

色素増感太陽電池

山中 良亮

ソーラーシステム開発本部 次世代要素技術開発センター

地球温暖化対策として、二酸化炭素（CO₂）排出量を削減する最有力候補である太陽電池が脚光を浴びています。昨年夏に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による太陽光発電ロードマップPV2030が、発電コスト7円／kWh以下を視野に入れたPV2030+に見直されるなど、太陽電池の将来的な技術開発には、様々な開発アプローチが必要不可欠となってきました。その中で、構造がシンプルで、材料や製造プロセスが安価なことから低コスト太陽電池として、色素増感太陽電池が注目されています。本稿では、色素増感太陽電池の概要を紹介します。

1 はじめに

色素増感太陽電池は、1971年に発表されたクロロフィルを被覆した酸化亜鉛を、ヒドロキノンを含む電解液に浸漬した光増感太陽電池に端を発したとされています¹⁾。その後、1991年にスイスのローザンヌ工科大学のグレッツェル教授により、多孔質酸化チタンにルテニウム金属錯体を吸着させ、ヨウ素系電解液を用いた色素増感太陽電池²⁾が提案され、変換効率が飛躍的に向上されました。これを契機に全世界で研究が活発化し、現在では、変換効率は11%を超えるレベルまで向上しています。

2 色素増感太陽電池の原理

図1に典型的な色素増感太陽電池の構造を示します。透明導電膜（以後、TCOと記載）が形成されたガラス基板上に多孔質の酸化チタンが成膜されており、この多孔質酸化チタン膜は、直径10～20nmの酸化チタン微粒子（図2）から形成されています。この酸化チタンの表面に図3に示す色素（Ru金属錯体色素）を吸着させています。色素増感太陽電池に使用される色素はカルボキシル基などの官能基を持っており、こ

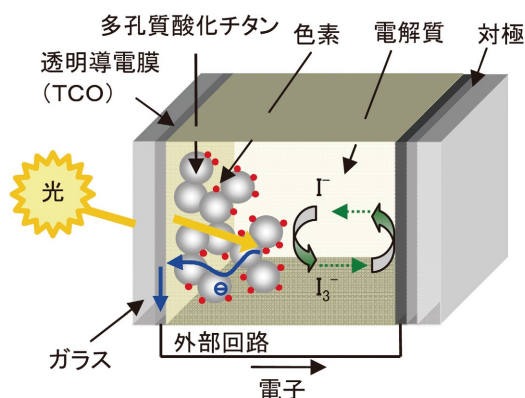


図1 色素増感太陽電池の構造

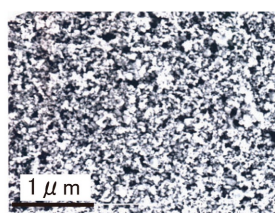


図2 酸化チタン微粒子

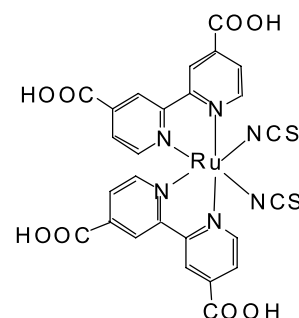


図3 代表的なRu金属錯体色素(N3色素)

のカルボキシル基と酸化チタンを脱水反応させることにより、酸化チタンと色素を化学結合させています。対向電極には酸化還元反応を活性化する触媒が形成されており、電極間に酸化還元性電解質を浸透させることにより、太陽電池が構成されています。

図4には色素増感太陽電池の動作概念図を示しています。太陽光を吸収した色素では、電子が励起され、その電子は10⁻¹²秒の時間オーダーで酸化チタンの伝導帯に注入され、外部回路へと運ばれます。酸化された色素は、電解質（I⁻）から電子を受け取り基底状態の色素に戻ります。

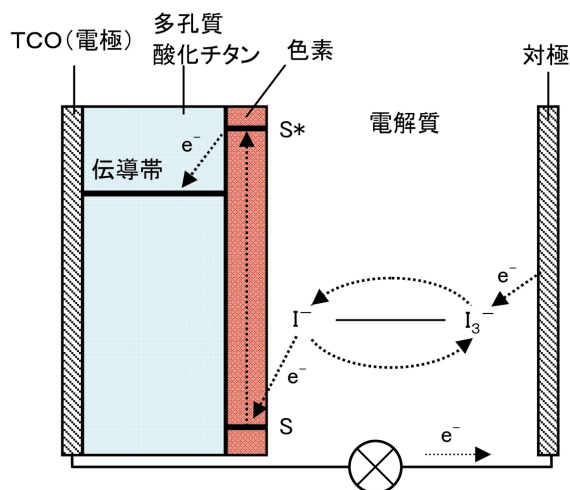


図4 色素増感太陽電池の動作概念図

Molecular Orbital) 準位を、吸着させる酸化チタンに適したエネルギー分布と空間分布に制御したことが挙げられます。

更なる高効率化技術としては、太陽電池セル内の色素が効率的に光を吸収できるような光マネジメント技術や、セル内部の各界面での反応抵抗や電解質イオンの拡散抵抗、電極の抵抗などの内部抵抗コントロール技術が必要となります。我々は、光マネジメント技術として、セル内部の光閉じ込め効果の指標としてヘイズ率を取り入れ、酸化チタン微粒子の粒径制御などにより、多孔質酸化チタン内部の光閉じ込めを実施し、出力電流を高めることができました。更に、内部抵抗コントロール技術として、色素増感太陽電池の抵抗解析に交流インピーダンス法を導入し、各界面での抵抗解析を実施、セル内部構造や材料開発にフィードバックすることで、内部抵抗を低減することに成功しました。これらの技術開発により、5mm角サイズで変換効率11.1% (2008年スペクトル補正により11.2%) を達成³⁾しており、色素増感太陽電池セルでは世界最高水準を実現しています (図6)。

す。一方、色素で酸化された電解質 (I_3^-) は対極まで拡散し、対極から電子を受け取り還元状態の電解質 (I^-) に戻ります。

次に、典型的な作製手順を図5に示します。TCO付き基板に、酸化チタン微粒子を分散させたペーストを塗布し焼成することにより、多孔質酸化チタン膜を作製します。これを色素溶液に浸漬させることにより、酸化チタン表面に色素を吸着させます。その後、対極との間に電解質層を形成させ、周囲を封止します。このように、色素増感太陽電池の作製工程には、真空プロセスや高温プロセスがないため (高くても 500°C

程度)、従来の太陽電池に比べ、プロセスコストを大幅に低減させることが可能とされています。

3 色素増感太陽電池の高効率化技術

1991年、色素増感太陽電池の変換効率を飛躍的に向上させた技術ポイントは、酸化チタン構造と色素の設計にあります。色素を吸着させる酸化チタンを多孔質にし、比表面積を広げることにより、吸着させる色素量を800~1000倍までに引き上げたこと、色素のLUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) /HOMO (Highest Occupied

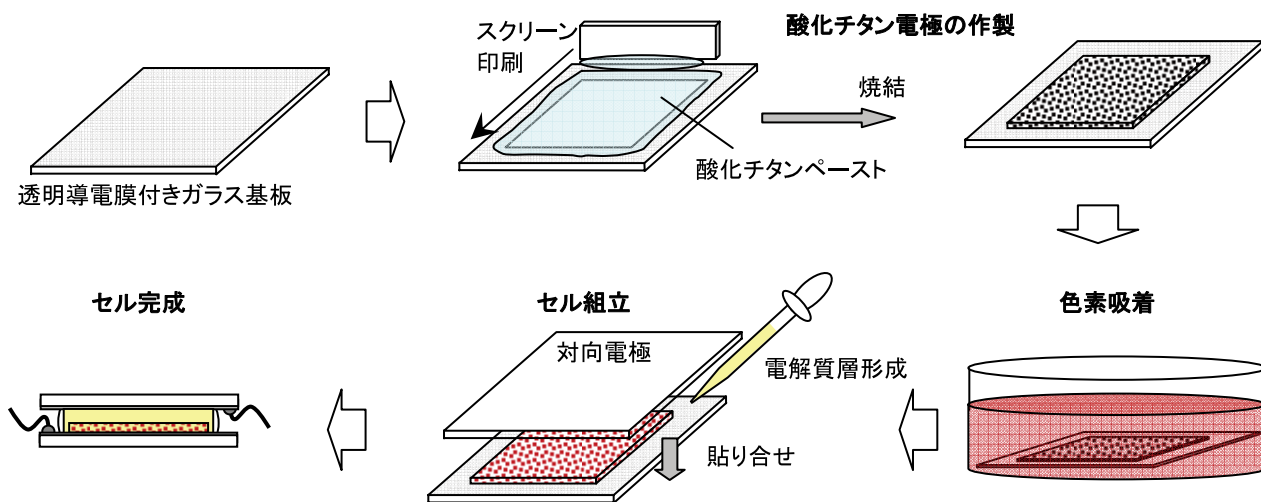


図5 色素増感太陽電池の作製手順

4 色素増感太陽電池の集積化技術

太陽電池は、出力を大きくするために受光面積を大きくしなければなりません。そのために、太陽電池セルを直列もしくは並列に接続する必要があります。薄膜シリコン太陽電池や色素増感太陽電池などの薄膜型太陽電池は、受光面となるガラス基板上に集積させる必要があります。色素増感太陽電池の集積構造は、様々な構造が提案されており、その中の一例を図7に示します。

(1) W型集積構造

図7 (1) に示す構造はW型集積構造といわれ、所定の場所に導電層ないしTCOが形成された2枚の基板上に一つおきに素子を作製し、2枚の基板上の素子が互い違いになるようにそれぞれの基板を張り合わせることで各セルを作製し、それぞれが直列接続されます。

(2) Z型集積構造

図7 (2) に示す構造はZ型集積構造といわれ、1枚のTCO付き基板上に素子を作製し、もう1枚のTCO付き基板を対極として使用します。素子を作製したTCO付き基板と対極を張り合わせて各セルを作製し、セルと隣り合う対極とを電氣的に接続させる接続層を作製することにより、それぞれが直列接続されます。

(3) モノリシック型集積構造

図7 (3) に示す構造はモノリシック型集積構造といわれ、Z型集積構造のTCO付き基板を1枚にした構造であり、酸化チタンなどの各層を順次下部層上に直接形成させて、最終的に、各セルを直列接続させる構造になっています。

特に、W型集積構造は2枚のTCO付き基板を張り合わせるだけで直列

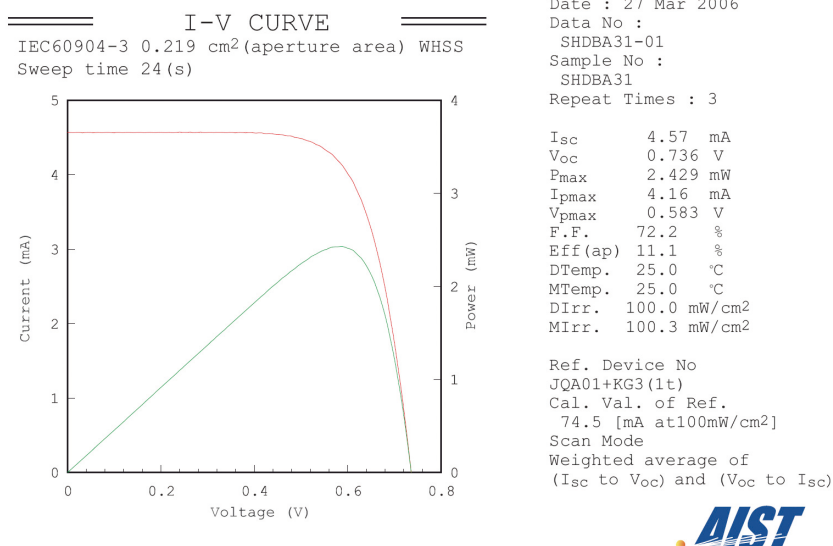


図6 公的機関で測定した色素増感太陽電池の世界最高性能 (2010年1月時点)

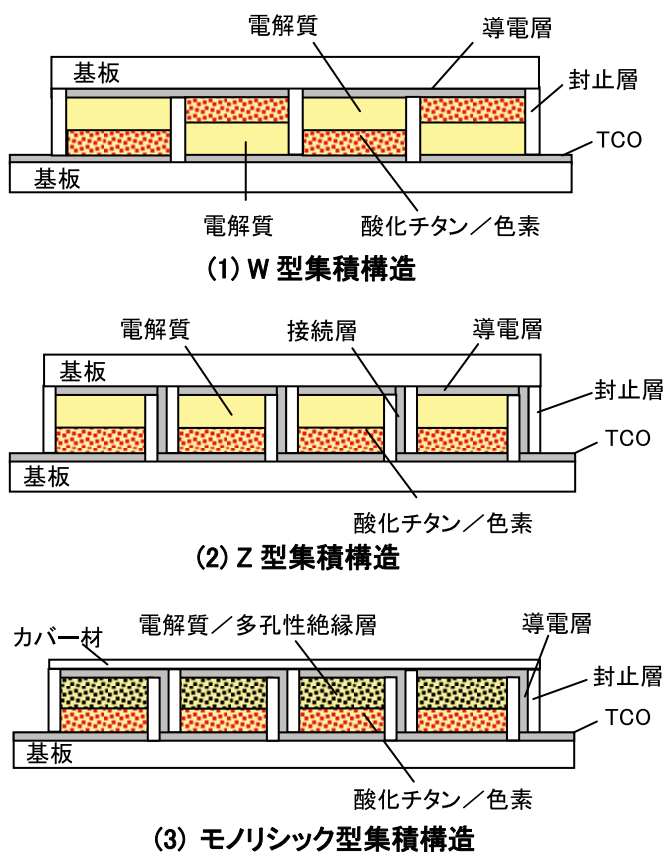


図7 色素増感太陽電池の集積構造

接続させることができるため、高密度な集積構造を簡単に形成することが可能となります。我々は、W型集積構造のプロセス検討を実施し、さらに、「色素増感太陽電池の高効率化技術」で培った技術をフィードバックさせることにより、5cm角サイズ

の集積型色素増感太陽電池で変換効率8.4%を達成し、色素増感太陽電池の集積構造では世界最高水準を実現しています⁴⁾。

5 おわりに

色素増感太陽電池技術は日進月歩

で発展中の技術であり、高効率化技術、集積モジュール化技術のほかに、信頼性に関する技術開発が重要となります。実用上求められる信頼性技術は、太陽電池を使用する環境などにより大きく変わることが想定されます。しかし、“光”、“温度”、“湿度”などの基本的な外乱が、どのようなメカニズムで性能に影響を及ぼすかななどの詳細は解明されておらず、性能変化および劣化の基本的な反応機構を解明していく必要があります。信頼性技術の確立に向け、このような観点からの技術アプローチが極めて重要と考えられます。

また、色素増感太陽電池の特長として、デザイン性やカラーバリエーションなどが挙げられます(図8)。発電デバイスの太陽電池としては、高い変換効率や長寿命は必須条件ですが、デザイン性やカラーバリエー

ションといった従来の太陽電池になりオプション機能を活かすことで、太陽電池の商品ラインナップの拡張の一役を担うことが期待されます。



図8 色素増感太陽電池のカラーバリエーション

参考文献

- 1) H. Tributsh and M. Calvin, Photochem. Photobiol., 14, 1971, 95.
- 2) B. O' Regan and M. Gratzel, Nature, 353, 1991, 737.
- 3) Y. Chiba, A. Islam, Y. Watanabe, R. Komiya, N. Koide, and L. Han, Jpn. J. Appl. Phys., 45, 2006, L638.
- 4) A. Fukui, N. Fuke, R. Komiya, N. Koide, R. Yamanaka, H. Katayama, and L. Han, Appl. Phys. Exp., 2, 2009, 082202.