

脚光を浴びる太陽光発電とガラス

太陽光発電研究組合 理事長

桑 野 幸 徳

Expecting More Solid Convergence between Photovoltaic Power Generation Industry and Glass Industry

Yukinori Kuwano

Photovoltaic Power Generation Technology Research Association, President

はじめに

21世紀に入り、地球環境問題、エネルギー枯渇の問題が深刻になってきた。人類がその人口を増大させ、豊かな生活を求めて、化石燃料の多くを消費してきた。その結果、化石燃料の高騰を招きまた大気中のCO₂の増大を引き起こし、それによる温暖化など気候変動が顕著になってきた。これらの解決の切り札として、太陽光発電が大きく注目を集めている。この太陽光発電とガラスの関わりは太陽電池の開発の初期から重要な関係を持っている。この分野でガラスがこれまで果たした役割と今後の展望を述べる。

1. 人々を魅惑する太陽電池

太陽電池は1954年にピアソン等によって発明された。当時は性能も悪く、発電コストも高く、主に人工衛星などに用いられていた。1973年のオイルショック（石油の価格が約10倍に上がった）を契機に、各国での国家プロジェクトが創設され新しい石油代替エネルギーとしての太陽電池の開発が始まった。しかし性能、コストの面でなかなか太陽光発電は普及しなかった。しかし粘り強い研究開発により大きく飛躍する時代が到来した。

1) 太陽のエネルギーは膨大

図—1に示すように地球に降り注ぐその太陽エネルギーは、1時間でおおよそ10京kcalに達し、たった1時間の太陽光のエネルギーで全世界が消費する1年分のエネルギーを賄うことができる。無公害で無限のエネルギーである。

2) 太陽電池は半永久的寿命を持つ

〒113-8311 東京都文京区本郷3丁目10番15号

JFAハウス 5階

TEL 03-5840-5820

FAX 03-3815-1277

E-mail: yuki-kuwano@sky.sannet.ne.jp

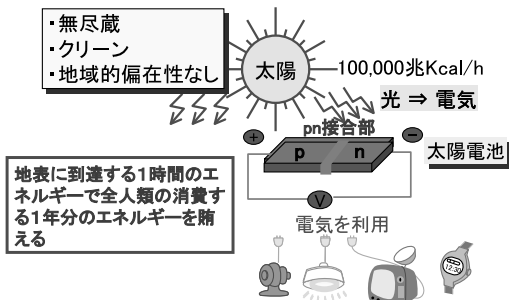


図1 太陽光エネルギーと太陽電池の発電原理

太陽電池は、図-1に示すように半導体の光電効果を利用したものでp-n接合をもつ半導体に光が入射すると、 $+$ の電荷と $-$ の電荷が発生する。これは光電効果と呼ばれる現象の一種で、半永久的に電気を発生する。電池と名前は付いているが、通常の化学電池とは異なる物理電池で原理的には半永久的の寿命を持つ。

3) 太陽光発電は素晴らしい

太陽電池をガラス基板などに複数組み合わせ、パネル状にしたものをモジュールと呼びこれを、電力制御装置等と組み合わせたものを太陽光発電システムと呼ぶ。その特徴は、無限でクリーンなエネルギー源である太陽エネルギーの特長に加えて、

- (1) 使う場所で太陽光から直接電気エネルギーが取り出せる。
- (2) 燃料は不要、排気ガス、騒音も発生しない。
- (3) 発電の規模の大小（例えば1Wと1MW）により、その効率は基本的に変わらない。
- (4) 可動部を持たないため基本的にメンテナンスフリーで長寿命。
- (5) 太陽電池を構成している主原料であるシリコンはガラスの主原料と同じSiで、地球上で2番目に多い元素であり、資源面でも全く問題がない。

2. 太陽光発電の最近の進歩

太陽光発電の開発の歴史を図-2に示す。筆者は、開発期間を3段階に分けて考えている。

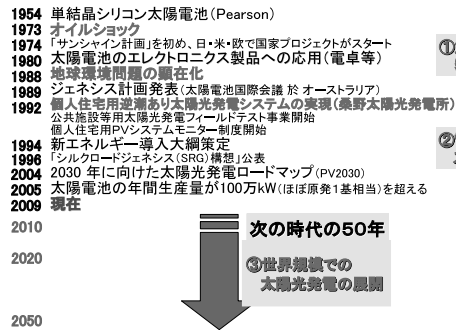


図2 太陽電池の開発の歴史

第1期は黎明期で1950年代から1980年半ばで、当時は変換効率も低く、価格も高く、人工衛星、灯台用電源、電卓用電源などに使われた。

第2期は成長期で、効率も向上し、1990年から2000年半ばで家庭用やビル用の電力用として使われた。

そして、現在、第3期の拡大期で太陽光発電がグローバル展開する時代になった。

1) 太陽電池の種類とその製法

太陽電池は用いる材料により、シリコン(Si)半導体、化合物半導体、最近登場した有機半導体などに分類される。主として生産されているものはSi系（単結晶、多結晶、アモルファスなど）で、最近、化合物半導体（CdTe、CIS等）が加わった。結晶系Si太陽電池の製造方法は、基本的にはSi半導体デバイスの製造法に似ている。

2) 太陽電池のエネルギー変換効率の向上は目覚ましい

太陽電池の変換効率の推移と今後の予想と共に図-3に示す。電力用として用いられる実用的なモジュールは、結晶Si系で11-19%、薄膜Si系で5-11%、化合物（CIS）系で6-12%に向上してきた。これらの成果には、日本のニューサンシャイン計画等の各国の国家プロジェクトが大きく貢献している。今後もより

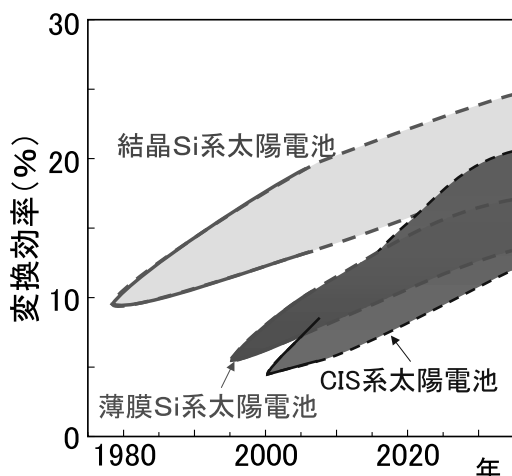


図3 各種太陽電池（モジュール）における変換効率の推移

一層の変換効率の向上やコストの低減が期待されている。

3. 太陽光発電の実用化の道

1) 日本の発想で太陽電池の実用化が始まる

1970年代はコストが下がらず苦戦が続いた。1980年初めに、日本の太陽電池メーカーは発想の転換を図り、当時、コスト的に太刀打ちできない電力用ではなく、化学電池と対抗できることに注目し、電卓の電源に応用しソーラー電卓として太陽電池を世に送り出した（写真—1）。

2) 日本で最初に系統連系が実現

1990年代になると、電力への太陽電池の応用も長年の研究成果が実り実用太陽電池モジュールの変換効率も10%を超えコストも下がりだした。日本では1992年に法制度の整備ができ、個人住宅の屋根に太陽光発電システムを設置して家庭用電力を賄い、余れば電力会社に売電できるようになった（このシステムは逆潮流ありシステムと呼ばれる）。その時、筆者は自宅に最初の実生活における逆潮流ありの太陽光発電システムを設置した（写真—2）。17年



写真1 1980年発売された太陽電池付き電卓（初期開発品）



写真2 初の実生活逆潮流ありの個人住宅用太陽光発電システム

目を迎えている現在でも、順調に発電している。

個人住宅や大きな建物への応用はその後、国の助成制度が1994年に創設され、大きく日本での太陽光発電の普及拡大に役立った。

3) 電力用太陽光発電は世界的規模で拡大中

2000年代の太陽光発電は日本だけでなく欧州、米国など全世界に広がっている。特にドイツでは2001年から再生可能エネルギー法に基づきフィード・イン・タリフ（FIT）という制度で、通常の電力価格の約3倍程度の高い価格で、太陽光発電によって発電した電力を電力会社が買う制度ができ、急速に普及が進んでい

る。そのため、太陽電池用の Si 原料が一時不足するまでになった。この F I T 制度はスペイン、フランス、などの EU 諸国をはじめ韓国などアジアを含め全世界に広がっている。写真—3 は最近スペインに設置された大規模太陽光発電システムである。

世界の太陽電池の生産量も図—4 に示すように急速に拡大し 6.7 GW のまで拡大してきた。このような動きの中で、日本でも個人住宅に太陽光発電を設置する場合の助成制度を 2005 年(11 年間実施)で中止していたが、2009 年から再開した(助成策は 7 万円/kW)。さらに 2010 年から日本版 F I T 制度とも呼べる、通常の電力価格の約 2 倍程度の高い価格で、太陽光発電によって発電した電力を電力会社が買う制度の創設が動き出した。これは大変歓迎されることである。



写真 3 スペイン Olmedilla 太陽光発電所の全景 (60 MW) 提供 (株) 資源総合システム

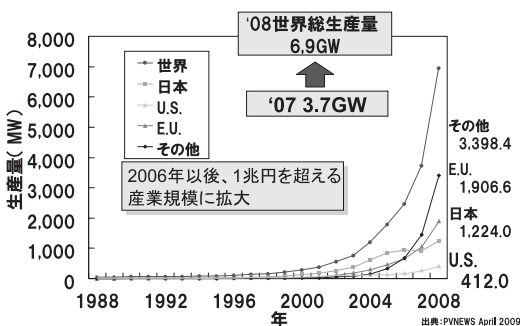


図 4 世界の太陽電池の生産量

4. 太陽光発電の実力はどれくらいか？

—日本の総電力の約30%を賄うことが出来る—

3 kW 家庭用太陽光発電で発生する電力は年間 3000 kWh⁽¹⁾で、それを石油換算すると 630 ℓ になる。つまり各家庭の屋根に油田ができたことになる。この電力量を CO₂ 削減換算すると、年間約 1.7 t-CO₂ に相当する。

これを基に日本の住宅の屋根やビル、空き地に太陽光発電を設置すると仮定して総発電量を計算すると、図—5 に示すように 2400 億 kWh となる。これは日本の総需要電力量 (8900 億 kWh, 2006 年) の約 30% に相当する。また、この発電量は CO₂ 削減量に換算すると 1.3 億 t になる。これは日本の CO₂ 総排出量の 10% に相当し極めて大きな削減効果になる。

5. この 50 年でどんな前進が図れたか

太陽光発電のこの 50 年を振り返ると大きな前進があった。まとめてみると

- ①変換効率は、4~10 倍以上に向上できた(シリコン系)
- ②コストは約 1/100 程度に低下できた
- ③太陽光発電システムとして電力系統との連系は問題ないことが実証された
- ④信頼性は 20 年以上大丈夫である
- ⑤産業規模は世界で 1 兆円規模になった。近い将来は 10 兆円規模になるだろう。



(⁽¹⁾) 発電量は、太陽電池 1 W で年間 1 kWh を発電する。『日本エネルギー学会』第 60 巻、第 3 号 (116-122)

(⁽²⁾) 資源エネルギー庁「エネルギー白書 2007 年版」

図 5 基幹エネルギーに成り得る太陽光発電

この成果は大変大きいものがある。

ただしこれは太陽光発電にとってはまだ十分でない。第7章に今後努力しなければならない点を記載する。

6. ガラスと太陽電池の相関関係

ここで太陽電池とガラスの関連をまとめておこう。

1) なぜ表面基板がガラスか？

開発の当初からガラスは太陽電池にとって欠かせない基幹材料であった。第1章2項で述べたように、太陽電池は半導体素子であるため戸外で使うためには、必ずエンキャプスレーション (encapsulation)、つまり実装することが必要である。表面は光を通す必要があるため透明で、耐候性が要求されるので一般に板ガラスが用いられた。一時、樹脂の表面基板が用いられ

たが、耐候性で問題が発生し、現在ではほとんどの場合、板ガラスが用いられている。図—6に結晶系 Si 太陽電池の製造工程を示す。板ガラスに太陽電池を複数個結線し、封止材料で封止し、アルミ材などでフレームを設け、耐久性のある形のモジュールを製造する。

2) 太陽電池に使われているガラス

現在、太陽電池は第1章で述べたように、色々な種類があるが実用化されているものとしては結晶 Si 系と薄膜系 (a-Si 系、化合物半導体系) を代表例として説明する。これらのモジュールの表面基板材料として用いられているガラス材料は以下の通りである。

- ① 結晶系 Si 系は一般的には白板強化ガラスが表面基板として使用されている。
- ② アモルファス Si 等の薄膜 Si 系太陽電池では表面ガラスとして白板未強化ガラス又

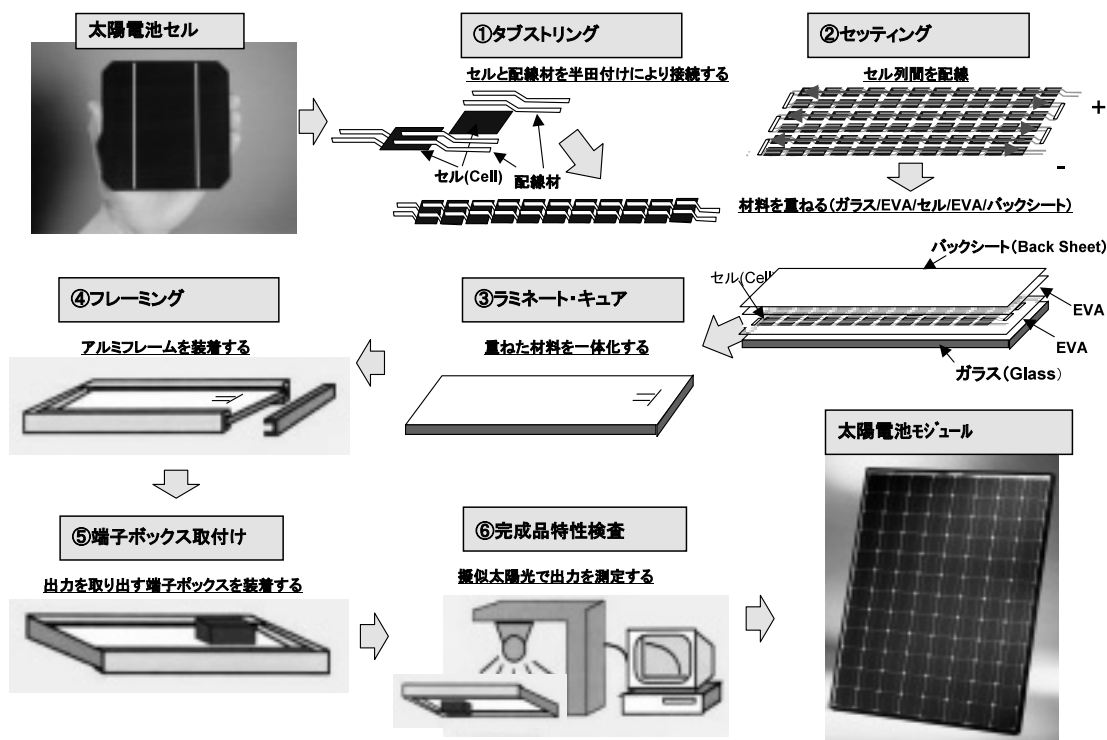


図6 結晶系 Si 太陽電池モジュールの製造工程

は青板未強化ガラスに透明導電膜を成膜したものが一般的には用いられている。

裏面はフッ素系樹脂とアルミニウム膜を張り合わせた防湿フィルムが多く用いられているが、最近、裏面にもガラス板を用いるタイプも登場している。

3) ガラス屋根瓦（和瓦）も開発された

1990年代には写真—4に示すような透明なガラス瓦とアモルファスSi太陽電池のハイブリット型の太陽電池が三洋電機（株）と旭硝子（株）の間で開発された。当時は、屋根材としての太陽電池瓦が認定されてなく、これらの開発が契機になりその後、太陽電池と屋根材が一体となったものが認定され、瓦建材として建材一体型太陽電池モジュールが使用できるようになった。

7. ガラス材料に対して何が課題か？

太陽電池の現在の課題は低コスト化である。そのために、①原材料コストを下げる ②変換効率を上げる ③寿命を延ばす ④生産量を増大させるなどが上げられる。変換効率を上げるために太陽電池の新しいデバイス構造、製法などに対する取り組みがなされている。ガラス基板に対しても以下のような取り組みが求められている。

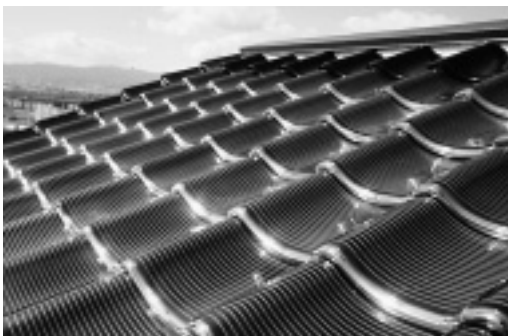


写真4 太陽電池和瓦 提供三洋電機（株）

1) さらなる基板のコストダウン

ガラス材料はすでに他の用途を含めて大きな産業である。太陽電池産業は世界の規模でみても2008年で約6.9GWである。仮に、モジュール効率を10%として結晶系Si太陽電池の場合で計算すると、現在、太陽電池に使われているガラスは約6700万m²なる。世界のガラスの生産量からするとまだまだ小さいと考えられる。しかし今後、太陽電池の生産量が10倍、100倍になったらその量は巨大なものになる。後述するように、その可能性を太陽電池産業は秘めている。さらなるコストダウンが求められる。

2) 信頼性は？耐久性？

太陽電池モジュールに対するテスト基準はIEC 61215（結晶系）、IEC 61646（薄膜系）、IEC 61730（安全性）で規定されている。ガラスに関係するものとしては、耐紫外光、強度（モジュールそのものの強度や降電試験など）などが重要な要素である。

その他にも、耐湿、温度サイクル、防火、絶縁、エージング（光）なども太陽電池用のガラスの性能にも係わってくる。

しかし、現状では太陽電池用のガラスの信頼性、耐久性は大きな課題ではないと考えられる。過去においては紫外線透過抑制（EVAの黄変防止）とガラス透過率劣化抑制のジレンマなどがあったが、現在はほぼ解決していると考えられる。

3) 高機能化ガラスへの期待

より反射を抑えたARガラスや、表面汚濁を防止するガラス（TiO₂コートなど）

などが開発されている。これらの実現と、長期の信頼性、コストなどの解決が求められている。

8. 今後の課題と展望

—既存の電力料金に匹敵するコスト（グリッドパリティと呼ぶ）を実現できる時代が見通せる

までになってきた—

グリッドパリティはいつ実現するか？

現在の太陽光発電の普及の支えはFITに象徴される各国の優位的買い上げ制度が果たす役割が大きい、しかし、真に太陽光発電が人類の基幹エネルギーになるためにはコストで既存の電力料金に対抗できるコストを実現することが重要である。つまりグリッドパリティの実現である。太陽光発電の日本におけるシステムコストの低下を図7に示す。低コスト化を実現するためには、前述のように①高効率化②長寿命化③生産量の増大がキーになる。

今後5-10年を考えた時、

- ① 太陽電池の効率はもっと上がっているであろう。
 - ② 寿命は現状20年が倍の40年には容易になっているだろう。
 - ③ 生産の規模は5倍から10倍にはなっているであろう。
 - ④ さらに、石油などの化石燃料の価格は現状の2倍くらいにはなっているであろう。
- それらを考えると、5-10年以内には確実にグリッドパリティは実現するであろう。と筆者は考えている。

9. 世界のエネルギーを賄う日を目指して—ジェネシス計画—

このような状況は太陽光発電の新しい時代に向かつての飛躍時代が来たことを意味する。筆者が提唱している太陽光発電による世界規模でのエネルギーシステムを紹介する²⁾。それはGENESIS計画(Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids)と呼ばれる計画である。図8に示すように世界の各地の砂漠に大規模な太陽光発電システムを設置し、その間を電気抵抗ゼロの超電導送電線で連系し、昼の世界から夜の世界に電力を輸送しようというものである。筆者らの計算によると全世界の砂漠の面積の4%(800 km²) 太陽電池を敷き詰めればよいこと

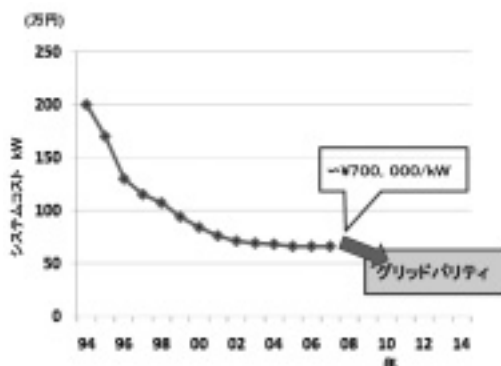


図7 日本に於ける家庭用太陽光発電システムの価格推移 (NEF HPデータに筆者加筆)

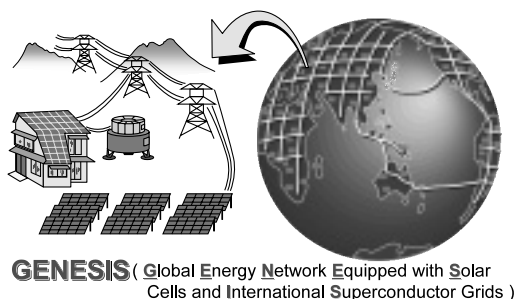


図8 太陽電池と超電導ケーブルによる世界的太陽光発電システム「ジェネシス計画」

になる。電力送電線の分野でも大きなブレイクスルーが最近起こった。液体窒素温度で実用可能な超電導ケーブルが住友電工(株)によって開発され、実用実験が開始されるまでになった³⁾。太陽光は発電が人類に大きく寄与できる日が近づいていることは確かである。

参考文献

- 1) 日本エネルギー学会 第80巻, 第3号(116-122)
- 2) Y. Kuwano, Proc. 4 th. Int. Photovol. Science and Engineering Conf. Sydney (1989)
- 3) 低温工学 42 (2007) 338