

2.5 太陽光発電・太陽熱発電

（1）研究開発領域の定義

太陽光発電・太陽熱発電に関する科学、技術、研究開発を記述する。太陽光発電および太陽熱発電は、太陽の光・熱エネルギー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からの動向を対象とする。宇宙太陽光発電も含める。

（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、蓄熱システム、高温化・高効率化、高温用溶融塩、高温用熱媒体、超臨界 CO₂ タービン、燃料化技術

（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パリ協定発効にみられる地球温暖化対策への世界的モメンタムの高まりから、第5次エネルギー基本計画¹⁾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（PV）は、風力と並び、将来的に大型電源としての活用が期待されている。また、第5期科学技術基本計画で提唱された Society 5.0²⁾では、太陽光をはじめとする多様なエネルギーをAI等によりの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³⁾においても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。

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とそれに伴うコスト増を、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、コスト減をはかることのできるシステムである。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。

太陽熱発電（CSP）は、安価な蓄熱システムを組み込むことにより、日射が無い場合でも電力供給が行える利点がある。また、日本が得意とするタービン等の発電プラント技術を活用できる。集光・集熱を行うため国内よりも直達日射量が多い地域で有効だが、本地域は発展途上国が多く、化石燃料の輸入により高コストの発電を行い、電力不足を解消している地域も多い。これらの地域にはCSPが適する。部品製造やメンテナンス等に就業機会があり、雇用改善にも役立つため、世界銀行は発展途上国へのCSPを後押ししている。

[研究開発の動向]

■太陽光発電

世界の2017年の太陽光発電（Photovoltaics: 以下PV）導入量は98GWで、累積400GWとなった⁴⁾。世界の平均的なPV発電コストは、0.07～0.31 USドル/kWh（2017年）となり、最低で0.02 USドル/kWhのケースもあり、トップランナーでは、他の電源よりも安い

発電コストを実現している⁵⁾。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も進んだ。しかし、日本のPV発電コストは世界と比べて高く⁶⁾、発電コスト低減に向けた研究開発が必要である。目標値としては、日本7円/kWh（2030年、NEDO PV Challenge）⁷⁾、米国3-5セント/kWh（2030年、DOE SunShot計画）⁸⁾、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）⁹⁾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、運用ソフトウェアコスト低減に関する研究開発がトレンドになっている。

長期信頼性を向上させ、システムが長寿命になればコスト低減に繋がる。最も普及している結晶Si系モジュールの酢酸による劣化機構が究明され、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、耐性材料や屋内信頼性試験方法（CIGS系を含む）の開発が進められている。PERC系モジュールの光・温度誘起劣化（LeTID）など新たな劣化機構も研究されている。NREL Reliability Workshop、EU Sophia、Sayuri PV、IEA PVPS Task 13など国際的取組が活発で、PVQATとIECの連携による標準化も検討されている。欧米の研究者が多く、国内より検討が進んでいる（酢酸による劣化解明は国内成果）。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。火災と感電（特に消防隊員）に関しては海外での整備が進み（米国電気工事規定での義務化など）、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言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。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、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。モジュールおよびシステム（増加が予想される中古品を含む）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。

導入の多様化としては、水上設置が世界的にも増加（特に中国）している。シンガポールでは水上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。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とも呼ばれ、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工夫設置が期待されている。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（トヨタなど）を中心にコンセプトが提案され、NEDO における FS や IEA PVPS TASK 17 の立ち上げなどに進展している。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。

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、ソフトスタート等）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。発電予測については、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リソースの増加や、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出力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、スマートメータ等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。

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）¹⁰⁾、米国では手続きコスト低減に向けた 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。

■宇宙太陽光発電

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。しかし、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が、アジア域は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、実用化がされていない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^{11)・14)}。また宇宙用高効率軽量高耐宇宙線用太陽電池や、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）等の研究と実証の必要性が叫ばれているが、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。

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と呼ばれる無線電力伝送方式とは多少異なる、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っており、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。ビーム型で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（5.8GHz 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。ビーム制御はアンテナのサイズの問題もあり、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。これらの開発は、現在日本がリードしているが、米国では民間企業が3年1,750万ドルの研究開発費を大学へ投入したり、中国宇宙庁 CAST 等中国で様々なビーム型無線電力伝送実証実験が実施されたりしており、今後予断を許さない。

■太陽熱発電

PV発電コストの急落により太陽熱発電（Concentrating Solar Power: CSP）のプラント建設数は予測を下回る状況にあったが、蓄熱を組み込むことにより電力需要曲線に合わせた低コストの電力供給が可能であることが評価され、再び増加傾向にある。現在、高温・高効率化を目指したタワー型の集光系を用いたプラントが増えている。また、低コストの蓄熱を実現するため熱媒体に565℃まで使用可能な硝酸塩系溶融塩を用いたプラントが増えている。CSPの研究開発は発電のみならず、高温の熱を利用した燃料製造、CO₂の有効利用や工業用熱供給の分野にも広がりつつある。

CSPの特徴として、太陽からまっすぐ地上に降り注ぐ「直達日射」の量によって発電コストが大きく変わることが挙げられる。直達日射量は乾燥地帯で豊富であり、米国南西部、南北アフリカ、中東、豪州などでは低コスト発電が可能である。世界で最も直達日射量が多いといわれるチリ北部の砂漠地帯での発電コストは、24時間電力供給が可能なプラントで0.06 USD/kWhと言われている。最新タワー型プラントの年平均発電効率（太陽光→電力）は約25%に達しているものと推測される。CSPの発電コストはPVに比べ高いという評価がある。しかし、最近のCSPプラントでは蓄熱システムにより日射が無い時間帯でも発電でき、蓄熱システムはPVで使用される二次電池よりも低コストであり、電力の安定供給まで含めた発電コストはCSPの方が優位である。また、ボイラも標準装備されるため長期間日射が無い場合にもバックアップ発電所は不要であり、PVに対する優位性がある。CSPの発電コストはプラント規模が大きいほど低下するため、数十MW以上の規模が低コスト発電には好ましい。

CSPの研究開発ターゲットは高温化による高効率化と低コスト化である。高温化の目標温度はプラントの発電方式によって異なる。蒸気タービンは現行の565℃から650℃への昇温が検討されているが、超臨界・超超臨界条件の蒸気タービンは大型化するためCSPに適さない場合が多い。このような場合には超臨界CO₂タービンの方がより小型で高効率に発電できるため活発な研究開発が行われている。太陽熱と組み合わせた超臨界CO₂タービンの温度条件は550～800℃と幅広いが、高温の方が高効率となる。現行565℃のタワー型プラントの蒸気タービンの効率は42～43%、650℃の蒸気タービンを用いた場合は46～47%、750℃の超臨界CO₂タービンでは50%以上が見込まれている。これらのプラントでは熱媒体を高温用溶融塩もしくは固体微粒子とし、低コストの蓄熱をセットにできる強みがある。ガスタービンを使用する場合には850℃から1000℃（可能であればそれ以上）を目標としている。この場合の熱媒体は空気であり、多孔質セラミックス等を用いた特殊なレシーバ（集光集熱装置）を必要とする。

CSPの主要技術は集光集熱、熱輸送（熱媒体）、蓄熱、発電方式に大別できる¹⁵⁾。集光集熱については、集光太陽光の吸収を高く、またそれによって温度が上昇した表面からの放射による損失を可能な限り低減する必要がある。このため、光吸収性が高く高温での酸化安定性の高い被膜の開発¹⁶⁾や選択吸収性があり放射損失が低い膜構造の研究開発が行われている¹⁷⁾。また、レシーバの構造を工夫することによる熱効率向上もある¹⁸⁾。熱媒体については、高温化に向けた硝酸塩系以外の溶融塩の研究、溶融金属系熱媒体の使用、空気の利用などが検討され、

一部は実用化されている。また、最近では金属酸化物の微粒子を熱媒体 / 蓄熱 / 熱媒体として使用する動きもある¹⁹⁾。蓄熱については、顕熱蓄熱の低コスト化があり、スラグのような安価な固体蓄熱材料の使用やサーモクラインシステムと呼ばれる一つのタンクに高温・低温の熔融塩を入れるシステムの開発が進んでいる²⁰⁾。熔融塩を用いた潜熱蓄熱では、低い熱伝導率を補うシステム開発が必要であり、熱伝導率が高い金属系の潜熱蓄熱材料に関する研究が盛んである。特に Al-Si 合金が注目されている。化学蓄熱は材料と反応の絞り込みがかなり進んできたが、一番の課題は繰り返し耐久性の向上である。発電方式については、上述のように蒸気タービンの高温化、超臨界 CO₂ タービンやガスタービンをを用いる動きがある²¹⁾。また、このような回転機器を用いた発電の他に熱光起電力発電 (TPV) や熱電変換を用いる動きもある²²⁾。発電以外の用途への熱利用についても活発な研究開発が行われている。集光太陽熱を利用した水の熱分解による水素製造や、水と CO₂ を金属酸化物により分解し、液体燃料を製造する技術²³⁾ などの多くの利用法が検討されている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■太陽光発電

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などを調査した結果²⁴⁾、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% に相当する量が削減でき、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。太陽光発電の農地への適用拡大も進展している。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や、劣化機構の解明等による長期信頼性の向上が期待され、IEA PVPS TASK 17 “PV for transport supports the solar mobility” も立ち上がった。

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、1km メッシュ) における日射量&発電量推定技術の研究開発が進められている。

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。

■宇宙太陽光発電

マイクロ波帯での GaN 半導体の開発の発展 (日本)^{25)・27)} や、無線送電実証の進展、新しい宇宙太陽光発電システムデザイン²⁸⁾ の発表 (米民間企業²⁸⁾、英民間企業²⁹⁾、中国宇宙庁³⁰⁾、中国大学³¹⁾) が着目される。JAXA が、宇宙太陽光発電へつなげるスピンオフ技術 (成層圏無線中継機や大型展開構造レーダーアンテナ衛星等) 検討を進めている。

■太陽熱発電

高温化・高効率化が注目動向である。現在普及している硝酸塩系熔融塩に代わる高温用熔融塩の開発が欧米を中心に行われている。塩化物系熔融塩と炭酸塩系熔融塩に絞り込まれつつあるが、防食技術の開発が検討課題¹⁶⁾。日本も研究開発を行っている。

700 ~ 800°C の熱を創り、輸送・蓄熱するタワー型プラントの熱媒体・蓄熱媒体として固体

微粒子（金属酸化物等）を用いる動きが世界的に顕著である²³⁾。固体微粒子は耐熱性が高く、高温の熱輸送と蓄熱が可能である。課題は安定的に使用可能な循環システムの構築である。

高温用の熱媒体としてNaを使うシステムがパイロットプラントレベルで動いている³²⁾。Naの低密度、高熱伝導率が特に重要視されている。水との接触は危険だが、Naと超臨界CO₂を熱交換することでリスクを下げることも検討されている。超臨界CO₂は超臨界CO₂タービンにて使用する。

新規蓄熱・発電システムとして、高温の金属系相変化材料と起電力発電（Solar-Thermophotovoltaic (TPV)）（もしくはTPV+熱電子発電）で安定電力供給を行う動きがあり²²⁾、潜熱蓄熱と組み合わせて一定温度での発電が可能である。

蒸気タービンに代わり、ガスタービン、超臨界CO₂タービンを用いたシステムの研究開発が行われている²¹⁾。高温の熱エネルギーを利用した水熱分解による水素製造、水とCO₂の分解による合成ガス製造などの燃料化技術の開発なども積極的に行われている²³⁾。

[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は、欧州のHorizon2020、米国のSunshotイニシアティブなどがあり、各国において基礎研究から応用研究、実用化を含む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。「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」³³⁾では、先端複合技術型Si太陽電池、高性能CIS太陽電池、革新的新構造太陽電池（ペロブスカイト、量子ドットなど）のセル・モジュール開発を中心としたプロジェクトを推進している。「太陽光発電リサイクル技術開発」³⁴⁾では、使用済みモジュールの回収・分解・再利用などの技術開発を行っている。「太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発」³⁵⁾では、セル・モジュール以外のBOSや維持管理のコスト低減を目的として、周辺機器の高機能化や、追尾・反射・冷却等の機能付加による発電量の増加、施工や取付に関する部品点数の削減や施工時間の短縮、発電器機・設備の健全性の自動診断や故障回避、自動修復、システムの劣化予防や長寿命化、人件費の削減等に寄与する監視・メンテナンス技術などを開発している。また、システムの構造安全・電気安全等の課題に関する調査・研究・実証、建築物に大量設置する環境を模擬したZEB化への課題抽出と解決に向けた開発・検証を行っている。JST「未来社会創造事業」においても主にセルに関する基礎的研究が行われている。

経済産業省「新エネルギー等の保安規制高度化事業（電気施設保安技術高度化の評価・検証事業）」³⁶⁾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、電気保安規制等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量の低下傾向を劣化予兆として早期に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」³⁷⁾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、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繋げるために、人間行動や社会的合理性を組み込んだ理論および基盤技術などを研究している。NEDO「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」

³⁸⁾ 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、余剰電力の発生、周波数調整力の不足等への解決策として、予測技術や出力変動制御技術を考慮した需給シミュレーションシステムを開発し、実際の電力系統で検証を行っている。また、再生可能エネルギーの受入可能量拡大のために設置が義務化された遠隔出力制御システムの開発と実証試験を行っている。

■宇宙太陽光発電

現在も継続している経産省宇宙産業室主導の宇宙太陽光発電を目指した無線電力伝送技術開発は新半導体の開発の成功や、それらを用いた 2015 年度に実施された 50m 級ビーム型無線電力伝送実験の成功は世界中で注目されている。

中国宇宙庁での SPS 研究活動は近年全貌が見え始め、世界中で注目を集めている。西安、成都、武漢、上海等各都市各研究機関で無線電力伝送や宇宙太陽光発電のシステム設計や実証実験が行われている。

無線電力伝送は 2011 年に日本の研究者主導で設立した米国国際学会 IEEE Wireless Power Transfer Conference の設立をはじめとする世界中での学会活動や、電磁誘導型の携帯電話無線充電器の世界規格 Qi の展開、電気自動車の無線充電を含むすべての無線電力伝送の周波数問題の ITU (International Telecommunication Union) での議論³⁹⁾ 等、実用化/標準化/法制化の議論が進化している。日本では、2014 年 10 月に宇宙太陽光発電学会が設立されている。

■太陽熱発電

EU は高温の金属系潜熱蓄熱と TPV 及び熱電子による発電を組み合わせた Amadeus と呼ばれるプロジェクトを行っている²²⁾。潜熱蓄熱の温度は約 1500°C であり、タワー型プラントを用いて高温の熱供給を行う。また、その温度で放出される赤外光と熱電子を用いて安定した発電を行うものである。同じく EU において、太陽熱を用いて水及び CO₂ を熱分解して合成ガスを製造し、液体燃料を製造する Sun to Liquid と呼ばれるプロジェクトを行っている²³⁾。高温の金属酸化物と水及び CO₂ を反応させ、酸化された金属酸化物は太陽熱によって還元され繰り返し使用可能とするシステムである。熱媒体として金属系微粒子を用いる CSP に関心を持つ各国の機関が集まり、Developing Particle-Based CSP Systems と呼ばれるプロジェクトが始まっている（日本から新潟大学が参加）¹⁹⁾。

(5) 科学技術的課題

■太陽光発電

太陽光発電システムに関する科学技術的課題は以下が考えられる。

- ・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の開発
- ・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）に関する技術の開発
- ・多様性に対応するシステム設計技術として、ドローン等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、設計図面等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（曲面对応、色制御）、部分影等による損失抑制技術等の研究開発
- ・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

■宇宙太陽光発電

マイクロ波帯での GaN 半導体の更なる開発、ビーム制御技術、無線電力伝送技術、宇宙構造物技術、宇宙環境物理学に関する早急な宇宙実証実験の実施などが課題である。

■太陽熱発電

CSP（+蓄熱システム）の流れは世界的に高温化・高効率化にある。これに合わせた研究開発課題は以下の通りである。

- ・集光技術：既存技術の高効率・低コスト化で対応可能であると判断されるため、新しいシステムの研究の必要性は低い。
- ・集熱技術：大気中且つ高温下でレシーバ表面の太陽光の吸収率を高め、赤外放射を抑えるコーティングの研究開発が課題である。
- ・熱媒体：システムの高温化に適する熱媒体は、空気、高温用熔融塩、低融点金属、固体粒子にほぼ絞られている。これらを総合的に比較検討し、最適なものに関して研究する必要性が高い。
- ・蓄熱技術：高エネルギー密度・低コスト化の研究、特に潜熱蓄熱と化学蓄熱について新規材料の探索が課題である。化学蓄熱は熱輸送・長期蓄熱にも耐えられるが、現在主流の気固系では繰り返し耐久性の向上が求められる。他の反応系の探索も重要である。
- ・発電技術：比較的規模が小さい高温条件下での発電には、超超臨界蒸気タービンよりも超臨界 CO₂タービンのほうが適しており、この分野の研究開発が課題である。欧米や韓国等では研究開発が活発に行われているが、日本では東芝による米国との共同開発、大学レベルでの小型タービン開発以外は行われていない。

共通の科学技術的課題として、デジタルツインを活用した大規模システムの包括的設計手法の確立が挙げられる。各発電システム全体及び構成部品のモデル構築が重要となる。

（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、保守点検等の義務化を図り、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求められる。また、行政等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、ランニングコスト低減が期待される。

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、ソフトコストの低減を含め、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系のトレンド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（Zero Energy Building）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、高効率且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ことが求められる。

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。太陽電池と住宅等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肝要である。ZEB、ZEH（Zero Energy House）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。

スマートグリッド等の電力系統へのインテグレーションについては、風力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における研究開発が重要である。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期待される。

■宇宙太陽光発電

宇宙太陽光発電に向けた研究開発の途中で生まれる派生技術の応用研究推進や、スピノフ技術の実用化が課題である。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も必要と考える。

■太陽熱発電

太陽熱発電システムは、蓄熱により夜間発電も可能であり、この安定性という点も考慮に入れた評価指標構築とその発信が重要である。

CSPの国際的な研究プラットフォームにSolarPACES（Solar Power and Chemical Energy Systems）があるが、日本は未加入であり、これにより研究開発が大きく遅れている。

SolarPACES は国際エネルギー機関 IEA の技術協力プログラムであり、国単位での参加が必要である。現在、SolarPACES には 19 か国が参加しており、参加国間での共同研究開発を積極的に行っている。これらの成果は一部の表面的な部分しか開示されないため、非参加国は重要な研究成果を共有できない。これと同じような状況は同じ技術協力プログラムの一つであり、工業用熱供給や住宅での熱利用技術等に関わる SHC（Solar Heating and Cooling）にも当てはまる。技術協力プログラムへの参加費用は年間 1 万ユーロとのことであり、参加することが期待される。

(7) 国際比較

[太陽光発電]⁴⁰⁾

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"> ● 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」：2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池セル・モジュールの開発を実施。 ● 長期信頼性を確保するため、産総研を中心にモジュールの耐久性向上、実環境下での出力測定や寿命予測、劣化要因と予防対策技術などの開発を進めている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● NEDO「太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト」：BOSや維持管理の分野を対象に、発電コスト低減を目的に、現地のメンテナンスや遠隔監視技術などが産学連携により進められている。 ● NEDO「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト」：企業を中心に、低コストのリサイクル、撤去・回収技術等、使用済みPVシステムの適正処分を実現する技術を開発・実証している。 ● NEDO「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」：系統連系技術は電力会社、大学を中心に出力制御や予測技術の検討が行われている。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。
欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 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。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 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技術省（BMBWF）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。 ● TÜV, 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。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● フランス国立太陽エネルギー研究所（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。

欧州	応用研究・開発	○	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 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。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●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。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 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。 <p>【スペイン、イタリア】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●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見られる。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。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●システム技術については、あまり研究開発例をみない
豪州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●オーストラリアでは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。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●オーストラリアでは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。

[宇宙太陽光発電]

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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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発化と日本が牽引する国際学会活動の発展
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●マイクロ波無線電力伝送コンソーシアムの拡大⁴¹⁾。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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●2000 年代の NASA の宇宙開発の停滞と呼応した宇宙太陽光発電研究の停滞 (現在の研究の主流は Naval Research Laboratory。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	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●民間企業主導の宇宙太陽光発電に関する研究投資。マイクロ波無線電力伝送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	×	↘	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●宇宙太陽光発電に関連するプロジェクトは 2010 年代以降あまり聞かず。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●民間企業から宇宙太陽光発電の新提案あり。

欧州	応用研究・開発	△	↑	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●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。電動バス用無線充電器（電磁誘導）を全国展開で実用化。 <p>【イタリア、ポルトガル、スペイン】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●特に、マイクロ波無線電力伝送研究と実用化が活発。
中国	基礎研究	◎	↑	●中国宇宙庁を中心に宇宙太陽光発電の新提案あり。
	応用研究・開発	◎	↑	●マイクロ波無線電力伝送のみならず様々な宇宙技術の実証実験計画有。ITUでの議論にも参加。電動バス用無線充電器（電磁誘導）を全国展開で実用化。
韓国	基礎研究	○	→	●韓国宇宙庁 KERI が宇宙太陽光発電に意欲。
	応用研究・開発	○	↑	●ビーム型マイクロ波送電に関するプロジェクトが始動。様々な無線電力伝送（電磁誘導中心）に実用化が進む。
東南アジア	基礎研究	△	↑	●マレーシアの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）。シンガポールで宇宙太陽光発電に関するシンポジウムを開催（2017）
	応用研究・開発	△	→	●無線電力伝送技術に興味。

〔太陽熱発電〕

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	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●新潟大学が中心となって集光太陽熱を利用した水熱分解による水素製造とそれに使用する金属酸化物に関する研究。 ●タワー用レシーバに適する高い光吸収性を有する被膜（ナノフロンティアテクノロジー社¹⁸⁾。パラボラトラフのような線集光用レシーバおよびそれに使用する選択吸収膜の開発¹⁹⁾。高温用熔融塩（塩化物、炭酸塩）の研究。
	応用研究・開発	△	→	●豊田自動織機はパラボラトラフのような線集光用レシーバを開発し、現在海外で評価中。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●DOEがGen3 CSP (Generation 3 Concentrating Solar Power Systems) プロジェクトを実施中¹⁶⁾。NRELやSandia等の多くの国研と大学が参加。 ●プロジェクトはCSPの高温高効率化を目指し、700℃以上で使用される熱媒体の開発とそれを用いるシステムの研究が中心。熱媒体は高温熔融塩、固体微粒子、気体の3種類を並行して研究。 ●集光系はタワーでそれに係るシステムの研究を実施。蓄熱は、化学蓄熱、新規の蓄熱システムに関する基礎研究。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●熔融塩タワーの低コスト化及び低コスト熔融塩トラフの開発。SkyFuel社は熔融塩トラフの既存の石炭火力発電所への導入。Hyperlight Energy社はプールに浮かべたプラスチックの円筒に反射鏡を張り付けた、低コストリニアフレネルコレクタの開発と実証試験を実施中。 ●ジョージア工科大は熔融スズを用いた稼働温度1500℃の高温CSPシステムとそれに係る要素機器の開発。 ●STEALSプロジェクトでは高温の太陽熱供給可能なタワー、金属系潜熱蓄熱と熱電変換を組み合わせた小型太陽熱発電システムの開発。
欧州	基礎研究	◎	↑	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●NEXT-CSPプロジェクト：固体微粒子を熱媒/蓄熱媒体とし、800℃の運転を可能とするシステムを構築。 ●AMADEUSプロジェクト：1500℃前後の金属系潜熱蓄熱システムとTPV及び熱電子を用いた高効率発電技術¹⁷⁾。 ●Sun to Liquidプロジェクト：金属酸化物を用い、太陽熱を利用してCO₂と水から合成ガスを製造し、可搬性の液体燃料を作るCCUプロジェクト²³⁾。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●英国では太陽熱発電に関する研究は一部の大学を除きやられていない。クランベリー大学では反射鏡並びにレシーバチューブガラス管のエロージョン・アブレーション特性に関する研究。

欧州	基礎研究	◎	↑	<p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ドイツはスペインとともに EU の中で太陽熱研究の中心的存在。DLR と Fraunhofer 研究所が太陽熱に関する研究の中心となっている。CSP 及び太陽熱による燃料製造などにかかわる多くの分野で基礎研究を行っている。EU のプロジェクトにも多数参加している。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●国立研究機関である CNRS やペルピニオン大学などで低コスト顕熱蓄熱材料の基礎研究。固体微粒子を使用するレシーバ、蓄熱システムに関する研究。太陽熱を利用した燃料製造に関する基礎研究等。 <p>【スペイン】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●国研である CIEMAT と CENER 並びに各大学、民間研究機関で基礎研究を行っている。 ●高温用溶融塩の研究、物性値向上を目指した分散系溶融塩の研究、蓄熱システム全般の基礎研究等多方面。 ●太陽熱利用燃料製造 (Sun to Liquid プロジェクト) では小型のパイロットプラントを完成させ実験を行っている²³⁾。
	応用研究・開発	◎	↑	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●MATS (Multipurpose Applications by Thermodynamic Solar) は、太陽熱発電、蒸発法の海水淡水化との組み合わせで、電力と水供給を目指すプロジェクト。エジプトのアレクサンドリア近辺にパイロットプラントを建設。 ●CoMETHy – solar steam reforming heated by solar salts at 550°C : 550°Cの溶融塩トラフによる安定的な熱供給を利用したメタンの改質による水素製造を目指すもの。完成しているイタリアの溶融塩トラフ技術を用いたもので、パイロットスケールレベルにある。 ●MUSTEC - Market uptake of Solar Thermal Electricity : CSP の市場展開を促進するためのプロジェクト。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ドイツ独自に行っている研究・開発は、新しい概念の低コストヘリオスタットの開発。太陽熱で駆動するソーラガスタービン用レシーバの開発及びそのシステム開発。 ●太陽熱でガスタービンを駆動するソーラガスタービンにかかわるシステム開発、レシーバ開発等も行っている。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●リアフレネル型の開発を行っているメーカーが複数ある (CNIM、EUROMED、CEA)。国の補助金により国内にパイロット～商業規模のプラント建設を実施。 ●同技術を生かし、EU のプロジェクトとしてヨルダンにプラントを建設。 ●アスベストの高温ガラス化処理による熱衝撃に強い固体蓄熱材の製造。 <p>【スペイン】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●Abengoa Solar、SENER 等太陽熱にかかわる企業が多く、世界のプラントの半分以上はスペイン企業が係る。 ●プラントレベルの高効率化や低コスト化などは企業自体が実施するか、国研の CIEMAT などとの共同研究開発を行っている。なお、上述の EU プロジェクトの大部分にも参加し応用研究や開発を行っている。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●多方面の基礎研究を行っているが、先行する欧米の研究の後追いが多い。現状考えられる様々な熱媒体、集光系を用いたプラントを建設するための基礎研究を実施。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●発電容量 50MW クラスの様々な方式の「実証プラント」を多数建設し、技術の向上を図っているが、欧米の CSP 先進国の後追いが多い。それを応用したプラントの建設も盛ん。熱媒体として低融点のシリコンオイルを用いたパラボラトラフ型プラントの建設等。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●金属酸化物の酸化還元を利用した水熱分解による水素製造。一部日本の新潟大学と共同研究。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> ●空気を熱媒体としたタワー型発電システムではパイロットスケールの発電プラントを有する。

豪州	基礎研究	◎	↗	● オーストラリアは ASTRI (Australian Solar Thermal Research Institute) とよばれる研究組織を作り国研、大学等で総合的な CSP に関する研究を行っている。実施内容はヘリオスタットの低コスト化、レシーバの高効率化、新規高温蓄熱材料、潜熱蓄熱材料とシステム、超臨界 CO ₂ タービンの研究等。
	応用研究・開発	◎	↗	● Vast Solar 社は Na を熱媒とするタワー型プラントを開発し、実証運転を実施中。 ● Na 熱媒を用いるタワー型プラントの今後の展開としては、超臨界 CO ₂ タービンと組み合わせ安全で高性能なシステム開発を目指す。リニアフレネル型コレクタを用いた石炭火力発電所への熱供給などの実証がある。

(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」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 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」,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/ (2019年2月1日アクセス) .
- 2) 内閣府「Society 5.0」,
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html (2019年2月1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 (NESTI2050)」,
<https://www8.cao.go.jp/cstp/nesti/gaiyo.pdf> (2019年2月1日アクセス) .
- 4) IEA PVPS Task 1, Snapshot of Global Photovoltaic Markets, 2018,
<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=266> (2019年2月1日アクセス) .
- 5) IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2017,
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf (2019年2月1日アクセス) .
- 6) 資源エネルギー庁「2030年エネルギーミックス必達のための対策～省エネ、再エネ等～」,
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/022/pdf/022_006.pdf (2019年2月1日アクセス) .
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「太陽光発電開発戦略 (NEDO PV challenges)」,
<https://www.nedo.go.jp/content/100575154.pdf> (2019年2月1日アクセス) .
- 8) U.S. Department of energy, “The SunShot Initiative,”
<https://www.energy.gov/eere/solar/sunshot-initiative> (2019年2月1日アクセス) .
- 9) Fraunhofer ISE, “Was Kostet Die Energiewende?,”
[https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/Forschungsfelder/Energie-Rohstoffe/Fraunhofer-ISE_Transformation-Energiesystem-Deutschland_final_19_11%20\(1\).pdf](https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/Forschungsfelder/Energie-Rohstoffe/Fraunhofer-ISE_Transformation-Energiesystem-Deutschland_final_19_11%20(1).pdf)

- (2019年2月1日アクセス) .
- 10) U.S. Department of energy, “Soft Costs,”
<https://www.energy.gov/eere/solar/soft-costs> (2019年2月1日アクセス) .
 - 11) Naoki Shinohara, “Wireless Power Transfer via Radiowaves (Wave Series),” ISBN 978-1-84821-605-1, (Great Britain and United States: ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Inc., 2014).
 - 12) (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).
 - 13) Naoki Shinohara ed., “Recent Wireless Power Transfer Technologies Via Radio Waves,” ISBN 978-879360-924-2, (EU: River Publishers, 2018).
 - 14) Naoki Shinohara ed., “Wireless Power Transfer: Theory, Technology, and Applications,” ISBN 978-178561-346-3 (UK: The Institution of Engineering and Technology, 2018).
 - 15) 吉田一雄, 児玉竜也, 郷右近展之『太陽熱発電・燃料化技術』(コロナ社, 2012).
 - 16) K. Tsuda, “Development of high absorption, high durability coatings for solar receivers in CSP plants,” SolarPACES 2017.
 - 17) Y. Okuhara, “Solar Selective Absorbers Based on Semiconducting beta-FeSi₂ for High Temperature Solar-Thermal Conversion,” SolarPACES 2017.
 - 18) J. Pye, “Optical and Thermal Performance of Bladed Receivers,” SolarPACES 2016.
 - 19) Hany Al-Ansary, “Overview of Worldwide Research Efforts on Developing Particle-Based CSP Systems,” SolarPACES 2017.
 - 20) A. Belén Hernández, “Parametric Analysis and Optimization of a Combined Latent-Sensible Packed Bed Energy Storage System,” SolarPACES 2017.
 - 21) M. Mehos, *et al.*, NREL/TP-5500-67464, 2017.
 - 22) EU, AMADEUS,
<http://www.amadeus-project.eu/> (2019年2月1日アクセス) .
 - 23) EU, SUN-to-LIQUID,
<http://www.sun-to-liquid.eu/> (2019年2月1日アクセス) .
 - 24) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「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, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100909.html (2019年2月1日アクセス) .
 - 25) J-Space Systems 「SSPS 宇宙太陽光発電システム」, 平成 21 年度～平成 26 年度,
https://ssl.jspacesystems.or.jp/project_ssps/wp-content/uploads/sites/17/2016/06/160603_4.pdf (2019年2月1日アクセス) .
 - 26) J-Space Systems 「SSPS 宇宙太陽光発電システム」, 平成 26 年度～平成 28 年度,
https://ssl.jspacesystems.or.jp/project_ssps/wp-content/uploads/sites/17/2016/06/平成26-28年度太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発1.pdf (2019年2月1日アクセス) .
 - 27) J-Space Systems 「SSPS 宇宙太陽光発電システム」, 平成 29 年度以降,
https://ssl.jspacesystems.or.jp/project_ssps/wp-content/uploads/sites/17/2017/04/平成29年度以降太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発1.pdf (2019年2月1日アクセス) .
 - 28) John Mankins, “SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily

- Large PHased Array,”
https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/mankins_sps_alpha.html (2019年2月1日アクセス) .
- 29) Ian Cash, "CASSIOPeiA Solar Power Satellite," *2017 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*, 2017.
- 30) Xinbin Hou, "Space Solar Power Concepts and MR-SPS," *Proceedings of Space Solar Power Satellite (SSPS) Workshop 2017*, Daejeon, Korea.
- 31) Baoyan Duan, "On New Developments of Space Solar Power Satellite (SSPS) of China," *Proceedings of Asia Wireless Power Transfer Workshop (AWPTW 2017)*, Singapore.
- 32) J. Fisher, "Vast Solar' s Grid-Connected Pilot Plant: Modular Tower Technology with Liquid Sodium HTF," SolarPACES 2016.
- 33) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」, 2018,
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100101.html (2019年2月1日アクセス) .
- 34) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト」, 2018,
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100070.html (2019年2月1日アクセス) .
- 35) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト」, 2018,
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100071.html (2019年2月1日アクセス) .
- 36) 経済産業省「平成29年度新エネルギー等の保安規制高度化事業(電気施設保安技術高度化の評価・検証事業)報告書」, 2018,
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000007.pdf (2019年2月1日アクセス) .
- 37) 科学技術振興機構 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 (2019年2月1日アクセス) .
- 38) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」, 2018,
http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100069.html (2019年2月1日アクセス) .
- 39) ITU Report, ITU-R SM.2392-0, "Applications of wireless power transmission via radio frequency beam," <http://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2392> (2019年2月1日アクセス) .
- 40) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「IEA PVPS レポート 世界の太陽光発電市場の導入量速報値に関する報告書 翻訳版」, 2018,
<http://www.nedo.go.jp/content/100785821.pdf> (2019年2月1日アクセス) .
- 41) ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム WiPoT,
<http://www.wipot.jp/> (2019年2月1日アクセス) .

2.6 風力発電

（1）研究開発領域の定義

風力発電に関する科学、技術、研究開発を記述する。風力発電は、風の運動エネルギーを風車（風力タービン）により回転力に変換し、歯車（増速機）などで増速した後、発電機により電力へ変換する発電方式である。設置する場所で陸上風力、洋上風力（浮体式、着床式）に分かれる。ここでは、風力発電に係る各要素技術、周辺技術、さらにシステム全体を最適化する基盤技術などを対象とする。

（2）キーワード

風力発電、洋上風力発電、浮体式、着床式、ダウンウィンド型風車、空中風車、運転保守、環境アセスメント、系統連系

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

風力発電は風の運動エネルギーの約45%を電力に変換できる。経済的に大量導入可能なので、再生可能エネルギーの中では水力発電の次に大規模に利用されている。現代の大型発電風車は、主に揚力型、水平軸、Upwind（ロータをタワーの風上に配置）、プロペラ式3枚翼の特徴をもつ。風向に追従して首を振るヨー制御、強風時に翼のひねり角度を変えて風を受け流すピッチ制御、風速に合わせてロータの回転数を増減する可変速運転、の3つの制御を標準装備している。主軸系の構成は、ロータと発電機の間歯車式の増速機構（増速機）を挟む方式が主流（約80%）で、ロータに大直径の多極同期発電機を直結するギアレス方式が少数派（約20%）である。これは数十年に渡って性能、強度、コストで淘汰されて進歩した結果であり、今後も大きくは変わらない。2枚翼、Downwind（+受動ヨー制御）のみが、まだ代替策として検討が続いている。

世界の風力発電は2017年末で累計539GW（約36万台）、新規52.5GW（約3万台）に達している^{1) 2)}。日本は累計3,399MW（2,225台）、新規169MW（77台）となっており、世界の0.6%（世界19位）、0.3%（同23位）である。年間電力供給に占める比率は、世界は5%、EUは11.6%、日本は0.6%である。既に10%を越える地域は15ヶ国（+米国14州）に上り地球温暖化防止に大きく貢献している^{3) 4)}。年商は約10兆円、関連雇用も数百万人であり、産業効果（地域の経済と雇用への貢献）も大きい。特に洋上風力発電は、累計18.8GW、新規4.3GW/年と急成長中である¹⁾。毎年1～2兆円（数千億円/案件）が動く新産業として、各国と大手重電企業（GE、Siemens、三菱重工、日立製作所他）の注目を集めている。

[研究開発の動向]

風車は、有史以前から中近東で製粉に利用され、中世には地形が平坦で安定した偏西風が吹く欧州で、製粉、灌漑、製材など様々な動力源として活用されてきた。発電用の風車は今から120年前の1897年に英国と米国で独立して誕生した。1891年にデンマークのPoul la Courが揚力翼型と回転数調整装置を持つ、4～6枚翼の水平軸風車を実用化し、20～30kW級の風車が農村電化の独立電源として普及した。1941～1945年の米国のGrandpa's Knob風車

(1250kW) は、交流発電機を用いて世界で初めて送電網に連系した。デンマークでは la Cour の弟子の J Juul が 1947 年頃から風車の連系試験を始め、後継した Gedser 風車 (200kW) は 1957 ~ 1967 年の 10 年に渡って安定して運転された。この他にも 100kW 以上の風車の開発が各国で 10 件以上行われたが、風の挙動や疲労強度の知見が足りず、ほぼ全てが不成功に終わった。日本では 1938 ~ 60 年頃に山田基博氏が開発した木製 2、3 枚翼の風車 (200 ~ 300W) が 1 万台以上作られ、農村電化に役立った。しかし安価な火力発電による送電網の普及で、風力発電は下火になった。

現代風車は、オイルショック (1973 年と 1978 年) の石油代替電源ニーズの下で、無人運転を可能にする電子制御技術と、軽量高強度のガラス繊維強化プラスチック複合材料 (GFRP) の発達の恩恵を受け、実用化された。1980 年代にはデンマークを中心に、水平軸プロペラ式 3 枚翼鋼製モノポールタワー、ストール制御 (高風速時の流入角では失速が生じて定格出力以上の発電を防ぐ設計、翼はハブに固定)、軸系は増速機と籠型誘導発電機、プロペラの回転数は一定 (固定速) という安価に大量生産可能な設計 (デンマークモデル) が確立して普及した。

風車は経済性の追求から 1990 年代後半に急速に大型化して、2000 年頃にはロータ径 50m、定格出力 1MW を越えた。これに伴い、出力制御と強風時停止を確実にを行うために、翼根部に旋回輪軸受を設置して翼のねじり角度で出力を制御するピッチ制御がストール制御にとって代わった。さらに電力変換装置 (インバータ/コンバータ) を介して連系することで、風速の強弱に合わせて回転数も増減する可変速運転 (瞬間的な風速変化による出力変動を平準化できる) も普及した。さらに 2010 年頃から瞬間的に系統電圧が低下しても風車の運転を継続する機能 (LVRT: Low Voltage Ride Through) も標準装備されている。

風力発電の普及に伴い、事業融資の際に風車の信頼性を担保するための認証制度が発達した。まずドイツの損害保険会社の Germanischer Lloyd (GL、今は DNV 傘下) が 1993 年にガイドラインを制定した。翌 1994 年には IEC-61400 (JIS C 1400 が対応) が国際標準として制定された。同標準では風の強弱に応じて風車をいくつかの種別に分類している。約 3 ~ 5 年毎に改訂が行われている。欧州主導だったため、台風や山岳 (複座地形) への対応が遅れていたが、1998 年のインドでのサイクロン被害と、2003 年の日本の沖縄宮古島での台風被害を契機に、日本の新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が「日本型風力発電のガイドライン」策定事業 (2005 ~ 2007 年度) を実施し、IEC 日本委員会から改訂を提案して、次の第 4 回改訂では台風に応じた基準風速 ($V_{ref\ Tropical}$) と山岳部の乱流に応じた高乱流 (A+) が追加される予定である (表 2.6-1)。

風力発電のコストは技術進歩と大量普及に伴い低下を続けている⁶⁾。今では好条件 (高風速、低労賃、広大な平地) の地域では、モロッコで 33 ドル/MWh (3.7 円/kWh) など、火力発電よりも安くなる場合も生じている。1991 年に始まり、2002 年頃から大規模化 (例: デンマーク Horns Rev の 2MW × 80 台) した洋上風力発電 (着床式) でも、初期トラブルを克服して約 1GW/年の大量導入が始まった 2010 年頃から産業化が進み、2015 年以降の入札では洋上発電所端で 10 円/kWh を下回る事例も出てきている。

風力発電の技術開発の主な目的は立地拡大と経済性向上である。立地拡大では、まず陸上の低風速地域 (表 1 の Class III の平均風速 7.5m/s) 向け風車、具体的にはより長いブレード (ロータ径 100m 以上)、高高度タワー (ハブ高 100m 以上) が開発されて、広く普及した⁴⁾。

表2.6-1 IEC61400-1の第4版におけるWind Class5)

Class		I（高風速）	II（中風速）	III（低風速）	S（特注）
ハブ高さにおける年平均風速 V_{ave}	(m/s)	10	8.5	7.5	設計者が規定する (例：洋上で年平均風速がClass Iを越える)
基準風速 V_{ref}	(m/s)	50	42.5	37.5	
	Tropical (m/s) V_{refT}	57	57	57	
乱れ強度 I_{ref} (-)	A+	0.18（極めて強い 例：山岳）			
	A	0.16（乱れが強い 例：丘陵）			
	B	0.14（乱れは中間 例：平野）			
	C	0.12（乱れが弱い 例：洋上）			

ブレードの延伸は、先細形状（Slim blade）による荷重軽減、風上側に予め湾曲（Prebend）させた形状で風荷重によるタワーヒットを回避する、内部構造（Box girder）を軽量化、繊維の積層設計の最適化、翼製法の VarRTM 化（鋳型をシールして真空吸引しつつ樹脂を注入する手法）等により達成された。

高高度タワーの実現には共振回避と曲げモーメントに耐える基部強度が必要である。後者にはタワー基部の大径化が望ましいが、輸送制約（4m を越すと歩道橋やトンネルを通れない）と両立させるために、種々の工夫（コンクリート製方式、トラス方式、円周分割方式、支線支持方式等）が行われている⁷⁾。

次の立地拡大の動きは洋上風力発電である。欧州の北海とバルト海は、氷河時代、陸地であったため、数十 km 沖合でも深さ 100m 未満である。陸上の適地に風車を立て尽くした欧州では、1991 年のデンマークの Vindeby（450kW × 5 台、老朽化で 2017 年に撤去）を嚆矢に、ドイツの West of Duddon Sands wind farm（2014 年 10 月運開、3.6MW × 108 台 = 389MW）など、大規模な洋上風力発電所が次々に建設されている。水深と海底地質に応じてタイプを使い分けているが、安価で施工性が良いモノパイル基礎が主流（80%以上）である³⁾。

洋上風力発電は、基礎と風車の据付に高価な建設専用船を使うため、陸上設置よりも工事費用が高い。建設専用船（Jack up vessel）は、海底まで脚を伸ばして船体を海面上に持ち上げ、波浪で揺れずにクレーン作業できる。建造費は約 200 億円、賃貸費は約 2 千万円 / 日である。定格出力の大きな風車を採用して設置台数（据付工事の工数）を削減するニーズが極めて強い。既にロータ径 164m、定格出力 9.5MW の風車（V164）が商用化されており、更に三菱 Vestas、SGRE（Siemens Gamesa）、Senvion 他の風車メーカーが 10 ～ 14MW 風車を開発中である。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

1) 着床式洋上風力発電の施工効率化やコストダウンに関する技術開発

下記技術が英国の研究機関 Carbon Trust の支援で実証研究が進み、実用化されている。

①ブイ上のドップラー風速計による洋上風速計速

- ・ 空中の塵や水滴の電波反射の波長変化から遠方の風速を計測できるドップラー風速計を、開

- 発海域の浮標（ブイ）に設置して、洋上風力サイトの現地風況を把握する。
- ②サククションバケット（Suction Bucket）式の洋上風車基礎^{8) 9)}
- ・バケット内部を水流で攪拌しつつ、土砂を吸引することで基礎を砂中に埋設できる。高価な建設専用船によるハンマー打設不要、モノパイル基礎（30m以上打設）より浅い約10mの砂層でも風車を支持可能、撤去が容易、等の利点あり。
- ③タンク内爆発式（Blue Piling）のモノパイル基礎打設工法^{10) 11)}
- ・基礎の上部に半分強の水を入れたランクを被せ、その中でガス爆発させて持ち上げた水の落下時の力積でモノパイルを打設する工法。自動化（建設専門船不要）と静音性に優れ、基礎上面の打ち傷も防止できる利点がある。
- 2) 浮体式洋上風力発電の実証研究^{12) 13)}
- ・2009年ノルウェーでの Statoil Hydro（現 Equinor）によるスパー型浮体の2.3MW風車×1台を嚆矢に、ポルトガル、日本、英国、フランスで2018年末までに10台以上の実証運転中である（表2.6-2）。各プロジェクトを表2.6-3に示す。
 - ・1MW以上の実証機レベルまで進んでいるのは、スパー型、バージ型、セミサブ型の3種類である。係留方式は懸垂式（Catenary）のみ実用化されており、緊張型（Tension Rig、浮体を小型化可能）はまだ研究段階である。現状では建設コストがまだ陸上の3倍以上（約100万円/kW）であり、本格的な商用化にはコストを半減させる必要がある。

表2.6-2 浮体の形式と得失¹²⁾¹³⁾

タイプ	スパー型	バージ型	セミサブ型
構造	細長く単純な形状	平底の荷船、舢舨（はしけ）の形状	半潜水型浮体形状
水深	100以上	100m以浅	50～100m
重量とコスト	比較的安価	比較的高い	比較的高い
風車の据付作業（施工性）	沖合で作業（高価な起重機船が必要）	埠頭で艀装（工事容易）	埠頭で艀装（工事容易）
特徴	風車のピッチ制御の工夫が必要	開口部の内外水位差で波浪荷重を減衰	安定性が良い
代表的なプロジェクト例	Hywind GotoFOWT	Floatgen	WindFloat FukushimaFORWARD

3) 風車の運転保守に関する技術開発

①風車の寿命診断システム（CMS:Condition Monitoring System）

- ・主軸受、増速機、発電機、等の主要機器に種々のセンサーを設置して常時監視することで、重大故障の発生を事前に検知するシステムが開発、実用化されている（図2.6-1）¹⁴⁾。

②運転データのBig Data解析による風車の運転の最適化

- ・大手風車メーカー（Vestas、SGRE、GE、Enercon等）は、10年以上前から自社の既設風車数千～数万台の風車の運転データを遠隔監視システム（Scada）で自社サーバに蓄積している。数十年分のBig Dataをスーパーコンピュータで人工知能（AI）解析することで、設置サイト毎の運転方法の最適化や、故障予知、寿命延長運転の提案等が可能になっている。

③風車の運転保守へのドローンの活用

- ・風車の点検や保守作業へのドローンの活用が広がりつつある。Aerones 社等は、寒冷地の風車で、風車停止中に、ドローンから温水を噴射してブレードに付着した氷雪を除去する。

④洋上風車へのアクセス方法の改良

- ・Ampelmann 社等は、油圧シリンダーで上下動を補償することで、波の高い荒天時でも確実に作業員が洋上風車に上陸できる渡船橋を開発実用化している。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

1) 洋上風力関連

- ・EU では Offshore Wind Accelerator という統合的な洋上風力の技術開発プログラムが運用されている¹⁶⁾。特に技術的成熟度（TRL：Technology Readiness Level）が高く、実用化が近い開発（例：上記 [新展開・技術トピックス] の¹⁾ ②③）は英国研究組織 Carbon Trust を中心に実証試験が行われている¹¹⁾。
- ・日本では風力発電の技術開発は、NEDO を中心に行われている^{9) 14)}。

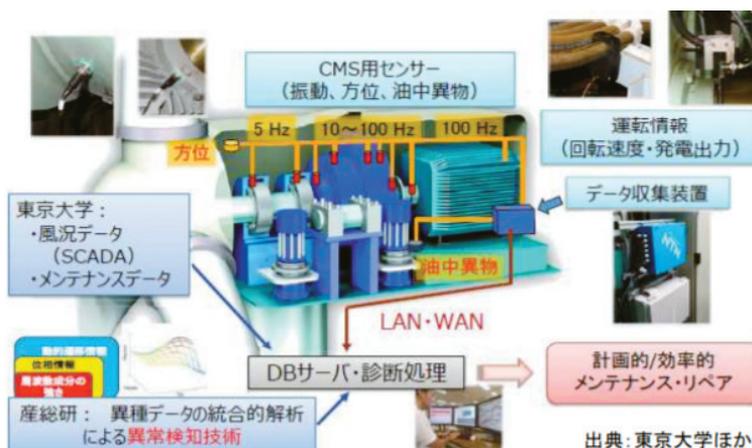


図2.6-1 風車のスマートメンテナンスシステム(NEDOの開発例)¹⁴⁾

2) 浮体式洋上風力発電プロジェクト

- ・世界の主な浮体式洋上風力発電プロジェクトの実績と計画を表 2.6-3 に示す。

表2.6-3 各国の浮体式洋上風力発電プロジェクト（2018年9月時点、JWPA調べ）

運開	国名	実施主体 (Project 名)	風車	浮体
2009	ノルウェー	ノルウェー Statoil 社 (Hywind)	2.3MW	スパー型
2011 ～ 16	ポルトガル	米国 Principal Power 社 (WindFloat)	2MW	セミサブ型
2013	日本 (長崎)	環境省→五島市 / 戸田建設 (GOTO FOWT)	2MW	スパー型
2013 2016 2017	日本 (福島)	経産省 / 丸紅 (FukushimaFORWARD)	2MW 7MW 5MW	セミサブ型 セミサブ型 改良スパー型

2017	英国 (スコットランド)	ノルウェー Statoil 社 (Hywind Scotland)	6MW × 5 基	スパー型
2018	フランス (大西洋岸)	フランス IDEOL 社 (Floatgen)	2MW	セミサブ型
2018	日本 (北九州)	NEDO/ 丸紅、日立造船、グローバル (NEDO 次世代洋上風力開発)	3MW	バージ型 (Moonpool)
建造中	英国	Kincardine Offshore (Scottish Offshore Demonstration)	2MW × 6 台 + 8.4MW	セミサブ型
建造中	ポルトガル	WindPlus/ スペイン EDP、 三菱商事、千代田化工他 (WindFloat Atlantic)	8.4MW × 3 台	セミサブ型
建造着手	日本	戸田建設 (五島市沖洋上風力発電事業)	2.1MW × 8 台 + 5.2MW	スパー型
計画中	ノルウェー	ノルウェー Equinor、出光興産 (Hywind Tampen)	8MW × 11 台	スパー型

(5) 科学技術的課題

立地拡大と経済性向上は引き続き重要課題である。

立地拡大では、Google 出資の Makani Power（グライダー式）とソフトバンク出資の Altaeros（気球式）の空中風車開発が数百 kW 級の実証試験の段階にある。既に大量の変動電源（風力と太陽光が電力の 15% 以上を供給）が導入されている欧州では、余剰電力の安価な処理法として、揚水発電、コジェネ発電所の発電比率変更、熔融塩による蓄熱、水素製造（天然ガス配管への混入やアンモニア製造）等が活用されてきている。蓄電池は高価なため優先順位は低い。南米、アフリカ、中近東、東南アジア等の新興市場は既存の欧州工場から遠く、輸送費削減と地元経済雇用のニーズから、現地工場開設が求められる（LCR: Local contents requirement）。タワー工場自体を移設可能なパッケージ化して現地生産する例（ドイツの建設大手 Max Bögl がタイに設置）も出てきている¹⁷⁾。

経済性向上では、15MW を越える超大型洋上風車も開発が検討されているが、大型化に伴って開発費が高騰（10MW 級で約 500 億円）しているため、開発投資を回収できるだけの市場の確保と、開発投資を負担する大企業への風車メーカ集約（寡占化）の課題が顕在化している。技術的には、ダウンウィンド（タワーの風下でロータを回転、風荷重で翼が押されてもタワーに当たらないので軽量化可能）、2 枚翼（例：表 2 の中央、コンパクトで輸送と建設に有利）、分割翼（輸送制約緩和）、超電導発電機（磁力が強いため発電機を小型化可能）等が一部の風車メーカで商用化され、実機レベルの試作機建設が行われている。欧州の着床式の洋上風力発電では、風況調査、機器の製造、輸送、建設、その後の運転保守まで、据付精度向上による Transition piece 不要工法、タワー一体輸送据付による建設スピードアップ、双胴船式の高速度アクセス船、等、サプライヤーチェーン全体で多様かつ網羅的なコスト削減が進められている。その結果、欧州洋上風力の発電原価（洋上発電所端）は 10 円 /kWh 以下にまで下がっている。

国の主力電源として位置づけられた再生可能エネルギー特に風力発電は、今後さらに導入が進むと予想される。生涯発電コスト（LCOE）の低減が最重要課題で、風車機器単体、関連施設での発電コスト低減が必須となっている。稼働率の向上、発電ロスの低減、翼やパワートレイン等などの性能向上や長期信頼性確保、保守費削減などが課題である。

洋上風車ではこれらに加えて、潮力、波力に対する海中基礎強度検討、送電系統最適化、設

置コスト低減、メンテナンス性の向上、長期保守に必要な運転情報・機器診断技術、また大型海上クレーンの使用を最小とする機器構造・保守技術の開発などが課題である。

課題克服のため、短期的には、稼働率向上のための予防保全技術、長期保守に必要な運転情報・機器診断技術、翼やパワートレイン等の性能・品質向上及び長期信頼性確保、保守性の向上と保守費削減、中長期的には、大型部位の長期信頼性確保の為に負荷制御や翼構造素材の開発、高圧送電を含む送電系統最適化、安価な洋上構造物（浮体式、着床式）の開発などが求められる。

現在、大規模な風力発電システムの設計は実証試験に依存しているが、今後のシステム大型化に伴い、科学技術的課題として、デジタルツイン（実用機器で起こる実現象を事前に正確に予想できるような解析手段）を活用した大規模風力発電システムの包括的設計手法の確立が挙げられる。風力発電システム全体及び構成部品のモデル構築が重要となる。

(6) その他の課題

欧州は、EU 司令で各国に再生可能エネルギー大量導入を各国に義務付けし、100GW 規模の壮大な導入目標を掲げて、数十年将来を見据えて一貫して総合的な産業育成政策をとっている。これが長期安定した大市場を生み、分厚い産業基盤の形成に成功している。世界的には、産業界の寡占化が進んでいる。

一方、日本は、風力発電の将来の導入目標は 2030 年に 10GW（2017 年末で累計 3.4GW、新規は約 500MW/年、世界市場の 1% 未満）、電力供給の 1.7% と小さい。法制面でも多くの規制（環境アセスメント、系統連系）や不足（一般海域での洋上風力）が残されており、国内の風力開発は事業リスクが高い状況が続いている。このため関連企業の開発投資や大学における人材育成も小規模に留まっており、研究開発を支える産業と人材の層が薄い。風力発電の本格的な発展のためには、国による積極的な大量導入計画の制定と、一貫性のある産業育成政策が求められる。

洋上風車に関しては、送電網や蓄電、水素などとの連携を見据えた再生可能エネルギーの電力運用システムの整備、洋上風車の建設やメンテナンスのための港湾基地の整備や一般海洋域での再エネ発電利用促進法案の整備、欧州に比べて高額な輸送・建設費用の低減、事業者が計画から運用までのリードタイムを短縮できるような省庁間の垣根を越えた関連法規の整備や規制緩和などの取り組みが必要である。

(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	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● NEDO「風力発電高度実用化研究開発」で大型軸受の故障予測の CMS (Condition Monitoring System) の開発を支援。 ● 台風や冬期雷といった東アジア特有の気象現象に対しては、日本のアカデミアによるガイドラインや標準の制定で世界を主導し、国内の産業競争力向上に貢献の可能性あり。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● NEDO が日本の気候風土に合致した風力発電の発電量予測システムの実用化研究を実施中。 ● NEDO が北九州市沖で浮体式洋上風力発電のコスト低減を狙った新プロジェクトを実施中。

米国	基礎研究	△	↘	●エネルギー省（DOE）が、2015年に、2050年までの風力発電の見通しに関する「Wind Vision」長期計画を発表。電源構成比率の目標として、2020年までに10%、2030年までに20%、2050年までに35%を掲げている。目標達成のため、陸上及び洋上の風力ポテンシャルを精緻に測定・予測する基礎研究や、洋上風力発電の配置・運転の最適化に関する基礎研究などに取り組んでいる。
	応用研究・開発	×	↘	●トランプ大統領はDOEの再生可能エネルギー関連予算を大幅に削減している。
欧州	基礎研究	◎	→	【EU】 ●大学・公立研究所の連携が進んでいる。公的研究プログラムも多い。 ●洋上用大型風車開発では、2006～11年のUpWind研究に続いて、翼開発のODB（Offshore Wind Demonstration Blade Project） ¹⁸⁾ 、耐エロージョンのBeLeB研究 ¹⁹⁾ 等が行われている。
	応用研究・開発	◎	→	【英国】 ●Offshore Wind Accessalatorを中心に英国Carbon Trust等による洋上風力発電のコスト低減に向けた技術開発・実証研究が活発に行われている。 【ドイツ】 ●ドイツを中心に、Class IIIの低風速地域向けのロータ径とハブ高の大きい高性能風車が大量に普及している。
欧州	応用研究・開発	◎	→	【フランス】 ●フランスIDEOL、ノルウェーEquinor等による複数の浮体式洋上風力実証プロジェクトの建設が進んでいる。
中国	基礎研究	△	→	●中国風車メーカーの大半は、欧米系の風車メーカー・設計コンサル会社からの技術供与を受けて風車製造に参入。自主開発は稀で知財権も軽視。 ●Goldwindは独風車メーカーVensysを買収して海外進出の知財権をクリア。
	応用研究・開発	△	→	●2011年頃から中国政府は風車メーカーの国際競争力強化に向けて、2.5MW以上の大型化とLVRT（Low Voltage Ride Through）装備を政策誘導。
韓国	基礎研究	×	↘	●不況で風力発電へのモチベーションが低下。撤退した企業が多い。
	応用研究・開発	△	→	●済州島で斗山重工業（Doosan Heavy）の3～5MW風車による着床式洋上風力の実証プロジェクトが運転中である。

（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」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↑：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) Global Wind Energy Council (GWEC), "Global Wind Report 2017," 2018年4月, <http://gwec.net/cost-competitiveness-puts-wind-in-front/> (2019年2月1日アクセス) .
- 2) BTM Consult ApS / Navigant Consulting, Inc., World Wind Energy Market Update 1997-2015.
- 3) WindEurope, "Offshore Wind in Europe: Key trends and statistics 2017," 2018年2月, <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope->

- Annual-Offshore-Statistics-2017.pdf（2019年2月1日アクセス）。
- 4) U.S. DOE, ” 2017 Wind Technologies Market Report,” 2018年8月,
<https://www.energy.gov/eere/wind/downloads/2017-wind-technologies-market-report>
（2019年2月1日アクセス）。
 - 5) IEC61400-1 4th Edition の FDIS 原稿。
 - 6) IRENA, ” Renewable Energy Auctions: Analysing 2016 Executive Summary,” 2017年
1月24日,
[http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REAuctions_](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REAuctions_summary_2017.pdf)
[summary_2017.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REAuctions_summary_2017.pdf)（2019年2月1日アクセス）。
 - 7) ” Sky is the Limit – 维斯塔斯高塔筒技术,” China Wind Power 2017 での Vestas 発表、
2017年10月。
 - 8) 日立造船株式会社「洋上風力発電施設に「サクシオンバケット基礎工法」適用への取り組み」,
<http://www.hitachizosen.co.jp/release/2018/02/002975.html>（2019年2月1日アクセス）。
 - 9) 新エネルギー・産業技術総合開発機構「洋上風力発電の低コスト化に向けた新たな技術開
発に着手」, 2018年9月10日,
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101019.html（2019年2月1日アクセス）。
 - 10) Fistuca, “Blue Piling Technology,”
<https://fistuca.com/blue-piling-technology/technology/>（2019年2月1日アクセス）。
 - 11) Carbon Trust, “Carbon Trust Offshore Wind Accelerator launches new project to
reduce costs and underwater noise in offshore wind construction,” 2018年3月13日,
<https://www.carbontrust.com/news/2018/03/offshore-wind-accelerator-blue-pilot/>（2019
年2月1日アクセス）。
 - 12) A. Henderson et al., “Floating Support Structures Enabling New Markets for Offshore
Wind Energy,” EWEC Conference 2009, Marseille, France.
 - 13) Carbon Trust, “Floating Offshore Wind: Market and Technology Review,” Prepared for
the Scottish Government, 2015年6月,
[https://www.carbontrust.com/media/670664/floating-offshore-wind-market-](https://www.carbontrust.com/media/670664/floating-offshore-wind-market-technologyreview.pdf)
[technologyreview.pdf](https://www.carbontrust.com/media/670664/floating-offshore-wind-market-technologyreview.pdf)（2019年2月1日アクセス）。
 - 14) 伊藤正治「風力発電技術研究開発に係る NEDO の取り組み」, 平成 27 年度 NEDO 新エ
ネルギー成果報告会, 2015年10月30日,
<http://www.nedo.go.jp/content/100778423.pdf>（2019年2月1日アクセス）。
 - 15) Robin Whitlock, ” Aeronos develops de-icing and cleaning drone for wind turbines,”
Renewable Energy Magazine, 2018年3月22日,
[https://www.renewableenergymagazine.com/wind/aeronos-develop-deicing-](https://www.renewableenergymagazine.com/wind/aeronos-develop-deicing-andcleaning-drone-for-20180322)
[andcleaning-drone-for-20180322](https://www.renewableenergymagazine.com/wind/aeronos-develop-deicing-andcleaning-drone-for-20180322)（2019年2月1日アクセス）。
 - 16) Carbon Trust, “The Offshore Wind Accelerator,”
<https://www.carbontrust.com/offshore-wind/owa/>（2019年2月1日アクセス）。
 - 17) Max Bögl, “Use of Wind Power in Thailand: Mobile factory for international markets,”
2017年,
<https://www.max-boegl.de/en/news/use-of-wind-power-in-thailand>（2019年2月1日ア

クセス）。

- 18) ODB: The Offshore Wind Demonstration Blade Project,
<http://odb-project.com/our-work/>（2019年2月1日アクセス）。
- 19) BeLeb: Development of a method for determining the service life of rotor blade coatings,
<https://www.iwes.fraunhofer.de/en/research-projects/current-projects/beleb.html>（2019年2月1日アクセス） /
https://www.iwes.fraunhofer.de/en/press---media/archiv_2017/effective-prevention-of-rain-erosion-on-rotor-blades.html（2019年2月1日アクセス）。

2.7 バイオマス利用

(1) 研究開発領域の定義

バイオマス利用に関する科学、技術、研究開発を記述する。

ここではバイオマスを燃料や電力等の二次エネルギーに利用する技術とシステム技術、バイオマスから複数形態のエネルギーや他製品を生産するシステム技術（バイオリファイナリー）を対象とする。

(2) キーワード

非食用バイオマス、第二世代バイオ燃料、第三世代バイオ燃料、バイオマス発電、バイオガス製造、バイオマスコジェネ・トリジェネ、トレファクション（半炭化）、BECCS（Biomass Energy CO₂ Capture and Storage）、CCU（CO₂ Capture and Utilization）、

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

バイオマスは、食料と競合せず持続可能な生産が可能であることが必須条件となるため量的な制約はあるものの、再生可能エネルギーの中で唯一の炭化水素資源であり、かつ石炭、石油、天然ガスや水素、ならびに化学品原料等への転換も可能であることから、貴重な資源として有効利用が図られている。また、再生可能エネルギーの中でベース電源的な役割を果たせるのは大型水力や地熱発電であるが、今後すぐに普及拡大が見込まれないため、バイオマスは天候等によって変動する太陽光や風力発電の平準化のための補助的なベース電源の役割を果たすことも期待されている。さらに、2050年の炭酸ガス削減80%に向けて石炭火力への混焼やIGCC（ガス化複合（ガスタービン、スチームタービン）発電）、IGFC（ガス化トリプル（ガス・スチームタービン、燃料電池）サイクル）への導入によって化石資源代替を図っていく上でも、バイオマスの役割は大きいと考えられる。特に、石炭火力でのCCS及びCCUによるCO₂有効利用技術に加えて、BECCSによってネガティブエミッションを達成することも重要であり、その実現のためには大規模な植林や農業残渣等の未利用バイオマス資源を有効利用することによって、食料と競合せず、かつ持続可能なバイオマス資源の生産サイクルを構築することが求められている。

さらに、熱電併給のコジェネだけでなく、バイオガス（水素を含む）やバイオケミカル併産型のトリジェネレーション型のバイオリファイナリープロセスの研究開発も展開されている。

[研究開発の動向]

食料と競合しないリグノセルロース系バイオマスから自動車用燃料用の第2世代バイオ燃料（エタノール、BDF（Bio Diesel Fuel）やガス化経由のBTL（Biomass to liquid）、ドロップイン型バイオ燃料を含む）製造技術に加えて、次世代のジェット燃料製造を目指した藻類由来油等第3世代バイオ燃料製造技術の研究開発が進められている。また、2012年7月の再生可能エネルギー固定価格買い取り制度（FIT）導入により、種々のバイオマスを燃焼による発電だけでなく、熱分解ガス化や嫌気性メタン発酵による熱電併給（コジェネ）型の利用技術の実証・実用化が促進されている。同時に、石炭火力発電混焼用のバイオマスのトレファクション：

半炭化技術やペレット製造プロセス（バイオマス専焼用も含む）の実証・実用化も進んでいる。この中でバイオマスガス化は学術研究が多く、2017-18の1年間で1200報を超える論文が世界中で出版され、180件を超える特許が出された。最多は中国（330報）、次いで米国（110報）、イタリア（80報）であった。

さらに、CCS（CO₂ Capture and Storage）技術を併用して温室効果ガスの削減を促進するBECCS（Biomass Energy CCS）やCCU（CO₂ Capture and Utilization）、ならびにバイオケミカル併産型のバイオリファイナリーへの展開も図られている。

REN21（21世紀のための自然エネルギー政策ネットワーク。自然エネルギーの促進を図るために政府機関、国際機関、NGO、産業界、地方自治体、研究機関など各ステークホルダーの考えを共有し、活動を奨励しようとする世界規模の政策ネットワーク。2004年設立、本部はフランスのパリ）が発表したエネルギー自然エネルギー世界白書2018¹⁾によると、2017年の再生可能エネルギー（大型水力を含む）は世界の電力供給の約25%を賄っており、そのうちバイオマスの占める割合は5.6%程度（全体では1.4%）に微増していることが報告されている。バイオマスについては、熱利用や輸送用燃料や他の化学原料等としての用途開発が進んでいる。ガソリン代替用のバイオエタノールは微増（約1.06億kL）で、軽油代替用のFAMEバイオディーゼルも3100万kLで横ばい、水素化植物油（HVO）は650万kLで漸増している状況であるが^{2,3)}、これは原油等の化石燃料価格が比較的安定していることも一因であろう。日本でも、2011年の東日本大震災と2012年のFIT導入に伴い、バイオマス利用が発電にシフトしており^{4,5)}、運輸用のバイオ燃料を含む熱利用が停滞気味であり、第三世代のバイオジェット燃料製造技術、バイオ水素やケミカル併産型のバイオリファイナリープロセスの研究開発へシフトしている状況である^{6,7)}。

バイオマスのエネルギーとしての用途拡大のためには、熱利用による化石資源代替が重要であるが、これも原油等の化石燃料価格の低価格安定傾向のため伸び悩んでいる状況である。しかしながら、2015年のパリ協定発効に伴って、2050年に向けて世界的に大幅な炭酸ガス削減が求められているため、化石資源の代替に効果的なバイオマスを主とした自然エネルギー熱利用への支援策やインセンティブ政策を打ち出すことが喫緊の課題となっている。例えば、World Bioenergy Association（WBA）等は、バイオエネルギーへの安定的な投資環境の整備のため、今後の化石資源に対する統一的なカーボンプライシングの導入を求めている^{1,2,5)}。EUでは2018年1月に可決された再生可能エネルギー新指令（REDII）で再生可能エネルギー熱の取り扱いが重要視されているが、バイオマス以外の風力や太陽光エネルギー等の変動を吸収できるヒートポンプ技術等が開発されており、地域熱供給網における供給温度が低温化していることから、熱源としてヒートポンプや大規模な太陽熱集熱器を採用する事例が見られている^{1,2,5)}。

発電市場の世界的な傾向では、これまでの石炭火力へのバイオマス混焼に加えて、大規模な石炭火力発電所でバイオマスへの燃料転換事例が増えている^{1,2,5)}。イギリスのDrax発電所やカナダのOntario発電所では100%バイオマス燃料への転換が実現されている。他にも、ガス化発電分野で石炭や天然ガスを木質バイオマスに転換する事例も見られている。特に、デンマークのオーステッド社が2017年2月に2023年までに石炭使用を停止し、自然エネルギー電力の増大を発表し、石炭火力発電所でのバイオマス転換を推進している。デンマークの石炭火力発電所は熱電併給プラントであるため、地域の熱需要に合わせて発電所の出力を調整することも有利な点であることから、より効率の良いエネルギー需給システムが構築されてい

ば既設の石炭火力発電所を再利用することも期待されている。このような状況の下で日本でも、国内外のバイオマスのトレファクション（半炭化）技術の開発によって、主として石炭火力での混焼率の向上を目指している。

上述したような大規模な石炭火力発電所におけるバイオマス転換が拡大すると、木質バイオマス需要が急激に増大するため、木質バイオマス等の持続可能性基準の導入をセットで実施しなければならない^{1, 2)}。これは、将来的に利用可能なバイオマス資源の供給不足を招くことにもつながることが危惧されている。また、ドイツでは以前の全量買い取りが保証されていた時と制度が変わり、自ら売電することが求められるようになり、小規模な発電事業者は需要家の電力需要を束ねて効果的な販売を行うアグリゲーターを介して VPP（Virtual Power Plant）を構築して売電を行うようになってきている。ドイツでは、約 1000 のバイオガスプラントと契約し、変動する電力需要に合わせて稼働割合を調整しながら対価を得ている会社もある^{1, 2)}。このような場合は、出力調整が容易なバイオガスによるガスエンジン発電が主となっているが、木質バイオマス発電プラントも調整力等の条件を満たせば参入可能であり、将来のバイオエネルギー発電の導入拡大モデルになると期待される。

アジアでは、日本や韓国のように海外の化石資源依存度が高い国では、再生可能エネルギーによる発電割合を大きくし、炭酸ガス削減を図るため木質ペレット等によるバイオマス発電が増大しているが、国産の木質バイオマス資源だけでは賄いきれないことから、東南アジアや北米等からの木質ペレットの輸入に頼らざるを得ない状況である⁸⁾。一方、中国では、国内の農林バイオマスによる直接燃焼発電とごみ焼却発電が 9 割以上を占めているが、最近ではごみ焼却発電の割合が大きくなってきている⁹⁾。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

バイオエネルギーの将来展開を考える上で、2017 年に IEA 等の国際機関から重要なレポートが公表されており、IEA は 5 年ぶりに Technology Roadmap を発表し、熱と電力に加えて輸送部門も含めた総合的な内容となっている³⁾。特に、地球温暖化防止に向けた 2℃シナリオと整合する量的な見通しを示している。具体的には、バイオエネルギーには他の自然エネルギーに対応できない輸送用燃料や産業用の熱利用の増大が今後見込まれており、太陽光や風力等の変動し易い自然エネルギーを補完する役割が重要視されている。欧州では、バイオマスの熱利用に対してインセンティブを付与する熱 FIT も導入されている。自然エネルギー財団がこのような国際的な動向をまとめて、日本のバイオエネルギー戦略の再考に関するレポートが出されている⁵⁾。

また、2050 年に向けた脱炭素化の促進に向けて、世界的に石油を主体とする化石資源由来のプラスチックや化学原料等をバイオマス由来に転換する動きも加速されつつある。その中で、Bioeconomy という新しいビジョンに基づいて、バイオマスをエネルギーだけでなくマテリアルとして積極的に利用することによって農地・森林等の適切な管理を前提として生態系の炭素固定を加速し^{10)・12)}、バイオマス由来の CO₂ 回収（BECCS）も促進するネガティブエミッションを実現するコンセプトが示されている。

さらに、持続可能なバイオマス利活用の国際的動向として、輸入バイオマスのトレーサビリティが重要視されてきている。特に、日本では、FIT 制度導入に伴って海外からの木質チップ・

ペレットやPKS（輸入ヤシ殻）等のバイオマスの輸入が急拡大しており、FITの対象としてディーゼル発電用にパーム油までも輸入する動きがあり、日本に対する批判にもなっている。木質バイオマスについては、FSC®等の森林認証によって、違法伐採木材をFITの対象としないように、所謂「合法木材」を燃料とするバイオマス発電をFITの条件としている。しかしながら、今後急速に木質バイオマスの輸入が拡大すると、ベトナム、インドネシア等の東南アジア諸国で、持続可能な伐採・植林のサイクルが保証されているかどうかを事前に確認する必要があると考えられる。また、東南アジア等で大量に副生しながら未利用の農業残渣を有効利用することによって化石資源代替可能なバイオ燃料を効率良く生産し¹¹⁾、廃棄物系バイオマスからの環境調和型・ゼロエミッションのバイオエネルギーを併産するエコシステムの重要性も指摘されている¹²⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

バイオマスは、量的な制約はあるものの、地熱発電や水力等のベースロード電源を担える再生可能エネルギーと同様に補助的なベースロード電源やエネルギーとして石油や石炭、天然ガス等の化石資源を直接的に代替し、温暖化防止に貢献できる役割を果たすことができるので、NEDOでは脱炭素社会を見据えたバイオマスエネルギー利活用プロジェクトも公募されている。また、バイオマスは発電だけでなく、運輸用燃料を含めた熱利用、バイオガス（メタン、水素）製造、生分解性プラスチック等の原料としてのエネルギー、マテリアル利用への展開が期待されており、特に木質バイオマスの成分分離技術の高度化、所謂バイオリファイナリーによるセルロースナノファイバーやヘミセルロースやリグニン由来物質からのケミカル製造プロセスの実証・実用化プロジェクトが推進されている。

さらに、種々のリグノセルロースバイオマスや微細藻類由来の機能性・健康食品や医薬品原料としての用途開発も図られている。バイオマス資源は、元来木材や食料としての利用が本筋であり、その高付加価値利用を図ることによって、生ごみや畜産・農業系の廃棄物系バイオマスを含めて総合的に熱電供給やマテリアル利用することが環境保全的にも経済的にも優位であると考えられる。

米国DOE（エネルギー省）は、2018年9月、バイオエネルギー変換、ドロップインバイオ燃料やこれに関連したエネルギー作物の低コスト生産研究などに8000万ドルを支出することを発表した¹³⁾。Neste Oil社はバイオ燃料に関してシンガポールへ重点投資を行い、現在260万トンのバイオディーゼル油の生産能力を、2022年に100万トン拡張する¹⁴⁾。他に同社はロッテルダムで100万トン、フィンランドのポルヴォーで100万トンのバイオ燃料を生産している。これらによりバイोजェット燃料や化学品原料油を生産する。また同社とClariantは持続可能な化学品材料を共同で開発することに合意し、家具、スポーツ用品、衛生用品、エレクトロニクス、自動車などのプラスチック材料やコーティング材料に用いられる添加剤溶液をバイオベース原料とすることで、石油の使用量とGHGの削減を目指す¹⁵⁾。GRE2018国際会議・バイオマスセッション（パシフィコ横浜）で、ドイツのDr. Andrea Kruseは、農業残渣等の未利用バイオマスの有効利用の一つとして、水熱前処理による成分分離や引き続く化学反応や炭化処理等を組み合わせることにより、ヒドロキシメチルフルフラール（HMF）やセルロースナノファイバー、リグニン誘導体等の有用物質を回収・製造でき、水熱炭化処理を組み合わせると先進的なバイオ炭素材料を製造可能であることを報告している¹⁶⁾。農業残渣等の未利用

バイオマスは熱分解・ガス化によるコジェネレーションやバイオエタノール等の原料としても有効利用できるが、水熱処理や化学反応・炭化反応を組み合わせることにより、HMFや炭素材料等の有用物質のコプロダクション型アグロファクトリープロジェクトを提案している。

（5）科学技術的課題

バイオマス利活用における科学技術的な課題として、次の5つが挙げられる。

① バイオリファイナリー

バイオリファイナリーについては、いくつかの分類がなされているが、基本的にはバイオマス原料を主成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニン等に成分分離し、各々の性質に応じた利活用を図るものである。バイオマス原料は木質バイオマスのみならず、稲わらやもみ殻、バガス等の農業残渣が含まれるが、それぞれの原料によって分離される成分の特徴が異なるため、石油リファイナリーのような大量生産プロセスの構築が難しいことが課題の一つである。その課題解決のためには、製材所や製紙・パルプ産業において比較的原料調達が容易な木質バイオマス等のカスケード利用を図るうえで、その未利用残材の利活用を図ることが挙げられる。これまで石油や石炭等の化石資源にエネルギーの一部を依存していた製材・製紙産業において、自前で熱電供給をしながらバイオケミカルやバイオプラスチック原料を併産することは、脱化石資源を図る上で中長期的に取り組むべき課題の一つである。

② 廃棄物系バイオマスゼロエミッション

日常的に排出される生ごみ、下水汚泥等の廃棄物系バイオマスは水分が多いため、化石資源を投入して焼却処分されており、自前のエネルギーでゼロエミッション型の有効利用を図ることは、非常に重要である。最近ではFITの導入によりこれらの廃棄物系バイオマスからのバイオガス製造による発電事業も推進されているが、その過程で副生する固体残渣や廃液を有機肥料や液肥として有効利用するゼロエミッションシステムも農工連携のアグリビジネスとして注目されている。このような廃棄物系バイオマスのゼロエミッションプロセスは、大都市で大量に排出される生ごみ、下水汚泥だけでなく、農村部での農産物残渣や家畜糞尿の有効利用によるエネルギー・食料併産システムの構築にもつながり、地産地消型の地方創生プロジェクトの一つとして長期的に取り組むべき課題である。

③ CCUを含む人工光合成

バイオマスのカーボンニュートラル性を最大限に活用して、BECCS（Biomass Energy CO₂ Capture and Storage）に加えて、CCU（CO₂ Capture and Utilization）を含む人工光合成プロセスの研究開発が注目されている。火力発電所や高炉等から排出される化石資源由来の炭酸ガスは比較的大規模なCCSプラントが必要であるが、ビール・酒造等のバイオマス利用において排出または副生する炭酸ガスをさらに回収・再利用すれば、比較的小規模であってもネガティブエミッションとしてのGHG削減効果が見込まれる。人工光合成を含むCCUとしては、再生可能エネルギー由来の水素を活用して、例えばギ酸やメタノール、メタン、DME等をエネルギーキャリアとして炭化水素資源として再利用し、化石資源代替を図ることも有望視されている。

④ 省エネルギー木造住宅

古来より世界に誇る木の文化を有する我が国は、昨今広まりつつあるCLT（Cross

Laminated Timber) 等を活用した木造建築へ回帰し、快適な省エネルギー木造住宅を普及させることも木質バイオマス利活用の有効な方法である。CLTは、欧州で開発された工法であり、板の層を各層で互いに直交するように積層接着した厚型パネルの呼称で、間伐材や細い木材の高度有効利用の観点から日本でも普及拡大が図られている。CLTの利用拡大によって住宅・ビルや公共建造物等の省エネルギーを追求することは日本が誇る木の文化の復活を促し、快適で、かつ民生部門由来の炭酸ガス削減を同時に達成する上で、必要である。このような木造建築の普及は、日本伝統の大工技術の継承と木材の利用拡大・自給率向上の点からも、中長期的な日本の省エネライフスタイルを確立する上で非常に有意義である。

(6) その他の課題

バイオマスのエネルギー利用については、単に発電や熱利用だけでなく、バイオマスニッポン総合戦略でも謳われているように、そもそもバイオマスによる化石資源代替を促進し、正味の炭酸ガス削減を実現して地球温暖化防止に貢献することが第一優先課題である。2012年から実施された再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）は、東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故の影響が大きかったことは事実であるが、太陽光や風力、地熱、水力等の他の再生可能エネルギーと共に、我が国のエネルギー自給率の向上に寄与することが本題であり、単にFITによる利益追求によって、国民負担が拡大し、しかも輸入されたPVパネルやバイオマス利用を促進する結果になっていることはFITのマイナスの部分といえよう。

これに加えて、バイオマス利用については、エネルギー自給率のみならず、木材や食料自給率の向上の面からもコストベネフィットを考慮すべきである。また、石炭火力へのバイオマス混焼についても、単に発電効率だけでなく、炭酸ガス削減と共にPM、SO_x、NO_x等の大気汚染物質の削減効果も加味して、環境影響を含めた費用対効果を検討すべきである。量的な制約を伴うバイオマスの持続可能性は重要な課題であるが、本来は日本に未利用で存在するバイオマス資源を極限まで有効利用することが追求されるべきであろう。

このような観点で今後のバイオマス利活用拡大への政策や法規制については、第5次エネルギー基本計画で示された2030年でのエネルギーミックス実現から2050年の炭酸ガス80%削減を実現するための総合的な再生可能エネルギー政策であると考えられる。単に、石炭等の化石資源の利用撤廃と再生可能エネルギー最大を目指すだけでなく、環境影響ミニマムとエネルギー自給率向上及び究極の省エネ社会を実現することが必要である。

(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	○	↗	リグノセルロース系バイオマスの成分分離リファイナリーと用途開発に関する研究は推進されている。
	応用研究・開発	△	→	FIT対象のバイオマス発電の開発は進んでいるが、バイオ燃料の実証研究は停滞している。
米国	基礎研究	○	→	バイオマス由来のケミカルや医薬品・健康食品、バイオプラスチック等の研究は継続している。
	応用研究・開発	○	→	非食用バイオマスからのバイオ燃料製造に関する研究開発は継続されている。

欧州	基礎研究	○	↗	<p>国際的に持続可能なバイオマス利活用システムの提案と課題解決のためのスキームが議論されている。 地産地消型バイオマス利活用スキームの提案と再生可能エネルギーの最大利用システムが議論されている。</p> <p>【英国】 CO₂削減と化石資源代替を実現するためのバイオマス利活用スキームが提案されている。</p> <p>【ドイツ】 地産地消型バイオマス利活用スキームの提案と他の再生可能エネルギーとの組合せ最適化が議論されている。</p> <p>【フランス】 未利用バイオマスの高付加価値利用に向けた触媒反応プロセスの研究開発が継続している。</p>
	応用研究・開発	◎	↗	<p>エネルギー政策として、バイオマス発電だけでなく、CHPにおける熱利用による化石資源代替が推進されている。 脱化石資源に向けた再生可能エネルギーの利用拡大が進み、小型バイオマス発電が拡大している。</p> <p>【英国】 脱石炭火力に向けて、バイオマスの混焼や専焼プラントへの転換が加速されている。</p> <p>【ドイツ】 脱原発と脱化石資源に向けた再生可能エネルギーの利用拡大が進み、小型バイオマス発電が拡大している。</p> <p>【フランス】 バイオマス発電と非食用バイオ燃料製造に関する研究開発は継続されている。</p>
中国	基礎研究	△	→	第2、第3世代バイオ燃料の製造研究が継続している。
	応用研究・開発	△	→	食料と競合しない第2世代バイオ燃料の応用研究が継続している。
韓国	基礎研究	△	→	未利用バイオマスからの高付加価値物質の製造研究が継続している。
	応用研究・開発	○	↗	木質ペレットやバイオ燃料の導入拡大が進められている。

（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」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

（8）参考・引用文献

- 1) ”Renewables 2018 Global Status Report,” Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), Institute for Sustainable Energy Policies (ISEP).
- 2) バイオマス産業社会ネットワーク「バイオマス白書2018 ダイジェスト版」.
- 3) Frankl Paul, “IEA Renewable Perspective: Tracking Clean Energy Progress 2018,” NEDO Session at Grand Renewable Energy, 2018年6月.
- 4) 三菱UFJリサーチ&コンサルティング「バイオマス発電を含めたバイオマス利用のあり方に係る調査報告書」, 平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査, 2018年2月.
- 5) 自然エネルギー財団「日本のバイオエネルギー戦略の再構築：バイオエネルギー固有の役

- 割発揮に向けて」, 2018年4月.
- 6) 藤井照重他『再生可能エネルギー技術』, 森北出版, 2016.
 - 7) 『知の散歩シリーズ1 再生可能エネルギーで地域を変える』, 弘前大学出版会, 2017.
 - 8) アジアバイオマスオフィス,
https://www.asiabiomass.jp/topics/1211_03.html (2019年2月1日アクセス).
 - 9) 国家再生可能エネルギー編著『2016年中国再生可能エネルギー産業発展報告』, 中国経済出版社, 2016.
 - 10) 中川仁 他『農林バイオマス資源と地域利活用 - バイオマス研究の10年を振り返る -』, 養賢社, 2018.
 - 11) IRENA, “Biofuel Potential in Southeast Asia: Raising food yields, reducing food waste and utilising residues”, 2017.
 - 12) Meyer Markus A. and Leckert Florian S., "A Systematic Review of the Conceptual Differences of Environmental Assessment and Ecosystem Service Studies of Biofuel and Bioenergy Production," *Biomass and Bioenergy*, 114: 8-17, 2018
 - 13) U.S. DOE,
<https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-36-projects-bioenergy-research-and-development> (2019年2月1日アクセス).
 - 14) *Hydrocarbon Processing*, December 12, 2017.
 - 15) *Biofuels Digest*, November 6, 2018.
 - 16) *Proceedings of Grand Renewable Energy International Conference 2018*, Biomass Session, パシフィコ横浜, 2018年6月21～22日.

2.8 その他の再生可能エネルギー利用（地熱、海洋）

（1）研究開発領域の定義

地熱エネルギーと海洋エネルギー利用に関する科学、技術、研究開発を記述する。

地熱エネルギー利用では地熱発電があり、高温の地熱によって生成された水蒸気により直接あるいは低沸点媒体と熱交換して蒸気タービン発電機を駆動して電力を発生させるものである。

ここでは、地熱資源の特性把握技術（物理探査や地化学探査など）や掘削技術、地熱発電技術として、フラッシュ発電、バイナリー発電および、高温岩体発電、涵養地熱システムを対象とする。

海洋エネルギー利用では、海洋発電がある。ここでは、海流、波、潮汐、塩分濃度、海水の温度差による再生可能な運動エネルギーを利用した発電方式を対象とする。

（2）キーワード

■地熱エネルギー

地熱発電、空中物理探査手法、低コスト掘削技術、貯留層評価・管理技術、環境モニタリング技術、バイナリー発電技術、EGS（地熱増産システム）発電、スケール対策、誘発地震、超臨界地熱

■海洋エネルギー利用

波力発電、潮汐発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電

（3）研究開発領域の概要

[本領域の意義]

■地熱エネルギー

地熱発電は、地熱という再生可能エネルギーを活用した発電であるため、運転に際していわゆる温室効果ガスの二酸化炭素の発生が火力発電に比して圧倒的に少なく、燃料の枯渇、高騰などの心配が少ない。また、他の主要な再生可能エネルギーを活用した発電と異なり、天候、季節、昼夜によらず安定した発電量を得られる。資源量も多く、特に日本のような火山国においては大きな潜在力を有すると言われる。このように地球温暖化への対策手法となることやエネルギー安全保障の観点からも各国で利用拡大が図られつつある。

我が国は世界の活火山の約8%を擁する屈指の地熱資源大国でありながら、10年以上政策的地熱研究開発を停止していた¹⁾。地熱は本来、我が国の得意分野であり、世界シェア70%を誇る地熱蒸気タービンや次々に開発中の小型バイナリー発電設備技術、各種センサや地震学の応用による革新的地下探査技術、高温掘削技術など、要素技術は高いレベルにある。今後は豪雪地帯の地熱カスケード利用技術（地熱発電からの排熱で調理、温室栽培や雪を溶かすように熱を段階的に利用する技術）や次世代EGS発電など、これらを恒久性の高い地熱利用システム技術に発展させ、再び世界をリードすることが望まれる。

■海洋エネルギー利用

海洋に存在する波浪、潮汐、潮流・海流、海洋熱、塩分濃度差等の持つ海洋エネルギーは、膨大な資源量を有する。これらのエネルギーは、波力発電、潮汐発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電、塩分濃度差発電等として利用可能なため、次世代のエネルギー源として認識され

ている。現在、欧米諸外国を中心に、その利用技術の開発が精力的になされ、新しい海洋エネルギー産業が勃興しつつある。わが国においても、第二期（平成 25 年度～ 29 年度）及び第三期（平成 30 年度～ 34 年度）海洋基本計画において、海洋再生エネルギー利用技術開発の必要性が謳われ、現在、海洋エネルギー利用技術に関する、NEDO や環境省等の大型研究プロジェクトが継続実施されている。

[研究開発の動向]

■地熱エネルギー

日本では 1980 年代に、新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）において、地熱開発促進調査が開始され、国内 60 以上の地熱開発可能性の調査が行われた。そのうち、特に有望であった地域は、90 年代に地熱発電所が建設された（柳津西山、八丈島など）。また、地熱資源調査や技術開発が様々な視点で行われ、全国地熱資源総合調査にはじまり、地熱貯留層の構成する断裂系の調査・解析手法を開発する「断裂系貯留層探査法開発」および後継の「貯留層変動探査法開発」、既存の地熱貯留層よりさらに深い深度での地熱開発可能性を岩手県の葛根田地熱地域で調査した「深部地熱資源調査」、国産バイナリー発電機の開発や炭酸カルシウムなどのスケール対策、掘削技術の開発を中心とした「深部地熱資源採取技術」そして、山形県肘折での「高温岩体発電技術」の実証試験が行われた。2000 年までに、地熱発電所は国内 18 地点、設備容量約 54 万 kW に達し、電源構成割合で 0.2% に達したが、2002 年度をもって「貯留層変動探査法開発」のなどの国による技術開発は終了するとともに、調査予算も大幅に縮小した。また、地熱資源の 80% が国立公園内にあり調査が不可能だったことや、温泉地の地熱開発に対する懸念が強いことも地熱開発が停滞する原因になった。

2000 年以後の日本の地熱開発が停滞している間に、アメリカ、フィリピン、インドネシア、ニュージーランド、メキシコ、イタリア、アイスランド、ケニア、トルコなどでは着実に地熱発電量を増大させており、世界の合計で見ると、2000 年の 7,974MW から 2015 年には 12,636MW まで増大している²⁾。この世界の地熱発電所建設の動きに対し、日本はフラッシュ発電タービンや、配管技術等で貢献しており、現在の世界の地熱発電量の 70% を日本の富士電機、三菱日立パワーシステムズ、東芝の 3 社がしめている²⁾。さらに坑口装置も世界の 50% ほどのシェアがある。その一方で、バイナリー発電技術や坑内探査技術、掘削技術などはアメリカなど海外が強い状況である。

地球温暖化対策としての CO₂ 排出削減に地熱が貢献できることから、日本の地熱開発に対して復活の動きが見え始めた。2000 年までの地熱開発促進調査で有望地域とされていた秋田県湯沢市の山葵沢地域での発電所建設が合意に達し 2019 年頃に 40MW 規模の発電所の運転開始を目指すことになった。また、環境省も地熱プロジェクトを立ちあげることになり、「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」、「温泉発電システムの開発と実証」、「高傾斜泥水制御技術の開発」といった温泉や公園の問題の解決に向けたプロジェクトが開始された。そして、2011 年 3 月の福島原発事故以後、エネルギー政策が大幅に見直され、地熱の技術開発・調査が本格的に行われるようになった。

政府の取り組みでは、経済産業省の地熱実務を行う組織として、従来から地下資源の探査・開発を行ってきた独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）に 2012 年度より地熱部を設置した。そこでは、地下探査・掘削といった開発企業の負担を軽減するために、

地熱資源調査・環境調和支援として、日本の企業が国内で地熱資源調査を行う場合に、調査費の一部（地質調査・物理探査・地化学調査等に関する経費や坑井掘削調査等に関する経費）を助成金として交付制度を設けた。従来、地熱調査・研究を担当していた NEDO は、2013 年度から「地熱発電技術研究開発」が開始され、おもに地上設備に関する研究開発を行うこととなった。

2012 年に FIT（再生可能エネルギーの買い取り制度）が導入され、地熱の場合は 15,000kW 以上の設備では 1kWh あたり 26 円＋税、15,000kW 未満の場合は 40 円＋税の調達価格で 15 年間の調達期間が設定された。

環境対応としては、国立公園等での地熱開発について 2012 年 3 月に条件付きながら規制緩和が行われた。国立公園は規制が厳しい順に、特別保護地区、特別地域の第 1 種、第 2 種、第 3 種そして普通地域と分類される。従来は、特別保護地区、特別地域はすべて調査のため立ち入りが禁止され、普通地域でも開発不可能であったが、現在は、特別地域第 2、第 3 種や普通地域については、小型かつ環境配慮、住民との合意形成の条件を満たせば地熱開発が許可されるようになり、例えば福島県土湯温泉地域の温泉バイナリー発電機（400kW）は国立公園内に設置されている。

■海洋エネルギー利用³⁾⁻⁹⁾

波力発電、潮流発電、海洋温度差発電等の海洋エネルギー発電技術の開発は、1970 年代のオイルショックを機に、わが国を含め、世界的に開始されたが、その後の石油価格下落によるエネルギー危機の緩和や装置のコストダウンが困難等の理由から、各国の研究開発費が削減され、研究開発は低調となった。しかしながら、2000 年代からの石油価格の高騰、地球温暖化に関連して、海洋エネルギー発電技術は、再び、脚光を浴び、その発電技術の開発は世界的なブームとなっている。

①波力発電・潮流発電・海流発電・潮汐発電

波力発電と潮流発電は、海洋エネルギー利用技術の中心で、欧州（特に英国）や米国を中心に進められている。波力発電装置は、次の 3 つに大別される。

- (ア) 波エネルギーを空気エネルギーに変換して空気タービンを回して発電する“振動水柱型”
- (イ) 波浪中で運動する物体の運動エネルギーを油圧エネルギーに変換して油圧モーター等を回転させる“可動物体型”
- (ウ) 波を貯水池等に越波させ、この貯水池の落差により生じた水流を用いてタービンを回転させる“越波型”

近年の世界的な海洋エネルギー利用技術開発の活発化に伴い、NEDO が中心となって大型の研究開発プロジェクト（2011 年度～2018 年度）を実施した。このプログラムでは、事業化時に発電コスト 40 円/kWh 以下のシステム開発を目指す「海洋エネルギー発電システム実証研究（9 プロジェクト）」と、事業化時に発電コスト 20 円/kWh 以下のシステムの要素技術開発を目指す「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発（9 プロジェクト）」の 2 つを実施した。この内、「海洋エネルギー発電システム実証研究」に関して、(株) IHI は、鹿児島県口之島沖の黒潮海域で、100kW 規模の海流発電としては世界初となる水中浮遊式海流発電システムの実証機実験を行い、最大 30kW の発電出力を確認した。エム・エムブリッジ（株）他は既存の防波堤に振動水柱型装置を追加設置した固定ユニット装置（多重共振型波力発電装置）を開発中で、山形県酒田市で衝動タービンを搭載した 15kW

装置の実証実験を行い、その性能を確認した。「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」に関して、九州工業大学、(株)協和コンサルタンツ他は、相反転プロペラ式潮流発電技術を開発し、長崎湾沖で、実用化時の想定実機（プロペラ直径 7m, 流速 4m/s の場合、定格 500kW）の 1/7 スケールモデルを用いた曳航試験で、設計発電効率を上回る 43.1% の発電効率を確認した。

海外の波力発電プロジェクトでは、ポルトガルアゾレス諸島のピコ島において、400kW の沿岸固定式の振動水柱型発電装置が 1999 年から稼働している。振動水柱型装置を防波堤に組み込んだスペインの Mutriku 波力発電システム（300kW）は 2011 年に完成した商用機で、出力は 1.5GWh である。韓国のジェジュ島でも 500kW の沿岸固定式の振動水柱型波力発電装置が 2017 年から稼働中である。浮体型の振動水柱型装置としては、アイルランドの OceanEnergy 社が、後ろ曲げダクトブイ型 500kW 装置の実海域実験を準備中である。

可動物体型装置では、スウェーデンの Seabased 社の装置がある。これは、単一浮体の鉛直運動を利用してリニア発電機を用いて発電するもので、スウェーデンの Stotenäs では、36 基から構成される合計出力 1MW の Wave farm が建設されている（2015 年）。フィンランドの AW-Energy 社は、海底ヒンジの振り子型装置 Waveroller を開発して、100kW 装置 3 基に関する実海域実験をポルトガル沖で行っている。中国では、可動物体型の 200kW Sharp Eagle が 2017 年に、万山列島の海域に設置され、継続運転を行っている。

海外の潮流発電プロジェクトでは、英国 Marine Current Turbine 社が SeaGen プロジェクトにて、北アイルランド Strangford 湖の入江に、水平軸型のプロペラ 2 基で出力 1.2MW の装置を 2008 年に設置した。スコットランドの北海岸とストローマ島の間の海域では、第 1 期 MeyGen プロジェクトにおいて、1.5MW の水平軸型プロペラ方式潮流発電装置 4 基（合計 6MW）が完成した（2017）。Nova Innovation プロジェクトにて、100kW の水平軸型プロペラ方式潮流発電装置 3 基（合計 300kW）が Shetland 島に完成した（2017）。Cape Sharp Tidal JV は、OpenHydro 社のタービンを用いた 2MW 装置の実海域実証実験を、カナダの潮流発電実証実験サイト FORCE で行い、性能を確認した。フランスの Sabella 潮流発電装置（1MW）は 2015 年にグリッドに接続され、稼働中である。

潮汐発電では、フランスのランス発電所（240kW）、韓国の Sihawa 発電所（254MW）、カナダの Annapolis Royal（20MW）、ロシアの Kislaya（9MW）等がある。

海外では、波力発電、潮流発電、潮汐発電のそれぞれにおいて商用プラントが稼働しているものの、日本では実海域実験レベルに留まっている。海外では、英国が最も積極的に、波力発電と潮流発電装置の実用化研究を行っている。

②海洋温度差発電

1970 年代のオイルショック以降、各国で海洋温度差に関する研究開発が進められたが、その後のエネルギー緩和に伴い、多くの研究機関は研究開発を中止した。そのような中で、佐賀大学は研究開発を継続しており、現在、数十 kW 級の実証研究では世界トップレベルにある。近年、米国、韓国、オランダ、フランス、中国などが、研究開発を再開している。発電装置の設置方法として、陸上設置型と浮体式とした洋上設置型があるが、現在稼働中の沖縄県久米島（100kW）やハワイ（105kW）の装置は、100kW 級の装置で、陸上設置

型である。近年、世界各所で 1MW 級の浮体型装置の建設計画が提案されている。今日では、海洋温度差発電の商用展開の推進を考え、海洋温度差発電による電力の単独利用でなく、汲み上げた大規模海洋深層水を利用して、海水淡水化と漁場造成、水素製造、リチウム等の有用金属回収を含めた複合利用が推進されている。

（4）注目動向

[新展開・技術トピックス]

■地熱エネルギー

経済産業省の長期エネルギー需給見通し（エネルギーミックス）において、2030年までに地熱発電の設備容量を約 140～155 万 kW（電源構成割合で 1.0～1.1%）にまで導入を促進する目標が掲げられている。その達成には、現在 58%程度である利用率を 83%まで向上させる必要がある。

そのため、JOGMEC では、新規開発地点の開拓と開発機関の短縮のための事業や研究開発を実施している¹⁰。新規地点開拓のためには、2012年度以後、助成事業を実施しており、2017年度には 27 件（うち新規 9 件）が採択されている。

JOGMEC の調査事業としては、2013年度から空中物理探査が国内 19 地域で実施され、さらに 2017年度からは空中物理探査で見いだされた重力や電磁データのアノマリー（法則・理論から見て異常な事象）を示すエリアにおいて、地下の温度構造や地質構造を把握するためのヒートホール調査が開始されている。

さらにリードタイムの短縮、コスト削減、出力の安定化の技術課題を解決するための技術開発として、地熱貯留層探査技術開発、地熱貯留層評価・管理技術開発、地熱貯留層掘削技術開発の 3 項目の技術開発が実施されている。

地熱貯留層探査技術開発では、地熱貯留層（断裂系）の空間的な位置を可視化するために、弾性波探査の適用および他の探査データを含めた統合解析手法の開発を行った。鹿児島県山川地熱発電所周辺などで 3 次元弾性波探査の結果、地層中の断裂の可視化技術の有効性を検証し、実用化にめどがたった。

地熱貯留層評価・管理技術開発では、地下における熱水・蒸気の流れの評価精度向上と熱源部への水補給の適切化のために福島県柳津地熱発電所で涵養試験を実施しており、一部の生産井で、地化学分析により涵養効果を示唆する挙動を確認している。

地熱貯留層掘削技術開発では、坑井の掘削期間短縮、コスト抑制にむけて、掘削効率・耐久性とも従来のローラーコーンビットより優れた PDC (Polycrystalline Diamond Compact) ビットの開発を実施した。国内地熱開発地域で実証試験を実施し掘削能率は目標を達成した。今後は耐久性の課題克服を行う予定である。

今後の技術開発事業としては、坑井近傍探査技術、透水性改善技術、酸性流体発生機構解明技術、逸泥対策技術、小型ハイパワーリグの開発などの研究計画を策定している。

JOGMEC のその他の取り組みとしては、2016年度より地熱開発研修制度を創設し、特に地熱掘削技術者向けの研修を行っている。さらにニュージーランドの GNS Science との共同ワークショップを実施して、特に双方が抱える技術課題や社会受容性（温泉・間欠泉、観光、環境関連）の情報交換を行っている。また、国内でも定期的に地熱シンポジウムを開催するなど地熱理解促進に向けた取り組みを行っている。

スケール対策技術では配管材料の改質や、磁気や高周波など物理的な手法を用いてのスケール付着抑制や回収技術が開発された。発電所の環境保全対策等技術開発では、硫化水素拡散予測シミュレーションモデルの研究開発、温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の研究開発、エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発など環境や景観、温泉に配慮した技術開発が行われた。2018年度には、新規に地熱エネルギーの高度利用化に係る技術として、発電所の還元井延命化技術や未利用エネルギーを活用可能にする技術、発電所の運転管理高度化に係る技術、具体的には、還元井の寿命を2倍以上にする技術の確立や、これまで未利用であった pH3 の酸性熱水が噴出する地熱井を利用可能にする技術の確立、IoT や AI 等のイノベーション技術を活用についての公募が実施された。

NEDO の技術戦略研究センターでは、長期的な地熱発電量の増大を目指して、特に導入量の飛躍的な増大には、非従来型地熱発電（EGS）技術の適用がブレイクスルーとなりうることから、EGS 技術の世界各地の導入状況、タイプ分け、そして従来型を含めた開発への課題をまとめ、2016年7月に技術レポート『TSC Foresight』Vol.12 地熱発電分野として公表した¹¹⁾。その中で、超臨界温度領域の利用可能性調査が1つの課題となっており、アイスランドで実施された IDDP プロジェクトや国内で実施された葛根田深部地熱プロジェクトにおける超臨界での開発課題の整理が行われている。

高温の温泉熱を利用したバイナリー発電は東北大震災後の FIT 導入により九州大分の別府地域などで導入が進められ、地熱発電所内でのバイナリー発電機も含めると国内 36 か所、合計 21MW のバイナリー発電所が震災以後に設置されている¹²⁾。

■海洋エネルギー利用

①波力発電の性能向上のための制御技術

波力発電装置は、出力を大きくするために、入射波周期と装置の可動部の運動周期を一致させる共振装置である。実際の海の波は、入射する波の周期と波高が時々刻々変化する不規則波であるので、共振状態を作ることが難しい。近年、入射する波を時々刻々計測しながら、Power take-off システムのダンピング係数を調整する制御法が提案されている。今後、制御法の高度化により、発電出力を高める工夫が進む。

②潮流発電関連新技術

近年実施された潮流発電に関する NEDO プロジェクトで、有望な技術が提案されている。相反転プロペラ式潮流発電装置では、プロペラと発電機に関して、相互に逆回転する二段のプロペラとそれらが連結された内外二重の回転電気子から構成されているため、磁界を切る相対速度が速くなり、高出力を得ることができる。また、プロペラの回転も少なくできるので、キャビテーションや水中騒音問題に有利となる。また、橋脚利用式潮流発電装置では、装置全体が海中にあるため、非接触動力伝達機構を提案している。この方法では、発電機を完全密閉にして、磁石を用いて、ダリウス型タービンによる外部の回転を発電機に伝達するものである。

③海洋エネルギー実証試験海域の整備

波力発電、潮流発電・海流発電、海洋温度差発電装置の商用化のためには、実機レベルで、発電性能や大波浪作用下での装置の安全性の実証試験が可能な海域確保が必要である。各国はそれぞれ独自に実証試験海域を保有しており、現在、グリッド接続された実証試験海域が世界中で 28 か所ある。英国の EMEC (European Marine Energy Center) は、スコッ

トランド政府等からの出資を受けた代表的な実証研究センターで、波力発電と潮流発電の両方に関する試験海域を持つ。世界中の装置の性能を評価して、装置の認証データ取得のための試験センターとなっている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■地熱エネルギー

よりポテンシャルの高い地熱資源の開発可能性の調査として、超臨界温度領域での地熱開発可能性調査が世界各地で行われている¹³⁾。

超臨界温度領域の岩体の掘削は、近年アイスランドで IDDP プロジェクトが行われ、2010年には IDDP-1 で 440℃の超臨界流体の生産を確認し、2017年には IDDP-2 で 4000 m、420℃まで掘削を行い、現在噴気試験の準備中である¹⁴⁾。また、イタリアの DESCRAMLE プロジェクトでは、深度約 3,000 m で 500℃の熱源の存在を確認している¹⁵⁾。さらに、EU とメキシコが共同でメキシコのロスアズフレス地熱地域付近で EGS と直接噴気の 2 通りの考え方で超臨界地熱資源調査を計画している¹⁶⁾。DOE は高温地熱利用と火山防災の観点からのプロジェクトをニューベリーで進めている¹⁷⁾。

日本では、2015～2017年度にかけて NEDO により「超臨界地熱開発実現のための革新的掘削・仕上げ技術の創出」¹⁸⁾、2017年度には「天然・人工地熱システムを利用した超臨界地熱発電の詳細検討」のプロジェクトで超臨界地熱発電の可能性調査が行われ、2018年度から「超臨界地熱発電技術研究開発」が開始されている。

在来型の地熱資源については、空中物理探査手法、地熱貯留層評価・管理技術、PDC ビット開発、環境保全対策技術（硫化水素拡散予測など）および高傾斜掘削をふくむ掘削技術の開発は、いずれも地熱資源のより詳細な把握、地熱資源の維持管理、環境への配慮のために重要なテーマであり、従来の地熱開発において課題となっていた地熱資源の不確実性や、公園・温泉等への配慮を克服することにより、すでに JOGMEC が開発支援をしている有望地域の開発促進に結びつくものである。

また、NEDO では、地熱発電技術として、AI-IoT の適用、酸性流体（フィリピン等で問題となっている）の利活用などの研究課題を開始している。

■海洋エネルギー利用

①海流発電装置「かいりゅう」

(株) IHI は、NEDO の「次世代海洋エネルギー発電技術研究開発」及び「海洋エネルギー発電システム実証研究」において、水中浮遊式海流発電システムを開発し、鹿児島県口之島沖の黒潮海域で、100kW 規模の海流発電としては世界初となる水中浮遊式海流発電システムの実証機「かいりゅう」の実海域実験を 2017 年に行い、最大 30kW の発電出力を確認した。装置の全長は約 20m で、直径 11m の 50kW タービン 2 基（合計 100kW）を搭載している。2018年にスタートした 3 年間の新 NEDO プロジェクトで、装置の長期実証実験が実施される予定である。海流発電に関しては、台湾も黒潮を対象とした発電装置の研究を継続実施している。

② MeyGen プロジェクト

スコットランドの Atlatis Resources 社によって進められている「MeyGen プロジェク

ト」は潮流発電では世界最大のプロジェクトで、第1期工事では、2017年に、スコットランドの北海岸とストローマ島の間の海域で、1.5MWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置4基（合計6MW）が建設された。2021年までに新たに53基が追加建設され、合計86MWの潮流発電ファームが建設される予定である。

③海洋インバースダム構想

海洋インバースダムとは、巨大な箱型のダム空間（函体）を海中に構築し、その中に海水を出し入れすることで蓄電と発電を繰り返すものである。ダム内部に海水を流入させる際、海面の位置エネルギーを利用して水車発電機で発電し、また深夜電力等の外部電源により水車発電機を揚水ポンプとしてダム内部の海水を外部に排水する際に、位置エネルギーを貯蔵することで蓄電池のように機能する¹⁹⁾。2014年10月、「一般社団法人海洋インバースダム協会（KID-S: Marine Inverse Dam Society）」が設立され、海水揚水発電における大規模エネルギー蓄積機能を持つ海洋インバースダム構想の実現に向け、研究開発や具体的な事業調査が行われている²⁰⁾。

(5) 科学技術的課題

■地熱エネルギー

30MW規模のフラッシュ型地熱発電を開発する場合、有望地域が国立公園内あるいはその近傍である場合が多く、これまで十分調査されてないために、貯留層の状況が不明であることが多い。地下データの採取とデータベース整備が必要である。JOGMECの空中物理探査で公園内を含む地下の状況は判明しつつあるが、今後はより詳細な解析が求められ、さらに公園に影響を及ぼさない地上調査法により、貯留層の的確な把握、それに基づいた適正規模な発電が求められる。

有望地域は山岳地域であり、掘削のための用地確保が難しいこと、さらに貯留層がより高温で、流体が酸性になりうることから、傾斜掘削を含む掘削技術の向上、そしてドリルビットの改良など、掘削コストの低減に直結する技術開発が必要となってくる。高温の酸性流体を想定した配管などの腐食対策、リスク評価も必要である。

公園の問題だけでなく、温泉への配慮も必要となってくる。温泉貯留層と地熱貯留層の関連を考察し、温泉への影響がなく温泉と共存可能な地熱開発の手法の開発が必要となってくる。

EGSは、水圧破碎の確実性、特に坑井間の連結を可能にすることが必要である。これまでのEGSでは、注水した水が半分程度しか回収できないため、周辺河川などからの補給が必要であったり、坑井間の距離が短いために貯留層が急冷却を起したり、さらに水圧破碎時などの誘発地震、注水による内部消費電力やコストの問題などが生じている。このような課題に対応する必要がある。

今後取り組むべき研究テーマとして、次を示す。

- 地熱井掘削の成功率を向上させ、地熱発電開発コストを低減するための高精度の革新的地下イメージング技術・地熱探査技術及び掘削技術の開発。
- 高度に持続的な地熱発電を可能にするための地熱貯留層シミュレーション技術・地熱貯留層モニタリング技術の開発。我が国では温泉との立地の競合という課題があり、細心のモニタリング技術が必要とされている。
- 地熱開発の社会受容性を確認し、開発への理解を促進させるための技術開発（環境・温

泉モニタリングの高精度化)

- より高温（超臨界領域を想定）の地熱資源開発のために、高温で使用可能な坑内検層機器および高温での掘削技術の開発。またそれに伴う配管等の地熱材料の評価技術の開発。さらに酸性流体の発生機構の解明
- 発電機の効率の向上。

■海洋エネルギー利用

海洋エネルギーの賦存量は非常に大きいものの、エネルギー密度が低いため、1か所あたりで得られるエネルギーが少なく、高効率化、大規模化が求められる。また、海洋環境での長期使用に耐えうる高信頼性も必要となる。特に、暴風時等の異常外力によるリスクや腐食環境のリスクは、長期間での実証が必要である。

再生可能エネルギーの普及促進には、低コスト化とシステム・サプライチェーン全体を通じた課題解決の両方を同時に検討する必要がある。

次に、発電方式別の科学技術的課題を示す。

- 波力発電は、高効率・低コストの装置開発、台風等の荒天時における装置の安全性の確保、一部方式における波の周期による単機出力変動抑制のための複数機での平準化が挙げられる。
- 潮流発電は、高効率・低コストの装置開発、浮体型装置では、台風等の荒天時における装置の安全性の確保、潮流の早い海域における施工法の開発がある。
- 海流発電は、発電装置の係留技術、姿勢・水深の制御技術、陸から離れた海域での効果的な施工・長期メンテナンスの効率化確立である。
- 海洋温度差発電は、施工法を含めた深層水取水管の低コスト化があり、大規模発電では、取水管の大口径化と、その長期耐久性が挙げられる。浮体型装置の場合、動揺する浮体と取水管の接続方法も課題である。また、大規模化した場合、排出する表層水より低温でかつ栄養分の多い深層水の環境影響に対する考慮が必要である。
- 装置への生物付着対策として、装置表面の塗装法等、新技術の開発が必要である。
- 海洋エネルギー利用装置に共通する基礎的で、大学等で行う研究開発課題は、(ア) 大幅にコスト低減が可能な海洋エネルギー変換装置の革新的システムの提案、(イ) 大電力直流送電、(ウ) 沿岸・海洋を考えた場合のエネルギー貯蔵（沿岸廃坑や海底高圧タンクの利用等）、(エ) エネルギー輸送媒体の変換効率の飛躍的向上（海上で水素を製造する等）、(オ) 装置を多数配置したファーム用革新的係留システムと新材料の開発（海上工事とメンテナンスコストの軽減を目的）等がある。²¹⁾

(6) その他の課題

■地熱エネルギー

日本における地熱発電の開発リードタイムは10年以上要しており、開発コストが世界標準の2倍程度となっている。そのため、一元的な許認可制度を導入し、開発リードタイムを抜本的に短縮する必要がある。特に環境アセスメントの短縮化は重要であり、早期の短縮の実現および環境アセスメントが必要な閾値の引き上げや、固定買取価格制度の継続的な運用も開発促進のために必要である。

良質な地熱資源の多くは国立公園内の特別保護地域に該当するため、開発が規制されている。

しかし、世界的に議論されている生態保護地域と、日本の公園の区分には差異があり、またケニアなど公園内での開発を積極的に推進している国もある。したがって、公園内の生態系に配慮した調査・開発をするのはもちろんであるが、公園の規制の全面的な見直しも必要かと思われる。

温泉商業地域が地熱開発に懸念を示すことなどから、有望地域であっても地元との調整が進まない地域が多い。しかしながら地熱資源は数少ない安定した国産資源であることから、地元との合意が段階的であっても進んでいくような体制作り、あるいは小規模な発電から環境影響を見ながらの段階的な開発が可能になるような法律（地熱法）の整備が必要となる。その場合、開発費用が最初から大規模な発電所を作るのに比べコストがかかることが想定されるので、その対応が可能な施策、場合によってはドイツが導入しているような、開発に伴う保険制度の導入も検討する必要がある。

■海洋エネルギー利用

我が国は、内閣府総合政策本部が、2014年から、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電、洋上風力発電の実証試験海域の選定を開始して、現在までに、6県8海域を選定済みであるが、選定後に、実証試験を行うために必要となる系統連系のためのケーブル敷設、波浪の計測等のインフラ整備に関して、国からの資金援助が無いため、実証試験海域は、まだ稼働していないのが現状である。実証試験海域のインフラ整備は国が行い、試験管体はベンチャーキャピタルとしての資金で賄うことで、装置の淘汰が行われ、実用化に至る高性能な装置が早期に実現されると期待されるため、実証試験海域のインフラ整備を国が早期に行うことが求められる。

開発ステージにおける開発資金の支援とリスク管理^{22)・24)}については、以下の課題がある。海洋エネルギー利用装置の開発は、次のように、ステージ1からステージ5の順に、進められる。次のステージに進むためにはステージゲートをクリアする必要がある。

- a) ステージ1: 提案した構想の検証（小型模型を用いた水槽実験）
- b) ステージ2: 設計評価（実機の1/25～1/10スケールの中型模型を用いた水槽実験）
- c) ステージ3: 実機の1/10～1/2スケールの大型模型を用いた実海域試験
- d) ステージ4: 原寸プロトタイプ（1/1スケール）の実海域試験
- e) ステージ5: 原寸プロトタイプ（1/1スケール）の複数機配列に関する実海域試験

我が国の研究開発費の支援・補助は、現在、ステージ1は文科省の科研費等の助成金、ステージ2は文科省の基礎研究費等の助成金、ステージ4とステージ5は経産省やNEDOの補助金（必要な研究開発費の2/3を補助）、の形で行われているが、ステージ3の支援が無いために、基礎技術の革新が、経産省やNEDOの実証試験に繋がらない。ステージ3の研究開発費の支援・補助を行う制度の確立が求められる。

技術的なリスク管理に関しては、各ステージでの試験方法の標準化、特に、実海域試験での試験方法について注意が必要である。

経済的なリスクに関しては、原寸プロトタイプの実海域試験を行うステージ4、ステージ5においては、海洋エネルギー利用技術が新しい技術であるため、実海域での大規模装置の試験や複数機配列試験や維持管理の面での不確実性が存在する。これらの不確実性のリスクについては、海洋エネルギー保険および保証基金を設立し、リスク（設置、運用における故障）の一部をカバーする等の方策が必要である。また、社会的リスクでは、対象海域を利用する漁業者の他に、将来の他の海洋利用者との衝突を防ぎ、海洋環境への影響を最小限に抑えるために、

関係者の同意プロセスを整備する仕組みを設ける必要がある。

海洋エネルギーの実証・実現においては、(ア) 漁業権との調整、(イ) 定期点検の期間、について議論となる。漁業権は、沿岸域では協議相手が明確であるが、沖合の場合は協議する相手が非常に多くなるため、個別プロジェクトで対応することは難しい。電気事業法において、風力発電は3年に1度の定期点検が義務付けられているが、海洋エネルギーについては記載がないため、1回/年の検査が求められることが予想される。しかし、頻繁にはアクセスしにくい場所に設置された海洋エネルギー発電設備の場合、その信頼性に応じて、保守期間の見直しができることが望まれる。また、海底の送電や変電設備等の付帯設備に要する費用も高額であること、ソフト・ハードのサプライチェーンの整備が必要であることに対しては、国による支援が必要である。

(7) 国際比較

■地熱エネルギー

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	◎	↑	産総研では、再生可能エネルギー研究センター (FREA) を中心に地熱探査技術や温泉モニタリング技術、超臨界地熱資源などの課題に取り組んでいる。また、九州大学などいくつかの大学が総合的な地熱研究を行っている。 また、NEDO では将来の超臨界地熱資源の開発可能性に関する研究に着手している。
	応用研究・開発	◎	↑	2013年度より、NEDO やJOGMEC が政策的な地熱研究開発を実施している。NEDO ではスケール対策技術やバイナリー発電の他に景観設計や硫化水素モニタリング、温泉モニタリングなど環境に配慮した研究を実施し、2018年度の新規課題では AI-IoT 技術の適用や酸性流体適用技術、そして超臨界地熱に関する研究を開始する。JOGMEC では空中磁気探査をメインに人工涵養技術、掘削技術の開発を行っている。 2013年以後、温泉バイナリーを中心に小規模な発電所の建設が36カ所で行われ合計21MWとなっている。その中には国立公園内に建設した土湯の例などがある。大規模発電所は、2019年運転開始予定の山葵沢地熱発電所に続き、岩手県八幡平地域で2地点の開発が進められているが、その他の地点は地元との合意形成、詳細な調査などを要する状況である。 フラッシュタービン技術や坑口装置技術は世界トップレベル
米国	基礎研究	○	→	米国エネルギー省 (DOE) では継続的な研究開発課題に取り組んでいる。その中で従来型地熱開発可能性の再評価として「PlayFairway」として、資源開発の技術的な可能性、社会受容性を含めた総合的な基礎解析を国内の多数の大学で実施し、GRC など地熱の国際会議で成果公表をするとともに、DOE もよりよい解析のための手法を地熱研究者とともに検討を行っている。 将来技術の EGS に関しても FORGE プロジェクトとして主要大学で基礎研究を実施している。 2017年の政権交代に伴い、地熱研究開発予算が減少傾向にある。
	応用研究・開発	○	→	DOE が推進する技術開発の中で SALT という低温地熱からの資源回収の応用的な研究も進行中である。また、DOE では基礎と同時に応用研究も進行しており、バイナリー発電設備メーカーのバイナリー発電技術、ローレンスバークレー国立研究所などでの地熱探査技術、スタンフォード大学やユタ大学などでのトレーサー技術開発、そして PlayFairway での地熱開発可能性総合解析など、研究開発課題が系統的に進められており、それが世界最大の発電量に結びついている。 Newberry においては超臨界温度領域の開発や火山防災をターゲットとした研究開発が進められている。

欧州	基礎研究	◎	↗	<p>ヨーロッパ全体の地熱資源分布についても調査が行われている。</p> <p>【イタリア】 世界で初めて地熱発電を実用したこともあり、独自のタービン技術、探査技術等の研究が行われている。 超臨界地熱の実現可能性調査として DESCRAMBLE プロジェクトが行われ、2017年に深度 2,900 m で 500°C の岩体の存在を確認した 【スイス、オランダ、ハンガリー】 WGC などの国際会議での基礎研究成果公表が多くなっている。</p> <p>【英国】 EGS については 90 年代に研究が行われていたが、近年新たな EGS プロジェクトのための研究が行われている。</p> <p>【ドイツ】 2015 年の世界地熱会議 (WGC) では、ドイツが発表件数第 2 位であり、その内容も掘削、探査技術、スケール対策など基礎的な案件が多い。</p> <p>【フランス】 ソルツにおける EGS プロジェクトでの探査、モニタリングの基礎データの解析・評価を継続している LabEx G-eau-thermie profonde において、8 年間、約 3300 万ユーロでの深部地熱資源の研究開発予算がついている。</p> <p>【アイスランド】 深部掘削プロジェクト (IDDP) が実施されているが、そのための基礎研究も盛んに行われている。</p>
	応用研究・開発	○	↗	<p>【イタリア】 2010 年から 5 年間で設備容量を 70MW 増加させている。また、近年は超臨界地熱資源の調査も行っている。</p> <p>【英国】 国内での火山活動がないため、地熱利用は EGS あるいは直接利用となる。2 地域での EGS プロジェクト、直接利用、地中熱利用の実現に向けての調査が行われている。</p> <p>【ドイツ】 ドイツにおいては中規模ながら、7 つの地熱発電所で 27MW の発電をしており、カーナサイクルも 2 カ所稼働している。またこれらの発電所は市街地に位置している。</p> <p>フランス、EU と共同でソルツ EGS プロジェクトを継続させている。</p> <p>【フランス】 本土においても地熱発電開発は行われており、2 カ所のデモ開発に対して出資されているが、実用化されているのはグアドブール (カリブ海の領土) 地域であり、その地域の 6% の発電を地熱でまかなっている。</p> <p>ドイツ、EU と共同でソルツ EGS プロジェクトを継続させている。</p> <p>【アイスランド】 アイスランドの IDDP プロジェクトは、第 1 期に超臨界温度領域の資源の存在を確認し、第 2 期では深度 4,600 m、426°C の掘削を完了させ、噴気試験に向けての準備を進めている。また、アイスランドでは 2010 年からの 5 年間で 90MW 発電を増加させ、国内の発電の 30% 以上を地熱でまかなっている。</p>
中国	基礎研究	○	→	<p>中国科学院などが、特にチベット南部や雲南省などの坑井データをもとに地熱ポテンシャルの評価をしており、また EGS に関する調査も行っている。また、2015 年の WGC でも発表件数第 4 位である。</p>
	応用研究・開発	○	→	<p>チベット南部の八羊井 (Yangbajing) 地熱発電所で蒸気フラッシュ発電が行われるなど、バイナリーを含めて約 28MW の地熱発電所が稼働中である。また、中国は暖房や地中熱利用などの直接利用にも力を入れており、その設備容量やエネルギーは世界一である。</p> <p>台湾については、地熱発電のためのポテンシャル評価が進められている。</p>
韓国	基礎研究	△	→	<p>KIGAM (韓国地質鉱物資源研究院) や各大学が、積極的に地熱探査技術やバイナリー発電技術の研究をしている。特に KIGAM は国内数百以上の地温勾配や熱流量のデータから地熱データベースおよび国内の地熱分布をとりまとめて、地下 6.5km までのポテンシャルを求めている</p>
	応用研究・開発	△	→	<p>NEXGEO 社が KIGAM や大学と浦項 (Pohang) で EGS 発電の開発研究を行っており、深度 4km を超える掘削が実施されたが、水圧破砕時の地震発生の影響で現在開発は中断している。またバイナリー発電の可能性調査も行われている。</p>

■海洋エネルギー利用

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	○	↑	第二期 (平成 25 年度～平成 29 年度)、第三期 (平成 30 年度から 5 年間) の海洋基本計画において、海洋再生可能エネルギーの実用化のための技術開発と発電事業の産業化の推進、装置の実証実験のための実証フィールド建設の推進が謳われた。 海洋温度差発電:佐賀大学において、1973 年から現在まで、継続的に、熱交換器、システムに関する研究を継続実施中。 波力発電:1960 年代に世界初の航路標識ブイ式の振動水柱型装置 (OWC) を実用化。固定式、浮体式 OWC 装置に関する基礎研究及び実海域実証実験を JAMSTEC 等で継続実施した。 潮流・海流発電:NEDO 要素技術開発プロジェクトで、水中浮体式黒潮発電、水平軸型及び鉛直軸型潮流発電装置 3 方式に関する要素技術研究を実施。
	応用研究・開発	○	↑	海洋温度差発電:NEDO 実証プロジェクトとして、沖縄県久米島で実海水を用いた 100KW プラントの実証試験を実施、継続稼働中。 波力発電:NEDO 実証プロジェクトとして、振動水柱型、可動物体型等に関する各種開発を、大学と民間会社共同で実施して、実証実験、設計において、30 円 /kWh の目標を達成。 潮流・海流発電:NEDO 実証プロジェクトで、IHI 他が水中浮体式黒潮発電 100kW 装置を製作し、鹿児島県沖の海域で性能を確認。30 円 /kWh の目標を達成。 政府は、海洋再生エネルギー装置の実海域性能を評価するための実証フィールド 8 海域を選定した。しかし、系統連携は未接続。
米国	基礎研究	◎	↑	The U.S. Department of Energy (DOE) Water Power Technologies Office's (WPTO) Marine and Hydrokinetic Programs (2017 年策定) で、現在から 2035 年までの海洋再生可能エネルギー利用の方針を策定済み。 19 大学と 6 国立研究所が、波力発電、潮流発電、海洋温度差発電等の海洋エネルギー利用に関する研究を実施している。研究分野は、装置の性能評価に関する実験や数値解析、power take-off システム、制御システム等である。
	応用研究・開発	◎	↑	28 企業が海洋エネルギー利用装置に関する研究を行っている。 ハワイ州立自然エネルギー研究所の 105KW 海洋温度差発電プラントが稼働中である。 OPT 社は、40kW 可動物体型波力発電装置を製品化している。 ダイレクトドライブ発電機を搭載した可動物体型波力発電装置 500kW 装置を開発中である。 波力発電に関する 7 つの実証実験サイト、潮流発電に関する 3 つの実証実験サイト、海洋温度差発電に関する 1 つの実証実験サイトを持っている。

欧州	基礎研究	◎	↑	<p>【EU】 欧州委員会では、海洋エネルギー分野でリーダーシップをとることを目的に、政策を策定済み。2050年までに、海洋再生可能エネルギー関係で、100GWの設備容量の新設、40万人の雇用確保を目標としている。このために、基礎研究に関する公的研究ファンドを加盟国に配分している。</p> <p>【英国】 英国は欧州の中でも波浪・潮流のエネルギーの資源量が豊富なため、海洋エネルギー利用に積極的である。特に、スコットランドが積極的である。 スコットランド政府関係から、61の波力発電関連プロジェクトが、24.4百万ユーロの研究開発費を獲得した。</p> <p>【ドイツ】 2025年までに、全電力の40～45%を再生可能エネルギーによる電力を目標としているが、風力や太陽光がメインである。 15の大学や研究所が波力発電や潮流発電の研究を行っている。潮流発電と波力発電に関する12の技術プロジェクトに国の資金が提供されている。</p> <p>【フランス】 潮流発電を中心に研究開発を実施中である。 Eel Energy社は、弾性振動板を利用した新形式潮流発電装置(1MW)を開発中である</p> <p>【ポルトガル】 波力発電と洋上風力発電を中心に研究開発を実施している。 波力発電に関しては、振動水柱型装置を中心に、ウエルズタービンや衝動タービンのような空気タービンの研究で成果を出している。</p>
	応用研究・開発	◎	↑	<p>【EU】 欧州委員会では、海洋再生可能エネルギーの応用研究・開発に関する公的研究ファンドを加盟国に配分している(2016年:8件、2017年:5件)。</p> <p>【英国】 1.5MWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置4基(合計6MW)で構成される第1期MeyGenプロジェクトが完成(2017)。 100kWの水平軸型プロペラ方式潮流発電装置3基(合計300kW)で構成されるNova Innovationプロジェクト完成(2017) 波力発電と潮流発電に関する世界標準の実証実験サイトEMECをオークリー諸島に保有。世界各国からの装置が持ち込まれ、実証実験が実施されている。グリッドに接続されている。両実験サイトとも外力が厳しい場所と穏やかな場所の2か所を保有している。EMECの運営で地域の雇用に貢献している。また、波力発電に関する世界標準の実証実験サイトとして、Carnwall沖の海域にWaveHubも建設されている。</p> <p>【ドイツ】 280kW潮流発電に関するプロジェクト、6kWの鉛直軸サボニウス型潮流発電に関する研究を実施中である。 波力発電に関するNEMOSプロジェクトが進行中。エネルギー貯蔵に関するSTENSEAプロジェクトが進行中。</p> <p>【フランス】 240MWのランス潮汐発電所は、1967年から継続して稼働中である。 Sabella潮流発電装置(1MW)は2015年にグリッドに接続され、稼働中である。 波力発電と洋上風力発電の実証実験サイトとして、SEM-REVを建設している。また、潮流発電の実証実験サイトとして、SENEOHとPaimpol-Brehatの2か所を保有している。これら3か所の実証実験サイトは、グリッドに接続されている。</p> <p>【ポルトガル】 アズレス諸島のピコ島で、振動水柱型波力発電の実海域実験が10年間継続して実施されている。</p>
中国	基礎研究	○	↑	<p>2020年までに、50MW以上の海洋再生可能エネルギーの利用が、2016年からの5か年計画の政府目標として謳われた。 2017年に111の海洋再生可能エネルギープロジェクトに12.5億元の予算が配分された。 水平軸型のプロペラ式潮流発電装置の研究開発が浙江大学で継続的に行われてきた。</p>

中国	応用研究・開発	◎	↗	2017年に波力発電、潮流発電等の4つの研究プロジェクトが、137百万元の公的研究開発費を獲得した。 200kWの可動物体型波力発電装置 Sharp Eagle が2017年から稼働中。 2017年に、浙江大学で開発した水平軸型のプロペラ式潮流発電650kW装置が、グリッドに接続された。
韓国	基礎研究	○	↗	政府は、2030年までに、1.5GWの海洋エネルギー関連施設の建設目標を公表している。国立の研究所である KRISO を中心に、波力発電、潮流発電の研究開発を実施中。 KRISO が20kWの海洋温度差発電設備を保有済み。現在、1MW海洋温度差発電プラントの建設を Kiribati で計画中。 KRISO が振動水柱型、可動物体型の波力発電に関する基礎研究を継続実施中。波力発電実証フィールド建設も準備中。
	応用研究・開発	◎	↗	Sihawa 潮汐発電所（254MW）を建設済み（2011年） 波力発電：KRISO が500kWの振動水柱型装置を Jeju 島に建設済み。 300kWの浮体式の振り子型装置も製作済み。 1MW潮流発電装置を Uldolmok で建設済み。

(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」……参考にした根拠や専門的な見解等に基づき、各国の現状を、日本の現状を基準にした評価ではなく、それぞれ絶対的な評価で判断。

◎：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」……近年（ここ1～2年）の傾向として、研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考・引用文献

全体として参考とした文書

- 科学技術振興機構 研究開発戦略センター「研究開発の俯瞰報告書 環境分野（2017年）」（CRDS-FY2016-FR-03）・「研究開発の俯瞰報告書 エネルギー分野（2017年）」（CRDS-FY2016-FR-02）（2017年3月）。

- 1) 柳澤教雄, 「地熱発電の現状」, 『日本エネルギー学会誌』 93 (2014):1140-1147.
- 2) Bertani R., “Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report”, *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, PaperNo.01001, 2015.
- 3) 近藤一郎, 『海洋エネルギー利用技術』, 森北出版, 2015.
- 4) IEA-OES, “Annual Report – An Overview of Ocean Energy Activities in 2017”, www.ocean-energy-systems.org (2019年2月1日アクセス)。
- 5) IEA-OES, “Annual Report – An Overview of Ocean Energy Activities in 2016”, www.ocean-energy-systems.org (2019年2月1日アクセス)。
- 6) IEA-OES, “Spotlight on Ocean Energy (2018)”。
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「海洋エネルギー」, 『NEDO 再生可能エネルギー技術白書』, 6章, 第2版, 森北出版, 2014.
- 8) 田窪祐子, 「海洋エネルギー技術研究開発に係る NEDO の取組」, 平成29年度 NEDO 新

- エネルギー成果報告会, 2017.
http://www.nedo.go.jp/events/report/ZZFF_100015.html (2019年2月1日アクセス) .
- 9) IEC/TC114, Presentation of latest status on wave, tidal and other water current converters, Seattle meeting, 2018.
 - 10) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 「平成29年度地熱部事業成果報告会資料」, 2018.
 - 11) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター, 「地熱発電分野の技術策定にむけて」, 『TSC Foresight』, 12, 2016.
 - 12) 火力原子力発電技術協会, 『地熱発電の現状と動向2017年』, 2018.
 - 13) Dobson P., *et al.*, “Supercritical Geothermal Systems - A Review of Past Studies and Ongoing Research Activities” , *Proceedings, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 2017.
 - 14) Fridleifsson G.O., “IDDP-2 – Drilling into the supercritical at Reykjanes” , *Proceedings, New Zealand Geothermal Workshop*, 2017.
 - 15) Bertani R., *et al.*, “The First Results of the DESCRAMBLE Project” , *Proceedings, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 2018.
 - 16) Jolie E., *et al.*, “GEMex – A Mexican-European Research Cooperation on Development of Superhot and Engineered Geothermal Systems” , *Proceedings, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 2018.
 - 17) Cladouhos T., *et al.*, “Super Hot EGS and the Newberry Deep Drilling Project” , *Proceedings, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 2018.
 - 18) 長縄成実, 「超臨界地熱開発実現のための革新的掘削・仕上げ技術の創出」, 『地熱技術』, 43: 57-63, 2018.
 - 19) 電力土木技術協会 「海洋インバースダム」 ,
http://www.jepoc.or.jp/tecinfo/library.php?_w=Library&_x=detail&library_id=386 (2019年2月1日アクセス) .
 - 20) 海洋インバースダム協会 ,
<http://kid-s.jp/index.html> (2019年2月1日アクセス) .
 - 21) 木下健, 「海洋エネエネルギー利用推進の課題」, 文部科学省 科学技術・学術審議会 海洋開発分科会 (第33回) , 2012.
 - 22) IEA-OES, “ANNEX II Extension, Development of Recommended Practices for Testing and Evaluating Ocean Energy Systems” , 2011.
 - 23) TPOcean, "Strategic Research Agenda for Ocean Energy", November 2016,
https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2017/03/TPOcean-Strategic_Research_Agenda_Nov2016.pdf (2019年2月1日アクセス) .
 - 24) Ocean Energy Forum, "The Ocean Energy Strategic Roadmap",
https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/sites/maritimeforum/files/OceanEnergyForum_Roadmap_Online_Version_08Nov2016.pdf (2019年2月1日アクセス) .