

称号及び氏名	博士（工学） 吉 田 修
学位授与の日付	2007年3月31日
論文名	「ビル用各種エネルギー供給システムの 新設・更新最適計画に関する研究」
論文審査委員	主査 横山 良平 副査 角田 敏一 副査 吉田 篤正

論文要旨

我が国では、オイルショック以降産業部門におけるエネルギー需要の伸びが小さいのに対して、民生部門における各種ビルのエネルギー需要の伸びは大きく、将来も伸びていくものと考えられており、ビルの省エネルギー化が重要な課題の一つとなっている。ビルは電力・空調などの各種エネルギーを必要とし、近年ではこれらに応じて新たなエネルギー供給機器の開発が進み、ビル用エネルギー供給システムはヒートポンプ、蓄熱槽、ボイラ、コージェネレーションなど多種多様なエネルギー供給機器から構成されるシステムとなっている。エネルギー供給システムは一度導入されると長期間使用されるため、その新設計画においては、エネルギー需要量の季節的・時間的变化に対応した構成機器の運用方を考慮しながら、機器の種類、容量および台数などを適切に決定することが重要である。また、近年においてはESCO事業のような新たなビジネススキームが登場し、使用中のエネルギー供給システムの中でエネルギー効率の低い一部の機器を撤去し、それに代わってエネルギー効率の高い機器を新しく導入するという更新計画を適切に行う必要性も高まっている。

しかしながら、ビル用のエネルギー供給システムの新設および更新計画にあたっては、構成機器の種類、容量、台数および運用方に非常に多くの代替性が存在するため、これまで、設計者は前例に基づいて多くの代替案の中で有望と思われるもののみを比較検討し、試行錯誤的にシステムの計画案を決定することが一般的であった。そのため、このようにして決定された計画案が合理的なものであるかは十分に検討されてこなかった。また、エネルギー供給システムは必要なエネルギーを安定的に供給することが第一の目的とされ、単純に必要な最大エネルギー需要を満たせるように計画案を決定するなどの方法が採用されてきた。しかしながら、企業間競争が激しくなった現在では経済性を極限まで追及したエネルギー供給システムの導入が望まれるようになってきている。また、地球環境保全と

いう新しい価値観にも対応したエネルギー供給システムの導入が社会的にも要求されるようになってきている。そのため、経済性だけではなく省エネルギー性や環境性にも優れたエネルギー供給システムの新設および更新計画を合理的に行うことが重要であり、そのための手法の構築が必要とされている。

本研究では、ビル用の各種エネルギー供給システムの新設および更新計画を、最適化手法を用いて上述の課題を考慮しながら合理的に実施するための方法を提案するとともに、それを具体的なシステムの計画に適用し、知見を得ることを目的とした。新設計画に対しては、従来の手法を拡張して実用性を高めるとともに、これまで研究が全くなされていなかった更新計画に対しては、これを合理的に策定する手法を新たに提案した。また、これらの手法を用いて、事務所ビルや病院という民生用ビルの代表建物を対象として最適計画を策定し、前例に基づく計画案と比較して、本手法によって合理性の高い計画案が策定可能であることを示した。本論文は7章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

1章では、結論として、ビル用エネルギー供給システムの新設および更新計画に際しての課題を指摘し、本研究の目的および本論文の概要を述べた。

2章では、エネルギー供給システムの新設計画に対して、実用性を高めるために従来の手法を拡張し、多種多様な機器を導入候補機器として含め、機器故障時のバックアップの観点から機器台数を考慮し、さらに多様な料金体系に対応できるような最適計画手法を提案した。例として延べ床面積約 15 000 m²の事務所ビルに本手法を適用し、前例に基づく計画では検討されなかったような電気熱源とガス熱源の機器をを組み合わせたハイブリッドシステムが最適であることを明らかにした。また、このシステムをいくつかの従来型システムと比較し、年間総経費が大きく削減されていることを示した。この適用例を通じて、本手法を用いることで経済性の観点からエネルギー供給システムの最適な構成と運用方策を上記の複雑な条件下においても合理的に導出できることを示した。

3章では、2章で提案した手法をさらに拡張し、経済性に加えて省エネルギー性あるいは環境性の観点から最適化を行う多目的最適化手法に基づくエネルギー供給システムの新設最適計画手法を提案した。例として2章と同様に延べ床面積約 15 000 m²の事務所ビルに本手法を適用し、経済性のための年間総経費に加えて省エネルギー性のための年間一次エネルギー消費量あるいは環境性のための年間CO₂排出量を目的関数として最適計画を行った。その結果、得られたパレート最適集合解に基づき、二つの目的関数の間のトレードオフ関係ならびに解の変化に伴うシステム構成の変化を明らかにした。これにより、経済性のある程度の低下を許容しつつ省エネルギー性あるいは環境性の向上を達成できるエネルギー供給システムの計画が可能であることがわかった。例えば、経済性の低下を4%だけ許容できれば省エネルギー性を22%向上させたり、環境性を18%向上できる。このときのシステム構成は2章で得られたものと異なり、それぞれ電気熱源機器を中心としたものであることがわかった。

4章では、対象ビルをより多種多様なエネルギー供給機器を必要とする延べ床面積約 25 000 m²の病院に変更し、経済性の観点からエネルギー供給システムの新設最適計画を標準的な条件下で行うとともに、条件が変化した場合における感度分析を行った。標準的な条件下では、前例に基づく計画では検討されなかったような電気熱源およびガス熱源の機器に加えてコージェネレーション機器からなるハイブリッドシステムが最適であることを明らかにした。感度分析においては、機器設備費、機器性能およびユーティリティ料金を変化し得る条件として採用し、電気およびガスに関する項目についてそれぞれ変化させて分析した。その結果、以下のような最適計画の特徴が明らかになった。ガス熱源機器の性能が向上、またはガス熱源機器の設備費あるいはガス料金が低減した場合には、ガス熱源機器の容量および運用時間がともに増大するが、年間総経費削減率はわずかである。一方、電気熱源機器の性能が向上、または電気熱源機器の設備費あるいは電気料金が低減した場合には、電気熱源機器の容量は大きく変化しないが、運用時間は増大し、年間総経費削減率は上記の場合より大きい。

5章では、エネルギー供給システムの更新計画に対して、新設計画の場合に考慮する必要がなかった時間の経過に関連する要因も考慮しながら、システムの更新年、撤去すべき機器および新しく導入すべき機器とその容量を経済性の観点から決定するための最適計画手法を提案した。ここでは、単一の機器が同種の機器に更新されるという最も単純な場合に対する適用例を通じて、上記の項目を合理的に決定できることを示した。また、計画時の機器特性や経済情勢などの条件が変化した場合の感度分析を実施した。これによって、機器性能の向上率が上昇したり、機器の実購入価格が増大したり、金利が上昇したりすると最適更新年は遅れ、機器の下取り評価額が増大すると最適更新年は早くなることを定量的に示した。

6章では、実用性を高めるために5章で提案した最適更新計画手法を拡張し、多種多様な機器の撤去および新規導入を考慮できるようにした。例として延べ床面積約 15 000 m²の事務所ビルに本手法を適用し、既設機器のどの機器を撤去し、また新規にどの機器を導入して更新を行えばよいかを、導入機器の容量や運用方策を含めて決定できることを示した。また、既設機器を導入した時点では存在しなかったが、更新計画を検討する時点において技術進歩によって登場した新型高効率機器を更新候補機器として考慮する場合の影響を分析した。このような機器を更新候補機器として考慮すると、最適更新年が早くなり、更新による年間総経費の削減率が大きくなることを示した。さらに、機器性能の向上率が変化した場合、更新計画がどのように影響を受けるか分析した。各種機器性能の向上率を高くするに従って、年間総経費削減率は増大し、機器性能の向上率の高い機器の導入が進んでいくが、そのためには更新を適切に遅らせて実施することが必要であることを定量的に示した。

第7章では、結論として、本研究で得られた成果を総括した。

審査結果の要旨

本論文は、ビル用エネルギー供給システムの新設および更新計画における機器の構成および容量などの決定を、様々な課題を考慮しながら合理的に実行するための混合整数線形計画法に基づく最適計画手法を提案するとともに、それを具体的なシステムの計画に適用することによって得られた様々な知見を示したものであり、以下の成果を得ている。

(1) エネルギー供給システムの新設計画に対して、実用性を高めるために従来の手法を拡張し、様々な条件に対応できるような経済性の観点からの最適計画手法を提案している。また、事務所ビルに本手法を適用し、前例に基づく計画では検討されなかったようなシステムが最適であること、従来システムと比較して年間総経費が大きく削減されることを明らかにしている。さらに、対象ビルをより多種多様な機器を必要とする病院に変更し、各種要因に関する感度分析を行い、機器の構成および容量に及ぼす影響を明らかにしている。

(2) エネルギー供給システムの新設計画に対して、上記の手法を拡張し、経済性に加えて省エネルギー性あるいは環境性の観点から多目的最適化に基づく最適計画手法を提案している。また、事務所ビルに本手法を適用し、年間総経費に加えて年間一次エネルギー消費量あるいは年間CO₂排出量を目的関数として最適計画を行い、二つの目的関数の間のトレードオフ関係ならびに解の変化に伴う機器の構成および容量の変化を明らかにしている。

(3) エネルギー供給システムの更新計画に対して、時間の経過に関連する要因も考慮しながら、機器の構成および容量に加えてシステムの更新年を経済性の観点から決定するための最適計画手法を提案している。また、事務所ビルに本手法を適用し、既設機器の存続・撤去、新規機器の導入および容量を合理的に決定できることを示している。また、機器性能向上率などに関する感度分析を行い、システムの更新年、ならびに機器の構成および容量に及ぼす影響を明らかにしている。

以上の諸成果は、ビル用エネルギー供給システムの計画を合理的に行うための最適計画手法を示すとともに、具体的なシステムの計画への適用によって得られた有益な知見を与えるものであり、エネルギーシステム工学の分野の発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。

本委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。