

高倍率集光型太陽光コージェネレーションシステムに関する研究

47-186726 平井 翔
指導教員 党 超 准教授

Concentrated photovoltaics and thermal system (CPVT) is a combination of solar photovoltaic generation and solar thermal collection technology and it is drawing increasing attention as a promising method to make efficient use of solar energy. While higher concentration ratio can enhance the performance of the system, it also increases the heat load on the photovoltaic cell, which requires advanced cooling method. In this study, a novel radial expanding minichannel heat sink is introduced into a parabolic CPVT to establish an advanced cooling system with the use of two-phase flow, and its effectivity as well as the electrical and thermal performance of the system is discussed.

Key words: Solar Energy, Concentrated Photovoltaics, Triple-junction Photovoltaic Cell, Two-phase Flow, Co-generation

1 緒言

集光型太陽光発電・熱利用システム(Concentrated Photovoltaic and Thermal system、以下 CPVT)は、集光器を用いて太陽光を一定の領域に集め、そこに設置した太陽電池による発電と熱交換器による集熱を同時に行うことで太陽光エネルギーの総合利用効率を高める技術である。CPVT の最大の利点は高価な太陽電池をより安価な集光器で代替することであり、集光の度合い(集光倍率)を高めることのできる集光器や冷却器の開発が太陽光利用のコスト削減を進めるうえで有望なアプローチとなっている¹⁾。

CPVT の中でもとりわけ高い集光倍率を得られるのが回転放物面状の反射鏡を用いたシステムである。その集光倍率は数百倍に及び、三接合型太陽電池と呼ばれる高価であるが高性能な太陽電池と組み合わせることによる高い発電効率が期待される²⁾一方で、その高い集光倍率は焦点に設置された太陽電池の冷却を困難にしており、数百 kW/m²にも達する熱負荷にさらされる太陽電池の冷却技術の開発は CPVT の実用化に向けて克服すべき課題としてこれまで多くの研究の対象となってきた。

本研究では、温度上昇に伴う発電効率の低下が比較的小さいという三接合型太陽電池の特長³⁾と水の持つ潜熱の大きさに着目し、気液二相流の安定的な流動を可能とする放射拡張流路型熱交換器⁴⁾を用いて熱交換器内で水を蒸発させることにより太陽電池を冷却し、熱源としての利用価値の高い高温の水蒸気と熱水の回収とともに三接合型太陽電池による高い効率での発電を両立する放物面集光型 CPVT によるコージェネレーションシステムの実現を目指す。

2 研究の手順と方法

2.1 研究の手順

本研究では、東京大学柏キャンパス環境棟屋上において放物面集光器と太陽追尾装置、三接合型太陽電池、熱交換器からなる CPVT を設置し、太陽電池およびシステムの基本的性能を確認するための集熱実験と発電効率測定とを別個に実施する。その後、発電と集熱を同時に行い、これらの結果を踏まえてシステムとしての性能を評価する。

2.2 研究に用いる CPVT システムの概要

(1) 回転放物面集光器

本研究の CPVT の中心に位置するのが Fig.1 に示す放物面集光器である。放物面集光器はその軸に平行に入射し

た光がその焦点に集まる放物面の性質を利用した集光器であり、本研究では直径 2 m、焦点距離 1.3 m のものを用いる。この集光器は金属製の放物曲面の表面に反射率の高いフィルムを貼った構造をしており、その焦点は直径約 2 cm の円形である。

放物面によって焦点に集光するためには放物面を常に太陽に正対させなければならないが、これは集光器に取り付けられた太陽追尾システムによる自動制御で行われる。システムには集光器の位置情報(GPS)が登録されており、この情報と時刻から太陽の理論位置を計算し、その方位角・高度角へ集光器を回転させる。太陽の理論位置に移動後は、集光器上部に取り付けられた光センサで検知された入射光の角度と理論角度とを比較し、その誤差が 0.0253° を超える度に集光器の角度を微調整することによって常に太陽を追尾し続ける。

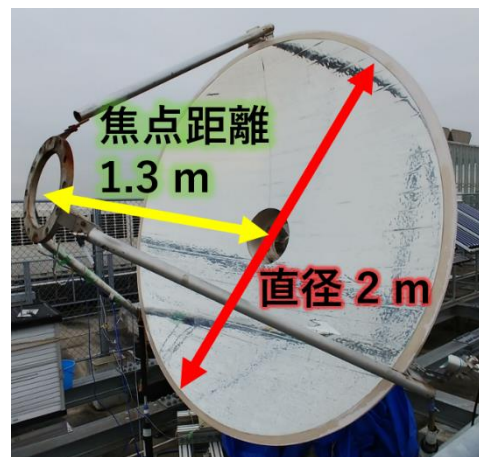


Fig. 1 Parabolic solar reflector used in this study.

(2) InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池

本研究では、焦点に設置した InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池に集光することで発電を行う。三接合太陽電池はバンドギャップが互いに異なる 3 種類の物質を基板上に積層して変換効率を向上させたものであり、組成により多少異なるものの InGaP、InGaAs、Ge はそれぞれ約 1.8 eV、1.3 eV、0.7 eV のバンドギャップを持つ⁵⁾。その結果、Fig.2 に示すように、1.12 eV のバンドギャップ⁶⁾を持ち現在最も普及している結晶シリコン太陽電池と比較してより幅広い波長領域の太陽光を利用することができ、これが 40%近くにも達する高い変換効率をもたらしている。

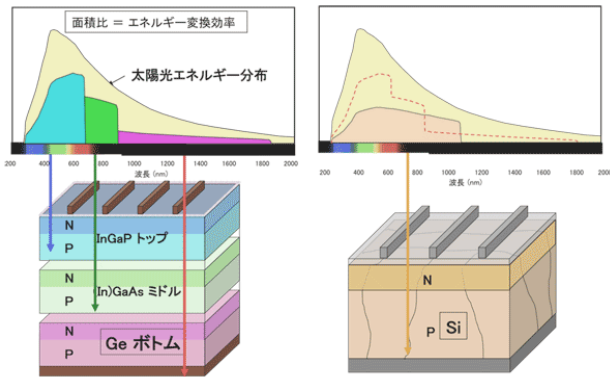


Fig. 2 Structure of triple-junction and single junction solar cell⁷⁾.

(3) 熱交換器

CPVTにおいて集光器と並び重要な役割を担うのが熱交換器である。本研究では、気液二相流の安定的な流動を可能にする Fig.3 に示す放射拡張流路型熱交換器を利用することにより、熱交換器内で水を蒸発させて潜熱による高熱伝達率を得るとともに熱源として利用価値の高い100℃を超える水蒸気と熱水を回収する冷却系の実現を目指す。

高集光倍率 CPVT において太陽電池の冷却を考える際には、熱交換器の性能だけでなく、太陽電池と熱交換器との接着方法についても十分に注意を払わなければならない。特に、熱交換器の温度が100℃前後に保たれる本研究では、太陽電池と熱交換器との間のわずかの温度差で太陽電池の破損や発電効率の低下が生じ得る。そこで、本研究では、融点が139℃と特に低いBi58Sn42はんだを用いてはんだ付けにより太陽電池を熱交換器に接合し、熱抵抗を十分に小さくする方法を採る。



Fig. 3 Radial expanding minichannel heat sink used in this study.

(4) その他の装置

地表に降り注ぐ太陽光には、大気を透過して地表に直接到達する直達日射と、大気中の水蒸気やエアロゾル等で反射、散乱されて天空の全方向から入射する散乱日射とがある。放物面集光器では直達日射のみが集光される。CPVTによる発電や集熱の効率を議論するためにはこの直達日

射量を正確に測定する必要があり、その測定には集光器に取り付けられた直達日射計を用いる。直達日射計はその軸と放物面の軸とが平行となるように集光器に固定されており、太陽を追尾する集光器の回転に直達日射計も追従することで常に直達日射量を測定し続ける。

本研究では冷媒として水を用いる。水はタンクに貯められ、ここからポンプによって系を循環する。タンクを出た水は流量計を経て熱交換器に流入し、ここで加熱され一部が蒸発し、気液二相流として流出する。この熱交換器の前後には熱電対が取り付けられ、ここで測定される冷却水の温度変化と流量をもとに集熱量を求める。熱交換器を出た水はラジエーターにおいて外気と熱交換することにより冷却され、液体の水としてタンクに戻る。冷却システムの概要を Fig.4 に示す。

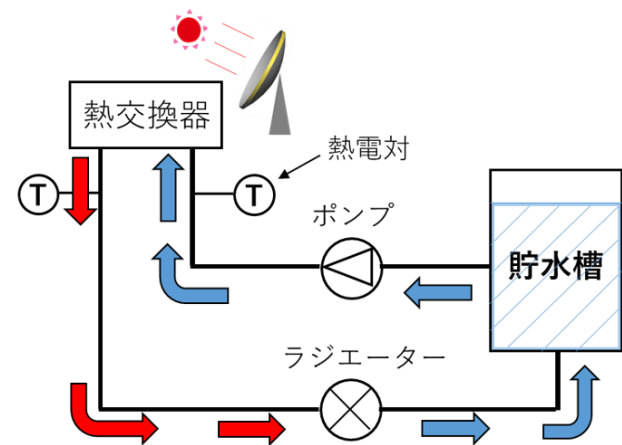


Fig. 4 Outline of water circulation system.

2.3 発電と集熱の効率の評価方法

(1) 発電効率の評価方法

太陽電池の発電効率 η は、

$$\eta = \frac{(IV)_{\max}}{\phi A_{\text{cell}}} \quad (1)$$

で定義する。ただし、 I 、 V 、 ϕ 、 A_{cell} はそれぞれ太陽電池の電流、電圧、太陽電池に入射する光の放射照度、太陽電池の面積であり、 $(IV)_{\max}$ は測定された I と V の積の最大値とする。本研究では、InGaP/InGaAs/Ge 三接合太陽電池の性能を確認するためまずは集光しない自然太陽光の下で発電効率の測定を行い、その後、集光した状態での発電効率を測定する。

(2) 集熱効率の評価方法

CPVT の集熱効率 η_{th} は、

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q}{\phi_{\text{dir}} A_{\text{par}}} \quad (2)$$

で定義する。ただし、 Q 、 ϕ_{dir} 、 A_{par} はそれぞれ熱交換器での集熱量、直達日射量、集光器の集光面積である。直達日射量は直達日射計の測定値を、集光面積は放物面の形状から幾何学的に計算した値を用いる。熱交換器での集熱量は、仮に熱交換器から流出する水が単相流であれば、冷却水の温度上昇から

$$Q = \dot{m}c(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (3)$$

に従って単純に求めることができる。ここで、 \dot{m} 、 c 、 T_{out} 、 T_{in} はそれぞれ冷却水流量、水の比熱、熱交換器出口およ

び入口における水温である。一方、水の一部が熱交換器内で蒸発し気液二相流として流出する場合、蒸発した水の量を正確に測定しない限り、水の温度のみから集熱量を求めることは難しい。そこで、本研究では、单相流による集熱実験を実施し、その集熱量をもとに気液二相流を用いた発電・集熱実験における集熱量を求めることとする。

3 実験結果と考察

3.1 三接合太陽電池の発電効率の測定

最初に、集光せず自然太陽光(750 W/m²)の下で測定した三接合型太陽電池の発電効率を Fig. 5 に示す。測定は太陽電池をヒーターでゆっくりと加熱しながら 40℃から 80℃の範囲で 10℃毎に行った。また、80℃以降の値は 70℃と 80℃の測定値をもとに線形的に外挿した。

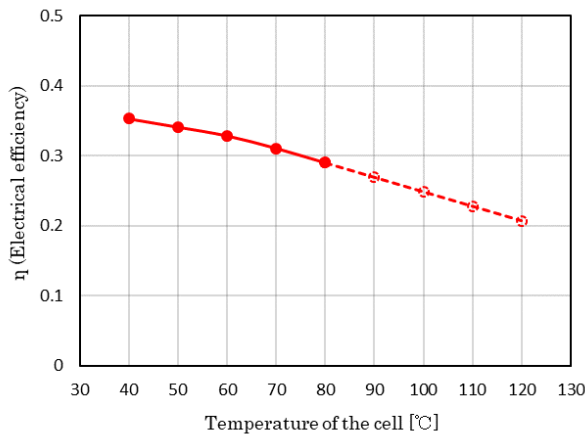


Fig. 5 Electrical efficiency (η) of the InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell measured under natural sunlight.

測定の結果、本研究に用いる三接合型太陽電池の特性が確認された。この電池は 40℃において発電効率が 0.35 となり、温度上昇に伴っておよそ -0.16% /℃の割合で効率が低下してゆく。一般的な結晶 Si 系の太陽電池では、25℃における発電効率が十数%程度、温度上昇に伴う効率低下の割合が -0.45% /℃程度であり、これと比較して三接合型太陽電池の高温域での良好な発電特性が確認される。

3.2 单相流による集熱実験の結果

続いて、冷却水が沸騰しない条件で行った熱回収実験の結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の左縦軸が集光器に入射したエネルギーと実際に回収された熱量、右縦軸は直達日射量に対応する。集光器の集光面積は 2.91 m² であり、集光器に入射したエネルギーは平均 2450 W であった。一方、冷却水によって実際に回収されたエネルギーは平均 1032 W であった。したがって、式(2)に基づき計算される熱効率は 0.42 という結果となった。

集光器に到達した直達光のエネルギーの一部は、集光器の表面で反射する際に失われる。また、集光器で反射して熱交換器に到達した光のエネルギーの一部は、熱交換器表面で反射し失われる。集光器と熱交換器の反射率と放射率をそれぞれ γ , ε とすると、式(3)で表される熱交換器において回収された熱量 Q と集光器に到達した光のエネルギーの間には、

$$Q = \gamma\varepsilon\varphi_{\text{dir}}A_{\text{par}} \quad (4)$$

が理想的には成り立つ。集熱実験にあたっては、熱交換器の表面に黒体スプレーを塗布し光の反射を抑える措置をとった。この黒体スプレーの放射率は 0.94(公称値)であるから、0.42 という低い熱効率はその大部分が集光器の反射率の低さに起因するものと考えられる。

式(4)で、 γ , ε , A_{par} はいずれも集光器および黒体スプレーに固有の値であり、同じ集光器と同じ黒体スプレーを用いて実験を行う限り、式(4)は直達日射量のみ関数となる。すなわち、集熱実験で実際に回収された熱量を直達日射量で割った値 q は集光器に固有の値となり、本研究の場合その値はおおよそ

$$q = 1.2 \quad (5)$$

となる。この値を用いることにより、次に述べる二相流による発電・集熱実験の結果を分析する。

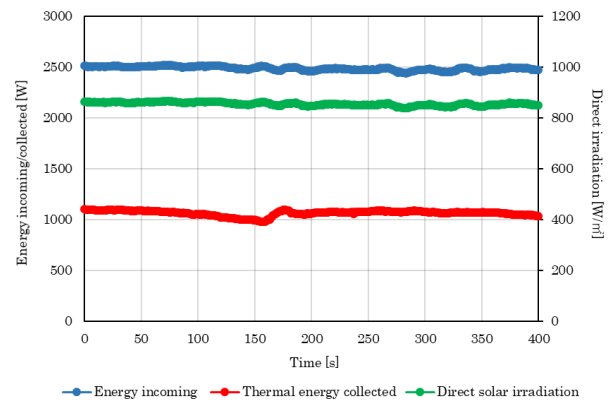


Fig. 6 Result of thermal collecting experiment.

3.3 気液二相流による発電・集熱実験の結果

最後に、本研究の本題である気液二相流冷却を用いた発電・集熱実験の結果を述べる。本研究で用いる放物面集光器の焦点の大きさは直径約 2 cm であり、その焦点における集光倍率は数千倍にも上る。そこで、太陽電池をはんだ付けした熱交換器を焦点から後方へ 2.5 cm 離れた位置に設置することにより集光倍率が数百倍になるよう調整したうえで実験を行った。この実験の結果を Table 1 に示す。

Table 1 Result of experiment on the electrical and thermal performance of PCVT with the use of two-phase flow.

測定した量	得られた測定値
直達日射量	539 W/m ²
太陽電池最大出力	2.40 W
熱交換器入口での水温	72.45 °C
同出口での水温	102.27 °C
冷却水流量	2.74 g/s

実験の結果、液体として流入した水が熱交換器内で沸騰し、気液二相流として流出した。すなわち、気液二相流による太陽電池の安定的な冷却が可能であることが示された。

流出する水が気液二相流であるため、その温度差と流量のみから集熱量を求めることは難しい。いま、この実験は 3.2 項の実験と同じ集光器・同じ黒体スプレーを用いて実

施されたことから、先に述べた通り熱交換器における集熱量は直達日射量のみから求めることができる。Table 1 より本実験における直達日射量は 539 W/m^2 であることから、式(5)の q の値を用いると、集熱量 Q は

$$Q = q \times 539 = 647 \quad (6)$$

すなわち 647 W と求められる。

次に、発電効率を求める。式(1)に従い効率を求めるためには、太陽電池表面における放射照度(W/m^2)を求めなければならない。本実験は、熱交換器を焦点から 2.5 cm 後方に設置して実施した。直径 2 m 、焦点距離 1.3 m の放物面の焦点の半径が $x \text{ m}$ であるとき、焦点の後方 1 m における光の半径を $y \text{ m}$ とすると、これらの間には Fig. 7 に示すような幾何学的関係から

$$x = 1 - \frac{1.44(1-y)}{1.44 - 1.3\ell} \quad (7)$$

が成り立つ。

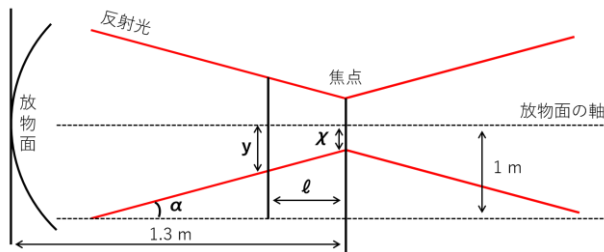


Fig. 7 Geometrical relationship between x , y , ℓ .

式(7)に基づき、焦点の半径を 0.01 m として焦点後方 2.5 cm における光の半径を求めると 3.23 cm となる。すなわち、半径 3.23 cm の円の内部に 647 W のエネルギーが存在することから、この円の内部における平均の放射照度は 197.5 kW/m^2 となる。太陽電池の面積は 1 cm^2 であるから、本実験での発電効率は 0.122 と求められる。

得られた発電効率は、Fig. 5 で想定される 100°C 前後での発電効率と比較すると低い。原因のひとつとして、太陽電池上における放射照度が過大に見積もられている可能性が考えられる。Fig. 7 に示される通り、放物面で反射した光は焦点の後方に離れるほど、光の円の中心付近でエネルギーの密度が小さくなる。したがって、太陽電池を中心とする半径 3.23 cm の円内での平均的な放射照度は 197.5 kW/m^2 であったとしても、太陽電池直上での放射照度はそれよりも低い値であると考えられる。焦点後方に設置された熱交換器上における光の分布に関するシミュレーション等を利用すれば、より精密に発電効率を求めることが出来ると考えられる。

また、もうひとつの原因として、太陽電池本体の温度が熱交換器よりも高くなっている可能性が挙げられる。本実験では太陽電池をはんだ付けにより接着したが、仮にはんだ付けが完全でない等の問題があった場合、熱交換器との間で数十度程度の温度差が生じ得る。太陽電池の表面温度を直接測定する方法の開発や、あるいは太陽電池の裏面に直接微細流路を刻み冷却する技術の開発等が今後の課題となる。

4 結論

本研究では、放射拡張流路型熱交換器を用いた放物面集光型 CPVT について研究し、次の結果を得た。

- (1). 放射拡張流路型熱交換器を用いることで、気液二相流による太陽電池の安定的な冷却が可能となり、集光倍率 200 倍の高集光倍率の下でも発電が可能である。
- (2). CPVT の冷却に気液二相流を利用することで、熱源として利用価値の高い 100°C を超える水蒸気と熱水を回収することが可能である。
- (3). 本研究では、放射拡張流路型熱交換器と三接合型太陽電池を組み合わせ、発電効率 12%、熱効率 42% のコージェネレーションシステムが実現された。

文献

- 1) O. Z. Sharaf and M. F. Orhan : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50, (2015), 1500-1565.
- 2) P. Pérez-Higueras et al. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, (2011), 1810-1815.
- 3) F. Almonacid et al. : Solar Energy Materials & Solar Cells, 105, (2012), 322-327.
- 4) S. Hong et al. : International Journal of Heat and Mass Transfer 143, (2019), 118588.
- 5) D. J. Friedman : Current Opinion in Solid State and Materials Science 14, (2010), 131-138
- 6) 喜多隆:『太陽電池のエネルギー変換効率』, コロナ社, (2012).
- 7) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) : 「革新的太陽光発電技術研究開発」プロジェクト.