

補助事業番号 2025M-402

補助事業名 2025年度 促進輸送膜を備えるコンパクトDirect Air Captureシステム開発のための基礎研究 補助事業

補助事業者名 神戸大学 神尾英治

## 1 研究の概要

補助事業者が創製した高速且つ高選択的CO<sub>2</sub>透過性能を有するイオン液体型促進輸送膜を用いたコンパクトDACシステムの開発に関する基礎研究を行う。本事業では、そのコンパクトDACシステムの心臓部であるイオン液体型促進輸送膜モジュールの開発と運転条件の最適化を行う。具体的には、①イオン液体型促進輸送膜モジュールの流路構造最適化、②膜モジュールの作製、③作製したモジュールを用いたDACプロセス運転条件の最適化を行う。

## 2 研究の目的と背景

近年、地球温暖化が深刻化しており、大気中CO<sub>2</sub>濃度を低減可能な技術の開発が求められている。空気中のCO<sub>2</sub>を分離回収するDirect Air Capture (DAC)が注目されている。都市部の高気密住宅やオフィスは室内CO<sub>2</sub>濃度が高く、DACの対象として適するが、小型DACシステムが必要である。CO<sub>2</sub>分離膜を用いることでコンパクトDACシステムを実現できる可能性があるが、既往のCO<sub>2</sub>分離膜はCO<sub>2</sub>選択透過性が低く、空気からのCO<sub>2</sub>分離では装置が大型化してしまうことが課題となっている。高速且つ高選択的にCO<sub>2</sub>を透過する高性能CO<sub>2</sub>分離膜を備えた小型DACシステムの開発が求められている。

高気密建造物内で使用できるコンパクトDACシステムの実現のために、申請者が創製したイオン液体型促進輸送膜を備えるCO<sub>2</sub>分離膜モジュールの設計と試作、運転条件最適化を行う。具体的には、①任意条件におけるイオン液体型促進輸送膜のCO<sub>2</sub>透過係数推算式の決定、②CO<sub>2</sub>透過係数推算式を組み込んだモジュール性能予測モデルの構築とモデル計算に基づくモジュール流路構造・運転条件の最適化、③ 3Dプリンタを用いた流路プレートの作製、その流路プレートを積層することによるイオン液体型促進輸送膜モジュールの試作とCO<sub>2</sub>透過試験を行う。

## 3 研究内容

### (1) 任意条件におけるイオン液体型促進輸送膜のCO<sub>2</sub>透過係数推算式の決定

補助事業者が開発してきたCO<sub>2</sub>反応性イオン液体型促進輸送膜は、既往の促進輸送膜の欠点である供給ガスの水蒸気分率低下に伴うCO<sub>2</sub>透過性能の低下が小さく、促進輸送膜モジュール内における水蒸気透過に伴うCO<sub>2</sub>透過速度の低下が起こりにくい。図1には、CO<sub>2</sub>反応性イオン液体の一種である[P<sub>2225</sub>][Pro]をCO<sub>2</sub>キャリアとするイオン液体型促進輸送膜のCO<sub>2</sub>透過係数に及ぼす水蒸気分率およびCO<sub>2</sub>分圧の影響を評価した結果を示す。イオン液体型促進輸送膜は乾燥ガスを含む低湿度ガスに対しても高いCO<sub>2</sub>透過係数を保っているが、依然として、そのCO<sub>2</sub>透過速度は供給ガスの水蒸気分率およびCO<sub>2</sub>分圧に依存する。このCO<sub>2</sub>透過係数( $P_{CO_2}$ )は水蒸気分率( $x_{H_2O}$ )

に対して二次関数,  $P_{CO_2} = A \cdot x_{H_2O}^2 + B$ , の依存性を示し(図1)、さらに、二次関数のパラメータAおよびBはCO<sub>2</sub>分圧( $p_{CO_2}$ )に対して、 $A = \beta_A / (p_{CO_2} + \alpha_A) + \gamma_A$ ,  $B = \beta_B / (p_{CO_2} + \alpha_B) + \gamma_B$ の依存性を示すことが確認された(図2)。これらの関係式を用いて、任意のCO<sub>2</sub>分圧および水蒸気分率の供給ガスに対するCO<sub>2</sub>透過係数の推算を行ったところ、図1に実線で示されているように、推算線は実験結果に対して良好に相関することが確認された。すなわち、本検討により、任意性状の供給ガスに対してイオン液体型促進輸送膜のCO<sub>2</sub>透過係数を予測可能な推算式が得られた。同様に、種々CO<sub>2</sub>分圧および水蒸気分率の供給ガスに対する水蒸気透過性能評価を行い、任意性状の供給ガスに対する水蒸気透過係数推算式も決定した。

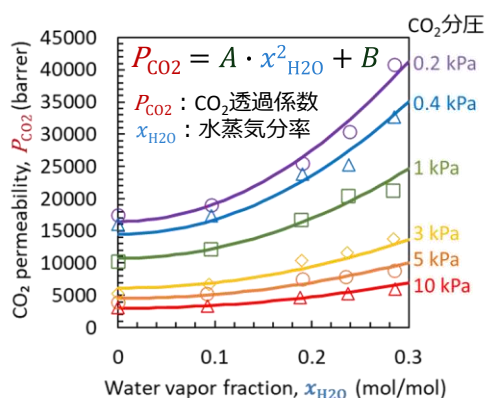
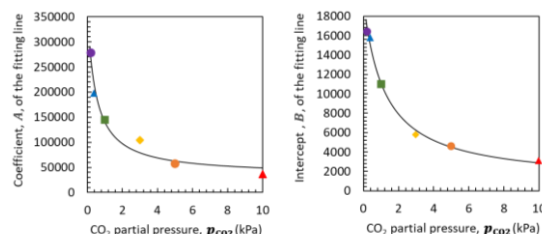


図1 [P<sub>2225</sub>][Pro]をCO<sub>2</sub>キャリアとするイオン液体型促進輸送膜のCO<sub>2</sub>透過係数に及ぼす水蒸気分率およびCO<sub>2</sub>分圧の影響

パラメータAおよびBのCO<sub>2</sub>分圧依存性



$$A = \frac{\beta_A}{p_{CO_2} + \alpha_A} + \gamma_A \quad B = \frac{\beta_B}{p_{CO_2} + \alpha_B} + \gamma_B$$

図2 [P<sub>2225</sub>][Pro]型促進輸送膜のCO<sub>2</sub>透過係数の水蒸気分率依存性推算式のパラメータAおよびBのCO<sub>2</sub>分圧依存性

(2) CO<sub>2</sub>透過係数推算式を組み込んだモジュール性能予測モデルの構築とモデル計算に基づくモジュール流路構造・運転条件の最適化

① CO<sub>2</sub>透過係数推算式を組み込んだモジュール性能予測モデルの構築

イオン液体型促進輸送膜のCO<sub>2</sub>透過係数はCO<sub>2</sub>分圧および水蒸気分率に依存する。イオン液体型促進輸送膜はCO<sub>2</sub>および水蒸気を選択的に透過するため、イオン液体型促進輸送膜を備える膜モジュールでは、モジュール内における選択的なCO<sub>2</sub>透過および水蒸気透過に伴い、モジュール内の供給ガス組成が連続的に変化する。図3はイオン液体型促進輸送膜モジュール内における水蒸気分率とCO<sub>2</sub>分圧の変化を模式的に示した図である。このような水蒸気分率とCO<sub>2</sub>分圧の連続的な変化の結果、モジュール内に備えられたイオン液体型促進輸送膜のCO<sub>2</sub>透過係数はモジュール内の位置ごとに変化する。イオン液体型促進輸送膜モジュールの性能を予測するためには、モジュール内任意位置における微小区間の供給ガスおよび透過ガス中の各ガス成分の物質収支を微分方程式で記述し、それらを連立する必要がある。ここで、微小区間の物質収支式中の透過係数にイオン液体型促進輸送膜のCO<sub>2</sub>透過係数推算式および水蒸気透過係数推算式を組み込むことで、イオン液体型促進輸送膜モジュールのCO<sub>2</sub>透過性能予測モデルを構築した。

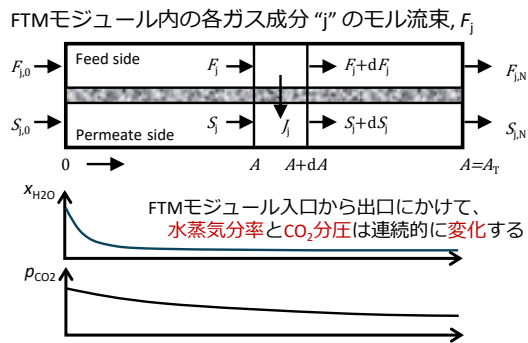
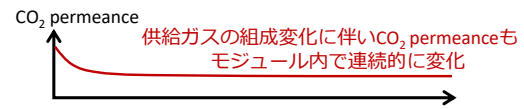


図 3 イオン液体型促進輸送膜モジュール内における水蒸気分率および CO<sub>2</sub> 分圧変化の模式図



Feed side

$$\frac{dF_j}{dA} = -J_j = -\frac{P_j}{\delta}(p_{i,F} - p_{i,S}) = -\frac{P_j}{\delta} \left( p_F \frac{F_j}{\sum_{j=1}^{NC} F_j} - p_S \frac{S_j}{\sum_{j=1}^{NC} S_j} \right)$$

Permeate side

$$\frac{dS_j}{dA} = J_j = \frac{P_j}{\delta}(p_{i,F} - p_{i,S}) = \frac{P_j}{\delta} \left( p_F \frac{F_j}{\sum_{j=1}^{NC} F_j} - p_S \frac{S_j}{\sum_{j=1}^{NC} S_j} \right)$$

Boundary conditions:  
 $A = 0$  (at inlet) ,  $F_j = F_{j,0}$  ,  $S_j = S_{j,0}$

図 4 イオン液体型促進輸送膜モジュール内における CO<sub>2</sub> 透過速度変化の模式図と微小区間における各ガス成分の物質収支式

② モデル計算に基づくモジュール流路構造・運転条件の最適化

構築したモジュール性能評価モデルによるイオン液体型促進輸送膜モジュールのCO<sub>2</sub>分離性能計算とCOMSOLを用いた偏流計算からモジュール流路構造と運転条件の最適化を行い、図5に示すモジュール流路構造を設計した。

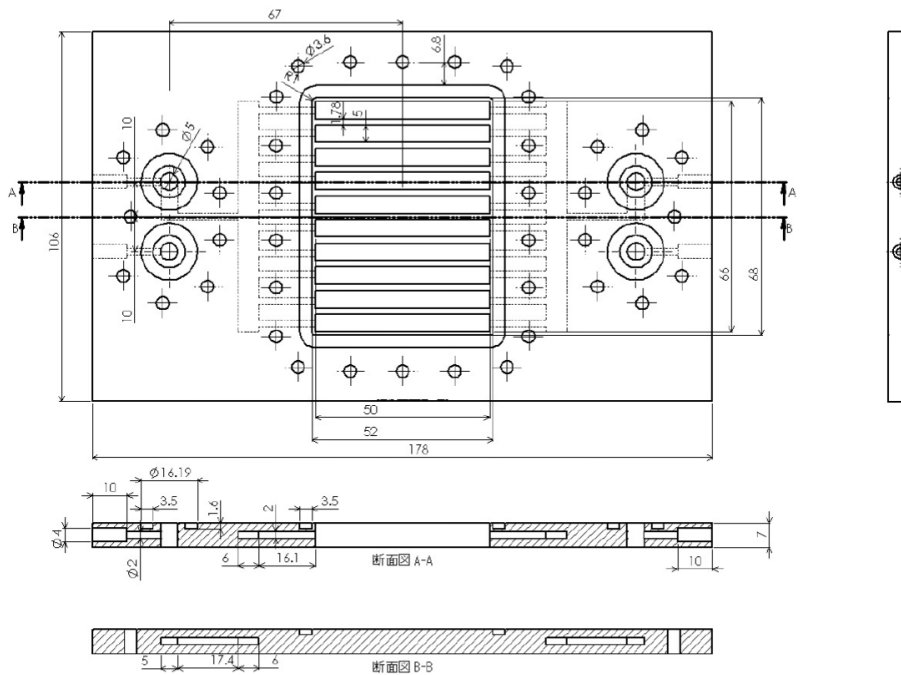
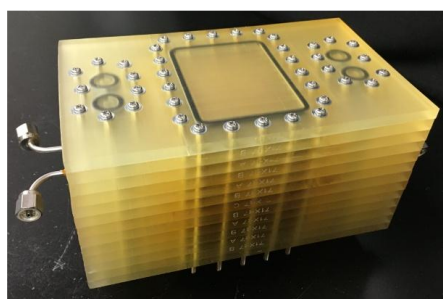


図 5 イオン液体型促進輸送膜モジュール流路構造展開図

(3) 3Dプリンタを用いた流路プレートの作製、その流路プレートを積層することによるイオン液体型促進輸送膜モジュールの試作とCO<sub>2</sub>透過試験

設計した流路構造を有する流路プレートを、3Dプリンタを用いて作製した。作製した流路プレート

をイオン液体型促進輸送膜とともに積層することにより、イオン液体型促進輸送膜モジュールを作成した。図6には10本流路10積層モジュールの写真とイオン液体型促進輸送膜を2~10枚備える10本流路プレート積層モジュールの透過ガス中CO<sub>2</sub>分率の実験値とモデル推算結果の比較を示す。モジュール性能評価モデルによる推算結果は実験結果に対して相関係数0.998以上の精度でCO<sub>2</sub>透過性能を予測することが可能であった。これは、構築したモジュール性能評価モデルの妥当性を示す結果である。



10本流路10積層モジュール

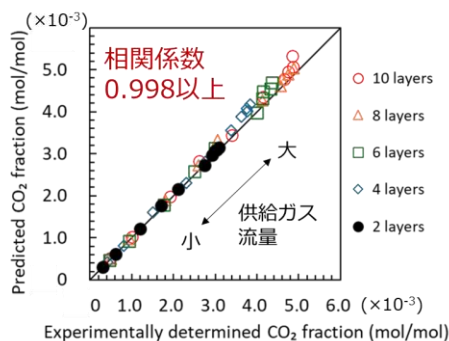


図6 イオン液体型促進輸送膜モジュール試作品およびその性能予測結果と実験結果の比較

イオン液体型促進輸送膜モジュールと既往の促進輸送膜モジュールの性能を比較した結果を図7に示す。本検討では、既往の促進輸送膜モジュールにはプロリンをCO<sub>2</sub>キャリアとする中空糸型促進輸送膜モジュールを用いた。図7に示されているように、既往の促進輸送膜モジュールではCO<sub>2</sub>回収率が非常に低いが、イオン液体型促進輸送膜モジュールでは高CO<sub>2</sub>回収率で高CO<sub>2</sub>濃度の透過ガスを得ることができると示された。これは、モジュール入り口付近における水蒸気の選択的透過に伴い原料ガス中の水蒸気分率が著しく低下し、既往の促進輸送膜モジュールではその水蒸気枯渇に伴うCO<sub>2</sub>透過速度の深刻な低下が起こるが、イオン液体型促進輸送膜モジュールではイオン液体型促進輸送膜のCO<sub>2</sub>透過速度が低湿度でも比較的高い値に維持されるため、モジュール内における水蒸気枯渇の影響が小さく、高CO<sub>2</sub>回収率を実現できた結果である。

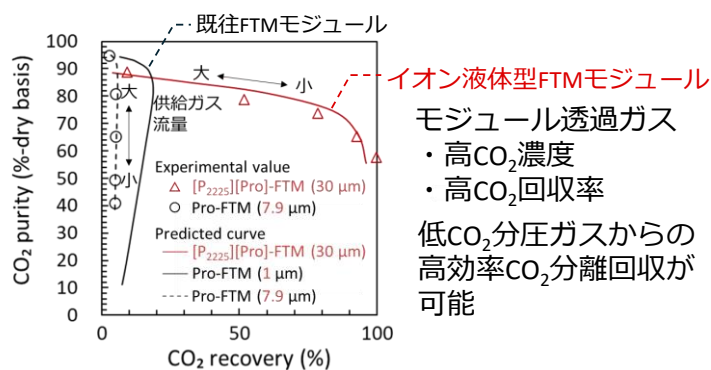


図7 イオン液体型促進輸送膜モジュールと既往促進輸送膜モジュールのCO<sub>2</sub>分離回収効率の比較結果

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

高CO<sub>2</sub>濃度の高気密建造物に対するDACを行うことで、大気中CO<sub>2</sub>濃度を低減するネガティブエミッションを達成できれば、地球温暖化や急激な気候変動等の大規模地球環境破壊を抑制できる。加えて、小型DACシステムにより高気密住宅やオフィス、学校等のCO<sub>2</sub>濃度を外気と同等あるいはそれ以下の低濃度に保つことができれば、居住者のQOL(生活の質)の改善が実現できる。また、高気密・高断熱マンションは今後益々増えることが想定されるが、そのような高気密住居の冷暖房エネルギーを軽減するには、換気量の最小化が効果的である。コンパクトDACシステムの導入により、室内CO<sub>2</sub>濃度の低減のための換気量を減らすことができれば、冷暖房の省エネ化が実現でき、DAC+省エネのダブルCO<sub>2</sub>削減が可能となる。また、常時CO<sub>2</sub>濃度を低く保つことによる仕事や学習の効率向上が期待でき、オフィスや学校に導入される。他にも、長距離旅客機や宇宙ステーションなど、大型装置を搭載できない特殊空間への導入も考えられる。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

補助事業者は、促進輸送膜によるCO<sub>2</sub>分離プロセスの実現に関する研究の一環として、従来の促進輸送膜が不得意とする低湿度ガスに対しても高速且つ高選択的にCO<sub>2</sub>を透過可能なイオン液体型促進輸送膜に関する研究を行ってきた。本研究は、イオン液体型促進輸送膜の実用化形態である膜モジュールについて、そのモジュール性能を高精度に予測可能なモデルを構築し、イオン液体型促進輸送膜モジュールが低湿度且つ低CO<sub>2</sub>分圧ガスから効率的にCO<sub>2</sub>を分離回収できることを実証したものである。本研究の位置づけは、これまでの基礎研究と今後の応用研究の懸け橋として重要な意味を持つものである。

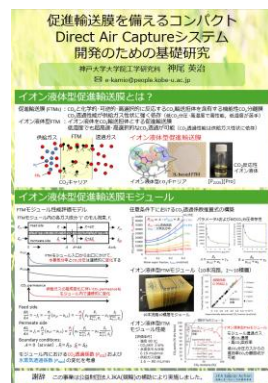
#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

Koki Ohashi, Eiji Kamio, Atsushi Matsuoka, Keizo Nakagawa, Tomohisa Yoshioka, and Hideto Matsuyama, A Composition-Dependent Performance Prediction Model for a Hollow-Fiber Membrane Module Equipped with Glycine-Based Facilitated Transport Membranes, Industrial & Engineering Chemistry Research 2026 65 (1), 784–798, DOI: 10.1021/acs.iecr.5c03731

#### 7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの  
研究内容紹介リーフレット

(2)(1)以外で当事業において作成したもの  
該当なし。



## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 神戸大学大学院工学研究科  
(コウベダイガクダイガクインコウガクケンキュウカ)

住 所: 〒657-8501  
兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1

担 当 者: 教授 神尾 英治 (カミオ エイジ)

担 当 部 署: 膜工学グループ (マクコウガクグループ)

E - m a i l: e-kamio@people.kobe-u.ac.jp

U R L: <https://www2.kobe-u.ac.jp/~matuyama/cx14HP/>