

特集

CO₂分離回収技術と
化学工学

CO₂分離回収技術の概要と動向

山田 秀尚

Overview and Trends of CO₂ Capture Technology

界で約2,000 Gton) があり, 他の緩和策と比べて低コストであると評価した。

1. はじめに

CO₂排出を実質的にゼロにし, カーボンニュートラルを実現するためには, 再生エネルギー導入, 省エネ, 電化, 水素利用, バイオマス活用など, あらゆる手段を総動員する必要があります。主要手段の一つとして, CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage), すなわちCO₂回収・利用・貯留が有望視されている。国際エネルギー機関IEA (International Energy Agency) が2021年に公表したネットゼロシナリオは, 2050年におけるCCUSによるCO₂排出削減量を世界で7.6 Gton/yとした¹⁾。また, 気候変動に関する政府間パネルIPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) などが示すシナリオの多くは, CCUSに対し, より多くの削減量を割り当てている。さらに, IPCC第3作業部会の最新報告によると, ネットゼロ達成には, CDR (Carbon Dioxide Removal), すなわちCO₂除去の導入が不可避である²⁾。CDRは, 排出源ではなく大気中のCO₂を対象に吸収・固定化を行うアプローチであり, 植林, 土壌炭素貯留, 風化促進, ブルーカーボン管理などの手段がある。CDRの中でもCCS (Carbon dioxide Capture and Storage) を伴うDACCS (Direct Air Capture with Carbon Storage) やBECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) は, 比較的大きなCO₂除去ポテンシャルを有する技術として期待されている³⁾。

CCSが地球温暖化対策技術として広く認知されるようになった契機は, 2005年に刊行されたIPCC特別報告である⁴⁾。同報告書は, 火力発電所や製鉄所などの大規模固定排出源の排ガスからCO₂を分離回収後, 輸送して地下に貯留するCCSに対し, 十分なCO₂地中貯留ポテンシャル(世

2. CO₂分離回収技術の分類

IPCCのCCSに関する特別報告書は, CO₂分離回収システムを, 燃焼後 (Post Combustion), 燃焼前 (Pre Combustion), 酸素燃焼 (Oxfuel Combustion), 産業プロセス (Industrial Processes) の4つに分類した (図1)。また, CO₂分離回収スキームを収着法 (Sorbents/Solvents), 膜分離法 (Membrane), 深冷分離法 (Cryogenic Distillation) に大別した (図2)。

収着法の代表はアミン液を用いた化学吸収法である。一

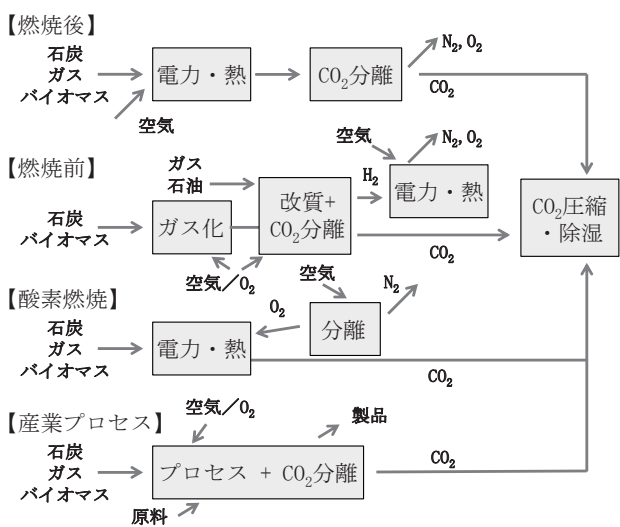


図1 CO₂分離回収システムの分類 (文献⁴⁾を参考に作成)

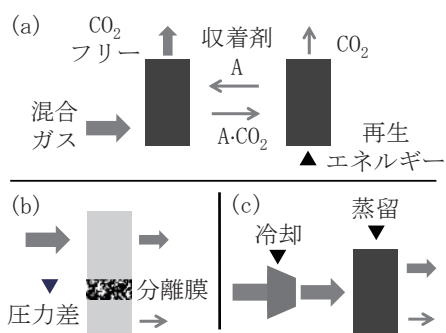


図2 CO₂分離回収スキーム: (a) 収着法, (b) 膜分離法, (c) 深冷分離法 (文献⁴⁾を参考に作成)



Hidetaka YAMADA (正会員)
2006年 京都大学大学院博士課程修了
現在 国立大学法人金沢大学 先端科学・社会共創推進機構 准教授
連絡先: 〒920-1192 金沢市角間町本部棟4階
E-mail: hidetaka.yamada@staff.kanazawa-u.ac.jp

2024年4月15日受理

般に、CO₂の収着反応は発熱的であり、発熱量が大きいほど収着剤を再生するための所要エネルギーが増大する。ベンチマークとされるMEA (Monoethanolamine) 液の場合、CO₂吸収に伴う発熱量だけで約2 GJ/ton-CO₂に相当し、加熱再生のための昇温に必要な顕熱と再生時に溶液の気化で消費される潜熱を合わせると、燃焼後回収における再生エネルギーは約4 GJ/ton-CO₂に達する⁵⁾。

膜分離法は、再生工程を必要せず、供給側と透過側の分圧差をドライビングフォースとしてCO₂を分離するため、低い所要エネルギーでの回収が期待できる。一方で、ガス選択性や透過速度に対する要求仕様を満たす製膜やそのモジュール化には高度な製造技術が求められ、現状は回収率や回収純度に課題がある。

深冷分離法は、空気を分離して高純度ガスを製造する実用技術として確立された手法である。しかし、低温冷却及び蒸留を伴うプロセスであり、特に、対象ガスが低濃度の場合には多大なエネルギーを消費する。そこで、CCUS関連では、液化天然ガスの冷熱を利用した冷却、他の分離法とのハイブリット化、あるいは回収CO₂の液化プロセスにおける適用などが検討されている⁶⁾。

近年、分離材に対するCO₂の吸収あるいは吸着、脱離、透過現象などを電気や光によって制御するCO₂分離回収技術にも注目が集まっている。

3. CO₂分離回収技術の市場

アミン液を用いた化学吸収法は1930年に発明され、20世紀中頃には、天然ガスや合成ガスを対象とした産業技術として確立していた。当時使用されていた吸収液は、TEA (Triethanolamine), MDEA (N-Methyldiethanolamine) などのアルカノールアミンの水溶液である⁷⁾。

1980年代には、燃焼後回収を対象にMEAを用いた吸収法が商用化された。しかし、MEA法には大きなエネルギー消費とアミンの劣化や装置腐食性といった欠点があった⁸⁾。1990年代に入ると、関西電力株式会社と三菱重工株式会社社がヒンダードアミンを用いた新規吸収液KS-1及びこれを用いたKM CDR (Kansai Mitsubishi Carbon Dioxide Recovery) プロセスを共同で開発し、MEA法のデメリットを大きく軽減した⁹⁾。

2019年時点で稼働中の大規模CCS設備 (>0.4~0.8 Mton-CO₂/y) は世界に19あり (合計約40 Mton-CO₂/y)、回収手法の内訳は、アミン液を用いた化学吸収法が9件と最も多く、セレクトソールなどを用いた物理吸収法が6件、その他が4件 (アミン以外の液を用いた化学吸収法、吸着法、膜分離法、分離なしの回収が各1件) であった¹⁰⁾。ここで、大規模回収の対象は天然ガス精製、貯留形態はEOR (Enhanced Oil

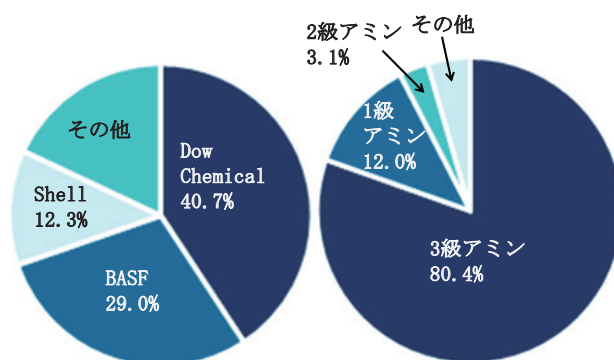


図3 化学吸収液の2021年世界市場占有率 (文献¹²⁾を参考に重量ベースの割合で作成)

Recovery) が大半であった。尚、稼働中設備の回収容量に、建設中及び計画中のプロジェクトによるものを加えた総容量は約80 Mton-CO₂/y (2019年) から約240 Mton-CO₂/y (2022年) と、近年はこれまでにない増加を見せている¹¹⁾。

天然ガス精製その他で、既にCO₂分離回収技術の市場があるCO₂源は、アンモニア製造、石油精製、発電などであり、市場が形成されつつあるCO₂源は、製鉄、セメント製造などである。いずれも化学吸収法のシェアが高い。物理吸着法は石油精製における水素製造などに、膜分離法は天然ガス精製などに現市場があるが大きくはない。現時点で、化学吸収液市場の多くはDow ChemicalやBASFなどの海外勢が占めている。また、使われているアミンは3級アミンが多い(図3)¹²⁾。これは、現状のCO₂源の多くが高圧ガス(天然ガス精製など)であることを反映しており、今後の対象が燃焼後回収及び製鉄やセメント製造などの産業プロセスに拡大することで、2級アミンや1級アミンの使用にシフトし、また、研究開発が続く吸着法や膜分離法との競争も本格化するであろう。

ネットゼロ社会のCO₂回収量 (>7 Gton/y) と現状のそれ(約40 Mton/y) を比較すると、今後、CO₂分離回収技術の市場は飛躍的に拡大するものと予想される。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 技術戦略研究センターは、当該市場は2040年以降に年間7兆円規模に到達すると見積もっている¹³⁾。これは、米国、中国、日本が目標に掲げるCO₂分離回収コストにIEAのシナリオにある年間回収量を掛けて試算した額である。雇用などを含めCCUSサプライチェーンが生み出す波及効果を加えるとその経済的効果は計り知れない。

4. CO₂分離回収技術の開発

最も大規模な予算で戦略的にCO₂分離回収技術の開発を行ってきたのは米国であろう。DOE (Department of Energy) 傘下の研究機関NETL (National Energy Technology Laboratory) で

1999年に始まった当該技術研究開発プログラムの予算規模は、2019年には\$101,000,000/yにまで増大した¹⁴⁾。膨大な予算を有効に活用すべく、ラボ・ベンチスケールでは数多くのアプローチを採用し、小規模パイロット試験、大規模パイロット試験、実証、商用化に進むにつれて、プロジェクト数を絞っていく運営がなされている。各プロジェクトに対して共通のプロトコルに基づく技術経済性分析を求め、Go/Stopの判断材料としていることも同プログラムの特徴である。また、予算の100%を政府が負担することは原則としてなく、一部を実施者が調達する必要はある。2005年に>\$100/ton-CO₂であった回収コストに対し、現状では\$40/ton-CO₂程度の見通しが得られている。

米国の他、ノルウェー、オランダ、フランス、イギリスなどの欧州、オーストラリア、カナダ、近年は中国においてもCO₂分離回収技術の開発が盛んである。ノルウェー政府は世界に先駆けて、産業分野（セメント工場及び廃棄物焼却施設）からの大規模CO₂回収実証試験を進め、フルスケールのCCSバリューチェーン構築を目指している¹⁵⁾。また、ノルウェーには世界最大のCO₂分離回収技術テストセンターTCM (Technology Centre Mongstad) があり、石油精製工場及びガス火力発電所の実ガスに対し、合計100,000 ton-CO₂/yの回収容量を有する実証試験環境が整っている。カナダでは、2014年に石炭火力発電 (Boundary Dam) における世界初の商用スケールCCSが始動した。アミン液による燃焼後回収設備 (Shell社Cansolvプロセス、約3,000 ton/d、回収率90%) で回収したCO₂をパイプラインで輸送して地中貯留するとともに、EORにも利用している。2016年に設立されたInternational CCS Knowledge Centreでは次世代CCS研究を推進している¹⁶⁾。

1990年に日本で開発が始まったKM CDRプロセスは、米国などでの実証試験を経て、テキサス州の石炭火力発電 (WA Parish) から4,776 ton/dを回収する世界最大のCO₂回

収プラント (2016年稼働開始) に採用された。さらに、三菱重工エンジニアリング株式会社は、2021年に新型アミン吸収液KS-21の実証試験をTCMで実施。同液の優れた省エネルギー性と低いアミンエミッションを確認し、商用化を完了した¹⁷⁾。日本には、他にも、東芝エネルギーシステムズ株式会社、日鉄エンジニアリング株式会社、株式会社IHIなど、優れた燃焼後回収設備と独自のアミン液を有するサプライヤーが多い。また、川崎重工業株式会社はアミン固体吸収剤を用いた手法で、従来のアミン液よりも省エネルギー効果の高い技術の確立を目指している¹⁸⁾。

上述のように、石炭火力排ガス (CO₂濃度10~15%)、高炉ガス (CO₂濃度20%程度) からのCO₂分離回収に対しては研究開発が進み、実証から商用のフェーズにある。一方で、天然ガス火力等のCO₂濃度10%以下の排ガスや、スケールメリットを享受できない中小規模の工場排ガスに対しては、適したCO₂分離回収技術が未確立である。そこで、2022年、NEDOグリーンイノベーション基金事業において、「CO₂の分離回収等技術開発」がスタートした (表1)¹⁹⁾。

さて、各CO₂分離回収技術のこれまでを振り返ると、吸収液等の素材開発から、ベンチ・パイロット試験、実証を経て商用化までの道のりに10年以上の長い期間を要していたことがわかる。当該技術の実装が2030年から2050年までに、といった時限をもって必要とされていることを鑑みると、いかに加速するか、が重要である。

NEDO技術戦略研究センターは、CO₂分離回収技術の研究開発における課題を分析し、社会実装加速に向けては、素材のスクリーニングやCO₂分離回収性能検証において、標準評価条件の策定、性能評価・劣化機構解析などに関する共通基盤の構築が有効である、とした¹³⁾。本分析に基づき、上記の基金事業の研究開発項目には、「CO₂分離素材の標準評価共通基盤の確立」が盛り込まれている。

表1 NEDO「低圧・低濃度CO₂分離回収の低コスト化技術開発・実証」¹⁹⁾

テーマ	事業者
天然ガス燃焼排ガスからの低コストCO ₂ 分離・回収プロセス商用化の実現	千代田化工建設株式会社 株式会社JERA 公益財団法人地球環境産業技術研究機構
低濃度・分散排出源CO ₂ の分離回収技術開発	株式会社デンソー
革新的分離剤による低濃度CO ₂ 分離システムの開発	株式会社レゾナック 日本製鉄株式会社
分離膜を用いた工場排ガス等からのCO ₂ 分離回収システムの開発	住友化学株式会社 株式会社00Y00
Na-Fe系酸化物による革新的CO ₂ 分離回収技術の開発	エア・ウォーター株式会社 戸田工業株式会社 国立大学法人埼玉大学
LNG未利用冷熱を活用したCO ₂ 分離回収技術開発・実証	東邦瓦斯株式会社 国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学
CO ₂ 分離素材の標準評価共通基盤の確立	国立研究開発法人産業技術総合研究所 公益財団法人地球環境産業技術研究機構

5. おわりに

将来において実現するカーボンニュートラル社会では、高度な資源循環システムが構築されている筈である。プラスチックなど、現在の化石資源由来材料の代替となるものは、やはり炭素を主成分とするものが多くを占めると考えられる。その際の炭素源は、①回収製品、②バイオマス、③回収CO₂、に大別されよう。分離回収したCO₂を燃料や化学品に変換して利用することは、一定期間、CO₂を固定する効果をもたらすだけでなく、化石資源に依存しないカーボンニュートラル社会において、炭素循環システムを支える重要な技術オプションである。

CCUSに期待される役割は、単に「とりあえず沢山出ているところから回収して地下に埋めておこう」とした2005年のIPCC特別報告の頃と比べて大きく変わっている。すなわち、CCUSは、Hard-to-Abate産業のうち回収可能なケース（鉄鋼やセメント産業など）でのCCSによる削減、回収が非現実的なケース（航空産業など）に対するCDRによるオフセット、GX（Green Transformation）に資する新産業で生ま

れる新規排出源からの回収、将来の炭素循環社会を支えるCO₂資源の供給など、カーボンニュートラル社会の基盤として多様な役割を担うことができるものと考えられる。この先、CO₂分離回収技術の重要性は極めて高いと言えよう。

参考文献

- 1) International Energy Agency : Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector (2021)
- 2) Intergovernmental Panel on Climate Change: Global Warming of 1.5°C (2022)
- 3) 経済産業省：ネガティブエミッション市場創出に向けた検討会とりまとめ (2023)
- 4) Intergovernmental Panel on Climate Change : Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage (2005)
- 5) Nakao, S.-I. et al. : Advanced CO₂ Capture Technologies, SpringerBriefs in Energy, Springer International Publishing (2019)
- 6) Kammerer, S. et al. : *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, **20**, 8087-8104 (2023)
- 7) Pakzad, P. et al. : CO₂ Absorption by Common Solvents, *Advances in Carbon Capture*, Elsevier (2020)
- 8) 飯嶋正樹, 高品徹 : *三菱重工技報*, **41**, 192-197 (2004)
- 9) 平田琢也ら : *三菱重工技報*, **55**, 42-47 (2018)
- 10) Yamada H. : *Polym. J.*, **53**, 93-102 (2021)
- 11) <https://www.globalccsinstitute.com/>
- 12) 富士経済：カーボンリサイクルCO₂削減関連技術・材料市場の現状と将来展望 (2022)
- 13) NEDO技術戦略研究センター：TSC Foresight カーボンリサイクル分野 (CO₂分離回収技術) (2024)
- 14) Brickett, L. et al. : *Fuel*, **268**, 117169 (2020)
- 15) <https://gassnova.no/en/>
- 16) <https://ccsknowledge.com/>
- 17) <https://www.mhi.com/jp>
- 18) <https://www.khi.co.jp/>
- 19) <https://green-innovation.nedo.go.jp>