熱光起電力(TPV)発電

Thermophotovoltaic Generation of Electricity

執筆者プロフィール

熊野 智之
Tomoyuki KUMANO

2000年豊橋技術科学大学機械システム工学
科卒業

2002年岐阜大学大学院工学研究科博士前期
課程修了

■主として行っている業務・研究

・TPV 発電システムの高性能化に関する研究

■所属学会および主な活動

日本機械学会 日本伝熱学会関東支部学生委員

■勤務先

東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制
御システム専攻 炭素循環エネルギー研究セ
ンター 花村研究室

(〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1/

E-mail: tkumano@tanso.mes.titech.ac.jp)

1. はじめに

工業的な熱源からの“熱ふく射”によって手軽に電力を得る—熱光起電力(Thermophotovoltaic: TPV) 発電の概念は1960年にアメリカで初めて提唱された。以来、宇宙用や軍用の小型電源といった特殊用途に焦点が当てられてきたが、光電変換技術の発展により近年では1kW未満の小型発電システムとしてレジャー用電源や家庭用暖房器具におけるコジェネなどより一般的な分野での適用が検討されるようになった。TPV 発電に関する研究開発は主に欧米の機関を中心に行われており、日本ではまだあまり馴染みがないのが現状である。本稿では、次世

代小型発電技術として期待されるTPV 発電の概要とTPV 研究の一端を紹介する。

2. TPV 発電システムの特徴

TPV 発電とは、高温に加熱されたエミッターからのふく射を、Si 系太陽電池よりもバンドギャップの小さなGaSb (最大光感度波長領域 約0.8~2.2 μ m) といった化合物半導体系光起電力電池(TPV セル)に導いて電力に変換する固体素子発電システムである(図1, 2)。熱源には一般に化

石燃料の燃焼熱が用いられるが、太陽集光熱や放射性同位元素崩壊熱なども利用できる。それらの熱エネルギーは、エミッターのふく射エネルギーを介して、TPV セルとその外部負荷回路によって電気エネルギーに変換される。セルの内部量子効率(フォトンがキャリア生成に関与する確率)がバンドギャップ以上の波長領域で90%程度と高いことから、達成可能なシステム効率は30~40%と見積もられている。よって、理論的にはガスエンジンや燃料電池といった同様の小型分散型発電システムに匹敵する可能性を

有しているが、現在実現されているシステム効率はわずか数%程度であり、TPV 発電技術はまだ開発途上にある。また、TPV システムでは、機械的な駆動部を持たないために騒音や磨耗による劣化がない、化学反応を伴わないため寿命が長いといった太陽光発電システムと同様の利点を有している。一方、その太陽光発電と比較すると、

- (1) 場所、時間帯によらず安定した発電が可能
- (2) エミッターの温度およびふく射スペクトルが制御可能
- (3) 発光部と受光部の位置関係が自由に決められる
- (4) 何らかの熱源が必要、多くの場合排気ガスが発生(CO₂の排出)

図1 簡単なTPV 発電の例

図2 TPV 発電システム

(5) Si 系のものに比べ、化合物半導体系の光起電力セルが希少で高価といった相違点が挙げられる。とりわけ (3) の点について言及すると、例えばエミッターとセルを図 3 に示すように設置することで、セルに入射するふく射強度を太陽光の数 100 倍程度まで増大させることが可能であり、大きな電力を得ることができる。このように、TPV 発電における最大の魅力は、太陽光発電では成しえない自由なシステム設計によりコンパクトで高効率な発電システムが実現可能であるという点にある。

3. TPV システムの高効率化

3.1 波長選択技術

TPV 発電システムにおいては、いかにして発電に有用な波長のふく射のみをセルに導くかという波長選択の概念が必要不可欠である (図 4)。よって、TPV 発電のシステム効率を向上させるためには、セル自身の光電変換効率もさることながら、このふく射の波長選択技術の進歩がポイントとなる。理想的な TPV 発電システムとは、エミッターがセルの感度波長領域に整合したふく射エネルギーのみを放射するものであると考えられる。この場合、余分な長波長のふく射によるセルの加熱がなくなると共に、放射する全ふく射エネルギーを抑制することでエミッター温度の温度上昇を効果的に行うことが可能となる。エミッターから放射されるふく射の波長を制御する方法としては、エミッターが金属である場合、表面に微細な周期構造を持たせることや適正な厚みの酸化膜を形成させることなどがあり、近年盛んに研究が進められている⁽¹⁾⁽²⁾。また、エミッターがセラミックスである場合には、表面に希土類酸化物をコートするなど希土類元素の有する特異な発光特性を応用することが技術的に検討されている⁽³⁾。このようなエミッターに波長選択性を付加する方法以外に、より一般的な波長選択手段として図 2 中にも示した光学フィルタを用いる方法がある。この場合、発電に有用な波長以外

図 3 システム構成の例

のふく射エネルギーは反射させてエミッター側に戻すことにより理想的な波長選択エミッターと同様の効果が得られる。しかしながら、実際エミッターからのふく射は等方的な拡散光であるから、透過率の角度依存性が大きい通常のバンドパスフィルタでは十分なフィルタリング効果が得られない。よって、拡散光を対象とした TPV 発電用フィルタの開発が望まれている⁽⁴⁾。また、光学フィルタを挿入せずに、セル表面に数 10 層もの干渉膜をコートすることで同様のフィルタリングを行うことがあるが、この場合もやはり入射角度や波長による影響を強く受けるため、膜設計に配慮を要する。

3.2 エネルギー循環技術

現実的には、完全に理想的な波長選択エミッターおよびバンドパスフィルタは実現困難であり、また熱源からの熱エネルギーが 100 % エミッターのふく射エネルギーに変換されることはないから、TPV システムを構築する上ではエネルギー循環を効率良く行うことが重要である。図 5 にエネルギー循環型の TPV システムの例を示す。これは本研究室で提案している熱循環燃焼法を応用したモデルであり、このシステムでは排気ガス顕熱と発電に不要な長波長領域のふく射エネルギーが石英多孔質体を介して同時に回収され、エミッターの加熱に寄与することでシステム効率の高効率化を実現させることが可能となっている⁽⁵⁾。

4. おわりに

次世代小型分散型電源としての期待が高まる熱光起電力 (TPV) 発電システムの概要と高性能化へ向けた技術について紹介した。今世紀は科学技術

図 4 波長選択の概念

図 5 エネルギー循環型の TPV システム

の上では“光の世紀”と呼ばれており、この光 (熱ふく射) 発電技術は光エネルギー利用の可能性をさらに広げるものである。

文 献

- (1) 亀谷雄樹・花村克悟, 矩形マイクロキャビティの熱ふく射に関する数値解析, 第 42 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. III (2005-6), 655-656.
- (2) 若林英信・牧野俊郎・ほか, 熱ふく射の分光選択放射機能をもつ表面の開発, 第 42 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. III (2005-6), 731-732.
- (3) Chubb, D.L. ほか, Rare Earth Doped High Temperature Ceramic Selective Emitters, *Journal of the European Ceramic Society*, **19** (1999), 2551-2562.
- (4) 熊野智之・花村克悟, 複層コートフィルターの積層による実在面からのふく射エネルギースペクトル制御, 第 42 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. III (2005-6), 735-736.
- (5) Hanamura, K. and Kumano, T., Thermophotovoltaic Power Generation by Super-Adiabatic Combustion in Porous Quartz Glass, *AIP Conf. Proc.*, **653** (2002), 111-120.