博士学位論文 審査結果の要旨

Abstract of review result

芝浦工業大学大学院 理工学研究科 博士（後期）課程

Doctoral thesis defense committee

博士学位論文審査委員会

Main examiner 主査	稲積 真哉
Examiner 審査委員	穴見 健吾
Examiner 審査委員	伊代田 岳史
Examiner 審査委員	宮本 仁志
Examiner 審査委員	HOSSAIN ZAKARIA

氏　　名 Applicant's Name	CHANCHAYANON, THITI
論文題目 Thesis title	Numerical and Experimental Evaluation for Performance Optimization of Ground Heat Utilization Systems with Energy Piles （エネルギーパイルを活用した地中熱利用技術の性能最適化に関する数値・実験的研究）

〔論文審査の要旨〕

本論文は、エネルギーパイルを活用した地中熱利用システムの性能最適化に関する包括的な研究である。エネルギーパイルは、建築物の基礎杭に熱交換器を組み込み、地中熱を冷暖房に利用する技術であり、再生可能エネルギー活用による脱炭素社会実現に貢献する有望な技術として注目されている。本論文は、実験、データ解析、数値シミュレーション、文献調査を統合し、エネルギーパイルのライフサイクル全体にわたる性能ベース設計フレームワークを提案している。提案する設計フレームワークでは、材料選定、杭の形状・配置、熱交換器構成、熱媒体循環、運転時間の最適化を統合的に扱い、初期調査段階から長期運用段階までの各フェーズにおける設計原則、構成要素、関係者の責任を明示している。システム性能の評価と最適化において、有限差分法（FDM）、有限要素法（FEM）、長短期記憶（LSTM）機械学習という 3 つの異なる数値解析手法を適用し、それぞれの特性を活かした多角的な検討を行っている。FDM 解析では、地盤の熱飽和現象に着目し、デューティサイクル制御を導入することで、短期および長期において熱飽和を約 0.75〜1.5°C 遅延・低減できることを定量的に示した。杭群を対象とした FEM シミュレーションでは、エネルギーパイルの本数が 1 本から 9 本に増加することで温度上昇係数が 1.00 から 2.91 に増大し、杭間土壌温度が外部領域より 2.18〜15.43%高くなることを明らかにした。さらに、LSTM モデルを用いた機械学習による予測では、熱交換器温度を R^2>0.90、RMSE≤0.27 の高精度で予測できることを実証し、層数の増加が長期予測の安定化に寄与することを確認した。最終的に、技術性能指標（SCOP/COP、SEER/EER）と経済性指標（LCCA、NPV、IRR 等）を統合することで、計画段階から長期運用段階まで透明性が高く実装可能な意思決定を支援する統一的方法論を構築している。

最終審査会は 2026 年 1 月 20 日に開催され、申請者による論文内容の発表および質疑応答が行われた。審査委員会は 5 名の審査委員により構成され、予備審査で指摘された事項への対応状況および論文全体の学術的価値について詳細に審議した。審査においては、以下の点が高く評価された。実験、数値解析、機械学習という多様な手法を統合し、エネルギーパイルシステムの性能評価に適用した点において、方法論的に優れている。また、FDM、FEM、LSTM という 3 つの異なる数値解析手法を用いて、それぞれの長所を活かしながら相補的な検討を行い、システムの熱的挙動を多角的に解明した点が独創的である。さらに、技術性能と経済性を統合した性能ベース設計フレームワークを提案し、実務での設計プロセス改善に具体的な指針を提供している点において、実用的価値が高い。

予備審査で指摘された事項、すなわち、多様な研究内容における各パートの意義と位置付けの明確化、技術的背景や課題の整理、東南アジア諸国での実用展開に向けた具体的方策の提示、結論の適用範囲や予測精度に関する議論の充実、簡略化の仮定に関する説明の明確化等については、申請者が誠実に対応し、論文全体の構成と論理展開が大幅に改善されたことが確認された。

本論文は、エネルギーパイルシステムの性能最適化において、実験と複数の数値解析手法を統合した包括的なアプローチを確立し、ライフサイクル全体を見据えた性能ベース設計フレームワークを提案した点において、学術的に高い独創性を有している。また、技術性能と経済性を統合した評価手法は、実務における設計手法の改善に直接的に貢献するものであり、実用的価値も顕著である。研究業績についても、査読付き論文等が博士学位取得の基準を十分に満たしていることが確認された。

以上の理由により、審査委員会は全員一致で、本論文が博士（工学）の学位を授与するに値する優れた研究成果であると判断した。