

2.1.5 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、火力発電所や製鉄所から生じるCO₂の分離、高純度水素や炭化水素の分離、海水の淡水化や各種排水の浄化、医療（人工透析、酸素濃縮）、鉱物資源や都市鉱山からの目的金属の分離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。化学プロセスにおける気体・液体の分離技術、CO₂分離技術、鉱物資源からの金属分離技術、資源循環のための分離技術などに研究開発課題がある。

(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、単体分離、メカノケミカル、センサ選別、アップサイクリング、イオン液体、深共晶溶媒、ナノ流体、磁性流体

(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、現状ではわずかに20%にすぎない。

既存の石油精製、石油化学システム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は少ない状況にある。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。非熱駆動型の分離プロセスには、膜分離や吸着などの新材料からのイノベーションが期待されている。

また、火力発電所や製鉄所、工場などから生じるCO₂分離技術の開発は喫緊の課題であり、実用化を指向した研究開発はもちろん、次世代に繋がる基盤的研究の裾野を広げていくことが大変重要である。CO₂分離技術には、物理吸収、化学吸収、分離膜、深冷分離や吸着、DAC（Direct Air Capture）などがあるが、単にCO₂を分離するだけでなく、分離した後のCO₂を有効利活用するCCUS（Carbon dioxide Capture,

Utilization & Storage) の観点から技術評価を進めていく必要がある。例えば、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分離やシェールガスをはじめとする天然ガス井戸元におけるCO₂と炭化水素との分離なども重要な課題である。

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、金属精製で発生する尾鉱、スラッジ、スラグ、ダストといった2次資源を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もとづいたリサイクルへと技術課題が変遷している。

[研究開発の動向]

• 膜分離技術

水処理膜が最大のマーケットであり、日本企業のシェアが高いが、精密ろ過や限外ろ過膜で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。

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。

水処理で最近注目される研究課題は、オイル含有水の膜処理である。石油やオイルシェールの採掘により排出される排水量は、オイル製造量の数倍に達するといわれる。オイル回収、処理水の再利用、水の廃棄のためにも、オイル含有水の膜処理技術が必要不可欠である。高分子膜およびセラミック膜および新規分離膜の開発が行われている。

一方、有機水溶液の処理に膜分離の利用が拡大している。NEDO先導プログラムでは、非水系の有機溶媒混合溶液の逆浸透分離が、蒸留や蒸発と比べて、分離エネルギーが1/100以下であることが明らかにされた。

• 化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

蒸留分離は熱エネルギー多消費型プロセスであるが、装置構造がシンプルであり、連続的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。最近では、競争力強化の観点から高効率かつ省エネルギーな分離プロセスの開発が求められており、塔頂蒸気を圧縮して熱エネルギーとして再利用するヒートポンプ蒸留や、塔内に仕切板を設け多成分系分離を可能にした塔分割型蒸留塔などで、従来比30～50%の省エネルギー化を実現している。

一方、膜分離技術は、基幹化学品を分離するプロセスで実用化された例はまだないが、膜材料、膜モジュール、膜分離プロセスなどを対象に精力的な研究開発が行われている。具体的には、JST-CREST「超空間制御に基づく高度な特性を有する革新的機能素材等の創製」において結晶性マイクロ細孔を有する材料を用いた新しい無機分離膜の研究開発が行われている。また、NEDO「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」では、光触媒を用いて水から水素を製造し、生成した水素を分離膜により分離・精製し、水素と二酸化炭素を原料として基幹化学品を製造する一連のプロセス開発が行われている。

吸着分離に関しては、NEDOエネルギー・環境新技術先導プログラム「革新的分離技術の導入による省工

「ネ型基幹化学品製造プロセス」において、オレフィン/パラフィン系の分離、水素・窒素を含む炭化水素系の分離などを対象に金属有機構造体（MOF）を用いた分離技術が検討されている。

• CO₂分離技術

CO₂分離回収を主な用途とするガス吸収液の開発が進められている。化学吸収法では、代表的なモノエタノールアミン水溶液に比べて、分離・回収エネルギーを大幅に低減するアミン吸収液の開発に成功している。物理吸収法も、代表的なポリエチレングリコールを主骨格に持つSelexol吸収液（dimethyle ether of polyethylene glycol）より高いCO₂吸収能を有するSelexol Maxが実用化されている。Selexol Maxは、ライフサイクル全体のコストが最大で17%削減可能であり、置き換えが進みつつある。アミンをシリカ等の多孔質材料に担持した固体吸収材の開発も進められており、アミンを吸収液として利用する場合に比べ、所要顕熱が低減し、溶媒に起因する潜熱損失も伴わないため、大幅な消費エネルギーの削減が期待できる。RITEが開発した固体吸収材を用いて、川崎重工業との実用化研究開発が進められており、2017年までに10 m³スケールで合成した固体吸収材を用い、1.5 GJ/ton-CO₂での低温スチーム再生性能（60℃）が実証されている。

• 固体を対象とした分離濃縮技術（天然鉱山、都市鉱山）

固体を対象とした分離濃縮技術は、選鉱から発展した物理分離プロセスと、製錬から発展した高温分離プロセス、湿式分離プロセスに大別される。

物理分離プロセスとしては、単体分離（異相境界面を選択的に破壊して、単体の状態にする）を促進するための技術開発と、相互分離（単体分離したものを相互に分離濃縮する）を高度化するための分離開発とに大別される。単体分離を促進するための技術開発では、機械的な作用力（圧縮、衝撃、せん断）を制御しながら単体分離を促進する研究開発のほかに、電気パルスやレーザー、マイクロウェーブ等を活用した異相境界選択破壊に関する研究開発や、粉碎中の発生エネルギーを利用して選択的な反応を進行させるメカノケミカル反応を利用した研究開発も実施されている。相互分離を高度化するための分離技術としては、磁性ナノ流体を用いた微粒子分離、レーザー誘起ブレイクダウン分光法（LIBS）等を利用したセンサ開発や、分離を高精度にするための機械的あるいはロボットを活用した装置の開発が進められている。

高温分離プロセスでは、原料が天然鉱石から2次資源に変遷したことによって新たに混入しはじめた有機物や微量忌避元素の分離のための熱力学的データを取得しながら、それらの相互分離精製をめざす研究開発が見受けられる。

湿式分離プロセスの開発動向は、イオン液体、深共晶溶媒、有機王水などの新たな溶媒を用いて抽出選択性を高めた分離技術開発や、亜臨界や超臨界といった新たな反応場によって選択性を高めた分離技術開発が見受けられる。また、多孔質材料や有機材料、あるいはバイオを利用した吸着材あるいは吸着プロセスの開発もさかんに行われている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 膜分離技術

有機溶媒系におけるろ過技術としては、中・高分子の溶質分離を目的とするナノろ過法がOSN（Organic Solvent Nanofiltration）やSRNF（Solvent Resistant NanoFiltration）と命名され、研究が活性化し

ている。有機溶媒系の逆浸透法については、キシレン分離がRO法で可能であることが報告されたのを契機に、OSRO (Organic Solvent Reverse Osmosis) として再び研究開発が活性化している。相変化を伴わない逆浸透法は、熱駆動型分離プロセスの蒸留や蒸発と比べて分離に要するエネルギーが1/100以下であるとされる。実際の蒸留法では熱の多重利用がなされており、過大評価している可能性もあるが膜分離法の省エネルギー性は有望である。

また、水蒸気をエネルギーおよび物資として回収する技術開発が注目されている。各種プロセスでの投入エネルギーは、水蒸気として高エンタルピーを有したまま環境に排出されるケースが多い。サブナノ細孔膜を用いた蒸気透過 (Vapor Permeation : VP) 法は、回収した水の品質が高く、また高温のまま回収できる点で優れている。高温でも高い水蒸気透過性と選択性を示すオルガノシリカなどの無機多孔性膜が注目される。

• 化学プロセスにおける気体・液体の分離技術

基幹化学品製造においては、原油資源のみならず、原料多様性の観点から、シェールガス、バイオマスのような新たな資源に関する分離技術の開発が必要になってきている。

基幹化学品製造プロセスは、基本的に反応プロセスと分離プロセスの組み合わせから成り立っているが、例えば、二酸化炭素 (もしくは一酸化炭素) と水素からメタンやメタノールを合成するプロセスでは、平衡条件から離れることが可能な膜反応器 (反応分離) に代表されるような新規プロセス開発が注目されている。また、人工光合成のようなクリーン系のみならず、Crude to Chemicalsのような不純物の多い系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。サウジアラビアのサウジアラムコは、フランスのアクセンス、テクニップFMCとの間で、原油から直接化学品を生産するCrude to Chemicals技術の共同開発を実施し、2021年までの商業化をめざしている。

• CO₂分離技術

常圧・室温付近で化学吸収させるアルカノールアミン水溶液だけでなく、近年では高圧下でも駆動可能なアミン系ガス吸収液の開発が進んでいる。東芝エネルギーシステムズでは、大牟田市で大規模実証設備を建設中であり、IHIでは、オーストラリアLoy Yang A発電所から排出されるCO₂をアミン吸収液で分離回収するプラントを稼働させている。日揮と日本ガイシは、米国テキサス州の油田回収設備において、モノリス型DDRゼオライト膜を活用した原油随伴ガスからのCO₂分離回収技術の実証実験を開始している。

新規CO₂吸収剤技術としては、九州大学の星野らにより、アミン含有ゲルを用いて中低圧のガスからCO₂を分離・変換・利用するプロセスの開発が行われている。最近、ハニカム-炭素繊維担持アミン含有ナノゲル粒子を回転カラムに用いて燃焼後の排ガスからCO₂を回収可能な温度スイング吸着プロセスを提案している。

また、CO₂とメタンをはじめとする炭化水素の分離、CO₂/水素分離、CO₂/窒素分離、CO₂/硫化水素分離などを目的としたガス吸収液の開発と評価も進められている。なかでも、イオン液体や深共晶溶媒 (deep eutectic solvents : DES) など新規物理吸収液やハイドレートを用いたCO₂分離法の開発が、国内外でさかんに実施されている。

• 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、機械的な破壊では達成できない選択的分離方法である電気パルス、レーザなどの研究開発が進められている。また、通常とは異なる選択性での融解や電析を達成しうる相互分離の手法として、イオン液体や深共晶溶媒を用いた金属やプラスチックの分離に対する研究開発が進められて

いる。

吸着剤としては、磁性ナノ流体が、磁性粒子の選択的な吸着特性と、ナノ流体の分離特性とを組み合わせ、レアアース等の分離に対する研究開発に使われている。また、金属有機構造体（MOF）では、金属と有機リガンドとの広範な相互作用が明らかにされつつあり、活性炭以外の有効な吸着剤が存在しない金属の選択的な相互分離に応用できる可能性が高く、注目されている。

〔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は、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。

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、「持続可能な社会実現」領域

ALCA（先端的低炭素化技術開発）「炭素循環化学システムの高効率化」

NEDO「機能性化学品の連続精密生産プロセス技術の開発」

NEDO「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」（人工光合成プロジェクト）

NEDO ムーンショット「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」

NEDO 先導研究プログラム「エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/新産業創出新技術先導研究プログラム/未踏チャレンジ」

JOGMEC「銅原料中の不純物低減技術開発事業/海底熱水鉱床関連事業」

一方、米国ではALTSEPというSustainable Separation Processesに関する取り組みが2015年から始まり、膜や吸着に関する材料からそれを利用するプロセスまでを対象に産学連携体制での検討を開始している。2019年には、ACS、AIChE、NISTの連名で、A Road Map to Accelerate Industrial Application of Less Energy-Intensive Alternative Separationsを発表し、分離プロセスバリューチェーンの階層ごとのワークショップを設置することで精緻な検討がなされている。

（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。さらに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、反応速度の向上が可能である。

・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り、特徴ある分離が可能となる一方で、分離したい対象ごとにも種々の条件が異なり、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、分離ユニットのみならず、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。

・固体を対象とした分離濃縮技術（天然鉱山、都市鉱山）の科学的理解

対象が複雑であり、物理的、化学的な現象の複雑な組み合わせで達成されるものであるが、その物理現象を科学的に理解することが重要である。純粋系、単純系で得られている知見を体系化し、実験的な検討とマルチフィジックスシミュレーションとの組み合わせによって知見を集積することが必要である。

(6) その他の課題

日本においては分離プロセス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。関連プロジェクトについて、情報を俯瞰的に把握できるような仕組みが望まれる。

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

膜分離技術

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	○	→	いくつかの国家プロジェクトで研究開発が進行中だが、膜分離はプロジェクトの一部の位置づけである。
	応用研究・開発	○	→	RITEのCO ₂ 分離膜プロジェクトが進行中。ムーンショットには膜分離も要素技術として取り上げられる。
米国	基礎研究	◎	→	DOEは水素関連プロジェクトを2020年から開始。膜分離、CO ₂ 回収プロジェクトも行われている。
	応用研究・開発	◎	→	Membrane Technology&Researchなど膜ベンチャーが成長し、実プロセスに採用され始めている。DOEプロジェクトも数多い。
欧州	基礎研究	◎	↗	Horizon 2020に分離膜を中心としたプロジェクトがあり、国際協力もうまく組織化されている。
	応用研究・開発	◎	↗	水処理膜以外の実用化が進んでいる。EVONIK：有機溶媒ろ過膜など。
中国	基礎研究	◎	↗	南京工業大学が無機分離膜、天津工業大学が高分子膜研究を牽引。論文数が増え、質も高い。
	応用研究・開発	◎	↗	大学発ベンチャー企業が多数。水素分離やゼオライト膜、膜反応器などで実用化が進んでいる。
韓国	基礎研究	○	→	Horizon 2020 (NANOMEMC2) で欧州と共同研究を実施した。論文数が増加し、日本の論文数の1.5倍以上。
	応用研究・開発	△	→	かつてはKRICTなどで大型プロジェクトを行っていたが、最近はないと思われる。

化学プロセスの気体・液体の分離技術

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	◎	↗	早稲田大学、神戸大学、産総研、広島大学を中心に膜分離に関する国家プロジェクトを実施中。
	応用研究・開発	○	↗	JST、NEDOによる分離技術に関する大型プロジェクトが開始されている。
米国	基礎研究	◎	↗	ExxonMobil、Georgia Tech、Imperial College Londonが、原油の直接分離。
	応用研究・開発	○	→	ALTSEPなど学会が中心となり産学連携体の構築が進んでいる。

欧州	基礎研究	◎	↗	Horizon 2020にて、無機分離膜の開発並びに反応分離プロセスの研究がなされている。
	応用研究・開発	△	→	Horizon 2020にて、すべての膜材料を対象に大規模な研究が行われている。
中国	基礎研究	◎	↗	大連理工大学、天津工業大学などで分離膜の開発が加速している。
	応用研究・開発	△	↗	上記大学からスピンアウトしたベンチャー企業などが集積化されている。
韓国	基礎研究	◎	↗	多くの大学の研究所にて膜分離技術に関する研究が行われている。
	応用研究・開発	△	→	CO ₂ 分離・回収に関するプロジェクト内で分離膜の開発が行われている。

CO₂分離技術

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	○	→	RITE、産総研、名古屋大学、京都大学、神戸大学、九州大学、日本大学などにおいて、ガス吸収液やゲル、分離膜の研究が実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	CO ₂ 分離回収の実証試験中。日本CCS調査によるCCS実証試験は、2019年11月でCO ₂ 圧入量30万tを達成した。
米国	基礎研究	◎	↗	イオン液体によるCO ₂ ガス吸収液やハイドレートを利用したCO ₂ /CH ₄ などの研究がさかん。
	応用研究・開発	○	↗	ガス吸収液、プロセス開発が進められており、酸性ガスの高効率分離が可能。CO ₂ -EORの開発や固定化アミンによるTSAプラント実証中。
欧州	基礎研究	◎	↗	ポルトガルのアヴェイロ大学やノバ・デ・リスボン大学などにおいて、イオン液体や深共融溶媒を用いたガス分離の研究が行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	ガス吸収液とプロセスの開発・実証が進められている。固定化アミンによるTSAプラント実証中。
中国	基礎研究	◎	↗	多くの大学でガス吸収液の開発と評価が進められており、論文数も増加傾向。
	応用研究・開発	○	↗	Tianjinにて、GreenGenプロジェクトによる400 MWのIGCCとEOR目的のCCSを稼働中。
韓国	基礎研究	◎	↗	多くの大学でガス吸収液の開発と評価が進められており、論文数も増加傾向。
	応用研究・開発	△	→	KEPCOとArstromaは、Dangjin火力発電所にて、CO ₂ 分離膜設備の稼働準備中。

固体を対象とした分離濃縮技術 (天然鉱山、都市鉱山)

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	○	↘	境界学問領域である上、研究開発を支える産業形成がなされておらず、研究者が少ない。
	応用研究・開発	○	→	NEDO、環境省などのプロジェクトで研究がなされているが、分野間の連携が十分ではなく、技術開発内容にはやや新規性が欠けている。
米国	基礎研究	○	→	中国に続く報告件数を維持している。
	応用研究・開発	◎	↗	CMI (Critical Materials Institute) でのプロジェクトが多数進行中であり、活発である。
欧州	基礎研究	○	→	ドイツ、フランスが牽引、英国、イタリアがそれに続く。新興国の台頭に押され気味である。
	応用研究・開発	◎	↗	Horizon 2020で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やMETGROW+ projectなど複数で活発に研究開発されている。
中国	基礎研究	◎	↗	基礎研究案件数を伸ばしており、論文数や学会での報告件数では他の国を圧倒している。
	応用研究・開発	◎	↗	国家主導でLiB分離濃縮技術開発センターを複数建設。迅速に開発拠点形成を進めている。
韓国	基礎研究	○	→	特に湿式分離プロセスでの伸びがみられるが、他の新興国に押されて低調。
	応用研究・開発	△	→	国をあげての大きなプロジェクトはないと思われる。

(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

- ・ 化学エネルギー利用 (環境・エネ分野 2.1.12)
- ・ 水循環 (水資源・水防災) (環境・エネ分野 2.2.3)
- ・ 水利用・水処理 (環境・エネ分野 2.2.4)
- ・ 除去・浄化技術 (大気、土壌・地下水) (環境・エネ分野 2.2.5)

参考・引用文献

- 1) David S. Sholl and Ryan P. Livery, “Seven Chemical separations to change the world”, *Nature* 532, no. 7600 (2016) : 435-437. doi : 10.1038/532435a
- 2) B. -H. Jeong et al., “Interfacial polymerization of thin film nanocomposites : A new concept for reverse osmosis membranes”, *Journal of Membrane Science* 294, no. 1 (2007) : 1-7. doi : 10.1016/j.memsci.2007.02.025
- 3) C. Y. Tang et al., “Desalination by biomimetic aquaporin membranes : Review of status and prospects”, *Desalination* 308 (2013) : 34-40. doi : 10.1016/j.desal.2012.07.007
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「平成30年度中間報告 NEDO 先導研究プログラム/ エネルギー・環境新技術先導プログラム/有機溶剤の超ろ過膜法開発による化学品製造プロセス革新」, https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201904/20190000000214.html (2020年12月30日アクセス).
- 5) JST 低炭素社会戦略センター「CCS (二酸化炭素回収貯留) の概要と展望-CO2 分離回収技術の評価と課題-」, <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2015-pp-08.pdf> (2020年12月30日アクセス).
- 6) JST-CREST「精密分子ふるい機能の高度設計に基づく無機系高機能分離材料の創製」, https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/43/43_04.html (2020年12月30日アクセス).
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」, https://www.nedo.go.jp/activities/EV_00296.html (2020年12月30日アクセス).
- 8) JST 低炭素社会戦略センター「低炭素社会の実現に向けた 技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書」, https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201901/20180000000059.htm (2020年12月30日アクセス).
- 9) D. -Y. Koh et al., “Reverse osmosis molecular differentiation of organic liquids using carbon molecular sieve membranes”, *Science* 353, no. 6301 (2016) : 804-807. doi : 10.1126/science.aaf1343
- 10) Jubao Gao, Yu Hoshino and Gen Inoue, “Honeycomb-carbon-fiber-supported amine-containing nanogel particles for CO2 capture using a rotating column TVSA”, *Chem. Eng. J.* 383 (2020) : 123123. doi : 10.1016/j.cej.2019.123123
- 11) Less Energy-Intensive Alternative Separations (AltSep), “Sustainable Separation Processes A Road Map to Accelerate Industrial Application of Less Energy-Intensive Alternative Separations”, National Institute of Standards and Technology (NIST), <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/greenchemistry/redesign/roundtables/altsep-report-2019.pdf> (2020年12月30日アクセス).
- 12) Kirstie A. Thompson et al., “N-Aryl-Linked Spirocyclic Polymers for Membrane Separations of Complex Hydrocarbon Mixtures”, *Science* 369, no. 6501 (2020) : 310-315. doi : 10.1126/science.aba9806
- 13) 苫小牧における CCS 大規模実証試験 30万トン圧入時点報告書 (「総括報告書」) 概要、https://www.japanccs.com/wp/wp-content/uploads/2020/05/report202005_overview.pdf (2020年12月30日アクセス).