

集光型太陽電池モジュールとガラス

岡本硝子株式会社

西 村 啓 道

Glass for Concentrating Photo Voltaic Modules

Hiromichi Nishimura

Okamoto Glass Co., Ltd.

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る現在太陽光発電等太陽エネルギーの代替は最重要の課題となっている。太陽光は1平方メートル当たり約1KWというエネルギー密度であり決して高密度とは言い難い。それゆえに少なくとも太陽光を大きな面積で捉えなるべく高い変換効率で発電すること、またW当りの発電コストをいかに低減するかが商用電源に代わって実用化される大切なポイントとなっている。

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とでその効率を増大させようとする考え方は、太陽光発電の初期からあったと言われている¹⁾。なお、集光型太陽電池は英語で Concentrating Photo Voltaic (CPV) と呼ばれている。集光型太陽電池は米国サンデ

ィア国立研究所で1970年代中頃に最初に開発された。結果は50倍の太陽集光で12.7%とその当時では高い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にすぐ引き続いて設置された。

我が国においては少なくとも1990年まで皆無と言ってよい。1975年度から1980年度にかけて元通産省の委託を受けてシャープで検討した例がある。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、日本では雲が多く散乱日射光の割合が高く集光システムは不向きとの結論が下されていたということである²⁾。

その後の太陽光発電ニューサンシャイン計画に沿った独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)においても集光型太陽光発電はテーマとして取り上げられていない。しかしながらその後Ⅲ-V族多接合高変換効率太陽電池等が開発されることでこの数年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みつつある。ちなみに現在

〒277-0872 千葉県柏市十倉二 380 番地
TEL 04-7137-3128
FAX 04-7137-3135
E-mail: h-nishimura@okamoto-glass.co.jp

少なくとも全世界で40社に迫る企業がこのCPV事業を手掛けつつある³⁾。

2. 集光型太陽電池モジュールにおけるガラス部品

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太陽電池として最低20年あるいは30年の耐久性が求められ、その特性を満足する材料として透明性と耐候性を有するガラスはかけがえの無い素材である。一部の高分子が高い耐候性を示すことも明らかではあるが代替することは難しいと考えられる。

日本に於いては現在でも太陽電池の主流は直接太陽光を受け発電するパネルタイプであり、集光型は主流ではない。その理由は既に上で述べた。パネル型太陽電池および発電システムの開発を上記「ニューサンシャイン計画」のもとNEDOを中心として1993年度から2000年度にかけて実施し、世界をリードする成果を積み重ねてきた。

その後も引き続きパネル型太陽電池の高性能化、低コスト化の開発研究が進められてきたが、忘れ去られていた集光型太陽電池開発の見直しとなる「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」が2001年度から2005年度にかけて新たに取り上げられ実施されてきた。その成果について広く注目されるに至っている⁴⁾。

今さら何故集光型太陽電池なのか、その見直しの理由が何なのかと言うと、比較的日射量の少ない日本では主流とはなり得ないとしても、年間日射量の多い地域例えば米国、スペイン、中東、オーストラリア等において太陽光を集光することによりパネル太陽電池の変換効率をはるかに上回る発電量を達成し得ること、また低エネルギーコストを実現できる可能性が見えてきたことによる。

特に太陽電池の種類として多接合型化合物半導体(Ⅲ-Ⅴ族)例えばInGaP/InGaAs/Geを

用い、太陽光をレンズにより500倍程度に集光することで世界最高レベルであるおよそ40%の光-エネルギー変換効率が相次いで報告されている。もともとこの太陽電池は宇宙衛星用にパネル太陽電池として使用されてきたもので、高価ではあるが高い変換効率で信頼性の高い特長を有するものである⁵⁾。

高い変換効率を保つためには太陽光を集光するのみならず、また太陽光を追尾することが不可欠となっている。太陽光を集光するためにはレンズなどを使用する必要があること、また追尾するために追尾機構を備える必要があることから、ただ単にパネルとしてガラスを使用する太陽電池と違ってコストアップになることは避けられない。また太陽電池自体高価格であってもそれを小面積に分割し、集光した光を照射し発電することで、より高い変換効率が達成できるとすると、集光化することのコストアップを補いしかもトータルでコスト低減に資するという可能性が明らかになったことで、ここ数年特に世界的に注目されるに至った。その背景を反映して最近集光発電に新規に参入するベンチャー企業、実用化を促進する企業が相次いでいる³⁾。

2.2. 集光型とガラスの役割

太陽光を集光する方法として大きく分ければ3つの方法が挙げられる。一つはガラスあるいはプラスチックのレンズ効果を利用する方法で通常の凸レンズ効果を使用するものとフレネルレンズを使用する方法の2つがある。2つ目はガラスを凹面反射鏡として集光する方法があるが、この方法は点光源から放物線反射鏡を用いて平行光にするのと全く逆の関係にあり、平行太陽光線を放物線反射鏡を利用して狭い面積に集光する方法である。3つ目は天体望遠鏡で使用されているカセグレン光学系を応用したレンズが考えられている。これらの3つの方法の原理を図1に示す⁶⁾。

この図1で左端図(1)がフレネルレンズであ

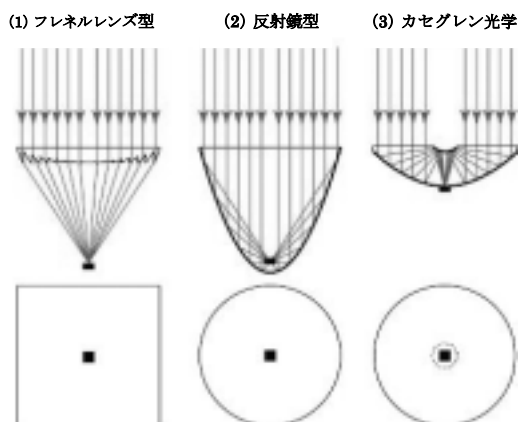


図1 集光型とその集光方法概念図

る。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とき分割数を上げる必要がある、そのためのこぎり状の断面が増しそのために同心円状の輝線が入る、また回折の影響があり光線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。そのため素材としてはプラスチックが主流となっている。

現在市場ではフレネルレンズを用いた集光型太陽電池用いた例が殆どと思われるが、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倍率および集光レンズと電池基板の距離を縮めたモジュールがNEDO委託研究で大同特殊鋼で開発され集光効率が高められたという報告がなされている⁷⁾。

写真1にシャープ社製の平板フレネルレンズ（表面に板状ガラスを配し内面に高分子フレネルレンズフィルムを貼付したもの）を用いた前記3接合化合物半導体太陽電池とを組み合わせた太陽電池を多数個集めモジュールとし、さらに太陽光追尾装置を装備したプラントの写真を示す。この装置は山梨県北杜市にある北杜サイトで実証評価中のものである。また大同特殊鋼製のドーム型のフレネルレンズを使用した集光追尾型太陽電池モジュールによる光発電プラン



写真1 NEDO 技術開発機構 大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証研究を実証する山梨県北杜市の北杜サイトにて撮影したシャープ社追尾型集光太陽電池モジュール写真

トも一部北杜サイトにて実証試験中であり、またあいち臨空新エネルギー実証研究エリアに設置され実証試験が続けられている。

反射鏡型のガラス集光法を図1の(2)に示す。このタイプはガラスを反射鏡として使用し平行光を凹面鏡の焦点位置に結像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。実際には凹面反射鏡にて集光された反射光を第二の小面積の反射鏡で反射させ、ホモジナイザー（ロッドレンズ）を通して照度を均一化・小面積化し、高倍率化した光を高性能太陽電池に照射し、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2に示す。

この図2の中のロッドレンズの一例を写真2に示す。

上記方法の実際の太陽電池モジュールは反射鏡と太陽電池をセットとし、およそ数十対集めたサブモジュールをさらに多数個集めて1台のモジュールとし、太陽に追尾する装置を備えた形でユニットとして使用される。

また平面反射鏡を多数個使用して一箇所に重なるように各反射鏡を面制御して集光することにより太陽電池に光を集め発電する、あるいは媒体を加熱し集熱し熱発電する方法がある。こ

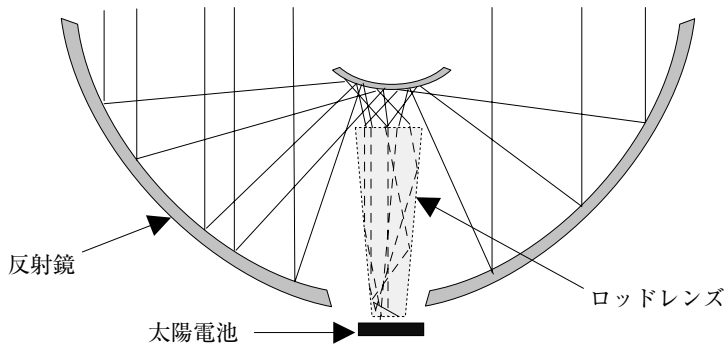


図2 反射鏡型集光太陽電池の集光・発電の概念図

の方法はヘリオスタット方式と呼ばれている。

第3のガラス集光方法であるレンズ方式はガラス凸レンズで焦点に光を集めるもので最もオーソドックスな手段である。しかしレンズ方式により大面積で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、原料コスト、あるいは電池容積の面から考えて重く、大きな容積となり現実的ではないと考えられる。そこで天文学分野で使用されている望遠鏡の一つで、良く知られているカセグレン型光学系を用いる方法があり、その図を図1.(3)に示す⁶⁾。

カセグレン光学系はある意味では下面および上面中心の一部は反射鏡になっているが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ため、効率良く集光することができる。フレネルレンズおよび反射鏡型では太陽光発電装置の深さが大きく薄型化には不向きであるのに対してこのカセグレン型は厚みを薄くすることができ家屋屋根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。ガラス材料の厚みとしては厚くなることからやや重量が重くなる欠点は避けられない。

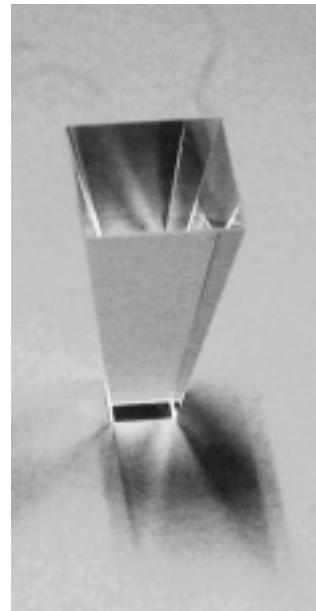


写真2 ロッドレンズ1例

写真3にカセグレン型光学系を用いたプラスチック製太陽光発電用レンズ模型を示す。集光の原理は図1.(3)に示した。太陽平行光が鏡面裏側で反射し、主鏡の光軸上前方に双曲面の凸

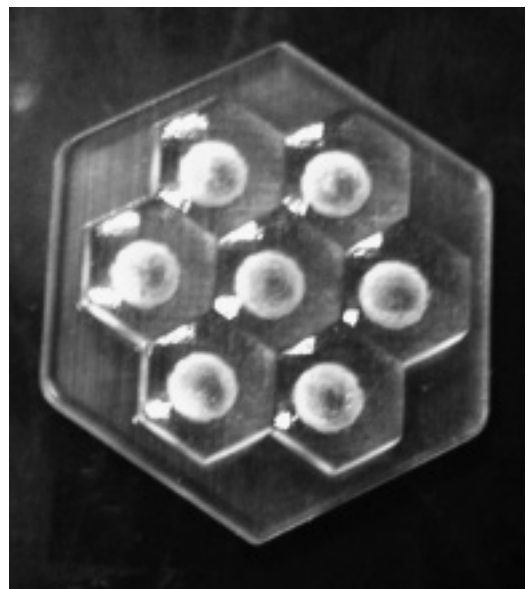


写真3 カセグレン光学系を利用したプラスチック製薄肉集光レンズ模型

面鏡（副鏡）を対向させ、下部凹面鏡の中央の開口部から裏側に光束を取り出して小面積太陽電池に導き発電させる方式である。

2.2. その他の集光方法

以上ガラスの代表的集光法について述べたが、集光方式としては他にも既にいくつかの提案がなされている。また低倍の集光にあっては金属反射板等を太陽電池の両側に設置する、あるいは放物型トラフをつけるなどすることで増進させたりすることも実際に実施されている³⁾。

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は疑問が残る³⁾。

3. 集光型太陽電池の種類による集光倍率と変換効率の関係

既に述べてきたが集光型太陽電池に主として使用される多接合化合物半導体太陽電池の特性はSi結晶系太陽電池とは異なり、集光することで温度上昇が起こることに伴う変換効率の低下がほとんど発生しない。むしろ集光倍率を高くすることで変換効率が高くなるのが集光型太陽電池として好ましい。

実際に広く使用されつつあるのは多接合型のⅢ-V族化合物半導体である。一部にSi太陽電池を使用されているようであるが、主流は宇宙太陽電池として実際に使用されてきたInGaP/InGaAs/Ge太陽電池であり、またGaAs系の多接合太陽電池である。

いずれもパネル状太陽電池として高い変換効率を有し信頼性の高い太陽電池ではあるものの、高価なために僅かに少量宇宙衛星用に使用されてきた。高価な太陽電池ではあるが小面積にして集光した太陽光を照射することにより得られる変換効率はパネル電池よりはるかに高いが故に、トータルのコストパフォーマンスが高く、特に日照率の高い地区で使用すれば十分低発電コストを実現できるものと期待が高まっている。

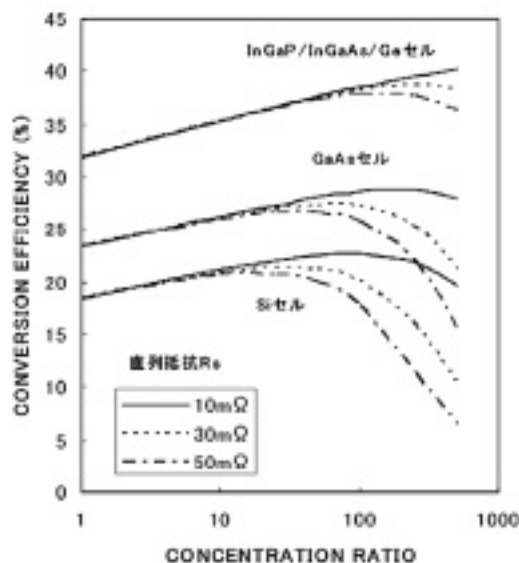


図3 太陽電池の種類による集光倍率と変換効率との関係（シャープ社データ³⁾）

InGaP/InGaAs/Geの3接合太陽電池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シャープ社で調べた結果が図3である。同図には比較してGaAsセルとSiセルの変化が示されている。この図3でセル間のトンネル接合の抵抗値がパラメーターとなっており、3接合化合物半導体太陽電池は影響を受け難いことが分かる⁵⁾。

今後さらに特性を向上させるためには接合膜構成についての様々な因子、例えば膜組成、成膜条件、電極構造等々を最適化する必要がある。

シャープ社および米国Spectrolab社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増えるものと期待されている。現在までの多接合化合物半導体太陽電池の変換効率の推移をまとめて表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項目の値はパネル型太陽

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	
1955～1960	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(メカ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

注：日経マイクロデバイス 2008. 8 月号をもとに筆者が編集

電池としての変換効率を示している。さらにデータは筆者が編集を加えたものである⁸⁾。

太陽光を高倍率に集光することにより、元来高価ではあるが高変換効率を有し宇宙用として使用されているパネル太陽電池を小面積で使用する、集光照射することでさらに高い変換効率化させることで汎用商用電源で最も安価である原子力発電コスト 5～7 円/KWh に匹敵する低価格を実現できる未通しが得られたという報道がなされている^{9,10)}。

4. まとめ

石油枯渇が避けられない将来、地球に降り注ぐ 1 時間の太陽エネルギーで人類が消費する年間のエネルギーをまかなえることから考え、太陽光発電はその代替エネルギーとして大きく期待され、全世界を上げて開発と実用化に拍車がかかっている。その中であっ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。

その中でガラス材料は高信頼性、高集光材料として重要な役割を果たすことは間違いない。その期待に答えるために高い精度、高い生産性を確立し低コスト化することがグリッドパリティの達成に欠かせない。日本が今までの経験

と実績を活かして世界をリードすることが求められる。

最後に本稿をまとめるにあたり資料提供また写真、資料使用の許可およびご指導をいただきましたシャープ社様、大同特殊鋼社様、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構様に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) NEDO 海外レポート No. 1012 p 65 2007.11.28
- 2) 愛工技センターニュース 平成 10 年 8 月 1 日 第 470 号
- 3) Photon International Nov. 2008 p 146 “Dawn of 500 Suns”
- 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」報告より
<http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/18h/jigo/55/1/6-5.pdf>
- 5) 高本達也, 兼岩実 “集光型化合物太陽電池” シャープ技報 93 p 49 2005 年 12 月
- 6) Morgansolar 社の資料 <http://www.morgansolar.com/lgo.php> より一部使用
- 7) 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 2000 年 12.25 より <http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/18h/jigo/55/1/5-2.pdf>
- 8) 日経 Microdevices 2008 年 8 号 p 91 をもとに編集
- 9) 例えば <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20080509/151492>
- 10) 日経 Microdevices January 2009 p 28