

|            |  |
|------------|--|
| 氏名（本籍）     | 桂木聖彦（東京都）  |
| 専攻分野の名称    | 博士（工学）   |
| 学位記番号      | 国博甲第1号   |
| 学位授与の日付    | 平成31年3月21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     | 国際資源学研究科・資源学専攻   |
| 学位論文題目（英文） | 帯水層蓄熱冷暖房システムの性能向上と普及促進に関する研究（Study on the performance improvement and dissemination of heating and cooling systems using aquifer thermal energy storage） |
| 論文審査委員     | （主査）教授 藤井 光<br>（副査）教授 長縄 成実<br>（副査）教授 川村 洋平  |

## 論文内容の要旨

帯水層蓄熱（Aquifer Thermal Energy Storage：以下 ATES と記す）は地下帯水層を蓄熱槽として利用するエネルギー利用技術である。同技術を用いた冷暖房システムは欧米各国において広く普及しているものの、日本では普及が進んでいないのが現状である。日本において普及が進まない理由としては、①システムの効率的稼働に関する検討が不十分である、②地域毎に厳しい地下水揚水規制が存在する、③井戸掘削におけるイニシャルコストが高いという要素が考えられるため、本研究ではこれらを克服するための種々の検討を行った。

本論文は5つの章より成り立ち、ATES 冷暖房システムの性能向上と普及促進に関する種々の検討を行った。第1章では研究の背景や目的、および ATES 冷暖房システムの概要をまとめた。

第2章の数値シミュレーションによる ATES 冷暖房システムにおける効率的な帯水層への蓄熱方法の検討では、山形県山形市の日本地下水開発(株)本社社屋に設置した ATES 冷暖房システムにおいて実際の稼働を行うとともに、FEFLOW を用いた長期シミュレーションを行うことで、蓄熱塊規模が適正となる注入方法の構築について検討を行った。その結果、揚水量に対する注入量の割合は、暖房運転期間では94～97%、冷房期間では80～87%となり良好な還元率を実現した。稼働期間の平均では、暖房 COP（＝冷暖房出力/ヒートポンプ消費電力）は4.20～4.63、SCOP（＝冷暖房出力/循環ポンプを含む消費電力）は3.14～3.67、冷房 COPは4.47～5.26、SCOPは3.48～3.96となり、ATESにより高いエネルギー効率が得られた。続いて、井戸掘削時の諸データに基づいて3次元シミュレーションモデルを構築しシステムを長期稼働させた場合の地下温度変動についてシミュレーションを行った。その結果、対

象地である山形は、夏期稼働期間と比べては冬期稼働の期間が長いため、長期間の運転において地盤中に冷熱塊が優勢となる傾向が見られた。一方で、シミュレーションモデルを用いたケーススタディでは、揚水井と注入井を適切な間隔と位置に配置することにより、エネルギー効率が高い冷暖房システムを構築できることが示された。

第3章では、日本国内における ATES 冷暖房システム普及に向けて、全国の各自治体が制定している地下水の採取に係わる条例を調査して、市町村毎に ATES 冷暖房システムの適応性の判定を行った。その結果、国内における全世帯の半数以上において、ATES 冷暖房システム導入時には社会システムによって制約を受ける現状が明らかとなった。

第4章では、ATES 冷暖房システムの優位性を示すため、クローズドループ型地中熱ヒートポンプ冷暖房システムとの比較を行った。その結果、山形施設での冷暖房負荷、地下条件を参考にして具体的な試算を行ったところ、ATES 冷暖房システムが掘削費においてクローズドループ型と比較して 89%費用を削減できることが明らかとなった。さらに、山形施設において 2013 年に試験的に地下水をヒートポンプに直接送水したところ、COP が 0.5 上昇した。以上より、経済面、エネルギー効率面からみて、ATES 冷暖房システムがクローズドループ型と比較して優れたシステムであることが確認された。

以上の通り、本研究では ATES 冷暖房システムの国内における普及阻害要因について検討と考察を行った結果、これらに対する一定の方策を示すことができた。本研究の成果は ATES 冷暖房システムの性能向上と今後の国内外における普及の一助となると考えられる。

## 論文審査結果の要旨

最終試験として、平成 31 年 2 月 7 日(木)13 時 30 分～15 時 00 分に審査委員会および博士論文公聴会を国際資源学部 1 号館 N317 号室において実施した。審査委員会および博士論文公聴会においては藤井光審査委員会主査、長縄成実審査委員、川村洋平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 実証試験における井戸の仕上げと掘削方法、
- ② 従来型空調システムとの性能比較、
- ③ 地下水揚水規制緩和のための方策、
- ④ 海外諸国の揚水規制、
- ⑤ 直接利用技術における地中熱利用の位置づけ、

などに関する質問があったが、いずれ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桂木聖彦氏が博士（工学）としての十分な資格があるものと判定した。