

# 集光型太陽電池(CPV)用ガラス部品とその役割

Role of Glass Parts for Concentrating Photo Voltaics

岡本硝子株式会社 常勤顧問 西村 啓道  
HIROMICHI NISHIMURA

Okamoto Glass Co. Ltd., Adviser

## 1. はじめに

石油エネルギーの枯渇が現実の問題として認識されている現在、再生可能エネルギーの中で有力とされているのが、太陽光エネルギーである。太陽光エネルギーのエネルギー密度は、1平方メートル当り1kWであり、決して高密度とは言えない。しかし、地球に降り注ぐ太陽光エネルギーの全量は、僅か2時間で人類が年間に使用するエネルギー量に匹敵しており、充分石油代替エネルギーになり得るものと期待できる。

地球上の五大陸には、赤道を挟んで太陽光が遮られることの少ないサンベルト地帯があり、有効に太陽光エネルギーを電気あるいは熱に変換することができれば代替エネルギーとして立派に役割を果たすことができる。またエネルギーコストも極めて重要な要素であり、開発あるいは実用化で必須な項目となっている。即ち、いかに高い変換効率で発電するか、またW当りの発電コストをいかに低減するかが開発競争に勝つために大切なポイントとなっている。

太陽電池と言えば、日本では先ず屋根やビルの屋上に設置するものというイメージが大きい。その理由は設置場所として平地面積の少ない日本において、屋根や屋上が最も有効な場所であることが上げられる。図1に太陽電池の種類を示す。ここに示した太陽電池の種類によって、特性は大きく異なっている。一般的には、太陽電池パネルとして平面状に並べて使用されている。

それに対して最近注目されているのが、集光型太陽電池CPV(Concentrator Photo Voltaics)である。太陽光を集光し高性能の太陽電池を使用して高効率で発電するこ

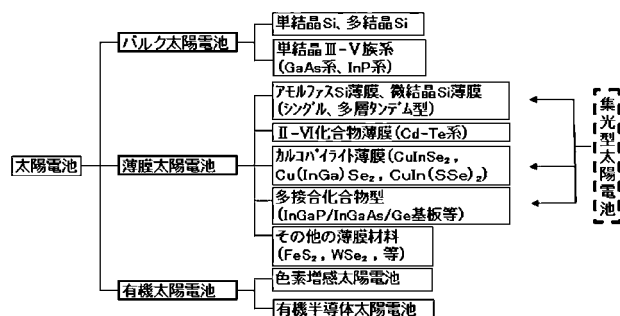


図1 太陽電池の種類

とで、発電コストを低減しようとするものである。集光発電の考え方は、太陽光発電の初期からあったと言われている<sup>1)</sup>。米国サンディア国立研究所で1970年代中頃に最初に開発され、50倍に集光した太陽光で12.7%と、その当時は高い変換効率が記録されている。その後フランス、スペインおよびイタリアで、追試験が実施されている。

我が国において、集光型の検討は、少なくとも1990年までは皆無といってよい。その後、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けたシャープで検討された例がある。また三菱電機、住友電工では集光型GaAs太陽電池で集光システムの可能性が検討されたものの、日本では曇りや雨の日が多く散乱日射光の割合が高いので、集光型システムには不向きとの結論が下されていたという<sup>2)</sup>。

その後、NEDOが運営する太陽光発電ニューサンシャイン計画においても、集光型太陽電池開発はテーマとして取り上げられていない。しかし、III-V族多接合高変換効率太陽電池等が開発されたことで、この数年でにわかに集光型太陽光発電に関する関心が高まり実用化検討

が急速に進んだ。

ちなみに、全世界で少なくとも40社に迫る企業がこのCPV事業を手掛けつつある<sup>3)</sup>。しかし、2009年のリーマンショック以降の景気低迷により、多くのベンチャー企業の業績に大きな変動が起こっており、期待されているCPV事業の立ち上がりに影響が及んでいる。

## 2. 集光型太陽光発電におけるガラス

### 2.1 集光型太陽光発電

エネルギー密度の希薄な太陽光ではあっても暴露による電池性能の劣化を防ぎ、また天候変化、特に暴風雨、砂嵐といった自然の脅威への耐性を有し、太陽電池として最低20年さらには30年の耐久性が求められる。その中で、高耐久性と高い光透過性をガラスは有しており、かけがえの無い素材となっている。一部の高分子材料も高い耐久性を示し、既にシステム上、欠くことのできない材料として実績を残し始めている。

日本に於いて2009年度の累積太陽電池導入量は、2,600MWに達しており、世界3位となっている。その太陽電池の主流はSi系で、直接太陽光を受け発電するパネルタイプであり、集光型は未だ僅か0.2%にすぎない、その理由は既に述べた通りである。

太陽光発電の開発は、NEDOのニューサンシャイン計画のもと、1993年から2000年にかけて世界をリードする成果を積み重ねてきた。その間、集光型太陽電池の開発には予算が計上されることはなかった。しかし、2000年にニューサンシャイン計画が終了すると同時に、「超高効率結晶化合物系太陽電池」の製造技術開発が2001年から2004年にかけてNEDOのテーマとして、始めて取り上げられ注目された<sup>4)</sup>。

何故、集光型が注目されるに至ったかを考えてみると、太陽光発電技術はグローバルな技術であり、世界を相手に考慮すべき開発技術であると認識したことにあると思われる。地球上で直達日射光の多い地域、即ちサンベルト地帯、例えば米国、地中海沿岸諸国、アフリカ、オーストラリア、中央アジアでは、この集光型太陽電池は高効率、低発電コストを特徴とするがゆえに将来性が極めて高いと期待される。特に、III-V族多接合、例えばInGaP/InGaAs/Ge基板を用いて500倍近く集光することで、およそ40%の変換効率を達成している。もともと、このIII-V

族多接合太陽電池は人工衛星用に開発されたもので、太陽電池としては高い変換効率と高い耐久性を示すが、高価であることからごく限られた市場でしか使用されていなかった。この電池が、高倍率集光下で高い変換効率を示し、かつ信頼性の高い電池であることが分かり<sup>5)</sup>注目されるに至った。また、欧米で集光型太陽光発電が先行して開発が進み実用化が始まりつつあったことで、日本でもにわかになら注目を集めることとなった。

太陽光を集光し、また太陽光を追尾することにより、小面積の太陽電池でより高い変換効率の発電をすることは、集光システムのコストアップを補い総合的にコストを低減する技術とされている。

### 2.2 集光方法とガラス

太陽光を集光する方法として、3つの方法が挙げられている。これらの3つの方法の原理を図2に示す。

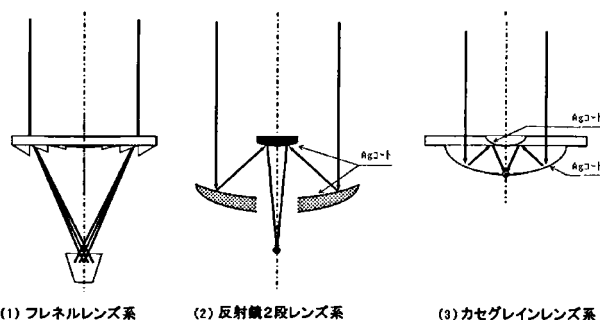


図2 集光型太陽電池の集光法概念図

図2(1)は、フレネルレンズ系である。フレネルレンズ自身は通常のレンズを同心円状の領域に分割し平面状に並べた薄型レンズである。倍率を上げようとする分割数を上げる必要があり、そのためのこぎり状の断面が増し、同心円状の輝線が入る。また回折の影響があり、集光効率が低下する欠点が避けられない。しかもガラスで高精度の成形加工が困難であることが障害となっている。そのためレンズ材料としてはプラスチックが主流となっている。現在、集光レンズとしてフレネルレンズを用いた例が多く、このフレネルレンズを平型から半ドーム型、ドーム型にすることにより集光効率を高めたモジュールが開発され集光効率が高められるという報告がある<sup>6)</sup>。写真1にフレネルレンズを用いたNEDO北杜サイトの追尾型集光太陽電池モジュール(シャープ)を示す。

図2(2)に、反射鏡2段レンズ系を示す。これはガラスを凹面鏡として使用し、太陽光を凹面鏡の焦点位置に結像



写真1 NEDO北杜サイト追尾型集光太陽電池モジュール(シャープ)

させ、その位置に太陽電池を設置し発電を行う方法である。実際には反射光を第二の小面積の反射鏡で二次集光し、その下に三次集光ホモジナイザー(ロッドレンズ)を設け、さらに均一に小面積の太陽電池に照射し、より高い変換効率で発電される仕組みになっている。その概念図を図3に示す。この図3のロッドレンズの一例を写真2に示す。この方法は反射鏡による集光を利用した方法である。一方、世の中には大きな反射鏡あるいは多くの鏡を組み合わせてその焦点位置に集光させて発電する方法もある。これらはディッシュ方式、ヘリオスタット方式とも呼ばれる集光発電方式である。これら二つの方式は、太陽熱発電法に利用されており、大きな凹面鏡あるいは大面積の平面鏡を使用している。

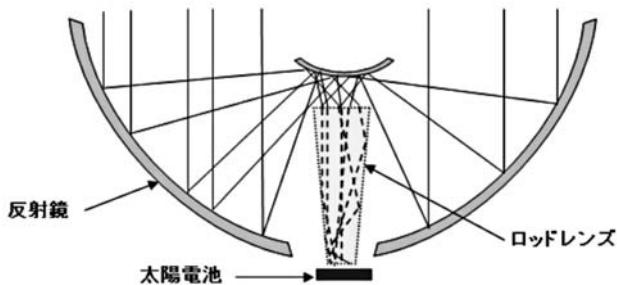


図3 反射鏡型集光太陽電池の集光・発電の概念図



写真2 ロッドレンズの一例

ガラスとして最もオーソドックスな集光方法は、レンズ方式である。しかし、レンズ方式により高集光倍率を達成するには大きな凸レンズを使用することを意味し、ガラスの使用量が増え原料コストがかかり、重量を増大させ、レンズの焦点距離を確保するため太陽電池モジュールの厚さを増大させるので現実的ではないと考えられた。そこで考えられたのがカセグレインレンズ系であり、図2(3)に示す。

カセグレインレンズ系は、レンズ下面および上面中心の一部が反射鏡になっており、二回反射させること、および屈折率の高いガラスを使用することで、効率良く集光することができる。フレネルレンズ系および反射鏡系では、集光装置が厚くなり薄型化には不向きであるのに対して、このカセグレインレンズ系は、薄型化が可能で家屋の屋根等への設置も充分可能であることが特徴である。レンズとしての厚みは、一つのセルの大きさにも依存するが5~12mmで済む。しかし、ガラス材料としてはその分厚くなり、重量がやや重くなることは避けられない。

写真3にカセグレインレンズ系を用いた太陽光発電用レンズモデルを示す。カセグレイン型は、太陽光をレンズ下部凹面鏡(主鏡)で反射し、レンズの光軸上前方の双曲面の凸面鏡(副鏡)で対向させ、下部凹面鏡の中央の開口部より裏側に光束を取り出して小面積太陽電池に導き発電する方式である。

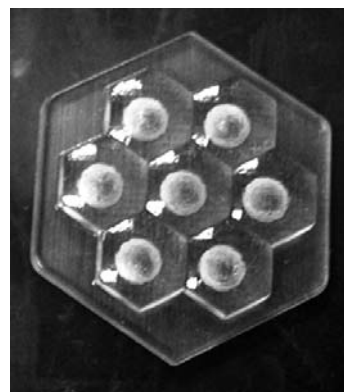


写真3 カセグレインレンズ系太陽光発電用レンズモデル

### 2.3 その他の集光方法

以上ガラスの代表的集光方法について述べたが、集光方法として他にいくつかの提案がなされている。その一つが平面導波路型集光レンズ、またの言い方としての全反射集光型があるが、その実効性等には未だ疑問点がある。薄型化に向いており期待できるが、実用化には困難を伴うと予想される。

またパネル型太陽電池において低倍率の集光法ではあるが、金属反射板等を太陽電池の両側に設置するか、放物型トラフを設置することで数倍から数十倍集光する方法の実用化も期待されるが、本稿では詳細については触れない。またホログラフィックに集光させる例もあるが、耐久性などに疑問が残る。

### 3. 太陽電池の種類と集光時の集光倍率と変換効率の関係

集光型太陽電池としての多接合化合物半導体太陽電池の特性は、結晶Si系太陽電池と異なり、集光による温度上昇が起こっても変換効率の低下がほとんど無いということである。また集光倍率を上げるほど、変換効率が上がるのが大きな利点である<sup>5)</sup>。

集光時の太陽電池の光電変換特性は、電池の温度上昇が起こり、そのために太陽電池の種類によって変換特性が大きく異なることが報告されている<sup>5)</sup>。Si系の太陽電池特性が、結晶系と非晶質系で性能に大きな差があることは良く知られている。非晶質(a-)Siに微結晶( $\mu$ c-)Si系薄膜を積層した、2層接合Si系太陽電池の吸収スペクトルを図4に示す。2種類のSi系の薄膜間で吸収する波長領域が大きく異なっていることがわかる。このように2種類の吸収波長領域を補い合うように設計すれば性能が向上することが期待されている<sup>7)</sup>。しかしながら、結晶Si系の温度変化による特性低下は改善されていない。

シャープの高本らは、太陽電池について集光倍率と変換効率との関係を測定し、図5に示す結果を得ている<sup>5)</sup>。

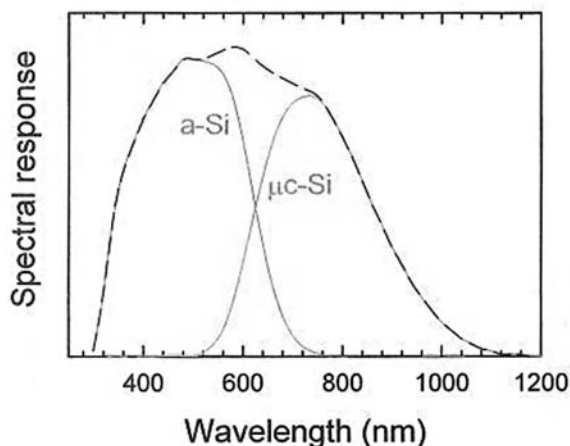


図4 非晶質(a-)Siと微結晶( $\mu$ c-)Si積層膜の吸収スペクトル

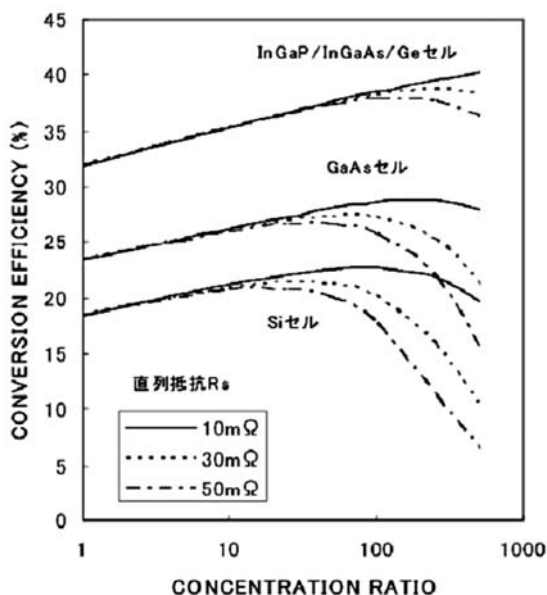


図5 太陽電池の種類による集光倍率と変換効率

SiセルやGaAsセルでは、変換効率は20%程と低く、集光倍率を高めていってもほとんど変換効率は上昇せず、やがて数10倍で急激に低下領域に入ることが分かる。

InGaP/InGaAs/Geセルにおいて、集光倍率を高めていった時の変換効率の変化を示したのが図5の一番上の曲線である。この多接合セルは、そもそも変換効率が32%と極めて高く、さらに集光倍率を高めるに従って変換効率は上昇を続け、やがて飽和から低下領域に入るが、SiセルやGaAsセルの変化と比較すると断然優れていることが分かる<sup>5)</sup>。

このような特性を得るためには膜構成について様々な因子、例えば膜構成、成膜条件、電極構造等々を最適化する必要がある。この図5では各セルの直列抵抗値がパラメーターとなっており、多接合セルはその影響を受け難いことを示している。

日本のシャープおよび米国Spectrolab等が多接合化合物半導体太陽電池の製造実績を有しており、今後集光型太陽電池の供給メーカーとして広く利用されるものと考えられる。また新たな参入メーカーも計画されている。現在までの多接合化合物半導体太陽電池の開発成果の推移を表1に示す。なお、この表には全ての記録が網羅されている訳ではないが、代表的な記録を表示している。また、倍率の表示が無い場合は、非集光太陽電池としての変換効率を示している。

太陽光を高倍率に集光し、多接合化合物半導体太陽電池を小面積で使用することで、汎用商用集光型太陽光

表1 多接合化合物太陽電池の経時的開発成果

年 代	開 発 概 要			研究機関
	太陽電池の種類、構成	倍 率	変換効率	
1995～1960	多接合太陽電池セル提案			Jackson氏ら
1982	AlGaAs/GaAs		15.10%	RTI
1987	AlGaAs/GaAs		20.20%	NTT
1989	GaAs/GaS(ムニカルスタック構成)	100	32.60%	Boeing
1997	InGaP/GaAs/InGaAs		33.30%	ジャパンエナジー等
2004	InGaP/InGaAs/Ge	200	39.20%	シャープ
2006	InGaP/InGaAs/Ge	236	39.20%	Spectrolab
2007	InGaP/InGaAs/Ge	1000	40%	シャープ
2008	InGaP/InGaAs/Ge	454	41.10%	Fraunhofer
2010	3接合化合物半導体太陽電池	不明	42.1%	シャープ・東大

発電でも原子力発電コストに匹敵する5～7円/kWhの低コスト化を実現できる見通しが得られたとの報道がされている<sup>8)</sup>。

#### 4. まとめ

現在、世界を上げて太陽光発電の開発が進められている。その中であって低コスト化の有力な手段の一つとして、集光型太陽電池への関心が高まっている。その主要な方向として、高変換効率を特徴とする多接合化合物半導体太陽電池を用い、集光倍率を高めることで40%を超える高変換効率を達成しつつある。

ガラスは、高耐久性、高信頼性の集光材料として、レンズあるいは反射鏡の要素材料として重要な役割を果たそうとしている。そのためにガラスの成形性を高め、求められる高い精度と高い生産性をもって低コスト化を実現し、グリッドパリティ(既存の系統電力と等価)を確保するだけでなく、さらなる低発電コストへの開発が望まれている。それが再生可能エネルギー問題の改善に資することに繋がると信ずる。日本が今までの経験と実績を活か

し、再度世界をリードできるよう期待したい。

最後に写真・図等の使用許可をいただきましたシャープ様、産業総合技術研究所太陽光発電研究センター様、そして新エネルギー・産業技術総合開発機構様に感謝します。

#### 参考文献

- 1) NEDO海外レポート No. 1012, p65 (2007)
- 2) 愛工技センターニュース 第470号, (1998)
- 3) Photon International, Nov. p146 (2008)
- 4) NEDO「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」報告(2006)
- 5) 高本、兼岩、シャープ技報 93, p49 (2005)
- 6) 太陽光発電技術研究開発「先進太陽電池技術研究開発」事後評価概要説明資料、NEDO技術開発機構新エネルギー技術開発部(2006)  
<http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/18h/jigo/55/1/5-2.pdf>
- 7) 平成21年度産業総合技術研究所太陽光発電研究センター資料(2009)
- 8) 日経Micro devices, Jan. p28(2009)