

氏名（本籍・生年月日）	富樫 聡（愛知県・昭和53年12月26日）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲 第611号
学位授与の日付	平成26年 3月20日
学位授与の要件	信州大学学位規程 第5条第1項該当
学位論文題目	地下熱利用技術の高度化に関する総合的研究

論文審査委員	主査	藤縄 克之	教授
		中屋 眞司	教授
		宮原 裕一	准教授
		高木 直樹	教授
		小松 登志子	教授

## 論 文 内 容 の 要 旨

昨今注目を浴びている再生可能エネルギーのひとつである地下熱を利用する技術のうち、国内で最も導入がすすんでいる技術が、ヒートポンプの熱源として利用する GSHP（Ground Source Heat Pump）システムである。また、地下浅層地盤の恒温性を利用する地下蓄熱技術（UTES：Underground Thermal Energy Storage）の導入により、地下熱利用の省エネルギー効果に加えて、熱需要に応じてより高温や低温を自在に蓄熱・回収することで、大幅なシステム高効率化が期待できる主要技術が帯水層蓄熱（ATES：Aquifer Thermal Energy Storage）である。

これら技術の導入により大幅な省エネルギー効果が期待できるものの、海外に比べると日本国内での普及は依然として遅れており、高い初期コスト、技術開発の不足、環境影響の懸念等が普及阻害要因にあげられている。したがって、地下熱利用技術の更なる普及を目指すためには、これら諸問題を解消するための技術開発が早急に望まれる現状にある。

本研究では、システムの適切な設計や環境影響評価に資する帯水層パラメータ評価のための調査および解析手法の開発として「2孔式塩水トレーサ試験と3次元数値モデルの逆解析による帯水層定数の同定」を、また、最も普及しているクローズド方式の GSHP システム設計に必須である熱応答試験についてこれまで不明瞭であった地下水環境の影響を明らかにするための「水理地質環境が熱応答試験のパラメータ同定に与える影響に関する実験的研究」を、オープン方式の GSHP システムおよび ATES 技術の高度化のために数値解析を活用した「地下水制御型 ATES システムの効果の検証と数値解析によるシステム最適化に関する研究」をそれぞれ実施し、地下熱利用技術の高度化に関する総合的研究をおこなった。以下に各テーマ別の内容と結果を整理する。

### 1. 2孔式塩水トレーサ試験と3次元数値モデルの逆解析による帯水層定数の同定

信州大学工学部キャンパスにおいて、不圧帯水層とその下部の被圧帯水層の飽和透水係数およ

び縦分散長を求めるため、塩水を用いた2孔式トレーサ試験を実施した。注入孔と観測孔でモニタリングした地下水の電気伝導度データを基に、密度流を考慮した飽和・不飽和流動および保存性トレーサの移流分散の連成問題を解くための3次元数値モデル(SIFEC3dp)にパウエルの特異傾斜法を組み合わせた逆解析法を適用することにより、パラメータの同定を行った。開発した逆解析法はまずパラメータが与えられた任意のテストケースで検証し、ついで現場のデータを用いてパラメータ同定を行った。同定されたパラメータを用いた数値シミュレーションによる計算濃度は実測された塩分濃度と良く一致した。

## 2. 水理地質環境が熱応答試験のパラメータ同定に与える影響に関する実験的研究

地盤の熱物性を求めるために広く利用されている熱応答試験の解析結果に地下水流動や土壌水分が与える影響を定量的に評価するため、地下水位および浸透量が調整でき、熱応答が測定できる室内実験装置を製作し、熱応答実験を実施した。飽和帯が卓越し、地下水流動が無視できる条件下での実験結果を用いて逆解析を行い、求められた実験地盤の熱伝導率を同様の環境下にある野外地盤で実施された原位置試験より得られた結果と比較したところ、ほぼ同程度の値が得られた。そこで、浸透流量や地下水位を変えて熱応答実験を実施したところ、浸透流量が増大するほど、また土層の飽和度が高くなるほど見かけの熱伝導率が増大することが明らかになった。さらに、不飽和帯における土壌水分量の影響を調べるための熱応答実験では、地下水位が同じであっても、土壌水分量の多い排水時の方が土壌水分量の少ない吸水時に比べて見かけの熱伝導率が大きくなることが明らかになった。

## 3. 地下水制御型 ATES システムの効果の検証と数値解析によるシステム最適化に関する研究

地下水流動を人為的に制御し、既往 ATES システムが抱える課題の多くを解消できる地下水制御型 ATES システムを開発し、その効果を水・熱連成解析コード sWATER により検証したところ、従来型システムよりも熱回収効率が向上し、且つ地盤熱負荷を低減できることが明らかとなった。また、信州大学工学部キャンパスを試験サイトとして、地下水制御型および比較検証用の従来型の2つの空調システムを導入し、実証試験により両システムの性能検証を行った。その結果、冷暖房ともに地下水制御型システムは従来型に比べて大幅なシステム効率の向上が図れ、特にフリークーリングによる効果が高いことが確認された。またサイトの地下水環境において最適なシステム運用条件を数値解析により検討し、同一の帯水層を蓄熱層とし、熱貯留と熱回収井戸を同じとした場合に熱回収率が最も高く、さらに長期間運用により、システム性能が年々向上することが確認できた。