「直接サイフォン井戸」を熱源とする ヒートポンプによる暖房給湯*

金山 公夫**・馬場 弘**

Space-Heating and Hot Water Supply by a Solar-Heat Pump System Applying a “Direct Siphon Well” as the Heat Source

Kimio KANAYAMA・Hiromu BABA

Abstract

A solar-heat pump system was researched and developed by the authors at the Kitami Institute of Technology. Being simplified and reduced, it was introduced into a residence to test it under every day conditions for a long period.

The solar system works only for a hot water supply, and the heat pump works for space-heating using ground water as a heat source. In the usual case, two bore holes are necessary: one for production and one for returning water. However, this particular method, namely a “direct siphon well” system, could be done by only one bore hole. Namely, a pump is set directly under the water surface, by which ground water is pumped up and forced into the heat pump, and after absorbing heat through an evaporator, the cold water is returned to a lower point in the same well. Water discharged from the heat pump flows partially into a road-heating system, and then flows out through a drainpipe. The ratio of the drainage to the returning water is 7:3 in average for the cold seasons, and the temperature of the water pumped up is 8.5 to 9.0°C throughout the year. 10 MJ/h of the extracted heat per bore hole is expected by this technique. The system is now working very well to make environment inside the house comfortable.

Advantages of the solar-heat pump system using the direct siphon well method are as follows:

* 空気調和・衛生工学会北海道支部第24回学術講演会
(1990, 3) および日本太陽エネルギー学会・日本風
力エネルギー協会合同研究発表会(1990, 12)で一部
発表

** 北見工業大学機械工学科

Department of Mechanical Engineering, Kitami Institute
of Technology

1) Since the solar-heat pump system can effectively be operated by this "direct siphon well" method from only one bore hole, cost for the boring is cheaper than for two bores. 2) The heat pump works smoothly and land subsidence is restrained, because the water level in the well is kept higher than usual due to returning water. 3) Charge for the sewerage is lower due to decrease of the drainage water. 4) The ground water pumped up from the well can be used for road-heating, space-cooling and so on.

Key words: Solar-heat pump system, Direct siphon well, Space-heating, Hot-water supply, Ground water, Heat source

1. まえがき

北見工業大学自然エネルギー実験室 1・2 号棟において、太陽熱と地下水熱を組み合わせた「ソーラーヒートポンプシステム」による暖（冷）房給湯に関する実験研究が 7 年間にわたって実施された^{1)~5)}。このシステムを軽量化して一般住宅に導入し、実生活のもとに暖冷房給湯の実験を行って 5 年目になる。給湯は主としてソーラーシステムで行い、暖房はヒートポンプで行うが、ヒートポンプの特性として安定した低熱源を必要とする。北海道のような寒冷地では、冬期の外気温度は月平均値で -10°C 程度となるので大気熱源ヒートポンプは不适当で、勢い地下水に熱源を頼らざるを得ない。その場合、都市における地下水利用には、地下水位の低下や地盤沈下を防止するため規制が加えられ、生産井と還元井の 2 本を用意するように奨励されている。しかし、このことは井戸掘削費の高騰につながる。

そこで本実験では、採熱管は用いず、1 本の井戸の上部から井水を汲み上げ、ヒートポンプで採熱後の冷水を同じ井戸の下部に戻して採熱を行う「直接サイフォン井戸」方式を試み、2 年間の性能測定を実施した。毎年、測定結果をもとに配管系や制御系の改良を加えながら実験を継続し、現在もシステムは順調に作動し、良好な居住環境が得られている。

記号および性能値

Q_i ; 傾斜面日射量
 Q_C ; 集熱器集熱量
 Q_W ; ヒートポンプ汲み上げ地下水熱量
 Q_H ; ヒートポンプ消費電力熱当量（水中ポンプ電力を含む）
 Q_B ; ボイラ熱量

Q_{TL} ; 暖房負荷（計算値）

Q'_{TL} ; 全供給熱量（測定値）

η_C ; 集熱効率 $= Q_C / Q_i$

F_C ; 太陽熱依存率 $= Q_C / Q'_{TL}$

F_W ; 地下水熱依存率 $= Q_W / Q'_{TL}$

F_{HP} ; ヒートポンプ電力依存率 $= Q_H / Q'_{TL}$

F_B ; ボイラ熱依存率 $= Q_B / Q'_{TL}$

F_{NE} ; 自然エネルギー依存率 $= (Q_C + Q_W) / Q'_{TL}$

COP ; ヒートポンプ成績係数 $= (Q_H + Q_W) / Q_H$
 $= 1 + Q_W / Q_H$

COP_S ; システム成績係数 $= (Q_C + Q_W + Q_H) / Q_H$

COP_{SB} ; システム成績係数（ボイラ熱含む）
 $= (Q_C + Q_W + Q_H + Q_B) / (Q_H + Q_B)$

ただし、熱量の単位は MJ。

2. ソーラーヒートポンプ住宅

実験対象となる住宅は床面積 105.1 m^2 の平屋で、一部地下室と中 2 階が付加された省エネルギー住宅（断熱ランク IV 以上⁶⁾、真冬の暖房負荷 $200 \text{ kJ} / \text{m}^2 \text{h}$ 以下）である。ソーラーパネル (7.64 m^2) は屋上に、ヒートポンプ (2.2 kW) をはじめ機器システムは地下室に設置されている。ヒートポンプは屋外に掘られた井戸 (40 m , $\phi 125$) から井水（通年 $9 \sim 10^{\circ}\text{C}$ ）を熱源として、建物 1 階の約 7 割の空間を 24 時間の連続暖房を行い、排水の 1 部は玄関アプローチの融雪用ロードヒーティング施設に送られる。ソーラーヒートポンプのシステムフローを図 1 (a) に、直接サイフォン井戸とヒートポンプおよびロードヒーティングの制御関係を図 1 (b) に示す。ヒートポンプの凝縮器は直列 2 連型で、1 台は暖房に、他の 1 台はソーラー集熱が不足した際に暖房の停止時のみ給湯加熱を行う。ヒートポンプで加温された温水は 43°C で床暖房パネルおよびファンコイルに供給さ

図-1 ソーラーヒートポンプのシステムフロー (a) と井水制御 (b)
Fig.1 System flow (a) and control method of ground water (b) of the solar-heat pump.

れ、戻りの温水は40℃で蓄熱タンク（230リットル）に貯湯されサイクルを繰り返す。ヒートポンプの低熱源となる井水は、井戸の浅い位置（水面下2 m）に設置された水中ポンプ（250 W）で揚水され、ヒートポンプ蒸発器を経て採熱冷却され、同じ井戸の深い位置（地面から26 m）に還水されて「直接サイフォン井戸」を形成する。井水流量は16～20リッター/minである。

ヒートポンプからの排水は一部が給水タンクで受水され、加圧ポンプでロードヒーティングに送水される。その際、ヒートポンプの発停と給水タンクの水面レベルスイッチの信号で、水中ポンプのON、OFFと給水タンク電磁弁1および還水パイプ電磁弁2の開閉が連動して制御される。この水中ポンプによってヒートポンプ作動時には常に蒸発器に井水が供給され、給水タンクはヒートポンプの作動に無関係に一定レベル範囲に水位が保たれる。ロードヒーティング用の加圧ポンプは、融雪コイル埋設土中の温度センサーで地温を感知し、2.5℃以下でONとなる。

3. 測定結果

平成元年3月から平成2年2月までの測定結果を

表1に示し、さらにそれを前年の測定結果と比較したものを図2に示す。図2において熱負荷の大きい冬期間は地下水への依存率が高く、熱負荷の小さい夏期は太陽熱への依存率が高い。表1より、通年の太陽熱依存率は15.1%であるのに対して地下水依存率は54.7%で、地下水への依存度が非常に高い。両者を合わせた自然エネルギー依存率は69.8%で、全熱負荷の7割が自然エネルギーに依存した住宅である。その結果、ヒートポンプ電力（水中ポンプ電力を含む）は25%、ボイラ灯油は僅か5パーセントで済んでいる。

厳冬期の井水から汲み上げられた地下水熱量は1月が最大値で6220.5 MJ/月が得られたが、これは1時間当たりに直すと8.4 MJ/hとなり、この程度の小規模の「直接サイフォン井戸」でも10 MJ/hの採熱は十分可能と推察される。また、システムの性能を示すシステム成績係数COP_sは厳冬期の12月～2月の平均で3.51、年平均で3.81となる。この数値は火力発電所の発電効率を末端で0.35、比較の対象とする熱機器の熱効率を0.8として、一次エネルギー基準のエネルギー利得に換算すると1.39となり十分に有利である。この際、ソーラーシステムの集熱能力を強化することによって、システム成績係数はさらに向上することになる。

表-1 ソーラーヒートポンプ住宅の測定結果

Table 1 Measured and calculated results on the residence by the solar-heat pump.

平成 元年度	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	TOTAL
日 射 量 Q_j MJ/月	2512.0	2991.5	3842.4	工 事 中	4065.4	3435.2	2934.2	3181.6	1999.1	2109.4	2856.6	2879.6	32807.0
集 熱 量 Q_C MJ/月	640.7	830.1	1334.0		1674.9	1092.2	757.4	1083.6	612.1	535.0	732.2	845.9	10138.1
地 下 水 熱 量 Q_W MJ/月	4506.7	3716.1	2944.1		575.9	671.3	840.3	1698.1	3795.3	6159.3	6220.5	5586.6	36714.2
ヒートポンプ電力 Q_E MJ/月	2473.5	1702.4	1316.0		246.5	289.3	354.2	739.6	1502.8	2781.7	2860.4	2393.6	16660.5
ボ イ ラ 熱 量 Q_B MJ/月	429.6	386.0	299.2		218.3	117.9	201.5	366.8	499.4	348.2	408.6	373.6	3649.1
全 供 給 熱 量 Q_{TL} MJ/月	8050.5	6634.6	5893.3		2715.6	2170.7	2153.4	3888.1	6409.9	9824.2	10221.7	9199.7	67161.9
集 熱 効 率 η_C	0.255	0.277	0.347		0.412	0.318	0.258	0.341	0.306	0.254	0.256	0.294	0.309
太 陽 熱 依 存 率 F_C	0.080	0.125	0.226		0.617	0.503	0.352	0.279	0.095	0.054	0.072	0.092	0.151
地 下 水 熱 依 存 率 F_W	0.560	0.560	0.500		0.212	0.309	0.390	0.437	0.592	0.627	0.609	0.607	0.547
ヒートポンプ依 存 率 F_{HP}	0.307	0.257	0.223		0.091	0.133	0.164	0.190	0.235	0.283	0.280	0.260	0.248
ボ イ ラ 依 存 率 F_B	0.053	0.058	0.051		0.080	0.054	0.094	0.094	0.078	0.035	0.040	0.041	0.054
自然エネルギー依存率 F_{NE}	0.640	0.685	0.726		0.829	0.812	0.742	0.716	0.687	0.681	0.681	0.699	0.698
成 績 係 数 COP	2.822	3.183	3.237		3.336	3.316	3.372	3.396	3.525	3.214	3.175	3.334	3.204
シ ス テ ム 成 績 係 数 COP_S	3.081	3.670	4.251		10.131	7.085	5.511	4.761	3.933	3.407	3.431	3.687	3.812
システム成績係数（ボイラ含） COP_{SB}	2.773	3.177	3.649		5.843	5.325	3.875	3.514	3.201	3.139	3.127	3.325	3.307
暖 房 負 荷 MJ/h	6.088	5.633	3.560		—	—	1.425	3.768	8.245	7.077	10.785	10.473	5.130
給 湯 負 荷 MJ/日	53.774	51.763	54.404		40.310	28.439	24.537	43.190	50.216	47.961	50.374	55.743	46.146

4. 「直接サイフォン井戸」採熱

図3に本実験に供用した「直接サイフォン井戸」の地質柱状図、井水汲み上げ点（水中ポンプ位置、8.5m）、還水点（26m）および測温点を示す。井戸内温度は井戸底部から5m間隔で7点と、水面直下の水温および直上の気温の合計9点で測定した。井戸内各レベルの井水温度および外気温の時間変化について、比較的寒い日（平成2年2月18日）の例を図4（a）に、温かい日（平成2年4月3日）の例を図4（b）に示す。

2月18日は朝方の最低気温は-13.5℃で、日中0℃くらいまで気温が上昇したが終日ロードヒーティングへ通水された。この日の汲み上げ水量13.84m³に対してロードヒーティング通水量（排水量）は9.28m³、したがって井戸への還水量は4.56m³となり、排水量対還水量の割合は0.671：0.329であった。これは真冬の1月～2月を通じてほぼ同じ割合であった。それに対して図4（b）では最低気温は-3.5℃と高く、さらに日中は17℃まで上昇し、春の陽気である。この日の井水汲み上げ量は7.32m³、うちロードヒーティング通水量は5.14m³

図-2 ソーラーヒートポンプ住宅の測定結果

Fig.2 Experimental results on the residence supplied by the solar—heat pump.

(a) 平成2年2月18日

(b) 平成2年4月3日

図-4 (a), (b) 井戸内水温および外気温度の時間的変化

Fig. 4 (a), (b) Hourly change of temperature in the ground water inside well and in the atmosphere.

で、それぞれ真冬の50%強の水量でしかない。測定期間を通じて、井水汲み上げ量および還水量と排水量の関係を図5に示す。

図4 (a) および (b) の井水温度の変化に注目すると、いずれも汲み上げ点（水中ポンプ）に近い10 m レベルでは若干の変動はあるものの8.5～9.0℃ではほぼ一定しており、還水点（26 m）に近づくほどヒートポンプの作動に従って温度変化の振幅が大きくなり、絶対値も低下して最低温度は5.5℃とヒートポンプ排水温度近くまで低下する。それ以下のレベルはほとんど温度の時間的変化はなく、還水点の直下に近い30 m ではほぼ一定の低い温度となっている。さらに深部においては、この程度の揚水量（20リッター/min）では井水は還水による攪拌や対流の影響は受けず、また自然対流を起こすこともなくただ伝導伝熱にのみに支配され、井戸底部の40 m では井水本来の温度を維持している。

このように「直接サイフォン井戸」方式を採用す

ることにより、井戸内の通常の熱伝達のほかに、排水分を補うために帯水層から湧出した地下水が井水と混合して熱輸送の役目をし、速やかに井水温度が回復するものと推察される。以上の井戸内水温の測定および揚水と還水の関係から、井戸内の井水の流動状況を想定して示すと、図3の矢印の通りである。

この点確かめるため、井戸内の水温測定用C-C熱電対（ $\phi 0.32$ ）を取り付けた全長40 mの測温用塩ビパイプを引き上げて、その表面を観察した。その結果、図3に示したように、還水点と揚水点の間に若干のサビ色の変色を確認した。これは井水が地上システムの管路内を通過中に溶解した鉄イオンが付着したものと推定され、このことから矢印で示した井水の流動ベクトルはほぼ妥当なものと考ええる。

本システムの場合、排水はロードヒーティングに使用される関係上、排水量と還水量の割合はロードヒーティングの制御温度で規定され、図5より真冬

図-5 井水汲み上げ量および還水量と排水量の比の月変化

Fig. 5 Monthly change of quantities of ground water pumped up and the ratio between returning and drain water.

においてその比は約7:3となるが、ロードヒーティングが停止する春夏秋においては排水量は0となる。しかし排水量:還水量の比は、井戸の水温、水質、水面レベルなどの低熱源としての条件およびロードヒーティングの能力を含めた「ソーラーヒートポンプシステム」の機能全体から個々に決められなければならない、それぞれのシステムに対して適値があるものと思われる。

以上に述べたように、「直接サイフォン井戸方式」のメリットは1)井戸堀削費が大幅に低減される、2)井水還元による地下水位が維持され、ヒートポンプの作動を良くし、地盤沈下を制御する、3)排水量の減少により下水道使用料金が低減する、および4)井水をロードヒーティングや冷房など別な用途に活用できるなどがあげられる。

寒冷地におけるヒートポンプ低熱源として、採熱管を用いた地中採熱方法⁷⁾も試みられているが、土壌の熱伝導率が低い上に、採熱管周りが凍結するためさらに熱伝導を悪くし、また伝熱面を中介することにより熱通過率が低下し、採熱孔一本当たりの採熱量が減少する。そのためボーリングの本数を増やす必要があり、熱的性能とコストの面で問題があるように思われる。

それに対して本方式は、一本の井戸の堀削費として2万円/m程度のイニシアルコストはかかるが、その他は殆ど不必要で、極めて安定した高性能な熱特性が得られ、地下水位の維持に有効であるほか、地下水の種々の用途が考えられるなど利点が多い。

5. むすび

ソーラーシステムとヒートポンプを組み合わせた「ソーラーヒートポンプシステム」を住宅に導入し、長期にわたる暖房、給湯の実験を行い、種々改良を

重ねた結果はほぼ満足すべき結果が得られた。その際、ヒートポンプの低熱源に井戸上部から揚水した地下水を利用し、使用後の低温排水の一部を同じ井戸の深部に還元する「直接サイフォン井戸」方式を採用することにより、コストの大幅な削減と高い熱性能が得られ、システム全体の安定した作動が達成できた。

この方式は熱負荷の大小、システム構成および帯水層を含む地下の地質構造等によって影響を受けると思われる。そこで現在、中程度の熱負荷で暖房と冷房を必要とする精密加工工場および熱負荷の大きい老人ホームの暖房給湯など大規模施設においても実証試験を実施中で、測定期間はまだ短いですが、システムはそれぞれ順調に作動している。ゆえに、ここに提唱した「直接サイフォン井戸」方式は、ヒートポンプ採熱による地下水熱利用のための汎用性のある有効な方法であると考えられる。

参 考 文 献

- 1)~3) 金山公夫、馬場 弘、福田武幸(1986, 1987, 1988):北見工業大学自然エネルギーシステムの性能Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、太陽エネルギー、Vol.12, No. 5, pp.13~20, Vol.13, No. 2, pp.12~17, Vol.14, No. 6, pp.35~40.
- 4) 金山公夫、馬場 弘(1990a):寒冷地のソーラー実用効果の現状と展望-自然エネルギーに依存した新しい住宅暖房、空気調和・衛生工学、64巻、11号、pp.49~53.
- 5) 金山公夫、馬場 弘、木村 健(1990b):ソーラーヒートポンプシステムを導入した自然エネルギー依存型住宅の性能、日本太陽エネルギー学会、日本風力エネルギー協会合同研究発表会講演論文集、pp.113~116.
- 6) 北海道立寒地建築研究所ほか監修(1980):省エネルギー住宅の計画と設計、p.51.
- 7) 西岡純二(1989):地中熱源ヒートポンプの研究開発、伝熱研究、Vol.28, No.109, pp.117~123.
(受付:1991年5月30日、受理:1991年12月5日)