

## 化学研究グループ

### グループメンバー(2021年12月末)

グループリーダー・主席研究員	中尾 真一	研究助手	荒木 華子
サブリーダー・主席研究員	長谷川 俊之	研究助手	大西 紀子
主席研究員(技術統括)	余語 克則	研究助手	尾方 秀謙
副主席研究員	馬場 宏治	研究助手	小倉 公美子
主任研究員	甲斐 照彦	研究助手	鹿嶋 麻衣
主任研究員	後藤 和也	研究助手	片岡 梢
主任研究員	Firoz Alam Chowdhury	研究助手	菰野 恵子
主任研究員	村岡 利紀	研究助手	白井 隆一
主任研究員	安原 健一郎	研究助手	杉本 理絵
主任研究員	龍治 真	研究助手	手嶋 孝
研究員	伊藤 史典	研究助手	鳴瀧 陽三
研究員	木下 朋大	研究助手	藤原 洋一
研究員	清川 貴康	研究助手	森 恵子
研究員	Quyen Thi Vu	研究助手	森 美佐都
研究員	段 淑紅	研究助手	山田 美久
研究員	淵上 暢彦	研究助手	吉野 直美
研究員	孟 烈	研究助手	米澤 順子

## CO<sub>2</sub>分離・回収技術の高度化・実用化への取り組み

### 1. CO<sub>2</sub>分離・回収技術の研究開発

2015年12月のCOP21で「パリ協定」が採択され、異常気象など気候変動による悪影響を最小限に抑えるために、産業革命前からの世界の平均気温の上昇を「2℃より充分低く保ち、1.5℃に抑える努力を追求する」ことが目標とされた。その後、さらなる気温上昇や世界規模で発生している甚大な自然災害など危機感の高まりを受けて、先の2021年11月のCOP26におけるグラスゴー気候合意では、気温上昇幅を「1.5℃に制限する努力の追求を決意」とされ、世界で初めて1.5℃が数値目標となった。IPCCによると、1.5℃目標のためには、2010年比で2030年までにCO<sub>2</sub>を45%削減し、2050年までにネットゼロを達成する必要がある。

我が国においても2020年10月の「2050年カーボンニュートラル」宣言と、2020年12月に策定(2021年6月詳細策定)された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を受けて、様々な方面からの地球温暖化防止のための取り組みが推し進められている。カーボンニュートラルを可能とする重要な革新的技術としてCCUS(Carbon dioxide Capture,

Utilization and Storage)/カーボンリサイクルがある。CCUS/カーボンリサイクルでは、「CO<sub>2</sub>を炭素資源として捉えて、分離・回収したCO<sub>2</sub>の燃料や素材への再利用(CCU)」と「分離・回収したCO<sub>2</sub>の地中貯留(CCS)」の組合せにより、大きなCO<sub>2</sub>削減効果が見込まれている。さらに、CO<sub>2</sub>分離・回収技術はCCUSの基盤となることが示され、2050年度までにCO<sub>2</sub>分離・回収コスト1,000円/t-CO<sub>2</sub>を目指し開発を進めることや様々なCO<sub>2</sub>排出源に対応する分離・回収技術を確立していくこと等が、目標として示されている。また、カーボンニュートラルを実現するためには、ネガティブエミッション技術が必要であり、特に最近注目されている大気中からのCO<sub>2</sub>の直接回収すなわちDirect Air Capture(DAC)は重要であり、2021年7月に改訂された「カーボンリサイクル技術ロードマップ(経産省)」では、進展のあった新たな技術分野としてDACが追記された。

このような背景を受けて、様々なCO<sub>2</sub>排出源に対し、最適な分離・回収技術を提案することにより、CCUSの実用化を推進していかなければならない。なかでも地球

温暖化対策として CO<sub>2</sub> の大規模削減が期待できる CCS を早期に導入、実用化するためには、大規模発生源等から排出される CO<sub>2</sub> 分離・回収コストの低減が重要である。

化学研究グループでは、CO<sub>2</sub> 分離・回収技術の研究開発を行っており、これまでに化学吸収法、固体吸収法、膜分離法で世界をリードする研究開発成果を上げてきた。材料の開発に始まり、加工、システム検討までを一貫して研究開発していることが特徴である。

化学吸収法においては、新化学吸収液の開発目標とした分離・回収エネルギー 2.0GJ/t-CO<sub>2</sub> を達成するとともに、吸収液からの CO<sub>2</sub> 回収温度を 100℃以下で可能とする画期的な吸収液を見出すことに成功した。また、COURSE50(「環境調和型プロセスの技術開発」プロジェクト、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)委託事業)で開発した化学吸収液は、商用化されている。

固体吸収法においては、CO<sub>2</sub> 高効率回収・低エネルギー消費型の固体吸収材の研究開発に取り組み、これまでに、低温で CO<sub>2</sub> 脱離性能の良い固体吸収材・システムを見出している。現在、NEDO 委託事業において民間企業と共同で石炭火力発電所の実燃焼排ガスによるスケールアップ試験の準備を進めている。

膜分離法は、圧力を有するガス源から CO<sub>2</sub> を低コスト、省エネルギーで分離するプロセスとして期待されている。RITE では石炭ガス化複合発電(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)等の高压ガスから低コスト、省エネルギーで CO<sub>2</sub> を回収することを目指した膜および膜エレメントの開発を行っている。実用化を目指し、量産化を念頭に連続製膜技術、および膜エレメント製造技術等の開発を進めるとともに、実ガスを用いた膜エレメントの検証試験を実施し、商用化を目指して取り組んでいる。

また、新たに NEDO のムーンショット型研究開発事業の中で大気中から CO<sub>2</sub> を回収 DAC(Direct Air Capture)し、燃料や原料として利用する技術の検討を開始した。低濃度 CO<sub>2</sub> の分離・回収に適したアミン化合物の開発を進めながら、金沢大学および民間企業と協

力して、大気中から高効率で CO<sub>2</sub> を分離回収できる DAC システムの開発に取り組んでいる。

以上のように、幅広い次世代の礎となる革新的な技術開発に取り組み、CO<sub>2</sub> 削減に向けた研究開発をリードするとともに、社会実装される技術確立を目指している。また、International Test Center Network(CO<sub>2</sub> 分離・回収技術の研究開発を推進する世界各地の施設のグローバル連合)に加盟し、CO<sub>2</sub> 分離・回収技術の早期実用化に向けて海外ネットワークを利用する活動も推進している。

## 2. 化学吸収法

吸収法は、混合ガス中の CO<sub>2</sub> を溶液中に選択的に溶解させることで CO<sub>2</sub> を分離する。特に、溶液中のアミンと CO<sub>2</sub> との化学反応を利用した化学吸収法は、燃焼排ガス等、比較的低 CO<sub>2</sub> 濃度の混合ガスへの適用が可能であり、CCS 分野では最も成熟した CO<sub>2</sub> 分離・回収技術の一つである。

化学吸収法では、溶液再生工程でのエネルギー消費やアミンの劣化などがコスト増大の要因となる。RITE は、アミンの分子構造がこれらの要因と密接に関わることに着目し、新規アミンの開発にいち早く着手した。2004 年に開始した「低品位廃熱を利用する二酸化炭素分離・回収技術開発(COCS)」(経済産業省(METI)補助事業)以降、主に製鉄プロセスを対象に、CO<sub>2</sub> 分離・回収エネルギーおよびコスト低減を可能とする高性能アミン系化学吸収液の開発を実施した。

製鉄プロセスにおける CO<sub>2</sub> 削減 30%を目標とした COURSE50 プロジェクトでは、RITE は、日本製鉄株式会社と共同で化学吸収法の高度化に取り組んでいる。ここで開発した化学吸収液およびプロセスは、2014 年に商用化した日鉄エンジニアリング株式会社の省エネ型 CO<sub>2</sub> 回収設備 ESCAP<sup>®</sup>に採用された。これまでに2基の商業設備が稼働し、1号機は室蘭製鉄所構内において飲料等を含む一般産業用途向けに、2号機は新居浜西火力発電所において近接する化学工場の化学副原料用に CO<sub>2</sub> を製造している。前者は製鉄所の熱風炉燃焼排ガスを CO<sub>2</sub> 回収源とする化学吸収法による商業設備とし

て世界初のものであり、後者は石炭火力発電の燃焼排ガスを CO<sub>2</sub> 回収源とする化学吸収法による CO<sub>2</sub> 分離回収設備として日本初の商業設備である。

また、最新の研究では、水以外の溶媒を用いた吸収液において、吸収形態および分極影響を制御することで更なるエネルギー消費低減の可能性を見出しており、新規溶媒および組成検討に継続して取り組んでいる。



図1 省エネ型 CO<sub>2</sub> 回収設備 ESCAP<sup>®</sup>  
(住友共同電力株式会社新居浜西火力発電所内)

### 3. 固体吸収法

固体吸収材は、アミンを水などの溶媒に溶かした化学吸収液と異なり、アミンをシリカや活性炭などの多孔質材料に担持したものである。固体吸収材を用いたプロセスは、溶媒に起因する蒸発熱や顕熱を抑制できることから、CO<sub>2</sub> 分離・回収エネルギーの低減が期待できる。

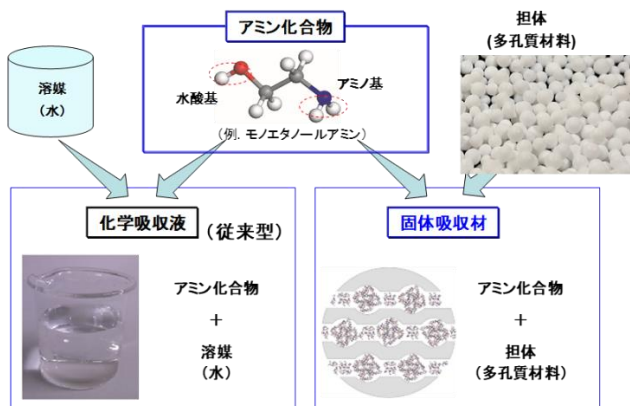


図2 化学吸収液と固体吸収材

2010年、RITEは主に石炭火力発電所の燃焼排ガスからのCO<sub>2</sub>分離・回収を対象に、固体吸収材の開発に着手した(METI 委託事業)。基盤研究フェーズ(2010~2014 年度)では、固体吸収材に適した新規アミンの開発に成功し、ラボスケール試験において、分離・回収エネルギー1.5GJ/t-CO<sub>2</sub>以下の目標を得た。本固体吸収材システムは、低エネルギー回収のみならず、排熱利用が可能なレベル(60℃)の低温プロセスを可能とする革新的な材料である。アミン系固体吸収材を用いた他の事業と比較して、本事業の低温再生という観点では世界トップの水準である。2015~2019 年度までの実用化研究フェーズ(METI/NEDO 委託事業)では、川崎重工業株式会社をパートナーとして、固体吸収材のスケールアップ合成(>10m<sup>3</sup>)、ベンチスケール試験(>5t-CO<sub>2</sub>/day)、石炭火力発電所での実ガス曝露試験などを実施した。

2020 年、RITE は川崎重工業株式会社とともに NEDO 委託事業「先進的二氧化碳素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究」に採択された。本事業では、関西電力株式会社の協力を得て、パイロットスケール試験設備(40t-CO<sub>2</sub>/day 規模)を舞鶴発電所内に建設し、2022 年度後半から石炭火力発電所の燃焼排ガスからの CO<sub>2</sub> 分離・回収試験を開始する予定である。



図3 固体吸収法の開発ロードマップ

現在、RITE では、パイロットスケール試験に向けて、固体吸収材のスケールアップ合成やベンチスケール試験の成果を基に最適化した固体吸収材の 100m<sup>3</sup> スケール

ルでの製造を進めている。また、材料劣化機構の解明と劣化防止技術の開発、プロセスシミュレーション技術による効率的な運転条件の検討なども進めている。

#### 4. 膜分離法

膜分離法は、圧力差によって分離膜の供給側から透過側へ CO<sub>2</sub> を透過・分離する分離法である。そのため、高圧ガスである燃焼前回収(Pre-combustion)への適用により、低コスト、省エネルギーでの CO<sub>2</sub> 分離・回収が期待される(図 4)。

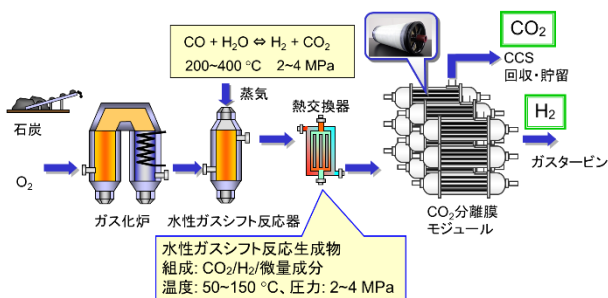


図 4 分離膜を用いた石炭ガス化複合発電(IGCC)からの CO<sub>2</sub> 分離・回収

RITE では、高密度のアミノ基を有するポリアミドアミン dendrimer を用いた新規な高分子系材料が優れた CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub> の分離性能を有することを見出し、この dendrimer と架橋型高分子材料の分離機能層を有する複合膜(分子ゲート膜)の開発を行ってきた。分子ゲート膜の概念図を図 5 に示す。

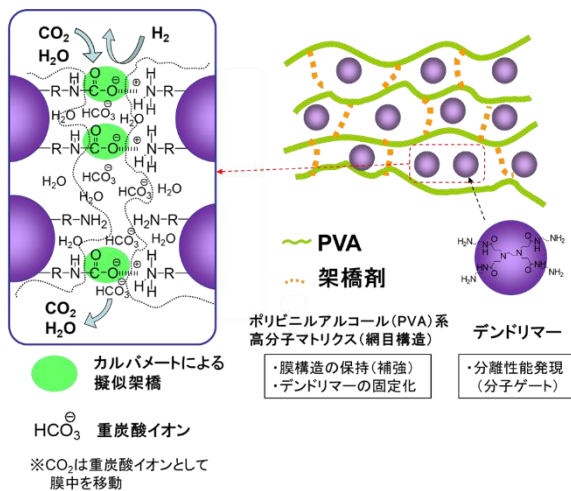


図 5 分子ゲート膜の概念図

ここに示すように、透過機構としては、加湿条件で、膜中に取り込まれた CO<sub>2</sub> が膜中のアミノ基とカルバメートや重炭酸イオンを形成し、分子サイズの小さな H<sub>2</sub> の透過を阻害することで、従来の CO<sub>2</sub> 分離膜では分離が難しかった CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub> を効率良く分離できると考えている。また、高圧条件への適用のために、ポリビニルアルコール(PVA)系の架橋高分子マトリクスを使用し、十分な耐圧性を有する膜材料を開発した。

これまでに、優れた CO<sub>2</sub> 透過速度と CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> 選択性を有する複合膜の開発に成功している。この成果の実用化を推進するために、現在、RITE および民間企業を組合員とする次世代型膜モジュール技術研究組合(MGM 組合)において、CO<sub>2</sub> 分離膜、膜エレメントの開発(図 6) および膜分離システム開発に取り組んでいる。

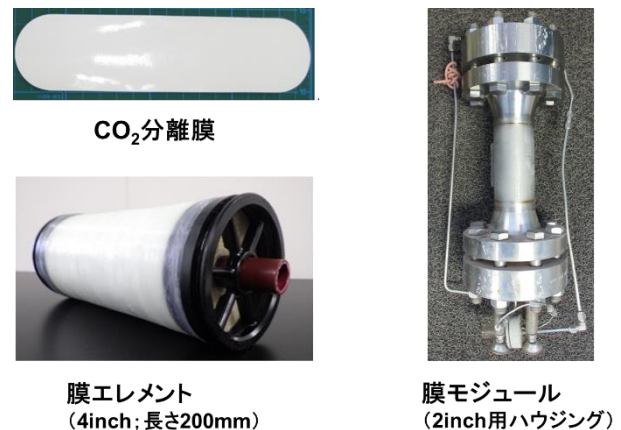


図 6 CO<sub>2</sub> 分離膜、膜エレメント(大面積の膜、支持体および流路材等の部材を一体化したもの)および膜モジュール(膜エレメントと収納容器(ハウジング)を組み合わせたもの)

過去の METI 委託事業「二酸化炭素分離膜モジュール研究開発事業」(2011~2014 年度)および「二酸化炭素回収技術実用化研究事業(二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発事業)」(2015~2018 年度)で得た成果(膜素材、膜エレメントや膜分離システム)を基に、その後、NEDO 委託事業「CCUS 研究開発・実証関連事業/CO<sub>2</sub> 分離・回収技術の研究開発/二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発」(2018~2021 年度)において、実機膜モジュールシステム開発を目指し、連続

製膜技術の確立とこれを用いた膜エレメントの開発に取り組んできた。

前事業では、連続製膜を用いた膜エレメントとして外径 2 インチおよび 4 インチの膜エレメントを作製し、2.4MPa の高圧下においても安定な分離性能を確認し、膜エレメントの基本製法の確立に目途を得た。また、4 インチ膜エレメントを用いて、石炭ガス化炉からの実ガスを用いた分離性能の検証試験を実施し、膜エレメントの実ガスに対する分離性能を確認できた。

今後の取り組みとして、新たに採択された NEDO 委託事業「CCUS研究開発・実証関連事業／CO<sub>2</sub>分離・回収技術の研究開発／二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発／高性能 CO<sub>2</sub> 分離膜モジュールを用いた CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> 膜分離システムの研究開発」において、前事業の成果に基づいて膜エレメントの CO<sub>2</sub> 分離性能・耐久性向上に関する検討、商用サイズに向けた膜モジュールのスケールアップ検討、CO<sub>2</sub> の利用プロセスに適する膜分離システム設計を行い、社会実装に繋がる実用化研究開発に取り組む。

## 5. 大気からの CO<sub>2</sub> 回収技術

RITE は 2020 年度よりスタートした NEDO の「ムーンショット型研究開発事業」で掲げられた目標 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」の「(1)温室効果ガスを回収、資源転換、無害化する技術の開発」で金沢大学および民間企業と協力して、大気からの高効率 CO<sub>2</sub> 分離回収・炭素循環技術の開発に取り組んでいる。

「ビヨンド・ゼロ」を可能とする技術を 2050 年までに確立することを目指す「革新的環境イノベーション戦略」のイノベーション・アクションプランを後押しするための制度の一つとしてこの「ムーンショット型研究開発制度」が位置づけられている。

大気から直接 CO<sub>2</sub> を回収する技術は Direct Air Capture(DAC)と呼ばれている。DAC はネガティブエミッション技術として期待されており、前述の「(1)温室効果ガスを回収、資源転換、無害化する技術の開発」では、他にも DAC に関する研究テーマが 6 件採択され

ている。

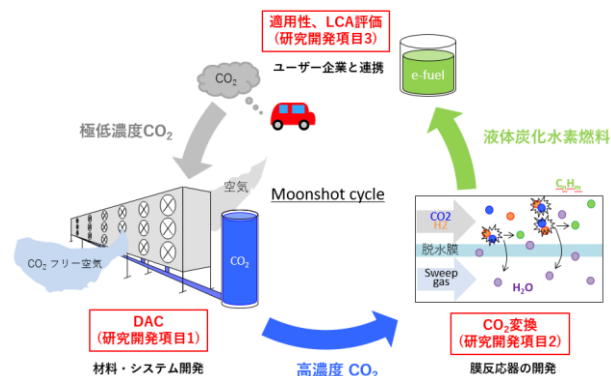


図 7 大気からの高効率 CO<sub>2</sub> 回収・炭素循環技術の開発

RITE はこれまでの知見を活かし、大気中の CO<sub>2</sub> を効果的に吸収・脱離する新たなアミンの開発を実施するとともに、大量の空気を通過させることができるように固体吸収材をハニカム等の圧力損失の少ない構造体にする技術についても検討を進めている。DAC 用に開発したアミンおよび担体を用いて、実際に RITE 周辺の外気を流通させて性能評価を行っている。大気は季節や天候、時間によって温度が刻々と変化するため、大量の空気の温度をコントロールできるように工夫を施した装置を新たに設計・製作し、様々な環境を想定した試験を実施している。



図 8 DAC ラボ試験装置

経済的に受容可能な DAC の実現に向けては材料開発だけでなく、プロセス開発も重要である。RITE では最適な運転プロセスを効率的に探索するため、シミュレ

ーション技術を活用している。液体炭化水素燃料の変換に適した量や純度の CO<sub>2</sub> を最も低いエネルギーで回収するプロセスについて計算と実験の両側面から検討を実施している。

### 6. 炭酸塩固定化技術

CO<sub>2</sub> 鉱物化(CO<sub>2</sub> mineralization)は、ネガティブエミッション技術の一つである風化促進(Enhanced weathering)の要素技術である。CO<sub>2</sub> をアルカリ土類金属と反応させ、化学的に安定な炭酸塩として固定化する技術であり、生態系に影響を与えない CO<sub>2</sub> 固定化技術として注目されている。特に近年は、アルカリ土類金属を含む副産物や廃棄物を用いることで、早期社会実装が期待されている。

RITE は、CO<sub>2</sub> を炭酸塩として固定化する技術において、長年にわたり培ってきた独自プロセスを保有している。2020 年より、民間企業と研究会を設置し、鉄鋼スラグや廃コンクリート等を対象として、これらから湿式で抽出したアルカリ土類金属を活用し、工場等より排出された CO<sub>2</sub> との反応により、安定した化合物である炭酸塩として回収する技術の開発、および生成した炭酸塩の有効利用技術の開発等(図9)に協力して取り組んでいる。

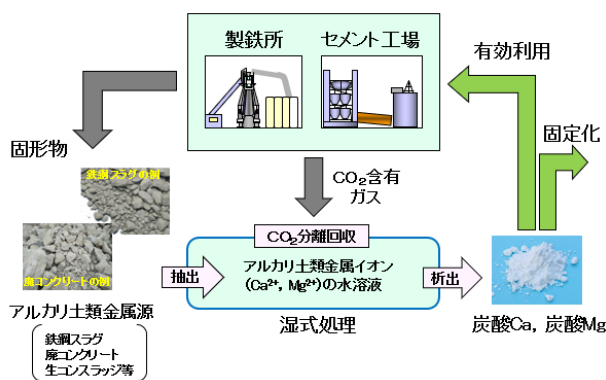


図9 CO<sub>2</sub> 炭酸塩固定化および有効利用技術

### 7. おわりに

化学研究グループでは、前述のとおり、主に化学吸収法・固体吸収法・膜分離法を対象に CO<sub>2</sub> 分離・回収技術開発を精力的に推し進めてきた。化学吸収法では実証ス

テージから高炉排ガスや石炭火力燃焼排ガスの商用機へ展開され、既に CO<sub>2</sub> 分離・回収技術として実用化されている。固体吸収法では、石炭火力燃焼排ガスに対して 2023-2024 年度に計画されている 40t-CO<sub>2</sub>/day 規模のパイロット試験に向けた検討に着手している。膜分離法では、IGCC 燃焼前排ガスからの膜エレメントを用いた実ガス試験において CO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub> の分離能を確認するなどの成果を得た。他にも新たに NEDO の「ムーンショット型研究開発事業」において採択された DAC 技術開発や、鉄鋼スラグや廃コンクリート等からの CO<sub>2</sub> の炭酸塩固定化技術開発に取り組んでいるところである。

化学研究グループでは、これらテーマにおける個々の研究課題に精力的に取り組み、実用化ステージに近いものは、スケールアップ検討や実ガス試験を通して早期の技術確立を目指し取り組んでいく。同時に、革新的技術開発に取り組み、より省エネルギーで低コストが可能な CO<sub>2</sub> 分離・回収技術を提案していきたいと考える。

特に今後の脱炭素化に向けた持続可能開発シナリオでは、天然ガスやバイオマス燃焼のからの CO<sub>2</sub> 回収の寄与が増大すると言われており、DACCS などのネガティブエミッション技術も必要とされている。したがって今後は、これらのより低濃度の CO<sub>2</sub> 排出源にも対応できるよう技術開発を進める必要がある。CO<sub>2</sub> 濃度が低くなると、その分処理すべきガス量が増大し、また高酸素濃度も高いため、今後はより低コストで劣化耐性の高い材料開発とそれに対応したシステム開発が重要であろう。