熱電変換材料の最近の動向—実用化に向けての新展開

太陽光・熱複合発電システム

木 皿 且 人*

1. はじめに

人間の活動が活発になるにつれて本来大気中に微量にしか含まれない「温室効果ガス」が大気中に大量に放出され、地球全体の平均気温が急激に上る地球温暖化が世界的な問題となっており、地球規模でこの問題に対処するため1997年に温暖化防止京都会議(COP3)が開催された。これを受けて我が国でも環境庁を中心に二酸化炭素排出抑制策、調査・研究、普及・啓発などの国内施策や、途上国支援や共同実施活動などの国際協力を進めようとしている。こうした中で、太陽光発電に代表される新エネルギーの導入はCO₂排出の少ないライフスタイルを実現する。

太陽エネルギーは、化石燃料に比べ資源賦存量の制約が無く環境負荷が小さい分散型エネルギー資源として有効活用が期待されている。我が国における太陽エネルギーの活用は通産省を中心にしたサンシャイン計画、ニューサンシャイン計画で積極的に太陽光発電を推進し、太陽電池の研究で着実に成果をあげてきた。また太陽熱を利用した発電として香川県仁尾町で実施された太陽集光による蒸気タービン式発電(ダイナミック発電)プラントが良く知られている。

太陽エネルギーが注目されているのは、エネルギー量が膨大で枯渇の心配が無いこと、汚染物質が発生しない事、地球上の殆どの場所で利用可能であるという理由による。しかしながら晴天時であっても1m²あたり1kWとエネルギー密度が低く、天候などの自然条件に左右されエネルギー出力が不安定等の問題点もある。

太陽熱によるダイナミックな発電システムでは設計点近傍の太陽熱が得られれば高効率で発電できるが、日射条件の変動により設計点を外れた条件では効率が大きく低下する。日本においては年間の太陽熱利用率は約20%が限界と言われ

ている。従って、太陽エネルギーで効率良く発電するには太陽エネルギーに対応して直接変換する発電方式が適している。

太陽電池は材料系に応じ太陽光スペクトルの特定の領域内で起電力が発生する。一般に普及しているSi系の太陽電池は可視光線域に変換(発電)領域があり、赤外線は基本的に発電に寄与しない。この未利用の赤外線(熱エネルギー)を熱電変換で発電し、太陽電池と組み合わせる太陽光・熱複合発電技術は従来の太陽電池の単独使用に比べ、発電能力の大幅な改善が可能となる。太陽エネルギーを光と熱の成分に分けて直接変換で複合発電する太陽光・熱複合発電技術は、深刻さを増すエネルギー問題や環境問題解決に有望なシステム技術として位置づけられる⁽¹⁾⁻⁽³⁾⁽⁶⁾。

2. 太陽光・熱複合発電の考え方

(1) 基本要素

(a) 太陽電池

図1に太陽光スペクトル、図2に一般的な太陽電池の特性を示す。図中、GaAs太陽電池、p型単結晶Si(c-Si)太陽電池、アモルファスSi(a-Si)太陽電池の光電変換領域はほぼ可視帯域にあり、特にa-Si太陽電池では800nmから短波長の可視光域に光電変換領域が存在する。太陽電池性能は図3に示すように、セル温度の上昇に伴い発電能力が低下する傾向を示す。

太陽電池は太陽光入射角度がセル面に垂直に入射するとき最高性能が出る。従って、追尾式太陽電池と固定式太陽電池では追尾式が1.4~1.5倍程度出力が高いという研究結果が報告されている(図4)。

近年太陽光発電の高効率化の一環として、集光型太陽電池の研究も盛んに行われており、変換効率が25%を超えるシステムも実用化されてきている。

* 航空宇宙技術研究所主任研究官(〒981-1525 角田市君萱字小金沢1)

Solar Light・Heat Hybrid Power Generation System; Katsuto Kisara (National Aerospace Laboratory, Kakuda)

Keywords: solar system, generation, solar power, hybrid system, thermoelectric

1999年7月9日受理

図1 太陽光の分光放射強度特性.

図2 各種太陽電池の分光感度特性.

図3 太陽電池の温度依存性.
 V_{oc} : 開放電圧, I_{sc} : 短絡電流, I_{ope} : 動作電流.

(b) 熱電発電

熱電発電はゼーベック効果により生ずる熱起電力を電力として取り出す直接変換である。現在、広い温度範囲にわたって高い変換効率を有する材料系は開発されておらず、一定の温度範囲で変換効率の高い材料系を組み合わせで発電させている。科技庁のプロジェクトでは、熱電変換材料に傾斜機能材料(FGM: Functionally Graded Material)の概念を取り入れて開発が行われ、素子レベルでの性能ではあるが、常温から約800°Cの温度差で変換効率17%を計測した事が報告されている。

熱電発電の効率は熱電発電モジュールの高温端と低温端の温度差に比例するので、太陽をエネルギー源とした熱電発電

図4 固定式および追尾式太陽電池の出力の比較.

の効率化は太陽熱を集光しエネルギー密度を高めてからモジュールにエネルギー投入するのが効果的である。

(c) 波長分離

太陽エネルギーを任意の波長で分離する手段にダイクロイックフィルターを使う方法がある。このフィルターを用いる事により太陽光発電で変換(発電)に関係する可視帯の波長を選択的に透過させ、それ以外の波長帯を反射させることができる。反射した赤外線を集光し、エネルギー密度を高めて熱電発電を行う。

本研究では太陽電池に一般的なa-Si太陽電池を用いたので、ダイクロイックフィルターの波長分離閾値を800 nmとした。このフィルターにより太陽エネルギーを光と熱の成分に分けて活用し、それぞれによる直接変換システムとして複合化しエネルギーを有効に活用するシステムを構築する。本システムにおいては波長選択フィルターが太陽エネルギーの有効活用において重要な役割を果たす。

(2) 太陽光・熱複合発電システム

仁尾町で実施されたような従来の太陽熱発電では太陽熱の1日の変化、また季節変化が大きく、それに応じて常に高効率で発電することはできない。ダイナミックな発電システムでは設計点近傍における太陽熱が得られれば高効率で発電できるが、日射条件の変動により設計点を外れた条件では効率が大きく低下する。ダイナミックな発電システムではタービンの入口温度が高いほど、高効率の発電が可能になる。例えば水蒸気サイクルではタービンの入口温度400°Cで発電効率34%に対して、570°Cでは40%に達する。しかし太陽熱を熱源とする場合、集熱温度が高ければ、太陽熱の集熱効率は低下し、太陽熱が弱くなればその集熱温度の設計点に達しない場合もありうる。従って日本においては年間の太陽熱利用率は20%が限界と言われている。太陽熱発電は、反射鏡によって集熱器に集めることが可能な直達光を利用するゆえに、曇天時や冬季はほとんど発電できない。

このような事実から、熱電発電のようにエネルギー変動に応じて直接発電できるシステムは太陽熱発電として有望である。本システムは熱と光による直接変換による可動部分のない静的な発電で、エネルギーレベルに応じた発電を実施し、熱電発電素子の冷却用に設けた熱交換器の排熱も給湯等の低レベル熱として利用する熱エネルギーのカスケード利用への展開も考えられる。

3. 試作装置および試験方法

(1) 試作装置および試験方法

太陽光・熱複合発電システム構成を図5に示す。ヘリオスタット、太陽電池、集熱器、熱電発電器で構成される。受光面積が 2 m^2 のヘリオスタットで太陽光を集光し発電する(図6, 7)。

熱電発電試験はヘリオスタットで受けた太陽熱をパラボラ型もしくはトラフ型の集熱器で太陽光密度を上げて熱電発電器を加熱する。こうした条件で、まず波長選択フィルタの効果の検証を検証するデータを取得する。

波長選択フィルタを用いて光と熱を分離し、分離したエネルギー成分を照射した場合の太陽電池性能を計測する。この効果を確認するため、図8に示すように波長選択フィルタ有無でデータを計測する。また、波長選択フィルタを通過および反射した強度を求めるため、日射計を用いて分割比を計測する。波長選択フィルタによる赤外線反射により、太陽電池性能データを取得する。

次に、太陽追尾による発電性能を評価するためのデータを計測する。そのために、波長選択フィルタを用いた太陽電池と、比較用太陽電池により太陽追尾データを計測し、入射角度と発電性能についてのデータを計測する。

太陽光加熱による熱電発電性能評価試験では、入手可能な熱電発電モジュールを用いてデータを取得するが、最終的に科技厅プロジェクトで開発が進められているFGM熱電変換

モジュールで発電することを目標に米国製およびロシア製モジュールで発電試験を実施する。

熱電発電モジュールは熱負荷が大きいため熱応力緩和が不可欠となる。特に太陽熱発電の場合は、日照条件によるエネルギー変動が激しく使用条件が厳しい。種々のモジュールで太陽熱による熱電発電技術の問題点を抽出し、開発が進められている熱電変換素子のモジュール化技術に有効なデータを提供する。

4. 結果および考察

(1) 波長選択フィルタの効果

波長選択フィルタの実験結果を図9に示す。波長選択フィルタの有無によるエネルギーの変化を日射計で測定した結果、入射エネルギーが50%、反射エネルギーが50%となる。波長選択フィルタの効果を調べるために参照用太陽電池と波長選択フィルタを装着した太陽電池のデータを図10に示す。試験に用いたa-Si太陽電池の光電変換領域は800 nm以下の波長帯であり、それより長波長帯域の赤外線領域は発電に関与しない。波長選択フィルタを装着した太陽電池は、入射太陽光強度が全日射強度の50%であるにもかかわらず、発電量は参照用太陽電池に比べて10%以上高い。双方の太陽電池裏面温度には明らかな差が見られ、波長選択フィルタを装着した太陽電池はセル温度の上昇が抑制され、結果として太陽電池性能を高い状態に保つことが出来る。

太陽電池は光の入射角度がセル面に対して斜めになるにつれて発電能力は低下する。図11に方位、仰角、太陽光強度の関係を示す。太陽光が垂直に入射する場合と斜めから入射する場合には入射する太陽光強度に大きな差が生ずる。図12は波長選択フィルタを装着した太陽電池と参照用太陽電池の入射角度と出力(発電)の関係を示している。入射角度が傾斜するにつれて波長選択フィルタを装着した太陽電池の出力データが参照用太陽電池の出力データと交差し、斜めからの光に関しては波長選択フィルタを用いる効果がない。同フィルタを用いる場合は、太陽光がセル面に垂直に入射する条件が最適であり、追尾式のシステムで効果性が高い。太陽追尾は発電能力の増加に直接関係し、固定式の発電に比べ発電量が50%程度向上する報告もあり、我々の実験においても太陽光強度に2倍以上の差が生ずることを考慮すると、追尾システムは高効率発電に不可欠である。追尾に要するエネル

図5 太陽光熱複合発電の概略図。

図6 溝型太陽光熱複合発電システムの外観写真

図7 ヘリオスタットの外観写真。

図8 太陽電池の外観写真。左側：波長選択膜有り、右側：波長選択膜なし。

ギであるが、実用システムにおける2軸制御を実施する場合、モーター消費電力は定格発電量の1%程度であるとの報告もあり、1 kW の発電では10~15 W と見込まれる。

(2) 熱電発電モジュール試験

太陽熱発電に熱電素子を用いるが、現時点で入手可能なデバイスは米国 HI-Z 社およびウクライナ Altic 社の数種のモジュールである。これらを手し、気象変動を伴う太陽熱試験を行い、モジュール単独試験では規定の出力を得た。

中温領域から常温で用いるロシア・ルーチ研究所製の PbTe/BiTe セグメント接合熱電モジュールはアルゴン雰囲気中で高温端温度を監視しながら最高定格温度500℃で所定の出力を得、変換効率9%を確認した。熱電発電システムでは熱の流れが重要となる。太陽光のようにエネルギー変動の激しい熱源では、熱ロスを最小限にするため熱電モジュール高温側の受熱部の熱容量を小さくし応答性を高める必要がある。前述のロシア製熱電変換モジュールは中・低温領域(500℃~室温)の発電で、受熱部から高温端への熱流制御をしつつ熱応力緩和機構を有する実用モジュールであり、エネルギー変動の大きい太陽熱発電にも十分対応できる構造となっている。これは FGM II プロジェクトで開発された3段 FGM 熱電素子のモジュール化手法の一つのモデルといえる⁽⁴⁾。ロシア製モジュールの熱流制御ならびに熱応力緩和機構の概念を図13に示す。

図9 波長選択膜の効果。

図10 太陽光発電での出力電力およびセル温度におよぼすフィルタの効果。

(3) 太陽光・熱複合発電

本研究において試作した太陽光・熱複合発電システムは溝型およびパラボラ型のシステムを試作した。溝型集光の発電システムは、凹状のガラス面上に波長選択膜をコーティングしたフィルターで集光形状は線状となる。発電に使用したモジュールは冷却用のペルチェモジュールで、高温端温度は最高160℃で入射した熱エネルギーに対して変換効率2.5%を得た。

本試験で用いた a-Si 太陽電池はフィルム状のサンヨー電気製アモルトンフィルム AT-7S62A 型で、変換効率は約5%である。この a-Si 太陽電池と熱電発電による複合発電で総合効率は7.5%となり、従来の a-Si 太陽電池単独に比べ50%出力が向上できた。本システムで用いた太陽電池も熱電発電素子も共に変換効率の低いデバイスではあるが、波長選択膜でエネルギーを分離し複合発電する事で総合効率の向上出来る事を実証した。また、パラボラ型のシステムでは波長選択膜を装着した太陽電池をヘリオスタットに設置し、反射した赤外線をパラボラで集光し熱電発電を実施し、同様の出力向上を得た⁽⁵⁾。

図11 太陽光の強度分布と方位方向および仰角方向の関係。

図12 太陽光発電量と入射角度の関係。

図13 ロシア・ルーチ研究所製セグメント型熱電発電モジュール。(a) 外観写真, (b) 概略図。

5. まとめと今後の展望

太陽光・熱複合発電において、太陽熱発電の効率を高くするには、太陽エネルギー密度を上げる必要があり、追尾集光が不可欠である。太陽電池も高効率化へのアプローチとして集光型太陽電池の研究が盛んに行われ、実用化の段階に入りつつある。例えば、米国 SunPower 社の集光型太陽電池はフレネルレンズで集光し無集光太陽電池に比べ9%の変換効率の向上を達成し、変換効率25%の太陽電池を実用化している。集光型太陽電池の材料系は単結晶 Si 系や GaAs 系が代表的であるが、これらの太陽電池の光電変換領域は a-Si 太陽電池と同様に可視光線の帯域にあり、高効率変換を達成するにはセルの温度上昇の抑制が不可欠である。従って、この場合も本研究で示したように赤外線の入射の抑制は効果的な手段であり、波長選択フィルタで分離した熱エネルギーは熱電発電で活用し、複合化するシステムが成り立つ。追尾集光システムが不可欠な太陽熱発電に、集光型太陽電池を組み合わせる複合システムは共に集光追尾という共通要素を有し、これらを複合化するシステムの成立性は高い。

太陽熱発電に FGM 型熱電発電素子を用いるなら、太陽電池と熱電発電で従来の変換効率(例えば SunPower 社の集光型太陽電池は25%)に更に8~9%を上乗せできる計算となり、(例えば SunPower 社の集光型太陽電池の25%に単純に加算すれば33~34%となる)高効率の太陽光・熱複合発電が達成される。このシステムを開発するための技術的課題は、波長選択フィルタの高集光時における耐久性の確保と前述の高効率熱電発電モジュールの形成技術の開発である。とり

わけ、気象条件により熱負荷が激しく変化し、繰り返し熱衝撃に曝される熱電発電モジュールに熱応力緩和技術を導入することは、熱電発電による太陽熱発電を達成するには克服しなければならない課題である。

集光型の太陽光・熱複合発電システムは、高密度エネルギー変換であり、少しの変換材料で大きな電力を得る手法であり、エネルギー変換材料の省資源化にも寄与するシステム化技術である。

太陽エネルギーの総合活用をはかって太陽光・熱複合発電の性能向上と実用化を図ることは、日本というローカルな地域の需要に左右されることなく、中国やロシア、その他の CO₂ 排出の顕著な地域のクリーンなエネルギー源として普及することで地球環境問題やエネルギー問題に対して広く世界に貢献できることを切望している。

文 献

- (1) 木皿且人, 森谷信一, 熊谷達夫, 新野正之: 興調整費「焼却炉廃熱等の未利用熱エネルギーの有効活用に関する研究」, 平成7年度成果報告書, (1996. 3), 1-4.
- (2) 木皿且人, 森谷信一, 熊谷達夫, 新野正之: 「焼却炉廃熱等の未利用熱エネルギーの有効活用に関する研究」平成8年度成果報告書, (1997. 3), 1-4.
- (3) 木皿且人ほか: 平成9年度太陽エネルギー学会発表会講演論文集, (1997. 11), 153-156.
- (4) 木皿且人ほか: 航技研ニュース, No 472, 1998.8.
- (5) 木皿且人ほか: 平成10年度日本太陽エネルギー学会講演論文集, (1998. 12), 217-220.
- (6) Research Project on the Effective Use of Untapped Thermal Energy from Garbage Incineration etc. 新野正之ほか 第16回 ICT.