

博士(工学) 吉村 誠一

学位論文題名

Study on Modeling of Operator Team
Behavior in Nuclear Power Plants

(原子力プラントの運転チーム行動モデリングに関する研究)

学位論文内容の要旨

日本における原子力発電は電源供給の主要部分を占めており、おおむね安全に運転されている。しかし、放射性物質の持つ社会的影響の大きさ故、原子力プラントは一層の安全運転が求められている。このような安全性は、従来よりシステムの自動化や運転員教育により実現されてきた。原子力プラントの安全性確保を人間側からみると、最大の影響要因はヒューマンエラーである。ヒューマンエラーを起こさないためには、運転員教育のみならず、その再発を防止するためのヒューマンエラーの分析・評価が必要不可欠である。

本論文は、原子力プラントの一層の安全性確保のために行なった、運転員の理解度に合った効果的・効率的学习を可能にする運転員教育システムならびにプラントトラブル時における運転チームの行動を模擬し、ヒューマンエラーの発生過程を解明するシミュレーションモデルの研究について論述したものであり、9章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景ならびに目的について述べている。また、本論文の構成と概要について言及している。

第2章では、運転員教育の現状と問題点ならびに原子力プラント運転員と他産業のプラント運転員との違いや原子力プラント運転員が求められる知識のレベルなど、運転員教育全般について論じている。

第3章は、運転員教育システムについて論じている。従来の運転員教育システムは、設備の構成や機能の解説に重点を置いたものが多く、トラブル時のプラント過渡応答を扱ったものは少ない。運転員にとって重要なことは、トラブル時に各パラメータが時系列的にどう変化するかを学習することである。これによりトラブルの原因やプラントが今後、どう推移するか予想し、適切な対応操作を行うことができる。このような教育を実現するものとして、本研究では、事象を原因と結果のつながりで表現する教材の構築方法を提案した。このような教材構築方法を採用することにより、事象全体の中で運転員が理解していない因果の部分（教育単位）を抽出することが容易になり、その教育単位だけを教育することにより、運転員のレベルに合った効果的・効率的学习が可能になる。また、教育は“事前評価（理解していない教育単位を抽出するために行う質問）”、“理解していない教育単位の教育”ならびに“再評価”的順に進める。開発した運転員教育システムの有効性は、23名の原子力プラント運転経験者がシステムを実際に使用することにより、“因果の理解し易さ”、“事前評価の有効性”、“教材内容の妥当性”的観点から評価した。その結果、特に、因果の理解し易さ、事前評価の有効性が示された。これにより、運転員教育システムの今後の開発方針を明確にした。

第4章は、定性推論を用いた教材作成の基本フレームについて論じている。従来、運転員教育システム実用化にあたっての最大のボトルネックは、教材作成に多大の労力を要す

ことと言われてきた。一方、定性推論は、プラントの過渡変化の理由を運転員に説明するための非常に有効な手法であるが、原子力プラントのような大規模システムに適用すると、定性方程式の解が不定になるという問題があった。そこで、本研究では、教育システムが内蔵するシミュレーションコードの解析結果を制約条件として用いることにより、方程式の解が不定になるのを防いでいる。定性推論で教材を作成するに当たり、本研究では、変数状態フレームならびにプラント状態フレームと呼ばれる2つの新しい概念を導入した。変数状態フレームは特徴点を結ぶ直線を定義するためのもので、運転員はある特徴点間ににおけるプラントの過渡変化の理由説明を要求する。プラント状態フレームは変数状態フレームをマージしたもので、過渡応答解説ルール（シミュレーション結果から求まる条件付き定性方程式をプロダクションルールの形で記述したもので、条件付き定性方程式の解説文を合わせ持つ）と共に用いて解説文を生成する。解説文の生成は、説明区間にあるプラント状態フレームを求め、その定性値ならびに定性微分値と合致する条件付き定性方程式を持つ過渡応答解説ルールを検索し、解説文を合成することにより行う。本方式により、教材作成に要する時間と費用の低減の可能性が示された。また、定性方程式に基づく事象の解説は教育効果の向上も期待される。

第5章は、自然言語入力に対する応答文の出力方式を検討することにより、教育システムのための効果的インターフェースを論じている。本研究で取り上げた応答文出力方式は、事象の因果記述に適した応答関数(因果を前向きあるいは後ろ向きに推論するための関数)を用い、運転員の理解度や質問歴に応じて応答文を出力する。本方式は概念検討の段階であるが、今後の教育システムインターフェースの一つのあり方を提案している。

第6章は、ヒューマンエラーの発生過程を解明し、その再発防止に用いる運転チーム行動モデルについて論じている。原子力発電所中央制御室の運転チームは通常4ないし6名で構成され、制御盤を見ながら、役割分担に従って各種操作を行う。従来のヒューマンモデルは、個人のモデルであり、また、操作に影響する各種の個人特性（性格、覚醒度など）や制御盤との実時間での相互作用が考慮されておらず、そのため、実際の運転チームの行動シミュレーションにそのまま適用することができなかった。そこで、本研究では、各種プラントに適用できるよう（原子炉出力、建設された年代などにより、運転員や制御盤上の計器の数などが異なる）、一般化した運転チーム行動モデルを考案した。その特徴は、環境（中央制御盤やプラント）、役割分担や競合解消ならびに合理的思考に影響するPSF(Performance Shaping Factor)や性格のモデル化である。これにより、中央制御室で実際に起こるヒューマンエラーの分析・評価に適用できることを論じている。

第7章は、運転チーム行動モデルを構成する一人の運転員の思考メカニズムについて論じている。ヒューマンエラーを分析・評価するためには、運転員の思考過程を明示する必要があるが、従来の工学的なモデルでは、ルールで情報の入出力関係を表現することが多い。また、心理学的なモデルは、一般的に思考過程を明示しない。そこで、本研究では、運転員のトラブル対応過程のプロトコール分析とインタビュー結果に基づき、メンタルモデルの構造とその生成手順を提案している。別のトラブル、別の運転チーム運転員の発話を本提案に当てはめ、妥当性を検証した所、運転員の発話内容（情報収集や対応操作の指示など）は、おおむね本提案通りにメンタルモデルが生成されたことを示している。これにより、本提案を運転員の思考メカニズムとして採用した。

第8章は、第6、7章で展開した運転チーム行動モデルのシミュレーションシステムの構築と実際の運転チーム（エキスパートと学生）との発話の比較によるモデリングの妥当性について論じている。ここで、シミュレーションシステムは、運転員の思考過程あるいは運転チームの意思形成過程に関する考察が主であるため、覚醒度や作業負担などの影響を受けない理想的な運転員を仮定している。また、マンマシンインタフェースならびにプラントの各モデルは、実際の運転チームが対応する実験設備と合わせた簡略なモデルとしている。幾つかの事象についてシミュレーション結果と実験結果を比較した所、問題解決に要する時間（警報がクリアされるまでの時間）はおおむね同じであることが判明し、モ

デリングの妥当性が示された。

第9章は、本研究の結論であって、得られた結果を総括している。

学位論文審査の要旨

主　查　教　授　嘉　数　侑　昇
副　查　教　授　岸　浪　建　史
副　查　教　授　和　田　充　雄

学位論文題名

Study on Modeling of Operator Team Behavior in Nuclear Power Plants

(原子力プラントの運転チーム行動モデリングに関する研究)

日本における原子力発電は電源供給の主要部分を占めており、また放射性物質の持つ社会的影響の大きさ故、原子力プラントは一層の安全運転が求められる。原子力プラントに生じるプラントトラブルは運転員のヒューマンエラー（誤判断・誤操作）に起因するものが大きな部分を占めている。したがって、ヒューマンエラーを低減することが、原子力プラントを安全に運用するための必要な要件であり、そのためには、ヒューマンエラーの予防保全・再発防止の面から、プラント運転員に対する効果的な教育システムの構築およびヒューマンエラーの分析評価を行なうことが、最重要課題として上げられている。本論文はこのような問題に対し、教育システム構築に関して、原子力プラント特有の知識レベルとそれらの有機的関係が必須であることを明らかにするとともに、評価試験を通じてその妥当性を明らかにしている。またヒューマンエラーの分析評価においては、従来手法が各個人の心的・行動状況にのみ着目してきた問題点を指摘するとともに、発話を含めたチーム活動としての心的・行動状況遷移に着目した運転チームの行動モデル構築手法を提案し、その有効性をシミュレーションプラントの適用実験において確認している。以上、本論文は、ヒューマンエラーを低減するという目的のもとに、これらの研究をまとめたものであり、その主要な成果は次の4点に集約される。

1. 運転員教育の現状と問題点ならびに原子力プラント運転員と他産業プラント運転員との違いを吟味した。すなわち、従来の運転員教育システムは設備の構成や機能の解説に重点を置いたものが多く、トラブル時のプラント過渡応答を十分にあつかったものは少ない。運転員にとって重要なことは、トラブル時に各パラメータが時系列的にどう変化するかを学習することである。これによりトラブルの原因やプラントが今後、どのように変化するかを学習しておくことが重要となる。以上のことから、本論では原子力プラント運転員に特有の求められる知識レベルを原因と結果との時系列的変化と捕らえた教育教材の作成法を提案している。さらに学習対象事象の有機的因果関係の利用法について必要な要件を明らかにしている。

2. 知識レベルとその因果関係の習熟度に応じて、柔軟に対応できる新たな教育システム構築手法を提案している。すなわち、提案した教材構築方法を採用することによって、学習すべきプラントの事象全体の中で運転員がまだ十分に理解していない因果関係部分だけを抽出し、再学習することが容易になり運転員の学習レベルに合った効果的・効率的学習法を可能としている。本手法に基づいて開発した運転員教育システムにおいて、熟達した運転員による評価試験を行ない、因果関係の理解しやすさ等に関して提案した手法の妥当性が確かめられている。

3. ヒューマンエラーの発生過程を解明し、その再発防止を行うための分析方法として、運転チーム行動モデルの必要性を明らかにしている。すなわち、ヒューマンエラー分析において、従来から行われている個人レベルのみのメンタル的モデル化による分析・評価では、役割分担に基づいた集団的意思決定過程を伴う原子力プラント運転員の行動分析に不十分であることを指摘している。また各個人はインタフェースである制御盤にて各種操作を行う。このとき、各操作に及ぼす性格や覚醒度と行った個人特性および制御盤との実時間的相互作用と行った点を考慮に入れる必要性を説いている。これらのことから時系列的展開性を持った発話活動、さらには各個人毎の心的特性を考慮に入れたチーム行動モデルの必要性を導き出し、プラント運転員の個々人に特有のメンタルモデルに基づいたチーム行動モデル化手法の提案を行っている。その特徴として、プラント環

境、役割分担や競合解消ならびに合理的思考に影響するPSF(Performance Shaping Factor)や性格のモデル化を含み、実際の運転チーム行動シミュレーションに適用可能なモデルとして提案されており、このシミュレーションを通じてヒューマンエラーの分析・評価に適用できることを論じている。

4. 試作したチーム行動モデルにおいて、シミュレーションプラントを対象とした適用実験を通じ、実際の運転チームによる実験結果との比較検討をおこなっている。この結果から適切なメンタルモデルが動的に構成され、実験課題の解決に要する時間及びそのチーム行動パターンがほぼ一致することが示され、提案したモデリング手法の妥当性が確かめられている。

以上のように本論文は、運転員教育システムや運転員チームのモデリングを開拓し、原子力プラントの安全上有益な新知識を得ており、原子力工学、情報工学の進歩に寄与するところが大である。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。