

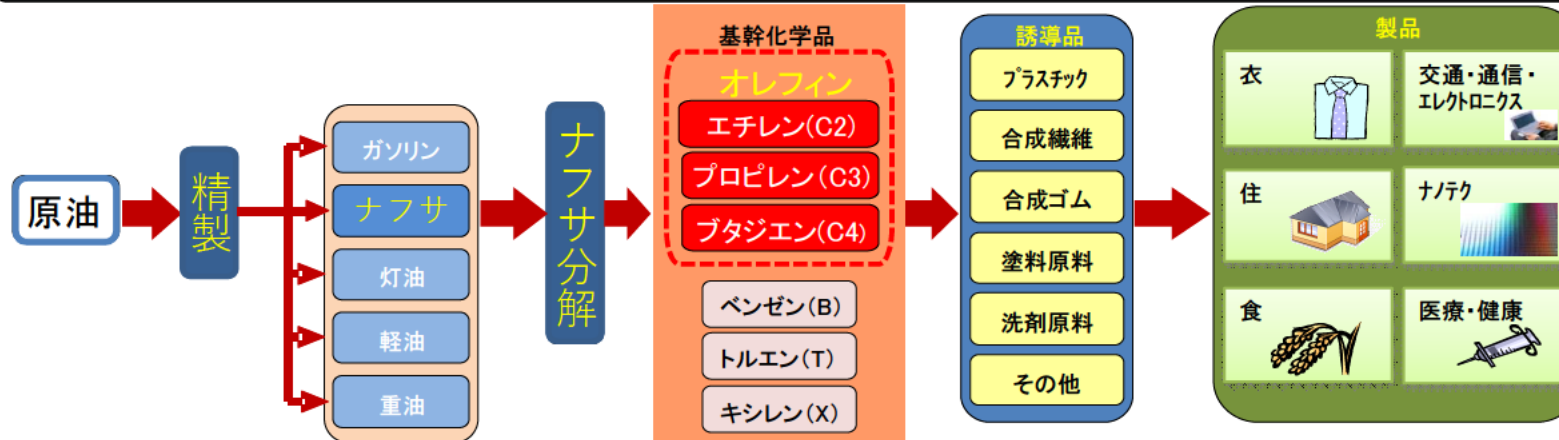
人工光合成によるプラスチック原料製造 －日本発の技術でグリーン革命を－

- ・背景と目的
- ・これまでの研究成果
- ・社会実装に向けての課題

2022年11月4日
NEDO 材料・ナノテクノロジー部
伊藤 智行

NEDO人工光合成事業の背景と目的

■ 日本の化学産業：あらゆる産業に、様々な素材を供給する基盤産業

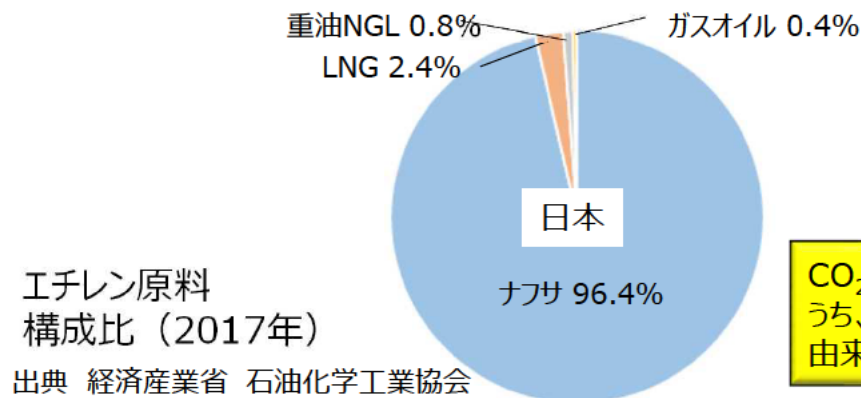


■ 課題

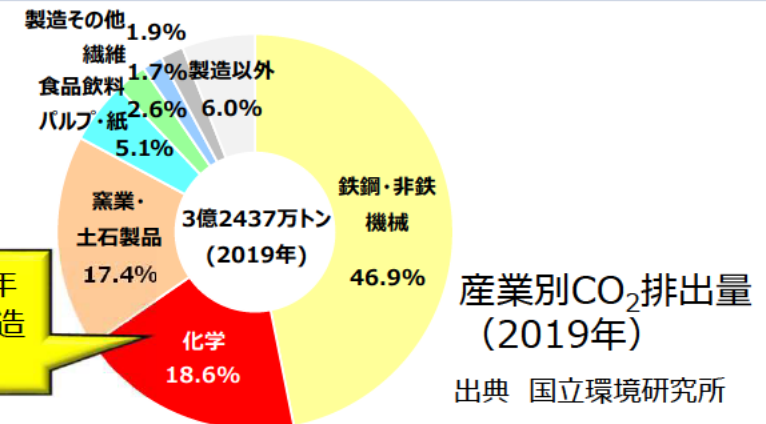
- ・原料の96%を原油（ナフサ）に依存
- ・二酸化炭素の排出量大

人工光合成による解決策

- ・CO₂を炭素源として利用
- ・太陽光を用いたグリーン水素の製造とCO₂排出量の少ないオレフィン製造



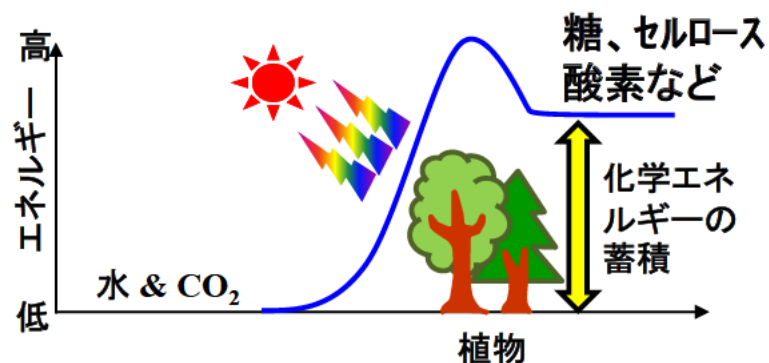
CO₂排出量 6,018万t/年
うち、C2～C4オレフィン製造
由来は40%弱



植物の光合成と人工光合成

植物による光合成

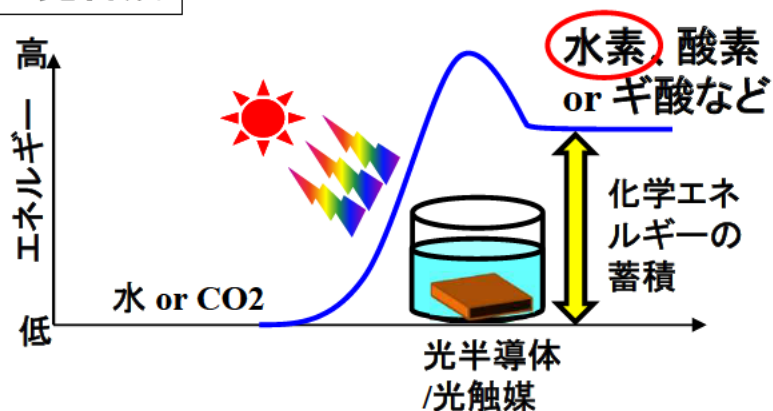
植物の光合成効率約0.3%



光合成とは？(人工も含む)

- ① 太陽光を用いる
- ② 水、 CO_2 を原料にする
- ③ 太陽エネルギーを高エネルギー物質に変えて蓄える

人工光合成



NEDOで研究開発中の人工光合成は

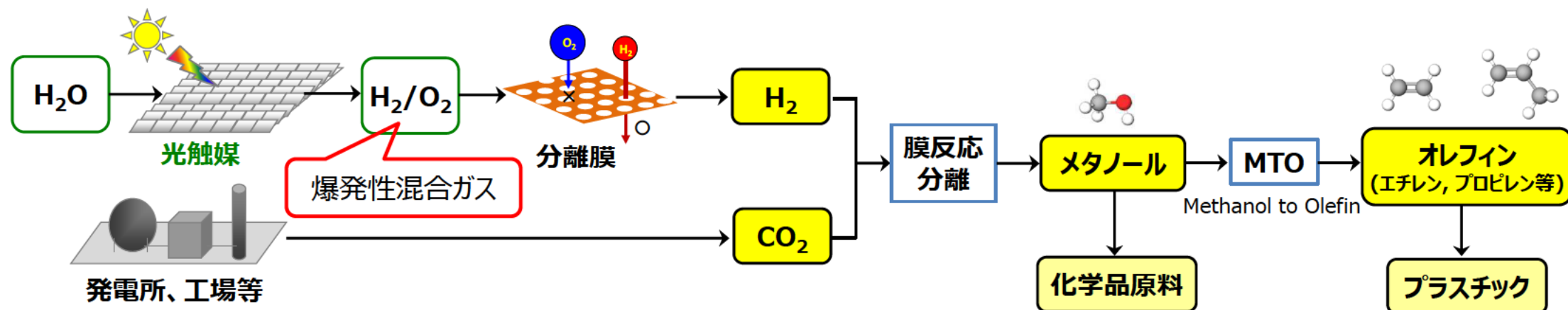
- ① 太陽光を用いて水を分解、水素を取り出し
- ② 水素と CO_2 からプラスチック原料(オレフィン)を作る技術

明治大学×SDGs掲載図を参考にNEDO作成
<https://www.meiji-sdgs.jp/articles/efforts/117/>

NEDO人工光合成技術の概要

太陽エネルギーを利用して、

- ① 光触媒によって、水を水素と酸素に分解し、
- ② 次に、分離膜によって、水素と酸素の混合ガスから水素を安全に分離し、
- ③ 最後に、その水素と工場排ガス等から取り出した二酸化炭素を原料として、基幹化学品であるC2～C4オレフィンを製造する基盤技術を開発する。



- ・日本が世界をリードする光触媒を活用した革新技术の開発により、化石資源依存の低減と CO_2 排出量の大幅削減に貢献する事が目的
- ・第1期(2012～2021年度)を終了し、第2期(2022～2030年度)をスタート

グリーンイノベーション基金事業

研究開発の実施体制

オールジャパン体制で実施



第1期(2012～2021年度)

人工光合成化学プロセス技術組合(ARPCChem)

【参加企業】

三菱ケミカル(株)、三井化学(株)、富士フイルム(株)、TOTO(株)
国際石油開発帝石(株)、(一財)ファインセラミックセンター、住友化学(株)(～2017年)

【共同実施先】

東京大学、京都大学、東京理科大学、明治大学、信州大学
山口大学、産業技術総合研究所、名古屋工業大学、東京工業大学、
富山大学(～2017年)、早稲田大学(2017年～)

第2期(2022～2030年度)

人工光合成化学プロセス技術組合(ARPCChem)：前半の水素製造を担当

グリーンイノベーション基金事業

【参加企業】

三菱ケミカル(株)、三井化学(株)、(株)INPEX、JX金属(株)、大日本印刷(株)
デクセリアルズ(株)、東レ(株)、トヨタ自動車(株)、日本製鉄(株)、(株)フルヤ金属
京セラ(株)

【共同実施先】

東京大学、信州大学、東京理科大学、産業技術総合研究所、東北大学
京都大学、名古屋大学、山口大学、岐阜大学、宮崎大学

三菱ケミカル(株)、三菱瓦斯化学(株)：後半のメタノール合成、オレフィン合成を担当

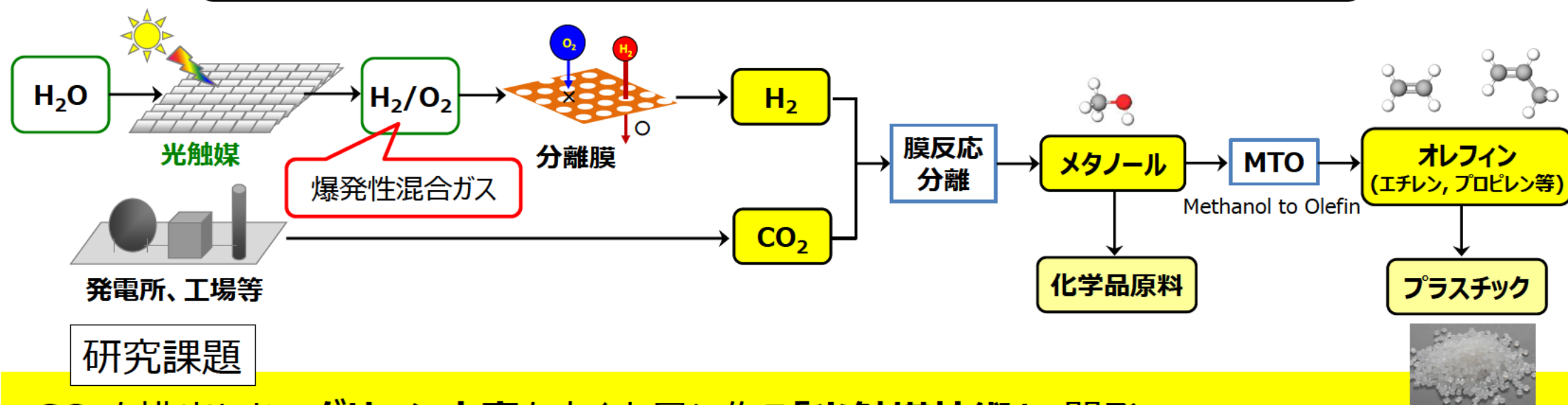
【共同実施先】

東京大学、東京工業大学

NEDO人工光合成技術の研究課題

太陽エネルギーを利用して、

- ① 光触媒によって、水を水素と酸素に分解し、
- ② 次に、分離膜によって、水素と酸素の混合ガスから水素を安全に分離し、
- ③ 最後に、その水素と工場排ガス等から取り出した二酸化炭素を原料として、基幹化学品であるC2～C4オレフィンを製造する基盤技術を開発する。



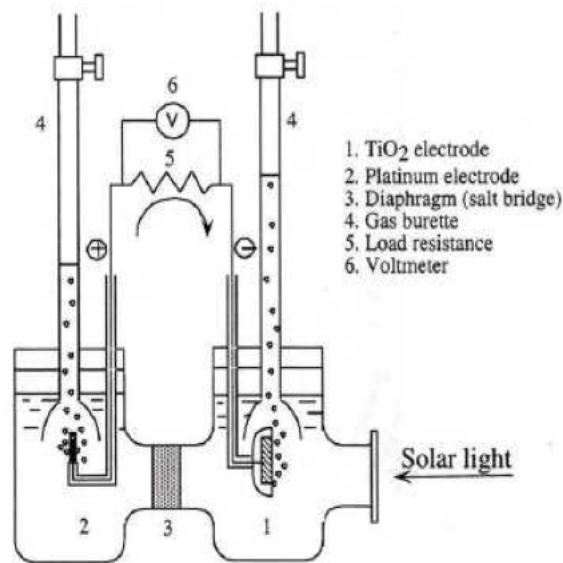
- ・CO₂を排出しない**グリーン水素**を安く大量に作る「**光触媒技術**」の開発
- ・爆発性を有す水素/酸素の混合ガスから高純度の水素を「**安全に分離・回収する技術**」の開発
- ・CO₂排出量が少なく目的物収率の高い「**CO₂からのメタノール経由オレフィン製造技術**」の開発

光による水分解の発見と光触媒の原理

1972年に世界で初めて光による水からの水素発生を報告
(本多・藤嶋効果)

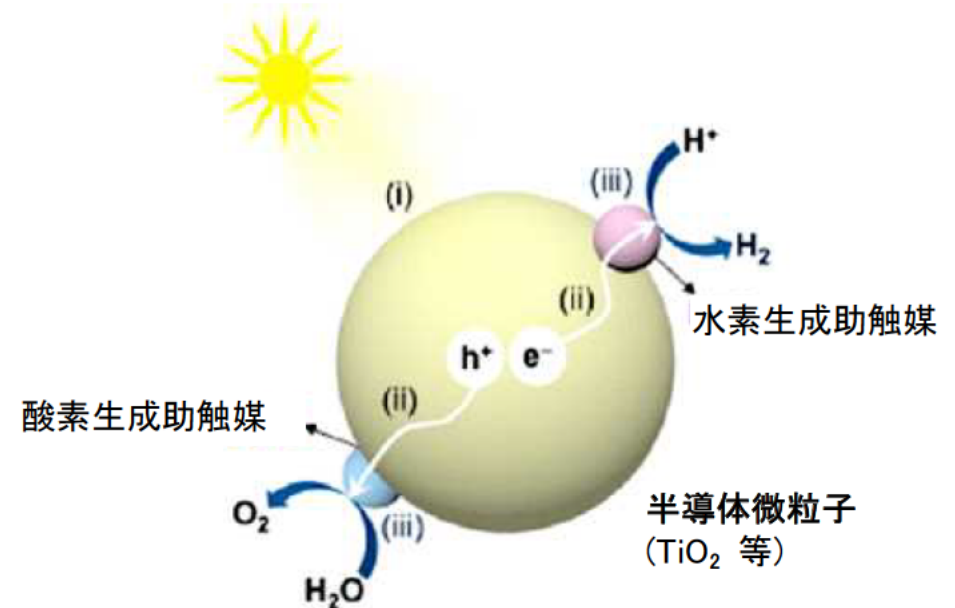
以来、本分野では日本が
世界の最先端に位置している

A.Fujishima, K.Honda, *Nature*, 238, 37(1972)



(出典)
独立行政法人 経済産業研究所(RIETI) BBLセミナー(2019年4月11日, 藤嶋昭先生資料)
<https://www.rieti.go.jp/jp/events/bbl/19041101.html>

光触媒系での電荷分離・水分解の原理図



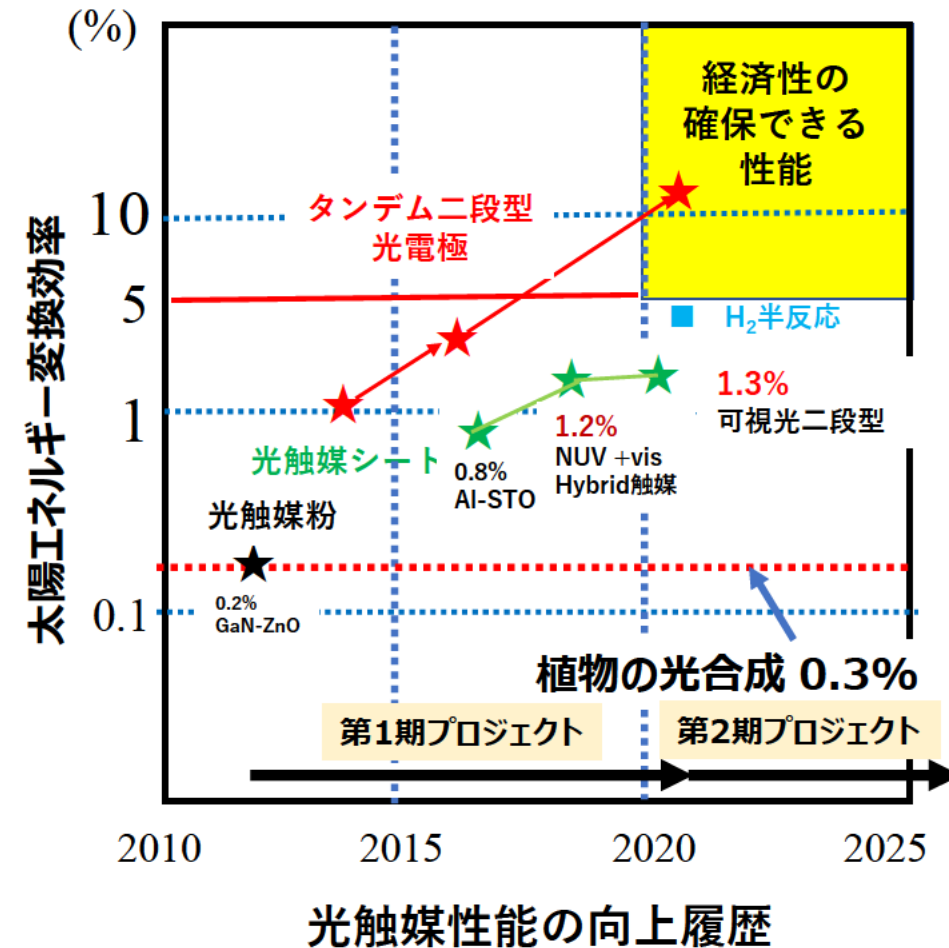
(出典)
瀬戸山亨「太陽光と水と二酸化炭素から、プラスチック原料へ～人工光合成プロジェクト～」
NanotechJapan Bulletin, Vol.13, No.5, 2020より
<https://www.nanonet.go.jp/magazine/feature/10-9-innovation/76.html>

光触媒の開発：反応システムと太陽エネルギー変換効率の変遷



これまでの成果と今後の課題

- ・タンデム方式で世界最高レベルの変換効率10%を達成
 - ・社会実装に向けての今後の課題
- タンデム式は高製造コストかつ高面積化が困難ゆえ、第2期のグリーンイノベーション基金事業では光触媒シートでの効率向上と低コスト化に注力

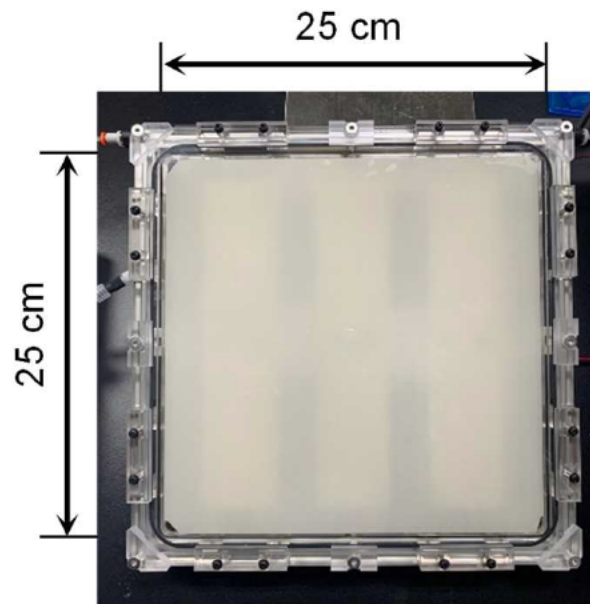


(出典)

NEDO/ARPCHEM人工光合成PJ成果報告会(2022.1.25)資料掲載図を一部修正

光触媒パネルの試作

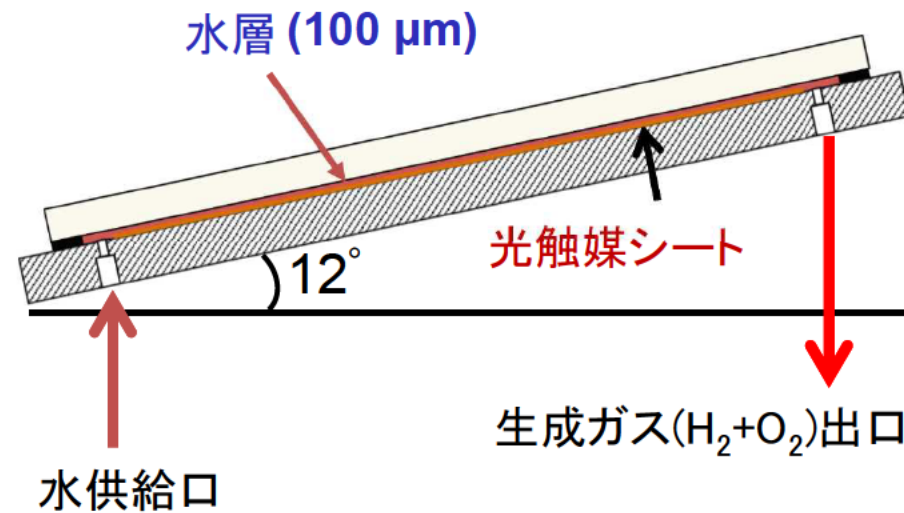
正面図



ガラス窓

$\text{RhCrO}_x/\text{AlドープSrTiO}_3$ (0.4 g)
+
 SiO_2 (0.9 g)

側面図



(出典)
NEDO/ARPCHEM人工光合成PJ成果報告会(2022.1.25)資料掲載図より

光触媒パネル (25 cm x 25 cm) での水分解反応の様子



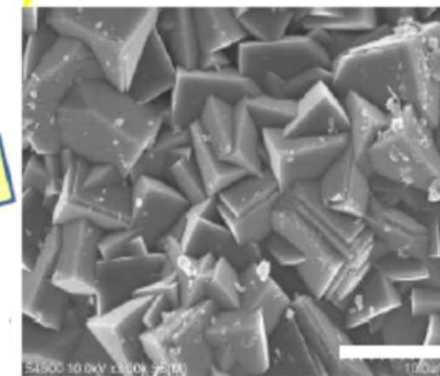
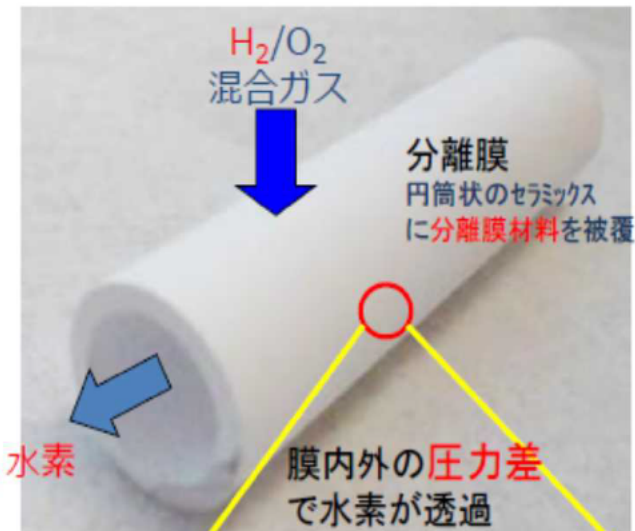
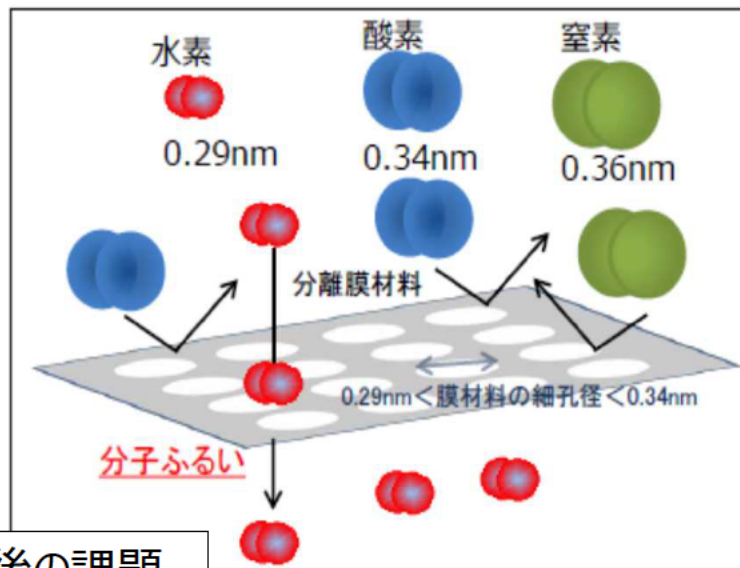
生成ガス($\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$) 出口

光源: UV-LED (365nm)

水供給口

分離膜：水素/酸素分離のコンセプト

分子ふるい効果により、サイズの小さい水素のみを選択的に透過させることが可能



(出典)
NEDO「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」
(人工光合成Pj) 2019年中間評価事業原簿の掲載図より

これまでの成果と今後の課題

独自改良したゼオライト膜で
透過側水素濃度96.1%, 水素回収率91.7%を達成
＜今後の課題＞
性能向上等によるコスト削減、スケールアップ法の確立

100 m² プロトタイプ光触媒水分解システム

東京大学 柿岡教育研究施設(茨城県)

水素ガス分離ユニット

$(0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}) \times 1600 \text{ panels} = 100 \text{ m}^2$



3～7L/min程度の水素が発生
1.8kL/日の水素製造
(他の報告値の10～20倍の量)

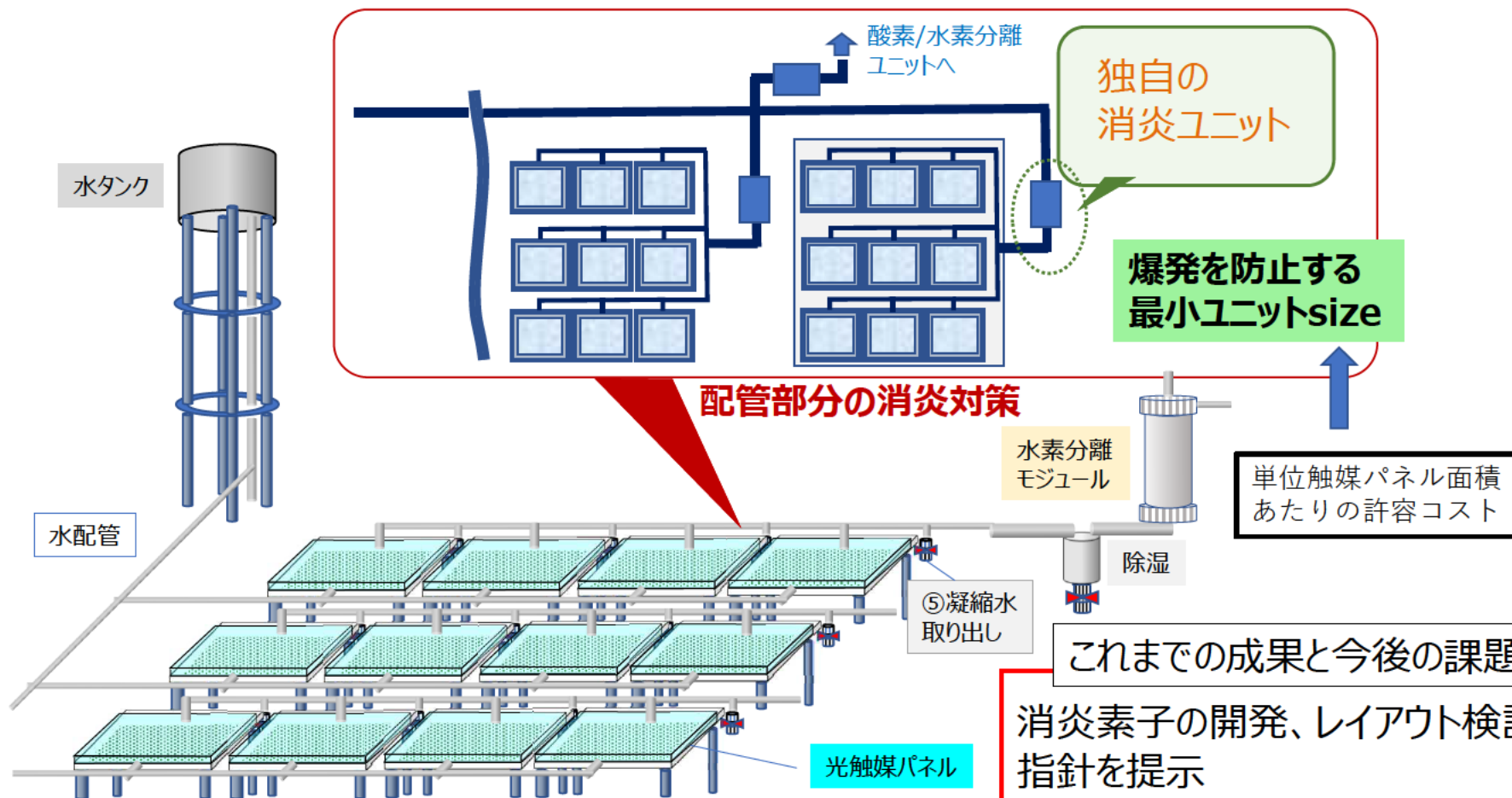
今後の課題

- ・安価で耐久性のある光触媒パネルモジュールの開発
- ・更なる大型化に向けての課題抽出

Nature, 598, 304 (2021)

2021.8.26 NEDOとARPCChemの共同リリース記事より

H₂/O₂ 安全分離プロセス開発



これまでの成果と今後の課題

消炎素子の開発、レイアウト検討、安全設計の基本指針を提示

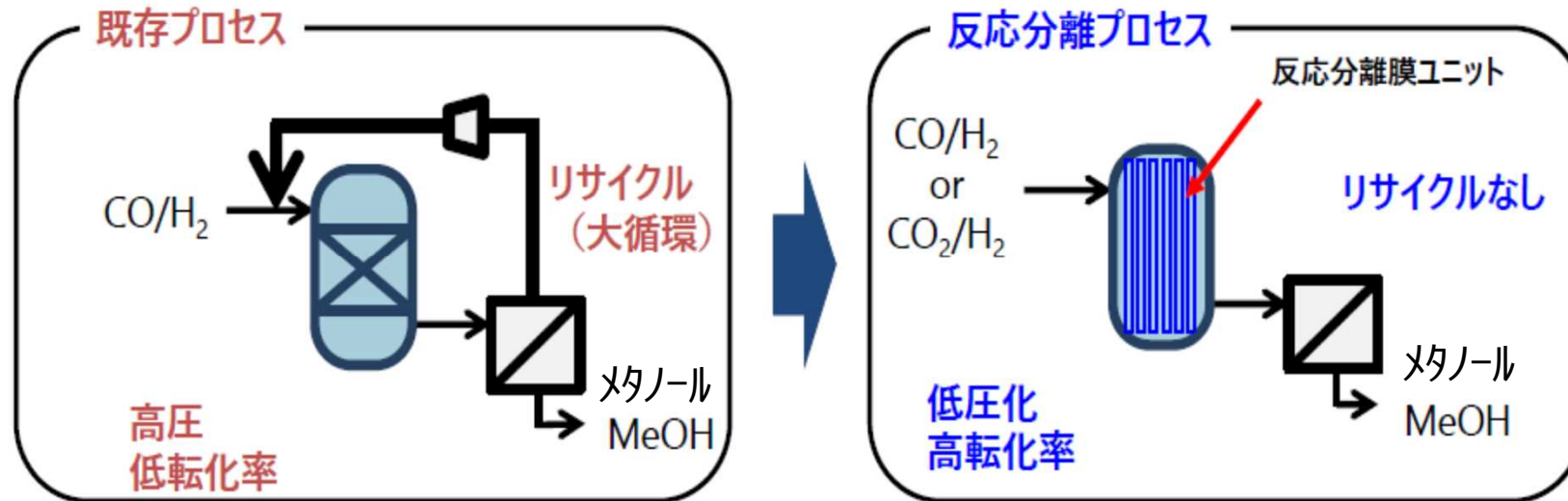
＜今後の課題＞

コストも含めた安全設計の詳細確立

保安基準の整備

(出典)
NEDO/ARPCHEM人工光合成PJ成果報告会(2022.1.25)資料掲載図を一部修正

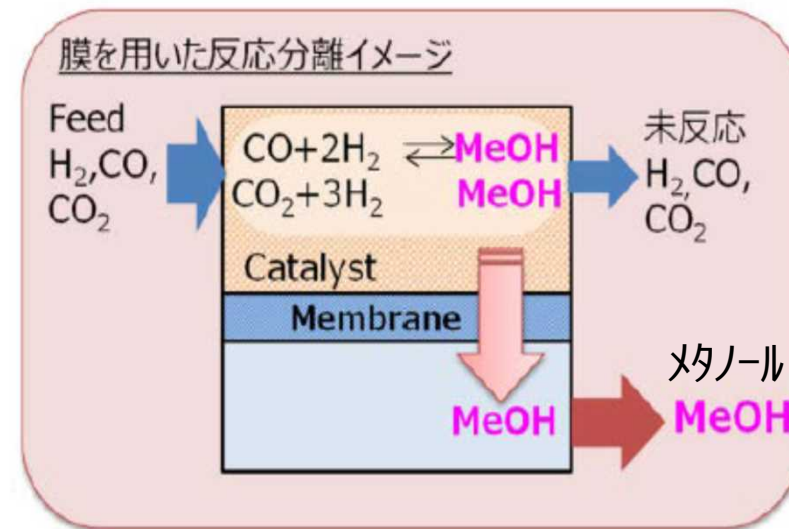
メタノール合成の反応分離プロセス開発



反応分離のコンセプト検証に成功

今後の課題

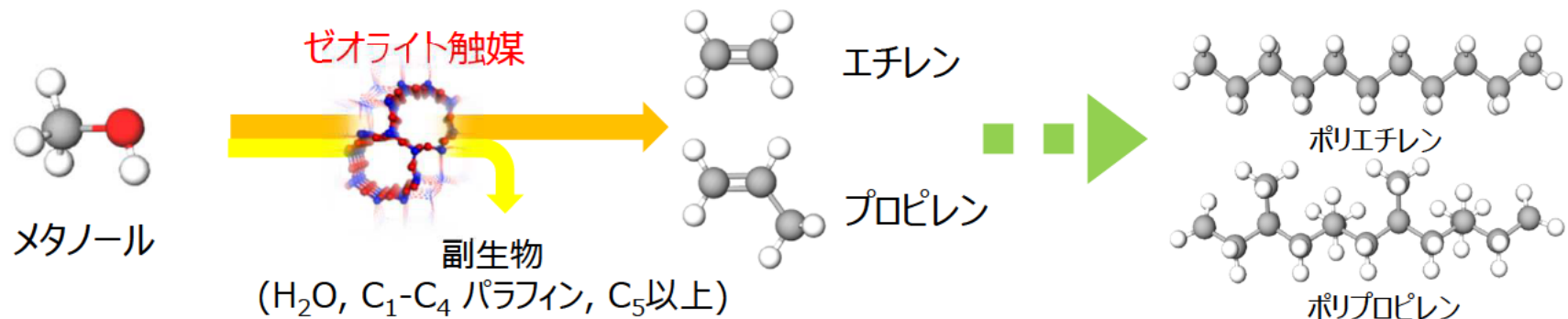
分離膜の開発、触媒形状等の最適化
⇒ 工業利用可能な膜型反応器の開発



(出典)

NEDO/ARPCHEM人工光合成PJ成果報告会(2022.1.25)資料掲載図、
ARPCHEM2021年度成果報告書の掲載図より

メタノールからのオレフィン(エチレン、プロピレン)製造



既存触媒 プロセス	反応成績※
SAPO-34	エチレン39% プロピレン39%
ZSM-5	プロピレン65-70%

※IHSレポートを元に算出

開発触媒 プロセス	反応成績
MTE	エチレン > 70%※
MTP	プロピレン > 75%

※ラボワンパス選択率

(出典)
NEDO/ARPCHEM人工光合成PJ成果報告会(2022.1.25)資料掲載図に一部追記

これまでの成果と今後の課題

既存の工業触媒を上回る選択率の触媒を開発

<今後の課題>

更なる触媒の改良、低コスト化、各触媒に適した反応方式と工業プロセスの確立

人工光合成法のコスト試算

水素製造コストの比較

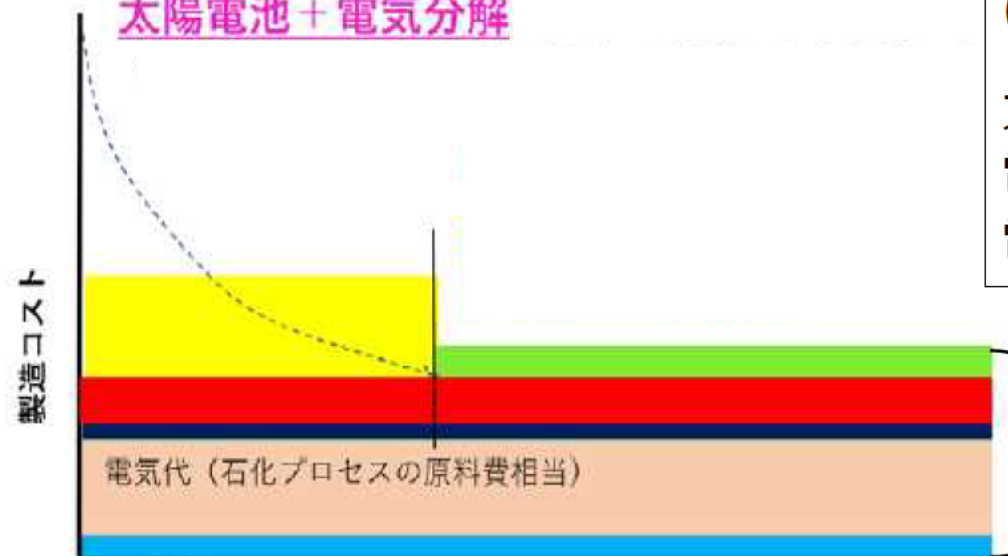
(太陽電池+電気分解 vs 光触媒法)

太陽光を直接水素に変換し、
電気代相当の費用が発生しない光触媒法は
電気分解法水素よりも低コストにできるポテンシャルあり

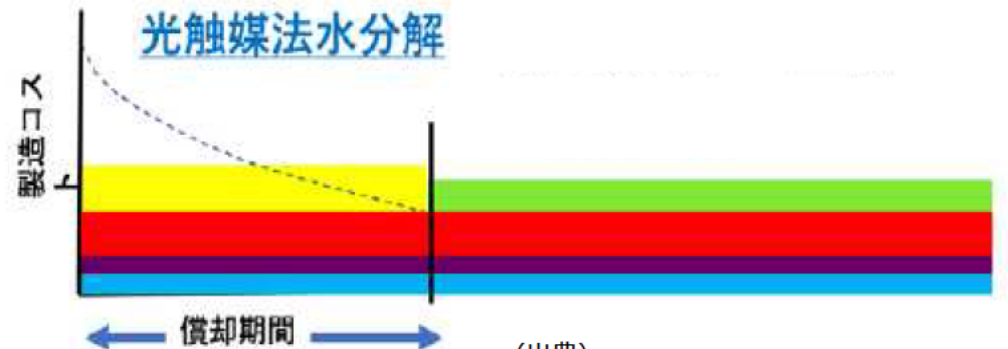
電気代の約2倍のコスト

- : 平均償却費
- : 修繕費
- : 固定費
- : 運転エネルギー費
- : 電気代(電気分解)
- : 原料水コスト

太陽電池+電気分解

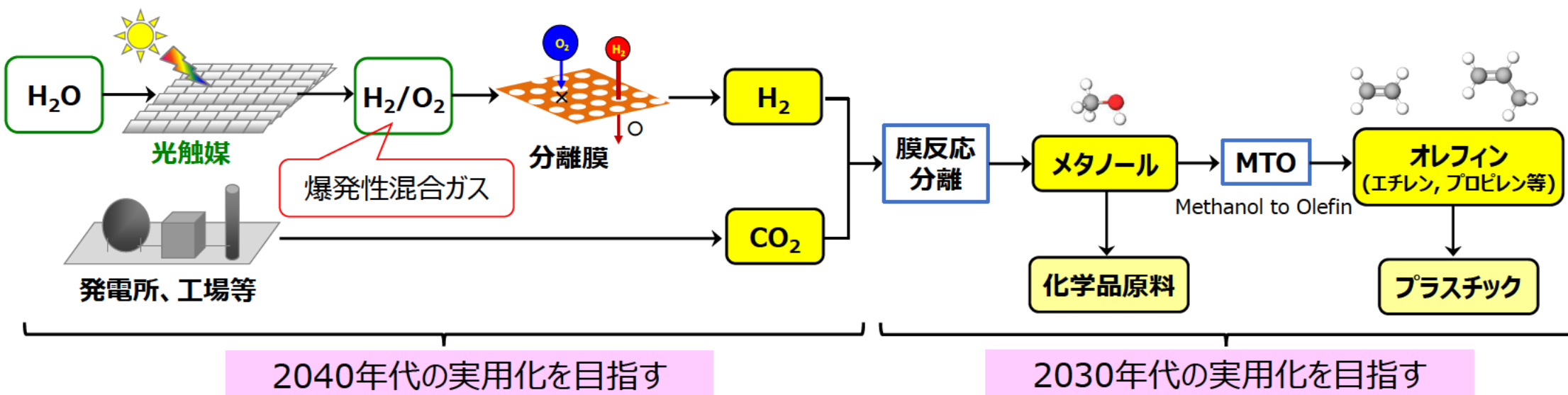


光触媒法水分解



(出典)
NEDO/ARPCHEM人工光合成PJ成果報告会(2022.1.25)資料掲載図を一部修正

グリーンイノベーション基金事業における研究課題と実用化時期



光触媒を用いた水素製造の研究課題

- ・太陽エネルギー変換効率の高い光触媒の開発(現状1% ⇒ 2030年目標10%)
- ・安価で耐久性のある光触媒モジュールの開発
- ・安全で安価で耐久性のある水素/酸素分離・回収システムの開発

CO_2 と水素からのオレフィン製造の研究課題

- ・膜型反応器を用いたメタノールの工業的製造プロセスの完成
- ・選択性と耐久性のあるオレフィン製造固体触媒の開発とそれを用いた工業的製造プロセスの完成

実用化のイメージ図



(出典)
NEDO/ARPCChem人工光合成Pj成果報告会(2022.1.25)資料掲載図より

CO₂調達が容易でプラスチック製造工場も近いコンビナート近傍等に設置の可能性