

2号機制御電源喪失後の RCIC 流量について

1. 現象の概要と検討課題

2号機では、地震後、原子炉隔離時冷却系（RCIC）の手動起動と原子炉水位高による自動停止を繰り返すことで原子炉水位を制御しており、3回目に RCIC を手動起動した直後に、津波により全電源喪失に陥った。その後計測された原子炉水位・原子炉圧力等のパラメータから、津波により制御電源を喪失した後にも RCIC は約3日間にわたって注水を継続していたものと考えられる。

津波後の原子炉圧力の計測値は通常運転圧力より低く維持されており、主蒸気逃がし安全弁（SRV）の作動設定圧力に至っていない。このような挙動を再現できる制御電源喪失時の RCIC 運転状態として、原子炉水位が制御されずに、RCIC タービンの抽気レベル付近まで水位が上昇し、蒸気と水の二相流が RCIC タービンへ崩壊熱相当のエネルギーを流出させるとともに、定格流量よりも低い流量で原子炉へ注水がなされていた可能性が考えられる。

この考えにもとづき、MAAP 解析においては、計測された原子炉圧力を再現できるように、注水量を定格流量の約 1/3 である 30m³/h として解析を実施し、RCIC 動作中の全体的な挙動をよく模擬することができた。一方で、仮設電源により復旧した 11 日 22 時頃の水位計指示値を補正すると、水位計の測定上限付近の有効燃料頂部（TAF）+6m 程度となり、MAAP 解析の結果は、この時点の水位を過小評価している。RCIC タービン蒸気加減弁が制御電源喪失時に全開となる仕様であることや、水源として使用していた復水貯蔵タンク（CST）の水量の減少量が大きいことを考えると、RCIC による注水量は、MAAP 解析において仮定した 30m³/h より大きかった可能性が高い。

本資料では、津波後の RCIC の注水量について考察し、事象進展への影響を評価するとともに、必要な対策を検討する。

2. RCIC タービンの設計について

RCIC 系統の概略図を図 1 に示す。2号機の RCIC はタービン駆動ポンプであり、原子炉で発生した蒸気を主蒸気管から取出し、加減弁で蒸気流量を調節して原子炉注水量を調整する設計となっている。注水量を調整する運転方法として、テストラインを使用し、RCIC から吐出された冷却水の一部を CST に戻し、原子炉への注水量を増減させる運転方法があるが、2号機については、この運転方法はとられておらず、RCIC ポンプから吐出された冷却水は全て原子炉に注水されていた。

次に、加減弁により原子炉注水量を調整する場合について、具体的に説明する。RCIC 運転中は、流量制御器からの給水速度指令信号を目標に速度制御されており、速度偏差に応じて E G - R アクチュエータへ加減弁の開度指令信号（電気信号）が出

力される。EG-Rアクチュエータは、弁開度指令信号の増減に応じてパイロットピストンを上下に動作させるが、ピストンが上方向に動くと加減弁は閉側へ、また下方向に動くと開側に動作するように、作動油の流路を決める役割を果たし、弁の開度を調整するサーボピストンはこの作動油の圧力を介して動作する。なお、作動油は、RCICポンプにより加圧されるため、電源を失ってもその機能は喪失しない。

また、EG-Rアクチュエータのパイロットピストンの上部には「センターリングスプリング」と言われるバネが設置されているが、このバネの強さは上下非対称（上>下）となっている。速度が一定の時（速度偏差が0の場合）は、ソレノイドコイルにNULL電圧をかけることで、パイロットピストンを中間位置に固定する構造となっている。パイロットピストンが中間位置の場合は、サーボピストン上下の作動油の力がバランスし、加減弁開度は一定の状態を維持する。（図2参照）

なお、制御電源喪失時（電気信号がない場合）は、NULL電圧がなくなるので、バネの力により下方向にパイロットピストンが押され、加減弁は開側に動作する。（図3参照）

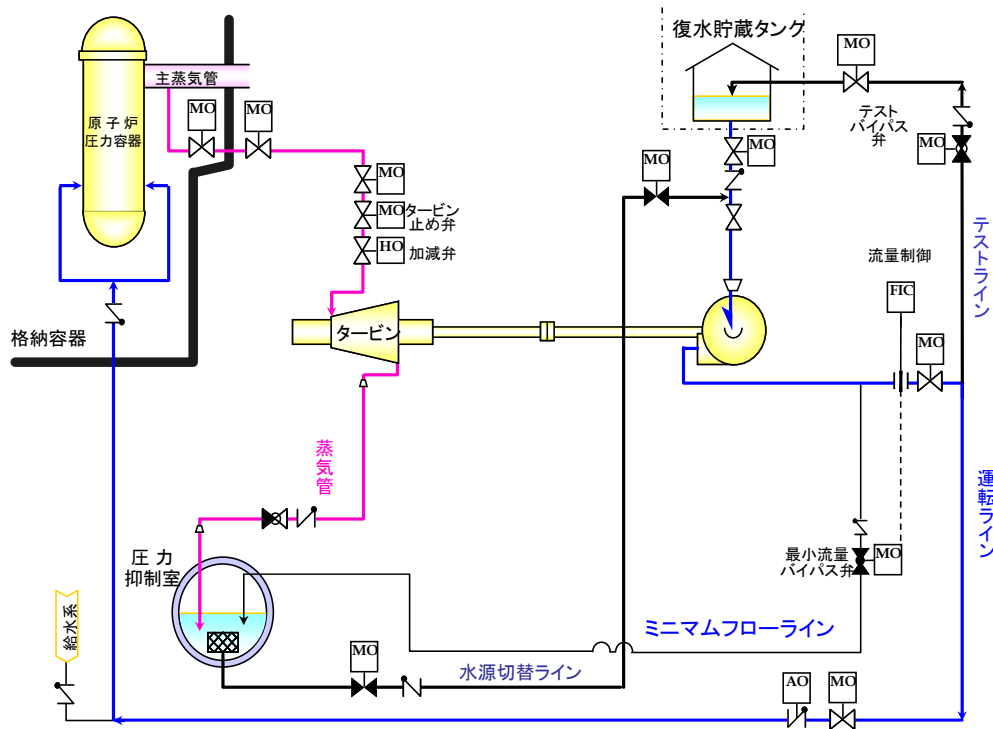


図1 RCIC 系統概略図

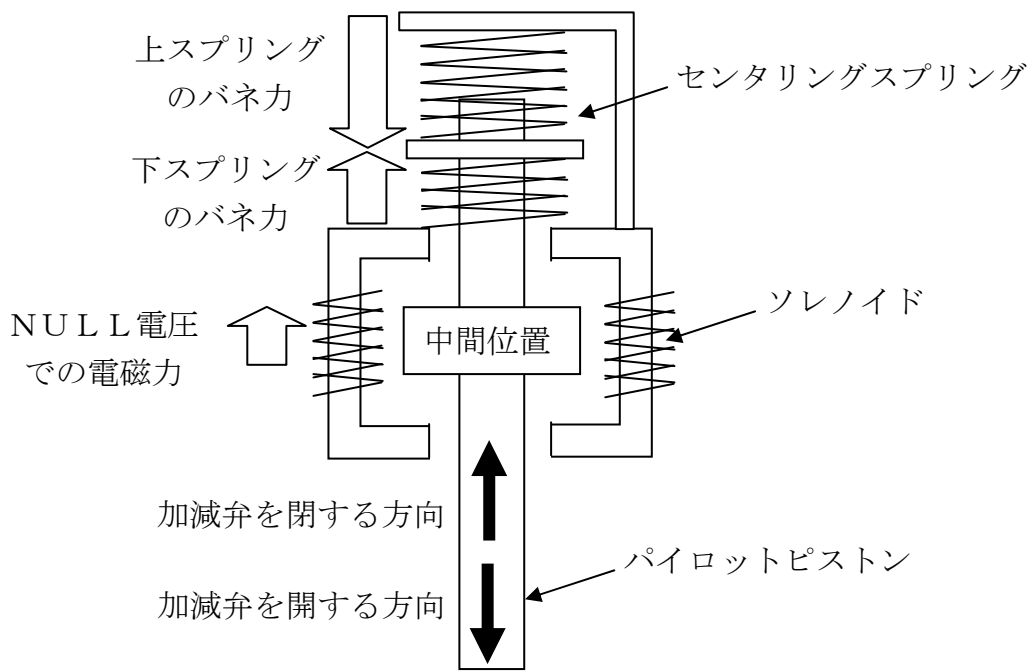


図2 EG-R アクチュエータの概要図

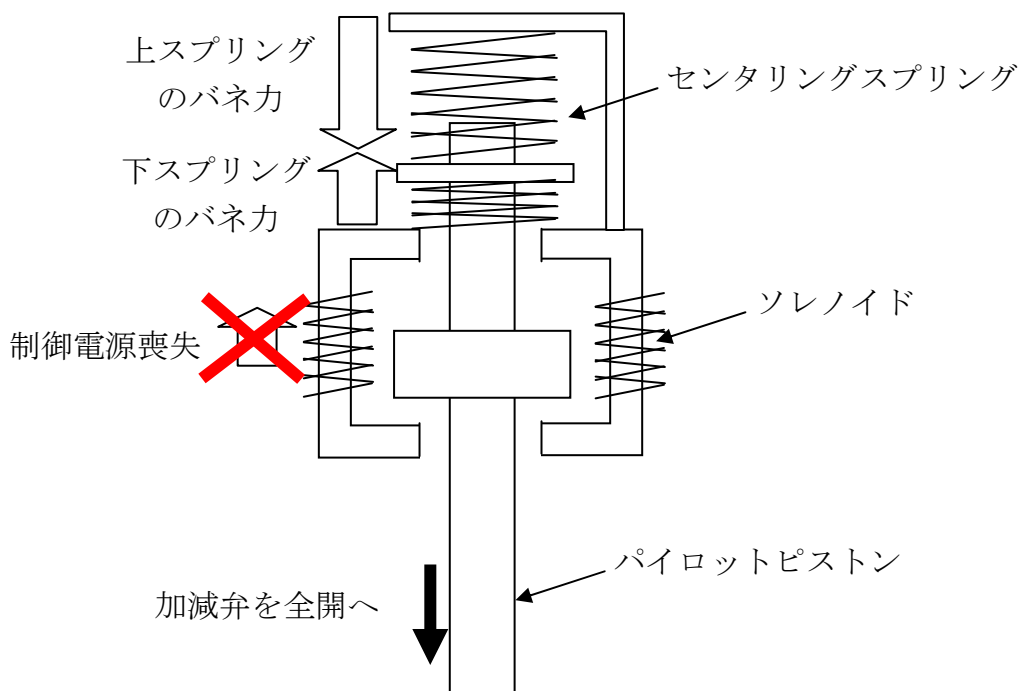


図3 制御電源喪失時の EG-R アクチュエータの挙動

3. 制御電源喪失時の 2 号機の RCIC の挙動について

2 号機は、1 号機よりも直流電源の喪失が遅かったことから、3 月 11 日 15 時 39 分の時点で、RCIC を再起動することが出来た。2 号機では、プロセスコンピュータによるパラメータ監視が 15 時 50 分頃まで可能であったため、この際の RCIC の注水量の変化が記録されている。(図 4 参照)

この注水量の変化は、2. にて示した、制御電源喪失時の挙動と整合しており、津波によって制御電源を喪失した後、RCIC タービンの加減弁は全開方向へと動き、原子炉への注水量を増大させたものと考えられる。

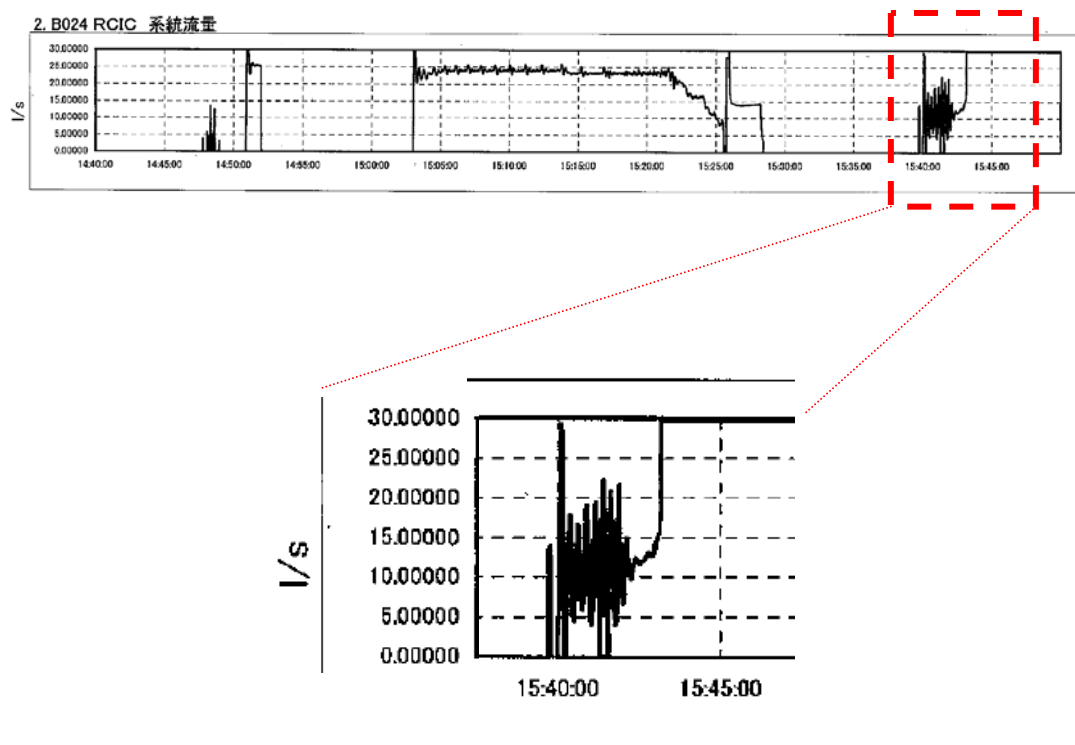


図 4 制御電源喪失後の RCIC の注水量の変化

ただし、流量増加前に見られる注水量の振動が発生した原因については、今後も検討が必要である。

また、現在解析で設定している RCIC の注水量は前述のとおり $30\text{m}^3/\text{h}$ (約 8.3l/s) であり、定格流量の 30%ほどである。これは、注水量の実測値が徐々に増加する傾向が見えること(プロセスコンピュータ停止直前には定格流量の $2/3$ 程度まで増加)、切り替え前の水源である復水貯蔵タンクの水量が 11.5 時間程度の運転時間で 1000t 程度減少していることから、制御電源喪失後の RCIC の流量はほぼ定格流量程度であった可能性がある。一方で、RCIC が無制御のまま運転される場合、原子炉水位が上昇し、主蒸気配管に原子炉水が流れ込むという状況になりうる。このような場合には、蒸気駆動を前提とした RCIC が定格流量を出せるのかどうか知見がない。そのため、今後は、RCIC の流量のパラメータサーベイをするなどにより、制御電源喪失後の RCIC の挙動について検討していくこととしたい。

ただし、事故進展の観点からは、冷却能力を喪失した後のある一点での圧力、水位の情報があれば、それ以前にどのような状態であっても、その後の挙動の評価には影響を及ぼすことはない。(注水量が異なった場合、圧力抑制室 (S/C) 気相体積の減少という形でわずかながら影響が生じる)

4. 対策との関係について

制御電源が喪失することにより、加減弁が全開となると、運転条件によっては RCIC タービンが速度大によりトリップしてしまう可能性がある。タービン速度大トリップ機構には、機械式のものがあるため、制御電源を失った場合でも作動することが可能である。2号機の実績からいえば、制御電源喪失後のトリップは回避することが出来ているが、出来る限りその可能性を減じておくことが必要である。

柏崎刈羽原子力発電所では、まず、制御電源喪失を防ぐという観点から、直流電源の強化を行っている。また、万一トリップしてしまった場合でも、それをリセットできるように現場に運転員を配置し、速やかに復旧操作ができる体制としている。さらに、再起動後に再びトリップしないように、手動で弁を操作して蒸気流量を減少させる操作、回転数による流量確認、及び、原子炉建屋内での原子炉水位確認を手順化し、事故時の RCIC の信頼性を高める方策をとっている。

5. まとめ

津波による2号機の制御電源(直流電源)喪失後の RCIC の挙動について、設計情報、測定データからの検討を行い、津波到達後に RCIC の注水量が増大していたことを明らかにした。ただし、原子炉水位上昇後の挙動については、現時点でも不明な点が残るため、今後の検討が必要である。

以 上