

持続可能な社会を拓く未来の化学反応

～クリーンでサステナブルな電解プロセスの基礎から応用まで～



荻原 仁志氏

埼玉大学
大学院理工学研究科 物質科学部門 教授

<https://park.saitama-u.ac.jp/~catalysis/index.html>



プロフィール・2000年東京工業大学工学部化学工学科応用化学コース卒。2005年同専攻博士後期課程修了、博士(工学)。2005年日本学術振興会特別研究員、2007年東京工業大学大学院理工学研究科物質科学専攻助教 2016年同物質理工学院応用化学系 助教。2017年埼玉大学大学院理工学研究科 准教授を経て、現職に至る。

>>

>>>

・はじめに

一見すると化学に無縁の私たちの暮らしであるが、実は数多くの化学反応で支えられている。衣服やプラスチック、医薬品、洗剤、ゴムなどの品々は、すべて化学反応で製造されるためである。ここで考えるべきは、これら化学製品を作るための「原料」となる。多くの化学製品は、炭素をもつ分子から構成されているため、これらを作るにはなんらかの「炭素源」が必要となる。現在の炭素源は、ほぼ石油などの化石資源であるため、化石資源なしに私たちの豊かな暮らしは成り立たない。しかし、化石資源は有限であるため、いつまでも使い続けるわけにはいかない。このような背景から、化石資源に代わる炭素源の調達、そして新たな炭素源を使った新反応の開発は、持続可能社会を構築する上で欠かせない未来技術となる。

・石油に代わる炭素資源

化石資源に代わり、近年重要視されつつある二つの炭素源がある。ひとつは、「削減すべき邪魔者」として扱われがちな二酸化炭素(CO₂)を炭素源とみなす考え方である。もうひとつは、太陽エネルギーによって得られるバイオ資源由来の炭素の活用で

ある。

CO₂は炭素を含む分子であるため、これを原料にして化学製品を作ることができれば、CO₂排出削減と新たな炭素資源の調達を同時に達成でき、一石二鳥といえる。ただしCO₂は非常に安定であり、容易には反応しない。ゆえにCO₂を炭素源として用いるには、さまざまな工夫が必要となる。また、バイオ資源は光合成によって生み出された炭素資源であり、トウモロコシなどから作られるバイオエタノールはその代表例であろう。したがって、CO₂やエタノールを資源に用いる化学技術は、化石資源への依存を下げるための重要な戦略となる。

本稿では、これら新たな炭素源を活用する化学技術について、私が取り組んでいる最新のアプローチを紹介する。キーワードは「電気化学反応」と「触媒」である。

・電力で駆動する反応(電気化学反応)

火力発電所では、まず熱を得てからタービンなどを介して電力へ変換する。一方、太陽光や風力発電などの自然エネルギーは、熱を経ずに電力を直接、創り出す。両者のエネルギー形態の違いは、化学反応による物質変換にも影響する。多くの化学反応に

は駆動力が必要であり、現代の化学産業では主に熱を駆動力としてきた。一方で、再生可能エネルギー（再エネ電力）がさらに普及すれば、クリーンな電力の利用領域は拡大することになり、このような未来社会では、熱ではなく電力を反応の駆動力とするという発想が合理的になる。電気を駆動力とする化学反応は古くから知られており、「電気化学反応」と呼ばれる。電気化学反応の身近な応用例は電池である。この他にも、電気化学がすでに大規模に使われている産業は存在するが、化学製品を作る分野では、電気化学が主役になる場面は限られてきた。

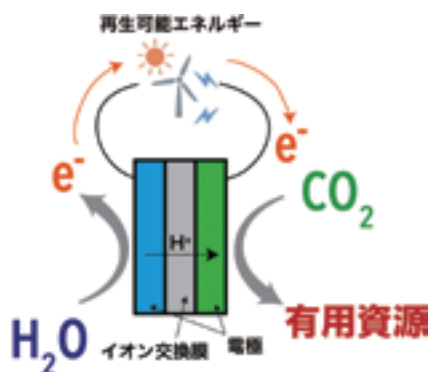
電気化学反応の詳細には立ち入らないが、「酸化」と「還元」の用語だけ紹介する。酸化・還元は化学反応の形式の一種であり、数多くの物質変換で利用されている。端的に言えば、酸化と還元とは「分子への電子の出し入れ」である。そして電気化学反応とは、電力を駆動力にして分子を酸化・還元して、分子のかたちを作り替える技術と捉えられる。

・二酸化炭素の電気化学的な還元反応

炭素資源としてCO₂を使うとき、CO₂に電子を注入、すなわち還元することで、有用な物質に変換できる。図1には、私たちが取り組んでいるCO₂の還元システムを示す。

この反応系では、資源としてCO₂、駆動力として再生可能エネルギー、電子源として水を使う。削減

図1 電気化学的なCO₂の変換反応のイメージ



すべきCO₂、クリーンな電力、そして豊富な水を利用するこのシステムは、環境負荷が低い優れた反応系である。

本システムの特徴は、反応デバイスとして膜/電極接合体を用いる点にある。図1に示したように、膜/電極接合体とは、2枚の電極で1枚のイオン交換膜を挟んだ構造体であり、電気化学反応の中核を担う。この2枚の電極に電圧を加えると、水から電子が移動して、CO₂が電子を受け取ることで、CO₂の形態が変わる。CO₂から得られる生成物としては、一酸化炭素 (CO) や炭化水素など、いずれも化学産業の有用な物質である。後述するように、これら生成物を得るためには電力の助けだけでは足りず、触媒とよばれる材料が必要不可欠となる。

・アルコールの電気化学的な酸化反応

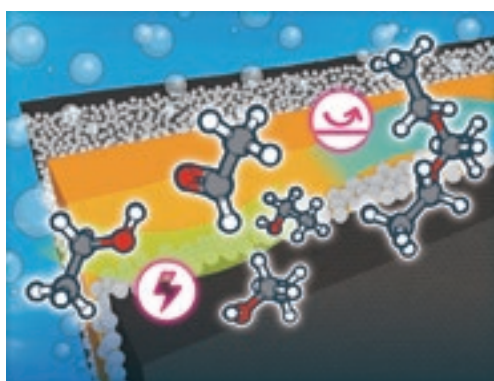
次に、アルコールの酸化反応について見ていく。アルコールの酸化と聞くと直感的に想像しにくいのが、実は私たちの身の回りにある現象であり、それは酒類の分解である。酒類に含まれるエタノールは、体内で段階的に酸化分解される。体内においてエタノールは、アセトアルデヒド、さらに酢酸、最終的にはCO₂へと酸化される。アセトアルデヒドは二日酔いの原因であるため、エタノールがどの程度まで酸化されるかによって、翌日の体調が変わることになる。こうしたエタノールの酸化反応を体内で担っているのが酵素であり、反応を進める触媒として働いている。

アルコールの酸化は、体内だけでなく化学産業においても重要である。アルコールを酸化して得られるアルデヒドやカルボン酸は、香料や溶媒、樹脂原料、医薬品中間体など、さまざまな有用物質の基本骨格として利用される。従来の化学産業でアルコールを酸化するには、酸化試薬が用いられてきたが、

これらは副生成物や廃液を生じやすく、環境負荷が課題となってきた。これに対して電気化学では、電力を駆動力として、分子から直接電子を引き抜く(酸化する)ことができる。つまり電力を利用することで、酸化試薬を用いない、クリーンな酸化反応を実現できる。

その一例として私たちの研究室で開発してきたアルコールの酸化反応例を紹介する。図2にそのイメージ図を示した。専門的な内容は割愛するが、エタノールを電気化学的に酸化することでアセタールと呼ばれる香料・フレーバー分野で利用される物質を合成することができる。この他にも、エタノールを酸化して、酢酸を合成する触媒の開発にも成功している。これらシステムは電解法の一例に過ぎないが、化学反応の駆動力として電気を使うシステムは、従来のプロセスが抱える課題を解決しうる潜在的なポテンシャルをもっている。

図2 エタノール電解デバイスのイメージ



・化学反応における触媒の重要性

さて、ここまで述べてきたいくつかの反応には、主役ではないが、とても重要な裏方が潜んでいた。それは「触媒」と呼ばれる材料である。私は触媒開発が専門であるため、本稿の最後に触媒の解説を入れたい。

触媒は一般社会でも用いられる用語であり、おそらく何かのきっかけ(あの一言が触媒となった)や仲

介役(彼が両者の触媒となった)といったニュアンスで使われることが多いのではないだろうか。化学反応の世界で、触媒のもつ役割はとても大きい。触媒を加えなければまったく進まない反応が数多くあるのだが、その理由は何だろうか。

物理化学とよばれる学問分野がある。物理化学を勉強することで、なぜ化学反応が進行するのか(あるいは、しないのか)を正しく理解できるようになる。本稿では物理化学の詳細には立ち入らないが、そのイメージを知ることは有益である。化学反応によって、物質Aから物質Bを作りたいとする。しかし、この反応が必ず進行するとは限らない。このような「化学反応は必ず進むとは限らない」との認識をもつことは重要である。なぜなら、疑似科学は実現不可能な事例を、さも実現可能であるかのように謳うからである。たとえば、水を分解して水素を作り、その水素から発電した電力でさらに水を分解する…といった話は永久機関と同様に不可能である。これはわかりやすい事例であるが、より複雑な疑似科学を見抜くためにも、基本的な化学の知識は役に立つ。

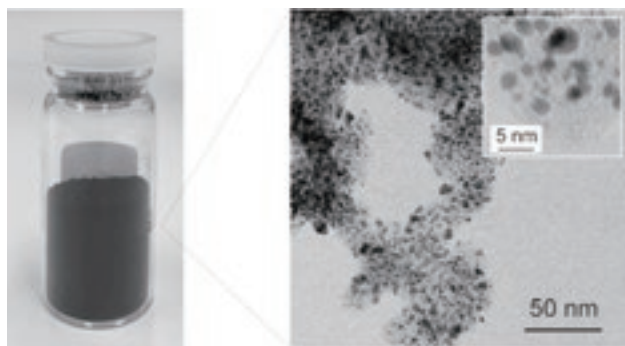
化学反応が進む向きは、エネルギーの高低で考えるとわかりやすい。水の流れを想像すると、高いところから低いところへ水が流れるのは自明であり、水が逆向き(つまり下から上)に動かないことは直感的に理解できる。このような水の動きは位置エネルギーの高低で説明される。化学反応の進行も、水の動きと似ている。物質Aから物質Bへと変化するためには、所定の条件下で、物質Aよりも物質Bのエネルギー(正確には自由エネルギー)が低くなければならない。このように、化学反応の向きも、水の流れのように、エネルギーの高低で決まっているのである。

ところで水の流れを考えたとき、途中で超えるべき山があるとどうなるだろうか。途中で山があると、

下り坂であっても水は流れ落ちにくくなり、山の大きさが大きいほど、障壁はより大きくなる。この喩えは化学反応にも共通しており、下り坂であっても、「山(活性化障壁という)」が大きい化学反応は、進みにくい。ここで触媒の出番となる。触媒はこの「山」の高さを下げ、反応が進みやすくなる新たな道筋を与える。触媒を加えないと化学反応がほとんど進まないように見えることがあるが、これは触媒の助けなしには、途中に存在する山(障壁)を超えられないためである。触媒はしばしば、反応を加速する「魔法の道具」のように扱われるが、実際には反応の障壁を小さくする材料といえる。

触媒はどのような姿をしているのだろうか。図3からわかるように、その見た目は何の変哲もない粉である。この粉を何万倍にも拡大して観察すると、真の姿が現れる。図3の拡大図は、さきほど説明したエタノールの酸化反応に使われる「白金触媒」の電子顕微鏡写真である。触媒として働くのは、写真中にみえるたくさんの黒い点であり、これらは白金の超微粒子に相当する。そのサイズは数ナノメートルであり、これは一般的なウイルスよりも一桁以上も小さい。このような触媒材料をほんの少量だけ仕込むことが、化学反応を加速的に進めるコツとなる。

図3 触媒の外観写真と電子顕微鏡像



・電解プロセスの社会実装に向けて

現代の化学産業には、多種多様の触媒が組み込

まれている。触媒がなければ化学反応が進まないことも多いため、私たちの社会を支える品々は触媒のおかげで手に入るといっても過言ではない。遠くない将来では、「電力×触媒」の協働が、豊かでクリーンな暮らしを支える基盤技術となると期待される。

再エネ電力を化学プロセスに適用すること、すなわち「化学反応の電化」は、炭素排出量を減らすとの世界目標(カーボンニュートラル社会の実現)に大いに資する技術である。さらに、本稿で取り上げたCO₂やアルコールといった炭素資源を使うことで、エネルギーと原料のいずれもが化石資源に依存しなくなり、カーボンニュートラルの達成に大きく近づく。

電解プロセスの社会実装は、再エネ電力の貯蔵や地産地消にも繋がる。太陽光発電や風力発電の課題は、出力の変動にある。つまり、天候に左右される再エネ電力は安定供給が難しく、需給のタイミングが合わないと、発生した電力を活かしきれないことになる。そこで、再エネ電力に電気化学反応を組み合わせると、余剰電力(power)を燃料・化学品に変換し、化学エネルギーとして貯蔵・輸送できるようになる。つまり余った電力を使って、電気化学的反応(たとえばCO₂の還元など)を行うことで、電力よりも貯蔵しやすい化学品を得ることができる。このような概念は「Power-to-X」とよばれ、近年大いに注目を集めている。電気化学反応はモジュール化しやすく、必ずしも大規模な設備に依存しないため、地方に賦存する再生可能エネルギーの受け皿にもなりやすいことから、「Power-to-X」システムは地方の再エネ電力の地産地消にも役立つだろう。

以上を踏まえると、電解プロセスの社会実装には複数の意義があると見なすことができる。今後の課題はプロセスのコストにあると考えられる。電解システムや触媒の技術開発によって、コストの削減を目指し、本格的な社会実装に繋げていきたい。