

氏 名	ヤン 楊 小 晶
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学 位 記 番 号	論 エ ネ 博 第 42 号
学位授与の日付	平 成 17 年 11 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学 位 論 文 題 目	A Study on Simulation-based and Human Factors-centered Design Methods for Advanced Main Control Rooms in Nuclear Power Plants (原子力発電所の新型中央制御室のシミュレーションベースの人間工学設計 手法に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 吉 川 榮 和 教 授 中 込 良 廣 助 教 授 下 田 宏

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、原子力発電所の新型中央制御室の人間工学的設計に適用するための、シミュレーションベースの評価手法を研究した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、新型中央制御室の計算機シミュレーションに基づいた人間工学設計手法に関する研究の背景と目的、本研究で提案する手法の概要とその意義、および論文の構成について述べている。

まず、研究の背景として、これまでの原子力発電所の中央制御室開発の歴史的発展を4世代に分類して展望した後に、従来の中央制御室のマンマシンインタフェース開発手順での評価方法に、人的因子面での定量的評価の必要なことを指摘している。そして、これを解決する方法として、人間工学的手法を取り入れた計算機シミュレーション手法を導入することにより、(1)中央制御室の設計理論と手法を体系化すること、(2)マンマシンインタフェースの構成要素を機能オブジェクトとして捉えてシミュレーションで設計すること、(3)運転員の人間信頼性の解析手法を導入すること、(4)中央制御室のマンマシンインタフェース設計の定量的評価手法を提起すること、の4つの観点からこの研究の意義を述べた後、本論文の構成を示している。

第2章では、計算機シミュレーションベースの操作手順に基づくタスク分析法を提案し、実際に3つの事故対応操作事例にその手法を適用してその有効性を示している。

まず、中国清華大学で開発された新型高温ガス試験炉 HTR-10 の、核熱流挙動とプラント制御システム及びマンマシンインタフェース挙動の全体の動特性を模擬する統合型シミュレーション環境 HTRSIMU を開発したことを述べた後に、これを用いて HTR-10 のマンマシンインタフェースの機能オブジェクトとその操作手順の新しい設計方法を提案している。これは、計算機シミュレーションの結果に基づいて、マンマシンインタフェースでの操作系列の各単位タスクについて、時系列に沿った操作手順を確認しながらプラントパラメータ表示と制御タスクを時間順に分解して求めて定量的に解析するものである。そして、統合型シミュレーション環境 HTRSIMU を用いて HTR-10 の(a)出力低減時、(b)燃料挿入管破損事故時、(c)外部電源喪失事故時について、プラント挙動と運転員の操作を模擬し、提案した手法を用いてこれらの対応操作手順とその時間を算出し、インタフェースへのパラメータ提示時間と操作余裕時間を対比して、この手法の有効性を示している。

第3章では、原子力発電所運転員の人間信頼性解析モデルとして、統合モデルと称する新たな IA モデルを提案し、訓練シミュレータでの実際のプラント運転員による事故時対応操作の実験データベースに提案したモデルを適用してその有効性を示している。

まず、原子力発電所事故の多くがヒューマンエラーに起因することから、運転員の人間信頼性解析法の向上が必要なことを述べ、代表的な運転員の人間信頼性解析モデルである認知行動モードの相違に着目する SRK モデルと、事故事象本来の診断難易度に着目する CP モデルとを検討している。その結果、運転員の認知行動モードと事象の難易度の双方が要因となる運転員の信頼性を解析するにはいずれも不十分であることから、SRK モデルと CP モデルの利点を生かしてそれらを統合するものとして IA モデルと称する新たなモデルを提案している。IA モデルは、人間—機械相互作用を人間側の要因と

発生事象の要因の両面から5つのタイプに分類するものである。54人の運転員による訓練シミュレータでの5つの事故時対応の操作データをもとに非対応確率の時間曲線を求め、その曲線のパターンの相違を提案したIAモデルの分類法で説明し、提案したIAモデルの有効性を示している。また、これらの結果をもとにマンマシンインタフェースの設計原理およびその技術的要件について考察している。

第4章では、原子力発電所の動特性だけでなく運転員の行動をも模擬する統合型マンマシンインタフェース評価システムを用いて新型中央制御室のマンマシンインタフェースの設計を人的要因の観点から定量評価する方法を述べている。

まず背景として、従来の原子力発電所の中央制御室に用いられてきたスイッチ、レバー、メータ等に代わり、最近ではコンピュータ技術を駆使した大型表示パネル、タッチスクリーン、キーボード、マウス等を用いる新型中央制御室が開発されてきたこと、新型中央制御室は設計自由度が高い反面、それらが運転員の操作に及ぼす影響を評価することが難しいことから、従来のマンマシンインタフェース評価手法の問題点を検討している。

次に、新型中央制御室の評価法として、原子力発電所の動特性だけでなくそれを操作する運転員の行動も模擬する計算機シミュレーションを用いた統合型評価手法を新たに提案し、実際に新型中央制御室を対象とした統合型マンマシンインタフェース評価システムをPCベースで構成している。これは、運転員の操作を模擬する操作プロセスシミュレータ、マンマシンインタフェース情報のエディタ、操作手順エディタで構成するもので、シミュレーションベースで様々なマンマシンインタフェース設計を評価するものである。

そして人的因子コストと称するマンマシンインタフェースを総合的かつ定量的に評価する新たな指標を提案している。提案する人的因子コストは、マンマシンインタフェース操作時の運転員の心的・肉体的負荷や時間要因等を統合する数値指標であり、(1)どこに操作対象があるのか、そのインタフェース画面を探すのに必要な人的因子コスト、(2)インタフェース画面から操作対象を特定するのに必要な人的因子コスト、(3)操作対象を操作するのに必要な人的因子コストの3つからなる。さらに、開発した統合型マンマシンインタフェース評価システムにより第2章で述べたHTR-10のために設計した新型制御盤と操作手順の妥当性を3つの事故事例の運転員対応操作での各操作ステップの人的因子コストを算出することにより、評価している。

第5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、原子力発電所の新型中央制御室の人間工学的設計に適用するための、シミュレーションベースの評価手法を研究した結果をまとめたもので、得られた成果は次のとおりである。

1. 中国清華大学開発の高温ガス試験炉HTR-10の核熱流流動特性と、その制御システムおよびマンマシンインタフェースの動的挙動を模擬する、パソコンベースの統合型シミュレーション環境HTRSIMUを開発し、さらにタスク分析法に基づいて運転操作の時系列にそって、マンマシンインタフェースへのプラントパラメータ表示と運転員入力操作との時間余裕の適切さを定量解析する、インタフェース設計法を新たに提案した。
2. HTR-10の出力低減操作、燃料挿入管破損事故対応操作、外部電源喪失事故対応操作の3つを実例に、統合型シミュレーション環境HTRSIMUを検証するとともに、1.に提案したインタフェース設計法の有効性を示した。
3. 運転員による事象診断の人間信頼性解析モデルとして、運転員の認知行動モードの相違に着目するSRKモデルと、発生事象自身の診断難易度の差に着目するCPモデルの双方の長所を統合し、運転員の事象診断における非対応確率—時間曲線を5つのパターンに分類するIAモデルと称する新たな手法を提案した。
4. 訓練シミュレータによる実際の運転員による各種事故事象に対する異常診断実験の操作データベースをもとに、事故タイプごとの運転員の非対応確率—時間曲線を求め、それぞれの曲線形状の相違を、3で提案したIAモデルで分類できることを示し、IAモデルが運転員の人間信頼性解析に有効なことを示した。また訓練シミュレータにより得た平均対応時間を実機条件に校正する方法を導いている。
5. 人的因子コストと称するマンマシンインタフェースの人的要因の適合性を総合的に定量評価する指標を新たに提起し、原子力発電所のプラント動特性と運転員操作行動を連係して模擬するPCベースの統合型マンマシンインタフェース評

価システムによる数値シミュレーション結果を用いて HTR-10 のインタフェース設計の妥当性を定量評価した。

以上要するに、本論文は、シミュレーションベースで原子力発電所の新型中央制御室を人的要因の観点から、設計し、評価する新たな方法を開発したもので、得られた知見は学術上、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のあるものと認める。また、平成17年10月5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。