

## 化学研究グループ

### グループメンバー(2020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	菰野 恵子
副主席研究員	余語 克則	研究助手	白井 隆一
副主席研究員	馬場 宏治	研究助手	片岡 梢
主任研究員	後藤 和也	研究助手	杉本 理絵
主任研究員	甲斐 照彦	研究助手	米澤 順子
主任研究員	山田 秀尚	研究助手	森 美佐都
主任研究員	Firoz Alam Chowdhury	研究助手	吉野 直美
主任研究員	龍治 真	研究助手	大西 紀子
研究員	段 淑紅	研究助手	鹿嶋 麻衣
研究員	伊藤 史典	研究助手	森 恵子
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	手嶋 孝
研究員	VU Thi Quyen	研究助手	尾方 秀謙
研究員	淵上 暢彦	研究助手	小倉 公美子
研究員	孟 烈	研究助手	山田 美久

## 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、COP21で「パリ協定」が採択され、これまで以上にCO<sub>2</sub>排出量の低減が必須となってきた。我が国では、2019年6月に、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」および「統合イノベーション戦略2019」が策定され、世界の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示された。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>の化石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。最近では2020年10月の第203回臨時国会の所信表明演説において、菅義偉内閣総理大臣は「2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュー

トラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言された。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)は重要である。

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、そのコストの約6割程度を占めると試算されている排出源からの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、低温で脱離性能の良い固体吸収材を見出すことに成功している。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実証試験を行う予定である。

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。

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、産業界で実用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

吸収法では、混合ガス中のCO<sub>2</sub>が溶液に選択的に溶解することを利用してCO<sub>2</sub>を分離する。特に、溶液中のアミンとCO<sub>2</sub>との化学反応に基づく化学吸収法は、燃焼排ガス等、比較的濃度のCO<sub>2</sub>にも適用が可能であり、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、アミン分子の構造がこれらの要因と密接に関わるこ

とに着目し、新規アミン液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%を目標としたプロジェクト「COURSE50」(NEDO 委託事業)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。COURSE50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。

ESCAP<sup>®</sup>1号機は室蘭製鉄所構内に、飲料等を含む一般産業用途向けに建設された(120t-CO<sub>2</sub>/day)。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は、世界で初めてのものである。2018年には、2号機が新居浜西火力発電所で操業を開始した(143t-CO<sub>2</sub>/day)。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は、日本初の商業設備である。回収されたCO<sub>2</sub>は、近接する化学工場で化学副原料として利用されている。



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

アミンを水などの溶媒に溶かした化学吸収液と異なり、

固体吸収材は、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では、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。

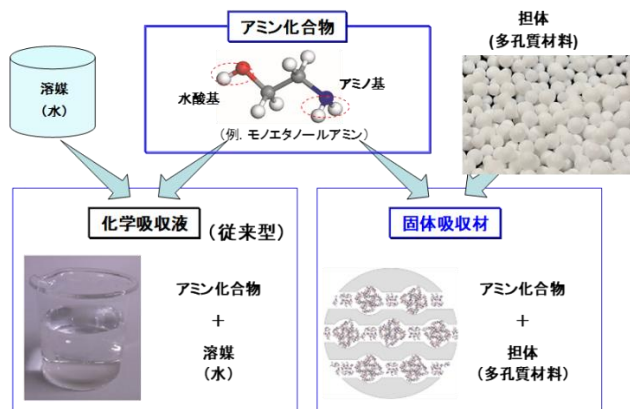


図2 化学吸収液と固体吸収材

RITE は、2010 年に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> 以下を実現した。本固体吸収材は、低エネルギー回収のみならず、60℃での低温プロセスを可能とする革新的な材料である。

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、CO<sub>2</sub> 分離・回収コスト 2,000 円台/t-CO<sub>2</sub> に目途を得た。アミン固体吸収材を用いた他の事業と比較して、本事業の回収規模、エネルギー、コストはいずれも世界トップ水準である。

2020 年、RITE は川崎重工業株式会社とともに NEDO 委託事業「先進的二酸化炭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 年度から石炭火力発電所から排出される燃焼排ガス中の CO<sub>2</sub> 分離・回収試験を開始する予定である。現在、RITE では、パイロットスケール試験に向けて、固体吸収材製造技術の合理化・低コスト化、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の高度化などを進めている。



図3 固体吸収法の開発ロードマップ

#### 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、高压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)。

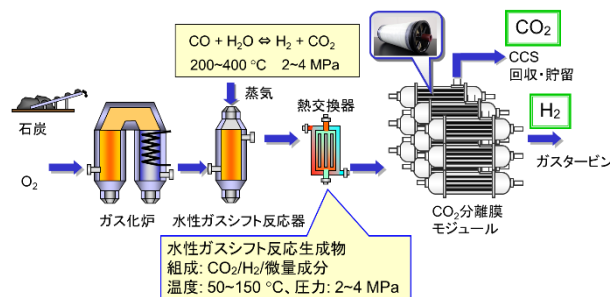


図4 分離膜を用いた石炭ガス化複合発電 (IGCC) からの CO<sub>2</sub> 分離・回収

RITE では、高密度のアミノ基を有するポリアミドアミンドリマー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、このデン

ドリマー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。

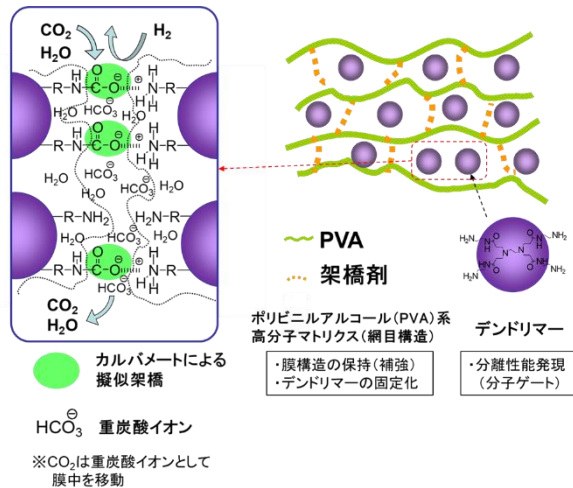
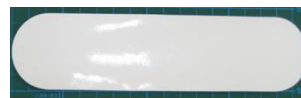


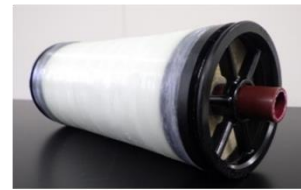
図5 分子ゲート膜の概念図

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、高压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。

基礎研究段階として、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および民間会社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)によって、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検討を実施中である。



CO<sub>2</sub>分離膜



膜エレメント  
(4inch;長さ200mm)



膜モジュール  
(2inch用ハウジング)

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)

METI 委託事業の「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)で開発した膜素材、膜エレメントや膜分離システムを基礎として、現在、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の開発を進めており、実用化に向け、MGM 組合として連続製膜技術および連続製膜した膜を用いた膜エレメントを開発中である。

連続製膜を用いた膜エレメントの量産化に向けた検討により、2.4MPa の高压下においても安定な外径 2 インチおよび 4 インチの膜エレメントが作製でき、膜エレメントの基本製法の確立に目途を得た。

また、実ガス試験による膜エレメントの分離性能、プロセス適合性等に関する技術課題の抽出と解決を行うために、電源開発株式会社若松研究所(以下、若松と記載)において、石炭ガス化炉からの実ガスを用いた膜エレメントの検証試験を実施した。4 インチ膜エレメントを用いた実ガス試験結果を図7に示す。なお、若松における石炭ガス化ガスの圧力条件に即して、全圧 0.8MPa(絶対圧)での試験を行った。

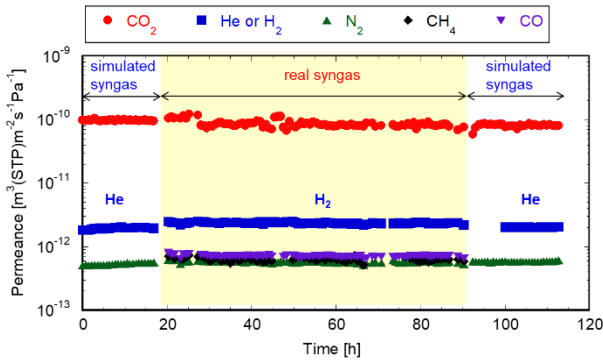


図 7 実ガス試験および実ガス試験前後の模擬ガス試験におけるCO<sub>2</sub>分離性能

温度:85℃、0.8MPa(絶対圧)

模擬ガスにはCO<sub>2</sub>/He/N<sub>2</sub>を供給ガスとして使用。

実ガス試験前後で膜エレメントの分離性能は、ほぼ同等の分離性能である事が判った。また、実ガス試験中の分離性能低下も認められなかったことから、4 インチ膜エレメントが実ガスに対する初期(短期)耐久性を有することを確認することができた。

今後は、これまでの成果に基づき、実機サイズの大型膜モジュールの開発および膜分離システムの研究開発を進める予定である。

### 5. 新たな取り組み

これまで述べたように、化学研究グループでは、製鉄所や発電所などの大規模CO<sub>2</sub>排出源を対象としたCO<sub>2</sub>分離・回収技術の高度化・実用化に注力してきた。最後に別の新たな取り組みについての二つの事例を紹介する。一つは、大気中からのCO<sub>2</sub>回収すなわちDirect Air Capture(DAC)、もう一つはCO<sub>2</sub>を炭酸塩として固定化する技術の開発である。

カーボンニュートラルを実現するためには、大気中に排出されてしまったCO<sub>2</sub>を除去できる技術、すなわちネガティブエミッション技術が不可欠である。近年、DACは代表的なネガティブエミッション技術の一つとして注目されており、海外でも検討が進んでいる。今後の普及のためには回収エネルギーおよびコストを大幅に低減することが望まれ、日本でも、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」で挑戦的な

研究開発が行われつつある。RITEは当該事業に採択された「大気中からの高効率CO<sub>2</sub>分離・回収・炭素循環技術の開発」で、金沢大学および民間企業と協力して、DACに最適な材料およびシステムの検討を開始したところである。本テーマを含め、ムーンショット目標4の「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」を達成するための技術開発の中で「(1)温室効果ガスを回収、資源転換、無害化する技術の開発」として、計8テーマが採択されている。

大気中からのCO<sub>2</sub>回収は、通常の石炭等の燃焼後排ガスからCO<sub>2</sub>を分離・回収する場合と比べ、CO<sub>2</sub>濃度は400ppm程度と2~3桁低いため、回収コストは極めて高価になると言われている。DACを現実的なものとするためには、これまでにない高性能なCO<sub>2</sub>分離材料の開発と大量の空気を効率よく吸脱着する事の出来るプロセスを構築する必要があり、CO<sub>2</sub>分離材料については、RITEがこれまで取り組んできた固体吸収材や有人宇宙活動用のCO<sub>2</sub>吸着剤の研究経験で培ってきたアミン系化合物を中心とする材料設計の知見を活かし、回収コストを低減できる優れた材料開発を目指している。一方、CO<sub>2</sub>分離・回収プロセスについては、共同実施者である金沢大学の吸着材ハニカムロータを用いたデシカント除湿空調プロセス研究の知見を活用し、CO<sub>2</sub>分離材料とプロセス技術の両者が連携することで高効率なDACシステムの開発を目指している。

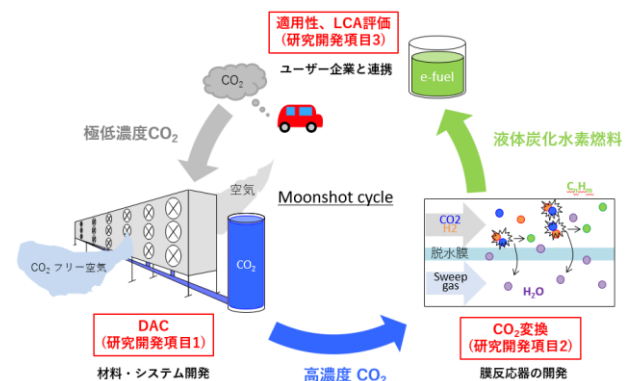


図8 大気中からの高効率CO<sub>2</sub>回収・炭素循環技術の開発

CO<sub>2</sub>を炭酸塩として固定化する技術において、RITEは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、JFE スチール株式会社、太平洋セメント株式会社、および RITE は、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。RITE の独自プロセスや研究開発スキルと鉄鋼およびセメント業界をリードする 2 社の技術力や幅広い見識を融合することによって、技術開発におけるシナジー効果が期待される。

研究課題に精力的に取り組む、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む、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。

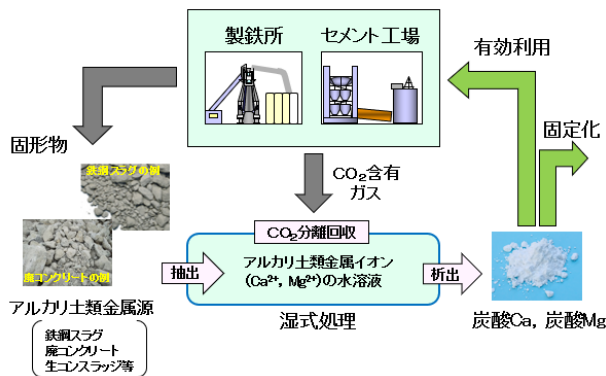


図9 CO<sub>2</sub>炭酸塩固定化および有効利用技術

## 6. 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 2020 年度より 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も取り組み始めたところである。

化学研究グループでは、これらテーマにおける個々の