

北見工業大学自然エネルギーシステムの性能 (Ⅱ)*

Performance Evaluation on the Renewable Energy Laboratory
at Kitami Institute of Technology ; Part 2

金 山 公 夫*
Kimio KANAYAMA

馬 場 弘**
Hiromu BABA

福 田 武 幸***
Takeyuki FUKUDA

Abstract

Since the house No. 2 of the renewable energy laboratory was completed in March, 1983, the second evaluation of the performance of the renewable energy laboratory was carried out supplying heat to both the house No.1 and house No.2 during the winter of '83 fiscal year. The differences from the experimental conditions on the preceding research¹⁾ are as follows : (1) Solar system is combined in parallel with a heat pump, (2) Temperature of heat supply is changed from 50°C to 40°C, and (3) An auxiliary boiler works intermittently due to increases of the heating load necessary to the house No. 2.

Comparing with the preceding results, while the solar fraction is decreased as a whole, the heat pump fraction is increased with increasing heat load. The heat pump fraction of 0.673, the solar fraction of 0.298 and the boiler fraction of 0.029 are obtained as the average values for four months in the winter. Moreover, the system COP grows up from 3.18 to 4.20 and on the contrary the rate of electric power for the heat pump goes down from 0.313 to 0.213.

From these results, the system performance on the second evaluation for the renewable energy laboratory consisting of Houses No.1 and No.2 was apparently improved in comparison with that on the first evaluation for the house No.1 in which the heat pump system was combined with the solar system in series.

Key Words : Solar energy, Solar system, Underground water heat, Heat pump, System coefficient of performance

1. ま え が き

北見工業大学自然エネルギー実験室は、寒冷地における太陽熱と地下水熱を組み合わせた自然エネルギーの複合利用による暖(冷)房給湯のための実験施設である。昭和58年3月に2号棟が完成したのを機に、既に完成している1号棟とともに、ソーラーヒートポンプシステムによる暖房給湯の実験が継続されている。この報告は、前報¹⁾に紹介された1号棟の性能測定に引き続き、今回完成した2号棟を含めた施設全体に対するソーラーヒートポンプシステムによる、主として暖房実験の結果を整理、解析し、太陽熱と地下水熱の組み合わせ利用によるソーラーヒートポンプシステムについて、システムの接続方法および制御方法を前回と変えて、システム成績係数との関連で性能評価を行ったものである。

2. システムの概要

自然エネルギー実験室1号棟および2号棟の建物平

面図を図1に示す。昭和58年度は1号棟(床面積 96 m²)のほかに2号棟(床面積 150m²)への熱供給が加わり、前回と同様に建物およびシステム各部および気象量に関する詳細な測定が行われた。1号棟内のシステム構成および操作に関して前年度と異なる点は、

(1) 暖房負荷の増加に対応して、集熱タンクと蓄熱タンクは2台のバランシングポンプによって熱的流体的に一体化され、ソーラーシステムとヒートポンプは負荷に対して常に並列で作動すること、(2) 冬期間の負荷への温水供給温度を 50°C から 40°C に下げたこと、および(3) 2号棟への熱供給が加わり、負荷が 1.6倍に増加したため、灯油だき補助ボイラによる若干の援助を受けたことである。

※ 日本太陽エネルギー学会第10回研究発表会講演会
(1984-12)にて講演発表

* 北見工業大学 教授
Department of Mechanical Engineering
Kitami Institute of Technology Professor

** 北見工業大学 助手
Assistant

*** 北見工業大学 技官
Technician

ソーラーヒートポンプの構成および作動に関するシステムフローを図2に示す。図に見られるように、システムは常に並列モードで作動し、負荷が小さいときはソーラーシステムのみが作動し、負荷の増大に伴ってヒートポンプおよび補助ボイラが作動して暖房が行われる。ヒートポンプは蓄熱タンク温度 t_{st} が $35^{\circ}\text{C} < t_{st} < 40^{\circ}\text{C}$ で作動し、補助ボイラは $t_{st} \leq 35^{\circ}\text{C}$ で作動する。

3. 主な記号および性能値

本報告で用いられる主な記号および性能値は次のとおりである。

t_a	: 日平均温度	$^{\circ}\text{C}$
t_R	: 3室平均温度	$^{\circ}\text{C}$
t_{st}	: 集・蓄熱タンク温度	$^{\circ}\text{C}$
Q_J	: 集熱面日射量	MJ
Q_C	: 集熱量 (=ソーラー熱量 Q_S)	MJ
Q_{CE}	: 集熱ポンプ動力の熱当量	MJ
Q_{TL}	: システムからの出熱から求めた全熱負荷 (一部計算値含む)	MJ
Q_{TL}'	: システムへの入熱から求めた全供給熱量 (= $Q_C + Q_W + Q_E + Q_B$)	MJ
Q_B	: 補助ボイラ供給熱量	MJ
Q_H	: ヒートポンプ全放熱量 (= $Q_E + Q_W$)	MJ
Q_1	: ヒートポンプ実放熱量 (= 2次側測定値)	MJ
Q_E	: ヒートポンプ動力の熱当量	MJ
Q_{EP}	: ヒートポンプ動力の熱当量 (1次側, 2次側循環ポンプ動力含む)	MJ
Q_W	: 地下水熱量	MJ
Q_L	: 暖房供給熱量	MJ
Q_{HW}	: 給湯熱量 (微小のため Q_L に含める)	MJ
Q_{MAC}	: 機械室暖房負荷 (計算値)	MJ
η_C	: 集熱効率 (= Q_C/Q_J)	
η_{CE}	: ソーラー電力率 (= Q_{CE}/Q_C)	
F_S	: 太陽依存率 (= Q_C/Q_{TL}' = ソーラーシステム効率 η_S)	
F_W	: 地下水依存率 (= Q_W/Q_{TL}')	
F_{NE}	: 自然エネルギー依存率 (= $(Q_C + Q_W)/Q_{TL}'$)	
F_E	: ヒートポンプ電力依存率 (= Q_E/Q_{TL}')	
F_{HP}	: ヒートポンプ依存率 (= Q_H/Q_{TL}')	
Q_B	: ボイラ依存率 (= Q_B/Q_{TL}')	

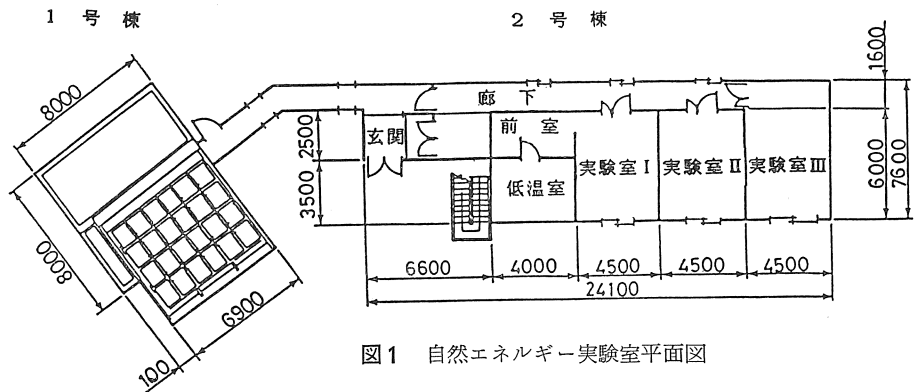


図1 自然エネルギー実験室平面図

並列ソーラーヒートポンプモード

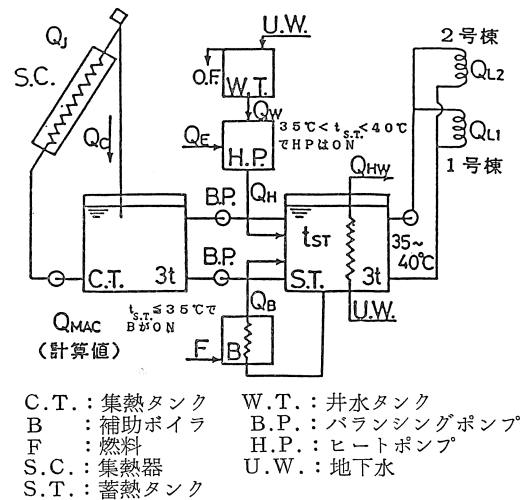


図2 ソーラーヒートポンプシステムのシステムフロー

$C.O.P.$: ヒートポンプ成績係数 (= Q_1/Q_{EP})
 $(C.O.P.)_S$: システム成績係数 (= Q_{TL}'/Q_{EP})
 $(C.O.P.)_{SB}$: ボイラ供給熱量を含めた成績係数 (= $Q_{TL}'/(Q_{EP} + Q_B)$)

4. 測定結果および検討

本実験施設における測定値および計算値として得られる熱量間には次の熱平衡式が成立する。

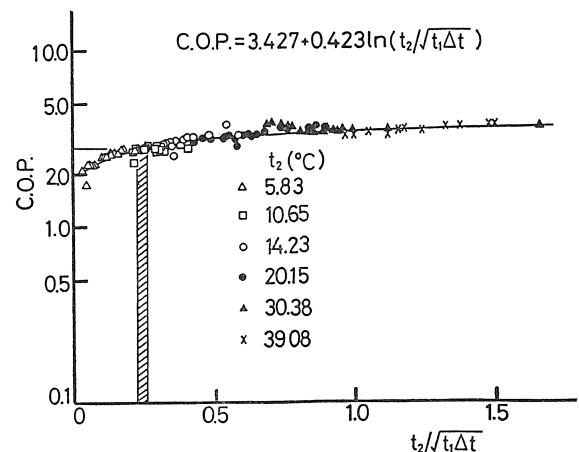


図3 ソーラーヒートポンプシステムに組み込まれたヒートポンプ単体の性能

出熱から求めた全熱負荷

$$Q_{TL} = Q_L + Q_{HW} + Q_{MAC}$$

(1)*

入熱から求めた全供給熱

$$Q_{TL}' = Q_C + Q_H + Q_B$$

(2)

本来、出熱から求めた全熱負荷と入熱から求めた全供給熱量は等しく、式(1)＝式(2)でなければならないが、測定値および計算値の計数上の誤差のため両式には差異が生じ、ここでは測定値のみから求められる式(2)に従って実験結果の解析および検討を行う。

使用されたヒートポンプは電動機入力 1.7 kW、出力 1.5 kW (アクア冷熱, AQ-2型)で、単体の実測による性能曲線を図3に示す。図の横軸は高温側温度 t_1 、低温側温度 t_2 および両者の温度差 Δt を含む無次元温度で表示し、高低両熱源の常用の温度範囲に対応させて一般化してある。この場合 $t_1 = 50^\circ\text{C}$ に固定し、 t_2 を種々変化させた際の成績である。本実験において自然エネルギー実験室に組込まれたときの使用条件は $t_1 = 35 \sim 40^\circ\text{C}$ 、 $t_2 = 8^\circ\text{C}$ で、図中斜線部分で示され、それに対する C.O.P. を縦軸から読み取ると 2.8 程度となる。

自然エネルギー実験室の1日毎の性能測定に関して、昭和58年11月21日から12月20日までの結果を図4(a)に、昭和58年12月21日から昭和59年1月20日までの結果を図4(b)に、また昭和59年1月21日から2月20日までの結果を図4(c)に示す。図には日射量、集熱量(＝ソーラー熱量)、地下水熱量、ヒート

* 機械室の暖房はシステムからの損失熱量及び各種機器類からの放熱によって賄われているが、これを測定することは困難なため暖房負荷計算から求めた値を用い Q_{MAC} とし他と区別した。

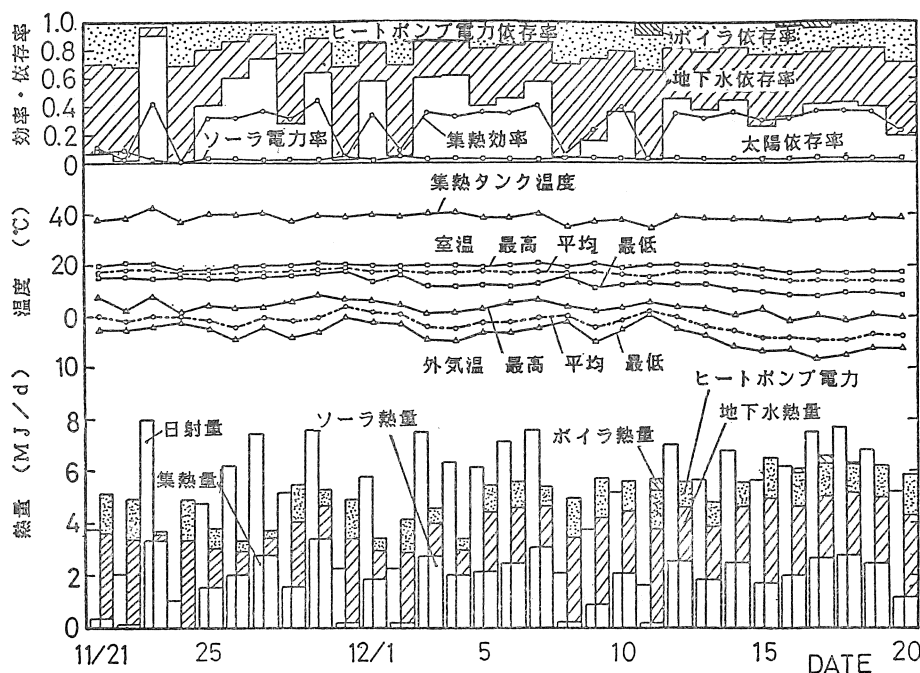


図4(a)

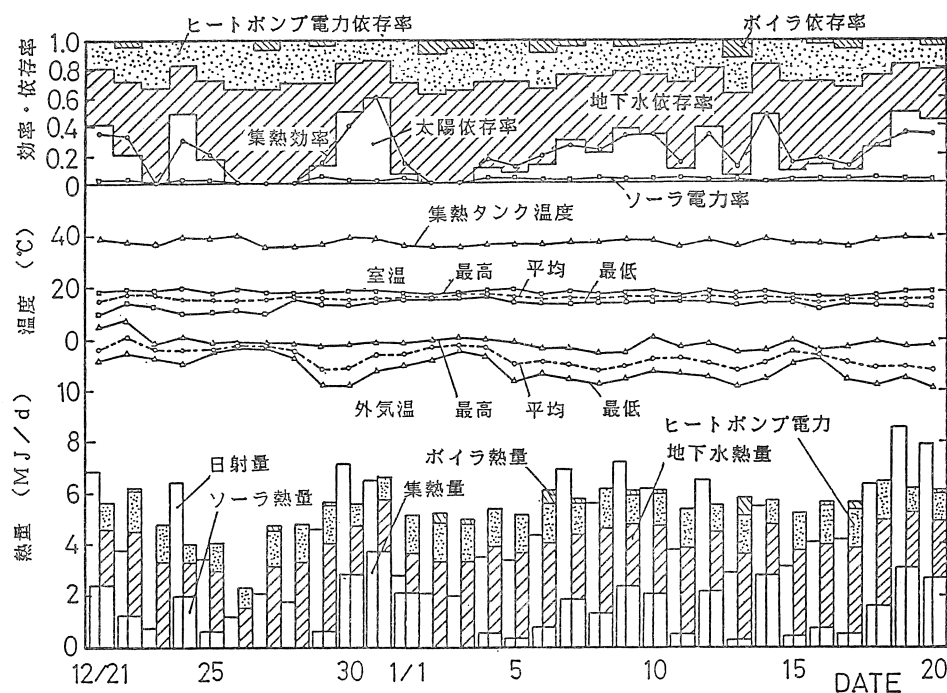


図4(b)

ポンプ電力、ボイラ熱量のほか、各種の温度、効率および依存率等を示している。これらの結果における一般的な傾向としては次のことがいえる。外気温度、日射量は毎日大きく変化するが、前報の直列接続の場合と異なり、蓄熱タンク平均温度は $35 \sim 40^\circ\text{C}$ のほぼ一定値に保たれる。また平均室温も $15 \sim 20^\circ\text{C}$ の間で一定である。日射量は概して外気温度が低いほど大きい。集熱量、集熱効率、太陽依存率は日射量に比例して増減し、地下水熱、ヒートポンプ電力、地下水依存率、ヒートポンプ電力依存率は日射量に逆比例して増

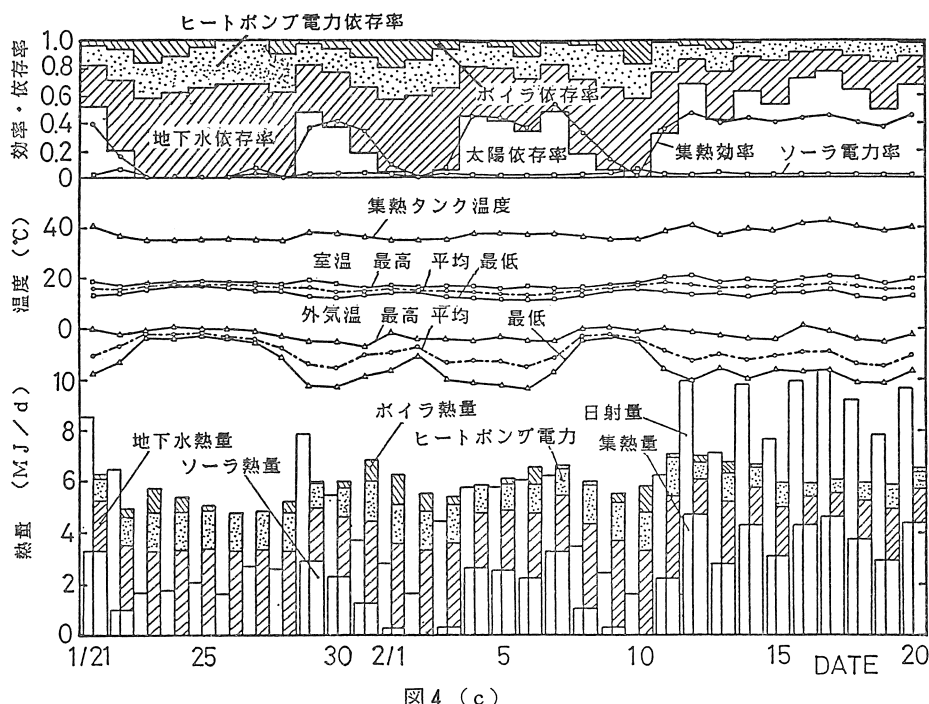


図4 (c)

図4 自然エネルギー実験室の1日毎の測定値および性能値

減する。集熱量が少なく、ヒートポンプの援助によっても負荷増に追いつけない場合は、補助ボイラによる熱供給が行われる。1号棟の熱負荷は外気温度に比例するが、2号棟の3室は使用が不規則で熱負荷は外気温度とは必ずしも関係がない。ソーラー電力率は集熱効率に逆比例し、その値は2~3%の小さな値である。

各測定期間について特徴的な事柄を述べると、図4(a)に示す。11月21日~12月20日の期間は、全般に天候が良く、日射量が大で、しかも外気温度があまり低くないため太陽依存率は大きい。ボイラが作動した日はわずか4日間であった。特に後半は冬至に近づき外気温度が低下するが、逆に晴天が続き日射量が大きく、太陽、地下水、ヒートポンプ電力およびボイラの各依存率の間にバランスのとれた関係が見られる。

(b)に示す12月21日~1月20日の期間は、外気温度が低下して暖房負荷が増大し、逆に日射量が低下したため太陽依存率に対する地下水、ヒートポンプ、ボイラの各依存率が増大する傾向がうかがわれる。ボイラは期間の半数に近い14日が作動している。(c)に示す1月21日~2月20日の期間は、外気温度はさらに低下し、かつ変動が激しく、日射量が外気温度に逆比例して増減する様子が見られる。前半は日射量が小さく、全然集熱がない日が6日間続き、これらの日はもっぱらヒートポンプとボイラに依存するが、外気温度が概して高いためボイラは作動しない日もある。例年2月は天候の回復が著しく、この期間の後半は外気温度が低いにもかかわらず、日射の大きい晴天日が9

日間続き、太陽依存率は非常に増大し、そのためボイラは殆んど使用されことなく、厳冬期における理想的な自然エネルギー暖房が行われた。

図5は、昭和58年11月21日から昭和59年2月20日までの日射量、集熱量(=ソーラー熱量)、ヒートポンプ放熱量(=ヒートポンプ電力+地下水熱量)およびボイラによる補助熱量と、それぞれの割合、集熱効率および太陽依存率などを各期間1月毎にまとめたもので、上に述べた期間毎の特性がより明瞭に示されている。すなわち、11月21日~

12月20日までの30日間は天候が良く、したがって日射量、集熱量が多く、ヒートポンプ放熱量は少ない。補助ボイラは稀に作動するのみであるから、ボイラ熱量は微少である。これに対して12月21日から1月20日までの31日間は天候が悪く、したがって日射量、集熱量が少なく、これを補うためにヒートポンプ放熱量が増大し、補助ボイラからも熱が供給される。1月21日~2月20日までの31日間は天候が回復し、それによって日射量、集熱量が増加し、同時に暖房負荷も増大するためヒートポンプ放熱量およびボイラ熱量は増大する。しかし、暖房負荷が最大のこの期間でもボイラ熱

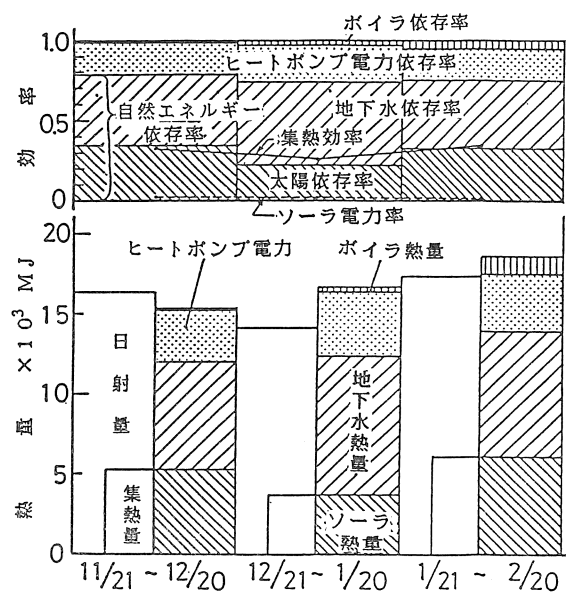


図5 測定期間1ヵ月毎の測定値および性能値

表1 測定期間毎の測定値および性能値

項 目	記 号	58年11月21日 ～11月30日	12月 1日 ～12月10日	12月11日 ～12月20日	12月21日 ～12月31日	59年 1月 1日 ～ 1月10日	1月11日 ～ 1月20日	1月21日 ～ 1月31日	2月 1日 ～ 2月10日	2月11日 ～ 2月20日	合 計 平 均
温 度											
日平均気温	$t_a, ^\circ\text{C}$	- 0.6	- 1.5	- 5.7	- 4.8	- 6.9	- 8.7	- 6.7	- 8.8	-10.9	- 6.07
三室平均温度	$t_R, ^\circ\text{C}$	17.8	17.3	15.2	17.7	16.8	16.3	16.5	15.2	16.8	16.62
集蓄熱タンク温度	$t_{CT}, ^\circ\text{C}$	39.4	38.8	38.0	38.4	37.2	37.7	36.5	36.4	39.9	38.03
熱 量											
集熱面日熱量	Q_J, MJ	4723.791	5412.469	6056.177	4438.619	4384.575	5247.608	4454.629	4029.908	8787.811	47265.587
集熱量	Q_C, MJ	1513.948	1770.179	1956.072	1256.041	956.265	1483.802	1080.195	1250.179	3687.316	14953.997
ソーラー電力	Q_{CE}, MJ	38.027	43.089	47.746	30.246	24.987	31.074	27.184	26.142	57.649	326.144
全熱負荷 (出熱)	Q_{TL}, MJ	4403.9	4953.5	5855.9	5423.8	5824.8	6147.5	6594.8	5978.2	6799.0	52307.6
全供給熱量 (入熱)	Q_{TL}', MJ	4502.446	4824.342	5881.685	5339.304	5581.447	5747.740	6106.514	5965.182	6380.148	50128.808
ヒートポンプ放熱量	Q_H, MJ	2988.501	3054.179	3626.231	4041.628	4463.988	4121.009	4646.016	4219.674	2580.867	33742.091
ヒートポンプ電力	Q_E, MJ	960.293	963.892	1200.456	1281.108	1387.772	1286.513	1447.860	1318.919	827.831	10674.644
地下水熱量	Q_W, MJ	2028.208	2090.285	2425.775	2760.520	3076.216	2834.496	3198.156	2900.755	1753.036	23067.447
ボイラ熱量	Q_B, MJ	0	0	99.382	49.301	161.194	142.496	380.303	495.329	107.467	1435.472
効 率											
集熱効率	η_C	0.320	0.327	0.323	0.283	0.218	0.283	0.242	0.310	0.420	0.3164
ソーラー電力率	η_{CE}	0.025	0.024	0.024	0.024	0.026	0.021	0.025	0.021	0.016	0.0229
太陽依存率	F_S	0.336	0.367	0.344	0.235	0.172	0.258	0.177	0.210	0.578	0.2981
地下水依存率	F_W	0.450	0.433	0.427	0.517	0.551	0.493	0.524	0.486	0.275	0.4600
自然エネルギー依存率	F_{NE}	0.787	0.800	0.771	0.752	0.723	0.751	0.701	0.696	0.853	0.7593
ヒートポンプ電力依存率	F_E	0.213	0.200	0.211	0.240	0.249	0.224	0.237	0.221	0.130	0.2137
ヒートポンプ依存率	F_{HP}	0.664	0.633	0.638	0.757	0.800	0.717	0.761	0.707	0.405	0.6731
ボイラ依存率	F_B	0	0	0.017	0.009	0.029	0.025	0.062	0.083	0.017	0.0282
成績係数	COP	2.631	2.741	2.749	2.769	2.860	2.824	2.839	2.794	2.729	2.780
ヒートポンプ成績係数	$(COP)_S$	4.226	4.461	4.228	3.747	3.582	3.983	3.759	4.030	6.930	4.198
システム成績係数	$(COP)_{SB}$	4.226	4.461	3.937	3.621	3.247	3.624	3.046	3.020	6.206	3.747

量は全供給熱量の 5.3%にしか過ぎない。

図 6 は、92日にわたる全測定期間中の日射量、集熱量、ヒートポンプ放熱量 (= 地下水熱量 + ヒートポンプ電力)、ボイラ供給熱量および 1, 2 号棟への暖房供給熱量などの熱収支をわかり易く、エネルギーフローに示したものである。

表 1 は図 5 と同様に期間を分けて旬間の測定結果および性能値の詳細をまとめたものである。今表中に示される測定値および性能値の期間合計および平均を前回のそれと比較すると、平均気温および 3 室平均温度はほとんど同じであるが、集・蓄熱タンク温度は前回は大きく変動したのに対して、今回は 35~40°C の間におさまり、しかも平均温度では前回の 22.6°C に対して今回は 38°C と高い。したがって集熱効率も 0.416 から 0.316 へと低下した。負荷が増大したのに伴って全供給熱量は $31.7 \times 10^3 \text{ MJ}$ から $50 \times 10^3 \text{ MJ}$ と 58.0% の増加を示した。内訳では太陽依存率は 0.625 から 0.298 と大きく減少し、反対に地下水依存率は 0.105 から 0.460 と大きく増加し、またヒートポンプ電力依存率は 0.315 から 0.213 に減少した。さらに今回はボイラによる供給熱量として、ボイラ依存率 0.029 が加わった。システム全体としての性能を示すシステム成績係数は、前回は 3.18 であったのに対して今回は 4.20 と 32.0% の増加を示し、ボイラ供給熱量を含めたシステム成績係数においても 3.75 と 18% の増加となる。この場合、前回の直列システムにおいてはヒートポンプは集熱タンク温度を低く抑える作用をするので、ソーラーシステムの集熱効率は上昇し、同時にソーラーシステムはヒートポンプ低熱源温度を上昇させる作用をするのでヒートポンプ成績係数は上昇することになる。しかし、通常は直列接続においてはソーラーシステムの作動如何にかかわらず蓄熱タンク温度を 40°C に維持するためにヒートポンプが常時稼動しなければならず、システム成績係数としての上昇は前回の結果が示すようにそれほど期待できない。また、暖房供給温度を 50°C から 40°C に低下させたこともシステム成績係数に好影響をもたらすが、その後の実験結果²⁾が示すようにこれによるシステム成績係数への影響よりも、並列接続による効果の方が明らかに大きいことが分った。以上の結果よりソーラーヒートポンプシステムとして前回の直列接続より今回の並列接続の方が負荷が増加したにもかかわらずはるかに優れていると結論することができる。

そのほか、出熱から求めた全熱負荷は入熱から求めた全熱負荷、すなわち全供給熱量に比較して測定期間の合計で 4.3% 大きい程度で一致していた。

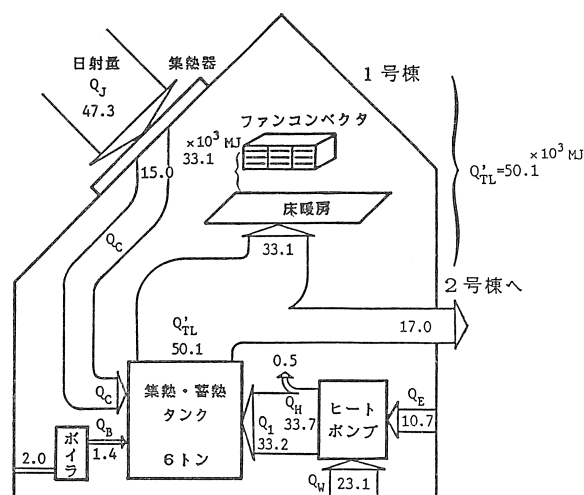


図 6 全測定期間 (92日) のトータルエネルギーフロー

5. む す び

昭和58年度の実験では、2号棟への熱供給が加わったため熱負荷が前年度の 1.6倍に増大し、それに伴って太陽依存率は0.48倍に減少し、ヒートポンプによる地下水依存率は3.38倍に増加した。しかし、ソーラーシステムとヒートポンプシステムの接続を並列化したこと、および負荷への供給温度を 50°C から 40°C へ低下させたことによってヒートポンプ稼動割合が減少し、システム成績係数は 3.18 から 4.20 へ 1.32倍に上昇を示し、逆にヒートポンプ電力依存率は 0.315 から 0.213 へと 0.68倍の減少となった。これらの事実はソーラーヒートポンプシステムの成績係数が改善されたことを意味し、ソーラーシステムとヒートポンプを直列接続から並列接続に切替え、かつ負荷への供給温度を下げることによってシステム性能の向上が得られることがわかった。以上前報と合わせて、本自然エネルギーシステムの長期間にわたる詳細な測定によってソーラーヒートポンプシステムの性能が建物負荷および気象量との関係で明らかにされた。

最後に、この研究における測定は、本学機械工学科昭和58年度卒業生熊谷一也君および黒河雅博君の協力に依ったことを付記して感謝する。

文 献

- 1) 金山公夫, 馬場 弘, 福田武幸: 北見工業大学自然エネルギーシステムの性能 (I), 太陽エネルギー-Vol. 12, No. 5, (昭61. 9) PP. 13~20.
- 2) 金山公夫, 馬場 弘, 山本政樹: 自然エネルギー実験室のシステム性能の測定および解析, 日本機械学会論文集 (B編) 第52巻, 第484号 (昭61. 12), PP. 4046-4052.

(昭和61年 9月29日 原稿受理)