

## 2.1.4 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。太陽光発電は、太陽の光を電力へ変換する発電方式である。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。宇宙太陽光発電も含める。セル・デバイス開発はここでは対象外とする。

### (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、建材一体型太陽電池（BIPV）、車載型太陽電池、発電予測、スマートインバータ、無線電力伝送、大型宇宙構造物、宇宙輸送、宇宙環境物理

### (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和パリ協定発効にみられる地球温暖化対策への世界的気運の高まりから、第5次エネルギー基本計画<sup>1)</sup>では、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた取組みを進めることが明記された。なかでも太陽光発電（Photovoltaics、以下PV）は、風力発電と並び、将来的に大型電源としての活用が期待されている。また、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。また、第5期科学技術基本計画で提唱されたSociety 5.0<sup>2)</sup>では、太陽光をはじめとする多様なエネルギーをAIなどにより的確に連携させ安定的にエネルギーを供給する社会像が示されている。さらに、エネルギー・環境イノベーション戦略<sup>3)</sup>、その後に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（2019年6月閣議決定）及び「統合イノベーション戦略2019」に基づき策定された「革新的環境イノベーション戦略」<sup>4)</sup>においても、我が国が強みを有するエネルギー・環境分野において革新的なイノベーションを創出し、社会実装可能なコストを実現し、これを世界に広めていくための非連続な技術革新が期待されており、PVの重要性は今後も増していく。また、新たに打ち出された「2050年カーボンニュートラル」に対しても、PVは重大な役割を担う。

宇宙太陽光発電は、地上太陽光の弱点である自然条件による発電の不安定さを克服するために、宇宙空間に太陽電池を設置することで発電を安定化させるシステムである。現在実用化が始まりかけている無線電力伝送技術の発展に加え、太陽光発電の高度利用や各種宇宙技術の発展が見込まれる。無線電力伝送の理論的限界と発電所としての経済性から、現在の宇宙システムよりも2桁程度大きな宇宙システムとなり、研究手法論的な反対意見も多い。しかし逆にきちんと技術ロードマップを念頭に置いた研究開発を進めれば到達できる目標であり、途中のスピノフ技術も多く、科学的意義は非常に大きい。

#### [研究開発の動向]

##### ■太陽光発電

2019年の世界のPV導入量は115 GWで、累積627 GWとなった<sup>5)</sup>。世界のPV大規模発電所の加重平均発電コストは、0.068 USD/kWh（2019年）となり、日照条件の良い地域などでは、他の電源よりも安い発電コストを実現している<sup>5)</sup>。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 (O&M) のコスト低減も進んだ。しかし、日本のPV発電コストは0.163 USD/kWh (2019年) と世界と比べてまだ高い水準にあり<sup>6)</sup>、発電コスト低減に向けた研究開発が必要である。各国の目標値としては、日本7円/kWh (2030年、NEDO PV Challenge)<sup>7)</sup>、米国3-5セント/kWh (2030年、DOE SunShot計画)<sup>8)</sup>、ドイツ4.5~7.2ユーロセント/kWh (2030年、連邦経済エネルギー省 BMWiによる見通し)<sup>9)</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、設置場所やアプリケーションの多用途化、電力系統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。

長期信頼性が向上し、システムが長寿命になればコスト低減につながる。最も普及している結晶Si系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 (PID) 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Siセルを用いたモジュールで生じる光・温度誘起劣化 (LeTID) 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。NREL Reliability Workshop、EU Sophia、Sayuri PV、IEA PVPS Task 13など国際的取組が活発で、PVQAT (The International Photovoltaic Quality Assurance Task Force) とIECの連携による標準化も検討されている。この分野は欧米の研究者が多く、国内より検討が進んでいる。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、EU Bankabilityプロジェクトにおけるファイナンス時のリスク分析やSunSpace Allianceによるベストプラクティクスの整備などがある。これは、特に途上国や砂漠地域など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。

火災と感電 (特に消防隊員) 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PVの火災が発生し、メカニズムの解明と対策が進められており、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いため、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はあるが、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。海外でも台湾の台風事故などがあるが、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。

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。また、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んでいる。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研究が必要な状況にある。モジュールおよび増加が予想される中古品を含むシステムの性能評価の低コスト化・迅速化へのニーズから、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モジュールを使う方法などが国内で検討されている。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・制度の見直しなどについて、官民による具体的なアクションプラン策定の取組が開始されている<sup>10)</sup>。

導入の多様化としては、水上設置 (Floating PV) が世界的にも増加している。特に中国で伸びており、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。シンガポールでは水上設置システムの比較試験を行い、O&M方法など含め検証している。国内でも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。2019年9月に千葉県の上設置メガソーラー発電所で台風によるアレイの破壊と火災事故が発生し、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。農業利用についても、中国で導入が拡大している。国内でも営農型 (もしくはソーラーシェアリング) と呼ばれ、導入が少しずつ進んでいるが、構造設計などに課題があり、設計指針の整備が求められている。

建物一体型はBIPV (Building Integrated Photovoltaics) と呼ばれ、日本、欧州におけるプロジェクトが進んでいる。国内では、ZEH (net Zero Energy House)、ZEB (net Zero Energy Building) との連動による導入拡大が期待されており、ZEBでは設置面積が小さいことから、壁面への高効率太陽電池の設置工夫が期待されている。パネル着色技術 (独・Fraunhofer等) など、建物のデザイン・意匠性に配慮した高付加価値化技術が研究されている。建材としての性能評価も含め、IEA PVPS 15による国際的な情報交換やIECによる標準化検討が行われている。

PV搭載自動車については、日本を中心にコンセプトが提案され、NEDOにおけるFS<sup>11)</sup> やIEA PVPS TASK 17の立ち上げなどに進展している。実証研究として、トヨタ自動車と日産自動車がシャープ製の高効率太陽電池を搭載した実証車を製作している。運輸部門に関連して、海外では道路一体型PVの開発も進められている<sup>12)</sup>。

電力系統との高度な協調技術として、自律調整機能 (電圧安定化、周波数安定化、力率調整、出力制御、ソフトスタートなど) と電力会社・アグリゲータとの双方向通信機能が実装されるスマートインバータが開発され、標準化が進んでいるが、具体的利用方法について検討・検証が求められている。PVの大量導入で懸念される慣性力の低下対策や、配電系統での電圧・潮流の最適な制御方式、電力品質を低下させない高圧連系の電力変換装置の開発に向けたプロジェクトも開始されている<sup>13)</sup>。

発電量予測については、各国でプロジェクトが立ち上がっている。IEA PVPS TASK 16においても国際的な情報交換の場が作られている。日射量モデルの改良、衛星観測データや全天カメラ画像による情報量の増加や、深層学習、アンサンブル学習などの予測手法が研究されている。国内の各電力会社でも発電量の把握方法の検討が進み、実装されている。日射量からの推定モデルが基本であるため、スマートメータなどの実測データによる補正や検証が必要である。出力制御については、海外でも実装されているが、国内ではより高度なリアルタイム制御、日射の短時間予測を利用した制御計画の修正などの研究が行われている。蓄電池の導入も進められているが、コスト低減が求められている。また、電力市場において日々の需給バランスを維持するためには、前々日・前日時点での気象予測の精度の向上が重要であり、その対策に向けた技術開発の方向性として、① 誤差の拡大を事前に把握する手法としてアンサンブル予報の活用、② 気象モデルの不完全性を補う手法として、複数の気象モデルの活用、③これらと併せて気象モデル自体の精度向上、が求められている<sup>14)</sup>。

融資、顧客獲得、許可、設置、労働、検査などのソフトコストは、ハードコストに比べて低下しておらず、

住宅用および商用システムの総コストの半分以上を占めるとの試算がある（米国DOE）<sup>15)</sup>。米国では手続きコストの低減に向けたFSなどが行われている。国内では、技術開発ではなく調査が行われている程度であり、さらなる対応が求められている。

## ■宇宙太陽光

宇宙太陽光発電は1970年代の宇宙開発競争の流れを受け、当時研究が始まっていたマイクロ波送電技術を採用して、次の宇宙開発の手段として研究が始まったものである。その後1990年代に入り、宇宙太陽光発電は深刻化する地球温暖化の対策の一つとしても注目を集めるようになる。地上太陽光発電、風力発電が普及段階に入った現在は、太陽光発電の高度利用の観点に加え、再び人類の宇宙進出の礎としても注目されている。1990年代までは国レベルの研究開発が主流であった。アジア域は現在も変わらず国主導であるが、欧米では他の宇宙技術と同様民間企業での研究開発が始まっている。

技術的には宇宙太陽光発電提唱当初から、無線電力伝送がキー技術であると考えられ、現在に至るまで様々な要素研究や実証実験が行われている。無線電力伝送は2010年代に入り様々な実用化の検討が始まり、一部の商品化・標準化もなされるようになってきている<sup>16) -19)</sup>。また宇宙用の高効率・軽量・高耐宇宙線の太陽電池や、大型宇宙構造物の展開・建造・保守、宇宙空間における高圧電力の取り扱い、そして安価な宇宙輸送（地上からの打ち上げや軌道間輸送等）などの研究と実証の必要性が掲げられている。ただし、世界中での宇宙開発のダウンサイジングに伴い、これら宇宙関連技術の実証研究例はあまり多くはない。後述のマイクロ波送電の日米での実用化の進展に伴い、宇宙太陽光発電に関連する研究開発のトレンドは、太陽光発電-マイクロ波送電システムモジュールの開発<sup>20)</sup> や宇宙実証実験<sup>21)・22)</sup> に移りつつある。また米国ではレーザー送電の実証研究も成果を挙げている<sup>23)</sup>。欧州では久しぶりに欧州宇宙機関（European Space Agency）が宇宙太陽光発電のアイデア・コンセプト募集のオンライン・キャンペーンを2020年夏より始めている。中国、韓国では無線電力伝送研究の遅れを取り戻すかのように、ビーム型無線電力伝送の実証実験やその計画が増えている<sup>24) -26)</sup>。ビーム制御はアンテナサイズの理論限界やビーム制御精度などの問題もあり、地上実証レベルや宇宙からの実証レベルではまだ課題が多い。これらの開発では現在は日本がリードしているが、世界の研究開発は加速しており、日本は後れを取らないか懸念されている。

無線電力伝送は新半導体の開発や大型ビーム制御アンテナの開発、実用化に伴う様々な回路技術やシステム技術が急速に進歩している。宇宙太陽光発電に用いるビーム型の無線電力伝送方式とは異なり、民生応用のユビキタス型や電磁誘導方式は技術的にクリアすべき課題は減り、電波法による周波数割り当てがないことが最大の問題となっている。米国で生まれた複数のベンチャー会社がマイクロ波送電システムに対して米国連邦通信委員会（Federal Communications Commission）の許可を得て、米国ウォルマート社や中国ギャランツ社との製品化を加速している<sup>27)</sup>。日本でもマイクロ波送電を推進する企業連合であるコンソーシアムの働き掛けなどにより、総務省情報通信審議会空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班における2018年12月より約2年間の審議を経て、3つの周波数帯のマイクロ波送電システムの省令改正が進もうとしている<sup>28)</sup>。ビーム型の商用化や、宇宙太陽光発電への応用はまだ道半ばであるが、技術的にはマイクロ波を用いた無線電力伝送用 GaN 半導体増幅器の効率が80%近く（5.8 GHz帯）になっており、要素技術としては更なる高効率化や量産化が求められている。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

##### ■太陽光発電

- ◆2020年2月25日に「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」が閣議決定した。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る予定である。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検討されている。固定価格買取制度（FIT制度）に加え、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）が創設される。
- ◆NEDOがPV搭載自動車の実現による運輸部門の温室効果ガス削減効果を調査した結果<sup>11)</sup>、2050年に全ての次世代自動車（EV、PHV、HEV）にPVが搭載された場合、乗用車に期待される排出削減量の9%相当が削減でき、また利用パターンによっては、年間の充電作業回数をゼロにできるとの試算結果が得られた。化合物多接合型などの高効率モジュールの適用に向けた技術展開が期待され、IEA PVPS TASK 17 “PV for transport supports the solar mobility” も立ち上がった。
- ◆2019年7月にNEDOが、世界最高水準の高効率太陽電池を搭載した電動車の公道走行実証を開始した。シャープ製の高効率太陽電池を搭載したプリウスPHVをベース車両とした実証車を開発し、公道での走行実験を行っている。また、2020年7月には、同様の取り組みとして日産自動車がBEVであるe-NV200をベースに実証車を開発した。III-V化合物高効率太陽電池モジュールで1 kWを超える定格発電能力を有しており、変換効率は31%程度と世界最高効率レベルのセルを用いている。
- ◆BIPVから車載PVまで、これまで以上にデザイン性を重視するアプリケーションが増えてきたことから、色つきの太陽電池モジュールの開発が活発になってきている。
- ◆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ブル予報を活用した日射・発電予測の高度化が期待される。
- ◆経産省が「スマート保安官民協議会」を設立、官民が連携し、IoTやAIなどの新技術の導入などにより、産業保安における安全性と効率性を高める取組が開始された。環境省は大規模な太陽光発電事業は法アクセス対象とすることを決めた。今後適正な事業を推進するための支援技術の開発が期待される。
- ◆Peer to Peer（P2P）通信方式を利用した再生可能エネルギー発電所と利用者の直接電力取引の導入が検討されている。仮想通貨で注目されるブロックチェーンを活用する技術の開発も進められており、蓄電池やEVの所有者とのPV電力取引なども含めた様々な電力取引形態の実現が期待される。
- ◆2019年6月にNEDOが慣性力の低下などに対応するための基盤技術の開発、配電系統における電圧・潮流の最適な制御方式の開発、および高圧連系用電力変換器における電圧フリッカ対策のための最適な単独運転検出方式の開発を行うプロジェクトが開始された。

##### ■宇宙太陽光

##### [日本]

- ◆5.8 GHzフェーズドアレイアンテナを用いたドローンへのマイクロ波送電実験に成功（METI-SPSプロジェクト、J-Spacesystems、三菱電機他、2019）<sup>29)</sup>
- ◆303 GHzレクテナ（受電整流アンテナ）の開発に成功（筑波大学他、2018）<sup>30)</sup>

## [米国]

- ◆太陽光発電-マイクロ波送電システムモジュールの宇宙実証実験(送電実験自体は失敗)(米国海軍研究所(U.S. Naval Research Laboratory : NRL, 2020)<sup>21)</sup>
- ◆国際宇宙ステーションの中で宇宙飛行士によるマイクロ波送電デモ実験(2020)<sup>22)</sup>
- ◆325 mの長距離レーザーによる送電実験(2 kW送電)の成功(NRL, 2019)<sup>23)</sup>
- ◆複数のベンチャー企業が920 MHz/2.45 GHz/5.8 GHzマイクロ波送電システムの米国連邦通信委員会認可(ISM機器として)と一部販売開始(2019)<sup>27)</sup>

## [中国]

- ◆35 GHz, 1 kW, 300 mのミリ波送電実験の成功、AC to DCの総合効率9.89%(武漢CSDDC, 2020)
- ◆5.8 GHz, 10 mのマイクロ波送電実験の成功、総合効率18.5%(成都Sichuan大学, 2020)<sup>26)</sup>

## [韓国]

- ◆韓国宇宙庁KARIのグループが宇宙太陽光発電の実施を希望しており、2017年11月と2019年2月の2回韓国内閣府内で国会議員を招きワークショップを開催
- ◆企業が10 GHz帯のGaN MMICを用いたフェーズドアレーを開発(2019)<sup>24)</sup>

## [注目すべき国内外のプロジェクト]

## ■太陽光発電

海外の大型プロジェクトとして、欧州のHorizon2020、米国のSunshotイニシアティブなどがあり、各国で基礎研究から応用研究、実用化まで広範なテーマについて研究開発を推進している。

国内ではNEDOが実用化に向けた複数のプロジェクトを推進している。2020年から立ち上げている「太陽光発電主力電源化推進技術開発」<sup>12)</sup>は、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・システム技術開発を中心に、適用可能なセル技術、新たな導入形態におけるガイドライン策定や信頼性評価・回復技術、低コストリサイクル技術、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など、広範囲にわたる技術開発がスタートした。

経済産業省「令和元年度新エネルギー等の保安規制高度化事業委託調査」や「令和2年度 産業保安高度化推進事業費補助金」では、先進的な保守管理技術を、実際の設備に導入して有効性を評価しつつ、電気保安規制などのあり方を検討している。常時監視の計測データをもとに、発電特性の低下傾向を劣化の早期予兆として検知する技術などを評価している。

PVだけが対象ではないが、系統との協調技術に関連して、JST CREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」<sup>15)</sup>では、エネルギーと情報を双方向・リアルタイムで処理し、需要と供給の状況把握や協調制御を可能とする理論、および需要と供給それぞれの利己的意思決定をエネルギーシステム全体の社会的利益につなげるために、人間行動や社会的合理性を組み込んだ理論や基盤技術などの研究が行われた。NEDO「再生可能エネルギーの大量導入に向けた次世代型の電力制御技術開発事業」<sup>13)</sup>では、再生可能エネルギーが電力系統に大量導入された際の、慣性力の低下対策や、配電系統での電圧・潮流の最適な制御方式、電力品質を低下させない高圧連系の電力変換装置(パワーコンディショナー)の開発を行っている。

## ■宇宙太陽光

### [日本]

- ◆JAXA中長期計画における「宇宙太陽光発電システムの要素技術実証による波及成果の創出に留意した研究開発」(2018-)において、宇宙太陽光発電の主要要素技術であるマイクロ波無線電力伝送技術、レーザー無線電力伝送技術、大型構造物展開組立技術を中心とした研究開発を実施。
- ◆経済産業省「宇宙太陽光発電における無線送受電技術高効率化等研究開発事業」(2019-、2009より継続)[J-Spacesystems]では、JAXA連携協力の下、マイクロ波送受電技術を中心とした研究開発。2019年度より太陽光発電-マイクロ波送電システムモジュールの開発や長距離マイクロ波送電実証実験に着手。
- ◆JST Center Of Innovation (COI)「活力ある生涯のためのLast 5X イノベーション」(2013-2021)[京大他]には、研究テーマの一つにマイクロ波送電を用いたバイタルセンサーの開発やインフラ点検センサーの開発を含む。
- ◆JST ERATO「川原万有情報網プロジェクト」(2014-2019)[東大他]では、研究テーマの一つに結合型ワイヤレス給電が含まれる。全体はIoT技術等の研究開発。
- ◆JST CREST/さきがけ「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」(2015-2019)は、エネルギーハーベスティング(熱発電等)に関する研究プロジェクトであり、いくつかの電波ハーベスティングを含む。
- ◆内閣府(JST、NEDO等)戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「IoE(Internet of Energy)社会のエネルギーシステム(旧:脱炭素社会実現のためのエネルギーシステム)」(2018-2022)[名古屋大、京大他]では、GaN開発、屋外ワイヤレス給電(ドローン、電磁誘導、マイクロ波他)、屋内マイクロ波送電(IoTセンサー)というカテゴリーで電磁誘導からマイクロ波送電までを網羅した研究開発で、ビジネス志向の研究を実施。

### [米国]

- ◆米国海軍研究所が宇宙太陽光発電用のビーム送電の研究開発に着手(2019.10)。予算は1億ドル以上。

### [欧州]

- ◆欧州宇宙機構による宇宙太陽光発電のアイデア/コンセプト募集のオンライン・キャンペーン(2020夏より)。

### [中国]

- ◆The Chinese SSPS Promotion Committeeが2018年1月17日に設立。中心は中国CAST他。
- ◆The ZhuRi(Chase the Sun) Projectが2018年12月23日に西安大学を中心にスタート。SPSデモ実験を予定。
- ◆Space Solar Power Experiment Baseの設置プロジェクト(重慶、2018.12.6発表)。Experiment Baseの広さは130,000 m<sup>2</sup>に及び、約3,000万ドルが投資されている。今後のマイクロ波送電実験や宇宙実証実験を計画。

## (5) 科学技術的課題

### ■太陽光発電

- ◆インフラ維持のスマート化に向けた、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ージメント、常時監視による不具合早期発見に関する技術。

- ◆システムリスクの低減化に向けた、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。
- ◆多様性に対応するシステム設計技術として、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に関する研究開発。
- ◆ソフトコストの低減化に向けた、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、非接触給電技術とドローン施工の組み合わせなどの研究開発。
- ◆PV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（曲面対応、色制御）、部分影による損失抑制技術などの研究開発。
- ◆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。
- ◆電力の需給調整（発電を調整して負荷と一致させる）における予測制御技術として、リアルタイムユニットコミットメント（発電の起動・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連動、PMU（電力系統解析を行うフェーズ情報計測装置）によるリアルタイム系統状況把握などの技術開発。
- ◆柔軟性を有する太陽光発電に向けた、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。
- ◆人口減少にともなうインフラ縮退などを考慮した太陽光発電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太陽光発電システムの開発。

## ■宇宙太陽光

- ◆マイクロ波帯での GaN 半導体の更なる開発の発展とビーム制御技術の発展。
- ◆無線電力伝送技術や宇宙構造物技術、宇宙環境物理学等に関する早急な宇宙実証実験の実施。

## (6) その他の課題

### ■太陽光発電

国内では固定価格買取制度（FIT法）により導入が急拡大し、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導入など、適正化に向けて法整備が行われた。しかし、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おり、これらのリスク評価、是正・補強、不具合の早期発見などの致命的リスクの低減技術が必要である。また、行政などによる保安のスマート化として、AI技術の活用と法規制の緩和による合理化を進め、ランニングコストを低減する必要がある。

研究開発の体制として、国内では導入ビジネスにリソースが割かれたことから、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。特にビジネスがアセットマネジメントやエネルギーマネジメント、サービスなどのストックに対する産業への転換が必要であるため、ソフトコストを含め、これらを支える技術の重要性が高まっている。

市場の9割を占める結晶Si系の勢いはしばらく継続すると予想される。中国・台湾がシェアの7割以上を占めるが、国際競争力の観点では、多様化するシステム形態と連動したデバイス開発が必要である。例えば、車載やZEBなど面積が限られ、信頼性が求められるアプリケーションに対して、高効率かつ高信頼性の太陽

電池を採用することなどが想定される。システムレベルからセルまでの一貫した研究開発を行い、標準化と連動して国際競争力を高める必要がある。

国内のシステムコストの高止まりの一因は、商流における中間マージンがある。太陽電池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。

スマートグリッドなどの電力システム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。発電予測など太陽光発電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。

■宇宙太陽光

- ・宇宙太陽光発電に向けた研究開発の途中で生まれるスピノフ技術の実用化と周波数の議論
- ・宇宙太陽光発電のような長期大規模システムの研究に取り組める腰をすえた研究環境の整備

(7) 国際比較

■太陽光発電

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」：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320 GW（うち新市場 約170 GW）、太陽光発電による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	○	→	
米国	基礎研究	○	→	●米国DOEのSunShot計画において、2030年までに補助金なしで電力事業規模太陽光発電システムの平均LCOEを3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 Laboratory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	○	→	●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。 ●系統連系される発電量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、研究者と共同で太陽光発電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。

2.1 俯瞰区分と研究開発領域  
エネルギー区分

欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●EUの2014～2020年までの7か年計画である科学技術計画Horizon 2020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>●ドイツ連邦経済エネルギー省（BMWi）及びドイツ連邦教育科学研究技術省（Federal Ministry of Education and Research:BMBF）が、様々な側面から太陽光発電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形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> </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 2020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。建物一体型（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（CLIM2POWER）。</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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●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。</li> </ul>

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。

■宇宙太陽光

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	○	→	●マイクロ波無線電力伝送に関するSIPプロジェクトの始動、経産省宇宙太陽光発電プロジェクトの継続。また国内の学会活動の活性化と日本が牽引する国際学会活動の発展。
	応用研究・開発	○	→	●マイクロ波無線電力伝送コンソーシアムの拡大。ITUにおける日本の積極的な関与。ただし議論が多いが商品化が他国に対して大幅に遅れ。
米国	基礎研究	○	→	●2000年代のNASAの宇宙開発の停滞と呼应した宇宙太陽光発電研究の停滞。現在の研究の主流は海軍研究所 (NRL)。近年空軍研究所 (Air Force Research Laboratory) が宇宙太陽光発電用のビーム送電の研究開発に着手。宇宙太陽光発電に関する学会 (IEEE WiSEE) の設立と運営。
	応用研究・開発	○	↗	●民間企業主導の宇宙太陽光発電に関する研究投資。NRLを中心とした宇宙実証実験の実施。マイクロ波送電のベンチャー企業主導の実用化の発展と米国内での周波数の認可 (2017.12)。
欧州	基礎研究	△	→	【EU】 ●欧州宇宙機構による宇宙太陽光発電のアイデア/コンセプト募集のオンライン・キャンペーンのスタート。 【英国】 ●民間企業から宇宙太陽光発電の新提案あり。
	応用研究・開発	△	→	【EU】 ●マイクロ波無線電力伝送のうち、IoT用の技術に関してはEU中心のコンソーシアムの発足と実用化の進展。特にイタリア、ポルトガル、スペインでのマイクロ波無線電力伝送研究と実用化が活発。電動バス用無線充電器 (電磁誘導) を全国展開で実用化。

中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●中国空間技術研究院を中心に宇宙太陽光発電の新提案あり。</li> <li>●The Chinese SSPS Promotion Committeeが2018年1月17日に設立。</li> <li>●The ZhuRi (Chase the Sun) Projectが2018年12月23日に西安大学を中心にスタート。</li> <li>●Space Solar Power Experiment Baseの設置プロジェクト (重慶, 2018.12.6発表)。約3,000万ドルが投資。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●35 GHz, 1 kW, 300 mのミリ波送電実験の成功 (ACtoDCの総合効率9.89%) (武漢 CSDDC, 2020)。</li> <li>●5.8 GHz, 10 mのマイクロ波送電実験の成功、総合効率18.5% (成都 Sichuan大学, 2020)。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>●1997年から2000年までのKERI中心のビームマイクロ波送電研究プロジェクトの次プロジェクトが未だ認められず。</li> <li>●韓国宇宙庁KARIの中のグループが宇宙太陽光発電の実施を希望しており、2017年11月と2019年2月の2回韓国内閣府内で国会議員を招きワークショップを開催。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>●韓国企業が10 GHz帯のGaN MMICを用いたフェーズドアレーを開発 (2019)。</li> </ul>
その他の国・地域 (任意)	基礎研究	△	→	<p>【マレーシア】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●マレーシア通信研究所が日本と連携してIoT用無線電力伝送用研究費を獲得 (2018)。</li> </ul> <p>【シンガポール】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●宇宙太陽光発電に関するシンポジウムを開催 (2017)。</li> </ul>

(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

- ・風力発電 (環境・エネ分野 2.1.5)
- ・その他の再生可能エネルギー発電 (水力、海洋、地熱、太陽熱) (環境・エネ分野 2.1.7)
- ・次世代太陽電池材料 (ナノテク・材料分野 2.1.1)

### 参考・引用文献

- 1) 資源エネルギー庁, 「第5次エネルギー基本計画」(2018), [http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/](http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/) (2021年2月12日アクセス)
- 2) 内閣府, 「Society 5.0」(2018), [http://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/index.html](http://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html) (2021年2月12日アクセス)
- 3) 内閣府, 「エネルギー・環境イノベーション戦略」(2016), <http://www8.cao.go.jp/cstp/nexti/>

- gaiyo.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 4) 統合イノベーション戦略推進会議, 「革新的環境イノベーション戦略」(2020), <https://www8.cao.go.jp/cstp/siryu/haihui048/siryu6-2.pdf> (2021年2月12日アクセス)
  - 5) IEA PVPS Task 1, “Snapshot of global photovoltaic markets”, (2020), [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA\\_PVPS\\_Snapshot\\_2020.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf) (2021年2月12日アクセス)
  - 6) IRENA, “Renewable power generation costs in 2019”, (2020), <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019> (2021年2月12日アクセス)
  - 7) NEDO, 「太陽光発電開発戦略 (NEDO PV challenge)」(2014), <http://www.nedo.go.jp/content/100575154.pdf> (2021年2月12日アクセス)
  - 8) US Department of energy, “The SunShot Initiative”, (2018), <https://www.energy.gov/eere/solar/sunshot-initiative> (2021年2月12日アクセス)
  - 9) Fraunhofer ISE, “Was Kostet Die Energiewende?”, (2015), <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Was-kostet-die-Energiewende.pdf> (2021年2月12日アクセス)
  - 10) 経済産業省, スマート保安官民協議会, <https://www.meti.go.jp/press/2020/06/20200629002/20200629002.html> (2021年2月12日アクセス)
  - 11) NEDO, 「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会中間報告書」(2018), [http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100909.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100909.html) (2021年2月12日アクセス)
  - 12) NEDO, 「太陽光発電主力電源化推進技術開発」(2020), [https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100174.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100174.html) (2021年2月12日アクセス)
  - 13) NEDO, 「再生可能エネルギーの大量導入に向けた次世代電力ネットワーク安定化技術開発」(2019), [https://www.nedo.go.jp/koubo/AT523\\_100089.html](https://www.nedo.go.jp/koubo/AT523_100089.html) (2021年2月12日アクセス)
  - 14) 第27回 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会, [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/027.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/027.html) (2021年2月12日アクセス)
  - 15) JST CREST, 「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」(2018), [https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research\\_area/ongoing/bunyah24-1.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah24-1.html) (2021年2月12日アクセス)
  - 16) Naoki Shinohara, *Wireless Power Transfer via Radiowaves (Wave Series)*, ISBN 978-1-84821-605-1, (ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc., Great Britain and United States, 2014), <https://assets.thalia.media/images-adb/41/e5/41e59545-ec0d-440b-9617-55dcecffd92a.pdf> (2021年2月12日アクセス)
  - 17) (中国語訳) 張超訳, Naoki Shinohara, 『Wireless Power Transfer via Radiowaves (Wave Series)』, ISBN 978-7-302-48696-1, (中国: 精華大学出版社, 2018)
  - 18) Naoki Shinohara (ed.), *Recent Wireless Power Transfer Technologies Via Radio Waves*, ISBN 978-879360-924-2, (EU: River Publishers, 2018), <http://cds.cern.ch/record/2622536>
  - 19) Naoki Shinohara (ed.), *Wireless Power Transfer: Theory, Technology, and Applications*, ISBN 978-178561-346-3, (UK: Inst of Engineering & Technology, 2018)

- 20) 経済産業省, 「令和元年度宇宙太陽光発電における無線送受電技術効率化等研究開発事業に係る委託先の公募について」(2019), <https://www.meti.go.jp/information/publicoffer/kobo/2019/k190517001.html> (2021年2月12日アクセス)
- 21) *US Naval Research Laboratory News Releases* (2020), <https://www.nrl.navy.mil/news/releases/nrl-conducts-first-test-solar-power-satellite-hardware-orbit> (2021年2月12日アクセス)
- 22) *LEctenna on ISS*, (2020), <https://www.youtube.com/watch?v=zo7w0D6vz5g> (2021年2月12日アクセス)
- 23) *US Naval Research Laboratory News Releases*, October 22, (2019), <https://www.nrl.navy.mil/news/releases/researchers-transmit-energy-laser-power-beaming-demonstration> (2021年2月12日アクセス)
- 24) Lawrence Jeon, “Transmitter for high power microwave wireless power transmission (in Korean),” *Magazine of the Korea Institute of Electrical Engineers (KIEE)*, Sept. (2019) : 11-14
- 25) Hexin Zhang, and Changjun Liu, “A high-efficiency microwave rectenna array based on subarray decomposition,” *Applied Science and Technology* 10, No. 4 (2016) : 57-61
- 26) Qiang Chen. “Research on High-Performance Receiving and Rectifying Technology for Microwave Wireless Power Transmission,” *Ph. D thesis in Sichuan University* (2020)
- 27) Ossia社, <https://www.ossia.com/> (2021年2月12日アクセス)
- 28) 総務省情報通信審議会空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班, [https://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/joho\\_tsusin/policyreports/joho\\_tsusin/idou/b\\_wpt\\_wg.html](https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/idou/b_wpt_wg.html) (2021年2月12日アクセス)
- 29) Naoki Shinohara, “Wireless Power Transfer in Japan and in Asia,” *Proc. of 49th European Microwave Conference* (2019) , 4
- 30) S. Mizojiri, and K. Shimamura, “Wireless power transfer via Subterahertz-wave,” *Appl. Sci.* 8, No. 12 (2018) : 2653, <https://doi.org/10.3390/app8122653>

#### 【本文全体に対して参考にした文献】

- a) NEDO 「IEA PVPSレポート National Survey Report 翻訳版」(2018), <http://www.nedo.go.jp/content/100785821.pdf> (2021年2月12日アクセス)