
人工光合成の技術動向

環境省 地球環境局 地球温暖化対策課 地球温暖化対策事業室

1. 人工光合成技術概要	(P. 3-10)
2. 戦略概要	(P. 11-17)
3. 民間主導プロジェクト概要	(P. 18-30)
4. 政府主導プロジェクト概要	(P. 31-71)
5. 論文概要	(P. 72-83)

1.人工光合成技術概要

半導体光触媒系の概要

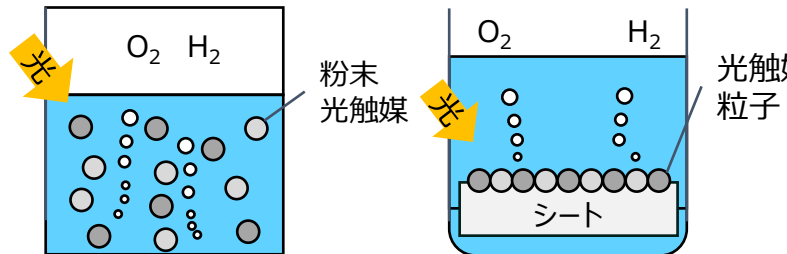
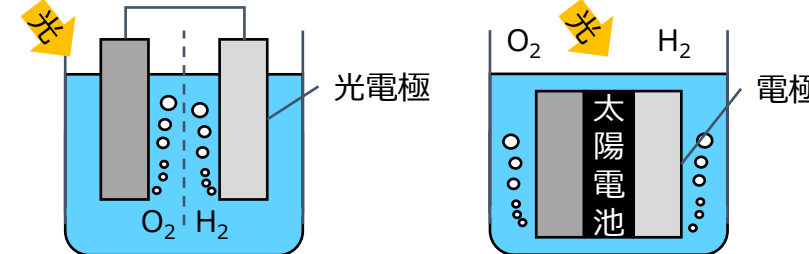
[] : 政府主導の取組より記載



- 本技術は、光触媒を活用する方法と光電極を活用する2パターンに大別される

半導体光触媒系

半導体光電極系

原理	半導体光触媒系	半導体光電極系
	① 水の中に粉末光触媒を分散させる方法 ② 粉末光触媒をシート状等に設置する方法  粉末光触媒 光触媒粒子 シート ■ 半導体特性をもつ粒子に太陽光を照射することで光励起※¹した電子を、反応サイト（助触媒）へ電荷移動させ、生成反応を促進させる※² ■ ① 拡散された粒子状の光触媒を用いる方式 ■ ② 粒子状の光触媒をシート上等へ配置する方式	③ 光電極を利用する方法 ④ 太陽電池の表裏に触媒を貼り付ける方法  光電極 太陽電池 電極 ■ 太陽光を照射することで生成される電気エネルギーにより、生成反応を促進させる ■ ③ 太陽光を半導体特性をもつ電極へ直接照射することで、光励起した電子を、反応サイトへ電荷移動させ、生成反応を促進させる方式 ■ ④ 太陽光を太陽電池へ照射することで生成される電気エネルギーを生成反応に用いる方式
主な生成物	$\text{H}_2\text{O} + (\text{CO}_2) \Rightarrow \text{水素} / (\text{メタノール等のCO}_2\text{由来の有価物})$	
太陽光変換効率 (%)	■ <1	■ ~20

※1：太陽光により、電子が高いエネルギー状態になる現象（同エネルギーは生成反応に用いられる）

※2：酸素発生反応と水素発生反応が、別々の光触媒粒子で促進される型と、同じ光触媒で促進される型が存在する

微生物系の概要

[-] : 政府主導の取組より記載



- 本技術は、微生物単体にて光合成を行うパターンと、光触媒や光電極とのハイブリッドのパターンに大別される

光合成微生物系

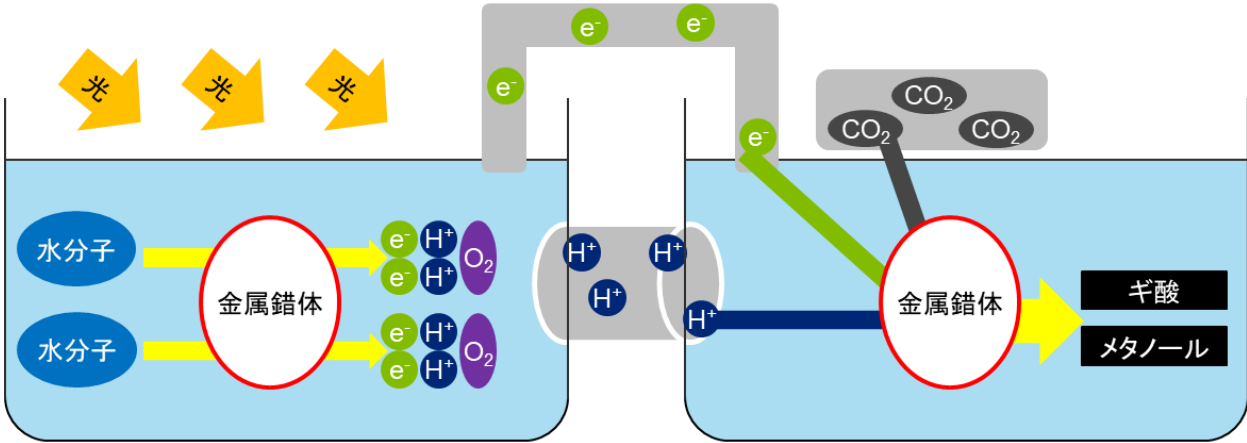
ハイブリッド触媒系

原理	光合成を行う微生物を利用し、目的の生成物を生成する方法	光触媒又は電極等と、生体触媒（微生物）を併用する方法
	■ 光合成を行う微生物（例：シアノバクテリア等）をゲノム編集により操作することで、微生物が持つ光合成代謝経路により生成反応を促進する	■ 光触媒由来の電気エネルギーや再生電力（電極）により、生体触媒（微生物）が生成反応を促進する
主な生成物	H ₂ O + (CO ₂) => 水素 / (メタノール等のCO ₂ 由来の有価物)	
生成量	■ エチレン : 7.2g/日	■ 水素 : 約900mol/h

金属錯体触媒の概要

- 本技術は、高い光励起能力をもつ錯体（金属イオンと分子の複合体）より得た電気エネルギーを用いて、目的生成物の生成を行うことが可能である

金属錯体触媒系

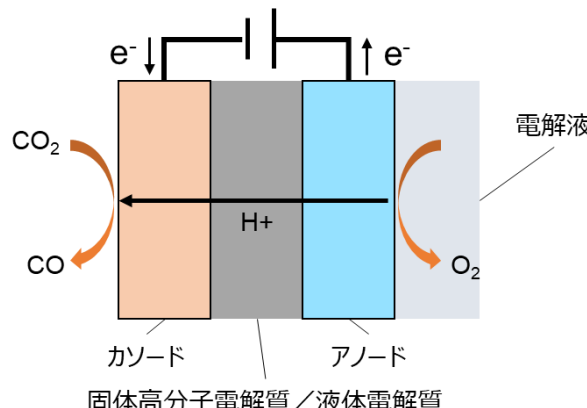
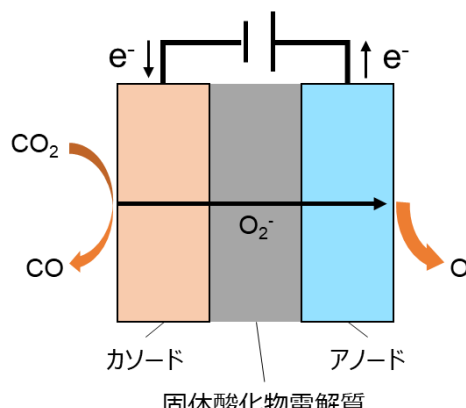
原理	 ① 水の電気分解により電子、水素イオン、酸素を生成 ② 電子と水素イオンが別ルートで移動 ③ 電子、水素イオン、CO₂により高エネルギー物質を生成
	■ 太陽光を直接金属錯体触媒へ照射することで、水を電子・水素イオン・酸素へ分解し、水素又はCO₂由来の有価物（電子・水素イオン・CO₂から生成）を生成する ■ 金属錯体触媒は、光励起反応により高いエネルギー状態の電子を生成可能であるが、光励起寿命が短い
主な生成物	$H_2O + (CO_2) \Rightarrow \text{水素} / (\text{メタノール等のCO}_2\text{由来の有価物})$
性能	詳細な情報が確認できなかったため記載なし

CO₂電解概要

[] : 政府主導の取組より記載



CO₂電解は還元反応や電解質により、3パターンに分類される

固体高分子型（PEEC）		液体電解質型	固体酸化物型（SOEC）
原理			
	■ アノード側では水が水素イオン（H⁺）へ還元され、水素イオンが固体高分子電解質または液体電解質を通過 ■ カソード側ではCO₂がCO／ギ酸／エチレン等へ変換する		■ カソード側で、CO₂がCO／ギ酸／エチレン等と酸素イオン（O₂⁻）に還元され、酸素イオンが固体酸化電解質を通過 ■ アノード側では酸化により、酸素が発生する
主な生成物		CO ₂ + H ₂ O => CO／ギ酸／エチレン／エタノール／メタノール 等	
性能	ファラデー効率※1 (%)	■ CO：約96 ■ ギ酸塩※2：≥90 ■ エチレン：約51	■ CO：約60 ■ ギ酸：90
	電流密度 (mA/cm ²)	■ CO：約200 ■ ギ酸塩：約125 ■ エチレン：約250	■ CO：約10 ■ ギ酸：約100
詳細な情報が確認できなかったため記載なし			

※1 : 全電流に対する目的生成物のうち生成反応に寄与した部分の電流割合

※2 : ギ酸イオン (HCOO⁻) を含む塩

共電解概要

[-] : 政府主導の取組より記載



■ 共電解は還元反応により、PEEC型とSOEC型に大別される

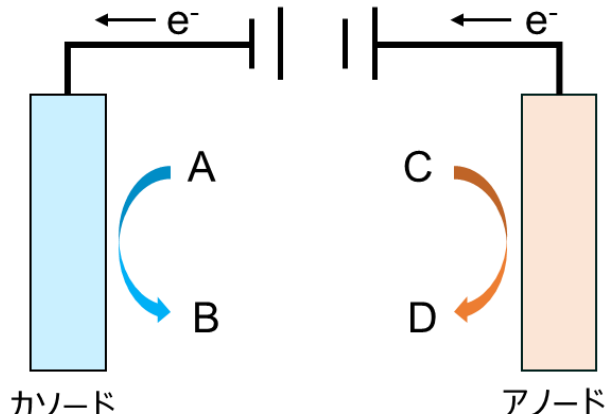
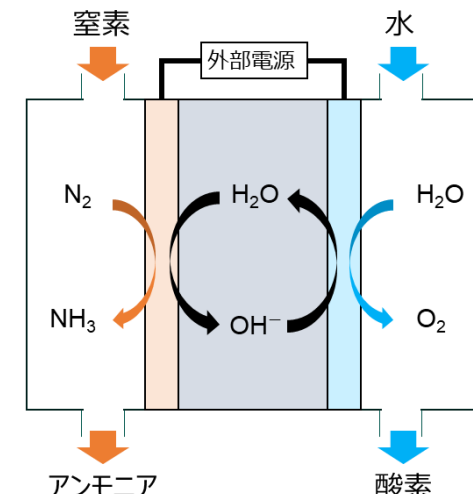
		固体高分子型 (PEEC)	固体酸化物型 (SOEC)
原理		電解液 カソード アノード 固体高分子電解質	カソード アノード 固体酸化物電解質
		■ アノード側では水が水素イオン (H⁺) へ還元され、水素イオンが固体高分子電解質を通過 ■ カソード側ではCO₂及び水が、CO及び水素へ変換する	■ カソード側で、CO₂及び水がCO、水素と酸素イオン (O₂⁻) に還元され、酸素イオンが固体酸化電解質を通過 ■ アノード側では酸化により、酸素が発生する
主な生成物		CO ₂ + H ₂ O => 合成ガス	
性能	電解効率 (%)	■ 44	■ 85
	電流密度 (mA/cm ²)	詳細な情報が確認できなかったため記載なし	■ >600

その他電解概要

■ CO₂電解または共電解に分類されない電解技術は大きく有機物電解と無機物電解に分かれる

有機物電解（インプット及びアウトプットともに有機物）

無機物電解（インプット及びアウトプットともに無機物）

原理	 カソード アノード	 窒素 水 外部電源 N₂ H₂O NH₃ OH⁻ アンモニア 酸素
	■ カソード側では、<u>基質となる有機化合物が酸化され水素イオン（H⁺）が発生</u>し、イオン交換膜を通過 ■ アノード側では、<u>通過した水素イオンが有機化合物を還元</u>することで目的物を生成する ■ また、特徴として<u>酸化剤や還元剤を使わずに</u>化学反応を開始することができる	■ アノード側にて、<u>水が酸素と水素イオン（H⁺）に酸化</u>された後、水素イオンが交換膜を通過 ■ カソード側では、<u>通過した水素イオンが原料となる無機物を目的生成物へ変換</u>する
プロセス	<例：有機ハイドライド電解合成法> トルエン + H₂O =>メチルシクロヘキサン（水素含有率の高い物資）	<例：窒素電解> N₂ + H₂O => アンモニア
性能	詳細な情報が確認できなかったため記載なし	

P.4

出所1：三菱ケミカル株式会社「事業戦略ビジョン（実施プロジェクト名：人工光合成型化学原料製造事業化開発）」（令和4年）

出所2：ARPCHEM「人工光合成プロセス技術開発」（令和4年）

出所3：新エネルギー・産業技術総合開発機構「世界初、人工光合成により100m²規模でソーラー水素を製造する実証試験に成功」（令和3年）

出所4：岡山大学「カーボンナノチューブ光触媒を利用した人工光合成技術」（令和2年）

出所5：Rice University “Highly efficient solar water-splitting using 3D/2D hydrophobic perovskites with corrosion resistant barriers”（2023年）

P.5

出所1：九州大学「日本一スイス 国際共同研究「再生可能エネルギー媒体としての水素研究」2020 年度 年次報告書」

出所2：名城大学「組換えシアノバクテリアによるCO₂を資源とする高効率なバイオエチレン創製」

P.7

出所1：出光興産株式会社「CO₂電解による合成ガス製造の技術動向調査」（令和4年）

出所2：株式会社東芝「再生可能エネルギーを用いた電解によるCO₂の資源化」（令和3年）

出所3：Montana State University “Development of a scalable, robust electrocatalytic technology for conversion of CO₂ to formate salt via graded microstructures and development of a bioengineered C₁ pathway for subsequent upconversion to ethylene glycol”（2023年）

出所4：Lawrence Livermore National Laboratory “Rational Design Platform for Transition Metal Catalyzed Electrochemical Synthesis”（2019年）

出所5：Kohta Nomoto..etc “Highly selective formate formation via bicarbonate conversions”（2024年）

出所6：Head of the R&D Department at Aragon Hydrogen Foundation “Air Carbon Recycling for Aviation Fuel Technology”（2022年）

P.8

出所1：出光興産株式会社「CO₂電解による合成ガス製造の技術動向調査」（令和4年）

出所2：株式会社東芝「CO₂資源化の実現に向けた共電解技術」（令和4年）

出所3：産業技術総合研究所「SOECを用いた液体合成燃料製造プロセスの研究開発」（令和5年）

2.戦略概要

調査対象の戦略一覧



■ 「半導体光触媒系・微生物系」と「CO₂電解・共電解」に関する以下の戦略等を調査した

国	組織	戦略名・プログラム名	年月	対象技術
 米国	DOE	Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Program Plan	2024年5月	半導体光触媒系・微生物系
	California Energy Commission	Roadmap for the Deployment and Buildout of Renewable Hydrogen Production Plants in California	2020年6月	半導体光触媒系・微生物系
	NREL	The 2022 solar fuels roadmap	2022年6月	半導体光触媒系・微生物系 CO ₂ 電解・共電解
	DOE	DOE Technical Targets for Hydrogen Production from Photoelectrochemical Water Splitting	2023年8月	半導体光触媒系・微生物系 CO ₂ 電解・共電解
	DOE	Industrial Decarbonization Roadmap	2022年4月	CO ₂ 電解・共電解
	DOE	SAF Grand Challenge Roadmap	2022年9月	CO ₂ 電解・共電解
	DOE	Sustainable Aviation Fuel Grand Challenge Roadmap Implementation Framework	2024年11月	CO ₂ 電解・共電解
	DOE	Carbon Conversion Multi-Year Program Plan	2024年12月	CO ₂ 電解・共電解
 EU	European Commission	SOLAR FUELS IN THE EUROPEAN UNION	2024年1月	CO ₂ 電解・共電解
	European Commission	Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU	2024年6月	CO ₂ 電解・共電解
 日本	資源エネルギー庁	グリーン成長戦略	2021年6月	半導体光触媒系・微生物系
	経済産業省	カーボンリサイクルロードマップ	2023年6月	半導体光触媒系・微生物系 CO ₂ 電解・共電解

※ 各国の水素戦略に関しては、人工光合成技術に関する記載が少ないため調査対象外とした

半導体光触媒系・微生物系に関する戦略サマリ

- 水素を生成する「半導体光触媒系」においては、米国が具体的な目標を掲げている
- 各国において、太陽光変換効率の向上が直近の課題として挙げられている

現状

米国にて、積極的な
取組が見られる

【光触媒】

- 太陽光変換効率：<1%
- 生涯水素生成量：約100g/m²
- 水素生成速度：0.1g/h

【光電極】

- 太陽光変換効率：最高20%程度
- 生涯水素生成量：約1000g/m²
- 水素生成速度：最高0.1-0.2g/h

European Commissionに
より定義されているTRL（9
段階）を使用

【光触媒】

- TRL：5

【光電極】

- 太陽光変換効率：10-15%程度
- TRL：4

【微生物】

- TRL：4

目標

最終目標※1

【光触媒】

- 太陽光変換効率：10%
- 水素生成速度：2.9g/h（m²あたり）

【光電極】

- 太陽光変換効率：25%
- 水素生成速度：7.2g/h（m²あたり）

2030年目標

【光触媒】

- TRL：7-8

【光電極】

- 太陽光変換効率：22%
- TRL：7-8

【微生物】

- TRL：5

2030年目標

【光触媒】

- 太陽光変換効率：10%

課題

【光触媒】

- 太陽光の吸収率の向上
- 水分解反応の量子収率向上（電荷移動の高効率化）
- 選択性の高い触媒の探索

【光電極】

- 上記と同様の課題
- 半導体部の劣化防止

■ 太陽光変換効率の向上

- 高い技術知見をもつ技術者の育成や連携

【光触媒】

- 太陽光変換効率の向上
- 反応速度の向上
- 生成物の分離の最適化
- 触媒の耐久性向上
- 生成コストの低減
- 実用化が可能なプラントのシステム設計

主な出口方針



化学品（水素を原料とする物質）



製鉄（水素燃料）



交通機関・輸送（水素燃料）



液体燃料（合成燃料等）



製油（原油製造）



製鉄（水素燃料）



交通機関・輸送（水素燃料）



燃料（合成燃料、アンモニア等）



化学品（プラスチック等）



製鉄（水素燃料）



交通機関・輸送（水素燃料）



液体燃料（合成燃料等）

CO₂電解・共電解に関する戦略サマリ

- 「電解系」においては、各国が変換効率向上を目標や課題に掲げており、そのなかで米国に関しては多種多様な出口を検討している

現状	目標	課題	主な出口方針
 【CO₂電解】 ■ 変換効率 ➢ ファラデー効率：CO、ギ酸、エチレンにて高いファラデー効率を達成 ➢ 電流密度：>100mA/cm² ➢ 過電圧：<1.7V ■ 耐久性：触媒・電極の劣化が見られる 米国にて、積極的な取り組みが見られたため、後述にて詳細に記載	最終目標※1 【CO₂電解】 ■ 変換効率：60%以上（全生成物） ■ 耐久性：長時間安定的に作動 ■ 規模：同様の性能をもつ商業用システム	【CO₂電解】 ■ C₁分子（メタノール、メタン）や高価値なC₂₊分子の形成を制御する要因を把握 ■ 低い過電圧にて高選択生成 ■ スケールアップに伴った耐久性の向上	化学品（溶媒、洗剤等） 燃料（ジェット燃料等） 素材（ポリマー、カーボン素材等） 農産業・飲食（肥料等）
 【CO₂電解】 ■ TRL：4（CO、ギ酸） ■ TRL：3（C₂） ■ TRL：2（C_{3~4}） European Commissionにより定義されているTRL（9段階）を使用	2030年目標 【CO₂電解】 ■ TRL：7-8（全生成物）	【CO₂電解】 ■ CO、ギ酸を生成する電解システムのスケールアップ ■ C₂炭素化合物の生成における安定性の向上 ■ C₃以上の変換効率の向上	化学品※2 燃料（ジェット燃料等） 素材（ポリマー、カーボン素材等）
 【CO₂電解・共電解】 ■ 変換効率は現状低い	2030年目標 【CO₂電解・共電解】 ■ 変換効率：50%（CO・水素） ■ 電流密度：500mA/cm²（CO・水素） ■ サイズ：100MW（CO・水素） 2050年目標 【CO₂電解・共電解】 ■ 電解効率：50%（CO・水素） ■ 電流密度：1000mA/cm²（CO・水素） ■ CO₂処理速度：11t/年/m²（CO・水素）	【CO₂電解】 ■ C₂₊のファラデー効率向上 ■ 触媒電極の単位容積あたりの電流密度向上 ■ 実用化が可能なプラントのシステム設計 【共電解】 ■ 再エネ電源負荷変動対応 ■ 装置規模の拡大	化学品（オレフィン、ウレタン等） 燃料（合成燃料、SAF燃料、ガス燃料）

※1：年度の具体的な記載なし

※2：具体的な記載なし

NREL : The 2022 solar fuels roadmap (米国)



環境省

- 本戦略では、人工光合成の「技術面」と「経済面」に関する具体的な最終目標が掲げられている

現状

目標

技術面

- STH※1 : <1%
- 電流密度 : <1 mA/cm²
- 生涯水素生成量 : 約100g/m²
- 水素生成速度 : 0.1g/h
- 耐久性 : 1000時間の駆動

- 太陽光吸収率の向上
- 水分解反応の量子収率向上
- 選択性の高い触媒の探索
- 水素の分離膜の最適化 等

技術面

- STH : 10%
- 水素生成速度 : 2.9g/h (m²あたり)
- 光触媒耐用年数 : 5年

経済面

- 光触媒 製造コスト : \$ 300/kg
- その他部品製造コスト : \$ 5/m² (シート)
- 年間の光触媒交換費 : \$ 4000/年 (t/日-H₂あたり)
- 水素生成コスト : \$ 2.10/kg

技術面

- STH : 最高20%程度
- 電流密度 : 10-100 mA/cm²
- 生涯水素生成量※2 : 最高約1000g/m²
- 水素生成速度※2 : 最高0.1-0.2g/h
- 耐久性 : 長時間駆動による電極の劣化

- 半電極内の電荷移動の高効率化
- 水素生成触媒の活性化
- 半導体部の劣化防止
- 光電極の透明性向上 等

技術面

- STH : 25%
- 水素生成速度 : 7.2g/h (m²あたり)
- 光電極耐用年数 : 10年

経済面

- 光電極 製造コスト : \$ 100/m²
- その他部品※3製造コスト : \$ 63/m²
- 年間の光電極交換費 : \$ 14000/年 (t/日-H₂あたり)
- 水素生成コスト : \$ 2.10/kg

技術面

- ファラデー効率 :
 - CO、ギ酸、エチレンでは高い数値を達成
 - C₂以上のファラデー効率は現状低い
- 電流密度 : >100mA/cm²
- 過電圧 : <1.7V
- 耐久性 : 長時間駆動による触媒・電極の劣化

- C-C結合を促進させる触媒の表面設計を確立
- 電解質及び物質移動の最適化
- 商業規模へのスケールアップに向けた触媒等の耐久性向上 等

技術面

- 変換効率 : 60%以上 (全生成物)
- ファラデー効率 : C₁分子 (メタノール、メタン) や高価なC₂₊分子を高選択に生成可能
- 過電圧 : 低い過電圧にて高選択に生成可能である
- 耐久性 : 長時間安定的に作動
- 規模 : 同様の性能を持つ商業用システム

(参考) EUにおけるTRLの定義



■ 前述のEUにおけるTRLは9段階あり、以下に具体的な定義を示す

レベル	定義	環境
9	技術が完全に運用可能であることが証明済みであり、加えて商業化に向けた完全なサプライチェーンが確立され、システムがフルレート生産のために最適化されている	—
8	最終形態のシステムが完成並びに成熟しており、機能が実際の導入環境において証明され、安定的な製造プロセスやトレーニングおよびメンテナンスのドキュメントの確立及び、対象市場の義務・認証・標準へも準拠されている	実際の導入環境
7	フルスケールのシステムが実際の導入環境にて実証されており、関連する環境条件・認可問題・地域/国家基準への適合性の保証や上流および下流技術の統合検証・確認、製造アプローチの定義が完了している	
6	実際に近い環境での実証にてプロセス性能が期待に一致しており、他の関連技術との相互運用性の実証や製造アプローチの定義、環境・規制・経済的問題への対処がされている	
5	大規模なプロトタイプがシステム全体に統合され、実際に近い導入環境にて堅牢性や安定した性能を示しており、他の関連パラメータ（スケールアップ・規制・経済問題等）が定義され、定性的に評価されている	実際に近い環境
4	縮小スケールのプロトタイプが開発、並びにシステム全体と統合（実験室レベル）され、数値解析による検証及び、主要なパフォーマンスが測定可能である	
3	実験室レベルのプロトタイプによる概念実証／数値モデルの実現や実験室レベルでの要素技術のテストが実施されており、主要パラメータが把握されている	実験室
2	技術に関する知識の向上や実現可能性の初期評価、初期数値及び定性的な技術間の相互作用が把握されており、プロトタイプ構築のアプローチや実験室レベルにおけるテストの初期技術仕様が定義されている	
1	新規概念や想定される障壁、適用方法を認識しており、基礎理論や文献を基に、原材料と技術の把握及び既存技術に対する潜在的な利点の評価が行われている	

P.13

- 出所1 : U.S. Department of Energy “DOE Technical Targets for Hydrogen Production from Photoelectrochemical Water Splitting” (2022年)
- 出所2 : Gideon Segev.. etc “The 2022 solar fuels roadmap” (2022年)
- 出所3 : U.S. Department of Energy “Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Program Plan” (2024年)
- 出所4 : Joint Research Centre “Solar Fuels in the European Union” (2023年)
- 出所5 : 経済産業省「【別冊 1】技術ロードマップ（カーボンリサイクルロードマップ資料）」（令和5年）
- 出所6 : 経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（令和3年）

P.14

- 出所1 : Gideon Segev.. etc “The 2022 solar fuels roadmap” (2022年)
- 出所2 : U.S. Department of Energy “Industrial Decarbonization Roadmap” (2022年)
- 出所3 : Joint Research Centre “Solar Fuels in the European Union” (2023年)
- 出所4 : European Commission “Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU” (2024年)
- 出所5 : 経済産業省「【別冊 1】技術ロードマップ（カーボンリサイクルロードマップ資料）」（令和5年）
- 出所6 : 経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（令和3年）

P.15

- 出所1 : U.S. Department of Energy “DOE Technical Targets for Hydrogen Production from Photoelectrochemical Water Splitting”（令和7年8月確認）
- 出所2 : Gideon Segev.. etc “The 2022 solar fuels roadmap” (2022年)

P.16

- 出所1 : European Commission “Technology Readiness Level: Guidance Principles for Renewable Energy Technologies” (2017年)

3.民間主導プロジェクト概要

①事例一覧

民間企業プロジェクトの調査結果概要（国内）

- 日本国内においては、民間企業が光触媒を中心に技術開発を進めており、飯田グループホールディングスの技術は大阪・関西万博2025で展示されている

国	プレイヤー	技術	インプット	生成物	取組状況
日本	飯田グループホールディングス	光触媒	太陽光、水、CO ₂	ギ酸（ギ酸から水素を生成し、家庭での給電や給湯に利用することを想定）	■ 2017年時点で、沖縄県の宮古島での実証実験住宅「IGパーフェクトエコハウス」を建築中 ■ 2025年時点で、ギ酸へのエネルギー変換効率が世界最高水準の4%を達成 ■ 同社の人工光合成技術を大阪・関西万博2025で展示
	住友金属鉱山	光触媒	太陽光、水、CO ₂	CO（プラスチック原料）等	■ 2023年時点で、研究開発段階にあり、従来の触媒（銀ナノ粒子助触媒を担持したタンタル酸亜鉛光触媒）に比べて約30倍の効率でCO₂をCOに変換し、CO濃度を270ppmから8,000ppm超へと大幅に向上させる成果を達成
	パナソニックホールディングス	光触媒	太陽光、水	水素（生成した水素を貯蔵し、家庭用純水素燃料電池を使用して電気と温水の供給を想定）	■ 2023年時点で、光触媒技術を用いた水素生成装置の超小型実験機での水素生成を実証済 ■ 今後は、結晶構造の制御方法を確立し、装置を大型化することで、2030年までに試作機の完成を目指している
	三井化学	光触媒＋微生物	太陽光、水、窒素	水素、アンモニア（肥料、化学工業用原料や水素の運搬媒体として利用）	■ 2023年時点で技術は研究段階にあり、アンモニア生成速度は、微生物の窒素生成プロセスと比較し、約81倍向上
	NTT	光電極	太陽光、水、CO ₂	水素、CO、ギ酸	■ 2023年時点で実験室環境での技術の検証中 ■ 350時間連続で稼働のうえ、水溶液中に溶解させたCO₂を還元する従来の手法に比べ10倍以上の変換効率を達成

民間企業プロジェクトの調査結果概要（海外1／2）



- 海外では、電解技術の取組が多いうえ、スタートアップ企業の技術は実証段階や実用化段階のものが多い

国	プレイヤー	技術	インプット	生成物	取組状況
豪州	Sparc Hydrogen	光触媒	太陽光、水	水素	■ <u>2025年中頃にパイロットプラントの試運転</u> を予定
米国	Sun Hydrogen	光電極	太陽光、水	水素	■ 2024年12月にプロトタイプモジュール（1m ² ）を用いた水素生成の実証試験を完了 ■ <u>2025年5月時点でパイロットプラント（25m²以上）設計を開始</u>
	Newlight Technologies	微生物	CO ₂ 、水、電力	PHB（ポリヒドロキシ酪酸：プラスチック等の原料）	■ 2019年に商業規模のPHB生成プラントを構築し、運用開始
オランダ	Avantium	CO ₂ 電解	CO ₂ 、電力	シュウ酸（プラスチック原料）やCO等	■ <u>2024年上半期時点</u> で生分解性ポリマー（プラスチック原料）の <u>パイロットプラント建設準備段階</u> へと進んでおり、計画が進行中
ドイツ	Siemens Energy	CO ₂ 電解	CO ₂ 、水、電力	エチレン、CO、酢酸等	■ 研究開発段階で、以下が各物質のファラデー効率 ➢ <u>エチレン：54%（300mA/cm²）</u> ➢ <u>CO：22%（300mA/cm²）</u> ➢ <u>酢酸：<1%</u>

民間企業プロジェクトの調査結果概要（海外2／2）



■ 米国のTwelve Benefit社は2025年に電解由来のSAF製造を実用化させる予定である

国	プレイヤー	技術	インプット	生成物	取組状況
米国	RenewCO ₂	CO ₂ 電解	CO ₂ 、水、電力	メチルグリオキサール（化学薬品原料）等	（左記のような物質を生成可能といった記載に留まっている）
	Twelve Benefit	CO ₂ 電解	CO ₂ 、水、電力	CO （最終生成物は、SAF等の液体燃料等）	■ 合成燃料製造プラントを建設中であり、 2025年に稼働予定
	OxEon Energy	共電解	CO ₂ 、水、電力	合成ガス （最終生成物は液体燃料）	■ 1日3リットルの燃料生成能力を持つシステムの設計・構築が予定されており、試運転は2024年に予定
	FuelCell Energy	共電解	CO ₂ 、水、電力	合成ガス （合成ディーゼル燃料としての利用を想定）	■ 合成ガスを生成する小型装置で実証する試験を実施予定
ドイツ	Sunfire	共電解	CO ₂ 、水、電力	合成ガス （合成燃料、液体燃料ワックスなどの化学製品を製造に利用を想定）	■ 2023年時点で工場試験を完了しており、同年に実証プラントでの運用が予定されている ■ 85%以上の電気効率 で生成物のエネルギーに変換可能

P.19

出所1：飯田グループホールディングス株式会社 HP（令和7年8月確認）

出所2：飯田グループホールディングス株式会社「巨大ジオラマと最先端の映像美で体感する“誰もがあたり前に、健康に長く、安全・快適に暮らせる未来社会”」（令和7年8月確認）

出所3：ニュースイッチ「脱炭素化へCO₂を有効活用する「人工光合成」。研究開発の現在地」（令和3年）

出所4：大阪公立大学「飯田グループホールディングス株式会社と大阪公立大学の共同研究「人工光合成技術」において、世界最高水準の蟻酸生成効率を実現-新エネルギー技術による脱炭素社会へ貢献-」（令和7年）

出所5：JSTORIES「住宅用エネルギーを人工光合成で」（令和4年）

出所6：大阪公立大学「人工光合成・研究開発ロードマップ」

出所7：大阪市立大学、飯田グループホールディングス「世界初！人工光合成技術による“IG パーフェクトエコハウス”開発に着手」宮古島に“人工光合成ハウス”を建設」（平成29年）

出所8：京都大学、住友金属鉱山株式会社「従来比約 30 倍の変換効率を示す二酸化炭素還元光触媒を共同開発」（令和7年）

出所9：日本経済新聞「住友金属鉱山、光触媒の新技术を開発 効率30倍」（令和7年）

出所10：Maintainable News「【Great News】CO₂を資源に変える。従来比30倍の変換効率を実現した次世代光触媒の衝撃！」（令和7年）

出所11：Kio Kawata..etc “Enhanced photocatalytic conversion of CO₂ by H₂O over Ag@Cr-cocatalyst-modified ZnTa₂O₆”（2024年）

出所12：ニュースイッチ「パナソニックHDが研究開始、電気使わずに水素生成する装置の中身」（令和5年）

出所13：NPO法人島原カーボンニュートラル推進協議会「パナソニック、家庭でグリーン水素発電 35年にも実用化目指す」（令和5年）

出所14：三井化学株式会社「三井化学カーボンニュートラルセンター、光バイオ触媒で空気と水からアンモニアと水素の同時合成に成功」（令和5年）

出所15：Nuttavut Kosem..etc “Photobiocatalytic conversion of solar energy to NH₃ from N₂ and H₂O under ambient condition”（2024年）

出所16：三井化学株式会社「三井化学グループ、製造業分野で重要な高純度リンマテリアルの循環利用技術開発に着手」（令和6年）

出所17：NTTグループ「半導体光触媒を用いた人工光合成において世界最長の連続動作時間を実現」（令和5年）

出所18：MONOist「NTTが350時間の連続動作が可能な人工光合成デバイスを開発」（令和5年）

出所19：NTTグループ「半導体光触媒を用いた人工光合成において世界最長の連続動作時間を実現～樹木が年間で固定する炭素量を上回る炭素固定量を350時間連続動作で達成～」（令和5年）

出所20：NTTR&D HP「人工光合成技術」（令和7年8月確認）

P.20

- 出所1 : Talib M. Rahman..etc “Photocatalyst sheet performance under intense UV irradiation and increased temperatures” (2025年)
- 出所2 : Fuel Cells Works “Sparc Hydrogen to Commission Green Hydrogen Pilot Plant in South Australia This July” (2025年)
- 出所3 : Sparc Hydrogen HP “Photocatalytic Water Splitting Technology”
- 出所4 : Sun Hydrogen HP “SunHydrogen Completes 1m² Green Hydrogen Panel Demonstration” (2024年)
- 出所5 : Sun Hydrogen HP “SunHydrogen Well-Positioned to Scale Technology From Lab-Scale to a 1m² Green Hydrogen Panel” (2023年)
- 出所6 : Sun Hydrogen HP “SunHydrogen Achieves Highest Known Efficiency for a Large-Area Hydrogen Module” (2025年)
- 出所7 : Sun Hydrogen HP “SunHydrogen to Deploy more than 30m² Hydrogen Production Pilot System in Collaboration with UT Austin” (2025年)
- 出所8 : Sun Hydrogen HP “CLEAN HYDROGEN FROM WATER & SUNLIGHT” (令和7年8月確認)
- 出所9 : Newlight Technologies HP (令和7年8月確認)
- 出所10 : Avantium HP (令和7年8月確認)
- 出所11 : Baran Sahin..etc “Fine-tuned combination of cell and electrode designs unlocks month-long stable low temperature Cu-based CO₂ electrolysis” (2024年)

P.21

- 出所1 : RenewCO₂ HP (令和7年8月確認)
- 出所2 : Twelve Benefit HP (令和7年8月確認)
- 出所3 : 三井物産株式会社 ニュースリリース「合成燃料の事業会社 米Twelve社への出資参画」(令和7年)
- 出所4 : OxEon Energy “Field Testing of a DAC to Fuels Prototype” (令和7年8月確認)
- 出所5 : Hydrogen Fuel News “The Rise of eFuels and FuelCell Energy’s FCEL New Innovations” (2024年)
- 出所6 : Sunfire HP “Progress Within Kopernikus P2X Research Project: High-Temperature Electrolyzer Successfully Commissioned” (2023年)
- 出所7 : “Breakthrough for Power-to-X: Sunfire puts first co-electrolysis into operation and starts scaling” (2019年)

3.民間主導プロジェクト概要

②個別事例

民間企業事例（1/5） Twelve Benefit社 ～CO₂電解～



- Twelve Benefit社は、独自のCO₂電解技術を活用して、SAF等の液体燃料の商業化を2025年に予定している

実施事業者	Twelve Benefit Corporation
国	米国
取組概要	■ 同社保有のCO₂電解技術を用いて、COを生成している ■ さらに合成ガスをベースにSAFや海洋燃料、ディーゼル燃料等の液体燃料の商業化に向けて開発を行っている ■ 同社はCO₂還元する独自の膜電極アセンブリ（MEA）の開発に成功している ■ 三井物産を始め、商船三井、日本政策投資銀行、TGVP（Toppan Global Venture Partners, Inc.）、Advantage Partners（アドバンテッジパートナーズ）といった日本企業も同社へ出資している
成果見込み	■ 同社製造によるSAFは、従来の航空燃料と比較して最大90%のCO₂排出削減を実現予定（船用燃料及びディーゼルも同様）のうえ、従来のバイオ燃料より水の使用量は1/1,000、土地面積も1/30となる
今後	■ ワシントン州に位置する初号プラント（生産規模最大5バレル/日）を建設中 ■ 同プラントは2025年中の稼働を予定しており、SAFを含む燃料等が生成される予定 ■ 合成燃料由来のSAFの商用化は世界初となる

民間企業事例（2/5） Sparc Hydrogen社 ～光触媒～

- Sparc Hydrogen社は、集光器と光触媒リアクターを組み合わせたモジュールを設置したパイロットプラントの建設を2025年の3月より開始しており、同年の7月に試運転を開始する予定である
- 試運転では、TRLを5から6に引き上げることを目指す

実施事業者	Sparc Hydrogen
国	オーストラリア
取組技術	光触媒（水素）
主な 出口方針	太陽光と水から、同技術を用いて生成される水素を、容易に電化できない 重工業（鉄鋼、セメント、化学産業等）において、再生可能エネルギー又は低CO₂排出燃料として利用 することを想定している
取組概要	■ 同社は、太陽光を集光し光強度を向上させることが可能な集光パネルと、光触媒リアクターを組み合わせたモジュールの開発に取り組む ■ 同社のモジュールでは、集光パネルにて太陽光の光強度を増幅させるとともに、余分な熱を再利用することにより、以下のメリットなどが見込める ➢ 太陽光変換効率の向上（水素生成速度の増加） ➢ 光触媒使用量の低減
成果・見込み	■ 従来、光強度の向上に比例して量子収率の低下が見られていたが、研究では、温度を120℃まで上昇させることで、100×10¹⁹光子/cm²/h（太陽光の120倍）の光強度にて以下を達成している ➢ 量子収率20%以上 ➢ 190μmol/cm²/hの水素生成速度 ■ 同社は、光触媒モジュールの特許を取得しており、2025年3月より南オーストラリア州ローズワシーにおいて、パイロットプラントの建設を開始している
今後	■ 2025年7月中に建設中のパイロットプラントの試運転を開始する予定である ■ 稼働開始後は、様々な光触媒リアクター設計と光触媒材料を実際の条件下で試験し、TRLを少なくとも5から6に上昇させることを目指す ■ また、ステークホルダーや資金提供団体へ同モジュールを紹介するとともに、各種機器のサプライヤーとの提携を進める予定である

民間企業事例（3/5） Sunfire社 ～共電解（固体酸化物型：SOEC）～

- Sunfire社は、共電解装置の開発に取り組んでおり、生成される合成ガスを用いて、合成燃料や化成品を製造することを目指している
- 2023年時には、150kW級（最大220kW）の共電解装置にて、85%の電解効率を達成した

実施事業者	Sunfire	同社は、以前よりSOEC型の水電解装置の開発に取り組んでおり、同技術の知見を活かしている
国	ドイツ	
取組技術	共電解（SOEC型）	
主な出口方針	電力、水、CO ₂ から、同技術を用いて生成される合成ガスを用いて、 燃料や化成品（例：ワックス） を製造することを想定している	
取組概要	■ 同社は、2019年9月よりBMBF（ドイツ連邦教育研究省）の資金提供を受けたプロジェクト「コペルニクスP2X-2」にて、水とCO ₂ から電力を用いて、 合成ガスを製造する共電解装置の開発 に取り組んでいる	
成果・見込み	■ 「コペルニクスP2X-2」における第1フェーズでは、10kW級の共電解装置にて、最大4Nm³/hの合成ガスの製造に成功した ■ 第2フェーズでの成果として、2023年に150kW級（最大220kW）の共電解装置の稼働に成功しており、電解効率85%を達成済みである ■ 上記の共電解装置は、プロジェクトパートナーであるカールスルーエ工科大学に納入され、FT合成設備等を含む全体システムと統合される予定である ➤ 今後は同システムにて、複数回の実証試験を経て、1日あたり約200Lの合成燃料の製造を目指している	
今後	■ 最終的に、20MW級の共電解装置から生成される合成ガスを用いて、 年間1,000万L（8,000t）程度の合成燃料 を製造することを目指す	

民間企業事例（4/5） Sun Hydrogen社 ～光電極～

- Sun Hydrogen社は、太陽光と水から水素を生成する光電極デバイスの開発に取り組んでおり、2024年には100cm²級の光電極デバイスにて太陽光変換効率10.8%を実証済みである
- 2025年現在は、1.92m²の光電極デバイスを16個組み合わせた、30m²級システムの設計を行っている

実施事業者	Sun Hydrogen
国	米国
取組技術	光電極（水素）
主な 出口方針	太陽光と水から、光電極デバイスを用いて生成される水素を、 <u>化石燃料に依存する産業（輸送、海運、データセンター、航空等）にて利用</u> するなどを想定している
取組概要	■ 同社は、積層する2つの半導体素材の両端に水素発生触媒と酸素発生触媒を接合した<u>ナノ粒子により構成される、光電極デバイスの開発に取り組む</u> ■ 上記の光電極デバイスの特徴として、<u>2つの半導体素材を配置した構成により、高い光電流密度及び光電圧の実現が可能</u>であることが挙げられる
成果・見込み	■ 2024年10月に、日本の本田技術研究所社が保有する研究施設において実証を実施済みであり、<u>100cm²光電極デバイスを用いて以下を達成済み</u>である ➢ <u>太陽光変換効率10.8%</u> ➢ <u>1.8V以上の光電圧</u> ➢ <u>単一の半導体において18mA/cm²の光電流密度</u> ■ 同年の12月には、<u>1m²光電極デバイスを用いた実証を完了</u>している ■ また2025年2月には、東京大学の堂免教授の研究室にて、<u>1,200cm²光電極デバイスを用いて太陽光変換効率9%を達成</u>した ■ 2025年現在は、<u>1.92m²光電極デバイスを16個組み合わせた30m²級システム</u>へのスケールアップに向けて取り組んでおり、システムの<u>設計段階</u>にある
今後	■ 将来的には、フットボール球場（約数千m²）を埋める程度のデバイスにて、<u>年間約40tの水素を製造可能な規模へのスケールアップを目指す</u>

民間企業事例（5/5） 飯田グループホールディングス社 ～光触媒～

- 飯田グループホールディングス社は、太陽光、水、CO₂から光触媒デバイスを用いて生成したギ酸を、水素に変換し、最終的に家庭において電力や熱として利用することを想定している
- 2025年には、ギ酸の変換効率^{※2}は装置の稼働エネルギーを含めて世界最高水準の4%を達成した

実施事業者	飯田グループホールディングス
国	日本
取組技術	光触媒（ギ酸）
主な 出口方針	太陽光、水、CO ₂ から、同技術を用いて生成されるギ酸を、水素へ変換し、最終的には電力や熱として家庭で利用することを想定している
取組概要	■ 同社は、大阪公立大学「人工光合成研究センター」と共同で、バイオロゲン^{※1}等の化合物で構成された触媒と、酸化チタンを組み合わせた光触媒、及び光触媒デバイスの開発に取り組んでいる ■ 2015年頃には、宮古島市の来間島にて上記光触媒デバイスを活用した「IGパーフェクトエコハウス」の建設を進めており、その中で太陽光の強度が気象条件・時間に大きく左右されるという課題が挙げられた ■ 近年では上記課題を受け、太陽光の強度に合わせて供給するCO₂や水の量を制御することで、常に濃度の高いギ酸が得られる光触媒デバイスの開発に取り組んでいた
成果・見込み	■ 2025年には、大阪公立大学杉本キャンパス内にて実施した実証実験において、装置の稼働に必要なエネルギーも含めたエネルギー変換効率^{※2}（ギ酸）4%（世界最高水準）を達成済みである ■ また同社は、上記の光触媒デバイスを組み込んだ「IGパーフェクトエコハウス」を大阪・関西万博2025にて出展している
今後	■ 同社は、2030年までに光触媒デバイスの実用化を目指している ■ 2050年には、同デバイスを搭載した「IGパーフェクトエコハウス」が含まれる、「未来の都市」の実現を目指し取り組む

※1：有機化合物の一種であり、電子を受け取る機能などを持つ

※2：ギ酸のエネルギー量／太陽光エネルギー量＋装置の稼働に必要なエネルギー量

P.25

出所1 : Twelve Benefit HP (令和7年8月確認)

出所2 : 三井物産株式会社 ニュースリリース「合成燃料の事業会社 米Twelve社への出資参画」(令和7年)

P.26

出所1 : Talib M. Rahman..etc “Photocatalyst sheet performance under intense UV irradiation and increased temperatures” (2025年)

出所2 : Fuel Cells Works “Sparc Hydrogen to Commission Green Hydrogen Pilot Plant in South Australia This July” (2025年)

出所3 : Sparc Hydrogen社 HP “Photocatalytic Water Splitting Technology” (令和7年8月確認)

P.27

出所1 : Sunfire HP “Progress Within Kopernikus P2X Research Project: High-Temperature Electrolyzer Successfully Commissioned” (2023年)

出所2 : “Breakthrough for Power-to-X: Sunfire puts first co-electrolysis into operation and starts scaling” (2019年)

P.28

出所1 : Sun Hydrogen HP “SunHydrogen Completes 1m² Green Hydrogen Panel Demonstration” (2024年)

出所2 : Sun Hydrogen HP “SunHydrogen Well-Positioned to Scale Technology From Lab-Scale to a 1m² Green Hydrogen Panel” (2023年)

出所3 : Sun Hydrogen HP “SunHydrogen Achieves Highest Known Efficiency for a Large-Area Hydrogen Module” (2025年)

出所4 : Sun Hydrogen HP “SunHydrogen to Deploy more than 30m² Hydrogen Production Pilot System in Collaboration with UT Austin” (2025年)

出所5 : Sun Hydrogen HP “CLEAN HYDROGEN FROM WATER & SUNLIGHT” (令和7年8月確認)

P.29

出所1 : 大阪公立大学「飯田グループホールディングス株式会社と大阪公立大学の共同研究「人工光合成技術」において、世界最高水準の蟻酸生成効率を実現-新エネルギー技術による脱炭素社会へ貢献-」(令和7年)

出所2 : NHK「未来の住宅はエネルギーを自給自足？」(令和6年)

出所3 : 日本経済新聞「人工光合成 住宅の電力作る挑戦」(平成29年)

4.政府主導プロジェクト概要

①事例一覧

光電極系の事例一覧（国内・海外）

- 光電極系では、太陽光変換効率約20%を達成済の事例は存在するが、その光電極セルは最大1cm²程度と小型に限られる

	プレイヤー	取組内容	目的（事業課題）	成果	
				性能	規模
国内	東北大学	太陽光と水から水素を生成するナノ構造光電極セルの開発	セルの構成部品をナノ構造的に制御することによる、太陽光捕集率の向上	—	不明
	神戸大学	太陽光と水から水素を生成するメソ結晶構造光電極の開発	最適な光電極の素材・構造を用いることによる太陽光の捕集率向上及び、導電性の向上	水素・過酸化水素：ファラデー効率約90%、光電流密度約1mA/cm ²	不明
	サンティアゴ・デ・コンポステーラ大学（スペイン）	太陽光と水から水素を生成可能な水分解プロセスの開発	太陽光捕集率の高い素材を用いた光触媒の選定及び、電極への塗工性の向上	水素：太陽光変換効率11%以上	光電極セル：縦50cm程度
海外	スイス連邦工科大学（スイス）	太陽光と水からエチレンを生成可能な光電極及びセルの開発	太陽光の捕集率・量子収率が高い光電極の接合が可能な製造技術の高度化	エチレン：太陽光変換効率1%	光電極セル：50cm ² （生成量0.3μmol/cm・h）
	アルマ・マーテル・スタジオ・ボローニャ大学（イタリア）	太陽光・水・CO ₂ からCOと水素へ変換する光電極セルの開発	最適な構造・形態・組成を持つ光電極による、変換効率の向上	不明	不明
	CIRCC国際会議（イタリア）	太陽光・水・CO ₂ から複数の炭素を含む化合物を生成可能な光電極セルの開発	安価かつリサイクル可能な高活性素材を用いることによる、デバイスの高性能化及び低コスト化	不明	不明
	アイルランド国立大学（アイルランド）	太陽光と水から水素を生成する、商業利用に適した光電極システムの開発	セルの導電性・選択性の改善による変換効率の向上	水素：光捕集率最大78.4%（可視光＋紫外光）	光電極セル：25cm ²
	ICFO：光科学研究所（スペイン）	太陽光・水・CO ₂ からC ₂ 化合物へ直接変換が可能な光電極セルの開発	広い光波長帯を用いた生成選択性向上による変換効率の向上	不明	不明
	コメットグローバルイノベーション社（スペイン）	太陽光から得られた電気を用いてCO ₂ からエチレンを生成可能なセルの開発	特定の波長帯の光捕集率を向上させることによる変換効率の向上	エチレン：ファラデー効率85%、光電流密度200mA/cm ²	光電極セル：25cm ²
	ライス大学（米国）	太陽光と水から水素を生成するペロブスカイト構造光電極セルの開発	広い波長帯の光により生じる電気エネルギーの高導電性及び、セルの高耐久性の確立	水素：太陽光変換効率20.8%	光電極セル：1cm ²

光触媒系の事例一覧（国内・海外）

- 光触媒系では、ARPCHEMが625cm²のセル同士を組合わせて、100m²級シートを製造済みであるが、太陽光変換効率は1%未満と光電極系と比べると低い状況にある

	プレイヤー	取組内容	目的（事業課題）	成果	
				性能	規模
国内	岡山大学	太陽光と水から水素を生成可能な半導体性光触媒及び光触媒シートの開発	広い波長帯の光から高い電気エネルギーを抽出する素材を用いることによる変換効率の向上	水素：太陽光変換効率0.1%@1005nm、0.3%@680nm（1005nm帯の変換効率から推定）	触媒：生成量32μmol/h
	ARPCHEM	オレフィン製造に向けて、原料となる水素を生成可能な光触媒シートの開発	光触媒素材の最適化による水素還元反応の活性化	水素：太陽光変換効率0.76%	光触媒シート：625cm ²
	名古屋大学	太陽光により、水から水蒸気を生成し、水蒸気を用いて水素を還元する光触媒システムの開発	水蒸気と広い光波長帯を用いることによる水分解反応の促進	水素：太陽光変換効率0.13%	不明
海外	アコンディシオナリエント・タラセンズ協会（スペイン）	太陽光を用いて、水とCO ₂ からCOと水素を生成する光触媒及び、COと水素からエタノールを生成する光触媒の開発	光捕集率が高く、選択性の高い素材を持つセル（リアクター）による合成効率の向上	不明	光触媒反応器：14cm ²
	バレンシア工科大学（スペイン）	太陽光・水・CO ₂ からメタノールを生成する、光触媒・光触媒シートの開発	高い光捕集率を持つ素材と高い電気エネルギーの移動特性を持つ素材を組み合わせることによる変換効率の向上	不明（太陽光変換効率目標5%）	不明
	パリ市立工業物理化学高等専門大学（フランス）	太陽光と水から水素の生成が可能な水分解プロセスに資する光触媒の開発	貴金属を使用しない豊富な素材を用いた触媒の選定及び、触媒の持続性・活性向上	水素：太陽光変換効率2～5%程度（見込み）	光触媒シート：1m ² （開発中）
	シズィジー・プラズモニクス社（米国）	光（太陽光やLED光）と水から水素を生成する、安価な原料のみを使用した光触媒の開発	高い効率で光を捕集する部分と捕集したエネルギーを用いて高効率に水素を生成する部分を併せた触媒を用いることによる変換効率の向上	水素：太陽光変換効率15.6%（LED光140Wにて照射した場合）	光触媒反応器：2.3cm ² （生成量～18g/日）

微生物（光合成微生物＋ハイブリット）の事例一覧（国内・海外）

■ 微生物系では、複雑な有価物を直接生成可能であるが、生成量は少ない状況にある

プレイヤー	取組内容	目的（事業課題）	成果
九州大学	太陽光と水から水素を生成する半導体光触媒と微生物を併せたハイブリット光触媒の開発	太陽光から電気エネルギーへの変換効率が高い半導体と、電気エネルギーより高効率に水素を生成可能な微生物を用いることによる、水素への変換効率の向上	水素：生成量900mol/h
名城大学	植物由来のエチレン合成酵素を持ち、太陽光・水・CO ₂ からエチレンを生成可能なシアノバクテリアの開発	大量のCO ₂ を消費でき、連続培養が可能なシアノバクテリア株の確立	エチレン：7.2g/日
大阪大学	昼は太陽光と水から酸素発生型光合成を行い、夜に水素を生成可能な微生物の開発	微生物内における水素生成酵素及び代謝経路の最適化	不明
産業技術総合研究所	太陽光・水・工場等から発生するCO ₂ を用いて、有価化学品（バイオプラスチック等）へ変換可能な微細藻類の培養・育種	微細藻類のCO ₂ 固定化能力の向上及び、培養条件の最適化による微細藻類の高純度化・大量生産	不明
	再生可能エネルギー・水・COから有価化合物を生成可能な微生物の開発	微生物の、①電気エネルギーを消費する能力の発現、②CO ₂ 固定化能力の活性化、による生成効率の向上	エチルマロニルCoA：生成量70μM／3時間 ブチリルCoA：生成量10μM／3時間
東京工業大学	太陽光・水・CO ₂ から新規PHAブロック共重合体（プラスチック）の生成が可能な微生物の開発	海洋分解性が高いプラスチックの生産による環境負荷の低減	不明
神奈川大学	太陽光と下水から、水素やアンモニアを生成可能な微生物の開発	水素生産量が多いシアノバクテリア株の増殖速度向上	水素生成量：従来のMo型発現株微生物と比べ、約10～20%の生成量向上を達成
アイデナー R&D（スペイン）	太陽光・水・CO ₂ から有価化合物（メタン・酢酸）を生成可能な微生物の開発	太陽光の電気エネルギーへの変換効率及び、化合物を生成する代謝経路への電子伝達能力の向上による生成率向上	メタン：生成率0.22%
カリフォルニア大学（米国）	太陽光・水・CO ₂ から最終的にブタノールを生成可能な微生物の開発	①酢酸塩を生成する微生物と、②酢酸塩を用いてより多くの炭素を含む化合物の生成が可能な微生物を併せることによる、生成効率の向上	ブタノール：Knallgas細菌ベースの生産性0.31g/L/h アセトゲンベースの生産性0.16 g/L/h
ミネソタ大学	再生可能エネルギー・水・CO ₂ から有機酸塩を生成可能な、無細胞生体触媒の開発	微生物代謝の工学的な編集を減らし、かつ高い生成効率を確立することによるリスクの低減	不明

CO₂電解の事例一覧（国内）

- 国内では、CO・ギ酸・エチレンを主な生成物として取り組まれており、CO・ギ酸において一部の事業者がファラデー効率90%以上・電流密度200mA/cm²程度を達成している

プレイヤー	取組内容	目的（事業課題）	成果	
			電解性能	電解規模
豊田中央研究所	CO ₂ からCOまたはギ酸を生成するセルの開発	安価かつ高い選択性を持つ触媒による太陽光変換効率10%の達成	ギ酸：ファラデー効率94%	セル：10,000cm ²
	CO ₂ からCOまたはギ酸を生成するMEA型セルの開発	電極や膜が密着した構造（MEA）によるCO ₂ 濃度・電流密度の向上	CO：ファラデー効率96%、電流密度200mA/cm ²	セル：2cm ²
東芝	火力発電所等から排出されるCO ₂ から高効率にCOを生成する電解システムの開発	セルの高スループット化・大面積化・スタック化による年間CO ₂ 処理量1tの達成	CO：ファラデー効率94%、電流密度200mA/cm ²	スタック：100cm ² 級セル×4（最大CO ₂ 処理量1t／年）
カーボンフロンティア機構	CO ₂ からギ酸を生成するダイヤモンド電極及びセルの開発	ダイヤモンド電極の活性化によるファラデー効率の向上	ギ酸：ファラデー効率95%	セル：200cm ²
東芝ESS	CO ₂ からCOを生成する電解装置の大型化・量産化技術の開発	CO ₂ ガスの直接電解による反応速度向上及びスタック化・大面積化に係る製造技術の確立	CO：ファラデー効率94%、電流密度200mA/cm ²	スタック：100cm ² 級セル×4（2025年現在400cm ² 級セルスタックを実証中）
東京大学	大気中CO ₂ を回収し、有用基礎化学品へ大量資源化する電気化学プロセスの開発	触媒・電極構造の最適化によるファラデー効率・電流密度の向上	エチレン：ファラデー効率約40%、電流密度200mA/cm ²	セル：100cm ² スタック：6.25cm ² 級セル×4
東京都立大学	アルカリ性の水に溶けたCO ₂ をギ酸に変換する電極触媒の開発	水溶液中へ溶かすことによるCO ₂ 利用率の向上及び、触媒・電極の構造設計の最適化によるファラデー効率の向上	ギ酸：ファラデー効率90%、電流密度100mA/cm ²	セル：4mm ²

CO₂電解の事例一覧（海外1/2）

- 海外では、国内と同様にCO・ギ酸において高いファラデー効率と電流密度が達成されている
- OCOchem社は、性能（ファラデー効率）と規模（セルサイズ）の両方において、高い成果を上げている

プレイヤー	取組内容	目的（事業課題）	成果	
			電解性能	電解規模
モンタナ州立大学（米国）	CO ₂ からギ酸塩を生成可能な電解セル及び大型セルの開発	大型セルの構成（ガス拡散電極や触媒等）の最適化（疎水性コーティング等）によるファラデー効率及び電流密度の向上	ギ酸塩：ファラデー効率90%以上、電流密度125mA/cm ²	セル：100cm ²
ランザテック社	CO ₂ からCOを生成するAEM型ベースの電解セルを基盤とした電解システムの開発	セルの高圧環境の維持及びCO ₂ のクロスオーバーの低減による電解効率の向上	CO：ファラデー効率約95%以上、電流密度200mA/cm ²	セル：250cm ² 生成量：275mL/min
NREL： 国立再生可能エネルギー研究所（米国）	CO ₂ からCO（後続のエタノール発酵工程の原料）を生成可能な電解システムの開発	MEA型セルにおけるクロスオーバーの低減及び、電極の劣化防止による電解性能の維持	CO：ファラデー効率約95%以上、電流密度200mA/cm ²	セル：250cm ²
ジョンス・ホプキンス大学（米国）	CO ₂ から複数の炭素を含む有機化合物を生成可能な電解プロセスの開発	最適な触媒を用いることによる、複数の炭素を含む化合物の生成量・濃度の向上	ギ酸塩：CO ₂ 変換効率90%以上（ファラデー効率90%以上）、電流密度100mA/cm ² メタノール：CO ₂ 変換効率90%以上、電流密度100mA/cm ²	ギ酸：生成濃度100mM以上 メタノール：生成濃度100mM
OCOchem社（米国）	CO ₂ からギ酸を生成する電解プロセスの早期実用化に向けた大規模システムの開発	電解セルのスタック化・大面積化によるシステムのスケールアップ	ギ酸：ファラデー効率80%以上	セル：15,000cm ²

CO₂電解の事例一覧（海外2/2）

- 海外では、その他生成物（アルコールやメタン等）に関しても、研究レベルで取り組まれている

プレイヤー	取組内容	目的（事業課題）	成果	
			電解性能	電解規模
NWO研究所 （オランダ）	空气中で捕捉されたCO ₂ のプラズマ駆動分解によるCOの生成が可能なセルの開発	プラズマ電極素材の最適化及びスタック化による反応面積の増加	CO：ファラデー効率90%以上	セル：2cm ² （0.1kW）
ブラウンホーファー 研究機構（ドイツ）	CO ₂ と水から、エチレン及び過酸化水素の同時生成が可能なセルの開発	触媒・電極の素材や構造の最適化によるファラデー効率及び電流密度の向上	エチレン：電流密度150～200mA/cm ²	セル：300cm ²
デンマーク工科大学 （デンマーク）	低温・低圧でCO ₂ から高選択性かつ、高効率に有価物質を生成するセルの開発	目的生成物の生成に適した素材や構造をもつ触媒・電極等によるファラデー効率の向上	ファラデー効率39%（エチレン）、13%（CO）、1.2%（プロパン）、0.88%（メタン）、電流密度600mA/cm ²	セル：2.25cm ²
AVLリスト社 （オーストリア）	CO ₂ のC ₂ /C ₃ アルケンへの直接電気触媒還元が可能なセルの開発	ナノ構造触媒の素材・構造の最適化による還元効率の向上	不明	セル：300cm ²
アラゴン 水素財団 （スペイン）	CO ₂ から、液体燃料の原料となるCOの生成が可能な電解プロセスの開発	最適な素材を用いた触媒による選択性及び電解効率の向上	CO：ファラデー効率60%、電流密度約10mA/cm ²	不明
オークリッジ 国立研究所 （米国）	CO ₂ からCO、COからC ₂₊ （エタノール等）の一連生成が可能な触媒及び助触媒の開発	触媒と助触媒の素材・構造及び、触媒間の物理的な配置設計の最適化による選択性の向上	不明	不明
ローレンス・ リバモア国立研究所 （米国）	CO ₂ からエチレンの直接生成が可能な触媒及びセルの開発	触媒の素材やナノ構造の最適化による反応場の活性化及び選択性の向上	エチレン：ファラデー効率51%、電流密度250mA/cm ²	不明
Lectrolyst社 （米国）	CO ₂ から酢酸やエチレン等の高価値な化合物を生成する電解プロセスの開発	MEA型セルによるエネルギー効率の向上に加え、導電性・選択性の高い部材による電解効率の向上	不明	不明

共電解の事例一覧（国内・海外）

- 共電解では、東芝ESS社や産業技術総合研究所がSOEC型特有の高温動作により高い電流密度を達成しており、スタック化によるスケールアップに関しても実証済みである

プレイヤー	取組内容	目的（事業課題）	成果	
			電解性能	電解規模
東京工業大学	CO ₂ から合成ガスを直接生成可能なSOEC型共電解セルの開発	電極設計の最適化による電解効率の高効率化及び大面積化・スタック化に係る耐久性向上に向けた製造方法の検討	合成ガス：電流密度約250mA/cm ²	セル：100cm ²
東芝ESS	低炭素社会実現に向けたCO ₂ 有価物変換技術としての共電解（SOEC型）技術の開発	より高い触媒活性による電解の高効率化に加え、セルのスケールアップ及び耐久性の向上	合成ガス：電流密度600～800mA/cm ²	セル：25cm ² （見込み）
産業技術総合研究所	FT合成による液体合成燃料の一貫製造に向けた合成ガスを生成するSOEC共電解技術の開発	セルの大面積化・スタック化に伴った耐久性の向上による、目的生成物量の増加	合成ガス：電流密度600mA/cm ²	スタック：20セルx2～4 生成量：～1500L/h
大阪ガス	SOECを用いた合成メタンの一貫製造に向けた技術開発	セルスタックのスケールアップに伴った耐久性・信頼性の担保	不明	不明
東北大学	CO ₂ を化学品原料に直接変換する電気化学的CO ₂ 還元反応プロセス及びセルの開発	水溶液中のCO ₂ 拡散率の増加による電流密度の増加	合成ガス：電流密度400mA/cm ² （200℃、印加電圧約3.9V）	電極：25mm ²
CSIC：科学研究高等評議会（スペイン）	CO ₂ と水蒸気から航空仕様を満たす炭化水素の直接生成が可能な多機能触媒及び電解システムの開発	導電性・選択性の高い多機能触媒の選定及び、再エネ変動への追従性向上	メタン：生成率99%、電流密度約150mA/cm ² 以上	セル：約16cm ²
	CO ₂ と水蒸気からグリーン燃料の原料となる合成ガスの生成が可能な電解プロセスの開発	高い耐久性・電解性能を持つ触媒の探索	不明	不明
デンマーク工科大学（デンマーク）	CO ₂ と水蒸気から合成ガスを生成する大規模電解システムの開発	電極や触媒の流出・剥離の低減による電解性能の維持及び、MW級スケールシステムの実現	不明	不明

国内

海外

P.32

- 出所1：東北大学 押切 友也「【2022年度】東北大学 押切 友也：ナノインプリントによる量産を志向した化学エネルギー製造のためのナノ光反応場の創製（YouTubeより）」（令和4年）
- 出所2：名古屋大学研究成果発信サイト「赤錆の光触媒作用で水素と過酸化水素を同時に製造 —太陽光水素の利用拡大に期待—」（令和4年）
- 出所3：European Commission “Periodic Reporting for period 3 - Bac-To-Fuel (BACterial conversion of CO₂ and renewable H₂ inTO bioFUEls)”（令和3年）
- 出所4：YouTube “BACTOFUEL PROJECT: FINAL RESULTS”（2024年）
- 出所5：European Commission “Periodic Reporting for period 2 - SUN2CHEM (Novel photo-assisted systems for direct Solar-driven redUction of CO₂ to energy rich CHEMicals)”（2025年）
- 出所6：European Commission “Novel photo-assisted systems for direct Solar-driven redUction of CO₂ to energy rich CHEMicals”（2025年）
- 出所7：European Commission “Periodic Reporting for period 1 - DESIRED (Direct co-processing of CO₂ and water to sustainable multicarbon energy products in novel photocatalytic reactor)”（2024年）
- 出所8：European Commission “Periodic Reporting for period 1 - FreeHydroCells (Freestanding energy-to-Hydrogen fuel by water splitting using Earth-abundant materials in a novel, eco-friendly, sustainable and scalable photoelectrochemical Cell system)”（2024年）
- 出所9：Desislava Daskalova..etc “Combined Structural and Plasmonic Enhancement of Nanometer-Thin Film Photocatalysis for Solar-Driven Wastewater Treatment”（2023年）
- 出所10：European Commission “Periodic Reporting for period 1 - SOREC2 (Solar Energy to power CO₂ REduction towards C₂ chemicals for energy storage)”（2024年）
- 出所11：European Commission “Periodic Reporting for period 1 – SolDAC (Full spectrum SOLar Direct Air Capture & conversion)”（2024年）
- 出所12：Rice University “Highly efficient solar water-splitting using 3D/2D hydrophobic perovskites with corrosion resistant barriers”（令和7年8月確認）

P.33

- 出所1：新エネルギー・産業技術総合開発機構「NEDO先導研究プログラム2019～2020」（令和2年）
- 出所2：岡山大学「カーボンナノチューブ光触媒を利用した人工光合成技術」（令和2年）
- 出所3：三菱ケミカル株式会社「事業戦略ビジョン（実施プロジェクト名：人工光合成型化学原料製造事業化開発）」（令和4年）
- 出所4：ARPCHEM「人工光合成プロセス技術開発」（令和4年）
- 出所5：新エネルギー・産業技術総合開発機構「世界初、人工光合成により100m²規模でソーラー水素を製造する実証試験に成功」（令和3年）
- 出所6：名古屋大学「ソーラー燃料の高効率製造に向けた波長帯域の補完的技術の融合」（令和7年）
- 出所7：Nefertiti “Preliminary report on the photocatalyst candidates: Synthesis conditions and photocatalytic activity evaluation”（令和5年）
- 出所8：European Commission “Periodic Reporting for period 1 - MOF2H2 (Metal Organic Frameworks for Hydrogen production by photocatalytic overall water splitting)”（令和4年）
- 出所9：ARPA-E “Photocatalytic Steam Methane Reforming for Hydrogen Production”（令和7年8月確認）
- 出所10：Yigao Yuan..etc “Earth-abundant photocatalyst for H₂ generation from NH₃ with light-emitting diode illumination”（令和7年8月確認）

P.34

- 出所1：科学技術振興機構「日本－スイス 国際共同研究「再生可能エネルギー媒体としての水素研究」2020 年度 年次報告書」
- 出所2：名城大学「組換えシアノバクテリアによるCO₂を資源とする高効率なバイオエチレン創製」（令和7年8月確認）
- 出所3：大阪大学「藻類による水素生産を目指した蛋白質構造に立脚した代謝工学(H 2 M)」(令和7年8月確認)
- 出所4：アルガルバイオ、関西電力「微細藻類によるCO₂固定化と有用化学品生産に関する研究開発」（令和7年8月確認）
- 出所5：産業技術総合研究所「微細藻類によるCO₂固定化と有用化学品生産に関する研究開発」（令和4年）
- 出所6：新エネルギー・産業技術総合開発機構「NEDO先導研究プログラム2019～2020」（令和2年）
- 出所7：京都大学「未来社会創造事業（探索加速型）「顕在化する社会課題の解決」領域年次報告書（探索研究）（研究開発課題名：都市代謝系と沿岸生態系が融合した循環型エネルギー・食料生産システムの構築）」（令和7年8月確認）
- 出所8：京都大学「研究開発課題名：都市代謝系と沿岸生態系が融合した循環型エネルギー・食料生産システムの構築」（令和7年8月確認）
- 出所9：Photo2Fuel “Artificial photosynthesis to produce fuels and chemicals”（令和7年8月確認）
- 出所10：Photo2Fuel “Artificial PHOTOSynthesis to produce FUELS and chemicals: hybrid systems with microorganisms for improved light harvesting and CO₂ reduction”（2024年）
- 出所11：ARPA-E “Integrated System for Electromicrobial Production of Butanol from Air-Captured CO₂”（令和7年8月確認）
- 出所12：Jeremy David Adams, Douglas S. Clark “Techno-Economic Assessment of Electromicrobial Production of n-Butanol from Air-Captured CO₂”（2024年）
- 出所13：ARPA-E “Cell-free Bioelectrocatalytic Platform for Carbon Dioxide Reduction”（令和7年8月確認）

P.35

- 出所1：東芝エネルギーシステムズ株式会社「CO₂電解技術を用いたCO₂資源化検討事業」（令和5年）
- 出所2：慶應義塾大学、東京理科大学、一般財団法人カーボンフロンティア機構「ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中のCO₂からの基幹物質製造開発事業」（令和7年8月確認）
- 出所3：東京大学「電気化学プロセスを主体とする革新的CO₂大量資源化システムの開発」（令和5年）
- 出所4：共同通信社「アルカリ性の水に溶けたCO₂をエネルギー物質に転換－炭素循環を実現する炭酸ガス回収・利用技術として期待－」（令和6年）
- 出所5：Kohta Nomoto..etc “Highly selective formate formation via bicarbonate conversions”（2024年）

P.36

- 出所1：Montana State University “Development of a scalable, robust electrocatalytic technology for conversion of CO₂ to formate salt via graded microstructures and development of a bioengineered C₁ pathway for subsequent upconversion to ethylene glycol”（2023年）
- 出所2：LanzaTech「Production of Bioproducts from Electrochemically-Generated C₁ intermediates”（2021年）
- 出所3：Dioxide Materials社HP（令和7年8月確認）
- 出所4：NREL「Integration of CO₂ Electrolysis with MicrobialSyngas Upgrading to Rewire the Carbon Economy”（2023年）

P.36

- 出所5 : Johns Hopkins University “Integrating Chemical Catalysis and Biological Conversion of Carbon Intermediates for Deriving Value Added Products from Carbon Dioxide” (2023年)
- 出所6 : OCOChem “OCOChem Advances Hydrogen Formate Electrolyzer Process By 10x to Create World’s Largest Industrial Scale CO₂ Electrolyzer Cell” (2024年)
- 出所7 : OCOChem HP
- 出所8 : OCOChem “Low Carbon Intensity Formic Acid Chemical Synthesis from Direct Air Captured CO₂ Utilizing Chemical Plant Waste Heat (ChemFADAC)” (2024年)

P.37

- 出所1 : European Commission “Periodic Reporting for period 3 - KEROGREEN (Production of Sustainable aircraft grade Kerosene from water and air powered by Renewable Electricity, through the splitting of CO₂, syngas formation and Fischer-Tropsch synthesis)” (2024年)
- 出所2 : European Commission “Periodic Reporting for period 2 - CO2EXIDE (CO₂-based Electrosynthesis of ethylene oXIDE)” (2022年)
- 出所3 : European Commission “Selective Electrochemical Reduction of CO₂ to High Value Chemicals” (2024年)
- 出所4 : European Commission “Periodic Reporting for period 2 - EcoFuel (Renewable Electricity-based, cyclic and economic production of Fuel) ” (2024年)
- 出所5 : European Commission “Periodic Reporting for period 1 - 4AirCRAFT (Air Carbon Recycling for Aviation Fuel Technology)” (2025年)
- 出所6 : Head of the R&D Department at Aragon Hydrogen Foundation “Air Carbon Recycling for Aviation Fuel Technology”
- 出所7 : Oak Ridge National Laboratory “Hybrid electro- and thermo-catalytic upgrading of CO₂ to fuels and C₂₊ chemicals” (2021年)
- 出所8 : Lawrence Livermore National Laboratory “Rational Design Platform for Transition Metal Catalyzed Electrochemical Synthesis” (2019年)
- 出所9 : Shunhan Jia..etc “Electrochemical Transformation of CO₂ to Value-Added Chemicals and Fuels” (2022年)

P.38

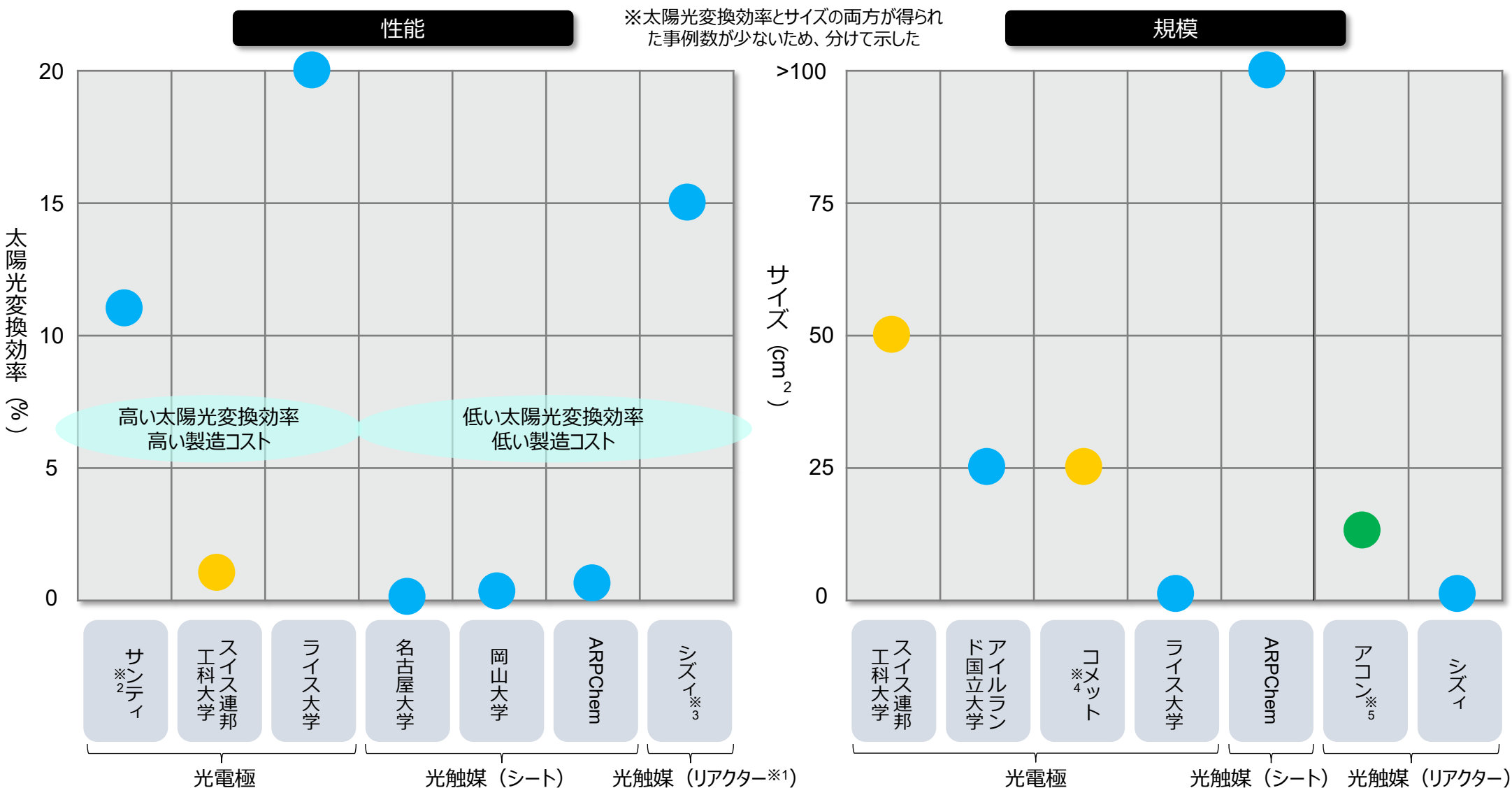
- 出所1 : 一般財団法人電力中央研究所、東京工業大学「CO₂電解リバーシブル固体酸化物セルの開発」(令和5年)
- 出所2 : 東芝エネルギーシステムズ株式会社、九州大学「CO₂/H₂O共電解技術の研究開発」(令和5年)
- 出所3 : 東芝エネルギーシステムズ株式会社「O₂資源化の実現に向けた共電解技術」(令和4年)
- 出所4 : 一般財団法人石油エネルギー技術センター「CO₂を原料とした液体合成燃料の開発への取組み」(令和5年)
- 出所5 : 産業技術総合研究所「SOECを用いた液体合成燃料製造プロセスの研究開発」(令和5年)
- 出所6 : 東北大学、産業技術総合研究所、宇都宮大学、科学技術振興機構「高温高圧水環境で二酸化炭素の電気分解効率を向上」(令和6年)
- 出所7 : Takaaki Tomai..etc “Hydrothermal Conditions Enhance Electrochemical CO₂ Reduction Reaction: A Sustainable Path to Efficient Carbon Recycling” (2024年)
- 出所8 : Imanol Quina..etc “Direct electrocatalytic CO₂ reduction in a pressurized tubular protonic membrane reactor” (2023年)
- 出所9 : E-TANDEM HP
- 出所10 : European Commission “Megawatt scale co-electrolysis as syngas generation for e-fuels synthesis” (2024年)

4.政府主導プロジェクト概要

②事例比較表

国内外性能・規模比較（光触媒系）

- 光電極系では、太陽光変換効率10%以上を達成できているものの、デバイスサイズは小規模な傾向にある
- 一方光触媒系では、太陽光変換効率は現状1%程度であるが、一部プレイヤーにより大型デバイスの開発がなされている



※₁：光触媒を筒状のリアクターの壁面等に埋め込む方式
 ※₂：サンティアゴ・デ・コンポステーラ大学（スペイン）
 ※₃：シズィー・プラズモニクス社（米国）
 ※₄：コメットグローバルイノベーション社（スペイン）
 ※₅：アコンディシオナメント タラセンス協会（スペイン）

凡例

●：水素

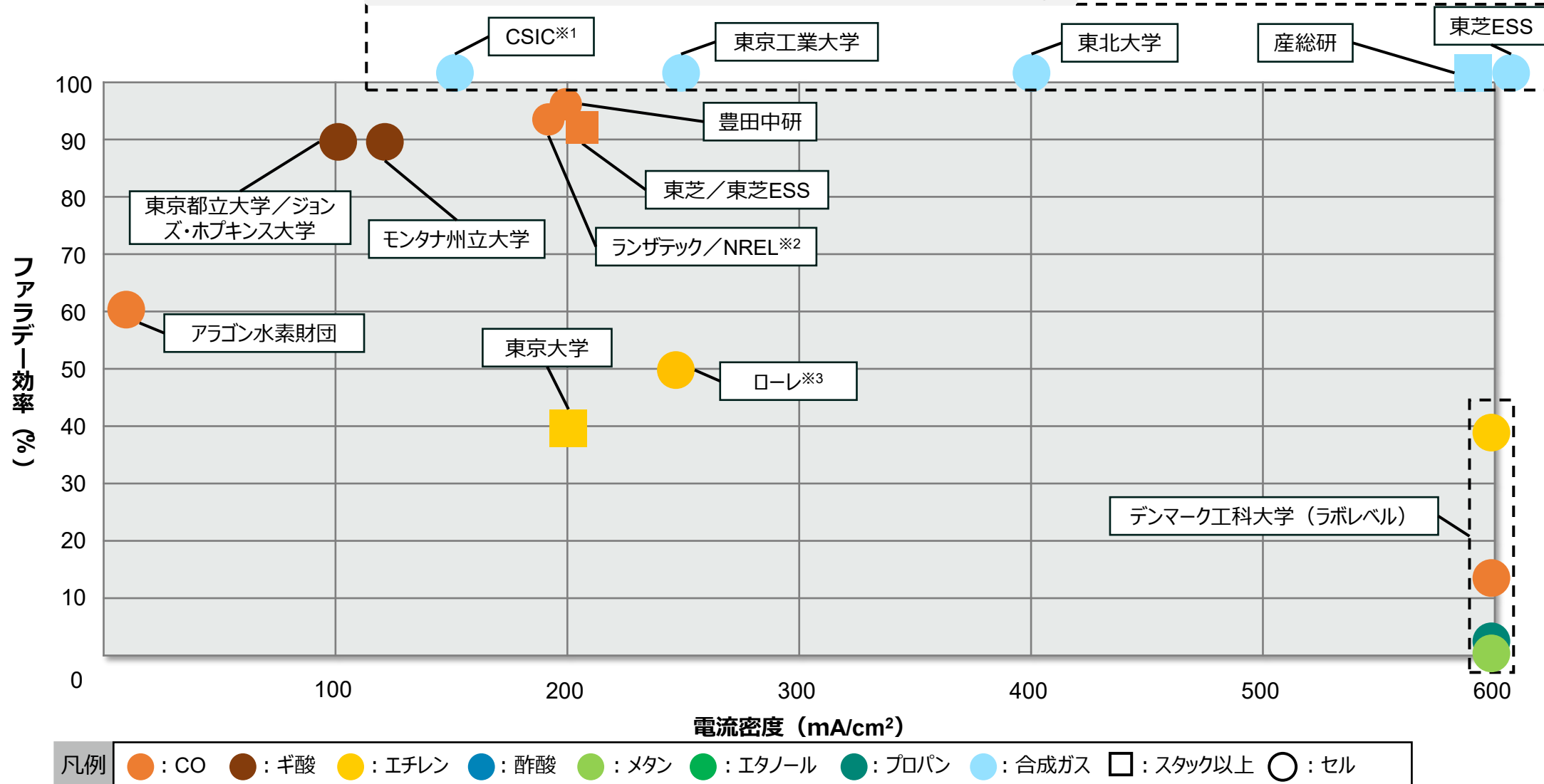
●：エチレン

●：エタノール

国内外性能比較（電解系）

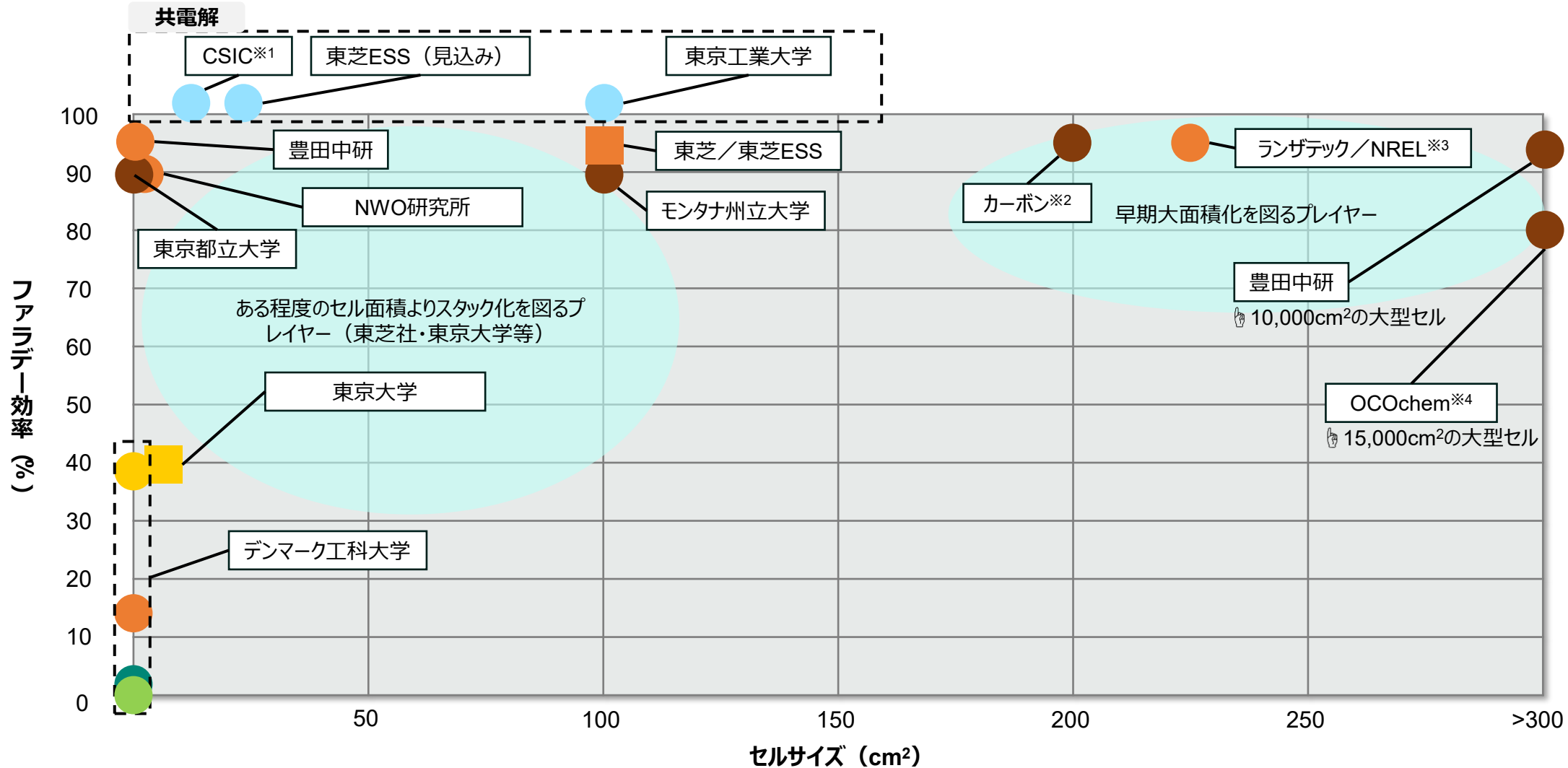
- CO₂電解（CO・ギ酸）では、ファラデー効率90%以上・電流密度200mA/cm²が一つの基準値であるとする
- 燃料電池への技術知見を持つ東芝社は、CO₂電解（CO）及び共電解（合成ガス）ともに比較的に高い性能を達成している

共電解（基本的に生成物が合成ガスのみであるため、ファラデー効率はほぼ100%である）



国内外規模比較（電解系）

- 東芝社やランザテック社など燃料電池への知見を持つプレイヤーは、電解装置の大面積化・スタック化に成功している傾向にある



※¹ : 科学研究高等評議会（スペイン）

※² : 一般財団法人 カーボンフロンティア機構

※³ : 国立再生可能エネルギー研究所（米国）

※⁴ : OCOchem社が世界最大の1.5m²級セル（酢酸ファラデー効率約80%）を開発

P.43

- 出所1 : European Commission “Periodic Reporting for period 3 – Bac-To-Fuel (BACterial conversion of CO₂ and renewable H₂ into bioFUELS)” (2021年)
- 出所2 : YouTube “BACTOFUEL PROJECT: FINAL RESULTS” (2024年)
- 出所3 : European Commission “Periodic Reporting for period 2 - SUN2CHEM (Novel photo-assisted systems for direct Solar-driven redUction of CO₂ to energy rich CHEMicals)” (2025年)
- 出所4 : Rice University “Highly efficient solar water-splitting using 3D/2D hydrophobic perovskites with corrosion resistant barriers”
- 出所5 : 名古屋大学「ソーラー燃料の高効率製造に向けた波長帯域の補完的技術の融合」(令和7年)
- 出所6 : 新エネルギー・産業技術総合開発機構「NEDO先導研究プログラム2019～2020」(令和2年)
- 出所7 : 岡山大学「カーボンナノチューブ光触媒を利用した人工光合成技術」(令和2年)
- 出所8 : 三菱ケミカル株式会社「事業戦略ビジョン(実施プロジェクト名:人工光合成型化学原料製造事業化開発)」(令和6年)
- 出所9 : ARPCHEM「人工光合成プロセス技術開発」(令和4年)
- 出所10 : 新エネルギー・産業技術総合開発機構「世界初、人工光合成により100m²規模でソーラー水素を製造する実証試験に成功」(令和3年)
- 出所11 : ARPA-E “Photocatalytic Steam Methane Reforming for Hydrogen Production” (令和7年8月確認)
- 出所12 : Yigao Yuan..etc “Earth-abundant photocatalyst for H₂ generation from NH₃ with light-emitting diode illumination”
- 出所13 : European Commission “Periodic Reporting for period 1 - FreeHydroCells (Freestanding energy-to-Hydrogen fuel by water splitting using Earth-abundant materials in a novel, eco-friendly, sustainable and scalable photoelectrochemical Cell system)” (2024年)
- 出所14 : Desislava Daskalova..etc “Combined Structural and Plasmonic Enhancement of Nanometer-Thin Film Photocatalysis for Solar-Driven Wastewater Treatment” (2023年)
- 出所15 : European Commission “Periodic Reporting for period 1 – SolDAC (Full spectrum SOLar Direct Air Capture & conversion)” (2024年)
- 出所16 : Nefertiti “Preliminary report on the photocatalyst candidates: Synthesis conditions and photocatalytic activity evaluation” (2023年)

P.44

- 出所1 : European Commission “Periodic Reporting for period 1 – 4AirCRAFT (Air Carbon Recycling for Aviation Fuel Technology)” (2025年)
- 出所2 : Air CRAFT “Air Carbon Recycling for Aviation Fuel Technology”
- 出所3 : 共同通信社「アルカリ性の水に溶けたCO₂をエネルギー物質に転換ー炭素循環を実現する炭酸ガス回収・利用技術として期待ー」(令和6年)
- 出所4 : Kohta Nomoto..etc “Highly selective formate formation via bicarbonate conversions” (2024年)
- 出所5 : Johns Hopkins University “Integrating Chemical Catalysis and Biological Conversion of Carbon Intermediates for Deriving Value Added Products from Carbon Dioxide” (2023年)
- 出所6 : Montana State University “Development of a scalable, robust electrocatalytic technology for conversion of CO₂ to formate salt via graded microstructures and development of a bioengineered C₁ pathway for subsequent upconversion to ethylene glycol” (2023年)
- 出所7 : Imanol Quina..etc “Direct electrocatalytic CO₂ reduction in a pressurized tubular protonic membrane reactor” (2023年)
- 出所8 : E-TANDEM HP (令和7年8月確認)

P.44

- 出所9 : LanzaTech “Production of Bioproducts from Electrochemically-Generated C₁ intermediates” (2021年)
- 出所10 : Dioxide Materials HP (令和7年8月確認)
- 出所11 : NREL “Integration of CO₂ Electrolysis with Microbial Syngas Upgrading to Rewire the Carbon Economy” (2023年)
- 出所12 : 東芝エネルギーシステムズ株式会社「CO₂電解技術を用いたCO₂資源化検討事業」(令和5年)
- 出所13 : 一般財団法人電力中央研究所、東京工業大学「CO₂電解リバーシブル固体酸化物セルの開発」(令和5年)
- 出所14 : Lawrence Livermore National Laboratory “Rational Design Platform for Transition Metal Catalyzed Electrochemical Synthesis” (2019年)
- 出所15 : 東北大学、産業技術総合研究所、宇都宮大学、科学技術振興機構「高温高圧水環境で二酸化炭素の電気分解効率を向上」(令和6年)
- 出所16 : Takaaki Tomai..etc “Hydrothermal Conditions Enhance Electrochemical CO₂ Reduction Reaction: A Sustainable Path to Efficient Carbon Recycling” (2024年)
- 出所17 : 一般財団法人石油エネルギー技術センター「CO₂を原料とした液体合成燃料の開発への取り組み」(令和5年)
- 出所18 : 産業技術総合研究所「SOECを用いた液体合成燃料製造プロセスの研究開発」(令和5年)
- 出所19 : 東芝エネルギーシステムズ株式会社、九州大学「CO₂/H₂O共電解技術の研究開発」(令和5年)
- 出所20 : 東芝エネルギーシステムズ株式会社「O₂資源化の実現に向けた共電解技術」(令和4年)
- 出所21 : European Commission “Selective Electrochemical Reduction of CO₂ to High Value Chemicals” (2024年)

P.45

- 出所1 : 東京大学「電気化学プロセスを主体とする革新的CO₂大量資源化システムの開発」(令和5年)
- 出所2 : 共同通信社「アルカリ性の水に溶けたCO₂をエネルギー物質に転換ー炭素循環を実現する炭酸ガス回収・利用技術として期待ー」(令和6年)
- 出所3 : Kohta Nomoto..etc “Highly selective formate formation via bicarbonate conversions” (2024年)
- 出所4 : European Commission “Megawatt scale co-electrolysis as syngas generation for e-fuels synthesis” (2024年)
- 出所5 : European Commission “Periodic Reporting for period 3 - KEROGREEN (Production of Sustainable aircraft grade Kerosene from water and air powered by Renewable Electricity, through the splitting of CO₂, syngas formation and Fischer-Tropsch synthesis)” (2024年)
- 出所6 : Imanol Quina..etc “Direct electrocatalytic CO₂ reduction in a pressurized tubular protonic membrane reactor” (2023年)
- 出所7 : E-TANDEM HP (令和7年8月確認)
- 出所8 : 東芝エネルギーシステムズ株式会社、九州大学「CO₂/H₂O共電解技術の研究開発」(令和5年)
- 出所9 : 東芝エネルギーシステムズ株式会社「O₂資源化の実現に向けた共電解技術」(令和4年)
- 出所10 : 一般財団法人電力中央研究所、東京工業大学「CO₂電解リバーシブル固体酸化物セルの開発」(令和5年)
- 出所11 : 東芝エネルギーシステムズ株式会社「CO₂電解技術を用いたCO₂資源化検討事業」(令和5年)
- 出所12 : Montana State University “Development of a scalable, robust electrocatalytic technology for conversion of CO₂ to formate salt via graded microstructures and development of a bioengineered C1 pathway for subsequent upconversion to ethylene glycol” (2023年)

P.45

出所13 : 慶應義塾大学、東京理科大学、一般財団法人カーボンフロンティア機構「ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中のCO₂からの基幹物質製造開発事業」
(令和7年8月確認)

出所14 : LanzaTech “Production of Bioproducts from Electrochemically-Generated C₁ intermediates” (2021年)

出所15 : Dioxide Materials HP

出所16 : NREL “Integration of CO₂ Electrolysis with Microbial Syngas Upgrading to Rewire the Carbon Economy” (2023年)

出所17 : OCOchem “Low Carbon Intensity Formic Acid Chemical Synthesis from Direct Air Captured CO₂ Utilizing Chemical Plant Waste Heat (ChemFADAC)” (2024年)

4.政府主導プロジェクト概要

③個別事例（国内）

国内事例（1/10） ARPChem ～光触媒～

- ARPChemは太陽光（可視光）と水から水素を生成する、半導体光触媒及び光触媒シートの開発に取り組む
- 太陽光変換効率1%以上を達成済みであり、生成された水素を高効率に分離可能である（回収率 $\geq 90\%$ 、濃度 $\geq 96\%$ ）
- 今後は、耐久性が高く、太陽光変換効率10%以上の高効率な光触媒シート・パネルの量産化を目指し取り組む

実施事業者	人工光合成化学プロセス技術研究組合（ARPChem）
事業名	人工光合成型化学原料製造事業化開発
案件名	グリーン水素（人工光合成）等からの化学原料製造技術の開発・実証
実施年度	2021～2028
事業概要	太陽光（可視光）と水を原料として水素を製造 する、半導体光触媒及び 光触媒を付着させたシート・パネル の開発
事業課題	■ 太陽光の量子収率※1の向上 ➢ 【光触媒】水素・酸素生成の活性化 ✓ 結晶性※2の向上 ✓ 水への逆反応の抑制 ✓ 励起※3された電子の再結合の抑制等 ■ 生成物分離の高効率化 ➢ 【分離モジュール】高濃度水素の分離・回収の高効率化 ■ 水素製造コストの低減 ➢ 【光触媒シート・パネル】大面積化及び量産化 ■ 耐久性・安全性の向上 ➢ 【製造システム】スケールアップに伴った耐久性・安全性の向上 ※1：光触媒に吸収された光のうち、反応に寄与した光の量 ※2：分子構造の状態（高結晶性とは、構造が規則的であり乱れが存在しない状態を示す） ※3：光エネルギーにより、電子が高エネルギー状態になる現象
成果	■ 100m²（単セル当たり625cm²）規模にて太陽光変換効率0.76%を達成（紫外線） ■ 水素回収率90%、濃度96%以上を達成
残存課題	■ 太陽光変換効率10%の達成 ➢ 【光触媒】光触媒の粒子サイズ・結晶性の制御 ➢ 【光触媒】水への逆反応及び電子の再結合の防止 ➢ 【光触媒シート・パネル】大面積化及び量産化 ■ スケールアップ ➢ 【製造システム】水素の生成・分離モジュールを統合したシステム全体における詳細な実証データの取得

国内事例（2/10） 岡山大学 ～光触媒～

- 岡山大学は、太陽光と水から水素を生成する、半導体性カーボンナノチューブ光触媒・光触媒シートの開発に取り組む
- 波長1005nmにおいて量子効率12.8%、波長680nmにおいて量子効率43%（世界最高レベル）を達成済である
- 今後は、太陽光から水素への変換効率の更なる向上に加え、アンモニアを高効率に生成可能なシートの開発も検討する

実施事業者	岡山大学
事業名	NEDO先導研究プログラム
案件名	ナノカーボンと鉄系触媒を用いる太陽光水素製造
実施年度	2019～
事業概要	太陽光と水から水素を生成可能な、半導体性カーボンナノチューブ（CNT）を素材とした光触媒（水素発生側）及び光触媒シートの開発
事業課題	■ 太陽光の捕集率※1の向上 ➢ 【光触媒】活性可能な波長域の拡大 ■ 太陽光の量子収率の向上 ➢ 【光触媒】幅広い波長域における量子収率の向上 ■ 光触媒のシートへの塗工性向上 ■ 光触媒シートの製造コスト低減 ➢ 【光触媒】高価な希少元素の使用量の削減 ➢ 【電子抽出材】安価な素材の利用
成果	■ CNT光触媒のチューブ構造を調整（直径等）することにより、300～1000nmまでの波長の捕集が可能であることが判明した ■ 波長1005nmにて、太陽光変換効率約0.1%を達成（量子効率12.8%） ■ TiO₂（金属酸化物）を電子抽出材※2として利用することで、高いエネルギー状態の電子抽出が可能となり、波長680nmにおいて、量子収率43%（生成量32μmol/hを達成）を達成した
残存課題	■ 太陽光変換効率（STH※3）の向上 ➢ 光触媒シートの実用化に向けた、最適な酸素発生光触媒の探索 ■ 光触媒のシートへの塗工性の向上 ■ 水素に加え、アンモニアの高効率生成技術の開発

「TiO₂ 電子抽出材」により、高いエネルギー状態の電子を抽出可能（量子収率43%を達成）

※1：太陽光のうち光触媒へ吸収された割合

※2：太陽光により励起された電子を抽出する物質

※3：Solar to Hydrogen（太陽光エネルギーから水素への変換効率）

国内事例（3/10） 東北大学 ～光電極～

- 東北大学は太陽光（可視光）と水から、高効率な水素・アンモニアを生成を目指し、ナノ構造光電極セルの開発に取り組む
- 光電極のナノ構造の精密な制御により、可視光をほぼ100%捕集可能なセルの実証に成功した
- 今後は、ナノ構造光電極の精密加工が可能な製造技術の確立により、デバイスの大面積化及び量産化を目指す

実施事業者	東北大学
事業名	ムーンショット型研究開発事業
案件名	ナノインプリントによる量産を志向した化学エネルギー製造のためのナノ光反応場の創製
実施年度	2022～2023
事業概要	太陽光（可視光）と水から、水素やアンモニアの生成が可能な、 光電極（水素発生側） の開発
事業課題	■ 太陽光の捕集率の向上 ➢ 【光電極】構造の最適化による、可視光の完全制御 ■ 水素製造のスケールアップ ➢ 【光電極】精密加工・高スループット・大面積加工の両立によるスケールアップ ➢ 【光電極】加工・製造技術の高度化による製造コストの低減
成果	■ 光電極のナノ構造（光触媒・半導体薄膜・反射膜）の配置を精密に制御し、可視光の約100%捕集を確認（光触媒の直径600nm） ➢ 例：半導体の膜厚を数nm変化させるなど ■ ナノインプリント加工法を用いることによる、高精度・高スループット・大面積加工の両立を検討中
残存課題	■ 水素製造のスケールアップ ➢ 【光電極】精密加工・高スループット・大面積化が可能なナノインプリント加工法の確立 ➢ 【セル】デバイスの量産化

以下などの構造を精密に設計することで
太陽光の捕集能力が向上する

- 光触媒（金属のナノ粒子）
- 半導体薄膜※¹
- 金属の反射膜※²

※¹：光を受けることで、水素生成に必要な電子を励起（発生）させる膜

※²：反射させる光の波長や反射率等を調整する膜

国内事例（4/10） 産業技術総合研究所 ～ハイブリット触媒～

- 産総研らは、再エネ電力とCO₂からポリマーや燃料等の原料となる有機化合物を生成する微生物（生体触媒）を開発する
- 電流消費能力の発現やCO₂固定能力を持つ酵素の開発に成功した
- 今後は、CO₂の吸収・濃縮・固定が可能な代謝経路の発現・高活性化を行い、リアクターでの高効率な化合物生成を目指す

実施事業者	産業技術総合研究所（産総研）	電極の表面に微生物を配置し、電極から電気エネルギー（電子）を付与することで生成反応を促進する
事業名	ムーンショット型研究開発事業	
案件名	電気エネルギーを利用し大気 CO ₂ を固定するバイオプロセスの研究開発	
実施年度	2020～2022	
事業概要	再エネ由来の電気エネルギー、水、CO ₂ から、 <u>ハブ化合物※1</u> を合成する微生物（生体触媒）を電極表面に配置したバイオリアクターの開発	
事業課題	■ <u>電気エネルギーの消費能力の活性化</u> ➢ 【微生物】電子を利用した化合物生成経路の発現 ■ <u>CO₂の吸収・濃縮能力の活性化</u> ➢ 【微生物】CO₂を輸送・濃縮する機能（酵素やタンパク質）を持つ株の開発 ■ <u>CO₂の固定能力の活性化</u> ➢ 【微生物】CO₂を固定する酵素を持つ株の開発 ■ <u>反応速度の向上</u> ➢ 【リアクター】CO₂（気体）、流入液（液体）、電極（固体）の三相界面※2の設計最適化	
成果	■ <u>電流消費能力の発現に成功</u> ■ <u>以下のCO₂固定量（炭素化合物の生成量）を達成</u> ➢ エチルマロニルCoA 70μM/3時間 ➢ ブチリルCoA 10μM/3時間 ■ ガス拡散電極を用いたリアクターにより反応の高速化を実証済	
残存課題	■ CO₂の吸収・濃縮能力の活性化 ➢ 【微生物】CO₂濃縮機構（輸送・濃縮する酵素の複合体）の発現 ■ CO₂固定能力の活性化 ➢ 【微生物】半人工的なCO₂固定経路に必要な酵素の導入 ■ CO₂固定速度の向上 ➢ 【リアクター】反応（CO₂を原料とした生成反応）の高速化	

※1：アセチルCoAやピルビン酸等の高エネルギー物質（ポリマー・燃料等の原料）

※2：気体・液体・固体が接触する箇所（界面設計は還元効率の向上において重要な要素）

国内事例（5/10） 九州大学 ～ハイブリット触媒～

- 九州大学は、太陽光（可視光）と水から水素を生成するハイブリット触媒（半導体光電極＋生体触媒）の開発に取り組む
- 光触媒・電極の高活性素材の特定や、生体触媒による高効率な水素還元（900mol/h）を達成するなど進捗が見られた
- 今後は、光触媒・電極における量子収率の更なる向上を図るとともに、リアクターへの応用を行い、実用化に向けて取り組む

実施事業者	九州大学
事業名	再生可能エネルギー媒体としての水素研究
案件名	酸窒化物半導体-生物触媒を組み合わせた光触媒による太陽光による高効率水素製造
実施年度	2018～2021
事業概要	太陽光（可視光）と水から水素を生成する、ハイブリット触媒（半導体光電極＋微生物由来の生体触媒）の開発
事業課題	■ 太陽光の量子収率の向上 ➢ 【光触媒】電子の励起・分離・伝達能力の高活性化 ➢ 【光電極】電子伝達酸化物の還元活性の向上（電子の受け渡し能力の向上） ➢ 【生体触媒】培養条件の最適化による高活性酵素の増加
成果	■ シアノバクテリア由来のヒドロゲナーゼ※1を用いて、900mol/hでの水素製造を達成した ■ GaN:ZnO（光触媒）の可視光活性が高いことが判明 ➢ TiO₂（半導体）を用いたコーティングにより、励起された電子の分離効率が向上することが明らかになった ■ TiO₂ベースの光電極が優れた電子伝達酸化物の還元活性を示すことが判明
残存課題	■ 太陽光の量子収率の向上（目標：波長420nmにて5%以上） ➢ 【光触媒】GaN:ZnOを素材とした光触媒の開発 ➢ 【光電極】TiO₂をベースとした光電極の開発 ■ 実用化に向けたアクターの開発・実証

微生物への高効率な
電子の伝達が重要

※1：水素を生成する酵素

国内事例（6/10） 東京大学 ～CO₂電解（固体高分子型：PEEC）～

- 東京大学を筆頭に、大気中のCO₂からエチレン製造までの一連のプロセス確立を目指し取り組んでいる
- 本事業にて、ファラデー効率60%、電流密度 200mA/cm²、10cm²セルでの小型同様の性能、を達成している
- 2025年現在も、CO₂からエチレンを生成する電解技術において、ファラデー効率・高電流密度・安定性の同時確立を目指し、取り組む

実施事業者	東京大学 先端科学技術研究センター
事業名	ムーンショット型研究開発事業
案件名	電気化学プロセスを主体とする革新的CO ₂ 大量資源化システムの開発
実施年度	2020～
プロセス	CO ₂ + H ₂ O => エチレン + O ₂
従来課題	■ ガス拡散電極※¹（カソード：Cu触媒） ➢ ファラデー効率※²の向上（選択性向上） 及び電流密度の向上 ➢ 酸によるCuの溶出抑制（長寿命化） ■ ガス拡散電極（アノード） ➢ アノード・カソード2極間の低電圧化（エチレンは低電位にて最も生成される） ■ セル ➢ セルの大面積化・スタック化
成果	■ 100cm²級セルにて以下を達成 ➢ エチレンのファラデー効率40%、電流密度200mA/cm² ■ 6.25cm² x 4スタックにて以下を達成 ➢ エチレンのファラデー効率40%
残存課題	■ 今後の残存課題としては、ファラデー効率（選択性）・高電流密度・安定性の同時確立が可能な電極及び触媒の開発である ■ 上述を含む、大気中のCO₂からエチレン製造までの一連のプロセス確立を目的としている ➢ CO₂回収・CO₂富化・CO₂電解・システム都合に取り組む都市型DACPLUS-Uコンソーシアムを構築し、社会実装に向け積極的に取り組んでいる

※1：カーボンペーパーまたは、カーボン布を用いた電極

※2：目的生成物の選択性（還元還元反応において、目的とする生成物が選択的に生成されるか）を示す性能

国内事例（7/10） 東京都立大学 ～CO₂電解（液体電解質型）～

- 東京都からの支援を受け、電解由来のギ酸を化学原料やエネルギー貯蔵体などとして産業利用することを目標とする
- 本事業にて、CO₂利用率89%や最高ファラデー効率91%を達成済みである
- 2025年現在は、電解の更なる高性能化、長時間稼働による性能維持、研究開発の規模拡大などへ取り組む

実施事業者	東京都立大学大学院都市環境科学研究科
事業名	カーボンニュートラルの実現に向けた取組
案件名	アルカリ性の水に溶けたCO ₂ をエネルギー物質に転換
実施年度	2021～
プロセス	CO ₂ + H ₂ O => ギ酸
従来課題	■ アルカリ性の水酸化カリウム水溶液 ➢ 水溶液中で捕捉したCO₂を直接利用することによるCO₂利用率の向上（気体CO₂は拡散するため利用率が低下する傾向にある） ■ 電極／触媒 （アノード：酸化イリジウム※¹ カソード：ビスマス※²） ➢ 水素イオン濃度の中和（アノードで発生する水素イオンにより、副生水素が生成され、ギ酸のファラデー効率が低下する） ➢ 電極触媒反応場の合理的な設計による、ギ酸生成反応のファラデー効率向上
成果	■ 4mm²級セルにおいて以下を達成 ➢ ギ酸のファラデー効率90%（電流密度300mA/cm²では、85%を達成） ➢ 電流密度100mA/cm²
残存課題	■ 今後の残存課題としては、電解の更なる高性能化、長時間稼働による性能維持（2025年現在は40時間ほど）、研究開発の規模拡大が考えられる ■ 本研究における成果を2024年5月に「電解セル及びそれを用いた化合物の製造方法」として特許出願済みである ■ 本技術にて生成されるギ酸を防腐剤、抗菌剤、還元剤、化学原料、直接形ギ酸燃料電池の燃料、運搬可能なエネルギー貯蔵体などとして、利用可能になることを目指す

※1：水の酸化性能が高く、水に溶けにくい ※2：毒性が低く、非常に安価な触媒

国内事例（8/10）東京工業大学 ～共電解（固体酸化物型：SOEC）～

- SOEC共電解とFT合成による液体合成燃料の一貫製造に向けたSOEC共電解技術の実用化を目指し取り組んでいる
- 本事業にて、ファラデー効率100%や10cm²セルスタックにおいて100時間の性能維持を達成した
- 2025年現在は、「カソードNi電極の電解質面における、Niの消失および空隙の粗大化による電極劣化の防止」へ取り組む

実施事業者	東京工業大学
事業名	カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／次世代火力発電技術推進事業／カーボンリサイクル技術の共通基盤技術開発
案件名	CO ₂ 電解リバーシブル固体酸化物セルの開発
実施年度	2020～2022
プロセス	CO ₂ + H ₂ O => 合成ガス
従来の課題	■ 電極（アノード：LSCF※¹ カソード：NiO-YSZ※²） ➢ ファラデー効率（選択性）の向上 ➢ 電極金属腐食の抑制による電解性能の維持 ■ セル ➢ 大面積化 ➢ スタック化
成果	■ 100cm²級のセルにて以下を達成 ➢ 電流密度250mA/cm² ■ 高耐食性を有するNi合金メッシュを支持材として用いることで、金属腐食を大幅に抑制し、連続試験後においても安定した電解性能を確認 ■ セルの大面積化に適した製造条件の取得
残存課題	■ 今後の残存課題としては、カソード側（－）Ni電極の電解質面における、Niの消失および空隙の粗大化による電極劣化の防止が挙げられる ■ 本開発において、事業者はNEDO「次世代FT反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発」事業へも参画し、SOEC共電解とFT合成による液体合成燃料の一貫製造に向けたSOEC共電解技術の実用化を、目的として取り組む

※1：正式名称は「ランタンストロンチウムコバルトフェライト」であり、電子及びイオンの高い導電性を持つ物質

※2：正式名称は「酸化ニッケル－イットリア安定化ジルコニア」であり、電子導電性及び触媒性能が高い一方、高温下での長時間利用による劣化が見られる

国内事例（9/10）産業技術総合研究所 ～共電解（固体酸化物型：SOEC）～

- 共電解技術の高度化や生成された合成ガスを用いた次世代 FT合成の高性能化による、実用ステージへの到達を目標とする
- 本事業にて、各スタックへのCO₂供給のムラ 1 %以下、熱サイクル 50 回の安定運転（耐久性向上）を達成している
- 2025年現在は、「カソードNi電極の電解質面における、Niの消失および空隙の粗大化による電極劣化の防止」へ取り組む

実施事業者	産業技術総合研究所
事業名	CO ₂ からの液体燃料製造技術の研究開発
案件名	CO ₂ を原料としたカーボンリサイクル液体合成燃料製造技術の研究開発
実施年度	2020～2024
プロセス	CO ₂ + H ₂ O => <u>合成ガス</u>
従来の課題	■ スタック ➢ 安定性・耐久性向上 ➢ <u>各スタックに供給されるCO₂及び温度の均一化</u> ■ セル ➢ 不純物（炭素など）や<u>高温作動による劣化の改善</u> ➢ セル単体における合成ガスの<u>ファラデー効率向上</u> ■ 電極（アノード：LSCF／LSM※1、カソード：Ni-YSZ） ➢ 電解質付近における、Niの消失および空隙の粗大化による劣化の改善
成果	■ 20セル×2～4のスタック規模にて以下を達成 ➢ <u>電流密度600mA/cm²</u> ➢ <u>合成ガスの生成量～1500L/h</u> ➢ 各スタックへのCO₂流量のムラが 1%以下になる条件を確認 ➢ 各スタックの温度分布が均一になる条件を確認 ■ セルにて1.3V以下の低電圧を達成
残存課題	■ 残存課題としては、<u>電解質付近におけるNiの消失および空隙の粗大化による劣化の改善が考えられる</u> ■ CO₂の共電解技術の高度化及び、生成された合成ガスを用いた次世代 FT合成の高性能化を行いながら、実証運転を通して最適化を図り、さらにパイロット規模のスケールアップを経て実用ステージへと進むことを目標とする

※1：正式名称は「ランタンストロンチウムマンガナイト」であり、触媒性能が高い一方で、融点が比較的低い

国内事例（10/10） エレクトロフラクション社 ～有機物電解～

- 機能性化学品、エネルギー、金属、無機素材など幅広い領域において、既存製法からSPE電解への製法転換を目標とする
- 本事業にて、「ゼロギャップ」構成によるエネルギー変換効率向上・ピペリジンの従来製法に比べエネルギー消費量の90%以上削減及び製造に掛かるトータルコストの20%～70%削減を試算し、達成可能と判断した
- 2025年現在は、社会実装に向けた更なる技術開発に取り組む

実施事業者	エレクトロフラクション社（横浜国立大学発スタートアップ）
事業名	新たな生産プロセス構築のための電子やイオン等の能動的制御による革新的反応技術の創出
案件名	固体高分子電解質電解技術に基づく革新的反応プロセスの構築
実施年度	2018～2023
従来の課題	■ カーボン電極／リンドラー触媒※1 ➢ 有機化合物の高効率・高選択（ファラデー効率）生成 ■ セル ➢ 大型化
プロセス	有機基質 => 有機化合物
成果	■ カーボン電極／リンドラー触媒を用いたセルにてエネルギー変換効率の向上を達成 ➢ 電極と交換膜を密着させる「ゼロギャップ」構成によって電気抵抗が抑えられ、使用電力に対する目的化合物の生産量が増加 ■ 100cm²級セルリアクターを用いた大型化実験にも着手 ■ ピリジンからのピペリジン（医薬品の原料）生成における従来製法に比べ、高い優位性を試算した ➢ エネルギー消費量の90%以上削減可能 ➢ トータルコスト20%～70%程度へ削減可能
残存課題	■ 今後、社会実装に向けた更なる技術開発が必要であると考えられる ■ 機能性化学品、エネルギーや金属、無機素材など幅広い領域において、既存製法からSPE電解技術への抜本的な製法転換を目指す

ゼロギャップ：カソード電極、アノード電極、交換膜を密着させた構造

ピペリジンは一般的に高温・高圧の条件下で水素を添加し、還元することで生成される

※1：あえて触媒活性を減弱したパラジウム触媒

P.50

出所1：NEDO「事業戦略ビジョン 実施プロジェクト名：人工光合成型化学原料製造事業化開発 ①グリーン水素（人工光合成）等からの化学原料製造技術の開発・実証 ②CO₂からの基礎化学品製造技術の開発・実証」（令和6年）

出所2：NEDO「人工光合成PJ公開成果報告会 人工光合成プロセス技術開発」（令和4年）

P.51

出所1：NEDO先導研究プログラム2019～2020「ナノカーボンを用いる太陽光水素製造」（令和2年）

出所2：JST新技術説明会「カーボンナノチューブ光触媒を利用した人工光合成技術」（令和2年）

P.52

出所1：NEDO若手研究者産業連携プラットフォーム「ナノインプリントによる量産を志向した化学エネルギー製造のためのナノ光反応場の創製」（令和5年）

P.53

出所1：産業技術総合研究所「電気エネルギーを利用し大気 CO₂を固定するバイオプロセスの研究開発」（令和3年）

P.54

出所1：科学技術振興機構「日本－スイス 国際共同研究「再生可能エネルギー媒体としての水素研究 2020 年度 年次報告書」（令和2年）

P.55

出所1：東京大学 先端科学技術研究センター「電気化学プロセスを主体とする革新的CO₂大量資源化システムの開発」（令和5年）

P.56

出所1：東京都立大学「アルカリ性の水に溶けたCO₂をエネルギー物質に転換 ―炭素循環を実現する炭酸ガス回収・利用技術として期待―」（令和6年）

P.57

出所1：一般財団法人電力中央研究所「CO₂電解リバーシブル固体酸化物セルの開発」（令和5年）

P.58

出所1：JPEC「CO₂を原料とした液体合成燃料の開発への取組み」（令和5年）

P.59

出所1：化学工業日報「エレクトロフラクション、電解合成の普及に力」（令和6年）

出所2：跡部 真人「固体高分子電解質電解技術に基づく革新的反応プロセスの構築」（平成30年）

4.政府主導プロジェクト概要

④個別事例（海外）

海外事例（1/9）バレンシア工科大学 ～光触媒～

- バレンシア大学は、太陽光（可視光）、水、CO₂を原料とし、メタノールを生成するMOF構造光触媒・シートの開発に取り組む
- 太陽光の捕集率やCO₂利用率の向上への対応策は確認されており、また、酸素生成側における光触媒の活性も見られた
- 今後は、光触媒活性の条件を把握し、高効率なメタノール生成の実現に向け取り組む

実施事業者	バレンシア工科大学
国	スペイン
事業名	Horizon2020
案件名	International cooperation for selective conversion of CO ₂ into methanol under solar light
実施年	2021～2024
事業概要	<u>太陽光（可視光）・水・CO₂</u> から <u>メタノール</u> を生成する、 <u>光触媒</u> （MOF構造※ ¹ ）・ <u>光触媒シート</u> の開発及び太陽光変換効率5%の達成を目指す
事業課題	■ <u>太陽光の捕集率の向上</u> ➢ 【光触媒】光捕集能力の向上 ■ <u>太陽光の量子収率の向上</u> ➢ 【光触媒】メタノール・酸素生成の活性化 ✓ 構造の結晶性・純度の向上（構造に乱れが存在しない状態） ✓ 多孔性の向上 ✓ 電荷移動遷移※²の増加 ■ <u>CO₂の利用率の向上</u> ➢ 【光触媒】水が存在する状態でのCO₂吸着率の向上
成果	■ カーボン量子ドット※³を組み込んだ構造により<u>光捕集率を改善</u>した ■ Cuベース（MOF構造）の<u>メタノール生成光触媒</u>にて、<u>高い結晶性・多孔性・電荷移動遷移を確認した</u> ■ 窒化炭素ベースの<u>酸素生成光触媒</u>において<u>高い活性が見られた</u> ■ 高い疎水性を持つ構造を組み込むことにより、水の存在する環境においても、<u>高いCO₂利用率を確認した</u>
残存課題	■ 太陽光の量子収率の向上 ➢ 【光触媒】触媒活性の条件の理解及び、素材・構造の最適化 ➢ 【光触媒】触媒反応を助ける助触媒の設計

※1：正式名称は「Metal-Organic Framework」であり、金属イオンからなる連続構造をもつ錯体 ※2：光エネルギーを吸収し原子間における電子の移動を伴う現象

※3：光増感剤（自らが光を吸収して得たエネルギーを他の物質へ渡す物質）

海外事例（2/9） シズィジー・プラズモニクス社 ～光触媒～

- シズィジー・プラズモニクス社は、可視光域の光、水、アンモニアから水素を生成する光触媒及び反応炉の開発に取り組む
- 光を捕集する「アンテナ部」と、捕集した光から化学反応を促す「リアクター部」を持つ光触媒により、高効率な水素生成を確認した
- 今後は、触媒及び反応炉のスケールアップに伴い、希少金属を要さない金属の組合せにより製造コストの更なる低減を目指す

実施事業者	シズィジー・プラズモニクス社
国	米国
事業名	ARPA-E（Advanced Research Projects Agency-Energy）
案件名	Photocatalytic Steam Methane Reforming for Hydrogen Production
実施年	2019～2020
事業概要	<u>太陽光/再生可能エネルギー由来のLEDライト（可視光）、水、アンモニアから水素を製造する、光触媒及び反応炉の開発</u>
事業課題	■ <u>太陽光の捕集率の向上</u> ➢ 【光触媒】太陽光による、電子の光励起の高効率化 ■ <u>太陽光の量子収率の向上</u> ➢ 【光触媒】捕集した太陽光エネルギーから促進される化学反応の高効率化 ■ <u>スケールアップ</u> ➢ 【反応炉】スケールアップに伴った効率の維持 ■ <u>製造コストの低減</u> ➢ 【光触媒】希少金属（Ir・Ru）を要さない安価な素材での製造 ➢ 【セル】化学反応に用いる熱エネルギーの低減
成果	■ 光から高エネルギー電子を生む、「アンテナ部（Cu）」と、電子エネルギーから化学反応を促進させる「リアクター部（Fe）」を備えた <u>2.3cm²の光触媒リアクターにて、STH15.6%</u>を示した
残存課題	■ スケールアップ ➢ 触媒及び反応炉の更なるスケールアップ・大面積化 ■ 製造コストの低減 ➢ 【光触媒】自然界に豊富に存在する金属の別の組合せの検討

- Cu触媒により高効率に光を捕集
- Fe触媒により、捕集した光から高効率に化学反応を促進

海外事例（3/9） スイス連邦工科大学 ～光電極～

- スイス連邦工科大学は、太陽光（可視光）、水、CO₂を原料として、エチレンを生成可能な光電極及びセルの開発に取り組む
- 光電極にて、高い光電流（アノード：4.5mA/cm²、カソード：20mA/cm²）を確認し、ファラデー効率70%を達成した
- 今後は、太陽光変換効率の更なる向上に加え、実用化を見据えた光電極及びセルのスケールアップを検討する

実施事業者	スイス連邦工科大学 ローザンヌ校
国	スイス
事業名	Horizon2020
案件名	Novel photo-assisted systems for direct solar-driven reduction of CO ₂ to energy rich Chemicals
実施年	2020～2023
事業概要	太陽光（可視光）、水、CO₂を原料として、エチレンを生成可能な光電極および光電極セルの開発
事業課題	■ 太陽光の捕集率の向上 ➢ 【光電極】太陽光捕集能力の高い電極素材の選定 ■ 太陽光の量子収率の向上 ➢ 【光電極】構成素材およびナノ構造の最適化 ➢ 【光電極】高活性な電極の製造・接合技術の確立 ■ 製造コストの低減 ➢ 【光電極】安価かつ豊富な素材の選定 ➢ 【光電極】連続製造プロセスによる量産化
成果	■ 50cm²級のセルにて太陽光変換効率1%を達成 ■ エチレン生成量0.3μmol/cm²・hを達成 ■ 電着塗装法※¹や酸化物半導体を組み込んだ製造法により、アノード光電極（BiVO₄）の高光電流（電子移動が活発な状態）を確認した（4.5mA/cm²、1.23V） ■ ペロブスカイト構造ベースのカソード光電極により、高い光電流を確認した（20mA/cm²、1.0V）
残存課題	■ 太陽光のエチレンへの変換効率の向上 ➢ 【光電極】エチレンの選択性の更なる向上 ■ スケールアップ ➢ 【光電極・セル】現実的なスケールでの大面積化及び量産化

※1：水溶性塗料を入れたタンクの中に被塗物を浸し、これを陽極、または陰極として直流電気を流し、塗膜を密着、形成させる塗装方法

海外事例（4/9） ライス大学 ～光電極～

- ライス大学は、太陽光と水から水素を生成する、光電極セルの開発に取り組む
- 太陽光変換効率20.8%にて100時間の駆動を確認しており、高い生成効率と耐久性を持つセルの実証に成功した
- 今後は、社会実装を目指し、セルのスケールアップ（5cm²）の実現に向け、要素技術の改良に取り組む

実施事業者	ライス大学
国	米国
事業名	EERE（Energy Efficiency and Renewable Energy）
案件名	Highly Efficient Solar Water Splitting Using 3D/2D Hydrophobic Perovskites with Corrosion Resistant Barriers
実施年	2020～2023
事業概要	太陽光と水 を用いて、 水素 を生成する 光電極及び水分解セル の開発
事業課題	■ 太陽光の捕集率の向上 ➢ 【光電極】半導体の素材・構造（ペロブスカイト構造）の最適化による広い波長域の利用 ■ 太陽光の量子収率の向上 ➢ 【触媒】素材の最適化による、生成効率及び安定性の向上 ➢ 【導電膜】電子の反応サイトへの移動の高効率化 ■ 耐久性の向上 ➢ 【光電極】水中（電解質）における劣化の防止 ➢ 【触媒】剥離の防止 ■ ランニングコストの低減 ➢ 【光電極】構成素材の再利用
成果 （一部抜粋）	■ 1cm²級のセルにて太陽光変換率20.8%を達成した ➢ 触媒（NiRuベース）の生成効率及び安定性の向上を確認 ➢ 疎水性の高い伝導膜により、耐久性の向上及び電子の移動の高効率化を達成 ■ 構成素材の再利用を実現
残存課題	■ 【セル】太陽光変換効率の更なる向上に加え、大面積化によるスケールアップ（目標：5cm²）

複雑な半導体電極構造により、**光捕集率・光量子収率の向上**が可能

疎水性の付与により、触媒やその他**構成部品**の**劣化防止**が可能

海外事例（5/9） アイデナーR&D社 ～微生物～

- アイデナーR&D社は、太陽光、水、CO₂からギ酸やメタノールを生成する、ハイブリット触媒（微生物＋光増感剤）を開発する
- 2025年現在は、2つの微生物（*Moorella thermoacetica* や *Metanosarcina barkeri*）を用いて、試験を実施している
- 2025年現在は、最適な光増感剤・培養リアクターの設計・生成物の分離方法等を検討しており、今後の実用化に向け取り組む

実施事業者	アイデナーR&D社
国	スペイン
事業名	Horizon2020（Horizon EUへ移管）
案件名	Hybrid systems with microorganisms for improved light harvesting and CO ₂ reduction
実施年	2022～2025
事業概要	太陽光、水、CO ₂ からメタンや酢酸を生成する、微生物と有機物質（光増感剤）から構成されるハイブリット触媒の開発
事業課題	■ 太陽光の捕集率の向上 ➢ 【光増感剤】太陽光エネルギーによる光励起能力の向上 ■ 太陽光の量子収率の向上 ➢ 【微生物】捕集した光エネルギーの目的生成反応への寄与率増加（微生物内の酵素への到達） ■ 培養効率の向上 ➢ 【培養リアクター】利用する微生物に沿った培養条件の適用 ■ 生成物分離の高効率化 ➢ 【分離モジュール】生成物の高効率かつ安価な分離方法の確立
成果	■ メタン生成率0.22%を達成（生成物のうち占める割合） ■ 光増感剤と微生物（<i>Moorella thermoacetica</i> や <i>Metanosarcina barkeri</i>）を用いたハイブリット触媒を試験中である
残存課題	■ 太陽光の捕集率向上 ➢ 【光増感剤】最適な素材の検討 ■ 培養効率の向上 ➢ 【微生物】<i>Moorella thermoacetica</i> と <i>Metanosarcina barkeri</i> に適した培養リアクターの設計 ■ 生成物分離の高効率化 ➢ 分離方法の分離効率及びコスト面における比較・検証

太陽光を吸収する光増感剤から生じるエネルギーにて、生成反応を促進させる

海外事例（6/9） デンマーク工科大学 ～CO₂電解（固体高分子型：PEEC）～

- デンマーク工科大学は、化学品製造における目的物質の分離コスト低減を目的とし、CO₂から目的物質を選択的に生成可能であり、分離工程を要さない電解技術の開発に取り組む
- 本事業にて、触媒の種類・構成割合にて生成物の選択性が変化することを特定し、COとエタノールの選択性向上に成功した
- 今後は、エチレンとエタノールの選択性向上に向け取り組む

実施事業者	デンマーク工科大学
対象国	デンマーク
事業名	Horizon 2020
案件名	SELECTCO2: Selective Electrochemical Reduction of CO ₂ to High Value Chemicals
実施年	2020～2023
プロセス	CO ₂ + H ₂ O => <u>CO/エタノール※¹/エチレン</u>
事業概要	CO ₂ からCO/エタノール/エチレンのいずれかを選択的に生成可能な電解技術の開発事業
課題	■ 【セル】カソードでの<u>塩の沈殿による冠水の防止（性能維持）</u> ■ 【触媒】個々の<u>目的生成物※²の選択性向上</u> ■ 【電極・ガス拡散層】触媒をサポートし、<u>反応物と生成物の効率的な物質移動</u>を可能にする、ガス拡散層の確立 ■ 【交換膜】<u>長時間駆動による劣化</u>及び選択性の変動防止 ■ 【交換膜】触媒と広間膜間における<u>高効率なイオン交換</u>
成果	■ 2.25cm²級のセルにて以下のファラデー効率を達成 ➢ <u>エチレンのファラデー効率約39%</u> ➢ <u>COのファラデー効率約13%</u> ➢ <u>プロパンのファラデー効率1.2%</u> ➢ <u>メタンのファラデー効率約0.88%</u> ■ <u>電流密度約600mA/cm²</u>（上述セルにおける数値）を達成
残存課題	■ <u>CO₂ から特定の製品に直接変換することで、化学製品の分離コストを軽減</u>することで、製造コストの大幅な削減を目的とする ■ 今後は、<u>エチレンとエタノールの選択的電解性能の向上</u>に向けて取り組む

※1：エタノールもしくはアセトアルデヒド ※2：還元反応において、目的とする生成物が選択的に生成されるか（ファラデー効率は選択性を評価する性能指標の一つ）

海外事例（7/9） オークリッジ国立研究所 ～CO₂電解（液体電解質型）～

- オークリッジ国立研究所は、CO₂から直接的にバイオ燃料となる物質の生成を実現することでエネルギー業界への貢献を目指す
- 本事業では、CNS触媒とCuPd助触媒を用いた2段階反応によりCO₂からエタノール等のC₂₊物質への直接電解を確認した
- 今後は、本技術により生成可能なC₂₊物質の識別及び定量化に加え、ファラデー効率58%達成を目指し取り組む

実施事業者	オークリッジ国立研究所
対象国	米国
事業名	EERE (Energy Efficiency and Renewable Energy)
案件名	Hybrid electro- and thermo-catalytic upgrading of CO ₂ to fuels and C ₂₊ chemicals
実施年	2018～2020
プロセス	CO ₂ + H ₂ O => <u>エタノール (C₂₊)</u>
事業概要	触媒と助触媒を用いた、CO ₂ からCO、COからC ₂ の2段階生成が可能な電解システムの開発
課題	■ 【電解システム】CO₂からC₂₊の還元における高いファラデー効率の実現 ■ 【触媒】触媒の最適な形状選択により、CO₂が表面において安定することでの、CO₂からCOの還元効率向上 ■ 【助触媒】助触媒による、COからC₂₊の生成効率向上 ■ 【触媒・助触媒】触媒と助触媒間の物理的距離を縮めた設置により、触媒にて電解されたCOのC₂₊への直接的な変換効率の向上
成果	■ CNS触媒※1とCuPd助触媒※2により、CO₂のC₂₊への直接変換を確認 ■ 【触媒・助触媒】CNS触媒・CuPd助触媒の製造方法を確認 ■ 【触媒・助触媒】CuPd助触媒の金属構成とCOの結合エネルギーとの関係性を特定
残存課題	■ CO₂から直接的にバイオ燃料となる物質を生成することで、バイオエネルギー産業への貢献を目的とする ■ 今後は、生成可能なC₂₊の識別及び定量化に加え、目標であるファラデー効率58%を目指し取り組む

エチレンやエタノール等のC₂₊の生成にはCuを含む触媒が用いられる傾向にある

※1：先端が鋭利なカーボンナノ触媒

※2：バイメタル触媒

海外事例（8/9） ジョンズ・ホプキンス大学 ～CO₂電解（液体電解質型）～

- ジョンズ・ホプキンス大学は、電気化学と生物学を複合した手法にてCO₂からバイオプロダクトを生成することを目的とする
- 本電解技術では、濃度55mMのメタノール生成を電流密度100mA/cm²、FE20%、20%炭素転換率にて達成した
- 加えて、濃度21mMのギ酸塩生成を電流密度100mA/cm²、FE90%、90%炭素転換率にて達成した
- CO₂からメタノールや酢酸塩等への変換における電解効率の向上が今後の課題として挙げられる

実施事業者	ジョンズ・ホプキンス大学
対象国	米国
事業名	EERE (Energy Efficiency and Renewable Energy)
案件名	Integrating Chemical Catalysis and Biological Conversion of Carbon Intermediates for Deriving Value Added Products from Carbon Dioxide
実施年	2018～2022
プロセス	CO ₂ + H ₂ O => 炭素化合物（ <u>メタノール※¹/ギ酸塩 等</u> ）
事業概要	CO ₂ の電解により生成されたC ₁ 及びC ₂ （メタノールやギ酸塩等）から微生物を用いPHA※ ² などの炭化水素を生成する2段階システムの開発
課題	■ 【システム】電気化学と生物学を用いた2段階プロセスによるCO₂からバイオプロダクトへの変換技術の確立 ■ 【電解触媒】<u>生成物の濃度と生成速度の向上</u> ■ 【電解触媒】ファラデー効率及び電流密度の向上による<u>メタノールまたはギ酸塩の生成量増加</u> ■ 【電解触媒】<u>循環システムによる炭素転換効率※³の向上</u>
成果	■ 開発したセルにおいて以下を達成 ➢ <u>CO₂からギ酸塩への変換効率90%以上</u>（ファラデー効率90%以上、生成濃度100mM以上） ➢ <u>CO₂からメタノールへの変換効率90%以上</u>（生成濃度100mM以上） ➢ <u>電流密度100mA/cm²</u>
残存課題	■ 電気化学では、CO₂の変換性能が高い一方で、複数の炭素を含む物質の生成においては低効率であるため、生物学的プロセスと複合した変換システムにて、バイオプロダクトの生成を目指す ■ 今後は、電気化学プロセスを用いた<u>メタノール生成における電解効率（ファラデー効率及び炭素転換率）のさらなる向上</u>に加え、<u>酢酸塩などの他物質の生成における電解効率の向上</u>が課題である

事例では、全体プロセスのうち電気化学プロセスに関してを紹介

※1：CO₂からメタノールと酢酸塩の生成も可能 ※2：ポリヒドロキシアルカノエート（バイオプラスチック） ※3：CO₂内の炭素が目的生成物（メタノールやギ酸塩等）へ変換された割合

海外事例（9/9） CSIC ～共電解（固体酸化物型：SOEC）～

- CSISは、排出されるCO₂から航空業界の厳しい仕様を満たす炭化水素の直接生成が可能な電解技術の開発に取り組む
- 本事業では、多機能触媒を用いたモジュール式プロトタイプを使用した実証においてCO₂から炭化水素の生成に成功した
- 今後は、電解技術のさらなるスケールアップに加え、工場等における大規模実証を目指し取り組む

実施事業者	CSIC（科学研究高等評議会）
対象国	スペイン
事業名	Horizon 2020
案件名	eCOCO2: Direct electrocatalytic conversion of CO ₂ into chemical energy carriers in a co-ionic membrane reactor
実施年	2019～2023
プロセス	CO ₂ + H ₂ O => <u>炭化水素（ジェット燃料の原料）</u>
事業概要	多機能触媒を用いてCO ₂ と水蒸気から効率的に炭化水素の生成が可能な電解システムの開発
課題	■ 【電解システム】再エネ電源の変動に合わせたスケールでの炭化水素の直接的な生成 ■ 【触媒】CO₂からの直接的な炭化水素の生成において、CO₂変換効率及びエネルギー効率の向上 ■ 【電極】450℃以下の温度における動作の最適化 ■ 【電解質】安定的かつ導電性の高い電解質の開発
成果	多機能触媒により、CO₂の電解と水素イオンの供給を一連のプロセスにて行い、直接的な炭化水素の合成を可能とする ■ 多機能触媒を搭載した16cm²級のセル（温度450℃及び気圧30bar）において以下を達成 ➢ <u>メタンの生成率99%以上</u> ➢ <u>電流密度約150mA/cm²以上</u> ■ コンパクトかつモジュール式であり、<u>再エネ電源の変動に合わせた生成プロセスの調整が可能</u>なシステムのプロトタイプを開発
残存課題	■ 新しいCO₂変換プロセスの開発により、CO₂から航空業界の厳しい仕様を満たす炭化水素を直接生成することを目指す ■ 今後は、<u>電解技術のスケールアップ及び、CO₂排出量の多い工場施設などでの大規模実証に取り組む</u>ことが必要であると考えられる

P.62

出所1 : European Commission “International cooperation for selective conversion of CO₂ into methanol under solar light” (2024年)

P.63

出所1 : ARPA-E “Syzygy Plasmonics : Photocatalytic Steam Methane Reforming for Hydrogen Production” (2019年)

出所2 : 日経XTECH「住友商事Gが光触媒で水素製造、韓国ロッテなどと共同で実証実験へ」(令和4年)

出所3 : Science “Earth-abundant photocatalyst for H₂ generation from NH₃ with light-emitting diode illumination” (2022年)

P.64

出所1 : European Commission “Novel photo-assisted systems for direct solar-driven reduction of CO₂ to energy rich Chemicals” (2025年)

P.65

出所1 : U.S. Department of Energy “Highly efficient solar water-splitting using 3D/2D hydrophobic perovskites with corrosion resistant barrier” (2023年)

P.66

出所1 : European Commission “Hybrid systems with microorganisms for improved light harvesting and CO₂ reduction” (2022年)

P.67

出所1 : European Commission “Selective Electrochemical Reduction of CO₂ to High Value Chemicals” (2024年)

P.68

出所1 : オークリッジ国立研究所 “Hybrid electro- and thermo-catalytic upgrading of CO₂ to fuels and C₂₊ chemicals” (2021年)

P.69

出所1 : ジョンズ・ホプキンス大学 “Integrating Chemical Catalysis and Biological Conversion of Carbon Intermediates for Deriving Value Added Products from Carbon Dioxide” (2023年)

P.70

出所1 : European Commission “Direct electrocatalytic conversion of CO₂ into chemical energy carriers in a co-ionic membrane reactor” (2024年)

5.論文概要

①事例一覽

- 「人工光合成の早期社会実装に向けた取組加速化に関する検討会」の委員からの情報提供を参考に、国外の主要研究者の論文から、最新の研究情報を整理した

主要研究者（論文著者）	所属組織	研究対象の人工光合成技術 （後述で抽出した論文情報より抜粋）
Erwin Reisner	University of Cambridge	光触媒、光電極、微生物
Edward Sargent	Northwestern University	光触媒、光電極、微生物、CO ₂ 電解、共電解
Shane Ardo	University of California Irvine	光触媒
Gabriele Centi	University of Messina	光触媒、光電極、CO ₂ 電解
Marcella Bochio	University of Padova	光触媒
Leif Hammarström	Uppsala University	光触媒、微生物
Sophia Haussener	Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL)	光触媒、光電極、CO ₂ 電解
Gregory Metha	University Adelaide	光触媒、光電極、CO ₂ 電解
Can Li	Dalian Institute of Chemical Physics	光触媒、光電極、微生物
Thomas F. Jaramillo	Stanford University	光触媒、光電極、微生物、CO ₂ 電解

詳細調査対象の論文の選定方法

- 前頁に記載の主要研究者の論文を公表年、技術内容、ジャーナルのインパクトファクターにより絞り込みを行い、調査を実施した

絞り込み



海外論文調査結果一覧（1/3）

■ 光電極系では、m²スケールの「人工樹木」型反応装置が設定されている

著者 (所属組織)	技術分野	タイトル	公表年	概要	原料	生成物	成果	
							性能	規模
Gregory Metha (University of Adelaide)	光触媒	Enhanced photocatalytic and photovoltaic performance arising from unconventionally low donor-Y6 ratios	2024	非フラーレンY6(アクセプター)とポリマーPIDT-T8BT(ドナー)を用いた電子ドナー-アクセプターナノ粒子およびフィルムによって、高い光触媒性能および光起電力性能が示された	H ₂ O	H ₂	水素発生最高速度：(条件)D:A比=1:6.7 (性能)6000 ± 200 μmol / h・g	不明
Erwin Reisner (University of Cambridge)	光電極	Modular perovskite-BiVO ₄ artificial leaves towards syngas synthesis on a m ² scale	2025	工業的に適合した大規模デバイス製造方法として、ペロブスカイト光吸収体の真空プロセスを活用し、10cm ² の完全蒸着PVデバイス(人工葉)を製造。モジュール性を実証するため、10×10枚の人工葉を並べた0.7×0.5m ² の「人工樹木」型反応装置を設計	CO ₂	CO、H ₂	ファラデー効率：17.7% (CO)、59.3% (H ₂)	0.7×0.5 m ²
Erwin Reisner (University of Cambridge)	光電極	Semiartificial Photoelectrochemistry for CO ₂ -Mediated Enantioselective Organic Synthesis	2025	太陽エネルギーを利用してキラル有機合成用のPECデバイスに統合された生体触媒を駆動するプラットフォームを開発	CO ₂	キラル1-フェニルエタノール	・エナンチオマー過剰率※1：93% ・アセトフェノンからキラル1-フェニルエタノールへの変換率：38%	不明

※1：アルキル鎖の炭素原子数キラル化合物における一方のエナンチオマーの割合が、もう一方のエナンチオマーの割合よりも大きい場合に、その差をパーセントで表したもの

海外論文調査結果一覧（2/3）

■ 微生物系では、分子間電荷移動を促進する光電陰極の開発などがみられる

著者 (所属組織)	技術分野	タイトル	公表年	概要	原料	生成物	成果	
							性能	規模
Erwin Reisner (University of Cambridge)	微生物	Bio-Inspired Self-Assembly of Enzyme-Micelle Systems for Semi-Artificial Photosynthesis	2025	半人工光合成のために、光増感剤を界面活性剤として利用し、水素化酵素およびギ酸脱水素酵素などの酵素と相互作用するミセル※ ¹ 骨格を形成するバイオハイブリッドアセンブリ方法を提示	CO ₂	H ₂ 、ギ酸	H ₂ 生成量： 最大350±36 nmol(10 μM※ ² , RuC ₉ ※ ³)、 最大5.0±0.09 μmol(5 μM, RuC ₁₇ ※ ³)	不明
Leif Hammarström (Uppsala University)	微生物	Embedding biocatalysts in a redox polymer enhances the performance of dye-sensitized photocathodes in bias-free photoelectrochemical water splitting	2024	分子間電荷移動が酸化還元ポリマーによって促進される、効率的で堅牢なバイオハイブリッド色素増感NiO光電陰極を開発	H ₂ O	H ₂	光電流：141±17 μA/cm ² (pH7、初期の印加電圧無し)	不明

※1：親水基と疎水基の両方を持つ分子が水中で集合して形成される、球状のコロイド状の構造体

※2：界面活性剤溶液中でミセルが形成される最低濃度(限界ミセル濃度)

※3：アルキル鎖の炭素原子数

海外論文調査結果一覧（3/3）

- CO₂電解系では、複数の研究でファラデー効率60%～70%の成果がみられる

著者 (所属組織)	技術分野	タイトル	公表年	概要	原料	生成物	成果	
							性能	規模
Edward Sargent (Northwestern University)	CO ₂ 電解	Electrosynthesis of CO from an electrically pH-shifted DAC post-capture liquid using a catalyst: support amide linkage	2025	CO ₂ の直接空気回収に関し、有望なアプローチである電気化学反応回収のエネルギー強度の改善	CO ₂	CO	・ファラデー効率：70% ・エネルギー強度 ※1：35 GJ/t-CO	不明
Edward Sargent (Northwestern University)	CO ₂ 電解	Carbon-Efficient CO ₂ Electrolysis to Ethylene with Nanoporous Hydrophobic Copper	2024	触媒表面の水とCO ₂ の濃度を調節するように3Dナノポーラス触媒を設計し、未反応のCO ₂ を回収する順方向バイアス双極性膜電極アセンブリ(f-BPM MEA)でより高いエチレン選択性を実現	CO ₂	C ₂ H ₄ (エチレン)	ファラデー効率：63%	不明
Edward Sargent (Northwestern University)	CO ₂ 電解	Reactive capture of CO ₂ via amino acid	2024	酸素が豊富でCO ₂ が乏しい条件に適用可能なアミノ酸塩回収溶液であるグリシン酸カリウムを使用した反応性回収方法を開発	CO ₂	CO	・ファラデー効率：64%(50 mA/cm ²) ・エネルギー効率：31% ・エネルギー強度 ※1：40 GJ/t-CO	不明

※1：目的物質を1t生成するために必要なエネルギー量

P.75

出所1 : Andrew Dolan..etc "Enhanced photocatalytic and photovoltaic performance arising from unconventionally low donor-Y6 ratios" (2024年)

出所2 : Virgil Andrei..etc "Modular perovskite-BiVO₄ artificial leaves towards syngas synthesis on a m² scale" (2025年)

出所3 : Tessel Bouwens..etc "Semiartificial Photoelectrochemistry for CO₂-Mediated Enantioselective Organic Synthesis" (2025年)

P.76

出所1 : Yongpeng Liu..etc "Bio-Inspired Self-Assembly of Enzyme-Micelle Systems for Semi-Artificial Photosynthesis" (2025年)

出所2 : Fangwen Cheng..etc "Embedding biocatalysts in a redox polymer enhances the performance of dye-sensitized photocathodes in bias-free photoelectrochemical water splitting" (2024年)

P.77

出所1 : Bei Zhou..etc "Electrosynthesis of CO from an electrically pH-shifted DAC post-capture liquid using a catalyst: support amide linkage" (2025年)

出所2 : Panagiotis Papangelakis..etc "Carbon-Efficient CO₂ Electrolysis to Ethylene with Nanoporous Hydrophobic Copper" (2024年)

出所3 : Yurou Celine Xiao..etc "Reactive capture of CO₂ via amino acid" (2024年)

5.論文概要

②個別事例

海外論文事例（1/3） Erwin Reisner ～光電極～

- Erwin Reisnerらは真空蒸着法を利用し10cm²のペロブスカイト-BiVO₄人工葉※¹デバイスを製造
- 過酷な屋外環境下において、m²スケールに近い人工葉の試験を実現

著者	Erwin Reisner
所属組織	University of Cambridge
タイトル	Modular perovskite-BiVO ₄ artificial leaves towards syngas synthesis on a m ² scale
公表年	2025
概要	工業化に適した人工葉大規模デバイス製造方法として真空プロセスを活用し、10cm ² の完全蒸着PVデバイスを製造
課題	■ 人工葉デバイスの大型化 ➢ 現状の堆積技術では1cm²を超えるプロトタイプの実現が困難 ✓ 現状の溶液処理とアニール処理を含む複数の堆積技術では数cm²を超える領域で不均一性を引き起こし、暗電流と光電流に影響を与えるピンホールを引き起こす可能性がある ✓ 上記により、膜欠陥が起き、動作中にデバイスの短絡や劣化の可能性を高める
成果	■ ペロブスカイト-BiVO₄人工葉デバイス※¹の製造に真空蒸着法を利用し10cm²に達する大型化を実現 ■ ペロブスカイト-BiVO₄人工葉デバイスから36時間にわたる1SUNの照明下でCOが88.6 μmol、H₂が373.1 μmolが得られた（各々ファラデー効率17.7%、59.3%に相当） ■ 上記人工葉デバイスをモジュールとして、小規模から大規模のPECリアクターを開発し屋外テストを実施
結論	■ 熱蒸着法の有用性 熱蒸着法は、処理中に堆積層を劣化させる可能性のある溶媒を使わず、スケーラブルかつ再現性の高いペロブスカイトベースの人工葉の製造に大きく貢献可能 ■ m²スケールへの拡張性 真空蒸着法を用いることで、過酷な屋外環境下において、1m²スケールまでの人工葉のモジュール性の試験を実現

※ 1 : ペロブスカイトをグラファイトエポキシでCu₉₂In₈に接合した光電陰極、BiVO₄光電陽極で構成

海外論文事例 (2/3) Leif Hammarström ～微生物～

- Leif Hammarströmらは、水分解システムにおけるバイオハイブリッド光電陰極を開発
- 上記光電陰極により、 $141 \pm 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ の光電流を示し、5時間にわたる安定した連続出力を実現

著者	Leif Hammarström
所属組織	Uppsala University
タイトル	Embedding biocatalysts in a redox polymer enhances the performance of dye-sensitized photocathodes in bias-free photoelectrochemical water splitting
公表年	2024
概要	オロゲン系酸化還元活性ポリマーと[FeFe]-ヒドロゲナーゼをPB6増感NiO電極に統合 して、効率的なバイオハイブリッド光電陰極を実現
課題	■ 色素増感光電陰極における太陽光水素効率の向上 ➢ 色素増感光電陰極で構成される水分解PECセルは、太陽光水素効率(STH)は、ほとんどが0.005%未満の値にとどまり応用に必要な閾値(>10%)とはほど遠い性能 ■ 光電陰極の性能改善 ➢ 色素増感光電陰極では電荷再結合が過剰であり、陰極光電流が最先端の陽極光電流に匹敵することができず非効率 ✓ ZnOとTiO₂を電子輸送材料とし色素から触媒のPtへの電荷移動を仲介するNiO光電陰極を提案したが製造に課題あり ✓ ヒドロゲナーゼは色素増感NiO光電陰極触媒の優れた候補
成果	■ 開発されたバイオハイブリッド光電陰極により以下の性能が示され ➢ 水分性能試験によりは10時間の反応でSTH 0.124%と改善 ➢ $141 \pm 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$(pH7、初期の印加電圧無し)の光電流を示し、5時間にわたって安定した連続出力を実現
結論	■ 水分解システムにおけるバイオハイブリッド光電陰極の開発 ビオロゲン系酸化還元活性ポリマーと、水素生成に関する高い触媒性能を持つ[FeFe]-ヒドロゲナーゼとを、PB6増感NiO電極に統合することにより、効率的で堅牢なバイオハイブリッド光電陰極を実現 ■ 酸化還元ポリマーによる電荷再結合の回避 過渡分光データから、酸化還元ポリマーは還元された色素から効率的に電子を抽出し、光電極における電荷再結合を回避可能なことが示された

海外論文事例（3/3） Edward Sargent ～CO₂電解～

- Edward Sargentらは、順方向バイアス双極性膜電極アセンブリで高いSPCE状態で動作する触媒を設計
- 上記触媒の適用により、最大63%のエチレンファラデー効率を達成

著者	Edward Sargent
所属組織	Northwestern University
タイトル	Carbon-Efficient CO ₂ Electrolysis to Ethylene with Nanoporous Hydrophobic Copper
公表年	2024
概要	触媒表面の水とCO ₂ の濃度を調節するように 3Dナノポーラス触媒 を設計し、未反応のCO ₂ を回収する 順方向バイアス双極性膜電極アセンブリ(f-BPM MEA) で より高いエチレン選択性 を実現
課題	■ シングルパス炭素効率(SPCE)*1の向上 ➢ 現在の電気触媒CO₂還元反応システムでは、中性またはアルカリ性の電解質を多用しているため、SPCEが低い ✓ CO₂原料の大部分が、陰イオン交換膜を通過して炭酸イオンを形成し、陽極室でCO₂ガスとして放出され失われる ■ カソードガス出口におけるエチレン濃度の低下 ➢ 膜電極アセンブリ内で順方向バイアスで双極性膜を使用することによりSPCEが向上するが、H₂の生成が多く、C₂H₄(エチレン)の生成が少ない
成果	■ 多孔質構造かつ疎水性向上により触媒表面でのCO₂濃度と局所的な水の利用性を最適化して、f-BPM MEAで高いSPCE状態で動作する触媒を設計 ■ f-BPM MEA システムに 上記触媒を適用することで、最大63%のエチレンファラデー効率を達成（従来45%未満）
結論	■ 触媒の開発 順方向バイアス双極性膜電極アセンブリにおいて、高SPCEを実現する触媒を開発 ■ エチレンファラデー効率の改善 上記触媒により最大63%のエチレンファラデー効率を達成

※1：電気化学反応において、投入された炭素源（例えば、CO₂）が、目的の製品に変換された割合を表す指標

P.80

出所1 : Virgil Andrei..etc “Modular perovskite-BiVO₄ artificial leaves towards syngas synthesis on a m² scale” (2025年)

P.81

出所1 : Fangwen Cheng..etc “Embedding biocatalysts in a redox polymer enhances the performance of dye-sensitized photocathodes in bias-free photoelectrochemical water splitting” (2024年)

P.82

出所1 : Panagiotis Papangelakis..etc “Carbon-Efficient CO₂ Electrolysis to Ethylene with Nanoporous Hydrophobic Copper” (2024年)

EOF
