

単結晶セルが太陽光発電産業で優位、しかし技術ロードマップは不確か

フィンレイ・コルビル

太陽光発電パネルは、ウエハやセルが大型フォーマットに移行しているため、電力が2倍になっている。

太陽光発電産業は、継続して力強い2ケタ成長で特徴付けられる分野になっており、年間の導入水準は100～200ギガワット（GW）の範囲である。今日、最終市場需要は、間違いなく世界的な出来事であり、政府の助成なしで実行可能になっている。上流の価値連鎖では、インゴット、ウエハ、電池（セル）及びモジュールを含め、コンポーネントの製造は、中国企業が優位に立っており、一握りの西側企業が競争力を維持しようと努めている。

しかし、中国優位のこの新局面は、もはや低コスト／低オーバーヘッド製造工場内の西側起源のレガシーであるプロセスフロー拡大に基づくものではない。現状、中心となっているのは、メガサイズ（10～20GW）製造工場、国内工作機械利用拡大、効率、スループット及びコスト削減取組を促進するための頻繁な変更の実施である。

本稿では、こうした変化が、ソーラーモジュールの定格電力で、2015年主流の250～260Wが、500Wを超える新しい変種レベルにどのように移ったかを説明する。議論は、小グループの中国大手資本が優位を占める領域にスポットを当てている。これら中国大手は、市場状況とはほぼ独立して15～20%の粗利を維持することができる。おのおのが、業界全体にさまざまな技術ロードマップバージョンを押しつけようとしている。

太陽光発電産業がいかにして片時も目を離せない技術変化実行の現段階に達したかの理解を説明し、今後展開される可能性のあるものに触れる。

年間導入100GW超時代の成長ドライバ

年間の太陽光発電容量導入は、過去数十年、4年ごとに2倍に拡大しており、2019年に125GWに達した（図1）。当初、屋根上設置（住宅と商用ビル）からの貢献が比較的強力だった。2020年のソーラーは、すべて大規模ソーラーファームであり、一般的には100MWから1GWの範囲であり、地方の大規模エリアに広がっている。地上設置需要は、公共事業部門によって刺激されている。また、長期的な環境上の必要性の一環として政府、あるいは公共事業プロバイダーなどによって義務付けられること

もある。

太陽光発電は現在、ほとんどすべての他のエネルギータイプよりも迅速かつ安価に導入が可能になっており、外部投資にとって重要な長期需要の牽引力となっている。株主は、上流メーカーの収益、長期のリスクのない収益ストリームに戻っている。これは、オフテイクへのエネルギー販売に基づいている。

中国、米国、インド、日本は引き続き、毎年、新規追加容量レベルが大きい。2020年だけで、中国は40GW以上を追加する見込みである。ヨーロッパは、合計で20GWを提案しており、南欧諸国は現在、補助金なしで運用している。オーストラリアは、現在、最重要点となっている、大規模公共事業プロジェクトからの新規ギガワット規模の追加があり、これは過去数年の住宅用システムの強力な採用への追加となる。しかし、最強の成長は、東南アジア、ラテンアメリカ、中東諸国の特定の国々から出ている（図2）。

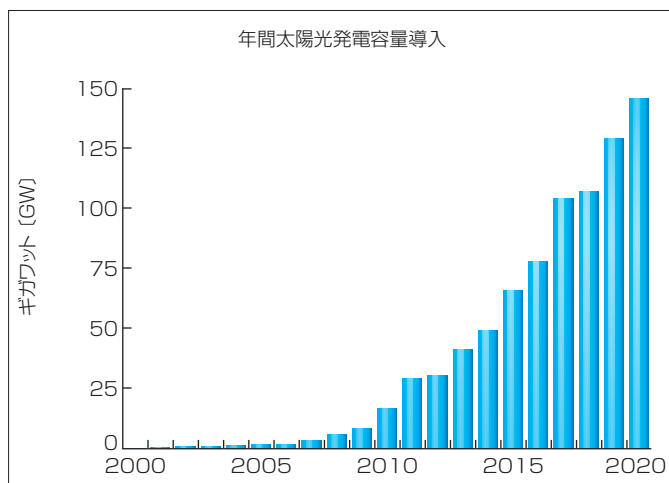


図1 太陽光発電産業は、今では100GWを超える時代に移行しており、新規の容量140～150GWが2020年中に導入される見込みである。

pタイプ多結晶ベース太陽電池の増減興亡

太陽光発電産業が、2010～2014年の間に、年間10GWから50GW市場に成長した際、主流技術はpタイプ鑄造シリコンインゴット（ブリック）から6インチ正方形太陽電池をスライスした多結晶シリコン（mc-Si）ウエハの利用をベースにしていた。2016年まで、この太陽電池を利用したモジュールのアセンブリは、年間導入太陽光発電容量の70～75%程度を占めた（図3）。

この期間に、pタイプmc-Si太陽電池の効率は、一般に17.5～18%の範囲だった。モジュールにパッケージすると（通常60セルを利用）、モジュールパワーは255～260Wと評価された。発電所のソーラーサイトと大型商業屋上導入は、この主流のモジュールタイプがターゲットとする重要市場だった。

残りの25～30%のモジュール製造は、もっと高効率のシリコンベース太陽電池（nタイプとpタイプ単結晶シリコン）と世界的供給の5%程度を占める薄膜変種で構成された（図4）。

pタイプモノ太陽電池製造の利点は、この時点でも明白であった。電池の効率19%から19.5%は、モジュールパワー270Wから280Wに変換された。さらに、先進的セルコンセプト、1980年代早期にさかのぼる研究コミュニティでは既知のコンセプトの多くは、もっと高品質のモノシリコンウエハ基板利用に依存していた。

とはいえ、主流技術としてモノに変更する望みには制約があった。これは、mc-Siウエハを作る企業が達成したコスト構造によるものである。つまり、mc-Siウエハは、半導体産業から採用した従来のチョクラスキー（CZ）法を利用してシリコンインゴット（ロッド）を引き上げるよりも大幅に低コスト

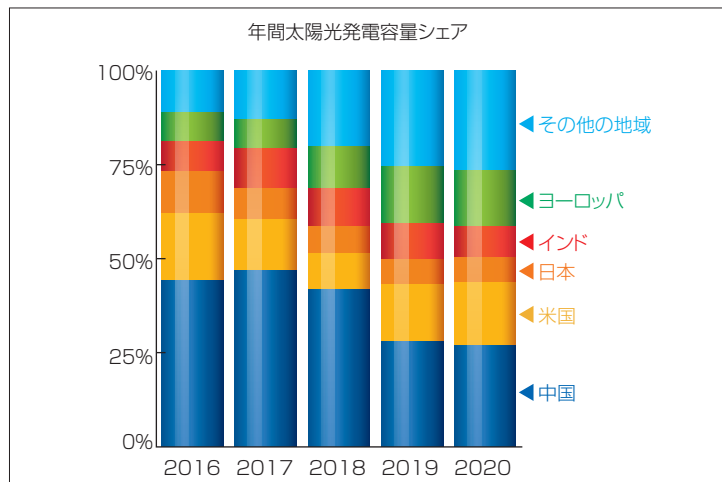


図2 中国と米国における新規太陽光発電の増加は、過去5年で増えた新規容量の約半分を占めた。

トになった。

さらに、pタイプモノとpタイプマルチモジュール間の出力差は、ごくわずか、5～7%程度だった。これは、当時、モノへの大規模変更に値しなかった。

2017から2019年の間、次に起こったことが、太陽電池とモジュール製造の展望を完全に変えた。

ロンジソーラー社、両面性500Wパネルの登場

2017年から、太陽光発電産業は、インゴットの引き上げから、ウエハスライス、セル製造、最終のモジュールアセンブリまで、すべての上流価値連鎖で技術変化の大洪水を目の当たりに

してきた。ほとんど息つくことなく、この3年から4年の期間は、ほぼ四半期ごとに製造環境の変化があり、あるにしてもどんな最終目標が探求されているかは、実際、誰にもわからない。

これを最もよく説明するために、この変動期に影響を及ぼしているさまざまな原動力に注目することが必要である。また、今日製造されている定格出力が優に500Wを上回るモジュールを何が引き起こしたかに目を向ける必要がある。

変化の重要な原動力をもたらしたのは、大手中国企業ロンジソーラー社（LONGi Solar）である。同社は、モノインゴット引き上げをコモディティ化された作業にすることでモノウエハ製

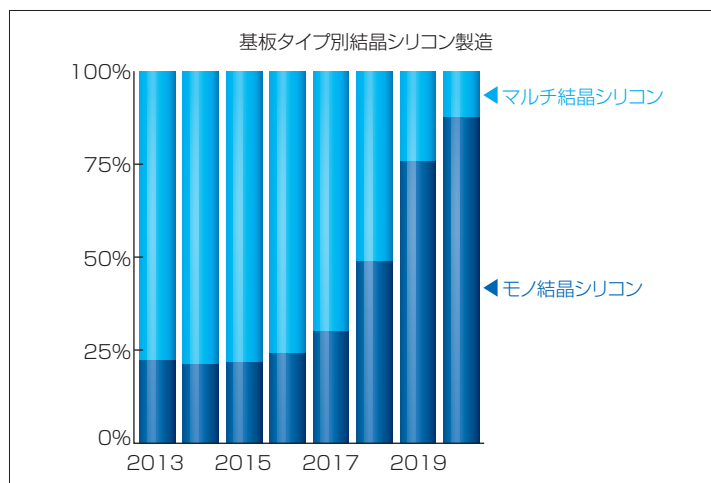


図3 結晶シリコン（c-Si）太陽光発電セルの製造は、過去数年で、マルチc-Siからモノc-Siに急速に移行した。

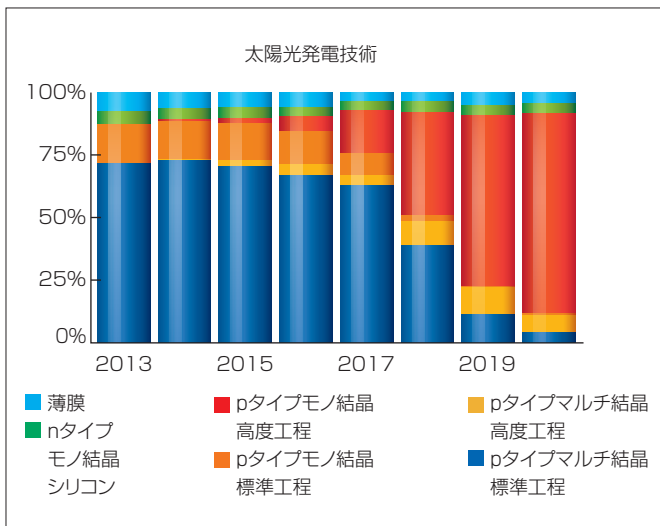


図4 結晶シリコンを使う太陽電池が太陽光発電産業で優位を占めている。現在、先進的な変種(特にPERC)は、裏面スクリーンメッキアルミニウムコンタクトに基づいたレガシー標準アーキテクチャに対して優勢である。

Rear Contact)と名付けられた。今日、そのアクリニウムが、世界で販売されるほぼすべてのシリコンベースソーラーモジュールに見られる。

PERCコンセプトの実装は、モノベースウエハにとって最適であることが分かっており、モノセル効率は、マルチセルタイプに対して、すぐに平均15%程度上回った。しかし、新しいPERC工程でモノベースセルを作ることは、追加の変更も可能にし、最終的に裏面が光吸収にも使えるようになった(両面性)。

業界は急速に、pタイプモノウエハ利用とPERCセル製造に移行した。これは既存のセル容量をアップグレードし、モノを中国や東南アジアで稼働するすべての新規製造能力の基盤にすることによるものである。この急増により、ソーラー製造でレーザーツールが初めて大規模に利用されるようになったが、これは裏面に堆積したパッシベーションスタックにコンタクト開口部を作る必要があったからである。最初の数年、ヨーロッパのレーザーインテグレータが強力な受注を獲得した。しかし、2019年までに、特にブカン・ディーアール・レーザー・テクノロジー社(Wuhan DR Laser Technology)といった中国のレーザー加工機サプライヤーが、レーザー・イン・PERC市場の90%以上を獲得していた。

2018年までに、pモノベースPERCセルは、年間ソーラー製造の半分程度を占めた。2020年、この数字は、75~80%程度に近づく見込みである。

とはいえ、pタイプモノウエハに移行し、セル製造にPERC工程を適用しても、モジュール出力は今日、多くが達成している500W超に達しない。技術変化ジグソーのこの最終部分は、主に過去12~18カ月で、モジュールユーザ

造/供給環境を完全に変えた。ロンジソーラー社は、2013年から2018年間に中国で20GWのモノインゴット/ウエハ製造能力を増やし、20~30%の売上総利益を報告しながら、マルチウエハ価格に釣り合うコスト構造で営業した。ロンジソーラー社は、まもなく別の中国企業、ジョンホワン・セミコンダクター社(Zhonghuan Semiconductor)と合併する。同社は、同様のモノインゴット/ウエハ拡張計画を素早く定めた。2017年までに、セルメーカーは、過剰な材料コストなしで、モノウエハとマルチウエハから、最終的に選

択できるようになった。

ロンジソーラー社が中国でマルチギガワットモノインゴット/ウエハ工場を建設していたほぼ同時期に、セルメーカーは、裏面に成長させた透明誘電体材料を利用してアルミニウムのスクリーンプリンティングを置き換えるという重要な工程変更をスタートさせていた。その実行は約30年遅れであった。このアーキテクチャは、オーストラリアのニューサウスウェールズ州の研究者により1980年代半ばに、パッシベートされたエミッターリアコンタクト(PERC: Passivated Emitter and

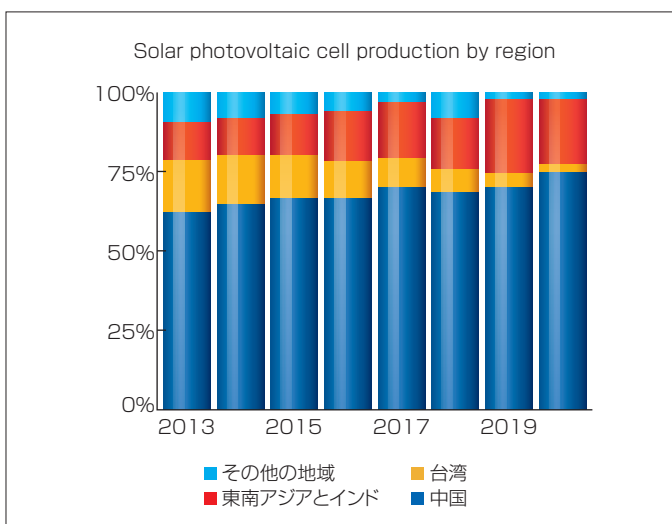


図5 中国は、継続して世界のソーラーセル製造で優位に立っている。東南アジアにおける大部分のセル製造能力も中国メーカー所有である。

一に急速に押し付けられたものである。

250Wから300Wパネルの500W超へのシフトは、2つの要素によるものである。ウエハ(セル)サイズの増加とアセンブリされたモジュールでこれらセルの数を増やして使用することである。それは、おそらく、ソーラー業界が見てきた最も微妙な技術ロードマップノードとは言えない。しかし、それは、これまで見られなかったレベルの不確定性を作り出した。

その混乱の理由は、主流の10~20のモジュールサプライヤーで採用されているウエハ寸法やモジュールサイズに標準がないように見えるところにある。現在より大きなウエハフォーマット範囲は、特に166mmと210mmが推進されている。同様に、モジュール当たりのセル数も可変であり、モジュールサイズの多様性が実現する。これは、400Wから600Wのどこでもモジュールを利用する発電所規模のプロジェクトになる。単面または両面光吸収は言うまでもない。

長年、業界は製造技術の変化を熱心に求めていた。現在、これが次々と起こりつつあり、業界の統一がないままで、推進されている。最終結果は、仮にあるとしても、どんな技術ロードマップが追求されているか、次の変化はどこから来るかは、全くの混乱である。

nタイプセルは今なおニッチレベル指定払拭を探索

業界の多くがデフォルトで起こると長年想定していた究極的な技術変革は、pタイプウエハからnタイプへの移行である。nタイプ基板は、米さんパワー社(SunPower)や三洋(現パナソニック)などの先発者が示した優れた特性を持っていて、効率は、クラス最高のpタイプバリエーションを上回る。

また、ソーラーが動作する通常環境に等しい高温で動作する時、pタイプモジュールよりも、nタイプモジュールは、損傷が少ない。

しかし、過去4~5年で、サンパワー社もパナソニックもギガワットを10GW超へ容量拡張できなかった。これは、世界的な上位10サプライヤーにとどまる上で重要であった。実際、サンパワー社は、先頃、上流事業を新規上場会社であるシンガポールのマクシオンソーラー社(Maxeon Solar)に分割した。その成長計画は、中国製のpタイプセルの利用に基づいている。

中国の大手モジュールサプライヤーのほとんどが、今日、n型、セルタイプのパイロットラインや初期の量産を確立している。これは主に多様化された動きとして、あるいは製造コストに何らかの大きなブレイクスルーが、ピアグループの競合他社によって達成された場合の防衛としてである。現在、力強い投資を見込んでいる2つのnタイプオプションは、ヘテロ接合ベースセルタイプ(パナソニックの独自技術と類似)と、不動態化エミッタ及び背面全拡散型(PERT)、あるいはトンネル酸化膜パッシベーションコンタクト(TOPCon)と言われることがよくあるより簡素化されたnタイプのクラスである。今日、PERT/TOPConバリエーションを用いて2GWレベルの容量を達成したのは数社であるが、nタイプが、業界で今までその時代を特徴付けていた、長年のニッチタグから実際に逃れるかどうかは明確ではない。

nタイプオプション(ヘテロ接合あるいはPERT/TOPCon)を超えて、タンデムあるいはマルチジャンクションセル(ペロブスカイト構造化合物利用)の話は、常にどこかで混乱状態となっている。とはいえ、ここでの活動は、確実に研究所

にあると結論づけるのが順当であろう。だが、それでも今後5~10年にわたり、監視することは重要である。

ロードマップ整理がなんらかの形を取り戻すのは2022年までは起こりそうにない

上位20モジュールサプライヤーの現在の製造活動と投資は、2020年と2021年は、さらに12~18ヶ月のpタイプモノベースモジュール製造の増加及びモジュールフォーマットの変化となりそうである。この点において、nタイプ技術採用に関して、しばらくは、いかなる大きな変化も非常に困難である。産業のセグメントは、nタイプ採用は、もしではなく、いつの問題との望みを持ち続けている。しかし、pタイプがソーラーにとって重要点であるとの意見はより実用的な声である。何らかの主要なプロセスフローの変化が必要となるまでには、さらに5年かかる。

おそらく、実用的な見方が実を結ぶなら、もっと難解なセルタイプ(タンデム/ペロブスカイト)が、採用される見込みがある。これら、より研究中心の構造が、研究室から外に出るには、もっと時間が必要であることは確かであり、業界がnタイプ優位を熱望するまでは、タイミングはその構造に有利となる。

その間、ソーラー技術は、pモノPERCがすべてであり、単一のモジュールフォーマットにどれくらい多くのシリコンがアセンブリできるかである。これは、わずか数年前にはサイエンスフィクションの基盤だったパワーレベルしきい値を破ることである。

著者紹介

フィンレイ・コルビルは、英PV-Tech & Solar Media社の調査責任者。e-mail:fcville@pv-tech.org