

PSCモジュールで世界最高効率を実現

(株)東芝

PSCとCu₂Oの開発に注力

東芝は次世代太陽電池 (PV) の技術開発を加速している。世界中で開発競争が激化するペロブスカイト太陽電池 (PSC) については、NEDOプロジェクトに参画して実用化研究に取り組んでおり、2018年には700cm²サイズのフレキシブルPSCモジュールで世界最高効率を達成した。

一方、無機材料を用いた次世代PVとして注目しているのが亜酸化銅 (Cu₂O) である。19年1月にCu₂Oを用いたPVセルの透明化に世界で初めて成功しており、同年6月には、Cu₂Oと結晶シリコン (Si) を組み合わせたタンデム型PVで変換効率23.8%を実現した。

OPVで培った成膜技術を活用

東芝は長年、軽量&フレキシブルな次世代PVの開発に取り組んでいる。最初に着目したのは色素増感太陽電池 (DSC) で、1990年代には、エネルギーハーベスティングを想定した有機薄膜太陽電池 (OPV) の開発を開始した。OPVの発電層を均一成膜する技術として、メニスカス塗布法という高精度の印刷技術も開発した。

メニスカス塗布法は界面張力により隙間の液体の表面がつくる局面を利用した塗布技術である。塗布とパターンニングを同時に行うことができるため、塗布後のスクライプが不要で、プロセスの高速化が期待できる。

この塗布技術により、OPVの性能が大幅に向上した。14年には、1cm角セルで世界最高レベルとなる11.2%の変換効率を達成したほか、サブモジュール (5cm角) でも9.9%の世界最高効率 (当時) を実現した。

そして現在、開発資源を集中しているのがPSCである。PSCはOPVの開発で培った塗布技

術を応用できるうえ、何と言っても、変換効率が高いのが大きな魅力だ。また、低温で塗布形成できるため、フィルム基板を使えば軽量&フレキシブルのモジュールが可能だ。

自家消費、分散電源が主流になる将来のPV市場では、設置制約の少ない軽量&フレキシブルPSCが有望と東芝は考えている。

フレキシブルPSCで世界最高効率

東芝は14年からPSCの開発を開始したが、15年にはNEDOプロジェクト「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発/ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発」に参画しPSCの開発を加速している。同プロジェクトでは、積水化学工業と連携し、超軽量PSCモジュールの開発に取り組んでいる。

そして、18年には、フィルム基板 (PEN基板) を用いたPSCでは世界最大となる703cm² (24.15cm×29.10cm、44セル直列) のモジュールの開発に成功し、同面積では世界最高となる変換効率11.7%を達成した。

OPVで開発したメニスカス塗布技術をPSCにも適用した。発電層の材料となるインク組成を工夫し、基板上でのヨウ化鉛 (PbI₂) とヨウ化メチルアンモニウム (CH₃NH₃I) の反応を制御するなど、ペロブスカイト結晶成長条件の最適化を行うことで、大面積での面内膜厚均一性、結晶膜質の均質性を高めることに成功した。面内膜厚分布は±7%、材料使用効率は90%以上を実現している。

ペロブスカイト発電層の塗布プロセスはスケールアップに適した2ステッププロセスを採用した。発電層は一般的なMAPbI₃ (ヨウ化鉛メチルアンモニウム) で、Cs (セシウム) やRu (ルビジウム) のようなアルカリ金属は添加してい

ない。

第1段階でPbI₂溶液、第2段階でMAI溶液をそれぞれ塗布するが、インク組成の工夫や乾燥条件の最適化でペロブスカイトの膜質が改善した。

PSCは25年ごろに商業化

150°C以下の低温プロセスのため、セル構造はTiO₂ナノポーラス層を用いないプレーナ型となっている。有機系材料を用いた正孔輸送層および電子輸送層もメニスカス法で塗布形成した。また、ITO透明電極の組成を見直したことで、低温でも多結晶化することに成功し、シート抵抗を下げる事ができた。

さらに、フィルム基板向けスクライブ技術やセル間への補助電極配置などで、セル間の抵抗値がガラス基板並みに下がり変換効率が改善した。

フィルム基板を用いた703cm²のモジュールで11.7%の世界最高効率を実現したが、現在は12.25%（社内測定）まで効率が改善している。また、ガラス基板（802cm²）では11.64%、5cm角（27.04cm²、8直列）のフィルム基板では14.8%の変換効率を実現している。

今後は5cm角をさらに向上するプロセス、構造を開発し、24cm×29cmモジュールへ適用する。

これまで、大面積化や均一成膜といった製造技術の開発に注力してきたが、今後は新たな材料探索による高効率化や耐久性向上の開発を強化する。最近では、Ag裏面電極を用いた逆構造PSCで耐久性が改善する技術を開発した。Ag電極と発電層（MAPbI₃）の間にイオンブロック層（ITO）を挿入することで、発電層からのヨウ素の拡散を防止し、Ag電極の腐食を抑制する技術を開発した。

さらに、イオンブロック層があることでAg電極が薄型化できることから、両面受光型のシー

スルーPSCが実現できるという。

早ければ、30cm角モジュールで効率20%を実現し、25年ごろの商業化を予定している。商業化に関しては、他社との協業も視野に入れているという。

低コストの4端子タンデム

PSCと並んで東芝が開発に力を入れているのがCu₂Oである。Cu₂Oはバンドギャップが2eVの直接遷移型半導体で、通常はp型伝導を示す。毒性がない、安価、資源的に豊富といった多くの利点があり、1980年代に米国を中心に研究が活発化したが、変換効率がなかなか上がらなかった。

国内では、金沢工業大が2000年代から積極的に研究開発を続けており、17年には、p層にNa添加のCu₂O、n層には3元系酸化物であるZGO（Zn₂GeO₄）を組み合わせたセルで変換効率8.23%を達成した。これはCu₂O系PVでは世界最高効率になる。

Cu₂Oは単体でも14～15%の変換効率が狙えるが、東芝はこのCu₂Oをタンデム型のトップセルに応用することを考えている。タンデム型はGaAsなどIII-V族化合物を用いた高効率PVが実用化されているが、製造コストが結晶Siに比べて数百倍から数千倍と高いのが大きな課題となっている。

一方、現在主流の結晶Siは変換効率が高く、製造コストも急激に低下しているが、変換効率が理論限界に近づいており、これ以上の大幅な伸びは期待できない。東芝はこの間を埋める技術としてCu₂O/Siのタンデム型を提案している。

タンデム型PVはバンドギャップの異なる2種類のPVを積層することで、太陽光の吸収波長領域が拡大し、高い発電量が期待できる。素子の構造で見ると、2種類の独立したPVを機械的に積層した4端子型と、異なるPVをモノリシックに直列接続した2端子型がある。