

薄膜系太陽電池基板レーザ加工技術の開発

Development of Laser Processing System for Thin Film Photovoltaic Substrate



中山 茂 昭 Shigeaki Nakayama ①
 山下 拓 人 Takuto Yamashita ②
 山田 紘 義 Hiroki Yamada ①
 細見 和 裕 Kazuhiro Hosomi ①
 中村 拓 郎 Takuro Nakamura ②

あ ら ま し

当社は薄膜シリコン太陽電池やCIGS太陽電池に代表されるガラス基板タイプの薄膜系太陽電池向けレーザ加工装置の商品開発に成功し、2005年以降、多くの太陽電池製造メーカーへの装置導入実績を持つ。近年は太陽電池市場の拡大と競争の激化により製造装置の更なるコストダウンが要求されている。そのため、ガルバノスキャナ光学系による新しいレーザ加工技術を開発し、従来装置と同じ処理能力に対する装置コストの低減を実現した。また、エッジリージョン加工技術、ガラス穴あけ加工技術など新しい製造プロセスへの応用展開を実現した。更には、今後新しい市場を形成するとされているフレキシブル基板タイプの次世代型太陽電池へのレーザ加工技術も確立した。

Abstract

We succeeded in developing a laser processing system for thin film photovoltaic glass substrate, as is represented by thin film silicon and CIGS, and have sold it to many photovoltaic manufactures since 2005. In recent years, however, with the expansion of the photovoltaic market and increased competition, production machines require further cost reduction. To this end, we have developed a new laser processing technology with galvanometer scanner optics, and achieved the same processing capacity as the conventional technology but at reduced cost. We expanded the applications of this new manufacturing process technology to fields such as edge deletion and glass drilling, and also established a laser processing system for next-generation photovoltaic flexible substrate, which is expected to form a new market in the future.

1. 緒 言

地球温暖化の原因とされるCO₂排出量の低減、石油や天然ガスなどの枯渇性燃料が持つ有限性への対策、環境汚染への対策など、環境問題に対する意識が高まりクリーンで枯渇することのない再生可能エネルギーに注目が集まっている。1990年にドイツで制定されたフィードイン・タリフ (FIT、エネルギーの固定価格買取) 制度は電力総需要に対する再生可能エネルギーのシェアを増やすことに成功した。その結果、現在では再生可能エネルギーの普及政策として最も一般的な手法とされ、欧州を中心に多くの国と地域で採用されることとなった。ま

た、2008年にアメリカ合衆国オバマ政権が掲げたグリーン・ニューディール政策の影響を受け、再生可能エネルギーは更に注目されることになった。これら世界的な動きにより、再生可能エネルギーの一つである太陽電池の導入量は飛躍的に伸びている。

一方、国内では、2011年3月11日に発生した東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故後、原子力発電に対する議論が続けられ、再生可能エネルギーへの期待も高まることとなった。また、2012年7月1日には日本でもフィードイン・タリフ「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」が施行され、メガソーラー (大規模太陽光発電施設) の建設が活発化している。

太陽電池の世界市場は表1に示す通り、モジュール出荷ベースで2011年に33.0GW、約40兆円、2012年は40.1GW、約30兆円を見込んでいる。長期的には2030

① Hitz日立造船(株) 精密機械本部 開発センター 太陽電池グループ

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

年に128.6GW (2012年比321%)、45兆円 (2012年比151%) の成長が予測されている。¹⁾

表1 太陽電池の世界市場(モジュール出荷ベース) ¹⁾

	2011年	2012年見込	2030年予測	30年/12年
出力(GW)	33.0	40.1	128.6	321%
金額(億円)	40,286	30,209	45,520	151%

図1に示す通り、これまで主に日本と欧米で形成してきた太陽電池市場は近年、中国・台湾の台頭により大きくシェアを奪われ、2010年には世界の全生産量の半分以上を中国・台湾が占める状況に変化している。過剰な太陽電池製造メーカーの乱立と生産過多からモジュール価格は下落の一途をたどり、2007年と2008年に世界シェアNo.1であったドイツのQセルズ社が2011年12月に破産するなど、事業が成り立たず破綻する太陽電池製造メーカーが続出している。今後、太陽電池製造メーカーの淘汰が進むと予想されるが、併せて製造プロセスの改善等による設備費のコストダウン要求が更に厳しくなると考えられる。

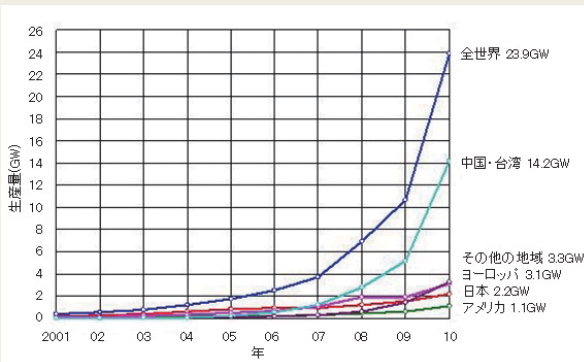


図1 世界における地域別太陽電池生産量²⁾

図2に示す通り、太陽電池の種類は大きくシリコン系、化合物系、有機系に分けられ、それぞれの種類の中で更に結晶系と薄膜系に分けられる。2012年の段階で、最も多く生産されているのは第一世代の太陽電池と呼ばれている結晶シリコン太陽電池であり、多結晶と単結晶を合わせると全体の70%以上のシェアを占める。また、第二世代の太陽電池と呼ばれている、薄膜系シリコン太陽電池は約8.1%、同じくCIGS太陽電池は約4.1%のシェアを占めている。³⁾ 次世代の太陽電池と呼ばれている有機系太陽電池はほとんど市場に出ておらず、まだ黎明期にあると考えられる。

太陽電池の種類の中でも、薄膜系太陽電池にはレーザ加工技術が必要とする製造プロセスが多く存在する。そのため、当社は薄膜シリコン太陽電池やCIGS太陽電池に代表される薄膜系太陽電池基板向けのレーザ加工装置の開発を行い、2005年以降、多くの太陽電池製造メーカーに対しレーザ加工装置の導入実績を持っている。また、周辺装置を含め、当社の得意分野であるトータルシステムエンジニアリングも行っている。これまで導入されたレーザ加工装置は、プロセスの最適領域(プロセス

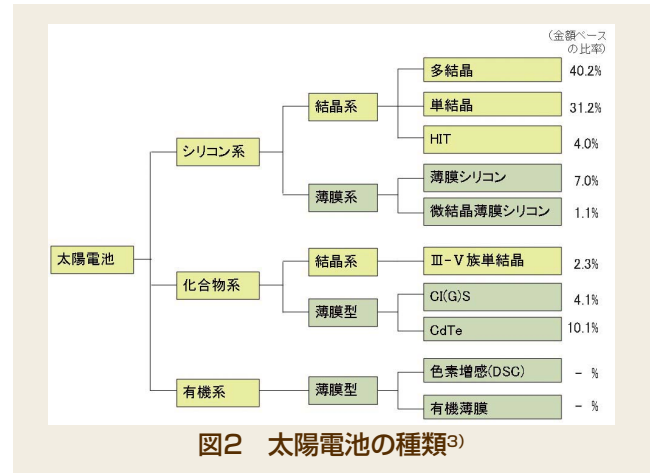


図2 太陽電池の種類³⁾

ウインド)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り、量産設備に対する歩留りの向上と製造エネルギーの低減を実現している。⁴⁾

ここでは、現在、必要となっている設備費のコスト低減を実現するために、ガルバノスキャナ光学系を用いた新しいレーザ加工技術の開発について述べる。また、エッジデリレーション加工技術、ガラス穴あけ加工技術など新しい製造プロセスへの応用展開についても述べる。更には、今後新しい市場を形成すると言われているフレキシブル基板タイプの次世代型太陽電池へのレーザ加工技術も紹介する。

2. レーザパターニング低コスト化技術の開発

2.1 パターニングプロセスの概要

薄膜系太陽電池は図3に示す通り、ガラスなどの支持基板に光電極(透明導電膜)、発電層、対極(金属膜)を積層した構造であり、各層の厚みは数 μm の非常に薄い膜である。この三層の膜をそれぞれ分断するようにパターニングし直列接続の短冊状のセルを構築する。一般的には、支持基板のサイズは1~1.5 m^2 程度、各セルの直列接続数に相当するパターニング本数は100~200本程度である。このパターニングにレーザ加工技術が用いられる。薄膜シリコン太陽電池に関しては、透明導電膜、発電層、金属膜のパターニングは全てレーザによるプロセスが採用

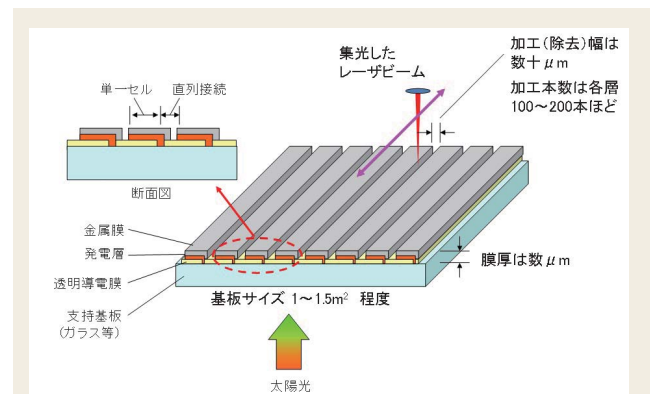


図3 薄膜シリコン太陽電池の構造

されている。CIGS太陽電池に関しては金属膜のパターニングにレーザーによるプロセスが採用されている。当社はここに挙げた全てのパターニングプロセスに量産装置を導入した実績を持つ。

2.2 従来方式のレーザーパターニング

図4に示す通り、レーザーを用いたパターニングプロセスは、(1)レーザービームを照射した状態でテーブルにセットした基板を走査してライン加工、(2)レーザービームをピッチ送りして次の加工ポイントへ移動、この二つの動作を繰り返して総加工本数分の処理を行う。ここでプロセス処理時間に大きく関連するのは、

- ①総加工本数/レーザービーム数 (= 走査回数)
- ②基板の走査速度 (= 走査時間)

である。

当社の現有レーザーパターニング装置において、①のレーザービーム数は最大で24ビームまで搭載することが可能である。これは1回のテーブル走査で24本の加工ラインを一度にパターニングできることを意味する。②の基板の走査速度は最大1,200mm/sである。ここで、加工ラインの長さ(基板長さ)を1,400mm、ライン本数を144本と仮定すると、基板搬送関連(基板の搬入、搬出、テーブルへの固定、解除など)の時間を含めたタクトタイムは、25s以下となる。⁵⁾

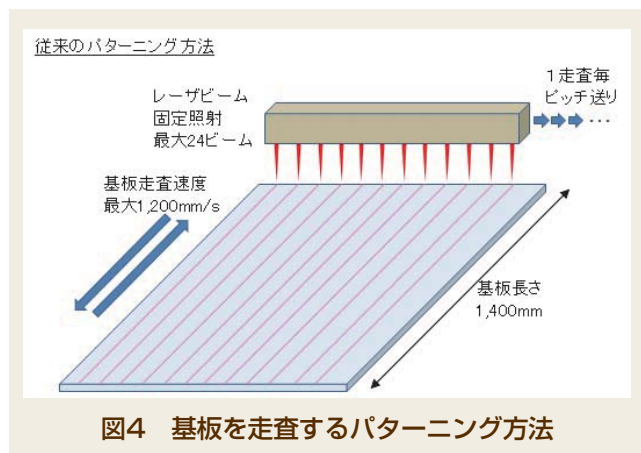


図4 基板を走査するパターニング方法

2.3 ガルバノスキャナ光学系の概要

現有レーザーパターニング装置と同じ処理能力で装置コストを低減する目的で、新しいレーザー加工技術の開発を行った。ここでは、従来の基板自体を走査する方法に変わり光学系にガルバノスキャナを用いてレーザービームを高速に走査することで処理時間の短縮を図る。

ガルバノスキャナとは図5に示す通り、直交する2つのミラー(X軸、Y軸)を高精度位置検出ができるエンコーダ付きモータによって回転させ、ミラーの回転角によってレーザービームを走査し、スキャンレンズを通して二次元の加工エリア内へ照射するものである。

レーザービームを固定し、1m²を超える大型基板を位置ずれや揺動が起らないように剛性体のテーブルに強固にセットしたまま高速で走査させて加工する従来の方法に比べて、数十mm角程度の小さなミラーを回転させて走査するガルバノスキャナは、より高速加工ができる方法

と考えられる。

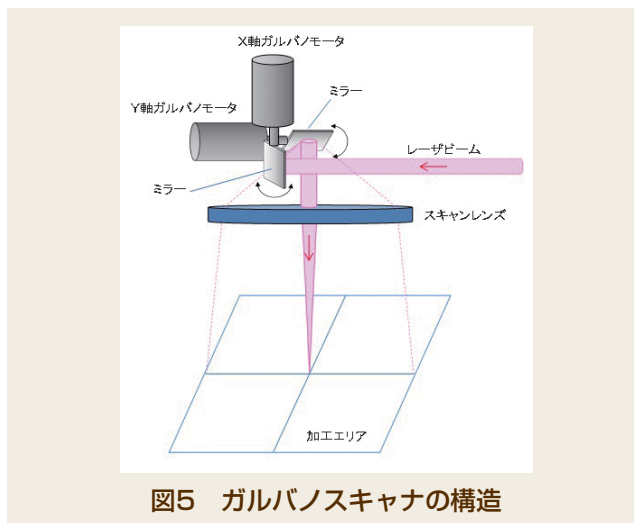


図5 ガルバノスキャナの構造

2.4 ガルバノスキャナ方式のレーザーパターニング

ガルバノスキャナによるパターニング方法は図6に示す通り、各ガルバノスキャナで最大5,000mm/sの速度でレーザービームを走査し、加工と同時にテーブルにセットした基板を最大100mm/sの低速で走査することで、一度に一定幅分のライン加工を行うものである。この幅の最大はガルバノスキャナの加工エリアに制限される。ここでプロセス処理時間に大きく関連するのは、

- ①総加工エリア/(レーザービーム数×1回の加工幅) (= 走査回数)
- ②基板の走査速度 (= 走査時間)

である。

今回開発した新しいガルバノスキャナ方式パターニング装置において、①のレーザービーム数を12本、1回の加工幅を100mm、②の基板の走査速度を100mm/sと仮定した場合に、基板搬送関連の時間を含めたタクトタイムは、25s以下となり、当社の現有レーザーパターニング装置の最大処理能力と同等になる。

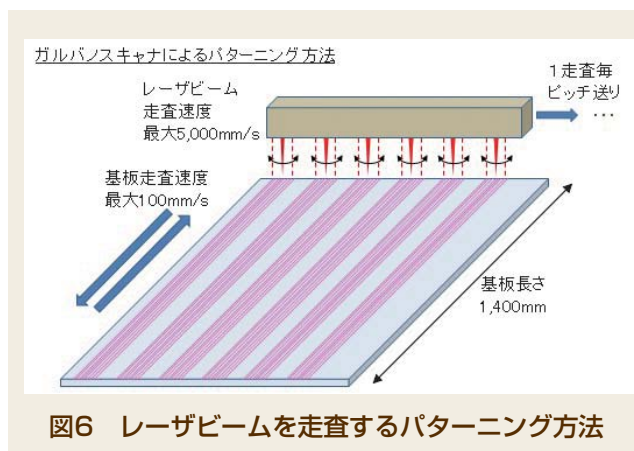


図6 レーザビームを走査するパターニング方法

2.5 基板位置座標制御の開発

ガルバノスキャナ方式では、加工エリア毎のパターニングを繰り返すため、ライン1本の中で、複数の継ぎ目が存在する。繋ぎ目が一カ所でも離れてしまうと、そのラインは短絡し太陽電池モジュール製品の発電効率の低下、あるいは口

ス品になることもあり得る。そのため、加工位置精度を上げ、繋ぎ目が離れないようにする必要がある。

当社は図7に示す通り、レーザビームの走査に係わるガルバノスキャナのビーム照射位置座標 (X_s , Y_s)、基板セットテーブル位置座標 (X_T) から実際の基板位置座標 (X , Y) を算出し、これを基準にレーザビームの出射 ON/OFF 制御を行うことで、確実にねらい位置にレーザビームが来るように制御し、加工位置精度の向上を図った。尚、これらを制御するコントローラは自社で開発した電子ボードである。

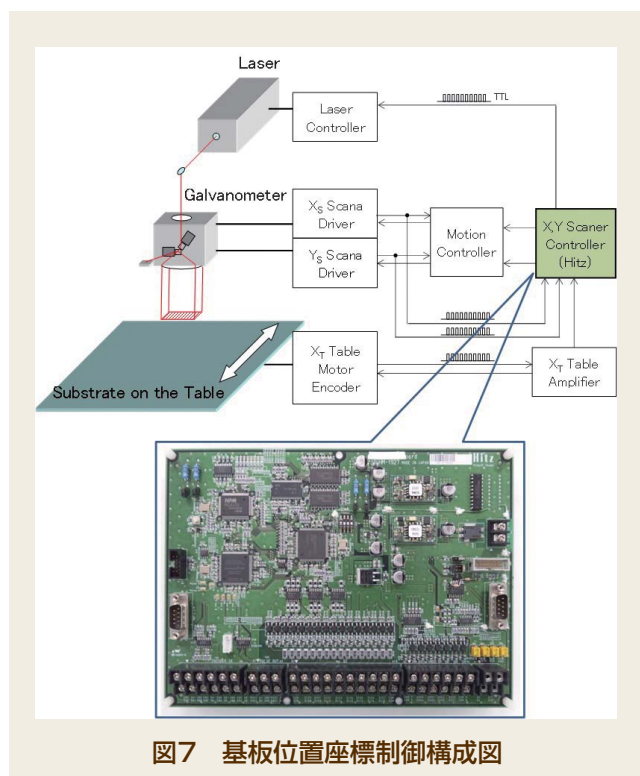


図7 基板位置座標制御構成図

2.6 ガルバノスキャナ方式の装置コスト 当社の現有レーザパターニング装置と今回のガルバノスキャナ方式パターニング装置を、同等の処理能力の条件下で比較すると、ガルバノスキャナ光学系が追加された分はコストが増加するが、レーザビーム数は半分に削減可能である。また、基板セットテーブルは低速駆動で済むため、駆動系の機械構成や剛性面で大幅なコスト削減が可能である。全体として従来装置とのコスト比が70%に削減される加工技術であることがわかった。

3. エッジデリレーション加工への応用展開

3.1 エッジデリレーションの概要 薄膜系太陽電池において、三層の膜のパターニング (P1 ~ P3パターニング)、層間絶縁処理 (エッジアイソレーション) を行った後、図8に示す通り、その外側にあたる基板の外周 (4辺の縁部) 10mm前後の全層を除去し、電気的に絶縁を行う製造プロセスをエッジデリレーションと呼ぶ。従来、エッジデリレーションは機械的にサンドブラスト等で膜を削り取って除去してきたが、(1)マスキング工程が不要、(2)洗

浄工程が不要、(3)除去面の品質が良い、(4)消耗品が少なくメンテナンスが良い、などの理由から、近年はレーザによる非接触完全ドライ加工が多く採用されている。

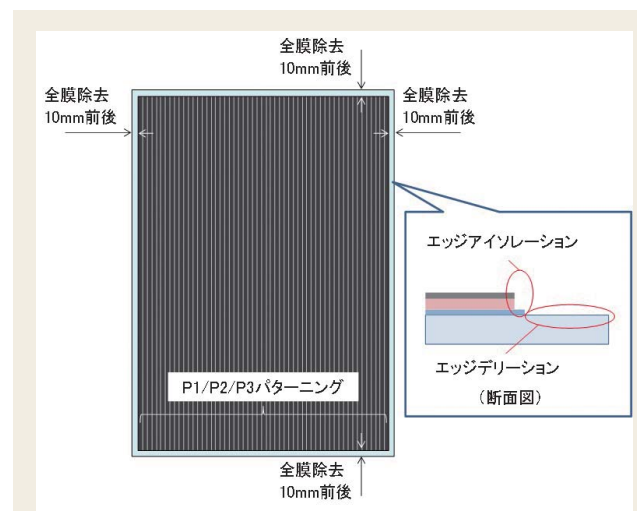


図8 エッジデリレーション説明図

3.2 エッジデリレーション加工技術 エッジデリレーションは膜の除去面積が広いので、レーザビームの高速走査で処理時間を短くする必要があります。またレーザビームは高出力のレーザ源を用いて、なるべく1ショットで広いエリアを除去できる方が効率的であるが、これに拘らず膜残りを極力少なくし安定した絶縁抵抗値 ($2G\Omega$ @1000V以上) を確保するために、最適なレーザ源と光学系を構築することが重要である。

図9に薄膜シリコン太陽電池におけるエッジデリレーション加工例を示す。ここでは四角にビーム成形した1ショットの加工エリアが約 0.8mm^2 のレーザビームをガルバノスキャナ光学系にて高速走査しながら、加工と同時にガルバノスキャナを搭載した光学ヘッド自体を最大 300mm/s の速度で基板の外周に沿って動かすことで、デリレーション幅である10mm前後の幅を1回の移動で全膜除去加工するものである。



図9 エッジデリレーション加工例

これは前章のガルバノスキャナ方式パターニング装置の技術を応用して他用途に展開した一例である。また、薄膜系太陽電池に限らず、様々な分野の機能性薄膜を成膜した基板の膜除去に応用可能な加工技術であると考え

られる。

4. ガラス穴あけ加工への応用展開

4.1 ガラス穴あけの概要 レーザビームを加工エリア内で自由に高速走査できるガルバノスキャナの特徴から、ガラス基板の穴あけ加工技術へ応用展開する。**図10**に示す通り、レーザビームをガルバノスキャナで巡回させながら徐々に集光点をガラスの表面から内面、裏面へと移動させ貫通穴を開ける。穴径は最大φ20mmまで、ガラスの厚みは最大4mmまで対応できる。

レーザによる穴あけは、従来は機械的に専用ドリル等で加工してきたが、(1)大口径の穴あけも可能、(2)冷却水が不要、(3)クラックの発生が少なく強度が高い、(4)消耗品が少なくメンテ性が良い、などの理由から、近年はレーザによる非接触完全ドライ加工が注目されている。

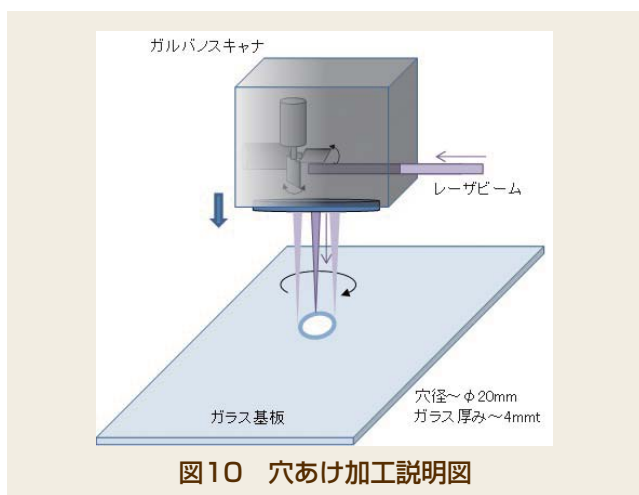


図10 穴あけ加工説明図

4.2 ガラス穴あけ加工技術 一般的なソーダ石灰ガラスや無アルカリガラスの場合、穴径φ4mm、ガラスの厚み1.8mmにおいて、15s以内で貫通穴を開けることができる。穴あけ加工例を**図11**に示す。

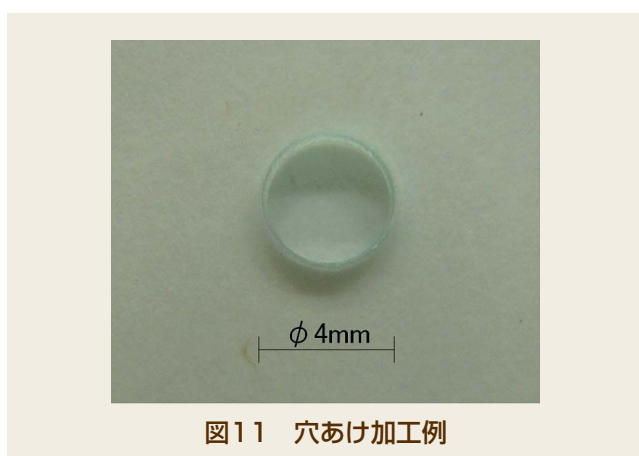


図11 穴あけ加工例

但し、強化ガラスや石英ガラスのような加工が難しい種類のガラスもあり、加工品質や加工時間など要求仕様を満足する最適なレーザ源と光学系を、その都度確認し構築する必要がある。

この技術により薄膜系太陽電池基板の配線用穴あけ

加工や、ディスプレイ分野ガラス基板の穴あけ加工などへの応用展開も期待できる。

5. フィルム基板太陽電池へのレーザ加工技術

5.1 フィルム基板太陽電池の概要 薄くて軽い、割れない、曲げられるなどの特徴から、ガラス基板タイプの太陽電池では実現できないような場所や用途に使われる、フレキシブル基板タイプの太陽電池が注目されている。構造上、結晶系ではなく薄膜系太陽電池がフレキシブル基板に適用でき、フィルムや金属箔を使った薄膜シリコン太陽電池やCIGS太陽電池を製造するメーカーが増えてきている。また、次世代型太陽電池と言われる有機薄膜太陽電池や色素増感太陽電池もフレキシブル基板タイプの開発が活発に行われている。

フレキシブル基板タイプの太陽電池はロール・ツー・ロール方式による連続大量生産ができることから製造コストの低減が見込まれる。また製造設備自体もガラス基板の枚葉式に比べると安価に構築できるため初期投資も少なく済む利点がある。そのためロール・ツー・ロール方式で製造できることを目指した、高温焼成や高真空成膜を排除した常温常圧による製造プロセス開発も行われている。

5.2 フィルム基板色素増感太陽電池の開発

当社はフィルム基板を用いた色素増感太陽電池の開発を行っている。色素増感太陽電池は意匠性に優れ、カラフルでシースルー、室内光などの低照度で効率よく発電できるなどの特徴を持っており、ロール・ツー・ロール方式での製造を可能とする常温常圧による製造プロセスの開発を行っているところである。また高効率化、低コスト化についての基礎的な研究開発も併せて行っている。⁶⁾**図12**に当社が開発している色素増感太陽電池モジュールの写真を示す。

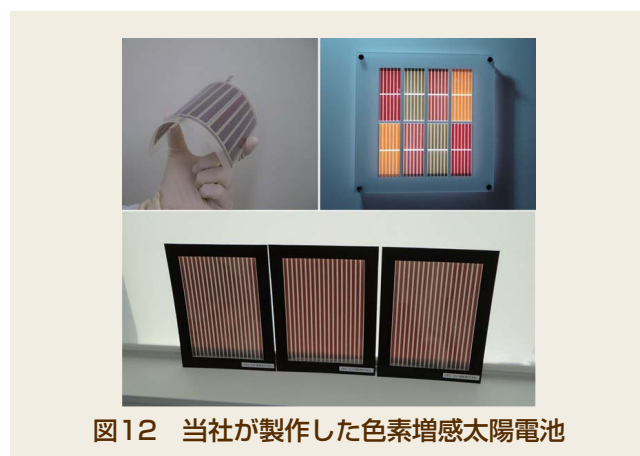


図12 当社が製作した色素増感太陽電池

5.3 フィルム基板へのレーザ加工技術 色素増感太陽電池は湿式太陽電池のため、他の薄膜系太陽電池とセル構造に違いがあるが、セル間の直列接続あるいは並列接続の回路形成にレーザパターニングが用いられる。当社の色素増感太陽電池は表裏両面の支持基板

に透明なフィルム材料を使用し透明導電膜の電極を成膜している。この透明導電膜を下地のフィルムにダメージを与えないようにレーザで分断して回路を形成する。

現在は太陽電池モジュールの製造をバッチ処理しているため、フィルム基板のサイズは最大300×300mmである。このサイズのフィルム基板をセットしたテーブルやガルバノスキャナを搭載した光学ヘッド自体を動かすことなく、レーザビームだけを走査して全エリアを加工することができる。処理時間はセルの直並列接続数にも依るが、最大サイズの太陽電池モジュールでも10s以下で処理可能である。

尚、将来、ロール・ツー・ロール方式の製造を行うにあたり、フィルムを連続的に送り出しながらレーザビームの位置座標をフィルム基板の座標と合せ込む必要がある。これには更に高度な位置制御を付加したガルバノスキャナ方式パターンニング装置の技術開発が必要と考える。

6. 結 言

当社はガラス基板タイプの薄膜系太陽電池向けレーザ加工装置の低コスト化を目的とした技術開発を行い、従来装置とのコスト比70%以下に低減できるガルバノスキャナ光学系を用いた新しい加工技術を確立した。

この技術を応用したレーザによるエッジデリレーション加工技術は、最大300mm/sで基板の外周(4辺の縁部)10mm前後の全層を除去し電気的絶縁を取ることができ。今後、機械的なサンドブラスト等の除去方法に代わり主流となっていくと考えられる。

また、レーザによるガラス穴あけ加工技術では、穴径φ4mm、ガラスの厚み1.8mmにおいて、15s以内で貫通穴を開けることができる。特に高品質な加工やウェットを嫌うプロセスにおいて機械方式に置き換わっていくと考えられる。

当社で開発を進めているフィルム基板タイプの色素増感太陽電池では、300×300mmサイズのフィルム基板上透明導電膜をガルバノスキャナのレーザビーム走査だけで加工することができる。このようなフレキシブルな太陽電池へのレーザプロセスの応用など、新しい分野・市場での適用を視野に入れた技術開発を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 株式会社経済編, 2012年版 太陽電池関連技術・市場の現状と将来展望 上巻, 2012, 1-5.
- 2) 株式会社資源総合システム編, PV News 2009年4月号, 2010年5月号及び2011年5月号を基に編集, 2011.
- 3) 株式会社総合プランニング編, 2011最新太陽電池関連市場の現状と将来性, 2011, 2.
- 4) 福田直見, 国塩和良, 中山茂昭ほか: 薄膜型太陽電池製造用レーザ加工装置の開発, 日立造船技報, 2011, 72, (1), 70-75.
- 5) 中山茂昭: 第5回レーザ加工技術展「Laser-5太陽電池製造に期待されるレーザ加工技術」講演資料, 2012.
- 6) 中山茂昭: 色素増感太陽電池(DSC)の紹介, 日立造船技報, 2012, 73, 54-55.

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 精密機械本部
開発センター 太陽電池グループ
中山 茂昭
Tel : 06-6551-9380 Fax : 06-6551-9849
e-mail : nakayama_shi@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Precision Machinery Headquarters
Solar Cell Development Group
Business and Product Development Center
Shigeaki Nakayama
Tel : +81-6-6551-9380 Fax : +81-6-6551-9849
e-mail : nakayama_shi@hitachizosen.co.jp



中山 茂昭



山下 拓人



山田 紘義



細見 和裕



中村 拓郎