

## 2.1.3 太陽光発電

### (1) 研究開発領域の定義

太陽光発電に関する科学、技術、研究開発を記述する。特に発電システムとしての低コスト化、効率向上、用途開発などの観点と大量導入のためのシステム技術、運用技術の観点からの動向を対象とする。

### (2) キーワード

長期信頼性、劣化機構の解明、リスク・安全性評価、保守のスマート化、軽量太陽電池、ペロブスカイト太陽電池 (Perovskite Solar Cell:PSC)、発電量予測、グリッドフォーミング・インバータ、MLPE (Module Level Power Electronics)

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

我が国におけるエネルギー自立の必要性と地球温暖化対策への世界的気運の高まりから、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた取組みが推し進められている。太陽光発電 (Photovoltaics: PV) は、風力発電と並び大型電源としての活用が期待され、小規模分散型電源にも適することから、需要地近接、需給一体型としての利活用も期待されている。コロナ禍でのエネルギー需要減、ロシアによるウクライナ侵攻によりもたらされた資源高の状況の中においても、世界で再生可能エネルギーの設備容量は増加の一途であり、新規導入された再エネの容量のおよそ6割をPVが占めている。さらなるPVの普及のため、発電コストを下げするために変換効率向上や耐久性向上、適用範囲拡大のための軽量化といったモジュールの進化が求められる。運用面では天候に左右されるため発電予測技術、効率的なメンテナンス技術が必要となる。大量導入後の経年劣化したモジュールのリサイクル技術も今後重要となる。

#### [研究開発の動向]

##### [導入状況]

- ・ 2021年の世界のPV導入量は175 GWで、累積942 GWとなった<sup>1)</sup>。大規模太陽光発電所の加重平均発電コストは0.048 USD/kWhとなり、日照条件の良い地域などでは、他の電源より安い発電コストを実現している<sup>1)</sup>。太陽電池セル・モジュールのコスト低下と導入拡大が進む中、システムのコストダウンや運用・保守 (Operation and Maintenance: O&M) のコスト低減も進んだ。しかし、日本のPVによる発電コストは0.086 USD/kWh (2021年) と世界と比べてまだ高い水準にあり<sup>2)</sup>、発電コスト低減に向けた研究開発が必要である。各国の2030年のコスト目標値としては、日本ではNEDO PV Challenge で7円/kWh<sup>3)</sup>、米国エネルギー省 (DOE) のSunShot計画では3-5セント/kWh<sup>4)</sup>、ドイツ連邦経済エネルギー省 (BMWi、現在は連邦経済・気候保護省 (BMWK) に改名) による見通しでは4.5~7.2ユーロセント/kWh<sup>5)</sup> などが掲げられている。このような中、システム技術としては、長期信頼性の向上、未利用地への展開、電力システムへのインテグレーション、運用ソフトコスト低減に関する研究開発がトレンドになっている。

##### [太陽電池モジュールと適用用途]

- ・ 現在の主流は結晶シリコン系太陽電池であり、世界の約8割を中国が生産している。コストが最大の性能であるためであるが、米国First solar社が製造するCdTe型太陽電池モジュールは2020年で6.1 GWと世界8位の位置を保っている。結晶シリコン系太陽電池セルの理論変換効率 (29%) にさらに近づけるため改良が続けられている。PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)<sup>6)</sup> はセル裏面側に不活性化層を形成し、キャリア (電子と正孔) の再結合で生じる発電ロスを抑制する技術である。ヘテロ接合

と呼ばれる異種のシリコン材料(単結晶シリコンとアモルファスシリコン)を接合した太陽電池もまた、キャリア(電子と正孔)の再結合を防ぐ目的である。三洋電機株式会社(現パナソニック株式会社)が開発した技術(HIT®: Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)<sup>7)</sup>でヘテロ接合が採用されていた。しかし、製造工程が増えコスト高であることから普及が進まず、2021年で生産が終了している。ただし、この技術は両面受光が可能な電池が作製でき<sup>7)</sup>、温度上昇による効率低下が少ない特長から、営農型PVへの利用<sup>8)</sup>など新たな展開も見られる。

- ・太陽電池セル(素子)レベルかつ研究室レベルでの値だが、最高変換効率の推移を米国国立再生可能エネルギー研究所(NREL)がまとめており<sup>9)</sup>、その中でGaAs系(III-V族系)化合物半導体太陽電池セルは最高で29%<sup>9)</sup>と高い変換効率を記録している。これは太陽光を最も効率よく変換できるバンドギャップをもつためだが、さらに他のIII族やV族の元素を添加してバンドギャップを変えることで、吸収波長帯域を変えられる。異なる元素組成の発電層を積層したものが多接合型太陽電池であり、3接合で最高で約38%<sup>9)</sup>を記録している。GaAs系の多接合型太陽電池の課題はコストであり、コストが厳しく問われない人工衛星など宇宙用途に限られている。GaAs系は宇宙線に耐性があるという特徴もある。GaAs系が高価である理由は、高価なGaAs基板上にIII-V族半導体層をエピタキシャル成長させる製法にある。最終製品には不要のGaAs基板を剥離して繰り返し製造に使う方法<sup>10)</sup>や、半導体層のエピタキシャル成長速度を早める方法が検討されている。車体に太陽電池モジュールを設置する車載用途では限られた面積で発電する必要があり、高効率の太陽電池としてGaAs系多接合型太陽電池に対する期待が大きい。トヨタ自動車株式会社は、NEDO、シャープ株式会社と共同で、プリウスPHEVに変換効率が30%を超えるIII-V族化合物3接合型太陽電池を約860W搭載し実証実験を行っている<sup>11)</sup>。日産自動車株式会社も同様にeNV200を使用し約1150WのIII-V族化合物3接合型太陽電池を搭載し実証を行っている<sup>12)</sup>。
- ・有機系太陽電池としては、色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池、PSCの研究開発が進められている。有機系は溶液塗布法(印刷)で連続的に製造でき、低コスト化の可能性とともに、軽量、薄膜、フレキシブルの太陽電池が作れるという特徴がある。センサーなどの小型の機器の電源や、重量制限のある屋根や建物壁面などに設置する建築物一体型太陽光発電設備(BIPV: Building Integrated Photovoltaics)として期待されている。中でもPSCは製造方法が比較的簡便で、かつ高い変換効率を得られやすいため、現在、研究開発が最も盛んに行われている。変換効率の最高値は26%<sup>9)</sup>を記録している。重要な課題としては吸湿による劣化の問題が指摘されている。代表的なペロブスカイト材料は $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbX}_3$  ( $X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ )で表されるが、Xの種類と組成によりバンドギャップ、すなわち吸収する光の帯域を変えられる特性があり<sup>13)</sup>、GaAs系と同じ考え方で他の吸収波長の異なる太陽電池と組み合わせることで広帯域の光を発電に利用するタンデム型の太陽電池も活発に研究開発されている。色素増感太陽電池、有機薄膜太陽電池の最高効率はそれぞれ13%<sup>9)</sup>、18%<sup>9)</sup>と、過去の開発初期段階に比べて格段の進歩が見られている。
- ・水上設置太陽電池モジュール(Floating PV)<sup>14)</sup>が世界的にも増加している。水面を有効活用するためフロート架台によって太陽電池を水面に浮かべる。特に中国で導入が伸びており、湖沼への設置を始め、安徽省や山東省では炭鉱地盤沈下地帯の利活用としての設置が見られる。海外では洋上を含む海水域での検討も始まっており、数MWを超える規模の実証なども行われている。国内でも洋上での一部パイロットプラントの実証が開始されている。安全性の検討が必要であり、国内での風荷重などの風洞実験が一部実施されているが、信頼性よりも導入が先行している状況である。2019年9月に日本で最大の千葉県の上水設置メガソーラー発電所(13.7MW)で台風によるアレイの破壊と火災事故が発生し(2021年に復旧)<sup>15)</sup>、その後の事故調査などにより水上設置の技術基準の見直しが行われ、設計・施工ガイドラインが策定されている。水上設置については、送電設備が共用でき、雨季・乾季で発電量が相補的となるメリットが見込まれることから、水力発電ダムへの設置、水力発電とのハイブリッド化も検討されている。

- ・営農型太陽光発電 (APV : Agrivoltaics)<sup>16)</sup> は、農地に支柱を立てて上部に太陽光発電を設置した、太陽光を農業と発電に利用した設置方式で、ソーラーシェアリングともよばれている。その導入ポテンシャルは、農地への遮光率を30%と仮定すると、日本全国で38 GWと試算されている。技術的には、農作物への影響を配慮する必要があり、遮光率と農作物の生育の関係 (30%以下) や適した太陽電池モジュールの形状、設置架台の種類 (追尾、一本足、垂直設置) などが検討されている。導入が最も拡大しているのが中国であり、欧州 (イタリア、ポルトガル、フランス)、韓国などにおいて導入支援が進められており、 Fraunhofer ISE における植物への成長の影響調査など、実証研究も進められている。

### [劣化メカニズム]

- ・最も普及している結晶シリコン系太陽電池モジュールの長期運用における湿熱劣化については、封止材に用いられる EVA (エチレン酢酸ビニル共重合樹脂) から発生する酢酸による電極の腐食と高抵抗化という劣化機構が我が国で解明され、対策が進められている。メガソーラーなどの高電圧システムでの電位誘起劣化については、ガラス由来の Na イオンが太陽電池セルに侵入し誘発するというメカニズムの解明が進み、Na の移動を制限する材料や漏れ電流を低減する材料など、耐性材料の開発や耐性の高いモジュール構造の研究が進んでいる。また、屋内信頼性試験方法 (CIGS 系モジュールを含む)、加速試験方法の開発が進められている。高効率 PERC 型結晶シリコンセルを用いたモジュールで生じる光・温度誘起劣化など新たな劣化現象も見つかり、その発現機構も研究されている。光・温度誘起劣化は、初期劣化の後、回復段階を経て、長期安定状態での緩やかな劣化モードに移行すること、光および温度ストレスを強くするとこの過程が早く起きること、屋外環境下でも数年をかけて実験室と同程度の光および温度ストレスがかかった場合は同じような劣化を示すことが、様々な研究機関から報告されている。
- ・PSC における吸湿による劣化については、その複雑なメカニズムの解明が進められるとともに、材料面 (電極、ホール輸送層など) やプロセス面 (不活性層、封止など) からの改善検討が行われている<sup>17)・18)</sup>。PSC の実用化には、変換効率のみならず長期間使用できる信頼性が重要であることを示している。

### [信頼性、安全性]

- ・太陽電池モジュールの信頼性、品質については、米国 NREL の PV Reliability Workshop<sup>19)</sup>、欧州委員会共同研究センター (欧州 JRC) の SOPHIA Workshop<sup>20)</sup>、国際エネルギー機関 (IEA) の PVPS Task 13<sup>21)</sup> など国際的な議論が活発で、米国 NREL 主導の PVQAT (The International Photovoltaic Quality Assurance Task Force)<sup>22)</sup> と国際電気標準会議 (IEC)<sup>23)</sup> との連携による標準化も検討が行われている。この領域は欧米の研究者が多く、国内よりも検討が進んでいる。汚れ影響の推定など、発電電力量の不確実性を低下させるモデリングについても海外が活発に研究している。リスク・安全性の分析と対策も求められており、事例として、欧州 Bankability プロジェクト<sup>24)</sup> における資金調達時のリスク分析や SUNSpACe Alliance<sup>25)</sup> によるスマート農業分野のベストプラクティクスの整備などがある。これらの知見は、特に途上国や砂漠地域など発電量が大きく、また汚れの影響が大きい地域における発電所計画時の評価に有用である。欧州 Trust PV プロジェクト<sup>26)</sup> において、太陽電池の全バリューチェーンに亘るデータが収集されている。
- ・火災と感電に関しては、米国電気工事規定での義務化など海外での整備が進み、標準化も検討されている。国内では、住宅用太陽電池モジュールの火災が発生し、メカニズムの解明と対策が進められている。これに関連して、モジュールの安全弁ともいえるバイパス回路の故障事例の確認や現地点検技術の開発が進められている。実際には太陽電池モジュールでの発火再現実験が難しく、太陽電池モジュール起因か、直流ケーブルの挟み込みなどの施工起因かの判断が困難などの課題もあるが、リスク低減は急務である。今後は屋根上設置においては鋼板などを設置し、万一の発熱やアーク発生時にも屋根に延焼しな



いような構造・施工が用いられる方向にある。

- ・土木・建築分野のリスク増加も課題となっている。構造崩壊、モジュール飛散、土砂崩れ、洪水などの事故や災害が国内で増加している。海外でも台湾で台風事故などが起きているが、日本国内が相対的に多く、構造設計の見直しや災害時リスクの周知、設計・施工に関するガイドラインなどの整備が進められている。また、経済産業省、農林水産省、国土交通省などにおいて地域共生の観点から、林地開発許可基準の見直しや、盛土規制法などの改定が行われている。

### [運用、保守]

- ・O&M市場は、PVの導入量（稼働量）の増加、セカンダリ（中古売買）市場、リパワリング（再生）設備更新等により安定的に成長するとみられている。導入時のみならず、導入後の保守、サービスの提供が事業を継続する上で重要と考えられる。
- ・保守のスマート化として常時監視システムの高度化が検討されている。保守の省力化としてドローンと画像技術の利用研究が進み、大型のPV設備を中心に遠隔監視が進められている。取得した膨大な運転データをAI等で学習することで、効率的な監視・点検技術が実用化されつつあるが、技術的裏付けや問題箇所の具体的な発見方法などの検討が引き続き必要である。増加が予想される中古品含めて、システムの性能評価の低コスト化・迅速化の必要性が高く、屋外で取得した電流-電圧特性の補正方法や日射計の代わりに太陽電池モジュール自身を使う方法などが検討されている。スマート保安推進に向けては、「スマート保安官民協議会」が設置され、スマート保安に資する新技術の導入や、それを促進する規制・制度のありかたについて、官民による具体的なアクションプラン策定の取組みが開始されている<sup>27), 28)</sup>。
- ・天候により変動する発電量の予測が重要となっている。初期値にゆらぎを持たせた複数のトレーニング・データセットを使用してさまざまな時間軸で機械学習ベースの予測を行い（アンサンブル予報）、高品質データを使って検証を行い予測精度を上げていく方法がとられている。株式会社ウェザーニューズは、高解像度な日射量予測を用いた太陽光発電量予測データのAPI（Application Programming Interface）での提供を開始しており、1 kmメッシュで72時間先まで30分毎に提供される<sup>29)</sup>。

### [電力系統への影響]

- ・PVが電力系統へ与える影響として慣性力の減少が挙げられ、系統の不安定化や系統全体の完全停止（ブラックアウト）につながるリスクがある。現在の電力系統は、慣性力のある同期発電機が使用されていることを前提に設計・運用されており、回転質量によって慣性力を維持することで系統周波数を一定に保ってきた。これまでのPVのインバータ（パワーコンディショナー）は系統電圧の安定性（ $101 \pm 6$  V）に依存した制御となっていたが、今後、電力系統へのPVの増大が予想される中、急激な出力変動に対しても自律的に動作し、系統側の周波数安定性を支援する機能を備えたグリッドフォーミング・インバータの研究・開発が進められている。既設設備などに対しては、連系点の電圧をリアルタイムで監視し、複数のパワーコンディショナーの送出電圧を瞬時に最適制御するメインサイトコントローラを追加することが提案されている。また、太陽電池モジュール毎のパワーエレクトロニクス機器（パワーオプティマイザ、マイクロインバータ）の設置、もしくはそれを太陽電池モジュールと一体化させたMLPE（Module Level Power Electronics）が注目されている。MLPEは必要なインバータの数が増えるというデメリットがあるが、複数のモジュールのうち一部が異常をきたした場合でも全体の発電への影響を最小限にでき、保守のしやすさや安全性の面でも有利であるため、米国では導入が進んでいる。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

#### ◆「強靱かつ持続可能な電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律」<sup>30)</sup> (2020年6月成立、2022年4月施行)

電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法（再エネ特措法）が改訂され、市場連動型の導入支援、再生可能エネルギーポテンシャルを活かす系統増強、再生可能エネルギー発電設備の適切な廃棄などの制度変更が行われた。また、災害に強い分散型電力システムの運営が可能となることも目指している。固定価格買取制度（FIT制度）に加え、主に太陽光、風力を対象に市場価格に一定のプレミアムを上乗せして交付する制度（FIP制度）が創設されている。また、再生可能エネルギー発電設備の適正な導入及び管理のあり方に関する検討会などにおいて、地域共生の重要性が改めて議論され、林地開発許可の見直しや盛土規制法、改正温対法においては再エネ発電設備の設置に不適当な区域と促進区域を明確にするポジティブゾーニングが定められている。

#### ◆PSC

- ・積水化学工業株式会社：1 m幅の大面积フィルム型PSCモジュールのプロセス開発を行っており、2025年の事業化を目指している<sup>31)</sup>。西日本旅客鉄道株式会社が今後開業予定のうめきた駅でPSCを採用予定である。
- ・株式会社東芝：2025年の実用化を目指している。「大熊町ゼロカーボンビジョン」を踏まえ、大熊町と協力し、復興を推進する取り組みの一つとして、東芝エネルギーシステムズ株式会社がPSC等の次世代太陽電池の量産体制を確立した後、同町で次世代太陽電池の実装検討を行っていくと発表している<sup>32)</sup>。
- ・英国Power Roll社：インドにフレキシブル薄膜太陽電池フィルム工場を設立する方針で、印・Thermax Groupと市場開拓を進めている。独自開発のマイクログループ加工したフィルムにPSCなどの薄膜太陽電池を高速のロール・ツー・ロール（R2R）生産プロセスで製造するとしている<sup>33)</sup>。
- ・英国OxfordPV社：2021年に生産プロセスを最適化、2022年から100 MW/年で商業生産開始予定、その後250 MW/年、1 GW/年に拡張を計画する<sup>34)</sup>。
- ・ポーランドSaule Technologies社<sup>35)</sup>：ポーランドWrocławで、初の工場を2021年5月21日に開設し、超薄型、軽量フレキシブルタイプのPSCの生産ラインを立ち上げている。
- ・中国Hangzhou Microquanta Semiconductor社：2022年2月に中国浙江省に12 MWのPSCモジュールを用いた地上設置型太陽光発電所を着工したことを発表。

#### ◆タンデム型太陽電池

- ・東京大学は、PSCとCIGS型太陽電池をタンデムに積層し、このコンセプトでは世界最高の変換効率26.2%を達成した。トップセルに使う半透明PSCは単体で変換効率19.5%となっている。さらに効率を向上させ、ビル壁面、電動航空機、ドローンなどへの利用が期待されるとしている<sup>36)</sup>。
- ・米国Swift Solar社<sup>37)</sup>：米・カリフォルニア州エネルギー委員会から車載用太陽光発電（VIPV）用PSCの開発資金を獲得、車載や航空機用途などをターゲットに、オールペロブスカイト・タンデム太陽電池の開発を行うとしている。
- ・シャープ株式会社は、NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発」のプロジェクトにおいて、軽量化、フレキシブル化のため表面の保護ガラスをフィルムに置き換えた3接合型のIII-V族系の太陽電池を開発した。実用サイズの軽量かつフレキシブルな太陽電池モジュールで世界最高の変換効率32.65%を達成。電気自動車や宇宙・航空分野などの移動体への搭載を目指している<sup>38)</sup>。
- ・株式会社東芝は、透過型亜酸化銅（Cu<sub>2</sub>O）太陽電池（10 mm x 3 mm）において、世界最高の発電効率9.5%を達成したと公表している。この太陽電池と発電効率25%のシリコン太陽電池に積層したタン

デム型の試算として、全体の発電効率は28.5%になり、EV (電費 12.5 km/kWh) に搭載した場合の航続距離は1日約37 kmになるとしている<sup>39)</sup>。

- ・東京大学は、コロイド量子ドット太陽電池 (ZnO ナノワイヤと PbS コロイド量子ドット) と III-V 族化合物 2 接合太陽電池 (InGaP/GaAs) を組み合わせた波長分割 3 接合太陽電池を作製し、赤外吸収太陽電池を用いた多接合太陽電池として世界最高性能となる変換効率 30% 超を達成したと報告している<sup>40)</sup>。

- ◆ 第三世代の静止気象衛星 (ひまわり 8、9 号) の観測データを活用した、従来よりも高分解能の時空間 (2.5 分、1 km メッシュ) における日射量推定技術の研究開発が進められている。また、2020 年 6 月に気象庁が新たに運用開始したメソアンサンプル予報を活用した日射・発電予測の高度化も進められている。日本気象協会/東京理科大学による短時間予測の開発プロジェクトが行われており<sup>41)</sup>、物理モデルと機械学習のハイブリッドにより予測誤差低減が図られている。また、日本気象協会/産総研による予測の大外れ低減に関するプロジェクト<sup>41)</sup> も開始している。

#### [注目すべき国内外のプロジェクト]

##### ◆ NEDO (GI 基金)「次世代型太陽電池の開発」<sup>42)</sup> (2021 ~ 2030 年度)

平地の少ない我が国において、従来設置の難しかった耐荷重の小さい工場の屋根やビル壁面等への設置を目指すため、軽量で曲面にも設置可能な PSC の開発を推進する。2030 年までにシリコン太陽電池と同等の発電コスト 14 円/kWh 以下を目指す。

##### ◆ NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発」<sup>43)</sup> (2020 ~ 2024 年度)

重量制約のある屋根、建物壁面、移動体など従来の技術では太陽光発電が導入されていなかった新市場に導入可能とするためのモジュール・システム技術開発。傾斜地、水上、営農といった設置が進みつつある新たな導入形態におけるガイドライン策定。小規模事業用 PV の適切なメンテナンスの確保や再投資を促すために必要となる信頼性評価・回復に係る技術開発。低コストリサイクル技術。出力抑制等の系統制約の克服に向けた太陽光発電側での対応方法の検討。

##### ◆ NEDO「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた次々世代電力ネットワーク安定化技術開発 (STREAM プロジェクト)」<sup>44)</sup> (2022 ~ 2026 年度)

疑似慣性パワーコンディショナーの実用化開発および M-G セット (周波数変換装置) の実用化開発。

##### ◆ NEDO「電力システムの混雑緩和のための分散型エネルギーリソース制御技術開発 (FLEX DER プロジェクト)」<sup>45)</sup> (2022 ~ 2024 年度)

電力システムの増強による経済的負担を軽減するとともに、電力システムの混雑による再エネの出力制御状況を改善するため、太陽光発電設備や蓄電設備などの分散型エネルギーリソースを活用する。

##### ◆ JST 未来社会創造事業「Sn からなる Pb フリーペロブスカイト太陽電池の開発」<sup>46)</sup> (2022 年度 ~)

2017 年からの探索研究を進展させ、環境規制のある Pb を用いない Sn 系の PSC を開発する。

#### [国外]

##### ◆ DOE “Sunshot 2030”<sup>47)</sup>

2011 年に開始した SunShot イニシアチブ (2020 年太陽光発電コスト (LCOE) 0.06\$/kWh) を進展させ、2030 年に 0.03\$/kWh まで半減させる目標。さらには 2050 年に向けては太陽光発電の低コスト化とエネルギー貯蔵技術の組み合わせによりグリッドの柔軟性を高め PV の電力に占めるシェアを拡大させる。集光型太

陽熱発電技術についてもコストを下げる事が出来ればさらなる可能性があるとしている。

#### ◆DOE “Perovskite Funding Program 2020”<sup>48)</sup> (2020年～)

PSCの性能向上、製造技術、性能検証を進めるための研究開発へのサポートを2020年と2021年に発表。Stanford大学などの22のプロジェクトを採択し総額4000万\$の資金を提供。

#### ◆欧州 “HighLite” プロジェクト<sup>49)</sup> (2019～2022年)

Horizon 2020プログラムの枠組みの中で、高性能、低コスト、さらに環境に優しい太陽電池モジュールの生産技術を開発する。特に従来の厚さの約半分となる100 μmの結晶シリコン系太陽電池の開発に焦点を当てている。次世代シリコン太陽電池モジュールの製造方法をパイロットラインレベルで実証することにより、欧州のPV産業の競争力を向上させることを目指している。

### (5) 科学技術的課題

- ・用途拡大: BIPV、太陽電池搭載自動車の普及に向けた、高効率・高信頼性太陽電池セルおよびモジュール、太陽電池の実装方法(曲面对応、色制御)、部分影による損失抑制技術などの研究開発。多様な設置状況に対応して、ドローンなどによるデジタル測量、多種多様なシステムの発電電力量推定のための研究開発。
- ・設置技術: ソフトコスト低減のための設計図面などの自動デジタル化ツール、足場レス施工技術、超軽量モジュール、ACモジュール化(インバータ)。非接触給電技術によるドローンの効果的な活用などの研究開発。設計・施工・運用までを最適化するためのデジタルツイン技術とデータプラットフォーム。
- ・リスクアセスメント: 構造および土木リスクの評価(架台崩壊、土砂崩れなど)、既設システムのリスク低減(架台の補強、地盤のずれ監視)に関する技術。
- ・インフラ維持のスマート化: 定期点検の延伸と現地作業の省力化、AI利用によるアセットマネジメント、常時監視による不具合早期発見に関する技術。
- ・発電量予測: ビックデータ、AI活用による短時間予測の高精度化、数値予報モデルの改良やアンサンブル予報の利用による前日予測の高精度化、予測の大外れの検出技術などの研究開発。
- ・柔軟性を有する太陽光発電: 高コストな蓄電池の設置を最小限にする最適制御技術。スマートインバータの開発(調整力、電圧サポート、遠隔制御等)、集中管理制御なしで並列運転できる疑似慣性力を持つインバータなどの研究開発。
- ・電力システム: PVからの調整力創出、オンサイト/オフサイトPPA(第三者所有型)、環境価値市場などを含む発電事業モデルの最適化、持続的な発電事業のための研究開発。
- ・電力の需給調整技術: リアルタイムのユニットコミットメント(起動・停止計画)、系統の空き容量を活用するコネクト&マネージ、出力制御の最適配分、VPP(仮想発電所)、EVとの連動、PMU(電力系統解析を行うフェーザ情報計測装置)によるリアルタイム系統監視などの技術開発。
- ・人口減少にともなうインフラ縮退などを考慮したPVの導入形態に関するビジョン研究。また、これらに対応する需要と一体化した自立型PVシステムの開発。

### (6) その他の課題

- ・結晶シリコン系太陽電池のサプライチェーンは、ポリシリコン、ウェハからモジュール製造まで中国一極集中となっている。コロナ禍によるサプライチェーンの混乱を受け、さらに緊迫する世界のエネルギー情勢下でエネルギー安全保障の観点から一國に過度に依存することの脆弱性が指摘されている。太陽電池の安定的な調達に向け、原料シリコンから太陽電池モジュールまでを一括で生産する垂直統合型生産拠点構築に向けた動きが、欧州を含めて立ち上がりつつある。関連してIEAは、2022年7月に「Solar



PV Global Supply Chains」を公表し、太陽電池のサプライチェーンに関する調査結果をまとめている。我が国においても縮小してきた太陽電池産業の立て直しが必要と考えられる。ただし結晶シリコン系太陽電池の圧倒的な量産体制に対して、コストの課題を克服する施策が必要である。

- ・これまで国内では導入ビジネスにリソースが割かれ、システム技術に関する産業界の参入が少ない。今後は産学連携を強化する必要がある。特に事業はアセットマネジメント、エネルギーマネジメント、保守のサービスなど継続的な産業へと転換していく必要があり、これらを支える技術の重要性が高まっている。
- ・国内のシステムコストの高止まりの一因として、商流における中間マージンがある。太陽電池モジュールと住宅など建物流通の標準化により、中小工務店、ビルダー向けの新築への導入拡大施策が必要である。ZEB、ZEHと連動した、屋根と太陽電池モジュールのサイズ、施工方法の標準化や設計支援ツールの技術開発とともに、中小工務店、ビルダー向けのアライアンスの形成などが求められる。
- ・国内では固定価格買取制度（FIT法）により導入が急拡大した結果、設備設計や施工の不良、地域との軋轢などの課題が発生しており、研究機関や産業界が協力してこれらの解決に取り組む必要がある。FIT法改正により他法令遵守、保守点検などの義務化を図り、電気事業法においても設計基準の適正化（JISC8955および電技解釈改定）や使用前自己確認制度の小規模事業用への拡大など、適正化に向けて法整備が行われたが、すでに導入されている既設案件の適正化が課題となっている。これらの設備のリスク評価、是正・補強、不具合の早期発見、保安のスマート化が必要である。また2030年代後半に太陽電池モジュールの廃棄量はピークを迎えると予想されており、リサイクルシステムの構築とともに回収した資源の再利用先の開拓も急務である。
- ・スマートグリッドなどの電力系統へのインテグレーションについては、風力発電などの他の再生可能エネルギー、EVや定置用、系統用を含めた蓄電池、ヒートポンプなどのデマンドレスポンス技術などを含めたエネルギーシステム全体における研究開発が必要である。発電予測などPVに関する要素技術についても、電気工学、気象学、AI技術などの融合研究の推進が必要である。

(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	○	→	●NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発」などで、基礎や応用の研究が実施されている。新市場創出に向けた太陽光発電の技術開発によって、2050年時点での国内累積導入量として、約320GW（うち新市場約170GW）、PVによるCO <sub>2</sub> 排出量削減（系統電源との比較）として、約110百万トン/年（うち新市場約60百万トン/年）を実現するための技術開発。
	応用研究・開発	○	→	(同上)
米国	基礎研究	○	→	●米国DOEのSETOによる2025年までの重点目標および計画（Solar Energy Technologies Office Multi-Year Program Plan）において、2025年までに平均LCOEを3セント/kWh、2030年に2セント/kWhまで削減するという高い目標を掲げ、国立研究所（NREL、Sandia National Laboratoriesなど）を中心に信頼性や評価技術を研究開発している。 ●DOEエネルギー高等研究計画局（ARPA-E）では、集光等を高度に組み入れた次世代高効率モジュール等の研究を推進している。



	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●SunShot計画の目標達成に向けて、市場障壁の撤廃、ハードウェア以外のコストの削減、技術革新等を産学連携で推進している。</li> <li>●系統連系される発電特性の正確な予測技術の開発、系統運用者や電力事業者が使用するエネルギー管理システムへの予測技術の組み込み等を推進しているほか、研究者と共同でPVの科学的知識基盤を構築するとともに、モジュールの性能、信用性、製造性を改善する新型商業用製品を製造する技術などを開発している。また、電力網に統合するための過渡モデルおよび動的モデルに関する研究開発が行われている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●HighLiteプロジェクト（2019～2022年）は、EUの太陽電池セル・モジュール製造業界の競争力を高めるため、Horizon 2020プログラムの枠組みの中で開始し、高性能、低コスト、環境に優しい太陽電池モジュールの生産技術の開発を推進。</li> <li>●EUの2021～2027年までの7か年計画であるHorizon Europeプログラム、第1次Horizon Europe戦略計画（2021～2024年）において、EU諸国の大学、研究機関、企業等の連携の下、新概念のセルやシステムまでを含む多数の研究開発プロジェクトを推進している。</li> </ul> <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●BMWK及びドイツ連邦教育研究省（BMBF）が、様々な側面からPVの研究開発を支援している。</li> <li>●TUV、Fraunhofer ISEを中心に品質管理及び寿命、分散配置型系統連系システム及び独立形システム技術、BIPV、リサイクル、システムの環境的影響に関する研究等を推進している。</li> <li>●BIPV用の印刷式PSCモジュール開発（BMWK）</li> </ul> <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●フランス国立太陽エネルギー研究所（Institut National de l’Energie Solaire：INES）などが研究開発を行っているが、研究分野の大半は材料科学に関するものである。</li> </ul> <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●システム技術については、主導的な研究開発例をあまりみない。</li> </ul> <p>【スペイン】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●S2S4EはEU内の5つの予測機関、3つの電力事業者とともに、週間～季節予報を含めた予測技術の活用と予測情報の公開を行っている。</li> </ul> <p>【その他】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●スペイン、イタリア、ポルトガル等の大学、研究機関において研究開発が行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●Horizon Europeプログラムでは、基礎研究だけでなく、実用化を目指した応用研究・開発も実施されている。BIPVの大規模普及に向けた技術、設置サイトに特化したシステムの生産性向上に関する技術、熱利用とのハイブリッド化技術、高度予測技術、低コスト化に向けたシステムマネジメント技術などの開発が行われている。</li> </ul> <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●上記の枠組のもと、エネルギーマネジメントや蓄電システムなどの系統連系形・独立形太陽光発電システム、ソリューションの経済的運用技術、新材料及び生産監視システムの導入など、効率的で費用効果の高い生産コンセプト、品質、信頼性、寿命に焦点を当てた新たなモジュール・コンセプトの導入などの応用研究開発も推進している。また、営農型システム、水上型に関する検討も行われている。季節予報（中長期予測）データの電力システムへの活用研究が進められている。</li> </ul> <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●INESなどがシステム技術に関する研究（道路やドローンへの組み込み技術、AI技術による不具合検知など）を行っている。</li> </ul> <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●システム技術については、主導的な研究開発例をあまりみない。</li> </ul> <p>【その他】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●スペイン、イタリア等の大学、研究機関において研究開発が散見される。イタリア新技術・エネルギー・環境庁（ENEA）とエネルギーシステム研究会社（RSE）では、エネルギー貯蔵、BIPVに関するシステム技術開発を推進している。</li> </ul>

中国	基礎研究	○	→	●各種エネルギー技術の2030年までの開発の重点項目や目標を定めた「エネルギー技術革命創新行動計画（2016～2030年）」及び「エネルギー技術革命重点創新行動ロードマップ」に基づき、エネルギー技術開発を行っている。第14次5ヶ年計画の一環として、2021年12月に「スマート太陽光発電産業創新発展行動計画（2021～2025年）」を公布。国家発展改革委員会（NDRC）、国家能源局（NEA）、中国工業情報化部（MIIT）、科学技術部（MOST）、中国科学院（CAS）傘下の研究所などが主に実施している。好調なPV産業に支えられ、セルおよびモジュールの変換効率では世界記録を更新するなどの技術力を背景に、システムレベルでも積極的な基礎研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	→	●多様なシステム技術について、実用化を目指した大規模なフィールド実証などが産学連携下で進められている。中国メーカーは欧州の研究機関との共同研究開発も数多く進めている。 ●フレキシブル太陽電池製造設備の重要技術と応用の探索（国家重点研究開発計画）
韓国	基礎研究	△	→	●システム技術については、あまり研究開発例をみない。
	応用研究・開発	△	→	●システム技術については、あまり研究開発例をみない。
その他の国・地域（任意）	基礎研究	○	→	【台湾】 ●台湾の工業技術研究院（ITRI）などで研究開発が行われている。 【豪州】 ●オーストラリア国立大（ANU）、ニューサウスウェルズ大学（UNSW）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）が中心となって研究開発が行われている。 【その他】 ●マレーシア等の東南アジア諸国においても大学を中心に研究開発が行われている。
	応用研究・開発	○	→	【台湾】 ●台湾の工業技術研究院（ITRI）などで研究開発が行われている。 【豪州】 ●オーストラリア国立大（ANU）、ニューサウスウェルズ大学（UNSW）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）が中心となって研究開発が行われている。 【その他】 ●マレーシア等の東南アジア諸国においても大学を中心に研究開発が行われている。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国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。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている      ○：ある程度の顕著な活動・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」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・次世代太陽電池材料（ナノテク・材料分野 2.1.3）
- ・太陽熱発電・利用（環境・エネ分野 2.1.8）
- ・蓄エネルギー技術（環境・エネ分野 2.2.1）
- ・水素・アンモニア（環境・エネ分野 2.2.2）

## 参考・引用文献

- 1) International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS), “Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach: Snapshot of Global PV Markets 2022,” [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/04/IEA\\_PVPS\\_Snapshot\\_2022-vF.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/04/IEA_PVPS_Snapshot_2022-vF.pdf), (2023年3月5日アクセス) .
- 2) International Renewable Energy Agency (IRENA), “Renewable Power Generation Costs in 2021,” <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>, (2023年3月5日アクセス) .
- 3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「太陽光発電開発戦略 (NEDO PV challenge) (2014年9月)」 <https://www.nedo.go.jp/content/100573590.pdf>, (2023年3月5日アクセス) .
- 4) Solar Energy Technologies Office, “The SunShot Initiative,” U.S. Department of Energy (DOE), <https://www.energy.gov/eere/solar/sunshot-initiative>, (2023年3月5日アクセス) .
- 5) Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), “Was Kostet Die Energiewende?: Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050,” <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Was-kostet-die-Energiewende.pdf>, (in German) (2023年3月5日アクセス) .
- 6) 高遠秀尚 「結晶シリコン太陽電池の研究開発」 国立研究開発法人産業技術総合研究所, [https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/results/2017/oral/0614\\_T01.pdf](https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/results/2017/oral/0614_T01.pdf), (2023年3月5日アクセス) .
- 7) 田口幹朗 「シリコンヘテロ接合太陽電池の“これまで”と“これから”」『応用物理』84 巻 1 号 (2015) : 37-43., [https://doi.org/10.11470/oubutsu.84.1\\_37](https://doi.org/10.11470/oubutsu.84.1_37).
- 8) ゼロFITナビ 「日本初「垂直営農ソーラー発電所」が運用開始」 <https://zerofit.jp/new/news/10240.html>, (2023年3月5日アクセス) .
- 9) National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Best Research-Cell Efficiency Chart,” <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, (2023年3月5日アクセス) .
- 10) Yasushi Shoji, et al., “Epitaxial Lift-Off of Single-Junction GaAs Solar Cells Grown Via Hydride Vapor Phase Epitaxy,” *IEEE Journal of Photovoltaics* 11, no. 1 (2021) : 93-98., <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3033420>.
- 11) 増田泰造, 他 「D-19 860Wの太陽光電池を搭載したプラグインハイブリッド車」『第18回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (第1回日本太陽光発電学会学術講演会) 講演予稿集』(日本太陽光発電学会, 2021), 113., [https://doi.org/10.57295/jpvsproc.1.0\\_113](https://doi.org/10.57295/jpvsproc.1.0_113).
- 12) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), シャープ株式会社 「世界最高水準の高効率な太陽電池セルを活用し、電気自動車用太陽電池パネルを製作：太陽電池活用による充電回数ゼロを目指して1kW超の定格発電電力を達成」 NEDO, [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101326.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101326.html), (2023年3月5日アクセス) .
- 13) 村上拓郎 「I-4 ペロブスカイト系タンデム太陽電池の世界動向」『第18回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (第1回日本太陽光発電学会学術講演会) 講演予稿集』(日本太陽光発電学会, 2021), 5-6., [https://doi.org/10.57295/jpvsproc.1.0\\_5](https://doi.org/10.57295/jpvsproc.1.0_5).
- 14) キョーラク株式会社 「水上太陽光発電.com」 <https://floatingsolar-system.com/>, (2023年3月5日アクセス) .
- 15) 金子憲治 「台風で損壊して出火した千葉・水上メガソーラーが復旧、アイランドを6分割：被災後、2年半で復旧、アンカー本数を2倍以上に」日経BP, <https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atcl/19/feature/00002/00093/?ST=msb>, (2023年3月5日アクセス) .



- 16) 農林水産省大臣官房環境バイオマス政策課再生可能エネルギー室「営農型太陽光発電について (令和4年11月)」農林水産省, <https://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/attach/pdf/einou-26.pdf>, (2023年3月5日アクセス) .
- 17) Takahiro Watanabe, Toshihiro Yamanari and Kazuhiro Marumoto, “Deterioration mechanism of perovskite solar cells by operando observation of spin states,” *Communications Materials* 1 (2020) : 96., <https://doi.org/10.1038/s43246-020-00099-7>.
- 18) 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>.
- 19) National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Photovoltaic Reliability Workshop (PVRW),” <https://pvrw.nrel.gov>, (2023年3月5日アクセス) .
- 20) European Research Infrastructure, <https://www.pv-reliability.com/>, (2023年3月5日アクセス).
- 21) International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS), “Task 13 Documents,” <https://iea-pvps.org/research-tasks/performance-operation-and-reliability-of-photovoltaic-systems/documents/>, (2023年3月5日アクセス) .
- 22) International PV Quality Assurance Task Force (PVQAT), <https://www.pvqat.org/>, (2023年3月5日アクセス) .
- 23) International Electrotechnical Commission (IEC), <https://iec.ch/homepage>, (2023年3月5日アクセス) .
- 24) 3E, “The solar bankability project: Read the final report,” <https://3e.eu/news/publications/solar-bankability-project-read-final-report>, (2023年3月5日アクセス) .
- 25) Sustainable development Smart Agriculture Capacity (SUNSpACe), <https://sunspace.farm/>, (2023年3月5日アクセス) .
- 26) TRUSTPV, <https://trust-pv.eu/>, (2023年3月5日アクセス) .
- 27) 経済産業省「スマート保安官民協議会」 [https://www.meti.go.jp/shingikai/safety\\_security/smart\\_hoan/index.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/safety_security/smart_hoan/index.html), (2023年3月5日アクセス) .
- 28) 一般社団法人太陽光発電協会「太陽光発電のスマート保安の取組み (2022年4月25日)」経済産業省, [https://www.meti.go.jp/shingikai/safety\\_security/smart\\_hoan/denryoku\\_anzen/pdf/004\\_08\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/safety_security/smart_hoan/denryoku_anzen/pdf/004_08_00.pdf), (2023年3月5日アクセス) .
- 29) 株式会社ウェザーニューズ「電力市場向けに、高精度な太陽光発電量予測データをAPI提供:1kmメッシュの高精度な日射量データを用いて、30分毎のPV発電量を予測」 <https://jp.weathernews.com/news/38620/>, (2023年3月5日アクセス) .
- 30) 経済産業省「「強靱かつ持続可能な電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律案」が閣議決定されました」 <https://www.meti.go.jp/press/2019/02/20200225001/20200225001.html>, (2023年3月5日アクセス) .
- 31) 積水化学工業株式会社「「うめきた (大阪) 駅」にフィルム型ペロブスカイト太陽電池を設置」 [https://www.sekisui.co.jp/news/2022/1377721\\_39136.html](https://www.sekisui.co.jp/news/2022/1377721_39136.html), (2023年3月5日アクセス) .
- 32) 福島県大熊町, 東芝エネルギーシステムズ株式会社「ゼロカーボン推進による復興まちづくりに関する連携協定書締結について」東芝エネルギーシステムズ株式会社, <https://www.global.toshiba/jp/news/energy/2022/07/news-20220722-01.html>, (2023年3月5日アクセス) .
- 33) Power Roll Limited, “Power Roll signs agreement with Thermax Global to develop the market for solar film in India,” <https://powerroll.solar/power-roll-signs-agreement-with-thermax-global-to-develop-the-market-for-solar-film-in-india/>, (2023年3月5日アクセス) .

- 34) Oxford PV, “Oxford PV places first equipment order with Meyer Burger,” <https://www.oxfordpv.com/news/oxford-pv-places-first-equipment-order-meyer-burger>, (2023年3月5日アクセス) .
- 35) Saule Technologies, <https://sauletech.com>, (2023年3月5日アクセス) .
- 36) 瀬川浩司, 他「【研究成果】変換効率26.2%のペロブスカイト/CIGSタンデム太陽電池を実現」東京大学, <https://www.c.u-tokyo.ac.jp/info/news/topics/20220712140000.html>, (2023年3月5日アクセス) .
- 37) Swift Solar Inc., <https://www.swiftsolar.com/>, (2023年3月5日アクセス) .
- 38) シャープ株式会社「実用サイズの軽量かつフレキシブルな太陽電池モジュールで世界最高<sup>\*1</sup>の変換効率32.65%<sup>\*2</sup>を達成」<https://corporate.jp.sharp/news/220606-a.html>, (2023年3月5日アクセス) .
- 39) 株式会社東芝「高効率・低コスト・高信頼性タンデム型太陽電池の実現に向け透過型Cu<sub>2</sub>O太陽電池の世界最高発電効率を更新：将来の無充電EVなど、カーボンニュートラル社会の実現に向けて課題となる「運輸の電動化」に貢献」<https://www.global.toshiba/jp/technology/corporate/rdc/rd/topics/22/2209-02.html>, (2023年3月5日アクセス) .
- 40) 東京大学先端科学技術研究センター「コロイド量子ドット太陽電池を用いた波長分割3接合太陽電池で30%超の変換効率を実現」[https://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/ja/news/report/page\\_01382.html](https://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/ja/news/report/page_01382.html), (2023年3月5日アクセス) .
- 41) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「「太陽光発電主力電源化推進技術開発/研究開発項目 (III) 先進的共通基盤技術開発」に係る実施体制の決定について」[https://www.nedo.go.jp/koubo/FF3\\_100290.html](https://www.nedo.go.jp/koubo/FF3_100290.html), (2023年3月5日アクセス) .
- 42) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「次世代型太陽電池の開発」Green Japan, Green Innovation, <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/next-generation-solar-cells/>, (2023年3月5日アクセス) .
- 43) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「太陽光発電主力電源化推進技術開発」[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100174.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100174.html), (2023年3月5日アクセス) .
- 44) 石塚博昭「再エネの主力電源化に向け、次々世代の電力ネットワーク安定化技術の開発に着手：2030年の再エネ比率36%～38%程度の実現に貢献」国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101550.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101550.html), (2023年3月5日アクセス) .
- 45) 石塚博昭「電力システムの混雑緩和のための分散型エネルギーリソース制御技術開発に着手：電力システムの増強コストを抑制し、再エネの導入拡大と電力の安定供給に貢献」国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101552.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101552.html), (2023年3月5日アクセス) .
- 46) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 未来社会創造事業「「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域 本格研究」JST, <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/lowcarbon/JPMJMI22E2.html>, (2023年3月5日アクセス) .
- 47) Solar Energy Technologies Office, “SunShot 2030,” U.S. Department of Energy (DOE), <https://www.energy.gov/eere/solar/sunshot-2030>, (2023年3月5日アクセス) .
- 48) Solar Energy Technologies Office, “Solar Energy Technologies Office Fiscal Year 2020 Perovskite Funding Program,” U.S. Department of Energy (DOE), <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-energy-technologies-office-fiscal-year-2020-perovskite-funding-program>, (2023年3月5日アクセス) .
- 49) HighLite, <https://www.highlite-h2020.eu>, (2023年3月5日アクセス) .