

# 太陽光発電の市場動向と技術動向

増田 淳

産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター

太陽光発電市場は飛躍的に成長しており、2012年の世界の導入量は30GW近い。その一方で、太陽光発電を取り巻く状況は、ここ数年間で目まぐるしい勢いで変化している。数年前までは、結晶シリコン系太陽電池は原料不足により価格が高騰し、次世代の本命はシリコン使用量の少ない薄膜シリコン系太陽電池と思われていた。薄膜シリコン系太陽電池用のターンキー装置が次々と発表され、中国、台湾の多くのメーカーが導入した。2008年秋以降のリーマンショックに基づく世界的な経済不況や、スペインでのフィードインタリフ制度（固定価格買取制度）の大幅縮小にも関わらず、太陽光発電市場は成長を続けた。テルル化カドミウム太陽電池が安価な製造コストを武器に攻勢をかけ、米国ファーストソーラー社は2009年に世界で初めて1社あたりの生産量が1GWを超えた。中国・台湾勢も安価な結晶シリコン系太陽電池の生産量を飛躍的に増やしており、2011年の生産量は世界の2/3を占める。太陽電池モジュールの国際価格も1\$/Wを割り込むまでに低下している。価格低下にともない太陽電池の導入は益々増えるであろう。最近では欧州市場もドイツからイタリアに中心を移しつつあるが、これまで生産の中心であった中国でも本格導入が急速に進展するなどアジア市場も活況を呈しており、世界市場の構図も大きな変化を見せている。その一方で、あまりにも急激な価格低下にともない、太陽電池メーカーや関連メーカーは苦境に立たされている。2007年、2008年と世界の太陽電池生産量1位であったドイツQセルズは韓国ハンファグループに買収された。ソリンドラ、ユナイテッドソーラー、コナルカ等の米国のベンチャー企業のみならず、世界最大手の中国・サンテックまでもが経営破綻しており、今後の業界再編が加速するものと予想される。日本では2012年7月から再生可能エネルギーの固定価格での全量買取制度が始まり、従来は住宅屋根設置が中心の、世界的に見れば特異な市場であったが、10kW以上の中規模発電所や、いわゆるメガソーラーも多数建設されている。このことと関連して、太陽光発電の大量導入に向けたスマートグリッド、スマートコミュニティなど、システム関連の研究開発の重要性が増すものと思われる。

急激なモジュール価格の低下により、グリッドパリティの達成も当初見込みより早まることが期待されているが、太陽光発電のコストは他の発電方式よりも高いことが課題である。各種の優遇制度に頼らざるとも真のエネルギー源となるためには、発電コストの低減が今なお重要なことは言うまでもない。現在の太陽電池生産量の9割近くは結晶シリコン系太陽電池であるが、結晶シリコン系のみならず、薄膜系も含めて発電コストの低減が喫緊の課題である。

本講では、太陽光発電の最近の市場動向について概観した後、結晶シリコン系、薄膜系、有機系といった各種太陽電池において、変換効率、製造コスト、寿命の3つの因子により決定されている発電コストを一層低減することを目的に行われている研究開発の概要について紹介する。

産業技術総合研究所・九州シンクロトロン光研究センター合同シンポジウム  
平成25年7月31日  
サンメッセ鳥栖

## 「太陽光発電の市場動向と技術動向」



独立行政法人産業技術総合研究所  
太陽光発電工学研究センター  
増田 淳

## 本講の内容

- 太陽光発電の現状
- 結晶シリコン系太陽電池
- 薄膜系太陽電池
- モジュール化技術と信頼性試験
- 有機系太陽電池

## 太陽光発電の現状

### 太陽電池生産企業上位10社の変遷

	2005 (1.8 GW)	2006 (2.5 GW)	2007 (3.7 GW)	2008 (6.9 GW)	2009 (10.7 GW)	2010 (24.2 GW)
1位	シャープ	シャープ	Q-Cells	Q-Cells	First Solar	Suntech
2位	Q-Cells	Q-Cells	シャープ	First Solar	Suntech	JA Solar
3位	京セラ	京セラ	Suntech	Suntech	シャープ	First Solar
4位	三洋電機	Suntech	京セラ	シャープ	Q-Cells	Yingli Green Energy
5位	三菱電機	三菱電機	First Solar (4位)	MOTECH	Yingli Green Energy	Trina Solar
6位	Schott Solar	三菱電機	MOTECH	京セラ	JA Solar	シャープ
7位	Suntech (6位)	MOTECH	三洋電機	Yingli Green Energy	京セラ	Q-Cells
8位	MOTECH	Schott Solar	SunPower	JA Solar	Trina Solar	GINTECH
9位	Isofoton	SunPower	Yingli Green Energy	SunPower	SunPower	MOTECH
10位	Shell Solar	Isofoton	Deutsche Solar/SolarWorld	Deutsche Solar/SolarWorld	GINTECH	京セラ

### 主要国の太陽光発電システムの累積導入量(単位:MW)

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
日本	1132	1422	1709	1919	2149	2628	3618
ドイツ	1034	1897	2727	3862	5362	9140	16548
米国	376	479	624	830	1172	1646	2524
スペイン	22	45	143	655	3166	3423	3792

**2010年度導入量**  
1位:ドイツ7408 MW, 2位:イタリア2321 MW, 3位:チェコ1490 MW

**2011年度導入量(総計27.7 GW、前年比66%増)**  
1位:イタリア9 GW, 2位:ドイツ7.5GW, 3位:中国 2 GW, 4位:米国1.6 GW, 5位:フランス1.5 GW, 6位:日本1.1 GW

**2012年度導入量(29 GW:速報値)**  
欧州:16.5 GW, アジア:8.7 GW, アメリカ大陸:3.7 GW

**2013年度予測(31 GW)**  
中国がドイツを上回り、初めて世界最大の消費国となる。欧州は前年比26%減の12 GW程度まで縮小。アジア太平洋地域は成長率が50%以上となり11 GW以上。

### 2011年の市場動向

- 生産量:29.5 GW(前年比約20%増)  
中国・台湾が全体の74%(前年比11ポイント増)  
薄膜が全体の11%
- 1位:Suntech Power(中)2.2 GW, 2位:First Solar(米)2.0 GW, 3位:JA Solar(中)1.7 GW, 4位Yingli Green Energy(中)1.6 GW, 5位:Trina Solar(中)1.5 GW
- 日本メーカーは10位内に入らず  
シャープ16位(減少)、京セラ18位(横這)、ソーラーフロンティア21位(大幅増)
- 導入量:27.4 GW(前年比約40%増)  
金額ベース:930億ドル(前年比約12%増)  
上位5か国:イタリア、ドイツ、中国、米国、フランス  
(この5か国で全体の3/4)  
中国は前年比470%増  
欧州は18.7GW(全体の68%、2010年の82%から下落)  
イタリア、ドイツ、フランスで欧州市場全体の82%

**2012年にはSuntechも経営破綻**

**最近のトピックス**

- 2012年7月より国内で固定価格買取制度開始  
国内でも10 kW以上のシステムの導入増加  
メガソーラーも次々と建設計画  
海外製品の割合増加
- 専門メーカーを中心に経営破綻  
Q-Cells→Hanwha  
Solyndra, Uni-Solar, Konarka, YOCASOL
- CdTeも一時的勢いを失う
- CIGSの量産が本格稼働

**太陽光発電の市場予測例**

出典: EPIA, Solar Generation V, 2008

年	Advanced Scenario (GWp)	Moderate Scenario (GWp)
2007	2.4	2.4
2010	6.9	5.3
2020	56	35
2030	281	105

**実際は2011年で27 GW**

**各種太陽電池のエネルギーペイバックタイム**

**薄膜系メガソーラーの例**

ドイツに建設された53 MWの大規模発電所Solarpark Lieberoseの外観写真。  
ファーストソーラーのCdTeパネル56万枚が使用されている。

シャープがタイで建設中の73 MWの太陽光発電所の完成予想図。  
シャープホームページより引用

ファーストソーラーが米ネバダ州で250 MWの大規模発電所を計画。  
2017年5月に完成予定。

**太陽電池の種類**

- シリコン系
  - 結晶系: 多結晶、単結晶
  - 薄膜系: a-Si、タンデム
- 化合物系
  - バルク単結晶系: GaAs、InP
  - 薄膜多結晶系: CIGS、CdTe
- 有機系
  - 湿式: 色素増感
  - 固体: 有機薄膜

斜字はフレキシブル化可能

**発電コスト削減のための3つの手法**

- 変換効率の向上  
→高効率化技術 ←材料開発、デバイス構造
- 製造コストの削減  
→高生産性技術(高スループット、大面積)
- 長寿命化  
→高信頼性モジュール製造技術

AIST

## 結晶シリコン系太陽電池

www.aist.go.jp

AIST

## セル製造コスト低減に向けた対処法

- シリコン原料を安価に製造する方法を開発
- シリコン原料を有効に利用する方法を開発  
ウエハ厚ならびにカーフロスの低減
- 薄膜太陽電池等新材料を用いる電池を開発  
薄膜シリコン太陽電池(シリコン使用量1/100)  
化合物薄膜太陽電池(シリコンを使用しない)

www.aist.go.jp

AIST

## 結晶シリコン系太陽電池の技術課題

- 原料コスト低減 → 薄型化、新規スライス法  
冶金法、新規ガス精製法
- 鉛フリーペースト、薄型対応ペースト
- 低反射率テクスチャ
- バスバー細線化
- バックコンタクト
- ヘテロ接合

www.aist.go.jp

AIST

## 太陽電池用シリコン供給ルート

www.aist.go.jp

AIST

## シリコンインゴットのスライス方法

マルチワイヤースライス

### 加工原理

< 薄型化と低カーフロス化に対する課題点 >

- 機械加工により生じるウエハ表面のダメージ層の影響により、ウエハの極薄化に限界  
⇒現在の量産での最薄ウエハ厚さ 180 μm レベル (薄く切断できても後工程で割れる)
- 加工負荷による断線防止のため、ワイヤの細線化、カーフロスの低減に限界  
⇒現在の量産でのカーフロス 180 μm レベル

ワイヤによる既存技術では、ウエハ厚 100 μm 以下及びカーフロス 100 μm 以下は困難

www.aist.go.jp

## 固定砥粒によるスライス

### 固定砥粒を用いたスライスのメリット

- 加工時間が短い ・ 環境負荷が小さい
- 研削液ならびにシリコン切粉の再利用の可能性

Method	Appearance (25x)	Surface	Thickness variation (μm)	Roughness (Ra) (μm)
Fixed Abrasive wire		Shiny surface	10 μm	0.3 μm
Loose Abrasive method			24 μm	0.6 μm

産業技術総合研究所とリタケカンパニーリミテドとの共同研究による

### 薄型ウェハーセル

・省Si資源、低コストウェハー  
・薄型化による効率低下と基板の曲がりなどが課題

・ZAE: (mc-Si 90 $\mu$ m/Al/glass) Alボンディング 15%

・Kyocera: (mc-Si 100 $\mu$ m p型 15x15cm) through-hole (metal-wrap-through) 17.1%

・CrystalClear (IMECなど欧州コンソーシアム):  $\mu$ -PERC (industrial-type Passivated Emitter Rear Cell) EFGリボンmc-Si 120 $\mu$ m Al-BSFローカルコンタクト 16.6%

・Sharp: (Cz-Si 120 $\mu$ m n型 12.6x12.6cm) 裏面コンタクト型 -19%

・Sanyo: (Cz-Si 85 $\mu$ m n型 10x10cm) 21.4% 薄型化による $J_{sc}$ 減(38.9 $\rightarrow$ 37.3 mA/cm<sup>2</sup>)  $\leftrightarrow$   $V_{oc}$ 増(0.725 $\rightarrow$ 0.739V) 表裏対称構造によりbowing無し

### バックコンタクトセル

・表面グリッド電極削減(除去)による $J_{sc}$ 増加  
・表面パッシベーションの自由度が大きい  
・モジュールアセンブリーが容易  
・優れた外観

**Emitter (Metal) wrap through 型**

・Kyocera: (mc-Si p型 15x15cm) 18.3%

・Q. Cells: (mc-Si p型 10x10cm) (ALBA) 17.1%

・ECN: (mc-Si p型 15x15cm) (ASPIR) 16.4%

・ISFH: (Cz-Si p型 10x10cm) 20.3% stabilized

**Interdigitate 型**

・Sharp: (Cz-Si n型 12.6x12.6cm) (IBC) 20.6%

・Fraunhofer ISE: (FZ n型 2x2cm) 21.3%

### 実用サイズでの高効率結晶シリコン太陽電池の発表例

- ・単結晶(三洋電機、ヘテロ接合): 24.7%(厚さ98  $\mu$ m)
- ・単結晶(SunPower、バックコンタクト): 24.2%
- ・単結晶(カネカ、ヘテロ接合): 22.1%
- ・多結晶(三菱電機): 19.3%(厚さ200  $\mu$ m)、18.0%達成(厚さ100  $\mu$ m)

### 薄膜系太陽電池

### CIGS太陽電池とは

・シリコンを使わない  
・薄い、省資源  
・セルの直接続工程が不要  
・組成比に自由度がある  
・不純物を積極的に利用 (Na, H<sub>2</sub>O)  
・基板を選ばない (フレキシブル化もできる)

・製法が多彩、性能と製造コストのバランスを様々な変えられる (低価格品から高性能品まで)

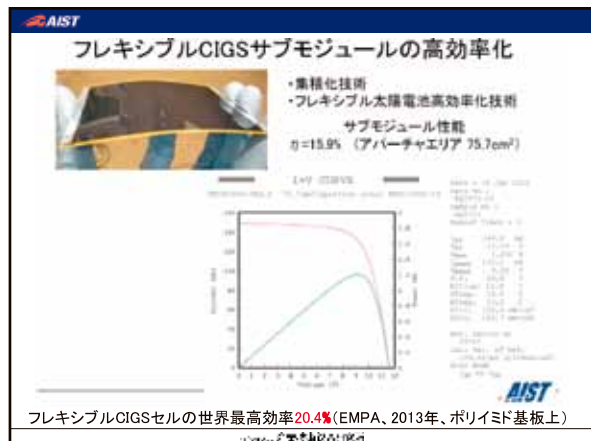
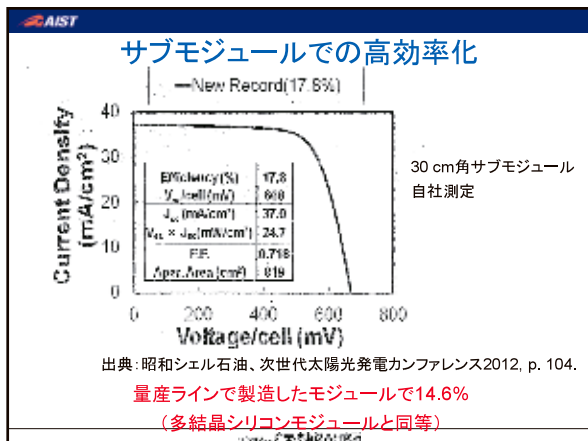
CIGS系太陽電池モジュールの構造例

カルコパイライト系および近縁の光吸収層材料の例

- ・Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS)
- ・Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> (CIGSS)
- ・CuInS<sub>2</sub> (CIS)
- ・Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS)

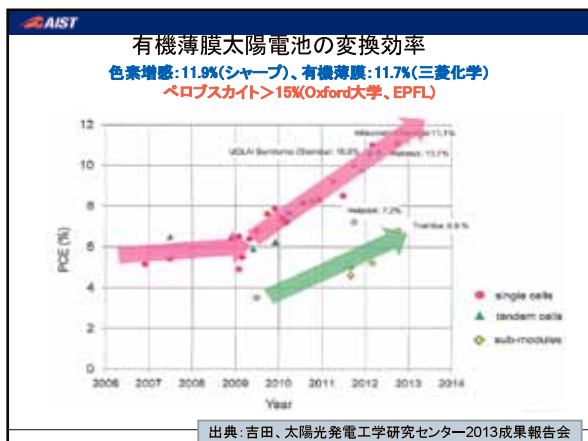
### CIGS太陽電池の特徴

1. 変換効率が高い(最高20.4%、Cdフリーで19.7%)
2. 吸収係数が大きく薄膜化可能
  - 吸収層約2  $\mu$ m
3. 優れた耐放射線性
  - NASDA人工衛星(つばさ:MDS-1)で実証済
4. 低コスト基板を使用可能



- ### CdTe薄膜太陽電池
- 太陽光スペクトルに最適な1.5 eVのバンドギャップ
  - 近接昇華法、真空蒸着法、電着法、スクリーン印刷法、スプレー法等の比較的簡便な方法で作製可能
  - 作製コストは極めて安価(<1\$/W)
  - 最高効率19.05%
  - 米国最大の太陽電池メーカーであるFirst Solar社等が量産
  - メガワット級発電施設に導入・管理し、廃棄・回収も適正に行えば安全性に関しては問題ないと主張
  - テルルの資源量が最大の課題
- First Solar社のCdTe太陽電池モジュール  
同社ホームページより転載

- ### 薄膜シリコン太陽電池の技術課題
- アモルファスシリコンの光劣化
  - 微結晶シリコンの高速堆積
  - 大面積堆積
  - 多接合化
  - 光マネジメント(透明電極、光閉じ込め、透明中間層)
  - フレキシブル・軽量化
  - シースルー化



- ### 有機薄膜太陽電池の研究課題
- 長波長に高感度を有する材料の探索
  - タンデム構造による高効率化
  - 大面積セル、モジュールでの高効率の実証
  - 信頼性の向上(劣化機構の解明)  
どこで使用するか?  
どの程度の寿命を期待するか?  
有機ELでの封止技術で充分か?

### まとめ

- 太陽光発電市場は、将来にわたり大きな成長が期待できる。国・地域別では中国、台湾勢の躍進が際立つ一方、化合物系を中心として薄膜系太陽電池の生産量も着実に増えてきた。
- 結晶シリコン系太陽電池に関して、新規スライス技術、ウエハ薄型化に対する様々な研究開発が行われている。
- 化合物薄膜太陽電池に関しては、日本では多結晶シリコン並の効率が期待できるCIGS太陽電池の量産が本格的に始まった。海外では、製造コストの安いテルル化カドミウム太陽電池が席捲している。
- 将来的には大幅なコスト低減が可能な有機系太陽電池への期待が大きい。安定性が重要な研究開発課題である。