

3号機 RCIC の停止原因について

1. 現象の概要と検討課題

3号機では、原子炉自動スクラム後の3月11日15:05に原子炉隔離時冷却系(RCIC)を手動起動し、15:25に原子炉水位高信号によりRCICが自動停止していたところで津波により全交流電源喪失に至った。津波到達後も直流電源が使用可能であり、RCICを16:03に再度手動起動し原子炉への注水を継続したが、3月12日11:36に中央制御室の状態表示灯等により、RCICが自動停止したことを確認している。その後、現場にて停止状態を確認し、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。RCICは全交流電源喪失時の設計条件の4時間以上、運転を継続できたものの、事故進展挙動を明らかにするため、また、機器や運転手順の改良等更なる安全性向上に資するため、実測データやプラントの設計情報をもとに、3号機のRCICの停止原因について検討する。

2. RCIC 関連操作と現場状況について

表1に3号機3月12日11:36のRCICトリップ及び再起動操作までのRCIC関連操作及び観測事実の時系列を示す。

<3月11日16時3分RCICの手動起動>

津波到達直前の3月11日15:25にRCICは原子炉水位高により自動停止していたが、津波到達後も直流電源が使用可能であったため、16:03にRCICを手動起動した。これにより原子炉への注水を継続し、主蒸気逃がし安全弁(SRV)とRCICにより原子炉圧力・水位が制御された。

この際、運転員はRCICの起動停止によるバッテリー消費を避けること、及び、原子炉水位確保を安定して行うため、復水貯蔵タンク(CST)を水源として、炉注水ライン及びテストラインの両ラインを通水するようにRCIC制御盤にて弁操作し、ライン構成を実施した。また、原子炉水位が緩やかな変化となるように、テストラインの弁の開度調整や流量調整器(FIC)にて、水位調整範囲を定めて流量調整を実施した。

図1に、この時の運転状態を表したRCICの系統概略図を示す。

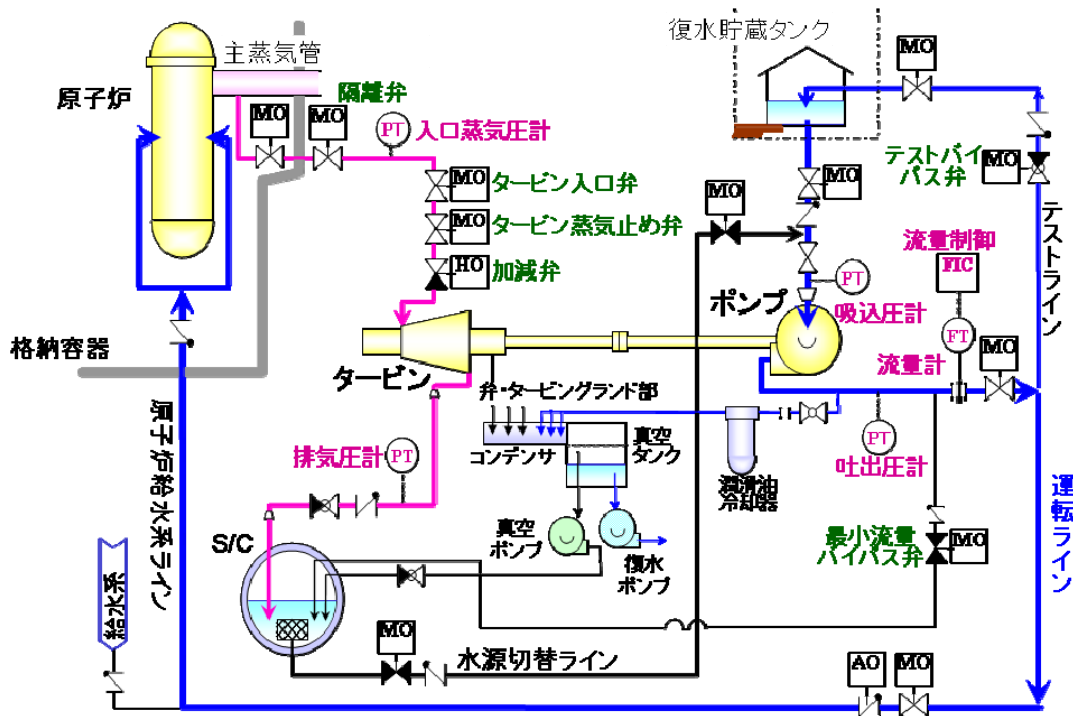


図1 RCIC 系統概略図

<3月12日11時36分RCICの自動停止>

3月12日11:36に、中央制御室のRCICの状態表示灯が停止を表示、流量や吐出圧力計などの指示値が0となり、RCICが停止したことを確認した。中央制御室のRCIC制御盤にて弁のリセット操作を実施し、再起動操作を試みるも、起動後すぐに停止することから、運転員が現場確認に向かった。HPCI室側からRCIC室に入室、両室内ともに床面には踝ほど（10～20cm程度）の水が溜まっているものの汗ばむような状況ではなかった。また、RCIC室天井から水がぼたぼた垂れて蒸気止め弁などにかかっていたがタービンやポンプ、配管等に異常はなかった。

現場で停止状態を確認し、蒸気止め弁の機械機構部に異常はなかったことから、中央制御室で再度弁のリセット操作・再起動操作をしたが、起動後すぐに蒸気止め弁が閉まり停止した。

RCIC停止の状況確認や起動操作の対応に追われる中、3月12日12:35に原子炉水位低により高圧注水系（HPCI）が自動起動し、原子炉への注水を再開した。

表 1 3号機 RCIC 関連操作と観測事実

時刻	内容	参考
3/11 14:47	原子炉自動スクラム	(1)
3/11 14:48	非常用ディーゼル発電機自動起動	(1)
3/11 15:05	RCIC 手動起動	(1)
3/11 15:25	RCIC 自動停止 (原子炉水位高)	(1)
3/11 15:38	全交流電源喪失	(1)
3/11 16:03	<p>RCIC 手動起動</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 運転員は RCIC の起動停止によるバッテリー消費を避けること及び原子炉水位確保を安定して行うため、炉注水ライン及びテストラインの両ラインを通水するように RCIC 制御盤にて操作し、ライン構成。原子炉水位が緩やかな変化となるように、テストラインの弁の開度調整や FIC にて、水位調整範囲を定めて流量調整。 ➤ バッテリー節約のため、監視計器や制御盤、計算機について、監視及び運転制御に最低限必要な設備を除き、負荷の切り離しを実施。監視計器については、A 系 B 系と二重化されていることから片系ずつ使用しバッテリー消費量の低減を図った。また、中央制御室の非常灯や時計の切り離しや、別室の蛍光灯を抜くなども実施。 	(1)
3/12 11:36	<p>RCIC 自動停止</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 中央制御室 RCIC 制御盤にて、RCIC 状態表示灯が停止表示、RCIC 流量計、吐出圧力計などの指示値が 0 となり、RCIC の停止を確認。 	(1)
～	<p>RCIC 再起動操作</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 中央制御室 RCIC 制御盤にて弁のリセット操作を実施し、再起動操作を試みるも、起動後すぐに停止することから、運転員が現場確認に向かう。 ➤ HPCI 室側から RCIC 室に入室、両室内ともに床面には踝ほど(10～20cm 程度)水が溜まっているものの、汗ばむような状況ではない。RCIC 室天井から水がぼたぼた垂れて蒸気止め弁などにかかっていたがタービンやポンプ、配管等に異常なし。 ➤ 現場で停止状態を確認。蒸気止め弁の機械機構部に異常はなかったことから、中央制御室で再度弁のリセット操作・再起動操作をしたが、起動後すぐに蒸気止め弁が閉まり停止。 	(1)
3/12 12:35	HPCI 自動起動 (原子炉水位低)	(1)

(1) 福島原子力事故調査報告書、東京電力株式会社、平成 24 年 6 月 20 日

<RCIC 蒸気止め弁のトリップ機構とリセット操作について（参考）>

RCIC タービントリップには、電気式トリップ機構と機械式過速度トリップ機構の2つのトリップ機構があり、異常時にはタービン蒸気止め弁を閉として蒸気を遮断する。図2にタービン蒸気止め弁とトリップ機構の概要図を示す。

電気式トリップは、トリップ信号（インタロックによる自動トリップ信号又は手動トリップ信号）が入ると蒸気止め弁駆動部に付いているトリップソレノイドが励磁してラッチ機構を外す。ラッチ機構が外れると弁シリンダー内にセットされているばねが伸長することで、蒸気止め弁を全閉とする。

機械式トリップはタービンの非常用调速機の作動により、過速度トリップ機構のタペットが押し上げられ、その動作によりラッチ機構と接続しているロッドが、スプリングの力によって動き、ラッチ機構を外す。電気式トリップの作動は RCIC の運転制御と同様、直流電源が必要であるが、機械式トリップは直流電源がなくても作動することが可能である。

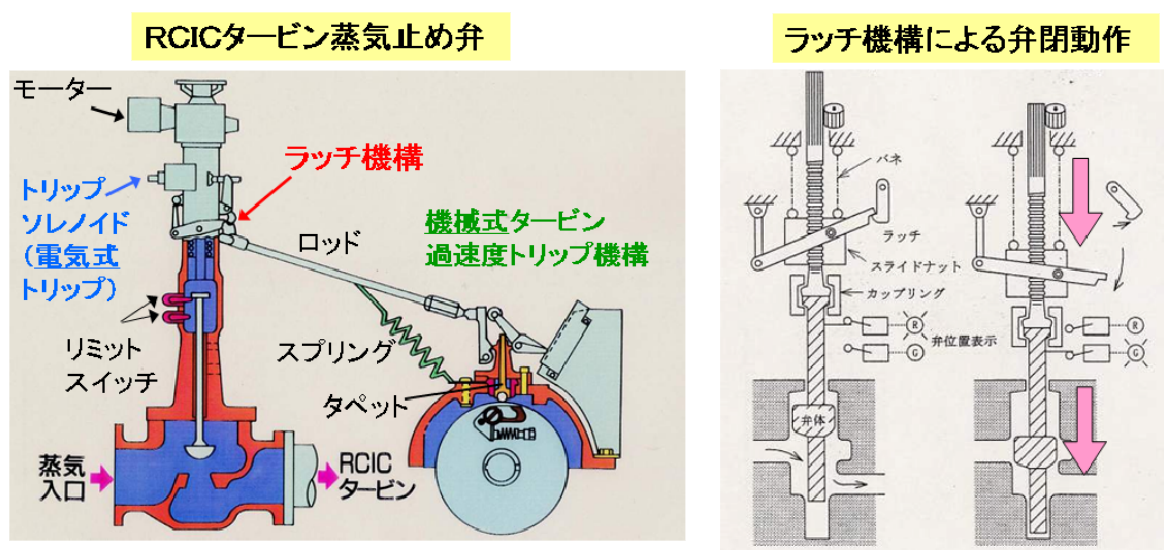
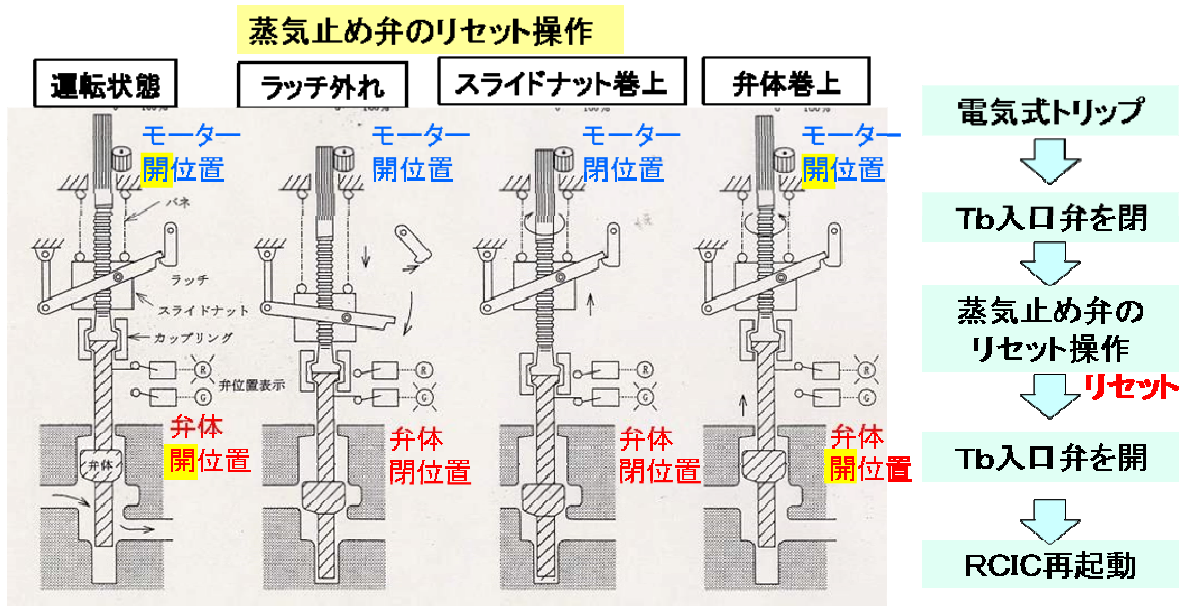


図2 RCIC タービン蒸気止め弁とトリップ機構の概要図

つづいて、電気式トリップによりラッチ機構が外れた後の、蒸気止め弁のリセット操作の概要図を図3に示す。トリップした状態の蒸気止め弁は電動部が開状態の位置のままなので、中央制御室の RCIC 制御盤にて蒸気止め弁を全閉操作し、モーターにて電動部を全閉位置まで回転させる。これによりスライドナットが巻き上げられ、ラッチレバーがラッチにかみ合う。この状態で電気回路的にはリセット状態となって、モーターで弁の開閉が可能となる。この後、RCIC 制御盤にて蒸気止め弁を全開操作し、弁体を全開位置とすることで、リセット完了となる。

以上のリセット操作は中央制御室の RCIC 制御盤からの遠隔操作により実施されるものであるが、機械式トリップが作動した場合は、さらに、現場での機械式トリップ機構の復旧操作が必要となる。また、電気式トリップのインタロック条件が解消されていない場合は、リセットできずに再度止め弁が閉となる。



3. 直流電源の状況について

図 4 に 3 号機直流電源と RCIC、HPCI 関連負荷の構成図を示す。1、2 号機と異なり、3 号機の蓄電池や直流電源盤はサービス建屋の中地下階に設置されていたため、津波による機能喪失を免れた。

図 5 に直流電源負荷の運転状況の概略図を、表 2 に事象の時系列と各負荷への供給状況を示す。電気式トリップに必要な RCIC 論理回路やトリップ信号の直流電源は蓄電池 DC125V-3A (分電盤 3A-1) から供給されている。3 月 12 日 11:36 の RCIC 自動停止の時点で、中央制御室にて RCIC の運転制御やリセット操作、原子炉水位計の監視ができており、蓄電池 DC125V-3A が枯渇する徴候は見られていないことから、電気式トリップの作動に必要な直流電源も確保されていたものと考えられる。

蓄電池 DC125V-3A の容量 (10 時間放電率換算で 1200AH) は、外部電源喪失後の非常用 D/G の起動や、分電盤の遮断器の作動といった瞬時的な負荷のほか、RCIC や中央制御室の制御盤、直流照明の 4 時間分の継続運転を考慮して算定されたものである。津波による全交流電源喪失後、RCIC は約 20 時間運転を継続していたことになるが、直流電源の設計上の余裕 (実際の消費電流は設計値よりも小さいこと等) や、直流照明等の不要な負荷の切り離し、原子炉水位高信号による RCIC トリップの回避などによって、この時点まで蓄電池は枯渇することなく運転・制御が継続されたものと考えられる。

ただし、3 月 12 日午後以降は、RCIC 復水器の真空ポンプのトリップや計器の停止等、蓄電池 DC125V3A の枯渇の徴候が確認されており、不安定な状況であったものと推定される。

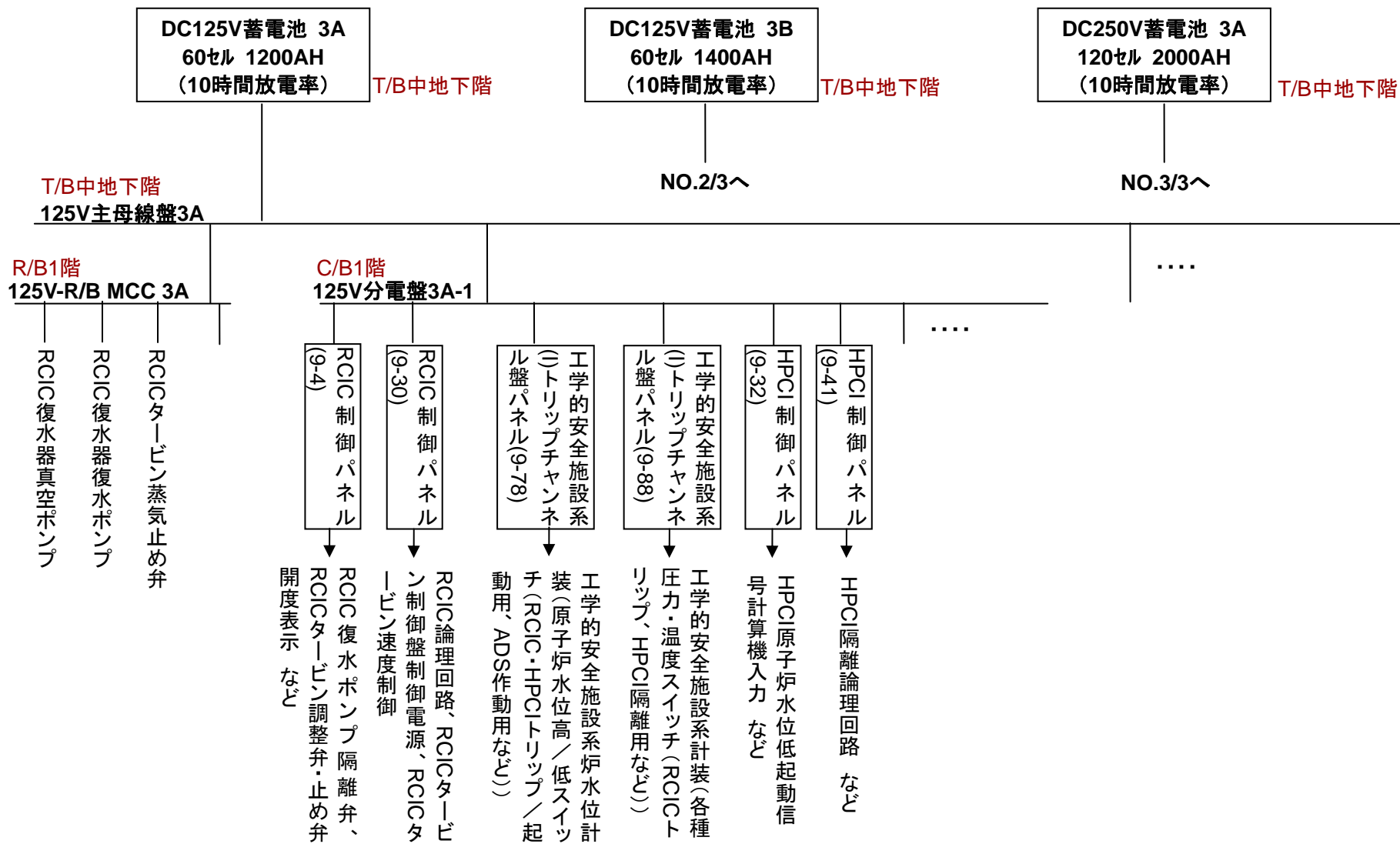


図4 直流電源とRCIC/HPCI関連負荷の構成図 (No.1/3)

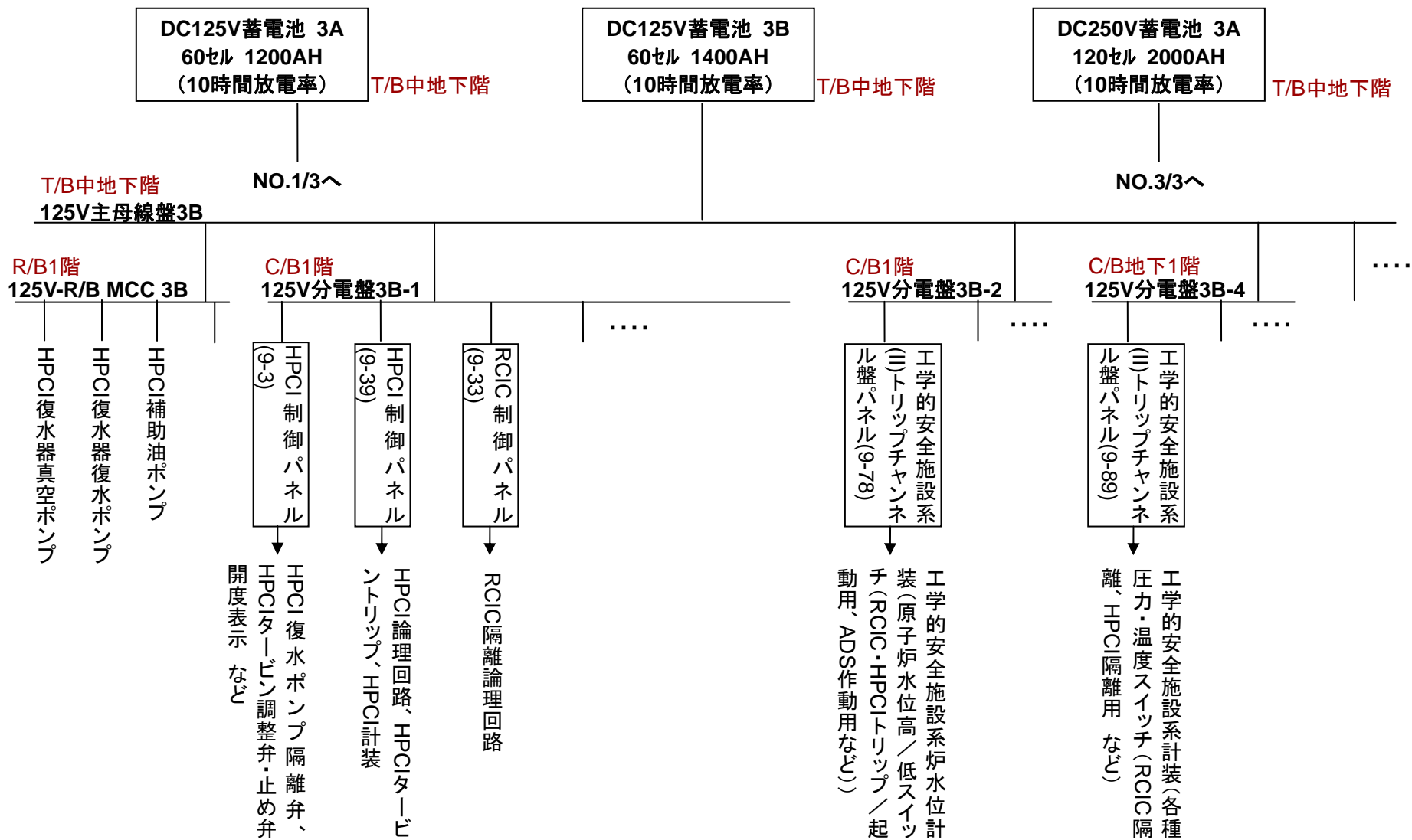


図 4 直流電源と RCIC/HPCI 関連負荷の構成図 (No.2/3)

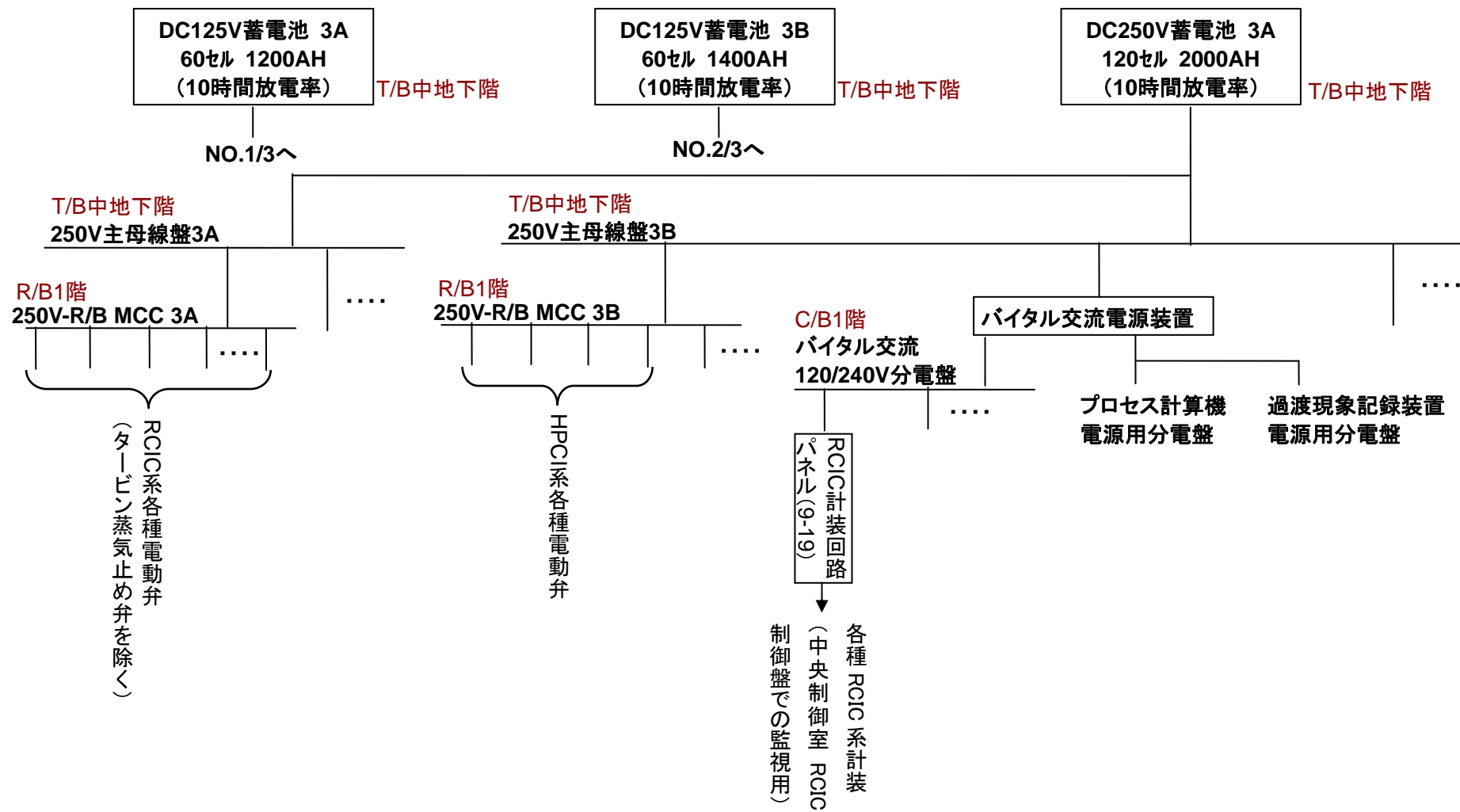


図 4 直流電源と RCIC/HPCI 関連負荷の構成図 (No.3/3)

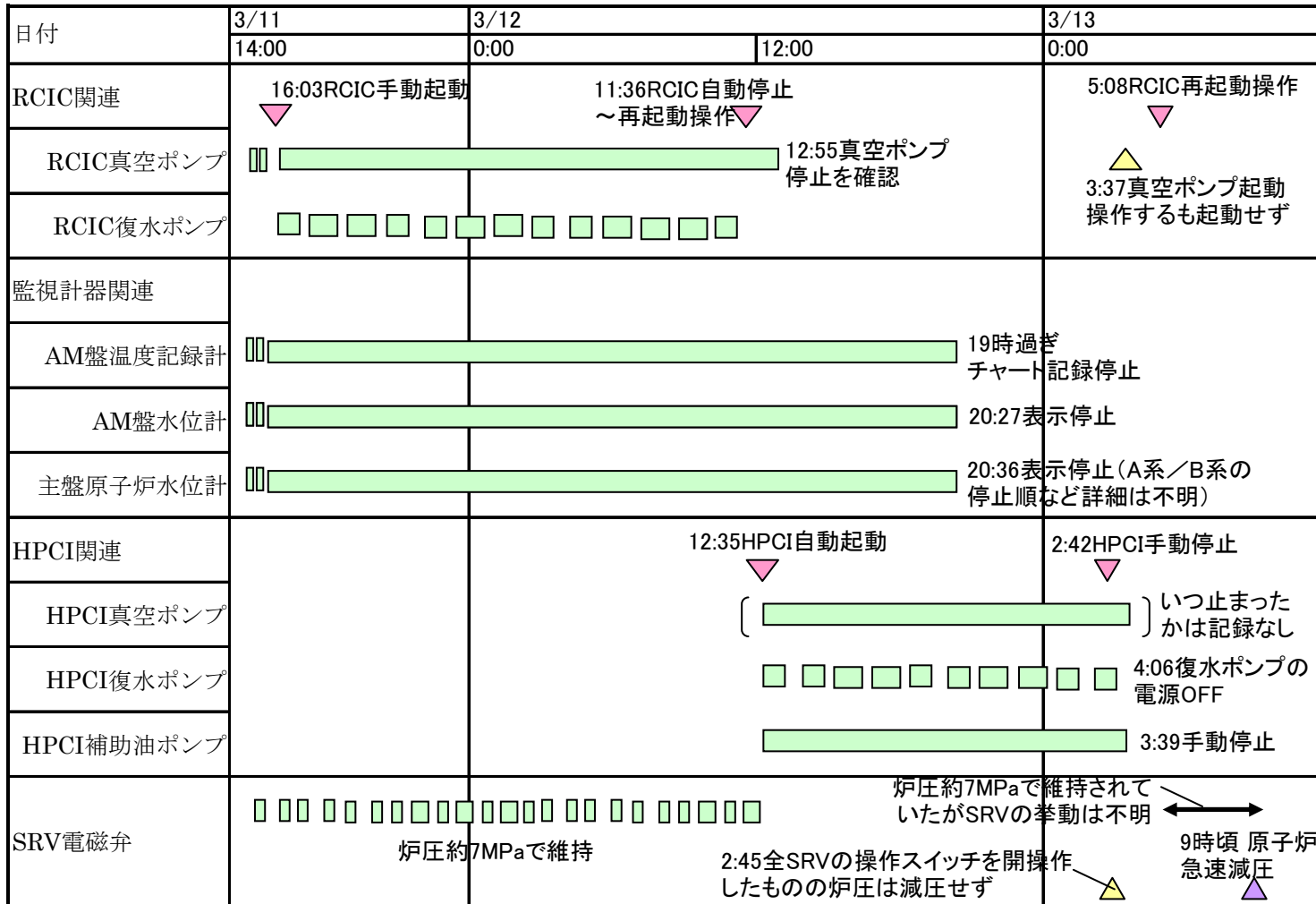


図 5 直流電源負荷の運転状況概略図

表 2 各負荷への直流電源の供給状況

日時	イベント	蓄電池 DC125V-3A			蓄電池 DC125V-3B			蓄電池 DC250V-3A			備考・推定内容 (○は各負荷の供給電源先を示す)
		主母線盤 3A			主母線盤 3B			主母線盤 3A	主母線盤 3B		
		MCC 3A	分電盤 3A-1	分電盤 3A-2	MCC 3B	分電盤 3B-1	分電盤 3B-2	MCC 3A	MCC 3B	バイタル	
3/11 16:03	RCIC 手動起動	○	○					○			
—	中央制御室にて関連パラメータを監視しながら FIC にて流量調整									○	バイタル分電盤については、RCIC 関連パラメータの監視等を除き、不要な負荷を停止
3/12 11:36	RCIC 自動停止		○*1)								
	RCIC 流量計や吐出圧力計指示値 0									○	
—	RCIC リセット操作・再起動操作	○						○			
—	RCIC 再起動直後に停止		○*1)								*1)この時点で直流電源の枯渇の徴候は確認されておらず、電気式トリップに必要な電圧が確保されていたものと推定
3/12 12:35	HPCI 自動起動 (原子炉水位低)				○	○			○		
～ 3/12 20:00 頃	監視計器表示 ・AM 盤格納容器温度記録計 チャート ・AM 盤 D/W 圧力計、S/C 圧力計、S/C 水位計 ・原子炉水位計 (広帯域、燃料域)		○	○							3/12 11:36 の時点では、各計器は動作継続しており、直流電源枯渇の徴候は確認されず 3/12 20:00 頃以降、計器の停止等枯渇の徴候が確認されており、不安定な状況であったものと推定

4. 停止原因の検討について

4. 1 電気式トリップの可能性について

3月12日11:36のRCIC自動停止について、前述の通り中央制御室での監視・操作や現場での確認の状況により、

- ・ トリップ機構を有するタービン蒸気止め弁が閉となって停止したこと
- ・ 中央制御室にてタービン蒸気止め弁のリセット操作が実施できたこと
- ・ RCICの運転制御に必要な直流電源が生きていたこと

から、機械式タービン過速度トリップは作動しておらず、電気式トリップが作動した可能性が高い。

電気式トリップのインタロック条件を図6に示す。

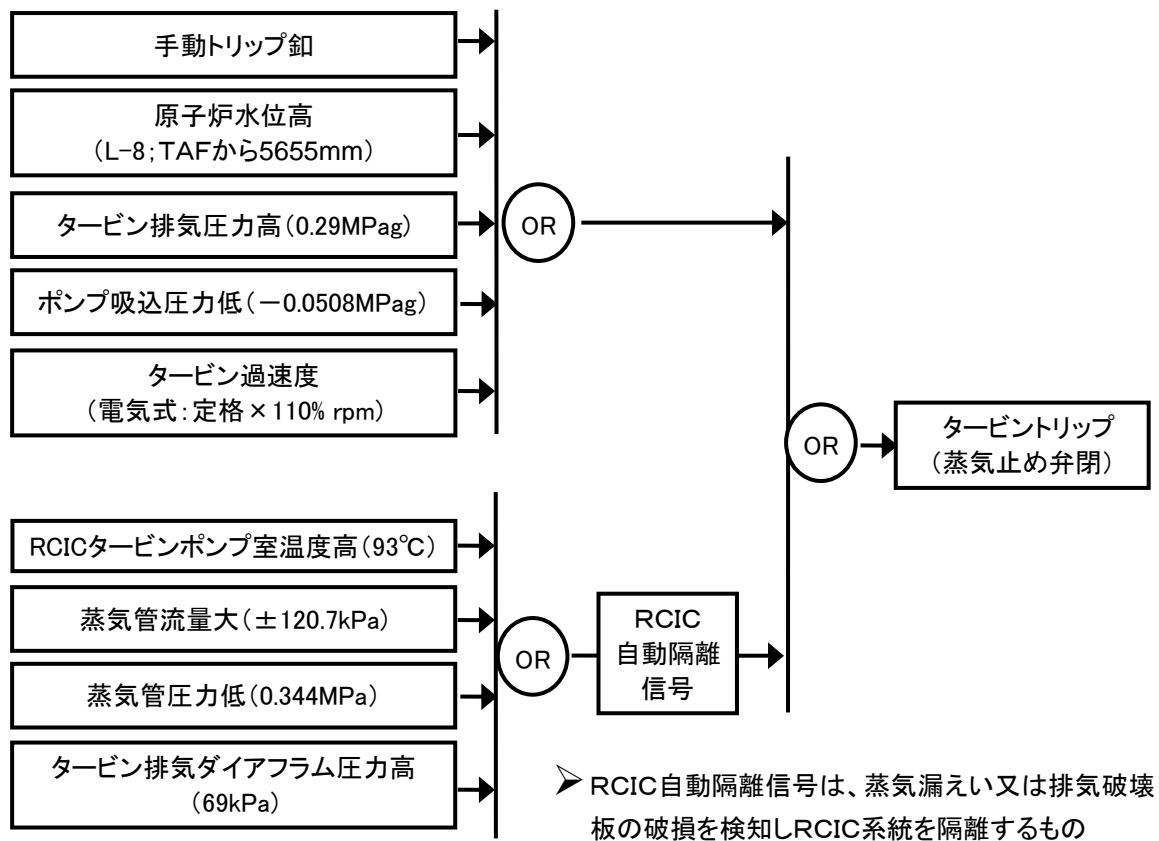


図6 RCICの電気式トリップのインタロックブロック線図

測定データ等から、タービン排気圧力高が、この中で最もインタロック条件の成立の可能性が高いと推定される。以下に各インタロック条件の成立の可能性について述べる。

4. 2 タービン排気圧力高インタロック作動の可能性について

図7に運転員が読み取ったタービン排気圧力の測定値を示す。除熱機能の喪失により、排気圧力は、D/W 圧力、S/C 圧力とともに上昇傾向にあり、3月12日11:36のRCIC停止時には、排気圧力高トリップ設定値に近い状況にあったことが分かる。ただし、11:25の排気圧力の読み値は0.25MPagであり、この時点ではトリップ設定値(0.29MPag)には達していない。また、停止した時点における排気圧力は確認されていないため、排気圧力高によりトリップしたことを示す観測記録はない。

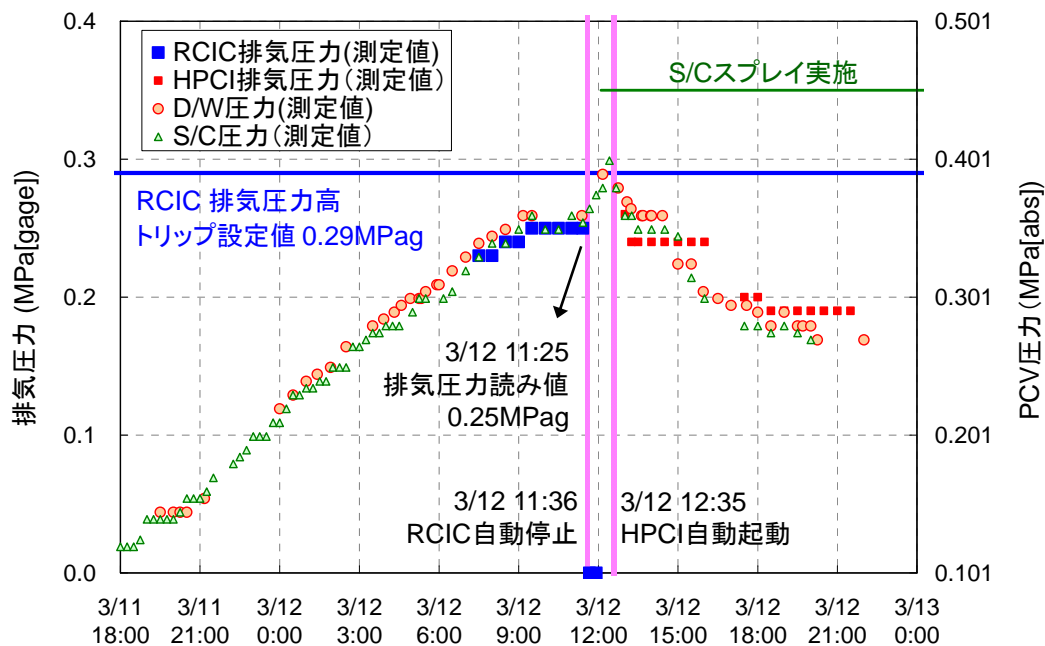


図7 RCIC タービン排気圧力と PCV 圧力の推移

しかしながら、最終的な熱の逃がし場を喪失している状態であり、格納容器の圧力は単調増加するはずの条件下で、RCIC トリップ前に D/W 圧力、S/C 圧力は3時間近く一定値を保った後、再度上昇していく挙動を示している。以下の点から、3月12日11:36の停止時に排気圧力高に達した可能性があると考えられる。

(1) 計器精度について

図8に示すように、中央制御室表示用の排気圧力計と論理回路入力用の排気圧力計は異なる。計器精度、読み取り誤差を考慮すると両者は0.02MPa程度の差が生じうる。従って、この誤差を考慮しても、3月12日11:25の読み値0.25MPagは、トリップ設定値(0.29MPag)には至っていないと考えられる。

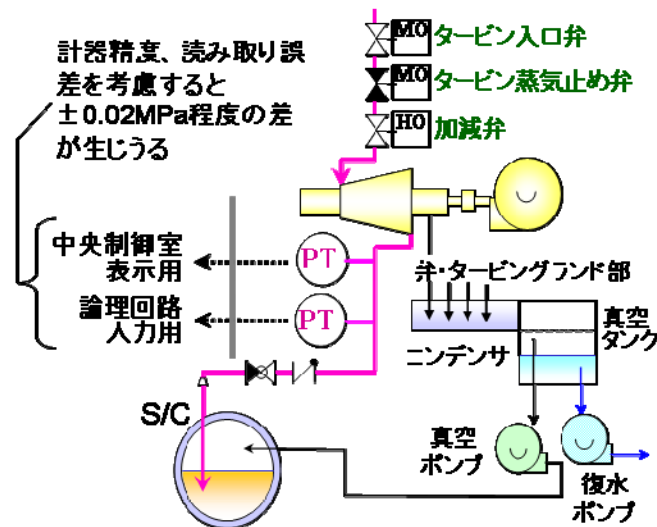


図8 RCIC 排気圧力計設置位置の概要図

一方、同日 11:25 から 11:36 にかけて D/W、S/C 圧力が上昇している。定期検査時に実施される、定格原子炉圧力（約 6.9MPag）での RCIC 試運転データによると、S/C 圧力が大気圧におけるタービン排気圧力は約 0.05MPag 程度である。これは定格運転時のタービン排気管の圧力損失を示しているが、11:25 から 11:36 にかけての S/C 圧力測定値は約 0.36MPaa であり、圧力損失分として 0.05MPag を加えると約 0.41MPaa（約 0.31MPag）となり、トリップ設定値を超える程度となる。

従って、11:25 の時点では排気圧力はトリップ設定値（0.29MPag）に至っていないものの、トリップ設定値に近い状況にあり、11:25 から 11:36 にかけて D/W、S/C 圧力が上昇した際に、排気圧力がトリップ設定値に到達した可能性が高いと推定される。

(2) リセット操作が実施できたことについて

図 7 に示したように、3 月 12 日 11:36 の RCIC トリップ後のタービン排気圧力読み値はほぼ 0MPag を示している。これは、排気管内の蒸気がコンデンサで凝縮し、また下流側に逆止弁が有るため S/C 圧力（背圧）がかからないためである。

RCIC 停止後に実施した再起動操作において、リセット操作はできたが再起動して蒸気を流し始めると再トリップする事象について、仮にトリップ原因がタービン排気圧力高であった場合、停止した時点で排気圧力計指示値が下がりトリップ条件は一度クリアし、その後蒸気を流し始めると排気圧力が再度上昇しトリップするというシナリオが説明できる。

なお、最終的な熱の逃がし場を喪失している状態で除熱機能を喪失した以降、単調増加していた D/W 圧力、S/C 圧力が、9:30 から 11:25 にかけて一定となった後、再上昇する事象については、その挙動の理由は不明である。当時、SRV や RCIC を経由して原子炉の蒸気が S/C に放出され、また、S/C 内が温度成層化していたと考えら

れており、S/C内の何らかの状況変化による挙動であった可能性が考えられる。

4. 3 その他インタロック作動の可能性について

以下のように他のインタロック条件の成立の可能性は低いと考えられる。

<手動トリップ>

手動トリップ釦を押した事実は確認されていない。

<原子炉水位高 (L-8 ; TAF から 5655mm) >

図9に原子炉水位(狭帯域)のチャート記録を、図10に原子炉水位測定値の推移を示す。原子炉水位を監視しながら、FICにてRCIC流量を調整しており、3月12日11:36のRCICトリップ時、原子炉水位測定値はL-8に達していないため、原子炉水位高インタロックによる停止の可能性はない。

<ポンプ吸込圧力低 (-0.0508MPag) >

CST水位が下がると発生しうるが、同じCSTを水源として、直後にHPCIが自動起動し運転している(同じトリップ条件を有する)。また、タンク水位低が発生した場合、インタロック条件がクリアされないため、リセット操作ができず、観測事実と整合しない。

<タービン過速度大 (電気式 : 定格×110% rpm) >

RCIC制御電源が生きており、運転員が原子炉水位を確認しながら流量調整器により蒸気調整弁の制御をしていたことから、過速度トリップが発生した可能性は低い。

<自動隔離信号>

状態表示灯にてRCIC隔離弁が閉になったとの確認記録はない。また、3月13日11時頃に中央制御室にてPCV外側隔離弁を閉操作している。

赤：原子炉水位（狭帯域）

緑：原子炉圧力（広帯域）

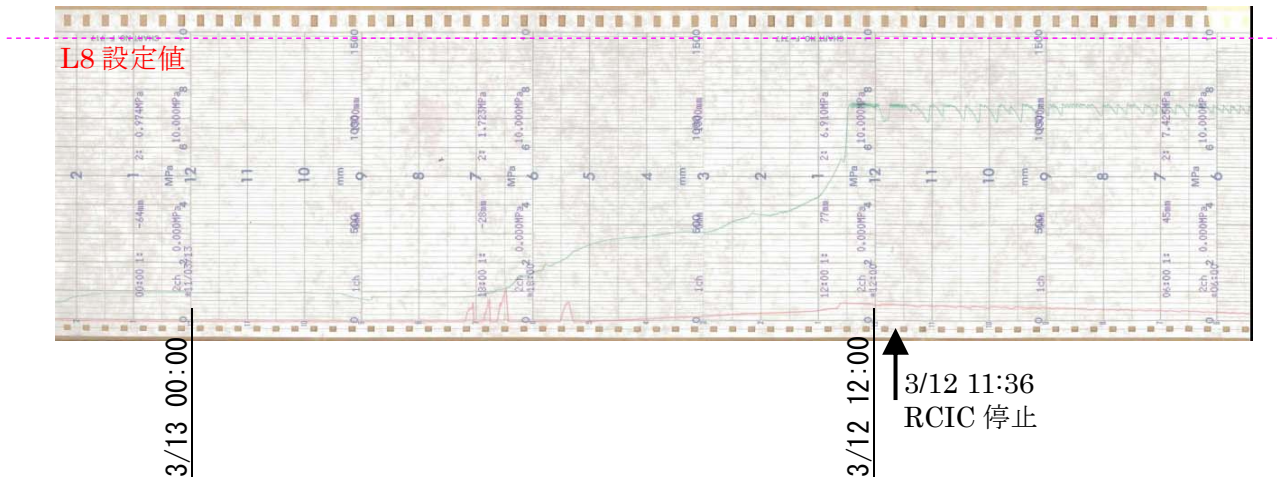


図9 原子炉水位／原子炉圧力チャート

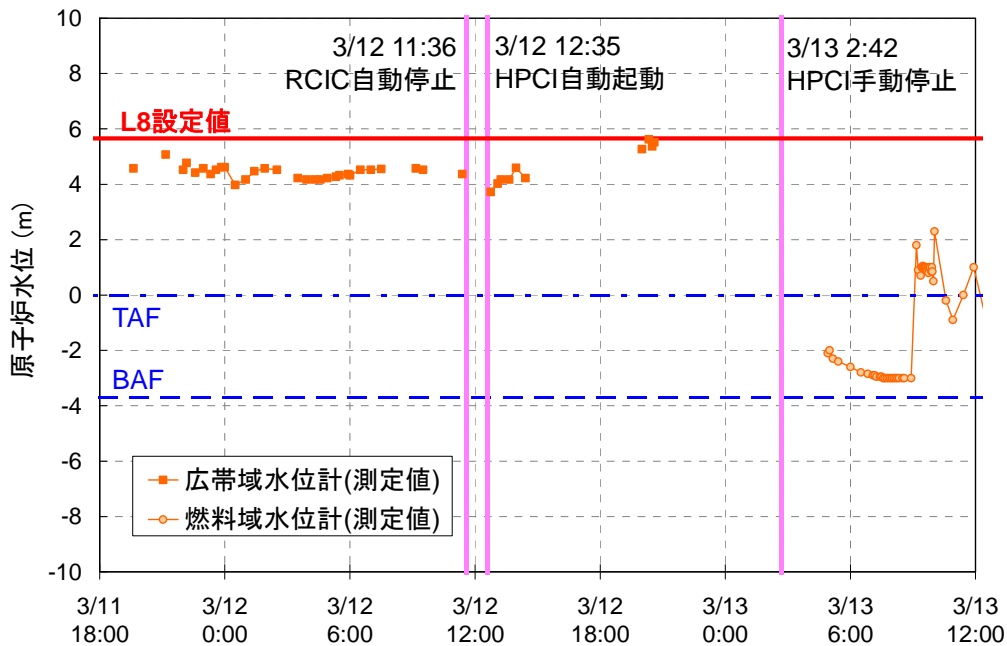


図10 原子炉水位の推移

5. 対策との関係について

柏崎刈羽原子力発電所の安全対策として、全交流電源喪失を想定した津波アクシデントマネジメント対応手順において、S/C 圧力上昇時でも RCIC 注水を継続させる観点から、タービン排気圧力高インタロックの除外操作を実施する手順を整備している。これは、タービン排気圧力がトリップ設定値を超えても、直ちに RCIC の機器が破損するものではないため、より広範囲に RCIC の運転継続を優先させるという考えに基づくものである。

ここで、RCIC の排気管には過圧防止のためにラプチャディスクを設置したベントラインが設けられているため、仮に S/C 圧力上昇とともに RCIC 排気圧力が上昇を続け、RCIC のラプチャディスク開放の設定圧力に達すると、当該ディスクが物理的に破裂し圧力を解放する設計となっている。ただし、代替注水設備等による格納容器スプレイ又は格納容器ベントによって、格納容器冷却を実施するため S/C 圧力は抑制されることとなる。(RCIC のラプチャディスク開放の設定圧力よりも、格納容器ベント実施の判断基準圧力の方が小さい。)

また、その他にも、以下の高圧注水機能の強化の対策に取り組んでいる。

- ・ 直流電源設備の強化（容量増強、高所設置）
- ・ 高圧代替注水系設備（HPAC）の追設
- ・ 全交流電源及び直流電源喪失時の現場での RCIC 手動起動手順の整備

6. まとめ

3 月 12 日 11:36 の 3 号機の RCIC 停止原因について、中央制御室での監視・操作や現場での確認の状況により、

- ・ トリップ機構を有するタービン蒸気止め弁が閉となって停止したこと
- ・ 中央制御室にてタービン蒸気止め弁のリセット操作が実施できたこと
- ・ RCIC の運転制御に必要な直流電源が生きていたこと

から、機械式タービン過速度トリップは作動しておらず、電気式トリップが働いた可能性が高い。

電気式トリップのインタロック条件のうち、測定データ等から最も成立条件に近いものはタービン排気圧力高である。3 月 12 日 11:25 の時点ではタービン排気圧力の読み値は 0.25MPag でありトリップ設定値 (0.29MPag) には至っていないものの、RCIC トリップ前に D/W 圧力、S/C 圧力は一定値を保った後再度上昇する挙動を示しており、以下の点から、同日 11:36 の停止時に排気圧力高に達したと推定される。

- ・ S/C 圧力測定値に排気管の圧力損失分を加味すると、タービン排気圧力はトリップ設定値を超える程度になっており、タービン排気圧力はトリップ設定値に近い状況にあった。
- ・ 3 月 12 日 11:25 から 11:36 にかけて S/C 圧力が上昇した際に、タービン排気圧力がトリップ設定値に達した可能性がある。
- ・ リセット操作はできる（この時点でトリップ条件は一度クリアしている）が、再起動して蒸気を流し始めると、再トリップする事象を説明可能。

- ・ 他のインタロック条件の成立の可能性は低い。

以 上