

地下水を利用した地中熱利用ヒートポンプシステム

藤井 光 九州大学大学院

柴 芳郎 ゼネラルヒートポンプ(株) 正会員

キーワード：地中熱利用ヒートポンプ(Geothermal Heat Pump), 地下水(Groundwater), 成績係数(COP), 移流(Advection)

地中熱利用ヒートポンプシステムは場所を問わず設置でき、また省エネルギー効果が高いため、今後の普及が期待されている。同システムでは、熱交換井掘削のための高額な初期投資が普及の阻害要因となっているが、地中熱交換井を設置する地盤中に速い地下水流れが存在する場合、熱交換井あたりの熱交換量が大きく増加し、初期投資を軽減することができる。本稿では、地下水流れが地中熱利用ヒートポンプシステムに与える影響について、地下水を汲み上げない閉鎖型地中熱利用システムおよび汲み上げた地下水との熱交換を行う開放型地中熱利用システムを対象として、原理と適用例を中心に解説する。

1. 地中熱利用における地下水の利用

大地の恒温性を利用して冷暖房や融雪を行う地中熱利用ヒートポンプ(Geothermal Heat Pump, 以下 GeoHP と略す)システムは、顕著な省エネルギー性とヒートアイランド現象抑制効果を持つため、国内外を問わず普及が期待されている。GeoHP システムは図-1 に示すように、U 字型管や同軸管などの地中熱交換器に不凍液や水などの熱媒体を循環して地中との熱交換を行う閉鎖型システムと、地下水を汲み上げて採熱・排熱を行い、その後水を地下に還元する開放型システムに大別される。一般的に、閉鎖型システムでは熱交換井あたりの熱交換量が小さく、開放型システムと比べて多数の熱交換井を必要とするが、地盤中に地下水流れが存在する場合は、地下水の熱移流効果によって、熱交換井周辺地盤の温度変化が抑えられるため、熱交換井長さを短縮できる。一方、開放型システムにおいては、水産出能力の高い帯水層に位置する揚水井を用いた場合、1 坑井あたりの熱交換量は極めて大きく、初期投資を大幅に節減できるが、水産出能力の低い地層には設置することができない。したがって、開放型システムでは揚水可能量により揚水井の本数が大きく異なるため、正確な揚水量の推定は GeoHP システムの設計に極めて重要である。以上より、設置予定地盤における地下水情報(流速、温度、水産出能力など)を事前に把握することは、高額な熱交換井掘削費が導入の障害となっている GeoHP システムの導入に不可欠である。

本稿では、閉鎖型・開放型 GeoHP システムの原理と適用例に関して地下水流の影響に重点をおいて解説する。

2. 閉鎖型 GeoHP システム

本章では、閉鎖型 GeoHP システムにおける地下水流の影響に関して、その理論とフィールドから得られた実例を示す。また、現在国内外で研究が進んでいる、光ファイバ温度計を用いた地下水流の推定についても適用例を紹介する。

2.1 閉鎖型システムにおける地下水流の影響

閉鎖型システムにおける熱交換井の周辺地盤は、冬期では暖房運転による採熱とともに低温化し、夏期では冷房運転による排熱とともに高温化する。したがって、長期にわたる運転や連続運転では、ヒートポンプ一次側の熱源水温度と二次側の熱媒体や冷媒温度の差が増加し、ヒートポンプの成績係数が低下する。一方、地下水流れが存在する地盤では、図-2 に示すように熱交換による地盤の温度変化を地下水流れが下流へ運搬するため(熱移流効果と呼ぶ)、熱交換井周辺の温度変化が抑えられる。これにより、ヒートポンプにおける一次側と二次側の温度差が小さく保たれるため、長期運転においてもヒートポンプの成績係数の低下は少ない。したがって、地下水流速の大きい地盤においては、GeoHP システムを用いたエネルギー効率の高い冷暖房が可能となる。

熱交換井における単位井戸長さあたりの地中熱交換量は、地盤の熱伝導率などにより異なるが、地下水流れの無い熱伝導型地盤では通常 50 W/m 以下である。実例として、北部東北地方における地下水流動状況の異なる地盤におけるサーマルレスポンス試験(地盤の熱伝導率や熱交換井における熱抵抗・熱交換量を評価するフィールド試験)の結果を表-1 に示す。なお、同表中の見かけ熱伝導率(λ_a)とは、岩石や土壌固有の熱伝導率(λ)ではなく、地下水流れによる熱移流効果を含む熱伝導率を表し、地下水流速の増加とともに λ_a/λ は増加する。また、同表中の熱交換量は一定の熱媒体の熱交換井入口温度(熱交換井 A, 熱交換井 B とともに 30°C)および循環流量(熱交換井 A: 25 l/min, 熱交換井 B: 30 l/min)のもとで 3 日間の熱媒体循環後に測定した。熱交換井 A は、地下水流れが非常に遅い

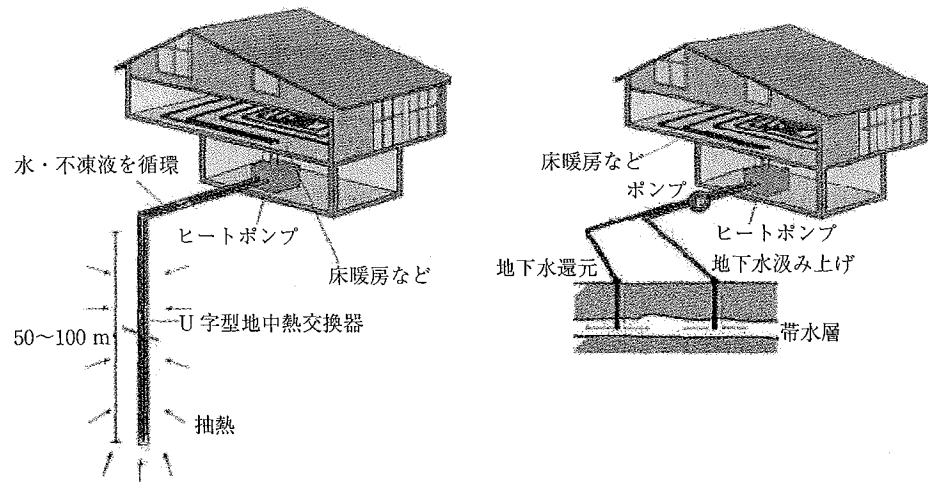


図-1 閉鎖型システム(左)と開放型システム(右)(環境省パンフレット“地中熱ヒートポンプとは?”より抜粋)

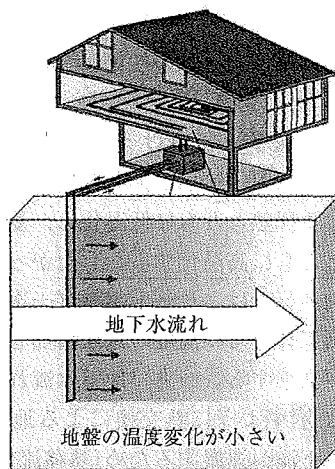


図-2 地下水流れの熱移流効果

熱伝導型地盤に位置し、標準的な地中熱交換量 40 W/m を示している。一方、熱交換井 B は速い地下水流れが存在する地盤に位置するため、熱交換井 B における見かけ熱伝導率および熱交換量は、熱交換井 A のそれぞれ 3.3 倍、2.1 倍と非常に高く推定された。地中熱交換井における熱交換量は、熱交換井 A のような地下水流れの無い熱伝導型地盤を想定して予測されることが多いため、熱交換井 B の位置において事前調査をせずに GeoHP システムの熱交換井本数や長さを設計した場合、過剰な地中熱交換器の設計をする可能性が高い。つまり、地下水流れに関する事前調査は、GeoHP システムの初期投資の削減に極めて重要である。

地下水流速と地中熱交換の相関については、新堀ほか⁴⁾が有限差分法を用いた数値モデルにより検討を行い、ペクレ数 ($Pe = ul/\alpha_s$, u : 地下水流速, l : 地中熱交換器外周/2, α_s : 地層温度伝導率) が 1 以下の場合は、熱伝導による熱移動が移流による熱移動と比較して優勢であることを示した。また、 $Pe = 1$ では熱交換に伴い坑井温度は低下(も

表-1 地下水流速の異なる 2 地点でのサーマルレスポンス試験結果

坑井名	実施地	見かけ熱伝導率 [W/(m·K)]	熱交換量 [W/m]	地下水流れ	地質
A	秋田県 秋田市	1.2	40	非常に遅い	砂混じりシルト
B	青森県 西目屋村	4.0	85	速い	凝灰岩

しくは上昇)し続けるが、 $Pe = 10$ 以上では坑井温度は熱交換開始後短時間のうちに定常状態になることも新堀ほか⁴⁾において示されている。なお、地中熱交換器外径 0.128 m (外径 0.034 m のダブル U 字管を 1 本の熱交換器とみなす)、地層温度伝導率を $3.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ とした場合、 $Pe = 1$ は $u = 0.129 \text{ m/日}$ に相当するため、地下水の熱移流効果により熱交換量の改善が期待できる地盤は、国内において広範囲に存在すると推定される。

地下水流速が大きい地盤では熱交換は短時間で定常状態となり、非常に大きい熱交換量が得られる場合がある。長野県大町市の地下水流速が極めて大きい(約 12 m/日)扇状地における強制排熱試験²⁾では、熱交換井内の充てん条件を変えたダブル U 字管型熱交換井に電気ヒータにより熱負荷をかけた水を循環し、セメント充てん井において 208 W/m 、珪砂充てん井において 247 W/m 、非充てん井において $368 \sim 383 \text{ W/m}$ という、極めて高い熱交換量が安定して得られている。GeoHP システムでは、地中熱交換器の安定性確保や地下水汚染の予防のために、熱交換器の降下後に熱交換井内をセメントや珪砂などで充てんすることが一般的である。しかし、流速の大きい地下水の流れのある地盤では、非充てん仕上げを採用することにより、地下水が直接地中熱交換器と接触して大きな熱交換量が得られるため、非充てん仕上げは高効率な熱交換井仕上げ法となる可能性がある。ただし、未固結地盤における非充てん仕

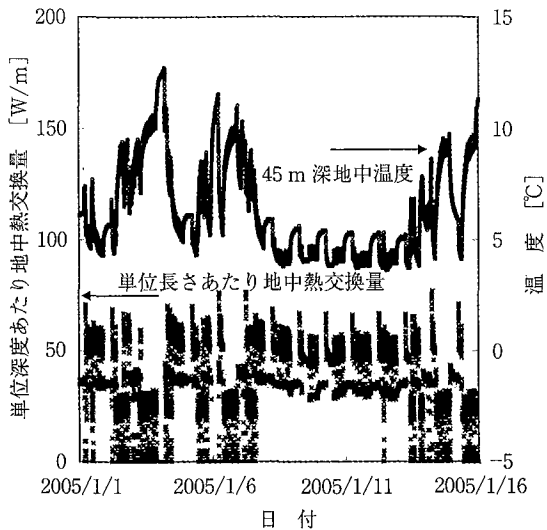


図-3 新福船(株)GeoHPシステムにおける地中熱交換量と45m深地盤温度の経時変化

上げは、坑壁保護にケーシング(坑井内に設置する鋼管)の設置を必要とし、採算性が低いため、岩盤などの安定性の高い地盤への適用が好ましい。

2.2 地下水流れの存在する閉鎖型 GeoHP システムの運転挙動

ここでは、速い地下水流れが存在すると推定された表-1中の熱交換井 A において設置された地中熱利用空調システムの運転実績を示し、閉鎖型 GeoHP システムにおける地下水流れの影響を評価する。

熱交換井 A は青森県の白神山地に位置し、高い見かけ熱伝導率は火山岩中に発達した割れ目を通した速い地下水流れに起因すると推定されている⁹⁾。GeoHP システムは、2002 年度冬期に新福船(株)社屋に設置され、深度 90 m の地中熱交換井 6 本を熱源として、面積 200 m² の高気密高断熱仕様の社屋の冷暖房および 200 m² の道路融雪を行っている。熱交換井は地中熱交換器としてダブル U 字管を用いており、熱伝導率と透水係数の高い珪砂を用いて熱交換井内を充てんしている。熱交換井では、岩盤中の水平方向の地下水流れに加えて、透水性の高い珪砂の充てんによる垂直方向の地下水流れが見かけ熱伝導率を改善している可能性がある。

2005 年 1 月における、地中熱交換井内の地盤温度および地中熱交換量の記録を図-3 に示す。本システムは、豪雪地かつ寒冷地に位置するため、システム稼働率が高く、熱交換井単位長さあたりの地中熱交換量が大きい。1 月 7 ~ 12 日までの 24 時間運転が行われた期間に注目すると、熱交換井における平均負荷が 42.2 W/m と大きいため、通常の地盤を想定すると、大幅な地盤温度低下は避けられない。しかし、図-3 に示す 45 m 深における地盤温度はシステム稼働前の初期地盤温度約 16°C に対して 4~6°C で安

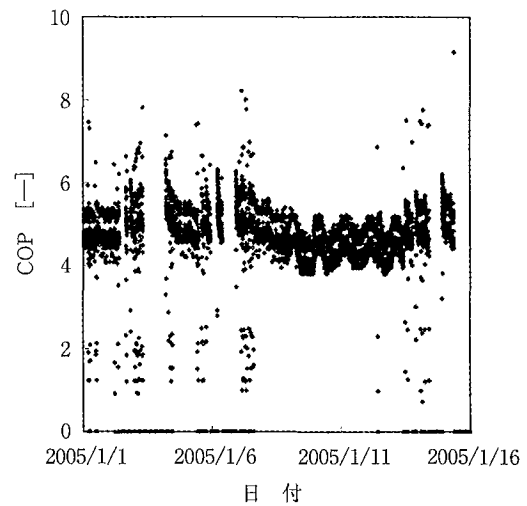


図-4 新福船(株)GeoHP システムにおけるヒートポンプ成績係数(COP)の経時変化

定しており、同地における速い地下水流れの移流効果により、温度低下が抑えられていることがわかる。

次に、GeoHP システムに設置された融雪用ヒートポンプにおける COP の推移を図-4 に示す。ヒートポンプは、加熱能力約 30 kW の機種を使用している。融雪運転における温水の設定温度は、約 13°C である。地中温度が安定しているために、高負荷の連続運転にかかわらず COP の低下はほとんど観察されなかった。

以上、流速の大きい地下水流れは、GeoHP システムにおける高 COP の維持に極めて効果的であることが明らかであり、したがって適切なシステム設置場所の選択により、GeoHP システムにおける大きな省エネルギーが達成可能と考えられる。

2.3 光ファイバ温度計を用いた地下水流れの推定

光ファイバ温度計は、光ファイバに入射したレーザパルス光により、光路のガラス分子から発生する、ラマン散乱光の強さの温度による違いを用いて、温度を測定する温度計である。光ファイバ温度計は坑井の深度方向に連続的に温度が測定できるため、深度によって見かけ熱伝導率が異なることが多い、地下水層を挟む地盤における地下水流れの検出に有効である。

平成 15 年度より九州大学にて実施している光ファイバ温度計による地下水流れの推定では、熱交換井の U 字管内に光ファイバを坑底まで挿入し、サーマルレスポンス試験における坑井加熱時および加熱後の温度回復時の熱交換井全体の温度変化を計測する。加熱した熱媒体の循環では、熱交換井と地盤との熱交換量が深度方向に対して一定ではなく、各深度の熱物性値と相関する。したがって、温度挙動データの解析では地層を深度方向に一般的な光ファイバ温度計の最小分解能である 1 m 間隔に分割し、熱伝

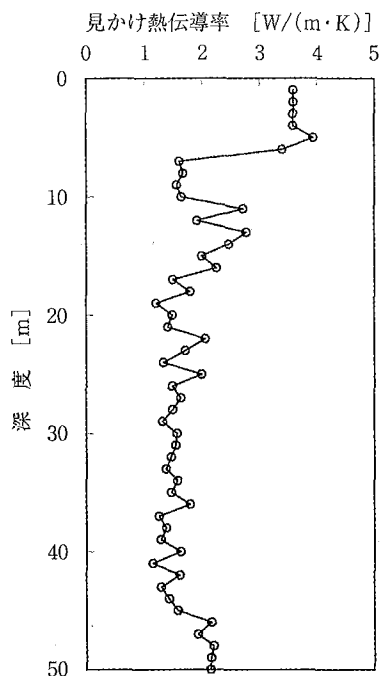


図-5 九州大学箱崎キャンパス内試験井における光ファイバ温度計を用いた見かけ熱伝導率の推定結果

導率分布をパラメータとして、非線形回帰法によって試行錯誤的に深度ごとの見かけ熱伝導率を推定する。

福岡市東区に位置する九州大学箱崎キャンパス内で実施されたサーマルレスポンス試験データを用いて推定された地盤の熱伝導率を図-5に示す。同熱交換井では、地表より深度17mまでが透水性の高い砂礫層であり、本坑井から約90m離れた深度約20mの揚水井は毎分約200lの揚水を行っている。したがって、試験井における浅部地盤中に地下水流が存在すると推定されるが、これは図-5に示された浅部における高い見かけ熱伝導率と類似した傾向を示している。また、同坑井における17m以深は透水性の低いシルト岩や泥岩からなるが、これは図-5に示される深度17m以深の低熱伝導率と調和的である。

以上、光ファイバ温度計を用いた地下水流の推定技術は、専用の調査井を必要とせずGeoHPシステムで実際に使用する熱交換井を用いて簡便に実施できるため、GeoHP設置予定地盤の地下水情報を得るために有効な調査法と考えられる。

3. 開放型 GeoHP システム

3.1 開放型システムの特徴

開放型システムは、揚水井から地下水を揚水して直接ヒートポンプの熱源水として利用して還元井に還元する形をとるが、地下水流速が大きい地域では還元された地下水の揚水井へのショートサーキット(短絡)はほとんどみられない。したがって、熱交換量は井水の産出能力に比例する

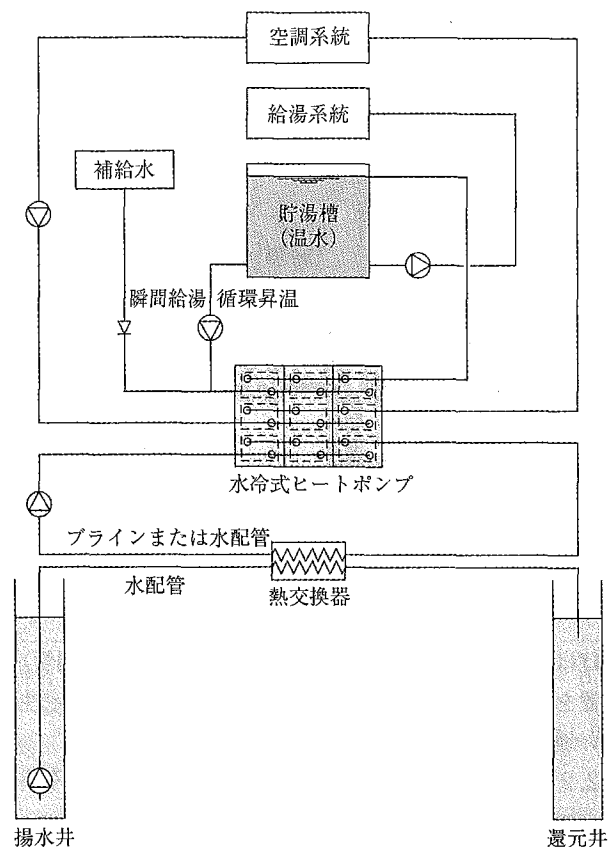


図-6 熱交換器を組み込んだ開放型 GeoHP システム例

ため、産出能力の高い揚水井がある場合は、少ない熱交換井数で大きな熱交換量を得ることができる。ただし、開放型システムでは地下水を汲み上げさらに地下還元する必要があるため、以下の地域特性が望ましい。

- 1) 地下水を汲み上げ・還元できる十分な透水性がある。
- 2) 季節変動が少なく、冷暖房に必要な十分な水量を確保できる。
- 3) 地下水の質がよい(鉄分が少ない、スケール付着や腐食の問題がない、還元井の目詰まりがない、濁りが少ない)

1), 2)については設置前の十分な調査が必要であるが、3)の地下水の水質については以下のような対策が可能である。すなわち、水質が悪い場合は揚水井とヒートポンプの間に洗浄・交換が容易な熱交換器を設置する(図-6)。また、還元井の目詰まり対策としては、揚水井と還元井を交換できるようにすればよい。

ヒートポンプにスケールがたまると、水量低下による性能低下や凍結リスクがあり、ヒートポンプの部品交換などのメンテナンス費用が増大するおそれがある。また、腐食で孔食ができた場合も、ヒートポンプの大部分の部品交換が必要となるおそれがある。その反面、熱交換器を間に設置すれば、悪い水質の井水が直接ヒートポンプに入らない

ため上記の危険がなく、ヒートポンプの循環水としては純水やブラインを用いることができる。

3.2 開放型システムの事例

2001年1月に新潟県糸魚川市に建設された市内下早川地区公民館である“藤のさとセンター”には冷暖房用としてエコアイスと組み合わせた開放型 GeoHP システムが採用された。ここでは、周辺の地下水散水式融雪用の坑井仕様を参考に、深度 50 m (150 A ストレーナ設置) の坑井が 2 本掘削された。これらは、それぞれ地下水揚水井と還元井であるが、将来、揚水量の変化や目詰まりによる還元量の減衰に対応するため、揚水井と還元井を交換できるように、両坑井とも揚水ポンプが設置されている。ヒートポンプは 7.5 馬力相当 2 機であり、加熱能力は 45.4 kW、冷却能力は 55.8 kW である。計測結果⁴⁾によれば昼間の冷却 COP は 5.1 であり、還元井への放熱量は $55.8 \times (5.1 + 1) / 5.1 = 66.7$ kW であり、揚水井と還元井の深さの合計が 100 m であるので、単位深さあたりの放熱量は 667 W/m となり、密閉型システムに比べると非常に大きな数値となる。また、当システムでは揚水試験用の水中ポンプをそのままヒートポンプ熱源水用として利用しているため、ヒートポンプで必要とされる標準水量に比べて大幅に流量が多く、最大利用可能な熱量はさらに大きいと考えられる。また、年間を通して揚水温度は 13~14°C と安定しており、夏は外気に比べて低く、冬は外気に比べて高いため効率のよい熱源であるといえる。

2004年11月には、長野県軽井沢町の“FTL 軽井沢”に地下水利用型 GeoHP システムが採用された。揚水井は 100 m であり、還元水は浸透層に排水している。ヒートポンプは 25 馬力相当で、暖房用温水と給湯用温水を供給する 2 回路型であり、暖房能力、給湯能力ともに 95 kW である。このシステムを採用することにより、ボイラ使用時に比べて大幅にエネルギー消費量を削減し、二酸化炭素排出量も削減している。当初は水質がよいものとして直接ヒートポンプに地下水を供給する形をとっていたが、1年強経過してスケールがたまり運転ができなくなってしまった。そこで、ヒートポンプ内の洗浄を行った後、プレート式熱交換器を井戸とヒートポンプの間に設置した。プレート式熱交換器にもスケールが付着するので、現在はヒートポンプの年 1 回の定期点検時にプレート式熱交換器の洗浄も行っており、スケール詰まりによる運転停止を未然に防いでいる。

3.3 開放型システムの課題

開放型 GeoHP システムの水中ポンプとしては、定速のポンプが用いられることが多い。しかし、実際には負荷変動によりヒートポンプが低負荷運転になった場合は必要な熱源水流量も少なくなるが、定速の水中ポンプではむだに

流量を流していることになり、システム COP が低下する。そこで、負荷に応じて水中ポンプ流量をインバータ制御することにより省エネルギー運転が可能となるが、現状では開放型 GeoHP システムでインバータ水中ポンプを用いている事例はほとんどない。今後は、インバータ水中ポンプを用いた開放型 GeoHP のシステム構成や制御方法などの開発や実証試験が必要である。

また、地下水のスケールの影響がある場合は、熱交換器の洗浄が必要であるが、熱交換器の洗浄は人手がかかるため運用コストの増大となる場合がある。したがって、スケールが付きにくい熱交換器の構造やスケールを自動的に洗浄する方法の開発が求められる。

同様に、還元井の目詰まり対策として揚水井と還元井を交換する場合は交換するときに手間がかかるため、自動的に切替えができるシステムがあると便利である。

おわりに

閉鎖型 GeoHP システムは、地下水流れが存在しない地盤では初期投資の回収に長期間を要するが、速い地下水流れのある地盤では、熱移流による熱交換量改善効果により、数年で初期投資が回収できる可能性がある。また、開放型 GeoHP システムにおいても、良好な帯水層に恵まれた場合の回収年数は十分に短いことが明らかである。したがって、地下水流動に関する情報を収集して、適地に優先的に GeoHP システム建設を行うことにより、このシステムの普及は大きく促進可能と考えられる。本稿が GeoHP システム設置計画における地下水の有効利用に多少の指針となれば幸いである。

最後に、GeoHP システムの運転データの公開をご許可いただいた三菱マテリアルテクノ(株)および新潟県糸魚川市の皆様に厚くお礼申し上げます。

(2008/5/7 原稿受理)

Geothermal Heat Pump Systems Using Groundwater Effects

Hikari Fujii^{*1}
Yoshiro Shiba^{*2}

Synopsis In geothermal heat pump systems, the existence of groundwater flow in the ground strongly affects the heat exchange performances of ground heat exchangers. In closed-loop systems, heat exchange rate can

^{*1} Graduate School of Engineering, Kyushu University

^{*2} General Heatpump Industry Co., Ltd., Member

be remarkably enhanced due to the advection effects of groundwater flow. For the detection of groundwater flows, optical fiber thermometers are efficiently used in thermal response tests of ground heat exchangers.

In open-loop systems, water is pumped up from aquifers for heat extraction (disposal) and re-injected into the ground. If highly productive aquifer exists, the use of open-loop systems can drastically reduce the number of wells, though careful operation is necessary for avoiding scaling or plugging problems.

(Received May 7, 2008)

引用文献

- 1) 新堀雄一・岩田宜己・森不可止・深谷滋三郎：坑井を用いた地中熱利用 HP の設計と地下水流動の関係についての一考察, 日本地熱学会誌(2002-10), pp.339~348
- 2) 岩田宜己・小林利文・深谷滋三郎・横原恵一・新堀雄一：地下水流動を考慮した地中熱利用ヒートポンプの実証試験, 日本地熱学会誌(2005-10), pp.307~320
- 3) 高橋 洋：白神山地での地中熱利用, 地熱エネルギー

(2003-7), pp.47~56

- 4) 池内 研・阿部孝男・高杉真司・佐藤敬二・柴 芳郎：藤のさとセンターへの地下水利用型地中熱利用ヒートポンプシステムの導入, 地熱エネルギー(2001-10), pp.408~413

(2008/5/7 原稿受理)



藤井 光 ふじいひかり
昭和 38 年生まれ/出身地 京都府/最終学歴 スタンフォード大学大学院修士課程・地球資源システム工学/学位 博士(工学)



柴 芳郎 しばよしろう
昭和 47 年生まれ/出身地 北海道/最終学歴 名古屋大学大学院工学研究科・計算理工学/学位 博士(工学)

SHASE-M(マニュアル)紹介

SHASE-M 0001-1-1994
都市ガスによる

コージェネレーションシステム 計画・設計と評価

- ・地球環境時代の期待に応える ・都市ガスによるコージェネレーションシステムのすべて
- ・最新の技術情報と計画・設計の実務について明快・平易に記述

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 第1章 エネルギー概論 | 第2章 コージェネレーションシステム |
| 第3章 コージェネレーションシステムと機器 | 第4章 コージェネレーションの計画・設計の手法 |
| 第5章 コージェネレーションの評価 | 第6章 設置事例 |
| 第7章 地域冷暖房におけるコージェネレーション | 付 録 |

☆執筆陣：石福 昭 柏木孝夫 近藤純一 斎藤 豊 高田秋一 長浜浩明
水野 稔 水野宏道 森田貞夫 大森文夫 杉野辰彰 本間 勲

体 裁 B5判 上製本 287頁
価 格 定価 5,097円 会員価格 4,580円 (消費税込)
送 料 380円

※『SHASE-M 0001-2-2003 都市ガスによるコージェネレーション評価プログラム-CASCADE III』も併せてご利用ください。

ご注文は、下記にご記入の上、FAX(03)3363-8266(空気調和・衛生工学会)にてお申し込みください。

配 送 先	会社名	部署名	担当者名	注 文 部 数	冊
	住 所 〒	TEL	FAX		