

2号機の原子炉圧力変化について

(1) はじめに

平成23年5月23日に原子力安全・保安院へ報告した「東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と影響評価について」において、2号機の原子炉圧力変化の実測値と解析値が整合していない。以下に、その理由にかかる推定を述べるとともに、今回の解析で想定した原子炉隔離時冷却系（RCIC）の運転状態について述べる。平成23年5月に実施した解析における原子炉圧力変化を図1、図2に示す。なお、図中の赤枠は解析値と実測値が整合していない部分を示している。

(2) 平成23年5月の解析について

2号機は津波の影響により制御電源を喪失したが、RCICの動作は継続していた。原子炉水位の低下からRCIC停止を判断したのは3月14日13時25分のことであり、地震発生から2日以上にわたり炉心に注水することが出来ていた。その間の原子炉水位測定値は燃料域水位計で有効燃料頂部（TAF）上、約3400mm～3950mm、原子炉圧力測定値は3月11日20時07分に計測された約7.1MPa[abs]から低下し、約5.4～6.4MPa[abs]と通常運転時より若干低い値で安定していた。

平成23年5月の解析では、電源を喪失した状況でのRCICの運転状態が不明であること、RCICが運転していた期間において原子炉水位が維持できていたことに鑑み、RCICは定格流量（95m³/h）で運転を継続し、原子炉水位L-2とL-8の間で自動起動と自動停止を繰り返す設定とした。そのため、解析上、原子炉圧力は逃し安全弁の開閉により圧力が保たれることとなり、実測値と整合しない結果となった。なお、原子炉への注水が停止するまでのRCICの運転状態は、原子炉水位が維持されている限り、注水停止後の炉心の状態への影響はほとんどない。

原子炉圧力変化の挙動にはRCICの運転状態が大きく関与していると考えられることから、以下に推定されるRCICの運転状態について検討した。

(3) 想定されるRCICの運転状態について

下記①②の観点から、制御電源を喪失したRCICは、設計上の運転モード（定格流量）で運転していたものではなく、また、原子炉水位による起動停止（L-2とL-8）を繰り返していたものではなかったと考えられる。

① 原子炉水位の補正について

2号機では、3月11日の事故発生から燃料域水位計にて原子炉水位を計測していた。燃料域水位計は原子炉冷却材喪失事故時の水位監視等を使用目的としていることから、大気圧、飽和温度で校正されている。したがって、原子炉が高圧時およびドライウェル（D/W）が高温時には、実際の水位を示しておらず値の補正が必要となる。

計測された原子炉水位を原子炉圧力および D/W 温度で補正※したところ、水位計の基準面器水面（TAF+約 5916mm）辺りを指示する結果となった（図 3）。本来、原子炉水位が L-8（TAF+5653mm）に到達した時点で RCIC はトリップするため、L-8 以上の水位になることはないが、制御電源の喪失により RCIC は制御されることなく運転継続していたと推測される。したがって、崩壊熱の減少も考慮すると L-8 以上の水位になっていた可能性が高いものと考えられる。また、水位計の構造上、原子炉水位が基準面器水面以上となると基準面器側配管と炉側配管の差圧（図 4 に示す $H_s - H_r$ ）が変化しなくなるため、見かけ上の原子炉水位は基準面器水面の高さで一定となる。

以上のことから、RCIC 運転期間中は原子炉水位が L-8 を越えて、さらに基準面器水面以上であったと考えられる。

※ 原子炉水位の補正に際しては、原子炉水位が測定された時刻における原子炉圧力及び D/W 温度の実測値が必要となる。原子炉圧力の実測値がない時刻の水位を補正する際は、測定されている他の時刻の原子炉圧力をもとに線形補間することで当該時刻の原子炉圧力の概算値を求め、使用した。また、D/W 温度は実測値がないため平成 23 年 5 月 23 日に原子力安全・保安院に報告した「東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と影響評価について」に記載の解析結果の値を用いた。

したがって、図 3 で得られた原子炉水位の補正值は、計測の誤差以外に、原子炉圧力と D/W 温度の推測に伴う誤差を含んでいる。

なお、原子炉圧力、格納容器温度に基づく原子炉水位の補正曲線については、事故時運転操作手順書に記載がある。

② RCIC の駆動蒸気について

上述のように原子炉水位は水位計の基準面器水面を越えていた可能性がある。さらに、主蒸気管高さ（TAF+約 7301mm）以上に水位が上昇していた場合には、主蒸気管への水滴のキャリーオーバーが無視できなくなると考えられ、RCIC の駆動蒸気は二相流となっていた可能性がある。駆動蒸気が二相流となり、クオリティーが低下した状態での RCIC の注水能力については定量的な

評価は困難であるものの、タービンの回転数は通常より少なくなり、RCICは定格より少ない流量で注水していた可能性がある。

(4) MAAP 解析結果

項目(3)の推定をもとに、MAAP 解析を実施し、得られた原子炉圧力の挙動を図 5 に示す。RCIC の流量を定格 $95\text{m}^3/\text{h}$ の約 $1/3$ である $30\text{m}^3/\text{h}$ と仮定した場合に、実測の原子炉圧力の挙動をおおよそ再現できる結果が得られた。

RCIC 運転期間中に原子炉圧力が通常運転時よりも低い圧力（約 $5.4\sim 6.4\text{MPa}[\text{abs}]$ ）で安定的に推移した要因としては、飽和状態のエネルギーが蒸気より大きくなる二相流で RCIC を駆動していたことが考えられる。この場合、原子炉圧力容器から圧力抑制室（S/C）への熱の移行量が通常の運転状態より大きくなり、原子炉圧力容器からの熱の持ち出しが崩壊熱分のエネルギーとバランスしていた可能性がある。

(5) 設計上の観点からの RCIC の運転について

一般に、RCICタービンへ流入する蒸気クオリティーが設計条件より多少悪化しても直ちに翼破損やブレーキにはならず、かつ、ドレン水はS/C方向へ排出されて直ちにタービン内に蓄積されるわけではないと考えられるため、二相流駆動の運転が継続される可能性がある。

さらに水位が上昇し、主蒸気管（RCIC蒸気供給ライン）が水没、もしくはそれに近い状態となった場合には、RCICタービンへ蒸気供給が十分でなくなることから、タービンは減速し、停止に至る可能性がある。ただし、タービンが直ちに停止はせず、減速に伴う注水量の減少により炉水位が低下して蒸気が流入する状態に戻るなど、原子炉水位が主蒸気管高さ近傍で維持される可能性も考えられる。

なお、RCICの制御電源が喪失した場合、設計上、加減弁はバネにより全開となり流量調整はできなくなる（図6にRCICの系統概略図を示す）。

(6) RCIC の機能低下にかかる推定

RCIC については、原子炉水位の低下から、3月14日13時25分に停止の判断をした。しかしながら、前述のように原子炉圧力およびD/W温度による補正後の水位計指示値は基準面器水面程度の一定値を示していたものと考えられることから、12時前後からみられる実測値の水位低下は、より高位置にあった水位が、その位置まで低下してきたものを表していると考えられる。したがって、RCICは水位の低下が観測される12時前後の時期より早い段階で機能が低下したのと考えられる。プラントデータの推移を見ると、3月14日9時頃から原

子炉圧力が上昇しているが、これは RCIC の機能低下により RCIC からの注水量が減少したこと、及び、RCIC タービンへの蒸気供給量が減少したことが原因と考えられる。

なお、この圧力上昇は 3 月 14 日 12 時頃までは RCIC の通常の停止（タービン止め弁閉による蒸気供給停止）から想定される圧力上昇よりも緩やかであるが、制御電源が喪失していたことで、蒸気供給側の弁が閉じなかったことによるものと考えられる。一方、3 月 14 日 12 時頃以降は圧力上昇が急になっている。この圧力上昇は、蒸気供給側の弁が閉じ、RCIC のタービンへ蒸気が流れないと仮定することで再現した。

(7) まとめ

以上のことから、不確かさは残るものの、制御電源の喪失により RCIC が制御されることなく運転継続したことで原子炉水位が L-8 以上となり、低クオリティの二相流で崩壊熱相当のエネルギーが原子炉外に持ち出されていたこと、RCIC タービンが低クオリティの二相流で運転することで定格の流量よりも少ない流量で注水されたこと等から、逃し安全弁の作動が無くても原子炉圧力容器内のエネルギーがバランスし、原子炉圧力は通常運転時よりも低い圧力で安定して推移していたものと考えられる。

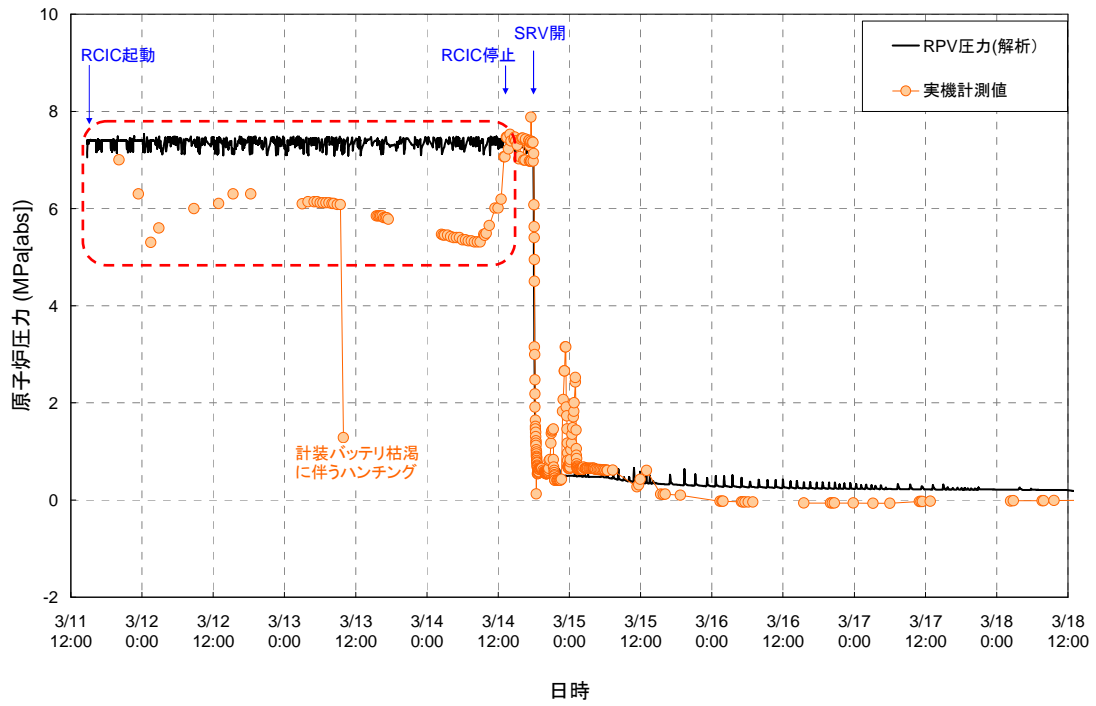


図1 2号機 原子炉圧力の挙動 (平成23年5月解析 図3.2.1.2)

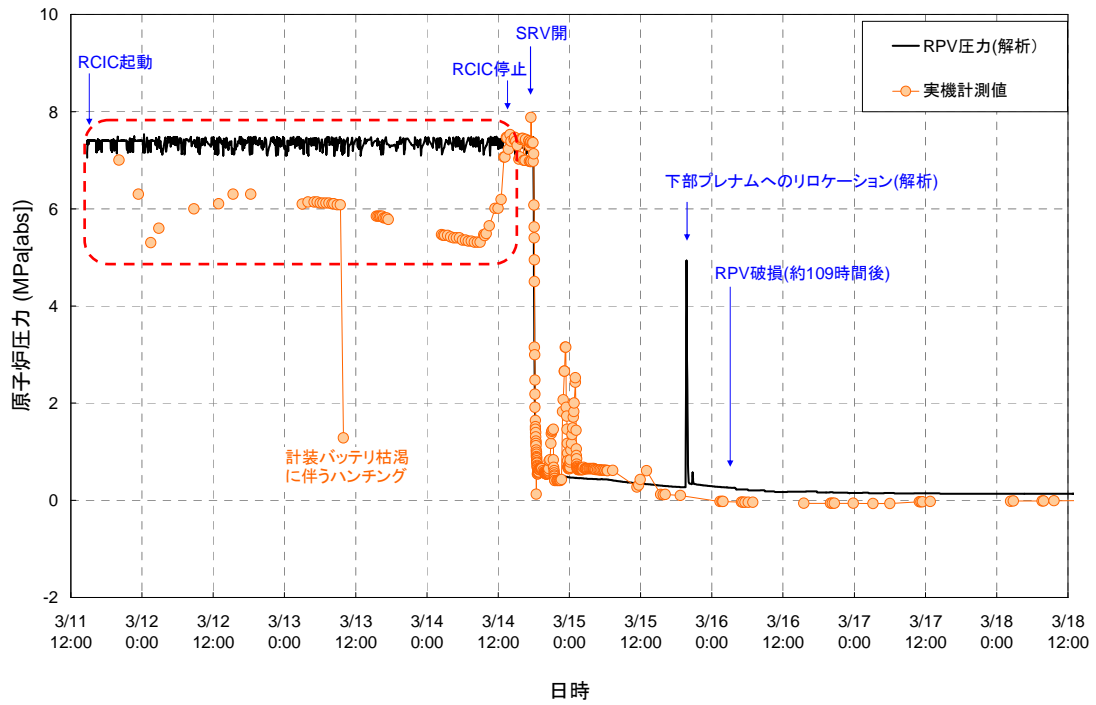


図2 2号機 原子炉圧力の挙動 (平成23年5月解析 図3.2.2.2)

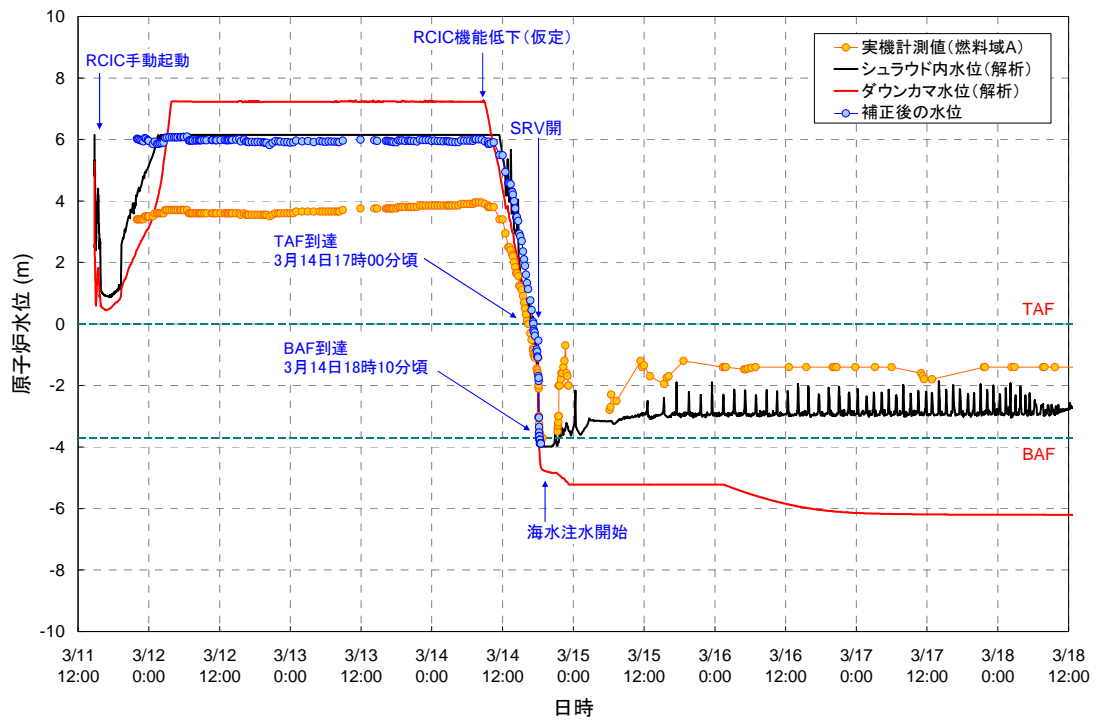


図3 2号機 原子炉水位の変化 (今回解析結果)

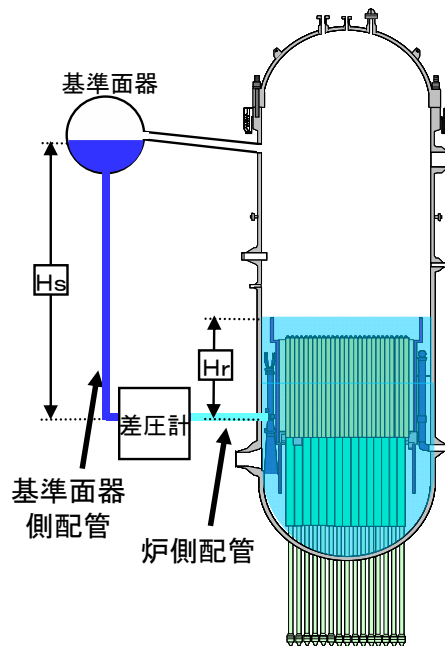


図4 原子炉水位計の構造

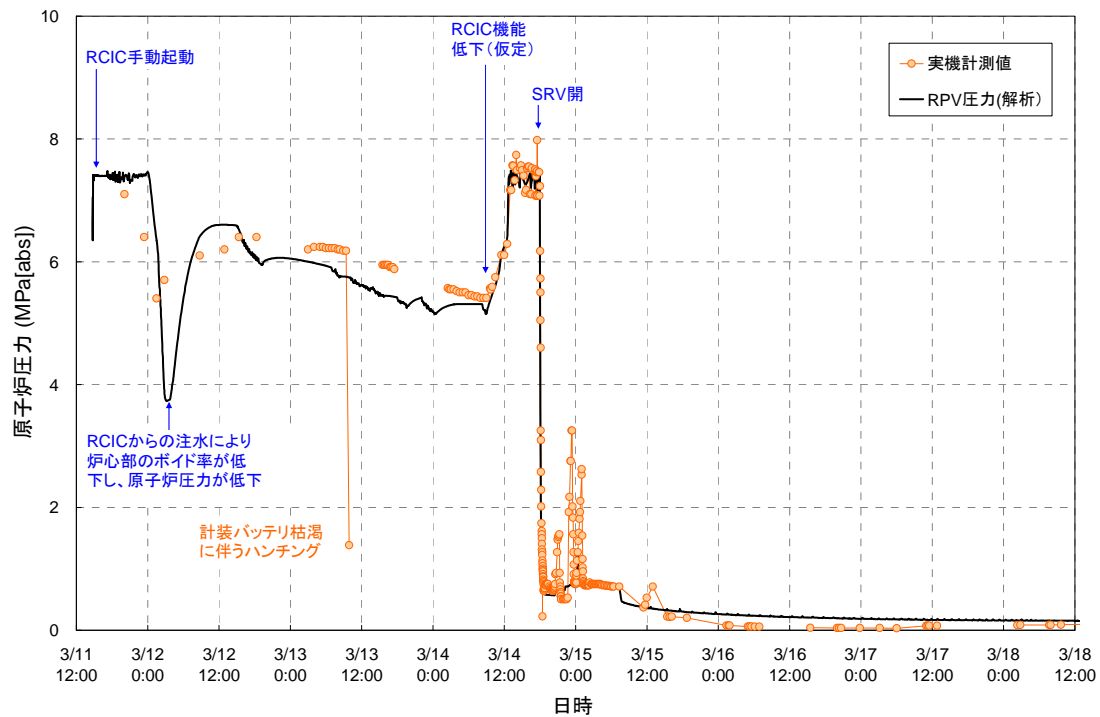


図5 2号機 原子炉圧力変化 (今回解析結果)

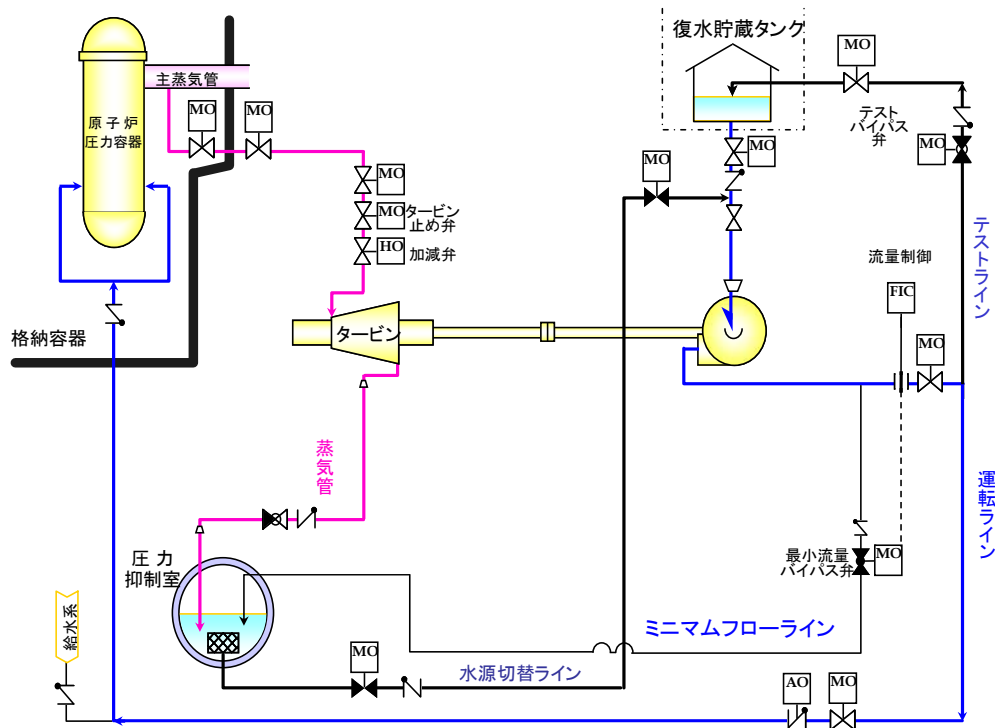


図6 RCIC 系統概略図