

# 電気エネルギーを利用し大気CO<sub>2</sub>を固定する バイオプロセスの研究開発



PM：加藤創一郎

国立研究開発法人産業技術総合研究所・上級主任研究員

共同実施機関：東京工業大学、名古屋大学

再委託先機関：神戸大学、大阪大学

研究開発期間：2020年度～2022年度

# コンセプト | バイオ・マテリアルの融合 / 脱光合成

太陽光発電：  
エネルギー変換効率 ~20 %

光合成：  
エネルギー変換効率 ~0.2 %

耕作適地が必要、食料生産との競合、  
大量の水使用、輸入依存、etc.

食料、燃料、  
構造材料、  
etc.

バイオマス  
(有機物)

電力

CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub>

微生物電気合成

CO<sub>2</sub>

H<sub>2</sub>, CO  
HCOOH

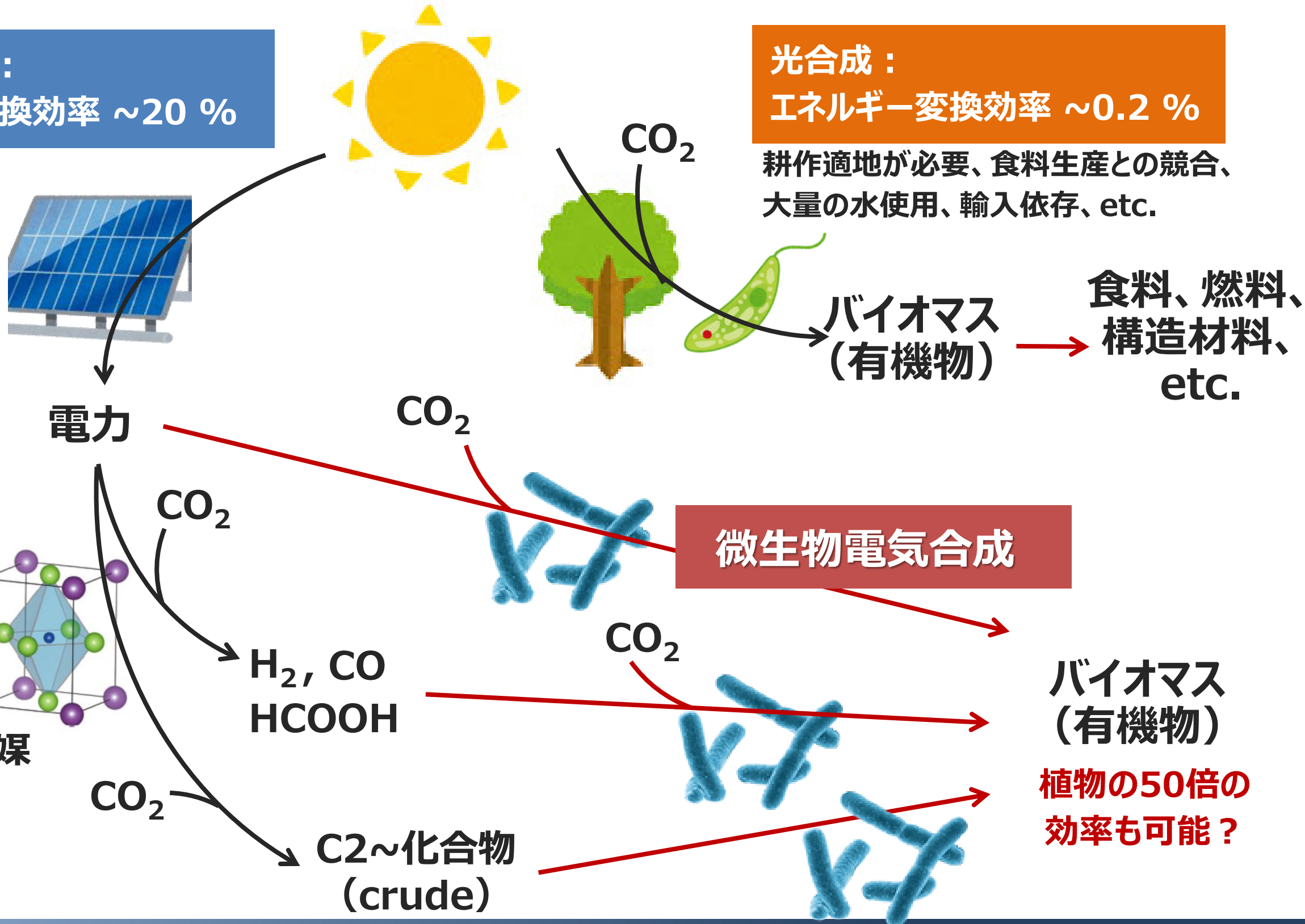
バイオマス  
(有機物)

植物の50倍の  
効率も可能？

電極触媒

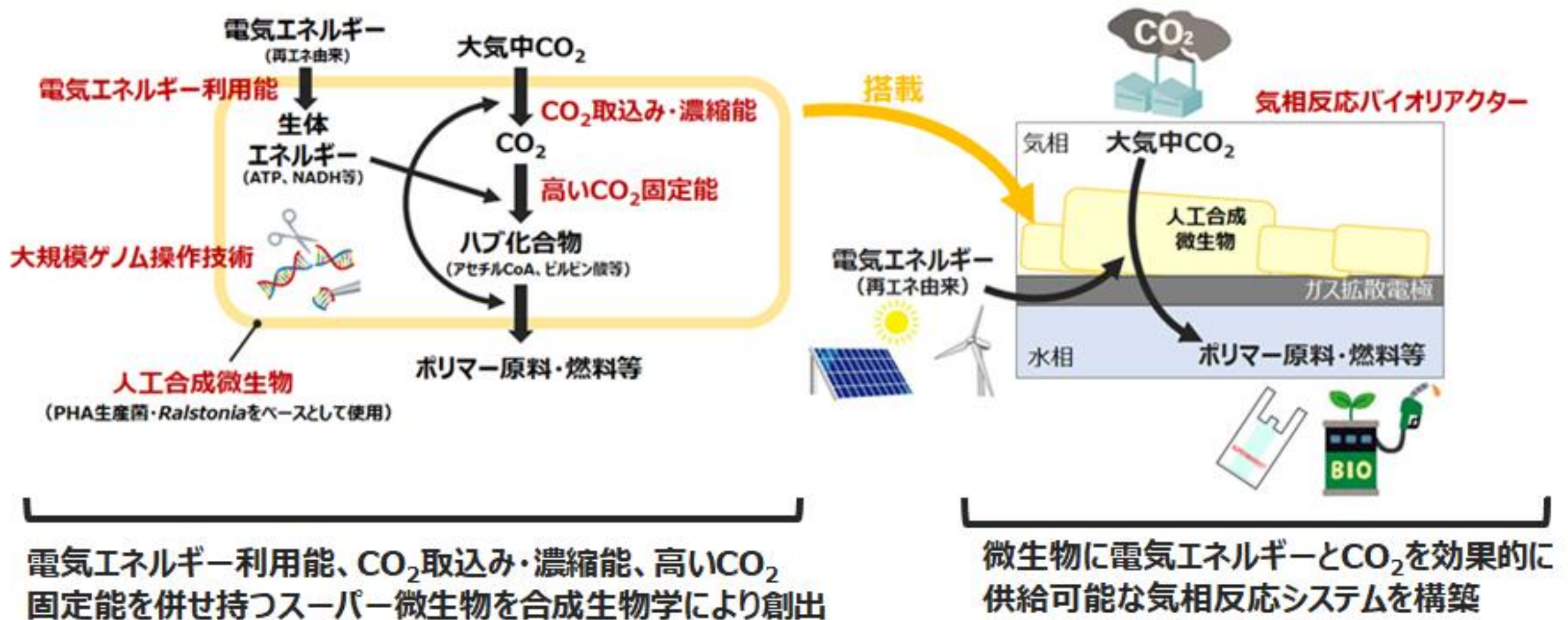
CO<sub>2</sub>

C2~化合物  
(crude)

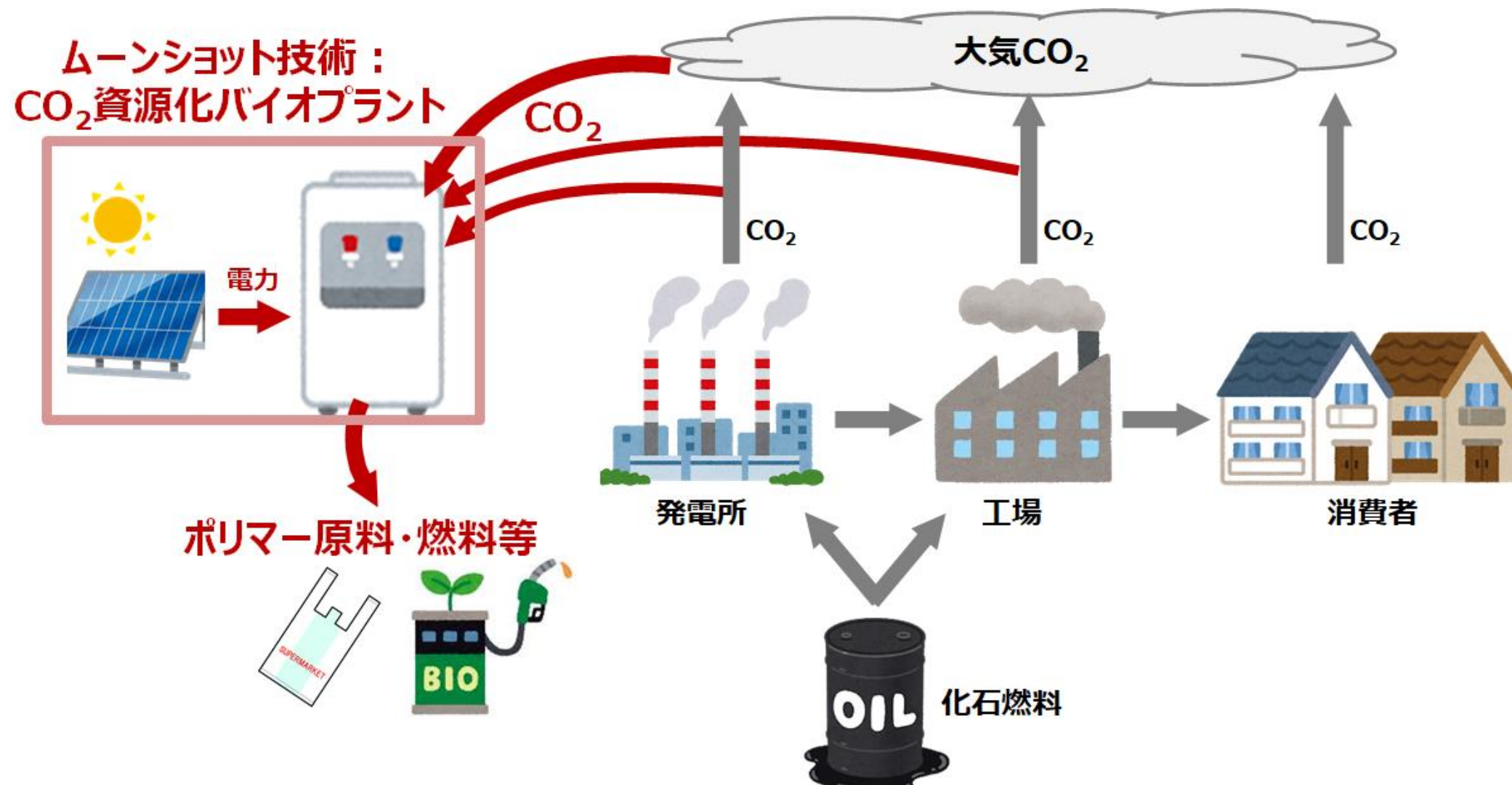


# 研究開発概要・PJ全体目標

- 微生物を用いた革新的なCO<sub>2</sub>資源化・ネガティブエミッション技術の開発
- 電気エネルギーを利用し大気中CO<sub>2</sub>を植物の50 倍以上の効率  
(1 m<sup>2</sup>あたり年間50 kgの大気CO<sub>2</sub>を吸収) で有用有機物に変換
- PJ達成目標 (2022年度) : 「電気利用CO<sub>2</sub>固定微生物の人工合成」と「気相反応リアクターの構築」を実現し本技術の実証可能性を明確に示すこと

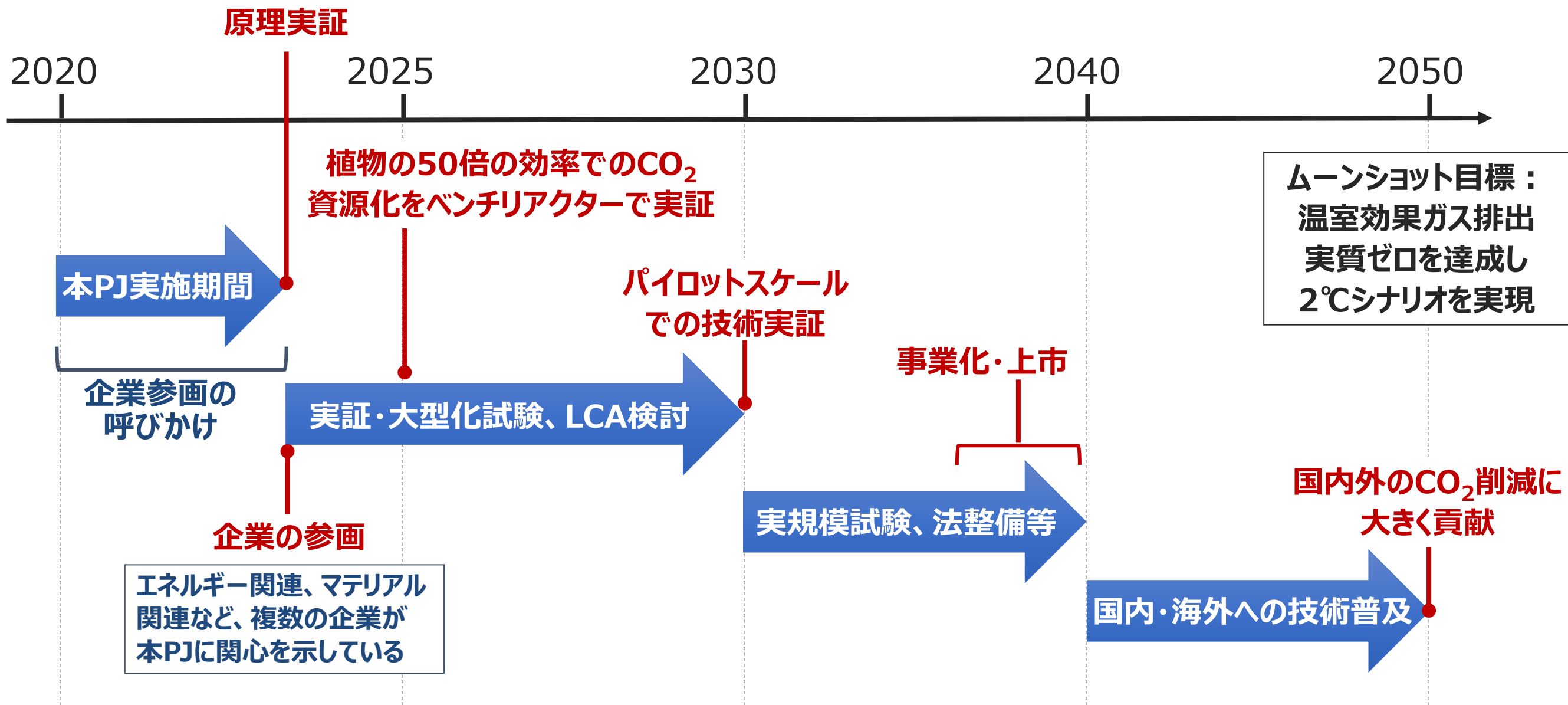


# 社会実装のイメージ



- \* 大気中CO<sub>2</sub>の削減（排ガス由来等、高濃度CO<sub>2</sub>も可能）
- \* 再生可能エネルギー由来の電力を利用（夜間余剰電力含む）
- \* バイオプラスチック・燃料の新規供給源

# 開発スケジュール



- 年間50万トンのCO<sub>2</sub>固定を実現：ネガティブエミッション目標値の3%程度に貢献
- 年間21万トンの有機物生産を実現：国内バイオプラ・燃料生産の10%程度に貢献

# 研究開発項目・実施体制

## ■PJ達成目標（2022年度）：

気相反応リアクターを使用し微生物による電気利用CO<sub>2</sub>固定の実証可能性を示す

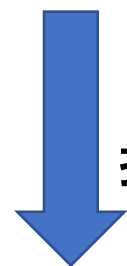
### プロジェクト統括・合成微生物創出（産総研・加藤）

#### ①ゲノム操作技術の開発

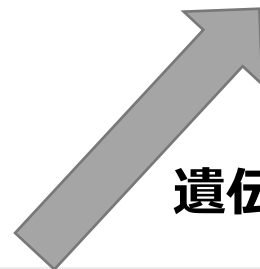
- ・長鎖DNA導入技術
- ・プロモーターライブラリ

#### ②-4. 電力利用CO<sub>2</sub>固定微生物の作製

電気利用菌、低濃度CO<sub>2</sub>固定菌、  
電気利用・低濃度CO<sub>2</sub>固定菌など随時作製



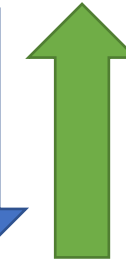
ゲノム操作  
技術を提供



遺伝子情報を提供



菌株提供



リアクター技術を  
提供

### 要素技術開発

- ②-1. 電気利用能の付与  
(東工大・福居)
- ②-2. CO<sub>2</sub>取込み・濃縮能の付与  
(神戸大・蘆田)
- ②-3. CO<sub>2</sub>固定能の強化  
(東工大・藤島)

### 気相リアクター開発

- ③-1. 気相反応バイオリアクターの構築  
(名古屋大・堀)
- ③-2. バイオ-ガス拡散電極の構築  
(大阪大・中西)

# 1. ゲノム操作技術の開発（産総研）

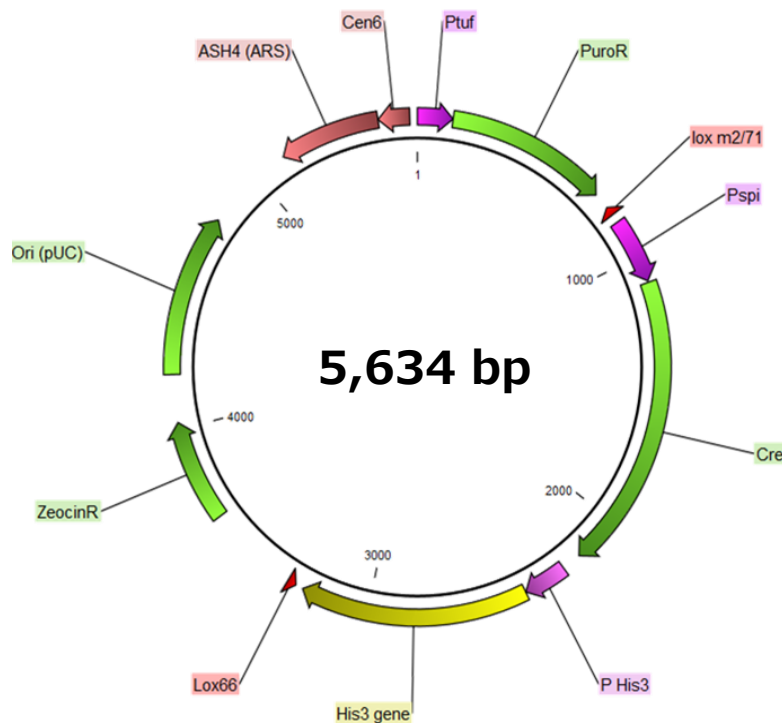
■ 本PJでの目標： *Ralstonia* の長鎖DNA導入技術を含むゲノム操作基盤技術の構築

\* *Ralstonia* への長鎖DNA導入技術の開発

目的：多数の遺伝子群をゲノムに導入可能な遺伝子操作方法の開発

成果：

- ・酵母人工染色体をベースに長鎖DNA導入ベクターをデザイン
- ・ゲノムへの遺伝子導入法（CreLoxP法）を *Ralstonia* に初めて導入

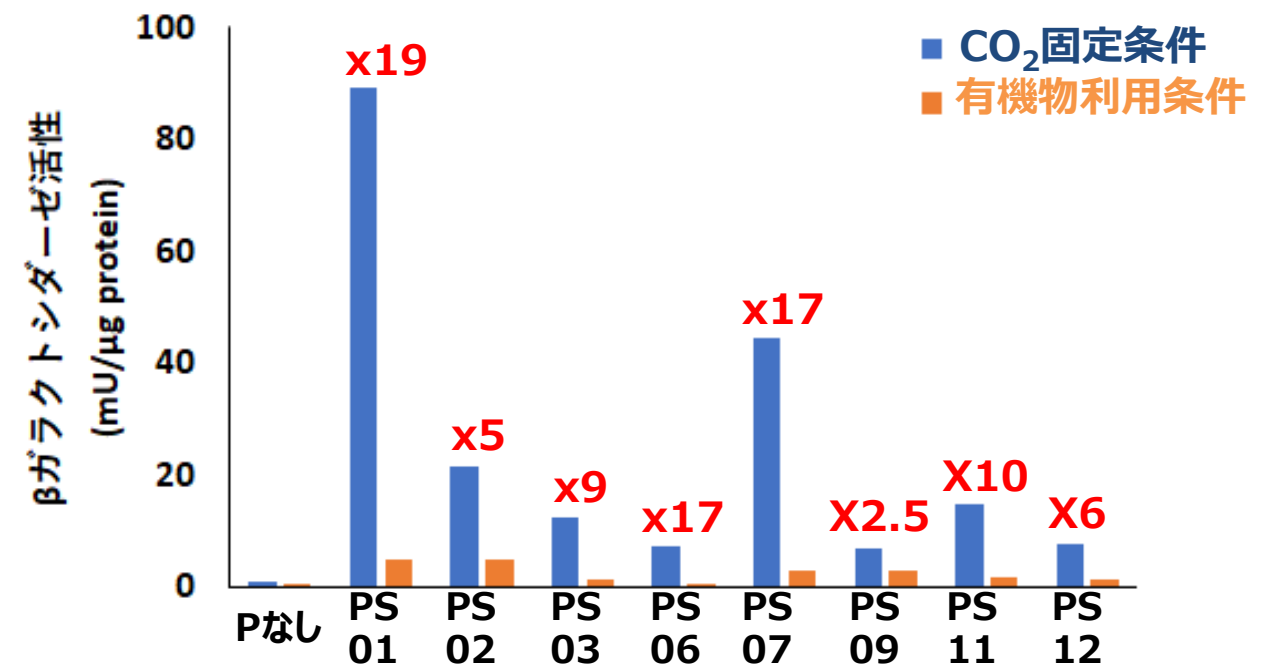


\* プロモーターライブラリ開発

目的：導入した遺伝子を適切量発現させるのに必要なプロモーターを複数獲得

成果：

- ・CO<sub>2</sub>固定条件での網羅的遺伝子発現解析
- ・比色法による簡便なプロモーター活性評価系を構築
- ・CO<sub>2</sub>固定条件下で特異的に機能するプロモーターを8種、恒常発現プロモーター3種を特定



# 2-1. 電気利用能の付与 (東工大)

■ 本PJでの目標 : *Ralstonia*に異種微生物の電子伝達パスを導入し電流消費活性を付与する

\* *Acidithiobacillus*由来電子伝達パスの導入

目的 : *Ralstonia*に異種微生物の電子伝達パス遺伝子を導入

成果 :

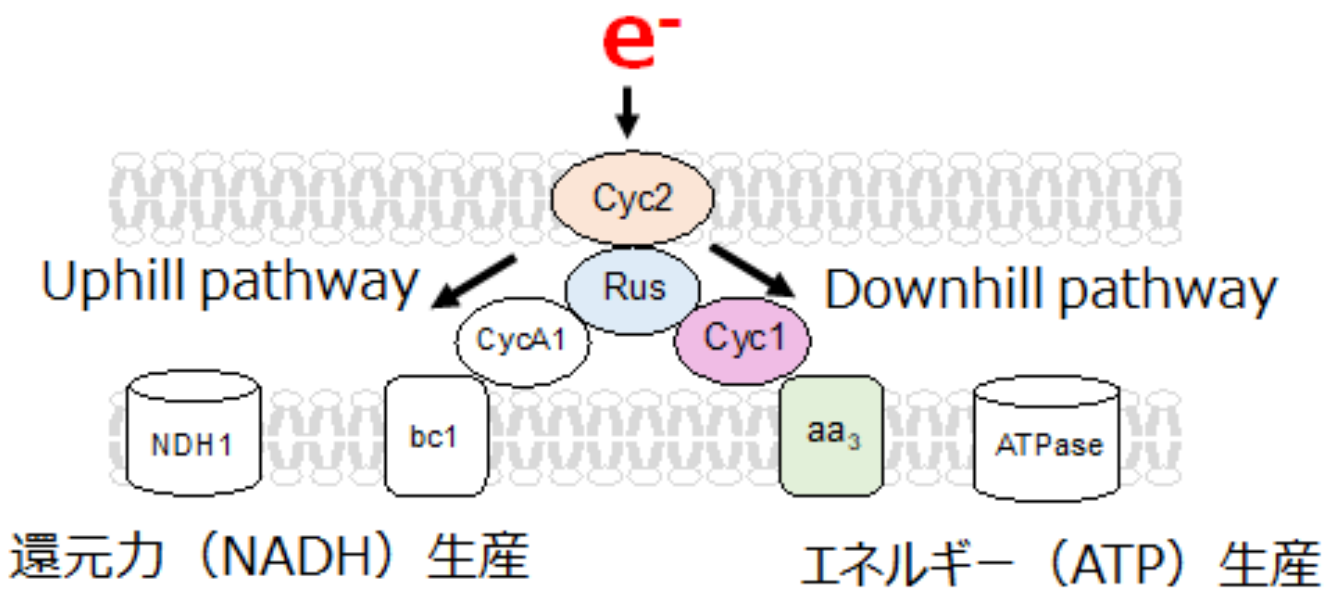
- ・ Uphill経路のみ、Up/Downhill経路双方を導入した株を作製
- ・ 導入した遺伝子群の発現をRNAレベル、タンパクレベルで確認

\* 導入株の電気化学測定

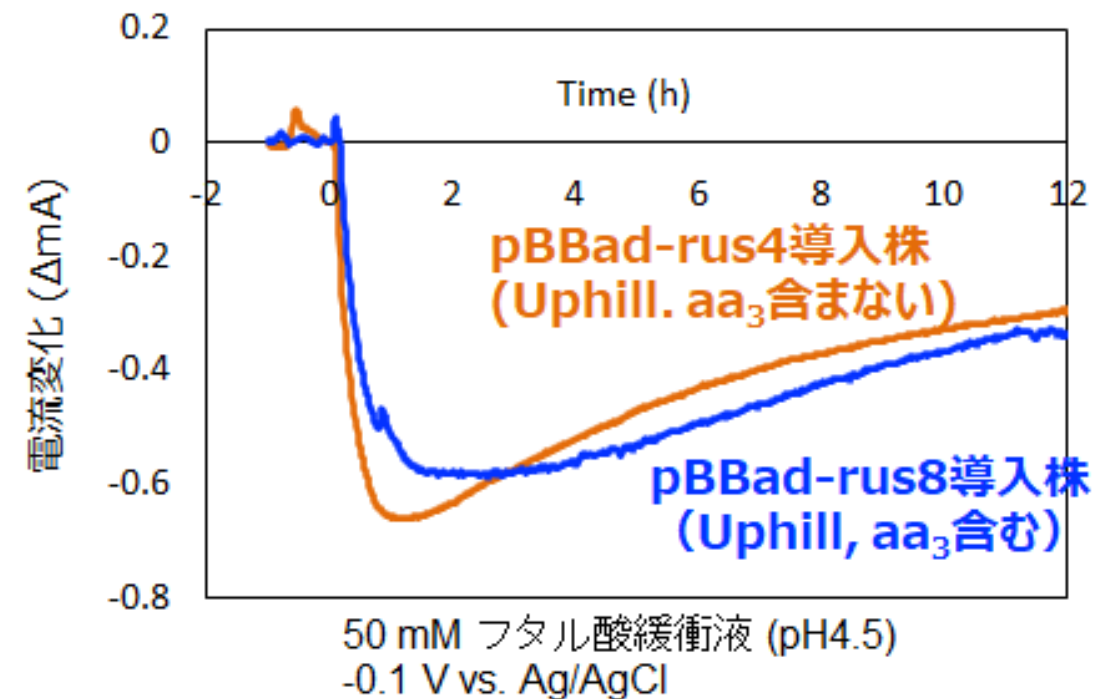
目的 : 電子伝達パス遺伝子の導入により電気利用能が付与されているかを確認

成果 :

- ・ Uphill経路導入株で明確な電流消費活性を確認
- ・ Up/Downhill経路導入株の電流消費活性、CO<sub>2</sub>固定活性を現在確認中



*Acidithiobacillus*の電子伝達パス





# 2-2. CO<sub>2</sub>取込み・濃縮能の付与（神戸大）

■ 本PJでの目標：*Ralstonia*に異種生物のCO<sub>2</sub>固定酵素・濃縮系を導入し活性を付与する

\* シアノバクテリア由来CO<sub>2</sub>濃縮系の導入

目的：シアノバクテリア等が持つCO<sub>2</sub>濃縮系を *Ralstonia*で発現させ能力を付与する

成果：

- ・シアノバクテリアの炭酸塩輸送タンパクを *Ralstonia*で発現させることに成功
- ・導入株のCO<sub>2</sub>取込み活性を確認中

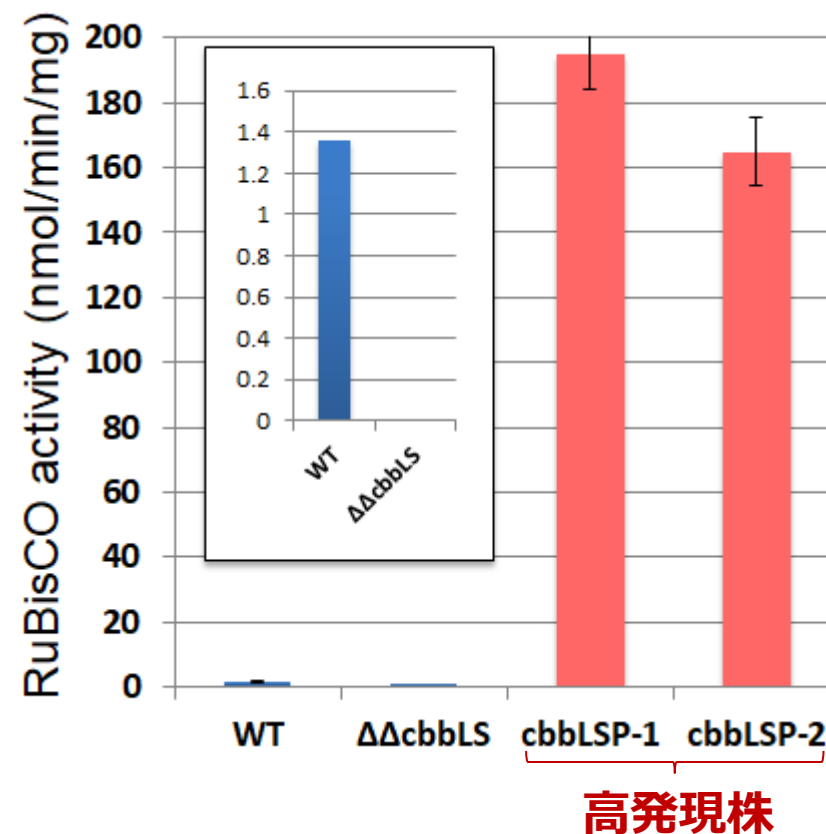
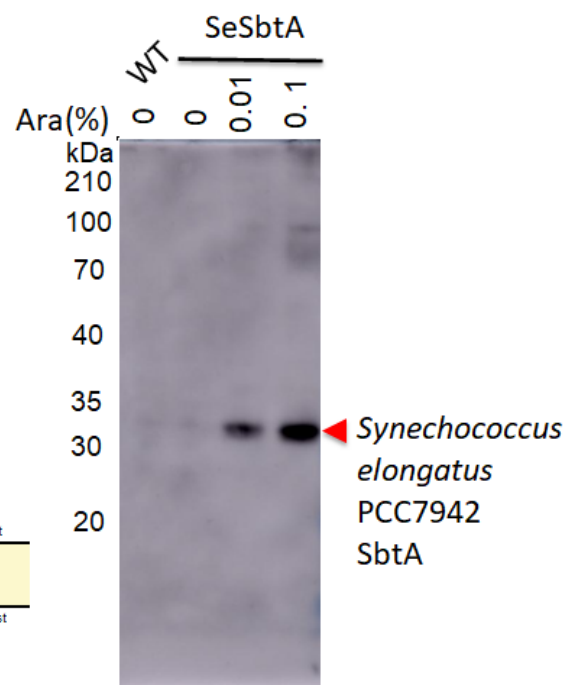
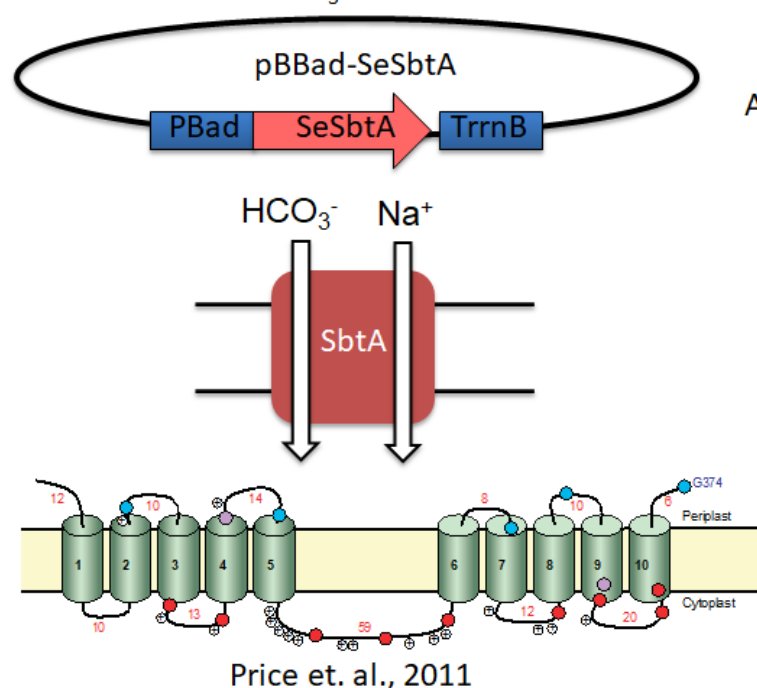
\* CO<sub>2</sub>固定酵素の発現強化

目的：内在性・外来性のCO<sub>2</sub>固定酵素（RuBisCO）の高発現によりCO<sub>2</sub>固定能を強化する

成果：

- ・内在性のRuBisCOの高発現によりCO<sub>2</sub>固定活性、生育が向上することを実証
- ・より活性の高い外来性RuBisCOも検討中

シアノバクテリア HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>トランスポーター発現系





# 3. 気相反応リアクターの構築（名大・阪大） 1

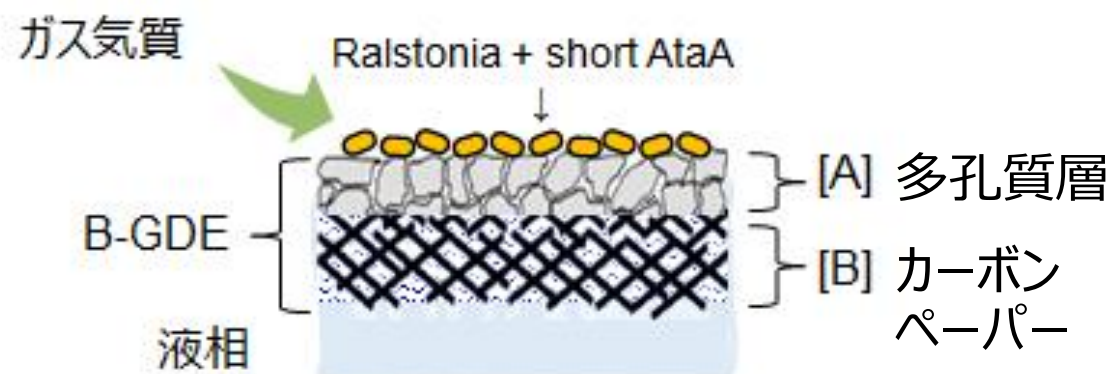
■ 本PJでの目標：気相反応バイオプロセスを確立し*Ralstonia*のCO<sub>2</sub>固定速度を向上させる

## \* バイオ・ガス拡散電極の開発

目的：*Ralstonia*に電気・気体（CO<sub>2</sub>）・液体（栄養分）を供給可能な電極を開発

成果：

- ・燃料電池などに使用されているガス拡散電極をベースとしバイオ反応向けに改良
- ・多孔質層の樹脂・炭素粉末混合比の調整などにより適度なガス・液体拡散性を実現



[A]: Applied microporous layer (MPL) (Ketjen Black (KB) + PVDF)  
[B]: Backing paper (Toray carbon paper + 5% PTFE)

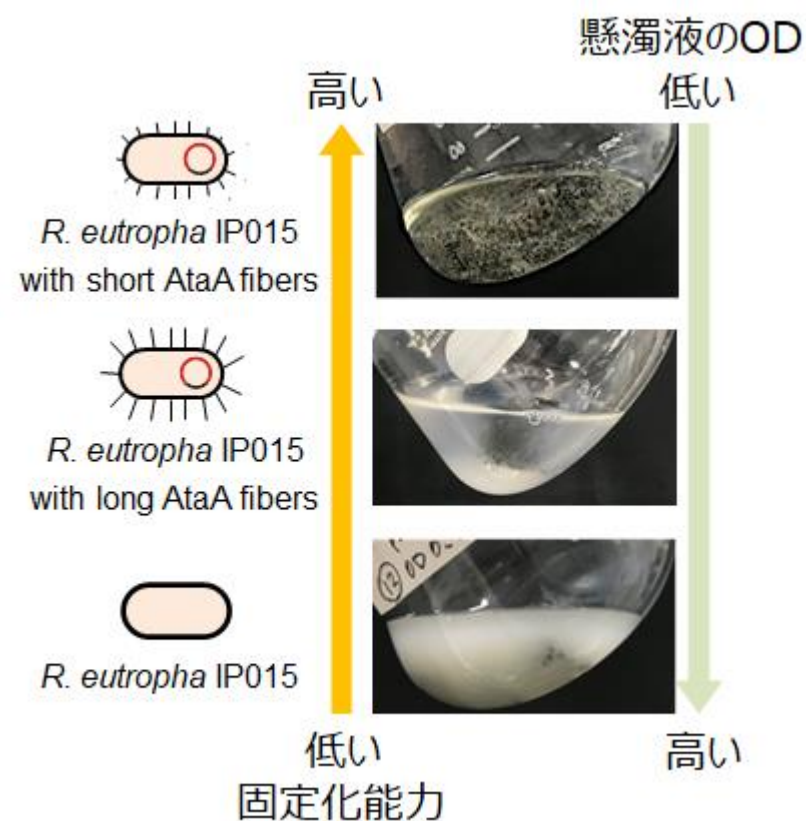
バイオガス拡散電極 Gas diffusion bio-electrode (B-GDE)

## \* *Ralstonia*の電極付着性向上

目的：接着性繊維の導入により*Ralstonia*の電極付着性を向上させる

成果：

- ・*Acinetobacter*由来の接着性繊維タンパク (Ata) の導入により*Ralstonia*の固体付着性を大幅に向上



# 3. 気相反応リアクターの構築（名大・阪大）2

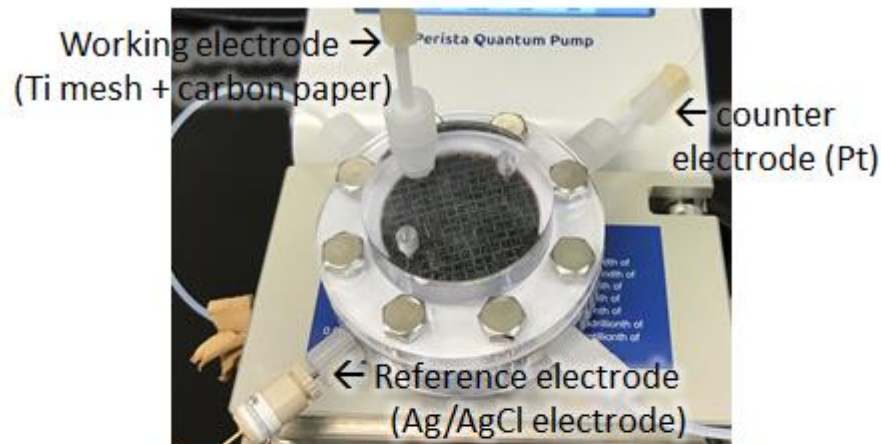
■ 本PJでの目標：気相反応バイオプロセスを確立し*Ralstonia*のCO<sub>2</sub>固定速度を向上させる

## \* 気相反応リアクターの開発

目的：*Ralstonia*に電気・気体（CO<sub>2</sub>）・液体（栄養分）を供給可能なリアクターを開発

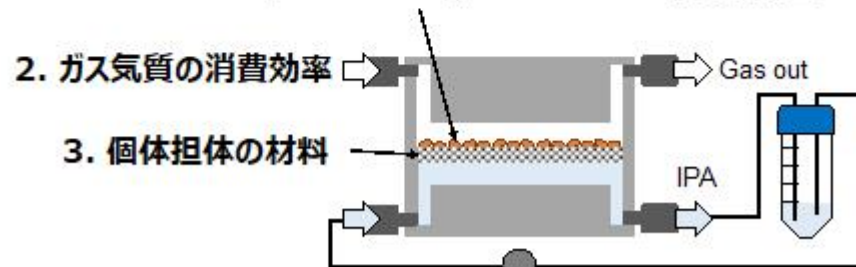
成果：

- ・目的とする反応が可能リアクターをデザインし作製した



三電極システムを導入した気相バイオリアクター

1. *R. eutropha* IP015/short AtaA の固定化量



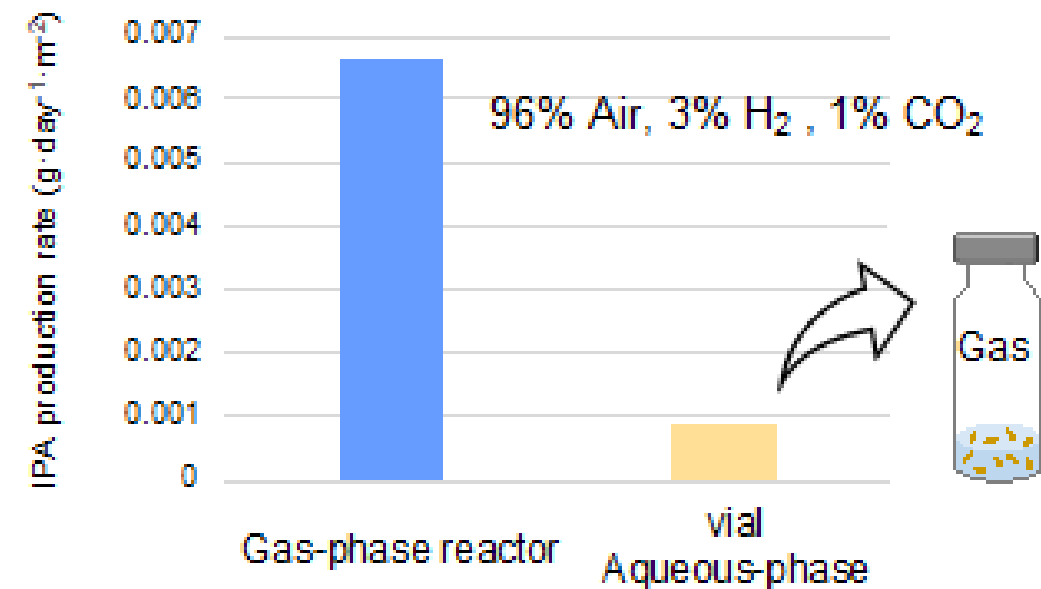
気相バイオリアクターにおける各因子の最適化

## \* 気相反応リアクターの優位性の実証

目的：気相反応リアクターにより*Ralstonia*のCO<sub>2</sub>固定速度を向上可能であることを実証

成果：

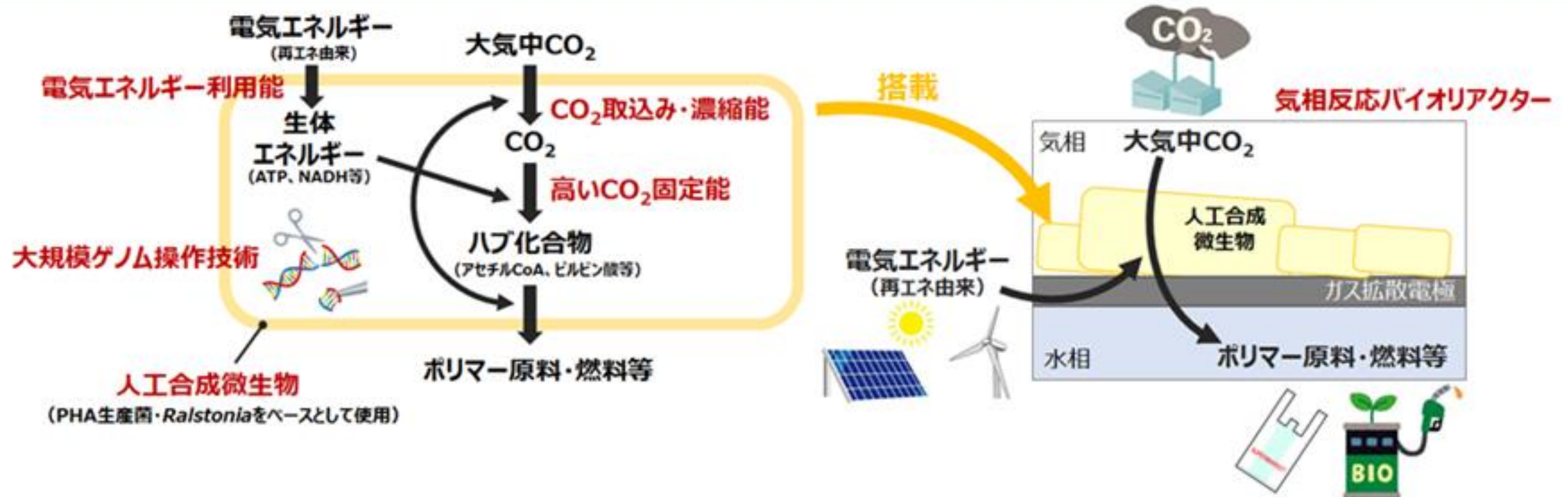
- ・水素とCO<sub>2</sub>からのイソプロパノール生産速度が液相反応と比較し大幅に向上可能であることが示された



気相反応と液相反応におけるIPA合成の比較

# 最終目標達成に向けて

- PJ達成目標（2022年度）：「電気利用CO<sub>2</sub>固定微生物の人工合成」と「気相反応リアクターの構築」を実現し本技術の実証可能性を明確に示すこと



電気エネルギー利用能、CO<sub>2</sub>取込み・濃縮能、高いCO<sub>2</sub>固定能を併せ持つスーパー微生物を合成生物学により創出

微生物に電気エネルギーとCO<sub>2</sub>を効果的に供給可能な気相反応システムを構築