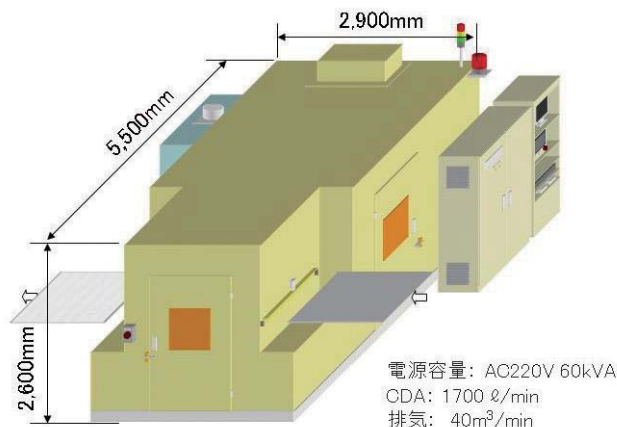


# 薄膜型太陽電池製造用レーザ加工装置の開発

Development of Laser Processing System for Thin-Film Photovoltaic Substrate



- |         |                    |   |
|---------|--------------------|---|
| 福田 直 晃  | Naoaki Fukuda      | ① |
| 国 塩 和 良 | Kazuyoshi Kunishio | ② |
| 中 山 茂 昭 | Shigeaki Nakayama  | ③ |
| 藤 井 義 和 | Yoshikazu Fujii    | ④ |
| 井 上 典 洋 | Norihiro Inoue     | ⑤ |
| 坂 井 一 郎 | Ichiro Sakai       | ⑥ |

## あ ら ま し

当社は薄膜型太陽電池製造に対して信頼性が高いレーザ加工装置を開発した。本装置はプロセスウィンドが大きく、メンテナンス頻度が少なく、消耗品が少ないという特長がある。既に多くの太陽電池製造メーカーに当社装置が採用されており、昼夜を問わず一年中稼動する量産ラインに導入している。薄膜型太陽電池におけるレーザ加工の精度や品質は発電効率に影響するため、製造に対する役割は重要である。ここではその一つである薄膜シリコン系太陽電池の金属膜加工に着目する。大型基板の金属膜加工では、基板の自重によるたわみで加工不良が発生する問題がある。この問題に対し、当社は独自の長焦点深度加工技術を開発し、安定性の高いレーザ加工を実現させた。

## Abstract

Hitachi Zosen corp. has developed reliable laser processing systems in thin-film photovoltaic lines. The features of these systems are: a large processing window, a low maintenance system and small consumable parts. Our systems have already been sold to several photovoltaic manufactures, and have been introduced into mass production lines. Laser processing influences the efficiency of electrical generation of photovoltaic substrate. This process largely affects production efficiency. In this paper, a metal scribe system is discussed. In the case of the scribe system for a large scale substrate, manufacturing defects have occurred easily because of a deformation under its own weight. To counter this problem, we have developed a processing technology using long focus depth. This technology makes highly stable processing possible.

## 1. 緒 言

欧州でのフィードイン・タリフ（固定価格買取り）制度の制定や米国でのオバマ政権が掲げたグリーン・ニューディール政策等の影響により、世界の太陽電池導入量は飛躍的に伸びている。2010年度の世界の太陽電池導入量は、ピーク時換算の発電量として23.9GW（原子力発電所の約23基分に相当）となった<sup>1)</sup>。更なる利用拡大のため、太陽電池モジュールの製造コスト低減や長寿命化、ならびに高変換効率に対する種々の

研究開発が活発に行われている<sup>2)</sup>。

現在の太陽電池の主流はシリコンウェハを用いた結晶型と呼ばれるタイプであるが、今後急速に成長すると考えられているタイプに薄膜型太陽電池がある<sup>2)</sup>。薄膜型はフラットパネルディスプレイで確立された製造技術の応用が可能であり、量産効果による大幅な製造コスト低減が期待できる。この薄膜型には原材料としてシリコンを使用する薄膜シリコン系と、銅-インジウム-セレンの化合物薄膜で構成するCIS太陽電池や、その化合物薄膜にガリウムを付加したCIGS太陽電池がある。これらの薄膜型太陽電池の製造には、結晶型太陽電池の製造工程にはほとんど適用されなかったレーザ加工技術が不可欠となる<sup>3)</sup>。

当社は、大型基板を用いる薄膜型太陽電池の製造に対するレーザ加工装置を開発した。本装置はプロセスの最適領域（プロセスウィンド）が大きく、メンテナ

① Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部 技術研究所 博士(工学)  
 ② Hitz日立造船(株) 精密機械本部 システム機械ビジネスユニット 設計部  
 ③ Hitz日立造船(株) 精密機械本部 システム機械ビジネスユニット 開発部  
 ④ Hitz日立造船(株) 精密機械本部 システム機械ビジネスユニット 生産技術部  
 ⑤ Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部 技術研究所  
 ⑥ Hitz日立造船(株) 精密機械本部 システム機械ビジネスユニット 開発部 博士(工学)

ンス頻度が少なく、消耗品が少ないという特長があり、薄膜型太陽電池製造に対する歩留りの向上と製造エネルギーの低減が可能である。既に多くの太陽電池製造メーカーに当社装置が採用されており、昼夜を問わず一年中稼動する量産ラインに導入している。

ここでは、まず太陽電池の製造プロセスにおけるレーザー加工について概説する。次に、加工対象膜のみを除去する複層膜の選択加工について説明し、薄膜シリコン系太陽電池の金属膜加工（薄膜Si系P3加工）に対する当社のレーザー加工装置を紹介する。

## 2. 薄膜型太陽電池基板の構造と製造工程

**2.1 薄膜型太陽電池基板の構造** 薄膜型太陽電池は、プラズマCVDやスパッタリング等の方法により基板上に光電変換膜や電極膜を膜厚数 $\mu\text{m}$ に積層させた構造となっている。この積層膜を幅数mmの短冊状セルとし、直列接続させることで効率のよい電流と電圧が得られる太陽電池となる。

**2.1.1 薄膜シリコン系太陽電池基板の構造** 薄膜シリコン系太陽電池構造の例を図1に示す。

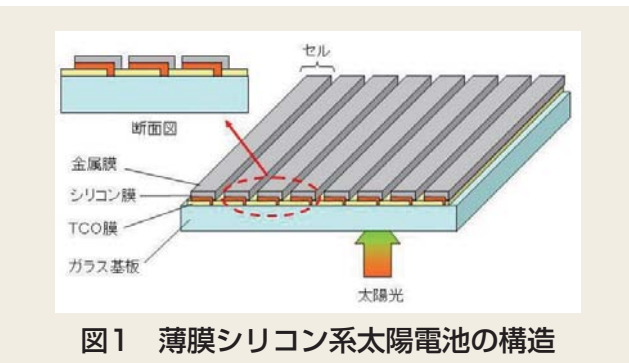


図1 薄膜シリコン系太陽電池の構造

図1に示すように基板としてはガラスが用いられ、その上に酸化錫等の透明導電膜（TCO膜：Transparent Conductive Oxide）、光電変換させるシリコン膜、アルミや銀等の金属膜が積層されている。この積層膜はガラス基板上でTCO膜が分離され、TCO膜上でシリコン膜分離と金属膜分離が行われ、単一セルが形成される。さらに、単一セルの金属膜が隣のセルのTCO膜と接続した直列接続構造となっている。

**2.1.2 薄膜化合物系太陽電池基板の構造** 薄膜化合物系太陽電池の例としてCIGS太陽電池の構造を図2に示す。

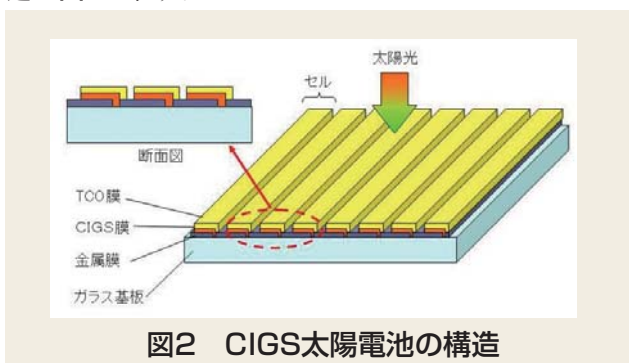


図2 CIGS太陽電池の構造

図2に示すように基板としてはガラスを用い、その上にモリブデン等の金属膜、光電変換させるCIGS膜、そして酸化亜鉛等のTCO膜が積層された構造となっている。この積層膜は、ガラス基板上で金属膜が分離され、金属膜上でCIGS膜分離とTCO膜分離が行われることで単一セルが形成される。さらに、単一セルのTCO膜が隣のセルの金属膜と接続した直列接続構造となっている。

**2.2 薄膜型太陽電池の製造工程** 次に、薄膜シリコン系太陽電池の製造工程と薄膜化合物系太陽電池の製造工程について説明する。レーザー加工は大気中での非接触加工が可能であり、薬液を使用しない完全ドライプロセス技術である。このような利点を持つレーザー加工は、薄膜型太陽電池の様々な工程に適用されている。

**2.2.1 薄膜シリコン太陽電池の工程** 薄膜シリコン系太陽電池に使用されるシリコン膜にはアモルファスシリコンを用いるタイプと発電効率を上げた微結晶シリコン堆積タイプの2つの種類がある。これらはほぼ同一の工程で製造されている。薄膜シリコン系太陽電池の製造工程例を図3に示す。

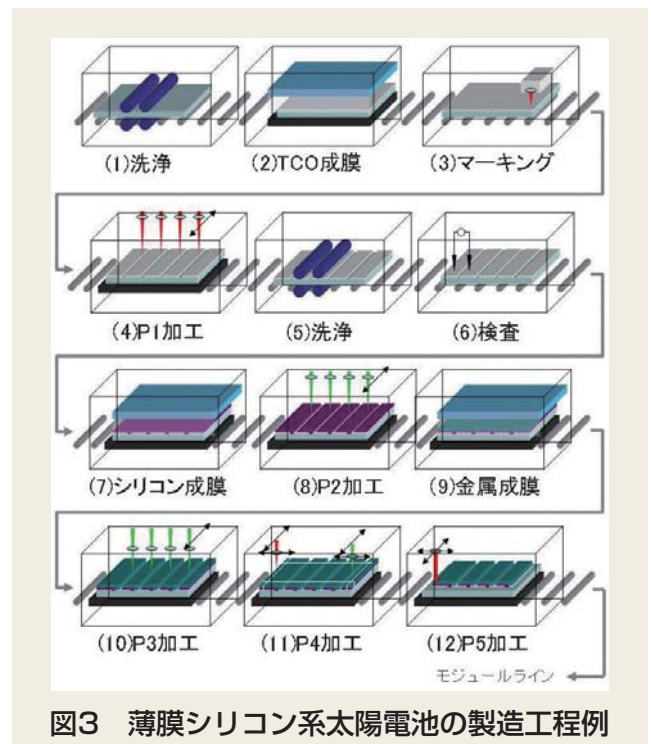


図3 薄膜シリコン系太陽電池の製造工程例

図3に示すように薄膜シリコン系太陽電池の製造工程では、まず(1)基板を洗浄、(2)TCOを成膜し、(3)ナンバーリングのためのマーキングを行う。続いてレーザー加工と成膜を繰り返し、細長いセルの直列接続構造を形成する工程となる。この工程では(4)TCO膜加工（薄膜Si系P1加工）し、(5)洗浄後、(6)絶縁検査、その後(7)シリコンを成膜し、(8)シリコン膜加工（薄膜Si系P2加工）、(9)金属の成膜と(10)金属膜加工（薄膜Si系P3加工）を行う。最後に、製品化のための工程である(11)基板端を絶縁するエッジアイソ

レーション（薄膜Si系P4加工）と（12）全膜除去するエッジデレーション（薄膜Si系P5加工）し、モジュールラインへ送られる。レーザー加工はマーキングと薄膜Si系P1加工からP5加工の6工程で使用される。

当社は薄膜シリコン系太陽電池製造に適用される全てのレーザー加工装置を開発した。既に多くの太陽電池製造メーカーに採用されている。

**2.2.2 薄膜化合物系太陽電池の工程** 国内で生産される薄膜化合物太陽電池には光電変換膜にCISを用いるタイプとCIGSを用いるタイプがあり、ほぼ同一の工程で製造されている。薄膜化合物系太陽電池の製造工程例を図4に示す。

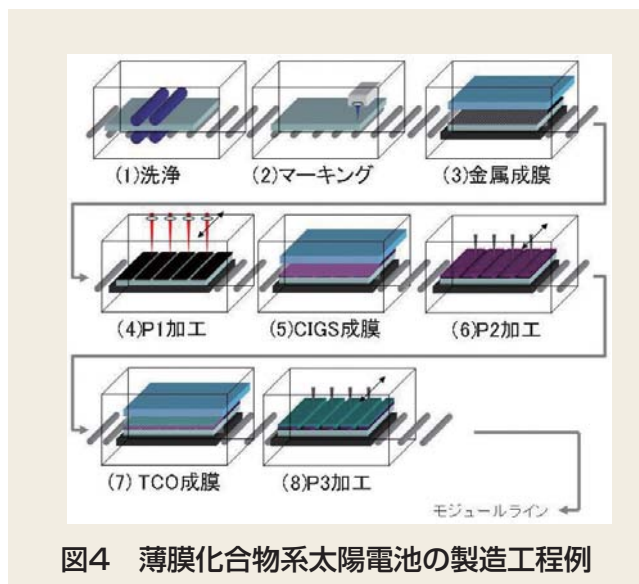


図4に示すように、(1) 基板を洗浄し、(2) ナンバーリングのためのマーキングを行う。引き続き(3) 金属膜の成膜と(4) 金属膜加工（薄膜化合物系P1加工）を実施する。その後、成膜とメカニカル加工（薄膜化合物系P2加工、薄膜化合物系P3加工）を繰り返すことで細長いセルの直列接続構造を形成する。レーザー加工はマーキングと薄膜化合物系P1加工の2工程で利用される。

当社はこれら2工程で利用されるレーザー加工装置を商品化している。さらに、メカニカル加工工程の代替となるレーザー加工技術の開発も行っている。

### 3. 薄膜型太陽電池における選択加工

上述で示したように多くの利点を有するレーザー加工であるが、特有の課題が存在する。その一つに選択加工がある。この加工では、加工対象ではない膜に熱的、機械的ダメージを発生させずに加工対象膜のみを完全除去する必要がある。薄膜Si系P2加工と薄膜Si系P3加工がこれに該当する。

積層された薄膜を選択的に加工するには、加工対象となる膜の吸収率が大きく、非加工対象膜の吸収率が小さい波長のレーザーを用いる方法がある。薄膜Si系P2

加工はこの方法が利用でき、TCO膜の吸収率が低く、シリコン膜の吸収率が高い可視光領域の波長を用いる。これらの膜に対する吸収率の差が大きいため、シリコン膜にレーザーを直接照射する方法（膜面照射法）であっても、ガラスとTCO膜を透過してシリコン膜にレーザーを照射する方法（ガラス面照射法）であっても、シリコン膜の選択加工が可能となる。

一方、薄膜Si系P3加工は「加工対象膜の吸収率が大きく、非加工対象膜の吸収率の小さい波長の選定」が難しい。これは加工対象となる金属膜がほとんどの波長の光を反射するためである。そこで、ガラス面からレーザーを照射し、シリコン膜とともに金属膜を除去させる加工法を用いる<sup>4)</sup>。これにより選択加工が実現する。レーザーの照射方法を図5に示す。

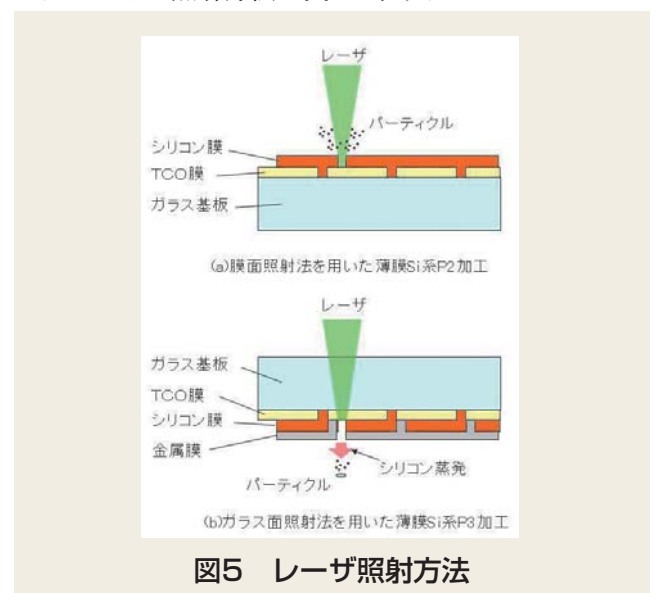


図5(a)は膜面照射法を用いた薄膜Si系P2加工を示している。図5(b)に示したガラス面照射法を用いた薄膜Si系P3加工では、まずレーザービームはガラスとTCO膜を通過する。その後、レーザービームはシリコン膜に吸収されシリコン膜が蒸発し、金属膜は蒸発物から押し出される形で剥離する。この加工にはシリコン膜に対する吸収率が高く、ガラスとTCO膜に対する吸収率が低い波長532nmのレーザーを用いる。

ガラス面照射法を用いることで実現できた薄膜Si系P3加工であるが、太陽電池基板の大型化に伴う問題がある。以下では薄膜Si系P3加工に必要なレーザービームの特性と大型基板のレーザー加工に対する問題について説明し、その問題を解決した当社のレーザー加工技術を紹介する。

**3.1 必要となるレーザービームの特性** 薄膜型太陽電池の量産システムでは高速で高精度な加工が要求される。当社は加工テーブルとして高速駆動タイプのリニアモータを使用している。発振器としては高繰返し発振が可能なLD励起QスイッチYVO4レーザー等を採用している。これらを同期させて加工痕を繋げ、高速で高精度なライン加工を実施する。加工に及ぼすレーザービームの安定性を図6に示す



図6 加工に及ぼすレーザービームの安定性

図6(a)は安定した加工状態を示している。一方、図6(b)はパルス周期が不規則な状態を示し、図6(c)はパルスエネルギーにばらつきが発生した状態を示している。図6(b)や図6(c)のように加工痕が途切れた場合、直列接続構造が形成できず電池性能が得られない。

このように高速・高精度な加工が要求される薄膜加工では、レーザービームのパルス周期とパルスエネルギーの安定性が重要となる。当社には社内の生産技術開発で30年以上取り組んできたレーザー加工に関するテクノロジーとノウハウがある。そのなかのパルス周期とパルスエネルギーの安定化技術を、発振器メーカーの協力のもとで活用し、特別仕様発振器として装置に搭載している。

次に、薄膜Si系P3加工の加工品質評価について説明する。加工品質評価には加工外観評価、絶縁評価や電池特性評価等がある。しかしながら、多くの太陽電池メーカーは加工外観評価のみでレーザー加工の良し悪しの大半を判断する。そこで、ここではこの加工外観評価について説明する。加工不良と判断する加工外観と加工結果例（ガウシアン状エネルギー強度分布のレーザービームを使用）を図7に示す。

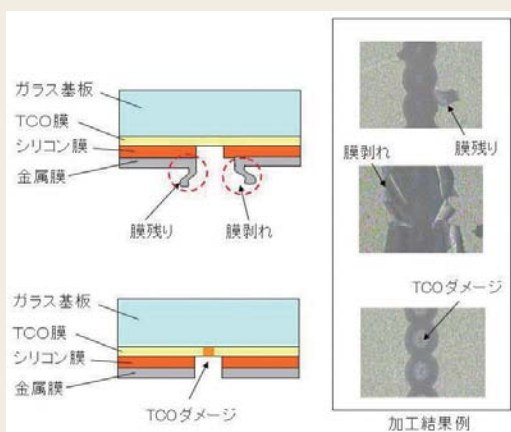


図7 加工外観評価

図7に示すように加工不良と判断される加工外観には膜残り、膜剥れとTCOダメージがある。これらの不良が発生すると電池性能が得られない。膜残りや膜剥れは照射するレーザービームのエネルギー密度不足が原因で発生した加工欠陥である。TCOダメージについては過剰なエネルギー密度を照射したことが原因となっている。このように薄膜Si系P3加工では、照射す

るレーザービームのエネルギー密度の過不足により、容易に加工不良が発生する。

一般的なレーザービームのエネルギー強度分布はガウシアン状である。このようなレーザービームを集光させた場合、照射スポット中央部のエネルギー密度が非常に高く、中心を離れるにつれエネルギー密度が減少した状態となる。このため薄膜Si系P3加工に対しては、スポット中央部にTCO膜のダメージが発生しやすい(図7)。TCO膜にダメージを与えずに加工を行うためには、加工スポット内のエネルギー強度分布の均一化技術が重要となる。当社はフラットパネルディスプレイ製造用レーザー加工装置で開発してきたエネルギー強度分布の均一化光学技術<sup>5)</sup>を有しており、本技術を応用することで薄膜型太陽電池に対しても安定した加工が実現できる。

3.2 基板セットテーブルとプロセスウインド拡大レーザーをガラス面から照射する場合、パーティクルはレーザー照射方向の反対側に飛散する。このとき膜面に接触する物体があると除去予定の膜が再付着する恐れがある。一般的にこのような加工ではパーティクルが再付着しないよう膜面側に空間を設ける。具体的には基板を保持するテーブルを中空とし、基板の縁数mmを支える構造にする。薄膜Si系P3加工の基板セットテーブルの模式図を図8に示す。

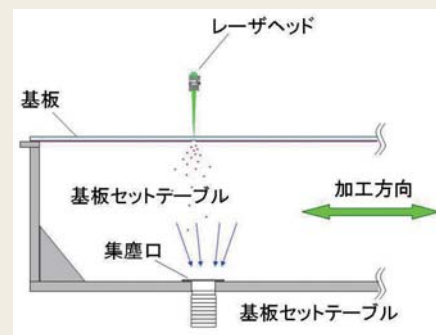


図8 ガラス面加工用基板セットテーブル

図8に示すように基板を支えるテーブルは中空とし、テーブル底部でパーティクルを集塵させる。この構造はパーティクルの再付着防止対策だけでなく、大量に発生する量産時のパーティクルをテーブル内に滞留させない目的もある。

このように薄膜Si系P3加工では、中空の基板セットテーブルを用いる必要があるが、このテーブル保持方法により基板が自重でたわむという問題が発生する。また、基板の大型化に対して基板のたわみは増大する。大型基板のたわみの完全防止は困難であり、基板に凹凸が残る状態となる。しかしながら大型基板の製造に対しても、この凹凸の有無に関わらず高速で高精度なレーザー加工が要求される。

大型基板のたわみ測定結果を図9に示す（基板寸法1,400mm×1,100mm×4mm、基板4辺の端から10mmを支持した状態にて測定）。

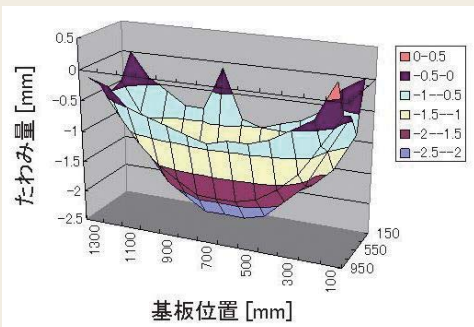


図9 大型基板たわみ測定結果(低減対策無し)

図9に示すように4辺支持の基板は自重により大きくたわみ、その最大たわみ量は2.3mmとなる(装置では基板固定等のたわみ低減対策を施す)。

レーザはレンズ等の光学素子を用いて微小領域にエネルギーを集光して加工を実施する。そのため、光学素子と基板間の距離(ワーキングディスタンス)が変化すると照射面の集光状態が変わる。大型基板では図9で示すようなたわみによるワーキングディスタンスの変化が大きいため、加工不良が発生しやすい。一般的には、加工不良防止対策として、ワーキングディスタンスを一定とするリアルタイム制御等を用いる。しかしながら、加工速度1,000mm/sec以上となる高速加工に対応した光学系の高速追従機構は、高価な装置になりかねない。そこで、当社はリアルタイム制御が不要となる独自の長焦点深度光学系を開発した。この光学系を用いることで、ワーキングディスタンスが±3mm変動した場合であっても加工状態を一定に保つことができる。長焦点深度光学系を用いた加工結果を図10に示す。

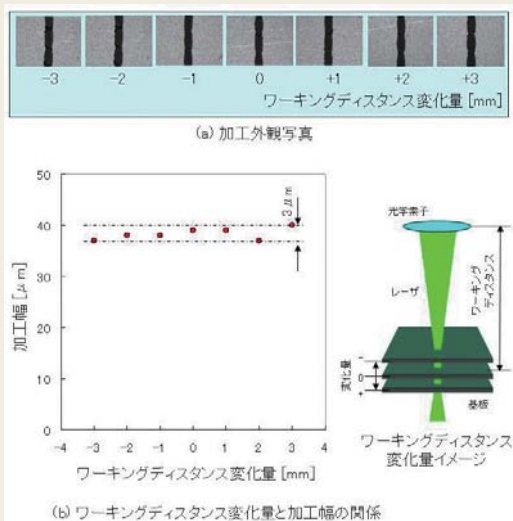


図10 長焦点深度光学系を用いた加工結果

図10(a)に示すように、ワーキングディスタンス±3mmの変化に対する加工外観の変化はない。また、図10(b)に示すように加工幅の変化も10%以下と非常に小さいことが判る。このように長焦点深度を有する当社装置は大型基板を用いる薄膜型太陽電池製造に対しても加工状態が安定し、加工不良を発生させない。

## 4. レーザ加工装置の概要

当社は薄膜型太陽電池に適用される全てのレーザ加工技術の開発を行った。ここでは直列接続構造を形成する薄膜Si系P1加工、P2加工、P3加工と薄膜化合物系P1加工用装置を紹介する。これらは発電効率に影響する重要な加工である。そのためマーキング、薄膜Si系P4加工やP5加工よりも高速で高精度なパターン形成能力が要求される。P1加工、P2加工そしてP3加工に対する当社装置の概略構成を図11に示し、装置仕様を表1に示す。

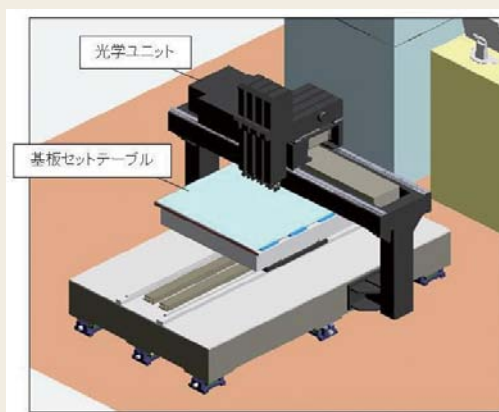


図11 装置の概略構成

表1 薄膜型太陽電池用レーザ加工装置仕様

外形寸法	W2,900mm × D5,500mm × H2,600mm	
基板寸法	最大 1,400mm × 1,400mm	
加工速度	最大 1,200mm/sec	
加工幅	30 μm ~ 90 μm	
光学ヘッド数	4ヘッド ~ 24ヘッド	
処理時間	32sec 以下	試算条件 光学ヘッド: 24ヘッド 加工本数: 192本 基板搬入出時間含む

図11に示すように本装置は、長さ方向(X軸方向)に高速走査する基板セットテーブルと門型やぐら上で幅方向(Y軸方向)に走査する光学ユニットで構成している。光学ユニットは製造時の処理時間を短縮するため、複数ラインを同時にレーザ加工するマルチ光学ヘッドとなっている。当社の装置の特長を以下にまとめる。

(1) **大きいプロセスウィンド** 当社はワーキングディスタンスが±3mm変化した場合であっても一定の加工状態(加工幅変化10%以下)となる革新的な長焦点深度光学系を開発した。この光学系は当社装置に標準装備している(特許申請中)。

(2) エネルギーロスの低減 光学ユニット内ではマルチビームとするためのビーム分岐やビームの個体差をなくすためのビーム成形を行う。分岐によるマルチビームは個体差が大きいため過剰なエネルギーからビーム成形し、出力が等しくなるよう調整する。このように一般的なマルチビームは大きなエネルギーロスが伴う。これに対し当社装置は光学系を最少部品数で最適化させ、個体差のない低エネルギーロスのマルチビームを実現させた。

(3) 高メンテナンス性 光学ユニットは完全密閉の内部陽圧構造とし、周囲からの塵を遮断している。これにより光学部品への汚れ付着による光学部品の劣化を低減させ、メンテナンスフリーを実現した。また、光学部品で唯一外部にさらされるレーザー出射口には、当社独自技術のエアバリア構造（特許技術）を搭載し、レーザー出射口の光学部品への加工屑の付着を防止している。

(4) 省フットプリント 上記で示したように当社装置はY軸方向に門型やぐらを用いた構造となっている。この構造により、大型太陽電池に対しても省フットプリントが実現できる。

#### <デモ装置による加工能力の実証>

当社は最大1,400mm×1,400mmの大型基板が加工できるデモ装置を保有している（図12）。本装置上部の光学系は太陽電池の膜構成に応じた変更が可能であり、様々なタイプの大型太陽電池基板に対して当社の加工能力が実証できる。



図12 大型デモ装置

薄膜型太陽電池の直列接続構造形成に用いるレーザー加工は、電池性能に影響を及ぼす重要な加工技術である。当社にはレーザー加工技術に対する30年以上の研究・開発の歴史がある。培ってきたテクノロジーとノウハウを活用し、薄膜型太陽電池製造用レーザー加工装置を開発した。大型太陽電池基板に対して、高速で高精度なパターン形成が可能となる当社装置は、以下の特長を有している。

- 1) 大きいプロセスウィンド（ワーキングディスタンス変化量±3mmに対する加工幅変化10%以下）により、量産時の歩留りを向上させることが可能
- 2) 光学系最適化によるエネルギーロスを低減
- 3) 高メンテナンス性と省フットプリント

### 参考文献

- (1) PV News, 2011, 30 (5)
- (2) 小長井：薄膜シリコン太陽電池の高効率化技術、応用物理, 2010, 79 (5), 393-403.
- (3) 財団法人 機械システム振興協会作成：産業用次世代レーザー応用・開発に関する調査研究報告書, 2009, 20-R-7, 28-32.
- (4) 川本ほか：積層型薄膜シリコン太陽電池におけるレーザーパターンニング, レーザ加工学会誌, 2008, 15 (2), 85-89.
- (5) 福田ほか：機能性薄膜用レーザーパターンニング装置, 日立造船技報, 2007, 68 (1), 30-33.

#### 【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部  
技術研究所 精密技術グループ  
福田直晃  
Tel: 06-6551-9312 Fax: 06-6551-9849  
e-mail: fukuda\_n@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation  
Business & Product Development  
Headquarters  
Technical Research Institute  
Precision Technology Group  
Naoaki Fukuda  
Tel: +81-6-6551-9312 Fax: +81-6-6551-9849  
e-mail: fukuda\_n@hitachizosen.co.jp



福田直晃



国塩和良



中山茂昭



藤井義和



井上典洋



坂井一郎