

炭素資源と触媒化学



随 筆

三 浦 雅 博*

Carbon Resources and Chemistry of Catalysis

Key Words : Fossil Resources, C1 Chemistry, Carbon Cycle

はじめに

周知のように、炭素資源とは、一般に石油、石炭、天然ガスのような化石資源と、草木や農産物のような生物資源（バイオマス）を指す。現在我々の豊かな生活を支えている主要なエネルギー資源は化石資源であり、エネルギー供給源とともに物質供給源として石油が重要な位置を占めているのは言を俟たない。一方で、将来的にカーボンニュートラルを達成するため、化石資源以外のエネルギー源の活用と排出二酸化炭素の回収と再資源化が近年重要な研究課題となっている¹⁾。炭素資源の効率的有効利用について、歴史的経緯を含めて、私の専門である触媒合成化学の役割について改めて考察した。

炭素資源利用の現状

最近のわが国における一次エネルギー供給のうち化石資源が占める割合（2018年統計値）は、石油41%、石炭24%、天然ガス21%である²⁾（全世界ではそれぞれ34%、27%、24%）³⁾。我が国での化石資源の年間利用量は石油換算で1人当たり年間約3.3トンともなる。それらの多くはエネルギー源として燃焼利用されている。一方で、石油の約2割が化学原料として化学工業で用いられている。石油化学工業協会のホームページによれば、「石油化学工業とは、石油や天然ガスを原料に化学反応を利用

して、ガソリンや灯油などのような燃料とは全く違った用途・性質の製品を作る工業であり、石油化学製品とは、プラスチック、合成繊維、合成ゴム、塗料、合成洗剤、薬品・肥料など」と定義されている⁴⁾。脂肪族および芳香族炭化水素化合物由来の石油化学製品も現代社会には不可欠である。現在のコロナ禍において考えてみても、洗浄剤、マスク、注射器、防護服素材のように化学製品の重要性は明らかである。石炭由来の化学原料は、石炭の乾留によるコークス製造（石炭利用の約40%）の副産物として少量であるが、主に芳香族化合物類が化学品製造に有効活用されている。また、メタンを主成分とする天然ガスは、一部改質によって一酸化炭素と水素の混合ガス（合成ガスと呼ばれる）に変換され、メタノールをはじめとする化学品が合成されている（メタノール生産の約60%が天然ガス由来である）。ここでは、大量生産されるいわゆるバルクケミカルズと少量多品種生産されるファインケミカルズをまとめて化学製品としているが、いずれにしてもそれらの製造に触媒化学・触媒合成化学が重要な役割を果たしている。

石油代替資源と化学品の製造⁵⁾

我々は、1973年と1979年の二度にわたる石油危機（いわゆるオイルショック）を経験した。石油価格とともに物価が著しく高騰した。これは、私の大学学部入学前後のことで2008年のリーマンショック後とは比肩できないほど就職難の時代であった。1973年当時、わが国の一次エネルギー供給のうち石油の占める割合は77%と大半を占めており現状と比べてその依存度の高さがわかる。石油危機は、石油代替エネルギー利用を促す契機となった。資源量や価格面で有利な石炭や石油系重質油の利用研究として、それらの水素化分解による流動性液体燃料



* Masahiro MIURA

1956年3月生まれ
大阪大学大学院 工学研究科 プロセス
工学専攻博士後期課程（1983年）
現在、大阪大学先導的学際研究機構
特任教授 工学博士
TEL : 06-6879-4346
FAX : 06-6105-6165
E-mail : miura@chem.eng.osaka-u.ac.jp

への直接転換（直接液化）や一酸化炭素（CO）と水素（H₂）の混合ガス（広い意味での合成ガス）へのガス化を経る Fischer-Tropsch 反応による炭化水素燃料（C_nH_{2n+2} + C_nH_{2n}）の合成（間接液化）研究が活発に行われた。また、燃料とともに化学品合成研究も行われ、通産省工業技術院（当時）では、一酸化炭素を基盤炭素源として基礎化学品を安定的に得る技術の開発を行う、通称「C1 化学大型プロジェクト研究」が1980年から8年間実施された⁶⁾。合成ガスから直接、またはメタノールを経由して、酢酸、アセトアルデヒド、エタノール、エチレングリコールなどの含酸素化合物、ならびにエチレンやプロピレンなどの炭化水素類を合成する課題が主な研究対象であった。含酸素化合物の合成においては、均一（可溶性錯体）触媒が有効なことが多く、研究の進展によって錯体金属上での変換反応の素過程がかなり理解できるようになった。その後、石油価格が安定化し化学品製造の主要な原料源は、経済的側面からこれまで主に石油に依存してきた。従って、C1 化学研究は一段落したが、その学術的成果は、均一触媒反応開発やそれによる精密化学品合成研究の発展に寄与してきた。また、後述するように、今後の二酸化炭素の再資源化研究の基盤ともなる。

石油危機当時、石油の可採年数（確認埋蔵量／年間消費量）は30年あまりとされていた。それから40年経った今、世界的に石油消費量が大きく増加しているにもかかわらず可採年数は50年程とされている²⁾。これは、新たな油田の発見、採掘技術の進歩、石油系重質資源の活用によるものである。しかし、永遠に石油資源が利用できるわけではないことを強く認識すべきである。

カーボンニュートラルと触媒化学

上述のように、歴史的には石油代替燃料や化学品製造のためのC1化学を基盤とする触媒合成プロセスの体系は練り上げられてきた⁷⁾。それらは、石炭や天然ガスに由来する合成ガスを原料としている。従って、石油が液体として最も使いやすいが、もし需給が逼迫すれば、石炭と天然ガスを使ったプロセスを使うことができる。一方で、化石燃料をエネルギー源として燃焼すれば、その種類によらず二酸化炭素が発生する。化石資源の枯渇の問題に加え、その利用に付随する温室効果ガス増大防止のため、わ

が国を含むエネルギー多消費の先進諸国では、化石燃料の使用を極力抑え、太陽光や風力のような自然エネルギーとバイオマスのような再生可能エネルギーを導入し、さらには二酸化炭素の回収貯蔵と、それを炭素資源として活用する、いわゆるカーボンニュートラルを目指す方針が打ち立てられている^{1),8),9)}。

ここで注意すべきは、地球環境維持のために地球環境圏に二酸化炭素は一定量必要で、また炭素を含む様々な素材は我々の生活に欠くことができないのであり、持続可能な炭素循環（カーボンサイクル）¹⁰⁾を目指すべきであるということである。

触媒化学分野での炭素循環社会構築への最も重要な貢献の一つは、二酸化炭素の再資源化である。二酸化炭素の化学的利用について、我が国ではすでに1950年にその研究会が発足したと報告されている¹¹⁾。二酸化炭素の有効利用研究は、その後も断続的になされており、1990年代には二酸化炭素の地球温暖化に与える影響の回避のため、その回収や水素還元によるメタノールや炭化水素類の製造（再資源化）研究が活発に行われるようになったが^{12),13)}、石油需給の安定化や経済性とのバランスの観点から、研究は静かに進行する状況になった。しかし、時代が進んで環境問題や化石資源の有限性から、上述のように二酸化炭素の回収とその再資源化研究の重要性が再び大きくクローズアップされるようになってきた^{1),8),9),14)}。

上述のように、一酸化炭素と水素の混合ガス（合成ガス）があれば、メタノールはじめ様々な化学品基礎原料を製造することが可能である。従って、二酸化炭素の捕集とその一酸化炭素、メタン、メタノール、蟻酸などへの還元的変換が基盤技術として重要である。種々の燃焼炉から大量に発生する二酸化炭素回収は、これまでも多くの研究があるが、大気中に拡散した濃度の低い二酸化炭素の回収（direct air capture = DAC）が今後の重要課題である。触媒化学分野では、やはり従来より目標とされている、より穏和な条件で稼働する低エネルギー消費での高効率な二酸化炭素の還元的変換法の開発が課題である。一方で、さらに困難かつ重要な課題は、還元的変換に用いる水素をいかに効率よく化石資源以外から大量に調達するかである。これに関しては、太陽光や風力のような自然エネルギーが考えられている。

自然エネルギーからの電気による水の電気分解による水素を得るということである。また、別の効率的な方法として二酸化炭素の直接電気化学的還元法も提案されている。これらの研究課題は、いずれも極めて重要であるが、経済性を含めた実用域に到達するには高いハードルがある。諸分野の特に若い研究者の柔軟な発想に基づくブレークスルー的な研究成果が期待される。

液体燃料・化学品製造の選択的・高効率プロセスの開発

35年前、私が阪大工学部の助手に就任して間もない頃、本誌の「若者」欄へ「二つの研究」という記事を寄稿した¹⁵⁾。二つの研究とは、助手就任前に携わった企業でのファインケミカルズとしての農薬合成研究と就任後開始したC1化学研究である。そこで共通点として挙げたのが、「選択性」である。医薬や農薬のような生理活性化合物では、それらが副作用や毒性なく高い選択性を持って作用発現すること、そして触媒化学研究では高い選択性で目的化合物を得る手法の開発を行うということである。

上述のようにC1化学におけるFischer-Tropsch反応では、一般に合成ガスから直鎖炭化水素の混合物が生成し、これを液体炭化水素燃料や化学品製造原料として用いることができる。この混合物の組成(炭素鎖長の分布)は、用いる触媒や反応条件によって変えることができるが、確率統計に従った一定の分布となるのみで、ある特定の炭素鎖長を持った化合物は得ることができない。この確率統計支配からの脱却は、炭素鎖長が定まった天然脂肪酸の生合成を見れば、可能であると考えられると当時記述した。しかし、そのような触媒系は未だ実現されておらず、触媒化学分野の挑戦として残っている。

医薬、農薬、色素、液晶のような低分子量ファインケミカルズから、様々なプラスチックをはじめとする高分子材料に至るまで、それらの含炭素材料の合成研究でも、選択性が追求されてきた。川上の化学原料から川下の化学品までそれらの製造は、選択性、経済性、安全性、環境調和性を考慮して製造されている。ところで、未開拓であるが、反応式を書けばそれらの要求を完全にクリアできると思われる炭化水素類の炭素—水素結合の直接変換に基づく反応、例えばメタンや脂肪族炭化水素の直接酸化によ

るメタノールや水酸基の置換位置の定まったアルコール合成、ベンゼンの酸素による直接水酸化やアニモニアによる直接アミノ化によるフェノールやアニリン合成などがある⁵⁾。しかし、本来化学的に安定で反応性の低い炭化水素類に反応性の高い水酸基やアミノ基を導入するプロセスの産業化への到達には極めて高い壁があり、これらも触媒化学分野における挑戦的課題として残されている。

ここで加えて述べたいことは、炭素資源の高効率利用に向けて触媒化学は従来に増してその役割を果たすべきということである。高効率な選択的触媒合成プロセスの開発は省資源、省エネルギー、低エミッションを目指すものである。さらに、炭素循環のためには製造した化学品のリサイクルを達成するプロセスの開発も極めて重要である。

おわりに

炭素資源枯渇問題と環境問題の解決の観点から、カーボンニュートラル社会の構築は、現在盛んに議論されているホットな話題である。本稿では、炭素資源の有効利用に関する触媒化学の役割について随筆として思いつくまま書いたもので、幾分とりとめのない内容となってしまったが、わかりやすい普遍的用語として「炭素循環(カーボンサイクル)」を旨として触媒化学が今後も豊かで安全な社会を支える学問と科学技術の発展に貢献していくだろうし、していかなければならないという点を再度強調して本稿のむすびとしたい。

参考文献

- 1) 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」, 経済産業省 HP, <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html>
- 2) 今日の石油産業, 石油連盟 HP, <https://www.paj.gr.jp/statis/data/>
- 3) エネルギー白書2020, 資源エネルギー庁 HP, <https://www.enecho.meti.go.jp>
- 4) 石油化学工業協会 HP, <https://www.jpca.or.jp/>
- 5) 三浦雅博, OM News, 近畿化学協会, 2020, No. 1, p1.
- 6) 加藤順, 有機合成化学協会誌, 1983, 41, 479.
- 7) G. A. オラー, A. ゲッペルト, G. K. S. プラ

- カーシュ, “メタノールエコノミー”, 小林四郎, 齋藤彰久, 西村晃尚 訳, 化学同人, 2010.
- 8) 関根泰, ペトロテック, 2021, 44, 255.
- 9) 里川重夫, ペトロテック, 2021, 44, 236.
- 10) 地球環境産業技術研究機構 HP,
<https://www.rite.or.jp>
- 11) 山本明夫, 高分子, 1984, 33, 60.
- 12) 佐野寛, 燃料及燃焼, 1998, 65, 723.
- 13) 相馬良枝, 藤原正浩, 安藤尚功, 燃料及燃焼,
1998, 65, 731.
- 14) 蒲田博之, IHI 技報, 2019, 59, 16.
- 15) 三浦雅博, 生産と技術, 1986, 38, 15.

