

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

1. はじめに

- 第12回の事故分析検討会において、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を明確に説明できないことが問題となった
 - 3号機のRCIC運転中の原子炉圧力挙動についての当社の認識は、RCICはCSTへの戻りラインと原子炉への注水ラインの両方を使う特殊な運転がされる中で、SRVが開閉するという複雑な状況での、原子炉圧力挙動であるというものであった
 - そのため、上記の定性的な説明の妥当性を確認するため、以下に示す流れで、再現解析も含めた検討を実施した
- ① RCICの操作実績と運転員の操作方法の確認
 - ② 当該期間中の崩壊熱の変化
 - ③ 逃がし弁開設定圧以下の状態でのSRVの動作モードについて
 - ④ 解析コードRELAPを用いた再現解析
 - ⑤ 総合的な評価とまとめ

また、国産初のBWRである3号機を建設したプラントメーカーである東芝より、当該期間中のSRV作動有無に関する見解を受け取っているため、その内容を参考として示す。

2. 3号機のRCICの操作実績

当直引継日誌の記載

2011年3月11日

15:06/15:25	RCICクイックスタート/L-8トリップ		
16:03	RCIC「起動」	Rx水位: -500mm	S/Cレベル: 150mm (ミニフロー弁開により上昇)
	RCICミニフロー弁「閉」		
16:13	HPCI、RCIC 水源切替防止リフト		
16:16	RCIC注入開始	Rx水位: -900mm	

2011年3月12日

象 発	11:36	RCIC トリップ	炉水位: +200mm (W)

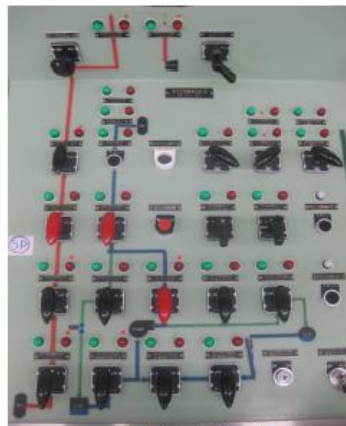
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/plant-data/f1_4_Nisshi3_4.pdf

3. 運転員の3号機のRCIC操作方法

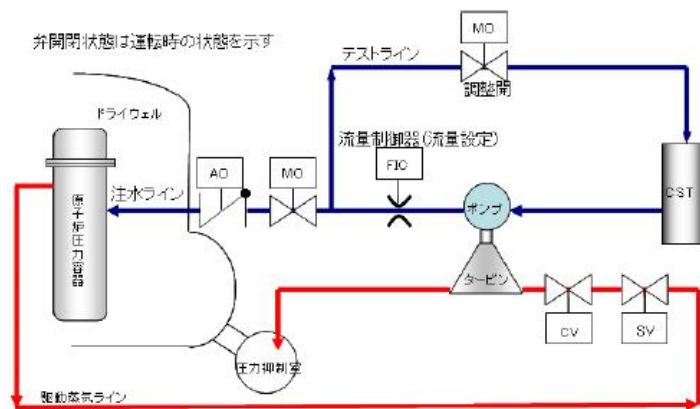
【RCICによる原子炉水位確保】

・ 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、原子炉水位高により自動停止に至らない措置、運転制御に必要なバッテリーを節約する措置を実施。

➢ 原子炉水位高によるRCICの自動停止に至らない措置として、中央制御室にて原子炉水位を監視しながら、原子炉への注水ライン及び定期的な機能試験に用いるテストライン(水源の復水貯蔵タンク(以下、CST)からCSTにループして戻すライン)の両ラインに通水するようにRCIC制御盤にて操作し、ラインを構成。水位調整範囲を定めて水位を確保した。



RCIC 制御盤 (後日撮影)

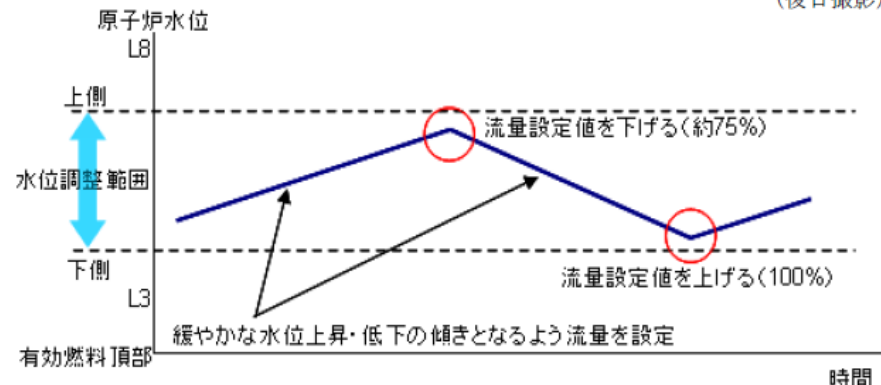


RCIC 及び HPCI の原子炉注水ライン概要

- 原子炉の水位監視に2名、RCICの操作に2名の体制で状況を報告し合いながら実施。また、次の注水手段として、RCIC停止後にHPCIをスムーズに起動するため、HPCI制御盤にて操作するスイッチなどに付箋を貼り準備を整えた。
- バッテリーを節約する措置として、弁や流量制御器(以下、FIC)の操作を少なくするため、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にて流量を設定した。原子炉水位が水位調整範囲の上側または下側に近づいたら流量の設定値を変更(定格流量(25.2L/s)100%から約75%の範囲)する方法を繰り返した。



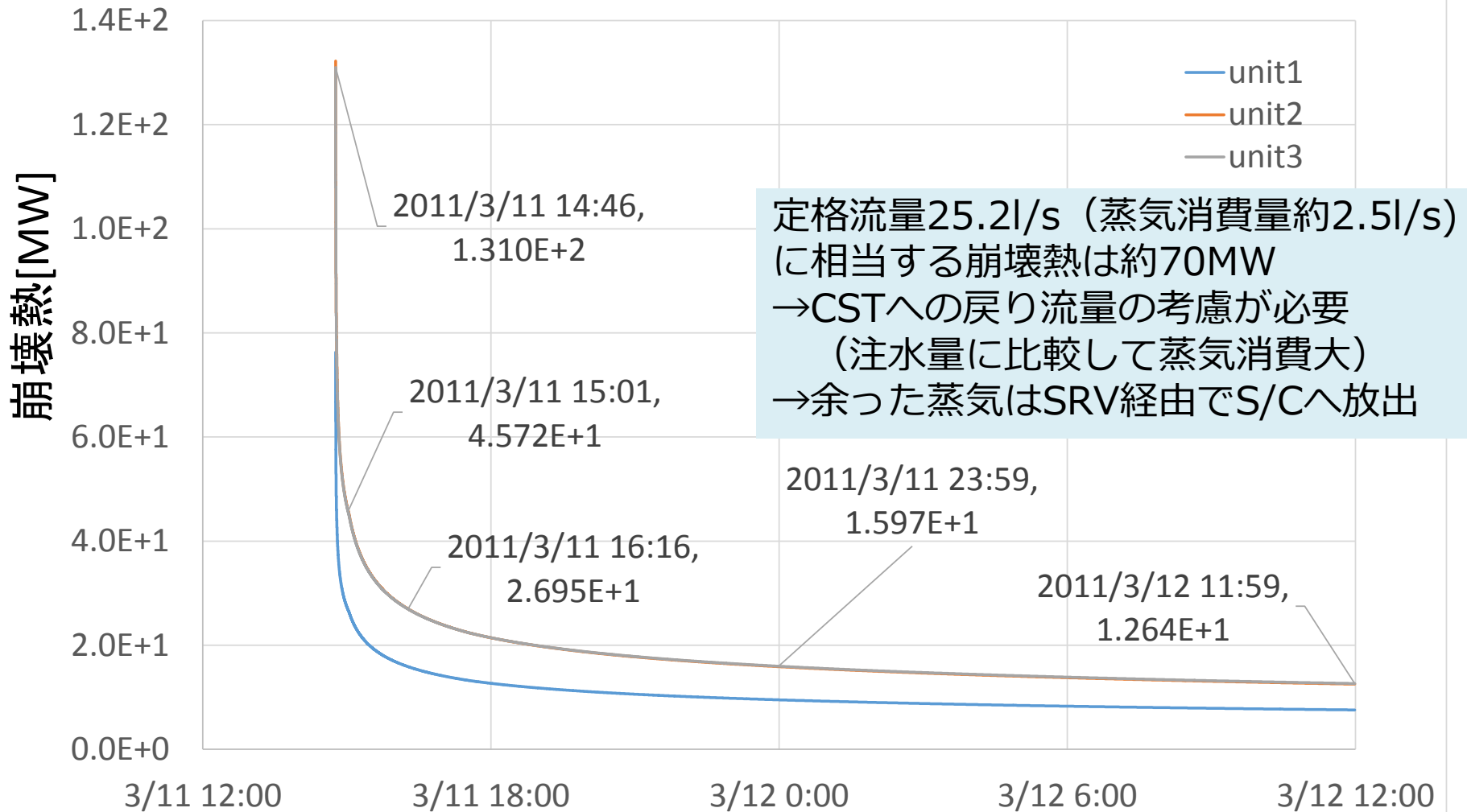
RCIC 流量制御器(FIC) (後日撮影)



原子炉水位の調整方法 (イメージ)

4. 崩壊熱

福島第一原子力発電所1～3号機の崩壊熱の時間変化



5. 予想されるSRVの開モード

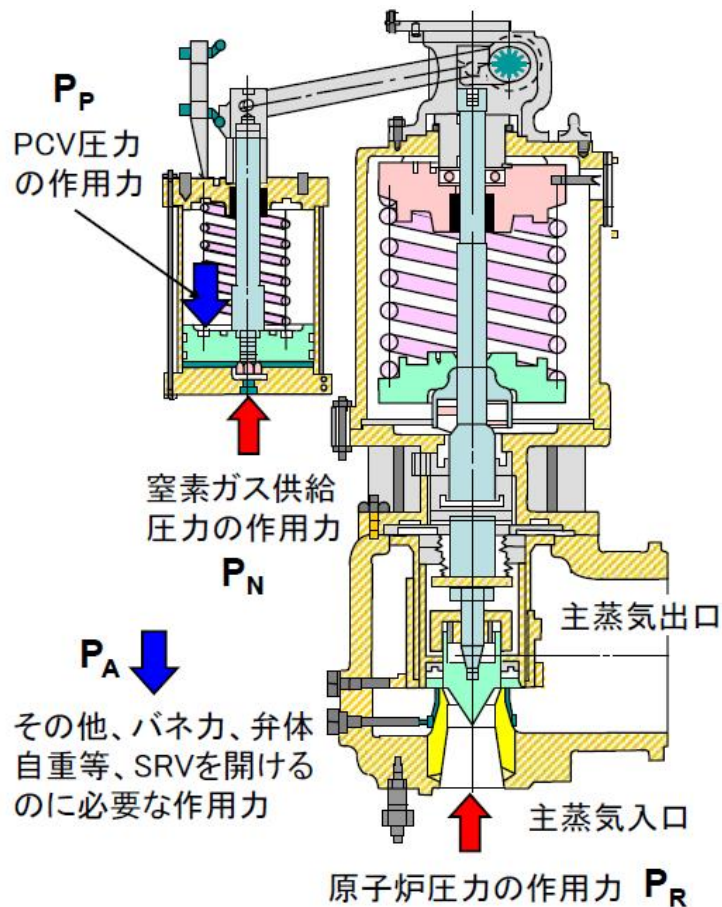


図7 SRV 断面図

逃がし弁モード

$P_P + P_A < P_N + P_R$
の場合に開

→復帰値まで減圧していない場合
原子炉圧力 (P_R) が上昇すると
開く可能性

いずれの場合も蒸気発生量が少ない
時間帯なので、開となってもすぐに
圧力が下がり閉となる可能性 (中間開)

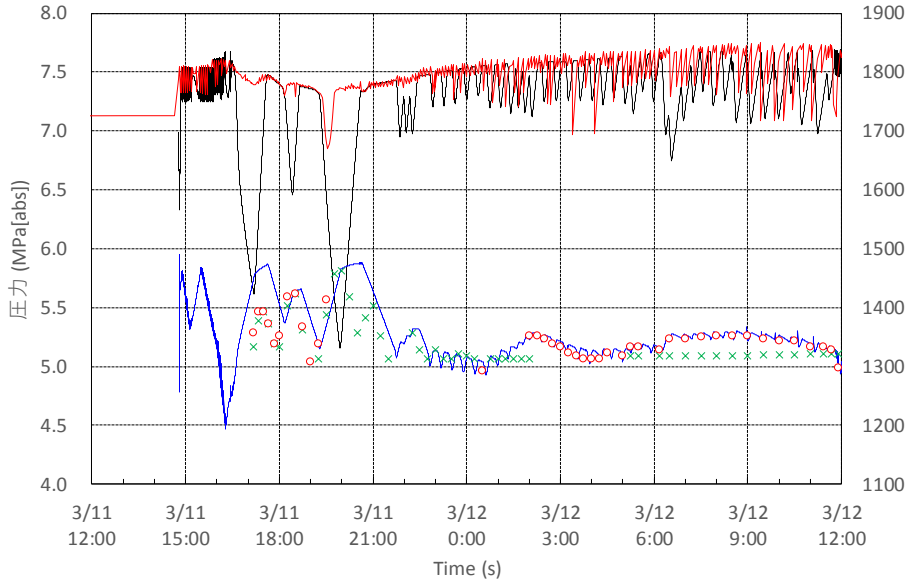
安全弁モード

$P_A < P_R$
の場合に開

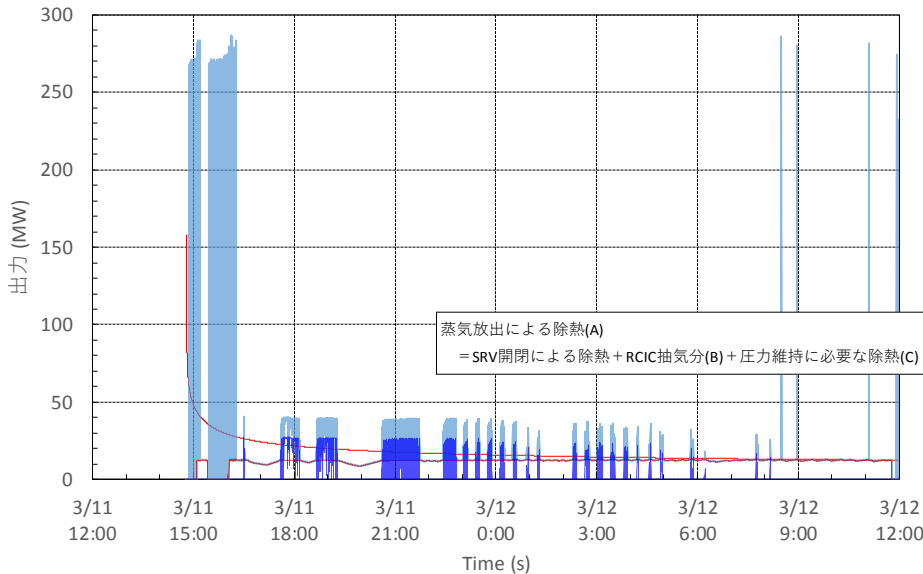
→ばねの温度が上昇することで
ヤング率が下がり、設定値より
低い圧力で開く可能性

6. RELAPを用いた解析結果 (プラント挙動)

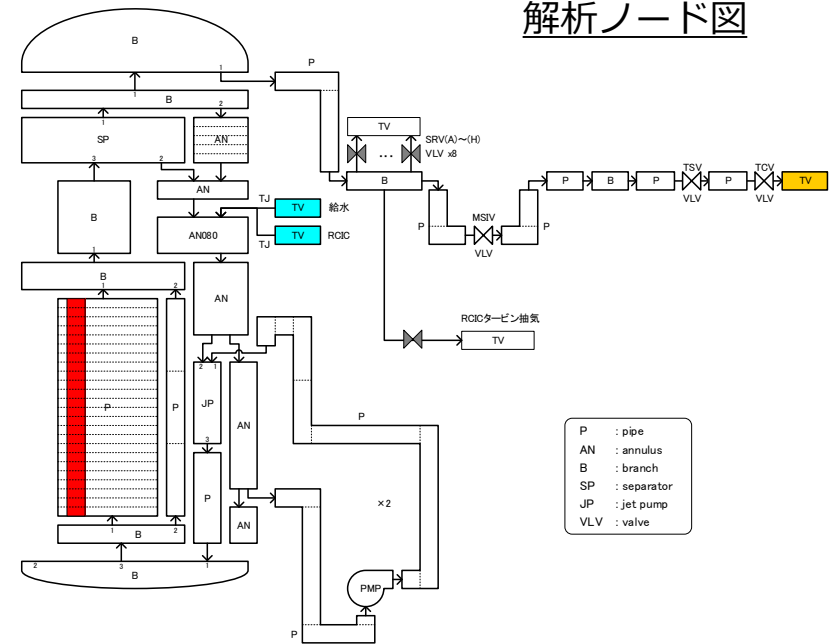
— 圧力(計算) — 圧力(チャート:補正有) — 広帯域水位(計算) × 狭帯域水位(測定値) ○ 広帯域水位(測定値)



— 崩壊熱 — 蒸気放出による除熱(A) — RCIC抽気分(B) — 圧力維持に必要な除熱(C)



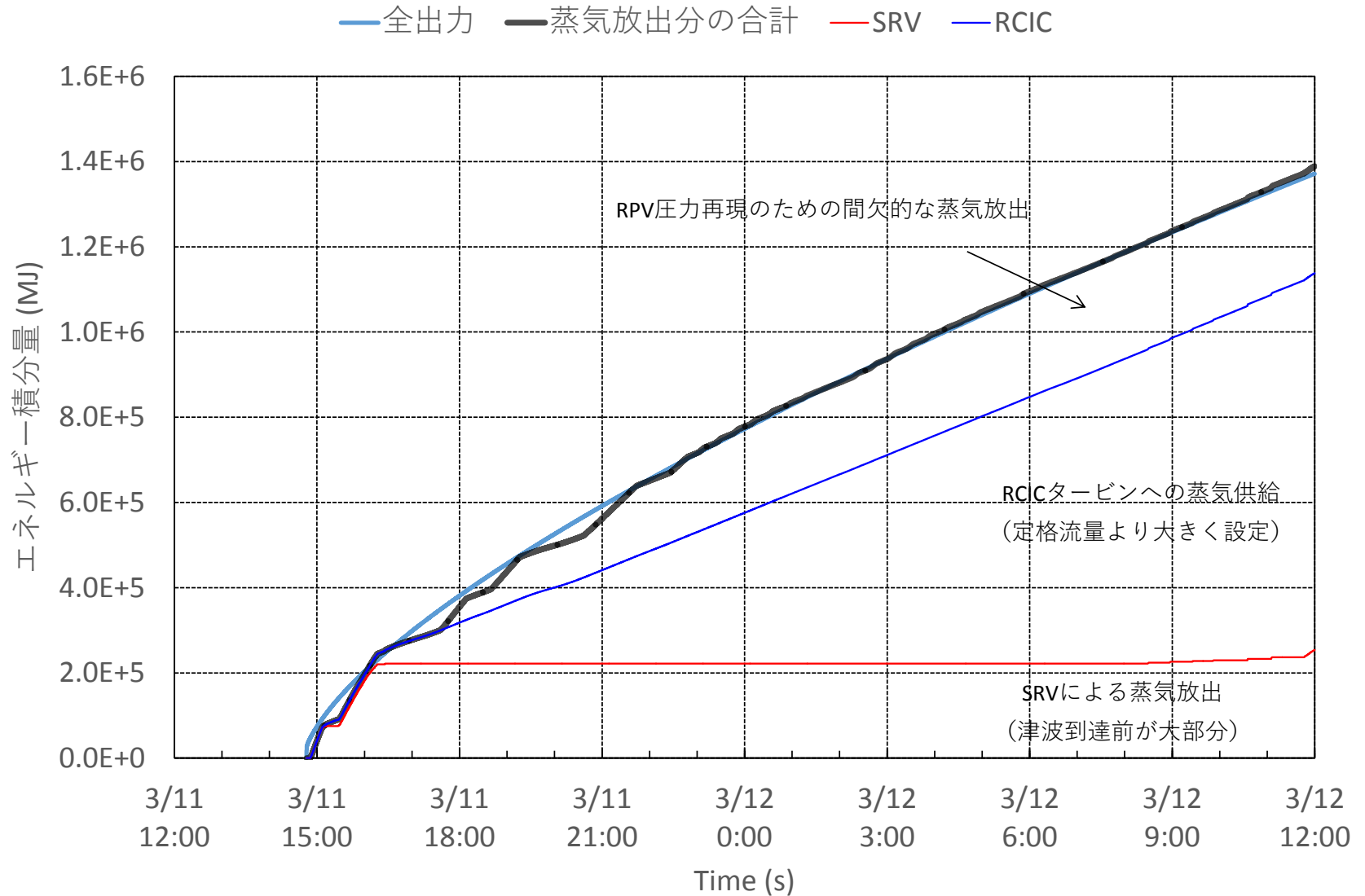
解析ノード図



圧力を維持するのに必要な蒸気について

- 原子炉圧力が緩やかに変動するように設定しているため、それを考慮すると流量はより大きく、放出間隔は長くなる
- RCIC注水による原子炉圧力の大きな変動は実測よりも変動幅が大きいいため、抽気と蒸気放出の割合は実際と異なる可能性がある(抽気流量は設計より大)
- RCIC抽気の過大評価はその他にも崩壊熱の過大評価、SRVシートリーク等の可能性がある。

6. RELAPを用いた解析結果 (エネルギーバランス)



7. まとめ

- 1F3のRCIC運転時の原子炉圧力挙動についての検討を実施した
- 津波到達以降のRCIC運転中の崩壊熱はRCIC定格流量に比較してかなり小さいものの、RCICタービンへの供給蒸気量（約2.5l/s）だけでは崩壊熱を消費できないため、SRV経由でのS/Cへの放出があった可能性が高い。
 - ただし、通常のSRVの流量よりも小さい流量（中間開の流路面積）と推定
- RCICから原子炉の注水される低温水による大きなRPV減圧が起こることが解析により示された。
 - （ノード内での温度均一化効果により、解析で評価される減圧は実際よりも大きくなる傾向）
- 1F3のRCIC運転時の原子炉圧力挙動は、炉圧変化に応じたSRVの中間開作動とRCIC注水による減圧の組み合わせを反映したものと考えられる。
 - ただし、逃し弁モードか安全弁モードかは特定が困難

(参考) 東芝ESSによるSRV開閉有無に関する見解

- 東芝ESSは東電同様、崩壊熱のエネルギーバランスから、SRV経由での蒸気放出は確実にあったとの見解
- SRV開設定圧未満でSRVが中間開になるメカニズムは以下の通り
 - SRVの開閉により窒素が消費され、アキュムレータ圧力が低下する
 - アキュムレータ圧力が低下すると、相対的に P_R の開挙動への影響力が高まる
 - 原子炉圧力がSRV開設定圧より低く推移する前の段階で、SRV開設定圧に到達しSRVが開いたが、 P_R の低下によりSRV閉設定圧に到達前に閉じる挙動となり、SRV開信号保持かつSRV閉の状態が成立する（若しくは僅かな開度でつり合った状態となる）
 - SRV開設定圧に到達しなくても、 P_R の上昇により $P_P + P_A < P_N + P_R$ が成立し、SRVが開くが、すぐに P_R が低下するため小さな圧力変化幅にて開閉を繰り返す。
 - ただし、19:30すぎのSRV閉設定圧に到達した後の圧力挙動については不明
- 初期アキュムレータ圧力 0.69MPaに対し、原子炉圧7.4MPaにおけるSRVが開き始めるのに必要なアキュムレータ圧力は0.090 MPa。全開に必要なアキュムレータ圧力は0.206 MPa（SRV力量バランスの簡易評価値、炉圧が低下すると増加）
- SRV開閉に窒素を消費することによる、アキュムレータ圧力は4回作動後0.210MPa、5回作動後0.145MPa、6回作動後0.094MPa、7回作動後0.053MPaと変化（断熱膨張を仮定した簡易評価値）
- 上記の評価値の関係から、中間開の状態が発生する可能性ありと評価