

2.1.8 太陽熱発電・利用

(1) 研究開発領域の定義

太陽熱発電システムとしての低コスト化、効率向上、用途開発などの動向を対象とする。

(2) キーワード

太陽集光、熱輸送媒体、蓄熱システム、ソーラー燃料製造

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

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、夜間においては太陽光発電 (PV) にバッテリーを導入するよりも安価にソーラー発電が行える。新規建設のCSPプラントのトレンドは7~18時間の大型の蓄熱システムを備えたCSPである。2020~2021年の新規CSPによる24時間発電の競売価格あるいは購入価格は中東・北アフリカ地域の国々 (MENA) 地域では0.07 USD/kWh台となっている。さらに昼間は安価なPV、夜間は蓄熱システムによるCSPで発電するハイブリッドプラントとすれば平均0.04~0.06 €/kWhの発電コストが可能と試算されている。このような背景から、CSP発電コストは夜間のバッテリー発電やガス発電との競争に移行しつつある。特にEUでは最近のウクライナ情勢の影響でロシアからの天然ガスへの依存を減らす必要があり、需要調整力を持った蓄熱付きCSPが再注目されるようになった。研究開発の大きな流れは、蓄熱システムの低コスト化と、発電システム全体の高温化による高効率化である。高温化にはこれまでの硝酸塩系溶融塩に替わる新たな熱輸送媒体の開発も重要である。さらに太陽光発電、風力発電からの電力を電熱変換して安価に蓄熱し、夜間等に従来の手法により熱発電する蓄熱発電 (カルノーバッテリー) のほか、1000~1500°Cの産業熱として熱利用する熱電池システムの開発も近年注目されており、太陽熱発電で培われた蓄熱技術の応用が期待されている。CSPはスケールメリットが大きいため、国内よりも直達日射量が大きく大型化が可能なサンベルトで有効だが、これらの地域は発展途上国が多い。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。また、日本が得意とするタービン等の熱発電プラント技術を活用できる。

[研究開発の動向]

2021年9月時点の世界のCSPの導入量は操業中のもので6.3 GWであったが、建設中のものが1.4 GW、さらに計画中のものが1.5 GWあり、合計すればCSPのキャパシティは9.2 GWに達していた¹⁾。2020年の新規導入は中国の0.2 GW、2021年はチリの太陽光発電とのハイブリッドプラント (110 MW CSP (17.5時間蓄熱) + 100 MW PV) のみであり、2020、2021年の世界のCSP導入量の年成長率は1~2%に留まったが、2022年に中国が1.1 GW (2024年に完成予定) と1.3 GWのプラント建設を発表した²⁾。これらを合わせると中国の導入量は3 GWに達し、導入量の大きかったスペイン (2.3 GW)、米国 (1.7 GW) を凌ぐことになる。1.3 GWプラントは12 GWhの蓄熱システムを備えたものである。建設中・計画中のCSPプロジェクトは、中国以外ではMENA地域、チリ、モロッコ、南アフリカ、ザンビア、オーストラリア等であり、今後発展途上国を中心に開発が進むことが期待される^{1), 3)}。さらにEUではウクライナ情勢の影響によるガスクライシスで天然ガスへの依存を減らす必要があり、需要調整力を持った蓄熱付きCSPが再注目されつつある⁴⁾。

CSP発電コストは、日中のPV発電コストと比較すると高いが、安価な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りPV導入によるダックカーブの解消や夜間のソーラー発電として再評価されている。このような背景から、CSP発電コストは夜間のバッテリー発電やガス発電との競争に移行している。蓄熱システム付きCSPによる24時間発電のコストは0.07~0.15 €/kWhと試算されていたが、2020~2021年に新規導入されたCSP発電の競売価格あるいは購入価格は0.073~0.094 USD/kWhであり、

ほぼ試算通りであった³⁾。0.073 USD/kWhを達成したのはドバイのCSPプラントであり⁵⁾、MENA地域ではこの水準の24時間CSP発電が実現している⁶⁾。チリの競売では0.05 USD/kWh以下の競売価格が提示されたこともあり⁷⁾、地域によってはさらに低い販売価格が可能と考えられる。さらに、日中の発電コストが安いPVと組み合わせれば発電コストは平均0.04~0.06 €/kWhに下がると試算されている。将来の発電コストの予測については国立再生可能エネルギー研究所 (NREL) の報告において、2030年にはCSP単独でもLCOEとして0.04~0.055 USD/kWh (2020年現在は8 US¢/kWhとして) が達成されるシナリオが示されている⁸⁾。

研究開発の大きな流れは、蓄熱システムの低コスト化と、発電システム全体の高温化による高効率化である。現在、主流の蓄熱付きCSPは、タワー型集光システム (点集光) と硝酸塩系溶融塩を熱輸送・顕熱蓄熱媒体とする2タンク顕熱蓄熱システムを利用し、水蒸気タービンにより565°Cで発電を行っているが、サーモクラインによる1タンクシステム⁹⁾や、蓄熱密度がより大きい潜熱蓄熱、化学蓄熱 (あるいはこれらの組み合わせ) によって、低コスト化・高温化しようとする研究が活発である¹⁰⁾⁻¹³⁾。現在の発電効率 (太陽光から電力) は年平均で約16~20%であるが、水蒸気タービンから高温系のコンバインドサイクル、超臨界CO₂タービンへ移行すれば効率を向上できる。例えば、現行の水蒸気タービンの効率は42~43%であるが、750°Cの超臨界CO₂タービンでは50%以上が見込まれる。現行の硝酸塩系溶融塩は約600°Cで熱分解するため、硝酸塩系以外の溶融塩、空気、溶融金属、固体粒子などの利用が検討されている^{10), 14)-16)}。

さらに、次世代技術として太陽集熱の燃料転換が注目されている。水とCO₂を熱化学サイクルで分解し、水素とCOを製造する反応器は5~6%のエネルギー変換効率をラボスケールで達成している。100 MWth級の実用規模への大型化によって約20%が見込まれる。現在、50~700 kWthのプラントで実証試験されている段階である^{17), 18)}。サンベルトにおいて太陽熱で100 MWth級に大型プラント化した場合の水素の製造コストは2~2.5 USD/kg-水素と試算されている^{19), 20)}。また、従来はセリア (酸化セリウム) を触媒とする1400°C以上の高温が必要な2段階熱分解サイクルであったが、最近、800°Cでセリア並みに反応するペロブスカイト触媒を開発したという報告があり、大きくコストダウンできる可能性が出てきている²¹⁾。

太陽光発電、風力発電からの電力を電気炉で熱に変換後、安価な蓄熱システムで蓄熱し、夜間等に従来の手法により熱発電する蓄熱発電 (カルノーバッテリー) が近年注目されており、太陽熱発電で培われた蓄熱技術 (500°C以上) の応用が期待されている²²⁾。発電だけではなく、高温熱そのものをセメント、石油化学、鉄鋼業等に直接供給する方法も、関連する産業の脱炭素化に寄与すると期待される。化学・石油、窯業・土石、鉄鋼・金属分野で必要とされる熱エネルギーの7割弱は1000°C以上であり、1000~1500°Cの熱電池開発が重要である。クリーンエネルギー企業 Heliogen (米国) はAIを活用した集光システムにより太陽エネルギーを1000°C以上の熱に転換する技術開発を開始している²²⁾。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

世界で導入が開始された商業用CSP/PVハイブリッドプラントの24時間の発電コストの動向が注目される。2021年から稼働したチリの110 MW CSP (17.5時間蓄熱) + 100 MW PVプラント²³⁾ は冷却水を用いない空冷であることが注目される。また、UAEに建設中の250 MW PV + 700 MW CSP (15時間の蓄熱システム) は世界最大級950 MWの24時間ソーラー発電^{24), 25)} であり、実際の発電コストがどこまで下がるかが注目される。

Vast Solar社 (オーストラリア) の低密度・高熱伝導率の金属Naを熱輸送媒体として使用したCSPは、小規模ながら1.1 MWプラントのデモ期間中 (2018~2020年) 安全に運転することに成功した²⁶⁾。従来の硝酸塩系溶融塩の2タンク式蓄熱システムと565°Cの水蒸気タービンを使用しているため、従来のCSPプラントよりも高温化はできていないが、将来的に600°Cを超える発電システムへの応用が期待される。Vast Solar社は複数の小型タワー集光器によるモジュラー型マルチタワー方式を推進しており、1414 Degrees社

(オーストラリア)と、南オーストリアにPV + CSP + バッテリーによるプラント建設 (Aurora プロジェクト) を開始する²⁷⁾。Vast Solar 社の最終的な計画は150 MWのモジュラー型マルチタワー CSPを建設することであるが、まずは30 MW CSPから開始し、2025年に稼働する予定である。

2018年3月、米国エネルギー省 (DOE) のGen3 CSPで約8千万ドルの予算で、700°C以上で作動するCSP開発の支援を開始した。2030年までにベースロード電源とし0.05 USD/kWhでCSP発電 (12時間以上の蓄熱) を行う技術の開発を目指したものである。熱輸送・蓄熱媒体として新規溶融塩¹⁵⁾ や、気体、固体粒子を用いるシステムの開発を推進した。特に固体粒子によるソーラーレシーバの開発は世界的に一大トレンドとなっており¹⁶⁾、800°C以上の粒子加熱の成功例が報告されている。2021年3月にDOEは、最も有望なものとして、固体粒子による蓄熱システムを選出した²⁸⁾。これによってサンディア国立研究所 (米国) が25百万USドルの支援を受け、数MWのCSPパイロットプラントの試験を行うこととなった。固体粒子を落下させて層流にして太陽集光を直接粒子に照射するソーラーレシーバ (粒子カーテンと呼ばれる) に特徴がある。2021年10月にはDOEが、The Solar Energy Technologies Office Fiscal Year 2021 Photovoltaics and Concentrating Solar-Thermal Power Funding Program (SETO FY21 PV and CSP) により40百万ドルで40プロジェクトを採択、そのうち25プロジェクトがCSP関連で33百万ドルの補助を得ている²⁹⁾。ソーラーレシーバ、ソーラー反応器、蓄熱システム、CSPシステム設計等の研究開発がサポートされる。当該プログラムでは2030年までに太陽エネルギーコストを50%にすることを目的としている。

EUでは、固体粒子を熱輸送・蓄熱媒体とし800°CのCSP運転を可能とする蓄熱システム開発研究プロジェクト、Next-CSP (2016～2021年) について報告がなされている。注目すべきはチューブラー型のソーラーレシーバの開発であり、レシーバ管内部の流動粒子を太陽集光で間接的に加熱する点が特徴である。ソーラータワーで550～850 kWthの太陽集光を照射して試験され、ソーラーレシーバ効率60～74%が得られた。さらに高温粒子と高圧空気 (ガスタービン用) との熱交換器の開発も実施された。これらの研究成果を基に、コンバインドサイクルや超臨界CO₂タービンと組み合わせたケースについて10～20 MW級のプラント設計が報告されている。ドイツ航空宇宙センター (DLR) は、レシーバを高速回転させ、粒子をレシーバ内壁に沿って円周上に流し、太陽集光を粒子に直接照射して加熱するソーラーレシーバを開発、900°C以上の高温粒子をタワー型集光システムで得ることに成功した。このソーラーレシーバのコンセプトにより、EUファンドから1.4百万€を受けてHIFLEXプロジェクト (2019～2023年) を開始している。イタリアでは700°Cで20 MWhの粒子蓄熱を行い、24時間800 kWthの熱供給をバスタ製造工程へ供給する取り組みがなされている。ソーラーレシーバは日中に最大で2.5 MWthの熱を吸収するとしている。

EUのHorizon 2020のSun-to-Liquidプロジェクトにおいて、2段階熱化学サイクルによって水・CO₂を共熱分解して合成ガスを製造、さらにジェット燃料に転換するソーラー実証試験が50 kWthの小規模ながら成功した³⁰⁾。太陽エネルギーから合成ガスの転換効率として4.1% (排熱回収無し) が報告されている。触媒としてセリアを発泡体状に成型した反応デバイスを用いている。セリアよりも高活性の触媒の報告は既に多数あり³¹⁾、それらを利用した反応デバイスを用いればエネルギー効率を格段に向上することが期待できる。

Heliogen社 (米国) はカリフォルニア州ランカスターにAIを活用したタワー型集光システムを建設した。太陽エネルギーを最高温度1500°Cの熱に転換して利用することを目指している。これが経済的に可能となれば、水やCO₂の熱分解サイクルを24時間運転することもでき、水素やメタノール等のソーラー燃料の製造を大きくコストダウンできる。

蓄熱発電 (カルノーバッテリー) あるいは熱電池開発については、Malta Energy社 (米国) が2018年に創業し、溶融塩を用いた顕熱蓄熱による蓄熱発電システムの開発を行っている。さらに2022年にはBrekthrough Energy Venturesの投資ファンドの支援を受け、産業用熱電池開発を行う米国2社 (Antora Energy社とRondo Energy社) が起業している^{22), 32), 33)}。発電利用では500°C以上、セメント、石油化学、鉄鋼業等の産業への熱供給としては1000°C以上をターゲットとした熱電池開発が注目される。Rondo Energy社 (米国) の1500°Cまで蓄熱できる低コストな耐火煉瓦による熱電池²²⁾ はTITANセメントと共同

開発を開始した³³⁾。ノルウェーのEnergy Nest社 (2016年にInfracapitalに買収) がドイツのセメント会社と共同開発した鉄とコンクリートの顕熱蓄熱による熱電池もモジュールシステム化されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

アラブ首長国連邦 (UAE) のNoor Energy 1プロジェクト^{24), 25)} がCSP/PVハイブリッドプラントの約1GWの実用例として注目される。また、モロッコでは、低コストの集光系であるパラボリックトラフ (線集光) からの溶融塩をPV電力による電気炉で565°Cへ再加熱する新型の800 MWCSP/PVプラントの建設が計画されている^{34), 35)}。

高温化に関しては、上記の米国Gen3 CSPプロジェクト、EUのNECT-CSPプロジェクト、DLRで開発された3つのタイプの固体粒子を用いる粒子ソーラーレシーバ及び粒子蓄熱システムの今後の開発が注目される^{28), 30)}。

燃料化に関しては、DLRがスペインのCIEMAT-PSAのタワー型集光システムを用いて700 kWthで発泡体触媒デバイスによる水熱分解水素製造システムを実証試験中である¹⁷⁾。また、新潟大学が開発した流動層型の水熱分解水素製造システムが、オーストラリア再生可能エネルギー庁 (ARENA) から2百万豪ドルの支援を受け、オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO) の集光設備を用いて500 kWthで実証試験が実施されている^{17), 18)}。

蓄熱発電・熱電池に関しては、Malta Energy社の溶融塩を用いた顕熱蓄熱発電システム、Antora Energy社の3000°C以上の高温にも対応する耐熱性、高い伝熱性を持つカーボンブロックによる熱電池³²⁾、Rondo Energy社とTITANセメントの耐火煉瓦による熱電池^{22), 33)} の開発が注目される。

(5) 科学技術的課題

蓄熱システムの低コスト・高温化に関しては、潜熱蓄熱や化学蓄熱の導入が大きなブレイクスルーとなる。潜熱蓄熱では溶融塩相変化材料 (PCM) カプセルや合金系の開発、化学蓄熱では、これまで十分な知見のある炭酸塩・水酸化物系の蓄熱材をCSPプラントに組み込むシステムの実証試験が必要である。長期的には、さらに高温 (900~1500°C) で作動する金属酸化物酸化還元系による蓄熱システムの開発が重要である。ここで、化学蓄熱の反応の応答性も課題となる。

超臨界CO₂タービンの導入が重要課題であり、それには700°Cで作動する熱媒体、蓄熱システムの開発が必要である。熱輸送・蓄熱媒体として塩化物系溶融塩や金属Naが有望だが、防食技術の開発が課題である。800°C以上の熱輸送・蓄熱媒体としては固体粒子 (金属酸化物等) が有望である。太陽集光で800°C以上に粒子加熱するソーラーレシーバ開発には成功しているが、粒子循環システム、熱交換器の開発が課題である。

長期的には、水・CO₂熱分解サイクルによるソーラー燃料製造が注目される。特に空気中からCO₂回収する技術開発と連携し、ソーラーメタノール、ジェット燃料の製造を目指す研究開発が重要である。ここでは、ソーラー反応システムの大型化と、効率向上の両立が課題である。また、熱分解プラントの24時間運転がコスト低下に大きく寄与する。これには1000~1500°Cの経済的な太陽熱蓄熱技術開発がブレイクスルーとなる。蓄熱発電・熱電池に関しては、500~1500°Cで作動する大型システムの開発が重要であるが、最もコスト高な部分は電熱変換である。電熱変換を低コスト化する新技術を実現し、蓄熱部の大幅なコストダウンも達成しなくてはならない。

(6) その他の課題

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。SolarPACESは国際エネルギー機関IEAの実施協定であり、国単位での参加が必要である。現在、SolarPACESには20カ国が参加しており、参加国間で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などの弊害がある。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●愛知製鋼、新潟大学、北海道大学、宮崎大学、東京工業大学が、水酸化カルシウム系¹²⁾、炭酸塩系、金属酸化物酸化還元系の化学蓄熱、熔融塩、合金系の潜熱蓄熱、塩化物熔融塩系、固体粒子の顕熱蓄熱による蓄熱システムや熱媒の開発を行い、CSPの低コスト化、高温高効率化を目指している。また、IHI、新潟大学が太陽熱による燃料製造システムの開発を行っている。新潟大学は連携企業と水熱分解水素製造システムを開発しており、流動層反応器によるシステムは豪州再生可能エネルギー庁の補助で、CSIROと連携して豪州において500kWthで実証試験される^{17)、18)}。研究用の太陽集光設備として三鷹光器が設計した楕円2次反射鏡による新型の100kWthビームダウン型集光システムが宮崎大学に設置されている。
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> ●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、海外で評価した。三鷹光器が設計した楕円2次反射鏡による新型の300kWthビームダウン型集光システムが、NEDOのプロジェクトで長野県富士見町に建設された。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●DOEが2018年3月からGen3 CSPで約8千万ドルの予算でCSPプロジェクトを支援。NREL、Sandia国立研究所、Brayton Energy等の13の国研、大学、企業が参加、700°C以上のCSPシステムの開発を目指した。熱媒体は熔融塩、固体粒子、気体の3種類を並行して研究された。2021年3月に米DOEは、最も有望なものとして、固体粒子による蓄熱システムを選出した²⁸⁾。 ●2021年10月に、DOEが、The Solar Energy Technologies Office Fiscal Year 2021 Photovoltaics and Concentrating Solar-Thermal Power Funding Program (SETO FY21 PV and CSP)により40百万ドルで40プロジェクトを採択、そのうち25プロジェクトがCSP関連で33百万ドルの補助を得ている²⁹⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●国内に1.7 GWのCSPを有しているが、現在、新規建設のプロジェクトはない。 ●大型の新技术開発としては、Gen3 CSPのプロジェクトの第3フェーズにおいて、ダウンセレクトされた固体粒子蓄熱システムによるCSPが大型実証試験される。すなわちサンディア国立研究所がDOEから25百万USドルの支援を受け、数MWのCSPプラントの試験を行う²⁸⁾。 ●2020年には世界のCSP開発を牽引してきた企業の一つ、Solar Reserve社の資産が整理・売却された。同社が計画していたオーストラリアのAuroraプロジェクトは豪Vast Solar社等へ引き継がれた²⁷⁾。一方、南アフリカのRedstoneプロジェクト(南ア最大の再生可能エネルギー投資)は、サウジアラビアのACWA Power社が米Brightsource Energy社から反射鏡とその制御、CMI社(現在のJohn Cockerill社)からソーラーレシーバに関する技術提供を受けて、建設を開始した(2023年運転予定)³⁶⁾。 ●Heliogen社が太陽集光システム・熱電池の開発に大きく支援・投資を開始。米カリフォルニア州ランカスターにAIを活用したタワー型集光システムを建設。太陽エネルギーを1000°C以上の熱に転換して利用することを目的として、最高温度1500°Cを目指している。 ●蓄熱発電(カルノーバッテリー)・熱電池については、米Malta Energy社が2018年に創業し、熔融塩を用いた潜熱蓄熱発電システムの開発を行っている。2022年にはBrekthrough Energy Venturesの投資ファンドの支援を受け、産業用熱電池開発を行うAntora EnergyとRondo Energyが起業し^{22)、32)}、1000°C以上の熱電池開発を開始した。Rondo Energy社とTITANセメントの耐火煉瓦による熱電池の共同開発を開始している³⁴⁾。

2.1
電力のゼロエミ化・安定化

2.1 電力のゼロエミ化・安定化

欧州	基礎研究	◎	↗	<p>【EU】 大型集光設備を有する独、仏、スペインが研究開発プロジェクトの中核を担っている。Horizon 2020では下記を含む16プロジェクトが行われた。</p> <ul style="list-style-type: none"> ●NEXT-CSP：固体粒子を熱輸送・蓄熱媒体とし800°Cの運転を可能とするシステムを開発。 ●Socreates：炭酸カルシウムによる800°C以上の太陽熱流動層化学蓄熱システムを開発¹¹⁾。 ●Sun to Liquid：金属酸化物酸化還元系による熱化学サイクルを用い、太陽集熱でCO₂と水から合成ガスを製造し、さらにジェット燃料に転換するCCUプロジェクトが50 kWthで成功³¹⁾。 <p>【ドイツ】 ●ドイツはEUの中でCSPに関する最先端技術開発の中心的存在。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。DLRが1.5 MWthの集光設備を持ち、EUでの大型実証サイトの一つとなっている。</p> <p>【フランス】 ●国立研究機関であるCNRSのPROMES研究ユニットが1 MWth太陽炉と5 MWthタワー型集光システムを持ち、研究開発の中心的役割をしている。太陽熱による燃料製造の研究も活発であり、メタンから水素と、カーボンナノチューブやC2炭化水素を合成するソーラー反応器開発を日本のIHIと共同開発している。CSP-NEXTプロジェクトの固体粒子を使用するチューブラー型レシーバによる蓄熱システムの開発ではスペインと共に中心的役割を担った。高温のコンバインドサイクルを利用する小型CSPの開発プロジェクトを行った（POLYPHEMプロジェクト³⁷⁾。</p> <p>【スペイン】 ●国研であるCIEMAT-PSA、CENER、またマドリードのIMDEA Energy公立研究所、並びに各大学、民間研究機関で活発に研究が行われている。CIEMAT-PSAやIMDEA Energyは大型の太陽集光設備を持ち、EUの大型の実証試験サイトになっている。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。IMDEA EnergyはCSP-NEXTプロジェクトの固体粒子を使用するレシーバによる蓄熱システムに関する研究ではフランスCNRSと共に中心的役割を担った。太陽熱利用燃料製造ではSun to Liquidプロジェクトで小型のパイロットプラントの実証試験をIMDEA Energyが行った³⁰⁾。</p> <p>【スイス】 ●スイス連邦工科大学チューリッヒ校（ETH）がセリア発泡体デバイスによる水熱分解ソーラー反応器のコンセプトを提案し、ラボサイズの試験を成功させた³⁰⁾。</p> <p>【英国】 ●英国では太陽熱発電に関する研究は一部の大学、企業を除き行われていない。Calix社は上記Socreatesプロジェクトに参加¹¹⁾。</p>
	応用研究・開発	◎	→	<p>【EU】 ●欧州にはスペインのAbengoa Solar、SENER、Acciona SA、フランスのCUNCINM、Energie SA等、CSPのメインプレイヤーとなる企業がある。スイスのSynhelion社（スイス連邦工科大学チューリッヒ校が設立）は太陽集熱による水・CO₂熱分解により製造したジェット燃料を推進している³⁸⁾。</p> <p>【ドイツ】 ●ドイツのDLRが中心的役割を担い、企業およびスペイン等との国際連携の下、空気を熱媒媒体とするオープンソーラーレシーバ、低コストヘリオスタット（反射鏡）、太陽熱で駆動するソーラーガスタービン用レシーバの開発等、多岐にわたる研究開発を行っている。DLR独自の方式による固体粒子ソーラーレシーバの開発も行い、タワー型集光システムで500 kWthの実証試験を行った。セラミック粒子を900°C以上に加熱することに成功し、製品化を行っている³⁹⁾。続く、EUファンド1.4百万€によるHIFLEXプロジェクト（2019～2023年）では、700°Cで20 MWhの蓄熱を行い、800 kWthの24時間の熱供給を行う⁴⁰⁾。</p>

				<p>【イタリア】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●上記のHIFLEXプロジェクト（2019～2023年）では南イタリアのパスタメーカー Barilla社が実証サイトを提供している。同社はパスタの製造過程への太陽熱利用が目的である。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●世界最初のリニアフレネル集光システムによる蓄熱付き9 MW CSPプラントをフランス国内で2019年から運転を開始した（eLLO Solar Thermal Project CSP Project）⁴¹⁾。運転はフランスのCUNCNIM社が行っている。 <p>【スペイン】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●スペインが2.3 GWのCSPを有しており、2021年においては世界でも導入量が大きい。南スペインのSolgest-1プロジェクトにおいて、110 MWのCSP（6時間の蓄熱付き）+ 40 MW PVの建設計画がSENER社によって進行中である⁴²⁾。Abengoa Solar、SENER、Acciona SA等のスペイン企業がCSPを運転するプラントレベルの高効率化や低コスト化を実施すると共に、国研のCIEMAT等との共同研究開発を行っている。 <p>【ギリシャ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●クレタ島に中国企業による52 MWCSPの建設計画がある（MINOSプロジェクト）³⁾。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●特になし
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●中国科学院が中心となって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"> ●現在のCSP導入量は520 MWであるが、2022年に1.1 GW（2024年に完成予定）と1.3 GWのプラント建設を発表した²⁾。これらを合わせると中国の導入量は3 GWに達し、導入量の大きかったスペイン（2.3 GW）、USA（1.7 GW）を凌ぐ。トラフ型、タワー型からリニアフレネルまで様々な集光系によるCSPプラントの多数建設している。ビームダウン集光システムによる熔融塩蓄熱型の50 MW CSPなど世界初の試みのプラントもある。 ●海外（UAE等）でも、これまでの米国・欧州の企業に替わって、Shanghai Electric社等の中国系企業が大型CSPプロジェクトの建設を行うケースが増えてきている。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●国研の韓国エネルギー技術研究院（KIER）が小型太陽炉と1 MW級のタワー型太陽集光器を持ち、開発の中心的役割を果たしている。近年は中国のプロジェクトに参加する機会が多い。金属酸化物の酸化還元系を利用した水熱分解による水素製造では日本の新潟大学と共同研究を行っている。
	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の200 kW CSPを実証試験したが、ドイツDLRの開発したシステムと同型のものであった。
その他の国・地域	基礎研究	◎	↗	<p>【豪州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ASTRI（Australian Solar Thermal Research Institute）とよばれる研究組織を作り、国研CSIROを主軸に、多くの大学、企業と総合的な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CO₂タービンの研究等。CSIROは豪州再生可能エネルギー庁（ARENA）の補助で新潟大学が開発した水熱分解水素製造システムを500 kWthで実証試験する^{17), 18)}。また、アデレード大学が中心となり、太陽熱をアルミナの製造工程の産業熱に利用するプロジェクト（ARENA）も行われている。 <p>【サウジアラビア】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●King Saud大学が砂を使った固体粒子ソーラーレシーバによる1000°Cの蓄熱システムを研究開発している。

	応用研究・開発	◎	↗	<p>【豪州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●豪州 Vast Solar 社の低密度・高熱伝導率の金属 Na を熱輸送媒体として使用した CSP が、1.1 MW プラントの小規模ながら 2018～2020 年のデモ期間、安全に運転することに成功している²⁶⁾。同社は複数の小型タワー集光器によるモジュラー型マルチタワー方式を推進、豪 1414 Degrees 社（蓄エネルギーのエキスパート）と、南オーストラリアに PV + CSP + バッテリーによるプラント建設（Aurora プロジェクト）を開始する²⁷⁾。Vast Solar 社の最終的な計画は 150 MW のモジュラー型マルチタワー CSP の建設であり、まずは 30 MW CSP の建設から開始し、これを 2025 年にオンラインする予定である。 <p>【南アフリカ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●500 MW の CSP を導入している。さらに 200 MW の建設計画がある。 <p>【UAE】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●700 MW の CSP が建設中であり、さらに Noor Energy 1 プロジェクト^{24), 25)} において約 1 GW の世界最大の CSP/PV ハイブリッドプラントが建設される。 <p>【モロッコ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●530 MW の CSP が導入されている。低コスト集光系であるパラボリックトラフ（線集光）と PV 電力による電気炉で熔融塩を加熱する新型の 800 MW CSP/PV プラントの建設計画がある^{33), 34)}。 <p>【チリ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●2021 年に太陽光発電とのハイブリッドプラント、110 MW CSP（17.5 時間蓄熱）+ 100 MW PV が運転を開始した。 <p>【イスラエル】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●2019 年に 242 MW の CSP を導入している。 <p>【インド】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●200 MW の CSP を導入している。
--	---------	---	---	--

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている

○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・太陽光発電（環境・エネ分野 2.1.3）
- ・産業熱利用（環境・エネ分野 2.2.4）

参考・引用文献

- 1) SolarPACES, “CSP Projects Around the World,” <https://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 2) Susan Kraemer, “China Announces Another 1.3 GW of CSP with 12,000 MWh of Thermal Storage,” SolarPACES, <https://www.solarpaces.org/china-announces-another-1-3-gw-of-csp-with-12000-mwh-of-thermal-storage/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 3) German Aerospace Center (DLR), “Solar thermal power plants: Heat, electricity and fuels from concentrated solar power,” SolarPACES , https://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/Study_Solar_thermal_power_plants_DLR_2021-05.pdf, (2023年1月19日アクセス) .
- 4) Susan Kraemer, “Paper Shows How Dispatchable CSP Can Solve the EU Gas Crisis,”

- SolarPACES, <https://www.solarpaces.org/paper-shows-how-dispatchable-csp-can-solve-eu-gas-crisis/>, (2023年1月21日アクセス) .
- 5) HELIOSCSP, “DEWA announces winning tender for world’s largest solar project,” <https://helioscsp.com/dewa-announces-winning-tender-for-worlds-largest-solar-project/>, (2023年1月19日アクセス) .
 - 6) Susan Kraemer, “All MENA CSP Now 7 Cents or Under Says ACWA Power,” SolarPACES, <https://www.solarpaces.org/csp-likely-7-cents-says-acwa-power/>, (2023年1月19日アクセス) .
 - 7) Susan Kraemer, “SolarReserve Bids CSP Under 5 Cents in Chilean Auction,” SolarPACES, <http://www.solarpaces.org/solarreserve-bids-csp-5-cents-chilean-auction/>, (2023年1月19日アクセス) .
 - 8) National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Concentrating Solar Power,” Annual Technology Baseline, https://atb.nrel.gov/electricity/2021/concentrating_solar_power, (2023年1月19日アクセス) .
 - 9) Christian Odenthal, et al., “Experimental and numerical investigation of a 4 MWh high temperature molten salt thermochemical storage system with filler,” *AIP Conference Proceedings* 2303, no. 1 (2020) : 190025., <https://doi.org/10.1063/5.0028494>.
 - 10) 児玉竜也他「太陽熱発電のための高温の顕熱・潜熱蓄熱術」『太陽エネルギー』43 巻 5 号 (2017) : 27-38.
 - 11) European Commission, “SOLAR Calcium-looping integRation for Thermo-Chemical Energy Storage,” Community Research and Development Information Service (CORDIS), <https://cordis.europa.eu/project/id/727348>, (2023年1月19日アクセス) .
 - 12) Hiroshi Kamiya, et al., “Development and factory verification of the high-energy density thermochemical storage system,” *AIP Conference Proceedings* 2303, no. 1 (2020) : 190020., <https://doi.org/10.1063/5.0029498>.
 - 13) Reiner Buck, et al., “Techno-economic analysis of thermochemical storage for CSP systems,” *AIP Conference Proceedings* 2303, no. 1 (2020) : 200002., <https://doi.org/10.1063/5.0028904>.
 - 14) Vast Solar, “Projects,” <https://vast solar.com/projects>, (2023年1月19日アクセス) .
 - 15) Samuel H. Gage and Craig S. Turchi, “Internal insulation and corrosion control of molten chloride storage tanks,” *AIP Conference Proceedings* 2303, no. 1 (2020) : 190010., <https://doi.org/10.1063/5.0030959>.
 - 16) Clifford K. Ho, “A review of high-temperature particle receivers for concentrating solar power,” *Applied Thermal Engineering* 109, Part B (2016) : 958-969., <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.103>.
 - 17) 児玉竜也「高温太陽集熱を利用した水素製造技術の研究開発動向と将来展望」3 章 3 節『水素の製造・輸送・貯蔵技術と材料開発事例集』技術情報協会 編 (東京: 技術情報協会, 2019), 72-79.
 - 18) 児玉竜也「革新的CCU技術—太陽熱利用水・二酸化炭素分解技術」『日本エネルギー学会機関誌えねるみくす』99 巻 4 号 (2020) : 379-387., https://doi.org/10.20550/jieenermix.99.4_379.
 - 19) Amanda L. Hoskins, et al., “Continuous on-sun solar thermochemical hydrogen production via an isothermal redox cycle,” *Applied Energy* 249 (2019) : 368-376., <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.169>.
 - 20) Zhiwen Ma, Patrick Davenport and Genevieve Saur, “System and techno-economic analysis of solar thermochemical hydrogen production,” *Renewable Energy* 190 (2022) : 294-308., <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.108>.

- 21) Alejandro Pérez, et al., “Hydrogen production by thermochemical water splitting with $\text{La}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{MeO}_{3-\delta}$ (Me= Fe, Co, Ni and Cu) perovskites prepared under controlled pH,” *Catalysis Today* 390-391 (2022) : 22-33., <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.12.014>.
- 22) Susan Kraemer, “Bill Gates-funded startup Rondo turns Solar or Wind into Heat,” SolarPACES, <https://www.solarpaces.org/bill-gates-funded-startup-rondo-turns-solar-or-wind-into-heat/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 23) National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Atacama I / Cerro Dominador 110MW CSP + 100 MW PV CSP Project,” Concentrating Solar Power Projects, <https://solarpaces.nrel.gov/project/atacama-i-cerro-dominador-110mw-csp-100-mw-pv>, (2023年1月19日アクセス) .
- 24) SolarPACES, “Thermal Storage Test Milestone at 700 MW DEWA CSP Plant,” <https://www.solarpaces.org/shanghai-electric-announces-thermal-storage-testing-milestone-at-the-700-mw-dewa-csp/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 25) National Renewable Energy Laboratory (NREL), “CSP-PV hybrid project Noor Energy 1 / DEWA IV CSP Project,” Concentrating Solar Power Projects, <https://solarpaces.nrel.gov/project/csp-pv-hybrid-project-noor-energy-1-dewa-iv-0>, (2023年1月19日アクセス) .
- 26) Vast Solar, “Jemalong CSP Pilot Plant - 1.1MWe,” <https://vast solar.com/portfolio-items/jemalong-solar-station-pilot-1-1mwe/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 27) David Carroll, “Vast Solar teams with 14D on Aurora solar plus storage project,” pv magazine Australia, <https://www.pv-magazine-australia.com/2022/06/16/vast-solar-teams-with-14d-on-aurora-solar-plus-storage-project/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 28) Solar Energy Technologies Office, “Generatoin 3 Concentrating Solar Power Sysem (Gen3 CSP),” Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, <https://www.energy.gov/eere/solar/generation-3-concentrating-solar-power-systems-gen3-csp>, (2023年1月19日アクセス) .
- 29) SolarPACES, “These 25 Advanced CSP & CST Technologies to Share \$33 Million US DOE Funding,” <https://www.solarpaces.org/these-25-advanced-csp-cst-technologies-to-share-33-million-us-doe-funding/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 30) Stefan Zoller, et al., “A solar tower fuel plant for the thermochemical production of kerosene from H_2O and CO_2 ,” *Joule* 6, no. 7 (2022) : 1606-1616., <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.012>.
- 31) Shang Zhai, et al., “The use of poly-cation oxides to lower the temperature of two-step thermochemical water splitting,” *Energy & Environmental Science* 11, no. 8 (2018) : 2172-2178., <https://doi.org/10.1039/c8ee00050f>.
- 32) Andrew Ponec, “Turning sunshine and wind into 24/7 industrial heat and power — cheaper than fossil fuels,” Antora Energy, <https://medium.com/antora-energy/turning-sunshine-and-wind-into-24-7-industrial-heat-and-power-cheaper-than-fossil-fuels-69355cdcde04>, (2023年1月19日アクセス) .
- 33) SolarPACES, “Rondo’s Thermal Storage to Decarbonize TITAN Cement,” <https://www.solarpaces.org/rondos-thermal-storage-to-decarbonize-titan-cement/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 34) Susan Kraemer, “Morocco Pioneers PV with Thermal Storage at 800 MW Midelt CSP Project,” SolarPACES, <https://www.solarpaces.org/morocco-pioneers-pv-to-thermal-storage-at-800-mw-midelt-csp-project/>, (2023年1月19日アクセス) .

- 35) TSK Electrónica y Electricidad, S.A. (TSK), “NOOR Midelt 800 MW Hybrid Solar Power Plant,” <https://www.grupotsk.com/en/proyecto/noor-midelt-800-mw-hybrid-solar-power-plant/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 36) SolarPACES, “ACWA Power’s Redstone CSP Draws Down Debt in 9th Month of Construction,” <https://www.solarpaces.org/acwa-powers-redstone-csp-draws-down-debt-in-9th-month-of-construction/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 37) POLYPHEM, “THE POLYPHEM PROJECT: SMALL-SCALE SOLAR THERMAL COMBINED CYCLE,” <https://www.polyphem-project.eu/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 38) Susan Kraemer, “How hot solar aviation fuel (thermochemistry heated by solar mirrors) taken off,” SolarPACES, <https://www.solarpaces.org/how-hot-solar-aviation-fuel-from-h2o-and-co2-has-taken-off/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 39) Susan Kraemer, “HelioHeat Commercializes the DLR 1000° C Solar Receiver CentRec®,” SolarPACES, <https://www.solarpaces.org/helioheat-commercializes-the-dlr-1000c-solar-receiver-centrec/>, (2023年1月19日アクセス) .
- 40) European Commission, “High storage density solar power plant for FLEXible energy systems,” Community Research and Development Information Service (CORDIS), <https://cordis.europa.eu/project/id/857768>, (2023年1月19日アクセス) .
- 41) SUNCNIM, “eLLO: the world’s first Fresnel thermodynamic power plant with an energy-storage capacity,” <https://www.suncnim.com/en/ello-worlds-first-fresnel-thermodynamic-power-plant-energy-storage-capacity>, (2023年1月19日アクセス) .
- 42) SENER, “SENER launches Solgest-1, the first hybrid concentrated solar power with storage and photovoltaic plant in Spain,” <https://www.evwind.es/2021/11/18/sener-launches-solgest-1-the-first-hybrid-concentrated-solar-power-with-storage-and-photovoltaic-plant-in-spain/83320>, (2023年1月19日アクセス) .