

Discussion Paper Series

RIEB

Kobe University

DP2012-J02

研究ノート：太陽電池市場の 2000 年代*

松本 陽一

2012 年 3 月 22 日

*この論文は神戸大学経済経営研究所のディスカッション・ペーパーの中の一つである。
本稿は未定稿のため、筆者の了解無しに引用することを差し控えられるたい。



神戸大学 経済経営研究所

〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 2-1

研究ノート：太陽電池市場の 2000 年代¹

松本陽一

概要

太陽光発電の産業規模が急速に拡大している。この分野において、日本および日本企業は世界的に極めて強い存在感をもってきたが、2000 年代の中頃から、その状況は大きく変化した。本稿では、太陽光発電の重要デバイスである太陽電池に焦点をあて、2000 年代の 10 年間に何が起きてきたのかを主に公表された資料を利用して跡づける。

太陽光発電と太陽電池

環境問題の深刻化や化石燃料の枯渇に対する懸念、原子力エネルギーへの不安など、さまざまな理由から新たなエネルギー源への期待が高まっている。その一例が太陽光であり、近年になって太陽光発電の需要は世界中で高まっている。図 1 は日本の住宅用太陽光発電システムを模式化して描いている。太陽光発電システムは太陽電池、パワーコンディショナーなどから成り立つ。ごく簡単に説明すると、太陽の光を太陽電池が受け、発電する。住宅の屋根上に設置するタイプのほかに、休耕地などを利用して、広い土地に多くの太陽電池を敷き詰めた巨大な発電施設もある。これは発電規模からメガソーラー²と呼ばれたり、ソーラーパークと呼ばれたりする。太陽電池については後述する。

太陽電池で生じた電気は直流（DC：Direct Current）である。家庭の電化製品に使われる電気は交流（AC：Alternating Current）なので、これをインバーターで交流にしてから使う。日本の住宅用太陽光発電システムの場合、インバーターと電力網を保護するための連携保護装置がセットになったパワーコンディショナーを介して電気を直流から交流にする。連携保護装置は停電の際に太陽光発電装置と電力網とを遮断する機能などがついている。これがないと、たとえば停電時に復旧作業を行おうとした作業員が太陽光発電からの電気によって感電する恐れがある。

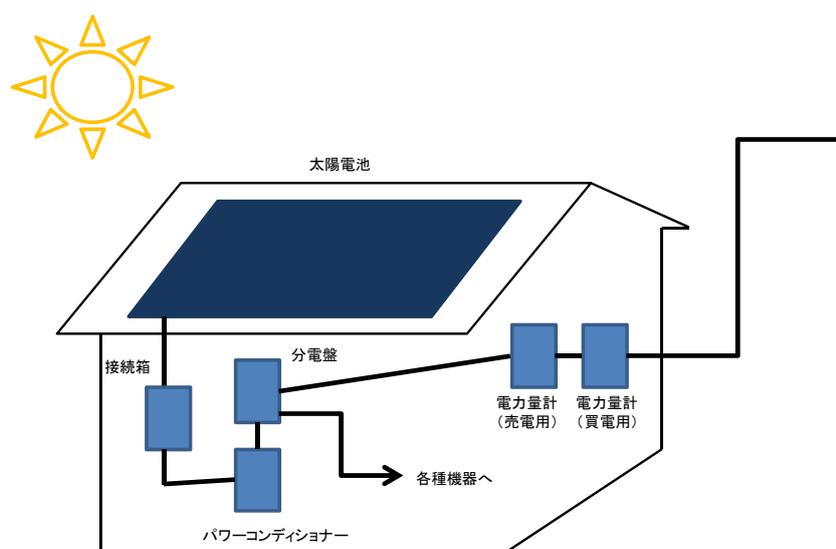
交流にされた電気は家庭内の電化製品を動かす。それでも余れば電力会社によって買い取ってもらえる。そのため日本の住宅用太陽光発電システムには、買った電力量をはかる計器と売った電力量をはかる計器との二つの電力量計が設置されている。このように電力網に接続した太陽光発電システムを系統連携型と呼ぶ。それに対して、電力網に接続しな

¹ 本稿は科研費（22730293）の支援をうけた研究成果の一部である。

² メガワットは 1000 キロワット、ギガワットは 1000 メガワットの意。

いものを独立型と呼ぶ。独立型のシステムは電力網の届かない離島や山間部に設置される。灯台や無線の中継基地などが代表例である。発展途上国の非電化地域に導入されることもある。系統連携型と独立型の違いのひとつに、後者には蓄電池が必要な点がある。太陽光発電は昼間だけ発電する。その日の天気によって発電量も異なる。蓄電装置がなければ、よく晴れた日には発電しすぎて使い切れない電気が発生し、雨の日には電気が使えない。

図1 日本の住宅用太陽光発電システム



注) 太陽光発電協会編 (2006)、2 頁、図 1・1 を参考に筆者が作成。

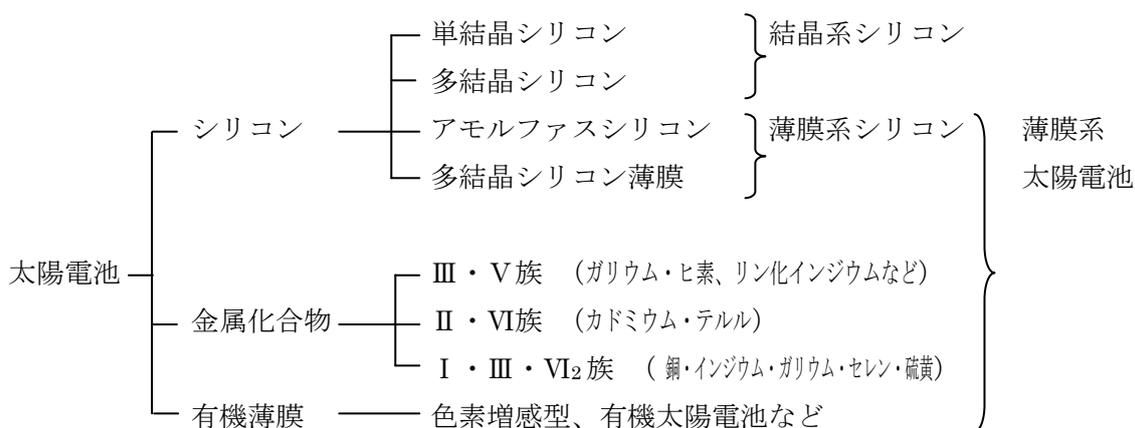
太陽光発電の重要デバイスで、文字通り発電を担うのが太陽電池である。太陽電池は半導体でできている。半導体の原子は太陽光があたると「+」と「-」が生じる。たとえばシリコンは、精製の際にどういう処理をするか（ドーパントを混ぜるか）によって、「+」が集まる「P型半導体」と「-」が集まる「N型半導体」に作り分けることができる。シリコンにボロンを添加すればP型半導体に、リンを添加すればN型半導体になる。ごく簡単にいうと、この2種類を貼り合わせたものが1つの太陽電池セルである。太陽光が半導体に当たると、2種類の半導体にはそれぞれ「+」と「-」が集まる。そうして「+」と「-」がはっきりと分かると2つの半導体の間に電圧が発生する。「+」の電極となった「P型半導体」と「-」の電極となった「N型半導体」、さらに電球などの抵抗物をつなぐと電気が流れる。太陽電池セルを直列に接続してガラス板などで封止したものを太陽電池モジュールと呼ぶ。住宅の屋根に載っていて、普段われわれが目にする太陽電池とは、このモジュールである。

太陽電池は、大別すると2種類ある。第1はシリコンを用いたタイプで、すでに一般に

広く用いられている。太陽電池として多く使われているのは結晶系シリコン（単結晶シリコンと多結晶シリコン）太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池である。以下、特に断らない限り単結晶と多結晶をまとめて結晶系シリコン太陽電池または単に結晶系太陽電池と呼ぶ。また、多結晶シリコン薄膜とアモルファスシリコンをまとめて薄膜系シリコン太陽電池、これと後述する金属化合物半導体太陽電池および有機薄膜太陽電池とをあわせて薄膜系太陽電池と呼ぶ。

結晶系シリコン太陽電池はシリコンの結晶を薄切りにして太陽電池セルを作る。シリコンの製造過程での電気消費量が単結晶に比べて少ない、単結晶シリコンの端材を再利用して作ることができるなどの理由から、多結晶シリコンは単結晶シリコンよりも安価であり、現在最も多く生産されている。薄膜系シリコン太陽電池はガラスや金属などの基板に薄膜状のシリコンを成長させて作る。結晶系と比べてシリコンの使用量が 100 分の 1 程度で済むことから、省資源化と低価格化に向いている。

図 2 太陽電池の種類



注) 太和田、2008 年、124 頁、図 2 をもとに作成。

第 2 の太陽電池はシリコンを用いないタイプで、こちらはシリコン太陽電池に対する次世代技術と目されている。III・V族やII・IV族、I・III・VI₂族などを合わせて金属化合物半導体太陽電池と呼ぶ。これは複数の元素を主原料としている。III・V族は主に人工衛星に用いられている。II・VI族のCdTe（カドミウム・テルル）太陽電池はカドミウムを用いるので日本では作られていないが、アメリカのファースト・ソーラーが生産している。I・III・VI₂族の一種であるCIS（銅・インジウム・セレン）系太陽電池は昭和シェル石油の子会社であるソーラー・フロンティアと本田技研工業の子会社であるホンダソルテックが生

産・販売している。金属化合物半導体を用いた太陽電池では新規参入が相次ぎ、有機太陽電池や色素増感型太陽電池といった新技術の開発も進められている。太陽電池の種類を図 2 にまとめた。

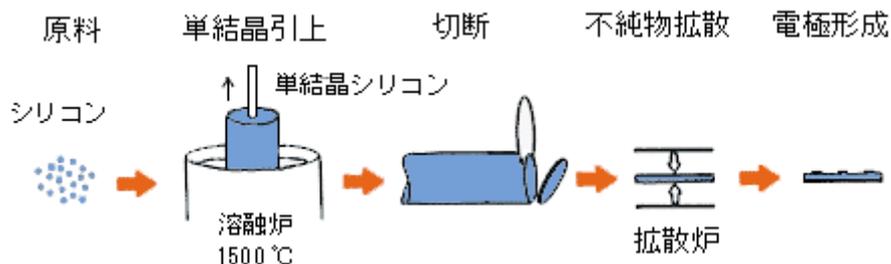
太陽電池の性能指標のひとつに「光電変換効率」がある。これは光をどれだけ効率よく電気に変換できるかを示す指標で、この数値が高いほど効率よく発電できる。小面積のセルでは単結晶シリコンが 25%弱、多結晶シリコンが約 20%、薄膜系シリコンが 10%程度といわれている。市販されている大面積のモジュールでは効率はもっと低く、結晶系シリコンが 13~16%、薄膜系シリコンが 7~8%といわれている。金属化合物半導体太陽電池のそれは、ガリウム・ヒ素系が 25~33%と報告されており、CIS 系では研究レベルで 20%、市販品では 10~12%である。コストや変換効率などを考えると、最も優れた太陽電池の方式をひとつだけ選ぶのは難しい。たとえば、住宅の屋根に設置する場合には限られた設置面積を有効活用するために割高でも高効率なものが良いのに対して、メガソーラーのように設置面積の制約が小さい場合には変換効率が少し低くても低価格なものが良い。

シリコン結晶系とシリコン薄膜系と、シリコンをもちいる点では同じでも太陽電池の作り方は大きく異なる (図 3)。結晶系の場合、シリコン・ウエハーが必要で、そのためにはまずシリコン・インゴットが必要である。この単結晶インゴットを薄くスライスするとウエハーができて上がる。インゴットの端材を再溶解・鋳造することで多結晶に使うインゴットを作ることができる。それを分割・スライスすれば多結晶用のウエハーになる。こうしてでき上がったウエハーに不純物拡散・電極印刷を行うと、それぞれ単結晶セルと多結晶セルができて上がる。このようにして作られたセルを複数個組み合わせるとガラスなどで覆うと、モジュールになる (シャープ株式会社ホームページより)。大規模な拠点で生産したセルを需要地に運んでモジュールに組み立てるのが一般的である。

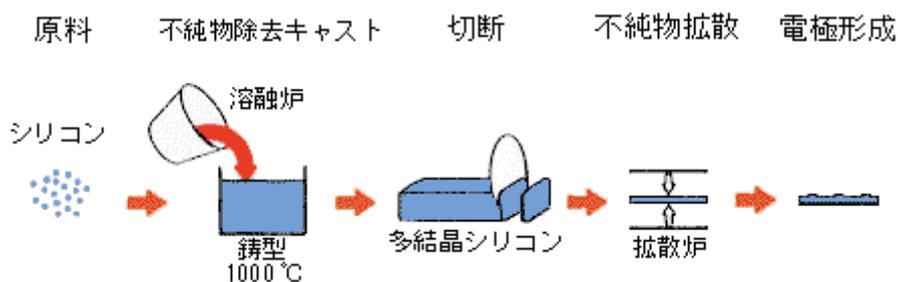
他方のシリコン薄膜系ではインゴットは不要である。こちらはガラスや金属の基板上に透明電極を形成し、そこに光電変換層 (半導体層) を形成する成膜工程を経て、太陽電池の最小単位であるサブモジュールができて上がる。このサブモジュールをガラスなどで覆って封止するとモジュールができて上がる。基板への成膜工程を経てモジュールが作られる点では金属化合物系の太陽電池の作り方も同じである。

図3 太陽電池セルの作り方

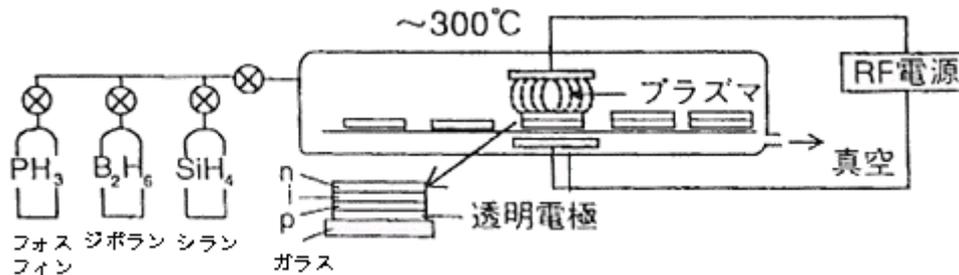
[結晶系 (単結晶)]



[結晶系 (多結晶)]



[シリコン薄膜系]



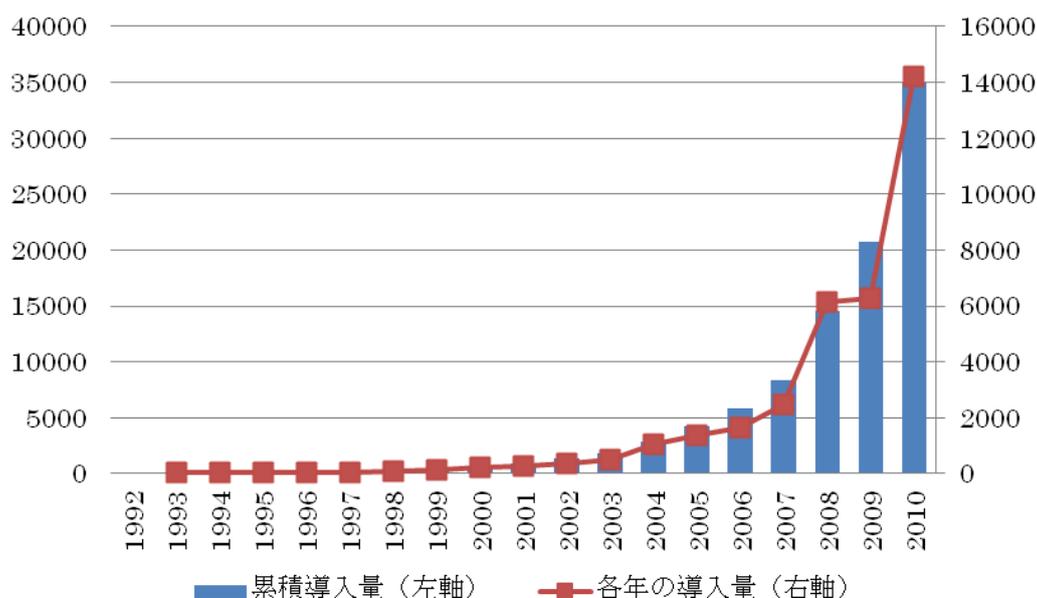
注) 太陽光発電協会ホームページから引用。

太陽光発電市場の急拡大

太陽光発電の市場規模は 2000 年代に急激に拡大した。図 4 は国際エネルギー機関による太陽光発電に関する調査 (IEA-PVPS) の対象国における太陽光発電導入量の推移である。太陽光発電の導入量は 1995 年に 30 メガワット、2000 年に 207 メガワットと着実に拡大していた。2000 年代になると普及の速度が増し、2005 年には 1367 メガワット、2010 年に 14195 メガワットになった。リーマンショックによる景気の低迷によって 2009 年の導入量

は 2008 年とほぼ同じになり、一時的に成長率が鈍化したものの、2010 年には再び大幅に市場が拡大した。2010 年時点で、累積導入量は 34953 メガワットである。

図 4 太陽光発電の導入量の推移



注) IEA-PVPS のアニュアルレポート (2011 年) を用いて筆者が作成。この調査の参加国はオーストリア、オーストラリア、カナダ、スイス、中国、ドイツ、デンマーク、スペイン、フランス、イギリス、イスラエル、イタリア、日本、韓国、メキシコ、マレーシア、オランダ、ノルウェー、ポルトガル、スウェーデン、トルコ、アメリカ合衆国である。

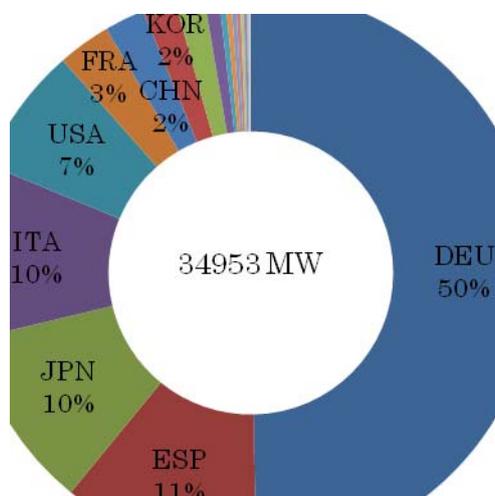
早くから太陽光発電設備の購入に対する補助金制度が整備されたことで、日本は太陽光発電の普及で世界をリードしてきた。1992 年には公共施設に太陽光発電を設置する場合に、その総投資額の 3 分の 2 を国が負担するフィールドテスト事業が NEDO によって開始された。1994 年には個人住宅を対象として新エネルギー財団 (NEF) が住宅用太陽光発電システムの設置に際して、設備費用のおよそ 2 分の 1 を補助する「住宅用太陽光発電システムモニター事業」がスタートした。1997 年度からは、補助金総額を大幅に増額した住宅用太陽光発電導入基盤整備事業が始まった。こうした成果によって、1990 年代後半から 2000 年代前半まで、日本はほぼ一貫して世界最大の太陽光発電市場だった。ところが、ドイツをはじめとする各国がフィード・イン・タリフ (FIT) と呼ばれる制度を導入したことで、2010 年の導入量は約 991 メガワットとドイツ、イタリアに次ぐ世界第 3 位になり、累積の導入量ではドイツ、スペインに次ぐ世界第 3 位になった。

太陽光発電の市場拡大を強烈に後押ししてきたのが「フィード・イン・タリフ」(Feed-in-Tariff (FIT)) と呼ばれる制度である。これは「固定価格買い取り制度」などと訳され、事業所や家庭が太陽電池で発電した電力を送電会社が政府の決めた価格で買い取ることを義務づけた制度である。買い取り価格は一般的に市場での電力価格よりも高く設定される。電力買い取りの原資は、電力料金の引き上げによって国民全体が負担する。価格が固定されているというのは、いったん設置した設備は、その導入時点で政府が定めた価格での電気買い取りを数十年間（ドイツは 20 年間）にわたって保証されることを指している。買い取り価格は太陽光発電のコスト低減を見込んで毎年引き下げられるので、早く設置した設備ほど高い値段で電気を売ることができる。なるべく早く設置することが投資回収のためには重要であり、これが急速な市場拡大に結びついた。太陽光発電の設備設置にかかる費用と、20 年間で回収できるお金は、高い精度で予測可能である。電気の買い取りは国が保証するので、魅力的な投資対象となった太陽光発電には多くの投資が集まった。日本においても 2010 年には家庭用の小規模発電設備（10 キロワット未満）の余剰電力を高価格で買い取る制度が始められ、それに併せて 2012 年からは中・大規模設備（10 キロワット以上）による発電の全量買い取り制度がスタートするなど、FIT の導入が進められている。

急激な普及をとげつつある太陽光発電であるが、その導入国は世界的に大きく偏っている。世界の主要市場は欧州（とくにドイツ、スペイン、イタリア）、日本、アメリカ合衆国の 3 地域である。なかでもドイツは 50%と、調査対象国における累積導入量の半分を占めており、世界最大の太陽光発電市場である。次いでスペインが 11%、日本が 10%、イタリア 10%、アメリカ合衆国 7%、フランス 3%、中国 2%、韓国 2%と続く。ドイツ、スペイン、イタリアの 3 カ国だけで累積導入量の 70%を占めている。太陽光発電の急速な普及は欧州各国が支えてきた（図 5）。

2000 年代中頃以降、再生可能エネルギーの普及をリードしてきたのがドイツである。1990 年の電力供給法（StrEG）によって、ドイツでは再生可能エネルギーを利用した発電設備の既存電力系統への接続が許可され、それによる電力を送電会社が買い取る仕組みが整えられた。太陽光発電の買い取り価格は市場の電力料金の 90%である。この電力買い取り制度は再生可能エネルギー源のうち、相対的に安価な風力の普及を後押しする効果はあったものの、割高な太陽光の普及には必ずしも結びつかなかった。2001 年には再生可能エネルギー法（EEG）によって買い取り価格が高く設定され、2004 年に EEG の改正法が施行されて太陽光発電の電気の買い取り価格が引き上げられると、ドイツにおける太陽光発電の普及は加速しはじめた。2003 年に 143 メガワットだった導入量は、2004 年に 635 メガワット、2005 年に 906 メガワット、2006 年に 951 メガワット、2007 年に 1274 メガワットと、わずか 5 年のうちに約 9 倍にも達している。

図5 2010年までの主要国の累積導入量シェア

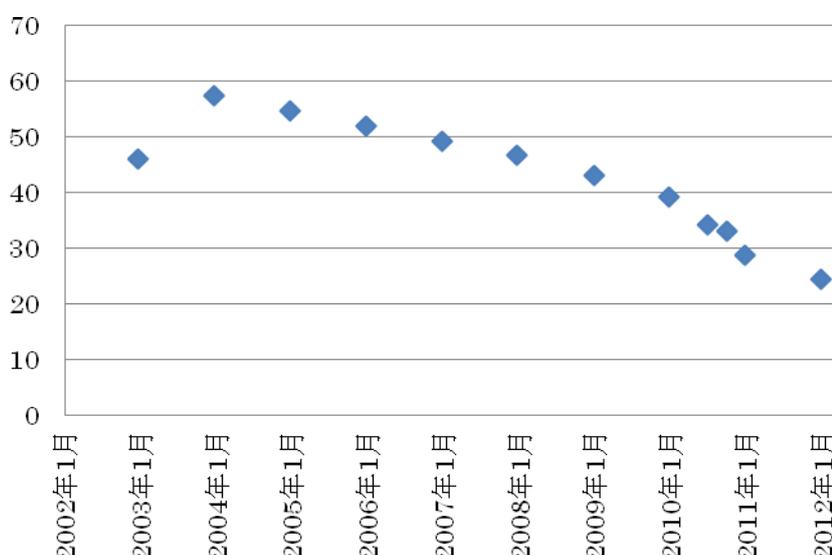


注) IEA-PVPS のアニュアルレポート (2011 年) を用いて筆者が作成。

図6はドイツにおけるFITの買い取り価格の推移を示している。これは30キロワット時以下の屋根上設備の場合の価格である。2003年の時点で46ユーロセントだった買い取り価格は、2004年に57.4ユーロセントに引き上げられた。その後は毎年5%ずつ低下していたが、2009年の制度改正によって2009年の価格は2008年比8%の減少になった。2010年1月には2009年比9%の下落となり、7月にはさらに13%低下、10月に3%低下した。2011年1月には13%の低下、2012年1月には15%の低下と、近年になって買い取り価格の低下速度が増している。2012年1月に改訂された買い取り価格は24.43ユーロセントであるが、これはドイツの一般家庭における電力料金とほぼ同じである³。ただし、屋根上設備の場合には、太陽光による電力を自家消費することで自家消費ボーナスを得ることができる。2012年1月に設定されたボーナスは30kW以下の設備で30%以下の消費の場合が8.05ユーロセント、30%超の消費の場合が12.43ユーロセントである。太陽光による電力を自分で使うと、本来払うはずの電気代を払わずに済む上に、上記価格をボーナスとして手にすることができる。この仕組みでは、同じだけの電力を使うなら、夜間よりも昼間に太陽光発電の分を自家消費する方が得になる。

³ IEAの調査によれば2010年のドイツの家庭用電力料金は平均24ユーロセントである。

図6 ドイツの太陽光発電買い取り価格の推移



注) 30kW以下の屋根上設備の1kWhあたりの買い取り価格。

FITが太陽光発電の普及にあたえた効果は特筆すべきものであるが、これは高い電力買い取り価格によって市場の拡大を促しながら、その漸次引き下げによって太陽光発電のコスト低減を促し、太陽光発電産業を補助金に頼らずに成立するものに育てるための過渡的な制度である。高コストな段階の太陽光発電があまりに多く普及すると、相対的に割高な発電設備が20年間温存されることになる。そして、その電力料金は一般の国民が負担する。再生可能エネルギーに投資できる余裕のある人にとっては魅力的な制度である一方で、その余力がない人には負担だけが増す。また、電力を多く消費する産業では、電力料金の上昇は当該産業の国際競争力に直結する問題である。多くの人の負担増によって成り立つ制度である以上、買い取り価格は市場での太陽光発電システムのコスト低減の推移を見極めた上で柔軟に対応する必要がある。一部の投資家だけがこれによって儲けすぎるような状況は、制度の性質上望ましくない。

この点で教訓を含んでいるのが、累積導入量でドイツにつぐ第2位にあるスペインにおける太陽光発電市場の熱狂的拡大と、その後の混乱である。スペインは再生可能エネルギーへの投資に積極的にとりくんできた国のひとつであり、とくに風力発電の普及がすすんでいた。また太陽光発電については小型設備が小規模ながらも着実に普及しつつあった。スペインで太陽光発電の導入量が急激にのびたのは2008年のことである。これはスペイン政府が2007年にFITによる太陽光発電の電力買い取り価格を大幅に引き上げたことが原因だった。100キロワット以下の小型設備は44ユーロセント、100キロワットから10メガ

ワットまでの設備で 41.75 ユーロセントでの買い取りが決められた。これは一般の電力価格の 9~10 倍に相当する。スペインの FIT では買い取り保証期間が 25 年間だったので、2007 年に小規模発電施設に 10 万ユーロ投資すると、トータルで 506 万 5782 ユーロのリターンを得られる計算になる (Alvarez et al., 2009)。2010 年までに目標としていた 371 メガワットの導入量は 2007 年 10 月までに達成される見通しとなり、結局、2008 年だけで 2758 メガワットの新規太陽光発電が導入された。2010 年までのスペインの累積導入量は 3915 メガワットであり、その 7 割にあたる量が 2008 年に設置された。太陽光発電の導入量の爆発的な増加を抑制するため、スペイン政府は 2008 年 9 月に新たな政令を公布し、買い取り価格の引き下げを行い、設置容量も年間 500 メガワットまでに制限した。2009 年のスペインの導入量は 60 メガワットにまで急減した。スペインでは、この市場過熱による送電会社の赤字が 2011 年末時点で 240 億ユーロに達しており、毎年 30 億ユーロずつ増える見込みである。送電会社を救済するため、スペイン政府は買い取り価格のさらなる低減や、既存設備の契約内容を遡及して変更する措置を行っている。

2008 年にスペインで急増した需要は 2009 年に消えた。生産能力に余剰をかかえた太陽電池メーカー間の低価格化競争は激化し、2009 年の時点では FIT の買い取り価格が相対的に高水準にあったドイツ市場の導入量が大幅に伸びた。ドイツの導入量は 2007 年が 1274 メガワット、2008 年が 1955 メガワットだったのに対して、2009 年は 3799 メガワット、2010 年は 7411 メガワットになった。ドイツではこの急激な導入増加に対応するため 2010 年に 3 度にわたる価格改訂を行った。ドイツの買い取り価格が低下した結果、投資対象として魅力度を増したのがイタリアである。

イタリアにおいては 2005 年の秋から中小規模の発電施設向けに FIT が始まり、それに伴って 2006 年から市場が拡大しはじめた。当初、トータルで 100 メガワットの導入を予定していたイタリアでは、大幅な需要増が見込まれたため、2006 年に全体の導入量を 500 メガワットまで増やし、年間 85 メガワットを上限に導入することにした。しかし 2007 年にはトータルの導入目標が 2016 年までに 3 ギガワットと拡大され、年間の 85 メガワットという上限が撤廃された。また、設備容量の上限であった 1 メガワットの制限もなくなった。小規模設備の買い取り価格は 2005 年からは 44.5 ユーロセントであり、2009 年に改訂されて 43.1 ユーロセントになった後、2011 年 1 月に 42.1 ユーロセント、同年 5 月に 39.1 ユーロセント、同年 12 月に 29.8 ユーロセントとなった。2011 年 1 月時点でドイツの買い取り価格（小規模施設）が 28.74 ユーロセントであるから、イタリアのそれがいかに高水準だったかが分かる。イタリアの導入量は 2007 年には約 70 メガワット、2008 年には約 338 メガワット、2009 年には 723 メガワット、2010 年には 2321 メガワットと拡大していった。2011 年の導入量は 8000 メガワット（速報値）に達したと報じられた（イタリアの電力買い取り価格および 2011 年の導入量については「PV EXPO 2012」における資源総合システムの貝塚泉氏の講演資料を参照）。単年度で初めて世界第 1 位の導入量を記録したものと見られている。

FITによって太陽光発電は魅力的な投資対象となった。より良い投資案件を求めたお金の流れは、相対的に良い条件のFITを提示する国に集中するようになった。各国政府の動向はいきすぎた太陽光発電に対する優遇措置を是正する流れにあり、FITは収益が得られる最低水準に抑えられる傾向にある。

太陽電池メーカーの競争

フィード・イン・タリフという制度によって太陽光発電市場は激変している。太陽光発電の中心となる太陽電池のメーカー間の競争は、それによってわずか数年間にめまぐるしい変遷をとげてきた。付表1は2000年代の太陽電池の世界シェア上位5社を一覧にしたものである。社名の下の実数が各社のシェアを示している。

2000年代の中頃まで、太陽電池の市場で最も大きな存在感を放っていたのは日本企業である。2006年までシャープはシェア第1位の座についていたし、京セラ、三菱電機、三洋電機の4社は安定的に上位に名を連ねていた。ところが2004年にドイツのFITが本格化すると、この安定的な構図に変化が生じた。まずドイツのQセルズが急速にシェアを伸ばした。2004年に第5位にランクインした同社は、2007年、2008年と世界第1位の座についていた。Qセルズから少し遅れて急激に成長を遂げたのが中国のサンテック・パワーとアメリカのファースト・ソーラーである。その一方で、2009年以降、フィード・イン・タリフの買い取り価格引き下げが加速すると、Qセルズは勢いを失った。これに代わって台頭したのがJAソーラー、インリー・グリーンエナジー、トリナ・ソーラーといった中国メーカーである。これらとサンテックとを合わせると、2010年の世界シェア上位5社のうち4社までを中国企業が占めている。日本企業はというと、2005年をピークに少しずつトップ5社にランクインする企業が減り、2010年にその数はゼロになった。

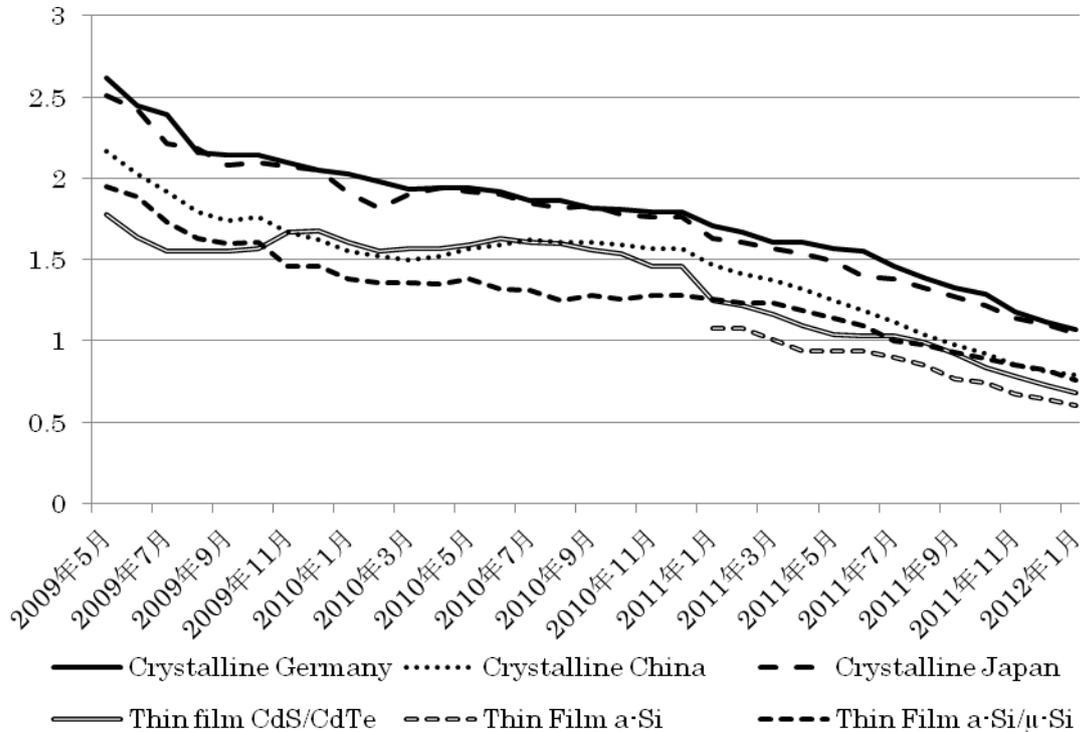
日本企業の中でトップシェアをほこるシャープにとっての躓きの石は、本来ならば望ましいはずの欧州の需要の急拡大だった。シャープは2006年におよそ435メガワットの太陽電池を生産した。ところが、2007年の太陽電池生産量は約362メガワットと、前年比でおよそ2割の生産量減少となった。それに対してQセルズは2006年には約252メガワットと生産量でシャープに大きく差をつけられていたものの、2007年には約388メガワットを生産し、シャープを逆転した。この原因のひとつとして、原料であるシリコンの調達に失敗したという問題がある。シャープは当時、年産710メガワットと世界最大の太陽電池生産能力をもっていた。ところが2007年には363メガワットしか生産しなかった。市場が急拡大し、生産能力が十分あるにもかかわらず、太陽電池を作ることができなかったのである。それに対して、海外の有力企業はシリコンメーカーとの長期的な調達契約を結んだ。たとえばサンテック・パワーは2006年にMEMCエレクトロニック・マテリアルズ(MEMC Electronic Materials)と10年間にわたるシリコンの長期供給契約を結んだ。同じようにQセルズもシリコンメーカーと長期調達契約を結んだ。

シリコンの調達が難しくなった背景には、急激に拡大する市場をめざして続々と参入してくる新興企業の存在がある。電子機器などの半導体のためにただでさえシリコンは大量に消費されている。それに加えて太陽電池向けの需要が急増したことで、シリコンの需給は逼迫した。2006年には太陽電池向け多結晶シリコンの大口取引価格は1キロあたり50～55ドル程度だった。それが2008年の最も高い時期にはスポット価格で1キロ400ドルを越す状態になった。2008年秋の経済危機後には一時40ドルを下回る程度にまで急落したが、2010年ごろには1キロあたり55ドル程度に落ち着いている（日本経済新聞2010年5月26日）。

シリコンの調達が容易になった後も日本の有力企業がシェアを下げ、またQセルズが2009年、2010年とシェアを低下させた理由に価格競争力があげられる。図7はドイツにおける太陽電池のスポット価格の推移を示している。縦軸の単位はユーロ/Wpである。入手できる最も古いデータは2009年5月のものである。これを見ると、2009年5月の時点で結晶系のドイツ製品と日本製品とが約2.5ユーロでほぼ同じ水準であり、その下に位置する結晶系の中国製品は2.17ユーロである。そして薄膜シリコン太陽電池が1.95ユーロ、CdTeが1.78ユーロとなっている。CdTeは実質的にファースト・ソーラーの価格である。ファースト・ソーラーは中程度の発電効率で低価格を実現できる技術を採用しており、2009年5月から2011年はじめまで1.5ユーロ付近の価格を保っていた。薄膜系シリコン太陽電池は2010年にファースト・ソーラーよりも安価で取引されるようになり、それを追うように中国製の結晶太陽電池も2009年後半に急激に価格を下げた。2009年の終わりから2010年の前半にかけて中国製の結晶系の方がファースト・ソーラーよりも低価格だった。一方で日本製の結晶太陽電池もドイツ製のそれも、一貫して価格は低下しているものの中国製品やファースト・ソーラーの製品に比べると常に高価格である。

ファースト・ソーラーが低価格の太陽電池を販売できるのは、その技術選択によるところが大きい。ファースト・ソーラーはカドミウムという安価な材料で太陽電池を作っている。同社は1999年に設立され、2002年から商業生産を開始した。2006年にはNASDAQに上場した。CdTe型の太陽電池を生産し、低コストを武器に急激にシェアを高めてきた。2009年2月には太陽電池モジュールの製造コストを1Wあたり0.98ドルまで低減したと発表している。CdTe太陽電池は過去に日本企業も研究開発をおこなっていたが、カドミウムを含むことから環境への悪影響を考慮して開発を止めた経緯がある。公害につながる恐れをファースト・ソーラーは独自のビジネスモデルで克服している。同社では使用済みのCdTe太陽電池の回収とリサイクルまで含むサービスを提供している。これは「pay as you go」という仕組みで、同社のモジュール販売時に、顧客からリサイクル処理費用に見合った金額を受け取りファンドとして積み立てている。このファンドは使用目的を特定した特定投資口座として保険会社が管理しており、ファースト・ソーラーの経営状況とは無関係に運用される（楡屋、2009年、136頁）。

図7 ドイツにおける太陽電池モジュールのスポット価格の推移



注) データの出所は SolarServer.com、2012年3月12日検索 (www.solarserver.com)。縦軸の単位はユーロ/Wp。

そもそも用いている技術が異なるファースト・ソーラーと比べると、結晶系太陽電池を低価格で販売する中国メーカーは、同じ技術選択の日本メーカーの直接的な脅威である。中国メーカーの多くは2000年ごろに創業した。サンテックは2001年、J Aソーラーは2005年、トリナ・ソーラーは1997年に、それぞれ設立された。また、インリー・グリーンエナジーは1993年に太陽光発電システムメーカーとして誕生したが、太陽光発電システムの生産を開始したのは1999年である。それぞれ米国の株式市場に上場することで大規模投資の資金をえた。サンテックは2005年にニューヨーク証券取引所に上場し4億5500万ドルを、J Aソーラーは2007年にナスダックに上場し2億2500万ドルを、トリナ・ソーラーは2006年にニューヨーク証券取引所に上場し9805万ドルを、インリーは2007年に同じくニューヨーク証券取引所に上場し3億1900万ドルを、それぞれ調達した。

多くの新興企業が参入できるのは、高い技術力をもった製造装置メーカーの存在によるところが大きい。装置メーカーの中には、スイッチを入れれば即生産可能な形で装置を納入する「ターンキー・ソリューション」を手がけるものがあり、お金さえあれば太陽電池

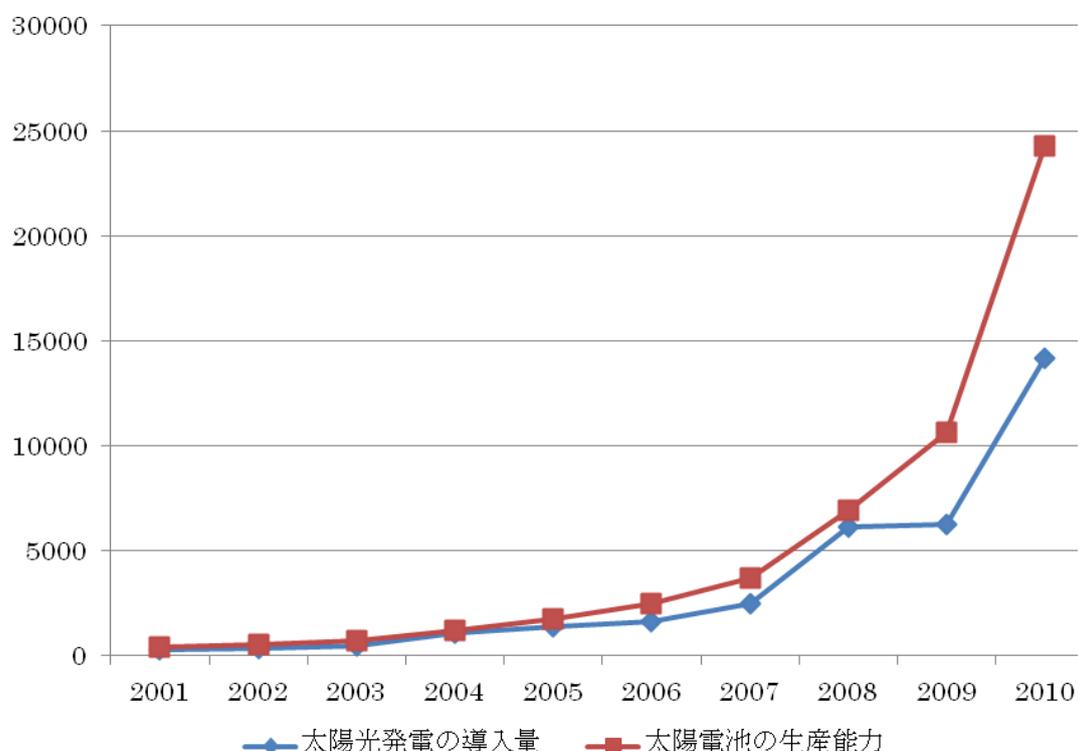
メーカーになること自体はそれほど難しいことではない。結晶系太陽電池のターンキー装置メーカーとしてはアメリカの GT Solar、Spire、ドイツの Schmid、Centrotherm などが有力である。GT ソーラーは 1994 年に設立された相対的に新しい会社で、インゴット、セル、モジュール、それぞれのターンキー設備を提供している。それに対してスパイアは 1970 年代から太陽電池の製造装置を手がけてきた老舗企業である。セルとモジュールのターンキー設備を販売している。シュミットは 1864 年に設立された企業で、プリント基板や薄型ディスプレイの製造装置を扱っており 2001 年に太陽電池事業に進出した。セルの製造装置とモジュールの製造装置を販売している。セントロサームもまたセルとモジュールのターンキー設備を売っている。同社は 1970 年代からドイツの公的研究機関であるフラウンホーファー研究所などに太陽電池関連の製品を納入してきた実績がある。

ターンキー・ソリューションはシリコン薄膜系太陽電池でも提供されており、スイスのエリコン・ソーラー (Oerlikon Solar) や日本のアルバックが有力メーカーである。

参入が容易なだけでなく、多くの中国メーカーが安価な太陽電池を製造できる要因のひとつに、積極的な設備投資による大規模生産がある。2010 年末時点での各社の生産能力を見ると、世界第 1 位は J A ソーラーの 1.9 ギガワット、第 2 位はサンテックの 1.8 ギガワット、第 3 位は同じく中国の LDK ソーラーで 1.5 ギガワットとなっている。トリナ・ソーラーは 1.1 ギガワットで第 10 位、インリーは 1 ギガワットで第 11 位である。日本メーカーではシャープが約 1.1 ギガワットで第 8 位、京セラが 0.5 ギガワットで第 20 位である。これだけでも中国メーカーの規模の大きさがよく分かるが、さらに驚くべきなのは、近年の生産規模拡張の速さである。2009 年の生産能力を見ると、J A ソーラーは 0.8 ギガワット、サンテックは 1 ギガワット、インリーは 0.6 ギガワット、トリナ・ソーラーは 0.55 ギガワットである。1 年間でサンテックは 1.8 倍、J A ソーラーは約 2.4 倍、インリーは約 1.7 倍、トリナは 2 倍に生産能力を拡張している。それに対して 2009 年の日本メーカーの生産能力はシャープが 0.855 メガワット、京セラが 0.4 メガワットであり、1 年間でそれぞれ約 1.3 倍、1.25 倍の生産能力拡張である。

日本の太陽電池メーカーの多くが 40 年近くにわたって研究開発を続けてきた老舗企業であるのに対して、中国メーカーの多くは 2000 年前後に設立された、相対的に若い会社である。それが急激な生産能力の拡張を実現できる背景には、株式市場などを通じた積極的な資金調達がある。付表 2 は 2010 年に世界シェア上位 5 社に名を連ねた中国の 4 社が 2008 年以降に実施した資金調達のうち、各社のニュースリリースや報道から確認できるものの一覧である。なお 4 社ともに中国開発銀行からの信用供与を実施されているが、この限度額全てを引き出したわけではない。たとえばサンテックの場合、2010 年に中国開発銀行から 3.43 億ドルを引き出した (Bakewell, 2011)。それを合わせると、同社は 2008 年から 2010 年までの 3 年間で 12.45 億ドルの資金を調達したことになる。これら全てを設備投資に使った訳ではないだろうし、社債の買い戻しなどに使われた可能性もあるので、その内訳は精査する必要があるけれども、ひとまず 3 年間で 1000 億円近く集めたことは確かである。

図 8 需要と供給のギャップの推移



注) 導入量は IEA-PVPS の調査、生産量は日本経済新聞の世界シェア調査記事を利用した。縦軸の単位はメガワット。

政府の後押しをうけて、中国メーカーは猛烈な勢いで生産能力をのばしている。その一方で、主な需要地である欧州では FIT の買い取り価格低減の速度を速めている。結果として、太陽電池の需要と供給のギャップが広がっている。図 8 は需給ギャップの推移を示している。太陽電池の供給力に対する需要の規模は 2001 年から 2003 年まで 60~70%程度だった。それが 2004 年に 90%近くになり、需給が逼迫した。その後、2005 年には 80%程度、2006 年と 2007 年には約 65%と落ち着いたが、2008 年には再び 90%近くになった。2009 年と 2010 年には 60%を切る水準である。図 8 をみると、2008 年までは需要と供給能力とは同じような伸び方を示している。ところが、2008 年秋の経済危機を受けて 2009 年の導入量は前年並みとなったにも関わらず、供給力は大きく増えた。2010 年には需要が伸びたが、供給力の伸びは、それを上回る勢いで進んだ。2009 年に世界で 10 ギガワット程度だった生産能力は、2010 年には 25 ギガワット程度にまで増えた。需給の差は大きく、2010 年時点で全世界の生産能力は需要の 1.7 倍になった。

欧州各国では FIT の買い取り価格の見直しが進んでいる。FIT の価格を高くすると、関連する企業や投資家が儲けすぎる。そのコストを支払うのは国民なので、FIT の買い取り価格を低く抑える必要がある。そのため市場で最も安い発電システムの価格に合わせて FIT の買い取り価格を決めることは理にかなっている。ところが、そうなれば最低価格を提示できない企業の製品は売れなくなる。これに対応するために中国メーカーがとった手段が大規模生産によるコスト低減であるが、それによって産業全体として大きな過剰生産能力をかかえることとなった。FIT は再生可能エネルギーを補助金なしに成り立たす「健全な」産業に育成するための政策であるけれども、それが特定の国への一極集中的な投資を呼び、電力買い取り価格の急速な低減を招き、結果として太陽電池メーカーの過剰投資と、熾烈な低価格化競争を引き起こしている。太陽光発電産業が果たして「健全な」発展を遂げてきたかどうかには疑問の余地があるものの、いずれにせよ大規模生産によるコスト低減の努力は限界を迎えつつあり、より低いコストでより多くの電気を生み出す太陽光発電システムを開発するために、改めて技術革新が必要な段階にさしかかっている。

付表1 太陽電池の生産量シェア上位5社の変遷

	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
1位	シャープ 18.9	シャープ 23.6	シャープ 26.6	シャープ 27.1	シャープ 24.8	シャープ 17.4	Qセルズ 10.4	Qセルズ 8.2	ファースト 9.5	サンテック 6.5
2位	BP 14.7	BP 13.5	シェル 10.4	京セラ 8.8	Qセルズ 9.3	Qセルズ 10.1	シャープ 9.7	ファースト 7.3	サンテック 6.6	JA 6.0
3位	京セラ 13.6	京セラ 11.5	京セラ 9.7	BP 7.1	京セラ 8.2	京セラ 7.2	サンテック 8.8	サンテック 7.2	シャープ 5.6	ファースト 5.8
4位	S&S 9.8	シェル 9.1	BP 9.5	三菱電機 6.3	三洋電機 7.2	サンテック 6.3	京セラ 5.5	シャープ 6.8	Qセルズ 5.0	インリー 4.6
5位	アストロ 6.6	三洋電機 5.7	RWE 5.7	Qセルズ 6.3	三菱電機 5.8	三洋電機 6.2	ファースト 5.5	モーテック 5.5	インリー 4.9	トリナ 4.6
総生産	396.14	520.15	742.28	1194	1727	2500	3733	6941.1	10660	24263

注) 日本経済新聞の世界シェア調査をもとに筆者が作成した。実数は各社のシェア、総生産とは全世界の生産量合計のこと。単位はメガワット。スペースの都合上、社名を省略しているものがある。BPはBPソーラー、S&Sはシーメンス&シェル、アストロはアストロパワー、シェルはシェルソーラー、ファーストはファースト・ソーラー、サンテックはサンテック・パワー、インリーはインリー・グリーンエナジー、JAはJAソーラー、トリナはトリナ・ソーラーのこと。薄い色（水色）の網掛けは日本企業、濃い色（オレンジ）の網掛けは中国企業を示している。

付表2 中国メーカーの資金調達

サンテック

時期	金額	内容
2008年3月	5.75億ドル	転換優先債券
2009年5月	2.77億ドル	株式の追加公募
2009年6月	0.5億ドル	転換社債
2010年4月	73.3億ドル	中国開発銀行による5年間の信用供与

JAソーラー

時期	金額	内容
2008年5月	4億ドル	転換優先債券
2009年7月	0.9億ドル	融資
2009年9月	300億元	中国開発銀行による5年間の信用供与

インリー

時期	金額	内容
2008年11月	0.75億ドル	融資
2008年12月	0.7億ドル	中国開発銀行からの融資
2009年1月	0.8億ドル	融資
2009年3月	4.2億元	融資
2009年3月	60億元	信用供与
2009年5月	10億元	中国輸出入銀行による信用供与
2009年6月	2.27億ドル	株式の追加公募
2009年7月	1億ドル	信用供与
2009年7月	3億元	信用供与
2010年7月	360億元	中国開発銀行による5年間の信用供与
2010年10月	10億元	債権
2011年5月	14億元	債権
2011年6月	11.6億元	融資

トリナ

時期	金額	内容
2008年7月	1.38億ドル	転換優先債券
2009年6月	0.57億ドル	与信枠の拡大
2009年8月	1.42億ドル	株式の追加公募
2009年9月	3億ドル	信用供与
2010年3月	1.75億ドル	株式の追加公募
2010年4月	44億ドル	中国開発銀行による5年間の信用供与

注)金額と単位は情報源どおり記載した。

参考文献

Alvarez, Gabriel Calzada, Raquel Merino Jara, Juan Ramon Rallo Julian, and Jose Ignacio Garcia Bielsa. 2009. "Study of the effects on employment of public aid to renewable energy sources," *Processos de Mercado*, Vol. 7, No.1, Universidad Rey Juan Carlos.

Bakewell, Sally. "Chinese Renewable Companies Slow to Tap \$47 Billion Credit," *Bloomberg*, Nov 16, 2011.

櫛屋勝巳、「プライス・リーダーの CdTe 光電変換効率 20% 目前の CIS 系」『太陽電池 2010』日経 B P 社、2009 年、128～139 頁。

太陽光発電協会編、『太陽光発電システムの設計と施工 改訂第 3 版』オーム社、2006 年。

太和田善久、「カネカにおける新事業創出と R&D マネージメント」、『テクノロジーマネジメント』、2008 年第 2 号、フュージョンアンドイノベーション、2008 年、121～138 頁。