

2.1.12 化学エネルギー利用

（1）研究開発領域の定義

本領域は化学反応によるエネルギー・物質変換を利用して、燃料・基礎化学品、エネルギーキャリアを製造する科学、技術、研究開発の領域である。

特にエネルギーシステムのゼロエミッション化に向けた技術として、再生可能エネルギーを用いた水素製造およびCO₂を原料とするCCU（CO₂回収利用）における燃料・化合物の製造技術に着目する。具体的にはCO₂を用いた化学反応による一連の炭化水素製造（燃料、基礎化学品）に関連してPower-to-X、CO₂フリー水素製造、これらの一連の燃料・化学品製造技術、エネルギーキャリアなどを対象とする。

（2）キーワード

CO₂変換技術、CCU、CO₂フリー水素製造、Power-to-X、FT合成、エネルギーキャリア

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

2050年超におけるCO₂を実質排出しないネットゼロエミッションエネルギーシステムの実現のためには、主に化石資源に依存してきたエネルギーシステムを、CO₂フリーなエネルギーを利用するシステム、例えば再生可能電力を用いた電化利用拡大などの大転換が必要となる。また、航空、船舶、長距離貨物のように燃料として液体炭化水素利用が有利な分野や、炭素源を必要とする化学品製造分野など、電化が困難とされる分野では、CO₂の循環の利用により、実質的に大気中CO₂を増加させないことが必要になる。このためには回収したCO₂を原料とし、CO₂フリーなエネルギーを用いた物質変換による燃料・化学品製造技術が必要になる。ただCO₂変換（CO₂還元）では、熱力学的に大きな吸熱反応過程が必要となる。このことは現在主流の熱化学的プロセスのみでは対応しきれず、電気や光などによる吸熱反応に適した反応プロセスの研究開発が求められる。世界各国で研究開発が進められているCO₂回収利用技術（CCU）・カーボンリサイクルによる燃料、化学品製造、Power-to-X（P2X：再生可能電力を用いて物質（水素、メタン、燃料、化学品等）を製造する技術）、人工光合成などは上記の大きな吸熱反応を含む一連の反応プロセスや技術を表す用語であり、本領域ではこれらCO₂変換技術および水素製造を含む一連のプロセス構築に必要な技術について俯瞰する。

なお、CO₂循環利用を実現する技術としては現状バイオマス利用が主流であるが、化学的なCO₂変換技術を用いる方が土地・水利用などの環境制約が小さいことやライフサイクルのCO₂排出量が低いなどのメリットを持つ¹⁾。またCO₂利用のために排ガス、大気等からのCO₂分離回収が必要になるが、これらの技術についてはCCS（二酸化炭素回収・貯留）技術の一部として2.1.1項「エネルギー資源探査・開発技術、CCS」で記載する。

〔研究開発の動向〕

■日欧米の研究開発動向の概略

我が国ではパリ協定達成に向けた長期戦略のための革新的イノベーションを創出することを目標とした「革新的環境イノベーション戦略」が2020年1月に策定された²⁾。この脱炭素・炭素循環に向けた技術として水素、およびカーボンリサイクル・CCUなどの領域の研究開発推進が、政策的にも重要案件として位置付けられて

いる。この技術領域の具体的な目標として、2050年頃にCO₂フリー水素製造コスト(プラント引き渡しコスト)を20円/Nm³に、CO₂分離回収コストを1,000円/t-CO₂に、CO₂からのメタン製造コストを40～50円/Nm³(天然ガス輸入価格レベル)に、2040年頃に回収CO₂からの液体系合成燃料の製造コストを200円/L(既存バイオエタノールレベル)に、また人工光合成を用いたプラスチック製造の実現などが掲げられている。

一方2050年気候中立(カーボンニュートラル)を目指す欧州(EU)では、2050年目標に対して、再生可能電力からの水素、さらにはその水素とCO₂よりメタン、燃料、化学品を生産するP2Xが重要技術として検討されている³⁾。欧州では自然変動電源である太陽光発電、風力発電からの余剰電力をメタン、燃料などの別のエネルギー形態に変換し、熱や交通部門に利用拡大することを検討している。このセクターカップリングと呼ぶ考え方は、CO₂削減および電力システムの安定化の両面の効果が期待でき、柔軟なエネルギーシステム構築に貢献できる。P2Xはこのセクターカップリングのためのキー技術である。またP2X技術で製造したメタンや炭化水素系燃料はガスパイプラインや燃料サプライチェーンなどの既存インフラ設備を利用できるため、新規インフラ投資を最小限に抑えることが可能となる。また現状の燃料への混合利用といった段階的導入を可能にできるメリットもあり、さらにはP2X技術を長期・大量貯蔵に適した燃料に変換する蓄エネルギー技術としての期待もある。なおセクターカップリングの考え方は我が国の革新的環境イノベーション戦略の中でも取り込まれている。

2020年時点、米国(連邦政府)は気候変動対策という点では積極的ではないが、エネルギー安全保障の観点から、エネルギー省(DOE)を中心に幅広いCO₂変換技術を検討しており、P2X技術以外にも人工光合成、生物学的変換技術などの基礎レベルを含む研究開発が実施されている。例えば、DOEのハイリスク・ハイペイオフ型の研究開発を目指すエネルギー高等研究計画局(ARPA-E)での燃料製造の研究プログラムとしては、例えばElectrofuelのように電気エネルギーと微生物を利用することで課題とされる反応速度を高める試みがあり、生物化学的変換の研究開発が積極的に利用されている。また、電気化学を用いた燃料製造の研究開発も行われている。これ以外もDOE科学局ではエネルギーフロンティア研究センター(EFRC)の中での基礎研究を実施、また人工光合成の研究として、人工光合成共同研究センター(JCAP)がイノベーションハブの一つとして実施されている。2011年からの第1期においては水分解による水素製造を、2015年からの第2期においては水とCO₂からの燃料製造(CO₂還元反応)を中心としたテーマとしており、光触媒に加え、電気化学触媒の研究開発も含まれている⁴⁾。

■ CO₂変換技術・水素製造技術の動向(Power-to-X、人工光合成など)

• Power-to-X (P2X)

P2Xは再生可能電力を用いて水素、メタン、液体系燃料、化学品を製造する技術やプロセスの総称であり、反応プロセスの中に電気化学プロセスが含まれている。風力や太陽光発電の再エネ導入が進む欧州、特にドイツを中心に、セクターカップリングのキーとなる技術として研究開発が進められている。なおP2X技術から製造されたガスや液体系炭化水素燃料をそれぞれe-gas、e-fuelなどと称して、熱用途や自動車・航空燃料用途への展開が期待されている。

欧州内のP2Xデモプロジェクトは2003年に最初のプロジェクトが開始されて以来、2017年末時点で完了・計画中を含めて128件ある⁵⁾。欧州16カ国が実施しており、国別ではドイツが最も多い。水電解水素製造や、CO₂との反応(サバティエ反応)によるメタン製造が最も多い。これは既存のガスパイプラインを利用して輸送、活用するPower-to-Gas(P2G)として考えられており、欧州では暖房等の熱需要が多いこと、パイプライン網が発達しているなどの理由によるものである。なお我が国でも国内の再生可能電力からのP2Gによるメタ

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

ン製造を想定した場合、既存インフラを利用できることから水素供給よりもコスト優位性を持つとの調査研究もあり、国内においてもP2Gが重要になる可能性がある。我が国でもNEDOプロジェクトとして、国際石油開発帝石、日立造船が、メタネーション試験設備を国際帝石のプラント内に完成させ、天然ガス生産時に付随して出るCO₂を活用した実証試験を実施している。メタン合成の反応器の能力は8m³/hであり、熱回収効率が高く、メタン合成能力の大型化に適したプレート型を採用している。

一方でP2X技術として水素、メタン以外の輸送用燃料や化成品原料を生産するPower to Fuel (P2F) についても検討されている。これは電解水素と回収CO₂を用いて、合成ガス(CO+H₂)またはメタノールを中間体として製造し、液体系炭化水素を製造するものである。合成ガスから炭化水素を製造する技術はフィッシャー・トロプシュ合成(F-T合成)として既にGTL(天然ガスからの液体燃料製造)技術の一部として商用化されている。ドイツでのジェット燃料を対象としたF-T合成による燃料製造コストの試算例として、現状で3.245 €/トン、2050年想定で1.352 €/トンとされている⁶⁾。

これらの水素を利用したP2X技術は水素製造以外のCO₂と水素の反応やその後段のプロセスは発熱反応として熱化学的なプロセスで対応でき、工業化例は少ないものの一部は商用化やそれに向けた実証化が行われている。合成ガス製造ではSunfire(独)が、メタノール製造ではCRI(アイスランド)と三井化学が、またメタン製造ではAudi(独)、日立造船/INPEXなどが実用化に向けた技術を保有しており、スケールアップなどに向けた研究開発が継続している状況である。このことから水素によるCO₂変換に用いる技術は実証化および商用化フェーズにあり、全体プロセスから見ると水素製造などの水素関連工程のインパクトが大きく、商用化に向けては、水素製造のコスト削減を可能にする研究開発が重要となる。

水素製造については、欧州では再生可能電力を用いた水電解による水素をグリーン水素、化石資源+CCSによる水素をブルー水素などと呼び、同じCO₂フリー水素であってもグリーン水素を優先する方向にある。一方、我が国では豪州の褐炭などからの水蒸気改質とCCSの組み合わせで製造される水素を大量に導入することを視野に入れており、むしろブルー水素への期待が大きい。2020年6月に国家水素戦略を策定したドイツでは、グリーン水素だけでなく、中間的対応としてのブルー水素の利用や水素輸入を進めることとしており、我が国と同様、まずは水素利用拡大を目指した戦略となっている⁷⁾。

水素製造技術としては水電解による水素製造があり、アルカリ水電解、固体高分子形水電解(PEM)、固体酸化物形電解質を用いた高温水蒸気電解法(SOEC)の検討が行われている。先の欧州のP2Xデモプロジェクトでの水電解技術は実証化・商用化レベルであるアルカリ電解槽とPEMが49件と多く、技術開発レベルのSOECは9件と少ない。我が国ではNEDO水素利用等先導研究開発事業(2014~2022年度)の基で水電解槽コスト5万円/kW(現状20万円/kW)、効率4.3 kWh/Nm³(現状5 kWh/Nm³)を目指すとしている。なお、我が国では、豪州の褐炭を原料とした水蒸気改質+CCSによる研究開発も進められており、CO₂フリー水素製造コストとして12円/Nm³を目指している。

またCO製造方法としてCO₂から水素による逆シフト反応以外によるものとして、近年では固体酸化物形電解質(SOEC)を利用し、700℃以上の高温下でCO₂をCOへ電解還元するシステムの実証が進められている。なお、高温下での電解還元の利点は、CO₂電解に必要な理論電圧を低減⁸⁾できることにある。Haldor Topsoeでは、オンサイト、オンデマンドなCO製造をコンセプトとしてSOECを用いて700~850℃の温度でCO₂を電解し、精製処理をすることで純度99.999%、生産量12 Nm³/hrのCOガス生産システム⁹⁾を提案している。現状では、純度99.5%、生産量96 Nm³/hrの大型化も実現し、商用化も行っている¹⁰⁾。

高分子電解質(PEM)を用いたCO製造としては3Mからの報告がある¹¹⁾。3Mでは、高分子電解質を利用しながら、室温下でCO₂を含有する水を電極表面の金属触媒(Ag)上で電解するものであり、かつ金属

触媒上をイオン性ポリマー（イミダゾリウム塩）で被覆していることが特徴となっている。ポリマー被覆により、副反応を抑制し、COの選択率を高めることができ、ファラデー効率は98%となっている。3Mでは、触媒表面の構造制御技術や連続成膜プロセス技術の開発も行っており、Roll to Roll プロセスでの製造を想定している。我が国でも東工大でPEMを用いたCO₂からのCOへの電解還元反応において、コバルトと窒素系ポリマーを熱処理した触媒（CoN₂C_x）で高い選択性を示す報告がある¹²⁾。

さらに水とCO₂から電解合成により合成ガスを製造する共電解の研究開発も進められている。ドイツのSunfireでは、CO₂と水を同時に電解還元し、合成ガスへ転換する共電解の技術開発を行っている¹³⁾。CO₂と同様に、高温下では水電解の理論電圧が低下することが特徴である。

日本においては、産業技術総合研究所がNiO-YSZ/YSZ/LSMからなる電解セルを用いた共電解技術を開発してきた¹⁴⁾。合成ガスからメタン合成することを想定しており、高いメタン転化率と熱の有効利用により、エネルギー効率が87%に達する可能性を報告¹⁵⁾している。

・人工光合成

人工光合成は光触媒による太陽光エネルギーを用いた光化学反応プロセスが含まれる合成法である。広義的に太陽光発電の電気を用いた反応、すなわちP2Xも含めることもあるが、ここでは光触媒による光化学反応とする。また人工光合成には粉状の光触媒を用いる場合と電極に光触媒を用いるタイプがある。

我が国ではNEDOと人工光合成化学プロセス技術研究組合（ARPCChem）による人工光合成プロジェクトが実施されており、光触媒による水分解と膜分離技術との組み合わせによる水素製造、およびその水素とCO₂から化学品原料であるオレフィンを製造する技術の研究開発を行っている。目標である光分解の光変換効率率は10%（2019年時点7%達成）であるが、紫外域に限定すれば100%の量子収率が得られる触媒（SrTiO₃（Alドーピングに調整法と助触媒での改良実施）を開発し、Natureに掲載された¹⁶⁾。また粉状の光触媒をシートに固定することで大面積化への対応も検討されている。

上記の人工光合成は水素製造に主眼を置いたものであるが、水を直接プロトン源としたCO₂の光還元反応の研究も進展している。光触媒として半導体触媒、分子触媒等があるが、両者の特徴を活かし、水の酸化側（水分解により酸素発生）を半導体触媒、CO₂還元側を分子触媒で機能させることにより、水とCO₂からギ酸・CO等の燃料合成系が構築されつつある。また、ルテニウム複核錯体と窒化炭素からなる複合光触媒を用いると可視光照射下でのCO₂のギ酸への還元反応に対して特異的に高活性を示し、通常同時に発生する水素を抑制し、CO₂のギ酸への還元選択率も75%から99%まで大幅に改善されることが報告されている¹⁷⁾。

我が国のこの分野の現状の基礎研究レベルは高い。例えば、豊田中央研究所が、半導体と金属錯体触媒を複合化した板状の「人工の葉」素子が太陽光照射下、水とCO₂から有機物であるギ酸（HCOOH）を生成することを報告した。その太陽光変換効率（4.6%）は植物の光合成反応の効率に比しても高い¹⁸⁾。また東京理科大学は、酸化コバルト修飾 BiVO₄、還元型酸化グラフェン、CuGaS₂を組み合わせたZ-スキーム型粉末光触媒系が可視光照射下、水を電子源とし、CO₂を還元してCOを生成することを見いだしている¹⁹⁾。さらに東工大では低濃度のCO₂（0.5-1%）でも働く金属錯体光触媒も報告している²⁰⁾。これは様々な排出源からのCO₂に対応できる技術に繋がる可能性がある。また、昭和シェル石油（現・出光興産）がメタン（と少量のエチレン）の合成に成功したと発表している²¹⁾。

米国では人工光合成共同研究センター（JCAP: Joint Center for Artificial Photosynthesis）がイノベーションハブの一つとして実施されている。2011年からの第1期においては水分解による水素製造に、2015年からの第2期においては水とCO₂からの燃料製造（CO₂還元反応）を中心としたテーマとしており、光触媒

に加え、電気化学触媒の研究開発も含まれている²²⁾。

■その他CCU関連のプロセス

- ・CO₂とメタンより合成ガスを製造するドライリフォーミングは近未来の技術として有望視されている。
- ・メタノールからオレフィンを作るMTO (Methanol To Olefins) 技術は、中国で研究開発が進んでおり、実際のプラント建設が増加している。これは石炭からメタノールを製造し、そのメタノールを経由してプロピレン、エチレンをすることで従来の石油ナフサを出発点とした化学コンビナートを置き換えようと言うものであり、石炭を原料としたC1化学コンビナートが大規模に展開される動きがある²³⁾。またメタノールから芳香族を作るMTA (Methanol To Aromatic compounds) の研究開発も進展している。将来的にはこれら化学品製造プロセスにCO₂をメタノールにする技術を組み込むことでCO₂の再利用が可能になるとしている。
- ・エネルギーキャリアは広義にはエネルギーの輸送・貯蔵のためのキャリアとなる化学物質を指すが、通常は水素バリューチェーンを構築するための物質であり、液体水素、有機ヒドライド、アンモニアを中心に研究開発が進展している。その他のキャリアとしてはギ酸、メタノールなども考えられ、またCCUとしてCO₂変換で製造したメタンや炭化水素などもエネルギーキャリアの一つと言える。エネルギーキャリアの研究開発としては戦略的イノベーション創造プログラム (SIP1期: 2014-2018年度) およびJST-CREST (2013-2020年度) で研究開発が進められてきた。現在はNEDO水素社会構築技術事業開発の中で水素サプライチェーン実証事業が実施されている²⁴⁾。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■電気化学、光化学等を利用したCO₂からの直接的な燃料・化学品

外部より電気や光を用いて、水とCO₂より炭化水素化合物を直接変換するプロセスが、水分解からの水素を経由する場合よりも必要なエネルギー量、電位で有利になる可能性がある。水分解の場合、熱力学的に必要なエネルギー (Gibbs自由エネルギー) および電位はそれぞれ949 kJ/mol-CH₄、1.23 Vであるが、仮にメタンをCO₂と水から直接生成させる場合は、エネルギー818 kJ/mol-CH₄、1.06 V²⁵⁾ となり、熱力学的に反応しやすい。もちろん電気や光を用いた水によるCO₂還元反応の場合、競合する水素発生を抑止する、CO₂の転換率を高める、狙いとするCO₂還元反応生成物の選択率を高めるなど、さまざまな反応速度論的課題があるが、消費エネルギーが削減でき、低い電位で反応する可能性や反応プロセスが簡略化される可能性がある。現状では電気、光を用いた水から直接CO₂を還元する方法は基礎研究レベルであるが、長期的に期待される研究開発である。

●中温域作動固体電解質²⁶⁾

現在実用化されている固体電解質は100℃以下の低温作動の固体高分子形と700℃程度以上の高温作動の酸化物形である。現在200℃～500℃の中温域で作動し実用レベルに耐えうる固体電解質は存在しない状況にある。電解合成を考えた場合、低温作動では触媒活性が低いためアノード側に貴金属系が必要、触媒被毒に弱い、反応速度が遅いなどの課題がある。一方で高温作動では、反応物が平衡制約を受けるため生成物が限定的 (COやH₂) となる、スタックが劣化しやすいなどの課題がある。中温域の固体電解質を開発することで、触媒開発の自由度も向上し、反応速度、反応選択性、耐久性等において大きな進展が期待できる。またこれにより電解合成だけでなく、燃料電池利用として、電気化学反応全体の大きな進展

が期待できる。なお、米国 DOE の ARPA-E では上記の考え方から REBELS プログラム (2014 年～2017 年)²⁷⁾ を実施し、中温域作動の固体電解質を前提とした電気化学反応に焦点を当てた研究開発が進められた。

・生物電気化学システム

一般的に生物学的変換は生成物の選択性が高い、不純物に強いという利点がある反面、変換速度が遅いことが課題になる。この変換速度を改善するために微生物を触媒として、電子やプロトンを経電化学的に与えることでいわゆるハイブリッド的に検討する方法も考えられている。これらは比較的新しい概念であり、研究はまだ始まったばかりと言えるが、化学品生産 (コハク酸、アセテートなど) の観点から期待できる²⁸⁾。また ARPA-E でも Electrofuels プログラム (2010 年～2013 年) で微生物に電子・プロトンを外部より与えることで最大 10 倍のエネルギー効率を得られるバイオ燃料生産方法の研究開発が進められた²⁹⁾。

■非光合成微生物による合成ガスからのガス発酵法による有機物製造

- ・ガス発酵法は、各種の菌による代謝を利用し、最適な温度を維持した発酵槽内で合成ガスや CO_2/H_2 の原料ガスから、①アルコール等の水酸基を有するものや、②カルボン酸基を有する化学品へ変換するものである。近年では、米国 LanzaTech が合成ガスからのエタノール製造の実証事業を世界各国で実施している。我が国では、環境省の二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業³⁰⁾で、積水化学工業が LanzaTech の技術を利用し、都市ごみからエタノールを製造するパイロットプラントを稼働させている。都市ごみからの合成ガス製造には、オリックス資源循環のガス化処理施設を利用している。更に、合成ガスを原料に C3 化合物のプロパノールの合成³¹⁾や、C4 化合物のコハク酸合成³²⁾に関する研究開発が EU 地域で活発に行われている。これらの化合物は、基礎化学品であるプロピレンやブタジエンなどへの転換を想定している。

■技術トピックス

- ・東芝は CO_2 を気体のまま直接利用可能な触媒として、固体 (触媒)、気体 (CO_2)、液体 (水) の三相界面反応が可能な触媒電極を開発した。触媒層にはナノサイズの細孔に加え CO_2 の流路とマクロ孔を導入した独自構造を採用し、より多くの CO_2 を触媒に供給できるようにした。これにより変換反応の停滞や電流密度の低下を解消した。 CO_2 の CO への変換速度は常温常圧環境で電流密度 700 mA/cm^2 で世界最高レベルであり、省スペース化・低コスト化できる³³⁾。
- ・Sunfire は 2018 年 11 月ドイツのドレスデン工場で高温共電解システムを開発し試験運転 (> 500 時間) を行った。固体酸化物セル (SOC) を用いて水蒸気と CO_2 から合成ガス (CO/H_2) を～80% の効率で製造する。共電解を用いた CO_2 からの初の 2 ステッププロセスの実証となり、e-fuels などの投資コストと運転コストを大幅に削減することができる³⁴⁾。
- ・ReactWell は合成原油のための研究開発プロジェクト Reactwell プロセスに DOE のオークリッジ国立研究所から CO_2 から電解で直接エタノールを合成する技術 (ORNL) のライセンスを得て、取り入れた。ORNL の方法は電極に炭素とナノサイズの銅のスパイクを使用することにより CO_2 からエタノールを直接合成することができるワンステップの反応であり、設備投資や運転コストを大幅に節約できる³⁵⁾。
- ・戦略的創造研究推進事業において、NIMS、高知工科大学、東京工業大学らの研究グループは、金属・セラミックス複合材料のナノ相分離構造のトポロジを操ることにより、メタンと CO_2 からドライリフォーミングに対して優れた低温触媒活性と長寿命特性を発揮する触媒材料の創成に成功した。低温領

域 (500°C未満) において、コーキングを効果的に抑止し、長時間 (1,000時間以上) 安定的に駆動することに成功した³⁶⁾。

- ・早稲田大学では、常温から100度程度の環境で、反応を進めることができるメタン化触媒プロセスを開発した。半導体性を有する触媒に外部から電場を印加することで、固体触媒表面で水素イオンを効果的に駆動させ、低温でも速やかに反応が進む³⁷⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・JST未来社会創造事業 (大規模プロジェクト型)「未来社会に必要な革新的水素液化技術」が実施されている。低コストの水素サプライチェーンの構築が目的である。
- ・JST戦略創造研究推進事業として2018年度よりCREST「革新的反応」とさきがけ「反応制御」が開始した。熱以外の電気、光等のエネルギーを積極的に利用する次世代に向けた反応やその制御に関する研究開発を実施中である。またCREST「エネルギーキャリア」(2013～2020年度)で電気化学、光触媒によるエネルギー・物質変換技術等の基礎的・基盤的技術の創出を目的とした研究開発が実施されている。
- ・経済産業省が中心となり、産総研ゼロエミッション国際共同研究センター、次世代エネルギー基盤研究拠点、カーボンリサイクル実証研究拠点が新設された。また2019年にはICEF (Innovation for Cool Earth Fourm)、RD20 (Research and Development 20 for Clean Energy Technologies)、TCFDサミット (TCFD: Task Force on Climate-related Financial Disclosures、気候関連財務情報開示タスクフォース) の一連の国際会議開催など、我が国が国際社会に連携強化に向けた主導的活動が開始されている。
- ・NEDOとARPCChemによる経済産業省は2020年度、CO₂と水から化学品を製造する「人工光合成プロジェクト」でフィールド実証を開始する。太陽エネルギーにより水を水素と酸素に分解する光触媒パネルをラボスケールの100倍となる100 m²に拡大し、実環境での評価に入る。
- ・環境省「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」のプロジェクトが実施されており、人工光合成による合成ガス製造、微生物利用によるエタノール製造、メタネーション技術など、注目される技術を用いた事業が実施されている。
- ・欧州では欧州燃料電池水素共同実施機構 (FCH-JU) が中心となり、水素・燃料電池技術開発・実証を推進している。Power-to-XプロジェクトとしてH2Futureが実施されており、固体高分子 (PEM) 形水電解技術 (シーメンス) による実証プロジェクトや革新的高分子電解質膜電解槽 (PEMEL) の研究開発が進められている。
- ・ドイツエネルギー機構 (DENA) を中心にPower-to-Gasの実証事業等の取り組みが進んでいる。
- ・ドイツ「エネルギー転換に関するコペルニクス・プロジェクト」は、マックスプランク研究所により発案され、①新ネットワーク構造、②余剰電力の貯蔵“Power-to-X”、③社会的受容も含めた産業化プロセス、④エネルギーシステム・インテグレーションの4つの領域からなる。②では余剰な再生可能エネルギーの90%以上を化学的原料、ガス燃料、または燃料の形で貯蔵するプロセスの研究などを実施する。今後10年でアーヘン工科大などのアカデミア、シーメンス社などの産業界、及び市民が連携してエネルギーシステムの転換に必要な技術的、経済的解決策を生み出すことを目指すとしている。

(5) 科学技術的課題

- ・CO₂変換技術を検討する際は、プロセス全体の効率等を見据えることが重要であり、反応のみならず、

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

その後の分離・精製プロセスなどの容易さや効率を考慮して、CO₂還元反応として何を生成物（または中間生成物）として狙うかを考慮していく必要がある。例えば水を溶媒とした光化学・電解合成では水に溶解しないメタン、エタン、エチレンなど炭化水素の製造を目指すなどの工夫や実用性を考えることが重要になる。また電解合成のように生成物の反応と分離の同時達成が可能な仕組みをうまく利用することも重要となる。水とCO₂からの電解合成を考えた場合、主な生成物の反応における主要な課題を示す³⁸⁾。

図表 2.12-1 CO₂直接電解合成反応の主要な課題

生成物	主な課題
メタノール	（水溶液中の反応）高過電圧、低選択性
酢酸	触媒の低安定性、反応媒体（水）からの酢酸の分離
メタン	非常に高い過電圧、低選択性
一酸化炭素（CO）	カソード側への高いCO ₂ 流量の要求、低転換率
炭化水素（C2以上）	低選択性、炭素-炭素結合形成ステップの理解不足

これらの課題解決のためには触媒開発が重要になるが、転化率、選択率の機能面に加えて、耐久性や安定性も重要な視点となる。さらには現状ではC1化合物が主たる生成物であるが、C2以上の生成物を直接合成するためには、C-C間結合生成ステップの理解が不足しており、基礎的研究の充実も必要となる。

また電気化学反応は安定的な電気に対して高い効率を達成できる技術であるが、余剰電力利用やデマンドレスポンスなどの変動電力に対して対応できる技術になっていない。電力貯蔵技術との組み合わせによる対応も考えられるが、電気化学反応装置単体で対応できる技術の研究開発が望まれる。

（6）その他の課題

- 研究開発については今後加速の方向ではあるが、最大の課題はコストにある。例えばScienceの文献³⁹⁾によれば特に電気をを用いるためには電力コストが4¢米/kWh以下レベル、および電力利用効率が60%以上になることが条件とされている。太陽光発電などを中心に3円以下の例も出てきているが、一方で稼働率などを考えると限定された地域でかつ十分にあると言える状況ではない。我が国においてもさまざまな政策を検討しているが、世界各国との連携を進めながら、TFCDなどのESG投資を活発化させるような政策が重要と考えられる。
- 2020年初頭からのCOVID-19による影響は世界各国でこれまでにない経済的な打撃をもたらした。一方でこの経済的な影響によるエネルギー消費低下は6%、CO₂排出量では8%と予想されている⁴⁰⁾。この数字は2009年金融危機のCO₂排出で6倍とは言えるものの、2050年カーボンニュートラルを目指すという視点から考えるとはるかに小さい数字である。このことは世界的なエネルギーシステムが過去より営々と築いてきた化石資源依存型から脱却できていないこと改めて示したものであり、今後、2050年までの30年程度で経済活動と両立させるためにエネルギーシステムの構造を根本的に変革することが重要であることを示している。欧州ではこのCOVID-19の機会をエネルギーシステムの改革のための投資チャンスと捉える考え方がある一方で、より経済的な影響を受けている開発途上国等では短期的な視点からの化石依存型の投資に走る可能性がある。これは長期間に影響するエネルギーインフラ投資がCO₂削減と

は逆の動きになる可能性もある。このような世界的な動向は今後の我が国の方向性にも大きく影響することから、今後の動向に注目しながら対応を考えていく必要がある。

- ・欧州では低炭素水素認証スキーム（CertifHy）において低炭素水素の定義（製造時CO₂排出量がプレミアム水素（CO₂排出量が36.4 g/MJ（天然ガス改質由来の値）より低いもの）と認証スキームを構築する動きがあり、これにより柔軟な水素取引が可能になると期待されている。我が国においても将来に向けて同様な制度検討が必要である。

（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	◎	↗	・人工光合成の分野で世界トップクラス。またJST戦略事業として革新的反応/反応制御などが開始されている。 ・水素戦略に加え、革新的環境イノベーション戦略により、カーボンリサイクル・CCUなどの研究開発支援が強化されている。 ・水電解技術高度化のための基盤技術研究、メタネーション触媒の研究が進行している。
	応用研究・開発	◎	↗	・水素戦略に加え、革新的環境イノベーション戦略により、カーボンリサイクル・CCUなどの研究開発支援の動きがある。 ・NEDO 水素利用等先導研究開発事業では、電解による水素製造技術や液体水素貯蔵技術などの開発が行われており、大型機の実証も計画されている。 ・NEDO 水素社会構築技術開発事業では、国内再エネをベースとする複数のFSが実施されている。（福島県浪江町など） ・その他、環境省地域連携・低炭素水素技術実証事業も実施されている。 ・旭化成がCO₂を原料とするカーボネート製造、尿素を用いるイソシアネート製造および高効率水電解システム（再生エネルギー由来電力の使用を想定）を開発。これらの技術はいずれも世界トップレベル。
米国	基礎研究	◎	→	・エネルギーセキュリティの観点より、DOEが中心となる研究開発を推進。化学的変換・生物化学的変換ともに基礎研究の層が厚く、世界を先導している。 ・人工光合成についてはDOEイノベーションハブとして人工光合成センターが光触媒、電気化学を含めてCO₂還元反応を中心に検討中。 ・水素：DOEを中心にH2@Scale HydroGEN（光電気化学、熱化学等を活用した水電解水素製造の研究）などが実施されている ・DOEでは、2020年までにクリーン水素コスト4ドル/kg水素以下にすべく、水電解をはじめ、太陽熱利用やバイオ水素技術等による水素製造等に関する研究開発プログラムを実施している。
	応用研究・開発	◎	→	・化学的変換・生物化学的変換ともに多くのベンチャーが活発に開発を進めている。 ・H2@scale プロジェクトで、余剰電力で水素を製造し、エネルギー用途や化学産業等の多様な産業への利用を検討中。 ・技術実証の初期段階。カリフォルニア州では2030年までに温室効果ガスを1990年比で40%削減する目標を掲げており、電力販売の50%を再生可能エネルギーにする目標を設定している。2016年にはガス事業者SoCalGasが、カリフォルニア大学アーバイン校に設置されている太陽光発電設備を用いて水素を製造し、都市ガス導管に混入させる米国初のP2Gプロジェクトを開始している。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

欧州	基礎研究	○	↗	【EU】 - 均一系光錯体触媒でフランスとスウェーデンが強い。均一系光錯体触媒と半導体光電極の組み合わせも検討されている。 - 水素・燃料電池研究開発は、HORIZON2020 の燃料電池・水素の技術開発を行う官民パートナーシップ、FCH2JUが実施。 【ドイツ】 - ドイツ連邦教育研究省（BMBF）がエネルギー転換に関するコペルニクス・プロジェクトを実施中（2016年～）。
	応用研究・開発	◎	↗	【EU】 2020年7月水素戦略を発表。欧州クリーン水素アライアンスを立ち上げ（2030年水電解設備 40 GW）。 - ドイツを中心として多くの P2G プロジェクトが進行中。（パイプライン網利用による熱需要向け） 【ドイツ】 2020年6月水素国家戦略（全体で90憶€を投資） - Audi e-gas プロジェクトなど多くの P2Gおよび P2Fuel プロジェクトが進行中。CO₂と再生エネルギー由来の水素から製造したメタンを燃料とする車の販売（CO₂の排出量を80%削減）が始まっている。 - Sunfireは2018年11月ドイツのドレスデン工場で高温共電解システムを開発し試験運転（> 500時間）を実施。固体酸化物セル（SOC）を用いて水蒸気とCO₂から合成ガス（CO/H₂）を～80%の効率で製造する。 【アイスランド】 - 地熱発電の電力を用いる水の電気分解により水素を製造。この水素とCO₂からメタノールを約 4,000t/年製造（CO₂の絶対量を削減）し、ガソリンの添加剤として使用 [アイスランドのガソリン市場の 2.5% 相当]。規模は小さいが実用化レベル。
中国	基礎研究	○	↗	- CO₂電解還元反応に関する論文数はトップとなっている。近い将来、世界の中核グループに入ってくると予想される。 - 大連化学物理研究所内にクリーンエネルギー研究所（DNL）を2008年に設置。
	応用研究・開発	○	↗	MTO（メタノールからのオレフィン製造技術）の研究開発が進展し、実用化されている。
韓国	基礎研究	○	→	韓国人工光合成センター（KCAP）が2010年より10か年計画として実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	2019年1月 水素経済活性化ロードマップ策定

(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

関連する他の研究開発領域

- ・エネルギー資源探査・開発、CCS (環境・エネ分野 2.1.1)
- ・バイオマス発電・利用 (環境・エネ分野 2.1.6)
- ・エネルギーキャリア (ナノテク・材料分野 2.1.4)

参考・引用文献

- 1) Schmidt et al., “Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation : A Review”, *Chem. Ing. Tech.*, 90, no.1-2 (2018) : 127-140, DOI : 10.1002/cite.201700129.
- 2) 内閣府『革新的環境イノベーション戦略』(2020), <https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui048/siryo6-2.pdf> (2021年1月20日アクセス)
- 3) EUROPEAN COMMISSION, IN-DEPTH ANALYSIS IN SUPPORT OF THE COMMISSION COMMUNICATION COM(2018) 773(2018), https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf (2021年1月20日アクセス)
- 4) JCAP, *JCAP research thrusts*, <https://solarfuelshub.org/thrusts> (2021年1月20日アクセス)
- 5) Christina Wulf, Jochen Linßen, and Petra Zapp, “Review of Power-to-Gas Projects in Europe”, *Energy Procedia* 155 (2018) : 367-378. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.041> (2021年1月20日アクセス)
- 6) Steven J. Davis et al., “Net-zero emissions energy systems”, *Science* 360, no.6396 (2018) : eaas9793, DOI : 10.1126/science.aas9793
- 7) IEEJ「ドイツの国家水素戦略：エネルギー転換に向けた水素支援」<https://eneken.ieej.or.jp/data/8998.pdf> (2021年2月9日アクセス)
- 8) Yao Wang et al., “A novel clean and effective syngas production system based on partial oxidation of methane assisted solid oxide co-electrolysis process”, *Journal of Power Sources* 277 (2015) : 261-267, DOI : org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.092
- 9) C. Mittal et al., “Small-scale CO from CO₂ using electrolysis”, *Chemical Engineering World* 52, no. 3 (2017) : 44-46, https://www.researchgate.net/publication/320144246_Small-scale_CO_from_CO2_using_electrolysis (2021年1月20日アクセス)
- 10) Rainer Küngas et al., “Lifetime Capacity – An Important Performance Metric for SOEC Stacks”, *ECS Trans.*, 91 (2019) : 2601-2611, DOI : org/10.1149/09101.2601ecst
- 11) Brian A. Rosen et al., “Ionic Liquid-Mediated Selective Conversion of CO₂ to CO at Low Overpotentials”, *Science* 334, no. 6056 (2011) : 643-644, DOI : org/10.1126/science.1209786
- 12) CRDS『(ワークショップ報告書) 科学技術未来戦略ワークショップ報告書 高度炭素・水素循環に資する革新的反応・分離のためのC_xH_yO_z制御科学』「CRDS-FY2017-WR-12」(2018), <https://www.jst.go.jp/crds/report/report05/CRDS-FY2017-WR-12.html> (2021年1月21日)
- 13) *11th Carbon Dioxide Utilisation Summit* (2018), <https://www.CO2value.eu/event/11th-carbon-dioxide-utilisation-summit/> (2021年1月20日アクセス)
- 14) JST/CREST『再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技

- 術の創造』, https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah25-1.html (2021年1月20日アクセス)
- 15) 水澤竜也他, 「共電解を利用したSOEC型メタン製造システムに関する定常サイクル計算」『燃料電池』14巻(2015): 81-86, <https://www.fcdic.com/pdf/toukouronbun/toukou11.pdf>
 - 16) Takata, T., Jiang, J., Sakata, Y. et al. “Photocatalytic water splitting with a quantum efficiency of almost unity”, *Nature* 581 (2020): 411–414, DOI: org/10.1038/s41586-020-2278-9
 - 17) Oshima T. et al., *Angewandte Chemie International Edition* 57, no. 27 (2018): 8154-8158, DOI: org/10.1002/anie.201711437
 - 18) 森川研究室ホーム, <https://www.tytlabs.co.jp/sflabmorikawa/theme.html> (2021年1月20日アクセス)
 - 19) Akihide Iwase et al., “Water Splitting and CO₂ Reduction under Visible Light Irradiation Using Z-Scheme Systems Consisting of Metal Sulfides, CoOx-Loaded BiVO₄, and a Reduced Graphene Oxide Electron Mediator” *Journal of the American Chemical Society* 138, no. 32 (2016): 10260-10264, DOI: org/10.1021/jacs.6b05304
 - 20) Takuya Nakajima et al., “Photocatalytic Reduction of Low Concentration of CO₂”, *Journal of the American Chemical Society* 138, no. 42 (2016): 13818-13821, DOI: org/10.1021/jacs.6b08824
 - 21) 出光興産株式会社『人工光合成(CO₂の固定化と利用に関する新技術開発)』, https://www.idss.co.jp/news/2016/shell_1205.html (2021年1月21日アクセス)
 - 22) JCAP, “Thrusts”, <https://solarfuelshub.org/thrusts> (2021年1月21日アクセス)
 - 23) 日経ビジネス, <https://special.nikkeibp.co.jp/atclh/ONB/19/yurin/07/> (2021年1月21日アクセス)
 - 24) NEDO『2021年度「NEDO先導研究プログラム/新技術先導研究プログラム」に係る公募について』, <https://www.nedo.go.jp/content/100920054.pdf> (2021年1月21日アクセス)
 - 25) 堂免一成, 瀬戸山監修, 『光触光/半導体を利用した人工光合成』(エヌ・ティー・エス, 2017), <https://pcat.cat.hokudai.ac.jp/document/pdf/BARTP2017.pdf> (2021年1月21日アクセス)
 - 26) CRDS『(戦略プロポーザル)反応プロセス革新～イオンと電子の制御による中低温域の革新的化学反応～/CRDS-FY2014-SP-05』(2015), <https://www.jst.go.jp/crds/report/report01/CRDS-FY2014-SP-05.html> (2021年1月21日アクセス)
 - 27) Advanced Research Projects Agency, “Reliable Electricity Based on EElectrochemical Systems” (2014), <https://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/rebels> (2021年1月21日アクセス)
 - 28) Gaseous Carbon Waste Streams Utilization (The National Academic Press, 2019), <https://www.nap.edu/catalog/25232/gaseous-carbon-waste-streams-utilization-status-and-research-needs> (2021年1月21日アクセス)
 - 29) Advanced Research Projects Agency – Energy, “Microorganisms for Liquid Transportation Fuel” (2010), <https://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/electrofuels> (2021年1月21日アクセス)
 - 30) 環境省『令和元年度二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業(廃棄物処理施設からの二酸化炭素を利用した化学品製造に関する技術開発と実証)』(2019),

<https://www.env.go.jp/press/107319.html>

- 31) 環境省『令和元年度二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業(廃棄物処理施設からの二酸化炭素を利用した化学品製造に関する技術開発と実証)』(2019), <https://www.env.go.jp/press/107319.html>
- 32) Lanza Tech, “Unique Process to Convert CO₂ into Isopropanol and Acetone” (2017), https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/07/f35/BETO_2017WTE-Workshop_SeanSimpson-LanzaTech.pdf (2021年1月21日アクセス)
- 33) IEA Bioenergy, “7th Conference on Carbon Dioxide as Feedstock for Fuels, Chemistry and Polymers” (2019), <http://CO2-chemistry.eu/> (2021年1月21日アクセス)
- 34) P. Weyrauch, J. Mampel, and G. Meurer, Bite sizing the challenge : A modular approach for the biotechnological valorization of CO₂ (Biotechnology Research and Information Network AG, 2020), DOI : org/10.1002/cite.202055461
- 35) Green Car Congress, “ReactWell licenses ORNL catalyst for direct conversion of CO₂ to ethanol” (2019.3.8), <https://www.greencarcongress.com/2019/03/20190308-reactwell.html> (2021年2月9日アクセス)
- 36) JST プレス発表「温室効果ガスを有用な化学原料に転換(2019.2.15)」 <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190215/index.html> (2021年2月9日アクセス)
- 37) Yamada K. *et al.*, “Low-temperature Conversion of Carbon Dioxide to Methane in an Electric Field”, *Chemistry Letters* 49, no. 3 (2020) : 303-306, DOI : org/10.1246/cl.190930
- 38) Gaseous Carbon Waste Streams Utilization (The National Academic Press, 2019), <https://www.nap.edu/catalog/25232/gaseous-carbon-waste-streams-utilization-status-and-research-needs> (2021年1月21日アクセス)
- 39) P. De Luna et al., “What would it take for renewably powered electrosynthesis to displace petrochemical processes?”, *Science*, 364 no.6438 (2019): eaav3506, DOI: 10.1126/science.aav3506
- 40) IEA, “Global CO₂ emissions in transport by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-2070”, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-CO2-emissions-in-transport-by-mode-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2070> (2021年1月21日アクセス)

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分