



CO₂ 分離回収・資源化・固定化技術の現状と展望

遠藤 明 Akira ENDO

カーボンニュートラルの実現に向けて、CO₂ 分離回収・資源化・固定化 (CCUS) 技術への期待が高まっている。しかし、CO₂ を排出源から回収し、利用あるいは地中貯留や鉱物化などにより大気中への再放出を抑制するためには、技術的課題だけでなく、エネルギー供給条件や経済制度との整合も含めた総合的な検討が不可欠である。本稿では、分離回収から資源化・固定化に至る技術チェーン全体を俯瞰し、各技術の現状と課題を整理するとともに、社会実装に向けた連携枠組みの在り方について概観する。

はじめに

カーボンニュートラルの実現に向けて、CO₂ 排出量の削減は喫緊の課題であり、排出源対策と並行してCO₂ を回収し、利用あるいは貯留または固定化する技術の重要性が高まっている^{1,2)}。CO₂ 分離回収、資源化、固定化は、それぞれ独立した技術分野として研究開発が進められてきたが、近年では排出源から最終的な処理・利用に至る一連の技術チェーンとして統合的に捉える必要性が認識されつつある。分離回収時の条件 (CO₂ 濃度、回収率、不純物成分など) は下流技術の成立性を左右し、資源化と固定化は適用条件や役割に応じて選択されるべき技術である。

本特集では、CO₂ 分離回収、資源化、固定化に関する最新の技術動向を、それぞれの専門的観点から紹介する。本稿では総論として、これらの技術をつなぐ全体構造を俯瞰し、各技術の現状と課題、さらに研究開発から社会実装へとつなぐ枠組みについて整理する。

CO₂ 分離回収・資源化・固定化技術をつなぐ全体構造

CO₂ 分離回収・資源化・固定化技術は、それぞれ独立した技術分野として議論されることも多いが、実際

えんどう・あきら
国立研究開発法人産業技術総合研究所材料・化学領域 領域長
〔経歴〕東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻博士課程修了、博士 (工学)。物質工学工業技術研究所入所後、分離技術の研究開発に従事、2025 年度より現職。CO₂ 分離回収および CCUS 関連技術の研究開発に携わる。〔専門〕化学工学〔趣味〕楽器 (トランペット、ピアノ)、囲碁。
E-mail: endo-akira@aist.go.jp



には排出源から最終的な処理・利用に至る一連の技術チェーンとして捉える必要がある。特に分離回収技術はこのチェーンの最上流に位置し、その後段に接続される資源化や固定化技術の成立性や経済性に大きな影響を与える。

また、資源化と固定化は、求められる CO₂ の純度、供給形態 (連続・変動)、立地条件が異なるため、分離回収条件と下流プロセスの整合を意識した設計が重要となる。

日本における CO₂ 排出源を濃度別に見ると、高濃度から低濃度まで多様な排出源が存在しており (図 1)、排出源条件に応じて適用可能な分離回収技術やそのコスト構造は大きく異なる。一般に、低濃度域になるほど分離回収に要するエネルギーやコストは増大し、分離回収技術としての実現可能性 (feasibility) が成立するための条件は一層厳しくなる。高濃度かつ大規模な集中排出源を対象とする分離回収技術については、すでに商用化あるいは実証段階に達しているものも多い。一方で、低濃度あるいは分散した排出源を対象と

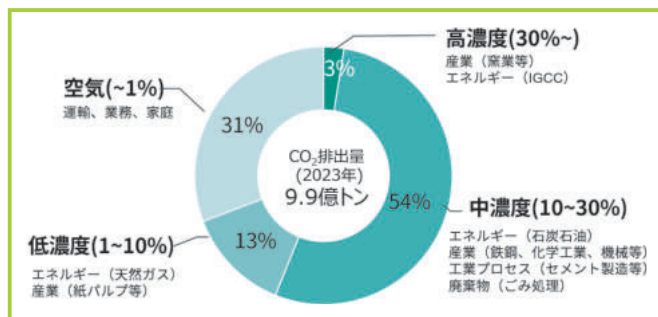


図 1 日本における CO₂ 排出源の濃度別分類と排出量の分布 (2023 年)

する分離回収は、現状では技術的・経済的な制約が大きく、今後の技術開発がカーボンニュートラル実現に向けた重要な課題として位置付けられる。

分離回収技術の成立性を考える上では、排出源の規模や立地条件も重要な要素となる。大規模な集中排出源では、スケールメリットを活かした分離回収や下流プロセスとの統合が検討しやすい一方、中小規模あるいは分散した排出源では、装置のコンパクト化や運用の柔軟性が求められる。

さらに、分離回収されたCO₂を資源化あるいは固定化につなぐためには、回収地点と利用・貯留地点との空間的な隔たりをどのように扱うかという問題も避けて通れない。CO₂の輸送を含めたシステム設計は、技術選択や経済性、さらには社会実装の可能性に大きく影響するため、分離回収技術単独ではなく、排出源から最終利用・貯留に至る技術チェーン全体の中で検討される必要がある。

例えば、地中貯留（CCS）を想定した場合、輸送および圧入を行うために、分離・回収したCO₂は脱水などの前処理を施した上で、一般に高い純度（おおむね95%以上）に調整され、圧縮・加圧された状態で一時的に貯蔵・輸送される。圧入前のCO₂は、輸送方式や貯留条件に応じて数MPa以上の圧力に保持されることが多く、温度についても環境条件や圧縮工程を反映した状態に調整される。これらの条件設定は、輸送の安全性や圧入操作の成立性に直結するため、分離回収段階での不純物管理やプロセス設計が下流の固定化プロセスと密接に関係する。

一方、資源化（CCU）を想定する場合には、後段の化学プロセスとの接続を考慮し、比較的高濃度のCO₂供給が想定されることが多い。例えば、合成反応や触媒反応への導入を前提とした場合、CO₂は反応器入口で一定以上の濃度や分圧を有することが望ましいとされる場合が多く、分離回収段階での濃縮が前提条件として議論されることも少なくない。

ただし、資源化プロセスにおいて必要とされるCO₂の濃度や純度は、反応系やプロセス構成、エネルギー供給条件に強く依存しており、必ずしも分離回収段階での高純度化が最適解となるとは限らない³⁾。分離回

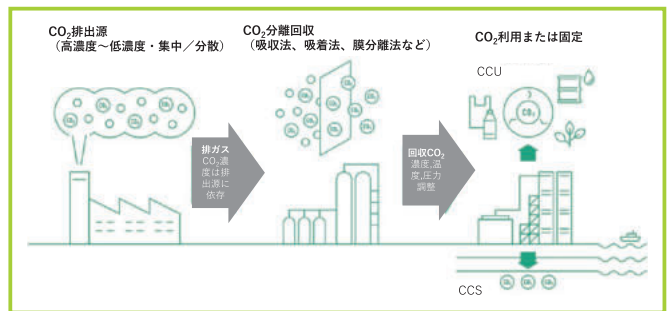


図2 CO₂排出源～分離回収、資源化/固定化への技術チェーンの概念図

収、反応、エネルギー供給を含めたプロセス全体の最適化を通じて、CO₂濃度や供給条件を決定する視点が重要となる。

このように、CO₂分離回収・資源化・固定化技術は個別に最適化すべき技術であると同時に、相互に制約条件を与え合う技術群でもある（図2）。カーボンニュートラルの実現に向けては、個々の技術開発を進めるだけでなく、排出源条件、分離回収、輸送、利用・固定化を一体として捉えた統合的な視点が不可欠となっている。

CO₂分離回収技術の現状と課題

CO₂分離回収技術には、化学吸収法、物理吸収法、吸着法、膜分離法など、原理の異なる複数の方式が存在する。これらの技術は、対象とする排出源のCO₂濃度、ガス量、圧力条件、夾雑成分の有無などに応じて適用可能性や性能が大きく異なる。そのため、分離回収技術は単一の方式で広範な排出源条件に対応できるものではなく、排出源特性に応じた技術選択が前提となる。

高濃度かつ大規模な集中排出源を対象とする分離回収については、化学吸収法を中心に、すでに商用化あるいは実証段階に達している技術も多い。一方、低濃度あるいは分散した排出源を対象とする場合には、いずれの方式においてもエネルギー消費やコスト、装置規模、運転の安定性といった点で制約が大きく、分離回収プロセス全体としての実現可能性が厳しくなる。特に低濃度域では、分離に要する駆動力が小さくなるため、分離効率の低下や装置規模の増大が避けられ

ず、技術的・経済的課題が顕在化しやすい。

分離回収技術の実用化を考える上では、コストおよびエネルギー消費が重要な制約条件となる。日本においては、火力発電や産業排ガスなどの高濃度排出源を対象とした化学吸収法を想定した場合、分離コストはおおむね2000～6000円/t-CO₂程度、また分離に要するエネルギーは約2～4 GJ/t-CO₂と整理されている。これらの値は排出源条件やプロセス設計によって変動するものの、2030年頃を目標として、分離コスト約2000円/t-CO₂、分離エネルギー約2 GJ/t-CO₂程度の水準が、政策的な目標として掲げられている⁴⁾。

また、分離回収技術の性能や成立性は、分離操作そのものだけでなく、前後段のプロセス設計や運転条件にも強く依存する。このため近年では、単一分離回収技術で対応するのではなく、複数の分離回収技術を組み合わせたハイブリッド型システムの検討も進められている。例えば、前処理によるCO₂濃縮と高効率分離技術を組み合わせることで、全体としてのエネルギー消費やコスト低減を図るアプローチが報告されている⁵⁾。このようなハイブリッド化は、排出源条件に応じた柔軟な技術選択を可能とする一方で、構成が複雑化するため、今後はシステム全体での評価や最適化がより重要になる。

このように、CO₂分離回収技術は、対象とする排出源条件や導入形態によって適用可能性が大きく異なる技術群である。今後は、個別技術の性能向上に加え、排出源特性を踏まえた技術選択とシステム全体の最適化を通じて、分離回収技術の実装可能性を高めていくことが求められる。

分離回収したCO₂の資源化技術の展開

分離回収されたCO₂は、その後の利用形態に応じて、様々な資源化技術へと展開される。CO₂資源化は、炭素を循環利用する手段として注目されており、生成物や反応経路の違いにより、複数の技術領域に整理することができる。

CO₂の資源化技術は、大別すると燃料化、基礎化学品、機能性化学品の3つの経路に分類される(表1)。燃料化では、再生可能エネルギー由来の水素を用いて

表1 分離回収したCO₂の主な資源化技術とその特徴(代表例)

利用区分	主な生成物例	反応経路・特徴	技術成熟度・規模感	主な制約・留意点
燃料化	メタン・メタノール、合成燃料(SAF等)	水素還元(合成ガス経路など)	実証段階～一部実用化検討; 潜在規模は大	水素・電力需要大; 再エネルギー供給に依存
基礎化学品	メタノール、尿素、有機カーボネート、ギ酸	既存化学プロセスとの親和性が高い	成熟度は比較的高い; 規模は限定的	経済性は水素価格に依存; 排出削減寄与は限定的
機能性化学品	ポリカーボネート、ポリウレタン原料、環状カーボネート	分子内導入(高付加価値用途)	一部実用化～開発段階; 小規模市場中心	用途限定・市場規模小; 規格・認証整備が課題

CO₂を還元し、合成燃料やメタノールなどを製造する経路が検討されている。潜在的な規模は大きいものの、水素およびエネルギー供給への依存度が高く、導入条件は厳しい。

基礎化学品への展開では、メタノールや尿素、有機カーボネート類など、既存の化学産業と親和性の高い製品が対象となる。これらの経路は比較的技術成熟度が高く、既存プロセスへの組み込みが可能である一方、CO₂消費量としては全排出量に対する寄与が限定的である。

一方、機能性化学品では、CO₂を分子中に取り込んだ高分子材料や溶媒など、高付加価値用途を中心とした展開が進められている。CO₂消費量は小さいものの、水素使用量を抑えられる反応経路も多く、用途限定の市場から段階的な導入が進む可能性がある。

本稿では、分離回収されたCO₂の利用について、社会実装との関係が比較的明確な経路を中心に整理した。いずれの資源化経路においても、分離回収されたCO₂の純度や供給量、立地条件、さらには水素やエネルギー供給との関係が技術成立性を左右する重要な要因となる。CO₂資源化は単独で大規模な排出削減を担うものではないが、適用条件に応じて選択的に導入することで、炭素循環の一翼を担う技術としての役割が期待されている。

CO₂固定化技術の現状と課題

CO₂固定化技術は、分離回収されたCO₂を地中に貯

留したり、鉱物やコンクリート中に固定化することで、大気中への再放出を抑制し、長期的に管理することを目的とした技術である。資源化とは異なる目的とスケールを担うCO₂対策の重要な選択肢の1つとして位置付けられており、特に大規模な排出削減を必要とする場面において、その役割が期待されている^{1,2)}。

固定化技術の中核をなす手法として、地中貯留(CCS)が挙げられる。CCSは、分離・回収したCO₂を圧縮・輸送し、地下の適切な地層に圧入・貯留する技術であり、北米や欧州を中心に実用化や商用規模での運用が進められている^{1,2,6)}。国際的には一定の技術成熟度に達していると評価されている一方で、その成立性は地質条件や貯留可能量、輸送インフラの有無といった立地条件に強く依存する。

資源化と固定化は、それぞれ技術成熟度や適用条件、担う役割が異なるため、排出源条件や立地特性、利用可能な用途に応じて役割分担されることが、CO₂対策全体の実効性を高める上で重要となる。また、CCSの導入にあたっては、CO₂の長期的な挙動を把握するためのモニタリングや安全性評価、規制・制度面の整備、さらには社会的受容性の確保といった、技術以外の要素も重要な検討事項となる^{1,6)}。このため、CCSは「どこでも適用可能な汎用技術」というよりも、適地を前提として成立する固定化技術として捉える必要がある。

一方、鉱物化は、CO₂を炭酸塩などの鉱物として化学的に安定な形に固定化する手法であり、長期的な隔離という観点では高い確実性を有する⁷⁾。建設材料や副産物の有効利用と組み合わせた研究開発も進められているが、反応速度や処理量、コストの面で課題が残されており、現時点では大規模固定化への展開には技術的な制約が大きい^{7,8)}。

固定化技術の適用にあたっては、貯留・固定化手法そのものの選択に加え、排出源の規模や立地条件、回収地点からの輸送距離、周辺環境との関係などを総合的に考慮する必要がある。CO₂固定化は単独で完結する技術ではなく、分離回収や輸送を含む技術チェーンの一部として設計されるべきものであり、排出源条件や地域特性に応じた適切な技術選択が、実効性のある

CO₂対策を構築する上で重要となる^{1,2)}。

研究開発を支える連携枠組みと 社会実装に向けた取り組み

CO₂分離回収・資源化・固定化技術は、従来大気中に排出されていたCO₂を回収し、処理・利用することを前提とするため、追加的なコストやエネルギー投入を不可避免的に伴う。このため、分離回収から利用・固定化に至る一連のプロセスを通じて、どのような技術構成や運用条件が成立し得るのかを、システム全体として検討する視点が不可欠となる。その結果として、研究開発と社会実装をつなぐ枠組みの構築が、CO₂対策を現実的に進めていく上で重要となる^{1,2)}。

ここでいう枠組みは、特定の技術や個別プロジェクトを指すものではなく、研究開発や実証を支える制度的枠組みに加え、エネルギー供給条件や水素価格、補助金、カーボンプライシング、クレジット制度といった経済・政策条件を含めた環境全体を意味する。これらの条件がどのように組み合わせるかによって、技術選択や導入規模の合理性が左右される^{1,2)}。

我が国および欧州におけるCO₂分離回収・資源化・固定化分野の主な研究開発・社会実装支援の枠組みを、表2に示す。欧州側の制度については、European Commissionが公表するInnovation FundおよびHorizon Europeの情報を参照されたい^{9,10)}。

我が国では、グリーンイノベーション基金(GI基金)を中心に、CO₂分離回収やCCUS関連技術を対象

表2 CO₂分離回収・資源化・固定化に関する主な研究開発・社会実装支援の枠組み

枠組み・プログラム	主体・地域	主な対象	特徴・位置付け
グリーンイノベーション基金(GI基金)	日本(METI/NEDO)	分離回収、CCUS、資源化等	研究開発から実証段階までを一体的に支援する国内最大規模の研究開発支援枠組み
先進的CCS支援事業	日本(JOGMEC)	固定化(CCS)	事業化を見据えたCCSプロジェクトの実証・導入を支援する制度
Innovation Fund	EU	CCUS全般	実証から社会実装までを対象とした大規模導入支援制度
Horizon Europe(CCUS関連)	EU	分離回収、固定化	研究開発から実証までを一体的に支援する欧州の研究開発プログラム

とした研究開発支援が進められている。これらの取り組みは、材料・プロセス開発からシステム評価に至る幅広い研究開発を支援し、将来の社会実装に向けた技術的選択肢を拡充する役割を担っている。また、固定化技術については、JOGMECによる先進的 CCS 支援事業を通じて、事業化を見据えた実証や導入支援が行われており、研究開発段階から社会実装段階への橋渡しを意識した枠組みが整備されつつある^{4,11)}。

一方、欧州では、研究開発から実証、社会実装に至るまでを一体的に支援する制度設計が進められており、CO₂分離回収・固定化技術の導入が産業活動と結び付きつつある。Innovation Fund や Horizon Europe の枠組みの下では、複数の排出源を束ね、回収・輸送・貯留を含む CCS バリューチェーン全体を制度的に設計・実装する取り組みが進められている。ノルウェーにおける LONGSHIP プロジェクトは、その一例であり、国家主導でバリューチェーン全体を構築する枠組みとして位置付けられる¹²⁾。

このように、CO₂分離回収・資源化・固定化技術の社会実装は、個別技術の性能や成熟度のみで決まるものではない。技術開発や実証を支える制度的枠組みと、エネルギー価格や炭素価格を含む経済・政策条件とが相互に影響し合う中で、どの技術構成が合理的に成立し得るのが判断される。排出源条件や地域特性に応じて、全体最適の観点から技術選択と導入を進めていくことが、実効性のある CO₂対策を構築する上で重要となる^{1,2)}。

おわりに

本稿では、CO₂分離回収・資源化・固定化技術を、排出源から最終的な処理・利用に至る一連の技術チェーンとして捉え、その全体構造と各技術の役割、ならびに相互の関係性を概観した。分離回収技術は排出源条件に強く依存し、資源化と固定化はそれぞれ異なる目的と制約を有することから、単一の技術によって包括的な解決を図ることは容易ではない。

2050年カーボンニュートラルの実現に向けては、こうした技術的制約や経済的条件を直視した上で、排出

源条件や地域特性に応じた現実的な技術選択を行うことが不可欠である。分離回収、輸送、利用・固定化を含むシステム全体としての最適化や、研究開発から実証、社会実装へと技術を橋渡しする枠組みの整備は、その前提条件となる。

CO₂分離回収・資源化・固定化技術は、いずれも万能的な解決策ではないが、条件を整えば意味のある選択肢となり得る技術群である。本稿で示した全体構造や考え方は、個々の技術を評価・選択する際の1つの視点を提供するものである。本特集では、分離回収、資源化、固定化の各分野について、より専門的な立場からの解説がなされており、これらの記事と併せて読むことで、CO₂対策技術の現状と課題を多面的に理解する一助となることを期待したい。カーボンニュートラルは本当に実現可能なのかという問いに対して、楽観論や悲観論に陥ることなく、技術と社会の両面から現実的に考えるための材料を提供できれば幸いである。

- 1) IPCC, *AR6 Working Group III Report*, 2022.
- 2) International Energy Agency, *CCUS in Clean Energy Transitions*, IEA, 2020.
- 3) S. Morimoto, N. Thuy, N. Kitagawa, S. Kataoka, *Journal of CO₂ Utilization* 2021, 45, 101452.
- 4) 経済産業省, 「CCUSに関する技術ロードマップ」, GX 実現に向けたロードマップ資料, 2023.
- 5) M.-C. Yu, L.-J. Bai, S. Muioli, P. Tontiwachwuthikul, T. V. Plisko, A. V. Bilydukevich, Y.-N. Feng, H. Liu, *Advances in Membrane Technologies* 2023, Article 100071.
- 6) Global CCS Institute, *Global Status of CCS Report 2024*, Global CCS Institute, 2024 (data as of 24 July 2024). <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/10/Global-Status-Report-6-November.pdf> (2026年3月現在)
- 7) R. Kumar, W. J. Chung, M. A. Khan, M. Son, Y.-K. Park, S. S. Lee, B.-H. Jeon, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 2024, 23, 739.
- 8) D. Zhang, Z. Ghoulah, Y. Shao, *Journal of CO₂ Utilization* 2017, 21, 119.
- 9) European Commission, *EU Innovation Fund*, European Commission official website. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/funding-climate-action/innovation-fund_en (2026年3月現在)
- 10) European Commission, *Horizon Europe*, European Commission official website. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en (2026年3月現在)
- 11) JOGMEC, 「先進的 CCS 支援事業について」, JOGMEC 公開資料, 2023. <https://www.jogmec.go.jp/ccs/index.html> (2026年3月現在)
- 12) Norwegian Ministry of Petroleum and Energy, *Longship - Carbon capture and storage*, Government of Norway official website. <https://www.regjeringen.no/en/topics/energy/carbon-capture-and-storage/id86982/> (2026年3月現在)