

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3) 地下水循環井の能力基礎実験について

Study on Development of Water and Air Multi-source Heat Pump System Using Groundwater Circulatory Wells (Part 3) ~Fundamental experiment for ability evaluation of groundwater circulatory well~

正会員 ○奥村 建夫(東邦地水) 正会員 大岡 龍三(東京大学生産技術研究所)
正会員 南 有鎮(東京大学大学院) 正会員 柴 芳郎(ゼネラルヒートポンプ工業)
谷藤 浩二(ゼネラルヒートポンプ工業)

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

^{*1}Toho Chisui Co., Ltd. ^{*2}Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo

^{*3}Graduate school of Engineering, Univ of Tokyo ^{*4}Zeneral Heat Pump Co., Ltd.

The geothermal heat pump system has high efficiency by using groundwater. However, we may face serious situation due to groundwater supply reduction, load to environment, and running cost including drainage fee. We are developing method to circulate water to same aquifer, for effective use of groundwater. Pumping and injection test were done in circulatory well dividing into two parts by partition system. Water level and temperature were differed at points of the pumping and injection on a same time. Based on this result, we will improve the system and solve the problems for groundwater use in heat pump system.

はじめに

地中熱利用ヒートポンプシステムは、省エネルギーやCO₂排出量削減を背景に社会的な関心が高まっている。このシステムは、地下水等を直接利用する開放循環型と熱交換器を地中に埋設し熱交換を行う密閉循環型がある。韓国や欧米では、均一な岩盤地盤を対象に普及が進んでいるのに対して、日本では複雑な地質状況等から掘削費が高価となることが、普及阻害の一つとなっている。一方、我が国では、地下水が豊富である地盤特徴を活かした前者の方法が有効と考えられるが、地下水利用には地盤沈下等の環境問題や、排水処理の費用負担が伴う。この対応策として、揚水した地下水を再度注水する利用方法が試みられている。しかし、揚水井と注水井を別に設置すれば初期費用が増加する別の課題が生じる。これらの問題を解決するためには、熱利用後の地下水を同じ井戸に還元する循環方式が有効と考えられる。

揚水については、全国で推計約 124 億 m³/年の地下水利用があり¹⁾、数多くの揚水井が設置されている。この多くの実績より、安定した揚水量の設定は、個々の井戸での限界揚水量を基にする方法が一般的に行われている。

注水は過去の過剰揚水からの教訓を生かして、地下水の涵養法や注水工法が土木分野で行われ²⁾、注水量の設計が研究されている。しかし、水質等の問題に起因した目詰まり状況の違いなどが大きく影響し、揚水のように設計法が一般化されていない。

地下水利用において問題となるストレーナ部の目詰まりの解消には、揚水と注水を繰り返すことが有効とされる³⁾。しかし、揚水と注水を1つの井戸で行った循環

井の事例・理論的研究は少なく、特に熱利用に応用したものはほとんどなされていない。

筆者らは、今回、名古屋市に設置した井戸を用いて、熱利用のための地下水循環井の能力を評価する基礎実験を行った。本報ではその結果について報告するとともに今後の課題について述べる。

1. 地盤条件と実験施設

1.1 地質地下水状況と井戸構造

名古屋市の実験サイトは、濃尾平野南部の海岸平野に位置する。図-1に地質状況と井戸構造図を示す。

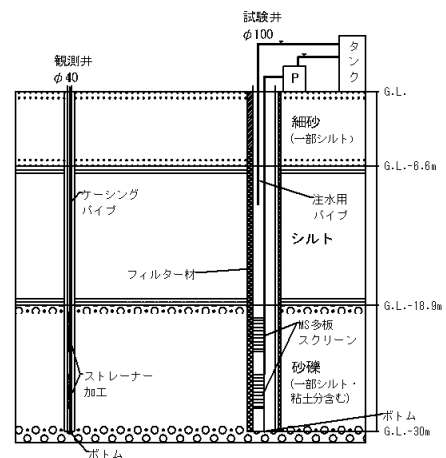


図-1 地質状況と井戸構造

GL-19m 付近までは軟弱な粘性土と緩い砂質土が覆い、その下位に帯水層となる礫質土が分布する、典型的な沖積低地の地盤となっている。

地下水位は砂質土の自由水で GL-2m 付近、下部の礫質土の被圧地下水で GL-5m 付近にある。

試験井は $\phi 150\text{mm}$ で掘削し、GL-20.0~23.0m と GL-25.0~28.0m の 2 箇所特殊合成樹脂多板式スクリーン（開孔率 10.4%）を配置した $\phi 100\text{mm}$ の VP 管を設置した。外側には $\phi 5\text{mm}$ の珪砂をフィルター材として充填した。

帯水層を構成する礫質土の粒径加積曲線を図-2 に示す。図から、20m や 22m のように部分的に粒径は異なっているが、全体的には $\phi 0.075\text{mm}$ 以上の細砂~中礫が主体の良好な帯水層であることが読み取れる。ただし、フィルター材（ $\phi 5\text{mm}$ ）に比べて細かい粒子が 50% 以上で、 $\phi 0.075\text{mm}$ 以下の細粒土も 10% 程度含まれている。

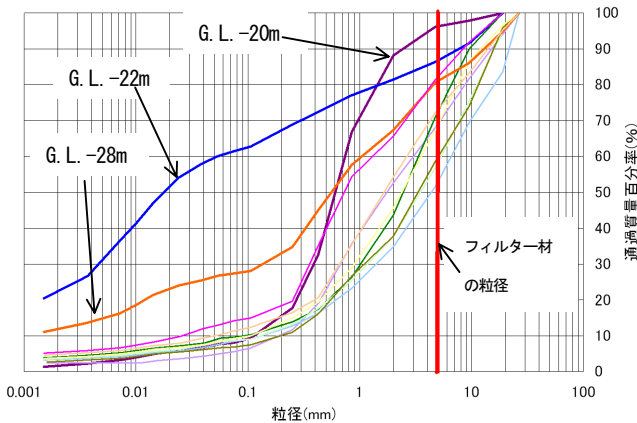


図-2 帯水層の粒径加積曲線

1.2 実験設備の配置と計測項目

実験フィールドに配置した試験設備を図-3 に示す。

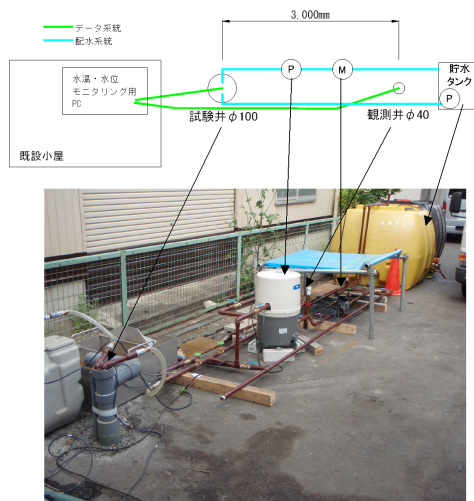


図-3 実験設備配置図

揚水した地下水は一旦タンク内に溜め、注水試験と循環試験に用いた。タンクへの貯水により、注水用水の確保を図ると共に、揚水した地下水と同じ水質の水を注水

することが可能となる。また、揚水・注水時の水温変化を把握するために、タンク内での自然加温を期待した。実際に試験期間中のタンク内水温は 18~21℃であり、地下水と比較して 1~4℃は高くなった。

揚水ポンプは出力 400W の地上ポンプを常時設置し、揚水能力に応じて他のポンプを追加した。水温の計測は試験井、観測井内の GL-5、10、17、19、21、22、23、25、27、29m に設置した熱電対と、GL-15m に設置した水温計内蔵の水圧式水位計で行った。さらに、循環試験時には GL-25m に温度計内蔵の水位計も追加で設置した。なお、水圧水位計の内蔵されている温度計については、機種による初期値の差を GL-15m の値を基準に補正した。

2. 揚水試験の概要および結果

揚水試験は揚水量を段階的に変化させた段階揚水試験と、一定揚水量の連続揚水試験を実施した（表-1）。

表-1 揚水試験の条件

試験名	揚水量	実施時間
段階揚水試験	44~136L/minの5段階	各段階90分
連続揚水試験	80L/min	8時間

図-4 に試験経過時の試験井と観測井の水位と水温を示す。揚水に伴う試験井内の最大水位低下量は 130cm 程度であった（図-4）。

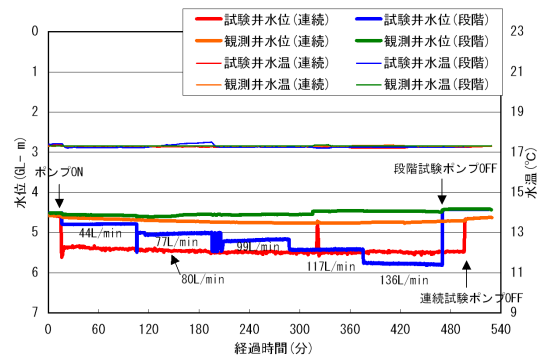


図-4 揚水試験時の水位と井戸内水温変化

揚水量と水位低下量および注水量と水位低下量の関係は図-5 のように求められ、各々折れ点で示される限界揚水量は約 100L/min、限界注水量は 60 L/min と推定された。

連続揚水試験の揚水量は、限界揚水量の 80% である 80 L/min とした。連続揚水時には水位低下量 90cm 程度で一定に保っている（図-4）。

一方で、観測井の水位は段階揚水試験、連続揚水試験とも大きな水位低下は確認されなかった。なお、図-4 に示されている若干の水位変動は潮位の影響によるものと考えられる。

水温は試験井、観測井とも 17.3℃で安定していることを確認した。

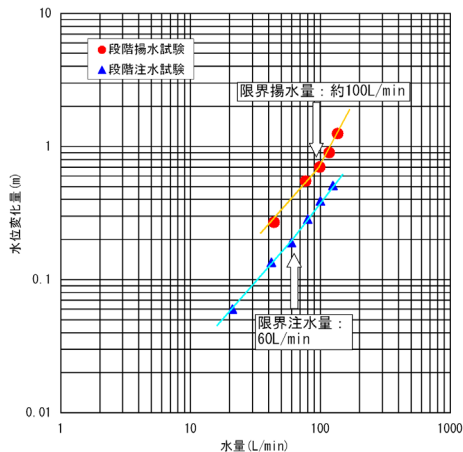


図-5 揚水・注水量と水位変化量の関係

3. 注水試験の概要および結果

揚水試験と同様に、段階的に注水量を変化させた段階注水試験と、一定の注水量での連続注水試験を実施した(表-2)。

表-2 注水試験の条件

試験名	注水量	実施時間
段階注水試験	20～125L/minの6段階	各段階30分
連続注水試験	60L/min	3時間20分

図-6 に注水試験時の水位と水温を示す。連続注水試験では、注水能力の継続性を確認するために、注水量を限界注水量と等しい 60L/min に設定した。

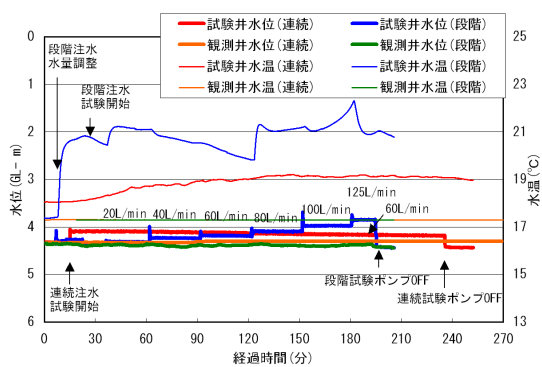


図-6 注水試験時の水位と水温変化

注水に伴う水位上昇は、段階、連続注水とも 50cm 以下であり、同量の揚水時に比べて水位の変動幅は半分程度となっている。連続注水試験の期間中、水位に大きな変動はなく、注水能力の減少も見られなかった。

水温については、上昇傾向に規則性は見られないが、井戸内へ与える影響は大きいことが分かる。なお、段階試験時の水温がタンク内水温に比べて高くなっているの

は、配管部での外気温による影響と考えられる。

4. 循環試験の概要および結果

循環試験は、井戸内でのショートサーキットを防止するため、遮水装置(写真-1)を用いて、3つのケース(表-3)の実験を行った。

写真-1 遮水装置

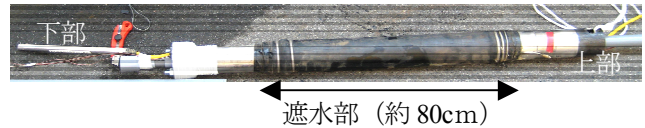


表-3 循環試験の条件

ケース名	遮水装置	揚水位置	揚水量	注水位置	注水量
ケース1	なし	27m	約50 L/min	22m	10～50L/minの5段階
ケース2	あり(25m)	27m		22m	
ケース3	あり(25m)	22m		27m	

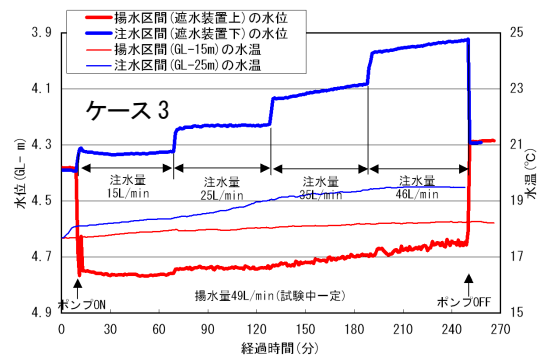
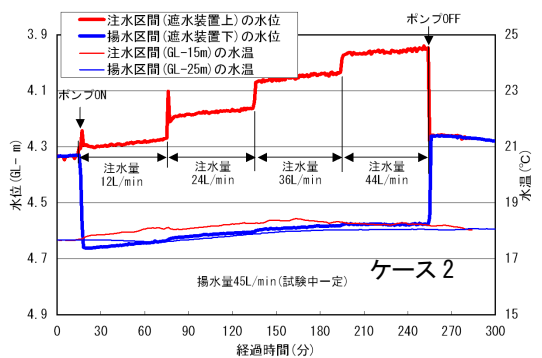
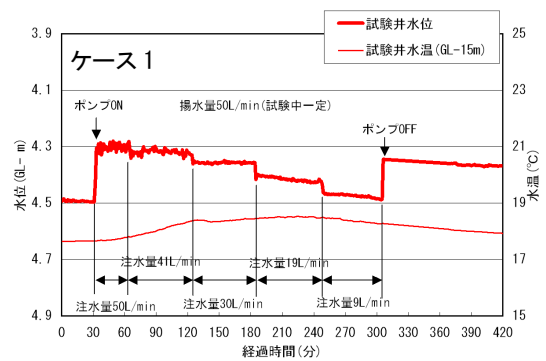


図-7 循環試験での水位と水温

図-7 に 3 ケースでの循環試験の水位と水温を示す。ケ

ース1とケース2を比較すると、遮水装置により、注水区間で水位が上昇し、注水区間と揚水区間とで温度差が生じていることが分かる。

遮水装置を設置し、揚水位置と注水位置を変えたケース2とケース3では、ともに揚水区間と注水区間での水位の違いが明確である。この結果から、単一井・同一帯水層であっても、遮水装置を設置することにより、地盤を経由しての地下水循環が行われ、有効な熱利用が可能であると考えられる。

5. 比揚水量と比注水量および循環量との関係

揚水井や注水井の能力を比較するために、以下の比揚水量と比注水量を用いた。

$$\text{比揚水量} = \text{揚水量} / \text{揚水時の井内水位低下量}$$

$$\text{比注水量} = \text{注水量} / \text{注水時の井内水位上昇量}$$

各試験での比揚水量と比注水量および循環量の関係を図-8に示す。図のC.T.は循環試験を意味し、ケースは表-3と同じである。また、循環試験ケース1では、揚水量と注水量の差を循環量として図示した。

図-8から、段階注水試験では約60L/min、段階揚水試験では約100L/minで折れ点を確認された。これらは図-5の限界注水量及び限界揚水量に対応する。

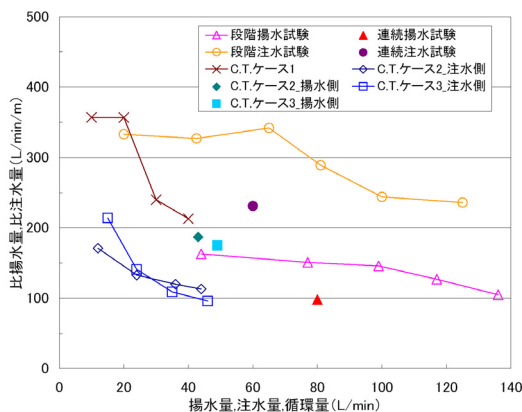


図-8 比揚水量、比注水量および循環量の関係

循環試験での上部と下部の比揚水量、比注入量とも近い値を示している。これは、遮水装置の上部と下部で同じ揚水、注水能力を有しており、両区間のストレーナー長が同じとなっていることを反映しているものと考えられる。遮水装置がない場合、比注水量は同じ水量の比揚水量に比べて2倍程度大きくなる。これは、同じ水量であっても注水時には揚水時に比べて動水勾配が小さくなることを意味している。

6. 考察および今後の課題

表-4に今回の試験で得られた帯水層の水理定数等を示す。限界揚水量に対する限界注水量の割合は60%であり、伊藤ら⁴⁾の報告に近い値が得られた。また、比揚水

量は循環時にストレーナー長が減少するにもかかわらずほぼ同じ値となり、同一帯水層全体で揚水能力が一定であると判断される。

表-4 水理定数一覧表

限界揚水量	100 (L/min)	
限界注水量	60 (L/min)	
透水係数	3.00×10^{-2} (cm/sec)	揚水試験時
	1.40×10^{-1} (cm/sec)	注水試験時
比揚水量	帯水層全体	98~163 (L/min/m)
	遮水装置上	175 (L/min/m)
	遮水装置下	187 (L/min/m)
比注水量	帯水層全体	231~342 (L/min/m)
	遮水装置上	113~171 (L/min/m)
	遮水装置下	96~214 (L/min/m)

井戸内に孔内遮水装置を設置することにより、一つの帯水層内であっても井内で異なる水圧を生じさせ、地盤を介した地下水循環が可能となる。さらに、揚水区間と注水区間での水温差は、循環井での熱利用の有効性を示している。

注水時には同量で揚水した場合に比べて動水勾配が小さいことから、井戸利用の支障となる目詰まり対策には有効となる。ただし、遮水装置により分割して循環を行う場合には、揚水や注水に対応するストレーナー長が減少するため揚水量、注水量とも減少する。

今回、孔内水温の変化を把握するに当たり、熱循環のための装置は用いず、地上タンク内の温度差(1~4℃程度)を利用した。今後はヒートポンプと接続して、水量・温度の循環性が確保できるかを検証する予定である。また、長期的な運転により目詰まり状況の把握、不圧地下水対象の実験を行い、今回の結果と総合した上で、効率的な地下水利用が可能なシステムの設計を行っていく。

【謝辞】

本研究は、平成 19、20 年度独立行政法人新エネルギー・産業総合開発機構 (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/地下水循環型空水冷ハイブリッドヒートポンプシステムの研究開発』により実施したものである。

参考文献

- 1) 国土交通省：「平成 18 年版 日本の水資源」 2006 年
- 2) 建設省土木研究所他：地下空間建設における地下水環境の保全技術マニュアル (案) 復水工法的设计・施工法 1993.3
- 3) アメリカ土木学会：地下水人工涵養の標準ガイドライン 2005.5
- 4) 伊藤恒雄ら：地下水の注入可能量は、揚水量の半分強 地下水技術第 48 巻第 2 号, pp24-26, 2006