

論文内容の要旨

氏名 岡本 和也

近年、地球温暖化、埋蔵資源の枯渇、環境問題の対応策の1つとして太陽熱利用、太陽光発電などの太陽エネルギー利用技術の普及促進が喫緊の課題となっており、世界各国で研究開発と導入が進められている。

PVセルの変換効率は年々向上しており、現時点で最も効率が高い実用PVセルは多接合PVセルであり、シリコン単接合の理論変換効率(非集光時)が29%に対して、3接合PVセルでは45%となっており、現在の最高変換効率は37.9%である。また、多接合PVセルは集光を行うことで単位面積当たりに入射する光子数が増加することで電子および正孔の擬フェルミ準位の差が広がることから太陽電池の起電力が増加し、変換効率が向上する特性があり、集光時の理論変換効率は3接合の500倍集光時で57.3%、多接合の集光限界では約75%であり、現在の最高変換効率は44.7%となっている。しかし、高効率な多接合PVセルは高価であることから、通常の太陽電池モジュールのように大面積化することが困難である。そこで、ミラーやレンズなどの比較的安価な材料を用いて製作した集光器(Concentrator)を用いることで、太陽光を集光し、且つPVセル面積を減らし、高効率化・低コスト化が進められている。

これまで主に集光倍率が500倍前後の集光器を有する高集光倍率の集光型太陽光発電(Concentrating PhotovoltaicsあるいはConcentrator Photovoltaics: CPV)システムの開発が進められてきた。しかし、高倍率の集光器を用いたCPVシステムはその性質上、高精度の太陽追尾架台が必要となり、高コストになる傾向がある。また、複数の架台を設置する場合にはモジュール同士の影の影響を抑えてシステム利用率を高くするために架台間の間隔をあける必要であり、通常のPVシステムより土地利用率が低くなる傾向がある。また、CPVシステムに限らず太陽光発電は設置場所・設置条件の変化により発電量が大きく異なるが、CPVシステムにおけるこれらの関係は明確ではなく、そのため、設計段階で架台の設置間隔と、単位モジュール面積当たりの発電量、単位敷地面積当たりの発電量などとの関係を定量的に把握することは有意義である。

他方、CPVシステムは年間日射量に占める散乱光の割合が大きい非サンベルト地域での優位性は低く、普及していない。その原因は、高倍率になるほど集光器の許容角が狭くなり、散乱光をPVセルに集光できないことにある。もし、散乱光からも発電するCPVシステムがあれば、今後、日本のような非サンベルト地域において発電量を最大化できるCPVシステムとなり得る。これは我が国のエネルギーセキュリティの観点からも重要である。

上記の点に加えて、従来CPVシステムの問題点をまとめると以下ようになる。

- ① フレネルレンズなどの古典的な構造と設計手法の光学系は、集光性能などにおいて頭打ちになっている。CPVシステムの更なる高性能化のためには、光学系のブレークスルーが必要である。

- ② 従来の CPV は集光器としてレンズを用い、架台にはペDESTAL方式の追尾架台を用いるタイプが多く、CPV の適用箇所を拡大するためには、CPV システムの多様化が求められている。
- ③ 集光系を含むモジュールの生産性向上による低コスト化の検討が必要である。
- ④ 高倍率の CPV では、散乱光から全く発電できないことから年間日射量に占める散乱光の割合が大きい日本のような非サンベルト地域において優位性が低い。
- ⑤ 複数の架台を設置する場合、モジュール同士の影を低減するために架台の設置間隔を広めに設定するため、土地利用率が低くなる。これは設置場所、気象条件等を考慮した設計段階での発電量予想がなされていないためである。

そこで本研究では、上記の①～⑤の技術課題に対して、それぞれ以下のようにアプローチし、工業上有益な知見を得ている。

- ① 新規機能性材料である負の屈折率材料を CPV の集光系に導入することで、レンズ高さを約半分、許容入射角を約 1.8 倍にでき、さらに、レンズ材料の屈折率の波長分散による光学的効率の低下を抑制できる可能性を示した。
- ② 平坦な屋上面などに設置しやすいロープロファイルの CPV システムとして、Off-Axis ミラー集光器とカルーセル方式の追尾架台を組み合わせた新規 CPV システムの試験検証を行った。本新規 CPV システムの試験検証により、集光倍率が同程度のレンズ集光系に較べて、より薄型で、より許容入射角の大きい集光器を実現できた。
- ③ すでに大量生産技術として確立している LED パッケージング技術を適用でき、且つ高性能な集光系を設計し、高性能な集光器として、自由曲面を持つ集光器の設計解析と試験検証を行った。
- ④ 散乱光を低コストの PV セルで捕集する散乱光活用型 CPV のコンセプト(以下、CPV+と表現する)を新たに提案し、理論予測と試作モジュールによる試験検証を行った。散乱光を全く活用できない従来 CPV モジュールに対する発電量の増加割合は、試作モジュールで理論予測と良く一致した。CPV+モジュールでは、散乱光から得られる発電電力は散乱比が 0.30～0.55 の条件でピークが得られた。この散乱比は世界の大多数の都市部における日射条件に適合している。
- ⑤ 更に、この CPV+システムについて光学設計解析、熱解析、電気解析、追尾誤差解析、影ロス解析を組み合わせることでセル・モジュール設計の段階からプラントレベルの発電量予想まで行う包括的設計を行った。モジュール間隔を東西および南北方向にピッチ 1.5 で配置することで固定非集光型 PV システムに比べ 2.3 倍の発電量が得られると予想される。

いずれの結果も、研究開発および実用化が進む太陽光発電分野において、産業上有益なものとなった。