

平成 30 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  
平成 31 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. 時間に依存して変化する動的な ET の解析手法の検討 .....	3
2.1. 先行 DPRA ツールの調査 .....	3
2.1.1. MCDET .....	4
2.1.2. PyCATSHOO .....	5
2.2. RAPID の改良 .....	8
2.2.1. RAPID-THALES2 の連携解析における改良 .....	8
2.2.2. 改良した RAPID による解析 .....	10
2.3. まとめ .....	24
3. 動的な ET のための熱水力解析手法の検討 .....	26
3.1. Apros と RAPID の連携 .....	26
3.2. SBO 事故を対象とした Apros-RAPID の連携解析 .....	28
3.2.1. 解析モデル、解析条件 .....	28
3.2.2. 解析時間の効率化 .....	38
3.2.3. 解析結果 .....	39
3.2.4. 事故シーケンスのグループ化 .....	54
3.3. まとめ .....	61
4. 動的な ET を用いた炉心損傷頻度の計算方法の検討 .....	62
4.1. 着目する事象の発生頻度/確率の導出に関する調査 .....	62
4.2. 解析結果のグループ化技術の調査 .....	63
4.2.1. K-means 法 .....	63
4.2.2. K-medoids 法 .....	64
4.2.3. ディリクレ過程ガウス混合モデル .....	65
4.2.4. Dynamic Time Warping 法 .....	66
4.3. 時系列データを含むクラスタリングに関する適用例 .....	70
4.3.1. 時系列データを含むクラスタリングに関する適用例 .....	70
4.3.2. DTW 法を利用した DPRA に関する研究 .....	70
4.4. 重要度評価 .....	72
4.5. まとめ .....	73

5. 動的 ET の解析ツールの基本的要件のまとめ .....	75
6. まとめ .....	76
付録 A. PSAM14 概要 .....	78
付録 B. RAPID の実行方法と入力ファイル .....	82
参考文献 .....	86

## 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要素の評価からなり、1970年代の米国での報告書 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、施設のリスクレベルを確認するため 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やその頻度及び影響の評価等に関し有用なツールである。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い[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や運転員による操作の成否や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の変化を通して事象の進展に及ぼす影響を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、原子炉施設内の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内シミュレーションコードと連携し、安全工学設備の作動や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いプラント状態が変化することによる機器や運転員等への影響等を考慮する必要がある。このような事象進展の時間依存性を考慮する PRA 手法 (以下、動的な PRA 手法、という) を開発・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及び事故シーケンスを対象とした動的な PRA 手法の開発・整備を行う。

本事業では、レベル1 PRA に用いるための動的な PRA 手法の開発を、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つのステージに分割して進めることにした。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-

ルへの反映を検討する。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。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ものとする。

本事業では、

1. 欧米諸国において先行して行われている動的な PRA 手法の開発状況を調査し、時間に依存して変化する動的な ET の解析手法について検討を行った。
2. 動的な ET のための熱水力解析手法として、解析コード **Apros** を適用した方法について検討を行った。
3. 動的な ET を用いた炉心損傷頻度の計算方法や解析結果のグループ化の方法について検討を行った。
4. 1. から 3. の検討内容を基に、今後開発を進めていく動的 ET の解析ツールの基本要件をまとめた。

## 2. 時間に依存して変化する動的な ET の解析手法の検討

時間に依存して変化するプラントの熱水力状態と事故対策設備の作動・不作動の状態とを組み合わせる動的な ET を構築し、これに基づき熱水力解析コードによりプラント状態を推定する動的な PRA (DPRA) 解析ツールについて、先行して開発された RAVEN 及び ADAPT について昨年度調査を行った。両解析ツールでは、設備・機器の故障タイミングや物理モデルの持つパラメータの不確かさについて、確率分布を仮定し、ランダムもしくは離散的にパラメータを抽出する。これら特徴を考慮し、事故シーケンスを構成する機器の故障のタイミングを予め与えた確率分布を基にサンプリングして得た値を基に、熱水力解析コード等の入力に反映する DPRA 解析ツール RAPID (Risk Assessment with Plant Interactive Dynamics) を昨年度整備した。また、先行して開発された DPRA 解析ツール (RAVEN、ADAPT 等) には、事故シーケンスの生成に加え、サンプリング方法等 DPRA 解析を行う上で様々なサポート機能を有していることが分かった。本年度は DPRA 解析ツールの更なる充実化を目指すうえで必要と考えられる機能について、欧州において先行して開発されている解析ツールの調査を行い、RAPID への反映すべき機能の検討を行った。

事故シーケンスの生成に関し、昨年度調査した DPRA 解析ツールでは、あらかじめ確率分布から抽出し設定した条件に基づき熱水力解析を実行するため、例えば、弁の故障時の漏えい面積がその時点での圧力や温度に依存する可能性を考慮するなど、機器の故障時に熱水力条件を考慮するような解析はできない。熱水力条件と故障や操作の困難性、複数の機器間の故障といった、相互作用を考慮することは、従来の解析ツールにない、新たな特徴と位置付けることができる。本機能を RAPID に取り込むため、本年度より、解析における熱水力条件を事故シーケンスに反映することができるよう RAPID の改良を進めた。

### 2.1. 先行 DPRA ツールの調査

先行研究の調査として、昨年度は米国の RAVEN 及び ADAPT を調査した。本年度は欧州の状況としてドイツの MCDDET 及びフランスの PyCATSHOO について調査し、それぞれの特徴等をまとめ、RAPID の機能として必要と考えられる機能を検討する。

表 2.1-1 各国で開発されている DPRA ツール

	ADS-IDAS	MCDET	ADAPT	RAVEN	SCAIS	PyCATSOO
開発元	UMd (現 UCLA) アメリカ	GRS ドイツ	OSU, SNL アメリカ	INL アメリカ	CSN スペイン	EDF フランス
開発開始年	1993	2002	2008	2012	2008	2013
代表的なシナリオ生成方法	離散的 DET	DET とモンテカルロ法	離散的 DET	離散的 DET hybrid DET adaptive DET など	離散的 DET	モンテカルロ法
連携する熱水力およびシビアアクシデントコード	RELAP TRACE MELCOR など	MELCOR など	MELCOR など	RELAP, MAAP など	MAAP	ツール内に内蔵された単体コード(高速炉)
調査年度	-	2018	2017	2017	-	2018

※DET : Dynamic Event Tree

### 2.1.1. MCDET

ドイツの原子炉安全協会 (GRS) で開発された DPRA 解析ツール MCDET は、モンテカルロ (Monte Carlo) 法によるランダムサンプリングと離散的な動的 ET (Discrete Dynamic Event Tree、略して DDET) を組み合わせた DPRA ツールである。DPRA において、事故シーケンスにおける状態変化 (機器の故障や回復、故障の状態、など) に不確かさがある場合、それらを確率論的に評価する。その評価において、モンテカルロ法を用いた評価では、より詳細に事象の不確かさを捉えることができるが、評価のための事故シーケンスの数が膨大になるという欠点がある。一方、DDET による DPRA の解析では、確率論的に評価する事象に対して、その確率分布を代表点で離散的に評価するため、モンテカルロ法ほど詳細な評価は行えないが、解析する事故シーケンスの数を抑えることができる。MCDET では、不確かさを含んだ事象を確率論的に評価する際、モンテカルロ法で評価するか、DDET で評価するかを使い分けている。

文献[3]では、MCDET の紹介とともに、PWR プラントにおける SBO 事故に対して、MCDET と MELCOR を組み合わせた DPRA の事例紹介が行われている。SBO 事故時には、ECCS による冷却水の注入、圧力逃し弁や安全弁による原子炉内の圧力上昇の抑止、電源の回復などを行い、炉心を冷却して事故を収束させようとする。この事例では、SBO 事故後に発生する事象の不確かさを、モンテカルロ法と DDET のいずれで扱うかを図 2.1.1 に示したように分類している。この図から分かるように、故障する可能性がある弁や事象の発生時間など偶発的な不確かさに対してはモンテカルロ法を適用し、分岐後に移り変わる状態に対しては知識不足による不確かさとして確率を与えて DDET で評価するようにして



いる。この文献では、モンテカルロ法によるサンプリングを行って 50 個の DDET を作成し、各 DDET に対して MELCOR を用いた解析が行われている。解析結果として、炉心部から放出される水素の放出量の時間変化が示されている。各 DDET において水素放出量の累積確率分布を求めるとともに、全 50 個の DDET の累積確率分布より、累積確率分布の平均値、及び上限及び下限（信頼区間 90%）を得ている。

また、2018 年に開催された PSAM14 では、GRS より MCDET を適用した DPRA 解析の発表が行われた。その発表では、作業員の操作をプログラム化したモジュールを MCDET と組み合わせて利用することで、ヒューマンエラーなどの作業員操作に対する不確かさも考慮した解析が示された。MCDET は今後も開発が進んでいきそうであり、引き続き動向を注視しておく必要がある。

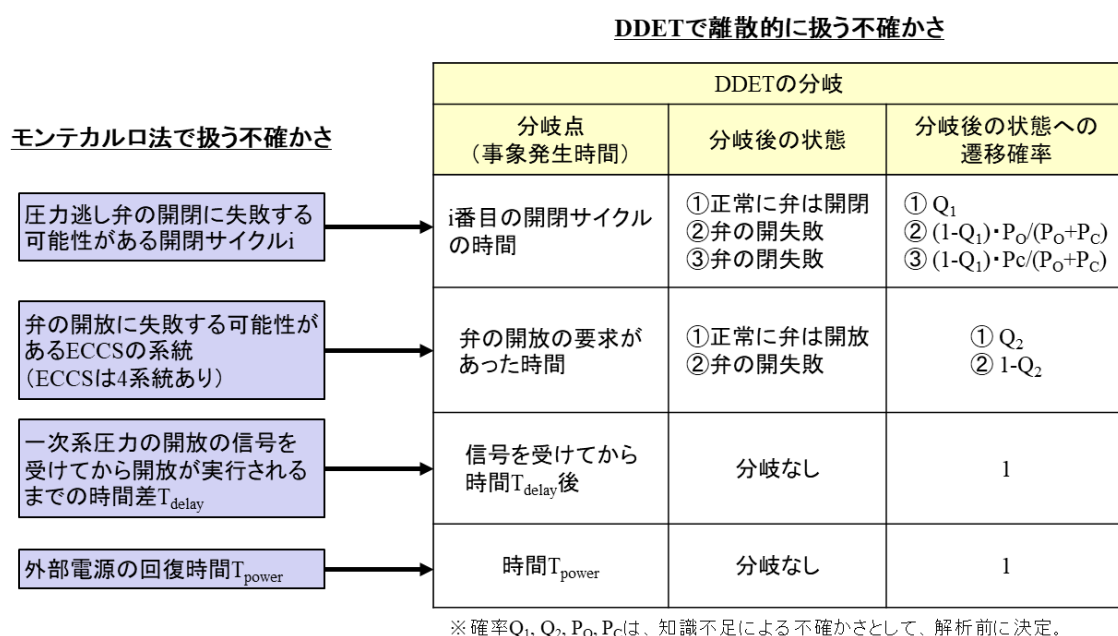


図 2.1.1-1 SBO 事故の事例におけるモンテカルロ法、DDET で扱う不確かさと DDET の分岐

### 2.1.2. PyCATSHOO

フランス電力公社(EDF) で開発した PyCATSHOO[4]は、動的な信頼性解析を行うため、区分的決定論的マルコフ仮定 (Piecewise Deterministic Markov Process; PDMP) [5]により機器の状態を解析するとともに、システムの状態との物理モデルとのカップリングを行う。PDMP では、物理モデルの状態変化を起こすタイミングに着目して解析を行う。このため、物理モデルを微分方程式で記述する。温度や水位といった物理モデルを制御するパラ

メータを設定し、設定値以内に状態が収まるように制御するとする。このとき、設定値（境界）に達した際に物理モデルを変更するためこれをモデル間の遷移（**jump**）とする。また、制御する機器についても取り得る状態として、正常に働いている状態（**success**）、途中で状態が変化する（故障等）状態（**fail**）、また、修復され元に戻る状態、のように状態変化について定義し、それぞれの状態への遷移確率を設定する。物理モデルにおけるパラメータの変化が進む中で、機器の故障が生じれば、境界に達する前に異なる物理モデルに遷移する、もしくは境界に達した後も物理モデルの遷移が行われずに継続している、という点に着目した解析を行う。PDMP では、このような解析を基本的にはモンテカルロ法を用いて解析する。PDMP モデルの概念を図 2.1.2-1 に示す。

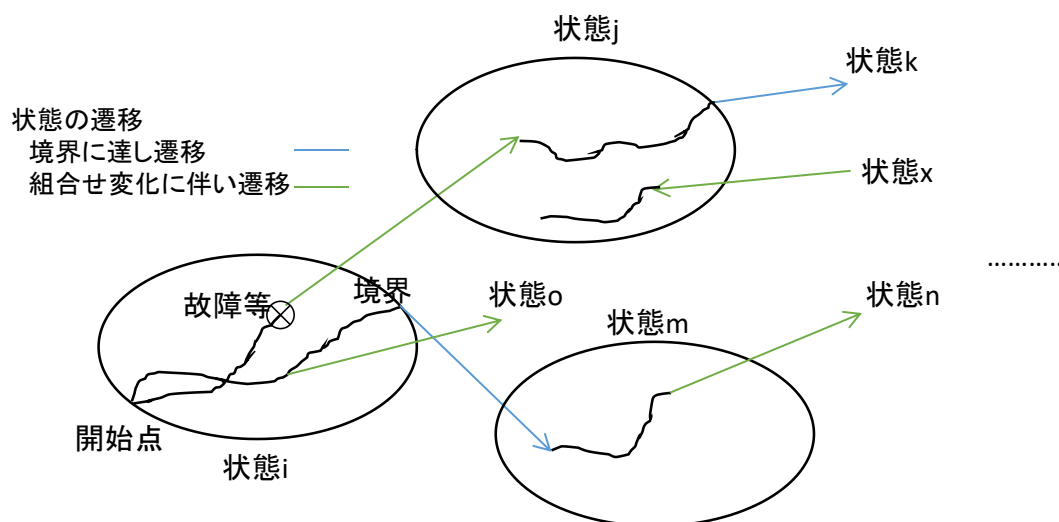


図 2.1.2-1 PDMP 概念図

PyCATSHOO による解析モデル図を図 2.1.2-2 に示す。なお、図では、水槽内の水位及び温度を制御しているシステムを想定している。水槽内の水位が下限を下回れば弁を開き、水を供給し、水位が上限を上回れば水槽下の弁が開き水位を下げる。また、水槽内水温が設定値を超えると、水の供給用及び排水用弁双方が開き水温を下げるものとする。物理モデルの遷移は、各センサーの設定値に達するタイミングもしくは弁もしくはセンサーの故障のタイミングとなる。

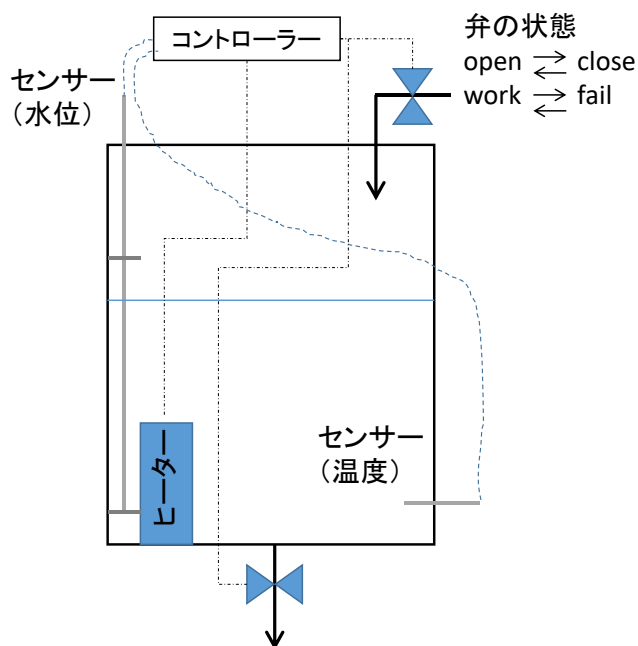


図 2.1.2-2 水の供給 2 系統及び排出 1 系統、ヒーターを持つ水槽のモデル図

このような解析モデルに対し、モンテカルロ法を用いてシステムが **fail** している状態に至る確率を求めている。上記の場合であれば、水位が設定値を超える場合や設定温度を超える場合について、故障の種類（1 つのみ故障、作動中のみ故障を考慮するなど）毎にシステムフェイル確率を求めている。

PyCATSHOO は、物理モデルと機器等の作動状態を繰り返し結び付けていることから、非常に有力な DPRA 解析用ツールである。しかしながら、物理モデルの構築を内部で行うため、複雑なモデルへの適用は難しいとされている。また、機器の数が増えると機器の状態と物理モデルとの結び付け及び繰り返し計算が膨大になることが予想される。一方で、EDFでも改良を進め、様々なモデルへの適用、計算の高度化[6]が試みられている。PSAM13では、供給電力の信頼性も含めた使用済燃料プールへの適用[7]、また、PSAM14では、より広範囲な電力網の信頼性評価への適用[8]が述べられており、今後の開発について注視していく必要があると考える。

## 2.2. RAPID の改良

昨年度整備した RAPID では、機器故障の生じる時刻や温度を指定した確率分布より決定し、これに基づく事故シーケンスの解析を可能とした。一方、プラントの状態変化が事故シーケンスに及ぼす影響、また、プラント状態に基づく機器間の相互作用といった、DPRA 解析ツールの特徴となるべき機能については、実装できていない。そこで、本年度は、解析途中の熱水力条件に基づき事故シーケンスの修正もしくは生成を行うことができるよう RAPID の改良に着手した。本改良では、従来の故障を想定する機器の確率分布及び確率分布を特徴づけるパラメータの他に、圧力や温度等の熱水力条件を反映させるタイミングの指定及び指定したタイミングにおける RAPID で読み込むべきパラメータの指定、及び読み込んだ熱水力パラメータに基づき変化する故障状態や故障するタイミングを解析し、これに基づく新たな事故シーケンスの解析が行えるよう、熱水力解析コードの入力の作成を行う。昨年度整備した RAPID では、プログラム本体に考慮するパラメータ及び確率分布をユーザーが書き込む仕様であるため、本体を壊してしまう恐れがあった。このため、本改良に際し、考慮する機器故障に関するパラメータ及び確率分布、並びに本改良で追加する解析途中の熱水力パラメータを書き出すタイミングを指定する値及び RAPID で読み込むパラメータを RAPID の入力ファイルとして用意し、それを RAPID で読み込むことができるような改良を併せて行うことにした。改良した RAPID の機能確認のため、昨年度と同様な BWR-4 MarkI の SBO シナリオを対象に THALES2 による解析を行った。

### 2.2.1. RAPID-THALES2 の連携解析における改良

上記の改良後の RAPID-THALES2 の連携解析の流れを図 2.2.1-1 に示す。

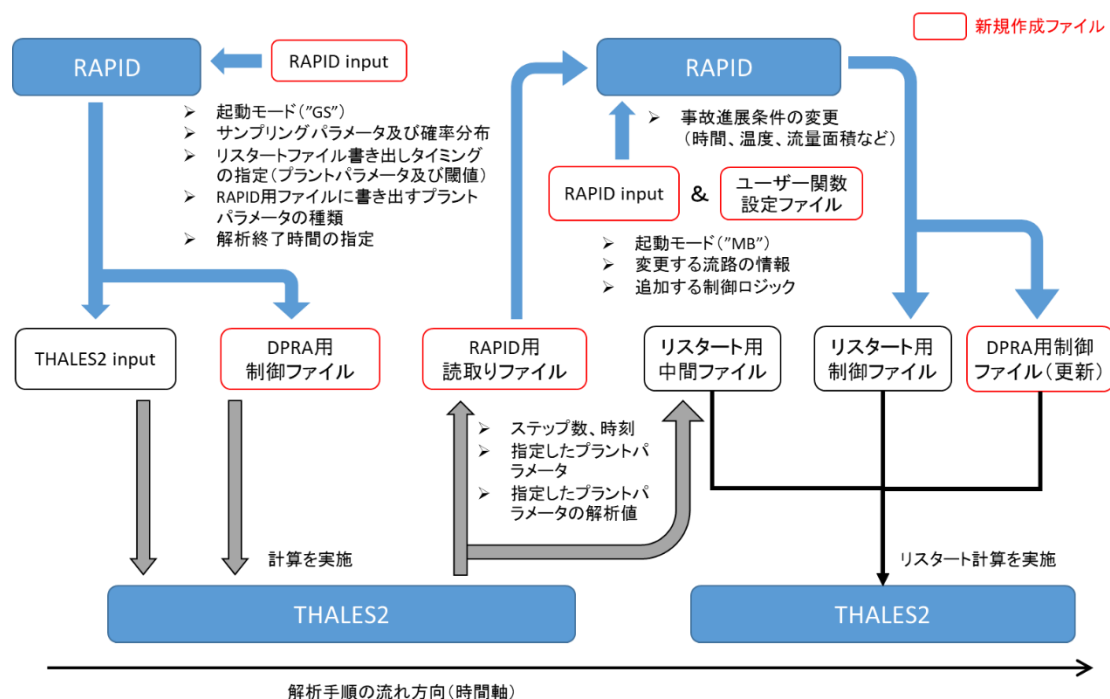


図 2.2.1-1 RAPID-THALES2 連携解析における解析の流れ図

RAPID には、

- 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)

の二つの機能があり、どちらの機能を実行するかは入力ファイルより指定する。事故シーケンス生成時の主な入力項目は、

- ・ RAPID の起動モード ("Mode": "GS")
- ・ 解析前にサンプリングを行うパラメータとその確率分布
- ・ 分岐生成を行う熱水カパラメータの条件 (THALES2 がリスタートファイルおよび解析途中の熱水カパラメータを出力するタイミングの条件)
- ・ 分岐生成時に出力する熱水カパラメータ
- ・ 解析終了時間

である。一方、事故シーケンスの分岐を生成する際の主な入力項目は、

- ・ RAPID の起動モード ("Mode": "MB")

- ・ 変更する流路の情報
- ・ 追加する制御ロジック
- ・ 変更する流路の変更値や制御ロジックの設定を決定する式やサンプリングの確率分布  
(ユーザー関数設定ファイルより指定)

である。入力ファイルの書式や記入項目の詳細は、付録 B に示す。図 2.2.1-1 に示した DPRA 用制御ファイルには、分岐生成を行う熱水力パラメータの条件が記載される。また、RAPID 用読み込みファイルには、分岐生成時のタイミングや熱水力パラメータが記載される。

## 2.2.2. 改良した RAPID による解析

改良した RAPID の機能確認のため、昨年度と同様に BWR-4/MarkI の SBO シナリオを対象に THALES2 による解析を行った。図 2.2.2-1 は、その解析モデル図である。

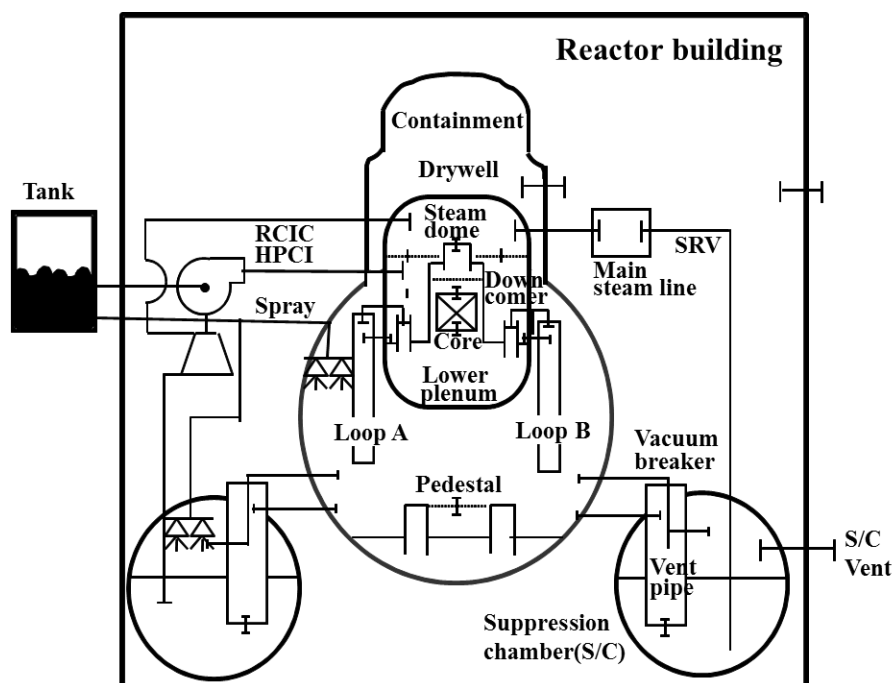


図 2.2.2-1 THALES2 の解析で用いた BWR のモデル

本解析では、安全逃し弁 (SRV) の熱的故障 (Thermal Seizure、略して TS) [9]における蒸気漏えい面積を故障発生時の温度や圧力より決めるようにし、解析途中の熱水力パラメータが反映されていることを確認するようにした。SRV の熱的故障に関して、以下のような設定を行った。

- ・ SRV の熱的故障が生じる温度  $T_{TS}$  は、解析を実施する前に決める。RAPID では、サンプリングを行って温度  $T_{TS}$  を決めることができるが、本解析では、簡単化のため、900K に設定した。
- ・ SRV の温度が  $T_{TS}$  に達した際、そのタイミングでの
  - SRV が接続されている主蒸気管 (Main Steam line) の温度 :  $T_{MS}$  [K]
  - 原子炉圧力容器 (RPV) の圧力 :  $P_{RPV}$  [MPa]

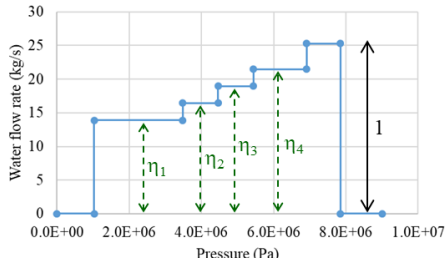
の値を THALES2 から RAPID 用読取りファイルに出力させるようにした。この値を RAPID が読み込んで、熱的故障時の SRV の漏えい面積に反映させる。反映させる方法であるが、以下の式で仮想的に漏えい面積の比率  $F$  を決定するようにした。

$$F = f \cdot \frac{T_{MS}}{T_{MS}^{mean}} \cdot \frac{P_{RPV}}{P_{RPV}^{mean}} \quad (0 \leq F \leq 1) \quad (2.2.2-1)$$

ここで、 $f$  は切断正規分布 (平均値 : 0.5、標準偏差 : 0.2、最小値 : 0.05、最大値 : 1) に対してサンプリングを行った値である。また、 $T_{MS}^{mean}$  は熱的故障が発生する温度の平均値であり、900K に設定する。また、 $P_{RPV}^{mean}$  は逃し安全弁の平均圧力であり、7.35MPa に設定する。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。SRV の面積に比率  $F$  を掛けることで SRV の漏えい面積を決定し、リスタート計算を実施する。

本解析では、事故シーケンスの分岐生成時の改良の確認に焦点を当てているため、事故シーケンス生成時のサンプリングは行わず、表 2.2.2-1 で指定した事故シーケンスについて解析を行った。また、解析終了時間は 12 時間に設定した。

表 2.2.2-1 事故シーケンスの事象、RCIC のポンプ特性

事象・ポンプ特性	変数	値
DC 電源の枯渇	枯渇時間[秒]	18000 (= 5 時間)
非常用電源 (AC 電源) の回復	回復時間[秒]	28800 (= 8 時間)
逃し安全弁の熱的故障	故障発生温度[K]	900
	バルブの漏えい面積[m <sup>2</sup> ]	故障発生時に(2.2.2-1)式より算出。 値 f は、切断正規分布 (平均値 : 0.5、標準偏差 : 0.2、最小値 : 0.05、最大値 : 1) よりサンプリングを行って決定。
RCIC のポンプ特性	原子炉圧力に依存した吐出量割合[-]	吐出量 25.28kg/s を割合 1 とし、圧力が小さい方から、吐出量割合を ( $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ ) = (0.55, 0.65, 0.75, 0.85) に設定 



#### ① 分岐生成を行わない場合 (SRV の熱的故障なし)

まず、分岐生成を行わない場合 (SRV の熱的故障が発生しない場合) の解析結果より、この事故シーケンスの概要を説明する。図 2.2.2-2 と図 2.2.2-3 に解析結果を示す。SBO 発生後、タービン駆動である RCIC により炉心冷却が行われるが、5 時間後に DC 電源も枯渇した後は冷却水の注入は行われず、7 時間後あたりから炉心の温度が上昇し始める。SBO 発生から 8 時間後、AC 電源の回復により RCIC による冷却水の注入が再開される。この時、炉心の最高温度は 2000K 以上の高温に達しており、炉心の一部は溶融して炉心支持板上に落下する。さらに、RPV 内の水位が通常運転時の 9.4m から 5.0m まで低下しており、炉心の一部が水面から出た状態になっている。その状態で RCIC による注水を行うため、注入した水が一気に水蒸気に変化し、炉内の圧力が急上昇する。また、燃料被覆管のジルカロイと水が反応し、水素も急激に発生する。これら高温の水蒸気や水素が主蒸気管に流れ込むため、主蒸気管の温度は急上昇し、熱的故障の発生温度  $T_{TS}$  (=900K) を越える。その後も RCIC による注水が続けることで、炉心の温度は低下し、炉内の圧力も低下していく。

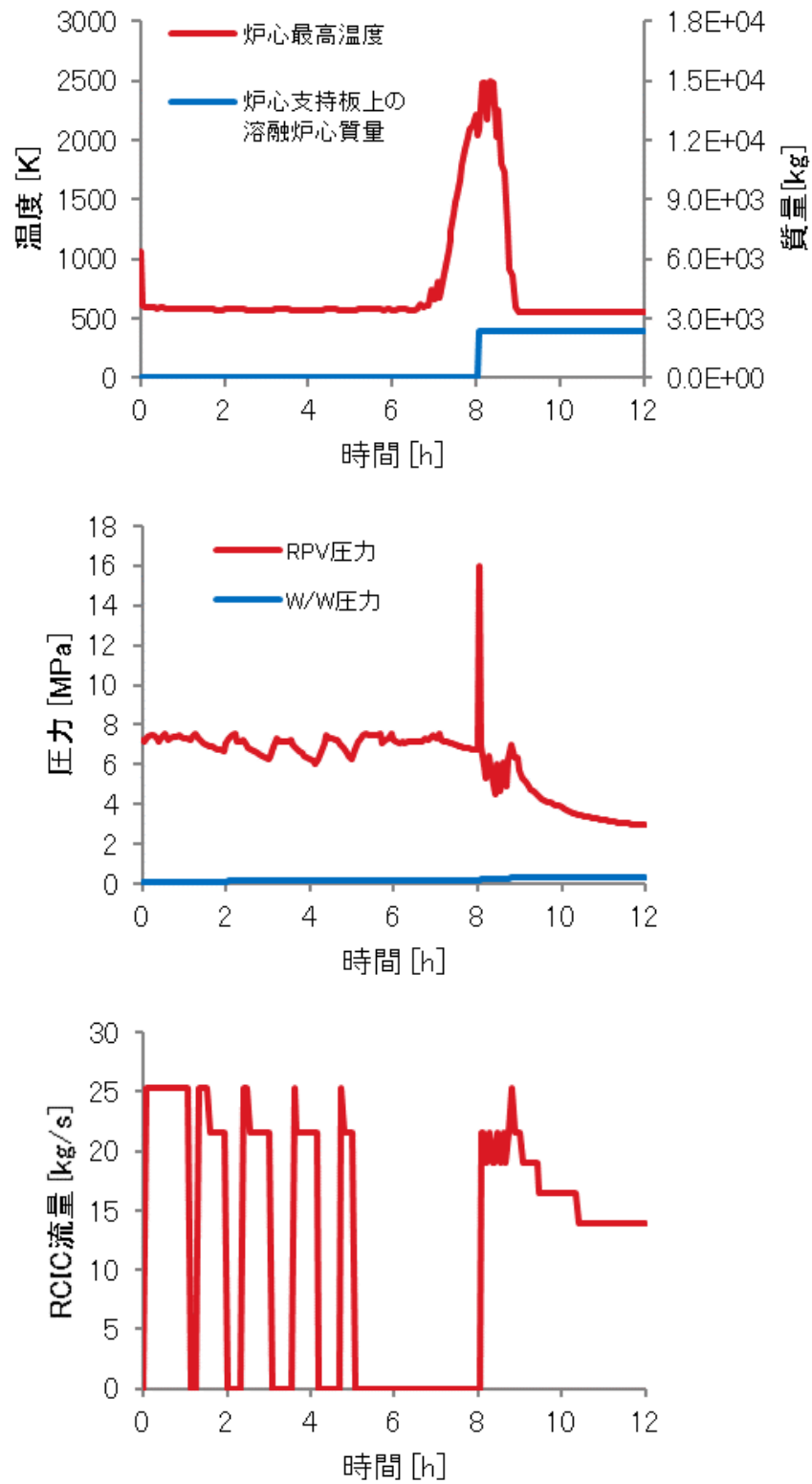


図 2.2.2-2 分岐生成を行わない場合の計算結果 (炉心温度・落下した炉心質量、圧力、RCIC 流量)

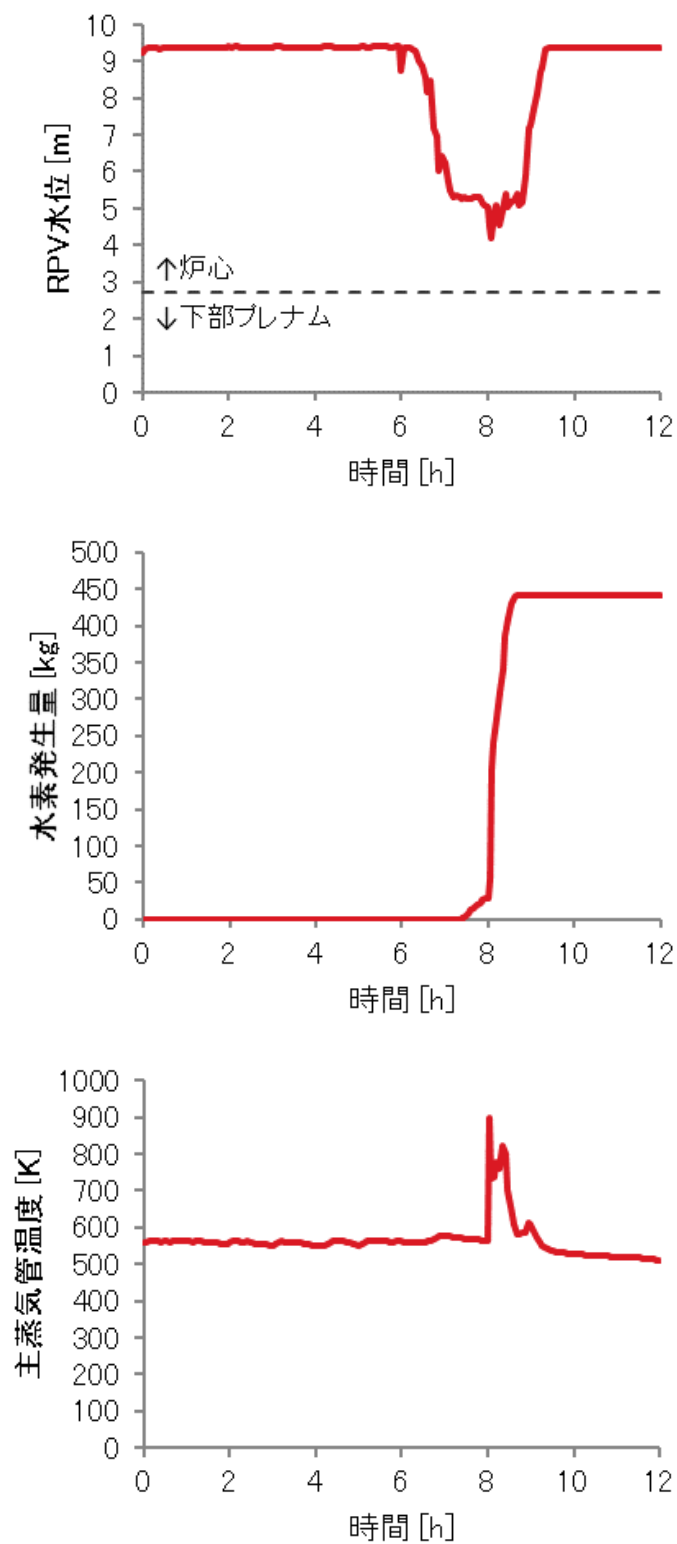


図 2.2.2-3 分岐生成を行わない場合の計算結果 (RPV 水位、水素発生量、主蒸気管温度)

② SRV の温度が  $T_{TS}$  に達したタイミングから分岐生成を行う場合

①で述べたように、SRV の温度が  $T_{TS}$  に達するタイミングは AC 電源の回復のすぐ後（正確には 78 秒後）である。改良した THALES2 では、そのタイミングにおけるプラントパラメータの値を捉えており、SRV の温度及び原子炉圧力はそれぞれ 900K、16.00MPa であった。この値より、熱的故障発生時の漏えい面積を決める。RAPID を用いて(2.2.2-1)式の比率  $F$  を算出した結果、サンプリング値  $f$  は 0.23 であり、

$$\begin{aligned}
 F &= f \cdot \frac{T_{MS}}{T_{MS}^{mean}} \cdot \frac{P_{RPV}}{P_{RPV}^{mean}} \\
 &= 0.23 \cdot \frac{900}{900} \cdot \frac{16.00}{7.35} \\
 &\cong 0.50
 \end{aligned}$$

となった。ここで注目すべき点は、サンプリングした値  $f$  に加えて、原子炉圧力の値  $P_{RPV}/P_{RPV}^{mean}$  を反映して比率  $F$  を算出している点であり、分岐生成の条件だけでなく、分岐後の事故シナリオに対してもプラントの状況を反映して分岐生成を行っている点である。この比率  $F$  より漏えい面積を求めて、リスタート計算を行った。さらに、原子炉圧力の値  $P_{RPV}/P_{RPV}^{mean}$  を反映した効果を見るため、サンプリングした値  $f$  ( $=0.23$ ) を漏えい面積の比率として漏えい面積を算出した場合のリスタート計算も行った。

図 2.2.2-4 から図 2.2.2-6 は漏えい面積の比率が 0.50 の場合の解析結果であり、図 2.2.2-7 から図 2.2.2-9 は漏えい面積の比率が 0.23 の場合の解析結果である。また、SRV の熱的故障が発生する時間、および、炉心支持板が破損して炉心が下部プレナムに落下する時間を表 2.2.2-2 にまとめる。

表 2.2.2-2 SRV の熱的故障発生時間と炉心支持板の破損時間

漏えい面積の比率	SRV の熱的故障発生時間[h]	炉心支持板の破損時間[h]
0.50 の場合	8.02	8.62
0.23 の場合		10.42

まず、漏えい面積の比率が 0.50 の場合の事故シーケンスについて説明する。SBO が発生し、8 時間後に AC 電源が回復し、RCIC による冷却水の注入が行われるが、①でも説明したように高温の水蒸気の発生により、SRV の温度も上昇して熱的故障が発生する。SRV の熱的故障により、SRV は開固着し、そこから冷却水が原子炉の外に漏えいし続ける。図 2.2.2-6 は、熱的故障した SRV からの漏えい流量、および、その積算値を示した図である。故障が発生した 8.02 時間で漏えいが生じることで、原子炉圧力も急速に低下していくとともに漏えい蒸気流量も減少する。RCIC は原子炉内の圧力が約 1.0MPa を下回ると、RCIC

からの注水も止まる。その結果、炉心の冷却効果が弱まり、8.62 時間後に炉心支持板が破損し、炉心が下部プレナムに落下する。この時、下部プレナムに溜まっていた冷却水が蒸発して、再び圧力が急上昇し、RCIC の注入も再開され、SRV からの冷却水の漏えいも増加する。その後も SRV からの冷却水の漏えいは続き、原子炉内の圧力・水位は低下していく。

次に、漏えい面積の比率が 0.23 の場合の解析結果を、比率が 0.50 の場合の解析結果と比較しながら説明する。比率が 0.50 の場合と同様に、8.02 時間後に SRV の熱的故障が生じ、冷却水が漏えいするが、漏えい面積が小さい分、漏えい流量も小さく、原子炉内の圧力低下も比率が 0.50 の場合と比べて緩やかである。その結果、RCIC から冷却水が注入される時間も長くなり、炉心の冷却効果もより長く継続する。ただ、10.42 時間後には、比率が 0.23 の場合でも炉心支持板が破損し、下部プレナムに溜まった冷却水に炉心が落下する。それにより、多量の水蒸気が発生し、圧力や RCIC 流量、SRV からの漏えい流量がピーク的に増大する。

以上の考察より、漏えい面積の違いによって単に漏えい量が変わるというだけでなく、原子炉内の圧力や水位の挙動、RCIC からの注入量、炉心支持板の破損タイミングなどが大きく異なり、熱的故障発生後の事故進展にも大きな影響を与えることが分かった。

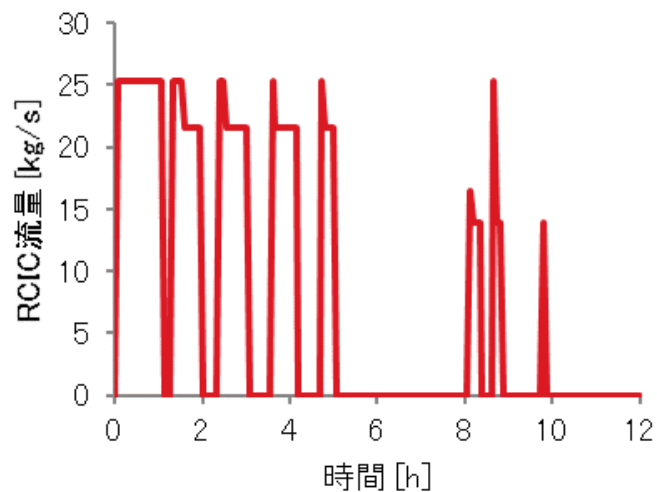
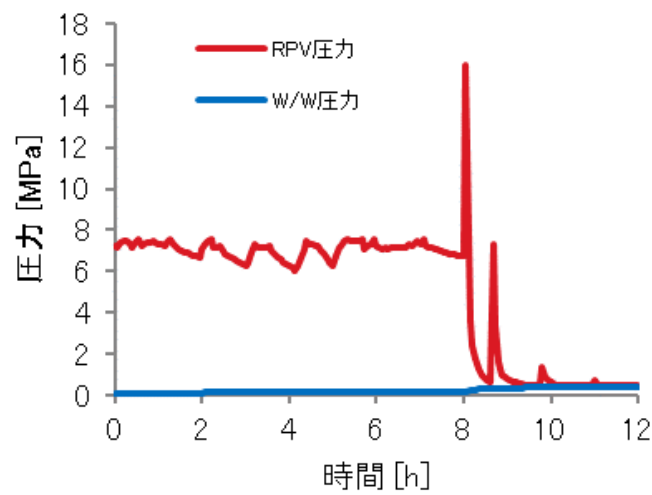
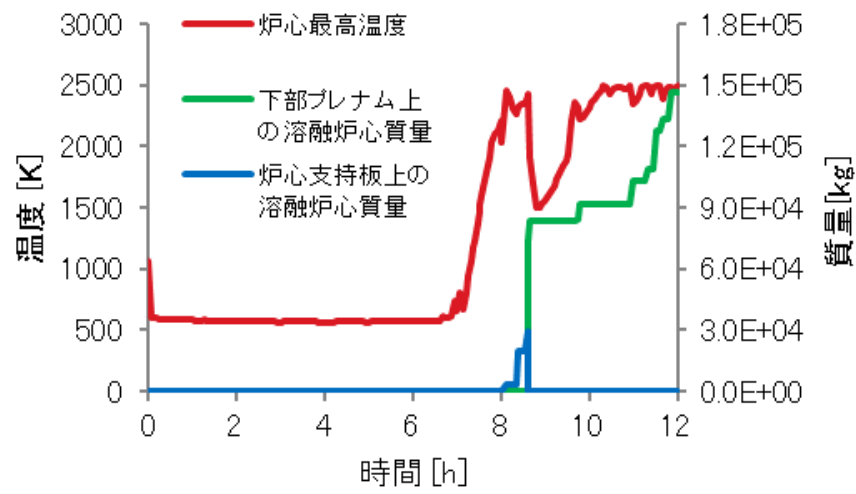


図 2.2.2-4 分岐生成を行う場合の計算結果：比率 0.50（炉心温度・落下した炉心質量、圧力、RCIC 流量）

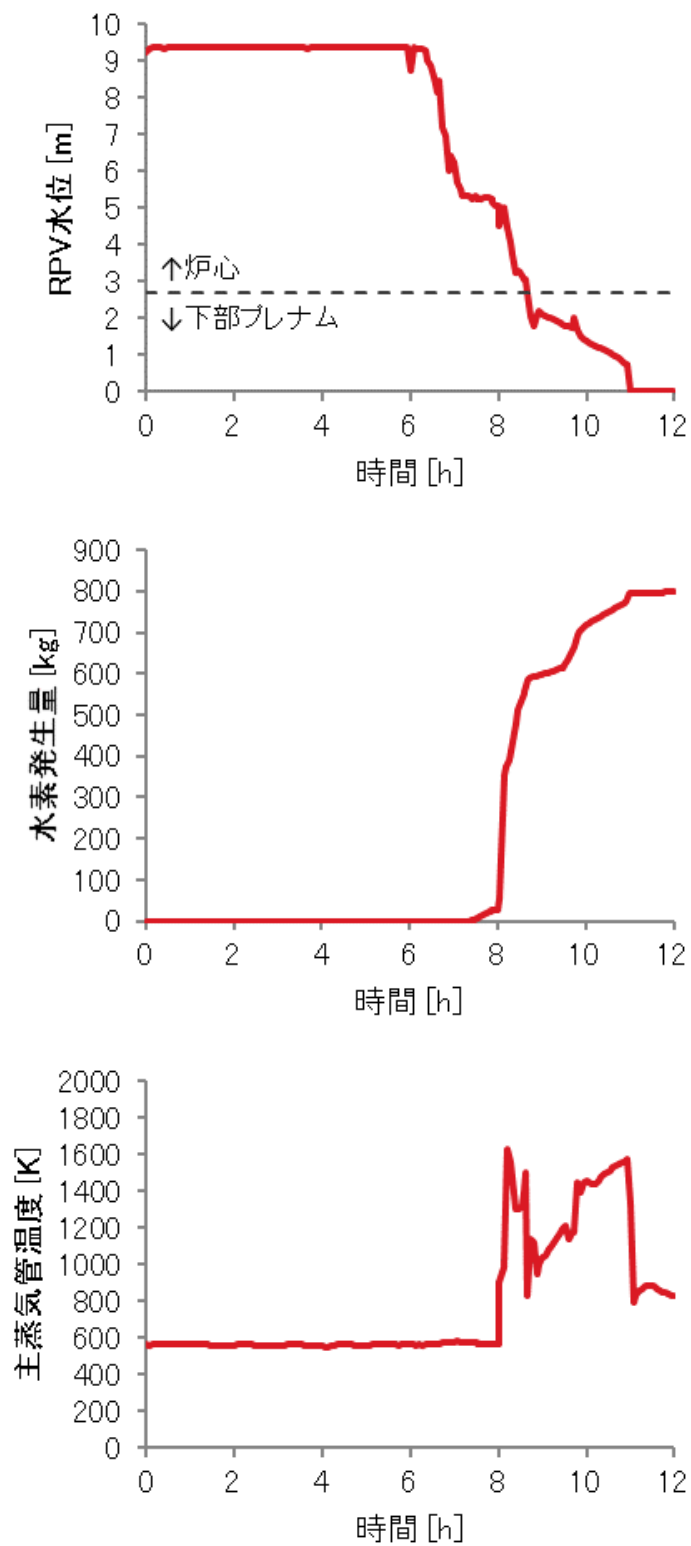


図 2.2.2-5 分岐生成を行う場合の計算結果：比率 0.50（炉心部水位、水素発生量、主蒸気管温度）

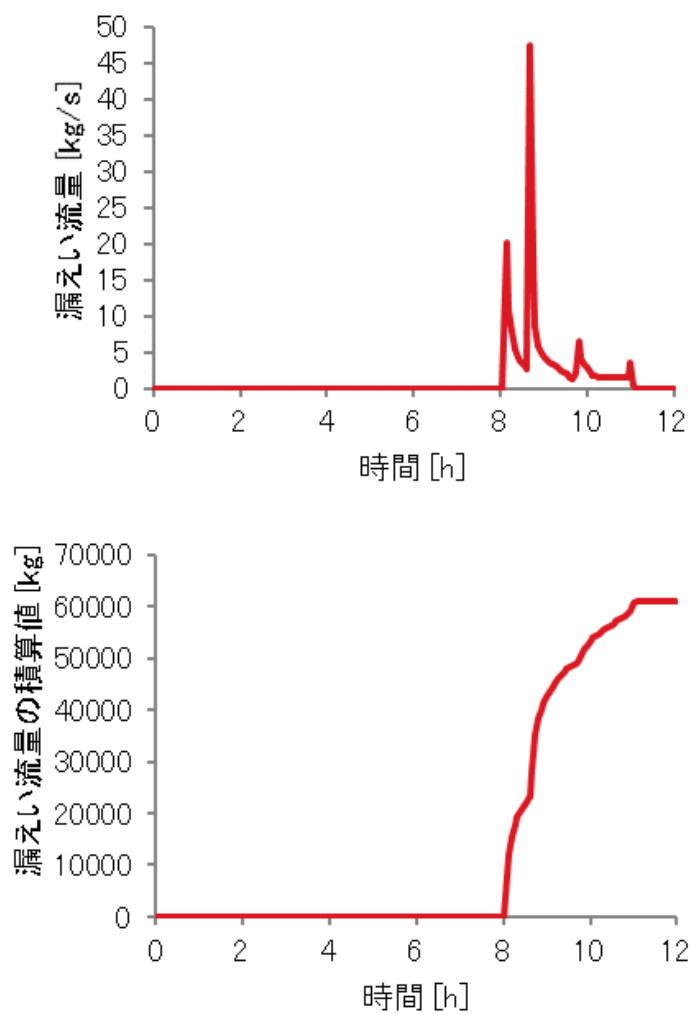


図 2.2.2-6 分岐生成を行う場合の計算結果：比率 0.50（漏えい流量とその積算値）



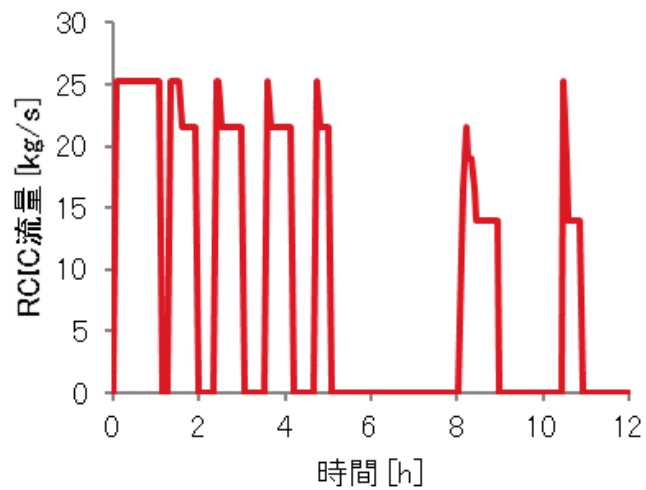
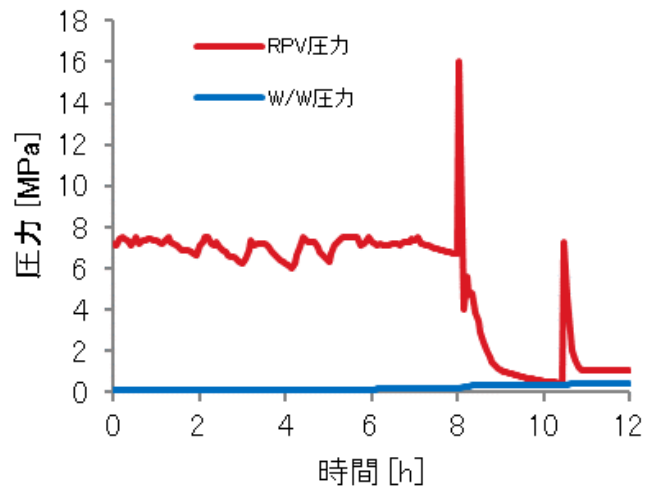
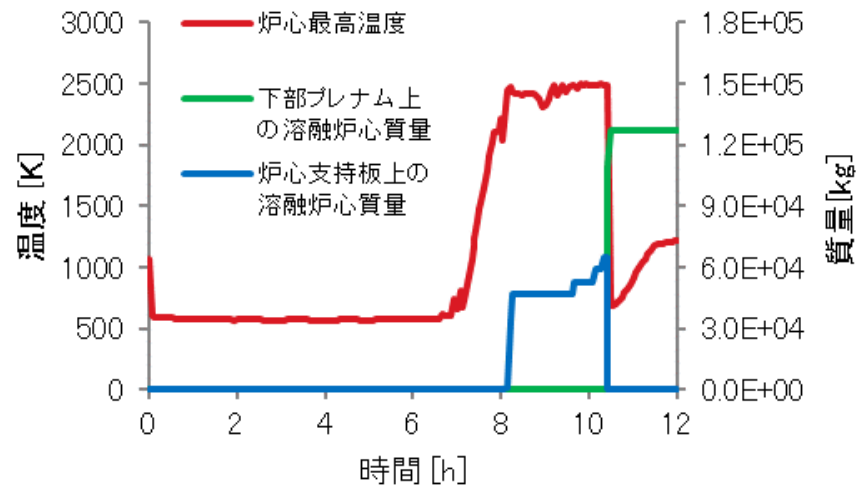


図 2.2.2-7 分岐生成を行う場合の計算結果：比率 0.23（炉心温度・落下した炉心質量、圧力、RCIC 流量）

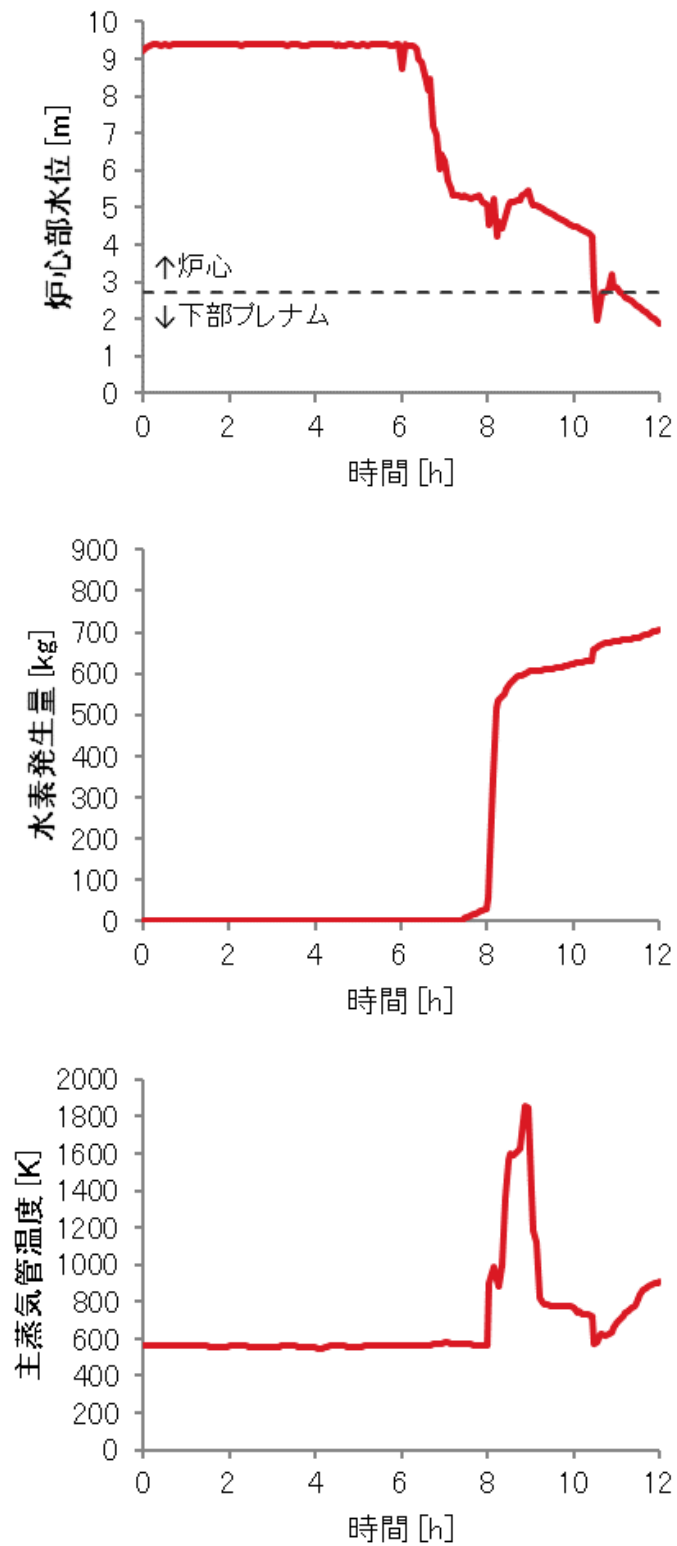


図 2.2.2-8 分岐生成を行う場合の計算結果：比率 0.23（炉心部水位、水素発生量、主蒸気管温度）

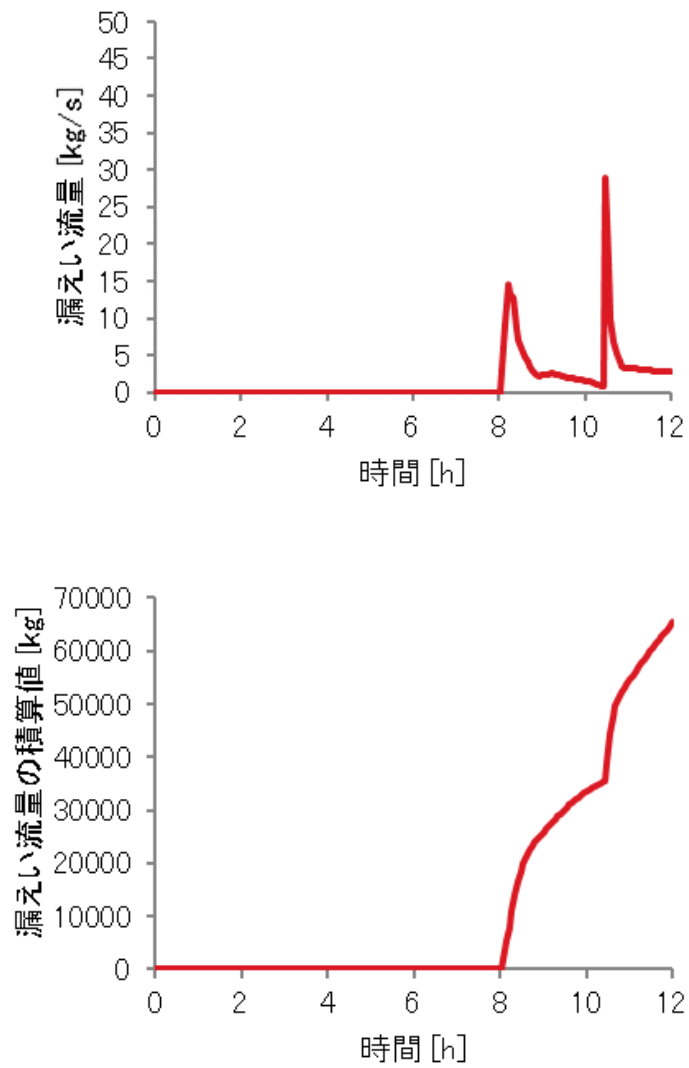


図 2.2.2-9 分岐生成を行う場合の計算結果：比率 0.23（漏えい流量とその積算値）

### 2.3. まとめ

昨年度の米国における DPRA 解析ツールとして、RAVEN 及び ADAPT の調査を行い、DPRA 解析ツールの基本的な機能を基に RAPID を開発した。先行して開発されている DPRA 解析ツールは欧州にもあり、本年度は RAPID に付加すべき機能としてどのようなものがあるかの観点から、ドイツの MCDET 及びフランスの PyCATSHOO を調査した。MCDET では、モンテカルロ法を用いたランダム性に基づく事象進展の決定とあらかじめ設定した発生確率に基づく事象の分岐を融合させることで、複雑な解析モデルに対応できるように設計されている。PyCATSHOO では、区分的決定論的マルコフ仮定 (PDMP) を用い、物理モデルと制御モデルに分けた解析対象モデルを構築し、モンテカルロ法により各モデルの繰り返し計算を行う。このため、DPRA 解析を行う上で詳細な検討が行えるという利点があるが、複雑なモデルに対して、構築すべきモデルの増大、繰り返し計算の増大、また、ある時刻での状態をすべてメモリーに保存するため、メモリー利用領域の増大を招く。このような不利益に対し、サンプリング法の向上により、より大きな解析対象に適用できるよう開発を進めている。

昨年度整備した RAPID には、昨年度調査した DPRA 解析ツールを含め共通的に持っている確率分布よりランダムに機器の故障等事故シーケンスの分岐を生じるタイミングを生成する機能を有している。今後、より現実的な解析を行うとすると、解析数の増大が見込まれることから、効率よく解析することが望まれる。これの解決の一つとして、ADAPT や MCDET のように事故シーケンスの分岐に至るような事象の変化点における機器の故障等の累積確率分布から数点を抽出し、それらの値が持つ確率を予め設定し、その値を最終結果に考慮することで、当該分岐における解析数を減じることが期待できる。したがって、今後の RAPID の開発の中に、離散的な分布の取扱いを考慮できるよう検討する。

また、プラントの熱水力状態を考慮して事故シーケンスの分岐を判定するという機能を付加していくうえでは、解析途中のプラント内熱水力情報を解析コードの中間出力から抽出し、取り込む必要がある。PyCATSHOO では、物理モデルと制御モデルを一つのコード内部に構築してデータの受け渡しを容易にしている。RAPID では、THALES2 もしくは Apros 等の既存解析コードとのカップリングによる DPRA 解析を目指し開発を進めているため、PyCATSHOO の解析モデル概念をそのまま適用することはできない。しかしながら、主となる解析コードで取り扱わないような部分に対し、物理モデル及び制御モデルを構築して RAPID で管理するといったことも考えられる。ただし、PyCATSHOO の同様なモデルでは、計算時間の増大が予想されるため、今後開発状況を継続して調査するとともに、RAPID への実装の可能性についても、継続して検討することとする。

プラントの熱水力状態を考慮して事故シーケンスの分岐を判定するという機能を RAPID に付加するため、解析途中のプラント内熱水力情報を解析コードの中間出力から抽出し、取り込むことができるよう、RAPID の改良を行った。本改良の確認のために実施した SRV の熱的故障が生じたときの漏えい面積が、その時の炉内圧力及び温度に依存するような解析

を行い、その機能を確認した。この追加した機能は、分岐の発生点だけでなく、分岐後の事故シーケンス（解析条件）も途中のプラント状況に影響を与える場合に有効と考える。今後は、この改良した機能をより具体的な事象に適用すべく、対象事故シナリオを検討し、機能向上を図る。

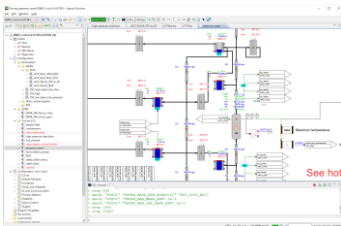
### 3. 動的な ET のための熱水力解析手法の検討

昨年度整備した RAPID により、全電源喪失事故を対象とした事故シーケンスの生成、また、生成した事故シーケンスに基づく THALES2 による解析という一連の試解析を行い、その機能の確認を行った。本年度は、RAPID を、動的な ET のために熱水力解析手法として、フィンランドで開発された解析コード Apros (Advanced Process Simulator) に適用する手法について検討を行った。以下では、Apros と RAPID との連携解析の方法、および、BWR プラントにおける SBO 事故を対象とした連携解析の結果を示す。

#### 3.1. Apros と RAPID の連携

Apros[10]とは、フィンランドの Fortum 社と国立技術研究センター (VTT) が共同開発しているプラント総合解析コードであり、GUI を用いたモデル作成・解析条件設定・解析結果の可視化が容易に行えるという特長がある。また、Apros の解析機能部のみを取り出した Apros Profile がある。Apros Profile を用いることで、外部からの計算実行の制御や計算の並列実行が可能であり、DPRA 解析での多ケースの解析を行う際に有効である。通常版の Apros と Apros Profile の機能の比較を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 Apros (通常版) と Apros Profile の比較

	Apros (通常版)	Apros Profile
GUI の有無	有り 	無し
モデルファイル	***.apros	***.snp.sz (スナップショットファイル)
モデルファイルに含まれる内容	プラントモデル、制御ロジック、GUI データベース	プラントモデル、制御ロジック
スナップショットファイルの出力	可能	可能
スナップショットファイルの読み込み	不可 (GUI データベースが含まれていないため)	可能
計算実行中の制御ファイル	SCL ファイル、GUI から操作	SCL ファイル (ただし、通常版の Apros とは構文が若干異なる。)
利点	GUI で操作でき、モデルや制御ロジック、計算結果が一目で分かる。	外部プログラム (Python) を介して、計算実行の制御が可能。

Apros と RAPID を連携させるためには、RAPID で生成した事故シーケンスを Apros の入力ファイルに反映し、その入力ファイルをもとに外部から Apros を実行する必要がある。その点で、通常版の Apros より Apros Profile の方が適している。ただ、Apros Profile は通常版の Apros と比べてマニュアルが充実しておらず、Apros Profile の実行方法や計算制御を行う SCL (Simantics Constraint Language) のコマンドは開発元である Fortum 社から情報を取得する必要があった。そのため、2018 年の 6 月 4 日から 6 月 15 日の間、Fortum 社で Apros のトレーニングを受講し、Apros の基本的な利用方法を習熟するとともに、Apros Profile の利用および SCL に関する情報を取得した。さらに、RAPID と Apros Profile の連携部分の開発を行っていた際も、Apros Profile に関する不明点や問題点は、随時 Fortum 社より情報や解決策を取得した。

DPRA 解析で Apros Profile を利用するためには、プラントモデルと制御ロジックを含んだスナップショットファイル (拡張子は、snp.gz)、および、計算実行中に計算制御を行う SCL ファイルが必要になる。プラントモデルや制御ロジックの作成は Apros で GUI を用いて作成し、そのデータをスナップショットファイルとして出力して、Apros Profile で利用する。また、SCL ファイルは SCL コマンドが記載されたテキストファイルであり、テキストエディタ等で作成・編集することができる。DPRA 解析では、事故進展における不確かさを RAPID でサンプリングを行って決めるため、SCL ファイルのひな型を用意し、RAPID で生成した事故シナリオを SCL ファイルのひな型に反映して、SCL ファイルを作成する。Apros Profile で計算を実行するまでのファイル準備の流れを図 3.1-1 に示す。

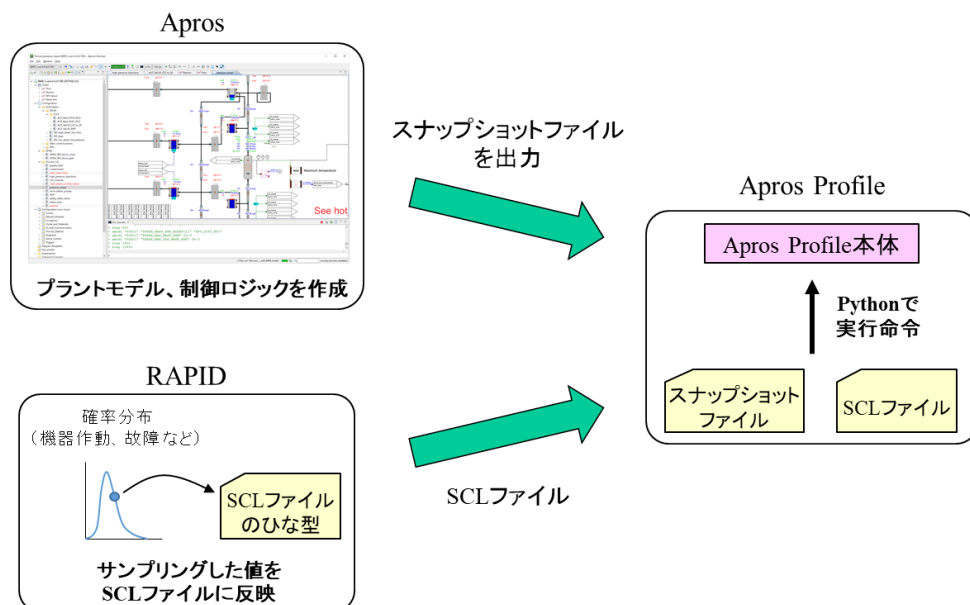


図 3.1-1 Apros-RAPID 連携解析における入力ファイル作成の流れ

RAPID で SCL ファイルを生成する際、注意すべき点がある。SCL ファイルには、解析実行中に行う解析条件の変更等を時系列で上から記述し、Apros Profile はその記述順序に従って解析を進めていく。そのため、RAPID でサンプリング結果によって、事故シナリオにおける解析条件変更の順序が入れ替わる場合は、解析条件変更の順に解析内容を SCL ファイルに記述する必要がある (THALES の入力ファイルのように、単にサンプリングした値をひな型に代入するだけでは、SCL ファイルは正しく作成されない)。そのため、SCL ファイルのひな型は、解析条件変更毎に分割して用意しておき、RAPID でのサンプリングにより、解析条件変更の順序が決まった時点でそれらを並べ替えて結合して SCL ファイルを作成するようにする (図 3.1-2 参照)。

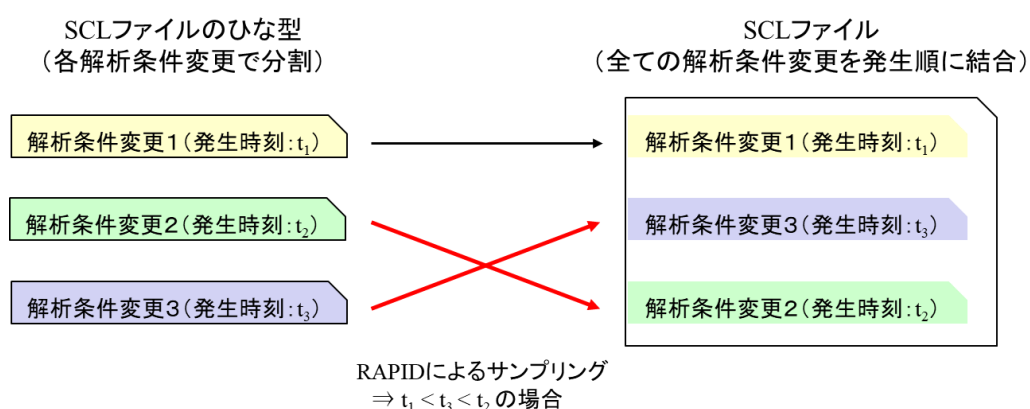


図 3.1-2 サンプリングによる発生時刻の入れ替えを考慮した SCL ファイルの作成

### 3.2. SBO 事故を対象とした Apros-RAPID の連携解析

前節で説明した Apros と RAPID の連携方法を用いて、SBO 事故を対象とした DPRA 解析を実施した。

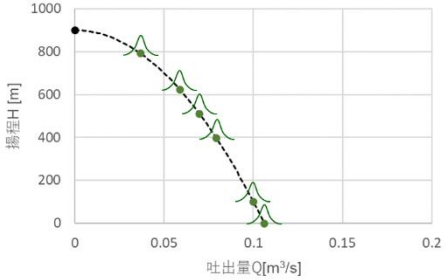
#### 3.2.1. 解析モデル、解析条件

昨年度実施した THALES-RAPID の連携解析と同様に、BWR 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、DPRA 解析を行った。BWR-5 型の原子炉であり、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 (原子炉隔離時冷却系) が起動するようにし、AC 電源回復後は HPCS (高圧炉心スプレー系) が起動するように設定した。

RAPID を用いて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 3.2.1-1 に示す。



表 3.2.1-1 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 $T_{DC}$ [秒]	切断正規分布 ( $\mu=14400, \sigma=7200, [7200, 21600]$ )
非常用電源 (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 ( $\mu=28800, \sigma=7200, [T_{DC}, 43200]$ )
逃し安全弁の熱的故障	故障発生温度[K]	切断正規分布 ( $\mu=700, \sigma=100, [600, 900]$ )
	バルブの開放率[-]	切断正規分布 ( $\mu=0.5, \sigma=0.2, [0.05, 1]$ )
逃し安全弁の閉失敗故障	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 ( $\mu=36000, \sigma=10000, [30000, 40000]$ )
	バルブの開放率[-]	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> 

本解析では、250 ケースの事故シーケンスを RAPID で生成した。RAPID でサンプルングした値の分布を図 3.2.1-1 から図 3.2.1-8 に示す。また、RCIC のポンプ特性のサンプルング結果を図 3.2.1-9 から図 3.2.1-12 に示す。

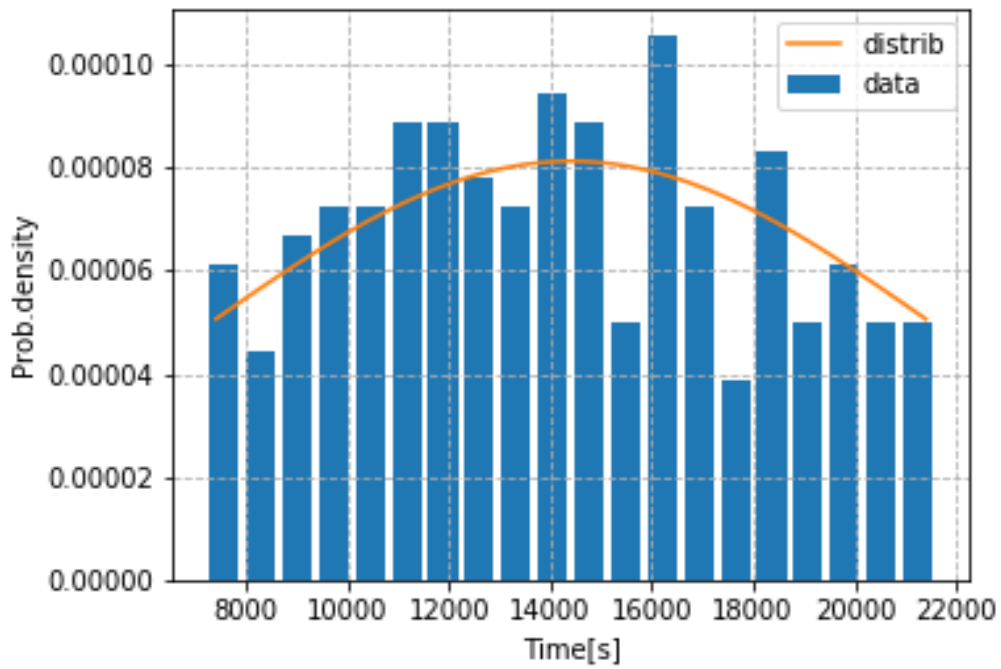


図 3.2.1-1 DC 電源の枯渇時間の確率密度分布

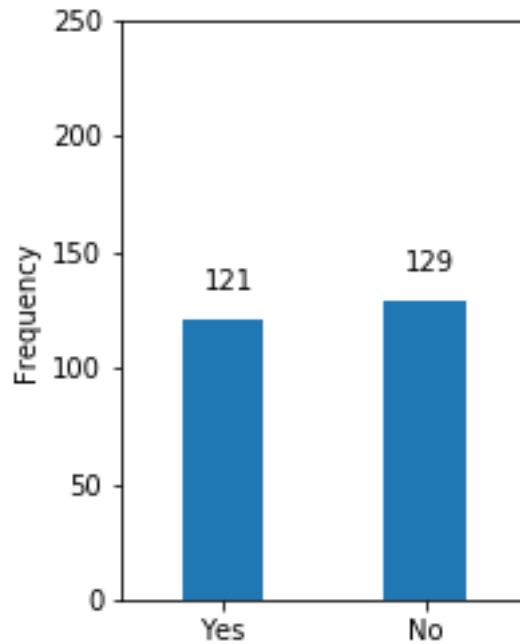


図 3.2.1-2 非常用 AC 電源回復の有無の度数分布

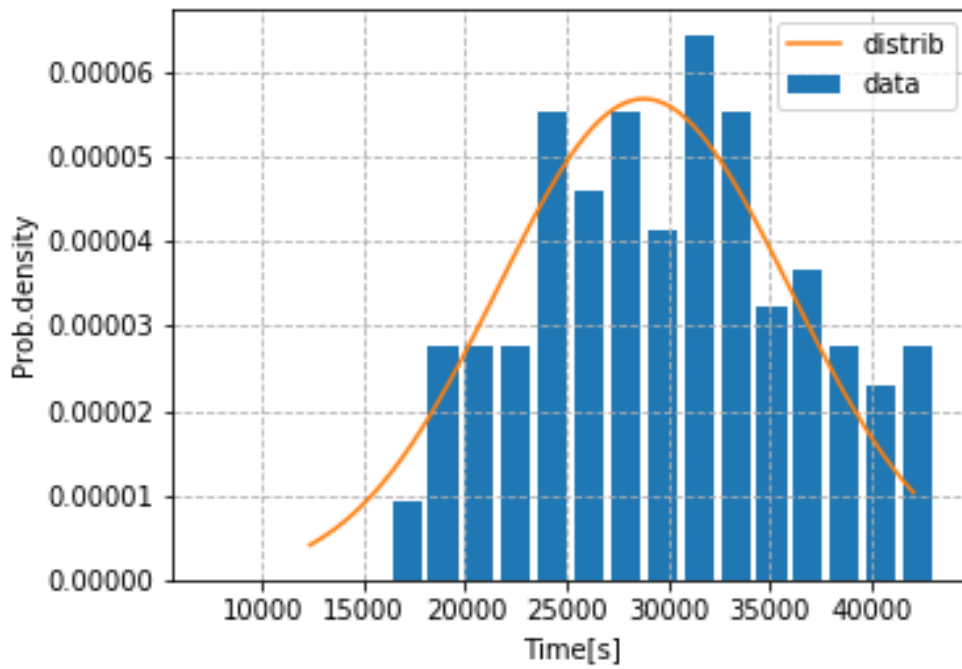


図 3.2.1-3 非常用 AC 電源の回復時間の確率密度分布

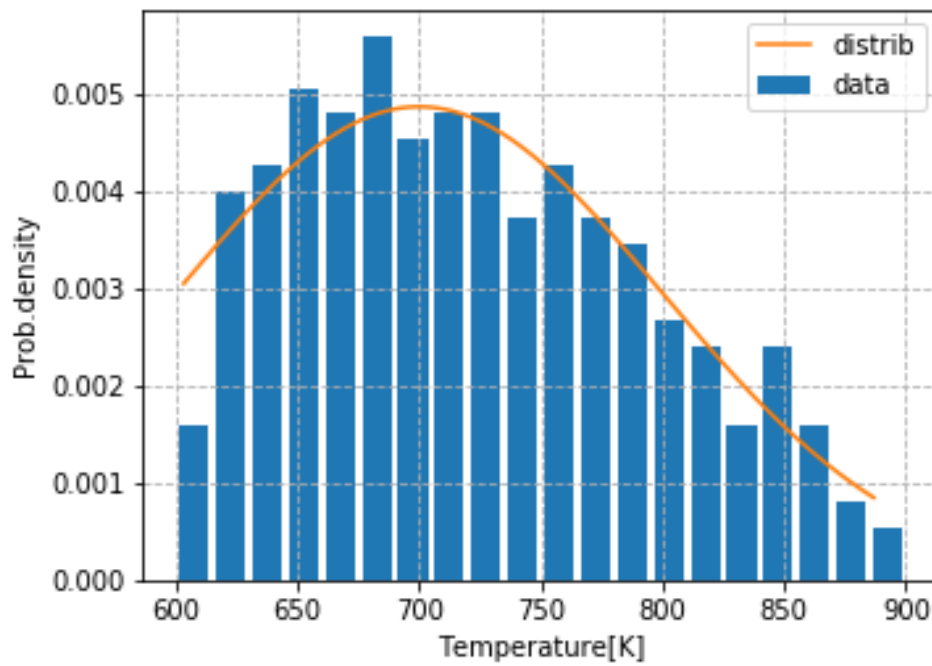


図 3.2.1-4 逃し安全弁の熱的故障発生温度の確率密度分布

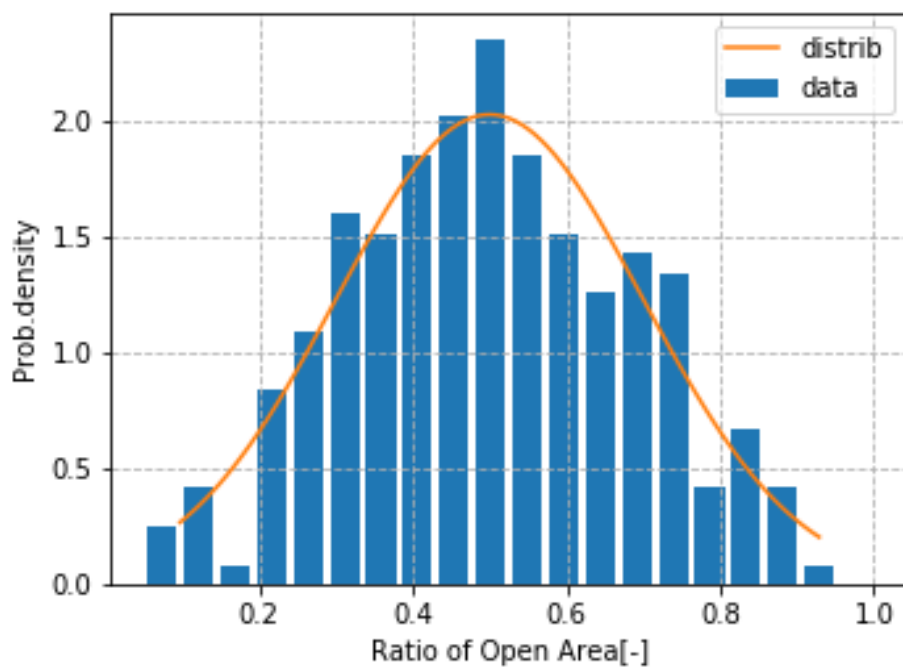


図 3.2.1-5 熱的故障発生時のバルブ開放率の確率密度分布

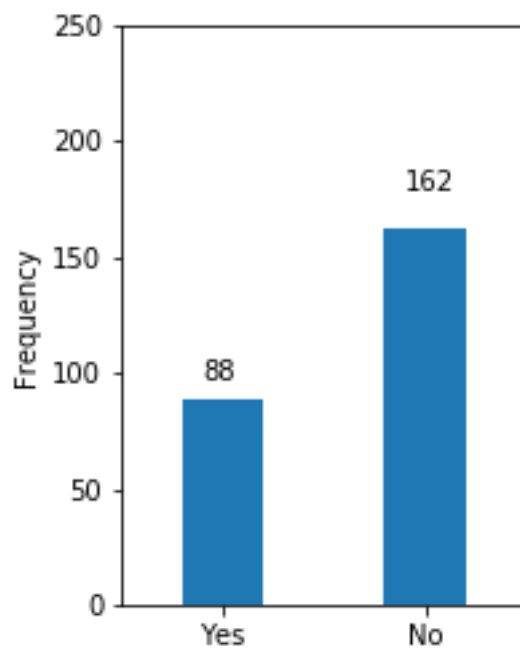


図 3.2.1-6 逃し安全弁の閉失敗故障発生の有無の度数分布

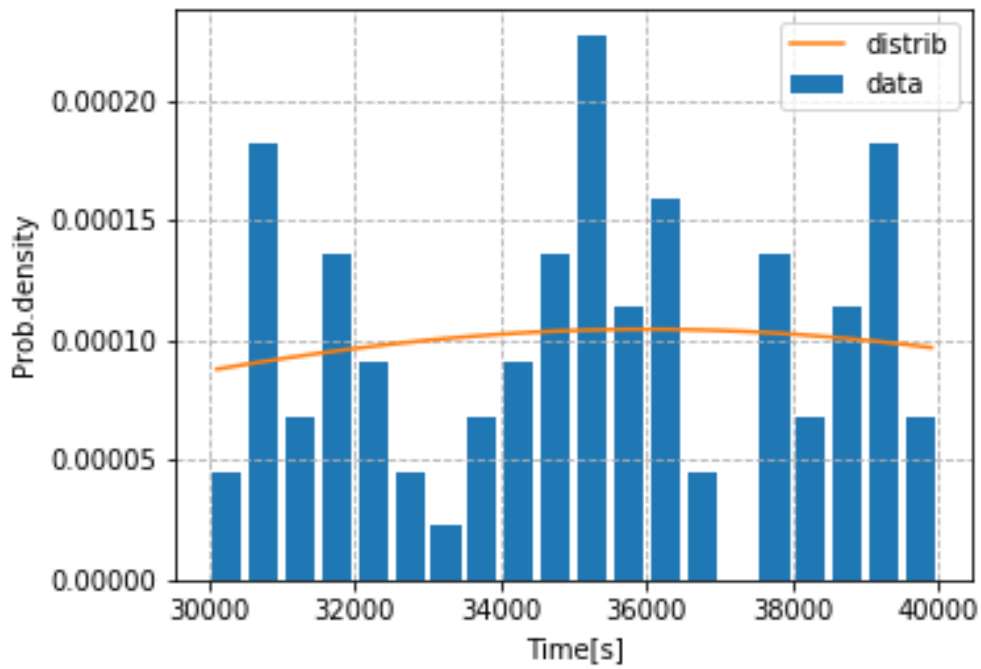


図 3.2.1-7 逃し安全弁の閉失敗故障発生時の発生時刻の確率密度分布

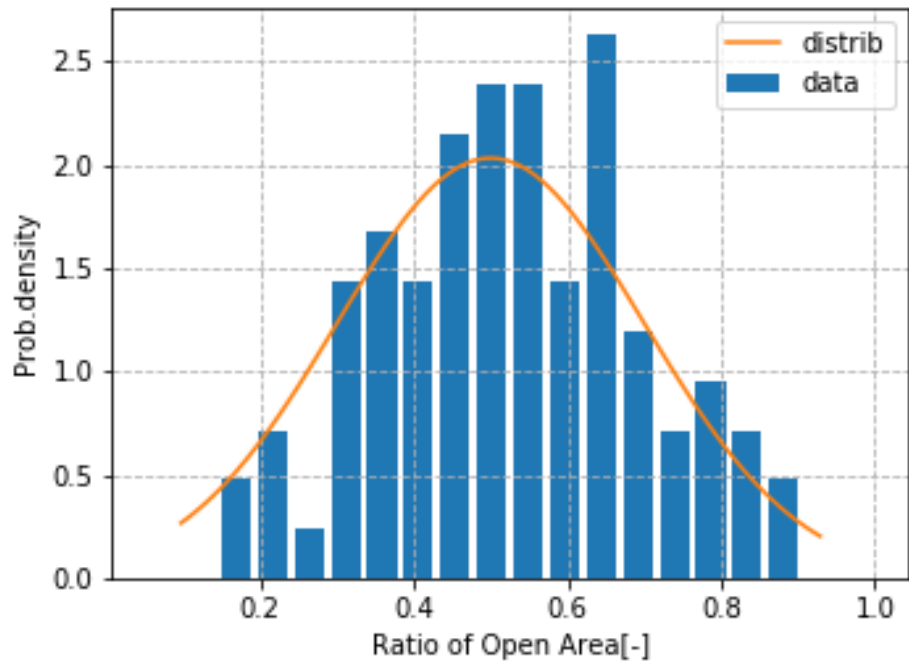


図 3.2.1-8 逃し安全弁の閉失敗故障発生時のバルブ開放率の確率密度分布

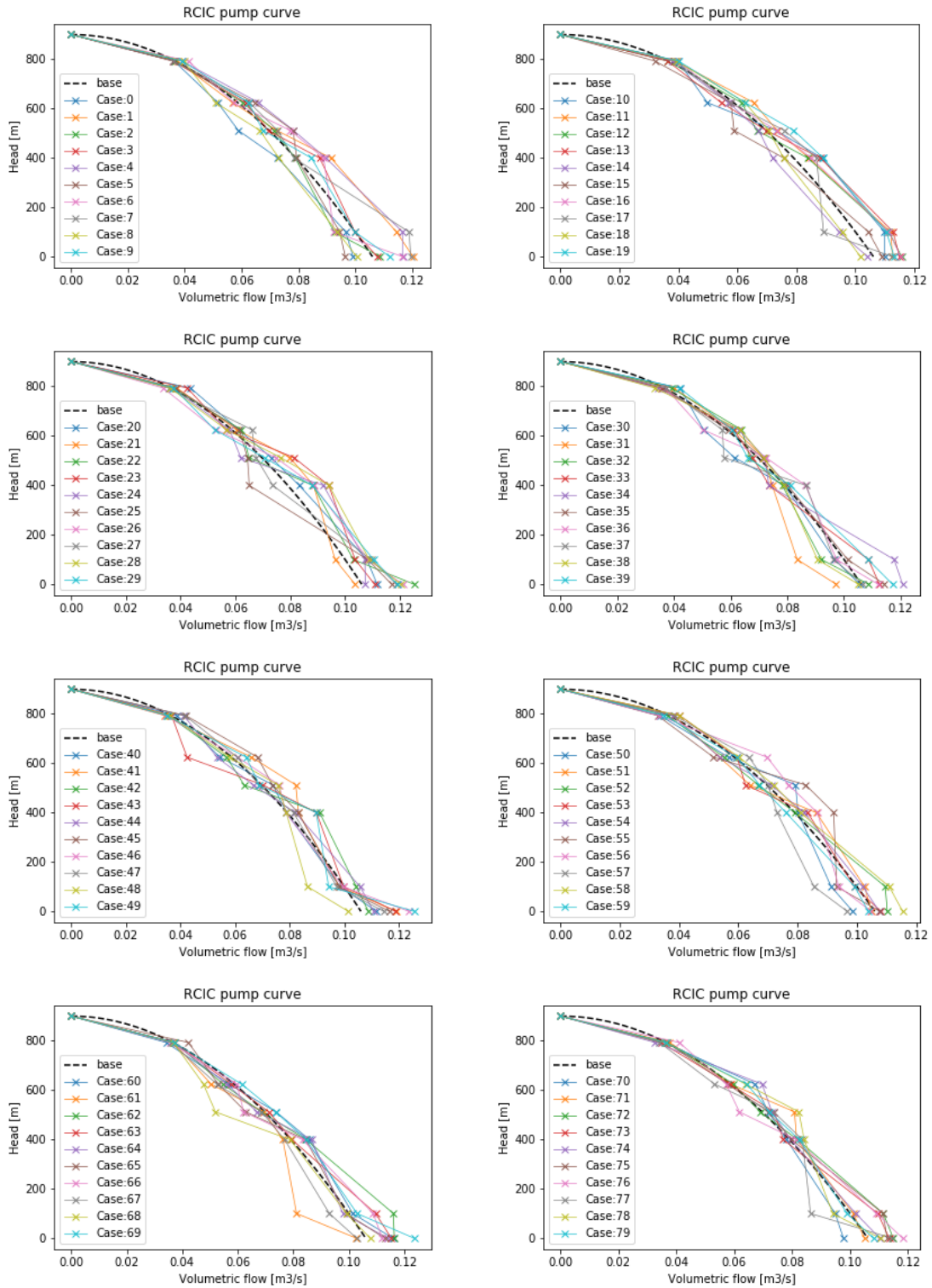


図 3.2.1-9 各解析ケース（合計 250 ケース）における RCIC のポンプ特性のサンプリング結果（1/4）

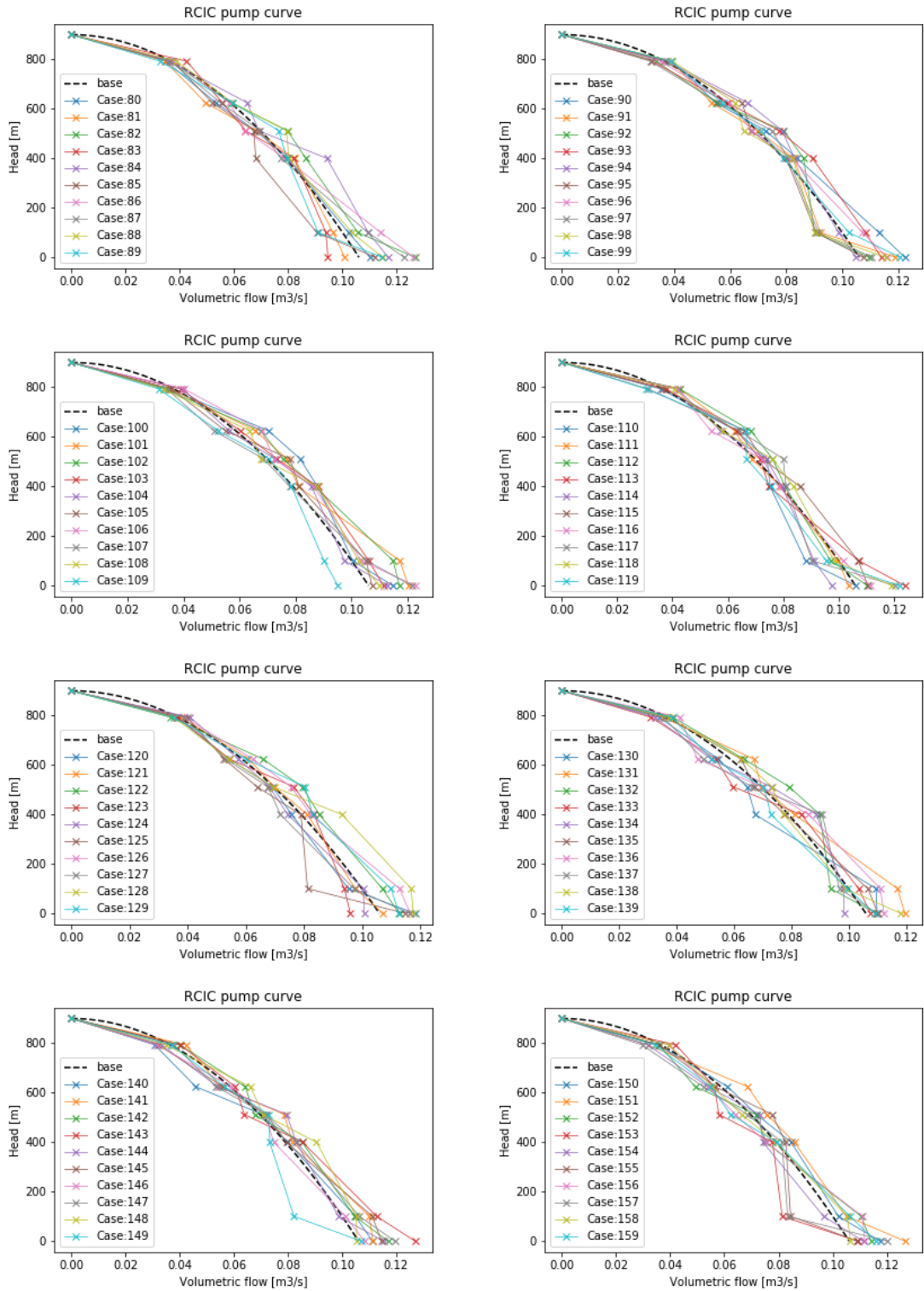


図 3.2.1-10 各解析ケース (合計 250 ケース) における RCIC のポンプ特性のサンプリング結果 (2/4)

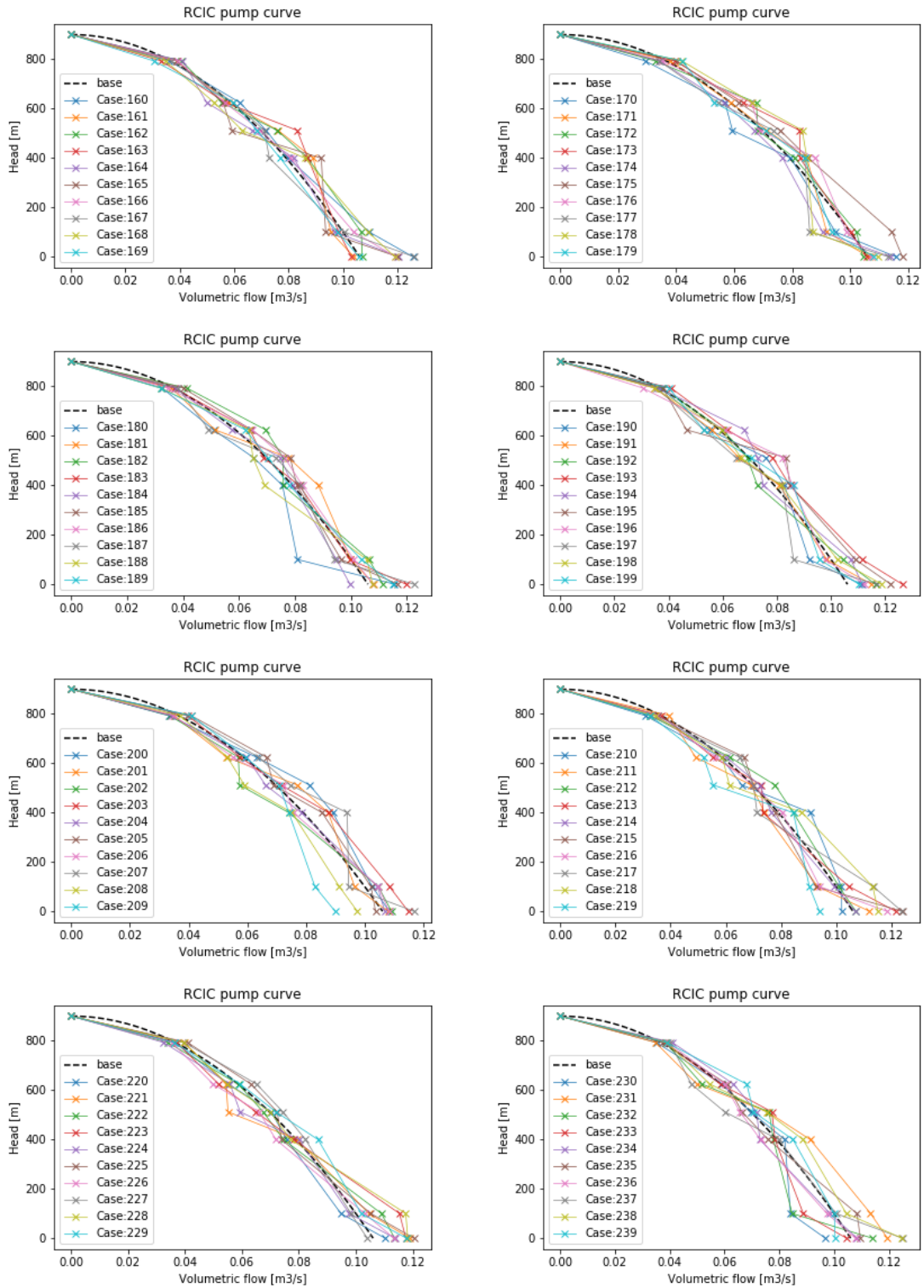


図 3.2.1-11 各解析ケース (合計 250 ケース) における RCIC のポンプ特性のサンプリング結果 (3/4)



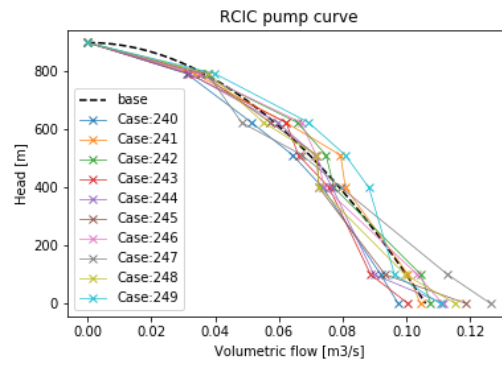


図 3.2.1-12 各解析ケース（合計 250 ケース）における RCIC のポンプ特性のサンプリング結果（4/4）

### 3.2.2. 解析時間の効率化

DPRA 解析では、非常に多くのケースの解析を実行する必要があるとともに、Apros で は 1 解析当たりの解析時間が長い。そのため、解析時間を短縮するように効率化を行った。レベル 1 確率論的リスク評価では、評価対象は炉心損傷の頻度である。本解析では、燃料被覆管最高温度 (MCT:Maximum Cladding Temperature) が 1200°Cに達したら炉心が損傷したとみなし、炉心損傷の判定基準とする。そのため、DC 電源の枯渇時間や AC 電源の回復時間などから、この判定基準に達することが判断できる事故シーケンスに対しては、解析を実施しないようにし、MCT が 1200°Cに達した時点で解析を終了するようにした。

図 3.2.2-1 は、DPRA 解析を行う前に、事前の検証計算を行った結果であり、DC 電源枯渇時間に対する DC 電源枯渇後 MCT が 1200°Cに達するまでの時間を示した図である。例えば、DC 電源枯渇時間が 4 時間の場合、DC 電源枯渇後 2.4 時間で MCT が 1200°Cに達したことが分かる。この検証結果より、DC 電源が枯渇して 5 時間以降に AC 電源が回復する場合は、AC 電源が回復する前に MCT が 1200°Cに達するとみなし、解析を実施しない (DC 電源枯渇時間が 6 時間の場合、1200°Cに達する時間が 2.8 時間で最長となるが、検証結果をそのまま適用するのではなく、ある程度余裕を持たせて“5 時間”という設定にしている)。ただし、この検証では逃し安全弁 (SRV: Safety Relieve Valve) の故障が無い場合を対象にしているので、SRV が故障する場合は、この適用範囲であっても解析を実施した。SRV の熱的故障に関しては、MCT が 1200°Cに達した時点での SRV の温度は 750K よりも低い (図 3.2.2-1 参照)。そのため、故障発生温度が 750K 以上であれば、SRV が熱的故障に至る前に MCT が 1200°Cを越えて解析が終了するので、解析を実施しないこととした。

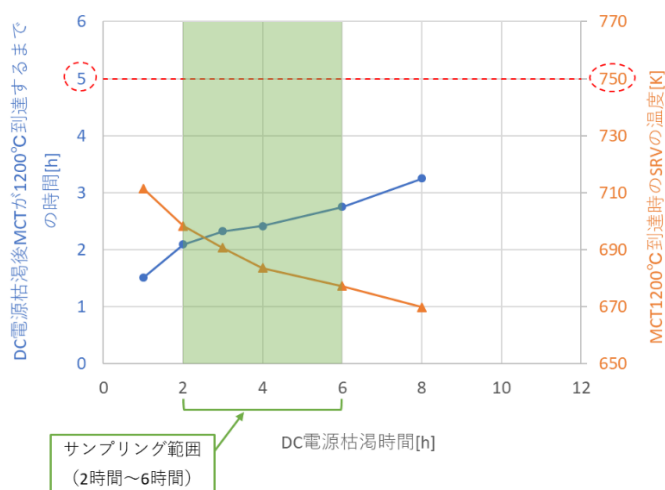


図 3.2.2-1 DC 電源枯渇後 MCT が 1200°Cに達するまで時間と MCT が 1200°Cに到達時の SRV の温度

RAPID で生成した 250 ケースの事故シーケンスに対して、解析を実施する必要のない条件である DC 電源枯渇後に 5 時間以上 AC 電源が復旧せず SRV が故障しない解析ケースは、41 ケース生成された。そのため、残りの 209 ケースについて実際に解析を行った。

さらに、解析を実施する事故シーケンスに対しても、炉心損傷の判定基準に達した時点で解析を終了して、解析時間を短縮するようにした。Apros Profile の SCL コマンドには、fork という条件分岐を生成するコマンドがあり、図 3.2.2-2 のような記述を加えることで、MCT が 1200°C に達した時点で解析を終了させることができる。

```
fork mdo
  waitUntil mdo
    val <- get "HOTCH_XA86#ANALOG_VALUE"
    return (val >= upperLimMCT)
  execProc(¥_ -> print "MCT is over limit.")
  ael "io close IS_PATO"
stop
```

図 3.2.2-2 MCT が 1200°C に達した際に計算を終了する SCL コマンド

ここで、“HOTCH\_XA86#ANALOG\_VALUE”は Apros のモデルにおける MCT である。また、“upperLimMCT”はユーザーが指定する炉心損傷判断の変数であり、値を 1200 に設定した。

### 3.2.3. 解析結果

解析を実施した 209 ケースの主要な解析結果を以下に示す。全 250 解析ケースに対して、0 から 249 までのケース番号が振られているが、解析結果に示されていないケース番号は、解析対象としなかった 41 ケースに該当する。

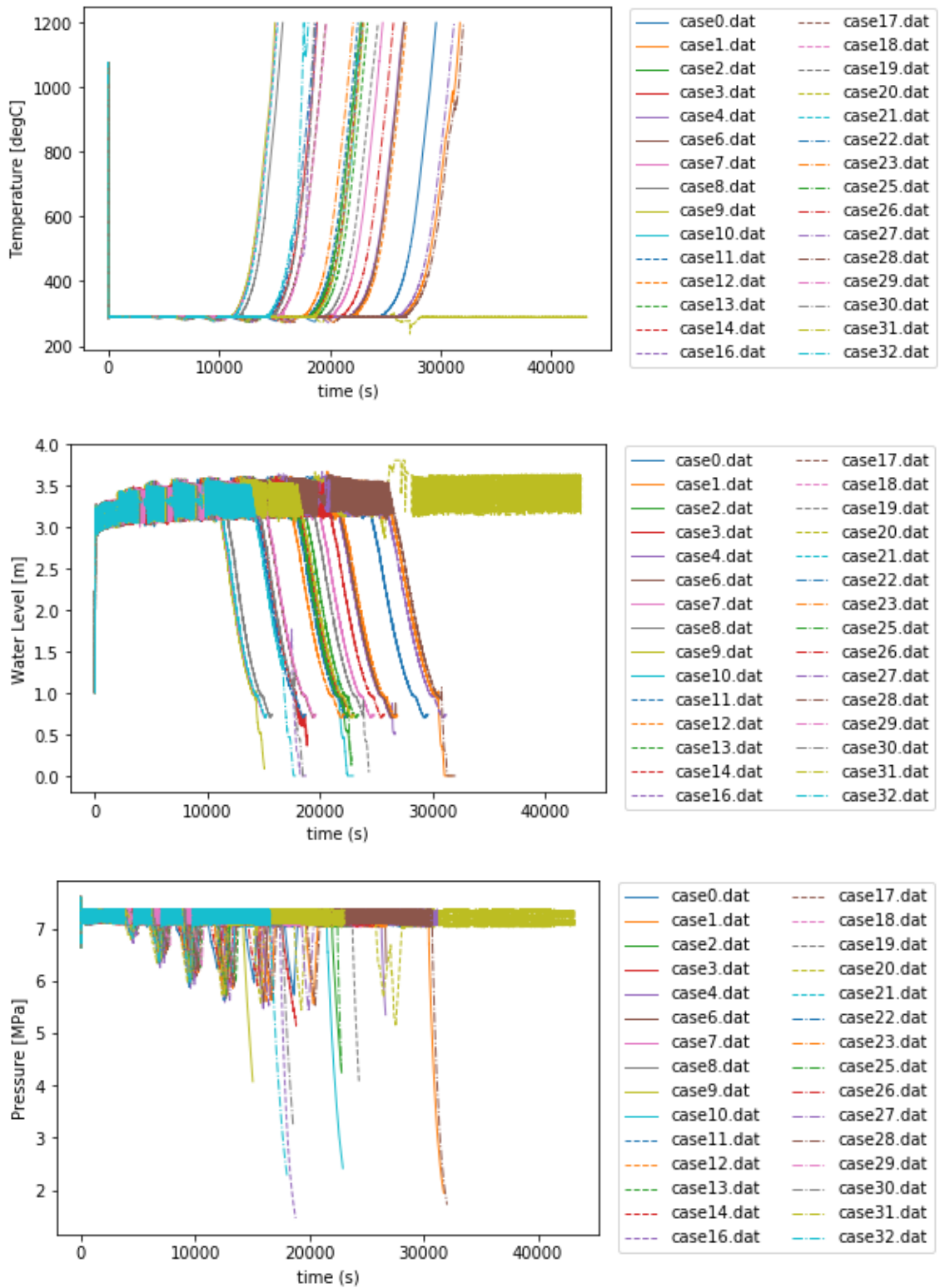


図 3.2.3-1 Case0 から Case32 までの結果 (上 : MCT、中 : 炉心部水位、下 : 原子炉圧力)

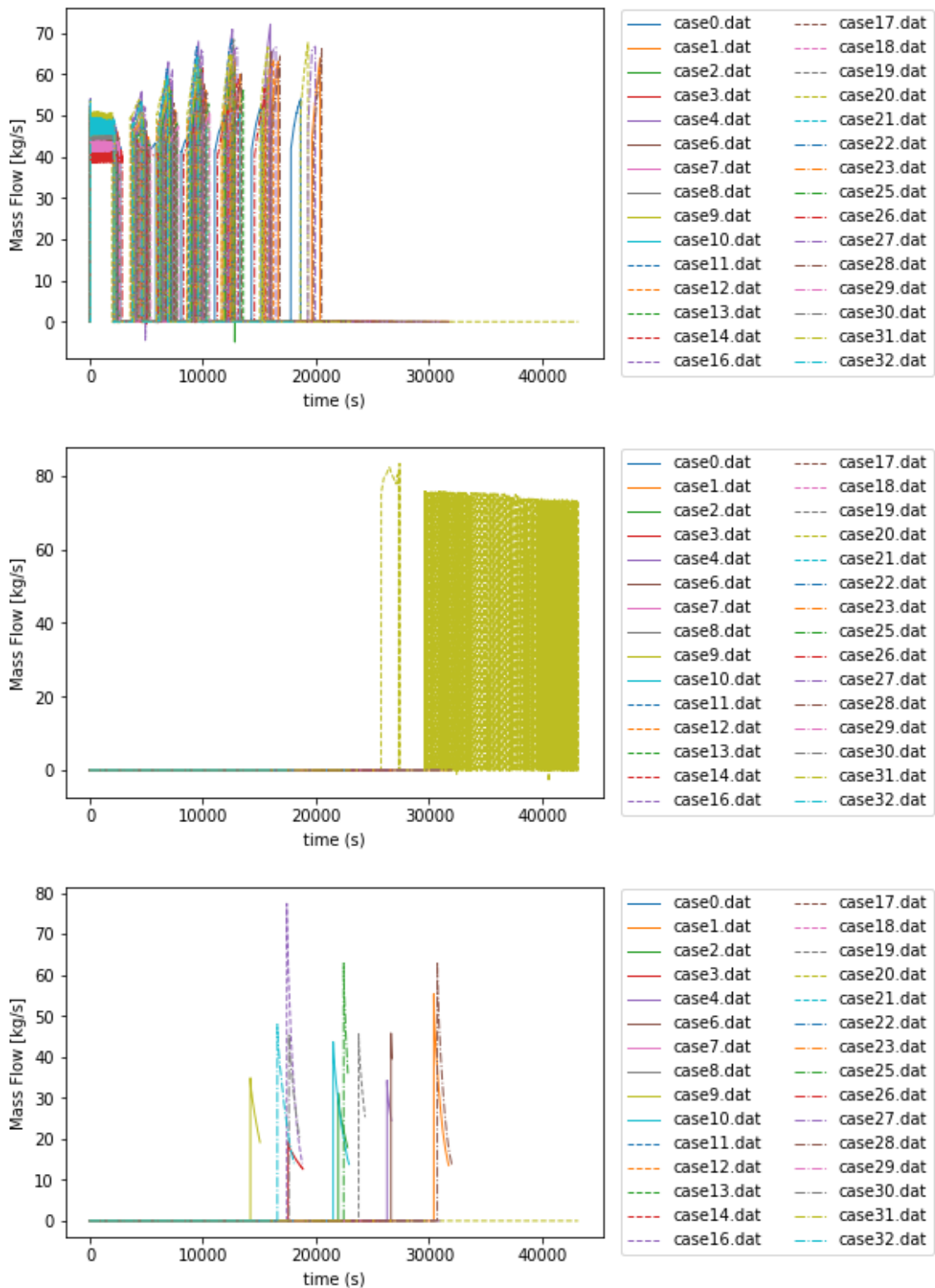


図 3.2.3-2 Case0 から Case32 までの結果 (上 : RCIC 注入量、中 : HPCS 注入量、下 : 熱的故障する SRV の流量)

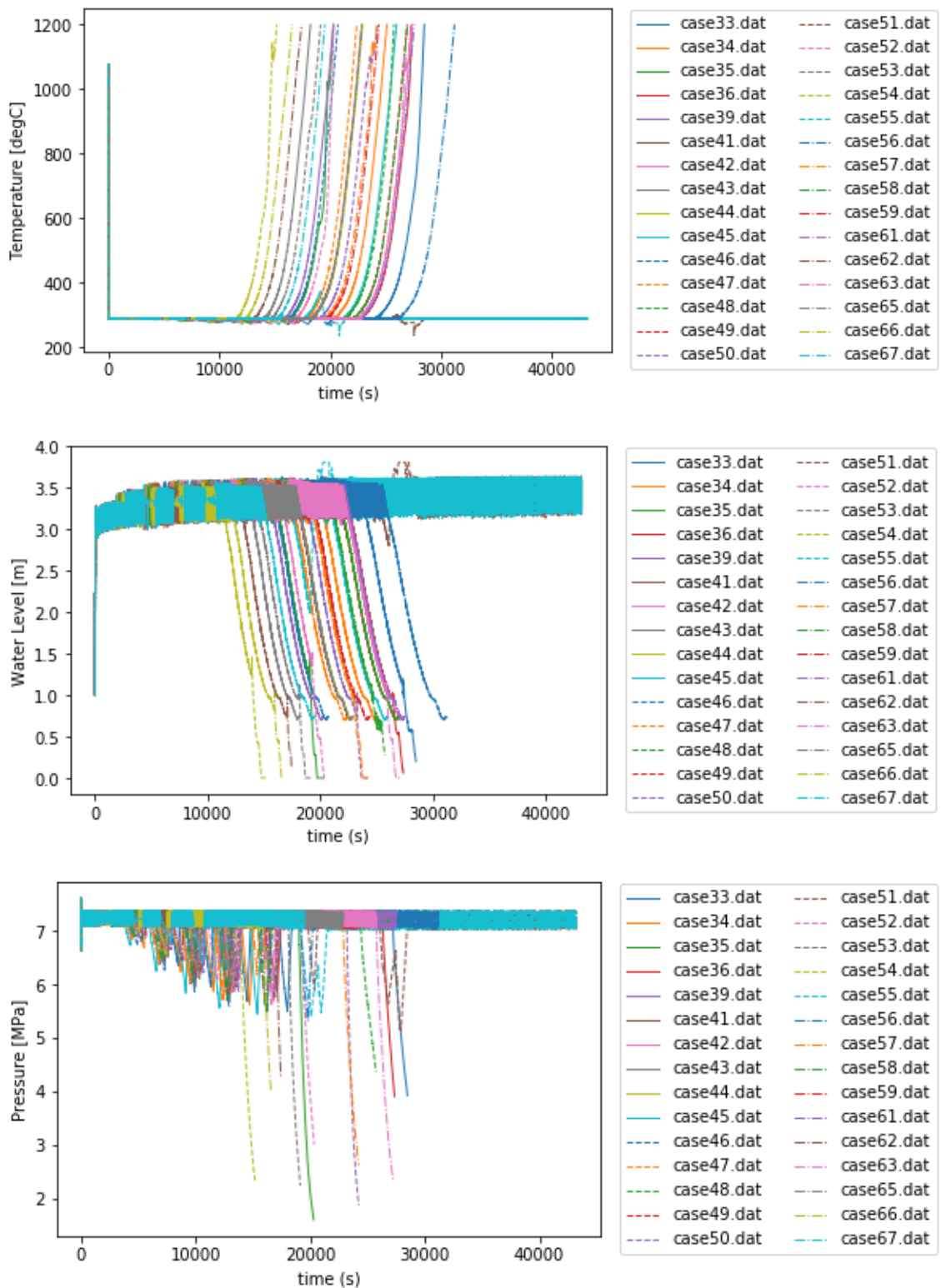


図 3.2.3-3 Case33 から Case67 までの結果 (上 : MCT、中 : 炉心部水位、下 : 原子炉 圧力)

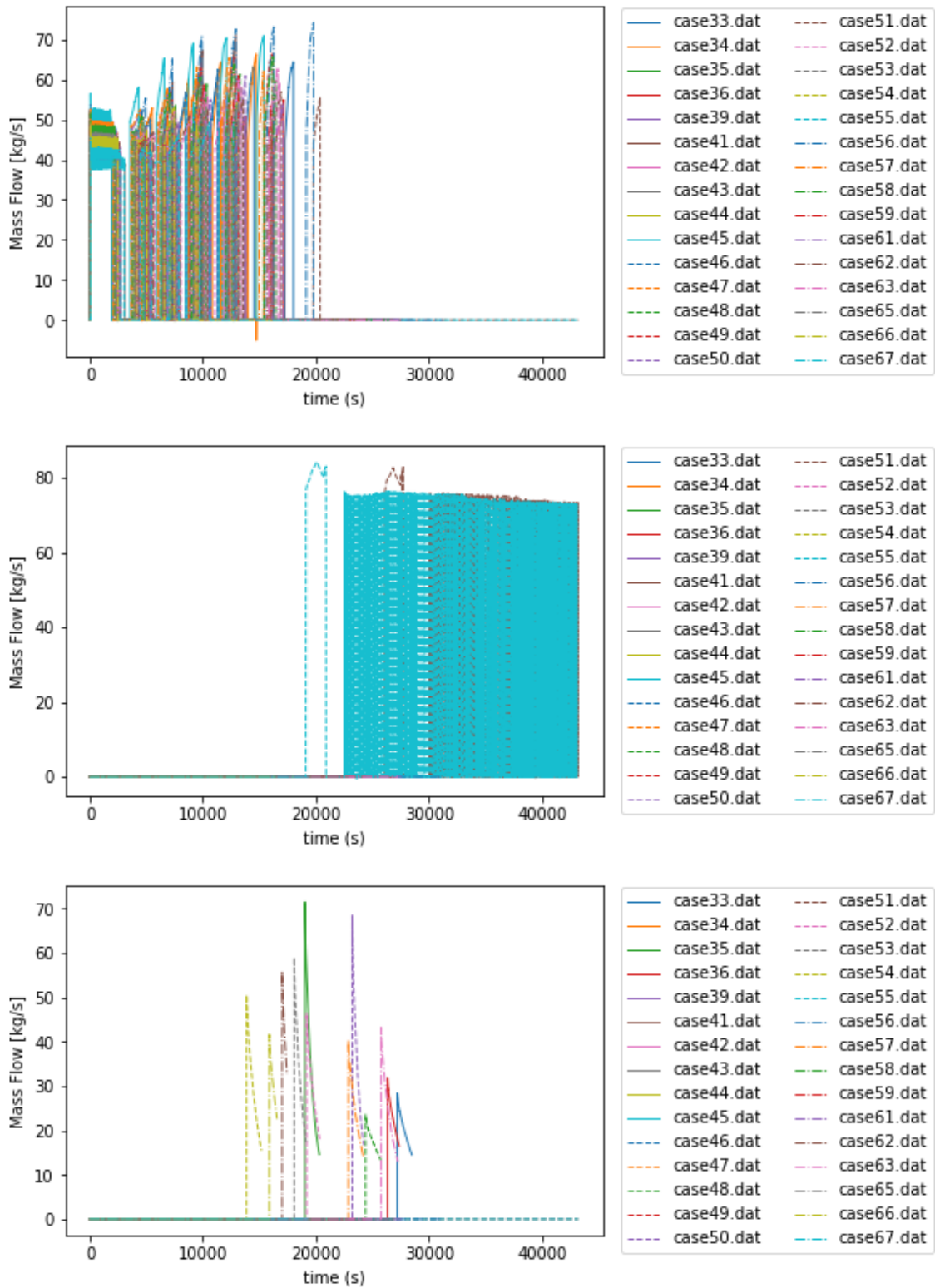


図 3.2.3-4 Case33 から Case67 までの結果 (上 : RCIC 注入量、中 : HPCS 注入量、下 : 熱的故障する SRV の流量)

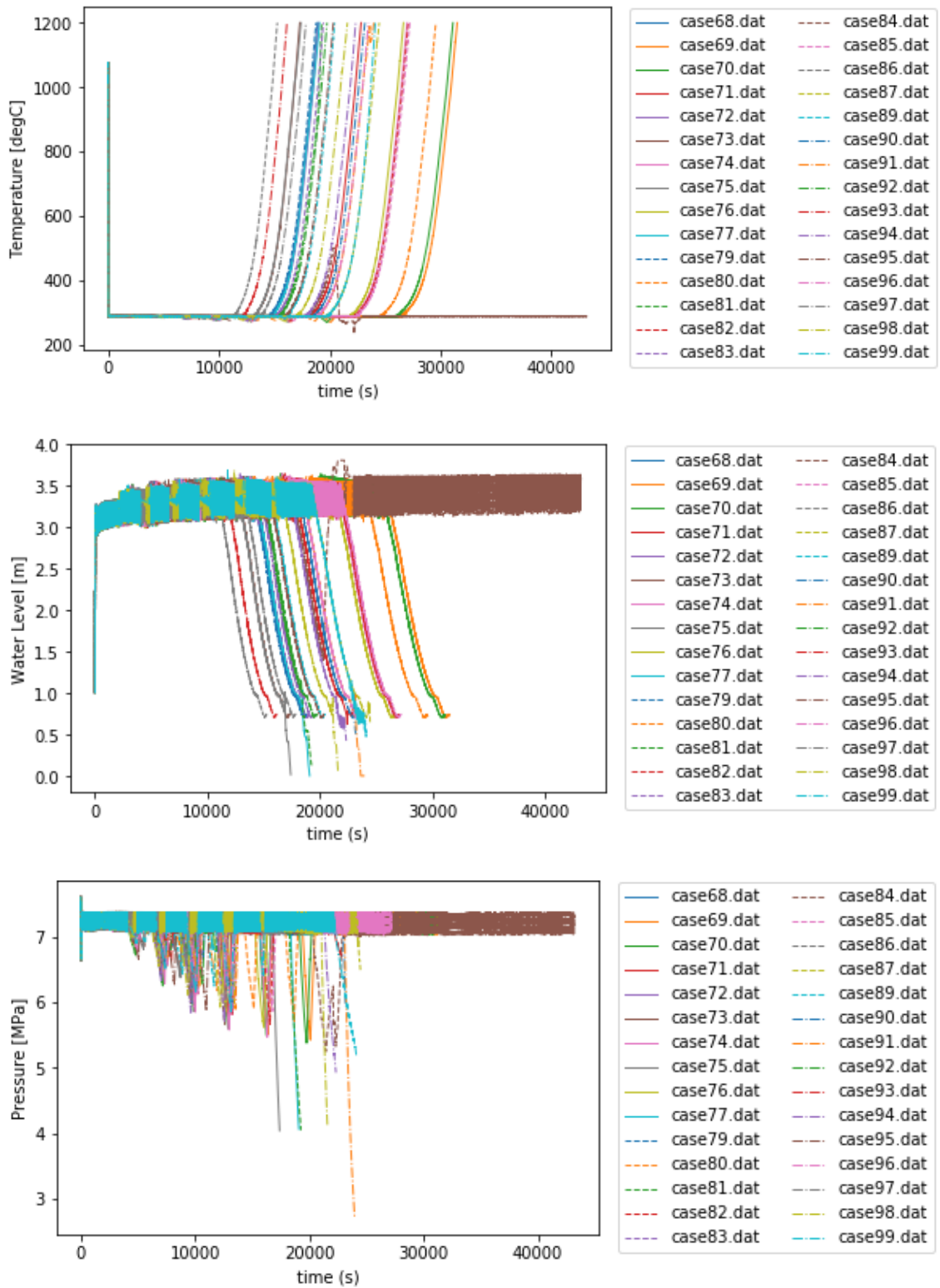


図 3.2.3-5 Case68 から Case99 までの結果 (上 : MCT、中 : 炉心部水位、下 : 原子炉 圧力)



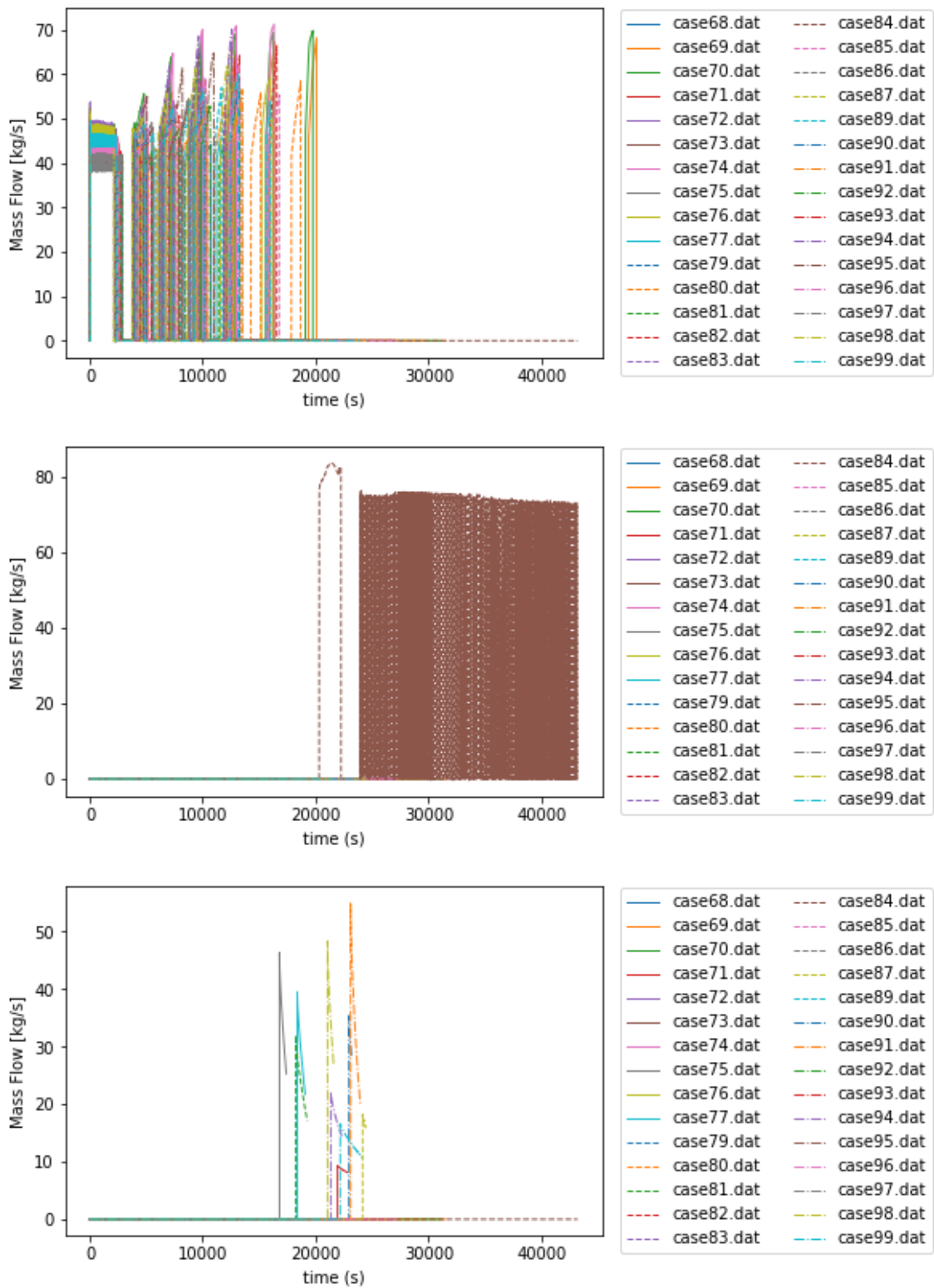


図 3.2.3-6 Case68 から Case99 までの結果 (上 : RCIC 注入量、中 : HPCS 注入量、下 : 熱的故障する SRV の流量)

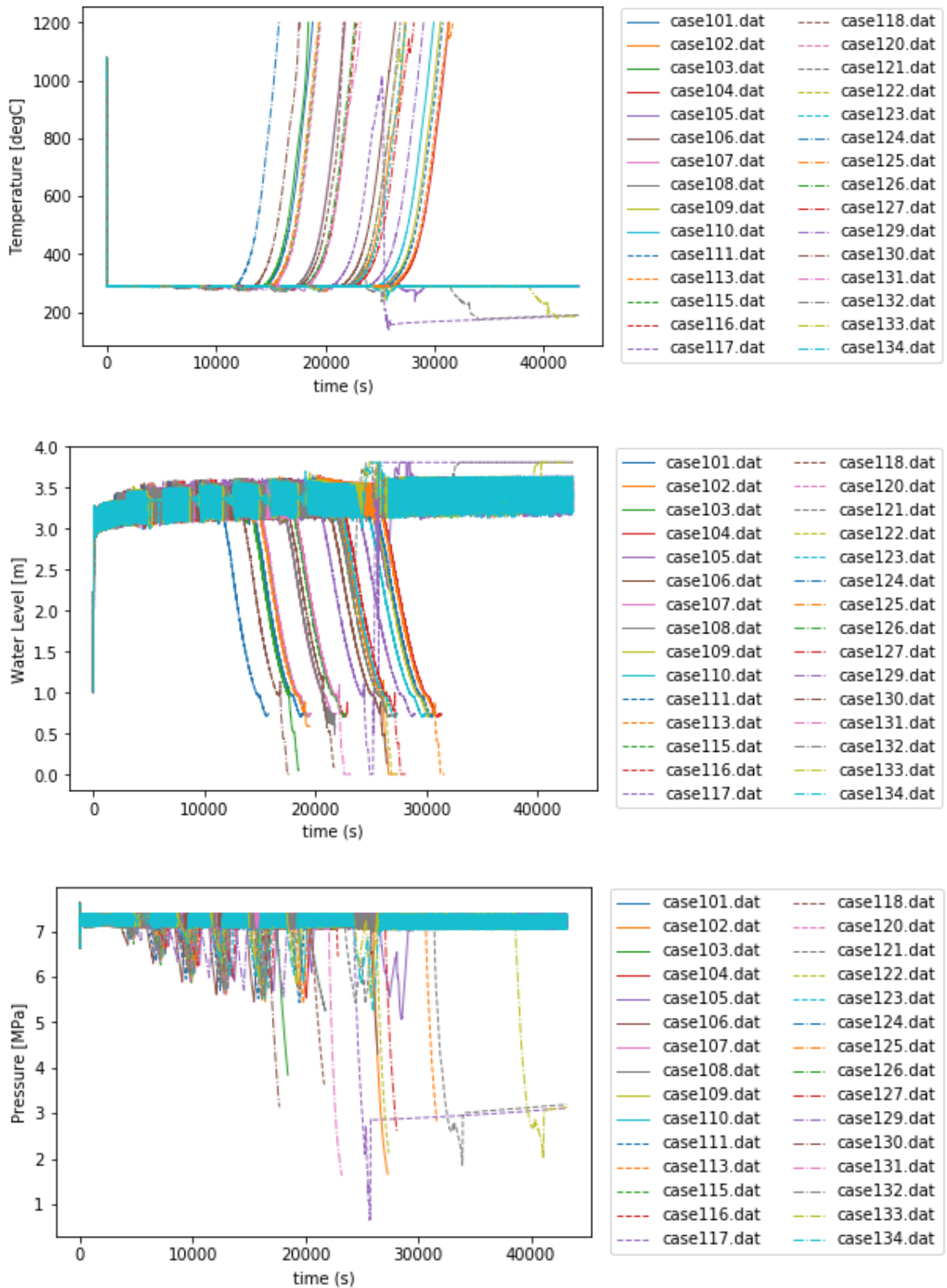


図 3.2.3-7 Case101 から Case134 までの結果 (上 : MCT、中 : 炉心部水位、下 : 原子炉圧力)

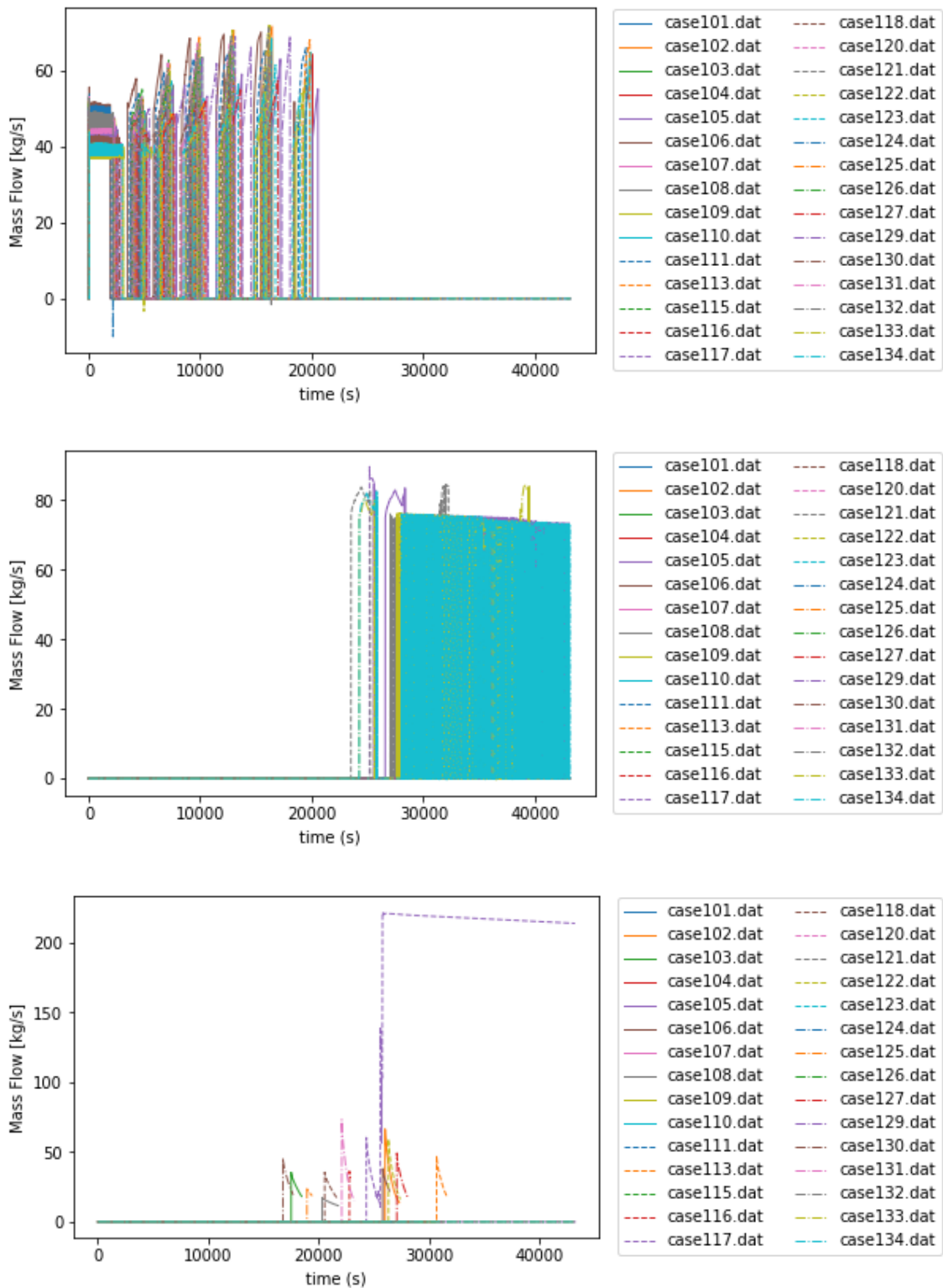


図 3.2.3-8 Case101 から Case134 までの結果（上：RCIC 注入量、中：HPCS 注入量、下：熱的故障する SRV の流量）

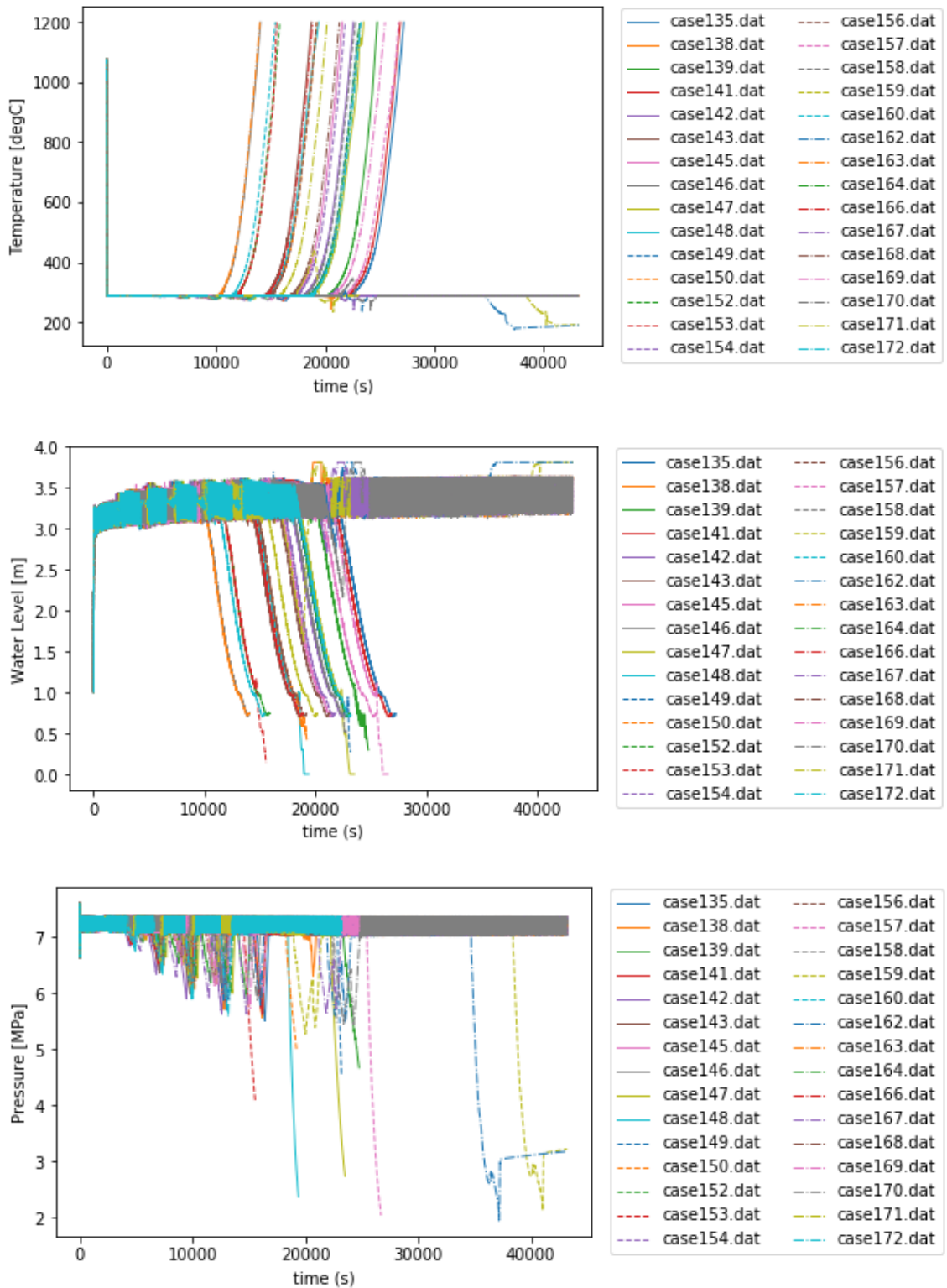


図 3.2.3-9 Case135 から Case172 までの結果（上：MCT、中：炉心部水位、下：原子炉圧力）

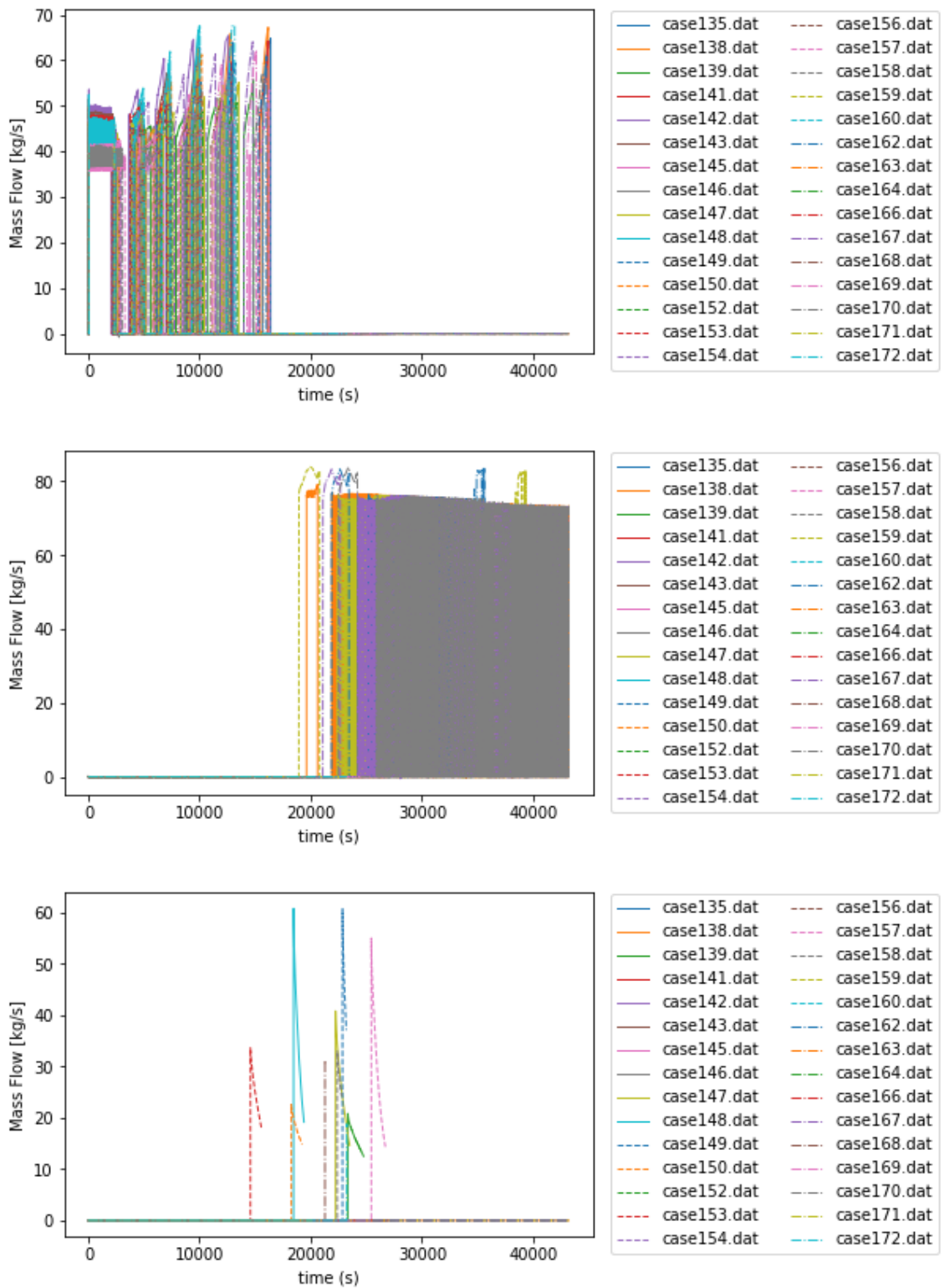


図 3.2.3-10 Case135 から Case172 までの結果（上：RCIC 注入量、中：HPCS 注入量、下：熱的故障する SRV の流量）

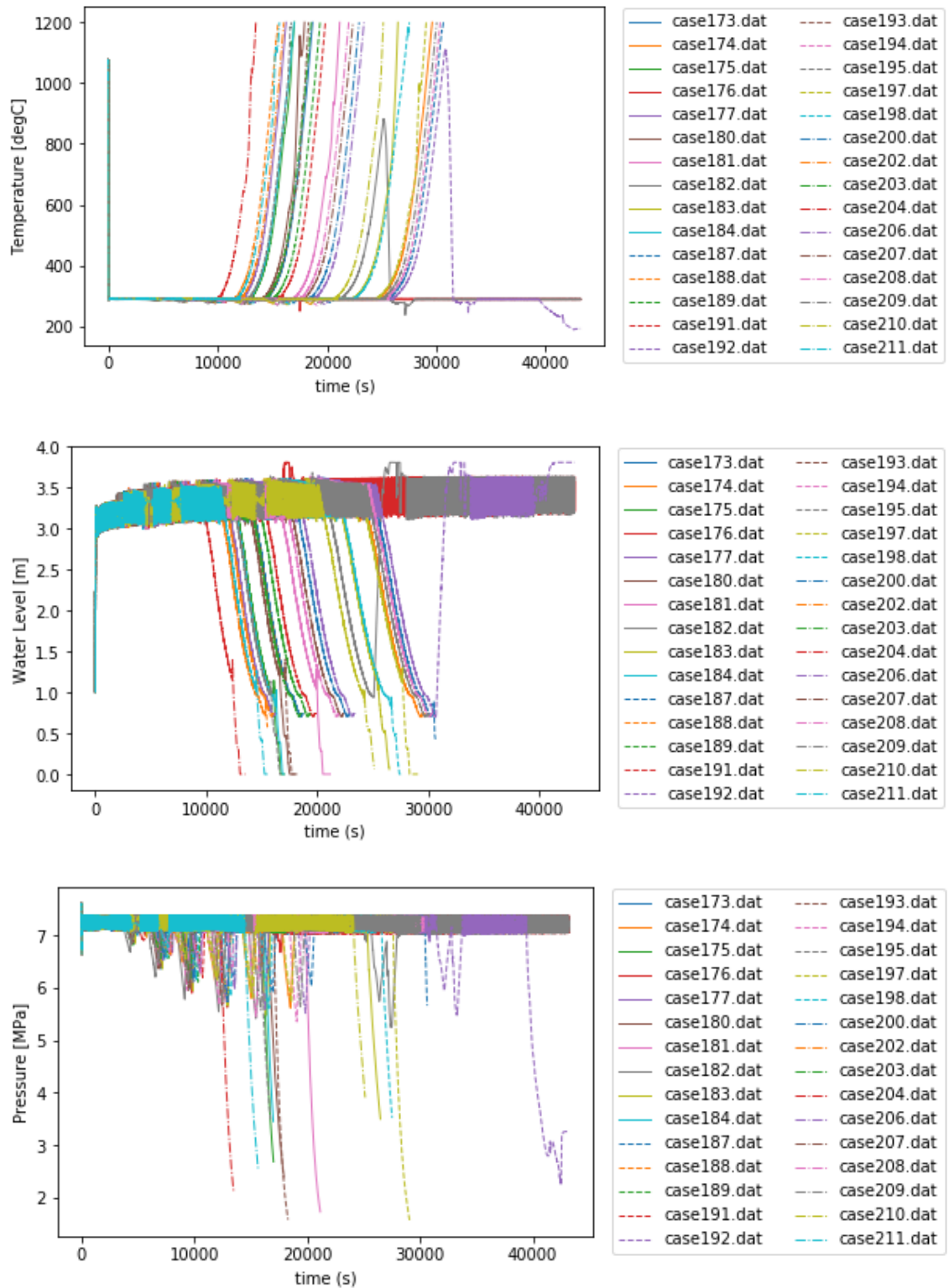


図 3.2.3-11 Case173 から Case211 までの結果（上：MCT、中：炉心部水位、下：原子炉圧力）

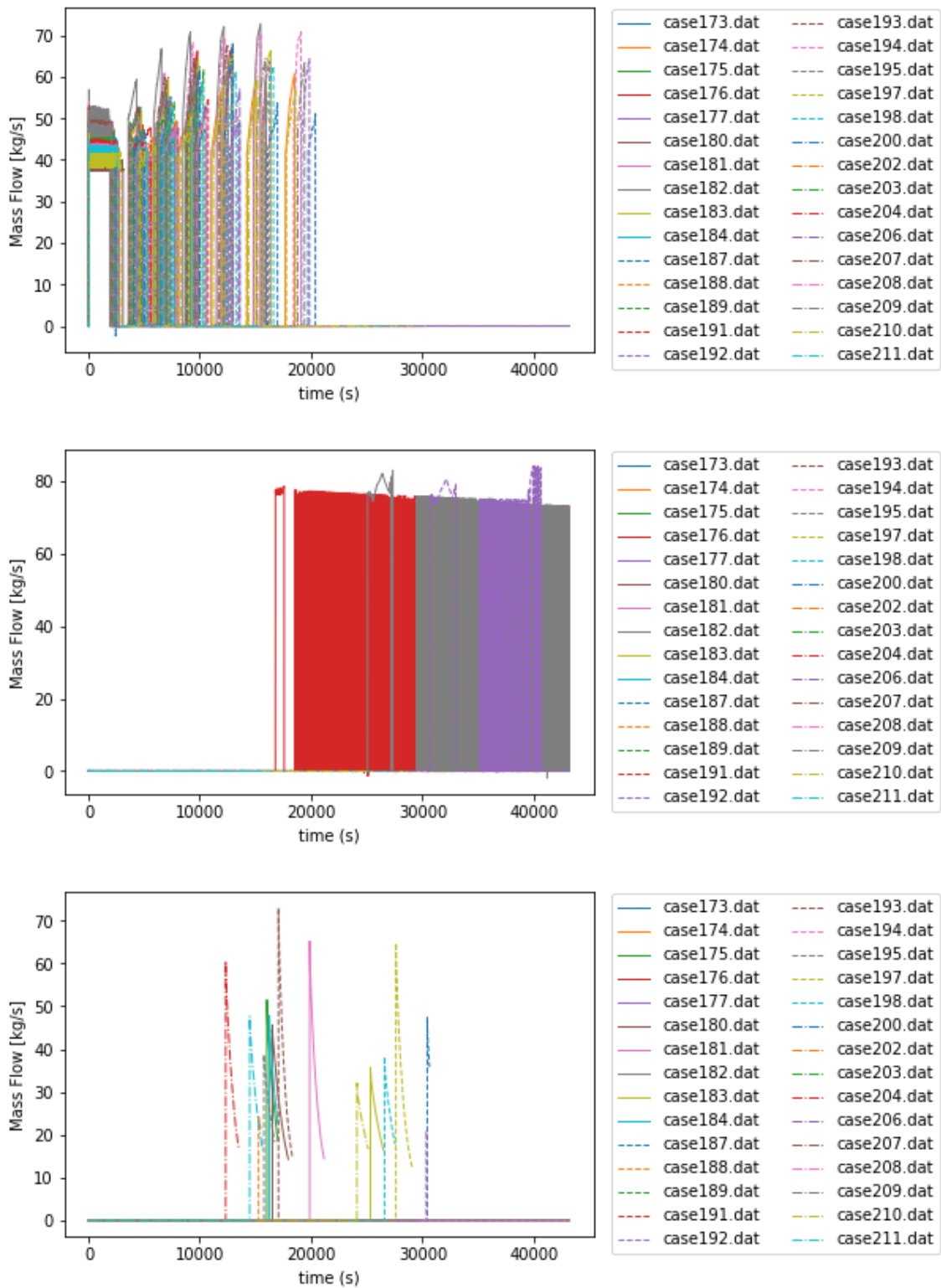


図 3.2.3-12 Case173 から Case211 までの結果（上：RCIC 注入量、中：HPCS 注入量、下：熱的故障する SRV の流量）

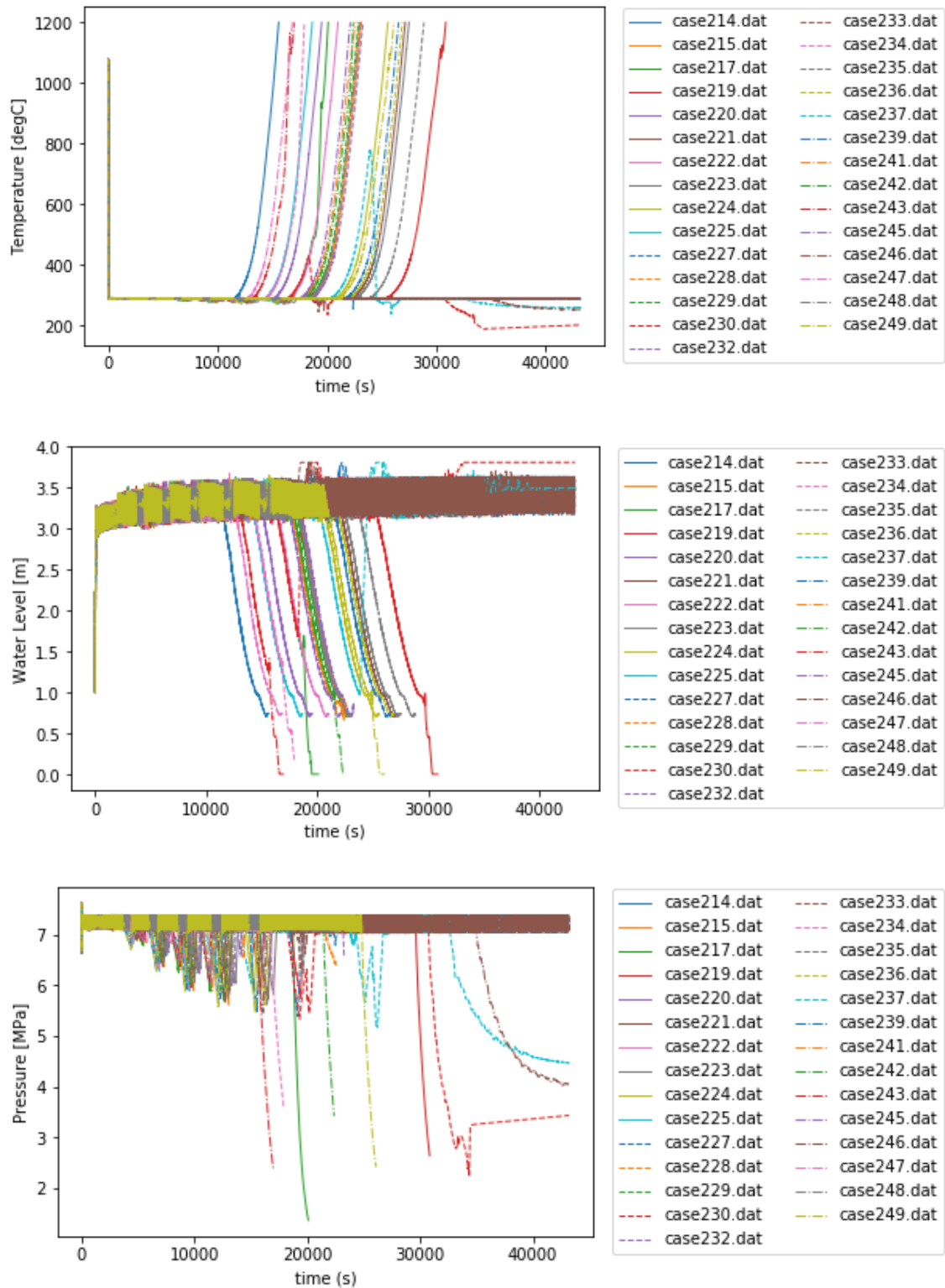


図 3.2.3-13 Case214 から Case249 までの結果（上：MCT、中：炉心部水位、下：原子炉圧力）



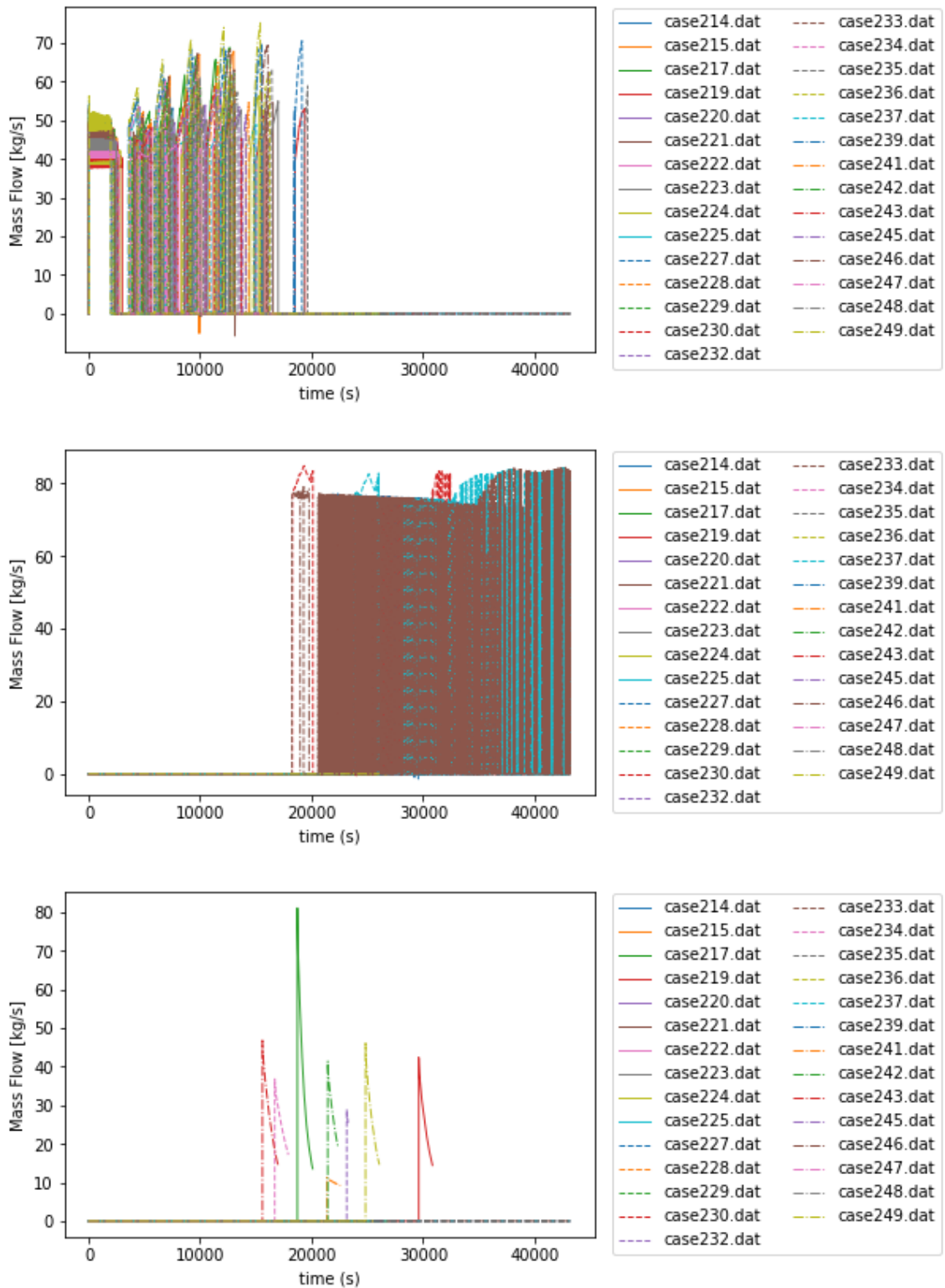


図 3.2.3-14 Case214 から Case249 までの結果 (上 : RCIC 注入量、中 : HPCS 注入量、下 : 熱的故障する SRV の流量)

### 3.2.4. 事故シーケンスのグループ化

解析を実施した 209 ケースの解析結果をもとに、事故シーケンスの分類を行う。レベル 1 確率論的リスク評価の観点より、炉心が損傷するかどうか最も注目すべき点である。3.2.2 節でも述べたように、燃料被覆管最高温度（MCT: Maximum Cladding Temperature）が 1200°C に達したら炉心が損傷したとみなし、炉心損傷の判定基準とする。MCT の解析結果を見ると、大きく分けて以下の 3 つのグループに分けることができる。

グループ①：炉心損傷に至らないもの

グループ②：MCT が単調増加して、炉心損傷に至るもの

グループ③：MCT の上昇が途中で一旦おさまり、再度上昇して炉心損傷に至るもの

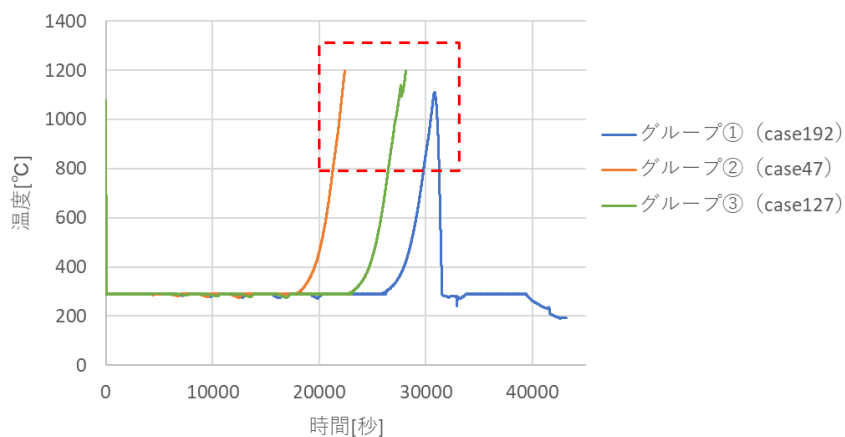


図 3.2.4-1 各グループの代表ケースの MCT の時間変化

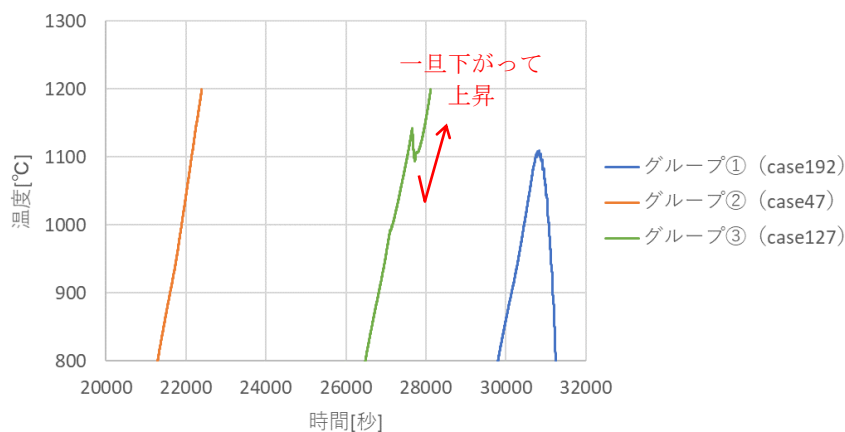


図 3.2.4-2 図 3.2.4-1 の赤破線部の拡大図

グループ①では、DC 電源枯渇後、AC 電源が回復して HPCS によって炉心が冷却されるため、炉心損傷には至らない (MCT が 1200°Cには達しない)。一方、グループ②、③では、AC 電源が回復する前に MCT が 1200°Cに達し、炉心損傷に至る。グループ①とグループ②、③を分ける主な要因は、DC 電源枯渇時間、および、DC 電源枯渇後の AC 電源の回復時間にあると考えられる。図 3.2.4-3 は、AC 電源の回復の事象を含んだケースにおいて、横軸に DC 電源の枯渇時間、縦軸に DC 電源枯渇後の AC 電源が回復するまでの時間を取り、各ケースの計算終了時間をカラープロットしたグラフである。

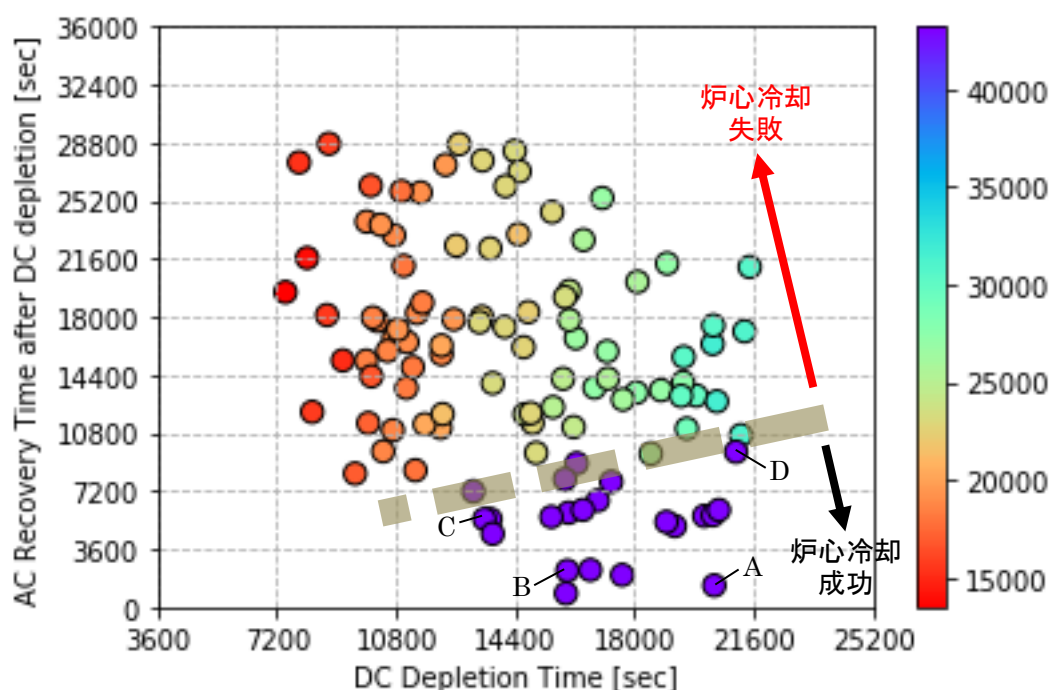


図 3.2.4-3 AC 電源回復の事象を含んだケースにおける計算終了時間のカラープロット

このグラフにおいて、紫色のプロットは計算終了時間の 12 時間 (=43200 秒) まで計算できたものであり、炉心損傷には至っていない。一方、紫色以外のプロットは計算終了時間の 12 時間より前に MCT が 1200°Cに達して、計算が途中で終了したケースである。これらのケースでは、AC 電源が回復する前に MCT が 1200°Cに達している。紫色のプロットは図の右下に集中しており、DC 電源の枯渇時間が遅く、AC 電源の回復時間が早いケースであることが分かる。中でも、より右下にある点 A や点 B のケースでは、MCT が上昇することなく、炉心冷却に成功している (図 3.2.4-4 参照)。一方、DC 電源の枯渇時間が早め (点 C) や AC 電源の回復が遅め (点 D) のケースでは、一旦 MCT が上昇してから炉心が冷却されている (図 3.2.4-4 参照)。炉心冷却に成功するかどうかの境界は、AC 電源

の回復時間が2～3時間のあたりに存在しそうであるが（図 3.2.4-3 の太い灰色破線）、本解析ではケース数が少なく、その境界を特定するのは難しい。

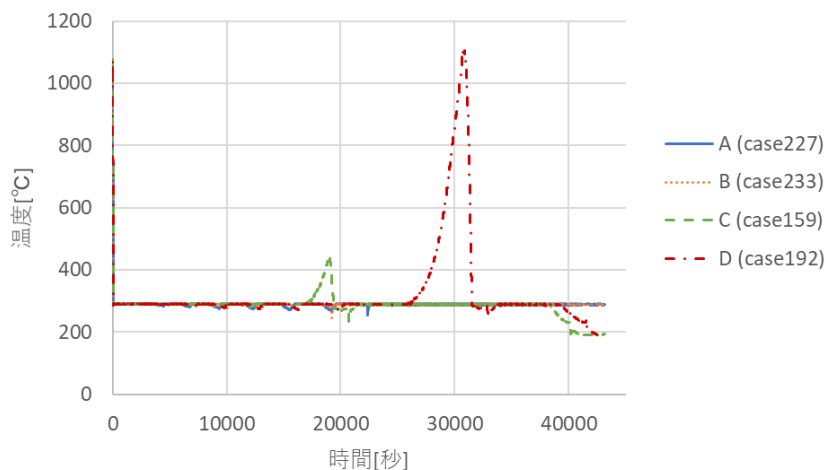


図 3.2.4-4 図 3.2.4-3 の点 A から点 D のケースにおける MCT の時間変化

サンプリングして得られた事故シーケンスに対して、成功／失敗などのある境界を効率的に探索する方法として、様々な手法が検討され、RAVEN に実装されているものがあることから、今後、これら手法を調査するとともに導入の検討についても検討を進める。以下、3つのケースの代表とした解析結果について考察する。

・グループ① (case192)

図 3.2.4-1 のグループ① (case192) において、40000 秒の手前で MCT が低下している。このケースでは、SRV の閉失敗故障が発生しており、故障発生後は SRV が弁の閉鎖信号を受けても、弁が閉じ切らずに開いたままになる。そのため、原子炉内の圧力は低下し、飽和温度に保たれていた炉内の冷却水の温度も低下する。

・グループ②とグループ③の差異について

グループ②とグループ③は共に、DC 電源枯渇後、AC 電源の回復が遅い（もしくは回復しない）ために、炉心からの崩壊熱によって MCT が上昇して 1200°C に至るケースである。そのため、炉心損傷するケースの多くはグループ②のように MCT は単調増加する。グループ③に属するケースの解析結果を調べると、

- SRV の熱的故障が発生している。

- SRV の熱的故障の発生により、炉心部の水位が急速に低下し、水位が 0m（炉心部の冷却水は空）に至る。
- 炉心部の水位が 0m の水位に達した直後に、MCT が低下し始める。

という特徴があることが分かった。図 3.2.4-5 と図 3.2.4-6 は、グループ③に属するケース 127 の熱的故障した SRV からの漏えい流量、原子炉圧力、MCT、炉心部水位を熱的故障発生タイミングで拡大して示した図である。

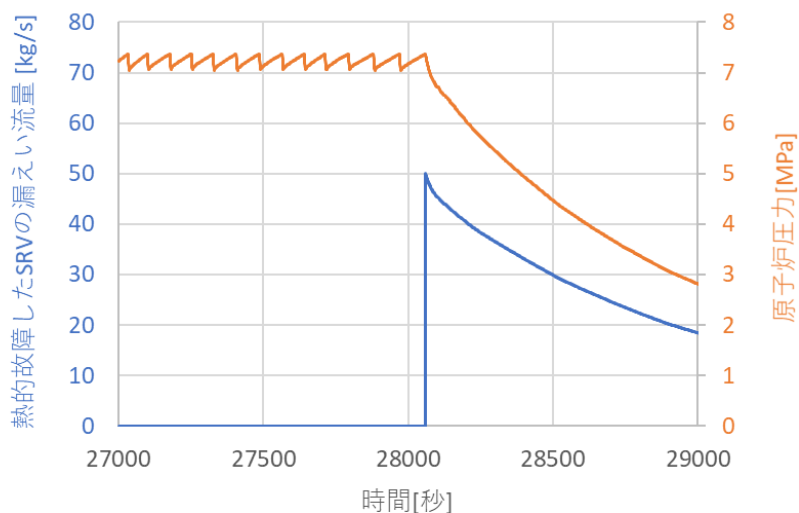


図 3.2.4-5 ケース 127 の熱的故障した SRV からの漏えい流量、原子炉圧力



図 3.2.4-6 ケース 127 の MCT、炉心部の水位

SRV の熱的故障は、28060 秒で発生する。熱的故障により SRV は開固着して、そこから冷却水が炉外へ流出し、炉内は減圧されていく。SRV が開いた直後と、炉内の減圧沸騰により、炉内の水位（蒸気を含む水位）は一瞬上昇するが、その後は SRV からの冷却水の漏えいにより、水位も低下していく。この時、減圧沸騰した水蒸気が炉心部を通過するため、炉心への冷却効果が働くが、MCT で見ると、上昇の傾きが若干小さくなる程度で減少するほどではない。やがて、炉心部水位は 0m になるが、その直後に MCT が低下しているのが分かる（28650 秒あたり）。

炉心部の水位が 0m になることと MCT の温度が低下することの因果関係を調査した結果、MCT を算出している Apros のモデルに起因することが分かった。本解析で利用した Apros の BWR モデルでは、MCT は炉心（Reactor モデル）からホットチャネルを抽出し、ホットチャネルのみの部分を模擬した Design Reactor モデルを用いて MCT を算出している。Design Reactor では炉内全てをモデル化するのではなく、炉心に接続された上部プレナム、下部プレナムのノードの物理量（圧力、ボイド率など）の値を反映したノードを境界条件として利用した簡易化したモデルで計算を行っている（図 3.2.4-7 参照）。

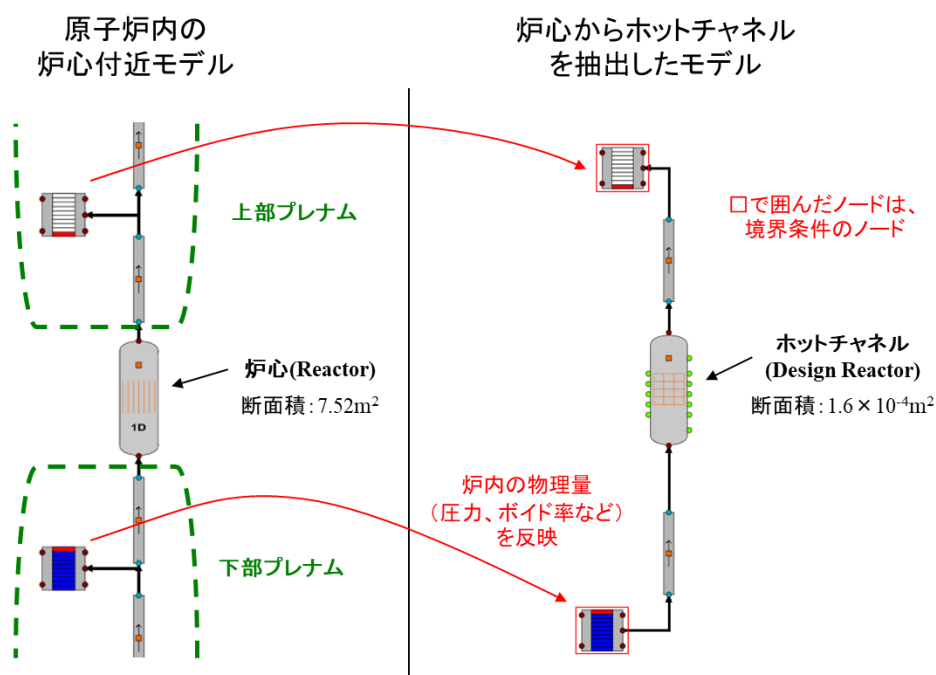


図 3.2.4-7 原子炉内の炉心付近のモデル（左）と炉心からホットチャネルを抽出したモデル（右）

一方、Reactor モデルにおいても、燃料棒の集合体全体を水平方向で平均化して、鉛直方向に対して燃料被覆管の最高温度を算出している。図 3.2.4-8 は、ホットチャネルにより算出した MCT と Reactor モデルにおいて燃料棒全体で平均化して算出した MCT である。

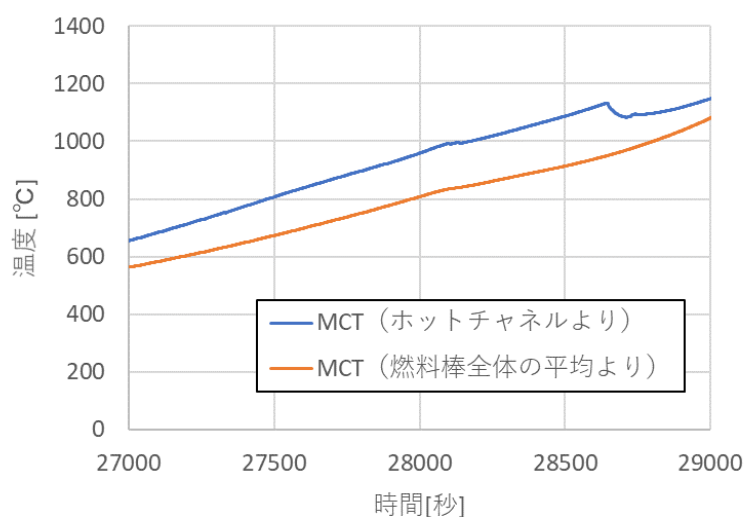


図 3.2.4-8 ホットチャネルにより算出した MCT と燃料棒全体で平均化して算出した MCT

このグラフより、ホットチャネルより算出した MCT は炉心部水位が 0m になった直後 (28650 秒) に低下しているものの、炉心モデルから算出した MCT は低下せず上昇し続けていることが分かる。

ホットチャネルより算出した MCT が低下する理由をより詳しく調査するため、SRV の熱的故障が発生する際の Design Reactor モデルの挙動を調べた。図 3.2.4-9 は、Design Reactor モデルで模擬されたホットチャネルにおける水蒸気の温度である。炉心は鉛直方向に 25 のノードに分割されており (下から順に NO1, NO2, NO3・・・)、奇数番目のノードの温度のみを図示している。また、図 3.2.4-10 は Design Reactor モデルおよび Reactor モデルを流れる水蒸気の水蒸気速度である。

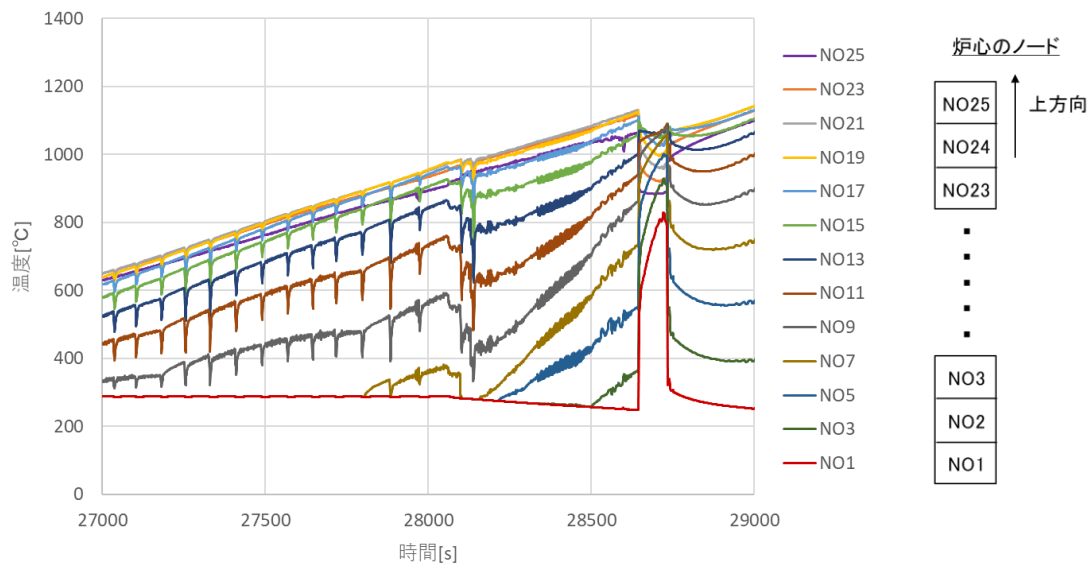


図 3.2.4-9 ホットチャンネルにおける水蒸気の温度（奇数番目のノード）

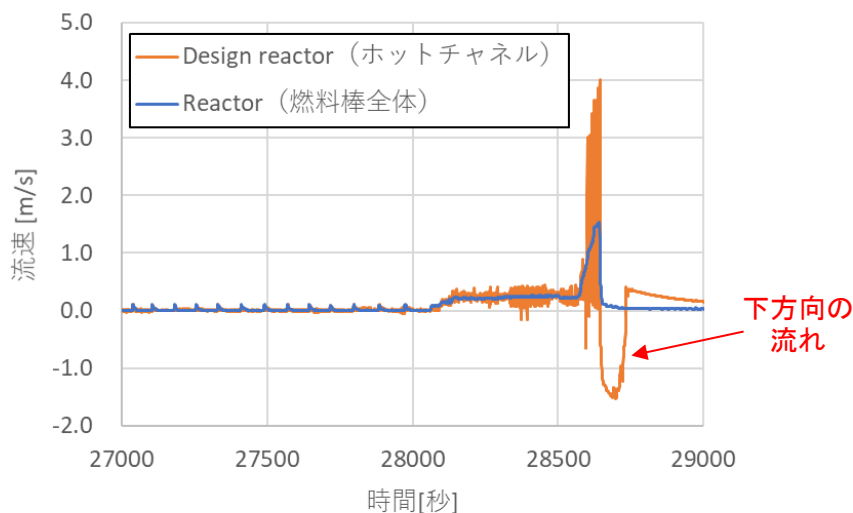


図 3.2.4-10 Design Reactor モデルおよび Reactor モデルにおける水蒸気の流速

SRV の熱的故障が発生した 28060 秒以降は、SRV からの冷却水の漏えいおよび減圧沸騰により水蒸気は上方（速度は正）に流れる。Reactor モデルでは炉心全体の蒸気の流れのため速度も滑らかに変化するが、ホットチャンネルを模擬した Design Reactor のモデルでは、流路断面が小さく、気泡の発生のタイミングで流速が激しく振動している。そして、炉心水位が 0m に達した後、Design Reactor の方の流速が大きく負に転じている。つまり、Design Reactor 内を下方方向に蒸気が流れる。Design Reactor モデルの上部に設置された上部プレナムの蒸気は、ホットチャンネル付近の蒸気温度よりも低く、この蒸気がホッ



トチャンネル部に流れ込むため、MCTに該当する燃料付近（NO19やNO21のあたり）の蒸気温度が下がり、MCTも低下することになる。本来、炉心水位が0mに達した後も、蒸気は上方に流れ続けると想定される。実際、炉心全体をモデル化しているReactorモデルの方では、速度は小さくなるものの、常に蒸気は上方に流れている（速度は正のままである）。Design Reactorの方の流速が負に転じた要因として、ホットチャンネルを簡易的に模擬したモデルに問題がある可能性がある。

以上の考察より、ホットチャンネルをDesign Reactorで模擬して取得しているMCTの挙動はグループ②と③で異なるが、Reactorモデルで燃料棒全体から算出したMCTを見ると、いずれのグループも炉心の水位が0mになった後もMCTは上昇し続けることが分かった。

### 3.3. まとめ

動的なETのための熱水力解析手法として、RAPIDと熱水力解析コードAprosを用いた方法の検討を行った。Aprosの解析部分を取り出したApros Profileは外部から実行の制御が可能であり、RAPIDと組み合わせるのに適していることが分かった。本事業では、当機構で開発しているRAPIDとの組み合わせられるように、Aprosの入力ファイルの仕様に沿って事故シーケンスの入力データを出力する方法を検討し、検討結果に基づきRAPIDを改良した。さらに、昨年度と同様に、BWRプラントにおけるSBO事故に対してAprosとRAPIDを連携した解析を実施した。昨年度利用した解析コードTHALES2と比べて、Aprosは計算に要する時間が長いため、事前に炉心損傷に至ることが明らかな事故シーケンスに対しては解析を実施しないなど、解析時間の効率化についても検討した。RAPIDとAprosの連携の試解析を多数行い、RAPIDで生成した事故シーケンスがAprosの解析モデルに反映できることを確認した。加えて、解析結果をもとに事故シーケンスのグループ化の検討を行った。本年度は目視による主観的なグループ化により3つのグループに分類した。しかしながら、ケース数が増えることで主観的な分類は限度があり、また、見落としの原因にもなり得る。より客観的な見落としを低減する手段として、機械学習の手法などの適用が考えられる。客観的なグループ化手段については、4章にてその調査結果を記す。

今年度、燃料被覆管温度による判定条件で計算を中断する機能を利用したが、この中断する機能は動的なETの分岐生成にも適用できる。また、Aprosにはリスタート機能が既に備わっている。これらの機能を合わせれば、今年度THALES2-RAPIDで行った解析途中の結果を反映した事故シナリオの分岐生成をApros-RAPIDにも適用できると考えられる。

## 4. 動的な ET を用いた炉心損傷頻度の計算方法の検討

3章で示した Apros を用いた動的な ET 解析のように、動的 ET 解析では、生成された事故シーケンスの解析結果として、着目する物理量の経時変化を得ることができる。炉心損傷に至る事象を考慮するには、燃料被覆管温度が損傷したと判断する温度、例えば被覆管温度 1200°C を損傷と判断した場合、1200°C に至る事故シーケンスと至らないシーケンスに大きく 2 分することとなる。3章では、炉心損傷に至る事故シーケンスをその進展の特徴から主観的ではあるが、2 分した。従来の ET 解析では、炉心損傷に至る事象進展における類似性を判断し、グループ化を行っているが、動的な ET 解析では、多数の事故シーケンスが生成されるため、事象進展の特徴を把握するために行う事故シーケンスのグループ化を自動的に行う技術は非常に有益である。以下では、動的 ET 解析による着目する事象の発生頻度/確率の導出方法とグループ化技術、また、従来の方法とは異なる DPRA により得られるリスク情報としての重要度指標について調査した結果を示す。

### 4.1. 着目する事象の発生頻度/確率の導出に関する調査

動的 PRA ツールを用いて着目する事象の発生頻度もしくは確率を求めている論文は、RAVEN、PyCATSHOO 等から得ることができる。これら[6,7,8,11,12,13,14,15]では、全体的な Run 数に対する着目する現象に至るシーケンス数より発生頻度/確率を算出している。しかしながら、RAVEN を用いた解析例[11]では、run 数から想定される確率より小さい確率、例えば、run 数 10000 回に対し、 $10^{-6}$  程度の確率、で表現される事故シーケンスが示されている。この場合の事故シーケンスは、ある特定の事象（例えば弁の故障）を含めた条件付きの結果であることがわかる。動的 ET 解析では、事象の発生するタイミングがプラントの熱水力条件へ与える影響を解析するため、発生するタイミングをサンプリングし、発生の有無については確率分布からサンプリングせず、その事象の発生確率を事故シーケンスに乗じているものと推察される。今後、動的 ET による解析を実施するうえで、想定される炉心損傷頻度/確率は  $10^{-6}$  以下が想定される。これらの評価では、起因事象については、発生したものとして熱水力解析を実施することで条件付確率を得ることとなるが、それでも十分な試行回数を得るには、 $10^5 \sim 10^6$  回程度の解析数が必要となりうる。この程度の解析数を行うためには、解析時間も膨大になる。以上のように、事故シナリオ中の想定される機器等の故障については、発生するタイミングのみのサンプリングにすることで、計算コストを抑えることができる。DPRA 解析ツールによる事故シーケンスの生成において、解析者があらかじめランダム発生事象の取扱いを決めることが重要である。また、ランダム発生事象の発生確率分布を発生しやすい方向にシフトすることでも計算コストを下げることができることが推察される。

今回の調査では、着目する事象に至る事故シーケンス数を解析数で除する、また、さらにファクターを乗ずることで発生頻度/確率を得ていた。今後開発する RAPID では、熱水

力条件の変化により発生する確率自体がシフトする、ランダム発生ではない事象を取り扱うことを想定している。このような場合についても同様の取扱いが可能かについて、今後も調査を継続する。

## 4.2. 解析結果のグループ化技術の調査

動的な ET で得られた解析結果に対して、事故シーケンスの類似性より事故シーケンスのグループ分け（クラスタリング）することは、事故シーケンスの特長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おり、K-means 法がよく用いられている。また、K-means 法と似た手法として、K-medoids 法がある。これら手法では、クラスタ数を予めユーザーが指定する必要があるが、クラスタ数も含め最適化することができる手法も提案されており、例えばディレクレー過程ガウス混合（Dirichlet Process Gaussian Mixture: DPGM）モデルがこれに当たる。以下では、代表的なこの二つの手法に加え、DPGM についても調査した結果を示す。また、上記手法については、時系列データを直接取り扱った例が無く、取り扱うためには時系列データを同じグループに属すると判断できるようにする必要がある。これに関する手法についても調査した結果を記す。

### 4.2.1. K-means 法

データ点の集合を以下の手順に沿って、 $K$  個のクラスタに分類する。

- ① データ点を  $K$  個のクラスタのどれかにランダムに割り当てる。
- ② 各クラスタに割り当てられたデータ点より、クラスタの重心を求める。（重心の座標は、クラスタ内のデータ点の“平均”の座標であり、この手法名の由来。）
- ③ データ点と各クラスタの重心の距離を計算し、最も近い重心のクラスタにデータ点を割り当て直す。（最も近い重心が、そのデータ点が属するクラスタの重心であれば、割り当て直す必要はない。）
- ④ ②と③を繰り返し、③でデータ点の再割り当てがなくなった時点で終了する。

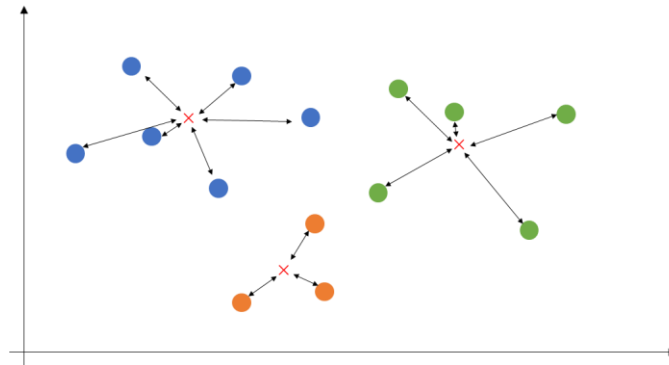


図 4.2.1-1 3 個のクラスタに分類されたデータ点。同じ色の点と同じクラスタに属する。×印が各クラスタの重心。

#### 4.2.2. K-medoids 法

K-means 法では、クラスタの重心を利用してクラスタリングを行ったが、この方法では、クラスタの medoid と呼ばれる点を利用して、クラスタリングを行う。medoid とは、クラスタ内の点で、その点以外のクラスタ内の点との距離の総和が最小になる点である。式で表すと、クラスタ  $i$  の点集合を  $X_i$  とし、点  $x$  と点  $y$  との距離を  $d(x,y)$  で表すと、medoid は、

$$\arg \min_{x \in X_i} \sum_{y \in (X_i - x)} d(x,y) \quad (4.2.2-1)$$

で与えられる。データ点の集合を以下の手順に沿って、 $K$  個のクラスタに分類する。

- ① データ点から  $K$  個の点をランダムに選び、 $K$  個の各クラスタの medoid とする。
- ② medoid となった点以外のデータ点を、最も近い medoid のクラスタに割り当てる。
- ③ 全てのクラスタにおいて、クラスタの medoid を再計算する。
- ④ ③において、medoid に変更がなければ終了し、あれば②に戻る。

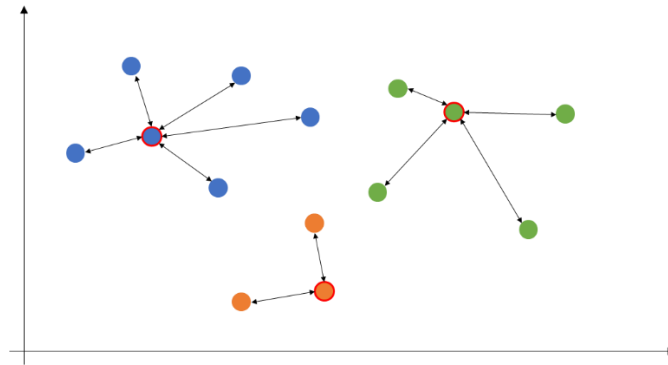


図 4.2.2-1 3個のクラスタに分類されたデータ点。同じ色の点が同じクラスタに属する。○で囲んだデータ点が各クラスタの mediod。

K-means 法と比べて、K-medoids 法の利点として、

- K-means 法では、データ点の距離の 2 乗の和を最小にする (※1) ようにクラスタリングの評価を行っているのに対して、K-medoids 法では、データ点の距離の (1 乗の) 和を最小にするように評価しているので、ノイズや外れ値 (outlier) の影響を受けにくい。  
※1: データ点の重心は、データ点の距離の 2 乗の和が極小値となる点である。
- K-medoids 法では、二つのデータの距離 (類似度) が分かれば、クラスタリングを行うことができる。(K-means 法では、重心を求める必要があるため、座標の概念が必要になる。)

が挙げられる。一方、欠点として以下の点が挙げられる。

- K-means 法では、データ点と各クラスタの重心の距離を計算コストは、データ点の数を  $N$  とすると  $N$  のオーダーになるが、K-medoids 法では、medoid の計算で各点が総当たりでクラスタ内の他の点との距離を計算するため、計算コストは  $N^2$  と大きくなる。

#### 4.2.3. ディリクレ過程ガウス混合モデル

ディリクレ過程ガウス混合モデル (Dirichlet Process Gaussian Mixture Model) は確率過程の 1 つであり、教師なしのデータクラスタリング解析に応用されているが、教師ありの回帰解析にも有用的なアルゴリズムである。ディリクレ過程はベイズ・ノンパラメトリック (Bayesian Nonparametric, BNP) 統計手法の代表的なアルゴリズムである。“ノンパラメトリック” はパラメータがないという意味ではなく、利用できるデータにより、モデルのパラメータが柔軟的に変わることがあるという意味である。BNP 法は、観測や解析のデ

ータをモデル化するため必要なクラスタ数を推定し、未来のデータにより、以前見られなかったクラスタを発見することもできる。無限なデータに対して、理論的に可能なクラスタの数も無限になるので、無限混合モデル (Infinite Mixture Model) とも呼ばれる[16]。そのクラスタの数及び各クラスタの特徴を表すパラメータ (例えば、中心の位置、分散など) を推定するため、ベイズ統計推定手法が利用されている。各クラスタのパラメータの事前分布がガウス分布に設定された場合、ガウス混合モデルと呼ばれ、データポイントがクラスタに属する確率がディリクレ分布になるので、“ディリクレ過程ガウス混合モデル” という手法名になされた。全てのパラメータを推定するため、Markov Chain Monte Carlo (MCMC) Gibbs Sampling 法[17]や Variational Inference 法[17]を利用する必要がある。

#### 4.2.4. Dynamic Time Warping 法

データをクラスタリングする方法として、K-means 法や K-medoids 法を説明したが、上記の説明では、データを“点”として扱い、二点間の距離から、二点が近いかどうかを判定していた。一方、DPRA におけるデータは、事故シーケンスという“時系列データ”である。データが点の場合、二点間の距離 (長さ) から、二点が近いかどうかを判定することができるが、時系列データの場合は点データのように単純に距離を求めることはできない。ただ、時系列データの形状等から二つのデータが近い、似ているということは言える。それを類似度という。K-medoids 法の利点でも述べたように、二つのデータが近いかどうかの類似度を数値化できれば、K-medoids 法を適用することができる。

二つの時系列データの類似度を評価する方法も数多く存在するが、その一つが Dynamic Time Warping 法 (略: DTW 法。和名は、動的時間伸縮法。) である[18]。時系列データの類似度を評価する最も単純な方法として、同時刻の値の差 (ユークリッド距離という。図 4.2.4-1(a)) から非類似度 (類似度の逆の意味。非類似度が小さいほど、二つの時系列データは似ている・類似度が大きいと言える。) を算出する方法が考えられるが、時系列データの変動の周期がずれた場合や変動が収縮・伸長した場合は、類似のものとはみなされない。一方、DTW 法では、二つの時系列データの各点の距離 (値の差) を総当りで比較した上で、二つの時系列の点同士の距離の和が最も小さくなるような関係を見つける (図 4.2.4-1(b))。この関係における距離が DTW 距離と呼ばれ、二つの時系列データの非類似度になる。この方法では、二つの系列の変動の周期性や長さが違っていても、DTW 距離を定義することができるという利点がある。

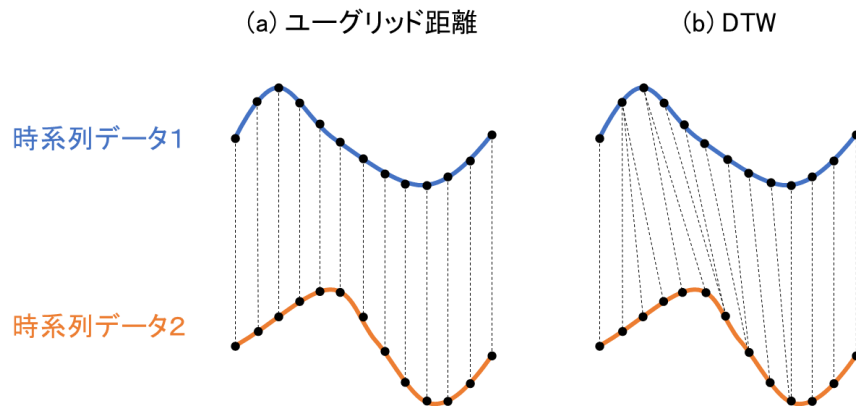


図 4.2.4-1 (a)ユーグリッド距離と(b)DTW における 2つの時系列データの対応付け

DTW 法で二つの時系列データ  $X=\{x_0, x_1, \dots, x_m\}$  と  $Y=\{y_0, y_1, \dots, y_n\}$  の距離 (値の差) を算出する際、二つのデータ点のペアの取り方 (対応付け) について、以下の条件が課せられる。

- ① データ列  $X$  の全てのデータ点  $x_i$  が、データ列  $Y$  の 1 つもしくは複数のデータ点とペアになる必要がある。
- ② データ列  $X$  の最初のデータ点  $x_1$  は、データ列  $Y$  の最初のデータ点  $y_1$  とペアになる必要がある。この時、 $y_1$  だけでなく、それに続く  $y_2, y_3$  などともペアになってよい。
- ③ データ列  $X$  の最後のデータ点  $x_m$  は、データ列  $Y$  の最後のデータ点  $y_n$  とペアになる必要がある。この時、 $y_n$  だけでなく、その前の  $y_{m-1}, y_{m-2}$  などともペアになってよい。
- ④ データ列  $X$  のデータ点がデータ列  $Y$  のデータ点とペアを形成していく際、データ番号の小さい順にペアとなっていく必要がある。例えば、データ列  $X$  のデータ点  $x_i$  と  $x_j$  (ここで、 $i < j$ ) とデータ列  $Y$  のデータ点  $y_k$  と  $y_l$  (ここで、 $k < l$ ) において、データ点  $x_i$  がデータ点  $y_l$  となり、データ点  $x_j$  がデータ点  $y_k$  とペアになるようなことがあってはならない。

データ列  $X$  に対して述べたが、データ列  $Y$  に対しても同様である。この規則のもと、二つの時系列データの点の距離を計算して、DTW 距離を算出する。DTW 距離を算出するにあたり、コスト行列  $C$  を導入する。コスト行列  $C$  は、 $m \times n$  次元の行列であり、成分  $C(i,j)$  は、データ列  $X$  の点  $x_i$  とデータ列  $Y$  の点  $y_j$  の距離 (コスト) である。コスト行列  $C$  に対して、 $m \times n$  次元の累積コスト行列  $D$  ( $D(i,j)$  は、 $D$  の  $i,j$  成分) を以下のように定義する。

$$D(i, 1) = \sum_{k=1}^i c(k, 1) \quad (1 \leq i \leq m) \quad (4.2.4-1)$$

$$D(1,j) = \sum_{k=1}^j c(1,k) \quad (1 \leq j \leq n) \quad (4.2.4-2)$$

$$D(i,j) = \min \begin{cases} D(i-1,j-1) \\ D(i-1,j) \\ D(i,j-1) \end{cases} + c(i,j) \quad (1 < i \leq m, 1 < j \leq n) \quad (4.2.4-3)$$

この累積コスト行列  $D$  において、 $D(m,n)$  が二つのデータ列  $X, Y$  の DTW 距離となる。

例として、以下に示す二つのデータ列  $X, Y$  の DTW 距離を算出してみる。

$$X = \{3, 4, 8, 3, 1, 5, 7, 3\}$$

$$Y = \{1, 3, 6, 2, 7, 9, 5, 4, 2\}$$

データ列  $X$  のデータ数は 8 ( $m=8$ )、データ列  $Y$  のデータ数は 9 ( $n=9$ ) である。横軸をデータ番号として、データ列  $X, Y$  をプロットしたのが図 4.2.4-2 である。

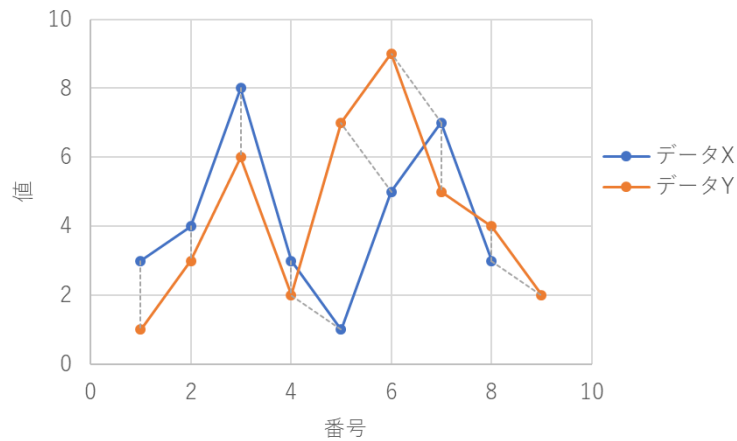


図 4.2.4-2 データ列  $X, Y$  (破線は、DTW 距離を算出時にペアとなる点を結んだ線)



まず、データ列 X,Y に対するコスト行列 C を計算すると、図 4.2.4-3 のようになる。

	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	j=6	j=7	j=8	j=9
i=1	2	0	3	1	4	6	2	1	1
i=2	3	1	2	2	3	5	1	0	2
i=3	7	5	2	6	1	1	3	4	6
i=4	2	0	3	1	4	6	2	1	1
i=5	0	2	5	1	6	8	4	3	1
i=6	4	2	1	3	2	4	0	1	3
i=7	6	4	1	5	0	2	2	3	5
i=8	2	0	3	1	4	6	2	1	1

図 4.2.4-3 コスト行列 C の成分  $C(i,j)$

コスト行列 C の値を利用して、上で定義した累積コスト行列 D を計算すると、図 4.2.4-4 のようになる。

	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	j=6	j=7	j=8	j=9
i=1	2	2	5	6	10	16	18	19	20
i=2	5	3	4	6	9	14	15	15	17
i=3	12	8	5	10	7	8	11	15	21
i=4	14	8	8	6	10	13	10	11	12
i=5	14	10	13	7	12	18	14	13	12
i=6	18	12	11	10	9	13	13	14	15
i=7	24	16	12	15	9	11	13	16	19
i=8	26	16	15	13	13	15	13	14	15

図 4.2.4-4 累積コスト行列 D の成分  $D(i,j)$ 。■の成分は、DTW 距離である  $D(8,9)=15$  を求めるまでに足してきた  $D(i,j)$ 。

$j=1$  の列、 $i=1$  の行は、それぞれ、(4.2.4-1)式、(4.2.4-2)式を用いて算出しており、コスト行列 C の  $i=1$  の行、 $j=1$  の列の値を順に足し合わせて求めている。 $i>1, j>1$  の成分については、(4.2.4-3)式を用いて算出しており、 $D(i,j)$  の値は、その上、左上、左にあるの中で最も小さい値に  $C(i,j)$  を加えたものになる (図 4.2.4-5 参照)。

	j-1	j
i-1	D(i-1, j-1)	D(i-1, j)
i	D(i, j-1)	D(i, j) = C(i, j) + □内で最も小さい値

図 4.2.4-5 D(i,j)の算出

図 4.2.4-4 の  $D(i=8, j=9)$  の値 15 がデータ列 X,Y に対する DTW 距離となり、■の成分は、DTW 距離である  $D(8,9)$  を求めるまでに足してきた  $D(i,j)$  である。つまり、■の成分の番号  $i,j$  で示される 2 点  $x_i, y_j$  の距離を足し合わせたものが DTW 距離であり、図 4.2.4-2 に示された破線はこの 2 点  $x_i, y_j$  を結んだ線である。

DTW 法では、二つのデータ列の数が異なっても計算は可能である。ただ、データの二点の距離を総当たりで計算するため、計算のオーダーが  $m \times n$  になり、計算コストがかかる点に注意が必要である。(ユークリッド距離のように、同時刻の二点の距離の計算では、計算のオーダーは  $m$  で済む。)

### 4.3. 時系列データを含むクラスタリングに関する適用例

#### 4.3.1. 時系列データを含むクラスタリングに関する適用例

K-means 法、K-medoids 法と DTW 法を組み合わせたクラスタリングの例として、台風の経路をクラスタリングした事例が Web 上で公開されている。台風の経路という時系列のデータに対して、DTW 法を用いることで二つの台風の経路の類似度を求めることができる。二つのデータの類似度を K-medoids 法で説明した二点間の距離とみなすことで、K-medoids 法を適用することができ、クラスタリングを行うことができる。一方、K-means 法を用いてクラスタリングを行うには、データの重心が必要になる。複数の時系列データに対して、時系列データの平均（重心となる時系列データ）を求める必要があるが、その方法として DTW Barycenter Averaging (DBA) 法[19]がある。この方法では、DTW 距離を計算する際にペアとなる点の集合に対して平均を求めて、その平均の点から成るデータ列を時系列データの平均とみなす。この DBA 法を K-means 法と組み合わせて、台風の経路のクラスタリングが行われている。

#### 4.3.2. DTW 法を利用した DPRA に関する研究

PSAM14 において、レンセラー工科大学のグループより、DTW 法を拡張した方法を用いて、①クラスタリングおよび②代替統計モデルについて発表が行われた。

① Global Alignment Kernel 法と K-medoids 法を組み合わせたクラスタリング[20]

DTW 法では、二つのデータ列の累積コスト行列  $D$  において、コスト（距離）を足し合わせが最も小さくなるものを DTW 距離とし、二つの時系列データの類似度として利用していた。Global Alignment Kernel 法（略：GAK 法）は、累積コスト行列  $D$  で重みづけを行ったカーネル

$$K_{GA}(X, Y) = \sum_{\pi \in A(m, n)} e^{-D(\pi)} \quad (4.3.2-1)$$

を二つのデータ列  $X, Y$  の類似度とみなす方法である。ここで、 $\pi$  は二つのデータ列  $X, Y$ （データ数は、それぞれ  $m, n$ ）の点データのペアの組み合わせの 1 組であり、 $A(m, n)$  は、そのペアの組み合わせの集合である。

動的イベントツリー生成モジュール MOSAIQUE（Module for SAMpling Input and QUantifying Estimator）とプラント解析コード RELAP5 を組み合わせて、PWR プラントにおける小破断冷却系喪失事故（SBLOCA）を対象とした解析が行われた。解析数は 2500 であり、文献[20]では全 2500 ケースの燃料被覆管の表面最高温度（PCT：Peak Cladding Temperature）の経時変化のグラフが示されている。

この全 2500 ケースに対して、GAK 法と K-medoids 法を組み合わせて、クラスタリングが行われた。分類の項目として、蒸気発生器の圧力・水位、炉心部の冷却材体積、加圧器の水位が利用された。また、クラスタリングの数については、クラスタリングされた 1 つのグループ内のシナリオ全てが炉心損傷（PCT が 1477K 以上に到達）するかしないかのいずれか一方になるまでクラスタリング数を増やしていき、その最小値を採用した。 $n_{1477\uparrow, i}$  と  $n_{1477\downarrow, i}$  をそれぞれクラスタ  $i$  内において炉心損傷する・しないシナリオの数とし、 $j$  をクラスタ数、 $N$  を全シナリオ数（ $N=2500$ ）とし、

$$\varepsilon_j = \frac{1}{N} \sum_{i=2}^j \min(n_{1477\uparrow, i}, n_{1477\downarrow, i}) \quad (4.3.2-2)$$

を用いて、クラスタ内に炉心損傷する・しないシナリオの混ざりを評価する。 $\varepsilon_j$  が 0 の時、全てのクラスタ内のシナリオは炉心損傷する・しないのいずれかに割り振られることになる。文献[20]では、クラスタ数  $j$  を 1 から順に増やしていき、 $j=53$  の時に最初に  $\varepsilon_j = 0$  となったため、クラスタリング数を 53 としている。（文献[20]では、クラスタ数  $j$  に対する  $\varepsilon_j$  の変化のグラフが示されている。）

② Shape DTW 法と Taylor-Kriging 法による代替統計モデルの作成[21]

DTW 法では、時系列データの“点”同士を比較し、二点のコスト（距離）の累積が小さくなるように DTW 距離を求めた。Shape DTW[22]では、データ点近傍の時系列データの

“形状”を数値化して比較し、その形状の類似度の蓄積から DTW 距離を求める方法である。

この論文では、Shape DTW 法と Taylor-Kriging 法を組み合わせた代替統計モデルを提案しており、PWR プラントにおける大破断冷却系喪失事故 (LBLOCA) の解析に適用して、このモデルの検証が行われている。

#### 4.4. 重要度評価

炉心損傷頻度の算出及びグループ化に関する技術について調査し、今後の方針を得た。また、DPRA 解析の結果の応用の観点として、考慮する機器等の重要度評価は安全性向上に関して有益な情報を与える。重要度評価において、従来の評価では、FV、RAW 等を用いるが、これらの指標では、成功、失敗の状態に対する影響度を評価している。DPRA 解析では、故障が発生するタイミングにより事象の進展の変化を追跡するため、これら事故進展の変化を考慮できる指標が必要となる。DPRA 解析における重要度指標として、次のような3つの指標が提案されている[23,24]。なお、調査した重要度指標では、故障/失敗のタイミングによる変化の尺度として、Cs の放出量に着目している。以下のその定義を示す。

DYI (Dynamic importance measure) 1

$$DYI1 = \frac{R(x = 1)}{R(x = 0)}$$

DYI2

$$DYI2 = \frac{R(x = 1_i)}{R(x = 0)}$$

DYI3

$$DYI3 = \frac{R(x = 1_i)}{R(x = 1)}$$

$R(x=1)$ は着目する事故シーケンスの対策が成功した場合に生じる Cs 量

$R(x=0)$ は着目する事故シーケンスの対策が失敗した場合に生じる Cs 量

$R(x=1_i)$ は着目する事故シーケンス  $i$  における Cs 量

以上の指標の例として、以下の条件における DYI1 を示す。

Operator action	Probability	Release fraction
Success immediately	0.25	10 <sup>-4</sup>
Success 10 min.	0.39	10 <sup>-5</sup>
Success 15 min.	0.35	10 <sup>-3</sup>
Failure	0.01	10 <sup>-2</sup>

$$DYI1 = \frac{\frac{0.25 \times 10^{-4} + 0.39 \times 10^{-5} + 0.35 \times 10^{-3}}{0.25 + 0.39 + 0.35}}{\frac{0.01 \times 10^{-2}}{0.01}} = 0.04$$

また、Cs 量以外の指標として、一次冷却系圧力等を用いた例[24]もある。

DPRA における重要度評価、特にレベル 1PRA では、上記提案されている Cs 量を指標にすることはできない。しかしながら、新たな物理量を含めて評価するという考え方は有益であり参考となる。例えば、レベル 1PRA の範囲であれば、炉心損傷に至る時間を考慮することで、炉心損傷に至らない、もしくは炉心損傷に至るとしてもその時間を引き延ばすことができる機器を重要と考え、この情報を基にコストを掛けるという判断も可能となる。また、この提案されている方法では、機器間の相関性は考慮されておらず独立と仮定して重要度の算出を行っている。今後、開発する DPRA 解析ツールにおいて事象発生 of 相関性を考慮する場合も想定し、相関性を考慮した重要度評価指標の調査及び検討を継続していく必要がある。

#### 4.5. まとめ

3 章にて実施した動的 ET に基づき熱水力解析を行い、多数の解析結果を得た。これら結果から炉心損傷頻度を得るには、炉心損傷に至る事故シーケンス数を解析数で除することで求められる。炉心損傷頻度／確率の算出方法に関して調査したところ、同様な算出方法であった。今後、より現実的な評価を行うためには解析数を統計上有意なレベルまで増やしていく必要があるが、解析時間を考慮すると解析数の増大には困難が伴う。これに対し、故障が発生するタイミングとその発生確率を予め設定することで解析数を減らすという工夫があることが調査を通じ分かった。事故シーケンスのグループ化においては、Apros を用いた形跡結果を被覆管温度の推移から主観的に 3 つのグループに分け、それぞれの事象進展について考察を加えた。主観的に行うグループ化では、見落とし等エラーが

想定されるため、客観性を持ったグループ化技術が必要となる。機械学習の分野で進められているクラスタリングの技術はグループ化に有益と考えられることから、調査を行った。DPRA 解析結果のクラスタリングでは、単純な座標間のクラスタリングとは異なり時系列データの類似性を評価する必要がある。本年度の調査範囲では、DTW 法による時系列データの関連付けを行ったうえで、k-means 等のクラスタリングを行うことで、DPRA 解析結果のクラスタリングは可能になると考える。調査した k-means、k-medoids 及びディリクレ過程ガウス混合モデルでは、この順にクラスタ化の精度は上がるが、同時に計算コストも上昇する。このため、得られるクラスタ化された事故シーケンス群の違いから生じるグループ間の事故進展の違いの判断など、クラスタリング技術の違いによる影響を把握することが必要である。以上から、RAPID へのクラスタリング技術の実装に関し、複数の技術を選択できるようにするとともに、本年度調査できなかったクラスタリング技術について調査を継続し、柔軟に対応していくことが重要である。

従来の PRA 解析により得られるリスク情報として、リスク重要指標に基づくリスク重要度がある。DPRA では、故障が発生するタイミングにより事象の進展の変化を追跡できるため、これら事故進展の変化を考慮できる指標が必要となる。本年度の調査において、3 つの重要度指標を提案し、その結果を示しているものがあつた。これらを参考に、どのような重要度指標が有効か、調査を継続するとともに考えられる温度、圧力、時間等考えられるパラメータと確率との組み合わせを検討することは有益である。

## 5. 動的 ET の解析ツールの基本的要件のまとめ

平成 29 年度及び平成 30 年度における DPRA 解析ツールの調査、また、DPRA 解析ツールの検討用として作成した RAPID 及び RAPID を用いた試解析を通じ、今後動的 ET の解析を含め、DPRA 解析を行うためのツールとして、以下の要件（機能）を有することが望まれる。

- ・ 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。
- ・ サンプル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、DPRA 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。

## 6. まとめ

平成 30 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 29 年度に整備した DPRA 解析コード RAPID の機能確認、また、今後実装すべき機能について調査した。

DPRA 解析ツールの調査では、ドイツの MCDET 及びフランスの PyCATSHOO を調査した。MCDET では事故シーケンスの生成をモンテカルロ法で設定する方法と、事故シーケンスの分岐点を予め与えた確率で生じるものとする方法を組合せ、効率的な解析を行っていた。PyCATSHOO では、より詳細な解析を行うため、物理モデルと制御モデルを解析対象ごとに生成し、これらを区分的決定論的マルコフ仮定（PDMP）法を用いることで効率よく解析する方法を示した。昨年度調査した ADAPT 及び RAVEN の機能の含め、また、RAPID による試解析を考慮すると、MCDET のように解析数を減らすことができるような方法を RAPID で取り扱えるようにすることは、有益であると考えられる。また、解析途中のプラント状態を反映した、事故シーケンスの進展を考慮できる機能を、RAPID に加えた。今後、本機能を用いたより実践的な条件での適用を行い、本機能の向上を目指す。

熱水力解析コード AproS と RAPID の連携を行うため、AproS を外部から制御する方法を調査し、RAPID で生成した事故シーケンスに基づく入力を、テキストベースで AproS に引き渡すことができるよう RAPID に改良を加えた。改良した RAPID を用いて、昨年度 THALES2 を用いた試解析と同条件（SRV の熱的故障については、発生する回数が多くなるよう、発生温度を下げている）で解析を行い、改良した RAPID により AproS との連携解析を行えることを確認した。

DPRA 解析ツールにより得られた結果から導き出せるリスク情報として、従来の PRA との比較から炉心損傷頻度が挙げられる。先行研究による炉心損傷頻度は、炉心損傷に至ると判断されたシーケンス数を全試行回数で除したもので得ており、RAPID においても同様なことができる機能を備える必要がある。また、試行回数より十分に小さい値が得られているものもあり、この場合、故障が発生するものとして解析を行い、のちに発生確率を乗じていると思われるものがある。これは、解析の試行回数を減らすためにも今後考慮すべき方法であり、炉心損傷頻度の算出において本方法を取り扱えるようにすることは有益である。その他のリスク情報として、従来 FV,RAW といった重要度指標を用いているが、これら指標では DPRA より得られる事象進展の変化タイミングといった特徴が表れない。これを解決するため、放出 Cs 量とその発生確率から重要度を図る動的な重要度指標が提案されていた。Cs 量や圧力、水素発生量といった物理量を含め重要度を図る試みは本事業にも有益であり、今後も調査し動向を確認するとともに、レベル 1PRA において適用できるような物理量についても試計算を通じ検討を進める。

DPRA 解析ツールにより得られる解析結果は非常に多く、主観的なグループ化では、従



来の ET のような機器の組合せと炉心損傷との関係を見出すことは難しい。このため客観的な手法として、機械学習の分野で用いられているクラスタリング技術が有益と判断し、クラスタリング技術を調査した。DPRA では、得られる結果が時系列データであることから、時系列データとしての関連性を保持しつつクラスタリングすることが必要である。今後クラスタリングのための機能の追加においては、時系列データの取扱いを含め整備していく。

平成 29 年度及び本年度の事業を通じ、DPRA 解析ツールが具備すべき機能として、以下の点を取り上げた。今後この要件に基づき整備を進めるとともに、新たに有用な情報、機能が調査等で判明した場合は、柔軟に取り込めるよう開発を進めるとする。

- ・ 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。
- ・ サンプル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、DPRA 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。

## 付録 A. PSAM14 概要

### 1. 会議の概要

第 14 回確率論的安全評価および管理に関する国際会議 (International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management : PSAM14) が、カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA) で 2018 年 9 月 17 日から 21 日までの 5 日間開催された。本会議には、米国を除くと、日本、韓国、中国から各々全参加者の 10%程度の参加者があり、日本からは主に地震、火山、暴風等外的事象ヘリスク評価事例の紹介が、韓国からは、人間信頼性評価 (HRA) やデジタル機器の信頼性評価、マルチユニット PRA などの幅広い研究の紹介が、また、中国からは、主に原子力も含み様々な分野 (輸送、水道、ガス供給など) へのリスク評価事例が紹介された。5 日間で約 270 の発表が 81 セッションに分かれて行われた。リスク評価及び信頼性解析に係わるセッションが多い中、動的確率論的リスク評価 (DPRA) に関するセッションは 5 つあり、その中での発表数は 20 であった。また、HRA に関するセッションも 7 つあり、この中では HRA データの収集、動的評価への対応等の発表が行われていた。

### 2. DPRA

#### (1) 情報収集、動向調査

DPRA のセッションでは、各国のグループで開発が進められている DPRA 解析ツールについて発表が行われた。

#### 解析コストの削減&結果処理の効率化

DPRA では、炉心損傷頻度などの結果を得るために、膨大な数の解析を実施して、その結果を処理する必要がある。この解析のコスト削減や結果処理の効率化に焦点を当てた発表が多数行われた。

- アイダホ国立研究所 (INL) のグループより、従来の PRA と動的な DPRA を組み合わせた Hybrid な PRA について紹介が行われた。この方法の特長は、プラント状況の変化や時間依存性が大きいイベントには DPRA を適用するが、そうでない部分には従来のイベントツリー/フォールトツリーによる PRA を適用して、DPRA による計算コストを上手く抑えている点である。
- オハイオ州立大学 (OSU) のグループから、DPRA 解析で解析コスト削減のために利用される代替統計モデルの評価について発表が行われた。K 近傍法などの複数の代替統計モデルに対して、訓練用のデータ数に依存して、実際に解析を行った計算結果との誤差がどのように縮まっていくのかを評価した結果が示された。
- OSU のグループより、DPRA の解析結果にディープラーニングの技術を適用した研究

結果が紹介された。具体例として、全交流電源喪失事故時の公共への放射性物質の放出について、DPRA 解析ツール ADAPT と熱水力解析コード MELCOR、放射線拡散予測コード RASCAL と組み合わせた DPRA 解析を実施し、放射線の放出量の解析結果にディープラーニング（ライブラリ Caffe）を適用することで、事故発生時の放射線量を予測する方法および検証計算の結果が示された。

- OSU のグループより、計算機クラスターを活用して、膨大な数のシナリオを並列に同時実行することで解析時間を短縮するという DPRA への高性能計算（HPC）の応用が紹介された。検証では、サンディア国立研究所（SNL）の計算機クラスターを利用して、ADAPT と MELCOR によるテスト計算が行われており、約 7 万の計算ジョブがローカルの計算機では 27.5 日かかるところが、計算機クラスターを用いた HPC を行うことで、4.7 日まで短縮されることが示された。

#### 作業員操作、人間性信頼性解析（HRA）と組み合わせた DPRA 解析

時間進展によるプラント状況の変化を考えた場合、作業員による操作もプラント状況の変化に大きく寄与する。その点に注目し、DPRA に作業員操作を取り入れた研究や HRA と組み合わせた研究についても多くの発表が行われた。

- OSU のグループより、DPRA 解析ツール ADAPT と熱水力解析コード MELCOR を組み合わせた DPRA 解析に結果を人間信頼性解析（HRA）モデルの入力データとして取り入れることで、プラント状況を反映した作業員の操作、および、その操作によるプラント状況の変化について紹介された。
- ドイツの原子炉安全協会のグループ（GRS）からは、DPRA 解析ツール MCDDET と作業員の操作をプログラム化したモジュールと組み合わせた DPRA 解析について紹介が行われた。リスク評価の対象は、PWR における蒸気発生器伝熱管損傷であり、ヒューマンエラーなどの作業員操作に対する不確かさも確率分布として取り入れた解析結果が示された。
- UCLA では以前より DPRA に作業員操作を取り入れた ADS-IDAC というツールの開発を進めており、その開発の経歴およびサンプリング機能の更新などについての紹介が行われた。

#### Dynamic Important Measure による事故緩和アクションの抽出

ある事故シナリオの結果が、シナリオ中のどのアクションに最も依存して生じたものかを測る指標として、DYnamic Important measure（DYI）と呼ばれる値が OSU と SNL のグループより紹介された。重大な事故が生じるシナリオが発生した場合、その事故の要因がシナリオのどのアクションに因るものかを特定することは、重大な事故を未然に防ぐ上で非常に重要である。発表で紹介された DYI の定義方法では、アクション間の依存性が含

んだ形で値が評価されており、各アクションに対する純粋なシナリオ結果への依存度を導き出せていない。定義方法も含めて、今後も調査・検討を行っていく余地があると考えられる。

#### 多目的システムにおける確率論的パフォーマンス評価

フランス電力公社 (EDF) より、機器の状態を区分的決定論的マルコフ仮定 (Piecewise Deterministic Markov Process; PDMP) により解析する DPRA 解析ツール PyCATSHOO を用いた解析事例が紹介された。複数のエリアへの電力供給において、供給システムの一部が故障した場合、供給状況や作業員の対応状況、作業の優先順位などを考慮した復旧作業のモデル化を行い、運転規則の違いによる故障時の電力供給のパフォーマンス低下を確率論的に評価した結果が示された。

#### GUI が整備された DPRA 解析ツール

INL のグループより、EMERALD と呼ばれるグラフィカルなユーザーインターフェイス (GUI) を備えた DPRA のソフトウェアが紹介された。このソフトウェアでは、各イベントのパーツを GUI の画面上で配置・接続していくことでイベントツリーを作成でき、時間依存性を取り入れたイベントや条件付きのイベントを設定することで動的なイベントツリーも作成可能である。また、物理現象を解析するコードと接続するための枠組みも用意されている。

#### (2) RAPID と THALES2 の連携解析についての発表

当機構で開発している DPRA ツール RAPID の紹介とシビアアクシデント解析コード THALES2 との連携解析及びその試解析結果について、当機構の鄭より発表を行い、DPRA の専門家から多数な有益の質疑とコメントをもらった。質問では、なぜ新たに JAEA のツールを開発しているのかとの質問に対し、(1) THALES2 と既存の DPRA ツールのインターフェースがなく、そのインターフェースを開発するのは困難であり、様々な研究目標によって改造する必要がある、(2) これまで JAEA で行った不確かさ解析手法 (サンプリング手法、代替統計モデルの構築、機械学習のアルゴリズム) を RAPID に利用したい、(3) DPRA の理解をツールの開発で深めたい、と回答した。OSU の Tunc Aldemir 教授から、既存のオープンソースコード (RAVEN) への貢献 (例えば、代替統計モデルの開発) を期待しているというコメントもあった。

### 3. まとめ

本会議に出席して、DPRA に関する各国の研究動向等の情報収集を行うとともに、計算

コストの低下に係わる技術など今後の研究に活用できる有益な知見を得ることができた。  
また、当機構で開発した DPRA ツール RAPID とシビアアクシデント解析コード  
THALES2 の連携解析について発表を行い、議論を通じて今後のツール開発に有益な情報  
を得ることができた。

## 付録 B. RAPID の実行方法と入力ファイル

DPR A 解析ツール RAPID は、Python で記述されたプログラムである。RAPID-THALES2 の連携解析において、RAPID を実行する際には、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)

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。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
“RandPara”	サンプリングするパラメータを指定。 {サンプリング変数:確率分布} の形で、入れ子構造で記述。
“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: {”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、表 B2 参照。
“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。 パラメータ名をコンマで区切って、[]で挟む。
“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: {”Value”: (判定値), ”Sign”: (不等号)}} 入れ子構造で記述。

表 B2. 条件判定で使用するパラメータ

記号	計測値	記号	計測値
PRCS	原子炉冷却系 (RCS) 圧力 [kgf/m <sup>2</sup> ]	TRB	RB気相温度[°C]
ZWPV	DC水位 [m]	TSAT	W/W飽和温度[°C]
ZWCT	CST水位[m]	TSB1~9	スラブ1~9の温度[°C]
ZWLA,ZWLB	再循環ループA,Bの水位[m]	TSBA~ TSBK	スラブ10~20の温度[°C]
TIME	計算開始時からの経過時間[s]	TCMX	被覆管最高温度[°C]
PDRY	D/W圧力[kgf/m <sup>2</sup> ]	TFMX	UO <sub>2</sub> ペレット最高温度[°C]
PWET	W/W圧力[kgf/m <sup>2</sup> ]	ZW13~17	ボリュウム13~17の水位[m]
PRB	RB圧力[kgf/m <sup>2</sup> ]	ZWTS	TORS (トーラス室) の水位 [m]
TDRY	D/W気相温度[°C]	TMS1~ TMS4	主蒸気管内気相温度[°C]
TWET	W/W気相温度[°C]		
TSUP	W/W液相温度[°C]		

```

# input of RAPID
{
  "Mode" : "GS",           # Mode of execution (GS, MB, RR, PR)
  "NumOfSim" : 10,        # Number of simulations
  "ReadDir" : "sbo_base", # Directory where the template file is located
  "WriteDir" : "det_inputs", # Directory where the input files are generated
  "RandPara" : {         # Sampling parameters
    # set the failure time of DG
    "@DGFAIL" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 14400, "std" : 7200,
                  "lowerLimit" : 7200, "upperLimit" : 21600},
    "@DGRECYN" : {"SamplingType" : "Bin", "prob" : 0.5},
    "@DGRECOV" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 28800, "std" : 7200,
                  "lowerLimit" : "@DGFAIL", "upperLimit" : 43200},
    # set the factors of RCIC flow rate
    "@RCICFA1" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.55, "std" : 0.1,
                  "lowerLimit" : 0.4, "upperLimit" : 0.6},
    "@RCICFA2" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.65, "std" : 0.1,
                  "lowerLimit" : "@RCICFA1", "upperLimit" : 0.7},
    "@RCICFA3" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.75, "std" : 0.1,
                  "lowerLimit" : "@RCICFA2", "upperLimit" : 0.8},
    "@RCICFA4" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.85, "std" : 0.1,
                  "lowerLimit" : "@RCICFA3", "upperLimit" : 0.9},
    # set the SRV thermal seizure temperature and open area factor
    "@TSTEMP" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 626.85, "std" : 100,
                  "lowerLimit" : 526.85, "upperLimit" : 826.85},
    # set the SRV stochastic failure parameters
    "@RFSRVF" : {"SamplingType" : "Bin", "prob" : 0.3},
    "@RFSRVT" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 36000, "std" : 10000,
                  "lowerLimit" : 30000, "upperLimit" : 40000},
    "@SRVOPAR" : {"SamplingType" : "TruncNorm", "mean" : 0.5, "std" : 0.2,
                  "lowerLimit" : 0.05, "upperLimit" : 1}
  },
  "PauseCriteria" : {
    "PRCS" : {"Value" : 1e7, "Sign" : ">"}, # 1e7 kgf/m2 = 98MPa
    "TMS2" : {"Value" : "@TSTEMP", "Sign" : ">"}
  },
  "OutputPara" : ["PRCS", "ZWCT", "PDRY"],
  "EndTime" : {"Time" : 12, "Unit" : "HR"},
  "EndCond" : {"TCMX" : {"Value" : 1200, "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。）



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
“ChangePath”	分岐生成時に変更する流路の情報。{情報の項目:項目値} の形で、入れ子構造で与える。項目値が“UserFunc”の場合、項目値をユーザー関数を用いて設定することができる。
“AddLogic”	分岐生成時に追加する制御ロジック。THALES2 の制御ロジックの書式に合わせて、制御ロジックを記述。
“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。

```
# input of RAPID
{
  "Mode" : "MB",                # Mode of execution (GS, MB, RR, PR)
  "TrunkDir" : "det_inputs/inp0", # Directory to make branch
  "RestartPara" : "TMS2",       # Parameter for restart
  "ChangePath" : {"ICNTL" : 1,
                  "INOPATH" : 38,
                  "CNGDATA" : "UserFunc"},
  "AddLogic" : ["SETPNT TGOT 626.85 DEGC",
                "LOGXX SR50 TMS2 GT TGOT LSG5 ON",
                "LOGL2 SR51 LSG5 ON SRVX ON",
                "LOGLL2 SR52 SRVX ON AND SRVC ON SRVC OFF"],
  },
  "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。）

## 参考文献

- <sup>1</sup> U.S. AEC, “Reactor Safety Study An assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants”, WASH-1400, Oct. 1975.
- <sup>2</sup> G.Apostolakis and T.L.Chu, “Time-depend accident sequences including human actions”, Nuclear Technology, Vol64 P115-126, Feb, 1984.
- <sup>3</sup> 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.
- <sup>4</sup> <http://pycatshoo.org/>
- <sup>5</sup> M. H. A. Davis. Piecewise-deterministic Markov processes: a general class of non-diffusion. Journal of the Royal Statistical Society. vol. 46, no. 3, pp. 353–388, 1984.
- <sup>6</sup> H.CHRAIBI, et al, Speed-up reliability assessment for multi-component system: importance sampling adapted to piecewise deterministic Markovian Processes, ESREL2016
- <sup>7</sup> H.CHRAIBI. “Dynamic reliability modelling and assessment with PyCATSHOO:ApplicaRon to a test case”. PSAM 2013
- <sup>8</sup> H.CHRAIBI, et al, “Addressing Critical Dependencies in the Probabilistic Performance Assessments of Multi-purpose Systems with PvCATSHOO”, PSAM14, 2018.
- <sup>9</sup> N. Bixler, R. Gauntt, J. Jones and M. Leonard, “State-of-the-art reactor consequence analyses project, Volume 1: Peach Bottom integrated analysis”, NUREG/CR-7110, Vol.1, Rev.1, 2013.
- <sup>10</sup> <http://www.apros.fi/en/>
- <sup>11</sup> D. Mandelli, et al, “Dynamic and Classical PRA: a BWR SBO Case Comparison”, INL/CON-14-33731, May 2015.
- <sup>12</sup> D. Mandelli, et al, “Comparison of a Traditional Probabilistic Risk Assessment Approach with Advanced Safety Analysis”, INL/CON-14-3294, November 2014.
- <sup>13</sup> Z. Ma, et al, “Comparing Simulation Results with Traditional PRA Model on Boiling Water Reactor Station Blackout Case Study”, INL/CON-14-33757, May 2015.
- <sup>14</sup> D. Mandelli, et al, “A Flooding Induced Station Blackout Analysis for a Pressurized Water Reactor Using the RISMC Toolkit”, Science and Technology of Nuclear Installations, Article ID 308163, Vol. 2015, 2015.
- <sup>15</sup> D. Mandelli, et al, “Integration of Fault-Trees and Event-Trees into Dynamic PRA”, Trans. ANS, Vol 118, June 2018.
- <sup>16</sup> Samuel J. Gershman and David M. Blei, A tutorial on Bayesian nonparametric models, Journal of Mathematical Psychology 56: 1-12, 2012.
- <sup>17</sup> Radford M. Neal, Markov chain sampling methods for Dirichlet process mixture models, Journal of Computational and Graphical Statistics 9 (2): 249-265, 2000.
- <sup>18</sup> Müller, Meinard “Dynamic Time Warping. In Information Retrieval for Music and Motion”, chapter 4, pages 69-84 (Springer) 2007.
- <sup>19</sup> F. Petitjen et al. “A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering” Pattern Recognition, vol. 44, pp. 678-693, 2011.
- <sup>20</sup> J. Kim and H. G. Kang “Pattern Identification of Dynamic Event Tree Scenarios with Clustering” PSAM14, 2018.
- <sup>21</sup> R. Christian and H. G. Kang “Code Surrogate Development for Dynamic PRA Using Anisotropic Taylor Kriging Methodology” PSAM14, 2018.
- <sup>22</sup> J. Zhao and L. Itti “shapeDTW: Shape Dynamic Time Warping” Pattern Recognition, vol. 74, pp. 171-184, 2018.
- <sup>23</sup> 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, November 2016.

- <sup>24</sup> Z. Jankovsky, et al, A Dynamic Coupled-code assessment of mitigation actions in an interfacing system loss of coolant accident, PSAM14, 2018.