

太陽光発電

Photovoltaic Power System

武田 行 弘*

Yukihiko Takeda

1. はじめに

同じ太陽エネルギーを利用する発電方式でも、太陽光発電と太陽熱発電では根本的にちがうところがある。太陽熱発電は、太陽熱で蒸気を作り、この蒸気でタービンをまわし、タービンにつなげた発電機を動かして電気を作る。すなわち、太陽の熱エネルギーを、いったん機械エネルギーに変え、それを電気エネルギーに再変換するというステップが必要である。これに対して太陽光発電は、太陽電池により太陽の光エネルギーからいきなり電気エネルギーに変える発電方式である。太陽電池は、その基本ユニットであるセルそのものが発電装置であるので、小容量のものから大容量のものまで多方面への利用目的と、蓄電池や直交変換装置等の周辺機器の組み合わせにより様々な利用システム形態を考えることができる。

太陽光発電システムの特徴としては、

- 太陽エネルギー密度が小さいため大電力を得るためにはかなりの面積が必要であること
- 太陽電池からの出力は直流であり、交流利用のための変換器が必要であること
- 太陽光をエネルギー源として利用することから、自然条件に伴う出力変動が発生することといった制約はあるものの、
- 燃料が不要であり、かつ燃料の燃焼を伴わないので環境に対する熱汚染が発生しないこと
- 可動部分がないため騒音の発生がなく、また、保守が容易であること
- 太陽電池はモジュール化できるため、量産化に適しており、また規模のフレキシビリティも大きいこと

等の利点を有している。

太陽電池が開発されて、すでに30年以上になる。し

かし、非常に高価なことから、1973年の第一次オイルショックまではあまり我々の身近なものではなく、灯台、気象観測用テレメータ、無線中継基地などの電源や人工衛星への搭載など特殊用途にしか使われてこなかった。しかし、前述のオイルショックが契機となり、代替エネルギー源として注目され、低コスト太陽電池の開発が各国で国家プロジェクトとして行われるようになった。我が国では昭和49年7月、通産省にサンシャイン計画が発足した。その結果、太陽電池の低コスト化技術は着実に進み、発足当時2~3万円/Wであったものが、現在は1,100~1,300円/W程度で購入できるところまで開発が進んでいる。また、システム開発の研究も進み、小容量の独立型はもちろん、系統と連系するタイプでも3kW級の個人住宅システムから1,000kW級の発電所システムまで幾つかの利用システムが完成あるいは建設中であり、それぞれについて運転研究が進められており、着々と実用化に近づいている¹⁾。

2. 太陽電池の開発

太陽電池は太陽光発電システムの中で最も高度な技術開発を要する部分であり、かつ、現在全体のシステムコストの約6割を占めている。そのため、太陽光発電システム実用化のためには、太陽電池製造技術の開発を進め、太陽電池の変換効率向上と製造コストの低減が必要不可欠の条件となっている。

2.1 太陽電池の開発現状²⁾

サンシャイン計画における太陽光発電関係の研究開発計画を表1に示す²⁾。

太陽電池の開発は大きく分けて、シリコン原料製造技術、セル製造技術、パネル製造技術の各製造工程別に行われているが、実用化研究段階にある結晶シリコン太陽電池の場合は、低コストシリコン実験精製システムおよび太陽電池パネル実験製作システムから成る年産500kW級の実験ライン(研究開発の遂行上、各工程は分離されている)に基づいて製造技術開発が行われ

* (財)電力中央研究所開発部新発電研究室室長

〒201 東京都狛江市岩戸北2-11-1

表1 サンシャイン計画における太陽電池および光発電システムの技術開発プロジェクト

研究開発項目	開発内容
シリコン原料製造技術	太陽電池用低コストSi原料の大量製造プロセス
セル製造技術	太陽電池セルの生成技術 <ul style="list-style-type: none"> 結晶系 <ul style="list-style-type: none"> リボン型太陽電池 キャスト型太陽電池 薄膜型太陽電池 非結晶系 — アモルファス太陽電池
	同上セルの低コスト大量製造プロセス技術
パネル製造技術	低コスト太陽電池パネルの連続・自動化プロセス技術
発電システム技術および周辺機器開発	システム設計, 最適制御, 系統接続, 集光システム, ハイブリッドシステム, 電力貯蔵方式などの開発および周辺関連機器(直交変換装置, 定電圧調整装置, 系統連系装置など)の小型化・低コスト化
利用システム	太陽電池パネルを各種の施設に実装し, 光発電システムとして各種の実証テストを行う。個人住宅, 集合住宅, 学校, 工場, 発電所など
評価技術	高忠実, 高照度, 高均一, 高速度性能を備えた, ソーラセルおよびパネル用の大型シミュレータの開発など

ている。これは、新エネルギー総合開発機構により昭和58年度に完成したもので、結晶形シリコンとしては、キャストとリボン結晶が用いられ、また接合形成法としては塗布拡散法による湿式とイオン注入法による乾式法の技術が用いられている。イオン注入法による太陽電池の量産規模ラインは、世界でも初めてのものである。

一方、結晶シリコン太陽電池に比べ研究開発の歴史が浅いアモルファスシリコン太陽電池については、昭和53年度より技術開発を加速化させ、アモルファスシリコンの諸物性、理論などの基礎研究分野から、モノシランガスの低コスト製造技術やアモルファス太陽電池の高品質製造技術、大面積製造技術、高効率製造技術、高信頼度製造技術などの実用化研究分野まで、大学、国立研究所、民間企業の総力を結集した研究体制を取って、研究開発を推し進めている。

我が国におけるアモルファス太陽電池の研究開発は世界的に最高の技術水準にある。しかし、実際の実用化のためには、効率や信頼度、およびコスト面でまだまだ研究開発しなければならないことが多い。表2に現在アモルファス太陽電池についての高効率、低コスト、高信頼性を目指して進められている研究内容を示す。

2.2. 太陽電池の生産実績³⁾

我が国における太陽電池の年間生産高推移を図-1に示す³⁾。最近の激増の様子が分かる。昭和59年度について材料別生産量をみると、約72%がアモルファスシリコン太陽電池で、次いで単結晶シリコン太陽電池が

表2 アモルファス太陽電池の高効率、低コスト化技術

(1) 高効率化の手法	<ul style="list-style-type: none"> ●太陽光の吸収量の増加 <ul style="list-style-type: none"> 表面反射損の減少化…… <ul style="list-style-type: none"> 反射防止膜の屈折率, 膜厚の最適化 表面凹凸化 裏面反射率の向上…… <ul style="list-style-type: none"> 反射率の高い金属の採用 裏面凹凸化 ●窓層の禁制帯幅の増加: $a \cdot Si_{1-x}C_x$, $a \cdot Si_{1-x}N_x$, $\mu c-Si$ ●光励起キャリアの収集効率向上 <ul style="list-style-type: none"> i層の膜質向上…… <ul style="list-style-type: none"> 膜形成条件最適化 H以外のターミネータ グロー放電以外の手法による膜質向上 i層におけるBの最適ドーピング ●太陽光の有効利用: タンデム構造の採用, $Si_{1-x}Ge_x$, $Si_{1-x}Sn_x$
(2) 産低技術コストの手法	<ul style="list-style-type: none"> ●量産装置: ロール・ツー・ロール方式, 多室分離方式 ●基板材料: ガラス, ステンレス, Al, セラミック, 高分子フィルム ●高速成膜法: Si_2H_6ガス ●大面積化技術: 集積化技術, 電極最適設計 ●モジュール化技術: アモルファス独特のモジュール化技術開発
(3) 研究指性高研究しを信した目録	<ul style="list-style-type: none"> ●Staebler-Wronski効果との関係 ●i層へのB添加効果 ●劣化メカニズムの解明

約15%、多結晶シリコン太陽電池が約13%である。また、用途別にみると、約%は民生用であり、そのほとんどが電卓用で、材料的にはアモルファスシリコン太陽電池がほとんどである。残り約%の電力用と言って

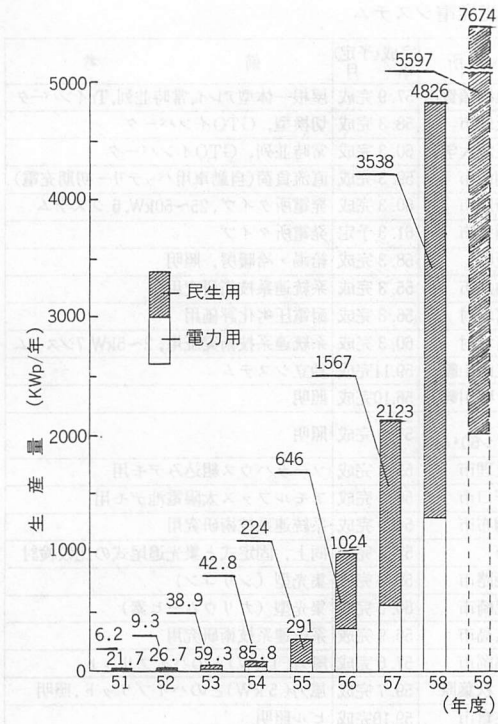


図-1 太陽電池生産量の推移

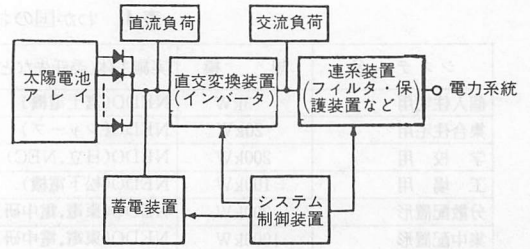


図-2 太陽光発電システムの構成例

表 3 太陽光発電システムの周辺装置による分類

主な用途	蓄電池	直交変換装置	商用電力系統との連系
直流ポンプによるかんがいシステムなど	×	×	×
灯台, 無線中継所, 街路灯など	○	× or ○	×
交流ポンプによるかんがいシステムなど	×	○	×
村落, 離島用電源システムなど	○	○	×
住宅用などの発電システムなど	× or ○	○	○ or ×
独立運転を考慮した発電システムなど	○	○	○ or ×

(○印は必要を意味する)

いるものは、一般電力用の他に、通信機器や照明標識などの小型電源用のものも含まれている。

2.3 海外における太陽電池開発動向²⁾

太陽電池の開発を最も積極的に行っているアメリカは、昭和58年秋からスタートしたエネルギー省(DOE)の新5ヶ年計画(1984~1988年、総額3.2億ドルを予定)において、薄膜太陽電池(結晶シリコン、アモルファスシリコンの区別はない)を中心として、特に変換効率の向上(平板式太陽電池モジュール効率15%以上、平板式薄膜太陽電池同12%以上、集光式太陽電池同22%以上)と長寿命(30年以上)の太陽電池を低コストで製造することを目標としている。また、ヨーロッパ諸国では、西ドイツとフランスが研究開発に積極的である。このうち西ドイツでは、国立研究機関であるブラウンホフファー太陽エネルギーシステム研究所がリードセンターとして、特に低コスト太陽電池基板材料の研究を積極的に進めている。一方、フランスでは、エネルギー管理庁(AFME)がコーディネータとなって、熔融シリコンの高速引上げ技術等、シリコン基板の低コスト化を目指した研究等を進めている。

3. 太陽光発電システムの構成

太陽電池は、軽量でどこにでも設置でき、しかも日

射量はそれほど地域差がないので、規模の大小や設置場所の違いによって発電特性が基本的に変わることではない。したがって、利用目的に応じてシステム構成も規模も変わるが、基本構成は図-2のようになる。太陽電池アレイは、太陽電池素子を多数並べて、所要の電圧、電流が得られるように、直列数および並列数が定められて接続される。直流負荷だけの場合は、これに蓄電装置(一般的には蓄電池が用いられる)が接続されるだけであるが、交流負荷を対象とする場合は当然インバータが必要である。インバータは直流電力を交流電力に変換する装置で、電圧調整機能や周波数調整機能などが要求される。また、電力系統との連系をする場合は、連系装置が必要となる。連系装置は光発電システムあるいは電力系統の異常時に、双方をすみやかに切り離す保護制御装置が主となるが、高調波抑制フィルタや電力系統からの侵入サージの防止および電力潮流の方向によって別個に計量できる積算電力計なども必要である。システム制御装置は全体に調和のとれた運転が行えるように、各システム構成機器を監視、制御するものであるが、規模によっては省略されたり、インバータの制御回路に含まれたりする。

表3に利用形態からみたシステム構成例を図-2の各構成機器の有無によって分類した例を示す。

表4 わが国のおもな太陽光発電システム

システム名	規模	実施主体(委託先など)	設置場所	完成(予定)年	備考
個人住宅用	3kW	NEDO(富士電機)	神奈川県横須賀市	57.9 完成	屋根一体型アレイ, 常時並列, Triインバータ
集合住宅用	20kW	NEDO(シャープ)	奈良県天理市	58.3 完成	切換型, GTOインバータ
学校用	200kW	NEDO(日立, NEC)	茨城県筑波大学	60.3 完成	常時並列, GTOインバータ
工場用	100kW	NEDO(松下電機)	静岡県湖西市	59.3 完成	直流負荷(自動車用バッテリー初期充電)
分散配置形	200kW	NEDO(東電, 電中研)	千葉県市原市	60.3 完成	発電所タイプ, 25~50kW, 6システム
集中配置形	1000kW	NEDO(東電, 電中研)	愛媛県西条市	61.3 予定	発電所タイプ
光・熱ハイブリット	5kWe+25kWt	NEDO(シャープ)	広島県坂町	58.3 完成	給湯・冷暖房, 照明
電中研・狛江	3kW×2	工技院, NEDO(電中研)	東京都狛江市	55.3 完成	系統連系技術研究用
電中研・赤城Ⅰ	8kW	NEDO(電中研)	群馬県宮城村	56.3 完成	耐電圧劣化評価用
電中研・赤城Ⅱ	21kW	NEDO(電中研)	群馬県宮城村	60.3 完成	系統連系技術実証用, 2~5kW, 7システム
山小屋用	5kW	NEDO(北陸電力)	富山県立山山麓	59.11完成	独立システム
京都街路燈	10W蛍光燈×34	NEDO(京セラ)	京都市, 鴨川畔	56.10完成	照明
サンシャインシティ庭園燈	20W蛍光燈×12	NEDO(12社)	東京都, サンシャイン60・4F	57.9 完成	照明
シャープ・ソーラハウス	1.15 kW	シャープ	奈良県天理市	55.3 完成	ソーラハウス組込みデモ用
三洋・モデルハウス	2kW	三洋電機	大阪府守口市	56.3 完成	アモルファス太陽電池デモ用
東京電力システム	1kW×2	東京電力	東京都調布市	54.9 完成	系統連系技術研究用
中部電力システム	500W×2	中部電力	名古屋市	57.3 完成	同上, 固定式と集光追尾式の比較検討
関西電力システムⅠ	50kW	関西電力	兵庫県姫路市	59.8 完成	集光型(シリコン)
関西電力システムⅡ	10kW	関西電力	兵庫県尼崎市	60.2 完成	集光型(ガリウムヒ素)
中国電力システム	1kW	中国電力	広島県広島市	56.9 完成	系統連系技術研究用
九州電力システム	2kW	九州電力	福岡県福岡市	57.6 完成	風力(1kW)とのハイブリット
第1家電システム	3kW	第1家電, 三洋電機	東京都, 秋葉原	59.7 完成	風力(5kW)とのハイブリット, 照明
京セラ・ソーラセンター	43kW	京セラ	千葉県佐倉市	59.10完成	ビル照明

4. 太陽光発電システムの開発状況

4.1 我が国における開発状況⁴⁾

我が国において、現在開発あるいは研究中の光発電システムについて、主なものを表4に示す⁴⁾。

大部分のシステムはサンシャイン計画に基づくものであるが、民間においても種々のシステム開発が行われている。これらの大半は研究用であるが、光発電システムの利用技術を確立し、太陽電池受入れのための環境作りをすることを目的とした面が強い。

なお、この表には記していないが最近では発展途上国向けの独立形システムが民間において多く製造されるとともに商用化のための努力が重ねられている。

4.2 海外における開発状況^{5), 6)}

電力システムの整備されている欧米先進国においては、我が国と同様、まだ太陽光発電による電力コストが高価なため国内での広汎な普及は困難な状況であるが、優れた代替エネルギーであるとの位置付けのもと、積極的に技術開発を進めている。アメリカの場合、これまでにDOE関連の利用システムは、およそ4MWに達しており、その波及効果が大きなものとなっていると同時に、国内には日射量が多く、電力系統が整備されていない地域があり、現在でも独立電源システムとして市場を有しているので、光発電業界には活力があり

技術開発も積極的である。アルコソーラ社にみられるように、民間企業が独自に大規模な太陽光発電所を建設し、その発生電力を電力会社の系統に売電するというような例も出てきている⁵⁾。

一方、ヨーロッパ諸国の場合、従来は主として発展途上国等の海外市場の開拓を目指した開発が進められてきたが、最近では自国における利用を目指した研究開発も行われるようになり、EC圏に30~300kW容量の中規模システムが15ヶ所建設され運転研究されることになっている⁶⁾。

5. 実用化のための課題

太陽光発電システムの実用化にとって最も重要な課題が低コスト化にあるのは言うまでもない。それと広範な普及を考えると、どうしても用途の限定される独立形に加えて連系形の利用形態となることが考えられるので、電力系統との連系技術を確立しておく必要がある。我が国における太陽光発電システムの開発においては、この2点に重点を置いて行われている⁴⁾。

このことは、本年7月に資源エネルギー庁でまとめた新エネルギー導入ビジョンの中でも明確にうたっており、これまでに実施された技術開発に基づけば、今後太陽電池製造技術の実証研究等のステップを経て昭和65年度までにディーゼル発電並みの供給コスト(シ

システム価格800~1,200円/Wp)の達成が見込まれるが、対応する需要分野は限定的であり、広範囲な普及が可能となる供給コスト(システム価格240~270円/Wp)の達成には新たな要素技術の研究開発が必要であること(価格の側面)と、一定規模の配電系統網に太陽光発電システムが分散して併入された場合の電圧変動、高調波等の対策について、系統連系実証研究が必要である他、系統連系利用が普及した場合に天候変化等によって派生する電力供給システム全体の効率に対する影響について分析・評価を実施する必要のあること(質および円滑性の側面)の2側面を、今後の重要研究課題と指摘している⁷⁾。

太陽光発電は、上記2つの側面からみた課題を克服することにより、実際の実用化のステップを踏み出すことになるが、初期の段階では、①技術開発に伴うリスクが依然として存在するとともに、②既存エネルギーに比べると経済性が確保されていないケースが多い。

他方初期導入は、①需要に対応することによる製造技術やシステムの習熟、②潜在需要家に対する啓蒙効果が期待される。そのため、技術開発リスクをカバーする補助金その他の金融措置ならびに税制措置等の政策的な支援が、初期導入時には必要である。

一方、太陽電池モジュールや太陽光発電システムの標準化、規格化の実施は技術の成熟を高める手段であり、一定段階の成果を得た技術について、競争の創出およびそれによる低コスト化を促進する方向に沿って、要素機器、システムの標準化、規格化を進めることも重要である。その場合に、国内のみならず国際的にもこれを実施していくことが望まれる。

さらに、太陽光発電システムは、日本のみならず各国において代替エネルギー源として強く期待している技術である。世界の国の中には、その国のおかれた資源条件や経済条件から、新しいエネルギー源を必要としている国が少なくない。したがって、我が国で開発した太陽光発電技術をこれらの国の状況に応じて移転するならば、現状レベルでも十分実用的であり、しかも、その国のエネルギー問題、国際収支問題の解決に資し、その国の経済発展に寄与するかもしれない。こうした国際協力の実施は、我が国の研究開発、導入実証をより加速化、効率化していく効果も有しており、技術進歩と実用化を相互に促進するものであるので、今後、重要視して行くべき一側面である。

以上、実用化のための課題として重要なものを整理すると以下の様になる。

- システムの低コスト化
- 系統導入条件の整備
- 初期導入時の政策的支援
- システムの標準化、規格化
- 国際協力

6. 将来展望

太陽光発電システムの発電コストは、システムの構成(蓄電池の有無等)によって差異はあるが、概ねサンシャイン計画発足当時の約2000円/kWhから、技術開発の進展により現在では200~250円/kWhのレベルまで低下してきている。今後の太陽電池の変換効率の一層の向上、製造コストの低下とともに周辺機器のコスト低減が図られることにより、太陽光発電システムの発電コストは昭和60年代中頃には100~150円/kWh(ディーゼル発電と競合できるレベル)、さらに昭和70年代には既存エネルギー源と競合できるレベル(20~50円/kWh)にまで低下するものと予想されている²⁾。この場合、全国の一定の日照条件下の戸建および集合住宅の屋根への設置を想定すれば、その出力合計は約2,000万kWp程度となり⁷⁾、代替エネルギーとして大きな役割をはたすことになる。

最後に図-3に総理府が行った「将来の発電の主力は……？」という世論調査の結果を示す。これによると、1980年の時には、将来の発電の主力についてはイメージがまとまっておらず、原子力33%、太陽熱28%、水力19%、不明19%だった。それが4年後の1984年になると、原子力発電が51%と、はじめて過半数を占めている。この間、太陽熱発電に対する否定的な意見が強くなった反面、太陽光発電への期待が高まったこともあって、世論調査の選択肢の変更があったが、とに

		地熱					
1980年 2月調査	12	7	33	28	1	19	
	火力	水力	原子力発電	太陽熱	太陽光	わからない	
1984年 3月調査	10	6	51	18	1	14	

(注) 1980年のときは「太陽熱」となっており
1984年には「太陽光」が選択肢となっている。

(出所)「総理府・世論調査」

図-3 将来の発電の主力は……？

かく、新設の「太陽光発電」が18%も占めて、水火力(16%)に並ぶという興味深い結果が出ている。また、「わからない」が大幅に減ったことも、国民のエネルギーへの関心の高まりと注目される。

このような状況下を考えると、太陽光発電システムの実用化開発研究は、ますます重要視するとともに、加速化する必要があると言えよう。

参考文献

1) 堀米, 他; 太陽光発電の研究開発の現状と今後の展望, 昭

59電気四学会連合大会, 1-1, (昭59-10)

2) 工技院編; 新エネルギー技術開発ビジョン, 通省産業調査会, (昭60-9)

3) 私信; (財)光産業技術振興協会の昭和59年度調査結果

4) 武田; 太陽光エネルギーの開発, 電気学会誌, 105巻3号, (昭60-3)

5) 石田, 他; ここまで来た太陽光発電—米国編—, 電力新報社, (1983)

6) 竹谷; 太陽光発電の市場予測, 電子技術, 26, No.1, (1984)

7) 資源エネルギー庁編; 新エネルギー導入ビジョン, 通省産業調査会, (昭60-7)

海外行事案内

第2回中国国際エネルギー展/会議

(China's 2nd Int'l Total Energy Exposition/Conference)

<会 期> 1986年6月10日(火) —15日(日)

<会 場> 国際貿易科学技術センター
(広東省広州)

<主 催> 国際貿易展示会社(英国)

<協 賛> 中国エネルギー保存研究所など数団体

この展示会と研究会は、1984年にはじめて開催され、成功した行事で、今回は石炭、石油、ガス、発電、水素エネルギー、原子力、地熱、代替エネルギーなど、あらゆるエネルギーに関する技術と情報の交換を目的としている。

ちなみに、先の第1回の展示会には、海外12か国からの参加を含め約300社の出展があり、3000㎡の展示場に約15000人の入場者があった。

中国では2000年までにGNPを4倍に引き上げることを目標としており、このためにはエネルギー資源の開発が急務になっている。このような情勢を背景にして、この展示会は、西側諸国にとっても中国との関係を深める絶好の機会であろう。

この展示会と国際会議の詳細については、下記の展示事務局へご照会下さい。

Dorinda C. Rowe

Project Manager

CHINA TOTAL ENERGY '86

International Trade and Exhibition Ltd.

553-579 Harrow Road

London W10 4 RH

United Kingdom