

氏 名	きたむらまさし 北村雅司
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学 位 記 番 号	エ ネ 博 第 107 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 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	人間機械相互作用の認知工学的評価手法と PWR 用中央制御盤への適用 に関する研究

論文調査委員	(主 査) 教 授 吉 川 榮 和	教 授 三 島 嘉 一 郎	助教授 下 田 宏
--------	----------------------	---------------	-----------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、複雑な機械システムのヒューマンマシンインタフェースでの、人間機械相互作用の認知工学的評価のための基礎的手法の開発と、原子力発電所プラントシミュレータの高機能化を行うとともに、それらを PWR 型原子力発電所の中央制御盤の検証及び妥当性評価に適用した結果をまとめたもので、6章からなっている。

第1章は序論で、原子力プラントの中央制御盤のような大規模システムのヒューマンマシンインタフェースでの、人間機械相互作用の認知工学的評価のための具体的な手法が確立していないことを述べ、客観的かつ定量的な評価を可能とする新たな認知工学的評価手法の提起と、PWR 型原子力発電所の中央制御盤に、それらの手法を適用してヒューマンマシンインタフェース設計の効果的な検証手法の確立を本研究の主題とすることを述べた後に、本論文の構成を示している。

第2章では、人間の内面的行動である認知行動の状態遷移を、視覚系その他の複数の生理指標を多角的に計測して、ヒューマンマシンインタフェースにおける人間の内面的認知状態を推定する方法を述べている。具体的には人間の内面行動である認知行動の状態遷移によって、個々の生理指標は様々に変動するが、単一の生理指標による認知状態の推定精度は低くても、複数の生理指標を組み合わせることによって人間の認知行動状態の推定精度が向上しうることに着目し、あいまい推論、統計的推定法、ニューラルネットによる推定法を提起して、基礎実験により個々の推定方法の精度を比較している。

次いでニューラルネットによる認知行動状態推定法について、ニューラルネット構成のための効果的な学習用知識を事前に実験で収集する方法を述べ、各種生理指標の計測、特徴抽出および認知状態推定の全体を一体化してリアルタイム処理するシステムを開発している。開発した実験システムを用いて、被験者実験により認知状態の推定精度を求めてシステムの有効性を考察している。その結果、(1)ヒューマンマシンインタフェースの設計評価に、生理指標を用いた人間の内面状態評価が有効であること、(2)生理データを用いた手法の限界として、個人差があるため、個人ごとにニューラルネットワークの作成が必要であることを示している。そして提案した手法は、他の研究者によって原子力発電所中央制御室運転員の認知行動シミュレータの開発と検証に应用され、コンピュータシミュレーションによる中央制御室の設計評価法に発展されたことを述べている。

第3章では、制御盤の設計においては人的操作の信頼性の定量評価が求められるとしてヒューマンエラー率およびメンタルワークロードを簡便に定量評価できる机上による評価手法を検討している。

まずヒューマンエラー率の机上評価法として、原子力発電所の確率論的安全性評価のために開発された THERP 手法は手順が明確な人的タスクの信頼性評価に適していることから、運転操作や保守手順が厳密に定められている原子力プラントの2つの制御盤の設計評価に適用している。具体的には、PWR 用総合デジタル化システム向け中央制御盤の開発に適用して、従来のアナログ型中央制御盤に比較して、同一タスクを遂行する上でヒューマンエラー率が改善されていることを評価している。さらに現場の保守用制御盤として変圧器保護リレー盤に適用して、ヒューマンエラーの発生確率が低い盤面の器具配列案を導出した適用例を示している。

次いでもう一つの大きな設計目標であるワークロード低減の評価については、従来の中央制御盤であれば、広い盤面上を移動するために要する時間が大半であるため、運転員の移動距離を評価していたが、計算機化された中央制御盤においては、座位による運転操作であるために移動はないものの画面を用いた運転操作に伴う認知処理のワークロードを評価する必要があるとしている。そして認知処理のワークロードを定量評価するために、Card らによって提唱された人間情報処理モデルを用いて認知処理のワークロードを評価している。具体的には、PWR 用総合デジタル化システム向け中央制御盤の開発に適用し、従来の中央制御盤と比較して認知処理のワークロードが改善されることの評価に応用している。

第4章では、原子力発電所中央制御盤のヒューマンマシンインタフェース設計の検証および妥当性確認には、原子力発電所の様々な事故時のプラント挙動をできるだけ正しく実時間で模擬できる事故シミュレータの開発が必要なることを述べて、そのための PWR 用事故シミュレータのシステム構成法と事故時原子炉二相流解析モデルを課題としている。

先ず、事故シミュレータのシステム構成法では、複数の計算機により高速演算を可能とするため、光ファイバにより結合された分散型共有メモリを用いる4台のコンピュータ構成のシミュレータアーキテクチャを開発している。そして事故時原子炉二相流解析モデルでは、高精度な二流体モデルと実用上同等の解析モデルであるドリフトフラックス熱非平衡モデルを用いることにより、高速かつ安定性に優れ、運転訓練などに使用可能とするため事故事象の模擬機能を向上させた二相流解析コードを開発している。そして開発した PWR 用事故時シミュレータが、PWR 用中央制御盤の設計における検証および妥当性確認のためのシミュレータ検証に適用可能であることを、ブロードダウン実験データ等の各種実験データとの比較により示している。

第5章では、原子力発電所中央制御室のヒューマンマシンインタフェース設計の評価規格や基準に関する国際的動向を展望し、その要請である①機能設計と詳細設計の2つの段階での検証の反復による評価、②人間信頼性解析の組み込み、を反映して具体化させた方法として、①客観評価法として、机上評価とモックアップによる動的検証評価、②主観評価法として運転員によるアンケート、チェックシート、インタビュー、画面チェック、で構成される中央制御盤のヒューマンマシンインタフェース設計の評価検証手法を導出し、これを PWR 総合デジタル化システム向け中央制御盤の標準設計仕様の開発に適用して有効性を確認した結果について述べている。特に従来はプロトタイプ制御盤での運転員によるアンケートによる主観評価を中心とした妥当性検証が主であったが、そのような運転員による検証実験の前に、制御盤の設計段階では第3章で提案した手法による机上評価によって人間信頼性評価を定量的に確認しておくことが、見通しよくヒューマンマシンインタフェースの設計検証を行うことに繋がるとしている。

第6章の結論では、本論文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、人間機械相互作用の認知工学的評価のための基礎的手法の開発と、原子力発電所プラントシミュレータの高機能化を行うとともに、それらを実際の PWR 型原子力発電所中央制御盤のヒューマンマシンインタフェース設計の検証及び妥当性評価に適用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. ヒューマンマシンインタフェースでの人間の内面行動である認知行動の、状態遷移に付随して視覚系その他の生理指標が変動することに着目し、複数の生理指標を組み合わせる人間の認知行動状態を推定する方法として、あいまい推論、統計的推定法、ニューラルネットによる方法を考案し、基礎実験によりそれぞれの推定精度を比較検討した。
2. ヒューマンマシンインタフェースにおける認知行動の状態推移をリアルタイムで推定する方法として、ニューラルネットによる推定法をもとに、ニューラルネット学習に必要な認知状態のサンプルデータ収集のための被験者実験法を考案するとともに、各種生理指標の計測、特徴抽出および認知状態推定を一体化したシステムを構成して、被験者実験によりその機能を検証した。
3. ヒューマンマシンインタフェースにおける人間信頼性の評価指標であるヒューマンエラー率とメンタルワークロードに対して、それぞれヒューマンエラー率の予測解析法である THERP 手法と人間情報プロセサモデルによるタスク遂行時間の予測によって、簡便に定量評価する方法を構成し、これらを用いる机上評価で各種制御盤の設計代替案の比較検討を行った。

4. 原子力発電所中央制御盤のヒューマンマシンインタフェース設計の検証および妥当性確認を行うための動的検証に用いる事故シミュレータについて、分散型のシミュレータ構成とドリフトフラックスモデルによる気液二相流モデルの適用により、その実時間計算機能の実現と熱流動解析機能の向上を達成し、既存の実験データ等との比較により解析精度を検証した。
5. 原子力発電所中央制御室のヒューマンマシンインタフェース設計の評価基準に関する国際的動向を展望し、その要請である①機能設計と詳細設計の2つの段階での検証の反復による評価、②人間信頼性解析の組み込み、を反映して、①机上評価とモックアップによる動的検証評価を組み合わせた客観評価法、②運転員へのアンケート等による主観評価法、で構成される具体的な中央制御盤のヒューマンマシンインタフェース設計の定量的、総合的な評価検証手法を新たに提起した。
6. PWR 総合デジタル化システム向け中央制御盤の標準設計仕様の開発において、上述の5. に提起した中央制御盤のヒューマンマシンインタフェース設計の評価検証手法に基づいて、3. による事前の机上評価の実施と、4. により機能向上を行った事故シミュレータを組み込んだ中央制御室モックアップにより実際の原子力発電所運転員を被験者にする動的検証実験、アンケート等による主観評価を実施して、提起した評価手法の有効性を示した。

以上要するに本論文は、人間機械相互作用の新たな認知工学的評価手法の提起、PWR 用プラントシミュレータの機能高度化、および原子力発電所中央制御盤の総合的な設計評価・検証手法の体系化を行ったもので、これらの成果は大規模プラントのヒューマンマシンインタフェース設計評価法の向上に貢献するものであり、学術上、實際上、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17年1月20日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。