

ソーラーヒートポンプPVシステムの性能の総合的評価（I）

Evaluation of the Performance of a Solar-Heat Pump PV System

趙 春江^{*1}

Chun Jiang ZHAO

金山公夫^{*2}

Kimio KANAYAMA

馬場 弘^{*2}

Hiromu BABA

遠藤 登^{*2}

Noboru ENDOH

Abstract

In the end of 1996, a hybrid solar heat pump PV system was equipped in the Renewable Energy Laboratory, Kitami Institute of Technology. Since then we carried out a lot of investigations and improvements for the system, so that the performance of the system was greatly increased. In this paper, the performances of the system during the winter from January 1998 to April 1998 when the system has been improved are described in comparison with those of the system from March 1997 to April 1997 before improving and from November 1997 to January 1998 when the system was being improved.

Key words;Solar System, Heat Pump, PV System, Flow-Down Collecting System, Collector Efficiency, Coefficient of Performance, Dependence Fraction on Renewable Energy, Space-Heating.

1. まえがき

平成8年12月に北見工業大学自然エネルギー実験室に新しいソーラーヒートポンプPVシステムが設置され、太陽熱・光と地下水熱の熱電併給による、次世代に向けての快適な住環境創製のための暖房モデル実験が開始された⁽¹⁾。この研究の主眼は導入装置の改良、改善を行ってエネルギー利得の高い寒冷地適用型のソーラーシステムの開発および自然エネルギー依存率の高いソーラーヒートポンプPVシステムの開発を行うことである。

平成9年3月21日～平成9年4月20日にかけてソーラーヒートポンプPVシステムに対して初期性能の測定を行った⁽²⁾。この1ヶ月間の測定結果によれば、主な性能値はコレクター集熱効率 $\eta_c = 36.9\%$ 、集熱システム成績係数 $COP_c = 29$ 、ヒートポンプ成績係数 $COP_{HP} = 3.49$ 、ソーラーヒートポンプPVシステム成績係数 $COP_s = 4.13$ 、システム自然エネルギー依存率 $F_{NE} = 0.758$ である。これらはシステム導入直後の過渡的な初期運転期間の値ではあるが、目標値より大部低い値である。

以来、システムやバーツの改良、改善および開発⁽³⁾

を行って、積雪問題を除いてシステムの性能は特段の向上を示した。本報告は平成9年11月1日～平成10年4月30日の冬期間の実験結果を整理、検討したものである。

2. 主な記号および単位

E_c :揚水ポンプの消費電力 MJ/d

E_{HP} :ヒートポンプの消費電力 MJ/d

E_{FS} :ヒートポンプ1次側と2次側の循環ポンプ消費電力 MJ/d

E_s :商用電力 MJ/d

COP_c :集熱システム成績係数

COP_{HP} :ヒートポンプ成績係数

COP_s :システム成績係数

q_d :測定期間の平均日射量(60°傾斜面) MJ/(m²d)

Q_c :コレクター集熱量 MJ/d

Q_{PV} :PV発電量 MJ/d

Q_w :地下水熱量 MJ/d

Q_B :ボイラー放熱量 MJ/d

Q_{HP} :ヒートポンプの放熱量 MJ/d

*1会員、北見工業大学大学院

*2会員、北見工業大学工学部(〒090-8507 北見市公園町165)
(原稿受付 平成10年5月8日)

Graduate Course of Engng., Kitami Institute of Techology
Dept. of Mech. Engng., Kitami Institute of Techology

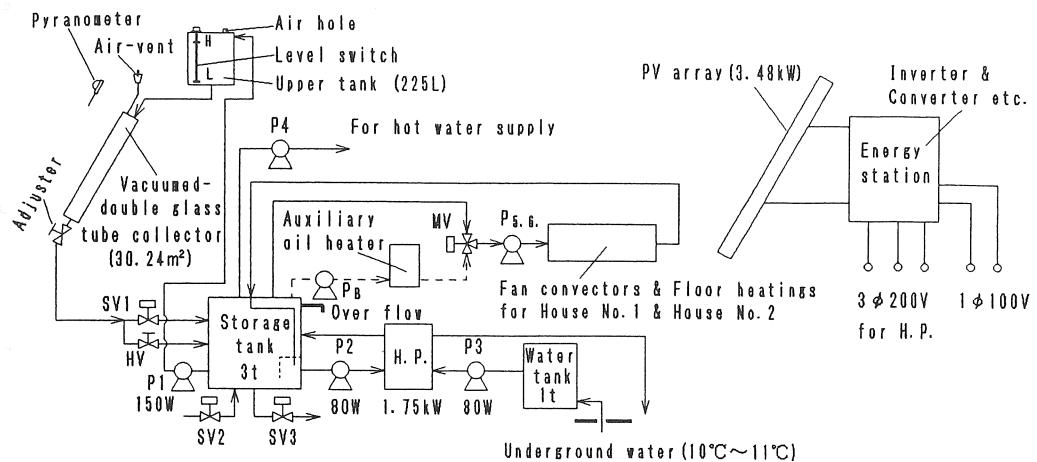


図1 改良されたソーラーヒートポンプPVシステムのブロックダイアグラム

Fig.1 Schematic diagram of solar-heat pump PV system improved

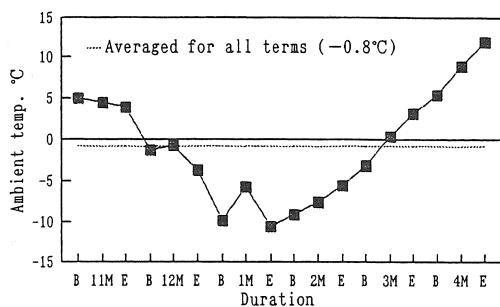


図2 日平均気温の変化および期間平均値

Fig.2 Average ambient temperature

 η_c :コレクター集熱効率 η_{PV} :PVの変換効率 F_{NE} :システムの自然エネルギー依存率 t_c :測定期間の平均外気温度 °C

B:上旬

M:中旬

E:下旬

3. システムの性能

システムは導入後種々の改良が行なわれた。その内容を項目で示すと、次の通りである。

- (1) 流下集熱式ソーラーシステムの開発
- (2) コレクターヘッダー部の断熱増強
- (3) 上部タンクの断熱増強
- (4) 蓄熱タンク内の配管改良

表1 ポンプ仕様の変更

Table 1 Exchange of the pumps

Items	Collecting pump	pumps for H.P.
Original	250W	130W×2
Present	150W	80W×2

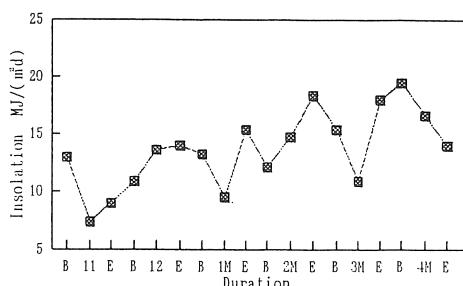


図3 傾斜面(60°)の日平均日射量

Fig.3 Daily average insolation on a tilt surface (60°)

(5) ポンプ容量の適正化

適正化によって変更になったポンプ仕様を表1に示す。

図1はH10年1月中旬までシステムに対して種々の改良が完了した後のシステムフローを示す。システムの性能はシステムの改良に伴って順次向上してきた。H9年11月1日～H10年4月30日の半年間の連続測定結果により、システムが改良後の性能(H10年1月21日～H10年4月30日)はその導入初期(H9年3月21日～

H 9年4月20日)および改良期間(H 9年11月1日～H 10年1月20日)の性能と比較すると大きく向上した。しかし、システム性能は外気温度および日射量などの気象要素にも基本的に影響される。図2、図3はそれぞれH 9年11月～H 10年4月の外気温度と日射量の変化を10日ごとの旬間の平均値で示す。以下にシステムの改良およびそれによる性能向上の結果を説明する。

3・1 集熱システムの性能

集熱システムは半強制循環集熱式から流下集熱式に改良された後、その性能は特段に向上した。

図4は揚水ポンプの消費電力の変化を示す。12月上旬まで凍結防止のために集熱用の水の流量を夜間は0.3m³/hに設定していた。コレクター出口の温度より判断して夜間流量を減少させる余裕がまだあることがわかったので、12月中旬から夜間流量を0.3m³/hから0.2m³/hに減じた。気温が次第に降下しているにもかかわらず、12月下旬からさらに夜間流量0.2m³/hを0.16m³/h(コレクター1枚当たり0.1L/minに相当)に絞った。4月末まで最低気温が-15°C以下の日は33日あり、その中、-20°C以下の日は8日あったが、システムは全く凍結す

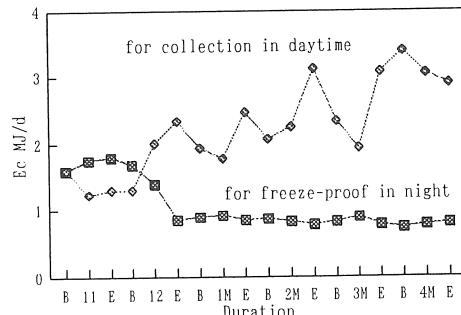


図4 揚水ポンプの消費電力の変化

Fig.4 Electric power consumption of lift pump

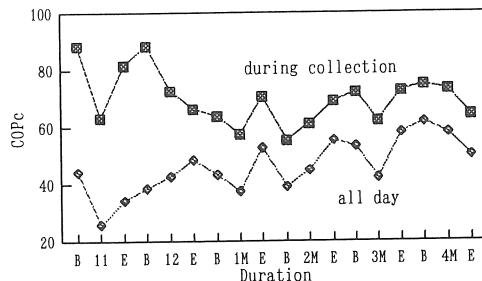


図5 集熱システムのCOPの変化

Fig.5 COP of collecting system

ることなく順調に運転した。12月中旬から日中の集熱時の水の流量を1.35m³/hから1.45m³/hに増したので、日中の消費電力が少し増大した。また12月下旬、1月下旬、2月下旬および3月下旬以後は晴天が多かったため、集熱時間が長くなり、日中の集熱に消費された電力は増加した。しかし1日の消費電力は旬間平均値で4MJ/dを越えることはなく、集熱システム成績係数は大幅に向上了。

図5は集熱システム成績係数COPcの変化を示す。夜間の凍結防止の消費電力を含め、COPcはH 9年11月1日からH 10年1月20日までの改良作業中の試行運転期間に1日の平均値で40、H 10年1月21日からH 10年4月30日までの改良作業完了後の定常運転期間に平均値で53に達した。

図6はコレクターによる集熱量および集熱効率を示す。集熱効率は外気温度の低下に伴って低下するが、12月中旬から日中の集熱時の流量を増大させたことにより集熱効率が大体安定した値に維持できた。1月上旬、2月上旬、2月中旬および3月中旬に積雪のため集熱効率は低下したが、その後天候の好転により集熱効率は向上し始め、4月中旬に平均集熱効率は44.4%に達した。集熱効率はH 9年11月1日からH 10年1月20日までの試行運転期間に平均値で35.2%，H 10年1月21日からH 10年4月30日までの定常運転期間に平均値で39.1%となる。これらの測定結果から積雪は集熱システムにとって大きなマイナス要因であるため、防雪対策は今後の重要な課題と思われる。

3・2 PVシステムの性能

図7はPVシステム(太陽電池)の発電性能を示す。PVの変換効率はほとんど日射量に関係せず、傾斜角60°で設置しているため積雪があっても日射があれば直ぐ滑落し、11%前後に安定している。発電量曲線が

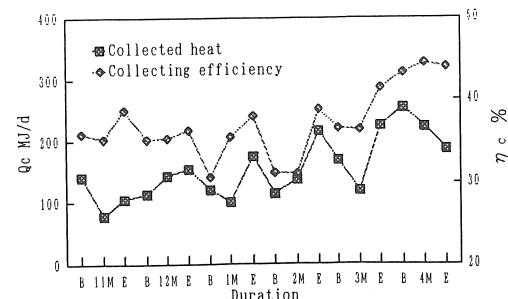


図6 集熱器の集熱性能の変化

Fig.6 Collecting performance of the collector

図3の日射量曲線によく対応していることより、PVを日射計代わりに集熱システムの運転制御に用いることもできる。

3.3 ヒートポンプの性能

図8はヒートポンプの運転性能を示す。11月下旬にヒートポンプの圧縮機の温度が高すぎる所以、2次側入口温度を低下させることにより、成績係数の向上を図った。12月上旬にヒートポンプは新しい圧縮機に交換され、成績係数はさらに向上した。しかし加熱能力が不足だったので、12月下旬からインバータを取り付けて電源周波数を50Hzから60Hzに転換させた。ヒートポンプの能力は増大したが、2次側循環ポンプの流量が適切でなく、成績係数はまた低下した。その後2次側循環ポンプの流量を増大させることにより成績係数はやや上昇したが、満足すべき成績になっていない。

実験により地下水温度が一定の場合（10°C～11°C）ヒートポンプ成績係数COP_{HP}はその2次側入口水温t_{z1}に大きく影響されることがわかった。実験による測定結果を図9に示す。

図9からCOP_{HP}と2次側入口水温t_{z1}の関係は次の式で表わされる。

$$\text{COP}_{\text{HP}}(t) = -0.073 t_{z1} + 6.13 \quad (1)$$

(25°C < t_{z1} < 45°C)

ヒートポンプ2次側は蓄熱タンクにつながっているため、2次側入口水温は蓄熱タンクの水温となる。ゆえに改良前はt_{z1} = t_w、よって

$$\text{COP}_{\text{HP}}(t) = -0.073 t_w + 6.13 \quad (2)$$

式(1)よりt_{z1}が低い方がCOP_{HP}は高くなることがわ

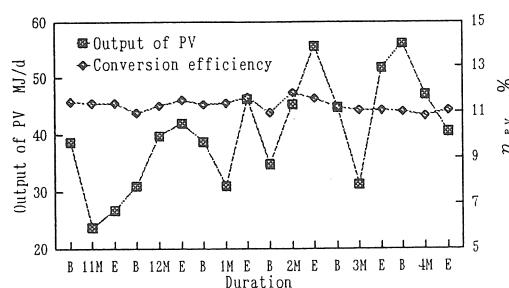


図7 PV発電性能の変化

Fig.7 Electric power generated from the PV and its conversion efficiency

かる。しかし蓄熱タンクの水温を人為的に下げるとは普通考えられない。そこで暖房戻りの水温は常に蓄熱タンクの水温より低いことに着目して、暖房戻りの水を直接ヒートポンプに導入することにした。しかもこの場合、暖房戻り水の流量はヒートポンプ2次側の流量より大きいため、常に2次側の流量を満足する。この方法を取り入れるためにH10年1月中旬に蓄熱タンク内の配管の改良工事が行われた。

暖房が行われている際、暖房戻り水の水温t_{sh}は蓄熱タンクの水温より平均で約2.5°C低く、改良後はt_{z1} = t_{sh} = t_w - 2.5となる。この場合、COP_{HP}は式(1)より

$$\begin{aligned} \text{COP}_{\text{HP}}(t) &= -0.073 t_{z1} + 6.13 \\ &= -0.073 t_{sh} + 6.13 \\ &= -0.073(t_w - 2.5) + 6.13 \\ &= -0.073 t_w + 6.31 \end{aligned} \quad (3)$$

を得る。式(2)と式(3)を比較すると、蓄熱タンクの水温が同じ場合、改良後のヒートポンプ成績係数は改

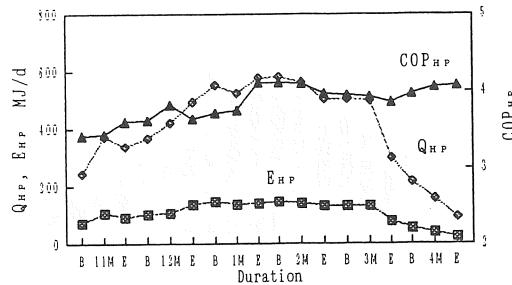


図8 ヒートポンプの作動性能

Fig.8 Running performance of heat pump

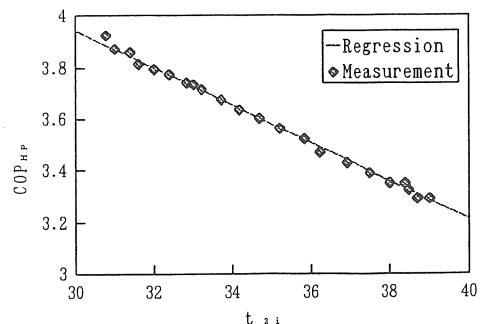


図9 COP_{HP}とt_{z1}の関係

Fig.9 Relation between COP_{HP} and t_{z1}

良前より平均で0.18向上することがわかる。

蓄熱タンク内の配管法を改良して暖房戻りパイプをヒートポンプ2次側の入口側に直結することにより、ヒートポンプ成績係数は著しく向上し、1月下旬には最高の4.11に達した。2月下旬から暖房負荷の低減により t_{21} が始終高い値となり、3月下旬に成績係数は3.84に低下した。その後暖房負荷、言い換えれば外気温度に追従させてヒートポンプを運転制御することにより成績係数は再び上昇し、約4となつた。このヒートポンプ制御に関しては今後さらに検討する必要がある。

ヒートポンプ成績係数COP_{H/P}はH9年11月1日からH10年1月20日までの試行運転期間に平均値で3.74、H10年1月21日からH10年4月30日までの定常運転期間に平均値で4.01となつた。

3.4 システム成績係数および自然エネルギー依存率

ソーラーヒートポンプPVシステムの供給熱量の関係を図10に示す。システム成績係数COP_sはシステムの取得熱とシステムに投入した購入エネルギーの比とし

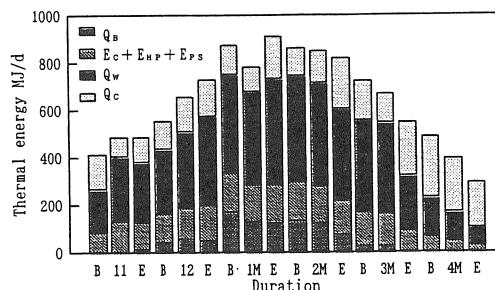


図10 システムへ供給された熱エネルギー

Fig.10 Thermal energies supplied by the system

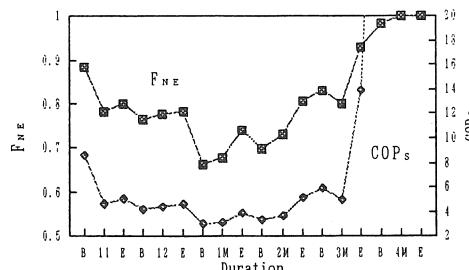


図11 ソーラーヒートポンプPVシステムの

COP_s および F_{NE}

Fig.11 The COPs of solar heat-pump PV system and the system's dependence on natural energy, F_{NE}

て、次のように定義される。

$$COP_s = (Q_c + Q_w + Q_B + E_c + E_{H/P} + E_{ps}) / (Q_B + E_s)$$

ここで

$$E_s + Q_{FV} = E_c + E_{H/P} + E_{ps}$$

であり、上式は

$$COP_s = (Q_c + Q_w + Q_B + E_c + E_{H/P} + E_{ps})$$

$$/(Q_B + E_c + E_{H/P} + E_{ps} - Q_{FV}) \quad (4)$$

となる。

システムの自然エネルギー依存率 F_{NE} はシステムが収得した自然エネルギーとシステムに投入した全エネルギーの比であり、次のように定義される。

$$F_{NE} = (Q_c + Q_w + Q_{FV}) / (Q_c + Q_w + Q_{FV} + Q_B + E_s)$$

$$= 1 - 1/COP_s \quad (5)$$

本システムから得られたCOP_sおよびF_{NE}を図11に示す。11月上旬は日射量が多く、ヒートポンプの運転時間は比較的少ないので、COP_sは8.61、F_{NE}は0.884に達した。1月上旬は雪が多くコレクターへの積雪のため灯油が多く消費され、COP_sは2.97、F_{NE}は0.663と期間中の最低値になった。しかしその後のシステムの改良により、COP_sとF_{NE}は向上した。2月下旬から晴天が多く、システムの消費電力の大部分が太陽電池の発電量により相殺され、COP_sは持続的に向上した。4月中旬と下旬にシステムの消費電力が大体太陽電池の発電量で賄える値となり、COP_sは無限大に近づき、F_{NE}は1に達した。H9年11月1からH10年1月20までの改良中の試行運転期間にシステム成績係数COP_sは平均値で4.5、自然エネルギー依存率F_{NE}は0.778となる。H10年1月21日からH10年4月30日までの改良後の定常運転期間にCOP_sは平均値で6.14、F_{NE}は0.837に達した。

真冬にシステムの自然エネルギー依存率の低い原因是暖房負荷が設計能力を上回ったこと、積雪によりコレクターの集熱能力が低下したこと等によるもので、このような場合にはシステムは灯油ボイラーに依存する以外にない。しかしその場合、式(5)からボイラー熱Q_Bの増大に伴ってF_{NE}は低下することがわかる。

4. 実験結果および検討

本システムの性能向上の結果を示すために、春先き1ヶ月間の改良前後の実験結果を取上げ、初期実験結果(平成9年3月21日～平成9年4月20日)とシステム改良後の実験結果(平成10年3月21日～平成10年4月20

日)を比較して表2に示す。このほか表2には参考として、気象条件(外気温度、日射量)がやや厳しい3月11日から1ヶ月間のシステム性能値を示す。表2から改良後のシステムの各性能値はすべて導入初期のシステムのそれを上回っている。これは水集熱流下式集熱システムの開発およびヒートポンプ回路の改善による結果である。

表3は改良中の試行運転期間のシステム性能値および改良後の定常運転期間のシステム性能値を示す。シ

ステム性能はシステム随所の改良、改善、および水集熱流下式集熱システムの開発に伴って明らかに向上した。

表4はH9年11月1日からH10年4月30日までの全暖房期間におけるシステムの熱収支を示す。暖房負荷は計算値で、その算出方法は次の通りである。

自然エネルギー実験室の熱特性の予測⁽⁴⁾により、暖房負荷係数Kは、1号棟の機械室(32m^2)は $6.96(\text{kJ}/(\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}))$ 、1号棟の計測室と研究室(64m^2)は $6.96(\text{kJ}/(\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}))$ 、2号棟の実験室(98.2m^2)は $6.27(\text{kJ}/(\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}))$ となる。H9年11月1日からH10年4月30日までの外気温度の平均値は -0.8°C である。機械室の室温が約 15°C 、ほかの室温が 20°C に維持されている。暖房負荷 $Q_L(\text{MJ})$ の計算式は次のように表わされる。

$$Q_L = 24(\text{h}) \times d K A \Delta t / 1000$$

ここでdは暖房日数、A(m^2)は暖房面積、 $\Delta t (\text{°C})$ は室温と外気温度の差である。よって各室の暖房負荷は機械室

$$Q_L = 24(\text{h}) \times 181(\text{日}) \times 6.96 \times 32 \times (15 + 0.8) / 1000$$

$$\approx 15286 \text{ MJ}$$

計測室と研究室

$$Q_L = 24(\text{h}) \times 181(\text{日}) \times 6.96 \times 64 \times (20 + 0.8) / 1000$$

$$\approx 40248 \text{ MJ}$$

2号棟実験室

$$Q_L = 24(\text{h}) \times 181(\text{日}) \times 6.27 \times 98.2 \times (20 + 0.8) / 1000$$

$$\approx 55633 \text{ MJ}$$

である。ゆえに暖房負荷の合計は 111167MJ となり、測定値との誤差は3%で極めてよく一致する。

5. むすび

以上ソーラーヒートポンプPVシステムの詳細な測定を行って、システムの改良、改善、および開発により、積雪問題を除いて本システムはほぼ満足すべき性能を発揮していることが示された。これによりシステムが今年度分の改良が完了した後の定常運転期間(H10年1月21日～4月30日)の測定結果を基準として、暖房期間におけるシステムの性能を平均値で評価すると以下の通りである。

- (1) 開発された水集熱流下式集熱システムの集熱効率は平均で39.1%，集熱システム成績係数は平均で53となる。
- (2) ヒートポンプ成績係数は平均で4.01となる。
- (3) 太陽電池の変換効率は11%に安定する。
- (4) 集熱システム成績係数およびヒートポンプ成績係数の向上によりシステム成績係数は向上し平

表2 気象条件およびシステム性能

Table 2 Weather's conditions and the performance of the system

(1997.3.21～4.20 vs 1998.3.21～4.20)

1997.3.21～1997.4.20 (before improving)						
t_c	q_s	η_c	COP _c	COP _{HF}	COP _s	F _{NE}
3.6	17.5	0.369	29	3.49	4.13	0.758
1998.3.21～1998.4.20 (after improved)						
t_c	q_s	η_c	COP _c	COP _{HF}	COP _s	F _{NE}
5.7	18.0	0.429	60	3.93	28.7	0.965
1998.3.11～1998.4.10 (after improved)						
t_c	q_s	η_c	COP _c	COP _{HF}	COP _s	F _{NE}
2.9	16.1	0.411	56	3.91	9.59	0.896

表3 気象条件およびシステム性能

Table 3 Weather's conditions and the performance of the system

(1997.11.1～1998.1.20 vs 1998.1.21～4.30)

1997.11.1～1998.1.20 (being improved)						
t_c	q_s	η_c	COP _c	COP _{HF}	COP _s	F _{NE}
-1.0	11.3	0.352	40	3.74	4.50	0.778
1998.1.21～1998.4.30 (completely improved)						
t_c	q_s	η_c	COP _c	COP _{HF}	COP _s	F _{NE}
-0.7	15.4	0.391	53	4.01	6.14	0.837

表4 システムの熱収支

Table 4 Heat balance of the system (MJ)

(1997.11.1～1998.4.30)

Energy collected	27916
Energy of underground water	55953
Elec. energy of H.P. compressor	19341
Elec. energy of the pumps for H.P.	2117
Elec. energy of collecting pump	594
Oil backup	9329
Total heating load measured	115250
Heating load calculated	111167

均で6.14に達する。

- (5) システム成績係数の向上によりシステムの自然エネルギー依存率は向上し83.7%となる。
- (6) システムの凍結防止性能は極めて良好である。

今後の改良は積雪防止、集熱システムの断熱性、システムの運転制御、システムの熱供給能力および蓄熱能力の適性化に重点を置いて研究を行う予定である。積雪防止および集熱システムの断熱性の問題が解決されれば、集熱システム成績係数は60以上に達すると見込まれる。システムの運転制御、システムの熱供給能力および蓄熱能力が適性化されれば、灯油消費量は低減する。これらの改良によりシステム成績係数は6.6以上を目指とし、それによってシステムの自然エネルギー依存率は目標値の85%が達成されることになる。

謝辞：本研究は平成8～10年度のNEDO提案公募型プロジェクトの研究成果の一部である。ここに関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- (1) 金山公夫, H 8 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構, 独創的産業技術開発促進事業研究成果報告書, 「次世代住環境のための高利得ハイブリッドシステムおよび要素技術の開発」, 8H代-176-1, (1997), 1~42.
- (2) 趙春江、金山公夫、馬場弘、遠藤登、ソーラーヒートポンプPVシステムの性能の評価と向上、その1：太陽熱と地下水熱によるハイブリッドシステムの熱供給能力、太陽エネルギー、Vol.24, No.2, (1998), 52~58.
- (3) 趙春江、金山公夫、馬場弘、遠藤登、ソーラーヒートポンプPVシステムの性能の評価と向上、その3：流下集熱式システムの開発および性能評価、太陽エネルギー、(投稿中).
- (4) 趙春江、金山公夫、馬場弘、遠藤登、気象量実測値にもとづく自然エネルギー実験室の熱特性の予測、太陽エネルギー、Vol.23, No.6, (1997), 47~52.