



6. おわりに

6. Summary

野崎 智洋

NOZAKI Tomohiro

東京工業大学 工学院機械系

(原稿受付：2023年2月7日)

本講座は「プラズマ触媒」をテーマに、最近の研究動向に基づき講座をまとめた。プラズマの専門誌であるため、触媒科学について理解を深めることを目的に、第3章では福原長寿先生（静岡大学）より、 CO_2 をメタンに変換する反応（ $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ）を例に、触媒反応（ミクロ）から反応工学（マクロ）まで橋渡しする内容で解説いただいた。吸熱反応と発熱反応を比較しながら、触媒の選定や反応器設計・スケールアップのポイントがわかりやすく解説されている。吸熱反応の場合、ガス流速と共に熱供給が追いつかなくなるため触媒温度が下がり（伝熱律速）、結果として反応量も低下する。言い換えれば、プラズマによる熱供給が反応器の温度を上昇させている場合、プラズマは熱源として作用していることになり、我々が期待する「活性種による反応促進効果」ではない可能性があることを示唆している。我々は古くから「非平衡プラズマの伝熱研究」に取り組み[1]、触媒温度、プラズマ温度の計測には細心の注意を払い[2,3]、さらに伝熱律速の壁を打開すべくプラズマ流動層反応器の開発も行った[4,5]。第3章でまとめられているように、プラズマ触媒反応は「化学的な触媒作用と物理的な機能を融合させた物質変換システムの開拓」に相当するもので、ご多忙のなか示唆に富む寄稿をいただいた福原先生には、改めて謝意を表す。

第5章では、触媒のキャラクターゼーションに用いられる代表的な分析手法として、透過電子顕微鏡（transmission electron microscopy, TEM）、X線回折法（X-ray diffraction, XRD）、赤外分光法（infrared spectroscopy, IR）、X線吸収微細構造（X-ray absorption fine structure, XAFS）を取り上げ、測定原理と基礎、および触媒科学の視点からデータ解釈の注意点などについて、高草木達先生（北大触媒科学研究所）に解説いただいた。これらの分析手法は、プラズマ材料研究でもよく利用されており、多くの読者に興味をもってもらえるものと期待する。プラズマの有無にかかわらず、化学反応が進行中の触媒の状態を分析する *in situ/operando* 計

測の重要性も解説いただき、プラズマ触媒反応に *in situ* IRおよび *in situ* XAFSを応用した事例が紹介されている。この研究は、JST CRESTの支援を受けて実施したもので、本講座第4章とともに読んでいただくことで、読者の理解が深まるものと思う。

第2では、金賢夏氏によりプラズマ触媒の基礎やデータ解釈の注意点について解説していただくとともに、第4章ではプラズマ触媒反応の速度論解析、流動層プラズマ、および逆水性シフト反応（ $\text{CO}_2 + \text{H}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ ）への応用事例を紹介している。講座全体を通して多くの読者に興味を持っていただければ幸いである。

第4章の冒頭でも述べたように、低炭素技術は多岐にわたるが、その中でも最大の関心は CO_2 に関連した技術である。再生可能エネルギーのように CO_2 を生成しない技術（Energy Payback Timeの後）と、 CO_2 生成を前提とした排出量削減技術に大別される。後者は機器の効率向上、CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)のほか、近年はメタネーション、化成品、セメントへの転換など CO_2 有効利用技術に関する研究が活性化している。エネルギーや物質の生産から消費まで、実質的な CO_2 排出量を削減するためには、再生可能エネルギーの利用は必須であり、Power-to-Xや広義のプロセス電化が喫緊の課題になっている。以上を鑑み、低炭素技術を背景としたプラズマ技術のあり方を述べて、本講座のまとめにしたい。

図1は化学プロセスの電化技術を分類したもので[6]、原著論文の図をもとにプラズマ技術をマッピングしなおした。直接プラズマ研究に携わっていない研究者も、プロセス電化の観点でプラズマ技術を取り上げる事例が増えている。

古くから電気化学反応、光化学反応は熱エネルギー以外の方法で化学反応を制御する技術として重用されてきた。図1に示した光化学反応は、電化という観点でまとめており、エキシマランプなどを光源として用いる光化学反応、光触媒反応、および光電気化学反応を指している。太陽光による CO_2 転換技術（人工光合成など）に限定していないことに注意されたい。太陽光発電と水電解を組

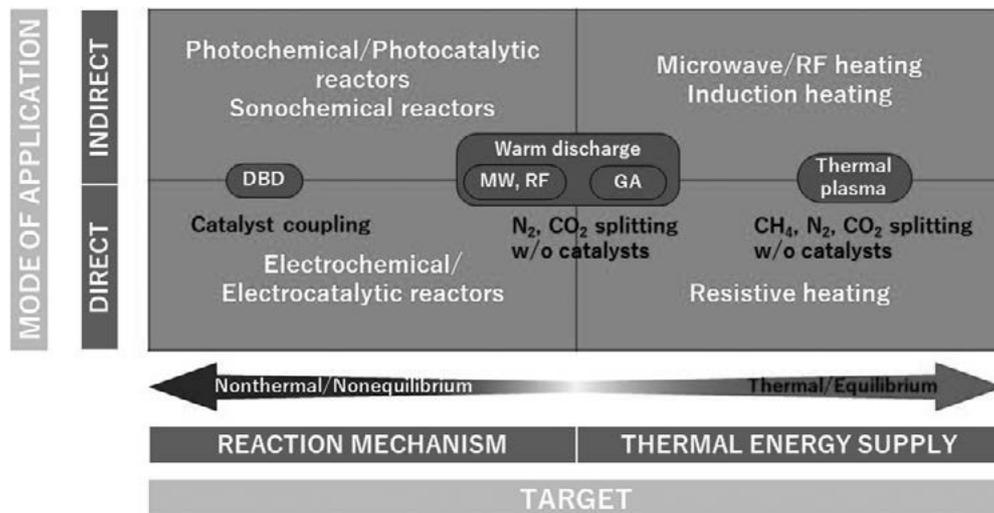


図1 電化技術の分類[6]. 原書論文に著者が加筆した. DBD: Dielectric Barrier Discharge, MWP: Microwave Plasma, GAD: Gliding Arc Discharge.

組み合わせれば、光触媒より高いエネルギー変換効率でグリーン水素を生成できるのと同様に、効率の高いUVランプを使って所望の光化学反応を高収率で実現すれば、化学プロセスにおけるCO₂排出量を削減できる可能性がある。太陽光より光量子フラックスが大きいので、反応装置がコンパクトになるだけでなく、フロータイプのリアクターに応用できるメリットもある。蛇足であるが、UVランプに関して、プラズマの光源応用はエネルギー効率の高さとこれまでの研究実績から、低炭素技術において将来性の高い技術になりうる。

マイクロ波加熱や通電加熱は、再生可能エネルギーと組み合わせれば有望な低炭素技術になる。化学反応自体は熱化学的に制御するが、必要な場所、必要な時間だけ加熱したり、温度勾配以外の方法で熱エネルギーを供給できるため、旧来の伝熱技術（熱伝導、対流、放射）では対応できないアプローチでプロセスの高効率化を実現できる。

マイクロ波やプラズマは反応場にエネルギーを投入するため必然的に加熱を伴うが、冷却はできない。冷熱の生成には熱機関が必要で、その駆動に電力を使うヒートポンプも有望な電化技術の一つである。コンプレッサーの摺動部材に、例えばDLCコーティングを施すことでCOPを高めることができれば、CO₂排出量削減に貢献する技術になり得る。本稿の執筆をはじめた2022年11月頃、欧州では天然ガスの供給不足と価格高騰により、冬季暖房の危機に直面したエネルギー問題が報道されていた。燃焼熱に頼らない低炭素な暖房技術としてヒートポンプが注目され、日本のヒートポンプメーカーが競って欧州市場に参入している旨、報道が締めくくられていた。

プラズマが低炭素技術であるかどうか議論することは無意味である。そうではなく、プラズマによるプロセス

電化が再生可能エネルギーの普及を促進すれば、低炭素化に貢献するのである。換言すれば、「プラズマによるプロセス電化」を普及させるために、旧来の電気化学反応や光化学反応と一線を画した、プラズマならではの非熱反応（または熱反応と非熱反応の複合化）の利点を明確に示さなければならない。そのために、現象解明に向けた基礎研究が重要であることは論を待たないが、現象の面白さだけが過熱気味にハイライトされてしまい、研究目的（なぜプラズマ触媒なのか）が軽視されているくらいがある。プラズマありきのエネルギー研究が散見されるなかで、エネルギー問題を解決するためにプラズマで何ができるのか考えなければならない。第3章のまとめに書かれている「化学的な触媒作用と物理的な機能を融合させた物質変換システムの開拓」は、まさにプラズマ触媒研究がめざすべき指標の一つであり、流行に便乗した一過性の研究ではなく、真に社会に貢献できるプラズマによるエネルギー研究の基盤を構築すること、そしてそのような研究の意義を理解した研究者の参画が不可欠である。

参考文献

- [1] T. Nozaki *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **34**, 3383 (2001).
- [2] T. Nozaki *et al.*, Plasma Sour. Sci. Technol. **11**, 431 (2002).
- [3] Y. Du *et al.*, Plasma Chem. Plasma Proc. **37**, 29 (2017).
- [4] X. Chen *et al.*, J. CO₂ Util. **54**, 101771 (2021).
- [5] X. Chen *et al.*, Plasma Process. Polym. e2200207 (2023).
- [6] A.I. Stankiewicz and H. Nigar, React. Chem. Eng. **5**, 1005 (2020).