

2.1.2 分離技術

(1) 研究開発領域の定義

分離技術とは、混合物から目的成分を取り出す、または不要物を取り除く技術に関する研究開発領域である。化学プロセスにおいて目的成分を低環境負荷・低エネルギーで取り出す技術、火力発電所や工場などから生じるCO₂の分離、グリーン水素の分離・精製、海水の淡水化や排水からの有用物回収、鉱物資源や都市鉱山からの目的金属の分離、医療用途（人工透析、酸素濃縮）など幅広い産業の基盤となっている技術である。環境保全、資源循環型社会の実現のためにも重要な技術である。以下では、膜分離技術、化学プロセスにおける気体・液体の分離技術、CO₂分離技術、固体を対象とした分離濃縮技術を対象とする。

(2) キーワード

膜分離、吸着、蒸留、反応分離、物理吸収、化学吸収、深冷分離、逆浸透、ナノろ過、浸透気化、ガス分離膜、CO₂回収、Direct Air Capture (DAC)、外部刺激、易分解設計

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

分離技術は相の状態によって分類が可能であり、分離したい成分が別々の相の場合と、分子混合物として同一の相に存在する場合に大別される。分離したい成分が別々の相の場合は機械的単位操作が主に使用され、気相中の固体あるいは液体微粒子の除去や液相中の微粒子の除去、粒子混合物の粒子サイズによる分級などがあげられる。一方、気相および液相における分子混合物の分離は、平衡分離（蒸留、吸着、吸収、抽出、イオン交換、晶析など）と速度差分離（膜分離、電気泳動、遠心分離など）に分類され、ガス精製、海水淡水化、浄水等の工業分野、排水処理や排ガス処理などの環境保全、食品・医薬品製造など幅広い産業に用いられている基盤技術である。

また、多種多様な分離手法が存在していることが本領域の特徴である。それぞれの分離技術は互いに競合関係にあり、採用されるためには当該分離を可能とする唯一の技術であるか、優位性を示さねばならない。それぞれの分離技術の優劣をコスト、エネルギー、LCAなどさまざまな視点を含めて比較する手法の確立に関する研究も望まれる。

米国では全エネルギーの32%が産業用途であり、そのうち45～55%が分離プロセスに使用されている。すなわち米国の全消費エネルギーのうち約15%が分離プロセスということである。この分離プロセスのエネルギーのうち、49%が蒸留、20%が乾燥、11%が蒸発の熱源として使用されている。非熱駆動分離を増やすべきだという指摘があるが、現状ではわずか20%にすぎない。

既存の石油精製、石油化学プラントでは、既存技術での最適化が図られており、また、長期信頼性・安定性・安全性（耐久性や耐汚れ性など）やメンテナンスの容易さも重要であるため、新たな分離システムを導入するインセンティブが少ない状況にあった。蒸留に使用される熱エネルギーの回収、再利用も一般的に行われている。しかし、2050年にカーボンニュートラルを実現するためには、さらなるエネルギー削減が求められており、膜分離や吸着などの新材料による非熱駆動型の分離プロセスのイノベーションが期待されている。さらに、個別の分離プロセスのみでなく、プラント全体、さらには近接の化学プラントをも統合的に最適化することが必要になる場合も想定される。

また、地球温暖化抑制と気候変動対策という観点からCO₂分離が重要な課題である。CO₂分離は、火力発電所や製鉄所、工場などから発生する排ガス中からのCO₂回収を主とする「排出抑制型」と、既に放出されている大気CO₂を回収して大気CO₂濃度の直接削減に寄与する「負排出型（ネガティブエミッション型）」の二つに大別できる。排出抑制型のCO₂回収では、CO₂濃度が比較的高い排出ガスからのCO₂回収であり、かつ排出地点が固定（限定）されているという特徴を有する。一方「負排出型」は、回収対象が大気である

ためCO₂濃度が極めて低いことと、大気から回収となるため回収地点が限定されないという、排出抑制型とは反対の性能が要求される。これらに適用可能なCO₂分離技術としては、エネルギーやコストの観点から、物理吸着、化学吸収、分離膜が主要な技術となる。また、CO₂分離は一般的なN₂やO₂などの無機ガスとの分離だけではなく、次世代の火力発電所として注目されている石炭ガス化複合発電 (Integrated coal Gasification Combined Cycle, IGCC) における燃焼前ガスからのCO₂分離では、水性シフト反応により生じるガスCO₂とH₂の分離や、シェールガスをはじめとする天然ガス井戸元では、CO₂と炭化水素との分離なども重要な課題である。このCO₂回収技術は、一般的にCCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) の起点となるため、その後段のプロセスと合わせて検討されなければならない。

一方、天然鉱山や都市鉱山からの有用物の分離技術も重要である。天然鉱山では、近年では低品位鉱石や、従来の金属精製では廃棄物となっていた尾鉱、スラッジ、スラグ、ダストなども二次資源として対象とせざるを得なくなり、それらに対する技術開発が求められている。これらは、目的とする元素の品位が低く、鉱物相が十分に成長していないため、物理的な分離濃縮が困難であり、また不純物の濃度が高い。また、都市鉱山においても、利益の出やすい工程内リサイクルや経済価値の高い貴金属等のリサイクルから、サーキュラーエコノミーの概念を主軸とした廃棄物ゼロに近い概念に基づいたリサイクルへと技術課題が推移している。ここにおいても、分離プロセスに要するエネルギーをいかに下げ、CO₂などのGHGをも排出しないという新たな制限が加わったことによって、これまで確立されてきたように見える分離技術やプロセスであっても、改めて再構築しなければならない状況にある。

[研究開発の動向]

• 膜分離技術

ガス分離や有機溶媒分離など各種の膜分離技術が研究レベルから実用化レベルへと広がっているが、水処理膜が依然として最大のマーケットであり、日本企業が海水淡水化用の逆浸透膜や半導体製プロセス用膜の主要メーカーである。しかし、精密ろ過や限外ろ過膜においては韓国や中国の技術開発が進んできている。かつては日米の数社のみが製造可能といわれていた海水淡水化膜でも日本のシェア低下が起きている。また、海水淡水化を志向した革新的膜として、多孔性ナノ粒子を添加したポリアミド膜やアクアポリンの利用があるが、このような革新的分離膜の提案が日本からはなされていない。

さらに、膜分離は有機化合物水溶液および有機溶媒混合液の処理への利用が拡大しており、NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラムにおいて、水溶液中からの有機溶媒などの膜回収を目的とする「産業廃水からの革新膜による有機資源回収」(2022年度～) が採択されている。

分離と反応を統合化した反応分離プロセスも重要な研究トレンドである。たとえば、欧州 Horizon 2020 の MACBETH プロジェクトでは、水素製造、プロパン脱水素によるプロピレン合成、酵素を用いたバイオ燃料製造において、膜反応器の実用化を目指した研究を進めている。

• 化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

化学プロセスにおける成分分離技術は、これまでは蒸留が大きな役割を担ってきた。蒸留は熱エネルギー多消費型のプロセスであるが、その一方で、シンプルな装置構造を持ち、連続運転が可能であることから、産業分野で広く利用されてきた。しかし、2050年のカーボンニュートラル実現のためには、さらなる省エネルギー化は避けては通れず、膜分離や吸着などの新材料による非熱駆動型の分離技術のイノベーションが期待されている。

また、水素関連の研究開発が世界各国で加速している。ドイツでは、連邦教育研究省 (BMBF) のコペルニクスプロジェクトやエネルギー機構の Power to Gas 戦略プラットフォームなどで電解水素製造、貯蔵、再生可能エネルギー発電に関する研究・実証プロジェクトが行われている。米国でも、エネルギー省 (DOE) で再生可能エネルギー由来の発電電力を利用した水素製造やその利用を中長期的なターゲットとして位置づ

け、燃料電池の技術開発等に注力している。我が国では、NEDO「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」において100m²規模の太陽光受光型光触媒水分解パネル反応器と水素・酸素ガス分離モジュールを連結した光触媒パネル反応システムを開発し、世界で初めて実証試験に成功している。

このように、化学プロセスに関してはカーボンニュートラルに資する新しいプロセス構築のために、原料、燃料、エネルギー効率などを考慮したシステム化を見据えた研究が加速しており、分離技術についても化学プロセス全体としての最適化が必要となっている。

• CO₂分離技術

CO₂分離はCCUSの起点技術であるため、CCUS向けのCO₂分離技術の開発が積極的に進められている。石炭火力発電所の燃焼後回収では、比較的CO₂分圧が低く、1級あるいは2級のアミン系化学吸収液が利用されている。天然ガス精製では比較高い分圧のCO₂ガスが対象となるため、3級アミン系化学吸収液あるいは、メタノール等の物理吸収液が使われている。これら排出抑制型のCO₂分離技術は、すでに実証・実装フェーズに入りつつある。

膜分離はCO₂分離回収コストを低減化させるものとして注目されており、現在もNEDOなどを通じて研究開発プロジェクトが行われている。米国Membrane Technology Research Inc.は高性能CO₂分離膜を開発しており、分離膜開発の性能ベンチマークの位置づけとなっている。日本でも、ゼオライト膜を活用したものや高分子をつかった分離膜の開発が進められ、工場等での実装に向けた動きが出始めている。

一方、負排出型CO₂分離は、Direct Air Capture (DAC) と呼ばれ、高度な挑戦的研究課題である。熱力学的には不利なプロセスであり、高コストになることが予想され、経済的に成立させることはハードルが高い。しかし、カーボンニュートラルを実現するためにはDACが必要になる可能性もあり、特に欧米では多額の資金援助を受けて研究が急加速している。化学吸収剤としては大気程度の低濃度CO₂回収を目指した新たな回収剤の開発が報告されており、膜分離としては藤川茂樹（九州大学）らの研究グループが極めて高いCO₂透過度を有する分離膜を開発している。一方、米国では、電気化学的手法を用いてCO₂を分離回収する新しい手法も提案されている。また近年では、回収と利用を一体化した技術の開発も進められている。例えば、倉本浩司（産総研）らとデルフト工科大学の研究グループや、清水研一（北海道大学）らの研究グループは、低濃度CO₂を吸着し、吸着CO₂から合成ガスなどを製造する触媒およびプロセス技術を開発している。

これらとは別に、コンクリートの混和材にCO₂を吸収する材料を用いて、セメントとCO₂を反応させ、コンクリートにCO₂を吸収・固定化するものがある。これも化学吸収を用いたCO₂分離の延長技術といえる。

• 固体を対象とした分離濃縮技術（天然鉱山、都市鉱山）

固体の分離技術は、歴史的には鉱石の分離濃縮技術である選鉱・鉱物処理技術として発展した。それらは大きく分けて、破碎・粉砕などの単体分離技術と、単体分離後の対象を、粒子径、比重、形状、磁性、電気的特性、ぬれ性などの物理的特性を用いて相互分離する物理的分離技術とに大別される。物理的分離技術の後には、選択的に浸出あるいは溶解させてイオンまたは液体とし、化学的に分離精製する技術が採用される。一般に、化学的分離技術に比べて物理的分離技術は省エネルギーであるが精度が低く、しばしば化学的分離技術の前処理として利用される。昨今は、これらの技術をリサイクルの前処理技術として応用されることが多い。

物理的分離技術では、破碎・粉砕といった単体分離に最もエネルギーを要する。破碎・粉砕では、投入エネルギーのほとんどが、利用できない音や熱に飛散してしまうからである。したがって、投入されるエネルギーを可能な限り異相境界面の単体分離に集中するような研究開発が進められている。また、昨今では、機械的な外部刺激だけでなく、電気パルスやレーザー、マイクロウェーブなどの電氣的、光学的な外部刺激を単体分離に利用する研究開発も進められている。

単体分離後の物理的分離技術では、大きいものと微小なものの両端の大きさに対する分離技術開発が盛ん

に行われている。センチメートル以上の大きさの対象では、現状ではもっぱら人手で分別されているところを自動化するために、センサーと組み合わせで精緻に分離するセンサー選別、あるいはソーティングと呼ばれる技術開発が行われている。これらの技術は今後も、多種多様なセンサー技術開発と、画像解析などのAI技術、ロボット開発と組み合わせられて発展するものと思われる。一方、マイクロメートルオーダー以下の微小粒子では、界面のぬれ性の違いを利用した浮選や、ナノ流体や磁性流体との組み合わせを利用した比重選別法など、粒子に対する選択性を増加させる工夫と組み合わせた選別方法が開発されている。

化学的分離技術では、固体を選択的に浸出あるいは溶解させて、選択性を高めることによる省エネルギー化をはかる技術開発が行われている。メカノケミカル反応では、固体中の成分の一部を機械的なエネルギーにより化学変化させて、選択的な反応性を付与することが行われている。また、イオン液体や深共晶溶媒、あるいは超臨界を利用した方法などで、回収対象となる元素に対する選択性を高める工夫も行われている。

以上のように、固体の分離技術としては、固体のあらゆる物理的、物理化学的、化学的特性の違いを利用した分離技術が開発されている。資源循環においては分離の対象が使用済み製品であり、製品使用後の処理で適用される分離技術を想定して、あらかじめ特性の違いを仕込んでおくことが原理上は可能である。このように、製品にあらかじめ分離可能な仕組みを仕込んでおく易分解・易分離設計に対する必要性も徐々に認識されているが、現状ではまだ画期的な技術開発には至っていない。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 膜分離技術、化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

有機化合物水溶液および有機溶媒混合液の膜分離技術については、NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラム「産業廃水からの革新膜による有機資源回収」(2022年度～)で取り組まれている。水液中に溶解している有機溶媒・油脂などの膜回収が研究ターゲットとなっており、有機溶媒混合物よりは分子量の差が大きく、膜分離の難易度は低い。実用化としては、有機化合物水溶液の膜分離技術が先行するであろう。

また、膜反応器は排水の生物処理と分離膜を組み合わせた膜分離活性汚泥法(メンブレンバイオリアクター)では世界的に実用化が進んでいるが、化学プロセスへ膜反応器(反応分離プロセス)を応用する研究も進んでいる。戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「エネルギーキャリア」(2014～2017年度)では、金属パラジウム膜、シリカ膜を用いて、アンモニア分解、シクロヘキサン脱水素、ヨウ化水素分解、硫酸分解などの反応で、反応分離システムを利用することによる反応温度の低温化と反応速度の向上が報告されている。NEDOプロジェクト「機能性化学品の連続精密生産プロセス技術の開発」(2019年度～)では、炭素膜とゼオライト膜を用いた反応系内からの脱水を行うエステル化膜反応器の開発が進んでいる。

さらに、再生可能エネルギーから製造された水素(グリーン水素)は、CO₂の有効利用技術として注目される。特に逆シフト反応により合成ガスを一旦製造すると、既存の化学プロセスへの展開が可能となる。メタネーションやメタノール合成においてもCO₂を水素で還元し水が生成するが、これらの反応では平衡論の制約が強く、脱水膜によって水を除去することで平衡をシフトして反応を効率的に進むと期待される。

Crude to Chemicals (C2C) のような汚れ系(ダーティサービス)にも利用可能な新たな反応分離プロセスの開発も必要になる。実際に、サウジアラビアのサウジアラムコは、加熱原油からの化学品直接製造(TC2C)プログラムを推進しており、米国のMcDermott、シェブロン・ルムス・グローバルとともに開発・実証を進めている。

• CO₂分離技術

排出抑制型のCO₂分離技術としては、NEDO グリーンイノベーション基金事業としてCO₂の分離回収等技術開発プロジェクトを始動させており、①天然ガス火力発電排ガスからの大規模CO₂分離回収技術開発・実証、②工場排ガス等からの中小規模CO₂分離回収技術開発・実証が進められている。また、CO₂分離素材

の標準評価共通基盤の確立にも取り組まれている。これまでも火力発電所・工場排ガスなどからのCO₂回収を目的とした分離素材の開発が進められてきたが、実ガスを用いたCO₂分離回収標準評価基盤がなかったため、研究開発フェーズから実証に向けた技術移行が困難であった。この実ガス評価基盤が整備されることによって、CO₂分離技術の実装化の加速が期待される。

一方、負排出型CO₂分離は研究開発フェーズであるが世界で競争が激化している。特に欧米では多額の資金援助を受けて、DACの研究が急加速している。先行するClimeworks社（スイス）やCarbon Engineering社（カナダ）などは、化学吸収法をベースとするものである。また、米国エネルギー省は5年間で35億ドルを投じ、DACプロジェクトのために4つの地域ハブを開発するプログラムを推進する取り組みを発表している。吸収したCO₂を再放出・利用するためには高温処理を必要とするため、DACプラントの設置地点なども含めて検討し、全体コストの低下を図ろうとしている。これに対して、日本では、低温でもCO₂再放出が可能な吸収材および吸収プロセスの開発研究が進められている。

・固体を対象とした分離濃縮技術（天然鉱山、都市鉱山）

単体分離を促進するための技術として、機械的な破碎では達成できない選択的分離方法である電気パルス、レーザー、マイクロウェーブなどの研究開発が進められている。

電気パルスでは、1990年代より、石炭やコンクリート、電子基板を対象として、電気パルス水中破碎・粉碎法の研究開発が進められてきた。近年は、対象に合わせて放電経路や電気パルス条件を精緻に制御し、少ない印加回数で丁寧に分離させる方法が検討されている。これらの方法では、放電経路上のジュール熱やローレンツ力の発生を制御して分離に活用することが可能となることから、リチウムイオン電池の正極活物質分離や、太陽光パネル樹脂中からの金属線分離、あるいはマルチマテリアルの接着分離など、精緻な分離の実現が期待されている。

マイクロウェーブによる局所的な加熱は、固体分離のための異相境界面の局所的改質や、マルチマテリアルの接着分離への適用が検討されている。特にCFRPや接着において、樹脂の選択的剥離や分離に有効であると期待されている。

また、大規模化や効率化、自動化に対する課題に対応するため。IoT、AI、ロボットを活用した研究開発の必要性に対する意識が高まっている。特にセンサー選別あるいはソーティングと呼ばれる固体選別では、色、成分、形状を瞬時に識別するセンサー開発に、画像解析学習をはじめとするAIが利用されている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

国家プロジェクトとして分離プロセスに特化したものはないが、下記のような様々なプロジェクトの重要な要素技術として研究開発が実施されている。

・ NEDO グリーンイノベーション基金事業

「CO₂の分離回収等技術開発」「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」「CO₂を用いたコンクリート等製造技術開発」「CO₂等を用いたプラスチック原料製造技術開発」「製鉄プロセスにおける水素活用」「再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造」など

・ NEDO ムーンショット型研究開発事業「目標4：2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」

「大気中からの高効率CO₂分離回収・炭素循環技術の開発」「冷熱を利用した大気中二酸化炭素直接回収の研究開発」「大気中CO₂を利用可能な統合化固定・反応系（quad-C system）の開発」「“ビヨンド・ゼロ”社会実現に向けたCO₂循環システムの研究開発」など

・ RITE CO₂回収技術高度化事業

「固体吸収剤等研究開発事業」「分離膜モジュール」

・ JST 未来社会創造事業 探索加速型「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域

- ・JST 未来社会創造事業 探索加速型「持続可能な社会実現」領域

欧州では、Horizon 2020のもとで反応分離プロセスに関する研究が推進されている。C2FUEL、MEMERE、ARENHA、MACBETHはいずれも水素あるいはCO₂に関連し、反応と組み合わせることでも有用物の生産に結び付けることをめざしている。

- ・MACBETH (Membranes And Catalysts Beyond Economic and Technological Hurdles)
総予算 5.6M€、期間 2020.4–2024.3、研究機関数 11
- ・ARENHA (Advanced materials and Reactors for ENergy storage tHrough Ammonia)
総予算 20.7M€、期間 2019.11–2024.10、研究機関数 24
- ・C2FUEL (Carbon Captured Fuel and Energy Carriers for an Intensified Steel Off-Gases based Electricity Generation in a Smarter Industrial Ecosystem)
総予算 4M€、期間 2019.6–2023.11、Coordinated by ENGIE
- ・MEMERE (MEthane activation via integrated MEmbrane Reactors)
総予算 5.4M€、2015.10–2020.1、Coordinated by ENGIE

2.1

(5) 科学技術的課題**・プロセス強化技術**

単一の単位操作のみで分離を行うのではなく、複数の技術を組み合わせるプロセス強化技術が注目される。反応と膜分離を組み合わせた膜型反応器は、平衡支配の反応系から特定成分を引き抜くことで平衡シフトし反応速度を向上することが可能である。膜反応器に関する国際会議 International Conference on Catalysis in Membrane Reactor (2022年8月、東京開催) は、コロナ禍にもかかわらず外国から出席者が50%以上であり、ヨーロッパで研究が盛んであることがうかがわれたが、この分野の日本での研究はまだ盛んと言えない。

・分離プロセスのプラットフォームづくり

分離手法には、蒸留、吸収、抽出、膜分離、吸着など多くの分離手法があるため、種々の分離手法の優劣を評価する手法の確立が必要である。さらには、分離工程のみならず、最終製品までの全体を統合した上での最適化も必要になる。加えて、多成分系、不純物の分離に関する信頼度評価も必要になる。このようなエンジニアリングにもとづいた分離プロセスの評価技術のプラットフォームづくりが必要である。また、ハードとしての共用実験設備の設置も望まれる。具体的には、同じ燃焼排ガスをを用いることで、異なる分離手法を公平に評価することが可能になる。

さらには、評価指標を何にするのかの議論も大切である。評価指標を、分離度、コスト、LCAのいずれにするかによって最適化の結果が異なることも重要な点である。

・資源循環のための固体分離技術の体系化と易分解設計

社会的ニーズを理解した研究と基礎研究間にギャップが存在している。社会的ニーズを理解した研究においては、破壊理論の構築や固体の詳細なキャラクタリゼーションなどの基礎研究に関心が薄く、一方で破壊理論や分析手法に興味がある基礎研究は純粋な系を中心に進められている。純粋な系で得られた知見を集積させ、マルチフィジックスなシミュレーションと、これまで培われてきた現場の知見とを組み合わせ、複雑系に対する理論を体系化させることが重要である。分離技術やプロセスの開発だけでは解決できない分離対象もあり、素材や製品の製造段階から、易分解設計にしておくことも重要な方向性である。

(6) その他の課題

評価指標を、分離度、コスト、LCAのいずれにするかによって最適な分離プロセスが異なる点に注意する必要がある。補助金やカーボンプライシングなど政策的な支援施策と、研究開発をリンクさせることが重要である。

また、日本においては分離技術に特化した国家プロジェクトは少ないが、さまざまなプロジェクトの一部として研究開発されているケースが多い。分離技術に関連するプロジェクトの情報を俯瞰的に把握できるような仕組みが望まれる。Horizon 2020 やHorizon Europeでは、プロジェクト相互の検索が可能な仕組みになっており、参考になると考えられる。

また、分離技術は多岐にわたるにもかかわらず、当該技術分野の研究者数は限られており、それぞれが持つ固有の技術を相互に補完しながら研究を進めていく体制が必要と思われる。

(7) 国際比較

| 国・地域 | フェーズ | 現状 | トレンド | 各国の状況、評価の際に参考にした根拠など |
|------|---------|----|------|--|
| 日本 | 基礎研究 | ○ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> CO₂、グリーン水素関連での研究開発は活発になっている。 分離技術を中心においた国プロジェクトはなく、膜分離のトップ誌であるJournal of Membrane Scienceへの掲載数は微増に留まっている。 資源循環のための分離技術は、評価が得られにくい学問領域である上に、産業形成も不十分であり、参加者が少ない。 |
| | 応用研究・開発 | ○ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> グリーンイノベーション基金などによってCO₂分離技術の社会実装が推進されている。 資源循環のための分離技術は、経産省、NEDO、JOGMEC、環境省のプロジェクトで進められているが、技術内容はやや新規性に欠く。 |
| 米国 | 基礎研究 | ◎ | → | <ul style="list-style-type: none"> 大手企業によるCO₂吸収技術への投資が盛ん。DOEの水素関連プロジェクトでは膜分離にも取り組んでいる。 MOFや分離膜などの最先端研究も活発。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> MTRなどの膜ベンチャー（気体分離）が成長し、実プロセスに採用されつつある。 カーボンマネージメントに65億ドルの予算が計上され、DACには35億ドルをかけ開発を加速している。 資源循環についてはCritical Materials Instituteでのプロジェクトが進行中。新興企業が大規模に台頭してきている。 |
| 欧州 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> Horizon 2020には分離技術を中心としたプロジェクト（HyGrid、C2FUEL、MEMERE、ARENHA、MACBETHなど）があり、国際協力の構築の面からうまく組織化されている。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> EVONIKなど大手化学メーカーが膜分離に積極的であり、有機溶媒ろ過膜を実用化した。 北欧では長期にわたるCCS実証検討を行っており、またアイスランドではDACプラントを稼働させた。 Horizon Europeの中に難処理鉱石や都市鉱山を対象とした種々のプロジェクトが設置されているほか、EIT Raw materialsなど複数で活発に研究開発されている。また、政府からも資源循環に産業資金が投入されるような積極的な仕組み作りの働き掛けがある。 |
| 中国 | 基礎研究 | ◎ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> 膜分離のトップ誌であるJournal of Membrane Scienceへの掲載数は、8年間で約4倍と急増している。ゼオライト膜による脱水技術やCO₂からの合成ガスの研究が活発である。 |
| | 応用研究・開発 | ◎ | ↗ | <ul style="list-style-type: none"> 大学からスピンアウトしたベンチャー企業などが大学隣接地域に集積化されている。高分子膜、水素分離やゼオライト膜の実用化が進んでいる。 膜反応器が実プロセスに10か所以上で採用されている。 |
| 韓国 | 基礎研究 | ○ | → | <ul style="list-style-type: none"> 多くの大学で、分離膜やCO₂吸収液の開発と評価が進められており、論文も増加傾向にある。 |
| | 応用研究・開発 | △ | → | <ul style="list-style-type: none"> 2013年、KEPCO/KIERプロジェクトで、固体吸収材を用いた大規模試験回収装置が建設されたが、その後の動きは鈍化。 |

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ CO₂回収・貯留（CCS）（環境・エネ分野 2.1.9）
- ・ ネガティブエミッション技術（環境・エネ分野 2.4.1）
- ・ 水利用・水処理（環境・エネ分野 2.9.1）
- ・ リサイクル（環境・エネ分野 2.9.4）

参考・引用文献

- 1) 公共財団法人地球環境産業技術研究機構化学研究グループ「CO₂回収技術高度化事業（分離膜モジュール）」<http://www.rite.or.jp/chemical/project/2014/04/membrane1.html>, (2022年12月22日アクセス).
- 2) U. S. Department of Energy, “Biden Administration Launches \$3.5 Billion Program to Capture Carbon Pollution from the Air,” <https://www.energy.gov/articles/biden-administration-launches-35-billion-program-capture-carbon-pollution-air>, (2022年12月22日アクセス).
- 3) Critical Materials Institute, “CMI Technologies with Reuse and Recycling, Ames National Laboratory,” <https://www.ameslab.gov/cmi/cmi-technologies-with-reuse>, (2022年12月22日アクセス).
- 4) EIT RawMaterials, “Developing raw materials into a major strength for Europe,” <https://eitrawmaterials.eu/developing-raw-materials-into-a-major-strength-for-europe/>, (2022年12月22日アクセス).
- 5) Shigenori Fujikawa, et al., “Ultra-fast, Selective CO₂ Permeation by Free-standing Siloxane Nanomembranes,” *Chemistry Letters* 48, no. 11 (2019) : 1351-1354., <https://doi.org/10.1246/cl.190558>.
- 6) Shigenori Fujikawa, Roman Selyanchyn and Toyoki Kunitake, “A new strategy for membrane-based direct air capture,” *Polymer Journal* 53 (2021) : 111-119., <https://doi.org/10.1038/s41428-020-00429-z>.
- 7) Sahag Voskian and T. Alan Hatton, “Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture,” *Energy and Environmental Science* 12 (2019) : 3530-3547., <https://doi.org/10.1039/C9EE02412C>.
- 8) Lin Shi, et al., “A shorted membrane electrochemical cell powered by hydrogen to remove CO₂ from the air feed of hydroxide exchange membrane fuel cells,” *Nature Energy* 7 (2022) : 238-247., <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00969-5>.
- 9) Fumihiko Kosaka, et al., “Enhanced Activity of Integrated CO₂ Capture and Reduction to

- CH₄ under Pressurized Conditions toward Atmospheric CO₂ Utilization,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 9, no. 9 (2021) : 3452-3463., <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c07162>.
- 10) Lingcong Li, et al., “Continuous CO₂ Capture and Selective Hydrogenation to CO over Na-Promoted Pt Nanoparticles on Al₂O₃,” *ACS Catalysis* 12, no. 4 (2022) : 2639-2650., <https://doi.org/10.1021/acscatal.1c05339>.
 - 11) Carlito Baltazar Tabelin, et al., “Copper and critical metals production from porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, and sustainability issues,” *Resources, Conservation and Recycling* 170 (2021) : 105610., <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105610>.
 - 12) Masoud Norouzi, et al., “Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis,” *Journal of Building Engineering* 44 (2021) : 102704., <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102704>.
 - 13) Eldon R. Rene, et al., “Electronic waste generation, recycling and resource recovery: Technological perspectives and trends,” *Journal of Hazardous Materials* 416 (2021) : 125664., <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125664>.
 - 14) Camila Távora de Mello Soares, et al., “Recycling of multi-material multilayer plastic packaging: Current trends and future scenarios,” *Resources, Conservation and Recycling* 176 (2022) : 105905., <https://doi.org/10.1016/j.rescorec.2021.105905>.

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
環境・エネルギー応用