

GX実現に向けたペロブスカイト太陽電池への期待

産業調査部 村松 周平、梅津 譜

要旨

- ・再生可能エネルギーの導入拡大、エネルギー安全保障、産業競争力強化に資する次世代技術として、ペロブスカイト太陽電池に注目が集まる。ペロブスカイト太陽電池は、中国をはじめとする海外企業との競争はあるものの、材料調達や製造というサプライチェーン全体で日本企業が競争力を持ち得る。
- ・ペロブスカイト太陽電池は、軽量性・柔軟性・透過性や高い変換効率を武器に、幅広い設置先への展開が期待されるものの、その実装には、研究開発強化や量産化などによって製造コストの低減・耐用年数の長期化・変換効率の向上を行う必要がある。
- ・本格普及に向けては、メーカーとユーザーが連携したユースケース開発・実証の深化と、初期においては政策的な需要確保も欠かせない。さらには、メーカーの量産化投資の判断に必要となる継続的かつ安定的な需要の確保に向けて、グローバルマーケットへの展開も積極的に検討すべきである。

日本政府が掲げるGX(グリーントランスフォーメーション)実現に向けて、再エネの一層の導入拡大に資する特長を持つとともに、日本企業が部素材を含めて高い技術力を有するペロブスカイト太陽電池への期待が高まっている。弊行はDBJ Research No.420『革新技術が描く電力系統の新たな可能性』(2024年6月28日)においても、電力分野における注目革新技術として、ペロブスカイト太陽電池や、蓄電技術(蓄電池や長期エネルギー貯蔵技術)、デマンドレスポンス(DR)などを挙げたが、本稿では、ペロブスカイト太陽電池に関する現状の技術・政策動向などを整理するとともに、技術開発・量産化・需要確保の観点から日本におけるペロブスカイト太陽電池の普及および日本メーカーの競争力強化に向けた方向性を整理する。

1.太陽光発電の課題とペロブスカイト太陽電池への期待

太陽光発電は、比較的導入が容易で発電コストも低いことから、国内外で最も導入が進む再エネ電源であり、今後においてもさらなる拡大が期待されている。国際エネルギー機関(IEA)は、2050年カーボンニュートラル(CN)の実現には、世界全体で22年と比較して30年に5倍、50年に15倍の太陽光発電容量が必要と試算しており、これは50年時点の発電量ベースの電源構成において太陽光発電が全体の40%以上を占めることを意味する。日本においても、第6次エネルギー基本計画において30年までに110GW程度の太陽光発電を導入する目標が掲げられており、今後5年程の間に40GW程度の太陽光発電の追加導入が求められる。

一方で、現在主流のシリコン系太陽光電池(以下、シリコン系)は、設置適地の減少や系統混雑の増加、製造サプライチェーンの中国依存といった課題に直面している。日本は国土面積の約4分の3を山地や丘陵地が占め、すでに平地面積当たりの太陽光パネル導入容量は主要国の中で最大と、追加導入可能量は多くはない。また、急斜面への太陽電池導入に伴う土砂崩れの発生や景観の悪化といった地域共生上の課題も生じている。加えて、FIT・FIP制度やオフサイトPPAを活用し、送配電網が十分に整備されていない土地に太陽光発電所が多く導入されたため、太陽光発電所と需要地を結ぶ送配電網の増強など系統全体に関わるコスト(統合コスト)が増加している。送配電網の混雑緩和には、電力消費地にパネルを設置して自家発電・消費を拡大することが有効だが、シリコン系の荷重に耐え得る設置先は限定的

である。さらに、シリコン系は、シリコン調達・ウェハー製造・パネル組立のいずれの領域も中国企業への依存度が高く(IEAによればそれぞれ7割・9割・7割)、調達・製造・組立のレジリエンス確保が世界共通の課題となっている。このほかにも、シリコン系は製造コストに占める原料(シリコン)のウェイトが大きく、技術・製造方法の革新によるコスト低減の余地が少ない点も、さらなる普及拡大に向けた課題である。

これらの課題を解決し得る特長を持った次世代技術が、「ペロブスカイト」と呼ばれる結晶構造を持つ化合物を用いたペロブスカイト太陽電池である(図表1)。ペロブスカイト太陽電池は、従来のシリコン系と比べて柔軟性・軽量性・透過性などに優れ、理論上の変換効率も高いことから、これまで耐荷重や形状の問題から設置が難しかった場所への導入や設置面積当たりの発電量増加が見込める。特に、電力需要地である住宅やオフィス・工場の屋根・壁面・窓への導入と電力自家消費が増加すれば、系統混雑の緩和、ひいては系統全体のコスト抑制につながることも利点と言える。自家消費は、送配電網の使用時に生じる託送料金や再エネ賦課金などが生じないため、需要家にとっても電気料金の低減というメリットが存在する。

また、ペロブスカイト太陽電池は主原料たるヨウ素を始めとした関連部材についても日本企業が競争力を有する技術であり、サプライチェーンの中国依存も少ない。これは日本政府が掲げる、CN実現と日本の産業競争力の強化を両立させるというGX戦略の考え方にも合致する。

さらに、製造コストについても、中長期的にはシリコン系と比較して低減が期待できる。ペロブスカイト太陽電池は、各素材の使用量が少なく、材料費はシリコン系の半分程度に抑制可能と見込まれるほか、製造工程は素材の塗布・印刷が中心のため量産効果が発揮しやすい。加えて、シリコン系では原料である二酸化シリコンから高純度シリコンを取り出す過程において1,700℃程度の熱が必要であるのに対して、ペロブスカイト太陽電池の製造では150℃程の熱でよく、製造時のエネルギー消費量(完成品の発電容量当たり)がシリコン系の1/10以下に収まることから、製造コストや温室効果ガス排出量の低減が可能となる。

図表1 シリコン系の課題とペロブスカイト太陽電池への期待

太陽光パネルの導入可能量減少	系統混雑と出力抑制	製造サプライチェーンの中国依存	製造コストの低下
現状の課題			
- 日本はすでに平地面積当たりの太陽光導入量は主要国で最大で追加余地少 - 地域共生上の課題も発生	電力消費地から遠隔地に太陽光発電が導入され、系統混雑・出力抑制が発生。その結果、系統増強が必要となっている	調達・製造・組立を中国企業へ依存	製造コストに占める原料(シリコン)のウェイトが大きく、コスト低減の余地が少ない
課題解決	課題解決	課題解決	課題解決
ペロブスカイトの特長			
柔軟性・軽量性・透過性など生かし、シリコン系の導入が難しい耐荷重の低い屋根・壁面・窓などに導入	電力消費地への追加導入・自家消費が可能であり、送配電網の増強負担が発生しない	- 関連部材含めて、多くの日本企業が開発を進める - 主原料(ヨウ素)の生産量は日本が世界第2位	素材やエネルギーの使用量が少ないため、理論上の材料費はシリコン系の半分程度になると想定される

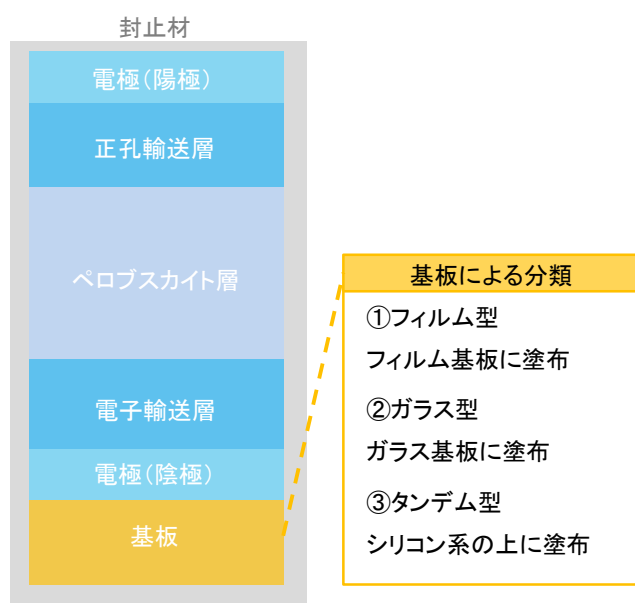
(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

GX実現におけるペロブスカイト太陽電池の重要性に鑑み、日本政府による政策的支援の枠組みも整いつつある。2023年、岸田首相は、30年を待たずにGW級の量産体制を構築することを宣言し、これを踏まえ経済産業省は、量産技術の確立・生産体制整備・需要の創出によって、ペロブスカイト太陽電池の国内サプライチェーン構築と社会実装に取り組む方針を示した。具体的には、生産側に対する支援として、グリーンイノベーション基金(GI基金)による技術開発支援「次世代型太陽電池の開発プロジェクト」がなされているうえ、GX経済移行債を用いた量産体制整備に対する設備投資支援「GXサプライチェーン構築支援事業」が計画される。需要の創出については、調達価格等算定委員会において、FIT・FIP制度の枠組の中でペロブスカイト太陽電池を念頭に置いた新たな発電設備区分の創設について検討が進んでいる。

2.ペロブスカイト太陽電池の構造・分類と企業動向

ペロブスカイト太陽電池は、1 μ m(0.001mm)程と非常に薄いペロブスカイト層、電極・正孔輸送層電子輸送層などを基板上に塗布し、最後に封止材でコーティングすることで製造され、基板の素材によって①フィルム型、②ガラス型と、既存のシリコン系を基板にする③タンデム型の3種類が存在する(図表2)。

図表2 ペロブスカイト太陽電池の構造



(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

についても、例えばキャノンがペロブスカイト太陽電池の被膜素材、東レが封止材、日本板硝子やAGCがガラス基板、日産化学が正孔輸送材料など、多くの日本企業が開発を進める。加えて、ペロブスカイト層の主原料であるヨウ素は千葉県や新潟県が産地であり、日本全体の生産量はチリに次ぐ世界第2位に位置する。すなわち、ペロブスカイト太陽電池は、中国をはじめとする海外企業との競合はあるものの、材料調達・部材製造・組立というサプライチェーン全体が日本国内で完結し得る技術と言える。

3.ペロブスカイト太陽電池の導入先

ペロブスカイト太陽電池の普及に向けては、①軽量性・柔軟性・透過性といった特長を生かしたシリコン系が設置困難な先への導入(主にフィルム型・ガラス型)と、②高い変換効率を生かした既存のシリコン系設置先の置き換え(主にタンデム型)、という二つの方向性が考えられる。

①については、耐荷重の低いプレハブ建屋や体育館、築年数の古い木造住宅などの屋根などが候補となる。また、屋根と比べると日照時間や日射量が限定的な点は懸念されるものの、建築物窓ガラスとしてのガラス型の設置や壁面へのフィルム型の設置も期待される。その際、設置・メンテナンス・取り外しの難易度やコストを踏まえれば、住宅などの低層建築物向けが先行し、高層建築物向けが後続すると考えられる。これらの建築物への導入は、住宅やオフィスビルなどのZEH・ZEB化(Net Zero Energy House/Building)実現に向けて重要な役割を果たすだろう。建築物以外でも、道路・カーポート上や、高速道路の防音壁などが有望と考えられる。

加えて、平地面積が限定される日本における再エネ拡大に資する営農型太陽光発電(ソーラーシェアリング)も有望な導入先である。営農型では、農地に支柱を立て上部空間に太陽光パネルを設置するため、シリコン系を活用するには荷重に耐える頑強な支柱・架台にかかる設置費や、日射量の減少に伴う栽培可能作物の限定や収穫量減少などが課題であった。ペロブスカイト太陽電池の軽量性・透過性という特長は、こうした課題を解決できる。さらに、自動車の車体や窓ガラスなどへの設置も、初期的には設置面積が広く形状もシンプルなトラックやバスを中心に、将来的には乗用車も含めて進む可能性がある。

②については、空き地への平置きや耐荷重の十分な屋根置きが対象であり、太陽光パネルの寿命(20年程度)に鑑みると、2009年の余剰電力買取制度の開始に伴い大規模導入が進んだ各地の太陽光発電設備がリプレースの時期を迎える30年前後が1つの契機となる可能性が高い。

ただし、これらはあくまでペロブスカイト太陽電池の潜在的な設置先であり、実際の普及拡大に向けては一層の技術開発によるコスト競争力の確保が不可欠である。現在、ガラスやアルミフレームを用いず、軽量かつ一定程度曲げることのできるセミフレキシブルシリコン系や、外観が良く、セル配置を工夫することで透過性を一定程度確保できる建材一体型(BIPV)の発電コスト低減がすでに進んでおり、各領域においてペロブスカイト太陽電池との競合が生じる可能性が高い(図表3-1)。

図表3-1 各太陽光電池の導入先別競争力

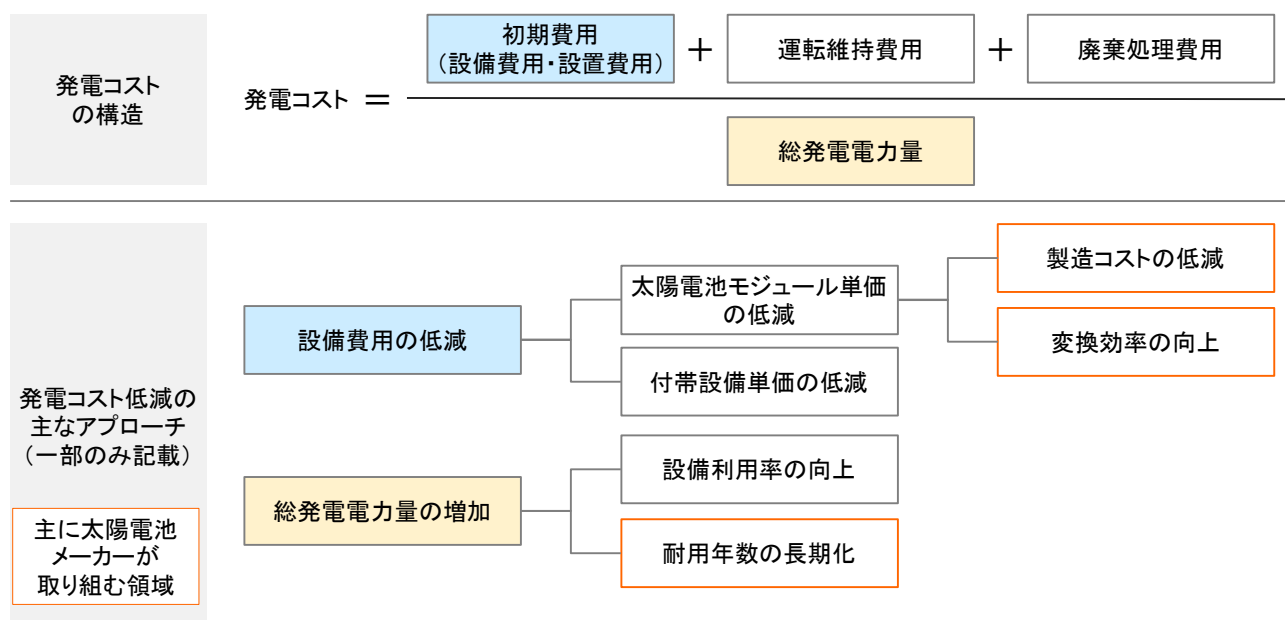
		求められる性能			各タイプの対応可能性						
		時に必要	必要	特に必要	一部対応可能	対応可能	コストも含めた総合評価で 現状競争力あり				
					(低 ← 現状の発電コスト → 高)						
		軽量性	柔軟性	透過性	既存	セミフレキ	BIPV	タンデム型	ガラス型	フィルム型	
市場規模	大	系統接続中心	平置き (メガソーラー)								
		営農型									
	小	自家消費中心	屋根								
		窓ガラス									
		壁面									
		車体									

(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

具体的には、フィルム型に関しては、特長である軽量性・柔軟性・透過性のうち、セミフレキシブルシリコン系も軽量性や柔軟性において一定の性能を実現しており、屋根や壁面への導入時に競合する可能性がある。また、ガラス型は高い透過性が強みであるが、窓ガラスへの導入においては相応の透過性を有するBIPVとの競合が想定される。いずれにおいても、ペロブスカイト太陽電池がシリコン系との競合を勝ち抜き展開先を拡げるには、発電コストを下げる必要がある。

発電コストの分析には、総費用を総発電電力量で割って算出される均等化発電原価(LCOE)を用いることが一般的である。LCOE低減に向けたアプローチとしては、製造コストの低減や変換効率の向上による設備費用の低減、耐久性向上(耐用年数の長期化)を通じた総発電電力量の増加などが有効であり、ペロブスカイト太陽電池メーカーの研究開発強化や量産化など踏み込んだ取り組みが必要となる(図表3-2)。

図表3-2 発電コストの構造と低減アプローチ



(備考)1.各種資料により日本政策投資銀行作成

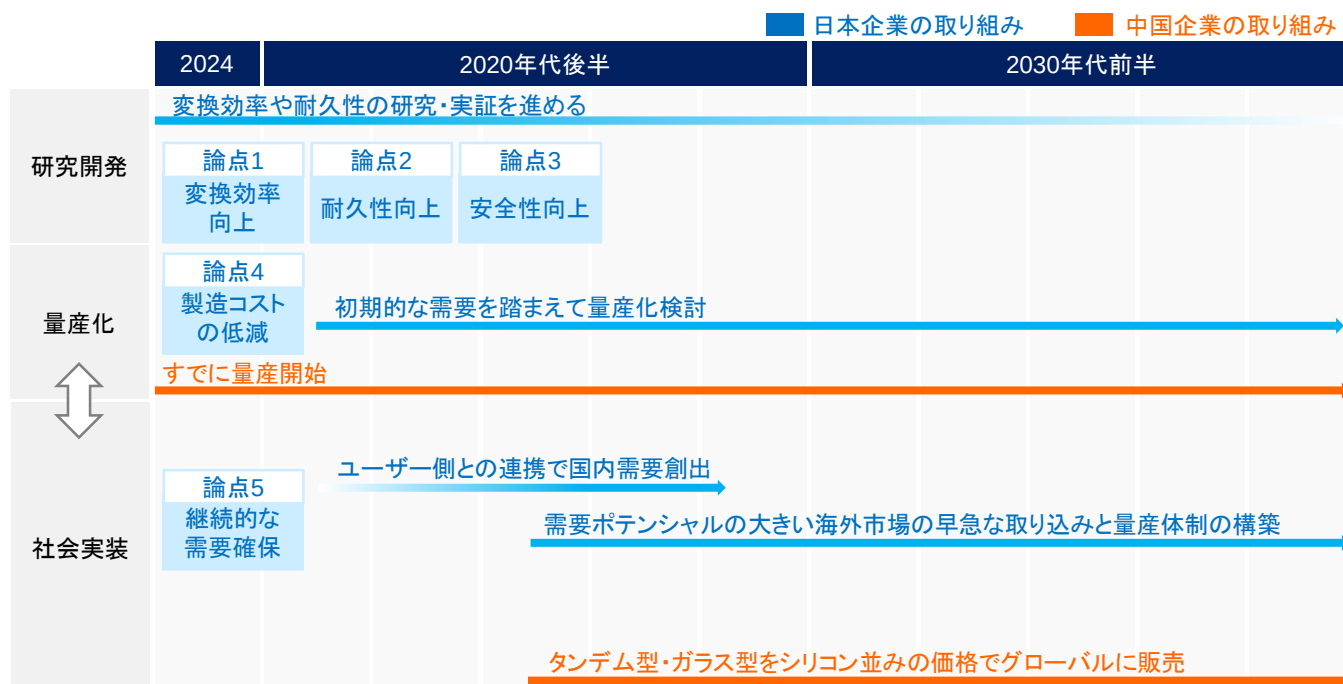
2.発電コストの構造は、本分析に特段の影響を及ぼさない割引率を捨象して記載

4.今後の普及拡大および日本メーカーの競争力向上に必要な取り組み

前節までの議論を踏まえると、ペロブスカイト太陽電池の日本における普及と日本メーカーの競争力向上を実現するには、継続的な研究開発によって変換効率の向上(論点1)や耐用年数の長期化(論点2)、安全性の向上(論点3)を図るとともに、早期に生産体制の構築を行い、量産効果によって製造コストを低減(論点4)する必要がある。また、メーカーが量産化投資を実施するためには、製品納入先の確保が重要であり、継続的な需要確保(論点5)が求められる(図表4-1)。

こうした取り組みを進めるにあたっては、自社の技術開発や国内のサプライチェーンの強化を図るだけでなく、特に競合と目される中国企業の動向への注視も必要である。中国企業はシリコン系の開発で蓄積された技術力や政策支援を背景に、すでにタンデム型やガラス型の量産化に着手しており、2020年代後半には日本含む世界市場に製品を投入する可能性があると考えられる。さらには、将来的にはフィルム型に対する取り組みを本格化することも想定されるため、日本企業として可能な限り早期に量産化を行い、中国企業に対抗してグローバルシェアを確保する必要がある。

図表4-1 今後の各種取り組みの時間軸



(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

4-1.研究開発(論点1,2,3)

まず、変換効率については、研究開発段階のセルベースではタンデム型29%、ガラス型26%程度まで到達しているものの、社会実装に向けたモジュールベースでは小規模なサイズ(200-800cm²)でもタンデム型20%、ガラス型14%程度にとどまっており、理論上の目標水準である30%台を目指してさらなる研究開発が求められる。

耐久性に関しても研究開発が進むが、ペロブスカイト太陽電池は大気中の酸素や水に弱いため、現時点では高コストの封止材を使用する必要があり、製品価格全体を押し上げる要因となっている。さらには、太陽光による光劣化と熱劣化も耐用年数の長期化に向けた大きな課題である。今後は、各層の耐久性向上と、封止材の低価格化の両輪の取り組みが求められる。

また、ペロブスカイト太陽電池には、毒性を有する鉛がヨウ素に次いで多く含まれている。今後住宅や農地といった設定先の拡大に向けて、鉛の含有量がEUのRoHS指令等で規定される基準値以下であることの証明、もしくは鉛の代替素材としてスズやゲルマニウムを用いる鉛フリー化が重要となる。

4-2.需要確保(論点5)

これまで述べてきた通り、ペロブスカイト太陽電池は既存のシリコン系と比較しても高いポテンシャルを有するものの、技術開発・コスト削減の途上にあり、商用ベースの導入はこれからである。本格普及に向けては、メーカーとユーザーが連携したユースケース開発・実証の深化と、初期においては政策的な需要確保が必要となろう。

メーカー・ユーザー連携については、足元でメーカーと電力・不動産・通信企業などが、具体的な利用シーンを想定した設置・メンテナンス手法の開発・低コスト化や、耐久性の検証などに取り組んでいる。一部では、商用化に関わる検討も進んでおり、こうした先進的なユーザーが、初期の需要創出を支えることになるであろう(図表4-2)。

図表4-2 メーカー・ユーザー連携の一例

メーカー × 自治体			
積水化学	東京都	2023	下水施設での実証実験
メーカー × 建設・不動産企業			
積水化学	JR西日本	2025	駅広場部分への設置
東芝	東急	2023	駅構内での実証実験
エネコート	三井不動産	2023	住宅での活用研究
メーカー × エネルギー企業			
積水化学	東京電力	2028	高層ビルへの設置
積水化学	JERA	2023	火力発電所での実証実験
メーカー × 自動車業界			
エネコート	トヨタ	2023	車載としての活用研究
メーカー × IT・通信業界			
エネコート	KDDI	2023	基地局での実証実験

(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

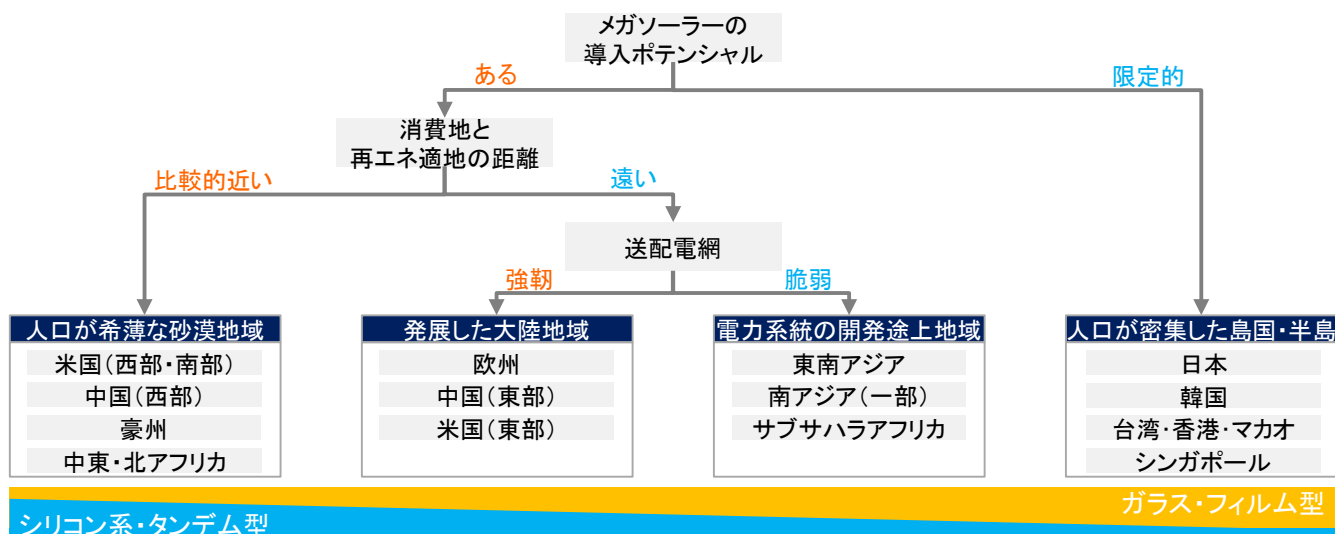
加えて、こうした一部の先進的取り組みのみで終わらせないためには、戦略的な制度設計と政策支援が欠かせない。具体的には、従来の再エネでも実施されてきたFIT・FIP制度や自家消費を前提とした導入時の補助金により民間の導入拡大を後押しするほか、政府・自治体が保有・所管する施設や、道路・鉄道関連などの各種インフラ設備への優先的導入なども考えられる。また、改正地球温暖化対策推進法に基づく再エネの促進区域設定(ポジティブゾーニング)において、ペロブスカイト太陽電池を念頭に置いて荒廃農地の活用を促進することも有効であろう。

なお、今後ペロブスカイト太陽電池の導入が本格化する際には、コーポレートファイナンスやプロジェクトファイナンスなどを活用した金融機関による支援が期待される。ただし、初期的な主要導入先である屋根については、事業者が建物所有者から屋根を賃貸する場合、事業者が対抗要件を具備せず、建物所有者が第三者に建物を売却した場合や倒産した場合において、ペロブスカイト太陽電池の撤去が生じる可能性がある点に留意が必要である。また、壁面や窓への設置では、これまでの屋根置きやメガソーラー案件以上に周囲での建造物新設による日照障害が発生しやすいため、周辺における建設計画の把握が求められる。

さらには、メーカーの量産化投資の判断に必要な継続的かつ安定的な需要の確保、ひいては収益の拡大に向けて、国内にとどまらずグローバルマーケットへの展開も積極的に検討すべきであろう。IEA「世界エネルギー見通し」(WEO)においては、シリコン系を前提とした試算ながら、2050年時点で世界全体の太陽光発電量のうち日本の発電量が占める割合は1%程度と試算されており、大規模な市場は海外に広がっていることがわかる。また、ペロブスカイト太陽電池ならではの新たな導入先についても、日本同様の地理的条件を有する韓国・台湾やASEAN各国などを中心に、海外市場の立ち上がりに目を配る必要がある。

海外市場のうち、既存のシリコン系やペロブスカイトのいずれのタイプが適するかは、メガソーラーの導入余地の有無、発電所立地と電力消費地の距離、既存の送配電網の充実度によって分類できる(図表4-3)。まず、既存のシリコン系・タンデム型は、電力消費地の近郊にメガソーラー適地が存在するか、メガソーラー適地と電力消費地とを結ぶ送配電網がすでに充実しているエリアに適すると考えられる。こうしたエリアでは、追加の送配電網増強にかかるコストが嵩まないため、純粋にパネルの変換効率が重要であるためだ。この分類にはアメリカ西部(カリフォルニア州)や豪州、中東のように日射量が多い余剰地が都市近郊にある砂漠・ステップ気候に属する地域や、欧州・中国などが主に当てはまる。これらのメガソーラー

図表4-3 海外市場の整理とガラス・フィルム型の進出先



(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

の導入ポテンシャルが大きい地域では、タンデム型ペロブスカイト太陽電池を活用した水素製造プロジェクトも今後立ち上がりを見せると予想される。

一方で、メガソーラーを導入した際に送配電網の増強のための追加コストが大きくなるエリアや、そもそもメガソーラーの導入余地が乏しいエリアにおいては、ガラス型・フィルム型のポテンシャルが発揮し得る。例えば、送配電網が脆弱な状況で経済成長に伴う電力需要の増加に直面する東南アジアや南アジアなどでは、送配電網に負荷を与えるメガソーラーの導入がシステムコストの上昇につながる。そのため、人口が密集し電力需要も旺盛なデリー・ジャカルタ・マニラなどの大都市圏を中心にガラス型・フィルム型を導入することで、システムコストを抑えつつ供給力を確保することが期待される。現在東南アジアや南アジアの人口一極集中は著しく、人口1,000万人以上のメガシティはすでに10都市存在しており、今後のさらなる都市化と経済成長の進展に合わせたフィルム型・ガラス型の導入ニーズの高まりが期待される。また、韓国や台湾、シンガポールなどは、日本同様に国土若しくは国土に占める平地面積が狭く、電力需要に比べてメガソーラーの導入余地が限定的であることから、ガラス型・フィルム型の都市部への設置が現実解となろう。今後のASEAN各国への展開に向けては、日本政府が主導するアジア・ゼロエミッション共同体(AZEC)の枠組みを巧みに活用していくことも期待される。

4.3.量産化(論点4)

こうした国内外での需要確保の手当てと並行して、コスト低減・供給量確保のためには、メーカーによる早期の量産体制構築が必要となる。ただし、実証期間が短く、量産化技術も十分に確立していない現段階での量産化投資には大きなリスクが伴うため、GX移行債を用いた政府による手厚い支援策や、金融機関によるリスクマネーの供給が必要となる。

また、中長期的に日本企業が中国はじめとする海外企業との競争に勝ち抜いていくためには、日本企業間の連携も検討課題となろう。短期的に見れば、各社が異なる基板や製膜方法を用いていることや、政府の掲げる2030年までの生産体制構築に向けて時間が限られていることから、連携構築には一定のハードルが存在する。しかしながら、中国企業がセミフレキシブルシリコン系やBIPVを含むシリコン系とペロブスカイト太陽電池の双方において技術開発や思い切った量産化・コスト削減を進めていることを踏まえると、日本企業が段階的にでも連携を深め、ペロブスカイト太陽電池に関わる知見や資金を結集し、継続的に規模拡大を図る体制構築も一つの在り方であろう。

おわりに

DBJ Research No.420『革新技术が描く電力系統の新たな可能性』(2024年6月28日)でも述べた通り、日本の電力系統は、電化・デジタル化進展などを背景とする電力需要の増加懸念への対応と、電力由来GHG削減の両立という困難な課題に直面している。本稿で取り上げたペロブスカイト太陽電池はこうした課題の解決に資する重要な技術である。また、ペロブスカイト太陽電池が、天候や時間帯により発電量が変動する変動型再生可能エネルギー(VRE)である点を踏まえると、電力系統への円滑な導入に向けては、デマンドレスポンス(DR)や蓄電池など、需給調整関連技術の進化も必要となろう。

日本政府が掲げるGXの実現に向けて、戦略的な制度設計・政策支援、ユーザー・メーカー企業の思い切った取り組み、それを支えるファイナンス支援により、ペロブスカイト太陽電池の早期の普及拡大と日本企業の産業競争力強化が期待される。

Appendix 各太陽電池の特徴

タイプ		開発 先行 国	設置先の拡大			発電コスト(円/kWh)の低減			技術成熟度
			軽量性	柔軟性	透過性	耐久性	変換効率	製品価格	
ペロブスカイト太陽電池	フィルム型	日本 中国	◎	◎	◎	△ or ◎	△ or ○	△ or ◎	△
	ガラス型		△	×	◎	○ or ◎	△ or ○	△ or ◎	○
	タンデム型	英国 中国	×	×	×	○ or ◎	○ or ◎	△ or ◎	○
シリコン系	既存	中国	×	×	×	◎	○	○	◎
	セミフレキ		○	○	×	○ or ◎	○	○	○
	BIPV	日本 中国	×	×	○	○ or ◎	△ or ○	○	○

(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

©Development Bank of Japan Inc.2024

本資料は情報提供のみを目的として作成されたものであり、取引などを勧誘するものではありません。本資料は当行が信頼に足ると判断した情報に基づいて作成されていますが、当行はその正確性・確実性を保証するものではありません。本資料のご利用に際しましては、ご自身のご判断でなされますようお願い致します。本資料は著作物であり、著作権法に基づき保護されています。本資料の全文または一部を転載・複製する際は、著作権者の許諾が必要です。当行までご連絡下さい。著作権法の定めに従い引用・転載・複製する際には、必ず、『出所：日本政策投資銀行』と明記して下さい。

お問い合わせ先 株式会社日本政策投資銀行 産業調査部

Tel: 03-3244-1840

e-mail(産業調査部): report@dbj.jp