

# ペロブスカイト太陽電池のGW級量産に進む中国

## —タンデム型で変換効率30%突破を目指す—



MITSUI & CO.  
GLOBAL STRATEGIC  
STUDIES INSTITUTE

三井物産戦略研究所  
技術・イノベーション情報部コンシューマーイノベーション室  
趙健

### Summary

- ペロブスカイト太陽電池は有望な次世代太陽電池技術として、製造が容易であり、軽くて柔軟性を備えるほか、異なる太陽電池と組み合わせたタンデム型<sup>1</sup>では、より広い波長域の太陽光を電気に変換できるため、結晶シリコン太陽電池では達成できない高い変換効率<sup>2</sup>の実現が可能である。
- 中国はその量産に先行する。スタートアップ企業らは2023年にも百MW（千kW）規模の量産を始めており、2024年内GW（百万kW）級の大面積セルの生産体制を整備する動きも出ている。
- 結晶シリコン太陽電池において圧倒的なシェアを獲得した中国太陽電池大手らは、結晶シリコン系より高い変換効率の達成が可能なタンデム型の開発に力を入れている。

### 1. ペロブスカイト太陽電池とは

ペロブスカイト太陽電池（Perovskite Solar Cell、以降PSC）とは、桐蔭横浜大学の宮坂力教授が2009年に発明した、ペロブスカイトと呼ばれる結晶構造の材料<sup>3</sup>を用いた新しいタイプの太陽電池である。現状主流の結晶シリコン（以降c-Si）太陽電池に匹敵する高い変換効率を有するほか、塗布技術によって低コストでの製造もできるため、有望な次世代太陽光発電技術とされている。特に近年、世界中のPSC開発企業は変換効率記録を相次いで更新しており、米国マサチューセッツ工科大学（MIT）の科学技術誌MIT Technology Reviewが2024年1月に発表した「世界を変える10大技術2024」には、PSCが1番目のAIに次ぐ2番目に選出された。日本は2050年のカーボンニュートラル達成に必要な技術の研究開発・実証から実装までを長期的に支援する「グリーンイノベーション基金事業」においてPSCを対象に指定し、2030年まで発電コスト14円/kWh以下の達成に向けて研究開発を進めている。欧州、米国も官民共同の開発事業を行っている。中国では、「第十四・五カ年エネルギー領域科技创新計画」などの政策でPSC&タンデム型太陽電池の材料、製造設備、量産と産業化技術の開発を後押ししているほか、一部のスタートアップは2024年内にもGW（百

<sup>1</sup> タンデム（多接合）型太陽電池とは、異なる吸収波長の太陽電池を積層させることで、光の波長を効率的に活用することが可能な太陽電池（出所：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO））

<sup>2</sup> 照射された太陽光エネルギーのうち、何%を電力に変換できるかを変換効率という値で表す（出所：産業技術総合研究所）

<sup>3</sup> 宮坂教授が世界で最初に太陽電池に応用したのは $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ という化学式で表されるペロブスカイト結晶（出所：科学技術振興機構）

万kW) 級の生産体制を構築するなどPSCの量産に先行している。

## 2. ペロブスカイト太陽電池の特徴

PSCと主流太陽電池の特徴・比較を図表1に示す。

図表1 主流太陽電池とペロブスカイト太陽電池の主要指標比較

主要指標	結晶シリコン (c-Si)	化合物系 (CISを例として)	ペロブスカイト (PSC)
主要材料	ケイ素	銅、インジウム、ガリウム、セレン	鉛、ヨウ素
吸収波長範囲	300~1,200 nm	400~1,300 nm	300~800 nm
★ 光吸収係数 (注1)	~10 <sup>4</sup> /cm	~10 <sup>5</sup> /cm	~10 <sup>5</sup> /cm
★ 光電変換層の厚さ	50~300μm	2~4μm	1μm
最高変換効率記録	27.10%	23.60%	26.10%
★ 製造工程	3日以上	結晶シリコンの約半分	結晶シリコンの数十分の一
製造温度	1,400℃以上	400℃以上	100℃
★ 軽量性	×	△	○
★ 柔軟性	△	△	○
耐久性	○	○	×
モジュール価格 (2023年実績)	平均0.12米ドル/W	結晶シリコンをわずかに下回る程度	結晶シリコンの1/5~1/3と予想
市場シェア (2022年実績)	97.50%	数% (注2)	開発中

★：特にPSCが優れているとされる指標

注1：光が物質中を1cm進んだときに、光の強度がどれだけ小さくなるかを表すときの尺度。値が大きいくほど強い吸収となる

注2：特にテルル化カドミウム (CdTe) とCIS系を含む薄膜系の合計

出所 NEDO、産総研、国際エネルギー機関 (IEA)、ドイツ機械工業連盟 (VDMA) など各種公開情報から三井物産戦略研究所作成

ペロブスカイトの光吸収係数はc-Siより一桁高く、光電変換を行うペロブスカイト層の厚さはc-Siの数十分の一〜数百分の一ですむため、軽くて薄い特徴を有する。PSCは基板の材料によってガラス基板型とフィルム基板型の両方が開発されており、特にフィルム基板型は軽くて曲がる太陽電池として注目されている。主要材料の鉛、ヨウ素は比較的安価であるほか、インクジェット方式などペロブスカイト溶液を使用した塗布技術での製造方法は、c-Si太陽電池の製造に必要な高温プロセスがなく、工程数も大幅に短縮できるため、製造時のエネルギー消費削減と低コストでの大量生産が可能とされる。また、ペロブスカイトは可視光範囲 (波長360~800nm) の光の利用率が高いため、吸収波長範囲が異なる他種類の太陽電池と積層することで、より変換効率の高いタンデム型太陽電池の開発が期待される。特にトップ層にペロブスカイトを、ボトム層に800nm以上の長波長範囲で高効率に発電するc-Siを使用するタンデム型太陽電池の開発は注目されている。

一方、PSCの実装と大規模普及には、耐久性向上と大面積セル製造技術の確立への課題が残る。ペロブスカイトは水分や酸素、光に弱く劣化しやすいため、屋外設置時の寿命は約5~10年程度とc-Si太陽電池の半分以下である。また、均質的なペロブスカイト層を成膜しながら、大面積セルを連続で製造することもいまだ難易度が高い。

上記特徴と課題から、PSCの実装初期は建物の屋根や外壁、自動車の車体など、軽量性・柔軟性の特徴が生かせる分野から導入されると予想される。今後、耐久性の課題が解決できれば、メガソーラーなど大型発電所への活用も可能である。

### 3. GW規模の量産に突入する中国企業

日本企業はPSCの研究開発に先行しており、特に軽量性・柔軟性や高耐久性を備える製品の開発においてリードしている。例えば積水化学工業は2023年10月に大阪本社ビルに国内で初めて「フィルム型ペロブスカイト太陽電池付き建材パネル」を実装し、2024年7月から運用を開始した。地上12階の風荷重に20年相当耐え、安定した発電性能の維持が可能な高耐久性の実現も目指している。

一方、PSCの開発に後発する中国では、スタートアップを中心に量産を加速させている。2023年の時点で既に年間百MWの生産規模に達しており、一部の企業は2024年内にGW規模の生産ラインの整備を進めているなど、市場投入に向けた動きが顕著となっている（図表2）。

図表2 中国各社のペロブスカイト太陽電池量産状況

企業	工場所在地	生産能力 (MW)			量産モジュール			稼働開始時期など
		稼働中	建設中	計画中	変換効率 (%)	基板タイプ	サイズ (m)	
万度光能	湖北省・鄂州市	200		1,800	n/a	ガラス	不明	長期的に2,000MWに拡張する予定
	安徽省・阜陽市		1,200		n/a	ガラス	不明	2025年内稼働開始の予定
	安徽省・阜陽市			1,800	n/a	ガラス	不明	上記建設中事業の2期目として計画中
極電光能	江蘇省・無錫市	150			17%	ガラス	1.2×0.6	2022年12月稼働開始。2024年内変換効率20%超を目指す
	江蘇省・無錫市		1,000		18%	ガラス	1.2×2.3	2024年3Qに竣工、順次に生産開始の予定。変換効率は目標値
仁燦光能	江蘇省・蘇州市	150			18%	ガラス	1.2×0.6	2024年1月稼働開始。2024年内変換効率20%達成を目指す。単接合とタンデム型両方が生産可能
昆山協鑫光電材料 (注1)	江蘇省・昆山市	100			19%	ガラス	1.0×2.0	2021年稼働開始。2024年4月変換効率が19.04%超達成
	江蘇省・昆山市		1,000		27%	ガラス	1.2×2.4	2025年3月竣工する予定。変換効率は量産するタンデム型の目標値
	江蘇省・昆山市			1,000	27%	ガラス	1.2×2.4	上記建設中事業の2期目として計画中
織納光電 (注2)	浙江省・衢州市	100			12%	ガラス	1.2×0.6	2022年始から稼働開始
	浙江省・衢州市		1,000		12%	ガラス	1.2×0.6	2024年後半稼働開始の予定
合特光電	浙江省・杭州市	100			28%	ガラス	不明	タンデム型の試作はまだ成功していない
大正微納科技	福建省・アモイ市		100		13~15%	フィルム	1.0×0.6	2024~2025年稼働開始の見込み
<b>合計</b>		<b>800</b>	<b>4,300</b>	<b>4,600</b>				

注1：一部報道によるとまず500MWを建設しており、稼働が順調に滑り出したら残りの500MWを建設するとの計画

注2：フィルム基板採用のフレキシブル製品も開発しているが、量産品はガラス基板を採用の模様  
出所 各社公開情報、報道から三井物産戦略研究所作成

---

2016年中国エネルギー大手GCLグループ傘下に入った昆山協鑫光電材料は、高変換効率の大面积セルの開発で最も進んでおり、電池大手のCATLやIT大手のテンセントからの出資を受けている。現在建設中で、2025年3月に竣工予定の1GW/年工場では、目標変換効率27%・1.2m×2.4mの大面积タンデム型PSCを生産する予定である。2024年4月、同社は香港中華ガス傘下のエネルギーソリューション企業・港華能源投資有限公司とともに、自社製2㎡面積モジュールを使用した世界初のタンデム型PSCによる発電実証事業を年内に実施すると発表した。極電光能なども、2024年～2025年にかけて順次に大面积PSCの生産を開始する予定である。

中国国内の太陽電池市場は地面や屋根設置型発電事業向けの需要が最も多く、高い変換効率が求められるほか、建築の壁面など用途が限定されるフィルム基板型太陽電池への需要も不透明であるため、PSCを量産する中国企業のほとんどは発電向けを想定して、ガラス基板型を採用する。フィルム基板型PSCの開発企業は少ないが、代表格となる大正微納科技は生産能力の拡大を図っている。

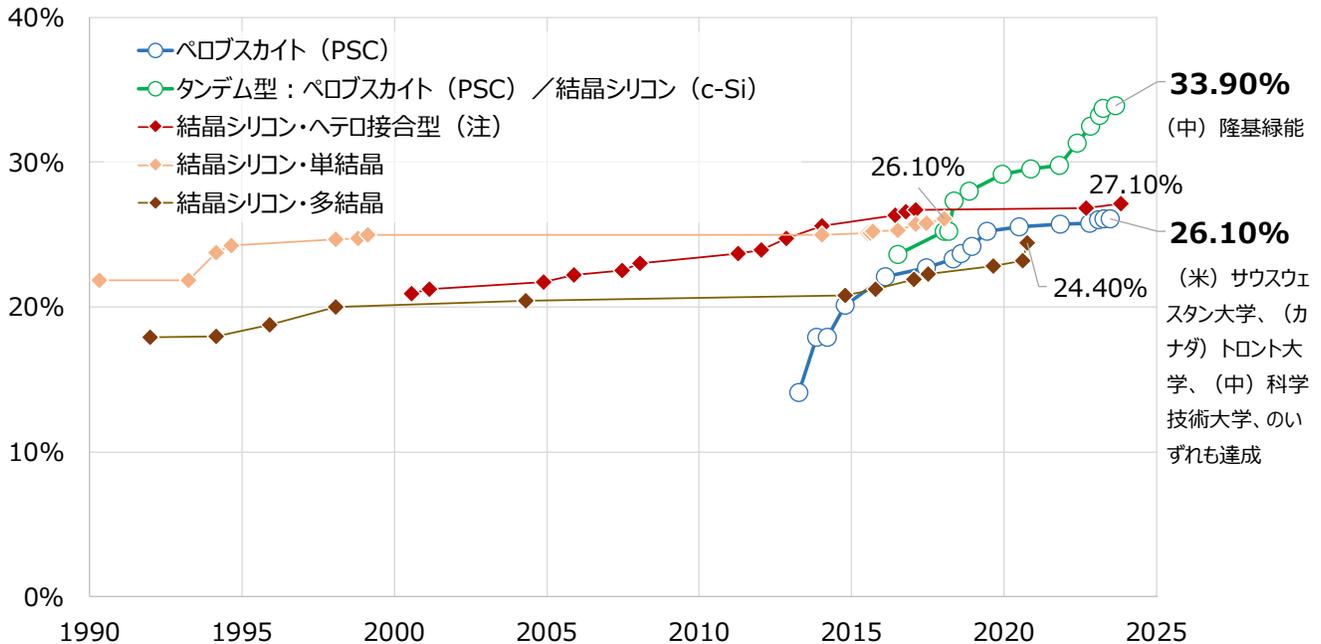
PSCを脱炭素の重要技術と位置付ける中国政府は、耐久性など主要課題の解決と今後の大規模実装を念頭に、2023年9月からの再生可能エネルギーの国家モデル事業に、「50MW以上のペロブスカイトとタンデム型太陽電池などの次世代太陽電池技術のモデル事業」を組み入れた。今後、PSCを使用する大規模の発電実証案件に取り組む可能性がある。

#### 4. 中国太陽電池大手の狙い：変換効率30%超のタンデム型

量産を急ぐスタートアップらと違って、c-Si太陽電池市場において圧倒的なシェアを有する中国の太陽電池大手らは、c-SiとPSCとで組み合わせたタンデム型で、変換効率30%を超える太陽電池の開発を目指している。

現在、技術が既に成熟しているc-Si太陽電池の変換効率は、その理論上の限界である30%に近付いている。各種太陽電池がラボで実現した最新の変換効率記録推移（図表3）によると、c-Si太陽電池の変換率は近年伸び悩んでいるのに対して、PSCは発明されてからその変換効率は急速に伸びており、特にc-Siとのタンデム型では変換効率が30%を超えている。

図表3 ペロブスカイトと結晶シリコン太陽電池の最高変換効率記録推移



注 ヘテロ接合型とは、物性の異なる半導体材料を組み合わせ、変換効率を高めた太陽電池である  
 出所 米国国立再生可能エネルギー研究所 (NREL) 「Best Research-Cell Efficiency Chart」 (<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>) (2024年5月22日 1500時最終アクセス) から三井物産戦略研究所作成

図表4に示す通り、現行c-Siでは届かない30%超の変換効率に達成する可能性と大量導入のポテンシャルが大きいとして、中国太陽電池大手のほとんどはPSCとc-Siのタンデム型太陽電池の開発に着手しており、複数の企業がラボで30%以上の変換効率を超えている。

2023年11月3日、隆基緑能が試作したPSC/c-Siタンデム型セルが達成した33.9%の変換効率はNREL<sup>4</sup>の認定を受け、初めて世界のトップに立った。出荷量世界1位の晶科能源は、2026年までに変換効率34%の達成を目指しており、同2位の天合光能は国からPSCとタンデム型の材料、製造設備・技術および大面積セル製造技術など複数の研究開発事業を受託し、変換効率31%のPSC/c-Siタンデム型の開発を目指している。

中国の太陽電池大手らにとって、高変換効率のPSC/c-Siタンデム型太陽電池の開発に成功すれば、将来メガソーラーなどへ大量導入の道が開かれるほか、各社既存のc-Si太陽電池の製造ラインとノウハウを生かしながら、次世代太陽電池技術の掌握も進むという一石二鳥にもなる。

PSCの研究開発が加速する現状に鑑み、中国太陽光発電産業協会は、2024年内ペロブスカイト&タンデム型太陽電池小委員会の設立に向けて準備を進めており、産業政策への助言、技術開発と実証事業の支援、技術標準の策定などを行っていく。

<sup>4</sup> NREL : National Renewable Energy Laboratory、米国国立再生可能エネルギー研究所

図表4 中国と世界主要企業開発中のタンデム型ペロブスカイト太陽電池

ランク (注)	国	企業	変換効率 (%)	セル/モジュール 面積 (cm <sup>2</sup> )	組み合わせ	開発、量産の進捗状況
3	中国	隆基緑能	33.90%	1.0	PSC/c-Si	2021年から研究開発を開始、2030年頃量産の見通し。2024年6月、34.6%の変換効率達成がESTI（欧州太陽光発電試験所）から認証を取得したと発表
1	中国	晶科能源	33.24%	n/a	PSC/c-Si	2026年変換効率34%超を目指す
	中国	曜能科技	33.14%	n/a	PSC/c-Si	2017年設立のスタートアップ。商用化向けの大面積セル開発と100MW規模のパイロットラインの立ち上げを進めている
			25.45%	275.6	PSC/c-Si	
6	中国	通威太陽能	33.08%	n/a	PSC/c-Si	2024年内パイロットラインを立ち上げる予定。薄型化、銀不使用電極などの技術も開発中
			23.84%	220.5	PSC/c-Si	
5	中国	阿特斯陽光電力	31.50%	n/a	PSC/c-Si	中国科学院寧波材料技術工程研究所とともに開発しており、左記変換効率をラボで達成。これからは大面積セルの試作を行う予定
6	中国	正泰新能	31.14%	n/a	PSC/c-Si	2024年内パイロットラインを立ち上げる予定
	中国	西安宝馨光能科技	29.65%	n/a	PSC/c-Si	親会社の宝馨科技は結晶シリコン太陽電池の上場企業、パイロットラインの整備を計画中
	日本	カネカ	29.20%	64.0	PSC/c-Si	シミュレーションでは35%の変換効率達成が可能という
	英国	Oxford PV	28.60%	258.1	PSC/c-Si	ドイツに量産工場を置き、タンデム型ペロブスカイト太陽電池の開発、量産に最もリードしており、2024年内に自社製セル使用の商品が発売される予定
2	中国	天合光能	28.53%	16.0	PSC/c-Si	PSCおよびタンデム型太陽電池の材料、製造設備と大面積セル製造技術など、国の研究開発事業を複数受託しており、変換効率31%超を目標としている
	中国	昆山協鑫光電材料	27.34%	2,050.0	PSC/c-Si	商用化向け大面積モジュールの開発に最も進んでおり、2025年以降変換効率27%の製品を量産する予定。親会社GCL Group傘下のGCL SIは2023年太陽光モジュール出荷量世界10位
			26.36%	17,100.0	PSC/c-Si	
			26.34%	2,048.0	PSC/c-Si	
	日本	PXP	26.50%	n/a	PSC/CIS	ペロブスカイトとカルコパイライト（黄銅鉱）を組み合わせた軽量・フレキシブルなタンデム型。2024年内パイロットライン稼働開始の予定
	米国	Tandem PV	26.00%	n/a	PSC/c-Si	2024年1月まで政府支援とベンチャーキャピタルから累計2,700万ドルの資金を調達しており、製造工場の建設を計画している
	中国	仁燦光能	24.50%	20.0	PSC/PSC	中国唯一のオールペロブスカイト使用のタンデム型を開発する企業
4	中国	晶澳太陽能科技	n/a	n/a	PSC/c-Si	ペロブスカイト技術の開発、試作が順調に進んだ場合、2～3年以内に変換効率30%の大面積タンデム型を開発する予定
8	中国	東方日昇新能源	n/a	n/a	PSC/c-Si	2027年まで変換効率30%・出力850Wのモジュールを開発する予定
29	中国	華晟新能源	n/a	n/a	PSC/c-Si	50MW規模パイロットラインの整備を進めており、2025年から試作開始する予定

注 2023年世界のモジュール出荷量実績ベース

出所 米国国立再生可能エネルギー研究所（NREL）「Solar Cell Efficiency Tables (Version 63)」

(<https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/87778.pdf>) (2024年5月22日1500時最終アクセス)、SOLARBE GLOBAL「Top PV module companies by shipment volume in 2023」(<https://www.solarbeglobal.com/top-pv-module-companies-by-shipment-volume-in-2023/>) (2024年5月22日1500時最終アクセス)、各社公開情報から三井物産戦略研究所作成

## 5. 今後の展望

富士経済は2024年5月、既存太陽電池からの置き換えや高効率なPSC/c-Siタンデム型の普及により、PSCは2020年代後半から本格的な量産になり、ガラス基板型が主流である世界市場は2040年までに約2.4兆円に成長すると予測した。一方、日本国内市場はまずフィルム基板型を中心に導入が進むが、2030年代以降ガラス基板型が徐々に主流になり、2040年の市場規模は世界全体の約1%に相当する233億円と予想した。

PSC実装の初期段階では、地面や屋根設置の用途に実装する中国と対照的に、日本は軽さ、柔軟さを生

---

かす用途において耐久性を引き上げながら実装を図っていくという構図になる。c-Si太陽電池のサプライチェーンを完備する中国企業は、ガラス基板型やタンデム型PSCの開発と量産に有利な状況と言える。一方、中国各社は高い変換効率の達成に力を入れているが、耐久性は十分検証されていない点が懸念されるため、今後屋外の耐久性実験による検証など継続的な開発が必要である。発電事業に求められる20～30年という耐用年数に近づくには、耐久性向上につながる高品質のペロブスカイト材料、封止材料や成膜技術・設備など、日本企業がリードしている材料や加工技術への需要も高まることになるだろう。長期的には、特に国内市場が相対的に小さい日本企業にとって、中国勢を含む海外企業との競争を想定した製品開発とグローバル戦略の早期策定が必要である。経済産業省が2024年5月に「次世代型太陽電池の導入拡大及び産業競争力強化に向けた官民協議会」の開催を発表し、官民連携でPSCの量産技術の確立、生産体制整備、需要の創出を三位一体で取り組む意向を表明した。PSCの大量普及期を見据えた開発競争はこれからである。

---

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できるとされる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社および三井物産グループの統一的な見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社および三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。