

令和 2 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 3 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	4
2.2. リスク情報の導出機能	6
2.2.1. 解析結果に対するデータベースの構築	7
2.2.2. クラスタリング機能の開発	8
2.2.2.1. 時系列データの形状に即したクラスタリング	9
2.2.2.2. 事象進展ベクトルに対するクラスタリング	10
2.2.2.3. 最適なクラスタ数を推定する機能の追加	11
2.3. 動的 PRA の効率的な実施機能	15
2.3.1. 効率的な動的 PRA の開発状況	16
2.3.2. 効率的動的 PRA 手法の構築	18
2.3.3. RAPID における効率的な動的 PRA 実施機能の構築	21
2.3.3.1. RAPID フレームワークのサンプラーの構成	21
2.3.3.2. 初期サンプラー (Initial samplers) の実装	23
2.3.3.3. 代替評価モデルを用いた適合サンプラー	30
2.3.3.4. Python の multiprocessing モジュールを用いた並列処理機能の整備	33
2.4. まとめ	34
3. 動的な PRA の試解析	35
3.1. SBO 事故シナリオに対する動的 PRA の試解析	35
3.1.1. BWR における SBO 事故シナリオ	36
3.1.2. BWR における THALES2 を用いた試解析	42
3.1.2.1. 生成した事故シーケンス	42
3.1.2.2. 解析結果	55
3.1.2.3. 解析結果の考察	81
3.1.2.4. 炉心損傷頻度の算出	88
3.1.2.5. クラスタリングによるリスク情報の導出	89
3.1.3. BWR における Apros を用いた試解析	98
3.1.3.1. 事故シーケンスの分岐生成機能の改良	98
3.1.3.2. SBO 事故シナリオに対する検証解析	104

3.1.3.3.	クラスタリングによるリスク情報の導出	111
3.1.4.	PWR における SBO 事故シナリオ	120
3.1.5.	PWR における Apros を用いた試解析	123
3.1.5.1.	SBO 解析のための Apros へのモデルの追加	123
3.1.5.2.	Apros による試解析の結果	126
3.2.	動的 PRA の効率的な実施機能の検証解析	135
3.2.1.	代替評価モデルの構築及び交差検証	135
3.2.1.1.	SVM 分類を用いた炉心損傷の予測	137
3.2.1.2.	SVM 回帰を用いた炉心損傷の発生タイミングの予測	145
3.2.2.	THALES2 を用いた適合サンプリングのテスト	147
3.3.	まとめ	149
4.	まとめ	150
付録 A.	ESREL2020-PSAM15 概要	152
付録 B.	RAPID の実行方法と入力ファイル	154
参考文献	170

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。
- ④ ②及び③で開発したそれぞれの機能を動的 PRA ツール RAPID として整備する。

本年度の動的な PRA 手法の開発は、以下を実施した。

1. 動的 PRA ツール RAPID について、共通部分や利用を選択する部分など汎用性及び保守性を向上させる目的でそのあるべき構造（フレームワーク）について検討を進めた。
2. 動的 PRA 実施結果から有用なリスク情報を導出するため、解析結果のデータベース化、クラスタリング機能の充実化、機器の重要度等のリスク情報を得るための機能を RAPID に追加した。また、膨大な数の事故進展解析を実施するため、代替評価モデルを構築する機能や効率的なサンプリング手法の導入を行った。
3. RAPID の BWR を対象とした簡略化した全交流電源喪失事故シナリオへの適用可能性を確認したことから、より現実的な BWR を対象とした全交流電源喪失事故を対象に Apros 及び THALES を利用した解析を行い、その適用可能性を確認した。また、PWR を対象とした解析への適用可能性を確認するため Apros を用いた解析を実施した。解析結果から主要なリスク情報の抽出を行った。
4. 本年度整備した RAPID を用いて効率化機能の利用による効率化の検証を実施した。
5. 以上の機能の整備及び解析を通じ、RAPID を用いた動的 PRA の実施に関する改善点をまとめた。

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、平成 31 年度に動的 PRA 手法の開発を進め、またこれを実施可能とするために RAPID の開発を進めた。平成 31 年度の動的レベル 1 確率論的リスク評価手法の開発事業において、以下の項目が動的 PRA ツールの開発に係る必要な項目として挙げている。

- ・解析における制御ロジックの構築を補助するような機能
- ・クラスタリング手法等の参考情報を取りまとめること
- ・クラスタリング機能の実装に際しては、必要な情報を取り出せるような機能
- ・様々なリスク情報の導出に向け、ユーザー関数などの機能の付加
- ・複数のサンプリング手段の用意
- ・複数の代替評価モデルを構築する手段の整備

本年度は上記項目を念頭に、クラスタリング機能の拡張を行うとともに同手法を用いたリスク情報の抽出機能、また、評価対象に応じて効率的なサンプリング手法を選択できるような複数のサンプリング手法の実装等動的 PRA の効率的な実施機能の開発を進めることで RAPID の整備を進めた。一方、様々な機能を追加することで RAPID の構造も複雑化し、開発における拡張性及び保守性の低下が懸念される。このため開発を進めるにあたり RAPID の開発方針及びその設計についての検討を合わせて進めた。

2.1. RAPID の開発方針

日本原子力研究開発機構（略称：JAEA）では、図 2.1-1 に示すように、シミュレーションに基づくリスク情報を活用した意思決定に寄与するため、シミュレーションによるシステム解析と確率モデルに基づく事故シーケンス生成の連携に加えプラント状態に依存する機器故障を考慮する、決定論的及び確率論的リスク評価を強固に結びつける動的 PRA 手法の開発を進めている。このような目的で構築した手法は従来の動的 PRA より複雑となることから、本動的 PRA 手法の実施をサポートする目的で RAPID の開発を進めている。RAPID は、動的 PRA ツールの開発要件で示されているようにサンプリング機能、解析の制御機能及び結果の処理機能を有する。図 2.1-2 に RAPID の設計思想とデータの流れを示す。

近年 RAPID に様々な機能を整備し解析の利便性の向上を図ってきたが、例えば THALES2 を用いた解析を行うための RAPID と Apros を用いた解析を行うための RAPID が開発の進展の違いから都合上それぞれ存在している。このため RAPID の機能を THALES2 で確認しても Apros も直ちに利用できる状態ではなく再度構築する必要がある。THALES2 と Apros の入力やモデルの違いがあり必ずしも同一になることはないが、このような構成は今後機能の追加やバグの修正等の保守を考えるうえで好ましい状態とは言えない。そこで今後の拡張性及び保守性の向上を目指し、RAPID の構造設計に関する検討に着手した。汎用性及び拡張性を考えた上、標準的な Python コードの構造[3]とオブジェクト指向プログラミングのコード設計理論[4]を参考し、RAPID の設計において機能単位でモジュールを用意する方針とし、ユーザーの独自性を有する計算の流れを定義できる RAPID の入力構造を設計した。

なお、本年度整備した機能のうち、複数のサンプリング手法や適合サンプリングの機能はモジュールとして整備した。

2.2. リスク情報の導出機能

動的 PRA の解析では、膨大な数の解析結果が生成されるため、そこから適切な機器重要度等のリスク情報を得るためには多数の解析結果を処理し必要な情報を抽出する機能が必要になる。昨年度までに解析結果から炉心損傷に至ったケースを抽出、カウントすることで炉心損傷頻度の推定を行うことができるようにするとともに、解析者が着目するパラメータに関連するシーケンス数の抽出及び抽出したシーケンス数の演算処理機能を **RAPID** に付加した。また、事故進展の類似性から解析結果を分類するクラスタリング機能を付加した。本年度は、クラスタ数の推定に関する参考情報の提供、入力および事故進展を特徴付けるパラメータを用いたクラスタリング機能を追加した。また、追加するクラスタリング機能では、クラスタリングを利用したリスク情報を導出できるように **RAPID** の改良を行った。加えて、解析結果の処理を効率的に行えるように、解析結果を特定の形式でデータベースに保存し、そのデータベースから結果処理を行えるようにした。

2.2.2. クラスタリング機能の開発

RAPIDにより生成される事故シーケンスに基づく事故進展解析により、様々な事故進展挙動を得る。この事故進展挙動の類似性からクラスタリングを行い、クラスタ間の差が生じる要因を検討することにより、有益なリスク情報を得ることができると考えられる。クラスタリングを行う方法として、二つの方法を整備した。一つは、事故進展挙動の時系列データの形状に即してクラスタリングを行う方法である。もう一つは、安全系の作動状態やプラント内の熱水力状態など事故進展に影響しそうな特徴量より構成されるベクトルを求め、入出力より構成されるベクトル（以下、事象進展ベクトル、とする）に対してクラスタリングを行う方法である。本年度は、昨年度実施した時系列データの形状に即してクラスタリング機能に改良を加えるとともに、事象進展ベクトルに対するクラスタリング機能を追加した。さらに、ベイズ情報量基準、エルボー法、シルエット分析によるクラスタ数を推定する際に参考情報を提供するオプション機能も追加した。図 2.2.2-1 にクラスタリング機能の概要を示す。

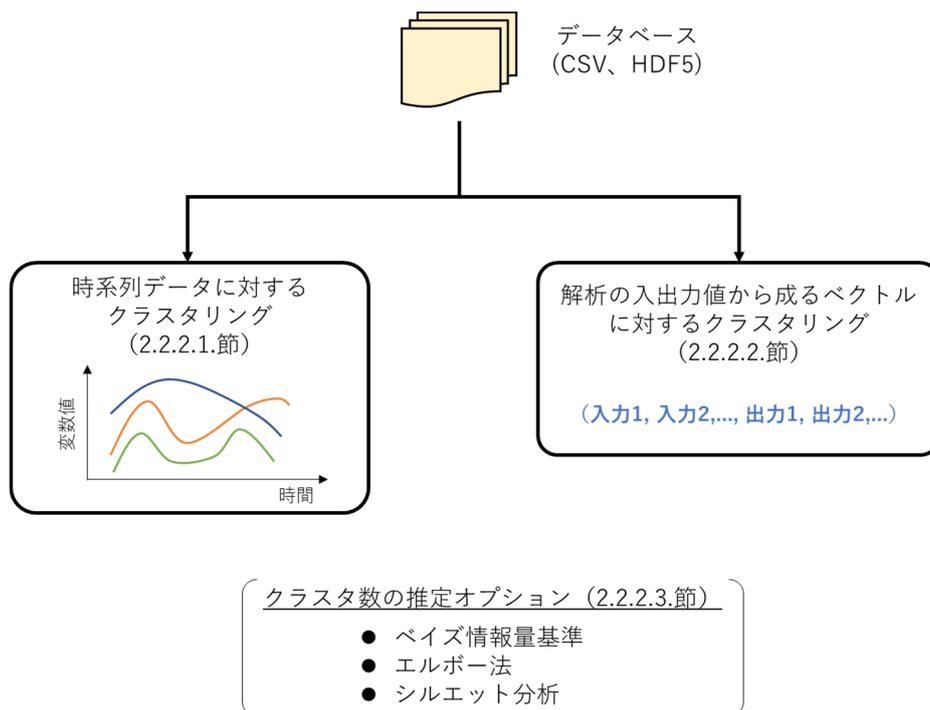


図 2.2.2-1 クラスタリング機能の概要

2.2.2.1. 時系列データの形状に即したクラスタリング

時系列データの類似性を測る手法として、Dynamic Time Warping 法（以下、DTW 法と略）がある。DTW 法は、時系列データ上の点と他の時系列データ上の点の距離を総当たりで求め、その距離の合計が最も小さくなるような関係（DTW 距離）を見つける手法である。

昨年度、前処理の段階で DTW 距離を算出して k-medoids 法によるクラスタリングを行う機能を RAPID に追加した。本年度は、k-means 法と DTW 法を組み合わせ、時系列データに対するクラスタリングを行う機能を RAPID に実装した。

Python のライブラリ tslearn[5]は、時系列分析のための機械学習ツールであり、k-means 法と DTW 法を組み合わせ、クラスタリング[6]が可能である。このライブラリ tslearn を利用して、時系列データに対するクラスタリング機能を RAPID に実装した。

また、レベル 1PRA において、炉心損傷の有無は重要な判定基準であるため、燃料被覆管最高温度の結果は重要であるが、その結果に至る事故進展状況も含めた事故シーケンスの分類を行うには、原子炉における圧力や水位の結果も考慮した分類も必要になる。そこで、多変数の時系列データ群に対してもクラスタリングを行えるようにした。ただし、多変数の場合、変数によって次元や単位も異なる。その点を考慮するため、以下のような前処理を加えるようにした。

<多変数の時系列データ群に対するクラスタリングのための前処理>

1. 各変数において、解析結果の値を解析結果の最大値で割ることで、0 から 1 の範囲の値に統一する。

$$\begin{array}{l}
 \text{時間のベクトル } t : [t_0 \ t_1 \ t_2 \ \dots] \\
 \text{変数 } x \text{ の時系列データ : } X_i = [x_{i,0} \ x_{i,1} \ x_{i,2} \ \dots] \\
 \text{変数 } p \text{ の時系列データ : } P_i = [p_{i,0} \ p_{i,1} \ p_{i,2} \ \dots] \\
 \vdots
 \end{array}
 \xrightarrow[
 \begin{array}{l}
 \max \left(\bigcup_i [p_{i,0}, p_{i,1}, \dots] \right) \text{ で割る。} \\
 \text{和集合}
 \end{array}
]{
 \begin{array}{l}
 \max \left(\bigcup_i [x_{i,0}, x_{i,1}, \dots] \right) \text{ で割る。}
 \end{array}
 }
 \begin{array}{l}
 X'_i = [x'_{i,0} \ x'_{i,1} \ x'_{i,2} \ \dots] \\
 P'_i = [p'_{i,0} \ p'_{i,1} \ p'_{i,2} \ \dots] \\
 \vdots
 \end{array}$$

i は データ番号

2. 1 の処理を行った後、時系列データ間でピアソンの積率相関関数を計算し、全てのデータに対する平均値を出力する。

$Ave[Cor(X'_i, X'_i)]$	$Ave[Cor(X'_i, P'_i)]$...
$Ave[Cor(P'_i, X'_i)]$	$Ave[Cor(P'_i, P'_i)]$...
...

(変数の数) × (変数の数) の行列

3. 2 で得られた相関係数の平均値より、相関が低いもの同士の変数の組み合わせをピック

アップする。相関が高いもの同士の変数は、同じような形状の時系列データであるため、片方のみを含めればよく、もう片方はクラスタリングの対象から除外する。相関が低い変数に対して、時系列データの線形結合を取り、一変数の時系列データに変換する。

$$Z_i = a X'_i + b P'_i + \dots$$

線形結合の係数 a, b, \dots は、相関係数の値を元に決める。

以上の処理により、次元や単位の違いを考慮した時系列データを作成することができ、この時系列データに対してクラスタリングを行うようにした。

2.2.2.2. 事象進展ベクトルに対するクラスタリング

安全系の作動状態やプラント内の熱水力状態など事故進展に影響しそうな特徴量を導くため、事故シーケンスの入出力のパラメータセットに対してクラスタリングを行う機能を開発した。入出力の値はデータベースより抽出して、それらの値から構成される事象進展ベクトルに対してクラスタリングを行う。

$$\text{事象進展ベクトル} = (\text{入力 1}, \text{入力 2}, \dots, \text{出力 1}, \text{出力 2}, \dots)$$

本開発では、Python のオープンソースライブラリ `scikit-learn`[7]に含まれている `k-means` 法と `Gaussian mixtures` 法によるクラスタリングを `RAPID` に組み込んで、クラスタリングを行うように実装した。

さらに、ベクトルの要素数（次元数）が多い場合、相関関係の強いパラメータ同士を同一とみなして次元削減してクラスタリングを行うこともできるようにした。次元削減の方法として、主成分分析（Principal Component Analysis、略して PCA）を適用するようにした。主成分分析とは、多くの変数で示されたデータに対して、より少ない指標や合成変数（複数の変数を合体したもの）を導き出し、データの傾向を要約する手法である。要約した合成変数のことを「主成分」と呼ぶ。イメージしやすい例を挙げると、身長と体重という二変数（二次元）のデータから、BMI（ボディマス指数）という一変数（一次元）の指標に要約することである。主成分分析を行う際、主成分はデータのばらつき（分散）が大きい方向に取る。なぜなら、ばらつきが大きいほど、そのデータを区別しやすく、データの特徴を捉えているためである。図 2.2.2-2 は、二次元のデータに対して、第一主成分、第二主成分を取った図である。

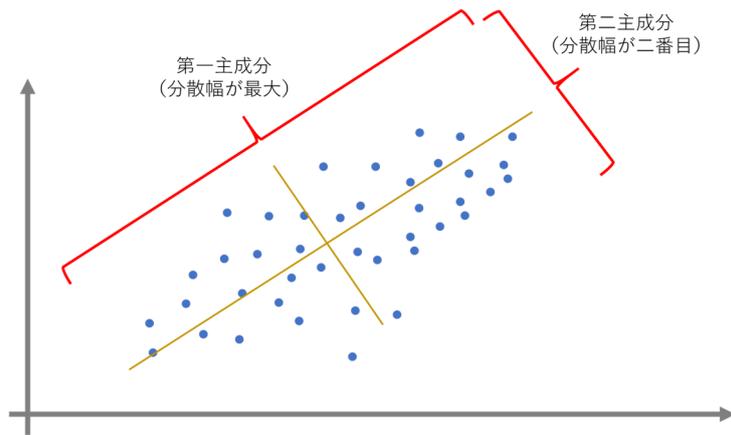


図 2.2.2-2 二次元データに対する第一主成分、第二主成分

数学的には、主成分分析はデータ点の共分散行列を求めて、対角化することである。その際に得られる固有ベクトルが多変数を主成分の軸に変換する際の重み（係数）となる。変換後の各主成分の値は、各主成分軸の固有ベクトル(a_1, a_2, \dots)、(b_1, b_2, \dots)を用いて、以下のように入力される。

$$\begin{aligned}
 (\text{第一主成分}) &= a_1 \times (\text{変数 1}) + a_2 \times (\text{変数 2}) + \dots \\
 (\text{第二主成分}) &= b_1 \times (\text{変数 1}) + b_2 \times (\text{変数 2}) + \dots \\
 &\quad \cdot \quad \quad \quad \cdot \\
 &\quad \cdot \quad \quad \quad \cdot
 \end{aligned}$$

事故シナリオの解析においても、多くの入力変数や出力変数があるが、その事故シナリオの解析結果を要約するような変数を抽出できれば、事故進展の概要や解析結果に影響する変数を特定しやすくなる。つまり、入力変数や出力変数から事故進展への影響度が高い変数を抽出することができ、機器の重要度に相当する情報を取得することができる。

2.2.2.3. 最適なクラスタ数を推定する機能の追加

k-means 法などのクラスタリング手法では、クラスタ数はユーザーが指定する値であり、事前に最適なクラスタ数は分からない。最適なクラスタ数を評価するために、

- ベイズ情報量基準に基づくクラスタ数の推定
- エルボー法、および、シルエット分析によるデータの集約度合いの評価

を行う機能を追加した。

ベイズ情報量基準

ベイズ情報量基準 (Bayesian information criterion, BIC) [8,9]は、ベイズ統計に基づいたモデル選択基準であり、

$$\text{BIC} = \log L - \frac{1}{2}k \log n \quad (2.2.2-1)$$

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 の値も大きくなる。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。クラスタリングにおいては、 BIC が向上する (BIC の値が大きくなる) かどうかで分割停止判定を行い、最適なクラスタを推定する。

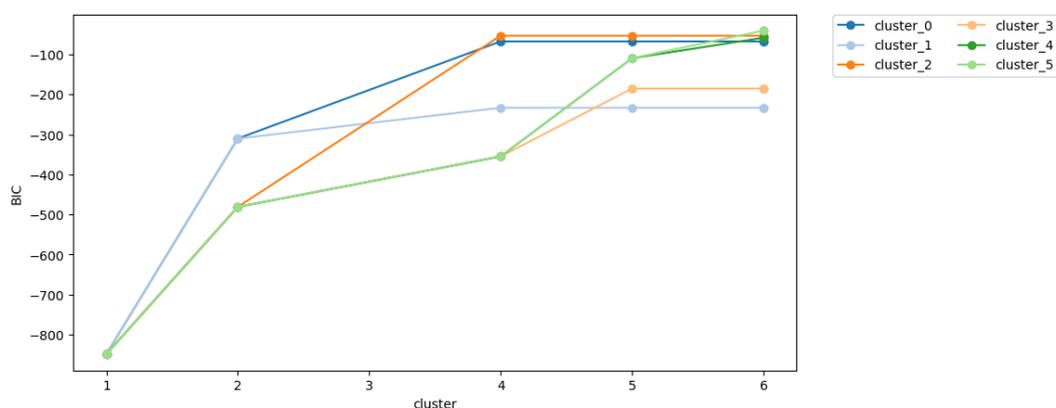


図 2.2.2-3 クラスタ数に対する BIC の変化

クラスタ数を 1 から順に二分割していき、 BIC の値が大きくなれば分割を採用し、 BIC の値が小さくなれば、その分割は採用しない。全てのクラスタにおいて、分割が停止するまで分割を続ける。図 2.2.2-3 に示した例では、クラスタ数が 6 で分割が停止している。

エルボー法

エルボー法[10]とは、各クラスタに対してクラスタ内誤差平方和 (データ点とクラスタ中心との距離の平方和) を算出し、クラスタ数の変化に対してこの誤差平方和の減少具合が小さくなるクラスタ数 (肘のようにガクンと曲がった点) を最適なクラスタ数とみなす方法である。図 2.2.2-4 にエルボー法の適用例を示す。この例では、クラスタ数が 1 から 2 になるところで誤差平方和が急激に低下しており、最適なクラスタ数は 2 と推定できる。

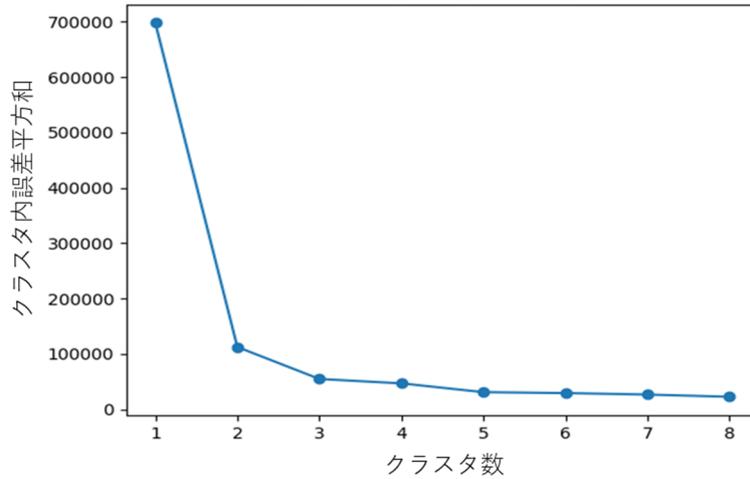


図 2.2.2-4 クラスタ数に対するクラスタ内誤差平方和の変化

シルエット分析

シルエット分析[11]とは、

- クラスタ内のサンプルがどの程度密にグループされているか（凝集度）
- 1つのクラスターが隣接するクラスターとどれくらい離れているか（乖離度）

をグラフで可視化し、適切にクラスタリングが行われているか分析する方法である。凝集度および乖離度は以下のように数値化することが可能であり、これらの値よりシルエット係数を算出する。

1. サンプル x_i と同じクラスタ内のその他すべてのサンプルとの平均距離として、クラスターの凝集度 a_i を計算する。
2. サンプル x_i と最も近くにあるクラスタ内のすべてのサンプルとの平均距離として、その次に近いクラスタからの乖離度 b_i を計算する。
3. クラスタの凝集度と乖離度の差を、それらのうち大きい方の値で割り、シルエット係数 s_i を計算する。

$$s_i = \frac{b_i - a_i}{\max(b_i, a_i)} \quad (2.2.2-2)$$

シルエット係数を用いてクラスタリングの良し悪しを判定する。図 2.2.2-5 は、シルエット係数を図示したシルエット図と呼ばれるものである。シルエット係数が 1 に近いほど、そのクラスターは他のクラスターから遠く離れており、良いクラスタリングができています。

ことを示す。また、シルエット係数の平均値に対する値や1つのクラスタに分類されるサンプル数（シルエット図の厚み）もクラスタリングの良し悪しを判断するポイントとなる。

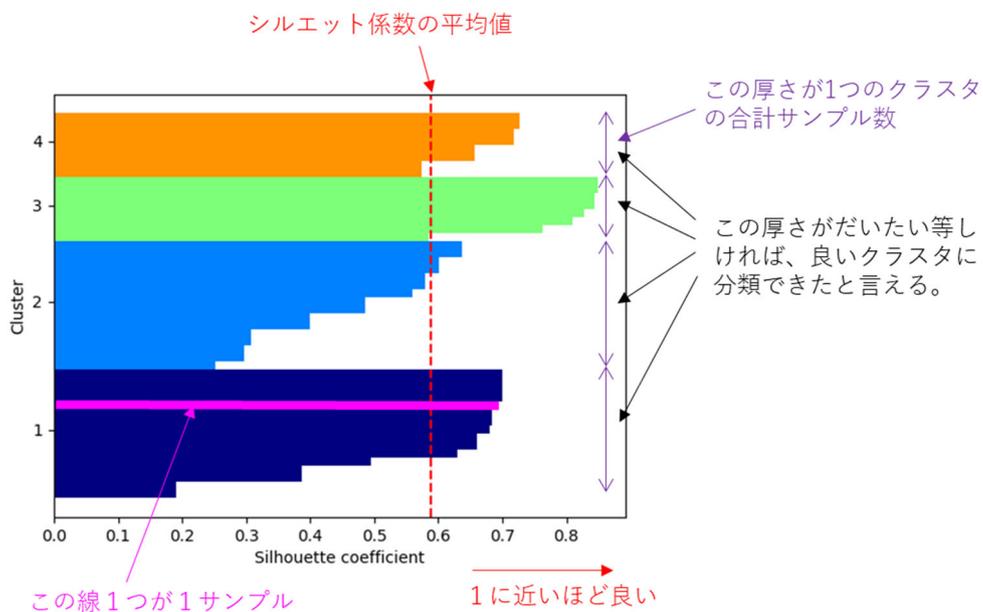


図 2.2.2-5 シルエット図

2.3. 動的 PRA の効率的な実施機能

シミュレーションに基づく動的 PRA を実施する場合、稀で重大な事故シナリオの発生確率を推定するため、膨大な計算コストが発生する。頻度論により事象の発生確率を推定する場合、事象の発生確率が平均に収束するまでには、膨大な試行回数を要する。さらに、シミュレーション・コードは複雑で高次元の入力、また、時間に強く依存するシステム・ダイナミクスなどの特徴を持つため、取り得るプラント状態が多数存在する。このような様々な状態を網羅的に把握するためには動的 PRA の計算コストを削減しなければ現実的な評価には至らない。

事故発生頻度と影響を効率的に推定するためは、2つの方法が考えられる：1) サンプル数の削減, 2) 多ケース解析によるシミュレーションの速度を向上。特に、2)について、ミラノ工科大学の Enrico Zio 教授の論文[12]により、並列処理による計算能力の向上及び適合サンプリングを用いたシミュレーションによりシミュレーション速度の向上が図れることが指摘された。

2.3.1. 効率的な動的 PRA の開発状況

本年度の RAPID に、効率的な動的 PRA 実施機能を調査し、下記の 3 種類の方法について実装した。

① サンプル数の削減による効率化

モンテカルロ・サンプリング法では、可能な事故シーケンスを有限数のブランチに制限するが、このプロセスを多数回に繰り返す必要がある。さらに、大部分のシミュレーションが結果を推定できるシーケンスに費やされるため、効率が低下する[13]。

ADS-IDAC[14]と ADAPT[15]は、離散動的イベントツリー (Discrete dynamic event tree, DDET) を使用して、例えば、システムの確率的な変動、ハードウェアの故障、運転員の応答などの重要なパラメータの変動を事故進展へ反映する場合、連続の確率分布を離散化することにより、サンプル数を減らすことが可能となる。また、膨大なパラメータの組合せの数を抑制するため、発生頻度に基づくカットオフ手法にも活用されている。しかし、発生頻度を計算するため、結果を処理する必要がある。DDET と比べると、モンテカルロ・動的イベントツリー (Monte Carlo dynamic event tree, MCDET) [16]は、不確かさの処理に優れるが、効率が低下する欠点がある。

以上の調査から、動的イベントツリーを利用するとともに、効率的な初期サンプリング (Initial sampling) 方法を適用することで、サンプル数を減らす方法として採用することとした。効率的な初期サンプリング方法の例として、ラテン超方格法 (Latin Hypercube sampling, LHS) が代表する層化抽出法 (Stratified sampling) と準モンテカルロ法 (Quasi Monte Carlo sampling, QMC) がある。

② 簡易なモデルを用いるシミュレーションによる効率化

代替評価モデル (Surrogate model)、低次元化モデル (Reduced order model) やメタモデル (Metamodel) は許容できる誤差でシミュレーション結果を高速に予測することができる簡易なモデルである。簡易なモデルを構築する方法は様々あるが、ここでは主に統計手法で構築する代替評価モデルについて述べる。元の解析モデルの詳細を知らずとも、データの入力と出力の関係により、統計的回帰 (連続的な出力) や分類 (離散的な出力) を用いて代替評価モデルを構築することが可能である。

適合サンプリング法 (Adaptive sampling) は、代替評価モデルの予測結果を利用することにより、シミュレーションする入力サンプルを生成する。適合サンプリング法を利用することにより、計算コストを大幅に削減することが可能である。RAVEN[17]と DAKOTA[18]に、代替評価モデルに基づく適合サンプリング法が実装されている。

③ 並行処理を用いるシミュレーションによる効率化

動的 PRA はシステムコードを繰り返して実行する必要があるため、並列実行により効率化ができる。並列処理版の ADS-IDAC があり、ADAPT, RAVEN と DAKOTA にも並行処理機能が備えられている。

表 2.3.1-1 に示すように、代表的な動的 PRA と不確かさ解析ツールの効率化処理機能をまとめた。JAEA は以上の 3 つの方針に従い、独自性を有する効率的 PRA 手法を構築し、RAPID の開発を進めている。

表 2.3.1-1 各ツールの効率化機能の比較

		① 効率的な初期サンプリング	② 代替評価モデルを用いた適合サンプリング	③ 並列処理
ADS-IDAC[14]	動的 PRA ツール	○	-	並列処理版があり
MCDET[16]		○	-	-
ADAPT[15]		○	-	○
RAVEN[17]	動的 PRA 及び不確かさ解析ツール	○	○	○
DAKOTA[18]	不確かさ解析ツール	○	○	○
RAPID (R2 年度、機能導入)		○	○	○
効率化の効果 (定性的判断)		少	大	中

2.3.2. 効率的動的 PRA 手法の構築

2.3.1 節で動的 PRA の効率的な実施のための方法として調査した結果、その方法は表 2.3.1-1 に示すように大きく 3 つの方策があり、これらを有機的に結びつけるため、図 2.3.2-1 に示すように動的 PRA を効率的に実施する手法を構築した。本手法はシステムコードのような詳細を持つもの（高忠実度モデル; High fidelity）、代替評価モデルのような簡易なもの（Low fidelity）を組合せ及び選択を行うため多忠実度モデル（Multi-fidelity model）と呼ばれている[19]。この手法の適用により効率的に PRA 結果を得られると考え、本手法の RAPID への構築を行った。

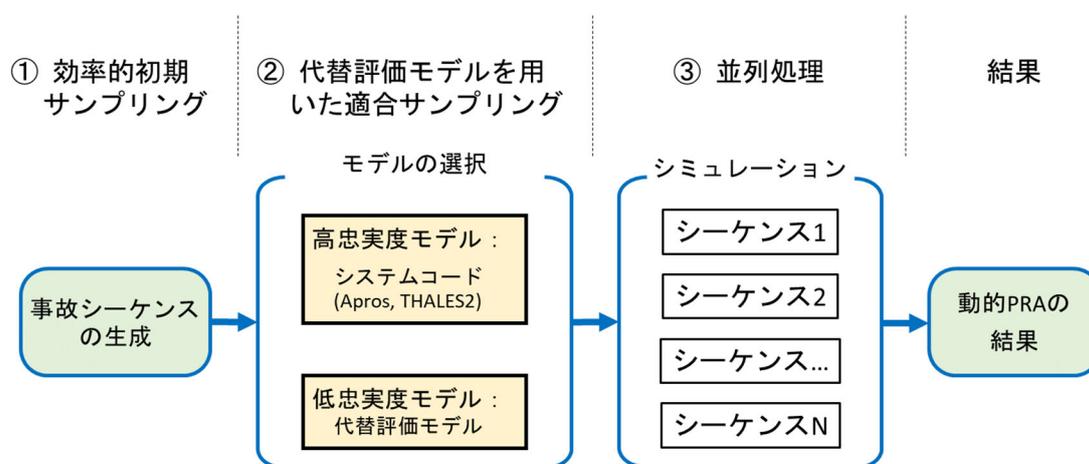


図 2.3.2-1 多忠実度モデルを用いた DPRA 手法のイメージ図

この手法の主たる部分は多忠実度モデルの選択であり、これは高忠実度モデルと低忠実度モデルの選択を計算コストを抑えつつ信頼できる結果を得られるようにすることである。多忠実度の動的 PRA を実施するため、図 2.3.2-2 に示すように、代替評価モデルを構築する必要がある。

代替評価モデルの構築には support vector machine (SVM) 及び Gaussian process model の機械学習アルゴリズムを用いることとした。また、代替評価モデル構築の入力として THALES2 及び Apros の解析結果を用い、代替評価モデルの妥当性検討には、データベース化した解析結果から代替評価モデルに用いないデータを選定し、それ以外のデータを用いて構築した代替評価モデルを利用して予測を行い比較することをすべてのデータで行う cross-validation 法によりその精度を確認する。

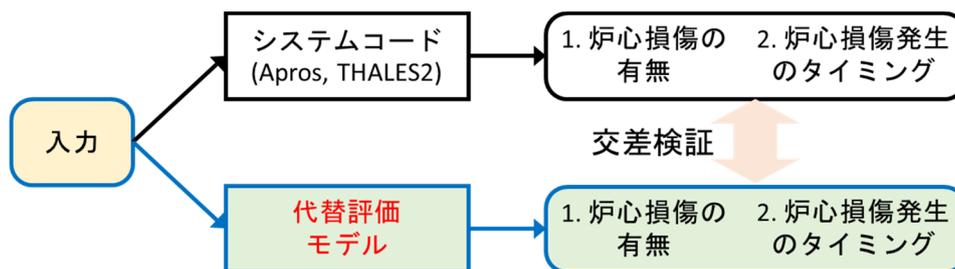


図 2.3.2-2 代替統計モデルの構築

適合サンプリング法は表 2.3.2-1 に示すよう 5 つのステップで構成される。

表 2.3.2-1 適合サンプリングの実施手順

1. モンテカルロ法を用いてシステムコードの初期入力をサンプリングし、コードを実行する。
2. シミュレーションのデータを用いて代替評価モデルを構築する。
3. モンテカルロ法を用いて入力空間に多数のサンプルを抽出し、代替評価モデルで結果を予測する。
4. 代替評価モデルの予測により、用いた入力が必要な事故シーケンスを同定できる場合、その入力をシステムコードで解析する。
5. 結果が収束するまで、2~4 を繰り返す。

適合サンプリング法の 1 つの活用先はシビアアクシデント (SA) 時の事故緩和対策の最適化解析である。例えば、放射性物質の環境への放出量を最小化するため、最適な緩和対策の組合せを推定する必要がある。図 2.3.2-3 に、格納容器ベント操作タイミングの最適化に応用した適合サンプリング法の例を示している[20]。初期入力値の組合せ \mathbf{x}_0 に対して SA 解析を実行する。解析結果を用いて暫定的な代替評価統計モデル $f^1(\mathbf{x})$ を作成する。サンプリングした入力空間を対象とし、この暫定モデルでの予測の平均値 $\mu(\mathbf{x})$ と分散 $\sigma(\mathbf{x})$ を計算し、最適値になる指標である $a(\mathbf{x}) = \mu(\mathbf{x}) - \sigma(\mathbf{x})$ の値が最も大きくなる \mathbf{x}_1 を抽出する。これは、 \mathbf{x}_1 において最適値になる可能性が一番高いを意味している。次のステップでは SA 解析コードで $f(\mathbf{x}_1)$ を算出し、 $f(\mathbf{x}_0)$ 及び $f(\mathbf{x}_1)$ を利用して、新たな暫定モデル $f^2(\mathbf{x})$ を作成する。このようにして代替評価モデルの更新を反復し、収束の判断基準として、 \mathbf{x}_i と \mathbf{x}_{i+1} が十分に接近した点が最適解 \mathbf{x}_{opt} となる。

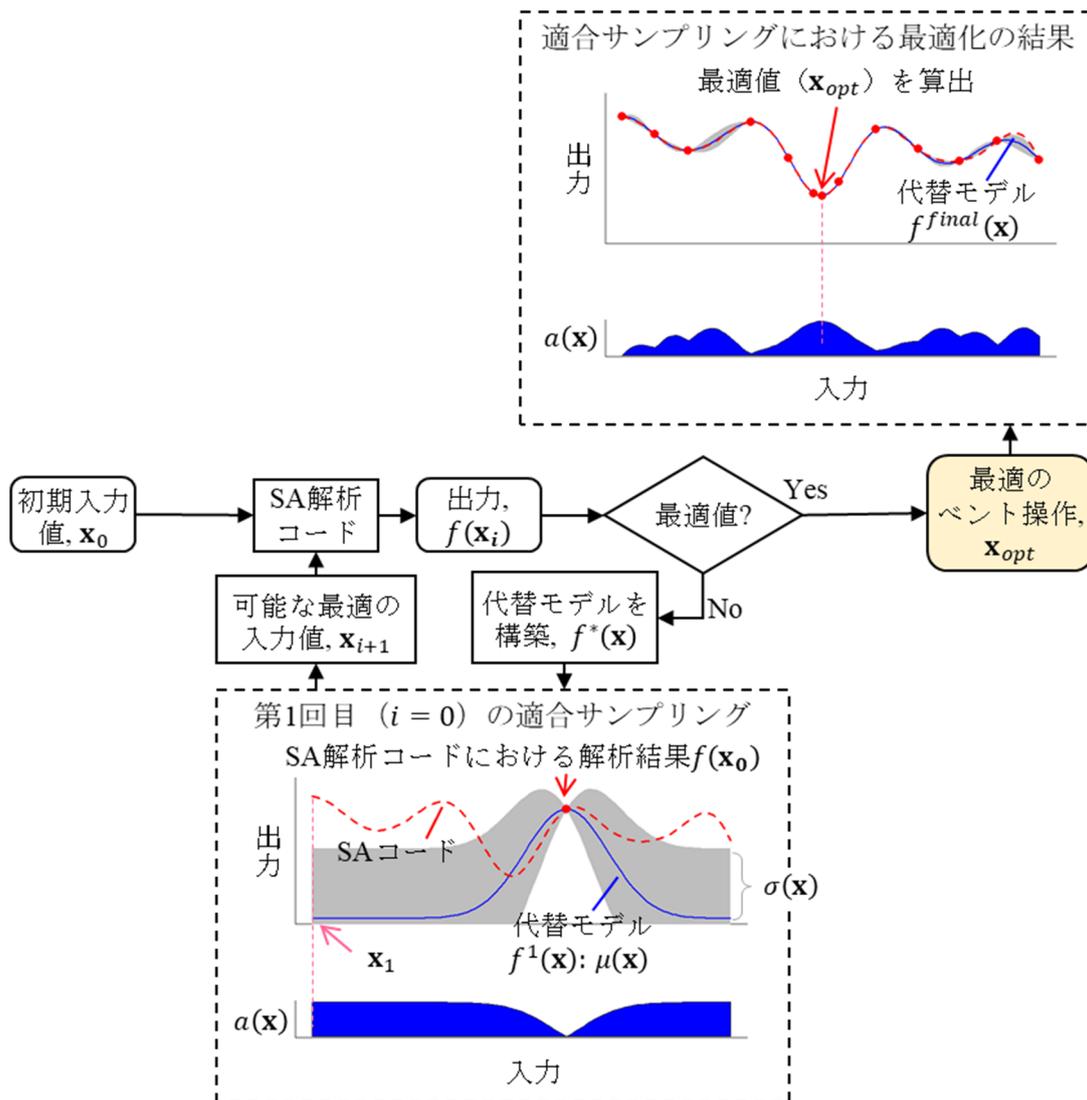


図 2.3.2-3 適合サンプリング法を用いた最適化手法の紹介[20]

2.3.3. RAPID における効率的な動的 PRA 実施機能の構築

汎用性、拡張性及び保守性を向上させるため、2.1 節で示した RAPID の設計方針に従い、RAVEN フレームワークを設計し、効率的な初期サンプラー、適合サンプラーと並列処理機能を RAPID に構築し、統一した入力ファイルを用いてテストを行った。

2.3.3.1. RAPID フレームワークのサンプラーの構成

RAPID フレームワークは図 2.3.3-1 に示すように各機能がモジュール化されている。rapid_driver.py は RAPID のエントリポイントであり、計算の流れ及び各モジュールの設定を JSON の入力方式で設定し、次のコマンドを利用すると、簡単に実行できる。

例：

```
./rapid_driver.py test_input.json
```

samplers.py モジュールは、表 2.3.3-1 に示すように、主に初期サンプラーと適合サンプラーで構成されている。distributions.py モジュールに、ユーザーが利用可能な確率分布が含まれている。Python のオープンソース・ライブラリーである scipy.stats を用い、表 2.3.3-2 に示すように、PRA でよく利用する 12 種類（離散型と連続型）の確率分布を実装した。

correlation_control.py モジュールではサンプリングパラメータ間の相関を解析者が定義できる独立したモジュールである。適合サンプリングではシステムコードの実行も行うため execution.py モジュールによりそれを実現する。例えば THALES2 の実行にはコードインターフェース thales2.py を利用することで可能となる。surrogate.py モジュールでは適合サンプリングに用いる代替評価モデルの訓練を行う。printers.py モジュールはサンプリング結果やシミュレーション結果をデータベースに書き出す機能を有する。

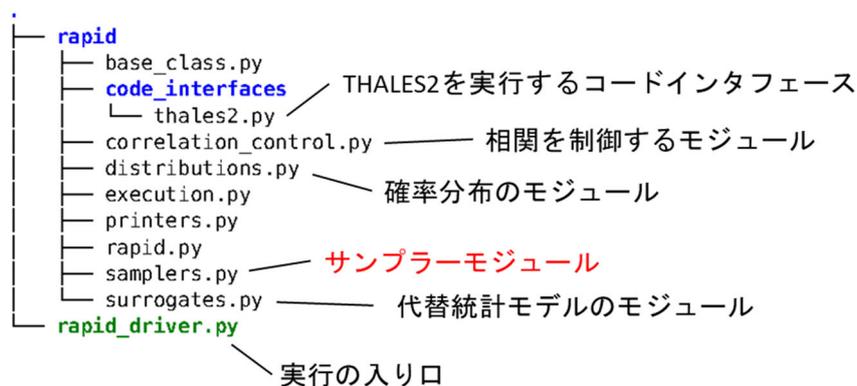


図 2.3.3-1 設計図（図 2.1-2）に応じた RAPID フレームワークのファイルシステム

表 2.3.3-1 RAPID で利用できるサンプラー

サンプラー		説明
初期サンプラー (Initial samplers)	Monte Carlo	パラメータの相関を考慮しないサンプラー
	Grid	
	Latin Hypercube	
	Quasi Monte Carlo	
	Correlated Monte Carlo	パラメータの相関を考慮するサンプラー
	Correlated Latin Hypercube	
	Correlated Quasi Monte Carlo	
適合サンプラー (Adaptive sampler)	Surrogate-based samplers	利用可能な代替評価モデル: サポートベクトルマシン (Support vector machine)、ガウス過程 (Gaussian process)

表 2.3.3-2 RAPID で利用できる確率分布

No.	離散型・連続型	確率分布名	
1	離散型	Bernoulli	ベルヌーイ分布
2		Geometric	幾何分布
3	連続型	Binomial	二項分布
4		Beta	ベータ分布
5		Exponential	指数分布
6		Gamma	ガンマ分布
7		Logistic	ロジスティック分布
8		Lognormal	対数正規分布
9		Log-uniform	対数一様分布
10		Normal	正規分布
11		Truncated Normal	切断正規分布
12		Uniform	一様分布

2.3.3.2. 初期サンプラー (Initial samplers) の実装

事故シーケンスの生成のためのサンプリングを実行する初期サンプラーとして、モンテカルロ (MC) サンプラー以外に、グリッド (Grid) サンプラー、ラテン超方格 (LHS) サンプラーと準モンテカルロ (QMC) サンプラーを RAPID に組み込んだ。また、`correlation_control.py` と各サンプラーを連結することにより、パラメータ間の相関を考慮することができるサンプリング機能 (Correlated MC サンプラー、Correlated LHS サンプラーと Correlated QMC サンプラー) を導入した。

① MC サンプラー

RAPID の JSON 形式の入力では、パラメータの数や分布の設定は自由であり、CSV ファイルへの出力もユーザーが指定できる。また、今後の拡張性等を考慮し、新たなサンプラーと分布の追加も容易である。例として、下記のように、変数の分布を設定し、1000 回のランダム・サンプリングした結果を図 2.3.3-2 に示す。

Parameter A ~ *Uniform*(location = 1, scale = 4)

Parameter C ~ *TruncatedNormal*(location = 10, scale = 1, upperlimit = 12, lowerlimit = 8)

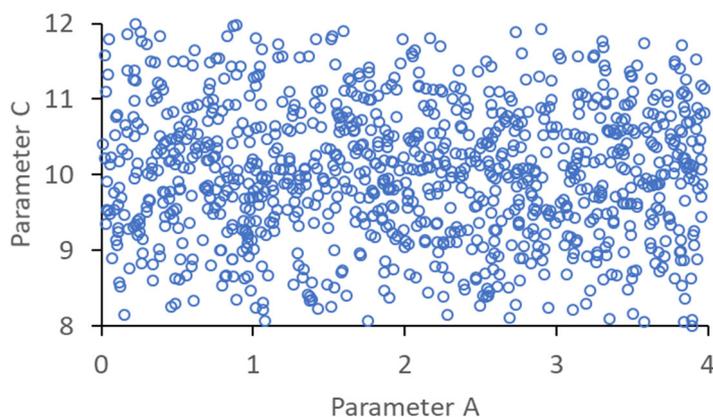


図 2.3.3-2 モンテカルロ・サンプリングの結果

② グリッド・サンプラー

RAPID に導入したグリッド・サンプラーは厳密な格子構造であり、全てのサンプルは格子の交差点から抽出する。グリッド・サンプラーの1つの欠点は、必要なサンプル・ポイント

トの数が入力の次元に指数関数的に依存することである。高次元の入力に対して、グリッド・サンプラーの活用は限られている。

図 2.3.3-3 は RAPID を用いた 1000 回のグリッド・サンプリングの結果の例であり、分布の設定は一様分布と切断正規分布である。デフォルトのグリッドの数は設定したサンプル数の平方根よりも大きい最小の整数となる。例えば、サンプラーの数が 1000 の場合、各変数のグリッドの数は 32 になる。

Parameter A~Uniform(location = 1, scale = 4)

Parameter C~TruncatedNormal(location = 10, scale = 1, upperlimit = 12, lowerlimit = 8)

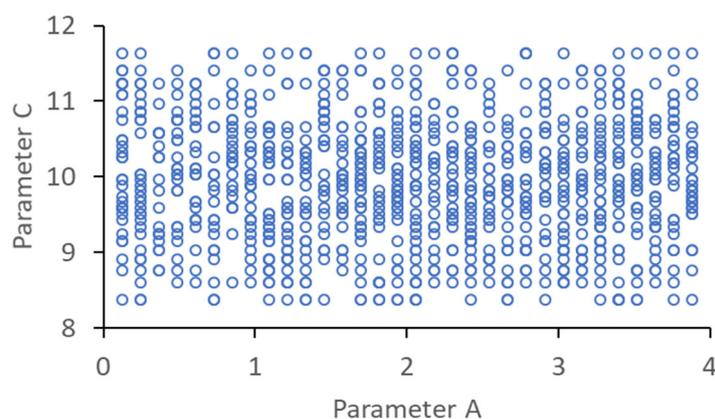


図 2.3.3-3 グリッド・サンプリングの結果

③ LHS サンプラー

LHS サンプリング[21]は、多次元分布の入力パラメータ空間において、与えられた確率密度分布と同等な出現頻度となるように、サンプルを抽出する方法である。LHS は入力分布を区間に分割する必要があり、MC サンプリングよりも優れた利点を持つ。例えば、サンプル数が等しい場合、MC サンプリングより、LHS サンプリングで得たサンプルの平均値の分散が小さくなる。LHS サンプリングは不確かさ解析に幅広く使われている。ここでは5つの種類の LHS 手法（従来の LHS、サンプルの間隔を平均した LHS、サンプル間の最小距離を最大化した LHS、サンプルの相関を最小化した LHS、サンプルの比率を最小化した LHS）を RAPID に導入した[22]。下記のような確率分布で設定したパラメータを実装した LHS サンプラーでテストを行い、機能を確認した。図 2.3.3-4 から図 2.3.3-8 にテスト結果を示す。

$Parameter A \sim Uniform(location = 1, scale = 4)$

$Parameter C \sim TruncatedNormal(location = 10, scale = 1, upperlimit = 12, lowerlimit = 8)$

- Classic LHS

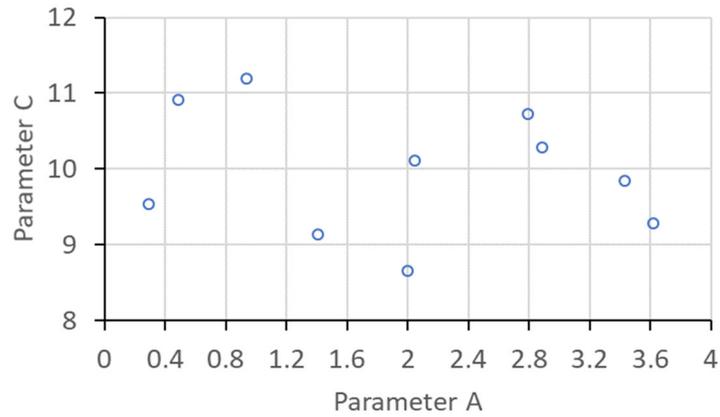


図 2.3.3-4 従来の LHS サンプリングの結果

- Centered LHS

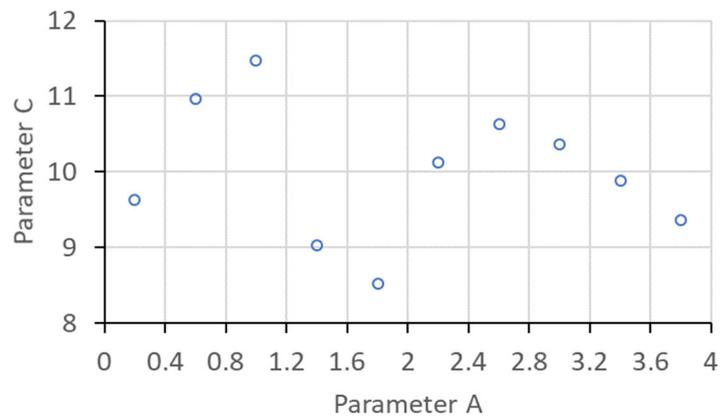


図 2.3.3-5 サンプルの間隔を平均した LHS サンプリングの結果

- Maximized minimal distance LHS

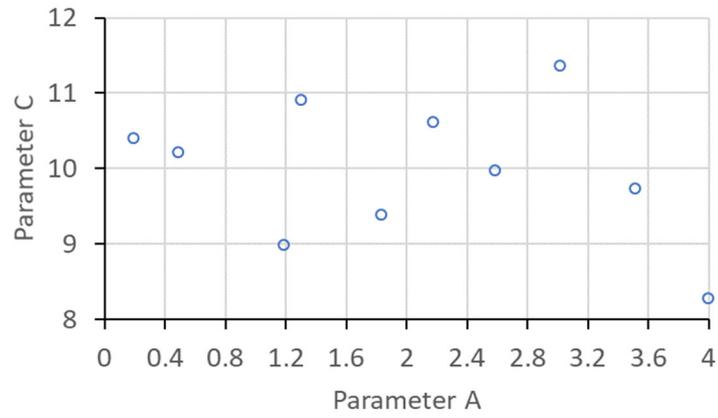


図 2.3.3-6 サンプル間の最小距離を最大化した LHS サンプルングの結果

- Correlation-optimized LHS

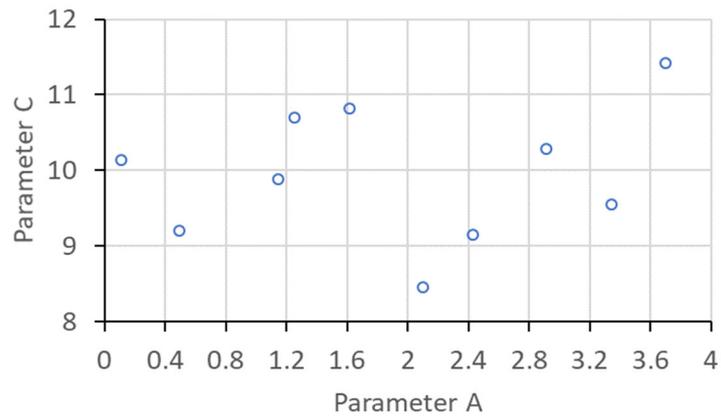


図 2.3.3-7 サンプルの相関を最小化した LHS サンプルングの結果

- Ratio-optimized LHS

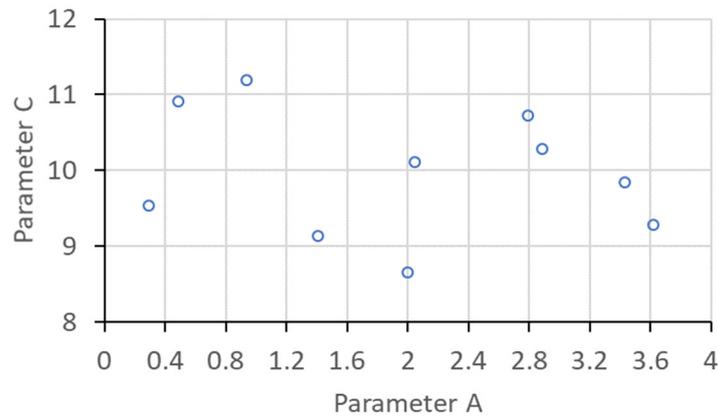


図 2.3.3-8 サンプルの比率を最小化した LHS サンプリングの結果

④ QMC サンプラー

QMC サンプラーは超一様分布列 (Low-discrepancy sequences) [23,24]を使用してランダム・サンプリングを実施する。ここでは Halton, Hammersley, Sobol の 3つの超一様分布列を RAPID に導入した。QMC は本質的に解析結果を積分するような問題に対して効率が良いことが示されている。これら 3 種の例を図 2.3.3-9 から図 2.3.3-11 に示す。例に用いた 2つのパラメータの確率分布は一様分布と切断正規分布を用いている。

Parameter A ~ *Uniform*(location = 1, scale = 4)

Parameter C ~ *TruncatedNormal*(location = 10, scale = 1, upperlimit = 12, lowerlimit = 8)

- Halton sequence

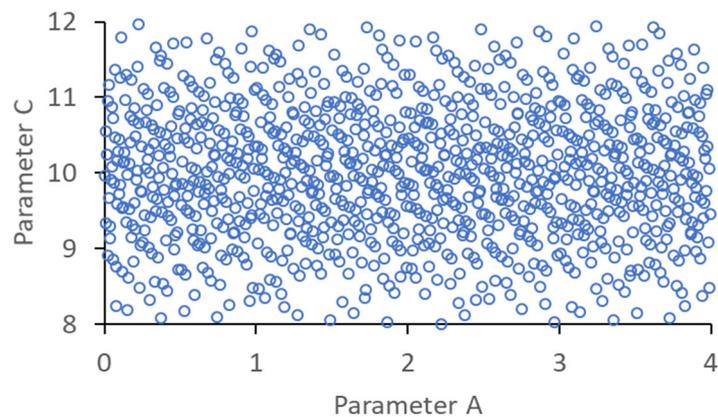


図 2.3.3-9 Halton シーケンスを用いた QMC サンプリング

- Hammersley sequence

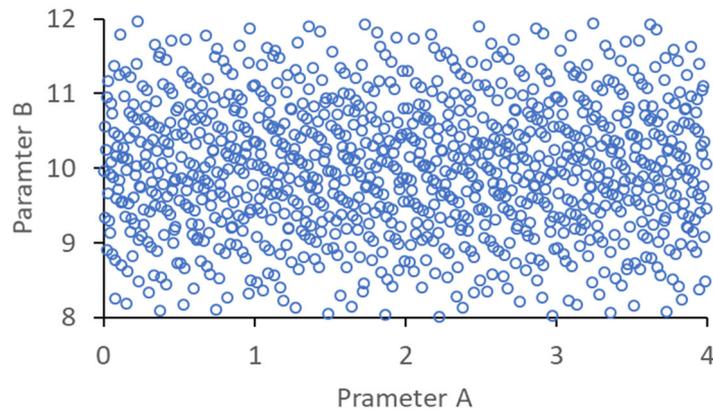


図 2.3.3-10 Hammersley シーケンスを用いた QMC サンプルング

- Sobol sequence

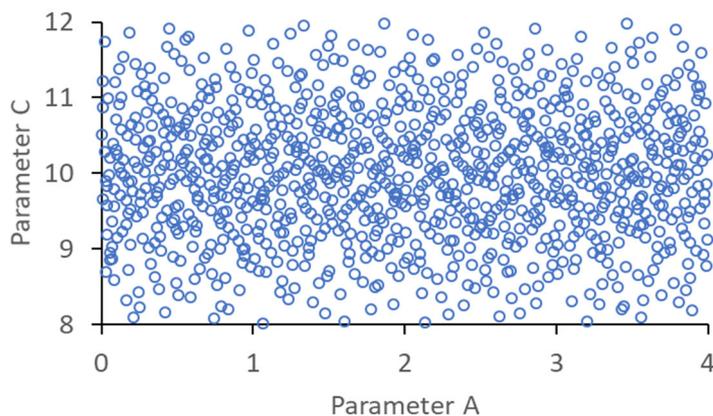


図 2.3.3-11 Sobol シーケンスを用いた QMC サンプルング

⑤ Correlated samplers

Iman-Conover 法 [25] を用いて、相関を考慮するモジュール (correlation_control.py) を実装した。そのモジュールは、多様なサンプラー (モンテカルロ、LHS、QMC) と分布 (表 2.3.3-2 のすべての連続型分布) に対応できる。

Parameter A ~ Uniform(location = 1, scale = 4)

Parameter B ~ Uniform(location = 1, scale = 4)

$Parameter\ C \sim TruncatedNormal(location = 10, scale = 1, upperlimit = 12, lowerlimit = 8)$

$Parameter\ D \sim LogNorm(location = 10, scale = 1, shape = 1)$

表 2.3.3-3 目標のサンプルの相関係数の行列

	Parameter A	Parameter B	Parameter C	Parameter D
Parameter A	1.0	0.3	0.8	0.0
Parameter B	0.3	1.0	0.3	0.0
Parameter C	0.8	0.3	1.0	0.3
Parameter D	0.0	0.0	0.3	1.0

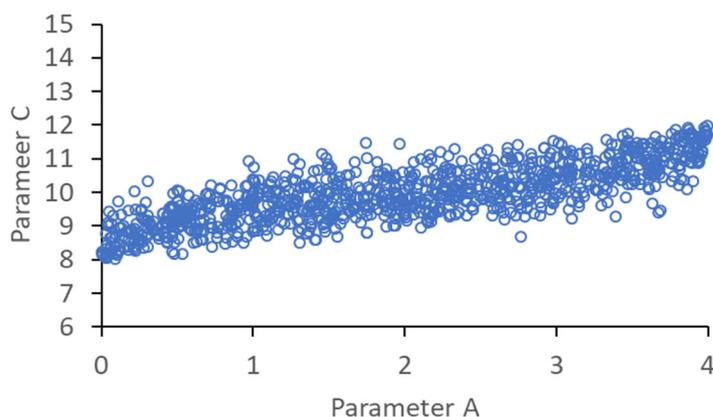


図 2.3.3-12 相関を考慮したモンテカルロ・サンプリングの結果
(スピアマンの順位相関係数=0.8)

```

Target Correlation Matrix:
[[1.  0.3 0.8 0. ]
 [0.3 1.  0.3 0. ]
 [0.8 0.3 1.  0.3]
 [0.  0.  0.3 1.  ]]
Sampled Correlation Matrix:
[[ 1.      0.285  0.778 -0.002]
 [ 0.285  1.      0.273 -0.01 ]
 [ 0.778  0.273  1.      0.293]
 [-0.002 -0.01  0.293  1.    ]]

```

図 2.3.3-13 目標の相関係数行列（上）とモンテカルロ・サンプリング結果の相関係数行列（下）の比較

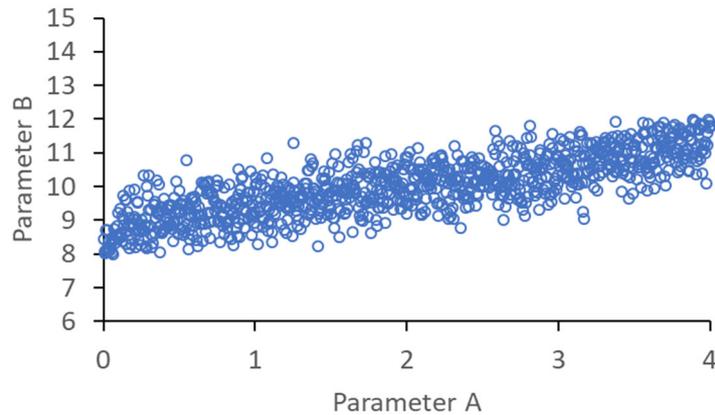


図 2.3.3-14 相関を考慮した LHS サンプリングの結果 (スピアマンの順位相関係数=0.8)

```

Target Correlation Matrix:
[[1.  0.3 0.8 0. ]
 [0.3 1.  0.3 0. ]
 [0.8 0.3 1.  0.3]
 [0.  0.  0.3 1.  ]]

Sampled Correlation Matrix:
[[ 1.      0.293  0.79 -0.004]
 [ 0.293  1.      0.288 -0.01 ]
 [ 0.79   0.288  1.      0.281]
 [-0.004 -0.01  0.281  1.      ]]

```

図 2.3.3-15 目標の相関係数行列 (上) と LHS サンプリング結果の相関係数行列 (下) の比較

2.3.3.3. 代替評価モデルを用いた適合サンプラー

表 2.3.2-1 の手順に従い、適合サンプラー及び必要なモジュールを実装した。適合サンプラーと同時に利用するモジュールは代替評価モデルを構築するモジュール (surrogate.py)、システムコードを実行するモジュール (execution.py) 及びシステムコードのインタフェースモジュール (例えば、thales2.py) である。

- 適合サンプラーの適用例

限界状態曲線 (Limit state surface) を推定するため、適合サンプラーを利用した例を紹介する。図 2.3.3-16 (左) に入力パラメータ A と B の設定値により、システムの故障確率の変化は応答局面になり、基準値により大きい範囲が故障状態と判断する。図 2.3.3-16 (右) の限界状態曲線を推定するため、適合サンプリング法を適用する。図 2.3.3-17 と図 2.3.3-18 を比較すると、代替評価モデルが限界状態曲線近傍法の入力空間を予測し、解析するサンプル数を大幅に減らすことができた。

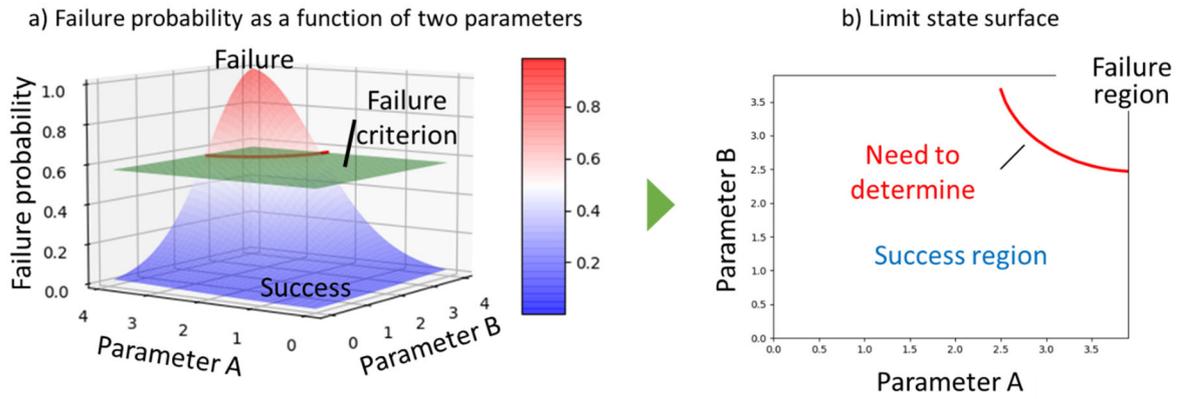


図 2.3.3-16 故障の限界状態曲線の例

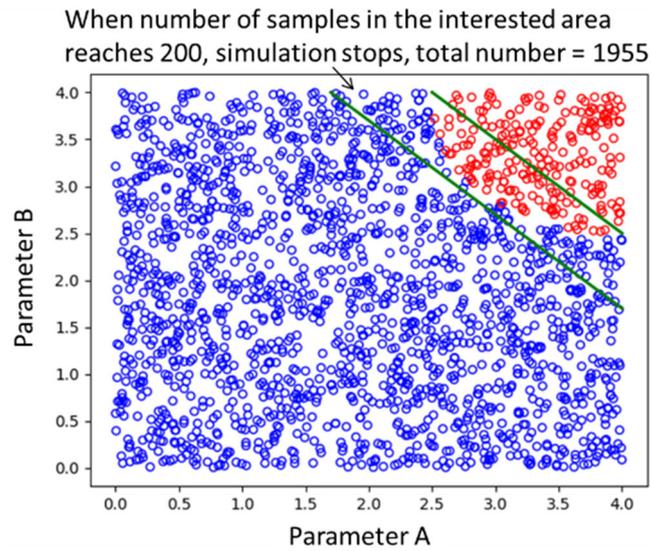


図 2.3.3-17 限界状態曲線を探索するためのモンテカルロサンプリング

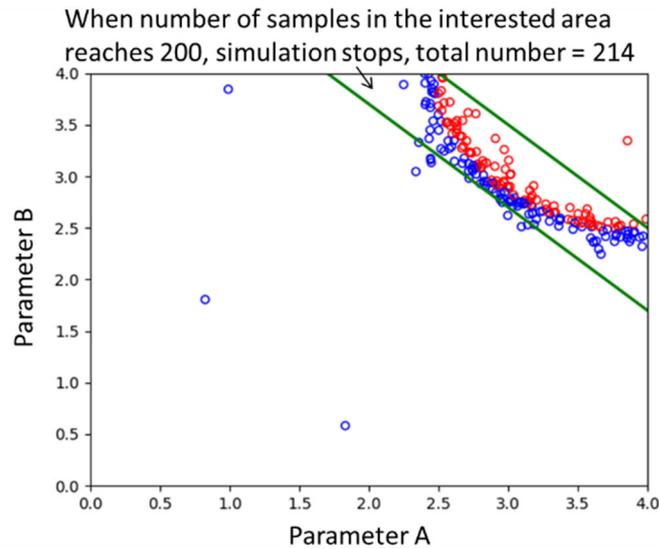


図 2.3.3-18 限界状態曲線を探索するための適合サンプリング

限界状態曲線を推定するため、表 2.3.3-4 に示すように、従来のモンテカルロ法の計算コストと適合サンプリングの計算コストを比較した。重要な計算領域に（緑直線の間）、200 ケースを実行する前提として、モンテカルロ法を利用する場合、1955 ケースの高忠実度モデルを実行する必要があるが、代替評価モデルを用いた適合サンプリング法を利用する場合、214 ケースの高忠実度モデルを実行する必要があった。システムコードの実行時間を 5 時間と代替評価モデルの実行時間を 5 秒とすると、88.90%の計算時間のコストを削減した。

表 2.3.3-4 MC サンプリング法と適合サンプリング法の計算コストの比較

(高忠実度モデルの実行時間：5 時間、代替評価モデルの実行時間：5 秒)

手法	高忠実度モデル（システムコード）の実行回数	代替評価モデルの実行回数	計算コスト（時間）
MC サンプリング法	1955	-	9775 時間
適合サンプリング法	214	10600	1084.7 時間

2.3.3.4. Python の multiprocessing モジュールを用いた並列処理機能の整備

マルチプロセッシング (multi-processing) 機能は、複数のプロセスを同一システム内で使用すること意味する。動的 PRA を実施するため、類似性がある複数の事故シーケンスを計算する必要があり、Python の multiprocessing モジュールを利用して並列処理機能を導入した。Multiprocessing モジュールは複数プロセスで分散処理を扱う Python のアプリケーション・プロセッシング・インタフェース (API) である。具体的には、動的 PRA の複数の入力データに対して、サブプロセス群に入力データを分配してシミュレーションコードを並列実行する。図 2.3.3-19 は RAPID-THALES2 による並行処理の例であり、同時に 3 ケースの計算を投入する様子である。現在ジョブ投入の順序は固定されておらず、図に示すように Run_0, Run_17, Run_34 が最初に投入された。3つのジョブの実施を終了した後、終了時間に応じで、自動的に Run_35, Run_1 と Run_18 が投入された。

```
Running Code Interface: code_interfaces.thales2
Working directory ./Thales2_parallel_simulations already exists.
Old directory and contents will be removed.
RAPID is executing external code: Thales2
Current working directory is /home/zheng/tests/efficient_sampling/tests
Working directory has been successfully created.
Starting Parallel Simulations...
Total number of simulation runs is: 200
Simulation ./Thales2_parallel_simulations/Run_0 starts to run.
  Waiting to finish ...
Simulation ./Thales2_parallel_simulations/Run_17 starts to run.
  Waiting to finish ...
Simulation ./Thales2_parallel_simulations/Run_34 starts to run.
  Waiting to finish ...
Simulation ./Thales2_parallel_simulations/Run_34 successfully finished!
Simulation ./Thales2_parallel_simulations/Run_35 starts to run.
  Waiting to finish ...
Simulation ./Thales2_parallel_simulations/Run_0 successfully finished!
Simulation ./Thales2_parallel_simulations/Run_1 starts to run.
  Waiting to finish ...
Simulation ./Thales2_parallel_simulations/Run_17 successfully finished!
Simulation ./Thales2_parallel_simulations/Run_18 starts to run.
  Waiting to finish ...
```

図 2.3.3-19 RAPID による並列的な THALES2 の実行の様子

2.4. まとめ

平成 30 年度及び平成 31 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、動的 PRA より得られるリスク情報の導出機能及び効率的な実施機能を RAPID に付加した。また、RAPID の拡張性及び保守性向上を考慮に入れた開発方針を示した。

リスク情報の導出機能の整備では、着目するパラメータの組合せと事故進展の関係からグループ化する過程（クラスタリング）においてパラメータの重み付けを行うが、これを利用することで動的 PRA の特徴である時間的要因やパラメータ間の関係を考慮した重要度を与えられると考え、クラスタリング手法の充実化を行った。動的 PRA の効率的な実施機能の開発では、3 種類の観点から機能の実装を試みた。1 つはサンプリング数を削減するため様々な効率的なサンプリング手法の実装、2 つは着目する範囲にサンプリング値を集約し解析結果の精度向上を図る手法の開発及び実装、最後は解析の並列処理を行う機能の実装である。

効率的なサンプリング手法として調査したものからグリッドサンプリング、ラテン超方格サンプリング及び準モンテカルロサンプリングを実装した。これらサンプリング手法にはそれぞれ特徴があり、例えばグリッドサンプリングでは空間すべてを計画的に選択できる一方、多次元パラメータへの適用には困難が生じる。また準モンテカルロではその開発の性質上結果の積分値に着目するような問題に適しているとされている。このような特徴を考慮し解析者は手法の選択を行う。

着目する範囲にサンプリング値を集約する方法は適合サンプリングと呼ばれており、代替評価モデルを用いて詳細な解析を実施するパラメータの選択を行う方法を実装した。解析の並列処理では既存の Python のアプリケーション・プロセッシング・インタフェースを用いてシミュレーションの実施の並列化を実現した。

RAPID へのこのような機能の拡張により多ケース解析を実施する動的 PRA を効率的に実施することが可能となるとともにリスク情報として事象進展の解析結果を用いた重要度評価を可能とした。

3. 動的な PRA の試解析

動的 PRA ツール RAPID を用いて、代表的な BWR および PWR 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. SBO 事故シナリオに対する動的 PRA の試解析

昨年度までに簡易化した BWR の SBO 事故シナリオを対象に RAPID を用いた動的 PRA の試解析を実施し、徐々に事故シナリオの詳細度を向上させ、RAPID の適用可能性を確認してきた。本年度は改良した RAPID を用い、THALES2 及び AproS による BWR における典型的な SBO 事故シナリオへの適用を試みた。加えて PWR への適用性を確認するため、AproS を用いた解析を行った。PWR への適用は本年度から開始するため、SBO 事故シナリオ解析の用いる安全設備を限定するとともに AproS の PWR 解析モデルに RAPID を用いた SBO 解析に必要なモデルや制御ロジックの組み込みを行った。

3.1.1. BWRにおけるSBO事故シナリオ

昨年度、BWR5型プラントを対象とした出力運転時内の事象レベル1PSA標準報告書[26]、INLのRAVENを用いたSBO事故解析の報告書[27,28]を参考に、SBO事故シナリオの詳細化を行った。今年度の解析では、事故シナリオに

- 炉心冷却系(RCIC,HPCS,LPCS)の利用優先順位の変更
- 残留熱除去系(RHR)による圧力抑制プール(S/P)内の除熱
- S/P ベント
- 低圧注水系の外部水源の利用
- プラント状態を反映した減圧操作の成功・失敗の設定

の変更や追加を行った。これらの点も含めて、本年度実施したSBO事故シナリオの各事象の詳細について、以下で説明する。

- ・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直後は原子炉圧力容器(RPV)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。そして、閉失敗故障するまでのSRVの開閉回数、および、故障時の開口割合をサンプリングの対象とした。昨年度、SRVの積算流量からSRVの開閉回数を推定していたが、今年度はTHALES2の改良を行い、SRVの開閉回数を直接カウントできるようにした。また、Aprosについても、モジュールEventによる信号のカウント機能を利用して、SRVの開閉回数を直接カウントできるようにした。
- ・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。内通が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。

$$F = f \cdot \frac{T_{MSL}}{T_{TS}^{mean}} \cdot \frac{P_{RPV}}{P_{RPV}^{mean}} \quad (3.1.1-1)$$

ここで、

F：補正した弁の漏洩率

f：サンプリングした漏洩率

T_{MSL} [K]：SRVが接続されている主蒸気管（Main Steam Line）の温度

P_{RPV} [MPa]：RPV圧力

T_{TS}^{mean} [K]：熱的故障（Thermal Seizure）が発生する温度の平均値

P_{RPV}^{mean} [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リングするものとした。

$$S' = S \cdot \frac{T_{loop}}{T_{loop}^{mean}} \cdot \frac{P_{RPV}}{P_{RPV}^{mean}} \cdot \exp\left(\frac{\tau - \tau^{mean}}{\tau^{mean}}\right) \quad (3.1.1-2)$$

ここで、

S' ：補正したシール損傷面積[m²]

S ：サンプリングしたシール損傷面積[m²]

T_{loop} [K]：再循環ループの液相温度

T_{loop}^{mean} [K]：再循環ループの液相温度の平均値

P_{RPV} [MPa]：RPV圧力

P_{RPV}^{mean} [MPa]：RPVの平均圧力

τ [h]：シール損傷発生時間

τ^{mean} [h]：シール損傷発生時間の平均値

ただし、シール損傷が発生する前に非常用ディーゼル発電機(Emergency Diesel Generator: EDG)が復旧していれば、冷却可能となるので、シール損傷は発生しないとする。

- 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 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 : 減圧操作は、逃がし弁を作動させて RPV 圧力を減圧する操作である。本操作に関する弁故障および人的過誤を含めて、失敗確率を $2.0E-3$ (対数正規分布の平均値) に設定する。また対数正規分布を仮定し、そのエラーファクタを 10 とする。この場合、関数形に与えるパラメータ (μ 、 σ) はそれぞれ、-7.2、1.4 となる。サンプリングした失敗確率に対して、プラントパラメータの反映を考える。減圧操作を行う場合は、本解析において

「高圧注水系の停止、かつ、低圧注水の起動に成功、かつ、EDG による電源確保」となった場合を想定している。この時のプラントの状態に応じた運転員へのストレスを失敗確率に反映させる。具体的には、スクラムから高圧注水系が止まるまでの時間と操作を行うタイミングの原子炉水位に着目するパラメータとする。

- 時間に関して : 高圧注水系で十分に崩壊熱を除去できていればそれだけ次の操作への余裕が生じる。このため、DC バッテリーの期待できる時間+余裕時間、ここでは解析上 DC バッテリーの最大時間 (6h) +4h を考慮した 10 時間を超える場合、運転員に良い影響を与えるものとする。

- 水位に関して : 冷却系が通常制御されている場合、原子炉水位のレベル 8 で停止、レベル 2 で稼働するとしている。水位が十分にある場合には操作に余裕があるとし、ここでは、レベル 4 以上の水位(Apros モデルでは、13.9827m)であれば運転員に良い影響、以下であれば悪い影響を与えるものとする。

以上の関係から以下のようなファクタをサンプリングされた失敗確率に乗じるものとする。

$$\begin{aligned} (\text{時間 } \tau, \text{水位 } L_{RPV}) &= (10 \text{ 時間以上, L4 以上}) \rightarrow 0.1 \\ &= (10 \text{ 時間以上, L4 未満}) \text{ and } (10 \text{ 時間未満, L4 以上}) \rightarrow 1 \\ &= (10 \text{ 時間未満, L4 未満}) \rightarrow 10 \end{aligned}$$

ただし、乗じた失敗確率が 1 を越える場合は、1 にする。ファクタを乗じた失敗確率で二項分布によるサンプリングを行い、減圧操作の成功・失敗を判定する。

操作に成功した場合の操作に要する時間については、プラントパラメータの影響は考慮せず、上限 10 分、下限 60 分の一様分布によるサンプリングを行って決定する。

- ・ 低圧注水系 : LPCS 及び LPCI と 2 系統が設備されているが、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。さらに、S/P の水温が上昇して利用限界温度（本年度の解析では 100℃に設定）に達した場合、水源を外部水源に切り替える。ただ、外部水源による注水を続けた場合、原子炉内の水が増加し続けるため、S/P の上端より 1m 下の位置まで水位が到達した場合、再度水源を S/P に切り替える。水源切替えの操作は、人間の操作であるため、操作の成功失敗の不確実さも考慮する。

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 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が SBO シナリオで検討されている。昨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にこれら操作を除いたが、本年度はこれらの操作も考慮する。

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、HPCS を優先する。ただし、HPCS による注水までに時間を要する（本年度の解析では 30 分と仮定）ため、その間は RCIC による注水を行い、HPCS による注水が可能となった段階で RCIC から HPCS に切り替える。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 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。高圧注水系の起動失敗や電源が確保できないなどにより、高圧注水系による冷却が行えなくなった場合、減圧操作を行って低圧注水に移行する。本作業は人間の操作が入るため、減圧操作の成功失敗、および、操作に要する時間の不確実さを考慮する。詳細は、上記の減圧操作の項目に記載した通りである。減圧操作時に低圧注水ポンプの起動を行い、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。しかし、RHR の起動失敗や EDG が修復していない場合、RHR による S/P 水の冷却が行われない。その結果、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 3.1.1-1 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 3.1.1-1 SBO 事故解析で考慮する機器等とその信頼性パラメータ

機器・操作	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	分布の設定変数	値	[下限,上限]	単位
DC バッテリ	枯渇時間	三角分布	a, c, b	4,5,6		h
EDG	復旧時間	指数分布	λ	1/8		1/h
HPCS 専用	起動失敗確率	二項分布	p	5.0E-04		
EDG	継続運転失敗時間	指数分布	λ	1.0E-04		1/h
	修復時間	指数分布	λ	1/8		1/h
RCIC	起動失敗確率	二項分布	p	2.5E-02		
	継続運転失敗時間	指数分布	λ	5.0E-03		1/h
HPCS	起動失敗確率	二項分布	p	3.0E-03		
	継続運転失敗時間	指数分布	λ	5.0E-05		1/h
LPCS	起動失敗確率	二項分布	p	3.0E-03		
	継続運転失敗時間	指数分布	λ	2.5E-05		1/h
	修復時間	指数分布	λ	1/24		1/h
RHR	起動失敗確率	二項分布	p	3.0E-03		
	継続運転失敗時間	指数分布	λ	2.5E-05		1/h
SRV 閉失敗故障	閉失敗までの回数	幾何分布	p	1.0E-03		回
	閉失敗時の漏洩率	切断正規分布	μ, σ	0.5, 0.2	[0.05,1]	
SRV 熱的故障	熱的故障温度	切断正規分布	μ, σ	427.0, 100	[327,627]	°C
	熱的故障時の漏洩率*1	-	T_{TS}^{mean}	427.0		°C
		-	P_{RPV}^{mean}	7.56		MPa
再循環ポンプのシール損傷	シール損傷時間*2	一様分布	α, β		[0.0, 12]	h
	シール損傷面積*3	対数正規分布	μ, σ	-9.2, 1.4	[0, 1.6E-3]	m ²
		-	T_{loop}^{mean}	290.0		°C
		-	P_{RPV}^{mean}	7.0		MPa
		-	τ^{mean}	6.0		h
減圧操作	操作失敗確率*4	対数正規分布	μ, σ	-7.2, 1.4		
		-	τ	10		h
		-	L_{RPV}	13.9827		m
	操作成功時の所要時間	一様分布	α, β	10, 60		min
LPCS の水源変更操作*5	操作失敗確率	二項分布	p	2.0E-3		

*1 (3.1.1-1)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。

*2 シール損傷時間までに EDG が復旧した場合は、損傷は発生しない。

*3 (3.1.1-2)式により決定する。

*4 上記の「減圧操作」に記載された関係より決定する。

*5 S/P→外部水源、外部水源→S/P の両方とも。

3.1.2. BWRにおける THALES2 を用いた試解析

前節に記載した SBO 事故シナリオについて THALES2 を用いた試解析を実施した。解析モデルには、昨年度 Apros の BWR-5 モデルより構築した THALES2 の BWR-5 モデルを利用した。RHR や代替低圧注水系など、昨年度取り入れられていなかった事象も追加して、より詳細な事故シナリオの解析を行った。

3.1.2.1. 生成した事故シーケンス

表 3.1.1-1 の確率分布をもとに、設備及び操作の成否に対して RAPID によるサンプリングを実施して、事故シーケンスの生成を行った。本試解析では、100 ケースの事故シーケンスを生成した。表 3.1.2-1 から表 3.1.2-12 に RAPID によるサンプリングで得られた値を示す。

表 3.1.2-1 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	RCIC の継 続運転失敗 時間[h]
0	5.02	6.52	成功	5060	4.5	成功	263
1	4.93	10.41	成功	11748	3.0	成功	522
2	5.19	11.67	成功	4369	3.4	成功	107
3	4.96	12.56	成功	13985	1.0	成功	46
4	4.90	2.81	成功	987	11.8	成功	171
5	4.56	0.88	成功	9362	1.0	成功	183
6	4.50	29.25	成功	10609	1.0	成功	101
7	5.09	20.63	成功	5549	5.5	成功	46
8	4.39	5.09	成功	6049	18.3	成功	853
9	4.96	14.26	成功	9522	0.1	成功	115
10	4.82	1.97	成功	2214	0.7	成功	321
11	5.17	0.42	成功	7298	2.2	成功	230
12	5.04	5.62	成功	3680	0.1	成功	205
13	5.11	0.69	成功	5467	3.3	成功	205
14	5.14	6.25	成功	3607	2.0	成功	246
15	5.57	2.02	成功	1291	2.1	成功	230
16	4.71	5.69	成功	11770	4.0	成功	79
17	4.90	7.11	成功	15957	5.0	成功	246
18	4.81	6.16	成功	46176	3.0	成功	277
19	4.43	1.70	成功	5573	3.6	成功	712
20	5.07	6.00	成功	16418	2.0	成功	913
21	4.82	21.20	成功	1418	0.1	成功	213
22	4.92	1.66	成功	6020	2.1	成功	341
23	4.92	0.30	成功	16954	2.0	成功	84
24	5.31	4.40	成功	8957	9.5	成功	34
25	5.22	21.83	成功	18132	18.0	成功	163
26	5.59	8.22	成功	7872	4.9	成功	40
27	4.57	0.81	成功	2071	1.6	成功	152
28	5.68	7.73	成功	2093	1.8	成功	26
29	4.48	13.53	成功	5604	7.7	成功	117

表 3.1.2-2 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	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	RCIC の継 続運転失敗 時間[h]
30	4.99	0.41	成功	6496	0.1	成功	170
31	5.73	8.97	成功	10750	4.0	成功	503
32	5.45	21.19	成功	12152	2.0	成功	141
33	4.84	2.15	成功	148	2.8	成功	132
34	5.12	4.50	成功	10367	22.0	成功	44
35	4.91	7.52	成功	9382	7.7	成功	413
36	4.74	1.58	成功	8506	15.6	成功	67
37	4.86	0.42	成功	18936	1.0	成功	92
38	5.97	2.40	成功	1522	3.1	成功	34
39	5.09	0.30	成功	6283	1.9	成功	136
40	5.22	0.89	成功	4293	21.8	成功	146
41	5.38	18.64	成功	3967	2.1	成功	341
42	4.28	2.50	成功	19092	9.0	成功	71
43	5.50	4.78	成功	13026	12.0	成功	136
44	4.92	5.70	成功	3143	2.2	成功	314
45	4.56	3.71	成功	8340	12.9	成功	95
46	5.96	2.29	成功	15079	10.0	成功	69
47	5.48	0.20	成功	7308	8.0	成功	138
48	4.94	2.50	成功	30543	4.0	成功	18
49	5.12	19.61	成功	7875	1.4	成功	693
50	5.14	0.34	成功	35368	0.0	失敗	182
51	4.73	15.50	成功	12996	3.0	成功	103
52	5.18	7.02	成功	13545	2.0	成功	124
53	5.28	11.37	成功	2972	27.1	成功	7
54	5.16	18.87	成功	12004	4.0	成功	63
55	4.41	1.66	成功	1663	20.2	成功	17
56	5.25	6.93	成功	24595	1.0	成功	90
57	4.71	10.78	成功	31179	2.0	成功	51
58	5.92	3.56	成功	1089	2.9	成功	2
59	4.59	2.26	成功	5289	0.4	成功	103

表 3.1.2-3 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	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	RCIC の継 続運転失敗 時間[h]
60	4.80	0.06	成功	11556	6.0	成功	75
61	4.65	11.60	成功	7887	4.9	成功	370
62	5.22	0.10	成功	6151	18.9	成功	139
63	4.68	0.29	成功	16211	5.0	成功	520
64	4.82	18.24	成功	4949	7.0	成功	55
65	4.72	9.28	成功	23961	10.0	成功	91
66	4.96	2.73	成功	4101	10.9	成功	73
67	4.68	3.00	成功	12192	25.0	成功	692
68	4.54	13.26	成功	452	5.9	成功	454
69	4.83	11.70	成功	7851	3.4	成功	60
70	5.23	9.78	成功	11675	2.0	成功	81
71	4.79	7.27	成功	16054	5.0	成功	14
72	4.67	0.63	成功	16651	0.0	成功	312
73	4.65	0.88	成功	12722	10.0	成功	19
74	5.13	3.87	成功	2226	12.2	成功	126
75	4.36	1.13	成功	8861	3.8	成功	2
76	4.37	14.94	成功	19074	6.0	成功	12
77	4.55	1.02	成功	10055	3.0	成功	79
78	4.66	2.31	成功	18969	16.0	成功	96
79	4.78	1.60	成功	2066	10.0	成功	34
80	4.93	8.20	成功	6209	2.9	成功	135
81	5.39	6.05	成功	1088	1.0	成功	162
82	4.34	1.31	成功	12314	1.0	成功	311
83	5.12	0.46	成功	200	24.8	成功	163
84	5.45	1.48	成功	7033	3.5	成功	933
85	5.32	16.73	成功	92	4.1	失敗	199
86	4.54	0.35	成功	972	9.1	成功	29
87	4.69	9.09	成功	1769	13.2	失敗	150
88	5.04	8.66	成功	150	5.1	成功	410
89	5.11	18.52	成功	3779	13.8	成功	13

表 3.1.2-4 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その4)

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	RCIC の継 続運転失敗 時間[h]
90	5.27	21.28	成功	12390	2.0	成功	494
91	4.89	2.02	成功	11771	0.0	成功	152
92	4.52	1.39	成功	9663	7.3	成功	162
93	5.04	2.27	成功	30060	4.0	成功	191
94	5.03	22.87	成功	15571	9.0	失敗	13
95	5.37	3.16	成功	11395	5.0	成功	278
96	5.09	10.51	成功	1736	13.4	成功	382
97	5.12	9.42	成功	3236	20.2	成功	136
98	4.30	6.93	成功	11245	9.0	成功	6
99	5.38	5.66	成功	19021	4.0	成功	289

表 3.1.2-5 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その5)

ケース 番号	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]	LPCS の水源 変更操作の成 功・失敗
0	成功	24205	成功	29343	47.0	成功
1	成功	45835	成功	4659	31.8	成功
2	成功	6927	成功	25766	53.0	成功
3	成功	7409	成功	119520	10.0	成功
4	成功	2359	成功	7550	55.8	成功
5	失敗	8423	成功	23780	9.0	成功
6	成功	5443	成功	28789	49.0	成功
7	成功	26752	成功	823	41.9	成功
8	成功	22	成功	17013	13.0	成功
9	成功	10448	成功	49602	38.0	成功
10	成功	10795	成功	78652	49.0	成功
11	成功	35339	成功	89770	24.0	成功
12	成功	10839	成功	23826	63.0	成功
13	成功	12988	成功	38113	3.0	成功
14	成功	434	成功	11094	21.0	成功
15	成功	8041	成功	546	10.6	成功
16	成功	12949	成功	41105	55.0	成功
17	成功	14299	成功	7568	1.1	成功
18	成功	12138	成功	68566	19.0	成功
19	失敗	3499	成功	37594	14.0	成功
20	成功	13133	成功	284	2.5	成功
21	成功	31299	成功	3546	7.1	成功
22	成功	9816	成功	210230	10.0	成功
23	成功	15286	成功	14813	8.0	成功
24	成功	63032	成功	27009	6.0	成功
25	成功	33721	成功	23835	23.0	成功
26	成功	2205	成功	45017	15.0	成功
27	成功	35810	成功	82590	4.0	成功
28	成功	7345	成功	1183	129.1	成功
29	成功	25705	成功	13586	0.1	成功

表 3.1.2-6 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その6)

ケース 番号	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]	LPCS の水源 変更操作の成 功・失敗
30	成功	29123	成功	28034	1.0	成功
31	成功	64274	成功	49899	30.0	成功
32	成功	9016	成功	6361	7.9	成功
33	成功	33864	成功	84794	32.0	成功
34	成功	26802	成功	17631	3.0	成功
35	成功	23925	成功	48544	26.0	成功
36	成功	31329	成功	87662	24.0	成功
37	成功	9410	成功	20128	34.0	成功
38	成功	35185	成功	19076	13.0	成功
39	成功	35814	成功	25456	47.0	成功
40	成功	4892	失敗	2908	23.4	成功
41	成功	8066	成功	3397	3.3	成功
42	成功	415	成功	1467	57.4	成功
43	成功	11055	成功	151020	40.0	成功
44	失敗	2209	成功	82294	12.0	成功
45	成功	20812	成功	39534	16.0	成功
46	成功	23764	成功	86023	5.0	成功
47	成功	5678	成功	87953	10.0	成功
48	成功	20328	成功	3922	11.9	成功
49	成功	86280	成功	44790	7.0	成功
50	成功	18472	成功	36592	3.0	成功
51	成功	23223	成功	14163	13.0	成功
52	成功	1063	成功	17303	9.0	成功
53	成功	30310	成功	46065	44.0	成功
54	成功	4566	成功	14334	26.0	成功
55	成功	17371	成功	54371	12.0	成功
56	成功	8071	成功	77563	5.0	成功
57	成功	49548	成功	60919	17.0	成功
58	成功	42507	成功	365	2.8	成功
59	成功	21695	成功	31881	2.0	成功

表 3.1.2-7 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その7)

ケース 番号	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]	LPCS の水源 変更操作の成 功・失敗
60	成功	21224	成功	65128	22.0	成功
61	成功	29001	成功	6708	50.3	成功
62	成功	1717	成功	61254	14.0	成功
63	成功	27084	成功	68867	145.0	成功
64	成功	12121	成功	26376	123.0	成功
65	成功	3169	成功	123140	20.0	成功
66	成功	18671	成功	48255	22.0	成功
67	成功	24817	成功	43689	6.0	成功
68	成功	34456	成功	24288	19.0	成功
69	成功	6510	成功	1865	46.7	成功
70	成功	204	成功	12259	31.0	成功
71	成功	89894	成功	20717	4.0	成功
72	成功	14710	成功	40797	23.0	成功
73	成功	15972	成功	84949	17.0	成功
74	成功	195	成功	43424	3.0	成功
75	成功	9526	成功	27962	41.0	成功
76	成功	6545	成功	88569	13.0	成功
77	成功	14495	成功	72317	33.0	成功
78	成功	10866	成功	722	7.4	成功
79	成功	52805	成功	40742	12.0	成功
80	成功	24863	成功	50367	51.0	成功
81	成功	92929	成功	65843	97.0	成功
82	成功	1510	成功	42560	28.0	成功
83	成功	14155	成功	21783	50.0	成功
84	成功	7718	成功	8528	51.5	成功
85	成功	18024	成功	95723	45.0	成功
86	成功	24205	成功	15445	13.0	成功
87	成功	193	成功	78679	28.0	成功
88	成功	75540	成功	71089	74.0	成功
89	成功	3080	成功	12283	38.0	成功

表 3.1.2-8 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その8)

ケース 番号	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]	LPCS の水源 変更操作の成 功・失敗
90	成功	40835	成功	28771	27.0	成功
91	成功	31271	成功	43280	15.0	成功
92	成功	11444	成功	24464	26.0	成功
93	成功	13707	成功	16253	29.0	成功
94	成功	23210	成功	36325	44.0	成功
95	成功	29872	成功	14524	29.0	成功
96	成功	3798	成功	2953	40.1	成功
97	成功	32145	成功	38944	25.0	成功
98	成功	2227	成功	41283	5.0	成功
99	成功	3894	成功	28917	29.0	成功

表 3.1.2-9 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その9)

ケース 番号	RHR の起動 成功・失敗	RHR の継続運 転失敗時間[h]	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 [°C]	シール損傷の 発生時間[h]
0	成功	14379	513	0.873	378.5	11.65
1	成功	5542	541	0.267	611.1	8.36
2	成功	73301	366	0.498	370.5	7.25
3	成功	63354	753	0.471	461.6	5.63
4	成功	34485	2295	0.696	328.0	7.62
5	成功	5232	1088	0.257	336.1	9.68
6	成功	40205	524	0.796	487.6	8.11
7	成功	12145	2607	0.358	384.4	5.96
8	成功	32604	1680	0.818	437.5	9.54
9	成功	133060	217	0.517	491.3	2.76
10	成功	3261	33	0.443	338.6	6.99
11	成功	9305	2641	0.814	399.0	0.55
12	成功	100480	1782	0.569	561.6	8.28
13	成功	35175	438	0.648	595.3	6.87
14	成功	9019	400	0.282	488.2	8.34
15	成功	30378	459	0.283	412.9	1.16
16	成功	22523	1072	0.124	372.9	11.48
17	成功	18813	56	0.596	353.9	10.65
18	成功	11560	801	0.569	496.2	2.80
19	成功	17592	264	0.467	410.9	11.97
20	成功	21307	24	0.477	417.4	9.44
21	成功	43947	5342	0.413	376.2	3.83
22	成功	140050	483	0.769	418.4	11.49
23	成功	24811	2903	0.426	425.2	1.62
24	成功	41223	284	0.505	562.9	11.38
25	成功	55081	96	0.409	380.7	1.57
26	成功	11816	1351	0.772	439.0	9.11
27	成功	42911	1950	0.437	331.2	7.65
28	成功	6928	134	0.386	421.2	5.90
29	成功	213640	165	0.621	453.6	2.73

表 3.1.2-10 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その10)

ケース 番号	RHR の起動 成功・失敗	RHR の継続運 転失敗時間[h]	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 [°C]	シール損傷の 発生時間[h]
30	成功	60454	1169	0.416	502.8	9.54
31	成功	53278	358	0.824	421.2	2.40
32	成功	55167	774	0.670	524.4	2.91
33	成功	7108	381	0.630	494.3	7.71
34	成功	6304	2204	0.385	436.8	8.21
35	成功	33786	1518	0.650	353.1	6.76
36	成功	28431	325	0.884	466.3	9.74
37	成功	27719	259	0.715	438.2	2.13
38	成功	13633	551	0.587	378.7	8.77
39	成功	38000	1668	0.630	443.2	10.15
40	成功	78419	1413	0.453	463.3	5.48
41	成功	11323	958	0.578	619.8	1.26
42	成功	7869	1120	0.304	425.9	2.79
43	成功	22854	1699	0.495	382.3	2.42
44	成功	27421	923	0.351	358.5	3.32
45	成功	18601	541	0.058	533.8	8.31
46	成功	39700	950	0.402	418.2	0.17
47	成功	112460	1764	0.101	436.5	0.45
48	成功	9961	577	0.513	552.6	11.66
49	成功	23811	685	0.555	487.3	6.03
50	成功	36350	42	0.583	477.8	9.07
51	成功	29489	419	0.655	366.7	9.61
52	成功	114630	37	0.576	476.1	1.23
53	成功	1550	504	0.795	447.5	5.64
54	成功	14785	3000	0.299	350.9	0.64
55	成功	22504	450	0.501	400.3	4.93
56	成功	27188	675	0.489	415.0	6.39
57	成功	8243	535	0.625	438.6	4.68
58	成功	105970	2291	0.484	444.0	2.13
59	成功	101160	66	0.503	493.0	7.16

表 3.1.2-11 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その11)

ケース 番号	RHR の起動 成功・失敗	RHR の継続運 転失敗時間[h]	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 [°C]	シール損傷の 発生時間[h]
60	成功	74057	576	0.692	427.1	2.70
61	成功	12014	2412	0.613	589.8	1.88
62	成功	63803	72	0.587	334.2	5.95
63	成功	56020	2488	0.132	447.3	4.02
64	成功	9041	2046	0.744	492.4	11.69
65	成功	19204	123	0.643	554.1	11.28
66	成功	2137	628	0.459	477.2	11.18
67	成功	13264	533	0.645	521.2	3.04
68	成功	110350	208	0.358	358.3	11.27
69	成功	25788	833	0.473	499.2	3.43
70	成功	43307	669	0.305	479.5	5.59
71	成功	18232	246	0.851	522.9	8.04
72	成功	30567	1087	0.223	356.1	3.92
73	成功	19082	483	0.176	542.4	2.14
74	成功	11272	536	0.357	570.1	7.15
75	成功	2223	1128	0.687	511.6	3.54
76	失敗	55935	2680	0.477	470.6	1.90
77	成功	12012	774	0.276	466.0	7.44
78	成功	39814	525	0.366	432.8	3.13
79	成功	29509	1051	0.933	457.3	5.05
80	成功	20241	125	0.467	419.4	3.49
81	成功	3849	245	0.314	454.5	8.70
82	成功	142170	421	0.166	406.5	10.81
83	成功	63063	646	0.678	552.0	8.59
84	成功	48726	1587	0.537	391.0	3.44
85	成功	2648	2498	0.639	556.5	4.21
86	成功	83202	435	0.813	387.5	10.48
87	失敗	21018	1433	0.699	393.9	5.05
88	成功	28754	1652	0.344	451.8	3.40
89	成功	25891	269	0.733	409.9	2.96

表 3.1.2-12 THALES2 試解析の事故シーケンスのサンプリング値 (その12)

ケース 番号	RHR の起動 成功・失敗	RHR の継続運 転失敗時間[h]	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 [°C]	シール損傷の 発生時間[h]
90	成功	2518	1174	0.396	407.4	4.71
91	成功	1627	738	0.103	609.1	1.64
92	成功	29281	2978	0.394	410.1	5.41
93	成功	49646	889	0.689	598.1	7.14
94	成功	6442	275	0.462	451.5	9.03
95	成功	111500	214	0.475	497.5	3.71
96	成功	9859	212	0.587	435.6	5.88
97	成功	58945	226	0.386	452.1	8.02
98	成功	17143	3150	0.532	440.3	3.03
99	成功	8264	584	0.112	449.3	0.82

3.1.2.2. 解析結果

生成した 100 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。3.1.1 節でも述べたように、

- SRV の熱的故障
- 再循環ポンプからの漏水
- 減圧操作

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 8 つ（分岐条件の数を n とすると、 2 の n 乗）の解析結果が得られることになる。

以下に、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 3.1.2-13 に示したように凡例や線種で分別できるようにした。

表 3.1.2-13 結果図の凡例の説明

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_SEAL	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_SRVT	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_SEAL_SRVT もしくは 番号_SRVT_SEAL	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
番号_DEPR	減圧操作を実施し、分岐点からリスタート計算を行ったもの。	赤色の細い実線

ただし、燃料被覆管最高温度 (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て結果から除外した。

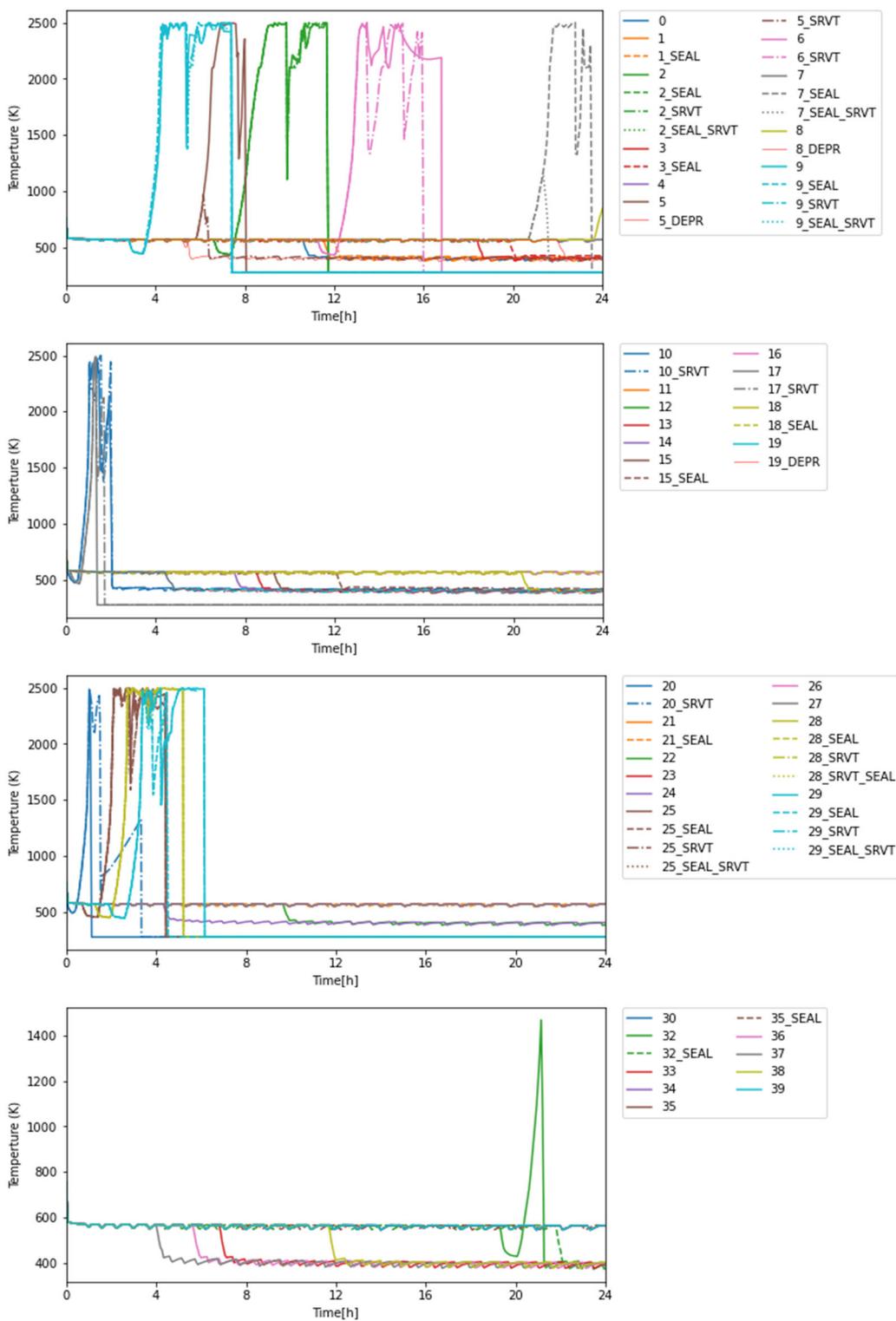


図 3.1.2-1 THALES2 の解析結果：燃料被覆管最高温度 (PCT)：その 1

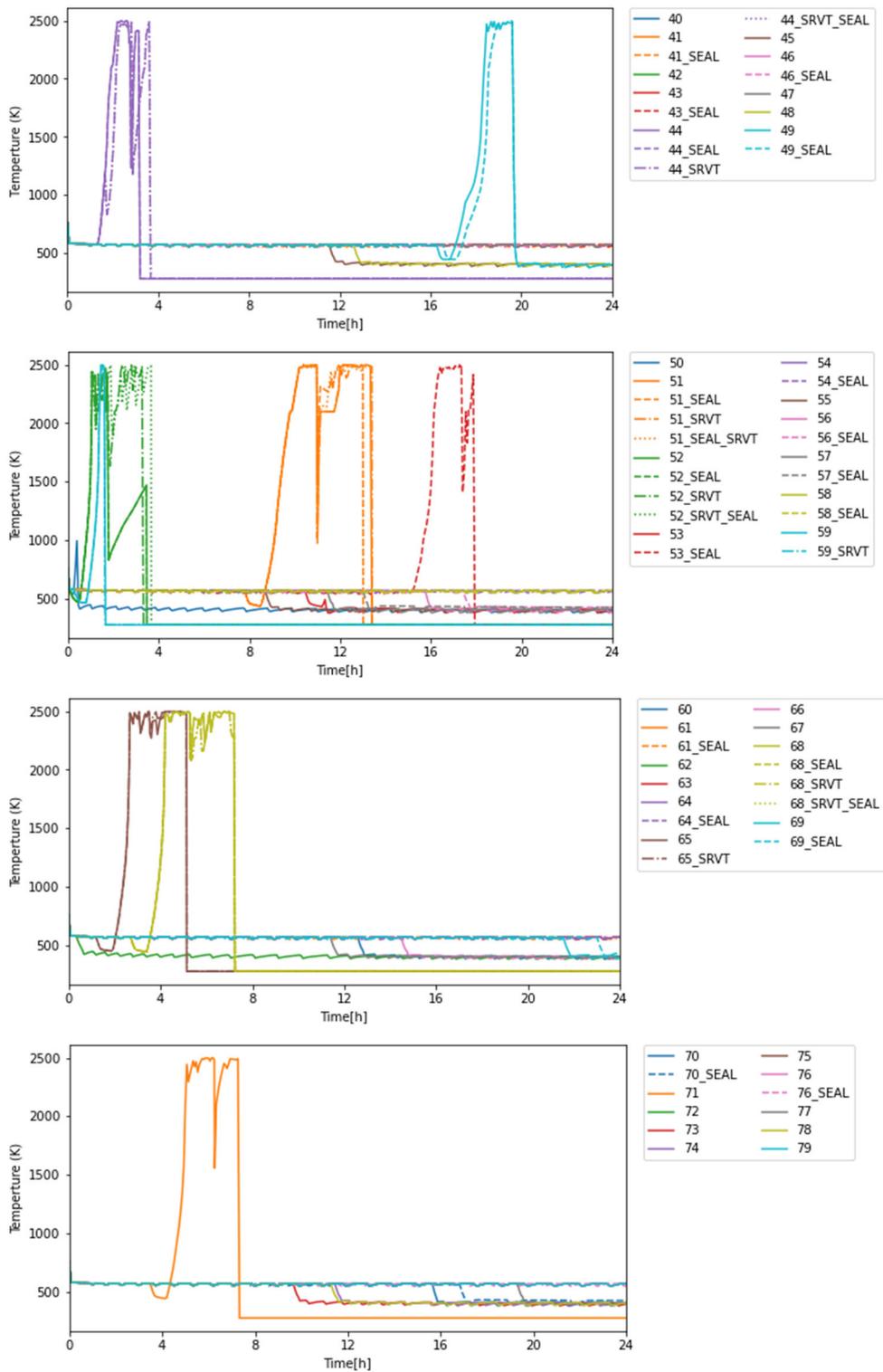


図 3.1.2-2 THALES2 の解析結果：燃料被覆管最高温度 (PCT)：その 2

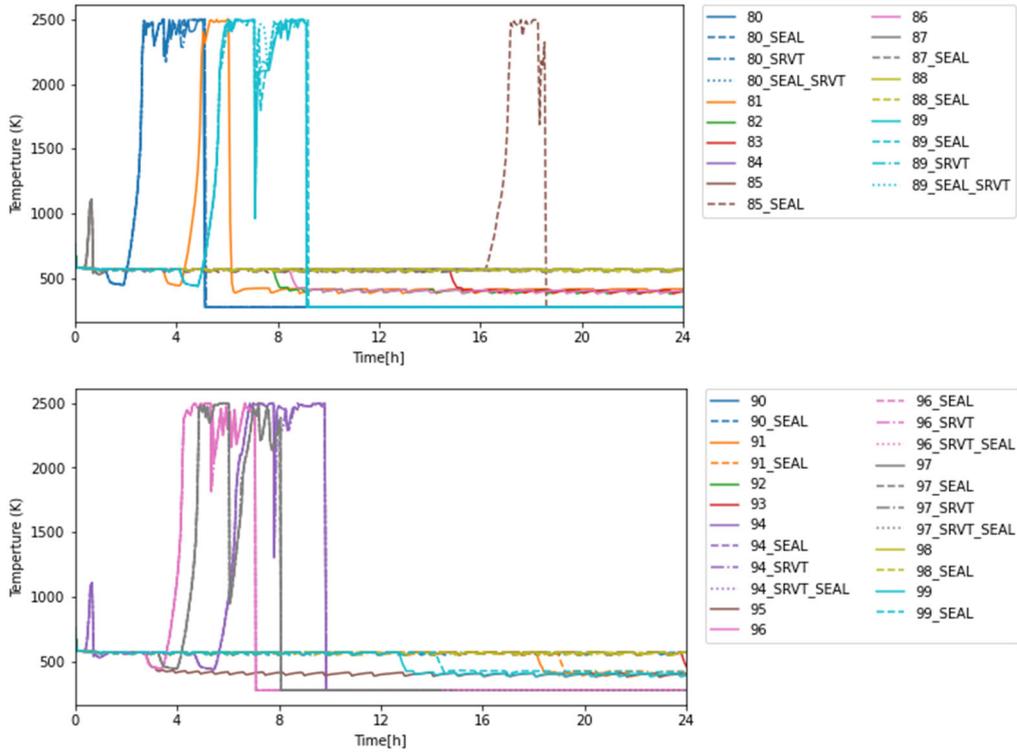


図 3.1.2-3 THALES2 の解析結果：燃料被覆管最高温度 (PCT)：その 3

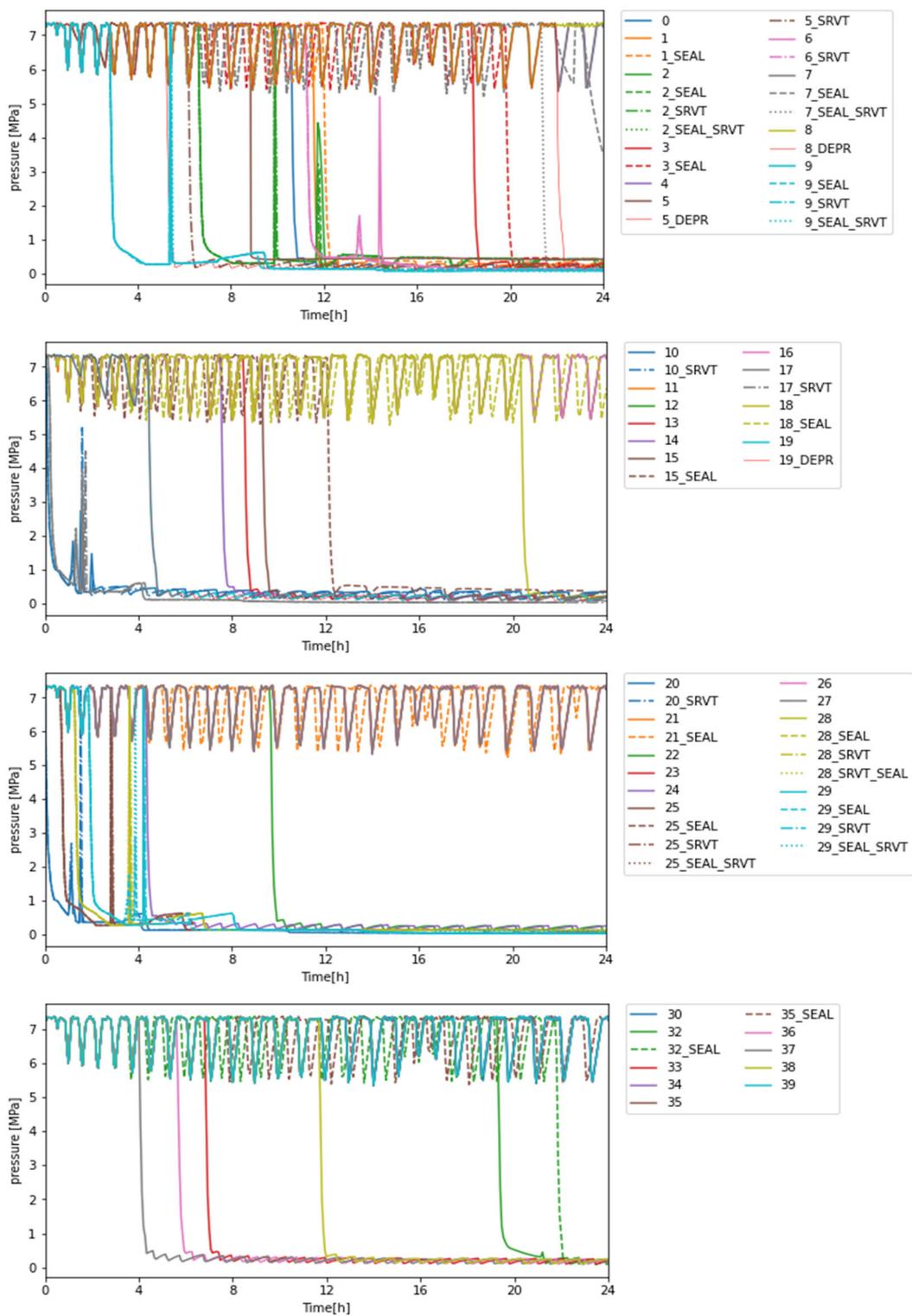


図 3.1.2-4 THALES2 の解析結果：原子炉压力容器（RPV）内の圧力：その 1

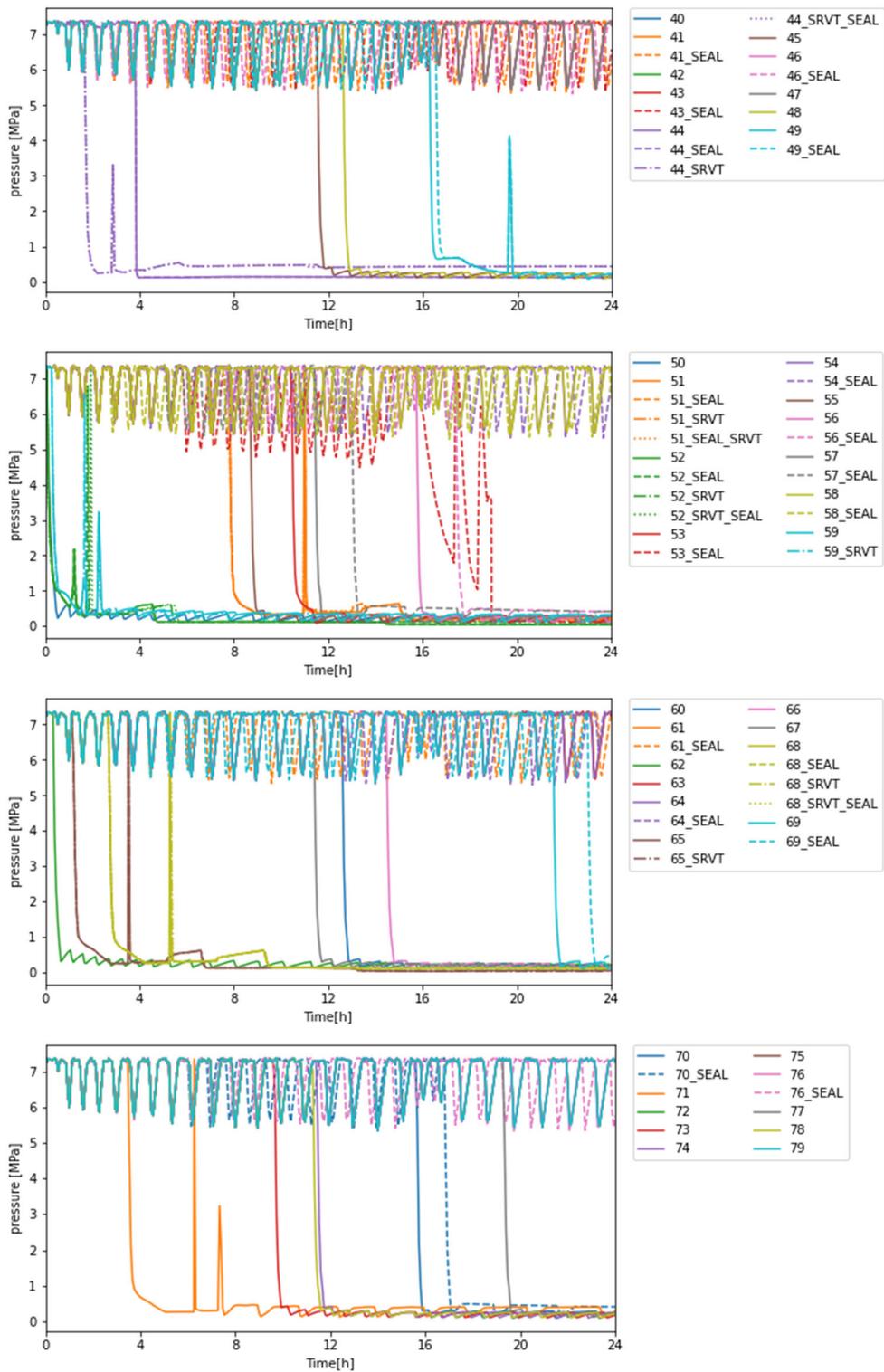


図 3.1.2-5 THALES2 の解析結果：原子炉压力容器（RPV）内の圧力：その2

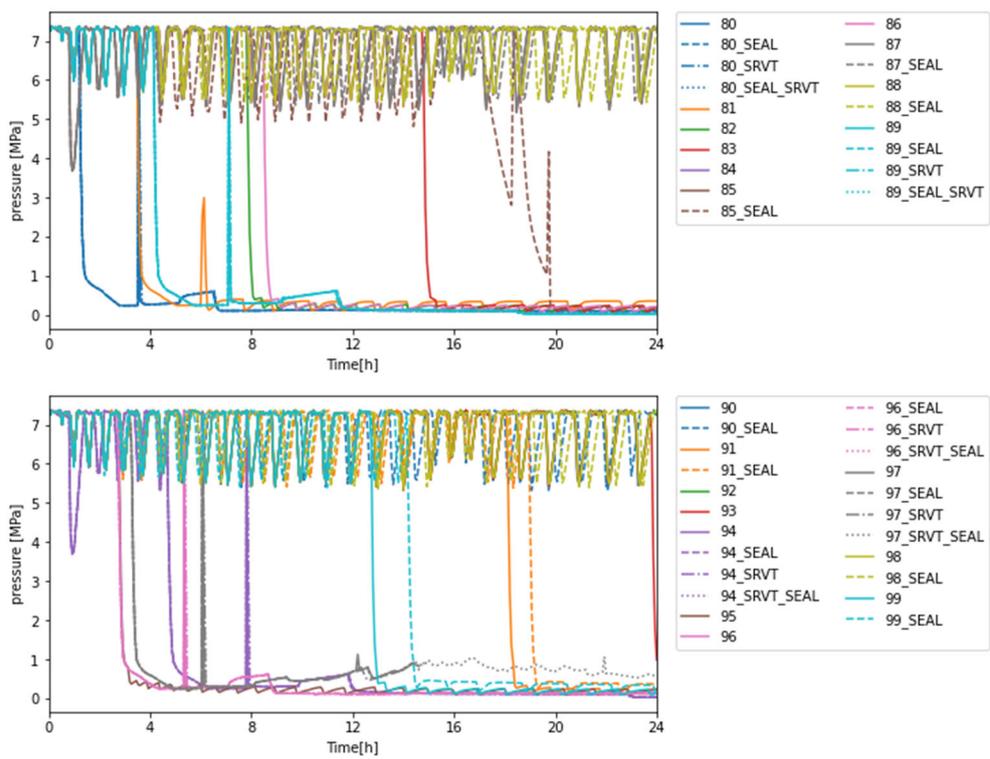


図 3.1.2-6 THALES2 の解析結果：原子炉压力容器（RPV）内の圧力：その 3

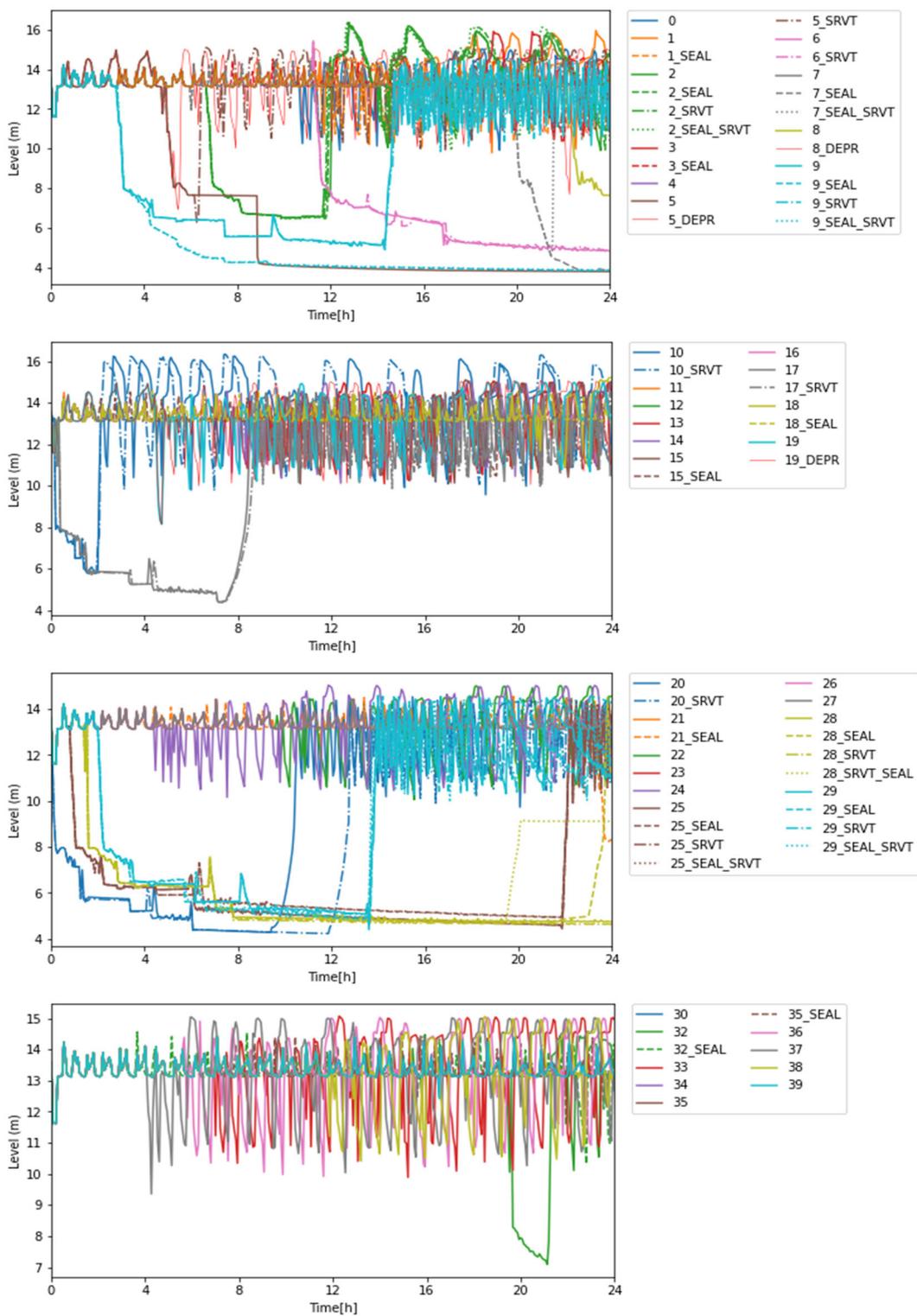


図 3.1.2-7 THALES2 の解析結果：原子炉圧力容器（RPV）内の水位：その 1

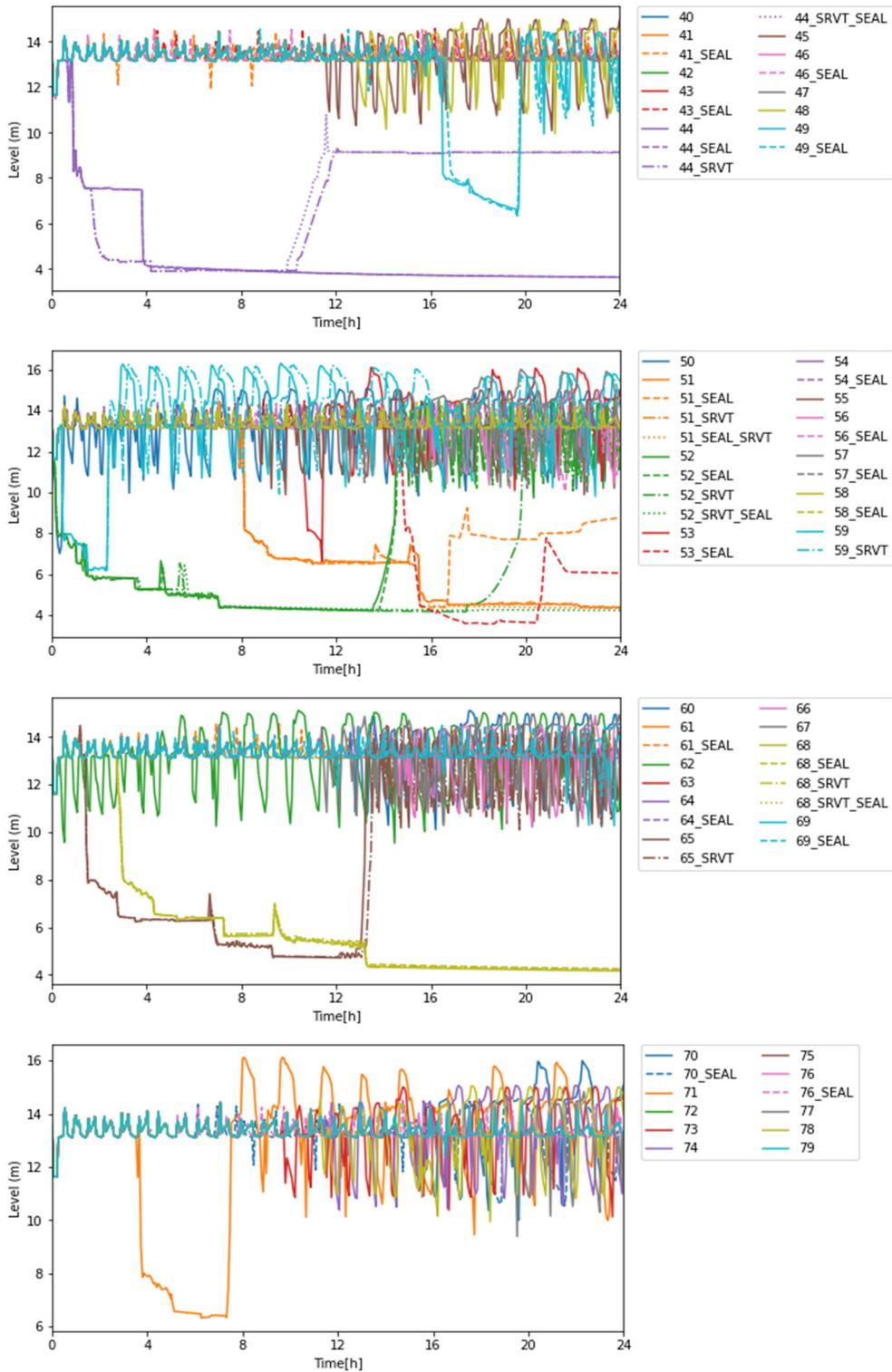


図 3.1.2-8 THALES2 の解析結果：原子炉压力容器（RPV）内の水位：その2

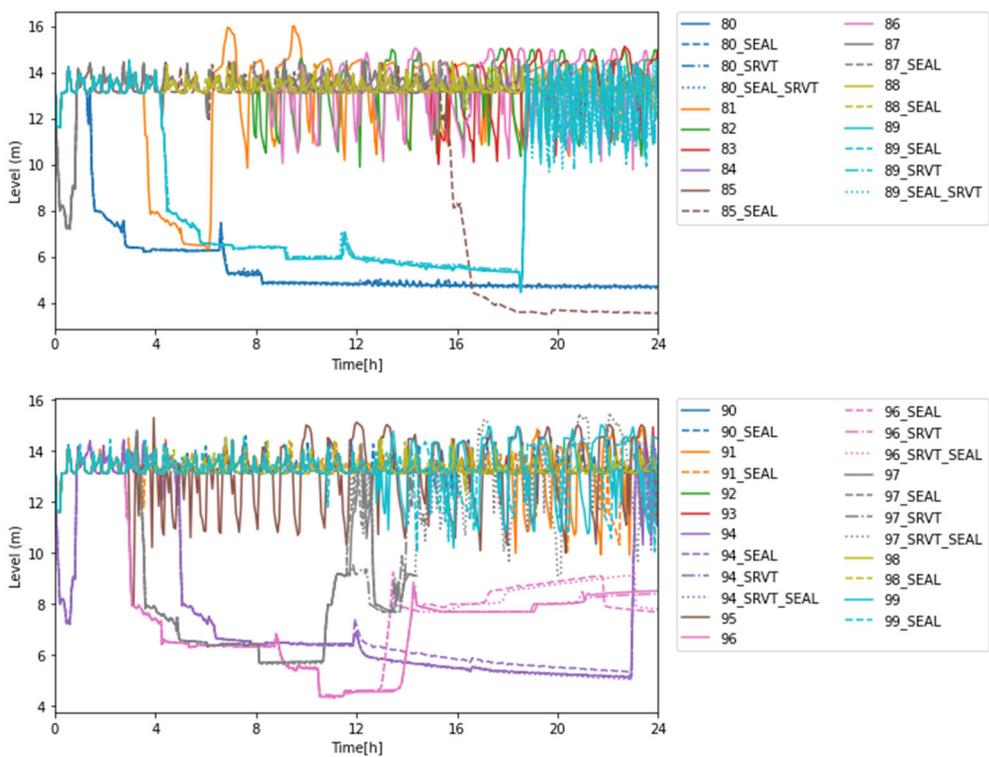


図 3.1.2-9 THALES2 の解析結果：原子炉圧力容器（RPV）内の水位：その 3

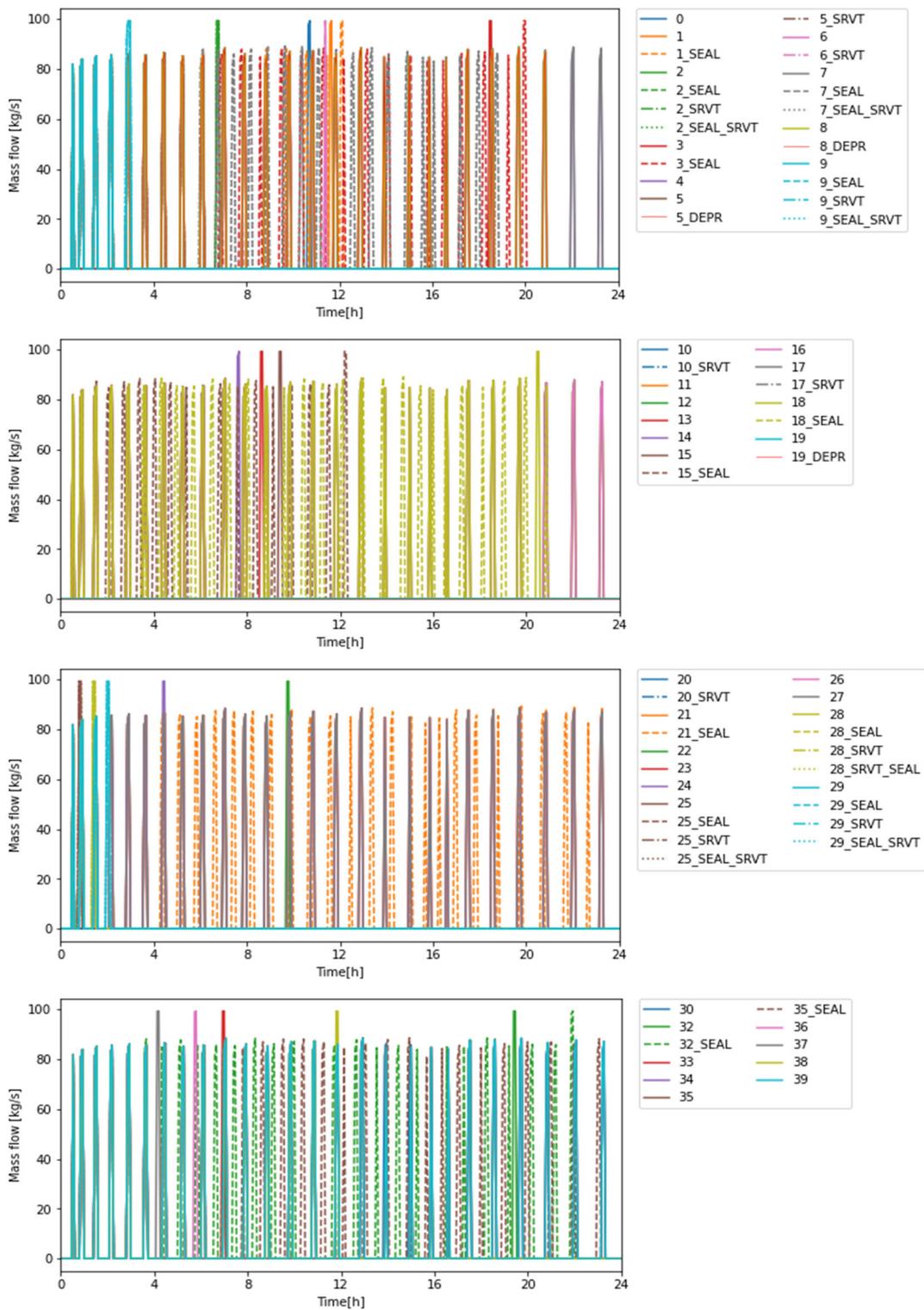


図 3.1.2-10 THALES2 の解析結果：HPCS 流量：その 1

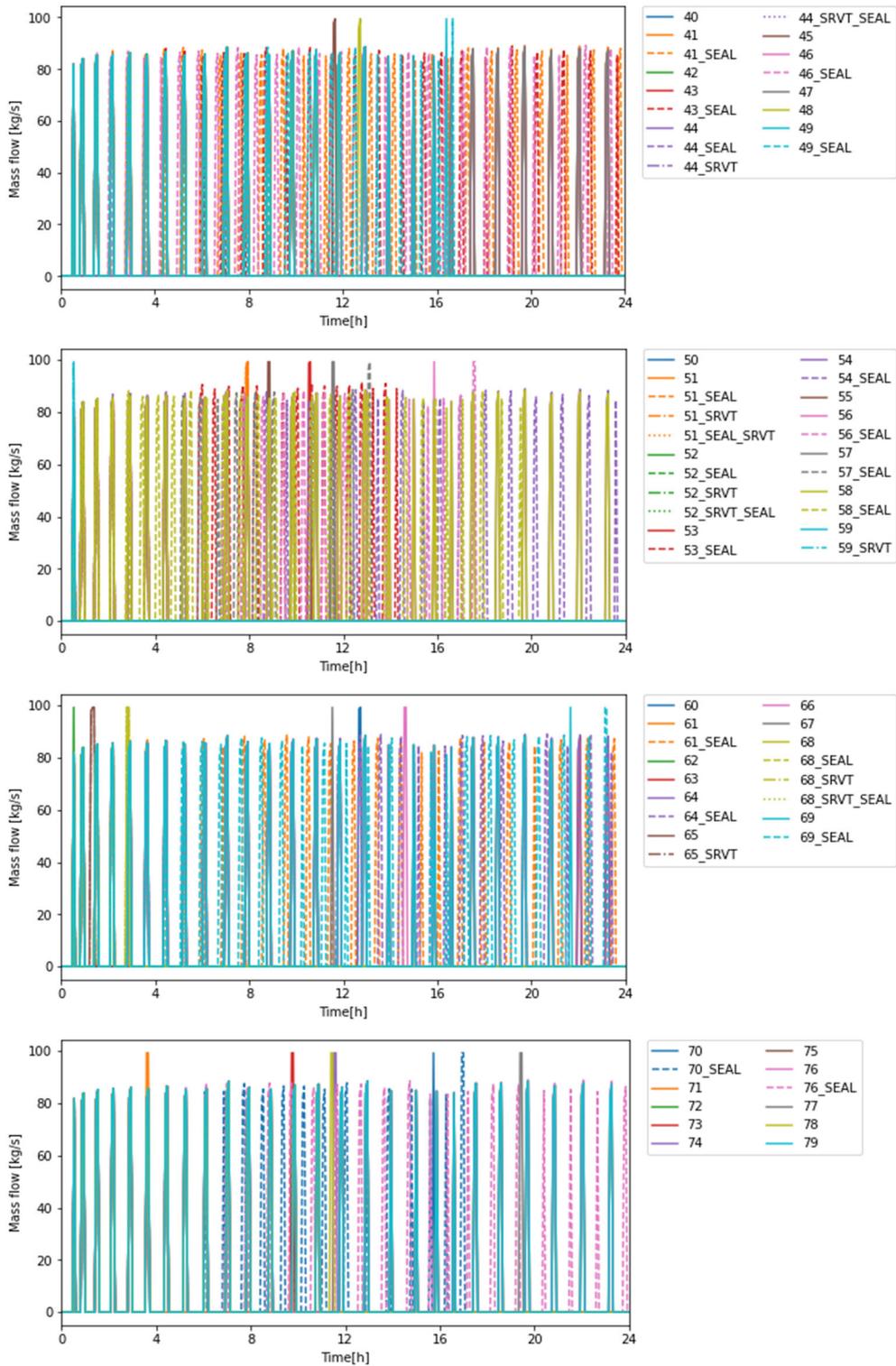


図 3.1.2-11 THALES2 の解析結果：HPCS 流量：その 2

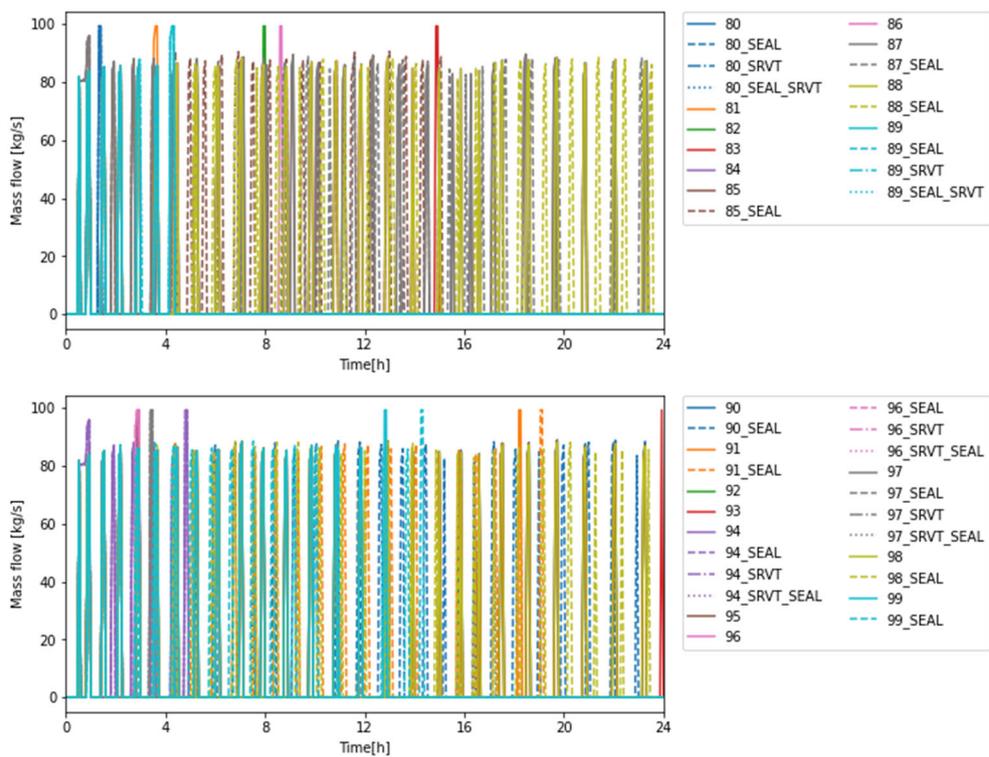


図 3.1.2-12 THALES2 の解析結果：HPCS 流量：その 3

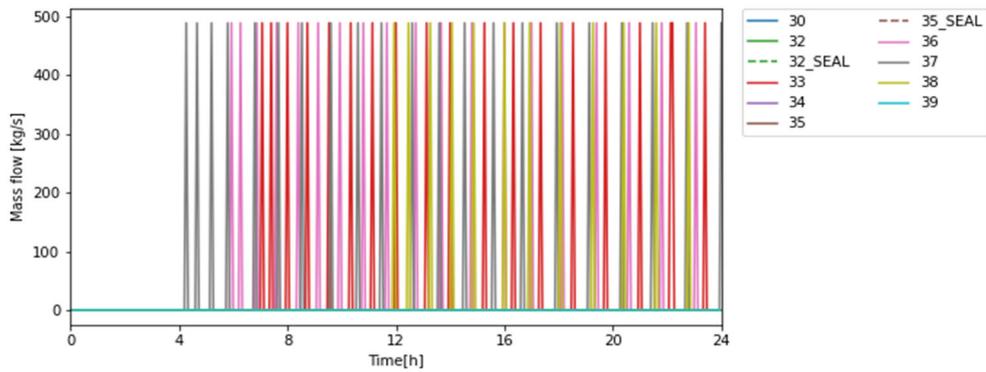
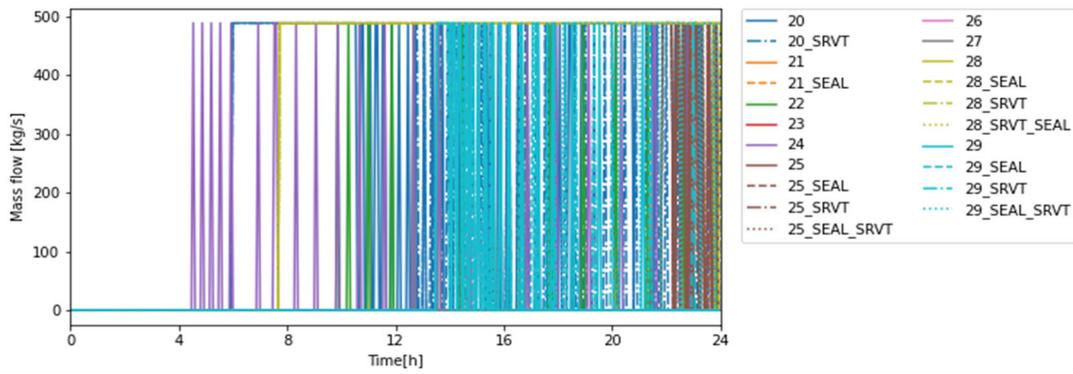
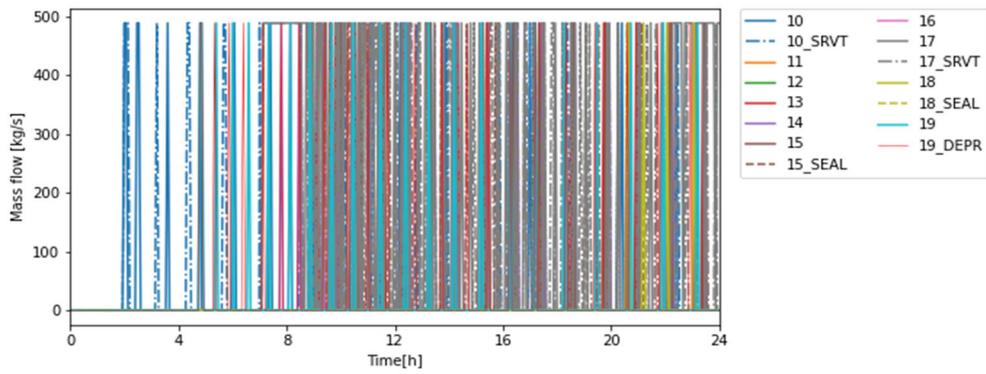
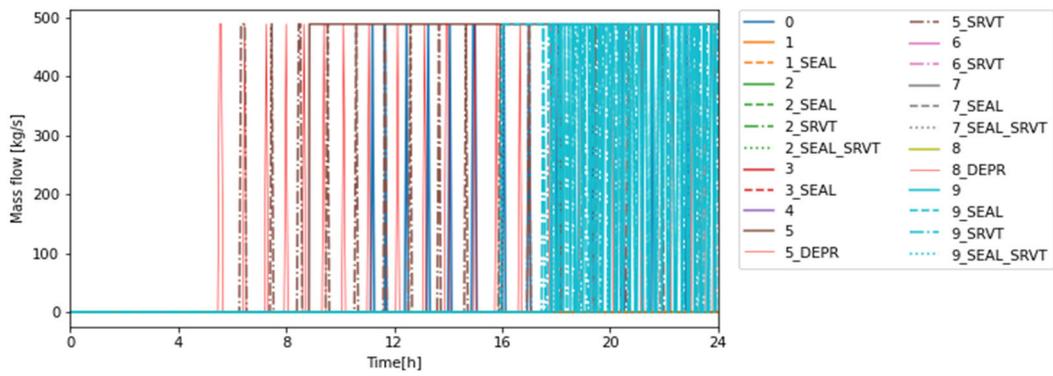


図 3.1.2-13 THALES2 の解析結果 : LPCS 流量 : その 1

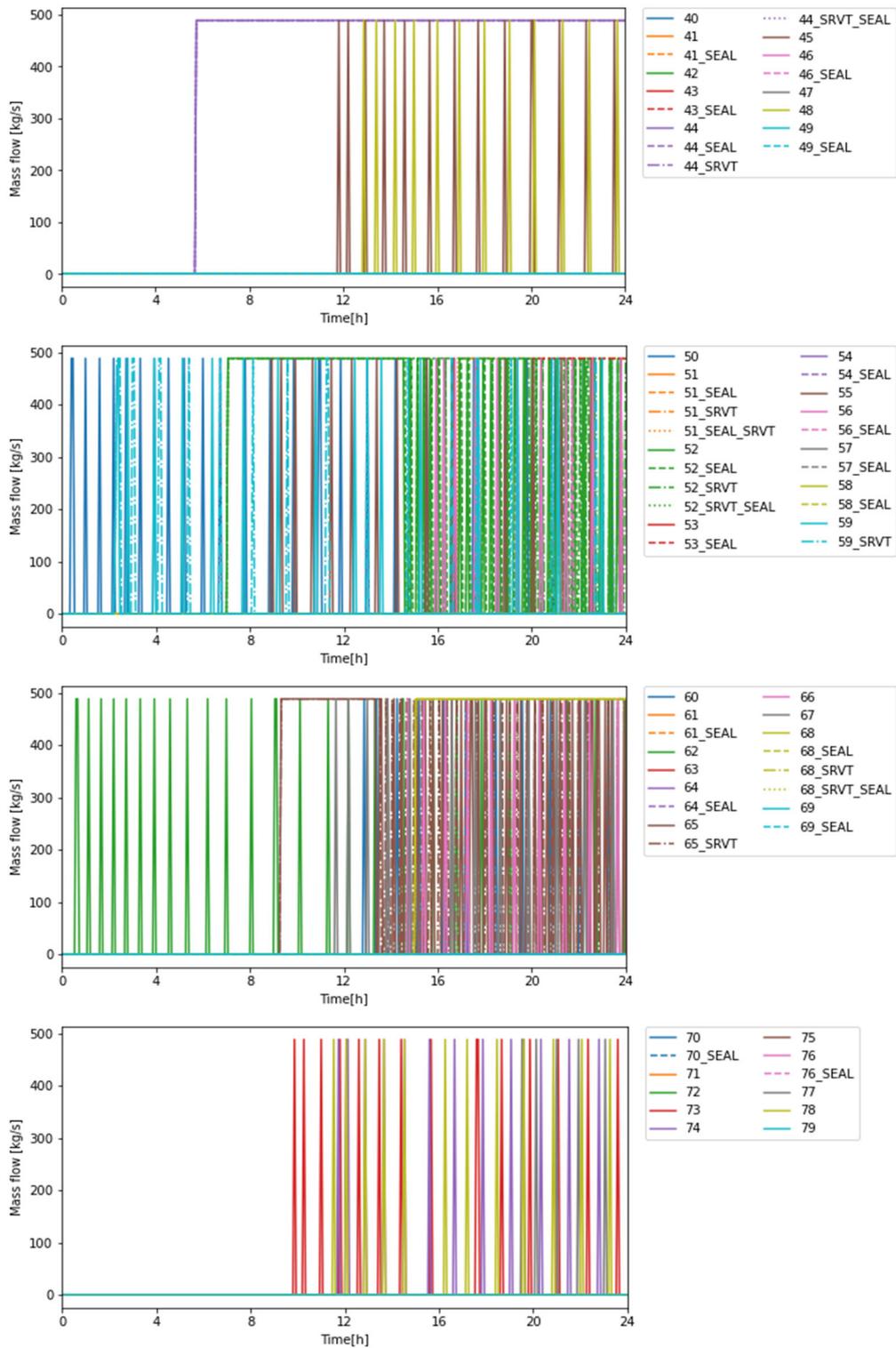


図 3.1.2-14 THALES2 の解析結果 : LPCS 流量 : その 2

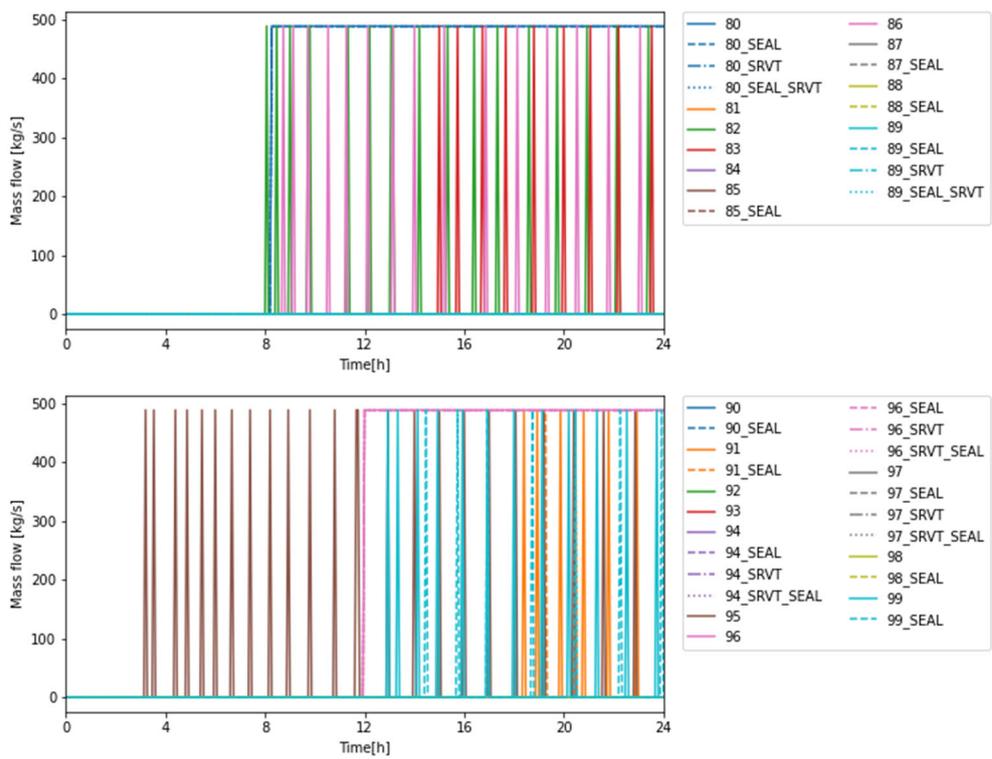


図 3.1.2-15 THALES2 の解析結果 : LPCS 流量 : その 3

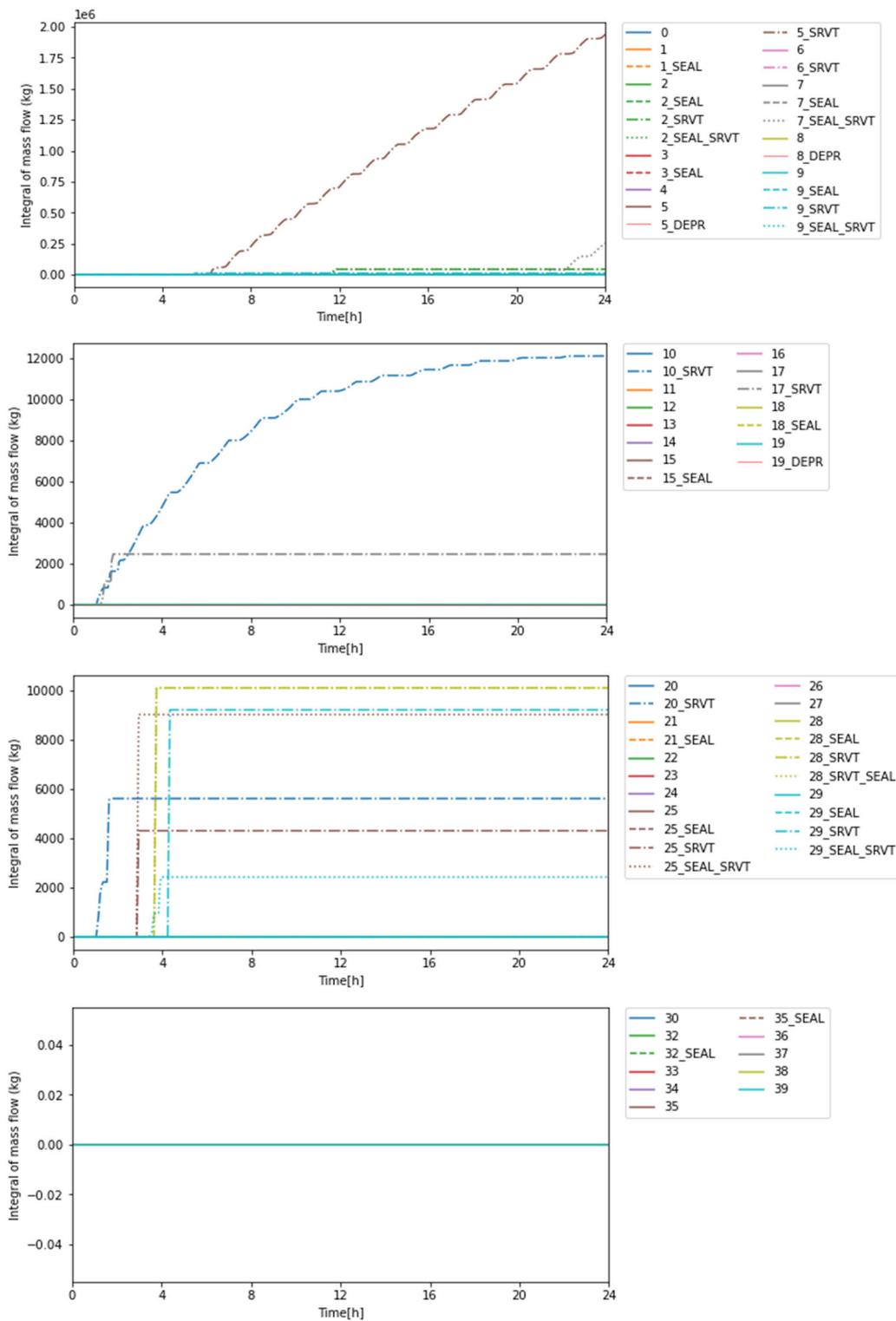


図 3.1.2-16 THALES2 の解析結果：SRV 熱的故障による漏洩積算流量：その 1

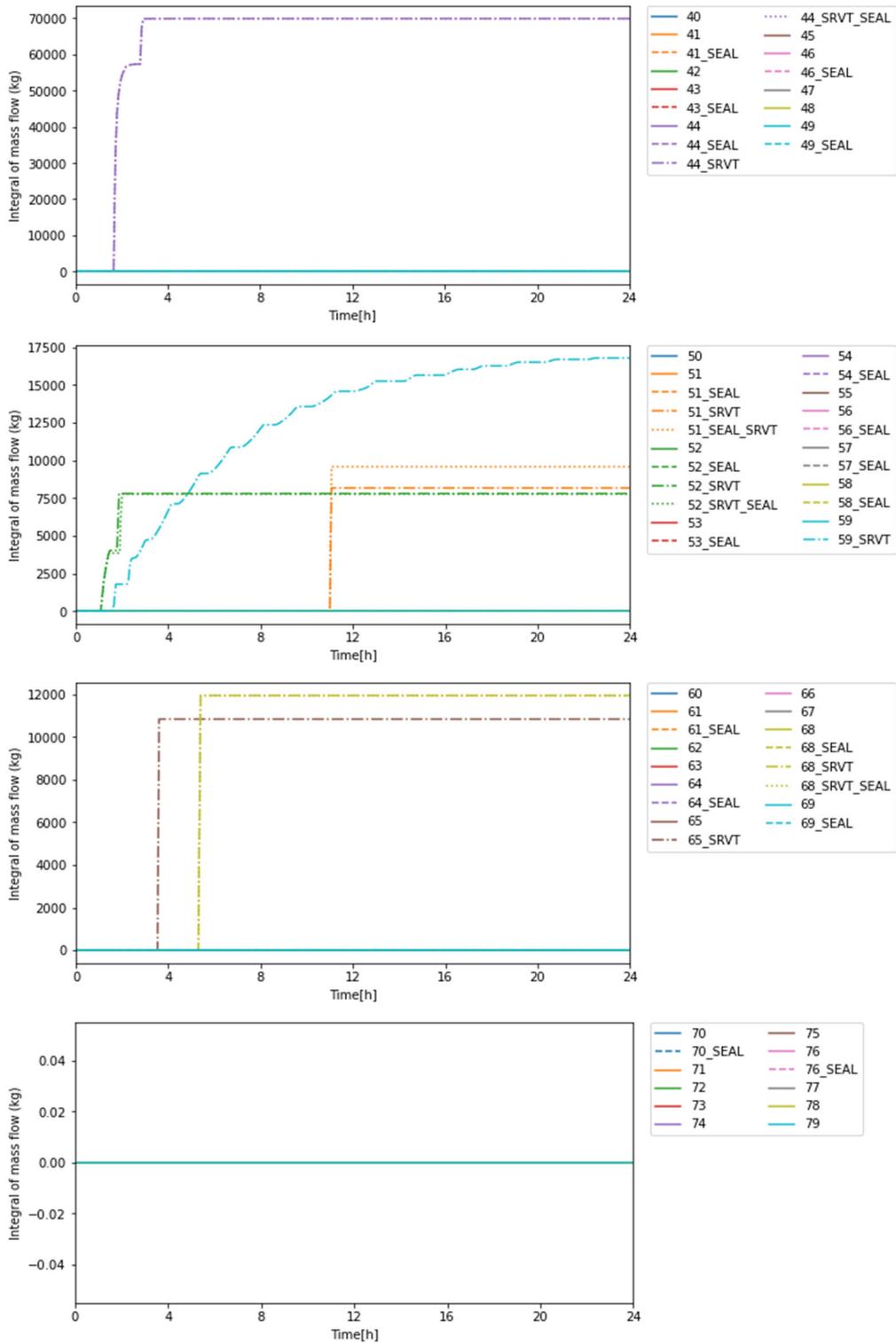


図 3.1.2-17 THALES2 の解析結果：SRV 熱的故障による漏洩積算流量：その 2

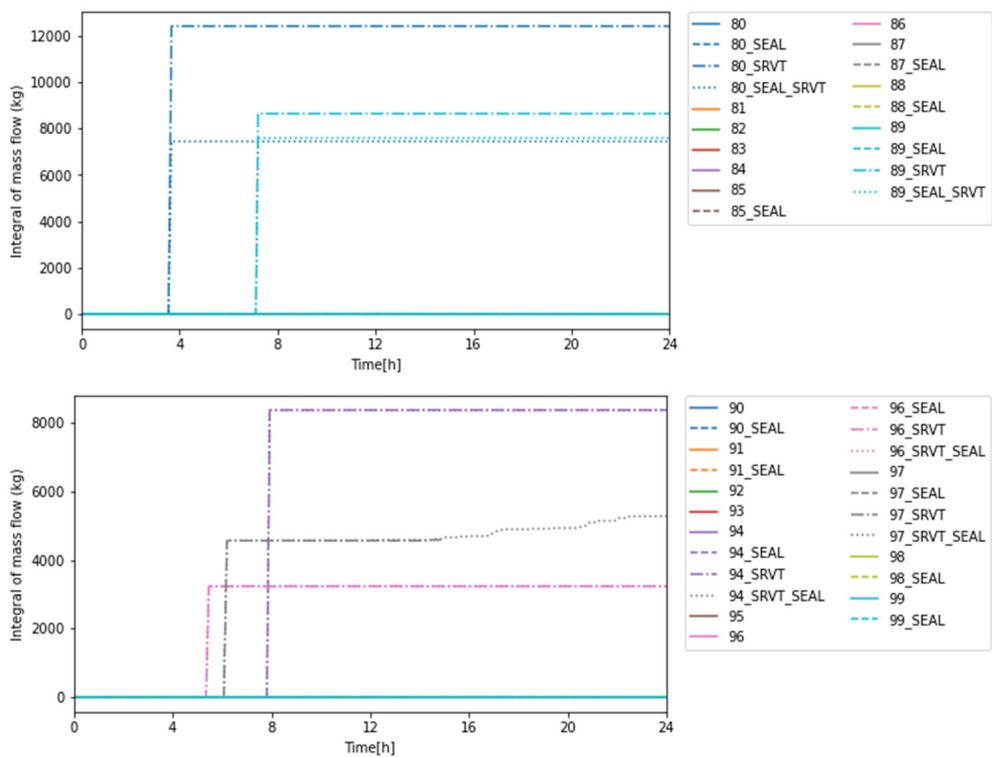


図 3.1.2-18 THALES2 の解析結果：SRV 熱的故障による漏洩積算流量：その 3

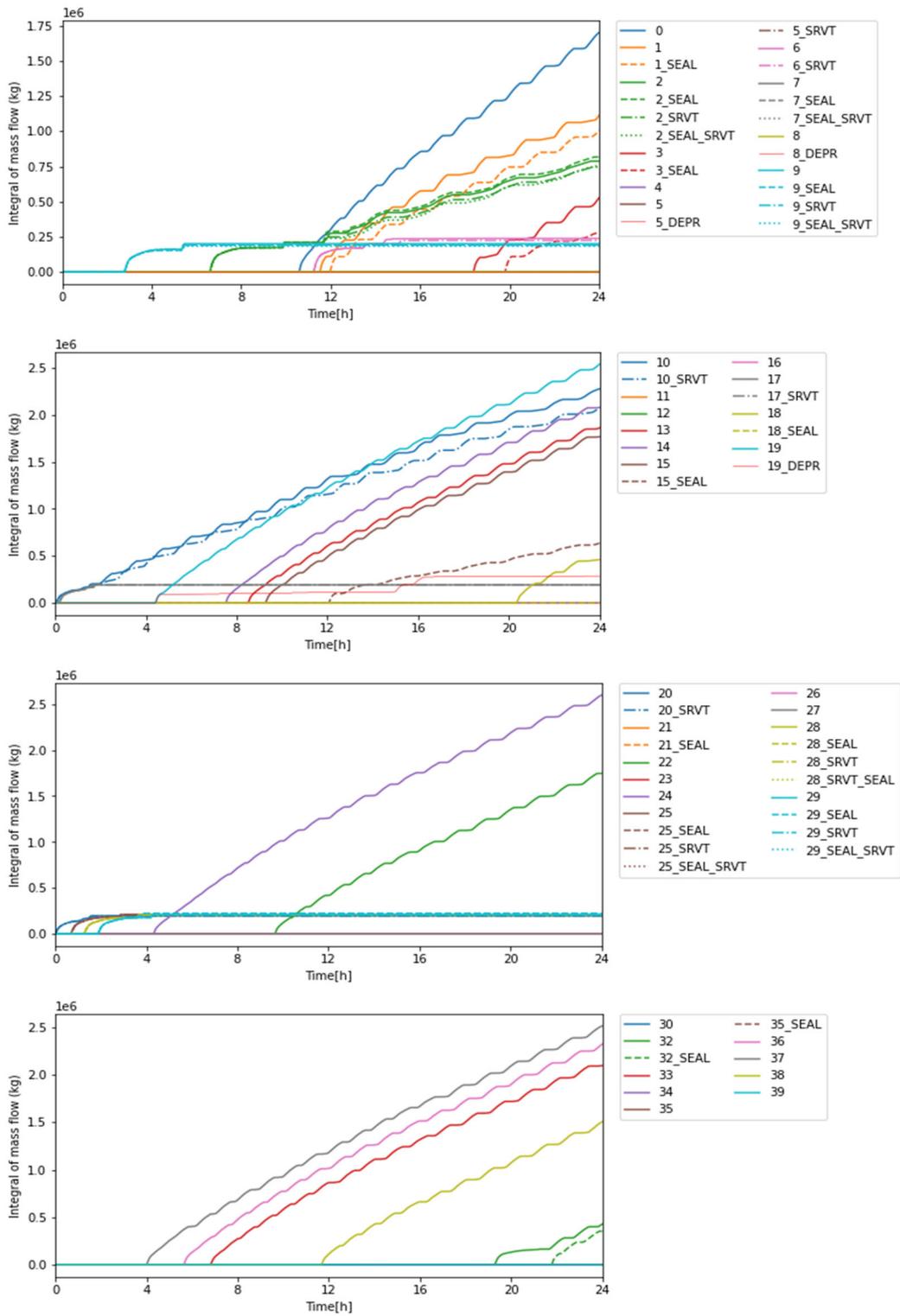


図 3.1.2-19 THALES2 の解析結果：SRV 閉失敗故障による漏洩積算流量：その 1

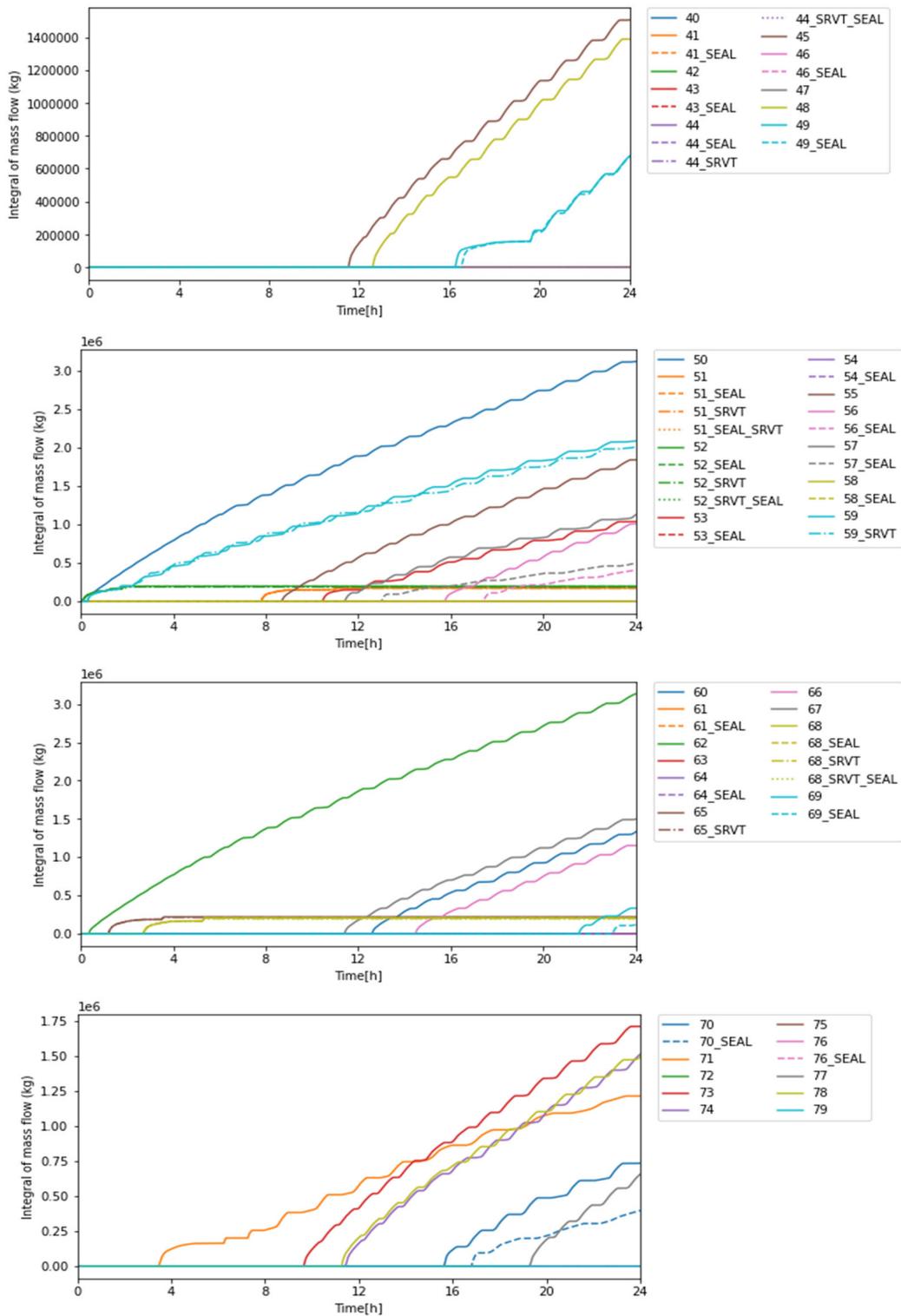


図 3.1.2-20 THALES2 の解析結果：SRV 閉失敗故障による漏洩積算流量：その 2

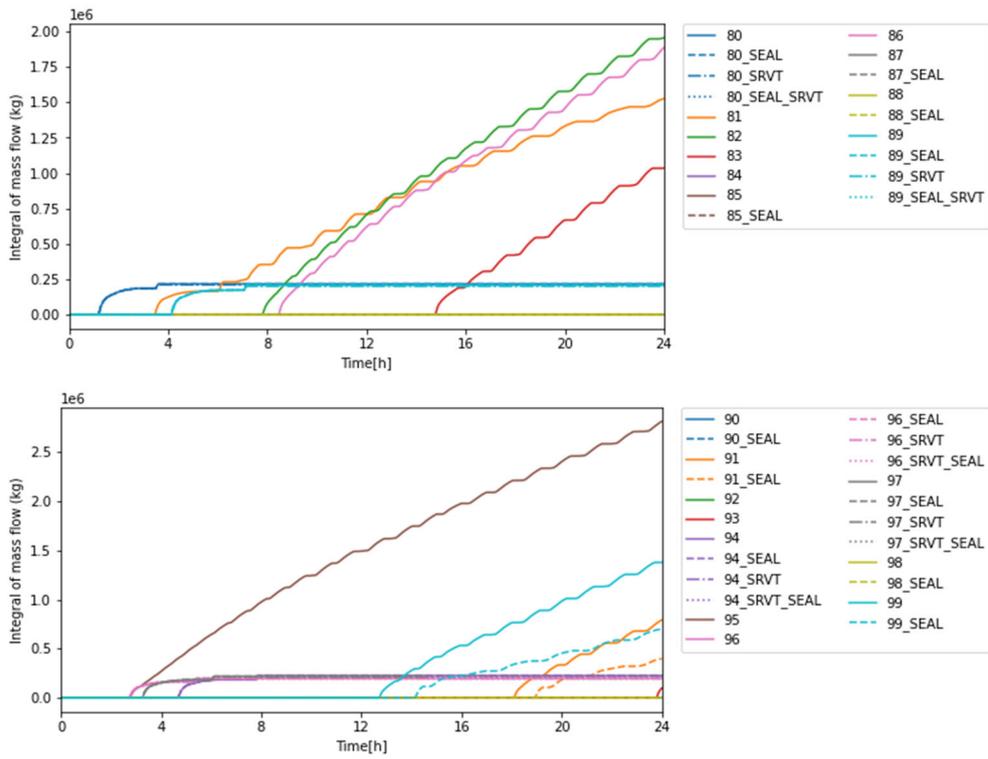


図 3.1.2-21 THALES2 の解析結果：SRV 閉失敗故障による漏洩積算流量：その 3

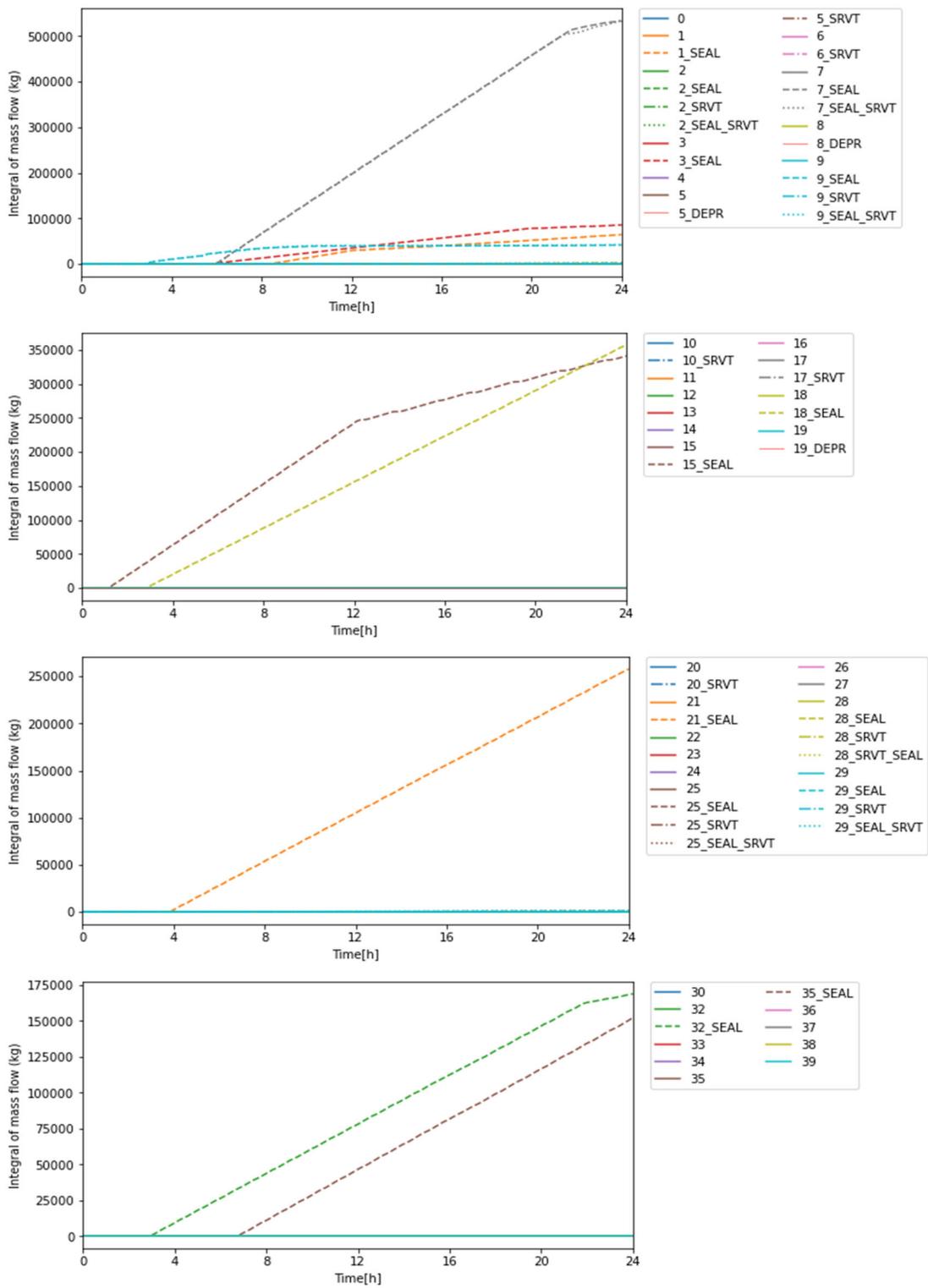


図 3.1.2-22 THALES2 の解析結果：シール損傷による漏洩積算流量：その 1

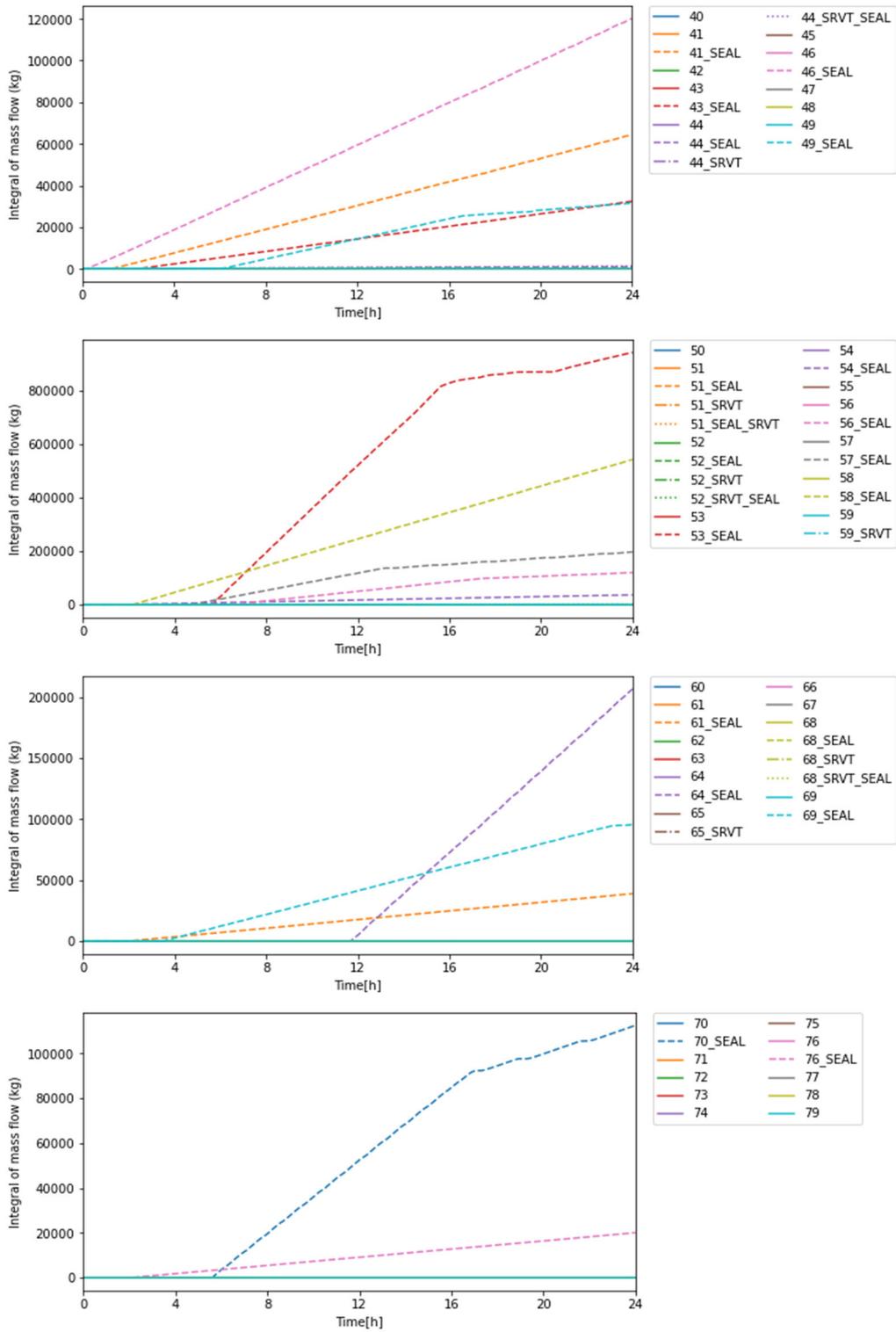


図 3.1.2-23 THALES2 の解析結果：シール損傷による漏洩積算流量：その 2

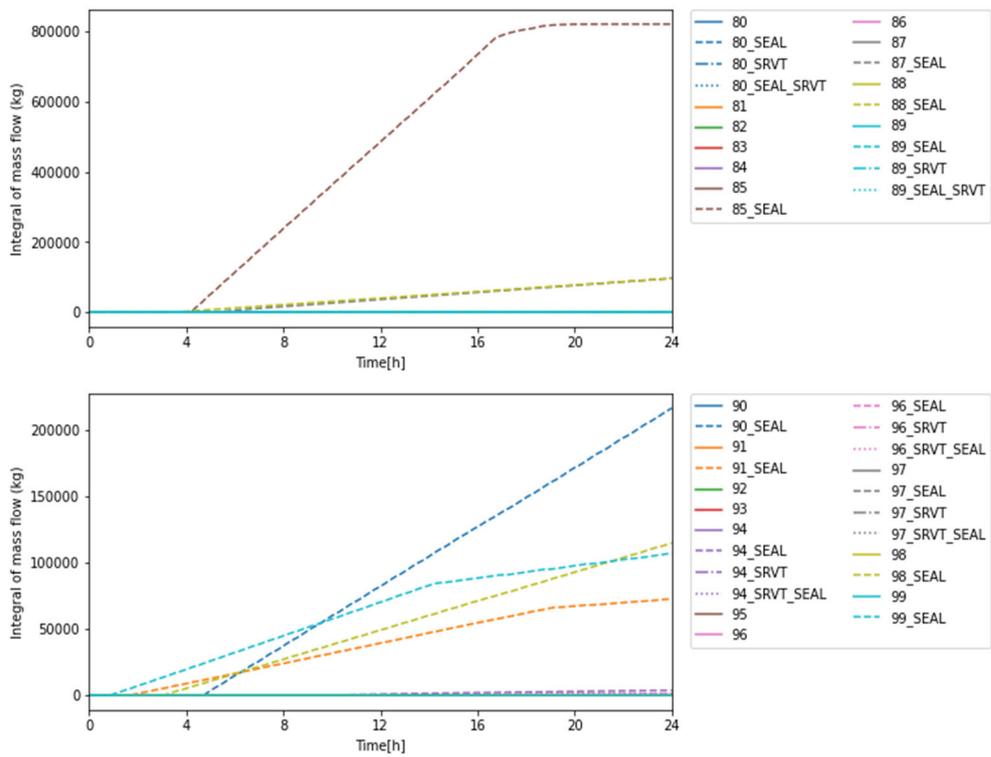


図 3.1.2-24 THALES2 の解析結果：シール損傷による漏洩積算流量：その3

3.1.2.3. 解析結果の考察

昨年度の解析では、RHR を考慮できていなかったため、冷却注水の際にキャビテーションが発生し、炉心冷却に失敗するケースが多く存在した。本年度の解析では、RHR を考慮したことで、S/P の温度上昇が抑えられ、解析終了時間である 24 時間まで炉心の冷却成功しているケースが多く存在した。その代表例として、ケース番号 0 の解析結果より、事故シナリオの概要を説明する。

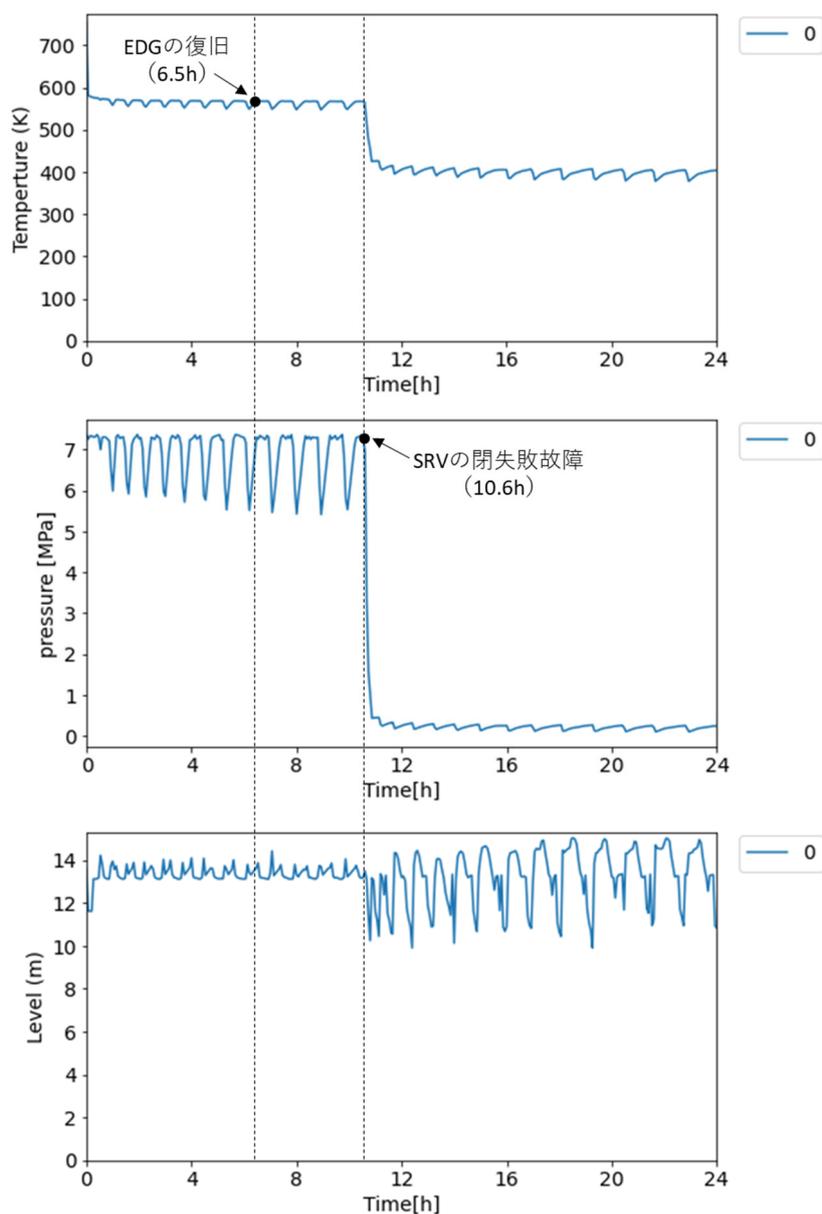


図 3.1.2-25 ケース 0 の解析結果 (上 : PCT、中 : RPV 内の圧力、下 : RPV 内の水位)

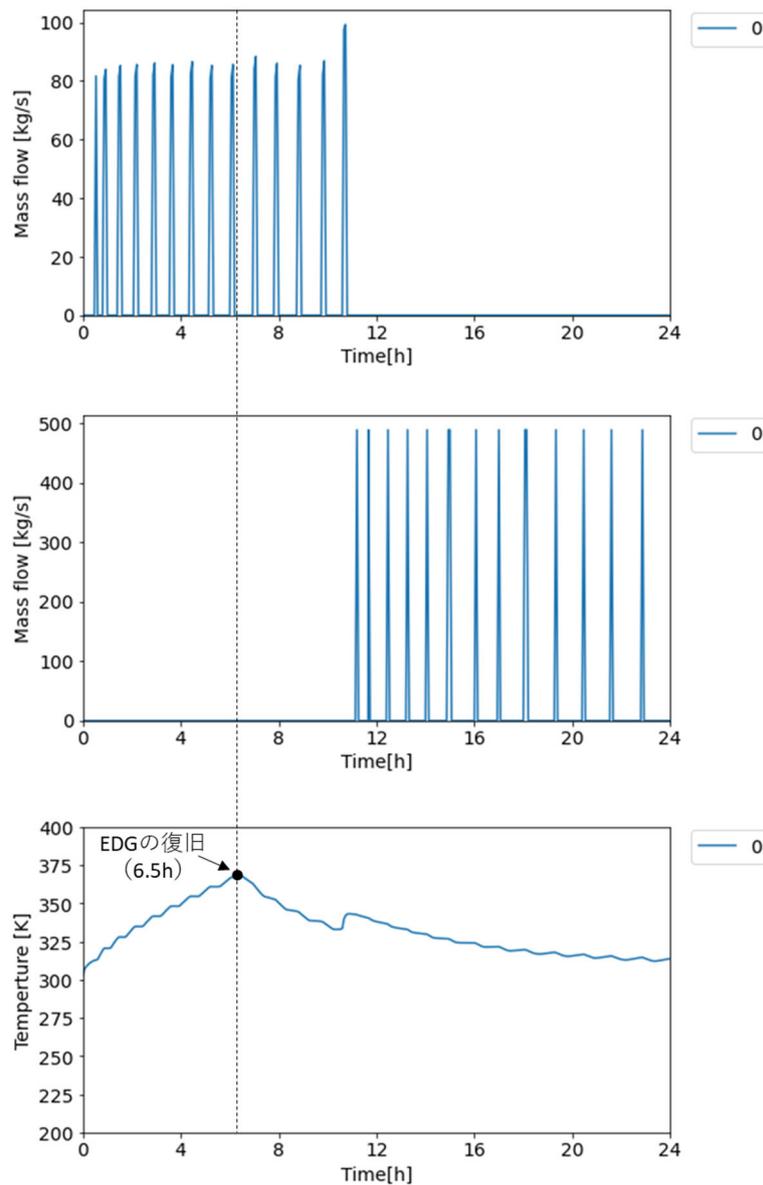


図 3.1.2-26 ケース0の解析結果（上：HPCS注水量、中：LPCS注水量、下：S/P内の液相温度）

図 3.1.2-25 は、ケース0における PCT 及び RPV 内の圧力・水位の解析結果である。また、図 3.1.2-26 は、HPCS、LPCS の注水流量、S/P 水の温度である。SBO 発生後、最初は RCIC による注水が行われるが、HPCS が起動して注水可能となった段階（SBO 発生から 30 分後と仮定）で HPCS に切り替える。本年度の解析では、HPCS による注水を優先し、電源が確保できて機器の故障が発生しない限り、HPCS による炉心の冷却を続ける。ただ、ケース0では、SRV の閉失敗故障が 10.6 時間後に発生し、RPV 内の圧力が低下する。しかし、6.5 時間後の時点で EDG は復旧しているため、RPV 内の圧力が 1MPa

以下に低下したら LPCS による注水が可能となる。さらに、RHR も作動するため、S/P 水の除熱が行われるので、昨年度のようなキャビテーションは発生せず、S/P 水を用いた炉心の冷却を続けることができる。

本年度の解析では、プラントパラメータを反映した分岐生成として、昨年度取り入れた SRV の熱的故障、再循環ループのシール損傷に加えて、低圧注水のための減圧操作も追加した。減圧操作は、3.1.1 節でも述べたように、

「高圧注水系の停止、かつ、低圧注水の起動に成功、かつ、EDG による電源確保」

の条件下で発生する。ケース番号 5 の解析でこの分岐が発生したので、解析結果をもとに説明を行う。

図 3.1.2-27 は、ケース 5 における PCT 及び RPV 内の圧力・水位の解析結果である。また、図 3.1.2-28 は、RCIC、LPCS の注水流量及び減圧操作を行う SRV の積算流量である。ケース 5 では、HPCS の起動に失敗するため、高圧注水系は RCIC しか利用できない。SBO 発生後、RCIC による注水が行われるが、4.56 時間後に DC 電源が枯渇して、RCIC による注水が停止する。LPCS の起動には成功しており、0.88 時間後に EDG は復旧しているので、RCIC による注水が停止した時点で減圧操作の条件が満たされる。このタイミングでの、RPV 内の水位は 13.1m であった。そのため、運転員への影響を反映したファクタは、

(時間 : 4.56 時間、水位 : 13.1m) = (10 時間未満、L4 未満) →10

になる。表 3.1.1-1 に示した確率分布より運転員の操作失敗確率の値をサンプリングすると、 4.63×10^{-4} となり、この値にファクタを 10 を掛けた値 4.63×10^{-3} を失敗確率として操作成功・失敗のサンプリングを行うと成功となった。そして、操作の所要時間をサンプリングすると、40.0 分 (=0.67 時間) となった。その結果、減圧操作の条件を満たした 4.56 時間から 0.67 時間後の 5.23 時間後に減圧操作が行われ、RPV 内の圧力が 1MPa を下回ったタイミングで LPCS による注水が開始された。

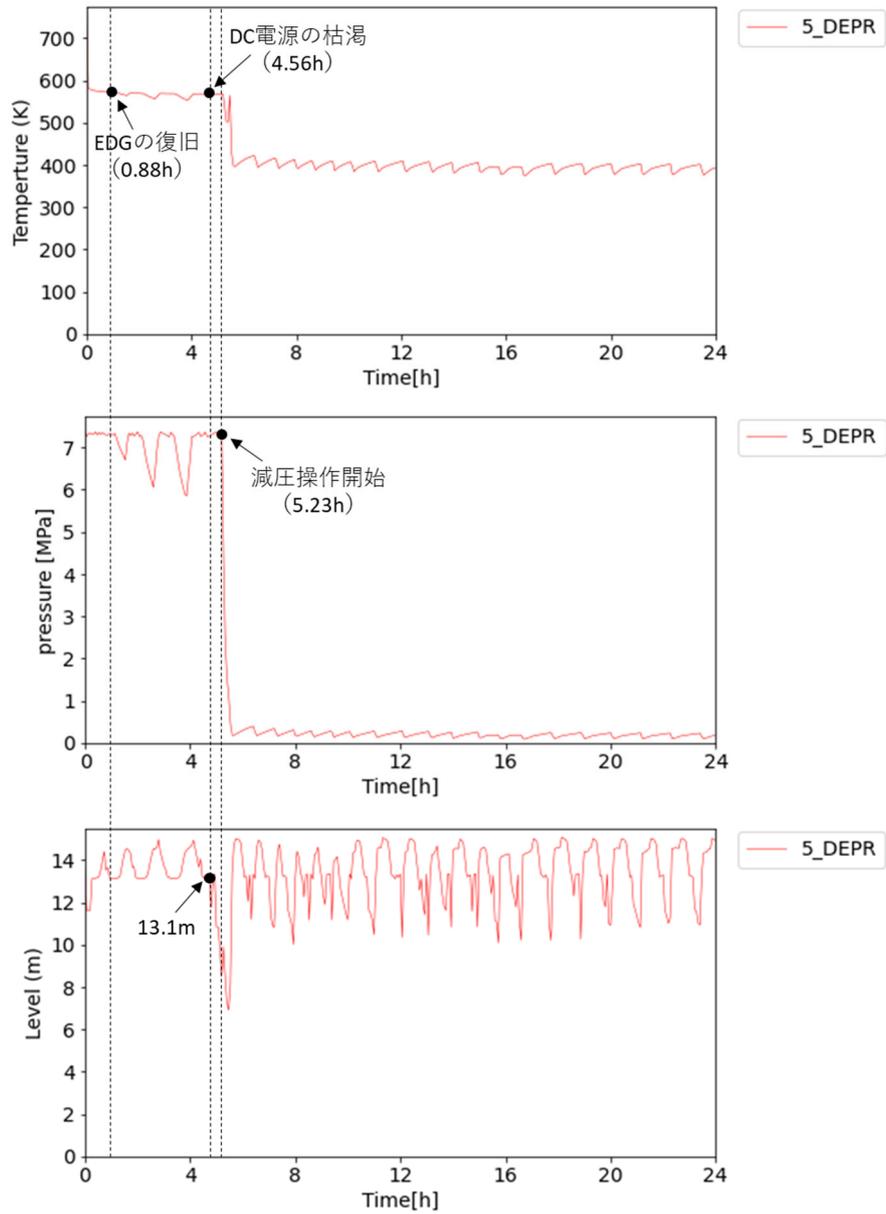


図 3.1.2-27 ケース 5 (減圧操作による分岐あり) の解析結果 (上: PCT、中: RPV 内の圧力、下: RPV 内の水位)

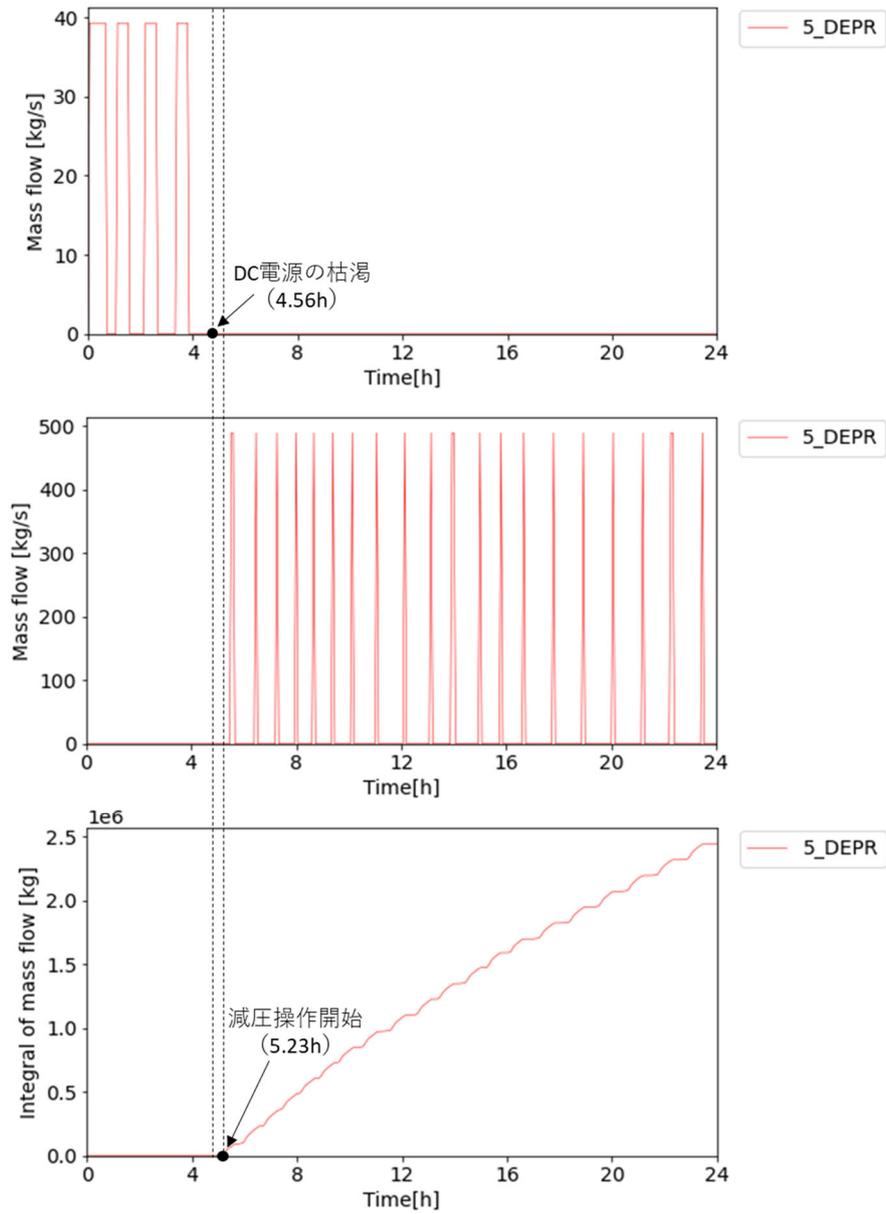


図 3.1.2-28 ケース 5 (減圧操作による分岐あり) の解析結果
 (上 : RCIC 注水量、中 : LPCS 注水量、下 : 減圧操作を行う SRV の積算流量)

本年度の解析では、RHR が作動せず S/P の圧力が上昇した場合に、S/P のベント操作を行う事象も追加した。ケース番号 76 は、RHR の起動に失敗するケースであり、S/P のベント操作の条件を満たす。

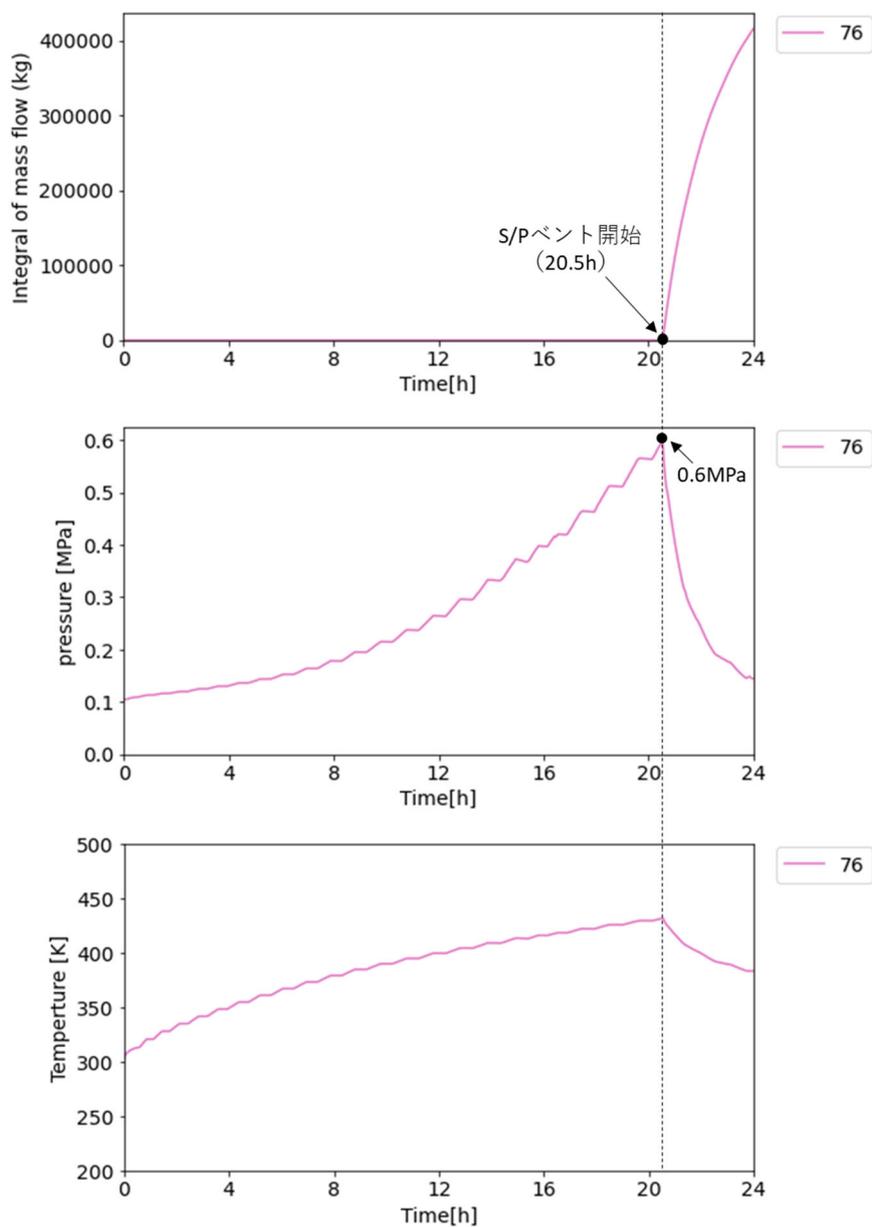


図 3.1.2-29 ケース 76 (分岐なし) の解析結果
(上 : S/P ベントの積算流量、中 : S/P 内の圧力、下 : S/P 内の液相温度)

図 3.1.2-29 は、ケース 76 における S/P のベントの積算流量、S/P 内の圧力および液相温度の解析結果である。本ケースでは、HPCS の起動に成功し、HPCS 専用の EDG も確保されるので、HPCS による注水が行われ、炉心冷却に成功する。ただ、RHR の起動失敗により、S/P 内の水は冷却されず、温度・圧力ともに上昇していく。そして、20.5 時間後には S/P 内の圧力が 0.6MPa に到達し、S/P のベント操作を実施する。その結果、S/P 内の圧力は低下し、水の温度も低下していくことが確認できた。

3.1.2.4. 炉心損傷頻度の算出

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)より算出される。本年度の解析結果をこの算出式に適用すると、条件付炉心損傷確率は、

$$\text{条件付炉心損傷確率} = 87 / 187 = 0.465$$

となった。SBO 事故の発生頻度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すると

$$\text{炉心損傷頻度} = 0.465 \times 10^{-6} = 4.65 \times 10^{-7}$$

となった。

3.1.2.5. クラスタリングによるリスク情報の導出

2.2.2 節で述べたクラスタリング機能を用いて、リスク情報の導出を行った。クラスタリングの際、今年度実施した RAPID-THALES2 の解析結果を利用した。以下では、

- 時系列データに対するクラスタリング
- 事象進展ベクトルに対するクラスタリング

の順に、クラスタリングを実施した結果を示す。

<燃料被覆管最高温度 (PCT) の時系列データに対するクラスタリング>

図 3.1.2-30 は、燃料被覆管最高温度 (PCT) の時系列データに対してクラスタリングを行った結果であり、クラスタ数は 2 及び 3 に設定した。

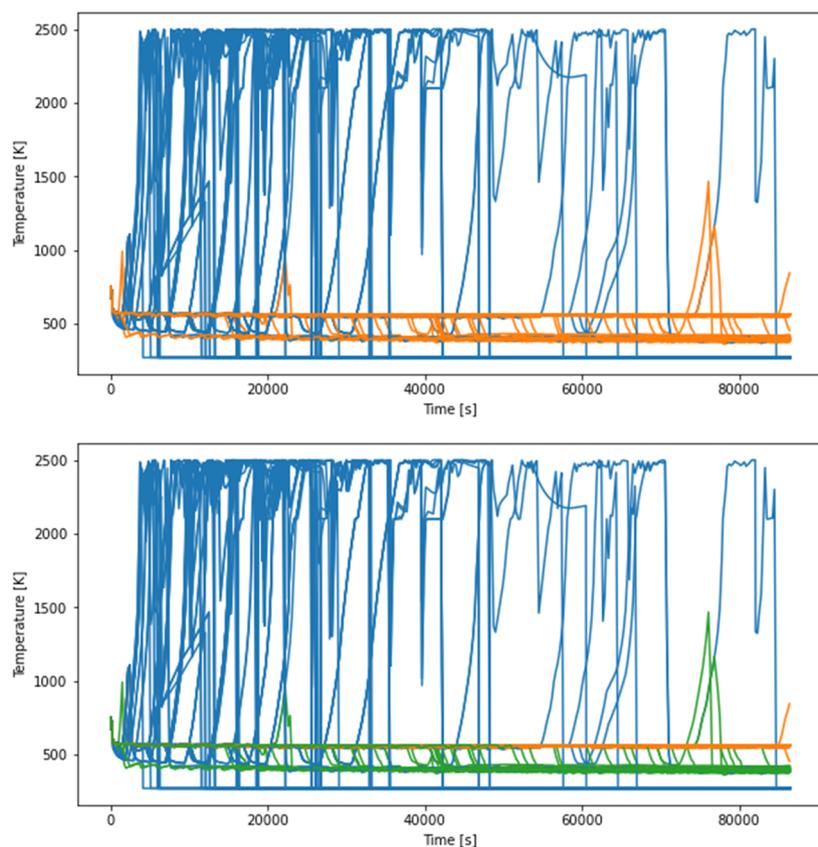


図 3.1.2-30 PCT の時系列データに対するクラスタリング
(上：クラスタ数は 2、下：クラスタ数は 3)

クラスタ数が2の場合は、炉心損傷に至ったケース（PCTが1473Kを越える）と炉心損傷に至らなかったケース（PCTが1473K未満）に分類された。クラスタ数を3の場合は、クラスタ数が2の場合の同様の分類になり、さらに炉心損傷に至らなかったケースの中でも、SRV故障や減圧操作によりRPV内の圧力が低下してPCTの温度が約400Kまで低下するケース（図3.1.2-30の下図の緑線）とRPV内の減圧は行われずにPCTの温度が約600Kを保持するケース（図3.1.2-30の下図の橙線）に分かれた。

PCTの時系列データに対して、2.2.2.3節の機能を用いたクラスタ数の推定を行った。図3.1.2-31は、ベイズ情報量基準(BIC)によるクラスタ数の推定結果であり、クラスタ数が28で分割停止している。また、図3.1.2-32はクラスタ数を28にした場合のクラスタリングの結果である。

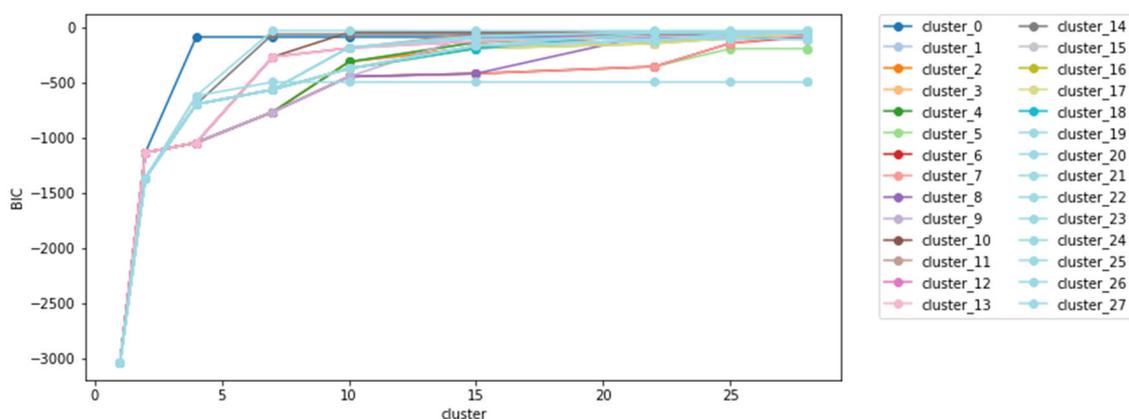


図 3.1.2-31 クラスタ数に対する BIC の変化 : THALES2 の PCT の時系列データ

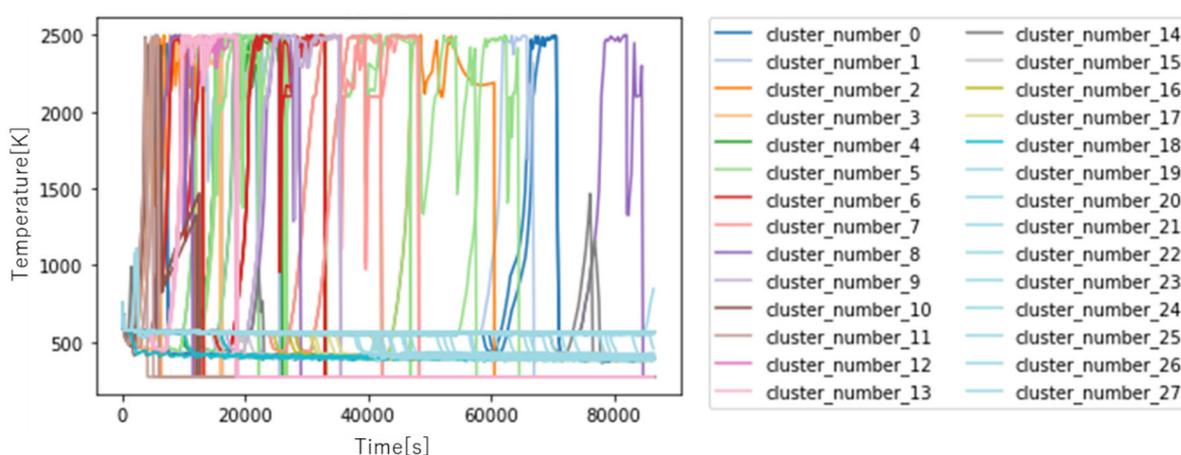


図 3.1.2-32 PCT の時系列データに対するクラスタリング (クラスタ数は28)

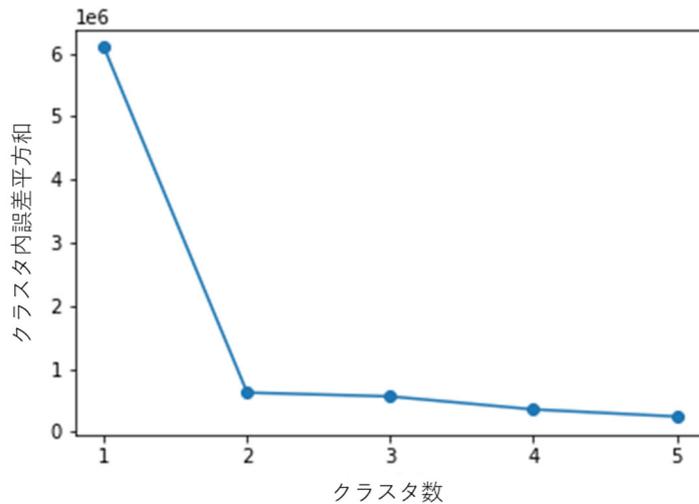


図 3.1.2-33 クラスタ数に対するクラスタ内誤差平方和の変化：THALES2 の PCT 時系列データ

図 3.1.2-33 は、エルボー法によるクラスタ数の推定結果である。クラスタ数が 1 から 2 になるところで誤差平方和が大きく減少しているが、その後の減少量は小さい。その結果、クラスタ数が 2 が良いと推定される。

図 3.1.2-34 から図 3.1.2-37 は、シルエット分析によるクラスタ数の推定結果である。クラスタ数が 2 または 3 の場合は、シルエット係数が 1 に近く、クラスタに分類されたデータの数もおおよそ均等にわかれている。クラスタ数が 4 または 5 の場合は、データ数が極端に少ないクラスタが発生しており、良いクラスタリングとは言えない。その結果、クラスタ数は 2 または 3 が良いと推定される。

上記の 3 つの推定結果から総合的に判断すると、クラスタ数は 2 または 3 が良いと推定される。BIC ではクラスタ数が 28 と非常に大きくなってしまったが、クラスタ数が 10 を越えたあたりから BIC の増加量は小さくなっており、過学習の傾向が見られる。図 3.1.2-31 より、BIC が大きく変化しているのは、クラスタ数が 5 あたりまでであり、過学習を抑えることができれば、BIC でもそれほど大きな推定値にはならないと予想される。過学習を抑えるには、BIC の定義式(2.2.2-1)式で示した第二項のペナルティ項を見直す必要があり、今後の課題である。

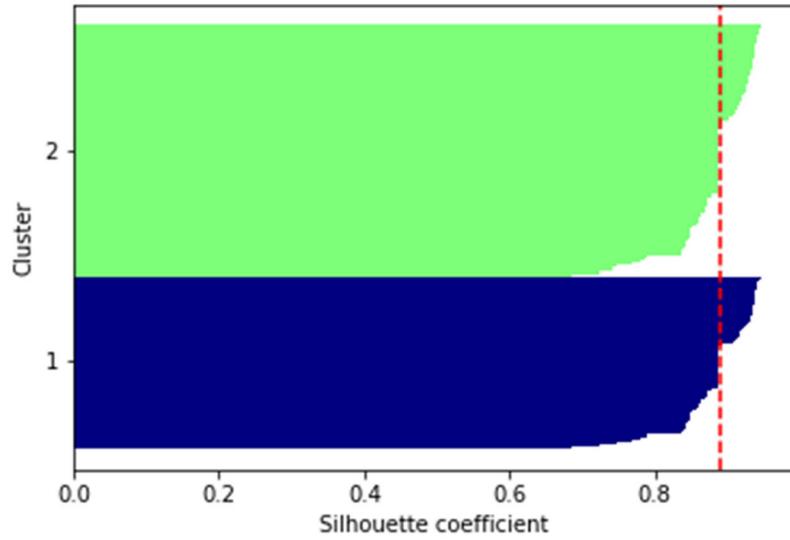


図 3.1.2-34 シルエット図：THALES2 の PCT の時系列データ（クラスタ数は 2）

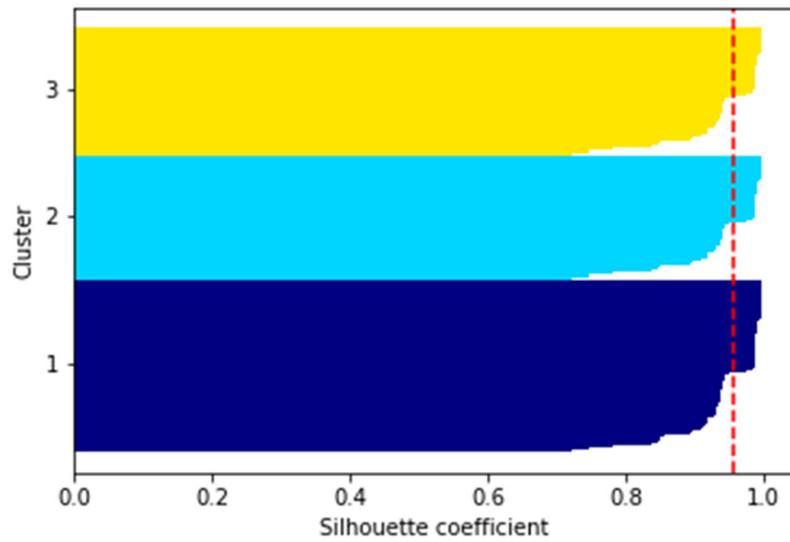


図 3.1.2-35 シルエット図：THALES2 の PCT の時系列データ（クラスタ数は 3）

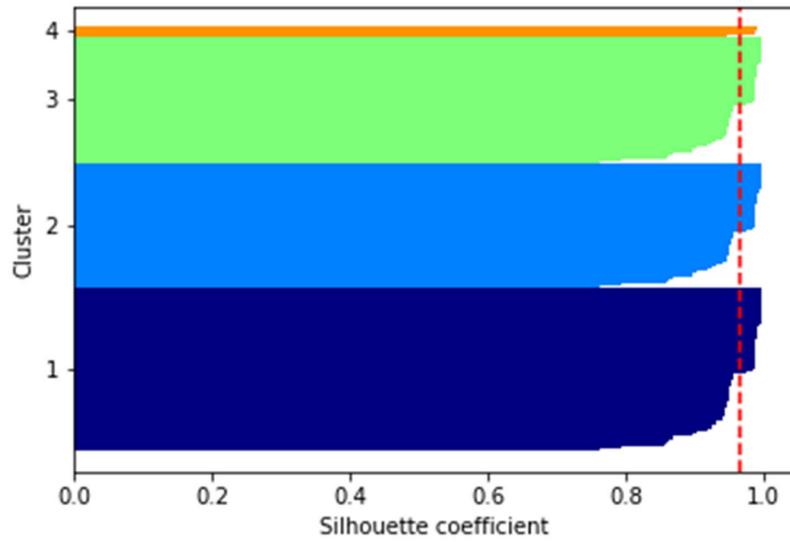


図 3.1.2-36 シルエット図：THALES2 の PCT の時系列データ（クラスタ数は4）

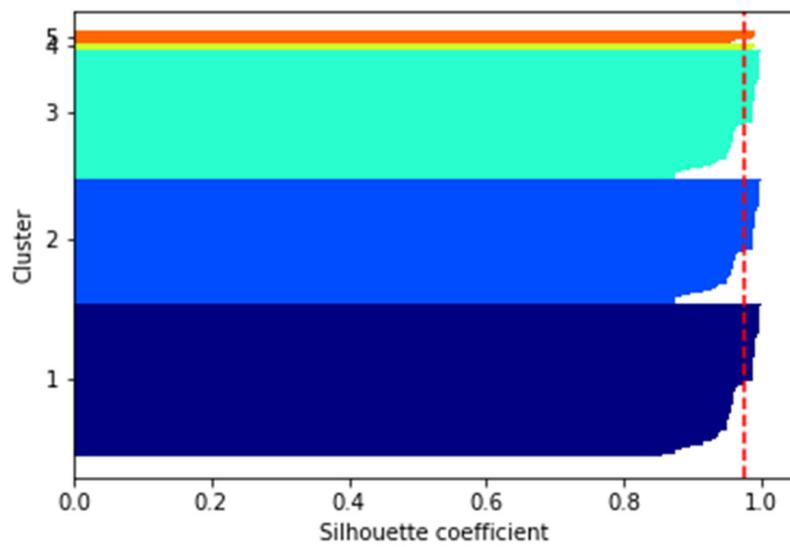


図 3.1.2-37 シルエット図：THALES2 の PCT の時系列データ（クラスタ数は5）

<事象進展ベクトルに対するクラスタリング>

まず、クラスタリングの対象となるベクトルを作成する。入力データからは

@DCFAIL	(DC 電源枯渇時間)
@DGREC	(非常用電源(AC)回復時間)
@SRVGNM	(SRV の閉失敗故障までの開閉回数)
@SRVGOPAR	(SRV の閉失敗故障の漏洩割合)
@TSTEMP	(SRV の熱的故障発生温度)
@TIMELOCA	(シール損傷発生時間)

の 6 項目を利用した。結果データは、時間に依存しない値からは、

Time_CoreDamage	(炉心損傷時間)
Max_PCT	(PCT の最高到達温度)

を利用した。時系列データに関しては、

TH-PSYS, 1	(RPV 圧力, MPa)
TH-ZMIX, 1	(炉心部水位, m)
FL-MPTOTM, 41	(SRV 閉失敗故障後の積算流量, kg)
FL-MPTOTM, 42	(SRV 熱的故障後の積算流量, kg)

に対して、PCT が 1200°C を越えたタイミングでの値を時系列データより抽出して利用した。ただし、PCT が 1200°C に達しない場合は、PCT の時系列データが最大値となるタイミングでの値を抽出して利用した。

これらで構成される事象進展ベクトルに対して、主成分分析による次元削減を行った。削減後の次元数は 2 とした。図 3.1.2-38 と図 3.1.2-39 に第一主成分軸と第二主成分軸への変換係数を示し、表 3.1.2-14 に係数の絶対値が大きい値の変数を示す。

図 3.1.2-40 と図 3.1.2-41 は、k-means 法と Gaussian Mixtures (GM)法による事象進展ベクトルのクラスタリング (クラスタ数は 2 に設定) の結果である。参考のため、炉心損傷の有無を示した図も図 3.1.2-42 に掲載した。クラスタリングの結果は、k-means 法、GM 法で同じような結果となっており、第一主成分の値によって二つの領域に分割している。図 3.1.2-42 の炉心損傷の有無の領域ともおおよそ一致しており、クラスタリングによる事故シーケンスの分類が適切に行われたと判断できる。

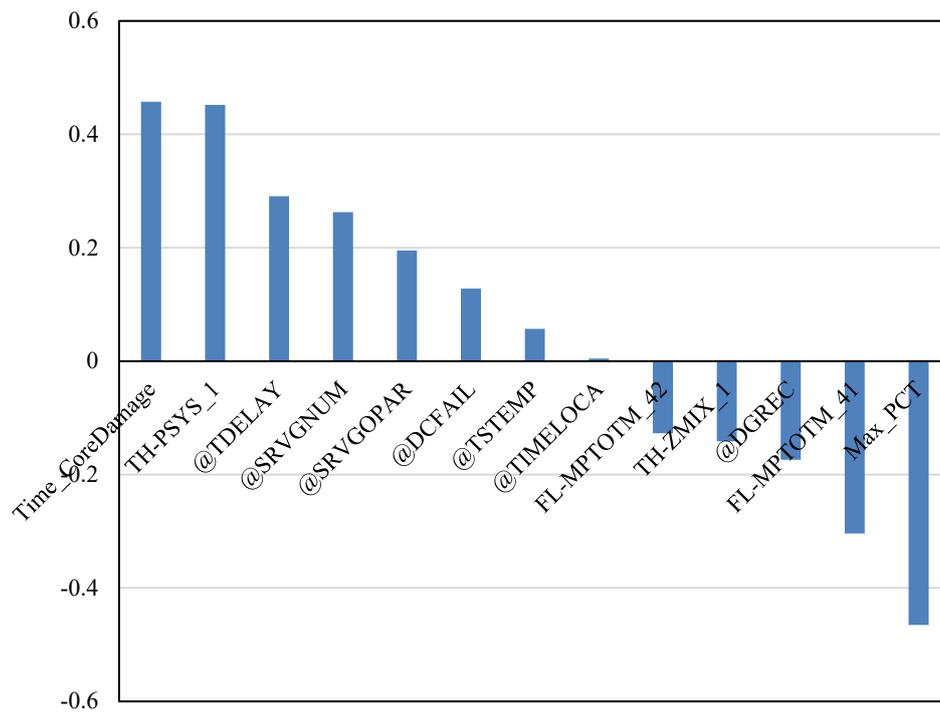


図 3.1.2-38 第一主成分軸への変換係数

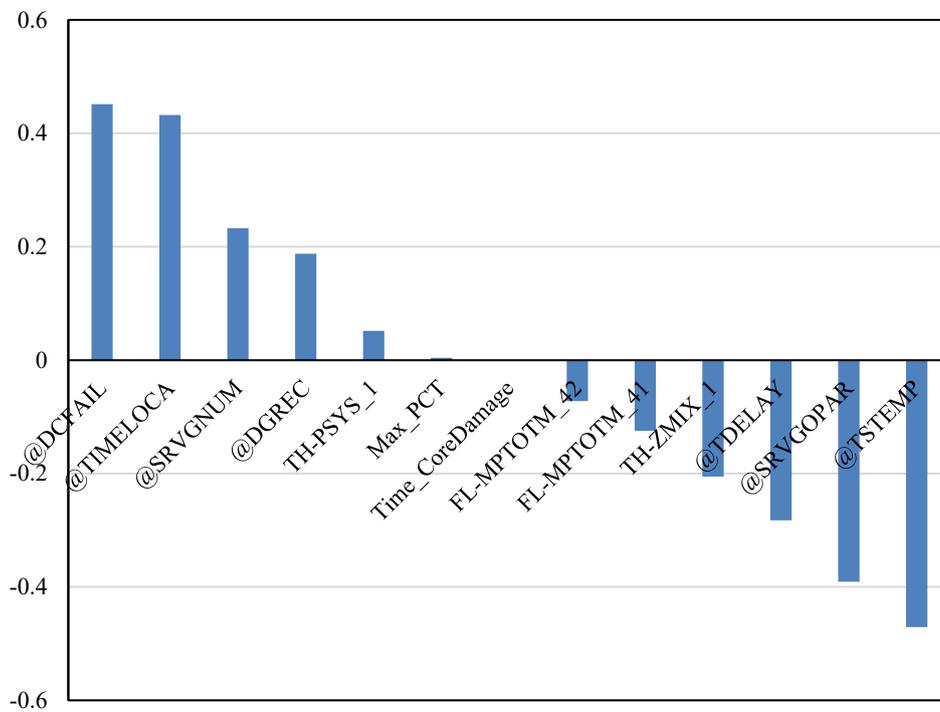


図 3.1.2-39 第二主成分軸への変換係数

表 3.1.2-14 各主成分の変換係数の絶対値が大きい変数

主成分	大きさの 順位	変数	符号	値
第一主成分	1	Max_PCT	-	-0.47
第一主成分	2	Time_CoreDamage	+	0.46
第二主成分	1	@TSTEMP	-	-0.47
第二主成分	2	@DCFAIL	+	0.45

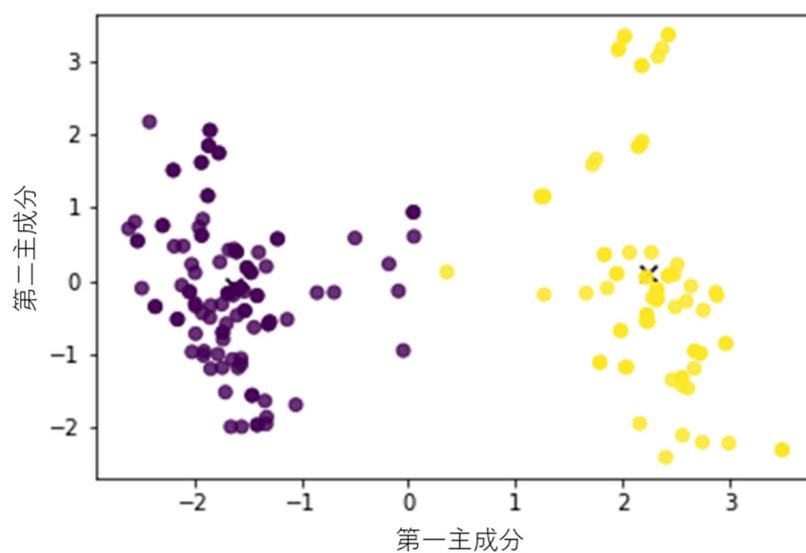


図 3.1.2-40 k-means 法によるクラスタリング結果 (クラスタ数 : 2)

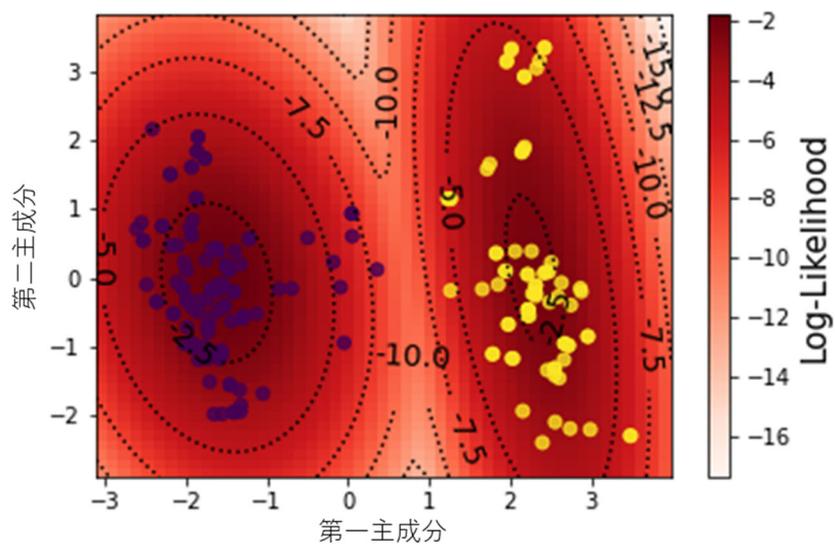


図 3.1.2-41 GM 法によるクラスタリング結果 (クラスタ数 : 2)

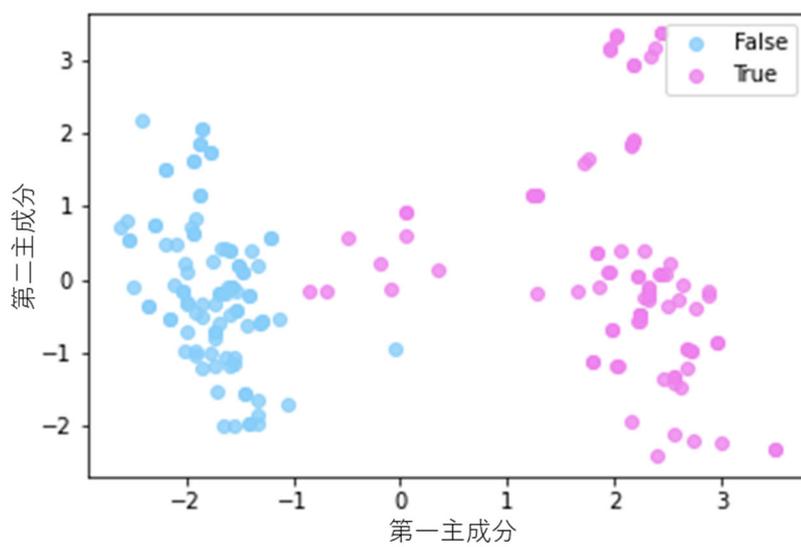


図 3.1.2-42 炉心損傷の有無の可視化 (損傷有 : True、損傷無 : False)

3.1.3. BWRにおけるAprosを用いた試解析

3.1.1 節に記載した SBO 事故シナリオをもとに、BWR における Apros を用いた試解析を実施した。RAPID-Apros 連携解析において、複数の分岐に対する分岐生成機能が不十分であったため、本年度はこの機能の改良を行い、複数の分岐にも対応できるようにした。また、本年度 SBO 事故シナリオに追加した事象に対して、Apros についてもモデルの編集や追加を行い、試解析を行った。さらに、クラスタリング機能によるリスク情報の導出も行った。

3.1.3.1. 事故シーケンスの分岐生成機能の改良

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する機能は、RAPID の一つの特徴である。RAPID-Apros 連携解析において、昨年度までに一つの分岐条件に対して分岐の事故シーケンスを生成できるようにしていたが、本年度はその機能を拡張し、複数の分岐条件に対しても分岐の事故シーケンスを生成できるように改良した。

複数の分岐に対応するためには、分岐点で生成されるリスタートファイル（スナップショットファイル）と分岐後の解析条件を設定した SCL コマンドが記載された入力ファイル（SCL ファイル）が、分岐ごとに整理されている必要がある。そこで、連携解析の際には分岐が生じるたびにその配下にフォルダを生成するようにし、各分岐のフォルダ内でスナップショットファイルと SC ファイルを管理するようにした。図 3.1.3-1 は、分岐生成によって構築されるフォルダの階層構造を示した図である。

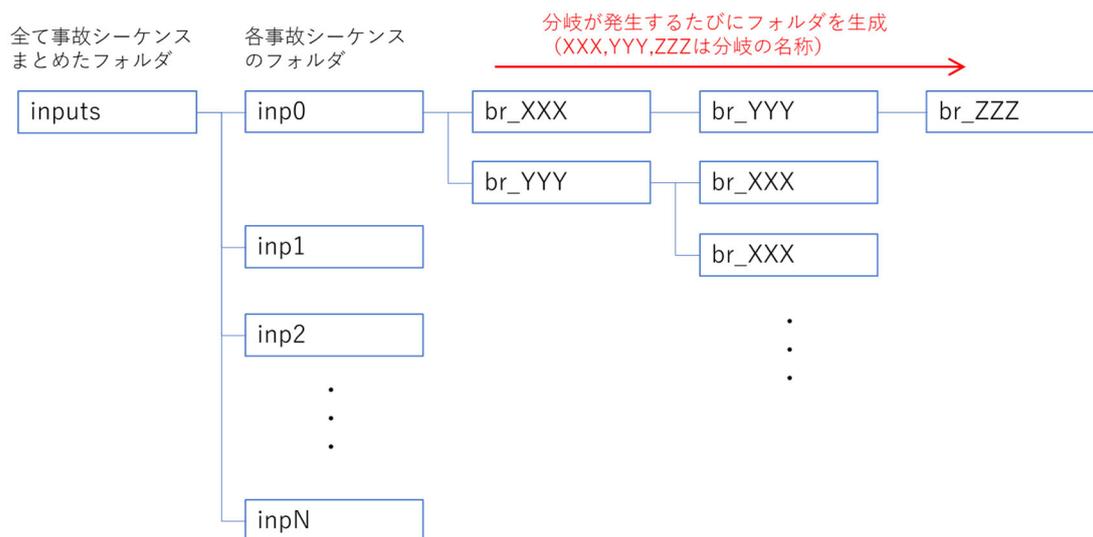
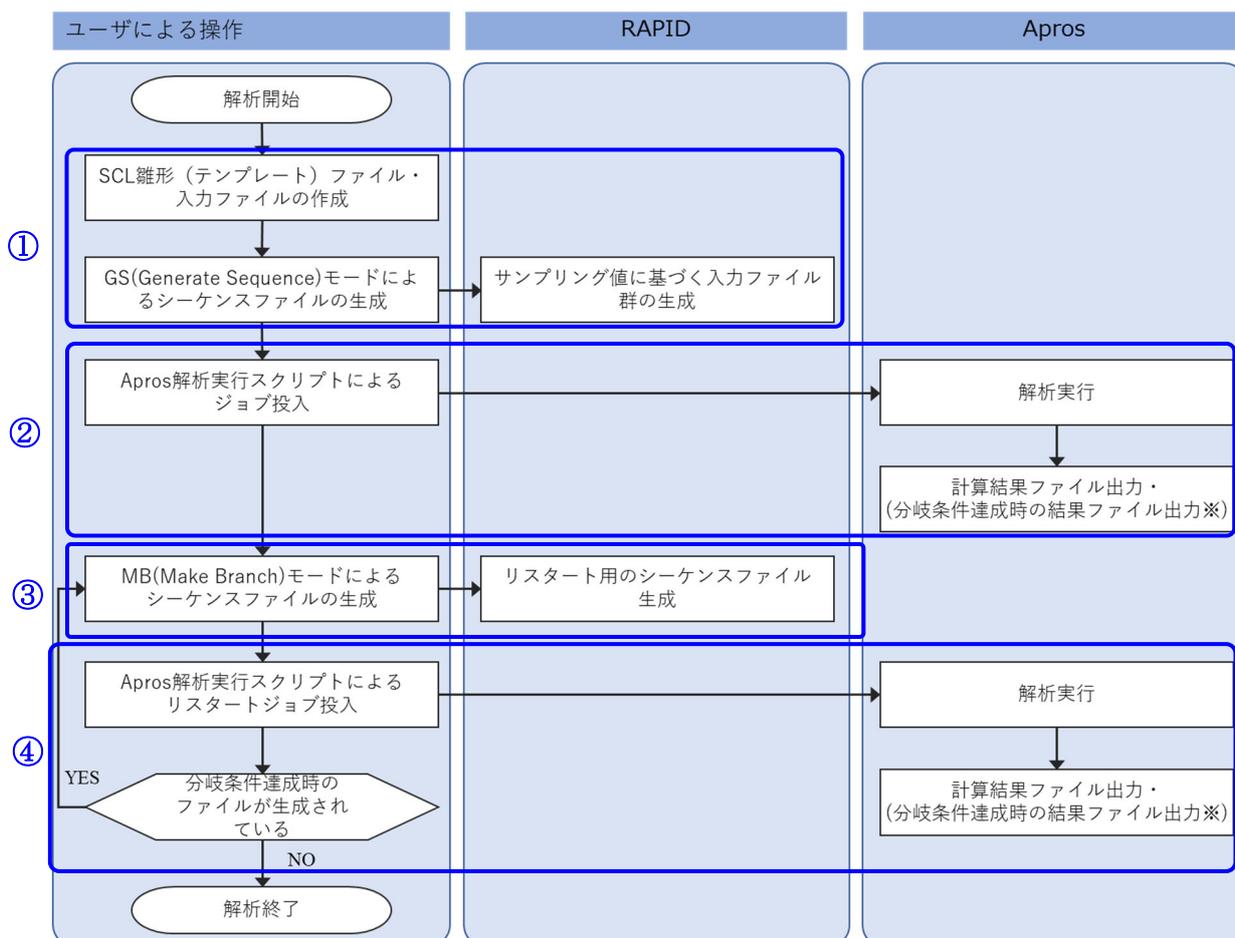


図 3.1.3-1 RAPID-Apros 連携解析におけるフォルダ構造

次に、RAPID-Apros 連携解析の流れを説明する。RAPID には、ユーザーが指定した確率分布などに基づいて事故シーケンスを生成する機能があるが、その機能は以下の二種類に分けられる。

- ✓ GS (Generate Sequence) モード：
事故シーケンスの初期状態を生成する機能。確率分布に基づいたサンプリングにより、不確かさを考慮した入力ファイル群が生成される。
- ✓ MB (Make Branch) モード：
分岐条件到達以降の事故シーケンスを生成する機能。

この二つの機能を利用して、RAPID-Apros 連携解析を実施する。図 3.1.3-2 に、RAPID-Apros 連携解析の流れを示す。



※分岐条件に到達しない場合は、結果ファイルは出力されない。

図 3.1.3-2 RAPID-Apros 連携解析の流れ

この図における①～④の解析手順の具体的な内容は以下の通りである。

- ① SCL ファイルの雛形や RAPID の入力ファイルを準備する。RAPID の GS モードで Apros の入力ファイル群（GS モードでは、入力ファイルで設定した数のサンプリング値に対応して複数のシーケンスファイルを生成することができる）を生成する。
- ② RAPID の生成したシーケンスファイル群を入力ファイルとして、Apros で解析を実行する。Apros はシーケンス毎に計算結果を出力する。また、Apros は分岐条件が達成されたシーケンスについては、リスタート計算用のデータを出力する。
- ③ 分岐条件が達成されたシーケンスについて、RAPID の MB モードを用いて、リスタート計算用のシーケンスファイルを生成する。
- ④ RAPID の生成したシーケンスファイルを入力ファイルを使用して、Apros にてリスタート計算を実行する。Apros はシーケンス毎に計算結果を出力する。また、Apros は分岐条件が達成されたシーケンスについては、リスタート計算用のデータを出力する。分岐条件が達成されたシーケンスについては、③の操作に戻り、繰り返しリスタート計算を実行する。

＜複数の分岐条件に対するテスト解析＞

改良した分岐生成機能を確認するため、BWR における事故シナリオを用いたテスト解析を行った。分岐条件として、3.1.1 節で述べた SRV の熱的故障と再循環ポンプのシール損傷を利用した。本テストでは、分岐条件を

- シール損傷発生時間：SBO 発生から 3600 秒後
- SRV の熱的故障発生温度：350℃

に設定した。

以下に、RAPID-Apros 連携解析のテスト解析で得られた結果の図を示す。赤線は、RAPID の GS モードによって生成した事故シーケンスファイルによって、最後まで計算した結果を表している。青で示した点線は、一回目のリスタート計算における結果であり、シール損傷による分岐の計算結果である。緑で示した線は、二回目のリスタート計算における結果であり、SRV の熱的故障による分岐の計算結果である。

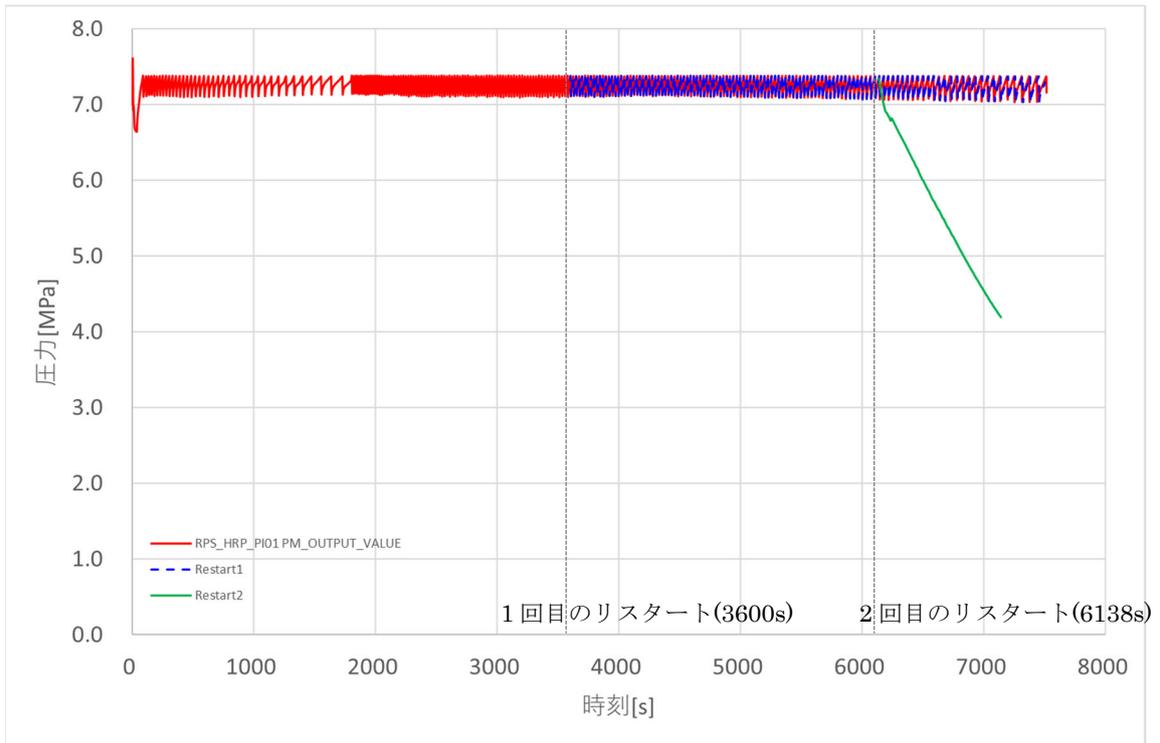


図 3.1.3-3 RPV 内圧力の時間変化

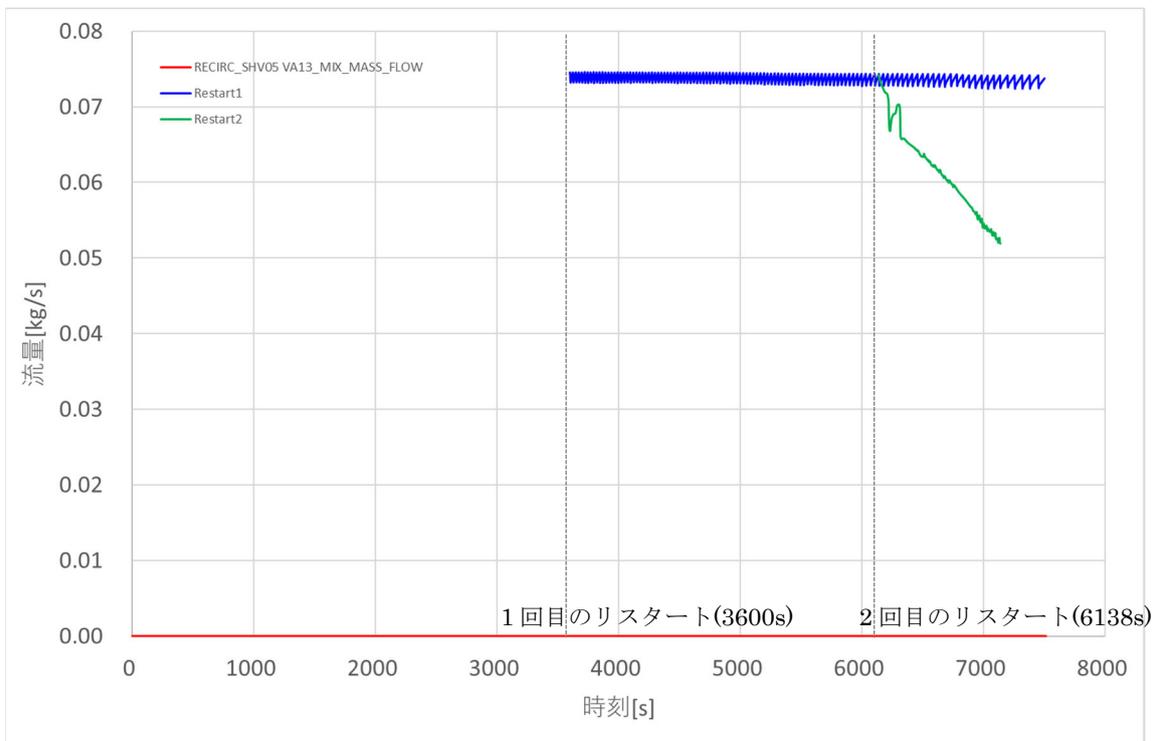


図 3.1.3-4 シール損傷による再循環ループの漏洩流量の時間変化

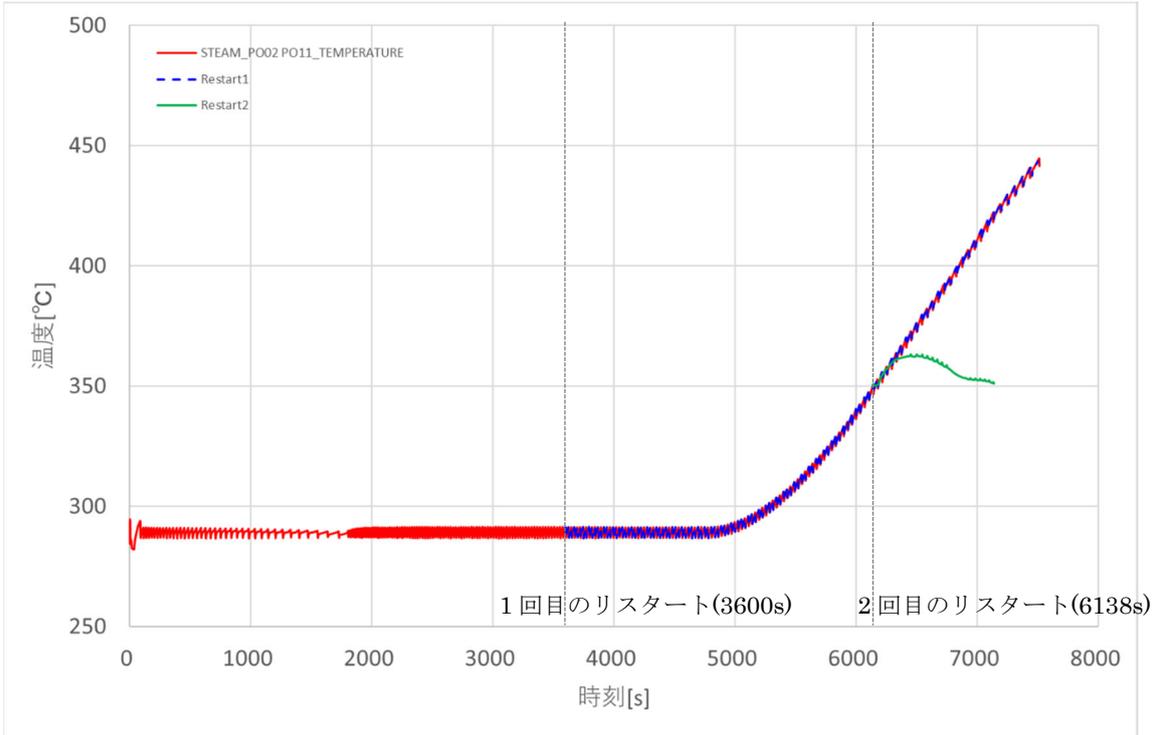


図 3.1.3-5 熱的故障する SRV 蒸気温度の時間変化

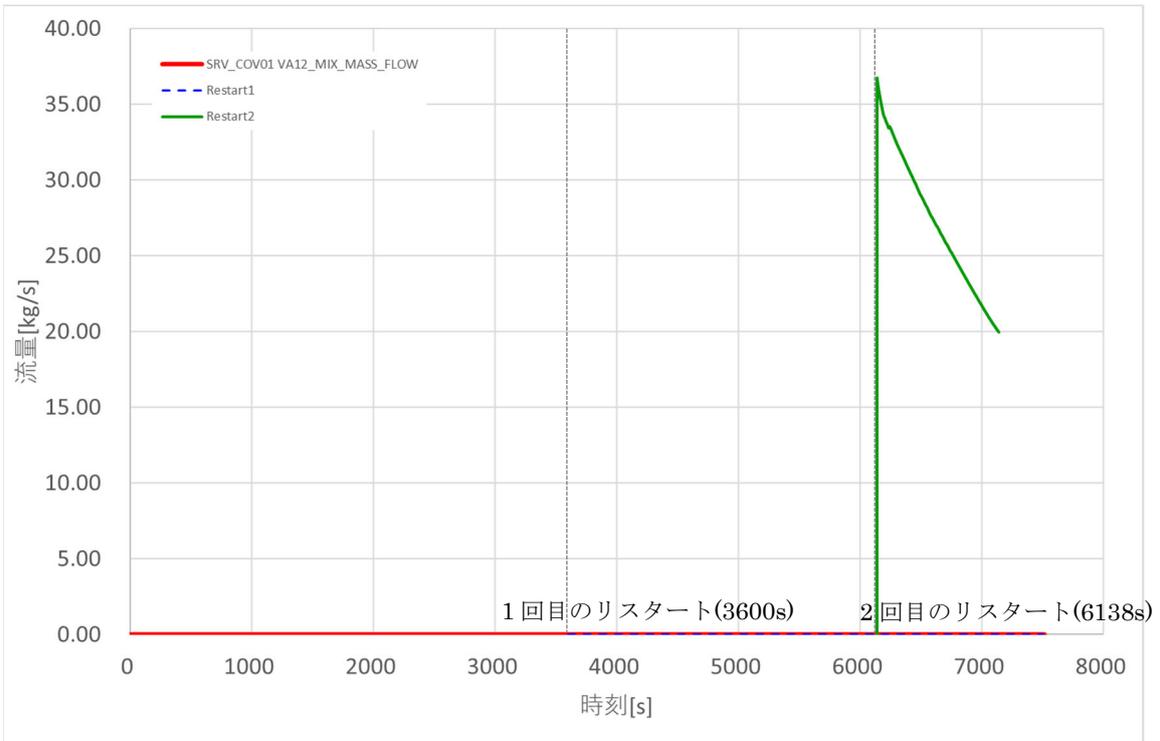


図 3.1.3-6 熱的故障する SRV における漏洩流量の時間変化

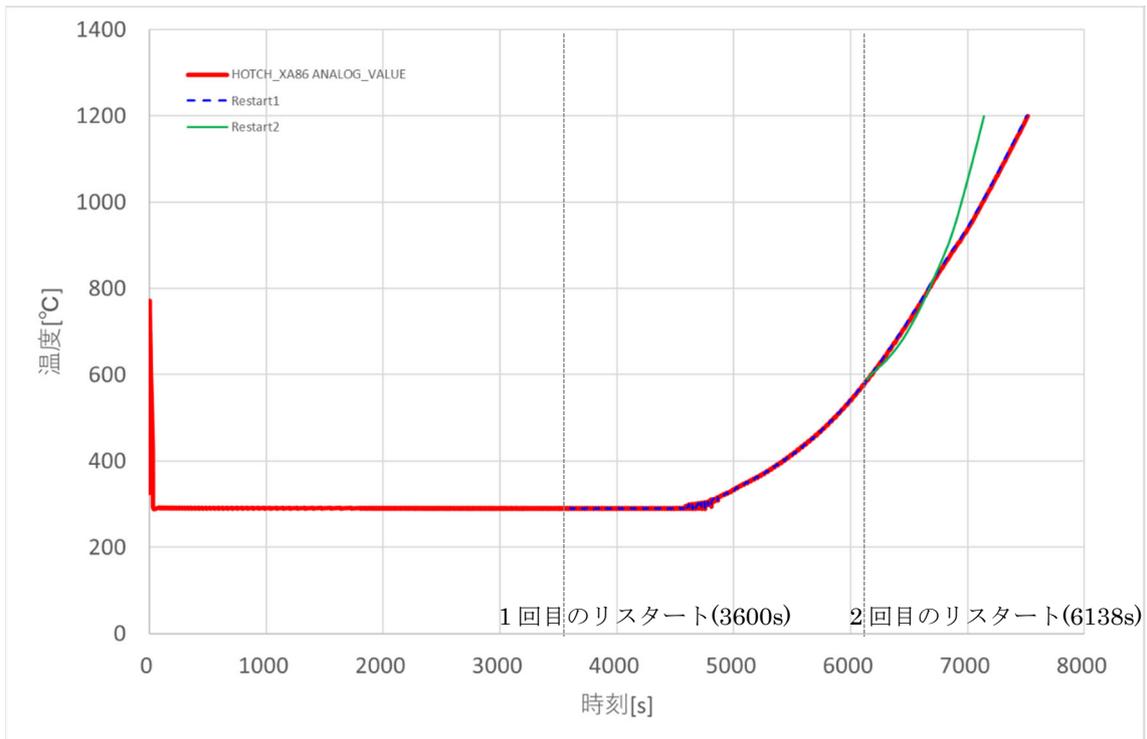


図 3.1.3-7 燃料被覆管最高温度の時間変化

一回目のリスタート計算では、3600秒後にシール損傷によって再循環ループからの漏洩が生じていることが図 3.1.3-4 より確認できる。ただ、漏えい面積が小さいため、RPV 内の圧力はほとんど変化しない（図 3.1.3-3）。また、図 3.1.3-5 より、6138 秒後に SRV の温度が 350°C に到達しているのが分かる。このタイミングで SRV の熱的故障が発生し、SRV から蒸気が漏えいして（図 3.1.3-6）、RPV 内の圧力も低下していることが確認できる（図 3.1.3-3）。

以上の連携解析のテストを図 3.1.3-2 に示した手順で実行することにより、複数の分岐条件に対しても、RAPID が分岐の事故シーケンスを生成できることを確認した。

3.1.3.2. SBO 事故シナリオに対する検証解析

3.1.1 節で示した SBO 事故シナリオに対して、Apros による解析を実施した。本年度は、事故シナリオに追加した事象を Apros のモデルに取り入れるため、モデルの編集や追加を行い、それらの事象に対して試解析を行った。

<HPCS 優先による炉心冷却>

昨年度までは、炉心冷却系は RCIC を優先するようにしていた。本年度は、HPCS を優先するように変更したので、制御ロジックにも変更を加えて、試解析を実施した。図 3.1.3-8 に HPCS 注水量、PRV 内の水位、PCT の解析結果を示す。HPCS は RPV 水位がレベル 2 (12.2m) で注水開始し、レベル 8 (14.6m) で注水を停止する。HPCS の注水により、炉心の冷却に成功していることが確認できる。

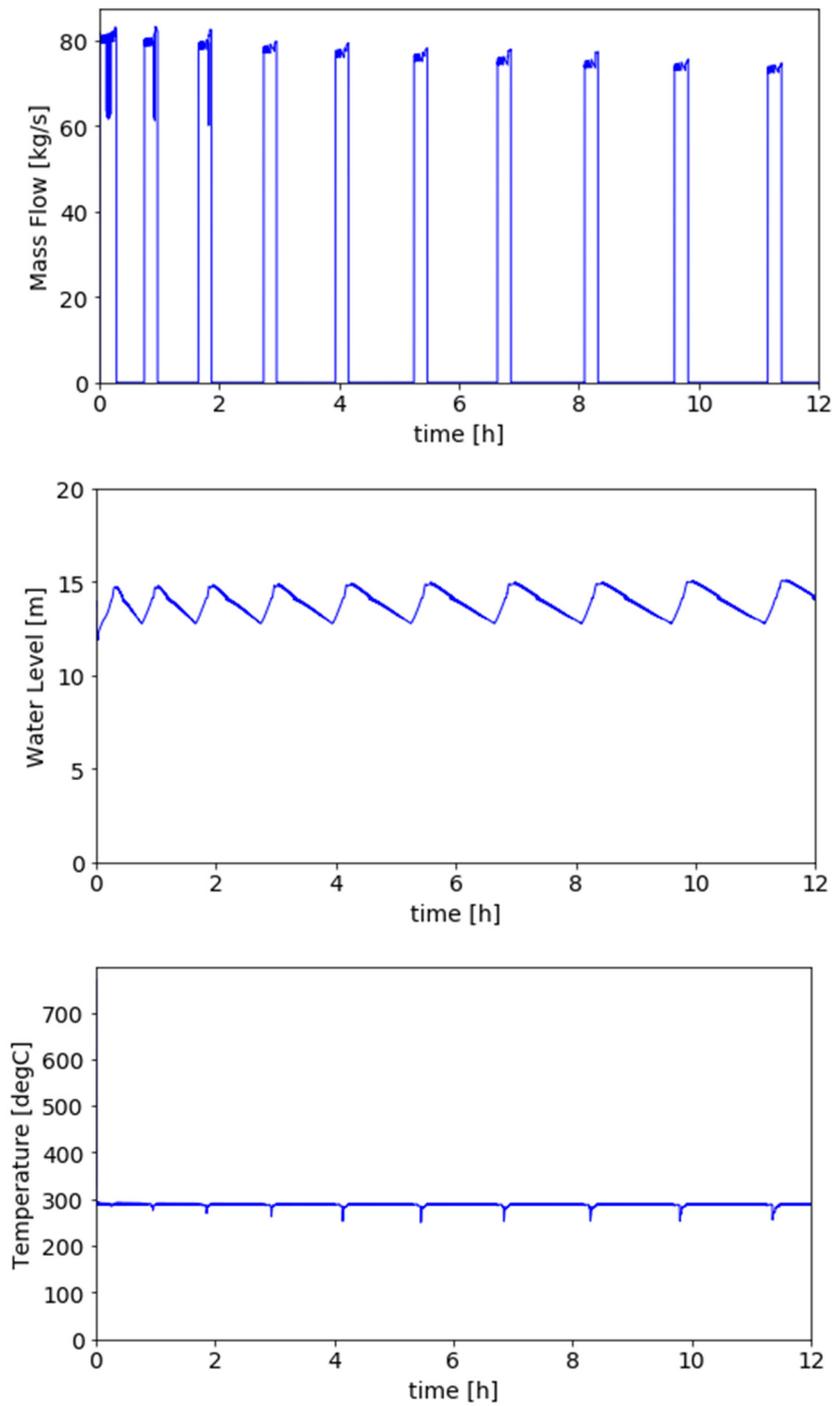


図 3.1.3-8 HPCS による炉心冷却の試解析結果
(上：HPCS 注水量、中：RPV 内の水位、下：PCT)

<減圧操作>

HPCS および RCIC の注水が不可能となった場合、減圧操作を行って LPCS による注水が行えるようにする。3.1.1 節で述べたように、プラントパラメータを減圧操作の成功・失敗確率に反映させるため、分岐を生成してリスタート計算を行う必要がある。本試解析では、

- HPCS ポンプの起動に失敗
- RCIC、LPCS ポンプの起動に成功
- SBO 発生から 0.4 時間後に EDG が復旧
- SBO 発生から 0.5 時間後に DC 電源枯渇

とシナリオを単純化し、減圧操作に対する検証解析を行った。図 3.1.3-9、図 3.1.3-10 に検証解析の結果を示す。簡易化したシナリオでは、HPCS ポンプの起動に失敗しているため、SBO 発生後は RCIC による注水が行われる。しかし、0.5 時間後に DC 電源が枯渇するため、RCIC による注水も不可能になる。EDG は 0.4 時間後に復旧しているので、減圧操作の条件

「高圧注水系の停止、かつ、低圧注水の起動に成功、かつ、EDG による電源確保」

も SBO 発生から 0.5 時間後に満たされる。このタイミングにおいて、RPV 内の水位は 13.6m であった。運転員への影響を反映したファクタは、

(時間 : 0.5 時間、水位 : 13.6m) = (10 時間未満、L4 未満) →10

になる。表 3.1.1-1 に示した確率分布より運転員の操作失敗確率の値をサンプリングすると、 9.84×10^{-4} となり、この値にファクタを 10 を掛けた値 9.84×10^{-3} を失敗確率として操作成功・失敗のサンプリングを行うと成功となった。操作の所要時間は、サンプリングの結果、14.4 分 (=0.24 時間) となった。減圧操作の条件を満たした 0.5 時間後からリスタート計算を行い、0.74 (=0.5+0.24) 時間後に減圧操作が行われた。その後、RPV 内の圧力が低下し、LPCS による注水が行われた。

本試解析より、減圧操作のモデル化、および、分岐を生成したリスタート計算が正しく行われていることを確認できた。

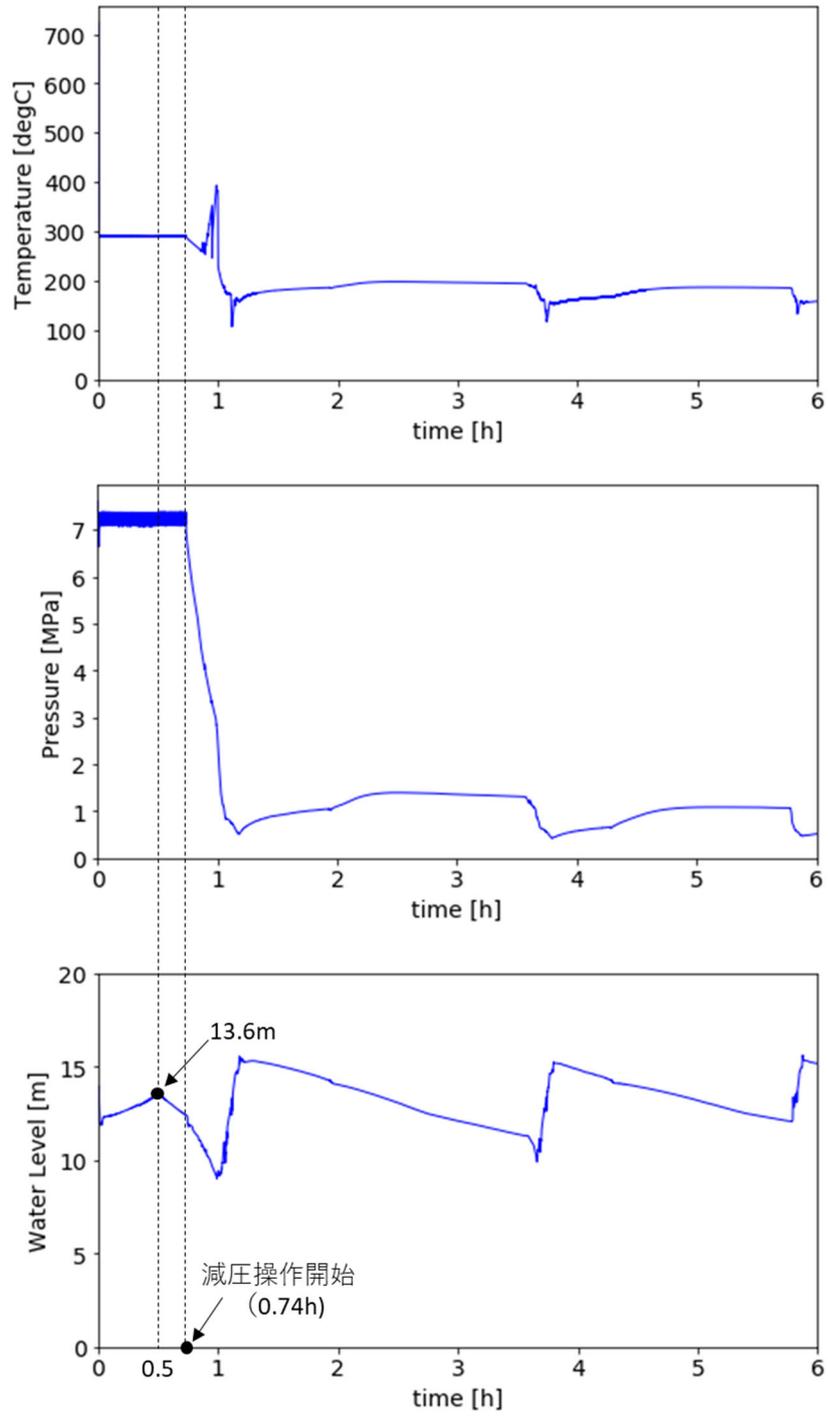


図 3.1.3-9 減圧操作の試解析結果
(上 : PCT、中 : RPV 内の圧力、下 : RPV 内の水位)

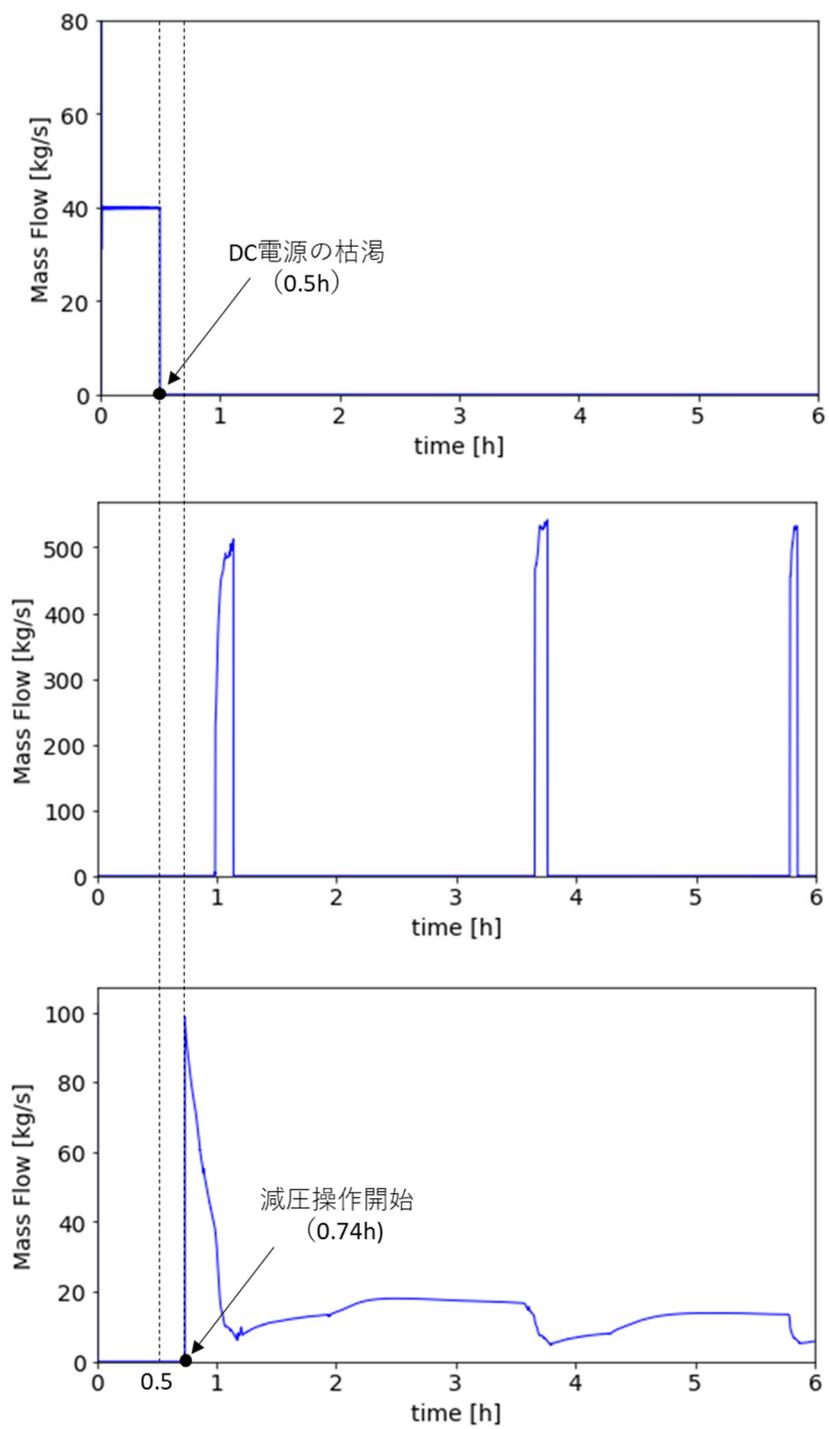


図 3.1.3-10 減圧操作のの試解析結果
 (上：RCIC 注水量、中：LPCS 注水量、下：減圧操作した SRV の流量)

<S/P ベント>

RHR の起動に失敗した場合、および、EDG が未復旧で RHR が利用できない場合、RHR による S/P の除熱を行うことができない。その場合は、S/P ベントにより S/P の除熱を行う。この S/P ベントを模擬するため、図 3.1.3-11 に示すように Apros のモデルに S/P ベント用のバルブを追加し、S/P ノードと環境ノードに接続した。

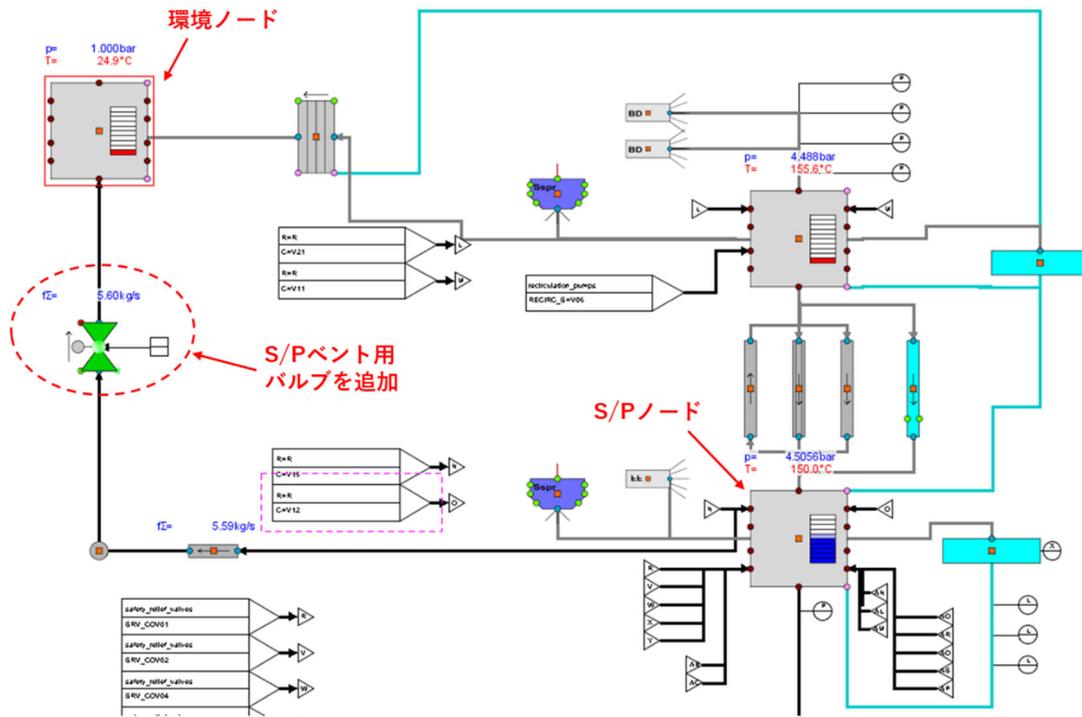


図 3.1.3-11 Apros モデルにおける S/P ベントの追加

追加した S/P ベントに対して、動作確認のテストを行った。本来、S/P ベントの設定圧は 0.6MPa 程度であるが、本試解析ではテストのため、設定圧を 0.3MPa の低めに設定した。図 3.1.3-12 は、テスト解析における S/P ベントの流量である。約 8.6 時間後に S/P の圧力が 0.3MPa に到達し、S/P ベントによって環境に流れ出ている。このベント操作により、S/P の圧力・温度が低下したことも確認した。

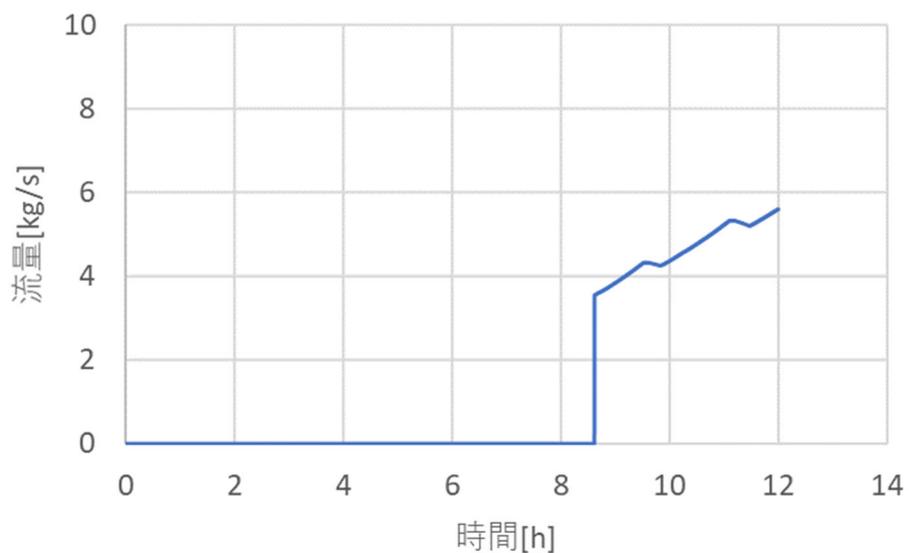


図 3.1.3-12 S/P ベントの流量

3.1.3.3. クラスタリングによるリスク情報の導出

2.2.2 節で示したクラスタリング機能を用いて、リスク情報の導出を行った。クラスタリングの際、昨年度実施した RAPID-Apros の連携解析の解析結果を利用した。以下では、

- 時系列データに対するクラスタリング
- 事象進展ベクトルに対するクラスタリング

の順に、クラスタリングを実施した結果を示す。

<燃料被覆管最高温度 (PCT) の時系列データに対するクラスタリング>

図 3.1.3-13 は、燃料被覆管最高温度 (PCT) の時系列データに対してクラスタリングを行った結果であり、クラスタ数は 2 及び 3 に設定した。

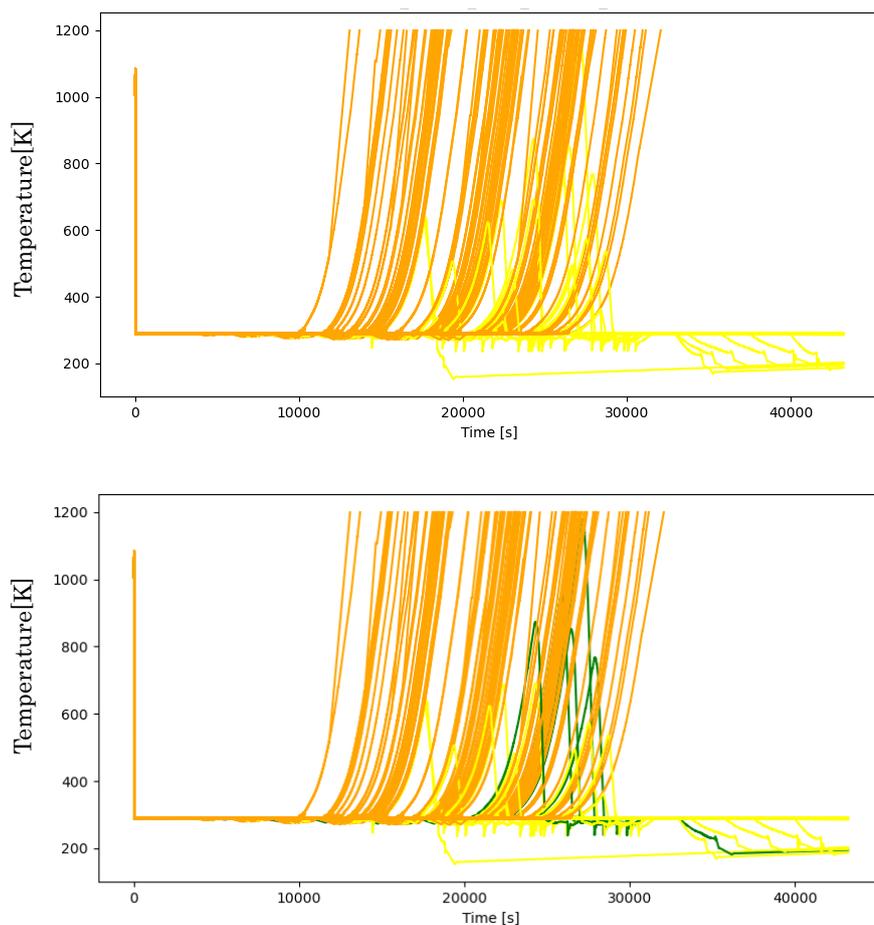


図 3.1.3-13 PCT の時系列データに対するクラスタリング
(上：クラスタ数は 2、下：クラスタ数は 3)

クラスタ数が2の場合は、炉心損傷に至ったケース（PCTが1200℃に到達）と炉心損傷に至らなかったケース（PCTが1200℃未満）に分類された。クラスタ数を3の場合は、クラスタ数が2の場合の同様の分類になり、さらに炉心損傷に至らなかったケースの中でもPCTが比較的高い温度に到達したケース（PCTが800℃程度まで到達）とそうでないケースに分類された。

PCTの時系列データに対して、2.2.2.3節の機能を用いたクラスタ数の推定を行った。図3.1.3-14は、ベイズ情報量基準(BIC)によるクラスタ数の推定結果であり、クラスタ数が23で分割停止している。また、図3.1.3-15はクラスタ数を23にした場合のクラスタリングの結果である。

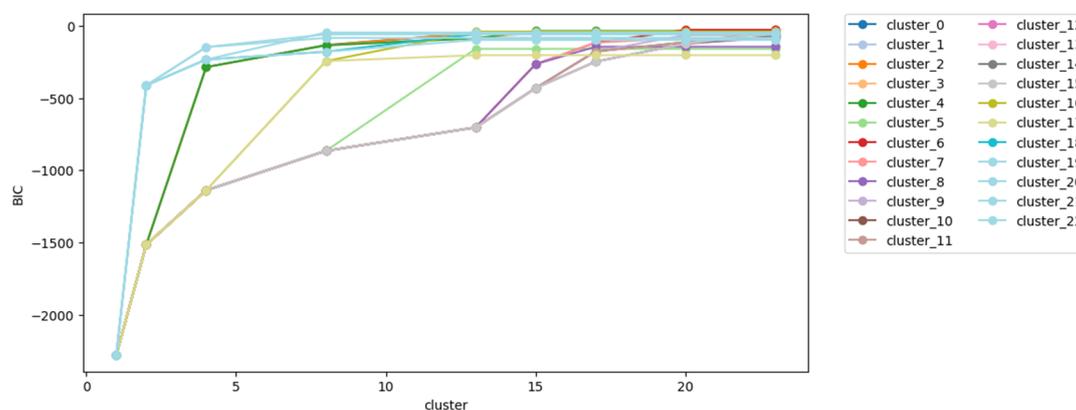


図 3.1.3-14 クラスタ数に対する BIC の変化 : Apros の PCT の時系列データ

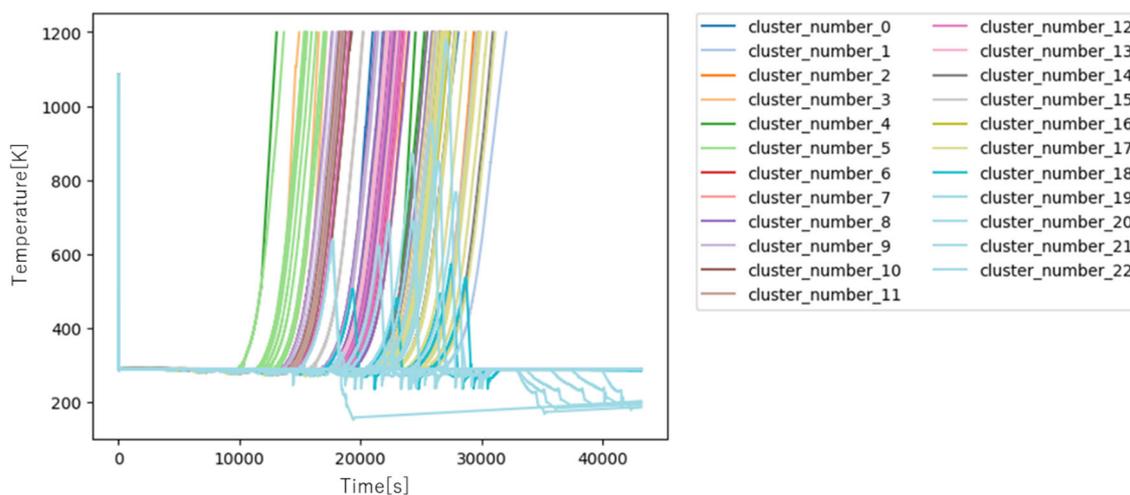


図 3.1.3-15 PCT の時系列データに対するクラスタリング (クラスタ数は23)

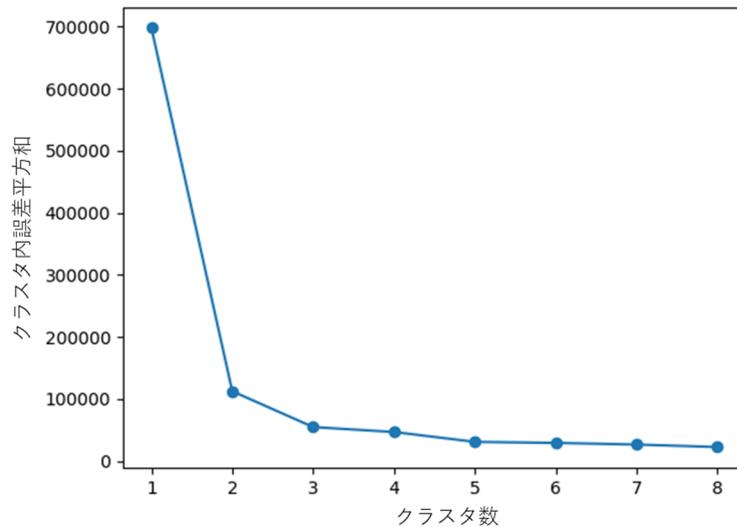


図 3.1.3-16 クラスタ数に対するクラスタ内誤差平方和の変化：Apros の PCT の時系列データ

図 3.1.3-16 は、エルボー法によるクラスタ数の推定結果である。クラスタ数が 1 から 2、もしくは、2 から 3 になるところで誤差平方和が大きく減少しているが、その後の減少量は小さい。その結果、クラスタ数が 2 もしくは 3 が良いと推定される。

図 3.1.3-17 と図 3.1.3-18 は、シルエット分析によるクラスタ数の推定結果である。クラスタ数が 2 の場合は、シルエット係数が 1 に近く、データ数が極端に少ないクラスタは発生していない。一方、クラスタ数が 3 の場合は、シルエット係数が 1 に近いが、データ数が極端に少ないクラスタが発生しており、良いクラスタリングとは言えない。その結果、クラスタ数は 2 が良いと推定される。

上記の三つの推定結果から総合的に判断すると、クラスタ数は 2 または 3 が良いと推定される。BIC ではクラスタ数が 23 と非常に大きくなってしまったが、原因は THALES2 の場合と同様に、過学習が原因であると考えられる。

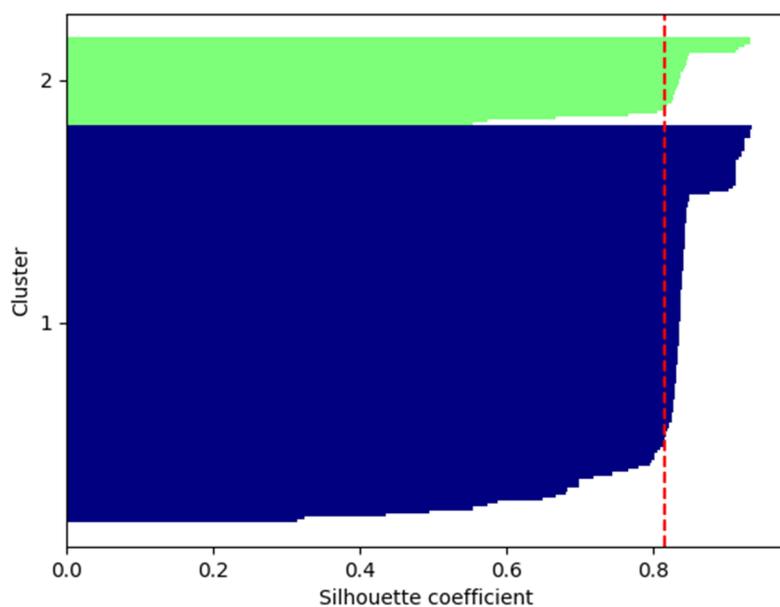


図 3.1.3-17 シルエット図 : Apros の PCT の時系列データ (クラスタ数は 2)

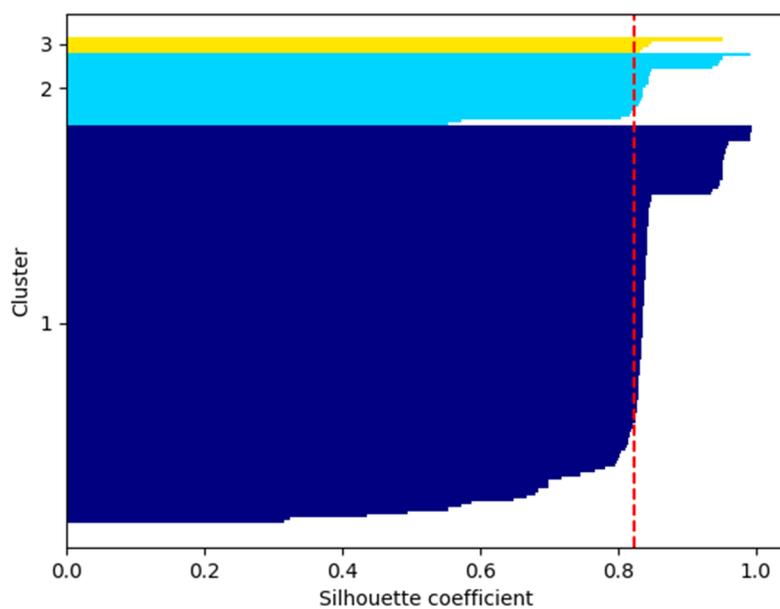


図 3.1.3-18 シルエット図 : Apros の PCT の時系列データ (クラスタ数は 3)

<事象進展ベクトルに対するクラスタリング>

まず、クラスタリングの対象となるベクトルを作成する。入力データからは

@DCDEPLE	(DC 電源枯渇時間)
@ACRECOV	(AC 電源回復時間)
@FCTIME	(SRV の閉失敗故障時間)
@FCRATIO	(SRV の閉失敗故障の漏洩割合)
@TSTEMP	(SRV の熱的故障発生温度)

の 5 項目を利用した。結果データは、時間に依存しない値からは、

Time_CoreDamage	(炉心損傷時間)
Max_PCT	(PCT の最高到達温度)

を利用した。時系列データに関しては、

"RPS_HRP_PI01 PM_OUTPUT_VALUE"	(RPV 圧力, MPa)
"REACTOR_AVE NR1_LIQ_LEVEL"	(炉心部水位, m)
"SRV_COV15 VA12_MIX_MASS_FLOW"	(閉失敗故障する SRV の流量, kg/s)
"SRV_COV01 VA12_MIX_MASS_FLOW"	(熱的故障する SRV の流量, kg/s)

に対して、PCT の最高到達温度に到達するタイミングでの値を時系列データより抽出して利用した。

これらで構成される事象進展ベクトルに対して、主成分分析による次元削減を行った。削減後の次元数は 4 とした。図 3.1.3-19 から図 3.1.3-22 に第一主成分軸から第四主成分軸への変換係数を示し、表 3.1.3-1 に係数の絶対値が大きい値の変数を示す。

図 3.1.3-23 と図 3.1.3-24 は、k-means 法と Gaussian Mixtures (GM)法による事象進展ベクトルのクラスタリング (クラスタ数は 2 に設定) の結果である。参考のため、炉心損傷の有無を示した図も図 3.1.3-25 に掲載した。クラスタリングの結果は、k-means 法、GM 法で同じような結果となっており、第一主成分の値によって二つの領域に分割している。図 3.1.3-25 の炉心損傷の有無の領域ともおおよそ一致しており、クラスタリングによる事故シナリオの分類が適切に行われたと判断できる。

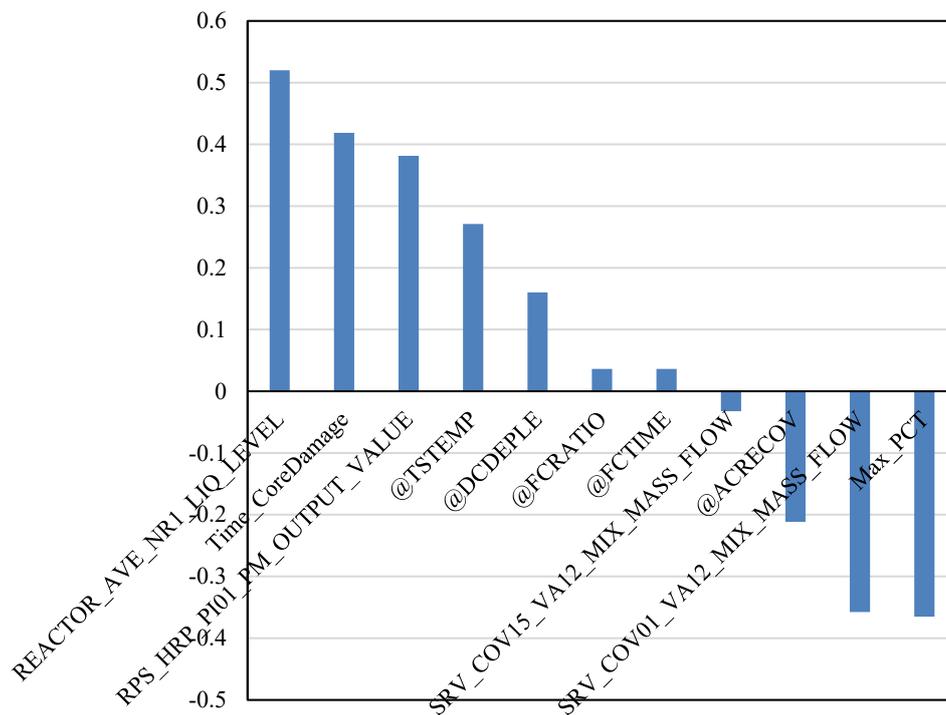


図 3.1.3-19 第一主成分軸への変換係数

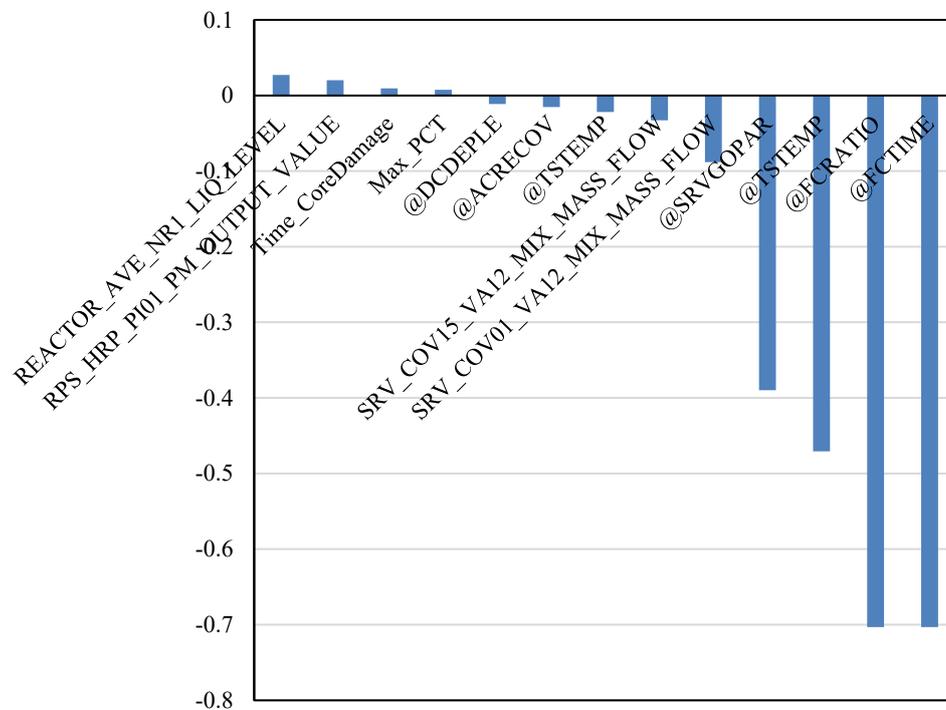


図 3.1.3-20 第二主成分軸への変換係数

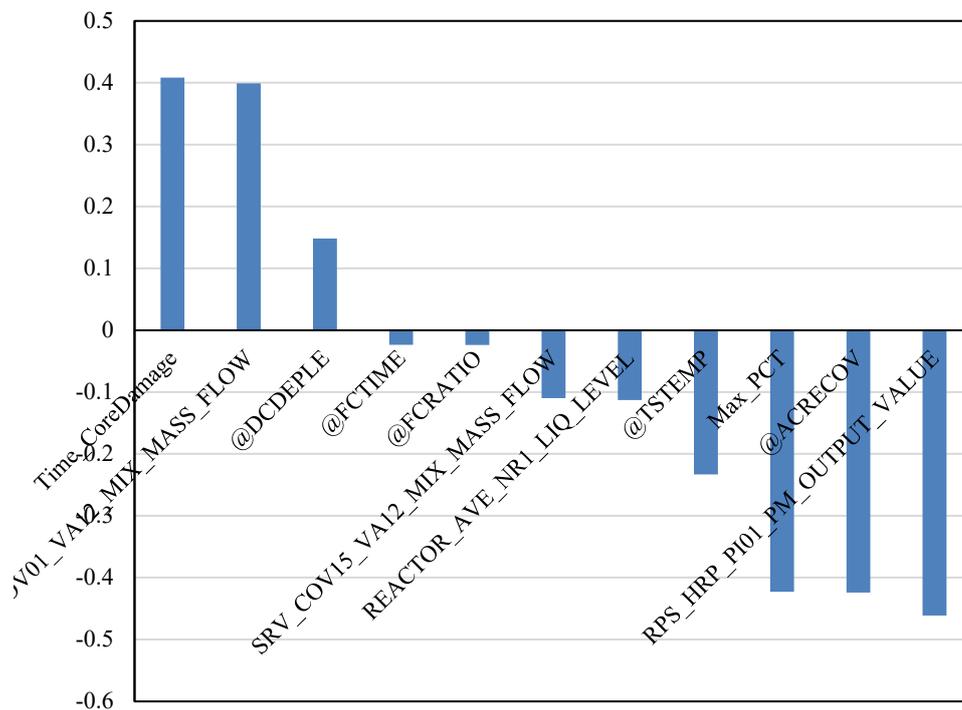


図 3.1.3-21 第三主成分軸への変換係数

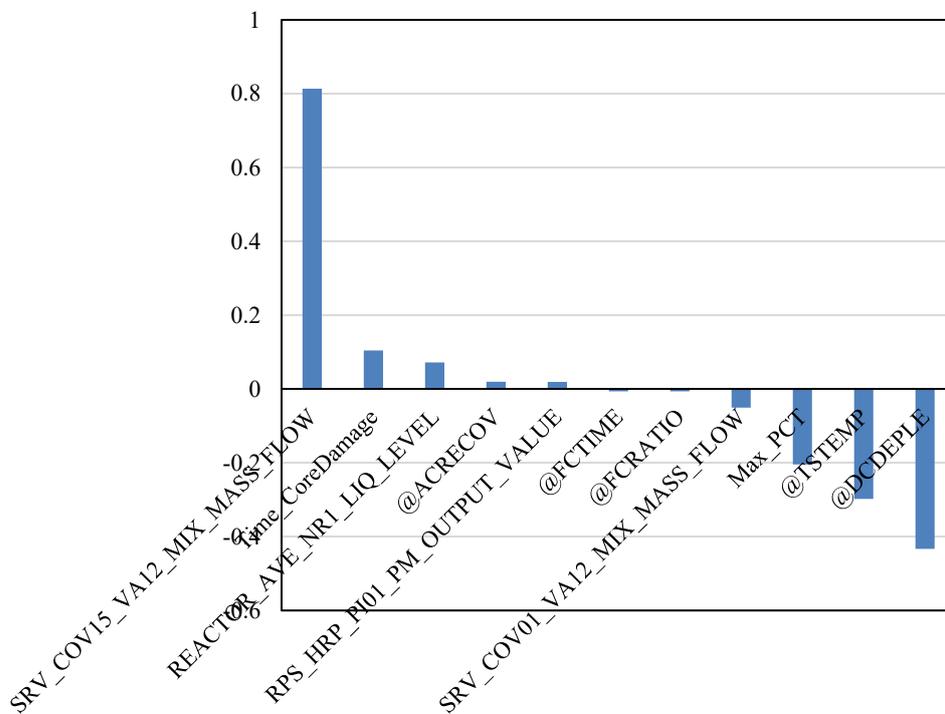


図 3.1.3-22 第四主成分軸への変換係数

表 3.1.3-1 各主成分の変換係数の絶対値が大きい変数

主成分	大きさの 順位	変数	符号	値
第一主成分	1	REACTOR_AVE_NR1_LIQ_LEVEL	+	0.52
第一主成分	2	Time_CoreDamage	+	0.42
第二主成分	1	@FCTIME	-	-0.70
第二主成分	2	@FCRATIO	-	-0.70
第三主成分	1	RPS_HRP_PI01_PM_OUTPUT_VALUE	-	-0.46
第三主成分	2	@ACRECOV	-	-0.42
第四主成分	1	SRV_COV15_VA12_MIX_MASS_FLOW	+	0.81
第四主成分	2	@DCDEPLE	-	-0.43

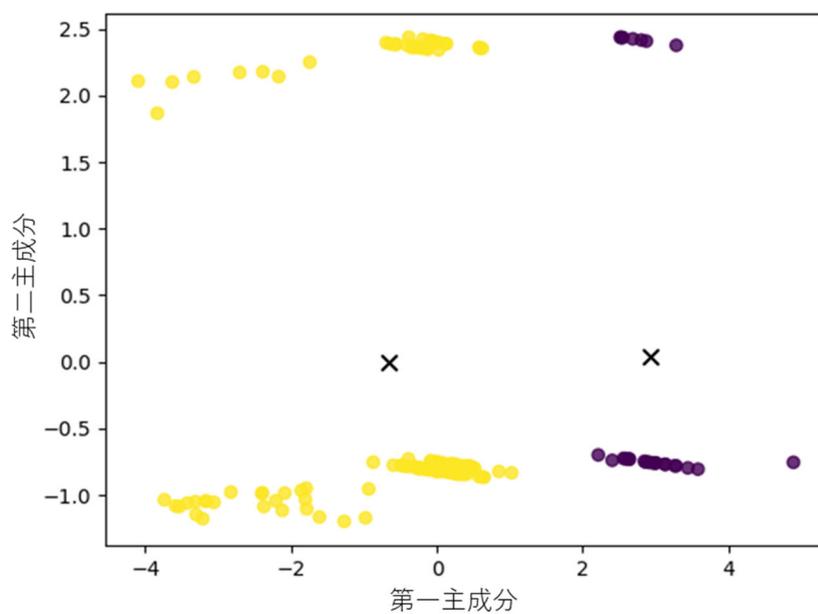


図 3.1.3-23 k-means 法によるクラスタリング結果 (クラスタ数 : 2)

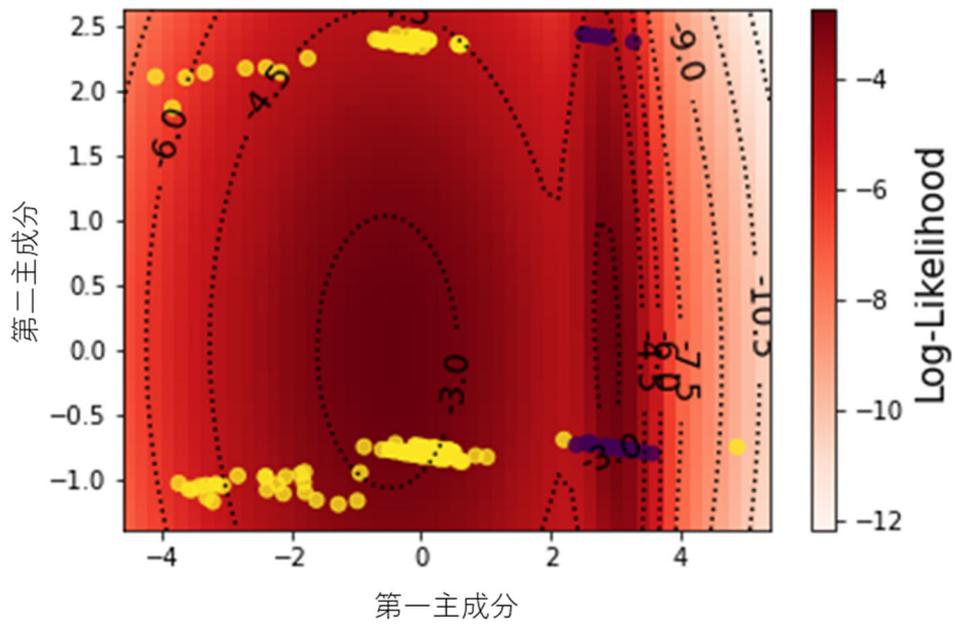


図 3.1.3-24 GM 法によるクラスタリング結果 (クラスタ数 : 2)

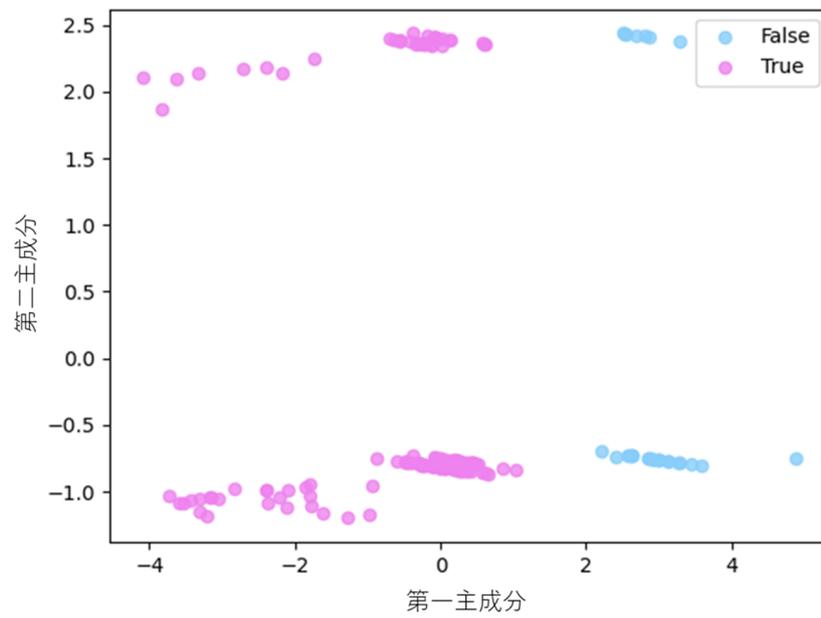


図 3.1.3-25 炉心損傷の有無の可視化 (損傷有 : True、損傷無 : False)

3.1.4. PWRにおけるSBO事故シナリオ

整備した RAPID の適用可能性を確認するため、本年度は PWR における SBO 事故を対象とした解析を実施した。SBO の事故進展は文献[29]を参照した。本年度は PWR への適用の初年に当たるため、第一段階として事象進展を簡素化する目的で当該文献に示されている外部電源喪失イベントツリーに従うとともに格納容器スプレイなどの格納容器冷却を対象とした安全系を除くこととした。また、対象は 4 ループであるが、故障等の考慮は 1 つのループに着目し、ポンプに故障が生じた場合は全ループ同じタイミングで故障したものとした。一方弁操作や再循環ポンプのシールリークについては着目する 1 ループのみに発生したとして解析を行うこととした。以下に考慮する事故進展を示す。

“外部電源喪失”が起因事象として生じ、“非常用所内電源”の成功/失敗を考慮しているが、本解析では SBO が生じたとしているため、非常用所内電源の起動には失敗したとする。ただし、非常用所内電源の回復は考慮する。次の“原子炉トリップ”の成功/失敗であるが、原子炉トリップの失敗は別の事故進展として考慮できるため、ここではトリップに成功するものとした。“加圧器逃がし弁開固着”の発生については考慮する。“短時間の電源回復”については外部電源は回復しないが所内の非常用電源の修復を考慮するため、回復時間をランダムサンプリングにより決める。“2 次系の冷却”ではタービン駆動のポンプにより 2 次系の冷却が期待できる。本解析では、タービン制御に DC 電源を利用しているとし、DC 電源が無くなる（バッテリーの枯渇）まで当該ポンプを利用可能とした。ここではバッテリーの枯渇時間並びにタービン駆動ポンプの起動の成功/失敗及び継続運転失敗に至る時間、それぞれに与えた確率分布から得るものとした。また、注水を行うためには 2 次系の蒸気を逃がす必要があるため、この弁操作の成功/失敗を確率で決定する。“RCP 封水 LOCA”では再循環ポンプから漏水が生じるか否かを判定している。本解析では、発生時間を確率分布から決め、発生する際の原子炉の状態に応じて漏水が生じる際の漏洩面積を決めることとした。なお、漏洩が生じる時間よりも早く所内電源が回復した場合には、本事象は生じないものとした。“号機間電源”及び“長時間の電源回復”は非常用電源の回復として同時に扱うこととした。所内電源が回復すると一次系に注水する高圧注水系のポンプが利用可能となる。高圧系ポンプの起動が成功すると注水ができるよう加圧器逃がし弁を開とする。この弁操作の成功/失敗についても確率分布より決定する。所内電源が回復するが高圧注水に失敗する場合、低圧注水系を起動し、起動出来たらさらに減圧して注水を行う。低圧注水系ポンプの起動の成功/失敗、継続運転時間を確率分布より決定する。本解析において、所内電源が回復しないと様々な安全系が使えないことから、低圧注水系に外部電源から起動可能な代替低圧注水ポンプを事故進展に考慮する安全系に加えることとした。これにより電源が回復しない場合でも 2 次系の冷却から 1 次系の冷却までの手段を考慮できる。ただし、代替低圧ポンプにおいても起動の成功/失敗及び継続運転時間について別途確率分布より得るものとする。本年度の解析は前述した安全系までの操作について RAPID による事故シーケンスの生成

を行う。

表 3.1.4-1 に事故シーケンスの生成に用いた機器や操作の故障モード及び確率分布等の情報をまとめる。

RAPID では昨年度のプラントの状態を反映した故障状態を考慮する機能を有している。本解析では、RCP シール LOCA 時の漏洩面積と 1 次系の弁操作の失敗確率にプラント状態を反映する。

○漏洩面積

漏洩面積については、BWR で考慮した再循環ポンプのシール損傷と同様の式を用いる。

○弁操作

弁操作を行う状況をパフォーマンスシェイピングファクター (PSF) として与え、これに基本となる確率を与え、現実的な失敗確率を得るものとした。

具体的には、プラント状態を以下の 5 つの状態に区分し、それぞれにファクタを与える。

電源あり、低圧ポンプ起動済み、2 次系冷却成功→0.1

電源あり、低圧ポンプ起動済み、2 次系冷却失敗→1

電源あり、代替ポンプ起動済み、2 次冷却成功→0.1

電源なし、代替ポンプ起動済み、2 次冷却成功→1

電源なし、代替ポンプ起動済み、2 次冷却失敗→10

本ファクタの与え方の考え方は以下の通り。

1) 所内電源が回復しており、かつ 2 次系の冷却を成功していればある程度の崩壊熱を取り除けていることから時間的余裕が生じ、これが操作に良い影響を当たると考えられることから 0.1 を与えた。

2) 所内電源は回復しているが低圧注水までには 2 次系の冷却が停止してしまっている、もしくはバッテリーにより 2 次系冷却を行っているが電源が回復していないため代替ポンプを用いた冷却を行う場合については、1) の状況と比較し操作しなければならない状況は悪くなっていることから、サンプリングした確率値をそのまま利用するとする。

3) 2 次系の冷却に失敗し、かつ所内電源も回復していない場合、代替低圧ポンプを用いた冷却を速やかに開始しなければならない状況であることからストレスは過大となることが予想され、この場合についてはファクタとして 10 を与えた。

なお、代替低圧ポンプの起動に失敗している場合は減圧操作を行わないため、弁操作の成功/失敗の確認は行わない。

表 3.1.4-1 PWR の SBO 解析に確率を考慮する機器・操作と確率分布

機器	故障モード	詳細解析用パラメータ					単位
		確率分布	変数	値1	値2	[下限,上限]	
EDG	修復	指数分布	$\mu = 1$ /MTTR MTTR=8 h	1/8			1/h
バッテリー	枯渇	三角分布		4,5,6			h
逃し弁	開固着	2項分布		1.00E-02			
逃し弁	閉失敗*1	2項分布	ρ	1.00E-03			
	閉失敗時の漏洩率	切断正規分布	μ, σ	0.5	0.2	[0.05,1]	
ポンプ	シール損傷時間*2	一様分布		0.00	12		h
シール	シール損傷面積*3	対数正規分布	μ, σ	-9.2	1.4	[0, 1.6E-3]	
		-	T_{loop}^{mean}	*3			°C
		-	p_{RPV}^{mean}	*3			MPa
		-	τ^{mean}	6.0			h
タービン駆動	起動失敗	2項分布	ρ	2.50E-02			
ポンプ	継続運転失敗	指数分布	λ	5.00E-03			1/h
高圧ポンプ	起動失敗	2項分布	ρ	3.00E-03			
	継続運転失敗	指数分布	λ	5.00E-05			1/h
減圧操作	操作失敗*4	2項分布	ρ	1.00E-03			
	操作時間	一様分布		10.0	60		min
低圧注水	起動失敗	2項分布	ρ	3.00E-03			
ポンプ	継続運転失敗	指数分布	λ	2.50E-05			1/h

3.1.5. PWRにおけるAprosを用いた試解析

3.1.4節で示した事故シナリオに従いAprosを用いた解析を実施する。

3.1.5.1. SBO解析のためのAprosへのモデルの追加

3.1.4節で示した事故シナリオの解析を行うため、LOCA解析に用いているApros解析モデルに以下の点について追加を行った。

○加圧器逃し弁－開固着及び開閉回数による閉失敗

従来の逃がし弁の手動開を残しつつ別途DPR A用開信号を取り扱うバイナリー信号を追加した。また、弁の開閉に伴う閉失敗を再現するため、手動開信号及び加圧器の圧力が設定値を超えることで弁を開とする信号のいずれかが入力される回数をカウントできるようにした。回数のカウントロジックはBWRのSRVのそれと同じである。図3.1.5-1に変更を加えたモデル図を示す。

○2次系タービン駆動ポンプ(T/D AFW)のバッテリー枯渇による停止制御

今回の解析範囲では2次系の電動ポンプによる冷却を考慮しないため、タービン駆動ポンプへの起動信号を利用して電動ポンプが停止するロジックとした。これに加え、蒸気逃がし弁の操作についてもタービン駆動ポンプの起動信号と連動できるようにApros diagramにモデルを追加した。2次系給水ポンプ関連のロジック図を図3.1.5-2に、蒸気逃がし弁を開にするロジック図3.1.5-3に示す。

○RCPシールLOCAのモデル化

RCPポンプの入口にパスを追加し格納容器に漏洩するパスを追加した。また漏洩面積を制御できるよう弁として模擬し、この弁に開度を与えるロジックを追加した。以上を反映したものを図3.1.5-4に示す。

○所内電源回復のモデル化

所内電源が回復したタイミングで動くべき機器への信号が伝わるよう回復信号をモデル化した。

○代替低圧注水ポンプのモデル化

1次系低圧注水ポンプに並列して同能力のポンプを代替低圧注水ポンプとして設置した。また、常設と代替の2つのポンプが同時に起動することがないようにこれら機器への起動信号のロジックをモデル化している。

○加圧器逃し弁操作時のPSF決定ロジック

弁操作が必要な状況時におけるプラントの状態(非常用電源、2次系冷却、低圧注水ポン

プの起動の状態) からに応じた PSF を決定するためのロジックを図 3.1.5-5 に示す。ここで決定した PSF を RAPID が読み取り弁操作の失敗確率と合わせて弁操作の成功/失敗を決定する。

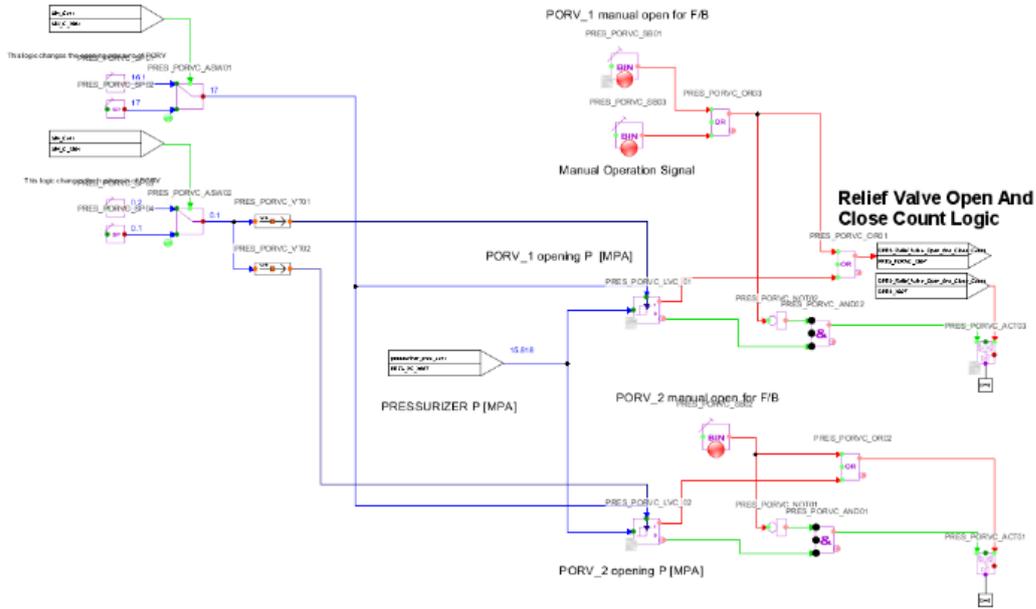


図 3.1.5-1 加圧器逃がし弁開固着及び開閉カウントロジックを追加したモデル図

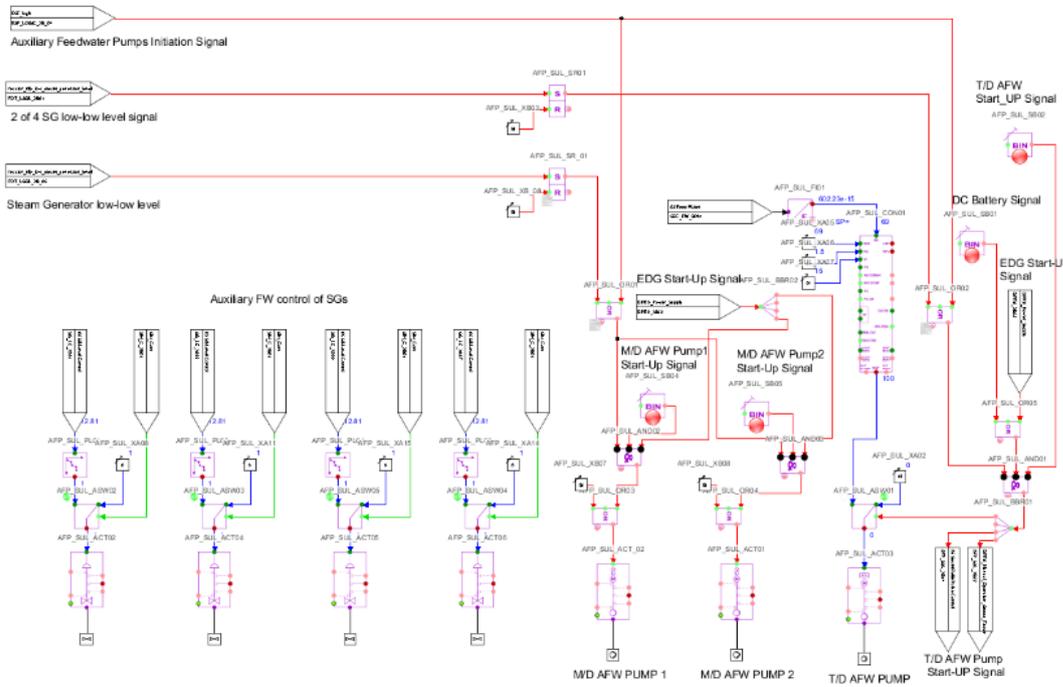


図 3.1.5-2 2次系給水ポンプの起動・停止制御ロジック図

SG A

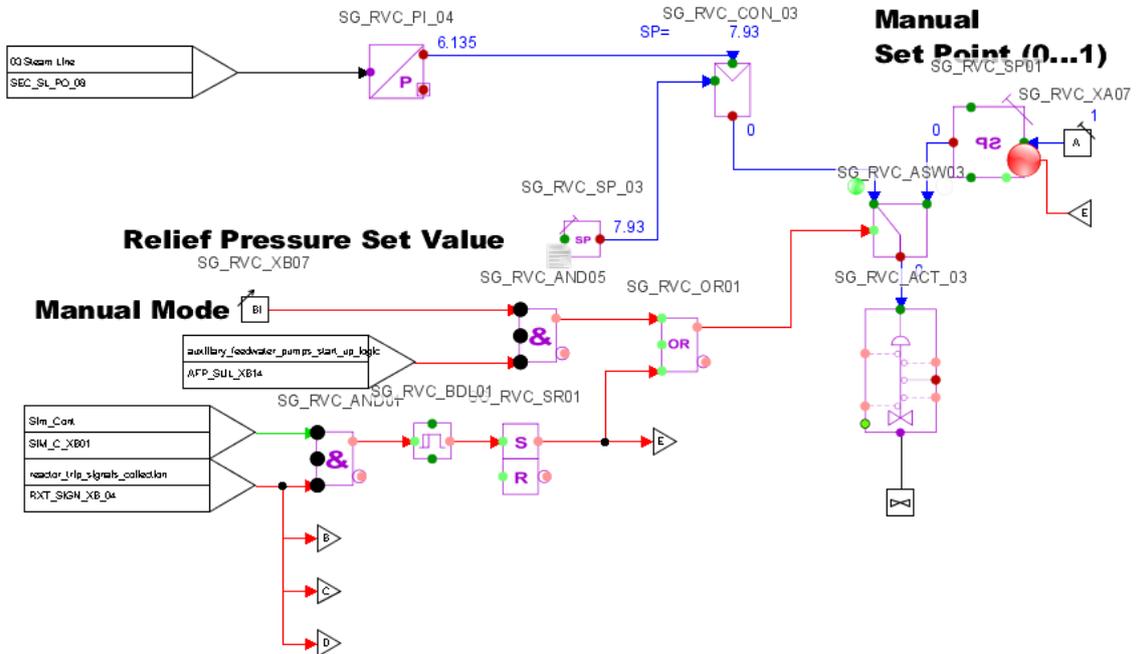


図 3.1.5-3 蒸気逃がし弁開制御ロジック図

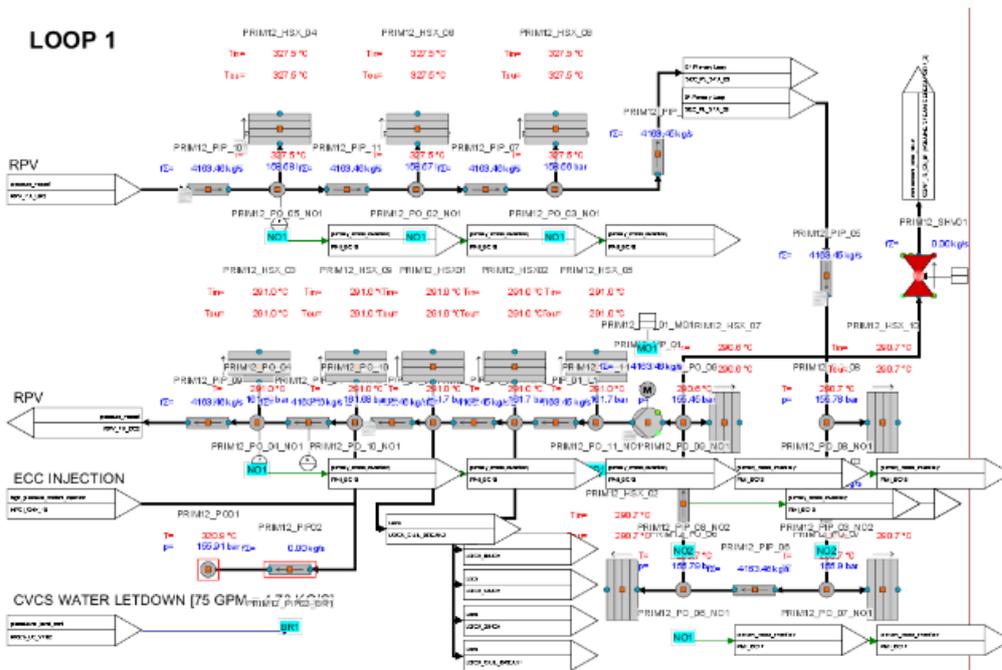


図 3.1.5-4 RCP シール損傷に伴う漏洩パスの形成

DPRA Manual Operation Stress Factor

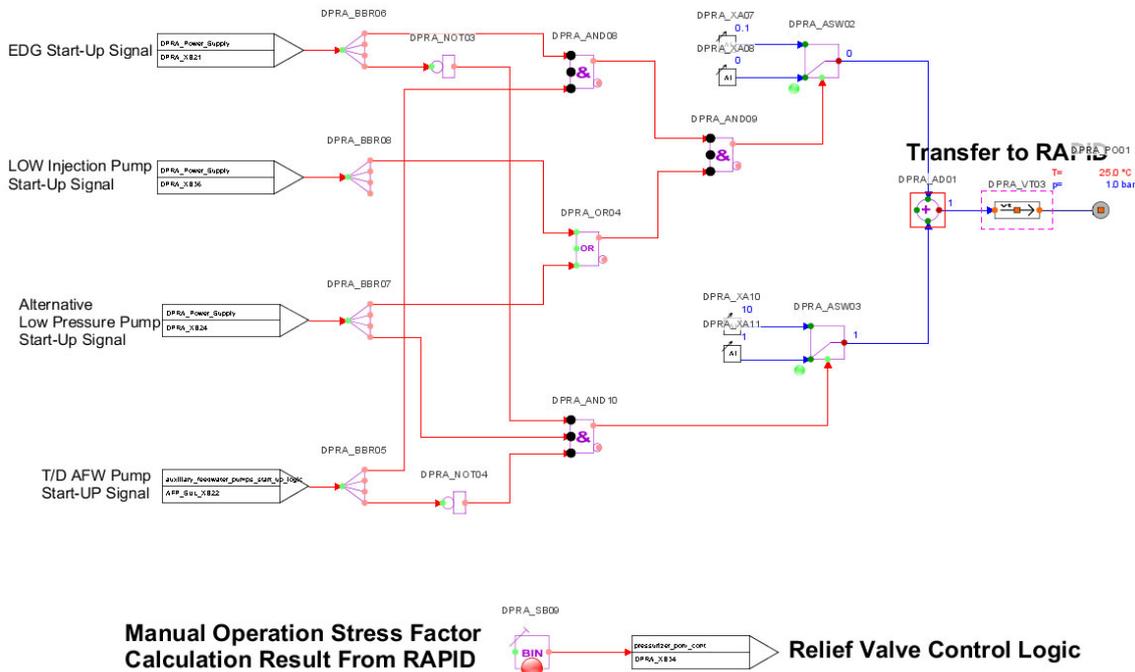


図 3.1.5-5 加圧器逃がし弁操作時の PSF 決定ロジック図

3.1.5.2. Apros による試解析の結果

3.1.5.1 節で追加したモデルやロジックについて Apros の GUI 上で信号の ON/OFF から目的の信号（起動信号等）が出力されていることを確認したのち、これらモデルを含め Apros profile を作成した。次に RAPID で生成する事故シーケンスが SCL により正しく解析を制御していること、また、SCL の制御通りに解析が進んでいることを確認するため、バッテリーの枯渇時間や非常用発電機による所内電源の回復時間など事故シーケンスを特徴づけるパラメータをランダムに決定するのではなく、あらかじめ決定した値に基づく事故シーケンスの生成を RAPID で行った。以下に解析に用いた事故シーケンス及び解析結果を示す。なお解析時間は 12 時間までとした。

1)SBO 発生から 4 時間後にバッテリーが枯渇、交流電源の回復に失敗するケース

本ケースでは SBO が発生し 2 次系の冷却をタービン駆動のポンプで冷却を継続するがバッテリー電源の枯渇によりタービン駆動ポンプの制御ができずに停止する。交流電源が回復しないため 1 次系の注水ポンプ等も利用できずに解析時間の 12 時間を迎える。

図 3.1.5-6 から図 3.1.5-10 に解析結果を示す。

SBO 発生、循環ポンプの停止により加圧器内の水が一次系内に流入する。一次系内の流量が低下するが系内の流量は低いながらも維持されている。2 次系側では、SBO 発生とともにタービン駆動のポンプが起動し冷却が始まり 2 次系管内の圧力及び温度が低下する。タービン駆動ポンプの流量に変化は生じるがバッテリー枯渇までの 4 時間 (14400 秒) まで冷却が継続し、一次系流量及び圧力、被覆管温度、2 次系管内温度ともほぼ一定に落ち着いている。バッテリーが枯渇しタービン駆動ポンプが停止するが、解析終了時刻まで大きな変化はなく炉心は冷却されるという結果を得た。

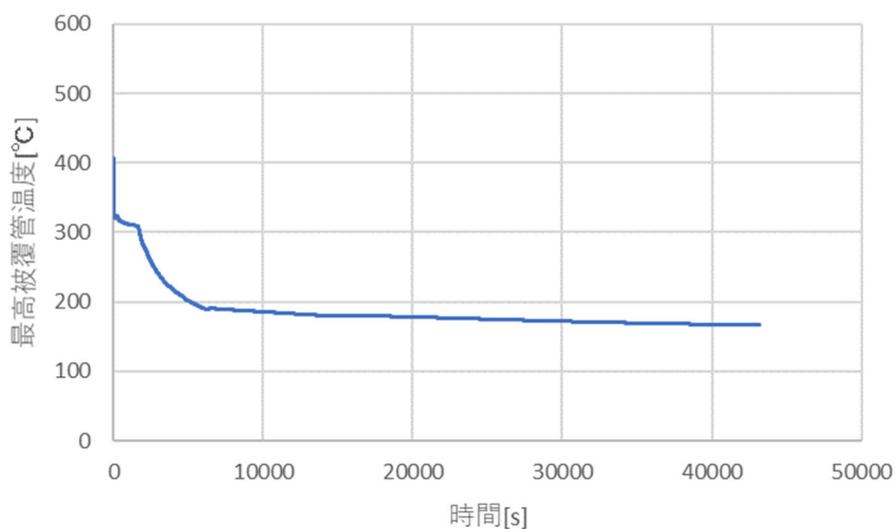


図 3.1.5-6 被覆管温度履歴(ケース 1)

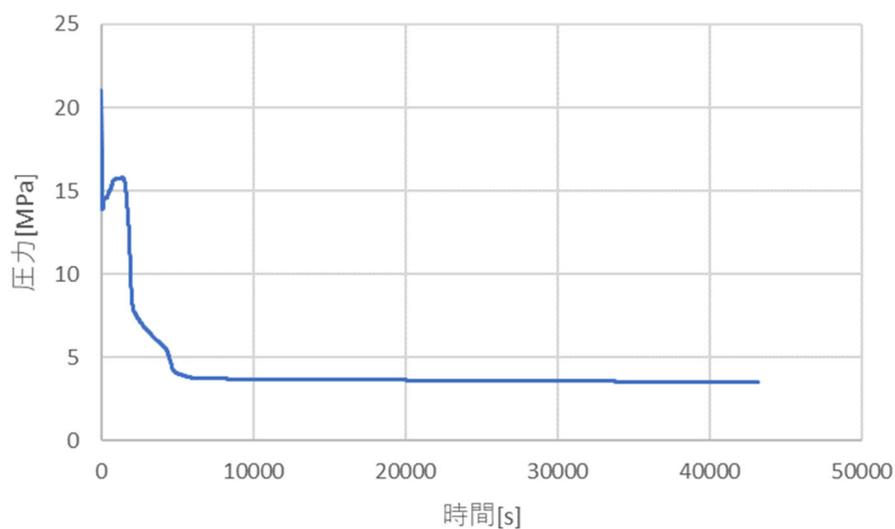


図 3.1.5-7 一次系圧力履歴(ケース 1)

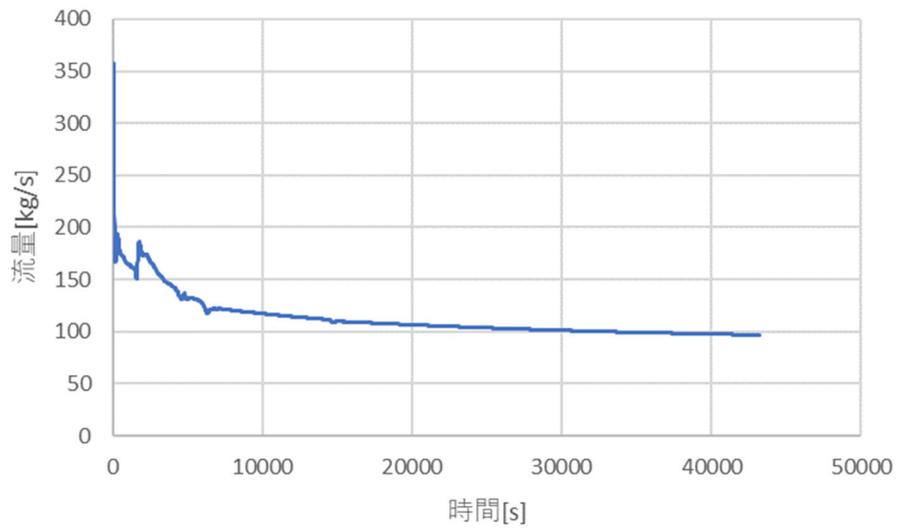


図 3.1.5-8 一次系内流量(ケース 1)

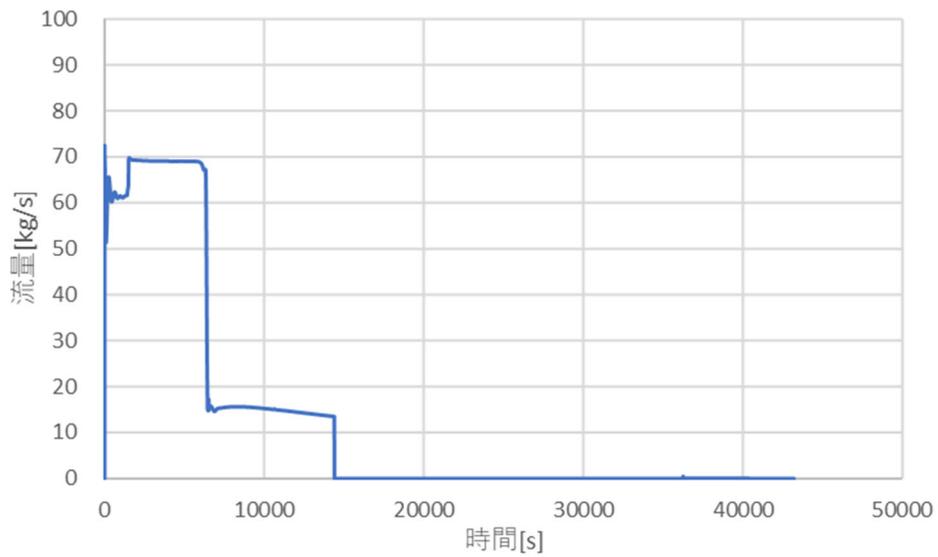


図 3.1.5-9 2次系タービン駆動ポンプ流量(ケース 1)

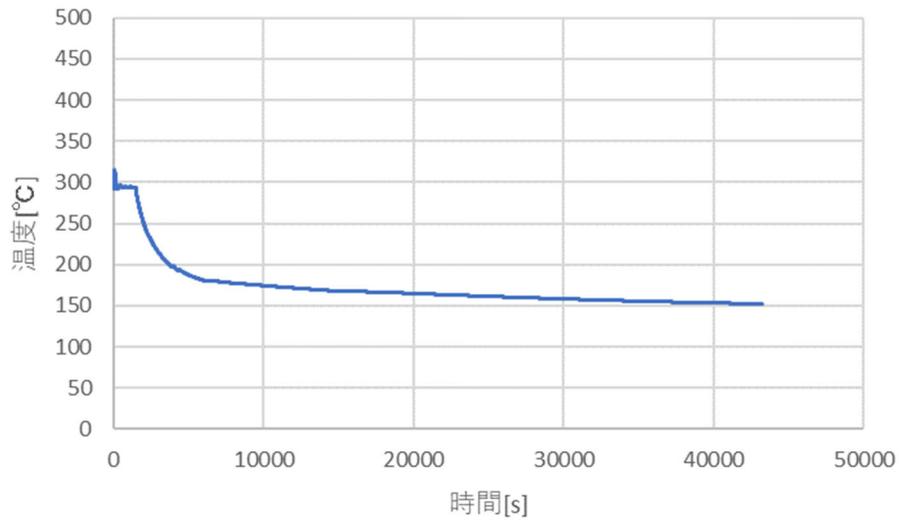


図 3.1.5-10 2次系管内温度(ケース 1)

2) SBO 発生から 4 時間後にバッテリーが枯渇、RCP シール LOCA が 6 時間で発生、交流電源の回復に失敗するケース

解析結果を図 3.1.5-11 から図 3.1.5-14 に示す。

解析開始から 6 時間までは 1 のケースと同じである。なお所内交流電源が回復していないため代替低圧ポンプの起動を試み成功しているが、1 次系圧力が高いため注水は行われていない。6 時間(21600s)に RCP ポンプのシール部からの漏洩 ($2.8E-3m^2$ の面積) が生じるため一次系圧力がさらに低下する。このとき代替低圧ポンプのグラフに流量が生じているがポンプ特性上注水できる圧力ではないため、急激な 1 次系内の水の流出に伴いポンプを通過した水量がプロットされたものとする。漏洩に伴う 1 次系圧力が下がることで代替低圧ポンプからの注水が可能となる。1 次系圧力の低下に伴いシール部からの漏洩量が減少し、代替低圧注水ポンプからの注水量とおおよそ同量になり解析終了まで継続される。1 次系の圧力がケース 1 より下がっていることから最終的な被覆管温度はケース 1 より低くなった。

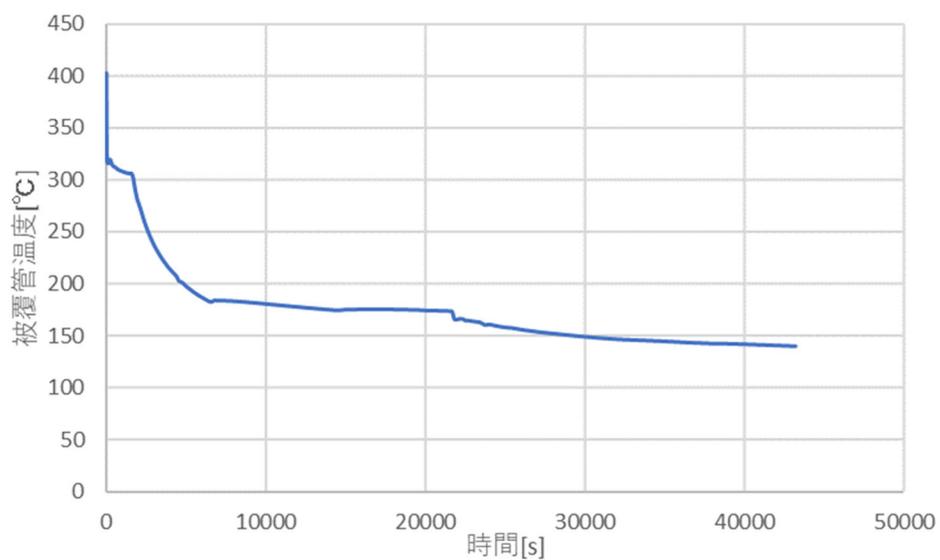


図 3.1.5-11 燃料被覆管温度履歴 (ケース 2)

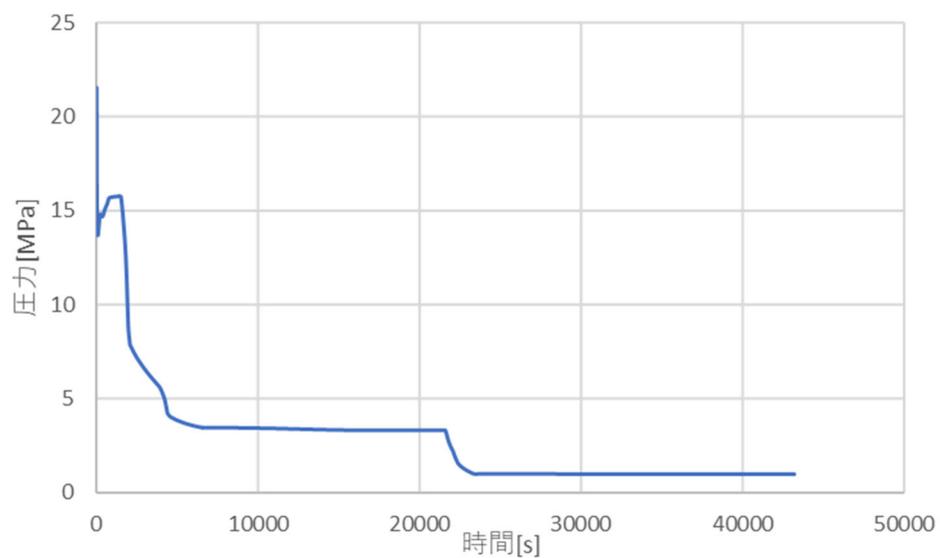


図 3.1.5-12 1次系圧力 (ケース 2)

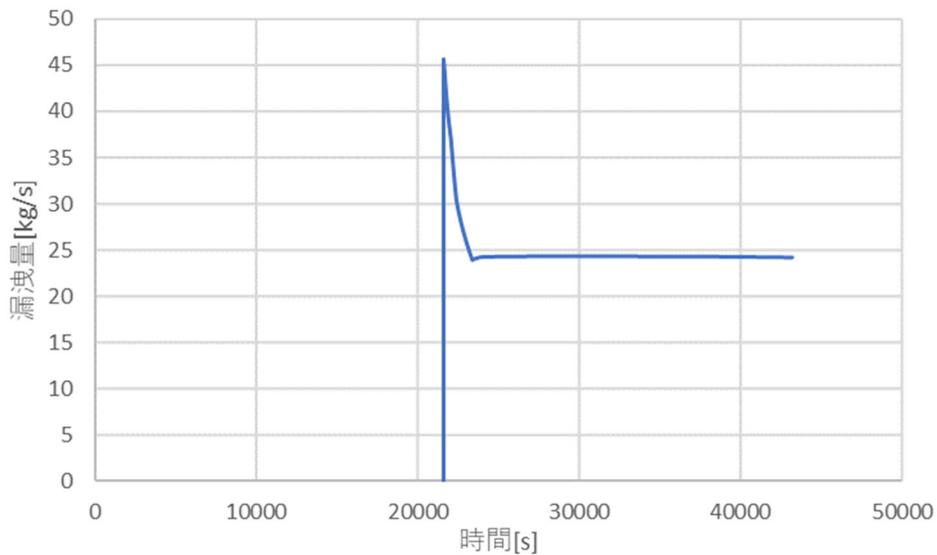


図 3.1.5-13 RCP ポンプシール部からの漏洩量 (ケース 2)

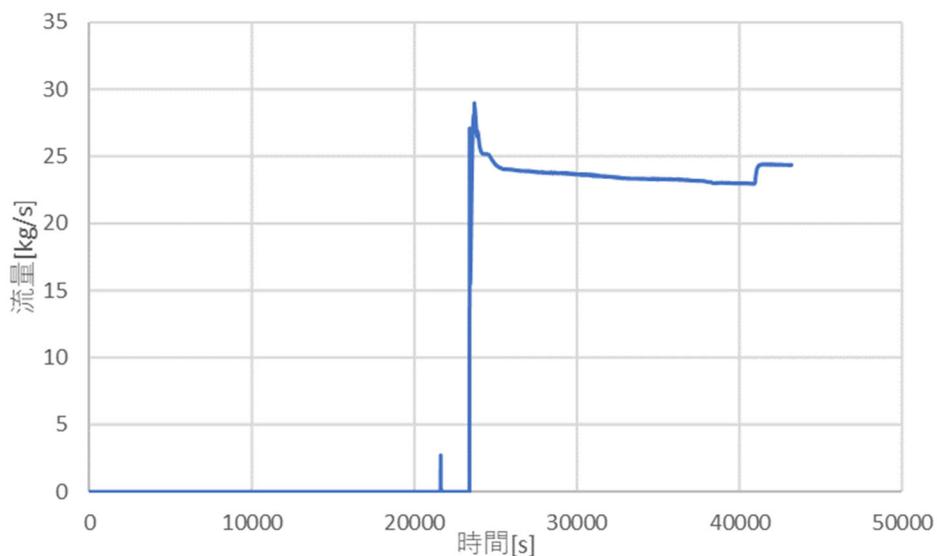


図 3.1.5-14 代替低圧ポンプ流量 (ケース 2)

3) SBO 発生から 4 時間後にバッテリーが枯渇、交流電源が 6 時間で回復、高圧注水ポンプ及び逃し弁開に成功するが 9 時間で高圧注水ポンプが停止、低圧注水にて注水継続を行うケース

解析結果を図 3.1.6-15 から図 3.1.6-19 に示す。

解析開始から 6 時間まではケース 1 と同じ。交流電源が回復することで 1 次系への高圧注水ポンプを用いた注水を開始するため、加圧器逃し弁の開操作を行う。逃し弁開により高圧注水が開始され燃料被覆管温度は低下する一方 1 次系圧力は上昇する。9 時間 (32400s) で高圧注水ポンプが停止することで蒸気の発生量が少なくなり 1 次系圧力が減少

する。低圧注水ポンプの起動に成功するので1次系圧力がポンプの吐出可能圧力まで減少したのちに注水が開始される。低圧注水が開始されると1次系圧力が維持され十分な注水に至らずに燃料被覆管温度が上昇し始める。1次系圧力が微増し40000s(約11時間)で低圧注水が維持できなくなる。その後燃料被覆管温度も上昇しているが解析終了時間までには燃料損傷に至るような温度には至らない。

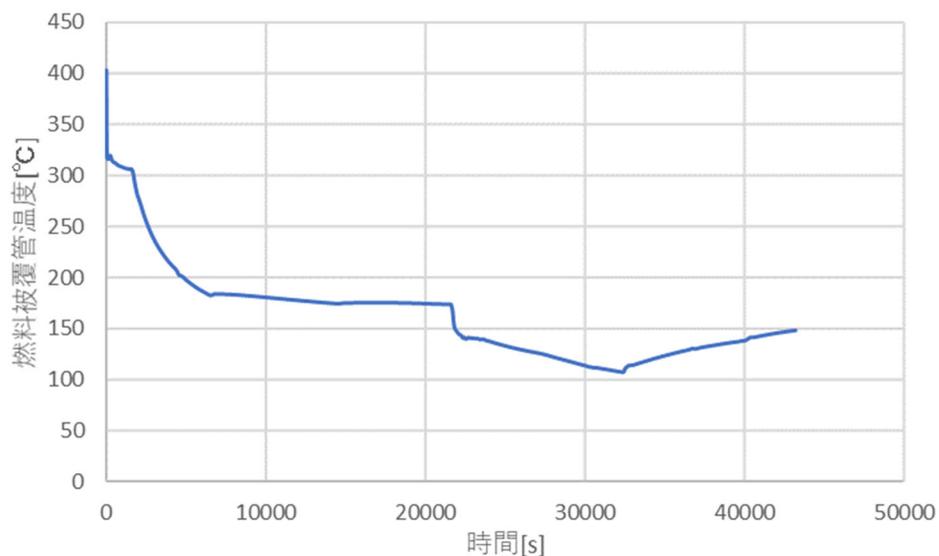


図 3.1.5-15 燃料被覆管温度履歴 (ケース 3)

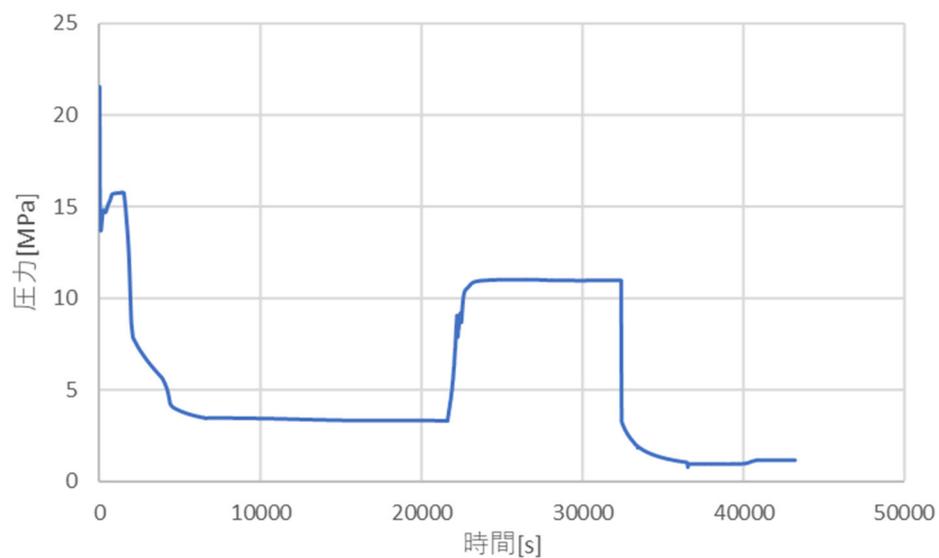


図 3.1.5-16 1次系圧力 (ケース 3)

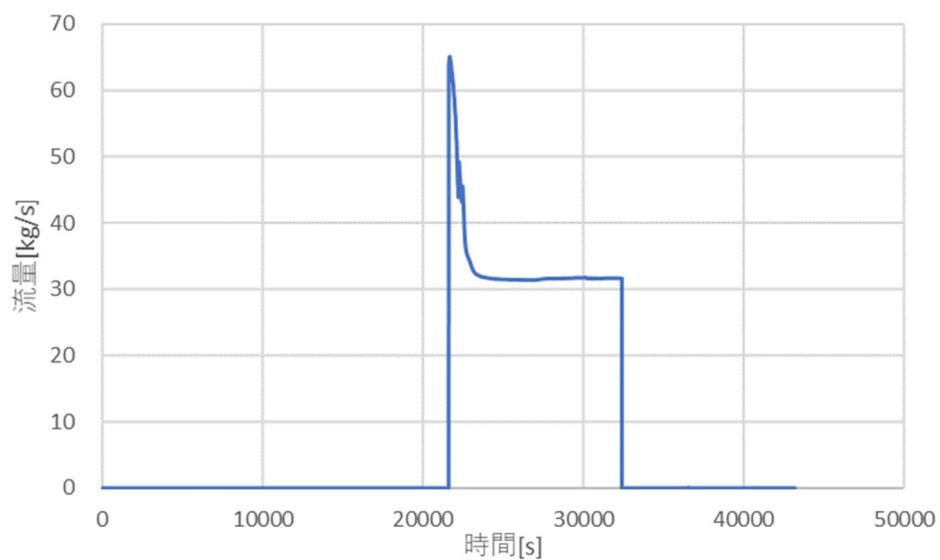


図 3.1.5-17 高圧注水ポンプ流量 (ケース 3)

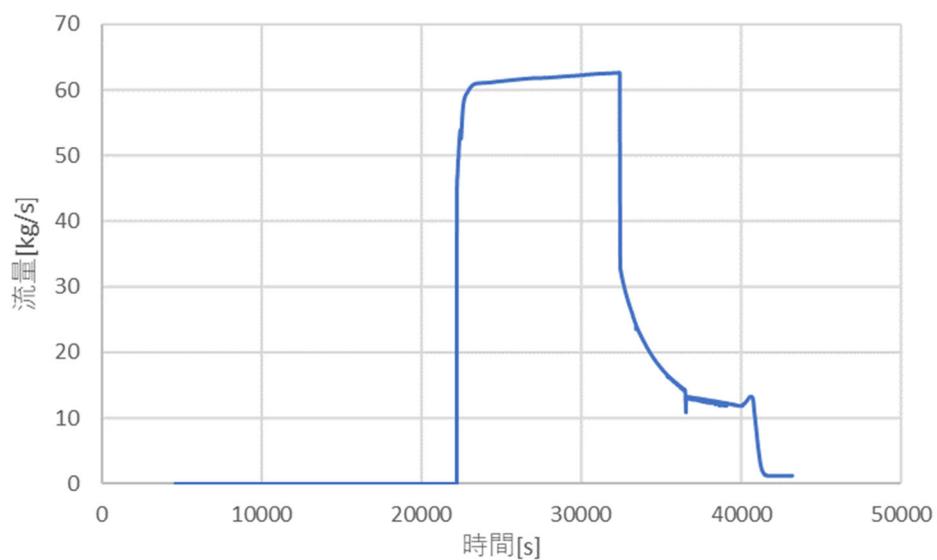


図 3.1.5-18 加圧器逃し弁開による蒸気流量 (ケース 3)

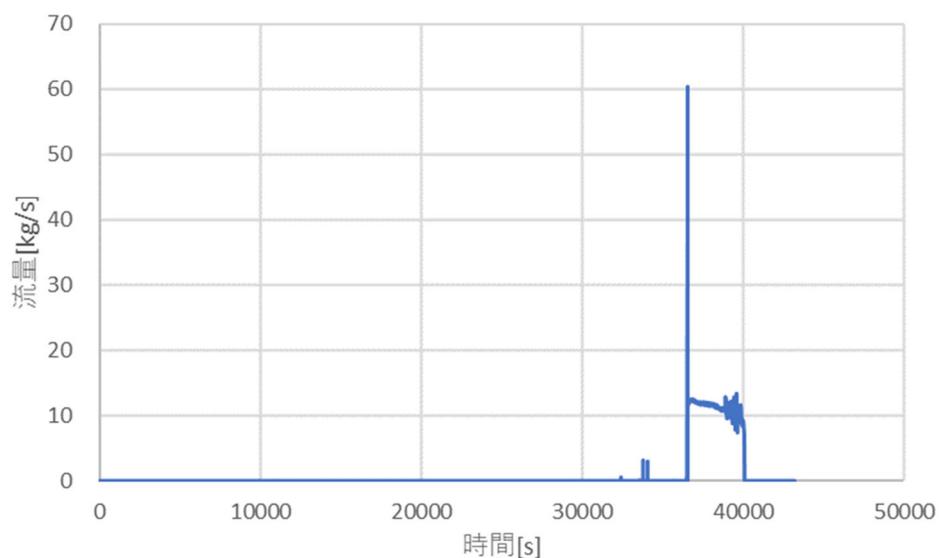


図 3.1.5-19 低圧注水ポンプ流量（ケース 3）

以上3つのケースにおいて、バッテリーの枯渇、RCP シール損傷、高圧注水起動/失敗、低圧注水起動、代替低圧注水ポンプの利用、蒸気逃がし弁の操作の SBO 解析用モデルとして追加した機能の動作確認とそれらによる熱水力挙動を確認した。この3つのケースでは炉心損傷に至るような事故シーケンスとはならなかった。今後炉内状況がより過酷になるようなケースや長時間の解析時間により機能を確認したのちに多数ケース解析を実施するとともに弁の開失敗など1度の操作しか行わない操作に関しては失敗した場合の解析を行い最終的な頻度計算の時に発生確率を乗じることで解析数や解析時間の短縮を図れるもの考える。

3.2. 動的 PRA の効率的な実施機能の検証解析

3.2.1. 代替評価モデルの構築及び交差検証

2.2 で作成したデータベースを利用し、Python のオープンソース機械学習ライブラリ scikit-learn[7]を用いた。

- 炉心損傷の有無を予測する場合、離散的な出力に対して、データを複数のクラスに分類することにより代替評価モデルを構築する。事故解析の入出力の関係が高度な非線形であるため、非線形分類手法を利用する。
- 炉心損傷発生タイミングを予測する場合、連続的な出力に対して、非線形回帰を行う。

サポートベクトルマシン (Support vector machine, SVM) 法[30]は、様々な教師あり機械学習の中、優れた手法の 1 つであり、分類や回帰に適用できる。カーネル関数を利用することにより、図 3.2.1-1 と図 3.2.1-2 に示すように、SVM 法は非線形分類及び非線形回帰に適用可能となる。

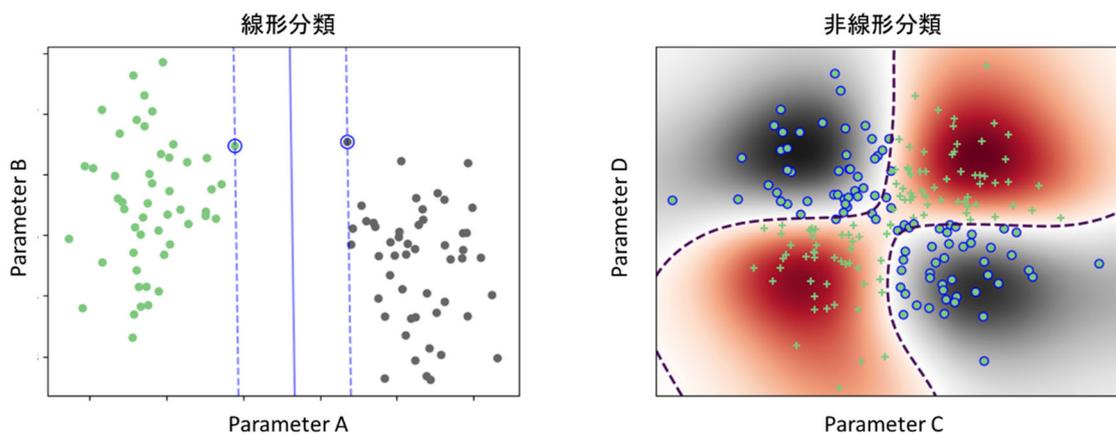


図 3.2.1-1 SVM を用いた線形分類と非線形分類の例

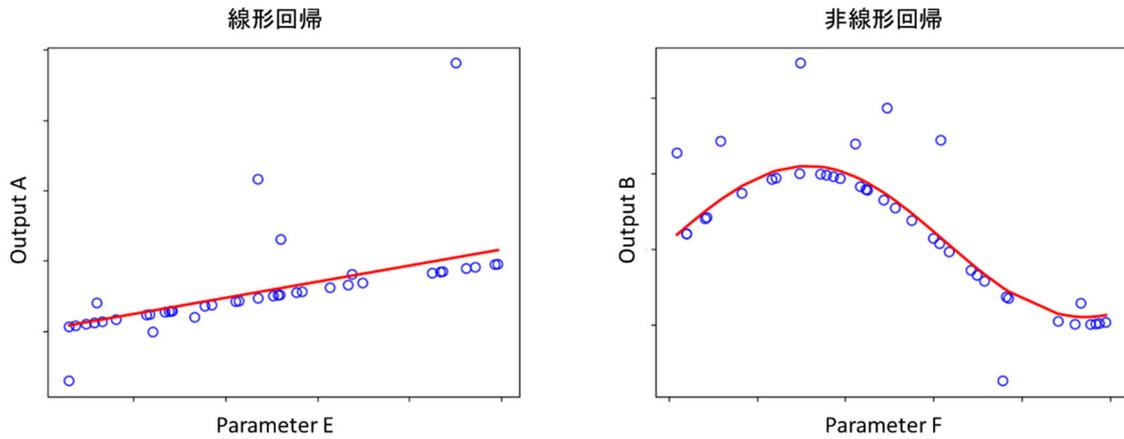


図 3.2.1-2 SVM を用いた線形回帰と非線形回帰の例

また、構築した代替評価モデルの予測性の検証には交差検証が良く用いられる。交差検証とは訓練データと検証データを分離して予測機能の確認を行うことであり、図 3.2.1-3 に示すように、4つのステップで実施される。



図 3.2.1-3 交差検証の手順

3.2.1.1. SVM 分類を用いた炉心損傷の予測

SVM の非線形分類モデルを利用し、炉心損傷状態を予測できる代替評価モデルを構築した。その妥当性を下記の予測正解率で確認した。

$$\text{予測正解率 (分類)} = \frac{\text{炉心損傷状態を正しく予測したケース数}}{\text{全ケース数}}$$

表 3.2.1-1 に示すように、Apros コードの代替評価モデルを用いて、154 ケースの Apros の解析結果を予測し、予測の正解率は 82.5% となった。

$$\text{予測正解率 (分類)} = 0.825$$

表 3.2.1-1 Apros の代替評価モデルの交差検証

事故 シー ケ ン ス 番 号	ブラ ン チ 番 号	入力					出力	
		DC 電源枯 渇時間 (s)	AC 電源回 復時間 (s)	SRV の閉 失敗故障 時間 (s)	SRV の閉 失敗故障 の漏洩割 合	SRV の熱 的故障発 生温度 (°C)	炉心損 傷の有 無	代替評 価モデ ルの予 測結果
0	0	21503	23686	9999999	9999999	349.31	0	0
1	0	18260	31745	9999999	9999999	462.23	1	1
2	0	14425	38739	33489	0.717	447.06	1	1
3	0	14351	29094	9999999	9999999	413.85	1	1
4	0	16127	9999999	9999999	9999999	500.48	1	1
5	0	12779	9999999	32334	0.697	444.62	1	1
6	0	11483	21412	9999999	9999999	361.62	1	1
6	1	11483	21412	9999999	9999999	361.62	1	1
7	0	9433	9999999	9999999	9999999	408.52	1	1
7	1	9433	9999999	9999999	9999999	408.52	1	1
8	0	11903	17608	9999999	9999999	346.09	0	1
8	1	11903	17608	9999999	9999999	346.09	0	1
9	0	11148	9999999	38684	0.417	411.38	1	1
9	1	11148	9999999	38684	0.417	411.38	1	1
10	0	14292	9999999	9999999	9999999	536.56	1	1
11	0	15416	9999999	9999999	9999999	445.66	1	1
12	0	18006	32144	9999999	9999999	404.43	1	1
12	1	18006	32144	9999999	9999999	404.43	1	1
13	0	7450	32285	9999999	9999999	344.69	1	1
13	1	7450	32285	9999999	9999999	344.69	1	1
14	0	15869	9999999	9999999	9999999	466.16	1	1
15	0	15480	22221	33733	0.425	427.27	0	1
16	0	21047	27789	9999999	9999999	449.64	0	0
17	0	17167	9999999	9999999	9999999	519.23	1	1
18	0	21566	32399	9999999	9999999	386.38	1	0
18	1	21566	32399	9999999	9999999	386.38	1	0

19	0	20801	38209	30710	0.661	510.06	1	0
20	0	10876	9999999	9999999	9999999	353.91	1	1
20	1	10876	9999999	9999999	9999999	353.91	1	1
21	0	18797	26995	9999999	9999999	451.27	0	1
22	0	20697	9999999	9999999	9999999	567.23	1	1
23	0	16435	9999999	9999999	9999999	446.07	1	1
24	0	11023	19691	9999999	9999999	382.91	1	1
24	1	11023	19691	9999999	9999999	382.91	1	1
25	0	18263	9999999	9999999	9999999	376.58	1	1
25	1	18263	9999999	9999999	9999999	376.58	1	1
26	0	21045	28360	9999999	9999999	521.02	0	0
27	0	19152	9999999	9999999	9999999	388.68	1	1
27	1	19152	9999999	9999999	9999999	388.68	1	1
28	0	10087	25425	39747	0.484	346.35	1	1
28	1	10087	25425	39747	0.484	346.35	1	1
29	0	12817	9999999	37007	0.409	381.32	1	1
29	1	12817	9999999	37007	0.409	381.32	1	1
30	0	14468	9999999	39169	0.443	449.16	1	1
31	0	17877	25748	9999999	9999999	478.47	0	1
32	0	12213	38503	9999999	9999999	431.45	1	1
33	0	10959	9999999	9999999	9999999	404.47	1	1
33	1	10959	9999999	9999999	9999999	404.47	1	1
34	0	17934	30324	9999999	9999999	442.84	1	1
35	0	20672	24213	9999999	9999999	520.37	0	0
36	0	15865	9999999	9999999	9999999	450.18	1	1
37	0	15133	22705	37070	0.29	560.66	1	1
38	0	15426	9999999	9999999	9999999	437	1	1
39	0	8359	9999999	9999999	9999999	583.69	1	1
40	0	8922	24589	9999999	9999999	409.27	1	1
40	1	8922	24589	9999999	9999999	409.27	1	1
41	0	17594	9999999	9999999	9999999	346.3	1	1
41	1	17594	9999999	9999999	9999999	346.3	1	1
42	0	20310	9999999	9999999	9999999	553.19	1	1
43	0	14874	26826	9999999	9999999	403.38	1	1

43	1	14874	26826	9999999	9999999	403.38	1	1
44	0	10195	25882	9999999	9999999	462.31	1	1
45	0	18290	9999999	9999999	9999999	515.96	1	1
46	0	17397	26334	33036	0.522	604.24	0	1
47	0	19106	31534	9999999	9999999	573.06	1	1
48	0	10952	27833	9999999	9999999	510.48	1	1
49	0	15846	9999999	9999999	9999999	543.49	1	1
50	0	12522	9999999	9999999	9999999	361.69	1	1
50	1	12522	9999999	9999999	9999999	361.69	1	1
51	0	20028	23206	9999999	9999999	419.87	0	1
52	0	10874	9999999	30622	0.376	527.53	1	1
53	0	9299	9999999	9999999	9999999	438.99	1	1
54	0	14854	9999999	9999999	9999999	618.47	1	1
55	0	7233	9999999	9999999	9999999	329.56	1	1
55	1	7233	9999999	9999999	9999999	329.56	1	1
56	0	9234	9999999	31081	0.403	495.58	1	1
57	0	17568	32395	9999999	9999999	452.85	1	1
58	0	14077	9999999	33761	0.706	460.88	1	1
59	0	20641	23649	35727	0.439	444.51	0	1
60	0	14451	27799	9999999	9999999	403.93	1	1
60	1	14451	27799	9999999	9999999	403.93	1	1
61	0	9891	9999999	9999999	9999999	488.49	1	1
62	0	16967	9999999	9999999	9999999	434.99	1	1
63	0	16845	24188	9999999	9999999	386.81	0	1
64	0	17950	34228	9999999	9999999	425.27	1	1
65	0	13283	9999999	39727	0.599	465.01	1	1
66	0	13503	27029	34050	0.12	413.96	1	1
67	0	15144	27905	9999999	9999999	451.09	1	1
68	0	13320	27691	32683	0.672	464.86	1	1
69	0	15306	27340	9999999	9999999	405.61	1	1
69	1	15306	27340	9999999	9999999	405.61	1	1
70	0	16813	20668	9999999	9999999	381.51	0	1
71	0	16265	29260	9999999	9999999	564.17	1	1
72	0	14441	9999999	9999999	9999999	428.63	1	1

73	0	18232	39836	38032	0.633	507.74	1	1
74	0	14732	34408	33802	0.779	415.14	1	1
75	0	12874	37041	9999999	9999999	380.5	1	1
75	1	12874	37041	9999999	9999999	380.5	1	1
76	0	18874	9999999	36128	0.615	353.26	1	1
76	1	18874	9999999	36128	0.615	353.26	1	1
77	0	16376	33061	9999999	9999999	442.36	1	1
78	0	16798	9999999	9999999	9999999	477.92	1	1
79	0	15847	9999999	9999999	9999999	467.92	1	1
80	0	11135	9999999	9999999	9999999	431.08	1	1
81	0	15572	24181	9999999	9999999	412.61	0	1
82	0	10324	11826	9999999	9999999	531.62	0	1
83	0	12982	19297	9999999	9999999	510.64	0	1
84	0	13076	18446	9999999	9999999	517.46	0	1
85	0	20227	28615	9999999	9999999	607.55	0	1
86	0	15816	38161	30199	0.542	550.1	1	1
87	0	18841	30945	9999999	9999999	368.59	1	1
87	1	18841	30945	9999999	9999999	368.59	1	1
88	0	15660	22376	32962	0.8	433.95	0	1
89	0	16583	31315	38425	0.914	327.01	1	1
89	1	16583	31315	38425	0.914	327.01	1	1
90	0	14114	17602	9999999	9999999	522.56	0	1
91	0	15685	30768	9999999	9999999	364.95	1	1
91	1	15685	30768	9999999	9999999	364.95	1	1
92	0	15623	36093	9999999	9999999	419.96	1	1
93	0	19404	35422	9999999	9999999	404.79	1	1
93	1	19404	35422	9999999	9999999	404.79	1	1
94	0	11918	9999999	9999999	9999999	573.47	1	1
95	0	16486	22421	39954	0.769	508.12	0	1
96	0	13133	33052	9999999	9999999	482.18	1	1
97	0	20831	9999999	9999999	9999999	345.13	1	1
97	1	20831	9999999	9999999	9999999	345.13	1	1
98	0	20212	26579	9999999	9999999	491.95	0	1
99	0	8340	9999999	9999999	9999999	546.23	1	1

100	0	15632	21423	9999999	9999999	414.63	0	1
101	0	20219	27429	38240	0.116	419.1	0	1
102	0	11682	32982	9999999	9999999	443.04	1	1
103	0	19883	20197	9999999	9999999	494.47	0	1
104	0	19167	9999999	33169	0.499	423.07	1	1
105	0	9190	9999999	9999999	9999999	464.75	1	1
106	0	10875	9999999	9999999	9999999	498.77	1	1
107	0	10909	11571	37499	0.429	480.7	0	1
108	0	16009	22956	9999999	9999999	618.37	0	1
109	0	13474	9999999	9999999	9999999	351.82	1	1
110	0	12575	9999999	35650	0.676	352.73	1	1
110	1	12575	9999999	35650	0.676	352.73	1	1
111	0	16391	9999999	38068	0.596	335.11	1	1
111	1	16391	9999999	38068	0.596	335.11	1	1
112	0	16157	28474	38178	0.682	362.59	1	1
112	1	16157	28474	38178	0.682	362.59	1	1
113	0	21378	9999999	9999999	9999999	490.42	1	1
114	0	11429	19724	33422	0.492	417.26	1	1
114	1	11429	19724	33422	0.492	417.26	1	1
115	0	13957	31941	9999999	9999999	483.07	1	1
116	0	20968	9999999	9999999	9999999	406.87	1	1
117	0	20126	9999999	34450	0.161	454.77	1	1
118	0	17016	9999999	9999999	9999999	371.84	1	1
118	1	17016	9999999	9999999	9999999	371.84	1	1
119	0	9346	9999999	9999999	9999999	379.25	1	1
119	1	9346	9999999	9999999	9999999	379.25	1	1

表 3.2.1-2 に示すように、THALES2 コードの代替評価モデルを用いて、49 ケースの THALES2 の解析結果を予測し、予測の正解率は 79.6% となった。

$$\text{予測正解率 (分類)} = 0.796$$

表 3.2.1-2 THALES2 の代替評価モデルの交差検証

事故 シー ケ ス 番 号	ブラ ンチ 番 号	入力							出力	
		DC 電 源枯渇 時間 (s)	非常用電 源(AC)回 復時間 (s)	減圧操 作の時 間遅れ (s)	SRV の閉失 敗故障ま での開閉回数	SRV の 閉失敗故 障の漏洩 割合	SRV の 熱的故 障発生 温度 (°C)	シール 損傷発 生時間 (s)	炉心 損傷 の有 無	代替評価 モデルの 予測結果
0	0	4.9884	2.7717	33.524	3714	0.03642	469.06	13527	0	0
0	1	4.9884	2.7717	33.524	3714	0.03642	469.06	13527	0	0
1	0	4.5678	8.5899	26.889	119	0.04099	626.57	17220	1	1
1	1	4.5678	8.5899	26.889	119	0.04099	626.57	17220	1	1
1	2	4.5678	8.5899	26.889	119	0.04099	626.57	17220	1	1
1	3	4.5678	8.5899	26.889	119	0.04099	626.57	17220	1	1
2	0	5.0348	0.74407	17.233	1900	0.0335	416.35	22569	0	0
2	1	5.0348	0.74407	17.233	1900	0.0335	416.35	22569	0	0
3	0	5.077	0.35887	56.773	1498	0.04109	484.39	1057.4	0	0
3	1	5.077	0.35887	56.773	1498	0.04109	484.39	1057.4	0	0
4	0	4.6379	4.7726	28.026	377	0.02583	466.81	27851	0	1
4	1	4.6379	4.7726	28.026	377	0.02583	466.81	27851	0	1
5	0	5.3517	5.0635	44.896	465	0.03575	370.48	15043	0	0
5	1	5.3517	5.0635	44.896	465	0.03575	370.48	15043	0	0
6	0	5.1226	0.77452	40.454	178	0.03874	539.33	17321	0	1
6	1	5.1226	0.77452	40.454	178	0.03874	539.33	17321	0	1
7	0	4.5155	6.7013	21.888	176	0.02727	402.33	1673.3	1	1
8	0	5.2029	18.817	12.267	1216	0.03343	436.16	12002	0	0
8	1	5.2029	18.817	12.267	1216	0.03343	436.16	12002	1	0

8	2	5.2029	18.817	12.267	1216	0.03343	436.16	12002	1	0
9	0	4.9241	5.6497	39.272	851	0.04512	457.64	38538	0	0
9	1	4.9241	5.6497	39.272	851	0.04512	457.64	38538	0	0
10	0	4.927	3.5178	27.813	2845	0.0271	399.59	36213	0	0
10	1	4.927	3.5178	27.813	2845	0.0271	399.59	36213	0	0
11	0	4.6523	2.1648	57.397	117	0.03805	491.63	4397.7	0	0
11	1	4.6523	2.1648	57.397	117	0.03805	491.63	4397.7	0	0
12	0	5.0612	16.27	34.091	109	0.01799	329.49	13034	1	1
12	1	5.0612	16.27	34.091	109	0.01799	329.49	13034	1	1
12	2	5.0612	16.27	34.091	109	0.01799	329.49	13034	1	1
12	3	5.0612	16.27	34.091	109	0.01799	329.49	13034	1	1
13	0	5.1825	6.0299	56.933	430	0.05039	413.23	1480.7	0	0
13	1	5.1825	6.0299	56.933	430	0.05039	413.23	1480.7	0	0
14	0	5.0689	8.7176	11.748	258	0.03117	353.39	25069	1	1
14	1	5.0689	8.7176	11.748	258	0.03117	353.39	25069	1	1
15	0	5.4128	10.498	20.591	1339	0.0159	372.36	41201	0	0
15	1	5.4128	10.498	20.591	1339	0.0159	372.36	41201	1	0
15	2	5.4128	10.498	20.591	1339	0.0159	372.36	41201	1	0
16	0	5.4012	3.9058	11.801	200	0.04139	398.9	27259	0	1
16	1	5.4012	3.9058	11.801	200	0.04139	398.9	27259	0	1
17	0	5.1404	19.445	48.523	1257	0.01582	572.41	10781	0	0
17	1	5.1404	19.445	48.523	1257	0.01582	572.41	10781	0	0
18	0	4.7523	4.7983	20.423	145	0.03082	448.13	4952.2	1	1
18	1	4.7523	4.7983	20.423	145	0.03082	448.13	4952.2	1	1
18	2	4.7523	4.7983	20.423	145	0.03082	448.13	4952.2	1	1
18	3	4.7523	4.7983	20.423	145	0.03082	448.13	4952.2	1	1
19	0	4.8589	2.4439	16.646	235	0.013	412.68	22684	1	1
19	1	4.8589	2.4439	16.646	235	0.013	412.68	22684	1	1
19	2	4.8589	2.4439	16.646	235	0.013	412.68	22684	1	1
19	3	4.8589	2.4439	16.646	235	0.013	412.68	22684	1	1

3.2.1.2. SVM 回帰を用いた炉心損傷の発生タイミングの予測

SVM の非線形回帰モデルを利用し、炉心損傷の発生タイミングを予測する代替評価モデルを構築した。連続的な出力に対する予測性を確認するため、下記の予測エラー率を利用した。

$$\text{予測エラー率 (回帰)} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|\text{予測値} - \text{正解値}|}{\text{正解値}}}{N}$$

炉心損傷があった Apros の解析データを抽出し、損傷が発生するタイミングを予測した。解析結果と予測時刻の比較を図 3.2.1-4 に示す。Apros の解析結果を用いた炉心損傷時刻の予測誤差は 4.6%となった

Apros の予測エラー率 (回帰) = 0.046

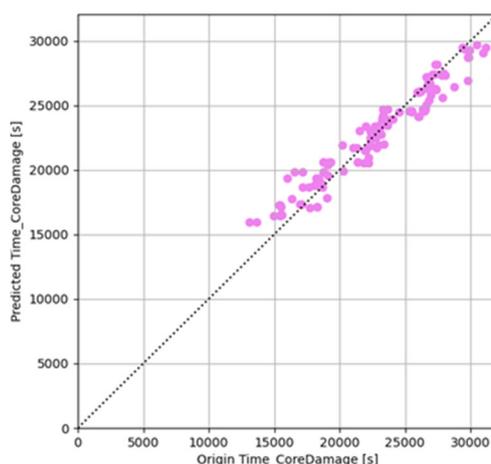


図 3.2.1-4 Apros の炉心損傷発生タイミングの予測

次に炉心損傷があった THALES2 の解析データを抽出し、損傷が発生するタイミングを予測した。解析結果と予測時刻の比較を図 3.2.1-5 に示す。THALES2 の解析結果を用いた炉心損傷時刻の予測誤差は 71.0%となった。THALES2 の結果を用いた予測時刻のエラー率は Apros のものと比較しエラー率が高くなった。これは炉心損傷が発生した事故シーケンスの数が少ないことため、THALES2 の代替評価モデルの予測性能が相対的に低下したものと考えられる

THALES2 の予測エラー率（回帰） = 0.710

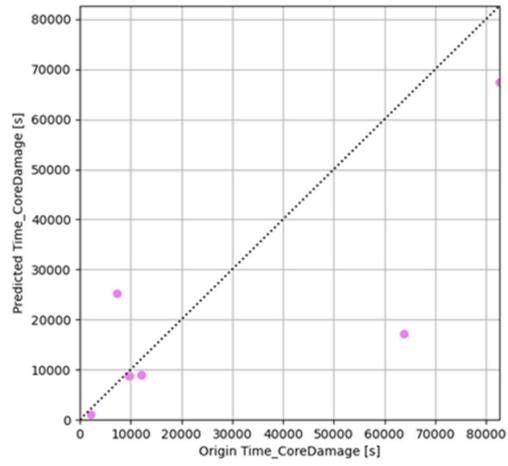


図 3.2.1-5 THALES2 の炉心損傷発生タイミングの予測

3.2.2. THALES2 を用いた適合サンプリングのテスト

THALES2 と SVM 回帰モデルを用いて、適合サンプリング機能の検証解析を行った。図 3.2.2-1 と図 3.2.2-2 に示すように、モンテカルロ・サンプリング法は入力空間からランダムにパラメータをサンプリングして事故解析を実行するが、適合サンプリング法では着目する炉心損傷が発生する境界付近の計算条件を自動的に判断及び選択することにより、境界付近のサンプル数は 33/220 から 193/200 になり、炉心損傷頻度の推定に必要な領域のケース数を効率よく増やせることを確認することができた。

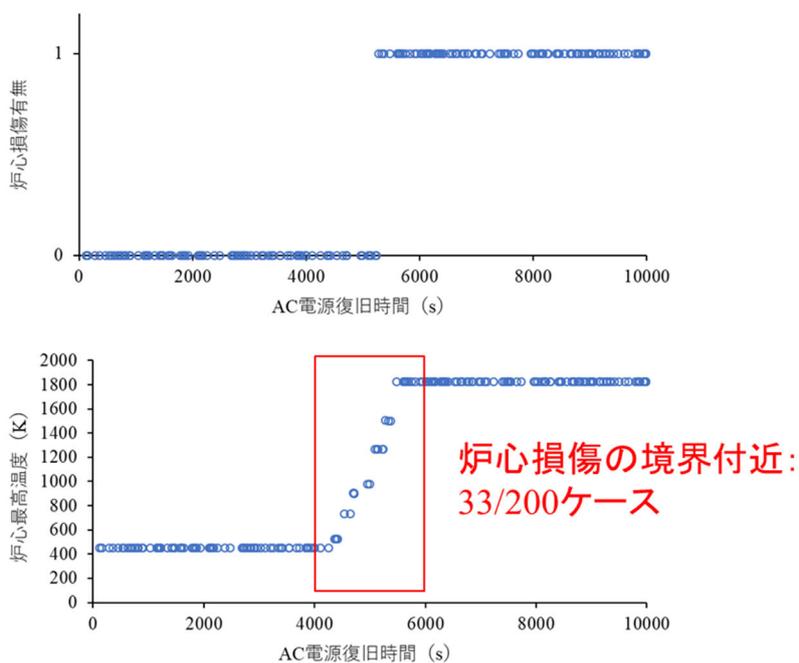


図 3.2.2-1 モンテカルロ・サンプリング法

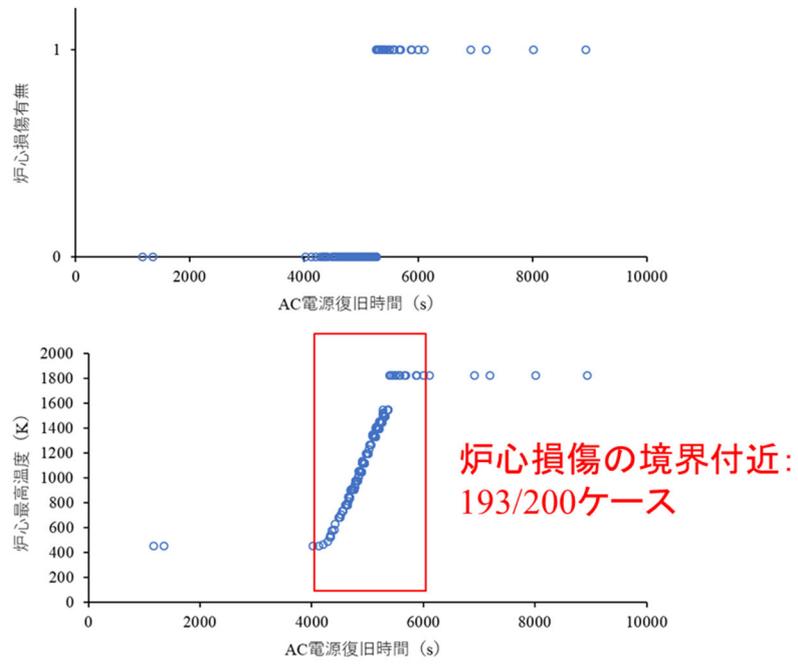


図 3.2.2-2 適合サンプリング法

3.3. まとめ

本章では整備している動的 PRA ツール RAPID の適用性確認並びに構築した手法及び RAPID の開発の課題等の抽出を目的に動的 PRA の試解析を実施した。BWR を対象とした全交流電源喪失事故 (SBO) の試解析では、昨年度までに考慮する対象機器を限定した簡易なシナリオから対象機器や発生条件など詳細度の向上を図り、本年度では RHR システム等の格納容器内の熱を系外に放出する機能を考慮することで一通りの SBO 事故シナリオの再現を試みた。構築した SBO シナリオに従い、THALES2 及び Apros による試解析を実施した。THALES2 による解析では、格納容器内熱除去システム及び故障確率に現実的な値を採用することで炉心損傷に至るケースは昨年度と比較し減ることを確認した。さらにクラスタリングを利用した重要度評価では、SRV の熱的損傷の発生閾値、バッテリーの枯渇時間が炉心損傷への寄与が大きいことが示された。また、Apros による解析では、THALES2 による解析と同等の詳細度の事故シナリオ解析ができるようにモデル、制御ロジックの追加に加え SCL による制御の詳細度の向上を図った。従来より事故シナリオの詳細度を向上させたことから機器の起動条件が複雑化したため追加したモデルの動作確認及び他モデルへの影響がないことを確認し選定した事故シーケンスについての解析を実施した。RAPID の PWR 事故シナリオへの適用性を確認するため、Apros を用いて PWR の SBO 事故シナリオの解析に着手した。本試解析においても事故シナリオの解析に必要なモデル及び制御ロジックの追加を行い、機能確認を行えるような事故シーケンスを選定し、これに基づく解析を実施することで多数解析実施への目途を得た。

本年度は解析対象となる機器や操作を増やすことで機器の動作条件や操作の発生条件など考慮すべき状態が増加し、これらを考慮した解析を行うためにはあらかじめ想定して解析モデルに組み込む必要がある。この検討を補助するような機能があれば解析者の負担軽減が図れると考える。

本年度整備した効率的な動的 PRA の実施機能の検証として、代替評価モデルの精度の確認及び適合サンプリング法の適用を行い、その性能の検証を行った。代替評価モデルは、Apros 及び THALES2 の解析結果を用いて構築し、炉心損傷に至るか否かについておよそ 80%程度の予測精度を得られることを確認した。また THALES2 を用いた交流電源回復時間をパラメータにした解析に適合サンプリングを適用し、解析上の誤差等を考慮して炉心損傷と判断する温度領域になるような交流電源回復時間を選択して解析することで、着目する領域の解析数を増やせることを確認した。

4. まとめ

令和2年度動的レベル1確率論的リスク評価手法の開発事業として、平成30年度及び平成31年度に取りまとめられた動的PRAツールの開発に係る要件に基づき、リスク情報の抽出機能及び効率的な実施機能の整備を行った。リスク情報の抽出では、動的PRAの特徴である時間依存性を考慮できるような重要度指標としてクラスタリング技術を利用したリスク情報導出法を検討し実装した。また、効率的な実施機能として、効率的なサンプリング手法として提案されている複数のサンプリング手法の導入、代替評価モデルを用いた適合サンプリング法に加え、解析の並列化処理を行えるように整備した。

整備した動的PRAツールRAPIDの適用性確認のため、SBO事故シナリオを対象にBWR及びPWRの解析を行った。BWRの解析ではTHALES2及びAprosを、PWRの解析にはAprosをそれぞれ用いた。THALES2を用いたBWRの解析では、利用する安全系やポンプの起動や弁操作の条件等昨年度と比較して詳細化を行い一通りの解析を行えることを確認した。Aprosを用いた解析ではTHALES2と同様な解析が実施できるよう解析モデル及び制御ロジックの更新を行い、追加した機能を確認できるような事故シーケンスを選定し、それに基づく解析を実施し詳細な解析の実施の目途を付けた。PWRを対象とした解析では、1次系の熱水力挙動に影響を与える事故シナリオに限定し、解析モデル及び制御ロジックの追加を行った。BWR同様、機能を確認できる事故シーケンスを選定し、その機能を確認することで対象範囲を広げた解析への適用の目途を付けた。さらに本年度整備した動的PRAの効率的な実施機能のうち代替評価モデルの精度を確認し、また、適合サンプリング法の適用により着目する領域へのサンプリングパラメータが集中することを確認した。

以上の機能の開発及び試解析を通じた機能の確認を行い、本年度までの動的PRA手法の開発において従来の信頼性評価で考慮する設備機器のおおよそを対象とする解析が実施できることが確認できた。一方、試解析を通じRAPIDを用いた動的PRAの実施に関して以下の点について改善の検討を要する項目であると考ええる。

- ・ RAPIDの拡張性及び保守性の向上

様々な機能を追加したRAPIDは動的PRAの実施を補助するがその構造は次第に複雑になってきている。各機能をモジュール化し解析者は必要な機能を入力から指定できるような構造であることが望ましいと考える。

- ・ 多忠実モデルの導入

本年度代替評価モデルを利用した適合サンプリング法を導入し、詳細な検討が必要な領域のパラメータセットを選択し、これを用いたシミュレーションを行うことで効率的に判断基準付近の解析数を増やすことができた。これを拡張し、高忠実度モデルと低忠実度モデルを目的に応じて選択し解析結果を得る方法は今後の動的PRAの実施に貢献できるものと考ええる。

- ・ 事象進展発生条件のモデル化

動的 PRA を行う際に解析モデルに考え得る作動状況を想定し発生ロジックを組み込んでいる。解析対象の事故シナリオに含まれる機器や操作が増えることで考慮すべき状態も増加する。このため従来フォールトツリーで考慮していたような発生条件を容易に検討できる仕組みがあれば解析者の負担軽減が図れると考える。

- 故障モデルの詳細化

BWR における SBO 解析ではバッテリーの枯渇時間及び SRV の熱的損傷閾値が炉心温度及び損傷時間への影響があるファクタと選定された。一方、炉心損傷に至ったシーケンスのみに着目すると SRV の閉失敗に至る開閉回数が少ないもの、再循環ポンプからの漏洩発生時間の短いものが多い。SRV の閉失敗確率は作動要求時に作動したのちに閉まらない場合から推定されており、今回の解析で用いるような 1 イベント中に複数回駆動するような場合に適用できるか検討する必要があると考える。また、ポンプシールからの漏洩は過去の PRA の知見を採用しているが、それらも仮定に基づいている。このような故障メカニズムを模擬できればより現実的な動的 PRA に資することができると思われる。

付録 A. ESREL2020-PSAM15 概要

1. 会議の概要

第 30 回欧州における安全及び信頼性に関する会議および第 15 回確率論的安全評価および管理に関する国際会議の合同会議 (30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference:ESREL2020 PSAM15) が、2020 年 11 月 1 日から 5 日までの 5 日間オンラインで開催された。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。Plenary 講演に加えて、テーマ別に 93 のセッションに分かれて発表が行われた。特に、“Dynamic Reliability / Risk Assessment” のセッションで動的 PRA に関する発表が多く行われた。

2. 情報収集、動向調査

“Dynamic Reliability / Risk Assessment” のセッションにおいて、以下の動的 PRA に関する発表が行われた。

1. Machine Learning for Risk Ranking Automation in IRSN Level 2 PSA

Level 2 PSA のデータを処理するため、フランスの IRSN は 2017 年から効率的なツールを開発している。機械学習の決定木学習 (Decision tree learning) を用いて事故進展イベントツリーの放出カテゴリーを自動的に分類し、重要なシビアアクシデント事故シナリオを同定できる計算ツールである。新たな手法で得たリスク・ランキングの結果と従来の手動的プロセスで得た結果はほぼ一致しており、計算時間は従来の 8 日から 15 分に短縮できたとした。

2. Coping Time Analysis for Chromium coated Zircaloy for Station Blackout Scenario based on Dynamic Risk Assessment

米国のレンセラー工科大学は、動的 PRA 手法と RAVEN-RELAP5 を用いて、事故耐性燃料の被覆管材料 (Cr-coated-Zr) を利用することにより、炉心損傷の発生時間 (Coping time) を 250 秒から 2700 秒の程度で遅延できることを示した。動的 PRA により生成及び解析した事故シナリオの数は 45000 であった。

3. Exploring and Generating Thermal-Hydraulic Models for Dynamic PRA Using State-charts: The example of MAAP5

従来の熱水力コードの検証 (Verification) の効率が低下のため、米国のオハイオ州立大学は、ステートチャート (State-charts) ツール (YAKINDU StateChart Tools software,

SCT) を用いて、自動的に多数の MAAP コードの検証する入力を作成した。SCT は、ステートチャートの概念に基づいたリアクティブなイベント駆動型システムの仕様と開発のための統合モデリング環境を提供するツールである。この研究により、DPRA の実施において必要になる熱水力コードの検証の効率を向上することができる。

4. Simulation-based Level 2 Multi-Unit PRA Using RAVEN and a Simplified Thermal-Hydraulic Code

JAEA の鄭は、マルチユニットを有する発電所を対象とし、シミュレーションに基づく動的 PRA の研究を紹介した。具体的には、外部電源の喪失が起因した全交流電源喪失事故シナリオにおいて、プラントのリスク指標を計算した。機構論的なシミュレーションと確率論的な信頼性評価の統合により、各ユニット間の相関を考慮した上、多数のユニットで同時に進展する事故シナリオを模擬した。アイダホ国立研究所で開発した RAVEN コードを用いて多数のモデルカップリングし、多数の事故シケンスを生成してプラントの時間に依存する動的挙動を評価した。炉心損傷と早期大規模放出が発生した原子炉の数と頻度などの情報を含めてリスク指標を定量的に算出し、開発したシミュレーションに基づく動的 PRA 手法はマルチユニット・プラントへの適用性を確認した。

5. Dynamic PRA of Flooding-Initiated Accident Scenarios Using THALES2-RAPID

JAEA の久保は、RAPID にシビアアクシデント解析コード THALES2 と外部事象評価シミュレーションを結合させた連携解析について紹介した。外部事象として PWR プラントにおけるタービン建屋内での内部溢水を選定し、溢水進展評価にはベルヌーイ則に式を用いた。また、溢水源の流量及び緩和設備の没水基準に関する不確実さを考慮した。回復操作については、運転員による溢水源の隔離とポンプによる排水を仮定とともにモデル化した。結果として、隔離操作が排水と組み合わせることによってより有効になることが示された。

6. Enhancement of the Treatment of System Interactions in a Dynamic PRA Tool

JAEA の田中は、平成 31 年度事業において整備した、プラントシミュレータと機器の信頼性モデルとの間の相互作用を向上させた RAPID について発表を行った。この相互作用の向上により、プラント状態を反映した機器故障を考慮できるとともに、その故障の結果をプラントシミュレータに反映させることで、より現実的な事故進展解析を行うことが可能となる。例として、BWR プラントの SBO 事故における逃がし安全弁の熱的故障について解析を行った。熱的故障による弁からの漏洩割合にプラント状態を反映させることで炉心支持板の破損のタイミングや頻度が変化し、より現実に近い形でのリスク評価が可能になることを示した。本件に関し、質問、コメント等は得られなかった。

付録 B. RAPID の実行方法と入力ファイル

B1. RAPID（従来版）の実行方法と入力ファイル

これまで開発を行ってきた RAPID（従来版）は、各機能のモードを入力ファイルより指定して実行するようにしてきた。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。今年度、RAPID において

- データベースの構築
- クラスタリング機能の改良
- 代替統計モデルの構築

を行った。これらの機能を実行する際の入力ファイルの設定方法と入力例を以下に示す。

<データベースの構築>

表 B1-1 に入力する項目を示す。また、図 B1-1 に入力ファイルの記述例を示す。

表 B1-1. RAPID の入力ファイルに記述する項目 (データベースの構築)

キー	値
"Mode"	"DB" (データベース作成時は、DB:DataBase を指定)
"ResultDir"	Apros および THALES2 の出力結果が格納されているディレクトリを指定する。 例： "/home/data/ResultData_THALES2/THALES2/"
"Code"	"apros" or "thales" 解析に用いたコード名。
"RestartFileName"	(apros のみ) DB 作成に必要な読み込む SCL ファイル名。 "ChangedParameter" と "ChangedParameterType" で指定するパラメータを探しに行き、変更した値を DB に格納する。"BWR_SBO_Restart.scl" などとする。
"CommentForBranch"	(apros のみ) ["Set the thermal seizure failure"] などとし、リスタートの SCL ファイルの変更部分のコメントから検索するために利用する。
"ChangedParameter"	(apros のみ) ["DPRA_SRVSO_XA06"] などとし、"CommentForBranch" で指定したコメント直下で探すパラメータを指定する。
"ChangedParameterType"	(apros のみ) ["ANALOG_VALUE"] などとし、"ChangedParameter" とセットになったパラメータを指定する。
"BranchType"	(apros, thales 両方) ブランチのファイル名識別子。 ["srv_temperature"] や ["TIME", "TMS1"] などとする。
"PathNum"	(thales のみ) THALES 内部でリスタート時に変更するパス番号を指定する。
"runWplot"	(thales のみ) wplot を起動する場合、"Yes" を入れる。 PLOT01 は"ResultDir" で指定した各ケースのディレクトリに作成される。
"runWplotInp"	(thales のみ) wplot を起動する場合に利用するインプットファイルをフルパスで指定する。

```
{
  "Mode" : "DB",
  "CaseNum" : 120,
  "Code" : "apros",
  "ResultDir" : "/home/data/ResultData_Apros/Apros",
  "BranchType" : ["srv_temperature"],
  "RestartFileName" : "BWR_SBO_Restart.scl",
  "CommentForBranch" : ["Set the thermal seizure failure"],
  "ChangedParameter" : ["DPRA_SRVS0_XA06"],
  "ChangedParameterType" : ["ANALOG_VALUE"]
}
```

図 B1-1. 入力ファイルの記述例（データベースの構築）

<クラスタリング>

表 B1-2 に入力する項目を示す。また、図 B1-2 に入力ファイルの記述例を示す。

表 B1-2. RAPID の入力ファイルに記述する項目 (クラスタリング)

キー	値
“Mode”	“CL” (クラスタリング時は、CL:Clustering を指定)
“ResultDir”	Apros または THALES2 の DB のパスをフルパスで指定する。
“Code”	“apros” or ”thales” 解析に用いたコード名。
“DB”	実行に用いたい DB のファイルを指定。
“NumOfCl”	指定するクラスタ数。1 などとする。(BIC を計算する場合、初期の分割数)
“Parameter”	着目するパラメータ名。一つの場合、 ["HOTCH_XA86_ANALOG_VALUE"] と指定し、DTW 法において多変数を扱う場合で、複数ある場合は、 ["HOTCH_XA86_ANALOG_VALUE", "BP02_PU11_MIX_MASS_FLOW", "RPS_HRP_PI01_PM_OUTPUT_VALUE"], のようにする。
"case"	利用するケース。 [[0, 0], [1, 0], [2, 0]], などとし、[ケース番号、分岐番号] の書式にする。
“dtw_clustering”	時系列データのクラスタリングを行う場合は”Yes”にする
"check_corr"	"Yes"の場合、多変数の DTW 法のためのピアソンの積率相関関数を用いた係数を算出する。
"corr_coef_list"	多変数の DTW 法のためのピアソンの積率相関関数を計算する変数。 ["HOTCH_XA86_ANALOG_VALUE", "BP02_PU11_MIX_MASS_FLOW", "RPS_HRP_PI01_PM_OUTPUT_VALUE"], のようにする。
"corr_coef"	各時系列データの線形結合に用いる係数。[1.0]と指定すれば、多変数ではない。[1.0, 1.0, 1.0]と指定すると、

キー	値
	$Z = aX' + bP' + \dots$ における a,b,c の値となる。"Parameter" で指定した変数の順に対応している。
"dtw_n_jobs"	DTW 法の計算の並列数。4 などとする。
"dtw_n_init"	DTW 法の計算の際の、異なる初期値を用いた k-means の実行回数。1 などとする。
"dtw_max_iter_barycenter"	DTW 法で重心を求める際のイテレーション回数。100 などとする。
"downsampling"	間引きのオプション。間引く場合、“Yes”を入力する。結果をクラスタリングする際に、利用する拡張用であるが、現状 apros のみ間引きしなければクラスタリングをできないので、apros であれば自動的に適用される。(ただし始点と終点は間引かない)
EP_clustering	事象進展 (Event Progression) ベクトルを用いたクラスタリングを行う場合に”Yes”を指定。
“scaling_method”	標準化もしくは正規化を指定。標準化であれば”standardization”、正規化であれば”normalization”を指定。
“EP_clustering_method”	事象進展ベクトルを用いたクラスタリングを行う場合で、k-means もしくは GaussianMixture を指定。
“dimension_reduction”	事象進展クラスタリングの前に次元削減を行う場合に Yes を指定。
“dimension_reduction_method”	PCA を指定。
“dimension_num”	次元削減後の次元数を指定。
“EP_list”	DB 内で事象進展ベクトルとして用いたい列名のリスト。 例： ["@DCDEPLE", "@ACRECOV", "@FCTIME", "@FCRATIO", "@TSTEMP", "Time_CoreDamage", "Max_PCT", "get_timing", "RPS_HRP_PI01_PM_OUTPUT_VALUE", "REACTOR_AVE_NR1_LIQ_LEVEL", "SRV_COV15_VA12_MIX_MASS_FLOW", "SRV_COV01_VA12_MIX_MASS_FLOW"],

キー	値
	この例のように、リスト内に <code>get_timing</code> 要素を記述するとそれ以降の変数について、“ <code>get_timing_type</code> ”に示す方法で時系列データの値を DB から前処理で抽出してスカラー値を算出して利用する。
“ <code>get_timing_type</code> ”	時系列データに対し、指定した時間の抽出方法を指定 <ul style="list-style-type: none"> - <code>threshold</code> : ある時系列データの値が指定した値を越えるもしくは下回る時間を指定する。 - <code>Maxmin</code> : ある時系列データの最大値もしくは最小値の時間を指定する。 - <code>direct</code> : 入力ファイルより時間を直接指定
“ <code>get_timing_list</code> ”	<ul style="list-style-type: none"> - <code>get_timing_type</code> で <code>threshold</code> を指定した場合 <ul style="list-style-type: none"> - [“列名”, “<code>Variable > value</code>”, “閾値の時間”] - [“列名”, “<code>Variable < value</code>”, “閾値の時間”] - <code>get_timing_type</code> で <code>Maxmin</code> を指定した場合 <ul style="list-style-type: none"> - [“列名”, “<code>Max</code>”] - [“列名”, “<code>min</code>”] - <code>get_timing_type</code> で <code>direct</code> を指定した場合 <ul style="list-style-type: none"> - [“列名”, “<code>direct</code>”, “指定したい時間”]
“ <code>out_axis</code> ”	次元削減を行わない場合のクラスタリング結果で表示する 2 軸。[" <code>Time_CoreDamage</code> ", " <code>Max_PCT</code> "]などとする。
“ <code>cluster_num_estimate</code> ”	クラスタ数推定を行う場合は“ <code>Yes</code> ”を指定。
“ <code>BIC</code> ”	“ <code>Yes</code> ”とすることで、 <code>BIC</code> によるクラスタリングを実施する。
" <code>elbow_method</code> "	“ <code>Yes</code> ”とすることで、エルボー法の出力をする。
" <code>elbow_upper_cluster</code> "	エルボー法のクラスタリング上限を入力する
" <code>elbow_lower_cluster</code> "	エルボー法のクラスタリング下限を入力する
" <code>silhouette_method</code> "	“ <code>Yes</code> ”とすることで、シルエット法の入力をする。
" <code>silhouette_upper_cluster</code> "	シルエット法のクラスタリング上限を入力する
" <code>silhouette_lower_cluster</code> "	シルエット法のクラスタリング下限を入力する

```

{
  "Mode" : "CL",
  "ResultDir" : "ResultData_THALES2",
  "Code" : "thales",
  "NumOfCl" : 2,
  "Parameter" : ["CR-TCMX_1"],
  "DB" : "/home/data/rapid_DB/DB_thales/csv/final_DB.csv",
  "downsampling" : "Yes",
  "case" : [[0, 0], [0, 1], [1, 0], [1, 1], [1, 2], ..., [19, 2], [19, 3]],
  "clustering" : "Yes",
  "check_corr" : "No",
  "corr_coef" : [1.0],

  "dtw_n_jobs" : 4,
  "dtw_n_init" : 1,
  "dtw_max_iter_barycenter" : 100,

  # BIC
  "BIC" : "No",
  "BIC_upper_cluster" : 2,
  "BIC_lower_cluster" : 1,

  # PDS clustering
  "PDS_clustering" : "No",
  "PDS_clustering_method" : "GaussianMixture",

  # Dimension reduction
  "dimension_reduction" : "Yes",
  "dimension_reduction_method" : "PCA",
  "dimension_num" : 2,

  "PDS_list" : [ "@DCFAIL", "@DGREC", "@TDELAY", "@SRVGNUM",
                 "@SRVGOPAR", "@TSTEMP", "@TIMELOCA",
                 "Time_CoreDamage", "Max_PCT", "get_timing",
                 "TH-PSYS_1", "TH-ZMIX_1", "FL-MPTOTM_41", "FL-MPTOTM_42"],

  "get_timing_type" : "threshold", # threshold or Maxmin or direct
  "get_timing_list" : ["CR-TCMX_1", "Variable > value", 1200],
  "PDS_cluster_num" : 2,
  "out_axis" : ["Time_CoreDamage", "Max_PCT"],

  # Elbow method
  "elbow_method" : "No",
  "elbow_upper_cluster" : 2,
  "elbow_lower_cluster" : 1,

  # Silhouette method
  "silhouette_method" : "No",
  "silhouette_upper_cluster" : 3,
  "silhouette_lower_cluster" : 2
}

```

図 B1-2. 入力ファイルの記述例（クラスタリング。#以降はコメント。）

<代替統計モデルの構築>

表 B1-3 に入力する項目を示す。また、図 B1-3 に入力ファイルの記述例を示す。

表 B1-3. RAPID の入力ファイルに記述する項目（代替統計モデルの構築）

キー	値
“Mode”	“SMS” (クラスタリング時は、SMS:Surrogate Model for Statistics を指定)
“DB”	実行に用いたい DB のファイルを指定。
“ML_type”	“Classification”もしくは“Regression”を指定。 Classification 指定時の目的変数は炉心損傷 (CoreDamage)、Regression 指定時の目的変数は炉心損傷のタイミング (Time_CoreDamage)。
“ML_method”	ML_type で Classification 指定時には、“SVM”を指定。 Regression 指定時には、“SVR”を指定。
“SVM_param”	ML_method で SVM を指定時にリストで指定。リストの1番目はカーネル関数の文字列、2番目は正則化係数の値、3番目は γ の値もしくは指定の文字列を指定。
“SVR_param”	ML_method で SVR を指定時にリストで指定。リストの1番目はカーネル関数の文字列、2番目は正則化係数の値、3番目は不感度係数の値を指定。
“SMS_list”	DB 内で説明変数に用いたい変数のリストを指定。 “SMS_list” : [“@DCFAIL”, “@DGREC”]などとする。
“weight_list”	SMS_list で指定した変数の重みづけをリストで指定。 リスト内の要素は全て数値とし、SMS_list と同じサイズを指定する。

```
{
  "Mode" : "SMS",
  "DB" : "inp/DB/csv/final_DB.csv",
  "ML_type" : "Classification"
  "ML_method" : "SVM",
  "SVR_param" : ["rbf", 1, 0.1],
  "SMS_list" : ["@DCFAIL", "@DGREC"],
  "weight_list" : [1, 1]
}
```

図 B1-3. 入力ファイルの記述例（代替統計モデルの構築）

B2. RAPID フレームワークの入力ファイル

2.3 節で述べたように、汎用性、拡張性及び保守性を向上させるため、RAPID フレームワークを設計し、効率的な初期サンプラー、適合サンプラーと並列処理機能を構築した。実行方法やテスト結果については 2.3.3 節で示したが、テストで利用した RAPID フレームワークの入力例を図 B2-1 から図 B2-7 に示す。また、表 B2-1 に入力項目の概要を示す。

表 B2-1. RAPID フレームワークにおける入力項目の概要

設定項目	内容
“ComputationalDetails”	ユーザーが利用するモジュール名（Sampling, Printing, Executing と SurrogateBuilding）と計算の流れを設定。
“Sampling”	サンプラーを設定。表 2.3.3-1 に示したサンプラーが設定可能。
“Printing”	出力ファイルの設定。
“Executing”	実行する解析コードなどを設定。
“SurrogateBuilding”	代替統計モデル構築に関する内容を設定。

```

{
  "ComputationalDetails": {
    "Workflow": [
      "Sampling",
      "Printing"
    ],
    "NumberOfRuns": "100"
  },
  "Sampling": {
    "Sampler": "Monte Carlo",
    "RandomSeed": "20210107",
    "RandomParameters": {
      "ParameterA": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "4"
      },
      "ParameterB": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "4"
      },
      "ParameterC": {
        "Distribution": "TruncatedNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "UpperLimit": "12",
        "LowerLimit": "8"
      },
      "ParameterD": {
        "Distribution": "Bernoulli",
        "Probability": "0.2"
      },
      "ParameterE": {
        "Distribution": "LogNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      },
      "ParameterF": {
        "Distribution": "LogNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      },
      "ParameterG": {
        "Distribution": "Beta",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "ShapeA": "1",
        "ShapeB": "1"
      },
      "ParameterH": {
        "Distribution": "Exponential",
        "Location": "10",
        "Scale": "1"
      },
      "ParameterI": {
        "Distribution": "Gamma",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      },
      "ParameterJ": {
        "Distribution": "Loguniform",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "ShapeA": "1",
        "ShapeB": "2"
      },
      "ParameterK": {
        "Distribution": "Pareto",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      },
      "ParameterL": {
        "Distribution": "Binomial",
        "TestNumber": "100",
        "Probability": "0.1"
      },
      "ParameterM": {
        "Distribution": "Logistic",
        "Location": "10",
        "Scale": "1"
      },
      "ParameterN": {
        "Distribution": "Triangular",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "0.2"
      },
      "ParameterO": {
        "Distribution": "Geometric",
        "Probability": "0.2"
      }
    }
  },
  "Printing": {
    "FileType": "CSV",
    "PrintFileName": "test_results_monte_carlo_sampling.csv",
    "PrintParameters": [
      "ParameterA",
      "ParameterB",
      "ParameterC",
      "ParameterD",
      "ParameterE",
      "ParameterF",
      "ParameterG",
      "ParameterH",
      "ParameterI",
      "ParameterJ",
      "ParameterK",
      "ParameterL",
      "ParameterM",
      "ParameterN",
      "ParameterO"
    ]
  }
}

```

図 B2-1. RAPID フレームワークのモンテカルロサンプラーの入力例

```

{
  "ComputationalDetails": {
    "WorkFlow": [
      "Sampling",
      "Printing"
    ],
    "NumberOfRuns": "100"
  },
  "Sampling": {
    "Sampler": "Grid",
    "RandomSeed": "20210107",
    "RandomParameters": {
      "ParameterA": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "4"
      },
      "ParameterB": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "4"
      },
      "ParameterC": {
        "Distribution": "TruncatedNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "UpperLimit": "12",
        "LowerLimit": "8"
      },
      "ParameterD": {
        "Distribution": "LogNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      },
      "ParameterE": {
        "Distribution": "LogNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      },
      "ParameterF": {
        "Distribution": "Bernoulli",
        "Probability": "0.3"
      },
      "ParameterG": {
        "Distribution": "Geometric",
        "Probability": "0.1"
      }
    }
  },
  "Printing": {
    "FileType": "CSV",
    "PrintFileName": "test_results_grid_sampling.csv",
    "PrintParameters": [
      "ParameterA",
      "ParameterB",
      "ParameterC",
      "ParameterD",
      "ParameterE",
      "ParameterF",
      "ParameterG"
    ]
  }
}

```

図 B2-2. RAPID フレームワークの格子サンプラーの入力例

```

{
  "ComputationalDetails": {
    "Workflow": [
      "Sampling",
      "Printing"
    ],
    "NumberOfRuns": "10"
  },
  "Sampling": {
    "Sampler": "LHS",
    "LhsType": "classic",
    "RandomSeed": "20210107",
    "RandomParameters": {
      "ParameterA": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "4"
      },
      "ParameterB": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "4"
      },
      "ParameterC": {
        "Distribution": "TruncatedNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "UpperLimit": "12",
        "LowerLimit": "8"
      },
      "ParameterD": {
        "Distribution": "LogNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      },
      "ParameterE": {
        "Distribution": "LogNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      }
    }
  },
  "Printing": {
    "FileType": "CSV",
    "PrintFileName": "test_results_lhs_sampling.csv",
    "PrintParameters": [
      "ParameterA",
      "ParameterB",
      "ParameterC",
      "ParameterD",
      "ParameterE"
    ]
  }
}

```

図 B2-3. RAPID フレームワークの従来の LHS サンプラーの入力例

```

{
  "ComputationalDetails": {
    "WorkFlow": [
      "Sampling",
      "Printing"
    ],
    "NumberOfRuns": "100"
  },
  "Sampling": {
    "Sampler": "Quasi Monte Carlo",
    "LowDiscrepancySequenceType": "Halton",
    "RandomSeed": "20210107",
    "RandomParameters": {
      "ParameterA": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "4"
      },
      "ParameterB": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "4"
      },
      "ParameterC": {
        "Distribution": "TruncatedNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "UpperLimit": "12",
        "LowerLimit": "8"
      },
      "ParameterD": {
        "Distribution": "LogNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      },
      "ParameterE": {
        "Distribution": "LogNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      }
    }
  },
  "Printing": {
    "FileType": "CSV",
    "PrintFileName": "test_results_quasi_monte_carlo_sampling.csv",
    "PrintParameters": [
      "ParameterA",
      "ParameterB",
      "ParameterC",
      "ParameterD",
      "ParameterE"
    ]
  }
}

```

図 B2-4. RAPID の Halton シーケンスを用いた準モンテカルロサンプラーの入力例

```

{
  "ComputationalDetails": {
    "WorkFlow": [
      "Sampling",
      "Printing"
    ],
    "NumberOfRuns": "100"
  },
  "Sampling": {
    "Sampler": "Correlated Monte Carlo",
    "RandomSeed": "20210113",
    "RandomParameters": {
      "ParameterA": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "4"
      },
      "ParameterB": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "4"
      },
      "ParameterC": {
        "Distribution": "TruncatedNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "UpperLimit": "12",
        "LowerLimit": "8"
      },
      "ParameterD": {
        "Distribution": "LogNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      },
      "ParameterE": {
        "Distribution": "LogNormal",
        "Location": "10",
        "Scale": "1",
        "Shape": "1"
      }
    },
    "TargetRankCorrelationMatrix": "test_target_rank_correlation_matrix.csv"
  },
  "Printing": {
    "FileType": "CSV",
    "PrintFileName": "test_results_correlated_monte_carlo_sampling.csv",
    "PrintParameters": [
      "ParameterA",
      "ParameterB",
      "ParameterC",
      "ParameterD",
      "ParameterE"
    ]
  }
}

```

図 B2-5. RAPID フレームワークの相関を考慮したモンテカルロサンプラーの入力例

```

{
  "ComputationalDetails": {
    "Workflow": {
      "Sampling",
      "Executing",
      "Printing"
    },
    "NumberOfRuns": "200",
    "Processing": {
      "Type": "ParallelProcessing",
      "NumberOfParallelProcesses": "3"
    }
  },
  "Sampling": {
    "Sampler": "Monte Carlo",
    "RandomSeed": "20210107",
    "RandomParameters": {
      "@DGFALL": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "8E3"
      },
      "@ACRECOV": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "1E4"
      }
    }
  },
  "Printing": {
    "FileType": "CSV",
    "PrintFileName": "test_results_thales2_parallel_execution_two_para_outputs.csv",
    "PrintParameters": [
      "TIME",
      "CR-TCMX_1"
    ]
  },
  "Executing": {
    "CodeName": "Thales2",
    "CodeLocation": "/home/zheng/tests/efficient_sampling/external_models/thales2_executables/thales2",
    "PlotCodeLocation": "/home/zheng/tests/efficient_sampling/external_models/thales2_executables/thalesPlot",
    "TemplateInputFolder": "/home/zheng/tests/efficient_sampling/external_models/thales2_executables/input_template/",
    "TemplateInputFile": "tbdwf_bw4mkI_nokiche_SI.inp",
    "WorkingDir": "./Thales2_parallel_simulations",
    "OutputFileName": "tbdwf_bw4mkI.out",
    "ResultFile": "PLOT01",
    "ResultParameter": {
      "Time": "TIME",
      "CoreDamage": "CR-TCMX_1"
    },
    "Database": "test_results_thales2_execution_outputs.csv"
  }
}

```

図 B2-6. 並列的な THALES2 の計算の RAPID フレームワークの入力例

```

{
  "ComputationalDetails": {
    "Workflow": [
      "Sampling",
      "Executing",
      "SurrogateBuilding",
      "Printing"
    ],
    "Processing": {
      "Type": "SequentialProcessing"
    }
  },
  "Sampling": {
    "Sampler": "Adaptive",
    "RandomSeed": "20210208",
    "MaxNumberOfRuns": "200",
    "RandomParameters": {
      "@ACRECOV": {
        "Distribution": "Uniform",
        "Location": "0",
        "Scale": "1E4"
      }
    }
  },
  "Printing": {
    "FileType": "CSV",
    "PrintFileName": "test_results_adaptive_sampling.csv",
    "PrintParameters": [
      "@ACRECOV"
    ]
  },
  "Executing": {
    "CodeName": "Thales2",
    "CodeLocation": "/home/zheng/tests/efficient_sampling/external_models/thales2_executables/thales2",
    "PlotCodeLocation": "/home/zheng/tests/efficient_sampling/external_models/thales2_executables/thalesPlot",
    "TemplateInputFolder": "/home/zheng/tests/efficient_sampling/external_models/thales2_executables/input_template/",
    "TemplateInputFile": "tbdwf_bw4mkI_nokiche_SI.inp",
    "WorkingDir": "./test_results_adaptive_sampling_svm",
    "OutputFileName": "tbdwf_bw4mkI.out",
    "ResultFile": "PLOT01",
    "ResultParameter": {
      "CoreDamage": "CR-TCMX_1"
    },
    "Database": "test_results_thales2_execution_adaptive_sampling_outputs.csv"
  },
  "SurrogateBuilding": {
    "Method": "svm",
    "Predictor": "svr",
    "Kernel": "poly",
    "Parameters": {
      "C": "1e3",
      "degree": "2"
    }
  }
}

```

図 B2-7. RAPID フレームワークの適合サンプラーの入力例

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 M. Anaya. Clean Code in Python: Refactor your legacy code base. Packt Publishing (2018)
- 4 R.C. Martin. Clean Architecture: A Craftsman’s Guide to Software Structure and Design. Pearson Education, Inc. (2018)
- 5 tslearn’s documentation, <https://tslearn.readthedocs.io/en/stable/>
- 6 F. Petitjean, et al., “A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering”, Pattern Recognition, vol.44, pp.678-693 (2011)
- 7 scikit-learn, <https://scikit-learn.org/stable/>
- 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 Elbolw method, [https://en.wikipedia.org/wiki/Elbow_method_\(clustering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Elbow_method_(clustering))
- 11 P. J. Rousseeuw, “Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis”, Journal of Computational and Applied Mathematics, vol.20, pp.53-65 (1987)
- 12 E. Zio, “The future of risk assessment”, Reliability Engineering and System Safety vol.177, pp.176-190 (2018)
- 13 P. Henneaux and J.C. Maun, “Numerical techniques for dynamic probabilistic risk assessment of cascading outages”, 2016 IEEE Power & Energy Society (PES) General meeting: Cascading Failure Working Group of IEEE PES CAMS (2016)
- 14 J. LaChance, et al., “Discrete dynamic probabilistic risk assessment model development and application”, SAND2012-9346. Sandia National Laboratories (2012)
- 15 Z. Jankovsky, et al., “How to ADAPT”, SAND2018-6660. Sandia National Laboratories (2018)
- 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 C. Rabiti, et al. RAVEN User Manual, Revision 7. INL/EXT-15-34123, Idaho National Laboratory (2020)
- 18 B.M. Adams, et al., Dakota User’s Manual, Version 6.13. SAND2020-12495, Sandia National Laboratories (2020)
- 19 B. Peherstorfer, et al., “Survey of multifidelity methods in uncertainty propagation, inference, and optimization”, SIAM review 60(3): 550-591 (2018)
- 20 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)
- 21 Scikit-Optimize, <https://scikit-optimize.github.io/stable/>, Version 0.8.1 (2020)
- 22 G. Damblin, et al., “Numerical studies of space filling designs: optimization of Latin Hypercube Samples and subprojection properties”, Journal of Simulation, vol.7, pp.276-289 (2013)
- 23 手塚集、超一様分布列の数理、岩波講座「統計科学のフロンティア、第 11 巻：新しい計算手法」(2003)

- ²⁴ K. Kubo, et al., “A Comparative study of sampling techniques for dynamic probabilistic risk assessment of nuclear power plants”, In: Proceedings of SNA + MC 2020. Chiba, Japan (2020)
- ²⁵ R. L. Iman, et al., “A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variables”, *Communications in Statistics - Simulation and Computation* 11(3):311–334 (1982)
- ²⁶ 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)
- ²⁷ 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)
- ²⁸ 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)
- ²⁹ 原子力安全基盤機構, “JNES における PSA 手法の標準化 = 出力運転時内の事象レベル 1PSA 手法 = (別冊 1) 出力運転時内の事象レベル 1PSA 標準報告書 = ドライ型 4 ループ PWR プラント =”, JNES/SA07-040, 4 月, 平成 19 年
- ³⁰ C.M. Bishop. *Pattern recognition and machine learning*. Springer (2006)