

3号機 RCIC 運転中のプラント状態の検討

※本資料は、添付資料 2 における検討課題リスト「共通-1」に挙げられる SRV の動作に関連した内容として、当社から株式会社テプコシステムズに委託し、解析コードを用いて評価された内容を基に作成したものである。

1. はじめに

3号機では地震発生から津波到達前及び津波到達後の合計 2 回、原子炉隔離冷却系（以下「RCIC」という。）による原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）への注水を実施した。1 回目の RCIC 運転は津波到達前の 11 日 15:05 に手動起動し、15:25 に原子炉水位高によって自動停止した。3号機では津波到達後も直流電源が使用可能だったので、2 回目の RCIC 運転は津波到達後の 11 日 16:03 に手動起動し、12 日 11:36 に自動停止するまで RPV への注水を継続した。この 2 回目の RCIC 運転では、原子炉水位高による自動停止及び手動起動の繰り返しの伴うバッテリー消費を避けるため、水源である復水貯蔵タンク（以下「CST」という。）への戻りラインを活用して RPV への注水量を調整する特殊な操作を継続することによって原子炉水位を確保した。

2 回目の RCIC 運転中の原子炉圧力は、RPV への注水開始から 19:30 頃まで低下傾向を示し、以降は上昇傾向を示していたことが測定されている。また、この一連の傾向を示す期間には、小さい圧力の低下と上昇、及び大きい圧力の低下と上昇を繰り返していた状況が確認されている。この期間に見られる大小の圧力低下と上昇は主蒸気逃がし安全弁（以下「SRV」という。）により制御された圧力変化の挙動とは異なっており、RCIC の特殊な運転状態の下で SRV が開閉したことに伴う変化を示したものと考えている。

この添付資料では、この期間の RCIC 動作実績の確認、原子炉圧力挙動を再現する解析などを通じて、上述した圧力挙動に対する認識が適切であるかを含め、当時のプラント挙動のメカニズムを検討した。なお、本件は SRV の作動に関する内容であることから、課題共通-1 と関連した検討である。

2. RCIC 運転期間のプラントパラメータについて

3号機の RCIC 運転は、地震発生から津波到達前及び津波到達後の 2 回行われたことが記録されている[1]。津波到達前に行われた 1 回目の RCIC 運転では RPV への注水によって原子炉水位が上昇し、起動開始から約 20 分後に原子炉

水位高によって RCIC は自動停止した。津波到達後の 2 回目の RCIC 運転では、RCIC の起動停止などに伴うバッテリー消費を避けること並びに原子炉水位を確保することを安定して行うため、CST への戻りライン及び RPV への注水ラインの両方を使用して RPV への注水が行われた。これらの運転期間の原子炉圧力及び原子炉水位は図 1 に示すように推移した。なお、図中に示している原子炉圧力は、記録計チャートをデジタイズしたものである。

ここでは、2 回の RCIC 運転におけるプラントパラメータの推移を津波到達の前後に分けて説明する。

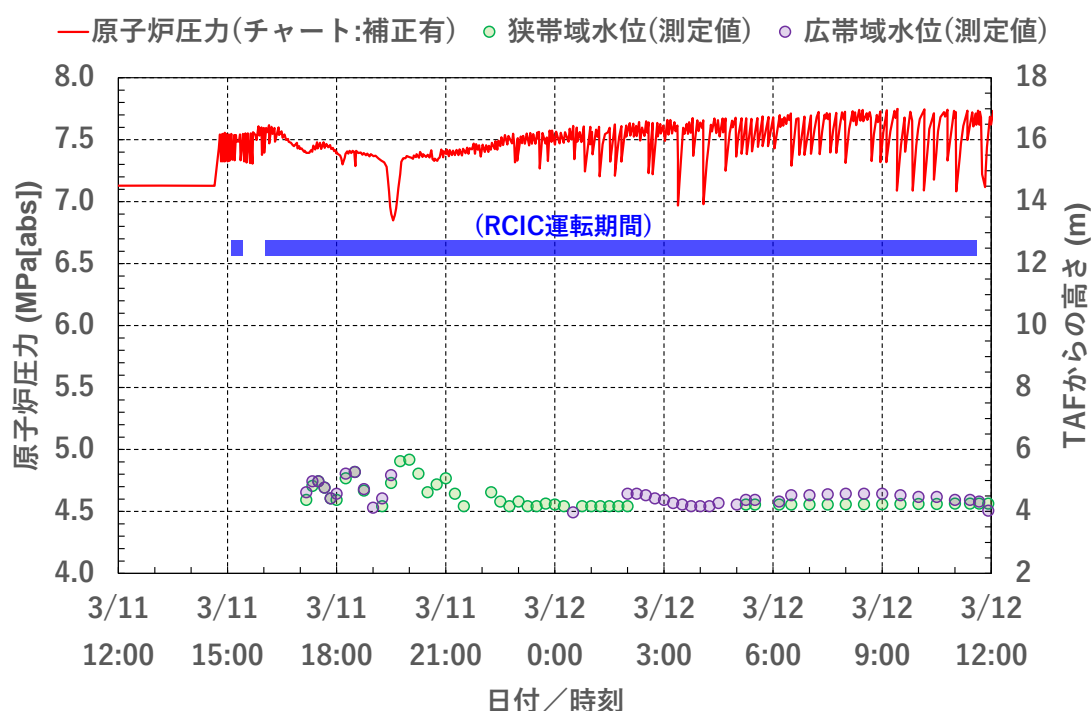


図 1 RCIC 運転期間中の原子炉圧力及び原子炉水位

2.1 地震発生から津波到達前までのプラントパラメータ

津波到達前の 1 回目の RCIC 運転期間中のプラントパラメータ (図 1) について説明する。地震トリップによる自動スクラムによって原子炉出力は低下したものの、主蒸気隔離弁 (以下「MSIV」という。) の自動閉によって原子炉圧力は上昇した。その後、原子炉圧力は SRV が開放する設定圧力に達して SRV が開いたことによって原子炉圧力は低下し、SRV が閉鎖する設定圧力まで低下すると SRV が閉鎖して再び上昇する挙動を繰り返して推移した。一方、11 日 15:05 に手動起動した RCIC が原子炉水位高によって 15:25 に自動停止したと記録されているように[1]、RCIC 運転によって原子炉水位は大きく上昇したと考えら

れる。

2.2 津波到達から RCIC 自動停止までのプラントパラメータ

(1) 原子炉水位

津波到達によって 3 号機は全交流電源が喪失したものの、直流電源は使用可能だったため 16:03 に RCIC を手動起動した。しかしながら、全交流電源の喪失によって充電機能が失われていたので、RCIC の起動及び停止に伴うバッテリー消費を避けるため、原子炉注水ラインとテストラインの両ラインを通水して注水の一部をテストラインで CST に戻すライン構成とした (図 2)。その上で、RCIC が自動停止する原子炉水位高まで原子炉水位が上昇しないように、上述のラインを切り替えるための弁及び流量制御器を操作することによって RPV への注水量を調整し、原子炉水位を確保した。具体的には、運転員が原子炉水位を監視し、調整範囲の上限又は下限に原子炉水位が近付いたら、上述した弁の開度や流量制御器の流量設定値を変更する操作を繰り返した (図 3) [2]。したがって、RPV へ注水された実際の水量は分からないものの、図 1 示す狭帯域水位及び広帯域水位の測定値に見られるように、原子炉水位は TAF よりも高い位置で水位上昇及び低下を繰り返しながら推移した。

この期間に見られる原子炉水位の上昇及び低下の変化は、RCIC による RPV への注水量と RCIC 抽気及び SRV 経由による RPV から原子炉格納容器 (以下「PCV」という。) への蒸気放出量との間の質量バランスの状況を表している。すなわち、RPV への注水量が蒸気放出量より多い時には原子炉水位は上昇し、逆の関係にあれば水位は低下することとなる。例えば、11 日 17 時頃からの水位が上昇している時には RPV への注水量が蒸気放出量よりも多かったことを表しており、17:30 頃に TAF から約 6m を示した後に水位が低下に転じているのは RPV への注水量が減少した状況を表しているといえる。

11 日 19 時頃から 19:45 頃の原子炉水位は比較的大きく上昇している様子が確認されており、RCIC から RPV への注水量が多い状況であったと考えられる。この時、低下傾向を示していた原子炉圧力が更に大きく低下しているのは、RPV への注水量が増えたことによって崩壊熱による蒸気発生量が減少した状況だったと考えられる。21 時以降の原子炉水位については、このような大きな水位変化は見られないものの、原子炉水位は RCIC が自動停止した 12 日 11:36 まで、RCIC から RPV への注水量の変化に伴うものと考えられる緩やかな水位上昇と低下を示しながら推移した。

(2) 原子炉圧力

津波到達以降の原子炉圧力は、しばらくの間は SRV が開放又は閉鎖される設

定圧力の範囲内で上昇と低下を繰り返して推移した。15:56 頃からはそれまでの圧力変化よりも若干高い圧力 (約 7.6MPa[abs]) を上限とする上昇と低下を繰り返した。この変化幅が若干変わった挙動は、逃がし弁モードの SRV の開閉が C 弁、G 弁、そして A 弁へと切り替わったことに伴うものであり、開閉した弁が切り替わった状況が過渡現象記録装置に記録されている [3]。

11 日 16:03 の RCIC 手動起動後 16:16 から注水が開始され [4]、原子炉圧力は 19:30 頃まで低下傾向となっている。これは RCIC から RPV への注水によって崩壊熱による蒸気発生量が減少した状況が反映された挙動と考えられる。原子炉圧力が低下傾向を示している途中に数回の圧力上昇が見られる挙動については、原子炉水位の変化で述べたように、RCIC から RPV へ注水する流量調整に従った変化を示したものと考えられる。

19:20 頃から原子炉圧力の低下が加速し、19:30 頃には約 6.85MPa[abs]まで低下している。上述したように、2 回目の RCIC 運転では、この頃に原子炉水位が最も高く上昇していたので、RCIC から RPV への注水量が相当程度に多いことを踏まえると、この頃の原子炉圧力の大きな低下は、この注水量の増加によって RPV 内の蒸気発生量が更に減少した状況が反映された挙動と考えられる。

その後、原子炉圧力は上昇に転じ、19:50 頃には約 7.35MPa[abs]に達している。この頃の原子炉水位の上昇は緩やかになって、20 時以降からは低下しているので、RCIC から RPV への注水量は減少し、炉心入口のサブクール度が低下した状況になったと考えられる。したがって、原子炉圧力が上昇に転じているのは、RPV への注水量の減少によって RPV 内の蒸気発生量が増加したことによるものと考えられる。

原子炉圧力が 19:50 頃に約 7.35MPa[abs]に達してから 12 日 11:36 に RCIC が停止するまでの圧力挙動は、小さい低下と上昇、及び大きい低下と上昇を繰り返しながら、全体的には緩やかな上昇傾向で推移した。この期間に見られた原子炉圧力挙動を示した要因は次節で考察する。

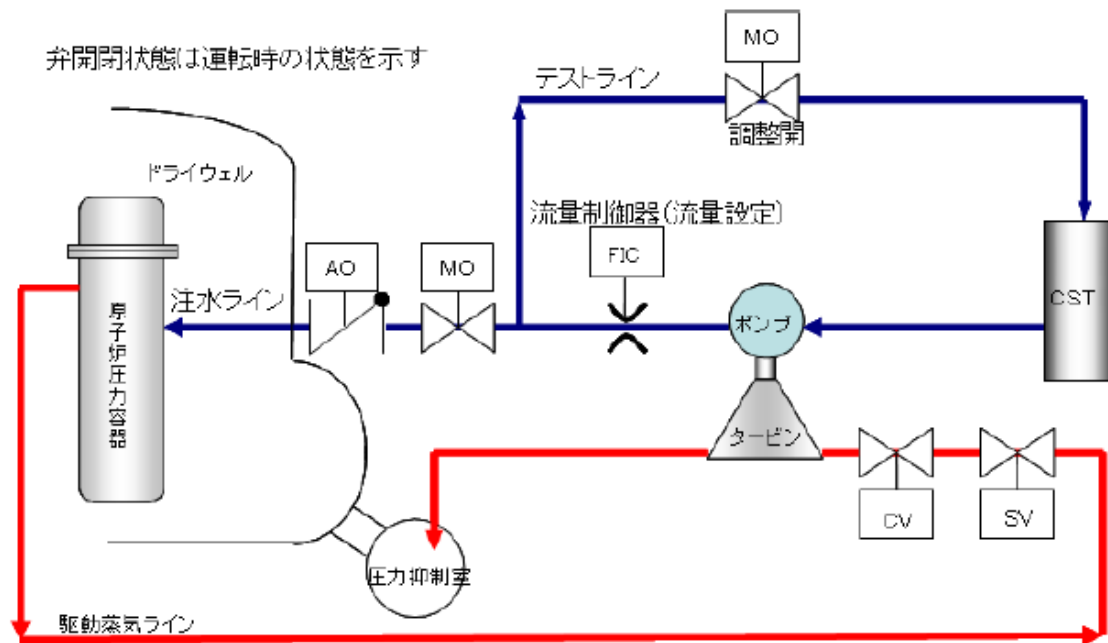


図2 RCIC 及び HPCI の原子炉注水ライン概要[2]

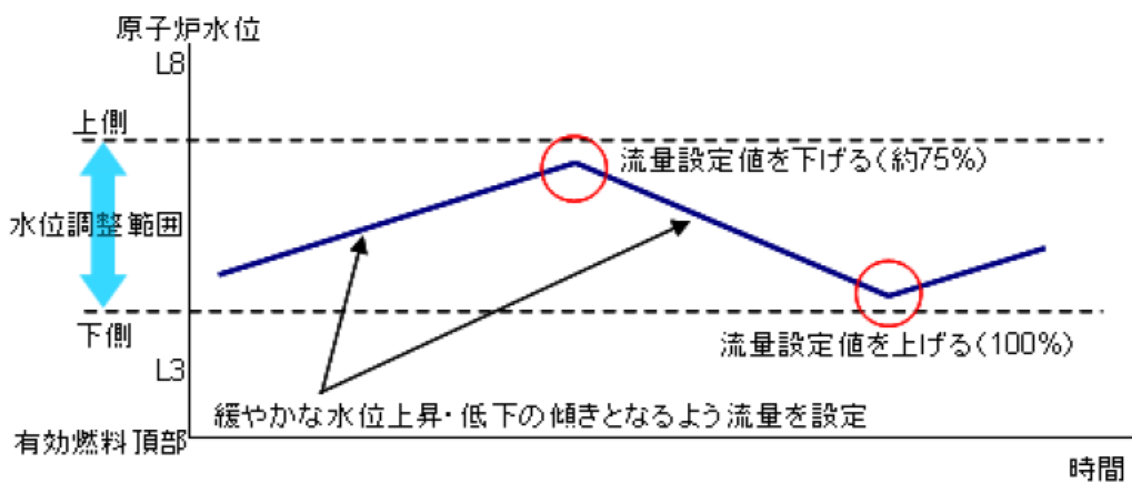


図3 原子炉水位の調整方法 (イメージ) [2]

2.3 2回目の RCIC 運転中の原子炉圧力挙動について

前節で述べたように、19:50以降の原子炉圧力は全体的には上昇傾向で推移した。また、2回目の RCIC 運転中の原子炉圧力挙動には、小さい圧力の低下と上昇、及び大きい圧力の低下と上昇を繰り返していた状況が確認されている。ここでは、原子炉圧力がこのような挙動を示した要因を考察する。

(1) 原子炉圧力の上昇傾向について

原子炉圧力の変化が全体的には上昇傾向だった要因について考える。この期間では、原子炉水位に急激な水位低下が無かったこと、及び原子炉圧力にも急激な圧力低下が確認されなかったことを踏まえると、RPV のバウンダリに有意な漏えいは無かったと考えることができるので、この期間の原子炉圧力は RPV 内のエネルギーバランスの関係に従って変化していたと考えることができる。すなわち、この期間の RPV 内のエネルギーバランスは正であったといえる。

3号機の崩壊熱の時間変化を図4に示す。図に示すように、2回目の RCIC 注水開始時(11日 16:16)の崩壊熱が約27MWであるのに対し、通常の RCIC 運転では約70MWの除熱が可能である[5]。したがって、エネルギーバランスの関係からは原子炉圧力は低下すると考えられるものの、当時の原子炉圧力は上昇傾向を示していたので、この時の RCIC 運転では崩壊熱を十分に冷却できない状況にあったといえる。すなわち、バッテリー消費を避けると同時に原子炉水位を確保するための特殊な操作となったので、RPV への注水量は通常の RCIC 運転時よりも少ない状況であったと考えられる。

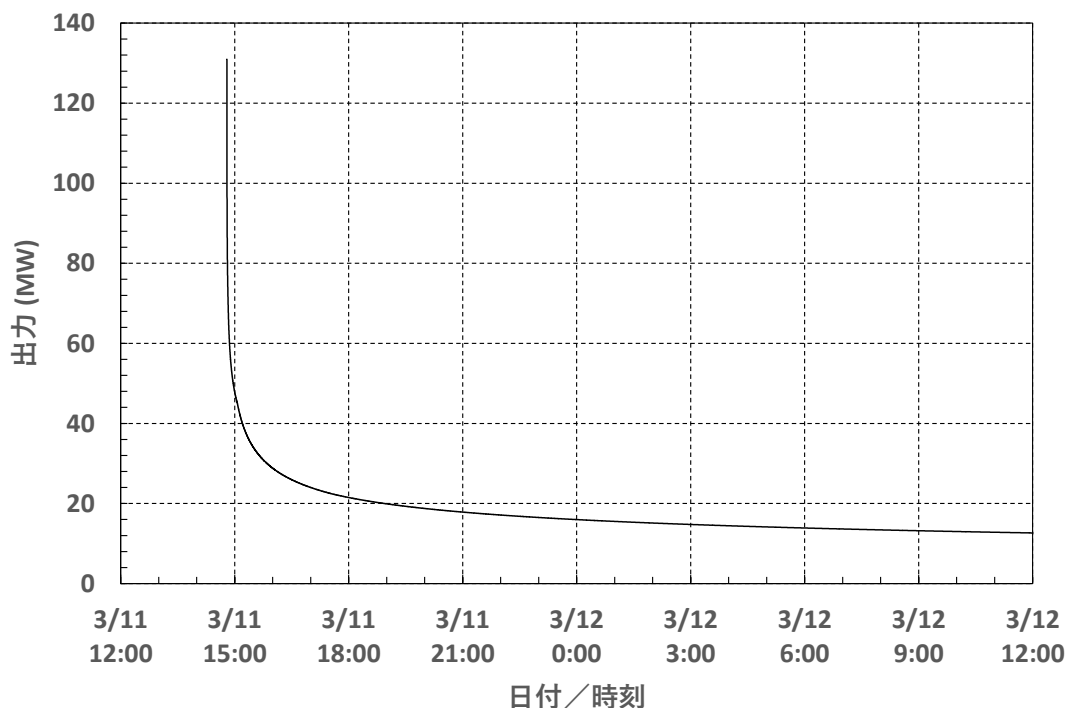


図4 崩壊熱の時間変化[6]

(2) 大小の圧力低下と上昇を繰り返した挙動について

2回目の RCIC 運転期間における原子炉圧力の全体的な変化の中に見られる

小さい圧力の低下と上昇、及び大きい圧力の低下と上昇について考察する。崩壊熱とのエネルギーバランスで考えると、RPV への注水のほか RCIC タービンへの抽気のみでは崩壊熱を除熱することができないので除熱の要因が更に存在しないと圧力は低下しないことになる。したがって、RCIC を作動させるための蒸気消費の他に、SRV 経由での RPV から PCV への蒸気放出がこの期間にはあったことが考えられる。

この時に予想される SRV の開モードについて考える。図 5 に示すように、SRV は弁を閉じる作用力よりも大きい作用力を与えることによって開く構造になっている。通常の逃がし弁モードでの SRV 開閉のメカニズムについて説明する。原子炉圧力が個々の SRV の吹き出し圧力まで上昇すると SRV 開信号が ON となり、図中の左側のシリンダーに窒素ガスが供給され、その窒素ガスによる作用力（図中の P_N ）と原子炉圧力の作用力（図中の P_R ）との合計が弁を閉じる作用力（図中の P_P+P_A ）よりも大きい場合に SRV が開く。その後、原子炉圧力が個々の SRV の吹き止まり圧力まで低下すると SRV の開信号が OFF となり、シリンダー内の窒素ガスが PCV に排出され、窒素ガスによる作用力（図中の P_N ）が無くなることで SRV が閉じる。一方、2 回目の RCIC 運転期間中には、SRV の吹き出し吹き止まりの圧力よりも細かな原子炉圧力の変動が見られており、この要因として、SRV が全開又は全閉にならない開閉状態になっていた可能性が考えられる。SRV がこのような開閉状態となるメカニズムとしては下記が想定し得る[5]。

- SRV に窒素を供給するアキュムレータへの新たな窒素供給が無い中で、SRV が開閉したことでアキュムレータ内の窒素が消費され、窒素ガスによる作用力（図中の P_N ）が低下する。
- 数回の作動により P_N が低下した中 SRV が開いた場合には、原子炉圧力が吹き止まり圧力まで低下する前（つまり、SRV 開信号は保持されたままの状態）に、原子炉圧力の作用力（図中の P_R ）が低下することで SRV が閉じるといった事象が起こり得る。
- SRV 開信号が保持されているため、シリンダー内の窒素ガスは排出されず、ある程度の作用力を維持する。その状態で原子炉圧力が上昇すると、再び SRV が開くが、すぐに原子炉圧力が低下するため小さな圧力変化幅で開閉を繰り返す。

一方、安全弁モードでは原子炉圧力の作用力（ P_R ）が弁を閉じる作用力（図中の P_A ）よりも大きい場合に開くので、ばねの温度が上昇してヤング率が下がるなどの要因によってばね荷重が小さくなることがあると、設定値よりも低い圧力で開く可能性がある。この期間に生じた SRV 経由での蒸気放出がどちらのモ

ードによる開であったかを特定することは困難であるものの、これまで述べたように、この時間帯では崩壊熱は低下しているので蒸気発生量が減少してきていることを踏まえると、SRV は開になってもすぐに原子炉圧力が低下して閉になる可能性はあったと考える。

また、この期間の原子炉圧力が低下と上昇を繰り返す要因としては、前述のように RCIC による注水量を調整していたことによる影響も考え得る。RCIC による注水量が増加すると、崩壊熱による蒸気発生量が減少することで原子炉圧力が低下し、逆に注水量が減少すると原子炉圧力が上昇することになる。この期間の原子炉圧力に見られる大小の圧力低下と上昇は、上記の SRV の開閉と RCIC による注水量の増減の両方が関係していた可能性が考えられる。

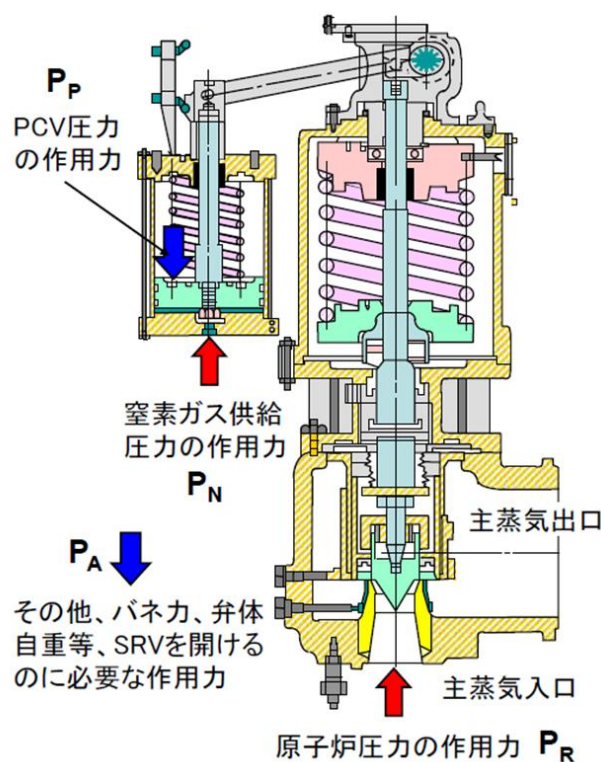


図 5 SRV の断面図[5]

3. シミュレーションによる検討

本章では、RCIC から RPV への注水、並びに SRV の開閉及び RCIC タービンへの抽気を解析条件に設定した 3 号機のプラントパラメータの再現解析を行い、RCIC の運転期間における原子炉圧力挙動を検討する。

3.1 解析体系及び解析条件

再現解析では BWR の 2 相流挙動をより实际的に評価することができる 2 流体モデルの RELAP5 コードを使用した。3 号機を模擬したノーディング図を図 6 に示す。図に示すように、原子炉压力容器、再循環ループ、給水系、主蒸気系などを模擬するコンポーネントでプラント全体を模擬した。また、対象期間のプラント挙動を再現するため、原子炉からの蒸気放出として、設計条件に従って開閉する SRV、RCIC タービン抽気、及び当該期間において解析上設定した条件にて SRV 経由の蒸気放出を模擬する弁（以下「蒸気放出模擬弁」という。）を設け、そして、RCIC から RPV への注水を模擬するコンポーネントを設けた。なお、原子炉スクラム後の崩壊熱はコード内蔵のモデルを用いた。当該期間のプラント挙動に影響を与える主要な解析条件の設定を次に示す。

(1) 設計条件に従って開閉する SRV について

津波到達までは SRV の逃がし弁モードによる通常の開閉が継続するとし、表 1 に示す開圧力及び作動順序に従って開く設定とした。作動順序については、SRV の開閉が C 弁、G 弁、そして A 弁と切り替わった状況が過渡現象記録装置 [3] に記録されているが、その点をふまえて便宜上設定したものである。また、津波到達に伴う全交流電源喪失後の SRV の開閉は、アキュムレータ圧力の低下を考慮し、過渡現象記録装置の記録に基づいて 8 回開閉するとした¹。

表 1 SRV 開閉の設定圧力と本解析での作動順序（単位：MPa[gage]） [7]

	A	B	C	D	E	F	G	H
開圧力	7.51	7.58	7.44	7.58	7.51	7.58	7.51	7.58
作動順序	3	5	1	6	4	7	2	8

(2) 蒸気放出模擬弁（SRV 経由の蒸気放出の模擬）について

2 回目の RCIC 運転期間における SRV 経由の蒸気放出については、上述したように、通常の開及び全閉ではないと考えられるので、原子炉圧力及び原子炉水位挙動を再現する面積として 1 弁全開時の 10% とした。弁の開閉条件は、原子炉圧力の測定値をおおむねトレースする曲線（図 7）を弁の開閉を制御する時々刻々の設定値とし、この設定値と原子炉圧力との関係に従って開閉する設定とした。

- ・ 弁面積 全開時の SRV 面積の 10%

¹ SRV の C 弁の作動が示されなくなった後、続いて作動した G 弁では 8 回の作動が過渡現象記録装置に記録されている [3]。

- ・開閉条件 開：原子炉圧力 > 図 7 に示す圧力の設定値
閉：原子炉圧力 < 図 7 に示す圧力の設定値

(3) 1 回目の RCIC 運転の模擬

11 日 15:05 に手動起動された 1 回目の RCIC 運転では、原子炉水位高によって 15:25 に自動停止するまでの間、2 回目の RCIC 運転のような流量調整の操作は行われなかった。したがって、この期間の RCIC から RPV への注水量は一定値で流入するとした。

- ・注水期間 15:06 に注水を開始し²、解析で原子炉水位が L8 に達する 15:25 に注水を停止。
- ・注水量 30 kg/s (原子炉水位高 L8 で RCIC が停止する時刻が測定値に一致する注水量とした)

(4) 2 回目の RCIC 運転の模擬

11 日 16:03 に手動起動され、16:16 から RCIC から RPV への注水が開始された 2 回目の RCIC の運転は、原子炉水位高による自動停止とならないように原子炉水位を監視しながらの操作だったので実際の RPV への注水の状況は分からない。しかしながら、上述したように、この原子炉水位の測定値 (図 1) は RPV への注水状況が反映されたものと考えることができる。したがって、蒸気放出模擬弁の開閉条件の考え方と同様に、原子炉水位の測定値をおおむねトレースする曲線 (図 7) を設定し、この設定値と原子炉水位との関係に従って RPV への注水の有無を切り替えるとした。この注水条件は RCIC が自動停止する 12 日 11:36 分まで継続させた。なお、RPV への注水量は、原子炉圧力及び原子炉水位を再現する流量として、1 回目の注水量の 80% とした。

- ・注水期間 11 日 16:16 ~ 12 日 11:36
- ・注水量 1 回目の注水量の 80%
- ・注水条件 原子炉水位が測定されている 11 日 17:10 から次に示す条件で注水を切り替える。ただし、原子炉水位高によって RCIC が自動停止するトリップは無効化した。
注水：原子炉水位 < 図 7 に示す水位の設定値
停止：原子炉水位 > 図 7 に示す水位の設定値

(5) RCIC 運転中の RCIC タービンへの抽気流量

RCIC タービンへの抽気の模擬は、RCIC の運転に必要な蒸気消費量に相当す

² 解析は当直員引継日誌の時刻に基づいて設定したものである。なお、参考文献[1]は 3 号機のアラームタイプに記録された時刻を記載している。

る量が抽気される弁面積を設定し、RCIC 運転中は開放させた。

- 弁面積 RCIC 運転時の蒸気消費量となる面積
- 抽気期間 RCIC 運転が行われた期間 (1 回目及び 2 回目)

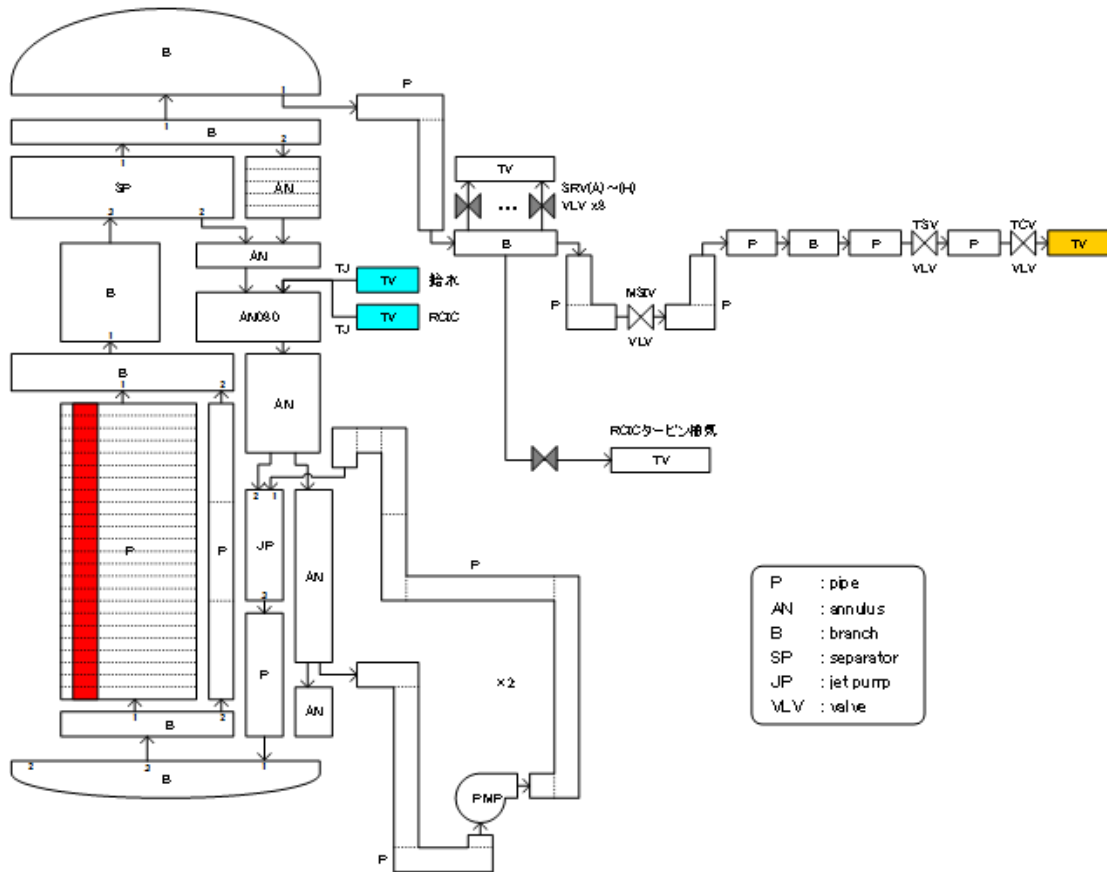


図 6 解析ノード図

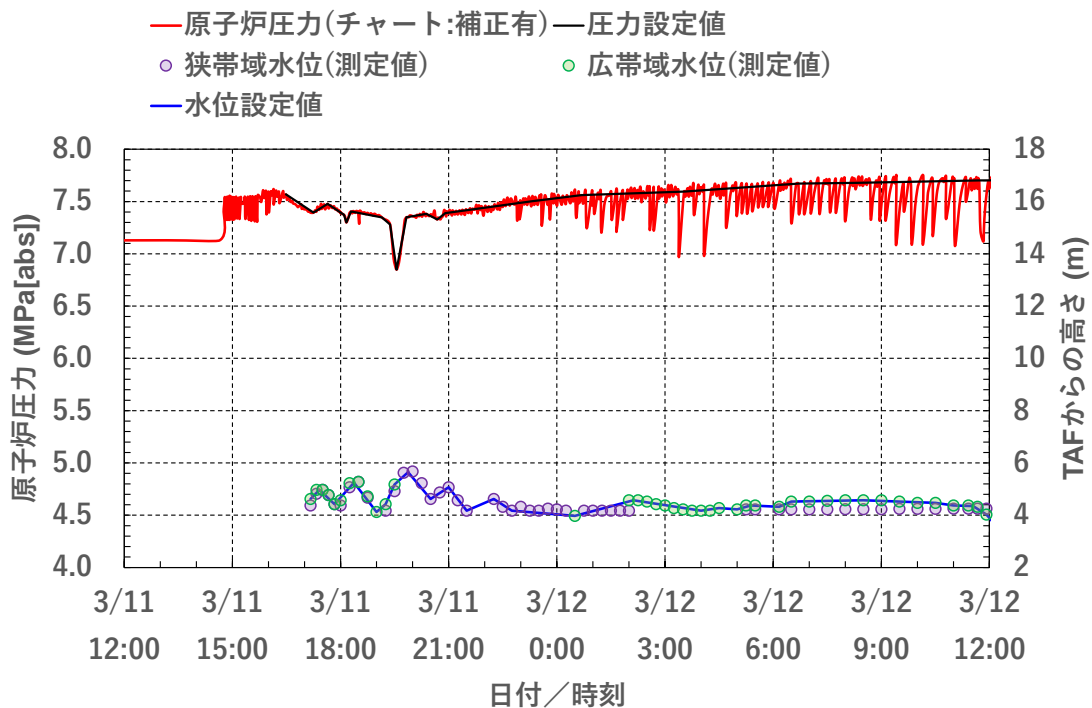


図 7 解析で使用した設定値（黒：圧力設定値、青：水位設定値）

3.2 解析結果

原子炉水位及び原子炉圧力の解析結果を測定値と比較して図 8 に示す。RCIC が手動起動されるまでのプラント挙動は、地震発生に伴う原子炉スクラムによる原子炉出力の低下によって原子炉水位及び原子炉圧力は低下するものの、MSIV が閉鎖されるのでこれらのパラメータは上昇に転じ、SRV 開閉による原子炉圧力の制御が RCIC 運転開始まで継続する結果となっている。RCIC 運転開始後の解析結果について以下に説明する。

(1) 原子炉水位

1 回目の RCIC 運転を模擬した期間の原子炉水位変化は、SRV の開閉に伴って蒸気が放出されるので水位低下するものの、11 日 15:06 から RCIC の注水を開始するので原子炉水位は上昇に転じている。原子炉水位は上昇を続けて 15:25 には原子炉水位高 L8 に達し、上述した解析条件に従って注水を停止したので原子炉水位は再び低下する結果となった。この期間の原子炉水位の測定値は無いものの、原子炉水位高で RCIC が自動停止したタイミングが事故発生時の記録 [1]エラー! 参照元が見つかりません。とおおむね同じ時刻であったことを踏まえると、1 回目の RCIC 運転における RPV への注水状況を再現していると考えられる。

11日 16:03以降の2回目のRCIC運転における解析結果について述べる。16:16からのRPVへの注水開始によって原子炉水位は上昇する。この時の原子炉水位の上昇は測定値と同様であるものの、測定値よりも早い水位上昇となっており、解析で注水を停止した時点(17:10)では測定値よりも高い水位となっている。これは、解析条件で述べたように、2回目のRCIC運転の注水条件を測定値が記録された17:10以降に設定したため、16:16から同時刻までは原子炉水位の状況と関係なく、定格の80%の注水量で継続した結果である。したがって、シミュレーションではRPVへの注水量は実際よりも多い結果になっているといえる。なお、RPVへの注水量が実際よりも多い結果になっていることは、後述する原子炉圧力に見られる大きな圧力低下の要因でもあると考えられる。

17:10以降のRCICからRPVへの注水は、水位測定値をトレースした設定値と原子炉水位との関係に従い、RCICからRPVへの注水及び停止を図9に示すように繰り返すことによって、原子炉水位の測定値を再現する結果になっている。

(2) 原子炉圧力

11日 15:06にRCICの注水を開始するまでの原子炉圧力は、原子炉スクラムによる原子炉出力の低下によって圧力低下するものの、その後MSIVが閉鎖するので原子炉圧力は上昇に転じ、SRVの開閉によって原子炉圧力は制御される結果となっている。

1回目のRCIC運転期間の原子炉圧力挙動について述べる。15:06からRPVへの注水を開始し、原子炉圧力は15:13頃から低下を始めるものの、15:25に原子炉水位が原子炉水位高L8に達してRCICは停止するので、原子炉圧力は上昇に転じてSRV開設定圧に再び達し、SRVの開閉による原子炉圧力の制御が継続している。

2回目のRCIC運転では、16:30頃から原子炉圧力は大きく低下し始めており、この時の圧力低下は測定値よりも大きい結果となっている。このような差異が生じている要因は次のように考える。原子炉水位の結果で説明したように16:16からのRPVへの注水が実際よりも多い結果になっているので、崩壊熱の発熱がより冷却される状態になっていることを踏まえると、解析結果の原子炉圧力が大きく低下している要因は、RCICからRPVへの注水量の違いによるものと考えられる。また、解析コードを用いたシミュレーションでは、プラント全体を複数のノードに分割して模擬するので、ノード内の温度は均一化されて減圧挙動を大きく評価する傾向があることも考えられる[5]。

このような大きい圧力低下は18:08頃及び19:15頃にも見られる。図9に示すように、解析ではこのタイミングでRCICからRPVへの注水が開始してお

り、また、この頃の崩壊熱は 16:16 よりも更に低下している状況なので (図 4)、2 回目の RCIC 運転の注水開始時に見られた大きい圧力低下と同様のメカニズムによって生じたものである。

解析では、19:55 頃に RPV への注水を停止したことに伴い、原子炉圧力は上昇に転じ、蒸気放出模擬弁の開閉設定圧まで上昇する。その後の推移は、RCIC から RPV への間欠的な注水 (図 9) 及び蒸気放出模擬弁の開閉 (図 10) によって、測定値に見られるような間欠的な圧力の低下及び上昇を繰り返しながら、原子炉圧力が緩やかに上昇する傾向を再現する結果となっている。

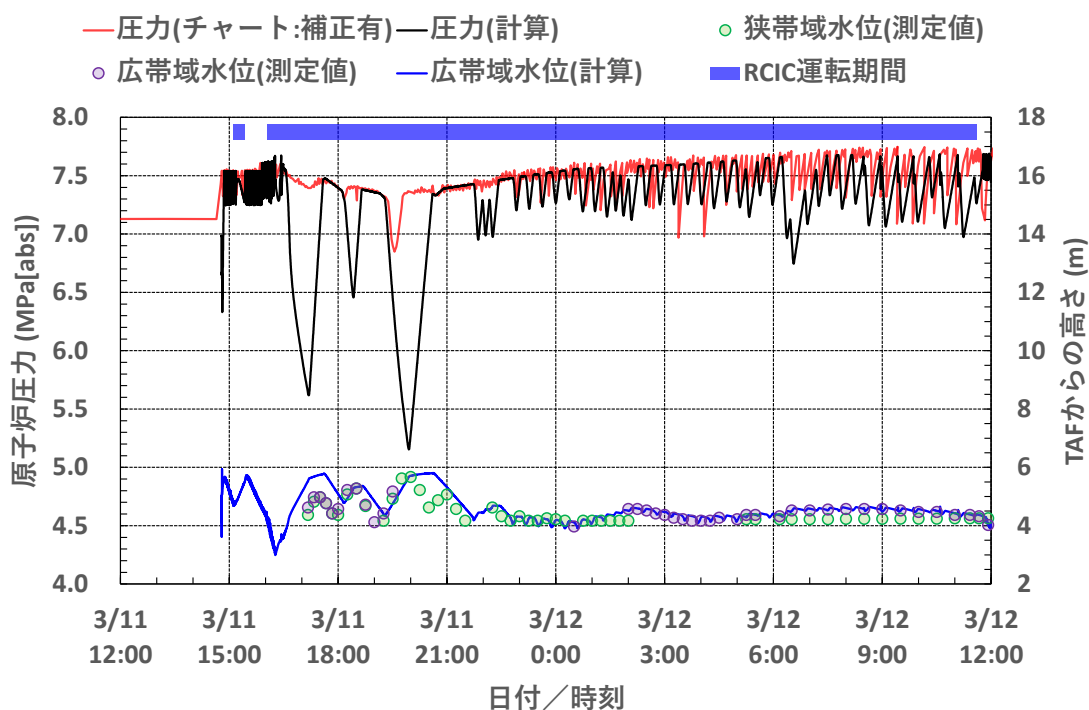


図 8 原子炉水位と原子炉圧力

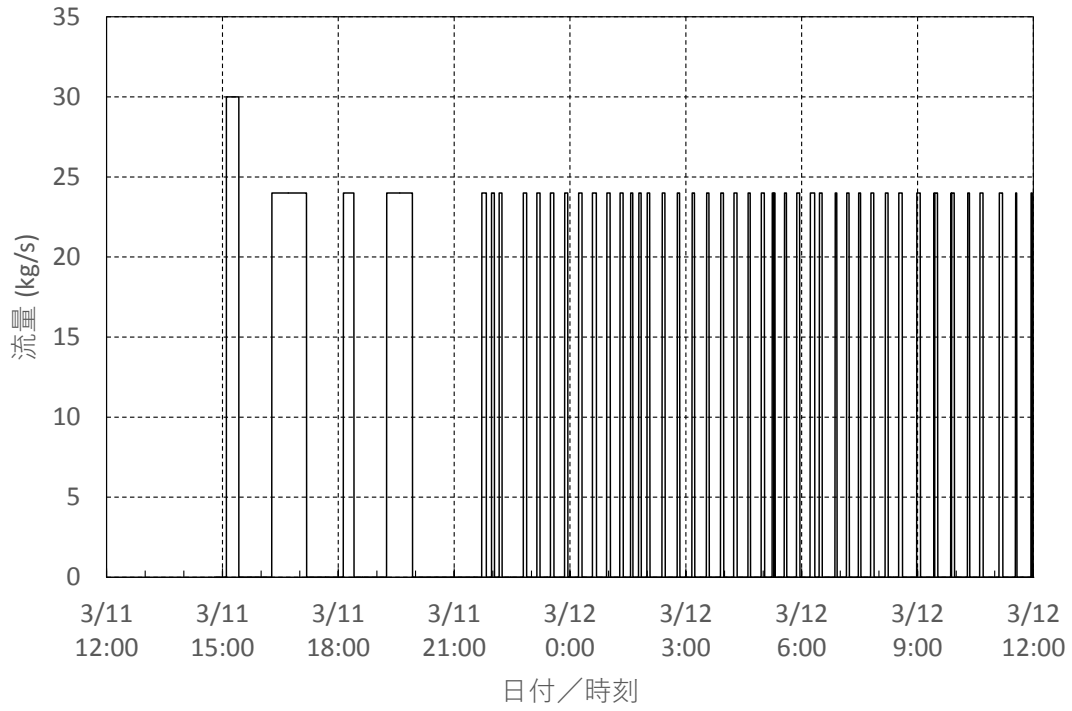


図 9 RCIC から RPV への注水流量

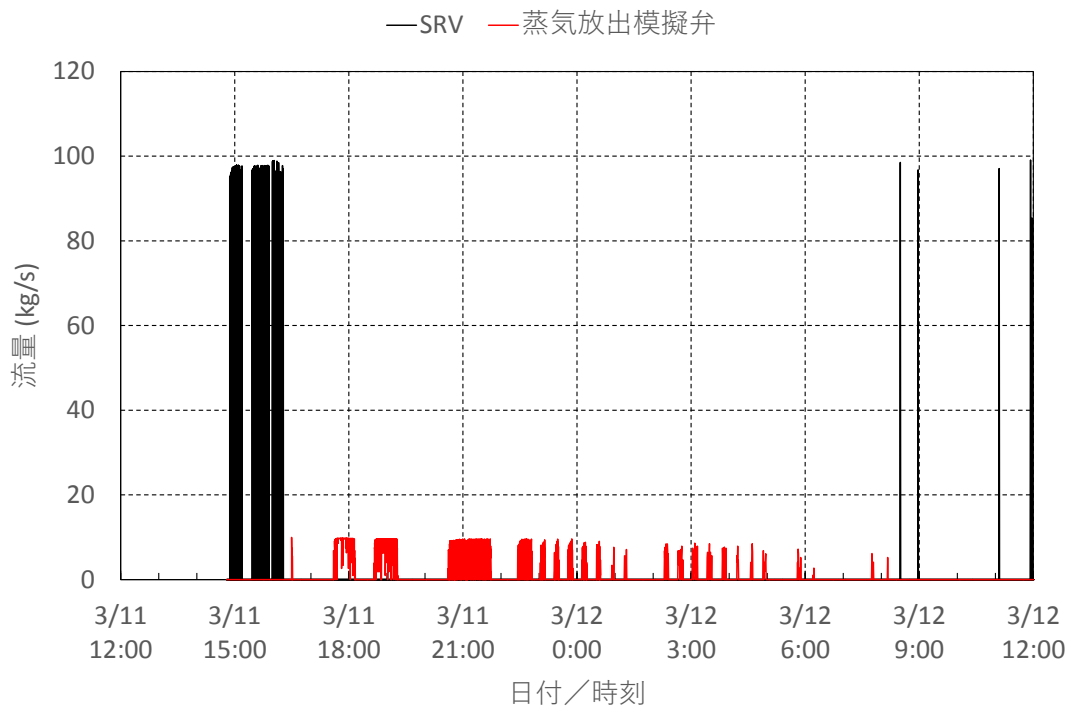


図 10 SRV 及び蒸気放出模擬弁の流量

3.3 RCIC 運転期間の原子炉圧力挙動について

ここでは、上述した解析結果を踏まえて RCIC 運転期間における実際の原子炉圧力挙動のメカニズムを説明する。

解析結果では、11 日 15:06 から開始した 1 回目の RCIC 運転によって RPV は冷却されるので、この頃まで継続していた SRV の開閉に伴う原子炉圧力の低下及び上昇の繰り返しが一時的に見られなくなる。その後、15:25 に原子炉水位が原子炉水位高に達して RCIC が停止したので、再び SRV によって原子炉圧力は制御される状況が 16 時頃まで継続している。これは、図 11 に示す崩壊熱と SRV、RCIC 抽気及び蒸気放出模擬弁の蒸気放出による除熱との比較に見られるように、津波が到達するまでの SRV 開閉条件として設定した SRV の蒸気放出に伴う除熱が崩壊熱よりも大きいことから確認することができる。

2 回目の RCIC 運転では、16:16 に注水が開始されてから 20 時頃までの原子炉圧力は低下及び上昇を繰り返しながら全体的には低下傾向で推移し、20 時以降はそれまでよりも小さい圧力低下及び上昇を繰り返しながら全体的には上昇傾向で推移する結果となっている。

注水開始から 20 時頃までの原子炉圧力の挙動について整理する。図 8 に見られるように、16:16 から開始された RPV への注水によって原子炉水位は上昇を続ける。そして、RPV への注水の制御を 17:10 に開始すると³、原子炉水位は設定値よりも高い状況なので注水が停止され(図 9)、原子炉圧力は上昇している。これは、RPV への注水によって崩壊熱による炉内の蒸気発生量が減少し、注水が停止すると蒸気発生量が増加したことによるものである。同様の挙動は 18:07～18:23 及び 19:15～19:55 にも生じている。なお、解析結果に見られる 20 時頃までの原子炉圧力の全体的な低下傾向は、当該期間の RCIC から RPV への注水による冷却効果が崩壊熱を上回る関係であったことを示唆するものである。

20 時頃から原子炉圧力は上昇に転じ、2 回目の RCIC 運転が停止する 12 日 11:36 まで、それまでよりも小さい圧力低下及び上昇を繰り返しながら全体的には上昇傾向で推移している。解析結果に見られる小さい圧力低下は解析条件に従った RCIC から RPV への注水のタイミングと一致しており(図 9)、20 時頃までに見られた圧力低下と同様に、RCIC から RPV への注水に伴う冷却の影響と考えられる。一方、RCIC が停止するまでは、測定値と同様に、全体的には上昇傾向となっている。これは RCIC タービンへの抽気による蒸気放出だけでは崩壊熱を消費できないことを示すものであり、崩壊熱を消費するための別途の蒸気放出が必要だったことを示唆するといえる。崩壊熱による

³ 2 回目の RCIC 運転の注水制御は原子炉水位が記録されている 17:10 から設定。

発熱と蒸気放出による除熱の積分値の比較を

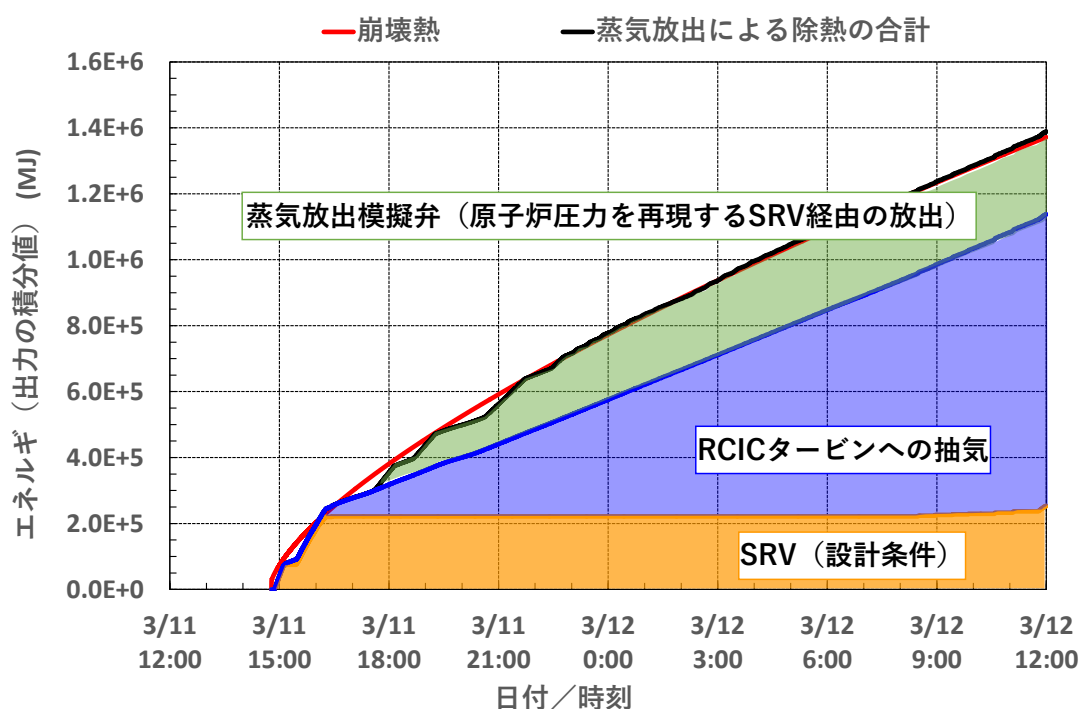


図 12 に示す。図に見られるように、2 回目の RCIC 運転期間の原子炉圧力の上昇傾向を再現するには、設計条件に従った SRV の開放及び RCIC タービンへの抽気の蒸気放出に加えて蒸気放出模擬弁の蒸気放出によって崩壊熱を消費する必要があったことが分かる。

RCIC が運転していた期間の測定値には、原子炉水位に急激な水位低下、及び原子炉圧力にも大きな圧力低下は確認されておらず、RPV のバウンダリには有意な漏えいが無かったことを踏まえると、上述の解析結果に見られるように、SRV 経由でサプレッションチェンバへ流れる蒸気放出があった可能性が高いといえる。ただし、図 11 からわかるように、設計条件に従って SRV が全開した場合よりも少ない流量の蒸気放出であったと考えられる。

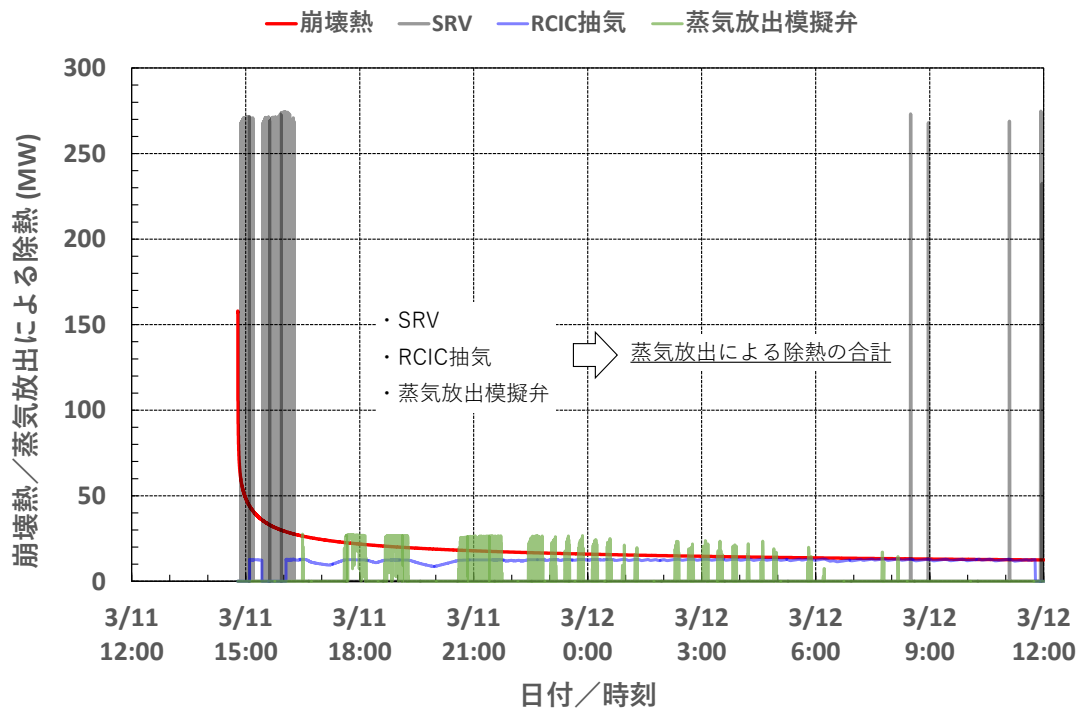


図 11 崩壊熱と蒸気放出による除熱の比較

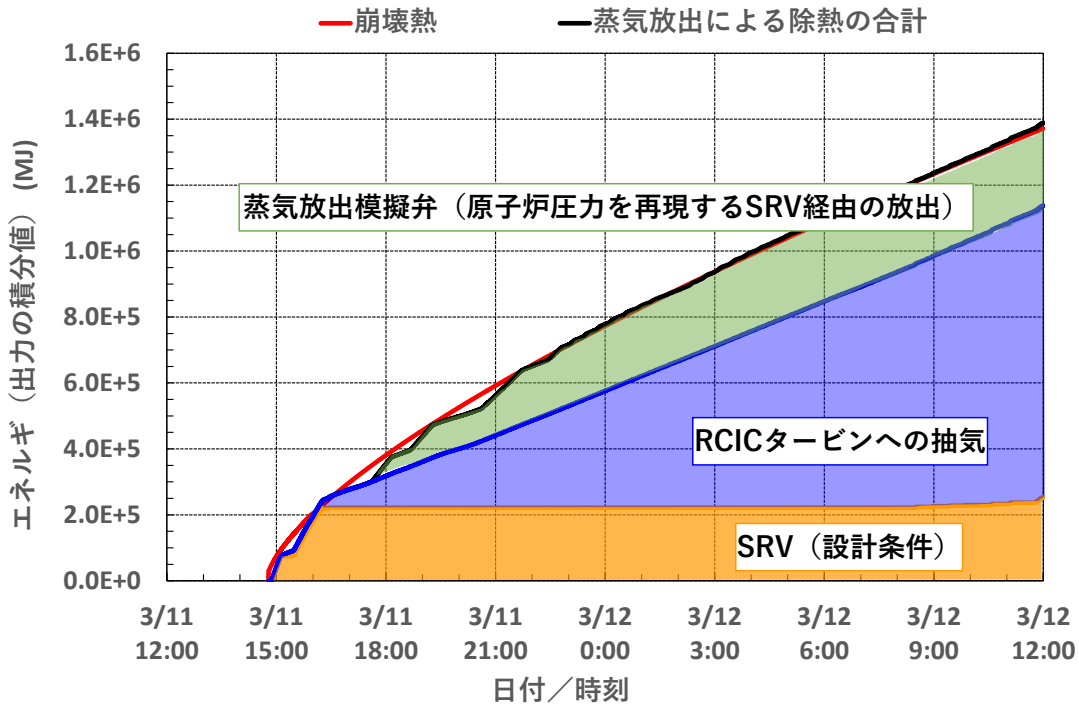


図 12 崩壊熱と蒸気放出による除熱の積分値及びその内訳

4. まとめ

この添付資料では 3 号機 RCIC 運転時の原子炉圧力挙動に注目して当時のプラント挙動を検討し、下記を確認した。

- ・ この期間は RPV のバウンダリが健全だったことを踏まえると、RCIC 運転時の原子炉圧力挙動は RPV 内のエネルギーバランスの関係に従って推移したといえる。
- ・ 2 回目の RCIC 運転開始から 19:30 頃までの期間に見られる原子炉圧力の大きな低下は、解析ではノード内の温度が均一化されて減圧を大きく評価する傾向はあるものの、RCIC から RPV への注水による冷却効果によって起こることを確認した。
- ・ 2 回目の RCIC 運転期間の原子炉圧力挙動について、設計条件に従った SRV の開放及び RCIC タービンへの抽気の蒸気放出だけでは崩壊熱を消費することができないので、SRV 経由でサプレッションチェンバへ流れる蒸気放出があった可能性が高い。ただし、設計条件に従って SRV が全開した場合よりも少ない流量の蒸気放出であったと考えられる。

これらの検討を通じて、RCIC 運転時の原子炉圧力の推移は、開閉モードの特定はできないものの SRV 経由の蒸気放出、及び RCIC から RPV への注水に伴う減圧効果を反映した挙動であったと考える。

5. 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策との関係について

本検討より、津波到達後、電源喪失により窒素を供給するアキュムレータへの新たな窒素供給が無い中で、SRV が開閉したことでアキュムレータ内の窒素が消費され、RCIC 運転期間に SRV が全開又は全閉にならない開閉状態になっていた可能性が考えられる。一方、原子炉の安全確保の観点では原子炉を減圧し低圧注水を促進するための ADS 機能及び手動による急速減圧機能が特に重要であり、これらの機能を維持するためには窒素供給手段や電源の確保が重要となる。

柏崎刈羽原子力発電所では、以下の対策により SRV の ADS 機能、手動による急速減圧機能を確保している（図 13 及び図 14 参照）。

- ・ アキュムレータの窒素喪失時の窒素供給手段を高圧窒素ガス供給系のポンベにより確保。さらに高圧窒素ガス供給系とは独立したラインからポンベからの窒素供給のみで逃し安全弁の動作が可能な系統を追設。
- ・ 逃がし安全弁への窒素供給ラインの電磁弁のシール材を高温耐性が優れ

た EPDM へ変更。

- ・ 逃がし安全弁への熱的影響緩和のための代替スプレイ手順を追加。
- ・ 常設直流電源喪失時に備え、AM 用蓄電池、可搬型直流電源設備（電源車）又は逃がし安全弁用可搬型蓄電池による供給手段を追加。

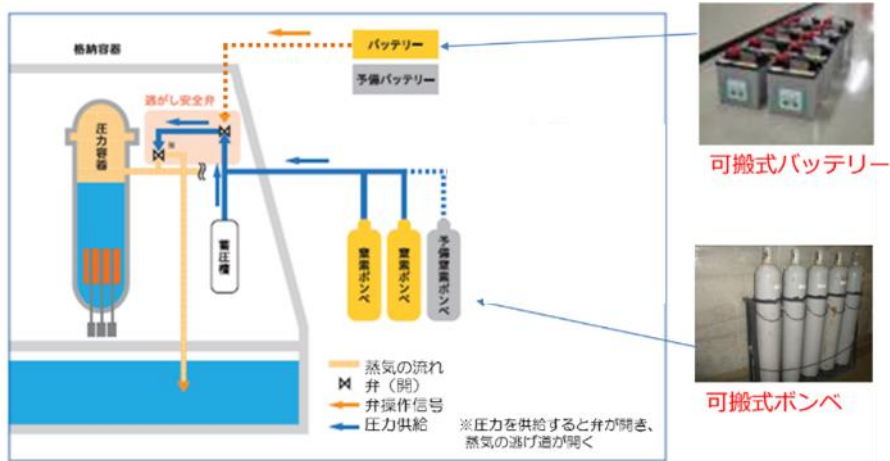


図 13 SRV による減圧機能確保のための対策（1/2）

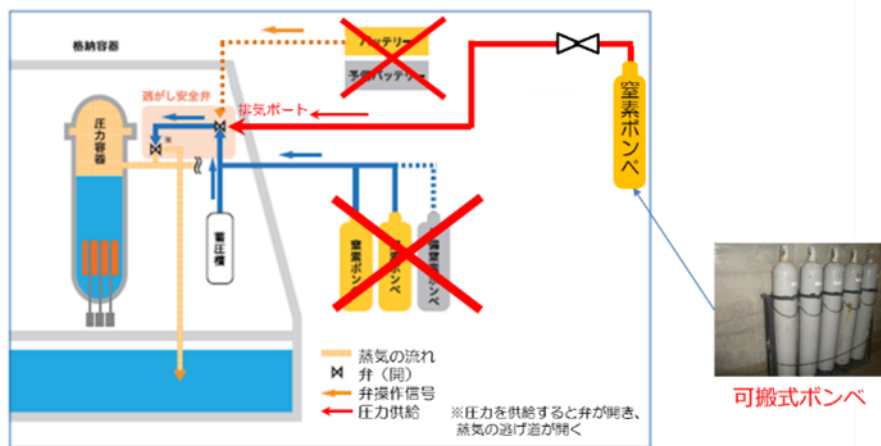


図 14 SRV による減圧機能確保のための対策（2/2）

参考文献

- [1] 福島原子力事故調査報告書 別紙 2 福島第一原子力発電所 3 号機における地震発生から 3 月 15 日（火）までの主な時系列、平成 24 年 6 月 20 日、東京電力株式会社
- [2] 福島原子力事故調査報告書 別紙 2 福島第一原子力発電所 3 号機 注水に関する対応状況について、平成 24 年 6 月 20 日、東京電力株式会社

- [3] 過渡現象記録装置データ（3号機）、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プラントデータ集 6. 過渡現象記録装置データ、東京電力ホールディングス株式会社、
https://www.tepco.co.jp/decommission/data/past_data/accident_plantdata/pdf/f1_6_Katogensho3.pdf
- [4] 3、4号機 当直長引継日誌、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プラントデータ集 4. 運転日誌類、東京電力ホールディングス株式会社、
https://www.tepco.co.jp/decommission/data/past_data/accident_plantdata/pdf/f1_4_Nisshi3_4.pdf
- [5] 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会 第14回会合 資料2-2 福島第一原子力発電所3号機のRCIC運転中の原子炉圧力挙動について、2020年9月3日、東京電力ホールディングス株式会社
- [6] Information Portal for the Fukushima Daiichi Accident Analysis and Decommissioning Activities 各号機の崩壊熱の時間推移、2012年11月30日、<https://fdada.info/develop/docs/pdf/ES-Unit123-05.pdf>
- [7] 福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第5回進捗報告 添付資料3-4 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、平成29年12月25日、東京電力ホールディングス株式会社