

2.1.4 電解・燃料電池

（1）研究開発領域の定義

電気エネルギーを入力として物質を得る電解技術および化学エネルギーを入力として電気エネルギーを得る燃料電池に関する研究開発領域である。再生可能エネルギー電力の利用促進を背景として急速に研究開発が進展している。電解による水素・アンモニア・有機ハイドライドなどのエネルギーキャリア製造や、CO₂を原料とする燃料・化成品、それらの高効率利用を可能にする燃料電池のための電極触媒、膜材料、デバイス技術などの研究開発課題がある。

（2）キーワード

エネルギーキャリア、再生可能エネルギー、アルカリ水電解、PEM型水電解、PEM型燃料電池、アニオン交換膜型水電解、アニオン交換膜型燃料電池、有機電解合成、人工光合成、CO₂電解、アンモニア・有機ハイドライド電解合成、固体酸化物型燃料電池

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

風力や太陽光などの再生可能エネルギーからの電気は、中東や北アフリカでは日本の電気代の10分の1の2セント/kWhを下回る価格で取引されるように世界的に低価格化が進んでおり、地球温暖化の解決のためにも大規模な利用が期待されている。一方で、再生可能エネルギーは広く薄く分布し、さらに生産と消費の過程で場所と時間のミスマッチがあり、大量に導入するにはそのまま電力として利用する以外に、水素などの他の物質に変換し、貯蔵・輸送する必要がある。

再生可能エネルギーを直接利用して物質変換する技術として、水電解による水素製造、光触媒による水素製造（人工光合成）などのグリーン水素製造技術が挙げられる。グリーン水素が生産されれば、高圧水素、液体水素以外に、水素を利用した反応によるアンモニア、有機ハイドライド、ギ酸などのエネルギーキャリアに変換し、水素エネルギーの貯蔵・輸送を行うことも考えられる。また、水素との反応により二酸化炭素を還元し、アルコール、エチレンを合成し、化学原料として利用することもカーボンニュートラル社会のための重要な技術となる。さらに、水素は鉄・セメント・ガラス製造等のマテリアル製造における低炭素化技術としての利用も期待されており、CO₂排出量削減の切り札と考えられている。

他に、再生可能エネルギーを直接利用する物質変換には、電気化学反応による二酸化炭素の還元、アンモニアおよび有機ハイドライドの製造も挙げられる。これらは水素を介さずに、再生可能エネルギーからの電気を直接利用し、電気化学反応により有用物質を製造する技術である。

また、エネルギーキャリアや燃料を高効率で利用するための燃料電池技術については、技術革新はもとより社会実装の迅速な推進が不可欠となっている。

〔研究開発の動向〕

近年再生可能エネルギーからの電気を利用する水電解による水素製造および化学品製造のための電解技術が注目されている。特に、再生可能エネルギーを用いる水電解で生産される水素はグリーン水素と呼ばれ、地球温暖化抑制のためだけでなくエネルギー安全保障の観点からも、各国で大きなプロジェクトが次々と立ち上がっている。さらにウクライナ危機を受け、ロシア産の天然ガスおよび原油からのエネルギー供給からの切替として、グリーン水素製造は欧州諸国での大型プロジェクトの立案が加速している。

日本は2017年12月に世界で初めての水素基本戦略を策定したが、EUおよび欧州諸国を筆頭に各国が2020年以降、次々と水素に関わる戦略を策定しており、欧州諸国における再エネ水素の導入目標規模は日本に比べてかなり大きい。このような背景を受け、日本は2023年6月に水素基本戦略を改定した。本改定では、

2040年までの水素導入量の拡大や、水電解・燃料電池などの戦略分野における研究開発の強化が示されている。

水電解には、常温から80℃程度の低温で運転するアルカリ水電解、固体高分子型（PEM型）水電解、アニオン交換膜型（AEM型）水電解、および500℃以上の高温で運転する高温水蒸気電解の4種類がある。電解セルはいずれも、多孔性のカソード極、アノード極と両極に挟まれる隔膜の構成となっている。

アルカリ水溶液を供給し電解を行うアルカリ水電解は、古くから研究されている電解法であり、最も大型の水電解装置の実証が進んでいる水電解方式である。隔膜には有機無機複合体の多孔膜を使用することが多く、電極間に存在するアルカリ水溶液の液体がイオン伝導を担うため、生成する水素と酸素の混合を避けるために電極間距離を確保しなければならず、それによる抵抗損失が大きくなるという課題がある。イオン伝導を速くするため、供給水溶液中のアルカリ水溶液（典型的にはKOH）濃度を6～8Mの高アルカリ濃度域まで高めることが多く、高アルカリ環境における周辺部材の腐食防止も検討されている。電極触媒としては、ニッケル系の触媒が利用されることが多い。多孔性の触媒層の細孔中で酸素または水素ガスがたまってしまうと、水が触媒表面に接触できず反応が阻害され効率が落ちてしまう。特に高電流密度領域でのガスの抜けは課題となっている。また、出力が大きく変動する再生可能エネルギーからの電力では、変動に対する追従も課題となっている。大きな出力変動に対する電極および電極触媒の安定性、漏洩電流、逆電流などが問題となる。

固体高分子型水電解は、燃料電池自動車などに利用される固体高分子型燃料電池に似ており、隔膜としてパーフルオロスルホン酸膜が用いられることが多い。隔膜を通るイオンはプロトンであり、環境は酸性となる。酸性環境では多くの金属は溶解してしまうため、貴金属を使用しなければならない。カソード触媒としては白金系触媒が用いられ、アノード触媒としてはイリジウム系触媒が用いられる。また、燃料電池ではセパレータや集電体にカーボンが用いられるが、カーボンは水電解で使用される1.2V以上の電圧で水または水蒸気と接すると腐食してしまうため使用できない。酸環境であるため通常の金属も使用できなく、代わりにチタン多孔体の表面を白金加工した材料が用いられ、多量の貴金属が必要となる。ポリマーを用いる固体高分子型水電解では、隔膜を薄膜化できるためIR損失が小さく、高い効率が得られ、出力変動への追従も容易となる。また、供給液に純水を利用することができ、さらに、隔膜がガスの透過を抑制できるため、水素を高圧にする事も可能である。使用貴金属量の低減と電極触媒に利用するイリジウムの溶解抑制が喫緊の課題である。高電流領域まで使用できるため、特に多孔電極内でのガスの抜けも重要となる。大型化への対応も今後の課題である。

アニオン交換膜型水電解は、アニオン交換膜を隔膜として利用しOH⁻イオンが伝導することにより水を電解する方法であり、上記の固体高分子型水電解と異なり環境がアルカリ性となるため、卑金属を含めほとんどの金属が使用可能となる。耐久性の高いアニオン交換膜が存在しないために研究は進んでこなかったが、最近になって、耐久性の高いアニオン交換膜が開発され、水電解への応用が注目されている。電解質膜として高分子薄膜が使用できるので、ガス透過を抑制しながら薄膜の利用が可能である。電極触媒、セパレータや集電体にニッケルなどの卑金属が使用できる。アルカリ水電解と同様に、特に、ニッケル系の触媒が使われることが多い。現状では電解液としてKOH水溶液やK₂CO₃水溶液を供給するケースが多いが、純水供給による水電解に成功している例もある。新しい技術であり、その安定性や効率化に関しては研究が始まったばかりである。高い耐久性が実証されれば、アルカリ水電解のように卑金属が使用でき、固体高分子型水電解のように薄膜使用による高効率化、高圧化、変動出力対応ができ、両方の利点を備えた電解技術となる。また、アニオン交換型システムは燃料電池においても革新性の高い技術であり、電解技術と並行して電極材料や膜材料などの研究開発がさかんに進んでいる。

高温水蒸気電解は固体酸化物型電解セル（SOEC）を用いた電解方式であり、固体酸化物型燃料電池（SOFC）の逆反応である。500℃以上の高温運転のため近くに熱の供給源が必要となり、発電所の近くなどの高温排熱源の近くでの運転が想定される技術である。イットリウム安定化ジルコニア無機固体電解質を隔膜として用いO²⁻イオンを伝導させる場合は700℃以上、セラミックスプロトン伝導体を用いる場合でも

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

500℃以上の高温での運転が必要であるが、高温では水電解のギブスエネルギー変化が小さくなり電解電圧を下げられるので、高温熱源が供給できるサイトであれば低温型よりも効率的になる。高温熱源の供給以外に、各過電圧の低減に伴う効率化、シール性能の向上、セラミックスを用いるため温度・圧力変化による割れや耐久性など長時間運転や大型化への課題がある。

再生可能エネルギーからの電気化学プロセスを利用したCO₂還元も研究されている。CO₂電解還元では、CO、ギ酸、エチレン等のC₂以上化合物など多様な化合物が生成しうる。特に基礎化学品であるエチレンなどのC₂以上化合物の直接合成が注目されている。銅系の触媒が使用されることが多いが、反応選択性向上に向けた電極触媒の検討が中心的な課題である。反応の高速化（高電流密度化）を促進するための電極構造設計やリアクター開発も活発化している。薄膜を用いた電解合成も報告されるようになってきている。また、システム全体としてのLCA評価に対する重要性の認識も高まっている。

再生可能エネルギーからの電気化学プロセスを利用したアンモニア、有機ヒドライドなどの水素キャリアの直接合成も報告されている。固体高分子型水電解と共通のシステムを用いたトルエンからの有機ヒドライドであるメチルシクロヘキサンの合成は、ある程度の規模の実証にも成功している。中・高温領域で行う窒素からのアンモニアの電解直接合成も研究が進展している。

本領域の論文・特許動向について示す。論文数は増加しており、そのうち中国の増加が特に顕著である。日本の論文数はほぼ横ばいであるが、近年微減の傾向である。電解と燃料電池を個別にみると、電解関連はすべての国で論文数が増加しているが、燃料電池関連では中国・インド以外は横ばいか微減の傾向にある。特許ファミリー件数およびPatent.Asset.Indexのシェアは、2010年代後半まで日本が世界1位であったが、前者は2020年、後者は2021年に中国に逆転されている。（詳細は「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向（2024年）」を参照）

（4）注目動向

〔新展開・技術トピックス〕

アルカリ水電解では、大型化および長期運転、出力変動運転に伴う耐久性の向上が研究されている。さらに、アルカリ水電解を高圧力で運転し加圧水素を得る高圧水電解法も今後の注目技術であり、高圧水素が必要となる場合に有効な手段となる。最近ではポリベンズイミダゾールなどのポリマー膜を隔膜に用い、ゼロギャップのアルカリ水電解も提案され、高い変換効率を達成している。実用的な耐久性に関しては今後の検討課題である。

固体高分子型水電解では、最近、パーフルオロスルホン酸膜よりもガス透過性が低い炭化水素系の隔膜も開発され、高効率および水素の高圧化が達成されている。電解質膜の開発だけでなく、耐久性を向上させるための触媒開発や大型セルの開発も重要となっている。また固体高分子型燃料電池はすでに実用化されているが、現在は特に大型モビリティ用途向けの研究開発が進展している。国内では燃料電池技術開発ロードマップにもとづき、非白金系触媒、単原子触媒などの電極開発や分解を抑制する電解質開発が進展している。

アニオン交換膜型水電解は新しい技術であり、アニオン交換膜の分解機構が明らかとなり、主鎖骨格にエーテルを含まない高耐久芳香族系アニオン交換膜が主流になると思われる。高耐久なアニオン交換膜の開発は今後も重要であり、電解セル内での劣化挙動をメカニズムベースで理解したうえでの材料設計が求められる。また、電極触媒には様々な卑金属が使用可能となり、ニッケル、モリブデン、鉄など、様々な高性能触媒が次々と報告されている。電極触媒となる金属の候補が多く、マテリアルズ・インフォマティクス技術を活用し、最適な触媒を短期間に設計する研究も重要となっている。

CO₂電解では、電極触媒開発、高効率化をめざしたリアクター開発、バイオシステムとのハイブリッド化が進展している。

触媒開発では、C₂以上化合物への触媒反応の実績を示す銅系材料を中心として、ナノ構造の精密制御を行った触媒やZnやAl等と合金化した触媒の検討が進んでいる。一方で、非常に長い歴史を持つ銅系触媒の

研究開発であるが、触媒作用原理は十分に明らかではなく、オペランド分光等や計算科学的手法を用いた研究が活発化している。最近さらなる高付加価値化をめざし、NiP系材料においてフランジオール（C4化合物）が一段階で得られることが見出されている。

一方で、銅系触媒の反応選択性やエネルギー変換効率はこの数十年間大きく改善はしていないため、電解セルやプロセスに着目した研究が進む。例えば、2段階カスケード方式によって、CO₂/CO変換、CO/C₂+変換を組み合わせることによって、1段階プロセスよりも高いエネルギー効率が得られている。

高付加価値化の方向性として、バイオシステムとのハイブリッド化が進んでいる。微生物が生育のための基質として利用可能な有機物をCO₂電解で合成し、その後段にバイオ発酵リアクターを接続する方式が関心を集めている。バイオシステムでは少量・高付加価値品を製造することで経済合理性を確保して、社会実装を早めることが期待されている。近年になり、Siemens社とEvonik社が共同で、CO₂/COの電気化学変換とバイオ発酵工程とを組み合わせるブタノールおよびヘキサノールを合成した。また、中国の研究グループがCO₂電解で得た酢酸を遺伝子改変した酵母の培養リアクターへと送り、糖を最終生成物として得ることに成功している。また米国の研究グループは、CO₂電解で得た酢酸をもとにバイオマスを得ている。これらの報告は、CO₂電解の最終生成物を従来の燃料・化成品原料用途から食料応用へと拡大させた点で関心を集めている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

世界の動向としては、燃料電池技術から水電解などのグリーン水素、低炭素水素やその応用全体に研究開発がシフトしている。

[日本]

燃料電池の共通課題、先端技術、多用途活用を目指すプロジェクトであるNEDO「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」が進められている。本プロジェクトには水電解などの水素関連技術も一部含まれる。

また、水電解、大規模水素利用、発電共通基盤、エネルギーキャリア、その他の水素製造技術を開発するNEDO「水素利用等先導研究開発事業」が実施されているが、本プロジェクトは2022年度に終了した。さらにNEDO「グリーンイノベーション基金事業」によって、エネルギーキャリア、水素燃焼、水電解などの実証事業が進んでいる。また、JSTでは2023年度よりGteX事業を開始し、水電解、燃料電池、水素貯蔵などに関する先端的な研究開発が始まっている。

CO₂電解については、NEDO「ムーンショット型研究開発事業目標4」にて、電気化学/CO₂資源化をキーワードとするプロジェクトが進められている。Cu系触媒材料をベースにシステムエンジニアリングや産学連携を特徴とするCO₂/C₂+変換を対象としたチーム、独自のDAC膜技術をコアとして金属触媒とリアクターの精密設計に特徴を持つチーム、微生物を担持した特徴的な電極によってプラスチック等の高付加価値品の製造を狙うチームなど、幅広いアプローチが進展している。

[米国]

米国では、インフラ法やインフレ抑制法にもとづき、水素サプライチェーン構築のための税制控除や研究開発の促進が急激に進んでいる。エネルギー省（DOE）が幅広い業界横断的な水素および燃料電池関連の基礎および応用研究プロジェクトであるH2@Scaleが進められており、2020年11月からは水素の製造、貯蔵、輸送、変換、燃料電池を含めた応用などの研究のためにHydrogen Program Planが進められている。さらに、DOEは、2021年10月にはEnergy Earthshots Initiativeを創設し、Hydrogen Shotを立ち上げた。水素エネルギーの活用に95億ドルを支出する戦略を発表し、10年後にクリーンな水素製造コストを1\$/kgとする事を目指している。

さらにDOEはHydroGEN Advanced Water Splitting Materials ConsortiumやHydrogen from

Next-generation Electrolyzers of Water (H2NEW) で、ハイスループットの材料試験法、材料試験結果のマテリアルズ・インフォマティクスによる解析、加速劣化試験法、電解セルの量産技術等のシームレスな検討が進んでいる。

【EU】

EUは2020年7月に水素戦略を発表し、2030年時点において欧州域内で40 GWの水電解装置を導入し、周辺国の再エネの適地にも40 GWを導入し、6800 kmの水素パイプラインで結ぶ壮大な計画が進んでいる。欧州燃料電池水素共同実施機構（FCH JU）のプロジェクトが注目され、産官学をあげた研究開発と実証の両輪での製造、貯蔵、輸送、変換、利用を含めた水素技術全体への取組が進んでいる。

ドイツでは2020年6月に国家水素戦略を策定し、水素技術の創出に70億ユーロ、国際パートナーシップ構築に20億ユーロの助成を予定しており、2030年に5GWの水電解装置の稼働を目指している。Fraunhofer Instituteは基礎研究から量産化、大型化などの実用研究を担っている。企業との関係が強く、日本の企業が海外に進出する際もFraunhoferでの評価が重要となっている。

英国では2022年4月にエネルギー安全保障戦略にもとづき、2030年までに5GWの水電解装置由来の水素製造を目標としている。この目標にもとづき、2023年にグリーン水素製造に関するプロジェクトを選出している。

【中国】

中国では、2022年1月時点で水素ステーションが178カ所稼働しており、水素ステーションの数でも、燃料電池自動車の累積販売台数でも日本を超えている。水素・燃料電池開発に力を入れており、2035年までに100万台の燃料電池自動車の導入を目指している。また、2030年までに太陽光、風力発電設備容量を12億kW以上にするなどの目標を掲げている。多くの燃料電池を含む水素関連の研究開発重点プロジェクトも進んでいる。欧州、米国、日本企業も中国での水素・燃料電池事業を進展させている。

【韓国】

韓国では、2021年12月時点で水素ステーションが170カ所設置されており、中国同様に、水素・燃料電池自動車の設置が進んでいる。2021年10月に「水素先導国家ビジョン」を策定し、クリーン水素の生産、流通、活用を推進している。2030年にグリーン水素25万トン、ブルー水素75万トンの生産量を、2040年までに水素ステーション1200カ所、燃料電池自動車620万台、燃料電池バス6万台の導入、水素価格3000ウォン/kgを目指し、水素エネルギーの普及に力を入れている。また、大規模な水素の生産、輸送・貯蔵、活用に関する技術開発事業もスタートさせている。

（5）科学技術的課題

電解技術は新しい高耐久・高性能な電解質膜が開発されれば、一気に進む場合がある。最近開発が盛んなアニオン交換膜は新しい電解技術開発に今後有望である。他にも工業的な触媒反応で重要となる200℃～500℃の中温領域で高耐久・高性能な電解質膜が開発されれば、新しい電解技術が生まれる可能性がある。材料開発は容易でなく、その成否を予測することは難しいが、挑戦的な基礎研究を継続する必要がある。

電極触媒に関してはアルカリ環境であればほとんどの金属が使用でき、さらに微細な構造等により大きく活性が変わるため、高耐久・高性能電極触媒の候補材料は無限に存在する。また、CO₂電解など生成物が複雑になる系では、選択性の向上や競合反応の抑制による過電圧の低減などが大きな課題となっている。カーボンニュートラル社会への要請が高まるなか、短期間によりよい電極触媒を見つけ出すためにはマテリアルズ・インフォマティクスなどの情報技術の利用が必要不可欠となる。人間の知識・経験と情報工学を融合した分野の進展は重要となる。また、実験データの解析方法の統一化など、研究者間でデータを利用できる体

制も重要となる。

また高出力化や大電流化を志向する際には、セル内での反応場や反応環境の不均一性（局所変化）が顕著になる。これは、電極材料や電解質膜の劣化や反応特性低下につながるため、様々な検討が進んでいるが、有効な策はいまだ見出されていない。そのためには、反応場の局所変化を定量的に分析する技術の確立も求められる。

グリーン水素の利用には、水素をそのまま利用する水素タービンや製鉄への応用などもあるが、アンモニア、有機ハイドライド、ギ酸、エチレンなど、さらなる物質変換をしてからの利用も想定される。必要な水素の純度や圧力などを決めるには、生産地と利用場所との距離、利用形態など、サプライチェーンを含め、利用までを考えた技術開発を想定する必要がある。

一旦、再生可能エネルギーから水素を製造するグリーン水素を経由した物質変換と、再生可能エネルギーを直接利用する電解による物質変換のどちらが有利なのか、シナリオによって異なる事が予想されるが、そのための原理的な理解や検討を進める必要がある。

さらに、出力が天候により時々刻々変化する自然エネルギーを利用するため、電解槽の運転制御も複雑になり、その制御のための工学も必要である。したがって電解質膜や電極触媒、電解セルの開発は重要であるが、同時に、幅広い工学を包含し、結びつけた研究も必要である。

（6）その他の課題

エネルギー分野の変革には時間がかかり、かつ世界全体で大規模に進める必要があるため、世界に広げるには技術が実証できてから10～20年は最低でも必要だろう。従来のような基礎研究をしっかりと進め、応用研究を進展させ、技術をほぼ完成させてから大型実証試験および社会実装へ進める時間軸では間に合わない可能性が高い。

電解技術は、工学的な大型化技術と、新しい材料の開発やメカニズム解明などの応用基礎研究が同時に進んでいる分野であり、今後も、両輪の研究開発を並行して進める必要がある。大型プロジェクトからの課題抽出と、その解決のための応用基礎研究との連携など、今までとは異なる研究プロジェクト体制も必要である。一方で、新材料技術は不連続的に生じうるため、多様な材料開発を長期間にわたり推進すべきである。

幅広い工学と電気化学、材料科学を理解し、異分野の人材と会話しながら進められる人材育成も必要である。現状では、化学工学などの工学分野と電気化学の両方を理解している人材は少なく、さらに材料開発も深く理解している人材はさらに少ない。また、情報分野にも精通し、AI制御やMI、ロボットを利用した材料最適化を短期間で実施できる人材も必要となる。これら全体を学べる教育環境の整備も重要な課題である。

エネルギーキャリアの社会実装には、高圧ガス保安法、消防法、毒劇法、労働安全衛生法、道路法、船舶安全法、航空法、港則法、化審法、消防法、水質汚濁防止法、大気汚染防止法などをクリアしたうえで、社会受容性があることが必要である。このような社会受容性の獲得に必要なLCAやリスク評価を客観的な立場で行うための体制構築も課題としてあげられる。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

(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	◎	→	・電極触媒・電解質膜開発において世界トップクラスの性能を有する成果が生まれている。 ・NEDO「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」、NEDO「水素利用等先導研究開発事業」、JST-ALCA事業で燃料電池や水電解PJが複数進んでいる。2023年度よりJST-GteX事業水素領域が開始。
	応用研究・開発	◎	→	・水電解では、新規材料として東レによる炭化水素系電解質膜が注目されている。また実証規模では、旭化成が10 MW級のアルカリ水電解を立ち上げ運転している。山梨県では固体高分子型水電解の16 MW級の実証を目指している。 ・CO ₂ 電解では、ムーンショット型研究開発事業による産学連携が活発化しており、事業化を見据えた本格的な活動が期待される。
米国	基礎研究	◎	↗	・2021年よりHydrogen Shotプロジェクトが開始し、水素コストを劇的に低減させるための革新技術に関する支援を進めている。 ・国立研究所を中心とした最先端の解析技術や理論計算を駆使した電極触媒の機能発現に関する高レベルな基礎研究が進展している。 ・DOEによって、HydroGENやElectroCatなどのコンソーシアムが展開され、データ科学を駆使した材料探索が進展している。
	応用研究・開発	◎	→	・インフラ法やインフレ抑制法によって、水素分野への大規模投資が進んでいる。地域水素ハブの構築やその中での電解槽の導入や研究開発のプロジェクトが進んでいる。 ・CO ₂ 電解では、Stanford大学発ベンチャーのTwelve社が多くのファンドを獲得。
欧州	基礎研究	◎	↗	・水電解では、炭化水素系ポリマー膜、ポリスルホン系膜による高性能セルが報告。ドイツ・フランス・英国を中心に学術論文の発表件数が多い。
	応用研究・開発	◎	↗	・欧州燃料電池水素共同実施機構（FCH JU）が次々にプロジェクトを進めている。ITM Power、Nel、Thyssenkrup社が英国、スペイン、デンマーク、オランダにおいて大型水電解プラントの実証を進め、商用化が進もうとしている。特に英国は急速に電解技術に関するプロジェクトを増加させている。 ・CO ₂ 電解では、Loter・CO ₂ M、ECO ₂ Fuelなどコンソーシアム型研究が発足。産学連携が活発化。
中国	基礎研究	◎	↗	・学術論文の発表件数が多く、その伸びも大きい。独創性の高い研究は限定的であるが、MOFなどの新規材料を積極的に電極触媒として活用する取り組みが多い。
	応用研究・開発	○	↗	・燃料電池車の累計販売台数は日本を超え、水素ステーションの設置数も世界一になっている。水素需要も再生可能エネルギー量も大きく、2030年までに太陽光、風力発電設備容量を1200GW以上にするなどの目標を掲げている。今後、水電解等のプロジェクトが次々に立ち上がることが予想される。
韓国	基礎研究	○	↗	・近年学術論文の発表件数が増大している。
	応用研究・開発	○	↗	・韓国も燃料電池販売台数で日本を抜き、水素ステーション設置数でも日本を超えている。水素ロードマップの策定が進むも、事故なども発生しており、水素社会への移行は必ずしも順調ではない。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) テレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考・引用文献

- 1) Zaki N. Zahran, et al., "Electrocatalytic water splitting with unprecedentedly low overpotentials by nickel sulfide nanowires stuffed into carbon nitride scabbards," *Energy & Environmental Science* 14, no. 10 (2021) : 5358-5365., <https://doi.org/10.1039/D1EE00509J>.
- 2) Roby Soni, et al., "Pure Water Solid Alkaline Water Electrolyzer Using Fully Aromatic and High-Molecular-Weight Poly (fluorene-alt-tetrafluorophenylene) -trimethyl Ammonium Anion Exchange Membranes and Ionomers," *ACS Applied Energy Materials* 4, no. 2 (2021) : 1053-1058., <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c01938>.
- 3) Hiroshi Nishiyama, et al., "Photocatalytic solar hydrogen production from water on a 100-m² scale," *Nature* 598, no. 7880 (2021) : 304-307., <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03907-3>.
- 4) Dongguo Li, et al., "Highly quaternized polystyrene ionomers for high performance anion exchange membrane water electrolyzers," *Nature Energy* 5 (2020) : 378-385., <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0577-x>.
- 5) Christoph Baeumer, et al., "Tuning electrochemically driven surface transformation in atomically flat LaNiO₃ thin films for enhanced water electrolysis," *Nature Materials* 20, no. 5 (2021) : 674-682., <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00877-1>.
- 6) Miao Zhong, et al., "Accelerated discovery of CO₂ electrocatalysts using active machine learning," *Nature* 581, no. 7807 (2020) : 178-183., <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2242-8>.
- 7) Muhammad Luthfi Akbar Trisno, et al., "Reinforced gel-state polybenzimidazole hydrogen separators for alkaline water electrolysis," *Energy & Environmental Science* 15, no. 10 (2022) : 4362-4375., <https://doi.org/10.1039/D2EE01922A>.
- 8) David Ali, et al., "Polysulfone-polyvinylpyrrolidone blend membranes as electrolytes in alkaline water electrolysis," *Journal of Membrane Science* 598 (2020) : 117674., <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117674>.
- 9) Cheng Wang, et al., "Ultralow Ru doping induced interface engineering in MOF derived ruthenium-cobalt oxide hollow nanobox for efficient water oxidation electrocatalysis," *Chemical Engineering Journal* 420, Part 1 (2021) : 129805., <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129805>.
- 10) Karin U. D. Calvinho, et al., "Selective CO₂ reduction to C3 and C4 oxyhydrocarbons on nickel phosphides at overpotentials as low as 10 mV," *Energy & Environmental Science* 11, no. 9 (2018) : 2550-2559., <https://doi.org/10.1039/C8EE00936H>.

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用

- 11) Adnan Ozden, et al., “Cascade CO₂ electroreduction enables efficient carbonate-free production of ethylene,” *Joule* 5, no. 3 (2021) : 706-719., <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.01.007>.
- 12) Thomas Haas, et al., “Technical photosynthesis involving CO₂ electrolysis and fermentation,” *Nature Catalysis* 1 (2018) : 32-39., <https://doi.org/10.1038/s41929-017-0005-1>.
- 13) Tingting Zheng, et al., “Upcycling CO₂ into energy-rich long-chain compounds via electrochemical and metabolic engineering,” *Nature Catalysis* 5 (2022) : 388-396., <https://doi.org/10.1038/s41929-022-00775-6>.
- 14) Elizabeth C. Hann, et al., “A hybrid inorganic-biological artificial photosynthesis system for energy-efficient food production,” *Nature Food* 3 (2022) : 461-471., <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00530-x>.

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用