

大気中からの高効率CO₂分離回収・ 炭素循環技術の開発



PM：兎玉 昭雄

国立大学法人金沢大学 新学術創成研究機構 教授

PJ参画機関：

国立大学法人金沢大学

公益財団法人地球環境産業技術研究機構RITE

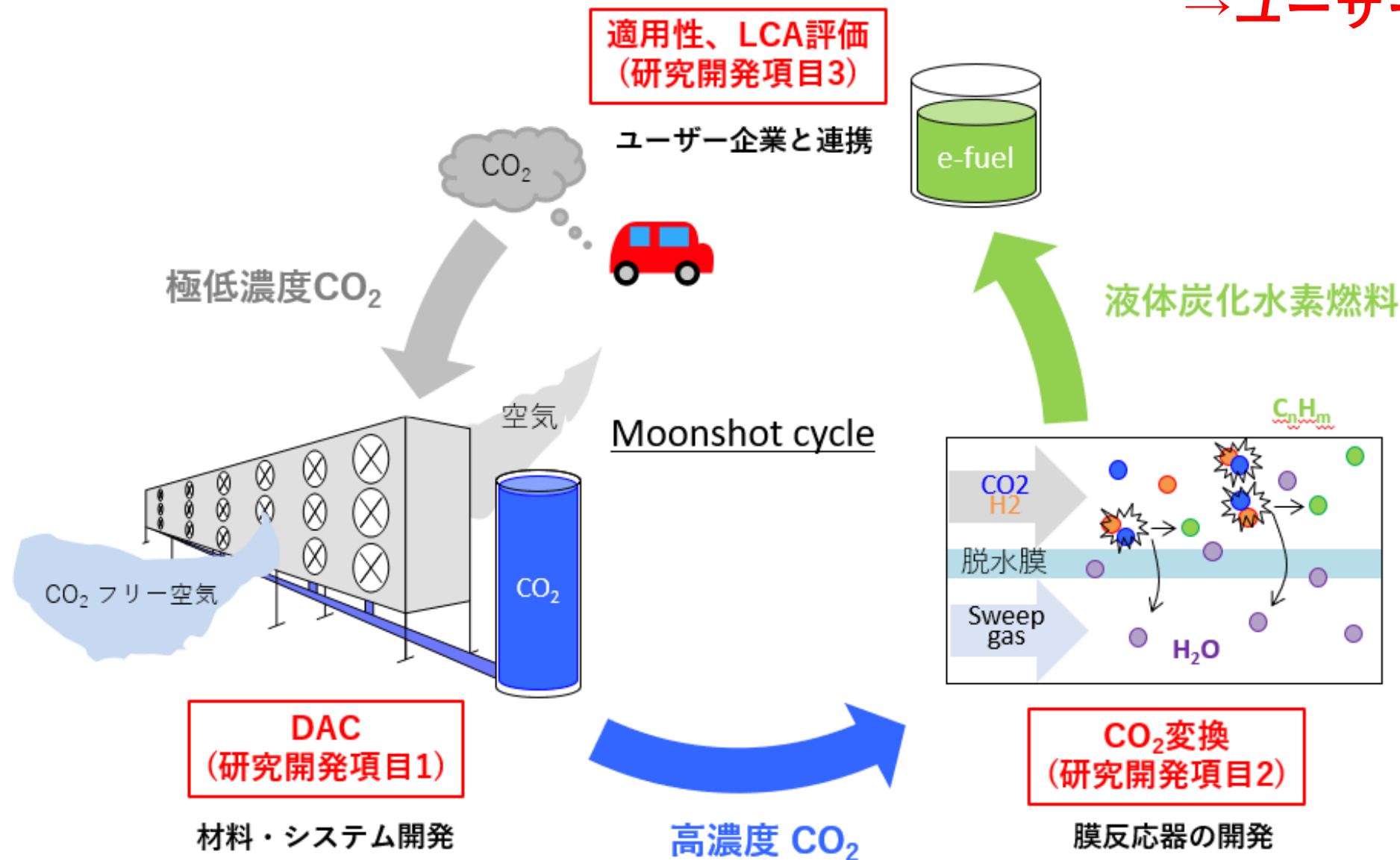
実施期間：2020年度～2029年度



プロジェクトの概要と開発項目

【実施内容】

1. 大気中からの高効率CO₂回収（Direct Air Capture DAC-TSA）開発
→ RITE固体吸収材の適用、金沢大デシカントローター技術の知見の適用
2. 炭素循環のためのCO₂変換技術開発（液体炭化水素燃料合成）
→ 膜反応器による高効率化
3. 液体炭化水素燃料適用性、システム全体のLCA評価
→ ユーザー企業と連携



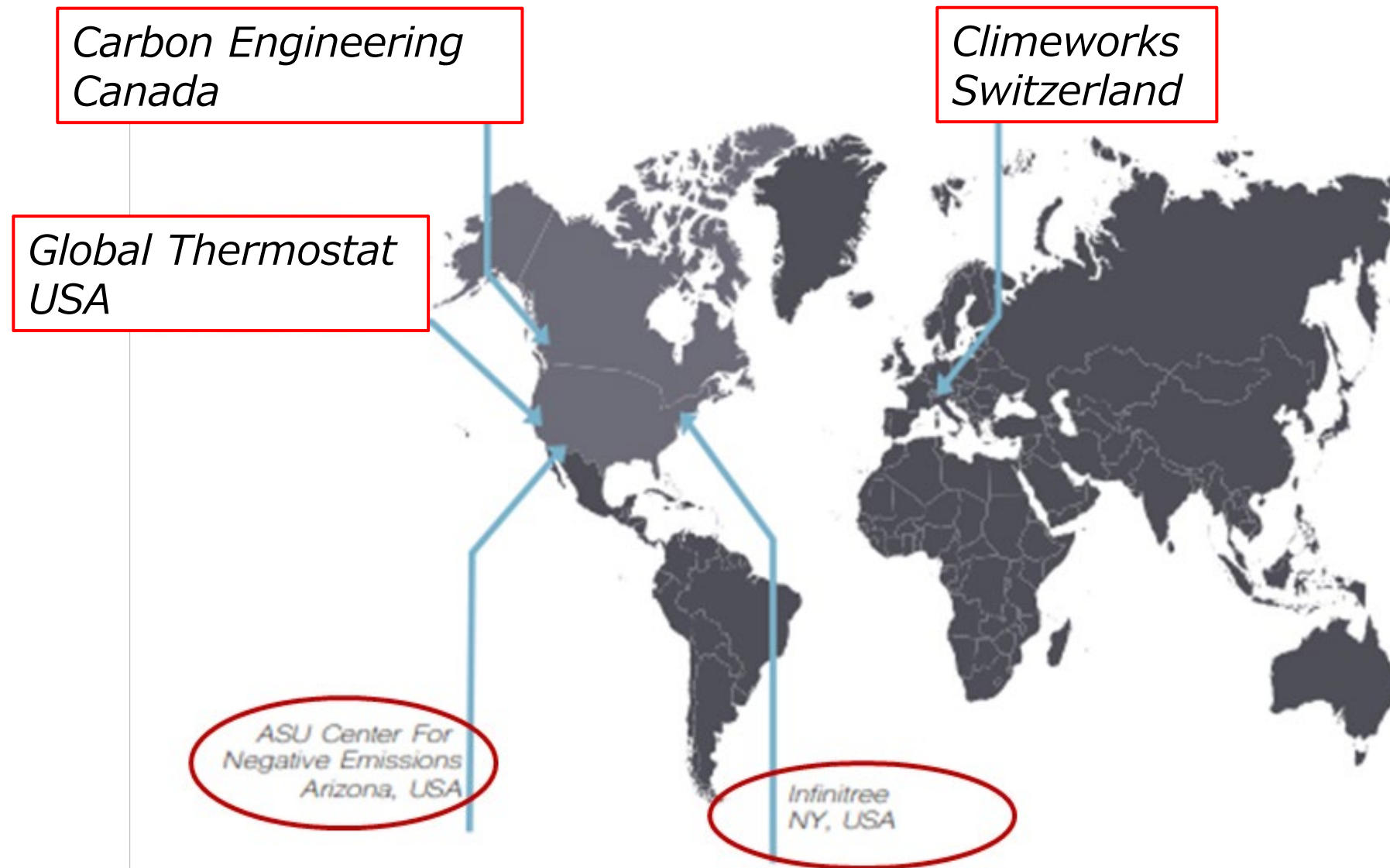


開発スケジュール

項目	年度	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	
DAC	DAC用新規吸収材の開発 (RITE)	新規材料探索・ラボ評価			合成方法最適化		材料および製造法改良・性能向上検討					
	高効率DACプロセス開発とシステム評価 (金沢大、RITE、エンジン会社再委託)	低濃度CO ₂ 回収プロセス検討 (間接加熱型, ロータリー型TSA粗濃縮システムの確立)				CO ₂ 回収システムの改良 (送風動力低減・蓄熱設備の導入)とLCA評価に基づく有効なDACシステムの構築						
		シミュレーション検討 (最適な濃縮プロセスの提案)		シミュレーション検討 (パイロット試験装置設計支援)		シミュレーション検討 (運転条件最適化)						
		低濃度CO ₂ 回収プロセス検討 (システム開発・改良)		低濃度CO ₂ 回収プロセス検討 (小型ベンチ試験)		低濃度CO ₂ 回収プロセス検討 (実用システム開発・改良)						
DACスケールアップ試験装置の詳細設計・製造と評価試験 (エンジン会社再委託)							課題抽出 改良検討 パイロット試験装置の設計	パイロット試験装置の製作	パイロット試験 実用性評価			
CO ₂ 変換	高効率CO ₂ 変換技術の開発と最適プロセス検討 (RITE)	脱水膜と水素透過膜の開発 一体型膜反応装置設計			膜の耐久性試験 一体型膜反応装置の製作と試運転		大気中から回収したCO ₂ の直接変換反応技術の開発					
	CO ₂ 変換スケールアップ試験装置の詳細設計・製造と評価 (エンジン会社再委託)					ベンチ/小型パイロットスケール試験装置の設計・製作		最適な膜反応プロセスの実証				
	CO ₂ 変換技術 e-fuel適用性、LCA評価 (自動車会社と連携)					e-fuel要求仕様の検討 経済性見通し判断		実証プラントの燃料を用いての部材影響およびエンジン実機評価		LCA最終評価 社会実装性評価		



DAC (吸収式) 海外先行事例



企業名	吸収材	所要エネルギー・コスト
Climeworks	アミン系固体吸収材	9.0GJ/t-CO ₂ (熱), 450kWh/t-CO ₂ (電力), 600\$/t-CO ₂
Carbon Engineering	KOH/Ca(OH) ₂ 水溶液	5.3 GJ/t-CO ₂ (熱), 366 kWh/t-CO ₂ (電力),
Global Thermostat	アミン系固体吸収材	4.4 GJ/t-CO ₂ (熱), 160 kWh/t-CO ₂ (電力), 150\$/t-CO ₂

⇒エネルギー・コストに課題

各社公開情報, ICEF 「Direct Air Capture of Carbon Dioxide」



DAC-TSA:低温廃熱駆動と送風動力の低減

熱: 4.4GJ/t-CO₂

電力: 160kWh/t-CO₂

CO₂吸収材の加熱
+
CO₂反応熱 (脱離)

主として送風動力
大気中から1トンのCO₂を
回収するには少なくとも
127万m³の空気処理が必要

未利用熱・太陽熱の活用

送風動力の低減

低温度再生可能な吸収液開発
顕熱ロスの低減

社会受容可能なサイズに収めつつ
送風時の圧力損失を低減

固体吸収材 (RITE)
+
ハニカムロータリー-TSA技術 (金沢大)



DAC-TSA:低温廃熱駆動と熱マネジメント

ポリエチレンジイミン担持シリカ

CO₂吸収容量0.4mol/kg_{固体吸収材}
固体吸収材の熱容量2kJ/(kg·K)
反応熱 = 80kJ/mol-CO₂

120°C排熱
11.8 GJ



CO₂ 1トン (509Nm³)

吸収工程で
120°C→30°C

放熱量
10 GJ

加熱: 30°C→120°C

温度スイングTSA

【材料革新】

- 脱離熱の低減と低温再生; CO₂吸収剤(アミン)の最適設計
- 固体吸収材(アミン+担持材)の顕熱低減; 担持体材料およびアミン担持率の最適化

【プロセス革新】

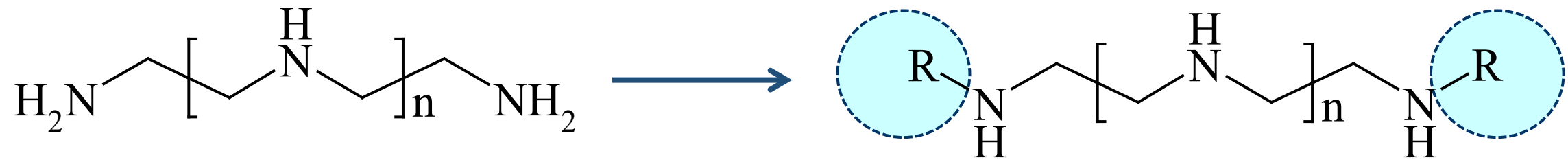
- 捨てられる熱をいかに回収し、再利用するか
- CO₂脱離に必要な熱をどのように供給するのか

11.8 GJの熱を120°Cの温風(ΔT=90°C)で供給しようとする9万Nm³の風量が必要⇒CO₂薄まる

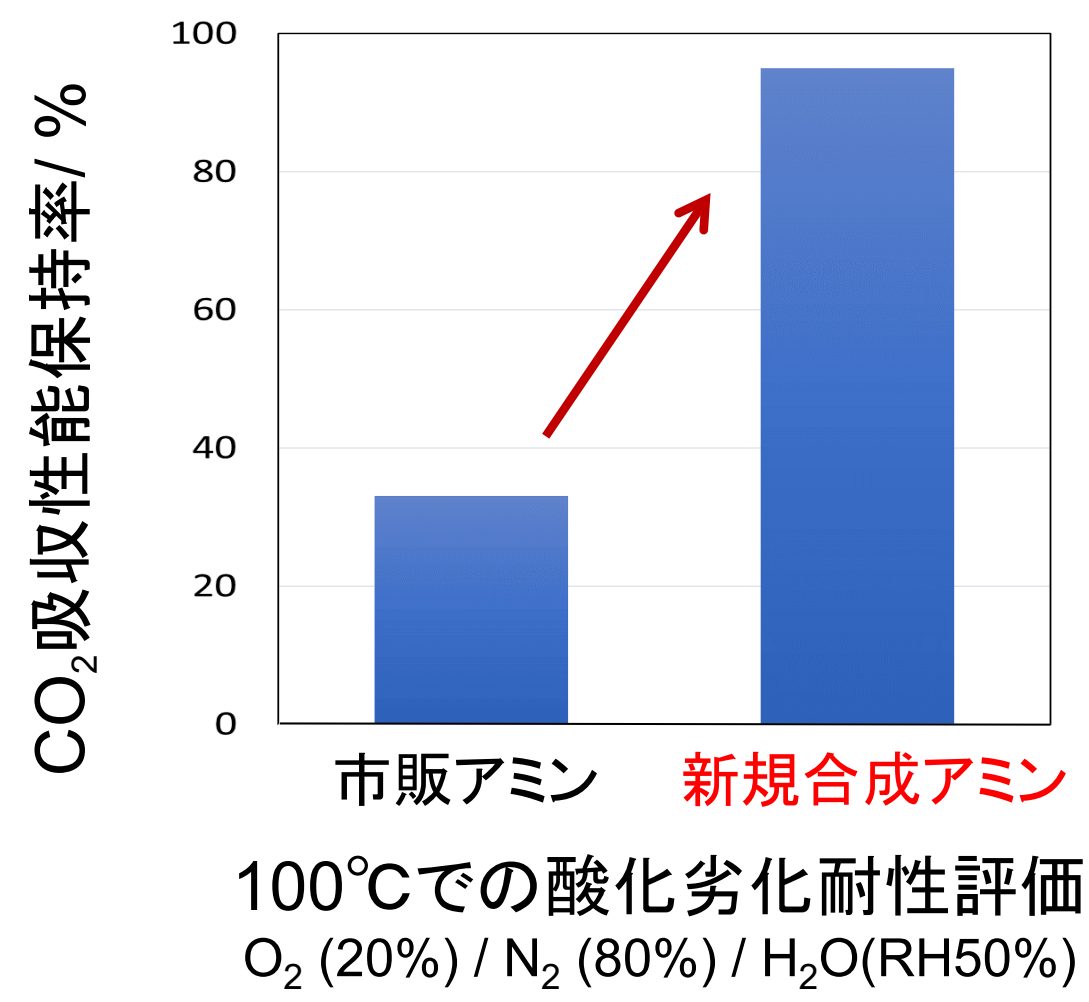
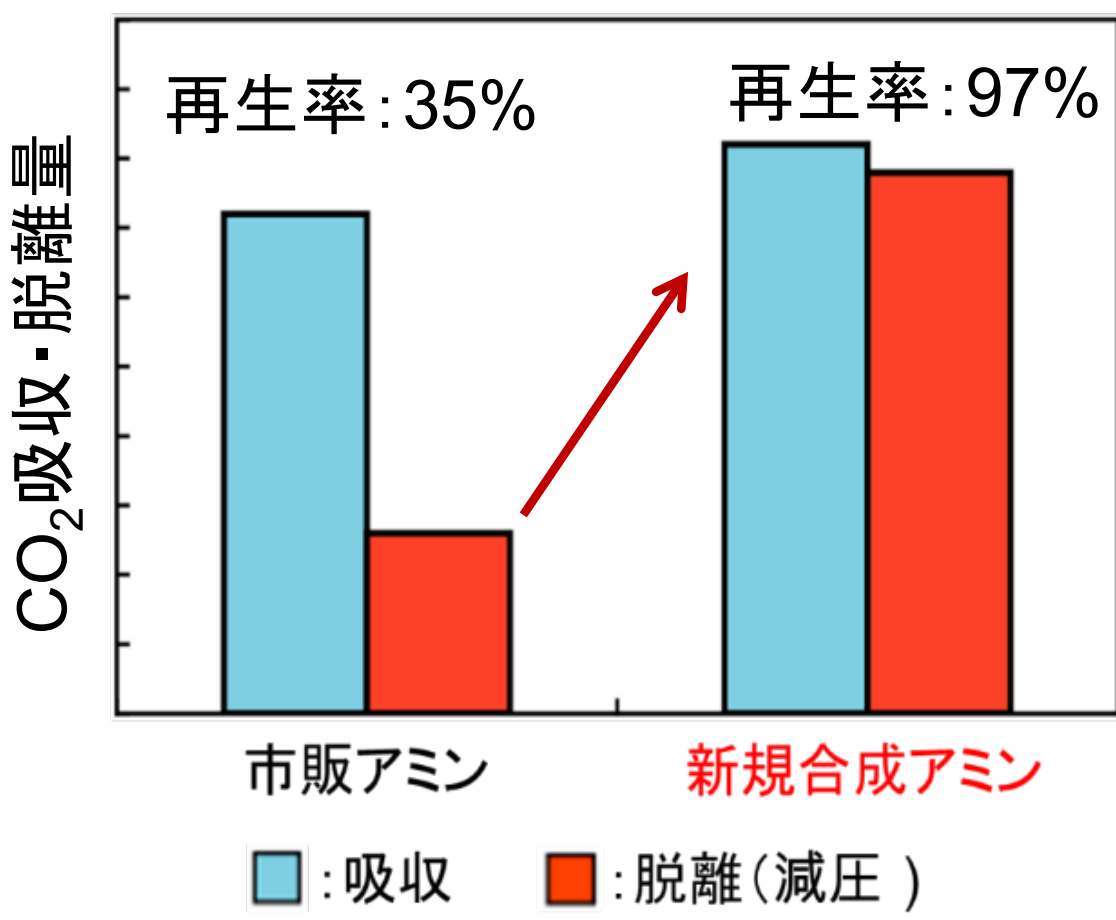
「吸収剤開発」、「担持体の最適化」、「プロセス開発・熱マネジメント」の重畳



60°C再生が可能なRITE固体吸収材



嵩高い置換基R→CO₂との結合が弱まり、脱離性能が向上(反応熱の縮小)



低温 (60°C) でCO₂再生率に
優れる固体吸収材を開発
RITE: 特許取得 (米国、日本)

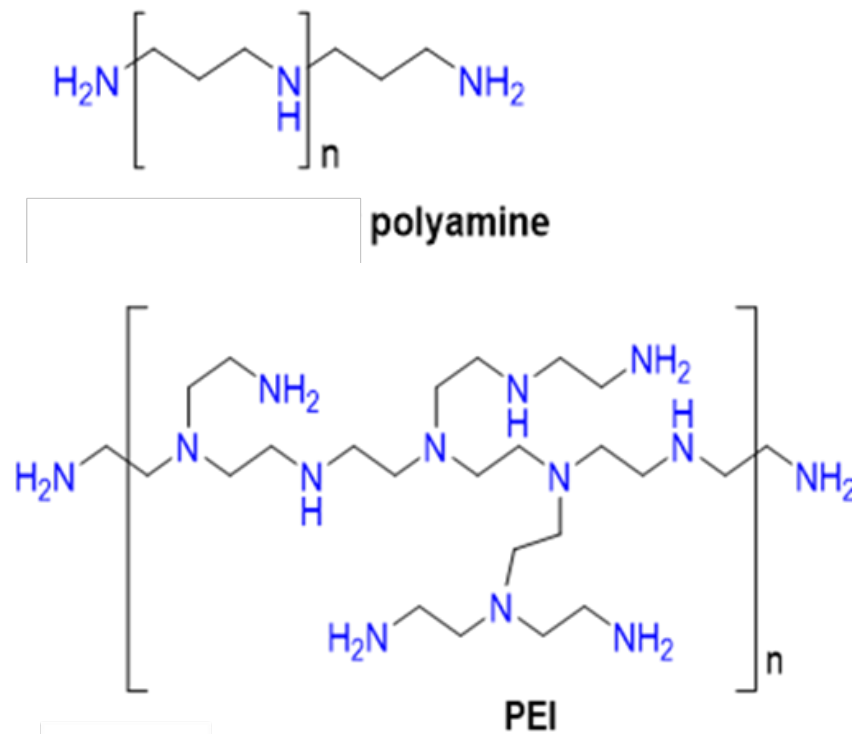
60°C再生可能⇒未利用熱・太陽熱の活用



アミンの検討状況

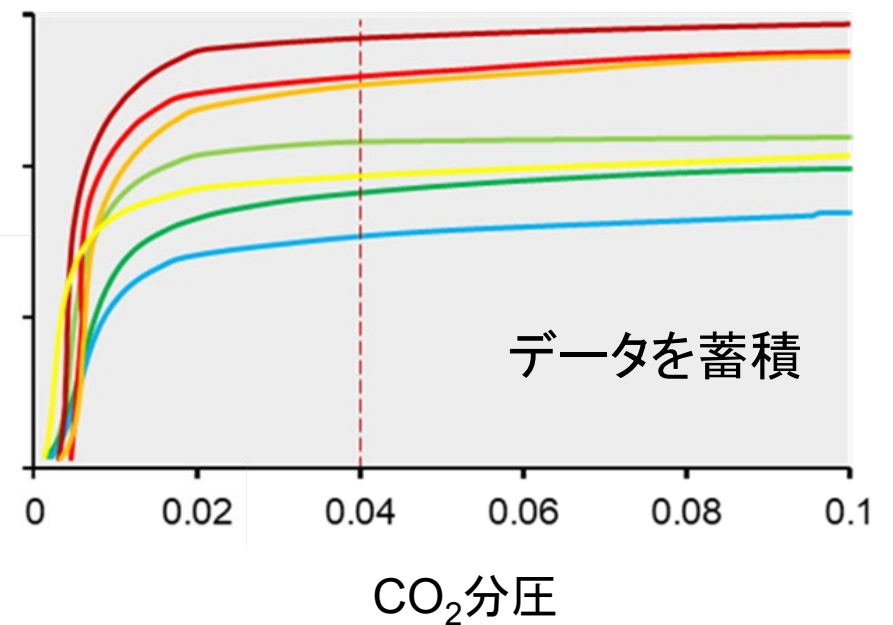
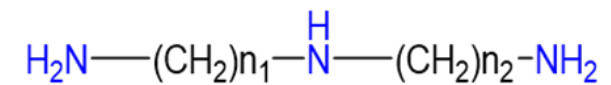
DAC用アミンのスクリーニング

・既存DAC材料



アミン構造の
スクリーニング

・種々のアミン類を評価



・吸収量、熱や酸化劣化耐性の高いDACに最適なアミン種を精査中

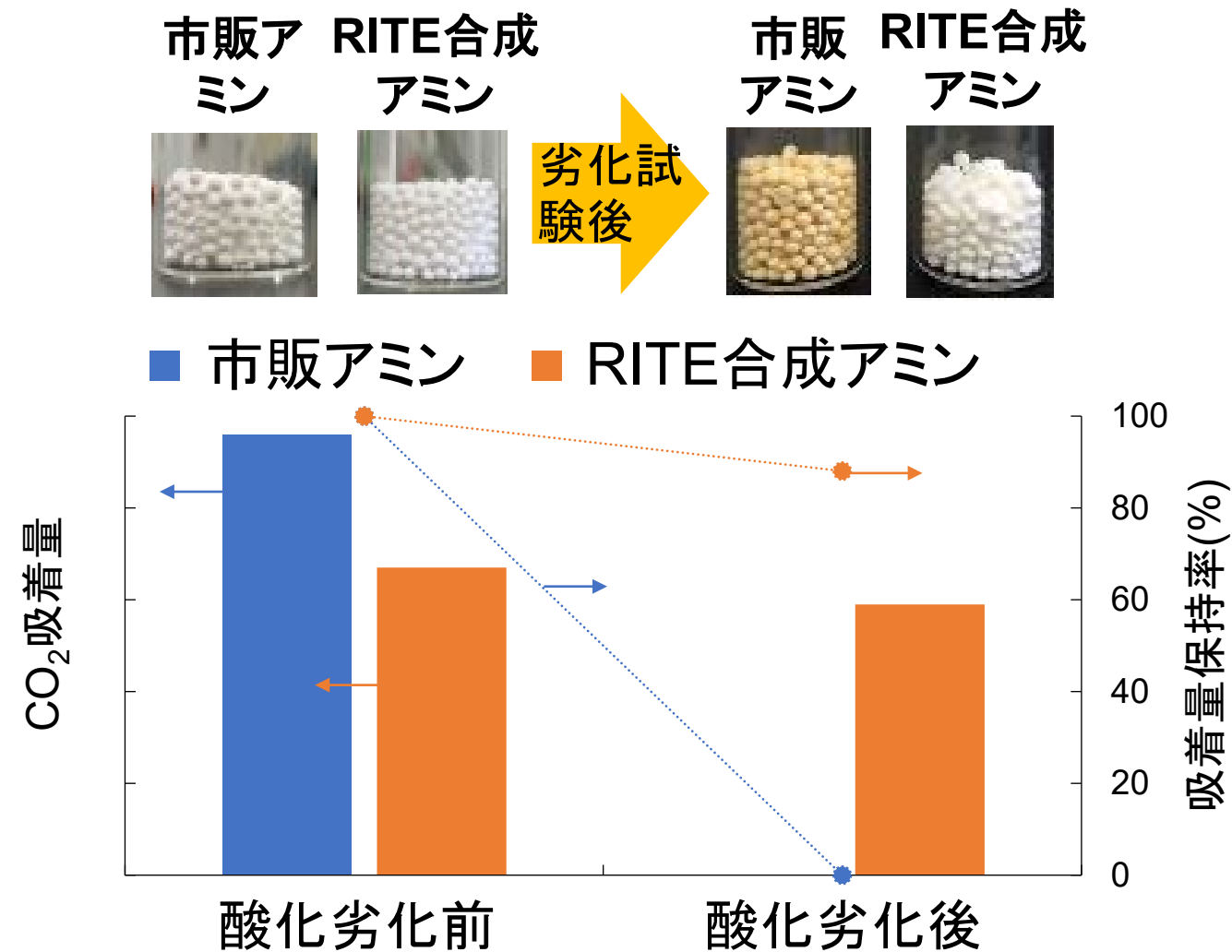
○スクリーニング結果をもとに、高性能なアミンを開発中



酸化劣化耐性の強化

RITE新規合成アミンの吸着、酸化劣化特性

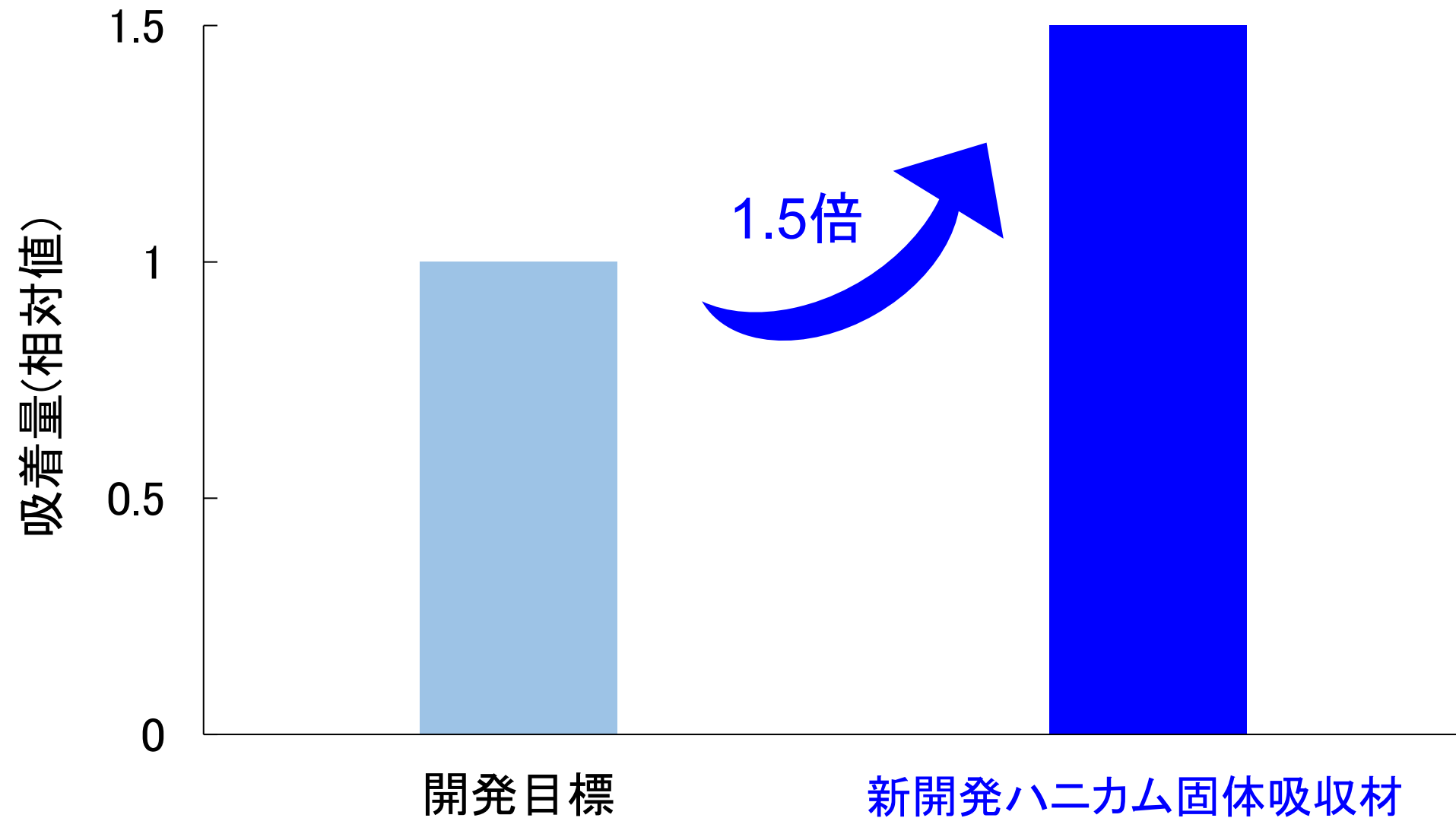
酸化劣化前後の吸着量(0.04kPa)



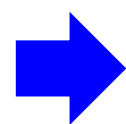
○高い酸化劣化耐性を持つアミン構造に目途
→脱着性能の把握および向上検討(置換基の導入等)を実施予定



ハニカム基材への担持



低温再生可能なアミンで、**2022年度の開発目標を大幅に上回るハニカム材料の開発に成功。**



今後は各種データを取得して更なるアミンの改良を行うとともに、
スケールアップに向けたアミン担持方法の検討を実施する。



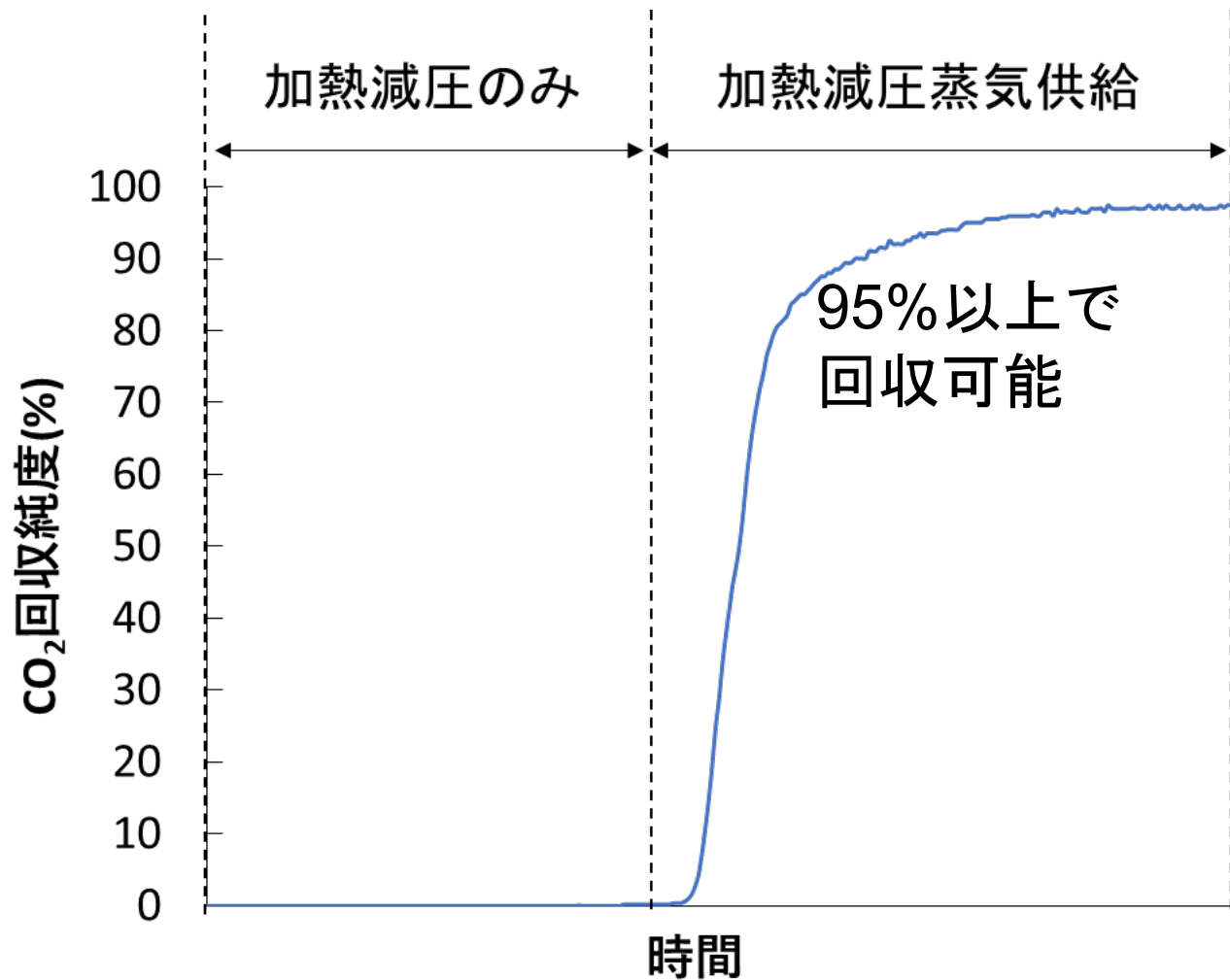
研究開発対象DACプロセス（異なる再生方式）

	研究開発対象	再生方式の長所・課題	CO ₂ 吸収材の課題
蒸気再生		<p>CO₂脱離後に蒸気凝縮分離 → 高濃縮可能</p> <p>蒸気廃熱が必要 蒸気温度によっては減圧系あるいは加圧系になるため装置強度が求められる</p>	
空気再生	<p>ハニカムロータリー式</p> <p>CO₂粗濃縮</p> <p>再生ゾーン</p> <p>加熱空気</p> <p>CO₂濃度低減空気</p> <p>大気</p> <p>ハニカムロータリー-TSA</p>	<p>様々な廃熱形態に対応可</p> <p>高濃縮にはプロセスの複雑化・複合化が必要</p> <p>◆ハニカムロータリー式 パージ空気が熱媒を兼ねるため、少量のパージ空気でもCO₂脱離に要するエネルギーを供給する工夫が必要</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・再生温度の低温度化 ・通風時圧力損失の低減 →ハニカム構造化 ・耐酸化特性 →加熱空気再生方式ではより強力な耐酸化性が求められる
空気再生	<p>間接加熱式</p> <p>再生工程に温水供給</p> <p>フィンコイル熱交換器</p> <p>吸収材 フィン表面に直接塗布</p> <p>外気</p> <p>CO₂除去</p> <p>CO₂濃縮回収</p> <p>加熱 太陽熱・排熱利用（脱着補助, 伝熱促進）</p> <p>少量の外気</p>	<p>◆間接加熱式 少量のパージ空気でもCO₂を脱離可能</p>	



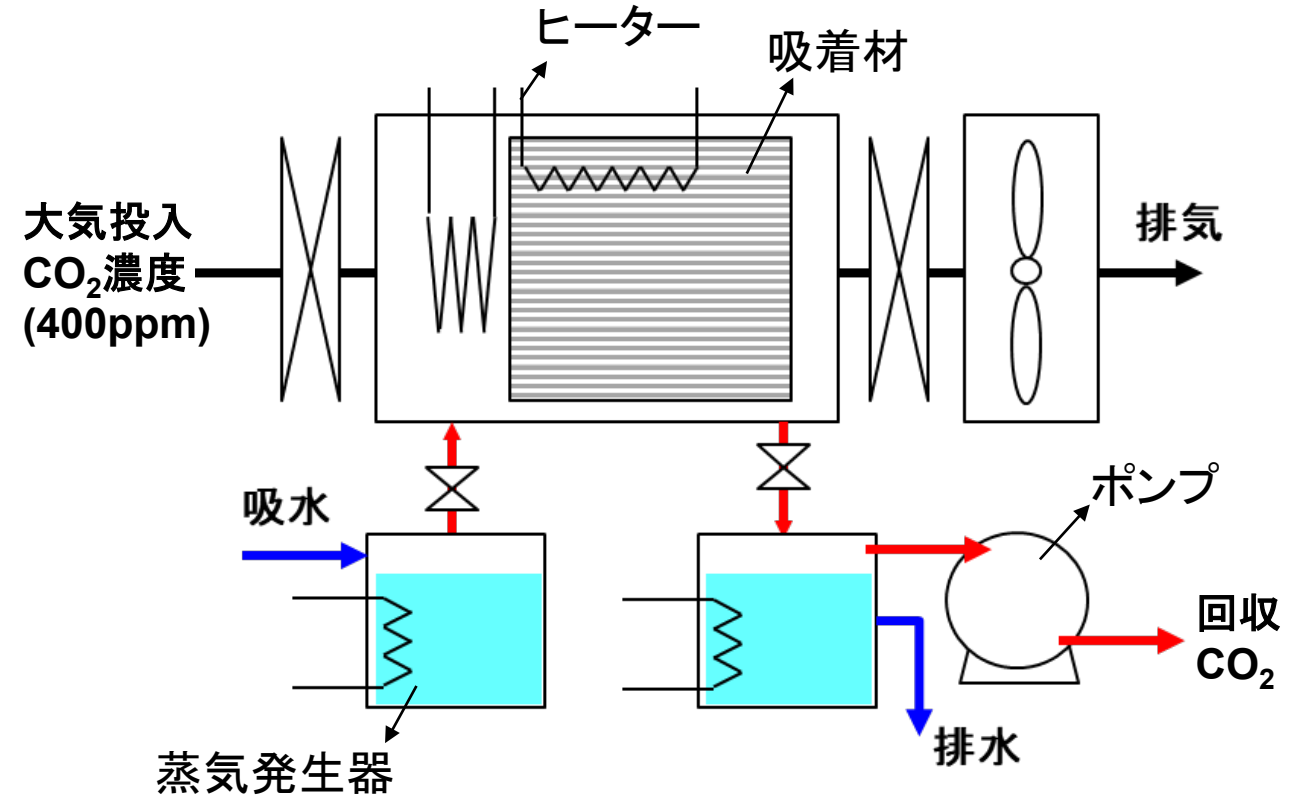
蒸気再生

ラボ試験装置によるCO₂脱着試験結果



- ・吸着したCO₂を高純度で回収可能
- RITE合成アミンやハニカム吸着材の評価を実施予定

小型ベンチ試験装置も製作中 (スケールアップ検討用)



小型ベンチ試験装置のイメージ図

検討内容

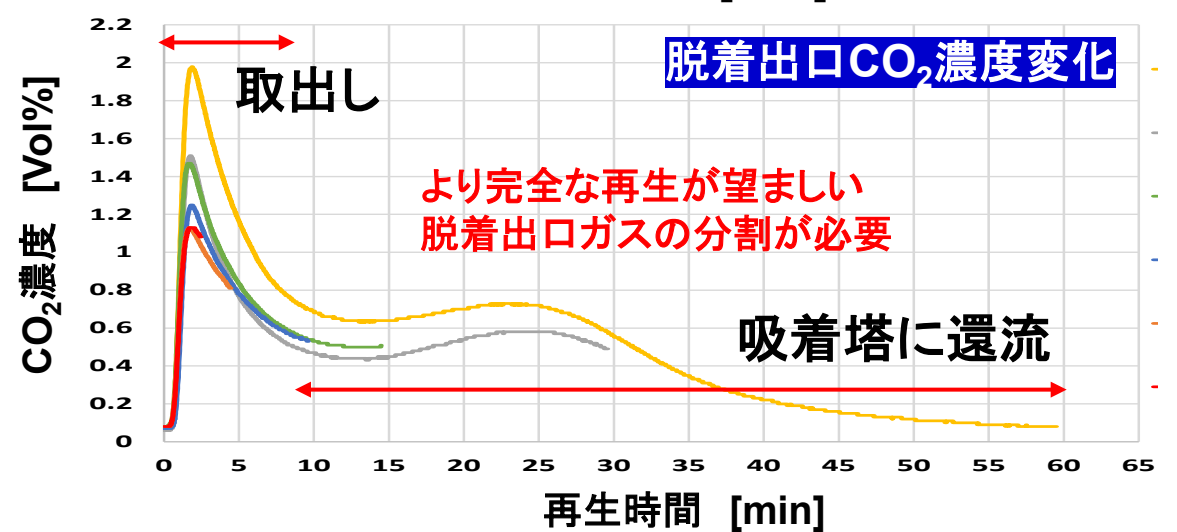
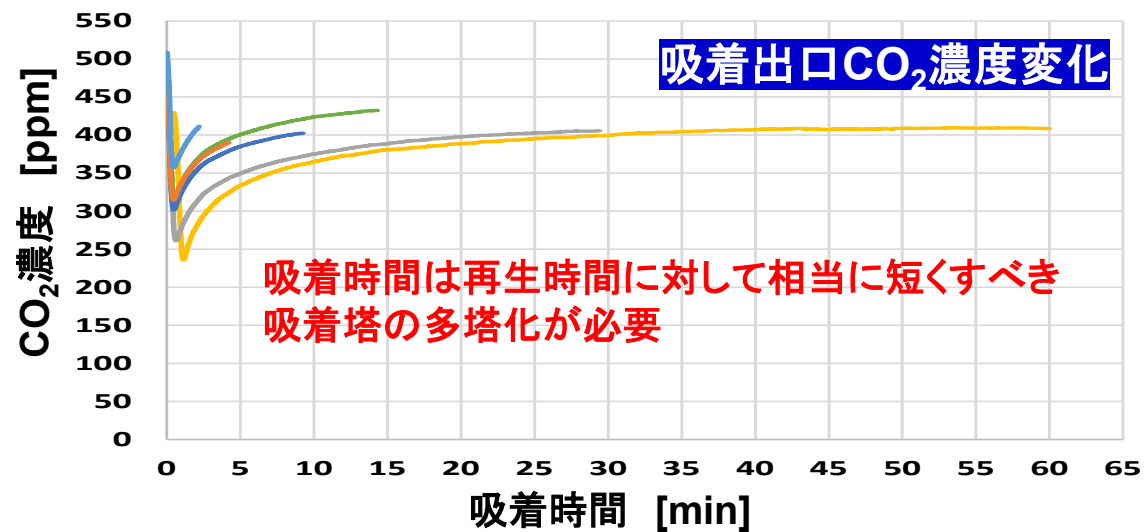
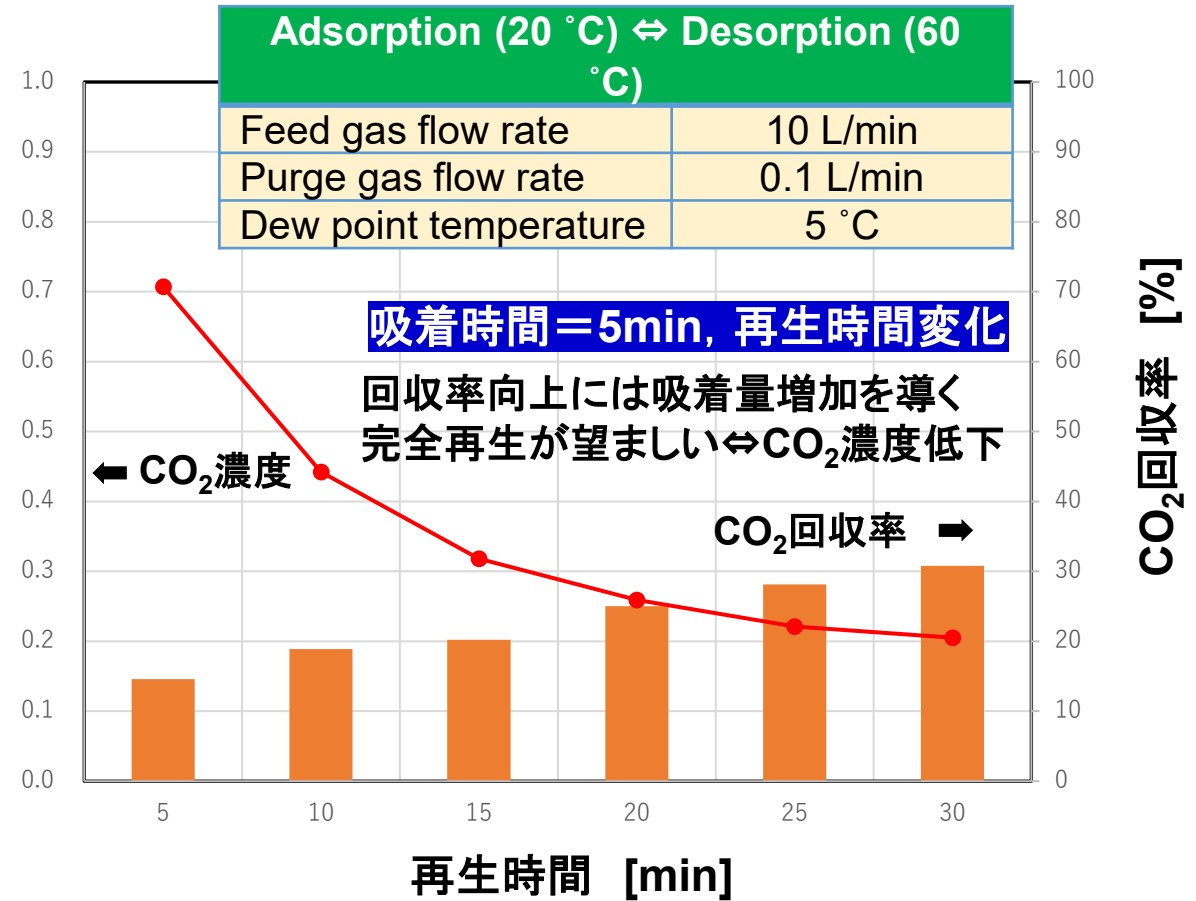
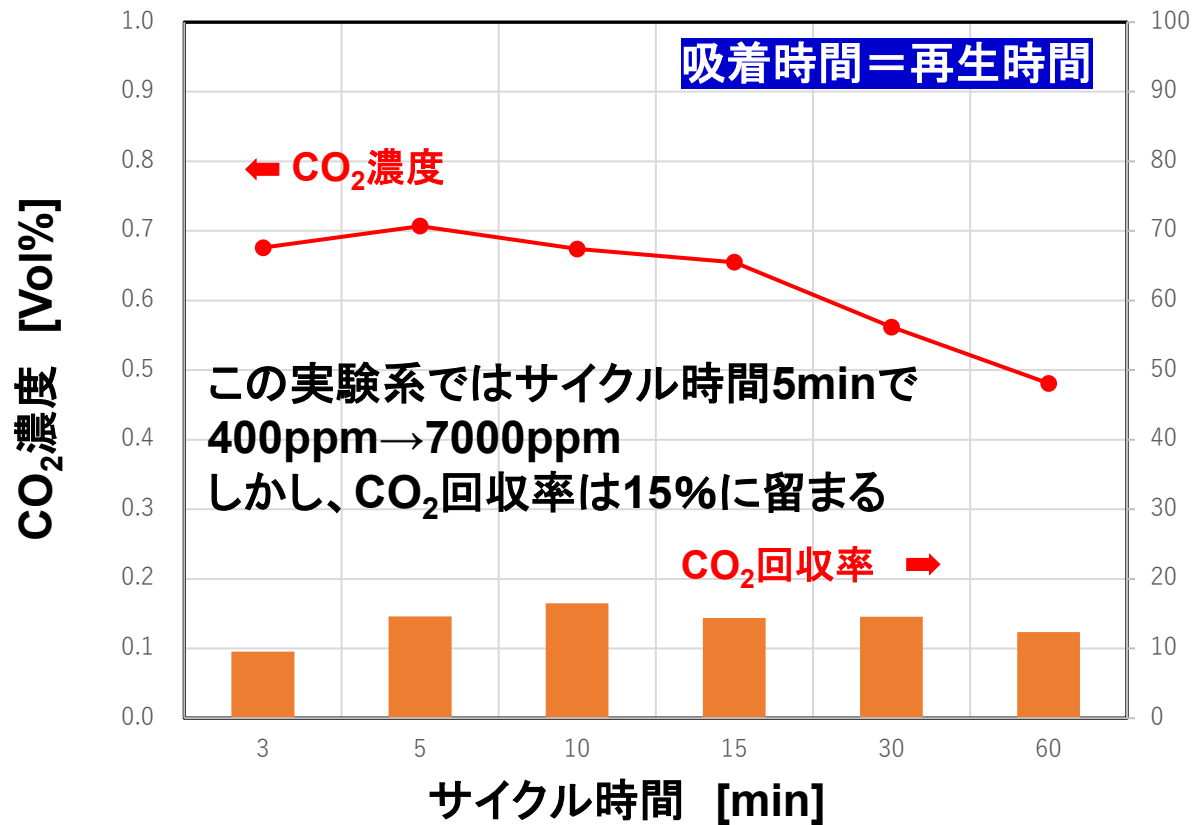
- ・ RITE開発固体吸収材の要素検証
- ・ スケールアップに向けたの課題抽出



加熱空気再生方式（間接加熱式）

空気再生

単純吸脱着サイクル操作 空間速度(吸着) $SV=30s^{-1}$

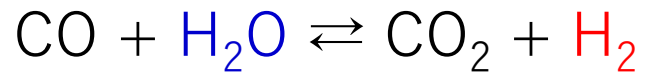
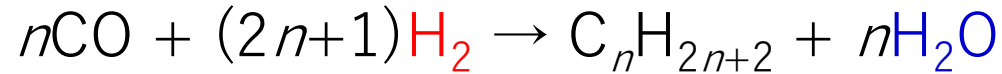




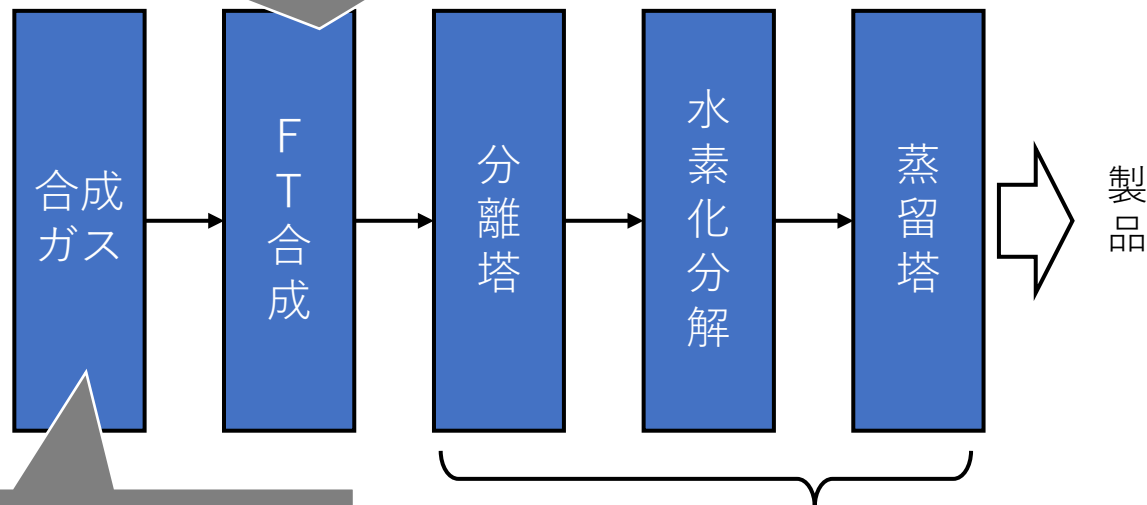
CO₂変換技術：FT合成による液体燃料化

【内容】

➤ 一般的なFT合成



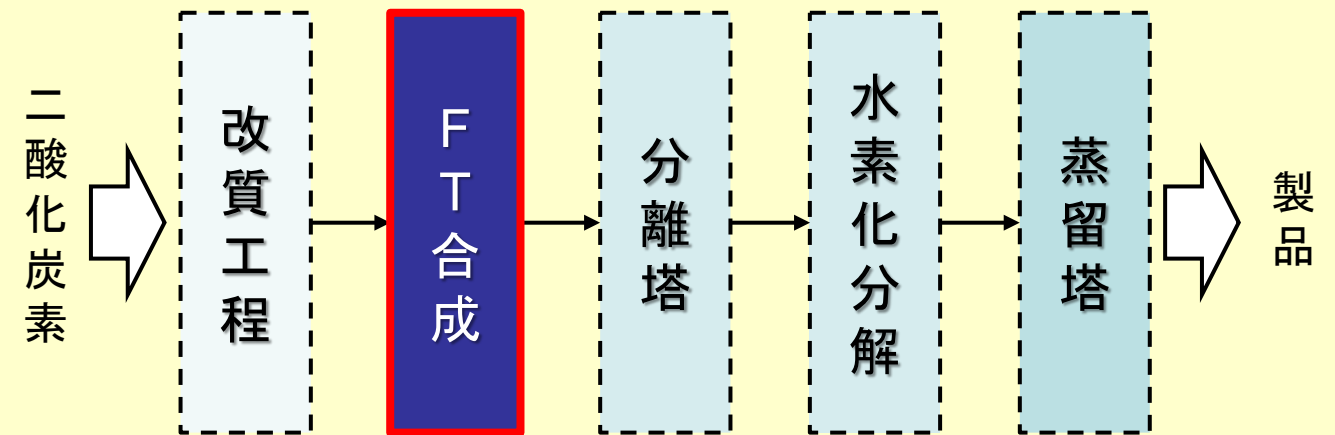
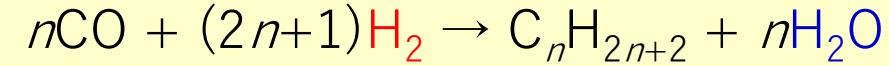
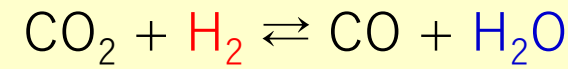
反応により生成する水が触媒を劣化



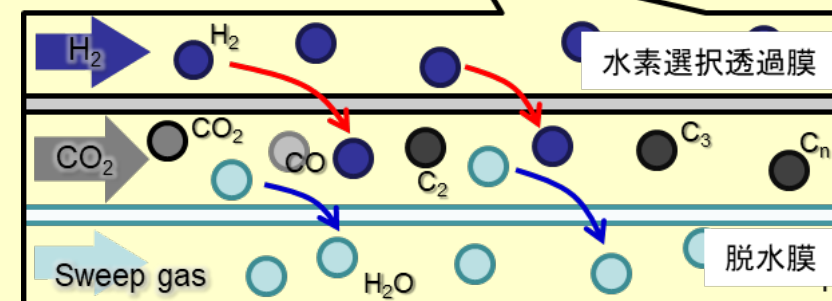
合成ガス製造
工程を經由

反応制御が困難であり、
後段の精製工程が必須

➤ 膜反応器を用いたCO₂のダイレクト変換



膜反応器の適用



- ◆ 水の除去による触媒劣化の抑制
- ◆ CO生成側に反応を促進。効率的な除熱

⇒ **高効率かつ省エネルギー型プロセス**

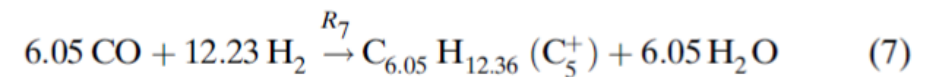
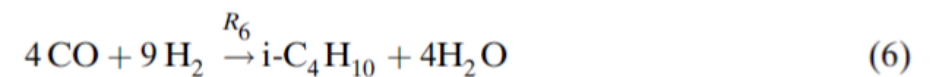
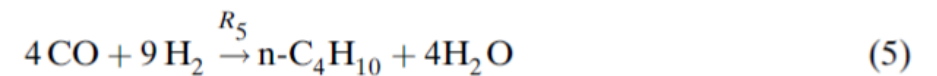
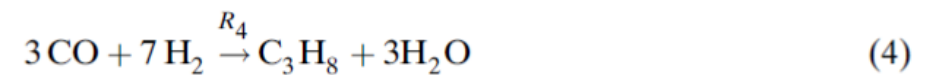
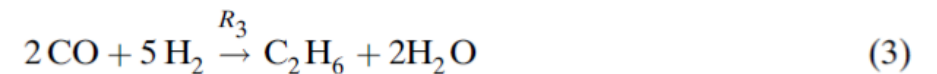
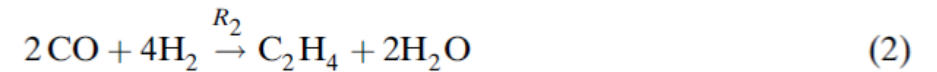
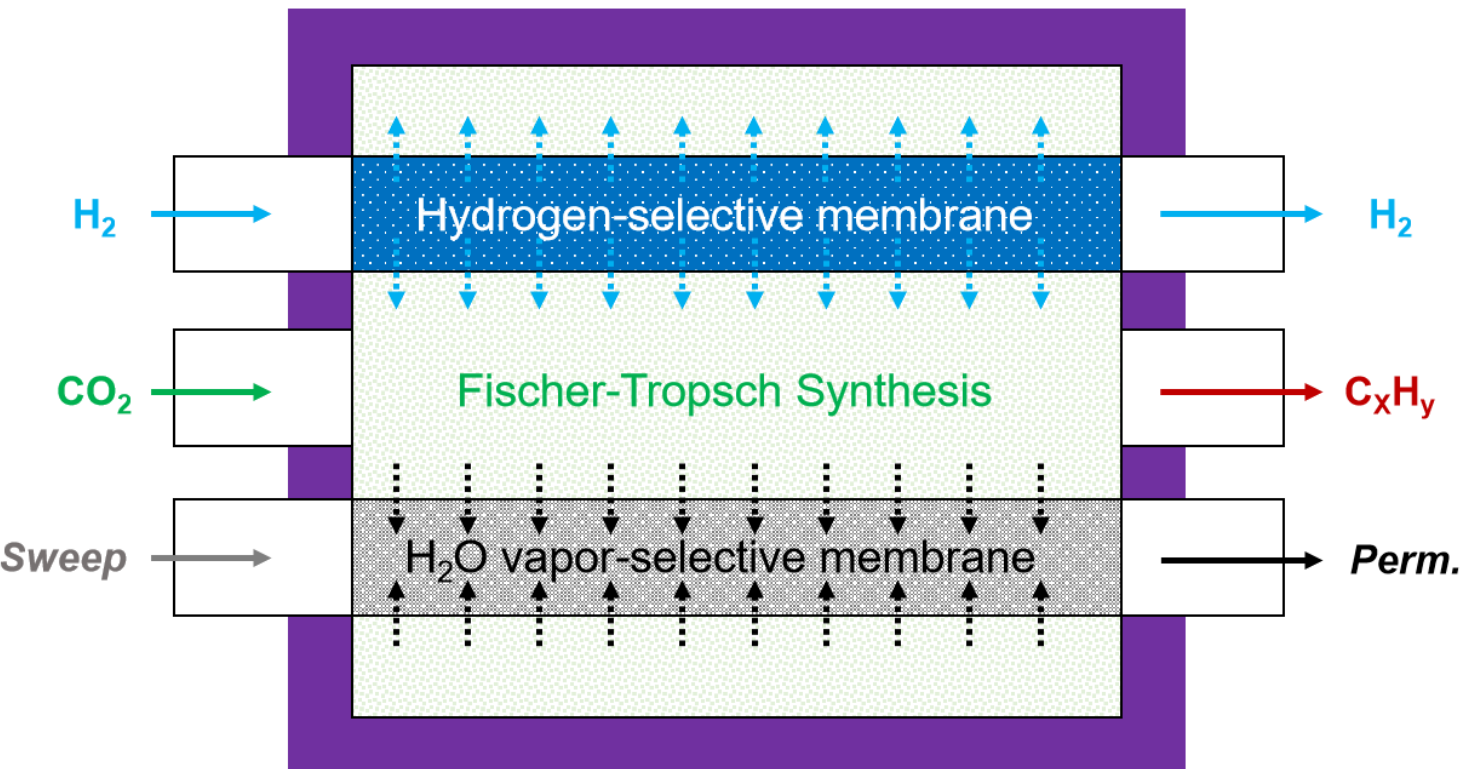
【目標】 DACで回収されたCO₂を原料として液体炭化水素燃料（e-fuel）を高効率で製造可能なCO₂変換技術を開発する。実用に資するCO₂の変換率を達成可能な最適膜反応プロセスをパイロットレベルで実証し、実用化に目途を得る。（メタン→合成ガス→FT合成に対する優位性検証）



FT合成用膜反応器の効果

シミュレーションモデルを構築し、膜反応器の効果を検証

<FT合成用膜反応器のシミュレーション>



FT反応の反応速度式 (Fe-HZSM-5)*

$$R_i = k_i \exp\left(\frac{-E_i}{RT}\right) P_{\text{CO}}^m P_{\text{H}_2}^n$$

*Marvast et al., Chem. Eng. Technol., 2005, 28, 1, 78-86.

<シミュレーション結果>

反応圧力1.7 MPa, 反応温度250°Cにて

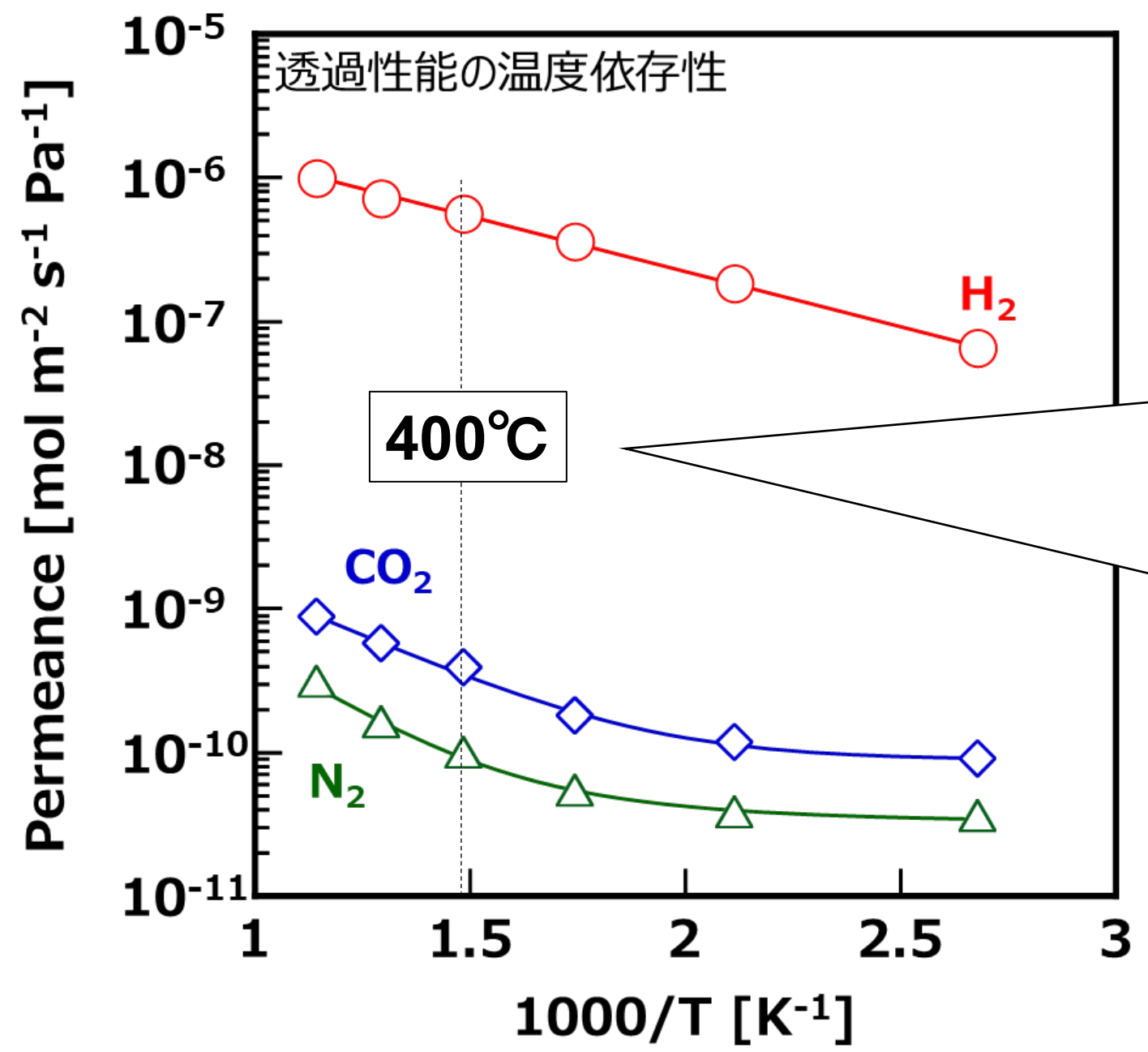
- **膜反応器: CO₂転化率 = 94%**
 - 触媒充填層型: CO₂転化率 = 65%
- ↪ 1.5倍

H₂O引き抜き + H₂供給を行うFT合成用膜反応器は高いCO₂転化率を示す



膜反応器に適用可能な分離膜の開発

<水素透過膜(シリカ膜)の開発>



<2022年度中間目標>

H₂ perm.; $5 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$
 H₂/CO₂; 3,000

400°Cにおける透過分離性能

- ◆ H₂ permeance
 $5.65 \times 10^{-7} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$
- ◆ CO₂ permeance
 $3.91 \times 10^{-10} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$
- ◆ N₂ permeance
 $1.00 \times 10^{-10} \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$
- ◆ H₂/CO₂
1450
- ◆ H₂/N₂
5640

比較的に高い透過分離性能を示す分離膜の開発に成功した



プロジェクトの最終目標

研究開発項目1. 「大気中からの高効率CO₂回収技術開発」

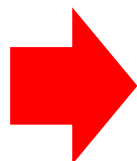
- ・開発した固体吸収材を用いた数t/day 規模のパイロットスケール試験を実施し、CO₂変換反応に適用可能な純度のDAC技術を確立する。
- ・分離回収エネルギーやコストを踏まえ、地球温暖化問題対策として有効なDACシステムの構築に目途を得る。
(目標：海外の先行事例を超える性能を達成)

研究開発項目2. 「炭素循環のためのCO₂変換技術開発」

- ・DACで回収したCO₂を原料として液体炭化水素燃料を高効率で製造可能なCO₂変換技術を開発する。
- ・Extractor-Distributor一体型膜反応器等による反応の制御と高効率化の検討を行い、実用に耐えうるCO₂変換率を達成可能な最適膜反応プロセスをパイロットレベルで実証し、社会実装に目途を得る。
(目標：商用運転のFT合成変換効率80%と同等レベル)

研究開発項目3. 「液体炭化水素燃料適用性、LCA評価」

- ・DAC - CO₂変換反応全体に対するLCA評価により正味のCO₂の削減効果を検証する。
- ・ユーザー企業による液体炭化水素燃料の適用性評価を行い、社会実装の可能性と課題抽出を進める。
(目標：実用化に向けた課題抽出と社会実装可能性の追求)



炭素循環社会の実現に貢献

