

2.1.3 次世代太陽電池材料

(1) 研究開発領域の定義

太陽光エネルギーを高効率かつ低コストで直接電気エネルギーに変換するデバイスの材料開発に関する研究開発領域である。全世界的なカーボンニュートラルに向けて、大規模普及が進むシリコン系太陽電池の高性能デバイス化技術や移動体やビルなどの従来導入が困難だった用途への次世代材料の研究開発課題があげられる。また、今後大量に廃棄される太陽電池セルのリサイクル技術も重要な研究開発課題である。

(2) キーワード

シリコン系太陽電池、PERC 型セル、CIS 薄膜太陽電池、CdTe 薄膜太陽電池、CIS 薄膜太陽電池、有機系太陽電池、ペロブスカイト太陽電池、使用環境の多様化、プロセス技術、劣化機構解明、タンデム化、車載太陽電池、リサイクル

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

世界における太陽光発電の導入量は、新型コロナウイルス感染症拡大の中でも順調に増加し、2021 年末における累積導入量は約 940 GW となった。これは、世界の総発電量の約 5% に相当する。2022 年内には累積導入量が 1 TW (1000 GW) を超えることとなる。世界的なカーボンニュートラルの大きな流れの中で、電力の再生可能エネルギー化は今後も進むと予測されており、中でも発電時に温室効果ガスを排出しない太陽光発電への期待は大きい。

我が国においても、東日本大震災後に導入された固定価格買い取り制度 (FIT 制度) の後押しもあり太陽光発電の導入拡大が進み、2021 年末における累積導入量は約 78 GW となり世界第 3 位となっている (国土面積あたりの導入量は世界第 1 位)。この導入量は、2015 年に制定された 2030 年の目標導入量 64 GW を 10 年前倒して達成したほどである。一方で、2050 年に温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルという挑戦的な目標の達成には、少なくとも 150 GW 以上、長期的には 300 GW 以上とさらなる大量導入が必要とされる。しかし、国土の限られた我が国では、現状技術の延長では、いずれ導入量制約に直面することになる。よって、高効率・低コスト・長期信頼性といった従来型の評価指標における次世代太陽電池セル・モジュールの研究開発を持続的に行うことに加えて、太陽光発電の「利用領域の拡大」に向けた研究開発が重要となる。従来は設置が困難であった重量制約のある屋根、ビルの壁や窓、自動車などの移動体への設置にあたっては、軽量性、意匠性、可撓性といった性能が求められる。つまり、超軽量太陽光発電モジュールや意匠性に優れた建材一体型太陽電池など用途に応じた太陽電池が必要である。

また、使用済太陽光発電モジュールの排出が始まっているが、その量は今後急激に増加することが予測される。それらを潜在的な資源として活用できるようリサイクル技術の開発が必要不可欠となる。メガソーラーからの大量排出は、太陽光発電モジュールへの置き換えの好機でもあり、長期信頼性に優れた高効率・低コストモジュールを開発しておく必要がある。研究開発にあたっては、大量導入により大量の材料が必要になることから、用いる材料の持続可能性・環境負荷の観点も重要である。

このように太陽電池に関連する技術領域は拡大を続けることとなり、次世代太陽電池の基盤として材料イノベーションの強化は不可欠といえる。

[研究開発の動向]

結晶 Si、CIS 薄膜、有機薄膜型、集光型、積層型など多様な太陽電池において、高効率・低コスト・長期信頼性という従来型の性能指標に基づき次世代太陽電池セル・モジュールの実現を目指す取り組みが継続的に行われている。セルの高効率化は、光吸収によるキャリア生成、キャリア分離、キャリア輸送という光か

ら電気へのエネルギー変換の各素過程での損失を最小化することが普遍的な指導原理であり、変換効率を極限まで高めることを目指して、光とキャリアのマネジメントのための研究が行われている。あらゆる太陽電池セルに共通する重要な研究項目としては、光吸収層や電荷回収層の材料開発とともに、劣化機構解明、接合形成技術、耐久性向上技術、表面・界面での高性能パッシベーション技術があげられる。また、低コストな材料・デバイスプロセス技術も不可欠である。

最近のトレンドとして、太陽光発電の「利用領域の拡大」に向けた研究開発が非常にさかんとなっている。今後の技術進展により導入量の飛躍的な増加が期待される市場としては、重量制約のある屋根、建物の壁面や窓、車載用や無人航空機等の移動体、LCCM住宅（ライフサイクルカーボンマイナス住宅）、水上、農地などがあげられる。これらの用途では、発電性能だけでなく目的に特化して最適化されたセル・モジュールを開発する必要があり、軽量性・意匠性・防眩性といった新たな性能指標が要求される。

表 2.1.3-1 に太陽電池の新たな用途とそれに応じて要求される性能指標と研究開発の方向性の典型例を示す。

表 2.1.3-1 太陽電池の新たな用途と要求される性能指標

用途	要求性能	研究開発の方向性
屋根	軽量性	・カバーガラスの薄膜化や特殊樹脂への代替 ・軽量基板上へのフィルム型太陽電池の開発
建物（壁面）	・意匠性 ・防眩性	・需要者が望む色彩の長期安定作動（セル表面の誘電体多層構造や反射防止膜の組成変調）
建物（窓）	・採光性 ・断熱性	・モジュール構造の工夫による実効的な透過率の向上 ・可視光透過材料の利用や薄膜化
移動体（車載等）	・軽量性 ・耐震性・耐衝撃性 ・フレキシブル性	・多接合による高効率性の追求 ・薄膜型太陽電池や有機・ペロブスカイト太陽電池による形状追従性の実現

特に、単接合セルでは、変換効率の限界に近づいていることから、高効率化への科学的根拠が明確である多接合型（タンデム型）太陽電池への期待が高まっている。

また、利用領域の拡大の観点で、近年ペロブスカイト太陽電池の研究開発が活発化しており、それとともに急激に変換効率の向上がみられる。

使用済太陽光発電モジュールの排出が始まっているが、将来の急激な増加を予測されることからリサイクル技術の確立が世界各国において重要な課題とされている。太陽光発電モジュールは、長期間にわたり屋外で使用されるため、太陽電池セル、封止剤、カバーガラスなどが強固に貼り合わされており分離・回収することは困難であるが、ガラス、希少金属、シリコンなどを潜在的な資源として活用できるようリサイクル技術の開発が必要である。メガソーラーからの大量排出は、太陽光発電モジュールへの置き換えの好機でもあり、長期信頼性に優れた高効率・低コストモジュールを開発しておく必要がある。研究開発にあたっては、大量導入により大量の材料が必要になることから、用いる材料の持続可能性・環境負荷の観点も重要である。

太陽光発電産業は、日本企業や欧州企業が世界のトップを占めた時代もあったが、世界的な勢力地図は塗り替えられ、特に結晶シリコン太陽電池の量産は中国系企業が牽引し、新しいセル構造を実装した高出力モジュールの量産計画が次々と発表されている。世界的な脱炭素化の大きな流れの中で、発電時に温室効果ガスを排出しない太陽光発電の導入拡大は世界各国で進むことが、多くの国の政策によって裏付けられている。そのような中で、特定国・企業に依存した現状のサプライチェーンの脆弱性は大きな課題である。近年の新型コロナウイルス感染症の拡大、ロシアによるウクライナ侵攻、人権問題に伴う貿易摩擦などの国際情勢への

不透明さからも、サプライチェーンの多様性・持続可能性を確保し、製造拠点を自国内に再構築しようという動きが欧米を中心に進んでいる。米国では、バイデン政権下においてクリーンエネルギーへの大規模な投資計画が進み、欧州ではグリーンディール推進が成長戦略と位置付けられている。また、中国やインドでは、太陽光発電の野心的な導入目標が掲げられている。各国政府は、金融政策や税制政策、研究開発への資金提供などにより、太陽電池産業への投資リスクを軽減すべきとしている。

日本では、グリーンイノベーション基金事業「次世代型太陽電池の開発」、NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発」などでペロブスカイト太陽電池の実用化や、新市場創造に向けた産学連携体制での技術開発が進められている。

ベンチマークとしてのラボレベルでの世界最高効率率は、ヘテロ接合型Si太陽電池 26.8% (中国・LONGi社)、ホモ接合型Si太陽電池 26.1% (ドイツ・ISFH)、ペロブスカイト/Siタンデム 32.5% (ドイツ・HZB)、集光型化合物多接合太陽電池 47.6% (ドイツ・FhG-ISE)、非集光型化合物多接合太陽電池 (3接合) 39.5% (米国・NREL)、CIS太陽電池 23.4% (日本・ソーラーフロンティア)、CdTe太陽電池 22.1% (米国・First Solar社) となっている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 結晶Si太陽電池

量産モジュールでは、従来の裏面全面にAl電極を用いる裏面電界型 (BSF型) から裏面パッシベーション膜とポイントコンタクトを導入したPERC (Passivated Emitter and Rear Cell) 型への転換が進んでいる。さらなる高性能化に向けては、裏面全面を極薄酸化膜でパッシベーションしたTOPCon (Tunnel Oxide Passivating Contact) 構造の採用、アモルファスシリコン薄膜で接合を形成するヘテロ接合型と表面に電極のないバックコンタクト (IBC) 型の融合、両面発電型の採用などが進んでいる。基礎研究としては、変換効率を極限まで高めるための要素技術、ペロブスカイトや化合物半導体とのタンデム化による超高効率化技術、用途拡大のための研究が盛んに行われている。

具体的には、カネカはIBCヘテロ接合太陽電池で高効率 26.7% (79 cm²) を報告している。IBC型は裏面でのpn領域や電極パターンニングが必要なため、量産化に向けてはシンプルなプロセス開発が求められるが、シャープや産総研において低コストプロセスの検討が進んでおり、日本が世界を先導する領域である。

これから社会問題化すると危惧される太陽電池モジュールの大量廃棄対策のため、結晶Si太陽電池モジュールのリサイクルのための研究や技術開発が進んでいる。2021年8月には韓国エネルギー技術研究院 (KIER) が廃棄モジュールから回収したシリコンから6インチの単結晶インゴットとウエハーを製造し、20.05%の変換効率を報告した。また、2022年2月、ドイツ・フラウンホーファー太陽エネルギー・システム研究所は太陽電池モジュールのSiをリサイクルし、それを100%原料として使用して作製した太陽電池にて、19.7%の変換効率を発表した。国内では、各省・自治体などで、太陽電池パネルのリサイクルに関する手法の議論や、太陽光発電設備の再資源化促進のための制度的対応の検討などが進められている。

• 薄膜Si系太陽電池

変換効率での不利を改善すべく、透明導電膜へのテクスチャ形成、透明中間層、プラズモニクス、フォトニック構造など、光閉じ込め技術の進歩が近年著しい。市場では、バルク結晶Si系モジュールの低価格化に押され、苦しい状況が続いているが、今後のさらなる生産量増大が必須の太陽光発電市場において、材料の安定供給面での優位性を考えると、中長期的な研究開発の継続が重要な分野といえる。またその特徴からエナジーハーベストデバイスとしての活用も期待される。

• CIS 系太陽電池

ソーラーフロンティアが年産 1 GW を有し、小面積セルでも 2018 年 11 月に報告した 23.35% (公式) の世界最高効率を誇り、日本が世界を牽引していた。ただ、同社は中国との価格競争の厳しさにより、生産を中止してシステムインテグレーターになることが決まっている。近年の CIGS 太陽電池の変換効率の向上が加速している背景にはアルカリ金属を発電層成長後に添加する PDT (post-deposition treatment) 処理がある。KF-PDT 処理をはじめとして、最近では RbF-PDT、CsF-PDT 処理などの重アルカリ金属処理が目され、これらの処理によって pn 接合および多結晶粒界の品質が向上し、変換効率の向上を後押ししている。さらに光吸収層のワイドギャップ化の検討も進められている。CIGS の代替を目指して、レアメタルフリーの材料が大きく注目されている。その代表格は、CZTSSe であるが、その他のレアメタルフリー材料として、Cu₂SnS₃、CuSbS₂、SnS、Cu₂O、BaSi₂ などの研究開発も活発化してきている。CZTS の公式最高効率は 10.0% (1.113 cm², UNSW) に書き換えられた。

• 集光型太陽光発電

ビル壁面や自動車屋根などの新しい設置方式では、太陽電池コストよりも工事費などの付帯費用がかさむので、限られた設置面積でいかに発電量を増大するかといった方向に関心が移りつつある。最高効率の太陽電池は集光型太陽電池であるので、さらなる高効率化を求め、欧州を中心に、新しい集光型太陽電池の研究開発が再燃している。大型架台を用いて大型パネルを高精度で追尾するといった、これまでの手法ではなく、微細な光学系やセル、モジュール内蔵の薄型駆動機構を組み込んだマイクロCPV (Concentrator photovoltaic) の新技術が研究開発の主流である。

• 有機薄膜型太陽電池

この数年で急激な特性改善がなされている。2022 年の Best Research-Cell Efficiencies (米 NREL) に掲載されている世界最高変換効率は、上海交通大学-北京航空航天大学 (SJTU-BUAA) の非フラーレン・アクセプター (NFA) を用いた高分子系太陽電池の 18.2% である。また、上海交通大学の Liu らの研究グループは、二種類の非フラーレン・アクセプターを高分子ドナーに添加したセルにより 19.3% (中国 NPVM での認証値は 19.2%) の変換効率を達成している。この分野は NFA を開発した中国が牽引しており、それ以外のグループでも 19% 台の変換効率が報告されている。また、耐久性に関しても非常に大きい進展があり、砂漠での耐久性試験や実験室での加速試験で実用上問題ないことが証明されている。応用面では、非フラーレン・アクセプターを用いた有機薄膜太陽電池は、可視域の透過率を高めた半透明~透明太陽電池としての応用研究が急速に進展している。今後の市場への投入に向け、特に製造工程を考えると、溶液を用いた各種塗布法で製造できる高分子系太陽電池のさらなる進展が望まれる。

リコーが九州大学との共同研究成果に基づき、有機薄膜太陽電池を用いたフレキシブル環境発電デバイスの市場投入を開始した。この太陽電池は、適応照度域が広く形状が自由なフレキシブルデバイスとして期待されている。現在のベンチャー企業としては、米国の NanoFlex Power Corporation 社やドイツの Heliatek 社が挙げられる。また、東洋紡はフランス原子力・代替エネルギー庁 (CEA) と共同研究を実施している。2022 年に有機光ダイオードで世界トップクラスの感度を有するフィルム型モジュール試作に成功し、2025 年までの実用化を目指している。グローバルな産官学連携の観点からも注目に値する取り組みである。

• 色素増感型太陽電池

色素増感太陽電池の最高変換効率は EPFL の 13.0% である (米 NREL 認証)。ただ、他の有機系太陽電池である有機薄膜型やペロブスカイト型に比較して、変換効率の観点からはほとんど飽和状態にある。一方、商品化に向けた取り組みには進展が見られている。リコーは 2020 年、完全固体型色素増感太陽電池モジュールの販売を開始している。色素増感太陽電池で完全固体型の実用化は世界初となる。同社はこの太陽電池を

用いて、二酸化炭素 (CO₂) 濃度センサーを発売している。

色素増感太陽電池の世界の主要なベンチャー企業は、G24i社から発展した G24 Power社 (英国) と 3GSolar社 (イスラエル) がある。色素増感太陽電池は実用化段階に入っており、研究者数そのものは大幅に減少傾向にある。それに伴い、ペロブスカイト系太陽電池の研究人口が増加している。色素増感太陽電池の世界の研究開発拠点として依然活発なのは、スイスEPFLのGrätzelとHagfeldtのグループである。ドナー・アクセプター結合型の新規色素の開発が継続されている。さらに電解質では、 V_{oc} のロスがヨウ素系電解液よりも小さい Co 系、Cu 系電解液を用いた高効率化研究に集約されてきている。EPFL以外では、中国のグループが研究開発を精力的に進めている。可能性のある用途の一つとして、色素増感太陽電池も有機薄膜太陽電池同様、透明太陽電池の研究が進められている。

• ペロブスカイト太陽電池

ペロブスカイト太陽電池は、2012年に発表された現在の固体型デバイス構造で10%を超える変換効率が発表されたのを契機に、国内外で熾烈な効率競争が展開されている。2022年現在、ペロブスカイト太陽電池の単セルの光電変換効率の最高値は25.7% (NREL 認証) となっている。本格的な開発研究が始まって10年足らずで急速に変換効率が上昇している。

ペロブスカイト半導体材料開発としては、金属ハライド型と呼ばれる ABX₃ 型の半導体材料における各サイトのイオン種や組成の組み合わせによるバンド構造の調整が主な研究課題となる。初期にはシンプルな MAPbI₃ (MA = メチルアンモニウム、~800 nm、1.55 eV) が多く用いられてきたが、より長波長領域 (~840 nm、1.5 eV) に吸収特性をもつ FAPbI₃ (FA = ホルムアミノジウム) は Pb 系の理想的な材料として期待が集まっている。近年 FAPbI₃ の室温付近での δ 相への相転移という課題に対して、A サイトや X サイトにイオンをドーブしたミックスイオン型の材料が、 α 相の安定性および塗布成膜による高品質なペロブスカイト薄膜の作製が容易という点から、主流となってきている。また、最近のトレンドとしては、ペロブスカイト層の結晶化過程の制御、耐久性の向上、電荷の取り出し効率の向上という観点から、表面のパッシベーション技術の開発が多く報告されている。

また、高い熱安定性をもつ材料として、CsPbI₂Br などオール無機ペロブスカイト半導体を用いた太陽電池の研究も活発化している。

一方、鉛フリー化材料として、Pb を Sn に置き換えた Sn 系ペロブスカイトの開発が進んでいる。PEABr などの大きなアンモニウムイオンを用いた 2D/3D 混合型のペロブスカイト材料を用いて、14.8% まで変換効率が向上している。また、B サイトに Sn-Pb を 1:1 で用いた混合型では 1000 nm を超える波長領域で光電変換が可能であり、上下の表面パッシベーション技術の開発により、23.6% の光電変換効率が達成されている。ペロブスカイト層からの電荷の取り出し効率の向上と、ペロブスカイト層自体の安定性の向上の観点から、表面パッシベーション材料・技術開発が、本分野における重要な方向性の一つとなっている。

電荷回収層材料の開発による高性能化研究も活発化に行われている。n-i-p 型の順型デバイスにおいて、電子回収層の SnO₂ の材料開発および表面処理技術により、25% を超える変換効率が報告されている。また、p-i-n 型の逆型構造デバイスでは、正孔回収層として、PEDOT:PSS や PTAA などのポリマー材料などの従来のバルク層材料に変わり、カルバゾール誘導体など単分子系の材料を用いて高性能化、高耐久化研究が進んでいる。これらの電荷回収層材料とペロブスカイト層との界面構造の詳細は依然不明な部分が多い。今後、これらの界面の科学の解明に基づいた材料の開発研究が、ペロブスカイト太陽電池の高性能化および高耐久性に重要な鍵を握るものと考えられる。

大量製造法の確立に向けたペロブスカイト層の大面积塗工法として、従来の貧溶媒滴下を伴ったスピンコート法に代わる手法の開発が進められている。塗布法としては、ダイコートやインクジェット法など様々な手法が利用できるが、結晶核の形成とグレインの成長過程の制御が課題である。中間体構造や核形成に効果をもつ溶媒や添加剤の開発が報告されている。特に塗布後の乾燥・加熱過程が重要であり、エアナイフ法や真空

乾燥法などが用いられている。材料化学およびプロセスエンジニアリングの双方の視点から、前駆体のインクの開発とプロセスの開発が進むことで、大量製造法が確立し、実用化が加速するものと期待される。

• タンデム型太陽電池

単接合セルでは、変換効率の限界に近づいていることから、高効率化への科学的根拠が明確である多接合型太陽電池への期待が高まっている。単接合太陽電池の材料が、結晶シリコン、CIS、CdTe、III-V族化合物半導体、ペロブスカイト、有機半導体と多様であることから、それらの組み合わせによる多接合太陽電池の材料構成の選択肢は極めて多い。そのため、人工衛星用や集光用で実績があるIII-V族化合物多接合太陽電池に加えて、特に二接合のタンデム太陽電池では、ペロブスカイト/Si、ペロブスカイト/CIS、化合物/Si、化合物/CIS、CIS/CIS、ペロブスカイト/ペロブスカイトなど多様な検討が行われている。どのような光吸収層の組み合わせにおいても、二端子型では各セルの電流整合が必要になることから、光マネジメントのためのセル構造の最適化が重要である。光吸収層の組成・膜厚、適切な屈折率の反射防止膜や中間層、裏面構造など検討事項は多い。例えばボトムセルの研究開発においては、トップセルによって太陽光の短波長領域は吸収されることとなる。よって、太陽光スペクトルの中でも、長波長領域の感度を最大化するような工夫が必要であり、光学的な設計は単接合太陽電池セルの場合とは全く異なる。異種材料の積層方法は、エピタキシャル成長や溶液成長など製膜技術によるものや、機械的な接合などいくつかの選択肢があり、それぞれにおいて解決すべき課題は多い。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発」(2020～2024年度)では、太陽光発電の大量導入社会の実現に向け顕在化する様々な課題の解決に向けた技術開発が産学連携体制で実施されている。太陽光発電の新市場開拓に向け、重量制約の有る屋根、建物壁面、移動体などに設置可能な太陽電池セル・モジュールの技術開発や、太陽光発電モジュールの低コストリサイクル技術の開発が進められている。具体的には、軽量基板上化合物薄膜太陽電池の高効率化技術、軽量CIS太陽電池製造要素技術、量子ドットを利用したシースルー太陽電池、壁面設置太陽電池の高性能化技術や生涯発電量最大化技術、移動体用超高効率モジュール技術開発、ペロブスカイト/Siタンデム太陽電池のプロセス技術開発、低環境負荷マテリアルリサイクル技術開発などが進められている。
- NEDO「クリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発事業」(2020～2024年度)では、太陽電池分野における国際共同研究が進展している。CIS系タンデム太陽電池要素技術、鉛フリー・アロイ化錫ペロブスカイト・タンデム太陽電池、金属酸化物パッシベーションコンタクトとSi量子ドット・ペロブスカイト複合膜を利用した低コスト・高耐久なタンデム太陽電池、多様な材料系を統合した軽量・フレキシブル多接合太陽電池などの研究開発が進められている。
- NEDO「グリーンイノベーション基金」では、重点14分野のうち、エネルギー関連産業の「次世代太陽電池の開発」として、ペロブスカイト太陽電池の基盤技術開発や、製品レベルの大型化を実現するための各製造プロセスの個別要素技術の確立に向けた研究開発が採択されている。
- JST未来社会創造事業でも、小規模ながら非鉛系ペロブスカイト太陽電池、有機薄膜太陽電池の研究開発が進行している。

(5) 科学技術的課題

カーボンニュートラルの世界的な動きを受けて、太陽光発電の導入量は加速度的に増加すると予測されている。このような需要に応えるためには、太陽電池そのものの開発もさることながら、システム技術としての成熟や電力系統との統合技術の向上、持続可能性への配慮が求められる。以上の観点から次のような課題に取り組むことが求められる。

• データ科学を活用したPV開発

近年、さまざまな科学技術分野において、実験科学、理論科学、計算科学に加えてデータ科学を連携させ、機械学習や深層学習を用いることで優れた研究成果が創出されるようになってきている。太陽光発電分野においても太陽電池セル・モジュールの開発や評価から太陽光発電設備のオペレーション・メンテナンスに至る多様な研究テーマが、データ科学応用により進展することが期待されている。具体的には、光吸収層や接合形成材料の新材料探索、複雑なセル構造を記述する多数の構造パラメータや材料選択の最適化、セルやモジュール製造の多次元のプロセスパラメータの最適化、セルやモジュールの故障解析、大量の気象データや地図データなどを用いた発電量予測、データを活用したメンテナンス時期の推定など幅広い研究領域に対してデータ科学応用は有用であると考えられる。

• 資源代替・リサイクル技術

2022年は、いよいよ太陽光発電の累積導入量がTWに到達しており、世界の脱炭素化に向けて、さらに導入量は増加すると予想されている。太陽電池にはさまざまなセル構造や材料が用いられているが、変換効率・コスト・長期信頼性に加えて持続可能性という観点で材料の選択やセル構造の設計を行う必要がある。例えば、現状多くの太陽電池セルでは表面電極に銀が用いられているが、その使用量の低減やアルニウムなどベースメタルへの代替は重要な課題といえる。また、ナノ材料に関する有害物質規制も欧州を中心に議論が進んでいるため、革新太陽電池における材料開発においてもこれらの動向を考慮する必要がある。特にペロブスカイト材料における鉛フリー化技術の確立は重要な課題である。さらに、資源の乏しい日本において、大量に導入されている太陽電池モジュールは、潜在的な資源と考えられる。経年劣化等により使用済みモジュールが排出される際には、有用な資源を回収し、太陽電池モジュールの製造に用いるなど、再度高付加価値ができるようなリサイクル技術の開発も重要なテーマである。

• 熱エネルギーとのハイブリッド化

太陽電池は、一般的に好天時に温度が上昇すると変換効率が低下する特性が知られている。また、雨天時には日射量が低下し、出力が低下する。このような熱的特性に起因する性能低下をエネルギーハーベスティングなどの熱と電気のハイブリッド化技術によってマネジメントするという研究の方向性があげられる。従来の太陽光発電と太陽熱発電をモジュールとしてハイブリッド化するのではなく、材料・セルレベルでの革新的な研究開発が期待される。

(6) その他の課題

太陽電池の研究開発は、太陽電池メーカーと大学・国研との共同研究が典型的な体制であった。これからは再生可能エネルギーが広く普及した未来社会のビジョンを市民も含めた多くのステークホルダーが共有し、バックキャストिंगすることで課題を抽出し、そのような課題をダイナミックに変化させながら研究を進めていくような拠点形成が必要となる。太陽電池のユーザーとなる自動車会社、建設業界、農業従事者、金融機関、自治体なども参画し、産学連携・異分野連携体制の構築が重要である。

量産太陽電池の製造は80%以上が中国で行われているが、人権侵害に対する配慮から欧米で貿易・輸入制限が実施されている。このような背景から安定した太陽電池の供給が得られるように、欧米では太陽電池の製造拠点の構築が進み、金融、税制優遇などでの大きなインセンティブが用意され、投資リスク軽減の政策が実施されている。このような動きは、インドなどの新興国においてもみられる。日本では、政策支援による製造の国内回帰の動きは鈍く、企業の高い技術力が衰退してしまうことや、太陽電池セル・モジュールの安定した供給が得られなくなるリスクがある。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 高度な光とキャリアのマネジメントを具現化する多様な材料やプロセス技術が大学や国研で創出されている。特に、太陽光発電の利用領域拡大や新市場形成に向けた多様な太陽電池セル・モジュールの開発に向けた基礎研究が実施されている。 JST や NEDO のプロジェクトをはじめとした国の主導的な取り組みが継続されている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> さまざまな種類の太陽電池で、変換効率の世界最高記録を保持するなど、高い技術力を保有している。一方で、ソーラーフロンティアが CIS 太陽電池製造から撤退するなど大手太陽電池メーカーにおける国内の研究開発や生産体制は縮小傾向にある。 有機系太陽電池では、リコーが九州大学との共同研究にもとづき、フレキシブル環境発電デバイスを市場投入している。 ペロブスカイト太陽電池では、産官学の研究連携が進み、大面積塗工技術およびフィルム化技術で国内企業が世界最高値を記録するなどリードしている (パナソニック、東芝、積水化学、カネカ、アイシン、エネコトなど)。
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> MIT ではハイスループット実験、機械学習、シミュレーションを融合することで、太陽電池に適用可能な鉛フリーペロブスカイト化合物やその劣化を抑制するキャップ層材料の探索や太陽電池の耐久性向上のための材料探索が進展している。 多くの電池系において NREL が先導的な取り組みを進めており、結晶 Si をベースとするヘテロ接合太陽電池の高効率化や、ペロブスカイトと結晶 Si のタンデム化などが実施されている。 NREL を中心とした研究開発コンソーシアム US-MAP が設立され、ペロブスカイト太陽電池の商業化に向けた基礎研究が進展している。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 米中間貿易摩擦激化により、国内太陽電池モジュール生産能力が増加傾向にある。 SunPower 社は、裏面接合型の結晶 Si 太陽電池モジュールで 25.2% と高い効率を達成している。CdTe 太陽電池市場には、新たな製造企業も参入している。 有機系太陽電池ベンチャーの草分けとして、高分子系では Solarmer Energy 社、低分子系では NanoFlex 社、Power Corporation 社が活躍中である。Ubiquitous Energy 社が有機薄膜太陽電池を用いた透明窓用太陽光発電パネルを開発しており、その製品を用いて ENEOS と日本板ガラスが実証試験を実施している。 ペロブスカイト太陽電池では、n TACT、Hunt Perovskite、Swift Solar、Solar-Tectic、Energy Material Corp.、Tandem PV、Solaires Enterprises Inc. (Canada) など多くの新興企業が設立され、実用化に向けて活動中。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 結晶 Si 系の要素技術についての基礎研究は、非常に高い研究水準を維持している。ドイツ Fraunhofer 研究所、ISFH、Konstanz 大学、HZB、オランダ TNO、ベルギー IMEC、仏 INES、スイス EPFL、CSEM など、各国の研究機関が中核的研究機関として学界・産業界をリードしている。トンネルパッシベーションコンタクト、キャリア選択性新材料を利用したヘテロ接合セル、ペロブスカイト/Si タンデムセルなど新規な取り組みで多くの成果が報告されている。 有機系太陽電池においては、有機薄膜型の研究が依然としてさかんであるが、スイス EPFL に代表されるように、研究の中心をペロブスカイト太陽電池に移行する動きも多くみられる。有機薄膜型では英国 Imperial College やケンブリッジ大学が基礎研究を牽引している。 ペロブスカイト太陽電池では固体化セルを開発したオックスフォード大学が世界の研究開発の中心となっている。さらに、ベルギー IMEC では有機系太陽電池の研究が精力的に実施されている。

2.1
俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

2.1 俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> 「EUソーラー・エネルギー戦略」において、欧州内に太陽電池製造拠点を再構築し、太陽電池セル・モジュールの需要を中国などからの輸入に依存せずに、安定供給することの必要性が言及されている。スイス、イタリア、フランス、ドイツなどで太陽電池製造ラインの構築が進み、研究機関においても産業を支える基盤的な応用研究が活性化している。 ペロブスカイト太陽電池では、Oxford PV、Saule technologies、Sollianceなどの新興企業や技術組合の取り組みが活性化している。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 結晶Si系太陽電池は、産業として急速な発展を遂げており、国家計画の下で、公的研究機関・大学が研究開発を推進している。 有機系太陽電池やペロブスカイト太陽電池においても留学時に培った人脈を活かし、国際共同で基礎研究を推進。潤沢な研究資金で猛烈な進歩を遂げており、世界をリードする研究水準となっている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 中国における2021年の太陽電池セル・モジュールの生産量は、世界全体の80%超を占めた。2021年末時点の太陽電池生産能力は約360GW/年に到達している。LONGi社が、M6規格(166mm角、274.4cm²)のヘテロ接合型太陽電池セルで変換効率26.5%の世界記録を達成するなど、多くの企業が量産レベルでの高性能セル・モジュールを開発している。 ペロブスカイト太陽電池も含め有機系太陽電池に関して多くのベンチャー企業の活動が活発化。Microquanta、UtmoLight、Wonder Solar社など。
韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電産業を育成しようとペロブスカイト、有機薄膜、タンデム太陽電池など多様な太陽電池の基礎研究を手厚く支援している。2021年には、研究開発拠点として、エネルギー研究に特化したKENTECHが新設された。 ペロブスカイト太陽電池では、世界トップレベルを走っており、UNISTが世界最高変換効率25.7% (米国NREL認証)を達成している。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 2050年カーボンニュートラル達成に向けたロードマップが設定され、太陽光発電の応用研究開発へも大きな投資が進む。大規模な洋上太陽光発電の実証実験、有機太陽電池のIoT応用研究など幅広い応用研究が実施されている。 Hanhwa Solutions社は結晶シリコンセルとモジュールの生産量の大幅な拡大を進めている。タンデム太陽電池の面積化に成功したことが報告され、2025年の量産を目指した研究開発を行っている。現代自動車は、自動車用次世代太陽電池の産学連携研究体制を構築し、PV搭載電気自動車向けのタンデム太陽電池の研究開発を行っている。 ペロブスカイト太陽電池については、Frontier Energy Solutionが廃業するなど、実用化に向けた本格的な動きは見えない。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・太陽光発電 (環境・エネ分野 2.1.3)
- ・有機無機ハイブリッド材料 (ナノテク・材料分野 2.5.6)

参考・引用文献

1) Martin A. Green, et al., “Solar cell efficiency tables (Version 60),” *Progress in Photovoltaics*

- 30, no. 7 (2022) : 687-701., <https://doi.org/10.1002/pip.3595>.
- 2) National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Best Research-Cell Efficiency Chart,” <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, (2023年1月26日アクセス) .
- 3) Eiji Kobayashi, et al., “Light-induced performance increase of carbon-based perovskite solar module for 20-year stability,” *Cell Reports Physical Science* 2, no. 12 (2021) : 100648., <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100648>.
- 4) Michael Saliba, et al., “Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency,” *Energy & Environmental Science* 9, no. 6 (2016) : 1989-1997., <https://doi.org/10.1039/C5EE03874J>.
- 5) Kohei Nishimura, et al., “Lead-free tin-halide perovskite solar cells with 13% efficiency,” *Nano Energy* 74 (2020) : 104858., <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104858>.
- 6) Zhanglin Guo, et al., “ V_{oc} Over 1.4 V for Amorphous Tin-Oxide-Based Dopant-Free CsPbI₂Br Perovskite Solar Cells,” *Journal of the American Chemical Society* 142, no. 21 (2020) : 9725-9734., <https://doi.org/10.1021/jacs.0c02227>.

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用