

SFC ディスカッションペーパー
SFC-DP 2009-007

「太陽電池産業を変革する
生産設備ターンキーシステム」

宇野 正¹、榊原 清則²

(申請者・宇野 正)

1 慶応義塾大学SFC研究所上級所員 (訪問)

2 慶応義塾大学総合政策学部教授

tuno62@qb3.so-net.ne.jp

kiyonori [kiyonori@jcom.home.ne.jp]

2009年8月

「太陽電池産業を変革する生産設備ターンキーシステム」

宇野 正¹・榊原清則²

はじめに

化石燃料の枯渇、石油価格の高騰、二酸化炭素排出による地球温暖化といった資源・環境問題を背景に、クリーンで持続可能なエネルギーとして太陽電池に期待が集まっている。太陽電池の生産量は近年急拡大し、2000年以降年率140～150%で成長を続け、旺盛な需要に応じて新規参入企業が増えている。

太陽電池の開発・生産に関しては、シャープを筆頭に複数の日本企業が世界上位を独占する状況が続いていた。しかし2000年前後に始まった市場の急拡大と共に、海外新興企業の追い上げが激化し、日本企業の世界シェアが低下している。

世界規模で始まった太陽電池産業の大きな変化の要因を列挙する。

- ① 第三次石油危機とも言える石油価格の高騰とエネルギー資源問題
- ② 環境問題の意識の急激な高まり
- ③ 政府支援、公共政策の変化
- ④ オイルマネー等、世界的な投資資金の流れの変化
- ⑤ 太陽電池セルデバイスの技術進歩
- ⑥ 太陽電池セル及びモジュールの製造装置と製造技術の進歩

最近の変化は⑤と⑥の技術進歩よりも、①から④までの技術以外の要因によってもたらされている。

太陽光発電システムの発電コストは、現在の主力である火力、原子力の発電システムに比べて2～3倍のレベルにまで低下してきたが、それでもなお高価であり、現状では経済合理的な意味で代替可能な段階には至っていない。しかし、市場の急拡大が技術の進歩を促し、自立可能な時期の到来が早まるという期待もある。

このように大きな成長が期待される太陽電池産業を特徴づける要素の一つとして、本稿では「生産設備企業のターンキーシステム」に注目した。「ターンキー」という言葉は他産業でも使われるが、太陽電池産業のように広く使われていない。

太陽電池産業では「生産設備企業のターンキーシステム」が将来動向を大きく左右する可能性が高い。この点を、本稿では太陽電池産業の競争分析を通じて明らかにする。

¹ 慶應義塾大学 SFC 研究所上級所員（訪問）。

² 慶應義塾大学総合政策学部教授。

I 太陽光発電について

I-1) 太陽光エネルギーと太陽電池の原理

単結晶シリコンを使った現在の太陽電池 (Photo Voltaic : PV) の原型は 1953 年米国のベル研究所の G.L.ピアソンらによって発明されたが、原理的には 1839 年フランスの物理学者エドモンド・ベッケルが太陽光から電気を起こした発見が最初である (小西、2008、56 頁)。太陽電池セルを構成する半導体が光のエネルギーを吸収すると、電荷を持った粒子対 (電子と正孔) が発生し、その粒子が半導体の中を移動して電極に集まることによって起電力が生じる。この移動を促すデバイス構造の基本が P 型半導体と N 型半導体の PN 接合である (PN ダイオードとも呼ばれる)。光で発生した粒子対 (電子と正孔) のうち、電子は N 型半導体の電極に、正孔は P 型半導体の電極に集まり、両電極を外部負荷に繋ぐと電荷の流れ、即ち電流が流れることになる。

太陽光を電気に変換するデバイスが太陽電池セルであり、太陽電池セルの主要性能「光電変換効率」は次式で表わされる。

$$\text{光電変換効率(\%)} = (\text{出力電気エネルギー} / \text{入射する太陽の光エネルギー}) \times 100$$

市販されている太陽電池セルの光電変換効率は 10~20%程度である。100%にならない主な理由を次に列挙する。

- ① 太陽光はセルの表面で反射され、一部の光しか内部に吸収されない。
- ② 太陽光のエネルギー分布とセルの吸収感度分布とを一致させることが難しい。
- ③ 吸収された光で発生する電荷対 (電子と正孔) が、取り出し電極に到達しない。
- ④ 取り出し電極を外部負荷に繋いで利用するとき、電荷をロスする内部抵抗がある。

光電変換効率を低下させるこれらの課題を解決する取り組みが、技術開発レベルと製品製造レベルで精力的に進められている。その概要を簡単に説明すると、①の課題に対しては、セルの表面に「反射防止膜」を形成して反射光を抑え、出来るだけ多くの光がセルに吸収されるようにしている。②と③の課題には、太陽光のエネルギー分布に近い吸収感度分布を持つセル材料の研究と、PN 接合の構造や形成方法に加え多接合構造等の開発が行われている。④の課題には、セル面積やセル形状の工夫、多くのセルをモジュール化する構成方法等、出力電荷をロスさせる内部抵抗の低減を図る工夫が考えられている。一般的には太陽電池セル単体に比べて、モジュール製品の光電変換効率は低くなる。

I-2) 太陽電池の種類・特徴と太陽光発電システム

現在製品化されている太陽電池の種類は表-1のように分類される。おもな太陽電池の特徴を比較した一覧表を表-2に示す。

表－1 「太陽電池の種類」

太陽電池	シリコン	結晶系	単結晶
			多結晶
			リボン
			球状
			HIT
	薄膜シリコン	アモルファス	
		タンデム型	
	化合物	単結晶	GaAs系
		多結晶	CIGS
			CdTe
有機系	色素増感		

* 雑誌「太陽光発電システムがわかる本」を参考に作成

表－2 「主な太陽電池の比較」

太陽電池の種類	光電変換効率	信頼性	コスト	製造エネルギー	その他	現在の主な用途
単結晶Si	◎ 14～17%	◎	△	△	豊富な使用実績	宇宙用 電力用
多結晶Si	○ 12～15%	◎	○	○	大量生産に最適	電力用
球状Si	○	○	◎	○	Si使用量を大幅低減	開発中
薄膜型	△ 6～9%	○	◎	◎	Si使用量を大幅低減、 フレキシブル形状	民生用 電力用
単結晶化合物(GaAs系)	◎	◎	×	△	重く、割れやすい	宇宙用
多結晶化合物(CIGS等)	○	○	○	○	資源量が少ない公害 物質の含有	民生用
色素増感型	◎	×	○	○	液体の利用、安定性 が課題	開発中

* 雑誌「PVJapan2008ナビゲータ」を参考に筆者が作成。元は野村證券経済研究所資料。

太陽電池の製品構成で言えば最小単位が「セル」であり、セルを直列に繋いで 10～20V の出力にしたものが「モジュール」である。この太陽電池にコンバータや接続機器などを付けると太陽電池システムとなる。

太陽電池市場の中心は結晶シリコン系であり、2006 年時点では生産量全体の約 90% を占めている（2006 年の場合、多結晶シリコン 46.4%、単結晶シリコン 38.2%、HIT6.0% で、合計 90.5%）。新エネルギー財団のデータによると、国内の太陽光発電システムの市場価格は、2005 年で 1KW 当たり新築設置の場合 53.8 万円、既築設置の場合 69.2 万円で、加重平均（新築：既築＝2：8）では 66.1 万円である。その内訳は、太陽電池モジュール 42.8 万円（64.8%）付帯機器（インバータや接続箱など）15.9 万円（24.0%）、設置工事費 7.4 万円（11.2%）である（小西、2008、29 頁）。太陽光発電システムの約 65% がモジュールのコスト、そのモジュールの 45% がシリコン基板コストなので、原材料シリコンがシステムコスト全体の約 3 分の一（29%）を占めている。

ここ数年の状況からは、原材料（多結晶）シリコンの供給不足が太陽電池の生産量を制約するようになり、業界動向に大きな変化の兆しが認められる。原材料問題を解消し、需要拡大に答えられる新たな流れとして、シリコン使用量の少ないセルとその製造方法、色素増感型セル等シリコンを使用しない新規セルの開発に注目が集まっている。特に、大型ガラス基板を用いた薄膜シリコンの太陽電池モジュールは、第二世代太陽電池の有力な候補として多くの企業が開発・製造に取り組んでいる。その中でも、AMAT、ULVAC に代表される大手生産設備企業による薄膜シリコン太陽電池モジュールの「ターンキーシステム」ビジネスは、太陽電池産業を大きく変革する「破壊的イノベーション」の可能性を秘めている。

II 太陽電池産業の企業動向

II-1) 太陽電池産業の企業分類と生産設備企業分類

調査会社「ENF 社」の公開情報（インターネット情報）によると、太陽電池産業は生産設備からソーラー製品まで 7 種類に企業分類されている（表-3 参照）。

2007 年現在、企業総数は世界で延べ 7459 社にのぼり、参入企業は近年益々増加する状況にある。表-3 から太陽電池セルの生産企業数が 153 社で分類上最も少なく、アジア太平洋地域に 63% の 97 社が存在する。ソーラーパネル設置企業は 2647 社で最も多く、ヨーロッパ地域に 63% の 1670 社が存在する。この事実は、太陽電池産業においてアジア太平洋地域がデバイスの生産基地、応用市場がヨーロッパという図式を象徴的に物語っている。

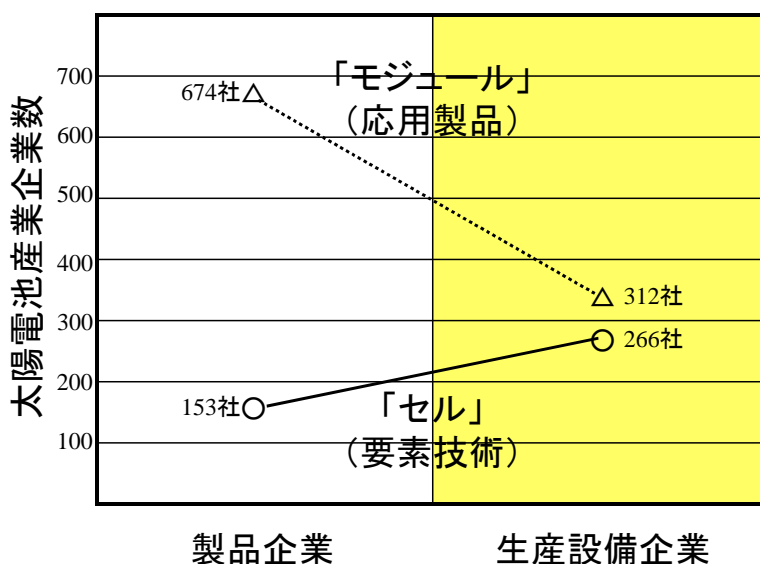
太陽電池セルの製造企業数 153 社に対し、その生産設備企業数は 1.7 倍の 266 社であり、太陽電池モジュールの製造企業数 674 社に対し、その生産設備企業数は半数以下の 312 社である。図-1 に示すように製造企業と生産設備企業の数、セルとモジュールで反対の関係になっており、製造工程においてセルは設備依存度が高く、モジュールは人手依存度が高いことを反映している。

表-3 「太陽電池産業企業分類」

分類	延べ企業数	詳細分類項目
生産設備	761社	インゴット/ブロック生産(52)、ウエーハ生産(131)、セル生産(266)、結晶モジュール生産(214)、薄膜モジュール生産(98)
コンポーネント	636社	バッテリー(97)充電器(48)コントローラー(148)コンバーター(36)データロガー(15)インバーター(149)モニター(26)架台(45)トラック(62)その他(10)
ソーラー原材料	978社	インゴット/ブロックプロセス(95)ウエーハプロセス(134)太陽電池プロセス(169)結晶モジュールプロセス(354)薄膜モジュールプロセス(226)
太陽電池セル	153社	ヨーロッパ(35)アジア太平洋(97)アメリカ大陸(18)その他(3)
太陽電池モジュール	674社	ヨーロッパ(183)アジア太平洋(432)アメリカ大陸(56)その他(3)
ソーラーパネル設置	2647社	ヨーロッパ(1670)アジア太平洋(369)アメリカ大陸(386)その他(10)全世界(212)
ソーラー製品	1610社	庭園灯(247)芝生灯(267)街路灯(270)交通信号(136)充電器(96)パワーシステム(169)揚水ポンプ(54)ソーラー玩具(40)他の照明製品(264)他のソーラー製品(67)

* ENF社のインターネット情報を参考に筆者が作成

図-1 「セルとモジュールの企業数」



(ENF社の公開データから筆者が作成)

セルとモジュールの製造企業数と生産設備企業数について、世界の主要地域別比較表を

表一4に示す。太陽電池の先進国「日本・ドイツ・米国」と新興国「中国」との間に、大きな違いが認められる。先進国では太陽電池セルの製造企業数に対して生産設備企業数は4～6倍も存在するが、中国では両方の企業数は同程度で少なく、先進国企業から多くの生産設備が中国に導入されているようである。一方、太陽電池モジュールについては、先進国では製造企業数124社、生産設備企業数147社と同程度存在するが、中国では生産設備企業数102社と少なく製造企業数331社の3分の一しか存在しない。セル以上にモジュールの生産設備は先進国から中国に導入されている。中国のモジュール企業数331社は世界全体693社の50%近い数であり、安い人件費を利用した新興企業が多い。

表一4「太陽電池セルとモジュールの製造、生産設備の企業数」

	日本	ドイツ	米国	世界合計	中国
太陽電池セル	5	10	18	160	63
セル生産設備	26	66	65	299	60
太陽電池モジュール	17	56	51	693	331
モジュール生産設備計	24	74	49	351	102
結晶	13	50	23	236	83
薄膜	11	24	26	115	19

太陽電池の生産設備企業全体の延べ企業総数は 761 社で、表—5 のように分類される。

表—5 「太陽電池の生産設備企業分類」

生産設備区分	主な設備(企業数)		
インゴット／ブロック生産設備 (52)	ターンキーシステム(2)	鑄造炉／凝固炉(14)	引上げ装置(22)
	インゴット測定器(7)	インゴット切断機&研削盤(5)	その他(2)
ウエーハ生産装置 (131)	ターンキーシステム(10)	切断機(31)	洗浄装置(35)
	検査設備(22)	研磨機／研削機(13)	その他(20)
セル生産設備 (266)	ターンキーシステム(14)	エッチング装置(47)	洗浄装置(20)
	拡散炉(31)	コーティング／沈殿(46)	スクリーン印刷(18)
	他の炉設備(16)	検査設備(62)	その他(12)
結晶モジュール生産設備 (214)	ターンキーシステム(20)	検査設備(48)	ガラス洗浄装置(8)
	結線配線配列装置(29)	ラミネート(37)	切断機／画線器(25)
	フレーミング器(17)	その他(30)	
薄膜モジュール生産設備 (98)	ターンキーシステム(23)	検査設備(12)	コーティング／沈殿(25)
	切断機／画線器(22)	洗浄装置(7)	エッチング装置(9)

* ENF社のインターネット情報を参考に筆者が作成

ここで特徴的なのは、それぞれの生産設備区分の全てに「ターンキーシステム」企業が多数存在することである。セル生産設備には 14 社、結晶モジュール生産設備には 20 社、薄膜モジュール生産設備には 23 社が含まれている。表—6, 7, 8 にそれぞれの「ターンキーシステム」企業名と地域を色分けして示す。これらの表から、欧州企業特にドイツ企業の多いことが分かる。セル生産設備では 14 社中 9 社が欧州企業であり、内 8 社がドイツ企業である。結晶モジュール生産設備では 20 社中 15 社が欧州企業であり、内 9 社がドイツ企業である。薄膜モジュール生産設備では 23 社中 12 社が欧州企業であり、内 6 社がドイツ企業である。3 種類合わせて「ターンキーシステム」企業計 57 社中、23 社 (40%) がドイツ企業である。

日本では大手垂直統合型企業が主体で、現在に至るまで太陽電池の生産設備は内製されてきたため、生産設備のターンキーシステム企業はほとんど存在しなかった。これに対して欧州特にドイツでは、市場が急速に立ち上がった 2000 年頃から、太陽電池の生産設備企業で「ターンキーシステム」企業が、一気に多数誕生したようである。

表－6 「セル生産のターンキーシステム企業」

企業名	地域	企業名	地域
ATS Automation	カナダ	Roth & Rau AG	ドイツ
Centrothem	ドイツ	Spire Solar	米国
Gebr. Schmid	ドイツ		
Grobal PV Specialists	米国		
GP Solar	ドイツ		
GPM	台湾		
GT Solar Incorporated	米国		
KUKA Systems	ドイツ		
Lotus Systems	ドイツ		
Menz Automation	ドイツ		
OTB Solar	オランダ		
Ramgraber	ドイツ		

(ENF会社データベースから筆者が作成)

表－7 「結晶モジュールのターンキーシステム企業」

企業名	地域	企業名	地域
(株)エヌ・ピー・シー	日本	Mondragon Assembly	スペイン
2BG srl	イタリア	Oilbricht GmbH	ドイツ
ACI-ecotec	ドイツ	P.Energy	イタリア
Electro Solar	イタリア	Reis GmbH&Co.KG	ドイツ
Gebr. Schmid	ドイツ	Rimas B.V.	オランダ
Global PV Specialists	米国	Solarhope Technological	中国
Gorosabel	スペイン	Spire Solar	米国
GP Solar	ドイツ	Teamtechnik	ドイツ
GT Solar Incorporated	米国		
KUKA Systems	ドイツ		
Manz Automation	ドイツ		
MiniTec Maschinenbau	ドイツ		

(ENF会社データベースから筆者が作成)

表－8 「薄膜モジュールのターンキーシステム企業」

企業名	地域	企業名	地域
(株)ULVAC	日本	Kingyoup Enterprises	台湾
(株)エバテック	日本	Leybold Optics	ドイツ
ACI-ecotec	ドイツ	Manz Automation	ドイツ
OC Oerlikon Balzers	スイス	Mirle Automation	台湾
Anwell Precision	香港	Mondragon Assembly	スペイン
Applied Materials	米国	MySystems	米国
China Solar Energy Holdings	香港	Polar Phtovoltaics	中国
EnergSolar	ハンガリー	Solar Thin Films	ハンガリー
Greatcell Solar	スイス	Solarcoating Machinery	ドイツ
Grenzebach	スイス	Teamtechnik	ドイツ
GTSolar Incorporated	米国	VON ARDENNE Anla	ドイツ
JUSUNG Engineering	韓国		

(ENF会社データベースから筆者が作成)

II-2) 日本と欧州・ドイツにおける太陽電池産業の発展経過

日本と欧州・ドイツの太陽電池に関する発展経過を比較しながら考察を加える。

産業の発展初期に太陽電池を取り扱っていたのは、半導体デバイスと同様に原材料や設備の開発、デバイス開発から製品化まで全てを1社で取り扱う垂直統合型企業であった。これらの多くは水平的にも事業ドメインを拡大し、電気製品や内蔵デバイスも同時に扱う大手電機メーカーであった。しかし、太陽電池の応用市場規模が小さかったため、研究開発は継続されたものの製品量産化は見送られる状態が長く続いた。

「石油危機」や「エネルギー危機」が世界的規模で発生したとき、エネルギー資源の海外依存度が高い日本では事態が深刻に受け止められ、国家安全保障の観点から新たなエネルギー資源開拓が重要な解決すべき課題になった。その結果、世界に先駆けて「サンシャイン計画」等の太陽電池研究開発支援や、家庭への太陽電池導入補助金制度等、一連の公共政策が打ち出された。30年間に亘る政府支援の成果が、日本の垂直統合型企業による家庭用屋根パネル事業を育て上げ、市場の拡大と共に日本が太陽電池産業で世界をリードする状況が作り出された。これに対して、ドイツを中心とする欧州ではエネルギー自給率が日本より高かったため、日本のような政府支援は「環境問題」の大きな高まりまで選択されなかった。この間の違いが両者の産業構造に大きな違いをもたらしたと考えられる。即ち、欧州では太陽電池の研究開発を継続していた大手の統合型企業で、経営合理性の観点から研究開発を断念せざるを得ない状況に追い詰められ、多くの研究開発技術者が中小の

材料・装置メーカー、半導体やロボット等の周辺産業に分散していった。原子力発電の選択肢を持たないドイツ政府が、急速な「環境問題」の高まりから 2000 年に再生可能エネルギー資源法³を導入し、「フィード・イン・タリフ（固定価格買取）制度＝FIT 制度」をスタートさせた。これにより、眠っていた太陽電池関係の研究開発技術者が一気に表舞台に出る状態になり、分散していた研究開発技術者が中心になって多くの新興企業が起こされた。それぞれが持っていた技術を活かした「分業型企业クラスター」が一気に立ち上がったと考えられる。その代表的企業が 1999 年末創業の太陽電池セル生産企業「Q-cells 社」であり、セル生産設備を一括受注して生産企業を支援するターンキーシステム企業「GP Solar 社（1999 年創業）」や「Centrotherm 社（2000 年から専門部門を立上げ）」である。こうした企業群が FIT 制度の導入を大きなビジネス・チャンスと捕らえ、資本市場から資金を集め相互補完と相乗効果で急速に成長したと考えられる。

ドイツを中心にした欧州では、製造企業に先行した技術力を保有する生産設備企業と、急速な立上げを目論む製造企業との利害が一致して、生産設備（Equipment）と製造（Manufacture）をそれぞれ専門に取り扱う太陽電池産業特有の「E/M」水平分業型企业群が主体になって市場を拡大して行った。

太陽電池産業の成長が注目されるようになった 1994 年からの 10 年間は、日本政府の事業化支援の恩恵を受けた日本の統合型企业が圧倒的なシェアで世界をリードしたが、2003 年頃からは欧州の水平分業型企业が急速に日本企業をキャッチアップし始めた。現在は両者横並びの状況にあり、将来どちらが主力になっていくのか予断を許さない段階にある。半導体や液晶では、日本企業が世界をリードする状況から脱落した苦い経過があり、太陽電池でも同じ経過を辿るのではという懸念が大きくなっている。各国政府の支援策が大きな影響を与えること、新しい成長産業への期待から新規参入する企業が多いこともあって、変化の激しいグローバル競争の途上にある。日本企業がグローバル競争力を回復させるには、従来のように新技術開発で先行するだけでなく、新たなビジネスモデルの構築も必要である。

³ 二度の改正を経て、現在では「再生可能エネルギー資源に優先権を与える法律（再生可能エネルギー資源法）」（2004 年 7 月 21 日）が施行されている。

II-3) ターンキーシステムについて

ターンキーという言葉は、「Turnkey」あるいは「Turn the Key」と英語表現され、完成品としてすぐに利用可能という意味で使われる。買い手が「鍵」を回すだけで工場設備を運転できる状態に仕上げ、引き渡す契約形態である。

契約形態を分類すると、①土地、建物を含めて全ての装置を一式用意する受託、②土地と建物は買い手に用意してもらい装置一式を用意する受託、③自社では不足する装置を他社から供給してもらい、一括まとめ受託 の3つのケースがある。

太陽電池産業の場合、ターンキーシステムは③のケースであり、セルと結晶モジュール、薄膜モジュールの生産設備に加え、セル生産を支えるインゴットやウエーハの生産についてもターンキーシステム企業が存在する。ターンキーシステムを標榜する代表的な生産設備企業2社「米国 Spire 社とイタリア 2BG srl 社」のセールスポイントを紹介する。

「米国 Spire 社」・・・太陽電池セル、モジュールのターンキー生産ライン（自動化、生産能力と工場レイアウト、モジュール設計サービス、生産環境整備、原材料のベンダーリスト）の一括提供、技術アドバイス、最終製品の品質保証、製造プロセス・ノーハウの移転。

「イタリア 2BG srl 社」・・・独自設計と顧客要望へのソリューション提供、設備稼働の確立とトレーニング支援、プロセス・ノーハウの提供、技術支援等。

太陽電池産業のターキーシステムをより明確にするために、他産業でのターンキーシステム・ビジネスの事例を2つ取り上げる。

(A) 半導体産業の事例

半導体産業では稀にターンキーシステムという言葉を使っている企業がある。一例を挙げれば、LSI 製品の設計開発サービスを受託する NSW 社が、数年前から図-3のような「(セミ) ターンキーサービス」の提案をするようになっている。NSW は自社で確立したデザイン・テクノロジー (FED、BED、テスト) と製造パートナーを適宜組合せ選定し (ファブリケーション・コーディネート)、顧客のオリジナル LSI 製品を実現する「水平分業型 LSI 製造サービス」を提案し、受注に結び付けている。提案から量産管理まで、NSW 社ターンキーグループが全てのコントロールを行う「ターンキーサービス」である。

図-3 「NSW社のターンキーサービス」

顧客	NSW	TSMC	ASE	運送業者
システム設計 ～論理設計	(デザインテクノロジー) (トータルコーディネート)	(製造パートナー)	(組立パートナー)	
	フロントエンド設計			
	バックエンド設計			
	テストプログラム開発			
		マスク製造		
		ウエハー製造		
				パッケージ実装
	信頼性評価			
	生産管理			
				配達

(NSW社の資料を参考に筆者が作成)

(B) 精密機械メーカー「森精機社」のターンキーシステムの例

森精機のターンキーシステムは顧客からのあらゆる要望に応えることが基本の考え方であり、これをヒヤリングというプロセスから開始する。次に引合い対応というステップで治具・工具の構想から仕様書の作成まで行い、顧客に提案する。顧客の承認が得られれば正式な仕様決定と日程の確立を開発・製造部と連携して行い、次に妥当性の確認と評価のステップに移る。納入前・立会いを経て、据付け・立上げ・検収まで行い、顧客の生産に対して最もメリットあるシステムを実現している。更にはシステム確立後も、全体に対する一連の技術・管理サポートを実施している。

図－4 「森精機ターンキーシステム」

ヒヤリング	引合い対応	ご提案	仕様決定	妥当性の確認・評価	納入前・立会	据付け・立上げ・検収
顧客のあらゆるご要望に応える。	<ul style="list-style-type: none"> ・治具、工具の構想 ・タイムスタディ（加工方法、時間の決定） ・お見積り ・納期の設定 ・システム構想 ・テスト加工 ・仕様書の作成 		<ul style="list-style-type: none"> ・開発・製造部との打合せ ・日程の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・完成度点検 ・プログラミングレポートの作成 ・加工・連続テスト ・加工データの事前提出 	<ul style="list-style-type: none"> ・加工実施 ・ワーク検証 ・不具合の摘出 ・出荷・納入の打合せ 	<ul style="list-style-type: none"> ・立上げ検証

（森精機社資料を参考に筆者が作成）

以上の二例にあるように、「ターンキー」という言葉は買い手に必要なシステムのトータル・ソリューションを提供するビジネス形態を意味するものである。最近は多くの産業で「ソリューション」という言葉が使われることが多く、「ハード」に比べて「ソフト」と「サービス」の比重がより大きい場合に「ソリューション」という言葉が、「ハード」の比重が大きい場合に「ターンキー」という言葉が使われる傾向がある。

太陽電池産業の場合には「ハード」の比重が大きいためか、海外の多くの生産設備企業が付加価値の大きな「ターンキーシステム」を指向している。

II-4) 薄膜シリコン型モジュールの生産設備企業ターンキーシステム

世界の主要太陽電池メーカーが一斉に増産計画を打ち出すなかで、新たに大手半導体メーカーの米インテルや IBM、ドイツの Qimonda AG、韓国の三星などの参入や、新興ターンキー企業群の動向に注目が集まっている。特に、新興ターンキー企業の多くが、米 AMAT、スイス OC Oerlinkon Balzers、日本 ULVAC 等、大手の装置メーカーと連携し、次世代太陽電池として期待の大きい薄膜シリコン型太陽電池の大型モジュール製造ラインを短期間に立ち上げようとしている。表一14 に示すように主要装置企業各社の 2007 年度累計受注高は、4 社合計で 1740 億円の規模に達している。ターンキー受注で先行したのは日本の ULVAC 社であり、公表ベースでは 2007 年 3 月に契約した台湾 NexPower Technology 社向けに 2008 年 6 月から量産出荷を開始した。米 AMAT 社は 2007 年 3 月にターンキー形

態で受注契約したインド Moser Baer Photovoltaic 社向けに、2008年9月から量産出荷の予定であり、タンデム構造の薄膜シリコン型太陽電池についても、2009年3月に生産開始予定と発表されている。

表-14 「薄膜型製造装置メーカーと受注実績」

メーカー名	ULVAC	AMAT	Oerlikon	Jusung	EPV	IHI
国籍	日本	米国	スイス	韓国	米国	日本
受注形態	ターンキー	ターンキー	ターンキー	ターンキー	単体装置	単体装置
基板寸法 m X m	1.1 X 1.4	2.2 X 2.6	1.1 X 1.25	1.25 X 1.25	0.79X0.79	1.2 X 1.6
発電面積 mXm/枚	1.54	5.72	1.37	0.74	.0.74	1.92
累計受注高 2007年度	350億円	700億円	650億円	40億円	不明	0

野村証券金融経済研究所の資料を参考に筆者が作成(PVJapan2008ナビゲータ資料より)

これまでの太陽電池モジュール生産は、結晶シリコン・セルをモジュール化する方式が主流であり、独自にセルの開発からモジュール製造まで取り組むには、相当な期間と経営資源の投入が必要だと言われてきた。しかし、次世代の主流として期待の大きい薄膜シリコン型太陽電池の場合には、ターンキーシステム対応の製造装置メーカーからの支援があれば、モジュール製造ラインを一気に立上げることが可能になる。

大型液晶パネル製造装置で実績のある AMAT、ULVAC の両社には、不足する一部装置を外部から調達して、最適な製造ライン一式を提供する「ターンキーシステム」事業に十分な技術開発力と経営資源が蓄積されていた。しかし、設備開発では協力関係にある顧客の太陽電池企業が、顧客から競争相手に変化する恐れがあるため、「ターンキーシステム」事業を開始するタイミングが大きな問題であった。環境問題の高まりと石油価格の高騰で、太陽電池市場が急激な立ち上がりを見せた 2007 年が、事業拡大のチャンスと見極めたようである。

海外では「ターンキーシステム」企業群が大きな流れになりつつあるが、日本国内ではシャープ社を筆頭に、自社開発の製造装置で差別化を図り、大規模ラインよりも新技術を

駆使した生産設備で優位性を維持しようとしている。「ターンキーシステム」企業群の拡大には大きな危機感と対抗意識を抱いているため、日本では「ターンキーシステム」の生産設備企業を育てる土壌はなく、ULVAC社の顧客は全て海外の製造企業である。

Ⅲ 太陽電池産業と半導体、液晶パネル産業の比較

太陽電池産業の全貌をより明確にして将来動向を考察するために、技術的にも経営的にも近い関係にある半導体と液晶の両産業と「技術・デバイス動向」「産業構造・ビジネスモデルの動向」について比較整理を行う。

Ⅲ-1) 技術・デバイス動向の比較

半導体、液晶パネルと太陽電池産業の技術・デバイス動向の比較表を表-15に示す。

**表-15 半導体、液晶、太陽電池の産業比較
「技術・デバイス動向」**

	半導体	液晶パネル	太陽電池
基本材料	単結晶Siウエーハ (大口徑300mmΦ)		多結晶Siウエーハ
		大型ガラス基板＋ 液晶＋薄膜	大型(ガラス)基板 ＋薄膜
デバイス構造	CMOS Tr.	液晶と駆動TFT	PN接合
性能特性	少数キャリアの 移動度	液晶の応答速度 (TFTのキャリア移動度)	少数キャリアの ライフタイム
製造技術トレンド	微細化(ムーア則)	大型化	大型化
製造設備	微細加工・複合化 設備専業	大型均質加工 設備専業	大型均質加工 総合(ターンキー)
付加価値	製造プロセス＋ 回路設計＋ソフト	製造プロセス	製造プロセス
応用製品	全ての機器	表示機器	太陽電池
応用システム	全てのシステム	表示機器システム	太陽光発電システム

太陽電池セルの基本的なデバイス構造は半導体材料のPN接合(ダイオード)であり、半導体製品の基本となるトランジスター構造に比べて簡単である。半導体デバイスMOSトランジスターの重要な基本特性は、電界効果で誘起された少数キャリアの移動度であるのに対して、太陽電池セルの重要な基本特性は太陽光で誘起された少数キャリアのライフタイムである。キャリアの移動度とライフタイムの基本特性に関する要因は異なっているため、原材料シリコンの作り方が違っている。太陽電池セルの場合には、太陽光で誘起され

た少数キャリアが再結合することなく電極に到達するよう、再結合中心となる重金属等を原材料シリコンから除去することが重要になる。ダイオード構造の形成方法や表面保護膜形成等シリコン・ウェハーの取扱いは半導体製造技術と同じであり、太陽電池セルの製造は半導体製品として取り扱われる。半導体と太陽電池は原材料シリコンを共有するデバイスであり、半導体デバイスの製造技術成果を利用する「親子の関係」にある。

一方、液晶パネルにおいては、液晶を駆動する SW デバイスが多結晶シリコンのトランジスター（TFT）で構成され、液晶の周辺に形成される。液晶パネル用の大型ガラス基板の上に形成される多結晶シリコンのトランジスター製造技術は、太陽電池セルの薄膜シリコン形成技術を応用したものと言われており、液晶パネルの製造でより進化した大型薄膜シリコン生産設備が、太陽電池セルの製造に逆利用される状況になっている。製造装置の点から、液晶パネルと太陽電池は「兄弟の関係」にある。

製品の付加価値については、半導体産業はハードからソフトまで広範囲で複雑かつ高度な付加価値構造であり、産業構造全体が水平分業多層化の方向に少しずつシフトしている。これに対し太陽電池の場合には、デバイス製造のハード付加価値が全てである。

太陽電池の技術・デバイス動向は、「マイクロには半導体（親）、マクロには液晶（兄弟）」と連動して今日に至ったと言えるが、最近の技術動向として非シリコン系太陽電池の研究開発が加速しており、将来は第三世代太陽電池に成長する可能性が高い。その時には、太陽電池の技術・デバイス動向は、半導体や液晶と違った新たな独自展開に移行することになる。

III-2) ビジネスモデルと主要企業の動向

半導体、液晶パネル、太陽電池の3産業について、ビジネスモデルと構成、主要企業を表-16のように整理して比較する。

半導体に比べて液晶パネルや太陽電池を構成する企業の種類と数は少なく、産業規模（2008年度で半導体は25兆円、液晶10兆円、太陽電池1兆円）と発展過程には大きな違いがある。水平分業ビジネスモデルという言葉がいずれの産業でも用いられるが、その中身は大きく異なっており、半導体産業の場合には、「F/F（ファブレス・ファンダリ）モデル」が水平分業の象徴とされ、製品開発における回路設計企業とチップ製造企業間の水平分業型ビジネスモデルである。液晶パネル産業の場合には、製品応用における液晶パネルの製造企業とPCやTVのようなセット機器企業間の水平分業である。太陽電池の場合には、製品製造におけるセルやモジュールの製造企業と生産設備企業間の水平分業を指す。

産業が大規模化しその構造が複雑かつ高度化した場合、垂直統合型企業の事業的メリットが失われ、いくつかの専門企業に分かれて補完し合う水平分業多層型ビジネスモデルに移行することが多いと言われているが、太陽電池産業の場合は、海外を中心に大規模化・複雑化する前に、水平分業型企業群が短期間に主流になるという特徴がある。

分業化された専門企業が成功する際には、従来の産業動向を大きく変化させる何らかの

イノベーションが発生していることが多い。半導体の場合は、不特定多数の顧客から製造だけを請け負う共通ファブ「ファンドリー」企業が、大きなイノベーションを引き起こして水平分業化を決定づけたが、太陽電池の場合は、生産設備企業の「ターンキーシステム」がイノベーションの原点になって、産業構造の単純化と水平分業化を加速するのではないかと考えられる。

表-16 半導体、液晶、太陽電池の産業比較
「主要なビジネスモデルと企業」

		半導体	液晶パネル	太陽電池	
主要な ビジネスモデル		垂直統合型 (IDM)	垂直統合型 (IDM)	垂直統合型 (IDM)	
		水平分業型 (F/F) 設計と製造の分業	(PC, TVセット企業 との水平分業)	水平分業型 (E/M) 設備と製造の分業	
構成	ハード (製造)	材料、生産設備	材料、生産設備	(材料) 生産設備	
		半導体製造 (F/F)	パネル製造	セル/モジュール製造	
		組立、テスト	組立、テスト	テスト	
	ソフト (設計)	回路設計 (F/F)			
ソフト開発 (システム)					
OS、IP、ライブラリ					
主要 企業	アメリカ	Qualcomm インテル		AMAT	
	日本	東芝	シャープ	ULVAC	シャープ
	韓国・台湾	三星 TSMC	三星、AUO		
	欧州			GP-Solar	Qcells

太陽電池産業の特徴を一言で表現すれば、付加価値構造が単純なことである。基本原理が光電変換現象であり、セルとモジュールに大きな付加価値が集中し、付加価値を決める要因は光電変換効率と製造コストである。2000年頃までは、材料・装置の開発からデバイス・システムの製造に至る全てを取り扱う垂直統合型企業が有利だと言われてきたが、2000年以降市場の急激な伸びは、垂直統合型より水平分業型の企業を伸長させる結果をもたらした。更に、従来の結晶シリコン型太陽電池に代わって、薄膜シリコン型太陽電池モジュール製品とその生産設備企業の「ターンキーシステム」が、図-5に示すように、水平分業化から企業集約による単純水平分業化という大きな構造変化を引き起こすと考えられる。

図一5「太陽電池産業の構造変化」

企業分類	結晶シリコン		薄膜シリコンモジュール	
	生産設備	製造企業	生産設備	製造企業
インゴット	○	○	○	○
ウエーハ	○	○		
セル	○	○		
モジュール	○	○	○	○
ソーラーパネル設置		○		○
ソーラー製品		○		○

注: 図中の黄色の背景は「垂直統合企業」を示し、緑色の背景は「単純水平分業化」を示す。また、矢印は製造プロセスの移行を示している。

* ENF社のインターネット情報を参考に筆者が独自に作成

薄膜シリコン型太陽電池は、以下に示すようにクリステンセンが主張する「破壊的イノベーション」(クリステンセン、2001)に必要な条件を多数備えている。すなわち、

- ① 液晶パネルで確立された大型薄膜シリコン形成技術。
- ② 性能(光電変換効率)は低いが製造コストが安い。
- ③ 品質向上は必要であるが実用上は問題ないレベルにあるモジュール製品。
- ④ 基板選択が可能で応用市場が拡大し易い。
- ⑤ 大規模・大量生産向きのモジュール製造ライン。
- ⑥ 生産設備企業のターンキーシステムで短期間に工場立ち上げが可能。

直近の世界的経済不況で一時的に停滞したが、環境問題の追い風が強まる方向にあるので、薄膜シリコン型太陽電池モジュールとその生産設備企業の「ターンキーシステム」による破壊的イノベーションは急速に進むと予想される。

太陽電池の応用市場については社会インフラ系を中心に拡大する状況にあり、民生・情報機器向けの半導体や液晶とは大きく違った産業構造になると考えられる。具体例としては、シャープの堺コンビナート構想のように、太陽電池製造企業と大型発電システム企業、電力会社、地方自治体の連携、液晶パネル等他産業との連携により、太陽電池産業全体が社会インフラを包含した広範囲な単純水平分業型構造に進展する可能性が高い。

IV まとめ

環境問題が世界的な広がりや深刻度を増すことにより、持続可能な新エネルギー源として、太陽光発電システムに対する期待が大きくなってきている。しかし、現在の太陽電池デバイスの技術的な完成度は、代替エネルギーとして化石燃料や原子力発電に比した経済性では不十分な状況であり、光電変換効率の向上と製造コストの一層の低減が必要である。結晶シリコン・セルを基本とする第一次太陽電池の時代が長く続いたが、今や薄膜シリコンモジュールを初めとする第二次太陽電池の時代に移行しようとしており、産業全体のライフサイクルから言えば成長期の始まりに相当する時期にある。「2010年度にグリッド・パリティ（既存電力並みの発電コスト）を実現する」というシャープ幹部の発言（『日経マイクロデバイス』、2009年1月号、74頁）もあるように、自立可能な産業への具体的な目標時期が明示されるまでに成長してきた。

半導体から液晶パネルへ、そして太陽電池へと電子デバイスの主役が移りつつあるが、先輩の両産業で発生した産業構造とビジネスモデルの変化が、太陽電池産業で顕著な形で顕在化すると予想される。その大きな理由は、太陽電池デバイスと太陽光発電システムの「単純さ」にある。ここに単純さとは、簡単という意味ではなく、物理現象を素直に利用する産業という意味であり、①基本デバイス構造が半導体のPN接合であること、②光エネルギーを吸収して電子と正孔の電荷対が発生する光電変換現象を利用すること、③発生した電荷を電極に集め、蓄電池に貯めてから利用すること、④光電変換効率の向上とデバイス製造コストの低下が主要な課題であること、が挙げられる。光電変換という物理現象をそのまま発電に利用する「単純さ」故に、いろいろな新しいデバイスや製造方法が考案されて、前世代の太陽電池を急激に置き換えてしまう可能性が高い。第二世代太陽電池として期待の大きい薄膜シリコン太陽電池モジュール製品が、第一弾の破壊的イノベーション製品になることが予想される。立ち上げ期間の短い特徴を有する太陽電池産業では、設備投資への経営判断が他の設備産業に比べてより大きな影響を与える傾向がある。そのときの大きな促進要因が生産設備企業の「ターンキーシステム」である。

2009年度は「グリッド・パリティ」実現への第一ゲート時期に相当し、金融バブル後の世界的な経済危機の影響で、厳しい企業淘汰が始まる可能性が高い。しかし、環境問題解決への大きな期待が世界規模で広がり、太陽電池産業は予想を上回る速度で自立可能な産業へ成長すると考えられ、太陽エネルギー利用の中核産業として期待が大きくなってきている。

参考文献

- ① 『日経マイクロデバイス』、2009年1月号。
- ② 「太陽電池 2008/2009 急拡大する市場と新技術」、日経エレクトロニクス共同編集、『日経マイクロデバイス』、2008年7月。
- ③ 小西正輝他、『太陽光電池発電システムがわかる本』、工業調査会、2008年。
- ④ 日経マイクロデバイス特別編集版、『PV Japan2008 ナビゲータ』、2008年7月。
- ⑤ 藤本隆宏・武石彰・青島矢一編著、『ビジネス・アーキテクチャ』、有斐閣、2001年。
- ⑥ クレイトン・クリステンセン著（伊豆原弓訳）、『イノベーションのジレンマ(増補改訂版)』、翔泳社、2001年。

謝辞

本調査研究は、慶應義塾大学「榊原研究室」の大学院ゼミでの討議をベースに推進した成果である。調査の参考情報と資料には、著者が所属していた（株）半導体理工学研究センター（STARC）において入手されたものが含まれる。

調査研究にご協力頂いたSTARCの今村陽一さん、ご支援頂きましたSTARC下東社長と研究推進部今村部長に感謝致します。慶應義塾大学榊原研究室の大学院生の皆さんにもお礼申し上げます。