

太陽電池の技術開発と今後の可能性について

シャープ株式会社 ソーラーシステム事業本部 副本部長兼次世代要素センター所長兼第一開発室長 佐賀 達男
 シャープ株式会社 ソーラーシステム事業本部 次世代要素技術センター 第一開発室 浅野 直城

【はじめに】

現在、我々は主なエネルギー源として石油・天然ガス・石炭等の化石燃料を利用している。ところが、これら化石燃料を大量に消費し続けることで、近い将来に地球温暖化や資源枯渇問題等が顕在化し、我々の生活に大きな影響を与える事が懸念されている。

太陽光発電は無尽蔵ともいえる太陽光をエネルギー源とし、発電時にCO₂等の温暖化ガスを排出しないという特徴を持つ。そのため、温暖化ガスの排出量を削減する低炭素社会の実現のためには非常に有効な手段である。我が国では政府による導入普及施策により、太陽光発電システムの生産量および累積導入量は世界トップクラスにまで達した。また、欧州を中心とする諸外国でもFIT（フィードインタリフ）制度の適用により太陽光発電の導入量は急激に拡大している。

クールアース50で提言された「世界の温暖化ガスの排出量を2050年までに半減する」と言う目標や、福田ビジョンで提唱された、太陽光発電の導入量を2020年には現状の10倍（推定320万戸）、2030年には40倍（同1280万戸）にするという目標を実現するためには太陽光発電を大幅に普及させることが必要となる。普及拡大のためには発電コストを、現在の46円／kWhから2010年には電力料金並の23円／kWhに、さらに先の2030年には汎用電力並の7円／kWh程度まで低減することがNEDOのターゲットとなっている。特に2030年に7円/kWhの目標を達成するためにはいわゆる第三世代型太陽電池等の大きな技術革新が必要になると考えられる。

太陽電池の種類は、その材質や製法から多岐に渡っ

ている。当社は用途や使用環境に応じて最適な太陽電池システムを提供するため、シリコン系だけでなく化合物系、有機系など幅広い領域で検討を行っている。ここでは、各種太陽電池の特徴を紹介し、その特徴を活かした商品展開について述べた。

【本編】

太陽電池の種類と特徴

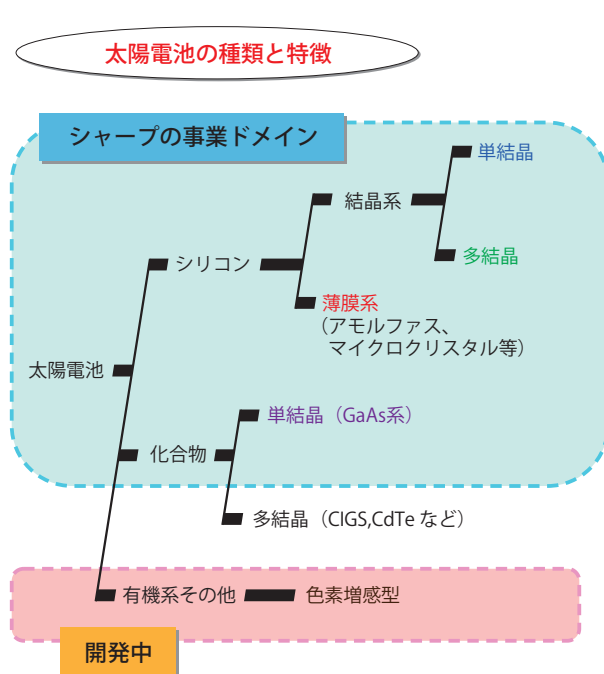
太陽電池は、その材質や製法から「シリコン系」「化合物系」「有機系その他」の三種類に大別でき、更にそれぞれについて「結晶系」「薄膜系」や「単結晶」「多結晶」などに分類することができる（図1）。ただし、HIT太陽電池等のような結晶系と薄膜系のハイブリッド型も存在するため厳密な分類は困難である。当社では「シリコン系」「化合物系」の技術開発および生産、「有機系その他」の技術開発を行っており、用途や使用環境に応じた太陽電池を幅広い領域で検討している。

1. シリコン系太陽電池

1-1 結晶シリコン太陽電池

結晶シリコン太陽電池は1953年にベル研のピアソンらによって発明され、電力用として最初に実用化された太陽電池である。最も長い使用実績を持つ太陽電池であり、住宅用太陽光発電システムや人工衛星用電源など幅広い用途に用いられている。結晶シリコン太陽電池は国内の太陽電池の出荷量（W換算）のうち、9割近くを占めている¹⁾。

1) 太陽光発電協会（財）光産業技術振興協会の太陽電池セル・モジュール出荷統計より



	特徴	2007年度 出荷比率 (日本) ¹⁾
単結晶シリコン	・豊富な使用実績	34.0%
多結晶シリコン	・現在、主流の太陽電池	56.6%
薄膜系シリコン	・少量の原材料シリコンで 太陽電池を形成 (結晶系の1/100以下の膜厚)	8.9%
単結晶化合物	・人工衛星や集光型などの 特殊用途 ・フレキシブルタイプを 開発中	—
多結晶化合物 (CIGS, CdTe など)	・貴重資源を材料に使う 種類の太陽電池がある	—
有機系その他	・従来の構造とは異なる 新しいタイプ	—

図1 太陽電池の種類と特徴

当社は1959年に太陽電池の開発に着手し、1963年に結晶シリコン太陽電池の生産を開始した。当初は無
人灯台や人工衛星など電力線の届かない、しかも過酷
な条件下での特殊用途へ設置を行い、現在までにそれ
ぞれ約1900箇所以上、約160機以上に搭載しており、
当社製パネルの長期信頼性が実証されている。その産
業用で培った技術開発をもとに住宅用の商品化を実現
し、1994年から住宅用太陽光発電システムの販売を開
始した。当社は、1963年の量産開始から2007年末ま
でに太陽電池の生産量が累計2GWを達成した。世界の
太陽電池累計総生産量は、8GWと見られ、世界の約4
分の1が当社製の太陽電池であることになる。

初期の結晶シリコン太陽電池は、高価な高純度シリ
コンを原料としてFZ法やCZ法で製造した単結晶シリ
コンを用いていたため、極めて高コストであった。そ
こで、単結晶シリコンよりも製造コストを低減できる
多結晶シリコンを用いた太陽電池製造方法が開発され
てきた。多結晶シリコンの製造法としては、シリコン
融液を坩堝内で直接固化してシリコンインゴットを得
るキャスト法が主流となっており、単結晶シリコンの
端材などの比較的安価なシリコン原料を用いることが
できる。

間接遷移型の光吸収を示すシリコン結晶は赤外領域
での光吸収係数が小さいため、太陽光を十分に吸収す
るためには通常200 μ m以上の基板厚が望ましい。更なる
低コスト化を実現するためには、出力の低下や基板
強度の低下を抑制しつつ、シリコン基板の薄型化を行
う必要がある。当社では、薄型化に伴い機械的強度が
低下するシリコン基板への応力負荷を低減するために、
工夫改善を図り、高い信頼性を保持した薄型化技術を
実現している（図2）。

多結晶シリコン型は生産性が高い反面、基板に存在
する欠陥のために単結晶型よりも変換効率が劣る欠点
を持つが、近年は優れた欠陥パッシベーション技術の
開発により、量産レベルでの多結晶シリコン太陽電池
のセル変換効率は15～16%にまで改善されている。
一方、単結晶シリコン太陽電池はその基板品質の高さ
から高効率化に適しており、量産レベルで20%以上の
セル変換効率が達成されている。今後、更なる変換効
率の向上による発電コストの低下が期待される。これ
らの結晶シリコン太陽電池は比較的狭い面積で高い発
電効率が求められる用途に適しており、電力用太陽電
池として現在世界各地の太陽光発電市場での主力商品
となっている。

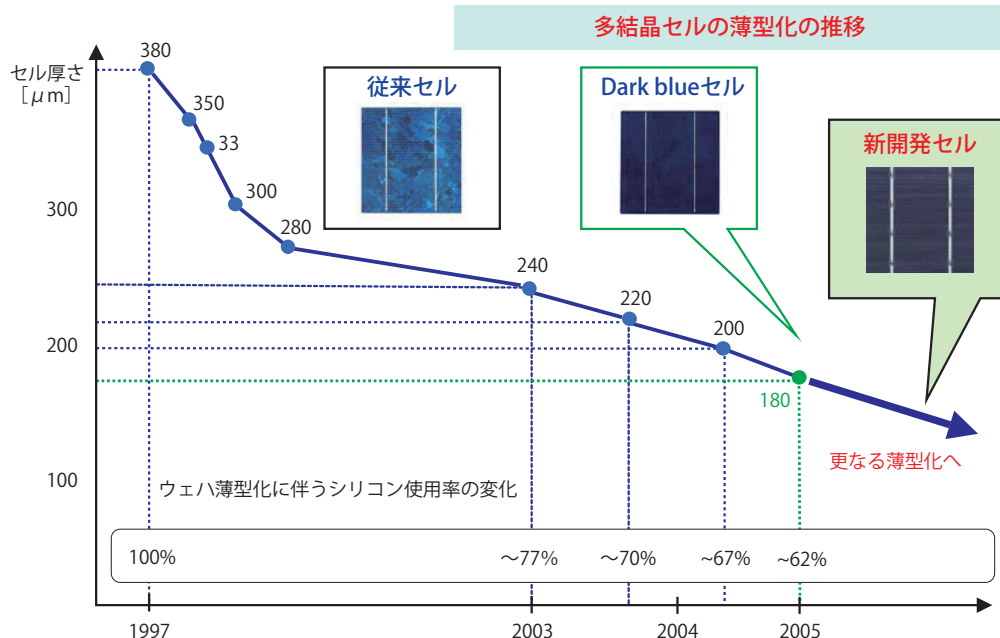


図2 多結晶セルの薄型化の推移

1-2 薄膜シリコン太陽電池

薄膜シリコン太陽電池は結晶シリコン太陽電池と異なり、CVD（Chemical Vapor Deposition：化学気相成長）装置の中で SiH_4 などの原料ガスを分解してガラス基板やフィルム基板上にシリコン薄膜を堆積することで製造する。前項の結晶シリコン太陽電池はシリコンインゴットをスライスした200ミクロン厚程度のシリコン基板を用いているが、薄膜シリコン太陽電池では2ミクロン厚程度のシリコン膜と薄くなり、また、大面積基板への成膜が可能となるため、材料面およびプロセス面から低コスト化が期待できる（図3）。

薄膜シリコンの種類としてはアモルファスシリコンおよび微結晶シリコンが挙げられる。アモルファスシリコン太陽電池は結晶シリコン太陽電池と比較して、バンドギャップが大きいため吸収可能な太陽光の波長が短くなり変換効率が低い。更に光照射により2～3割程度の初期劣化が起こる等の欠点を持つ。その反面、光吸収係数が大きく短波長～中波長領域の光を1ミクロン以下の厚さで十分に吸収できることからシリコンの使用量を大幅に低減できる利点を持ち、また高温時にも出力が低下しにくい利点を持つ。

微結晶シリコン太陽電池は、アモルファスシリコンと同様にCVD等で製造されるが、結晶性を持たないアモルファスシリコン型とは異なり、結晶シリコン型に近い挙動を示す。微結晶シリコンは、アモルファスシリコンでは吸収しにくい赤色および赤外域の太陽光を吸収できる。そこで、アモルファスシリコン太陽電池を受光面側として微結晶シリコン太陽電池と直列に接合することで太陽光の吸収量を改善する高効率のタンデム型薄膜シリコン太陽電池が開発されている（図4）。タンデム型薄膜シリコン太陽電池は、アモルファスシリコン太陽電池よりも50%ほど出力を向上することができる。

また、薄膜シリコン太陽電池はその特徴を活かして様々な応用商品を展開できる。一般的な薄膜シリコン太陽電池モジュールは高出力を得るためにほぼ全面に薄膜シリコンを形成している。当社は、意図的に薄膜シリコンを部分的に除去して採光性を高めたシーソー型モジュールを販売している。これらをビルの壁面に設置することで意匠性の高い太陽光発電システムが実現できる（図5）。

現在、結晶シリコン太陽電池の原料である高純度シリコンの価格が上昇しているため、シリコンの使用量を低減できる薄膜シリコン太陽電池は非常に有力な技

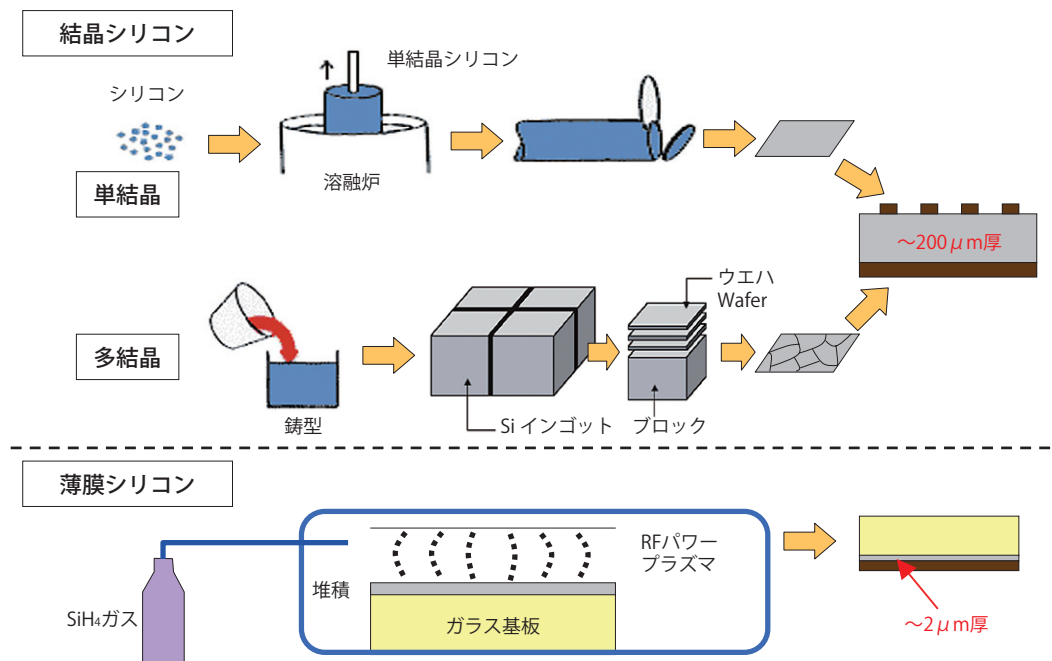


図3 結晶シリコン型と薄膜シリコン型の製造方法の違い

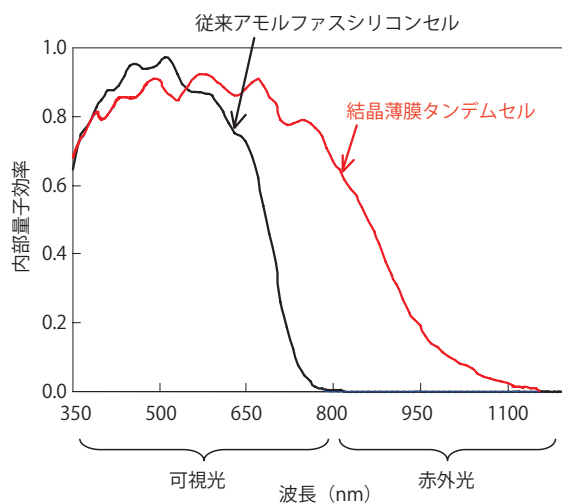


図4 素子分光感度特性

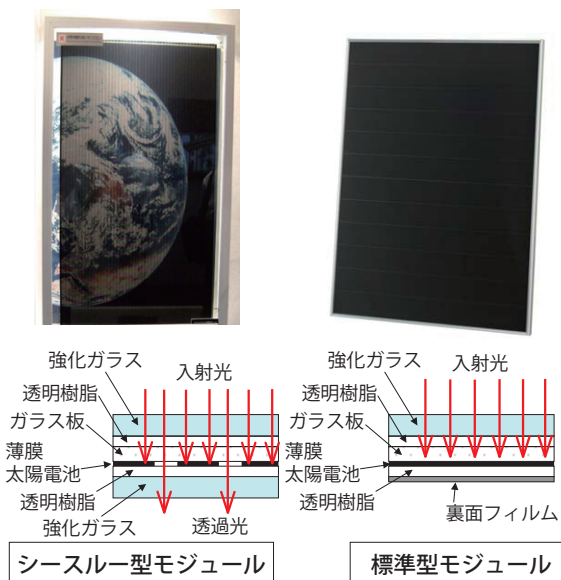


図5 薄膜シリコン太陽電池の応用

術である。また、薄膜シリコン太陽電池とTFT液晶は同じ薄膜形成技術をベースとしているため材料やユーティリティなどの共用化が可能である。そのため、当社では大阪・堺に建設中の液晶パネル工場に薄膜太陽

電池工場を併設し、液晶パネル製造のノウハウを活用した高い生産性かつ大規模（生産能力最大1GW／年まで拡張可能）の薄膜シリコン太陽電池の量産設備を2010年3月までに稼働させる予定である。

2. 化合物太陽電池

化合物太陽電池の代表として、単結晶のGaAs系、多結晶のCIGS (Copper Indium Gallium Selenide) 系やCdTe系等の化合物半導体を用いたものが挙げられる。化合物半導体の多くは直接遷移型の光吸収を示すため、結晶シリコン型と異なり数ミクロン程度で太陽光を十分に吸収することができ、薄膜化に適している。

2-1 単結晶化合物太陽電池

当社では人工衛星用電源および集光発電システムを目的としたGaAs系化合物太陽電池の生産および開発を行っている。結晶Ge太陽電池の上にそれぞれ吸収ピークが異なるInGaAs太陽電池およびInGaP太陽電池をエピタキシャル成長させて多接合化することで、単接合太陽電池よりも有効に太陽光を利用することが可能となり、高い変換効率を実現している。

単結晶多接合化合物太陽電池は高効率である半面、材料・プロセス両面で非常に高コストである。そのため、従来は人工衛星用など特に軽量で高出力が求められる場合の用途に限定されてきた。しかし、フレネルレンズ等で太陽光を数百倍に集光することで、化合物太陽

電池の占めるコストを低減でき、また入射光量の増加に伴って変換効率を向上できることから、化合物太陽電池を用いた集光型発電システムによる一般電力用としての普及が期待されている(図6)。現在、250倍集光で40.7%の超高効率を実現した化合物太陽電池が報告されており²⁾、当社でも1100倍集光で40.0%を可能にする化合物太陽電池の開発に成功した³⁾。集光倍率が高くなるほど高価な化合物太陽電池の使用量が低減できるという点から、より安価な集光型発電システムの実現に更に近づいたと言える。

2-2 多結晶化合物太陽電池

近年、多結晶化合物材料を用いた、集光システムに頼らない安価な化合物太陽電池が実用化されてきた。CIGS型やCdTe型太陽電池は、その比較的高い変換効率および簡易な製造プロセスからシリコン系太陽電池よりもエネルギーペイバックタイムが短い利点を持つ(多結晶シリコン型: 2.2年、アモルファスシリコン型: 1.7年、CdTe型: 1.3年、CIGS型: 1.1年、年間生産量は30MWと仮定⁴⁾)。材料の選択によって半導体のバンドギャップ制御が可能であるため、太陽光の吸収に適した、優れた外観を持つ高性能モジュールの製造を実現している^{5) 6) 7)}。

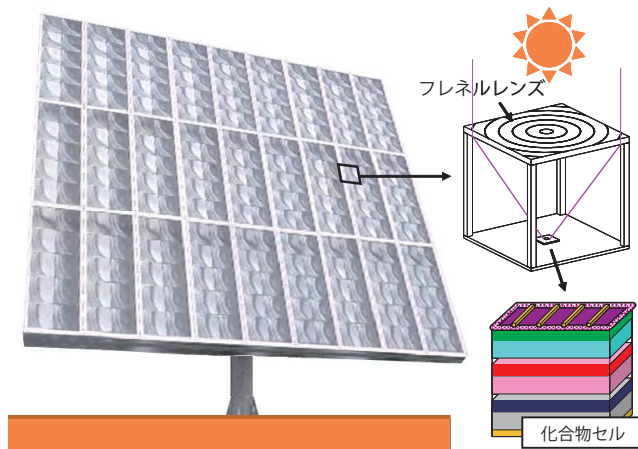


図6 集光型太陽光発電システム

- 2) G. S. Kinsey, "Operating Characteristics of Multijunction Solar Cells", PVSEC-17, Fukuoka, Japan, (2007).の口頭発表より
- 3) T. Sasaki, T. Takamoto, "Characterization of Carrier Recombination in Lattice-Mismatched InGaAs Solar Cells on GaAs Substrate", PVSEC-17, Fukuoka, Japan, (2007).の口頭発表より
- 4) NEDO委託業務成果報告書「太陽光発電の調査報告書」(平成12年度), pp.48-51.
- 5) 昭和シェルソーラー社のHP "http://www.showashell-solar.co.jp/"より
- 6) ホンダソルテック社のHP "http://www.honda.co.jp/soltec/"より
- 7) First Solar社のHP "http://www.firstsolar.com"より

特にCdTe型は従来のシリコン型を上回る発電コストパフォーマンスを実現しており、急激にその生産量を増加させている。

これらの太陽電池はIn、Ga、Se、Teなどの希少金属を使用すること、またCdTe型についてはCdを使用することから、大量生産、設置した場合に資源面および環境面への配慮などの課題も挙げられる。

3. 有機系その他の太陽電池

3-1 色素増感型太陽電池

色素増感型太陽電池は従来のシリコン型や化合物型のPN接合とは異なる構造を持つ太陽電池であり、1991年にグレッツェルらによって10%近い変換効率が報告された⁸⁾。酸化チタン微粒子上に吸着した有機色素が光を吸収して、酸化チタン側に電子を放出し、電子を失った有機色素は対極側からヨウ素イオンを通じて電子を受け取ることで、太陽電池としてのサイクルが成立する。結晶シリコン型のように高価な高純度材料を用いず、また印刷プロセスによりシンプルかつ大面積の製造が可能となるため、結晶シリコン型と比較して数分の一の製造コストの実現が期待されている。また、様々な有機色素を採用することでステンドグラスのような意匠性の高いカラフルなモジュールも製造可能である。一般に揮発しやすい電解液を使用しているため長期信頼性が低いという課題を持つが、昨今では封止技術が改善された結果、1,000時間以上の使用でも大きな特性劣化が起こらないという報告も見られる⁹⁾。

当社は公的機関での測定結果としては世界最高のセル効率（11.1%、面積は約0.2cm²）およびモジュール効率（7.9%、面積は約25cm²）を達成している¹⁰⁾。今後は

長期信頼性を実現し、低コスト太陽電池として早期の実用化を目指す予定である。

3-2 有機薄膜型太陽電池

有機薄膜型太陽電池はP型有機半導体およびN型有機半導体でPN接合を形成しており、光吸収層のみに有機色素を用いる色素増感型とは異なる構造の有機系太陽電池である。低分子有機半導体を蒸着して形成する低分子系、および高分子有機半導体をスピンコート等で塗布して形成する高分子系の二種類が存在する。1986年にTangらは、変換効率は約1%と低いもののP型およびN型の低分子半導体を積層してPN接合を形成した有機太陽電池の開発に成功した¹¹⁾。現在、タンデム型で最高6.5%の変換効率が報告されており¹²⁾、今後は色素増感型と同様に長期信頼性を実現し、低コスト太陽電池としての実用化が期待される。

3-3 量子ドット太陽電池

超高効率を得る手段としては前述の化合物太陽電池のような多接合化が挙げられるが、量子ドット太陽電池は新しい概念で超高効率化の実現を目指すものである。量子ドットと呼ばれる10nm程度の半導体粒子を規則的に並べ、その間隔を制御することで元の基板とは異なる波長の光を吸収できるようになる。その結果、幅広いスペクトル領域の太陽光を吸収し、高い変換効率を実現できると期待されている¹³⁾。

4. 総括

それぞれの太陽電池はその材質・製法に由来する固有の特徴を持つ。そのため、特徴を比較して種類の

8) M. Graetzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films", Nature 353, pp.737 - 740, (1991).

9) K. R. Thampi, "Recent Advances in Dye Sensitized Solar Cell Research and Manufacture", Proc. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 September 2007, Milan, Italy, pp.182-186, (2007).

10) L. Han, "High Efficiency Dye-Sensitized Solar Cells and Integrated Modules", Technical Digest of the International PVSEC-17, Fukuoka, Japan, pp. 83-84, (2007)

11) C.W. Tang, Appl. Phys. Lett., 48, 183, (1986).

12) J. Y. Kim, "Efficient Tandem Polymer Solar Cells Fabricated by All-Solution Processing", Science, 317 (5835), pp. 222-225, (2007).

13) R. D. Schaller, "High-efficiency carrier multiplication through direct photogeneration of multi-excitons via virtual single-exciton states", Nature Physics, 1, pp. 189 - 194, (2005).

太陽電池に絞り込むのではなく、寧ろそれらの特徴を活用した商品展開が必要と考えられる。例えば、結晶シリコン太陽電池は高効率であり低温環境下での発電能力が高いことから、設置面積が限られている人口の多い北半球の都市部への設置、薄膜シリコン太陽電池は温度特性が優れる反面、設置面積当たりの出力がやや劣ることから、比較的高温で大規模な設置面積を確保しやすい地域への設置、化合物太陽電池は高出力で温度特性が優れる反面、セル単価が高コストであることから、砂漠地帯での集光型発電システムや人工衛星への適用、等のように活用されている（図7）。

ただし、どの種類の太陽電池も本格的な普及の目処とされるコスト目標（一般家庭の電力料金、日本国内の場合は23円／kWh）を実現できてはいない。今後は各々について高効率化・低コスト化・長期信頼性の改良を行い、上記目標をクリアして普及促進に繋げることが求められる。

profile

佐賀 達男（さが たつお）

シャープ株式会社 ソーラーシステム事業本部 副本部長 兼 次世代要素技術開発センター所長
48年生まれ、岐阜県出身。74年名古屋大院卒業後、シャープ入社。
宇宙用太陽電池、地上用太陽電池の技術開発を担当し、06年より現職。

profile

浅野 直城（あさの なおき）

シャープ株式会社 ソーラーシステム事業本部 次世代要素技術開発センター 第一開発室 主事
78年生まれ、岐阜県出身。03年名古屋大学院卒業後、シャープ入社。
地上用太陽電池の技術開発を担当し、07年より現職。

