

特集論文

高効率微結晶タンデム型太陽電池の
量産化への取組みMass Production Start-up Activities on High
Efficiency-microcrystalline Tandem Solar
Cells

守井 淳*¹
Aitsushi Morii

高塚 汎*²
Hiromu Takatsuka

山内 康弘*³
Yasuhiro Yamauchi

田頭 健二*⁴
Kenji Tagashira

竹内 良昭*⁵
Yoshiaki Takeuchi

坂井 智嗣*⁶
Satoshi Sakai

地球環境対策の切り札として太陽電池が注目されており、当社ではすでにアモルファス型太陽電池を実用化している。従来よりアモルファス型の出力より 1.5 倍の出力が得られ、低コスト化が期待できる生産の高い薄膜シリコン太陽電池の研究開発を行ってきたが、平成 19 年 10 月より年間 40 MW 生産工場を立ち上げ、生産を開始した。

1. 微結晶タンデム型太陽電池の特徴

当社は従来からアモルファス型太陽電池の製造販売⁽¹⁾を行って来たが、この度アモルファス型の効率を大幅に上回る微結晶タンデム型太陽電池の生産を 2007 年 10 月より開始した。基板のサイズはアモルファス型と同じで発電出力は 130 W, 140 W, 150 W の 3 種類の製品を予定している。

微結晶タンデム型太陽電池は図 1 に示すように従来のアモルファス電池膜に微結晶電池膜を直列に重ねたものである。図 2 に微結晶タンデム型太陽電池の分光感度の一例を示すが、アモルファス電池膜で吸収できない長波長の光を微結晶電池膜で吸収するため効率が高くなる。しかし、微結晶 Si 膜は光吸収係数がアモルファス Si 膜より低いため、微結晶タンデム型太陽電池の i 層の膜厚はアモルファス型太陽電池の 5 倍以上が必要であり、製膜室の数を増やさずアモルファス

と同じ生産能力を確保するためには、単純には 5 倍の製膜速度が必要となる。このため当社ではアモルファス型太陽電池で開発した VHF プラズマ CVD 製膜技術を高機能化させ、微結晶 Si 膜の超高速製膜技術を開発した⁽²⁾。

2. 高速製膜技術

通常、製膜速度を上げると性能低下を招く。この対策として、当社の共同研究先である(独)産業技術総合研究所では従来よりも製膜圧力を高く(数百 Pa)して、かつ電極と基板間隔を狭くして高パワーを投入する製膜方法(高压枯渇法)を開発して、2~3 nm/s の製膜速度にて微結晶 Si 単体セル効率 9 % を達成している⁽³⁾。一方、当社では微結晶タンデム型太陽電池の高効率化開発を 5 cm 角基板対応の小型プラズマ CVD 装置を用いて実施し、図 3 に示すようにタンデムセルで初期値 13.4 % を達成していた⁽⁴⁾。これらの技術を

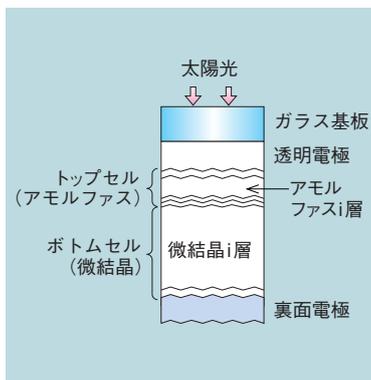


図 1 微結晶タンデム太陽電池の構造
微結晶タンデム太陽電池の断面構造を示す。

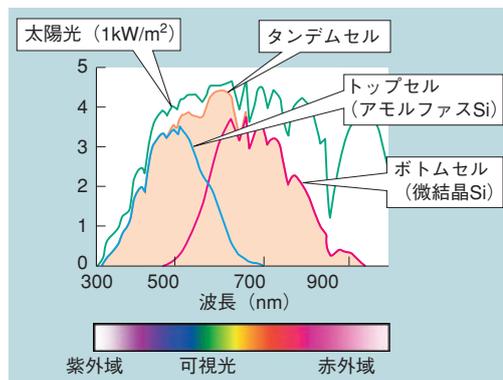


図 2 微結晶タンデム太陽電池の分光感度特性
太陽光の波長ごとに電気に変換される光子の密度を示す。

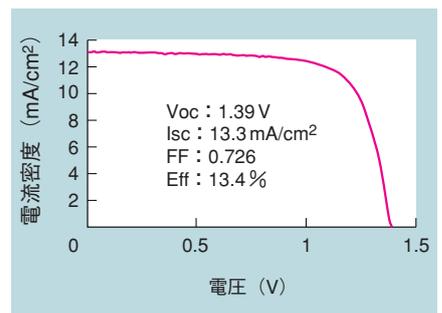


図 3 微結晶タンデムセルの発電特性
12 cm² の小面積微結晶タンデムセルの発電電流・電圧特性を示す。

*¹ 長崎造船所太陽電池事業ユニット長

*² 長崎造船所太陽電池事業ユニット技師長 工博

*³ 長崎造船所太陽電池事業ユニット次長

*⁴ 長崎造船所太陽電池事業ユニット製造課主席 工博

*⁵ 技術本部長崎研究所プラズマ・光技術研究室主席 理博

*⁶ 技術本部先進技術研究センタープロジェクトグループ主席

融合し、更に前述の高圧条件で生じるプラズマの局在化を抑制するために開発した微結晶 Si 製膜用の新型電極を適用することで、約 2 nm/s の高製膜速度でボトムセル（微結晶 Si 型）効率 8.8 % を得た。さらに、大面積高速均一製膜技術開発成果に基づき電極冷却構造を適用することで、図 4 に示すように製膜速度 2.5 nm/s で効率 8.6 % を達成した。

3. CVD 装置の稼働率向上

プラズマ CVD 装置での電池膜生産能力は、製膜速度だけでなく、基板サイズ、製膜速度、稼働率、効

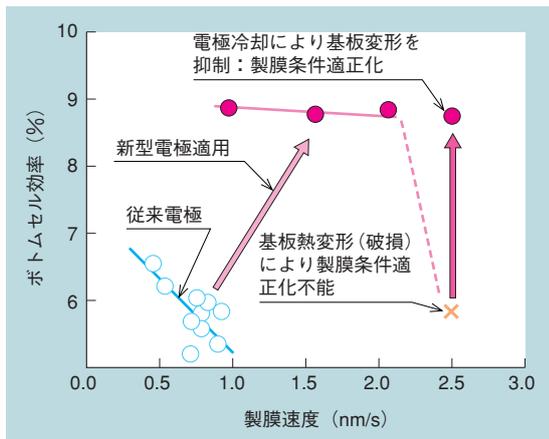


図 4 微結晶ボトムセルの製膜速度と効率の関係
 新型電極は従来型電極に比べ効率が高くなること、電極の冷却でガラス基板変形を抑制した場合に製膜速度が 2.5 nm/s で効率が下がらないことを示す。

率、歩留りの掛け算となる。通常、プラズマ CVD 装置は、製膜を続けると製膜室内の電極やヒータに膜が付着するため、定期的に製膜室を開放して構成部品を取り外し、洗浄したものと交換する必要がある。この時、再組立てした後に膜厚分布の調整や、製膜室のベーキングを行う必要があり、稼働率が落ちる一つの原因となっている。そこで当社では半導体制膜装置で用いられるフッ素系ガスを用いたプラズマクリーニング技術を太陽電池製造設備に世界で初めて適用した。これにより、製膜室を数ヶ月にわたり開放せず連続製膜が可能となり、稼働率が相対値で約 20 % 向上した。

タンデム型太陽電池生産設備には、これら技術を用いたプラズマ CVD 装置を新たに開発した。また、この装置には高速製膜に必要な超高周波電力の供給が出来る電源と電極を新たに開発して適用している。膜分布の均一性を制御するために電極を分割して、それぞれ製膜速度を調整できる機能も持たせた。ガラス基板搬送には特殊なロボットを使用せず、機械的な機構で搬送するシステムを採用して真空中での機械トラブルの低減を図った。また、プラズマ CVD 装置内での基板の温度管理のためロードロック室からアンロード室までの伝熱シミュレーション計算による予測を行っている。基板の変形に関しては、伝熱シミュレーションと応力解析を組み合わせた解析技術を開発した。この技術を用いることで、ガラス基板に発生する応力が計算できるので、ガラスの破壊強度の解析結果から破損確率を推定できる。図 5 に解析結果を示す。また、電極

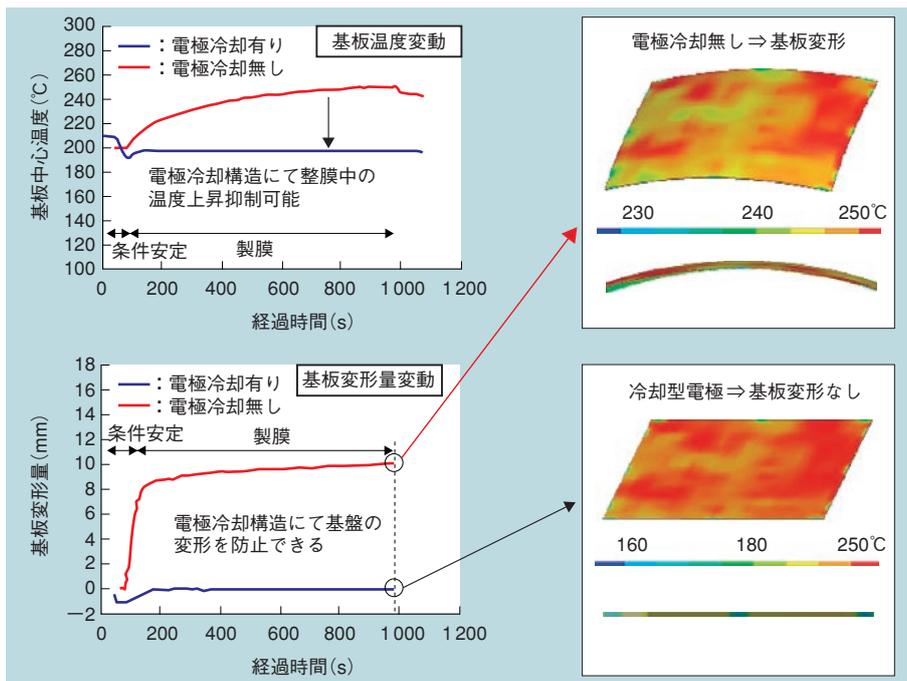


図 5 微結晶ボトムセル製膜時のガラス基板温度と変形量解析結果
 基板冷却が有無による製膜中のガラス基板温度の変化と変形量のシミュレーション計算結果を示す。

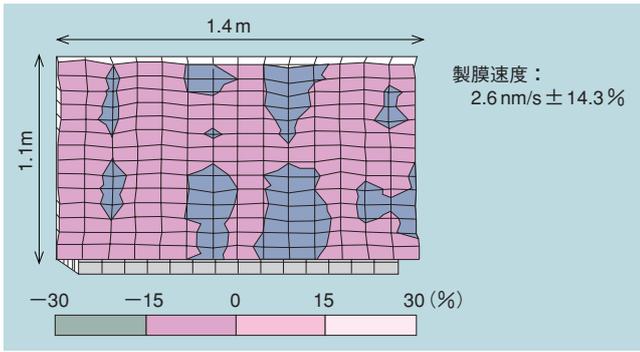


図6 微結晶シリコン膜の製膜速度分布
1.1 m × 1.4 m 基板の微結晶シリコン膜製膜速度分布を示す。



図7 微結晶タンデム生産工場外観
建設した年産 40 MW 微結晶タンデム生産工場の外観写真。

を冷却して放電で発生する熱を電極より除去する構造を採用することで基板の変形・割れを抑制することが可能となった。電極冷却がない場合は製膜中に基板温度が 40℃ 以上上昇し、かつ基板表裏や面内温度差により基板割れが 1 000 枚に 1 枚程度発生することが解析結果で予測できた。これに対して電極冷却を行うことで製膜中の基板温度上昇は 10℃ 以下に抑制され、かつ基板が割れる確率も冷却なしに比べ 100 分の 1 以下に抑制できる。

これらの結果により、微結晶高速製膜に必要な大電力を投入した条件にて安定した製膜が可能となり、1.1 m × 1.4 m サイズの大面积基板を用いて図 6 に示すように 2.6 nm/s ± 14.3 % の製膜速度で微結晶 Si の大面积高速均一製膜を確認した。以上述べたような設計技術の適用によって 1.1 m × 1.4 m の基板を安定して搬送、高速で微結晶シリコン膜の製膜が可能となった。

図 7 に示す新工場は平成 19 年 10 月より生産を開始しており、平成 20 年度から 40 MW のフル生産に入る予定である。タイトル写真に微結晶タンデム型太陽

電池の外観を示す。

生産した電池の出力分布を図 8 に示す。電池の出力は平均値 ± 5 % 以内に収まっており高い製造再現性を有していることがわかる。平成 19 年度は 130 W 製品から販売を始め、生産と並行し電池出力を向上させ、平成 20 年度中に 150 W の製品を販売する予定である。微結晶タンデム型太陽電池の標準出力当たりの発電量年間変化を図 9 に示す。このデータはドイツの性能評価機関で計測しているもので、結晶型に比べて高い発電性能が得られている。微結晶シリコンはアモルファスシリコン中に柱状の結晶粒子が充填されている構造で電気的には結晶とアモルファスの中間の特性を持っている。このため出力の温度係数も結晶型とアモルファスの中間の値となるため、温度が高い夏場の発電量が結晶型より多いと考えられる。

4. ま と め

従来発売してきたアモルファス型太陽電池の出力を大幅に更新した微結晶タンデム型太陽電池の生産を 2007 年 10 月より開始した。微結晶タンデム型太陽電

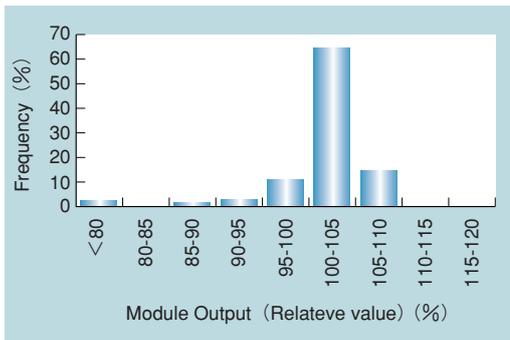


図8 電池の出力分布
量産時のタンデム太陽電池の出力分布特性を示す。

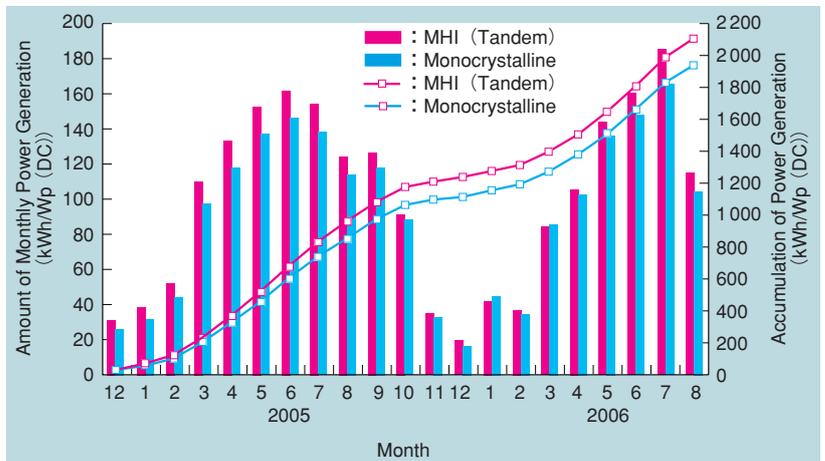


図9 微結晶タンデム太陽電池の年間発電特性
ドイツ Kassel 屋外で計測した微結晶タンデム太陽電池の発電特性を単結晶シリコン太陽電池との比較を示す。

池の微結晶電池膜の製膜には超高周波を用いて従来の5倍の製膜速度で生産が可能なプラズマ CVD 装置を開発・設計して生産に供している。生産した微結晶タンデム型太陽電池の性能はドイツに於けるフィールドテストの結果、結晶型を上回る年間発電量であることが確認された。今後は電池1枚当たりの出力を向上させ、更に高品質の製品を生産できるよう努力していく所存である。

なお、微結晶タンデム太陽電池及び微結晶 Si 高速製膜技術は(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究により開発したものである。

参 考 文 献

- (1) 高塚, 山内ほか, 三菱重工技報 Vol.41 No.1 (2004)
- (2) 山内, 高塚ほか, 三菱重工技報 Vol.42 No.3 (2005)
- (3) T. Matsui, M. Kondo and A. Matsuda, Proceedings 3rd World Conference on

Photovoltaic Energy Conversion, Osaka (2003)
p.1570

- (4) S. Goya, Y. Nakano, N. Yamashita, et al., Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka (2003)
p.1849



守井淳



高塚汎



山内康弘



田頭健二



竹内良昭



坂井智嗣