



集光型太陽光発電システムの 高日射地域における性能優位性

Advantages of Concentrator Photovoltaic System in High Solar Radiation Region

三上 壘*

Rui Mikami

稲垣 充

Makoto Inagaki

守口 正生

Masao Moriguchi

北山 賢一

Ken-ichi Kitayama

小中 博之

Hiroyuki Konaka

岩崎 孝

Takashi Iwasaki

集光型太陽光発電 (CPV) は結晶シリコン太陽光発電 (Si-PV) と比較して、単位面積あたり及び公称出力あたり大きな発電量が期待できる。これらと比較するために、CPVの展開が期待される高日射地域 (モロッコ) で実証試験を行いCPVは固定Si-PVと比較して直達日射強度 (DNI) が7.9kWh/m²/dayの時に単位面積あたり約2.5倍、公称出力あたり約1.3倍の発電量を得られることを明らかにした。また今回、モジュールのガラス表面への砂の堆積をさけるため、夜間ガラス面を下に向ける構造の架台を新たに開発し、砂塵の影響のある地域で砂による発電電力量低下を大幅に低減できることを明らかにした。

Concentrator photovoltaic (CPV) systems are promising power generation systems due to their high outputs per module active area and rated power compared with crystalline silicon photovoltaic (Si-PV) systems. In a field test conducted in Morocco, where solar radiation is high, our CPV system demonstrated approximately 2.5 times higher output power per module active area and 1.3 times higher output power per rated power than a Si-PV system under the condition of direct normal irradiance of 7.9 kWh/m²/day. We have developed a tracker that faces to the ground during the night, thus preventing soil or sand from accumulating on the glass surface of the CPV module and contributing to high power generation.

キーワード：集光型太陽光発電、発電システム、直達日射量

1. 緒言

再生可能エネルギーを活用した電力システムへの需要の高まりを受け、筆者らは高効率発電技術として集光型太陽光発電 (CPV) システムの開発を行っている⁽¹⁾。

2012年7月に当社横浜製作所構内における、「メガワット級大規模蓄発電システム」向け合計100kWのCPVシステム屋外実証運転の開始⁽²⁾に続き、2014年3月には住友電工としてCPVシステムを初めて製品化し、2基合計15kW以上のCPVシステムを宮崎大学に納入した。また同年7月には開発したCPVモジュールが日本国内メーカー初の第三者認証機関でのIEC国際規格試験に合格した⁽³⁾。

これらと並行して、CPVシステムの優位性を実証するため、高日射地域であり再生可能エネルギー導入に前向きなモロッコ王国 (以下、モロッコとする) にて実証実験を行ってきた。本論文では、モロッコの実証試験で得た発電データからCPVの優位性に関して報告する。

2. CPVの特徴と課題

CPVは、レンズ等で直達太陽光を小面積の発電素子 (セル) に集光し、光エネルギーを電気エネルギーに変換する太陽光発電装置である。CPVシステムはCPVモジュールと、

CPVモジュールを太陽と常に正対させるための追尾架台から主に構成される。

CPVモジュールの発電素子には、異なるバンドギャップエネルギーの半導体材料を積層し、受光感度帯域でのロスを低減した高効率な多接合化合物太陽電池が用いられる。多接合化合物太陽電池においては、フランスのSoitec社から508倍集光下 (508Suns, 1Sun = 1kW/m²) において46%の世界最高効率⁽⁴⁾が報告されており、ドイツのAzur Space Solar Power社では変換効率44%のセルが量産されている⁽⁵⁾。ここ数年毎に変換効率の向上が図られており、更なる技術開発によって、近い将来に変換効率50%以上の超高効率化が期待できる⁽⁶⁾。

現在MW級の太陽光発電所に使用されているSi-PVのモジュール変換効率は15~17%程度が主流となっている。CPVがレンズによって太陽からの直達日射光のみをセルに集光させて発電しているのに対して、Si-PVはレンズを持たず、雲などからの散乱光も利用して発電しているため、曇りや雨などの日射が弱く太陽が直接見えない時にも発電する。

このため、直達日射量が散乱光に対して多い地域でCPVの優位性は高まる。一方でこのような地域は砂塵によるモジュール汚れの影響が懸念される。そこで筆者らはCPVシステムをモロッコに設置し、CPV優位性の確認と汚れによ

る影響の定量化とそれへの対策を実証した。

3. モロッコに設置したCPVシステム

2013年3月にモロッコのカサブランカ地方にある住友電装(株)の海外現地法人SEWS CABIND MAROC (SEWS-CM)の工場敷地内にCPVシステムを設置した。

写真1は設置したCPVシステムの写真である。当システムはSi-PVとの発電比較を行うために、架台中央にCPVモジュールを、架台上下にSi-PVモジュールをそれぞれ搭載し太陽光を追尾している(以下、2軸Si-PVとする)。搭載したCPVモジュールの有効発電面積は約15.4m²で、Si-PVモジュールの有効発電面積は約14.6m²である。CPVと2軸Si-PVそれぞれにパワーコンディショナーが接続されている。

またカサブランカよりも高日射地域であるワルザガートに2015年9月に新たなCPVシステムを設置した。写真2は、設置したシステムの写真である。ワルザガートの1日の積算直達日射量の年間平均は約7kWh/m²/dayであり、モロッコ王国の太陽エネルギー庁(MASEN)も太陽光発電の展開を計画している。MASENが管理するサイト内の研究エリアに、20kW級CPVと南向き傾斜角20度に固定設置したSi-PVシステム(固定Si-PV)10kWを設置した。

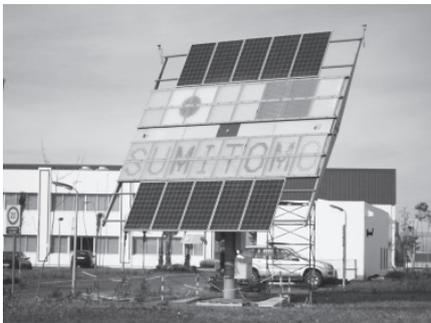


写真1 SEWS-CMに設置したCPV



写真2 ワルザガートに設置したシステム
(奥が20kW級のCPV、手前が10kWの固定Si-PV)

設置したCPVモジュールはカサブランカに設置したモジュールと比較して、使用しているセルの変更や光学設計の変更により、単位面積あたりで6%の発電性能向上を図った。

ワルザガートでの実験に用いた各太陽電池モジュールの変換効率はCPVが直達日射強度(DNI) = 1000W/m²、分光放射照度 = AM1.5D、セル温度 = 25℃、風速 = 0mのCSTC*1条件下で約33%であったのに対して、Si-PVは全天日射強度(GNI) = 1000W/m²、分光放射照度 = AM1.5G、セル温度 = 25℃のSTC*2条件下で約17%であった。

またワルザガートの実証実験で使用した追尾架台のモジュール搭載面積は70m²であり、横浜製作所やカサブランカに設置した架台の32m²と比較すると、約2倍の搭載面積を持つ。

設置したCPVと固定Si-PVにはそれぞれパワーコンディショナーが接続され、各システムからの発電電力はパワーコンディショナーの交流側をモニターしている。

4. モロッコでのCPVの発電実証

図1は、2015年11月4日に得られたワルザガートでの発電データである。発電システムとして見た場合には、1日の積算日射量に対する得られた積算発電電力量が重要になる。この日得られた日射データおよび発電データから計算すると、1日の積算直達日射量(DNI) 9.1kWh/m²/dayに対して、CPVの1日の発電電力量が2.6kWh/m²であった。一方固定Si-PVは傾斜全天日射量(GTI) 7.0kWh/m²/dayに対して、発電電力量は0.99kWh/m²になっていた。

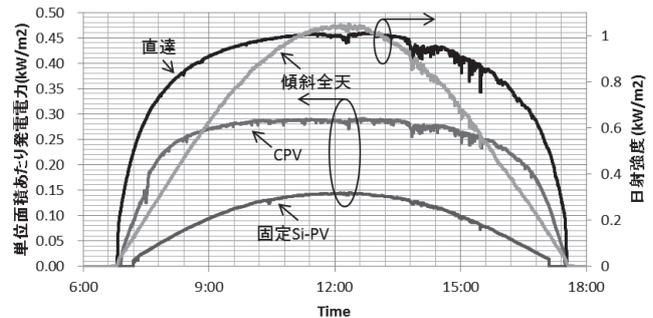


図1 2015年11月4日の発電データ

1年半に及ぶカサブランカでの発電実証で得られたデータ及び、2015年11月4日から11月20日にワルザガートでの発電実証で取得した発電データを図2に示す。積算直達日射量に対する発電電力量をプロットした。図から見てとれるように、CPVは積算直達日射量に対して単位面積あたりの発電電力量が単調増加する。

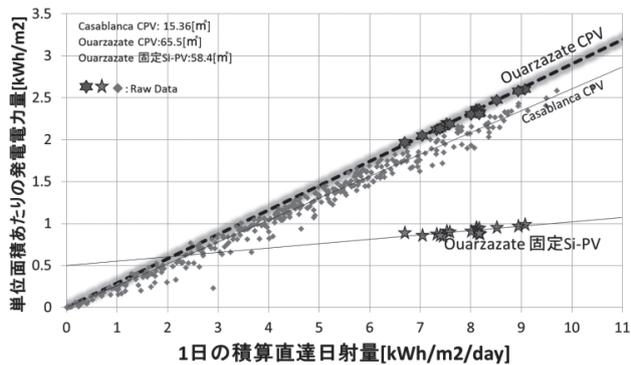


図2 モロッコにおける単位面積あたりの発電電力量の比較

カサブランカで取得してきたCPVの発電データと比較して、ワルザザートに設置したCPVシステムの単位面積あたりの発電電力量が6%向上していることがわかった(図2)。これは前述の通り、設置したCPVモジュールの単位面積あたりの出力を6%向上したことに起因すると考えられる。11月4日から11月20日の積算直達日射量の平均は7.9kWh/m²/dayであった。このときの単位面積あたりの積算発電電力量の平均は固定Si-PVが0.91kWh/m²であり、CPVが2.27kWh/m²であった。この結果、CPVは固定Si-PV比で単位面積あたり約2.5倍の発電電力量が得られることがわかった。

また、図3に公称出力あたりの発電電力量をCPVと固定SiPVで比較したグラフを示す。CPVの公称出力は前述のCSTC条件下で21.9kW、固定SiPVの公称出力はSTC条件下で10kWとしている。同期間での公称出力あたりの発電電力量の平均はCPVが6.81kWh/kW、固定Si-PVが5.33kWh/kWであった。固定Si-PV比で約1.3倍の公称出力あたりの発電電力量が得られることがわかった。

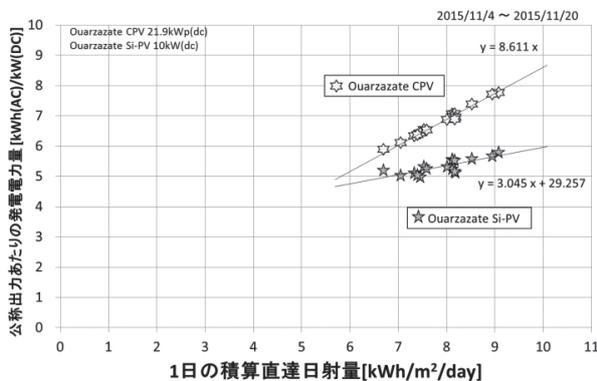


図3 ワルザザートでの公称出力あたりの発電電力量の比較

5. モロッコでのCPV発電実証におけるガラス表面汚れの影響

カサブランカにおける実証では、太陽電池モジュールのガラス表面の汚れが発電に大きな影響を及ぼしていることもわかった。

汚れ指標は以下のように導出している。まず、計測された各時刻の発電電力に対して、その時の日射強度と有効面積で割った変換効率(Eff)を導出した。こうすることでCPVやSi-PVがスペクトルや日射強度の変化によって発電電力が変動する影響を除外した。さらに温度変化による影響を除外するために、各モジュールの裏面温度を测温抵抗体(Pt100)で測定し、CPVは使用した化合物半導体セルの出力の温度係数(-0.10%/°C)を、固定Si-PVは出力の温度係数(-0.41%/°C)をそれぞれ使用して、25°Cでの値となるように温度補正後の変換効率(Eff')を導出した。下記式(1)が温度補正式である。

$$Eff' = Eff \times (1 + a(25 - T_{mod})) \quad \dots\dots\dots (1)$$

a : 温度係数 [%/°C]
 T_{mod} : モジュール裏面温度

カサブランカでの実証では汚れによって気象条件などにもよるが1週間で10%以上CPVの発電性能を低下させていた。また前述したように光学方式の違いからCPVの方が汚れの影響をより受けやすい。このため、カサブランカでは1週間に1回の清掃を実施して発電データを取得した。

この汚れに対する対策を考察するために、ガラス表面への汚れ付着メカニズムを考察した(図4)。空中へ舞う細かい砂がガラス表面に堆積し、雨や結露水と反応して、表面に粘土状に固着しているモデルを考えた。このモデルの正しさを検証するために実際に同敷地内でダミーサンプルを暴露して実験を行った。同じダミーモジュールを2つ用意し、一つはガ

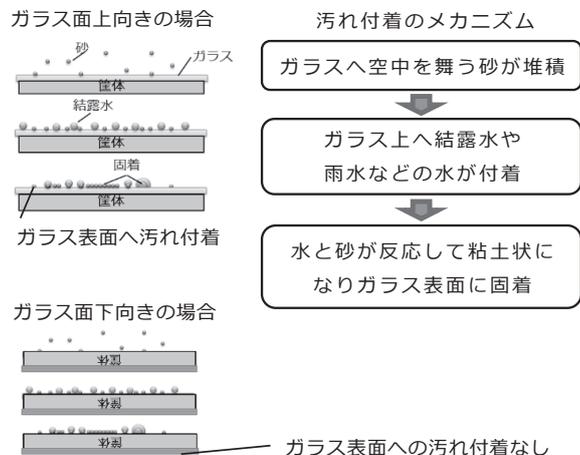


図4 ガラス表面への汚れ付着メカニズム

ラス面が常時上向きに、もう一方はガラス面が常時下向きになるように設置して、3日間暴露した。暴露後のガラス表面を観察したところ、ガラス表面の向きで劇的に汚れの付着度合いが変わることが明らかになった(図5)。この実験結果からガラス表面を夜間発電しない時間帯に下向きにすることで堆積する砂の量を減らし、また同時に雨や結露水がガラス表面に付着する可能性を低減することで、汚れによる発電電力低下を抑制することが期待できることを明らかにした。



図5 カサブランカでの暴露試験結果

筆者らはカサブランカでの実証結果を踏まえて、モロッコのワルザザートに汚れによるロスの低減を目的とした追尾架台を実証実験に使用した(写真3)。

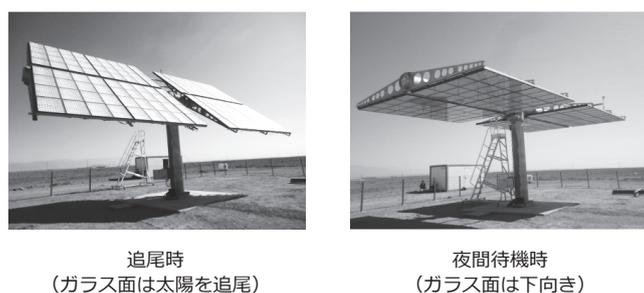


写真3 ワルザザートに設置した追尾架台

本追尾架台の最大の特徴は、夜間待機時に搭載する太陽電池モジュールのガラス表面を下向きにできることである。

11月4日から11月20日までの実証期間で、CPVシステムは夜間ガラス面を下向きにして待機させて運用した。この

期間中の汚れによる出力低下を図6のグラフに示す。

11月4日に各モジュールのガラス表面の清掃を行って暴露初日とし、前述の式(1)で導出した温度補正後の変換効率の初日からの低下割合をプロットした。グラフに示したプロットの傾きが汚れによる低下割合に相当し、16日間の暴露でCPVと固定Si-PVは共に5%以下の低下に留まっている。

一方でカサブランカでの発電データでは2014年10月から同年11月にかけての発電データから低下割合を導出した。CPVに関しては5日間で15%の低下が確認され、2軸Si-PVは5日間で3%の低下が確認された。設置した地域の時期やその間の気象の影響も受けているため、単純な比較はできないが、両地域のSi-PVの発電電力の低下割合と比較すると、ワルザザートに設置したCPVの汚れによる発電電力の低下はカサブランカのCPVと比較して大幅に抑えられていると言える。

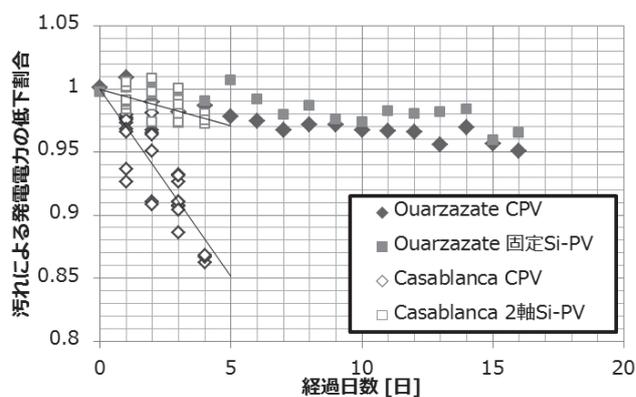


図6 モロッコでの汚れによる発電電力の低下割合

6. 結 言

筆者らは単位面積あたり及び公称出力あたり高い発電電力量が期待される集光型太陽光発電(CPV)システムのフィールド実証を高い日射量が期待できるモロッコで行い、固定Si-PVと比較して、単位面積あたりで約2.5倍、公称出力あたりで約1.3倍の発電電力量が得られることを明らかにした。また、夜間にモジュールのガラス表面を下向きで待機できる追尾架台を設置し、高い防汚効果が得られることを明らかにした。

今後、さらにワルザザートでの長期間の実証データを蓄積し、CPVシステムの高日射地域での優位性をより明らかにしていく。

7. 謝 辞

本研究の一部、モロッコのワルザザート地域におけるCPVシステムの実証は、独立行政法人国際協力機構（JICA）の「開発途上国の社会・経済開発のための民間技術普及促進事業」の助成を受けたものである⁷⁾。

用語集

※1 CSTC

Concentrated Standard Test Conditionの略。CPVモジュールの出力を測定する標準条件。国際標準規格IEC 62670-1にて規定。

直達日射強度 (DNI) = 1000W/m²、分光放射照度分布 = AM1.5D (ASTM G173)、セル温度 = 25℃、風速 = 0m/s

※2 STC

Standard Test Conditionの略。結晶シリコン太陽電池モジュールの出力を測定する標準条件。国際標準規格IEC 60891及びIEC 60904にて規定。

全天日射強度 (GNI) = 1000W/m²、分光放射照度分布 = AM1.5G (ASTM G173)、セル温度 = 25℃

参考文献

- (1) 齊藤健司 他、「集光型太陽光発電システムの開発」、SEIテクニカルレビュー第182号、PP.18-21 (2013)
- (2) 中幡英章 他、「スマートグリッド実証システムの開発」、SEIテクニカルレビュー第182号、PP.4-9 (2013)
- (3) TUV. communication、2014年 第10号、P.6
URL https://www.tuv.com/media/japan/online_magazine/tuv_communication_online/201410.pdf
- (4) Soitec, Press Release
URL <http://www.soitec.com/en/news/press-releases/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent-1599/>
- (5) Azur Space, CPV Solar Cells
URL <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells>
- (6) NREL, Best Research-Cell Efficiencies
URL http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- (7) JICAプレスリリース 2014年8月27日
URL http://www.jica.go.jp/press/2014/20140827_01.html

執筆者

三上 壘* : パワーシステム研究開発センター
主査



稲垣 充 : パワーシステム研究開発センター



守口 正生 : インフラ事業推進部 主席



北山 賢一 : パワーシステム研究開発センター
主席



小中 博之 : パワーシステム研究開発センター
主席



岩崎 孝 : スペシャリスト
パワーシステム研究開発センター
グループ長



*主執筆者