

3号機 13日 2時頃から9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。

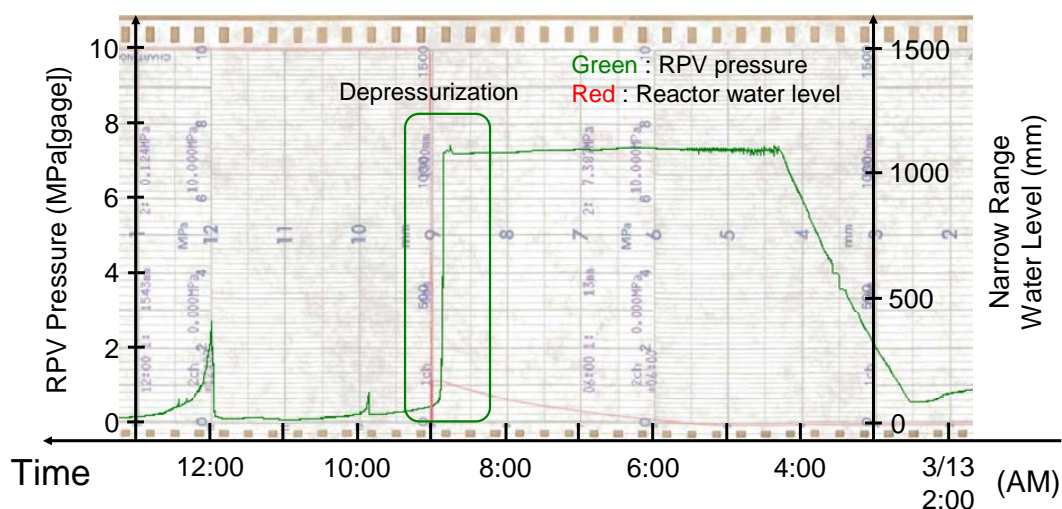


図1 原子炉圧力チャート（広帯域）

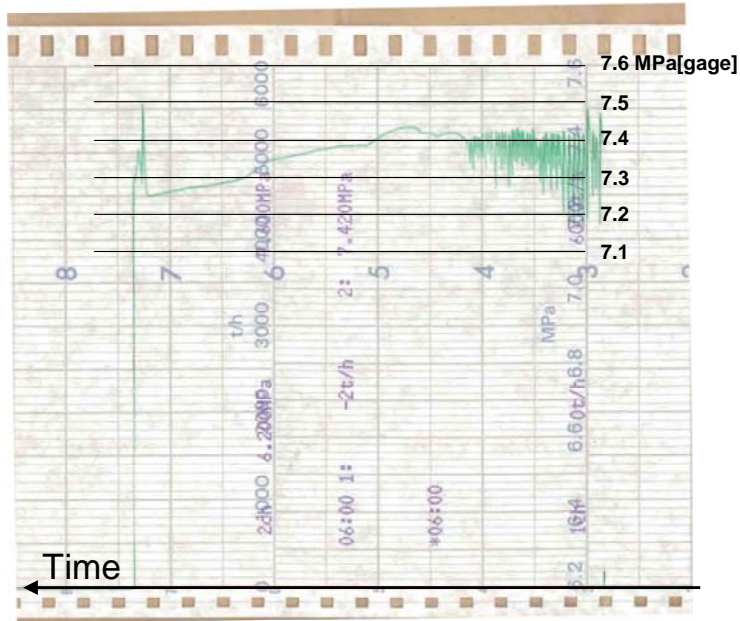


図2 原子炉圧力チャート（狭帯域）

2. HPCI 停止～炉圧上昇

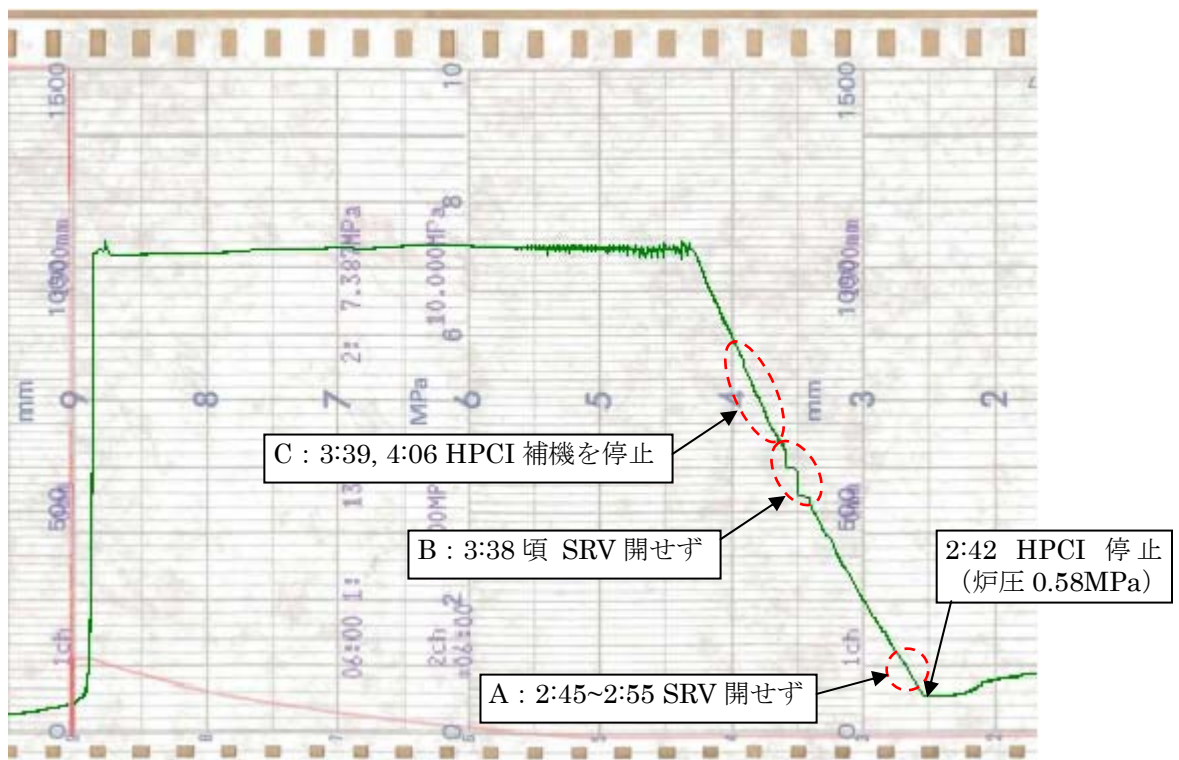


図3 原子炉圧力チャート（広帯域）

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 において、A の区間では SRV 操作により原子炉圧力が変化した傾向はみられないが、B の区間では変化がみてとれる。これについては、設計上 SRV の開動作に必要なとされている炉圧 (※) が A の時には足りなかったが、B の時には十分あったことで動作した可能性がある。

また、電源については、C の段階で HPCI の補機系を停止しているため、それより前の A、B の段階では不足していた可能性がある。

(※) SRV において、弁体と弁棒の接続は弁体に偏芯荷重が加わらないよう軸方向には固定していない。SRV を原子炉が冷温状態 (無負荷) で開操作すると、弁体自身は引き上がり弁座面に乗ったままである。残った弁体を全開するために必要な弁体前後の差圧は、主蒸気逃がし安全弁機器設計仕様書によると 3.5kg/cm^2 ($=343\text{kPa}$) である。13 日 3 時前後の格納容器圧力は計測されていないものの、前後の時間で計測できている値から推定すると 200kPa [gage]程度はあったと考えられる。したがって、原子炉圧力は 543kPa [gage]程度必要となる。

ただし、A の区間で既に原子炉圧力が 1MPa 程度まで上昇しており、必要な差圧を確保できていた可能性があること、B の区間 (原子炉圧力 4MPa 程度) において SRV がわずかながら開したことで上昇が留まったとしても、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こと等、説明できていない挙動もあり、上述のシナリオもあくまで可能性の一つといえる。また、逃がし弁機能を使用する場合、設定圧が低い側の SRV については、駆動用の窒素が枯渇していた可能性が高いことから、全ての SRV で同じ挙動であったとは考えにくい。

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 4 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 5 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 5 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 以外の原因で圧力容器から圧力が抜ける箇所が生じた可能性（原子炉圧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。

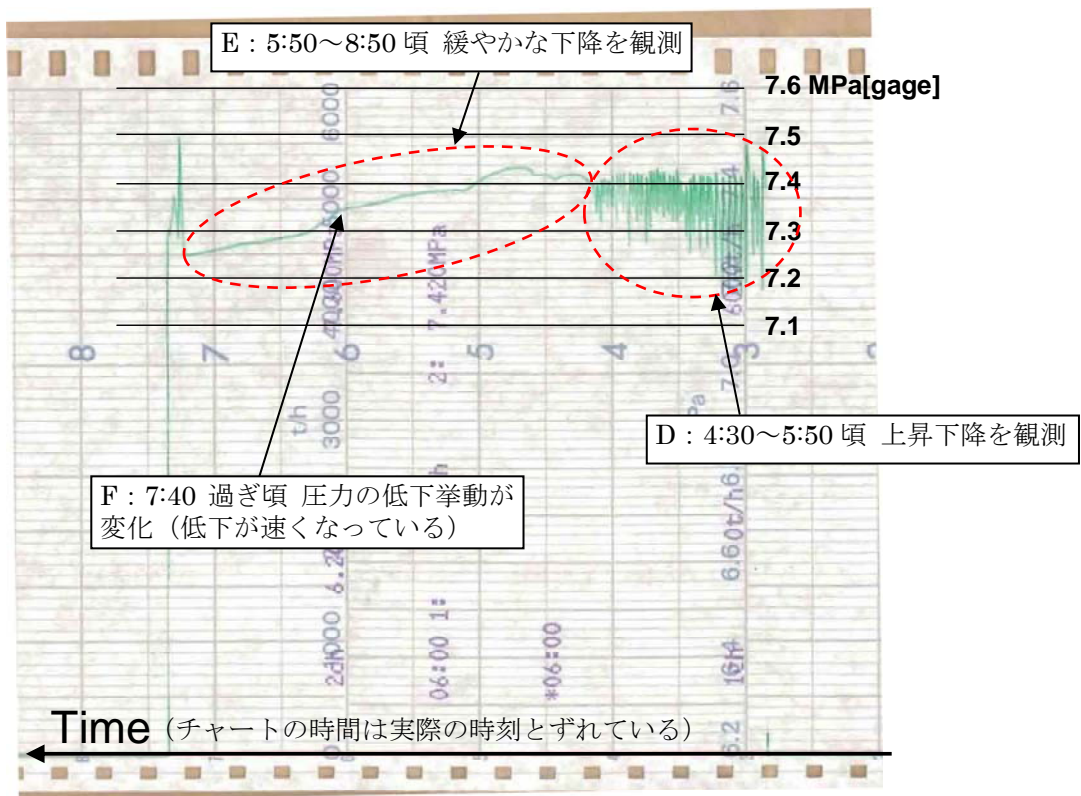


図4 原子炉圧力チャート (狭帯域)

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

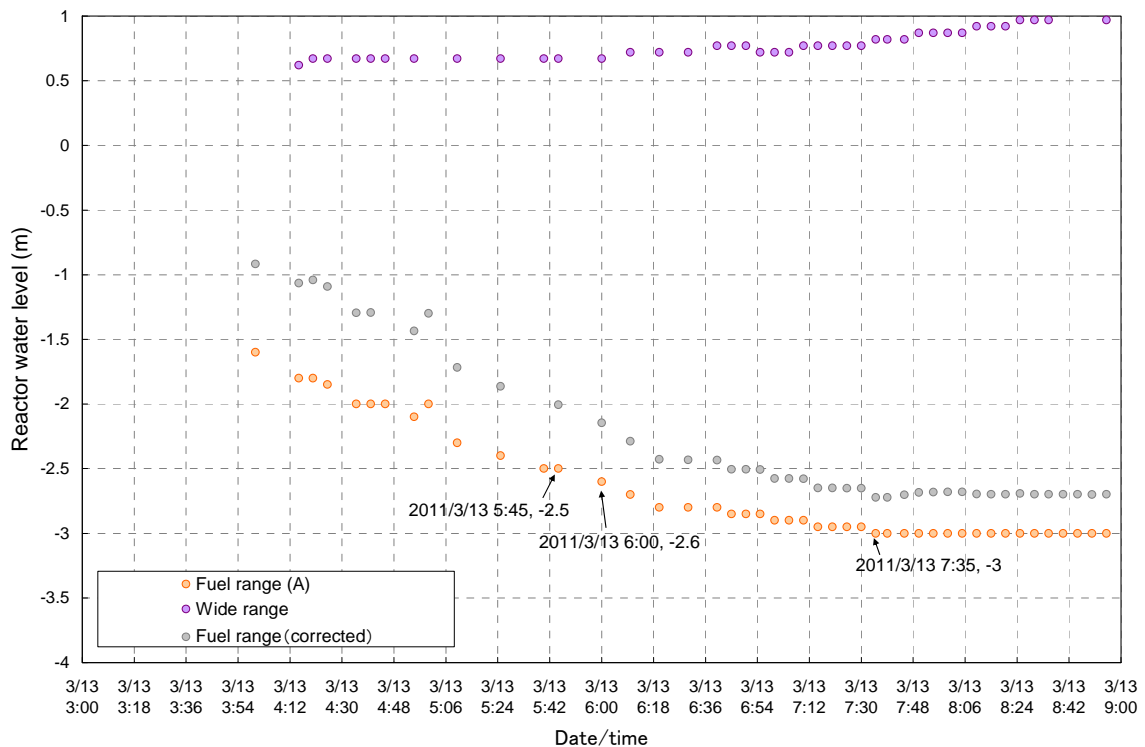


図5 原子炉水位の変化

4. 減圧時の挙動について

減圧時の挙動（図6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5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り、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。)

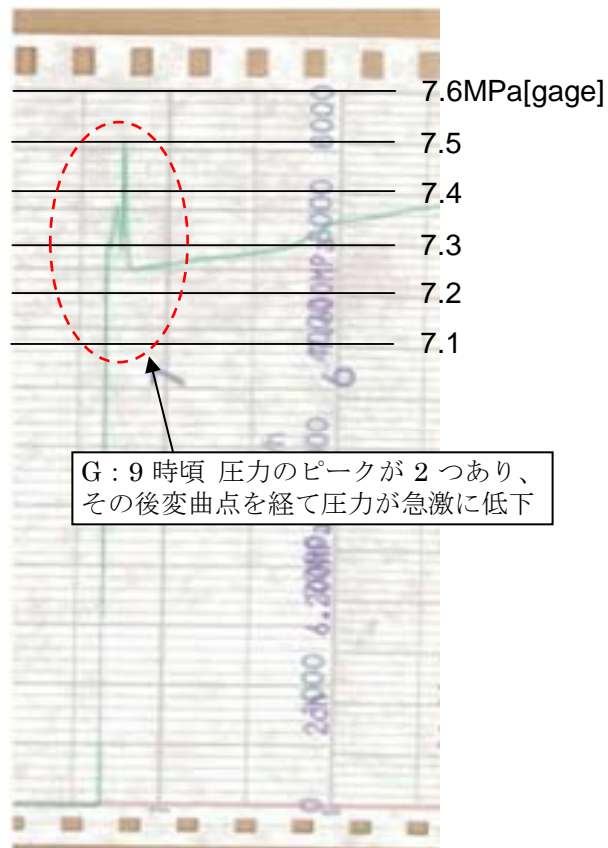


図 6 原子炉圧力チャート（狭帯域）

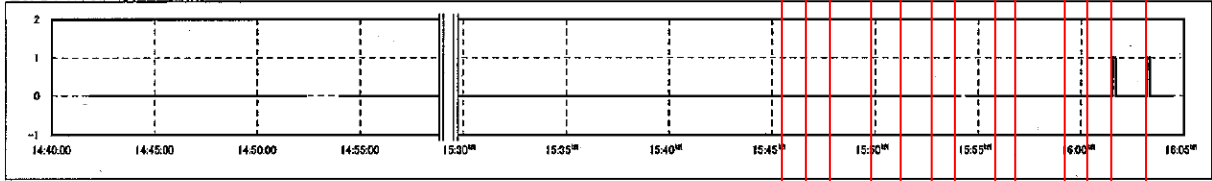
5. 図 4 の D の区間の挙動について

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。

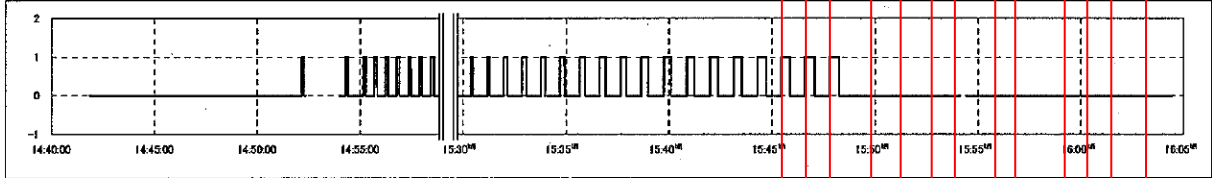
図 7 に過渡現象記録装置のデータ（地震直後のデータが記録されている）を示す。上 4 つのグラフが SRV 作動の記録で、一番下が原子炉圧力（狭帯域）の推移である。赤い線で補足したように、基本的に SRV の開操作により原子炉圧力が低下しているのがわかる。SRV(C)が動作している間は、SRV の設定値の間を原子炉圧力が上下していると思われる挙動を示している。その後、SRV(G)や(A)が作動した時には、SRV が開していないタイミングで、吹き出し吹き止まりの設定値よりも細かな圧力変動が観測されている。これは、設定値の低い SRV(C)に作動要求が発信されているものの、アキュムレータ内の窒素が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 4 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。

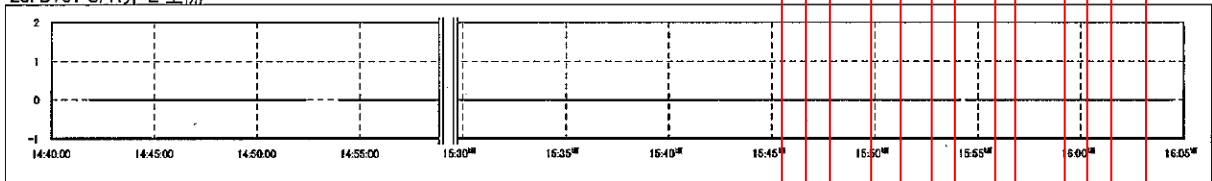
26. D747 S/R弁 A 全開



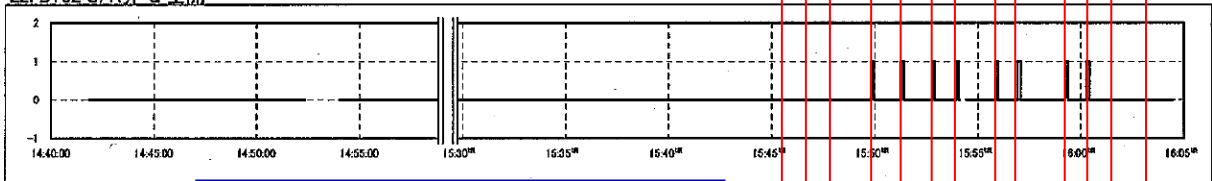
21. D728 S/R弁 C 全開



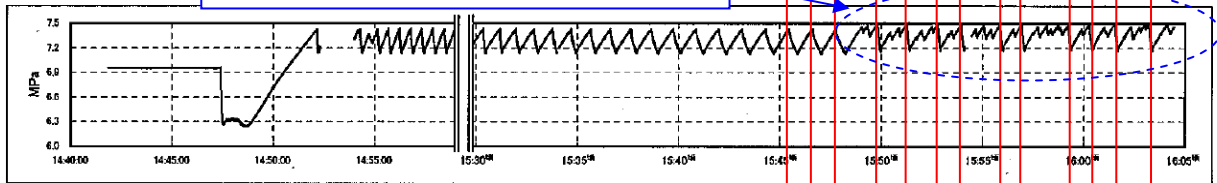
23. D731 S/R弁 E 全開



22. D732 S/R弁 G 全開



大きな圧力変動の間に細かな圧力変動あり



(一番下のグラフは原子炉圧力(狭帯域)の記録)

図 7 過渡現象記録装置のデータ

6. まとめ

急速減圧前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 の区間で、SRV が開するのに必要な原子炉圧力があると考えられるにもかかわらず、SRV の開操作時に B の区間でみられるような圧力の変化がない。
- ・ 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