

氏 名 崔 林日

学 位 の 種 類 博士 (工学)

学 位 授 与 年 月 日 2024 年 9 月 23 日

学 位 論 文 名 帯水層蓄熱システムの運用実績評価と無次元揚水温度を指標とした長期安定運用  
手法の構築

論文審査委員 主査 工学研究科 教授 西岡 真稔

副査 工学研究科 教授 伊與田 浩志

副査 工学研究科 教授 貫上 佳則

副査 工学研究科 教授 鍋島 美奈子

### 論文内容の要旨

日本は2050年にカーボンニュートラル社会を実現することを目指している。しかし、業務や家庭セクターのエネルギー消費は未だ増大傾向にあり、空調用エネルギー消費を削減することが大きな課題のひとつである。このような社会的背景の元で、本研究は、空調設備の大幅な省エネルギー化を可能とする帯水層蓄熱システム(A TES)について、高効率かつ長期間持続的に運用できる手法を確立することを目的とし、数値シミュレーションによる検討と長期運用実績データの分析を通じ、その具体的運用手法を導いた。

本論文は、次の6章で構成する。

第1章では、本研究の背景と目的、A TESに関する既往研究を概観し、本研究の位置づけを明らかとした。

第2章では、後述する章の検討で必要となるターボ冷凍機モデルについて、既往研究のモデルにおける回帰係数算定手順の曖昧な点について吟味し、高精度モデルの作成において必要な要件を見いだした。その要件のひとつは、ターボ冷凍機を定格値の周波数で一定に運転する条件下において、与えた冷却水温度条件と、これに対して得られる冷凍機最大能力との関係を表す機器特性データを用いることである。メーカーからこの特性データの提供を受け、回帰係数を作成した結果、部分負荷時・低温領域の冷却水入口温度条件を含む、広範囲の運転条件に対して高精度なモデルが作成できた。

第3章では、A TESを長期間に渡り性能を低下させることなく持続的に利用するために、冷水・温水積算蓄熱量を平衡させて運用する方法について検討した。既往研究で示された

FCS (フリークーリング蓄冷システム) を用いる方法に対し、FCSとHPS (ターボ冷凍機蓄冷システム) を併用する方法を新たに提案した。外気湿球温度の高い条件ではHPSの性能が高いこと、またFCSとHPSの優劣の境界となる外気湿球温度の閾値が存在することを明らかとした。

第4章では、A TESの長期間に渡る運用実績データを取得し、詳細に性能分析を行った。4年間の平均シス

テムCOPは5.0に達しており、ATESは通常システムより大幅な省エネルギー化を達成できることを実証した。4年に渡る実績データは類例が乏しく貴重なデータである。他方、4年間の運用終了時点で、冷水積算蓄熱量として-739GJの不均衡蓄熱量が残存している問題点も明らかとなり、不平衡を生じさせない運用手法の確立が重要な課題であることを示した。

第5章では、4章の実績運用データに基づき分析を行った。その結果、前年度の実績値から得た無次元揚水温度を指標とし、次年度の運用方法を決定することにより、経年の運用において積算蓄熱量の平衡を維持する運用が可能になることを示した。さらに実務への適用のため、この運用手法を具体的手順として整理し、フローチャートとしてまとめた。

第6章は総括であり、本研究の成果を要約して述べた。

### 論文審査結果の要旨

日本が脱炭素社会の実現を目指す中で、未だ増加の傾向にある業務セクターの空調用エネルギー消費を大幅に削減する技術として、本論文は帯水層蓄熱システム(ATES)に着目している。ATESは、オランダなどで普及が進んでいるが、日本において実運用された事例は極めて乏しく、また日本とオランダとは地質構造や気候が異なる。そこで本論文は、日本の実情を踏まえて実運用に適用可能な具体的運用手法の確立を目指し、数値シミュレーションを用いた検討および長期運用実績データの分析を行っている。

最初の成果として、年間の冷温蓄熱量を平衡させるための設備システムの提案を行っている。性能を低下させることなくATESの長期運用を行うためには、冷水蓄熱量と温水蓄熱量について、年間で平衡するように運用することが不可欠である。一方、東京以西の大都市に立地する業務ビルでは暖房負荷が冷房負荷より小さいため、ATESの冷水蓄熱量の不足分を補充する措置が必要である。この問題に対し、本論文では高効率の冷水製造方法として、冷却塔を用いたフリークーリング蓄冷システム(FCS)とターボ冷凍機蓄冷システム(HPS)を併用する設備システムを提案している。また提案した設備システムの熱効率を数値シミュレーションにより評価するため、ターボ冷凍機のモデルが広い運転条件で高精度に性能を予測できるように、モデルパラメータを決定する方法を改良している。これを用いてFCSとHPSの効率を比較した結果、外気湿球温度が低温の条件ではFCSが、高温の条件ではHPSの効率が高く、FCSとHPSの優劣を分ける閾値が存在すること、また大阪の事例ではその閾値が6°Cであることの知見を得ている。

次の成果として、4年間に渡り兵庫県で実施されたATESの長期運用を通じて、ATESの最適な運用手法を提案している。運用実績より、期間平均システム成績係数(COP)は5.0に達しており、通常システムと比べATESは高効率な空調システムであることを実証している。さらに、運用実績に基づく分析により、前年度の実績値から得た無次元揚水温度を指標として、次年度運用計画を決定する運用手法を提案し、実務に適用可能な具体的手順としてまとめている。これにより、実務において生じる様々な事象に対応しつつ、冷温の年間積算蓄熱量平衡を維持することが可能な運用手法が提案されている。

以上のように、ATESに関する詳細な数値シミュレーションの分析と、長期間取得・蓄積した運用実績データに基づいて、日本の実情に即したATES運用法を提案しており、本研究の成果は、知見の新規性および実務への有用性が高く空調調和設備工学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文の著者は博士(工学)の学位を受ける資格を有するものと認める。