

カーボンニュートラルとサーキュラーエコノミーに貢献する次世代太陽電池

(東大院総合¹・有機系太陽電池技術研究組合²) ○瀬川 浩司^{1,2}

Next generation solar cells contributing to carbon neutral and circular economy (¹*Dep. of General Systems Studies, Grad. School of Arts and Sciences, The Univ. of Tokyo*, ²*Research Association for Technology Innovation of Organic Photovoltaics*) ○Hiroshi Segawa^{1,2}

The studies of the next-generation high-performance solar cells have been mainly conducted about the perovskite solar cells (PSCs). The power conversion efficiency (PCE) over 26% was achieved about twelve years from the advent of the PSCs. At the next stage, it is demanded that these photovoltaics contribute to the carbon neutral as well as circular economy. In this lecture, the current situation and the future prospects of the next generation solar cells will be reviewed based on the state-of-the-art technology trend of the PSCs.

Keywords : Organometal Halide Perovskite; Perovskite Solar Cell; Next Generation Photovoltaics; Carbon Neutral; Circular Economy

有機金属ハライドペロブスカイトを光吸収層に用いた太陽電池は「ペロブスカイト太陽電池 (PSC)」と総称され、現在では社会の認知度も上がってきた。その変換効率は、小面積セルでは既に 26% を超えており、次世代高性能太陽電池として確固たる地位を固めている。2024 年 12 月に政府が発表した第 7 次エネルギー基本計画の原案にも、PSC の社会実装を進めることが明記され、その目標値は 2040 年に 20GW (2000 万 kW) となっている。日本のカーボンニュートラルの達成には、さまざまな場所に設置可能な太陽電池が不可欠であり、日本企業が進めている PSC 軽量モジュールや PSC シースルー型建材などの実用化を目前に控え PSC が国の目標の一角を占めることになったのである。加えて経済安全保障の観点でも、PSC の光吸収層の重量の約 6 割を占めるヨウ素が国産 (世界生産量 2 位でシェアは約 3 割) である点など強みがある。さらに、発電層の厚さが 1 ミクロン程度と極めて省資源でもあり、日本にとっては大きなアドバンテージがある。塗布製造による大量生産が進めば、原理的には劇的な低コスト化も期待できる。課題は大面積化した場合の高い変換効率の維持と長寿命化である。また、主要な原料に鉛を含むため、回収プロセスなどを含めたサーキュラーエコノミー対応も求められる。

一般的に、高性能の半導体デバイスは高純度の原料を用いて高度な蒸着や結晶成長などのプロセスを経て欠陥なく作成するのが普通だが、ペロブスカイト太陽電池はこの常識を完全に覆している。その理由は、有機金属ハライドペロブスカイトの特殊なバンド構造にある[1]。最も基本的な構造の $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ の場合、伝導帯だけでなく価電子帯も反結合性の軌道から構成されている。このため、ハロゲンや金属が物理的に脱落してできた欠陥準位は禁制帯の中に現れにくく、伝導帯のすぐ下の浅い位置か価電子帯の中に埋もれてしまう。このため、塗布プロセスでハロゲンや金属が脱落した構造欠陥ができて禁制帯の中に電子状態としての不純物準位が現れにくいのである。このことが、塗布によって構造欠陥のある薄膜でも高性能太陽電池ができる理由になっている。また、有機金属ハライドペロブスカイトは直接遷移型で吸収係数が高

く、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の厚さでも100%可視光を吸収する。さらに電子とホールを同時に移動させることができる性格を持ち、バンド計算から求められる電子やホールの有効質量は0.2~0.3程度と非常に軽いうえ、実験的には電子とホールの結合エネルギーが極めて小さく、光吸収によって生じた励起子が簡単に解離して電荷分離が起こり電子輸送層とホール輸送層に移動できるのである。有機金属ハライドペロブスカイトは、太陽電池材料としてはまさに理想的な材料と言えよう。

これまでに報告されたペロブスカイト太陽電池は、①透明導電電極基板/酸化物半導体緻密層/酸化物半導体多孔質層/ペロブスカイト層/正孔輸送層/対極という層構造の「ナノ構造型(mesoscopic)」、②透明導電電極基板/酸化物半導体緻密層/ペロブスカイト層/正孔輸送層/対極という層構造の「平面ヘテロ接合型(planar hetero-junction)」、③透明導電電極基板/正孔輸送層/ペロブスカイト層/電子輸送層/対極という層構造の「逆構造型(inverted)」の3種に大別できる。現在までに発表された論文中の変換効率最高値を概観すると、2021年頃まではナノ構造型が変換効率トップにあることが多かったが、最近では SnO_2 緻密層を用いた平面ヘテロ接合型や逆構造型のほうが優位となっている。効率23%以上を報告した例のうち、 SnO_2 平面ヘテロ接合型が約6割、ナノ構造型が約2割、 TiO_2 平面ヘテロ接合型と逆構造型がそれぞれ約1割となっている。太陽電池出力は、開放電圧(Voc)、短絡電流密度(Jsc)、曲線因子(FF)の積で与えられるが、最近報告例が目立ち始めた逆構造型はFFの高さがPCE向上に寄与している。逆構造型デバイスでは、正孔輸送層としてカルバゾール系化合物の末端にホスホン酸のついた低分子の自己組織化単分子膜(SAM)を用いたものが報告されたのをきっかけに性能向上が進んでいる。従来、順構造型に比べて逆構造型の性能が低い理由として正孔輸送層が入射光の一部を吸収してしまうこと、ペロブスカイト層内の電子と正孔の移動度に違いがあること、透明導電電極や対極材料のフェルミ準位との組み合わせで不利になること、などが指摘されていたが、実は検討数が不足していただけであった可能性も高い。さまざまな材料の長所・短所をうまく組み合わせることでデバイス全体の性能向上を図る検討が今後も期待される。

以上の構造の区別は、研究開発の上では重要であるが、社会実装の観点では、基板がフィルムであるかガラスであるか、ワットあたりの重量がどれくらいであるかの方が重要なファクターとなる。また、建材一体型の場合は、発電性能よりもデザイン性や施工性のほうが重要なファクターとなる。これらについては、現在進みつつある様々な実証事業の中で、よりよい活用方法が見いだされていくことになるだろう。本講演では、PSCの最新の研究開発動向に基づいて、カーボンニュートラルとサーキュラーエコノミーへの対応についても言及する。

謝辞：本研究の一部は、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)の支援により行われたものである。

文 献

- [1] G. Giorgi, J. Fujisawa, H. Segawa, K. Yamashita, *J. Phys. Chem. Lett.*, 4, 4213-4216 (2013).