

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が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

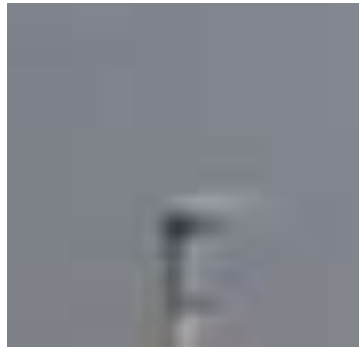


図2 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月13日10時）
上：ライブカメラ映像全体 中： 3, 4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図

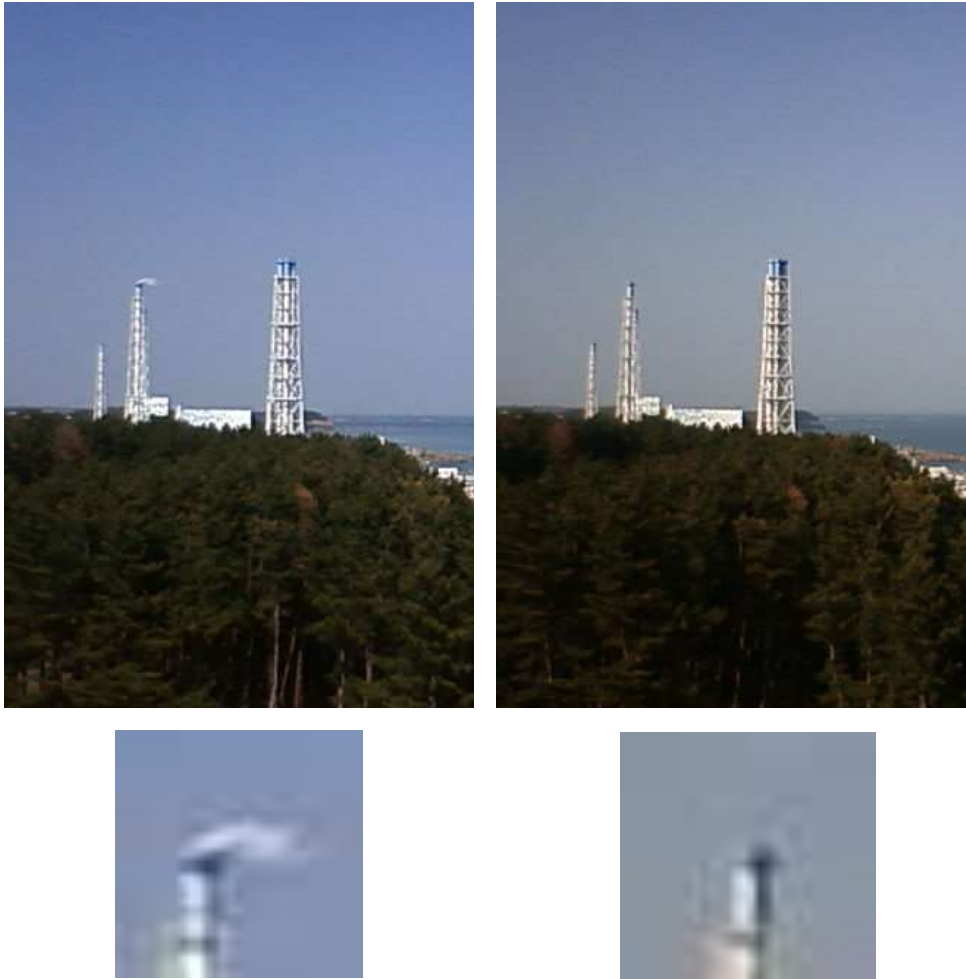


図3 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（抜粋）
（撮影日 左：3月13日13時 右：3月13日15時）
上：ライブカメラ映像（抜粋） 下：3,4号機排気筒拡大図

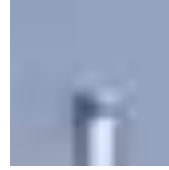
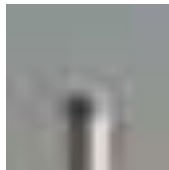


図4 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（抜粋）
（撮影日 左：3月14日7時 右：3月14日10時）
上：ライブカメラ映像（抜粋） 下：3,4号機排気筒拡大図

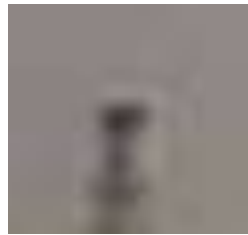


図5 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月15日7時）
上：ライブカメラ映像全体 中： 3,4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図

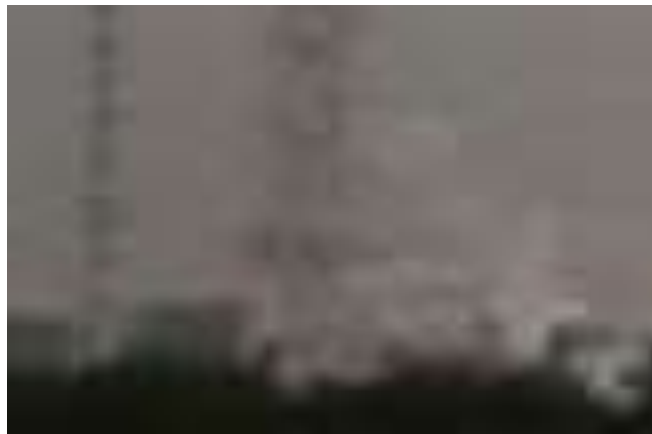
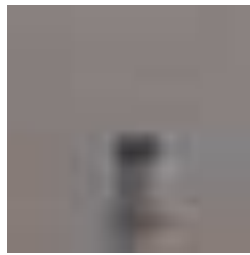


図6 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月15日16時）
上：ライブカメラ映像全体 中： 3,4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図



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

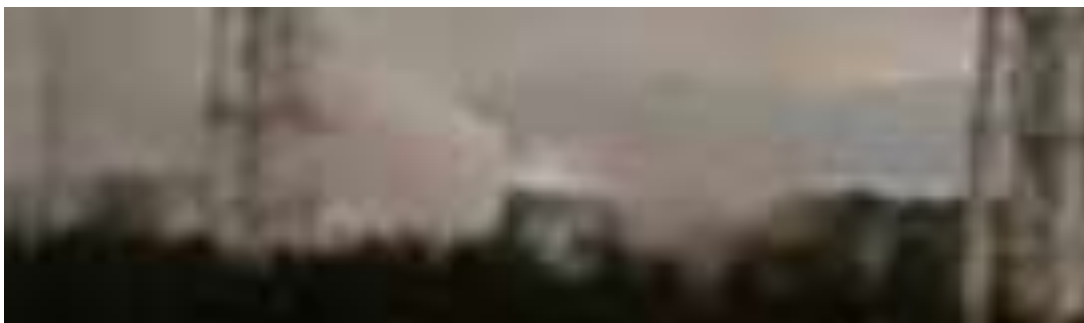
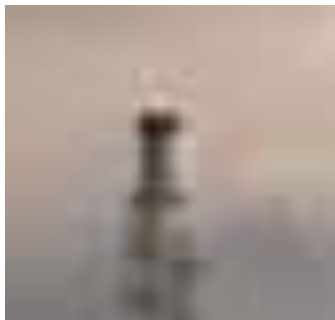


図8 福島第一原子力発電所ライブカメラの映像（撮影日 3月16日10時）
上：ライブカメラ映像全体 中： 3,4号排気筒拡大図 下：原子炉建屋周辺拡大図



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こっている。

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内の水を押しよ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行く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高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。

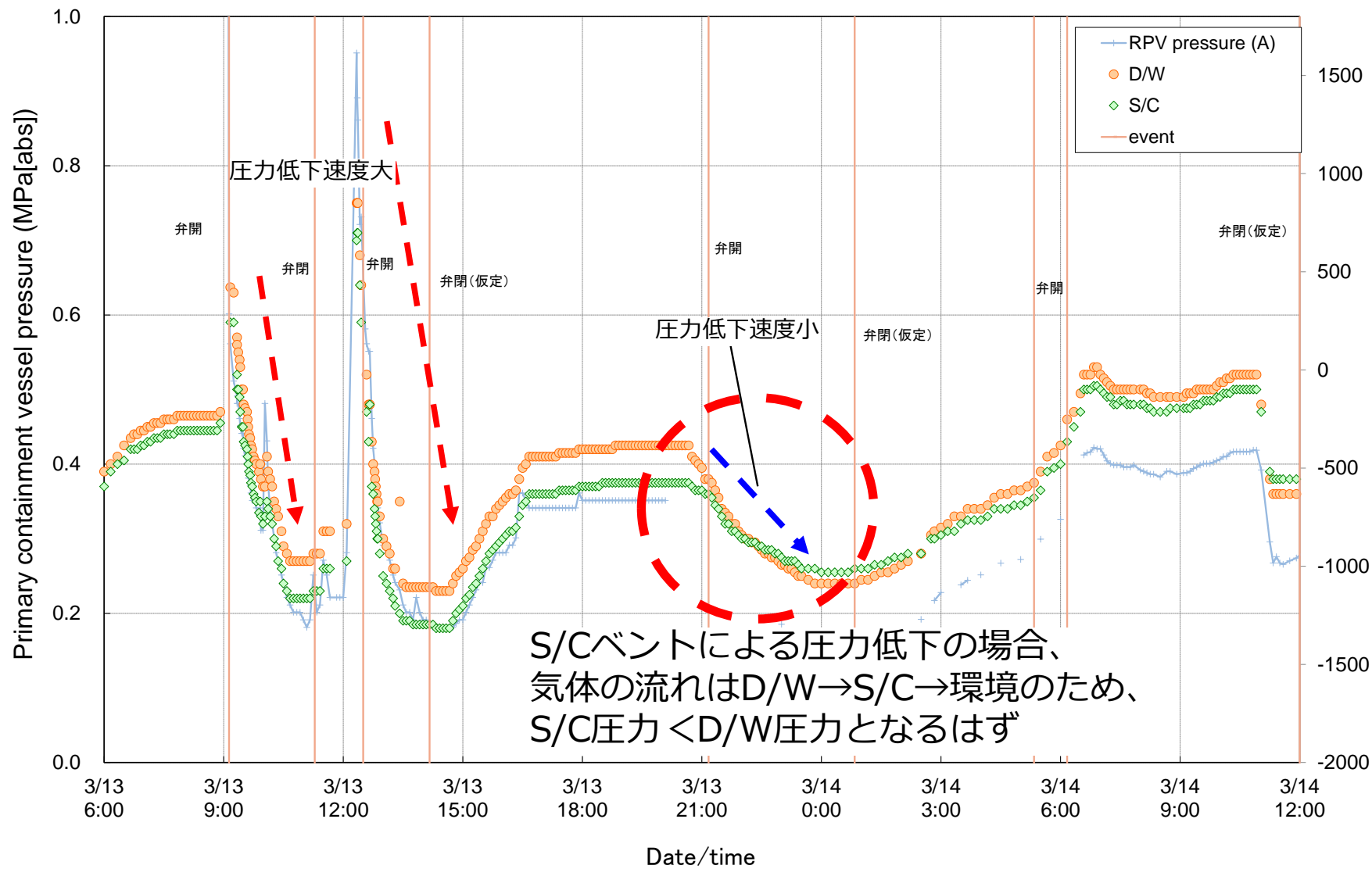


図 12 3号機の格納容器圧力の変化 (3月13日6時から3月14日12時)

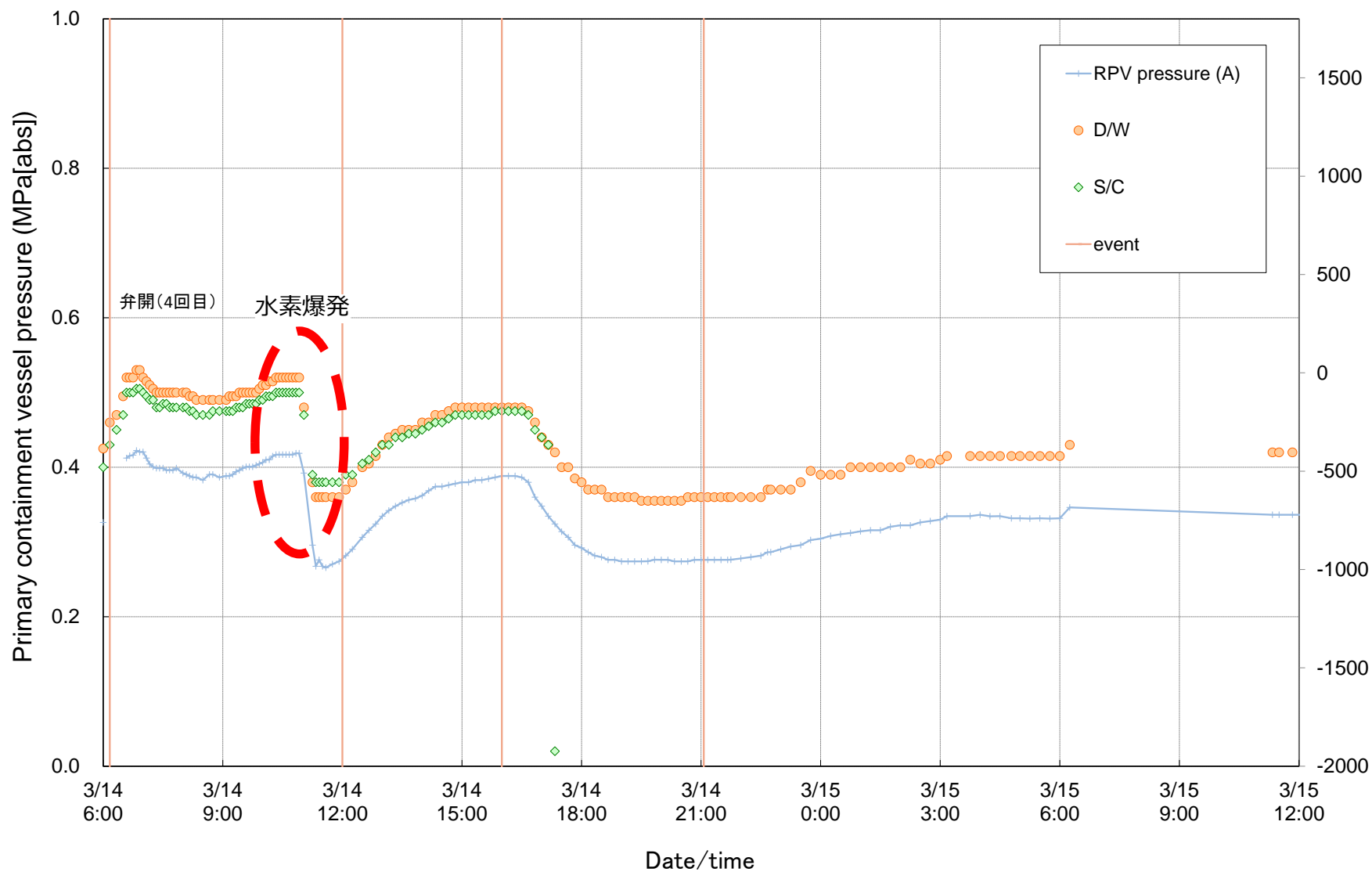


図 13 3号機の格納容器圧力の変化 (3月14日9時から3月15日12時)

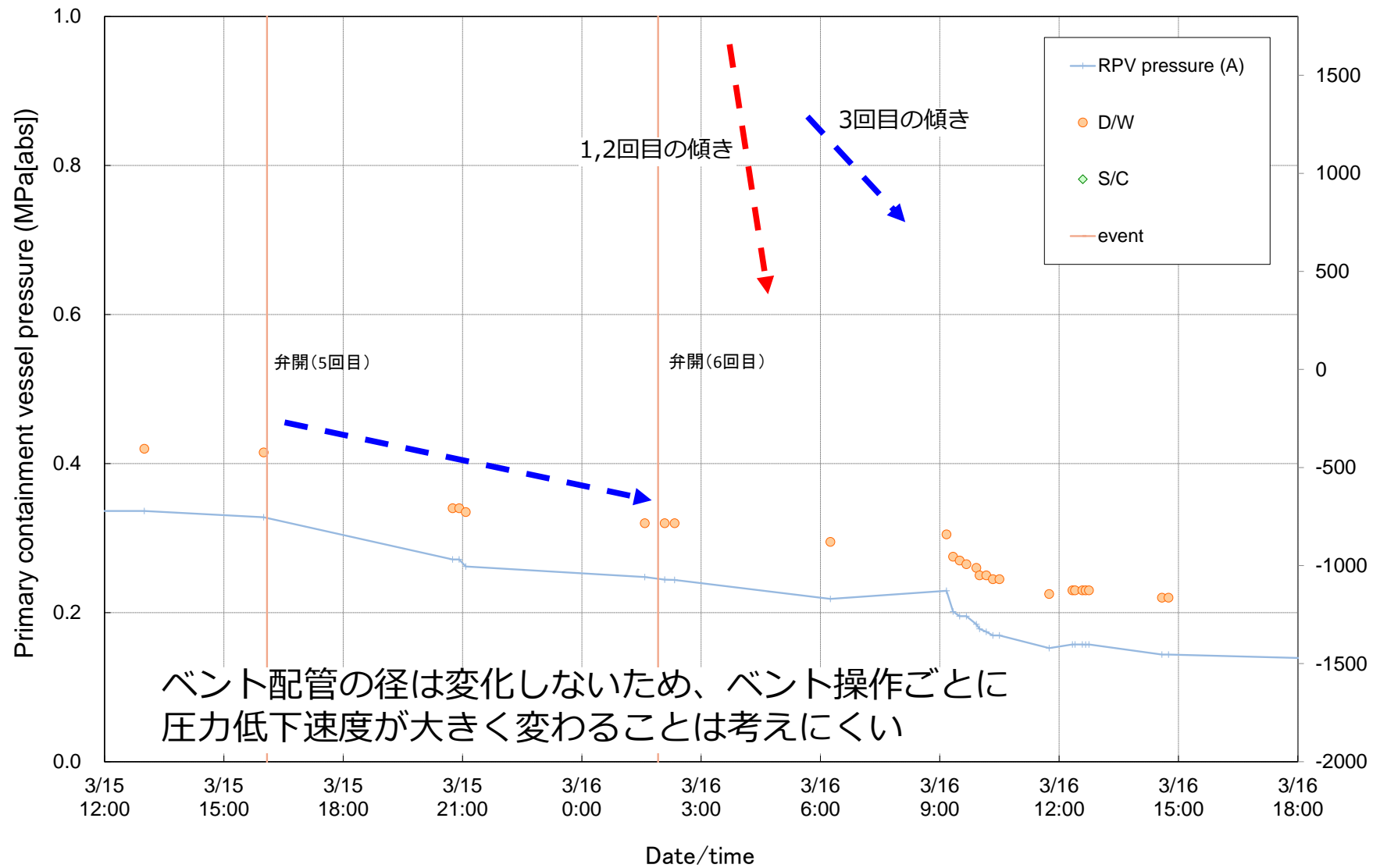


図 14 3号機の格納容器圧力の変化 (3月15日12時から3月16日18時)

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に、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。