

## 化学研究グループ

### グループメンバー(2025 年4月)

|                |                      |      |        |
|----------------|----------------------|------|--------|
| グループリーダー・主席研究員 | 余語 克則                | 研究助手 | 浅野 誠   |
| サブリーダー・主席研究員   | 水野 雅彦                | 研究助手 | 荒木 華子  |
| 主席研究員          | 喜多 英敏                | 研究助手 | 浦井 宏美  |
| サブリーダー・副主席研究員  | 菊池 直樹                | 研究助手 | 大西 紀子  |
| サブリーダー・副主席研究員  | 山口 秀樹                | 研究助手 | 尾方 秀謙  |
| 副主席研究員         | 林 成年                 | 研究助手 | 小倉 公美子 |
| 副主席研究員         | Firoz Alam Chowdhury | 研究助手 | 片岡 梢   |
| 主任研究員          | 甲斐 照彦                | 研究助手 | 菰野 恵子  |
| 主任研究員          | 木下 朋大                | 研究助手 | 杉本 理絵  |
| 主任研究員          | 久貝 潤一郎               | 研究助手 | 津田 和彦  |
| 主任研究員          | 後藤 和也                | 研究助手 | 手嶋 孝   |
| 主任研究員          | 瀬下 雅博                | 研究助手 | 奈良 裕子  |
| 主任研究員          | 村岡 利紀                | 研究助手 | 鳴瀧 陽三  |
| 主任研究員          | 龍治 真                 | 研究助手 | 藤井 暁義  |
| 研究員            | 伊藤 史典                | 研究助手 | 藤原 洋一  |
| 研究員            | 清川 貴康                | 研究助手 | 宮地 裕子  |
| 研究員            | 段 淑紅                 | 研究助手 | 森 恵子   |
| 研究員            | 孟 烈                  | 研究助手 | 保野 篤司  |
| 研究員            | 山口 創司                | 研究助手 | 吉井 隆裕  |
| 研究員            | 窪田 善之                | 研究助手 | 吉野 直美  |
| 研究員            | 鳥越 葵                 | 研究助手 | 米澤 順子  |
| 研究員            | 前田 浩彰                |      |        |
| 研究員            | 加藤 剛                 |      |        |

## CO<sub>2</sub> 分離・回収、有効利用技術の高度化・実用化への取り組み

### 1. はじめに

RITE では CO<sub>2</sub> 分離回収・有効利用に関わる各種技術の早期実用化・産業化を目指した研究開発およびその産業利用に向けた活動を行っている。以下、現在の RITE の取り組みについて述べる。

### 2. CO<sub>2</sub> 分離回収・有効利用技術の研究開発

我が国においては 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、様々な方面から地球温暖化防止のための取り組みが進められている。昨年 2024 年 5 月には CCS 事業法が成立し、CCS ロードマップ(二酸化炭素の年間貯留目標 2030 年 600~1200 万トン/年、2050 年 1 億 2000 万~2 億 4000 万トン/年)の実現へ向けて大きく前進した。

同事業法に基づき、先進的 CCS 事業国内 9 拠点が採択されている。

さらに、カーボンニュートラルを実現するためには、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を低減する技術、すなわちネガティブエミッション技術の導入が不可欠であり、特に大気中から CO<sub>2</sub> を直接回収する Direct Air Capture(DAC)が注目されている。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(経済産業省)」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。二酸化炭素の除去(CDR)、回収・利用・貯留(CCUS)において CO<sub>2</sub> を循環的に利用したり削減したりする取り組みであるカーボンマネジメントが本格化しており、海外で DAC 大型プロジェクトが進行する中、我が国では 2020 年度からムーンショット型開発事業において様々な DAC 技術研究開発が実施され、その成果の一端が 2025 年大阪・関西万博に展示されている。

RITE の研究開発に関しては、2024 年度に万博での DAC 実証に向けた取り組みが大きく前進した。

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)「ムーンショット型開発事業」で開発している DAC(Direct Air Capture)技術の実証試験を大阪・関西万博の会場内で行なっている。国内および世界各国からの来場者へ、RITE の優れた DAC 技術を披露する。

また、国内の CO<sub>2</sub> 分離素材開発を支援・加速するため、実ガス(燃焼排ガス)試験が可能な国内初の炭素回収技術評価センター(RCCC:RITE Carbon Capture Center、計画名称:実ガス試験センター)を2025年2月に RITE 内に開設した。NEDO 事業「CO<sub>2</sub> 分離素材の標準評価共通基盤の確立」における取組である。

RITE は CO<sub>2</sub> 分離回収の国際ネットワークである ITCN(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)に国内唯一の機関として参加しており、国際連携にも取り組んでいるが、ITCN を通じて、RCCC での CO<sub>2</sub> 分離・回収の標準化へ向けた取り組みを世界へ発信していく予定である。

RITE では、これまでに化学吸収法、固体吸収法、膜分離法を中心に、さまざまな CO<sub>2</sub> 回収技術の研究・実用化を推進し、世界をリードする研究開発成果を上げてきた。化学吸収法においては、COURSE50(「環境調和型プロセスの技術開発」プロジェクト、NEDO 委託事業)で開発した化学吸収液が実用化された。今後、先進的 CCS 事業向けに利用拡大が期待される。一方で、新しい「混合溶媒系吸収液」の開発にも取り組んでいる。

固体吸収法では、低温で CO<sub>2</sub> 脱離性能の優れた固体吸収材を使ったシステムのパイロット試験を 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を使って進めている。CO<sub>2</sub> 濃度が低い天然ガス火力発電所排ガス向けへの展開も進めており、低温再生だけでなく酸化劣化耐性の高い固体吸収材を開発中である。

膜分離法は、これまで高压ガス(二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)/水素(H<sub>2</sub>))源として IGCC(Integrated coal

Gasification Combined Cycle:石炭ガス化複合発電)、水素製造プラントを適用先に想定してきたが、2024 年度からは、小型水素製造システム(CO<sub>2</sub> 回収型水素製造装置)の実証試験に向けた新たな NEDO 事業を開始している。

さらに、RITE では CO<sub>2</sub> 有効利用技術として、脱水膜を搭載した膜反応器(メンブレンリアクター)の開発に取り組んでいる。製鉄所から排出する CO<sub>2</sub> を水素と反応させて高効率にメタノールを合成する NEDO プロジェクト「CO<sub>2</sub> を用いたメタノール合成における最適システム開発」を民間企業と共同で2021年度から受託している。

産業廃棄物等に含まれるカルシウム、マグネシウムを利用して排ガス中に含まれる CO<sub>2</sub> を固定化し、高純度な炭酸カルシウムを製造する取り組みも民間企業と共同で行っている。

### 3. 大気中からの CO<sub>2</sub> 回収技術

「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2020年度よりNEDO「ムーンショット型研究開発制度」がスタートした。

RITE は、この中の目標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」において、金沢大学および三菱重工業株式会社と協力して、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に取り組んでいる。(図1)

大気中から直接 CO<sub>2</sub> を回収する技術は Direct Air Capture(DAC)と呼ばれている。DAC は貯留と組み合わせることで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、他にも工業的な DAC に関する研究テーマが6件進行中である。

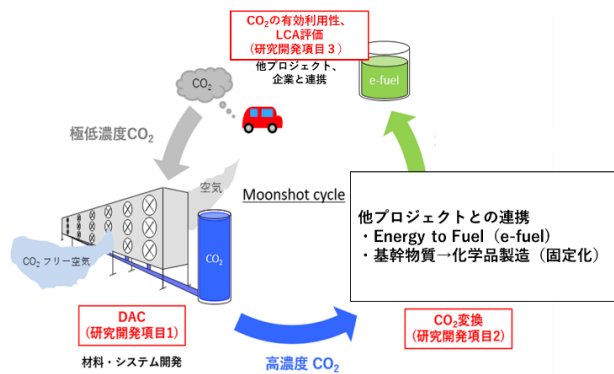


図1 大気中からの高効率CO<sub>2</sub>回収・炭素循環技術の開発

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を開発するとともに、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、吸収したCO<sub>2</sub>を圧力と温度スイングにより低エネルギーで脱離させる技術についても検討を進めている。ラボ試験装置(図2)での基礎データの収集、プロセスシミュレーションによるアミン・吸収材構造の改良指針策定と最適運転条件の予測、DACシステム評価装置(図3 三菱重工業株式会社にて設計・製作し、RITE敷地内に設置)での性能検証により、吸収材とシステムの性能向上を図っている。



図2 DACラボ試験装置

2024年度は2025年4月に開幕した大阪・関西万博会場にて最大0.5t-CO<sub>2</sub>/day規模のパイロットスケール実証試験を行うべく、三菱重工業株式会社の協力のもと、パイロット試験機の試運転を実施した。(図4)

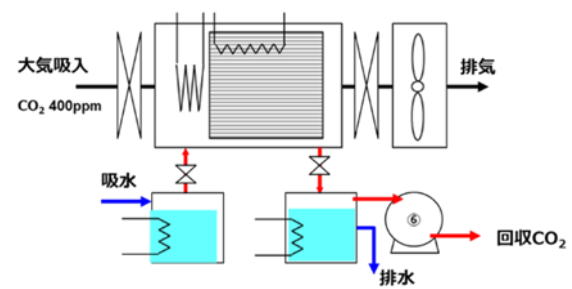


図3 DACシステム評価装置の概念図(上)と装置を設置したDAC実験棟(下:RITE敷地内)



図4 大阪・関西万博会場に設置したパイロット試験機

回収したCO<sub>2</sub>は隣接する大阪ガス株式会社のメタネーション設備に供給してメタンを合成し、迎賓館の厨房で利用する計画であり、このような規模で有効利用の実証を行うのは日本初の試みである。

#### 4. CO<sub>2</sub>分離素材の標準評価共通基盤の構築

脱炭素化に向けては、電力部門・産業部門ともに燃料やエネルギー源の転換が進むが、一定の化石燃料需要



は残存し、CO<sub>2</sub> 排出も必然的に避けられない。そのため、比較的 CO<sub>2</sub> 排出量の少ない天然ガスの燃焼によって排出される CO<sub>2</sub> 濃度 10% 以下の低圧・低濃度排ガスからの CO<sub>2</sub> 分離回収に対して、低エネルギー・低コスト技術の開発が必要である。RITE は、2022 年 5 月に、国立研究開発法人産業技術総合研究所と共同で、NEDO 委託事業「グリーンイノベーション(GI)基金事業／CO<sub>2</sub> の分離回収等技術開発プロジェクト／低圧・低濃度 CO<sub>2</sub> 分離回収の低コスト化技術開発・実証／CO<sub>2</sub> 分離素材の標準評価共通基盤の確立」を受託した。カーボンニュートラル社会実現を念頭に、世界で拡大する CO<sub>2</sub> 分離回収市場において国内企業の産業競争力を強化してシェアを拡大することを支援するため、新規の CO<sub>2</sub> 分離素材を対象に燃焼排ガス(実ガス)を使って性能評価できる共通基盤の構築を実施する。

本事業は、2022 年から 2030 年までの 9 年間で予定し、次の研究開発項目を実施する。

- (a) 実ガスを用いた標準評価法の策定(RCCC の設置・運営)
- (b) 革新的分離素材開発に向けた標準評価法の確立
- (c) 耐久性評価手法の開発
- (d) データベースの構築と標準評価法の普及。

2024 年度までの 3 年間においては、発電所排ガスおよびボイラー排ガス等を想定した燃焼排ガスを対象とする CO<sub>2</sub> 分離素材を評価するために、実ガスを用いて評価する炭素回収技術評価センター(RCCC)を RITE 本部研究所内に設置するとともに、標準評価法の素案策定に取り組んだ。RCCC は、図 5 に示すように、吸収法、吸着法および膜分離法の各 CO<sub>2</sub> 分離技術の試験設備と、燃焼排ガスを供給するボイラーで構成し、2024 年度末の時点で、評価建屋、排ガス供給設備、PSA 試験設備及び膜モジュール試験設備の設置が完了した。

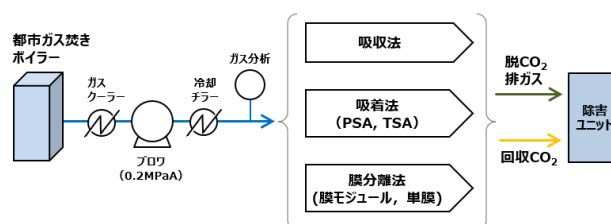


図 5 RCCC 全体構成

(各分離法に実ガスを供給: 約 0.1t-CO<sub>2</sub>/day 相当)

2025 年 1 月実施のステージゲート審査の結果、3 年間の成果が認められ、2028 年度まで(第 2 期)の事業継続が承認された。2025 年度上期には、吸収法を含めた 3 基の試験設備の運用を開始する。また、吸着法(TSA)試験設備および分離膜(単膜)試験設備の導入を第 2 期前半に計画している。

カーボンニュートラルに向けた CO<sub>2</sub> 分離素材の開発において、これまでは海外での共通基盤の確立が進んでいたが、日本でも RCCC の運用を開始する。また、プロジェクト推進協議会を通じての国内企業からの意見収集、および ITCN (International Test Center Network) 等の国際会合への参加による海外機関との協力体制構築の活動を継続している。RITE は、本事業を通して、CO<sub>2</sub> 分離素材開発に関わる企業・機関が活用できる国内初の実ガス試験センターを提供し、今後も我が国が CO<sub>2</sub> 分離回収技術において世界のトップランナーであり続けるよう、国内の CO<sub>2</sub> 分離素材開発の促進に貢献する。

## 5. 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(図 6)。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。

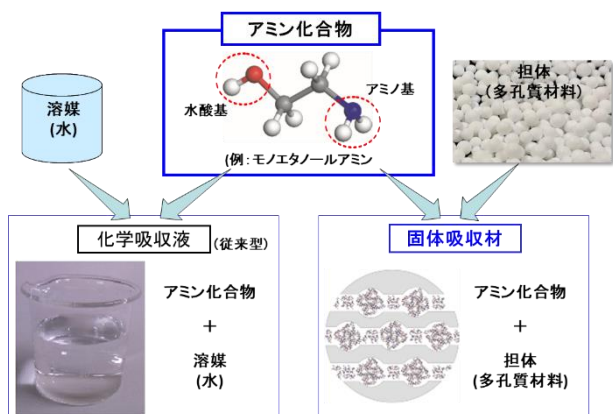


図6 化学吸収液と固体吸収材



図7 固体吸収法の開発ロードマップ

### 1) 石炭火力発電所向け

RITE は 2010 年より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、固体吸収材の開発を実施している。基盤研究フェーズ(2010～14 年度)では、60℃の低温排熱が利用可能な革新的な固体吸収材を開発し、実用化研究フェーズ(2015～19 年度)では、川崎重工業株式会社(KHI)をパートナーとして、固体吸収材のスケールアップ合成(>10m³)、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 年からの 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」では、関西電力株式会社の協力を得て、KHI が舞鶴発電所内にパイロットスケール試験設備(40t-CO<sub>2</sub>/day 規模)を建設し、2023 年度後半から RITE が供給した固体吸収材を用いた石炭火力発電所の燃焼排ガスからの CO<sub>2</sub> 分離・回収試験を開始した(図7)。

また、材料劣化機構の解明と劣化防止技術の開発、使用材の再利用技術の開発、長期保管試験による取扱い方法の検討などを進めており、長期保管試験では、材製造から 3 年間にわたって定期的に材の確認を行い、異常の無いことを確認した。さらに、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おり、KHI の移動層システムにおいて高い精度で CO<sub>2</sub> 回収量や分離回収エネルギーを予測可能なシミュレータを開発している(図8)。

パイロット試験ではこのシミュレーション技術を活用して最適運転条件の検討を行う予定である。また、シミュレーションは実際には観測が困難な装置内部での吸脱着挙動を把握するのに役立っており、計算結果は材料開発にも活用されている。

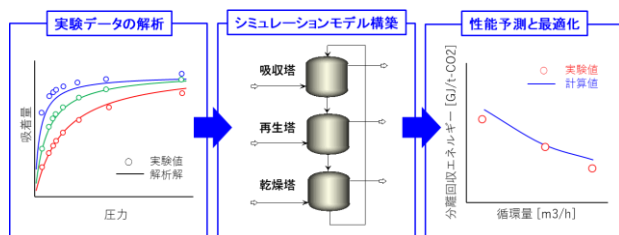


図8 RITE の保有するシミュレーション技術

### 2) 天然ガス火力発電所向け

2022 年より、GI 基金事業/CO<sub>2</sub> の分離回収等技術開発において、千代田化工建設株式会社(幹事会社)、株式会社 JERA と共同で、天然ガス燃焼排ガスからの低コスト CO<sub>2</sub> 分離・回収プロセス商用化の実現への取り組み

を開始した。天然ガス燃焼排ガスに含有する  $\text{CO}_2$  濃度は 4% 前後と石炭燃焼排ガス中の  $\text{CO}_2$  濃度 (13% 前後) と比較して低い一方、酸素濃度は 10% 程度と高いため、低い  $\text{CO}_2$  濃度においても、高い  $\text{CO}_2$  吸収性能を示し、酸化に対する高い耐久性を有する固体吸収材が求められる。RITE は過去に培った知見、技術に基づくアミン開発およびそれを担体に担持させた固体吸収材開発を担当している。これまでに僅かな温度変化で  $\text{CO}_2$  吸収量が大きく変化する固体吸収材を新たに開発した (図 9)。開発した固体吸収材は低温再生が可能な点だけでなく、比較的酸素濃度が高い天然ガス火力発電所排ガスに適用できる非常に優れた酸化劣化耐性を有している点も特徴である。

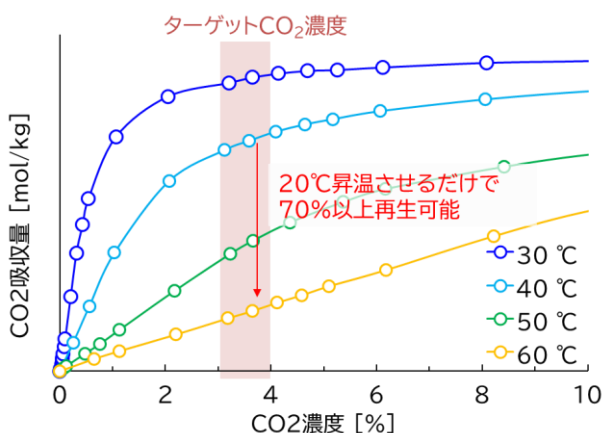


図 9 本事業で開発した固体吸収材の  $\text{CO}_2$  吸着等温線

また、2024 年度は化学メーカーの協力のもと、開発したアミンを工業製造ラインで大規模に製造する試験を実施しており、工業的スケールの製造にも問題がないことを確認している。2024 年度 3Q に行われたステージゲート審査を通過し、現在は基礎研究フェーズからベンチスケール試験フェーズに進んでいる。2025 年度もベンチスケール試験に向けて、更なる吸収材の改良を進める予定である。

## 6. 化学吸収法

化学吸収法は、混合ガス中の  $\text{CO}_2$  を化学反応を介して溶液中に選択的に溶解 (分離) させ、次工程において

$\text{CO}_2$  を含む溶液を加熱昇温し、高純度  $\text{CO}_2$  を回収する技術である。特に、アミンを利用した化学吸収液は、燃焼排ガス等、比較的低  $\text{CO}_2$  濃度の混合ガスへの適用が可能であり、化学吸収法は CCS 分野では最も成熟した  $\text{CO}_2$  分離・回収技術の一つである。

RITE は、「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)、および COURSE50 において、製鉄プロセスを対象に、 $\text{CO}_2$  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なアミン系化学吸収液を開発し、その成果は、日鉄エンジニアリング株式会社の商業設備「省エネ型  $\text{CO}_2$  回収設備 ESCAP<sup>®</sup>」に採用されている (図 10)。



図 10 省エネ型  $\text{CO}_2$  回収設備 ESCAP<sup>®</sup>

(住友共同電力(株)新居浜西火力発電所内に設置の 2 号機。化学工場の化学副原料  $\text{CO}_2$  を製造。)

化学吸収法は前述のように商用レベルに達しているものの、CCUS の社会実装加速には吸収液の量産化を含めた大規模化やコスト低減が課題であり、溶液再生工程でのエネルギー消費削減やアミンの耐久性向上などの取り組みが必要である。

RITE は、COURSE50 において、水以外の溶媒を用いることで、 $\text{CO}_2$  の吸収形態および溶液中の分極影響を制御することができ、更なるエネルギー消費低減の可能性を有するブレイクスルー技術「混合溶媒系吸収液」を提示した (図 11)。従来のアミン系化学吸収液で一般的であった溶媒の水の一部を非水溶媒に置き換えることにより、溶液の比熱や  $\text{CO}_2$  との反応熱が低減できる。

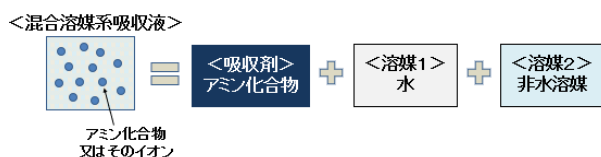
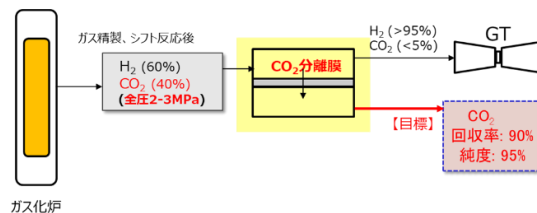


図 11 混合溶媒系吸収液のコンセプト

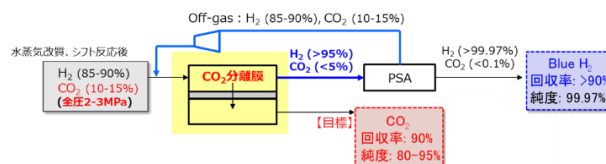
本技術の研究開発は、2021 年 1 月から NEDO 基金事業「製鉄プロセスにおける水素活用」において、混合溶媒系吸収液の化学種や液組成の最適設計、および実用性等の検討を進めている。2023 年度から 2024 年度にかけて日本製鉄株式会社東日本製鉄所君津地区において実際の高炉ガスをを用いたベンチ試験を実施し、混合溶媒系吸収液が従来のアミン水溶液よりも  $\text{CO}_2$  分離回収エネルギーを低減できることを確認した。今後、実用化に向けて、長期実ガス試験を実施し、 $\text{CO}_2$  分離回収性能の技術実証および耐久性評価の実施を検討していく。

## 7. 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  $\text{CO}_2$  を透過・分離する分離法である。そのため、高圧ガスである石炭ガス化複合発電(IGCC)や水素製造装置への適用により、低コスト、省エネルギーでの  $\text{CO}_2$  分離・回収が期待される(図 12)。



(a)IGCC



(b)水素製造プラント

図 12 分離膜を用いた石炭ガス化複合発電(IGCC)や水素製造装置からの  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  と  $\text{H}_2$  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13に示す。

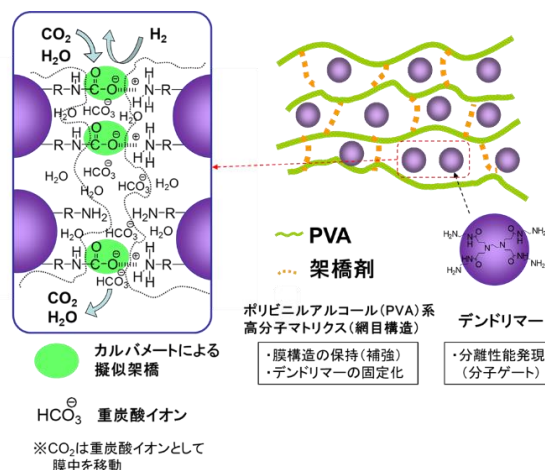


図 13 分子ゲート膜の概念図

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  $\text{CO}_2$  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  $\text{H}_2$  の透過



を阻害することで、従来の  $\text{CO}_2$  分離膜では難しかった  $\text{CO}_2$  と  $\text{H}_2$  を効率良く分離できる。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。

この成果の実用化を推進するために、RITE 及び住友化学株式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)において、 $\text{CO}_2$  分離膜、膜エレメントおよび膜分離システムの開発に取り組んできた。

膜材料の開発については、新たに本分離膜の適用先として小型中圧の水素製造装置を想定し、中圧条件向けに膜材料の改良を実施した。その結果、改良膜材料(単膜)の分離性能を大幅に向上させることができた。分離性能試験の結果を図14に示す。

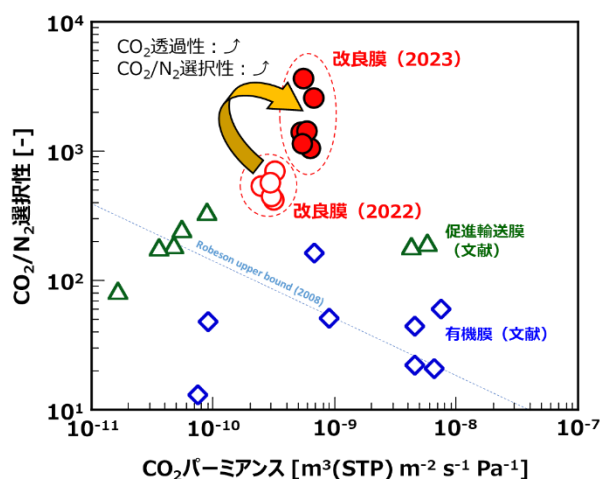


図 14 膜材料(単膜)の  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  分離性能

MGM 膜の試験条件: 温度  $85^\circ\text{C}$ 、全圧  $0.85\text{MPa}$ 、供給ガス組成  $\text{CO}_2/\text{N}_2=20/80$

文献: Kamio et al., J. Chem. Eng. Jpn., 56 (2023) 2222000.

膜材料の改良により、 $\text{CO}_2$  パーミアンス、 $\text{CO}_2/\text{N}_2$  選択性共に向上させることに成功し、水素製造装置に適用するために必要な分離性能を示す膜材料が得られた。

膜エレメントの開発については、エレメント径が従来の 4 倍、エレメント長さが従来の 3 倍である 20cm 径、60cm 長の商用サイズ膜エレメントの開発に成功し、商

用サイズ膜エレメントの製作技術を確立することができた(図 15)。



図 15  $\text{CO}_2$  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)

2024 年度からは、水素製造装置メーカーの三菱化工機株式会社と共同で NEDO 助成事業「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／ $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  分離膜の水素製造システムへの適用性検討」において  $\text{CO}_2$  回収型水素製造装置の実証試験に向けた事業を開始している。

## 8. $\text{CO}_2$ を原料とするメタノール合成技術の開発

$\text{CO}_2$  の水素化反応は反応により水が生成し、その水が触媒の劣化、反応速度の低下の原因となる。また、多くは発熱反応であり、反応により発生した熱を如何に効率的に除去するかも課題の一つである。これらの課題を解決すべく、RITE では膜反応器による高効率かつ省エネルギー型の  $\text{CO}_2$  有効利用技術、特に  $\text{CO}_2$  を原料としたメタノール合成技術の開発を行っている。

RITE ではこれまでに、高い水熱安定性と透過分離性能を兼ね備える脱水膜(Si-rich LTA 膜)の開発に成功するとともに、その新規脱水膜を適用したラボスケールのメタノール合成膜反応器は従来の触媒充填層型反応器よりも3倍の  $\text{CO}_2$  転化率を示すことを実験的に明ら



かにしてきた。現在は、NEDO 委託事業「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／CO<sub>2</sub> 排出削減・有効利用実用化技術開発／化学品への CO<sub>2</sub> 利用技術開発／CO<sub>2</sub>を用いたメタノール合成における最適システム開発」にて、開発した脱水膜の長尺化を検討している。これまでの検討にて、比較的の高い透過分離性能を有する実用的長さの脱水膜を合成することに成功するとともにメタノール合成の反応温度域で目標値(H<sub>2</sub>O 透過率:  $1 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ , H<sub>2</sub>O/MeOH 選択性: >1,050)を達成することができた。

2024 年度は、高い透過分離性能を示す実用的長さ(1,000 mm)の脱水膜の再現性向上、水熱安定性(耐久性)の確認および更なる透過分離性能の向上に注力した。再現性の向上では合成方法を改良することにより、歩留まりの向上に成功している。加えて、改良した合成方法では、より長手方向に対する性能分布が小さくなっている結果が得られており、高性能かつ再現性の高い長尺脱水膜合成方法を確立することができた。図16に長尺脱水膜の長手方向に対する性能分布をまとめた結果を示す。縦軸の変動係数は、1,000 mm 長の脱水膜を 100 mm にカットしたサンプルの透過分離性能の標準偏差および平均値から算出しており、性能分布が小さいほど小さくなる。得られた長尺脱水膜のカットサンプル(100 mm)を用いた耐久性試験を実施し、合成方法改良前後の脱水膜の水熱安定性を確認した。その結果、改良後の脱水膜は 500 h の間、結晶性を維持していることが明らかとなり、水熱安定性を有していることが示唆された。RITE 開発の実用的長さの長尺脱水膜は他の脱水膜と比較して高い透過分離性能を有していることから、メタノール合成用膜反応器をはじめとして、様々な用途に適用可能であり、上述のとおり、再現よく高い性能を有する脱水膜の合成条件を確立したことから、一步一步着実に実用化に向けて進んでいる。

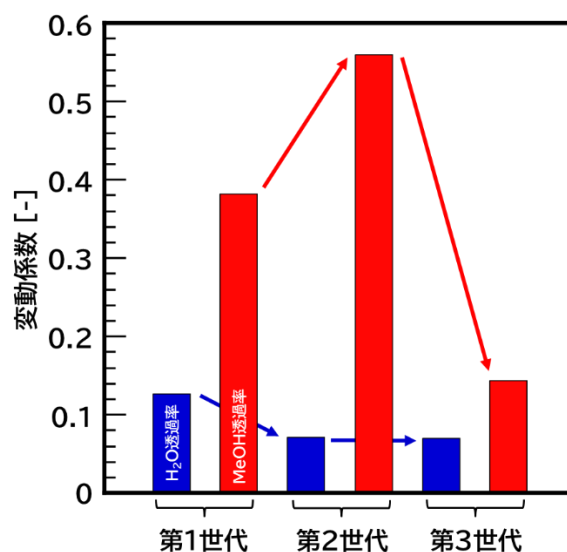


図 16 長尺脱水膜の長手方向に対する性能分布

今後、開発した実用的長さの脱水膜の実用化を目指すとともに、更なる透過分離性能の向上(特に Si/Al の向上)を目的として様々な支持体上への脱水膜合成条件検討を進めていく。

### 9. He 回収を目的とした無機系分離膜の開発

これまで RITE では水素製造を目的としたシリカ膜の開発を手掛けており、水素キャリアのひとつであるメチルシクロヘキサン(MCH)脱水素をはじめとして様々な反応により生成した水素を選択的に透過させることが可能な各種シリカ膜の製膜に成功している。シリカ膜は、対向拡散 CVD(Chemical Vapor Deposition: 化学蒸着)法を用いて製膜しており、多孔質基材の内側に酸素(O<sub>2</sub>)を、外側にシリカ源を供給することで、お互いが基材細孔内を拡散していき、出会ったところでシリカが析出する(図 17)。細孔内がシリカで埋まると、埋め切れていない箇所では優先的に反応が起こるため、比較的性能の高いシリカ膜を再現よく製膜することが可能である。

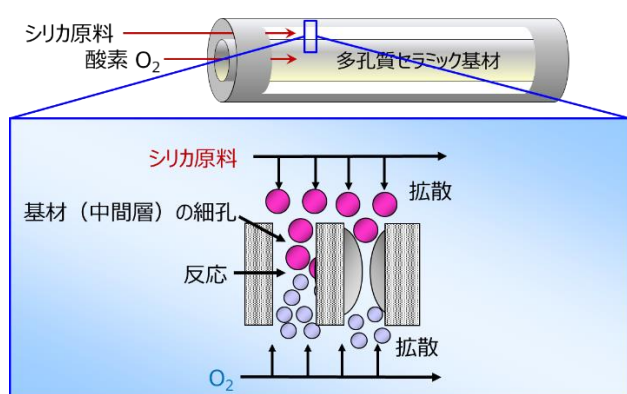


図 17 対向拡散 CVD 法によるシリカ膜の製膜イメージ

昨今、世界的なヘリウム危機が問題となっており、如何に確保できるかが重要となっている。また、省エネルギー性を考えると相変化を伴わない膜分離法でヘリウムを回収する方法が良いと考えられる。分子サイズは、ヘリウムが最も小さく、0.26 nm であり、そのほかの小分子のサイズは  $\text{H}_2$ :0.29 nm,  $\text{CO}_2$ :0.33 nm,  $\text{N}_2$ :0.36 nm,  $\text{CH}_4$ :0.38 nm であることを考えると、これまで RITE にて開発してきた水素分離用のシリカ膜はヘリウム分離に十分適用可能であると考えられる。現在、「NEDO 先導研究プログラム／新産業・革新技術創出に向けた先導研究プログラム／不燃性ガス田における高効率ヘリウム膜分離回収技術の開発」にて一般財団法人ファインセラミックスセンターからの再委託を受け、ヘリウム分離用シリカ膜の長尺化を検討している。

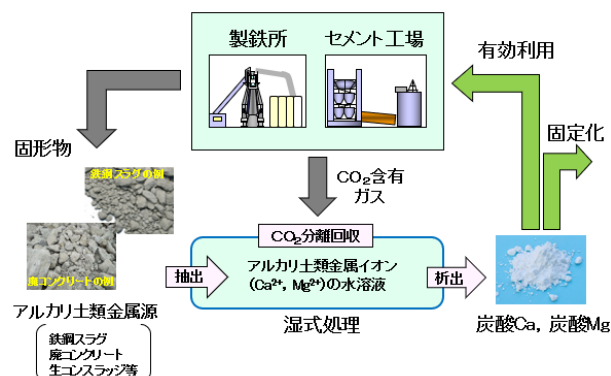
## 10. 炭酸塩固定化技術

$\text{CO}_2$  鉱物化( $\text{CO}_2$  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)の要素技術であり、 $\text{CO}_2$  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る。

RITE は、 $\text{CO}_2$  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 年からは、民間企業との共同研究により、鉄鋼スラグ、廃コンクリート等から湿式でアルカリ土類金属を抽出し、工場等から排出される  $\text{CO}_2$  を、安定した化合物である炭酸塩として回収する技術開発、生成した炭酸

塩の有効技術の開発(図 18)に取り組んでいる。

これまでに、反応温度、反応時間等のプロセス最適化に取り組んできており、現在、スケールアップ含め、本プロセスの事業化を目指した検討を行っている。

図 18  $\text{CO}_2$ 炭酸塩固定化および有効利用技術

## 11. 実用化・産業化に向けた取り組み

実用化・産業化を促進するための情報交換・連携促進の場として「産業化戦略協議会」を設置し、現在、民間企業計 42 社(2025 年 4 月現在)と特別会員として、一般社団法人ファインセラミックスセンターが参画している。

2023 年度からは、革新的環境・エネルギー技術に資する  $\text{CO}_2$  分離回収・有効利用技術を確立することを目的に活動内容を広げて以下の事業を推進している。

### 【全体活動】

- ① 研究会の実施
- ② 会員限定無料セミナーの実施
- ③ 会員向けニーズ・シーズ情報、ホットトピックスの発信
- ④ シンポジウムの開催

### 【個別活動】

- ① 共同研究、国費事業の立案・予算申請および獲得
- ② 研究部門への研究員派遣の受け入れ
- ③ 技術相談の“優先”受付
- ④ 会員企業のニーズとシーズのマッチングを仲介

2024 年度は  $\text{CO}_2$  分離回収研究会と膜反応器の 2 つの研究会を実施した。

$\text{CO}_2$  分離回収研究会では、RITE より、海外を中心と

した CO<sub>2</sub> 分離回収に関する最新動向の学会や訪問調査結果、RCCC に関する情報提供を行った。

膜反応器研究会では、RITE より、膜反応器を用いた CO<sub>2</sub> 有効利用や、分離膜の支持体に関する情報提供を行い、支持体メーカー様からも支持体製造に関する情報を共有いただいた。

上記 2 つの研究会は 2024 年度で終了し、2025 年度からは、スコープを CO<sub>2</sub> の分離回収および有効利用に広げた新たな研究会を発足した。

会員限定無料セミナーは会場＋オンラインで 3 回開催し、大学、民間企業の研究者から CO<sub>2</sub> 分離回収および有効利用に関する最新の研究開発動向や開発事例の講演を行い、活発な質疑・応答が行われた。

さらに、講演内容に関連する特許・文献調査を行い、RITE 研究員のコメントを記載した「ニーズ・シーズ情報」を 1 回、学会トピックスや RITE メンバーの海外視察を記載した「ホットトピックス」を 1 回発信し、会員の技術開発推進と知見向上に寄与した。

2025 年 2 月に開催した「革新的 CO<sub>2</sub> 分離回収・有効利用技術シンポジウム」のポスター発表では、産業化戦略協議会の取り組みに加えて、会員企業 2 社からも参加いただいた。

## 12. おわりに

RITE では、今後も継続して、様々な排出源を対象とする CO<sub>2</sub> 分離・回収技術開発を精力的に推し進めていく。各テーマにおける個々の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、社会実装を目指し取り組んでいく。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。脱炭素化に向けた持続可能開発シナリオで CO<sub>2</sub> 回収の寄与が大きく期待される DACCS などのネガティブエミッション技術にも力を注ぐ。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となる。これら技術開発を一層に加速させ、より省エネルギーで低コストが可能な CO<sub>2</sub> 分離・

回収技術を早期に社会実装できるよう取り組んでいく。

RCCC については、公正・中立な実ガス試験データを取得できるセンターとして運営する。GI 基金事業の期間内から外部サンプルの受入れをスタートし、利用者である国内の CO<sub>2</sub> 分離素材開発者に公正・中立なデータを提供する。また、GI 基金事業終了後のセンター継続運営を目指して、外部サンプル受入れを通じて運営ノウハウの構築を育む。一方で、ITCN や国際学会での発表を通して RCCC で得られる標準評価法のデータを海外へ共有し、RITE が確立する標準評価法の国際的な認知・普及を推進する。

以上の活動を通じて、国内 CO<sub>2</sub> 分離回収技術のさらなる発展に貢献できるよう取り組む所存である。