

太陽光熱複合発電システムの研究開発
Research and Development of Solar Hybrid Generation System
Utilizing Photovoltaic and Thermoelectric Generation

高度ミッション研究センター
Advanced Mission Research Center
鈴木拓明、木皿且人、新野正之
Hiroaki Suzuki, Katsuto Kisara and Masayuki Niino

Abstract

We are investigating the solar hybrid generation system utilizing photovoltaic and thermoelectric generation in terms of effective utilization for solar energy. This generation system separates solar energy into light energy and heat energy, uses the light energy for photovoltaic generation, and uses the heat energy for thermoelectric generation. At current year, specification and efficiency calculation of pilot solar hybrid generation system were examined, elemental study of photovoltaic and thermoelectric generation was carried out, and field test for pilot unit was executed in Miyagi Prefecture. As the results, improvement of system efficiency is expected to combine the photovoltaic generation and the thermoelectric generation comparing with existing solar cells. In the elemental study, possibility of high efficiency photovoltaic and thermoelectric generation was confirmed to use solar energy condensing system and sun-tracking system. In the field test, compatibility between photovoltaic generation and thermoelectric generation was confirmed.

1. はじめに

近年、エネルギー・環境問題解決のために、自然エネルギーの高効率利用が求められている。その解決策の一つとして複数の発電システムを複合化した発電システムが提案されている^[1]。我々が研究を進めている太陽光熱複合発電システムは、太陽光エネルギーの光・熱成分を各々に有効利用した複合発電システムであり、太陽光を分離後、光成分は太陽電池、熱成分は熱電発電素子により発電するものである。また複合発電システムの冷却水は温水として利用可能である^[2,3]。

そこで我々は、中国研究機関と 1996 年度より太陽光エネルギー利用、熱電発電に関する研究交流を行っている。2004 年度からは JST 戦略的国際科学技術協力推進事業の支援を受け、太陽光熱複合発電システムの研究開発を進めている。2005 年度は宮城県利府町の協力を受け、国内実証試験を実施した。2006 年度は中国内モンゴル自治区での 1 年間の無人耐環境試験を実施中である。

2005 年度は主に実証試験システムの仕様検討・目標効率の試算、太陽光発電部・熱電発電部の要素試験を行い、システム製作・国内実証を実施した。

2. 太陽光熱複合発電システムの概念

太陽光エネルギーは紫外線・可視光線の光成分、赤外線の熱成分に分類される。そして既存のシリコン系太陽電池は、可視光線・近赤外線領域は効率良く電気エネルギーに変換できるが、遠赤外線領域はほとんど発電に寄与しない。むしろ熱エネルギーとなり、太陽電池の素子温度を上昇させ、発電

効率低下を招く。特に集光型太陽電池の場合は、太陽光を集光し太陽電池に照射するため、素子冷却による変換効率維持が課題の一つとなっている。また化合物半導体太陽電池は、長波長領域の光電変換が可能だが有効波長領域に限界がある。しかし熱エネルギーに変換し利用する場合は、長波長領域をほぼ全て利用可能である。

我々が提案している太陽光熱複合発電システムは、集光した太陽光エネルギーを波長選択フィルタにより光成分である可視光線と熱成分である赤外線に分離し、光成分により太陽光発電を行い、熱成分により熱電発電を行うものである。本システムは通常の太陽光発電では、廃熱とされる熱エネルギーを有効利用するものであり、集光型太陽電池の冷却問題も解決できる。更に集光方式を用いることにより、熱成分を高効率熱発電に利用可能な高位熱源に引き上げられる利点も有している。更に本システムの冷却水は、集熱・熱電発電部において、生活用水として十分な温度まで上昇する。よって、複合発電・給湯システムより構成される集光型太陽光熱複合発電コージェネシステムの提唱に至った。

3. 実験と結果

・ 仕様検討、目標効率の試算

実証試験システムの設計・製作に先立ち、2004年度に引き続き実証試験システムの仕様検討・目標効率の試算を実施した。

現在市販段階にある太陽電池の中で最も高い変換効率を持つのが、単結晶Siを用いた集光型太陽電池であり、光電変換が可能な波長領域は可視光線から近赤外線 ($\lambda=300\sim1200\text{nm}$) である^[4]。また熱電発電素子は素子に与える温度差、熱電材料の性能指数が増加すると発電量、変換効率が増加する特性を持つ^[5]。従って熱電発電部において高い発電量、変換効率を得るためには、太陽光集光・追尾方式を用いて常に熱電発電素子に高位の熱源を投入する必要がある。

従って実証試験システムの仕様は、太陽光集光・追尾方式により常時太陽光を集光し、波長選択フィルタにより光・熱成分に波長分離させ、光成分は集光型太陽電池を用い、熱成分は熱電発電素子を用いて発電することとした。Fig. 1 に集光型太陽光熱複合発電システムの概念図を示す。

Table 1 に目標効率の試算結果を示す。ここで目標効率の試算は、フレネルレンズが光学アクリル樹脂製 (光学損失 5%)、反射ミラーがAl製全反射ミラー (光学損失 5%)、波長選択フィルタが分離波長 1000nm (光学損失 5%)、太陽電池が単結晶Si集光型太陽電池 (モジュール効率 23%)、熱電発電素

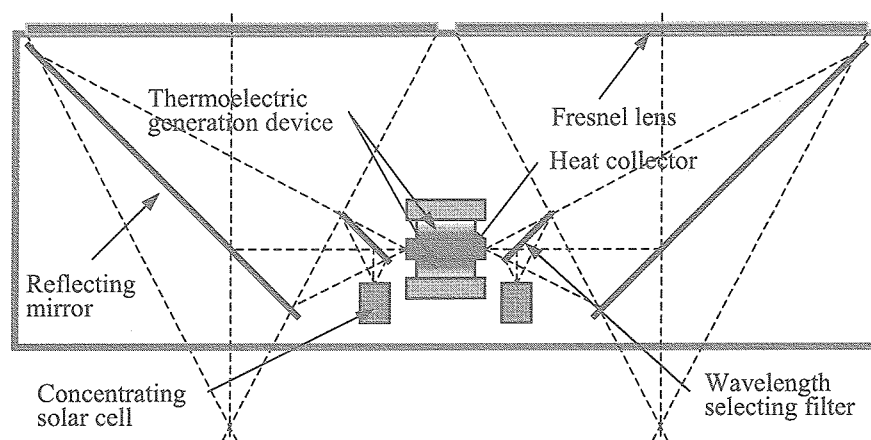


Fig. 1 Schematic diagram of solar hybrid generation system utilizing photovoltaic and thermoelectric generation.

Table 1 Efficiency calculation of hybrid generation system.

Thermoelectric module	Low temperature module	Middle temperature module
Optical and thermal loss (%)	24	24
Efficiency of PV (%)	17	17
Efficiency of TEC (%)	3	9
Electrical loss	2	3
Electrical efficiency of hybrid generation system (%)	20	26
Efficiency of heat recollection (%)	46	41
Heat recollection loss (%)	8	6
Combined efficiency of hybrid generation system (%)	66	67

子がCoSb₃系中温用素子(モジュール効率12%)、Bi₂Te₃系低温用素子(モジュール効率5%)の2種類、太陽電池部の損失10%(損失は可視光線に対する値)、熱電発電部の損失10%(損失は赤外光線に対する値)として計算した。また電気系損失は発電量の10%、熱回収系損失は熱回収量の15%とした。

システム発電効率は中温用熱電素子を用いた場合約26%、低温用熱電素子を用いた場合約20%と試算された。またシステム熱回収効率はそれぞれ約41%、約46%、システム総合効率はそれぞれ約67%、約66%であった。既存の単結晶Si太陽電池のシステム発電効率が、平板型で約16%、集光型で約20%であり、本複合発電システムは発電に加え、熱回収も可能であるため、画期的な発電システムであると言える。

・ 太陽光発電部、熱電発電部の要素試験

太陽光発電部の要素試験では、自然太陽光を入射し発電特性評価を実施した。試験装置の構成は、フレネルレンズ(300×300mm)1枚により集光し、集光型太陽電池(HECO262; SunPower社製)に照射するものである。素子冷却は水冷とし、集光率はフレネルレンズ受光面積を変化させ、83~744sunsとした。

Table 2 に発電特性の集光率依存性の測定結果を示す。集光率が増加するにつれてシステム効率は減少する傾向を示し、カタログ値より(モジュール効率)より低い値であった。HECO262は集光率100suns近傍で最大変換効率を示し、集光率が増加するにつれて変換効率が減少するがカタログ値では集光率400sunsで22.4%を維持している。そこで損失原因を調査した。主な原因は①フレネルレンズによる光学損失、②正方形の太陽電池受光面に対して内接円で入射していることによる光学損失、③素子温度上昇による効率低下であった。そこで損失原因②の解決策として、ホモジナイザによる集光太陽光の均一化、③の解決策として冷却能力の改善を行った。その結果、集光太陽光を均一化、素子温度を低減でき、システム効率を向上できた。しかし高集光では効率低下が著しいため、素子の研究開発が必要である。実証試験システムにおいては想定している最大集光率は420sunsであるため、損失原因②、③の改善により対応可能である。

Table 2 Condensation dependence of generation properties for HECO cell.

Condensation (suns)	Power output (W)	Efficiency (%)	Efficiency of catalogue (%)	Optical loss (%)
743.8	9.0	10.1	19.4	47.8
330.6	4.2	10.7	23.3	53.9
186.0	3.0	13.5	23.8	43.3
82.6	1.6	16.2	23.9	32.3

熱電発電部の要素試験では、自然太陽光を入射し熱電発電素子の温度差、電気的特性評価を実施した。試験装置の構成、実験条件は以下の通りである。フレネルレンズは 300×300 mm を 4 枚 (受光面積: 0.360 m²)、反射ミラーは Al 蒸着裏面ミラー、集熱体は材質を Al とし表面にグラファイトを塗布したものをを用いた。熱電発電部は、低温用熱電発電素子 (HZ-2; Hi-Z 社製) を集熱体の上下に 1 枚ずつ取り付け、冷却板によりはさみ込み、素子周囲を断熱材により覆う構造とした。また波長選択フィルタは無しとした。

Fig. 2 に熱電発電素子の温度特性の冷却水流量依存性、Fig. 3 に発電量の温度差依存性を示す。温度特性は、冷却水流量 0.2l/min 付近で高温部温度は約 195°C、低温部温度は約 55°C まで上昇し、温度差は約 140°C を示した。電圧、電流、発電量は文献値 (カタログ値) と同等の温度差依存性を示し、発電量は最大温度差 140°C において最大発電量 2.4W (熱電素子 2 枚) を示した。以上より、集光方式を用いることで熱電発電の熱源として、太陽光が利用可能であることを確認できた。また温水回収では 25~30% の冷水を 55~60% の温水として回収することができた。

・ 実証試験システムの設計・製作

Fig. 1 の集光型太陽光熱複合発電システム概念図、要素試験結果を踏まえ、実証試験システムの設計・製作を行った。Fig. 4 に実証試験システムの外観写真を示す。

システムの原理、構成は下記の通りである。フレネルレンズにより太陽光を集光し、波長選択フィルタにより太陽光を光成分である可視光線、熱成分で

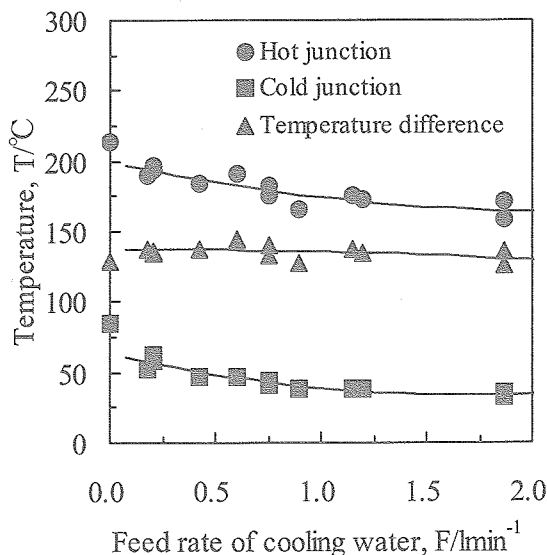


Fig. 2 Feed rate dependence of hot, cold junction temperature and temperature difference for HZ-2 device.

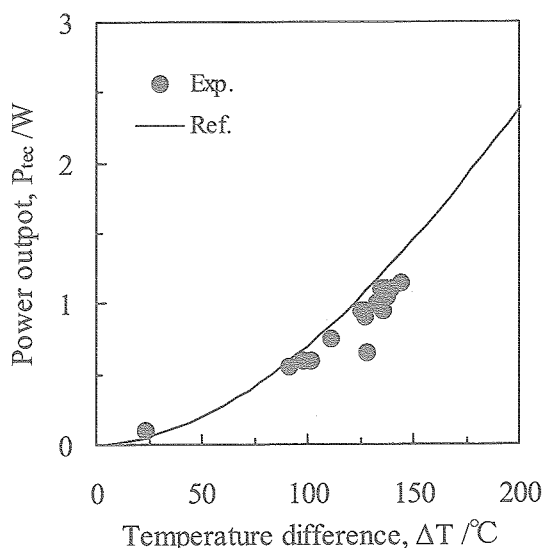


Fig. 3 Temperature difference dependence of power output for HZ-2 device.

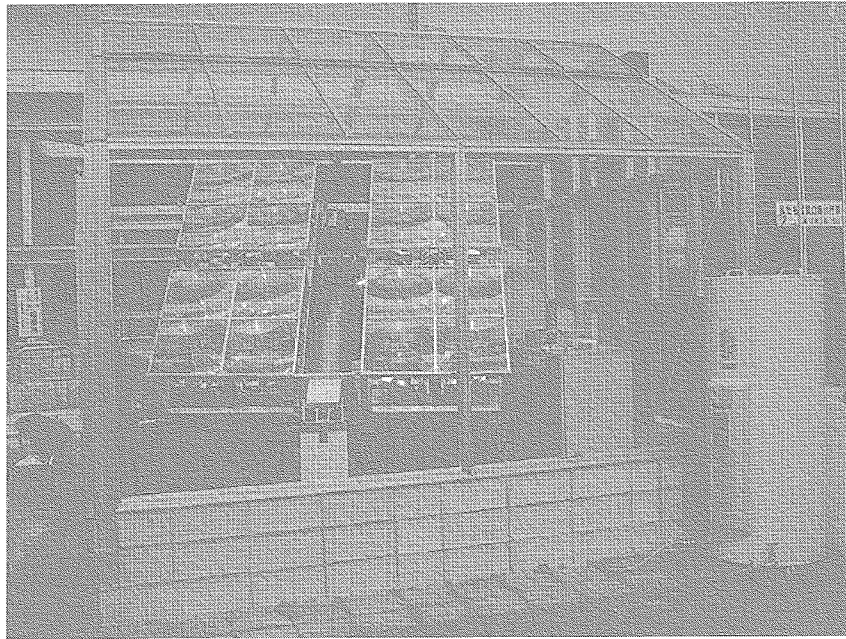


Fig. 4 Photograph of pilot solar hybrid generation system.

ある赤外線に分離させる。そして光成分はホモジナイザにより均一化され、集光型太陽電池に照射される。熱成分は集熱体に照射・集熱され、集熱体の温度を上昇させる。そして集熱体側が高温部、冷却板側が低温部となり、その温度差を用いて熱電発電素子により発電を行う。更に熱電発電部を通過した冷却水は温水として回収される。

実証試験システムは基本ユニット 8 台により構成される。基本ユニットの構成、実験条件は以下の通りである。フレネルレンズは 450×450 mm を 2 枚 (受光面積: 0.405 m^2)、反射ミラーは Al 蒸着表面ミラー、集熱体は材質を Cu とし表面にグラファイトを塗布したものをを用いた。波長選択フィルタは分離波長を 1000 nm とした。熱電発電部は集熱体 1 個に対して熱電発電素子 1 個とした。そして太陽追尾は方位角、仰角を個別に制御する赤道儀方式を採用した。

・国内実証試験

国内実証試験は宮城県利府町において 2005 年 10 月から 2006 年 3 月まで実施した。Table 3 に実証試験の代表的な試験結果を示す。システム全体の発電性能は、入射太陽光エネルギー 2903.0 W に対して、太陽電池総発電量 133.5 W (変換効率 $\eta=4.6\%$)、熱電発電総発電量 6.0 W ($\eta=0.2\%$)、総発電量 139.5 W ($\eta=4.8\%$)、総熱回収量 769.3 W ($\eta=26.5\%$) であった。そしてシステム全体のエネルギー変換量は 907.6 W ($\eta=31.3\%$) であった。国内実証試験により太陽光熱複合発電システムの実現可能性を確認できた。しかし太陽追尾システムによる光軸のずれ、光学系への砂塵の付着などによる新たな問題が見られた。またシステム発電効率向上のためには集光システム、太陽電池部、熱電発電部の光学・熱的損失の改善が必要不可欠な状態であった。今後はシステム構成部位の個々の損失低減、追尾精度の向上、光学系への砂塵付着の防止などが検討課題である。

Table 3 Measured data for field test.

		Symbols	Units	Value
Measured date and time		-	-	2005/11/16 10:30
Incident solar energy		Q_{sun}	W	2903.0
Utilized solar energy		Q_{tot}	W	907.6
Efficiency		η_{tot}	%	31.3
Electrical power output		P_{ele}	W	139.5
Efficiency		η_{ele}	%	4.8
Photovoltaic generation	Power output	P_{pvc}	W	133.5
	Efficiency	η_{pvc}	%	4.6
	Device temperature	T_{pvc}	°C	33.3
Thermoelectric generation	Power output	P_{tec}	W	6.0
	Efficiency	η_{tec}	%	0.2
	Hot junction temperature	T_{h}	°C	128.3
	Cold junction temperature	T_{c}	°C	36.1
	Temperature difference	ΔT	°C	92.2
Heat recollection		Q_{hea}	W	769.3
Efficiency		η_{hea}	%	26.5

4. まとめ

実証試験システムの仕様検討・目標効率試算より、本複合発電システムは既存太陽光発電の変換効率を越えると予想される。太陽電池部・熱電発電部の要素試験では、太陽光集光・追尾方式を用いることで、高効率な太陽光発電、熱電発電の可能性を確認できた。国内実証試験では、太陽光熱複合発電の実現可能性を確認できた。しかしシステム総合効率向上のためはシステム構成部位の個々の損失低減、精度向上が必要である。

謝辞

本研究は、JST 戦略的国際科学技術協力推進事業「環境保全及び環境低負荷型社会の構築のための科学技術」の研究の一環として行われた。また共同研究機関の航空宇宙振興財団、武漢理工大学、上海硅酸盐研究所の先生、研究者方々に感謝致します。

参考文献

- [1] 谷辰夫, ソーラーエネルギー, 丸全刊, 1986
- [2] 鈴木一行, 木皿且人, 遠藤長司, 新野正之, 唐新峰, 張清杰, 傾斜機能材料論文集, 161-164 (2004)
- [3] 木皿且人, 新野正之, 鈴木拓明, 石川東一郎, 鈴木一行, 傾斜機能材料論文集, 115-118 (2005)
- [4] W. P. Mulligan, A. Terao, D. D. Smith, P. J. Verlinden and R. M. Swanson, Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, (2000)
- [5] 上村欣一, 西田勲夫, 熱電半導体とその応用, 日刊工業新聞社, 1988