



CCUS システムの開発戦略 省エネルギー化と普遍化を目指す Combined Carbon Capture and Conversion (quad-C) プロセスと HumiDAC プロセスを例として

福島康裕 Yasuhiro FUKUSHIMA

様々な濃度の二酸化炭素の分離回収および利用・固定 (CCUS) 技術は, 世界中で精力的に研究されており, そのうちいくつかは社会実装に向けて実用プロセスの開発競争が行われている。本稿では, 省エネルギー化と普遍化を実用化における重要な鍵と捉え, そのためのプロセスの開発戦略を Combined Carbon Capture and Conversion (quad-C) プロセスと派生プロセスである HumiDAC プロセスを例として述べる。

はじめに

人類は, 与えられた環境に適応して, その人口を増やし, さらに開発した資源の活用を高度化することで発展を続けてきた。そして, その発展は産業革命以降大きく加速し, 地球の物質循環に無視できない攪乱をもたらすようになってきた。その結果として, 人類にサービスを提供する生態系, そして人類自身が適応困難な, 環境の変化——急速な気候変動——を引き起こしつつある。

大気中の二酸化炭素濃度がある水準以下に抑え, 大気以外の環境中の炭素ストックを減らさずに, 我々人類が炭素を利用し続けていく「カーボンニュートラル (= ネットゼロ) 社会」を実現することが必要である (図 1)。その中で, 二酸化炭素を排ガスや大気等の混合ガスから分離・回収し, それを化学物質の炭素源として利用, あるいは環境中に固定化する Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage (CCUS) 技術は, ネットゼロ社会の実現に向けた鍵技術である。

人為的気候変動の顕在化を否定, あるいは (その有無にかかわらず) 変動を人類は受け入れるべきであるという主張もある。しかし, 気候変動の緩和策として

ふくしま・やすひろ

東北大学大学院環境科学研究科先端環境創成学専攻 教授

〔経歴〕 東京大学大学院工学系研究科助手, 国立成功大学環境工学系助理教授, 同副教授, 東北大学大学院工学研究科准教授, 同教授を経て現職。〔専門〕 プロセスシステム工学, ライフサイクル工学。〔趣味〕 ゴルフで各地をまわること, カフェを巡ること。

E-mail: fuku@tohoku.ac.jp

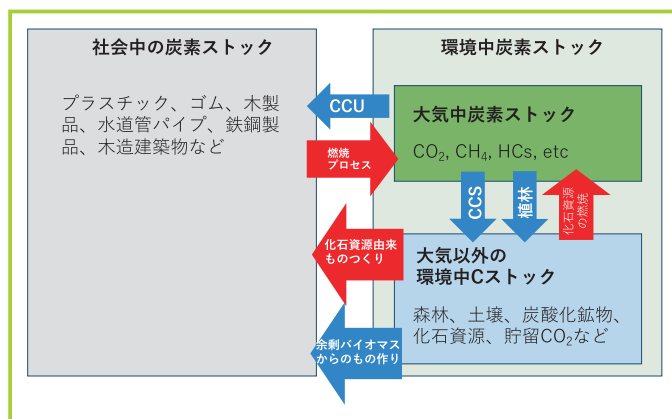


図 1 炭素ストックと CCUS 技術の位置付け

以外にも, ネットゼロ社会を実現することには意義がある。利便性の高い環境中の炭素ストックである石油や石炭, 天然ガスは地理的に偏在し, これが国際紛争の火種の 1 つにもなってきた。したがって, 輸入炭素源の代わりに, バイオマスやリサイクル資源, そして廃水や排ガスなど地域でアクセス可能な炭素源に加え, 地球上どこでもアクセス可能な大気に炭素源を求めることを可能にし, これを基盤とした生産体系への移行が達成されれば, 間接的に国際紛争の火種を減らすことにも貢献できる。世界に先駆けてこれを国内で社会実装することができれば, 国内での新規産業の創出, 資源の安定供給, 生産の海外依存度の低減を実現, 結果として我が国の持続可能性と豊かさを向上することにもつながる。筆者も策定に参加している, 化学工学会の「炭素自立ビジョン」¹⁾ はそのような絵姿の一例である。

CCUS 事業が今後展開していくために求められるの

は、まず低コスト化、次に様々な地理的条件やスケール、そして多様な製品の生産に適用可能とするためのプロセスの普遍化である。低コストでも特定の条件を満たす場所にしか導入できず、決まった製品しか作ることができないようであれば、ネットゼロ社会の達成に意味のある貢献をすることは難しい。実際に、現状に目を向けて見れば、最も商業化が進んでいるアミン水溶液による二酸化炭素吸収プロセスにおいても、コストに占める設備費の割合を減らすために非常に大規模なプロセスを想定しないと採算が取れず、国内での普及は制限されている。また、空気からの二酸化炭素回収は Direct Air Capture (DAC) と呼ばれるが、その実装もエネルギーが安価で空気の成分が安定して乾燥している地域において、大規模に建設されるプロセスでしか進められておらず、その世界中での社会実装への道のりはまだ見えてきていない。

そこで本稿では、より広範な社会実装を狙った CCUS システムの開発戦略を概観し、筆者の手がけた Combined Carbon Capture and Conversion (quad-C) プロセスと派生プロセスである HumiDAC プロセスでの、これらの戦略の取り入れ方について述べる。

エネルギーコストの削減

ほとんどの CCUS システムでは吸収、あるいは吸着による二酸化炭素の選択的な捕捉が採用される。ここで吸収熱や吸着熱は多くの場合利用されることはなく、エネルギー損失となる。

また、捕捉プロセスに続いて、今度は熱を加えて二酸化炭素を回収し、吸収・吸着材が再生される。この方法を採用する以上、この再生過程（＝二酸化炭素の脱離過程）での熱供給は必須である。

上記2点のエネルギー消費を削減するアプローチとして、構造が立体的に複雑なアミンを吸収剤とする吸収液を用いることが提案されている。また、そのような吸収液を使うことで、脱離に必要な温度の低温化も可能であり、そうなれば、未利用廃熱や未利用冷熱を利用して新たに化石資源を消費することのないプロセスを開発する道が開ける。

ただし、ここで課題となるのが供給ガス中の水分である。多くの場合燃焼排ガスや発酵ガスなど、ターゲットの供給ガスは湿っており、DAC の場合では季節や場所によって空気中の湿度が変動する。そうなると二酸化炭素の脱離は 60℃ の低温で達成できる吸収液であっても、余分に系内に侵入した水を吸収液（また

は吸着材）から分離する必要があるため、結局 100℃ を超えるような温度で熱を供給する必要が生じてしまう。主に外気の湿度によって加熱時間の制御も必要となるだろう。

また上記の事情もあり、脱離した二酸化炭素は、多くの場合水分を含んでいる。二酸化炭素の出荷のためには、冷却や乾燥剤を利用して乾燥させるか、余分にエネルギーを加えて二酸化炭素の加圧の過程で水を分離する必要がある。

普遍化

プロセスの普遍化、つまりどこでも使えるものとするのは、開発するプロセスのインパクトを大きくする上で重要である。

空気を供給ガスとする場合、空気はどこにでもあるため、DAC プロセスは二酸化炭素の需要地に設置可能である。この観点からは、究極の普遍化を達成し得るプロセスといえるが、気温や湿度が大きく変動するため、これに対応することができるかが実用化において1つの鍵となる。また、空気中の二酸化炭素は 0.04% 程度の低濃度であることから大量のガス供給が必要となり、大きな設置面積や送風のための動力が必要となれば、普遍化の妨げとなる。低濃度でも高回収率を達成する技術、あるいは動力消費の少ない送風技術があれば省エネルギーだけでなく、普遍化にも大きく貢献する。

発酵ガスや燃焼排ガスからの二酸化炭素回収の場合も、供給ガスの組成はある程度変化するが、外気と比べれば制御されており、その濃度も数% から 20% 以上と桁違いに高く、DAC で述べた障壁は低くなる。一方で、ガスの発生地で二酸化炭素が固定されるため、需要地までに距離があれば、輸送コストが高くなり得る。

二酸化炭素の需要先とその規模は、様々であり、発生源の排ガスや発酵ガスについても同様である。したがって、様々なスケールでペイする、つまり安価な装置で実現できれば普遍化に貢献することになる。

省エネルギーと普遍化を目指した プロセス開発の例: quad-C プロセスと HumiDAC

上記のような分析の下に、筆者は 2020~24 のムーンショット型研究開発事業に応募、これが採択され、DAC を化学物質の変換と統合することで省エネルギーを実現する quad-C プロセス (Type I: 吸収液利用, Type II: 吸着材利用²⁾) の開発に携わった。ここでは

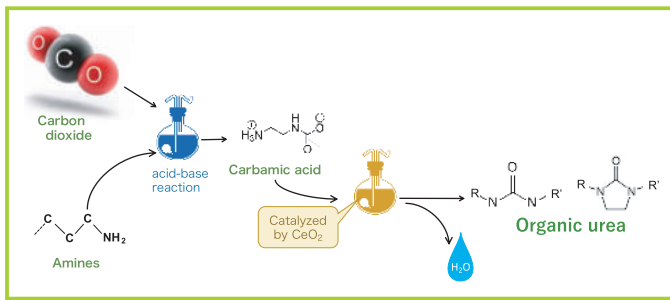


図2 quad-C 反応系

Type I プロセスについて説明する。

このプロセスで用いる反応系は、アミンによる二酸化炭素の化学吸収でカルバミン酸を得る反応、これに続けて、得られたカルバミン酸を固体触媒変換で有機尿素類と水に変換する反応である(図2)。反応に用いるアミンによって異なる有機尿素類を得ることができ、それぞれ異なる反応速度や平衡定数を持っている。

この反応系の特徴は二酸化炭素を吸収液からエネルギーを加えて脱離させることなく変換に供することで省エネルギー化を図る点である。このようなプロセス統合も、省エネルギー化のメリットを得る1つの方法となり得る。

いずれのアミンを用いる場合でも、2段目のカルバミン酸を変換するプロセスは水を副生する。未反応のアミンとターゲット物質である有機尿素類を分離しアミンを回収、リサイクルする過程で水を除去する必要があり(図3)、そこで大きな分離コストが必要となる。このコストを最小限にするために、空気中の水分がアミンに吸収されることを最小限に止める必要がある。

そこで、このプロセスに必要な要素プロセスとして開発を行ったのが、空気から水を排除する膜である。まず、疎水性のイオン液体の中から二酸化炭素をよく透過するものをスクリーニングした。イオン液体は揮発性がほぼゼロであるので、多孔質の樹脂膜に支持させることで、大量の空気に触れても揮発して失われることのない、水排除膜を得ることができた。この膜を想定すれば図3に示したような省エネルギー化プロセスが構築できる。エチレンジアミンを用いてエチレン尿素(2-imidazolidinone)を得る反応系で条件の最適化を進め³⁾、高い収率と圧倒的な低エネルギー消費でエチレン尿素を生産できる見通しができてきている。

この水排除膜を用いれば、quad-CによるDACだけでなく、ほかの二酸化炭素固定プロセスも省エネルギー化と普遍化が可能である。そこに商機を見いだ

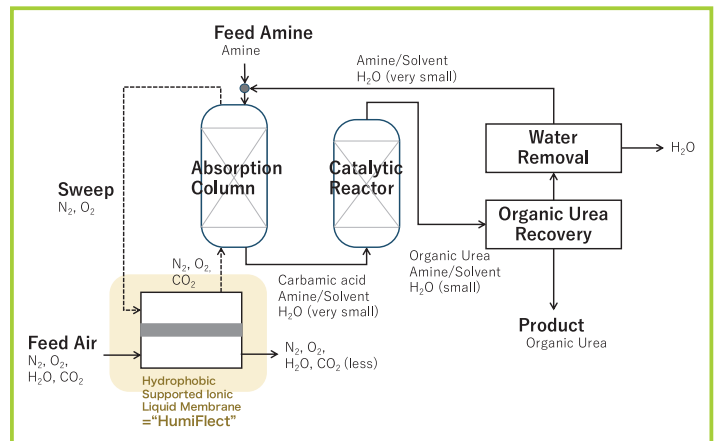


図3 quad-C プロセス Type I のプロセス概念図

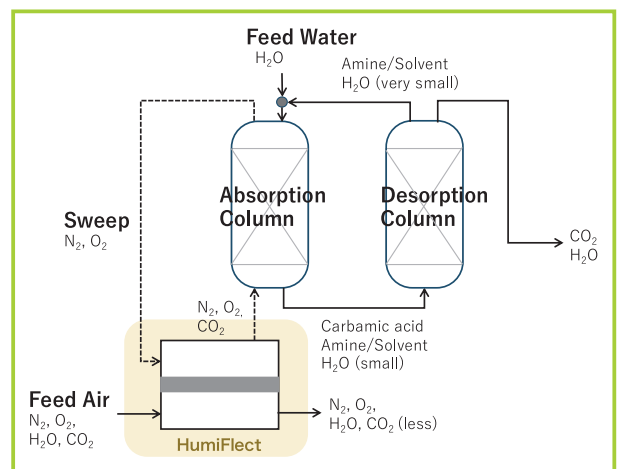


図4 HumiDAC プロセスの概念図

し、この膜を HumiFlect、そして非水系アミン溶液などの吸収液を合わせてもちいて、水の系内への侵入を抑えることで省エネルギー化を実現する二酸化炭素固定システム HumiDAC (図4) と名付け、これらを製品化し販売する事業を担う大学発ベンチャーの準備をすすめている。

まとめ

quad-C や HumiDAC だけでなく、開発が進んでいるほかの新しいCCUプロセスでは本稿で述べたような省エネルギー化と普遍化の特徴を持っているものが多い。本稿を参考に、革新的なプロセスの開発案件がさらに生まれ、実用化へと至る道を共に進むことができるようになることを望む。

- 1) 化学工学会 地域連携カーボンニュートラル推進委員会. <https://www.cn.scej.org> (2026年3月現在)
- 2) K. Yagihara, J. Ni, A. Wang, H. Ohno, Y. Fukushima, *Green Chem.* **2025**, *27*, 1679.
- 3) R. Fujii, M. Yabushita, D. Asada, M. Tamura, Y. Nakagawa, A. Takahashi, A. Nakayama, K. Tomishige, *ACS Catal.* **2023**, *13*, 1562.