

「理戦」81号(2005年夏)掲載

原題「太陽電池には何ができるか」(掲載時に変なタイトルに変えられてしまいました)

名古屋工業大学 市村正也

[歴史]

たいていの科学技術には発明者がいる。蒸気機関を発明したのはワットであり、電球を発明したのはエジソンである、というように。しかし太陽電池にはそのような明確な発明者はいない。太陽電池が初めて作製されたのは1953年、アメリカのベル研究所においてであると一般に見なされている。実際は、太陽電池のようなもの(光をあてると電圧が発生する素子=光起電力素子)はそれ以前から作られていたし、その物理現象すなわち光起電力効果は19世紀後半にすでに発見されていた。1953年が太陽電池元年であるといわれる理由は、このとき初めてシリコンで光起電力素子が作られたためである。それによって発電の性能が飛躍的に向上した、つまりある一定量の光を照射したときに得られる電力が大幅に増加した。他の材料を用いた光起電力素子は発生する電力がきわめて小さかったため、エネルギー源として使われることはなく、もっぱら光の量を測る目的で使われていた。シリコンを用いたときに初めて、エネルギー源すなわち「電池」としての応用用途が生まれたのだ。(なお以下では、光をあてると発電する素子を「太陽電池」と呼び、光で発電することを「太陽光発電」という)

太陽電池の“発明”から二年後の1955年には最初のソーラーカーが作られ、さらにその三年の後には太陽電池を搭載した人工衛星が作られている。太陽電池はまず分散独立電源としての利用が進んだ。燃料の補給も不要であるため、電源系統から離れたへんぴな場所で電力を得るには好都合だった。日本で初めての実用的な太陽電池システムは1966年に作られた長崎県尾上島灯台だといわれている。昼間発電した電力を蓄電池に蓄え、夜灯台の明かりを点灯させる。以来四十年近く、その太陽電池システムは働き続けている。

このように太陽電池は約五十年の歴史がある。あるいは、たった五十年の歴史しかない。他の発電システムと比較する際にこのことを忘れてはならない。火力発電に用いられる内燃機関の歴史は18世紀のワットの発明までさかのぼる。また風力発電も、その風車自体はそれこそドンキホーテの昔からあった。このような歴史のある、成熟した技術に比べると、太陽電池はきわめて歴史の浅い、新しい技術であると言うことができる。

[太陽電池の原理と発電効率]

太陽電池の性質を表す最も重要な値はエネルギー変換効率(あるいは単に“変換効率”)である。これは
変換効率 = (太陽電池の出力パワー) / (太陽光のパワー)

で定義される(「パワーの単位はワットWである)。市販のシリコン太陽電池の効率は15%程度である。

[以下、原理は少しわかりにくいかもしれませんが。次の節に飛んでもけっこうです]

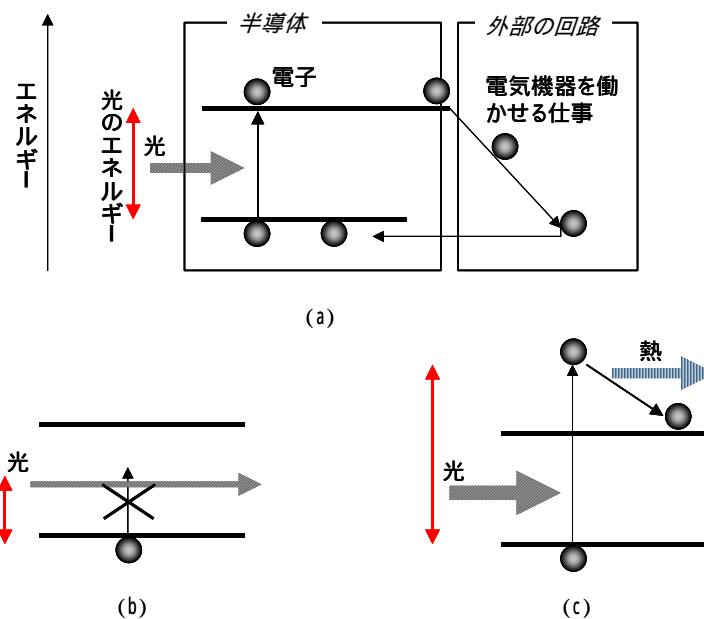


図1 太陽電池の動作原理(a)と損失が発生する二つの要因(b)(c)

光は粒子の性質を持っており、光の粒 = 光子は波長(色)に応じたエネルギーを持っている。可視光の中では紫色が一番光子エネルギーが大きく、赤色が一番小さい。紫外線は紫よりさらにエネルギーが大きく、赤外線は赤よりさらに小さい。太陽電池は光子エネルギーを電気的なエネルギーに変換する。

太陽電池の材料は半導体である。半導体の中では、電子(価電子)はエネルギーの低い安定な状態とエネルギーの高いより不安定な状態の二通りの状態をとることができる。エネルギーの低い状態は建物の一階、高い状態は二階にたとえることができる。電子は、普段はより安定な一階にいる(図1(a))。そこに光があたると、そのエネルギーで電子は二階に上がることができる。太陽電池は、この二階に上がった電子を二階から外に取り出す。この電子は、山の上にある水と同じで大きな位置エネルギーを持っており、下に落ちる時(位置エネルギーの低い状態に戻るとき)仕事をすることができる。電子の場合はモーターを動かしたり、電球を光らせたりすることができる。これが太陽電池の発電動作である。

この過程において、もし光のエネルギーが一階と二階のエネルギー差より小さいと、光は電子を二階に上げることができない(図1(b))。このような光は半導体を素通りしてしまい、電気に変わることはない。一方、光エネルギーが一階/二階のエネルギー差より大きいと、電子は二階の床を通り越して天井の方まで一旦持ち上げられるが、すぐに二階の床までは落ちてきてしまう(図1(c))。電子を外に取り出せるのは二階の床からである。したがって、床を越えて高く持ち上げられた分のエネルギーは外に取り出すことができず、半導体の中で熱に変わってしまう。光エネルギーがもっとも効率よく電気エネルギーに変わるのは、光エネルギーが一階/二階のエネルギー差に一致するときである。それより小さいときはまったく電気には変わらず、大きいときは超過した分は熱に変わってしまう。シリコンの一階/二階のエネルギー差は近赤外線のエネルギーに相当する。したがってシリコン太陽電池は近赤外線を効率よく電気に変換できるが、もっとエネルギーの小さな赤外線はまったく電気に変換できず、エネルギーの大きな可視光や紫外線はそのエネルギーのかなりの部分が熱に変わってしまう。

半導体材料はそれぞれ決まった一階/二階のエネルギー差を持っている。一方、太陽光はエネルギーの大きな紫外線からエネルギーの小さな赤外線まで、様々なエネルギーの光が混ざったものである。(プリズムなどを通すとそれらが分離し、虹のように見える)この太陽光を半導体にあてると、そのうちのエネルギーの小さな光は半導体を素通りしてしまい、エネルギーの大きな光は半導体の中で熱を発生させる。したがって、太陽光のエネルギーをもれなく電気エネルギーに変えるのは不可能で、必ず透過および熱発生による損失がある。一階/二階のエネルギー差が大きければ大きいほど素通りによる損失が大きくなる。エネルギー差が小さくなれば素通りの損失は減るが、熱発生の損失が増える。

実際には、電子を“二階の床から”取り出すためには構造に工夫が必要であり、しかも取り出す過程である程度の損失を伴う。このことを考慮し、また上で説明した損失を考慮して、太陽電池の変換効率が理論的に計算されている。それによれば、シリコン太陽電池の変換効率は20%程度である。これは理論限界であって、これ以上の効率をシリコンだけを用いて実現することはできない。

現在販売されているシリコン太陽電池の効率は10から15%である。実際の素子では電極金属で覆われてしまう部分があり、効率は低下する。この低下がなければ、現在のシリコン太陽電池、特に高級品である単結晶太陽電池の効率は理論限界の20%にかなり近い。ということは、変換効率はすでに理論限界近くまで到達しており、今後大きな向上は望めないことになる。

[発電量]

晴れた日の日中、地上に到達する太陽光のパワーは約 1 kW/m^2 である。1kWはおおよそ電気ストーブを「強」で使っているときの電力に相当する。それだけのパワーがたった1m四方に降り注いでいるのであるから、太陽のエネルギーがいかに膨大であるかがわかる。

上で述べたように、太陽電池の変換効率は約15%である。掛け算をすると、晴れた日の日中なら1m四方の太陽電池の出力は約150Wになる。150Wの電力があれば中程度の大きさのテレビは映る。パソコンも使えるだろう。同時に扇風機も動かせるかもしれない。

同じように計算すると、1kWの電力を得るためには約 7 m^2 の太陽電池が必要である。また、原子力発電一基分=百万kWの電力を得ようと思えば、約3km四方の太陽電池が必要になる。(たしかにこれは広大な面積だが、原子力発電所というのも敷地はいいかげん広大である)

ところで、太陽電池は光がなければもちろん発電はしない。たとえば「1kWの太陽電池」とは、晴れた日の日中に1kWの電力を発電する太陽電池を意味する。雨が降っていれば出力ははるかに小さくなるし、夜は出力ゼロである。発電装置として太陽電池を考えると、最大出力がいくつかということに加え、どの程度の時間働いてくれるかを考えなければならない。

ワットに時間をかけたものを電力量といい、通常kWh(キロワット時)という単位で表す。1kWの電力を1時間使ったときの消費電力が1kWhである。電力料金はこの電力量の値をもとに計算される。

さて日本で1kWの太陽電池を一年間使うと、おおよそ1000kWhの電力量を発電してくれる。つまり、太陽電池は一年で約1000時間働く。一日あたりにすると3時間弱である。太陽電池は、平均すると一日3時間ほどフルパワーで働き、あとは休んでいる電源ということになる。晴れた日はもちろん3時間以

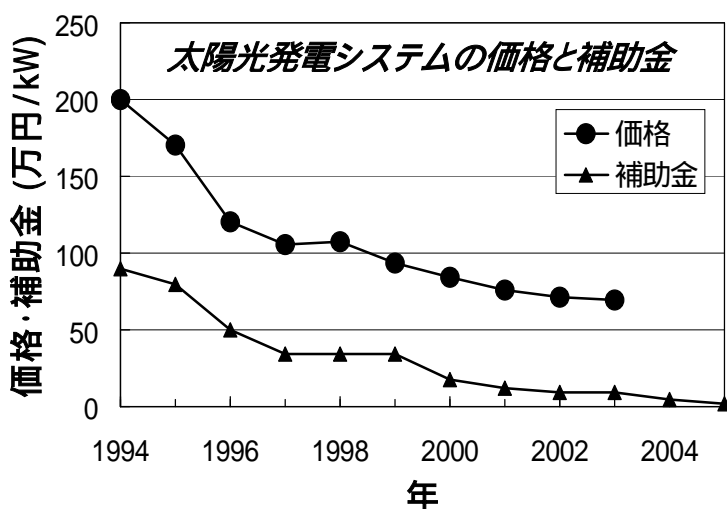


図2 太陽光発電システムの価格と補助金の推移

上働くが、雨の日はほとんど働かず、平均すると3時間ぐらいになるのだ。

一方、日本における一般家庭の消費電力量は平均で年間およそ4000kWhとされている。ということは、4kWの太陽電池があれば家庭での消費電力分を発電できることになる。現在販売されている家庭用太陽電池システムが3~4kWなのは、それだけあれば家で使う分を発電できるためだ。4kWの太陽電池の面積は約30m²であり、標準的な家の屋根にらくにおさまる。

[経済性]

太陽電池システムの価格は業者によって大幅に異なり、04年では1kWあたり50万円から100万円程度である(新エネルギー財団のホームページ <http://www.nef.or.jp/> に公表されていたが、現在は中止したようである)。平均的な値である70万円/kWを使って、太陽電池の経済性を考えてみる。4kWのシステムだと280万円になる。一方、これを使って得られる年間の発電量は上で示したように4000kWhであり、日中の電力料金の単価はおおよそ25円/kWhであるから、年間の稼ぎは約10万円である。太陽電池の寿命は少なくとも20年とされているので、稼ぎの総額は200万円と見積もられる。コストが280万円だから、20年かけて80万円ほど損をすることになる。(もっとも、激安の業者をさがして50万円/kWで購入すれば、ちょうどもとはとれる計算になる)

経済産業省(通産省)は94年から家庭用の太陽電池に対する補助金制度を設けている。ただその金額は年々減少し、17年度はわずかに2万円/kWであり、もらっても損得の大勢に影響はない。図2は新エネルギー財団が公表している、補助金を受けて設置された太陽電池システムの平均設置価格と補助金の額である。太陽電池の価格は下がってはいるが、ここ数年はあまり大きな変化がない。一方、94年の開始時はkWあたり100万円近かった補助金の金額は急激に減少し、廃止も間近い。

結局、現在の太陽電池の価格では、“もとをとる”のは難しい。しかも、現在は電力会社が電力を売値で買い取ってくれている。つまり、昼間に発電し家庭内で使いきれない分の電力は、その時間帯での電

力料金と同じレートで電力会社が買い取ってくれる。この「余剰電力購入制度」は法的な制度ではなく、電力会社の自主的な運用によるものである。電力会社にとっては、電力という商品を売値で仕入れるわけであるから不利な制度であり、その分消費者にとっては有利な制度である。それでも、もとがとれない。これが現在の太陽光発電の実力である。

実際、単純に発電単価を計算すると、70万円÷(1000kWh×20年)で35円/kWhになる。火力発電が10円以下、自然エネルギーの風力発電でも10円程度といわれていることを考えると、太陽光発電はまだ数倍ていど割高な発電ということになる。(激安の業者を使っても、25円/kWhである)

ところで、原子力発電一基分に相当する百万kWの太陽電池システムの価格は7千億円になる。高額だが、国の原子力関連予算は、たとえば平成15年度では5千億近い。これを使えば、原発一基分、とまではいかないまでも、それに近い出力の太陽電池が購入できる。(もっとも、太陽電池は原発と違って一日三時間しか働かないが)

[生産量]

太陽電池の生産量は図3に示すように急激に増えつつあり、04年には全世界で百万kWを突破した(『PV NEWS』2005年4月)。中でも日本での生産量の増加は著しい。00年までは米国での生産が世界最大だったが、それ以降は日本が世界最大の太陽電池生産国になっている。94年以降に急激な伸びを見せているのは、その年に始まった補助金制度が太陽電池普及に効果があったと考えるべきだろう。

欧州での生産も順調に増えており、その他のアジア諸国などでの生産も増加してきている。一方、米国での生産はここ数年ほとんど増えておらず、03年は前年を下回っている。世界の趨勢から一人はずれたこの米国の動きは、現ブッシュ政権のエネルギー政策と無関係ではないはずだ。

このように急増しているとはいえ、全世界で百万kWという量は、既存の発電設備の容量と比べればまだ微々たるものである。たとえば日本の発電設備は約2億kWあり(電気事業連合会 <http://www.fepec.or.jp/>)、日本での年間の太陽電池生産量60万kWはそのわずか0.3%にすぎない。(し

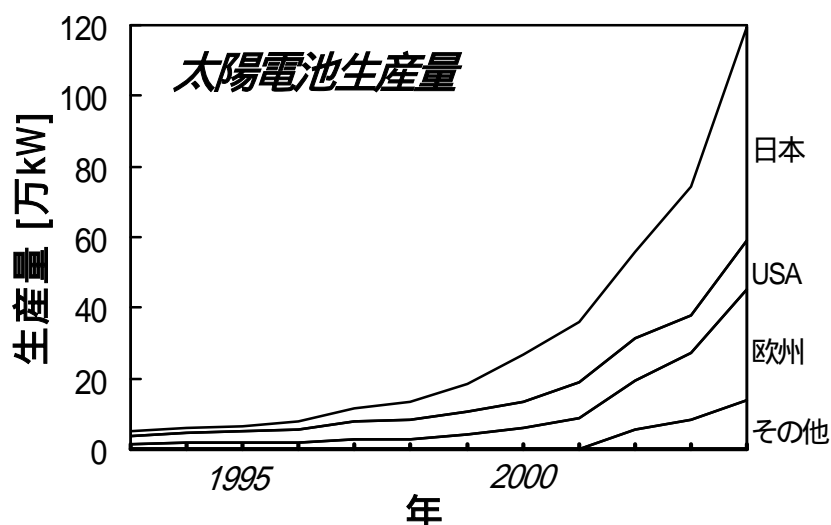


図3 太陽電池の生産量

かも、太陽電池は一日3時間しか働かない)

それに比べ風力発電ははるかに大規模に導入が進んでいる。03年時点で全世界の発電容量は4000万kWであり、同年の太陽光発電の容量180万kWの20倍以上である(朝日新聞05年2月13日)。前節で述べたように風力発電のコストが低いことを考えれば、これは当然の結果ではある。ただし、日本では風力発電の導入はあまり進んでおらず、設備の容量は太陽光発電と同程度に過ぎない。これは日本の制度に問題があるためである。家庭用の太陽光発電については余剰電力購入制度があり、電力会社が電力を売値で買い取ってくれる。これは実質的な固定価格買い取り制度である。一方、風力発電設備を作ってその電力を電力会社に売るときは全く事情が異なり、電力会社は無条件に買ってくれるわけではない。03年に新エネルギー特別措置法が施行され電力会社は風力などの新エネルギー源の電力買い取りを義務付けられたが、その義務量は当面総発電量の1%以下と極端に少ない。つまり、電力会社は風力発電などの電気をあまり買わなくてもいいと法的に許されてしまった。このように枠が極小の固定価格買い取り制度は、本誌79号で飯田氏が指摘しているように、新エネルギーの導入を阻止するために作られたとしか言いようがない。もし風力発電に対して、現在太陽光発電に適用されているような固定価格買い取り制度が導入されたら、風力発電の発電容量は爆発的に増加するだろう。逆に、太陽光発電に対する余剰電力購入制度が廃止され固定価格買い取り制度に移行したら、太陽電池の普及は完全に停止するだろう。

ところで、このような経済的な問題を別にしたら、太陽電池の増産はどこまで可能だろうか。地球の地殻を構成する元素の割合(%)をクラーク数というが、シリコンのクラーク数は約27で酸素に次いで二番目に大きい。つまり地球の四分の一はシリコンであり、まさに無尽蔵である。道ばたの石にもたくさんシリコンが含まれているわけだが、実際にはシリコンは二酸化シリコンを主成分とする鉱物、ケイ石を原料として生産されている。ケイ石を還元して(酸素を除いて)得られた純度の低いシリコンを金属シリコンと言うが、その全世界での生産量は年間百万トン程度あり、ほとんどはアルミ合金やシリコンゴムなどの素材として使われている。純度を高め半導体として使われるのはその数%に過ぎずしかもその大半は集積回路に使われる。結局太陽電池として使われているのは百万トンの金属シリコンのうち1万トンにも満たないと予想される(NEDO「太陽光発電技術周辺動向調査」など)。つまり原料資源は豊富にあり、生産設備さえ作ればまだいくらでも増産は可能とすることができる。

[E P T]

太陽電池はひとたび作ってしまえば、燃料を使うこともなく二酸化炭素もいっさい放出しない。しかしその製造にはエネルギーを使う。太陽電池の使用でどれだけの燃料が節約でき、どれだけ二酸化炭素放出を減らせるかを議論するには、製造段階のエネルギー消費も考える必要がある。極端な話し、太陽電池がその寿命の間に発電する電力量の合計よりも、製造に使うエネルギーの方がもし大きければ、太陽電池は作れば作るほどエネルギーを浪費することになる。

太陽電池の研究者は20年以上前からこの問題の重要性を意識し、EPT(Energy Pay-back Time)という量を定義し、太陽電池の良し悪しを表す値の一つとして使ってきた。このEPTとは、「太陽電池の製造に使われたエネルギーを太陽電池が自ら発電するのに必要な期間」であり、いわばエネルギーの借金

返済期間である。EPTの期間が過ぎるまでは、自分が生まれてくるのに使われてしまったエネルギーを埋め合わせているに過ぎない。EPTを過ぎて働いて初めて、新たなエネルギーを生み出したと言える。

シリコン太陽電池を製造するには、たしかに大きなエネルギーを消費する。シリコン太陽電池は薄くしすぎると突き抜ける光が多くなり効率が落ちてしまうので、厚さが0.3mm程度ある。その結果、1Wの太陽電池を作るにはシリコンが7gほど必要になる。しかもそのシリコンは高純度でなければならない。金属シリコンを原料にして高純度のシリコンを作る一般的な方法は次のようなものだ。金属シリコンを塩酸と反応させて塩素、水素との化合物を作り、その化合物(液体か気体)の純度を化学的プロセスで高め、最後に加熱分解して塩素水素を除きシリコンを得る。金属シリコンの純度は98%程度だが、このプロセスを経るとほとんどの不純物は一万分の一程度にまで減少する。このシリコンは太陽電池を作るのに十分良質であるので、太陽電池級(solar-grade、SOG)シリコンという。(集積回路や高級な太陽電池用にはさらに単結晶化の工程を施すが、その過程で純度がより高まる。)SOGシリコン製造の工程の中では、特に最後の熱分解に大きなエネルギーを消費する。もちろんそのシリコンを太陽電池に加工する際にもエネルギーを消費する。

EPTを計算する際には、太陽電池以外にもインバーターなどの周辺機器を製造するエネルギーも考慮しなければならない。またより厳密に見積もろうと思えば、工場の生産設備を作るのに消費されたエネルギーや、輸送に使うエネルギーも計算に入れる。実際にそこまで考慮した計算も行われているが、結果的には太陽電池を製造するのに使うエネルギーが圧倒的に大きい。それだけシリコンの製造には大きなエネルギーが必要なのだ。

こうして計算されたEPTがいくつもの研究グループによって報告されている。工場での生産規模をどの程度に仮定するかで結果は異なってくるが、EPTは悲観的な見積もりでも4年程度である。太陽電池の寿命は20年はあるから、借金を返し終えてから16年ぐらいは働いてくれることになる。したがって太陽電池は確かに新エネルギー源である。ただ、4年というEPTはまだ長すぎる。それだけ借金返済にかかってしまうほど製造にエネルギーを消費してしまうということが、太陽電池の価格が下げ止まりつつある原因の一つだと考えてよいだろう。

ところで、20年程度たち太陽電池の“寿命がきた”としても、実際にはいくらか効率が低下した程度でありもとの石に戻るわけではない。少しずつ劣化が進行するので20年ぐらい経つと新品に代えなくなるかもしれない、というだけのことである。製品に問題がなければもっと長期間使うことも可能であり、例えばSiemens社は25年保証をつけて太陽電池を販売している。また廃棄したシリコン太陽電池はリサイクルが可能である。電極などを取り除き、シリコンを溶融し固めてまた太陽電池を作る。現在はまだ捨てられる太陽電池がほとんどないからリサイクル工場は存在しないが、そのための技術開発は進んでいる。リサイクル材から作る太陽電池のEPTはケイ石から作る場合に比べもちろん短くなる。エネルギーをもっとも多量に費やすシリコンの純化過程が不必要になるからだ。

[心理的効果]

家庭用の太陽電池システムには、発電電力と発電電力量、消費電力と消費電力量を表示するモニターがたいてい付いている。太陽電池を設置するとどの程度発電しているかが気になり、そのモニターをしばしば見る。すると消費電力も同時に意識するようになり、自然と節電を心がけるようになるといわれている。

太陽電池はこれ以外にも心理的な効果を発揮することがある。企業は太陽電池を設置することで環境問題に取り組んでいる姿勢をアピールすることができ、それによってイメージアップを図ることができる。また太陽電池を目にすることで人々が環境・資源問題の重要性を認識でき、その解決に取り組もうという雰囲気盛り上がる。太陽電池は必ず外で使う。必ず人目につく。だから広告塔やシンボルとしての働きをすることができる。もし太陽電池が屋内で使うものなら、企業も役所も学校も、これほど設置に熱心にはならなかったかも知れない。

もうひとつ、太陽電池には手軽に使えるという長所がある。普段の生活で電卓などの電源として使われているが、それだけでなく自分の手で工作をして使って楽しむことができる。たとえば乾電池の代わりに太陽電池を使ってプラモデルを動かしてみると楽しい。(大きめのおもちゃ屋さんならプラモデルコーナーに小型の太陽電池を売っている) 1、2万円出して少し大きめの太陽電池を買い、それと自動車用バッテリー、自動車電源用インバーター回路を購入すれば、簡易型の太陽電池電源設備ができる。(もう一つ、太陽電池とバッテリーの間には逆流防止用のダイオードが必須だ) 昼間、太陽電池でバッテリーに充電し、その電気を自動車用インバーターで100Vの交流に変えて家電製品を使う。それだけでも少しわくわくした気分になる。太陽光発電は私たちにとても親しみやすい科学技術だ。

この点に関し、原子力発電は太陽光発電の対極にある。私たちは原子力発電の現場に近づくことはできない。そこで本当に何が起きているのか知ることさえできない。私たちの生活とは完全に乖離しているという点に、原発の本質的な危険性が孕まれているとは言えないだろうか。

[将来]

太陽光発電は既存の電力源に比べればまだ数倍もコストが高い。太陽電池の研究者たちの多くはそのコストを下げる技術を開発しようと努力している。シリコン太陽電池のコスト高は原料となるシリコン結晶が高価であるためだから、別の安価な材料を使う研究が数多くなされている。

また同じシリコンを使うが、その使用量を今の十分の以下に減らす技術も開発されている。この新技術、薄膜シリコン太陽電池は表面がギザギザの形の加工されている。そこにあたった光は屈折して斜めに進む。ギザギザの形をうまく設計すると、斜めに進んだ光はシリコンの底面で全反射を起こし外に出ない。このため(理想的には)シリコンの板を十ミクロン程度にまで薄くしても光が突き抜けることがなく、効率が落ちない。

アモルファスシリコン太陽電池も新技術の一つに含めてよいかも知れない。アモルファス太陽電池はかなり前から電卓などに使われていたが、屋外で使われることはなかった。直射日光にさらすと短期間で出力が落ちてしまう欠点があったためだ。しかし数年前から屋外でもほとんど劣化しないアモルファス太陽電池が生産されるようになった。効率が通常のシリコン太陽電池より低いため売れ行きはよくな

いようだが。

このような薄膜化の技術が完成すれば、ある量のシリコンから今の十倍以上の太陽電池が生産できるようになる。このことは、太陽電池という技術がまだ未成熟な段階にあることを示している。ある量の鉄の塊から火力発電所を作るとして、将来技術の進歩によって今の十倍の発電設備が作られるようになる可能性は、まちがいに存在しない。風力発電でも同じである。最初に述べたように、太陽電池の歴史は火力や風力に比べ浅い。コストや生産量を考えれば、現在の太陽電池の実力では環境・資源問題を解決することはできないと言わざるを得ない。しかし、だから太陽光発電は無意味だと考えるのは間違っている。未成熟なぶん、この先大きな技術の進歩が期待できる。

最後に少し夢をつづってこの文章を終えたい。岐阜大学の箕浦教授らのグループは、水溶液に電流を流して半導体を作るメッキ技術と天然色素を利用して、太陽電池を開発している。私たちのグループも、メッキ技術とそれに類似の光を用いた薄膜作製技術を用い太陽電池を作ろうとしている。（私たちの研究ははるかに遅れているが）メッキに最低限必要なのは電源とピーカーだけだ。このような技術が実用化されれば、高価な装置を使わず、また大きなエネルギーを消費することなく太陽電池を作ることができる。小さな町工場でも、もしかしたら学校の理科室でも太陽電池が製造できるかもしれない。技術力や経済力のない発展途上国でも大量生産が可能になるだろう。世界中で人々が自分で太陽電池を作り、自分でそれを使って電力を得ることができるようになる。そうすれば、私たちの社会は今よりもう少し平等で民主的なものになっていくだろう。太陽電池という技術は、そのような方向に発展していくことも可能なのだ。