

氏名	石黒 修平
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	医工博甲第454号
学位授与年月日	平成31年3月20日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
専攻名	情報機能システム工学専攻
学位論文題目	直接膨張方式地中熱ヒートポンプに用いる地中熱交換器の開発研究
論文審査委員	主査教授 武田 哲明
	教授 藤森 篤
	教授 中山 栄浩
	准教授 角田 博之
	准教授 鳥山 孝司
	准教授 船谷 俊平

学位論文内容の要旨

地盤の比較的浅層部分に存在する地中熱を利用することで優れた省エネルギー性能を発揮する地中熱ヒートポンプの導入が進められている。地中熱とは、地下100m程度の深さまでに存在する低温の熱エネルギーであり、地中温度は年間を通して温度変化がなく、夏は外気より温度が低く、逆に冬は温度が高い。この地中熱ヒートポンプは、従来の空気熱ヒートポンプを用いた冷暖房・給湯システムよりも省エネルギー性に優れたシステムを構築することが可能である。また、冷房排熱を地中に放出するため、ヒートアイランド現象の防止にも繋がると期待されている。

研究に用いた実験装置は、市販の空気熱ヒートポンプ室外機内の空気／冷媒熱交換器を地中熱交換器に取り替えたものである。冷媒量はR410Aを6.95kg、圧縮機の潤滑油を1kg充填した。冷媒は、暖房サイクルで圧縮器、四方弁、室内空調熱交換器（凝縮器）、膨張弁、地中熱交換器（蒸発器）の順に循環して圧縮機に戻る。冷房サイクルでは四方弁により冷媒の循環方向を変え、凝縮器と蒸発器の役割を切り替える。これまで、直接膨張方式地中熱ヒートポンプの地中熱交換器は配管抵抗や潤滑油の底部停滞等による1次側冷媒循環の不安定さから商用化が進まなかった。そこで、本実験ではこれらの課題を解決するため、ボアホール長を30mに短縮し、U字管の一方を複数細管で構成し、5本の1/4インチ銅管をU字管の下部で1本の3/8インチ銅管に接続する構造とした。また、3/8インチ銅管側には保温材を巻いた。本実験結果の評価には、空気熱ヒートポンプと同様に成績

係数 (Coefficient of Performance, 以下 COP) を使用し, ここでは, 空気エンタルピー法により冷房・暖房運転時の COP を求めた. 山梨大学甲府東キャンパス内の実験場において 30m のボアホールを使用した熱応答試験の結果は, 土壌の有効熱伝導率は $1.69\text{W/m}\cdot\text{K}$, 熱抵抗は 0.08K/W 及び不易層温度は 18.3°C であった.

直接膨張方式地中熱ヒートポンプでは, 地中熱交換器において冷媒流れが蒸発・凝縮を伴う気液二相流となるため, 適切な熱交換器の仕様が確立されていない. そこで, 運転時における地中熱交換器内の適切な冷媒循環方向を決定するため, 暖房運転において, 地中熱交換器への冷媒循環方向を逆方向に変更した場合について検討を行った. 暖房運転において, 冷媒循環方向が 1 流路側から流下し, 底部で反転して 5 流路側から流出する場合, 平均取得熱量は 2.8kW , 平均 COP は 7.4, 平均消費電力は 0.4kW となった. 一方, 冷媒循環方向が逆方向となる 5 流路側から流下し, 底部で反転して 1 流路側から流出する場合, 平均取得熱量は 3.0kW , 平均 COP は 3.6, 平均消費電力は 0.8kW となった. 暖房運転時には地中熱交換器は蒸発器となるため, 液状冷媒が, 5 流路側から流入することで, 1 流路に対して 5 流路分の摩擦損失による流動抵抗が増大すること, さらに液状冷媒が細管内を流下する際に管壁部分から蒸発することで更なる流動抵抗となることから圧縮機の負荷が増大したものと考えている. これにより, 冷媒循環方向が 5 流路側から 1 流路側の場合の消費電力が増大し, COP が低下したものと考えている. したがって, ボアホール型の地中熱交換器では, 蒸発過程において液冷媒を流下させる場合に, 断熱材等を用いて熱交換器最下端に到達するまでの間に液冷媒の蒸発を防ぐ対策を施さないと浮力による流動抵抗を抑えることができないことから, 圧縮機に負荷がかかり, 消費電力が増大する. これより, 冷房運転では複数管側から単管側に, 暖房運転では単管側から複数管側に冷媒を流動させる必要がある. 2013 年 8 月 19 日から 8 月 23 日にかけて, 一般家庭における使用を想定した冷房間欠運転 (運転開始 9:00, 運転終了 17:00) を行った結果, 夜間の運転停止中に地中温度は概ね回復し, 運転期間中の COP 増減率は最大約 15% 程度 (COP = 6.3~7.4) であることから, 一般家庭の使用負荷程度であれば, 補助冷却システム等は必要なく運転可能であると考えられる.

直接膨張方式地中熱ヒートポンプでは, 冷暖房運転において更なる高性能化を実証してきたが, 熱交換性能が優れているため, 従来法である間接方式地中熱ヒートポンプに比べ地中熱交換器深さを短縮できることから, 単位深さ辺りの採放熱負荷が大きくなる. そこで, 本実験では, 中規模施設および農業利用を想定した複数本の地中熱交換器を並列に用いた場合の性能評価, 地中との採放熱特性および地盤への環境負荷影響を明らかにすることを目的とした実験を行った. 実験装置は前述で使用したシステムに対して, 地中熱交換器を $20\text{m}\times 2$ 本とし, 複数細管側の配管数を 5 本から 4 本に変更した. これは, 地中熱交換器の伝熱面積, 容積および製作コストを検討項目としてシステムの再評価を行った結果及び地盤への負荷を分散させるためである. 本実験において, 深さ 30m の

シングル地中熱交換器を用いる場合及び深さ 20m の地中熱交換器を 2 本並列に用いる場合においても、COP は冷房運転時 10 以上、暖房運転時においても 5 以上の値を得て、十分省エネルギー機器として成立している。

暖房運転の結果、地中熱交換器の温度変化を見ると、いずれの地点も運転開始とともに温度が急激に低下しており、5m、10m および 15m 地点で運転開始 5 時間後に 0°C を下回った。暖房運転においては地中熱交換器全域にわたり温度変化が見られることから、地中熱交換器内で冷媒の蒸発過程が終了していない可能性があると考えられる。運転期間平均で COP は 5.6、出力 4.2kW および消費電力 0.9kW である。COP は運転開始 5 時間後に約 7 から約 5 に減少した。これは地中熱交換器温度が 0°C を下回った時間と一致する。したがって、実用化の観点からは長期にわたる連続負荷運転時の性能を確保するため、ボアホール内に外部から注水してボアホール内の水を攪拌する等の補助的な除熱システムを導入することも検討の必要がある。

論文審査結果の要旨

学位論文の審査においては、研究テーマに関する背景情報の調査、開発研究を行うに当たっての実用化への課題抽出、実用化への見通し、等について、新しい知見を含めて、どのような成果が得られているかという視点から評価した。

まず、背景情報については、現在、地中の比較的浅層部分に存在する地中熱をヒートポンプの熱源として利用することで優れた省エネルギー性能を発揮する地中熱ヒートポンプに関する開発研究であるとともに、研究の対象としたテーマは、直接膨張方式と呼ばれる新しい熱交換方式を採用した地中熱ヒートポンプに使用される地中熱交換器の開発である。熱源として利用する地中熱は、地表から 10m より深い地中温度は年間を通して一定であり、夏は外気より温度が低く、逆に冬は外気より温度が高い。したがって、従来の空気熱ヒートポンプを用いた冷暖房・給湯システムよりも省エネルギー性に優れたシステムを構築することが可能である。また、冷房排熱を地中に放出するため、ヒートアイランド現象の防止にも繋がると期待されている。しかしながら、従来方式である間接方式地中熱ヒートポンプでは、地中熱交換器を挿入するボアホールの掘削コストが高いため、産業界への普及に対して解決すべき大きな課題となっている。そこで、特に、地盤の浅層部分に存在する地中熱をヒートポンプの熱源として利用することでボアホール掘削コストも抑えつつ、優れた省エネルギー性能を発揮する地中熱ヒートポンプシステムが構築できるとして研究を進めている。

開発研究を行うに当たっての実用化への課題抽出として、まず、ボアホール深さを 30m 以下とする場合の地中熱交換器の開発研究を進めている。従来型の地中熱ヒートポンプでは、ボアホールを浅くすることは、熱交換効率が悪く、50W/m 程度の熱量しか、採放熱できないことが分かっており、

出力を大きくできない。そこで、ヒートポンプの冷媒を直接地中に導入して熱交換を行う直接膨張方式地中熱ヒートポンプの地中熱交換器の開発を進め、複数本で構成される銅管を、水を封入したボアホール内のケーシング管に収めて地中熱交換器を構成している。複数本の銅管については、5本、4本、3本と試験を行って調査し、最終的に3本のボアホールを1組として、出力約10kWのヒートポンプに対応できる地中熱交換器の基本仕様を策定している。

実用化への見通しについては、今回、研究開発に用いた実験装置は、市販の空気熱ヒートポンプ室外機内の空気／冷媒熱交換器を地中熱交換器に取り替えたものであり、もともと実用化の観点からは産業に製品として供給されている機器であったが、これまでの研究結果では、地中熱交換器内の配管抵抗や潤滑油の底部停滞等による冷媒循環量の不安定さから適切に設置できなかった。そこで、これらの課題を解決するため、ボアホール長を30mに短縮し、U字管の一方を複数細管で構成し、単管の方に保温材を施工する構造とした。その結果、得られた冷暖房性能は従来型の地中熱ヒートポンプのみならず、空気熱ヒートポンプにも勝る性能を得た。これらの成果を基に、基本設計が行われた地中熱交換器は、山梨大学の大村博士記念学術館の1階ホールの空調システムや北杜市大泉町の夏秋イチゴ用農業ハウスの冷暖房空調システムとして導入されている。

これらより、直接膨張方式地中熱ヒートポンプの経済性に対する優位性を証明できたとし、今後は製品のJIS化も含めて、実用化に大きく前進したとしている。以上のことから本論文は十分な実験データと深い考察から記述され、学位論文として有意な成果を見出しており、学位論文審査結果を合格とした。