

**高校生のページ****太陽光発電のいま、そしてこれから**

光・電子理工学教育研究センター デバイス創生部門 先進電子材料分野  
藤田 静雄

**1. はじめに**

5月のある日、夏には昨年以上の節電が求められている中で、建物を管理して居られる事務室の方と一緒にその対策について話し合いをしました。私たちの研究室がある建物には大きなガラス窓があり、そこから太陽の光が文字どおり sun sun と差し込みます。事務室の人がこう言われました。「このガラスにスプレーで何か吹き付けて赤外線も紫外線も遮断できるようになったらいいのですがね。」太陽の光には赤外線、可視光線、紫外線が含まれていますが、赤外線は温度を上げ、紫外線はソファなどの布地を色落ちさせます。この両方を遮断して可視光線だけが窓ガラスを通るようにできたら、窓からの景色はそのまま赤外線と紫外線の影響を除くことができるのです。私はそこで答えました。「私たちの研究が実用化したらそれが可能になるのですがね。」そして「別のものをその上に吹き付けて太陽電池ができたならもっと役に立つと思いませんか。」と付け加えました。「そんな夢よりこの夏への対策ですよ。」と言われてしまいました。でもこれは夢ではありません。昨年新聞にこういう記事が出ていました「塗る太陽電池、実用化めど」（朝日新聞 2011年7月19日）。科学技術の進歩は、まず夢を見ること、そしてそれを実現しようと努力することによってもたらされるのです。

地球温暖化対策としての温暖化ガス（CO<sub>2</sub> など）削減が必須とされたことを皮切りに、東日本大震災の被害をふまえ、自然界から与えられるエネルギーである太陽光を用いた発電、すなわち太陽電池による太陽光発電への期待が急速に高まっています。期待、というより必須、と言った方が時の流れに叶っているかもしれません。しかし少し考えていただきたいと思います。太陽電池を作るにも使い終わった太陽電池を廃棄するにもエネルギーが必要です。ですから太陽電池は、製造や廃棄にかかるエネルギーよりも、いっそう多いエネルギーを生み出してもらわないと意味がありません。また太陽電池を設置しようとするコストがかかります。そのコスト以上に利益がないと太陽電池を設置しようとする動機が一気に覚めてしまいます。すばらしい技術であったとしても、それが世の中で普及するためには、技術の良し悪しだけでなく、経済的な価値があるのかどうかという問題がいつもついてまわります。太陽電池はどうなのでしょう、技術から少し視野を広げ、その今と将来について述べたいと思います。

**2. 太陽電池のしくみ**

太陽電池を形作る材料は半導体です。半導体には負の電荷をもつ電子を多く持つ n 型半導体と、正の電荷をもつ正孔<sup>1)</sup>と呼ばれる粒子を多く持つ p 型半導体とがあります。太陽電池の基本構造は、図 1 (a) に示すように、n 型半導体と p 型半導体とを縦に積み重ねたもので、電気を取り出すための電極がそれぞれの層に付けられています。集積回路など多くの半導体素子と比べて構造は単純ですが大きな面積を必要とする点で大きく異なります。

太陽電池の上面から光が当たると、光によって半導体の中に電子と正孔が生まれます。ここで n 型半導体の中に生まれた電子は n 型半導体の中に留まりますが、ここで生まれた正孔はいわば n 型半導体の中で異質なもの（少数キャリアと呼びます）ですから p 型半導体の方に移動しようとし、逆に p 型半導体の中に生まれた正孔はそのまま留まりますが、電子は n 型半導体の方に移動しようとし、こ

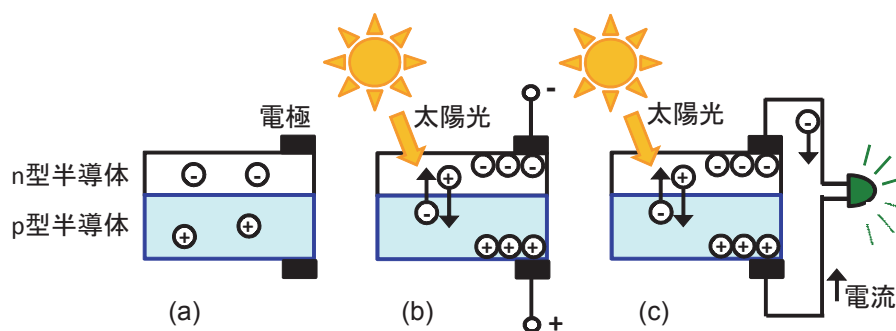


図1 太陽電池の基本構造と動作

うして、図1 (b) のように、p型からn型に電子が移動し、n型からp型へ正孔が移動することによって、n型がマイナス、p型がプラスとなる電圧が生まれます。したがって図1 (c) のように外部に回路をつなぐとp型から回路を通してn型へ電流が流れます。これが太陽電池の原理です。

太陽電池に照射される光の強度に対して、太陽電池から取り出すことのできる電力の比を効率と呼びます。半導体の代表とされるシリコン(Si)を用いた太陽電池モジュールの効率は、14～18%程度です<sup>2)</sup>。これを高くするためには、(i) 太陽光が表面で反射することを防ぐ、(ii) 太陽光をより多く吸収できる半導体材料を選ぶ、(iii) 少数キャリアがうまく移動できる構造をとる、といった工夫がされています。それにしても太陽光の80%以上が電気に変換されずに無駄になっているわけですから、これはあまりにもったいない、ということで研究者はこの無駄を減らそうと、熱心な努力を続けているのです。

### 3. 太陽のエネルギー

太陽は直径140万キロ（地球109個分）の天然の核融合炉で、表面温度は6000℃、中心部の温度は1500万℃とされています。その輻射が地球を暖め、わたしたちが適温のもとで生命を維持できているのです。現在の年齢は約46億歳と推定されますが、残りの寿命は約50億年と予測されています。一方人類の歴史を考えると、ネアンデルタール人が生まれたのが50万～30万年前とされていますので、これからの人類の歴史にとって太陽は永遠に生き続けると思って良いでしょう。

太陽からは熱・光エネルギーが地球に降り注ぎますが、日本に降り注ぐ光エネルギーは晴天の日中で約1kW/m<sup>2</sup>です。気象庁の統計によると東京の2002～2011年の平均の1年間の日照量は1,288kW/m<sup>2</sup>となっています。これを日本の平均と仮定して、日本の陸地面積38万km<sup>2</sup>に1年間に降り注ぐエネルギーの量を計算すると、490兆kWhとなります。一方日本で1年間に消費する電気エネルギーは約1兆kWhですので、その約500倍もの光エネルギーが太陽から降り注いでいると言えます。太陽のエネルギーのすごさを実感いただけるでしょうか。しかも重要なのは、このエネルギーを使っても減らない、またこのエネルギーは無料だということです。

### 4. 太陽電池はエネルギー的に元が取れるのか

太陽電池はこの無尽蔵の太陽エネルギーから電気を取り出す素子ですが、太陽電池を製作し、また設置、廃棄に至るまでにエネルギーが必要です。図2に太陽電池のライフサイクルとそこに必要なエネルギーを示します。このライフサイクルにかかるエネルギーに比べ、それ以上のエネルギーを生み出さないと、太陽電池はエネルギー収支の点で価値がないということになってしまいます。太陽電池の寿命は20年から35年、あるいはそれ以上とされていますが、石油等の化石燃料を用いる場合と根本的に違うのは、運転にエネルギーが不要だということです。つまり一旦設置してしまえば、太陽の光を受けてひたすら電気を作り続けますので、エネルギーが不要だけでなくCO<sub>2</sub>等の排ガス、廃棄物等を一切出さ

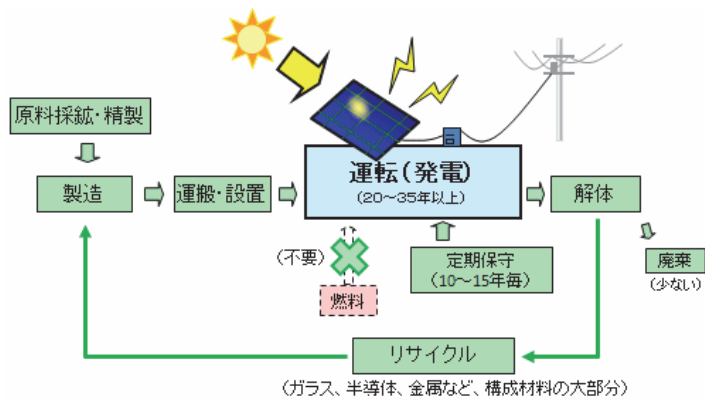


図2 太陽電池のライフサイクル (産総研 太陽光発電工学研究センターによる)

ないということが素晴らしいことなのです。

図3は各種太陽電池のエネルギー回収期間 (Energy Payback Time; EPT) の報告値を示したものです。エネルギー回収期間とは、製造から廃棄までのライフサイクルにかかるエネルギーを何年で回収できるか、という値です。縦軸は太陽電池の種類ですが、下から上に向かって新しい技術が用いられた太陽電池、より新しい時期に開発された太陽電池、と考えていただいても結構です。1990年代の製品はエネルギー回収期間が数年と考えられており、それでも太陽電池の寿命を考えるとエネルギー的に十分元が取れると言えます。技術の進歩とともにエネルギー回収期間は短くなり、最近のものでは2年程度でエネルギーの元が取れると考えられています。図4は各種太陽電池のエネルギー回収比 (Energy Payback Ratio もしくは Energy Profit Ratio; EPR) を示したものです。エネルギー回収比とは、素子の寿命のうちに、製造から廃棄までのライフサイクルにかかるエネルギーに対して何倍のエネルギーを生み出すことができるか、という値です。縦軸の並びは図3と同じです。1990年代の製品はライフサイクルにかかるエネルギーの数倍のエネルギーを生み出してくれるとされていましたが、最近の製品では20倍以上のエネルギーを生み出します。さらに将来技術では、30倍以上のエネルギーを生み出すことが期待されます。これは新技術の採用や量産規模の拡大で、製造にかかるエネルギーがどんどん少なくなり、一方、太陽電池がエネルギーを生み出す効率がどんどん高くなっていることによるものです。

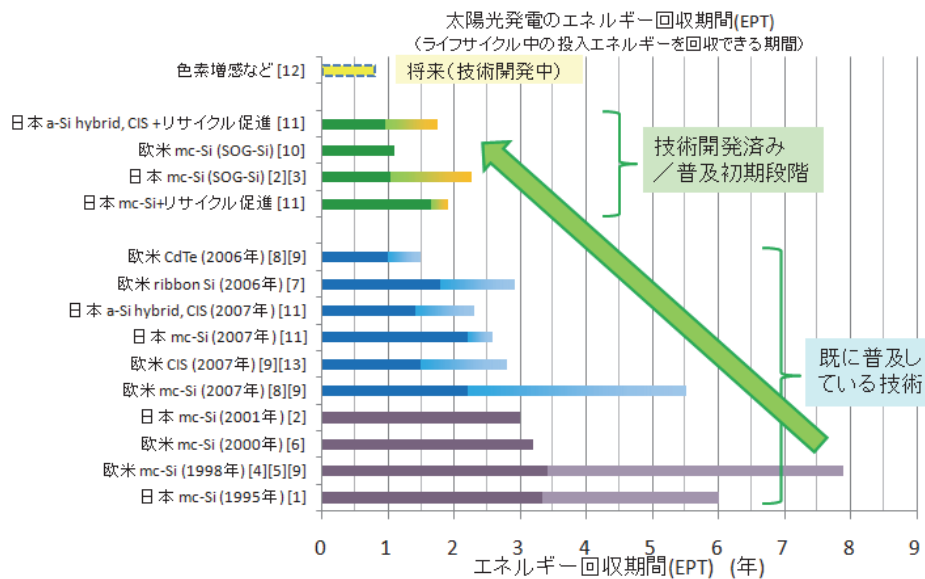


図3 各種太陽電池のエネルギー回収期間 (産総研 太陽光発電工学研究センターによる)

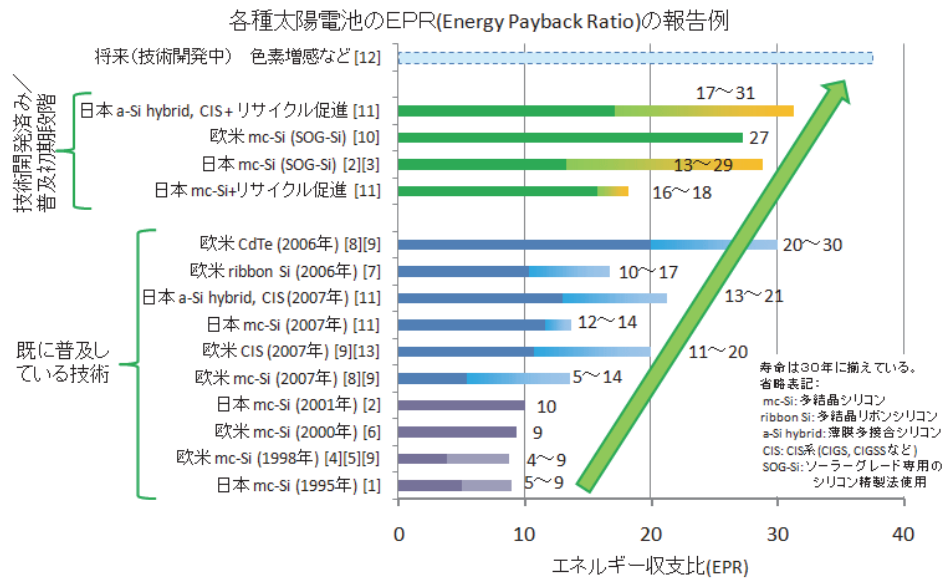


図4 各種太陽電池のエネルギー回収比 (産総研 太陽光発電工学研究センターによる)

図5は発電量あたりの温暖化ガス (CO<sub>2</sub> など) 排出量を示したものです。石油等の化石燃料を用いる火力発電と比較して、太陽電池を用いる太陽光発電では圧倒的に温暖化ガス排出量が少ないことがわかります。太陽電池の製造、運搬、設置において温暖化ガスを排出しますが、一旦設置してしまえば運転中は温暖化ガスを出さないためにこのような小さな値となるのです。また技術の進歩に連れて温暖化ガス排出量も少なくなっています。太陽光発電以外にも、風力発電や水力発電など自然のエネルギー (再生可能エネルギー) を用いる発電方式ではいずれも温暖化ガスの排出量は少ないことがわかります。

### 5. 太陽電池はコスト的に元が取れるのか

上でのべたように、太陽光発電は大きなエネルギーを生み出してくれますし、温暖化ガスの排出がきわめて少ないクリーンなエネルギーであるといえます。しかしコストの面で火力発電や原子力発電に負けています。太陽電池の設置・運用にかかる経費を太陽電池が作り出す電気ので割れば、その電気の価格が出てきます。日本の家庭に太陽電池を設置した場合、現在これは40~50円/kWhであると試算されています。他方家庭用の電気料金は20~30円/kWhで、これに比べると太陽電池が作り出す電気はかなり高い電気になってしまいます。別の言い方をすれば、お金をかけて太陽電池を設置するよりは、電気会社から電気を買って使った方が安いということになります。

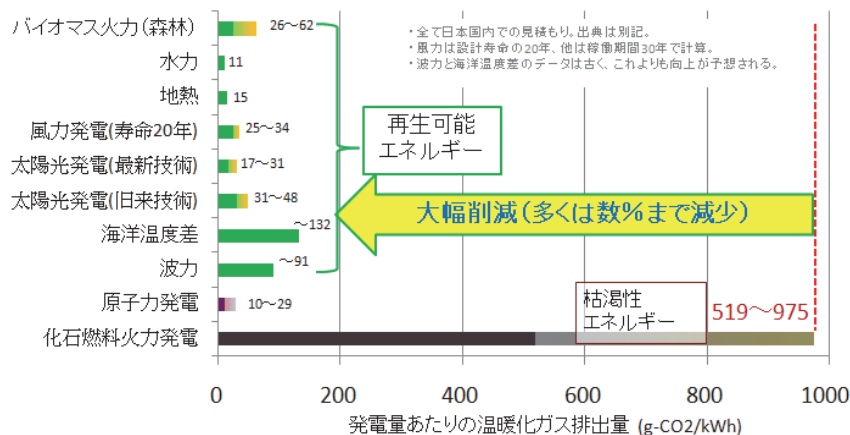


図5 各種発電方式に対し、発電量あたりの温暖化ガス排出量 (産総研 太陽光発電工学研究センターによる)



しかし温暖化ガス排出量の削減、自然エネルギーの有効利用を考えると、太陽電池の普及は地球規模で求められる問題と言って過言ではないでしょう。また、火力発電や原子力発電など、枯渇性の原料を用いる発電のコストは今後上昇することはほぼ確実で、一方太陽光発電は技術の進歩と普及で発電のコストは年々下がっています。実際、世界で最も太陽光発電の普及が進んでいるドイツでは、太陽電池の設置にかかる費用は日本の半額以下（出力1 kWあたり20万円以下）になっており、また2020年までにはガス火力発電と同等の発電コストになるとみられています。太陽電池設置への補助金、太陽光発電で得られた余剰電力の買い取り制度などは、さまざまな議論はありますが、上で述べてきた太陽光発電の利点を生かすべきであるという考えには多くの賛同があり、研究者・技術者は新しい技術の開発に努め、社会は普及への努力を続けています。

私も電気電子工学に携わる者としての使命と興味から、昨年秋に自宅に太陽電池を設置しました。まだ半年の運転でコストがどうという判断はできませんが、初期投資額は10～15年で回収できるのではないかと発電量をj得ています。もちろんこれは余剰電力買い取り制度がなければ達成できない数字です。しかしもし設置費用が半額であれば、この買い取り制度がなくてももっと短い期間で回収できると試算しています。これから初めての夏を迎え、日照が増すことと、高温で発電効率が低下するということとの釣り合いで、どのような結果が得られるのかということをお眺めしてみたいと楽しみにしています。太陽電池を設置すると、発電量と消費量がわかるモニターが設置されます。これを見ると、無駄な消費が実感され、原因を探ってそれを切つてゆきます。太陽電池設置の効果は意外とここにあるのではないかと、という気もしています。

### 6. 私たちの研究

太陽電池には新しい技術の導入が強く求められており、太陽電池を構成する半導体材料のみならず、電気を取り出すための電極、全体の構造、製造技術など、幅広い観点からの研究開発が世界中で進められています。私たちは企業との共同研究により、太陽電池に用いる新しい電極材料とその製造技術に関する研究を行っています。図1に示したように、太陽電池は半導体の効果で得られた電気を外へ取り出すための電極（図中黒塗りの部分）が必要です。Siを用いた太陽電池では、この図のように、太陽光が入射する側（図1ではn型半導体の表面）の一部に金属の電極を設ければいいのですが、新しく開発された半導体、例えばCu-In-Ga-Seという元素でできた半導体を用いた太陽電池では、電極として太陽光も電気も通すという「透明導電体」を半導体全面を覆うように付ける必要があります。この電極の製造技術が大きな課題となっており、太陽電池の効率を落とすことなく、また太陽電池に求められる大きな面積および低い製造コストといった点を満足するような製造技術を共同研究しているのです。図6は、横軸が電極材料（実際には酸化亜鉛：ZnO）を形成する温度、縦軸が得られた電極材料の電気抵抗に相当する値です。この研究の目標は200°C以下の温度で抵抗が低い「目標」と記された領域です。研究の開始当初（図中○と点線）には、とても遠い目標に思えていましたが、最新結果でこれがほぼ達成できるようになりました。また図にある「別の目標」とは太陽電池の別の構成材料として求められる特性で<sup>3)</sup>、これも達成できています。実際の産業に応用されるにはまださまざまな問題を解決する必要がありますが、私たちの研究成果が太陽電池の一層の高性能化と普及につながり、社

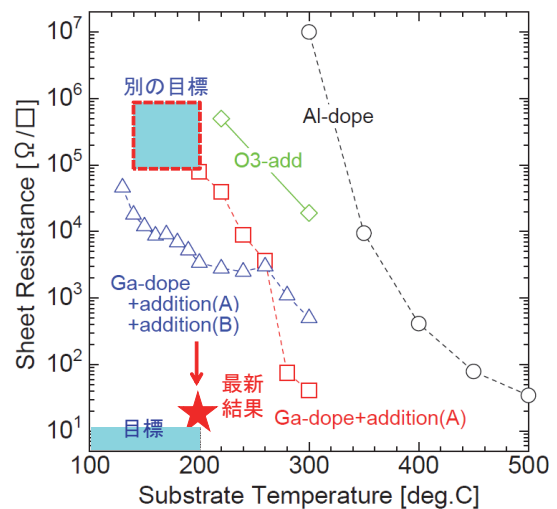


図6 電極材料の形成温度と抵抗の関係

会に対する使命を果たしてゆければいいと大いに期待しています。それから、最初に記した「ガラスに吹き付けて赤外線も紫外線も遮断する材料」とは、ここで示した酸化亜鉛を意味しています。この成果がもしかしたら活かせるかもしれないという思いがしたのです。

また、2012年6月から、私たちの研究室在籍の修士課程2回生の学生が、7ヶ月の予定でヨーロッパの太陽電池関係の研究所で研究に参加しています。私たちが半導体材料の研究で培ってきた技術を、先方での研究に生かしたいと思っています。聞くところによると、同研究所には世界各国の著名な大学の学生がインターンシップを兼ねて研究に参加しているとのことで、これからは国際的な視野で勉学・研究に励むことの大切さを実感しています。

## 7. おわりに

工学に携わる者は、技術が社会にどのように活かせるのかという価値を十分に認識する必要があります。いま社会からは、豊かな暮らしの実現とともに地球環境の保護との両立を強く求められています。とくにこれから工学の道に進んで行かれる方には、技術で地球を守ることが必須の課題とされてきます。ここで記した太陽光発電は、その観点で社会からの強い要請を受け、多くの研究者・技術者が使命感を持って取り組んでいる課題です。その他にも、効率の良いエネルギー機器、LED照明、電気自動車、エネルギーマネージメントシステム、省エネルギー製造ライン、レアメタル（希少金属）を含まない新材料など、これからの工学に課せられた課題は山積しています。将来の地球の真の豊かさは、これからの若い人たちの活躍に委ねられていると言って過言ではないでしょう。これを読まれる若い人たちに、「これからの地球をよろしくお願いします」と心の底からのお願いをして本稿を締めたいと思います。

また最後に記しましたように、国を越えた交流はますます盛んとなります。大学生のレベルでもそれにかかわる機会がどんどん増えてくると思います。これからの若い人たちには、自己の回りの小さな社会にとらわれることなく、地球規模の大きな視野を持った活躍をしてほしいと強く願っています。

なお、本稿を記すにあたり、独立行政法人産業技術総合研究所（産総研）太陽光発電工学研究センターの櫻井啓一郎博士（2001年電気系の博士課程修了）に資料のご提供や数々の助言をいただきました。ここに深く感謝するとともに、同研究センターのスタッフが関与されている著作物等を最後に示し、本稿を読まれる方への参考に付したいと思っています。

## 参考文献

1. 産総研太陽光発電工学研究センター編：トコトンやさしい太陽電池の本（日刊工業新聞社、2007年）
2. 櫻井啓一郎著：波に乗れにつぼんの太陽電池（日刊工業新聞社、2009年）
3. 桑野幸徳・近藤道雄 監修：図解 最新太陽光発電のすべて（オーム社、2011年）
4. 産総研太陽光発電工学研究センターホームページ <http://unit.aist.go.jp/rcpvt/ci/index.html>

## 注

- 1) 実際には電子が存在すべきところに存在しない、電子の抜けがらです。
- 2) 太陽電池を組み込んだパネルの効率で、個々の太陽電池の効率よりは低くなります。個々の太陽電池の効率は研究レベルで20～23%程度です。
- 3) 企業との共同研究のため詳しいことを記せずに申し訳ありません。