

■ 展 望 ■

太陽電池技術の現状と将来



佐々木 正*

Tadashi Sasaki

1. はじめに

シリコン pn 接合の実用化に伴い、シリコン トランジスタとほぼ時を同じくして市場に導入されたシリコン太陽電池は、利用の実績としては1/4世紀の歴史をもっている。

その利用形態は、1970年代までは人工衛星や灯台などの無人電源用が主なものであったが、1980年代に入って、電卓を中心とした室内光を利用する民生機器への適用が大量になされるようになった。将来的には、代替エネルギー源として一般家庭用に商用電源として併用される形態までが考えられている。そのための必要条件である太陽電池の低価格化のための幅広い分野の開発と、大規模利用（商用電源併用）時のシステム技術の開発が並行して進められている。

低価格化を目指した開発は、第1次オイルショック直後の1970年代末から日本、米国、ECの各国で政府資金を投入して進められてきて現在に及んでいる。日本では、通産省によるサンシャイン計画が中心的役割を果たし、1974年以来基礎的研究が進められており、1980年からは結晶型シリコン太陽電池の製造技術についての開発が、さらに1983年からアモルファスシリコン太陽電池についても製造技術の開発が新エネルギー総合開発機構（NEDO）の委託で進められている。

一方、太陽電池システム技術についても、サンシャイン計画の中のNEDO委託研究として、1980年から住宅、学校、工場用の現地消費型システム、電力事業用としての集中型光発電システム、光・熱ハイブリッド型システム、及び利用に関する周辺技術の開発が進められている。この中で集中型の集中配置型と呼ばれるシステムは、完成時の出力が1,000kWpという大規模のものである。この中の一部システムは、既に設置を完了して運転研究段階に入っている。

太陽電池に使用される材料も、1980年代前半までは、

シリコン単結晶のウェハー（板）が大部分を占めていたが、1980年代の後半からは種々の開発成果を反映して、リボン結晶（シリコン）や多結晶シリコン、最近ではアモルファスシリコン薄膜が実用化されている。また、GaAsやCdTe、CdSなどの化合物半導体材料を使った太陽電池も数多く開発されている。

このように、代替エネルギー源としての大量利用を目指した開発は多岐に亘っているため、その概要についての紹介を行うことにする。

2. 太陽電池の種類と技術開発の流れ

2.1 太陽電池の種類

2.1.1 装置面

装置としては、これまでに最も多く使われてきた平板型と、光学系を使って高密度にした光を太陽電池に入射させる集光型に分類される。

これに加えて最近では電気の他に熱エネルギー（温水又はヒートパイプ）も同じ装置から取り出すように構成した光熱ハイブリッド装置も試作されている。この場合には、平板型、真空管型、集光型が採用されている。平板型と真空管型は熱コレクターに太陽電池を付加した形をとり、集光型は太陽電池装置に集熱機能を備えた構成となっている。

2.1.2 材料面

太陽電池素子の材料別に分類すると、シリコン系と化合物半導体系とに大別され、さらに製造方法等によって多くの種類に分けられる。その主なものを図-1に示しておく。

シリコン系では、従来の単結晶に加えて多結晶が使われ始め、また非晶質（アモルファス）も実用化が進められている。化合物系では、GaAs系が集光型用と人工衛星用として開発されており、またII-VI族については低価格化を目指して開発が進められている。

2.2 技術開発の流れ

* シャープ 副社長

〒162 東京都新宿区市谷八幡 878

(註) 本研究会、第5回総会記念特別講演会

(59/4/27大阪)で講演

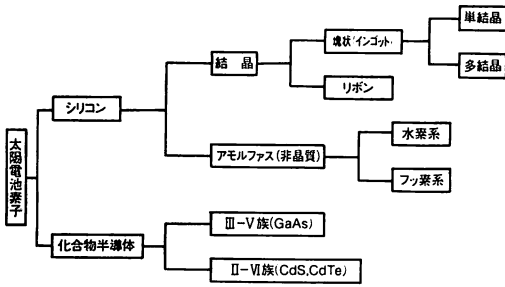


図-1 太陽電池素子の材料別分類

現在進められている技術開発は、太陽電池モジュールの低価格化と、低価格モジュール実現時の利用形態を考えたシステム構成法に関するものが主流となっている。

2.2.1 太陽電池の低価格化

太陽電池からの発生電力価格を商用電源からの価格と同等にするためには、1 Wp 当たり数百円のモジュール価格が要求される。第1次石油ショック時のモジュール価格数万円/Wp に対して現在までの技術開発の結果として数千円/Wp が現状での価格であるが、上記の目標を実現するには、さらに1/10の価格低減が必要となるので、各種太陽電池について製造方法から製造工程の細部の改良に至るまでの数多くの開発が地道に進められている。

2.2.1.1 シリコン系太陽電池

シリコン系太陽電池モジュールの完成までの製造方法について従来技術と現在進められている技術の流れを全体的に把握するためにまとめたのが図-2である。図の中で中央を通る線が、従来から採用されている方法で、この中でも自動化の導入や工程の改善などの徹底的な改良が行われている。その他の流れが新しく開

発されている方法で一部は製品にも導入されている。

1) 結晶性シリコン太陽電池

イ) 原料精製

現在のシリコン太陽電池に使われているシリコンウエハは、LSI用と同等の高い純度をもつシリコン母材(半導体級(SEG)Si)を使っているが、低価格太陽電池用としては、必要最低限の純度で低価格化を実現したシリコン母材が要求される。このような太陽電池専用の母材が、SOG(太陽電池級)Si と呼ばれるものである。

SOG-Siを得る方法の主なものを次に記す。

i) トリクロロ シランを介する方法

金属シリコンからSiHCl₃を作りこれを精溜してから水素還元を行う方法は、現状のSEG-Siに適用されているが、これを改良して収率を上げる方法が、サンシャイン計画(大阪タニウム, 信越化学)の中で進められている。またSiHCl₃をSiH₂Cl₂に変え、さらにSiH₄にしてから熱分解する方法は米国のユニオンカーバイド社で開発されている。

ii) SiCl₄の金属還元法

金属シリコン又はSiO₂と塩素との反応で得たSiCl₄をNa(Westinghouse社)又はZn(Battelle Columbus研究所)で還元してSOG-Siを得る方法である。

iii) SiO₂の炭素還元法

SiO₂から金属シリコンを得る際のアーク炉による炭素還元工程だけでSOG-Siを得る方法である。この場合、通常の原料では98.5%程度のSiしか得られないので、高純度のSiO₂とカーボン電極を使って開発が進められている。

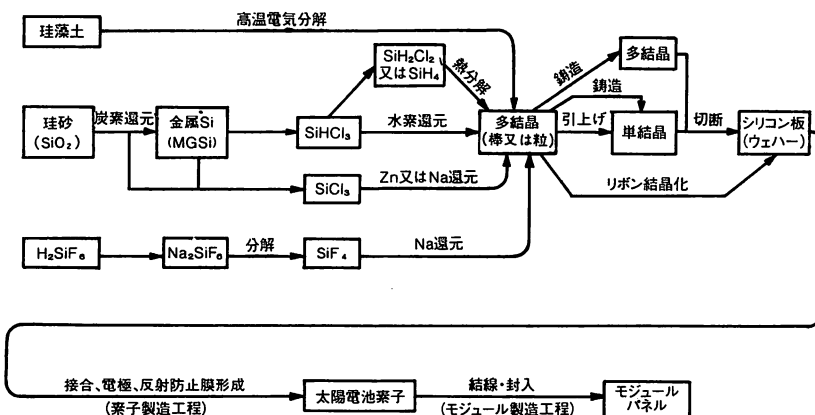


図-2 太陽電池完成までの全工程概要

これに加えて、原料 SiO₂ を特殊な酸処理で高純度化する方法 (Siemens 社) と、還元後に引き上げ法で再結晶させ不純物偏析効果によって純度を上げる方法 (Dow Corning 社) がとられている。

iv) 特殊な原料を使う方法

SiO₂ 以外の原料として、H₂SiF₆ を使う方法 (SRI International 社) と珪藻土を使う方法 (Stanford 大学) が開発されている。

H₂SiF₆ は、磷肥料生産時の副産物で、これを SiF₄ に変成してから Na で還元して SOG - Si を得ている。

珪藻土を使う方法では、炭酸バリウムと弗化バリウムを加えた融液中で、電解を行って得た Si を再結晶させて不純物量を低下させている。

ロ) 結晶-基板作製技術

i) 単結晶引き上げ法 (Cz 法) の改良

Cz 法については、結晶の大口径化と多数本のインゴットの連続引き上げ法が検討されている。連続引き上げの 1 例 (Siltec 社) を図-3 に示す。この場合は、引き上げ用と補給用の二つのルツボを備え、両者間を融液輸送管で結んでいる。

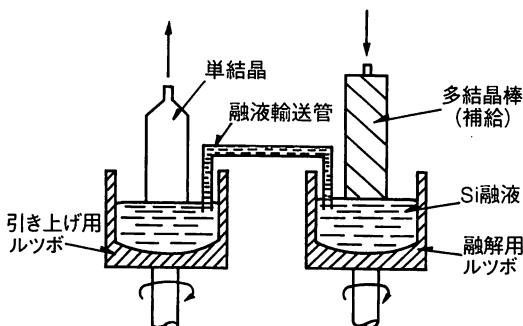


図-3 融液輸送法による単結晶連続引き上げ炉 (Siltec 社)

ii) 鑄造法

シリコン融液を鑄型に流し込んで多結晶または単結晶のインゴットを得るのがこの方法である。多結晶については、日本ではサンシャイン計画 (日本電気-大阪チタニウム) の中で開発が行われており、また西独のワッカー社からは Silso という商品名で発売がなされている。単結晶については米国の Crystal Systems 社で HEM 法と称する方法 (図-4) が発表されている。

iii) リボン結晶

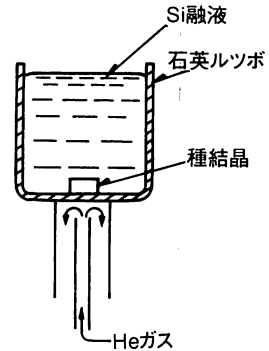


図-4 鑄造法による単結晶成長炉 (Crystal Systems社)

リボン結晶は、板状結晶を直接シリコンの融液から引き出して作られる。ダイを使って厚さ制御を行いながら結晶を得る方法としてはサンシャイン計画 (東芝) で開発されている方法と、Mobil-Tyco 社による EFG 法と呼ばれる方法 (図-5) がある。ダイを使わない方法としては、Westinghouse 社による Dendritic Web (図-6) や サンシャイン計画 (日本シリコン)

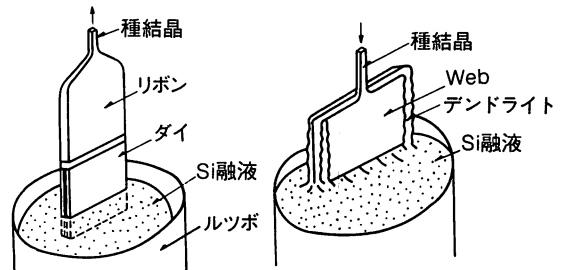


図-5 EFG法の概念図 図-6 Dendritic Web リボンの成長状態

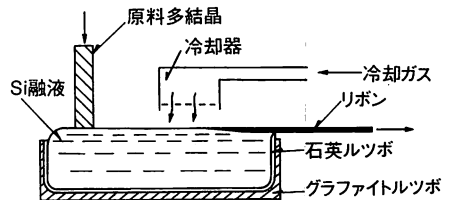


図-7 横引き法によるリボン結晶成長炉 (サンシャイン計画, 日本シリコン)

による横引き法 (図-7) が開発されている。

iv) その他の基板作製法

その他の方法として、シリコン融液をノズルから回転ロールに向かって吹き付けて板状多結晶を得る超急冷法 (東北大学, 図-8), 回転円板

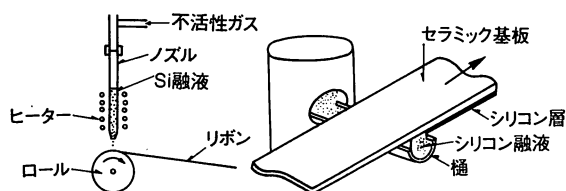


図-8 超急冷法によるリボン成長装置 (東北大学)

図-9 SOC法原理図

上にシリコン融液を滴下させて多結晶円板を得る方法(ホクサン), また異種基板を使う方法として, Honeywel社のセラミックによるもの〔SOC (Silicon on Ceramics) 法, 図-9〕やフランスのLEP社のカーボン基板によるもの〔RAD (Ribbon Against Drop) 法, 図-10〕がある。

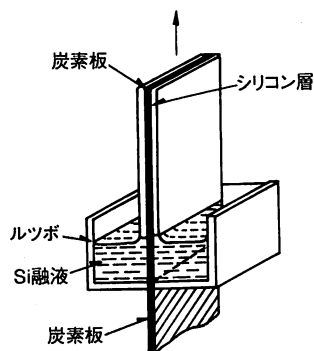


図-10 RAD法原理図

ハ) 連続自動工程の導入

シリコン基板から出発して, pn接合形成, 電極取付け, 反射防止膜形成, 素子間結線, パッケージングの工程を経て太陽電池モジュールが完成するが, この一連の工程を連続自動化する開発は, サンシャイン計画(日立, シャープ, 東芝, 日電)を中心に行われている。素子工程については, 自動化に適するように開発された新工程として, 塗布拡散法, イオン注入法, 電極印刷法等が導入されている。

2) アモルファス シリコン (a-Si) 太陽電池

a-Si 薄膜を SiH_4 のグロー放電分解法で作製するとギャップ間準位が水素によって消されて p 型, n 型を作ることの可能性が示されたのが1975年(ダンディ大学)で, その翌年には RCA から a-Si 太陽電池が発表された。それ以来, 急速に開発が進み,

当初2%台であった変換効率も最近では10%を超えるに至っている。

a-Si は, 光の吸収係数が大きいために, 太陽電池として必要な膜厚が $1 \mu\text{m}$ 程度ですむという利点をもつので, 価格的にも有利であることが期待されている。電卓用を中心とする屋内光利用の分野では既に結晶シリコンに替って商品化されている。屋外太陽光を対象としては, 変換効率の向上と信頼性の改善について現在数多くの開発が進められている。

イ) アモルファス太陽電池の構成

a-Si の材料としては, 水素系 (Si : H) とフッ素系 (Si : F : H) が主に使われている。構造的には, ガラス基板上に透明導電膜を介して pin の各層を設けたもの(図-11)とステンレス鋼 (SS) 基板上に pin 層を順次形成して透明導電膜を形成したもの(図-12)が主流となっている。

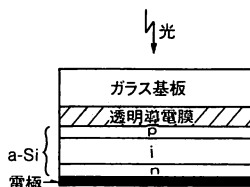


図-11 ガラス基板 - pin 構造

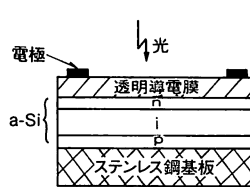


図-12 ステンレス鋼基板 - pin 構造

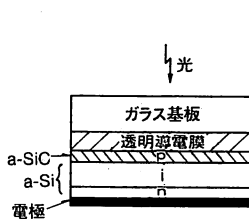


図-13 ガラス基板 - ヘテロ接合構造

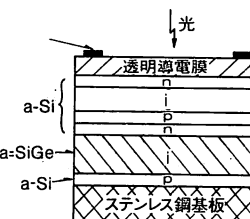


図-14 タンデム構造

ガラス基板型の改良として, p 層をバンドギャップの広い SiC で形成したヘテロ接合型が開発されている。(大阪大学, 図-13)

一方, a-Si 素子で吸収できず透過してしまう長波長光を吸収するように, バンドギャップが a-Si よりも狭い a-SiGe による素子を重ねたタンデム構造と呼ばれる素子(三菱電機, 図-14)も高効率化を狙って開発されている。

ロ) a-Si 太陽電池の作製方法

a-Si 膜の作製方法としては, プラズマ CVD 法が主に用いられている。プラズマ CVD 法でも

電極の置き方や電力の加え方には幾つもの方法があるが、標準的な平行平板電極型の装置を図-15に示す。

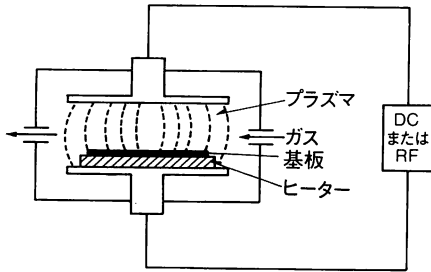


図-15 平行電極型(容量結合法)装置

最近では、pinの各層を別々の反応室で作製するように構成した3室分離型の装置が、量産用だけでなく、実験室用としても使用されるようになっている。これは、不純物の微量な混入があっても素子特性(信頼性を含む)に大きな影響があるので実験の精度上の要求が高まっていることによる。

量産用の装置として、ステンレス鋼基板を用いた素子への適用として、Roll to Roll方式と呼ばれる連続生産機も導入されている(シャープ)。この方式の概要を図-16に示す。SS基板は、0.2mmの厚さでロール状に巻かれており、これが巻き取り側のロールで引かれて各反応室を経過していく。

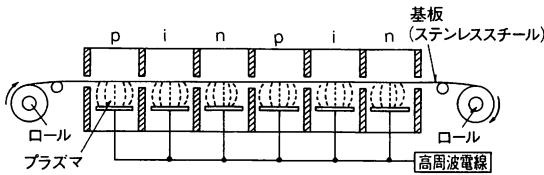


図-16 ベルト式アモルファス・シリコン膜作製装置(Roll to Roll方式)

ハ) a-Si 太陽電池の信頼性改善

a-Si:H膜太陽光を照射すると、電気伝導度が図-17のように変化し、その変化は150℃のアニールで回復するという現象が1977年にStaeblerとWronskiによって発見され、S-W効果と呼ばれている。

一方、a-Si 太陽電池の 変換効率が太陽光下で低下する現象も数多く観測されており、電力用としての実用化のために解決しなければならない

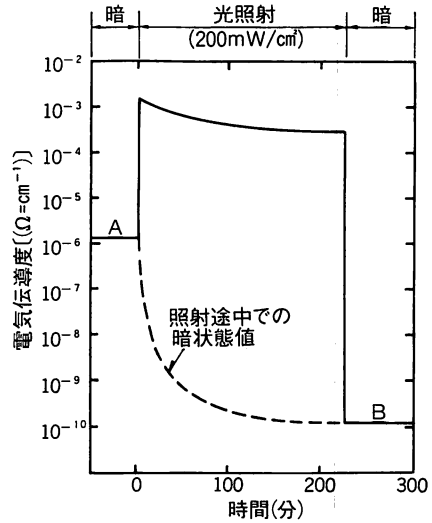


図-17 光照射による a-Si:H 膜の電気伝導変化 (S-W効果)

重要な課題となっている。現在も数多くの劣化現象の観察と劣化機構の解明の研究がなされており、その進展によって、材料中の微量不純物の制御や、素子構造の最適化が行われて、実用に耐える信頼度が実現されていくものと期待される。

3) 化合物半導体太陽電池

1) GaAs 系太陽電池

GaAs 系太陽電池は、高い変換効率(20%前後)が得られ、また温度上昇による効率低下率が小さいという特長をもっているが、資源量の制限と高価であるという難点をもつ。これを解決する方向で、出来るだけ薄い素子(必要厚さは、10μm程度)を形成する技術開発と集光用素子の開発が行われている。

薄い基板を作成する方法として剥離薄膜法(Peeling Film Technology, PFT)と呼ばれる技術が二種開発されている。その一つは、GaAs 基板上に GaAlAs 層を介して GaAs層を形成して GaAlAs 層をフッ酸で溶解して GaAs の薄膜を得る方法である。(東工大、図-18) 他のも一つは、GaAs 基板上に、部分的にフォトレジスト膜を形成してから炭化させ、その上に GaAs 薄膜

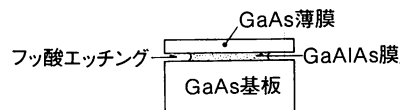


図-18 化学法による薄膜剥離

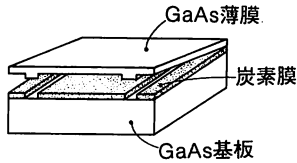


図-19 機械的(くさび)方法による薄膜剥離

を形成後、くさびを打ち込む形で薄膜を分離する方法である。(マサチューセッツ工大、図-19)

集光素子については、300倍程の集光下で23%という高効率達成されている。(住友電工)

ロ) CdS/CdTe 太陽電池

この型の太陽電池は、p型CdTeを主層とし、n型CdSを組み合わせ、両層共焼結法で作られる。(松下電器)このCdTe、CdS層に加えて、電極層もペーストを印刷して炉の中を通すという共通した工程で製造されるので、全体を一貫してベルト炉で構成した量産設備を容易に構成できるという利点をもつ。

2.2.2 太陽電池電源(光発電)システムの開発

直流負荷に対する独立電源システムは、太陽電池の実用化以来使われているものであるが、太陽電池の低価格化に従って拡大する需要に備えて新規の構成のシステムの開発が種々進められている。その内容は、交流負荷を対象とした独立電源から商用電源との併用を行うシステムにわたり、システム規模としても個人住宅用の3kWpのレベルから電力事業用の1,000kWpにまで及んでいる。

商用電源との併用システムは、商用系統と結ぶという意味から連系式と呼ばれる。連系式には、単に商用電源から補給をうけるバックアップ方式(図-20)と、補給だけでなく光発電システムの余剰電力を商用系統に送り込む(逆潮流させる)ようにした完全連系方式(図-21)とがある。わが国では、完全連系方式は、電気事業法上の制約があって現時点では実用化できないが、将来は法改正も行われるものと考えられる。

交流負荷に対して使用されるインバータについては、家庭用負荷を対象とする場合は一般的に負荷率の低い状態で運転される時間帯が長くなるので、低負荷率時の変換効率の高いものが要求される。小容量のシステムでは、トランジスタを使ったインバータが使われ、トランジスタではスイッチングに必要な電力が小さいので低負荷時の効率はあまり低下しないので問題は少ないが、サイリスタを必要とする大容量のシステムで

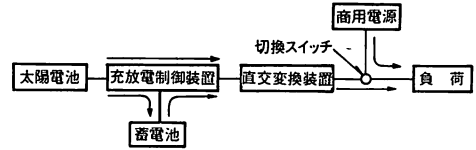


図-20 商用電源バックアップ式システムのブロック図

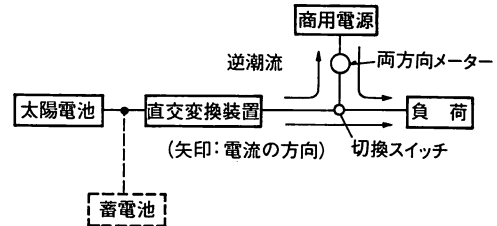


図-21 商用電源連系式システムのブロック図

は、サイリスタのスイッチング所要電力が大きいことが問題となる。このため、スイッチング電力が小さいように構成したGTO(Gate Turn Off)サイリスタが、低負荷時のインバータの高効率化のために使用されている。

日本でのシステム開発は、サンシャイン計画の中の新エネルギー総合開発機構(NEDO)による委託研究として進められているものが多数を占めている。この研究は、昭和55年から開始されたもので現在一部のシステムは運転研究段階に入っている。NEDO委託研究の概要を表1に示す。この中で工場用システムだけが直流負荷を対象とし、他は交流負荷に供給するものである。また光・熱ハイブリッド・システムは、電力に加えて熱(温水)も取り出すように構成されている。

その他民間資金によるものでは、関西電力による50kWp(平板型)と10kWp(集光型)実験システムや三洋電機による住宅用2kWp(アモルファス太陽電池)システムがある。

米国でも、政府資金(エネルギー省(DOE))を中心に多くのシステムが各所に設置されている。システム規模は5kWpから350kWpで、負荷も住宅用、病院用、空港用、ショッピングセンター用等多岐に亘っている。その概要を表2に示す。この中で、住宅用としては、DOEが北東部(マサチューセッツ州)と南西部(ニューメキシコ州)に住宅実験場を設けており、それぞれに5つの実験住宅を異なる施工者が設計・建設を行っている。その中には、太陽電池モジュール自体が屋根機能を代行する形の方式も採用されている。

集光型の中で、線型の光学系をもつものは、集熱機

表1 NEDO 委託研究により開発中の光発電システム

適用対象	太陽電池量	受託会社	構成率
個人住宅	3 kWp	富士電機	屋根瓦置換式(ルーフパネル), トランジスタインバータ, 商用系統と常時並列
集合住宅	22 kWp	シャープ	屋上架台式, GTOインバータ, 商用系統と切換式
学校	200 kWp	日立, 日本電気	GTOインバータ, 商用系統と常時並列
工場	100 kWp	松下電池	電池工場用, 直流負荷, 直流側で商用入力と並列
電力事業 (分散配置型)	200 kWp	東京電力研 電中	20kWp ~ 50kWp の6システム
電力事業 (集中配置型)	1,000 kWp	四国電力研 電中	200kWp, 400kWp, 400kWp のユニット制御
光熱ハイブリッド (集光型)	5kWp(電気) +25kWp(熱)	シャープ	中国電力と協力, 事務所照明, 給湯, 空調

表2 米国の主な光発電システム

適用対象	太陽電池量	型	設置場所	備考
ショッピングセンター	100 kWp	平板型, 単結晶	ニューメキシコ州	晴天日300日以上
博物館	135 kWp	" , 多結晶	オクラホマ州	設置角度は冬に合わせる。 夏用に反射板を置く。
学校(高校)	100 kWp	" , 単結晶	マサチューセッツ州	年間116,000kWhを発電 休暇中の5,000kWhを売電
軽工業 (キャンデー工場)	35 kWp	" , 角形単結晶	カリフォルニア州	工場休日分は売電
住宅 (住宅実験場に 10システム)	4.8~7.0 kWp	" , 単結晶	北東部住宅実験場 (マサチューセッツ) 南西部住宅実験場 (ニューメキシコ)	屋根への設置方式: 架台式, 屋根材置換式, 屋根機能代行式 の3種
病院	60kWp	集光型, 線型放物面鏡	ハワイ州	光・熱ハイブリッド式
事務所	47 kWp	" , "	ニューメキシコ州	光・熱ハイブリッド式 (ヒートポンプ, 暖房)
学校(大学)	320 kWp	" , "	ミシシッピ州	光・熱ハイブリッド式 (2軸追尾, 暖房)
空港	27 kWp	" , 線型フレネルレン ズ(アーチ形)	テキサス州	光・熱ハイブリッド式
空港	225 kWp	" , 円形フレネル レンズ	アリゾナ州	
村落	350 kWp	" , "	サウジアラビア	

能も付加された光熱ハイブリッド型として構成されている。商用電源と併用するものは、全部が完全連系式を採用し、両方向電力計を備えている。

民間では、ARCO Solar社が、1,000 kWp のシステムを電力会社(Southern California Edison Company)用に設置を行い、また長期計画(30年)としてガス・電気会社(Pacific Gas & Electric)用の建設を行っており、その中の6,000 kWpシステムの第1期計

画2,000 kWp分の設置を完了している。

3. 将来の展開

太陽電池の開発の主流となっている低価格化については、さらに太陽電池の市場価格を現在の1/10に下げるといふ課題を残している。この目標を達成するために結晶シリコン、アモルファスシリコンの両方について並行して開発が進められていくことになろう。

表3 太陽電池の種類別割合の予想
(Maycockによる)

	1990年	2000年
単結晶シリコン	30	10
多結晶シリコン	25	25
板状シリコン (リボンを含む)	15	25
アモルファスシリコン	20	30
その他 (化合物半導体等)	10	10

これは、太陽電池の種類によって用途別に使い分け(現在でアモルファス太陽電池が室内光用に主に使われているように)がなされるというのが大方の予想となっていることとも関連する。1990年と2000年での種類別の割合を予想した代表例を表3に示しておく。この例では、アモルファスシリコンが漸増して2000年に30%に達し、一方結晶系シリコンの中では単結晶の比率が減少している。

結晶系シリコンで特に価格面で大きなネックになっているのは原材料であり、SOG-Siをいかに簡単な方法で精製するかが最大の課題として今後も継続して研究が進められるものと考えられる。その1例が、既に述べたシーメンスでの開発で、この場合MG-Siを得る工程を改良しただけでSOG-Siを得ることを目指している。多結晶ウェハーについては、現在はSEG-Siを使った市販品が供給されているが、さらにSOG

-Siを使った開発の成果を反映した低コストのウェハーの供給を目指して、不純物の制御技術の開発や素子作製方法の改良等が行われている。

アモルファス・シリコンについても、変換効率の向上、製膜速度の向上、材料収率の改善、屋外太陽光下での劣化の克服などの多岐に亘る開発が継続して強力に進められていくことが予想される。

応用面では、商用電源との併用という形態での開発は、日米両国で強力に進められているので、ここ数年でシステム技術面の確立が行われることになる。ところが、実需要面では商用電源併用式よりも、独立電源の形態の村落用や、水汲み上げ用のシステムが、当面(2,000年辺りまで)大多数を占めることが考えられるので、この方面の開発が改めて取り上げられるようになっている。その一つとして、NEDOでも、「中間需要の創出」という新しい目標を目指して独立電源システムの研究開発を発足させようとしている。この流れの開発は、発展途上国の政府でも今後積極的に取り上げられていくものと思われる。

宇宙用太陽電池については、スペース・シャトルの実用化に伴って、改めて衛星発電所の具体化が検討され始めており、今後の進展が期待される。

以上述べたように、代替エネルギー源としての実用化と、発展途上国での文化的生活の向上を目指した太陽電池技術の開発は、今後も息長く続けられ人類の未来への希望の灯となっていくことであろう。

