

# 電気化学プロセスを主体とする 革新的CO<sub>2</sub>大量資源化システムの開発



**PM : 杉山正和**

**国立大学法人東京大学 先端科学技術研究センター 所長・教授**

**PJ参画機関 :**

**国立大学法人東京大学、国立大学法人大阪大学、国立研究開発法人理化学研究所、  
UBE株式会社、清水建設株式会社、千代田化工建設株式会社、古河電気工業株式会社  
マクセル株式会社**

## 1. プロジェクト概要

## 2. 進捗・成果

## 3. まとめ・今後の取組

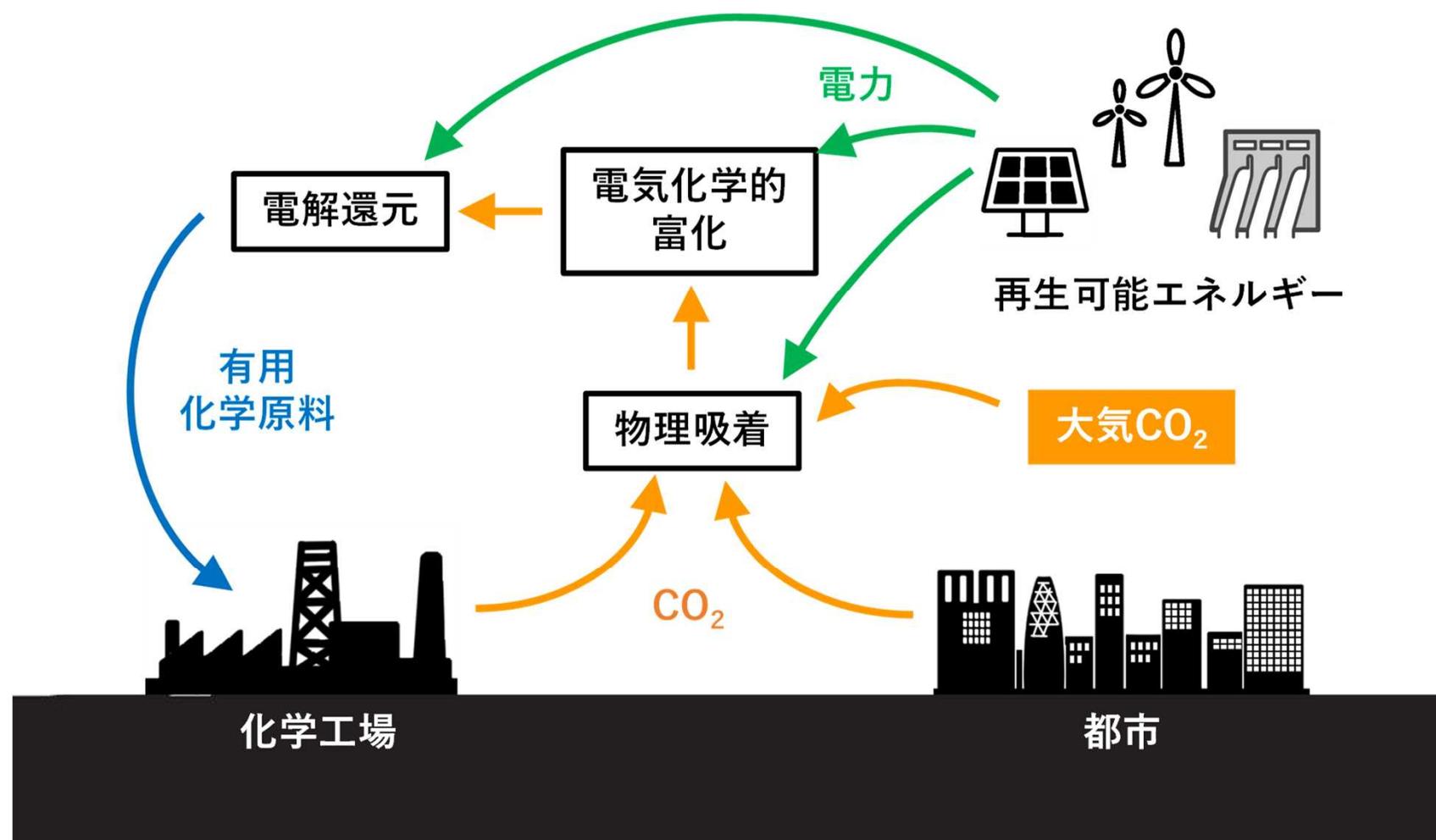
## 1. プロジェクト概要

## 2. 進捗・成果

## 3. まとめ・今後の取組

## (2029年度最終目標)

大気中CO<sub>2</sub>を回収・有用基礎化学品へ大量資源化するシステムを電気化学プロセスを主体に開発する



プラットフォームエネルギーである  
電気エネルギーを用いたCO<sub>2</sub>循環システムの構築  
～ CO<sub>2</sub>排出1億 ton/年削減@2050に向けて～

# 目標プロダクト：エチレン

プラスチック製品の約半分に  
**エチレン**が使用されている。

## 石油化学コンビナート

### 化学基礎製品

642万 t **エチレン**

550万 t プロピレン

89万 t ブタジエン

369万 t ベンゼン

171万 t トルエン

660万 t キシレン

CO<sub>2</sub>発生  
3100万 t /年

ナフサ  
4294  
万kL

熱分解  
(850℃)

▼ **エチレン**とキシレン  
から合成  
例) ペットボトル、繊維

▼ **エチレン**と  
ベンゼンから合成  
例) CDケース、食品トレイ

**1050万トン**  
(2019年)

その他  
23.0%

**ポリエチレン**  
23.3%

**ポリプロピレン**  
23.2%

**ポリ塩化ビニル**  
16.5%

**ポリスチレン**  
7.3%

**PET** 3.5%

**ABS** 3.2%

▼ **エチレン**を重合  
例) レジ袋、ラップ

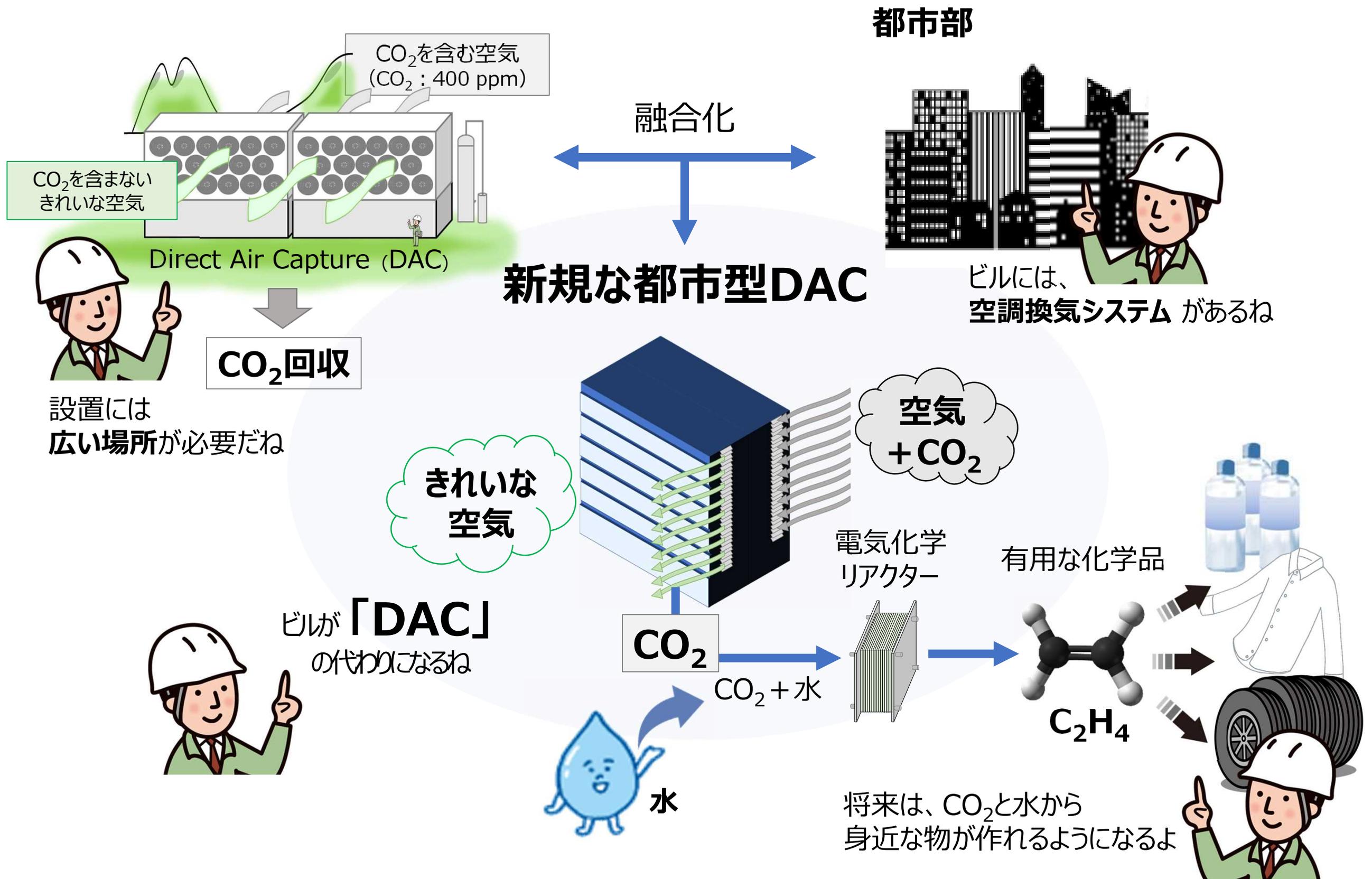
▼ **エチレン**と塩素から合成  
例) 消しゴム・ホース

石油化学工業協会「石油化学工業の現状2020年」より

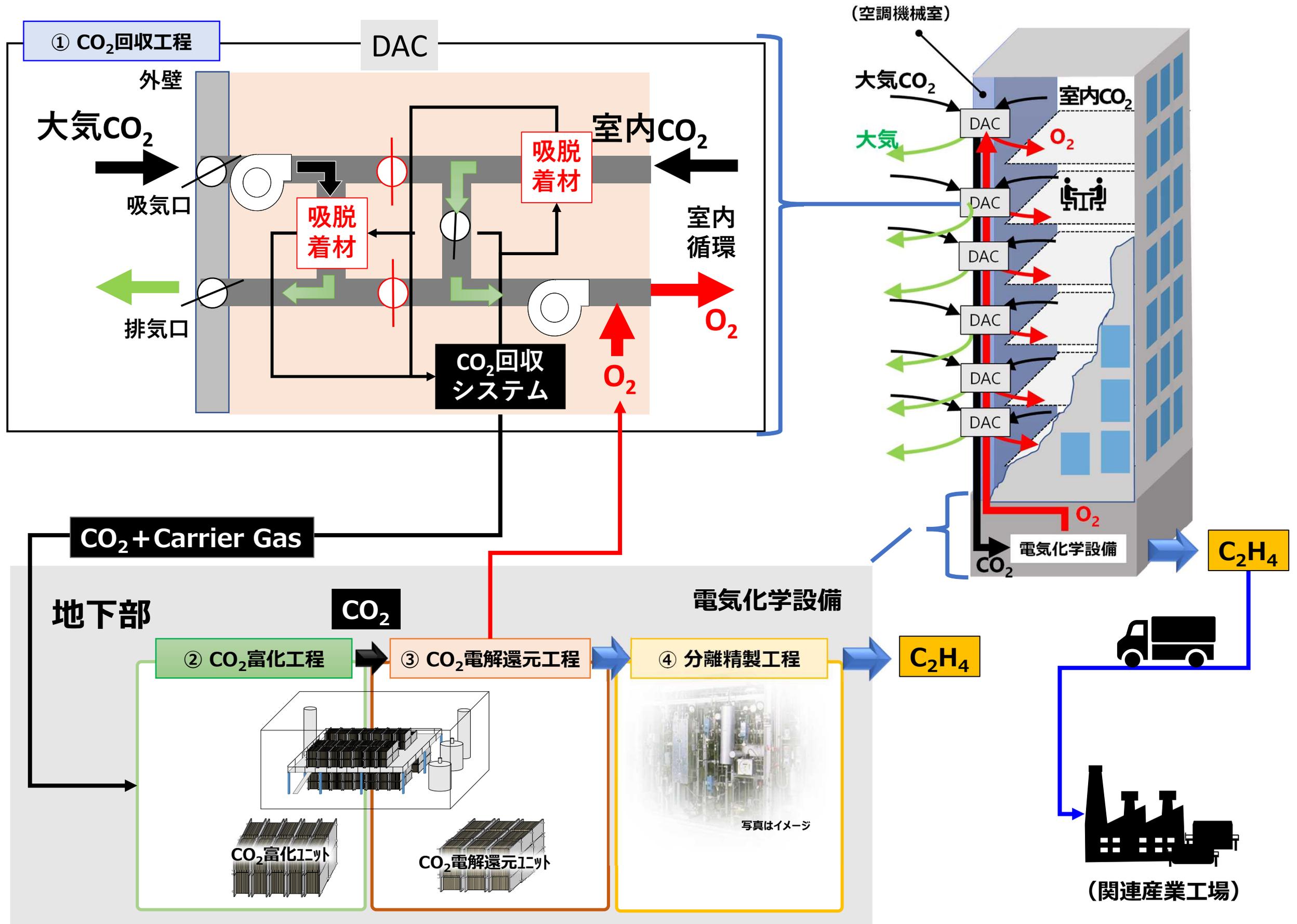
## 都市型DAC-Uシステム(人工光合成)



# ビルは「まちの空気清浄器」

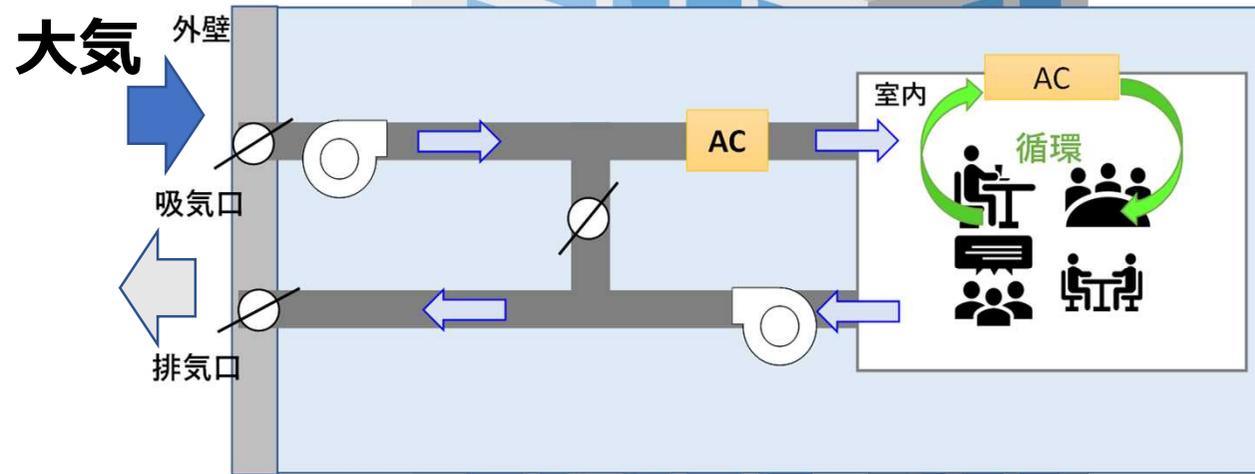


# 「都市型人工光合成」(CO<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>も循環)



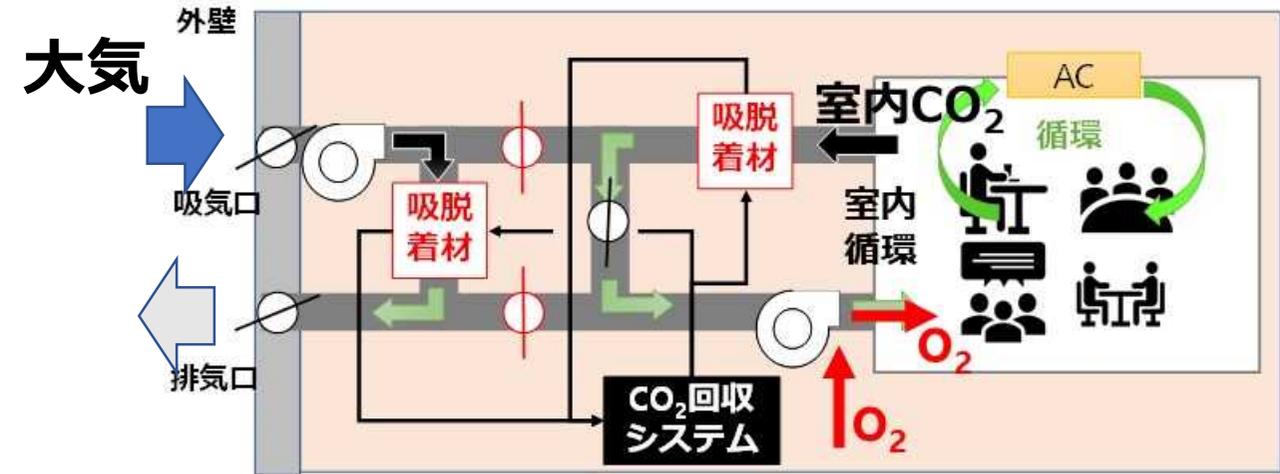
# CO<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>の循環がもたらす空調換気の省エネ化

## 既設（空調換気システム）



## 本技術

## 新規な空調換気システム



全空調エネルギー

30

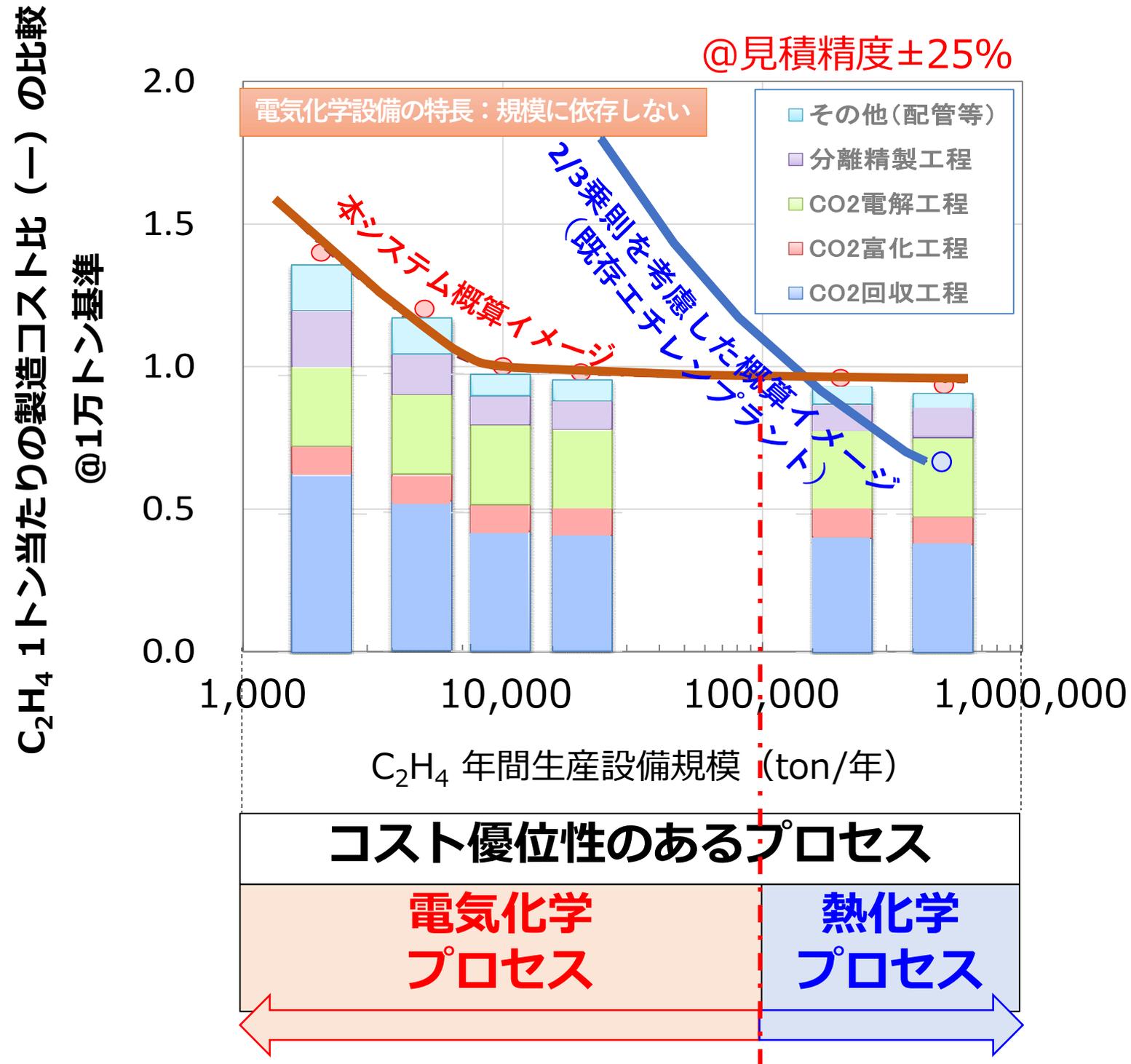
70

外気空調エネルギー

30

CO<sub>2</sub>回収エネルギーへ  
利用可能

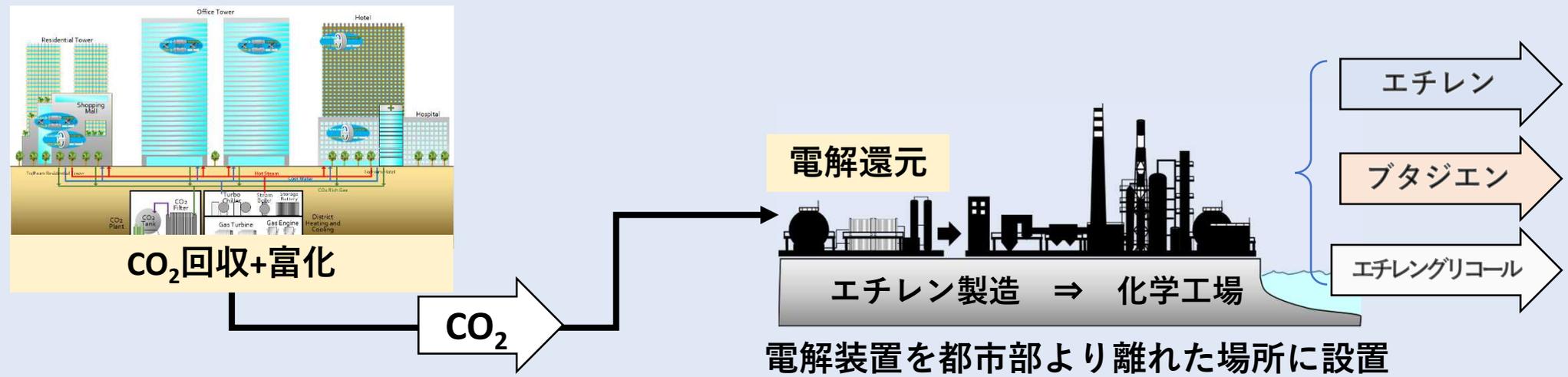
## エチレン生産 1 トンあたり概算製造コスト



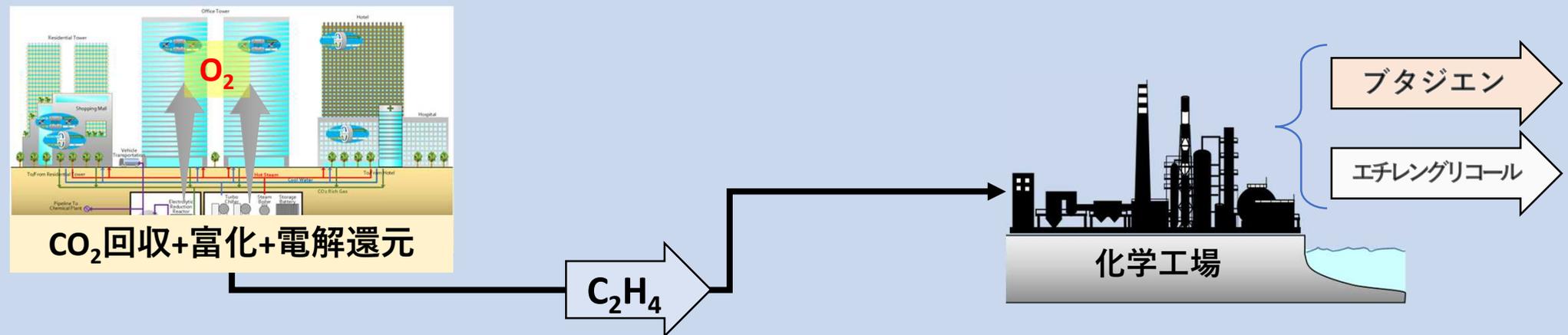
# 様々なシーンに対応したスケールラブルな社会実装形態

## 移送物質

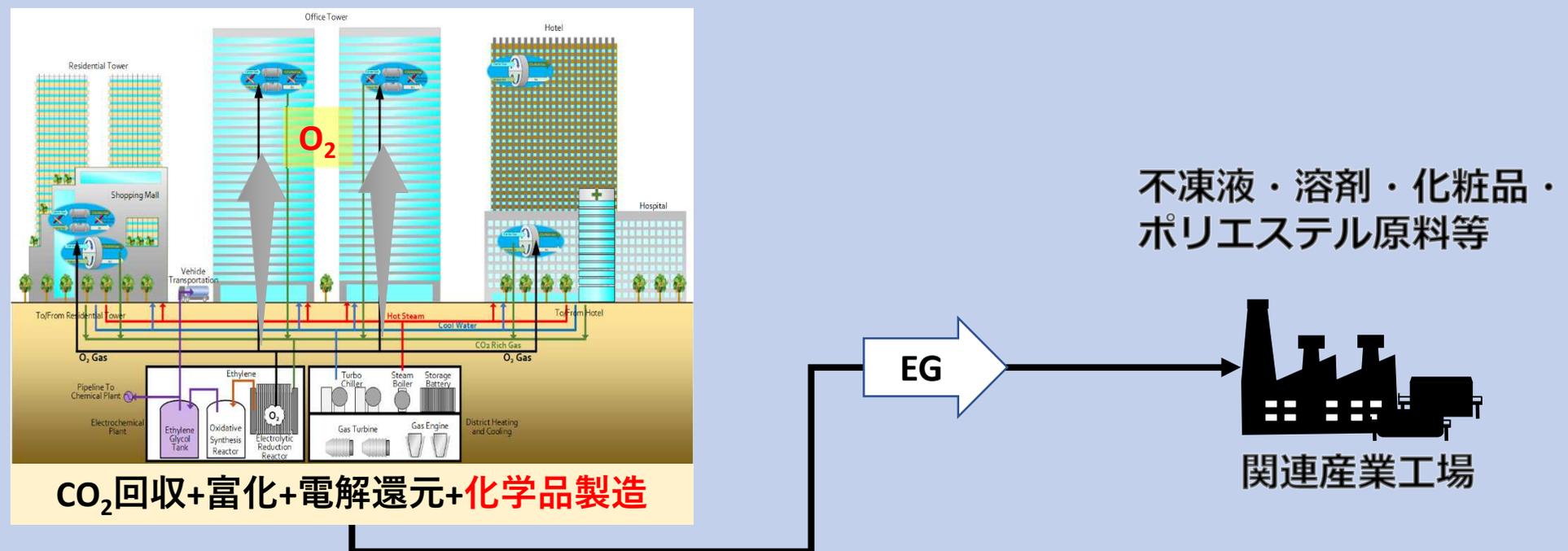
$CO_2$   
二酸化炭素



$C_2H_4$   
エチレン

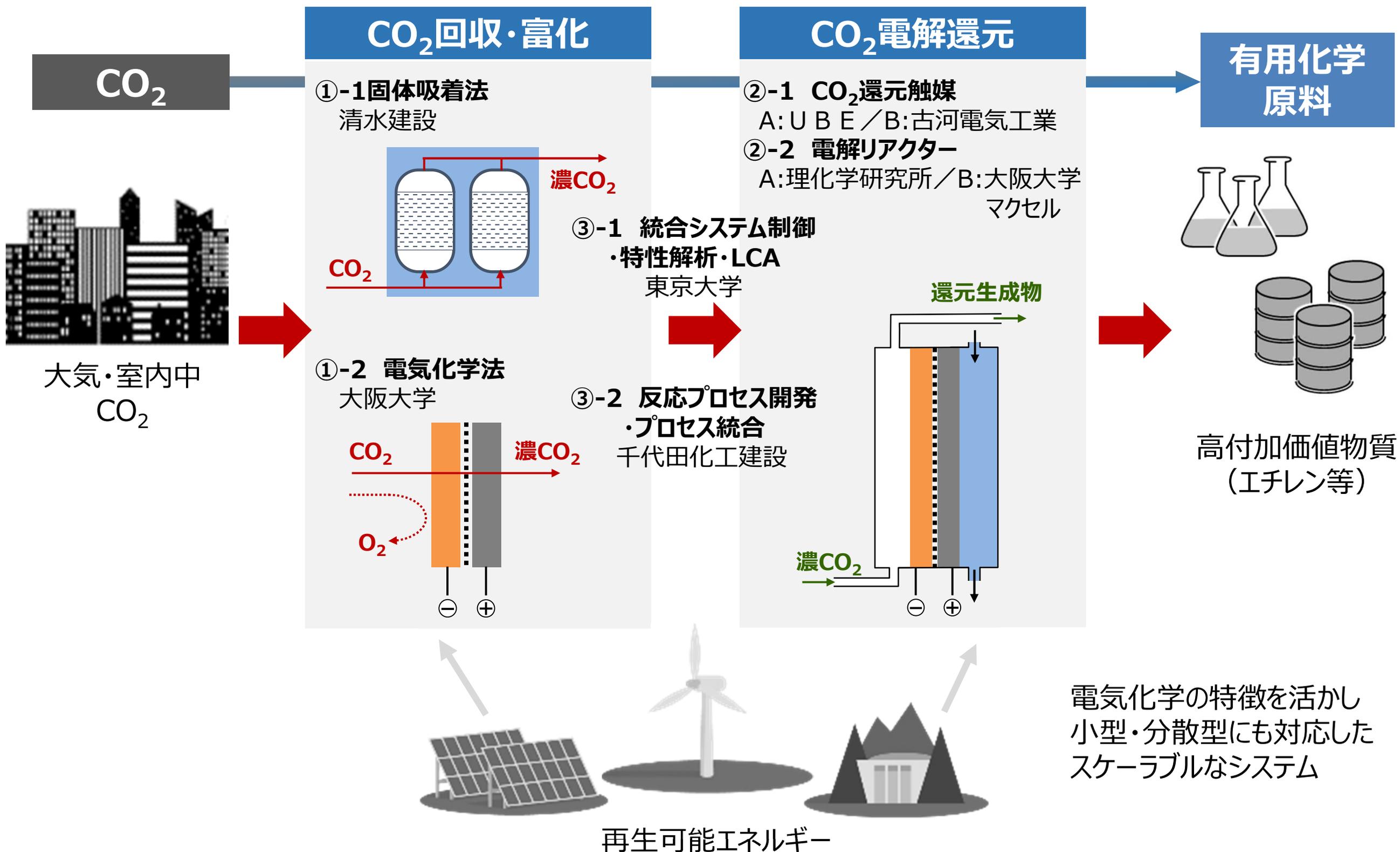


$C_2H_6O_2$   
エチレングリコール  
(EG)



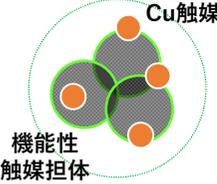
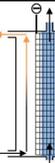
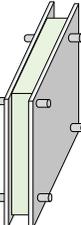
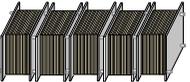
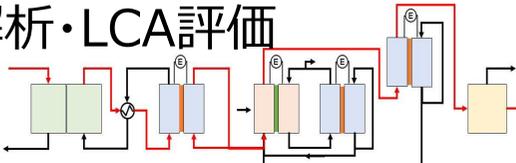
# システム概要・開発体制

- CO<sub>2</sub>回収から化学原料まで一気通貫システム、各機関が分担して開発
- DACについては、他機関との連携を軸に開発



# 開発項目・役割分担

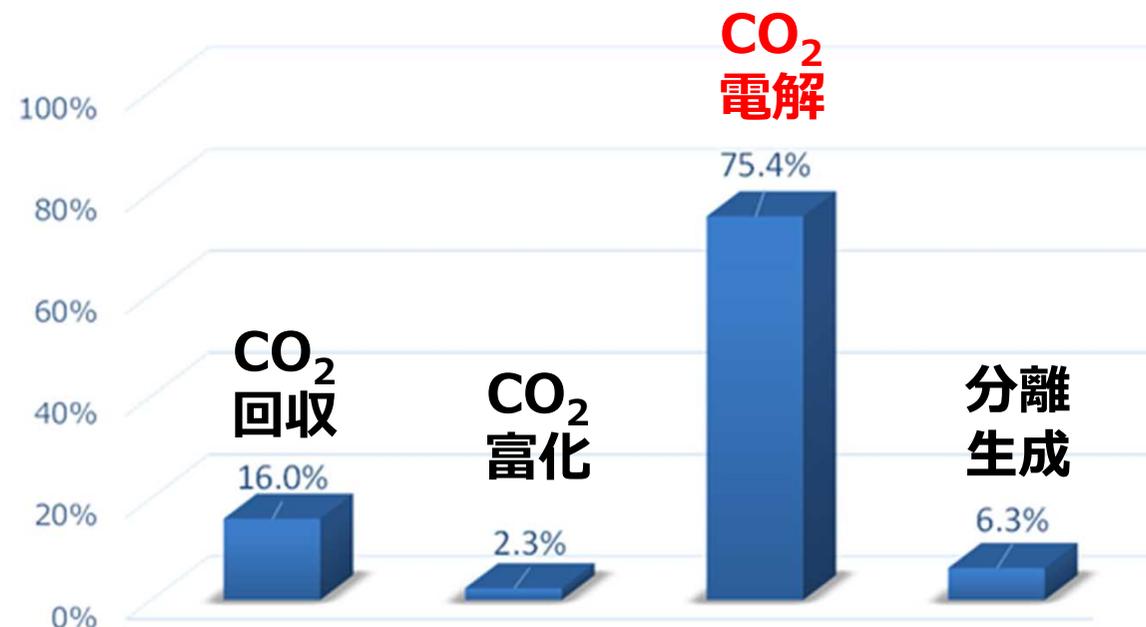
- 開発項目：部材からシステムまで広くカバー
- 役割分担：連携開発を基本とした責任体制を構築。外部連携も積極的

研究開発項目		研究分担 (基礎検討/工業化検討)			
CO <sub>2</sub> 回収富化工程	固体吸着法によるCO <sub>2</sub> 回収 	清水建設	ムーンショット内連携 外部企業連携		
	電気化学法によるCO <sub>2</sub> 富化 	大阪大学	外部企業連携		
CO <sub>2</sub> 電解還元工程	リアクター部材	触媒 	化学材料・素材	大阪大学 東京大学	UBE
		GDE電極 	構造形成・制御		古河電工
		MEAリアクター 	膜	理化学 研究所	UBE、古河電工、 マクセル
		スタック 	構造体		外部企業連携
					外部企業連携
システム統合化	反応プロセス開発・プロセス統合 統合システム制御・特性解析・LCA評価 	東京大学	千代田化工建設		

年度	2022	2024	2029
CO <sub>2</sub> 排出量※ (t-CO <sub>2</sub> /t-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	+1.0 ~ +1.5 デバイス開発／検証	+0.5 ~ +1.0 実験室規模 1,000時間	<-0.5 パイロットプラント 5,000時間
内) 運転時CO <sub>2</sub> 排出量	-0.5 ~ 0.0 (5.0~4.5 V, FE= 55 ~65%)	-1.0 ~ -0.5 (4.5~3.8 V, FE= 55 ~80%)	<-2.0 (3 V, FE= 80%)
内) 設備CO <sub>2</sub> 排出量	+1.5	+1.5	+1.5

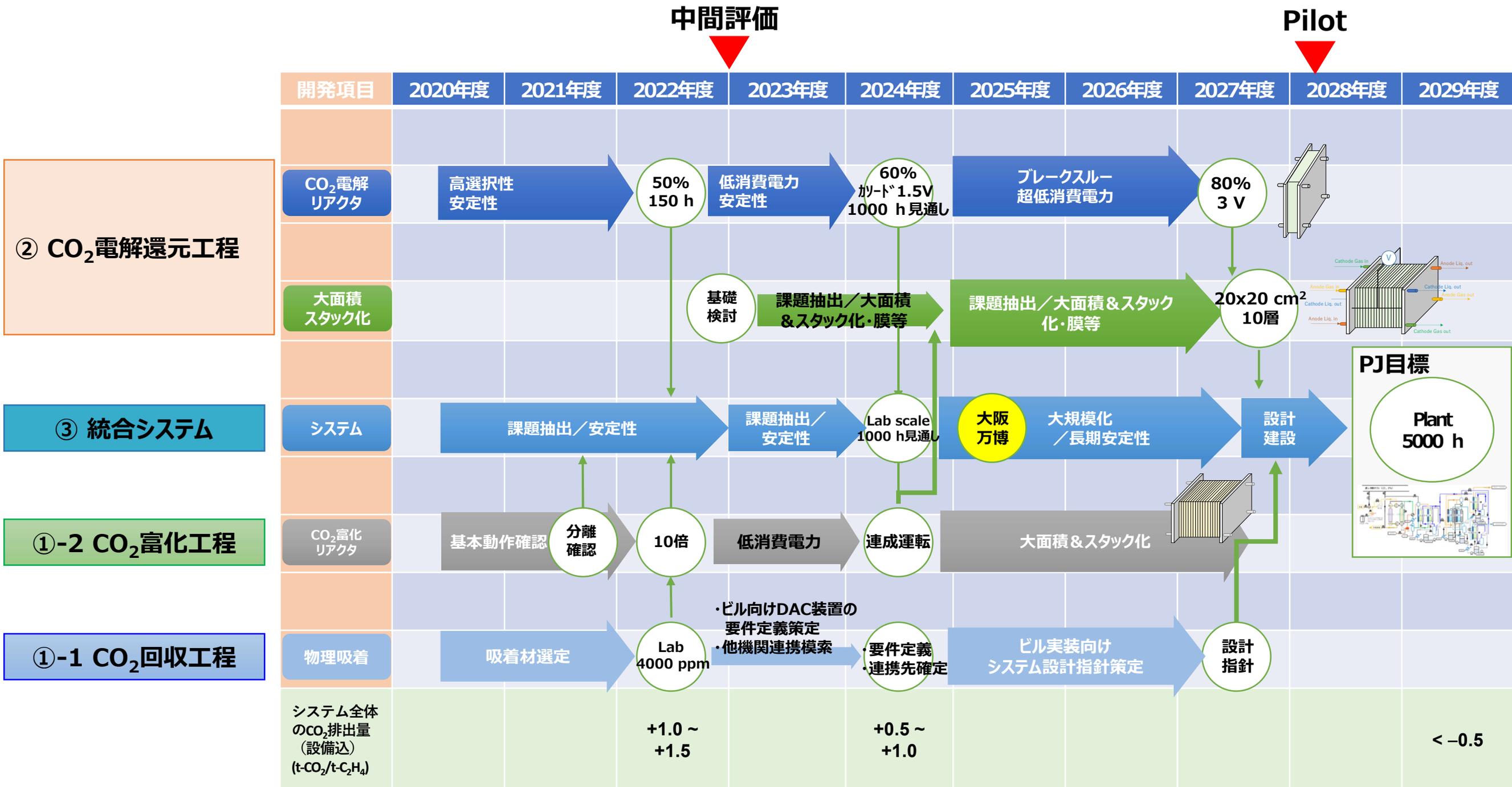
※大気CO<sub>2</sub>回収からエチレン生成までのシステム全体のCO<sub>2</sub>排出量（設備込）

## 各工程に必要なエネルギー割合



- 精度±20%の粗々試算
- 電力のCO<sub>2</sub>排出量として太陽光発電30g-CO<sub>2</sub>/kWhを仮定
- 設備に関わるCO<sub>2</sub>排出量を含む

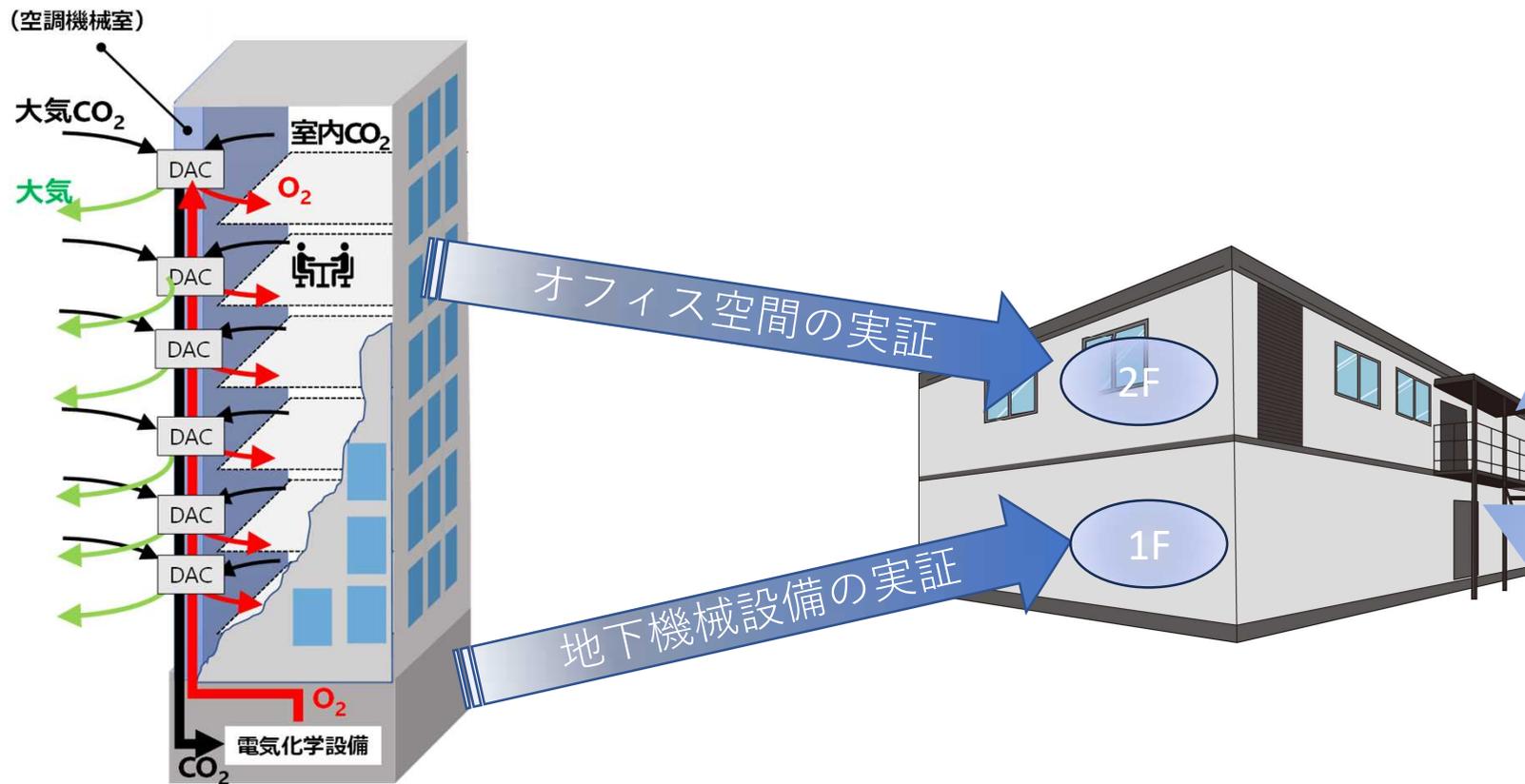
# プロジェクト目標と計画



## パイロット 実装イメージ

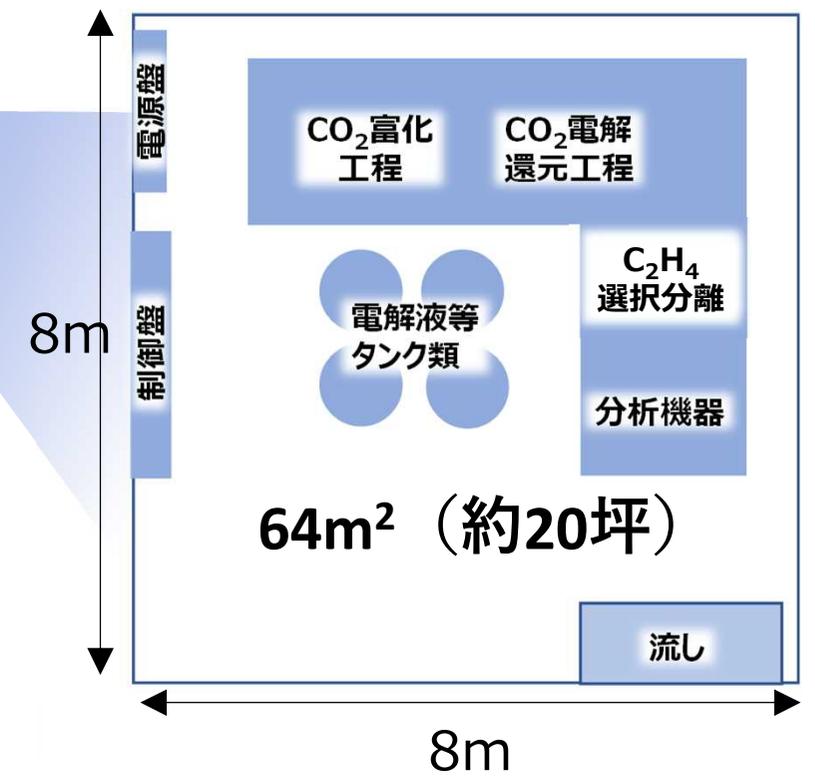
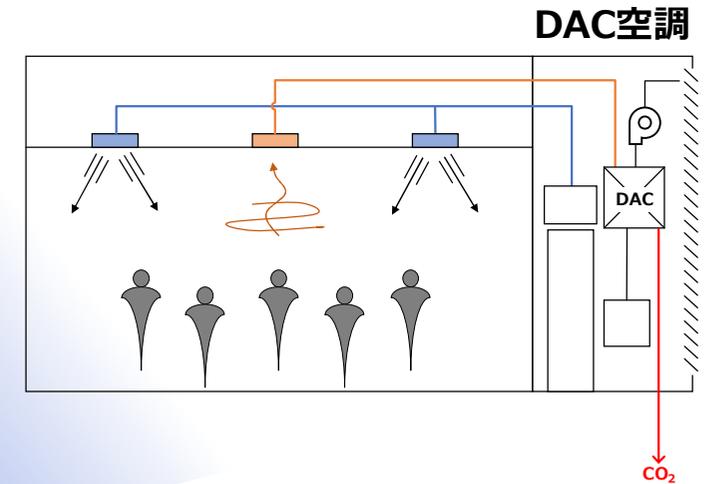
- CO<sub>2</sub>処理量 : ~10 kg/day
- エチレン生産量 : ~ 3 kg/day

ビル実装イメージ



オフィス空間の実証

地下機械設備の実証



1. プロジェクト概要

**2. 進捗・成果**

3. まとめ・今後の取組

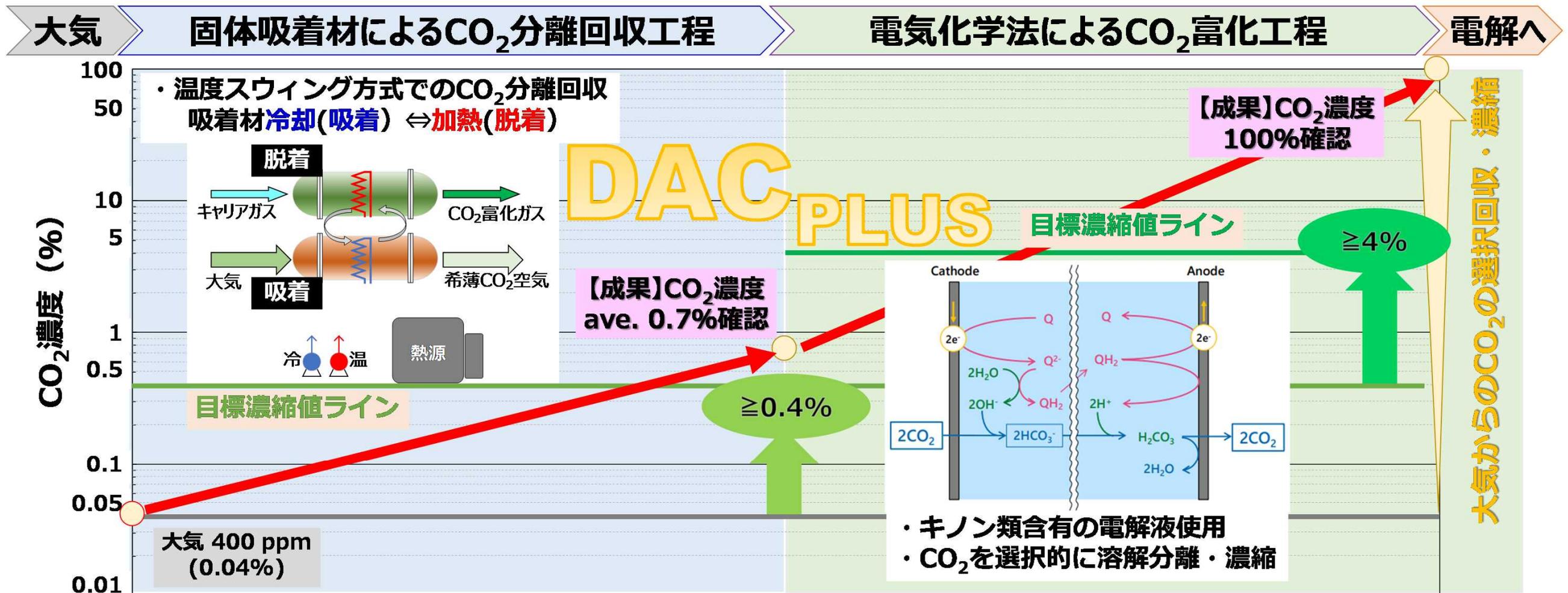
# CO<sub>2</sub>回収・富化：基本性能の確認

□ CO<sub>2</sub>回収：濃縮達成 0.04% ➔ ave. 0.7%

22年度目標：0.4%

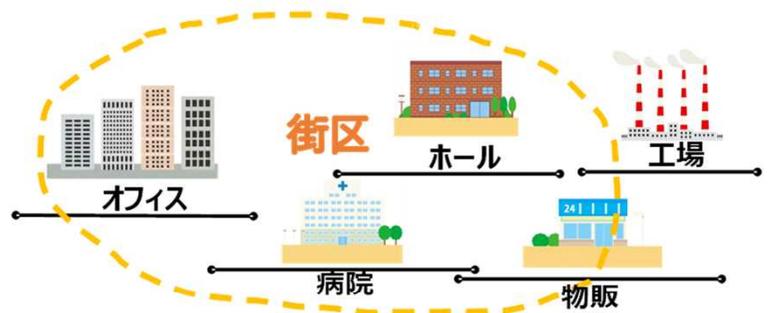
□ CO<sub>2</sub>富化：濃縮達成 0.7% ➔ 100%

22年度目標：10倍濃縮



# CO<sub>2</sub>回収：DAC要件定義

- ビル向けDAC要件定義の概念を整理
- 建築・建築設備とDACとの境界の定義（暫定）
- 要件定義整理表雛形作成（暫定）



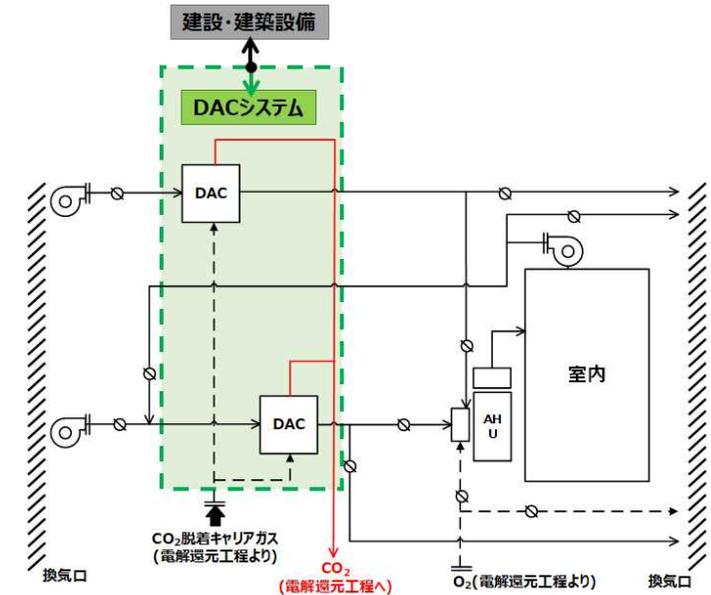
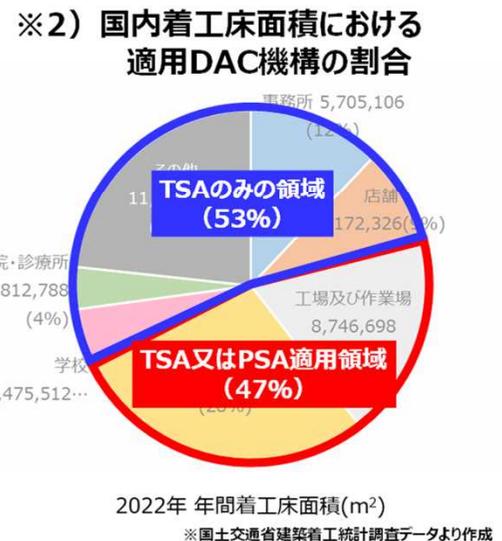
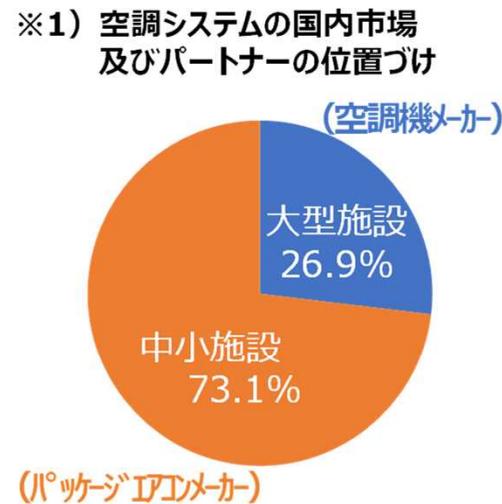
【要件定義】

①室内空気質	ビル管理法	安衛法
②騒音(dBA)	- 40 — 45 — 50 — 55 — 60 — 65 — 70 — 75 -	

【対応仕様】

DAC固体吸着材	物理（一次側湿気対策検討要）	化学修飾
DAC機構	無機吸着材メーカー 無機吸着材スタートアップ TSA パッケージエアコンメーカー 空調機メーカー	化学吸着材メーカー 化学吸着材メーカー 児玉プロジェクト 金沢大学児玉教授 他 PSA エンジニアリング企業 PSA空気乾燥機メーカー

ビル向けDAC要件定義の概念を整理



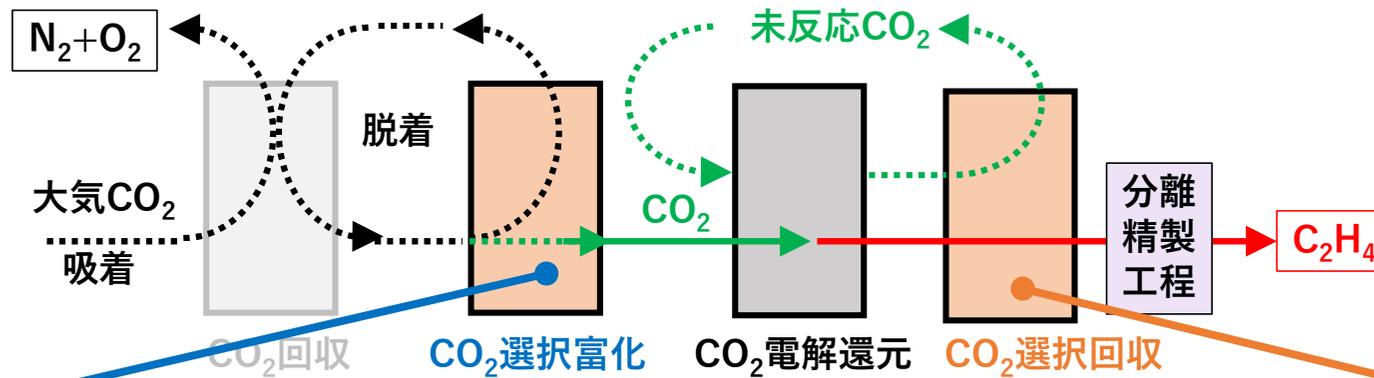
境界設定フロー図（暫定）

要件	項目	オフィス		ホール	物販	病院	工場
		大	中小				
要件	CO <sub>2</sub> 濃度	≦1,000 ppm				≦1,000 ppm	≦5,000 ppm
	騒音/振動	NC45/VAL≦		NC45/VAL≦		NC45/VAL≦	NC45/VAL≦
	機器設置スペース	床面積の4~6%					
	温湿度	17~28℃/40~70%R.H.					
	空気質	HCHO:100 µg/m <sup>3</sup> , TVOC:400 µg/m <sup>3</sup> 以下					
	臭気	- (無きこと)					悪臭防止法
	エネルギー種	電気				電気/重油/ガス	電気/重油/ガス
特殊設備	地域冷暖房				自家発電	※コジェネ	
要件定義に沿ったDAC×カニズム	DAC吸着材	固体吸着材				固体吸着材	固体吸着材
	DAC方式・機構	TSA		TSA / PSA	PSA / TSA	TSA / PSA	PSA / TSA
	連携者候補						

要件定義整理表（暫定）

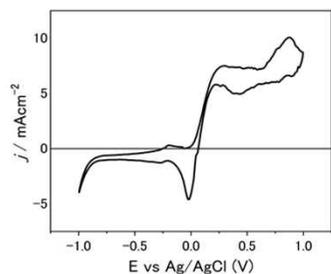
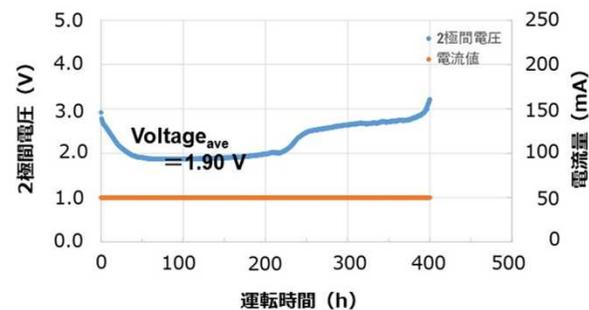
# CO<sub>2</sub>富化：安定性評価・大面積化

- CO<sub>2</sub>電解出口ガス（未反応CO<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>）からのCO<sub>2</sub>選択的分離（CO<sub>2</sub>富化セルの利用範囲拡大）
- 電極およびリアクタ改良による低電圧化／大面積化
- 性能劣化要因を特定し、対策の指針を策定

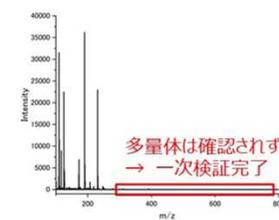


## 【課題の抽出】

- 高pH域（電極近傍）非対称な電気化学特性を把握（抜粋）



非対称な電気化学特性

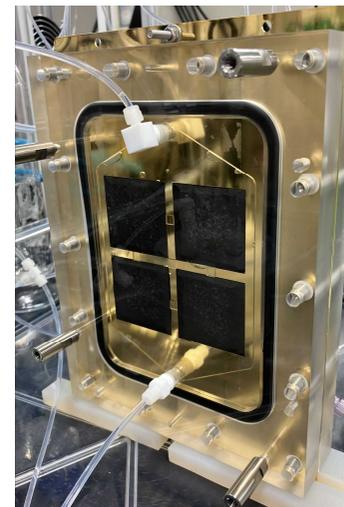


反応後溶液のMSスペクトル結果

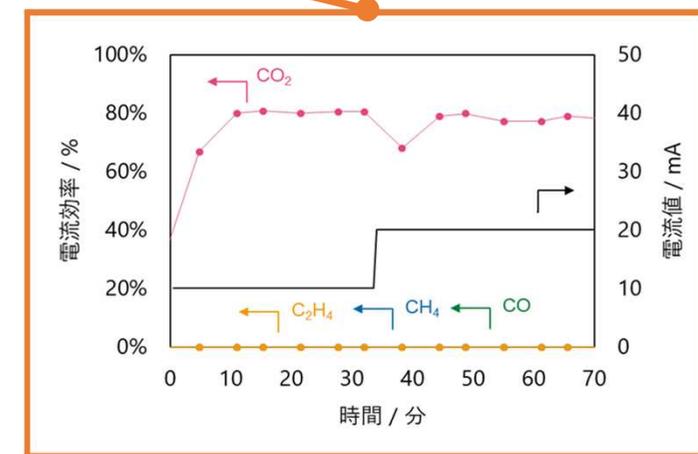
2.5cm角



10cm角



改良リアクタ・大面積化



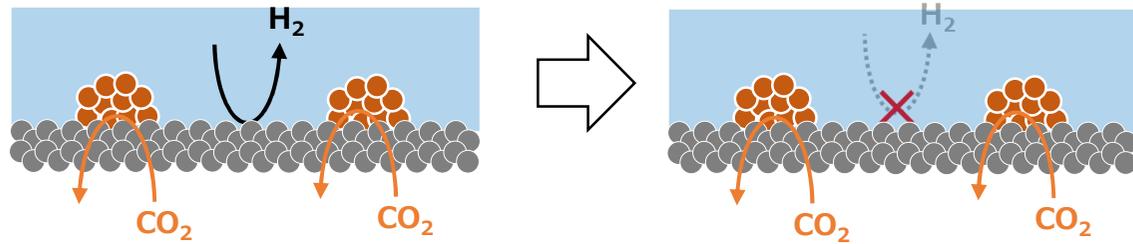
例) CO<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>選択分離の実例

# CO<sub>2</sub>電解還元：カソード電極 設計指針

## ■ 電流効率の向上方策

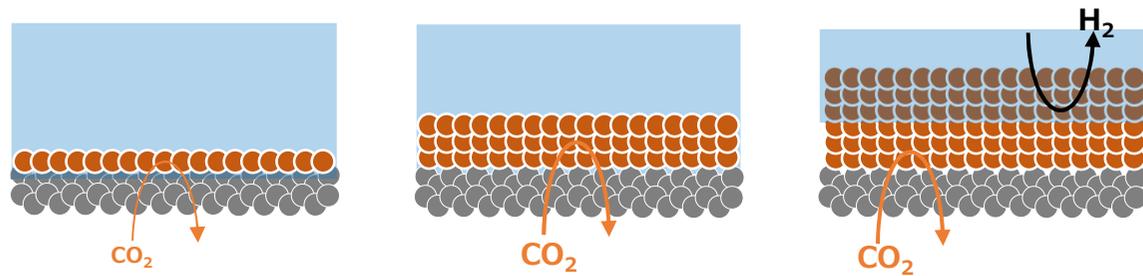
### □ vs. 水素

#### ① マクロな水素発生サイトの徹底的排除



#### ② 標的電流値に応じた適切な触媒構造制御

例) 標的電流値に応じた適切な触媒担持量

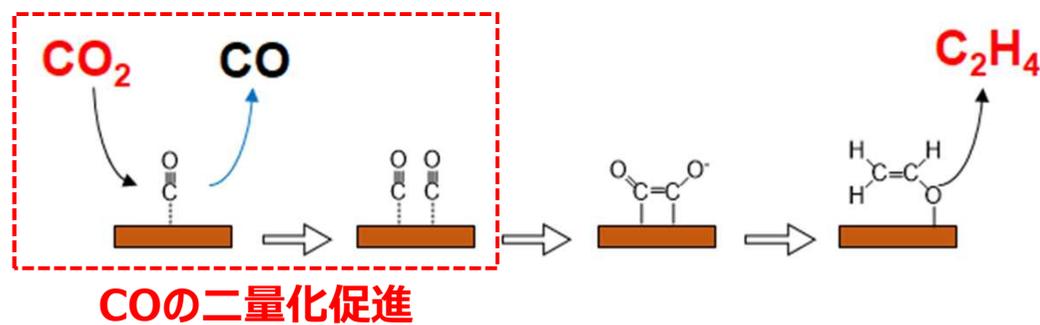


電流密度：小  
電流効率：大

電流密度：大  
電流効率：大

電流密度：大  
電流効率：小

### □ vs. 他のCO<sub>2</sub>還元生成物

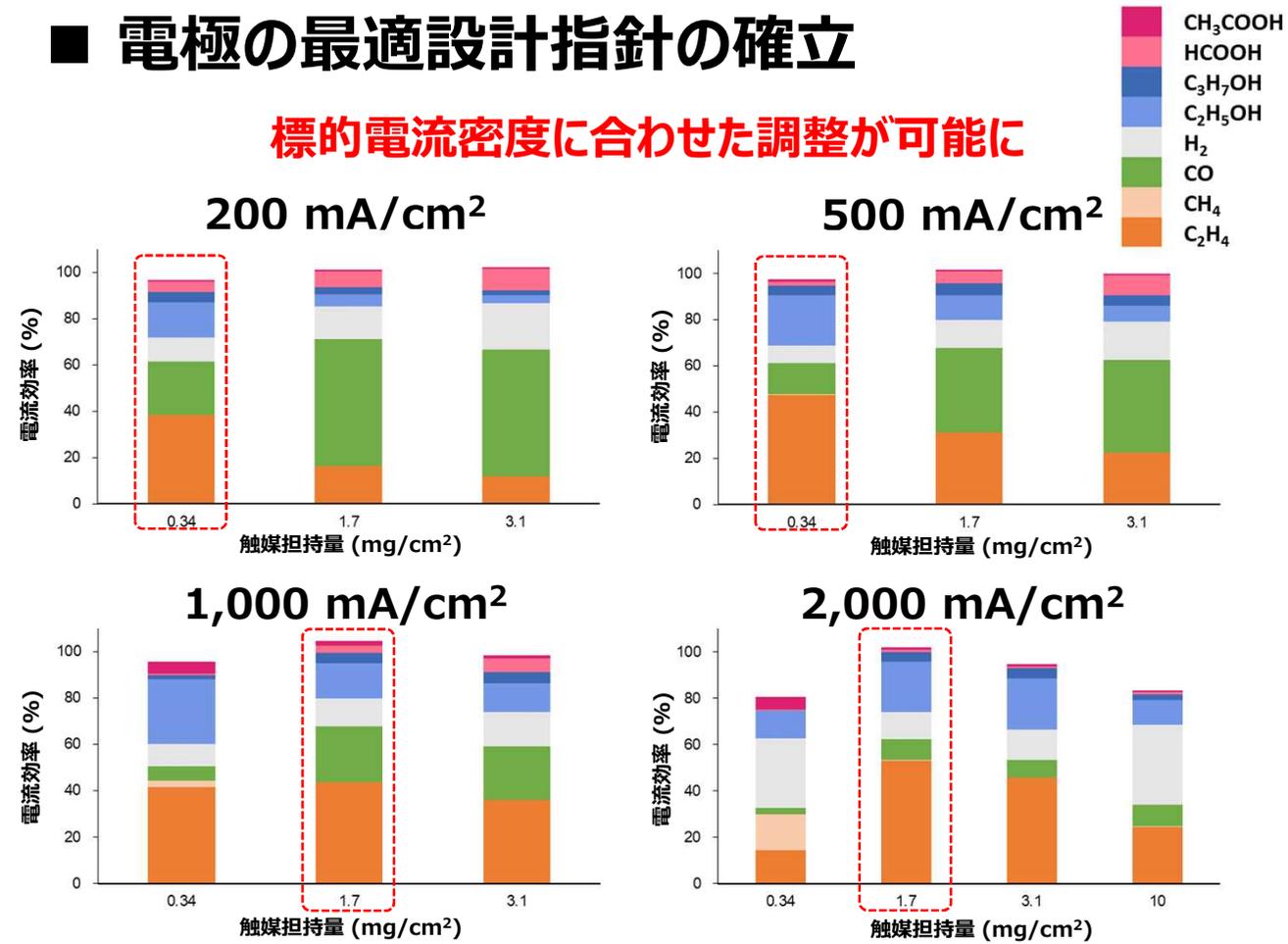


方策

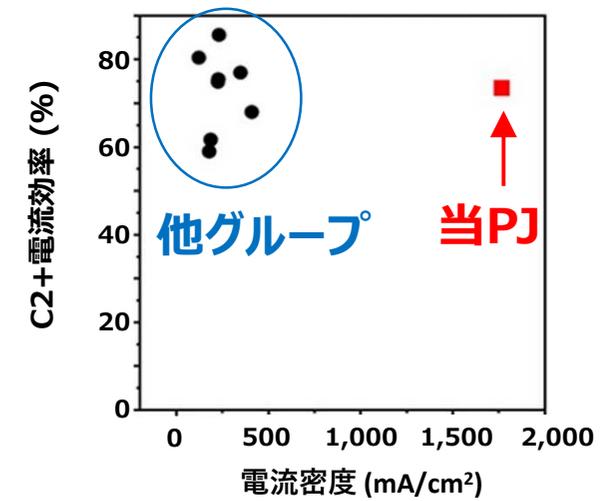
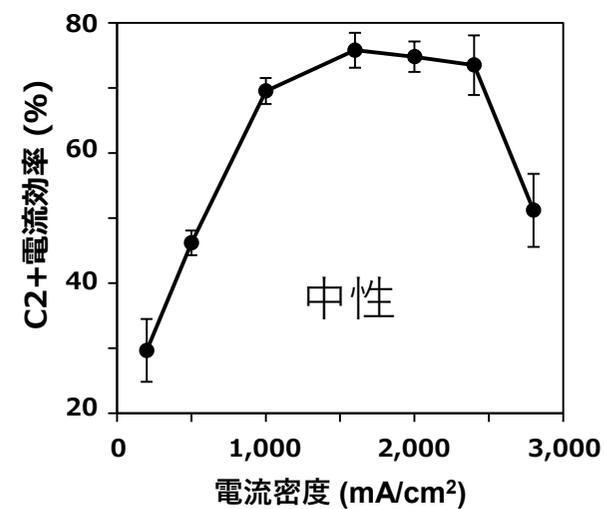
- 触媒/電極の適度な多孔化によるCO局所分圧の向上
- 電流密度上昇によるCO局所分圧の向上

## ■ 電極の最適設計指針の確立

標的電流密度に合わせた調整が可能に

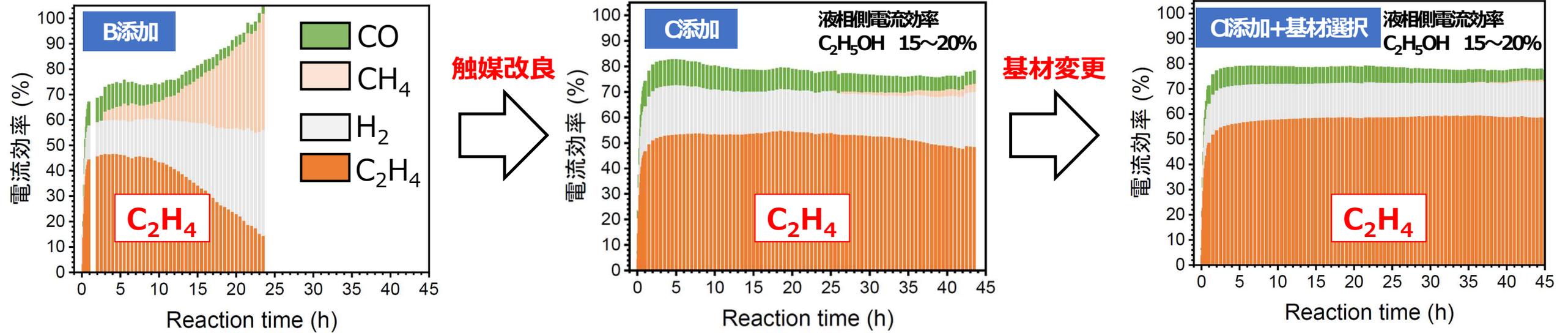


## ■ 電流効率の電流密度の両立



# CO<sub>2</sub>電解還元：カソード電極 触媒開発

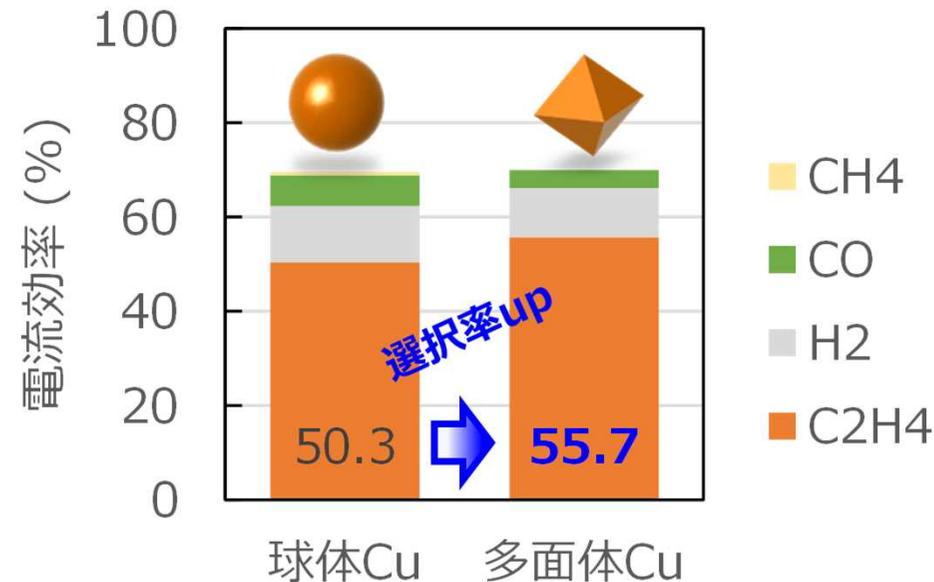
## □ C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>電流効率と安定性の同時向上



## □ 高選択率を目指す取組

### □ 多面体Cuでエチレン選択率56%。要因を把握し、設計指針を策定中

	球体Cu	多面体Cu
粒子像*		
製造方法	燃焼法	湿式還元法
購入形態	粉体	分散液



## □カソード電極（触媒）開発

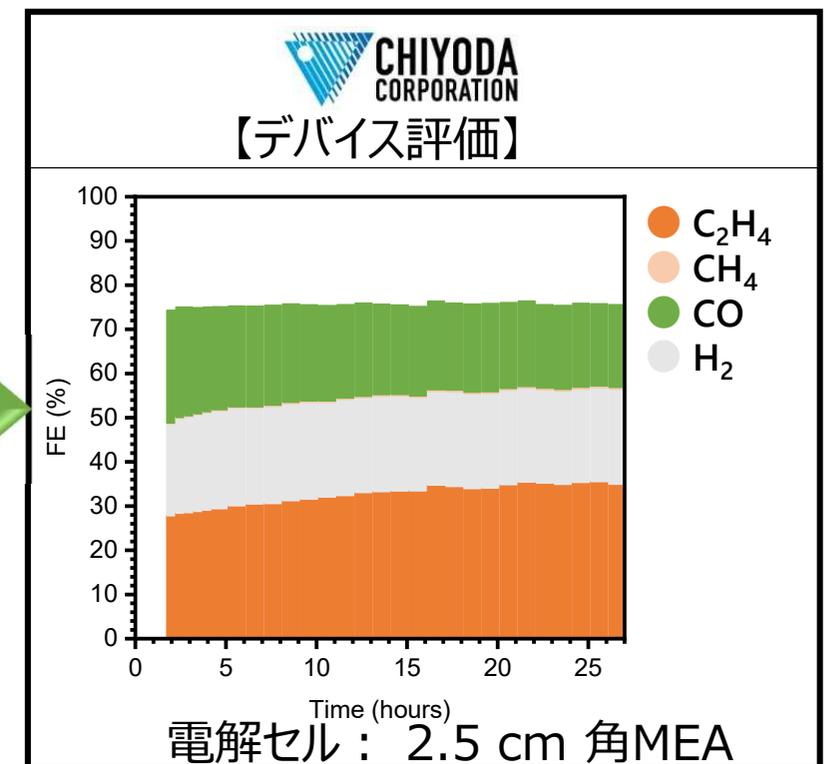
### □ 機関連携による電極試作開始／結果速報（1号試作品）

**UBE**  
【MPL/GDL作製】  
撥水化剤処理等

基材面積 6 cm角

**maxell**  
Within the Future  
【触媒塗工／GDE作製】  
塗工処理等

基材への触媒塗工処理イメージ



触媒付加電極の1号試作品  
評価結果

東大先端研  
Research Center for  
Advanced Science and Technology  
The University of Tokyo

**古河電工**  
【触媒開発・調製】  
Cu-Al合金触媒調製

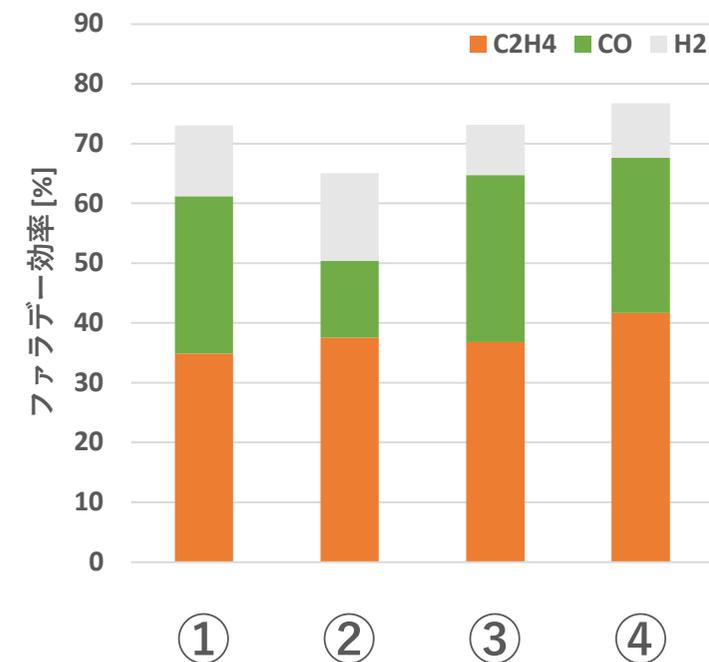
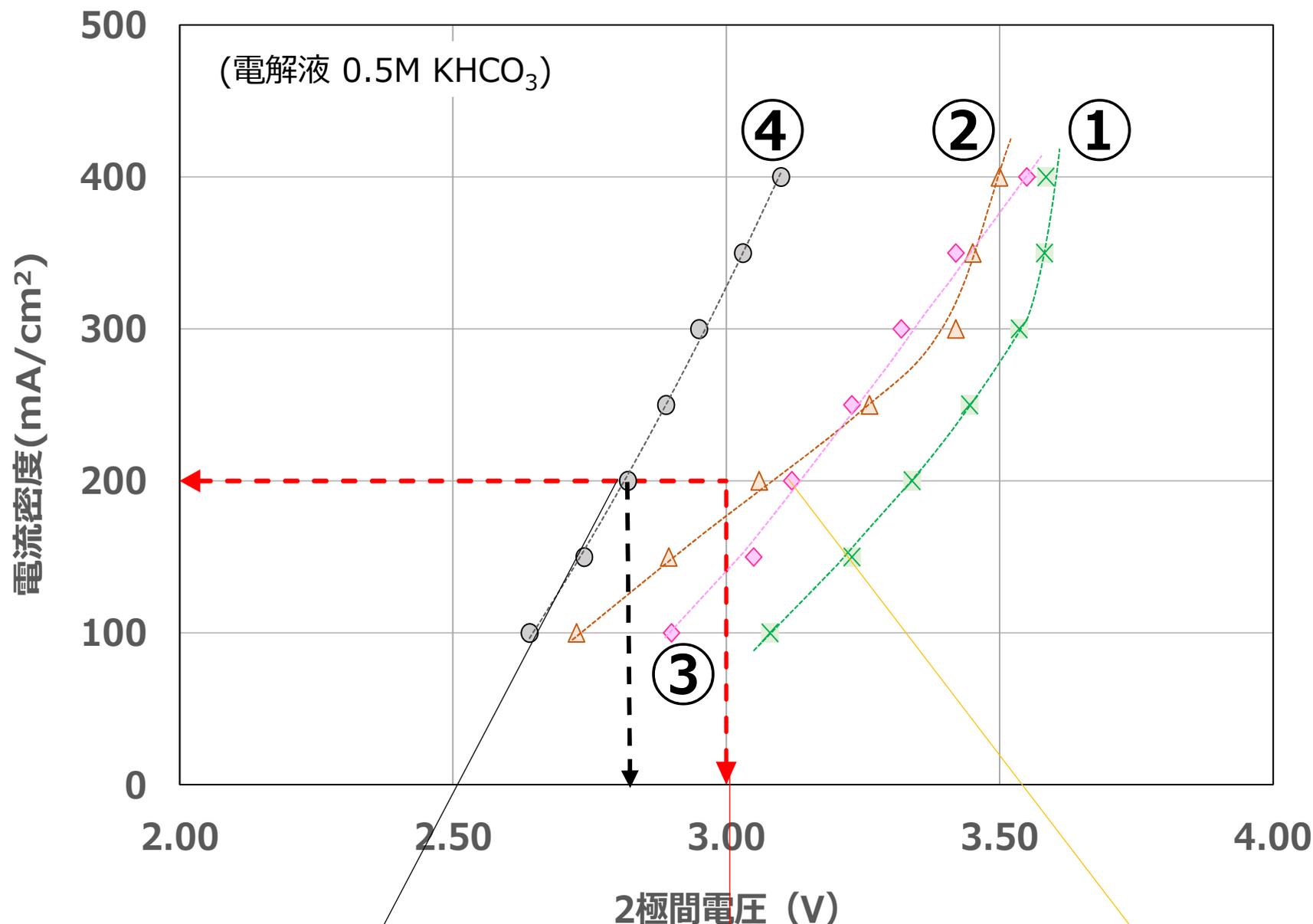
イメージ	SEM像
●: Cu ●: Al 固溶合金	1 μm 1.00μm
調整方法	熱プラズマ法



【将来】  
ロール to ロール式  
塗工試作機への実装を目指す

# CO<sub>2</sub>電解還元：アノード電極開発

□アノード電極構造の最適化により2極間電圧 2.82V @200mA/cm<sup>2</sup> を確認



参考) カソード生成物@200 mA/cm<sup>2</sup>

項	構造
①	市販品
②	触媒α
③	触媒β
④	触媒γ

④セル電圧 2.82 V  
@200 mA/cm<sup>2</sup>

目標：3.0V  
@200mA/cm<sup>2</sup>

②セル電圧 3.06 V  
@200 mA/cm<sup>2</sup>

# CO<sub>2</sub>電解還元：リアクター性能の向上

## □ 世界最高レベルの高電流密度

- ・ 高電流密度 (2,000 mA/cm<sup>2</sup>) 下でC<sub>2</sub>+ FE80% **実証**

## □ 電流効率の向上／動作電圧の低減

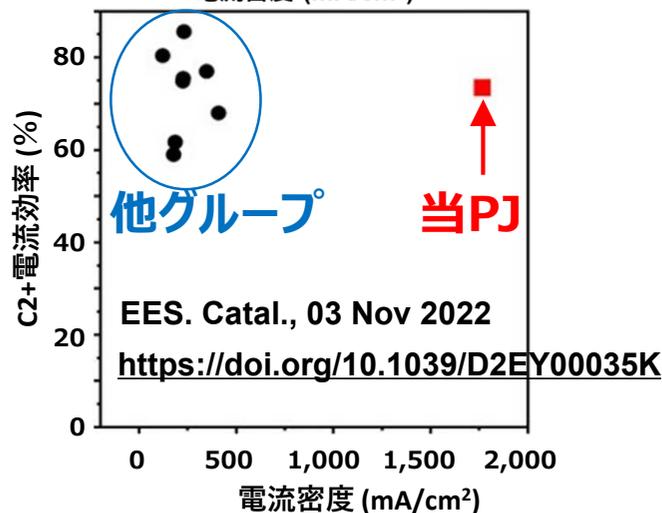
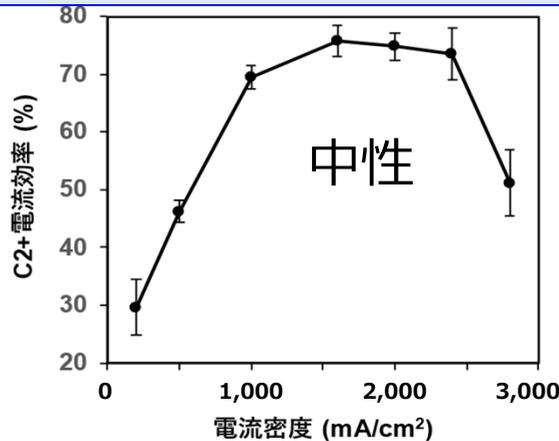
- ・ C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>電流効率 60%、2極間動作電圧2.8 V **達成**

**世界トップ**

22年度 目標：100 mA/cm<sup>2</sup>

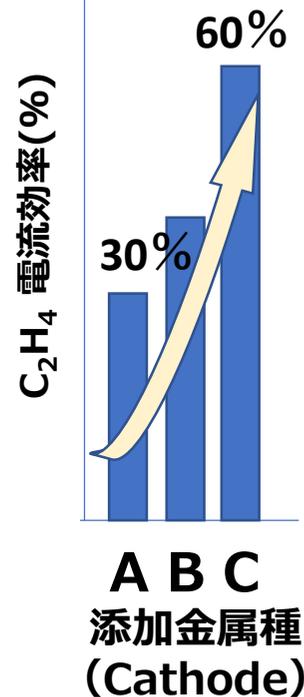
24年度 KPI 目標  
CO<sub>2</sub>排出量(t-CO<sub>2</sub>/t-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)  
+0.5~+1.0

- 電流密度 2,000 mA/cm<sup>2</sup>
- C<sub>2</sub>+ 電流効率 80% **実証**

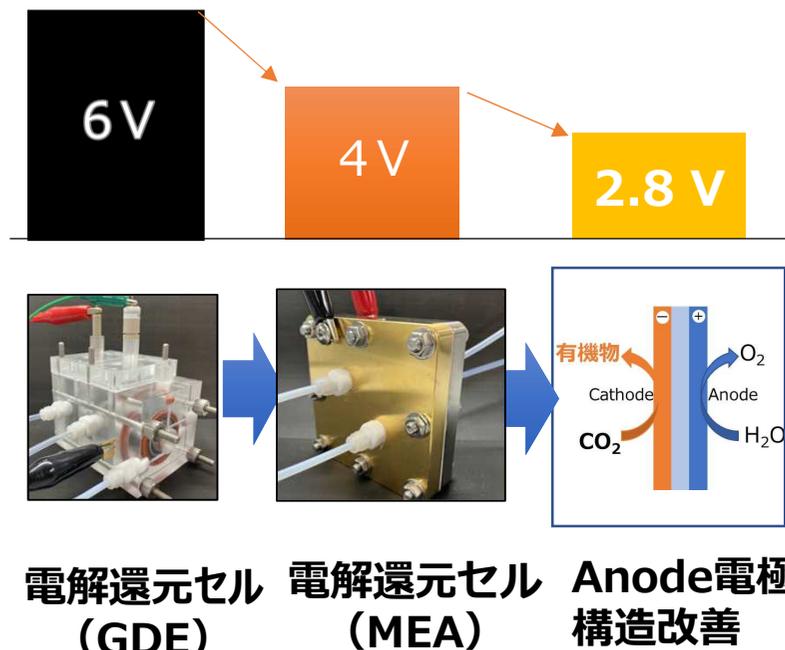


### 電流効率と電流密度の両立

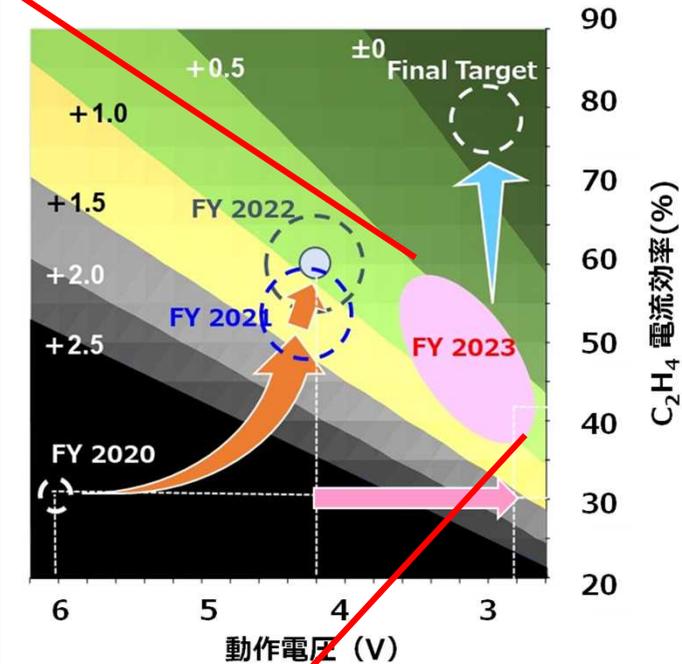
- 電流効率 60%
- 2極間動作電圧2.8 V **達成**



### 触媒選択性向上



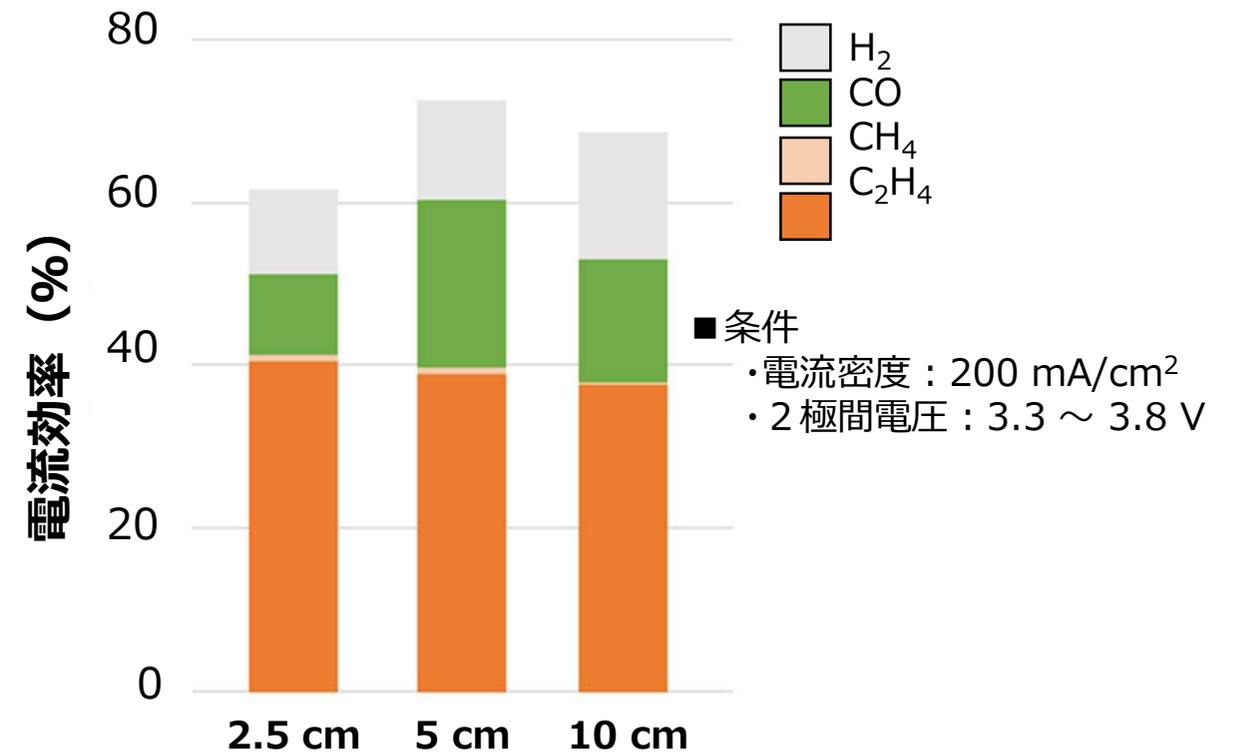
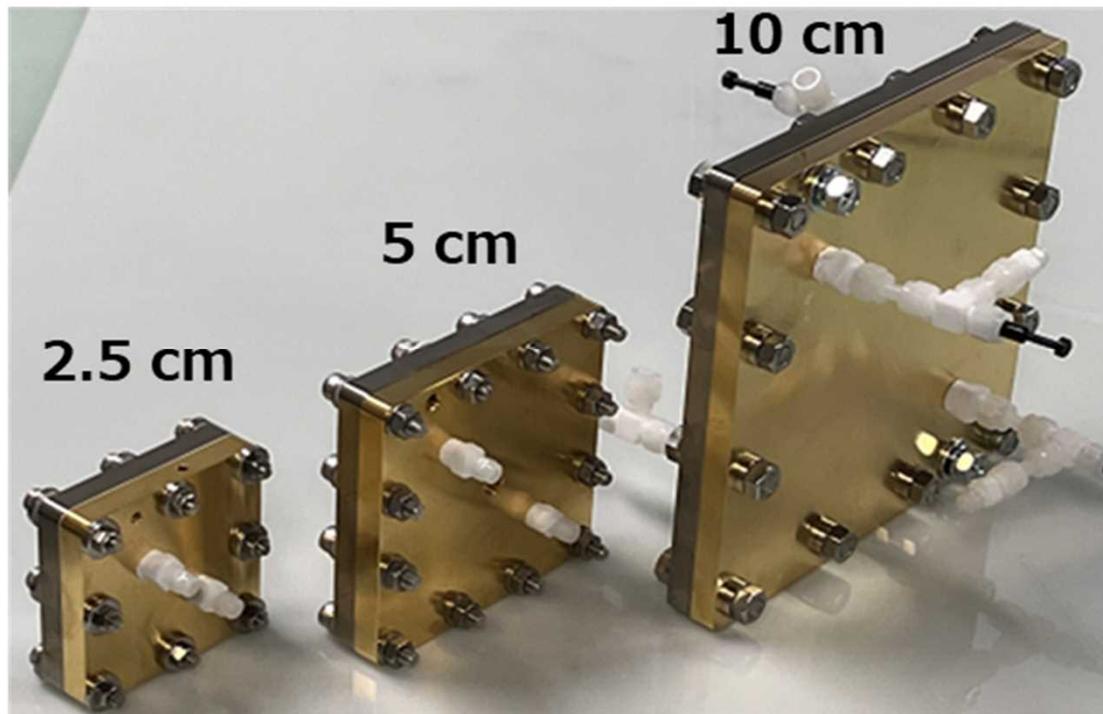
### 動作電圧低減



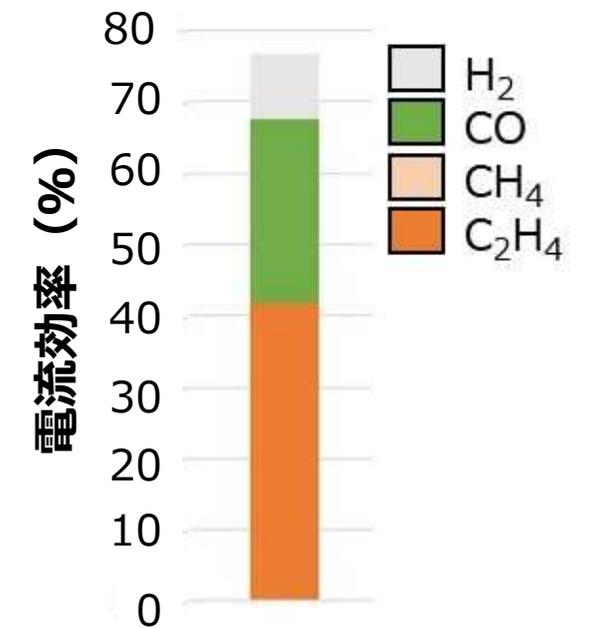
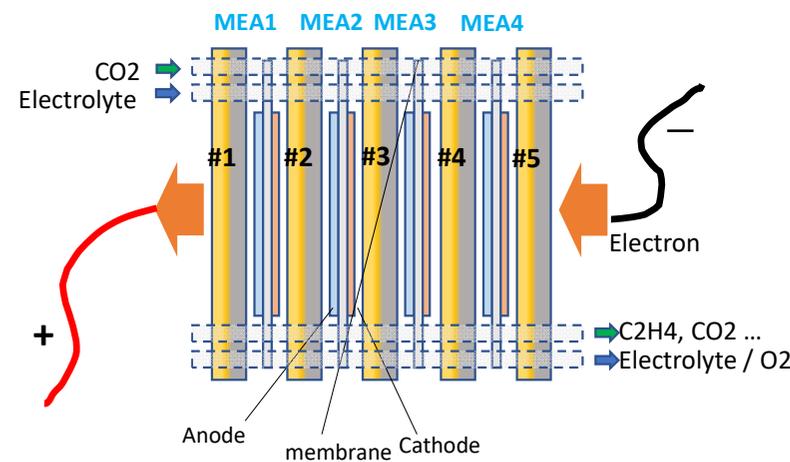
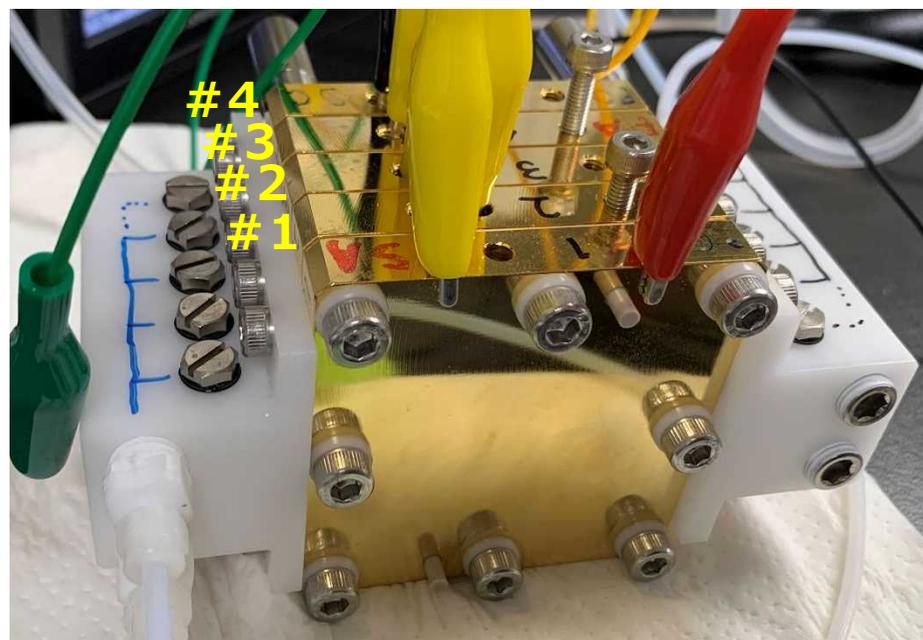
### システム全体のCO<sub>2</sub>排出量 (t-CO<sub>2</sub>/t-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)

# CO<sub>2</sub>電解還元：リアクターの大面積化・スタック化

## □10 cm角セルにおいて2.5 cm角セル同等性能を実現



## □2.5 cm角×4 スタック においてエチレン生成を確認



## ロシミュレーションモデルの開発に着手

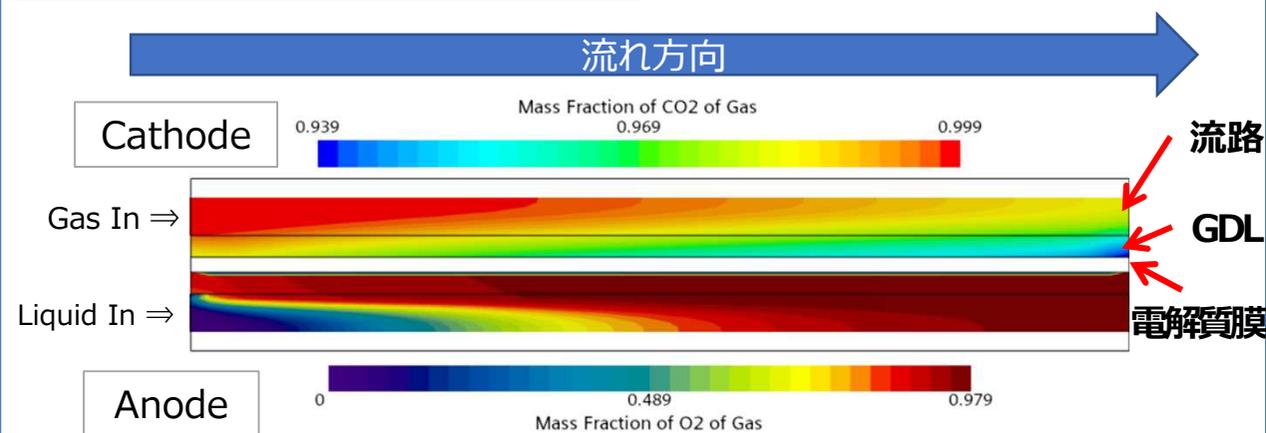
### 電解反応モデル

#### 【検討内容】

- カソード／アノード間の反応過程モデル構築
- CO<sub>2</sub>スリップの取込

#### ○基礎検討モデルでの反応解析例

Anode-Cathode間のCO<sub>2</sub>・O<sub>2</sub>濃度分布

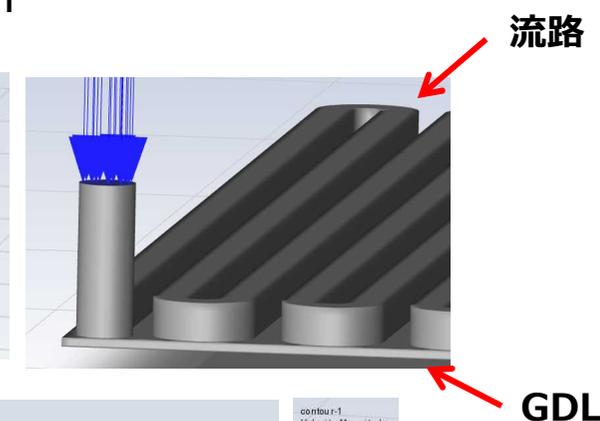
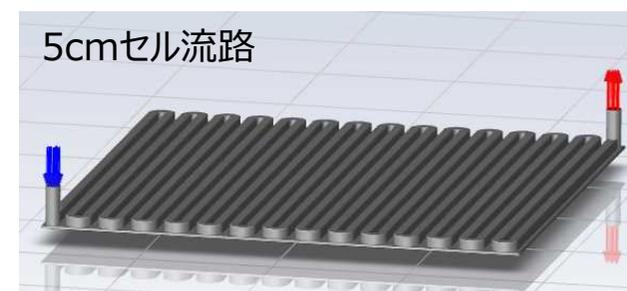


Cathodeで下流に行けば行くほどCO<sub>2</sub>濃度の低減(還元反応)再現  
→流れによる反応効率への影響解析実施

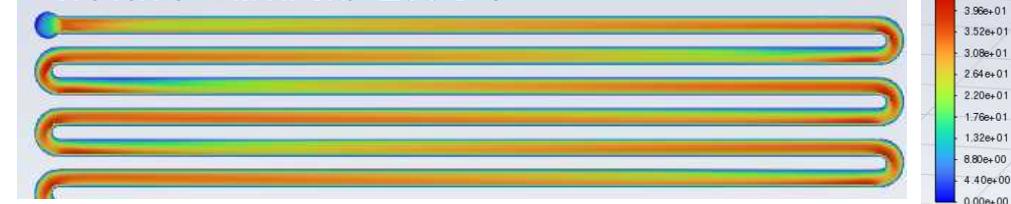
### 流体モデル

#### 【検討内容】

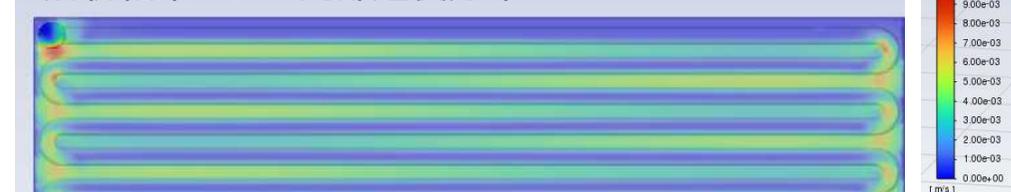
- セル流路および拡散層膜（GDL）内の流れ解析
- 大面積に向けた流路の設計



#### 解析結果-流路内部速度分布

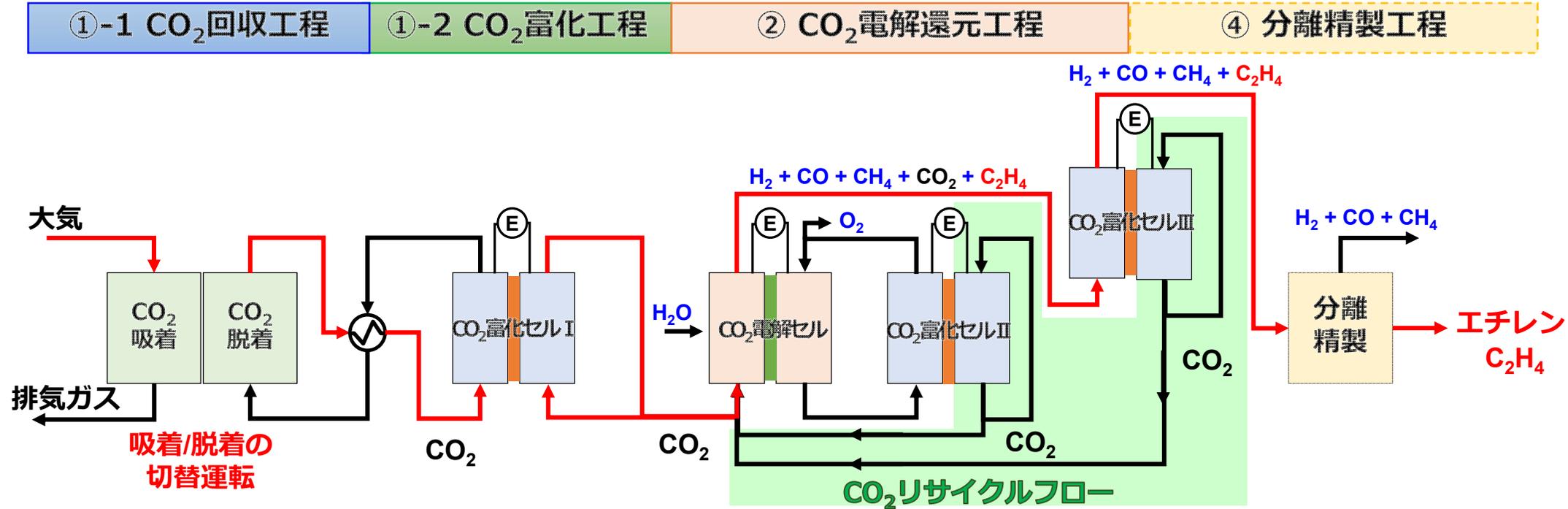


#### 解析結果- GDL内部速度分布



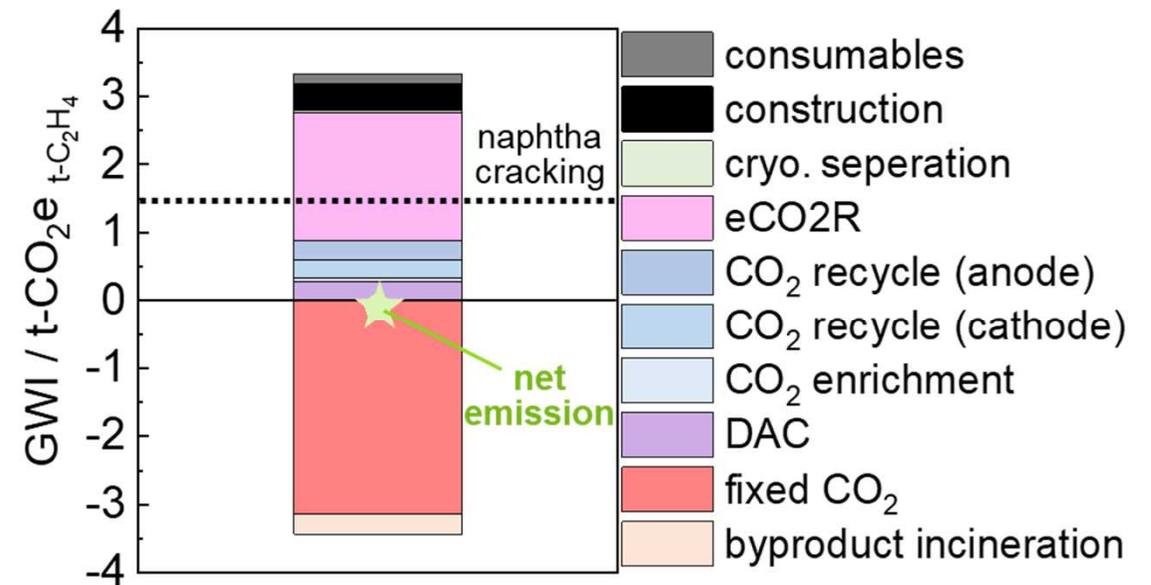
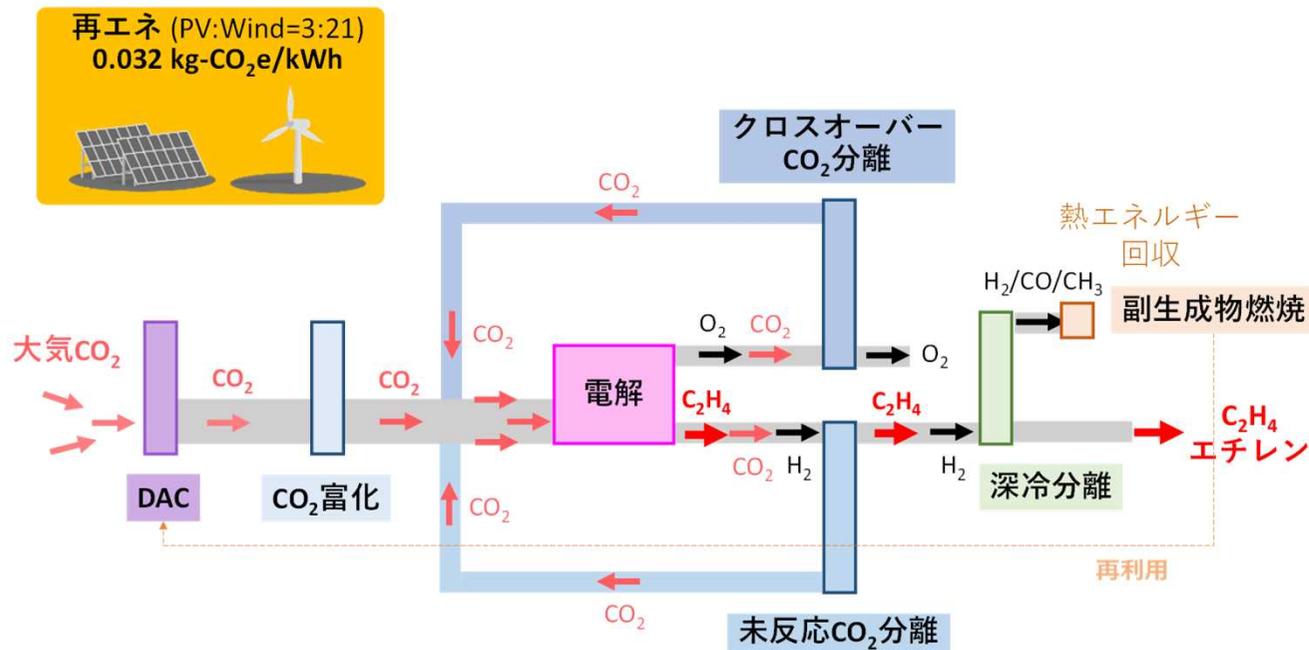
流路、GDL内部の流動状態から大面積セルでの最適流路設計実施

## □ 統合システムの設計：富化セルを活用したCO<sub>2</sub>リサイクルフロー導入

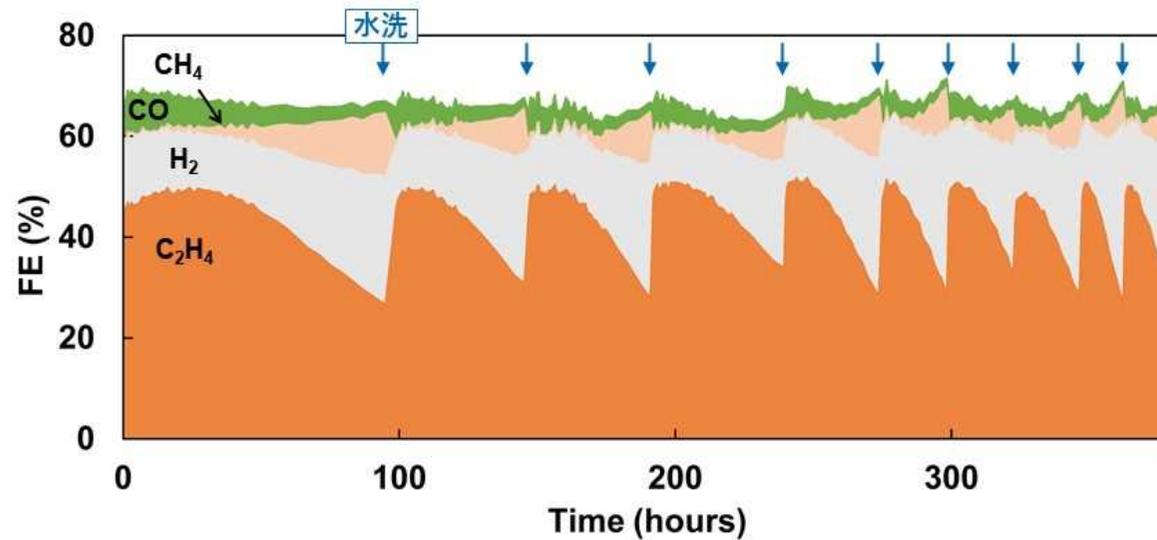


## □ CO<sub>2</sub>リサイクルのLCA評価

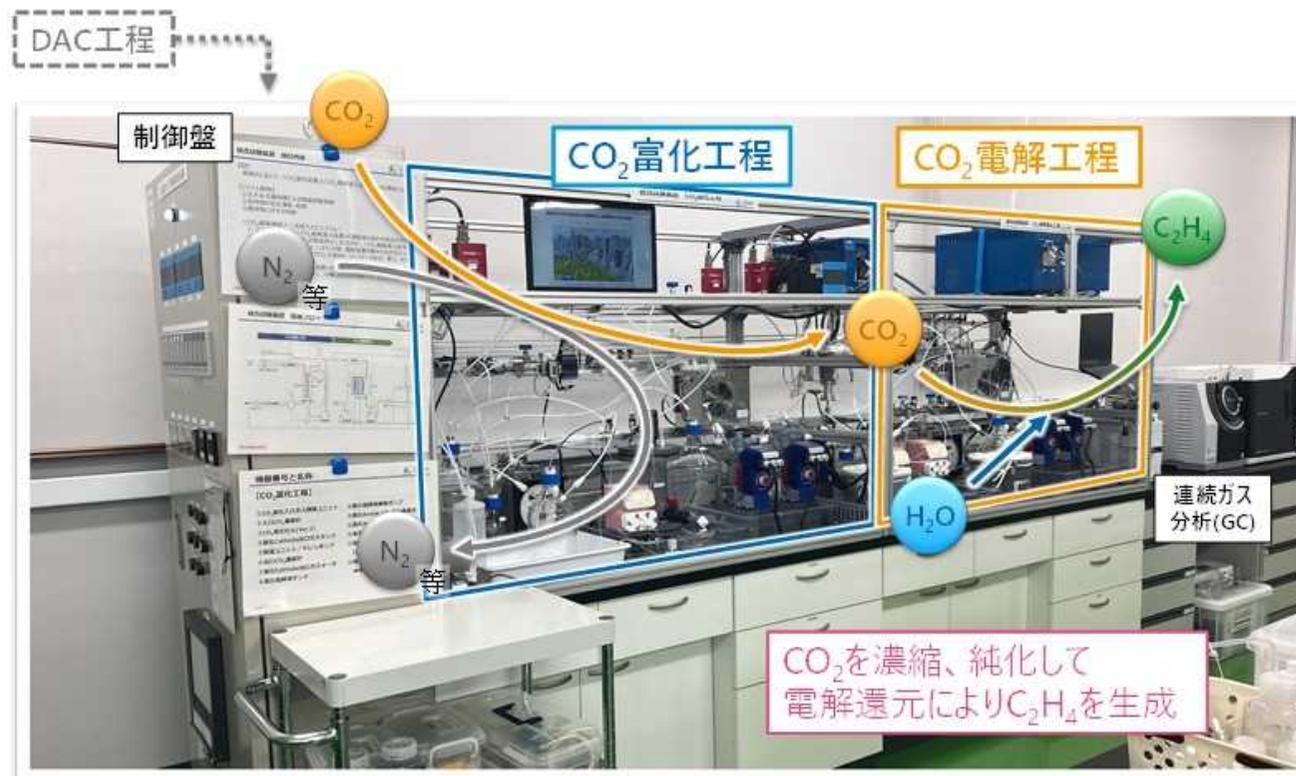
□ 副生産物の燃焼熱をDACのCO<sub>2</sub>脱着用熱として再利用するシステムのLCAを検討



□連続運転に向けたシステム制御に関する検討実施 → 運転制御による影響を確認



□ Lab.規模での「CO<sub>2</sub>富化+CO<sub>2</sub>電解」連成運転による評価を開始





大使館との交流

東大先端研  
Research Center for  
Advanced Science and Technology  
The University of Tokyo



杉山所長・教授

欧州大使館他との情報交換会  
・ルウエー大使館  
・ドイツNRW州貿易投資振興公社他  
・スイス在大阪領事館



Joel.Ager 教授

大阪大学



中西教授



学生留学

Institute of Engineering  
Thermodynamics



Dr. Seyed Schwan Hosseiny

DLR Institute of Engineering  
Thermodynamics: Dr. Seyed Schwan Hosseiny  
学生留学【大阪大学：中西教授】

理化学研究所



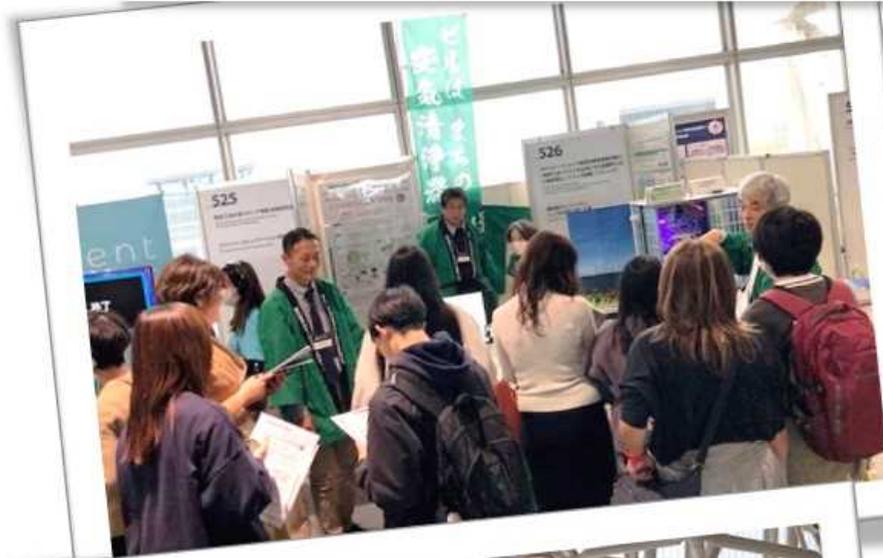
Dr. 藤井

共同研究

Lawrence Berkeley National Laboratory,  
Materials Science & Engineering :  
Prof. Joel Ager  
共同研究【理化学研究所：藤井博士】  
学生留学【大阪大学：中西教授】

## JST主催サイエンスアゴラに出展

- 2023/11/18-19 テレコムセンター
- 本プロジェクトブースへの来場者数：400名超
- 名刺交換：約15社



## 1. プロジェクト概要

## 2. 進捗・成果

## 3. まとめ

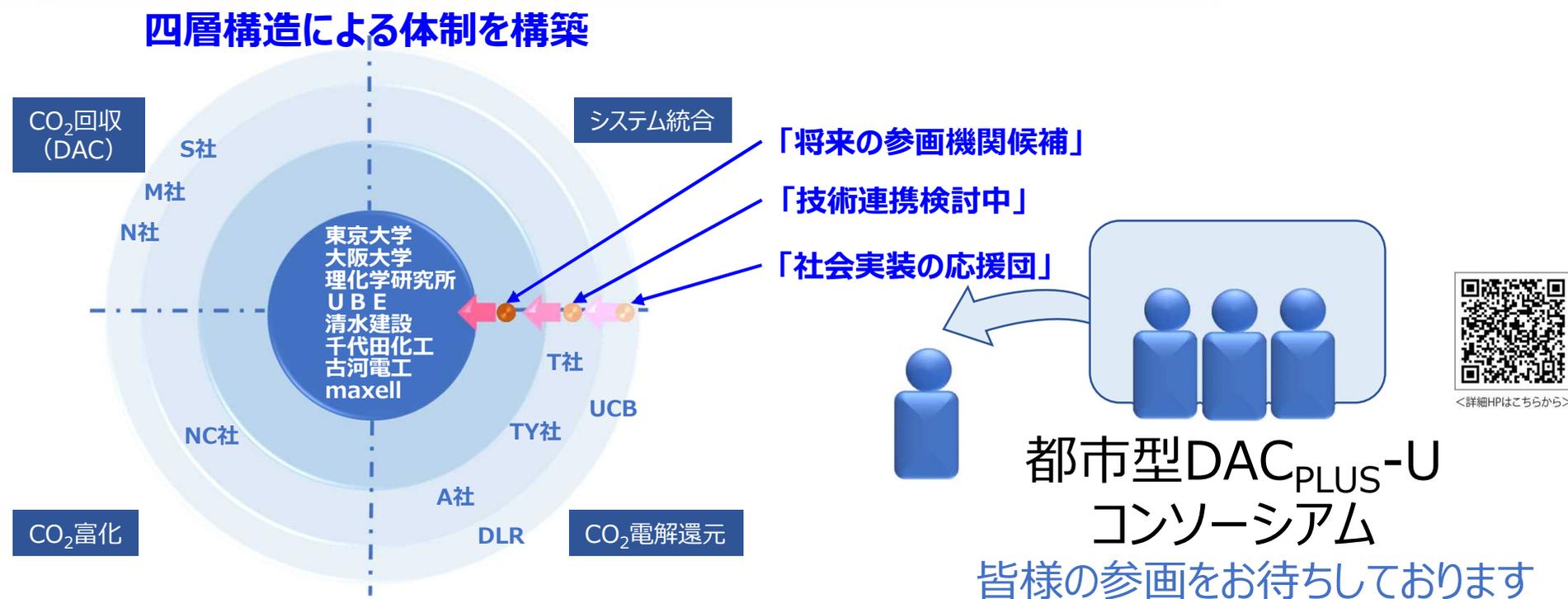
## □ 成果まとめ

テーマ	主な成果	今後の課題
CO <sub>2</sub> 回収・富化工程	<ul style="list-style-type: none"> <li>ビルへの実装モデルの概念（要件）を明確化</li> <li>大気CO<sub>2</sub> 400 ppmからCO<sub>2</sub>濃度100%までの濃縮に成功</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>プロトタイプ的设计・製造</li> <li>低駆動電圧化・長期安定運転</li> </ul>
CO <sub>2</sub> 電解還元工程	<ul style="list-style-type: none"> <li>エチレンへのFE 60%、2極間動作電位 2.8 V 達成</li> <li>大面積化への取組／10cm 角セル評価・機関連携</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>電流効率、電流密度、安定性を同時満足する電極開発</li> </ul>
システム統合・LCA	<ul style="list-style-type: none"> <li>大気CO<sub>2</sub>からエチレン製造までの概念設計・LCA実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>「CO<sub>2</sub>富化+CO<sub>2</sub>電解」連続評価</li> <li>LCAの精度向上</li> </ul>

## □ 今後の開発目標

時期	研究開発の対象規模	CO <sub>2</sub> 処理量 (kg/y)	CO <sub>2</sub> 排出量削減目標 (1tonのエチレン製造当たり)
2024年度	実験室規模のシステム	25	+0.5~+1.0ton以下
2027年度	ベンチ装置	250	±0.0~+0.5ton以下
2029年度	パイロット装置	3,300	-0.5ton以下 (カーボンネガティブ、及び連続稼働5,000h達成)

## □ 社会実装化に向けた取組



**END**