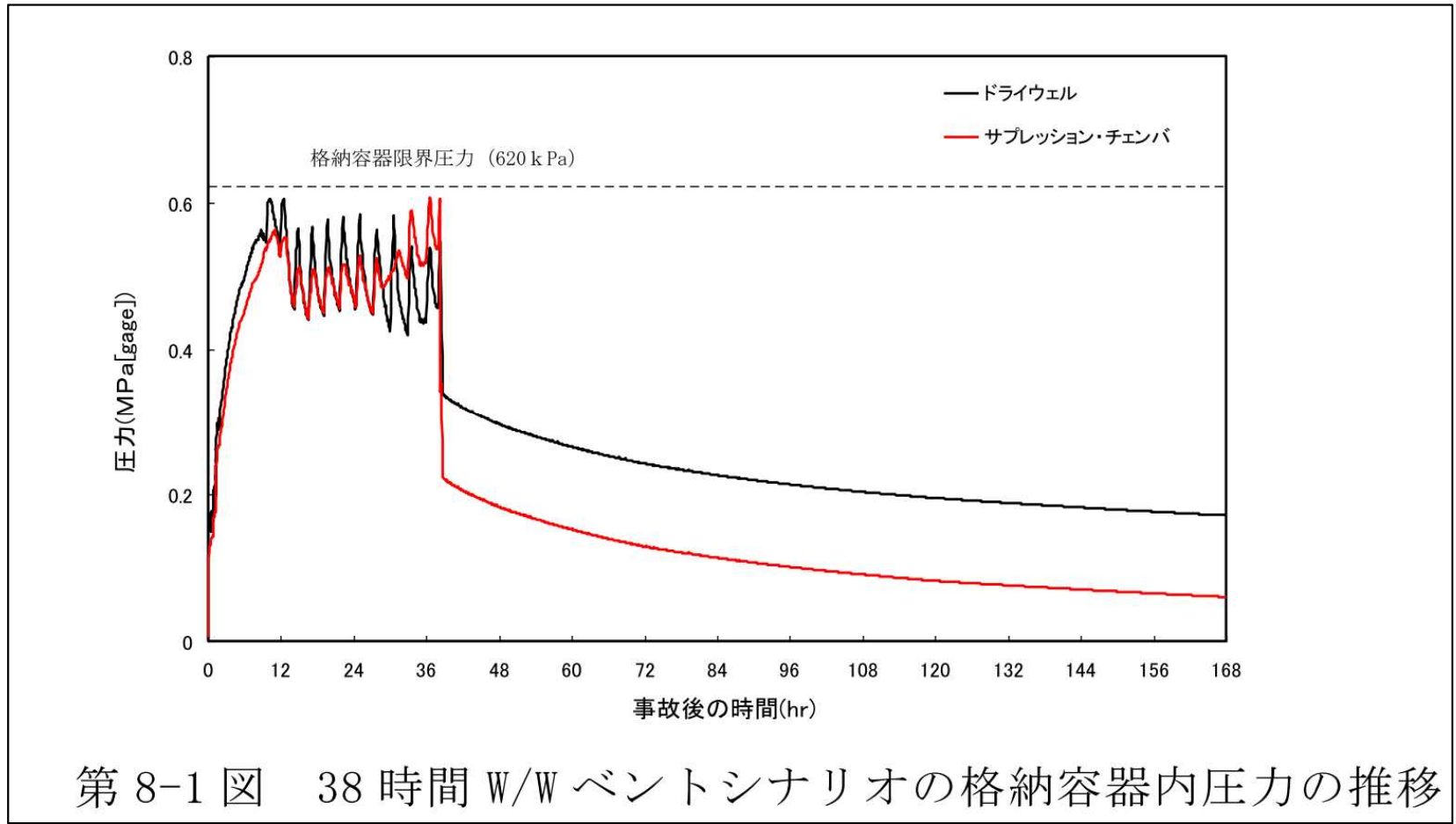
解析結果

前項までの基礎検討結果から、実測値の再現性が高いパラメータを選定
解析結果は概ね実測値と整合する結果を再現していることから、提示したシナリオ
の実現性があると考えられる

初期の主蒸気管貫通部での漏えいはPCVの圧力挙動に影響
を与える規模ではないと仮定し、解析では考慮していない



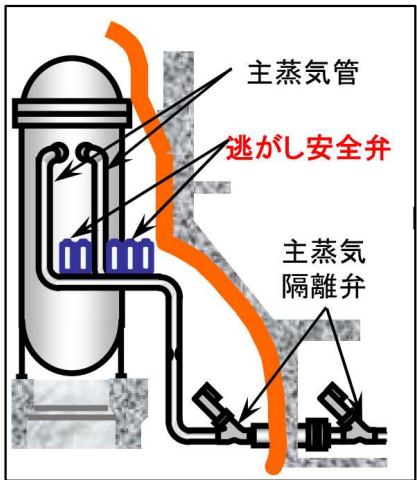
ABWRでのW/Wベント時のPCV圧力



↑ ↓ W/Wベント時は
 $P_{D/W} > P_{S/C}$

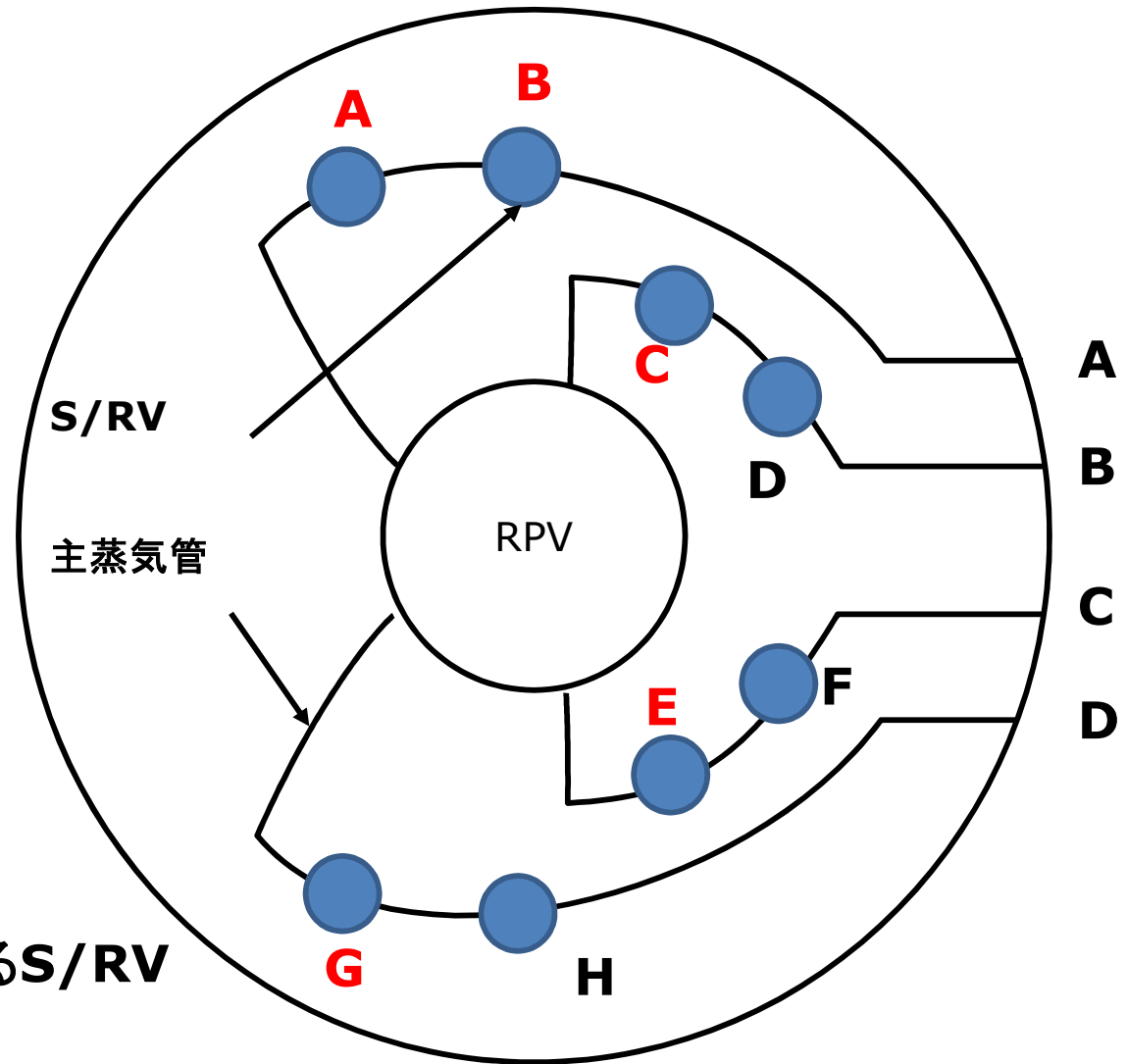
引用: 東京電力株式会社、柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉格納容器圧力逃がし装置 (ベント実施に関する考慮事項)について、平成27年4月

3号機主蒸気管

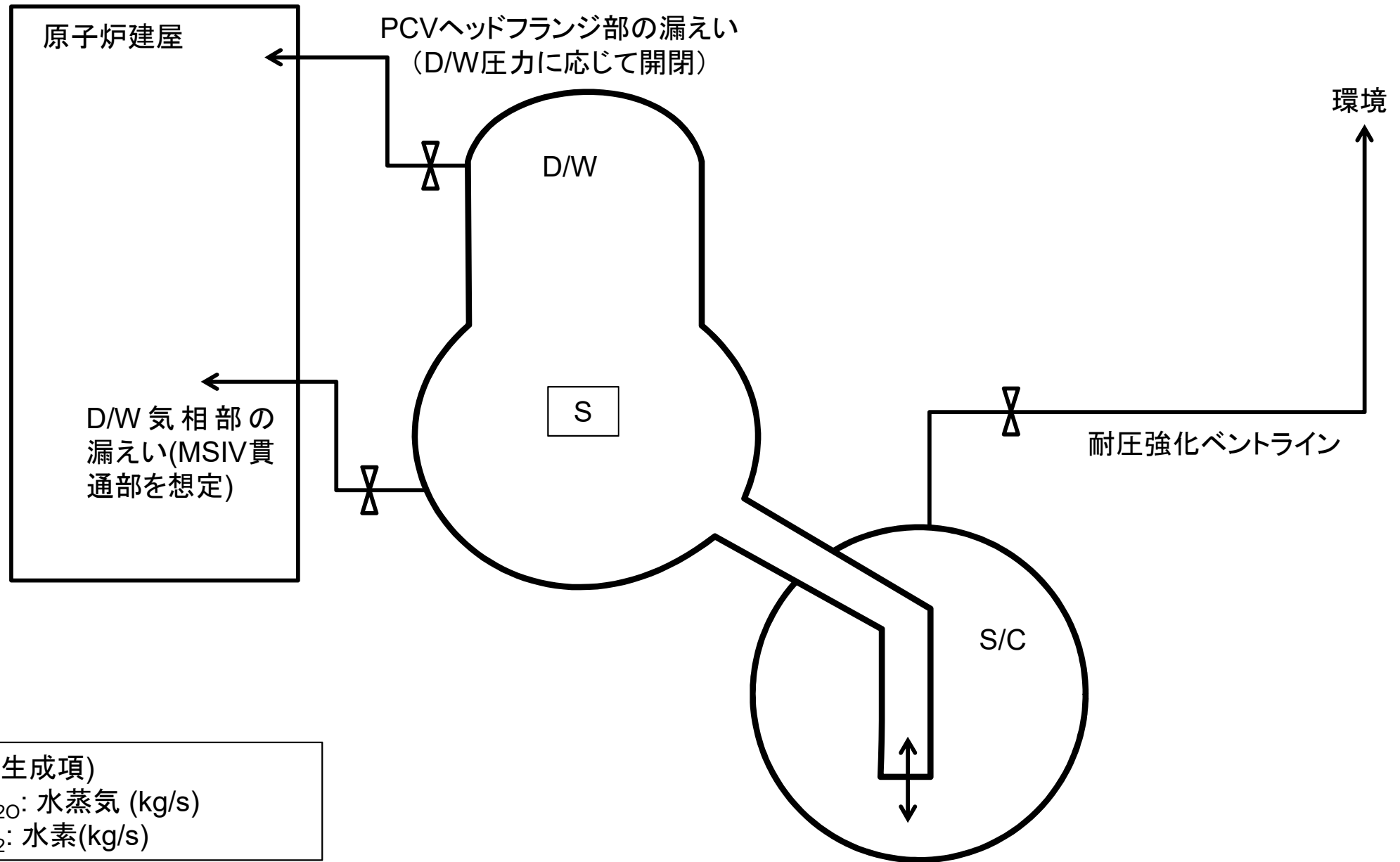


MSIVとは高低差あり※

赤字はADS機能のあるS/RV



解析ノード図



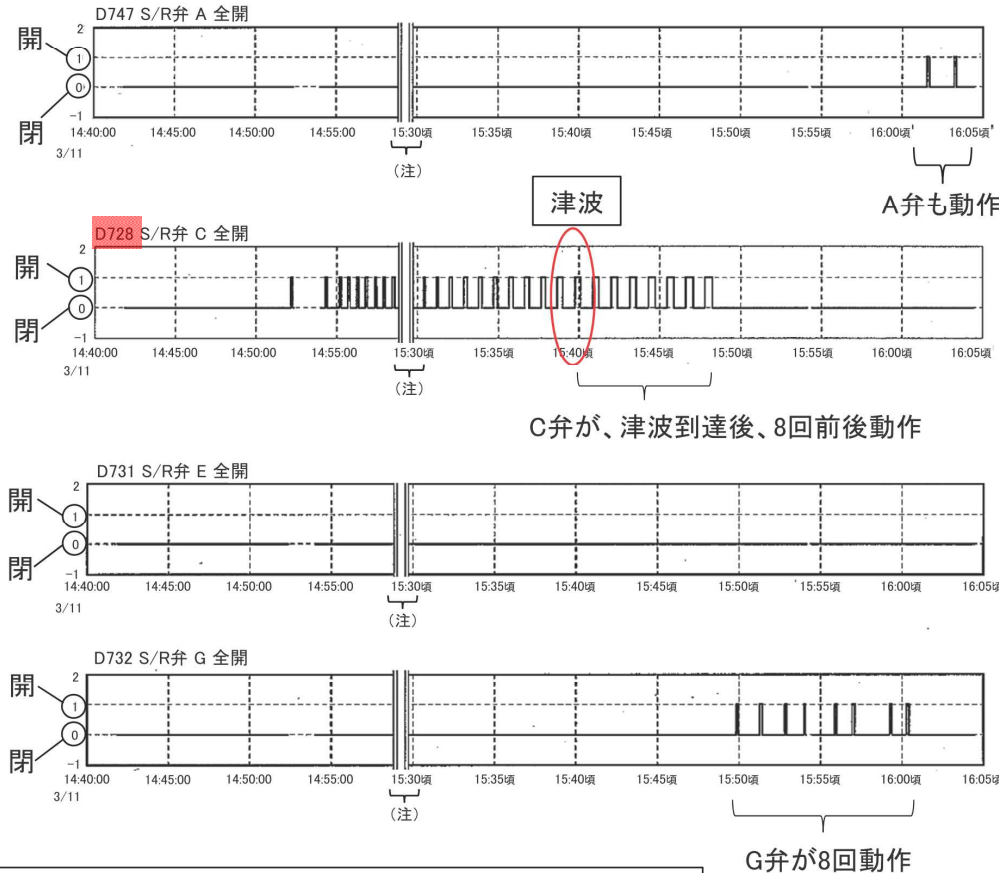
アキュムレータによる逃し弁の動作

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



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回にわたった(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とその前後のSR弁の開閉動作に関する記録と整合する。
なお、アラームタイプには、SR弁の開閉に関する記録はない。

15	41	0	4	8	10	D616	MSIV	内側	ACロジック	トリップ	オン	
15	41	0	8	5	70	D616	MSIV	内側	ACロジック	トリップ	オフ	
15	41	2	5	4	30	D706	6.9KV	メタクラ	3D	母線電圧喪失	オン	
15	41	3	9	7	30	D625	逃し安全弁	C	開		オフ	
15	41	4	8	0	60	D639	CS系	A	起動		オフ	
15	42	0	2	9	10	D625	逃し安全弁	C	開		オン	
15	42	4	8	9	60	D625	逃し安全弁	C	開		オン	
15	43	1	2	5	90	D625	逃し安全弁	C	起動		オン	
15	43	3	2	8	00	D639	CS系	A	起動		オフ	
15	43	4	1	2	50	D658	主蒸気管	圧力	低	B1	オフ	
15	43	4	1	2	50	D679	原子炉	水位	低	(L-2 MSIV)	オフ	
15	43	4	2	1	10	D575	PLR	MG	セット	モーター	A	オン