

平成 31 年度原子力規制庁委託成果報告書

原子力施設等防災対策等委託費  
(動的レベル 1 確率論的リスク評価手法の開発)  
事業

国立研究開発法人  
日本原子力研究開発機構  
令和 2 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

# 目次

1. はじめに .....	1
2. 動的に ET 解析を一貫して行う解析ツールの開発 .....	3
2.1. RAPID の開発方針 .....	3
2.2. 解析条件の生成 .....	6
2.3. 熱水力解析等のための入力データの作成 .....	6
2.4. 熱水力解析コード等とのインターフェイスの開発 .....	8
2.4.1. RAPID-Apros 連携解析における分岐生成機能の追加 .....	8
2.4.2. 動的な ET 解析を効率的に行うインターフェイスの開発 .....	10
2.5. 動的な ET の解析 .....	13
2.5.1. クラスタリング .....	13
2.5.2. リスク情報の導出機能 .....	14
2.6. まとめ .....	16
3. 一貫して行う解析コードの適用性の確認 .....	17
3.1. 解析モデルの詳細化 .....	17
3.1.1. THALES2 の解析モデルの更新 .....	17
3.1.2. SBO シナリオの詳細化 .....	19
3.2. 解析結果 .....	23
3.2.1. THALES2 を用いた試解析 .....	23
3.2.1.1. 生成した事故シーケンス .....	23
3.2.1.2. 解析結果 .....	27
3.2.1.3. 結果の考察 .....	38
3.2.2. Apros を用いた試解析 .....	43
3.2.2.1. 解析モデル、解析条件 .....	43
3.2.2.2. 解析結果 .....	48
3.2.2.3. 結果の考察 .....	61
3.2.2.4. 詳細化した事故シナリオに対する試解析 .....	64
3.3. クラスタリング .....	68
3.3.1. THALES2 の解析結果 .....	68
3.3.2. Apros の解析結果 .....	76
3.4. リスク情報の導出 .....	79

3.4.1.	THALES2 の解析結果 .....	79
3.4.2.	Apros の解析結果 .....	81
3.5.	課題と解決策の検討 .....	84
3.6.	まとめ .....	85
4.	動的な ET の効率的な解析手法の検討 .....	86
4.1.	動的な ET の開発状況 .....	86
4.1.1.	MCDET .....	86
4.1.2.	DICE .....	87
4.2.	効率的なサンプリング手法の調査 .....	88
4.2.1.	効率的なモンテカルロサンプリング法 .....	88
4.2.2.	サロゲートに基づく適応サンプリング法 (ベイジアン最適化手法) .....	89
4.2.3.	効率的なサンプリング手法の RAPID への検討 .....	90
4.3.	代替統計モデル構築手法の調査及び検討 .....	90
4.3.1.	動的 PRA での代替統計モデルの適用例 .....	91
4.3.2.	代替統計モデルのトレーニングのための機械学習アルゴリズム .....	92
4.3.3.	代替統計評価モデルの RAPID への適用検討 .....	94
4.4.	まとめ .....	96
5.	まとめ .....	97
付録 A.	ESREL2019 概要 .....	99
付録 B.	RAPID の実行方法と入力ファイル .....	102
参考文献	.....	111



## 1. はじめに

原子炉施設を対象とした確率論的リスク評価 (Probabilistic Risk Assessment: PRA) は、解析対象施設に対する「発生し得る事故の種類と同定」、「同定した事故に至る事象の組み合わせで表現される事故シナリオ及びそれらの頻度の同定」並びに「各事故シナリオによる被害影響の評価」の 3 要素の評価から構成される。この PRA は、1970 年代に米国で作成されたレポート WASH-1400[1]を皮切りに発展を続け、施設の安全性向上に関する評価手法としてその有用性が認められてきた。我が国においては、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律に基づく安全性向上評価において、施設のリスクの度合いを確認するため PRA を実施し、原子力規制委員会に報告することが求められるようになった。また、PRA より得られるリスク情報を利用する検査制度の検討も進められている。このように PRA は論理的に考え得る事故シナリオの同定、その頻度及び影響の評価等ができるため、多くの規制活動に用いられているツールである。

WASH-1400 レポートが発刊される以前は、小破断 LOCA が炉心損傷に至るとは考えられていなかったが、PRA により小破断 LOCA でも炉心損傷に至るパスが同定された。1979 年に生じたスリーマイル島原子力発電所事故 (TMI 事故) 事故は、加圧器逃がし弁の開固着により 1 次冷却水が流出するという小破断 LOCA を起因事象として炉心損傷に至った事故であり、PRA による事故シナリオの同定の有用性が確認された。しかし、実際に起きた事故の進展では、運転員による設備の起動や停止が行われたため、WASH-1400 レポートで示されたイベントツリー (ET) 上に正確な事故進展を表現することはできていなかった[2]。

従来実施されてきた ET 解析及びフォールトツリー (FT) 解析による PRA では、あらかじめ事故シナリオを想定し、想定に基づき解析及び評価を実施する。そのため、工学的安全設備の作動、運転員による操作の成否及び工学的安全設備の作動のタイミングが、原子炉容器及び格納容器の内部の状態に変化を与え、その変化が事象の進展に及ぼす影響を従来の PRA では考慮することができない。このような従来の PRA の制限を解決するためには、熱水力解析コードやシビアアクシデント解析コード等のプラントシミュレーションコードと確率論的な評価手法を連携し、工学的安全設備の作動及び運転員による操作のタイミングの変化による事象進展の変化、また、事象進展の変化に伴う工学的安全設備の作動及び運転員による操作のタイミングの変化等を考慮する必要がある。このような事象進展の時間的な依存性を考慮する PRA 手法 (以下、動的な PRA 手法、という) を開発及び整備することにより、従来の PRA 手法における制限を解決するとともに、事象発生ランダム性を考慮することで事故シナリオの網羅性の向上が見込まれる。本事業では、炉心損傷に至る事故シナリオを対象とした動的な PRA 手法の開発を行う。

動的な PRA 手法の開発では、大きく分けて、動的な PRA 手法の調査、シナリオ・ジェネレータの作製、及び解析結果の処理方法の開発の 3 つの作業ステージで進めている。

- ① 調査では、動的な PRA 手法開発を先行して行っている欧米諸国で作成されたツールの機能や開発コンセプト等の調査を行い、本事業で開発するツールへの反映を検討する。
- ② シナリオ・ジェネレータの作製では、想定する起因事象の発生から事故に至るまでの安全工学設備や運転員の対応に関して、成否及びその時刻を確率密度関数から求め、これに基づく事故シーケンスを生成する。生成した事故シーケンスに基づき熱水力解析コード等プラントシミュレーションコードによる解析に必要な情報を作成する。加えてプラントシミュレーションコードより得られるプラントの熱水力状態等を基にした安全工学設備等の挙動を事故シーケンスに反映する。
- ③ 解析結果の処理方法の開発では、動的な PRA の実施により膨大な計算結果を得ることになるため、計算結果のグルーピングや解析結果の統計的処理を行うための手法開発を行う。

本年度の動的な PRA 手法の開発は、以下を実施した。

1. シナリオ・ジェネレータの作製及び解析結果の処理方法の開発として、動的に ET 解析を一貫して行う解析ツールに以下の機能を付加した。
  - ・事故対処設備の作動に不確実さを仮定した確率分布、事故対処設備ごとのランダム故障に係る確率分布等から得られる事故対処設備の状態及び故障の組合せを設定し、解析条件を生成する機能
  - ・生成した解析条件に基づき、熱水力解析コード Apros[3]及びシビアアクシデント解析コード THALES2[4]の入力を作成する機能
  - ・生成した解析条件を反映した入力に基づき解析を効率的に実施することができるインターフェースの開発
  - ・解析結果を整理して炉心損傷頻度等のリスク情報を算出する機能
2. 開発した解析ツールを BWR プラントにおける全交流電源喪失事故を対象とした動的な ET 解析に適用し、解析結果の処理も含め本解析ツールの適用性を確認した。
3. 動的な ET を効率的に行うため、事故進展解析を短時間で行うための方策について調査した。また、他機関における動的な PRA のための解析ツールの開発状況を調査するため、欧州で開催された国際会議に参加し、情報収集を行った。これら調査を通じ、今後の開発に有益となる機能を検討した。

## 2. 動的に ET 解析を一貫して行う解析ツールの開発

平成 30 年度動的レベル 1 確率論的リスク評価手法の開発事業において、動的 PRA ツールの開発の基本要件及び有用な機能として以下の点を挙げた。

- ・事故シーケンス生成において様々な確率分布を取り扱えること。
- ・サンプリングした値を熱水力解析コード等の入力に反映させること。
- ・解析モデルの最適化や確率分布の離散的な取り扱い等、数学的もしくは論理的なアプローチにより解析回数を減らすための技術が必要である。
- ・動的 ET 解析では、解析数が膨大になるため、解析実施において解析者の負担を軽減させるユーザーインターフェイスは有益である。
- ・膨大な解析結果を客観的に取りまとめるため、クラスタリング技術は有用である。
- ・機器等の事故シナリオ上の重要度を把握するため、動的 PRA 用の重要度指標が必要であり、重要度指標を検討するとともに、検討した重要度指標を算出する部分を解析ツールに実装する必要がある。

上記項目を踏まえ、本年度実施した解析条件の生成、入力データの作成、熱水力コード等とのインターフェイス及び動的な ET の解析のための機能の開発状況について以下で述べる。また、現在開発している動的 PRA ツール RAPID（以下「RAPID」という）の開発方針及び RAPID を用いた解析の流れを以下に示した。

### 2.1. RAPID の開発方針

動的 PRA 手法の開発では、熱水力解析コード等と確率論的な評価手法を連携し、数多くの解析を実施するため、プラントシミュレーションに基づくリスクの定量化及び解析の自動化を行うツールの開発が重要である。これらのツールを RAPID に組み込むため、さらには今後追加するツールを柔軟に組み込むため、RAPID を動的 PRA を実施するためのフレームワークとして開発する方針とした。

また、RAPID では、多様な事故シナリオを模擬するため、ランダムな要素を統計的にサンプリングし、プラントシミュレーションツールの入力として反映する。動的 PRA 手法における RAPID の主たる着想点は、決定論的なシミュレーションツールと確率論的機器信頼性モデルを含む従来の PRA モデルを緊密にカップリングし、プラントの状態に依存する機器故障のメカニズムを明示的にモデリング（explicit modeling）し、その故障や復旧のタイミングを事故進展に反映する。このような相互作用を、時間に依存するプラント状態の情報と機器信頼性評価の情報を同一の計算フレームワーク（RAPID）上でフィードバック・ループさせることで、再現する。また、従来の PRA では、リスク評価手順と事故進展をシ

シミュレーションする手順は独立していたが、これらを統合することで、更に合理的なリスク情報を得ることができると考える。

さらに、動的 PRA では多くのケースの解析を行うため、様々リスク情報の導出には自動化が必要であり、RAPID はこの機能を備えるものとする。また、決定論的シミュレーションツールの計算コストを低減するため、機械学習の手法を利用して簡易な予測できる代替統計モデル（サロゲート・モデル）を構築し、リスク情報の信頼性を確保しながら解析の利便性を向上する。この手法は、米国アイダホ国立研究所が開発したシミュレーションに基づくリスク手法（RISMC, Risk-Informed Safety Margin Characterization）[5,6]の考え方と一致するが、RAPID では、シミュレーション間のインタラクション及び計算のコントロールをさらに明示的に模擬している点に特徴がある。

上記の開発方針に基づき、図 2.1-1 に示すように、RAPID は、入力作成ツール（Preprocessor）、計算制御ツール（Controller）及び計算結果の処理ツール（Postprocessor）で構成させた[7]。外部の解析モデル（プラントシミュレータ、PRA モデル等）と結合することにより、RAPID は動的 PRA におけるシミュレーションのプロセスをコントロールし、機器信頼性モデルを含む PRA モデルとカップリングして有用なリスク情報を算出することができる。動的 PRA を実行するためには以下の 4 つの項目が必要である。解析者が必要とする特定の解析に対しては、RAPID とシミュレータのインタフェースを別途構築及び定義することで柔軟に対応できる。

- (1) 事故進展を模擬するシミュレータと事故シナリオを作成する PRA モデル
- (2) 初期入力作成及びランダムサンプリング用のプリプロセッサ
- (3) 計算を自動的に開始、一時停止、リスタート、終了シミュレーション実行のコントローラー
- (4) データ分析、リスク情報の導出及び代替統計モデルを訓練するポストプロセッサ

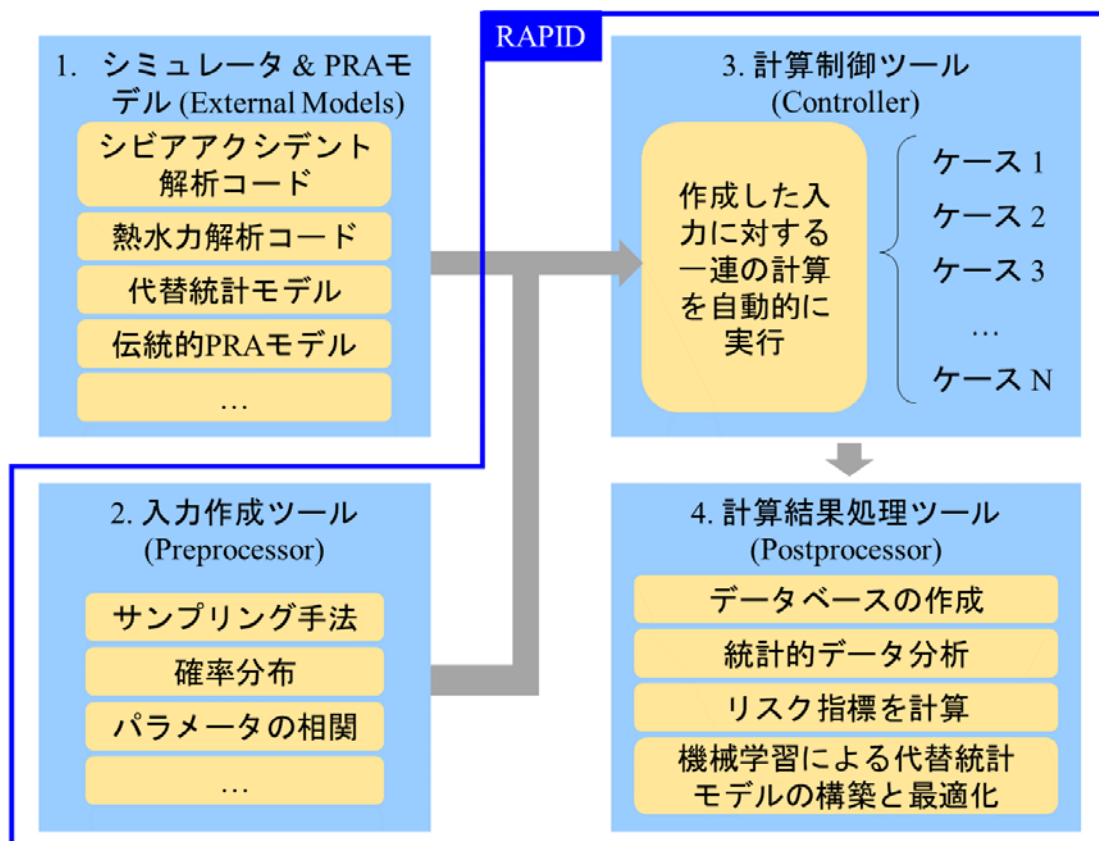


図 2.1-1 RAPID コードの基本構造及び機能

## 2.2. 解析条件の生成

動的 PRA の解析では、事故対処設備の故障のランダム性やその不確実さを考慮した事故シーケンスの生成を行う。RAPID では、不確実さやランダム故障に係る確率分布を設定し、その確率分布を基にサンプリングを行い、サンプリングの結果により判定された故障の組み合わせを反映させた事故シーケンスを生成することができる。ただ、昨年度までに開発した RAPID では、確率分布の種類は正規分布（切断正規分布を含む）と二項分布に限られていた。本年度は、取り扱える分布を拡張し、

- 三角分布
- 一様分布
- 対数正規分布
- 指数分布

に対するサンプリングも行えるように、RAPID を改良した。

## 2.3. 熱水力解析等のための入力データの作成

2.2 節で開発した解析条件の生成機能を基に、熱水力解析コード Apros[3]及びシビアアクシデント解析コード THALES2[4]のための入力データを作成する機能を開発した。RAPID を用いた入力ファイルの作成手順は、以下の通りである。

- ① 連携する解析コード（Apros もしくは THALES2）の入力ファイルのひな型（サンプリングによって決定する変数以外の値を入力したもの）を用意する。
- ② サンプリングによって決定する入力値は、@でタグを付けた変数を入力ファイルに記入する。
- ③ RAPID の事故シーケンス生成のモードで RAPID を実行することにより、@付きの変数がサンプリング値に置き換えられ、入力ファイルが作成される。

基本的には Apros、THALES2 とともにひな型の準備方法は同じであるが、Apros の場合は発生する事象を時系列で並べる必要があるため、事象ごとにひな型を分割して用意する必要がある。一方、THALES2 では、入力ファイルに発生時間を設定し、その時間を満たすかどうかの判定文を設定する。例として、全交流電源喪失事故のシナリオにおける DC 電源の枯渇と逃がし安全弁(SRV)の開失敗故障の発生時間をサンプリングにより決定し、入力ファイルに反映される過程を図 2.3-1 と図 2.3-2 に示す。

### 例. DC電源の枯渇とSRVの閉失敗故障の設定

#### DC電源枯渇の設定のひな型ファイル

```
// Wait @DCDEPLE seconds
wait @DCDEPLE ← 枯渇時間をサンプリング

// DC NOT AVAILABLE -> Stop RCIC pump
acl "modi BP02 PU11_MALFUNCTION 2"
```

DC電源回復と同時に原子炉  
隔離時冷却系(RCIC)を停止

**RAPIDを実行**  
サンプリングの結果、  
DC電源枯渇が15,000秒後  
SRVの閉失敗故障が20,000秒後  
SRVの漏えい面積割合が0.3  
の場合

#### RAPIDにより生成されたAprosの入力ファイル (DC電源枯渇とSRV閉失敗故障の部分)

```
// Wait @DCDEPLE seconds
wait 15000 ← サンプリング値が設定される。

// DC NOT AVAILABLE -> Stop RCIC pump
acl "modi BP01 PU11_MALFUNCTION 0"

// Wait @FCTIME seconds
wait 5000 ← DC電源枯渇から閉失敗故障までの  
時間をRAPIDが算出して設定する。

// Failure to close SRV
acl "modi DPRA_SRVFC.SB01 SB_VALUE true"
acl "modi DPRA_SRVFC.SP01 SP_VALUE 0.3"
```

サンプリング値  
が設定される。

#### SRV閉失敗故障の設定のひな型ファイル

```
// Wait @FCTIME seconds
wait @FCTIME ← 故障時間をサンプリング

// Failure to close SRV
acl "modi DPRA_SRVFC.SB01 SB_VALUE true"
acl "modi DPRA_SRVFC.SP01 SP_VALUE @FCRATIO"
```

故障の設定。故障時の弁の漏えい  
面積割合(@FCRATIO)もサンプリング

注意: Aprosの入力において、//以降はコメント文

図 2.3-1 RAPID による入力ファイルの作成過程 (Apros の場合)

### 例. DC電源の枯渇とSRVの閉失敗故障の設定

#### THALES2の入力のひな型ファイル (DC電源枯渇とSRV閉失敗故障の部分を抜粋)

```
SETPNT TIDC @DCDEPLE SEC
LOGXX CNT1 TIME GE TIDC RCIC OFF
.
.
.
.
.
@ SRVの閉失敗故障↓SRVAの弁が故障)
SETPNT TIFC @FCTIME SEC
LOGXX CNT2 TIME GE TIFC SRVA ON
.
.
.
.
.
SRVA MS1 -2.1 1.0 WETW 0 -2
0.00E+00 @SRVOPAR
```

故障時の弁の漏えい面積割合  
(@FCRATIO)をサンプリング

**RAPIDを実行**  
サンプリングの結果、  
DC電源枯渇が15,000秒後  
SRVの閉失敗故障が20,000秒後  
SRVの漏えい面積割合が0.3  
の場合

#### RAPIDにより生成されたTHALES2の入力ファイル (DC電源枯渇とSRV閉失敗故障の部分を抜粋)

```
SETPNT TIDC 1.50E+04 SEC
LOGXX CNT1 TIME GE TIDC RCIC OFF
.
.
.
.
.
@ SRVの閉失敗故障↓SRVAの弁が故障)
SETPNT TIFC 2.00E+04 SEC
LOGXX CNT2 TIME GE TIFC SRVA ON
.
.
.
.
.
SRVA MS1 -2.1 1.0 WETW 0 -2
0.00E+00 3.00E-01
```

サンプリング値  
が設定される。

注意: THALES2の入力において、  
行頭の@以降はコメント文

図 2.3-2 RAPID による入力ファイルの作成過程 (THALES2 の場合)

## 2.4. 熱水力解析コード等とのインターフェイスの開発

動的 PRA の解析では、生成した解析条件をプラントシミュレーションコードに入力するため、RAPID とプラントシミュレーションコードとのインターフェイスが必要である。昨年度までに、熱水力解析コード Apros 及びシビアアクシデント解析コード THALES2 に対して、RAPID とのインターフェイスの開発を行い、初期の事故シーケンスの条件に対応するインターフェイス及び RAPID の入力ファイルを作成した。また、THALES2 に関しては、プラントの状態変化を事故シーケンスに反映するために、RAPID における分岐生成機能を追加した。本年度は、Apros を対象にしたプラントの状態変化を事故シーケンスに反映するための分岐生成機能を開発した。また、RAPID と THALES2 との連携解析を効率的に行えるインターフェイスを開発した。

### 2.4.1. RAPID-Apros 連携解析における分岐生成機能の追加

昨年度、熱水力解析コード Apros と RAPID とのインターフェイスを作成し、初期の事故シーケンスを生成できるようにした。本年度は、分岐生成機能を追加して、Apros の解析によるプラント状態を反映した事故シーケンスの生成を行えるようにした。図 2.4.1-1 は、RAPID-Apros の連携解析の流れ図であり、赤文字の記述および赤の破線で囲んだ部分が本年度追加した部分に該当する。

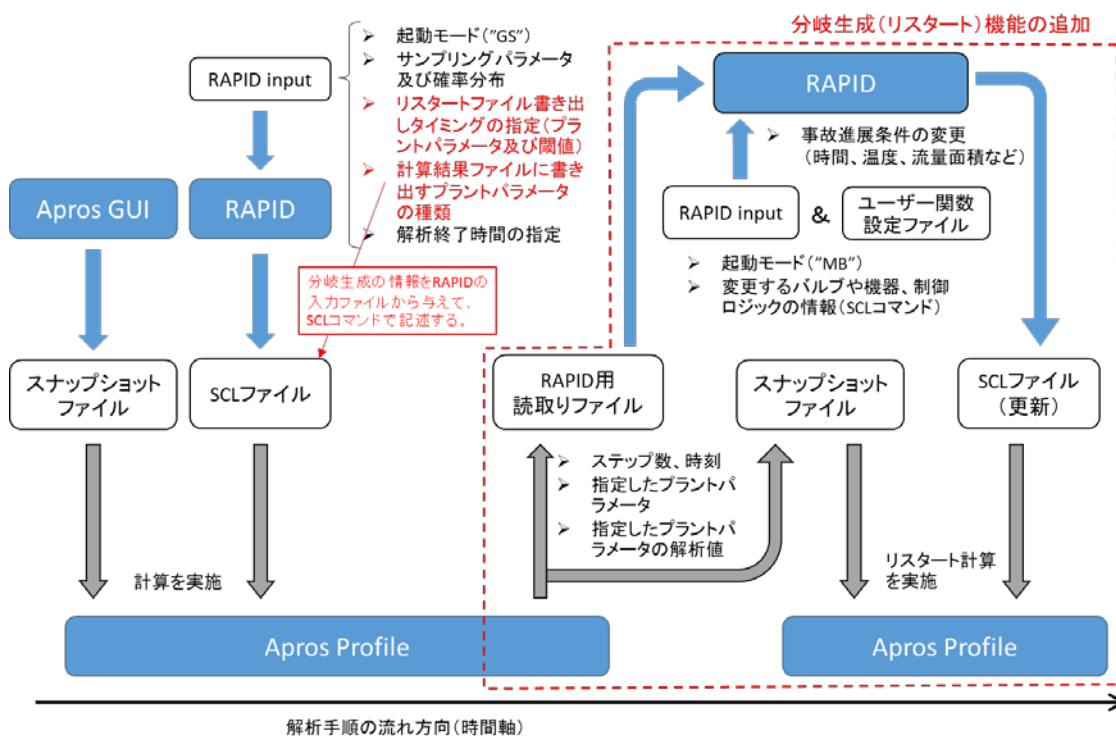


図 2.4.1-1 RAPID-Apros 連携解析における解析の流れ



RAPID-Apros の連携解析では、Apros の解析機能部のみを取り出した Apros Profile を用いて解析を行うが、その実行には

- スナップショットファイル（プラントモデル、制御ロジックを含んだファイル）
- SCL ファイル（解析実行中の制御を記述したファイル）

が必要である。さらに、分岐生成を行うためには、その分岐条件をあらかじめ SCL に記載しておく必要があり、分岐条件に達したタイミングでのプラントパラメータ、および、スナップショットファイルを出力させる必要がある。解析実行中に分岐条件を満たしたかどうかの判定を行うには、図 2.4.1-2 に示したように、コマンド `fork` を利用すれば可能である。

```
fork mdo
waitUntil mdo
  val <- get "STEAM_PO02#PO11_TEMPERATURE"
  pause_limit_value = 400.0 :: Double
  return (val > pause_limit_value)
```

(コマンド `cwrite` を用いてスナップショットファイルを出力)

(コマンド `printingToFile` を用いてプラントパラメータを出力)

図 2.4.1-2 主蒸気管温度が 400℃を越えたタイミングを取得する SCL コマンド

スナップショットファイル、プラントパラメータの値は、それぞれコマンド `cwrite`、`printingToFile` を用いて出力することができる。分岐条件や分岐条件に達した際に出力するプラントパラメータは、RAPID の入力ファイルより設定することができる（付録 B 参照）。入力ファイルで設定された分岐条件は、RAPID によって図 2.4.1-2 のような SCL コマンドに変換され、分岐条件を組み込んだ SCL ファイルが作成される。

RAPID によって作成された SCL ファイルを用いて Apros の計算を実行すると、分岐条件に達したタイミングで RAPID 用読取りファイルを出力する（図 2.4.1-3 参照）。このファイルには、分岐が発生した時刻及び入力ファイルで指定したプラントパラメータの値が記載されており、この値をもとに分岐点以降の事故進展条件を変更する。変更する条件の設定は、RAPID の入力ファイルとユーザー関数設定ファイルを用いて行う。プラントパラメータを反映した条件変更の式は、ユーザー関数設定ファイルを用いて自由に設定することができる。設定された条件変更に沿って、RAPID が SCL ファイルを更新し、リスタート用の SCL ファイルを作成する。この SCL ファイルとリスタート時に出力されたスナップシ

ョットファイルを用いることで、分岐点からの計算が可能となる。

```
current_time, 11173.69,  
srv_temperature, 400.05,  
rpv_pressure, 7.25,  
pump_seal_liq_temp, 287.13,
```

図 2.4.1-3 RAPID 用読取りファイルの出力例

## 2.4.2. 動的な ET 解析を効率的に行うインターフェイスの開発

動的な ET 解析では、事故シーケンスの生成と解析実行を繰り返し行う。事故シーケンスが膨大な数となる場合には、これらの処理を効率的に行う必要がある。そこで、RAPID および熱水力解析コード等の実行を効率的に行うスクリプトファイルの作成を行った。Python を用いた外部プログラムの実行には、いくつかの方法があり、

- モジュール subprocess
- モジュール PyAutoGUI

等を用いることで外部プログラムの実行が可能となる。モジュール `subprocess` は、計算機のプロセスを管理するモジュールであり、バックグラウンドでプロセスを起動して、外部プログラムの実行を行うことができる。一方、モジュール `PyAutoGUI` は、マウスの操作やキーボード入力をプログラム化して実行するモジュールであり、コマンドプロンプトの起動や外部プログラムの実行の操作・入力をプログラム化しておけば、自動的にそれらの処理が行われる。

どちらのモジュールを用いても外部プログラムの実行は可能であるが、プロセス管理に関連して、`multiprocessing` というモジュールがある。このモジュールを用いると、複数のプロセスを同時に管理することができ、複数の計算ジョブの同時に実行するのに適している。モジュール `multiprocessing` との組み合わせの観点から、モジュール `subprocess` の方を利用して効率的に解析を行うスクリプトファイルを作成した。

本年度は、RAPID-THALES2 の連携解析に対して、スクリプトファイルの作成を行った。図 2.4.2-1 は、スクリプトファイルによる RAPID-THALES2 の連携解析の流れを示した図である。

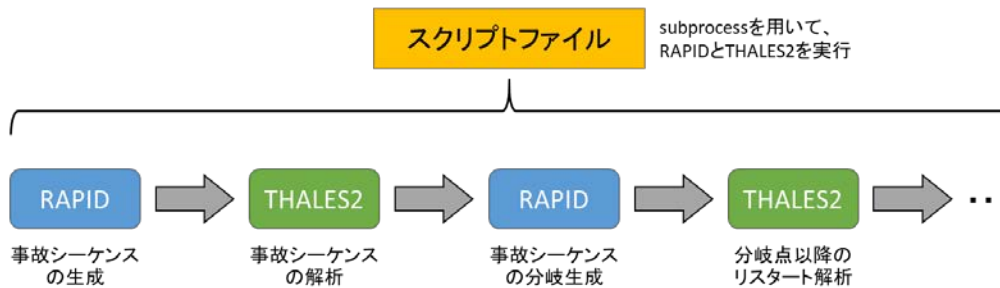


図 2.4.2-1 スクリプトファイルによる RAPID-THALES2 の連携解析の流れ

RAPID を実行する際には、RAPID の実行ファイルである driver.py を以下のような命令文で実行する。

```
subprocess.run("python driver.py inputRAPID.json", shell=True)
```

同様に、THALES2 を実行する際にも subprocess を用いるが、複数の計算ジョブを同時に実行するため、モジュール multiprocessing に計算ジョブを渡し、その中で THALES2 を実行する。

```
p = multiprocessing.Pool(numProc)
p.map(run_thales, range(0, 10))
```

まず、モジュール multiprocessing のオブジェクト Pool を生成する。ここで変数 numProc は同時に起動するプロセスの数であり、同時に実行する計算ジョブの数に相当する。生成されたオブジェクト p のメソッド map により、実行する関数と実行する事故シーケンスの番号の範囲を与える。関数 run\_thales において、解析を行う事故シーケンスの番号のフォルダに移動し、

```
subprocess.run("thales2.exe < bwr5mk1.inp", shell=True)
```

で THALES2 を実行する。

スクリプトファイルが上記の命令文を順次実行することで、RAPID と THALES2 の実行が繰り返し行われ、連携解析を一貫して行うことができる。ただ、本年度作成したスクリプトファイルでは、分岐条件の数は限られている。そのため、分岐が多い事故シナリオにも対応できるように、今後改良を進めていく必要がある。

Apros に関しては、RAPID と Apros を連続実行するところには至っていないが、分岐生

成した事故シーケンスに対してバッチファイルを作成し、バッチファイルを実行するだけで **Apros** のリスタート計算が実行できるようにした。**Apros** を実行する場合には、ライセンスサーバーの起動、および、ライセンス認証も行う必要があるため、**THALES2** と比べて実行を自動化するには難しい点がある。ただ、**Apros** の方も可能な範囲で効率的な実行を行えるように、引き続き開発を進めていく必要がある。

## 2.5. 動的な ET の解析

動的 PRA では工学的安全設備等の設備の故障のタイミングの考慮やプラントの状態などを考慮した工学的安全設備の故障の組合せを多数生成し、得られた故障の組合せに対してプラントシミュレーションを実施する。このため、条件付炉心損傷確率などのリスク情報を得るためには多数の解析結果から必要な情報を抽出したり、事象進展の類似性に基づきグループ化（クラスタリング）するなどの処理が必要であるが、解析者自ら実施するには非常に困難な作業となる。そこで、これらの作業を容易にするため、解析結果を処理する機能を RAPID に付加した。ここでは、本年度 RAPID に付加した、クラスタリング機能及びリスク情報の導出機能について述べる。

### 2.5.1. クラスタリング

事故シーケンスを類似性によりグループ分け（クラスタリング）することは、事故シーケンスの特徴を把握する上で有効である。クラスタリングについては、機械学習の分野で様々な手法が提案されている。昨年度、クラスタリングの代表的な手法として **k-means** 法や **k-medoids** 法について調査を行った。また、時系列データを分類する際、2つのデータの類似度を定義する **Dynamice Time Warping** 法（DTW 法）についても調査を行った。本年度は、これらの手法を RAPID に実装した。**k-means** 法や **k-medoids** 法では分割するクラスタ数をあらかじめ決めておく必要があるが、クラスタ数を推定する方法の一つとして **x-means** 法[8,9]がある。**x-means** 法とは、**k-means** 法の逐次繰り返しとベイズ情報量基準（**Bayesian information criterion, BIC**）による分割停止判定を用いて、最適なクラスタを推定する方法である。**BIC** は、ベイズ統計に基づいたモデル選択基準であり、一般的には、

$$\text{BIC} = -2 \log L + k \log n \quad (2.5.1-1)$$

の形式で与えられる。ここで、**L** は尤度関数、**k** はパラメータの次元数、**n** はデータの数である。第一項はモデルの良し悪し（尤もらしさ）を示す値であり、モデルが良い（尤もらしい）ほど、**L** の値は大きくなり、**BIC** の値は小さくなる。第二項は、モデルの過学習を避けるための項であり、ペナルティ項と呼ばれる。**x-means** 法の処理の流れは以下の通りである。

- ① **k-means** 法を用いて少ないクラスタ数（通常は 2）のクラスタに分割する。
- ② 分割したクラスタそれぞれにおいて、さらに **k-means** 法で 2つのクラスタに分割する。
- ③ 分割したことにより、**BIC** が良くなれば（**BIC** の値が小さくなれば）分割されたクラスタを採用し、そうでなければ元のクラスタに戻す。
- ④ 分割が終了するまで、②と③を繰り返す。

本年度は、x-means 法も RAPID に実装した。クラスタリングに関する手法は、RAPID の開発言語である Python において多くのライブラリが公開されている。その中で、pyclustering (<https://github.com/annoviko/pyclustering/>) はクラスタリングに特化したライブラリであり、k-means 法、k-medoids 法、x-means 法の全ての計算が可能である。また、pyclustering はクラスタリングに関わる計算を C++ で処理するため計算速度も速い。これらの利点より、ライブラリ pyclustering を用いてクラスタリングの実装を行った。また、DTW 法に関しては、ライブラリ dtw (<https://github.com/pierre-rouanet/dtw>) を用いて実装を行った。

昨年度までに開発した RAPID には、

- GS モード：事故シーケンスを生成 (Generate Sequences)
- MB モード：事故シーケンスの分岐を生成 (Make Branch)

の二つの機能が備わっていたが、クラスタリング機能の追加により、

- CL モード：事故シーケンスをクラスタリング (CLustering)

の機能を追加した。CL モードにおける主な入力項目は、

- 解析に用いたコード名 (Apros、THALES2 のどちらか)
- クラスタリング手法 (k-means 法、k-medoids 法、x-means 法)
- クラスタ数 (k-means 法、k-medoids 法の場合のみ)
- クラスタリングするパラメータ名

である。また、クラスタリングを効率的に行うために、時系列データの間引きやクラスタリングの対象とする時間の区間も入力ファイルより設定できるようにした。入力ファイルの書式や記入項目の詳細は、付録 B に示す。

### 2.5.2. リスク情報の導出機能

PRA より得られる代表的なリスク指標として条件付炉心損傷確率および炉心損傷頻度がある。従来の PRA では炉心損傷に至る故障や失敗の組合せをイベントツリー、フォールトツリーにより求め、それぞれの基事象の発生確率を与えることで得る。現在検討している動的 PRA では、次のように炉心損傷確率を求める。まず、解析の結果として燃料被覆管温度が 1200℃ に達した事故シーケンスを炉心損傷に至ったと仮定する。この炉心損傷に至った

解析数を全解析数から解析エラー等を含まない有効な事故シーケンス数で除することにより条件付炉心損傷確率を求める。

このように炉心損傷の判断を決めているため、多数の解析結果がどちらに属するかを機械的に判定する機能を **RAPID** に追加した。この機能の中には解析がエラー等で最後まで実施できなかったもの、事故進展挙動に不審な点があり解析結果に信頼が置けないものなど、不必要な事故シーケンス数を取り除く機能も含めた。また、起因事象の発生頻度、故障の発生タイミング等でプラントシミュレーションにて得ないものなどについては発生確率値を **RAPID** の入力として与え、得られた条件付炉心損傷確率に起因事象の発生頻度を乗じて炉心損傷頻度を得ることができるようにした。

その他のリスク情報として、従来の **PRA** では **FV** 指標、**RAW** 指標などを用いて機器の重要度を計る。動的 **PRA** では従来の評価に加え時間軸を考慮することが可能であり、対策の成否の時間による放射性物質の放出量の変化[10,11]や **FV**、**RAW** を動的 **PRA** の結果から得られるように拡張した指標が提案されている[12]。このような動的 **PRA** の特徴を考慮できるような指標を導出できるようにするための第一段階として、解析者が指定したパラメータ及びその値に合致する事故シーケンス数を抽出、また、複数の着目したパラメータに関連するシーケンス数を用いた四則演算ができるインターフェースを作成した。

条件付炉心損傷確率などリスク評価に関する値の算出では、**RAPID** の入力ファイル中に

- **EX** モード：事故シーケンスよりリスク情報を導出 (**Extract risk**)

を記述する。**EX** モードにおける主な入力項目は、

- 解析に用いたコード名 (**Apros**、**THALES2** のどちらか)
- 解析が正常終了したケースをカウントするための条件
- 導出したいリスク情報の判定条件 (炉心損傷の判定条件など)

である。二つ目の項目は、解析の途中で計算が中断したケースや、計算結果が発散して異常な値を取るケースなどをリスク評価の対象から除外するためのものである。また、リスク情報の判定条件が複雑な形の場合は、ユーザー関数を用いて設定することもできる。入力ファイルの書式や記入項目の詳細は、付録 **B** に示す。

## 2.6. まとめ

平成 30 年度動的レベル 1 確率論的リスク評価手法の開発事業報告書にまとめられている動的 PRA ツールの開発に係る要件に基づき、解析条件の生成、入力データの作成、熱水力コード等とのインターフェイス及び動的な ET の解析のための機能を RAPID に付加した。また、RAPID の利用の柔軟性の向上を考慮に入れた動的 PRA ツール開発における方針を示した。解析条件の生成では、より現実的な解析を行うための取扱う確率分布の拡張を、入力データの作成では、生成した解析条件に基づく THALES2 及び Apros の入力作成機能を、熱水力コード等とのインターフェイスの作成では、RAPID-Apros の連携解析機能の強化及び RAPID-THALES2 の多ケース解析のためのインターフェイスの作成を、動的な ET の解析のための機能として、計算結果のクラスタリング機能や条件付炉心損傷確率などのリスク情報を導出するための機能の開発を行った。このように整備した RAPID により複雑な事故シナリオの解析への適用が期待できる。



### 3. 一貫して行う解析コードの適用性の確認

2章で開発した RAPID を用い、代表的な BWR プラントを対象とした全交流電源喪失時 (Station Blackout; SBO) の事故シーケンスの試解析を行った。また、試解析を通じ課題等を抽出し、その解決策の検討を行った。

#### 3.1. 解析モデルの詳細化

今年度開発した RAPID の適用性の確認のため、より複雑かつ現実的な事故進展のシミュレーションを行う。解析対象は、SBO 事故とし、事故シナリオの詳細化を行った。また、昨年度まで THALES2 の解析で用いていた BWR プラントのモデルは BWR4 であり、Apros のモデルとは異なっていた。このため、THALES2 の解析モデルを Apros モデルを参考に BWR5 に更新するとともに、BWR5 型プラントを対処とした出力運転時内の事象レベル 1PSA 標準報告書[13]、INL の RAVEN を用いた SBO 事故解析の報告書[14,15]を参考に RAPID で解析を行う SBO シナリオの更新を行った。

##### 3.1.1. THALES2 の解析モデルの更新

Apros の BWR モデルから、原子炉圧力容器の大きさ、配管等の接続位置等を参考に THALES2 のモデルを構築した。THALES2 はシビアアクシデント解析コードであり、格納容器の大きさが必要であるため、その体積は出力に比例するものとして BWR4 の格納容器体積を参考にその体積を設定した。高圧及び低圧注水ポンプの特性の変更として、原子炉隔離時冷却系 (Reactor Core Isolation Cooling System; RCIC) については蒸気駆動であることから稼働圧力内ではフラットな特性、また、高圧炉心注水系 (High Pressure Core Spray; HPCS) 及び低圧注水系のポンプは電動ポンプであることから圧力-流量の特性カーブを用いることとした。蒸気逃がし安全弁 (Safety Relief Valve; SRV) の開放圧及び閉止圧は Apros と同様とした。以上のように解析モデルの規模や接続位置等を Apros に合わせた THALES2 のモデルを用いて事故解析を行ったところ、解析上のタイムステップの取扱いやグラフ化する際のプロット間隔に違いがあるため完全に同一ではないが、図 3.1.1-1 から図 3.1.1-3 に示すように事故進展による燃料被覆管温度やポンプの流量、SRV からの蒸気流量はほぼ同様な結果を得ることができた。

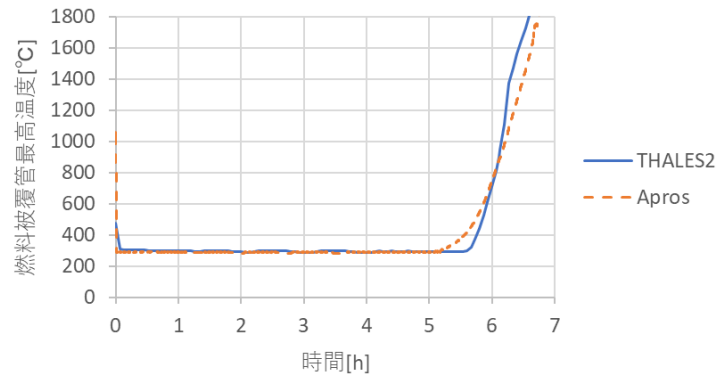


図 3.1.1-1 燃料被覆管温度履歴における THALES 及び Apros の比較

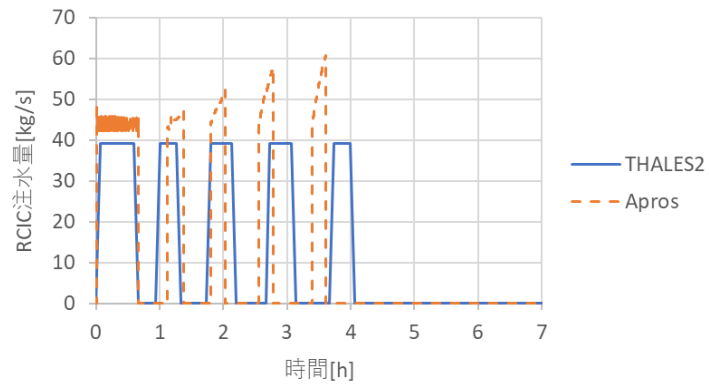


図 3.1.1-2 RCIC 注水量における THALES 及び Apros の比較

(THALES2 は、定格流量 39.28kg/s で固定、Apros は、RPV 圧力に依存するとしている。)

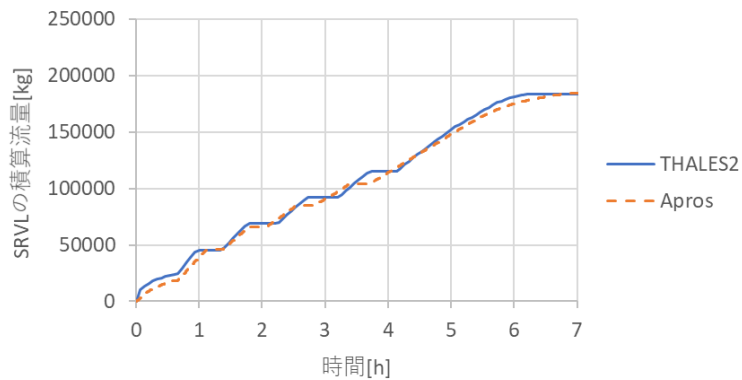


図 3.1.1-3 SRV を経由する気相の積算流量における THALES 及び Apros の比較

### 3.1.2. SBO シナリオの詳細化

昨年度に実施した RAPID による SBO シナリオ解析では、SBO 発生後バッテリーの枯渇、AC 電源の復旧、SRV の熱的故障、RCIC ポンプ特性の不確かさに限定して解析を実施した。このように RAPID のサンプリング対象を限定することで、RAPID の基本的な機能を確認することができた。しかしながら従来検討がなされている SBO シナリオ[13,14,15]では、高圧注水系のほか、減圧操作や低圧注水、また、格納容器ベントなど様々な設備及び操作があり、それぞれの設備及び操作の成否に対してサンプリングを実施して、組合せの生成を行う。そこで RAPID の開発の次のステップとして、従来の検討されてきた SBO シナリオを対象として動的 PRA 用の組合せ生成の拡張を行った。文献調査を踏まえ、BWR5 プラントの以下の設備・機器や操作を対象とする。

- ・非常用電源：2 系統利用可能であるが、評価では 1 系統として評価する。また、解析スタート時点で機能を喪失するが、回復操作により AC 電源の復旧を考慮する。復旧後の継続運転失敗は考慮しない。
- ・SRV 閉失敗：SBO 直後は圧力容器内が高圧になることから SRV が複数回作動することが想定される。SRV の故障モードとして開失敗と閉失敗があるが、開失敗では高圧を維持することで高圧注水が可能である。一方閉失敗が生じるとその開口部から蒸気が流出し注水が間に合わなければ炉心が露出する可能性がある。このことから、閉失敗に着目する。また、調査した SBO シナリオ解析では、閉失敗の弁の数による漏洩面積の違いに伴う事故進展の影響を考慮するため、1 弁、2 弁、もしくは 3 弁まで考慮していた。今回は詳細な事故シナリオへの適用性の確認のため、1 弁のみを対象とした。また、THALES2 では現状 SRV の開閉回数をカウントできないため、一開閉あたりの気相流量を仮定し、閉失敗を検討する SRV からの積算流量が設定値（開閉回数×1 開閉あたりの流量）に達したときに閉失敗が生じたとした。このときの開口割合についてもサンプリングの対象とした。
- ・SRV の熱的故障：SRV に高温の蒸気が流れることで弁体がわずかに拡張し、内通を起こす故障モードである。内通を生じた際の漏洩面積は弁の最大面積に漏洩率を乗じて得るものとする。また漏洩率は、(3.1.2-1)式に示すように発生する際の原子炉圧力容器内の圧力や蒸気温度に依存すると仮定した解析を行うものとした。なお本式は RAPID を用いた解析におけるプラント状態を故障に関するパラメータに反映させる機能を確認する目的で仮に設定したものである。

$$F = f \cdot \frac{T_{MSL}}{T_{TS}^{mean}} \cdot \frac{P_{RPV}}{P_{RPV}^{mean}} \quad (3.1.2-1)$$

ここで、

F : 補正した弁の漏洩率

f : サンプルングした漏洩率

T<sub>MSL</sub> [K] : SRV が接続されている主蒸気管 (Main Steam Line) の温度

P<sub>RPV</sub> [MPa] : RPV 圧力

T<sub>TS</sub><sup>mean</sup> [K] : 熱的故障 (Thermal Seizure) が発生する温度の平均値

P<sub>RPV</sub><sup>mean</sup> [MPa] : RPV の平均圧力

- 再循環ポンプからの漏水：再循環ポンプのシールは高温にさらされるため、通常運転時は冷却されている。SBO 時にはその冷却ができないためポンプシールが損傷し、損傷部から冷却水が漏洩する可能性がある。この損傷時の開口面積に対してもプラント状態を故障に関するパラメータに反映させる機能の確認の目的で、(3.1.2-2)式のような、冷却水温度、原子炉容器内圧力及び SBO 発生時からの損傷するまでの経過時間に関係があると仮定しサンプルングするものとした。

$$S' = S \cdot \frac{T_{loop}}{T_{loop}^{mean}} \cdot \frac{P_{RPV}}{P_{RPV}^{mean}} \cdot \exp\left(\frac{\tau - \tau^{mean}}{\tau^{mean}}\right) \quad (3.1.2-2)$$

ここで、

S' : 補正したシール損傷面積[m<sup>2</sup>]

S : サンプルングしたシール損傷面積[m<sup>2</sup>]

T<sub>loop</sub> [K] : 再循環ループの液相温度

T<sub>loop</sub><sup>mean</sup> [K] : 再循環ループの液相温度の平均値

P<sub>RPV</sub> [MPa] : RPV 圧力

P<sub>RPV</sub><sup>mean</sup> [MPa] : RPV の平均圧力

τ [h] : シール損傷発生時間

τ<sup>mean</sup> [h] : シール損傷発生時間の平均値

- DC 電源 : 2 系統のバッテリーを持つがここでは 1 つの DC 電源として評価する。
- RCIC ポンプ : 蒸気を駆動源としたポンプであり、その回転数は DC 電源により制御される。このため、DC 電源の喪失、駆動蒸気の喪失、もしくはポンプの故障でその機能を失う。
- HPCS ポンプ : AC 駆動のポンプであり、HPCS 専用の非常用ディーゼル発電機 (Emergency Diesel Generator: EDG)を持つ。このため、AC の回復、及び専用 EDG からの AC 供給双方を失うか、HPCS ポンプ自体の機能喪失で注水機能を喪失する。
- 減圧操作 : 高圧注水が成功し、その後低温停止に向けて注水量の大きい低圧注水系を

利用可能とするため原子炉圧力の減圧を行う。本検討では減圧操作自体は成功するが、減圧操作が必要な状況になってから実際に減圧操作するまでの時間をサンプリングすることとした。

- ・低圧注水系:LPCS (Low Pressure Core Spray)、LPCI(Low Pressure Coolant Injection System)と 2 系統設備されているが、今回の検討では 1 系統の低圧注水系があるとして解析を行う。低圧注水ポンプには交流電源が必要であることから EDG の修復後に利用可能となる。低圧注水系の故障モードとして、起動失敗及び継続運転失敗を、また、ポンプ故障時の修復までの時間をサンプリングの対象とした。

低圧注水と並行して格納容器内温度の上昇を抑えるため残留熱除去 (Residual Heat Removal System: RHR) 系の起動や RHR の故障等によりその機能を果たせない場合の格納容器ベント、また、消防ポンプによる炉心への注水が SBO シナリオで検討されているが、本年度は検討すべき事故シーケンスの分岐数を抑えるため、これら操作を除くこととした。以下に上記設備・機器等を考慮した事故シーケンス構築の考え方を示す。

外部電源喪失後、スクラム及び主蒸気管に設置されている弁による隔離は成功とする。また、DC 電源となるバッテリーについても計測機器等への配電は可能とする。ただし容量 (利用可能時間) についてはサンプリングの対象として枯渇までの時間を得る。スクラム成功後 SRV の作動状況に応じて再開失敗を考慮する。考慮する SRV は 1 弁とする。次に EDG の修復による AC 電源の再開を考慮する。ここでは 1 系統のみを考慮する。EDG 再起動まで RCIC による冷却を行う。高圧注水系を用いた冷却では、簡便のため RCIC を優先と考え、RCIC が停止する (故障、DC 喪失、炉圧低下など) まで運転が継続される。RCIC 停止後、HPCS 用 EDG の起動に成功している場合には、HPCS の運転に移行する。なお HPCS の水源は THALES2 内蔵の制御により復水貯蔵タンクから圧力抑制プール (Suppression pool: S/P) 水の切替えが行われる。このため本解析では、この切替えは成功するものとする。EDG が稼働している場合、低圧注水に移行するため減圧操作を行う。今回の試行では、高圧注水による冷却 1 時間以降に減圧操作を行うとする。本作業は人間の操作が入るため  $1 + \alpha$  時間として操作時間の不確実さを考慮する。対応遅れを示す  $\alpha$  の範囲についてはサンプリングを行う。減圧操作時に低圧注水ポンプの起動を行い、原子炉圧力容器 (Reactor Pressure Vessel: RPV) の圧力が 1MPa 以下に達したとき注水が行われるものとする。冷却に伴い S/P 水温度が上昇した場合、RHR による S/P 水の冷却が行われるがこの操作については検討から除いている。このため長時間の注水作業により S/P 水が飽和温度に達するとポンプのキャビテーションにより注水ができなくなるとした。

本解析では、外部電源の回復はないとした。また、EDG 起動に成功し、HPCS 及び低圧注水中に EDG が停止した場合、事故シーケンス構築ロジックを簡便にするため EDG が修復されるまでその他の安全機能の操作は行わないとする。

以上の事故進展を表現する事故シーケンスを生成するため、各設備・機器の故障パラメータを文献を参照し表 3.1.2-1 に示すような確率分布及び確率分布を特徴づける値を設定した。

表 3.1.2-1 詳細解析で考慮する機器等とその信頼性パラメータ

機器	サンプリングの対象とするパラメータ	サンプリングに必要な情報					
		確率分布	変数	値	[下限,上限]	単位	
EDG	修復時間	指数分布	$\mu =$	1/8		1/h	
			1/MTTR				
バッテリー	枯渇時間	三角分布		4,5,6		h	
SRV	閉失敗までの回数*1	2項分布	$p$	3.33E-03			
	閉失敗時の漏洩率	切断正規分布	$\mu, \sigma$	0.5, 0.2	[0.05,1]		
	熱的故障温度	切断正規分布	$\mu, \sigma$	700.0, 100	[600,900]	K	
	熱的故障時の漏洩率*2	切断正規分布	$\mu, \sigma$	0.5, 0.2	0.5, 0.2	[0.05,1]	
		-	$T_{TS}^{mean}$	700.0			K
	-	$p_{RPV}^{mean}$	7.0			MPa	
ポンプ	シール損傷時間	一様分布			[0.0, 12]	h	
シール	シール損傷面積*3	対数正規分布	$\mu, \sigma$	-9.2, 1.4	[0, 1.6E-3]	m <sup>2</sup>	
		-	$T_{loop}^{mean}$	563.0		K	
		-	$p_{RPV}^{mean}$	7.00		MPa	
		-	$t^{mean}$	6.0		h	
RCIC	起動失敗確率	2項分布	$p$	2.50E-02			
	継続運転失敗時間	指数分布	$\lambda$	5.00E-03		1/h	
HPCS	起動失敗確率	2項分布	$p$	3.00E-03			
	継続運転失敗時間	指数分布	$\lambda$	5.00E-05		1/h	
減圧	操作遅れ時間	切断正規分布	$\mu, \sigma$	60, 30	[10, 120]	min	
低圧注水ポンプ	起動失敗確率	2項分布	$p$	3.00E-03			
	継続運転失敗時間	指数分布	$\lambda$	2.50E-05		1/h	
	修復時間	指数分布	$\mu$	1/24		1/h	

\*1 SRV の閉失敗には失敗する回数  $n$  を求めたのち、1 回あたりの平均蒸気流量(400kg)を乗じて積算流量とし、積算流量に達したらサンプリングした値と弁面積より開放面積を求める。

\*2 (3.1.2-1)式により漏洩率を求め、弁の面積に乗じてその値を決定する。

\*3 (3.1.2-2)式により決定する。

## 3.2. 解析結果

3.1 節に示した BWR5 プラントの事故シナリオに対して、THALES2 および Apros を用いた試解析を実施した。以下では、その試解析の結果を示す。

### 3.2.1. THALES2 を用いた試解析

THALES2 を用いた試解析について、生成した事故シーケンス、解析結果、結果の考察の順に示す。

#### 3.2.1.1. 生成した事故シーケンス

表 3.1.2-1 の確率分布をもとに事故シーケンスを生成した。試解析では、20 ケースの事故シーケンスを生成した。RAPID によるサンプリングで得られた値を表 3.2.1-1 から表 3.2.1-3 に示す。

表 3.2.1-1 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その1)

ケース 番号	DC 電源枯 渇時間[h]	EDG 修復 時間[h]	HPCS 用 EDG の起 動成功・失 敗[-]	HPCS 用 EDG の継 続運転失敗 時間[h]	HPCS 用 EDG の修 復時間[h]	RCIC の起 動成功・失 敗[-]
0	4.98	3.45	成功	28400	16.70	成功
1	5.57	7.18	成功	1780	30.70	成功
2	4.70	6.70	成功	6760	0.67	成功
3	5.01	4.93	成功	17400	3.00	成功
4	5.67	4.69	成功	16300	7.01	成功
5	5.38	4.05	成功	15600	9.12	成功
6	4.57	24.00	成功	1380	6.69	成功
7	5.22	2.06	成功	6070	0.23	成功
8	4.35	1.12	成功	11800	6.11	成功
9	4.90	11.90	成功	6100	7.19	成功
10	5.04	2.47	成功	4970	0.15	成功
11	5.20	11.30	成功	2800	18.00	成功
12	4.11	10.80	成功	10400	9.57	成功
13	4.67	21.80	成功	4850	10.00	成功
14	4.95	8.76	成功	17000	12.00	成功
15	4.47	2.91	成功	1410	2.04	成功
16	4.51	3.35	成功	11900	3.79	成功
17	5.18	8.16	成功	176	1.33	成功
18	5.41	1.20	成功	12800	0.30	成功
19	5.24	19.10	成功	4090	29.90	成功



表 3.2.1-2 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その2)

ケース 番号	RCIC の継 続運転失敗 時間[h]	HPCS の 起動成功・ 失敗[-]	HPCS の 継続運転失 敗時間[h]	LPCS の起 動成功・失 敗[-]	LPCS の継 続運転失敗 時間[h]	LPCS の修 復時間[h]
0	324.00	成功	25600	成功	11100	42
1	53.70	成功	36500	成功	47100	12
2	104.00	成功	22900	成功	22500	7
3	79.70	成功	11900	成功	168000	1
4	174.00	成功	17900	成功	91600	21
5	14.50	成功	13100	成功	136000	2
6	311.00	成功	17200	成功	763	22
7	73.70	成功	4280	成功	6370	14
8	313.00	成功	34800	成功	36300	12
9	2.75	成功	17700	成功	23400	37
10	75.40	成功	57700	成功	139000	3
11	85.90	成功	33800	成功	139000	5
12	79.00	失敗	8840	成功	925	93
13	104.00	成功	14600	成功	111000	4
14	158.00	成功	26200	成功	41200	32
15	81.20	成功	3290	成功	126000	1
16	215.00	成功	52800	成功	20700	31
17	400.00	成功	5050	成功	29300	6
18	197.00	成功	16600	成功	25900	6
19	129.00	成功	7700	成功	38200	4

表 3.2.1-3 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その3)

ケース 番号	減圧操作の 時間遅れ [min]	SRV 閉失 敗故障の回 数[-]	SRV 閉失 敗故障時の 弁の開放率 [-]	SRV 熱的 故障の発生 温度[K]	シール損傷 の発生時間 [h]
0	61	819	0.416	844	2.65
1	105	894	0.456	808	5.22
2	83	262	0.441	870	9.11
3	37	25	0.413	738	1.14
4	87	1130	0.090	625	6.03
5	65	62	0.657	642	3.97
6	48	259	0.560	685	8.75
7	95	320	0.296	658	11.28
8	96	192	0.831	702	6.81
9	59	1160	0.570	676	1.15
10	66	49	0.776	808	1.47
11	43	374	0.656	856	3.86
12	31	55	0.227	894	2.38
13	51	167	0.316	693	11.00
14	11	208	0.135	733	1.29
15	56	53	0.633	779	1.20
16	60	207	0.424	647	1.89
17	92	188	0.489	733	7.50
18	53	76	0.374	686	11.97
19	85	26	0.361	737	5.33

### 3.2.1.2. 解析結果

生成した 20 ケースの事故シーケンスに対して、THALES2 による試解析を行った。この事故シナリオにおいて、

- SRV の熱的故障
- 再循環ループのシール損傷

は、プラントパラメータを反映した事象である。そのため、これらの故障や損傷の発生条件に達した際には、その時点からプラントパラメータを反映した分岐の事故シーケンスを生成してリスタート解析を行った。本試解析では、発生条件に達しても、故障や損傷は発生せずにそのまま計算するケースも残した。そのため、本試解析では、生成した 1 つの事故シーケンスに対して、最大 4 つの解析結果が得られることになる。

図 3.2.1-1 から図 3.2.1-10 に、事故の進展状況を示す主要な解析結果を載せる。分岐が発生したものに対しては、表 3.2.1-4 に示したように凡例や線種で分別できるようにした。

表 3.2.1-4 図 3.2.1-1 から図 3.2.1-10 に示した凡例の説明

凡例	計算内容	線種
番号のみ	分岐点に達しても、故障や損傷は生じないとして、そのまま計算したもの。	実線
番号_brSEAL	再循環ループのシール(SEAL)損傷が発生し、分岐点からリスタート計算を行ったもの。	破線
番号_brSRVT	SRV の熱的故障(Thermal seizure)が発生し、分岐点からリスタート計算を行ったもの。	一点鎖線
番号_brSEAL_brSRVT もしくは 番号_brSRVT_brSEAL	再循環ループのシール損傷、SRV の熱的故障の順、もしくは、SRV の熱的故障、再循環ループのシール損傷の順で発生して、リスタート計算を行ったもの。	点線

解析終了時間は、24 時間とした。THALES2 の解析では、炉心が損傷に至ったとみなした後、即ち燃料被覆管最高温度 (PCT: Peak Cladding Temperature) が 1200°C (=1473K) を越えた後も計算を続けた。ただ、PCT が 3000K を越えるケースは、計算が発散した異常なケースとみなし、結果から除外した。

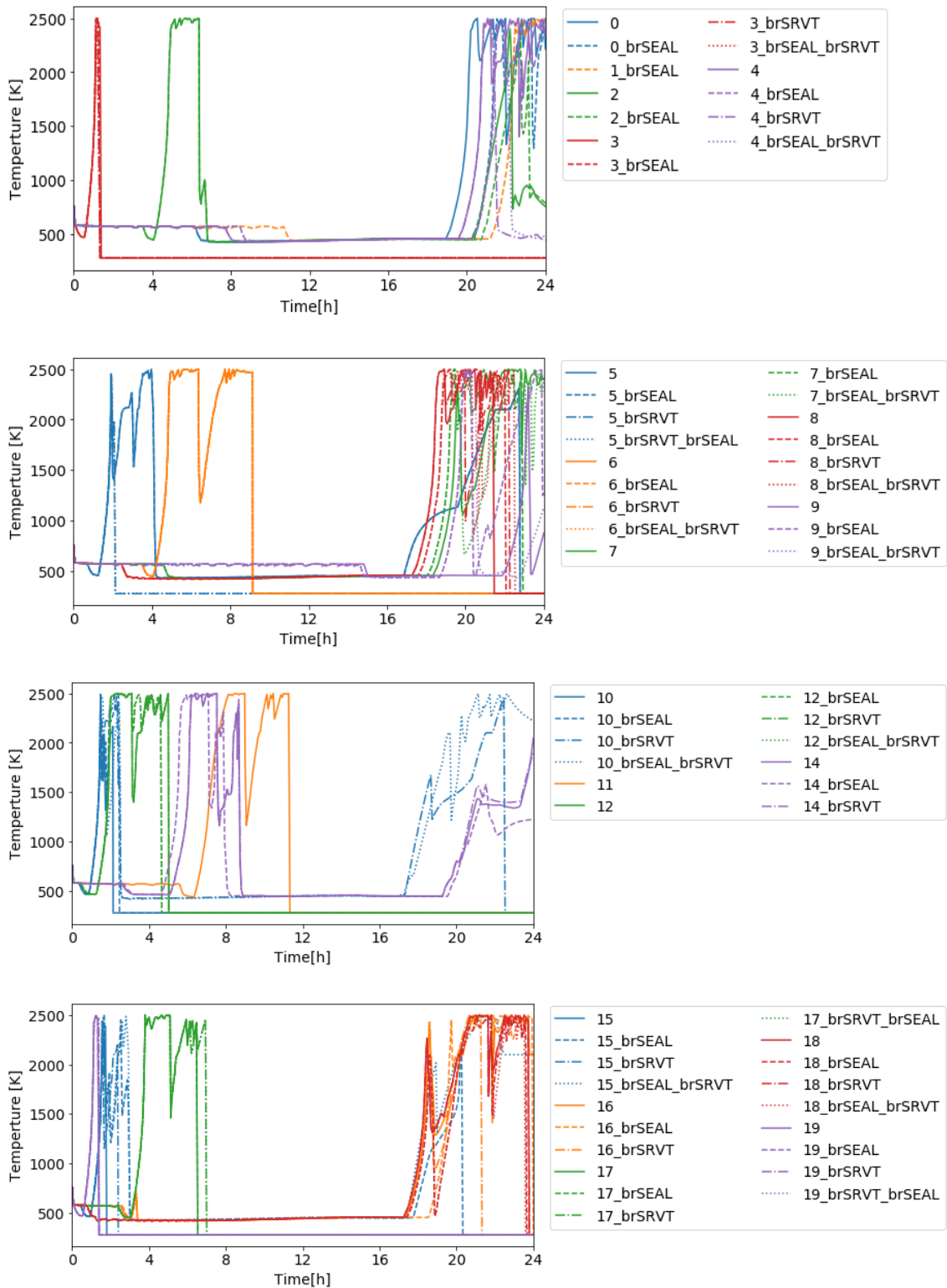


図 3.2.1-1 THALES2 の解析結果：燃料被覆管最高温度 (PCT)

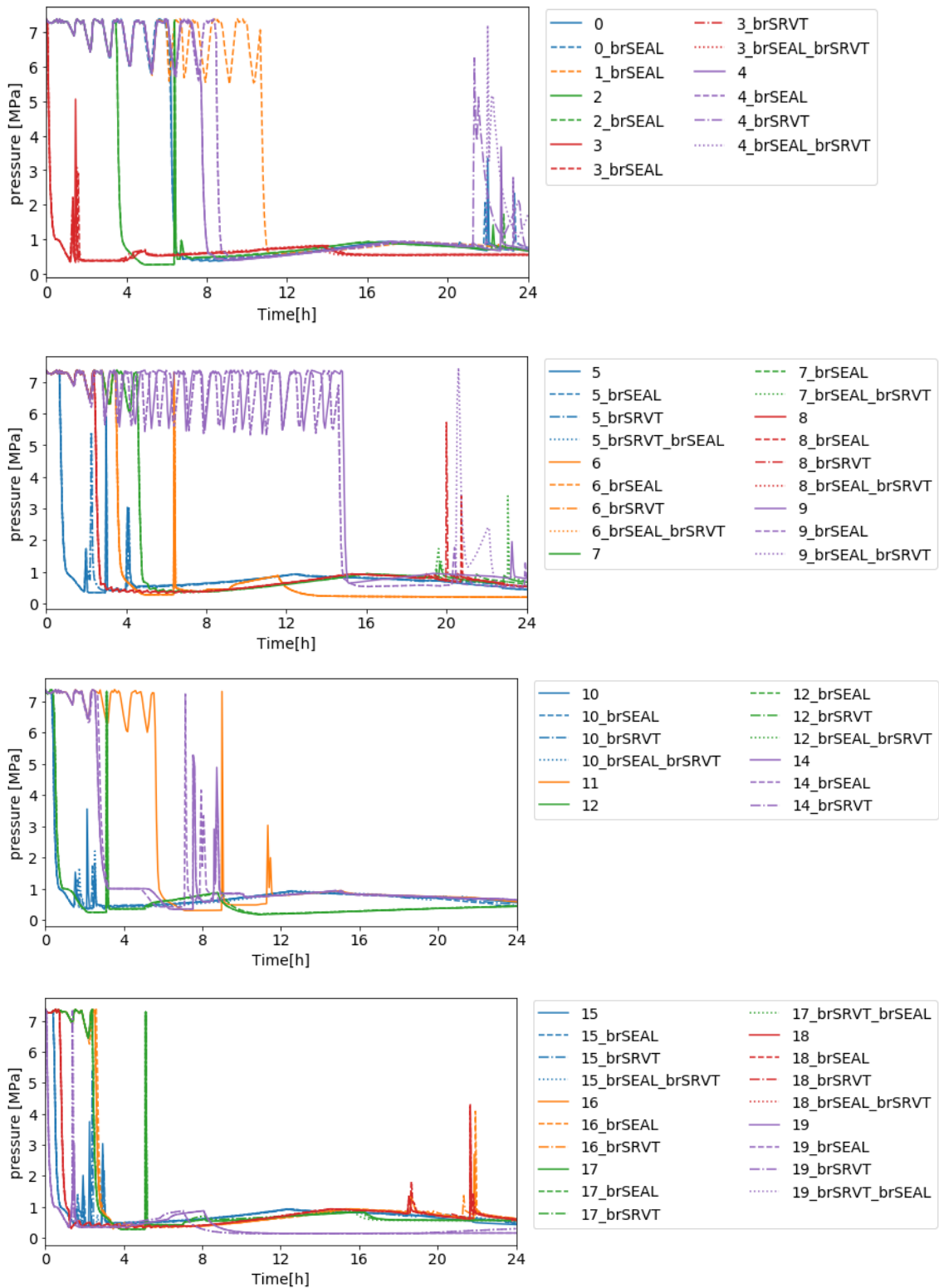


図 3.2.1-2 THALES2 の解析結果：原子炉压力容器（RPV）内の圧力

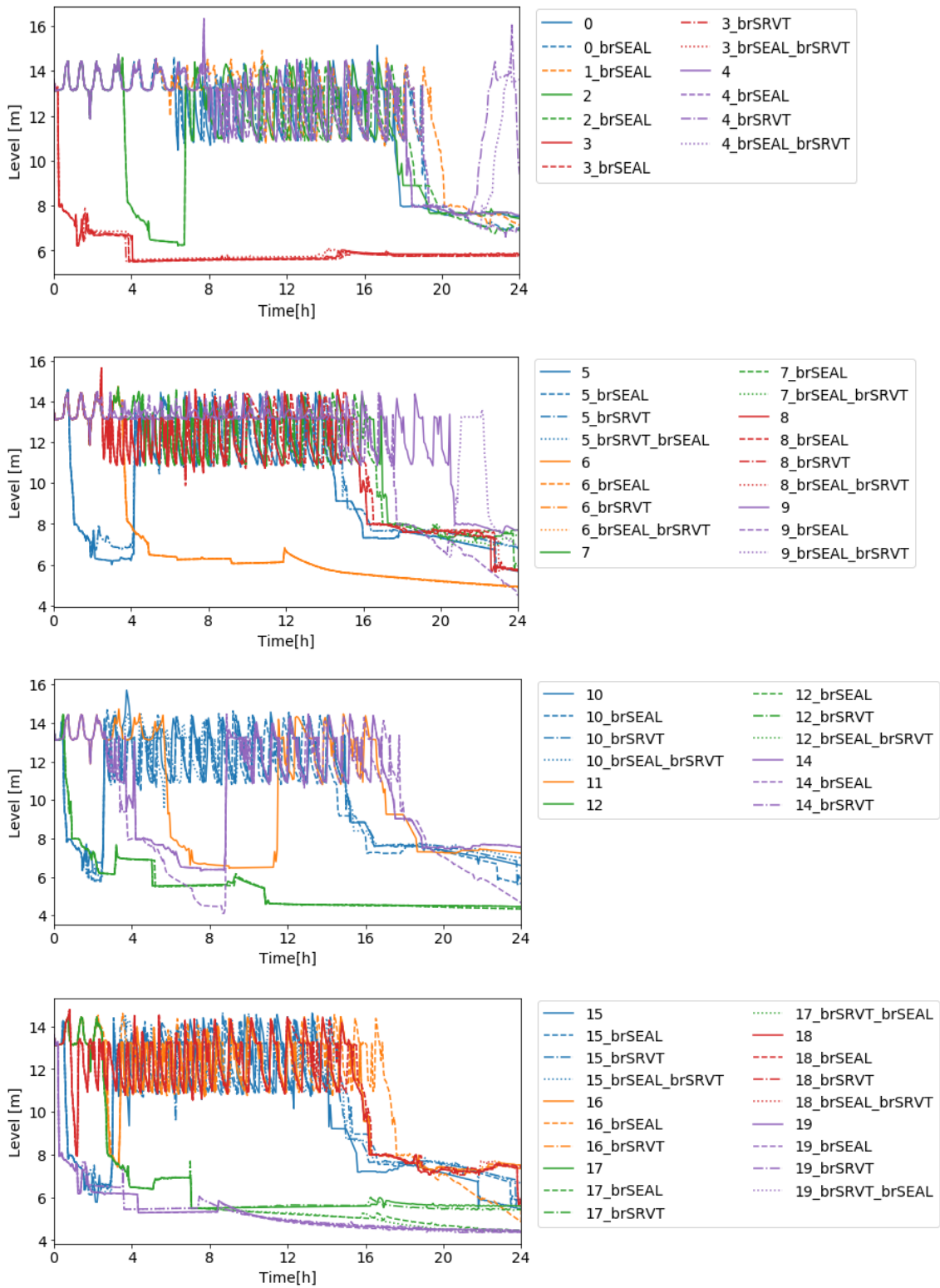


図 3.2.1-3 THALES2 の解析結果：原子炉压力容器（RPV）内の水位

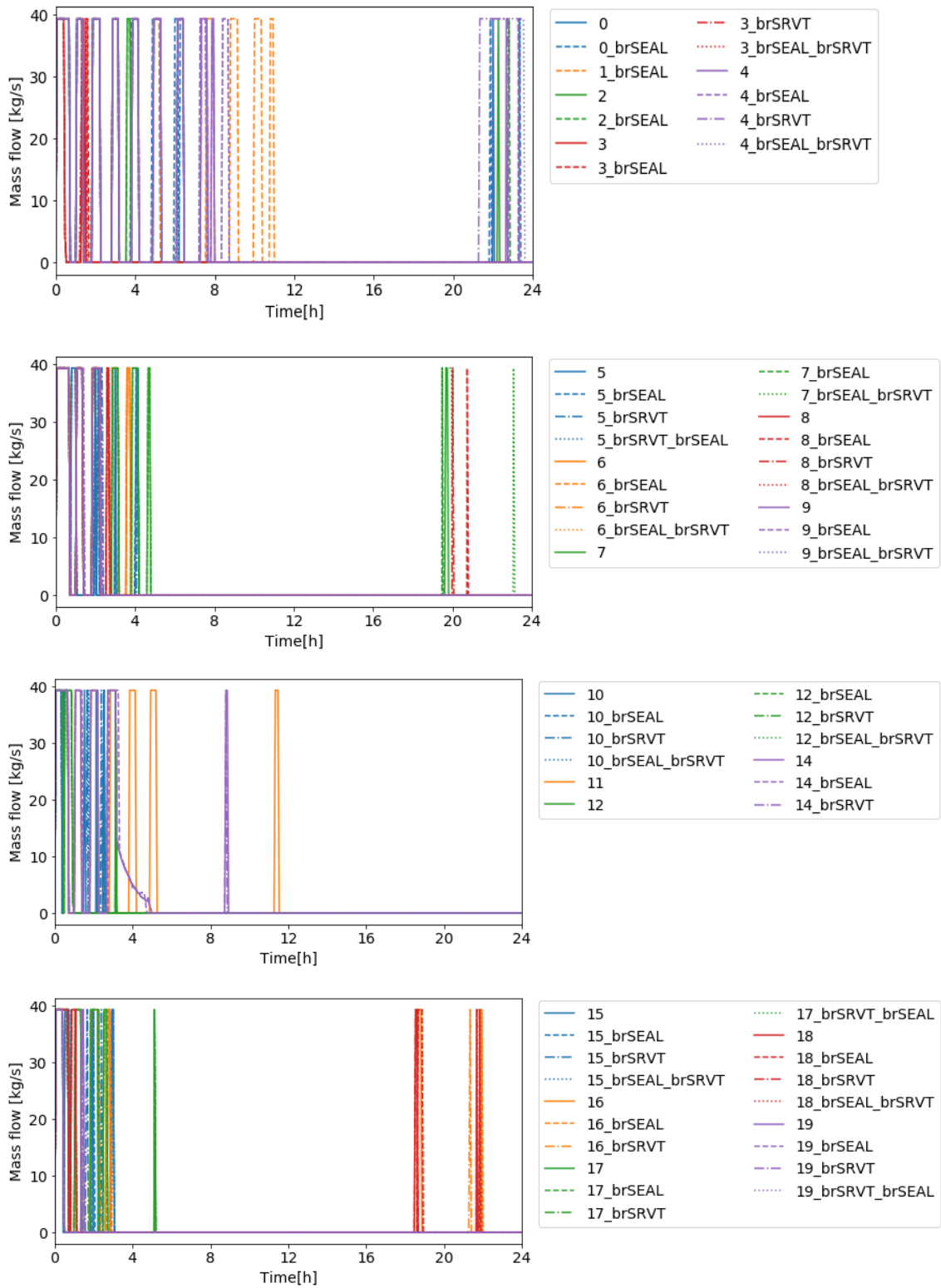


図 3.2.1-4 THALES2 の解析結果 : RCIC 流量

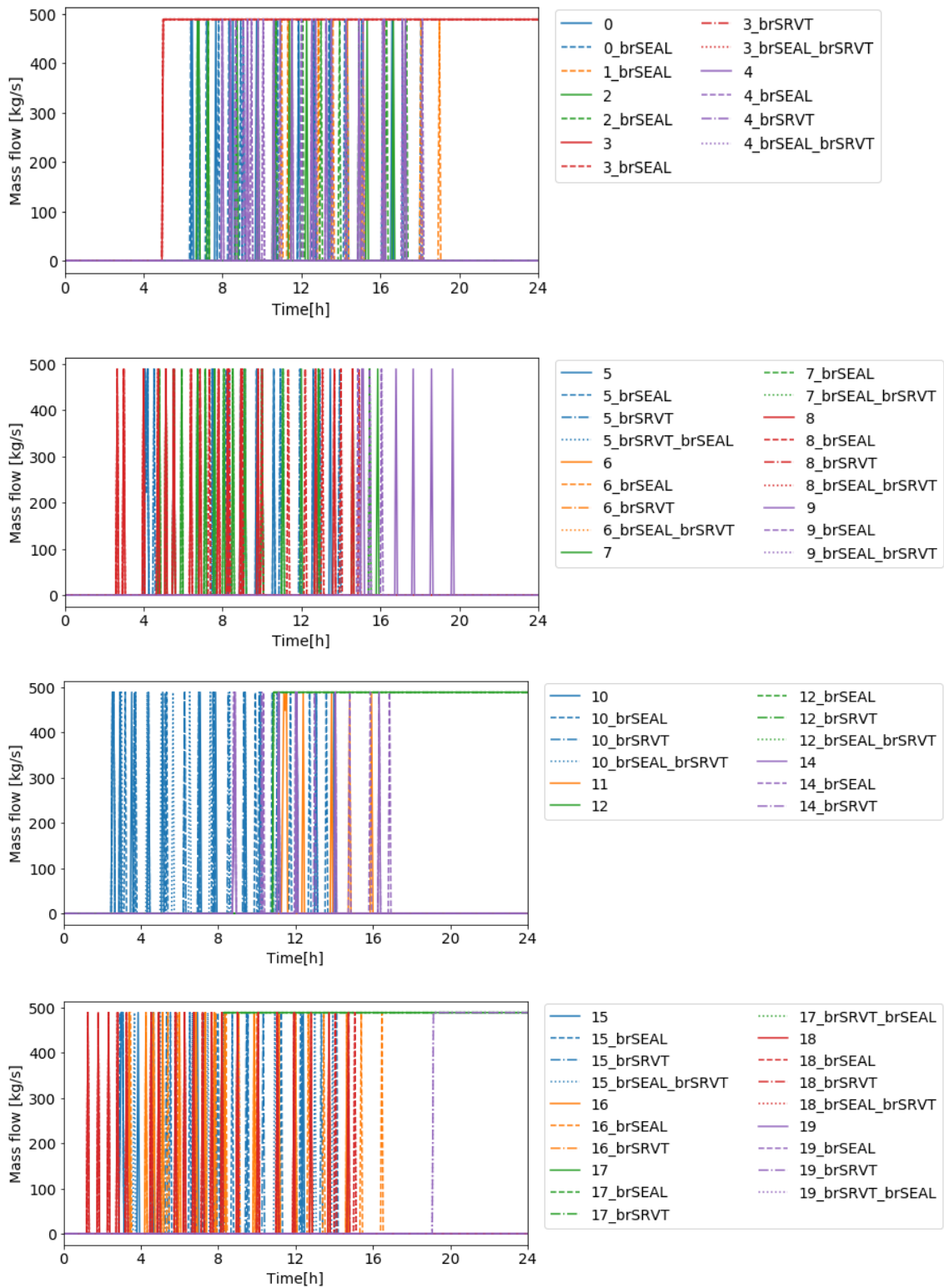


図 3.2.1-5 THALES2 の解析結果 : LPCS 流量



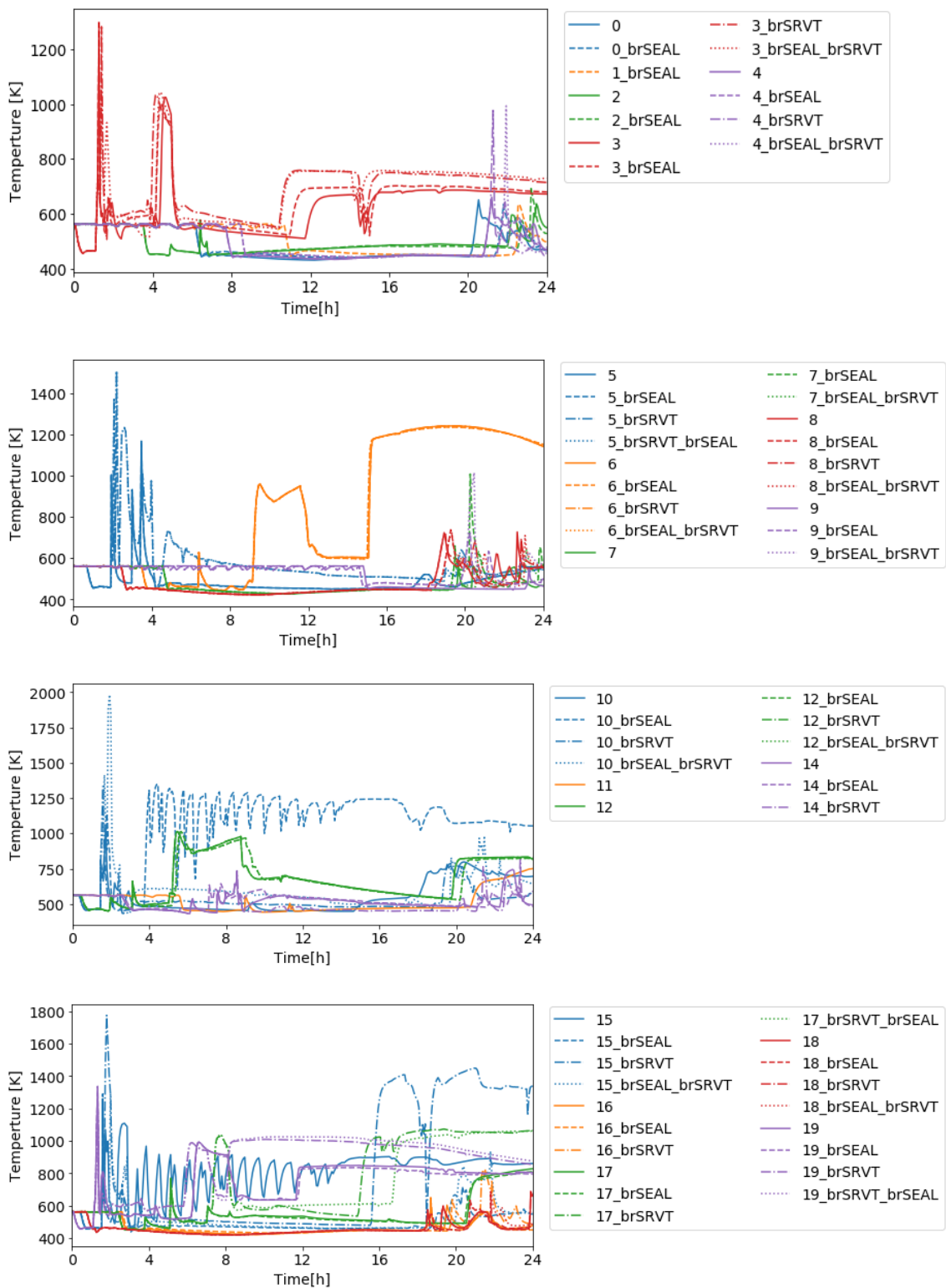


図 3.2.1-6 THALES2 の解析結果：熱的故障の対象である SRV が接続された主蒸気管の温度

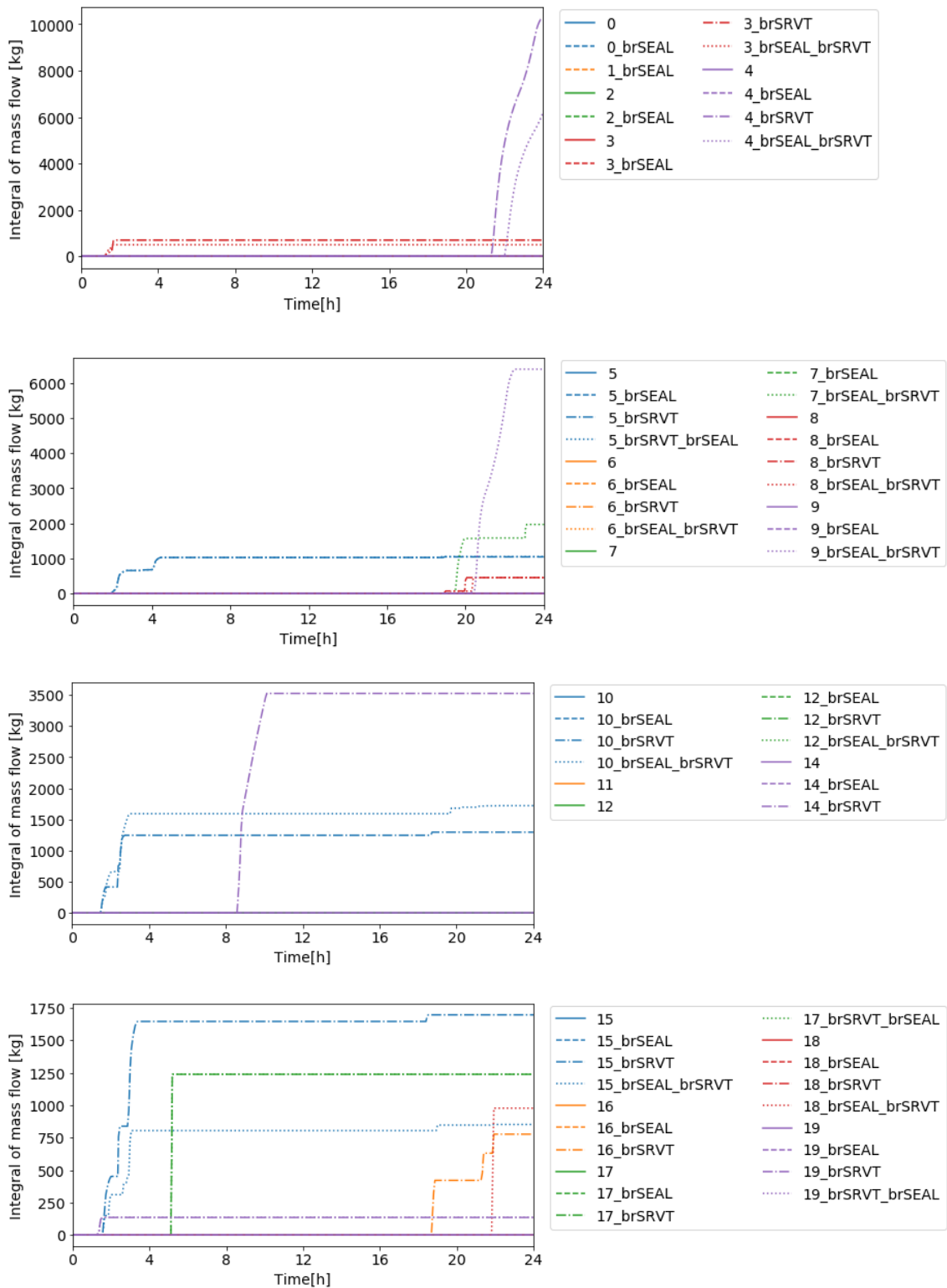


図 3.2.1-7 THALES2 の解析結果：SRV 熱的故障による漏洩積算流量

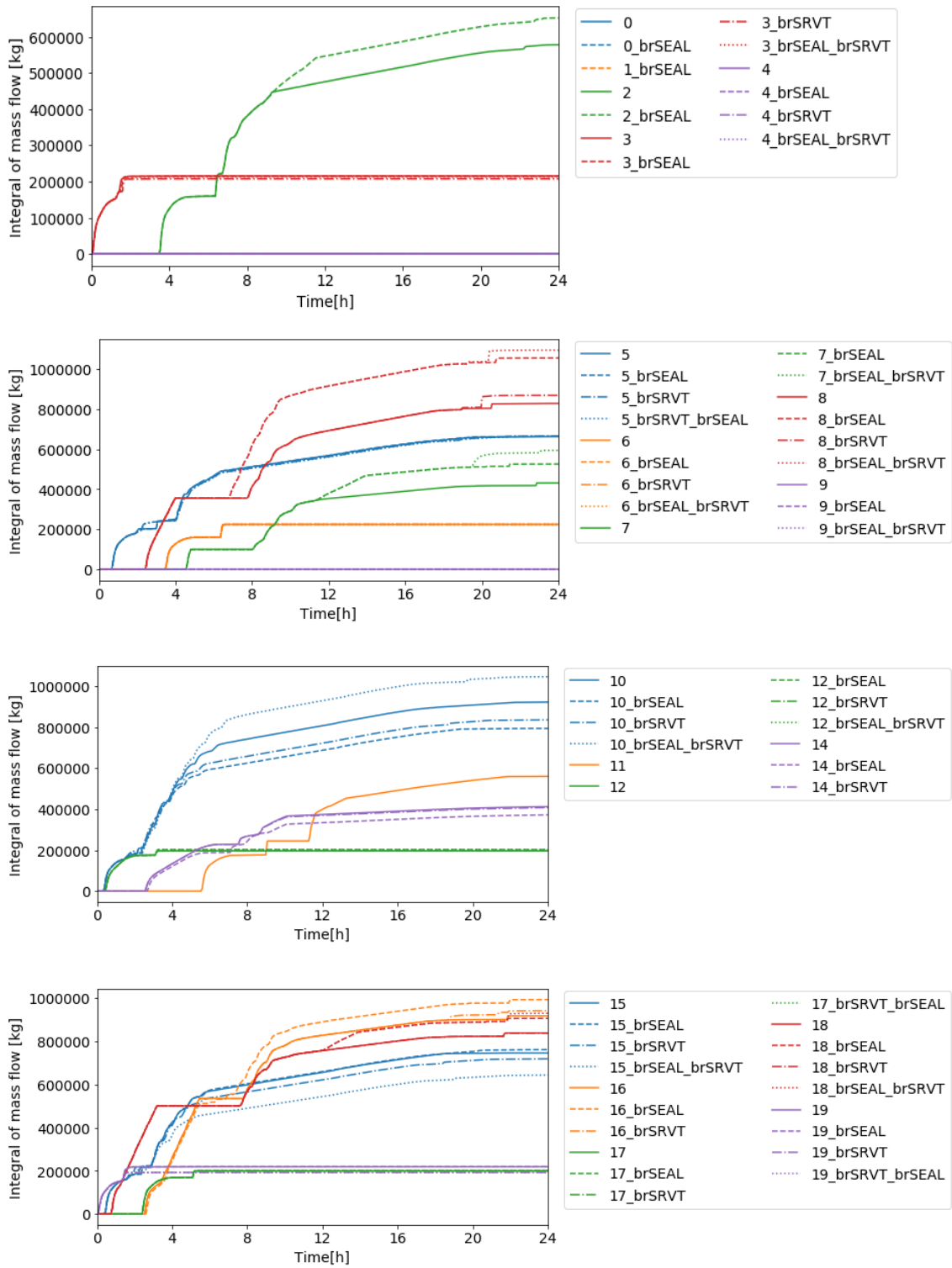


図 3.2.1-8 THALES2 の解析結果：SRV 閉失敗故障による漏洩積算流量

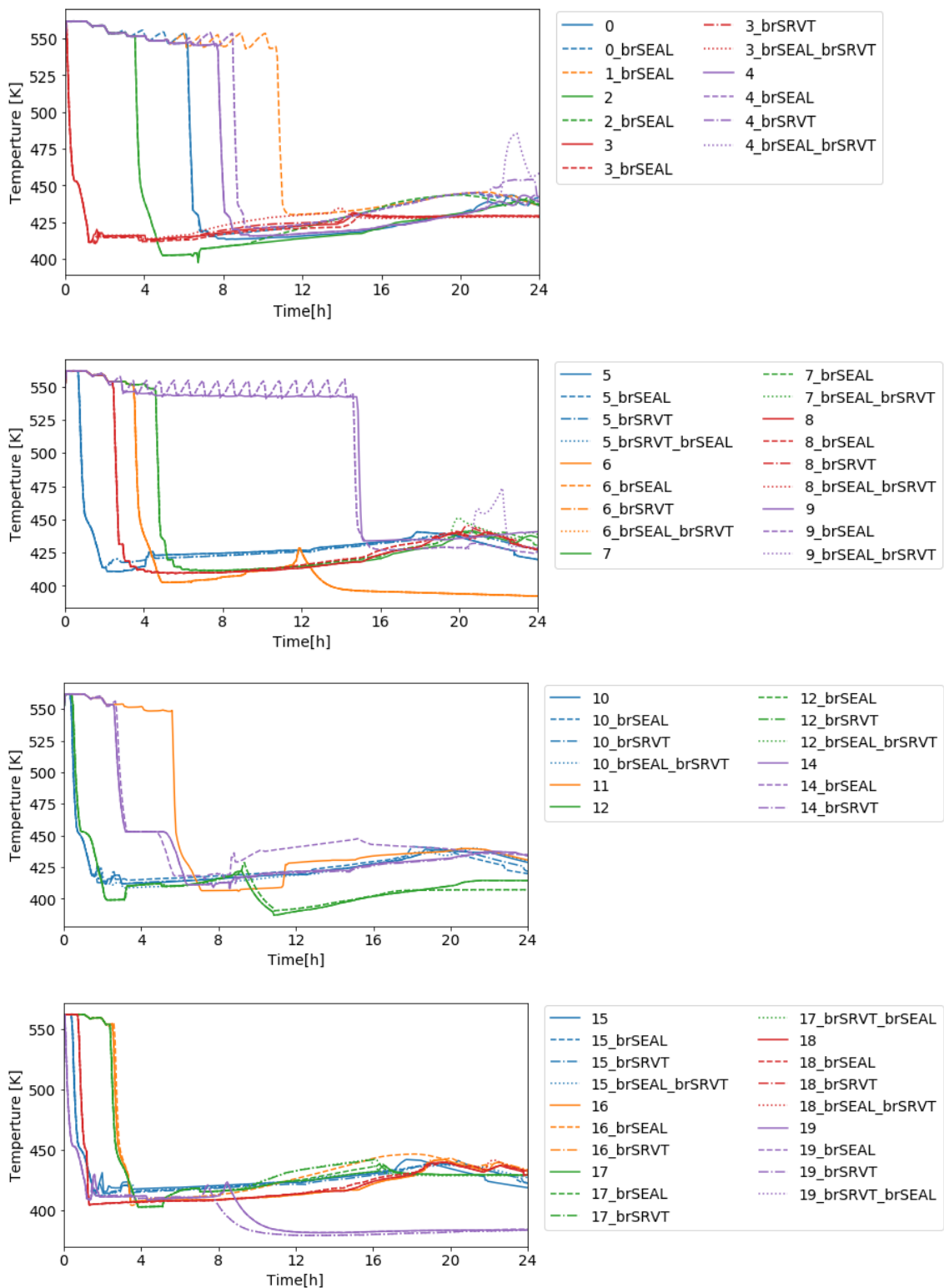


図 3.2.1-9 THALES2 の解析結果：シール損傷する再循環ループの液相温度

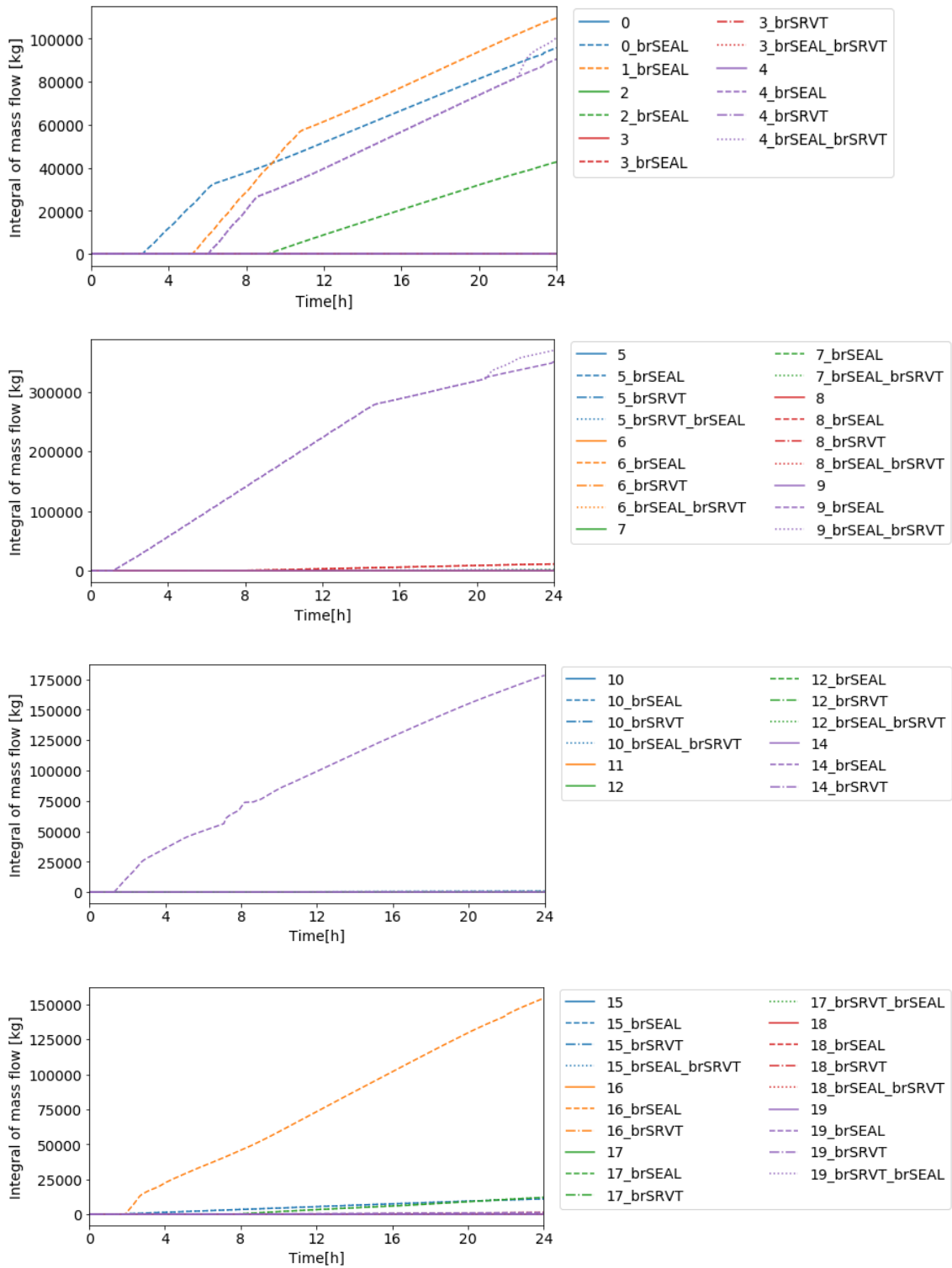


図 3.2.1-10 THALES2 の解析結果：シール損傷による漏洩積算流量

### 3.2.1.3. 結果の考察

本年度の解析では、高圧注水系（RCIC、HPCS）の他に、低圧注水系（LPCS）や減圧操作も取り入れた。解析結果にもこの操作に従って炉心冷却できたケースが存在した。それらのケースのうち、ケース番号 0 の分岐が発生しなかったケースを代表例として、操作過程と圧力容器内の挙動を説明する。

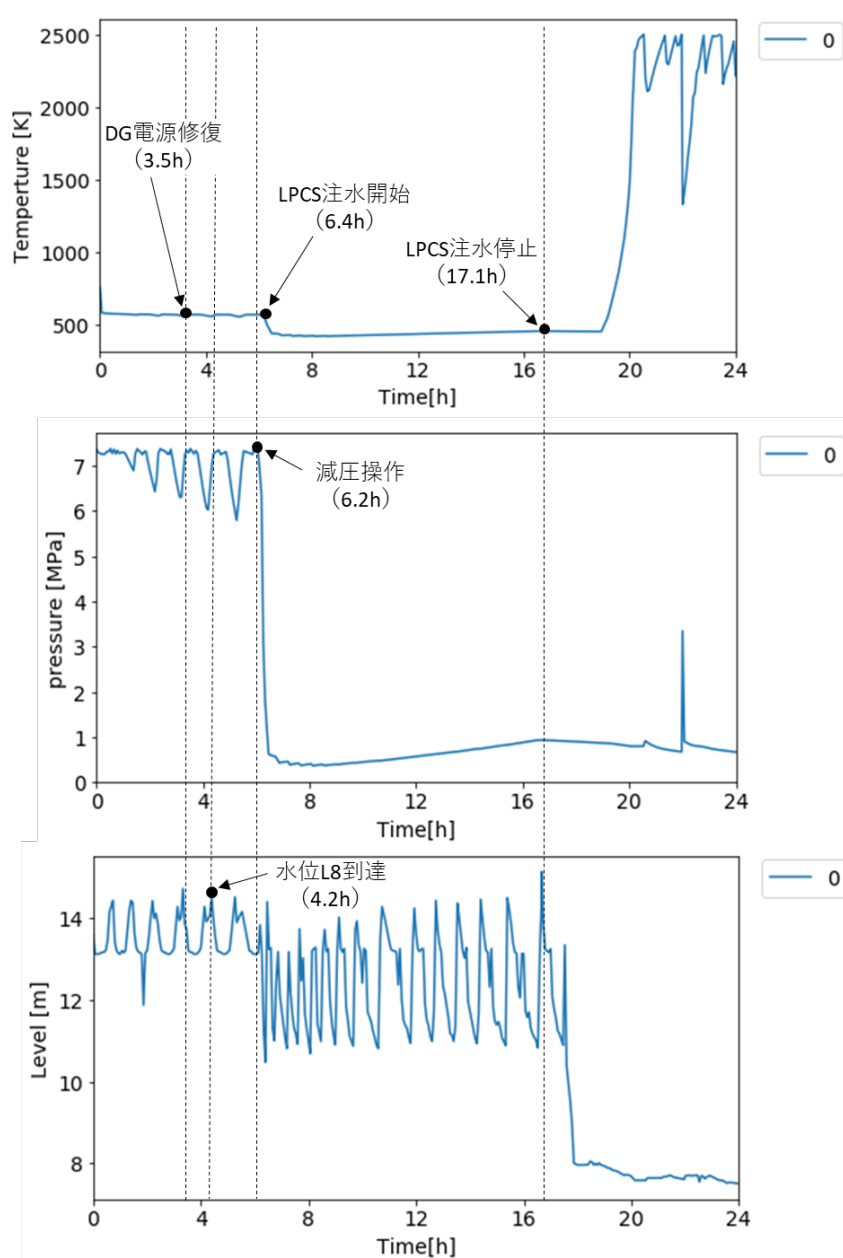


図 3.2.1-11 ケース 0（分岐なし）の解析結果（上：PCT、中：RPV 内の圧力、下：RPV 内の水位）

図 3.2.1-11 は、ケース 0（分岐なし）の場合における PCT 及び RPV 内の圧力・水位の解析結果である。SBO 発生後、DC 電源により RCIC による注水が行われる。表 3.2.1-1 に示したように、ケース 0 では DC 電源枯渇時間（4.98 時間）より EDG 修復時間（3.45 時間）の方が早いため、継続的に RCIC による注水が行われる。また、EDG 修復により、LPCS を起動する。EDG 修復から 0.7 時間後、RPV 水位が L8（炉心冷却系の停止基準）の水位に到達し、減圧操作に入る。減圧操作は時間遅れを考慮した  $1+\alpha$  時間後に行われるが、時間遅れの不確かさ  $\alpha$  は、ケース 0 の場合 61 分（=約 1 時間）であった。そのため、RPV 水位が L8 の水位に達してから 2 時間後（SBO 発生から 6.2 時間後）に減圧操作が行われ、RPV 圧力が低下する。それに伴い、LPCS の注水が可能になり、炉心は冷却され続ける。しかし、減圧操作によって、RPV 内の蒸気が S/P に流れ込み、S/P の温度が上昇し、17.1 時間後に飽和温度に達する。S/P の水が飽和温度に達するとポンプのキャビテーションにより注水できなくなる。また、高圧注水系も 1MPa 以下の低圧では注入できないため、炉心への冷却水の注入が行われなくなり、20 時間後あたりから炉心温度が上昇し始め、炉心損傷に至る。

ケース 0 と同様に、その他のケースでも、LPCS が停止するまでは炉心冷却に成功しているケースが得られたが、比較的早い段階で炉心損傷に至ったケースも得られている。それらのケースの多くは、SRV の閉失敗故障が早い段階で発生している（図 3.2.1-8 参照）。閉失敗故障が生じると、蒸気が RPV の外に出てしまう。それと同時に、RPV 内が減圧されて、RCIC による注水ができなくなり、炉心損傷に至ってしまう。

SRV の熱的故障や再循環ループのシール損傷については、それぞれ図 3.2.1-7、図 3.2.1-10 に漏洩積算流量を示しており、故障や損傷が発生していることが確認できる。そして、故障や損傷による分岐の有無により、PCT や RPV 内の圧力や水位の挙動にも違いが見られ（図 3.2.1-1 から図 3.2.1-3 参照）、事故シーケンスの進展に影響が出ていることが分かる。

リスタート時にプラントパラメータが反映されていることを確かめるため、ケース番号 4 の熱的故障とシール損傷の両方が発生したケースを代表例として取り上げる。表 3.2.1-3 で示したように、ケース 4 では、

- シール損傷発生時間：6.03 [h]
- 熱的故障発生温度：625 [K]

である。図 3.2.1-12 は、再循環ループの液相温度、RPV 圧力、シール損傷部からの漏洩積算流量の解析結果である。

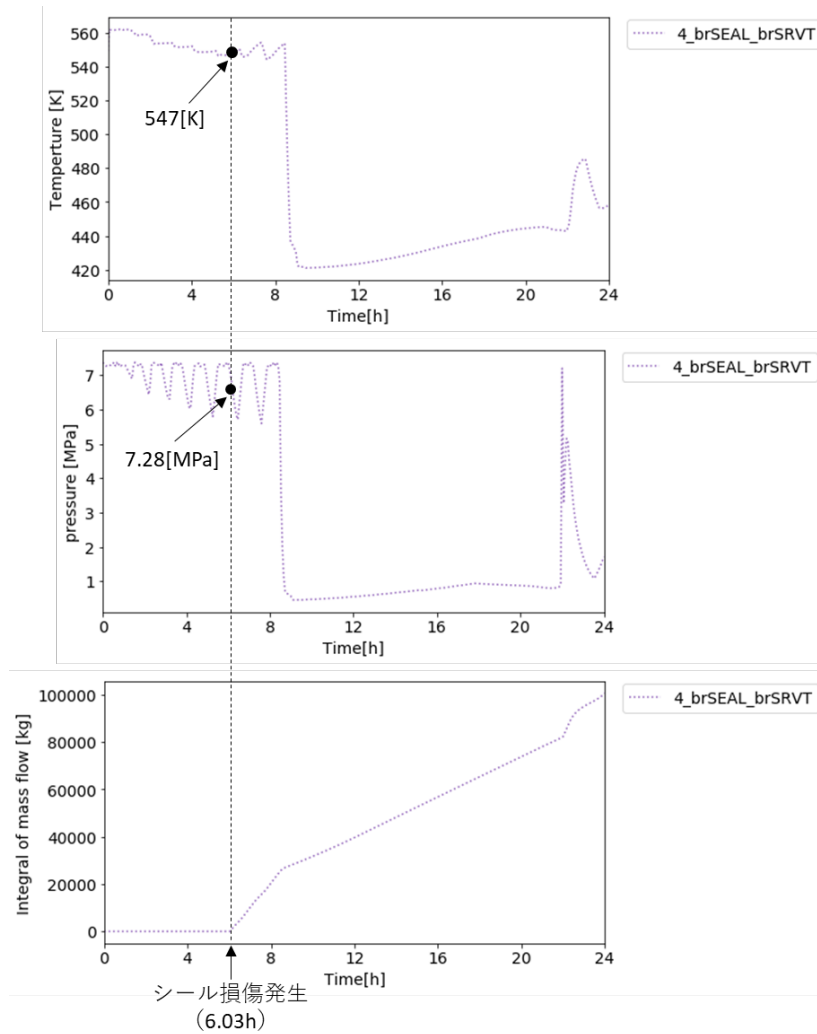


図 3.2.1-12 ケース 4（両方の分岐あり）の解析結果（上：再循環ループ液相温度、中：RPV 内の圧力、下：シール損傷による漏洩積算流量）

シール損傷のタイミングでは、再循環ループの液相温度は 547K であり、RPV 圧力は 7.28MPa であった。また、再循環ループの液相の平均温度  $T_{loop}^{mean}$ 、RPV 圧力の平均値  $P_{RPV}^{mean}$ 、シール損傷の発生タイミングの平均値  $\tau^{mean}$  は、表 3.1.2-1 に示した通りである。これらの値より、シール損傷漏洩面積は、(3.1.2-2)式より

$$\begin{aligned}
 S' &= S \cdot \frac{T_{loop}}{T_{loop}^{mean}} \cdot \frac{P_{RPV}}{P_{RPV}^{mean}} \cdot \exp\left(\frac{\tau - \tau^{mean}}{\tau^{mean}}\right) \\
 &= 1.14 \times 10^{-4} \cdot \frac{547}{563} \cdot \frac{7.28}{7.0} \cdot \exp\left(\frac{6.03 - 6.0}{6.0}\right) \\
 &\cong 1.16 \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$



であった。このケースでは、再循環ループの液相温度、RPV 内の圧力、シール損傷発生温度のいずれも平均値に近い値であり、サンプリングにより得られた値  $1.14 \times 10^{-4}$  とプラントパラメータを反映した値はほぼ同じであった。

図 3.2.1-13 は、熱的故障が発生する SRV が接続された主蒸気管の温度、RPV 圧力、SRV 熱的故障による漏洩積算流量の解析結果である。

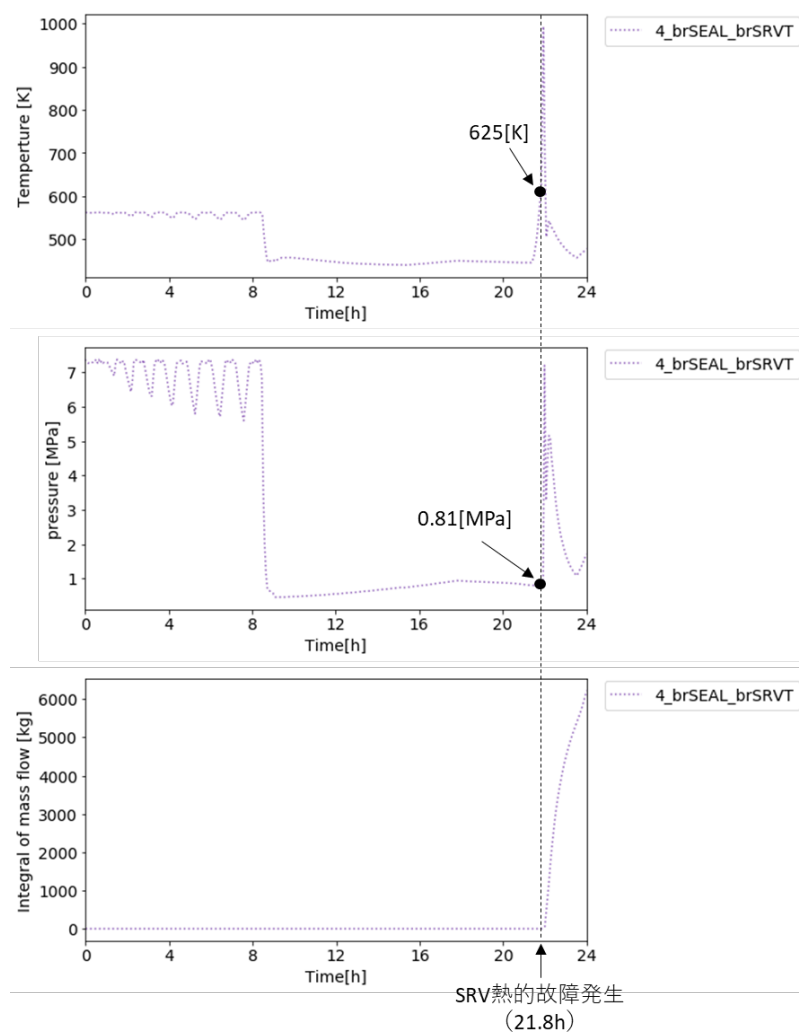


図 3.2.1-13 ケース 4（両方の分岐あり）の解析結果（上：熱的故障が発生する SRV が接続された主蒸気管の温度、中：RPV 内の圧力、下：SRV 熱的故障による漏洩積算流量）

熱的故障は 21.8 時間後に発生し、そのタイミングでの主蒸気管の温度は 625K、RPV 圧力は 0.81MPa であった。また、熱的故障が発生する温度の平均値は、表 3.1.2-1 より 700K

である。これらの値より、SRV の熱的故障による漏洩面積割合は、(3.1.2-1)式より

$$\begin{aligned} F &= f \cdot \frac{T_{MSL}}{T_{TS}^{mean}} \cdot \frac{P_{RPV}}{P_{RPV}^{mean}} \\ &= 0.328 \cdot \frac{625}{700} \cdot \frac{0.81}{7.0} \\ &\cong 0.0339 \end{aligned}$$

となった。このケースでは、減圧操作を行った後に LPCS が停止して炉心温度が上昇して熱的故障が発生したため、RPV 内の圧力は低く、その分熱的故障時の漏洩割合も小さくなった。

### 3.2.2. Apros を用いた試解析

2.4.1 節で述べたように、RAPID-Apros の連携解析において、分岐生成機能を追加した。この機能を確認するため、SBO 事故シナリオのうち、SRV の熱的故障に焦点を当てた解析を行った。

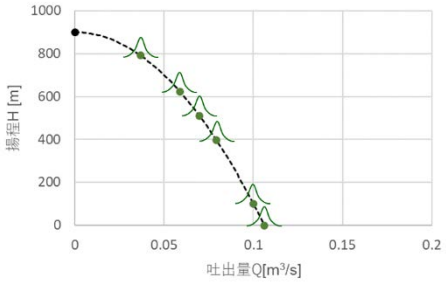
#### 3.2.2.1. 解析モデル、解析条件

昨年度実施した RAPID-Apros の連携解析と同様に、BWR-5 型の原子炉プラントにおける SBO を起因事象とした事故シナリオに対して解析を行った。非常用冷却系の高圧注入は、SBO 発生後 DC 電源が持続している間は RCIC が起動するようにし、EDG の修復により AC 電源回復後は HPCS が起動するように設定した。

事故シーケンスを生成する際にサンプリングにより決定する事象・ポンプ特性と、それらのサンプリングの確率分布を表 3.2.2-1 に示す。SRV の熱的故障に関して、故障発生温度は事故シーケンスを生成する際に決定するが、SRV の漏洩面積の割合は(3.1.2-1)式を用いて決定して、分岐生成機能によるリスタート計算を行うようにした。(3.1.2-1)式における平均温度 $T_{TS}^{mean}$ は、表 3.2.2-1 より 700K である。また、RPV 内の平均圧力 $P_{RPV}^{mean}$ は、熱的故障する SRV の開圧力 7.58MPa と閉圧力 7.54MPa の平均値 7.56MPa を適用した。さらに、 $F$  の下限値は 0、上限値は 1 とし、その範囲を越える場合は、それぞれ 0、1 に設定するようにした。

本解析では、120 ケースの事故シーケンスを RAPID で生成した。これらのケースのサンプリングした値の分布を図 3.2.2-1 から図 3.2.2-6 に示す。

表 3.2.2-1 サンプルングする事象・ポンプ特性と確率分布

事象	変数[単位]	確率分布 ( $\mu$ :平均, $\sigma$ :標準偏差, [最小値, 最大値])
DC 電源の枯渇	枯渇時間 $T_{bc}$ [秒]	切断正規分布 ( $\mu=14400, \sigma=7200, [7200, 21600]$ )
EDG (AC 電源) の回復	回復の有無[-]	二項分布 (確率: $p=0.5$ )
	回復時間[秒]	切断正規分布 ( $\mu=28800, \sigma=7200, [T_{bc}, 43200]$ )
SRV の熱的故障	故障発生温度[K]	切断正規分布 ( $\mu=700, \sigma=100, [600, 900]$ )
SRV の閉失敗故障	故障発生の有無[-]	二項分布 (確率: $p=0.3$ )
	故障発生時間[秒]	切断正規分布 ( $\mu=36000, \sigma=10000, [30000, 40000]$ )
	漏洩面積割合[-]	切断正規分布 ( $\mu=0.5, \sigma=0.2, [0.05, 1]$ )
RCIC のポンプ特性	吐出量[m <sup>3</sup> /s]	<p>吐出量 <math>Q</math>[m<sup>3</sup>/s]と揚程 <math>H</math>[m]の関係が</p> $H = -80000 Q^2 + 900$ <p>の性能曲線をベースとし、揚程 <math>H</math> が 793, 624, 512, 399, 100, 0 における吐出量をサンプルング。切断正規分布を利用し、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\mu</math> : サンプルングする揚程でのベース曲線の吐出量</li> <li><math>\sigma</math> : <math>\mu</math>の0.1倍</li> </ul> <p>下限値 : <math>\mu - 2\sigma</math> (ただし、吐出量に対して揚程が右肩下がりの曲線になるようにする。)</p> <p>上限値 : <math>\mu + 2\sigma</math></p> <p>とする。</p> 

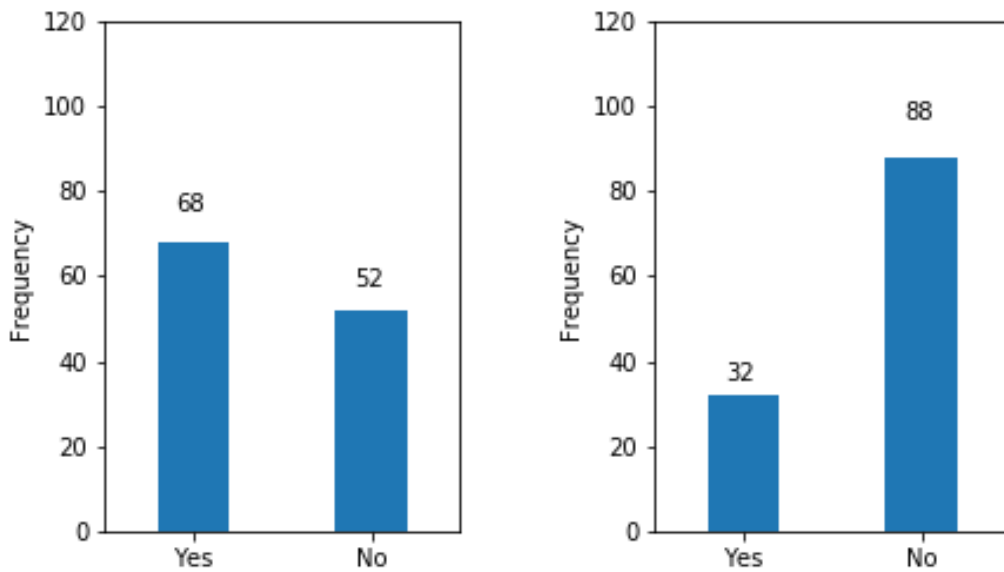


図 3.2.2-1 左：EDG 電源回復、右：SRV の閉失敗故障発生の有無の度数分布

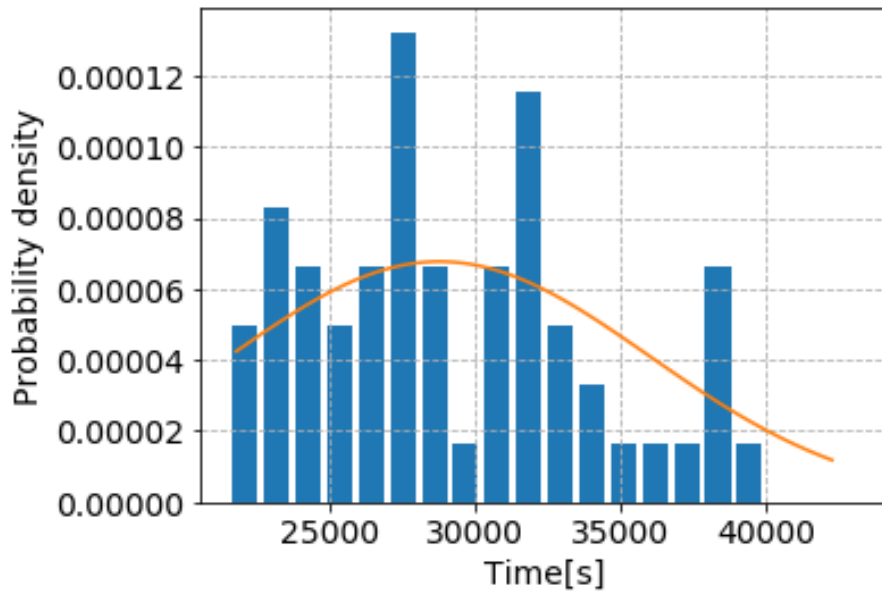


図 3.2.2-2 DC 電源の枯渇時間の確率密度分布（棒グラフ：サンプリング値の度数を確率密度に変換したもの。曲線：サンプリング時に用いた確率密度関数）

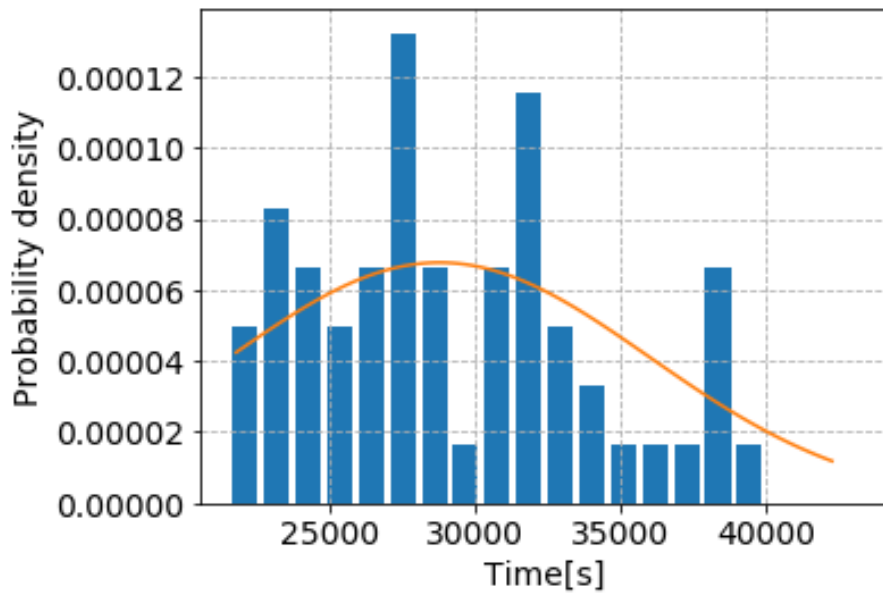


図 3.2.2-3 EDG 電源の回復時間の確率密度分布（棒グラフ：サンプリング値の度数を確率密度に変換したもの。曲線：サンプリング時に用いた確率密度関数）

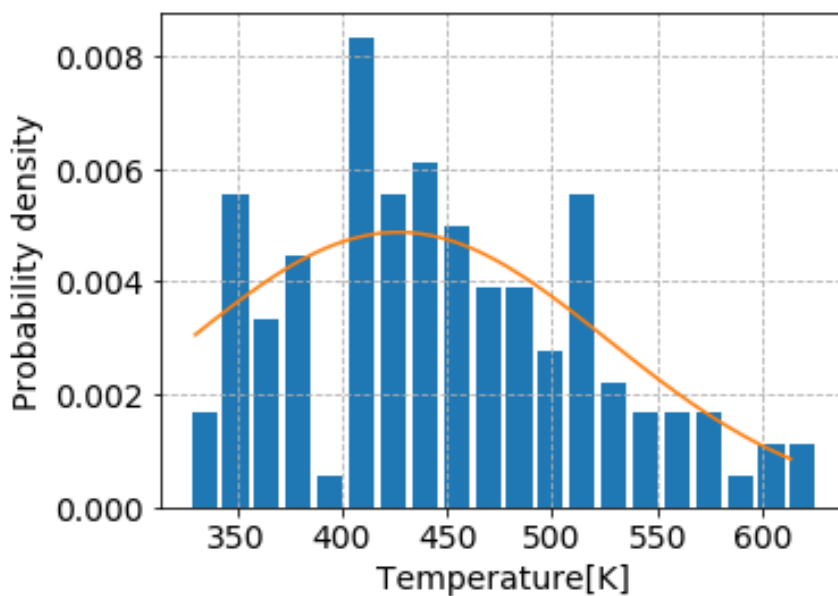


図 3.2.2-4 SRV の熱的故障発生温度の確率密度分布（棒グラフ：サンプリング値の度数を確率密度に変換したもの。曲線：サンプリング時に用いた確率密度関数）

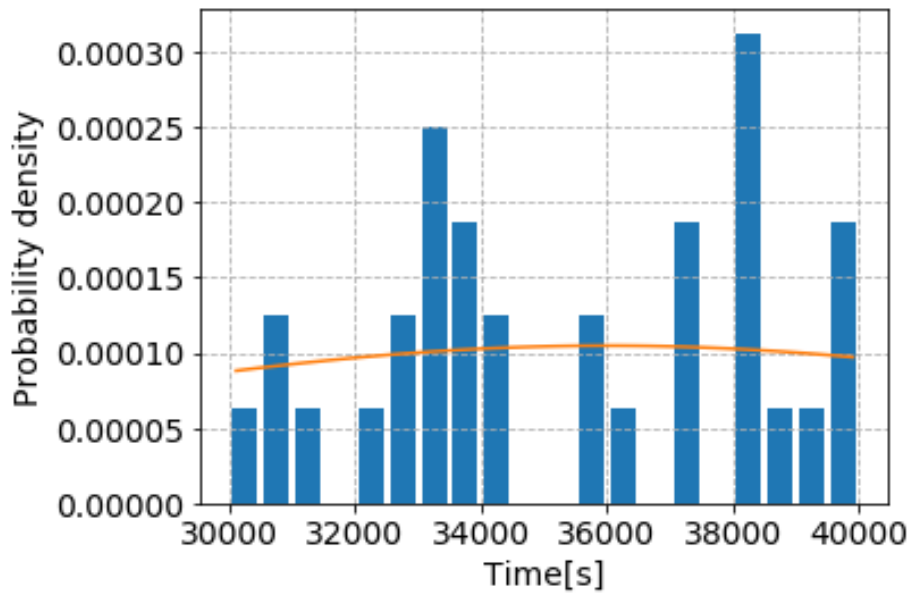


図 3.2.2-5 SRV の閉失敗故障発生時の発生時刻の確率密度分布（棒グラフ：サンプル値の度数を確率密度に変換したもの。曲線：サンプリング時に用いた確率密度関数）

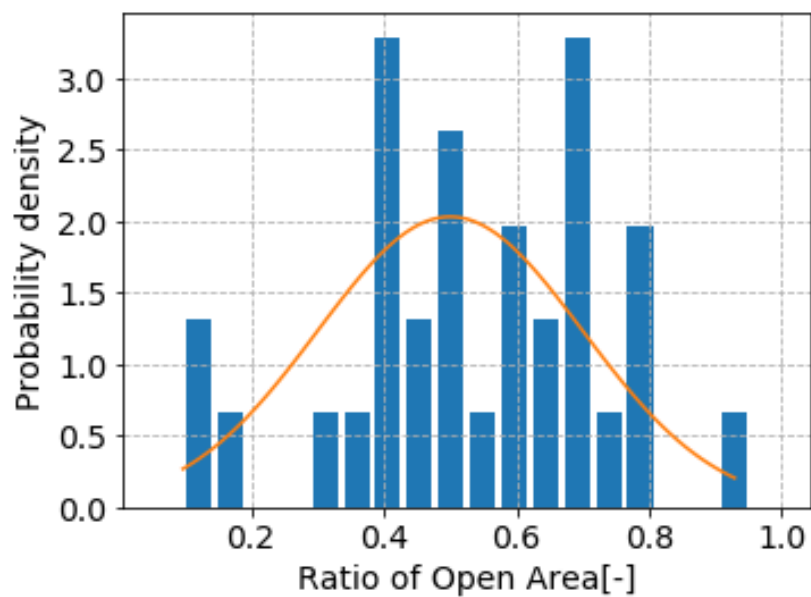


図 3.2.2-6 SRV の閉失敗故障発生時の漏洩面積割合の確率密度分布（棒グラフ：サンプル値の度数を確率密度に変換したもの。曲線：サンプリング時に用いた確率密度関数）

### 3.2.2.2. 解析結果

前節で生成した 120 ケースの解析を行った。また、SRV の熱的故障による分岐生成が生じたケースについては、分岐点以降の解析も行った。図 3.2.2-7 から図 3.2.2-18 は、事故の進展状況を示す主要な解析結果である。

解析を実施した 120 ケースのうち、分岐条件に達してリスタート計算したものは 35 ケース存在した。結果の図で、凡例に”restart\_case(番号).dat”と記載されたものが分岐に対応する。また、本解析では燃料被覆管最高温度 (PCT) が 1200℃に達したら炉心が損傷したとみなし、このタイミングに達した時点で解析を終了するようにした。



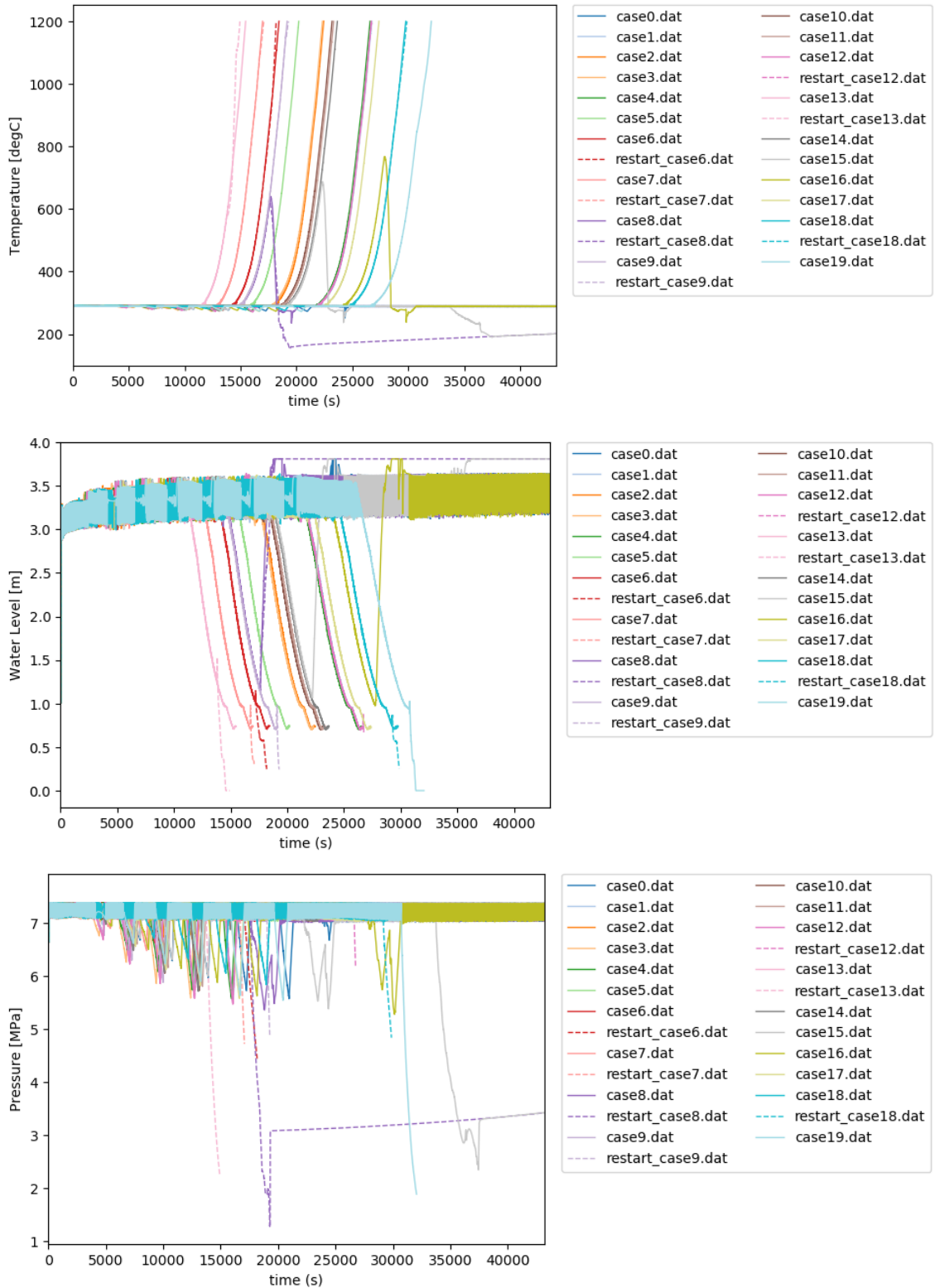


図 3.2.2-7 Case0 から Case19 までの結果 (上 : PCT、中 : 炉心部水位、下 : 原子炉圧力)

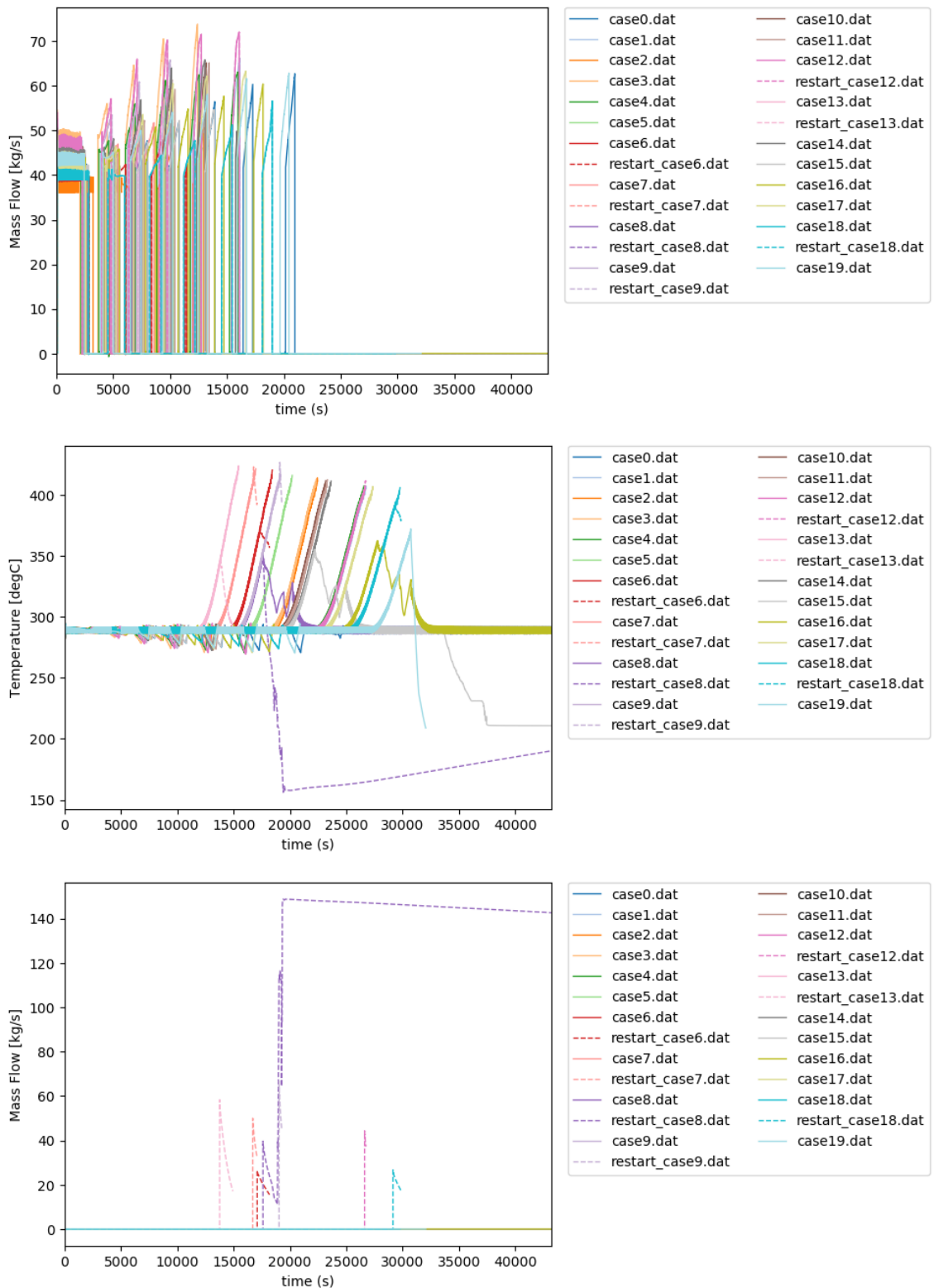


図 3.2.2-8 Case0 から Case19 までの結果 (上: RCIC 注入量、中: 熱的故障の対象である SRV (以下、SRV-TS と呼ぶ) の温度、下: SRV-TS の流量)

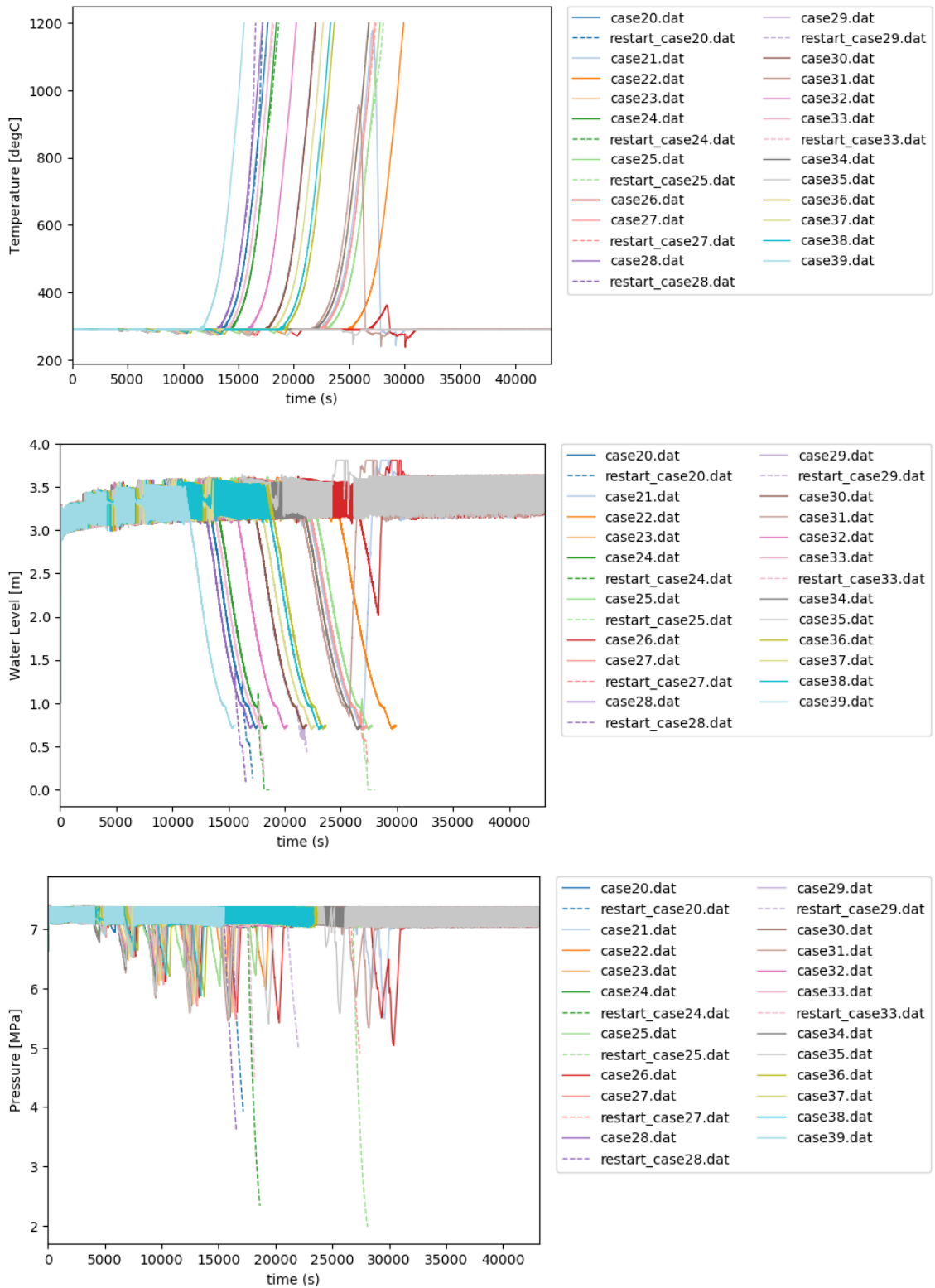


図 3.2.2-9 Case20 から Case39 までの結果 (上 : PCT、中 : 炉心部水位、下 : 原子炉圧力)

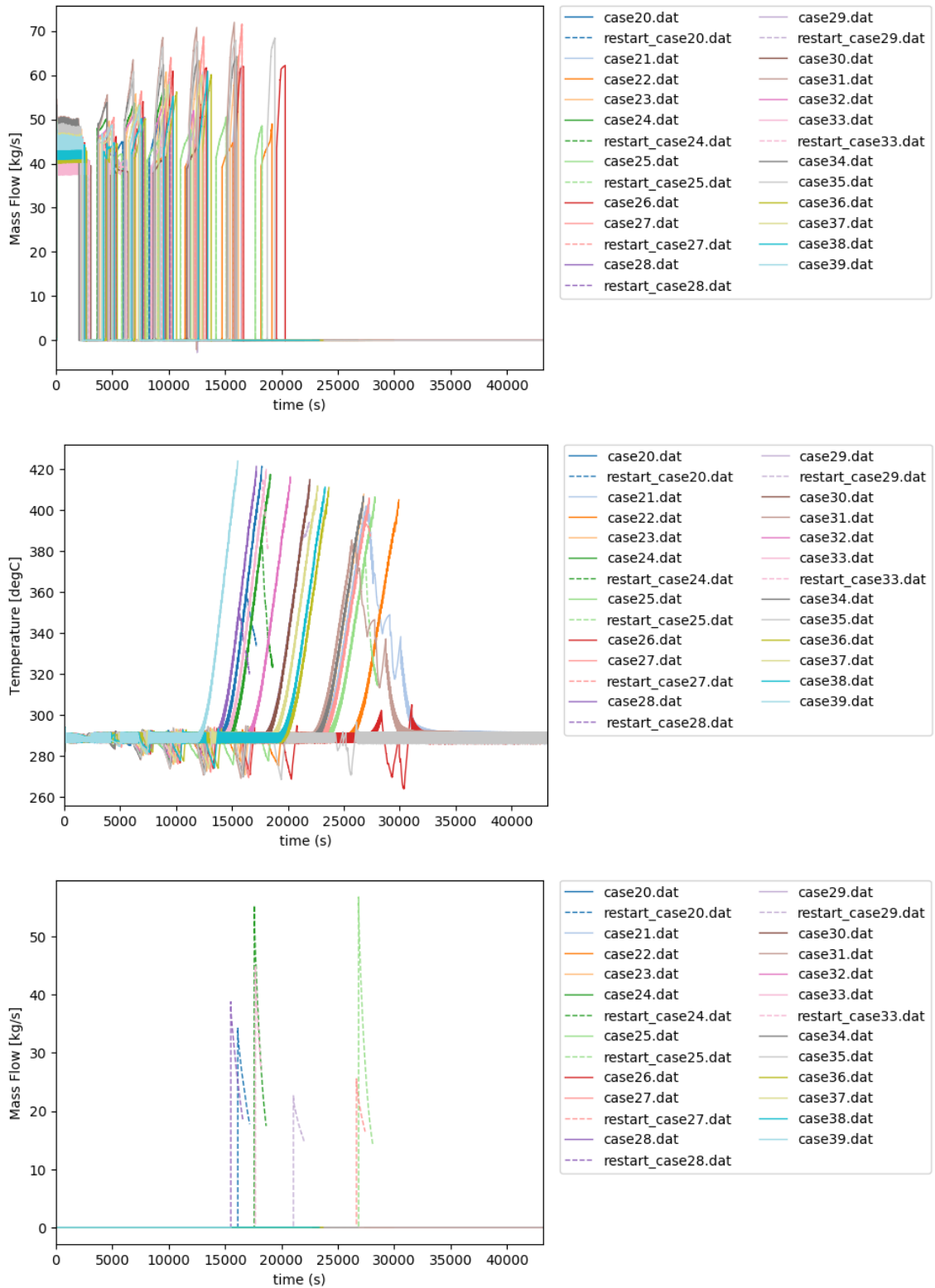


図 3.2.2-10 Case20 から Case39 までの結果（上：RCIC 注入量、中：SRV-TS の温度、下：SRV-TS の流量）

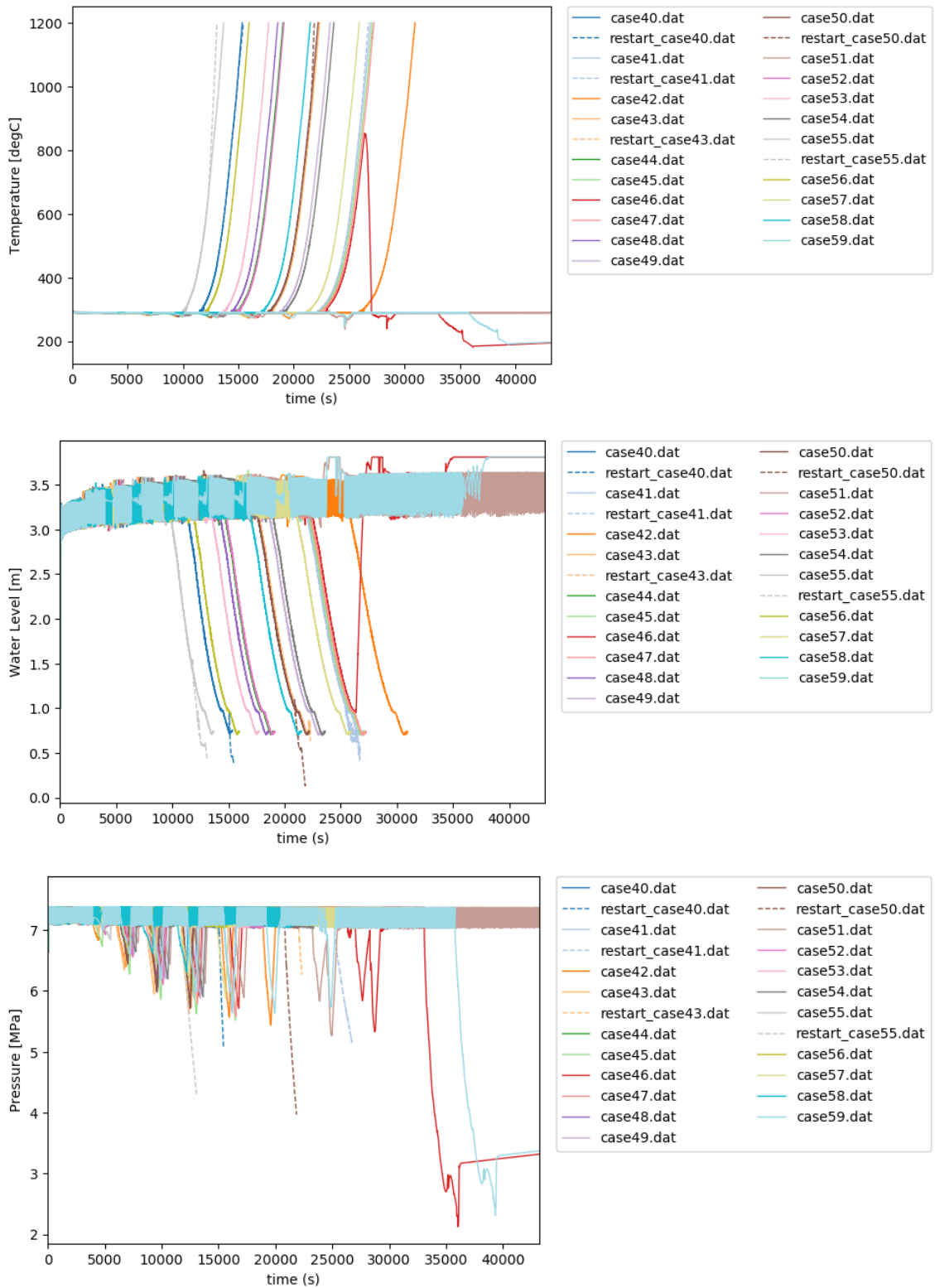


図 3.2.2-11 Case40 から Case59 までの結果 (上 : PCT、中 : 炉心部水位、下 : 原子炉 圧力)

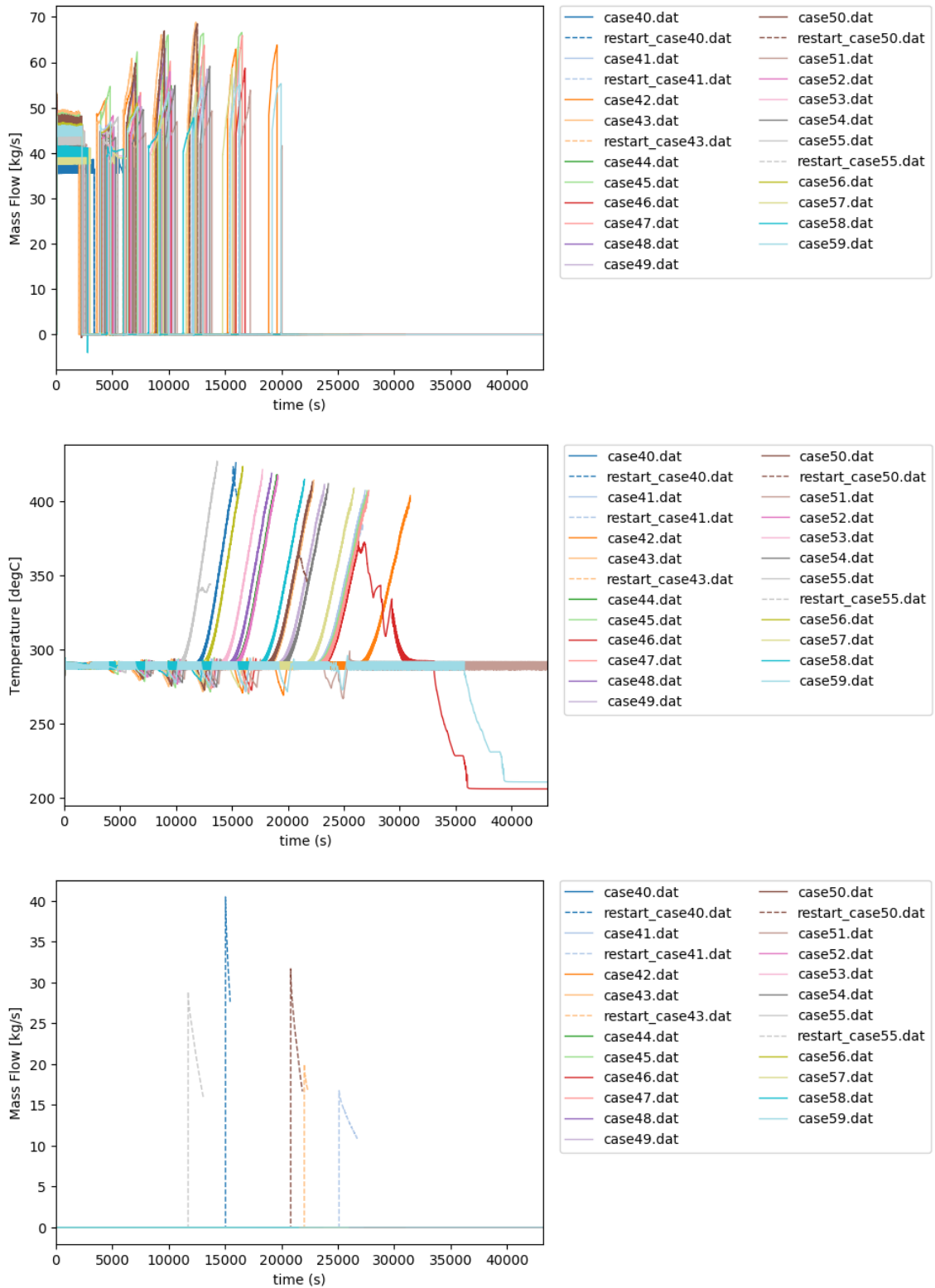


図 3.2.2-12 Case40 から Case59 までの結果（上：RCIC 注入量、中：SRV-TS の温度、下：SRV-TS の流量）

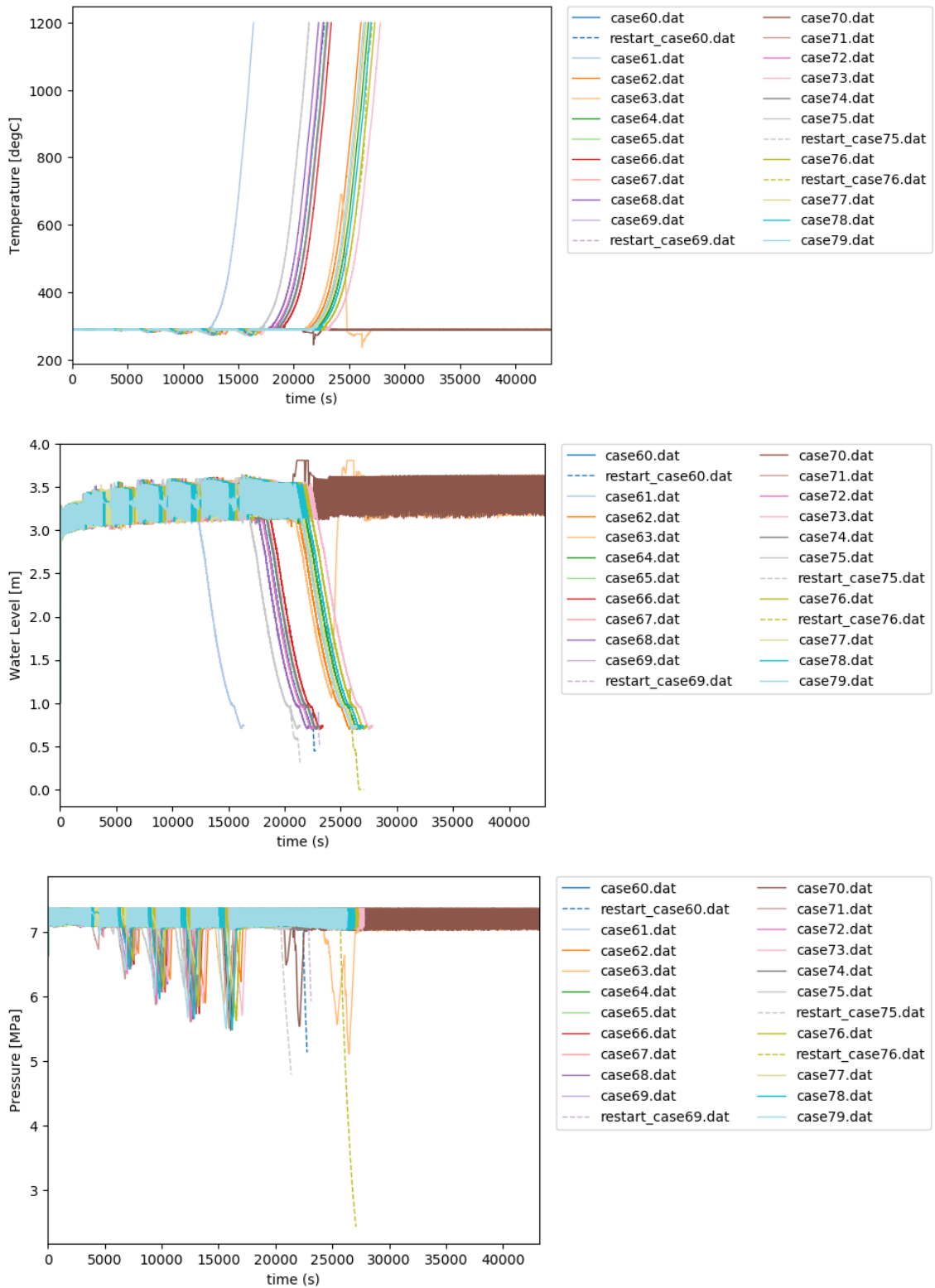


図 3.2.2-13 Case60 から Case79 までの結果 (上 : PCT、中 : 炉心部水位、下 : 原子炉 圧力)



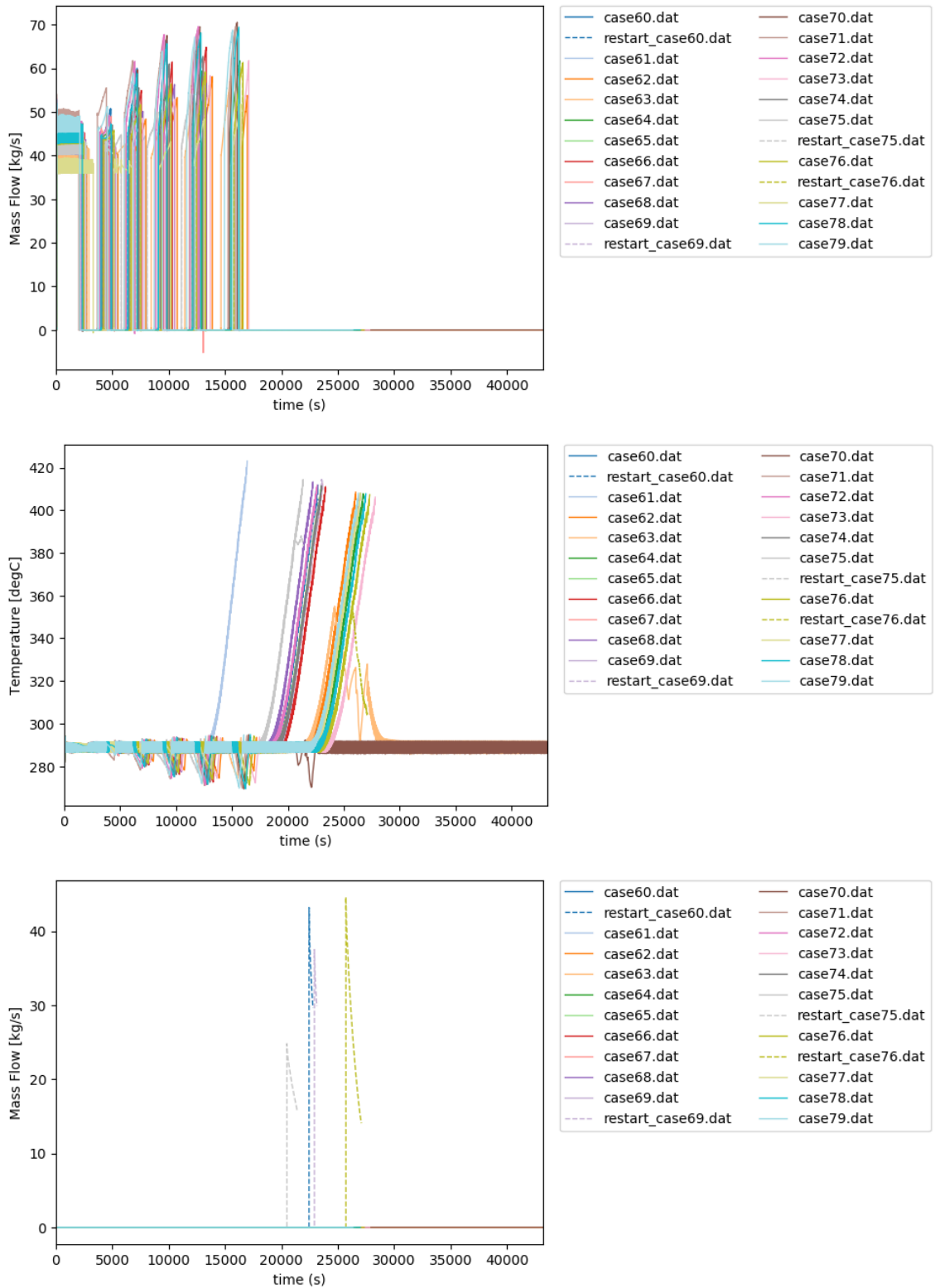


図 3.2.2-14 Case60 から Case79 までの結果（上：RCIC 注入量、中：SRV-TS の温度、下：SRV-TS の流量）



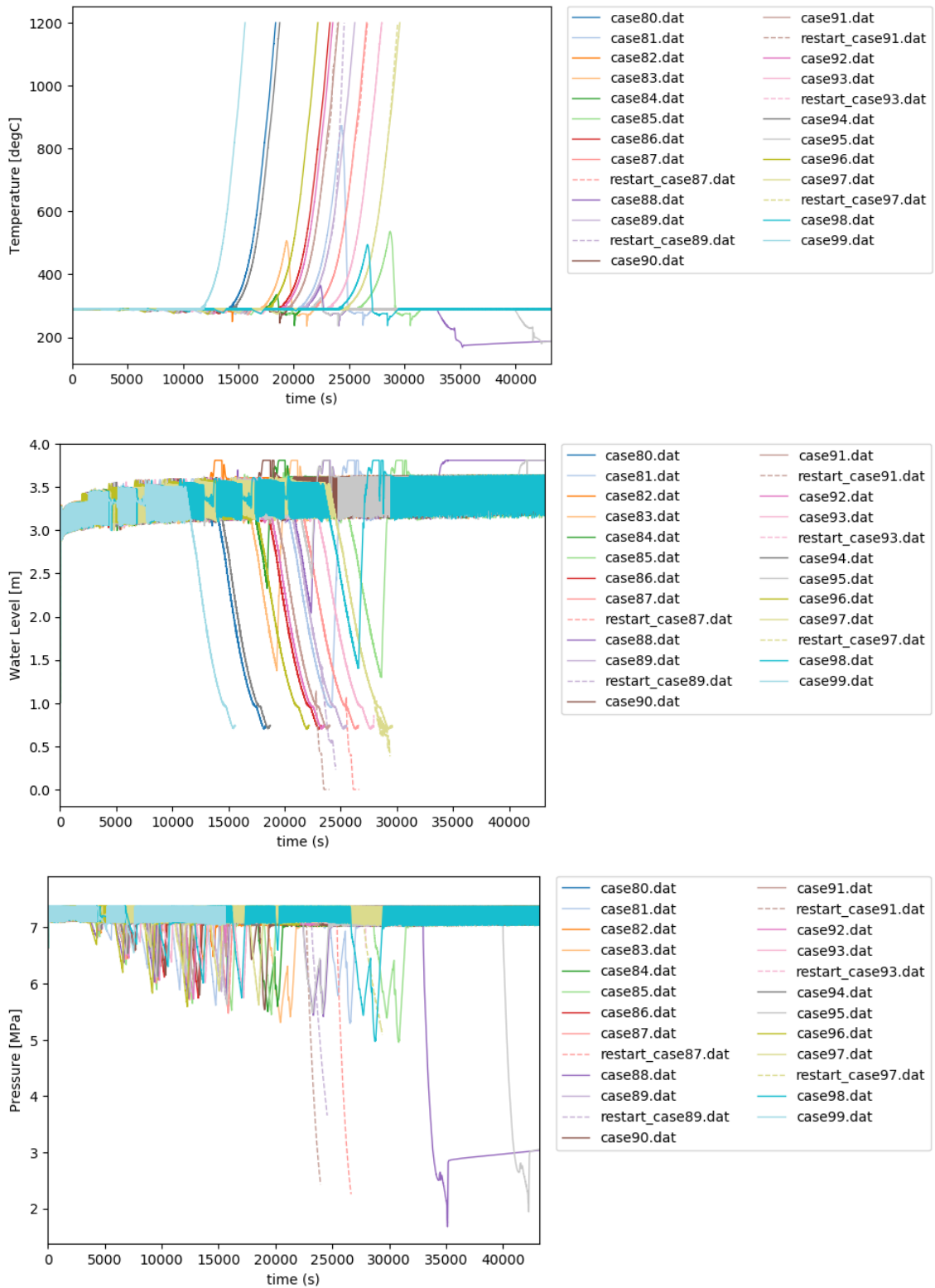


図 3.2.2-15 Case80 から Case99 までの結果（上：PCT、中：炉心部水位、下：原子炉圧力）

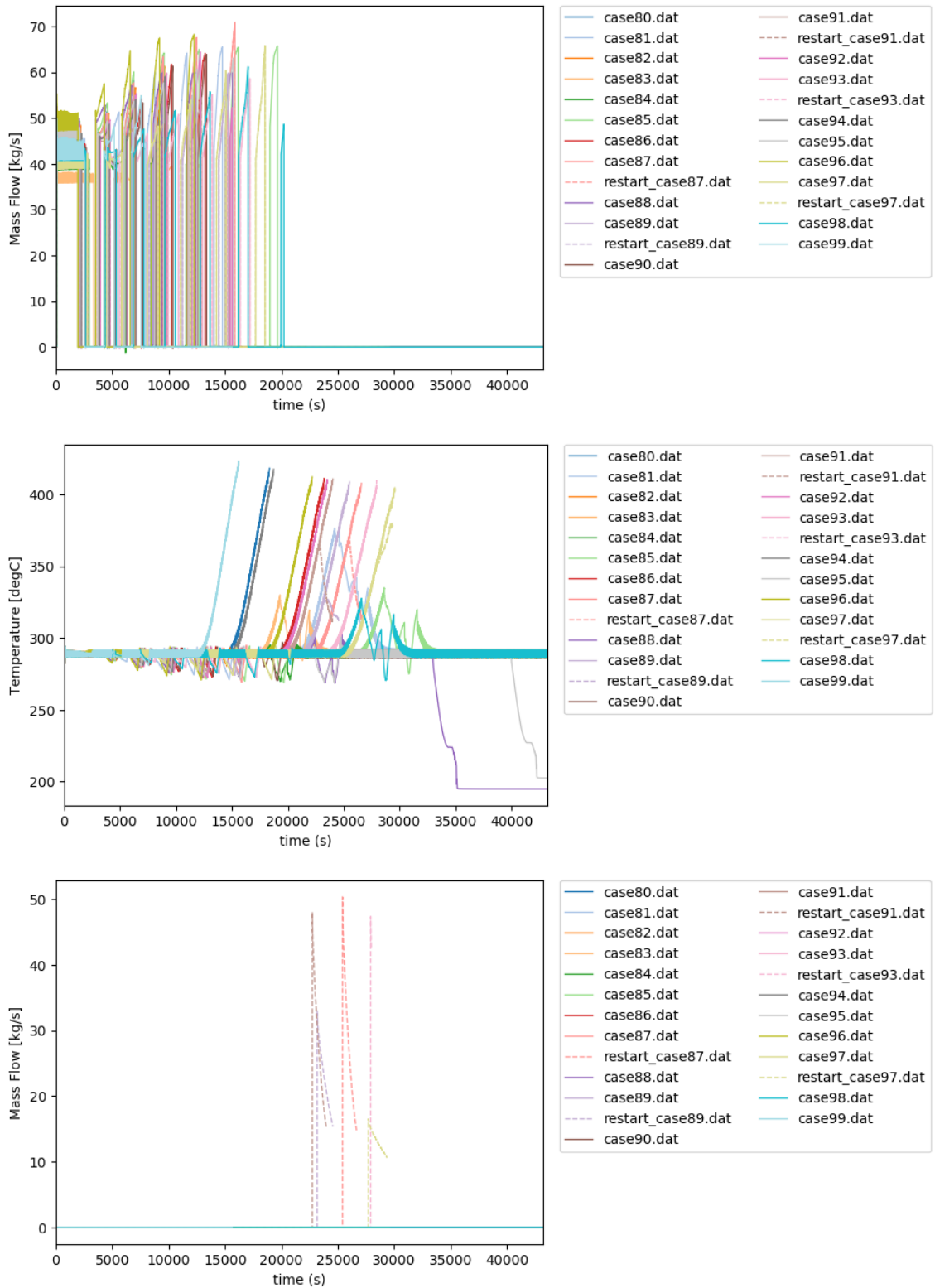


図 3.2.2-16 Case80 から Case99 までの結果（上：RCIC 注入量、中：SRV-TS の温度、下：SRV-TS の流量）

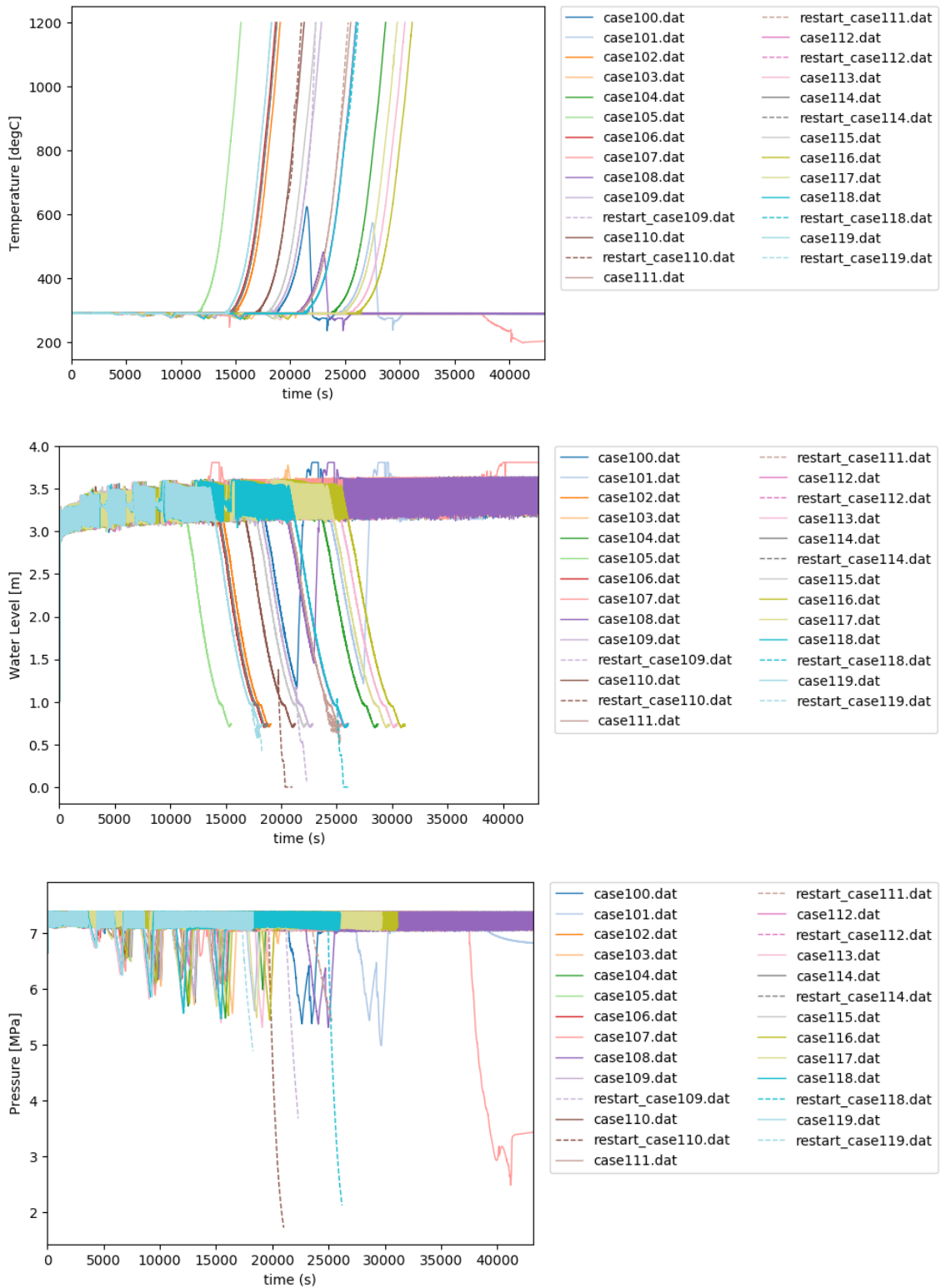


図 3.2.2-17 Case100 から Case119 までの結果 (上 : PCT、中 : 炉心部水位、下 : 原子炉圧力)

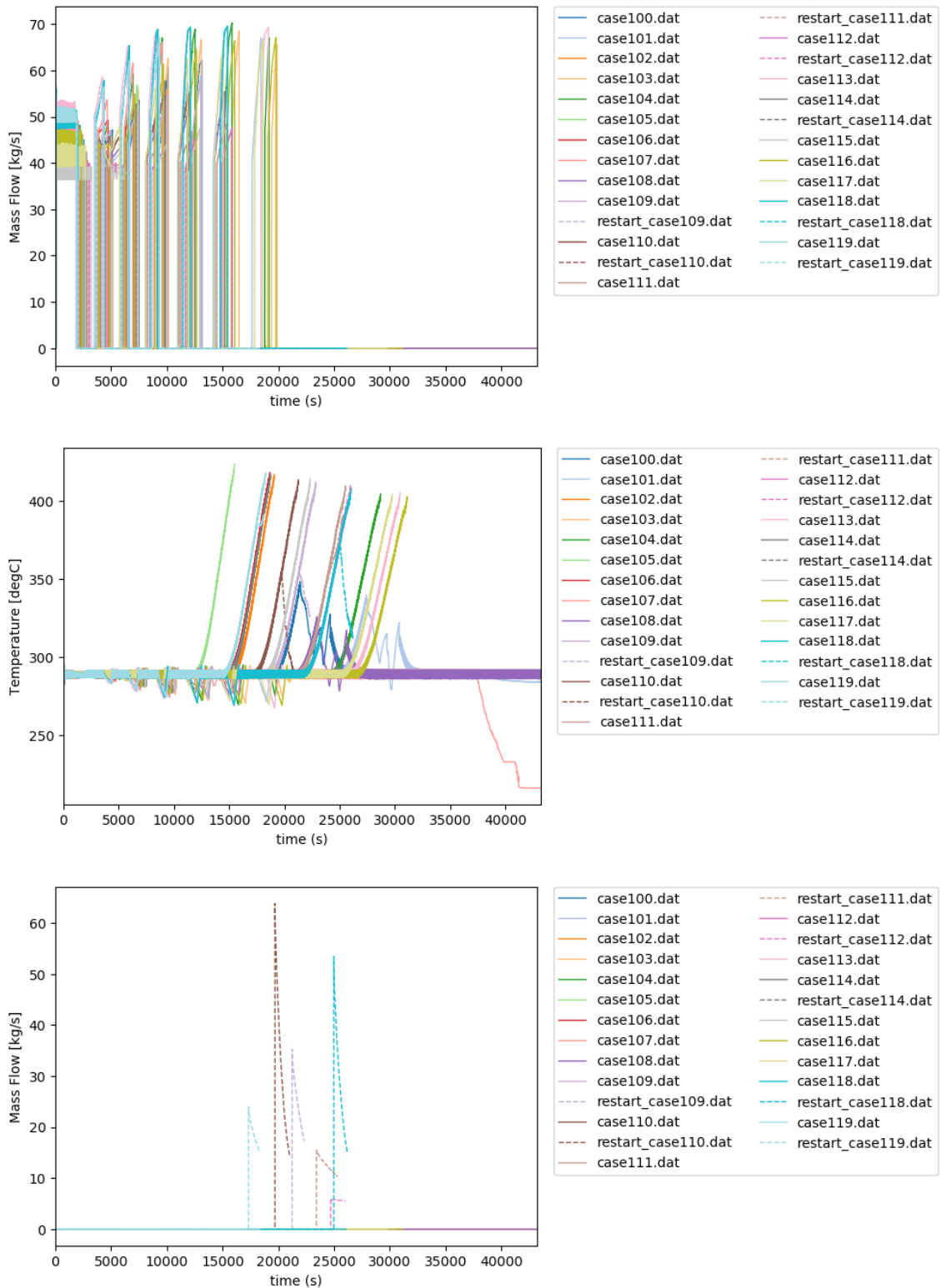


図 3.2.2-18 Case100 から Case119 までの結果 (上: RCIC 注入量、中: SRV-TS の温度、下: SRV-TS の流量)

### 3.2.2.3. 結果の考察

PCT の解析結果より、解析結果は炉心冷却に成功したケースと失敗したケースに大別される。SRV の熱的故障により分岐が生じたケースのほとんどは炉心冷却に失敗しており、炉心損傷直前に分岐が発生している。なぜなら、SRV の熱的故障の発生条件である SRV の温度上昇は、炉心部の水位が低下し、炉心の温度が上昇して、その過熱蒸気が主蒸気管に流れ込むことによって生じるためである。SRV の熱的故障に関して、例としてケース番号が 13 のケースを取り上げ、故障の有無による解析結果への影響を説明する。

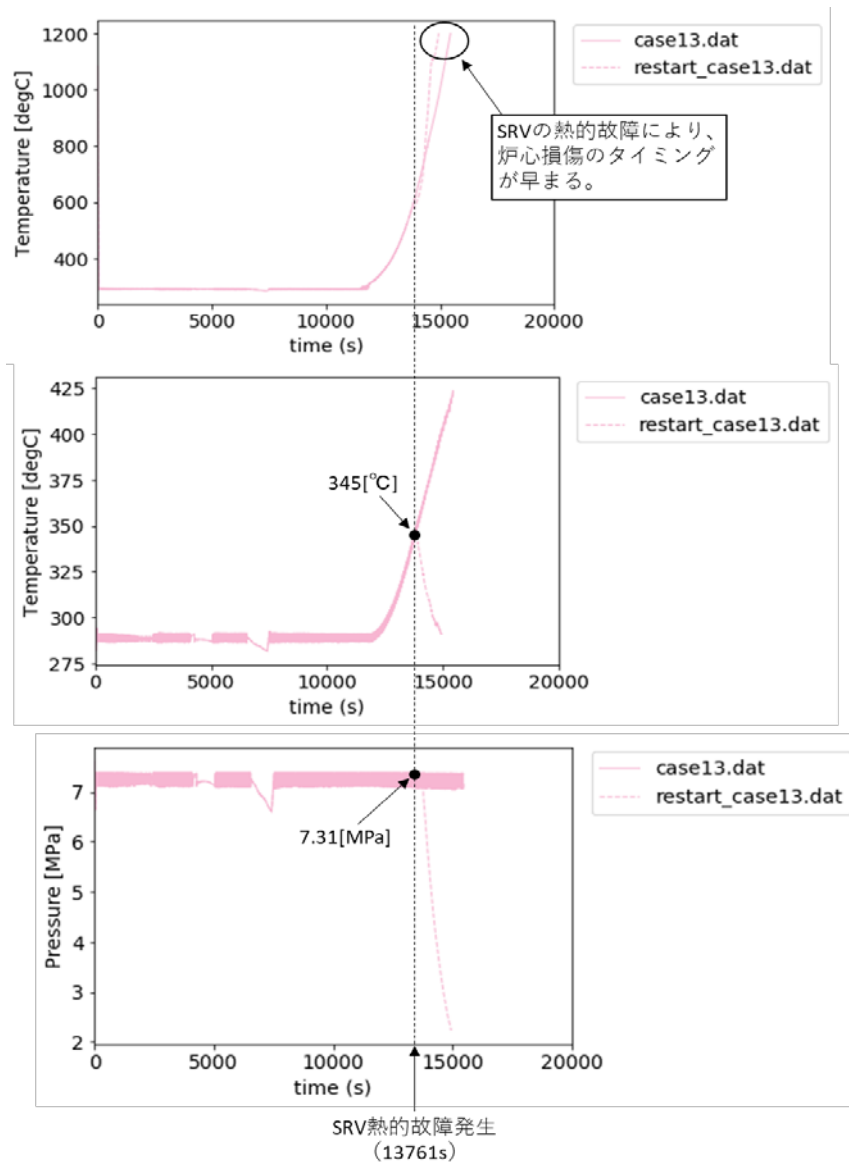


図 3.2.2-19 ケース 13 の解析結果 (上 : PCT、中 : SRV-TS の温度、下 : RPV 内の圧力)

図 3.2.2-19 は、ケース 13 の PCT、熱的故障する SRV の温度、RPV 内の圧力の解析結果である。ケース 13 の熱的故障発生温度は 345°C(=618K)に設定されており、解析を行った結果、熱的故障は 13761 秒後に発生した。そのタイミングでの SRV の温度、RPV 内の圧力は、それぞれ 618K、7.31MPa であった。熱的故障時の SRV の漏洩面積割合を(3.1.2-1)式より算出すると、

$$\begin{aligned}
 F &= f \cdot \frac{T_{MSL}}{T_{TS}^{mean}} \cdot \frac{P_{RPV}}{P_{RPV}^{mean}} \\
 &= 0.278 \cdot \frac{618}{700} \cdot \frac{7.31}{7.56} \\
 &\cong 0.237
 \end{aligned}$$

となり、プラントパラメータを反映することでサンプリングで得られた値 0.278 より少し小さい値になった。熱的故障により、故障した SRV から蒸気が流出し、RPV 内の圧力は低下する。その結果、炉心部の水位は急激に低下し、熱的故障しなかった場合よりも早く炉心損傷に至る。

ここではケース 13 のケースを取り上げたが、その他のケースについても、熱的故障により炉心損傷のタイミングが早まる傾向にある。ただ、ケース 8 の場合は SRV の熱的故障が生じるものの、その後炉心冷却に成功している。その理由は、熱的故障の発生温度が 346°C(=619K)と比較的低く、かつ、AC 電源の回復が 17608 秒後と早いためである。図 3.2.2-20 は、ケース 8 の PCT、熱的故障する SRV の温度、RPV 内の圧力の解析結果である。SRV の温度が 346°Cに達するのが 17477 秒後であり、そのわずか 131 秒後に AC 電源が回復し、HPCS による炉心冷却が始まる。熱的故障した分岐の方は、故障した SRV から蒸気が流出するが、減圧されたことにより LPCS が作動し、炉心冷却に成功する。このように、熱的故障の有無によって LPCS の注入の有無が異なるなど、事故進展に大きな違いが生じていることが分かる。

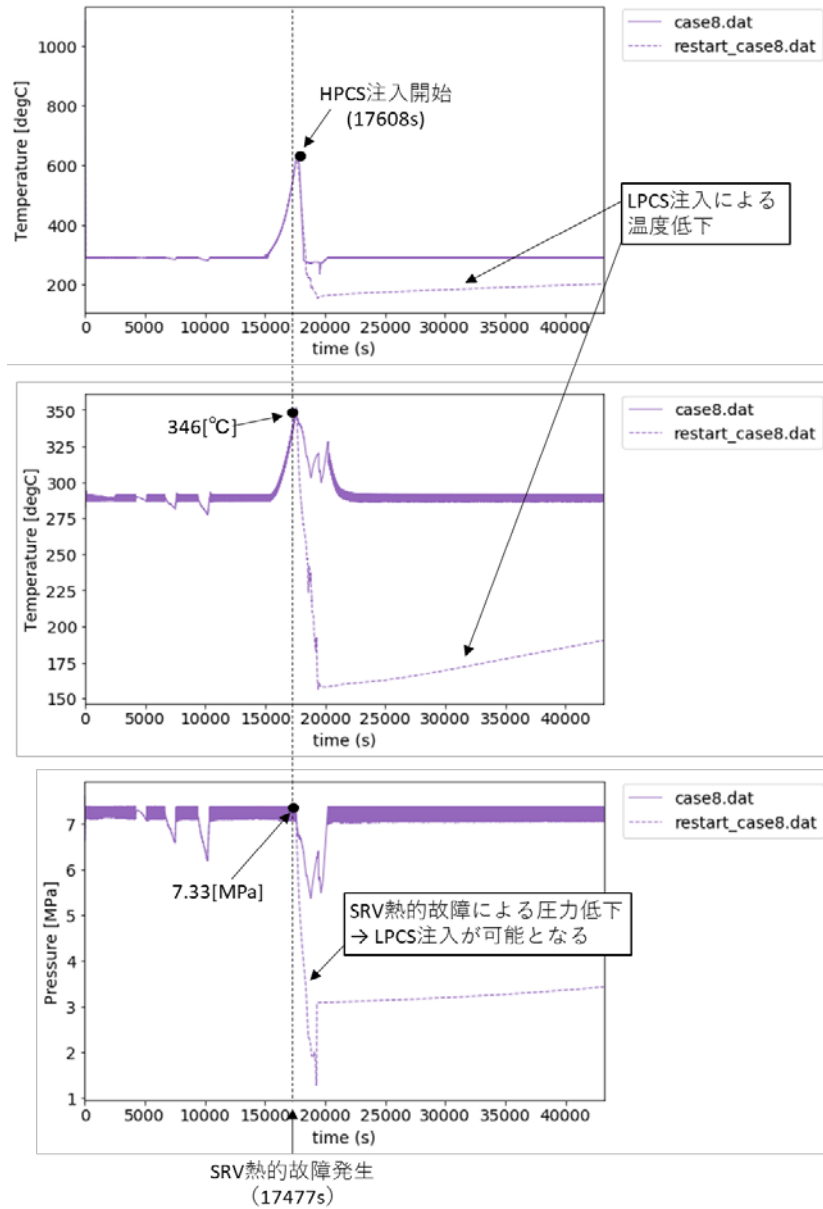


図 3.2.2-20 ケース 8 の解析結果 (上 : PCT、中 : SRV-TS の温度、下 : RPV 内の圧力)

### 3.2.2.4. 詳細化した事故シナリオに対する試解析

前節までに、RAPID-Apros の連携解析におけるリスタート機能の確認を行った。次のステップとして、3.1 節で検討した詳細化した事故シナリオへの適用がある。しかし、詳細化した事故シナリオでは、SRV の熱的故障と再循環ループのシール損傷の二回のリスタート計算が起こり得る。そこで、本節ではこれら二つの分岐条件におけるリスタート計算の試解析を行った。また、これまで SRV の閉失敗故障は時間で設定していたが、RAPID-THALES2 の連携解析と同様に、SRV の積算流量によって閉失敗故障とした場合の試解析も行った。

#### <二つの分岐条件におけるリスタート計算>

本試解析では、二回のリスタート計算の確認に絞って試解析を行うため、過去の解析結果から事故シナリオを簡素化した。

- SBO 発生から 3600 秒後に DC 電源が枯渇、かつ、EDG (AC 電源) の修復は無し。
- SBO 発生から 5400 秒後に再循環ループのシール損傷発生。
- SRV の熱的故障発生温度は 350℃ (=623K) に設定。

再循環ループのシール損傷は、図 3.2.2-21 に示したように再循環ポンプの隣のノードからドライウェルに繋がる流路を設定し、その流路内にあるバルブを開いてシール損傷を模擬した。

再循環ループのノード図

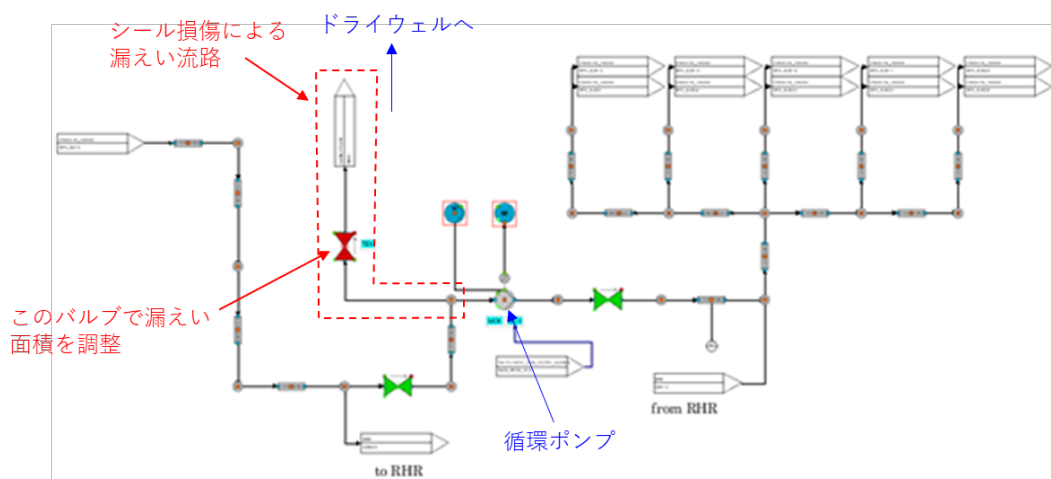


図 3.2.2-21 Apros モデルにおける再循環ループのシール損傷の設定



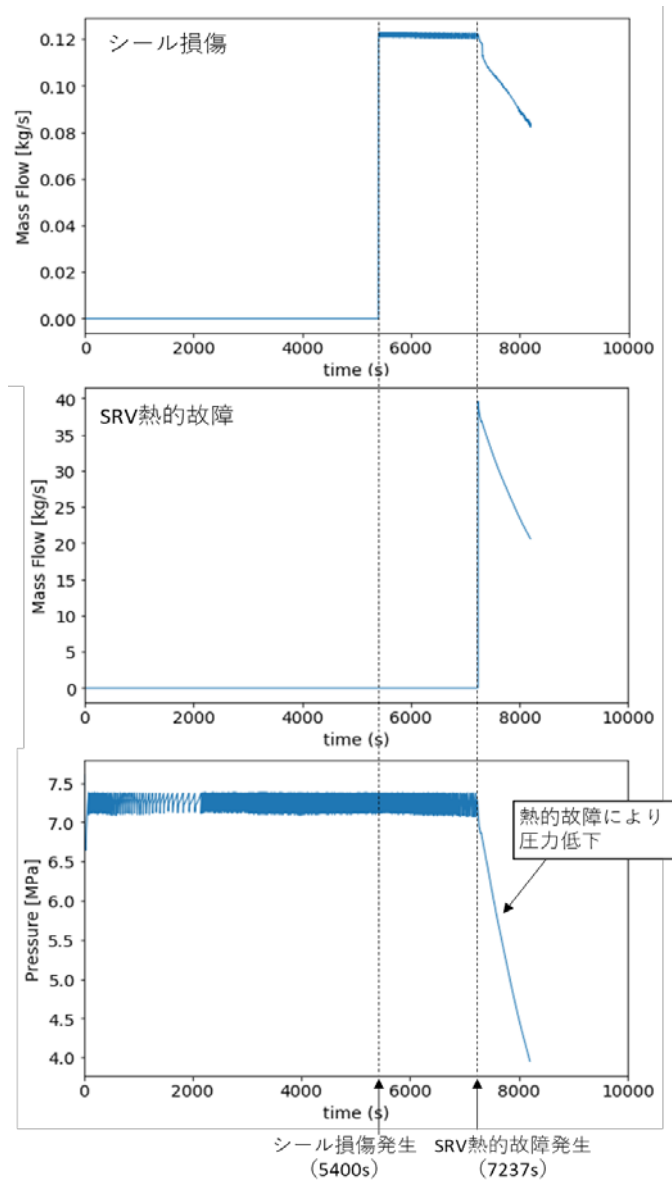


図 3.2.2-22 シール損傷部及び熱的故障した SRV の漏洩流量、RPV 内圧力

図 3.2.2-22 は、シール損傷部及び熱的故障した SRV の漏洩流量、RPV 圧力の結果である。設定したシナリオ通り、5400 秒後にシール損傷が発生していることを確認できる。ただ、シール損傷の面積は  $2.5 \times 10^{-5} \text{m}^2$  と小さいため、漏洩流量も小さく、RPV 内の圧力にはほぼ影響は無い。その後、炉心冷却系は停止したままであるため、炉心の温度が上昇し、7237 秒後に SRV の熱的故障が発生する。熱的故障時のバルブの漏洩面積は  $3.1 \times 10^{-2} \text{m}^2$  であり、故障後 RPV 内の圧力が低下する。それに伴い、シール損傷部の漏洩流量も低下していることが確認できる。この試解析により、二つの分岐条件に対しても Apros によるリス

ターゲット計算が行えることを確認した。

#### <積算流量による閉失敗故障の設定>

SRV の積算流量の取得は、Apros のモジュール BC, Time Integral を用いて取得することができる。これを閉失敗故障する SRV に設定した (図 3.2.2-23 参照)。

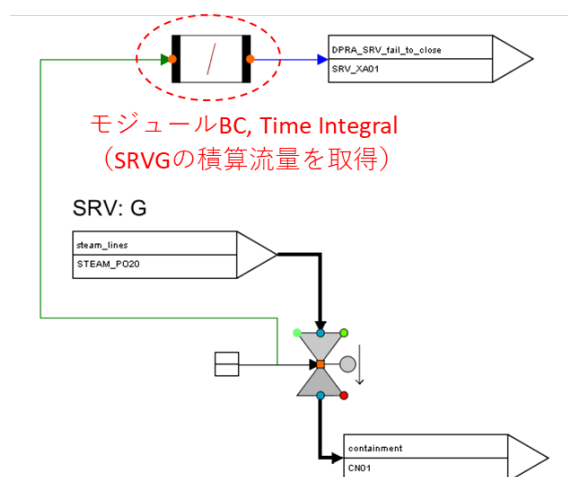


図 3.2.2-23 モジュール BC, Time Integral による SRV の積算流量の取得

本試解析では、積算流量が  $10^5\text{kg}$  に達したら閉失敗故障が発生するとして解析を行った。図 3.2.2-24 は閉失敗故障する SRV の積算流量とバルブの開放率、および RPV 内圧力の結果である。積算流量が  $10^5\text{kg}$  に達するまでは、RPV 内の圧力に従って SRV の開閉を繰り返す。積算流量が  $10^5\text{kg}$  に達すると、閉失敗故障が生じて、バルブ開いたまま (本解析では故障時の開放率を 0.5 とした) になり、SRV から蒸気が流出し続け、RPV 内の圧力が下がる。この結果より、積算流量による SRV の閉失敗故障が確認できた。

以上、詳細化した事故シナリオのうち、二つの分岐条件がある場合のリスタート計算、および、積算流量による SRV の閉失敗故障の試解析を実施した。二つの分岐条件のリスタート計算の際、Apros の入力ファイルである SCL ファイルは RAPID を用いて生成したが、二回目以降の分岐生成には完全には対応しておらず、一部手動で編集を行った。その理由は、THALES2 の場合は各事故シーケンスのフォルダ内で解析を実行できるのに対して、Apros の場合は解析実行用のフォルダで解析を行わねばならない上に、解析結果が結果専用のフォルダにまとめられてしまうためである。しかし、解析結果や RAPID 用制御ファイル (分岐条件に到達したタイミングの値を出力した csv ファイル) を各事故シーケンスで階層 (フォルダ) に分けて整理できれば、二回目以降の分岐生成も RAPID で可能と考える。

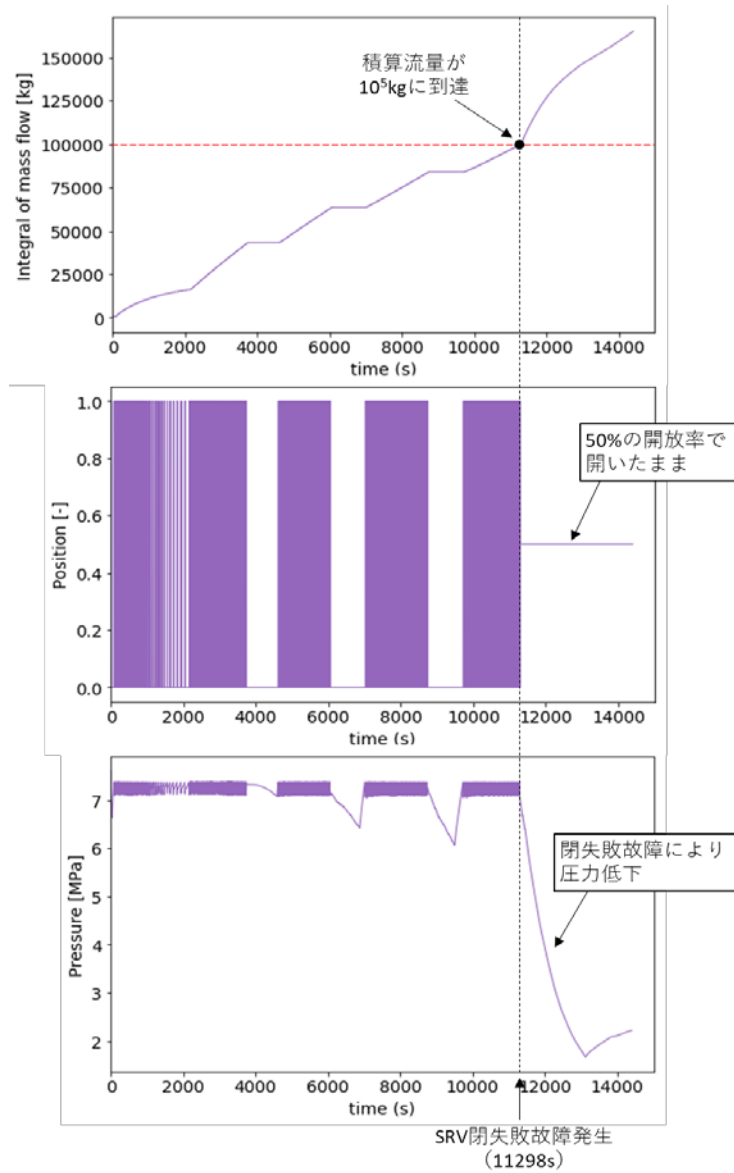


図 3.2.2-24 閉失敗故障する SRV の積算流量とバルブ開放率、RPV 内圧力

### 3.3. クラスタリング

本年度開発したクラスタリングの機能(2.5.1節参照)を用いて、THALES2 および Apros の解析結果のクラスタリングを行った。

#### 3.3.1. THALES2 の解析結果

クラスタリングを適用する解析結果を得るために、詳細な事故シナリオのうち、

- DC 電源の枯渇、EDG の修復
- RCIC による炉心冷却
- SRV の閉失敗、熱的故障
- 再循環ループのシール損傷

のみを取り入れた解析を実施した。計算終了時間は 24 時間としているが、炉心損傷・溶融による下部プレナムが破損した場合は、そのタイミングで計算を終了するようにした。また、THALES2 における解析では、炉心損傷が発生した後に SRV の熱的故障が生じるため、得られた解析結果はすべて炉心損傷に至ったケースである。RAPID を用いて、20 ケースの事故シーケンスを生成して解析を行った。SRV の熱的故障及び再循環ループのシール損傷により分岐した事故シーケンスを含めると、62 ケースの結果が得られた。図 3.3.1-1 と図 3.3.1-2 に PCT の解析結果を示す。PCT の時系列データに対して、クラスタリングを行った。クラスタリングの際、PCT が 3000K を越えるケースは計算が発散した異常な結果であるとみなし、クラスタリングの対象から除外した。PCT が 3000K を越えたケースは 8 ケース存在したため、それらを除外した 54 ケースでクラスタリングが行われた。

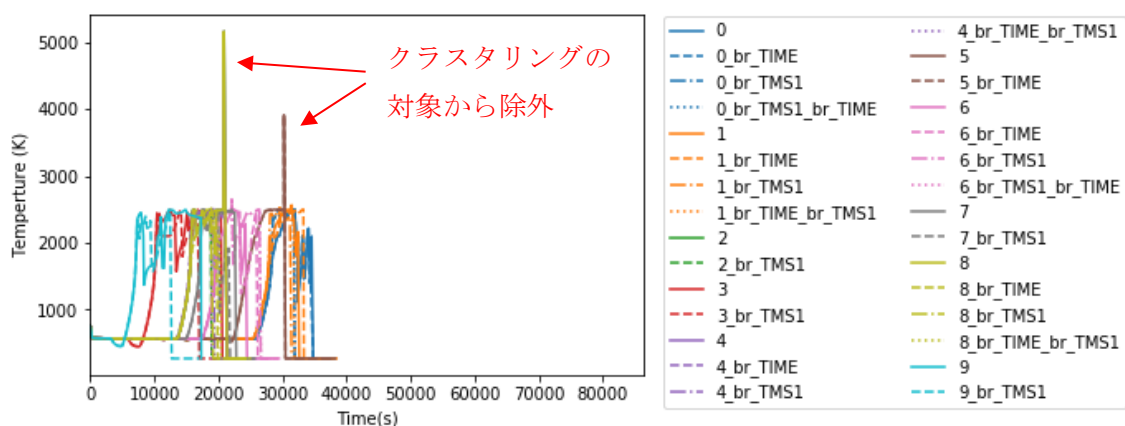


図 3.3.1-1 クラスタリング用の THALES2 の PCT の結果 (その 1)

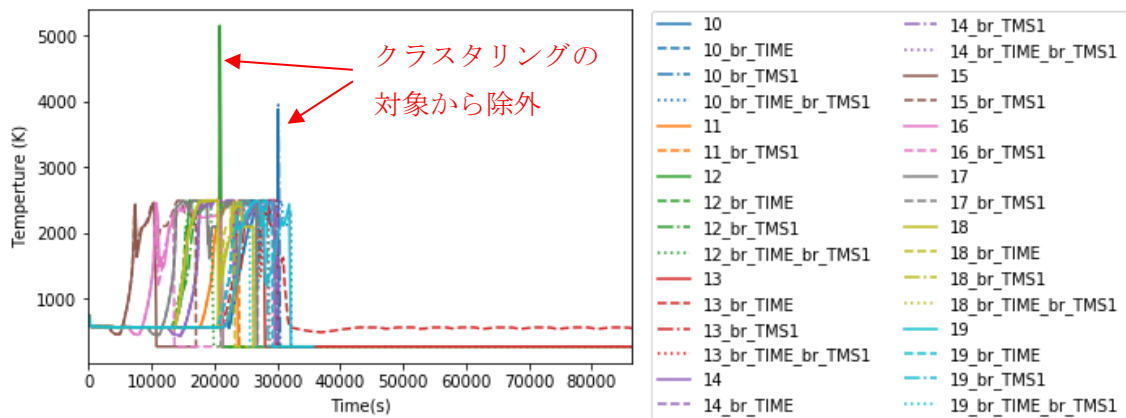


図 3.3.1-2 クラスタリング用の THALES2 の PCT の結果 (その 2)

<x-means 法によるクラスタリング>

PCT の結果に対して、x-means 法によるクラスタリングを実施した。図 3.3.1-3 はクラスタリングの結果であり、5つのグループに分類された。同じ色の線は同じグループに属していることを意味する。

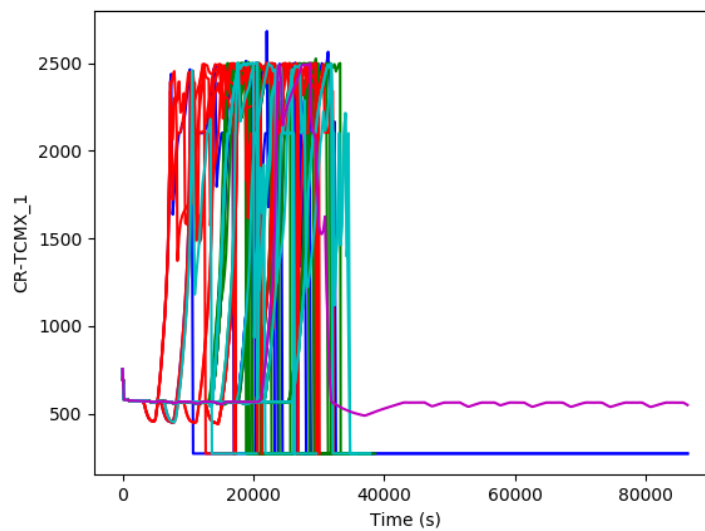


図 3.3.1-3 x-means 法による PCT のクラスタリング (THALES2 の結果を利用)

<k-means 法、k-medoids 法によるクラスタリング>

x-means 法で得られたクラスタ数 5 を用いて、k-means 法及び k-medoids 法による PCT のクラスタリングも実施した。

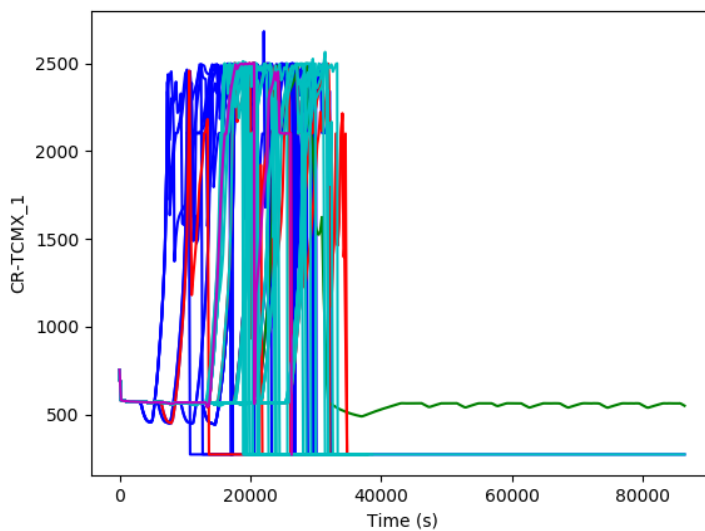


図 3.3.1-4 クラスタ数 5 の k-means 法による PCT のクラスタリング (THALES2 の結果を利用)

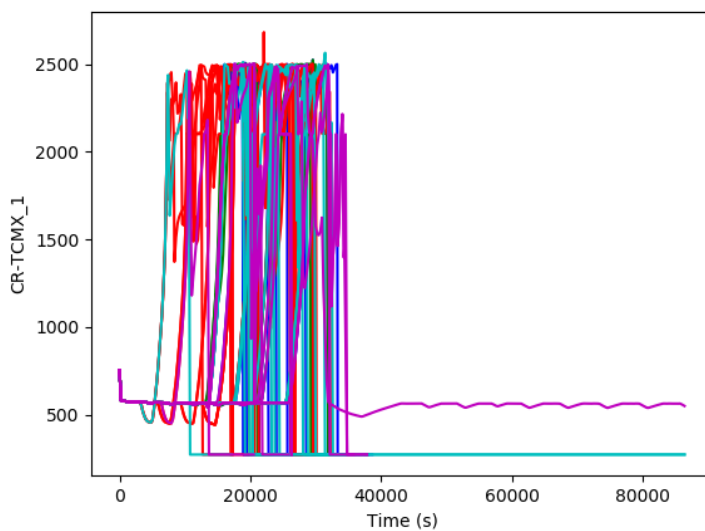


図 3.3.1-5 クラスタ数 5 の k-medoids 法による PCT のクラスタリング (THALES2 の結果を利用)

x-means 法が推定したクラスタ数 5 を用いてクラスタリングした場合、クラスタ数が多く、各クラスタの特徴が捉えにくい。そこで、クラスタ数を 2 および 3 にして、k-means 法、k-medoids 法によるクラスタリングを実施した。

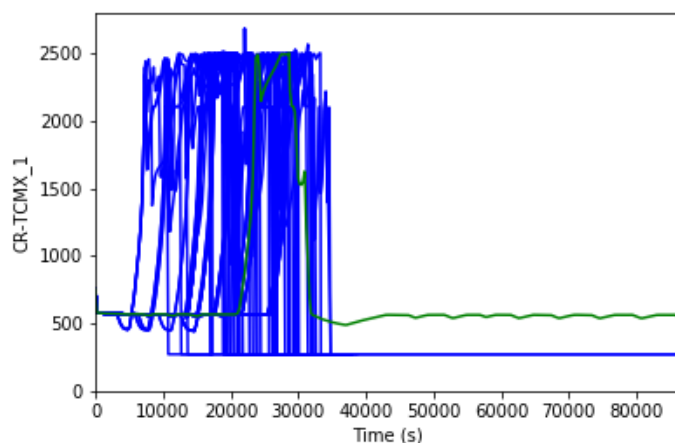


図 3.3.1-6 クラスタ数 2 の k-means 法による PCT のクラスタリング (THALES2 の結果を利用)

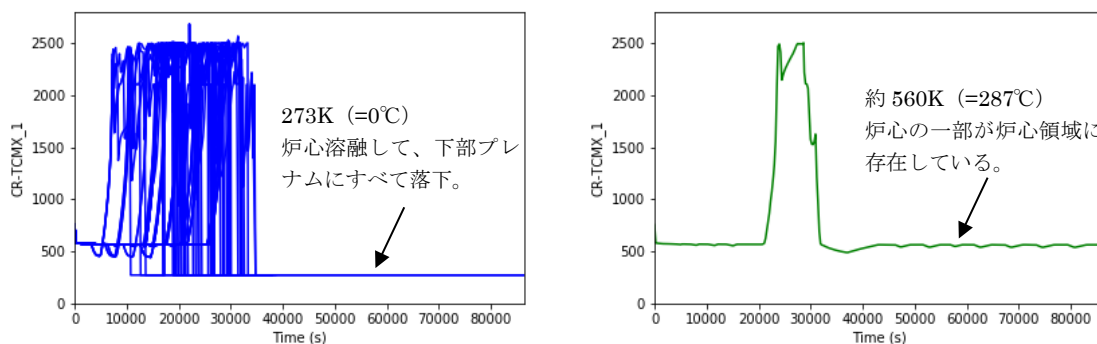


図 3.3.1-7 クラスタ数 2 の k-means 法による各クラスタの PCT (THALES2 の結果を利用)

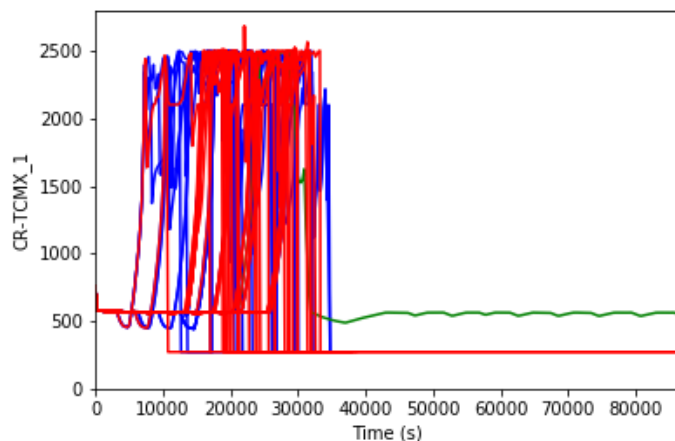


図 3.3.1-8 クラスタ数3のk-means法によるPCTのクラスタリング (THALES2の結果を利用)

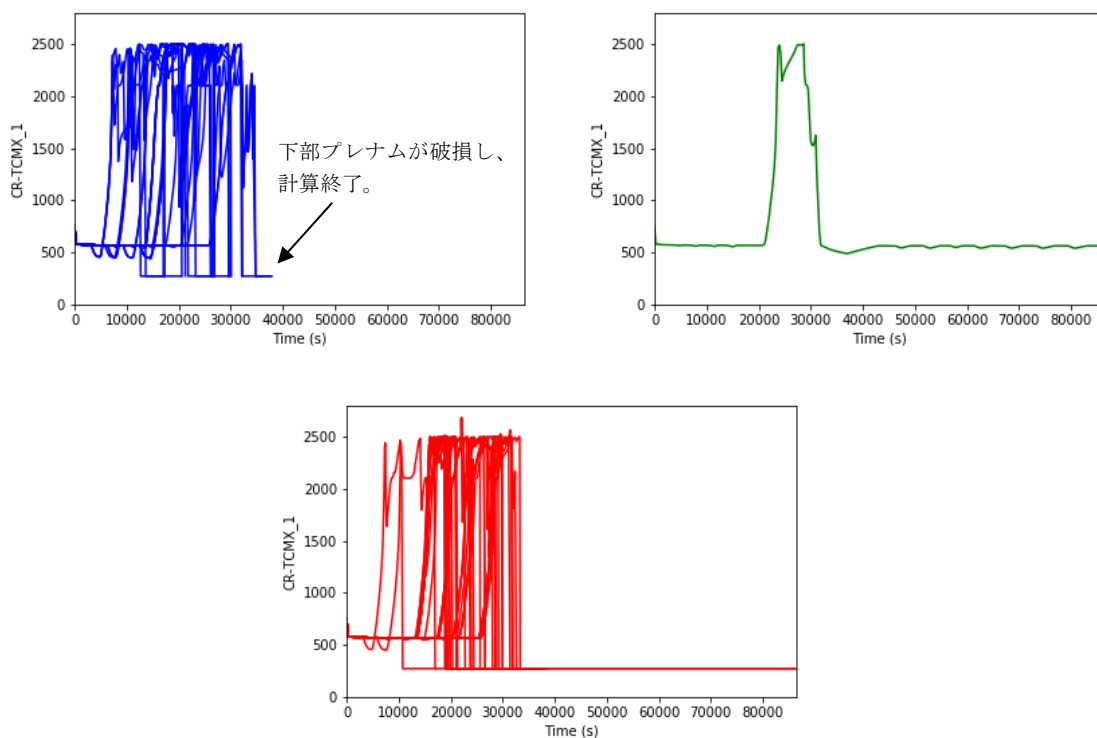


図 3.3.1-9 クラスタ数3のk-means法による各クラスターのPCT (THALES2の結果を利用)



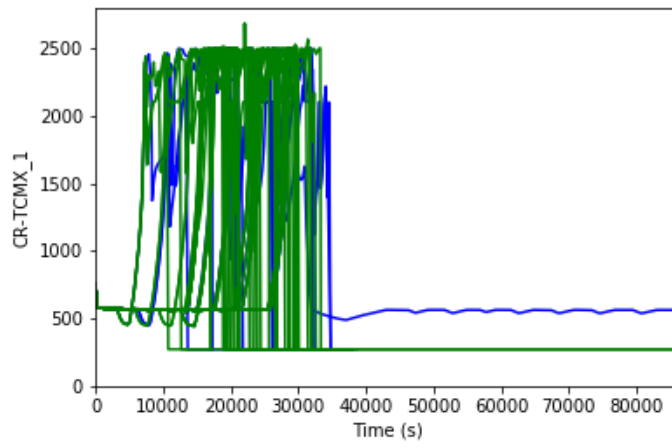


図 3.3.1-10 クラスタ数 2 の k-medoids 法による PCT のクラスタリング (THALES2 の結果を利用)

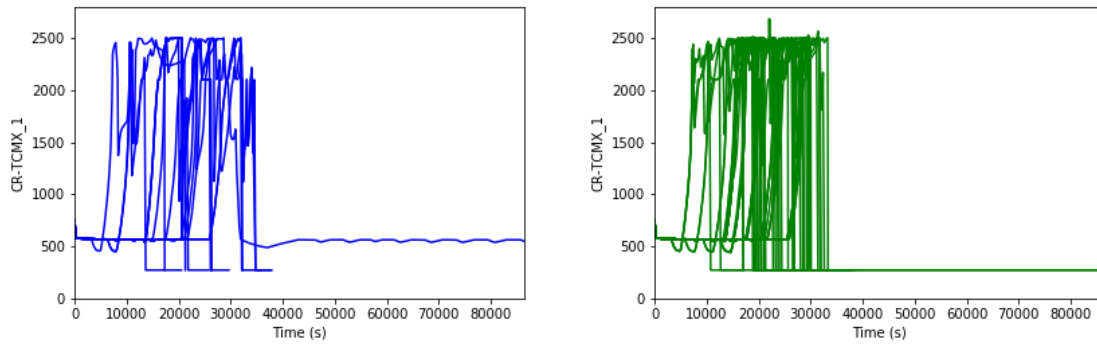


図 3.3.1-11 クラスタ数 2 の k-medoids 法による各クラスターの PCT (THALES2 の結果を利用)

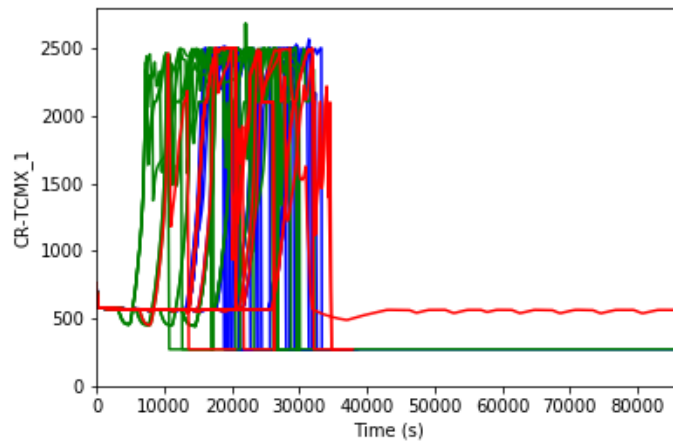


図 3.3.1-12 クラスタ数3のk-medoids法によるPCTのクラスタリング (THALES2の結果を利用)

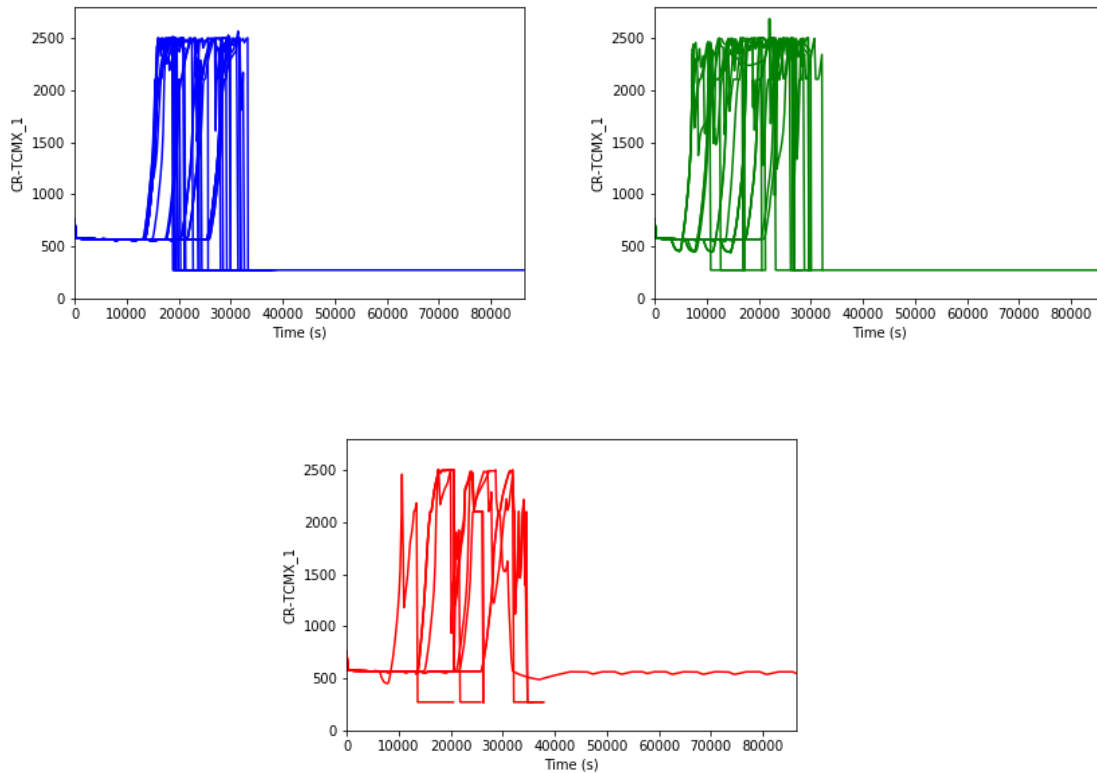


図 3.3.1-13 クラスタ数3のk-medoids法による各クラスタのPCT (THALES2の結果を利用)

図 3.3.1-6、図 3.3.1-7 はクラスタ数が 2 の場合の **k-means** 法によるクラスタリングの結果である。炉心溶融して支持板や下部プレナムにすべて落下したケース（青線）と炉心の一部が落下しなかったケース（緑線）に分かれた。

図 3.3.1-8、図 3.3.1-9 はクラスタ数が 3 の場合の **k-means** 法によるクラスタリングの結果である。クラスタ数が 3 の場合も、炉心がすべて落下するケースと一部落下しないケースに別れるが、すべて落下したケースは、下部プレナムが破損して計算が終了したケース（青線）と下部プレナムが破損しないケース（赤線）にさらに分類された。

図 3.3.1-10、図 3.3.1-11 はクラスタ数が 2 の場合の **k-medoids** 法によるクラスタリングの結果である。**k-medoids** 法の場合は、炉心が一部落下しなかったケースと下部プレナムが破損したケースが同じクラスタに分類された（青線）。

図 3.3.1-12、図 3.3.1-13 はクラスタ数が 3 の場合の **k-medoids** 法によるクラスタリングの結果である。クラスタ数が 3 の場合は、炉心がすべて落下したケースと一部落下しなかったケースが混在してクラスタリングされた。

**k-means** 法はクラスタ数が 2 や 3 の場合には、炉心落下の有無や下部プレナムの破損の有無など工学的な観点から見ても意味のある分類が行われた。一方、**k-medoids** 法はクラスタ数が 2 の場合、PCT の曲線の特徴は捉えた分類にはなっているが、クラスタ数が 3 の場合にはどのような特徴で分類されたか判断しづらい。**k-means** 法と **k-medoids** 法では、クラスタリングの算出方法が異なるため、クラスタリングの結果に差異が出る可能性があるが、どのような時系列データの場合にどちらの方法を適用した方が良いかの知見は今後も試解析等を行いながら蓄積していく必要がある。

### 3.3.2. Apros の解析結果

クラスタリングを適用する解析結果として、3.2.2 節で得られた試解析の結果を利用した。3.2.2 節でも述べたように Apros においても SRV の熱的故障が生じるような状況では、炉心が露出しており多くのケースが炉心損傷に至っている。クラスタリングの対象として PCT の結果を利用し、分岐が発生したケースについては分岐側のケースのみを適用することにした。Apros では解析結果を 1 秒刻みで出力しているため、時系列のデータ数が非常に多く、そのままのデータを用いて DTW 距離を算出すると相当な時間がかかる。そのため、180 秒間隔でデータの間引いてからクラスタリングを実施した。また、PCT は DC 電源が枯渇するまではどれも同じ挙動であることから、DC 電源枯渇時間の最小値である 7200 秒をクラスタリングの対象開始時間として、クラスタリングを効率的に行った。

<x-means 法によるクラスタリング>

図 3.3.2-1 は、x-means 法によるクラスタリングを実施した結果である。20 のグループに分類されており、同じ色の線は同じグループに属していることを意味する。

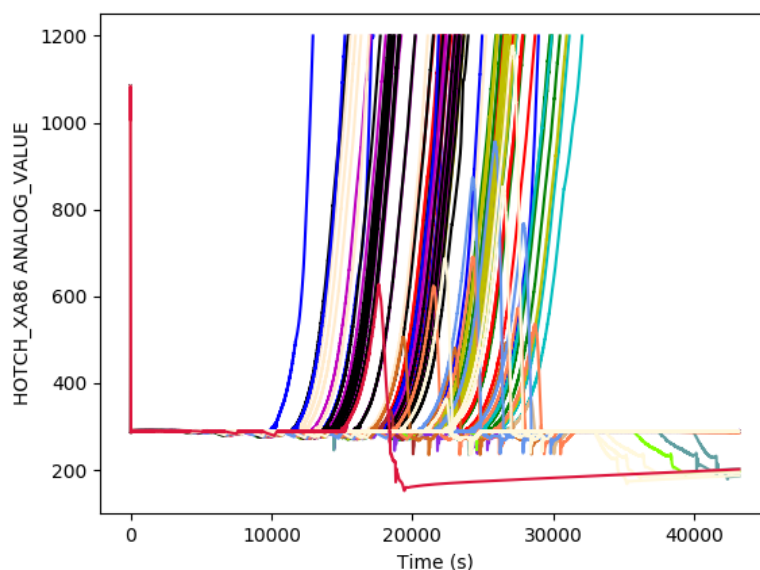


図 3.3.2-1 x-means 法による PCT のクラスタリング (Apros の結果を利用)

<k-means 法、k-medoids 法によるクラスタリング>

x-means 法で得られたクラスタ数 20 を用いて、k-means 法及び k-medoids 法による PCT のクラスタリングも実施した。また、クラスタ数が 2 の場合も実施し、炉心冷却の成

功と失敗に別れることを確認した。

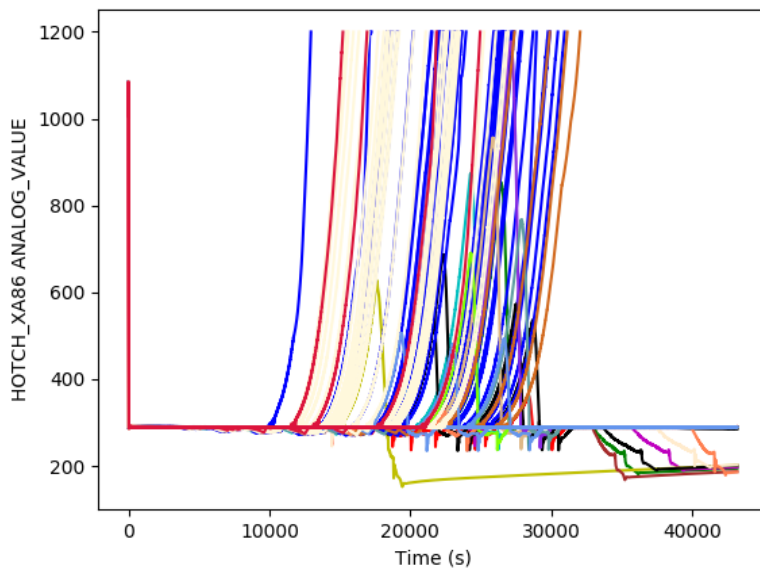


図 3.3.2-2 クラスタ数 20 の k-means 法による PCT のクラスタリング (Apros の結果を利用)

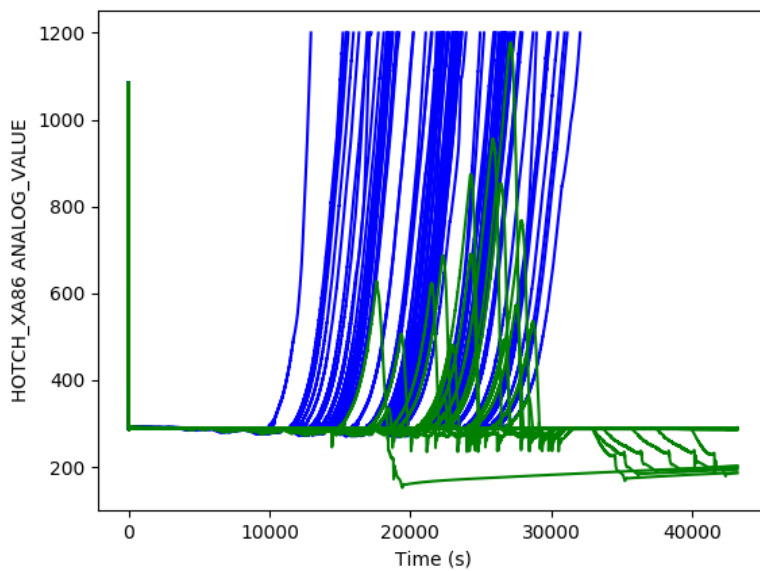


図 3.3.2-3 クラスタ数 2 の k-means 法による PCT のクラスタリング (Apros の結果を利用)

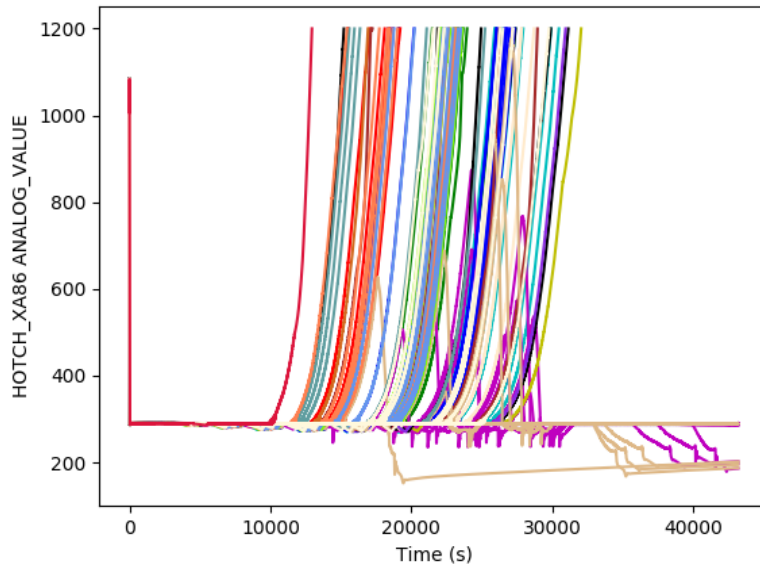


図 3.3.2-4 クラスタ数 20 の k-medoids 法による PCT のクラスタリング (Apros の結果を利用)

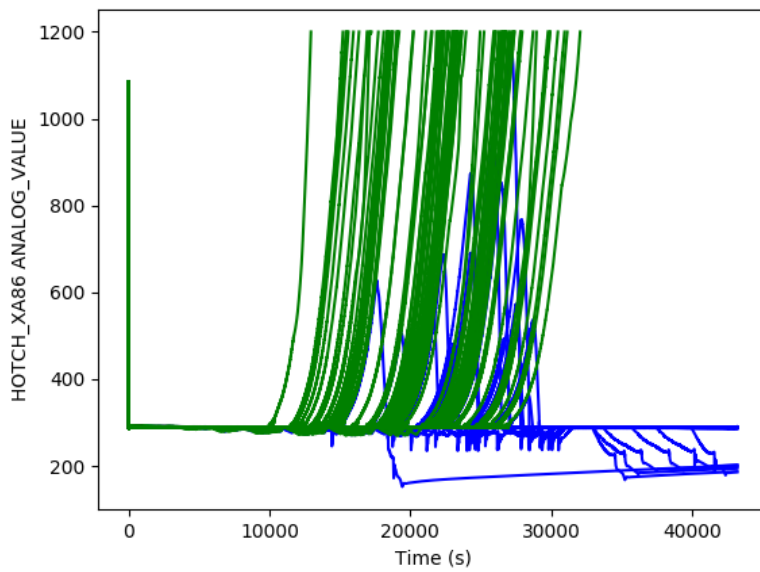


図 3.3.2-5 クラスタ数 2 の k-medoids 法による PCT のクラスタリング (Apros の結果を利用)

### 3.4. リスク情報の導出

2.5.2 節において本年度開発したリスク情報導出機能を用いて、THALES2 および Apros の解析結果より、リスク情報の導出を行った。

#### 3.4.1. THALES2 の解析結果

3.3.1 節のクラスタリングで利用した解析結果を用いて、以下のリスク情報の値を算出した。なお②は故障の発生する時刻の変化が炉心損傷に至る事故シーケンス数の変化に与える影響を見ることを想定した場合に考えられる情報導出の方法の一つとして算出を試みた。ここでは、比較的初期（ここでは 15,000 秒と仮定）まで下部プレナムが破損せず計算が継続しているシーケンスに対して、燃料被覆管が破裂して放射性物質が放出し始める (Gap-release) 目安の温度 900°C (=1173K) を越えてないシーケンスの数の比率を求めた。なお下限条件の 274K は、THALES2 において炉心領域に燃料が存在しなくなると 273K となるため、このようなケースを除く目的で指定している。この試行によりあるタイミングにおける 2 つ条件に合致するようなケースを抽出できることを確認している。

- ① 条件付炉心損傷確率および炉心損傷頻度
- ② (15,000 秒まで計算が継続しているケース数のうち、15,000 秒のタイミングで PCT が 274K 以上かつ 1173K 以下のケース数) / (15,000 秒まで計算が継続しているケース数)

##### ①の算出について

条件付炉心損傷確率は、(炉心損傷したケース数) / (解析ケース数) で算出した。ここで、(解析ケース数) は、「解析が正常に終了しなかったケースを除いた解析結果の数」であり、計算が発散したケースや計算が中断されたケースなどは、確率の評価から除いた。THALES2 の計算では、3.3.1 節のクラスタリングの場合と同様に、PCT が 3000K を越えるケースは確率の評価から除いた。一方、(炉心損傷したケース数) は、(解析ケース数) のうち PCT が 1200°C (=1473K) に達したものをカウントして取得した。炉心損傷頻度に関しては、SBO 事故発生頻度として  $10^{-6}$  [1/year] を仮定し、また、複数のファクターによる算出を確認するため、これを外部電源喪失頻度と所内の EDG 起動失敗に分け、

SBO 事故発生頻度 :  $10^{-6}$  [1/year]

- ・ 外部電源喪失事故発生頻度 :  $10^{-3}$  [1/year]
- ・ 所内 EDG 起動失敗確率 :  $10^{-3}$

と仮定して、この値を条件付炉心損傷確率に掛けて、炉心損傷頻度を算出した。

## ②の算出について

(15,000 秒まで計算が継続しているケース数)

→解析結果より、15,000 秒まで計算が継続しているケースをカウントして取得した。

(15,000 秒まで計算が継続しているケース数のうち、15,000 秒のタイミングで PCT が 274K 以上かつ 1173K 以下のケース数)

→上で取得したケースのうち、15,000 秒のタイミングで PCT が 274K 以上かつ 1173K 以下かどうかを判定してカウントした。

また、①と同様、PCT が 3000K を越えているものは評価の対象から除外した。

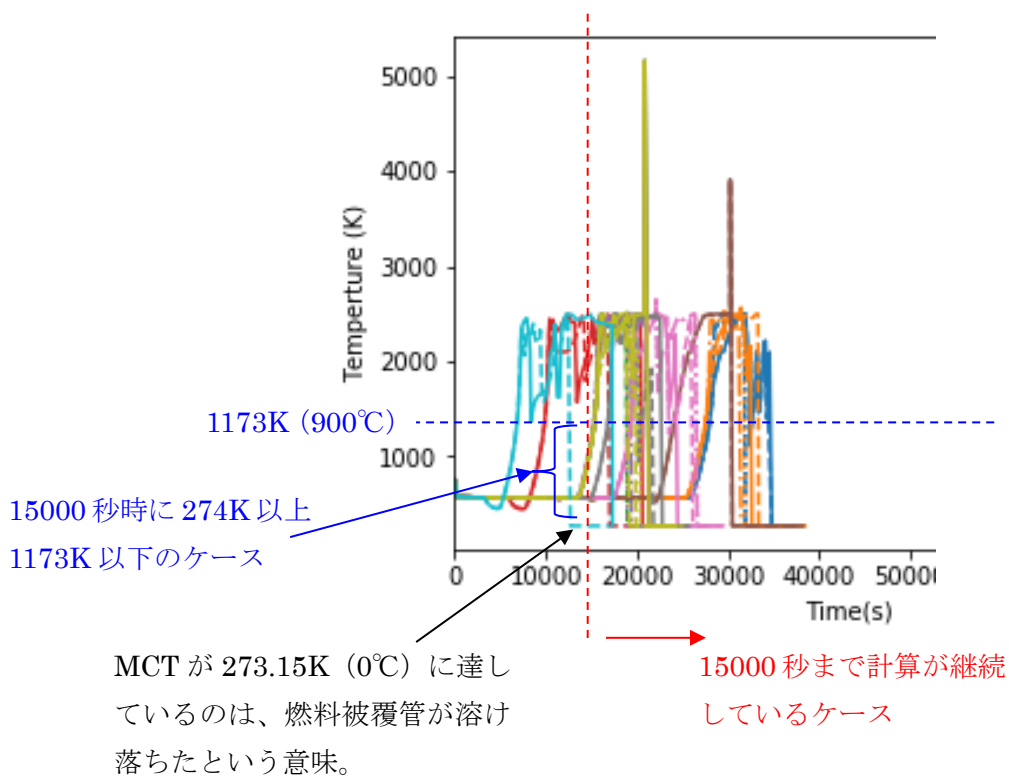


図 3.4.1-1 ②の算出で利用するケース数の抽出説明 (THALES2 の解析結果)

①の算出で利用するケースを解析結果から抽出する際は、値の上限値や下限値を設定するだけで解析ケースを絞り込めるため、RAPID の入力ファイルより設定可能であるが、②の算出の場合には、該当するケースを抽出するための条件式が複雑になるため、ユーザー関数を用いて抽出を行った。図 3.4.1-2、図 3.4.1-3 は RAPID により①及び②の値を算出した結果であり、算出した値はこれらの図のようにテキストファイルに出力される。



Satisfied case number (1) : 54	
Success case number (2) : 54	
Satisfied/Success (1)/(2) : 1.0000	← 条件付炉心 損傷確率
factor1 : 0.001	
factor2 : 0.001	
Multiplied by factors : 0.000001	← 炉心損傷頻度

図 3.4.1-2 ①の算出結果 (THALES2 の解析結果より算出)

sum of case number (1) : 31	
sum of case number (2) : 54	
result (1)/(2) : 0.5741	← ②の値

図 3.4.1-3 ②の算出結果 (THALES2 の解析結果より算出)

図 3.4.1-2、図 3.4.1-3 において、(1)の値が算出式の分子、(2)の値が算出式の分母に相当する。条件付炉心損傷確率が 1 となっている。その理由は、3.3.1 節でも述べたように、THALES2 における解析では、炉心損傷が発生した後に SRV の熱的故障が生じるため、得られた解析結果はすべて炉心損傷に至っており、それらの解析結果を用いて算出したためである。

### 3.4.2. AproS の解析結果

3.2.2 節で得られた試解析の結果を利用して、以下の項目のリスク情報の値を算出した。3.3.2 節のクラスタリングの場合と異なり、分岐が発生したケースについては、分岐元のケースと分岐したケースの両方を利用して算出した。②で抽出するシーケンスの特徴は THALES2 の結果を用いたものと同じであるが、対象とする時間を計算時間の後半部（ここでは 25,000 秒）とし、また、THALES2 と異なり下限値は必要ないことから下限条件を取り除いた。

- ① 条件付炉心損傷確率および炉心損傷頻度
- ② (25,000 秒まで炉心損傷しないケース数のうち、25,000 秒のタイミングで PCT が 900°C 以下のケース数) / (25,000 秒まで炉心損傷しないケース数)

### ①の算出について

3.4.1 節の THALES2 の場合と同様である。Apros の場合でも、計算が正常に終了しなかったケースは除く。Apros の場合は、

- ・ PCT が 1200°C に到達
- ・ 計算終了時間の 12 時間まで計算実行

を満たすケースが正常に解析を終了したものとみなし、それ以外のケースを除外するようにした。

### ②の算出について

(25,000 秒まで炉心損傷しないケース数)

→解析結果より、25,000 秒まで計算が継続しているケース (25,000 秒までに PCT が 1200°C に達しないケース) をカウントして取得した。

(25,000 秒まで炉心損傷しないケース数のうち、PCT が 900°C 以下のケース数)

→上で取得したケースのうち、25,000 秒のタイミングで PCT が 900°C 以下かどうかを判定してカウントした。

また、①と同様に正常に解析が終了しなかったケースは評価の対象から除外した。

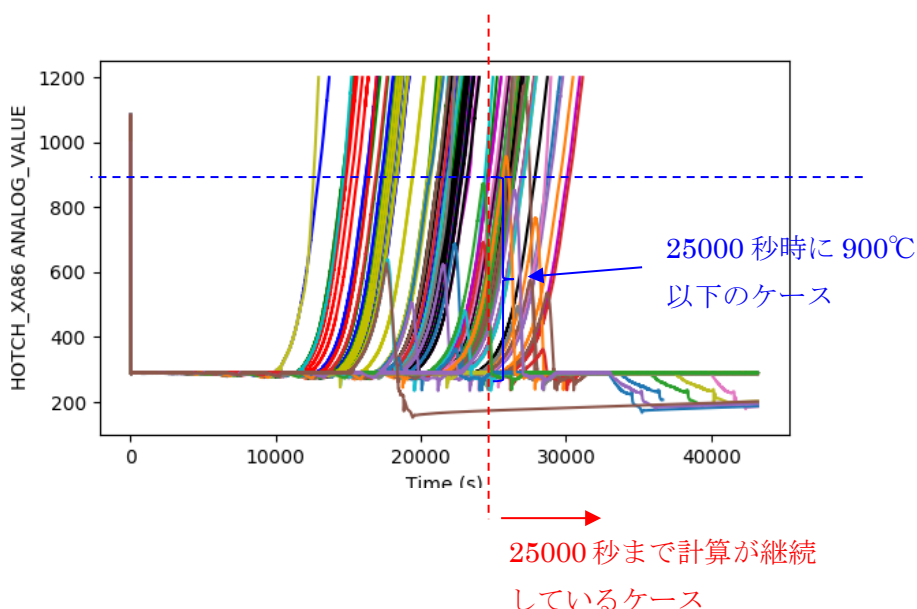


図 3.4.2-1 ②の算出で利用するケース数の抽出説明 (Apros の解析結果)

THALES2 の場合と同様に、①の算出で利用するケースは RAPID の入力ファイルより設定したが、②の算出の際にはユーザー関数を用いて該当するケースの抽出を行った。図 3.4.2-2、図 3.4.2-3 は RAPID により①及び②の値を算出した結果である。

Satisfied case number (1) : 127	
Success case number (2) : 155	
Satisfied/Success (1)/(2) : 0.8194	← 条件付炉心 損傷確率
factor1 : 0.001	
factor2 : 0.001	
Multiplied by factors : 0.0000008194	← 炉心損傷頻度

図 3.4.2-2 ①の算出結果 (Apros の解析結果より算出)

sum of case number (1) : 68	
sum of case number (2) : 75	
result (1)/(2) : 0.9067	← ②の値

図 3.4.2-3 ②の算出結果 (Apros の解析結果より算出)

### 3.5. 課題と解決策の検討

本年度整備した RAPID を用いて、THALES2 との連携においてより詳細な SBO シナリオの解析、Apros との連携の強化、THALES2 及び Apros より得た解析結果のクラスタリングを行い、条件付炉心損傷確率及び炉心損傷頻度の算出やその他リスク情報の導出で考えられるシーケンスを抽出する機能を確認した。今年度の詳細事故シナリオへの適用を経て、RAPID の適用可能性を確認できた。また、一貫した処理機能の向上により解析者の負担を軽減できた。RAPID-Apros に対してもリスタート機能の追加により連携解析機能が向上した。一方で詳細事故シナリオへの適用ではいまだ考慮していない対策が多く、今後このような対策を取り入れた場合の解析を行うため、ひな形となる入力への反映の検討を行う必要がある。同様に Apros への入力作成においてはその構成ロジックがより複雑になることから、入力作成機能の向上を図る必要がある。

クラスタリング機能に関しては、今回の試行において自動的にクラスタ数を推定する手段では結果を考察することが困難な結果を得た。クラスタ数を手動で 2 つ、3 つと増やしていく分には工学的説明のできる結果を得ることもできているので、クラスタリングの機能についてはその使い方や手法の選定についてより深い検討を要すると考える。特に今年度の整備においては、汎用性を考慮し公開ソフトをそのまま利用する方針で整備したが、公開ソフトでは、クラスタリングの特徴量が取得しにくい。このため、中身を編集したり、拡張性の高いモジュールを利用するか、既にあるものをベースに自ら改良して実装するなどの方法についても検討が必要である。

リスク情報導出機能では、目的とするシーケンスを抽出し解析者が指定する関数にて計算できることを確認した。この機能を利用し従来のようなリスク重要度指標や新たに提案されつつある動的 PRA に適したリスク重要度等への適用を確認する必要がある。その際に解析者が指定するユーザー関数の利用を RAPID でより柔軟に取扱えるようその取扱う範囲を拡大することが望まれる。

### 3.6. まとめ

本章では、本年度改良した RAPID を用いて解析から結果の処理までを一貫して行った。また、RAPID の様々な問題への適用性を確認するため、BWR における SBO 事故のシナリオを詳細化し、これに対して THALES2 との連携解析を実施し、適応に関する柔軟性を向上することができた。Apros との連携解析では、詳細化した SBO 事故シナリオへの適用に向けてインターフェイスの改良を行い、課題とその解決策を検討した。本章を通じて、RAPID の改良すべき点として、以下の点を抽出した。

- 詳細化した事故シナリオへの対応では、入力に反映する制御ロジックが複雑になるためあらかじめひな形を用意する、もしくは制御ロジックの構築を補助するような機能は有益である。
- クラスタリング手法の違いによりその結果も異なる。このため手法選択のための参考情報を経験を通じ取りまとめることは今後の解析に向けて有益である。
- クラスタリング機能の実装に際し、汎用性を考慮して公開しているモジュールをそのまま用いたが、クラスタリングの特徴量などへのアクセスを考慮するとより拡張性の高いモジュールやモジュールに手を加え必要な情報を取り出せるような開発が必要である。
- リスク情報の導出として条件付炉心損傷確率などの算出機能を付加した。今後様々なリスク情報の導出に向け、ユーザー関数などをあらかじめ用意するなど様々な問題への適用性向上に向けた機能の付加が必要と考える。

## 4. 動的な ET の効率的な解析手法の検討

動的な ET の解析では、熱水力解析コード等を用いて膨大な数の事故進展解析を実施するため、事故進展解析を効率的に実施する必要がある。そのための方法例として、事故進展解析を短時間で実施できる代替統計モデルの利用や、事故進展に重大な影響を与えるような事象に対して効率的にサンプリングを行う方法などが考えられる。以下では、これらの方法に関して調査した結果を述べる。また、動的 PRA ツールの開発状況について本年度収集した情報も述べる。

### 4.1. 動的な ET の開発状況

動的 PRA ツールの開発状況について、ドイツで開発されている MCDET と韓国で開発されている DICE の情報を得たので、それらの情報を以下に示す。

#### 4.1.1. MCDET

MCDET(Monte Carlo Dynamic Event Tree)[16]は、ドイツの原子炉安全協会 (GRS) で開発された動的 PRA ツールである。確率的な安全評価のフレームワークで複雑なシステムダイナミクスにより現実的なモデリングを実施するため、決定論的 (Deterministic) と確率論 (Probabilistic) 的安全評価を統合するツールとして開発された。決定論-確率論統合安全解析 (Integrated Deterministic Probabilistic Safety Analysis: IDPSA) の代表的なツールとして、MCDET は不確実さを有する複雑なプラントシステムの安全評価を可能とする。

PRA の結果には、物理現象のランダム性に係わる偶然的な不確実さ (Aleatory Uncertainty) と知識及び認識の不足に係わる認識論的不確実さ (Epistemic Uncertainty) が存在する。MCDET では、モンテカルロサンプリング法により連続的な偶然的な不確実さを定量化し、動的 ET により離散的な偶然的な不確実さを定量化する。なお、MCDET で用いる動的 ET 手法は、離散的な確率変数を用いて時間に依存するシステムの状態変化を表現する手法である。二段階のモンテカルロ法 (Two-stage Nested Monte Carlo) による認識論的不確実さについても取扱いが可能である。動的 ET 手法は、発生確率が低い事象を考慮する際に解析時間の観点から有効である。

情報収集の一環として GRS を訪問し、上記の MCDET 開発に係る基本的な考え方に加え、PWR における温度誘因蒸気発生器伝熱管破損[17,18] (Thermally induced steam generator tube rupture) や原子力発電所内での油火災時の消火失敗確率[19,20]など適用例について紹介を受けた。温度誘因蒸気発生器伝熱管破損事象については、GRS で開発中の熱水力解析コード ATHLET(Analysis of Thermal-hydraulics of Leaks and Transients)[21] や米国サンディア国立研究所が開発中の総合シビアアクシデント解析コード MELCOR[22]と、また、火災の評価については、米国国立標準技術研究所が開発した火災解析コード FDS (Fire Dynamics Simulator)[23]と結合することにより、評価を行って

おり、非常に汎用性の高いツールとして開発されていた。現時点で、RAPID は THALES2 及び Apros との結合しか行っていないため、今後外部事象に対する動的 PRA の評価等を見据え、より幅広い評価対象及び解析コードに対応可能な構成とする必要があると考える。また、MCDET には、「Crew-Module」と呼ばれる運転員操作失敗確率を評価するモジュールが備わっており、これを使用することにより事故時運転操作手順書 (EOP) 及びプラント状態を考慮したモデル化が可能になる[24]。動的 PRA の実施に当たっては、事故シナリオの進展と機器信頼性評価 (外部事象や人的過誤起因等) の相互作用をモデル化する必要となることが考えられるため、RAPID においては、それを考慮する解析モデルとの連携もしくは内部に取り込むことを考慮に入れた開発が必要があると考えられる。

その他 MCDET の開発のプログラム言語として、主に Python が使用されており、ユーザーインターフェースを考慮し、「Jupyter Notebook」 [25] という統合環境を活用し、プログラムだけでなく、その説明文や使用方法、解析結果を管理していた。このような統合環境を使用することにより、開発者だけでなく解析者の負担も減らすことができると考えられるため、RAPID 開発においても上記のような統合環境の活用を検討していきたい。

2019 年 9 月に開催された国際会議 ESREL2019 では、MCDET の解析事例として、PWR プラントにおける SBO 事故時の蒸気発生器伝熱管損傷 (SGTR) についての解析結果が発表された[26]。SGTR が発生した場合、放射性物質 (FP) が二次系ループに移行し、大気中に放出される危険性が高まる。ただ、SGTR が発生する前に一次系ループのホットレグやサージラインに破損が生じた場合、そこから放出された FP は格納容器内に留まり、大気中に放出されることはない。その点を検討するため、発表では SGTR に加えて、ホットレグやサージラインの破損も合わせた評価が行われた。また、運転員操作による二次系ループ側の SG の減圧 (二次系ループにおける “bleeding”) と SGTR との関係についての解析結果も示された。今後は SGTR に対する冷却処置も取り入れた検討を行い、SGTR の回避や影響緩和など、シビアアクシデント時における冷却処置の有効性を評価できるように開発を進めるとのことである。

#### 4.1.2. DICE

韓国の Kyung Hee 大学などの研究者によって、動的 PRA ツール DICE (Dynamic Integrated Consequence Evaluation) の開発が進められている。この開発は、大韓民国原子力安全委員会 (NSSC) の支援のもとで進められているプロジェクトであり、韓国でも独自の動的 PRA ツールを保有するために進めているようである。

2019 年 9 月に開催された国際会議 ESREL2019 において、DICE の概要および開発方針を紹介する発表が行われた[27]。DICE の基本的な枠組みは、従来の動的 PRA ツールをもとに設計されており、プラントシミュレータ、機器操作モデル、作業員操作モデルをスケジューラーで管理しながら連携させて解析を行う設計となっている。特に、作業員操作をモデ

ルに組み込む際、プラントの状況や過去の操作データを効率的に学習する LSTM (Long Short-Term Memory) という人工知能の技術を適用している点に特徴がある。事故シナリオの時間進展については、スケジューラーが離散的動的イベントツリーを用いて管理しており、分岐生成のポイントに達したら、そのタイミングでのプラントの状況をもとに機器動作や作業員動作の情報を更新し、分岐後の解析を進めていく。このように機器動作・作業員操作とプラントシミュレータとの動的な相互作用を取り入れた設計である点は、我々が開発を進めている動的 PRA ツール RAPID でも重要視している点であり、今後も開発状況や開発後の結果を注視したいと考えている。

## 4.2. 効率的なサンプリング手法の調査

効率的なモンテカルロサンプリング法と適応的なサンプリング (Adaptive Sampling) を問題の特性に応じて適切に選択すれば、ダイナミック PRA の効率を向上させることが期待できる [28]。例えば、結果の根本的な不確実さを明らかにする必要がある場合、より効率的なモンテカルロサンプリング法 (ラテンハイパーキューブサンプリング法、準モンテカルロ法) または決定論的サンプリング法 (格子法) の利用が効果的である。また、モデルの最適な結果を求める場合、サロゲート (代替統計モデル) に基づく適応サンプリング法を利用すれば、PRA の計算コストの節約が期待できる。この方法はベイズ最適化とも呼ばれている [29]。本節では、準モンテカルロサンプリング法とサロゲートに基づく適応サンプリング法の調査内容を記す。

### 4.2.1. 効率的なモンテカルロサンプリング法

効率的なサンプリング手法の調査として、米国アイダホ国立研究所が開発中の RAVEN (Reactor Analysis and Virtual control ENvironment) [30]、米国カルフォルニア大学ロサンゼルス校が開発中の ADS-IDAC (Accident Dynamics Simulator coupled with the Information, Decision and Action in a Crew context) [31]に取り入れられているサンプリング手法、不確実さ解析に用いられている例として、燃料挙動に関する確率的解析 [32]におけるサンプリング手法を調査した。加えて、RAPID を利用した複数のサンプリング手法の検討 [33]についても以下に述べる。

#### ・RAVEN 及び ADS-IDAC に備わるサンプリング手法

RAVEN には、モンテカルロ法に加え、「Grid strategies」及びラテン超方格サンプリング法が備わっていることが分かった。また、ADS-IDAC にはモンテカルロ法に加え、ラテン超方格法及び準モンテカルロ法が備わっていることが分かった。

Grid strategies では、各パラメータに対して、等分線を作成し、その等分線の交点からランダムにサンプリングすることにより、サンプリング値の一様性の向上を図った手法で



ある。

ラテン超方格法では、まず、各パラメータに対して、確率分布をサンプリング数で等間隔（等確率）に分割する。その後、各パラメータを重複なくランダムに組み合わせる。最後に各試行で使用するパラメータの組み合わせをランダムに決定する手法である。

準モンテカルロ法では、乱数の代わりに、低食い違い量列（low-discrepancy sequence）または準乱数列（quasi-random sequence）と呼ばれる無駄なく不規則性を有する数列を用いる手法である。

しかし、調査した文献には、それらのサンプリングを使用することにより、どの程度効率的に行えるのかには言及されておらず、あくまでもサンプリング結果の一様性に関する記載しかなかった。

#### ・燃料挙動に関する確率的解析

K. Forsberg らは、STAV6 と呼ばれる燃料挙動解析コードを用いて燃料棒内圧の解析に準モンテカルロ法を適用し、モンテカルロ法による解析結果の比較を行った[32]。その結果、準モンテカルロ法を用いた場合、モンテカルロ法と比較して、10 分の 1 以下の試行回数で平均値が収束していることが示されている。

#### ・RAPID を利用したサンプリング手法の比較

日本原子力研究開発機構（略称：JAEA）では、サンプリング手法の特徴を把握するため、サンプリング手法の違いによる収束までの試行回数の比較を行っている[33]。ここでは、ラテン超方格サンプリング、格子点サンプリング及び準モンテカルロ法を対象とした。比較では本事業で整備している RAPID を用いて、BWR4 における SBO シナリオを対象に評価し、その結果、準モンテカルロ法を用いた場合、モンテカルロ法の 10 分の 1 程度の試行回数で炉心損傷時刻の平均値が収束することを示した。

### 4.2.2. サロゲートに基づく適応サンプリング法 (ベイジアン最適化手法)

JAEA では、SBO シビアアクシデント時の最適な格納容器のベント操作のタイミングを検討するため、図 4.2.2-1 に示すサロゲートに基づく適応サンプリング法の手順を適用した[34]。この手法により、グローバルの最適値を求めるための計算負荷を低減できたことから、動的 PRA の計算負荷低減策の一つとしてその概要を述べる。本手法では、ハイフィデリティ（High-fidelity、高忠実度）のシビアアクシデントコードを実行する前に、サロゲートモデルを使用して結果（環境へのソースタームの放出量）を予測する。高忠実度のモデルの解析条件は、予測値と予測不確かさのバランスで決める。例えば、全領域の最小値を求める場合、予測値が小さく、かつ予測の不確かさ大きい領域となるような入力値を用いて優先的に解析する。この手法では、解析を実行しながら、ガウス過程を使用してサロゲートモデルを

訓練することで予測精度も向上させるとともに、予測の不確かさも明示することができる。サロゲートモデルを構築する手法の調査は次節で述べる。

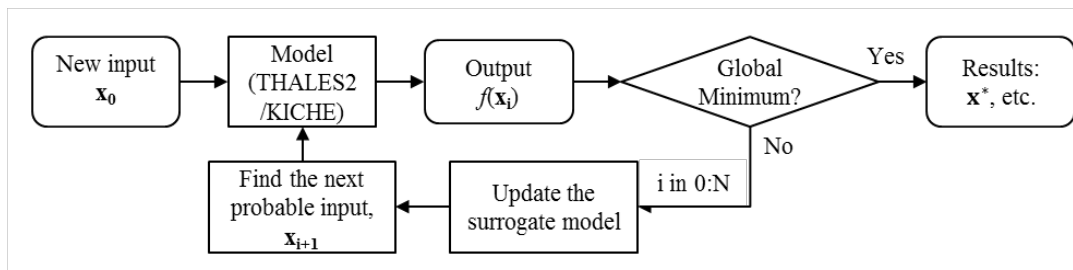


図 4.2.2-1 適応サンプリング法の手順

#### 4.2.3. 効率的なサンプリング手法の RAPID への検討

動的 PRA を実施する際、大量の事故シーケンスを生成して解析を行うため、その計算のコストの低減が必要である。調査した効率的なランダムサンプリング手法及び適合サンプリング手法により計算の収束性の向上が見込まれた。RAPID へ実装としては、様々な問題への適用性を考慮し、一つのサンプリング手法ではなく、解析者が選択できるように複数の手法を用意しておくことが有益と考えられる。

#### 4.3. 代替統計モデル構築手法の調査及び検討

代替統計モデルの適用は、コンピューター・シミュレーションにおいて比較的長い歴史があり、例えば、計算コードの不確かさ及びグローバル感度解析への応用[35]や DAKOTA ツールにおけるサロゲートに基づく最適化解析[36]が挙げられる。一部のエンジニアリング問題において、多数のシミュレーションが必要になるため、解析負担を軽減する方法の 1 つとして、代替統計モデル又は低次元化モデルとして知られる近似モデルにより、妥当な計算コストで許容可能な予測を提供する方法がある。サロゲートに基づく解析は、システム・パフォーマンスの向上、コストの削減、安全性の向上の観点からエンジニアリングに貢献している。例えば、代替統計モデルは、現代の航空宇宙システム設計に適用され、高忠実度のモデルでは、高速で近似結果を提供し、最適化研究が実現可能になった[37]。サロゲートに基づく手法は、原子炉安全分析にも適用され、例えば、北欧型 (Nordic) BWR の蒸気爆発の圧力インパルスを予測するために、人工ニューラルネットワークを使用して代替統計モデルが構築された[38]。

図 4.3-1 では、水平方向に訓練プロセス、垂直方向に検証プロセスを含む代替統計モデルの概念を示している。代替統計モデルは、忠実度 (フィデリティ) が高いモデルから取得し

たデータを使用して構築する。それらのモデルの構造は、忠実度を犠牲してより単純な統計モデルにより計算コストを低くすることができる。検証プロセスで予測の正確さを満さない場合、訓練プロセスを繰り返すために必要なデータを増やす必要がある。簡易で予測性がある代替統計モデルを訓練することで、動的 PRA を含む高度なリスク評価を支援できると考える。以下では、代替統計モデルを用いた解析例とその構築・訓練のための方法について調査した結果を述べる。

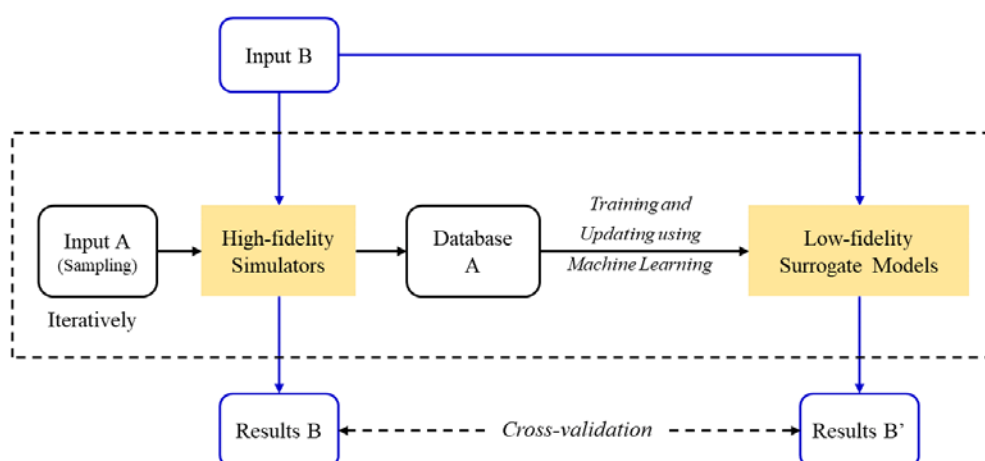


図 4.3-1 プロセスと検証プロセスを含む代替統計モデルの概念図

#### 4.3.1. 動的 PRA での代替統計モデルの適用例

動的 PRA には、解析の不可欠な部分として複雑な構造論モデルを含める必要がある。複雑な高忠実度のモデルは、リスクの定量化に不可欠な情報（事故の結果）を提供し、また、無視された事故シナリオと過少もしくは過大評価した情報を明らかにする。より詳細なモデルが使用されるほど、分析はより困難になる。代替統計モデルは、忠実度が低い、高速で、忠実度が高いモデルを近似し、解析に役立つ情報を提供できるという特徴を有している。シミュレーションツールを用いて複雑な原子力発電所システムの信頼性を評価するには、膨大な計算作業が必要であり、この問題を解決するために、熱水力コード等のシミュレータとして高速実行する代替統計モデルを使用することが有用であることが分かった[28]。本節では、RAPID の開発に参考となる情報を収集するため、動的 PRA に代替統計モデルを適用した研究を調査した。

決定論的な手法と確率論的な手法を組み合わせた統合安全評価（Integrated Safety Assessment, ISA）のアプローチを適用した動的 PRA ツールである SCAIS（Simulation code system for ISA）は、代替統計モデルを使用してリスク評価を支援することを提案し

ていた[39]。これらの代替統計モデルを活用することにより、無数の過渡事象の高速シミュレーションを可能にした。

成功基準の限界面を探索等の高度な信頼性解析の問題を解決するため、代替統計モデルが適応的に限界面の推定を支援できることが分かった[40]。動的 PRA ツールである RAVEN [41]は、高忠実度のマルチフィックスのシミュレーションのために、合理的な代替モデルを構築できるという特徴を持つ。RAVEN では、特定の問題に向け、複数の代替モデルを統合する機能も提供する。代替モデルを用いた解析例として、SBO シナリオにおける RELAP5-3D のシミュレーション結果を用いて構築された代替モデルを一般的なマルチユニット原子力発電所の動的 PRA に適用していた[42]。この解析例の代替モデルは、SBO 時の各ユニットモデルの熱水力挙動の予測に用いられた。その代替モデルは、数千程度の RELAP5-3D の結果を用いて訓練され、予測した結果は、交差検証で高い一致性を示していた。高速で実行できる代替モデルは、シミュレーションに基づく動的 PRA の計算負担を軽減し、数百万程度のシミュレーション・サンプルが代替モデルを通じて生成された。また、多数のシミュレーションを通じ、様々なマルチユニットの損傷状態が発見された。その他 RAVEN を用いた適用例として、PWR 設計に事故耐性燃料 (ATF) が導入された場合の SBO 時炉心損傷頻度の変化を推定するため、代替モデルに基づく成功・失敗の境界面の適合的な探索手法が適用された[43]。

#### 4.3.2. 代替統計モデルのトレーニングのための機械学習アルゴリズム

機械学習の教師あり学習 (Supervised Learning) は、入力から出力へのマッピングとモデルの出力の予測に役立つ。この部分、代替統計モデルを構築するため、教師あり学習のアルゴリズムを簡単に紹介する。出力値が離散値であるか連続値であるかに基づき、教師あり学習は分類 (Classification) と回帰 (Regression) として分類されている。より詳細な機械学習の紹介は、出版物で見つけることができる[44,45]。

- 分類 (Classification)

分類問題を解決する場合、入力の  $\mathbf{x}$  から出力の  $\mathbf{y}$  にマップし、出力の可能な値は離散的である ( $\mathbf{y} \in \{1, 2, \dots, N\}$ )。  $N = 2$  の場合、それはバイナリ分類であり、  $N > 2$  の場合、マルチクラス分類である。動的 PRA では、分類が事故時の炉心の状態を予測しようとする場合等に役立ち、考えられる結果が離散的な炉心損傷がありとなしである。

- 回帰 (Regression)

出力  $\mathbf{y}$  の可能な値が連続している場合、回帰問題に属す。例えば、環境へ放出された放射線物質の量を評価する場合、可能な推定値は連続間隔の間である。

(1) 回帰及び分類の線形モデル

線形回帰 (Linear Regression) とロジスティック回帰 (Logistic Regression) は、それぞれ回帰と分類の最も簡単な方法である。線形回帰では、応答と入力の線形関数である。ガウスノイズを伴う線形回帰は次のようになる。

$$p(y|\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \mathcal{N}(y|\mu(\mathbf{x}), \sigma^2(\mathbf{x})) \quad (4.3.2-1)$$

出力 $y$ の平均推定値 $\mu(\mathbf{x})$ は、入力 $\mathbf{x}$ の線形関数である。

$$\mu(\mathbf{x}) = \omega_0 + \omega_1 x_1 + \dots + \omega_n x_n = \mathbf{w}^T \mathbf{x} \quad (4.3.2-2)$$

ロジスティック回帰モデルを分類に使用できる。出力 $y$ がバイナリの場合、(4.3.2-1)式のガウスモデルをベルヌーイモデルに変更し、ロジスティック (シグモイド) 関数を用いて、入力 $\mathbf{x}$ を離散的な出力 $y = 0$  or  $1$ にマッピングできる。

$$p(y|\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \text{Ber}(y|\mu(\mathbf{x})) \quad (4.3.2-3)$$

$$\mu(\mathbf{x}) = \text{sigm}(\mathbf{w}^T \mathbf{x}) = \frac{e^{\mathbf{w}^T \mathbf{x}}}{e^{\mathbf{w}^T \mathbf{x}} + 1} \quad (4.3.2-4)$$

(2) カーネル法 (Kernel Methods)

問題が本質的に線形でない場合、回帰と分類のために一般線形モデルでカーネル・マシンを利用すれば、非線形回帰と分類へ適用できる。カーネル・マシンは次のように定義する。

$$\boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}) = [\kappa(\mathbf{x}, \mu_1), \dots, \kappa(\mathbf{x}, \mu_K)] \quad (4.3.2-5)$$

$\kappa(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ はカーネル関数であり、入力 $\mathbf{x}$ と $\mathbf{x}'$ の類似性を定量的に定義する。1つの代表的なカーネル関数は radial basis function (RBF) カーネルであり、次ように定義されている。

$$\kappa(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}')^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}')\right) \quad (4.3.2-6)$$

(4.3.2-1)式と(4.3.2-3)式の入力ベクトルをカーネル・マシンで置き換えると、下記のように、非線形回帰と分類モデルを取得でき、その手法を利用すれば、複雑な非線形のモデルの代替統計モデルを構築することが可能になる。

$$p(y|\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \mathcal{N}(y|\mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}), \sigma^2(\mathbf{x})) \quad (4.3.2-7)$$

$$p(y|\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \text{Ber}(y|\mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x})) \quad (4.3.2-8)$$

カーネル法が使われているサポートベクターマシン (Support Vector Machine, SVM) は、分類や回帰へ適用できる。予測性能が優れた学習モデルの1つであり、動的 PRA の代替統計モデルの構築に役立つ方法であると期待している。

(3) ノンパラメトリック確率過程 (Nonparametric stochastic processes)

JAEA は、ディリクレ過程とガウス過程を非線形回帰に適用し、シビアアクシデントコードの計算結果を予測した。モデルの構造はデータに応じて柔軟的に調整でき、ベイジアン手法に含まれている。

(4) ニューラルネットワーク (Neural network)

ニューラルネットワークは、原子力安全解析[38]及び PRA[28]にも適用され、代替統計モデルの構築法の選択肢の1つと考えられる。

表 4.3.2-1 に、代替統計モデル構築手段とする可能な機械学習アルゴリズムをまとめた。

表 4.3.2-1 動的 PRA へ適用できる機械学習のアルゴリズム

アルゴリズム	分類/回帰	パラメトリック/ ノンパラメトリック
Linear regression	回帰	パラメトリック
Logistic regression	分類	パラメトリック
Neural Network	両方	パラメトリック
Infinite mixture of Gaussians (Dirichlet process)	両方	ノンパラメトリック
Support vector machine (SVM)	両方	ノンパラメトリック
Gaussian process (GP)	両方	ノンパラメトリック

### 4.3.3. 代替統計評価モデルの RAPID への適用検討

過去の研究により、動的 PRA の実用性のためには、計算負荷の低減が必要であり、この解決として代替統計モデルを適用する必要性が強調されている。SCAIS や RAVEN では代替統計モデルを利用した動的 PRA を行っている。このような状況からも RAPID に代替統計モデルを構築する機能を実装する必要がある。JAEA は、シビアアクシデント解析の効率化を目的に、ソースタームの不確かさ評価及びグローバル感度解析[46]とシビアアクシデントの事故緩和対策の最適化[34]に Dirichlet process などを利用して構築した代替統計モデルの適用した経験を有している。シビアアクシデント・コードは高度に非線形な

数値モデルであり、結果を正確に予測するため、高度な機械学習アルゴリズムを利用しなければならない。動的 PRA を効率で実現するため、分類と回帰を含めて一部の教師あり学習アルゴリズムを調査した。以上の調査を踏まえ、RAPID への代替統計モデルを構築する機能の実装は、代替の対象の詳細度やその目的に応じて構築する手段も変わり得ることから、JAEA での代替統計モデルの構築の際に用いた手法をはじめ、線形回帰モデルやより複雑なガウス過程などの有用と考えられる手法を複数取り入れることが重要であると考えられる。

#### 4.4. まとめ

動的 PRA では多数の事故シーケンス解析を行うため、計算の効率化が必要であり、その手段としてサンプリングの効率化やシミュレーション自身の効率化に関する研究が行われている。RAPID による動的 PRA の効率化に資するため、上記 2 種の効率化に関して調査を行った。サンプリングの効率化では、従来のモンテカルロ法からより収束性の高い準モンテカルロ法や、目的関数を最小/最大にするような領域を探索する方法があった。これらは解析の目的に応じて利用されるものであり、RAPID の汎用性を向上させるうえで非常に有力な方法である。シミュレーションの効率化では、シミュレーションの結果を利用して代替統計モデルを構築し、これにより非常に多くのシミュレーションを可能としていた。代替統計モデルを構築する手段は様々提案されており、それらは代替統計モデルの要求される精度や目的に応じて選択されるべきである。このことから、RAPID への代替統計モデルの実装には、解析者が目的に応じて代替統計モデルを構築する手段を選択できるよう、複数用意しておくことが RAPID の利用に関する柔軟性を向上させるものと考えられる。

以上から、効率的なサンプリング手法として、収束性の高い準モンテカルロ法などの方法を複数整備すべきである。また、代替統計モデルの構築にも同様に、線形回帰モデルやより複雑なガウス過程などを複数整備すべきである。また、構築した代替統計モデルによりサンプリングすべき領域を探索し、これをシミュレーションコードにフィードバックするような仕組みも整備することでその利用性の向上が見込まれる。



## 5. まとめ

平成 31 年度原子力施設等防災対策等委託費（動的レベル 1 確率論的リスク評価手法の開発）事業において、平成 30 年度同事業で取りまとめた動的 PRA ツールの開発要件に従い、動的 PRA ツール RAPID の改良を行った。この改良により、事故シーケンスを生成する際に用いる確率分布の種類を拡張し、入力データの作成では、生成した解析条件に基づく THALES2 及び Apros の入力作成機能を、熱水力コード等とのインターフェイスの作成では、RAPID-Apros の連携解析機能の強化及び RAPID-THALES2 の多ケース解析のためのインターフェイスの作成を、動的な ET の解析のための機能として、計算結果のクラスタリング機能や条件付炉心損傷確率などのリスク情報を導出するための機能の開発を行った。

改良した RAPID を用いて事故シナリオの再現から入力の実行、解析、解析結果の処理と一貫した解析を実施した。対象とした事故シナリオは SBO であるが、RAPID の適用性の確認のため、従来の PRA で考慮されてきた安全系を多く含むよう解析対象の事故シナリオの詳細化を行った。詳細化した SBO 事故シナリオを対象に THALES2 を用いた解析を試行するとともに、Apros において詳細化した SBO 事故シナリオに対応できるようにインターフェイスの改良を行い RAPID との連携解析をより強化した。試解析を通じて得た結果に対し、クラスタリングや条件付炉心損傷確率の導出などを行い、結果処理部の機能確認も行い、RAPID の適用の柔軟性を確認することができた。

動的 PRA では多数の事故シーケンス解析を行うため、計算の効率化が必要であり、その手段としてサンプリングの効率化やシミュレーション自身の効率化に関する研究が行われている。RAPID による動的 PRA の効率化に資するため、効率的なサンプリング手法や代替統計モデル用いたシミュレーションの効率化の現状及び代替統計モデルの構築手法に関する調査を行った。

本年度の事業を通じ、以下の点が今後の動的 PRA ツールの開発と考えられる。

- ・詳細化した事故シナリオへの対応では、入力に反映する制御ロジックが複雑になるためあらかじめひな形を用意する、もしくは制御ロジックの構築を補助するような機能は有益である。
- ・クラスタリング手法の違いによりその結果も異なることから、手法選択のための参考情報を経験を通じ取りまとめることは今後の解析に向けて有益である。
- ・クラスタリング機能の実装に際しては、より拡張性の高いモジュールやモジュールに手を加えクラスタリングの特徴量などの必要な情報を取り出せるような開発が必要である。
- ・様々なリスク情報の導出に向け、ユーザー関数などをあらかじめ用意するなど様々な問題への適用性向上に向けた機能の付加が必要と考える。

- ・ サンプリングの効率化は解析の目的に応じて異なるため、解析者が選択できるよう複数用意しておく必要がある。
- ・ 代替統計モデルの構築に関して、解析の目的やその要求される精度に依存するため、動的 PRA ツールへの実装の際には、解析者が目的に応じて代替統計モデルを構築する手段を選択できるように整備しておく必要がある。

以上の項目を新たな動的 PRA ツールの開発に係る必要な項目として提案する。

## 付録 A. ESREL2019 概要

### 1. 会議の概要

第 29 回欧州における安全及び信頼性に関する会議 (European Safety and Reliability Conference:ESREL2019) が、ハノーファー大学で 2019 年 9 月 23 日から 26 日までの 4 日間開催された。本会議では、原子力工学の分野だけでなく、宇宙工学や輸送工学、サイバーシステム工学、保険・金融工学など様々な分野におけるリスク評価・安全解析に関する研究の発表が行われた。本会議には、開催国のドイツをはじめとする欧州諸国、また、アジア圏からは、特に中国から数多くの専門家が参加した。本会議では、ノルウェーの Stavanger 大学 T. Aven 教授の「リスク評価及び管理における最近の進展」、Singapore 大学 K. Phoon 教授の「機械学習を用いた地質データの不確かさ管理」、中国の同済大学 J. Li 教授の「確率密度進展法」、NASA の L. Crespo 氏の「層別正規分布の概論」、英国の Liverpool 大学 S. Ferson 教授の「不良データによる予測と決定」の 5 つの Plenary 講演が行われた。研究発表はパラレルセッション形式で行われ、19 個の方法論と 23 個の応用分野でセッションが分けられ、4 日間で約 590 の発表が行われた。

### 2. 情報収集、動向調査

#### (1) 動的な確率論的リスク評価に関する動向調査

本会議では、動的 PRA ツールに関して二つの発表が行われた。

#### MCDET (ドイツ原子炉安全協会)

ドイツ原子炉安全協会では、動的 PRA ツール MCDET の開発が行われている。MCDET の特長として、不確かさの種類によってモンテカルロ法と離散的動的イベントツリーを使い分けることで、計算コストを抑えつつ、事故のダイナミクスを考慮した確率論的リスク評価を行う点が挙げられる。

本会議では、PWR プラントにおける SBO 事故時の蒸気発生器伝熱管損傷 (SGTR) についての解析結果が発表された。SGTR が発生した場合、放射性物質 (FP) が二次系ループに移行し、大気中に放出される危険性が高まる。ただ、SGTR が発生する前に一次系ループのホットレグやサージラインに破損が生じた場合、そこから放出された FP は格納容器内に留まり、大気中に放出されることはない。そのため、SGTR に加えて、ホットレグやサージラインに破損のタイミングも合わせた評価が行われた。解析結果より、SGTR が発生する前にホットレグもしくはサージラインが破断する確率は約 1%であり、ほとんどが先に SGTR が生じることが示された。さらに、SGTR とホットレグ破断の発生時間の差についても評価が行われた。

運転員操作による二次系ループ側の SG の減圧(二次系ループにおける“bleeding”)と SGTR との関係についても考察が行われた。運転員操作による SG の減圧を行うと、一次

系ループと二次系ループの圧力差が大きくなり、SGTR が起こりやすくなる。発表では、SG の減圧後の SGTR 発生時刻とループ間の圧力差、伝熱管の温度、SG 伝熱管の劣化度合いとの関係が三次元のプロット図で示された。この図より、SGTR 発生時刻が二つのグループに分類されることが示された。一つは、圧力差が大きい(15MPa~17MPa)の領域である。この領域では、伝熱管の劣化度合いが大きいほどすぐに SGTR が発生し、SGTR 発生時刻に対する伝熱管の劣化度合いの依存性が顕著に現れることが分かった。温度が上昇するにつれて、劣化度合いが小さい伝熱管も SGTR が発生していき、600℃を越えると劣化度合いに依らず SGTR が発生すると予想される。もう一つの領域は、圧力差が 15MPa 以下で伝熱管の温度が 600℃以上の領域であり、この領域では伝熱管の劣化度合いの依存性はあまり見られず、SG の減圧後 4000 秒から 10000 秒の範囲で SGTR が発生していることが分かった。

今後は SGTR に対する冷却処置も取り入れた検討を行い、SGTR の回避や影響緩和など、シビアアクシデント時における冷却処置の有効性を評価できるように開発を進めるとのことである。

#### DICE (韓国の Kyung Hee 大学など)

韓国の Kyung Hee 大学などの研究者によって、動的 PRA ツール DICE (Dynamic Integrated Consequence Evaluation) の開発が進められている。この開発は、大韓民国原子力安全委員会 (NSSC) の支援のもとで進められているプロジェクトであり、韓国でも独自の動的 PRA ツールを保有するために進めているようである。

本会議では、DICE の設計案が示された。DICE の基本的な枠組みは、従来の動的 PRA ツールをもとに設計されており、プラントシミュレータ、機器操作モデル、作業員操作モデルをスケジューラーで管理しながら連携させて解析を行う設計となっている。特に、作業員操作をモデルに組み込む際、プラントの状況や過去の操作データを効率的に学習する LSTM (Long Short-Term Memory) という人工知能の技術を適用している点に特徴がある。事故シナリオの時間進展については、スケジューラーが離散的動的イベントツリーを用いて管理しており、分岐生成のポイントに達したら、そのタイミングでのプラントの状況をもとに機器動作や作業員動作の情報を更新し、分岐後の解析を進めていく。このように機器動作・作業員操作とプラントシミュレータとの動的な相互作用を取り入れた設計である点は、我々が開発を進めている RAPID でも重要視している点であり、今後も開発状況や開発後の結果を注視したいと考えている。

#### (2) リスク評価・安全解析に対する機械学習の適用

本会議の発表では、K. Phoon 教授の Plenary 講演をはじめとして、リスク評価・安全解析に機械学習を適用した発表が数多く見られた。その中には、原子力工学に関連する発表も

いくつか行われたが、特に動的 PRA ツールに関連がある発表として、(株)原子力安全システム研究所の木下氏による機械学習を用いたアダプティブ・サンプリングの発表があった。同氏の発表では、大型非定常試験装置 (LSTF) における小破断 LOCA 時の炉心損傷回避の成功／失敗の境界をアダプティブ・サンプリングによって効率的に導き出す解析例が示された。このような成功／失敗の境界を効率的に導き出すことは、動的 PRA でも重要であり、今後我々が開発を進める上で参考になる発表であった。また、韓国の Chosun 大学からは、原子炉起動時の操作を深層強化学習させることで、起動時の操作を自動化や補助・支援を行うシステムの発表が行われた。また、技術仕様書に則した操作の監視、および機械学習を用いた操作逸脱時の復帰操作の提示を行うシステムの開発に関する発表も行われた。

### (3) その他信頼性評価に係る技術的傾向

T.Aven 教授の講演では、近年のリスク評価に係る懸念として未知の象徴としてブラックスワンの取扱いがあり、これに対処する手段としてパフォーマンスの喪失から回復過程を評価する Resilience 評価が有効であるとしていた。Resilience の評価として、ダメージを受けたシステムを行う回復対策によるパフォーマンス回復量をシミュレーションすることで対策のランキングを行うという具体的な取組み例も紹介された。機構で開発している RAPID はこのような評価にも適用可能であると考えられる。また、インターネットシステム等の信頼性評価においては、状態の変化引き起こす条件や事象発生順序に重きを置いた Dynamic FT 手法や Bayesian Network などを用いた評価が行われていた。

## 付録 B. RAPID の実行方法と入力ファイル

RAPID は、Python で記述されたプログラムである。RAPID を実行するには、RAPID のプログラムファイルである `driver.py` の後に入力ファイルを指定して実行を行う。

`driver.py` (入力ファイル)

入力ファイルのファイル名は自由に設定できる。入力ファイルの書式には、JSON (Java Script Object Notation) の書式を適用し、

{キー1 : 値1, キー2 : 値2, キー3 : 値3, . . . }

の形で必要な項目を入力ファイルに記述していく。RAPID を

- ① 解析開始時に、事故シーケンスを生成 (Generate Sequences)
- ② 解析途中で、事故シーケンスの分岐を生成 (Make Branch)
- ③ 解析結果の時系列データをクラスタリング (Clustering)
- ④ 解析結果より、リスク情報を導出 (Extract risk)

のいずれのモードで起動するかは、入力ファイルに記述して指定する。RAPID-Apros の連携解析において、事故シーケンスを生成時に記入する項目を表 B1 に示す。また、図 B1 に入力ファイルの記述例を示す。

表 B1. RAPID の入力ファイルに記述する項目（初期の事故シーケンスを生成時）

キー	値
“Mode”	“GS” (初期の事故シーケンス生成時は、GS:Generate Sequence を指定。)
“NumOfSim”	生成する事故シーケンスの数
“ReadDir”	入力ファイルのひな型が入っているディレクトリ
“WriteDir”	サンプリング後に生成される入力ファイルを格納するディレクトリ
“Events”	事故シーケンスで発生しうる事象の内容。 {事象の名称: 事象の内容} の形で、入れ子構造で記述。 事象の内容については、表 B2 参照。 初期事象 “Initial” と計算終了を指定する事象 “CalcEnd” は、必須の設定事象である。
“PauseCriteria”	リスタートファイルを出力するタイミングの条件。 {プラントパラメータ名: {”Name”: (Apros の変数名), ”Value”: (判定値), ”Sign”: (不等号)}} の入れ子構造で記述。指定できるプラントパラメータは、Apros の変数名に従う。
“OutputPara”	リスタートファイルを出力する際に出力するプラントパラメータ。 {プラントパラメータ名: {”Name”: (Apros の変数名)}} の入れ子構造で記述。
“EndTime”	計算を終了する時間。 {”Time”: (数値), ”Unit”: (単位)} の形で与える。単位は、”SEC”, ”MIN”, ”HR” が設定可能。
“EndCond”	計算を終了する条件。設定は任意。 {プラントパラメータ名: {”Name”: (Apros の変数名), ”Value”: (判定値), ”Sign”: (不等号)}} の入れ子構造で記述。

表 B2. “Events”で設定する事象の内容

キー	値
“SCLfile”	事象の内容が記述された SCL ファイル名。SCL ファイルは、“ReadDir” で指定したフォルダに入れておくこと。
“Time”	<p>事象の発生時間に該当するサンプリング変数を設定する。</p> <p>初期事象 “Initial” では、設定不要。</p> <p>計算終了を指定する事象 “CalcEnd” では、計算終了時間[秒]を設定する。</p> <p>事象の発生時間に時間[s]の値を直接与えることもできる。その場合、その事象の SCL ファイルのひな型の時間の所には変数@TIME を設定する。</p>
“EventProb”	事象が発生するかどうかをベルヌーイ試行でサンプリングして決める事象に対して、その発生確率を設定する。
“RandPara”	<p>サンプリング変数とその確率分布を            {サンプリング変数：確率分布,“(確率分布に必要なパラメータ 1)”：            値 1, ...}</p> <p>の形で、入れ子構造で記述。“SCLfile”で指定した SCL ファイルに埋め込んだサンプリング変数の確率分布はここで指定する。確率分布で必要なパラメータ（平均値や標準偏差など）も合わせて指定する。</p>



```

# input of RAPID
{
  "Mode" : "GS", # Mode of execution
  "ReadDir" : "sbo_base/template", # Directory where the template file is located
  "WriteDir" : "inputs", # Directory where the input files are generated
  "NumOfSim" : 10, # Number of simulations
  "Events" : {
    "Initial" : {
      "SCLfile" : "BWR_SBO_Initial.scl",
      "RandPara" : {
        # RCIC flow rate
        "@RCICVAL1" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.03655, "std" :
          0.003655, "lowerLimit" : 0.02924, "upperLimit" : 0.04386},
        "@RCICVAL2" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.05870, "std" :
          0.005870, "lowerLimit" : "@RCICVAL1", "upperLimit" : 0.07044},
        "@RCICVAL3" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.06965, "std" :
          0.006965, "lowerLimit" : "@RCICVAL2", "upperLimit" : 0.08358},
        "@RCICVAL4" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.07911, "std" :
          0.007911, "lowerLimit" : "@RCICVAL3", "upperLimit" : 0.09493},
        "@RCICVAL5" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.10000, "std" :
          0.010000, "lowerLimit" : "@RCICVAL4", "upperLimit" : 0.12000},
        "@RCICVAL6" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.10607, "std" :
          0.010607, "lowerLimit" : "@RCICVAL5", "upperLimit" : 0.12728},
      }
    },
    "DCdepletion" : {
      "SCLfile" : "BWR_SBO_DCdepletion.scl",
      "Time" : "@DCDEPLE",
      "RandPara" : {
        "@DCDEPLE" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 14400, "std" : 7200,
          "lowerLimit" : 7200, "upperLimit" : 21600}
      }
    },
    "ACrecovery" : {
      "SCLfile" : "BWR_SBO_ACrecovery.scl",
      "Time" : "@ACRECOV",
      "EventProb" : 0.5,
      "RandPara" : {
        "@ACRECOV" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 28800, "std" : 7200,
          "lowerLimit" : "@DCDEPLE", "upperLimit" : 43200}
      }
    },
    "SRVFailClose" : {
      "SCLfile" : "BWR_SBO_SRV_FailClose.scl",
      "Time" : "@FCTIME",
      "EventProb" : 0.3,
      "RandPara" : {
        # SRV fail to close : time and open area factor
        "@FCTIME" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 36000, "std" : 10000,
          "lowerLimit" : 30000, "upperLimit" : 40000},
        "@FCRATIO" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.5, "std" : 0.2,
          "lowerLimit" : 0.05, "upperLimit" : 1}
      }
    }
  },
}

```

```

"CalcEnd" : {
  "SCLfile" : "BWR_SBO_CalcEnd.scl",
  "Time" : 43200
}
},
"PauseCriteria" : {
  "srv_temperature" : {"Name": "STEAM_P002 P011_TEMPERATURE", "Value" : "@TSTEMP",
    "Sign" : ">"},
  "RandPara" : {
    "@TSTEMP" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 426.85, "std" : 100,
      "lowerLimit" : 326.85, "upperLimit" : 626.85}
  }
},
"OutputPara" : {
  "rpv_pressure" : {"Name": "RPS_HRP_PI01 PM_OUTPUT_VALUE"}
},
"EndCond" : {
  "cladding_temperature" : {"Name": "HOTCH_XA86 ANALOG_VALUE", "Value" : 1200.0,
    "Sign" : ">"}
}
}

```

図 B1. 入力ファイルの記述例（初期の事故シーケンスを生成時。#以降はコメント。）

RAPID-Apros の連携解析において、事故シーケンスの分岐を生成時、記入する項目を表 B3 に示す。また、図 B2 に入力ファイルの記述例を示す。

表 B3. RAPID の入力ファイルに記述する項目（事故シーケンスの分岐生成時）

キー	値
“Mode”	“MB” (事故シーケンスの分岐生成時は、MB:Make Branch を指定。)
“TrunkDir”	分岐を生成するファイルが入っているディレクトリ
“RestartPara”	分岐を生成する分岐条件のプラントパラメータ
“Casenumber”	リスタートするケース番号
“RestartFilename”	分岐を生成するファイルが入っているディレクトリにあるリスタートに利用するスナップショットファイルの名前
“ChangePara”	分岐生成時に変更するパラメータの情報。{リスタート用ひな型 SCL ファイルに設定した@付き変数：変数の値} の形で与える。変数の値を"UserFunc"とした場合、ユーザー関数 calcCHGDATA で設定する。
“EndTime”	計算を終了する時間。{“Time”：(数値), “Unit”：(単位)}の形で与える。単位は、“HR”, “S”が設定可能。

```
# input of RAPID
{
  "Mode" : "MB",
  "TrunkDir" : "det_inputs/inp3",
  "RestartPara" : "srv_temperature",
  "Casenumber" : "3",
  "RestartFilename" : "case3_srv_temperature.snp.gz",
  "ChangePara" : {"@SRVOPAR" : "UserFunc"},
  "EndTime" : {"Time" : 12, "Unit" : "HR"}
}
```

図 B2. 入力ファイルの記述例（事故シーケンスの分岐生成時。#以降はコメント。）

解析結果の時系列データをクラスタリングする際、記入する項目を表 B4 に示す。また、図 B3 に入力ファイルの記述例を示す。

表 B4. RAPID の入力ファイルに記述する項目（解析結果のクラスタリング時）

キー	値
“Mode”	“CL” (解析結果のクラスタリング時は、CL:Clustering を指定。)
“ResultDir”	解析結果が格納されているディレクトリ
“Code”	解析に用いたコード名。Apros もしくは THALES2 を指定。
“ClMethod”	クラスタリング手法 k-means、k-medoids、x-means が設定可能。
“NumOfCl”	クラスタ数 (x-means の場合は意味を持たない。)
“Parameter”	着目するパラメータ名
“Decimation”	DTW 距離を計算する際に、時系列データを間引く機能。間引きのデータ点の間隔を指定。
“StartCl”	クラスタリングの対象とする区間の始まりの時間
“EndCl”	クラスタリングの対象とする区間の終わりの時間 (“StartCl”よりも小さい値を入力した場合は時系列の最後まで対象区間に含む。)

```
# input of RAPID
{
  "Mode" : "CL",
  "ResultDir" : "ResultData_apros",
  "Code" : "Apros",
  "ClMethod" : "x-means",
  "NumOfCl" : 3,
  "Parameter" : "HOTCH_XA86 ANALOG_VALUE",
  "Decimation" : 180,
  "StartCl" : 7200,
  "EndCl" : 43200
}
```

図 B3. 入力ファイルの記述例（解析結果のクラスタリング時。#以降はコメント。）

解析結果よりリスク情報を導出する際、記入する項目を表 B5 に示す。また、図 B4 に入力ファイルの記述例を示す。

表 B5. RAPID の入力ファイルに記述する項目（解析結果よりリスク情報導出時）

キー	値
“Mode”	“EX” (解析結果よりリスク情報導出時は、EX:Extract Risk を指定。)
“ReadDir”	解析結果が格納されているディレクトリ
“Code”	解析に用いたコード名。Apros もしくは THALES2 を指定。
“SuccessPara”	解析が正常終了したことを判定する条件を設定。 "parameter1": {"parameter": "HOTCH_XA86 ANALOG_VALUE", "Value": 1199.0, "Sign": ">", "condition": "or"} の形で与える。"parameter1"の部分は、任意のパラメータで、複数与えることができる。"parameter"は Apros/THALES2 で指定されている変数を与え、"Value" は閾値、"Sign"は:">"または"<" で与えて、閾値との大小関係で判定する。"condition": は or または and で与え、複数のパラメータに対して and/or 条件を与えることができる。
“CriteriaPara”	解析結果に対する判断基準。炉心損傷の条件を設定するか、それ以外のパラメータを与えられる。書式は、“SuccessPara”と同じである。
“ExtractType”	“Default”または“UserFunc”を指定する。 Default であれば、“SuccessPara”と“CriteriaPara”を用いた判断を行う。“UserFunc”の場合は、ユーザー関数を用いてリスク情報導出の条件を与える。
“Factor”	“ExtractType”で算出したリスク情報の値に対して、定数を掛ける。 “Factor” : { “factor1” : 0.1, “factor2” : 20 } のように定数を複数設定すると、複数の定数を掛けることができる。

```

# input of RAPID
{
  "Mode"      : "EX",
  "ReadDir"   : "ResultData_apros",
  "Code"      : "Apros",
  "SuccessPara" : {
    "parameter1" : {"parameter": "HOTCH_XA86 ANALOG_VALUE", "Value" : 1199.0,
                    "Sign" : ">", "condition" : "or"},
    "parameter2" : {"parameter": "SIMULATION TIME", "Value" : 43199.0,
                    "Sign" : ">", "condition" : "or"}
  },
  "CriteriaPara" : {
    "parameter1" : {"parameter": "HOTCH_XA86 ANALOG_VALUE", "Value" : 1199.0,
                    "Sign" : ">", "condition" : "and"}
  },
  "ExtractType" : "Default", # choose Default or Userfunc
  "Factor" : {
    "factor1" : 0.1,
    "factor2" : 0.01
  }
}

```

図 B4. 入力ファイルの記述例（解析結果よりリスク情報導出時。#以降はコメント。）

## 参考文献

- 1 U. S. AEC, “Reactor Safety Study An assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants”, WASH-1400 (1975)
- 2 G. Apostolakis and T. L. Chu, “Time-depend accident sequences including human actions”, Nuclear Technology, vol. 64 pp. 115-126 (1984)
- 3 <http://www.apros.fi/en/>
- 4 J. Ishikawa, K. Kawaguchi, and Y. Maruyama, “Analysis for iodine release from unit 3 of Fukushima Dai-ichi nuclear power plant with consideration of water phase iodine chemistry”, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 52, pp. 308-314 (2015)
- 5 C. Smith, et al., “A Framework to Expand and Advance Probabilistic Risk Assessment to Support Small Modular Reactors”, INL/EXT-12-27345, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho (2012)
- 6 C. Smith, et al., “Risk-Informed Safety Margins Characterization (RISMC) Pathway Technical Program Plan”, INL/EXT-11-22977, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho (2016)
- 7 X. Zheng, et al., “Severe Accident Scenario Uncertainty Analysis using the Dynamic Event Tree Method”, in Proceedings of 14th International Conference of Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM14) (2018)
- 8 D. Pelleg and A. Moore, “X-means: Extending K-means with efficient estimation of the number of clusters”, In Proceedings of the 17th International Conf. on Machine Learning (2000)
- 9 石岡 恒憲, “クラスター数を自動決定する k-means アルゴリズムの拡張について”, 応用統計学, vol. 29, pp. 141-149 (2000)
- 10 Z. Jankovsky, et al., “Dynamic Importance Measures in the ADAPT Framework”, in Transactions of the American Nuclear Society, vol. 115, (Las Vegas, NV), pp. 799-802, American Nuclear Society (2016)
- 11 Z. Jankovsky, et al., “A Dynamic Coupled-code assessment of mitigation actions in an interfacing system loss of coolant accident”, in Proceedings of 14th International Conference of Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM14) (2018)
- 12 D. Mandelli, et al., “Measuring risk-importance in a Dynamic PRA framework”, Annals of Nuclear Energy, vol. 128, pp. 160-170 (2019)
- 13 独立行政法人原子力安全基盤機構, “JNES における PRA 手法の標準化 = 出力運転時内部事象レベル 1PRA 手法 = (別冊 2) 出力運転時内の事象レベル 1PSA 標準報告書 = BWR5 型プラント =”, JNES/SAE07-040, 平成 19 年 4 月 (2007)
- 14 D. Mandelli, et al., “Risk Informed Safety Margin Characterization (RISMC) BWR Station Blackout Demonstration Case Study”, INL/EXT-13-30203, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho (2013)
- 15 D. Mandelli, Z. Ma and C. Smith, “Dynamic and Classical PRA: a BWR SBO Case Comparison”, INL/CON-14-33731, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho (2015)
- 16 M. Kloos and J. Peschke, “MCDET : A probabilistic dynamics method combining monte carlo simulation with the discrete dynamic event tree approach”, Nuclear Science and Engineering, vol. 153, pp. 137-156 (2006)
- 17 M. Kloos and J. Peschke, “Preliminary phase of a MCDET analysis of a high pressure scenario with potential steam generator tube rupture”, in Proceedings of 13th International Conference of Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM13) (2016)
- 18 M. Kloos and J. Peschke, “Results of an IDPSA aimed to assess the potential of a

- thermally induced steam generator tube rupture”, in Proceedings of 14th International Conference of Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM14) (2018)
- <sup>19</sup> M. Kloos, J. Peschke and B. Forell, “Integrated Deterministic Probabilistic Safety Analysis (IDPSA) of a fire scenario”, in Proceedings of 12th International Conference of Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM12) (2014)
- <sup>20</sup> M. Kloos and J. Peschke, “Improved modelling and assessment of the performance of firefighting means in the frame of a fire PSA”, Science and Technology of Nuclear Installations, vol. 2015 (2015)
- <sup>21</sup> GRS, “ATHLET, Mod 3.1 Cycle A, Program Overview”, (2016).
- <sup>22</sup> R. O. Gaunt, et al., “MELCOR computer code manuals. Vol. 1: primer and users’ guide, version 1.8.5”, NUREG/CR-6119 Rev.2, SAND2000-2417/1 (2000)
- <sup>23</sup> K. McGrattan, et al., “Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model”, NIST, Gaithersburg, Md, USA; VTT, Espoo, Finland, 6th edition (2013)
- <sup>24</sup> M. Kloos and J. Peschke, “Consideration of human actions in combination with the probabilistic dynamics method Monte Carlo dynamic event tree”, in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability (2008)
- <sup>25</sup> <https://jupyter.org/>
- <sup>26</sup> M. Kloos and J. Peschke, “Monte Carlo and Dynamic Event Tree Simulation for Assessing the Potentials of Tube and Pipe Ruptures”, in Proceedings of 29th International European Safety and Reliability Conference (ESREL2019) (2019)
- <sup>27</sup> S. Baek et al., “Introduction to DICE (Dynamic Integrated Consequence Evaluation) Toolbox for Checking Coverability of Operational Procedures in NPPs”, in Proceedings of 29th International European Safety and Reliability Conference (ESREL2019) (2019)
- <sup>28</sup> E. Zio and N. Pedroni, “How to effectively compute the reliability of a thermal-hydraulic nuclear passive system”, Nuclear Engineering and Design vol. 241, pp. 310-327 (2011)
- <sup>29</sup> J. Snoek, H. Larochelle and R. P. Adams, “Practical Bayesian optimization of machine learning algorithms”, Advances in Neural Information Processing Systems 25, December 03-08, Stateline, Nevada, United States (2012)
- <sup>30</sup> C. Rabiti, et al., “RAVEN, a New Software for Dynamic Risk Analysis”, in Proceedings of 12th International Conference of Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM12) (2014)
- <sup>31</sup> M. Diaoneasa and A. Mosleh, “Discrete Dynamic Event Tree Uncertainty Quantification in the ADS-IDAC Dynamic PSA Software Platform”, in Proceedings of 14th International Conference of Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM14) (2018)
- <sup>32</sup> K. Forsberg, N. He and A. Massih, “Probabilistic Analysis of Nuclear Fuel Rod Behavior Using a Quasi-Monte Carlo Method”, Nuclear Science and Engineering, vol. 122, pp. 142-150 (1996)
- <sup>33</sup> 久保 光太郎 他 “ダイナミック PRA のためのサンプリング手法の検討”, 日本原子力学会 2020 年春の年会, 講演番号 2K10
- <sup>34</sup> X. Zheng, et al., “Bayesian optimization analysis of containment-venting operation in a boiling water reactor severe accident”, Nuclear Engineering and Technology, vol. 49, pp. 434-441 (2017)
- <sup>35</sup> A. Saltelli and M. Ratto, “Global sensitivity analysis”, the primer. John Wiley &



- Sons, Ltd. West Sussex, England (2008)
- <sup>36</sup> B. M. Adams, et al., “Dakota, a multilevel parallel object-oriented framework for design optimization, parameter estimation, uncertainty quantification, parameter estimation, uncertainty quantification, and sensitivity analysis: version 6.11 user’s manual”, SAND2014-4633. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, United States (2019)
- <sup>37</sup> N. V. Queipo, et al., “Surrogate-based Analysis and Optimization”, NAG8-1791, NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL, United States (2005)
- <sup>38</sup> D. Grishchenko, S. Galushin and P. Kudinov, “Failure domain analysis and uncertainty quantification using surrogate models for steam explosion in a Nordic type BWR”, Nuclear Engineering and Design, vol. 343, pp. 63-75 (2019)
- <sup>39</sup> J. M. Izquierdo, et al., “Current status and applications of integrated safety assessment and simulation code system for ISA”, Nuclear Engineering and Technology, vol. 49 pp. 295-305 (2017)
- <sup>40</sup> D. Mandelli, et al., “Dynamic PRA: an overview of new algorithms to generate, analyze and visualize data”, in Proceedings of 2013 ANS Winter Meeting and Nuclear Expo. November 10-14, Washington DC, United States (2013)
- <sup>41</sup> C. Rabiti, et al., “System reliability analysis capability and surrogate model application in RAVEN”, INL/EXT-16-37243, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho, United States (2015)
- <sup>42</sup> D. Mandelli, et al., “Multi-unit dynamic PRA”, Reliability Engineering and System Safety, vol. 185, pp. 303-317 (2019)
- <sup>43</sup> Z. Ma, et al., “Plant-level scenario-based risk analysis for enhanced resilient PWR – SBO and LBLOCA”, INL/EXT-18-51436, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho, United States (2018)
- <sup>44</sup> C. M. Bishop, “Pattern recognition and machine learning”, Springer. Singapore (2006)
- <sup>45</sup> K. P. Murphy, “Machine learning a probabilistic perspective”, The MIT Press. Cambridge, Massachusetts (2012)
- <sup>46</sup> X. Zheng, et al., “An integrated approach to source term uncertainty and sensitivity analyses for nuclear reactor severe accidents”, Journal of Nuclear Science and Technology vol. 53(3), pp. 333-344 (2016)