

化学研究グループ

グループメンバー(2024年4月)

グループリーダー・主席研究員	余語 克則	研究員	前田 浩彰
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	山田 昌宏	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	鹿嶋 麻衣
主任研究員	甲斐 照彦	研究助手	片岡 梢
主任研究員	木下 朋大	研究助手	菰野 恵子
主任研究員	久貝 潤一郎	研究助手	杉本 理絵
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	大島 悠輔	研究助手	宮地 裕子
研究員	清川 貴康	研究助手	森 恵子
研究員	段 淑紅	研究助手	森 美佐都
研究員	Vu Thi Quyen	研究助手	保野 篤司
研究員	孟 烈	研究助手	吉井 隆裕
研究員	山口 創司	研究助手	吉野 直美
研究員	窪田 善之	研究助手	米澤 順子
研究員	鳥越 葵		

CO₂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

化学研究グループでは、研究部門と産業連携部門の組織体制を構成し、CO₂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、現在の化学研究グループの取り組みについて述べる。

2. CO₂分離回収・有効利用技術の研究開発

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CO₂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、様々な方面からの地球温暖化防止のための取り組みが進められている。

2022年5月には「クリーンエネルギー戦略」が策定され、該戦略の下でCCS長期ロードマップが取りまとめられた。2050年時点でのCO₂貯留量の目安が1.2~2.4億トンと明記され、その実現に向けた先進的CCS事業国内7拠点が採択されている。CCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)/カーボンリサイクルは、主要な取り組みの1

つであり、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位置付けられ、「CO₂を炭素資源として捉えて、分離・回収したCO₂の燃料や素材への再利用(CCU)」や「分離・回収したCO₂の地中貯留(CCS)」との組合せにより、大きなCO₂削減効果が見込まれる。CO₂分離・回収技術はCCUS推進のための基盤技術であり、2050年度までにCO₂分離・回収コスト1,000円/t-CO₂を目指し開発を進めることや様々なCO₂排出源に対応する分離・回収技術を確立していくこと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、大気中のCO₂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CO₂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CO₂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いる。

このような背景を受けて、様々なCO₂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。地球温暖化対策としてCO₂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CO₂分離・回収コストの低減が重要である。また、並行してCO₂分離・回収技術の標準化を推進していくことも重要である。国際的な標準化の動向に歩調を合わせながら、国内の分離素材の評価方法を標準化して、様々な分離素材を共通の方法で評価できるようにすることが求められている。また、CCU(utilization)の早期社会実装も強く求められている。分離回収したCO₂を炭素源として有効利用して化学品、燃料、鉱物へ変換してカーボンリサイクルする技術開発が重要である。

化学研究グループでは、CO₂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、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が、実用化されている。

固体吸収法では、低温でCO₂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。CO₂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。さらに、NEDOムーンショット型研究開発事業の中で大気からCO₂を分離・回収するDAC(Direct Air Capture)の開発も進めている。

膜分離法は、これまで高圧ガス(二酸化炭素(CO₂)/水素(H₂))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、小型中圧水素製造システム(CO₂回収型水素製造装置)の実証試験に向けた新たなNEDO事業を開始する。

CO₂分離・回収の標準化へ向けた取り組みも推進している。NEDO事業「CO₂分離素材の標準評価共通基盤の確立」において、国内初の実ガス試験センターをRITE内に設置し、実ガスを使用する標準評価法の確立を行う。2024年度中にセンターを竣工する予定である。また、ITCN(International Test Center Network:CO₂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)に加盟する国内唯一の機関としてRITEは、海外ITCNメンバーとの情報交換を定期的に行っている。該ネットワークを通して、CO₂分離・回収の標準化へ向けた取り組みを世界へ発信する。

CO₂有効利用技術については、現在、アミン技術を利用した炭酸塩固定化と脱水膜を利用するメタノール合成に取り組んでいる。炭酸塩固定においては、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CO₂を固定化する。アミン液を利用してカルシウム、マグネシウムを選択的に抽出してCO₂と反

応させて高純度な炭酸カルシウムを製造する。メタノール合成においては、発電所、製鉄所、セメント、化学工場から排出するCO₂を膜反応器(メンブレンリアクター)により水素と反応させて高効率にメタノールを合成する。「CO₂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NEOOより受託し2021年度から開発を行っている。

3. 化学吸収法

化学吸収法は、混合ガス中のCO₂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CO₂を含む溶液を加熱昇温し、高純度CO₂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CO₂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CO₂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、CO₂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CO₂回収設備 ESCAP[®]」に採用されている(図1)。



図1 省エネ型CO₂回収設備 ESCAP[®]

(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CO₂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、CO₂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2)。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CO₂との反応熱が低減できる。

本技術の研究開発は、2021年1月からグリーンイノベーション基金事業「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。2024年1月には日本製鉄(株)君津製鉄所において実際の高炉ガスを用いたベンチ試験を開始し、新たに開発した混合溶媒系吸収液の性能評価を実施している。



図2 混合溶媒系吸収液のコンセプト

4. 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3)。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、CO₂分離・回収エネルギーの低減が期待できる。

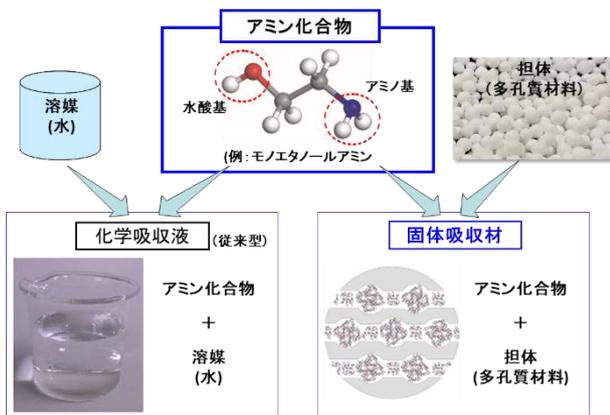


図3 化学吸収液と固体吸収材



図4 固体吸収法の開発ロードマップ

1) 石炭火力発電所向け

2010年、RITEは主に石炭火力発電所の燃焼排ガスからのCO₂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-CO₂以下の目的を得た。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(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-CO₂/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KHI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、KHIが舞鶴発電所内に建設したパイロットスケール試験設備(40t-CO₂/day 規模)の試運転を完了し、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CO₂分離・回収試験を開始した(図4)。

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、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、プロセスシミュレーション技術では、KHIの移動層システムにおいて高い精度でCO₂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5)。

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運転条件の最適化を行う予定である。さらに、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。

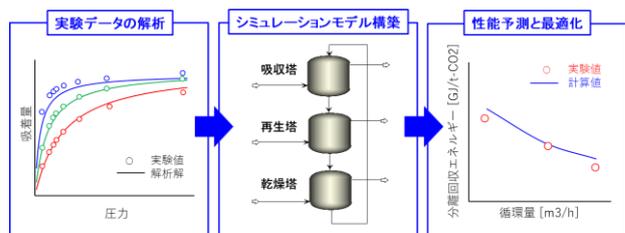


図5 RITEの保有するシミュレーション技術

2) 天然ガス火力発電所向け

2022年より、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CO₂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CO₂濃度は4%前後と石炭燃焼排ガス中のCO₂濃度(13%)と比較して低い一方、酸素濃度は

10%程度と高いため、低い CO₂ 濃度においても、高い CO₂ 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、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。本事業は 2024 年度にステージゲートが設定されているが、本年度開発したアミンにより目標を達成する固体吸収材の開発に成功している。この固体吸収材は低温再生が可能でなく、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 6)。

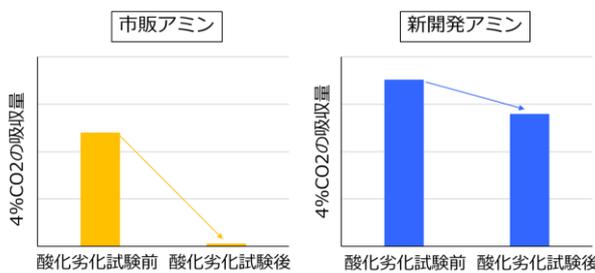
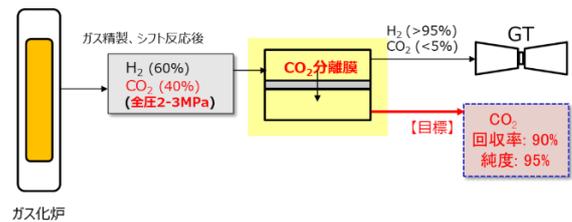


図 6 高温の酸素でアミンを強制的に酸化劣化させる試験実施前後の CO₂ 吸収量の変化
図中の縦軸は同じスケールを表す。

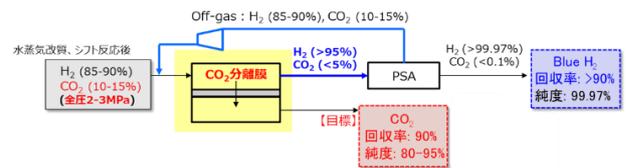
今後は前述のアミンの工業生産性を確認するとともに、ベンチ試験を実施し、その結果をもとに吸収材を改良していく予定である。

5. 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 CO₂ 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 CO₂ 分離・回収が期待される(図 7)。



(a)IGCC



(b)水素製造プラント

図 7 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 CO₂ 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 CO₂ と H₂ 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 8 に示す。

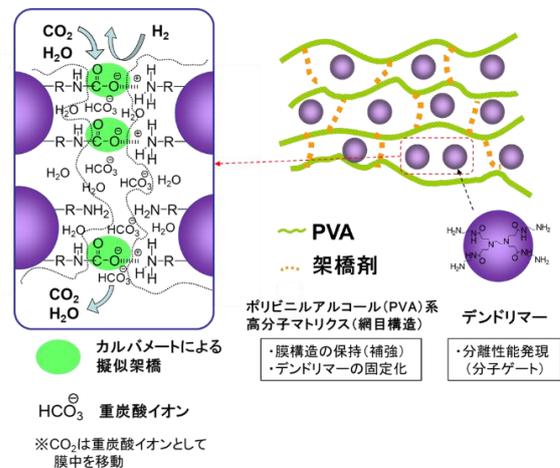


図 8 分子ゲート膜の概念図

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 CO₂ 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 H₂ の透過を阻害することで、従来の CO₂ 分離膜では分離が難しかった CO₂ と H₂ 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。

この成果の実用化を推進するために、現在、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、CO₂ 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いる。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／CO₂ 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 CO₂ 分離膜モジュールを用いた CO₂—H₂ 膜分離システムの研究開発」においては、これまでの成果に基づいて膜エレメントの CO₂ 分離性能・耐久性向上と商用サイズ膜モジュールの開発、CO₂ の利用プロセスに適する膜分離システム設計等、社会実装を目指した開発に取り組んだ。

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)の分離性能を向上させることができた。分離性能試験の結果を図 9 に示す。

膜材料の改良により、CO₂ パーミアンス、CO₂/N₂ 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認することができた(図 10)。2024 年度からは、小型中圧水素製造システム(CO₂ 回収型水素製造装置)の実証試験に向けた新しい事業を開始する。

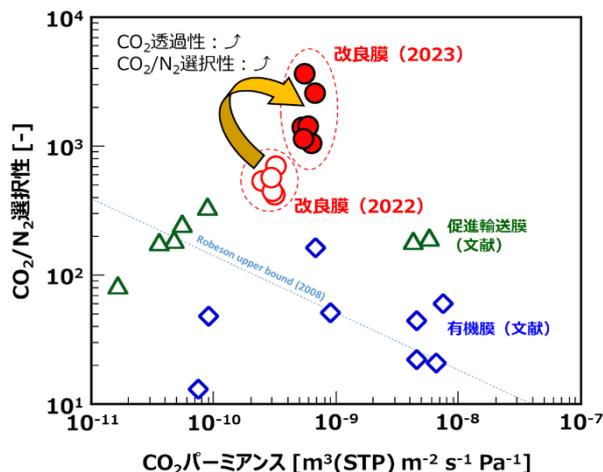


図 9 膜材料(単膜)の CO₂/N₂ 分離性能

MGM 膜の試験条件: 温度 85°C, 全圧 0.85MPa, 供給ガス組成 CO₂/N₂=20/80

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



CO₂ 分離膜



膜エレメント
(20cm 径、60cm 長)



膜モジュール
(20cm 径、60cm 長用ハウジング)

図 10 CO₂ 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)

6. 大気中からの CO₂ 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 CO₂ 分離回収・炭素循環技術の開発に取り組んでいる。

大気中から直接 CO₂ 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、2023年度からは 6 件中 5 件が継続中である。

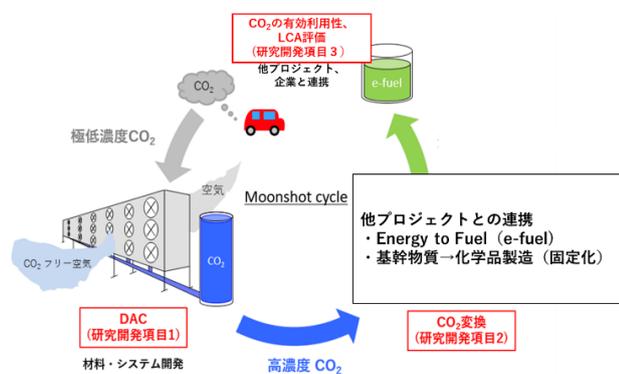


図 11 大気中からの高効率 CO₂ 回収・炭素循環技術の開発

RITEはこれまでの知見を活かし、大気中の CO₂ 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、吸収した CO₂ 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 12)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13; 三菱重工業株式会社にて設計・製作、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。2025年には大阪・関西万博会場にて最大0.5t-CO₂/day 規模のベンチスケール実証試験を行う予定である。



図12 DAC ラボ試験装置

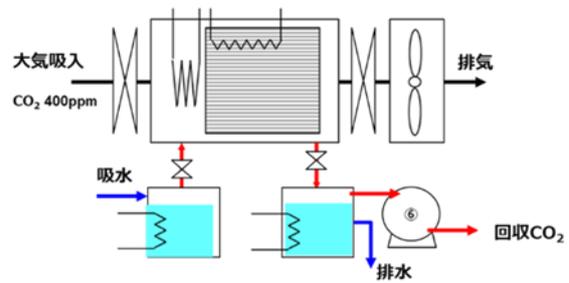


図13 DAC システム評価装置の概念図(上)と装置を設置した DAC 実験棟(下:RITE 敷地内)

7. CO₂ 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、CO₂ 排出も必然的に避けられない。そのため、比較的 CO₂ 排出量の少ない天然ガスの燃焼によって排出される CO₂ 濃度 10%以下の低圧・低濃度排ガスからの CO₂ 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基金事業／CO₂の分離回収等技術開発プロジェクト／低圧・低濃度 CO₂分離回収の低コスト化技術開発・実証／CO₂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 CO₂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 CO₂分離素材を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年間を予定(第1期:2024年度まで)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(実ガス試験センターの設置・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、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 CO₂分離素材を評価するために、実ガスを用いて評価する実ガス試験センターを RITE 本部研究所内に設置するとともに、標準評価法の素案を策定する。実ガス試験センターは、図14に示すように、吸収液、吸着材および膜の各 CO₂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、2023年度までに基本設計が終了している。

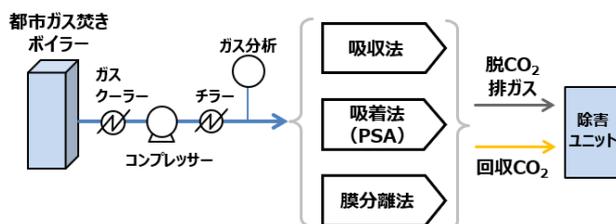


図14 実ガス試験センター全体構成

(各分離法に実ガスを供給:約 0.1t-CO₂/day 相当)

近年、カーボンニュートラルに向けた CO₂分離素材の開発において、世界では共通基盤の確立が進んでいるが、日本ではそのような基盤が整備されておらず、プロジェクト推進協議会を通じて国内企業の意見を収集するとともに、ITCN (International Test Center

Network)等の国際会合に参加し、海外の機関との協力体制構築にも努めている。RITE は、本事業を通して、CO₂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する予定であり、今後も我が国が CO₂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 CO₂分離素材開発の促進に貢献する。

8. CO₂を原料とするメタノール合成技術の開発

CO₂有効利用技術は CO₂削減に効果的であり、世界各国で盛んに研究開発・実証検討が行われている技術である。その中で CO₂の水素化による有効利用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 CO₂有効利用技術、特に CO₂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 CO₂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／CO₂排出削減・有効利用実用化技術開発／化学品への CO₂利用技術開発／CO₂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おり、比較的に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した。加えて、メタノール合成の反応温度域で目標値(H₂O 透過率: $1 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, H₂O/MeOH 選択性: >1,050)を達成することができた。特筆すべきは、長尺脱水膜の透過性が目標値の約2倍の高透過性を発揮しており、これは膜反応器に適用した際、メタノール合成効率の向上効果を期待することができる成果である(図15)。この性能を有する実用的長さの脱水膜を複数本具備したベンチスケール膜反応器

試験を JFE スチール(福山)にて実施中である。また、実用的長さの脱水膜の再現性向上を検討しており、図 16 に示す様に、合成条件を精査することにより、ラボスケール試験(図中のチャンピオンデータ)と同等程度の長尺膜を合成することに成功した。これは、すでに市販されている脱水膜よりも高い、あるいは同等程度の性能を有していた(図中の+のプロット)。また一般的な脱水膜である LTA 型ゼオライト膜と比較して Si-rich LTA 膜は高い水熱安定性が期待できるため、これまで LTA 型ゼオライト膜では適用の難しかった分離系への展開が可能になると考えられる。

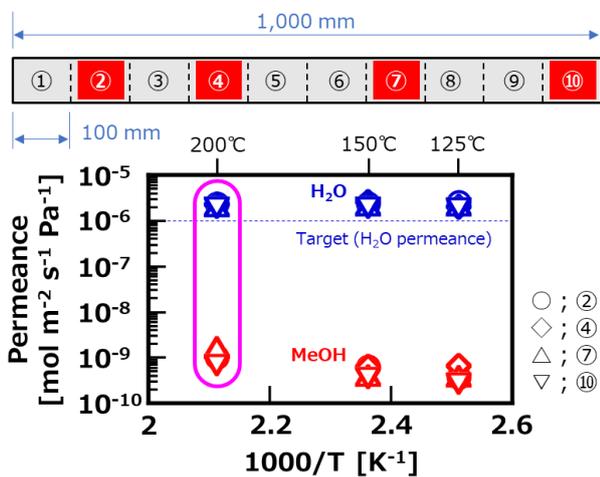


図 15 長尺脱水膜(100 mm カットサンプル)の H₂O/MeOH 透過分離性能

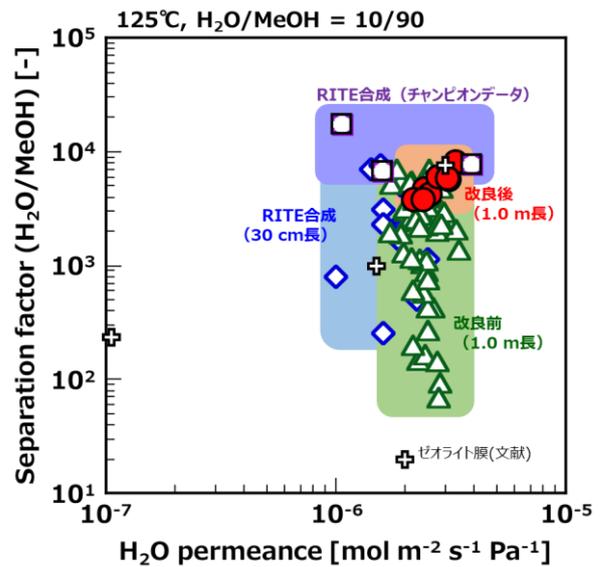


図 16 長尺脱水膜の H₂O/MeOH 透過分離性能

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(O₂)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を優先的に反応が起るため、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。

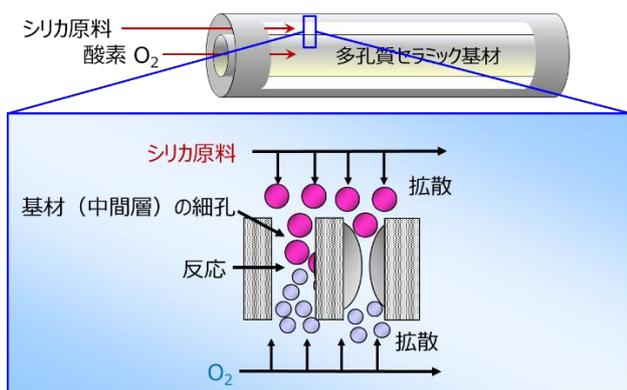


図 17 対向拡散 CVD 法によるシリカ膜の製膜イメージ

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 H_2 :0.29 nm, CO_2 :0.33 nm, N_2 :0.36 nm, 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

CO_2 鉱物化(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、 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。更に近年は、カーボンニュートラル社会の早期実現に向けて、 CO_2 を資源として有効活用する技術課題への注目が高まっており、産業分野の廃棄物や副産物に含まれるアルカリ土類金属を用いた CO_2 炭酸塩固定化技術の研究開発が国内外で進められている。

RITE は、 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 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。

本プロセスにおいて、これまで、反応温度の低下と反応時間の短縮による省エネ化、一度使用した液を再度使用するプロセス(再生液適用)を確立した。そして、スケールアップが可能なプロセスであることも明らかにした。加えて、抽出時に使用する液を改良することで、材料コストの低下も期待できる。現在、これまで明らかにしてきた知見と情報を基に、本プロセスの事業化を目指した検討を行っている。

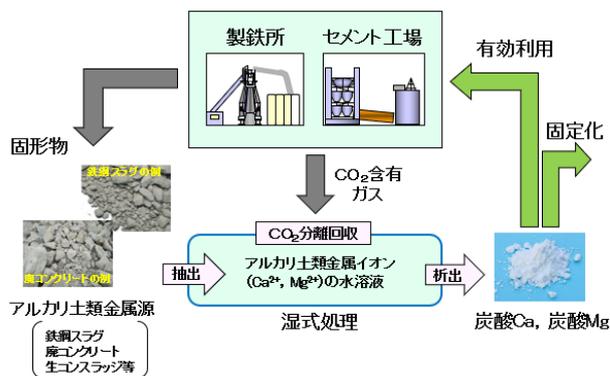


図 18 CO_2 炭酸塩固定化および有効利用技術

11. 実用化・産業化に向けた取り組み

産業連携部門のコアとなるのは、「産業化戦略協議会」で、民間企業計 33 社(2024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 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た。

【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

2023年度は CO₂ 分離回収研究会と膜反応器の2つの研究会を実施した。

CO₂ 分離回収研究会では、化学研究グループより、最新の DAC 技術について、各 DAC 企業の技術概要とトピックス紹介を行った。

膜反応器研究会では、化学研究グループより、膜反応器全般に関する情報提供、CO₂フリー水素製造に関する情報提供を行った。

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 CO₂ 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、化学研究グループ研究員のコメントを記載した「ニーズ・シーズ情報」を 2 回、学会トピックスや経済産業省、NEDO の最新情報を記載した「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。

また、2024 年 2 月に開催した「革新的 CO₂ 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

化学研究グループでは、今後も継続して、様々な排出源を対象とする CO₂ 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、社会実装を目指し取り組んでいく。低濃度の CO₂ 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 CO₂ 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。CO₂ 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 CO₂ 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。

具体的には、化学吸収法では実用化されている化学吸収液のさらなる普及、高度化を目指す。固体吸収法では、2023 年度から始まる石炭火力燃焼排ガス向け 40t-CO₂/day 規模のパイロット試験を確実に実行するとともに、新たに開始している天然ガス火力燃焼排ガス向けの新規吸収材開発を着実に遂行する。DAC 技術開発については、2025 年大阪・関西万博でのベンチスケール実証向け装置の製作・吸収材の製造を行う。膜分離法では、後継事業として 2024 年度から「高圧用 CO₂ 分離膜の水素製造システムへの適用性検討」を開始した。標準評価法の確立については、2024 年度中に実ガス試験センターを竣工し、実ガスを使用した試験を開始する。

また、分離・回収した CO₂ の有効利用 (Utilization) やそのために必要となる水素製造技術への取り組みも継続して推進する。鉄鋼スラグや廃コンクリート等への CO₂ 炭酸塩固定化技術開発に加え、今後は、CO₂ を燃料や化学原料にリサイクルする新たな探索研究にも力を入れていく。さらに、実ガス試験センターの設置、産業化戦略協議会の活動を通じた、CO₂ 分離回収の産業界の皆様との連携をますます強化していくことも継続して推進する。国内 CO₂ 分離回収技術のさらなる発展、貢献できるように取り組む所存である。