

集光型太陽光発電システムのプラント実証

Evaluation of Concentrator Photovoltaic System Power Plant

安彦 義哉*

Yoshiya Abiko

三上 塁

Rui Mikami

飯屋谷 和志

Kazushi Iyatani

田村 真士

Shinji Tamura

杉山 開路

Kaiji Sugiyama

上山 宗譜

Munetsugu Ueyama

集光型太陽光発電（CPV）システムの展開が期待される高日射地域（モロッコ）において、CPVおよび結晶シリコン太陽光発電（Si-PV）の実証機を用いた発電性能の比較評価を実施した。この結果を受け、CPVシステムを用いたメガワット級発電実証プラントをモロッコ王国ワルザートに建設し、発電プラントとしての実証試験を開始した。CPVはSi-PVと比較して単位面積当りの発電量および公称出力（実効定格）当りの発電量共に優位であることを実証し、発電プラント稼働後約1年間システム出力係数（Performance Ratio）の変化もなく、安定した発電が確認できた。

Sumitomo Electric Industries, Ltd. installed a concentrator photovoltaic (CPV) system in a high solar irradiation area in Morocco and evaluated its power output performance in comparison with a crystalline silicon photovoltaic (Si-PV) system. Based on the positive result, a mega-watt class CPV power plant was built in Ouarzazate, Morocco and is now operating for demonstration purposes. The CPV system is superior to the Si-PV system in power generation per module area and effective rated power. The performance ratio of the plant has remained almost the same throughout the year, confirming its stable operation.

キーワード：集光型太陽光発電、メガワット級発電プラント、年間発電量

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、当部で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て、100kW CPVシステムの実証試験を開始⁽²⁾し、2014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⁾。

CPVシステムは直達光をレンズで100～1000倍程度に集光し高効率で発電をするシステムであることから、直達日射量（DNI）が高い（図1 DNI ≥ 6 [kWh/m²/day]）地

域で適し、Si-PVと比較して高温下での性能低下が少ないことから、高温高日射地域での実用化が期待されている。北米南西部、南米チリ、中近東、南北アフリカ、豪州、中国チベット地方、モンゴル東部などが該当する。当社はそうした地域でのCPVシステムの性能優位性を実証するため、高温高日射地域でありかつ再生可能エネルギー導入に積極的なモロッコ王国にて実証実験を行ってきた。

当部では2015年に同国内でも有数の高日射地域ワルザートに建設したCPVシステムおよび併設したSi-PVシステム実証機を用いて初期性能と初期発電量比較データ、実証状況について報告した⁽⁵⁾。本論文においてその年間発電量評価結果を明らかにし、2016年11月に隣接する場所に建設したメガワット級CPV発電プラント⁽⁶⁾で得た発電データからCPVの優位性、更なる性能向上に向けた取組みに関して報告する。

2. CPVの特徴

CPVシステムは、虫眼鏡のような凸レンズ等で直角に入射する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。その主な構成は、レンズ等の集光部、セルを含む配電部とそれらを固定維持するための筐体部からなるCPVモジュールと、それを同一平面上に敷設し太陽と常に正対させるためのCPV追尾架台システムからなっている。

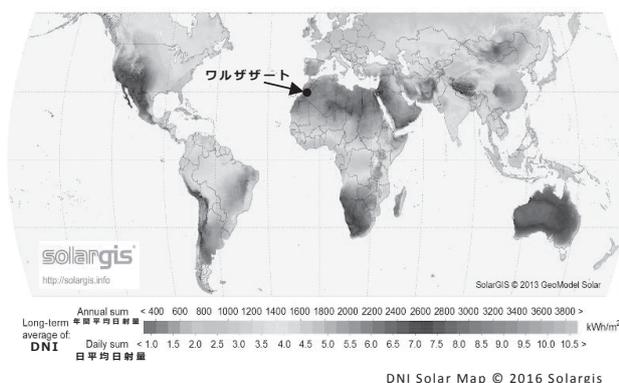


図1 世界の直達日射量（DNI）マップ⁽⁴⁾

CPVモジュールのセルには、異なるエネルギーバンドギャップの化合物半導体薄膜を積層し、受光感度帯域でのロスを低減した高効率な多接合構造を用いている。この構造においてはこれまでにSoitec社から508倍集光下（508 Suns, 1 Sun = 1kW/m²）46%の世界最高効率⁽⁷⁾が報告されており、AZUR SPACE Solar Power社では平均変換効率44%のセルが既に量産されている⁽⁸⁾。これを用いた量産モジュール平均変換効率は現在33~36%程度となっており、MW級発電プラントで使用されている平板Si-PVのモジュール変換効率16~18%程度と比較して約2倍程度となっている。また更なる多接合化などの技術開発によって近い将来、セル変換効率50%以上の超高効率化が期待できることでモジュール変換効率40%程度へ向上することが見込まれている^{(9),(10)}。

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は集光レンズを持たず、雲や塵で散乱した光や周囲構造物からの反射光なども利用して発電することができる。このため、日本や北欧など曇りや雨などが比較的多い地域では同じ発電容量（定格）に対して、Si-PVの方がCPVより多く発電する。

このような特性からCPVの優位性は、直達日射量が散乱光に対して多い地域で高まるが、総合的に考慮される実環境での発電量比較が非常に重要となる。

3. CPVとSi-PVの年間発電量比較

まず2015年8月に建設（2016年11月系統連系開始）したCPVおよびSi-PV実証システム⁽¹¹⁾（写真1）の年間発電量比について報告する。本実証システムのCSTC^{*1}およびSTC^{*2}標準定格は、CPVが20 [kW]、Si-PV（20°固定）が10 [kW]でありSi-PV標準定格と対等に比較可能なCPVシステムの実効定格^{*3}は18.0 [kW]である。

システム有効稼働日（CPV、Si-PV双方が正常に稼働した日数）のモジュール面積当りの発電電力量をCPVシステム

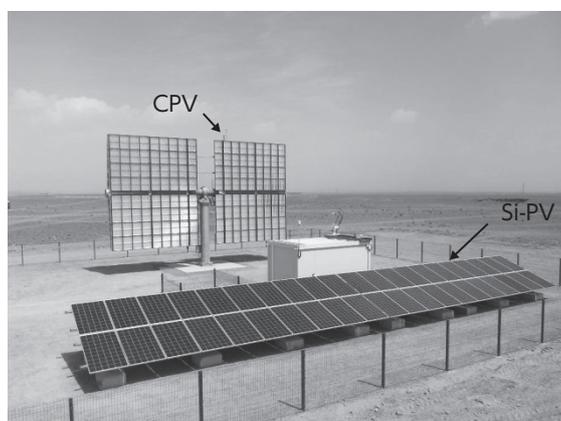


写真1 ワルザザートに設置したCPVとSi-PV実証システム

の入射エネルギーとなる直達日射量（DNI）とSi-PVシステムの入射エネルギーとなる全天傾斜日射量（GTI）に対してグラフ化したものを図2に示す。両システムのモジュール総面積はCPVシステムが73.9 [m²]、Si-PVシステムが65.5 [m²]である。また発電量はAC側の電力メータで計測した値を採用した。

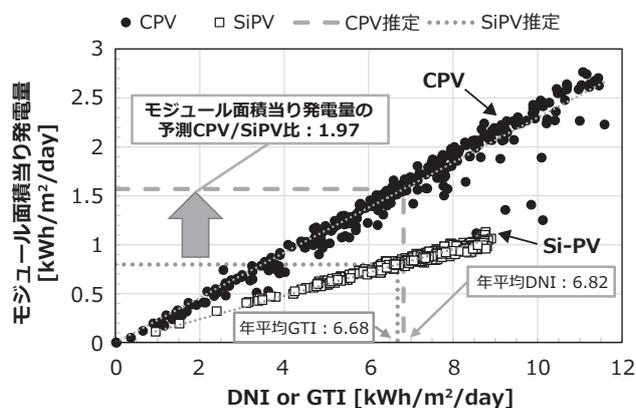


図2 ワルザザートにおけるモジュール面積当りの発電量比較

DNIに対するモジュール面積当りのCPV発電量と、GTIに対するSi-PV発電量は線形性の高い直線となっており、季節依存性も小さいことが判った。ここで発電量比を算出するのに用いた年平均DNIとGTIは、Solargis社提供の現地実証地点の20年間の気象データ平均値である。

この結果から該地20年間のDNI平均6.82 [kWh/m²/day]、GTI平均6.68 [kWh/m²/day]に対してモジュール面積当りのCPVシステム発電量は1.57 [kWh/m²/day]、Si-PVシステム発電量は0.798 [kWh/m²/day]となる。従ってCPV/Si-PV予測発電量比は1.97となり、同じモジュール面積を設置した場合、CPVは年間で1.97倍の発電量を得られることを示している。

次にシステム有効稼働日の実効定格当りの発電量をCPVシステムのDNIとSi-PVシステムのGTIに対してグラフ化したものを図3に示す。

図3のグラフより実効定格当りのCPVシステム発電量は6.45 [kWh/kW/day]、Si-PVシステム発電量は5.22 [kWh/kW/day]となり、CPV/Si-PV予測発電量比は1.23となる。これは同じ条件でモジュール定格容量を設置した場合（例：1MW）、システムが正常に稼働している状態が維持されれば、CPVは年間で1.23倍（例：Si-PV 1.23MW相当分）の発電量を得られることを示している。

なお本発電量比はモロッコのワルザザートの気象環境下固有の数値であり、設置場所によって異なる。

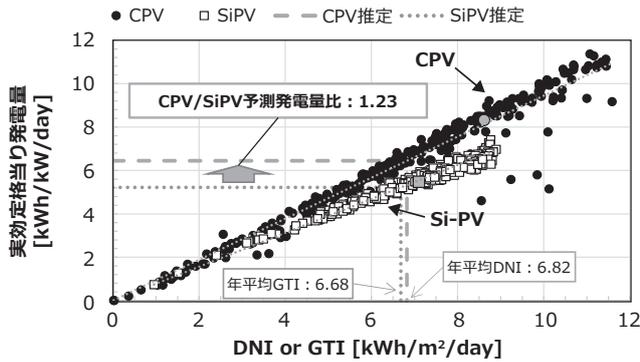


図3 ワルザザートにおける実効定格当りの発電量比較

4. メガワット級CPV発電プラント概要

前記結果を受けてその隣接地に2016年に設置したメガワット級CPV発電プラントの概要を紹介する(写真2参照)。本システムにはCSTC標準定格で915kW分、実効定格で823kW分のモジュールを設置している。追尾架台は33基設置されており、1基当たりのCSTC標準定格は27.7kW、実効定格は24.9kWとなる。

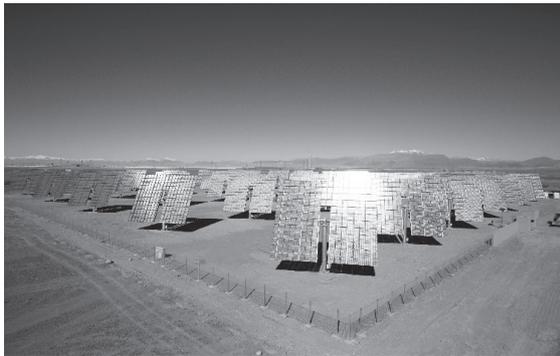


写真2 ワルザザートのメガワット級CPVシステム全景

また主な大型構造鋼材の現地調達を行ったことで、材料・輸送・施工コスト低減も実現した。また気象状況や周囲環境、施工精度の影響をあまり受けず、その設置環境下で発電量を最大化できる追尾制御装置も開発した(写真4)。この制御装置は各架台独立に発電出力から太陽軌道を自動補

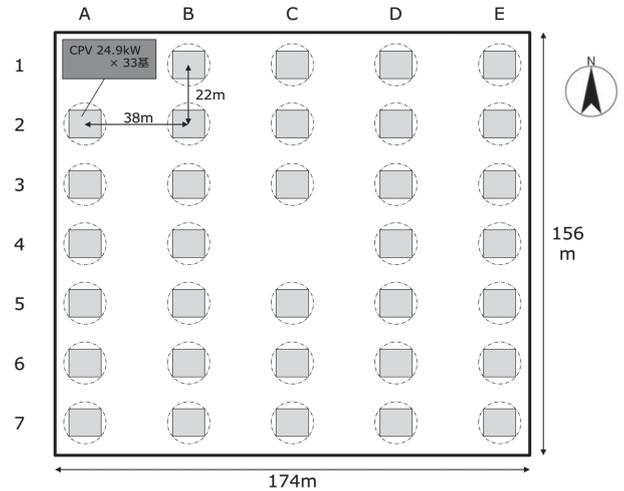


図4 CPV発電プラントレイアウト図

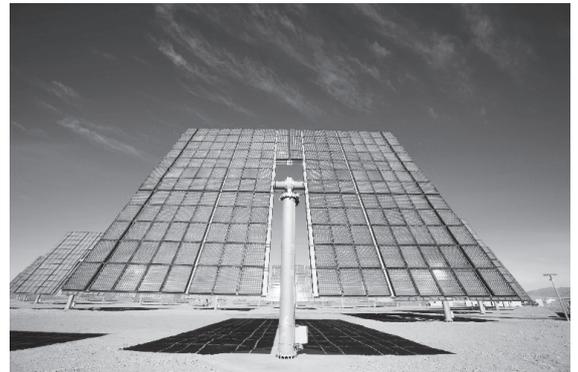


写真3 自社開発追尾架台システム

また本サイトのレイアウトは南北156m、東西174m、所要面積2.71haとなっており、隣接追尾架台システム間(南北22m、東西38mピッチ)にCPVモジュール相互に生じる影による年間発電ロス率は1.5%程度となるように設計した(図4)。

本システム設置に向けて、当社では独自の太陽追尾架台システムを開発した(写真3)。

この追尾架台システムの主な特徴として前記実証機から構造を見直し、特殊重機を必要としない範囲での大型化(設置モジュール面積103m²、高さ約11m、幅約12m)、構造体鋼材の軽量化、施工性にも配慮した設計としたこと、



写真4 精確に太陽を追尾するCPVシステム

正することを特徴としておりメガワット級プラントのように多数の追尾架台を調整する際、各架台毎に調整する手間を掛ける必要がないため、調整コストを大幅に削減することが可能となった。

また本プラントの追尾架台システムは、前記実証システムで導入したCPVモジュール受光レンズ面の汚れを抑制するのに大きな効果のあるCPVモジュール反転機能を有している（写真5）。この機能によりモジュール受光面清掃のしやすさに加え高温高日射の過酷な環境で効率よく作業することが可能となった。



写真5 反転機能を用いて受光面を下向きにした夜間待機姿勢

5. 発電性能

CPV発電プラントの発電性能および設計妥当性を確認するため、発電性能の検証を行った。運用開始直後および最近の発電データ例を図5、図6に示す。

一般に太陽光発電システムの性能評価は、システム出力係数（Performance Ratio, 以後PR）で表される。PRは太陽光発電システムの公称最大出力値（定格）に対して、実際にどの程度の発電量が得られたのかを示す値で、設置条件等に違いがあるシステムにおいて、太陽光発電システム同士を公平に比較することができる指標である。

CPVシステムのPRは次の式で規定される。

$$PR = (G/P)/(DNI_{in}/dni_{std})$$

- G : 発電量 [kWh]
- P : システム定格 [kW]
- DNI_{in} : 直達日射量（入射エネルギー）[kWh/m²]
- dni_{std} : 基準日射強度 [kW/m²]

PRの値は設置したモジュールの最大発電容量（DC出力）に対して、実際に電力として系統連系できる発電電力（AC出力）までのロス分（直列モジュール間性能バラツキ、影、

DC/AC変換、送電抵抗、受光面汚れ、温度特性、スペクトル特性、昇圧トランス等の損失分）を差し引いたものである。Si-PVシステムでは典型値として一般に80～85%程度が用いられている。

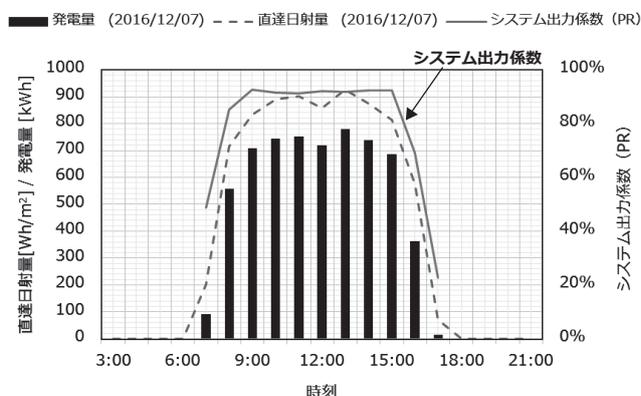


図5 運転開始直後の発電データ例

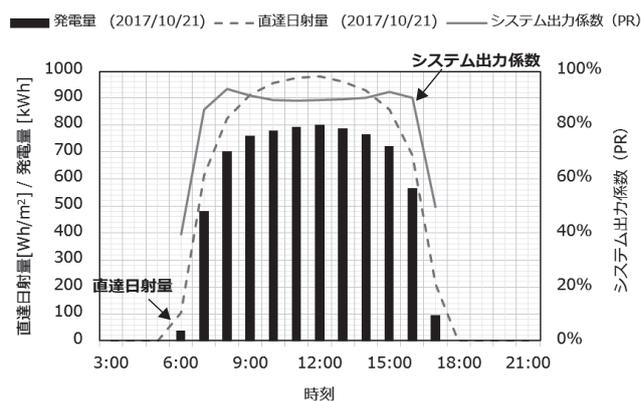


図6 運転開始11か月後の発電データ例

運用開始直後の2016年12月7日のCPVシステム実効定格に対するPRは、ピークPR値が92.7%、通日のPR値が87.8%となっている。一方、運転開始11か月後の2017年10月21日のPR値はピークPR値が93.2%、通日のPR値は88.5%が得られた。

このことから稼働期間11か月で発電性能はほとんど変化がないこと、その性能はSi-PVシステムと比較しても同等以上であることが判った。

また20kW実証システムとメガワット級プラントで実効定格当りの発電量が有効稼働日でどう変化しているかを確認した（図7）。

このグラフより隣接システム間の影によるロスや送電ケーブルの長距離化（電圧降下）、強風時の安全退避頻度などの

追加発電ロス要因はあるものの、設置したモジュール発電容量に対しての発電量はほぼ同等であり、想定通りの発電量となっていることを確認した。

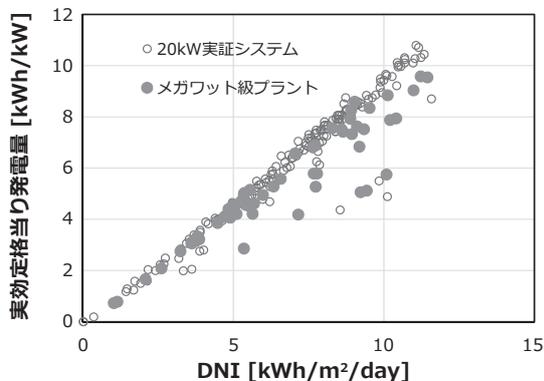


図7 20kW実証システムとメガワット級プラントの実効定格当りの発電量

6. CPV発電プラントレイアウト検討

今回設計した発電プラントは、土地利用上の制約が殆どなかったため、追尾架台システム間のスペースを大きく取り朝夕の影による発電ロス1.5%まで小さくした。しかし実際のプラント建設は区画化し決定された土地面積にどれだけ設置可能でどの程度の発電量が得られるか、すなわち単位数敷地面積当たりの年間発電量も重要なファクタとなる。

そこで当社CPVシステムの場合、どこまで狭い土地に設置可能であるかについても検討した。

設置容量（定格）を本CPV発電プラントと同じ823kWと固定し、CPVの追尾架台動作の干渉が起こらない範囲で最密に設置した場合、典型的なSi-PVシステムの場合と本プラントの場合で比較したのが表1である。

本結果から、当社CPV発電プラントの所要面積は、最大で本プラントの1/3程度に縮小することが可能で、典型的なSi-PVよりも小さくすることが可能であることが判った。この際、面積縮小に伴い隣接CPVシステム間の影による損失は11.5%まで上昇するが、その相応分（10%）設置基数を増やすことで年間発電量を維持可能であることが判った。

またレイアウトを最密化すると単位数敷地面積当たりの発電量は、Si-PV典型値の約1.5倍となることも確認した。

表1 CPVプラントの所要面積

	Si-PV 典型値	本プラント	最密に設置 した場合
所要敷地面積 [ha]	1.21	2.71	0.90
影による発電損失 [%]	4	1.5	11.5

7. 結 言

高日射地域で威力を発揮する集光型太陽光発電（CPV）システムの本国モロッコ王国ワルザザートにおける20kW実証システムを用いた発電評価において、併設したSi-PVのシステムと比較してモジュール面積当りの発電量が1.97倍、実効定格当りの発電量が約1.23倍であることを確認した。

又、1MW級発電プラントを併設し、発電実証試験を実施中である。その中でメガワット級プラントに発電システムを拡張した場合においても想定通りの発電量を得られることを確認した。プラント所要面積においても典型的なSi-PVプラントと同等以上が可能であることが判った。

今後更なる大型発電プラント導入に向け、システム稼働率および出力係数（PR）の最大化に努めて、CPVメガワット級発電プラントの有効性を明らかにしていく。

8. 謝 辞

2015年に設置した実証システムの一部は、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」の支援を受けたものである。また2016年に設置した実証プラントは、モロッコ王国のモロッコ持続可能エネルギー庁（MASEN）との共同実証プロジェクトとして特別にサポートを受けて実施しているものである。

用語集

※1 CSTC

Concentrator Standard Test Conditions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

分校放射照度分布 = AM1.5D (IEC60904-3, ASTM G173)

セル温度 = 25°C、風速 = 0m/s

※2 STC

Standard Test Conditions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IEC60904にて規定。

全天日射強度 (gni) = 1000W/m²

分校放射照度分布 = AM1.5G (IEC60904-3, ASTM G173)

セル温度 = 25°C

※3 実効定格

CPVとSiPVの定格を比較する場合に適用する実効的な公称出力値。CPVの基準入射エネルギーとなる直達日射強度 (dni) とSi-PVの基準入射エネルギーとなる全天日射強度 (gni) の基準スペクトル (IEC60904-3, ASTM G173) のエネルギー量を基に決定したCPV定格。具体的にはCSTC条件の内、直達日射強度 (dni) を900W/m²とした時の出力値。

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) Solargis s.r.o.
[URL] <http://solargis.com/assets/graphic/free-map/DNI/Solargis-World-DNI-solar-resource-map-en.png>
- (5) 三上 壘 他、「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」、SEIテクニカルレビュー第188号、PP.123-127 (2016)
- (6) 住友電工プレスリリース、「モロッコ王国での集光型太陽光発電 (CPV) プラント運用実証開始について」
[URL] <http://www.sei.co.jp/company/press/2016/11/prs103.html>
- (7) Fraunhofer ISE, Press Release
[URL] <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html>
- (8) Azur Space, CPV Solar Cells
[URL] <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells>
- (9) Fraunhofer ISE & NREL, Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) technology
[URL] <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cpv-report-ise-nrel.pdf>
- (10) NEDO, NEDO PV Challenges
[URL] <http://www.nedo.go.jp/content/100573590.pdf>

(11) JICA事例紹介

[URL] https://www.jica.go.jp/activities/schemes/priv_partner/kaihatsu/case/mor_01.html

モロッコ国 フルザガトにおける集光型太陽光発電システム (CPV) 普及促進事業報告書 (先行公表版)

[URL] <http://libopac.jica.go.jp/search/detail.do?rowIndex=1&method=detail&bibId=1000030533>

執筆者

安彦 義哉* : パワーシステム研究開発センター
グループ長



三上 壘 : パワーシステム研究開発センター
主査



飯屋谷和志 : パワーシステム研究開発センター
博士 (工学)



田村 真士 : パワーシステム研究開発センター



杉山 開路 : パワーシステム研究開発センター



上山 宗譜 : パワーシステム研究開発センター
部長



*主執筆者