

氏名（本籍）	ハディ ファラビ アスル Hadi Farabi Asl（イラン）
専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	工博甲第 238 号
学位授与の日付	平成 29 年 9 月 27 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学資源学研究科・資源学専攻
学位論文題目（英文）	半開放型地中熱利用システムの開発と評価 (Development and Evaluation of Semi-open Loop Ground Source Heat Pump Systems)
論文審査委員	(主査) 教授 藤井 光 (副査) 教授 田子 真 (副査) 教授 今井 忠男 (副査) 教授 大場 司

論文内容の要旨

Renewable energies have an important role in providing energy demands and reducing environmental damages due to the fossil fuel consumption. Among the commercialized sources of renewable energies, the importance of geothermal resources is rising worldwide. Among direct utilizations of geothermal energy, Ground Source Heat Pumps (GSHPs) are a rapidly growing usage of geothermal energy, accounting for 70% of the installed capacity of direct geothermal energy use in 2015 worldwide. However, this technology is not as popular as other renewable energies in Japan due to the high drilling costs. New technologies are focused on possible opportunities to improve the GSHP system performance and make it competitive with conventional heating and cooling systems. The objective of this study is to investigate the effect of water pumping and injection on the convective heat transfer in Ground Heat Exchangers (GHEs).

At the first step of this study, the effect of water pumping and injection in Thermal Response Tests (TRTs) was investigated. In this step, nine sets of TRTs were performed with different rates of water injection or pumping and different injecting water temperature on a GHE drilled in the campus of Akita University, Japan. Results of TRTs showed that with increasing water injection and pumping rate, the average

temperature of heat medium decreased. For example, the average of heat medium temperature for TRT without injection or pumping was 3.8°C higher than TRT with 15 L/min water injection after 48 hours of heating. The GHE was modeled using a numerical simulator and the outlet water temperature and the ground temperature recovery were history-matched based on the TRT data. Then, sensitivity analyses were carried out to investigate the effects of injecting or pumping of water with different rates and different inlet temperatures and also different natural groundwater velocities. Results of experiments and simulations showed that heat exchange rate between ground and GHE increased significantly by applying water injection or pumping inside the GHE.

In the next step of this study, a new semi-open loop GSHP system was introduced that consists of two ungrouted GHEs. In order to increase the heat transfer rate of GHEs, groundwater is pumped from one GHE and is injected to the other one using a water pump. The GHE length is 60 m each and this system could meet the heating and cooling demands of 3 rooms in Akita University campus with total area of 100 m². TRTs were performed on each GHE individually. Results of the calculation showed a high effective thermal conductivity and fast temperature recovery, revealing the possibility for fast groundwater flow in the formation.

Following TRTs, the effect of water-pumping and injection on the system performance was evaluated in heating and cooling field tests on the GSHP system. Water pumping and injection could increase COP by up to 7%. The SCOP enhancement was limited due to the presence of fast natural groundwater flow in the formation. A numerical model was constructed and was validated by experimental data. The system performance under different groundwater velocities and operating conditions was evaluated in a sensitivity analyses. The results of field tests and sensitivity analysis showed that water pumping and injection, especially in formations with slow groundwater flow, has significant effect in enhancing the system performance enhancement and also in increasing GHE heat transfer capacity. In the formations with fast natural groundwater flow, the effect of water pumping and injection on COP enhancement was limited to 12%. But in the absence of groundwater flow, this parameter could increase up to 40%-100%, for heating and cooling operations. Sensitivity studies were also carried out to evaluate the effect of GHE spacing on system thermal performance. Results of the numerical simulation showed that 5 m distance between GHEs can guarantee a limited thermal interference between the GHEs.

The economic study of semi-open loop GSHP system is the last step of the research.

A sample building, which was built on a ground having a similar condition to the experimental condition, was considered and the hourly heating and cooling loads based on the Akita city's climate were calculated and applied in the simulation. The validated numerical model was used to calculate the necessary GHE length in the absence of natural groundwater flow, with and without water pumping and injection. This process was repeated for the formation with slow groundwater flow. According to the economic parameters in Japan such as annual inflation rate and interest rate, the final saving of semi-open loop GSHP system was calculated considering the parameters including drilling costs, heat pump and distribution system costs, water pumping and injection system costs, labor and piping costs. Results of economic analysis showed that semi-open loop GSHP system is more economical in comparison with normal GSHP systems, though the merit depends on groundwater velocities. The results of economic analysis showed the important effect of water pumping and injection on drilling cost reduction, especially in slow groundwater flow condition. Drilling cost could be reduced averagely around 65%, which is very important in the countries with high drilling cost like Japan. Considering the costs of water pumping and injection in GSHP system, semi-open loop technology was estimated to reduce system cost around 22%-36% in different scenarios. As the conclusion, the introduction of the semi-open loop system is considered to be the promising solution in improving the performance of GSHP systems and its economic feasibility as a renewable and efficient heating and cooling technology.

論文審査結果の要旨

1. 論文審査結果の要旨

地中熱利用ヒートポンプ(GSHP)システムは高い省エネルギー性能を持ち、地球温暖化対策に有効な冷暖房システムと広く認識されている。一方、GSHP システムでは地盤における地下水流れの熱移流効果が熱交換効率に大きく影響するため、国内に多く見られる難透水性地盤(粘土、シルト層など)では、従来型空調に対して競争力が低いと考えられてきた。本研究ではこの問題を解決するため、地中熱交換井で地下水の揚注水を行なうことにより、熱交換井内に人工的な地下水流れを発生させて熱交換効率を向上させる半開放型 GSHP システムを提案し、GSHP システムの普及を目指した。

研究は秋田大学構内に設置した GSHP システムにおけるフィールド試験、これらより得たデータに基づく数値シミュレーション、および経済性検討により実施し、半開放型 GSHP システムの高いシステム効率の実証と同システムのデザイン最適化を目指した。

本論文は 5 章より構成され、第 1 章では本研究の社会的及び技術的背景、GSHP システ

ムの原理と国内外における普及の現状、および地中熱利用分野における従来の研究を概説するとともに本研究の目的について述べた。

第2章では、熱交換井における揚注水が熱交換性能に与える影響について、地盤の熱物性評価技術である熱応答試験を用いて評価した。熱応答試験では深度100mの試験井において、揚水レート・注水レートを0L/min～15L/minと変化させて熱媒体の加熱循環を行い、揚注水レートの増加とともに熱媒体の温度増加が抑制され、エネルギー効率の改善が期待できることを示した。また、地盤情報に基づく数値シミュレーションにおいては、揚注水は地中熱交換井における地盤温度変化に対して抑制効果を持つが、その効果は地下水流れが遅い地盤でより顕著であることを示した。

第3章では、深度60mの熱交換井2本とヒートポンプ、エアコン室内機から構成される半開放型GSHPシステムを構築し、長期冷暖房試験を実施した。そして、その結果より15L/mの揚注水によってヒートポンプのCOP(=システム出力/消費電力)が約5%改善できることを示した。次に、地盤・地下水情報に基づいて数値シミュレーションモデルを構築し、冷暖房試験データに基づいてモデルの妥当性を検証した。さらに、同モデルを用いた感度計算を揚注水レートと地下水流速を変化させて実施し、地下水流れが実験地と同様の0.15m/d程度の地盤では、揚注水によるCOP改善効果は冷暖房時に最大約13%であるが、地下水流れが存在しない地盤では暖房・冷房運転時でそれぞれ最大40%、100%程度のCOP改善効果があることを示した。これにより、半開放型GSHPシステムの導入は地下水流れが遅い地盤において顕著な省エネルギー効果をもたらすことが明らかとなった。

第4章では、前章のシミュレーション結果に基づいて、半開放型GSHPシステムの経済性に関する検討結果を示した。検討はインフレ率と金利を考慮し、計算期間20年間、秋田における一戸建て住宅を想定して、初期コストと運転コストの総額を算出した。そして、地下水流れがない地盤、地下水流れが0.15m/d程度の地盤において、揚注水の導入はそれぞれ35%、22%程度の顕著な総コスト削減効果を持つことを示した。

第5章では、本研究で得られた主な知見について総括した。

以上のように、本論文での成果はこれまで地中熱利用に不適と考えられていた地下水流れが遅い地域における地中熱利用システム普及に対する重要な知見をもたらし、地球温暖化対策への貢献が期待される工学的価値の高い研究と考えられる。

従って、本論文は博士(工学)の学位論文として十分価値のあるものと判断した。

2. 最終試験結果の要旨

最終試験は平成29年6月26日(月)10時30分～11時45分に審査委員会および平成29年6月28日(水)14時30分～15時45分に博士論文公聴会をいずれも国際資源学部2号館B202号室において実施した。審査委員会および公聴会においては藤井光審査委員会主査、田子真審査委員、今井忠男審査委員、大場司審査委員の出席のもと、論文内容と関連事項に関して詳細な質疑応答を行うとともに、口頭による学力確認を行った。審査委員会では、

- 1) 坑井配置に関する最適化計算の条件設定は妥当な範囲か?
- 2) 地中熱交換井における地下水流れはどのようにモデル上で定義されたか?
- 3) 熱応答試験より得られた地盤熱伝導率は妥当な範囲であるか?
- 4) 本研究で提案した半開放型 GSHP システムは温暖化対策に有望と判断できるか?
- 5) 半開放型 GSHP システムは大型施設に導入可能か?

などの質問があったが、いずれの質問に対しても学術的に明確な回答が得られた。以上の論文審査並びに口頭試問の結果、学位資格審査委員会は全員一致で Hadi Farabi Asl 氏が博士（工学）としての十分な資格があるものと判定した。