

### 23rd EU-PVSEC報告 [CIS系太陽電池]

中田時夫 (青山学院大学)

会議名 : 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition

開催期間 : 2008年9月1日-5日

開催場所 : Valencia, スペイン

\*\*\*\*\*要 約\*\*\*\*\*

CIGS 薄膜太陽電池は、ここ数年で世界的に、商業化への動きが加速し、大きな転換期を迎えた。現在、CIGS 太陽電池メーカーはベンチャー企業を含め、全世界で 20 社を超え、2012 年の生産能力は現在の 60MW/年から一挙に 2.5GW/年に拡大すると予想される。これに伴い、本国際会議の発表も、これまでの基礎的な研究内容から、大面積、量産化技術や、Cd フリー化、フレキシブル化など商業化を念頭に置いた報告が中心となり、この分野の実用化に向けた勢いを印象付けた。

\*\*\*\*\*

#### 1. 会議の概要

CIS、CdTe 系分野のプログラムに掲載された発表論文数は合計で 92 件あり、その中で 84 件が CIGS 関連であった。これに対して、CdTe 関連はオーラル1件のみで、米国で 5 月に開催された 33rd IEEE PVSC と際立った違いを見せた。国別ではドイツが 28 件と最も多く、次いで、英国、フランス、米国、日本の順であった。

プレナリーセッションでは、AVANCIS(独)とホンダソルテック (日) から、モジュール製造技術とスケールアップに関する講演が、また、Wuerth Solar (独) から「PV マーケットにおける薄膜太陽電池の離陸」と題した講演があった。本稿では、「CIS,CdTe, and other (II-VI) Ternary Thin Film Cells」のセッションで発表された内容について、「CIGS モジュール製造技術」、「フレキシブル太陽電池」、「CdS 代替バッファ層」、「生産量の将来予測」に分けて報告する。なお、CdTe に関しては、とくに注目すべき発表がなかったので、ここでは割愛する。

#### 2. CIGS モジュール製造技術

今回の会議で、最も注目されたのは、SoloPower社(米)からの報告であった。同社の特長はCu(InGa)Se<sub>2</sub> 製膜を、電着/セレン化法で行う。これまで電着法によるGaの添加は困難視されていたが、これを始めて解決したばかりでなく、全セル製造工程をロール・ツー・ロール法で行うことにも成功した。この製膜法では、材料の使用効率が 100%に近く、装置コストも安価、CIGS薄膜の組成制御性も良好、連続運転が可能のため、高スループットであり、低コストが可能であるとしている。これまでに、ステンレス基板を用いた小面積セルで変換効率 13.8% (0.48cm<sup>2</sup>)、1m<sup>2</sup>モジュールで変換効率 8.96% (94W) を得ている。電着法では、これまでフランスのIRDPEグループを大きく上回る性能である。2007 年末には既に、100cm<sup>2</sup>のサブモジュールを製造し、その安定性を確認している。2008 年にはSan Joseに 20MWの生産工場を建設し、2009 年第 3 四半期に市販を予定とのことである。さらに、2010 年には 100MWまで生産量を拡大する計画であり、そ

の立ち上がりの早さは注目に値する。

ホンダソルテックからは、CIGS太陽電池モジュールの製造技術と性能に関する報告があった。海外の国際会議では最初の発表となることから、大きな注目を集めた。ホンダのCIGS製膜法はスパッタ/セレン化法であるが、低アルカリガラスの使用、車の塗装技術を用いたNa添加法、CBD-InSバッファ層の採用など随所にホンダ特有の技術を盛り込んでいる。同社の125Wモジュールに関して、NRELによる測定結果が報告され、最大出力128.5W ( $V_{oc}=279.3V$ 、 $I_{sc}=0.6526$ 、 $FF=0.705$ )、アパーチャーエリア効率=12.8%、モジュール効率=11.5%とのことである。これは、現在、市販の薄膜太陽電池モジュール（カタログ値）の中では、もっとも高い変換効率である。また、今回、新型モデルとして、低電圧型(125W、93V、1.98A)モジュールを発表した。これは、同じサーキットを3枚、並列接続したもので、2008年10月から産業用に国内で販売予定とのことである。ホンダでは、これらCIGSサーキット製造プロセスを、オートメーション化しており、ここでも車製造で培われた技術が活かされているように思えた。

AVANCIS社(独)から、20MW/年の工場が完成し、2008年10月14日に製造を開始するとの報告があった。CIGS製膜法は、旧Shell Solar社の技術を継承するもので、Se/In/CuGaプリカーサを $H_2S$ 雰囲気中で急速加熱(RTA)し、 $Cu(InGa)(SSe)_2$ 薄膜を形成するセレン化/硫化法である。同社では30cm×30cmモジュールで平均アパーチャーエリア効率12.6%、最高変換効率13.8%を得ている。また、モジュールサイズを1595mm×686mmと大型化し、出力100W~120Wをもくろむ。ガラス基板はCIGSモジュールの材料コストの大部分を占めるため、大型ガラス基板を内製できる点は、将来、コスト面で有利となるであろう。また、用途拡大のため、Saint Gobain社と共同で多雪地帯用の第2世代新型モジュールの開発を行っている。これはガラス二重構造で、車載用ガラスシールド技術を応用したものである。

Heliovolt社(米)はFASST (Field Assisted Simultaneous Synthesis and Transfer) プロセスと呼ばれるユニークな非真空CIGS製膜プロセスを開発し、商業化を目指す。FASSTプロセスは、第1段階で、異なる組成のプリカーサを2つの基板上に低温で堆積し、第2段階で、これらを上下に重ね、静電界中で加圧し、急速加熱することで、CIGS薄膜を形成する。この製膜法では数分で大粒径CIGS膜が高速に製膜でき、原料使用効率も高いのが特長であるとしている。プリカーサの製膜法は色々な方法が使えるが、今回は、スプレー法を紹介した。現在、小面積セルで変換効率12.2%が得られており、20MWの製造ラインを建設中とのことである。

IRDPE (Institute for Research & Development on PV Energy, 仏) から、CISELプロジェクトの進捗状況について報告された。これまで、電着法により、小面積セルで11.4%、30cm×30cmモジュールで8%の変換効率を得ていたが、更なる効率改善のため、膜質の均一性と、S/Se比の制御によるgraded-bandgap化を目指して研究を進めている。今回は変換効率の進展はなく、大面積化に研究の重点を置いているようであった。2011年に30cm×60cmのモジュール製造を目指すという。

産総研から、変換効率15.9%の集積型CIGSミニモジュールに関する報告があった。このCIGS薄膜は3段階法で製膜したものであるが、これとは別に、インライン装置を開発し、これと同程度の変換効率14.2% (76cm<sup>2</sup>) を得たとのことである。さらに、Seラジカル源を用いたCIGS製膜を行い、高効率セルが得られることを実証した。この方法ではSeの反応性が高まるため、Seの使用量が少なくでき、量産化に有利であるとしている。

### 3. フレキシブル太陽電池

ZSW (独) から、フレキシブルCIGSミニモジュール作製技術に関する報告があった。最も注目されるのは、モノリシック集積型モジュールを作製する際、ステンレス基板上に絶縁膜としてエナメルを塗布した点である。この方法で、変換効率 14.5%のミニモジュール (12.75cm<sup>2</sup>) を達成している。また、Naの添加はエナメル液にNa<sub>2</sub>Oを混入する。膜厚 25μmのポリイミド箔を基板とし、インライン蒸着装置を用いて基板温度 450°CでCIGS製膜を行い、変換効率 12.3% (0.5cm<sup>2</sup>) を得ている。

産総研は、高効率化に必要な Na 源としてケイ酸塩ガラス薄膜を用い、セラミックス、Ti、ポリイミド上で各々、真性変換効率 17.7%、17.4%、および 14.7%を得たとのことである。一方、従来のフレキシブルCIGS太陽電池はCdSバッファ層を用いていたが、青学大からは、ZnS(O,OH)バッファ層を用いたCdフリー・フレキシブルCIGS太陽電池に関する報告があり、Ti箔を用い、フレキシブルCIGS太陽電池としてはこれまでの最高の変換効率となる 17.7%を達成した。

#### 4. CdS 代替バッファ層

HZB(独)では、カルコパイライト系太陽電池のバッファ層作製技術として、ILGAR (Ion Layer Gas Reaction) と呼ぶ独特なバッファ層製膜技術を提案していたが、今回、この方法で大面積インラインプロセス用に装置開発を行った。ILGAR法ではInCl<sub>3</sub>溶液をスプレー法で基板に拭きつけ、H<sub>2</sub>Sガスで反応させて、In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>を形成する。AVANCIS社で作製したCIGSSe膜を用い、10cm×10cmミニモジュールで、12.4%を得ている。CBD-CdSに比べて、変換効率は同程度で、光照射効果はなく、ダンプヒートテストの結果、CBD-CdSよりも安定とのことである。このほか、光照射効果がないZn(S,O) バッファ層および反応モニタリング法も開発している。このZn(S,O)バッファ層をAVANCIS社のCIGSSe膜に適用し、変換効率 14.2% (0.5cm<sup>2</sup>) および 12.5% (30cm×30cm) を得ている。

IRDRE (仏) は、CBD-Zn (S,O,OH) バッファ層の上にi-ZnOとZn<sub>0.24</sub>Mg<sub>0.76</sub>Oをrf-スパッタ法で付けたCIGSセルの特性を比較した。その結果、ZnMgOをつけたセルでは開放電圧の低下なしに短絡電流を改善でき、変換効率が改善され、安定性も向上するとのことである。

AVANCIS(独)は、CdS代替バッファ層の開発も進めており、スパッタZnMgO、CBD-Zn(O,S)、およびPVD-In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>で各々、小面積セルで13~14%程度、30cm×30cmモジュールで10.6~12.5%を得ている。

ETH (スイス) から超音波スプレー法によるIn<sub>2</sub>S<sub>3</sub>バッファ層に関する報告があった。この方法の利点としては、低コスト、大面積化、インラインへの導入が可能などであるが、CIGS表面の変質および不純物混入などがあり、変換効率の改善が今後の課題である。

#### 5. 生産量の将来予測

Wuerth Solar (独) のDimmlerは「PVマーケットにおける薄膜太陽電池の離陸」と題して講演を行った。最初に、各種の薄膜太陽電池モジュールの特長について述べ、CIGS系については、現状の小面積セルの最大変換効率が19.9%、モジュール効率は11~13%であるが、中長期的には、15~17%が、また、CdTeと薄膜Si系はこれより2~4%低い値が目標となつた。また、薄膜系は、膜厚が2~5μm程度であるため、原料の使用量が少なく、エネルギーペイバックタイムは現状でも1.5年以下となり、長期的には、0.5年以下になるとしている。将来的には、第8世代大面積ガラス基板を用いた、FPD産業とのシナジー効果や、フレキシブル基板では幅0.6m×長さ数Kmの大面積製膜が可能であることから、パッケージング産業とのシナジー効果が期待できるとした。また、2012年になると、薄膜太陽電池の総生産量は、薄膜Si系が11GW、

CIS系が2.5GW、CdTe系が1.2GWとなると予想され、製造コストは10MWで2.5ユーロであるが、1GWでは0.7ユーロとなるとしている。結論として、薄膜系は製造コスト面で大きなメリットがあること、変換効率のポテンシャルが高いこと、現状でもすでにコスト競争力があり、生産量が急拡大しており、2012年には全太陽電池の30%以上のシェアとなると予想されるが、この目標達成には、さらなる研究開発が必要であるとした。

## 6. おわりに

CIGS薄膜太陽電池は、ここ数年で世界的に、商業化への動きが加速し、大きな転換期を迎えている。これに伴い、本国際会議におけるこの分野の口頭発表も、大面積、量産化技術などに関する企業からの報告が大部分を占め、大学や研究機関からの基礎的な研究成果の発表の場が減少する傾向にある。これを象徴するのが、広大な展示会場に600件という膨大な数の太陽電池関連企業のブースである。本会議ではほとんど発表のない中国が、展示では全体数の30%を占めるというのも驚きであった。

現在、大面積CIGSモジュールの最高変換効率は、120×60cmで13%程度であり、小面積セルの20%と比べると、まだ改善の余地が大きい。変換効率の改善は直接、低コスト化に反映するので重要である。小面積セルに関しても、理論効率との隔たりは大きく、十分にCIGS太陽電池のポテンシャルを引き出しているとは言い難い。したがって、昨今のバブルとも思える商業化の波に溺れずに、次世代を見据えた基礎研究も同時に推進すべきとの思いを強く抱く会議であった。