

3号機 13日 2時頃から12時頃の原子炉圧力の挙動について

1. 検討対象の概要

福島第一原子力発電所3号機では、2011年3月13日2時42分に高圧注水系（HPCI）を手動停止して以降、原子炉圧力が上昇に転じ、5時間ほど約7MPaをキープしていたが、13日9時頃、急速に低下し1MPaを下回った。この一連の原子炉圧力の挙動（図1、図2）について整理する。以下に記載する推定は、9時頃の急速減圧が自動減圧系（ADS）機能の作動によるもの（原子炉圧力容器バウンダリの損傷ではない）として進めている。

なお、図2でチャートが印字している記録は、実際の時刻とずれている。これは、HPCI運転時、炉圧が1MPaに低下した際に、ナローレンジでの監視ができないことから、直流電源（DC）延命として電源をOFFしていることによる。HPCI停止後、炉圧上昇に伴い、電源をONとしている。

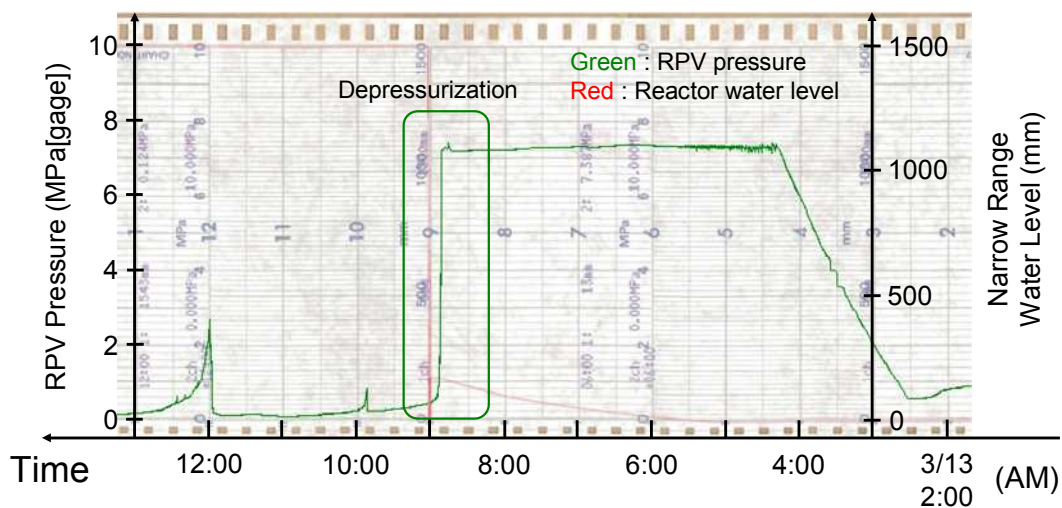


図1 原子炉圧力チャート（広帯域）

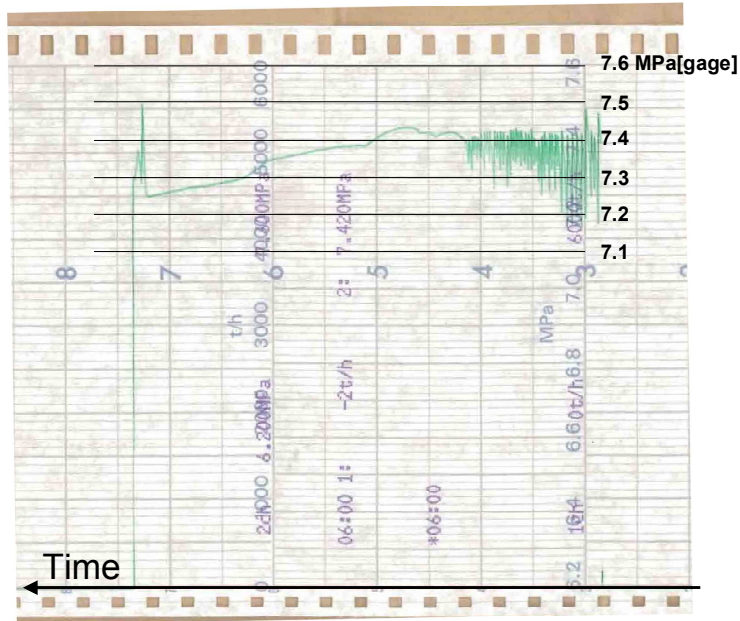


図2 原子炉圧力チャート（狭帯域）

2. HPCI 停止～炉圧上昇

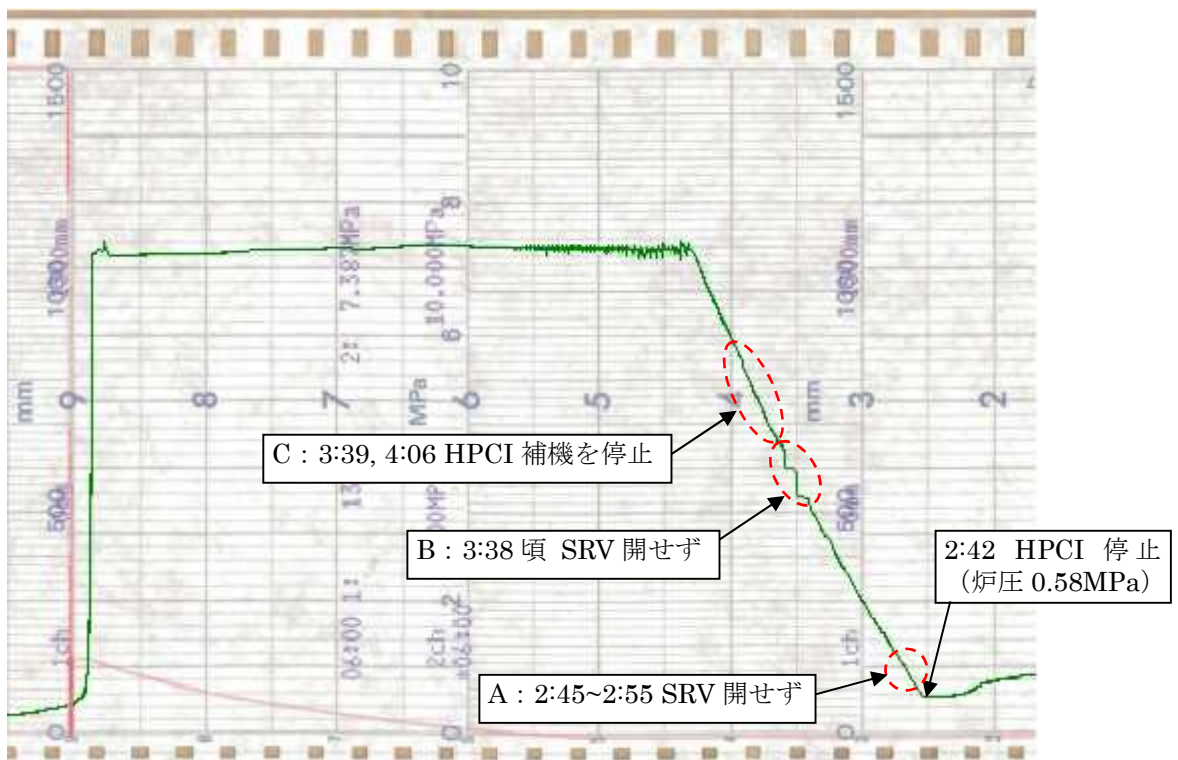


図3 原子炉圧力チャート（広帯域）

この頃実施された運転操作情報を以下に整理した。

- 13日2時42分 HPCI 手動停止。
- HPCI 停止直後の13日2時45分に主蒸気逃がし安全弁（SRV）（A）を開操作（逃

がし弁機能、ADS 機能) したが開せず。ただし、圧力が低下しなかったとの観測から開せずと判断 (以下同様)。

- その後、SRV 全弁を開操作 (逃がし弁機能、ADS 機能) したが開せず。
- 13 日 3 時 38 分、再度 SRV 全弁を開操作 (逃がし弁機能、ADS 機能) したが開せず。
- 13 日 3 時 39 分、HPCI の補助油ポンプ (AOP) を停止。
- 13 日 4 時 6 分、HPCI 復水ポンプを停止。

図 3 の A, B の段階で、SRV を開操作したにもかかわらず原子炉圧力が減圧されていない原因については、背圧となる格納容器圧力の影響、SRV の駆動に必要な窒素ガス供給の問題、電磁弁への電源供給の問題などが考えられる。

まず、図 3 の A, B の段階で、設計上 SRV の開動作に必要なとされている力学的条件 (SRV への窒素供給圧力、原子炉圧力、格納容器圧力) がどのような状況であったのか検証する (図 4)。

評価方法については、添付 2-12 の項目 5.5 にて詳述している。なお、評価にあたっては次の仮定をおいている。

- ①SRV の開度：全開を仮定
- ②D/W 温度：着目している期間にわたって 120°C 一定
- ③アキュームレータからの N₂ ガスの供給圧力：設計上の最大値
- ④SRV に N₂ ガスを供給する系統からのリーク：無
- ⑤D/W 圧力：計測データのない 13 日 2:00~4:40 の期間、13 日 4:45 の値 0.36MPa[abs]で一定

仮定②について、D/W 温度の実測値がないため、グラフの表示期間 (13 日 2:00~6:00) における MAAP 解析結果を参考に設定した (MAAP 解析の内容については、添付資料 3 参照)。また、仮定⑤について、D/W 圧力は 12 日 22:00 の 0.27MPa[abs]から 13 日 4:45 の 0.36MPa[abs]まで値がないため、SRV が開きにくくなる条件として、0.36MPa[abs]を設定した。

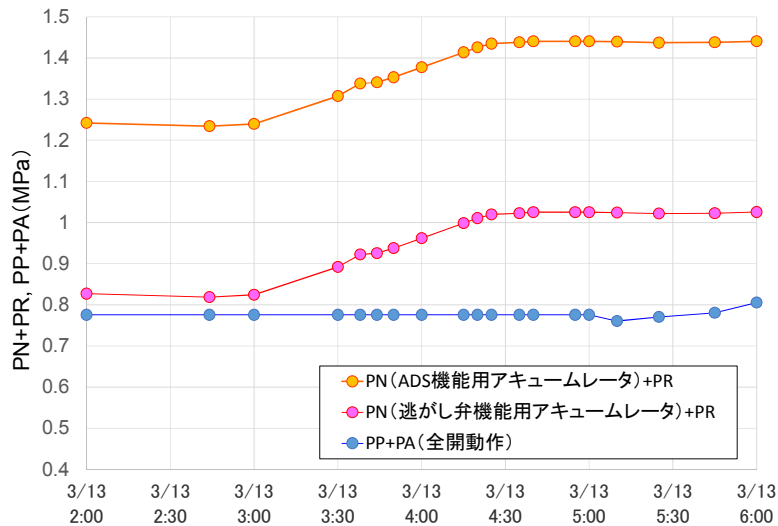


図 4 SRV への窒素供給圧力、D/W 圧力、原子炉圧力に基づく力学的要因の評価図

図 4 では、PN+PR（窒素ガスの供給圧力+原子炉圧力の作用力）が SRV を開ける側の力を、PP+PA（ドライウェル圧力+バネや弁体などの作用力）が SRV を閉じる側の力を意味しており、時系列でそれらの挙動を比較している。「PN+PR > PP+PA」であった場合に、SRV が設計上は開くこととなる。図 4 より、ADS 機能、逃がし弁機能ともに設計上は作動できた可能性がある。

なお、3 号機ではこれより前に ADS 機能を作動させていないこと、13 日 9 時頃には ADS 機能が働いたと考えられる原子炉圧力の低下が観測されていることから、この時点で ADS 用のアキュムレータには SRV の作動に必要な窒素ガスが十分に確保できていたと考えられる。したがって、ADS 機能であれば設計上作動できた可能性は高いと考えられる。（13 日 9 時頃の減圧挙動については、添付資料 3-3 参照）

一方、直流電源の枯渇状況について、C の段階で直流電源にて駆動していた HPCI の補機系（補助油ポンプや複水ポンプ）を停止している。13 日 9 時頃の原子炉減圧は ADS 機能が働いたことによるものと考えられ、その時には必要な直流電源が確保できていたと考えられる。これは、HPCI の補機系を停止したことによって直流電源の電圧が回復し、ADS 作動に必要な電圧が確保された可能性がある、それより前に SRV を操作した A、B の段階では電圧が不足していた可能性がある。

したがって、A、B の段階で全 SRV の逃がし弁機能および ADS 機能を作動させようとしたものの、原子炉圧力の減圧が確認できなかったのは、直流電源の枯渇により電圧が不足していたことによる可能性が考えられる。

なお、B の区間（原子炉圧力 4MPa 程度）において、原子炉圧力の上昇が留まり一定の圧力を示した後、垂直に圧力が上昇する挙動が 2 回観測されている。これは、仮に SRV がわずかながら開したことで上昇が留まった可能性もあるが、そ

の後垂直に圧力が上昇している点については説明がつかない。直流電源の低下によりチャートのペンが正常に作動しなかった可能性はあるが、現時点では原因を特定できていない。

3. SRV の動作～急速減圧前について

7MPa 強まで上昇した原子炉圧力は、図 5 からも分かるように、D の区間において SRV の動作を思わせる上昇下降を繰り返している。原子炉圧力は 7.4MPa を超えた辺りから下降していることから、表 1 の SRV 設定圧からすると、SRV(C) が動作していた可能性はある (5 章で別途検討)。これは、2 章で述べたように、3 時 39 分と 4 時 6 分に HPCI の補機系を停止させたことで、直流電源の容量に余裕が出来たことで SRV が動作した可能性がある。

その後、5 時 50 分頃から SRV 動作と思われる圧力の上下動が観測されなくなり、原子炉圧力が徐々に低下している挙動が観測されている。ここは、D の区間において作動していた SRV のアキュムレータ内の窒素を消耗しきったこと、あるいは電源容量が低下していったこと (5 時 08 分に原子炉隔離時冷却系 (RCIC) の止め弁 (DC125V) が操作できなくなったとの記録も存在する。)、あるいは水位の低下により蒸気発生量が極端に低下したこと、原因は明確ではないが何らかの理由で原子炉圧力の急激な上昇下降が観測されなくなったと考えられる。上昇下降の振幅が徐々に小さくなっていることから、窒素を消耗した可能性が高いと考えられるが、蒸気発生が停止するわけではないので、何らかの形で発生する分の蒸気を逃さない限り圧力は上昇することから、SRV が何度も繰り返し動作することによって弁体と弁座の接触面が荒れて隙間ができた可能性があり、水位低下による蒸気発生量の低下と共に原子炉圧力が緩やかに低下していったものと考えられる。

なお、E の区間で圧力の低下が速まっているポイント F がある。この頃の原子炉水位を図 6 に示す。燃料域水位計の値に注目すると、13 日 7 時 40 分の少し前あたりから水位の低下が有効燃料頂部 (TAF) -3000mm で止まっている。(水位計の測定下限値は TAF-3700mm) この水位は補正後の水位 (※) (図 6 の灰色プロット) で BAF+1m 程度であるが、この頃注水をしていないことから、圧力が微減する中、水位低下が止まる要因はない。従って、水位計の基準水柱内の水が一部蒸発して水位を高めに指示しており、実際の水位は燃料域水位計の計測下限値である有効燃料底部 (BAF) 近辺より下がっている可能性が高い。つまり、原子炉水位は BAF 程度 (あるいは以下) まで減少していると考えられる。従って、炉水が直接加熱されず、蒸気発生量が減少したことにより、圧力の低下速度が上昇した可能性がある。このような状況では、燃料の過熱が進んでおり、場合によっては一部の燃料溶融が発生していた可能性がある。

(※) 補正後の水位は、測定値のない格納容器温度を MAAP での解析結果を利用して計算されている。この解析結果は、水位の低下を過小評価しており、事故進展を遅く評価していたことがわかっていることから、実際の格納容器温度は解析結果より高かったものと考えられる。そのため、この補正では水位は過大評価される傾向にある。

E の区間については、政府事故調の報告書にて、SRV 以外の原因で压力容器から圧力が抜ける箇所が生じた可能性（原子炉压力容器バウンダリの損傷の可能性）が高いとしており、前述のとおり燃料溶融の可能性もあることから、炉内計装の破損など、原子炉圧力バウンダリの損傷の可能性も否定されるものではない。

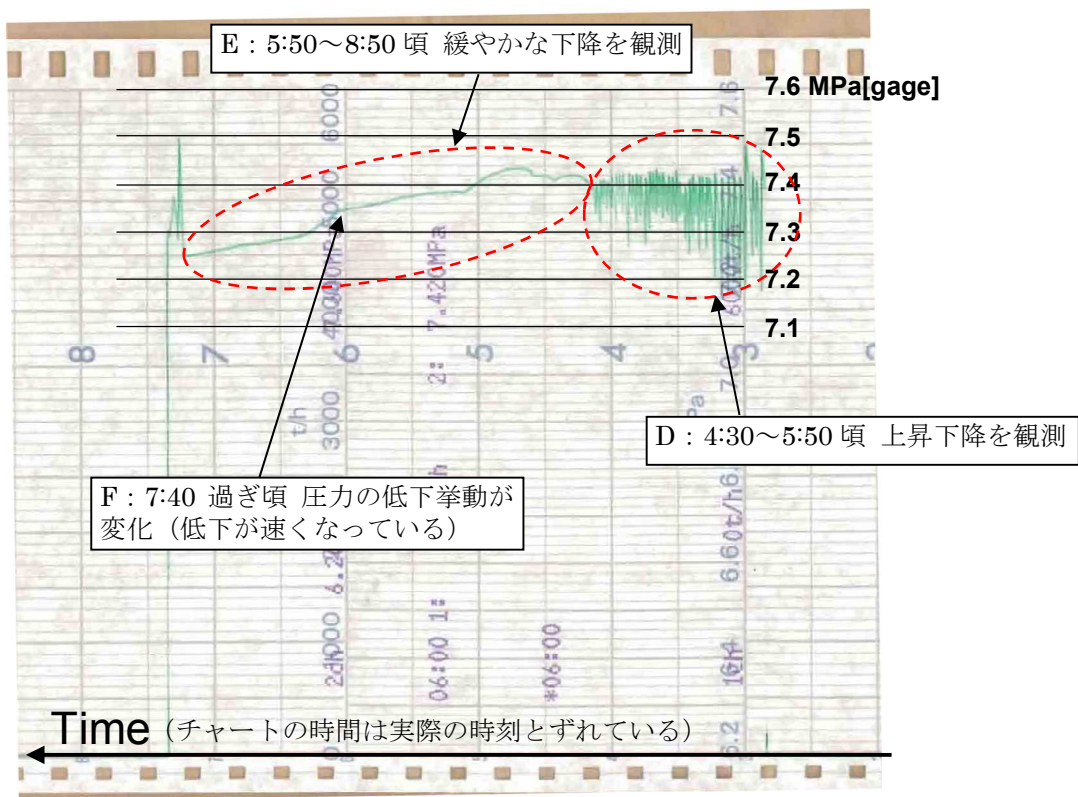


図5 原子炉圧力チャート（狭帯域）

表1 SRVの逃がし弁機能と安全弁機能の作動圧力 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

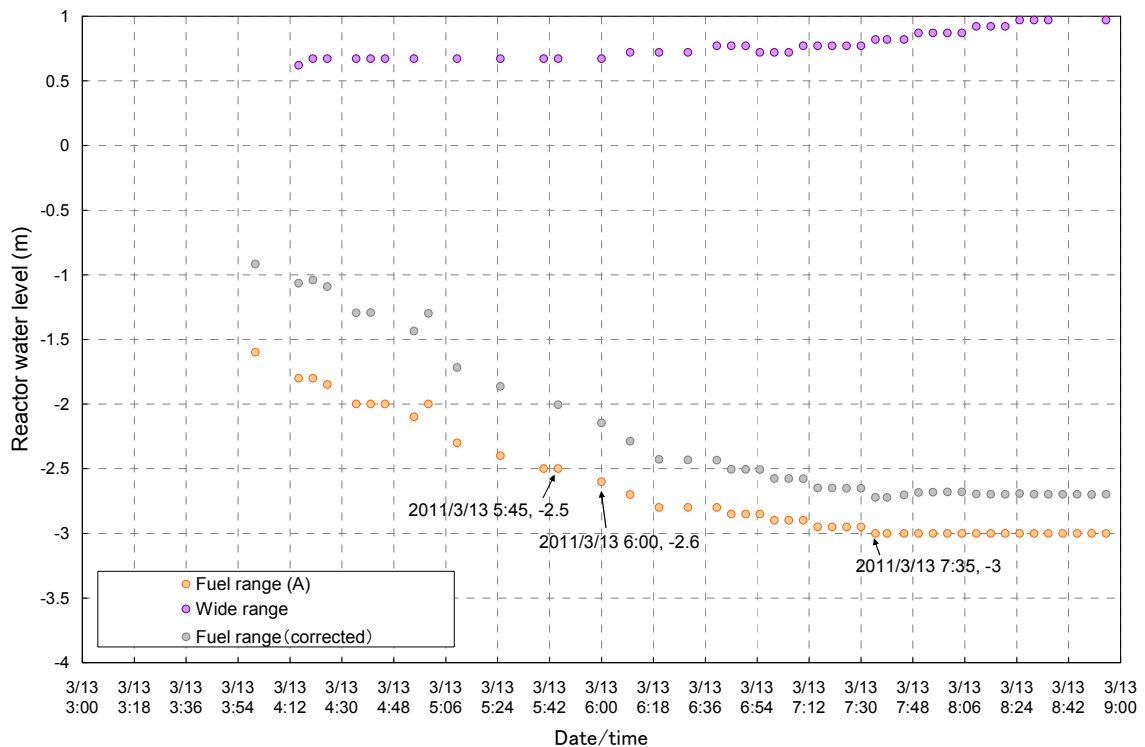


図6 原子炉水位の変化

4. 減圧時の挙動について

減圧時の挙動（図7に示すGの区間）については次のとおり。それまで緩やかな低下傾向を示していた原子炉圧力は、突如7.5MPa[gage]程度まで急激に上昇している。その後一旦低下したものの、もう一度急激に上昇し（今度は7.38MPa[gage]程度）、再び低下していく途中から急激な低下挙動を示している。

最初のピークについては、原子炉への注水がなくなってしばらく時間が経っていること、図6の水位の変化をみると、この頃水位はBAF以下にある可能性が高いことから、溶融した燃料の一部が圧力容器底部に移行した際に蒸気発生が起これ、圧力が上昇した可能性がある。表1をみると、SRV(A), (E), (G)については作動設定圧力が7.51MPa[gage]であり、これらの弁のいずれかが動作した可能性がある。実際、急速減圧が生じた際にはSRV(A), (G)のランプが点灯したとの記録がある。

また、その後の急激な圧力の低下については、ADS機能が作動したことによる可能性がある。ADS機能は、圧力抑制室(S/C)の圧力が上昇したことで作動した(S/C圧力の上昇をRHRポンプ吐出圧力計が検知したことで作動した)と考えられ、「原子炉圧力が7.51MPa[gage]まで上昇」→「SRVが作動したことである程度の蒸気がS/Cに移行」→「S/Cの圧力が上昇」→「ADS作動」となった可能性がある。(この減圧挙動に関する考察は別レポートにて詳細に検討を実施している。)

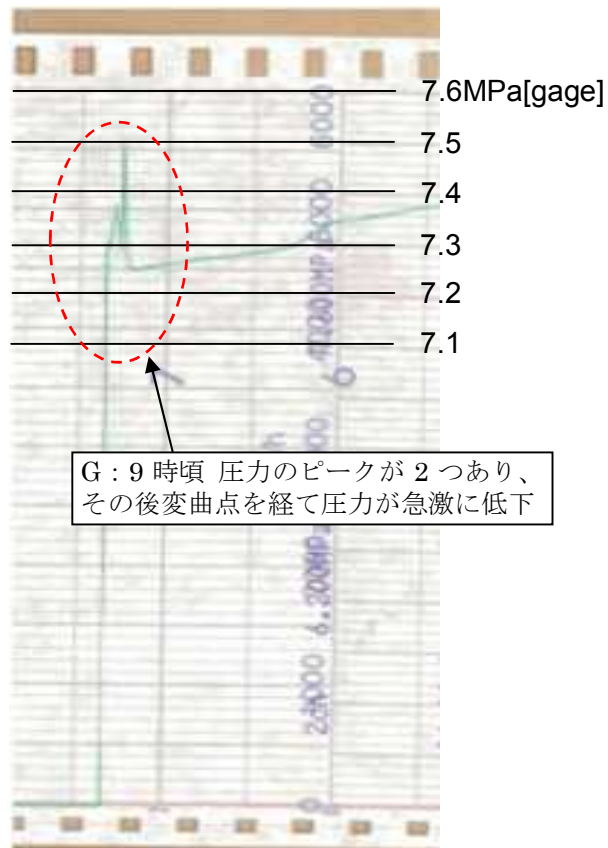


図 7 原子炉圧力チャート（狭帯域）

5. 図 4 の D の区間の挙動について

この区間、SRV の作動によるものと考えられる細かな圧力の上昇下降がみられるが、SRV の設定値（吹き出し、吹き止まり）とは若干異なる挙動を示している。

図 8 に過渡現象記録装置のデータ（地震直後のデータが記録されている）を示す。上 4 つのグラフが SRV 作動の記録で、一番下が原子炉圧力（狭帯域）の推移である。赤い線で補足したように、基本的に SRV の開操作により原子炉圧力が低下しているのがわかる。SRV(C)が動作している間は、SRV の設定値の間を原子炉圧力が上下していると思われる挙動を示している。その後、SRV(G)や(A)が作動した時には、SRV が開していないタイミングで、吹き出し吹き止まりの設定値よりも細かな圧力変動が観測されている。これは、設定値の低い SRV(C)に作動要求が発信されているものの、アキュムレータ内の窒素が完全に消費しきっていないことから、中間開のような状態になったと推定される。

図 5 に示す D の区間についても、このように消費しきっていない窒素が SRV に供給されたことで、細かな圧力変動を示していた可能性がある。

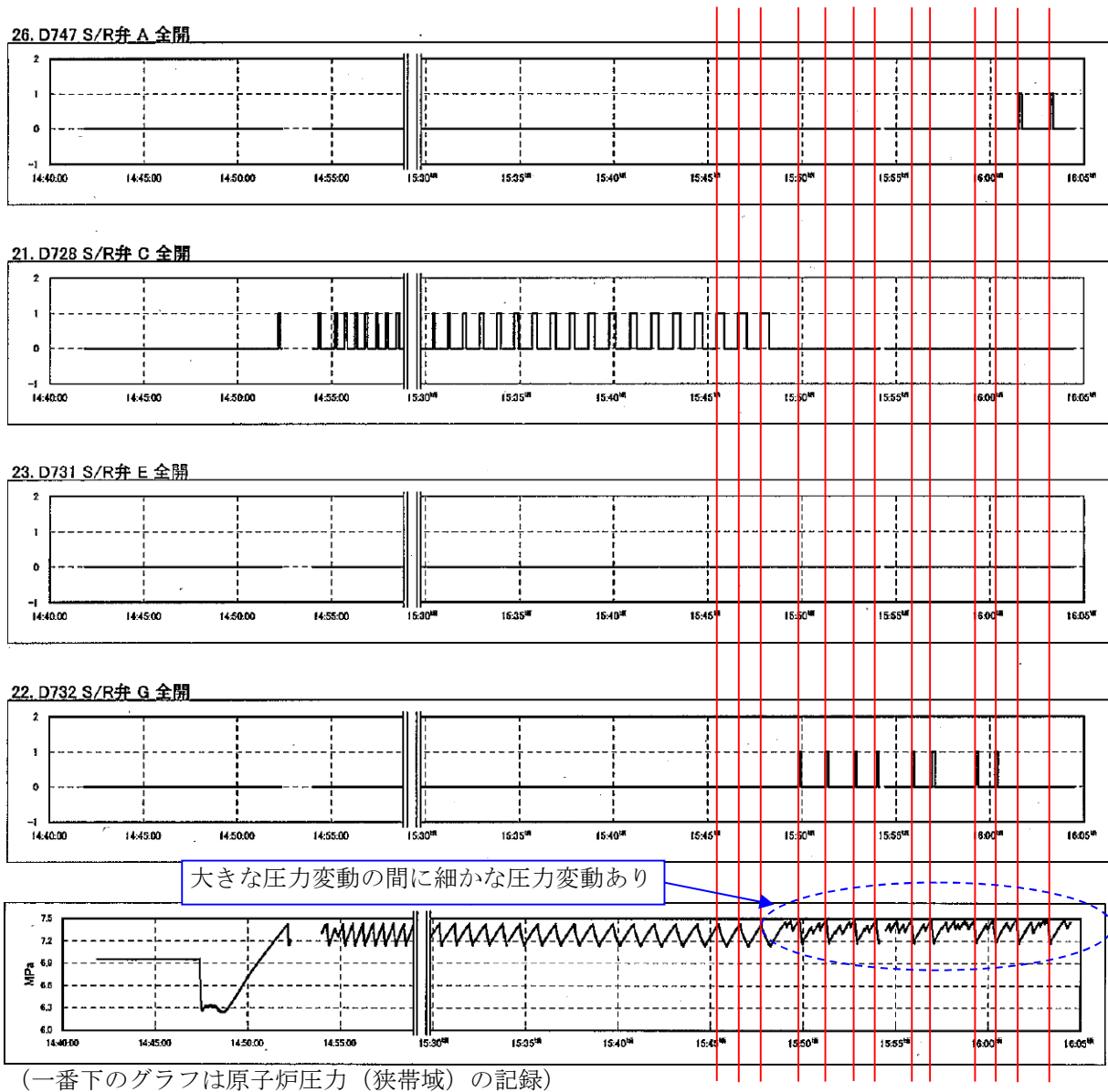


図 8 過渡現象記録装置のデータ

6. 13日9時過ぎから12時頃までの挙動について

13日9時過ぎから12時頃までの原子炉圧力の挙動を図9に示す。また、この頃実施された運転操作情報を以下に整理した。

- 13日9時の減圧以降、バッテリー10個を直列に接続する作業が完了し、SRVの制御盤に繋ぎこんだ。
- 13日9時50分頃、SRV制御盤の操作スイッチにて、SRV(A)を開操作(ADS機能の電磁弁を励磁させる操作)。
- 13日12時頃、原子炉圧力の上昇を確認。SRVの制御盤を確認すると、表示灯が消灯しており、原因を調査したところ、バッテリーの配線外れを発見。配線を復旧して、SRVを開操作。

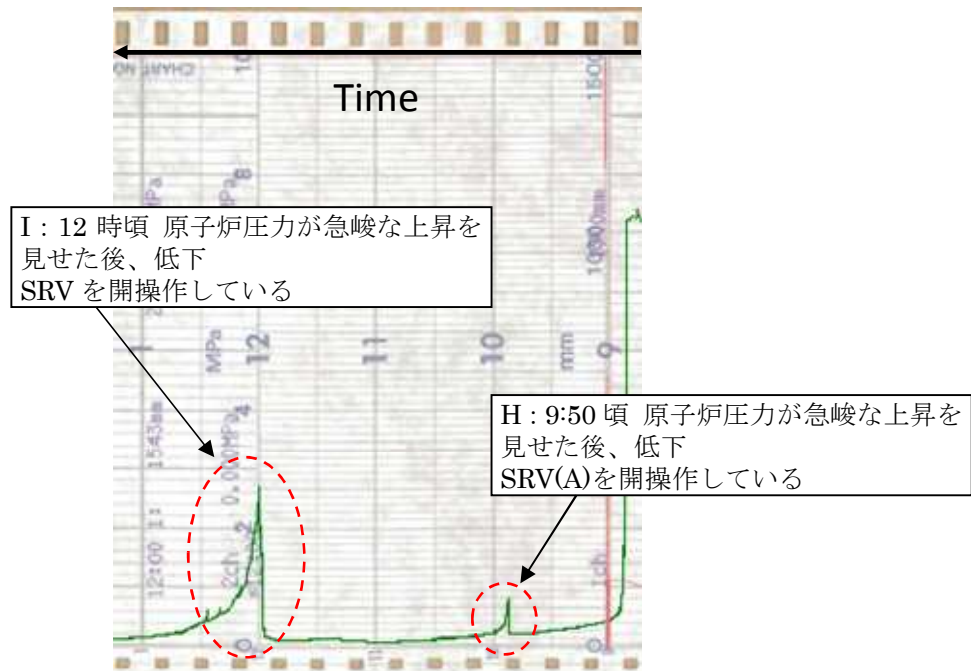


図9 原子炉圧力チャート（広帯域）

図10に示すように、3号機では13日4時～9時頃、燃料域水位計の指示値はTAFを下回っている（広帯域水位計の指示値は、注水が無いにも関わらず上昇しており、水位計配管内の水が蒸発したことで過大に指示している可能性が高い）。9時以降の燃料域水位計の指示値は、それ以前に比べて急激に上昇している。13日9時25分から消防車による淡水注入を試みており、原子炉圧力が1MPa以下に減圧されたことで原子炉内にある程度注水された可能性は考えられる。ただし、13日13時以降、水位計の指示値が一定となっていることから、水位計配管内の水が蒸発したことによる指示値の変化もあわせてとらえた可能性があり、指示値通りの水位であった可能性は低いと考えられる。

水位が十分でない中SRVが閉じた場合には、図9にみられる急峻な圧力上昇とはならないと考えられ、HおよびIの期間では、燃料の一部が下部プレナムに移行するなど、原子炉圧力容器内で急激な蒸気および水素の発生があったものと考えられる。単純にSRVが閉じたことに伴う圧力上昇であれば、図3に示すHPCI停止後の圧力上昇速度と類似するものと考えられる。

なお、13日9時頃の原子炉圧力の減圧挙動について、減圧速度から、SRVが6弁開（ADS機能の作動）したことによるものと考えられるが、Iの期間における原子炉圧力の減圧速度は、9時頃の減圧速度に比べてゆるやかである。したがって、9時頃にADS機能が作動することで6弁開をしていたとしても、この頃には6弁全てを全開状態に維持できていなかったものと考えられる。上述のように、この頃原子炉水位が低下していた可能性は高く、炉心の損傷に伴い原子炉圧力容器内の温度は高温になっていたと考えられることから、いつの時点からかは不明であるものの、原子炉圧力容器からD/Wへ気体の漏えいが発生していた可能性も考え

られる。I の期間で原子炉圧力がゆるやかに低下したことについては、操作通り SRV が開した可能性、原子炉圧力容器内の気体の発生がおさまりに徐々に D/W へ気体が漏えいしていった可能性が考えられる。

また、期間 H にみられる原子炉圧力の減圧速度は、13 日 9 時頃の減圧速度とほぼ同じであり、ADS 機能が作動した後、SRV の開状態をこの頃まで維持できていた可能性は考えられる。

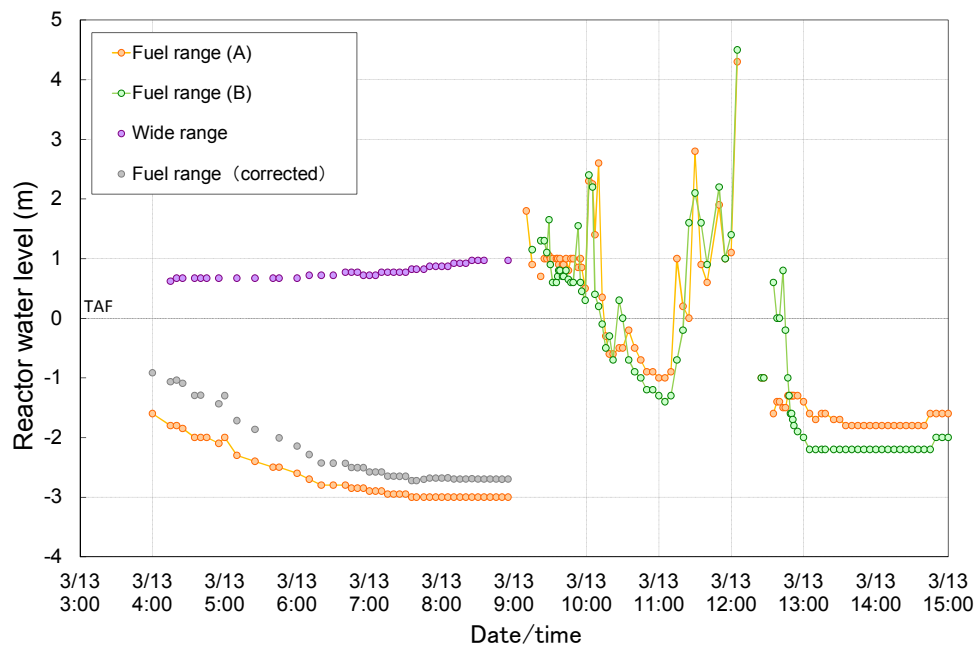


図 10 原子炉水位変化 (13 日 3:00~15:00)

7. まとめ

急速減圧前後の原子炉圧力の挙動について検討した。依然未解明の事項については、以下に整理する。

- ・ A の区間と B の区間はいずれも SRV の開操作を試みているが、原子炉圧力の挙動に違いがある。
- ・ B の区間で、圧力の上昇が緩やかになった後、上昇するときの速度が速い。
- ・ G の区間で、2 回目のピークの挙動については、説明できていない。

上述の課題に対しては、引き続き検討を進めていく。

以 上