太陽光発電技術の開発動向と将来展望

矢 田 茂 郎*

* 三洋電機株式会社

Progress in Solar Cell Technology and Future Prospects*

Shigeo Yata*

* New Materials Research Center, Sanyo Electric Co., Ltd.

In order to resolve serious global environmental problems such as the greenhouse effect and acid rain, the key lies in the development of clean energies. Solar cell, which converts sunlight directly into electricity through the photovoltaic effect of semiconductors, is a key technology to overcome global environmental problems. This paper will review recent advances in solar cell technologies and their application technologies. Finally, future prospects are also reviewed, including a new global energy supply system called the GENESIS.

Key words : semiconductor, solar cell, GENESIS

1. は じ め に

近年、深刻になってきた温室効果や酸性雨などの地球環境問題の解決には、クリーンなエネルギー源の開発がカギを握る。半導体の光電効果によって太陽光を直接電力に変換する太陽電池は、まさに地球環境問題を克服する基幹技術と言える。ここでは、太陽電池の技術開発動向及び実用化に向けての取り組みを述べるとともに、大量普及に向けた将来の展望について述べる。

2. 太陽電池開発の必然性

2.1 全世界の環境問題

私たちを生み育ててきた地球には、気温を保ち、雲や雨を作る大気層が存在する。地球の直径 12,700 km を約 1 m に縮小すると、その表面に存在する大気層(12 km)はわずか 1 mm になる。この極薄な大気層に、私たちは化石燃料を燃やし、放出している。これは閉じたガレージの中で車のエンジンをかけ、排気ガスで窒息させるようなものである。この化石燃料は、約 0.02 % の変換効率で太陽エネルギーを約 2 億年かかって貯えたもので、人類は 100~150 年でこれを使い切ろうとしているのである。2 億年を 1 年(約 3000 万秒)とするなら、たった 15 秒から 23 秒で使い切ってしまうおとしているのである。

この人間の活動が、二酸化炭素やイオウ酸化物などの急激な増大をもたらし、それによって地球環境の異常に直面するのは至極当然と言える(図 1)。

2.2 エネルギー資源の枯渇

石炭や石油などの化石燃料の消費は、地球上のエネルギー資源量(確認埋蔵量)の観点からも、曲がり角を迎えている。現状のエネルギー消費が続くとし

ても、250 年以内に地球の化石燃料は枯渇してしまうと予想されている。また、世界の総人口の増加と 1 人当たりのエネルギー消費量の増加とが相まって、今後のエネルギー消費量は爆発的に増加していくと予想される。そして、西暦 2020~2030 年頃には人類の必要とするエネルギーと化石燃料の生産量との間に大きなギャップ、いわゆるエネルギーギャップが生じる(図 2)。これを解決するために新エネルギーの開発が必要である。

2.3 新しいクリーンエネルギー源としての太陽エネルギー

地球環境問題とエネルギー資源の枯渇という 2 つの理由から、我々は化石燃料にかわる豊富で安全な新しいエネルギー源を開発していく必要がある。この意味で、太陽エネルギーは、クリーン、無尽蔵で世界中のどこでも利用できるという特長を持つ最も理想的なエネルギー源と言える。地球に降り注ぐ太陽エネルギーは、170 兆 kW に達し、約 1 時間で全世界の 1 年分のエネルギーを賄えるほど膨大であり、また、太陽の寿命も人類の歴史に比べて桁違いに長く、半永久的なエネルギーとみなすことができる。

図 1 化石燃料消費が地球環境に与える影響

* 〒 570-8502 守口市大日東町 1-1 (1-1, Dainichi-Higasimachi, Moriguchi, 570-8502 Japan)

図2 各種エネルギーの消費量推移と予測¹⁾

図3 太陽電池の発電原理

太陽電池は、太陽の光のエネルギーを半導体の光電効果を利用して電気エネルギーに変換する(図3)。pn接合をもつ半導体に光が入射すると、+の電気を持つ正孔(電子の抜けた穴)と-の電気を持つ電子が発生し、それらがpn接合部で分けられ、+と-の電荷が両電極に集まる。この両電極を結線すると電流が流れる。太陽電池は、太陽エネルギーそのものの特長に加えて、以下の特長をもつ。

- (1) 光から直接電気エネルギーが取り出せる。
- (2) 化石燃料などを必要とせず排気ガスを発生しない。
- (3) 発電の規模の大小(例えば1Wと1MW)により、その効率が変わらない。
- (4) 曇りの日のような拡散光でも発電する。
- (5) 可動部を持たないため基本的に騒音の発生がなく、寿命も半永久的である。

また、太陽電池を構成している主原料であるシリコンは、地上で2番目に多い元素であり、資源面でも全く問題がない。

図4 太陽電池の変換効率の向上

3. 太陽電池の技術開発動向

3.1 太陽電池の形態及びエネルギー変換効率の向上

太陽電池は用いる材料により、シリコン、化合物半導体、有機半導体に分類されるが、主として用いられているのはシリコンである。さらに製造方法により、単結晶、多結晶、アモルファスに分類される。

単結晶シリコン太陽電池は、最初に開発が進んだ太陽電池で、変換効率(入射エネルギーを電気エネルギーに変換できる割合)は10cm角サイズで20%以上の高いものが得られている。しかし、製造工程が複雑でコストが高いという欠点がある。

これを改善するために開発された多結晶シリコン太陽電池は、溶融したシリコンを casting 中で固化し、これをスライスしたウェハを用いているが、単結晶シリコン太陽電池に比べて変換効率は多少劣るものの、コストの低減が可能である。

アモルファスシリコン太陽電池は上記2種類の太陽電池とは製造方法が全く異なっており、 SiH_4 などのガスをグロー放電で分解し、ガラスなどの基板上に形成可能であるため、低コスト太陽電池としての優れた特長を持っている。

図4にシリコン系太陽電池の変換効率の推移と今後の予想を示す。この20年間で、変換効率(小面積)は単結晶シリコン系で18%から25%に、多結晶シリコン系では12%から18%に、アモルファスシリコン系では5%から13%へと大幅に向上してきている。

今後は研究開発が加速され、変換効率は単結晶シリコン系で約27%、多結晶シリコン及びアモルファスシリコン系で20%程度まで向上していくと予想される。

以下、技術開発面における最近のトピックスとして、結晶系分野における新型太陽電池の開発、薄膜太陽電池開発の進展、建材一体型太陽電池開発の3点を紹介する。

3.2 新型結晶系太陽電池(HIT 太陽電池)

結晶系太陽電池は、現在の電力用太陽電池の主流であるが、近年、新型太陽電池の開発などによる高効率化が顕著である。研究開発レベルでは、小面積(4cm^2)では

図5 太陽電池セル構造

図6 HIT 太陽電池のI-V特性³⁾

あるが、変換効率24%を上回る値がPERL(Passivated Emitter and Rear Locally Diffusedの略)セル構造²⁾の開発により実現されている。

一方、アモルファスと単結晶をハイブリッドした新型太陽電池であるHIT太陽電池が高効率太陽電池として実用化されている。

HITとは、Heterojunction with Intrinsic Thin-layerの略であり、n型の単結晶シリコンウエハの表と裏に、それぞれi/p型アモルファスシリコンとi/n型アモルファスシリコンを順次積層し、さらにその上に透明電極を形成している(図5)。

HIT太陽電池はi層を形成することで、単結晶シリコンとアモルファスシリコン層の界面の特性を向上させており、従来型の結晶系シリコン太陽電池と比較して以下のような優れた特長を持つ。

(1) 高効率

低コストプロセスで高効率が得られる。実用サイズ(10 cm 角以上)で世界最高の20.7%の変換効率を得られている(図6)。さらに、商品レベルでもセル変換効率18.3%、モジュール効率16.1%と世界最高の値を達成している。

(2) 省エネルギー

接合形成温度が単結晶の約900°C(熱拡散法)に対して約200°Cと低温のため、生産時エネルギーを低減できる。

(3) 省資源

低温形成で、しかも表裏対称構造であるので、基板へ

図7 太陽電池の変換効率の温度依存性

のストレスが減少し、セルの薄型化(省資源化)が実現できる。

上記の特長に加え、HIT太陽電池は発電量が多く得られるという長所がある。

太陽電池モジュールを屋根面などに設置した場合、太陽電池モジュールの温度が上昇する。特に夏場の晴天時には70°C以上になる。一般に、太陽電池の変換効率は温度の上昇と共に低下し、単結晶シリコンの場合、75°Cでは25°Cと比較すると発電量が約80%にまで低下してしまう。

HIT太陽電池の変換効率の温度係数(-0.33%/°C)は、単結晶シリコン太陽電池(-0.45%/°C)と比較して小さい(図7)ため、発電量の低下が小さい。これは、屋根設置のように温度が上昇しやすい場所での使用した場合でも出力低下を押さえることができることを示している。同出力の単結晶シリコン太陽電池と比較した8月(大阪/晴天日)の1日のデータでは、モジュールの表面温度がピーク時(75°C)の発電量で約10%、1日の積算発電量で8.8%多いという結果が得られている。

3.3 薄膜系太陽電池

太陽電池が今まで以上に普及して行くためには、低コスト化が最も大きい課題である。この課題を解決する最有力候補が、薄膜系太陽電池である。

代表的な薄膜太陽電池であるアモルファス太陽電池は、これまで民生機器への応用が中心であったが、近年、電力用としても市場が広がり始めている。また、アモルファス太陽電池は光照射初期に特性低下が起こり、その後安定するという特徴を持つ。これは、光照射初期にアモルファス膜中の欠陥(ダングリングボンド)密度が増加することによって起こり、一般に光劣化というが、その機構については現在でもまだ解明されていない。このため通常アモルファス太陽電池の特性としては、初期特性ではなく安定化後の効率で評価されるが、この初期劣化の抑制技術についても開発が進んでいる。図8に、当社の大面積アモルファス太陽電池における安定化後効率の推移を示す。これは、経済産業省のニューサンシャイン計画に基づくNEDOの委託研究として、「低コスト大面積アモルファス太陽電池モジュール」の開発を加

図8 太陽電池の安定化後効率の推移

速的に推進した結果であり、これによりアモルファス太陽電池の効率を、大面積化、プロセス高速化と併行しつつも、着実に進展することができた。

3.4 建材一体型モジュールの開発

これまでの太陽光発電システムは、ビルの屋上や住宅屋根の上に専用架台を固定し、その上に太陽電池を設置していた。この場合、外観が良くないという問題があった。また、太陽光発電システムのコストの中で専用架台の占める割合も大きく、全体のコストダウンを妨げているという問題もあった。

これらの問題を解決する方法として、太陽電池と建材の両方の機能をもった建材一体型太陽電池モジュールがある。建材一体型太陽電池モジュールは、設置後の外観が従来の屋根置き型モジュールに比べてデザイン的に優れており、発電する建材としての商品価値を生み出すものとして期待されている。

特に近年、大手住宅メーカーが積極的に太陽光発電システムを導入しているが、大手住宅メーカーを中心に、美観に優れた建材一体型太陽電池の普及が飛躍的に進んでいる(図9)。

屋根材は従来の建築基準法(2000年6月からは改正建築基準法に移行)により不燃材に限定されていたが、近年様々な工夫によって防火性を向上させ、その性能評価結果をもとに1999年には建設大臣の特別認定を受けて屋根材として用いることを認可された建材一体型太陽電池モジュールが現れた。なお、現行の改正建築基準法で

図9 建材一体型太陽電池の設置例

図10 世界の太陽電池生産量の推移⁴⁾

は、防火性能評価基準が定められており、所定の評価試験に合格することで不燃材でなくとも屋根材として使用できる。また、屋外での信頼性については、JIS(C 8917 及び C 8918)で定められた環境試験法により確認している。

さらに、屋根材だけでなく、ビルなどの建築物の壁材や窓材として用いるものなどもある。具体的には、窓用のシーソー型モジュールや壁用のガラスカーテンウォール型モジュールなどがある。

4. 太陽電池の実用化に向けての取り組み

4.1 太陽電池の生産量とコスト

太陽電池の生産量は近年急速に増加してきた(図10)。全世界の生産量は2000年には約280 MWに達しており、日本、米国、EUのなかでも、日本が116 MWを占め、世界最高の生産国となった。図11に、太陽電池コストの推移と予測を示す。コストの急激な低下は製造技術開発と、生産量の増加の結果である。

4.2 太陽電池の応用

太陽電池の応用は、宇宙用、灯台用などの初期需要に

図 11 太陽電池コストの推移と予測

図 12 個人住宅用太陽光発電システム設置例

加え、1980 年からは、エレクトロニクス製品いわゆる民生用機器への応用が、アモルファスシリコン太陽電池の実用化により、急速に進行した。現在、電卓、ラジオ、時計、充電器などへ応用が進んでいる。

電力用途については、90 年代に入って日本の制度面の環境が整備され、これにより太陽光発電システムの電力系統への接続の道が開けた。当社ではこれに対応し、1992 年に日本初の逆流ありの実生活住宅太陽光発電システムを開発、設置し、太陽光発電システムの有効性を実証した。その結果、1994 年度には、個人住宅に太陽光発電システムを設置する場合、その設置費用を通産省が助成するという制度がスタートした。種々の民間企業より一斉にシステムが発売され、数多くの設置例が紹介されるようになった(図 12)。このような助成制度(現状では約 1/3 補助)により、太陽光発電システムは設置戸数が加速的に拡大している。特に 2000 年度はこの助成に応募が殺到し、約 25,000 件分もの設置が確定したが、2001 年度には本助成金対象件数が約 53,000 件(3.7 kW/件として)と倍増される予定である。

また、1994 年度には 3 kW で約 600 万円程度であった住宅用太陽光発電システムの価格も、量産効果と前述の技術開発成果の相乗効果により、現在では半分以上に低減した。

4.3 産業用システム

また、1992 年度から地方公共団体などが太陽光発電システムを導入する際には、設置費用の 1/2 を国が負担する助成金制度が発足した(NEDO 公共施設等用太陽光発電フィールドテスト事業)。97 年度までに計 175 か所

図 13 NEDO フィールドテスト事業(シーガイア: 宮崎県 40 kW)

図 14 ビル用太陽光発電システム(司電機産業(株): 大阪府 8.0 kW)

に設置(図 13)されるとともに、1998 年度から「産業等用太陽光発電フィールドテスト事業」へと引き継がれ、2000 年度予算では約 40 億円が計上され、導入件数は 151 件、導入量も約 3.7 MW にまで増加した。

また、図 14 に示すシースルー太陽電池など、ユニークなシステムもある。

5. 21 世紀への展望

5.1 太陽光発電導入ビジョン

石油に替わる安定したエネルギー源の確保や二酸化炭素の排出など地球環境問題への対応から、わが国では新エネルギーの導入を積極的に図らなければならないとした「新エネルギー導入大綱」が 1994 年に決定された。大綱では 2000 年までに太陽光発電による発電量を当時の約 20 倍の 40 万 kW、2010 年には約 250 倍の 500 万 kW*(表 1 の注釈参照)に引き上げる計画が出され、その実現に向けた具体的な施策が示されている(表 1)。

また、2030 年を目処に太陽光発電の大規模導入(5250~8200 万 kW)を目指した計画が策定されており、政府は太陽光発電の更なる積極的導入を図っている。これらの背景の下、今後の旺盛な需要に対応するため、太陽電池メーカー各社が増産を計画しているが、その中で当社も約 330 億円の設備投資を行い、現在、年間 15 MW の生産能力を 2005 年にはアモルファスも含めて、現状の 8 倍に当たる 120 MW へ増産することを計画し

表1 新エネルギー導入大綱の概要

▶ 目標

2000年	累計	40万kW
↓		
2010年	累計	500万kW*

*1998年の長期エネルギー需給見通しで、460万kWを改定

▶ その具体的な施策として

- ①住宅への導入促進
- ②公共施設等を中心とした導入促進
- ③政府関係施設へ導入促進
- ④保安義務の簡素化を軸に電気事業法等の規制緩和
- ⑤建材一体型太陽電池の開発

図15 メガソーラー (3.4 MW を計画)

ている。

さらに当社では、21世紀のクリーンエネルギーの象徴として、当社の岐阜事業所内(岐阜県安八町)に世界最大規模である3.4 MWの太陽光発電システム「メガソーラー」を建設することも計画している(図15)。

5.2 GENESIS 計画

最後に、太陽光発電の究極の姿、GENESIS計画(Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids: 旧約聖書で創世記の意味)(図16)を紹介する。GENESIS計画とは、太陽光発電システムを世界の各地に設置し、それを高温超電導材料を用いた電力ケーブルを用いてネットワーク化する計画である。太陽電池で発電した電力は、電気抵抗ゼロの超電導ケーブルでロスなく地球をグルリとまわって、昼間の世界から夜の世界にも運ばれる。これにより地球全域に電力がいきわたる。

我々の計算(表2)によると、西暦2010年の全世界の1次エネルギー消費量は、原油換算で約140億kl/年になると予測され、これをシステム変換効率10%の太陽光発電システムで賄うとすると、その面積はわずか約800km×800kmになる。それは全世界の砂漠面積の4%にすぎない。

図16 GENESIS 計画の実現に向けて

表2 世界のエネルギー消費予測と太陽電池のシステムエリア換算

年	全世界のエネルギー消費予測量 (原油換算×億kl/年)	太陽電池システム変換効率 (%)	太陽電池システムエリア (広さkm四方)
2000	110	10	729
2010	140	10	802 全砂漠面積の4%
2050	350	15	1030
2100	1110	15	1850

夢のような計画だが、図16に示すような段階的なアプローチが重要であり、現在、すでに最初のローカルネットワーク構築のステップに入っている。今世紀の中頃までにこの計画が実現されれば、人類はエネルギー問題から開放されるであろう。

謝 辞

本報告の一部は、経済産業省ニューサンシャイン計画の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託され実施したもので、関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 国連調査(World Population Prospects 1990, Energy Statics Yearbook など)による。
- 2) J. Zhao et al., : Progress in Photovoltaics, 7 (1999) 471.
- 3) Hitoshi Sakata et al., : 28th IEEE PVSC (Anchorage, September, 2000).
- 4) PV news, 2001年2月号。

(2001年3月5日受理)