

京都ワークショップ（より高度なリスク解析法の実現を目指して）報告

吉川 榮和¹、楊 軍²、楊 明³、松岡 猛⁴

（1：シンビオ社会研究会、2：華南理工大学、3:深圳大学、4：宇都宮大学）

『原子力安全と緊急時対応のためのリスク情報に基づく知的意思決定支援のための要素技術の研究』に関する国際共同研究プロジェクトの一環として開催された京都ワークショップでの日中分担研究者による講演発表4件と討論の概要を報告する。

日時：2023年5月24日 水 午前9時20分—12時

会場：京都市左京区吉田牛の宮町11-1 芝蘭会館別館2階研修室I

主催：華南理工大学およびシンビオ社会研究会

協賛：京都大学エネルギー理工学研究所ゼロエミッション研究拠点

本ワークショップ開催の経緯と本報告の構成、参加者

中国広州華南理工大学 電力学院 楊 軍 准教授は広東省の支援を得て原子力発電所の事故時安全管理へのリスク解析の適用をテーマに2022-23年の2年間『原子力安全と緊急時対応のためのリスク情報に基づく知的意思決定支援のための要素技術の研究』に関する国際共同研究プロジェクトを始めていますが、この国際共同研究に当会メンバーも参加しています。この度2023年5月21—26日に京都国際会議場で開催の国際会議ICONE30に概プロジェクトの中国側メンバーが来日しましたのでその機会に合わせて5月24日に京都ワークショップを開催しました。ワークショップでは、日中メンバーが分担研究の進展を発表し、プロジェクトの成果取りまとめに向けての今年度後半の取り組みを討議しました。当日のプログラムでは次回広州で開催のワークショップの計画や深圳大学楊明教授が来年秋に深圳で開催を検討している関連国際会議についての意見交換もありましたが、これらは省いて、本報告では該国際共同プロジェクトの日中分担研究者による当日の発表4件を中心にその概要を紹介します。当日の研究発表と討論は英語で行われましたが、以下では当日のPPTを除き、すべて日本語で記載します。当日の会場参加者は中国側9名、日本側2名の合計11名でした。（その他にオンライン遠隔聴講者2-3名）

講演1：「原子力安全と緊急対応管理のためのリスク情報に基づく知的意思決定支援システム」に関する国際共同プロジェクトの紹介」（華南理工大学准教授 楊 軍 氏）

（英文表題：Introduction to the international cooperation project ‘Risk-informed Intelligent Decision Support System for Nuclear Safety and Emergency Response Management’ (Professor. YANG Jun, South China University of Technology))

発表PPT； [こちら](#)

発表と討論の概要

講演概要

楊軍氏は同氏の主導する2年間の国際共同プロジェクトの目的と主要テーマ、中国と日本の参加メンバー、成果として求められている具体的事項とその数値目標とこれまでの達成度、そして2年目に入った現在までの進捗を発表した。以下ではとくに4つのサブテーマのそれぞれの研究の進捗状況を要約する。

(1) 安全性の監視と管理のためのリスクの多層化

この表題のテーマは知的なリスク情報に基づく意思決定支援システムを構成するための基本概念となるもので、次の3つの要素で構成される。

- ①重要安全機能モニタリングによりプラントの安全状態を俯瞰する
- ②成功する道の立案により極端な条件下で想定外の事象発生への対抗策を提供する
- ③運転のナビゲーションと監督により運転員に有効なタスク実行のための手順の案内を行うとともにプロセスに対応している運転員の対応状況を監督する

楊軍氏はとくに①について、どのように目標—機能の樹状図、成功の樹状図、状態の樹状図を組み合わせるべきかを課題として挙げた。

(2) 強化したモデリングと解析基盤の開発

楊軍氏は、①GO-FLOW モデルを自動的に生成するツール、②GO-FLOW の解析機能を強化するアルゴリズム、③GO-FLOW の基盤の強化と最適化を進めているとし、その内容は次の何展宇氏の講演で紹介すると述べた。そして強化したGO-FLOW 解析のアルゴリズムの導入の仕方を示し、修復可能なPMSシステムの信頼性解析を例にしてどのような問題を解こうとしているのかを述べた。

(3) 緊急対応管理のための「成功する道」の立案

楊軍氏は、「成功する道」の立案法として、次の2つのオプションを述べた。

- ①GO-FLOW チャートに対するグラフ横断解析で得た最小パスセットをもとに成功パスを追跡して立案する方法。これは機能実現と目標達成を高度な抽象レベルで達成する手順を求めたものであり、運転員には手順のステップごとのガイダンスを与える必要がある。
- ②フロー図の知識表現と推論を組み合わせた方法。こちらはGO-FLOW モデルとは関係ないプラントパラメタのオンラインモニタリングをもとに状況を診断して対応策を推論する知識処理のようであり、ポロン希釈事故に対する手動補填操作を対象にケーススタディを行っている。

(4) 運転のナビゲーションと監督

楊軍氏は、次の2つの方法で構成することを提案した。

- ①GO-FLOW のモデル、トレンドへのインパクト解析等から時々刻々変わる目標達成の観点でのその都度その都度の信頼度をはかる方法を導出する。
- ②不安全な行為の同定、手順に基づくナビゲーションと監督、手順ではないパスのガイド、運転上の使命達成度モニタリング、トレンドへの影響度の予測、運転上のハザードの分析の機能を統合した知的な運転状態監督システムの開発。

討論概要

全体として広範な機能開発に対してどのように開発した方法を検証しようとしているかについて議論があった。

講演 2：「動的でリビング PSA に適用するための GO-FLOW の拡張」 (華南理工大学博士課程学生 何 展宇 氏)

(英文表題：Expansion of GO-FLOW for dynamic and Living PSA applications, (HE Zhanyu, Graduate Student, South China University of Technology))

発表 PPT； [こちら](#)

発表と討論の概要

講演概要

何展宇 氏は、まず同氏の主題とする GO-FLOW の機能拡張のために GO-FLOW の 14 個のオペレータを 4 種類に分類し、また対象システムに使われるコンポーネントを能動的コンポーネントと受動的コンポーネントに分類した後、(1)GO-FLOW の自動モデリング機能、(2)リビング PSA に適用するための GO-FLOW モデリングプラットフォームの拡張、(3)信頼性解析の改良について説明した。そして結論として次の 4 つを述べた。

- ①コンポーネントモデルの分類表を導入してシステムのコンポーネントと GO-FLOW オペレータのマップ対応を容易にした。
- ②自動 GO-FLOW モデリングツールにより P&ID 図から GO-FLOW モデルを抽出できるようにした。
- ③新たな GO-FLOW プラットフォームは元来の機能を保持しながら、共通要因解析や成功パスの分析ができるようにした。
- ④NEA アルゴリズムの適用により計算効率の改善と信頼性解析の精度を向上させた。

討論概要

NEA アルゴリズムは再帰的關係を取り扱うものならループ構造も取り扱えるのでないかとの質問があり、そうではないとの回答があった。

講演 3：「ループ構造のあるフェーズドミッションシステムの信頼性解析」 (宇都宮大学客員教授 松岡 猛 氏)

(英文表題：Reliability analysis of phased mission system with loop structures, (Prof. Takeshi Matsuoka, Utsunomiya University))

発表 PPT； [こちら](#)

発表と討論の概要

講演概要

技術の発展に伴い、多くのシステムが高度化・複雑化している。原子力発電所や航空宇宙システムなどこれらのシステムの多くはフェーズド・ミッション・システム (PMS) と呼ばれ、異なるタスクを複数の連続した期間で実行するものとなっている。このような工学システムが、特に安全や事故防止

といった重要なミッションをサポートするために設計されたシステムにおいては、ミッションの信頼性を正確に求めることが極めて重要である。

信頼性解析やアベイラビリティ解析ではシステムに論理的ループが存在するとそれを如何にして解くかが長い間問題になっていた。その解決法として論理ループのサポートシステム間の依存関係が比較的弱い箇所で切断し、ループのない新しい論理を展開する試みが従来から多くなされている。例えば Vaurio は論理ループを解消するための反復法を提案した。この方法は、ループ構造の再帰性を反復計算で考慮するため、非常に直感的であるが一つの解の可能性を与えるだけである。

一方、厳密解を得るためのアプローチが講演者によって最近開拓された。これは論理ループを持つグラフ関係に対して、任意の集合を持つ形式解を与える方法であり、論理的ループ構造を持たないこの解を、フォールトツリー (FT) や図形ベースの信頼性解析手法に利用すればループのあるシステムの解が求まる。

講演者は、提案した本解析方法を、簡便性、直接性、厳密性の観点から、図形ベースの信頼性解析手法の一つである GO-FLOW に適用してシステムのモデル化を行った。実際の大規模システムである BWR 原子力発電所システムを取り上げ、形式的解析解における任意集合の決定方法を解説した。

一般に、PMS の解析方法は、シミュレーションに基づく方法と解析的な方法の2種類に分類される。解析的手法はさらに、(1) フォールトツリー (FT)、バイナリ決定図 (BDD) などの組合せ手法、(2) マルコフプロセス、ベイズネットワーク (BN) などの状態空間モデルベース手法、(3) 前二者の組み合わせであるモジュール手法の三つのグループに分けることができる。

ループ構造を持つシステムを非解析的に解くと、各フェーズで反復計算や数値計算が必要になる。そのため、ループ構造を持つ PMS の解析において、異なるフェーズ間の依存関係を扱うことが非常に困難となる。このため、ループ構造を持つ PMS の信頼性解析の文献はほとんど見られない。本研究では、ループ構造の論理を厳密解の助けを借りて GO-FLOW チャート上に直接モデル化した。また、BWR・PMS を GO-FLOW 解析における PMS オペレータを用いて同じ GO-FLOW チャート上にモデル化している。GO-FLOW 手法は解析的な組合せ手法であり、解析の初期段階で独立した構成要素に対して数値計算を行う。このため、ループ構造を持つ PMS の信頼性解析が容易かつ効率的に、高速に行えるようになっている。

以上の技術的要件を説明し BWR プラント起動時の論理ループ構造を考慮した信頼性解析の実施例を紹介した。このシステムの起動時の動作は特徴的なフェーズド・ミッション・システム (PMS) となっている。

討論概要

GO-FLOW の機能拡張を実施中の華南理工大学のチームから松岡氏が新たに提案した LOOP 構造を考慮した PMS の解法はどのように機能拡張に反映できるのか質問があり、今後検討するとの回答があった。

講演4：「原子力発電所の緊急状況管理の知的支援のためにどのように DiD リスク解析のフレームを適用したらよいか」(シンビオ社会研究会会長・京大名誉教授 吉川 榮和 氏)

(英文表題：How to Apply DiD Risk Analysis Framework for Intelligent Support to Manage Emergency Situation of Nuclear Power Station, (Prof. Hidekazu Yoshikawa, Symbio Community Forum))

発表 PPT ; [こちら](#)

発表と討論の概要

講演概要

吉川榮和氏の講演は、A.原発の緊急事態で動的に変動するリスクをどのようにモニターすべきかの考察から始めて、B.講演者らが 30 年前に取り組んだ「高速事故追跡システム」の研究をもとに原発の緊急事態管理のための新たな知的支援システムのアイデアを提起した。

A では、原発安全性の設計原理として核燃料、被覆、原子炉冷却水の圧力境界、格納容器の 4 つの障壁があり、多重防護の仕組みで放射性物質の環境への放出を防止すること、障壁の健全性は STOP,COOL および CONTAIN の 3 つの安全機能で保証する等の基本原則から始めて原発原子炉容器内、格納容器内および環境外への放射性物質放出影響の 3 段階のシビアアクシデントの発展段階とそれぞれの段階に適用される解析コードについて簡単に触れたうえで、①3 つの安全機能の組み合わせでリスクレベルを段階分けすること、②個々のリスクレベルの中での動的に変化するリスクの程度をよりひどいリスクレベル段階に至るまでの余裕時間と施設の構造的健全度の 2 軸で定量化すること、について考察し、①については楊軍氏の提起する個々の安全設備—重要安全機能—3 つの安全機能のツリー構造でプラント安全目標を表わす知識表現と個々のクリティカル安全機能の状態の 4 段階表現は、実際の原発の計装信号との対比関係を規定しさえすればプラントの安全度、言い換えれば“健全度”を常時監視する「ヘルスマニター」を構成できる。しかし、人間ドックと同様でこのような「ヘルスマニター」の情報提供は、「どうしたら健康を回復できるか」という問題とは別物である。そのためにはどこがどの程度悪くなっているのかを詳しく知ったうえで、健康を回復するためにどの程度時間的余裕があるかを考えて適当な治療法を考える、という問題がある。これが上記の②の問題である。

勿論、楊軍氏の提起する知識表現モデルを更に一歩進めることで②に挙げた問題に対応することが考えられるが、吉川榮和氏は著者らが 30 年前に取り組んだ研究を②の問題に適用できるのでないかと次の話題である B に移った、

B では、吉川榮和氏は「高速事故追跡システム」の 3 つの要素である①カルマンフィルタの組み合わせた診断的プラント分析器、②超実時間高速事故シミュレータ、③双方を制御してトラブル発生検知、原因診断、将来予測、対応操作を提案する AI マネージャの基本的考え方を説明し、これは今の AI の方面でいうところの「データ同化」の考え方であること、さらに著者らが開発した DiD リスクモニタソフトを用いれば現代の進んだ AI ソフトを用いて全体をインテリジェントな緊急時対応支援技術として実現できることを提起した。

討論概要

リスクモニタやヴァーチャルニューメリカルリアクターが哈爾濱工程大学核学院で取り組まれてきたこと、カルマンフィルタによるパラメタ推定は現在の AI ソフトのパッケージに入っていること、高速事故トラッキングは VR を応用してデジタルツインとして実現できないかなどのコメントがあった。

全体のまとめと課題（文責 吉川榮和）

楊軍氏が全体を主導している本プロジェクトは、いわゆるフェイズドミッション問題を取り扱え、様々な故障事象生起の統計的性質や共通要因故障が考慮できて、対象システムの動的モデルを基本的な図形

オペレータを用いたグラフ表現してそれから動的計算アルゴリズムに変換してシミュレーションする機能を具備した GO-FLOW ソフトウェアを中核として、システムの安全機能の階層化モデルの知識表現とプラント計装信号の動的変動の観測をもとに、動的に変化するリスク状態を判断するリスクモニタの導入と、状況に応じてリスク状態を回避ないし軽減させる手順を生成する知的推論を統合システム化するとともに、それによる推論結果を運転員に適切に提示し、運転員操作のヒューマンエラーを防止しようと意図して進められている。このような知的支援システムの開発では、その個々の要素の有効性や全体システム動作の時間的整合性を検証する上でプラントシミュレーターを用いた開発システムの実験的検証が必須である。またそのためにはどのようなタイプの原子炉のシミュレーターを用いるかを検討することが本プロジェクトの次の段階へのプロジェクトの発展には必要である。また最近進歩の著しい AI 技術と VR シミュレーターを融合させるデータ同化の方面からの接近も期待される。

当日会場風景



参加者集合写真

