

地下水循環型空水冷ハイブリッドヒートポンプシステムの開発に関する研究

(その7) 最適運転手法の検討

Study on Development of Water and Air Multi-source Heat Pump System Using Groundwater Circulatory Wells

(Part 7) Study on the Optimum Operation Method

正会員 ○谷藤 浩二 (ゼネラルヒートポンプ工業) 学生会員 南 有鎮 (東京大学大学院)

正会員 大岡 龍三 (東京大学生研) 正会員 柴 芳郎 (ゼネラルヒートポンプ工業)

正会員 奥村 建夫 (東邦地水) 正会員 三輪 義博 (東邦地水)

Koji TANIFUJI^{*1} Yujin NAM^{*2} Ryozo OOKA^{*3} Tateo OKUMURA^{*4} Yoshiro SHIBA^{*1} Yoshihiro MIWA^{*4}

^{*1}Zeneral Heatpump Industry Co.,Ltd. ^{*2}Graduate Student, The Univ. of Tokyo

^{*3}IIS, The Univ. of Tokyo ^{*4}Toho Chisui Co.,Ltd.

For the high efficiency of heat pump, groundwater heat pump system (GWHP) uses groundwater as heat source which keeps annually stable temperature. However, it is difficult for only ground heat source to meet the heating and cooling loads with an annual balance. In order to optimize the operation method of GWHP systems, it is necessary to develop a system using both groundwater and air sources according to the condition of building loads. Furthermore, in intermediate season (for example, spring or autumn), in which heating and cooling loads are not so much, GWHP system is not more efficient than ASHP system according to conditions of temperature. In order to more efficiently use GWHP systems, it is necessary to develop a system using both groundwater and air sources according to the conditions of temperature and building loads. This paper describe about the method on the optimum operation for a long-term stable performance. The optimum control of temperature is considered in order to select more efficient heat source, and the method to switch pumping position is developed to prevent a clogging at pumping and returning wells.

はじめに

地球温暖化対策やCO₂排出量削減が急務とされる中、省エネ技術や未利用エネルギー活用として地下水利用空調システムが注目されている。しかし、都心部の厳しい地下水揚水規制や設計手法の未整備などの問題で、欧米¹⁾に比べ普及が進んでいない。また地下水利用方式 (Open System) は地中熱交換器を用いて熱交換を行う地中熱利用方式 (Closed System) に比べ、揚水した地下水と直接熱交換を行うことによって莫大な省エネ効果が期待されるものの、長期運転性能や最適設計手法において未解明な部分が多く、実用化に不安な声もある。特に、日本のようなローム層、粘土層等、複雑な地層が重なっている地盤条件においては、長期揚水・還元運転による井戸の目詰まり問題が懸念されることから長期性能確保のためには目詰まり対策を考慮したシステムが要求される。一方、地下水理学や土木学の分野では井戸の目詰まり対策として逆洗運転による井戸の洗浄が有効であるとされる。そこで、本研究では、空気熱源と地中熱源 (地下水) の最適利用のため、空冷と水冷、両方に対応ができ、温

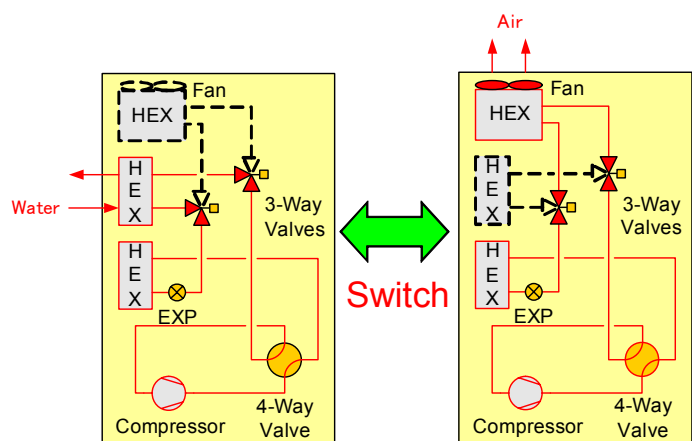


図1 空冷/水冷の切り替え制御

度条件によつての切り替えを行う空水冷ヒートポンプシステムの開発と共に、長期運転による目詰まり対策として自動逆洗運転が可能なシステムを開発した。前報^{2), 3)}では、地盤・地下水条件が異なる二つの実験サイトにおいて冷暖房実証実験を行った。本報では、開発したシス

システムの最適運転手法として温度条件による空冷/水冷切り替え制御および自動逆洗のための切り替え運転制御について述べる。

1. 空冷/水冷の最適切り替え制御

図1は空水冷ヒートポンプシステムにおける空冷/水冷の切り替え制御を示す。本システムには独立した二つの熱交換機（空冷、水冷）と二つの3方弁が設置され、それぞれ空気と熱源水との熱交換に利用される。本研究では、水冷モードを地下水として検討しているが、地中熱交換器を利用した地中熱方式の熱源循環水や通常の熱源水にも対応できる。冷媒（R410A）は3方弁の制御により空冷あるいは水冷の系統を通るようになっていいる。図2は本開発システムにおける空冷/水冷切り替え制御フローを示す。一般に、同じ熱源温度であれば、水の対流熱伝達率および凝縮器内温度推移が空気のそれより有利であることから、空冷より水冷のほうが良い性能が得られると考える。そこで本研究では、総括補正温度差 T_r [°C]を設定し空冷/水冷の切り替え制御に用いた。暖房の場合は、外気温が水冷の熱源である地下水温度に T_r を足した温度より高温であれば空冷運転にし、それ以下であれば水冷運転にする。また冷房運転では、外気温が地下水温度に T_r を引いた温度より低ければ空冷運転、それ以上であれば水冷運転にする。また、地下環境への影響や凍結防止のため、井戸内地下水温度に上限温度 (T_{max}) [°C]および下限温度 (T_{min}) [°C]を設定し、それを超える場合は、空冷運転にする制御を採用した。

一方、総括補正温度差 T_r は式 (1) により算出される。

$$T_r = T_C + T_{HEX} - T_P \quad (1)$$

ここで、 T_C は凝縮器の入出口温度差補正、 T_{HEX} は熱交換器補正、 T_P は揚水ポンプなどの補機動力補正である。

図3は凝縮器内入出口温度差 (T_C) の冷房時の例を示す。冷媒は凝縮機の入口に入ってから間も無く相変化が起こるため、段階的な温度変化を見せている。一方、熱源となる空気や水の温度はほぼ線形に近い動きを見せる。図4は凝縮器内温度の実測例であり、空冷と水冷のそれぞれの温度例を示す。例えば、熱源温度(入口温度)が空冷、水冷、共に同じ温度(20°C)

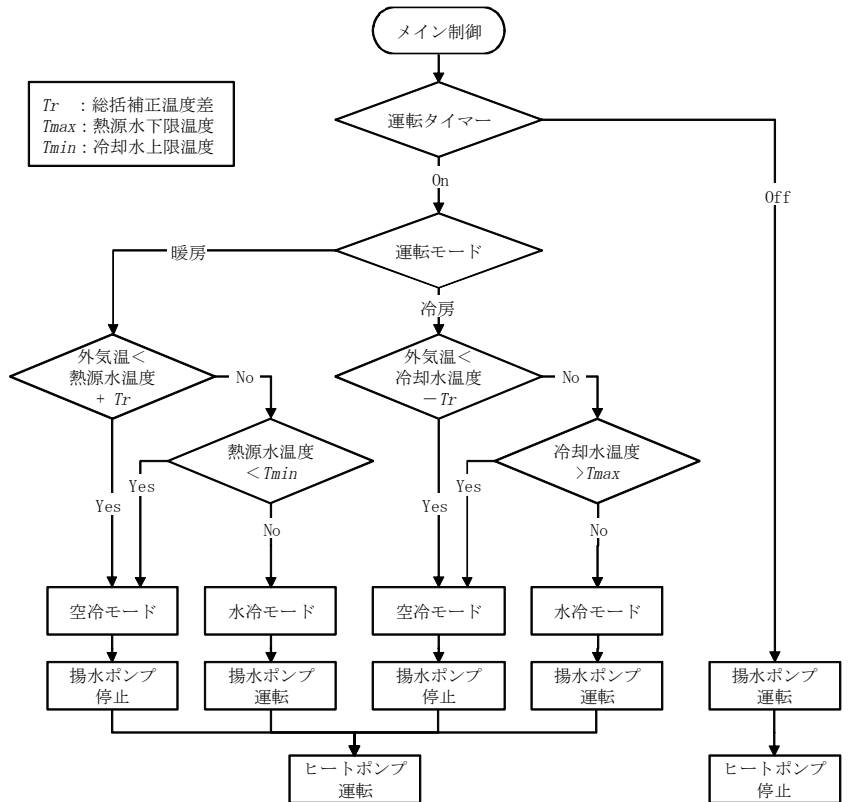


図2 空冷/水冷切り替え制御フロー

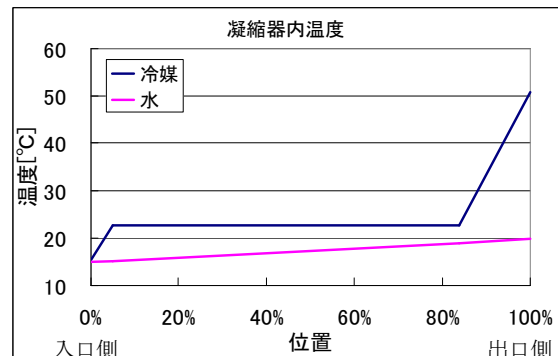
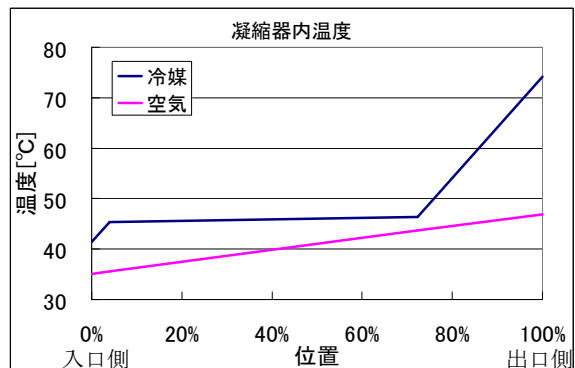


図3 凝縮器内入出口温度差の例
(上: 空冷、下: 水冷)

であっても出口温度がそれぞれ違う温度となり、凝縮器内の平均温度は、空冷と水冷で約 3°C差が生じる。

ここでの温度差 3℃を凝縮器内の入出口補正温度差とする。

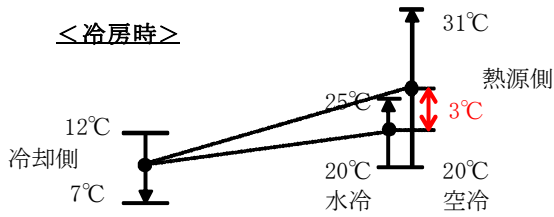


図4 凝縮器内入出口温度差の例 (冷房時)

また、図5はヒートポンプ運転時の放熱量とピンチ温度差の関係であり、実験結果から得られた結果を示す。同じ放熱量である場合、水冷のほうが対流熱伝達率が高いため空冷より若干有利であることが分かる。ここで得られる空冷と水冷のピンチ温度差を T_{HEX} とする。

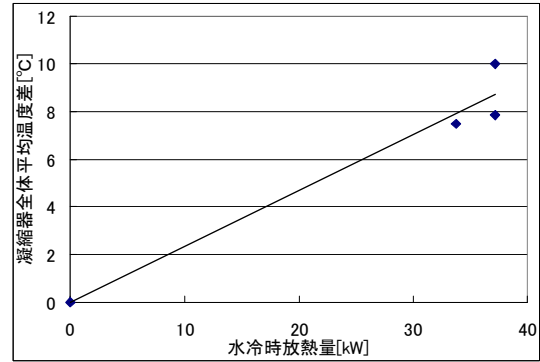
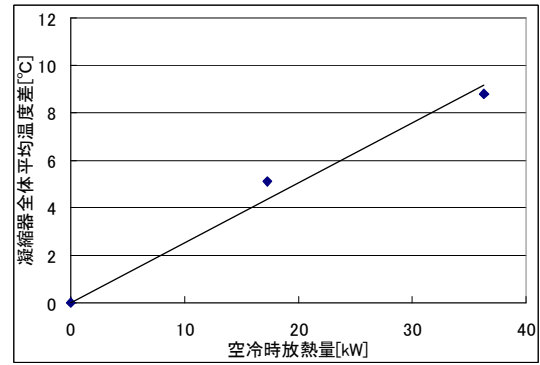


図5 ヒートポンプの放熱量とピンチ温度差 (左：空冷、右：水冷)

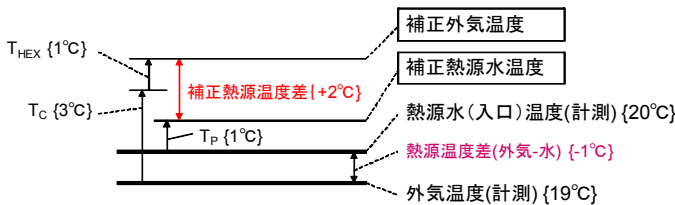


図6 補正熱源温度の計算例 (冷房時)

上記のことから、本実験装置においては、 T_C を3℃、 T_{HEX} と T_P を1℃とし、 T_r を3℃とした場合が最適であると考えられる。

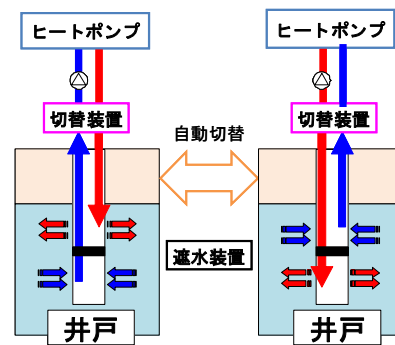
その場合、例えば冷房時に (図6)、地下水の揚水温度が20℃で外気温度が19℃で計測された場合、外気温が冷房熱源として有利に見えるが、補正した熱源温度を比較すると補正外気温度が補正地下水温度より2℃高く、水冷のほうが有利となる。

2. 目詰まり防止のための自動切り替え制御

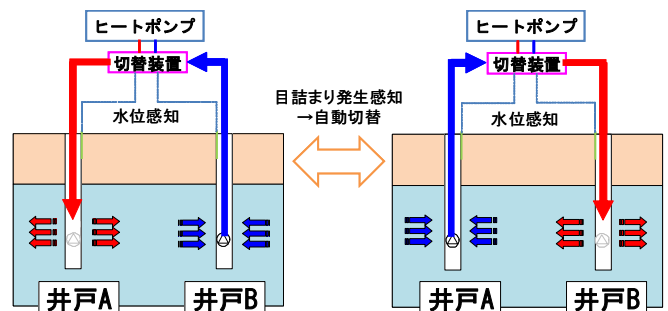
地下水を熱源とする空調システムの長期運転性能を確保するためには、地下水の揚水・還元による井戸内目詰まり現象を防ぐ技術が不可欠である。アメリカ地質研究所の研究報告 (Priceら、1965) によると、注水井戸や井戸周辺の帯水層内で発生する目詰まりは以下の問題に起因するとされる。⁴⁾

- ・ 注入水中の懸濁物
- ・ 帯水層内での化学反応や微生物の増加
- ・ 注入水中の空気
- ・ 帯水層内土粒子配列の変化

一方、土木や地下水理学の分野では、井戸の目詰まり対策として、逆洗運転や孔内洗浄 (エアリフト・ブラッシング・ベラー) が有効とされる。しかし、システム導入後のメンテナンス費用や手間を考慮すると井戸の



(a) 井戸1本方式 (SCW)



(b) 井戸2本方式

図7 逆洗運転システム

洗浄を定期的に行うことは困難である。初期コストや長期運転性能に対する不安が本システムの実用化を妨げている状況から見ると簡易で自動的なシステムの構築が要求される。

そこで、本研究では目詰まり防止のための自動逆洗運

転のシステムを提案すると共に、そのための制御について検討を行った。図7に本研究で開発した目詰まり防止のための自動逆洗運転システムのイメージ図を示す。井戸1本方式の場合、地下水の水位が比較的浅い（深さ-8m以内）場所に適用することから⁹⁾地上ポンプを用い井戸内上下で揚水・還元の切り替えを周期的に行うシステムである。揚水と還元的位置を切り替えることによって自動逆洗運転が可能となる。一方、井戸2本方式は、地下水水位が深く（深さ-8m超）地上ポンプで揚水が困難な場合に適用する方式であり、井戸の両側に水中ポンプを設置し目詰まりが発生したときに、揚水/還元井戸の切り替えを行うシステムである。

図8は井戸2本方式（千葉サイト）を対象にした揚水・還元井戸の自動切り替え制御のフローを示す。まず、運転開始あるいは井戸の切り替えが行われた場合、揚水井戸内泥出しのため、10分程度放流運転を行い水質の良い状態で熱交換を行う。運転中、還元井戸に設置された水位感知器から満水が感知された場合、揚水・還元井戸の切り替えを行い、両井戸とも目詰まりで満水になった場合は、空冷運転に切り替えるフローになっている。この自動切り替え制御については千葉サイトに構築され、正常に作動することが確認できた。

一方、井戸1本方式（SCW）では満水の感知が困難であるため、揚水や還元にかかる動力や圧力で目詰まりを把握する方法が有効と考えられるが、今後のシミュレーションによる検討および現場（名古屋サイト）での検証実験が必要である。

5. まとめ

本研究では、空気と地下水を空調熱源として併用する地下水循環型空水冷ヒートポンプシステムの開発を行った。本論文では、開発システムの最適運転のため、空冷/水冷の切り替え温度制御について詳細な検討を行った。また、長期運転の課題となっている井戸内目詰まり問題の対策として、揚水井戸/還元井戸の自動切換え制御について検討を行った。

今後、実大実験装置を用いた長期性能の実証実験と共に、地下水・地中熱移動数値シミュレーションを用いた検討により長期性能の予測を行う。またGA（Genetic Algorithm）を用いた最適化手法による実用化検討を行う予定である。

謝 辞

本調査は、平成19、20年度独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)『エネルギー使用合理化技術 戦略的開発/エネルギー使用合理化技術実用化開発/地下水循環型空水

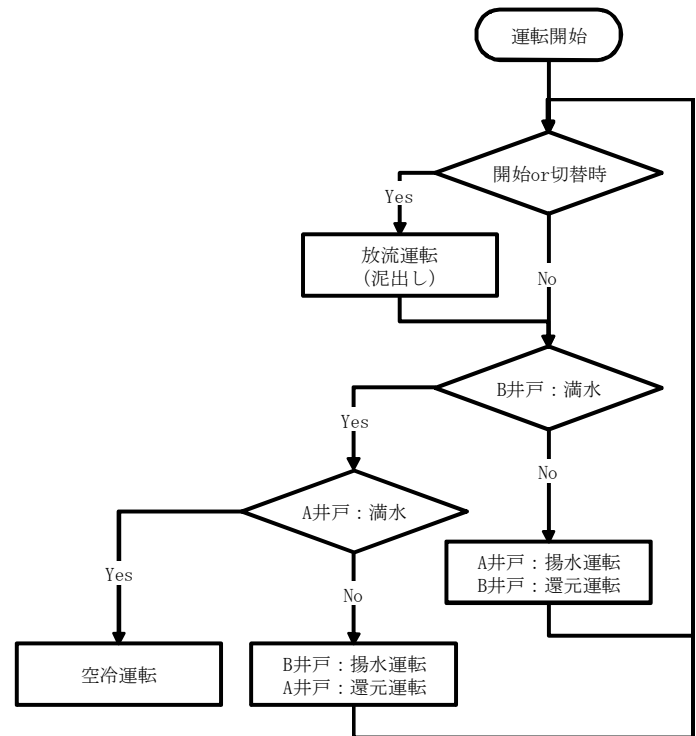


図8 揚水・還元井戸の自動切り替え制御のフロー

冷ハイブリッドヒートポンプシステムの研究開発』によった。記して関係各位に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Orio C.D et al., A Survey of Standing Column Well Installations in North America, ASHRAE Transactions, 111(2), 2005, pp. 109-121
- 2) 南有鎮、大岡龍三、柴芳郎、奥村建夫、地下水循環型空水冷ハイブリッドヒートポンプシステムの開発に関する研究（その4）冷暖房性能実験について、日本建築学会大会学術講演梗概集、2009（投稿中）
- 3) 柴芳郎、南有鎮、大岡龍三、奥村建夫、谷藤浩二、三輪義博、地下水循環型空水冷ハイブリッドヒートポンプシステムの開発に関する研究（その5）SCW方式の冷暖房性能実験、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、2009（投稿中）
- 4) 村下敏夫、永井茂、人工地下水用井戸の目詰まり、日本地下水学会会誌第14巻第2号、pp.11-14、1972
- 5) 南有鎮、大岡龍三、柴芳郎、奥村建夫、地下水循環型空水冷ハイブリッドヒートポンプシステムの開発に関する研究（その1）SCWシステム概要及び実験装置の構築、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2, pp.1105-1106、2008
- 6) Yujin Nam, Ryoza Ooka, Yoshiro Shiba, Tateo Okumura, Development of hybrid heat pump system using multi sources of groundwater and air, Renewable Energy 2008, pp.1-4, 2008
- 7) Xu Sheng Heng and Ladislaus Rybach, Development and Application of a New Powerful Groundwater Heat Pump System for Space Heating and Cooling, Proceedings World Geothermal Congress, 2005, pp.1-5 (iga.igg.cnr.it/pdf/WGC/2005/1416.pdf)