

2.1.1 次世代太陽電池材料

(1) 研究開発領域の定義

太陽電池は、太陽光エネルギーを直接電気エネルギーに変換するデバイス/テクノロジーであり、長きにわたる研究開発の結果、広く社会実装が進んではいるが、パリ協定後のGHG削減のために、より一層の普及が求められている。普及に必要な、高効率化・低コスト化を実現するための技術的検討は、もっとも古くから実用化されたシリコンの単結晶/多結晶/薄膜系、高効率太陽電池の代表である III-V 化合物系、低コスト高効率特徴の CdTe、CIS 系に加え、近年、研究開発人口が増え効率が急上昇してきたペロブスカイト系などに対してさかんに行われている。これらに加え将来の超高効率化に向けた次世代太陽電池についても注目する。

(2) キーワード

シリコン系太陽電池、PERC 型セル、パッシベーションコンタクト、CdTe、薄膜太陽電池、CIS 薄膜太陽電池、低コスト化、高効率化、有機系太陽電池、分子設計、プロセス技術、劣化機構の解明、ペロブスカイト太陽電池、タンデム化、車載太陽電池、モジュール、リサイクル

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

地球環境・温暖化問題は、今世紀に入りますます顕在化し、喫緊の対応が必要となっている。2018 年 7 月に閣議決定された日本の第 5 次エネルギー基本計画では、再生可能エネルギーについて、確実な主力電源化への布石としての取組を早期に進めることが明記され、また、2020 年に就任した菅首相は、その所信表明演説において、2050 年に温室効果ガスをゼロとすることを宣言するなど、わが国の再生可能エネルギー導入の姿勢は、大きく前進し始めている。

再生可能エネルギーの一番手である太陽光発電の大量導入は、明らかに世界の潮流となっている。すでに海外においては、超大規模発電所として、太陽光発電設備の建設が急激に進んでおり、日射量が豊富で大規模なシステムを安価に構築可能な中東地域では、1.6 USセント/kWh 以下の入札事例が出てくるなど、低炭素かつ安価な電源として実績を出し始めている。

日本国内でも太陽光発電の普及は進んでおり、わが国における導入量は、2030 年のエネルギーミックスで示された目標 64 GW に、2019 年末時点ではほぼ到達している。しかし、2050 年に向けた再生可能エネルギーを中心とする脱炭素化エネルギーシステムの構築には、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。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に加えて、太陽光発電の「利用領域の拡大」を通じて、導入量を増やしていくことが重要となる。そのためには、用途に応じて、軽量、フレキシブル、任意形状、設置容易性、交換可能といった求められる機能を持つとともに、意匠性にも優れた、さまざまなタイプの太陽電池を提供することや、ゲームチェンジング・テクノロジーとなりうる第三世代太陽電池を早期実現することが、非常に重要な研究ターゲットとなっている。

[研究開発の動向]

Si 系太陽電池や化合物半導体系太陽電池では、極限まで変換効率を高めるために、材料の点欠陥・表面

欠陥の低減、表面・界面パッシベーション技術、光マネジメントの最適化などの研究がさかんに行われてきた。また、集光型太陽光発電は、太陽電池の使用量が圧倒的に少量化できるため、低コスト化のための新技術として注目され始めている。

変換効率を極限まで高めるためには、さまざまな要素技術の研究開発が必要となる。結晶Si太陽電池では、金属酸化物や窒化物、二次元物質、有機高分子などの異種材料により高いパッシベーション性能と高い伝導特性を両立するパッシベーターティッドコンタクト技術、表面・界面での精緻な化学組成制御などによる高性能パッシベーション、基板の超薄型化や超薄型基板にも対応可能な表面ナノ構造形成技術を駆使した光マネジメントなどの高効率化技術が必要である。また、低コスト化に向けて高品質基板の低コスト製造技術に対して産業界からの根強い要請があり、擬単結晶などの高品質インゴット製造技術、基板の大型化・薄型化技術の開発が必要である。高効率結晶シリコン太陽電池の主流であるPERC (Passivated Emitter and Rear Cell) 型およびその改良版のPERL (Passivated Emitter and Rear Locally Diffused) 型の太陽電池では、光照射・温度上昇による劣化現象であるLeTID (Light and elevated Temperature Induced Degradation) が課題となっており、その発生メカニズムの解明と抑制手法の確立が重要となっている。また、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、接合界面のデザインとデザインした界面を実現するプロセス技術の開発が必要である。化合物系の太陽電池に関しては、今後、さらなる効率向上と低コスト化のために、集光型太陽光発電関連技術が重要となる。

CIS太陽電池では企業が高度な製造技術を有し、これを支える形で大学・国立研究所が学術的知見の蓄積・提供と新たな高効率化要素技術の開発を行っている。実用化規模の面積モジュールの高効率化および低コスト製造プロセスにおいて日本は世界最高水準の技術を有している。超高効率太陽電池などの次世代技術への研究開発も米国、日本、欧州で進められているが、先進諸国の太陽電池企業の多くは中国、韓国など新興国の安価なシリコン太陽電池や米国のCdTe太陽電池との低コスト競争により停滞傾向にある。近年、CIS太陽電池では、CIS光吸収層の改良 (K、Cs、Rb添加など)、接合界面の改質 (CIS表面層のIn酸化物の制御)、バルクのキャリア密度上昇による高効率化のブレイクスルーがあり、変換効率23.4%を達成している。

有機系太陽電池として期待されている有機薄膜太陽電池に関しては、ここ数年の急激な特性向上 (変換効率及び耐久性) により、一時の停滞期から脱して再び世界的に研究開発がさかんになってきた。現在、この研究を牽引しているのは米国と中国である。最近の進展は、新素材である非フルーレン・アクセプター (NFA) と、素子構造の精密制御によるところが大きい。今後さらなる変換効率の向上には、新規熱活性化遅延蛍光 (TADF) 材料や新規導電性ポリマーを用いた高効率有機太陽電池の研究、一重項エキシトン解裂を用いた革新的有機太陽電池の研究、三重項色素を用いた革新的有機太陽電池の研究に加え、エキシトン解離に必要なバンド構造 (オフセット・エネルギー) の解明が求められる。

量子ドット太陽電池に関しては、量子ドット・ナノワイヤを利用したもの、異なるバンドギャップを有する量子ナノ円盤構造を利用したものなどが提案されている。最近では、新規ペロブスカイト化合物 (CsPbX_3) にて構成された量子ドットが注目されはじめ、マルチエキシトン生成を示唆する結果が報告されている。変換効率も PbS 量子ドットの記録を破り、 $\text{Cs}_{0.5}\text{FA}_{0.5}\text{PbI}_3$ (FA: formamidinium) 量子ドット太陽電池にて16.6%が報告されている (豪クイーンズランド大学)。

ペロブスカイト太陽電池においては、発明からわずか9年ほどで、25.2%の変換効率が達成されている (米NREL 認証)。今後は、より一層の高効率化をめざした新規ペロブスカイト化合物やホール輸送剤の開発と発電機構の解明、高耐久化をめざした劣化機構の解明、低毒性化を目標とした非鉛系ペロブスカイト化合物の開発が重要となる。これらの有機系太陽電池の研究開発では、新材料の創出に向け、マテリアルズ・イン

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

フォーマティクス (MI) の活用が精力的に行われるようになってきている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

結晶 Si 太陽電池

太陽電池用 Si 基板のシェアは、単結晶が増加傾向にあり、2019年度に単結晶が約65%、多結晶が約35%と数年前より多結晶を逆転している。また、日本発の技術である機能性欠陥の活用や種結晶のアレンジを工夫することで高品質擬単結晶インゴットを製造する技術についての研究が世界的に広がり、中国・GCLは量産化に至っている。基板サイズは、156.75 mm角 (M2規格) が世界市場の約70%を占めるが、将来的に166 mm角 (M6規格)、182 mm角 (M10規格)、210 mm角 (M12規格) に置き換えられるとの予測がある。

高性能セルの研究開発においては、単結晶シリコンでは、表面に電極のないバックコンタクト構造とアモルファス Si をベースとするヘテロ接合を複合化したセル構造を採用したカネカ社が26.73% (産業技術総合研究所測定) の世界最高効率を保有している。ホモ接合における最高効率はドイツ・ハーメルン太陽エネルギー研究所が報告した26.1%であり、n型単結晶をベースとし、バックコンタクト構造、酸化膜によるパッシベーション (ピンホールもしくはトンネリングにより導電性を担保)、高ドーブ多結晶薄膜による接合を複合化した構造を採用している。多結晶 Si 基板をベースとするセルでは、中国・Jinko Solarが23.3%を達成し、中国・Trina Solarの持つ23.2%を0.1%更新した。プロセスが煩雑なバックコンタクト型に対し、よりシンプルなプロセスで高効率を追求する新規セル構造として、ドイツのフラウンホーファー研究所は、界面再結合速度の小さい酸化膜を介してトンネル効果により電流を収集する「トンネル酸化膜パッシベティッドコンタクト構造 (TOPCon)」を提案し、その後、量産化技術開発も含め研究が世界中に広がっている。また、ヘテロ接合型太陽電池で課題となっている接合材料中での寄生吸収の低減に向け、より大きなバンドギャップをもつ酸化チタン、酸化モリブデン、酸化ニッケル、窒化チタンなどの金属酸化物や窒化物、グラフェンやカルコゲン化合物などの二次元物質、有機 EL や有機薄膜太陽電池のキャリア輸送層に利用される PEDOT/PSS などの導電性有機高分子をヘテロ接合形成に適用する試みが行われている。

結晶 Si 太陽電池モジュールの廃棄・リサイクルのための技術開発も進んでいる。株式会社 NPC では、使用済み太陽電池モジュールの部材の分離を行うための手法として、ホットナイフ分離法を開発し、実用化している。加熱した金属刃を太陽電池モジュールのカバーガラスと封止材の間に差し入れて掃引することで、両者を効率よく分離できる。装置化も完了し、国内リサイクル会社での運用が始まっている。

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ネルギーハーベストデバイスとしての活用も期待される。東京都市大では IoT 用エネルギーハーベストデバイス応用を目的に両面受光型薄膜 Si 5 接合太陽電池を作製し、3000 lux の LED 照射下で 4V 以上の開放電圧を報告している。非晶質 Si、微結晶 Si では産総研などにより近年世界最高効率が更新され、着実な技術の向上がみられる。薄膜結晶 Si では、2020年に Helmholtz Zentrum Berlin (HZB) がラインレーザによる溶融・

結晶化により、14 μ m厚の Si 結晶薄膜を作製し、IBC-SHJ セルにて開放電圧 645 mV、変換効率 15.1% を達成した。

CIS 系太陽電池

ソーラーフロンティア社が年産 1 GW を有するとともに、小面積セルでの世界最高効率 (23.4%) を誇るなど、日本が世界を牽引している。近年、CIS 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注目され、これらの処理によって光吸収層の品質が向上し、変換効率の向上を後押ししている。CIS 系タンデム型太陽電池の実現に向けては、ワイドギャップの硫化物カルコパイライトである Cu (In,Ga) S₂ が開発され 16% の効率が確認されている。効率 30% のタンデムセルを実現するには、ボトムセルに 24% の CIS 太陽電池を用いた場合を想定すると、トップセルである Cu (In,Ga) S₂ には少なくとも 18% 以上が要求され、高効率化の研究が今後も求められる。

また、CIS の代替をめざして、レアメタルフリーの材料も開発が進められている。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。CZTSSe の公式最高効率は 11.3% (1.1761 cm²、韓国の DGIST) である。

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 (効率 47.1%)、高効率を求め、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。また、従来型技術では直達日射しか活用していなかったために CPV は高直達日射が得られる乾燥地域向けの大規模発電プラント向け技術とされていたが、マイクロ CPV では、微小光学系、微小駆動機構を組み込んでおり、通常のソーラーパネルと同程度の厚さで、かつ、通常のパネルと同様に、定置設置が可能である。

ドイツでは Si 太陽電池の上に 1 mm 程度の集光型太陽電池を配置する手法で 34.1% のモジュール効率を記録している (集光型太陽電池の透過光を活用するとともに、パネル背面からの光も活用)。EU のプロジェクト (イタリア、スペイン) では、薄型モジュール内部に追尾機構を組み込み、35.4% のモジュール効率を達成した。米国では、マイクロ CPV の衛星用ソーラーパネルへの応用が進められている。日本では、機構による追尾に一切頼らず、非結像光学系技術を駆使した全天からの太陽光の有効利用により、32.8% のモジュール効率を達成した。この方式は、また、曲面化が可能であることから、高い信頼性が要求される車載応用が期待されている。

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。2020 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-マサチューセッツ大学 (SJTU-UMass) の非フラーレン・アクセプターを用いた低分子系太陽電池の 17.4% である。また、高分子系太陽電池では、浙江大学の Chen らの研究グループは、2 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

17.0%の変換効率を達成している。

また、耐久性に関しても非常に大きい進展があり、プリンストン大学のForrestらによって実用上問題がないことが証明された。以前砂漠での耐久性試験でセルの安定性を確認していたが、昨年実験室での加速試験で27,000年安定である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。

一方、発電機構の面では、励起子を解離するために必要と考えられてきたドナー・アクセプター材料のエネルギーオフセットが0.1eV未満の系でも、効率良く電荷生成する系が報告されている。これにより、エネルギーギャップ E_g と開放電圧 V_{oc} との光エネルギー損失が0.5 eVを切る系が報告されるようになった。有機薄膜太陽電池のもっとも大きな損失過程が低減できる可能性があるため、今後のさらなる機構解明が求められる。現在の有機薄膜型のベンチャー企業としては、米国のNanoFlex Power CorporationやドイツのHeliatekがあげられる。

色素増感型太陽電池

シャープが2012年に達成していた色素増感太陽電池の最高変換効率を、8年ぶりにEPFLが更新し、12.3%になった(米NREL認証)。他の有機系太陽電池に比較して、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みられ、最近の最大のニュースは、リコーが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たことである。色素増感太陽電池で完全固体型は世界初となる。

色素増感太陽電池の世界の主要なベンチャー企業は、G24iから発展したG24 Power(英国)と3GSolar(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。現在、色素増感太陽電池の世界の研究開発拠点として残っているのは、EPFLのGrätzel研とHagfeldt研である。その研究は、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、Voc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た。

ペロブスカイト太陽電池

現在の世界最高変換効率は高麗大学の25.2%である(米NREL認証)。シングルセルでの変換効率は上限に近づいてきており、それに合わせて商品化に向けた取り組みがさかんになってきた。わが国での最近のトピックとしては、パナソニックがNEDO事業「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」で、大面積モジュール(開口面積802 cm²:縦30cm×横30cm)で世界最高変換効率16.09%を達成したことがあげられる。この製造工程では、低コスト化が可能なインクジェット法が用いられている。また、三菱マテリアルは本年、ペロブスカイト太陽電池の製品化をめざすエネコートテクノロジーズ(京大発スタートアップ)へ出資を行った。エネコートテクノロジーズはJSTおよびNEDOプロジェクトで得られた成果を活用している。また、欧米でも新たな取り組みが継続しており、ドイツFraunhofer研究所による建材用途に大面積セルの作製、英国のベンチャー企業Oxford Photovoltaicsのペロブスカイト/シリコンタンデム型太陽電池の研究開発などの例があるほか、ベルギーでは、IMECがペロブスカイト/シリコンタンデム型太陽電池の研究開発を精力的に進めている。また、カナダ・サスカチュワン大学ではフレキシブル太陽電池実現の可能性が明らか

にされている。

上記のペロブスカイト太陽電池は鉛を用いているが、その毒性に対する懸念から、鉛フリーの研究もさかんであり、ハロゲン化 Bi 系金属化合物で 4% 程度の効率が報告されている。また、もっとも研究が注力されている Sn 系ペロブスカイト太陽電池の効率も上がってきており、再現性のある 10% 以上の変換効率が報告されている。

高効率化をめざした研究開発では、世界中で各種タンデムセルが精力的に検討されている。シリコンとのタンデムセルでは、世界最高の変換効率はドイツ HZB Institute の 29.1% である (米 NREL 認証値)。なお、先に述べた Oxford Photovoltaics は 28% の変換効率を得ている。さらに、究極のセルであるペロブスカイト・ペロブスカイト・タンデムセルでは、スタンフォード大学とオックスフォード大学が共同で 20.3% を達成している。タンデム化においてはシングルセルで 25% 以上が達成されているため、26% 以上の変換効率が求められ、それをめざした研究開発が世界中で精力的に実施されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・ 2020 年度より、NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発」が開始された。このプロジェクトは、太陽光発電の主力電源化を推進するため、需要地に近接しているが従来の技術では太陽光発電の導入が進んでいなかった場所を利用可能にするための太陽光発電システム開発や、長期安定的な事業運営を可能にするために、現在顕在化している事業上の課題を解決する技術開発を行うものである。新市場創造技術開発、および、安全性・信頼性確保技術開発の課題に対して、産学連携体制で真正面からの取り組みが期待されている。
- ・ NEDO では、2020 年度より「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」が開始された。この事業は、2030 年以降に温室効果ガス排出量の大幅削減など、気候変動問題解決に資するクリーンエネルギーや環境分野における革新的技術の開発を目的として実施するものであり、太陽光発電の技術ポテンシャルへの期待も大きい。
- ・ Si 系太陽電池に関しては、2015～2020 年に NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発プロジェクト」が実施され、6 大学 (豊田工業大学、明治大学、名古屋大学、九州大学、東京工業大学、兵庫県立大学) コンソーシアム体制によるヘテロ接合太陽電池など次世代型セルのオープンイノベーションプラットフォームが構築された。また、北陸先端科学技術大学院大学では、Cat-CVD によるドーピングやパッシベーション技術のヘテロ接合太陽電池への実装で進展があった。産業技術総合研究所では、次世代薄型結晶 Si モジュールの研究開発や高性能キャリア選択性パッシベーターコンタクトの開発が進められた。JST-CREST では、名古屋大学が、高品質シリコンインゴット創製に向け、実験、理論、シミュレーション、データ科学を融合させた新たな研究開発の方法論の構築に取り組んでおり、結晶欠陥に関連する特徴領域抽出、粒界の原子構造や物性を解明する新たな計算法、多結晶組織やその変化の新たな計測手法など、多様な材料に横展開可能な基盤技術の創出を進めている。
- ・ CIS 太陽電池では、NEDO プロジェクトで、ソーラーフロンティア社、産業技術総合研究所と複数の大学からなるオールジャパン体制で CIS 太陽電池の高効率化・物性評価をより一層進める研究が実施され、ソーラーフロンティア社から世界最高効率である 23.25% が報告された。
- ・ JST の未来社会創造事業では、鉛フリーペロブスカイト太陽電池の開発、超薄型シリコン系トリプル接合太陽電池の開発が進められている。地球規模課題である低炭素社会の実現に向けてボトルネックとなっている課題の新規募集も継続して行われている。

- ・集光型太陽光発電システムの研究開発としては、2015年7月より、超高効率・低コストIII-V族化合物太陽電池モジュールの研究開発がNEDOプロジェクトとして実施された。このプロジェクトでは非集光でも変換効率30%を超えるモジュールが開発されており、新しい用途が期待される。日本における一般的な自家用車の一日あたりの走行距離は30 km程度であり、この高効率モジュールを車載太陽電池として用いることにより、電気自動車における一日30 km分の電力を発電することが可能となる。
- ・有機系太陽電池では、ペロブスカイト太陽電池のプロジェクトに資源を集中して研究開発が進められている。具体的には、NEDOプロジェクト「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」(2019年度終了)や、JSTの未来社会創造事業があげられる。有機薄膜太陽電池においては新しいプロジェクト投資が減っており、以前実施されたJST さきがけ『太陽光と光電変換機能』領域の研究者がネットワークを形成し、わが国の基礎研究開発を牽引している。

(5) 科学技術的課題

短期～中期的な視点では、実用太陽電池の主流である結晶Si太陽電池において、変換効率を極限まで高める技術開発が必要である。またポストPERC型の高効率セル構造では、海外企業に遅れをとらないように、容易に追いつくことのできない技術の確立と早期の量産化を行うべきである。金属酸化物などの異種材料による接合形成や局所ドーピングを駆使することにより、半導体レーザや超高速トランジスタで用いられているような「バンドエンジニアリング」の概念を実用太陽電池でも具現化する必要がある。Siをボトムセルとするタンデムセルによる超高効率化には、Siと整合性に優れたバンドギャップ1.5～1.7 eV程度の半導体材料の開発が必要である。金属とSi化合物であるシリサイド半導体、シリコンをベースとするナノ構造、ペロブスカイトなどがその候補としてあげられる。

長期的な視点では、太陽電池が自立的に普及し始めるためには、現在の理論限界効率を突破するような、飛躍的な変換効率の向上が可能な新概念太陽電池が必要となる。ナノワイヤや量子ドットなどの量子構造を用いた太陽電池はその1つの候補である。また、蓄電や熱電といった機能を有する多機能太陽電池により、さらなる光電変換効率の向上やエネルギーの有効利用、利用用途の拡大などが可能となる。これらの新概念太陽電池は現在の太陽電池よりも非常に高い限界効率を有するものの、その多くは未だ基礎研究の段階である。

また、真の再生可能エネルギー源として普及させるには、単に太陽電池単体の開発だけでは不十分であり、モジュールとしての効率向上、長寿命化に加えて、用途別の太陽電池開発、システム技術の開発が不可欠である。需要地近接型では、建物壁面、工場の屋上など、軽量、可撓性、意匠性が求められるとともに、建材相当の長期安定性、信頼性が重要となる。

加えて、世界的な導入量拡大が始まってからすでに10数年が経過し、発電性能を維持するための維持管理技術、不具合等を屋外において検出する点検技術、設備更新や廃棄時のリサイクル技術等の重要性が高まっている。日本でも固定価格買取制度導入から20年経過以降、全量買取の対象であった多くの発電システムから、大量の太陽電池モジュールが排出されることが予想されている。設備を更新し、長期的に主力電源として太陽光発電を利用していくためにも、これらのモジュールの適切なリサイクル技術の開発が不可欠である。

CIS太陽電池については、日本の企業(1社)が世界一の製造技術を有するとともに変換効率の面でも世界トップレベルを維持している。この技術的優位性を維持するためにも、産官学の連携が必須である。特にCIS太陽電池では光吸収層の準安定性による欠陥密度評価の難しさ、5元素以上にも及ぶ多元系化合物半導

体の電子構造評価の難しさを克服するためにも官学による評価・分析面に関する学術面のサポートが必要である。

超高効率III-V化合物太陽電池については、その圧倒的な高効率が魅力である。搭載可能面積の限られた車載太陽電池やモバイル型太陽電池は今後急速に発展すると考えられ、それらの新規用途をめざした研究開発が課題となる。また、III-V化合物太陽電池を用いた集光型太陽電池は高日照地域で特に高パフォーマンスを示す。集光型太陽電池の効率や実環境下での発電特性、さらには耐久性を向上させることにより、高日照地域で太陽発電由来の水素を生成することが可能となり、これまでの化石燃料に頼るエネルギー供給の在り方を変える開発課題となる。

有機薄膜太陽電池については、非フラーレン・アクセプターに代表される新材料の開発、3元ブレンドなどの新素子構造の提案により、急激な変換効率の向上がみられ、すでに17%以上の変換効率が達成されている。また、十分な耐久性を有することも実証された。この非フラーレン・アクセプターに代表される新規材料の開発では中国の勢いが目覚ましく、国家重点としての取り組みが成果をあげている。また、米国・欧州でも継続的に研究開発が実施されており、その成果にもとづいて例えば米国 NanoFlex Power Corporation のようなスタートアップ企業が立ち上げられている。それに対して、最近のわが国における有機薄膜太陽電池への研究支援は大きく減少してきており、日本の国際競争力を維持するためには、長期的視点に立った研究支援を継続的に行う必要がある。実用化に向けた技術開発も喫緊の課題であるが、民間企業にとって投資リスクが大きいこと、自立的な市場参入・拡大はあまり期待できない。そのため、国が主導的な役割を果たし、資金・人材面での支援を行い、技術開発の推進を後押しすることが求められる。

ペロブスカイト太陽電池は、研究開発が順調に進んでおり、商品化に向けた取り組みも開始されている。今後の本格的な市場展開に向けては、さらなる高効率化、高耐久化、低毒性化等の多くの課題をクリアする必要がある。そのためには、国が主導した新材料開発、発電機構解明、劣化機構解明等の基礎研究を強力に推進するとともに、産官学連携による技術開発を効果的に進めていく必要がある。この新材料開発においては、各種の材料開発で有効性が示されてきたマテリアルズ・インフォマティクス (MI) の活用が望まれる。

(6) その他の課題

2030年、2050年といった長期的なエネルギー・環境政策の視点では、太陽光発電がわが国の主力電源として担う役割は大きく、太陽電池モジュールの自立的な導入を推し進めていく必要がある。今後は太陽電池モジュールの設置に適した土地が少なくなっていくことや、新しい応用先を探すなかで求められる太陽電池のスペックはますます高くなることが予想され、発電コスト以外の指標 (kWh/m²、W/g、曲げ性、意匠性、強度等) を重視したセル・モジュール開発が重要になると考えられる。このような出口・用途に応じた研究開発を行うためには、これまで行ってきたような材料種別の研究実施体制だけでなく、太陽電池を使う側 (たとえば、ゼネコンやハウスメーカー、車メーカーといった出口ユーザー企業) から用途に応じたニーズを引き出し、国費の投入に資する技術目標と波及効果 (エネルギー自給率やCO₂削減等のアウトカム) を明確にして研究開発を推進することが求められる。

(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	◎	→	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研究機関で創出され、共用可能な高度なプロセス設備を含む試作ラインが構築された。 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により、京都大学発のペロブスカイト太陽電池ベンチャー企業が立ち上げられている。有機薄膜太陽電池は、JST さきがけ『太陽光と光電変換機能』領域の研究者がネットワークを形成し、継続して基礎研究を牽引している。
	応用研究・開発	◎	↗	さまざまな種類の無機系太陽電池で、変換効率の世界最高記録(2020年4月現在)を保持するなど、高い技術力を保有している。一方で、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り、ソリューション・サービスへの転換が進む傾向にある。 有機系太陽電池の応用では、色素増感型が先行しており、リコー、シャープ、フジクラ等の各企業が発売に向けたセル開発を行なっている。NEDOプロジェクトの成果にもとづき、2020年パナソニックがペロブスカイト太陽電池大面積モジュールで世界最高のエネルギー変換効率16.09%を達成した。
米国	基礎研究	○	↗	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を行っている。NREL、アリゾナ州立大学などでは、結晶Siをベースとするヘテロ接合太陽電池の高効率化を支援する基礎研究や、ペロブスカイトと結晶Siのタンデム化など新規な取り組みが実施されている。ペロブスカイト太陽電池の商業化に向けては、NRELを中心とした研究開発コンソーシアムUS-MAPが設立された。IBM社は、CZTS太陽電池で構成材料の最適化により小面積ながら12.6%の変換効率を報告している。First Solar社はCdTe太陽電池で、セル効率22.1%を報告した。新技術への取り組みは大学を中心に活発化している。有機系太陽電池では、ミシガン大学、南カリフォルニア大学などが中心、ペロブスカイト太陽電池では、コロラド大学、カリフォルニア大学バークレー校が研究を牽引している。
	応用研究・開発	○	↗	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22.8%と高い効率を達成している。Si基板に関連する周辺産業でも技術開発力が高いベンチャー企業が多く、融液からの直接成長やエピタキシャル基板など新しいアイデアが生まれている。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、低分子系ではNanoFlex Power Corporationが活躍中である。
欧州	基礎研究	◎	→	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。CIS太陽電池、CZTS太陽電池ともに、基礎物性からデバイス評価まで、学術的な研究にしっかり取り組んでおり、研究水準は着実に上がっている。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、色素増感型ではなお、スイスEPFL(グレッツェル研)が研究の中心である。EPFLはSi系薄膜においても世界の研究開発を牽引している。有機薄膜型では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

	応用研究・開発	◎	→	結晶Si太陽電池では、太陽電池サプライチェーン再構築の動きが活発化しており、装置産業の復活に期待が高まっている。また、太陽電池製造コストの大幅削減につながる研究開発が産学連携体制で進められている。利用技術の開発や標準化、規格化では幅広い検討が行われている。薄膜Siではエリコンソーラー社により、小面積a-Siセルの安定化効率10%超が初めて達成されるなど、高い技術開発水準を有している。有機薄膜型では、Heliatek社が13%以上の変換効率を達成しており、住宅向けにセルの販売を開始している。集光型太陽電池・化合物太陽電池においても、高い技術開発水準を有している。研究機関で企業の研究所的な研究を展開しているので実用化は早い。
中国	基礎研究	○	↗	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。以前は、海外の研究機関等の追跡研究が主体であったが、研究水準は急激に上昇している。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いる。
	応用研究・開発	◎	↗	原料からモジュールに至るまで中国国内での生産量は増加傾向にある。基板の大型化・多品種化、セル構造の高度化、ハーフカットセルを採用したモジュール生産が進められており、新しい技術の導入のために大規模な設備投資能力のある大手企業による寡占化傾向が強まる可能性が高い。数GW~数十GW/年の生産能力拡大計画が続々と発表されている。有機系太陽電池においては、多くのベンチャー企業が創立されている。
韓国	基礎研究	○	→	政府は、半導体や液晶分野に続く産業として、太陽光発電産業を育成しようとして研究開発を支援している。Si系(結晶系、薄膜系)ではすでに出遅れており、ペロブスカイトおよび有機太陽電池を中心にして、材料、セルともに次世代技術開発に集中している。ペロブスカイト太陽電池の研究開発では世界のトップレベルを走っており、高麗大学が世界最高変換効率25.2%(米国NREL認証)を達成している。
	応用研究・開発	○	→	政府によるRenewable Energy 2030戦略では、2030年まで国内エネルギーの20%を再生可能エネルギーでまかなうことを目標としており、太陽光発電は60%を占有する予定である。応用研究開発は高効率シリコン太陽電池発電システム開発に集中している。セルとモジュールの生産技術は世界レベルであり、R&D水準は着実に上昇傾向にある。

(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 2.1.4)

参考・引用文献

1) M. A. Green et al., "Solar cell efficiency tables (version 55)", *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 28,

- no. 1 (2020) : 3–15. doi : 10.1002/pip.3228
- 2) NREL, “Best-Research Cell Efficiency Chart”, Photovoltaic Research, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (2020年12月20日アクセス)
- 3) K. Masuko et al., “Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell”, *IEEE J. Photovoltaics* 4, no. 6 (2014) : 1433. doi : 10.1109/JPHOTOV.2014.2352151
- 4) K. Yoshikawa et al., “Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%”, *Nature Energy* 2, no. 5 (2017) : 17032. doi : 10.1038/nenergy.2017.32

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用