

PVの多様な設置形態を可能にする フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュール

Film-Based Perovskite PV Module with Light Weight and Flexibility to Accommodate Various Styles of Installation

都鳥 颯司 TODORI Kenji 宮内 裕之 MIYAUCHI Hiroyuki

我が国は、2050年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロにすることを目指している。こうした中、次世代太陽電池としてペロブスカイト結晶構造の材料を用いたフィルム型ペロブスカイト太陽電池が注目されている。結晶シリコン太陽電池に比べて軽量でフレキシブルな形状に対応可能なことから、従来設置できなかった場所への適用が可能になり、太陽光発電(PV)の発電量増加に貢献すると期待されている。

東芝は、ペロブスカイト層の成膜プロセスの改良などによって、大面積で高効率のペロブスカイト太陽電池モジュールの実用化を推進しており、今回、受光部サイズ24.15×29.10 cm、エネルギー変換効率^(注1)14.1%のフィルム型モジュールを開発した。また、適用先の一つとして、農業用ハウスをモチーフに設置形態を検討した。

The Japanese government is committed to reducing greenhouse gas emissions to net zero by 2050. In this context, film-based perovskite photovoltaic (PV) cells using material with a perovskite crystal structure are currently attracting attention as next-generation PV cells. Due to their flexibility and lighter weight compared with crystalline silicon PV cells, film-based perovskite PV cells are expected to contribute to an increase in the amount of electricity generated by PV systems by making it possible to expand their application to locations where conventional PV systems cannot be installed.

Toshiba Corporation has been working toward the practical realization of a film-based perovskite PV module with a large area and high efficiency by improving the perovskite layer forming processes. We have now developed a prototype module with dimensions of 24.15 × 29.10 cm that achieves an energy conversion efficiency of 14.1%. Concurrently, we have confirmed the potential of perovskite PV modules through feasibility studies centering around their installation on agricultural greenhouses.

1. まえがき

2015年12月のパリ協定を踏まえて、2020年10月、我が国でも2050年までに二酸化炭素(CO₂)などの温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする方針が示された。これを受けて、主力電源として再生可能エネルギー(以下、再エネと略記)の利用拡大が求められている。再エネとして、結晶シリコン太陽電池を用いたメガソーラーが普及してきたが、近年、PVの設置に適した場所が減少してきている。特に、都市部においては、旧来型のメガソーラーの設置は困難である。

このような状況の下、フィルム型の太陽電池が注目されている。建屋への荷重の負担の少ない軽量性と、曲面形状に貼り付けられるフレキシブル性を備えたフィルム型ペロブスカイト太陽電池は、従来とは異なる多様な設置形態があると分析されている。具体的には、体育館、倉庫、展示会場、工場など、屋根の耐荷重が低く、従来の太陽電池では困難な建物への設置が考えられる。壁・窓・曲面部などにも設

(注1) 太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換する効率。

置でき、ZEB (Net Zero Energy Building) や ZEH (Net Zero Energy House) の普及にもつながると期待されている。その上、活性層材料の製造プロセスにおいて、結晶シリコン太陽電池が1,000～1,500℃の高温を必要とするのに対して、フィルム型ペロブスカイト太陽電池は150℃以下の低温であることから、製造に伴う電力量、すなわち温室効果ガスの排出量を低減できると考えられる。

また、固定価格買取(FIT)制度の終了や災害に対する電力レジリエンス(危機耐性力)への期待から、自家発電・地産地消型のPVが拡大していくと考えられ、2030年の自家発電市場は4.2 GWまで伸長すると試算されている⁽¹⁾。このため、人口の多い都市部でPVの設置要求が高まり、設置の自由度が高いフィルム型ペロブスカイト太陽電池は都市部での再エネ導入に適していると考えられる。都市部においてもバーチャルパワープラント(VPP)の技術を活用した、メガソーラーの形成も可能になる。

更に、建屋への荷重の負担の少ない軽量性のフィルム型ペロブスカイト太陽電池は運搬や設置がしやすいため、アジアやアフリカなどの電力グリッドが普及していない国や地域

にも浸透すると予想される。

ここでは、東芝が実用化に向けて開発を進めているフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの特長や、性能、その適用例について述べる。

2. フィルム型ペロブスカイト太陽電池の概要

ポリマーフィルム基板上に作製できる塗布型太陽電池としては、有機薄膜太陽電池、色素増感太陽電池、及びペロブスカイト太陽電池が知られている。これらの中でペロブスカイト太陽電池は、2020年12月時点で 0.0954 cm^2 という小さな面積ではあるが、単結晶シリコン太陽電池と同程度のエネルギー変換効率25.5%が報告され²⁾、塗布型太陽電池の中で最も高いエネルギー変換効率を得られている。ペロブスカイトの名称は、光を吸収して電荷を発生する活性層材料がペロブスカイト結晶構造であることに由来し、具体的な材料は多数存在する。

ペロブスカイト太陽電池セルの構造には、既報のプレーナー型を採用している³⁾。酸化インジウムスズ(ITO: Indium Tin Oxide)などを用いた透明電極はシート抵抗が大きく、モジュール構造としては集積型が適している。結晶シリコン太陽電池モジュールは、一部のセルが影になると、ストリング(太陽電池モジュールを直列に接続したブロック)単位で発電出力をバイパスさせてシステムから切り離す必要があるため、発電量が大きく低下してしまう。ロールトゥロール(Roll to Roll)方式^(注2)での製造による長尺の集積モジュールでは、銅インジウムセレン太陽電池(CIS: Copper Indium Selenide Solar Cell)集積型モジュールと同様に、セルの長さを長くすることで影による発電量の低下が避けられ、都市部での設置で問題となる影による影響を最小限に抑えられる。これは、セルの一部でも太陽光が照射されれば、セルが回路の一部として機能するからである。

高効率になる要因の多くは、ペロブスカイト結晶層に由来する。標準的なペロブスカイト材料であるヨウ化鉛メチルアンモニウム($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$: 以下、 MAPbI_3 (Methylammonium Lead Iodide)と略記)は、バンドギャップが1.55 eVであるが、鉛(Pb)の一部をスズ(Sn)に置き換えたり、カチオンサイトのメチルアンモニウム(CH_3NH_3 : 以下、MAと略記)をホルムアミジウム($\text{CH}(\text{NH}_2)_2$: 以下、FAと略記)に置き換えたり、ハロゲンサイトのヨウ素(I)を臭素(Br)や塩素(Cl)に置き換えたりすることで、バンドギャップをエネルギー変換効率が30%を超えるショック

レークワイサー限界(Shockley-Queisser Limit)^(注3)に近づけることができる。このことは、シリコンよりも高効率化できるポテンシャルを持っていることを示している。

また、ペロブスカイト層は有機無機ハイブリッド型多結晶であり、結晶シリコンとは異なる柔らかい特徴を持っている。したがって、雹(ひょう)やあられなどが降って割れることは少なく、結晶シリコン太陽電池のように、厚いガラスで保護する必要がない。このため、軽量化できる。

3. 高効率化技術

ペロブスカイト太陽電池は、小面積セルの特性を維持しながら大面積化することが難しい。フィルムモジュールの高効率化技術は、大面積にしても小面積セルの効率を落とさない技術であるといえる。ペロブスカイト太陽電池の作製プロセスの中では、ペロブスカイト層の成膜プロセスで太陽電池の特性が大きく変わるため、塗布方法の選択やそのプロセス開発が重要な意味を持つ。当社は、独自のノウハウにより機能性インクを成膜できるメニスカス塗布技術⁽³⁾を保有しており、ペロブスカイト太陽電池の開発にも適用している。

メニスカス塗布は印刷技術の一つであり、フィルム基板とアプリケーションヘッドの間に設けたギャップに塗布溶液を注入し、表面張力に由来するメニスカス(円弧状の液面)で制御する塗布方法である。機能性インクを薄く、均一に、かつ大面積に塗布できる特長がある。モジュールは、セルを直列に接続した構造であり、電気特性の悪いセルが存在するとモジュールの特性が低下するため、大面積で均一な塗布技術が重要となる。

キーとなるペロブスカイト層の成膜は、2ステップ法で行っている。ペロブスカイト材料が MAPbI_3 の場合、ヨウ化鉛(PbI_2)膜を形成した後にヨウ化メチルアンモニウム($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$: 以下、MAIと略記)を塗布し、 PbI_2 膜とMAI溶液を反応させて MAPbI_3 を形成する。基板の状態によってはインクのはじきなどで欠陥が生じるが、 PbI_2 層の塗布条件を改良することで、そのはじき欠陥を低減することに成功した。また、 PbI_2 のインク条件や PbI_2 層の後処理条件の改良、及びMAIインクの改良で、500 nmよりも長波長側の吸光度を向上させることができた。更に、塗布条件や乾燥条件が重要であり、これらを適正に制御することでペロブスカイト多結晶膜の均一性が向上し、セルごとの特性ばらつきを低減できた。

その結果、受光部サイズ $24.15 \times 29.10\text{ cm}$ (面積 703 cm^2)の44セル直列フィルムモジュールで、エネルギー変換効率14.1%を実現した。このモジュールの電流-電圧特性と電流密度-セル電圧特性を、**図1**に示す。ヒステリシスが認め

(注2) シート状の材料やデバイスの製造において、一つの製造プロセスの前と後でロール状に巻き付けながら大量生産を行う方法。

(注3) 1961年にショックレーとクワイサーが提唱した、どのような半導体を用いても太陽電池のエネルギー変換効率は32.7%を超えないという限界。

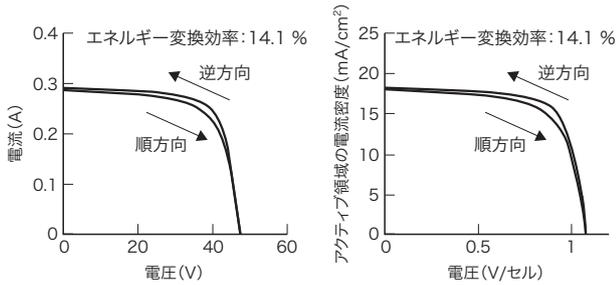


図1. 受光部サイズ24.15×29.10 cmの試作モジュールの電流-電圧特性

1セル当たりの電圧として1 V以上が得られており、ヒステリシスも比較的小さいことが分かる。電流密度値は、セル間ギャップを除いたアクティブ領域の面積で電流値を割ったものである。

Current-voltage characteristics of prototype film-based perovskite PV module with dimensions of 24.15 × 29.10 cm

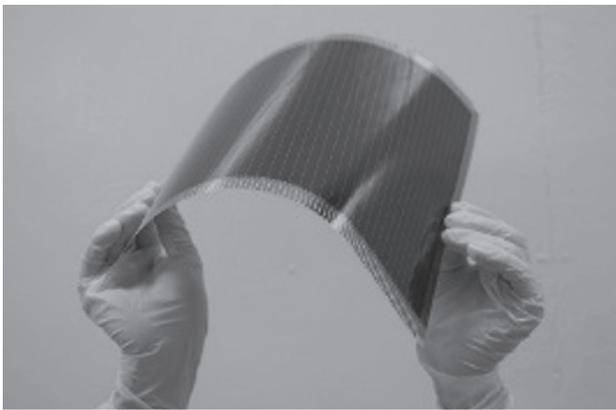


図2. フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの試作品

試作したフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールは、軽量でフレキシブル性に優れている。

Prototype film-based perovskite PV module

られるが、これはペロブスカイトでよく見られる現象で、ペロブスカイト層に起因するキャパシター成分が影響していると考えられる。得られたエネルギー変換効率14.1%は、大面積のフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールとしては世界トップ^(注4)であり、大きな製品競争力となる。また、5×5 cmサイズのフィルムモジュールでエネルギー変換効率16.7%、27×29 cmサイズのガラスモジュールでエネルギー変換効率16.1%が得られた。

フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの試作品を、図2に示す。

4. 耐久性の向上技術

ペロブスカイト太陽電池の劣化要因は、セル構造やモ

(注4) 2021年1月現在、当社調べ。

ジュール構造によって異なる。当社が開発しているプレーナー型ペロブスカイト太陽電池の劣化要因は、以下の三つであることが分かった。

- (1) ペロブスカイト層を形成しているハロゲンイオンとカチオンイオンが、セル内を移動する。
- (2) 移動したハロゲンイオンが、金属電極と反応して腐食を生じる。
- (3) カチオンであるMAイオン(MA⁺)が電子と結合してメチルアミン(CH₃NH₂)となり、セル外へ揮発する。

(1)のイオンの移動は、ペロブスカイト層の組成を混晶(ミックスペロブスカイト)にすることで抑制され、プレーナー型においても耐久性が向上することが実験で確認できた。また、(2)については、金属電極に当初は銀(Ag)を用いていたが、腐食しにくい金属を用いることで、耐久性が向上した。(3)については、ミックス系でのカチオン組成であるMAの大部分をFAに置き換えることで、耐久性が向上することが実験で確認できた。

また、イオンの移動は結晶界面から始まるため、界面のパッシベーション(不動体化処理)で耐久性が更に向上することもシミュレーションから明らかになった。MAPbI₃のペロブスカイト太陽電池では、構成するイオンの移動を防ぐことができれば、耐久性が向上すると考えている。85℃の耐熱試験では、ペロブスカイト層に(FAMA)Pb(IBrCl)₃を用いた1×1 cmのガラスセルで1,000時間後のエネルギー変換効率は初期値の約95%を、5×5 cmフィルムモジュールで550時間後のエネルギー変換効率は初期値の約90%を、それぞれ維持できることを確認した。

5. ペロブスカイト太陽電池の適用先

ペロブスカイト太陽電池は、その軽量でフレキシブルな形状対応が可能な特長を生かし、耐荷重性の低い屋根、ビルなどの側壁・窓、農業用ハウス、電気自動車・鉄道などのインフラ設備への適用などが想定される。

PVなどの再エネの活用については、都市郊外では設置場所を確保しやすいがエネルギー需要は少なく、一方で都市近郊ではエネルギー需要は多いが設置場所が確保しにくいという問題がある。解決策の一つとして、従来の結晶系シリコン太陽電池では設置できなかった、建造物の表面に軽量でフレキシブルな形状対応が可能なフィルム型ペロブスカイト太陽電池を用いることが考えられ、PVの設置量を増やすことが期待される。

直近の取り組みとして、耐荷重性の低い構造物の一つである農業用ハウスをモチーフに設置形態を検討した(図3)。農業用ハウスは、比較的軽量の鋼材に透明な樹脂シート



図3. 農業用ハウスへの設置例

農業用ハウスに適用することで、スマート農業に使用する電気機器へ電力を供給できる。

Example of installation of test PV modules on agricultural greenhouse

をかぶせた簡易な構造であるため、フィルム型ペロブスカイト太陽電池の固定方法や設置場所を検証するのに適している。また、得られた電力は、農業ハウス内の温湿度センサーや、IoT (Internet of Things) 機器に利用され、データに基づくスマート農業により、農作物の多収穫・高品質生産に役立てられる。更に、シースルーのフィルム型ペロブスカイト太陽電池を用いることで、農作物の生育と発電を両立できる。

これらの検証を通じて、結晶系シリコン太陽電池では設置できなかった新たな設置場所を見いだしてだけでなく、これまで難しいとされてきた建造物の表面などへの設置方法を確立し、適用先を広げていく。

6. あとがき

今回、PV発電量の増大に貢献するフィルム型太陽電池として、当社のフィルム型ペロブスカイト太陽電池の開発状況について述べた。24.15×29.10 cmサイズのフィルムモジュールでは、世界トップのエネルギー変換効率14.1%が得られており、様々な設置形態の検討も進めている。

この研究は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」を受けて実施したものである。また、2020年度に開始したNEDOの委託事業「太陽光発電主力電源化推進技術開発」では、2024年度末までに、モジュールのエネルギー変換効率23%、耐久性15年、モジュール質量3 kg/m²以下の達成を目指して研究

開発を進めている。これらの成果を基に、2050年までの国内温室効果ガス排出量の実質ゼロ化に貢献していく。

文献

- (1) 富士経済 エネルギーシステム事業部編. 2020年版 太陽電池関連技術・市場の現状と将来展望. 富士経済, 2020, 258p.
- (2) Green, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 57). Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2021, **29**, 1, p.3-15.
- (3) 都鳥顕司, ほか. 軽量・フレキシブルなフィルム型ペロブスカイト太陽電池ミニモジュールの高効率化. 東芝レビュー. 2018, **73**, 3, p.13-17. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2018/03/73_03pdf/a04.pdf>. (参照 2021-03-25).



都鳥 顕司 TODORI Kenji
研究開発センター ナノ材料・フロンティア研究所
トランスデューサ技術ラボラトリー
応用物理学会・日本物理学会・日本光学会会員
Transducer Technology Lab.



宮内 裕之 MIYAUCHI Hiroyuki
東芝エネルギーシステムズ (株)
グリッド・アグリゲーション事業部
再生可能エネルギー技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.