

IRON & STEEL

クリーンエネルギーに挑む

エネルギー問題の克服は、2000年代の課題といえるだろう。

21世紀、鉄鋼はもちろん、すべての産業が
「成長の限界」を超えて生き残っていくためには、
化石燃料の枯渇と環境破壊という

あまりにも重いテーマを
克服しなければならない。

今回はその答えのひとつに
なりうるかもしれない
クリーンエネルギーの技術に
目を向けてみよう。



写真：ガラスカーテンウォール方式太陽電池

太陽光発電は、 人類究極のエネルギーになりうるか？

―鍵は変換効率と生産効率のアップ―

地球に降り注ぐ太陽の光がもたらすエネルギーは、60分で全人類が消費する1年分のエネルギーに匹敵するという。考えてみれば、石油も石炭も、そして植物の光合成で支えられているあらゆる生物の生命活動のエネルギーも、すべてが太陽エネルギーに由来している。もし、太陽からのエネルギーをじかに使用可能な形に変換することができれば、現在私たちが直面しているエネルギー問題、さらには環境問題も、一気に解決へのめどがつくはずである。そんな究極のエネルギー・太陽光発電の現状を、レポートする。

コストダウンが進み、現実味が出てきた太陽光発電

約20年前、太陽光発電が華々しく脚光を浴びた時期があった。石油ショック直後の昭和49年頃である。だがその当時、太陽電池の製造コストは、1Wあたり約3万円。いうまでもなく、「火力とは比較にならない」ほど、高くつく電力だった。その後さまざまな技術革新によって、平成7年現在、太陽電池の製造コストは1Wあたり約580円程度にまで下がってきた。2ケタのコストダウンである。これにともなって耐用年数から算出した発電コストは、1kWhあたり約100円程度になった。あともう少し、太陽電池の製造コストが1Wあたり約200円にまで下がると、発電コストは電力会社の電気料金と競争可能になると考えられている。しかし20年で2ケタのコストダウンを果たしてきたスピードを考えれば太陽電池が火力や原子力と競争しうる、もうひとつの電力源となっていくこともあながち現実性のない話ではなくなってきたといえよう。平成8年度の太陽光発電をはじめとする新エネルギー関係の技術開発・導入促進の予算は、平成6年12月に策定された「新エネルギー導入大綱」を受けて、大幅増額となった。平成8年度版新エネルギー便覧（資源エネルギー庁編）によれば、太陽光発電システムの普及促進等にあってられる本年度の予算は、昨年の118.9億円から、131億円へと約12億円の引上げとなっている。またある太陽電池のメーカーでは、米国衛星メーカーか

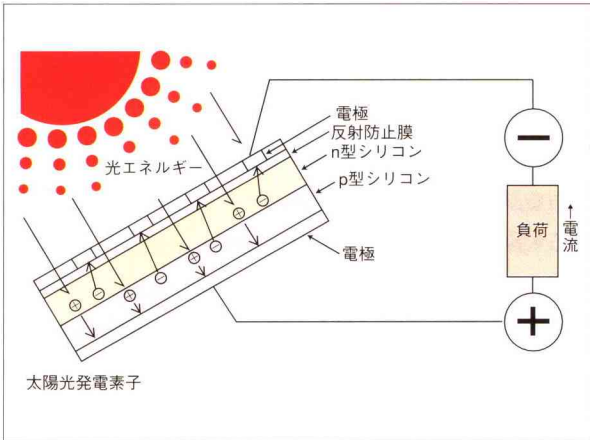
らの発注を受けて生産を倍増、量産化によるよりいっそうのコストダウンの可能性が見え始めるなど、太陽電池をとりまく状況が、少しずつ動き始めている。太陽電池は、今、衛星用など特殊な用途に限られていた時代から、より一般的な用途へと普及する過渡期にあるといえるのかもしれない。

半導体の光電効果―太陽電池の発電原理

光が当たるだけで電気が起こる原理とはいったいどんなものなのか、ここで簡単に触れておこう。太陽電池は半導体によってできている。半導体にはよく知られるようにp型とn型とがある。半導体にはさまざまなものがあるが、もっともポピュラーなところでシリコンを例にしてみよう。Ⅳ族元素であるシリコンに微量のⅢ族元素（ホウ素、アルミニウム、ガリウムなど）を添加したものがp型。この場合には、結晶中の電子を共有する際に電子が足りなくなるから、p型半導体ではプラスの性質を持った電子の孔（正孔）が一定数生じた状態になる。またⅤ族（リン、ヒ素、アンチモンなど）を添加したものがn型で、こちらは逆に電子があまり、一定数の自由電子が生じた状態になる。このp型・n型を接合し、その接合部に光を当てると、正孔と電子の対が新たに形成され、その正孔がp型に、電子がn型に集まってくる。この状態でpとnの両端に電線をつないで回路にすると電流が生じる



サントリーミュージアム／13 kW（大阪市）



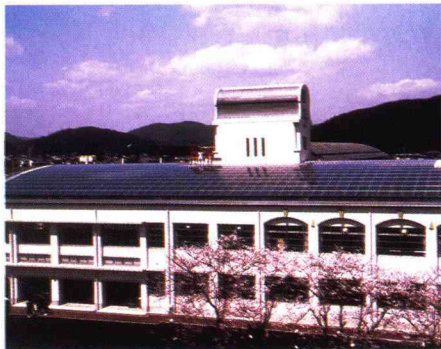
太陽発電の原理



丘の公園／95 kW（山梨県清里）



高知県のいち動物公園／70 kW（香美郡野市町）



八木町立八木中学校／50 kW（京都府船井郡）



東京駅東北・上越新幹線ホーム／30 kW



東京都水道局東村山浄水場／70 kW（東村山市）

のである。この他シリコン以外にも、太陽電池にできる半導体にはⅢ族とⅤ族の化合物（ガリウム、ヒ素）やⅡ族とⅣ族の化合物（硫化カドミウム）などで形成される化合物半導体などがある。

pn接合の半導体に光が当たることで電流が生じる現象を「半導体の光電効果」と呼ぶが、かのアインシュタインは、半導体の光電効果が「光が粒子としての性質を持つため」であることを証明し、ノーベル物理学賞を受賞している（有名な相対性理論で受賞したのではない）。その意味で太陽電池とは、光の粒子性という、きわめて現代物理学的なテーマと関連して生まれてきた技術と見ることもできるかもしれない。集積回路など今日の半導体技術も太陽電池同様、pn接合によって成立しているが、実は太陽電池の発明（1954年）は、トランジスタよりも古い。ただし当初は先述のように、あまりに高価な電力だったため、汎用性はほとんどなく、後に人工衛星用などの特殊な電力源として使用されるようになるにとどまった。現在も衛星用としては欠かせない電力源であることはいうまでもない。

エネルギーの自給自足を可能にする太陽電池

ある試算によると、全人類の消費エネルギーをすべて現在ある太陽電池でまかなうには、約800km四方の大きさのものを作ればこと足りるという。800kmといえばほぼ東京―広島間の距離に相当する。むろんそんなに大きなものを作るはずはない。だが、この面積に匹敵する太陽電池を世界中のいたるところに分散設置するということになれば、可能性があるだろう。別の試算によれば、日本で住宅、ビルディング、

高速道路など、可能な限りの建設物に太陽電池を設置すれば、電力需要の約40%をカバーできるという説もある。たとえそこまで高比率にならずとも、さまざまなエネルギー源を「ベストミックス」で使っていこうという今日のエネルギー観からすれば、太陽光発電は大きな可能性を秘めているといえよう。

建築物に太陽電池を張り巡らす発想は、すでに研究として進展しており、新エネルギー産業技術総合開発機構（略称：NEDO）では、建設会社や建材メーカーなどと共同で、建材一体型の太陽電池の研究を進めている。ひとつには個人住宅用の屋根材に組み込まれているもの。またもうひとつはビル用カーテンウォールなどの形になったものなどがある。

家庭用のシステムでは、屋根に設置した太陽電池で必要電力の多くをまかなうこともできる。ただし問題はコスト面で、一般家庭で導入するには、まだ価格的な問題が大きいようである。

カーテンウォール型のものもいくつかのタイプが研究されている。「太陽電池というのは、意匠的な面白さというものがありますから、今の時点ではむしろそうしたデザイン面で施主の方に選んでいただくことを狙っています」（鹿島建設技術研究所 伊藤正氏）という。カーテンウォール方式多結晶シリコンタイプの太陽電池から得られるのは1m²で約100W弱。限られた電力ではあるが、うまく工夫して使えばより快適な室内環境づくりなどに役立てられる。価格的には通常の高級カーテンウォールより1m²あたり7万円高程度になるという。

やはり太陽電池のコストダウンを期待するとともに、導入初期には国の助成金による後押しが必要といえそうだ。現在、住宅用では新エネルギー財団が住宅用太陽光発電システムモ



モンゴルの遊牧民の協力を得て実証研究が行われている携帯発電システム。太陽電池ユニット、バッテリーユニット、コントロールユニットからなり、各ユニット30〜40kg、全体で約110kgで、移動が可能

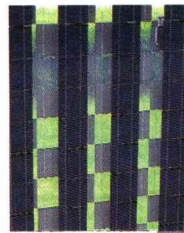


70kWの太陽電池に1kWの風力発電を組み合わせた山小屋用システム（白馬山荘）



断熱パネル方式の住宅用太陽電池。温度上昇によるアモルファス太陽電池の劣化改善もねらって、研究開発中

鹿島建設技術研究所
伊藤 正氏



ビル壁面への設置を可能にするガラスカーテンウォール方式。左は窓などに取り付けて透過光を利用できるタイプ。



モニター事業を実施しており、モニターになることで、システム設置費用の2分の1相当額（上限60万円/kW）の補助が受けられるようになっている。規模の大きな公共性の高い施設については、NEDOが設置者と共同で運転データの収集等を行う太陽光フィールドテスト事業を実施しており、設置費用の2分の1を負担してもらえ。いずれも通産省の補助のもとに実施されている事業だ。

現時点でコストをある程度度外視してでも太陽電池導入が効果的と考えられる用途というのものもある。例えば「防災」である。阪神大震災以来、都市型地震に対する防災意識が高まっているが、もしもの地震で送電設備が破壊された時、その場で発電できて燃料も不用品な太陽電池は最低限の電力を確保するために、きわめて有効な手段である。NEDOの太陽光フィールド事業でも、防災型の設備には特に設置費用の3分の2が補助されるといった配慮もされている。

同様に、送電のためのインフラがない場所で電力を必要とする場合も、電線を敷設するコストまでを含めて考えれば、太陽電池を採用するほうが現実的という場所は、世界中にいくらかでもある。NEDOがモンゴルで実証研究中の携帯発電システムなどもこの例に当たるだろう。この携帯式太陽電池は、日中に充電した電力によって移動式テント（ゲル）で60Wほどの電球とテレビ、ラジオが使えるようになっているもので、利用者の遊牧民からは「まるでウランバートルにいるようだ」

テクノジャンプを可能にする太陽電池

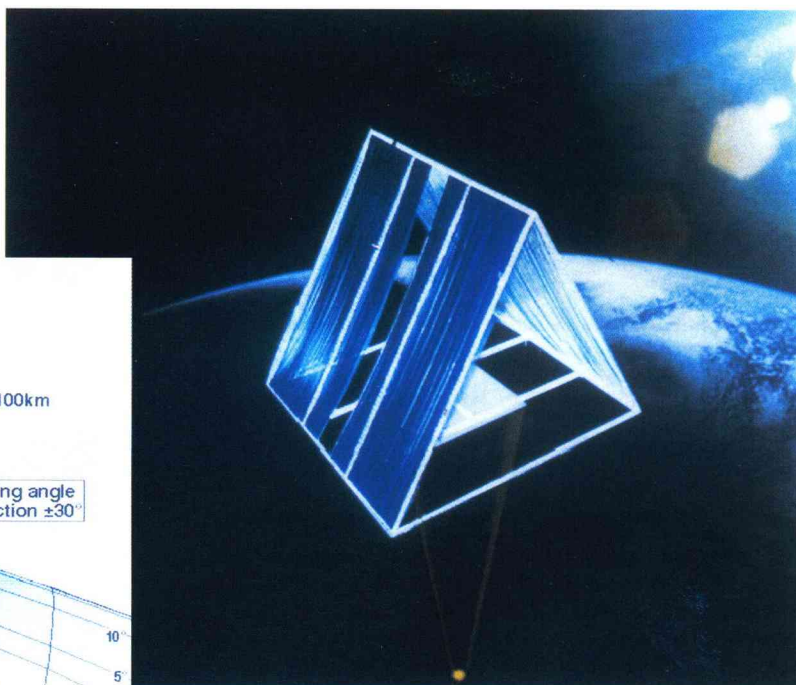
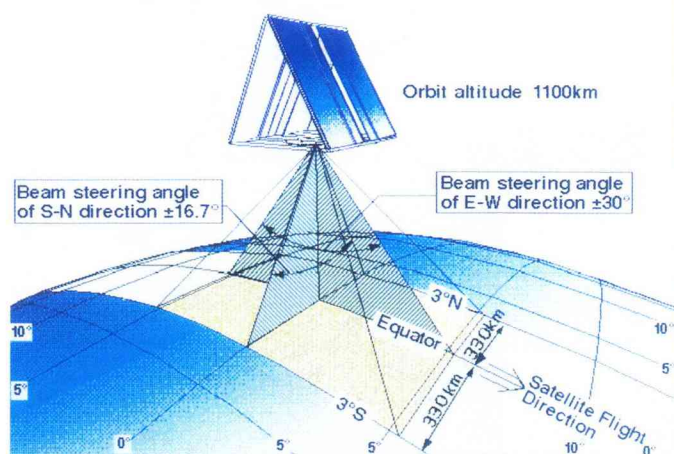
近年、パソコンによる情報通信が急速に普及している。情報通信には通信用の回線が不可欠だったが、それも無線や衛星通信などの技術が開発されるにつれ、かならずしも必須要因ではなくなりつつある。しかし、電力供給のためのインフラがないというのは、致命的である。いかなるハイテク機器も電気なしでは機能しないからだ。そうした電力供給のインフラが未整備あるいは困難な場所でも、太陽電池なら電力を得ることができる。太陽電池と無線通信の組み合わせによって、インフラがない土地でも自由自在に世界中の情報を得ることも不可能ではなくなるのである。ジャングルの真ん中にいても、先進国のデータベースに自由にアクセスしたり、最新のニュースを手に入れたりできるようになるわけだ。こうした現象を「テクノジャンプ」と呼ぶ。いわゆる「陸の孤島」にも、物理的な距離を飛び越えて、情報が届くというニュアンスなのだろう。「テクノジャンプ」を可能にするために、太陽電池はきわめて有効な電力供給手段といえるだろう。

と感嘆の声が上がっているという。

海に浮かぶメガフロート太陽光発電所

低開発国や僻地など、特殊な用途にも有効な太陽電池だが、主要な電力源のひとつとなるだけの大容量の電力を供給していくには、やはりある程度まとまった面積が必要である。大面積の太陽電池を建設するには、砂漠などの土地を利用すればいいという意見もある。先述した800km×800kmという面積は、世界の全砂漠面積の4%程度だというから地球上の陸地に太陽電池に必要な土地が空いていな

SPS2000のイメージ▶
 /さらに詳しい情報をSPS2000の
 ホームページで見ることできる
<http://spss.isas.ac.jp>



◀1号機は赤道上空の軌道を回りながら、
 その直下の国々に電波で送電する

いわけではない。しかし資材運搬やメンテナンス、電気の搬送などを考えると、まだまだ解決しきれない課題もある。日本のように広大な平地を得ることが難しい場所では、海上を使うアイディアも提示されている。例えば本誌2号で紹介したような鋼製の浮体構造物（メガフロート）を海上に浮かべて、太陽光発電所を作るなどといった発想も、そのひとつである。もし実現すれば、鋼製の巨大な浮き島が太陽の光を集めるエネルギー基地として活躍することになるだろう。それまでに、太陽電池そのもののコストダウンと、よりいっそうの変換効率のアップ、電力搬送問題の解決など、技術的な課題が残されているのも事実ではある。

宇宙へ持っていけば利用できる太陽エネルギーは10倍

太陽電池による発電量をアップさせるには、太陽電池そのものの機能を上げる以外にもうひとつ、宇宙空間に設置するという方法がある。宇宙では太陽エネルギーの密度が大きく、天候・季節に左右されることもない。そのためもし宇宙空間に太陽電池を置くことができれば、年間に利用可能な太陽エネルギーの量は地上の約10倍（送電によるロス分を差し引いた最終的なエネルギー量でも約5倍）にもなるという。現在、文部省宇宙科学研究所と大学研究者らのグループが宇宙での太陽光発電技術の研究開発に取り組んでおり、西暦2000年には軌道上での組み立てを開始することを目指している。

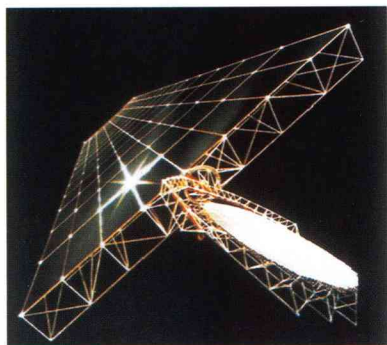
SPS2000と名付けられたこの発電衛星は、縦・横各3m、長さが300m強のトラスビームの組み合わせによって構成

され、外見は三角柱を横に寝かせたような形をしている。ここにアモルファス太陽電池の帯を張り巡らせて、発電を行う。断面を三角形にしてあるのは、底辺を重くすることで、常にアンテナを取り付けた底が地球に向いているようにするためである（重力傾斜による姿勢安定）。軌道は地上11,000km。ちょうどランドマークタワーよりも大きな構造物が軌道上にぽっかり浮かんでいると思ってもらえればよい。地上への送電は電磁波（2.45ギガHz）によって行う。

発電衛星のアイディアは、1968年にピーター・グレーザー（米）によって提案され、米国のエネルギー省（DOE）とNASAによって1977年から1980年まで研究が続けられていた。しかしそこで考案されたモデルは5km×10km（5ギガW）というあまりにも巨大なものであったため、かなり本格的な研究が行われはしたものの、さすがに非現実的として、中止の止むなきに至った。

その前例をふまえてSPS2000は「とにかく実現が可能なものを作ろうという発想でスタートしました。そのためは、地上の発電所の電力と価格的にも競争しうること、商業的に使える技術によって建設・運用が可能であることを必須条件としています」（文部省宇宙科学研究所・成尾芳博氏）という。こうして1987年から、日本でのSPS2000の研究はスタートした。

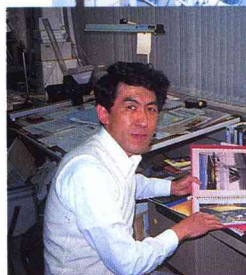
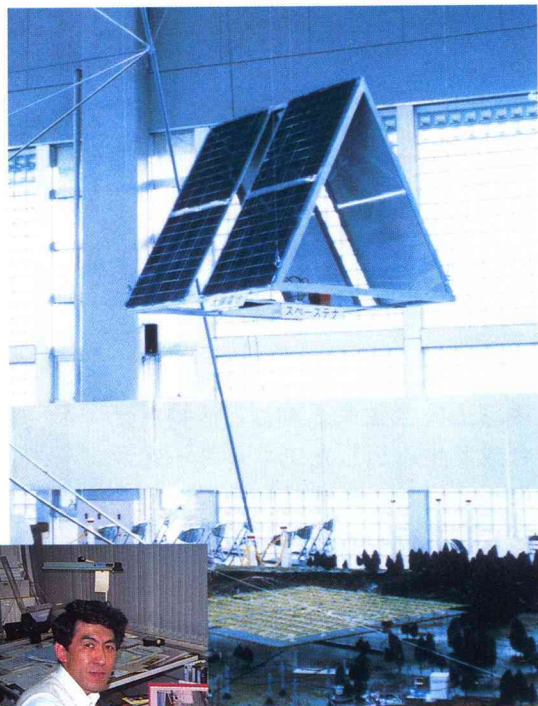
グレーザーのモデルに比べてかなり現実的であるというものの、SPS2000は、宇宙に作る構造物としてはかつてない大きさである。どのくらいのサイズにすればいいのか、コストと実用の両面から検討されたという。「日米欧露加共同開発で話題になっている国際宇宙ステーション



DOE/NASAが提案した最初の発電衛星。あまりにスケールが大きすぎて、プロジェクトが中止となった

アモルファス太陽電池が、いっそうのコストダウンを促進する？

太陽電池用の半導体としては、現在はシリコン系が大きな位置を占めているが、シリコン系の中にも、単結晶、多結晶、アモルファスの3種類がある。単結晶太陽電池は1個の大きなシリコン結晶をスライスしてウエハー状にしたものから作られる。エネルギー変換効率はもっとも高いが、結晶を大きく育てるのに時間と手間がかかり、コスト高となりやすい。変換効率は多少落ちるものの、その点、多結晶型太陽電池のほうが製造コスト的にはかなり有利になるため、最近ではこの多結晶型がよく用いられている。さらにこうした結晶タイプとはまったく異なる方法で作られるものにアモルファス太陽電池と呼ばれるものがある。これは真空の装置内にシリコンを含有するガスを入れ、放電することでガスを分解し、シリコンを基盤上に堆積させてシリコン膜を形成する。製造工程をよりシンプルにやすく大面積で製造できるなど、量産化した場合にもっとも低コスト化が期待できるとされている。



宇宙科学研究所・成尾芳博氏

SPS2000のシステム機能モデル。ミニチュアの発電衛星に照明が当たると、ジオラマのレクテナ（電波を受ける地上のアンテナ兼変換装置）に送電され、模型の設備に電気が供給されるようになっている

ジョンの電力源は太陽電池です。その出力が110 kW。つまり現状で宇宙に建設が決定している最大の太陽電池発電システムは110 kWだということです。しかしSPS2000は宇宙ステーションのような自給自足のための発電システムではなくて、発電そのものを目的とした発電設備ですから、地上で商業的に使用できるだけの電力を送れなくてはなりません。それでは地上の発電設備はどのくらいの規模かというと、原子力発電所では100万 kWくらいのものが多い。そこでSPS2000は発電設備であるかぎりには1万 kWはめざそう、ということで規模を決定しました」（前出・成尾氏）。

SPS2000の組み立ては、すべてロボットを使って無人で行われる。その実証実験として、宇宙ステーション・ミール（露）の補給船プログレスを使って、長さ約100mのトラスを軌道上に組み立てることも計画中だという。成尾氏らは現在そのためのロボット開発にも余念がない。

2100年、衛星発電なしに産業の活力維持は困難になる？

発電衛星が現実のものとなるには、打ち上げコストの低減や太陽電池そのもののコストダウンなど、いくつかの技術的なブレークスルーが前提条件として不可欠である。現時点では「2000年までの間に可能になるだろう」という、ある意味で不確定な技術的・経済的な見通しを前提としているSPS2000だが、その成功は、考え方次第では、人類の未来を左右するほどのものになるかもしれない。

静岡大の山極助教授らが行った「ワールド・ダイナミク

ス」（あらゆる要素をデータとして、人類の経済・社会活動の活力をシミュレートするもので、過去にはローマクラブのレポートなどが有名）のシミュレーション結果によれば、もし2000年代の後半までに衛星発電による電力開発が行われなかった場合、世界レベルの産業活力は著しい下降線をたどるという。むろん新エネルギー源は、衛星発電のみではないから一概に受けとることはできないにせよ、将来のエネルギー源として、衛星発電技術が希望の光のひとつであることは確かなのではないだろうか。米国での研究がストップして以来、この分野では日本の研究が世界でもっとも進んでいるという。1990年のヒューストンサミットで、日本はこの衛星発電と核融合による「地球再生計画」を提案し、各国から大きく評価された。しかし研究開発のための資金問題ひとつにしても、前途多々というわけにはいかないのが現状だという。それでも近年では日本の研究成果に刺激を受けて、米国や欧州でも発電衛星の研究がスタートしており、国際的な関心はむしろ高まってきている。今後の展開に期待したい技術である。

日本は長い間「資源に恵まれない国」を自称してきた。しかし太陽の光は、地球上のあらゆる場所で平等に降り注いでいる。太陽エネルギーを活かした産業システムの実現は、日本のような資源の乏しい国にとっては、まさに夢の技術でもあるはずだ。

【取材・写真協力：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）
文部省宇宙科学研究所 鹿島建設株式会社・技術研究所】