

|             |                                                                                                                                                                       |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名         | オウ 陽 軍                                                                                                                                                                |
| 学位(専攻分野)    | 博 士 (エネルギー科学)                                                                                                                                                         |
| 学 位 記 番 号   | エ ネ 博 第 136 号                                                                                                                                                         |
| 学位授与の日付     | 平 成 18 年 9 月 25 日                                                                                                                                                     |
| 学位授与の要件     | 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当                                                                                                                                               |
| 研究科・専攻      | エ ネ ル ギ ー 科 学 研 究 科 エ ネ ル ギ ー 社 会 ・ 環 境 科 学 専 攻                                                                                                                       |
| 学 位 論 文 題 目 | A Methodological Study on Fault Diagnosis and Simulation of Man-Machine Scenario in Accident for Nuclear Power Plant<br>(原子力発電所の故障診断と事故時のマンマシンシナリオシミュレーションの方法論に関する研究) |
| 論文調査委員      | (主 査) 教 授 手 塚 哲 央 教 授 三 島 嘉 一 郎 助 教 授 下 田 宏                                                                                                                           |

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、原子力プラントの故障診断と異常事象伝播シナリオのシミュレーションについて、プラントの機能、構造および動的振舞いをグラフィカルな抽象化モデルで表現する新たな方法論の開発とその有効性の検証結果をまとめたもので、5章からなっている。

第1章は序論であり、まず、人類の持続的発展と地球環境の保全のためには原子力発電が大きな役割を担っているが、事故による放射線災害の危険性が潜在するため、本論文の目的として、原子力プラントの運転安全性向上のため、自動化の進んだプラントに異常事象が発生した際に運転員がその状況を的確に診断して誤りなく対応操作を行えるよう、運転員への新たな計算機化支援法の創出を目指すことを述べた後、本論文の構成を示している。

第2章では、原子力プラントを構成する設備機器の目標と機能の関係、全体と部分の関係を、プラントシステムの中の質量、エネルギー、情報の流れに着目して図形表現により抽象化するマルチレベルフローモデル (Multilevel Flow Model; MFМ) を応用した故障診断アルゴリズムの開発とその適用を述べている。

まず、加圧水型原子力プラント (Pressurized Water Reactor: PWR) の単一故障時の異常診断について、MFМによるプラントモデルをもとに異常源から拡大波及する警報の定格値からの偏倚の因果律を用いて根本原因を高速に逆推論する方法を提案している。同方法により、21種類のプラント警報信号を用いて殆どの異常の根本原因を原子炉トリップ以前に正しく同定できることを安全解析コード RELAP5/MOD2 による19種類の事故シミュレーションを基に示している。さらに、この単一故障診断法を、F. Dahlstrand による方法にグラフ理論を組み合わせることで多重異常を含めて根本異常原因を統合的に説明する方法へと拡張している。当該方法をタンク2台、ポンプ1台の簡単なシステムの異常診断に適用し、その機能を確認した後、単一故障の根本原因推定法では根本原因の分離が困難だった PWR 冷却材喪失事故 (LOCA) に適用し、根本原因の分離が困難であった理由は、単一故障の仮定のもとに根本原因として推定された第1候補とそれ以外の潜在的候補群が異常波及の強固な因果律で結合された同一コンポーネントにあるためであり、当該方法を用いることによりコンポーネント異常を同定できると結論している。

第3章では、支援システムが自動的に同定した根本原因の正当性を運転員が確認することが求められることを指摘し、自動支援システムの診断結果をプラント緊急事態の運転員に理解しやすく提示する表現法をラスムッセンの3つの運転員モードから論じている。

次いで、第2章で提案した MFМ による異常原因推定をそのまま人間に提示しても自動診断と同等の診断ができないことを示すため、簡単な被験者実験を行っている。実験では、学生3名を被験者にして MFМ による異常原因診断を教示した後、インタフェース上で MFМ による根本原因診断作業を合計16課題課している。その内訳は、それぞれの被験者に対して8課題ずつに分けた2回の実験を行い、その正答率および課題遂行時の視点の動きを調べ、事後アンケート調査を行っている。実験結果によれば、(1)視点の動きのデータから、すべての被験者は2回目の実験では目の動きそのものは要領よく

って MFM による異常診断のコツはつかんでいるように見えるが、(2)正答率は50%程度で2回目になっても必ずしも向上していない。この実験結果をもとに、MFM による異常原因推定の理解しやすい提示法を検討している。その結果、MFM による異常診断法を実際に運転員支援に適用するには、(1)診断はコンピュータ処理のほうが確実なこと、(2)その診断結果の正当性を運転員に確認させるには、MFM による処理法をそのまま画面提示するのではなく、診断過程全体をその順序に沿ってブレイクダウンし、注目すべきパラメータ間の関係を明確にすること、(3)パラメータ間の整合関係のチェックが直観的に行える表示法を導入すること、が必要であると論じている。そしてパラメータ間の相等、和、微分、積など数量関係の整合性を直観的に理解しやすい表示法として、Vicente のエコロジカルインタフェースデザイン (Ecological Interface Design; EID) の適用を提案している。すなわち MFM による定性推論の結果と EID による主要なプラントパラメータ間の関係を可視化して表示し、運転員の直感的理解を向上させるインタフェース設計手法を提案し、PWR の異常診断用インタフェースを試作している。

第4章では、前章までに提案された MFM による定性推論手法を基礎に、原子力プラントで発生した異常事象の伝播過程と、運転員による対応操作により異常事象を収束させる過程とを理解しやすい Web ベースのアニメーション形式で提示できる事故シナリオ提示手法を提案し、そのプロトタイプを開発している。提案する手法は、要するに(a)MFM の定性推論によるプラントの異常伝播過程の生成、(b)事故の進展に伴う運転員の異常対応操作とプラント事故シナリオの変化を Petri-Net モデルにより制御、(c)事故シナリオの変化に伴うプラント挙動進展をアニメーションとテキストにより表示するグラフィカルインタフェース、の3つにより構成している。開発したプロトタイプを用いたシミュレーションにより、提案する手法が運転員の異常診断や対応操作の訓練に適用できるばかりでなく、プラント異常時の運転員操作の心的負荷の時間的変動を推定する方法へ拡張できることを示し、原子力プラントの事故時運転技術の向上に有用な手法となりうることを示している。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果を要約し、今後の課題を展望している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、原子力プラントの故障診断と異常事象伝播シナリオのシミュレーションについて、プラントの機能、構造および動的振舞いをグラフィカルな抽象化モデルにより表現する方法論の基礎的手法とその新たな応用について研究した結果をまとめたもので、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 原子力プラントで単一故障発生時の異常診断について、グラフィカルな抽象化モデルであるマルチレベルフローモデル (Multilevel Flow Model; MFM) により記述されたプラントプロセスモデルを用いた定性的推論により高速に異常の根本原因を同定する方法を提案し、コンピュータシミュレーション実験によりその効果を検証した。さらに上記方法を、単一故障から多重故障を含めた異常事象の根本原因を同定し、解釈するための統合的推定手法に拡張した。
2. MFM による異常の根本原因の同定は、人間の机上による作業では方法の原理・手順は理解できても必ずしも正確にできないことを少数の被験者によるインタフェース実験で示した。この実験結果から、運転員への効果的な支援方法として、MFM による診断は計算機に任せ、その自動診断の結果を運転員に確認させるほうがより合理的であるとして、ラスムッセンによる運転員の3つの行動モードの観点から、運転員にとって直観的に理解しやすい表示方法を提案した。
3. 具体的には、MFM による定性推論の結果とともにエコロジカルインタフェースデザイン (Ecological Interface Design; EID) により主要なプラントパラメータ間の関係を可視化して表示することにより、運転員の直感的理解を向上させるインタフェース設計手法を提案した。
4. MFM の定性推論手法を基礎として、原子力プラントで発生した異常事象の伝播過程と、運転員による対応操作により異常事象が収束する過程とを、理解しやすい Web ベースのアニメーション形式で提示できる事故シナリオ提示手法を提案した。
5. 上記で提案した手法が運転員の異常診断や対応操作の訓練に適用できるばかりでなく、プラント異常時の運転員操作の心的負荷の時間的変動を推定する方法へと拡張できることを示した。

以上、要するに本論文は原子力プラントの運転安全性に関し、異常原因の同定と異常の波及伝播を予測する基礎的な定性

推論法とその応用を研究したもので、得られた成果は今後の原子力プラント運用の安全性と信頼性のさらなる向上に貢献するものであり、学術上、実際上、資するところが大きい。

よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成18年8月24日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。