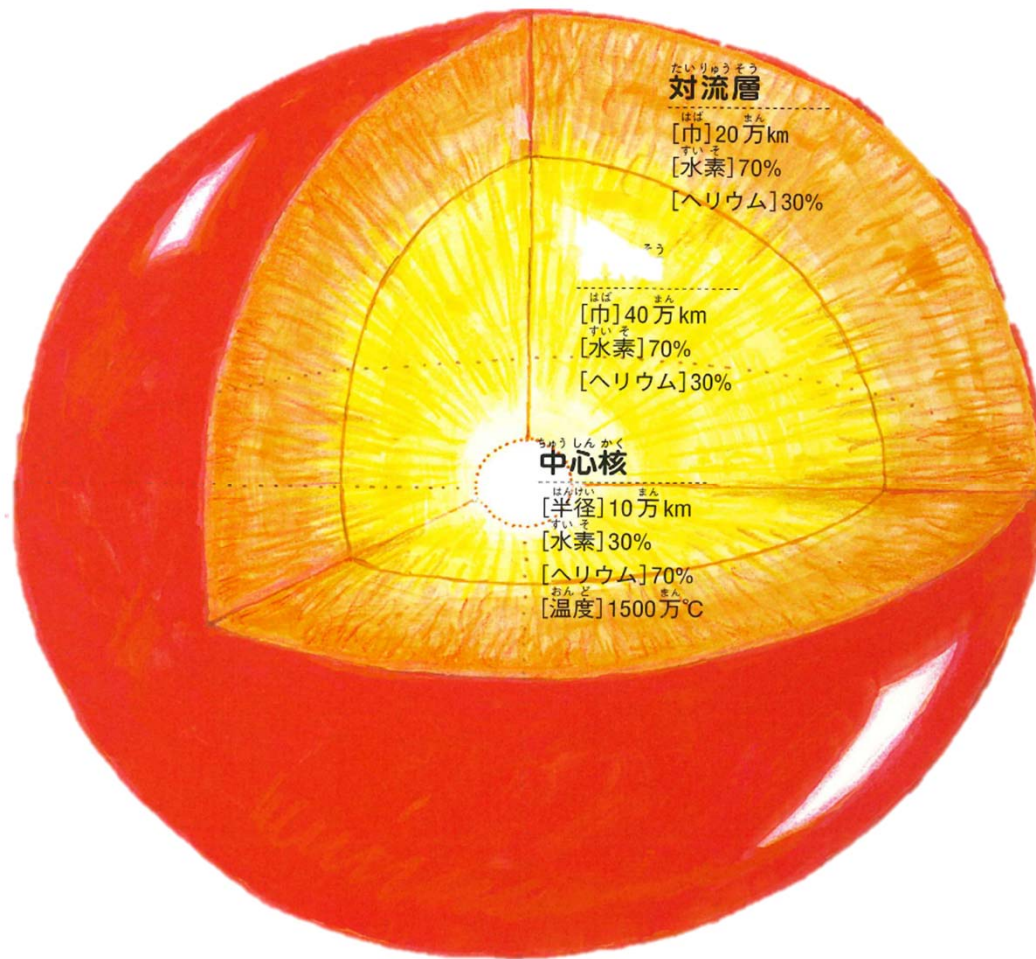


光触媒を基軸とした カーボンリサイクルの実現

藤 嶋 昭
東京理科大学 栄誉教授

太陽エネルギーのすごさ



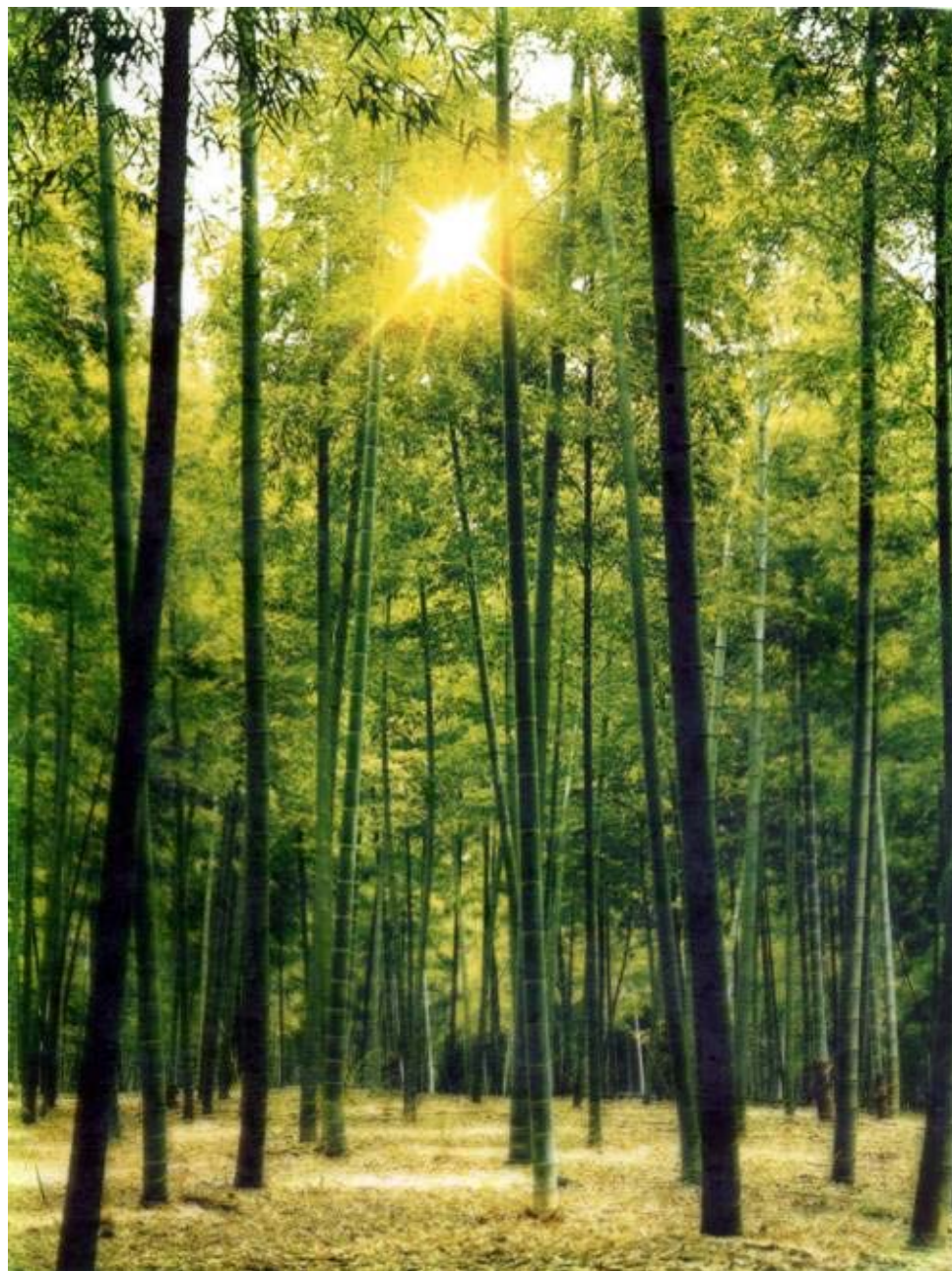
水素 → ヘリウム
6億トン/秒

22億分の1が地球へ

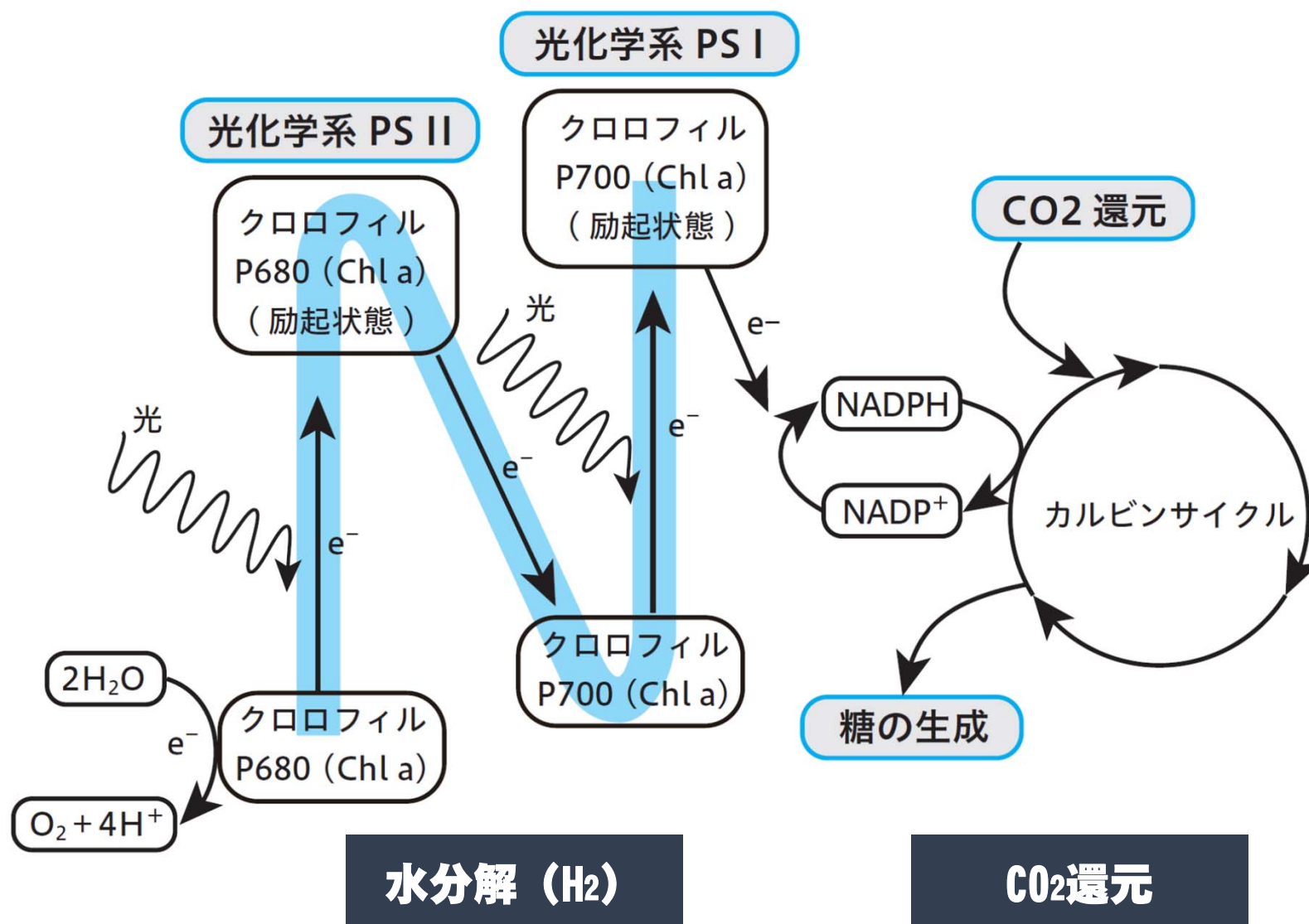
1年のうち1時間変換で

エネルギー問題解決！

地球上へ太陽を !!
核融合研究



光合成におけるZスキームとカルビンサイクル

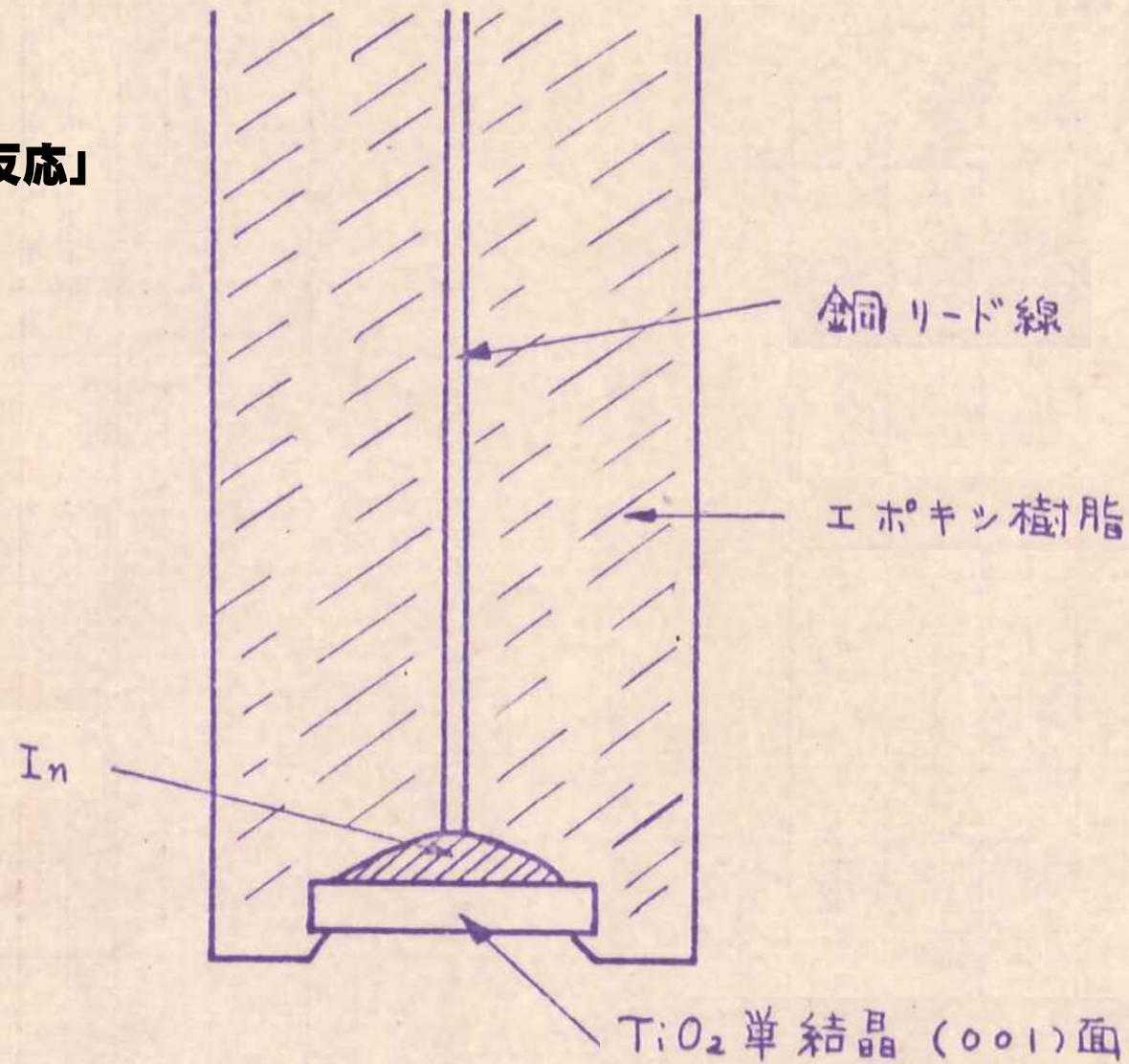


酸化チタンの光触媒による水の光分解に成功

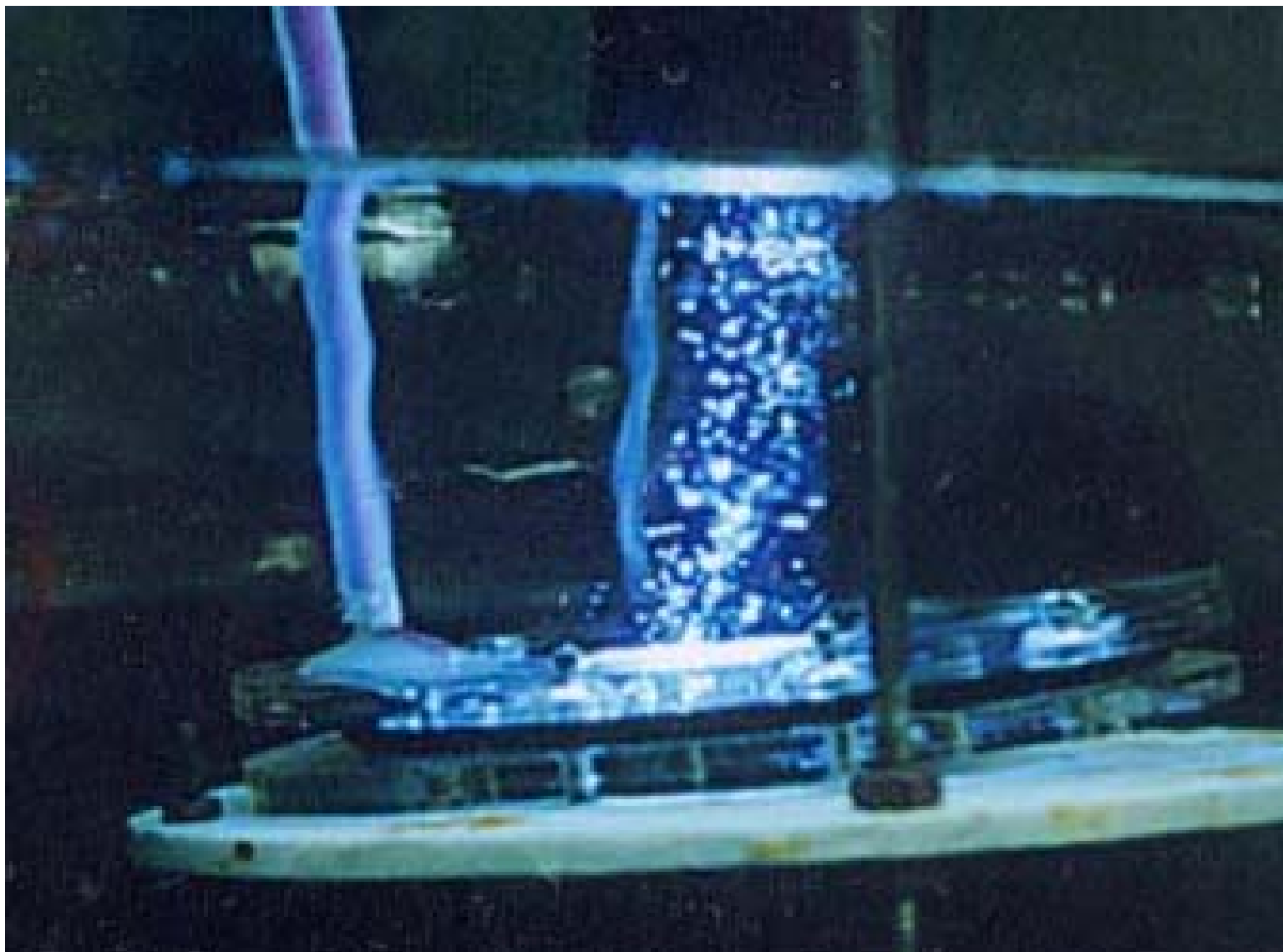


酸化チタン電極の断面図

博士論文
「半導体の光電極反応」
から抜粋

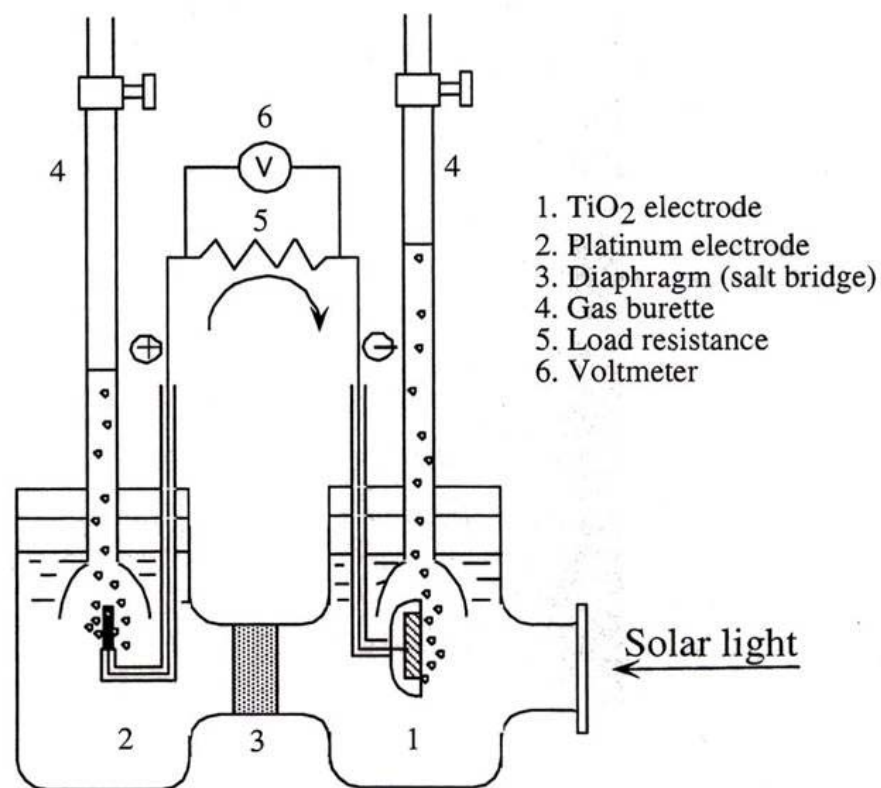


酸素発生の様子

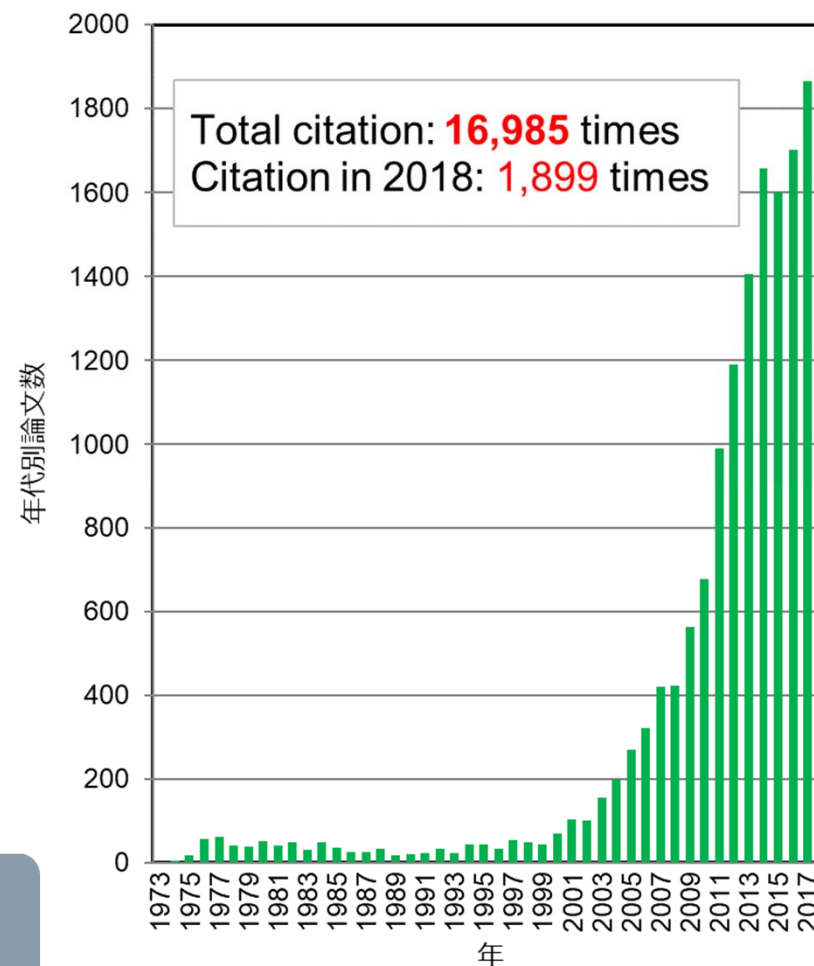


水の光分解を発見

A. Fujishima, K. Honda *Nature* (1972)



ルチル型 TiO_2 単結晶による水の光分解に成功し、
今もなお高い注目を浴びている

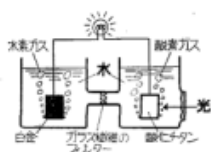


全国紙元旦の一面記事で報道

昭和49年(1974年)1月1日 火曜日 31627号 (日刊)

太陽で「夢の燃料」

日本科学者発見の原理に脚光



西村 哲郎 助教授



西村 哲郎 助教授

水中の半導体に光あて 水素ガスを採取

各国が注目

実用化にはなお時間

【東京12月31日電】東京理科大学の西村哲郎助教授が、水中の半導体に光をあてると水素ガスを採取できるという原理を発見した。この発見は、水素ガスの採取に大きな進歩をもたらす可能性がある。西村氏は、この発見について、水素ガスの採取に大きな進歩をもたらす可能性がある。この発見は、水素ガスの採取に大きな進歩をもたらす可能性がある。

西村氏は、この発見について、水素ガスの採取に大きな進歩をもたらす可能性がある。この発見は、水素ガスの採取に大きな進歩をもたらす可能性がある。

朝日新聞

発行所
朝日新聞東京本社
東京千代田区有楽町2丁目3番地
電話(03)212-0131
郵便番号100
©朝日新聞東京本社1974

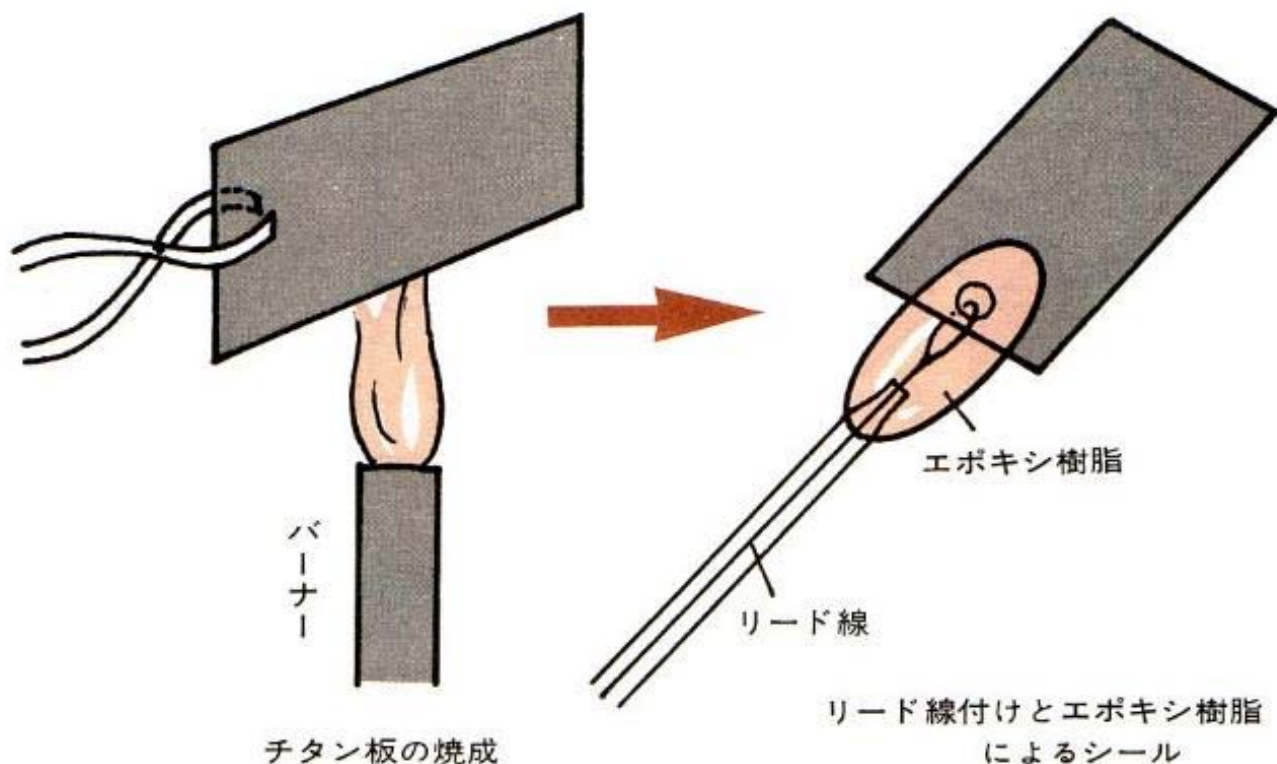
あけまして
おめでとう
ございます

みなさまの新年に立つ
三和銀行

昨年末の
外貨準備
122億
余に減る

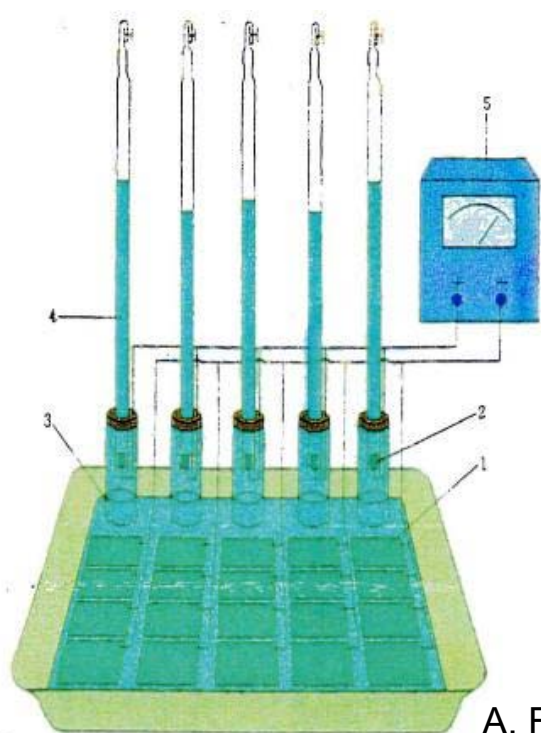
簡易・大面積酸化チタンの作製法を開発

チタン板をバーナーで炙るだけで
大面積かつ高活性酸化チタンの作製法を開発



太陽光による水素製造の試み

酸化チタン板を敷き詰めて、太陽光下での水素発生実験

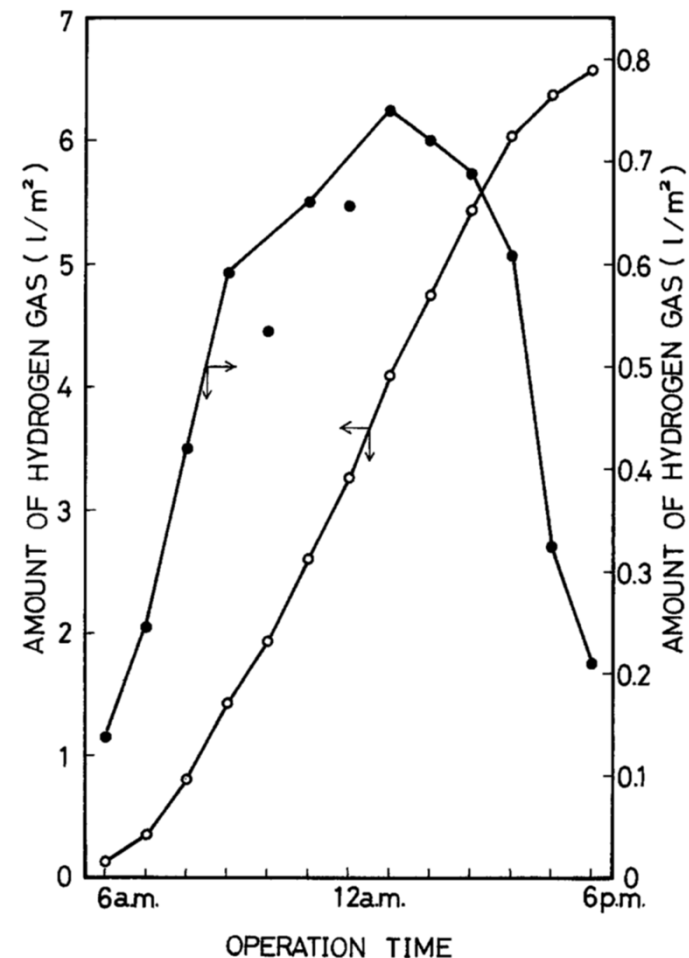


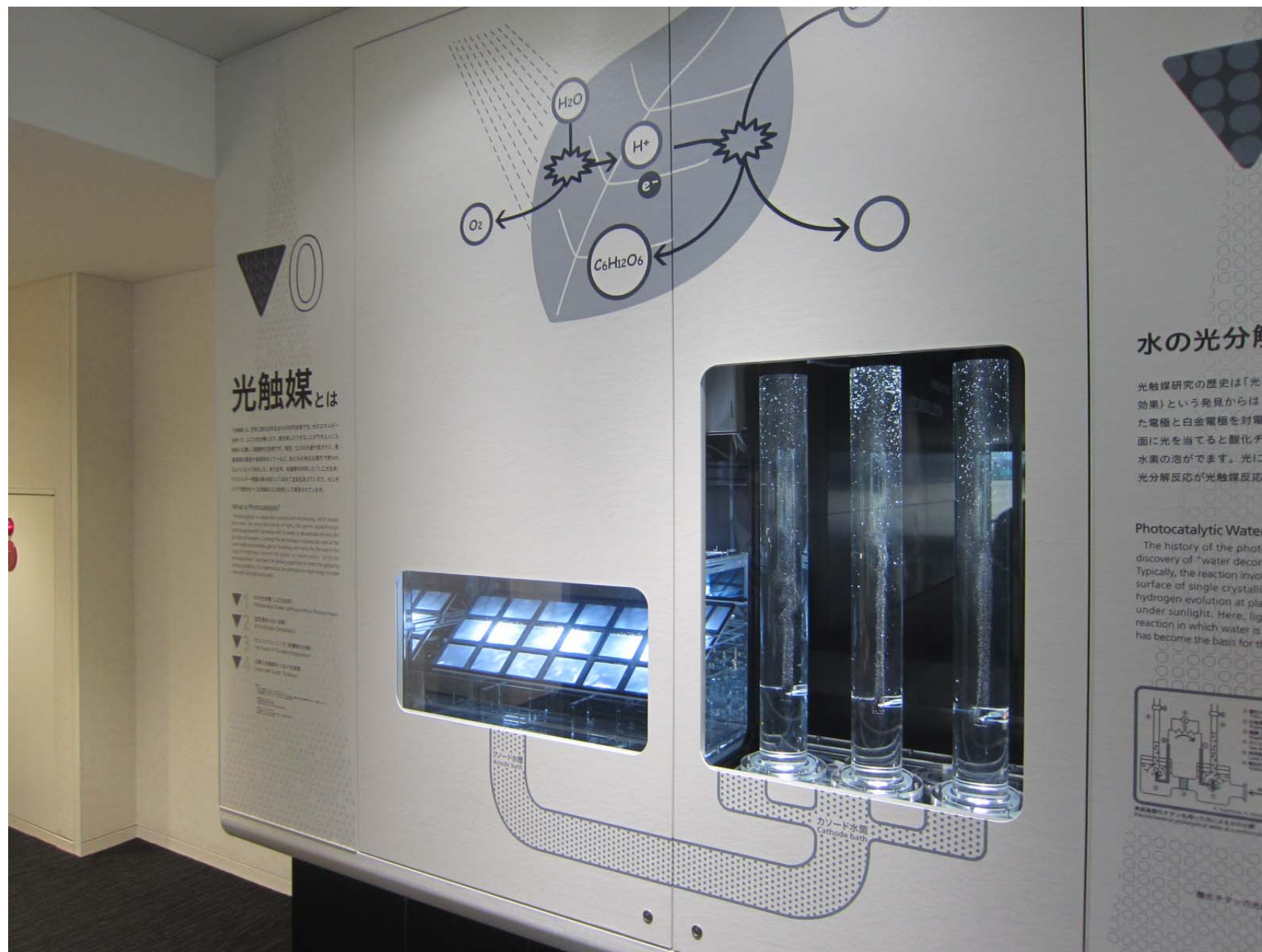
太陽光下での水素発生実験

- 1. TiO₂電極
- 2. 白金電極
- 3. 塩橋

A. Fujishima, K. Kohayakawa, K. Honda,
J. Electrochem. Soc. **1975**, 122, 1487.

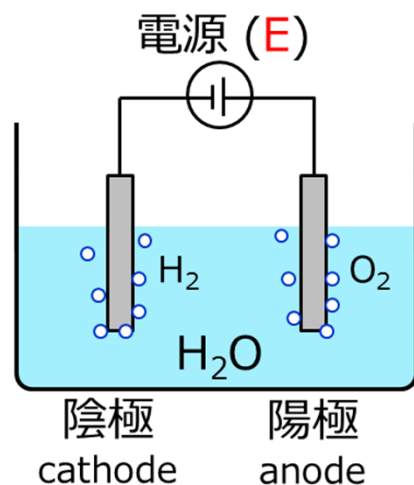
1m²あたりの酸化チタン板に対し、
6.6リットル/日の水素しか取り出せないことを実証





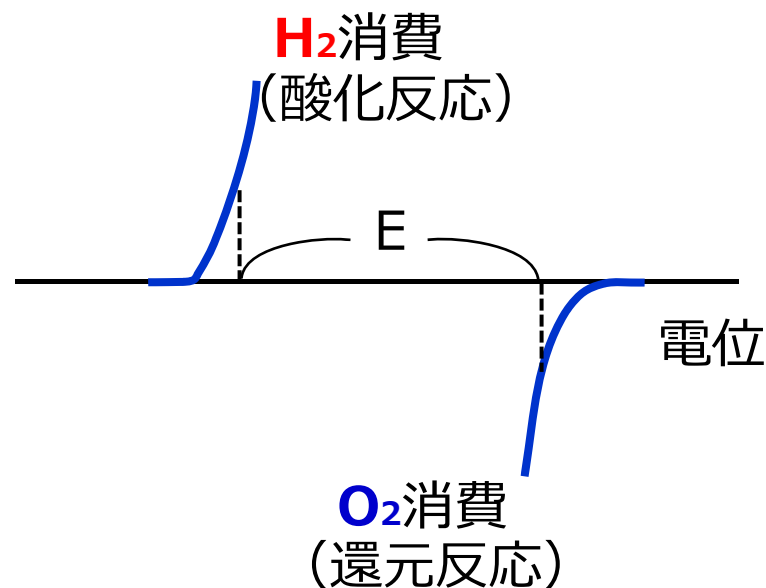
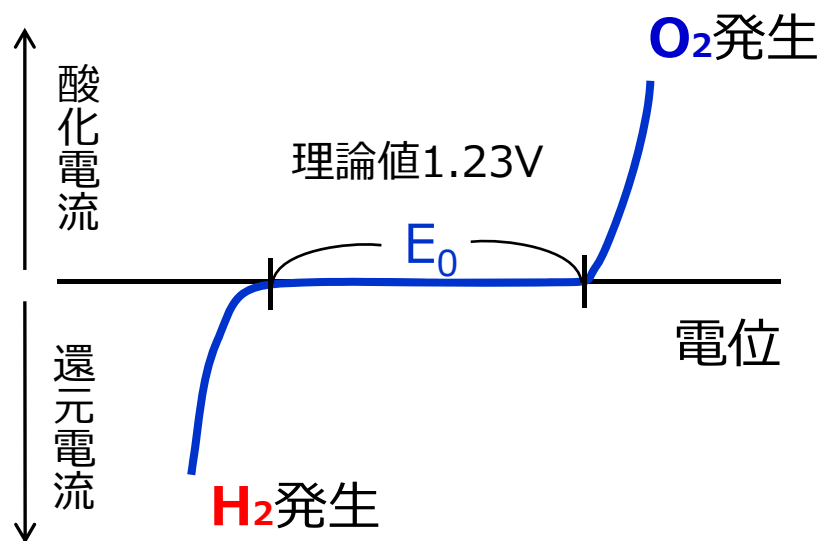
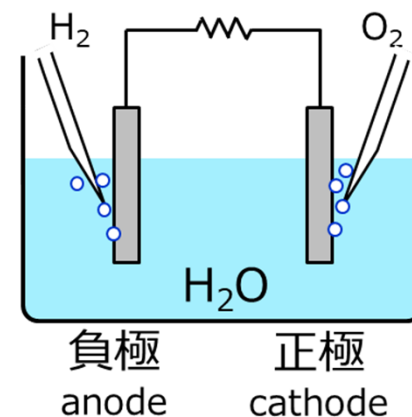
光触媒反応の基本原理

水の電気分解

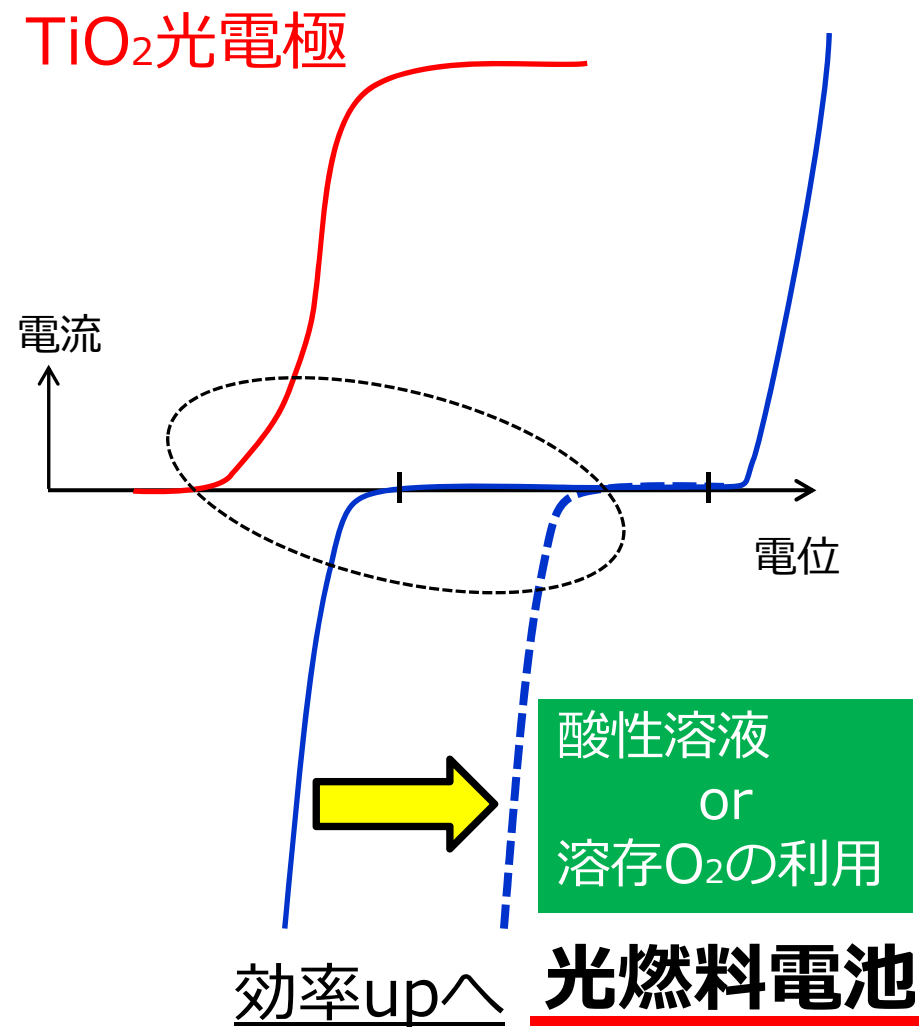
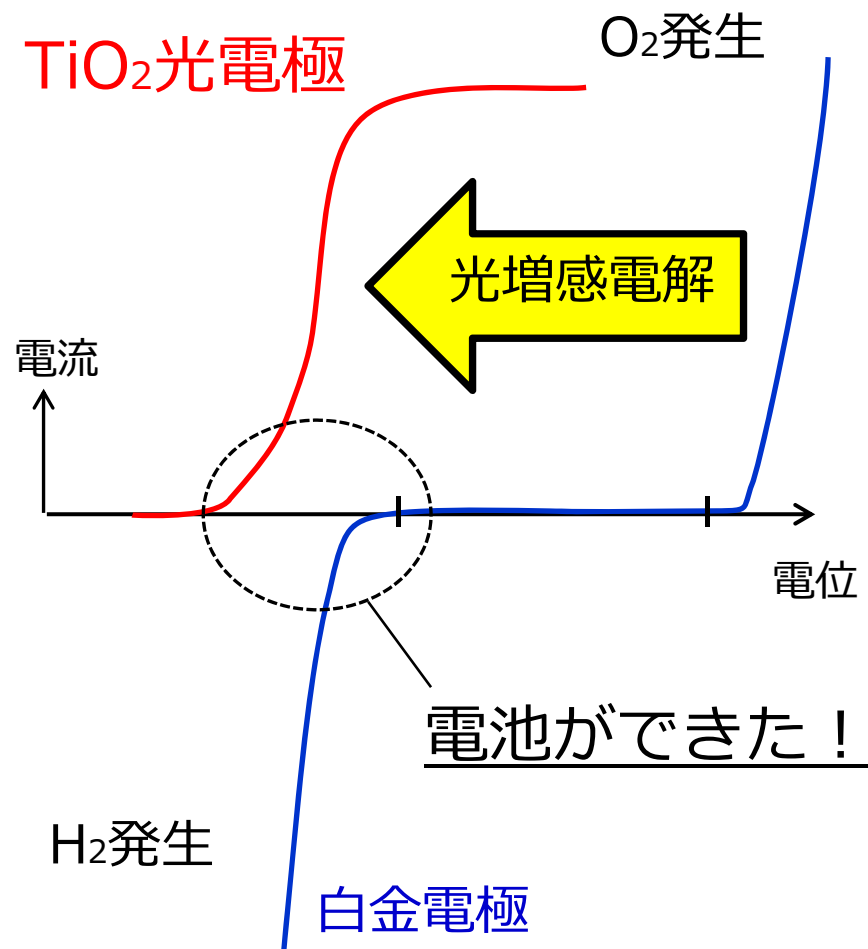


燃料電池

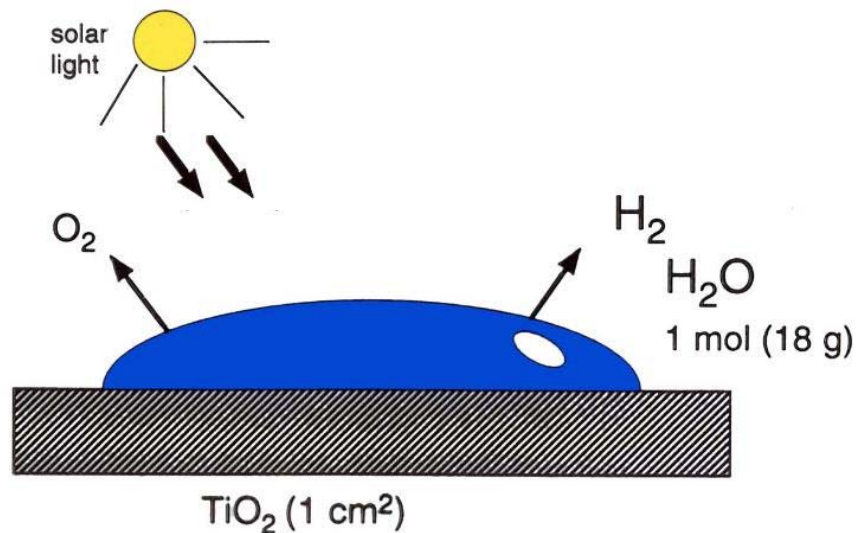
水の電気分解の逆反応
生成物は水



光触媒反応の基本原理

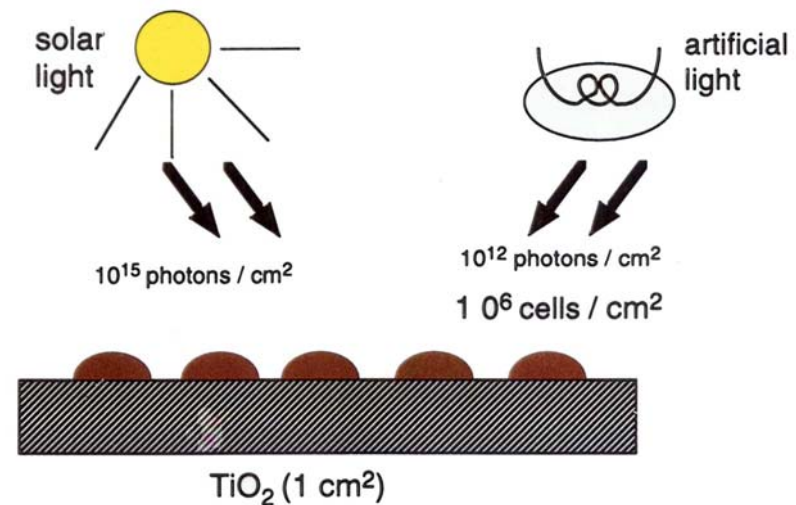


発想の転換



1cm² のTiO₂上にある1molの水(18g)を分解して水素を発生するのに必要な光子数は 6×10^{23} 個以上

太陽光は 10^{15} photons / cm²



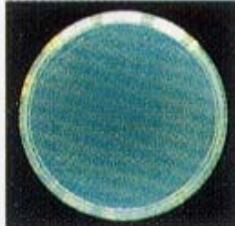
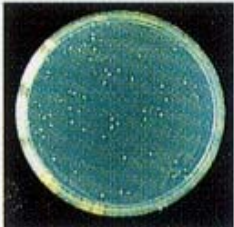
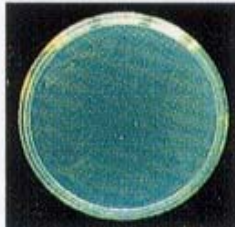
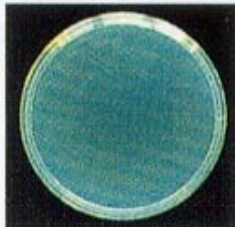
1cm² のTiO₂上にある大腸菌 10⁶個と比べて、実際の太陽光は非常に強い。蛍光灯でも、大腸菌の数よりも多い。



エネルギー効率を考えると、水素発生に用いるよりも、細菌などの分解に用いる方が現実的である

殺菌性能評価

Bactericidal effect

	Ordinary tile	Photocatalytic anti-bacterial tiles
	1000 lux illumination	1000 lux illumination (1 hour.)
<i>E. coli</i>		
Methicillin-resistant <i>Staph. aureus</i> (MRSA)		
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>		



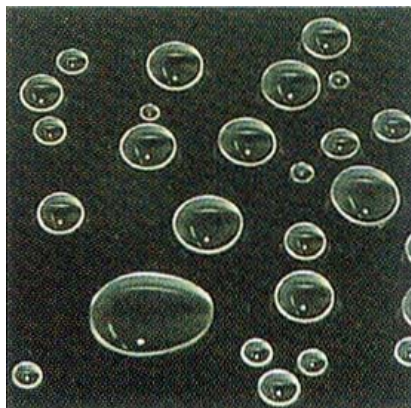




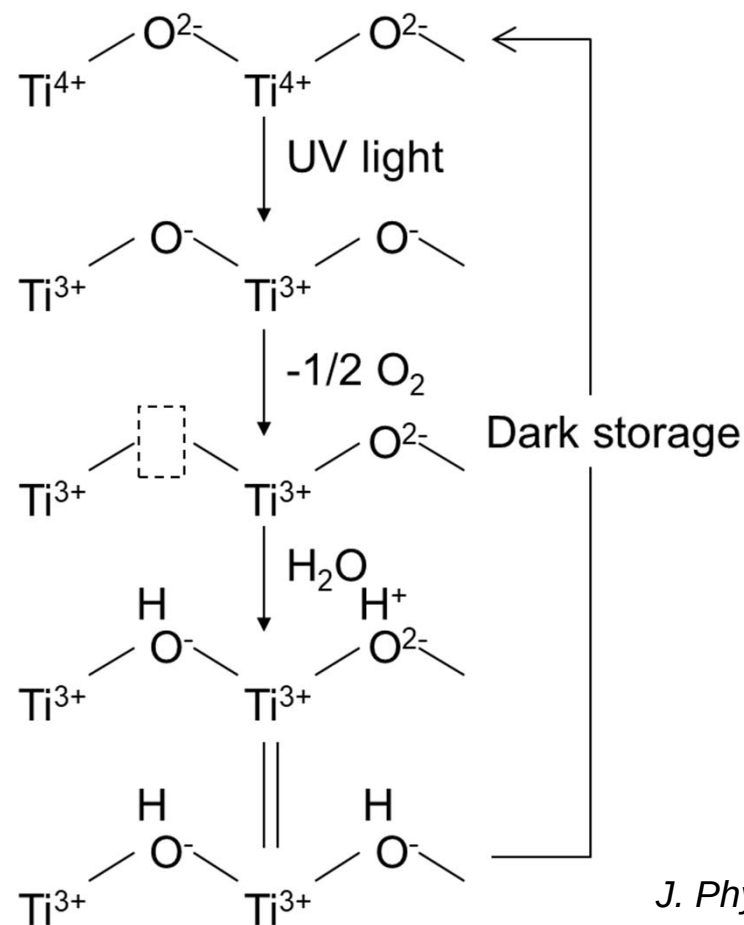
N700系喫煙ルーム 光触媒脱臭装置

超親水性作用の発見 カガミがくもらない

疎水性TiO₂



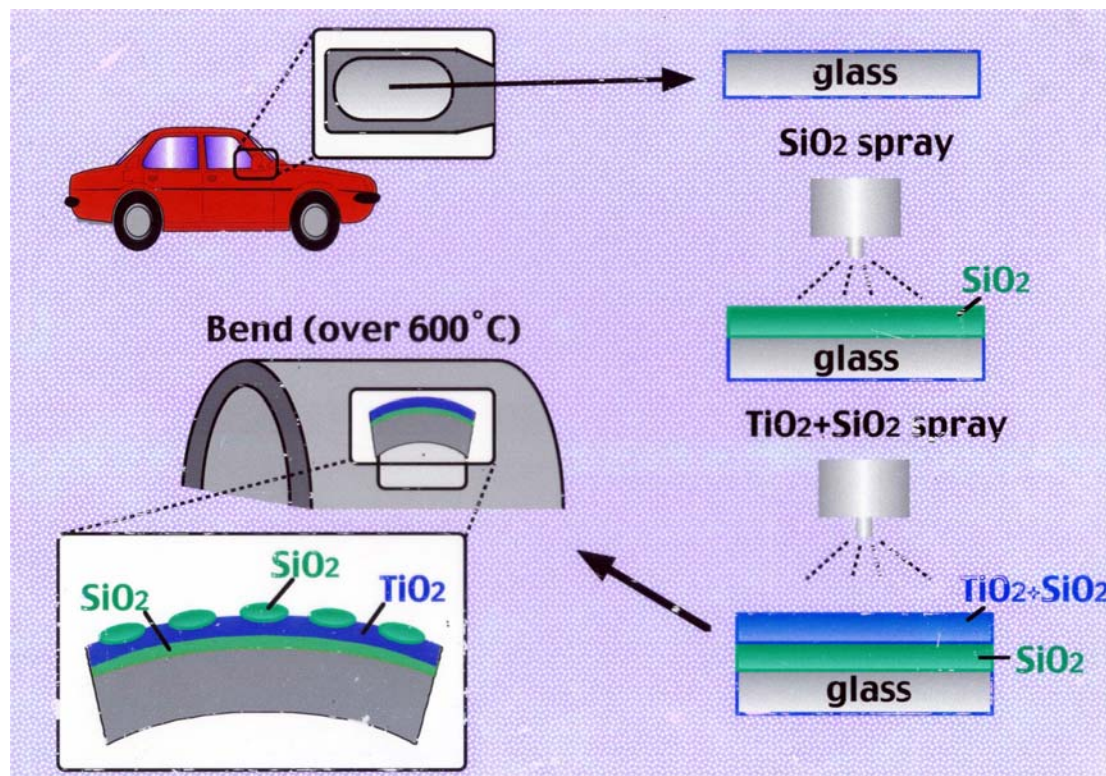
親水性TiO₂



J. Phys. Chem. B **2001**, 105, 3023

Wang, R.; Hashimoto, K.; Fujishima, A. *Nature* **1997**, 388, 431

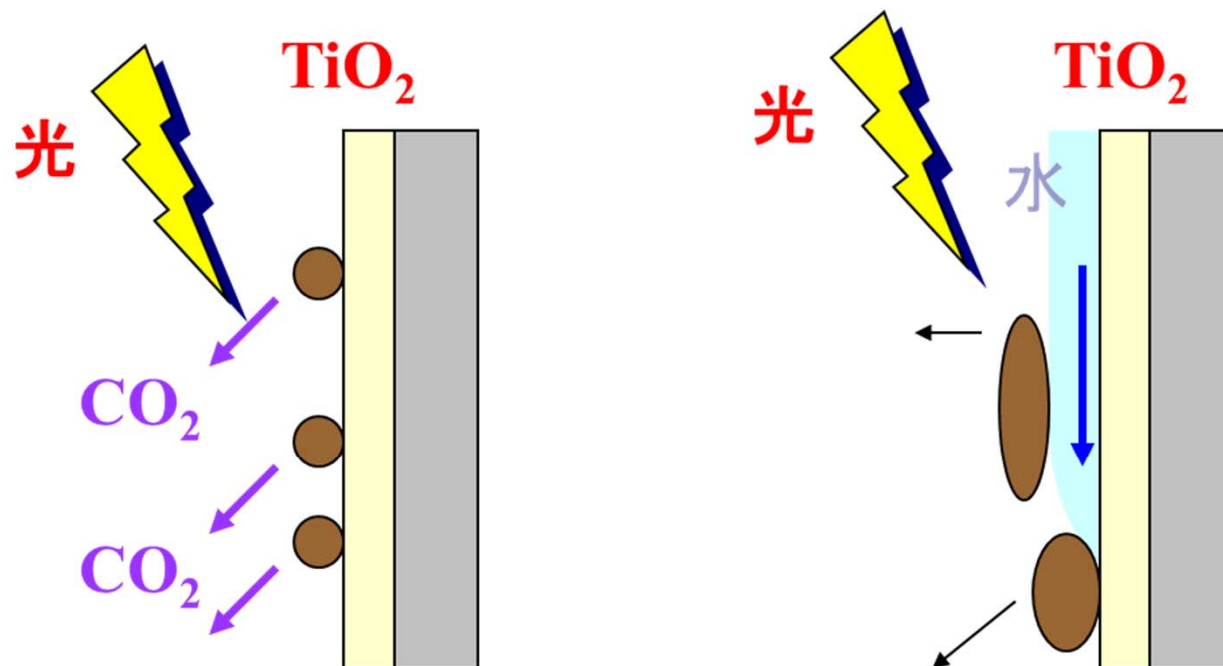
車のサイドミラーのコーティング



光触媒つきミラー

光触媒によるセルフクリーニング効果の発現

有機物分解と超親水性作用により，セルフクリーニング効果



(1) 徐々にくる油汚れは強い酸化力で分解させる.

(2) かなりの油汚れも水をかけると超親水性効果で除去できる.

セルフクリーニング環境材料として、産業応用が飛躍的に拡大

酸化分解力

Advanced oxidation process

超親水性

Superhydrophilicity





グランルーフ(東京駅八重洲)



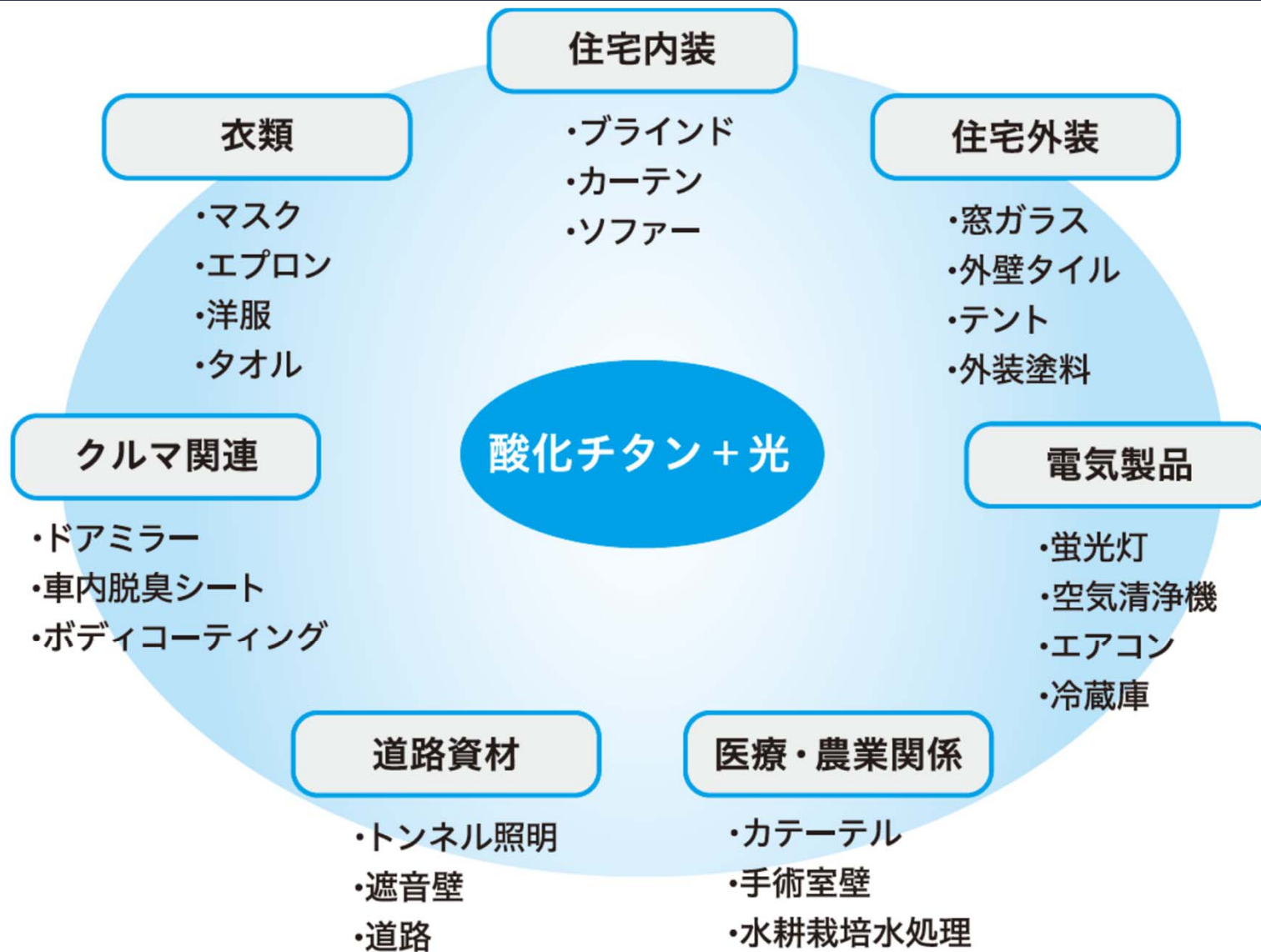
アメリカでも展開



ダラスカウボーイズ・フットボールクラブ
スタジアム

発想の転換から 環境光触媒が発展

各ジャンルで活躍する光触媒



東京理科大学 光触媒国際研究センター

Tokyo University of Science
Photocatalysis International Research Center

2013年開所

経済産業省
平成22年度補正
予算で実施する
「イノベーション
拠点立地支援
事業（「技術の
橋渡し拠点」整
備事業）」の助
成により整備



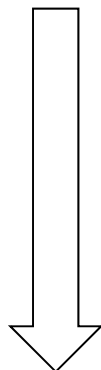
皇居で講書始 『太陽エネルギーと光触媒』

2018年1月10日



パスツール型研究でイノベーションへ挑戦

基本原理の発明から



パスツール型という

Donald E. Stokes

馬場靖憲

実用化まで

藤嶋昭と橋本和仁が
研究に力く光触媒はパスツール型だ。

安部総理大臣の 「世界経済フォーラム (ダボス会議)」 基調講演で紹介



**例えば人工光合成です。
これにとってカギを握るのが
光触媒の発見でしたが、手掛
けたのは日本の科学者で、
「藤嶋 昭」という人です。**

YOMIURI ONLINE 2019年1月23日 19時58分

人工光合成によるカーボンリサイクルの鍵



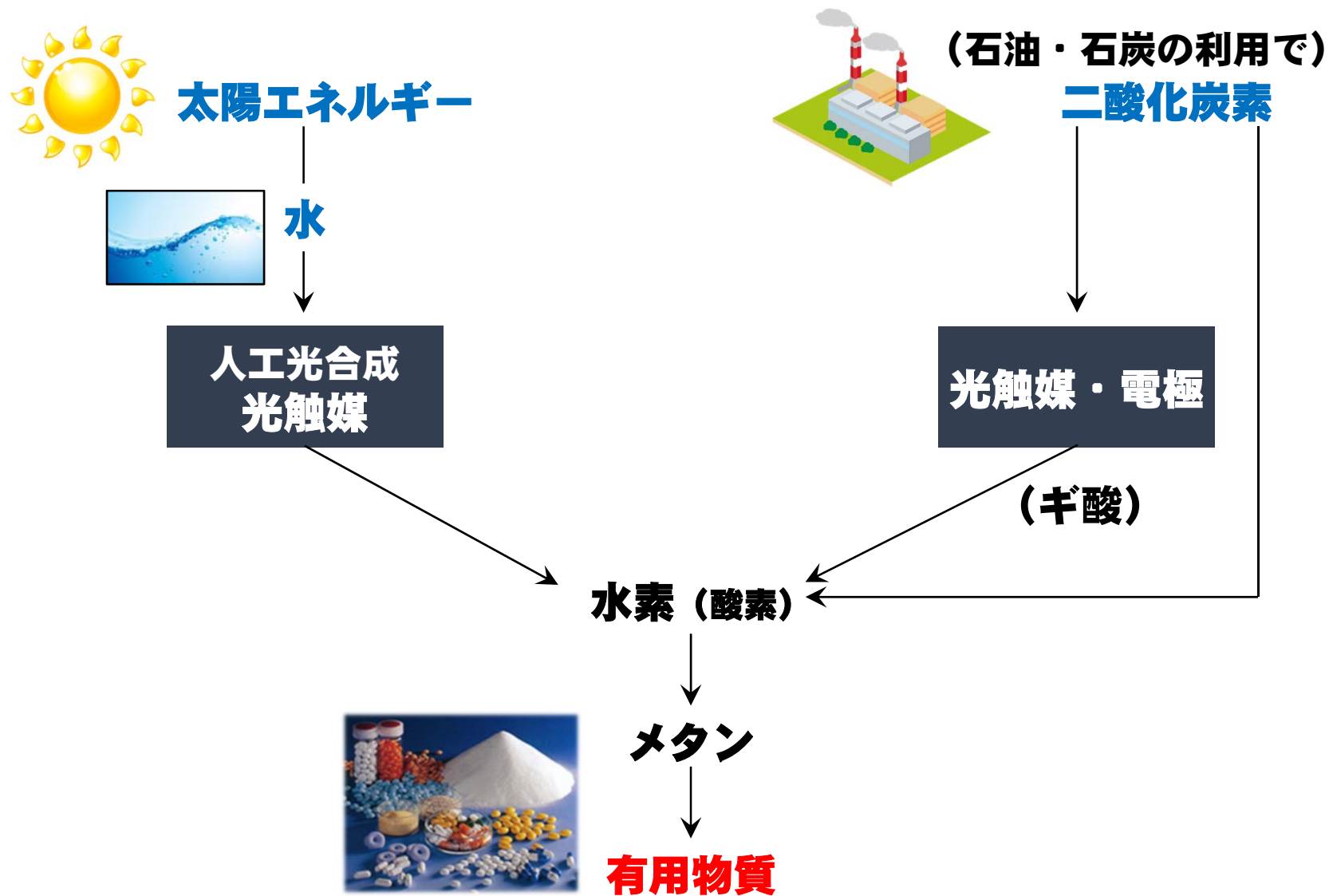
メタネーション

↑
(人工光合成)



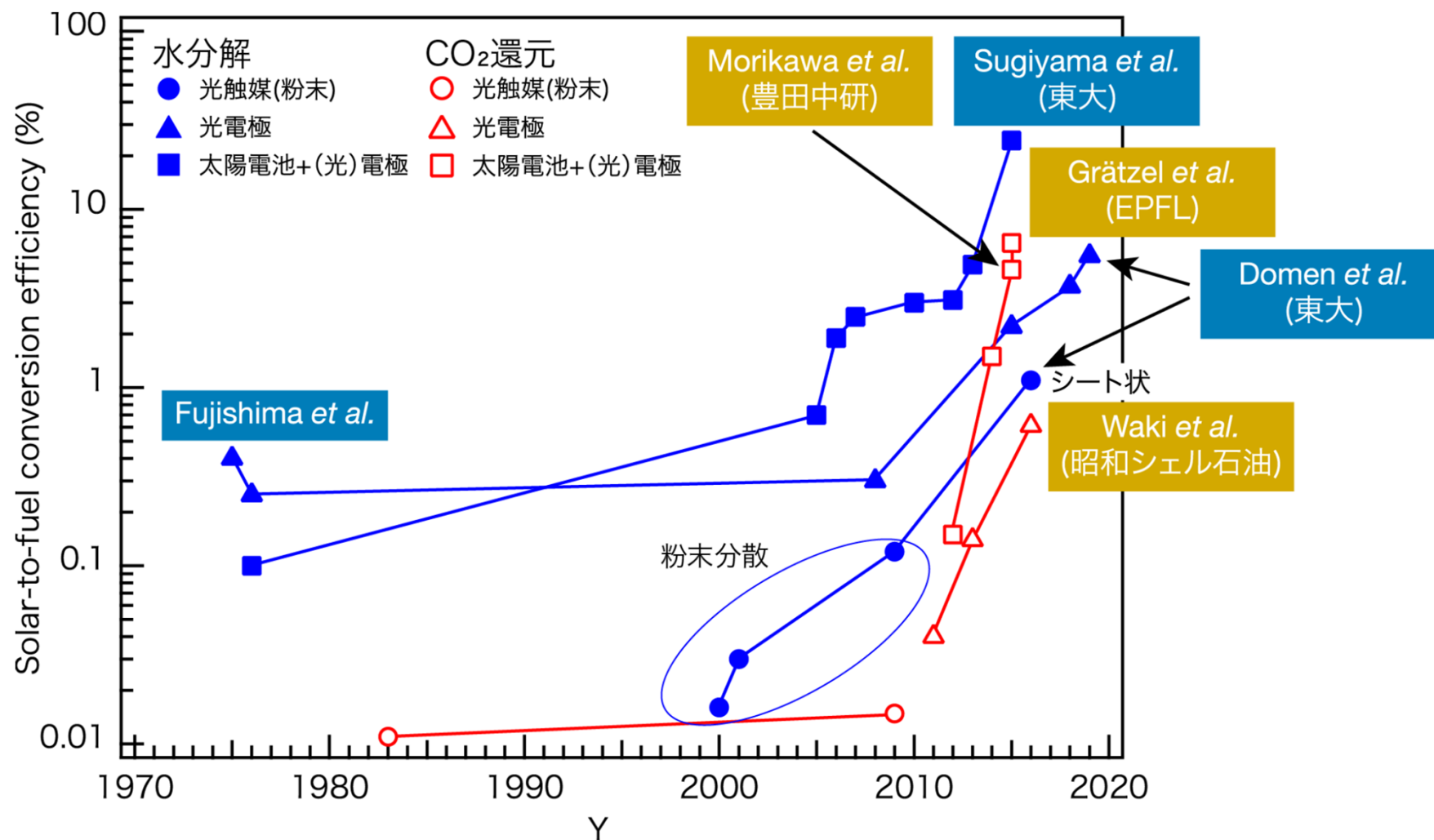
効率良く可能か？

提言【概要】



各国における人工光合成の研究開発動向

人工光合成の効率記録



アメリカにおける人工光合成の研究開発動向

2010年：エネルギー省(DOE: Department of Energy)により
Joint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP)の設立



第1期 (～2015年9月)

ソーラー水素製造技術に注力



第2期 (2015年10月～2020年)

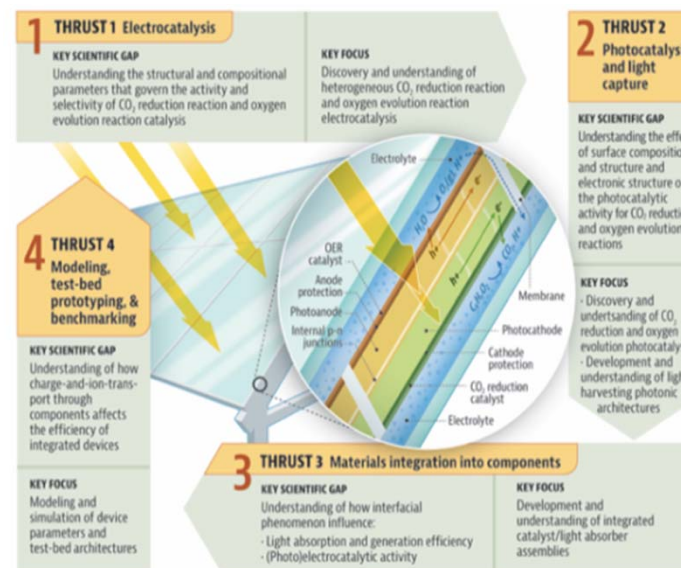
太陽エネルギーにより二酸化炭素を化学燃料に変換

研究資金 5年間で7,500万ドル (約83.6億円)

参画機関

カリフォルニア工科大学
ローレンス・バークレー国立研究所
カリフォルニア大学アーバイン校
カリフォルニア大学サンディエゴ校
スタンフォード大学 SLAC国立加速器研究所

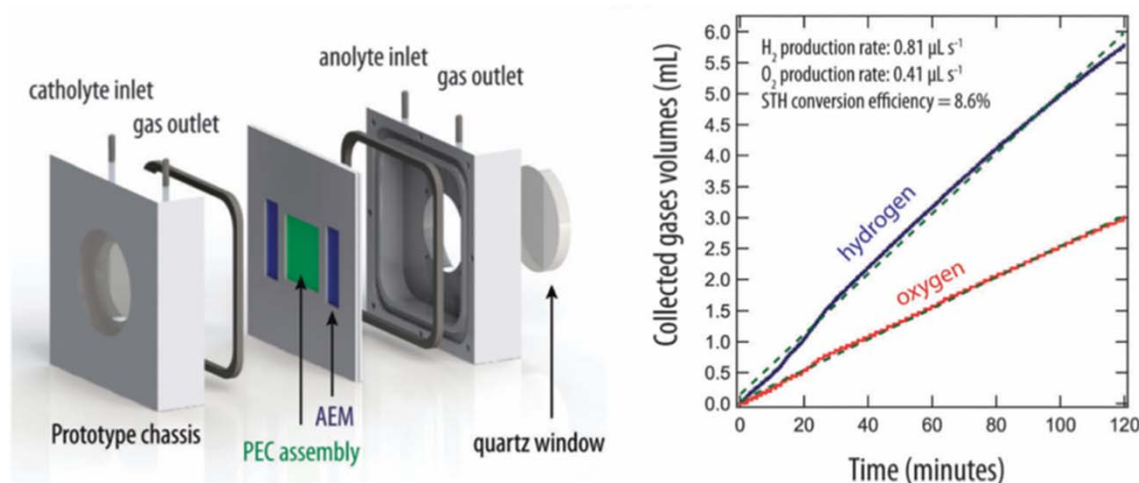
一体型のデバイスを用いて表面と裏面で水の酸化反応と二酸化炭素の還元反応をそれぞれ進行させることを目指している



JCAPによる研究成果

一体型デバイスによる光電気化学的水分解反応の実施

H. A. Atwater (カルフォルニア工科大)ら



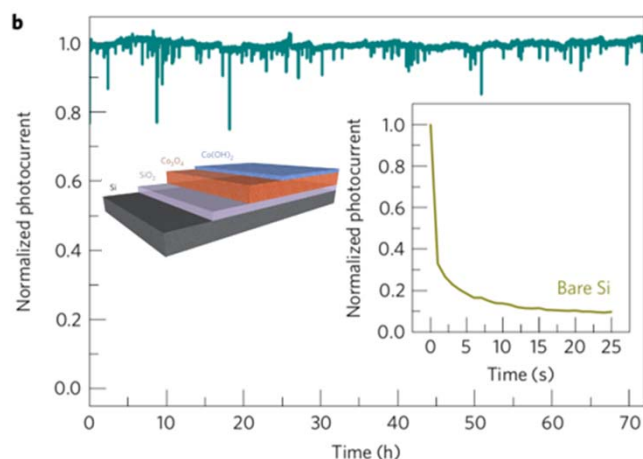
Ni触媒と TiO_2 保護層で修飾されたGaAs/InGaPタンデム接合型光アノードとイオン交換膜で隔たれたNiMo系カソードを用いて1M水酸化カリウム水溶液中で光電気化学的水分解反応を行い、**10%**の太陽光-水素変換効率と**数十時間**にわたる連続運転を実施

水素と酸素が別々の場所から生成するため、水素爆鳴気が発生しないため、爆発に対する安全性が高いが、デバイスが煩雑であることから拡張性やコストに難あり

Energy Environ. Sci., **8**, 3166-3172 (2015)

JCAPによる研究成果

水分解触媒を半導体上に一体化して太陽電池を強化



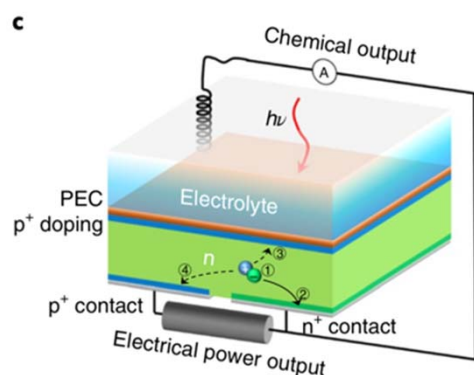
I. D. Sharp (ローレンス・バークレー国立研究所)ら

水分解触媒の化学的性質を原子スケールで太陽電池に組み込み、人工光合成の安定性と効率を大きく向上

作成した人工光合成システムは、**3日間**連続駆動

Nat. Mater., **16**, 335-343 (2017)

太陽光による水分解で水素と電気の両方を生成する人工光合成システム HPEV (hybrid photoelectrochemical and voltaic) セルを開発



I. D. Sharp (ローレンス・バークレー国立研究所)ら

水素生成に使用されず残った電子を捕獲して発電に利用することで、太陽光-水素変換効率を大幅に向上

計算上では20.2%の効果が期待

Nat. Mater., **17**, 1115-1121 (2018)

JCAPによる研究成果

データ解析によるCO₂還元用新規光触媒の探索

K. A. Persson (ローレンス・バークレー国立研究所)ら

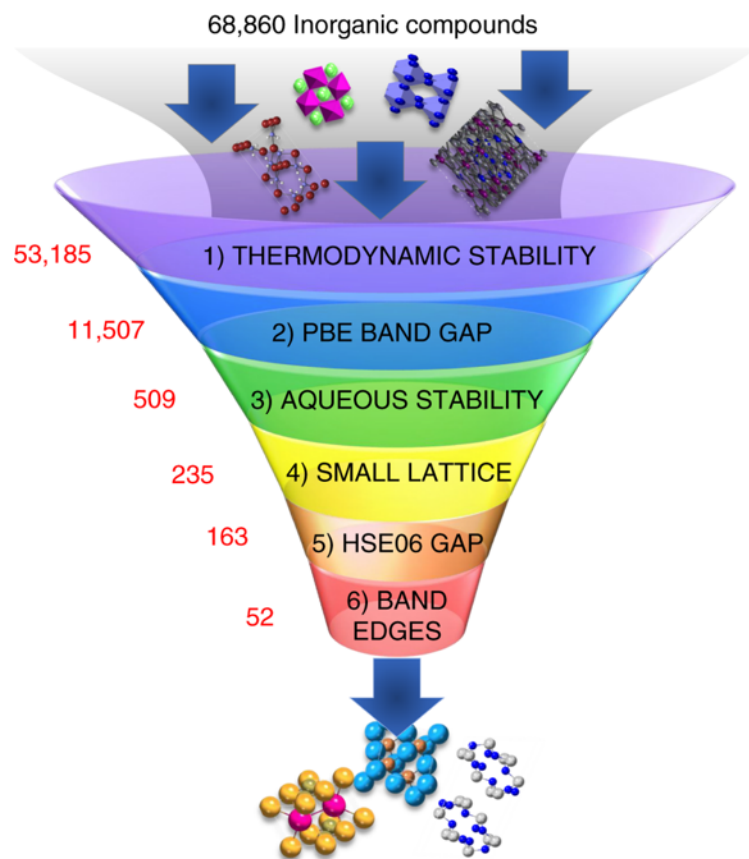
68,860種類の無機化合物を第一原理計算に基づくスクリーニングを実施

CO₂還元用光アノードの候補材用を52種類まで絞り込み

9種類：実験報告あり

43種類：新候補材料

{ 34種類：合成報告あり
8種類：合成報告なし
新規触媒としての可能性



Nat. Commun., **10**, 443-1121 (2019)

欧州における人工光合成の研究開発動向

Photoelectrochemical Demonstrator Device (PECDEMO)

8% 以上のSTH、1,000h以上の安定性、50 cm²以上のサイズのデバイスの実証

2014年4月1日～2017年3月31日（3年間） 総額340万ユーロ（約4.3億円）

参画機関

ヘルムホルツセンターベルリン研究所
スイス連邦工科大学ローザンヌ校
イスラエル工科大学
ドイツ航空宇宙センター

ポルト大学
エボニックインダストリー社
ソラロニクス社

Hybrid Materials For Artificial Photosynthesis (HyMAP)

2015年7月～2020年7月（5年間） 総額約250万ユーロ（約3.2億円）

IMDEA エネルギー機構（スペイン）が主幹

1%以上の太陽光-水素変換効率を有する多機能光触媒の開発

Fuel from Sunlight: Covalent Organic Frameworks as Integrated Platforms for Photocatalytic Water Splitting and CO₂ Reduction (COFLeaf)

2015年9月～2020年8月（5年間） 総額約150万ユーロ（約1.9億円）

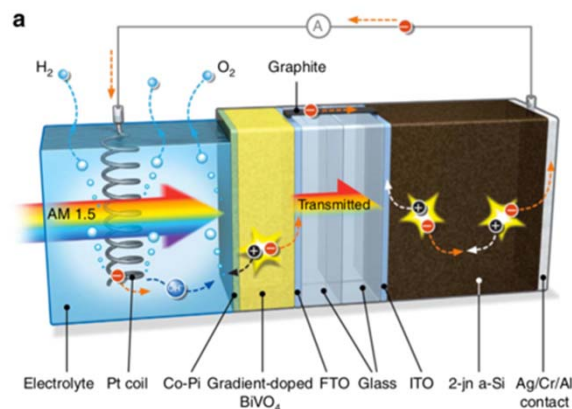
マックス・プランク研究所が主幹

有機分子を利用した水分解・CO₂還元システムの開発

PECDEMOによる研究成果

膜厚方向にドーパントの傾斜があるBiVO₄光アノードの作成

R. van de Krol (ヘルムホルツセンターベルリン研究所)ら



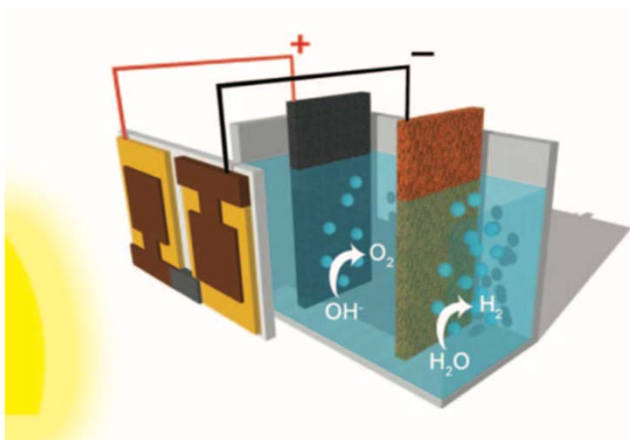
高い光アノードを観測

シリコン太陽電池と組み合わせて無バイアス条件下で
4.9%の太陽光-水素変換効率を報告

Nat. Commun., **4**, 2195 (2013)

安価な電池-電極による高効率水分解システムの開発

M. Grätzel (スイス連邦工科大学ローザンヌ校)ら



安価なペロブスカイト太陽電池とNi発泡電極を用いた
電解槽を組み合わせて12.3%の太陽光-水素変換効率を
実現

水蒸気存在下での太陽電池の安定性に課題

Science, **345**, 1593-1596 (2014)

日本における人工光合成の研究開発動向

文科省の科研費から経産省の未来開拓研究まで幅広い研究投資が同時期に始まったため、基礎研究から応用研究まで取り組みは広がっている。

経産省 未来開拓研究

グリーン・サステナブルケミカルプロセス基盤技術開発（革新的触媒）
「人工光合成化学プロセス技術研究組合 (ARPCChem)」

文科省 科学研究費補助金 新学術領域研究

「人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：実用化に向けての異分野融合 (AnApple)」

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 さきがけ
「光エネルギーと物質変換領域」

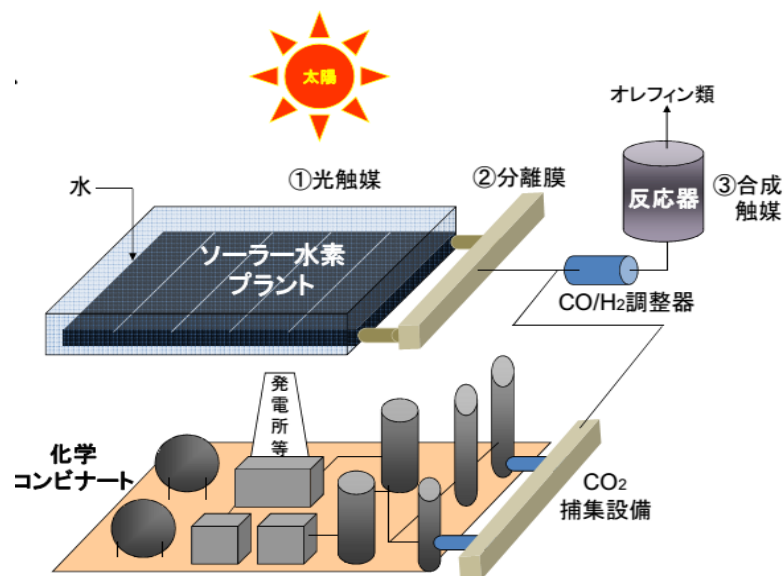
科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 先導的物質変換領域 (ACT-C)
低エネルギー、低環境負荷で持続可能なものづくりのための先導的な物質変換技術の創出

経産省 人工光合成化学プロセス技術研究組合 (ARPCChem)

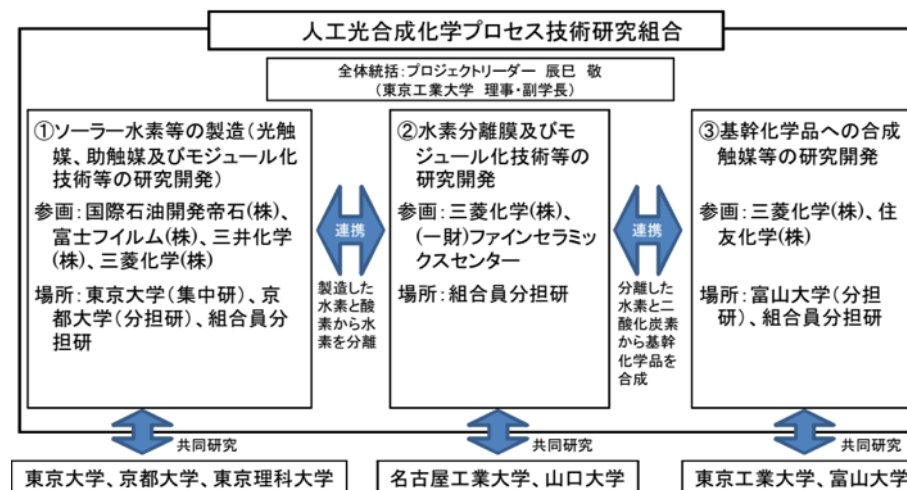
経産省と文科省との連携により開始された未来開拓研究プロジェクトの初年度の案件
事業期間：2012年～2021年度の10年間 事業規模：約150億円

- 2021年度末までに太陽光-水素変換効率10%を実現する光触媒システムを開発する。
- 太陽エネルギーを利用して光触媒によって水を分解し、分離して得られた水素と二酸化炭素からプラスチック原料等基幹化学品の製造を目指す。

想定しているシステム



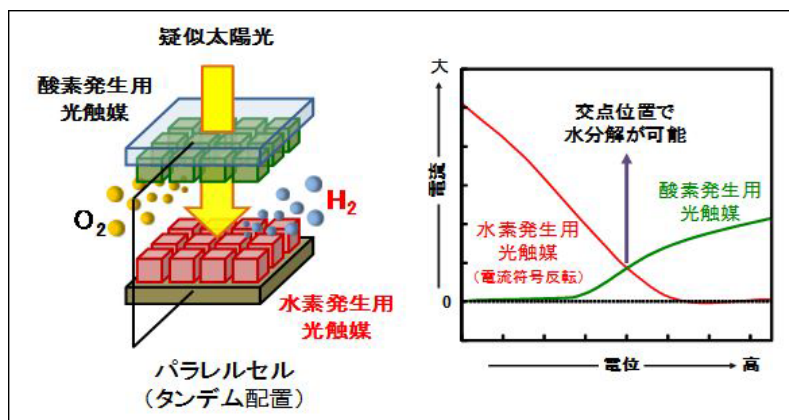
研究体制



5企業、1団体が参画

経産省 ARPChemにおける研究成果

人工光合成の水素製造で世界最高レベルのエネルギー変換効率2%を達成



- 可視光領域の光を吸収する水素および酸素発生用光触媒の組み合わせの最適化
- 光触媒をシート状にし、パラレルセルを作成



太陽光-水素変換効率が最高で**2.2%**、1時間平均で1.95%を達成

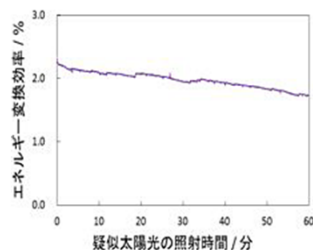


図3 エネルギー変換効率の時間変化

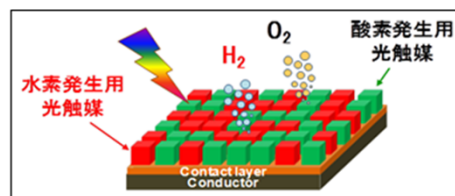


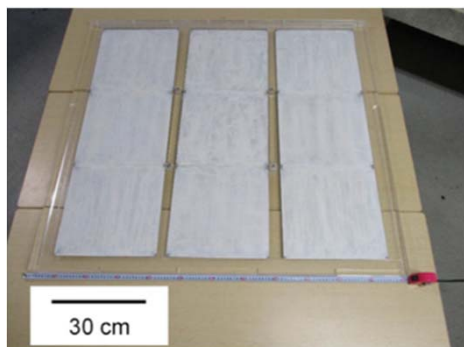
図4 混合型光触媒シートの概念図

将来の実用化を想定して、水素および酸素発生用光触媒を同じ基板上に成形した**混合型光触媒シート**を開発し、水素と酸素の発生を確認。

NEDO プレスリリース(2015年3月31日)

経産省 ARPChemにおける研究成果

大面積化・低コスト化を実現する新しい光触媒パネル反応器を開発 堂免 (東大)ら
TOTO(株)、三菱ケミカル(株)と共同開発



光触媒パネル反応器
1 m × 1 m

基板上に光触媒を塗布したシートを含む反応器を作成し、わずか水深1mmでの水分解を安定的に達成。

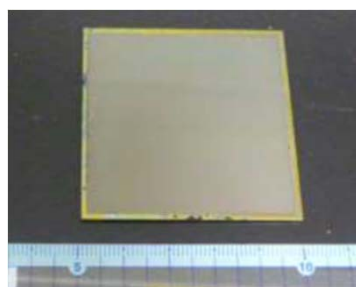
➡ 水量を大幅に低減することで、**反応器を軽量で安価な材料で作成することを可能に**

1m²サイズの大型パネル反応器を試作し、自然太陽光下でも水を水素と酸素に分解できることを確認。

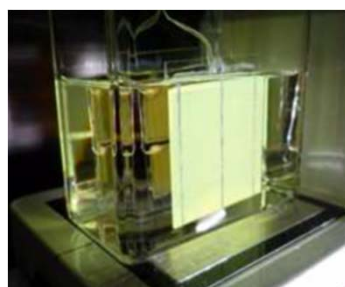
Joule, **2**, 509-520 (2018)

CIGSをベースとした光触媒で、非単結晶光触媒の中では世界最高の水素生成エネルギー変換効率12.5%を達成

堂免 (東大)ら



水素生成光触媒
5 cm × 5 cm



CIGS太陽電池は、赤外領域までの対応光を利用でき、既にメートルスケールの製造技術が確立されている。

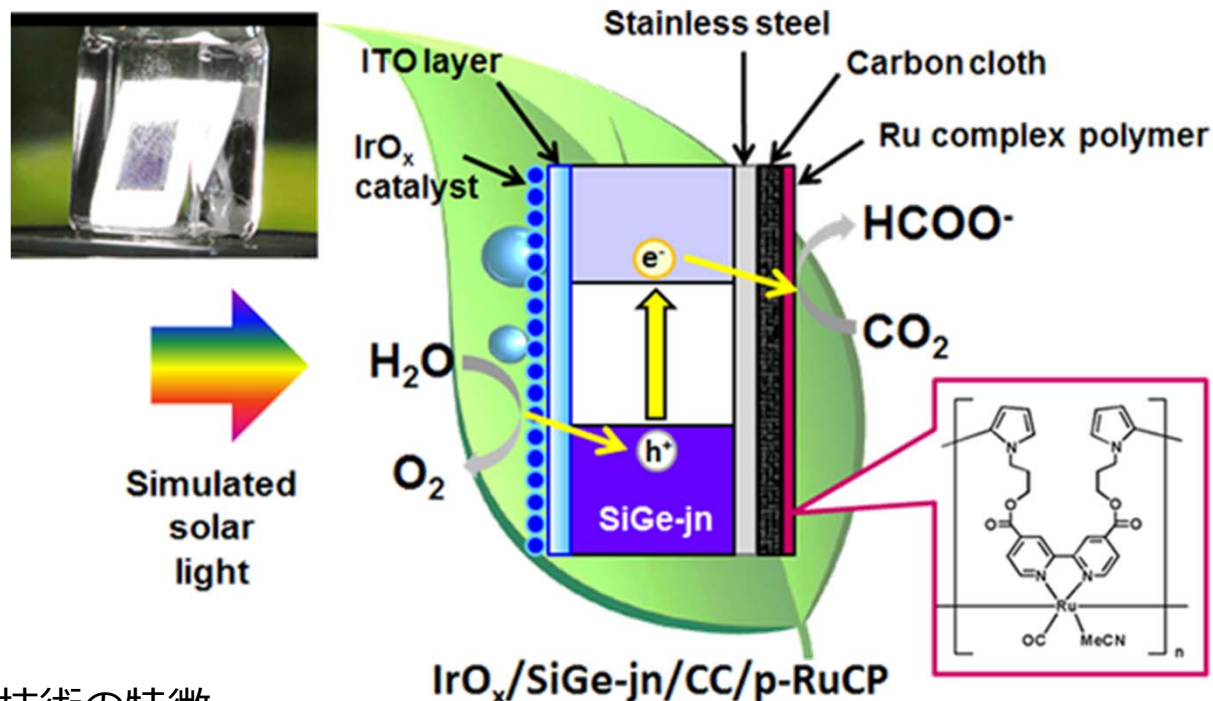
非単結晶光触媒は、単結晶と比較して**大型化（メートル級）に適した材料系であり、実用化が期待**

Angew. Chem. Int. Ed., **58**, 2300-2304 (2019)

JST ACT-Cでの研究成果

一枚の板状人工光合成デバイス「人工の葉」によるCO₂からのギ酸合成に成功
(2011年発表当時、人工光合成の実証に世界で初めて成功)

豊田中央研究所 森川健志シニアフェローら



光電極方式の超高効率化

- Ru 錯体
- carbon多孔体
- Si-Ge 接合型半導体
- IrO_x

上記の板状構造素子を
pH=6.4 の水溶液中に投げ込
む簡便な方法を開発し、**当初
計画の目標である太陽光変換
効率1.0%を遙かに凌駕する
4.6%でギ酸生成を達成**

技術の特徴

- 太陽光と同等の成分、強度の光
- 常温常圧下で反応
- 外部からの電力供給無し、
酸化還元反応を仲介する試薬を不使用

S. Sato et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 15240-15243 (2011)
T. Arai et al., *Energy Environ. Sci.*, **6**, 1274-1282 (2013)
T. Arai et al., *Energy Environ. Sci.*, **8**, 1998-2002 (2015)

企業による人工光合成研究への取り組み

会社名	方式	生成物	効率(%) ^{*1}	発表年	
NTT	光電極	水素	0.84	2017	水分解
TOTO(株) 三菱ケミカル(株)	光電極	水素	3.7	2018	
パナソニック(株)	光電極	ギ酸 メタン	0.2 0.04	2012 2013	CO ₂ 還元
(株)東芝	光電極	一酸化炭素	1.5	2014	
(株)豊田中央研究所	光電極	ギ酸	4.6	2014	
昭和シェル石油(株)	光電極	メタン エチレン	0.61 0.1	2016	

*1 太陽光エネルギーから生成物への変換効率

その他

- 富士通研究所：人工光合成用電極（明反応電極）の開発（2016）
- 飯田グループホールディングス(株)：人工光合成技術による「IGパーフェクトエコハウス」の実証試験開始（2017）

人工光合成に関するロードマップ

日本は世界に先立って人工光合成についてロードマップを策定している。

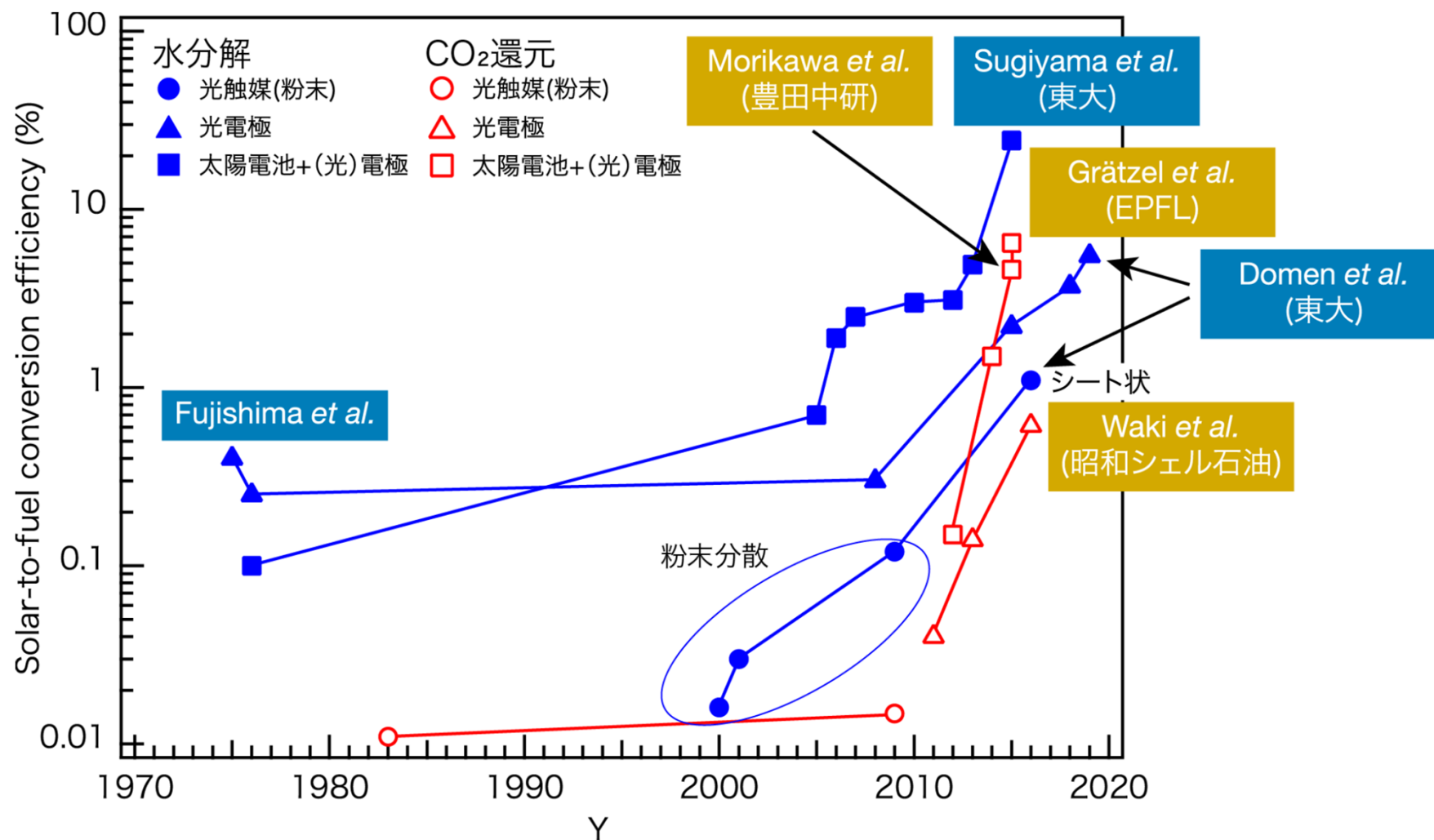


出所) 経産省 エネルギー関係技術開発ロードマップ (平成26年12月)

水素と二酸化炭素から有機化合物を作るのに必要な「合成触媒」の開発が先行

太陽エネルギーを利用して水から水素を製造するための「光触媒」、さらに水素を安全に分離するための「分離膜」の開発を進め、2022年に全体を組み合わせた総合的な人工光合成の実証実験に着手

人工光合成の効率記録



材料開発で重要な点

TiO₂の特徴

- 光照射で強い酸化力（水も分解）
しかし、TiO₂は分解しない
- 紫外線を吸収（透明）
- 資源十分
- 安全（食べてよい）

他の半導体

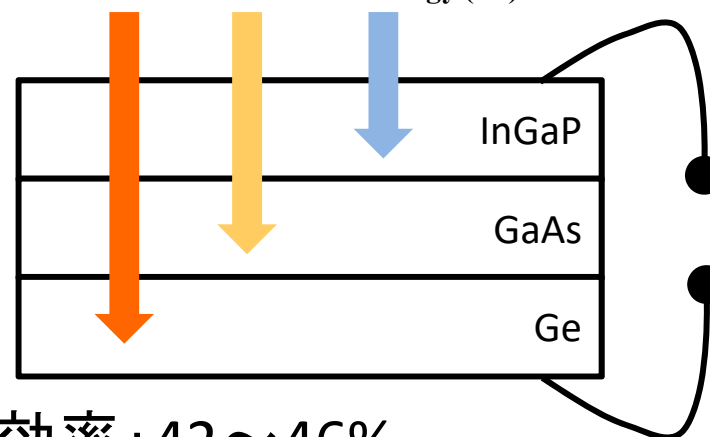
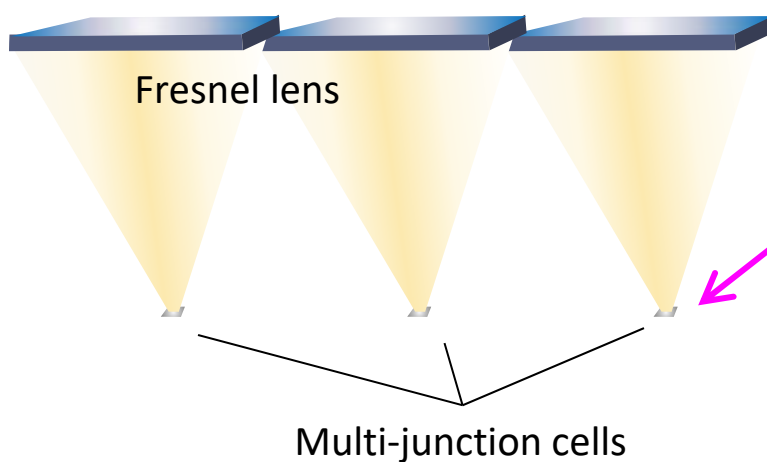
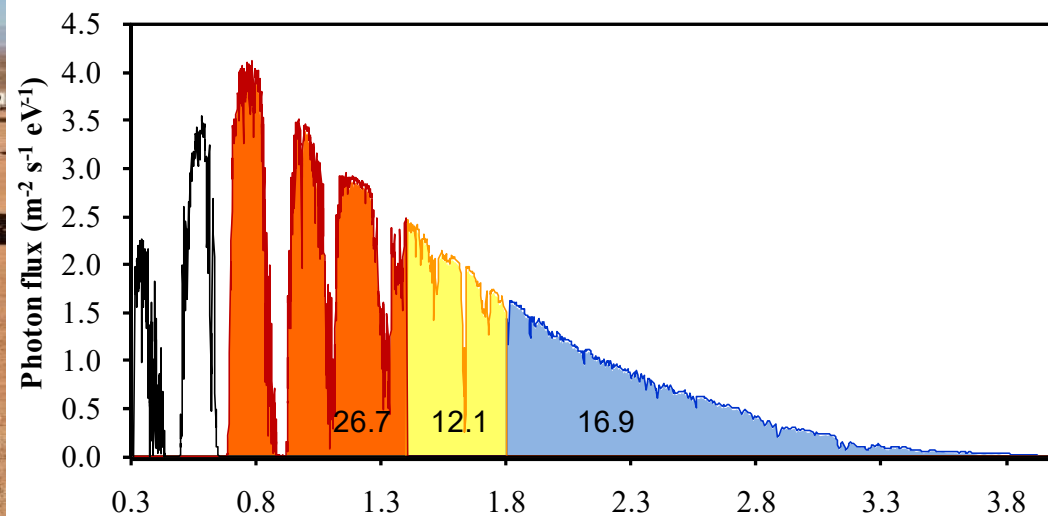
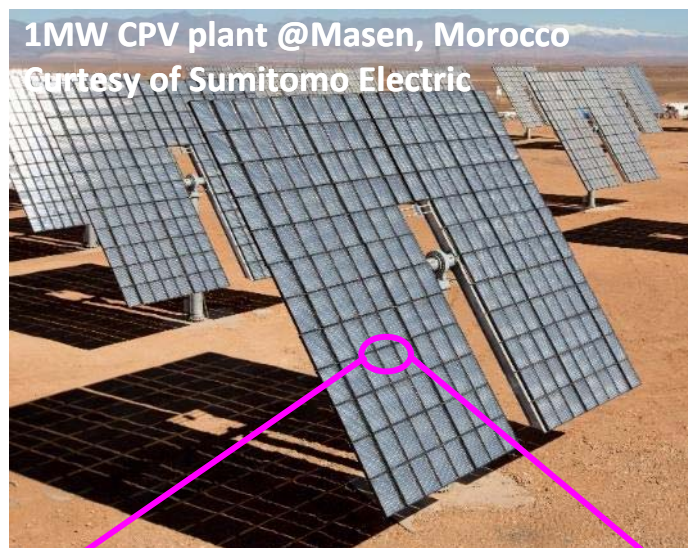
- 可視光を吸収できる（色がついている）
- 水中で分解しやすい（水や有機物を分解できない）
- 資源的に問題がある
- 毒性のあるものもある

明確な課題

1. 太陽エネルギー変換効率
2. 安定性
3. スケールアップ
4. コスト（安価な材料）
5. 柔軟な反応条件
（酸・アルカリ・犠牲試薬フリー）

課題解決の例として

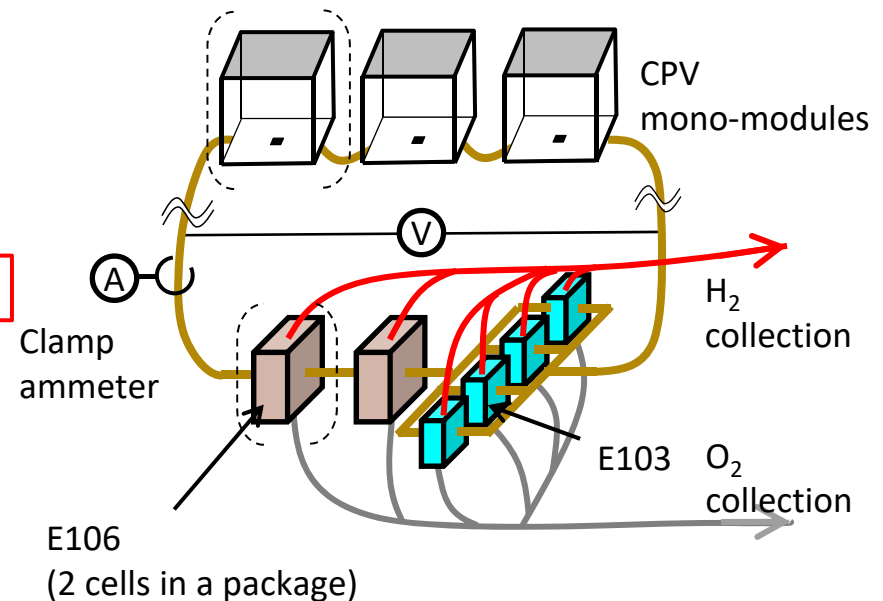
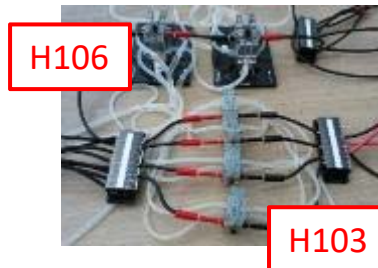
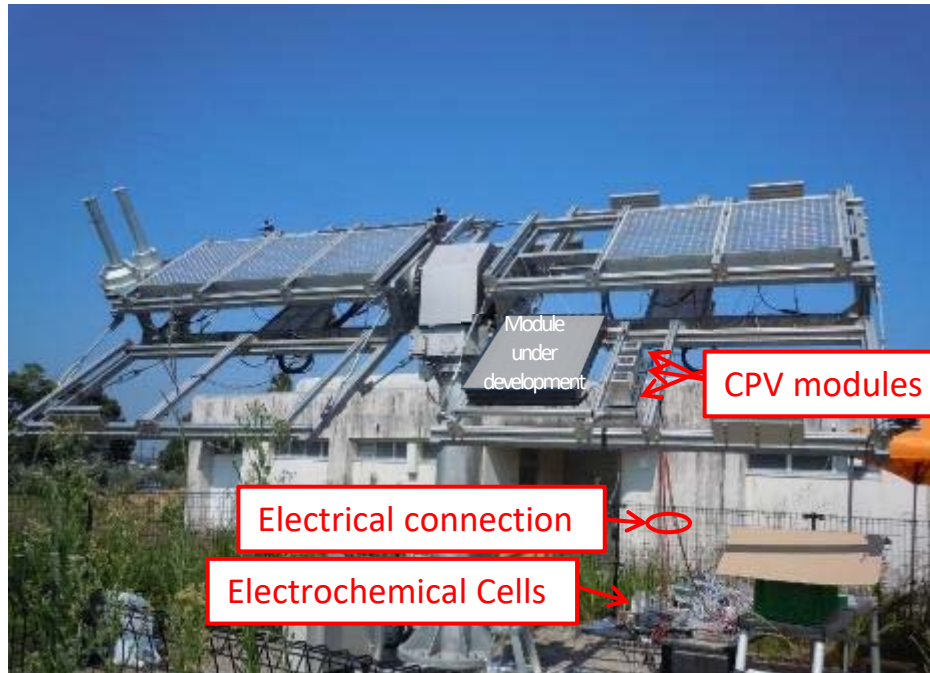
集光型多接合太陽電池



セル効率: 42~46%
モジュール効率: 30~33%

太陽光→水素 エネルギー効率の最大化

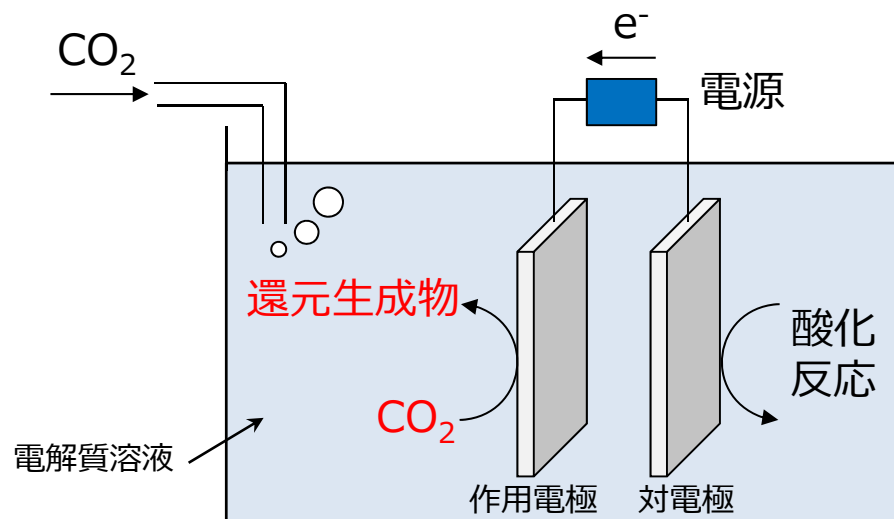
高効率太陽電池と電解セルの直接接続



STH効率 24.4%
(宮崎の屋外で実証！)

CO₂還元の研究

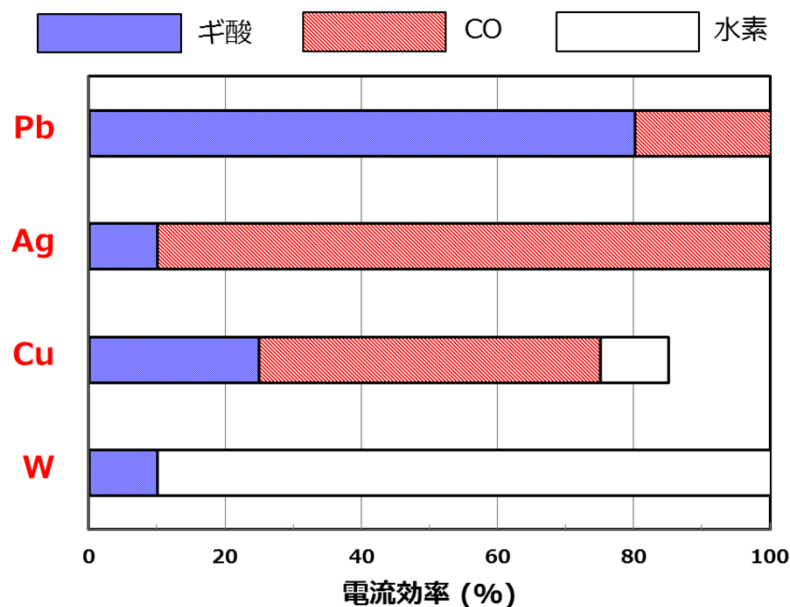
CO₂の電気化学的還元（電解還元）



- $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{HCOOH}$
- $\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- $2\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 12\text{e}^- \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$
- $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
- $\text{HCOOH} + \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{HCOOCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$

電解還元による生成物の分布比

(MeOH, 41 atm, 25°C)



T. Saeki, A. Fujishima *et al.*,
J. Electroanal. Chem. 404, 299 (1996).

金属電極の違いにより生成物異なる
 環境にやさしく安定な電極材料は見当たらず

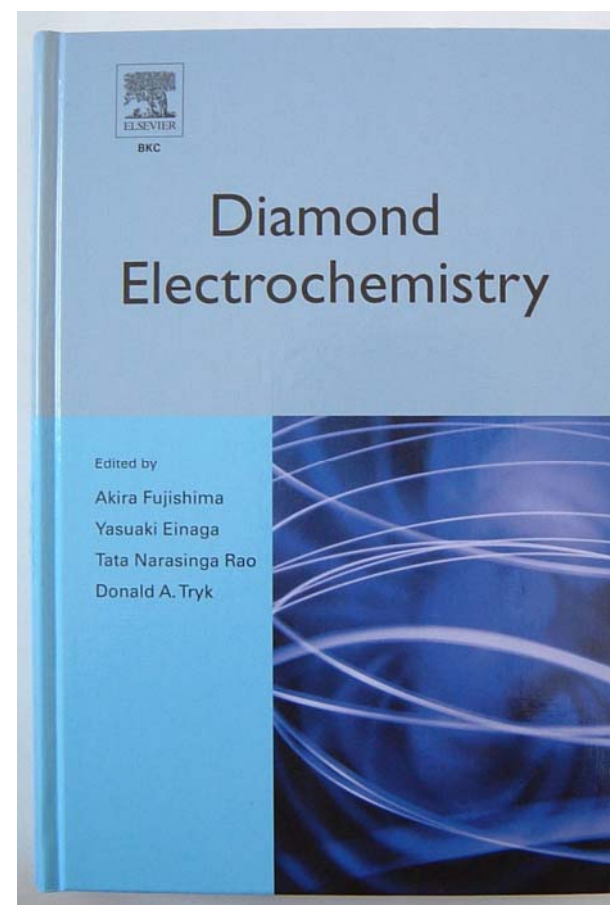
ダイヤモンド電極の研究を先導



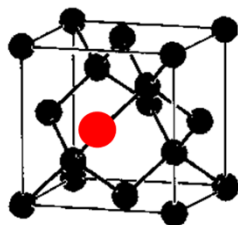
ダイヤモンド電極の**国際シンポジウム**
東京大学 山上会館, 2003年3月

世界初の成書 “Diamond Electrochemistry”

Edited by Akira Fujishima, Yasuaki Einaga,
Tata Narasinga Rao, Donald A. Tryk
Co-published by BKC INC., Tokyo, and
ELSEVIER B.V., Amsterdam.

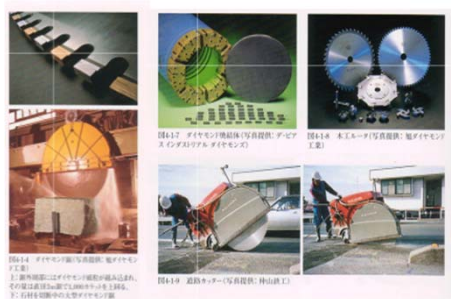
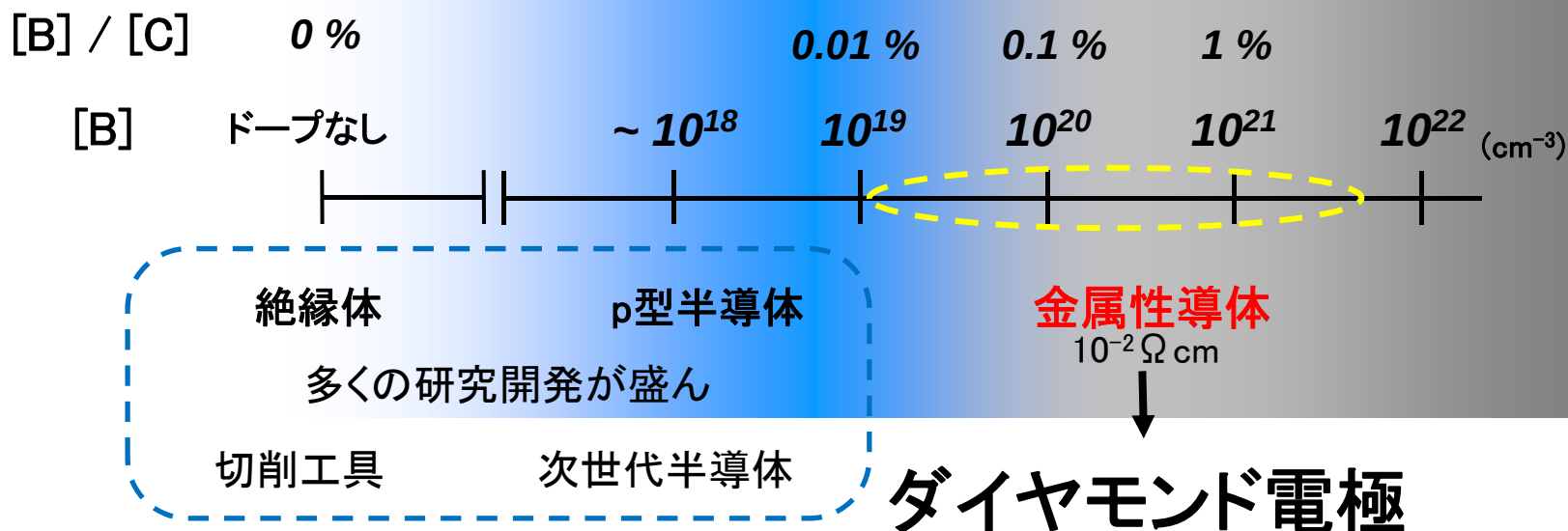


ダイヤモンド電極

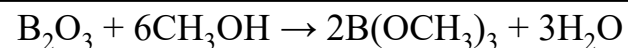
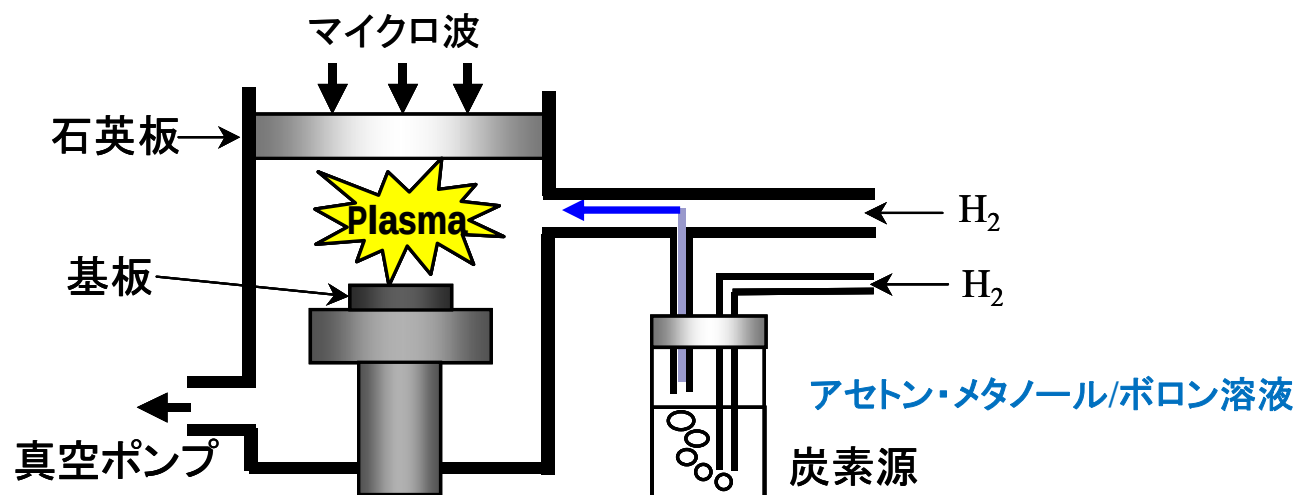


●炭素(C)
●ホウ素(B)

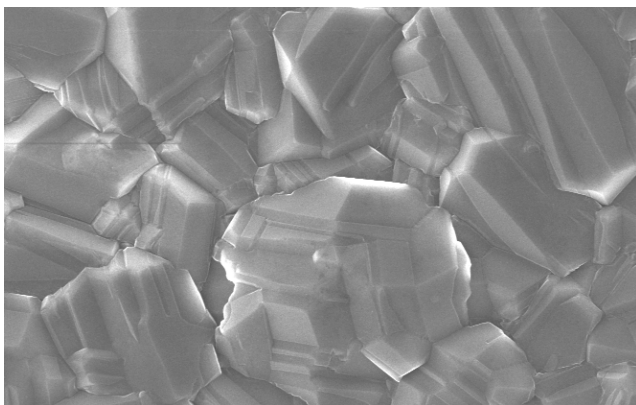
Boron-doped Diamond (BDD)



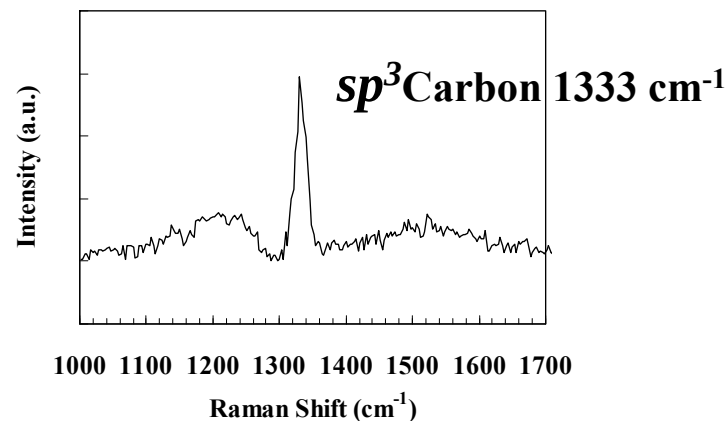
プラズマCVD法によるダイヤモンド合成



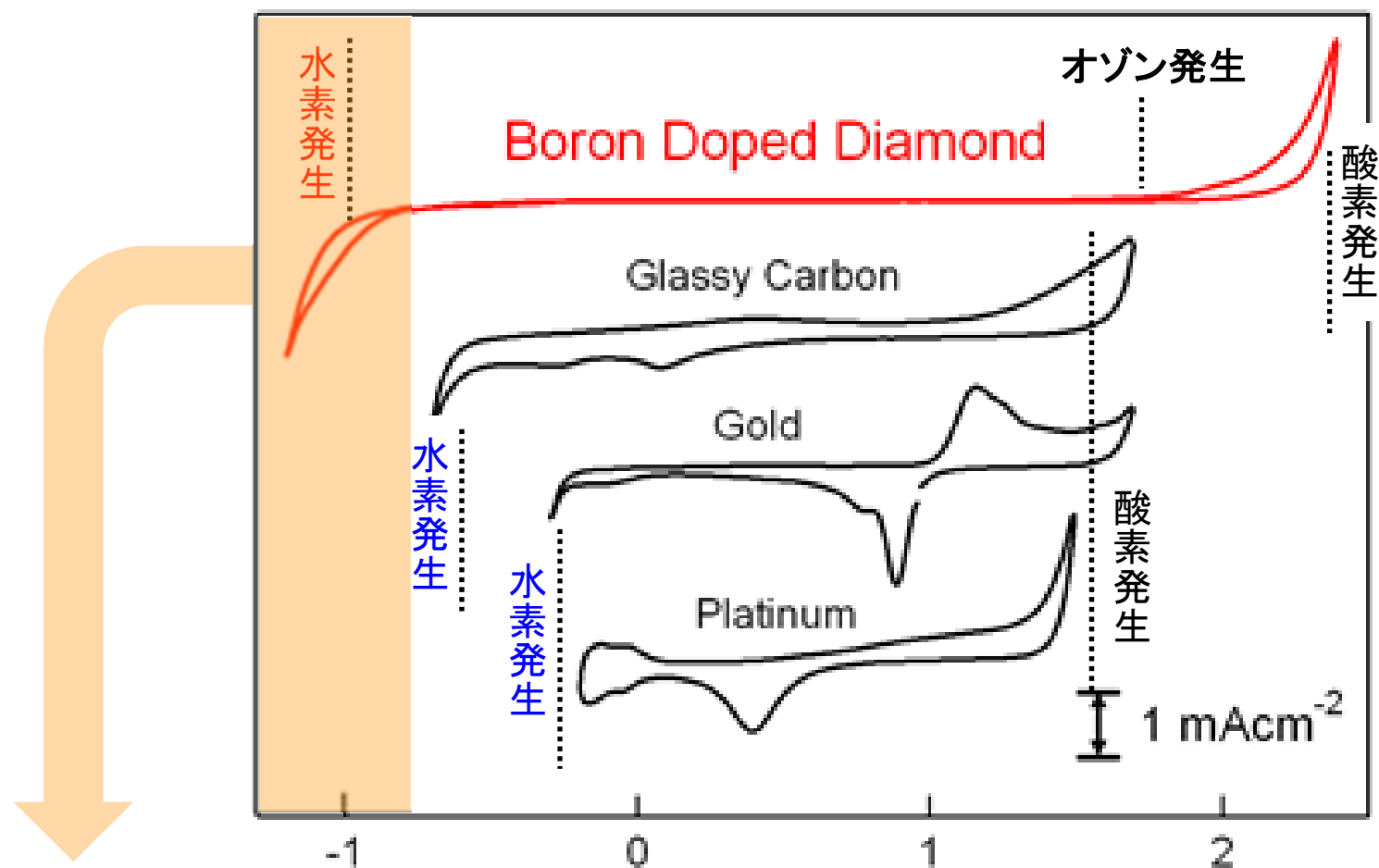
SEM像



ラマンスペクトル

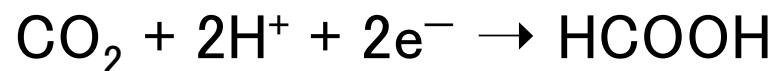


ダイヤモンド電極の広い還元領域を利用

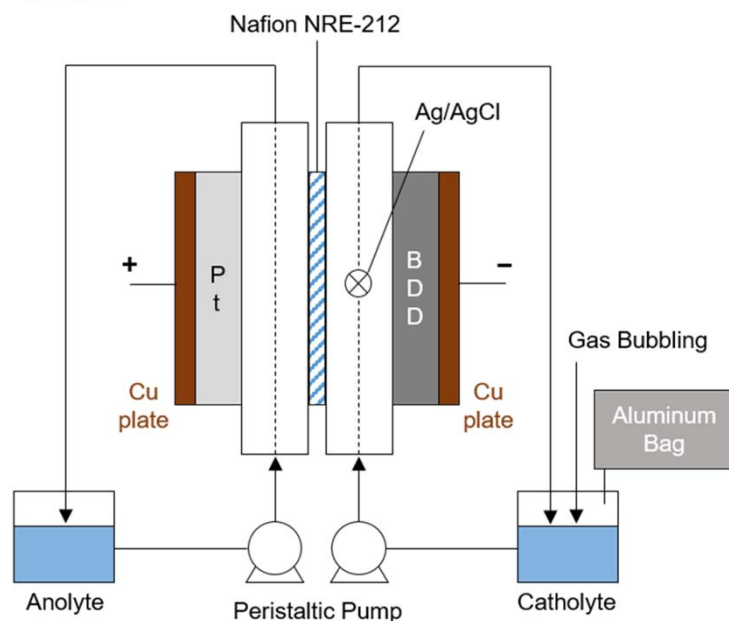


CO₂の直接電解による
選択的な還元が可能

ダイヤモンド電極によるCO₂還元



フローセル



陰極液: 0.5 M KCl aq.
陽極液: 1.0 M KOH aq.
(電流密度: 2, 5, 10, 20 mA cm⁻²)

流速 (mL min ⁻¹)	ファラデー 効率 HCOOH (%)	ファラ デー効 率 H ₂ (%)	全ファラ デー効率 (%)
20	35	41	76
50	85	8.6	95
100	91	3.6	95
200	95	4.1	100
500	88	8.1	99

⇒ 物質輸送が重要

的確な反応システムの構築により、**電解効率100%のギ酸生成**を実現

Angew. Chem. Int. Ed., 57, 2639 (2018).

ダイヤモンドの高速合成システム

液中プラズマ装置



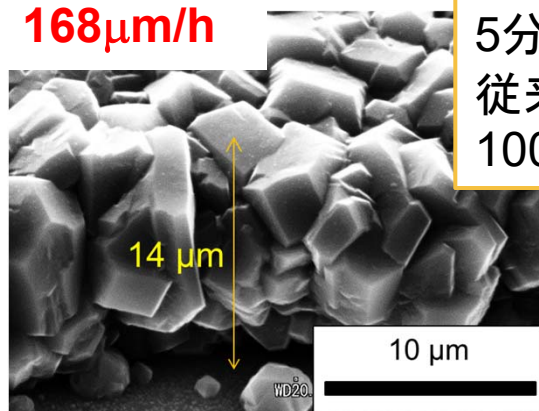
成膜条件

マイクロ波出力 300W
圧力 60 kPa
溶媒 エタノール, メタノール
電極 3φ電極
基板 単結晶シリコン
成膜時間 5分

ホウ素源 酸化ホウ素 (B/C : 10000 ppm)



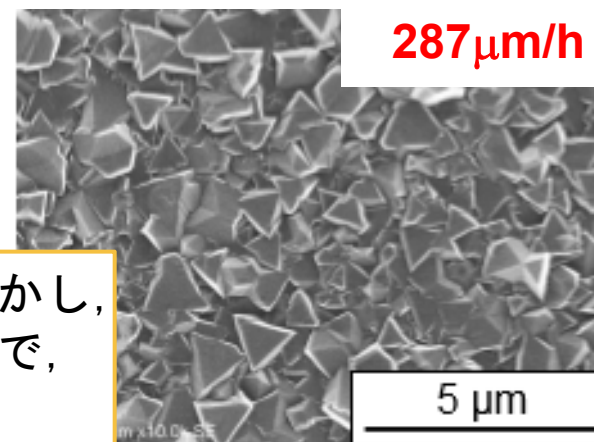
168 $\mu\text{m}/\text{h}$



5分後の膜厚
従来の気相法に比べ
100倍以上の高速成長

溶媒に酸化ホウ素を溶かし、
条件を最適化することで、
さらに高速化

287 $\mu\text{m}/\text{h}$



Diamond Relat. Mater., **2016**, 63, 12

Diamond Relat. Mater., **2019**, 92, 41

次世代型人工光合成のモデル

エネルギー源

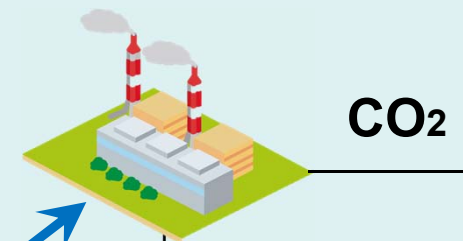
- ・ 太陽光
- ・ 水
- ・ 二酸化炭素



太陽光



水



CO₂

O₂

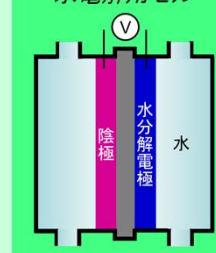
CO₂

革新技術



集光型多接合太陽電池

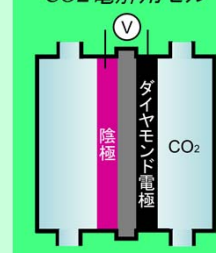
水電解用セル



電力

電力

CO₂電解用セル



水分解電極

ダイヤモンド電極

燃料化

CH₄

H₂

ギ酸

メタノール

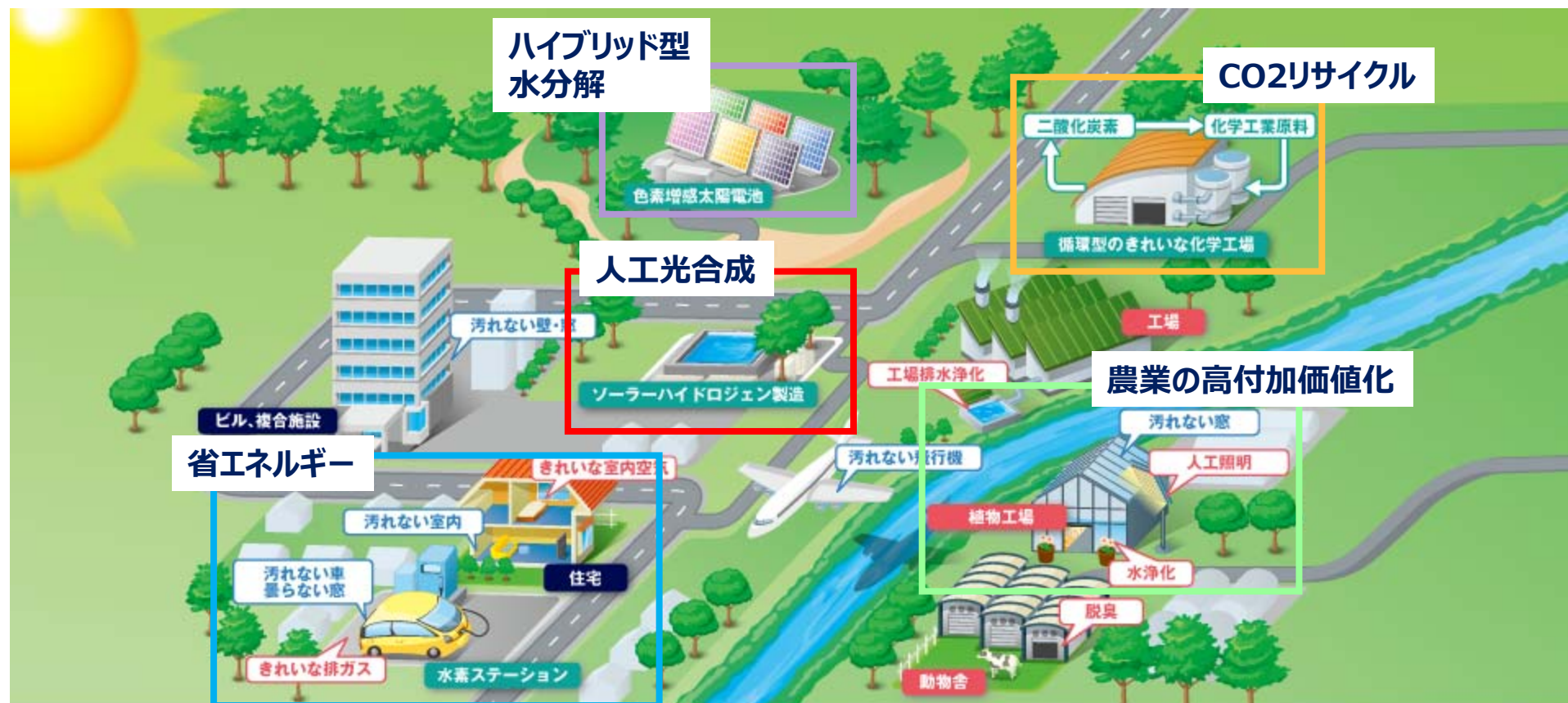
CO₂

パスツール型志向で産学官連携

カーボンリサイクル実現のため、
国家戦略 **(官)** として取り組み、
革新的ブレークスルー **(学)** と
迅速な社会導出 **(産)** を目指す。

産学官の総合力

光触媒が活躍する未来社会像

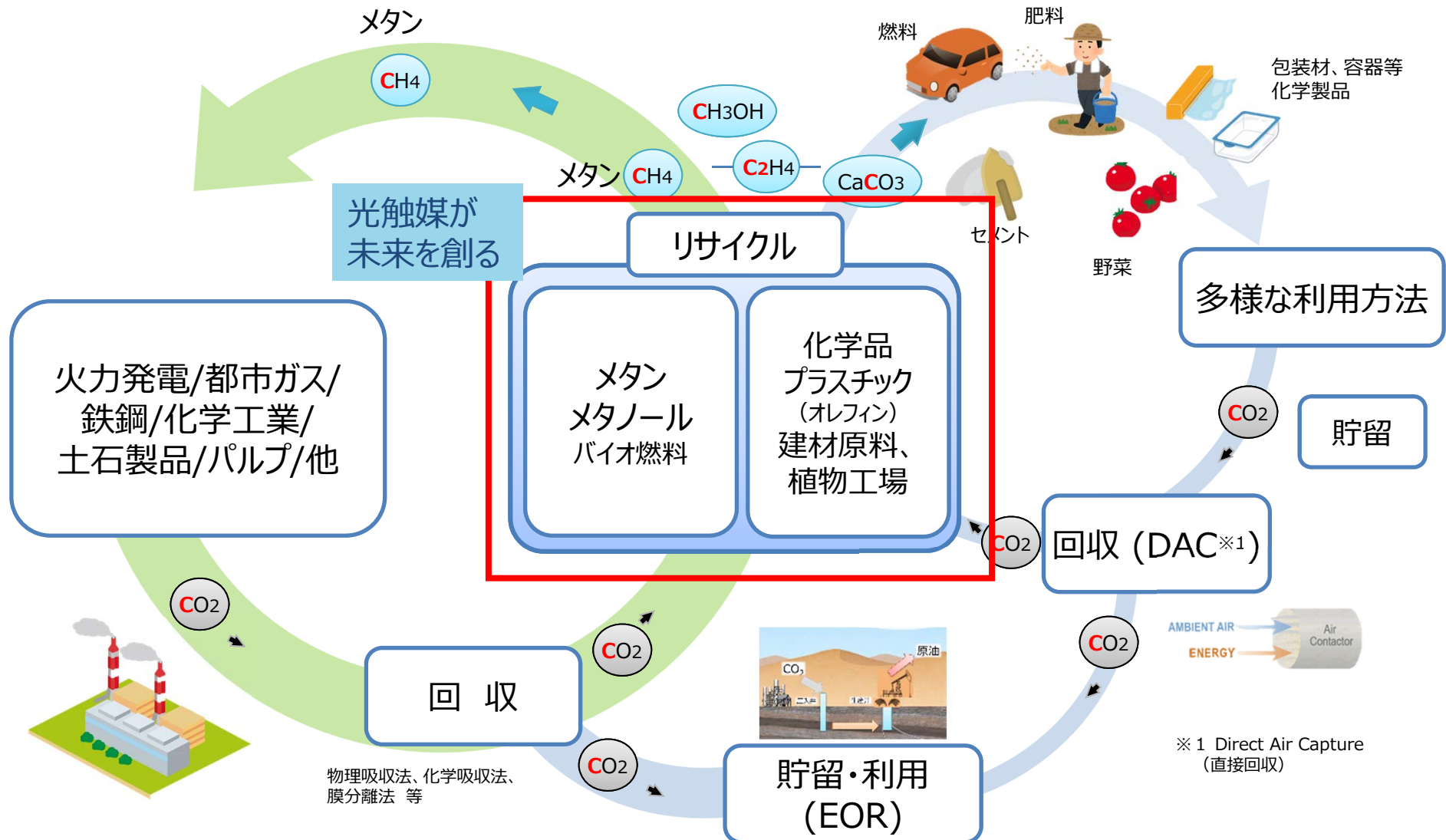


東京理科大学光触媒国際研究センターHPより抜粋

<https://www.rs.tus.ac.jp/pirc/>

カーボンリサイクルのコンセプト ～実現に向け研究開発を強力に推進～

経済産業省
カーボンリサイクル室



参考資料

各国における人工光合成の研究開発動向

アメリカにおける人工光合成の研究開発動向

2010年：エネルギー省(DOE: Department of Energy)により
Joint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP)の設立



第1期 (～2015年9月)

ソーラー水素製造技術に注力



第2期 (2015年10月～2020年)

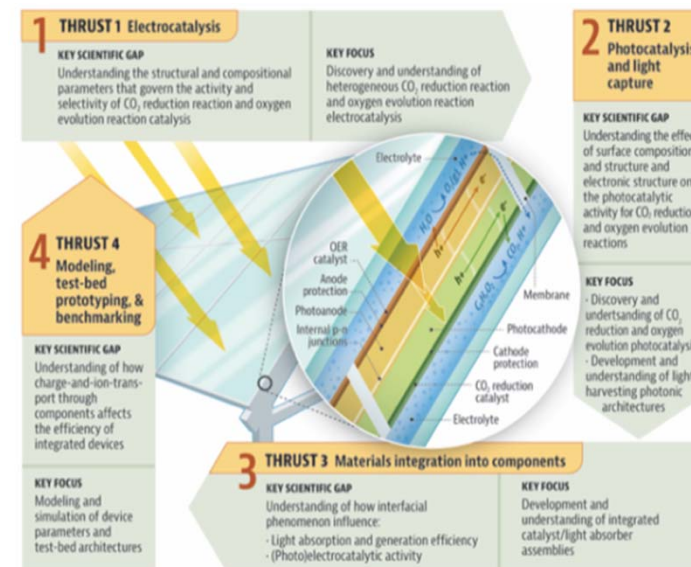
太陽エネルギーにより二酸化炭素を化学燃料に変換

研究資金 5年間で7,500万ドル (約83.6億円)

参画機関

カリフォルニア工科大学
ローレンス・バークレー国立研究所
カリフォルニア大学アーバイン校
カリフォルニア大学サンディエゴ校
スタンフォード大学 SLAC国立加速器研究所

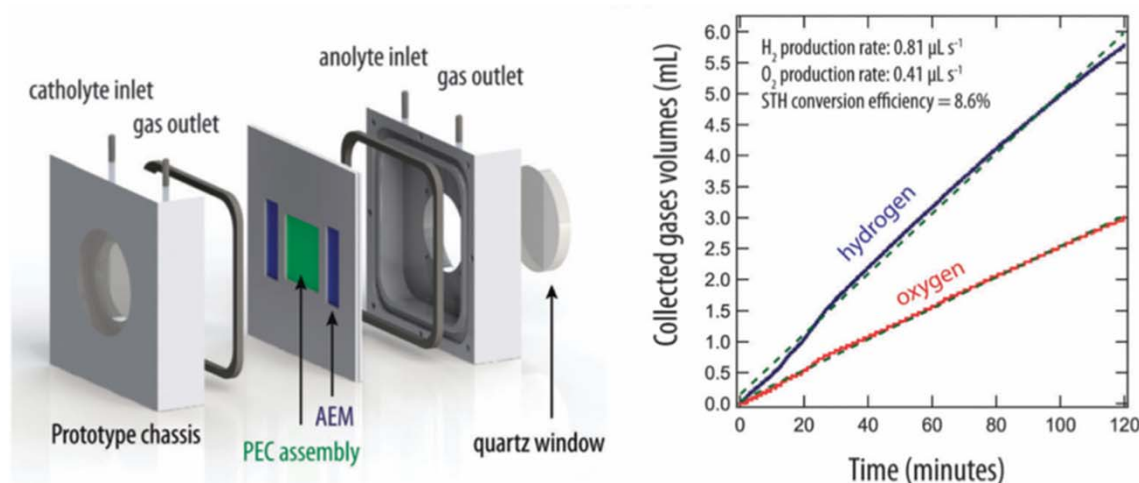
一体型のデバイスを用いて表面と裏面で水の酸化反応と二酸化炭素の還元反応をそれぞれ進行させることを目指している



JCAPによる研究成果

一体型デバイスによる光電気化学的水分解反応の実施

H. A. Atwater (カルフォルニア工科大)ら



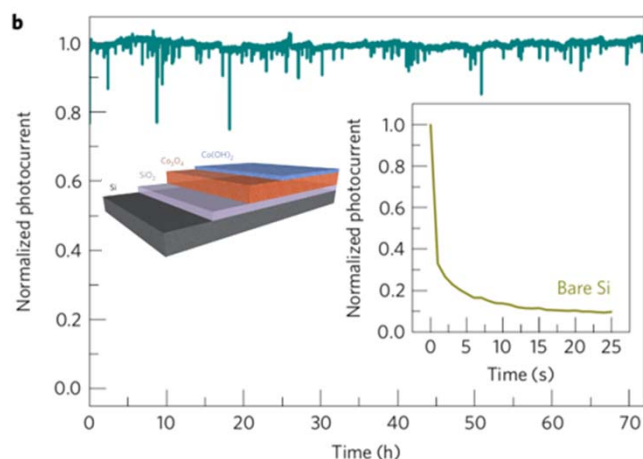
Ni触媒と TiO_2 保護層で修飾されたGaAs/InGaPタンデム接合型光アノードとイオン交換膜で隔たれたNiMo系カソードを用いて1M水酸化カリウム水溶液中で光電気化学的水分解反応を行い、**10%**の太陽光-水素変換効率と**数十時間**にわたる連続運転を実施

水素と酸素が別々の場所から生成するため、水素爆鳴気が発生しないため、爆発に対する安全性が高いが、デバイスが煩雑であることから拡張性やコストに難あり

Energy Environ. Sci., **8**, 3166-3172 (2015)

JCAPによる研究成果

水分解触媒を半導体上に一体化して太陽電池を強化



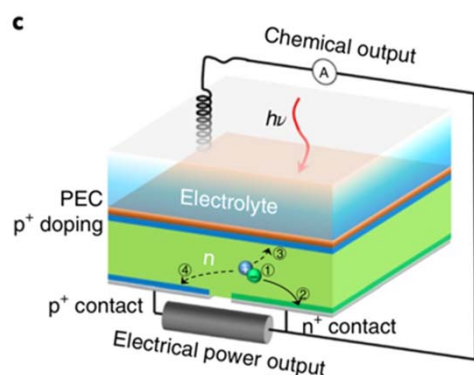
I. D. Sharp (ローレンス・バークレー国立研究所)ら

水分解触媒の化学的性質を原子スケールで太陽電池に組み込み、人工光合成の安定性と効率を大きく向上

作成した人工光合成システムは、**3日間**連続駆動

Nat. Mater., **16**, 335-343 (2017)

太陽光による水分解で水素と電気の両方を生成する人工光合成システム HPEV (hybrid photoelectrochemical and voltaic) セルを開発



I. D. Sharp (ローレンス・バークレー国立研究所)ら

水素生成に使用されず残った電子を捕獲して発電に利用することで、太陽光-水素変換効率を大幅に向上

計算上では20.2%の効果が期待

Nat. Mater., **17**, 1115-1121 (2018)

JCAPによる研究成果

データ解析によるCO₂還元用新規光触媒の探索

K. A. Persson (ローレンス・バークレー国立研究所)ら

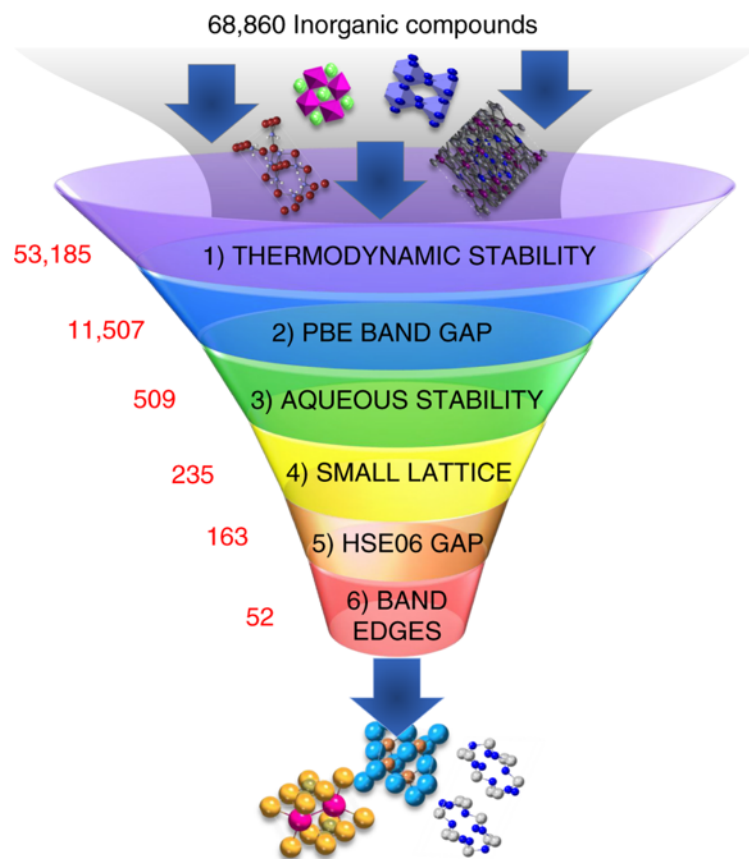
68,860種類の無機化合物を第一原理計算に基づくスクリーニングを実施

CO₂還元用光アノードの候補材用を52種類まで絞り込み

9種類：実験報告あり

43種類：新候補材料

{ 34種類：合成報告あり
8種類：合成報告なし
新規触媒としての可能性



Nat. Commun., **10**, 443-1121 (2019)

欧州における人工光合成の研究開発動向

Photoelectrochemical Demonstrator Device (PECDEMO)

8% 以上のSTH、1,000h以上の安定性、50 cm²以上のサイズのデバイスの実証

2014年4月1日～2017年3月31日（3年間） 総額340万ユーロ（約4.3億円）

参画機関

ヘルムホルツセンターベルリン研究所
スイス連邦工科大学ローザンヌ校
イスラエル工科大学
ドイツ航空宇宙センター

ポルト大学
エボニックインダストリー社
ソラロニクス社

Hybrid Materials For Artificial Photosynthesis (HyMAP)

2015年7月～2020年7月（5年間） 総額約250万ユーロ（約3.2億円）

IMDEA エネルギー機構（スペイン）が主幹

1%以上の太陽光-水素変換効率を有する多機能光触媒の開発

Fuel from Sunlight: Covalent Organic Frameworks as Integrated Platforms for Photocatalytic Water Splitting and CO₂ Reduction (COFLeaf)

2015年9月～2020年8月（5年間） 総額約150万ユーロ（約1.9億円）

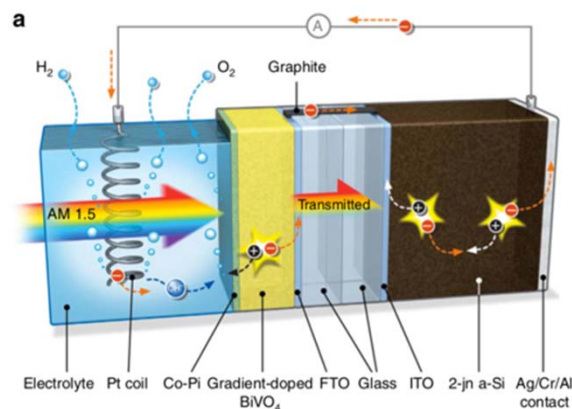
マックス・プランク研究所が主幹

有機分子を利用した水分解・CO₂還元システムの開発

PECDEMOによる研究成果

膜厚方向にドーパントの傾斜がある BiVO_4 光アノードの作成

R. van de Krol (ヘルムホルツセンターベルリン研究所)ら



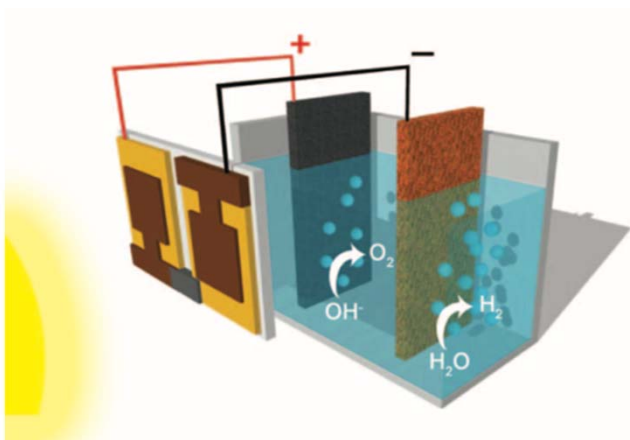
高い光アノードを観測

シリコン太陽電池と組み合わせて無バイアス条件下で
4.9%の太陽光-水素変換効率を報告

Nat. Commun., **4**, 2195 (2013)

安価な電池-電極による高効率水分分解システムの開発

M. Grätzel (スイス連邦工科大学ローザンヌ校)ら



安価なペロブスカイト太陽電池とNi発泡電極を用いた
電解槽を組み合わせて**12.3%**の太陽光-水素変換効率を
実現

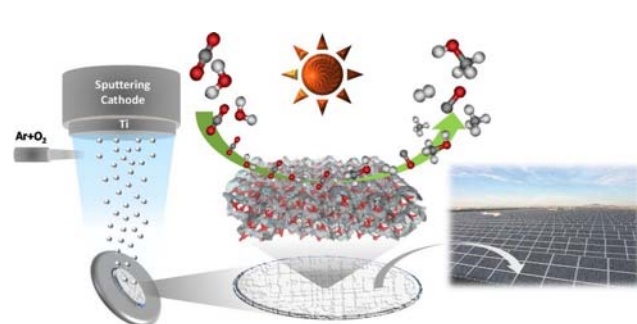
水蒸気存在下での太陽電池の安定性に課題

Science, **345**, 1593-1596 (2014)

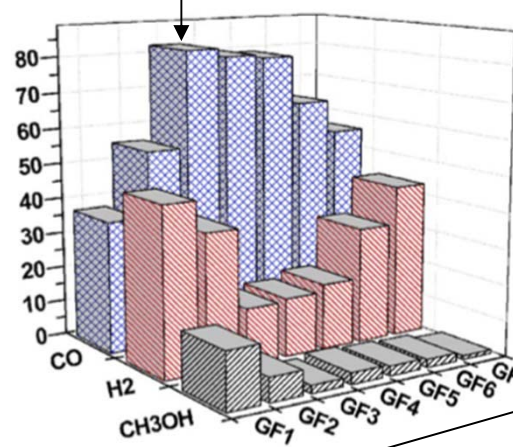
HyMAPによる研究成果

DCマグネトロンスパッタTiO₂膜によるCO₂還元

V. A. de la Peña O'Shea (IMDEAエネルギー機構)ら

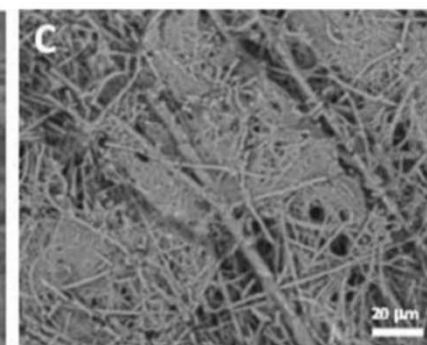
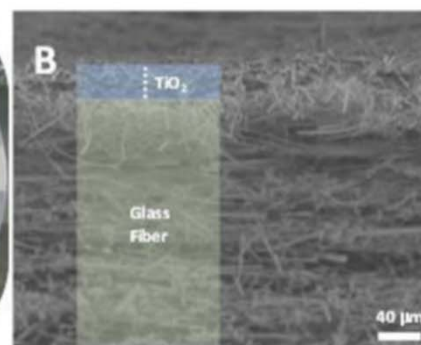
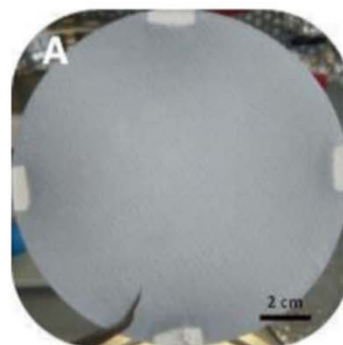


TiO₂密度
1 g/m²



TiO₂層疎、非晶質

TiO₂層密、結晶化



ガラスファイバーウェハー（面積：132.7 cm²）上にTiO₂をスパッタで成膜

結晶性と吸収係数との兼ね合いより、TiO₂密度が1g/m²の時CO₂からCOへの還元の高い選択性を発揮

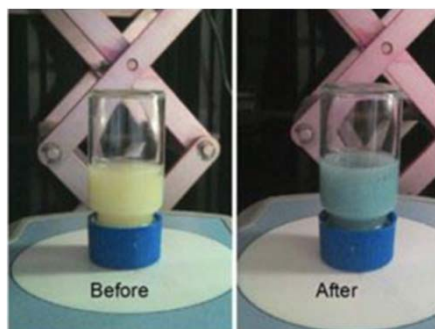
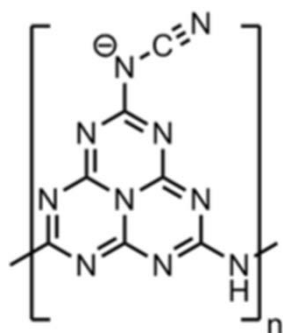
Appl. Catal. B: Environmental, **224**, 912-918 (2018)

COFLeafによる研究成果

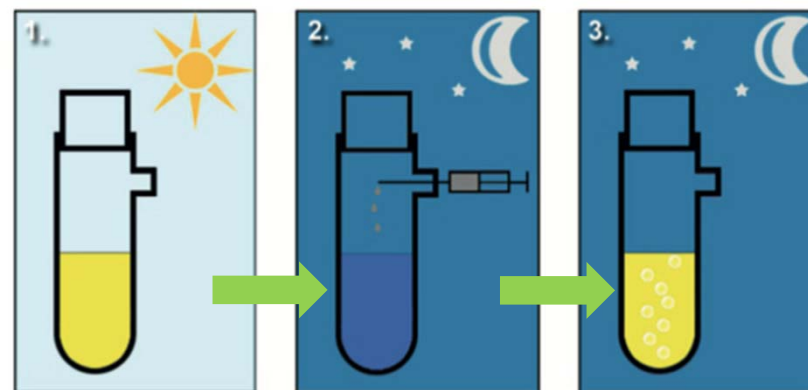
明条件下で生成した電子を放出することで、暗条件下での水分解を実現

B. V. Lotsch (マックス・プランク研究所)ら

ポリマー光触媒
NCN-CN_x



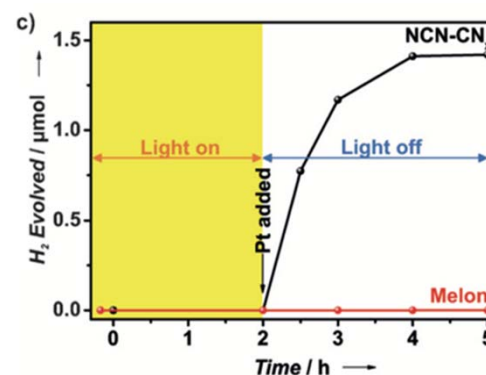
電子供与体存在下で光照射すると、
電子が補足され、変色する



光触媒による
電子補足

水素生成用
助触媒の投入

放出電子による
水の還元



日中しか太陽光を利用できない
という制限を克服できる可能性

Angew. Chem. Int. Ed., **56**, 510-614 (2017)

アジアにおける人工光合成の研究開発動向

韓国

Korean Center for Artificial Photosynthesis (KCAP)

2010年に10カ年計画として西江大学に設立

韓国内最大の鉄鋼会社であるPOSCO社や米国のJCAPなどと連携

基礎研究も行うが、最終的なゴールは人工光合成の商用化

水の完全分解や二酸化炭素を用いたメタンの生成等、幅広い研究を実施

中国

Dalian National Laboratory of Clean Energy (DNL)

大連化学物理研究所内に2008年に設置

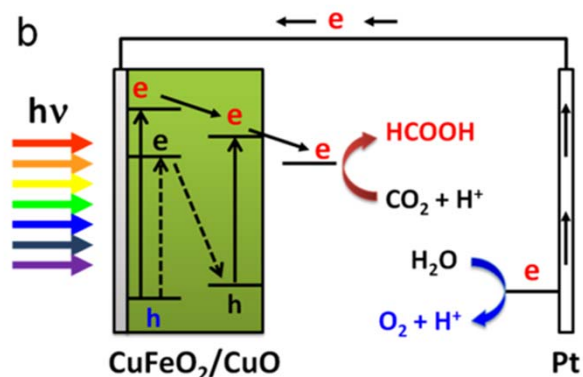
中国初の国立のエネルギー研究機関

無機半導体や金属錯体を利用した水の分解についての研究を実施

KCAPによる研究成果

変換効率1%でのCO₂還元を実現

H. Park (慶北大)ら



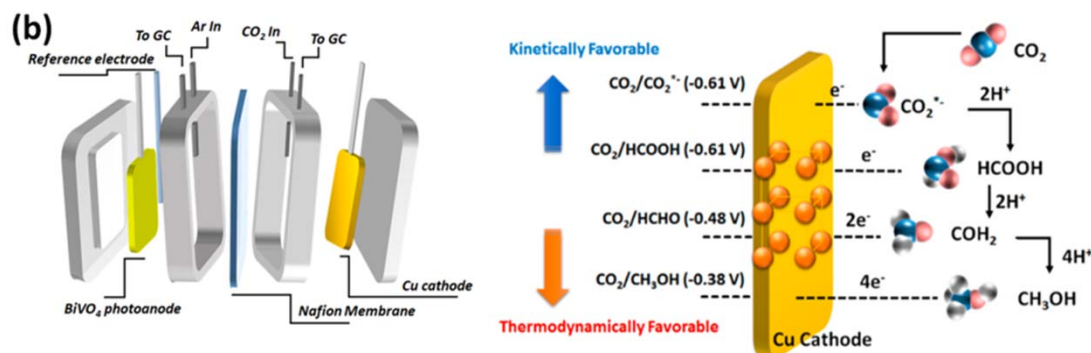
疑似太陽光照射下で、高い選択性(>90%)でCO₂還元によりギ酸を生成

太陽光-ギ酸変換エネルギーは反応開始時で1-1.2%
ギ酸生成は1週間維持

Energy. Environ. Sci., **8**, 2638-2643 (2015)

CO₂還元によりホルムアルデヒドをファラデー効率85%で生成

Y. S. Kang (西江大)ら



CO₂の還元準位を調節することで、
選択的還元を実現

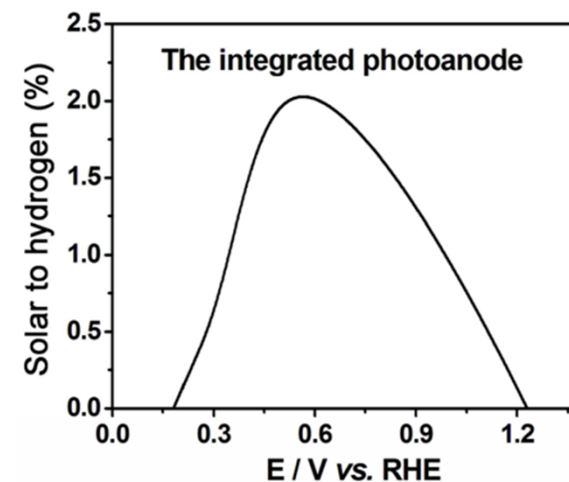
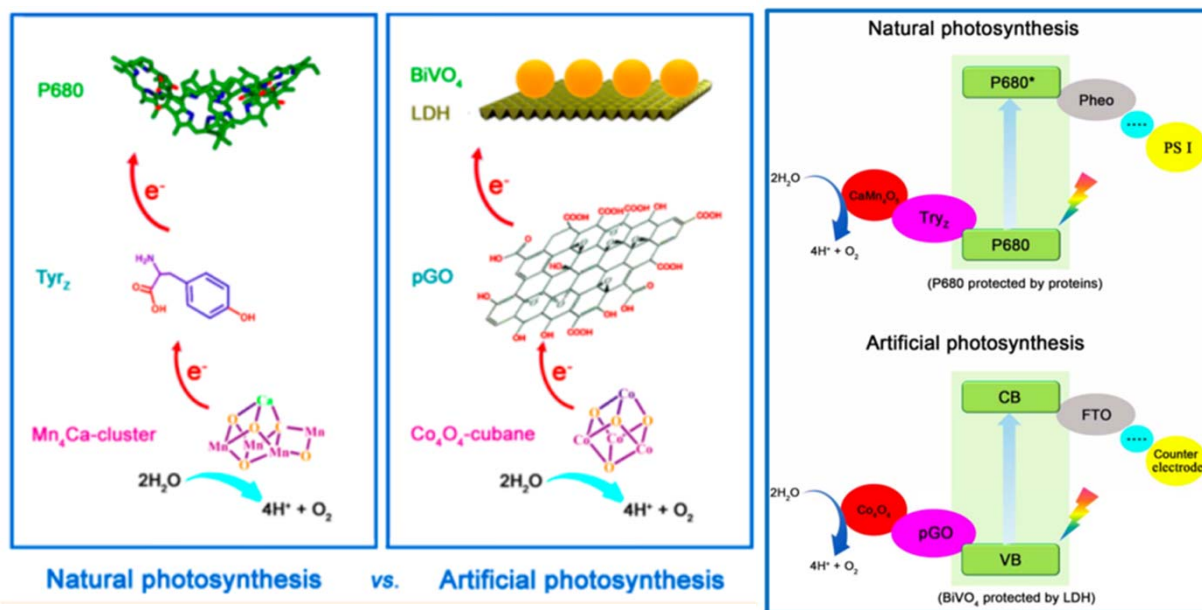
ACS Catal., **8**, 968-974 (2018)

DNLによる研究成果

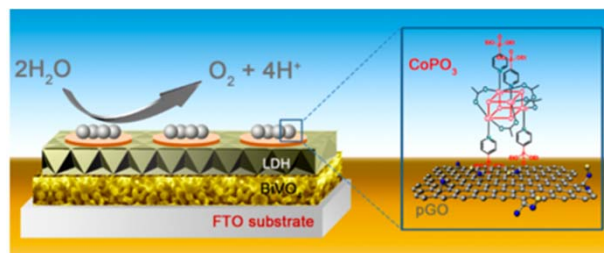
自然の光合成（光化学系II）を模倣した人工光合成システムの構築

C. Li (大連化学物理研究所)ら

天然の光合成と人工光合成の動作原理



光化学系IIを模した
光電極



太陽光-水素変換エネルギー 2%を達成

J. Am. Chem. Soc., **140**, 3250-3256 (2018)

日本における人工光合成の研究開発動向

文科省の科研費から経産省の未来開拓研究まで幅広い研究投資が同時期に始まったため、基礎研究から応用研究まで取り組みは広がっている。

経産省 未来開拓研究

グリーン・サステナブルケミカルプロセス基盤技術開発（革新的触媒）
「人工光合成化学プロセス技術研究組合 (ARPCChem)」

文科省 科学研究費補助金 新学術領域研究

「人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：実用化に向けての異分野融合 (AnApple)」

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 さきがけ
「光エネルギーと物質変換領域」

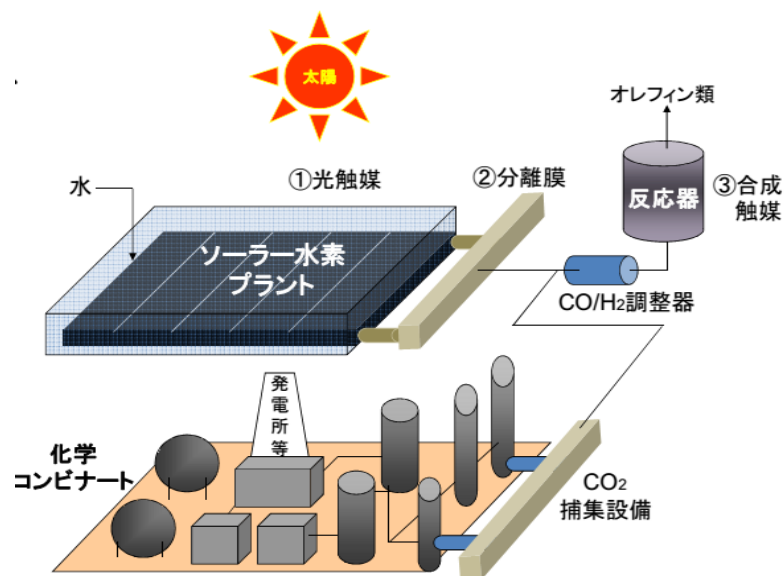
科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 先導的物質変換領域 (ACT-C)
低エネルギー、低環境負荷で持続可能なものづくりのための先導的な物質変換技術の創出

経産省 人工光合成化学プロセス技術研究組合 (ARPCChem)

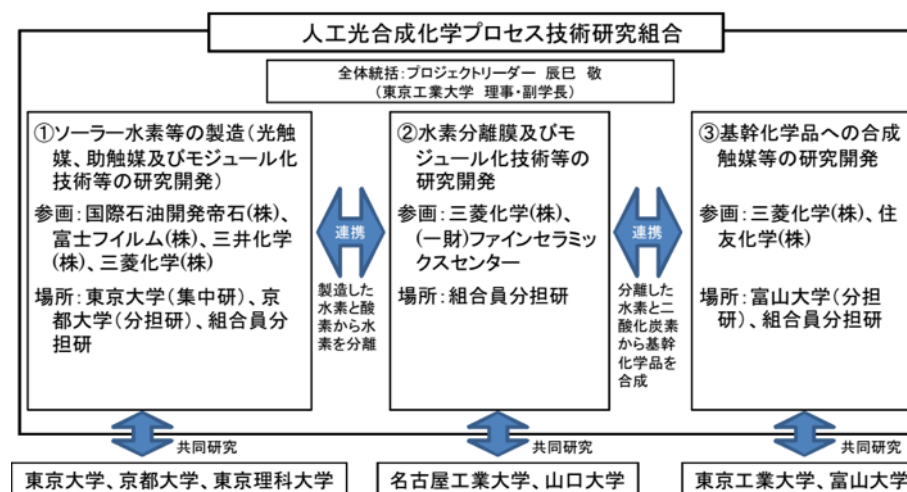
経産省と文科省との連携により開始された未来開拓研究プロジェクトの初年度の案件
事業期間：2012年～2021年度の10年間 事業規模：約150億円

- 2021年度末までに太陽光-水素変換効率10%を実現する光触媒システムを開発する。
- 太陽エネルギーを利用して光触媒によって水を分解し、分離して得られた水素と二酸化炭素からプラスチック原料等基幹化学品の製造を目指す。

想定しているシステム



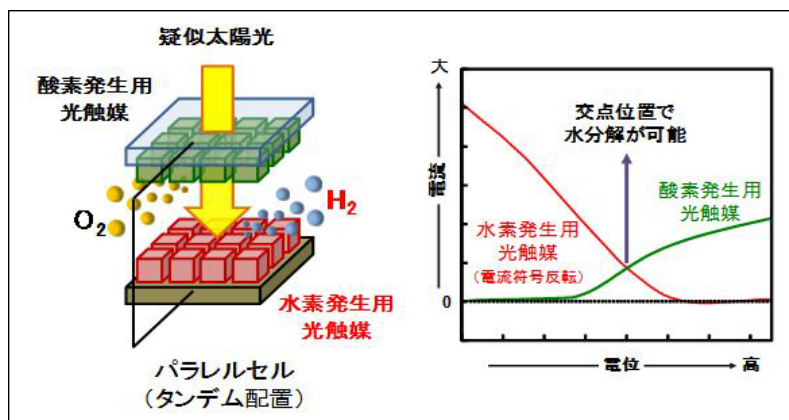
研究体制



5企業、1団体が参画

経産省 ARPChemにおける研究成果

人工光合成の水素製造で世界最高レベルのエネルギー変換効率2%を達成



- 可視光領域の光を吸収する水素および酸素発生用光触媒の組み合わせの最適化
- 光触媒をシート状にし、パラレルセルを作成



太陽光-水素変換効率が最高で**2.2%**、1時間平均で1.95%を達成

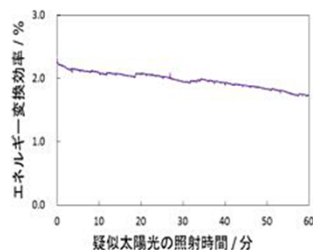


図3 エネルギー変換効率の時間変化

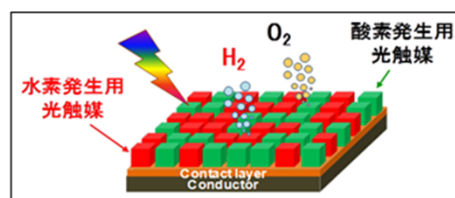


図4 混合型光触媒シートの概念図

将来の実用化を想定して、水素および酸素発生用光触媒を同じ基板上に成形した**混合型光触媒シート**を開発し、水素と酸素の発生を確認。

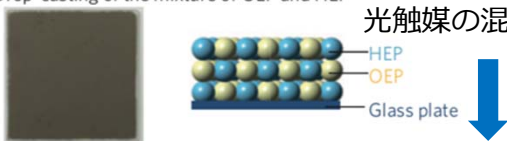
NEDO プレスリリース(2015年3月31日)

経産省 ARPChemにおける研究成果

人工光合成を実現する混合粉末型光触媒シートを開発 堂免 (東大)ら
TOTO(株)と共同開発

粒子転写法を用いて作成

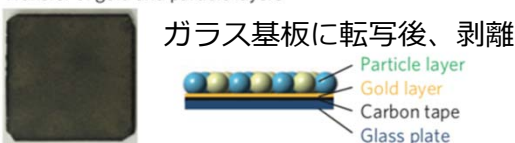
(I) Drop-casting of the mixture of OEP and HEP 水素発生光触媒と酸素発生光触媒の混合体を成膜



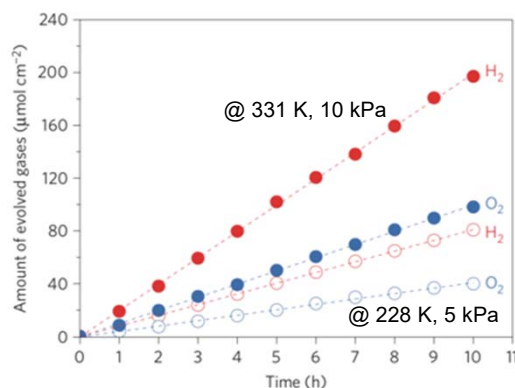
(II) Deposition of gold layer 導電性層 (金) の蒸着



(III) Transfer of gold and particle layers

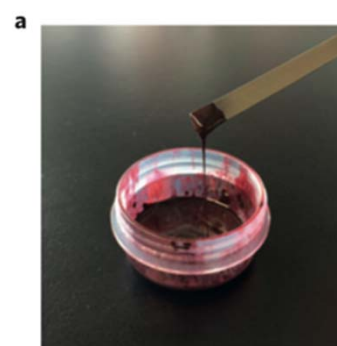


ガラス基板に転写後、剥離

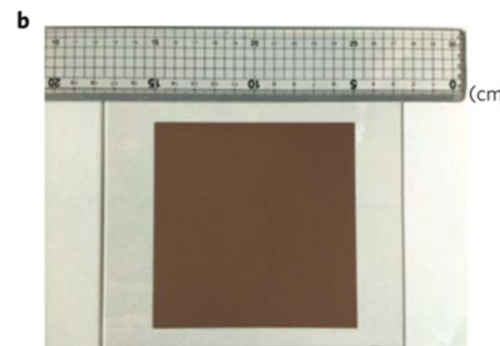


1.1 %の太陽光-水素
変換効率を達成

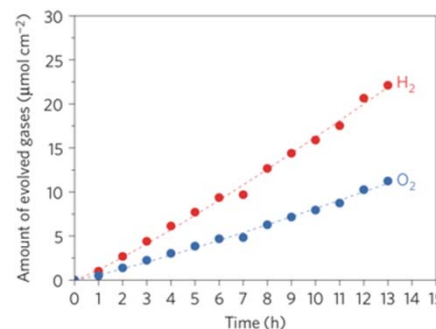
スクリーン印刷を用いて作成



プリント用インク



光触媒シート
10 cm × 10 cm



水素、酸素の定常的な
発生を確認

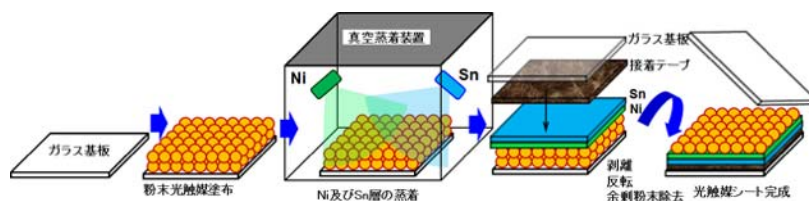
大幅な製造コストの削減に期待

Nat. Mater., 15, 611-617 (2016)

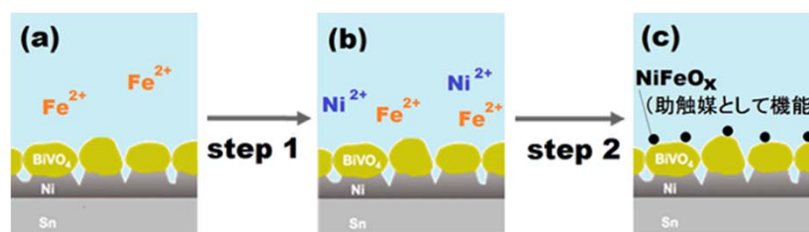
経産省 ARPChemにおける研究成果

助触媒の自己再生機能を有する光触媒シートを開発

堂免 (東大)ら

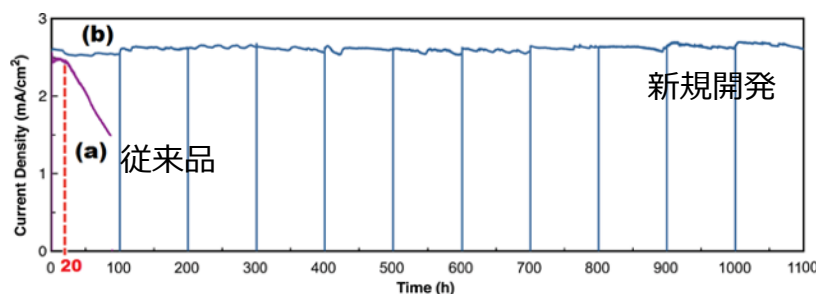


バナジン酸ビスマス粉末をガラス基板上に塗布し、導電層（ニッケル、スズ）を蒸着後、粒子転写法により酸素発生機能を有する光触媒シートを開発



導電層から溶け出した Ni^{2+} イオンが、水中の微量溶解 Fe^{2+} とともに $NiFeO_x$ として光触媒表面に固定化し、助触媒として機能

助触媒の脱落／溶解

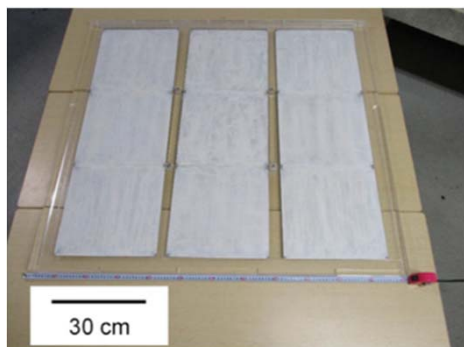


従来法で作成したバナジン酸ビスマス光触媒シートは光照射後、約20時間で助触媒の脱落、溶解に起因する活性低下が起きるが、本シートでは**1100時間経過しても活性低下せず**

NEDO プレスリリース(2016年12月21日)

経産省 ARPChemにおける研究成果

大面積化・低コスト化を実現する新しい光触媒パネル反応器を開発 堂免 (東大)ら
TOTO(株)、三菱ケミカル(株)と共同開発



光触媒パネル反応器
1 m × 1 m

基板上に光触媒を塗布したシートを含む反応器を作成し、わずか水深1mmでの水分解を安定的に達成。

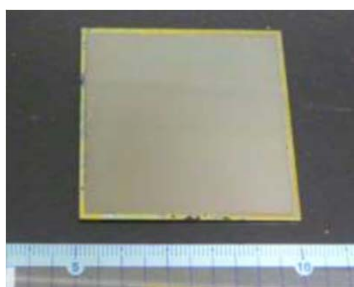
➡ 水量を大幅に低減することで、**反応器を軽量で安価な材料で作成することを可能に**

1m²サイズの大型パネル反応器を試作し、自然太陽光下でも水を水素と酸素に分解できることを確認。

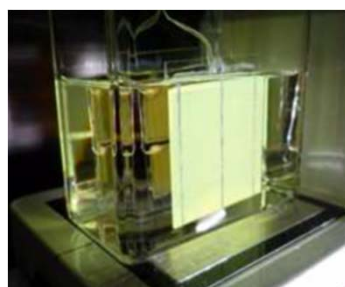
Joule, **2**, 509-520 (2018)

CIGSをベースとした光触媒で、非単結晶光触媒の中では世界最高の水素生成エネルギー変換効率12.5%を達成

堂免 (東大)ら



水素生成光触媒
5 cm × 5 cm



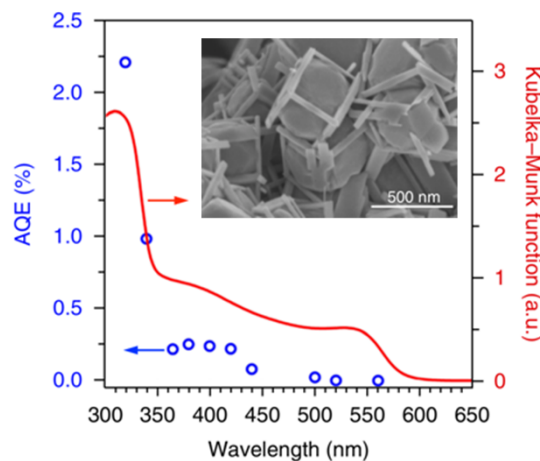
CIGS太陽電池は、赤外領域までの対応光を利用でき、既にメートルスケールの製造技術が確立されている。

非単結晶光触媒は、単結晶と比較して**大型化（メートル級）に適した材料系であり、実用化が期待**

Angew. Chem. Int. Ed., **58**, 2300-2304 (2019)

経産省 ARPChemにおける研究成果

世界で初めて、可視光領域で水を分解する窒化タンタル光触媒の開発に成功

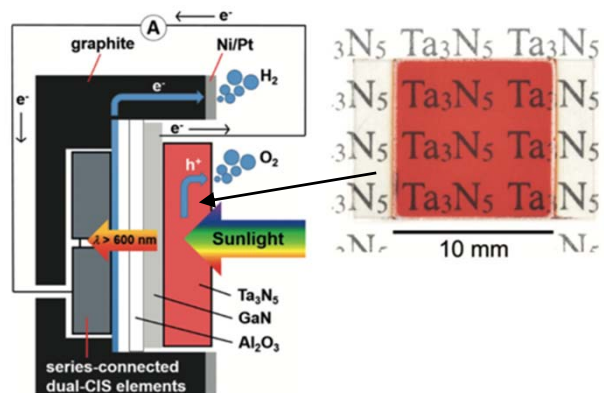


堂免 (東大)ら
窒化タンタルは、次世代の光触媒材料として2000年頃から有望視されていたが、実際に光触媒を製造して水分分解を確認した**世界で初めての事例**。

従来検討されてきた方法に比べ1/10以下の短時間での製造が可能で、**安価なプロセスの実現が期待**。

Nature Catalysis, **1**, 756-763 (2018)

窒化タンタル Ta_3N_5 光触媒を用いて、太陽光によって水を高効率に分解できる赤色透明な酸素生成光電極の開発に成功



赤色透明な酸素生成電極を開発したことで、水分分解用のタンデムセルを構成

水の分解反応による水素/酸素製造で**世界トップレベルの太陽光エネルギー変換効率5.5%**を達成。

Angew. Chem. Int. Ed., **58**, 2300-2304 (2019)

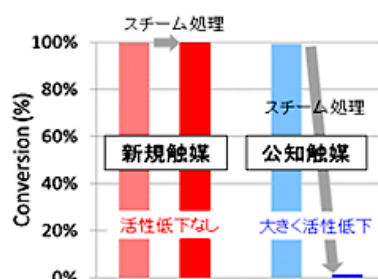
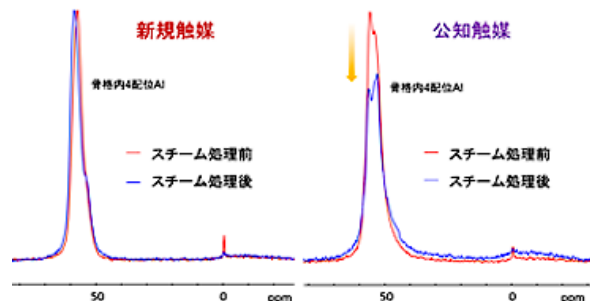
経産省 ARPChemにおける研究成果

超高耐久性ゼオライト触媒を開発

東工大、三菱化学(株)

二酸化炭素と水素から合成されるメタノールから、プラスチックなどの化学品原料として用いられるオレフィンを高効率かつ高生産性で製造する超高耐久性ゼオライト触媒を開発

MTO (Methanol to Olefin) 反応プロセスは、通常のオレフィン製造プロセスと比較してCO₂削減効果の優れたプロセスであるが、高温のスチーム環境下で反応させるため、既存の触媒では活性の大幅な低下が問題になっていた。

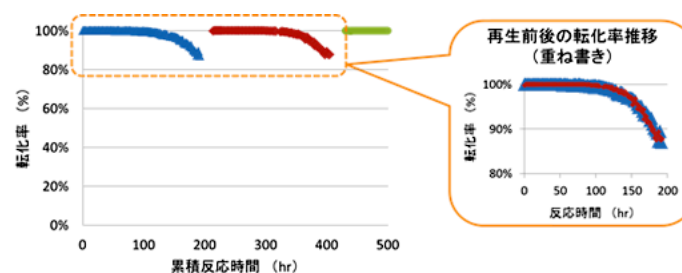


新規触媒では、反応点である4配位Alが高温のスチーム処理後も安定に存在し、触媒活性が維持される。

小型パイロット装置



実証運転結果



小型パイロット装置においても高耐久性を実証

二酸化炭素を資源とするオレフィン生成の商用化に大きく前進

NEDO プレスリリース(2017年3月16日)

文科省 人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換 (AnApple)

事業期間：2012年～2017年度の5年間 事業規模：4億円

研究班

光捕集機能を有する
人工光合成システムの開発

水の酸化光触媒機能を有する
人工光合成システムの開発

水素発生光触媒機能を有する
人工光合成システムの開発

二酸化炭素還元光触媒を有する
人工光合成システムの開発

総括班

それぞれの研究班によるブレークスルー技術を集積・融合した、水を電子源とする人工光合成システムの構築

社会が新エネルギーの獲得方法を選択する「議論の土俵に載せる」ための複数の実証事例、科学的指針を提示

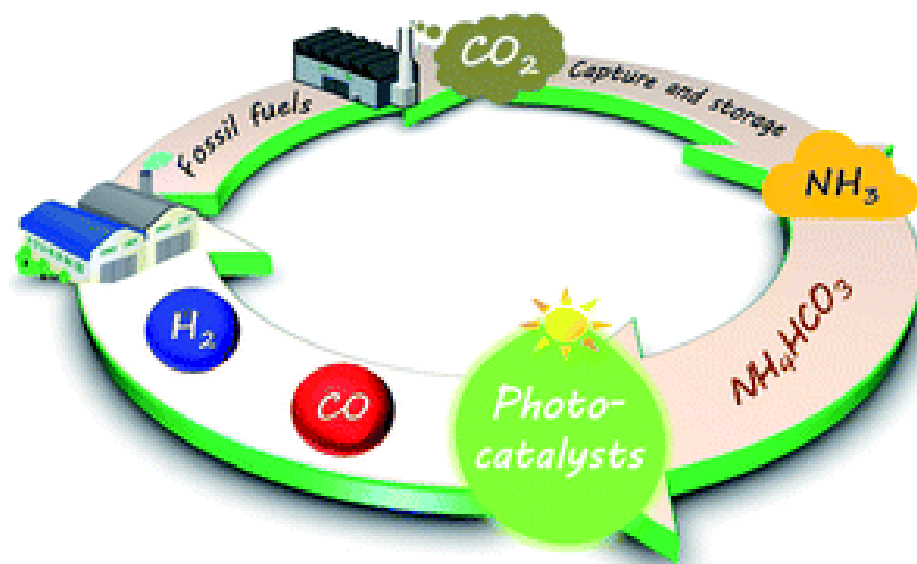
「光合成分子機構の学理解明と時空間制御による革新的光－物質変換系の創製 (I⁴LEC)」に後継 (2017年～2021年度)

文科省 AnAppleにおける研究成果

人工光合成技術による二酸化炭素とアンモニアからの合成ガスの創生

京都大学 田中庸裕教授ら

アンモニアを電子源として二酸化炭素 (CO_2) を光還元し、
一酸化炭素 (CO) を取り出す反応に高い活性を示す光触媒群を発見



CO_2 を光還元する場合には同時に水も光還元される問題があった。

- 今回発見した触媒を用いると水の光還元はほぼ進行しないため、 CO_2 から一酸化炭素のみを得ることに成功。
- アンモニアからは無害な窒素のみが生成するため、常温・常圧条件下で水素と一酸化炭素の合成ガスを容易に得ることが可能となる。

Formation rate^a/μmol
h⁻¹

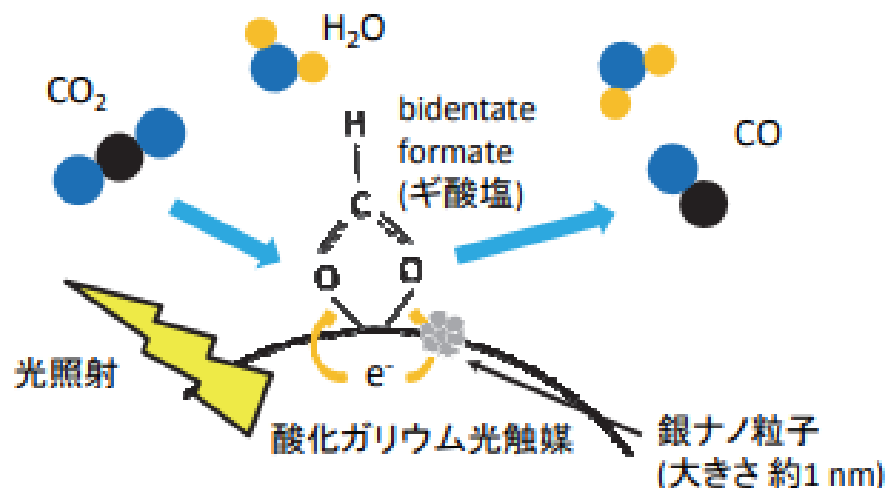
Entry	Catalyst	H ₂	N ₂	CO	Selec. ^b (%)	e ⁻ /h ^{+c}
1	ZnGa ₂ O ₄ /Ga ₂ O ₃	125.2	191.4	532.0	80.9	1.14
2	ZnGa ₂ O ₄	39.4	94.2	305.4	88.6	1.22
3	La ₂ Ti ₂ O ₇	5.9	17.4	41.6	87.6	0.91
4	SrO/Ta ₂ O ₅	2.71	11.5	42.9	94.1	1.32

Z. Huang, et al., *Chem. Sci.*, **8**, 5797-5801 (2017)

文科省 AnAppleにおける研究成果

人工光合成の光触媒反応を促進する銀ナノ粒子の機能を解明

大阪市立大学 吉田朋子教授ら



太陽光と二酸化炭素と水から一酸化炭素を生成する光触媒は、銀微粒子を添加することで反応促進が試みられてきたが、具体的な指針は何もなかった。

- 銀微粒子の粒形を制御し、検討したところ、**ナノメートルスケールでの大きさによって一酸化炭素の生成機構が変化**することを発見。
- 一酸化炭素生成の反応中間体である「ギ酸塩」の生成が、**1ナノメートル前後の小さな銀ナノ粒子の近くで促進され、一酸化炭素が効率的に生成**していることを明らかにした。

触媒設計指針へフィードバック → 高効率な触媒の開発
希少資源の無駄のない有効利用

M. Yamamoto et al., *J. Mater. Chem. A*, **3**, 16810-16816 (2015)

JST さきがけ「光エネルギーと物質変換領域」

事業期間：2009年度～2016年度

採択件数：39件 (13件×3期) 事業規模：総額20.16億円

人類にとって、理想的なエネルギー源である太陽光による広義の物質変換を介して光エネルギーを化学エネルギーに変換・貯蔵・有効利用しうる高効率システム構築を目指した独創的で挑戦的な研究を実施

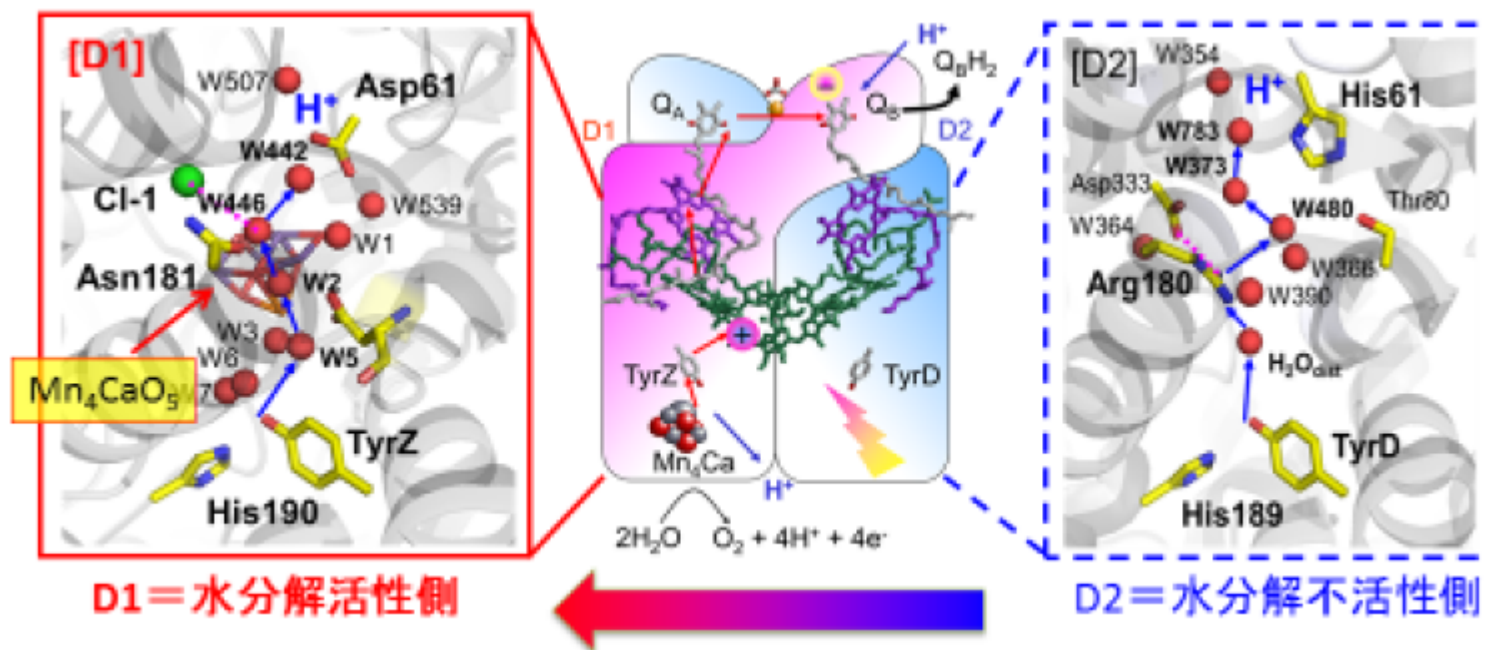
研究対象

- 半導体触媒や有機金属錯体による光水素発生
- 二酸化炭素の光還元
- 高効率な光捕集・電子移動・電荷分離・電子リレー系
- 光化学反応場の制御
- 水分子を組み込んだ酸化還元系
- ナノテクノロジーを駆使した光電変換材料
- 高効率光合成能を有する植物、藻類、菌類などの利用技術
- 光を利用したバイオマスからのエネルギー生産
- 光合成メカニズムの解明

JST さきがけにおける研究成果

光合成の光化学系II(PSII)での水分解反応で利用されるプロトン移動経路を発見

東京大学 石北央教授ら



PSIIの結晶構造を基に量子化学計算を行い、水分解に直接関わらないとされるD2蛋白質サブユニット側の酸化還元活性アミノ酸TyrDから蛋白質表面に伸びる**プロトン移動経路を発見**。

さらに、D2蛋白質と相同性のあるD1蛋白質サブユニット側の「TyrZ・近傍の水分解触媒サイトMn₄CaO₅」から水分解時に利用される可能性のあるプロトン移動経路を同定。

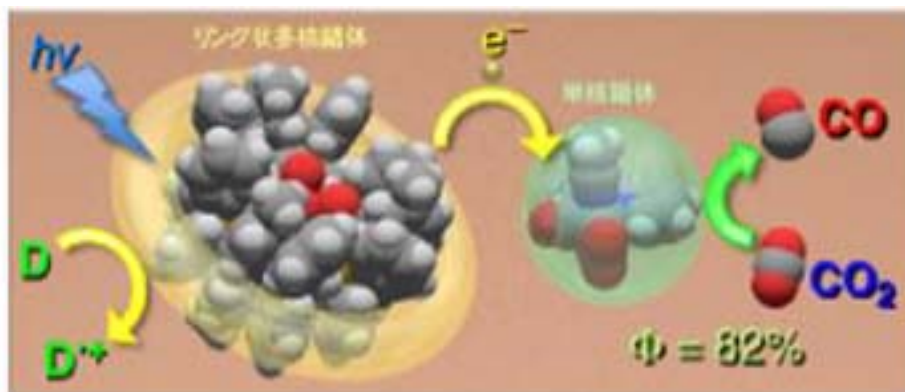
→ **反応機構が明らかになったことで人工光合成系の設計に利用可能**

K. Saito et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **110**, 7690-7695 (2013)

JST さきがけにおける研究成果

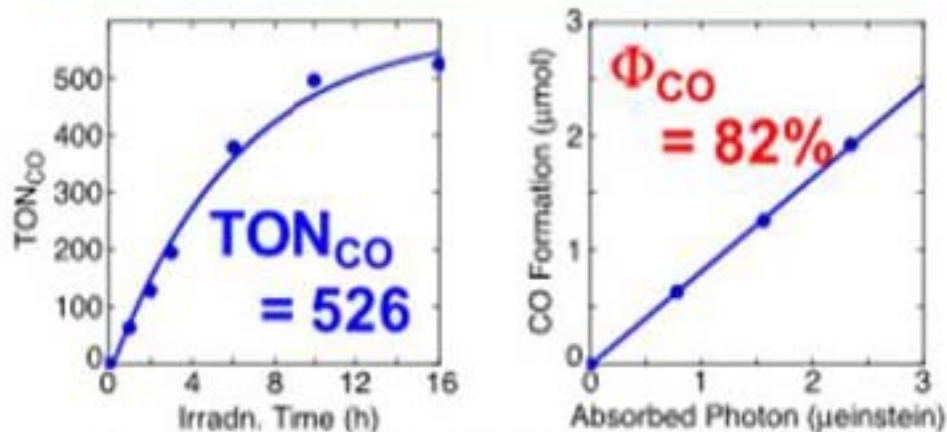
世界最高の反応量子収率を示すCO₂還元光触媒系の合成に成功（2013年当時）

東京工業大学 石谷治教授ら



環状レニウム(I)錯多核錯体の配位子の種類、核数を制御することで、配位子間 π - π 相互作用を増強し、**量子収率・励起寿命を大幅に向上**できることを発見。

非常に長い励起寿命を有する環状多核錯体を光増感剤「光アンテナ」としてCO₂還元光触媒反応系を構築し、**反応量子収率82%**を達成。これは既存のCO₂還元光触媒の中で、最も高いCO₂還元量子収率を示す光触媒である。（2013年）

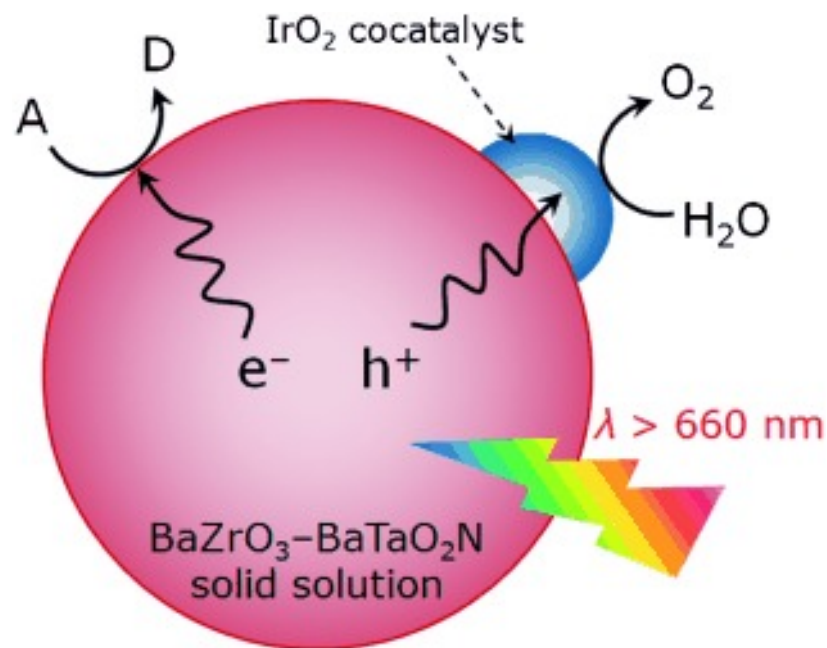


T. Morimoto et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **135**, 13266-13269 (2013)

JST さきがけにおける研究成果

「BaTaO₂N光触媒を用いて650nm以上の広域可視光による水の完全分解に成功」

東京工業大学 前田和彦准教授、東京大学 堂免一成教授ら



BaTaO₂Nは可視光照射下において水分解水素生成反応に有効な光触媒であるが、酸素生成反応の活性はゼロと考えられてきた。

BaTaO₂Nに助触媒修飾することで水の酸化に安定な光触媒となること、BaZrO₃と固溶体を形成することで活性が向上することを明らかにした。

650nm以上の広域可視光を利用して水の酸化還元を単一の半導体光触媒で実証した初めての例となる。

K. Maeda and K. Domen, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51**, 9865-9869 (2012)

JST 戦略的創造研究推進事業 先導的物質変換領域 (ACT-C)

事業期間：2012年度～2018年度

採択件数：50件 事業規模：各課題につき4000万～3億円

環境・エネルギー・創薬などの社会的課題を視野に入れ、革新的な物質変換技術の創出を目指し、具体的な達成目標として、

1) 二酸化炭素還元法の創出

2) 不斉炭素－炭素結合等の直接的生成法の開拓

3) n 電子系分子の化学合成と新機能創製

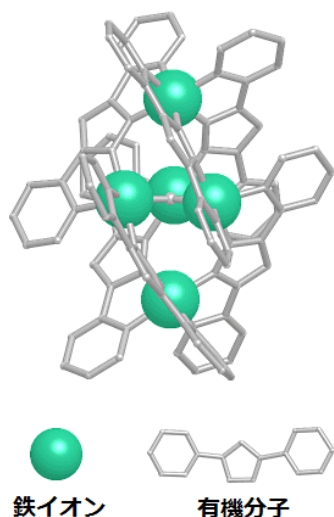
が設定されている。これらの達成目標の実現に向けて、「触媒」および「触媒反応」が全体のキーワードとなっている。

二酸化炭素を用いた物質変換については、水の分解も含めた光触媒研究に重点が置かれており、「人工光合成」を念頭に置いている。

JST ACT-Cでの研究成果

人工光合成の実現に向けた酸素発生触媒の開発に成功 分子科学研究所 正岡重行准教授ら

人工光合成の実現の障害となっていたのは、水の分解による酸素発生反応の効率の低さ。水に光を当てるだけでは、酸素は発生しないため、水の分解を手助けして酸素を効率よく発生させる触媒の開発が大きな課題。



植物の光合成で酸素発生触媒の役割を持つたんぱく質複合体の中に存在する錯体の構造に注目し、**その機能を人工的に模倣して、鉄イオンと有機分子を組み合わせた鉄錯体を新たな触媒分子としてデザイン。**

実験化学的手法と計算科学的手法を組み合わせで検討

- 触媒の処理能力を示す触媒回転頻度
→ **毎秒 1 9 0 0 回という非常に高い酸素発生速度**
- 触媒の耐久性を示す触媒回転数
→ **1 0 0 万回以上と、高い耐久性**

- (1) 天然の光合成系に匹敵する高い活性
- (2) 高い耐久性、
- (3) 安価な金属元素から成る

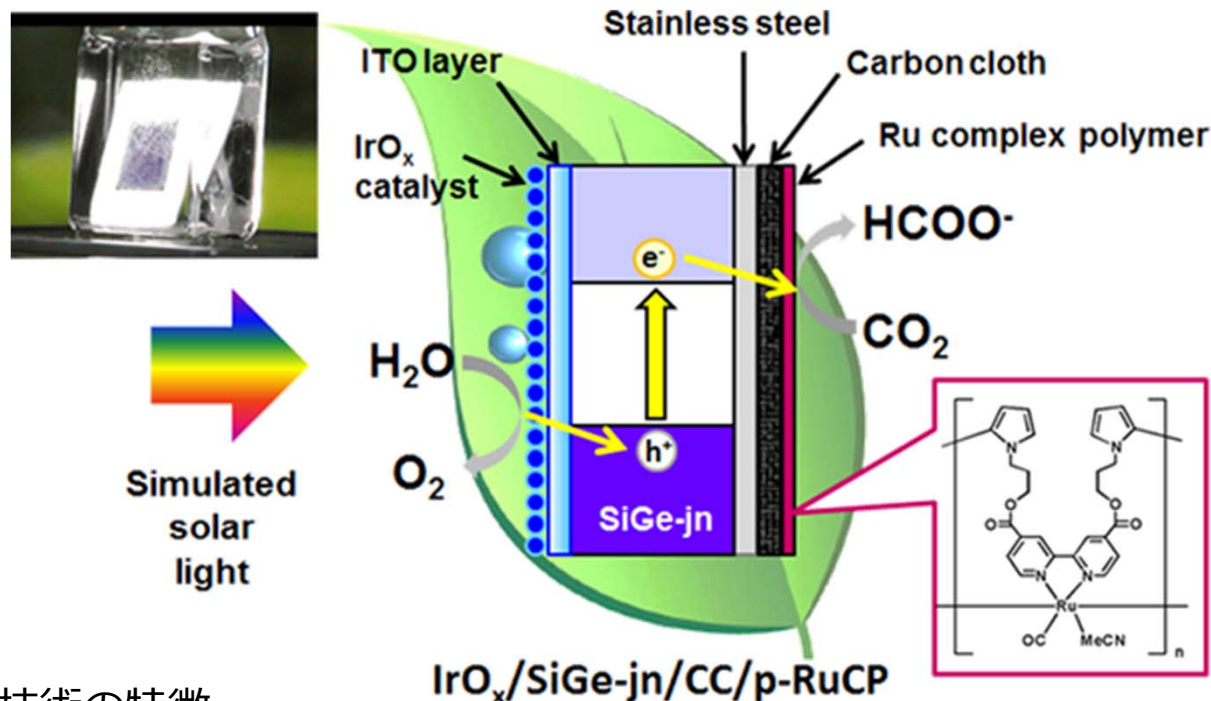
3つの条件を満たす酸素発生触媒の開発に成功

M. Okamura et al., *Nature*, **530**, 465-468 (2016)

JST ACT-Cでの研究成果

一枚の板状人工光合成デバイス「人工の葉」によるCO₂からのギ酸合成に成功
(2011年発表当時、人工光合成の実証に世界で初めて成功)

豊田中央研究所 森川健志シニアフェローら



光電極方式の超高効率化

- Ru 錯体
- carbon多孔体
- Si-Ge 接合型半導体
- IrO_x

上記の板状構造素子を
pH=6.4 の水溶液中に投げ込
む簡便な方法を開発し、**当初
計画の目標である太陽光変換
効率1.0%を遙かに凌駕する
4.6%でギ酸生成を達成**

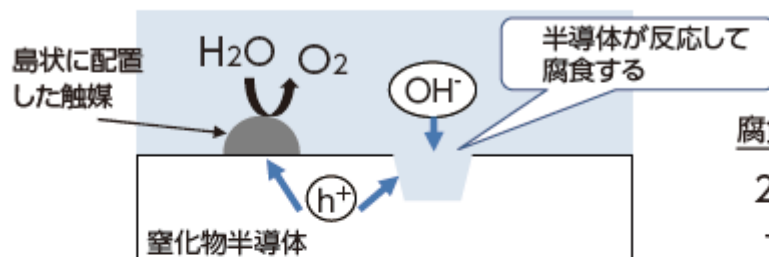
技術の特徴

- 太陽光と同等の成分、強度の光
- 常温常圧下で反応
- 外部からの電力供給無し、
酸化還元反応を仲介する試薬を不使用

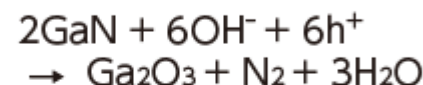
S. Sato et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 15240-15243 (2011)
T. Arai et al., *Energy Environ. Sci.*, **6**, 1274-1282 (2013)
T. Arai et al., *Energy Environ. Sci.*, **8**, 1998-2002 (2015)

企業による研究成果（NTT先端集積デバイス研究所）

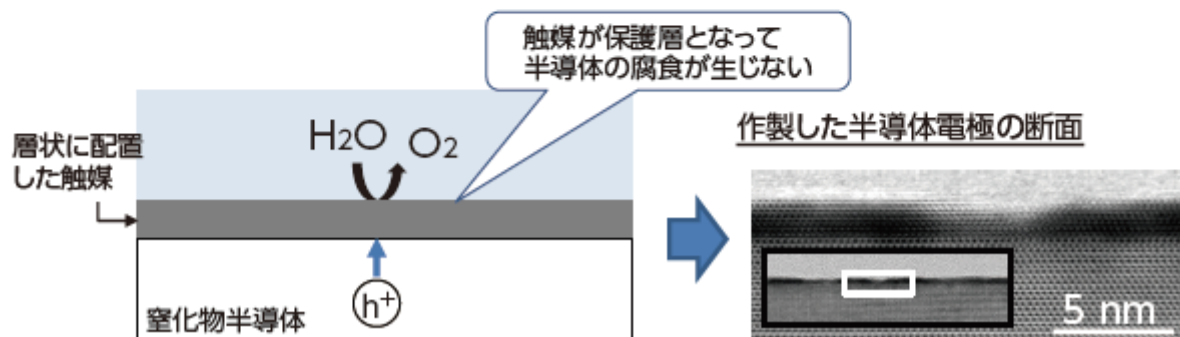
従来の触媒配置の問題点



腐食反応の概要



触媒を層状に配置して腐食を防止



特徴

光を照射した際に生じる正孔 (h⁺) や、水溶液中の水酸化物イオン (OH⁻) によって、人工光合成に使用する窒化物半導体 (GaN) そのものが腐食される問題があった。通信デバイスや電池の開発で培った半導体成長技術と触媒技術を活用して、**触媒層の厚みを1 ~ 2nm 程度に抑えて高い光の透過率を維持**することで、水分解による水素生成効率**0.84%**を達成し、**触媒の長寿命化することに成功**。

企業による研究成果（パナソニック(株)）



金属触媒

■ インジウム → ギ酸
変換効率：0.2%

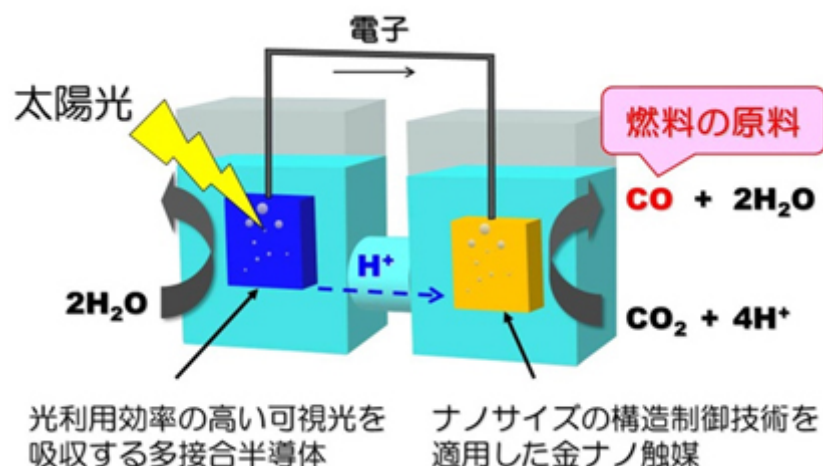
■ 銅 → メタン
変換効率：0.04%

特徴

高い太陽光エネルギー変換効率に加えて、**窒化ガリウムとインジウム、銅という無機材料だけで人工光合成を実現**。従来、触媒部は金属に有機物を配位させた金属錯体を用いることが多かったが、金属錯体の場合、照射した光の量に素早く追従できる反応速度を得るのが難しかった。

さらに、**触媒部に用いる金属を変更することで生成する有機物の種類を変えることに成功**。

企業による研究成果（株東芝）



技術の特徴

- 太陽光と同等の成分、強度の光を用いたこと
- 常温常圧下で反応を進めたこと
- 外部から電力を供給せず、酸化還元反応を仲介する試薬を使わないこと

東芝は火力発電で大量に排出される二酸化炭素を分離回収するCCS（二酸化炭素の分離、回収、貯留）技術の開発を進めており、人工光合成技術とCCSなどと組み合わせて役立てたいとしている。

多接合半導体

アモルファスシリコンを用いた3層の太陽電池と同じ材料を用いることで、太陽光に含まれている**53%の光（紫外～可視）を吸収可能**とした。

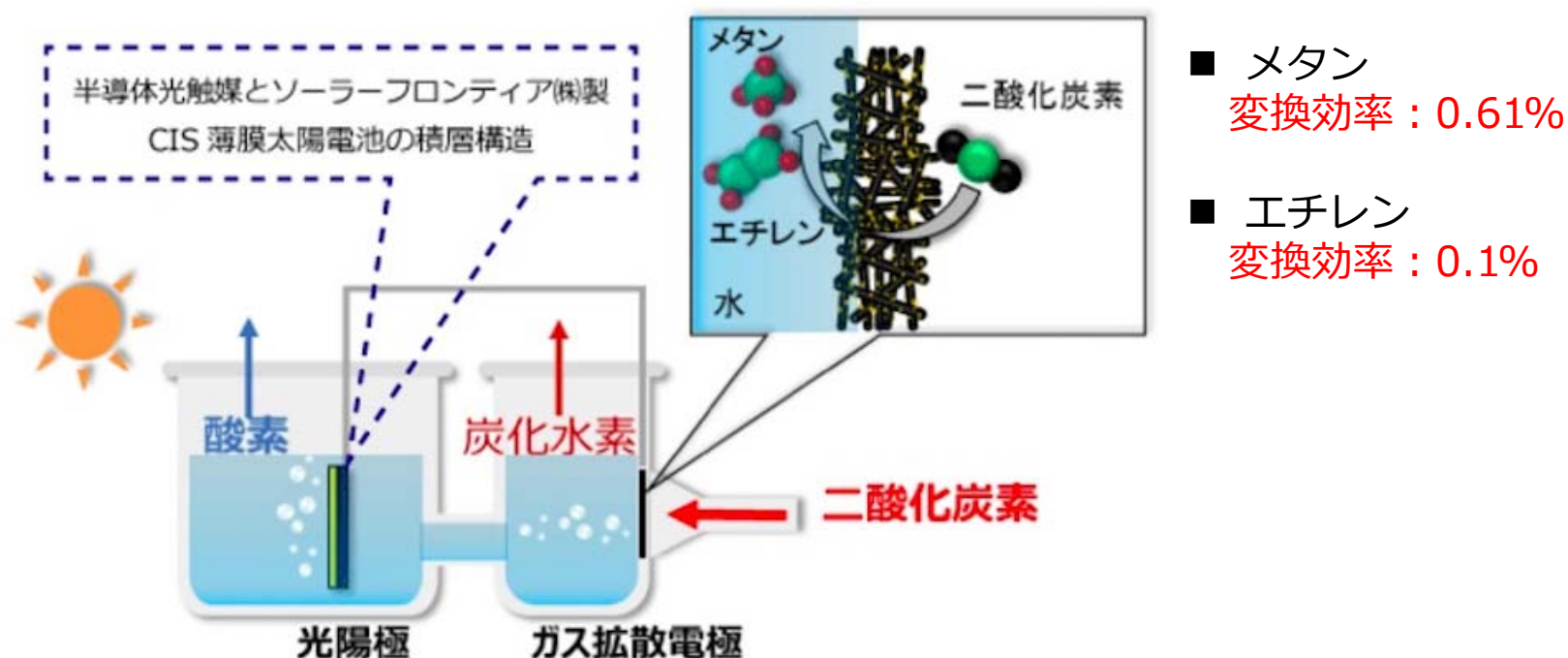
太陽光を受け取り、水（H₂O）を分解して、酸素（O₂）と水素イオン（H⁺）、電子（e⁻）を生み出している。

金ナノ触媒

二酸化炭素が一酸化炭素に変化する「場」（活性サイト）を増やすことに成功。

変換効率：1.5%

企業による研究成果（昭和シェル石油(株)）



ガス拡散電極を利用し、常温常圧下で水と二酸化炭素（ CO_2 ）から太陽光のエネルギーだけで**メタン**と**エチレン**を合成することに成功。**常温常圧下で太陽光のエネルギーのみで炭化水素などの有用な物質を生成できたのは「世界初」。**

特徴

燃料電池などで使用されている**ガス拡散電極**を用い、**気体のままの CO_2 を利用することに成功**。従来、多くの人工光合成の研究では CO_2 を一度水に溶かした状態で変換する方式を採用していたが、原料となる CO_2 が少量しか水に溶けないため、変換が難しいという課題があった。

人工光合成の効率記録

