

# 事故シナリオの定量的安全評価方法の開発

## - シナリオジェネレータの開発研究 -

Development on Quantitative Safety Analysis Method of Accident Scenario  
— The Automatic Scenario Generator Development for Event Sequence  
Construction of Accident —

小島 重雄 (Shigeo Kojima)\* 尾上 彰 (Akira Onoue)†  
河合 勝則 (Katsunori Kawai)‡

**要約** 平成5年から炉心損傷以外の事故シナリオの評価に関する研究を開始し、その解析方法の研究を実施してきている。本研究では従来の炉心損傷を目標としたPSA（確率論的安全評価）ではなく、より詳細な事故シナリオが予想される炉心損傷以外のシナリオ解析のため、自動的に事故の流れが解析できる方法により、事故シナリオ自動作成のアルゴリズムとしてAIシミュレーションにより事故シナリオを発生する基本構造を開発した。また事故シナリオを模擬するために、機器の故障についての影響の推定、ヒューマンエラーのシナリオ発生メカニズムのモデル化、想定した事故シナリオの確率的、定量的評価の実施等の一連の評価方法を自動化した。

**キーワード** PSA, 事故シナリオ, AI, シミュレーション, ヒューマンエラー

**Abstract** This study intends to develop a more sophisticated tool that will advance the current event tree method used in all PSA, and to focus on non-catastrophic events, specifically a non-core melt sequence scenario not included in an ordinary PSA. In the non-catastrophic event PSA, it is necessary to consider various end states and failure combinations for the purpose of multiple scenario construction. Therefore it is anticipated that an analysis work should be reduced and automated method and tool is required. A scenario generator that can automatically handle scenario construction logic and generate the enormous size of sequences logically identified by state-of-the-art methodology was developed. To fulfill the scenario generation as a technical tool, a simulation model associated with AI technique and graphical interface, was introduced. The AI simulation model in this study was verified for the feasibility of its capability to evaluate actual systems. In this feasibility study, a spurious SI signal was selected to test the model's applicability. As a result, the basic capability of the scenario generator could be demonstrated and important scenarios were generated. The human interface with a system and its operation, as well as time dependent factors and their quantification in scenario modeling, was added utilizing human scenario generator concept. Then the feasibility of an improved scenario generator was tested for actual use. Automatic scenario generation with a certain level of credibility, was achieved by this study.

**Keywords** PSA, accident scenario, AI, simulation, human error

## 1. はじめに

従来の確率論的安全評価では、原子力プラントの炉心損傷に至る確率の評価が主体である。炉心損傷に至らない事故シナリオ、即ち非破局的事象に関する確率評価はほとんど実施されていない。非破局的

事象については、従来のPSAで用いられている単純なET (event tree), FT (fault tree) による解析法でもある程度の確率評価は可能であるが、非破局的事象の特徴である解析対象設備の多様さによるシナリオの数の多さ、シナリオの複雑さ、事故対応処置によるシナリオの時間的推移への割り込み、ヒュー

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所  
現 コンピュータソフト開発(株) 特別プロジェクト  
† (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

‡ 三菱重工(株) 原子力技術センター

ーマンファクタの問題、シナリオからの回復等、高確率領域特有の複雑さがあり、従来のPSA解析評価法以上に事故シナリオの作成が困難である。本来、確率的にリスクを評価するには、全確率領域における事象シナリオを検討することが必要であり、炉心損傷のような低確率領域の事故シナリオだけでなく、中確率領域、高確率領域を含めた総合的な評価により完結するのである。しかしながら、非破局的な事象については、従来ほとんど研究が行われていない。本研究の目的は、このような複雑な事故の状況をモデル化する方法を確立するため、炉心損傷のような破局的な影響をもたらす確率的に非常に低い事故シナリオではなく、実際に発生が予想される高確率領域の事故シナリオを解析するための有効な方法を開発し、原子力発電所の信頼性を向上することである。

## 2. 解析アプローチ

### 2.1 起因事象の分類

原子力プラントの破局的な事象としては、TMI事故、チェルノブイリ事故のような炉心損傷事故が現

実に発生しており、炉心損傷を対象としたPSAの重要性がクローズアップされている。しかしながら、炉心損傷には至らないが、事故の発生がより高い頻度で発生すると思われる事故シナリオについては、明確な事故分類がなされていないのが現状である。しかし、事故分類の中で、設計基準事故を逸脱するような事故の取り扱いについて分類、言及している国もある。また、IAEAの事故評価尺度(INES)に定義された事故のクラス分けがあり、実際に発生した事故の厳しさの分類に使用されている。本研究では、より広い事故形態を評価できる様に表1に示した非破局的な事象の起因事象についての3クラス分類を採用する。

本論文では、クラス1に属する起因事象による事故シナリオとして、炉心損傷に至らないような炉心に係わる多重故障を対象にしている。この領域の事故シナリオについては、従来起因事象発生後の設備の多重故障を対象にしてPSAで解析が実施された例もある。クラス2に属する事故シナリオは、炉心以外の燃料、廃棄物からの放射性物質の放出を想定しており、PSAはほとんどなされていない領域である。クラス3は一般に外部事象に分類されるような起因事象から派生する事故シナリオである。

表1 起因事象の分類

クラス	クラス	クラス
設置許可申請書安全評価審査指針に記載されている事象+多重故障 (制御系等の多重故障) 設置許可申請書安全評価審査指針に記載されている事象の重ね合せ (LOCA+SGTR等) 設置許可申請書安全評価審査指針に記載されていない事象 (計器用空気源の喪失等) 格納容器の汚染に係わる起因事象(格納容器スプレイの誤動作等) 多重運転員操作失敗に係わる起因事象又は運転員誤介入に係わる起因事象 その他炉心に係わる事象	使用済燃料貯蔵プールに係わる起因事象 (除熱喪失、冷却材喪失等) 使用済燃料輸送容器に係わる起因事象(破損、除熱喪失、冷却材喪失等) 燃料取扱作業に係わる起因事象(落下等) 気体廃棄物貯蔵タンクに係わる起因事象 (タンク破損、漏洩等) 液体廃棄物貯蔵タンクに係わる起因事象 (タンク破損、漏洩等) その他炉心以外からの放射性物質の放出に係わる事象	水素設備に係わる起因事象(爆発、火災、漏洩等) 窒素設備に係わる起因事象(漏洩等) 高圧電源設備に係わる起因事象(感電等) 加速物質に係わる起因事象(回転機器の破損、高圧液体の噴出等) 高温設備に係わる起因事象(破損、接触等) 電磁波等に係わる起因事象 その他クラス1、クラス2に属さない事象

## 2.2 評価フレームワーク

本研究では以下の評価フレームワークに則って事故シナリオを作成する機構を検討した。

- A) 起回事象の発生
- B) A) から予想される後続事象の発生
- C) 目標とする最終状態に至るかかどうかというシナリオの論理的構成のチェック
- D) シナリオの定量化

A) の「起回事象の発生」については、評価対象とする設備の構成機器それぞれに故障を想定することにより実現する。

B) の「A) から予想される後続事象の発生」については、起回事象から次の事象に移る様々な要因を考慮し、考えられる全てのシナリオの展開を推定

する必要がある。シナリオの展開は、クラス Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ の各非破局的事象を分析することにより以下のフレームワークに従って構成される。

- (ア) 流体系，計装制御系，電源系の設備構成を把握し，構成機器の故障による影響を考慮する。
- (イ) 流体系，計装制御系においては，圧力・温度・水位等の物理パラメータを考慮する。
- (ウ) 機器の機能が部分的に喪失することを考慮する。
- (エ) 非破局的事象の成立条件（安全注入発信の条件など）を定義できる必要がある。
- (オ) 運転員操作及び保守・操作に係わるヒューマンエラーを考慮する。
- (カ) 設備の過渡的な状態遷移を考慮する。
- (キ) 故障していた機器が正常状態に復帰するとい

表2 クラス Ⅰ の非破局的事象の例

非破局的事象	シナリオの概要	特徴
水素設備に係わる事象	操作ミス，機器の損傷により水素ガスの漏出，及び，漏出後の発火・爆発，及び，発火・爆発による機器の損傷を起因とする更に大規模な事故へ発展。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ヒューマンエラーの考慮が必要。</li> <li>・ 配置的な要因等多種多様なシナリオが考えられる。</li> <li>・ 運転に係わる判断・操作を考慮する。</li> <li>・ 事象の進展に応じた時間的な要因を考慮する。</li> <li>・ 保守・試験を考慮する。</li> </ul>
窒素設備に係わる事象	操作ミス，機器の損傷により窒素ガスの漏出が発生し、人体に影響を与える。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ヒューマンエラーの考慮が必要。</li> <li>・ 配置的な要因等多種多様なシナリオが考えられる。</li> <li>・ 運転に係わる判断・操作を考慮する。</li> <li>・ 事象の進展に応じた時間的な要因を考慮する。</li> <li>・ 保守・試験を考慮する。</li> </ul>
高圧電源設備に係わる事象	操作ミス，機器の損傷，設計ミス等により，高圧電流が想定以外の機器に流れ，機器の損傷、発火，及び，機器の損傷を起因とする更に大規模な事故へ発展。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ヒューマンエラーの考慮が必要。</li> <li>・ 配置的な要因等多種多様なシナリオが考えられる。</li> <li>・ 運転に係わる判断・操作を考慮する。</li> <li>・ 事象の進展に応じた時間的な要因を考慮する。</li> <li>・ 保守・試験を考慮する。</li> </ul>
加速物質に係わる事象	回転機器の異常により発生するミサイルが発生し，機器・人体・プラントの健全性を喪失する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ヒューマンエラーの考慮が必要。</li> <li>・ 配置的な要因等多種多様なシナリオが考えられる。</li> <li>・ 保守・試験を考慮する。</li> </ul>
高温設備に係わる事象	操作ミス，機器の損傷，設計ミス等により，高温流体が噴出し他設備の機能喪失，人体の損傷を招く。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ヒューマンエラーの考慮が必要。</li> <li>・ 配置的な要因等多種多様なシナリオが考えられる。</li> <li>・ 保守・試験を考慮する。</li> </ul>

う状態変化を考慮する。

- (ク) 事故シナリオが様々な設備の状態から開始されることを考慮する。
- (ケ) 空間的に異常が伝搬する経路を考慮する。
- (コ) プロセスフロー図等の図面情報で表現できない知識を扱う必要がある。

C) の「目標とする最終状態に至るかかどうかというシナリオの論理的構成のチェック」は、B) で生成したシナリオによって定義される設備の状態が、目標とする最終状態に至る条件に合致するかどうか判定することによる。

D) の「シナリオの定量化」については、C) の条件に当てはまるシナリオを構成する機器の故障の頻度、点検の頻度などを定量的に定義することにより算出する。

このようなフレームワークによりプラントレベルの評価を行うと、各非破局的事象に対して膨大な事故シナリオを対象にすることになり、人間が直接実行することは困難である。本研究では、説明したフレームワークに従い、計算機の機能を用いて自動的にシナリオの生成を行うシナリオジェネレータを開発することにした。

表 2 にクラス の事象の例を示す。

### 3. シナリオの自動生成

シナリオを自動的に生成するシナリオジェネレータを実現するため、前章に示すフレームワークに即した AI シミュレーションを開発した。

#### 3.1 AI シミュレーションとは

現在使われている安全解析手法即ち「チェックリスト法」、「What if 法」、「HAZOP」、「FMEA」、「MLD」、「HBTf」、「PET」、「ESD」、「ダイグラフ法」、「TLFT」及び「シミュレーション法」と上述のシナリオ生成の基本方針とを比較検討した結果、事故シナリオの自動生成に最も適切な手法として、シミュレーション法を選定した。但し、このシミュレーション法は、対象とする設備に関する物理現象を定量的に再現しようとする計算に非常に時間がかかるという問題点がある。そのため、目標とする

異常事象に至る各設備の物理パラメータの変化を「流量高」、「温度低」といった定性的な形式で表現し、これを系統設備に応じて伝播させるという定性的シミュレーションを実施することによりシナリオを生成させると共に計算時間の短縮を図る。更に、目標とする異常事象に至る機器故障・運転操作をシミュレーションの結果から自動的に導き出すために必要な設備・運転・保全に関する知識を計算機に組み込むため AI 技術を利用する。この両方の利点を活かし、AI のアルゴリズムで定性シミュレーションを実施することにした。このように、シナリオ自動生成のために、AI 技術とシミュレーション技術を密接に関連づけた手法を開発し、AI シミュレーションと名付けた。AI シミュレーションの特徴を明確にするため、非破局事象のシナリオ生成に従来から原子力発電設備の PSA に用いられているフォールトツリー手法とイベントツリー手法の適用を考えてみる。フォールトツリー手法では、運転操作等による設備の状態の推移を考慮することが困難である。また、イベントツリー手法では、非破局的事象を評価するためには膨大な量の ET が必要となり、作業量の観点から非現実的である。AI シミュレーションによれば状態の推移を追跡することが可能であると共に計算機の能力を利用して自動的にシナリオを生成することが可能である。

尚、AI を利用するため、AI 構築支援ツール「G2」を採用した。AI シミュレーションの機能及びシナリオ生成の考え方を以下に説明する。

##### 3.1.1 シナリオの生成

AI シミュレーション機能を用いて、機器の故障が異常事象即ち、安全注入信号発信に至るシナリオを生成する手順を図 1 を用いて説明する。

プロセスフロー図、インターロック線図などの入力図に表現される構成機器をランダムに自動選択し、異常を発生させる。

機器異常により発生した信号が下流側の機器に伝わる。

誤信号により機器が動作し、スプレイ流量が増加する。

流量増加時、機器の異常によるパラメータの変化に関する情報が下流側の設備に伝搬する。

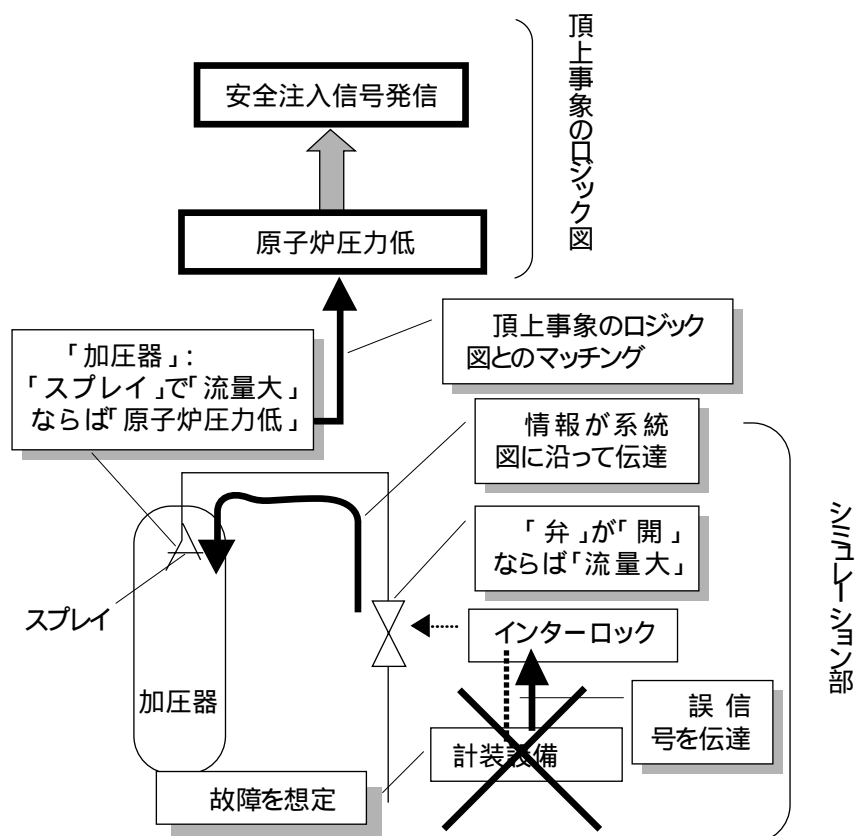


図1 シナリオ生成の手順

上流側の設備の流量増加により加圧器スプレイ流量が増加する。スプレイ流量増加により「原子炉圧力低」を発生させる。

目標とする事象(ここでは「安全注入信号発信」の発生条件である「原子炉圧力低」と加圧器で発生した「原子炉圧力低」という事象が一致し、「安全注入信号発信」を認識する。

### 3.1.2 シナリオジェネレータ

AIシミュレーション技術を核として非破局的事象が生成するシナリオジェネレータを作成したのであるが、このジェネレータはシナリオ生成という目的だけでなく、日々のプラント管理活動において非破局的事象に関する重要なシナリオの選定や重要な機器の特定等にも活用することが考えられる。このシナリオジェネレータは安全性評価・信頼性評価の専門家ではないプラント要員や設計者が使用することも意識して作成されている。

シナリオジェネレータに必要な機能は以下の通りである。

- ユーザーが入力した系統情報に基づいて、非破局的事象を発生するシナリオを自動的に生成する。
- 系統情報の入力を容易にするグラフィカルユーザーインターフェースを具備する。
- 非破局的事象を特定する定義情報が変更可能であって任意の非破局的事象に対応できる。
- 事故シナリオを構成する個々の機器の異常発生確率を入力データとすることにより事故シナリオ発生確率を定量化できる。

次にシナリオジェネレータの作成にあたり、これらの要求機能の実現方法について説明する。

ユーザーが入力した系統情報即ち、プロセスフロー図、インターロック線図等に基づいて、非破局的事象を発生するシナリオを自動的に生成する。

【実現方法】この機能は前項にて説明したAIシ

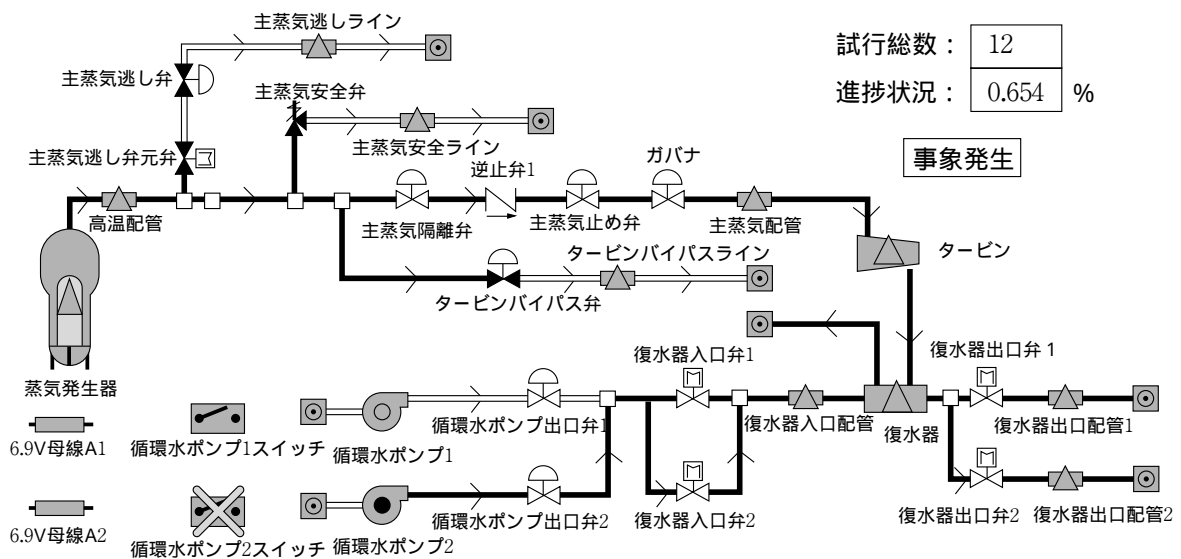


図2 系統図の入力の例

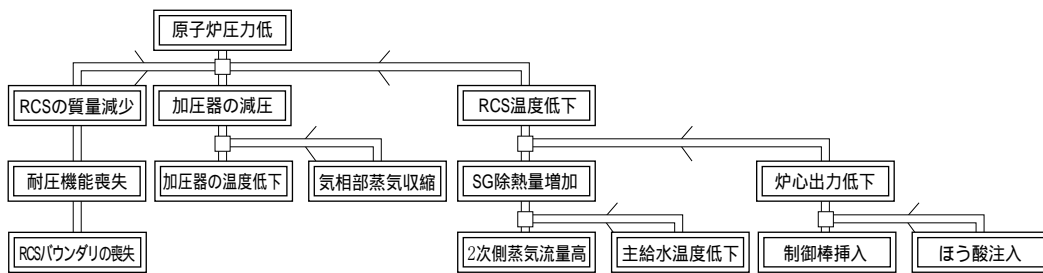


図3 非破局的現象発生に関する条件の例

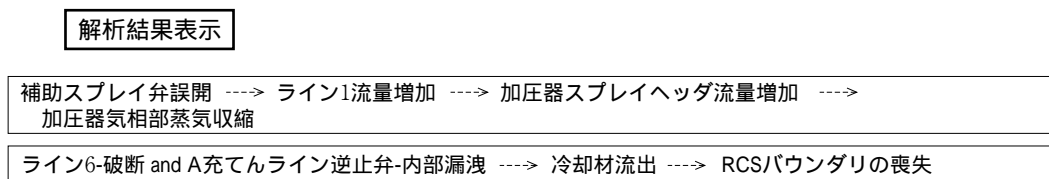


図4 自動的に生成したシナリオの例

ミュレーション技術を用いる。

系統情報の入力容易にするグラフィックユーザーインターフェースを具備する。

【実現方法】シナリオ生成の入力データとなる系統情報は非常に重要であり、その入力はシナリオ生成の出発点である。入力をいかに簡単化

するかが、シナリオ生成のための労力削減の重要な条件となる。AIシミュレーションの作成に用いる「G2」は優れたグラフィカルユーザーインターフェースを備えており、予め用意された機器のアイコンを画面上に貼りつけ、各機器の間を接続することにより、流体系統図、イン

ターロック線図等を入力することができる．系統図の入力の例を図2に示す．

非破局的事象を特定する定義情報を変更可能とし、任意の非破局的事象に対応できるものとした．

【実現方法】非破局的事象は表1に示したようにさまざまな事象があり、それぞれ発生する条件即ち、機器の異常やシステムのパラメータの変化等は異なる．そこで、目標とする異常事象が発生する条件を論理的に表現し、系統図に基づくAIシミュレーションから得られた機器の状態・システムのパラメータの変化がその条件に当てはまるシナリオを生成することにより多様な非破局的事象に対応できるようにした．非破局的事象が発生する条件の例を図3に示す．

事故シナリオを構成する個々の機器の異常発生確率を入力データとして定義することにより事故シナリオ発生確率を定量化できる．

【実現方法】生成したシナリオを図4に示す．得られたシナリオは「機器の故障」、「機器の保全」、「機器の故障に起因する状態変化」、「運転員の操作」等からなっている．シナリオの発生確率の計算は、シナリオの構成要素をミニマルカットセットと考え、フォールトツリー手法と同様に計算した．尚、定量化において、運転要領書等に定められた「運転員の操作」のような必然的に実施される操作については発生確率を1.0と想定し、「機器の故障」等の発生確率が小さいものについては既存の信頼性評価用のデータを利用した．

## 3.2 ヒューマンエラーのモデル化

シナリオ生成に関し、重要な要因としてヒューマンエラーがある．人的な要因を非破局的事象の発生シナリオの中に含ませる方法について検討した．その結果、従来様々な操作の失敗にどのように人間が係わるかに着目されて来たヒューマンエラー解析の枠を越えて操作失敗とともに異常が発生した後の正しい運転操作、回復操作をシナリオの中に自動的に組み込むヒューマンエラーシナリオジェネレータを開発した．

### 3.2.1 従来のヒューマンエラー解析手法の採用

非破局的事象の発生シナリオ自動生成に係わるヒューマンエラー解析は以下の2点が重要と考えられる．

- a. 非破局的事象に至るシナリオの構成要素としてどのようなヒューマンエラーを考慮するか．
  - b. ヒューマンエラーの発生確率はどの程度か．
- これらの着目点毎に既存の解析手法の調査結果を以下に示す．

シナリオ構成要素としてのヒューマンエラー

非破局的事象発生シナリオに含まれるさまざまな人的要因には、「正しい運転操作」、「故障した機器の回復操作」、「運転操作の失敗」、「保守・点検後に放置された誤操作」などが考えられる．これらの人的要因が機器の異常及び異常に伴う設備の状態の変化に応じて、シナリオの展開方向を決定する重要な要因にもなり得る．従来の代表的なヒューマンエラー解析手法としてTHERP, SRK, HAZOP, GEMS, PHECA, Murphy diagram, CADA, HRMS, CES等がある．しかし、いずれの方法も解析者が規定したヒューマンエラーに影響を与える要因の分析や発生確率を計算することにとどまっておき、運転員が様々な局面で非破局的事象発生シナリオにどのように係わるかを解析によって規定することは出来ない．また、シナリオに含まれるヒューマンエラーを自動的に生成するという機能は備えていない．

本機能は、シナリオジェネレータ開発にあたり、非常に重要であると考えられる．

ヒューマンエラーの発生確率の評価

ヒューマンエラーの発生確率の算出は、THERPをはじめ、人間の行動を要素的に分解する方法が主流を占めてきたが、近年Cognitive Systems Engineering<sup>(1)</sup>の視点に基づく方法が提唱されている．ヒューマンエラーの発生確率を定量的に求めるこの方法のアルゴリズムを上記のシナリオジェネレータに適用することは可能と考えられる．しかし、シナリオジェネレータは非破局的事象のシナリオを自動的に生成することを目的としており、得られたシナリオの発生確率を直ちに算出できることが望ましい．従って、ヒューマンエラーの発生確率の計算はシナリオが得られた時点で自動的に行われること

が必要であるが、ヒューマンエラーの分析を自動的に実施する方法はまだ開発されていない。現時点では、予め計算したヒューマンエラーの結果をデータベースとして蓄えておき、これを使ってシナリオの定量化を行い、重要なシナリオに含まれるヒューマンエラーについてのみ詳細に分析する方法が妥当と考えられる。

### 3.2.2 ヒューマンエラーシナリオジェネレータ

非破局的事象に至るシナリオに関係する人的要因として「正しい運転操作」、「運転操作の失敗」、「故障した機器の回復操作」及び「保守・点検後に放置された誤操作」をシナリオに組み込む方針を以下に説明する。

#### (1) 正しい運転操作

設備のパラメータの変化、機器の異常停止などのトリガーに応じ、運転員は運転手順書等に従って操作する。運転員操作により設備は新しい状態に移行するため、運転操作を考慮することは非破局的事象のシナリオを求めるに当たり必須である。シナリオジェネレータには運転手順書等に記載されている正しい運転操作を定義する論理式を組み込んである。図5に示す例では、条件（循環水ポンプ1停止）と条件（循環水ポンプ2停止）が同時に成立することをANDゲートで表現し、その結果として「ガバナ 閉」操作が実行されることを表している。この論理式は後述の「ヒューマンエラーを含むシナリオの例」に用いている。シナリオジェネレータは運転員の操作によって発生した設備の状態変化を認識し、設備の状態を次の段階に移行させる。

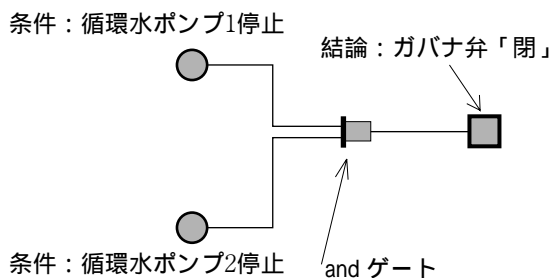


図5 運転操作を定義する論理式の例

#### (2) 運転操作の失敗

運転手順書等に規定されている運転操作に失敗する場合には、シナリオジェネレータでは論理式で定義された正しい運転操作を不成立とし、それを設備の状態遷移に反映させるのである。即ち、シナリオジェネレータでは、誤った運転操作を機器の1つの故障モードとしてシナリオの展開を次の段階に進める。

#### (3) 故障した機器の回復操作

これは異常の発生によって機能喪失していた機器を正常に戻す操作を意味する。回復操作により、機器は運転可能になるとともに、機器の運転状態もしくは待機状態に関するインターロックにも影響を与える。シナリオジェネレータでは、運転操作・インターロック・流体的な状態の伝搬事象が収束した段階で故障していた機器を自動的に正常状態に復帰させるシナリオを発生させる。

#### (4) 保守・点検後に放置された誤操作

これは点検等の際、運転員が機器を間違った待機状態に放置することを意味する。非破局的事象の起因事象、シナリオ進展過程において期待される収束動作失敗などの原因になる。シナリオジェネレータでは、機器の故障と同様に扱い、シナリオに組み込む。

### 3.2.3 適用事例

ヒューマンエラーを含むシナリオの例を図6に示す。まず、この例の異常事象の状況を説明する。

- 循環水ポンプに給電する電源が故障し、循環水ポンプが停止したため、運転員が主蒸気流量を絞る操作を行ったが、弁を閉止する速度が速すぎたために、タービン第一段後圧力低によるタービンバイパス弁開信号が発信した。
- タービンバイパス弁はタービン第一段後圧力低で開となるインターロックがあるが、開となるには循環水ポンプが運転中である必要があるため、閉状態を維持していた。
- その後、運転員が循環水ポンプの電源を復帰させたため、タービンバイパス弁が開となった。
- まだ、主蒸気ラインが完全に閉止していなかったため、主蒸気ラインとタービンバイパスラインの両方に蒸気が流れ「主蒸気流量高」という



信号が発信し、安全系の設備が起動する。

このシナリオでは、「ガバナ弁の閉操作」と「電源の復帰」という2種類の人的要因を考慮している。尚、この評価例は仮想的な設備に対し、適用した

ものであり、実際の国内の原子力発電所ではこのような事象は発生しない。

### 3.3 フィージビリティの検討

シナリオジェネレータによる自動シナリオ発生システムの機能を確認するためプロトタイプシステムを開発し、フィージビリティ解析を実施した。プロトタイプシステムは、非破局的事象のうち、分析事例が多い「安全注入信号発信」に至るシナリオを生成することを目的とした。プロトタイプシステムの作成は、「安全注入信号発信」に至る過去の事例を調査し、シナリオ生成に必要な知識を具体化し、計算機ツールに組み込むという手順で行った。機能確認のために代表設備として、「一次冷却系統(加圧器まわり)+化学体積制御系統(図7)」と「主蒸気ライン+タービン、循環水系(図8)」を選定し、解析を試みた。

「一次冷却系統(加圧器まわり)+化学体積制御系統」に係わる「安全注入作動の原因」は「原子炉圧力低下」であり、その原因としては「一次冷却材の漏洩」、「スプレイ流量の増加」、「充てん・抽出の不一致」が考えられる。

「主蒸気ライン+タービン、循環水系」に係わる

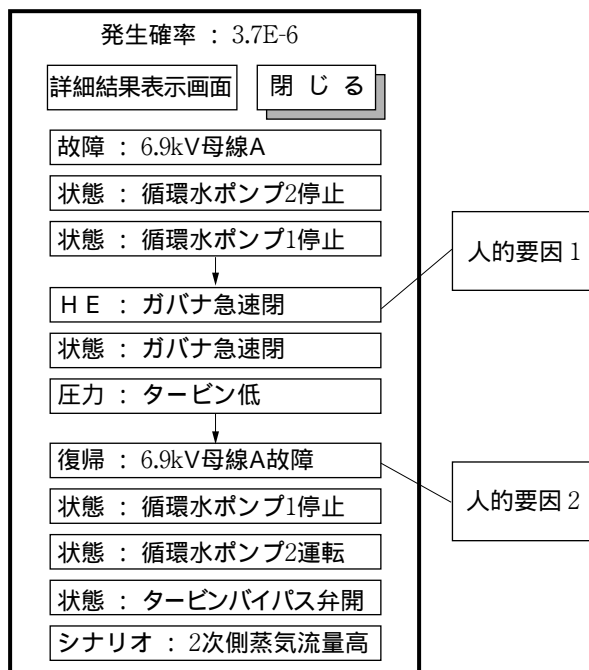


図6 ヒューマンエラーを含むシナリオの例

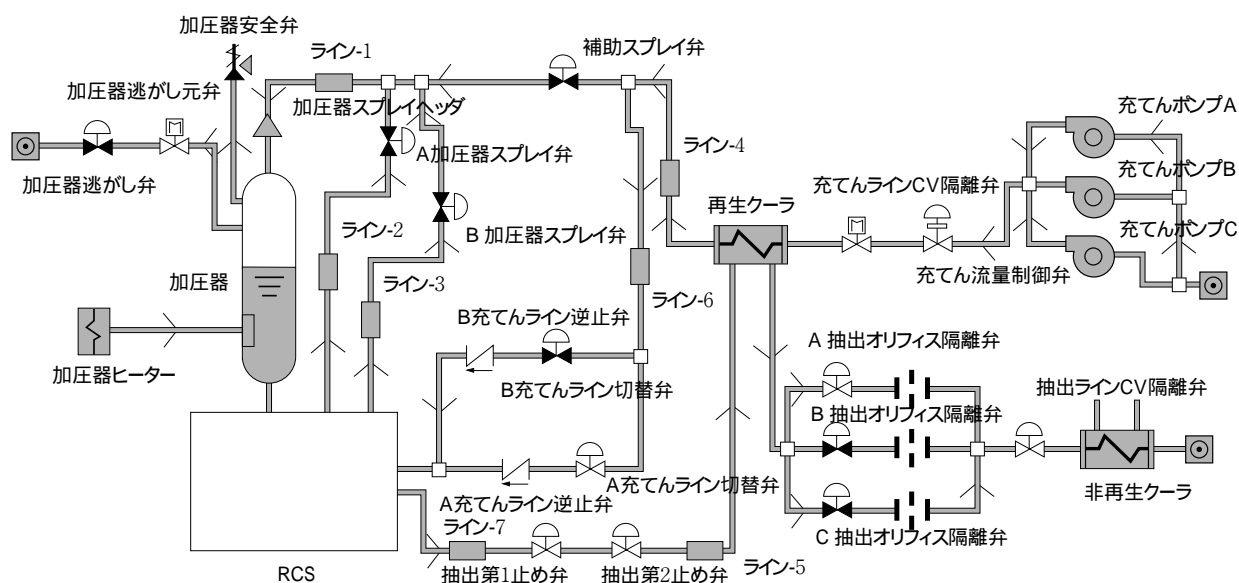


図7 一次冷却系統(加圧器まわり)

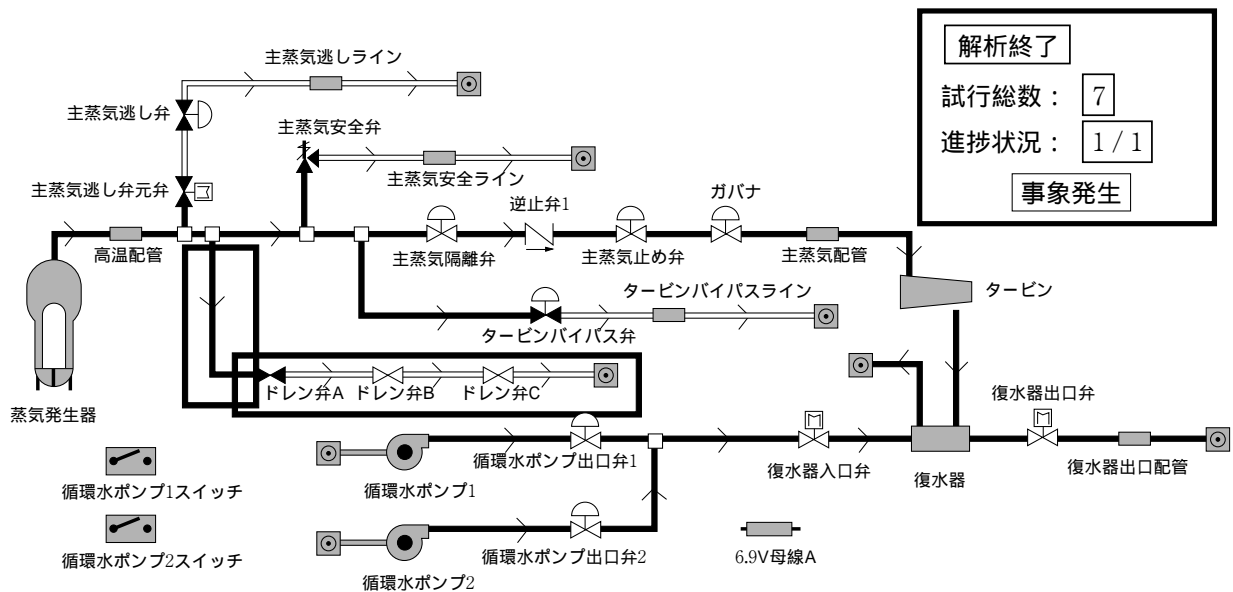


図8 主蒸気ライン+タービン，循環水系

「安全注入作動の原因」は「主蒸気流量の増加」であり、その原因は、主蒸気ライン，タービンバイパスライン，主蒸気逃がしライン，主蒸気安全ライン等の蒸気発生器出口ラインの異常開が考えられる。

プロトタイプシステムはこれらの安全注入信号発信の原因に至る機器故障・運転失敗・運転操作の組み合わせからなるシナリオを自動的に生成する。得られたシナリオを分析し、「2.2 評価フレームワーク」に示した(ア)～(コ)の基本方針が満足されており、且つ、その事故シナリオが妥当であることを確認した。この結果、シナリオジェネレーターに対する機能要求が満足されていると評価できる。

#### 4. まとめ

従来の確率論的安全評価では、炉心損傷に至らない事故を対象としたものはほとんど見られない。事故の結果が炉心損傷ほど大きくなっても発生頻度が高い事故の原子力発電所の安全性及び稼働率に与える影響は、炉心損傷に至る場合に比べ、小さいとはいえない。原子力発電所の信頼性の向上という観点から炉心損傷以外の事故事象の原因・シナリオを明らかにし、その改善策を検討することは重要と考えられる。しかし、炉心損傷以外の事故事象を評価するためには、解析対象設備の多様さによるシナリオ

の数の多さ、シナリオの複雑さ、事故シナリオの時間的推移、ヒューマンファクタの問題等を考慮するという複雑な課題があり、炉心損傷事故に対するシナリオ作成以上に困難である。

炉心損傷以外の事故事象の特徴を分析し、且つ、従来の確率論的安全評価方法を検討した結果、従来の方法をそのまま適用することは、頂上事象の多様さや考慮すべき要因の多さのために、解析者の作業量が膨大になり非現実的であることが推定できた。そこでAI技術とシミュレーション法を組み合わせた新たな評価技術を開発した。

本論文では、炉心損傷以外の事故の特徴分析、事故シナリオ生成のためのフレームワークの定義、AIシミュレーションを利用したシナリオジェネレーター、ヒューマンエラーに関するシナリオの生成方法及びプロトタイプシステムを用いた機能確認に基づく有効性についてまとめた。

#### 文献

- (1) Woods, D.D, People, H.E. and Roth, E.M., The cognitive environment simulation as a tool for modeling human performance and reliability NUREG/CR-5213, USNRC, 1990