

氏名(本籍)	白川 昌和 (徳島県)
専攻	信頼性情報システム工学専攻
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第133号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成31年3月24日
学位論文題目	Study on applying interactive multi-objective optimization method for power plant system design (主査) 荒川 雅生
論文審査委員	(副査) 佛圓 哲朗 (副査) 八重樫 理人 (副査) 後藤田 中

## 論文内容の要旨

In projects of social infrastructure systems such as energy and environment, water supply and sewerage, roads, railways, airports, urban and building, and information communication where experts from different fields participate, various opinions and ideas are given at the upstream design phase, and the system design often becomes increasingly complicated. This study was conducted to overcome such problems; that is, an optimization method that can be considered for the overall system design was established to improve the system performance and achieve appropriate balance among various evaluation indices while satisfying safety requirements and avoiding over-engineered of the entire system. Moreover, in this study, we considered that it is possible to create a completely new technical innovation by accepting diverse system requirements.

For example, thermal and nuclear power plants can be described as large-scale systems having a complicated hierarchical structure as they are composed of many systems, machines, and components. In the system design of such a power plant, naturally, the technical development of individual machine and component is important. Furthermore, a system design that captures the overall characteristics of the plant system and its design optimization is essential. The evaluation indices in the system design of power plants are diverse. Specifically, on the premise of ensuring safety of life and property, the evaluation indices have multiple objectives taking many factors into consideration such as maintainability, environmental feasibility, economic efficiency, construction workability, operational controllability, and reliability. These evaluation

indices are treated as multi-objective optimization problems. Although the capabilities of computers and optimization tools have improved, we are often confronted with the difficulty of solving problems in actual plant system design. The reasons for the difficulty include the mathematical modeling of the design object; however, the problem of decision-making by the designer is equally important. In engineering design tasks for a power plant, design engineers with a variety of expertise such as mechanical, electrical, chemical, control, information, architectural, and civil work together in the project. In addition, engineering design, from basic planning to construction, has many processes and takes several years to complete. Design engineers are required to make appropriate value judgment according to design processes taking the design progress and market changes into consideration.

The system design of a power plant must satisfy safety requirements and take into consideration a plurality of evaluation indices. In addition, features such as the need for flexible decision-making according to design progress and market changes should also be considered. Such advanced engineering designs are mostly dependent on the expertise and intuition of skilled designers, which may increase the project cost and risk. Consequently, the problem of how to carry out the overall system optimal design has not been addressed.

Therefore, the aim of this doctoral research is to develop an interactive multi-objective optimization system that supports multiple-criteria decision-making for the system design of a power plant through interaction between a designer and a computer. This system consists of a simulation model that calculates various evaluation indices of the plant system design and an interactive multiple-criteria decision-making system that implements a multi-objective optimization algorithm. The basic planning and design of the plant system can be categorized into three major design problems: process design, where heat balance calculations of the process flowsheet are carried out; operation design, where a control strategy is developed; and layout design, where a plot plan (general arrangement drawing) is created. Since the process design can be mostly evaluated objectively (non-subjectively), we focused on the remaining two design problems in this research, namely operation design and layout design, which are likely to reflect the designers' (or operators') subjective decision. Further, since we intend to use this system in the upstream design phase (for instance, basic planning and design), which has high degree of design freedom for decision-making, the system should be able to examine numerous design candidates in a limited time frame using simple design data. We verified the usefulness of the proposed system by evaluating some design problems faced in actual power plants. The proposed method does not require the effort

of registering design knowledge and rules on a computer as in the conventional method, and it has a feature that easily reflects the thinking and value judgment of designers in the resulting optimum design. Moreover, there is no need to comprehensively calculate Pareto-optimal solutions beforehand as in the conventional method; the proposed method is superior in terms of its responsiveness to changes in the market environment and plant characteristics.

## 審査結果の要旨

本論文は、発電プラントのシステム設計全般への対話型多目的最適化の導入を図り、設計者により意思決定の場を広げることを目的としたものである。3部構成となっており、全10章から構成されている。(6編のジャーナル論文、および、2編の国際会議論文をまとめたものである)

第1部では、発電プラントの設計技術者の現状とシステム設計構築へ向けた課題を整理している。特に第2部でのべる運用面での動的シミュレーションにおける評価対象における入出力関係を整理し、どのような問題を取り扱うのかを整理している。

第2部では、電力プラントの運用面での現実に抱えている火力プラントの立ち上げ時の運転の最適化を取り上げている。現在、我が国では太陽光発電に代表される自然エネルギーの利用割合が増している。太陽光発電は特に天候と言う外乱に左右されることが多く、不足分をまかなう、バッファ役が火力発電プラントには求められており、状況に応じた停止、再稼働を計画しなければならない。この際に立ち上げの最適化は運用上非常に重要な役割を果たしている。ところが、運転のためのシミュレーション単体ですら、時間を要するために、最適な運転計画を意思決定に許される時間内に終わらせることはほぼ無理であった。この問題に対して、ニューラルネットワークの一種である RBF ネットワークを近似器として利用し、満足化トレードオフ法による対話型意志決定法を利用することで、運転者が所望する計画を選べるようにした。本論文では、近似精度の精査、運転者の意思の反映がどのような立場にあるかなども、SOM、DEA を通じて伝える工夫などもあわせて検討している。

第3部では発電プラントの2次元的な配置、すなわち、プロットプランを扱っている。プロットプランは熟練したエンジニアの経験と勘に寄り添うことが多く、最適化困難な問題としてソフトウェアの導入が困難な問題であった。それ故に、非常に時間を要する部分であり、エンジニアの一助となる提案が求められているところである。この問題に対して、3つの最適化ステップを通じて課題の解決を図っている。すなわち、配置順序決定問題(順序決定のための遺伝的アルゴリズム)とルール選択(通常遺伝的アルゴリズム)から建屋の配置を決定し、PSO を利用した配置の自動調整を通じて、複数の配置案を提示し、パレート解の中から選択できるようにし、最後に ACO を用いた配管やパイプの経路候補をあげ、

その後、遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化により経路を決定する方法の提案を行っている。発電プラントの特殊事情を考慮するためには、このような構成が必要不可欠であり、実際に、設計者の意図した選択を可能としている。

以上、要するに本論文は発電プラントの運用として必要なプロセス設計、配置設計、運用設計の中から運用設計、配置設計を特に取り上げ、いずれも満足化トレードオフ法をベースに設計者との対話型の意味決定を行うシステムを提案し、個々の最適化困難な問題に対して最適化の工夫を施すことでこれを乗り越え、実用的なレベルに至った研究であり、特に熟練のエンジニアには、基礎検討段階での提案を行い、より全体を俯瞰しながら設計を行えるツールを提供したものである。このような試みは、プロジェクトに参加するメンバーの合意形成を高め、プロジェクトをスムーズに運用するためのカギになりうるものであり、工学上、工業上極めて有益な論文である。

## 最終試験結果の要旨

公聴会、及び、口頭による最終試験は平成31年2月19日13:30より2時間強ほど行われた。発表後、30分強に及ぶ質疑応答、その後、主査、副査による最終試験によって行われた。

公聴会では、学外の最適化に関するエキスパート3名、学内の教員20名を含む34名の出席の下、日本語で発表がなされた。論文の主旨、目的、実用上の狙いを含めて概要の説明後、配置設計の研究内容、運用設計の研究内容の順に説明が行われた。

質疑応答では11個の質問がなされた。いくつかを抜粋する

**Q:** 配置設計、運用評価まで網羅的であるが、今までなぜやっていなかったのか気になる。この研究以前は、どの程度の水準だったのか？

**A:** かつては、CAD等の既構築のデータがあるが、活用していない。熟練設計者の設計コンセプト支援(共感)が大事になる。熟練設計者とシステムを競争させると熟練設計者がかかってしまう。プラントの規模も大きくなり、技術者が判断の部分は、人間によるところ。配置設計においても、設計コンセプトの支援にフォーカスを当てたものであり、そもそも提案の最適化はゼロからを補えるものではない。

**Q:** 配置設計については、受け入れられにくいのは理解できるが、立ち上げのような運転のフレキシブルな運用の方が受け入れられやすいのではないか？

**A:** 既にこちらはパッケージとしても売られている。運転士はいろいろな情報に囲まれていて大変なので、情報の提示が楽になるような気がしている。使ってもらえるうえで、相手を説得していく、理解が得られるような部分を改善していきたい。

**Q:** 基数列を入れ替えるというアイデアはおもしろい、なぜこれを選んだのか？

**A:** 基数列を入れ替えているのは、最良にむかっている合理性が見いだせるからである。満足化トレードオフ法の提案者である甲南大学名誉教授の中山弘隆先生より

C:満足化トレードオフ法がここまで実際の会社で使われるようになったかと感激する。最終試験においては、本論文の先にある姿について議論が行われた。本論文で提示したシステムはエンジニアの支援のツールとして、より、思考する機会と場を与えることを目的としており、さらに発展させていきたいという旨の発言があった。発表のわかりやすさ、質問に対して的確に回答できている点、論文の工業上、工学的な質の高さを含め、本人の博士（工学）としての資質は疑う余地がない。最終試験を合格とする。