

熱・電気複合型太陽電池システムの実用化に関する研究

A Study for the practical Using of a Hybrid Photovoltaic System

下野間 弓 恵 *¹
Yumie SHIMONOMA土 屋 昭 *²
Akira TSUCHIYA矢 田 直 之 *³
Naoyuki YADA

Abstract

The solar cell has the feature that the electric conversion efficiency decreases when the surface temperature of the solar cell rises. However, the decrease in the electric conversion efficiency can be prevented by setting up the heat exchanger on the back of the solar cell, and by removing of heat on the surface of the solar cell. Moreover, the removed heat can be used as heat energy for making warm water. This research clarified the optimum conditions of cooling water and insulator for the Hybrid Photovoltaic System.

キーワード：太陽電池システム，電気変換効率，熱交換器，自励振動式ヒートパイプ
Key words：Photovoltaic system，Electric conversion efficiency，Heat exchanger，Heat pipe

1. 緒 言

太陽電池は，太陽電池パネルの表面温度が上昇することによって太陽光を電気（電力）に変換する効率（以後電気変換効率と称する）が低下する特性を持つ。しかし，太陽電池パネル裏面に熱交換器を設置し，太陽電池パネルの熱を回収することにより，電気変換効率の低下を防ぎ，かつ回収した熱をエネルギーとして活用することが可能となる。平成 16 年度の関口の研究⁽¹⁾では熱交換器に自励振動式ヒートパイプであるヒートレーンプレートを用いて電気変換効率を向上させることに成功している。

そこで本研究では，平成 16 年度の関口の研究成果を実用的な規模に拡大するため，太陽電池の定格出力を 250 W から 10 kW へと規模を拡大した実験装置を製作し，その最適な運用条件や問題点を実験的に明らかにした。

2. 実験装置

2. 1 実験装置の概要

本研究では，太陽エネルギーの有効利用を目指して，太陽光から電気エネルギーと熱エネルギーの双方を得ることが可能な装置を設計・開発した。

本研究では電気変換効率が高く，一般的に広く普及している

単結晶型太陽電池 112 枚（56 枚 1 組）を使用して，10 kW 級太陽電池システムを 2 基製作し，比較実験を行なった。太陽電池は MSK 社製太陽電池モジュール（LPS125-180JH 定格発電効率 14.7%）を使用している。この太陽電池モジュールには，シリコン単結晶を母材とした 72 個のセルが，アルミ合金製の枠（1580 mm× 802 mm）に納められている。実験装置の規模としては，1 基当たりの定格出力は 10 kW で縦 4 m，横 22 m であり，実験装置を設置している総面積は 281.91 m² で重量は新制御方式適応型の熱交換器付太陽電池 C1（以後 C1 と称する）が 11 t，比較用の効率向上追求型の熱交換器無太陽電池 C2（以後 C2 と称する）が 5 t である。

1 基の太陽電池の裏面に熱交換器を設置して，電気エネルギーと熱エネルギーの双方を回収する。もう 1 基の比較用の太陽電池には特に手を加えないで電気エネルギーの発生量を測定した。

本研究の実験装置の全体図を Fig.1 に示す。Fig.1 の C1 および C2 を使用して，実際の気象条件下で実験を行い，冷却水流量や温度などの種々のデータを収集した。

Fig.1 において，ステンレス槽 K1 および K2 には C1 の裏面に密着した自励振動式ヒートパイプ I が計 140 本設置されており，C1 の裏面から奪った熱をステンレス槽内の冷却水へ輸送する。C1 と C2 を比較し，発生電力量差がどれだけ生じるかを電力計 E1 および E2 で測定し，データログ B を介してパーソナルコンピュータ F1 で記録する。また，C1 および C2 の発生電力量，外気温度および日射量などは，リアルタイムでモニタ用パーソナルコンピュータ F2 によって表示・記録している。なお，日射

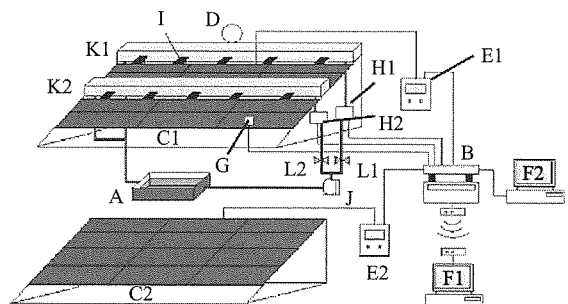
*1 神奈川工科大学大学院生（〒243-0292 厚木市下荻野 1030）
e-mail：abcxyz5932@yahoo.co.jp

*2 神奈川工科大学大学院生

*3 神奈川工科大学工学部准教授
（原稿受付：2008年3月13日）

計については太陽電池の設置角度と同様に仰角 20° で設置している。F2 では、C1 および C2 の発生電力量を直流値だけでなく、パワーコンディショナで変換した交流値も記録されている。発生電力量の交流値を記録しているのは F2 だけである。

出力電力に関してはパワーコンディショナを介して系統連系しており、太陽電池は最大電力点制御を行っている。



A: Tank
B: Data logger
C1: Solar panel with
C1: heat exchanger
C2: Solar panel without
C2: heat exchanger
D: Pyranometer
E1, E2: Wattmeters
F1: Personal computer
F2: Personal computer
F2: for monitor
G: Platinum resistance
G: thermometer
H1, H2: Flow meters
I: Heat pipe
J: Pump
K1, K2: Stainless tanks
L1, L2: Flow control valves

Fig.1 The experimental apparatus of this study

2. 2 共同研究

本研究は株式会社山田養蜂場との共同研究である「災害時を想定した自立エネルギー供給システムの開発および実証試験」および NEDO のフィールドテスト事業の一環として行なっている。詳しい内容については、NEDO の平成 17 年度成果報告書「健康科学研究所太陽光発電技術等フィールドテスト事業」⁽²⁾ (研究コード番号 P03046) に記載されている。

2. 3 実験装置設置場所

本研究では株式会社山田養蜂場みつばち健康科学研究所（岡山県苫田郡鏡野町市場 194，東経 $133^\circ 56'$ ，北緯 $35^\circ 6'$ ）の屋上に太陽電池と架台，熱交換器，白金抵抗測温体，日射計および流量計を設置して実験を行なった。データの収集は，測定機器の電源が確保可能な健康科学研究所の 3 階の研究室内にて行い，発生電力量，温度，日射量および流量の測定を行なった。収集されたデータは電話回線により，神奈川工科大学（神奈川県厚木市下荻野 1030）内のパーソナルコンピュータに転送される。実験装置の様子を Fig.2 および Fig.3 に，またステンレス槽内の様子を Fig.4 にそれぞれ示した。

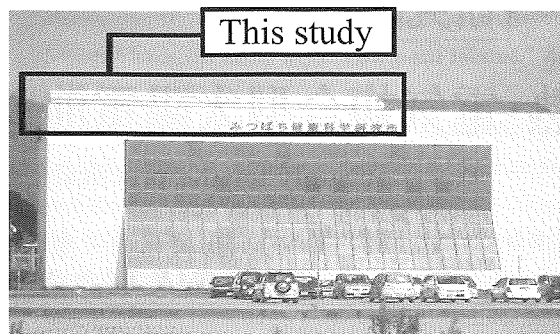


Fig.2 The installation place for the experimental apparatus



Fig.3 Solar panel with heat exchanger: C1

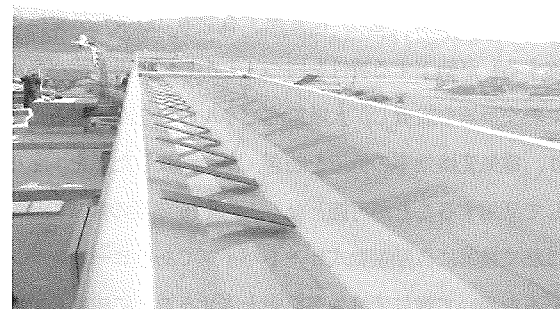


Fig.4 Heat exchanger in stainless tank

3. 各種効率の算出方法

本研究では、C1 または C2 が発電を開始した時間から、C1 および C2 が発電を終了した時間までを測定時間とした。さらにこの測定時間内において得られたデータから、後述する熱効率，電気変換効率およびエネルギー回収効率を算出した。

太陽電池は天候が曇りや雨天時であっても発電を行う。そこで本研究では，測定時間の天候が快晴で，かつ直達日射強度の変動が少ない日を選定の基準として測定日を決定した。なお，快晴の定義として，測定時間内の平均直達日射強度が 4 月～9 月の期間では 500 W/m^2 以上とし，平均直達日射強度の減少する 10 月～3 月は 400 W/m^2 以上の日とした。なお，快晴時以外の

天候時でも、実験結果の相対的な関係は同じであったため、以下の検討においても快晴時のデータを使用することとした。

3. 1 熱量効率の算出

測定時間における熱量効率 H_n は式 (1) で算出できる。熱量効率 H_n は、測定時間内で測定された総回収熱量 Q_n [kJ] を、その時間に太陽から得られるエネルギー量である総直達日射量 S_n [kJ] で除すことで算出した。

$$H_n = \frac{Q_n}{1000 S_n} 100 \quad (1)$$

3. 2 電気変換効率の算出

測定時間における電気変換効率 E_n は式 (2) で算出できる。電気変換効率 E_n は、測定時間内で測定された総発生電力量 P_n [kW] を、同時刻の総直達日射量 S_n [kJ] で除すことで算出した。

$$E_n = \frac{P_n}{1000 S_n} 100 \quad (2)$$

3. 3 エネルギー回収効率の算出

熱量効率 H_n と電気変換効率 E_n を加算したものを、太陽エネルギーから回収したエネルギーの割合とし、エネルギー回収効率 A_e とした。エネルギー回収効率 A_e は式 (3) より算出した。

$$A_e = H_n + E_n \quad (3)$$

4. 実験方法および測定条件

本研究では株式会社山田養蜂場みつばち健康科学研究所の屋上に実験装置を設置し、測定を行なった。太陽電池の設置角度は、製作した架台の都合により南南東向きの仰角約 20° とした。

本研究では7つの測定条件で実験を行った。測定条件1では、ステンレス槽内の冷却水の流量を、Table 1 にまとめたようにステンレス槽毎に変化させて実験を行った。測定条件2では、冷却水の流量をすべてのステンレス槽において最大に設定した。測定条件3では、C1の裏面に設置していた断熱材を断熱材設置面積の約57%について取り外し、断熱材を外したパネルを全体の約79%とした。測定条件4では、すべての断熱材を取り外した。測定条件5では、ステンレス槽内に差し込まれた自励振動式ヒートパイプの一部にステンレス製の放熱フィンを設置した。測定条件6では、放熱フィンの材料をアルミに変更し、ステン

レス槽内およびC1の裏面に設置されている自励振動式ヒートパイプの一部に設置した。測定条件7では、すべてのステンレス槽内およびC1の裏面の自励振動式ヒートパイプにアルミフィンを設置した。測定条件7のアルミフィンの様子をFig.5に示す。Fig.5において上の写真はステンレス槽内のアルミフィンを、下の写真は自励振動式ヒートパイプに設置したアルミフィンをそれぞれ示す。

Table 1 Average flow

Measurement conditions	Average flow [L/min]					
	1	2	3	4	5	6
1	5.3	5.6	9.1	9	10.6	12.3
2	1.8	2	9.8	11.3	11.2	12.9
3	9.8	9.7	9.9	9.9	10.5	10.7
4	10.8	9.6	8.9	10.1	10.3	10.2
5	10	10.1	9.9	9.8	9.6	8.9
6	9.8	10.1	9.3	9.4	9.6	9.9
7	9.4	9.6	9.4	9.6	9.7	9.7

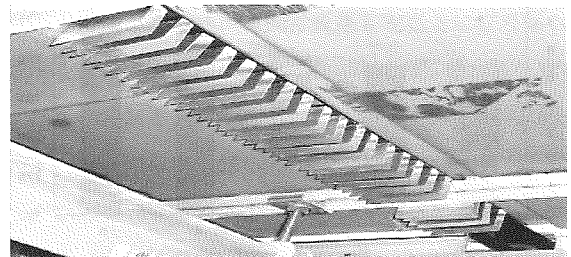
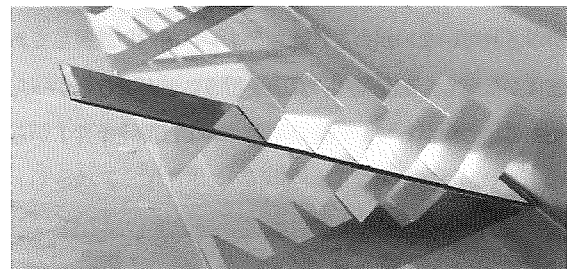


Fig.5 Aluminum fin

なお、太陽電池からの熱を冷却水に放熱するために設置したステンレス槽は6つに分かれており、ステンレス槽1から4では太陽電池8枚を1組とし、ステンレス槽5から6では太陽電池12枚を1組とした。

5. 実験結果

測定期間は2006年4月29日～2007年12月31日であり、その間に既述のように実験装置の測定条件を変えて実験を行い、比較および検討を行った。各測定条件における選定基準を満たした測定日は以下の通りである。

測定条件1では2006年4月29日～6月1日の期間中の6日間とした。測定条件2では6月4日～9月9日の期間中の20日間とした。測定条件3では9月14日～10月29日の期間中の9日間とした。測定条件4では2006年11月3日～2007年3月7日の期間中の18日間とした。測定条件5では3月13日～7月9日の期間中の13日間とした。測定条件6では7月14日～11月19日の期間中の20日間とした。測定条件7では11月24日～12月31日の期間中の4日間とした。すなわち、測定条件1から7の測定日は合わせて90日間である。

5.1 熱量効率 (H_n)

熱量効率 H_n は式 (1) で算出される。各測定条件における熱量効率を Fig.6 に示す。なお、図中のプロットは各測定条件の平均外気温である。Fig.6において、測定条件6および7の熱量効率が示されていないが、これはステンレス槽内に設置してある測温体が故障し、熱量効率の算出を行うことができなかったためである。したがって、熱量効率については測定条件1から5について検討を行った。

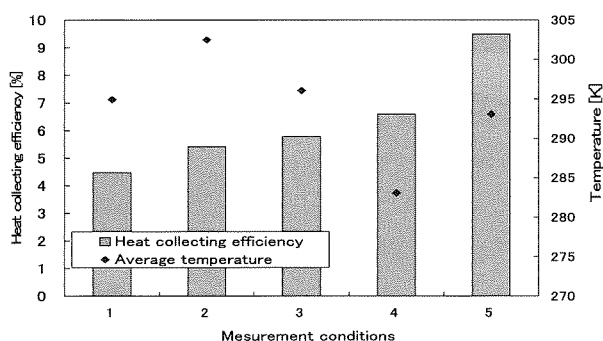


Fig.6 Heat collecting efficiency

Fig.6から明らかなように、測定条件5が最も大きい値を示している。これは、4.1節で述べた様々な改良の成果である。測定条件1から流量を一部大きくした測定条件2において、熱量効率が向上していることから、冷却水の流量を大きくすることで、熱量効率が向上することがわかった。このことは、流量をすべて大きくし、断熱材を取り外した測定条件3において、熱量効率がさらに向上したことで確認できる。測定条件4では、測定期間が冬季であったため冷却水の温度が低くなり、太陽電池パネルの熱をより多く回収することが可能となり、熱量

効率が向上したと考えられる。測定条件5では、ステンレス槽内に放熱フィンを設置したことにより、それまで以上に熱量効率が向上した。

結論として、熱量効率はステンレス槽の冷却水の流量を最大に調節し、放熱フィンを設置することで向上すると考えられる。

5.2 電気変換効率 (En)

電気変換効率 En は式 (2) で算出される。各測定条件における電気変換効率を Fig.7 に示す。なお、図中のプロットは各測定条件の平均外気温である。

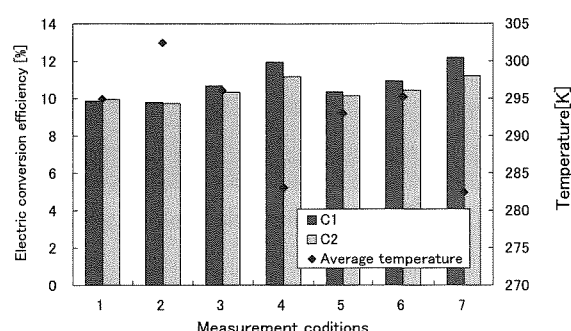


Fig.7 Electric conversion efficiency

Fig.7から明らかなように、電気変換効率は冬季である測定条件4および7で高い値を示している。

測定条件1においては、C1の電気変換効率がC2の電気変換効率の値より低くなった。この理由として、C1の熱交換器を使用することで生じる冷却効果が、C2に及ぼす大気による空冷効果より低かったことが考えられる。測定条件2においては、C1の電気変換効率がC2の電気変換効率の値より若干高くなった。これは、外気温が高くなることで、C2に及ぼす空冷効果が減少したことが理由として考えられる。測定条件3において、断熱材を取り外すことで、自励振動式ヒートパイプが放熱板としての役割も果たし、本来の熱交換器による冷却効果と放熱板による冷却効果の2つの冷却効果により、C1の電気変換効率が上昇した。それにより、C1とC2の電気変換効率差が拡大した。測定条件3および測定条件4において、平均外気温度が低下したことにともない、電気変換効率が上昇したことが確認された。測定条件5では、平均外気温度が上昇したため、電気変換効率が低下した。しかし、さらに平均外気温度が

上昇した測定条件 6 においては電気変換効率が上昇した。これは太陽電池パネルの自励振動式ヒートパイプにアルミフィンを設置したことにより、C1 に対しての空冷による冷却効果が増加したためと考えられる。アルミフィンの放熱効果は、測定条件 7 における C1 の電気変換効率の平均値が最も高い値を示したことから確認できる。したがって、冬季において外気温度が低下することで、電気変換効率が上昇することが確認できた。

結論として、電気変換効率は空冷による冷却効果の影響が大きく、C1 の裏面に取り付けてある断熱材を全て取り外し、さらに自励振動式ヒートパイプに放熱フィンを取り付けることで効率を向上させることが可能となった。

5.3 エネルギー回収効率 (A_e)

エネルギー回収効率 A_e は式 (3) で算出される。各測定条件におけるエネルギー回収効率を Fig.8 に示す。

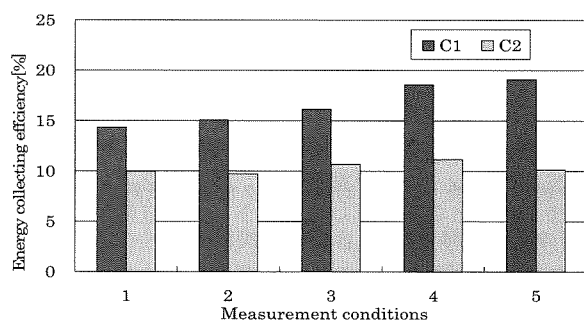


Fig.8 Energy collecting efficiency

但し、測定条件 6 および 7 は、熱量効率の算出不能であったため除いた。Fig.8 から明らかなように、測定条件 1 のエネルギー回収効率の値が最も低い値を示した。これは、測定条件 1 のステンレス槽内の冷却水の流量が小さいため、熱量効率が低下したことが理由として考えられる。測定条件 2 において、エネルギー回収効率が上昇した。これは、平均外気温が上昇することで、熱量効率が向上したことが理由として考えられる。測定条件 3 においても、エネルギー回収効率が上昇した。これは、ステンレス槽内の流量を大きくしたことで熱量効率が向上し、さらに、熱交換器に取り付けてある断熱材を取り外したことで電気変換効率が向上したことが理由として考えられる。このことは、断熱材を全て取り外した測定条件 4 のエネルギー回収効率がさらに上昇したことで確認できる。また、測定条件 5 にお

いては、ステンレス槽内に放熱フィンを設置したことにより、平均外気温度の上昇にともない、熱量効率が向上した。エネルギー回収効率については、夏季では電気変換効率が低下し、熱量効率が向上する。また、冬季では電気変換効率が向上し、熱量効率が低下することが明らかになった。

夏季および冬季ともにエネルギー回収効率については、C1 の方が常に C2 よりも優れた性能を得られた。

6. 明らかになった問題点

6.1 経済的問題点

本研究は平成 16 年度の関口の研究に基づいて、実用化が可能な規模に拡大した実験装置の製作を行った。しかし、関口の研究では熱量効率は最大で 20.8 % であるのに対し、本研究では熱量効率が最大で 9.5 % と低い値となった。この大きな要因の一つに自励振動式ヒートパイプの枚数が少ないことが挙げられる。関口の研究では、太陽電池パネルに対して 44.8 % の面積に自励振動式ヒートパイプが取り付けられていた。しかし、本研究では太陽電池パネルに対して 22.7 % の面積にしか自励振動式ヒートパイプを取り付けていない。この理由は、装置を製作する際、ステンレス槽を太陽電池パネル上部に設置したことにより架台の強度を通常よりも強化しなければならず、架台製作費が増えたためである。その対応策として、高価な自励振動式ヒートパイプの枚数を減らし、減らした面積を補うため、自励振動式ヒートパイプよりも安価な銅板を使用した方が、熱量効率の増加には至らなかった。

6.2 物理 (形状) 的問題点

本研究において、常時測定を行ったことで明らかになった問題点として、太陽光の日射角度の変化により、15 時頃から C1 の太陽電池パネルにステンレス槽が影を落とすことで、発生電力量が低下する点があげられる。

また前項で述べたように、自励振動式ヒートパイプの設置面積を補うために、C1 の太陽電池パネル裏面に銅板を取り付けた。しかし、銅板の重さに両面テープの粘着力が耐えきれず、太陽電池パネルとの密着性が低くなった。これにより太陽電池パネルと熱交換器との間に空気が入ってしまい、太陽電池パネルの熱を回収できず、総回収熱

量が減少してしまった。なお本研究では、測定条件3の実験で断熱材を外す際に、銅板が太陽電池パネルから剥離していることがわかった。

6.3 技術的問題点

本研究で熱交換器に使用している自励振動式ヒートパイプは、本実験装置用に特別に製作されたもので、市販のものより長大に作られている。また、常に水に浸かった状態で、かつ屋外で使用されるのも今回が初めてである。実験を継続していく中で、この自励振動式ヒートパイプの不具合が報告⁽³⁾された。それは、自励振動式ヒートパイプの製造会社であるティーエスヒートロニクス株式会社が行った実験により明らかになった。すなわち、自励振動式ヒートパイプを長時間水に浸し続けることで防錆塗膜が剥れ、ブリストア（気泡）が発生する。この部分から材料のアルミが腐食することで、自励振動式ヒートパイプ内の作動液が漏れてしまい性能が悪化する。2006年10月の動作テストでは、本実験装置においても、140本中15本の自励振動式ヒートパイプの性能が悪化していることが確認された。現在はステンレス槽内に差し込まれた自励振動式ヒートパイプの放熱部に塗料を塗り、ステンレス槽の冷却水の水位を自励振動式ヒートパイプの先端が出る高さに調整をすることで、性能悪化を防いでいる。

6.4 実用化に向けて

実用化を目指す上で明らかになった問題点としては、自励振動式ヒートパイプの本数不足が挙げられる。自励振動式ヒートパイプの本数が少なくなったことで、熱量効率および電気変換効率が減少し、エネルギー回収効率が減少してしまった。今後、装置を製作する上で、太陽電池パネルの面積に対する自励振動式ヒートパイプの設置本数を多くすることで、エネルギー回収効率が上昇すると考えられる。

また、ステンレス槽およびタンクが大きく、重量が大きいことから、熱を回収するための装置を小型化させることも、実用化に向けての重要な改善すべき点となる。太陽電池パネル裏面に取り付けてある銅板に関しては、自励振動式ヒートパイプの本数を増やすことで必要でなくなる。さらに6.2節で述べたように太陽電池パネルにステンレス槽

が影を落とし、発生電力量が低下してしまう問題点から、ステンレス槽が影を作らない形状にする必要がある。

7. 結 言

平成16年度の関口の研究⁽¹⁾では熱量効率が最大で20.8%、電気変換効率差が最大で3.2ポイント、エネルギー回収効率が最大30.3%と報告されている。しかし、本研究において熱量効率の最も良い測定条件5で最大9.5%、電気変換効率差の最も良い測定条件7で最大1.0ポイント、エネルギー回収効率の最も良い測定条件5で最大19.1%となった。これらの数値は関口の研究で報告されているデータより、すべての点で大幅に低下している。この原因として自励振動式ヒートパイプの枚数不足および不具合、熱交換器に使用した銅板の重量および熱伝導性両面テープの密着性の低下によって生じる回収熱量の低下、ステンレス槽が大きいことで太陽電池に影が生じることによる発生電力量の低下などがあげられる。

今後、実用的な熱・電気複合型太陽電池システムを完成させるに当たっては、貯水タンクなどの断熱が不十分な箇所の断熱処理を行い、自励振動式ヒートパイプの不具合を解消する必要がある。また、実用化の際には本研究で明らかになった問題点から、不具合を解消した新たな、かつ安価な自励振動式ヒートパイプの開発および枚数の増加、ステンレス槽およびタンクの小型・軽量化などを考慮した装置を製作する必要があると考えられる。

なお、本研究は神奈川工科大学太陽エネルギーシステム研究開発センタープロジェクト「環境対応型太陽光・熱エネルギー利用のための革新的システムの研究」（文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業）の一環として遂行された。

最後に、本研究を遂行するに当たり、協力していただいた井草良一氏および大久保翔平氏に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- (1) 関口祐一，神奈川工科大学大学院修士論文（2006）。
- (2) NEDO 成果報告書「健康科学研究所太陽光発電技術等フィールドテスト事業」（2007）。
- (3) ティーエスヒートロニクス株式会社 「浸水試験の報告書」（2007）。