

ソーラーヒートポンプP Vシステムの経済性評価

Economic Evaluation of a Solar - Heat Pump PV System

金山 公夫*¹ 趙 春江*² 馬 場 弘*¹ 遠 藤 登*¹
Kimio KANAYAMA Chun Jiang ZHAO Hiromu BABA Noboru ENDOH

Abstract

A study of the economic performance of a solar - heat pump PV system for the hot water supply and space heating of an old - age home is presented. The investigation is based on the initial capital cost, maintenance cost, running cost, interest rate, fuel inflation rate, direct economic interests due to energy incoming and a carbon tax, indirect economic interests due to the improvement of the healthy and residential environment, contribution for the national policy, as well as the residual value of the initial capital cost. We also discussed the payback time of the system on the basis of the theory of the external costs.

The economic performance could be evaluated in terms of a payback time as following: Taking the direct economic interests into account the payback time is 47 years; Taking the direct and the indirect economic interests into account the payback time is 21 years; Taking the direct and the indirect economic interests as well as the contribution for the national policy into account the payback time is 18 years; Taking the direct and the indirect economic interests, the contribution for the country, as well as the residual value of the initial capital cost into account the payback time is 17 years; The payback time counted on the basis of the external costs is 9 years.

Key words: Economic Evaluation, Solar - Heat Pump PV System, Space Heating, Capital Cost, Payback Time, External Cost

1. まえがき

太陽エネルギー利用の合理的技術としてソーラーシステムとヒートポンプを組合わせた、いわゆるソーラーヒートポンプシステム (Solar-assisted heat pump system - S A H P) の研究が約20年前から国の内外で行われてきた。そして今日、太陽電池 (P V) 技術の発達により P V を組合わせたいわゆるソーラーヒートポンプ P V システムとしてのハイブリッド化が可能となった。

1996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 P V 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・給湯モデル実験の研究が開始された⁽¹⁻²⁾。本研究では、これまでの S A H P の研究結果をふまえて、設計導入された装置の改良改善を行うことによって、エネルギー利得の高

い寒冷地適用型のハイブリッドシステムを開発することを目的としている。以来約1年半の実験研究で改良改善を重ね、本システムは積雪問題を除いておおむね満足すべき状態のもとで稼動している。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によると、水集熱流下式集熱システムの成績係数(夜間の凍結防止を含む)は約53、ヒートポンプ成績係数は4、太陽電池の変換効率は11%、システム成績係数は6.14、システムの自然エネルギー依存率は84%とほぼ目標値にあり、その上システムの凍結防止性能は極めてよいことがわかった⁽³⁾。

このようなハイブリッド自然エネルギー利用システムは事業用または住宅用として性能的には適切なシステムと言える。しかしながら、これが普及するためには経済的に公私にわたり利益をもたらすものでなければならない。すなわちシステムの初期投資額および維持費などのユーザの支出、システムからの生産エネル

*1会員、北見工業大学工学部(〒090-8507 北見市公園町165)

*2会員、北見工業大学大学院
(原稿受付 平成10年7月23日)

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

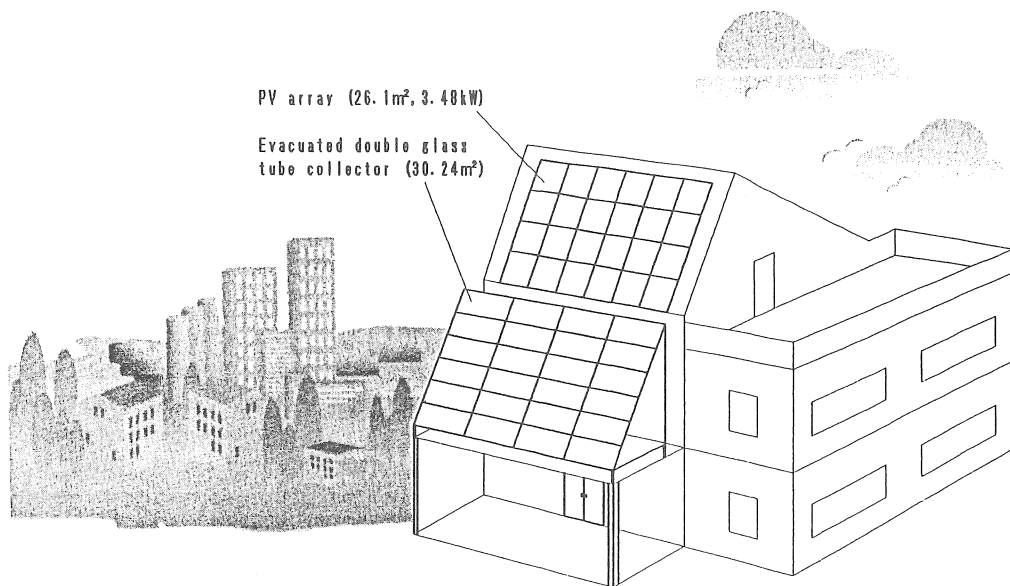


図1 老人ホームに導入されたソーラーヒートポンプPVシステムの外観
床面積 1階112.5㎡, 2階112.5㎡, 建物熱損失係数7kJ/㎡h℃

ギーによるユーザの収入, およびこれらより算出される償却年数などいわゆる経済性が保証されなければならない。この点に関しては, 著者ら⁽⁴⁾により以前にソーラーヒートポンプシステムを導入した個人住宅について, 経済性評価の試算がなされた経緯がある。

本論文はエネルギーの収入, 炭素税の負担軽減, および環境改善による健康性, 居住性の向上などからソーラーヒートポンプPVシステムが個人または公共にもたらす直接および間接的経済利益, および社会への貢献を考慮してソーラーヒートポンプPVシステムの経済性評価を行ったものである。その際, エネルギーの収入, 間接的経済利益と社会的貢献を評価するための付随的収入, 炭素税, エネルギー価格上昇率, 銀行金利, システム設備の残存価値および外部コストなどの要素を用いて経済的解析を行い, 本システムの普及の可能性について検討を行った。

2. 主な記号および単位

C: 初期投資額 (NEシステムのための割増分)	万円
M: 年間設備補修費 (=0.015C)	万円/年
E: 年間燃料節約額	万円/年
N: 償却年数	年
r: 金利	%

i: インフレ率	%
j: 燃料価格上昇率	%
V_i : 償却期間中でのシステムの総収入	万円
V_o : 償却期間中でのシステムの総支出	万円
V_c : 償却期間中でのシステムの取得 エネルギー以外の収入	万円

3. 経済評価

自然エネルギーシステムの経済性評価は, 一般に償却年数をベースに行われるが, 評価方法は各国のエネルギー政策など実情により異なる⁽⁵⁾。償却年数は従来の購入エネルギーシステム (PEシステムと略す) に追加された自然エネルギーシステム (NEシステムと略す) の初期投資額としての増分およびシステムにより節約されるエネルギーの価格を基数として種々の要素を加味することにより算出される。節約されたエネルギーの価格の算出は購入エネルギーの種類 (灯油, 電気, 石炭等) により異なるが, 本文においては灯油を算出基準とする。また評価システムには本システムのコレクター, ヒートポンプ, PVおよび暖房・給湯システムの仕様そのまま導入されたとし, 本システムの特徴を生かし暖房負荷のほか通年の給湯負荷が見込まれる老人ホームを対象施設に取り上げる。図1は老人ホーム

におけるソーラーヒートポンプP Vシステムの外観を示す。計算においてシステムの熱供給能力はソーラーシステムの最大能力がこのホームの暖房・給湯負荷の最小値に等しくなるものとし、それが不足する時にヒートポンプが作動し、厳寒期にさらに不足の時に小型ボイラーが作動するように、N Eシステムの最大の能力を発揮させ、最も成績係数の大きいソーラーシステムを年中フル・ロードで稼働させるものとする。

3.1 システムの初期投資額

本システムはコレクター、ヒートポンプ、太陽電池、蓄熱タンク、上部タンク、ボイラー、ポンプ、配管類および制御装置などからなる並列ソーラーヒートポンプP Vシステムである。システムの熱源はそれぞれコレクターのための太陽熱およびヒートポンプのための地下水熱からなる。P Eシステムは灯油だき集中暖房・給湯方式（セントラルヒーティング）とするが、この方式は蓄熱タンク以後の暖房・給湯システム部分はP EとN E両システムに共通であり、N Eシステムを採用しなくてもP Eシステムのこの熱源部分は設置しなければならない。しかもP Eシステムは自然エネルギー収入がゼロで、初期投資額が償却できないので、ユーザにとって償却すべき金額は、N Eシステムの設備費からP Eシステム熱源部の設備費を差引いた残りの増分である。表1は自然エネルギーを産出するのに必要な機器、設備、価格、所要台数およびユーザの初期投資額を示す。以下の検討はすべて初期投資額について行われる。

3.2 システムのエネルギー収益

灯油価格をH10年5月現在の価格45円/L(消費税込み)、灯油発熱量を36.5MJ/L、ボイラー熱効率を80%、昼夜平均電気価格を20円/kWh、水中ポンプの動力発熱を0とする。また実測値により傾斜面(60°)日射量を4532MJ/(m²y)(H9年6月1日～H10年5月31日)、集熱効率の年間平均値を42%、集熱システム成績係数の年間平均値を75、インバータ2次側の出力を基準としたP V実効変換効率を10%、ヒートポンプ成績係数の年間平均値を4、ヒートポンプ(H P)、H P循環ポンプおよび水中ポンプの累計稼働時間を5760h/y(240d/y)とする。

これらのデータにより算出されたシステムのエネルギー収支および収益は表2に示される。

3.3 評価方法

本研究に用いられるN Eシステムの収入および支出を含めた経済性評価の計算式⁽⁶⁾を次に示す。

表1 N Eシステム構成、設備費および初期投資額 (万円)

項 目	設備費	備 考
制御装置 1 式	30	温度センサー、レベル計、制御盤、配線工事等を含む。
真空二重ガラス管 コレクター 1 式	300	集熱面積30.24m ² 、接続部品、架台、工事を含む。
揚水ポンプ 1 台	3.85	150W
電磁弁 2 個	4.02	25 A
上部タンク 1 個	10	180 L、保温付き、工事を含む。
蓄熱タンク 1 個	70	4 t、保温付き、工事を含む。
太陽電池 1 式	420× 0.5	3.48kW、多結晶、定格変換効率13.5%、工事を含む。自己負担50%の補助政策による。
ヒートポンプ 1 式	65	1.75kW、A Q-3 型
HP循環ポンプ 1 台	2.1	80W
井戸	100	50m深さ
水中ポンプ	6.58	250W
配管	22	管材、バルブ、保温材システム配管工事を含む。
計	823.55	
消費税 5%	41.18	
合計	864.73	
控除分	-105	P Eシステムの蓄熱タンク、ポンプ、配管等を設置するのに必要な投資額、消費税を含む
初期投資額	759.73 ≒760	864.73-105=759.73 Cとする

表2 システムのエネルギー収支および収益

項 目	エネルギー収支	収益(万円/年)
太陽熱	57560(MJ/年)	
地下水熱	108864	
動力発熱E _c	767	ボイラー熱の価格
E _{HP}	36288	29.2MJ/45円に換算
E _{FS}	1659	すると
計	205138	31.6137
太陽光発電	3286(kWh/年)	
消費電力	-12194	水中ポンプを含めて
計	-8908	-17.816
合 計 (Eとする)		13.7977≒13.8

注：E_c=揚水ポンプの消費電力、E_{HP}=ヒートポンプの消費電力、E_{FS}=H P循環ポンプの消費電力。

$$C \frac{(1+r)^N}{(1+i)^N} + \sum_{k=1}^N M \frac{(1+r)^{k-1}}{(1+i)^{k-1}} < \sum_{k=1}^N \frac{[(1+r)(1+j)]^{k-1}}{(1+i)^{k-1}} \quad (1)$$

式(1)の左辺は償却期間中でのシステムの総支出、右辺は同期間中でのシステムの取得エネルギーによる総収入である。N EシステムがP Eシステムより経済

的であるためには式(1)を満足しなければならない。

経済的に安定している国においてはインフレ率*i*を0、金利*r*を3%としてよいとすると、式(1)は以下のようなになる。

$$1.03^N C + \sum_{k=1}^N 1.03^{k-1} M < \sum_{k=1}^N E [1.03(1+j)]^{k-1} \quad (2)$$

ここでそれぞれ支出を*V_o*、収入を*V_i*として、

$$V_o = 1.03^N C + \sum_{k=1}^N 1.03^{k-1} M \quad (3)$$

$$V_i = \sum_{k=1}^N E [1.03(1+j)]^{k-1} \quad (4)$$

とおく。

3.4 ユーザの経済利益

ユーザの経済利益は直接経済利益および間接経済利益に分けられる。

3.4.1 直接経済利益のみを考慮する償却年数

直接経済利益はエネルギー収入および炭素税の負担軽減によりもたらされる。

京都会議(COP3)以前に欧米では炭素税という概念がすでにあり、2、3の国では実施に踏み切っているが、特にCOP3以降炭素税が盛んに話題になってきた。炭素税については多くの議論によりそれが1トン当たり100ドルというのが一般である。ここで1トン当たり15000円(石油が供給元から末端のユーザに分配される過程で消費される分も含む)として検討を試みる。

灯油の比重を0.815kg/l、炭素含有量を90%とすると、表2に示す年間取得エネルギーより本システムの年間灯油節約量が7025リットルであるため、炭素の年間削減量が約5.2トン、免除される炭素税が約7.8万円/年となる。これをシステムのエネルギー収入以外の収入*V_c*として式(4)に加えると、式(4)は

$$V_i = \sum_{k=1}^N E [1.03(1+j)]^{k-1} + \sum_{k=1}^N 1.03^{k-1} V_c \quad (5)$$

となる。ここで、*C*=760万円、*E*=13.8万円/年、*V_c*=7.8万円/年、*M*=0.015*C*=11.4万円/年、*j*=0.03として式(3)および式(5)による計算結果を図2に示す。図2からシステムのエネルギー収入および炭素税など直接経済利益のみを考慮した場合、NEシステムの償却年数は47年となることが見込まれる。

3.4.2 直接経済利益に間接経済利益を加える償却年数

上述のようにシステム収入を評価するとき、エネルギーの収入および炭素税の負担軽減による収入のみに着目したが、NEシステムを利用することによる健康面の利益および居住性向上の利益、いわゆる間接経済利益を用いてシステムの寄与を検討しなければならない。システムがもたらす間接経済利益は灯油消費量の減少に比例するので、システムの付随収入として償却年数を検討する。

(1) 灯油燃焼および灯油輸送中の排ガスにより排出される有害なSO_xやNO_xなどは環境悪化の原因となる。灯油を燃やすため炭素税を支払わなければならないが、それ以外にSO_xやNO_xによる障害を直接受けることになる。それゆえ灯油消費が減少することによる患病率の低下と寿命の延長というメリットが確実に存在することになる。これは節約される灯油消費量当たり40円/Lの利益をもたらすとすると、7025L/年×40円/L=28.1万円/年となる。

(2) NEシステムによる暖房・給湯が快適性および安全性をもたらすのみならず、周辺環境の改善にも役立つ。ボイラー排気の黒煙に含まれる炭素の付着による着物、建物および周囲の汚染を無視することができない。NEシステムはそれらを清掃するための支出を低減する効果がある。これらを総合して居住性向上の利益とする。これは節約される灯油消費量当たり10円/Lの利益をもたらすとすると、7025L/年×10円/L=7万円/年となる。

よって本NEシステムがユーザにもたらす直接経済

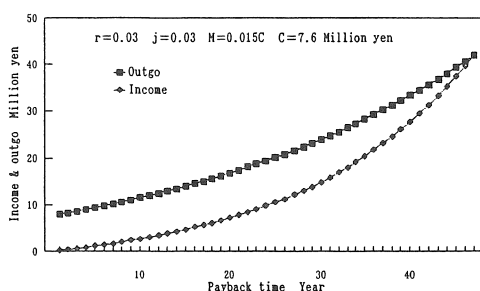


図2 炭素税を考慮する償却年数

表3 直接経済利益および間接経済利益(万円/年)

	直接経済利益	間接経済利益
エネルギー収入	13.8	
炭素税の減少	7.8	
SO _x やNO _x の減少		28.1
居住性の向上		7

利益および間接経済利益は表3に示す通りである。

ここで $C=760$ 万円, $E=13.8$ 万円/年, $V_c=42.9$ 万円/年, $M=0.015C=11.4$ 万円/年, $j=0.03$ として式(3)および式(5)による計算結果を図3に示す。図3から直接経済利益および間接経済利益を考慮した場合、償却年数は21年となることが見込まれる。

3.5 国家備蓄への貢献

化石エネルギー資源は産出国と消費国間の政治・経済的な関係により消費国に大きな経済不安をもたらす。この意味で石油はどこに国にとっても戦略物質である。日本のような消費国では国家の安全と国民生活の安定のために巨大な石油貯蔵装置が建設され、大量の備蓄が行われている。ここで石油貯蔵装置の建設費を10万円/ m^3 とする。また本システムの灯油節約量7025 L/年に相当する分およびこれを供給するために製錬、運輸などにより消費される石油をその量の15%とすると、石油危機に対応できるように国は $7025 L \times 1.15 \div 8.1 m^3$ の石油貯蔵装置を増設しなければならない。この建設費の増分は10万円/ $m^3 \times 8.1 m^3 = 81$ 万円となる。もしこの分を用いて本システムの初期投資額を補助すると、式(3)は式(6)で表わされる。

$$V_0 = 1.03^N(C - 81) + \sum_{k=1}^N 1.03^{k-1} M \quad (6)$$

ここで, $C=760$ 万円, $E=13.8$ 万円/年, $V_c=42.9$ 万円/年, $M=0.015C=11.4$ 万円/年, $j=0.03$ として式(5)および式(6)で算出された結果を図4に示す。図4から直接経済利益および間接経済利益に国家備蓄への貢献を加えた場合、償却年数は約18年となることが見込まれる。

3.6 残存価値を加える総合的経済性評価

石油危機時代に設置され20年以上たったいまでも使

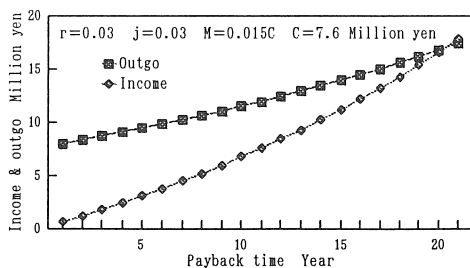


図3 直接経済利益および間接経済利益を考慮する償却年数

われているソーラーシステムをよく見かける。もしこのシステムの償却年数は上述のように18年となるならば、18年目以後の使える分は残存価値と考えられる。本システムの残存価値を10% C とし、国家備蓄への貢献を加え、償却期間中の総支出 V_0 は

$$V_0 = 1.03^N(C - 81) + \sum_{k=1}^N 1.03^{k-1} M - 0.1C \quad (7)$$

となる。ここで, $C=760$ 万円, $E=13.8$ 万円/年, $V_c=42.9$ 万円/年, $M=0.015C=11.4$ 万円/年, $j=0.03$ として式(5)および式(7)から算出された結果を図5に示す。図5から直接経済利益、間接経済利益、国家備蓄への貢献およびシステムの残存価値を考慮することによりNEシステムの経済性を総合的に評価する場合、NEシステムの償却年数は約17年となることが見込まれる。

3.7 エネルギー収入に外部コストを加える償却年数

エネルギー価格に含まれていない社会的コストについての最初の分析は1988年にドイツで公表され、多くの科学的論議を引き起こした。東北大学の齊藤氏⁽⁷⁾は「外部コスト」を用いてあるNEシステムの経済性を

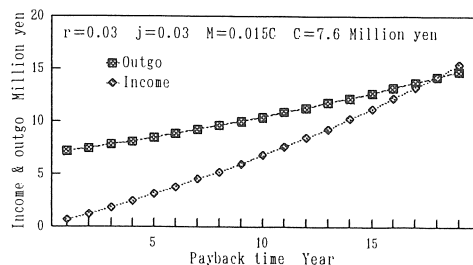


図4 直接経済利益および間接経済利益に国家備蓄への貢献を加える償却年数

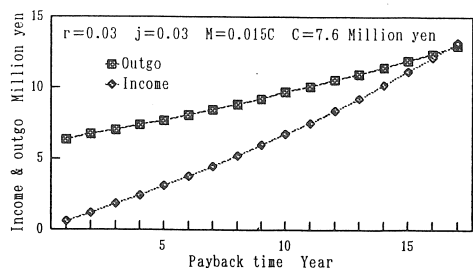


図5 直接経済利益、間接経済利益、国家備蓄への貢献およびシステムの残存価値を考慮する償却年数

評価した。この方法に倣って、しかし控えめに外部コストを考慮し本NEシステムの償却年数を試算する。

表4は有害排ガスの削減、天然資源の温存、国民健康性の向上、地球温暖化防止およびエネルギー戦略などの観点から考慮した本システムのエネルギー収入以外の外部コストの低減による付随収入を示す。ここで、この付随収入を $V_c=90.95$ 万円/年とし、 $C=760$ 万円、 $E=13.8$ 万円/年、 $M=0.015C=11.4$ 万円/年、 $j=0.03$ として式(3)で算出されたシステムの支出合計および式(5)で算出されたシステムの収入合計を図6に示す。図6からシステムのエネルギー収入に外部コストの低減による付随収入を加えてシステムの経済性を評価する場合、本NEシステムの償却年数は約9年となる可能性が見込まれる。

4. むすび

以上はNEシステムのエネルギー収入および炭素税の負担軽減による直接経済利益、健康性および居住性向上による間接経済利益、国家備蓄への貢献、NEシ

表4 本システムの付随収入 V_c (万円/年)

効 果	外部コスト
CO_2 , NO_x , SO_x 削減	54.64
石油の有効利用	11.85
患病率の低減	7.8
地球温暖化防止	5.4
周囲環境の浄化	4.8
火災、ガス中毒の防止	0.19
運輸事故の減少(海上、陸上)	0.2
国家備蓄の減少	8.1
建設時エネルギー*	-0.5
建設時 CO_2 の排出*	-1.53
合 計	90.95

*) システムの耐用年数を10年とした。

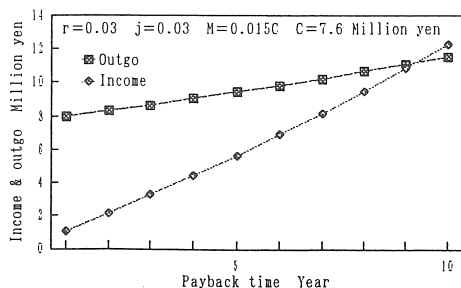


図6 外部コストを考慮する償却年数

ステムの残存価値、および外部コストなどの観点から現在のエネルギー情勢にもとづいてNEシステムの経済性を検討した。間接経済利益および外部コストは個人の価値観により異なるが、環境に対する優しさの指標として加えなければならない要因である。本研究の検討結果より著者らの個人的見解も含めて以下の結論が得られた。

- (1) システムのエネルギー収入および炭素税など直接経済利益だけを考慮した場合、NEシステムの償却年数は47年となることが見込まれる。
- (2) 直接経済利益に健康性および居住性向上による間接経済利益を加えた場合、NEシステムの償却年数は21年となることが見込まれる。
- (3) 直接経済利益および間接経済利益に国への貢献を加えた場合、NEシステムの償却年数は約18年となることが見込まれる。
- (4) 直接経済利益、間接経済利益、国への貢献およびシステムの残存価値を考慮してNEシステムの経済性を総合的に評価する場合、NEシステムの償却年数は約17年となることが見込まれる。
- (5) システムのエネルギー収入に外部コストを加えてNEシステムの経済性を総合的に評価する場合、NEシステムの償却年数は約9年となる可能性が見込まれる。

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) 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.
- (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システムの性能の総合評価(Ⅰ), 太陽エネルギー, Vol.24, No.5, (1998), 44～50.
- (4) 金山公夫, 馬場弘, 遠藤登, 趙春江, ソーラーヒートポンプシステムの省エネ・環境保全効果を考慮した経済性の検討, 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集(Ⅳ), (1993-3), 317-319.
- (5) J.W.Macarthur, W.J.Palm and R.C.Lessmann, Performance Analysis and Cost Optimization of a Solar-Assisted Heat Pump System, *Solar Energy*, Vol.21, (1978), 1～9.
- (6) 田中俊六, 太陽熱冷暖房システム, 朝倉社, (1977), p.170～172, p.239～243.
- (7) 齊藤武雄, 実践する環境共生型住宅建築, 第17回新エネルギー産業シンポジウム, (1997), p.6～17.