

2. 解 説

太陽エネルギー利用のための技術開発の現状

新エネルギー総合開発機構

若 松 清 司

太陽エネルギーは、エネルギー量の膨大さ、クリーン性、非枯渇性、需要の形態や規模に対する融通性等の数多くの長所を有するので、これを有効に利用するためのソーラーシステム、熱発電システム、光発電システム等の広範囲の技術開発が進められている。

太陽エネルギーは古くから人類に利用されているが、その利用分野をみると第1表のように極めて広い。ここでは最初にふれたように熱利用、熱発電、太陽電池等にしばって、主にわが国で進められている研究開発の現状を中心に概観してみる。

1 太陽熱の利用（給湯・冷暖房）

熱エネルギー源として太陽を利用することは、古くから行われている。住宅の構造を太陽の光をよく受け入れるようにし、暖房に活用しているのは勿論、特に給湯用（台所、風呂等）としての太陽熱温水器（屋根の上等に設置）は400万軒以上の住宅に普及している。

最近冷房も行うシステム開発が進められ、その実用普及が期待されている。

このようにその利用方法は、ソーラーシステムとしてシステム化され、単なる加熱用から進んで、建物、産業用の給湯、冷暖房および生産プロセスにおける熱源用として、得られる温度レベルの幅が拡大して行くにつれて、その用途は多岐にわたって広がりつつある。

わが国におけるエネルギー需要の約70%は熱エネルギーでその中の半分近くはソーラーシステムで対応することが可能な温度領域といわれている。

ソーラーシステムは基本的には、太陽熱を集める集熱器（コレクター）、夜間などに備えて熱を蓄めておくための蓄熱槽、熱を需要に伝えるための熱交換器、種々の熱伝送系および場合により補助ボイラー、冷凍機などから構成される。このシステムが普及するためには、従来からある石油や電力を利用するシステムに較べ経済的であることが重要で、そのための低コスト化、高効率化のための広範囲な技術開発が進められている。

(a) 民生用の給湯・冷暖房

住宅用太陽給湯システムは太陽湯水器にしる、強制循環給湯システムであれ、すでに各メーカーとも標準システムがあり、カタログ商品となっている。暖房・給湯システムでは建物の暖房に必要とされる熱負荷が建物の断熱性などで大きく影響を受けるので、建物と一体として考えることが必要であり、どの程度まで太陽熱エネルギーを取り込むかを総合的に決めることが重要となる。

熱伝達の媒体としては、給湯も容易に出来る水式が多く、床のコンクリート、砂、砂利層などにプラスチック管を蛇管状に配置し、オンドル式の蓄熱式床暖房とする方式が最もコストが安く、実施例も多い。

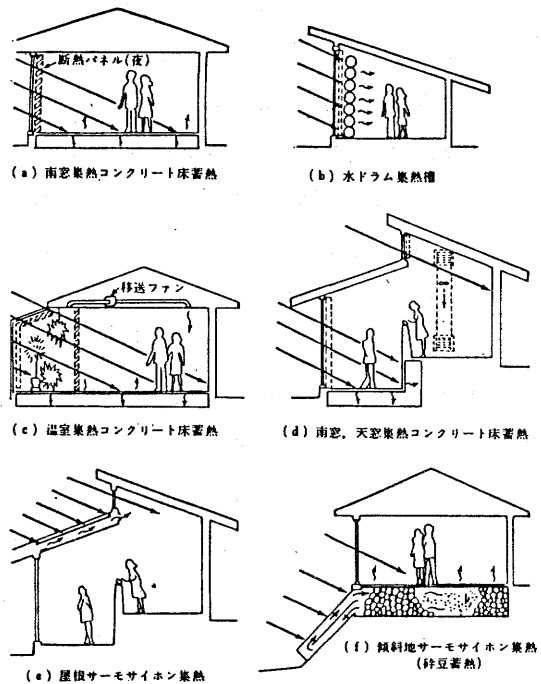
太陽冷暖房・給湯システムは、太陽集熱器などが四季を通じて利用でき、設備の利用率が高くなること、夏の冷房負荷もまかなえることなどから関心が持たれている。各種のシステムがあるが一般には平板形集熱器あるいは真空ガラス管形集熱器と組み合わせた温水加熱吸収冷凍機式の例が多い。

屋根の上の集熱器から蓄熱槽、放熱器等へと太陽熱をポンプやファンで強制的に輸送し、冷暖房や給湯を行うシステムを「アクティブソーラシステム」と呼ぶが、これに対し、入射する太陽エネルギーをそのまま直接あるいは伝導、対流、輻射などを利用して、外部からの動力にたよらずに室内の暖房などを行うシステムを「パッシブソーラシステム」と呼んでいる。またこれを利用した家を「パッシブソーラハウス」と呼んでいる。自然循環温水器は代表的パッシブシステムである。

第1表 太陽エネルギーの利用分野

	熱利用	光利用
間接利用	水力発電 風力発電 波浪発電 海洋温度差発電	薪、ワラなどの直接利用 バイオマス変換（メタン、アルコール、水素） エネルギー植物（青サング、ユーカリなど） 光合成産物の利用 光合成機構の利用 促成栽培（光量、温度、CO ₂ などの制御） 人工光合板*
直接利用	太陽熱冷暖房・給湯 太陽熱蒸溜 太陽熱発電 太陽熱電子発電 太陽熱電発電 太陽熱プロセスヒート 太陽熱水素製造 太陽による物質の溶解	太陽電池・宇宙発電 光化学電池* 光化学的水素・電力製造*

(*印は、方式により両方にまたがるもの)



第1図 パッシブソーラハウスの例

パッシブソーラハウスは第1図の例のように主に建物の構造を冬期の日中に出来るだけ多くの太陽熱を吸収できるようにし、しかも日中に室内が過熱しないように熱容量を持つような工夫がされている。日本の住宅は昔から南側への開口面積が大きくて、ある種のパッシブソーラハウスであるが、熱容量が小さく、断熱性が悪い(夏むきに出来ているわけだが)。この点を改良すれば比較的容易にパッシブソーラハウス化が可能と考えられるが、まだそれほど普及はしていない。

(b) 産業用ソーラシステム

わが国の工業部門で消費されるエネルギー量は一次エネルギーで約60%(石油換算で2億トン弱)と高く、このうち100℃以下の熱エネルギーとして用いられているのはほぼ半分といわれている。このような熱はソーラシステムで供給が可能であり、大きな潜在需要が見込まれる。しかしそのための産業用ソーラシステムは、民生用に比べ利用温度がより高いものやより低温(低温倉庫など)が要求されること、必要な熱の量が膨大であること、温度制御がより厳格であることなど厳しい条件が必要とされ、しかも既存の重油ボイラーや電気利用機器に比べ経済的に見合うことが要求される。

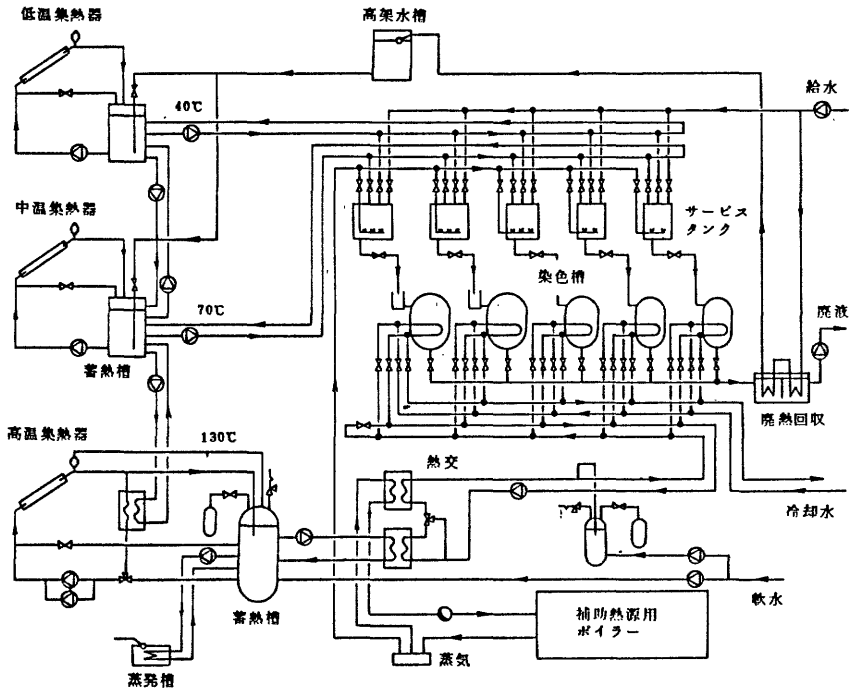
産業用ソーラシステムの集熱系は、供給すべき熱の温度レベルによって大きく異ってくる。平板型集熱器では100℃以下、真空管型で100℃~150℃程度である。それ以上では、線状集光式(line focus)で太陽追尾方式(例えばセグメントミラー方式)等の採用が必要となる。更に高温の数百度C以上になると回転放物面鏡やフレネルレンズを用いた集光式や多数の太陽追尾平面鏡(ヘリオスタット)で集光する中央集光方式などが利用される。

集熱器の効率是一般に高温になると低くなるので、適用には経済性の面からの制約が大きくなる。

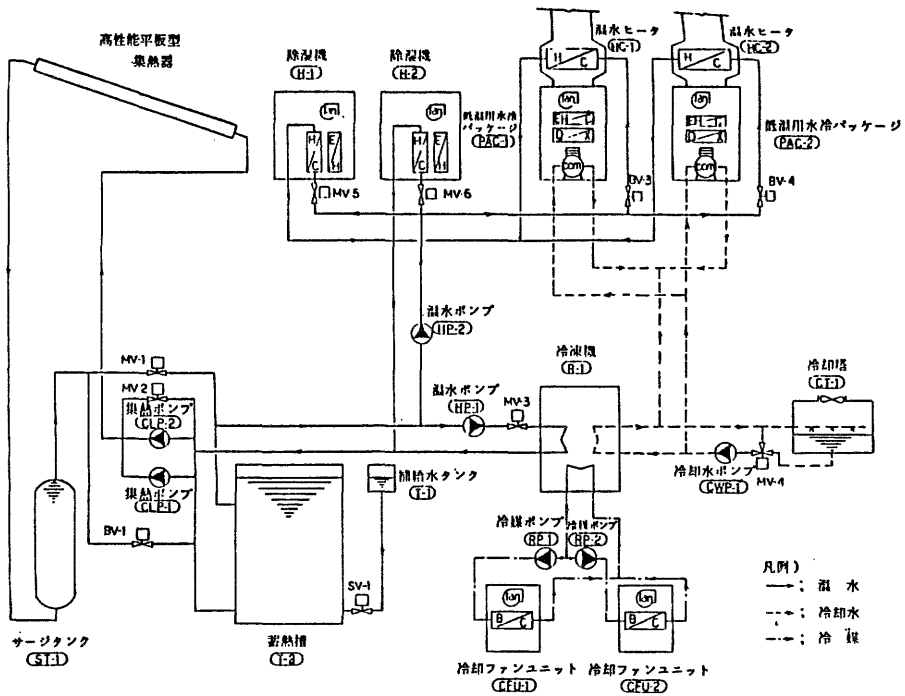
わが国での研究開発の例(サンシャイン計画)では、①段階的溫度レベルの熱管理を必要とする生産プロセスに太陽熱を安定的に効率よく利用するカスケード・ヒート・プロセス形と②常に一定溫度レベルの熱管理を必要とする場合のためのフィックス・ヒート・プロセス形の二つのシステムの開発が行なわれている。

前者では毛織物工場の染色工程(溫度レベルは40℃, 70℃, 130℃程度の3種類)で運転研究が行なわれている。(第2図参照)。

また、後者ではしいたけ用の定温倉庫(溫度レベルは15℃)の例がある(第3図参照)。



第2図 カスケーディングヒートプロセス型システム系統図



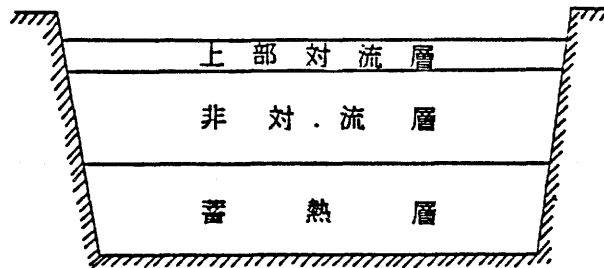
第3図 太陽熱利用定温倉庫の全体系統図

太陽熱を有効に利用するためには、昼夜の1日単位から、天候による数日、更には夏、冬の季節にまたがる供給の安定性をはかるための蓄熱システムが必要となる。

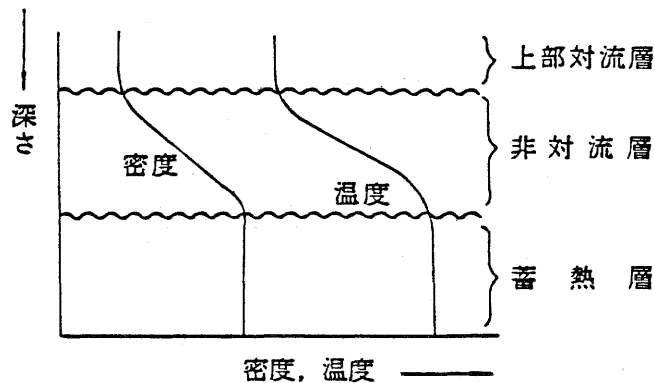
システムの利用に応じて、温度レベル、必要蓄熱時間等が決まり、それによって、そこで使われる適切な熱媒体をさがし出すことが重要である。

蓄熱の方法には①物質の比熱を利用する顕熱蓄熱、②相変化に伴う潜熱を利用するもの、③可逆熱化学反応を利用するものがある。

最も一般的なのが水を使う①のタイプのもので、温度成層を形成するソーラポンドの例などもある(第4～5図参照)。



第4図 ソーラポンドの構成



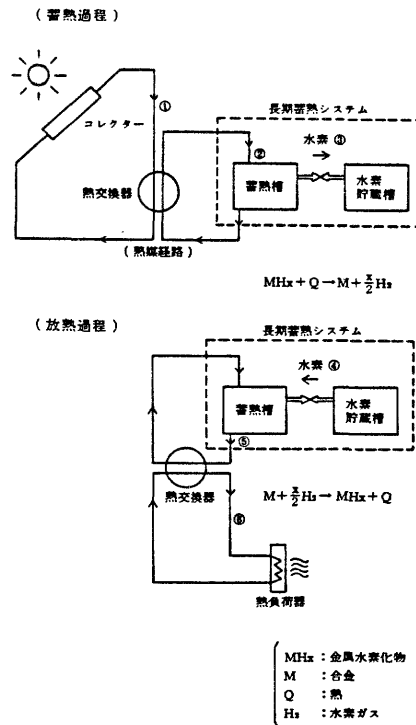
第5図 ソーラポンドの密度, 温度分布

②のタイプではパラフィン系，水化物系などがある。(第2表参照)。

③のタイプでは塩水化物，アンモニア化物，金属水素化物(第6図参照)などが検討されている(第6図)。

第2表 顕熱蓄熱材と潜熱蓄材の例

	蓄熱材	体積比熱 (cal/cm ³ °C)	潜熱 (cal/cm ³)	熱伝導率 (kcal/mh°C)	○特長 ●問題点
顕熱蓄熱材	水	1		0.55	○1種類で種々の温度域をとれる ○安価 ○伝熱媒体兼用(水) ●蓄熱密度小
	岩石, レンガ	0.4~0.6		0.3~3	
	コンクリート 土	0.3~0.8		0.45	
潜熱蓄熱材	パラフィン系	0.2~0.4	20~40	0.4	○蓄熱密度大 ○一定温度蓄熱 ●熱交換が必ず必要 ●過冷却・相分離(水化物), 腐食性
	水化物系	0.4~0.7	50~160	0.5~0.8	



第6図 金属水素化物を利用する長期蓄熱システムの基本原理

2 太陽熱発電システム

太陽熱発電は、太陽エネルギーを熱エネルギーに変換し、250℃以上の高温蒸気を作り汽力タービンにより発電する方式である。このシステムは、太陽エネルギーを集光し高温蒸気を得るための集光集熱部、集熱部からの熱を伝送する熱伝導部、熱を蓄え、日射変化に合わせて安定運転を行うための蓄熱部、蒸気により発電するタービン発電部からなりたつ。

このシステムで最もポイントとなるのは、集熱部と蓄熱部である。勿論伝送部における熱損失の軽減等も実用上重要問題になる。

わが国では1000 kW のタワー集光式と曲面集光式の2つの方式のパイロットプラントを昭和56年春に建設し、昭和59年春までの3ヶ年間の運転研究が行なわれた。

タワー集光方式は、1 m×1 mの鏡16枚から構成されたヘリオスタット（太陽に向けて追尾する）約800台で太陽光を反射させ、これをタワー頂にある集熱器に集め約250℃の蒸気を発生させ、（蓄熱槽を介して）約190℃の飽和蒸気をタービンへ送り汽力発電するシステムである。

一方曲面集光方式は、1 m×1.5 mの鏡3枚からなる平面鏡約2,500枚で反射させた太陽光を、さらに約120基のパラボラトラフ形曲面鏡に反射させ、曲面鏡の上に配置された集熱管に集め、集熱を行う方式により過熱蒸気を発生させ、これをタービンに送り汽力発電を行うシステムである。

いずれの方式も技術的フィージビリティが明確にされたが、実用のためには経済性の面で1桁程度のコスト低減を図ることが必要であり、そのための基礎的研究が必要と思われる。

海外においては第3表のようにソ連を除いて六基の大型のパイロットプラントが建設されており、プラントの規模ではアメリカのソーラーワンが1万kWと最大で、フランスのテーマスが2,500 kW とこれについている。

第3表 世界の大型太陽熱発電パイロットプラント

名 称	方式	出力	スポンサー	設置場所	竣工
EURELIOS	タワー	1 MW	EC	イタリア・シシリー島	1981・5月
THEMIS	タワー	2.5 MW	フランス	南フランス・ピレネー	1983・6月
CESA-1	タワー	1 MW	スペイン	南スペイン・アルメリア	1983・6月
SSPS-CRS	タワー	0.5 MW	IEA	南スペイン・アルメリア	1981・9月
SSPS-DCS	分散	0.5 MW	IEA	南スペイン・アルメリア	1981・9月
SOLAR-ONE	タワー	10 MW	アメリカ	カリフォルニア	1982・4月
SUNSHINE №1	タワー	1 MW	日本	香川県仁尾町	1981・8月
SUNSHINE №2	分散	1 MW	日本	香川県仁尾町	1981・9月
クリミア	タワー	5 MW	ソ連	クリミヤ半島	?

一方このような発電専用のシステムに対して、経済性、エネルギー総合効率の向上等を目ざした熱電気複合システムの研究も行なわれている。これは、産業分野などのように電気のみでなく熱の需要も多い利用系に対して、太陽熱で発電を行い電力を供給するとともに、太陽熱を必要に応じて熱のまま直接供給するシステムである。昭和57年に電気出力15kW、熱出力45kWのモデルプラントが建設され、運転研究が続けられている。

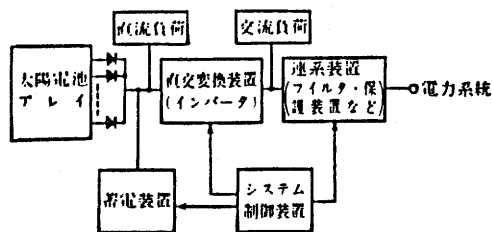
この方式のシステムは太陽熱を多目的に有効利用することが可能であるので、高いエネルギー効率(40%以上)が予想されるので、小規模分散形システムとして実用化が期待される。

3 太陽光発電

太陽光発電は、太陽電池を用い太陽光から直接電力を取り出し、利用するもので、発電したその場で利用できること(オンサイト・ジェネレーション)、発電規模を自由に設計できること、メンテナンス・フリーであることなどの特徴を有しており、わが国において相当量の電力を供給できる可能性がある。

太陽電池は、現在電卓等の民生用の機器、無人灯台や無線中継局等の特殊用途、あるいは人工衛星の電源用などとして用いられているが、一般電力用として利用するためには、光-電力の変換効率の向上、価格の低下、既存送配電網との連系など解決すべき問題が多い。

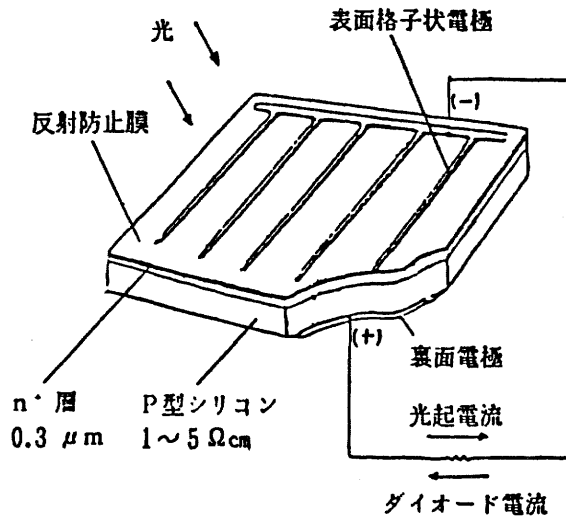
太陽光発電システムは、結晶シリコン、アモルファスシリコン等の半導体からなる太陽電池の光電変換機能を用いて発電するもので基本的には、太陽電池モジュールに、蓄電池、直交変換器等の周辺機器を組み合わせて、構成される(第7図)。



第7図 太陽光発電システムの構成例

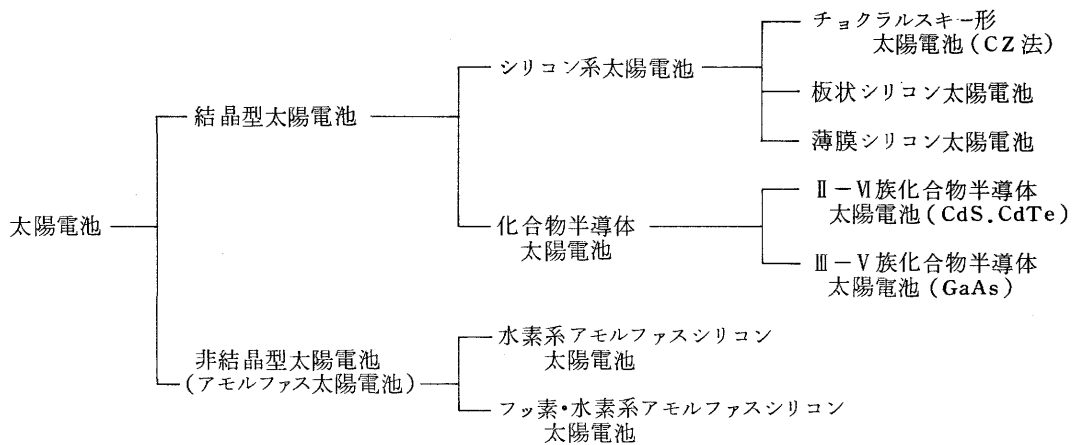
太陽電池が最初に作られたのは、1954年で、シリコンの単結晶ウェーハを基板としたシリコンPN接合によるものであり、第8図に構造の一例とその動作を示した。

太陽光発電システムではこの太陽電池セル(10cm角又は、12.5cm丸)を40~50枚直並列に接続し、モジュール(40cm×120cm程度)に組み立て、架台に取付ける。



第8図 p-nの接合太陽電池セルの構造の一例とその動作

シリコンの他に、太陽電池に利用されるものとして、第9図のようにひ化ガリウム (GaAs) GaAlAs, リン化インジウム (III-V族化合物), 硫化カドミウム, テルル化カドミウム (II-V族化合物), 硫化銅, CuInSe₂, 有機物等があるが、一般的な位置づけとして宇宙用に GaAs, 地上用に、シリコン系 (結晶形, アモルファス形) 太陽電池の技術開発が、主流となっている。

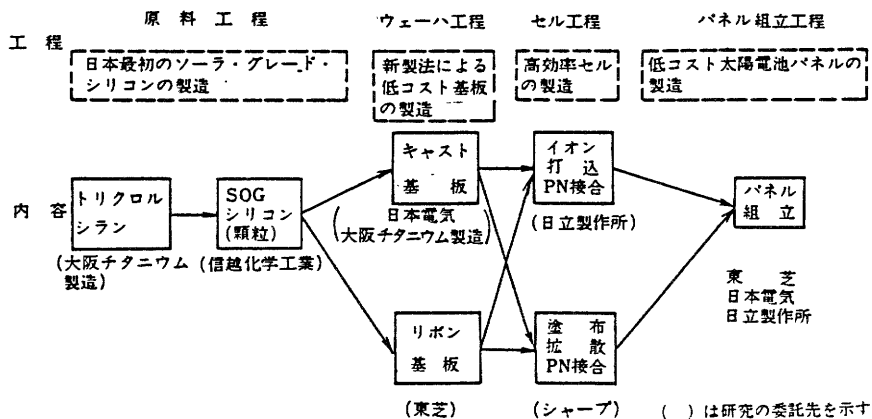


第9図 太陽電池の分類

以下にはシリコン系の結晶形太陽電池とアモルファス形太陽電池の開発状況について詳しくふれてみたい。

(a) 結晶形シリコン太陽電池

わが国における結晶形シリコン太陽電池製造技術開発は、これまで年産500kW規模の製造実験ライン(第10図)により進められている。



第10図 結晶形太陽電池製造技術開発
年産500kW規模製造実験ライン

太陽電池級原料シリコンの製造、多結晶シリコン基板(ウェーハ)製造、PN接合、電極形成(セル化)および、太陽電池セルを集合してモジュールに組立てる工程(モジュール化)の4工程より構成されている。

太陽電池用原料として用いるシリコンは、その純度より、大別して3種類ある。

第1は、半導体用シリコンで、純度は、11ナイン程度である。第2は、わが国および米国UCC社で開発されている流動床方式の連続生産技術による顆粒状又は、粉末状のシリコン(純度6N~7N)である。

第3は、主にヨーロッパで長期的に開発が進められている固体精製法による太陽電池用シリコン(純度5N~6N程度)である。

わが国で、技術開発をすすめている第2の方法は、金属シリコンから太陽電池用シリコン原料を低コストで製造する技術で、これは、金属シリコンからトリクロロシラン(TCS)をつくるTCS製造工程と得られたTCSを水素還元して顆粒状シリコンをつくる水素還元工程とから構成されている。TCS製造工程では、TCS年産200トン(顆粒状シリコン10トン相当)規模の実験装置が開発され後工程より発生する副生四塩化ケイ素をリサイクルしつつ、TCSを製造する技術の有効性が検証されるとともに、TCS精製原単位の向上による低コスト化条件が確認されている。

TCSの水素還元工程では顆粒状シリコン年産10トン規模の試験装置の開発が行われ、

これにより流動床下でTCSを水素還元する技術の有効性が検証されている。

ウェーハの製造技術として大別して2種類ある。第1は、スライス型シリコンウェーハであり、CZ法(チョクラルスキー法)、FZ法、キャスト法でインゴットを製造し、内周刃法(IDソー)、マルチワイヤーソー(MWS)等により、スライスするものである。前2者は、単結晶シリコンであり、半導体用オフスペックを太陽電池に利用することで、低コスト化することが、できるが、需給バランスによる変動が大であり、根本的な低コスト化としては、キャスト法による多結晶シリコンがある。

第2は、ノンスライス型シリコンウェーハであり、各種のリボン法と、スピニング法がある。リボン法は、米国ウェスティングハウス社のd-Web法のみが、単結晶シリコンウェーハであり、他は、多結晶シリコンウェーハである。単結晶ほど光変換効率のハイレベルのセルが得られるが、リボン法では、現在まだ生産性に課題がある。スピニング法は、これまでにないアイデアによるウェーハ製造技術であり、リボン法にかわる新技術として期待されている。

結晶形太陽電池の製造コストは、およそ、原料20%、ウェーハ30%、セル化20%、モジュール化30%であり、ウェーハ製造工程の低コスト化が、望まれるところである。

太陽電池製造工程の中で、最も、付加価値を高められるのがセル化である。理論光変換効率は、シリコン単結晶において、種々の仮定より算出されており、米国、ジェット推進研究所(JPL)では、27.6%と云う試算があるが、現在の実験製作データとしては、FZ法による単結晶ウェーハで、オーストラリア、サウスウェールズ大学のグリーンらによる19.1%が最高である(4cm^2)。

わが国における現在の光変換効率は、顆粒状シリコン原料によるキャストウェーハにおいて、11~12%の域にあるが、結晶形太陽電池の実用化のためにもより高効率化を図る必要が生じている。すなわち、キャストウェーハで、光変換効率15%を達成すべく、昭和61年度以降3年間の技術開発推進が予定されている。

米国に於ける高効率化研究は、シリコン単結晶が中心であり、その目標は、光変換効率18%である。この日本と米国の差は米国が効率に注目し、原料シリコンを半導体用からの流用ベースとしているのに対し、わが国では、太陽電池用シリコンを低コスト化することこそ実用化への道としていることからくる。又、高効率化研究は、使用するウェーハの品質の相違はあるものの、世界的に開発がすすめられており、結晶形太陽電池を低コスト化し、普及させるためには、是が非でも必要な技術開発である。

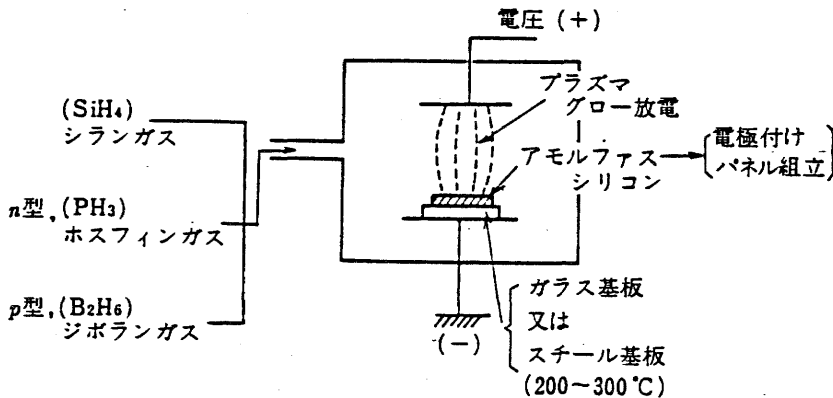
基本的には、高効率セル構造をどのようなタイプにするか(アイデア)および、それをどのように実現するか(テクニック)、さらに、どのように安価に製造するか(オートメーション)が、ポイントのように考えられる。

太陽電池セルを直並列に接続しモジュール化する技術開発は、年産500kW規模の実験製作システムの中で、連続自動化が、ほぼ、達成された。これは、セルを直列にリード接続するセル配列接続工程、接続された太陽電池に、表面ガラス、フレーム、テドラシール（防水シール）等を取り付けモジュール化するパッケージ工程及び完成したモジュールの性能チェックをする検査工程より構成されており、約95%の歩留まりと10分/モジュールの高速組み立てが、可能となっている。

(b) アモルファス形シリコン太陽電池

アモルファス型太陽電池の製造プロセスは比較的簡単である。真空のチャンバー内でグロー放電をさせ、シランガス、燐を含んだホスフィンガス、又はボロンを含んだジボランガスによって、ガラス基板かスチール基板にアモルファスの1ミクロン以下の膜を作る。アモルファスはPINの層から出来ている（第11図）。

第11図 アモルファスシリコン太陽電池の製造プロセス
（水素系アモルファスの例）



シリコンの原料も少く、製造時間も短く、温度も200~300度で、製造原価が安くなる可能性はあるが、今のところ効率が悪く信頼性が低い。これは結晶体でないので基本的に不安定で、水素が抜けたりすると結晶構造が変わり変換効率が落ちるのである。

一般にアモルファス物質は、結晶形と異なり不規則な原子構造を有しており、ガラス等であれわれれになじみの深い物質である。最初に述べたようにアモルファス太陽電池は、結晶形太陽電池に比べ、可視光領域の吸収係数が大きいため必要なシリコンの厚みは1 μm 程度で十分であること（結晶形の場合数百 μm ）、膜形成が比較的低い温度で行えるため消費電力が少なくすむこと、製造工程が簡単で大面積化・連続自動化が容易であることなどの特徴を有している。太陽光発電の中心課題の一つは低価格の太陽電池を開発することであり、前記特徴を有するアモルファス太陽電池はまさに有望であるといえる。しかしながら、アモルファ

ス太陽電池は一方では結晶形に比較して、変換効率が低いこと、および光劣化現象が存在することの太陽電池の材料としては好ましくない点も有している。

わが国においては、このような利点・欠点を併せ有するアモルファス太陽電池について、変換効率の向上、信頼性の向上、量産性の拡大を目ざして、大学、国立研究所および企業の研究所の3者が協力して研究開発に取り組んでいる。大学においては、電子状態の解明・膜構造の解析等理論的研究が、また、国立研究所においては、新材料の開発・セル構成等の基

第4表 アモルファス太陽電池の研究テーマとその目標

テ マ	目 標 (1985年)
アモルファス太陽電池高品質製造技術	真性効率 12% (100 cm ²) モジュール効率 8.5% 劣化率 15%/10年
アモルファス太陽電池大面積製造技術	真性効率 10% (1,200 cm ²) モジュール効率 7.0% 劣化率 15%/10年
アモルファス太陽電池高能率製造技術	真性効率 10% (100 cm ²) モジュール効率 7.0% 成膜速度 10 Å/s 劣化率 15%/10年
アモルファス太陽電池セラミック基板	真性効率 10% (100 cm ²)
アモルファス太陽電池可とう性基板	真性効率 10% (100 cm ²)
アモルファス太陽電池高効率	真性効率 15%
アモルファス太陽電池高信頼性	劣化率 10%/20年 真性効率 9% (100 cm ²)
アモルファス太陽電池高速成膜	成膜速度 30 Å/s 真性効率 10% (100 cm ²)

礎的研究がそれぞれ進められている。企業の研究所においては、原料であるモノシランガスの低コスト製造方法の開発、太陽電池を高効率かつ高速度で製造することを目ざした高能率製造技術、均一性のよい大面積のセルの開発を目ざした大面積製造技術、太陽光に対する感度特性に優れている多層の構造を有する太陽電池の製造技術などの研究開発が進められている(第4表)。

(c) 利用技術

以上の太陽電池や製造技術の開発と併行して、周辺技術および利用技術についても研究開発が進められている。周辺技術については、既存の電力系統との連系協調運転方式、複数システム間の相互干渉の問題などについて研究が行われるとともに、高効率かつ低コストの直流-交流変換装置および蓄電装置の研究開発も開始されている。

利用技術については、現地消費形発電および集中形発電の二つのタイプの利用方法について、いくつかのパイロットシステムを建設し、運転研究を行っている。現地消費形では、個人住宅用(3 kW)、集合住宅用(20 kW)、学校用(200 kW)、工場用(100 kW)の四つの応用システムが建設されている。これらのシステムは、いずれも電力を消費する場所で発電を行ういわば現地消費形システムであり、実際に太陽光発電システムを設置した場合のシステム上の問題を明らかにし、その解決を図ることを目的としている。また、昭和59年からは、既存送配電系統から遠く離れた離島・山間辺地等における独立分散形太陽光発電システムの開発に着手している。

集中形発電については、集中配置形(1000 kW)および分散配置形(200 kW)の二つのシステムが建設されている。前者は、まとまった敷地に多数の太陽電池を集中配置し発電を行うもので、総合的な効率の向上が見込まれている。後者は、小規模の太陽電池を多数分散配置し、系統を通じ全体を一つの発電所として運用するもので、都市周辺のデッドスペースを有効に活用することが可能となるシステムである(第5表)

以上

参考資料：電気学会技術報告 II部 第187号
「太陽エネルギー利用技術の進展」(1985年4月発行)

第5表 利用技術開発のためのシステム例

システム名	規模	設置場所	備考
個人住宅用	3 kW	神奈川県逗子市	屋根-体形トランスインバータ, 常時並列
集合住宅用	20 kW	奈良県天理市	切換形GTOインバータ
学校用	200 kW	茨城県筑波大学	常時並列GTOインバータ
工場用	100 kW	静岡県湖西市	直流負荷, 直流側並列
分散配置形	200 kW	千葉市市原市	電力事業用 25~50kw 6システム
集中配置形	1000 kW	愛媛県西条市	電力事業用 200+400+400 [kW], ユニット制御, 低コストアレイ構成
電中研・狛江	3kW+3 kW	東京都狛江市	系統解析用
電中研・赤城	8 kW	群馬県宮城村赤城試験センター	耐電圧劣化評価用
光・熱ハイブリット	5kWe+25kWt	広島県坂町	給湯・冷暖房・照明