

# 太陽電池開発の現状と将来展望

小長井 誠

## Present Status and Future Prospects of Photovoltaics

Makoto KONAGAI

Photovoltaics (PV) is a power generation system using solar cells as an energy conversion device. Due to the governmental dissemination and promotion programs, PV market is expanding very rapidly. The annual production of solar cells in the world in 2002 increased up to 520 MW. Si solar cells with efficiencies of 13-16% are commercially available now, and thin film solar cells such as microcrystalline Si and Cu(InGa)Se<sub>2</sub> have been extensively developed up to now. However, further reduction of PV system price will be required for mass deployment of PV system. The target for PV system introduction in Japan is  $4.82 \times 10^6$  kW at the price of  $9 \times 10^5$  yen for 3 kW residential system in 2010. To achieve the long-term targets, a new five-year program was initiated in 2001. The research theme and major targets under the New Sunshine Program are presented. The major target for Si thin film solar cells is the achievement of efficiencies of 12% at the manufacturing cost of 100 yen/W.

**Key words:** photovoltaics, solar energy conversion, solar cells, Si solar cell, thin film solar cells

地球温暖化ガスの排出抑制が叫ばれるなか、新エネルギー源として期待されている太陽光発電が急成長している。太陽光発電とは、太陽電池により、太陽光から直接電気へのエネルギー変換を行う発電方式であり、発電システムとしては、太陽電池のほか、インバーターや系統連系のための保護装置などからなっている。シリコン太陽電池の生産量は、ここ数年、30%の増加率を維持している。いよいよ本格的な導入の始まりである。本稿では、太陽光発電システムの中核をなす太陽電池に焦点を当て、太陽電池産業界の動向、研究開発の現状、さらには2030年を見据えた太陽光発電開発ロードマップを紹介する。

### 1. 太陽電池の基礎

太陽光発電は、英語で photovoltaics (PV) と表現されている。これは半導体に光を照射すると起電力が生じる光起電力効果から命名されたものである。太陽電池による発

電原理は、きわめて単純である。基本的には半導体 p-n 接合からなる。p-n 接合に太陽光が照射されると半導体内部で電子-正孔対が励起され、電子は n 側へ、正孔は p 側へ流れることによって光起電力を生じる。現在広く使われているのは、厚さ 0.2~0.35 mm の単結晶シリコン、あるいは鋳造法による多結晶シリコン太陽電池である。

太陽電池の光照射下の電流-電圧特性は図1に示されている。太陽電池から取り出すことのできる出力は、動作点で異なる。動作点は負荷抵抗の大きさで変化する。負荷抵抗を調整して得られる最大の出力を用いてエネルギー変換効率  $\eta$  (以降、単に変換効率と表記する) が定義される。

したがって、

$$\eta = (\text{最適動作点での出力 } P_{\text{out}}) / (\text{太陽光強度}) \times 100\%$$
$$P_{\text{out}} = (\text{開放電圧 } V_{\text{oc}} \times \text{短絡電流 } I_{\text{sc}} \times \text{曲線因子 } FF)$$

と表される。

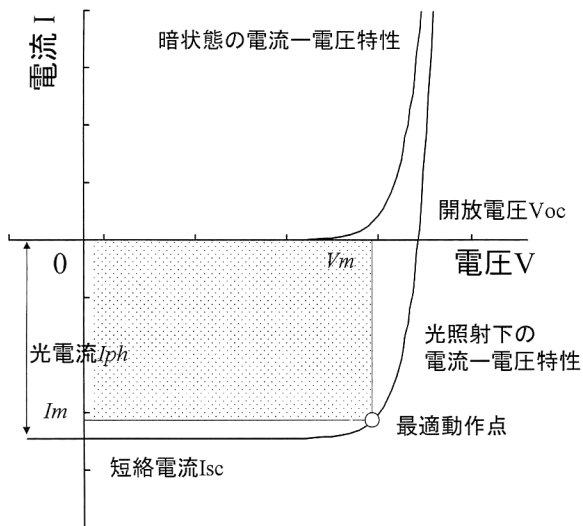


図1 太陽電池の照射下の電流-電圧特性.

ここで曲線因子  $FF$  は、

$$FF = \frac{(\text{最適動作点での電圧 } V_m \times \text{最適動作点での電流 } I_m)}{(\text{開放電圧 } V_{oc} \times \text{短絡電流 } I_{sc})}$$

で定義される。

1枚1枚の太陽電池はセルとよばれる。太陽光の強度は、日中、約  $1 \text{ kW/m}^2$  である。量産化されている  $15 \text{ cm}$  角シリコン太陽電池セルの変換効率は  $15\sim 18\%$  となっている。たとえば、変換効率  $16\%$ 、大きさ  $15 \text{ cm}$  角のシリコン太陽電池セルからは、約  $3.6 \text{ W}$  の出力（電圧  $0.5 \text{ V}$ 、電流  $7.2 \text{ A}$ ）が得られる。太陽電池を発電に用いる場合は、出力電圧  $0.5 \text{ V}$  では低すぎる。そこで、動作電圧を高めるため、何枚かの太陽電池を直列に接続する。一般には、シリコン太陽電池セルを  $36$  枚直列に接続し、動作電圧を  $18 \text{ V}$  までに高める。これをモジュールとよぶ。住宅用の場合は、これらのモジュールを直列に配線して、電圧を約  $200 \text{ V}$  まで高める。

シリコン太陽電池そのものは、代表的な半導体デバイスであるから、何年使ってもほとんど劣化しない。しかし、長期に屋外に放置すると、モジュールの外部端子が錆びたり、水分がしみ込んだりするので、寿命は  $20$  年くらいとなる。現在、寿命を  $30$  年にするよう開発が進められている。

最近、シリコン太陽電池の変換効率が向上するにつれ、照射下の経時変化が詳細に調べられるようになり、シリコン中に含まれる  $p$  型ドーパントの  $B$  と酸素が関係した現象により、シリコン太陽電池には数%の劣化がみられることが報告されている。そのため、 $p$  型ドーパントとして  $B$  に代わり、劣化のない  $Ga$  をドーパントとして用いる方向が示されている<sup>1)</sup>。

シリコン太陽電池の製造コストを削減するため、薄膜太

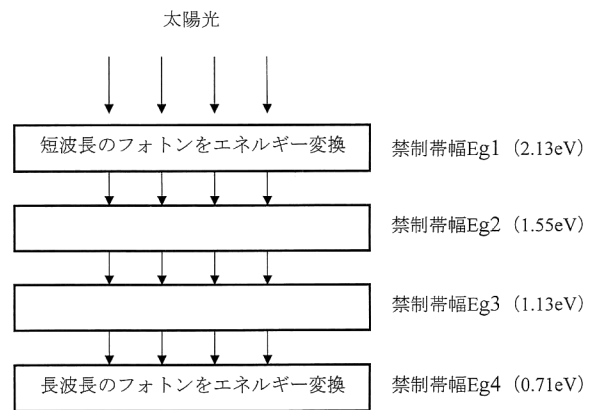


図2 4接合セルの基本構造. 変換効率  $50\%$  以上が期待される。

陽電池が開発されつつある。薄膜太陽電池では、光吸収層の厚さが  $0.2\sim 3 \mu\text{m}$  となっており、使用する材料が少ないため低コストの太陽電池として期待されている。薄膜太陽電池の代表例がアモルファスシリコン (a-Si)、微結晶シリコン ( $\mu\text{c-Si}$ ) や銅・インジウム・ガリウム・セレンからなる  $\text{Cu(InGa)Se}_2$  (CIGS) 太陽電池である。

このほか、変換効率を大幅に向上させるため、2つから4つの太陽電池を組み合わせて動作させる多接合太陽電池がある。多接合太陽電池の基本的な構造を図2に示す。同図には、将来  $50\%$  の変換効率を期待することが可能な4接合セルを示す。実際には、図中のそれぞれの太陽電池はトンネル接合により直列接続されている。

表1は、現在、市販されている、あるいは開発途上にある太陽電池の種類、ならびに変換効率の現状をまとめて示したものである。これまで電力用に生産されているのは、ほとんどバルク型シリコン太陽電池である。市販されている大面積モジュールの変換効率は  $13\sim 18\%$  となっている。一方、これから本格的な実用期に入ると期待されているのが薄膜太陽電池である。市販されている大面積アモルファスシリコン太陽電池モジュールの変換効率は約  $8\%$  となっている。現在、重点開発項目になっているのが、ハイブリッド太陽電池（後述）とCIGS太陽電池である。このほか、 $2010$  年以降をねらう材料系として、色素増感太陽電池などがある。

超高効率という観点では、インジウム・ガリウム・リン等のIII-V族化合物半導体を用いた3接合太陽電池で、 $30\%$  を超す変換効率が得られている。宇宙用途や集光システムでは、III-V族化合物半導体系がその優位性を発揮している。これらの用途では、出力/重量比が重要な性能指数になっている。

表1 各種太陽電池の種類と現状.

太陽電池の種類	大面積モジュールの変換効率 (%)	小面積セルの変換効率 (%)	量産化の現状 (2001年)
<b>バルク型</b>			
単結晶 Si	13~18 (市販品)	24.7 (4 cm <sup>2</sup> )	年間 140 MW 以上
多結晶 Si (キャスト)	13~16 (市販品)	19.8 (1 cm <sup>2</sup> )	年間 190 MW 以上
Si (集光)		26.8 (1.6 cm <sup>2</sup> )*	一部実用化
<b>III-V族化合物</b>			
GaAs		25.1 (3.9 cm <sup>2</sup> )	宇宙用, 集光用として一部実用化
GaInP/GaAs 多接合		30.3 (4 cm <sup>2</sup> )	
<b>薄膜型</b>			
<b>Si系薄膜</b>			
a-Si	7~8(市販品) 10 (開発段階)	13.0 (0.25 cm <sup>2</sup> )	年間 33 MW 以上
<b>ハイブリッド</b>			
Cu(InGa)Se <sub>2</sub> 薄膜	10 (市販品) 12~13 (開発段階)	14.7 (1 cm <sup>2</sup> ) 19.2 (0.25 cm <sup>2</sup> )	一部実用化 (1 MW)
CdTe 薄膜	11 (開発段階)	16.4 (1 cm <sup>2</sup> )	民生機器用
色素増感セル	数% (開発段階)	10 (1 cm <sup>2</sup> )	今後の課題

\*100倍集光.

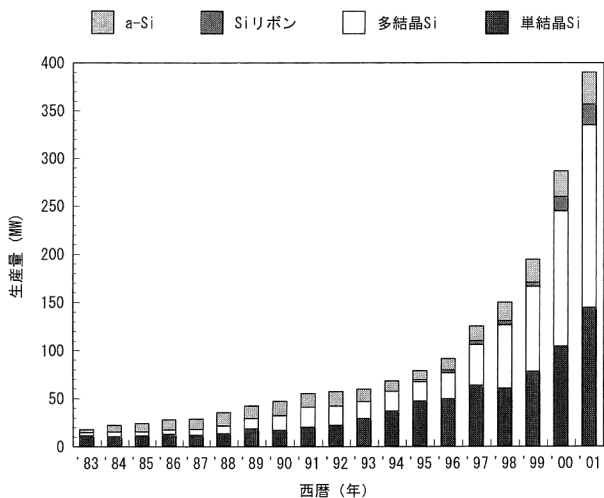


図3 太陽電池の生産量推移.

## 2. 日本のエネルギー源としての太陽光発電

1999年度, わが国が保有する電源設備は2.2億kWで, 年間の総発電電力量は約9200億kWhである<sup>2)</sup>. 1軒の住宅の屋根に3kWの太陽光発電システムを設置すると年間発電量は約2628kWhとなるから(後述), 1000万軒の住宅に3kWのシステムを設置すると, 電源設備としては3000万kW, 年間発電量は263億kWhとなる. この発電量は, 国内の年間発電電力量の約3%である. このほか, アパート, 工場, 駅の屋根, ビルの外壁, 高速道路の防音壁, さらに休耕地などを利用すれば, 数字の上では日本で消費する電力の約10%は太陽光発電でまかなえることになる.

この分野では, よくエネルギーペイバックタイム(EPT)が議論されることがある. 太陽電池を製造する際,

表2 生産量の地域別分類.

地域	2000年 (MW)	2001年 (MW)	2002年 (MW)
日本	128.6	171.22	254.50
アメリカ	74.97	105.1	112.90
ヨーロッパ	60.66	86.22	112.05
その他の地域	23.42	31.60	40.70
計	287.65	394.14	520.15

エネルギーを消費している, このエネルギーが太陽電池の生涯発電量よりも多ければ, エネルギー政策に貢献しないことになってしまう. これまでの試算では, 太陽電池の種類にもよるが, 100MW/年くらいの生産量になると, EPTはおおよそ1~2年となる<sup>3)</sup>. したがって, 発電に際して燃料を必要とせず, CO<sub>2</sub>を排出しない太陽光発電は, まさに地球環境問題を解決する救世主となりうる.

## 3. 住宅用太陽光発電システム補助事業と太陽電池産業

### 3.1 生産量推移

図3は, 2001年までの世界における太陽電池の生産量推移を材料別に示したものである. また, 2002年における世界の太陽電池の生産量は520MWに達した(表2). これらの太陽電池は, 住宅用途をはじめ, 各種の太陽光発電システムに利用されているが, 3kWの住宅用システムに換算すると約17万軒に相当する.

地域別では, わが国が254MWと全体の約半分となっている. 2002年には, 米国と欧州の生産量がほぼ同一となった. わが国では, シャープの生産量が, 国内の約50%にあたる123MWとなっている.

現在は、単結晶シリコン太陽電池、キャスト法（鋳造法）による多結晶シリコン太陽電池が圧倒的に多数を占めているが、今後は薄膜系の生産量が増加するものと期待されている。

### 3.2 産業界の動向

生産量推移からも明らかなように、わが国の太陽電池製造メーカーの製造能力は大幅に増強されつつある。新聞報道によれば、シャープはシリコン太陽電池の製造能力を年産 200 MW に増強する。京セラは、2003 年には年産 150～160 MW までアップさせる。三洋電機は、2005 年度までにアモルファスシリコンを界面層として用いた HIT (heterojunction with intrinsic thin-layer) とよばれる高効率シリコン太陽電池を商品化し、生産能力を年産 100 MW に増強する。HIT 太陽電池では、セル効率 21.3% ( $V_{oc}=717\text{ mV}$ ,  $I_{sc}=3.86\text{ A}$ ,  $FF=0.77$ ,  $100\text{ cm}^2$ ) が達成されている<sup>4)</sup>。三菱電機も年産 45 MW に増強する。このように、この 1～2 年の間に、わが国の結晶シリコン系太陽電池の製造設備（生産能力）は合計 500 MW 以上になる見込みである。

現在、シリコン太陽電池に用いられているシリコン原料はおおよそ 5000 トンである。この原料の多くは、シリコン半導体産業から出てくる規格外品であるが、規格外品をこれ以上多量に供給することは難しい状況にある。シリコン太陽電池の厚さを 0.2 mm、変換効率を 15% と仮定すると、2010 年には 15000 トンの原料シリコンが必要となるため<sup>5)</sup>、数年後には原料不足が生じる危惧がある。このため、太陽電池用低コストシリコン原料の開発が急ピッチで進められている。

国外の企業では、シリコンリボン結晶に力を入れているところもある。リボン結晶では、本質的に切り屑が少ないからである。米国の RWE Schott Solar では、現在リボンシリコン太陽電池を 20 MW 生産しているが、2005 年には 100 MW まで増強予定である<sup>6)</sup>。

一方、薄膜系では、鐘淵化学工業がハイブリッドタイプを中心としたシリコン系薄膜太陽電池の生産量を増やしつつある。三菱重工業は、年産 10 MW のアモルファスシリコン太陽電池工場を完成させ、太陽電池事業に参入した。海外では、United Solar 社の 30 MW アモルファスシリコン太陽電池生産工場が 2002 年の 6 月末に完成し、生産・販売を開始した。

CIGS 太陽電池については、まだ生産量が年間の統計量調査に現れるほど多くはないが、Shell Solar 社の 2002 年の生産量は 1 MW と報告されている<sup>7)</sup>。わが国では、最近、昭和シェル石油が 10 kW の CIGS 太陽電池システムを完

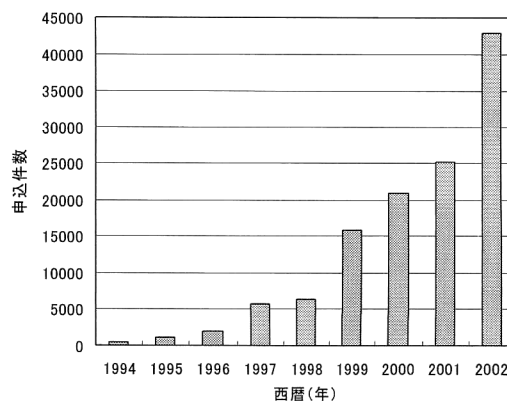


図4 住宅用太陽光発電導入促進事業における申し込み件数推移。一般住宅用（一般用）のみの推移。

成させた。また、ホンダが CIGS 太陽電池の研究開発を行っているとの報道があり、世界中にインパクトを与えた。なお、ホンダは、将来、工場で使う電力の 2～3 割を太陽光発電でまかなう計画と伝えられている。海外では、Wuerth Solar が、学校の屋根に 50 kW の CIGS モジュールを設置した。同社は 2002 年には 150 kW を生産している。さらに 1.5 MW 製造ラインを 2003 年第一四半期中に稼働開始する。モジュール効率は 10% である。

### 3.3 住宅用太陽光発電システム

最近の太陽電池産業の急速な拡大は、わが国における住宅用太陽光発電システムの普及策（太陽光発電導入基盤整備事業）によるところが大きい。図4は、住宅用太陽光発電システム補助事業への申し込み件数の推移を示したものである。2002年度の申し込み件数は、個人住宅 43000 件となっている。この事業に対する 2001 年度、2002 年度予算は、それぞれ 235 億円、232 億円となっている。

また、図5は、3 kW に換算した場合の価格推移を示したものである。ひところ、太陽電池は高いから消費者が購入しない、販売量が少ないから量産できず安くならない、という負の循環となっていたが、1994 年度、補助事業が開始されるや、国民の関心が急速に高まり、販売量の急増とともにシステムの販売価格も大きく下がってきている。補助事業の内容も、当初の 2 分の 1 補助から徐々に補助額を下げる方向にあるが、詳細は新エネルギー財団のホームページ (<http://www.solar.nef.or.jp/>) を参照されたい。

図5には、システム価格の中に占める太陽電池のみの価格、付属機器等（インバーター等）の価格も示されている。全システム価格に占める太陽電池の割合は 6 割程度と大きくなっている。ひところ数百万円していた住宅用 3 kW 太陽光発電システム価格は、2002 年には平均 230 万円前後まで低下した。国の計画では、2010 年までに 3 kW システ

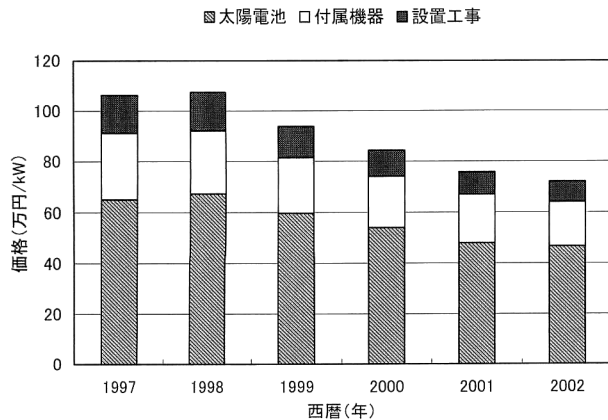


図5 住宅用太陽光発電システム価格の推移 (kW 単価)。

ムの販売価格を90万円にすることを目標としている。ここまで下がれば、現在の電力料金と太陽電池からの発電コストが同一レベルになる。

#### 4. 2030年に向けてのロードマップ

太陽光発電が最初に注目を集めたのは、1973年の第一次石油危機のときである。それ以来、太陽光発電の課題は一貫して発電コスト、すなわち kWh あたりいくらで発電できるかという点である。特に太陽電池そのものの製造コストを下げるのが最重要課題となっている。

太陽光発電システムの価格目標を明確にするため、生涯発電量を計算してみる。3 kW の太陽光発電システムが20年間使用できたとすると、大雑把に見積もって、

$$3 \text{ kW} \times (24 \text{ 時間} \times 365 \text{ 日}) \times 20 \text{ 年} \times \eta_s$$

の発電量となる。ここで  $\eta_s$  はシステム利用率である。太陽光発電システムは、日照がないときには発電しないので、システムとしての年間利用率が低くなる。ここでシステム利用率を10%と仮定し、上式に  $\eta_s = 0.10$  を代入すると、生涯発電量は52560 kWh となる。

現在、個人住宅では、電力会社が太陽光発電による電気を売値と同じ25円/kWhで買い取ってくれるので、20年間で131万円 (52560 kWh × 25円/kWh) ほど自家発電す

ることになる。すでに述べたように、現状では、3 kW のシステム価格が230万円程度であるから、まだもとを取れないことになる。

上記の計算では、システム利用率を0.1と仮定したが、屋根の傾斜角度や設置面の状況によって、システム利用率はさらに小さくなる。そこで、国のプロジェクトでは、一般家庭に広く普及させるためには、3 kW システムを2010年までに90万円まで下げる必要があると考えている。

表3は、資源エネルギー庁などを中心にとまとめられた太陽光発電開発に関する2030年までのロードマップである<sup>8)</sup>。このロードマップで最も重要な点は、2010年までに積算で482万kWの太陽光発電システムを導入することである。そのためには、太陽光発電による発電コストを現在の電力レベル、すなわち25円/kWhまで下げる必要がある。この目標を実現するためには、太陽電池の製造コストを、生産レベルで100円/Wまで下げる必要がある。

当面の発電コスト目標は25円/kWhであるが、太陽光発電の本格的な実用期を迎えるためには、さらに発電コストを下げなければならない。最終的には電気事業者発電コスト並み、すなわち現在の各種発電所の発電端コスト並み、5~10円/kWhまで低コスト化をはかる必要がある。

そのためには、まず太陽電池の製造コストをいっそう下げる必要がある。ロードマップでは、生産レベルでの太陽電池製造コスト目標を2020年に75円/W、さらに2030年には30~50円/Wにまで低下させることを求めている。なお、一般に研究開発レベルの技術が製造ラインに移され実用化されるのに5年程度を要する。したがって、これらの研究開発は、実用期の5年前には実現されていなければならない。ロードマップの表中に、研究開発レベルの目標値と生産レベルの目標値が示されているのは、技術移転の期間を考慮したためである。

製造コストの将来目標を実現するためには、変換効率の大幅な向上が必要である。たとえば製造コストを50~75円/Wレベルまで下げるには、バルクシリコン系に対して

表3 太陽光発電に関するロードマップ。

	2000年	2005年	2010年	2020年	2030年
製造原価目標* (円/W)					
研究開発レベル	140	100	75	50	30
生産レベル		140	100	75	50
住宅用システムの販売価格目標 (万円/kWh)	88	37	30	20	12
発電価格見込み (円/kWh)	70	30	25	10~15	5~10
国内での導入量 (GW)			4.82	23~35	52~82
市場規模 (億円)	1100 (2001年)		4730	12500	22500

\*この目標値は技術開発目標であり、開発された技術が生産ラインに移されるのに4~5年かかる。

表4 2001年度からスタートした研究開発プログラム。

研究開発テーマ分類	具体的なテーマ
先進太陽電池技術研究開発	
シリコン結晶系薄膜太陽電池モジュール製造技術開発 目標：変換効率>12%, >3600 cm <sup>2</sup> , <100 円/W	薄膜ハイブリッド太陽電池モジュールの製造技術開発 微結晶 Si を用いたタンデム型太陽電池の高速・大面積製膜低コスト生産技術研究開発
CIGS 系薄膜太陽電池モジュール製造技術開発 目標：変換効率>13%, >3600 cm <sup>2</sup> , <100 円/W	環境調和型大面積 CIGS 系薄膜太陽電池モジュール製造技術開発 高速真空プロセスによるモジュール製造技術開発
超高効率結晶化合物系太陽電池モジュール製造技術開発 目標：変換効率>40%, <100 円/W	集光発電技術に関する研究
大量導入に向けた共通基盤技術の研究開発および調査	
太陽電池評価技術の研究開発	
太陽光発電システム評価技術の研究開発	太陽光発電システム総合支援技術の研究開発
太陽光発電システムのリサイクル・リユース処理技術等の研究開発	結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクル・リユース処理技術の研究開発 CIGS 系薄膜太陽電池モジュールの低コスト化のためのリサイクル・リユース処理技術の研究開発 太陽電池モジュール用ガラスのリサイクル・リユース研究開発 太陽電池モジュール適正処理のための社会システムの研究
太陽光発電システムの電磁環境性に関する研究開発	
革新的次世代太陽光発電システム技術研究開発	
2001 年度採択	
めっきブリッカーを用いた CuInS <sub>2</sub> 薄膜太陽電池の研究開発	
ナノ構造制御シリコン太陽電池の研究開発	
マイクロ分散の組成分布をもった SiGe 多結晶をベースにした新しい太陽電池の研究開発	
完全固体型色素増感太陽電池の開発	
Cat-CVD による低価格太陽電池製造技術の研究開発	
シート型ベータ鉄シリサイド ( $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> ) 太陽電池の製作に関する研究開発	
超高光閉じ込め型薄膜シリコン太陽電池の研究開発	
シリコン系太陽電池技術研究開発 (MCSB 太陽電池の技術研究開発)	
低コストで高性能な色素増感太陽電池技術の研究開発	
2002 年度採択	
ワイドギャップ微結晶 SiC 薄膜太陽電池の研究開発	
カーボン系薄膜太陽電池の研究開発	
有機薄膜太陽電池の研究開発	
高効率カルコゲナイド系太陽電池の研究開発	
イオンゲルを用いた高性能色素増感太陽電池の研究開発	
ラテラル結晶化薄膜シリコン太陽電池の研究開発	

モジュール効率 20%<sup>9)</sup>、薄膜シリコン系で 14~16%、CIGS 系で 16~18% の変換効率達成が大きな目標となる。製造コストを下げるには、変換効率の向上とともにスループットの向上が必要不可欠である。これらの技術目標がクリアされれば、2010 年の太陽光発電システムの導入量として 482 万 kW、2020 年には 3000 万 kW 以上が期待できる。

最近、太陽電池産業が急成長するにしたがい、国内の市場規模が議論されるようになった。2001 年の太陽電池産業の市場規模は 1100 億円であるが、2010 年を過ぎたころには 1 兆円を越す市場規模が期待される<sup>10)</sup>。

## 5. ニューサンシャイン計画における太陽電池開発

2001 年度、新エネルギー・産業技術総合開発機構

(NEDO) は、2010 年度目標を達成するため、太陽光発電技術開発に関する新しい 5 か年計画をスタートさせた。太陽電池開発に関するプログラムは、おもに「先進太陽電池技術開発」と「革新的次世代太陽光発電システム技術研究開発」からなっている。

### 5.1 先進太陽電池技術開発

「先進太陽電池技術開発」のプロジェクトでは、これまで開発を進めてきた薄膜系の技術レベルを一段と向上させ、2005 年までには実用化のめどをつけようとするもので、製造コスト目標を 100 円/W に定めている。対象とする太陽電池は、おもにシリコン結晶系薄膜太陽電池と CIGS 系薄膜太陽電池である (表 4)。シリコン結晶系薄膜太陽電池は、ハイブリッド型とよばれている構造 (図 6) で、アモル

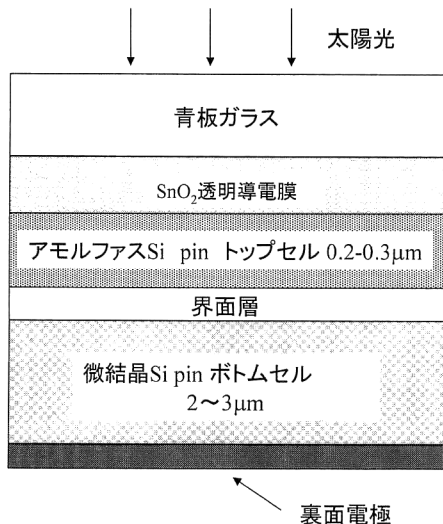


図6 ハイブリッド太陽電池の構造。

ファスシリコン太陽電池（トップセル）と微結晶シリコン太陽電池（ボトムセル）のタンデム構造になっていることに特徴がある。どちらの層も低温でプラズマCVD法により製造される。この構造の太陽電池で、面積3600 cm<sup>2</sup>、変換効率12%の達成が目標となっている。

一方、CIGS系薄膜太陽電池とは、Cu(InGa)Se<sub>2</sub>を中心とした材料系による太陽電池を指しており、ハイブリッド太陽電池を上回る変換効率の向上が望まれている。この系の目標は、100円/Wの製造コスト、変換効率13%（面積3600 cm<sup>2</sup>）となっている。現在、Cu(InGa)Se<sub>2</sub>太陽電池の生産量は年間1 MW程度と少ないが、すでにセレン化法や蒸着法で製造されており、市販レベルでの変換効率は10%となっている。

## 5.2 革新的次世代太陽光発電システム技術研究開発

2005年までは、これまで開発が進められてきたシリコン系薄膜太陽電池やCu(InGa)Se<sub>2</sub>系薄膜太陽電池の技術開発に重点が置かれる見込みであるが、2010年以降のいっそうの低コスト化に対しては、従来の材料系以外の新材料が登場する可能性もある。長期的には、従来技術の延長線上をいくものと、まったく新しいところから開発をスタートする革新的次世代技術開発の両面からのアプローチが必要である。このような観点から、新たに「革新的次世代太陽光発電システム技術研究開発」がスタートした。具体的なテーマ名は表4に示されているが、このなかでも最近、特に話題をよんでいるのが色素増感太陽電池である。色素増感太陽電池は1991年に雑誌“Nature”に報告されて以来注目されている<sup>11)</sup>。これまでのアモルファスシリコン太陽電池のように真空技術をベースにした製造技術でなく、常圧で塗布する技術をもとにしているため、低コスト化とい

う点に特徴がある。また、これまでの半導体太陽電池とは動作原理が異なる。この構造では、粒径10~30 nmの二酸化チタンの微粒子が、厚さ10 μm程度、透明導電膜(TCO)つきガラス基板にコーティングされ、二酸化チタンは光を吸収する色素でおおわれている。対極であるPtでコートされたTCO/ガラスとの間は無水性のiodide/triiodide(I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup>)を含む電解液で満たされている。光は色素分子で吸収され、電子を二酸化チタンの価電子帯へ注入する。注入された電子は二酸化チタン膜を通り、TCOへ流れ、triiodideは電子を受け取ることによってiodideになる。現在、10.4%の変換効率を得られている。この太陽電池の実用化に対するおもな課題は集積化・大面積化である。また、溶液の封止技術、電解液の固体化などの課題解決が必要である。

太陽光発電技術開発の当面の課題は、2010年までに482万kWのシステムを国内に導入することである。この導入目標を達成するためには、いっそうの低コスト製造技術開発にチャレンジしていかなければならない。2010年に向けて、薄膜が主流になるとの予測もあるが、このままシリコン技術の改良型が使われていくという見通しもある。ハイブリッド型などの薄膜太陽電池がバルク太陽電池を追いかけ、追い抜くのか、これからの技術開発によるところが大きい。

結晶シリコン系では、厚さ50 μmで変換効率20%を得る技術開発、薄膜系では、16~18%と現在の結晶シリコン系に迫るモジュール効率の実現がロードマップの最終目標値である。

## 文 献

- 1) M. Dhamrin, Y. Kayamori, H. Hashigami and T. Saitoh: "Metastability in B-doped multicrystalline silicon wafers and solar cells," *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-3)*, S5O-C6-04 (Osaka, 2003) p. 263.
- 2) 資源エネルギー庁編：エネルギー2002（エネルギーフォーラム、2001）。
- 3) 小長井誠編著，太陽光発電技術研究組合監修：薄膜太陽電池の基礎と応用（オーム社、2001）p. 7.
- 4) M. Tanaka, S. Okamoto, S. Tsuge and S. Kiyama: "Development of HIT solar cells with more than 21% conversion efficiency and commercialization of highest performance HIT modules," *WCPEC-3*, 4O-D10-01 (Osaka, 2003).
- 5) T. Tomita: "Present status of photovoltaic industry and issues in the future," *WCPEC-3*, 6PL-D2-01 (Osaka, 2003).
- 6) J. Kalejs: "An overview of new developments in crystalline silicon ribbon material technology for solar cells," *WCPEC-3*, 4PL-E1-02 (Osaka, 2003).

- 7) R. R. Gay, V. Probst and F. H. Karg: "CIS thin film development and production status at shell solar, May 2003," *WCPEC-3*, 2PL-C1-03 (Osaka, 2003).
- 8) 神田正雄: 第17回太陽光発電システムシンポジウム (太陽光発電協会, 2000) pp. 2-6.
- 9) G. P. Willeke: "The Fraunhofer ISE roadmap for crystalline silicon solar cell technology," *Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (New Orleans, 2002) pp. 53-57.
- 10) T. Kobayashi: "PV vision in Japan," *WCPEC-3*, 8O-D11-01 (Osaka, 2003).
- 11) B. O'Regan and M. Graetzel: "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films," *Nature*, **353** (1991) 737-740.

(2003年8月1日受理)