

# 「二酸化炭素原料化基幹化学品 製造プロセス技術開発」 (事後評価)

(2014年度～2021年度 8年間)

## プロジェクトの概要 (公開版)

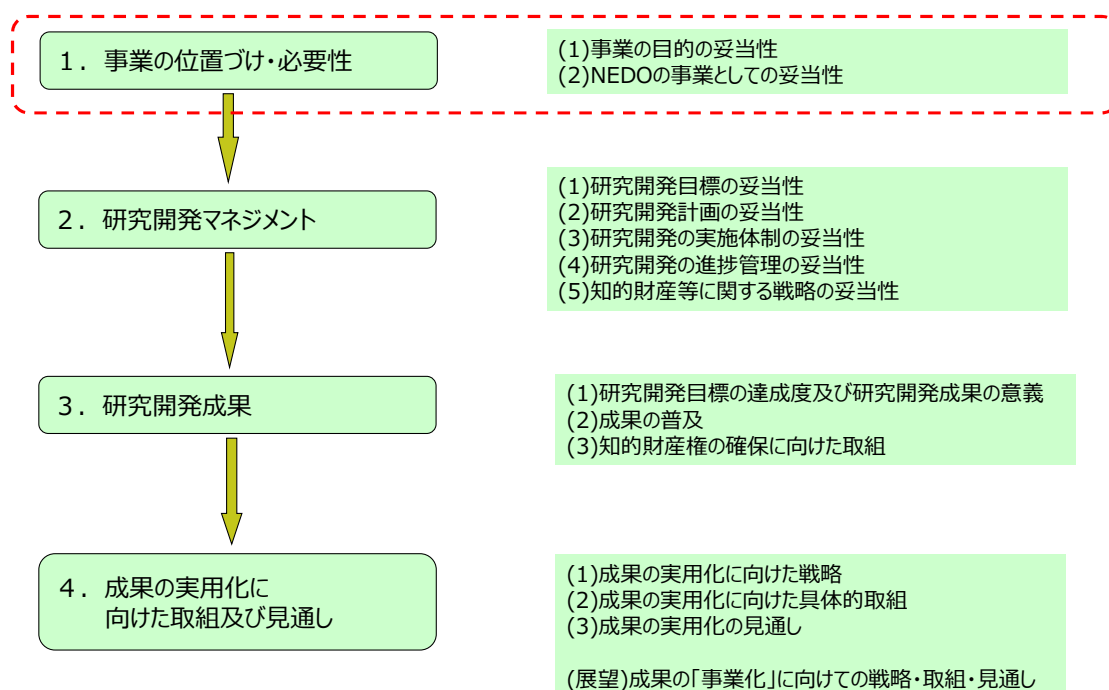
### 5.1 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント

NEDO 材料・ナノテクノロジー部

2022年11月10日

1

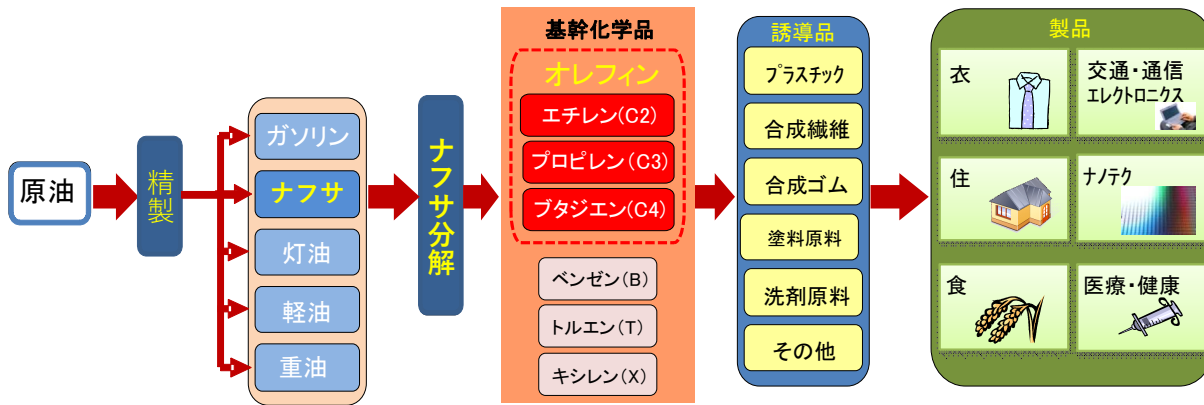
#### 発表内容



2

◆ 事業実施の背景と事業の目的

■ 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  
主原料は原油由来ナフサ



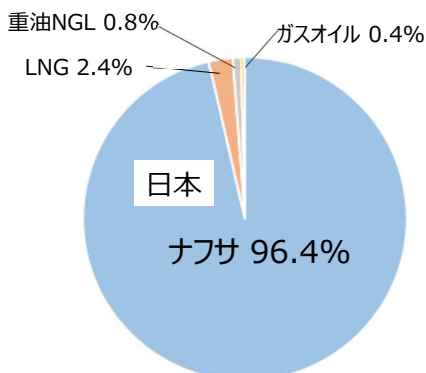
◆ 事業実施の背景と事業の目的

■ 課題

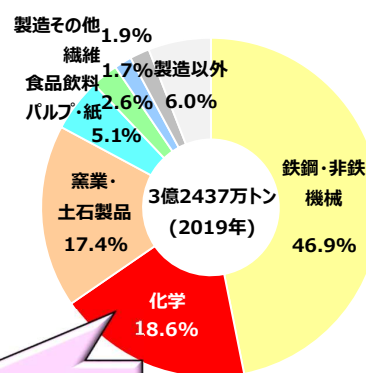
- 原料の96%を原油（ナフサ）に依存
- 二酸化炭素の排出量大

事業の目的

化石資源依存からの脱却と  
CO<sub>2</sub>排出量の大幅削減に貢献する技術の開発



エチレン原料  
構成比 (2017年)  
出典 経済産業省 石油化学工業協会



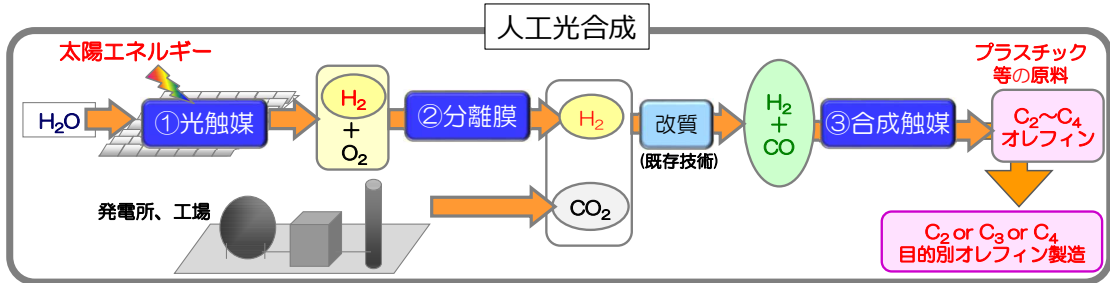
産業別CO<sub>2</sub>排出量  
(2019年)  
出典 国立環境研究所

CO<sub>2</sub>排出量 6,018万t/年  
うち、C2~C4オレフィン製造  
由来は40%弱

■ プロジェクトの位置づけ

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、化石資源依存からの脱却とCO<sub>2</sub>排出量の大幅削減に貢献する

◆ 政策的位置付け(2019年以降)

Ⅲ. 産業 水素 CC

カーボンサイクル技術によるCO<sub>2</sub>の原燃料化など

⑱ 人工光合成を用いたプラスチック製造の実現

**【目標】**

- 産業プロセス中の排ガス等から分離回収したCO<sub>2</sub>を人工光合成により得られる水素等を原料とすることにより基幹化学品を製造するための要素技術開発を進め、2030年までに技術を確立する。具体的には、2020年から100m<sup>2</sup>規模の水素製造パネルを用いたフィールド試験を開始するとともに、2021年から社会実装を見据えたメタン改質等の水素製造システムの実証に着手する。人工光合成等のCO<sub>2</sub>フリー水素製造技術は要素技術開発レベルにあり、引き続き、基礎基礎研究を進めるとともに、変換効率向上のための材料設計や、分離プロセスなどを含むプロセス検討を、官民共同の下ナショナルプロジェクトでの実施を行う。

**【技術開発】**

- 産業プロセス中の排ガス等から分離回収したCO<sub>2</sub>を人工光合成により得られる水素等を原料とすることにより基幹化学品を製造するための要素技術開発を進め、2030年までに技術を確立する。具体的には、2020年から100m<sup>2</sup>規模の水素製造パネルを用いたフィールド試験を開始するとともに、2021年から社会実装を見据えたメタン改質等の水素製造システムの実証に着手する。人工光合成等のCO<sub>2</sub>フリー水素製造技術は要素技術開発レベルにあり、引き続き、基礎基礎研究を進めるとともに、変換効率向上のための材料設計や、分離プロセスなどを含むプロセス検討を、官民共同の下ナショナルプロジェクトでの実施を行う。

**【実施体制】**

- 化学メーカー、プラントメーカー、大学、公的研究機関が一体となり、サプライチェーンを意識した体制を構築する。

← 要素技術開発フェーズ

＜水素製造システム＞  
(低コスト化、適用拡大)

メタン酸化的低温改質プロセス技術

水電解 (P.25参照)

人工光合成：太陽エネルギーを用いた水からの水素製造技術 (100m<sup>2</sup>級フィールド試験) (プロセス検討)

人工光合成由来の水素の分離等のプロセス要素技術

＜プラスチック製造＞

CO<sub>2</sub>と水素から基幹化学品を製造する技術

→ 実用化・実証開発フェーズ

実証試験

小規模実証 (1ha級)

大規模実証 (100t/年級)

社会実装

・メタンを水素源とした基幹化学品製造技術を先に実用化、社会実装

社会実装

・メタン由来水素から、人工光合成や水電解に由来するCO<sub>2</sub>フリー水素に徐々に置き換え

1) IEA資料 (The Future of Petrochemicals) を基に、NEDO TSCで試算。 ・化学プラントへの一部適用 サプライチェーンの構築についても検討 41

「革新的環境イノベーション戦略」  
(2020年1月21日、統合イノベーション戦略推進会議)

CO<sub>2</sub>資源化と削減に繋がる将来技術として  
官民共同のナショナルプロジェクト体制での実施が謳われている

1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

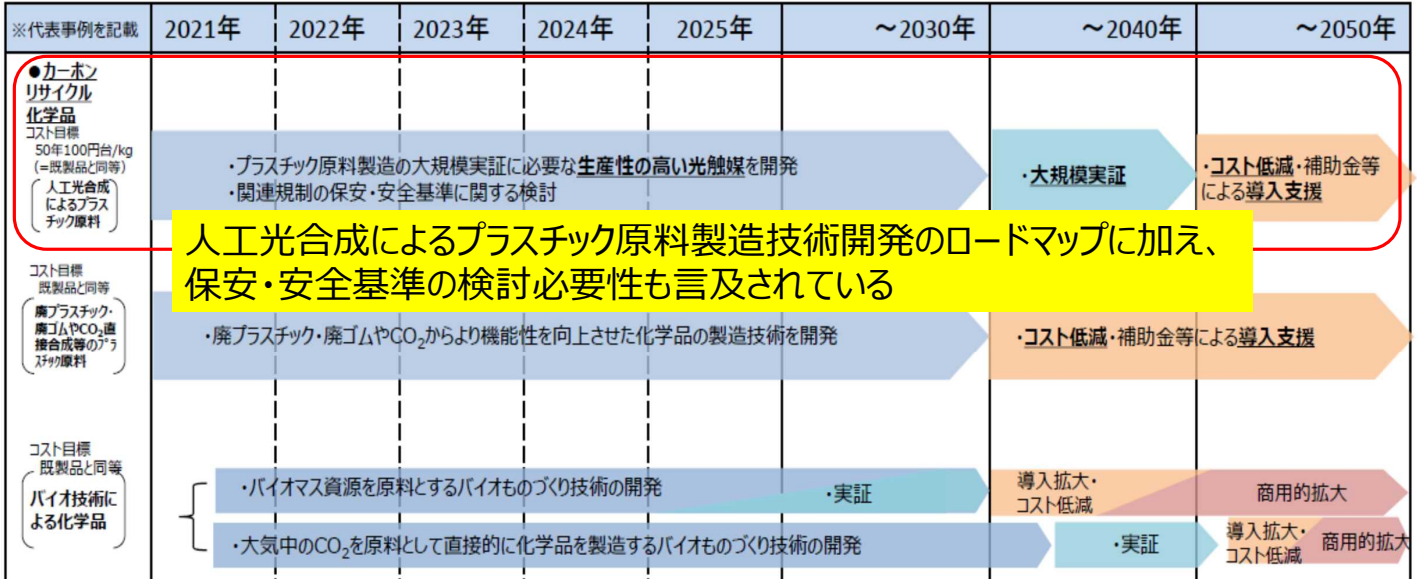
◆政策的位置付け(2019年以降)

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(2021年6月18日)より

⑪カーボンリサイクル・マテリアル産業  
(カーボンリサイクル)の成長戦略「工程表」

●導入フェーズ: 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ 4. 自立商用フェーズ

●具体化するべき政策手法: ①目標、②法制度(規制改革等)、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

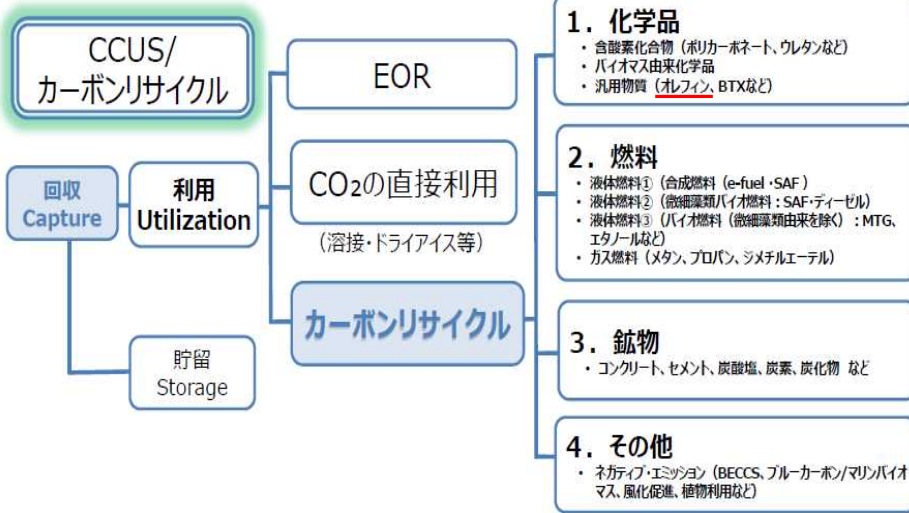


1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

◆技術戦略上の位置付け(2019年以降)

- カーボンリサイクル: CO<sub>2</sub>を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化によりコンクリート等、人工光合成等により化学品、メタネーション等により燃料へ再利用し、大気中へのCO<sub>2</sub>排出を抑制。
- カーボンリサイクルは、CO<sub>2</sub>の利用(Utilization)について、世界の産学官連携の下で研究開発を進め、非連続的イノベーションを進める取り組み。
- 省エネルギー、再生可能エネルギー、CCSなどとともにカーボンリサイクルは鍵となる取り組みの一つ。

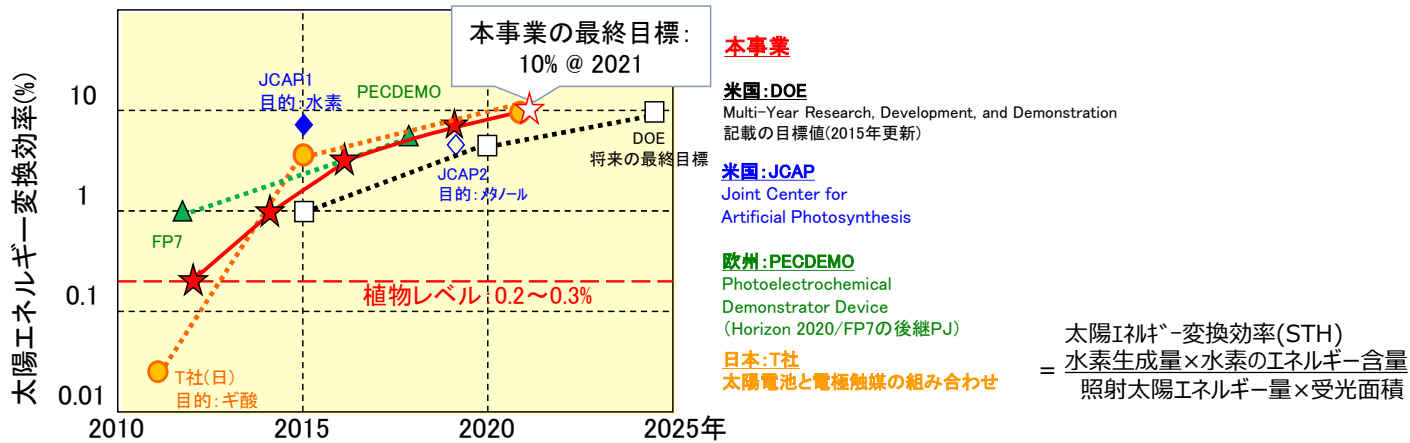
「カーボンリサイクル技術ロードマップ」  
(2019年6月7日経産省策定、2021年7月改訂)



CO<sub>2</sub>固定化・有効利用のために  
必要な技術として位置付けられ  
ている

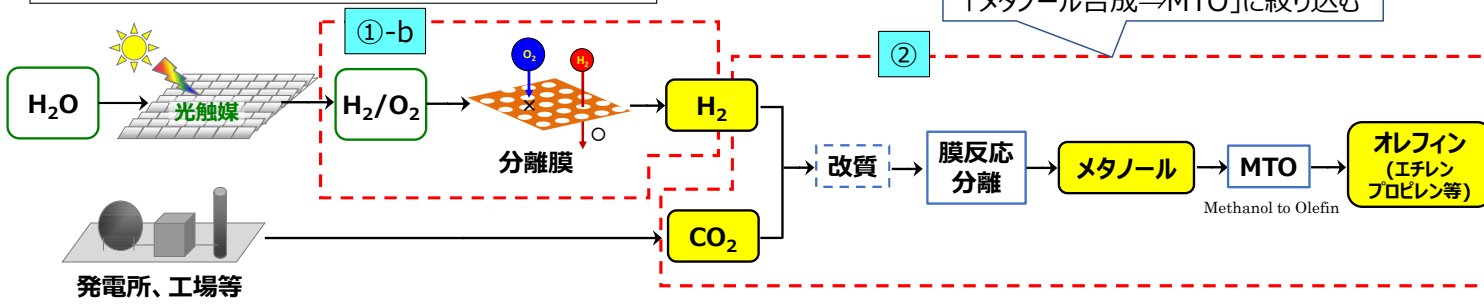
◆ 国内外の研究開発の動向と比較

①-a 光触媒：日本がリード。他は太陽電池を利用した光電気化学的システムが多くコスト面で厳しい。水素製造を目指した米国JCAPは終了し、現在は太陽光、水、二酸化炭素から燃料を製造するDOE主導プロジェクトが主体。欧州も太陽電池を中核としたシステムが主流であったが、2021年設立のP4Pでは太陽光等の再生可能電力に依存しない化学物質や燃料製造を将来目標に掲げている。中国は近年、大学での光触媒研究が非常に活発で今後の動向は注視必要。本事業では、実用的な太陽エネルギー変換効率10%目標、大面積化と低コスト化を視野に研究開発を実施。



最終目標の一つ太陽エネルギー変換効率10%は、水素製造コストの観点ならびに国内外の競合技術・他国目標と比較しても妥当な設定

◆ 国内外の研究開発の動向と比較



①-b 分離膜：爆発性で動的分子サイズが近いH<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>混合ガスから安全にH<sub>2</sub>を取り出す技術開発は世界で前例のない高難度テーマ。分離膜材料の研究開発は脱水膜モジュール等で日本の技術はトップレベル。本事業では安全設計指針の確立と高性能で長期耐久性を有する膜材料開発を目指す。

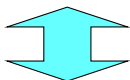
②合成触媒：現行の工業化技術であるCO<sub>2</sub> or 合成ガスからメタノール合成は、高温高圧・高リサイクルプロセスだが、反応分離プロセス導入で低圧化とリサイクル削減を目指す。中国等で実施されている現行MTOプロセスは、主にエチレン(30-50%)とプロピレン(50-30%)の併産プロセスであるが、独自開発の触媒でC<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>の目的別オレフィン合成(CO<sub>2</sub>由来炭素導入率それぞれ70%)を目指す。



◆他事業との関係

光触媒の効率向上とそのモジュールコストダウンの双方を意識して主にシート型を中心に実用化取組をしている事業である。

水分解光触媒によるソーラー水素と、二酸化炭素からメタノール経由でオレフィン製造プロセス開発が当該事業の特徴である。



<他の国プロ事業>

・「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」(文部科学省) 2017～2021年  
天然光合成等との異分野融合による研究領域発展を目指す。  
一部テーマで光触媒による水分解を検討。

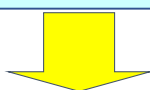
・「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業」(環境省) 2018～2022年  
太陽電池と電極触媒を活用したシステムでCO<sub>2</sub>と水から合成ガス等

本事業と重複した国プロはない

◆NEDOが関与する意義

人工光合成技術

- ・カーボンニュートラルへの貢献 (CO<sub>2</sub>削減・固定化) ⇒ 社会的必要性大
- ・「ソーラー水素」と「CO<sub>2</sub>」を原料とした新規化学品製造プロセス  
⇒ 輸入に依存している化石資源依存の低減に貢献  
⇒ 日本の化学産業の競争力の強化、全産業に波及
- ・研究開発の難易度高、開発リスク大 ⇒ 産官学の知見を結集
- ・長期にわたる研究開発 (10年) ⇒ 投資規模大



N E D O が持つこれまでの知見、実績を活かして推進すべき事業

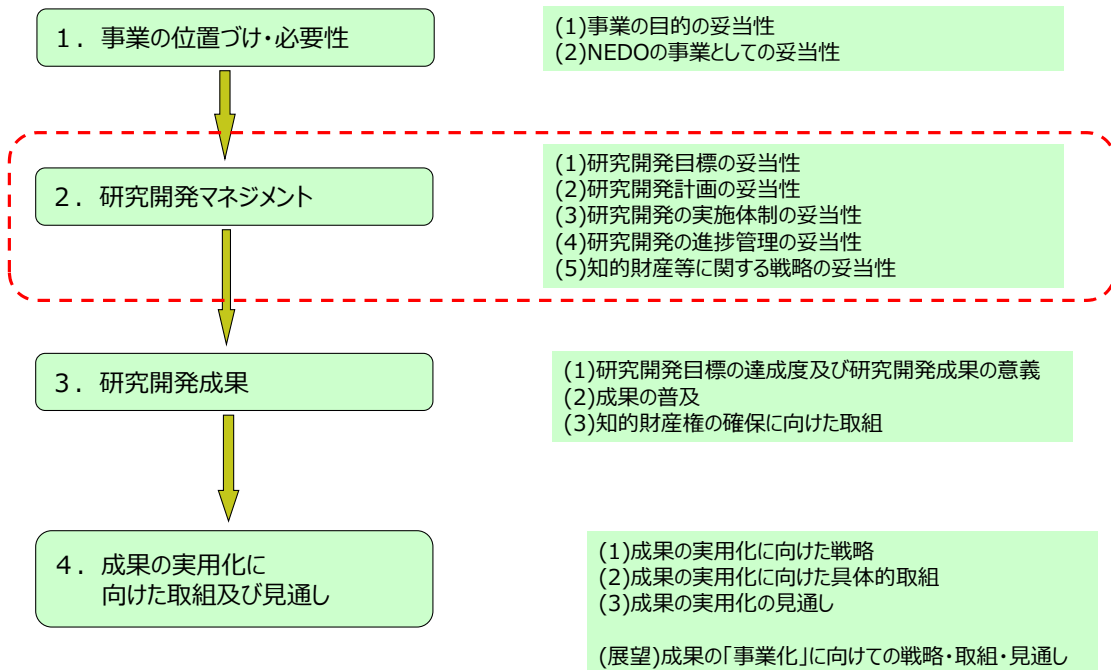
◆実施の効果 (費用対効果)

費用の総額	150億円	10年 (METI直執行2年を含む)
CO <sub>2</sub> 削減効果	▲868万トン/年※1	省エネルギー + CO <sub>2</sub> 固定化 (化学品の原料) # 左記の値は、日本の化学産業の年間排出量の約14%に相当
省エネ効果	原油換算で ▲31.5万k l/年※2	現状：原油輸入・石油精製・ナフサ熱分解法 本事業：本PJ対象設備・CO <sub>2</sub> 回収エネルギー

※1：2030年時点で、日本のオレフィン生産量の20% (250万トン) を人工光合成プロセスに置換えたとして算出

※2：既存オレフィン製造プロセスを人工光合成プロセスに置換した際の省エネ効果を原油換算として

発表内容



◆事業の目標

■本事業の目標

高効率の光触媒を用いて太陽エネルギーにより水から水素を製造し(ソーラー水素)、高効率分離膜により生成する水素を分離・精製して、さらにソーラー水素とCO<sub>2</sub>を原料として高効率合成触媒を用いてプラスチック原料等の基幹化学品を製造する一連のプロセスを想定し、その触媒及び分離膜、反応プロセス等を研究開発する。これらの開発により、CO<sub>2</sub>排出量の削減や化石資源に依存しない原料による基幹化学品の製造に大きく貢献する。

◆本プロジェクトにおける「実用化」の考え方

当該研究開発で確立した「高効率なソーラー水素製造用光触媒」、「水素/酸素分離膜」、「オレフィン合成触媒」の3つの新規化学プロセスについて、工業化を目的とした試験設備での実証を可能とする技術を確認することをいう。

◆研究開発目標と根拠

研究開発項目 (個別テーマ)	研究開発目標 (2021年度の最終目標)	根拠
①-a 光触媒	<ul style="list-style-type: none"> <li>光触媒等のエネルギー変換効率10%を達成する。</li> <li>小型フロー式でエネルギー変換効率を最大限引き出し、長期耐久性も兼ね備えたモジュールを設計する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>本PJでは、水素製造の従来技術と製造コスト面で競合可能なレベルの変換効率10%を最終目標とする。ただし、基盤的研究開発のため光触媒システムの方式は問わない。</li> <li>光触媒モジュールでは光触媒材料に依存しない共通の技術課題がある。実用化を見据えフロー式で長期の安定性能・安定運転可能なモジュール設計が必要。</li> </ul>
①-b 分離膜	<ul style="list-style-type: none"> <li>水素を安全に分離可能な長期耐久性も兼ね備えたモジュールを設計する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>光触媒から爆発性のある水素/酸素の混合気体が生成するので、実用化を見据え水素を長期間安全かつ安定して分離する分離膜と、爆発安全性を担保できるモジュール設計が必要。</li> </ul>
②合成触媒	<ul style="list-style-type: none"> <li>投入された水素又は二酸化炭素由来の炭素数2、3、4の単独オレフィンへの導入率として70% (ラボレベル) を達成する。</li> <li>目的とする単独オレフィン製造用の小型パイロット規模のプロセスを確立する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存MTO技術と同等以上のオレフィン収率を達成するため、メタノール合成 + MTOの一貫収率で各オレフィン収率70%を最終目標に設定。</li> <li>長期寿命評価、大型パイロット規模装置設計に必要な基礎データ取得のためにメタノール合成/MTO反応の小型パイロット試験が必要であるため。</li> </ul>









◆知的財産権等に関する戦略

■本事業における知財マネジメント

「NEDO知財マネジメント基本方針」適用PJ

・技術研究組合にて「知的財産権取扱規程」、「発明小委員会規則」等を策定し知財活動を実行

■オープン&クローズ戦略

中国はじめ世界的に研究が盛んな光触媒自体の開発は基礎研究に近いため主に大学が担当し特許出願による公知化と実施可能性国における権利化による他者牽制を推進(オープン戦略)。

一方、モジュール開発並びに水素回収システムの安全設計技術、メタノール合成の反応分離に必須の無機分離膜シール技術など工業化に必須となる要素技術はノウハウとして秘匿(クローズ戦略)、

# 「二酸化炭素原料化基幹化学品 製造プロセス技術開発」 (事後評価) (2014年度～2021年度 8年間)

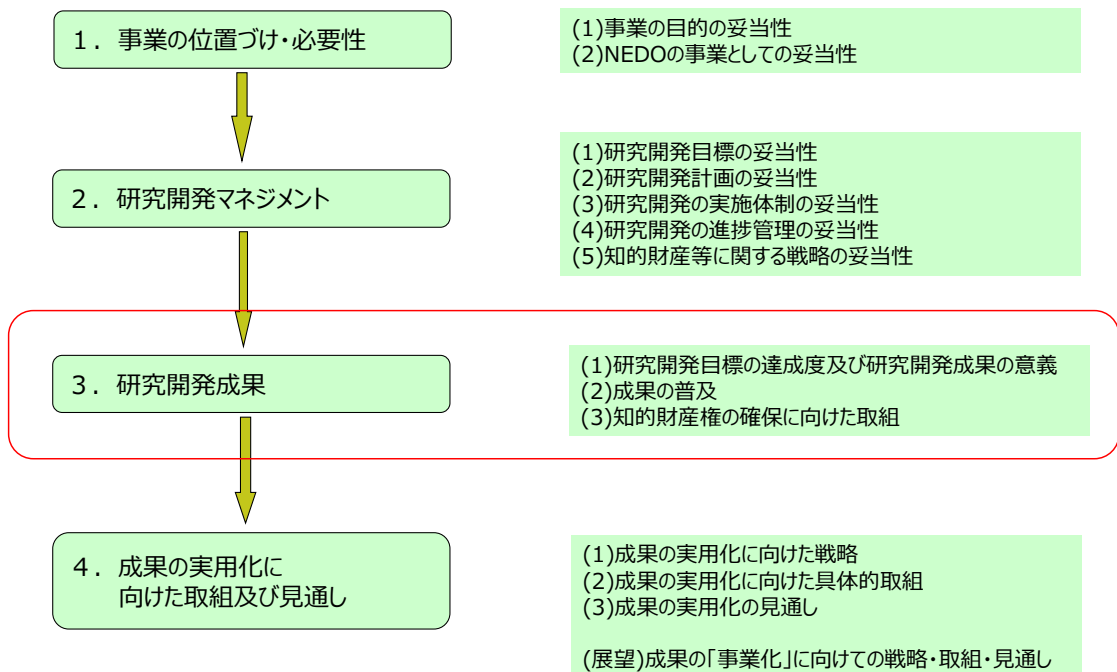
## 研究開発成果、 成果の実用化に向けた取組及び見通し

人工光合成化学プロセス技術研究組合  
プロジェクトリーダー 瀬戸山 亨

2022年11月10日

1

### 発表内容

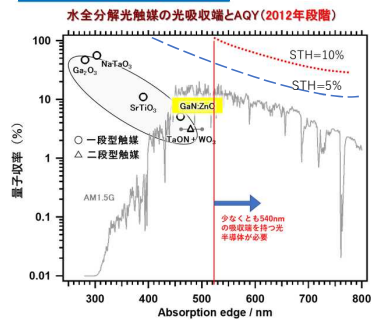


2

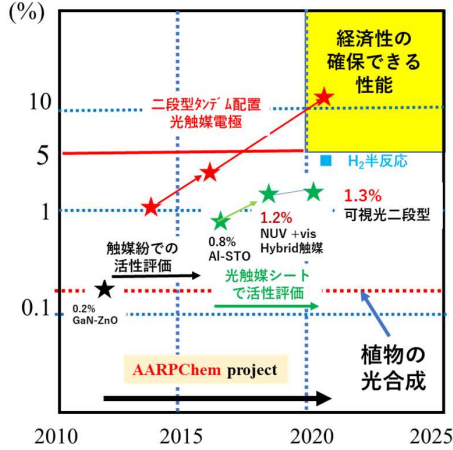


# 研究開発成果

## 3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義



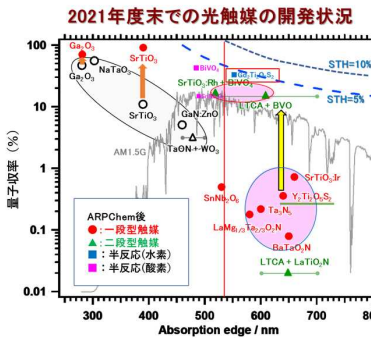
~100人/年の研究員による精力的な研究開発を実施



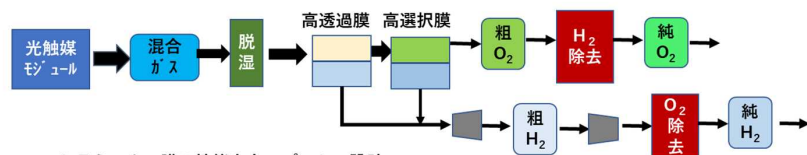
光触媒性能の向上履歴



100m²スケールでの屋外試験での光触媒シートのスケールアップ容易性の実証



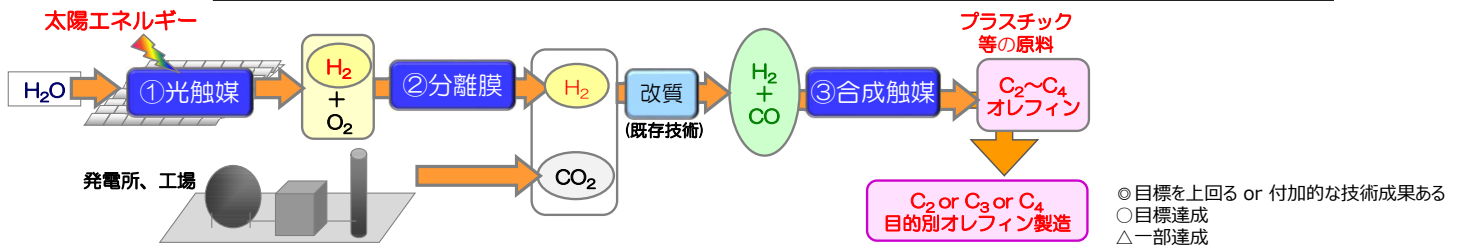
### H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>分離膜の開発



- セラミックス膜の性能向上+プロセス設計
- 高分子膜をフィールドテスト→実課題の発掘

3

## 3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義



研究開発項目	研究開発目標(最終目標)	成果	達成度
①-a 光触媒	<ul style="list-style-type: none"> <li>光触媒等のエネルギー変換効率10%を達成する。</li> <li>小型フロー式でエネルギー変換効率を最大限引き出し、長期耐久性も兼ね備えたモジュールを設計する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ta<sub>3</sub>N<sub>5</sub>アノードを用いたタンデムセル型で最終目標の変換効率10%を達成</li> <li>Al: SrTiO<sub>3</sub>微粒子光触媒で近紫外光において、量子収率~100%を達成(Nature掲載)</li> <li>100m<sup>2</sup>級パネルでのField-test実施(Nature掲載)</li> </ul>	◎
①-b 分離膜	<ul style="list-style-type: none"> <li>水素を安全に分離可能な長期耐久性も兼ね備えたモジュールを設計する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>分離膜(ゼオライト膜、シリカ膜)は自主目標値を超える性能を達成</li> <li>H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>混合ガスを安全に分離するための消炎素子を開発しレイアウトの最適化、Field-test実施</li> </ul>	◎
② 合成触媒	<ul style="list-style-type: none"> <li>投入された水素又は二酸化炭素由来の炭素数2、3、4の単独オレフィンへの導入率として70%(ラボレベル)を達成する。</li> <li>目的とする単独オレフィン製造用の小型パイロット規模のプロセスを確立する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>メタノール合成+MTOの一貫収率で、各オレフィンの収率70%以上を達成</li> <li>MeOH, MTOそれぞれの小型パイロットの連続運転を実施</li> </ul>	○

光触媒テーマの研究開発項目の目標と達成状況

研究開発項目	最終目標 (2021年度末)	成果	達成度	今後の課題と解決方針
① 光触媒の吸収波長の長波長化及び光触媒の低欠陥化	太陽エネルギー変換効率:STH(太陽エネルギーから水素エネルギーへの変換効率) 10%を達成する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・透明Ta<sub>3</sub>N<sub>5</sub>光アノードと二直列CIGS光カソードのタンデムセルで、最終目標のSTH=10%に到達</li> <li>・Al:SiTiO<sub>3</sub>微粒子光触媒で近紫外光において、量子収率~100%を達成</li> <li>・単一光触媒で650 nmまで用いて水分解達成</li> <li>・Z-スキーム型で1.2%の太陽エネルギー変換(STH)達成</li> </ul>	◎	<b>【光触媒材料】</b> 酸窒化物、酸硫化物、ドーパ型酸化物の高機能化。 ・結晶性向上 ・粒径および結晶形制御 ・表面の親疎水性制御
② 光触媒と助触媒の界面の設計等				<b>【助触媒】</b> ・安定性（長期耐久性）の向上 ・新規担持法の開発 ・より安価・無害な元素の使用 ・逆反応の阻止 ・Z-スキーム型での電子・正孔伝達材の開発
③ 大表面積と物質拡散性を両立するモジュールの設計等	光触媒モジュール化における個別要素技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> <li>・加圧型モジュール(1m<sup>2</sup>)の試作</li> <li>・100 m<sup>2</sup>の受光面積を持つ常圧型水分解・水素製造システムの試作終了</li> </ul>	◎	<b>【1 ha級の受光面性を持つ常圧型水分解モジュールの試作と各種課題の抽出】</b> ・安定な光触媒粒子の展開方法の開発 ・安価な水分解パネルの開発 ・安価な水素分離システムの開発 ・安全性の確保

プロジェクトの目標

最終期待性能： 爆発危険性を回避できる“透過水素濃度96%以上、水素収率90%以上”の性能だが、支持体等の価格で分離膜コストが大きく動くので、膜性能にpointを絞って目標値を記載

1. 単膜性能  
 (脱湿後) 乾燥H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>混合ガス系, 透過減圧環境100時間保持時性能  
 高透過膜: H<sub>2</sub>透過速度 2.5×10<sup>-7</sup> mol/(m<sup>2</sup>・Pa・s)  
 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>透過速度比 15  
 高選択膜: H<sub>2</sub>透過速度 0.8×10<sup>-7</sup> mol/(m<sup>2</sup>・Pa・s)  
 H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>透過速度比 100
- 2: 脱湿 (前処理) プロセス  
 50°C飽和水蒸気含むH<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>混合ガスを脱湿モジュール経由で分離膜に供給し、膜特性が乾燥ガス供給時とほぼ同等であることを実証。
- 3: 長尺化  
 シリル化CHA膜、シリカ膜の長尺化を検討。課題抽出とその解決方針を確立。
- 4: 連結膜モジュール  
 安全なH<sub>2</sub>分離可能な高透過膜と高選択膜を組み合わせた連結膜モジュールを作製。H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>混合ガス系での透過性能を実測し、想定性能達成を確認。
- 5: 水素/酸素混合ガスを安全に分離するための最適な安全プロセスを提案する

成果 自主目標値を超える性能を達成 ◎

- 1: 単膜性能 (◎)  
 シリル化CHA膜: H<sub>2</sub>透過速度 2.82×10<sup>-7</sup> mol/(m<sup>2</sup>・Pa・s)  
 (Z膜) H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>透過速度比 20.4  
 シリカ膜 H<sub>2</sub>透過速度 1.01×10<sup>-7</sup> mol/(m<sup>2</sup>・Pa・s)  
 (S膜) H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>透過速度比 153
- 2: 脱湿 (前処理) プロセス (○)  
 50°C飽和水蒸気を含むH<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>混合ガスを、独自設計したシリカゲル充填脱湿モジュールを介してZ膜、S膜に供給。それぞれの膜特性が乾燥ガス供給時とほぼ同等であることを実証。
- 3: 長尺化 (◎)  
 Z膜: 40cmのCHA膜のシリル化を実現。膜長さ17.3cmのZ膜単膜で、透過減圧における供給圧依存性確認。20KPa(G)~100KPa(G)で透過H<sub>2</sub>濃度96.7%~95.6%、H<sub>2</sub>収率80.7%~96.9%を確認。  
 S膜: 20cm長尺で高性能膜を実現。
- 4: 連結膜モジュールによる最終性能 (◎)  
 A) Z膜+Z膜 (膜連結)  
 透過H<sub>2</sub>濃度: 96.0% H<sub>2</sub>収率: 91.0%  
 B) Z膜+S膜 (膜連結)  
 透過H<sub>2</sub>濃度: 98.0% H<sub>2</sub>収率: 90.4%
5. H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>混合ガスにおいての最適な消炎素子を見出し、機器の配置、レイアウトを検討し、最適な安全プロセスを提示した。(○)

### 反応分離型メタノール合成プロセス & On-demand型MTO触媒プロセス開発

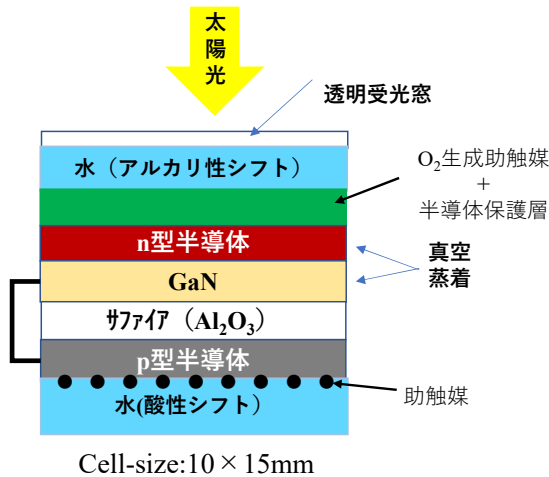
	実施計画	達成状況	達成度	今後の課題
高収率メタノール合成用反応分離膜 & 反応分離プロセスの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>反応分離膜スケールアップ検討及び技術確立。接合・シール技術の確立</li> <li>反応分離膜の更なる改良、解析</li> <li>コンパクト膜モジュールの設計</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>40cm長の<b>反応分離膜の合成法確立に目途</b></li> <li><b>1,000hr以上の耐久性を有する接合技術</b>を確立</li> <li>支持体改良により透過性能向上</li> <li>複数本膜モジュール、大型反応器構造を提案</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>分離膜の工業的合成法確立及び製造コスト低減</li> <li>分離膜の長期寿命試験</li> <li>大型反応器詳細設計、及び工業的接合技術の開発</li> </ul>
目的別オレフィン製造用触媒、分離膜 & 分離プロセスの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>リサイクルを加味した各オレフィンの収率70% (ラボレベル) を達成</li> <li>触媒スケールアップ及び成形・造粒検討</li> <li>高効率な合成法の最適化</li> <li>リサイクル系適用可能なゼオライト膜の更なる性能向上と耐久性の確認</li> <li>リサイクル系プロセスを最適化、省エネルギー性及び経済性を評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>メタノール合成+MTOの<b>一貫収率で、各オレフィンの収率70%以上を達成</b></li> <li>バインダ検討により成型触媒の長寿命を実現</li> <li><b>高速流通合成によりCON合成</b>に成功</li> <li>Ag-BEAより性能の高い<b>Ag-X膜でプロピレン/プロパン流通条件において10,000hr以上の耐久性</b>を確認</li> <li>各オレフィンの分離プロセスを最適化し、省エネ化の達成を確認。MTPケースで変動費削減を確認</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>MTP：触媒コスト削減、高効率合成法スケールアップ</li> <li>MTE：コーキング抑制・寿命向上</li> <li>工業的触媒成型技術の確立</li> <li>分離膜の合成のスケールアップ及び製造コスト削減</li> </ul>
反応プロセスの最適化及び小型パイロットでの触媒の長寿命化等の検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>小型パイロット装置での連続運転</li> <li>経済性評価の精度向上、一定の前提の元に既存技術と比較</li> <li>大型パイロットのプロセスの提案</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>MeOH, MTOそれぞれの<b>小型パイロットの連続運転を実施</b></li> <li>既存技術、市況オレフィンコストとの比較実施</li> <li>大型パイロットプロセスの概念設計による<b>H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>からの一貫プロセスを提案</b></li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>パイロットスケールでのリサイクルを含めた運転実証</li> <li>流動床プロセスの確立及びスケールアップ</li> </ul>

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み(中間) / 一部達成(事後)、×未達

光触媒開発 ①

### タンデム二段型触媒の達成水準とその評価

#### STH=10%を達成した Tandem型電極触媒の構成



反応開始直後：STH = 12-12.5 %  
 反応開始後, 80分間STH > 10%

#### 課題

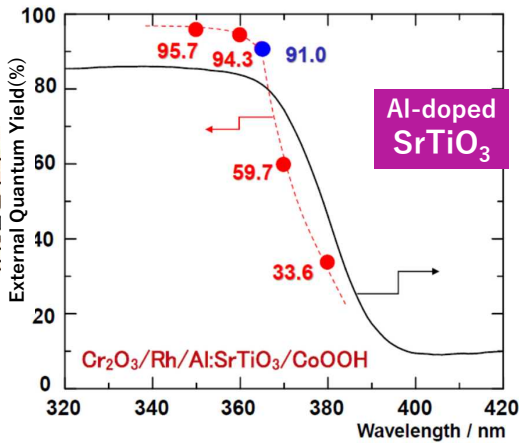
- pH勾配発生回避に水循環要  
 → 水層厚み1mm程度でscale-upでの循環は難しい
- 有望なn型半導体が水に不安定で保護層要  
 → 完全保護層形成は高難度
- 製造工程が複雑で、高コスト  
 → 半導体成膜はDry process⇔助触媒担持はWet process  
 サファイア基板だけでも高い価格

- Project開始時に高活性光触媒の実現を目指して光触媒電極の開発を実施。相応の性能は得ることができた。
- 極言すれば、Tandem型PVにH<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>発生用助触媒を担持したようなものであり、**高製造コスト+大面積化が難しい。**
- **結論：大量のGreen-水素製造の為の本命となる技術とは考えにくい。**

粉末光触媒の活性向上とシート化を優先



粉末触媒の触媒シート化

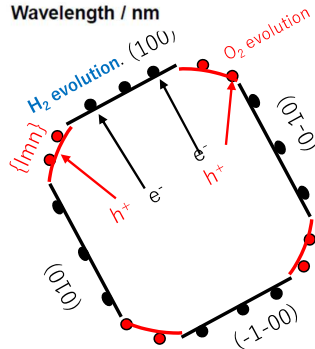
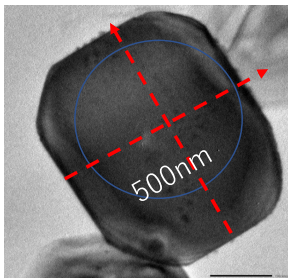


近紫外光照射下で  
量子収率≒100%  
が実現

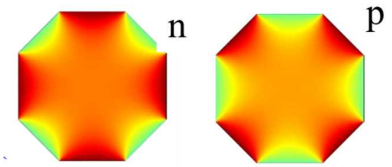
近紫外応答高活性  
触媒の触媒シート



Al-doped-SrTiO<sub>3</sub> の 25cm 角モジュール

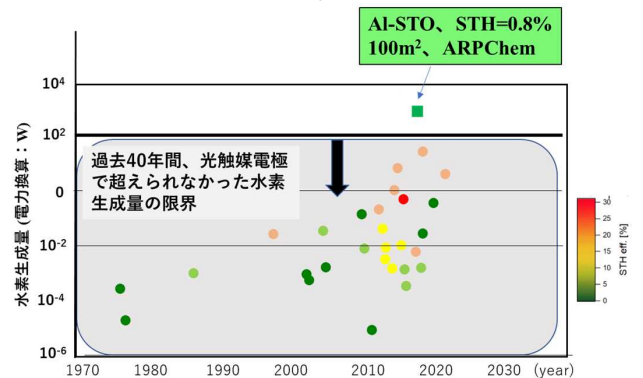


自己組織的に  
水素用助触媒/  
酸素用助触媒が  
異なる結晶面に  
担持されており  
水に戻る逆反応  
が起こりにくい



内部電場の二次元  
モデルsimulation

Al-doped-SrTiO<sub>3</sub>による光触媒シートのscalabilityの実証

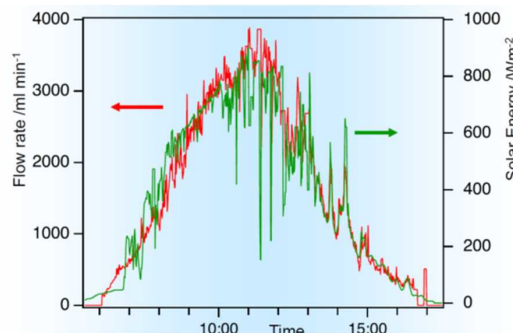


柿岡爆発試験設備でのAl-STO触媒での  
100m<sup>2</sup>級パネルでのField-test

ポリイミド中空糸分離膜

水素濃度 > 95 %  
水素回収率 > 73 %

3 ~ 7L/min程度の水素が発生  
1.8kL/日の水素製造



太陽光照射量に追従  
した水素の生成の確認  
= 単純・安価な水分解  
プロセス構成

① 光電極型触媒の成果

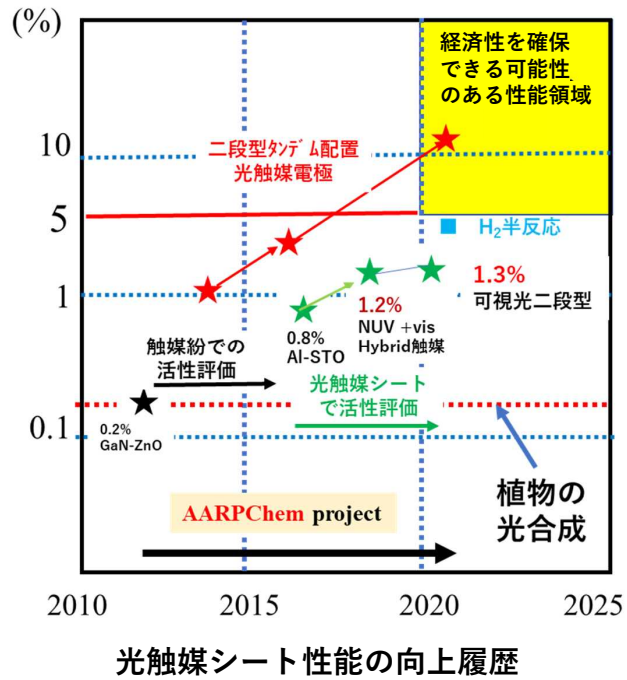
- 二段型tandem光触媒電極で数時間、STH>10%を実現
- ➔ 低コスト化、スケールアップに難あり、事業化対象とはしない。

② 一段型触媒の成果

- 近紫外光応答のAl-doped-SrTiO<sub>3</sub>において、量子収率≒100%実現。これを用いた触媒シートで100m<sup>2</sup>級の屋外試験実施。
- BaTaO<sub>2</sub>N、Ta<sub>3</sub>N<sub>5</sub>、Y<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub>で、低活性ながら全分解が実現。
- フラックス法合成の複数の酸硫化物触媒において、水素生成半反応において高い量子収率が実現(量子収率≒30%は出色)。但し全分解は未達。
- ➔ 低酸素生成能の解明が重要。それに基づく触媒設計
- 光半導体の結晶性、欠陥、不純物
- 助触媒との界面設計

③ 二段型触媒の成果

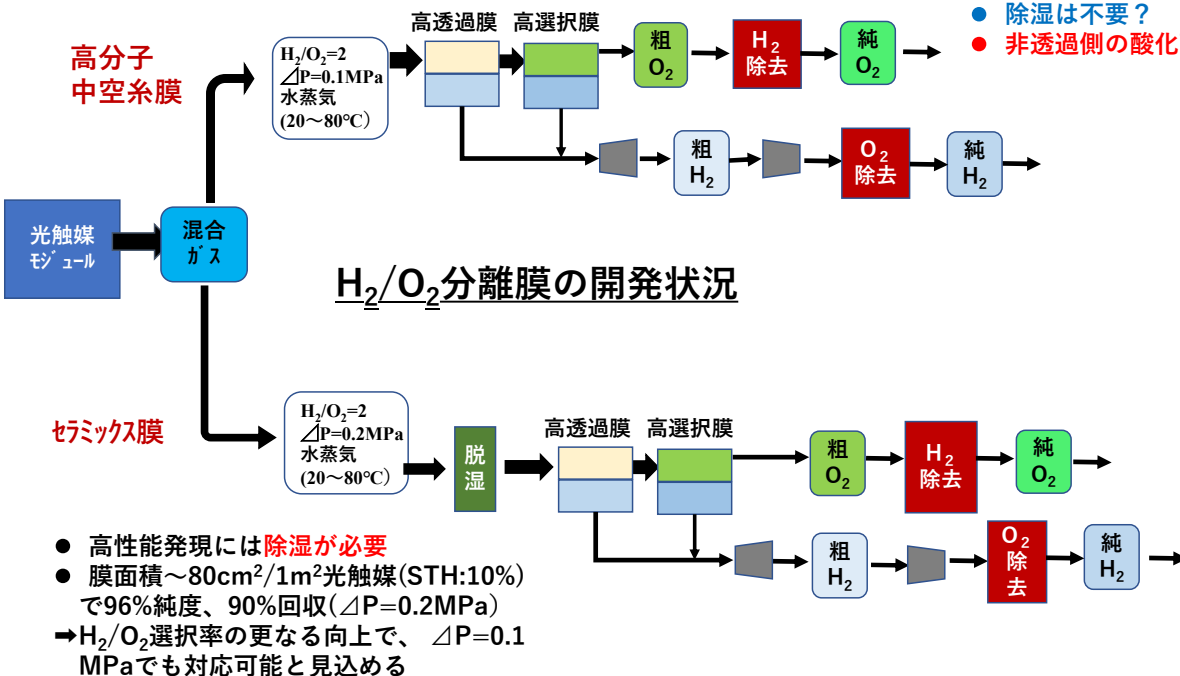
- 可視光照射下でLTCA/Au/BiVO<sub>4</sub>系でSTH>1.3%を達成
- LTCA : La<sub>5</sub>Ti<sub>2</sub>Cu<sub>0.9</sub>Ag<sub>0.1</sub>S<sub>3</sub>O<sub>7</sub>
- ➔ STH>8%(Tandem型)の可能性があり、触媒系としての最適化を実施予定



H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 安全分離プロセス開発 ①

水素純度~95%  
水素回収率~73%

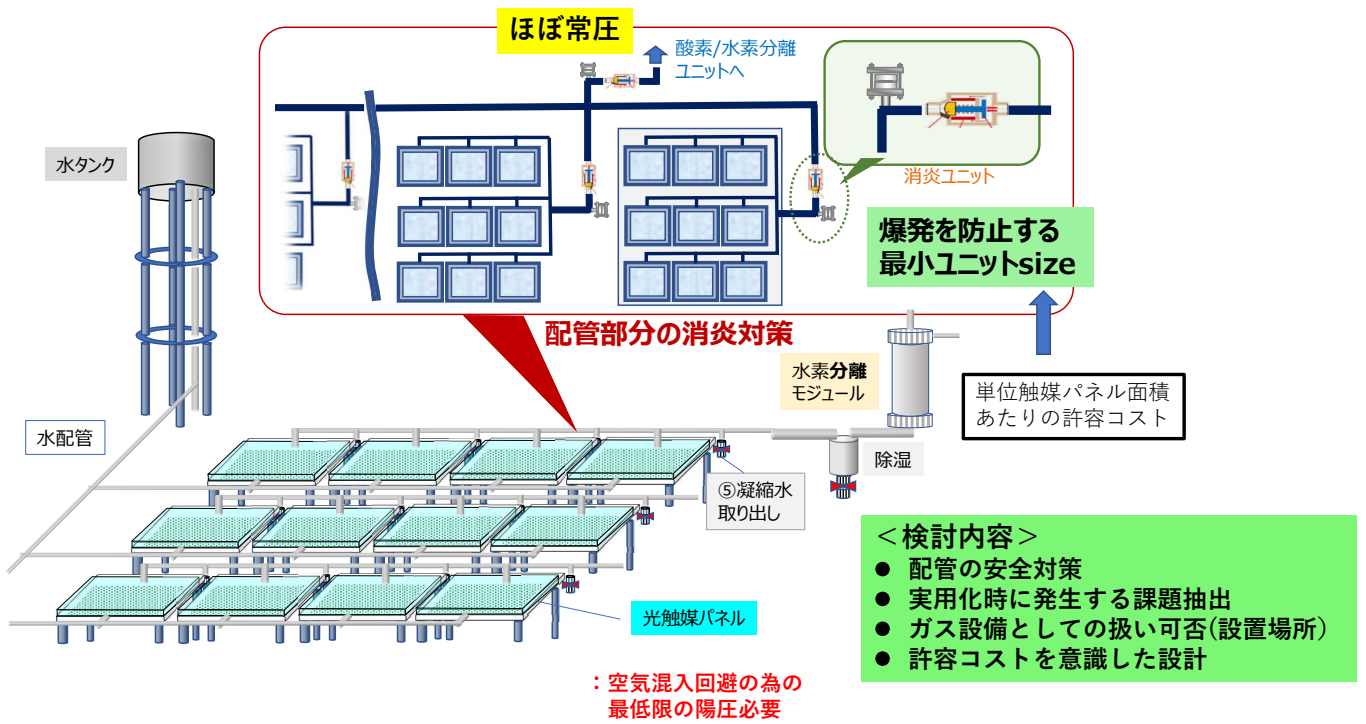
- H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>分離選択性が水素回収率に直結。どこまで選択率が上がるかが鍵
- 中空糸構造がとれるので安価を期待
- 除湿は不要?
- 非透過側の酸化耐久性



- 高性能発現には除湿が必要
- 膜面積~80cm<sup>2</sup>/1m<sup>2</sup>光触媒(STH:10%)で96%純度、90%回収(ΔP=0.2MPa)
- ➔ H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>選択率の更なる向上で、ΔP=0.1MPaでも対応可能と見込める

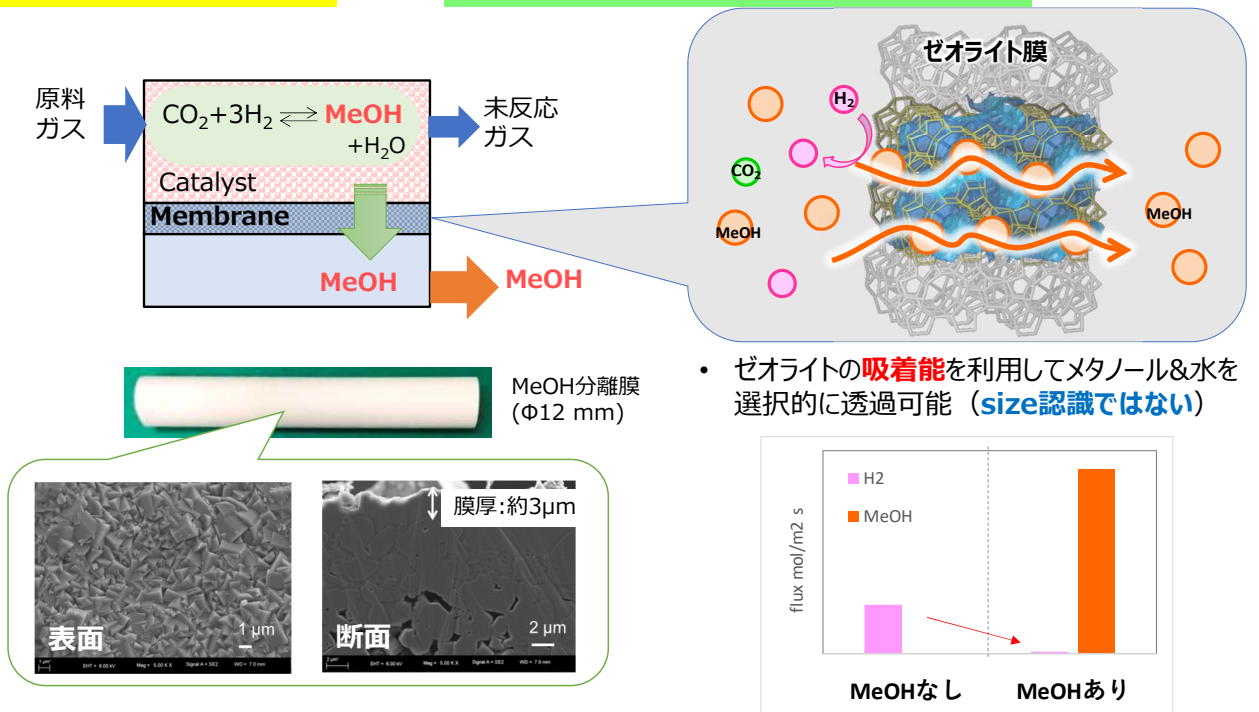


**H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 安全分離プロセス開発 ②**

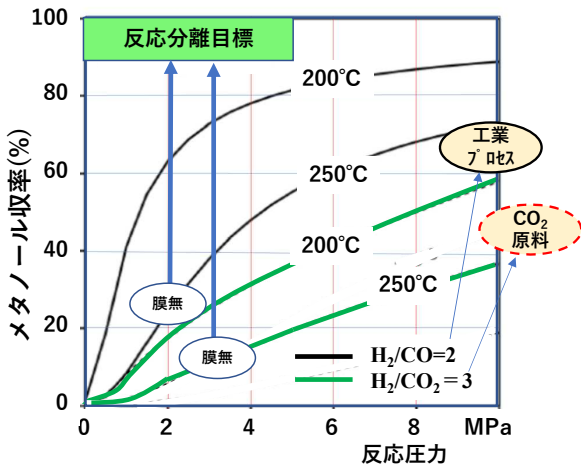


**メタノール選択透過膜 ①**

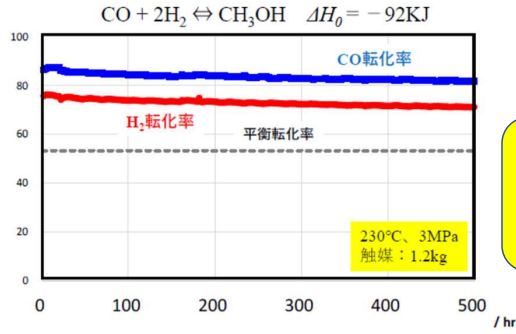
分子サイズの大きなメタノールが、CO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>に優先して透過する分離膜の設計



## メタノール選択透過膜 ②

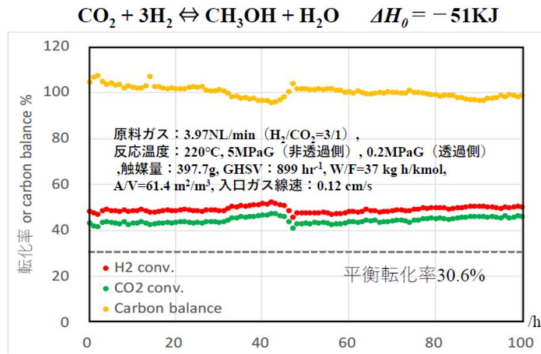


- 膜を用いない反応では平衡制約の為、高圧反応が避けられないが、それでも大きなリサイクルが必要。高収率化が容易。
- CO/H<sub>2</sub>原料では発熱は大だが、公知触媒が使用可能で、触媒劣化懸念が少ない。
- CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>原料では発熱量は減る。開発触媒の耐水性懸念。高収率化への負荷大。



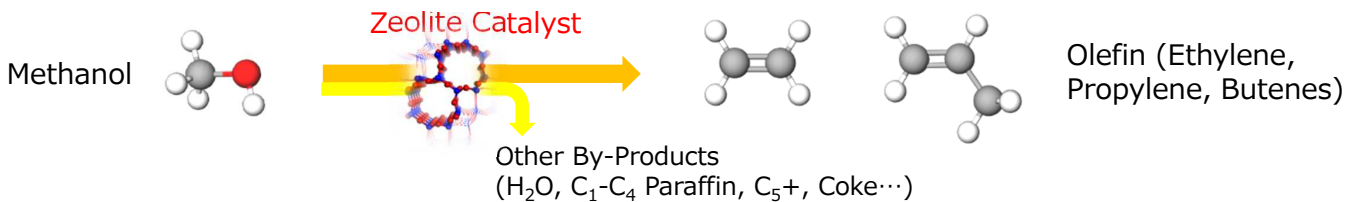
反応分離による  
低圧化+平衡  
Breakを実証

(a) 2 H<sub>2</sub>/CO 原料での 500 時間連続運転結果



(b) 3H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 原料での 100 時間連続運転結果

## 革新的MTO触媒プロセス開発



既存触媒プロセス	反応成績※
SAPO-34 流動床	エチレン39% プロピレン39%
MTP:MFI 固定床	プロピレン65-70%

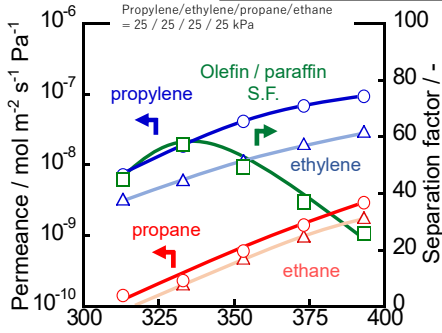
※IHSレポートを元に算出

開発触媒プロセス	反応成績
MTE: DDR 流動床	エチレン: ~83%※ ワンパス収率: 70%
MTP: CON 固定床	プロピレン> 76% ワンパス収率: 52%

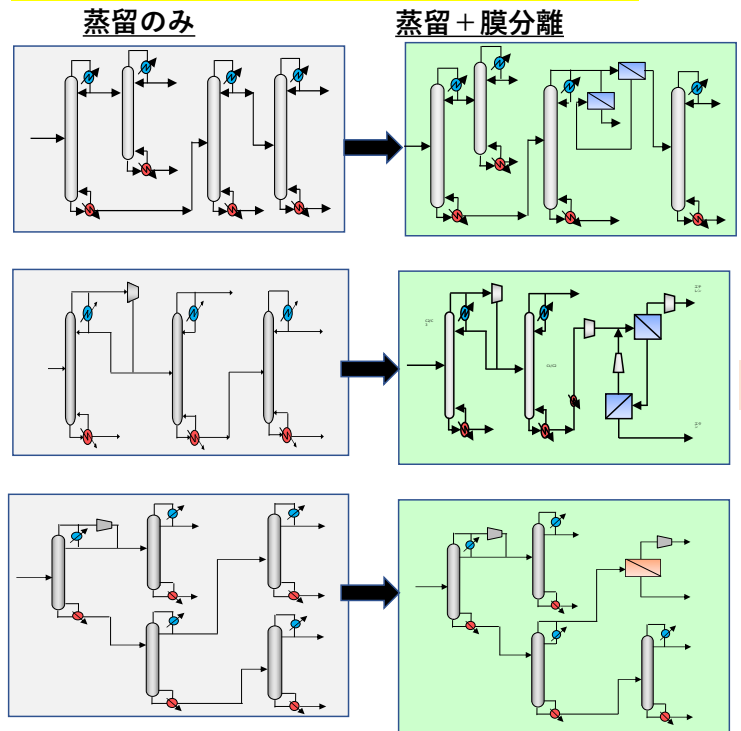
※リサイクル時選択率

- 既存のMTO触媒と比較して、エチレンおよびプロピレンを選択的に製造可能なMTE触媒、MTP触媒を開発
- ➔ どちらを優先するかは、立地場所により選択が異なる可能性が大きい。

3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義



蒸留 + 分離膜によるオレフィン/パラフィン分離



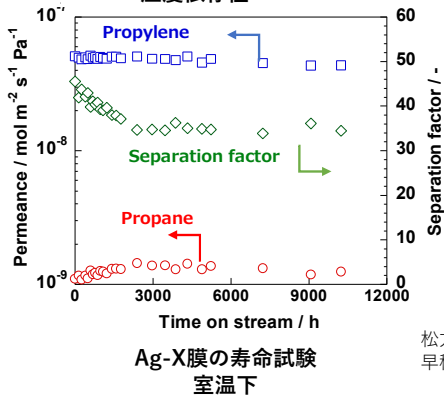
省エネルギー (%)

-49%

-46%

-30%

Ag-X膜の分離性能の温度依存性



松方 et.al  
早稲田大学

17

3. 研究開発成果 (2) 成果の普及

NEDO-ARPCHEM人工光合成プロジェクト 特許&外部公表状況

	特許 国内 出願	特許 外国 出願	特許 PCT 出願	学会 発表	論文 掲載	プレス 発表	新聞・ 雑誌 報道等
2012年度	3件	0件	0件	0件	0報	0件	3件
2013年度	10件	1件	3件	15件	2報	0件	1件
2014年度	25件	0件	5件	43件	12報	1件	2件
2015年度	20件	8件	10件	60件	13報	1件	約50件
2016年度	19件	9件	6件	70件	20報	2件	約50件
2017年度	18件	6件	3件	43件	16報	1件	約50件
2018年度	18件	11件	5件	59件	13報	3件	約60件
2019年度	17件	8件	1件	28件	11報	1件	約60件
2020年度	10件	13件	0件	16件	14報	1件	約60件
2021年度*	20件	1件	0件	33件	14報	1件	約60件
合計	160件	57件	33件	367件	115報	11件	約400件

特許登録 ; 国内 44件、海外 28件

\*2022年2月末現在

18

◆波及効果(人材育成面)

育成について：

アカデミアで昇格した/新職を得た研究者は以下の通り

光触媒

- 高田剛(信州大学特任教授)
- 久富隆史(信州大学准教授)
- 片山正士(東京大学准教授)
- 王謙(名古屋大学准教授)
- 岩瀬顕秀(明治大学准教授)
- 松尾拓紀(熊本大学准教授)
- 嶺岸耕(東京大学特任准教授)
- 鈴木洋一(慶応大学特任准教授)
- 朝倉裕介(早稲田大学主任研究員(研究院講師))
- Zhenhua Pan(中央大学助教)
- 東智弘(宮崎大学助教)
- 後藤陽介(産総研・主任研究員)
- 坂井延寿(東京大学特任助教)
- 阪田薫穂(高エネルギー加速器研究機構研究員)

分離膜

- 田中一宏(山口大学教授)

合成触媒

- 脇原徹(東京大学教授)
- 横井俊之(東京工業大学准教授)
- 伊與木健太(東京大学講師)
- 大須賀遼太(東北大学助教)

アウトリーチ活動 (代表例)

公表年月日	タイトル
2015/10/8	ICEF2015 (2nd Annual Meeting) : Artificial Photosynthesis における招待講演
2016/2/28	Gordon Research Conference: Renewable Energy/Solar Fuels における招待講演
2016/8/18	講談社ブルーバックス 夢の新エネルギー「人工光合成」とは何か 分担執筆
2017/2/28 ~ 2017/3/4	国際シンポジウム Artificial Photosynthesis: Faraday Discussion における基調講演および招待講演
2017/4/1 ~ 2018/3/31	(一財)高度技術社会推進協会 TEPIA先端技術館 における展示
2019/6/14 ~ 2019/6/16	G20イノベーション展 におけるデモンストレーション
2019/9/25	カーボンリサイクル産学官国際会議2019 における招待講演
2020/1/15 ~ 2020/1/18	World Future Energy Summit 2020(アブダビで開催) 日本館における展示(カーボンリサイクル技術の一例)
2020/1/23	第48回総合科学技術・イノベーション会議(首相官邸) 革新的環境イノベーション におけるデモンストレーション
2020/1/29 ~ 2020/1/31	Nano tech 2020(ナノテク展) における展示 (nano tech大賞 2020プロジェクト賞受賞)

2013/6/17	NHKクローズアップ現代 二酸化炭素が資源に！ 夢の人工光合成
2016/6/29	BS朝日(北海道テレビ) とけてゆく スイス 氷河×光×地球の未来
2018/12/13	フジテレビ FNNプライムニュース デイズ 世界が注目！ 温室効果ガスを削減する夢の技術 日本発の「人工光合成」
2019/6/16	テレビ朝日 ANNニュース G20で“水素”をアピール 日本は主導権握れるか
2021/10/16	NHKおはよう日本 純度高い水素取り出す大規模実験に成功 「光触媒」の働き活用
2021/10/27	NHK視点・論点 カーボンニュートラルを目指して ~人工光合成への期待~
2021/12/12	TBS日曜版Nスタ 水素を取り出す実験に成功！ 鍵は“光触媒”

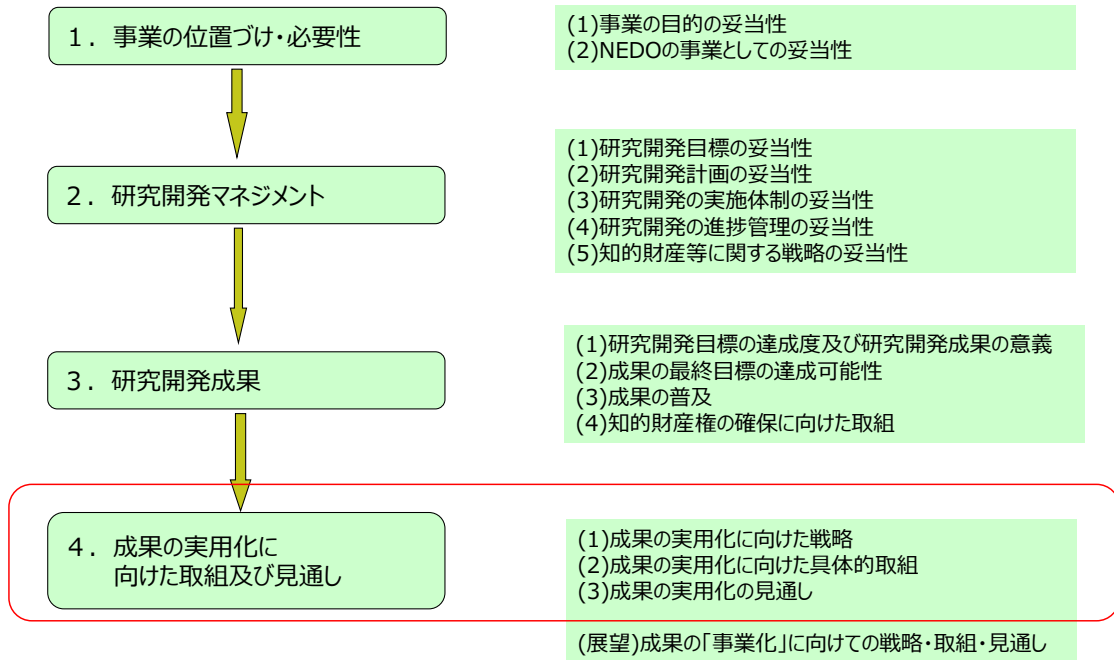
NEDOニュースリリース：11回



2013/6/17 NHKクローズアップ現代



2021/10/16 NHKおはよう日本



4. 成果の実用化・事業化に向けての取組及び見通し

◆本プロジェクトにおける「実用化」の考え方

当該研究開発で確立した「高効率なソーラー水素製造用光触媒」、「水素／酸素分離膜」、「オレフィン合成触媒」の3つの新規化学プロセスについて、工業化を目的とした試験設備での実証を可能とする技術を確認することをいう。



10年間の事業における本定義の「実用化」は**達成**  
 ・光触媒、分離膜：100m<sup>2</sup>パネルの屋外設備で実証  
 ・合成触媒：小型パイロットを設置し連続運転実証



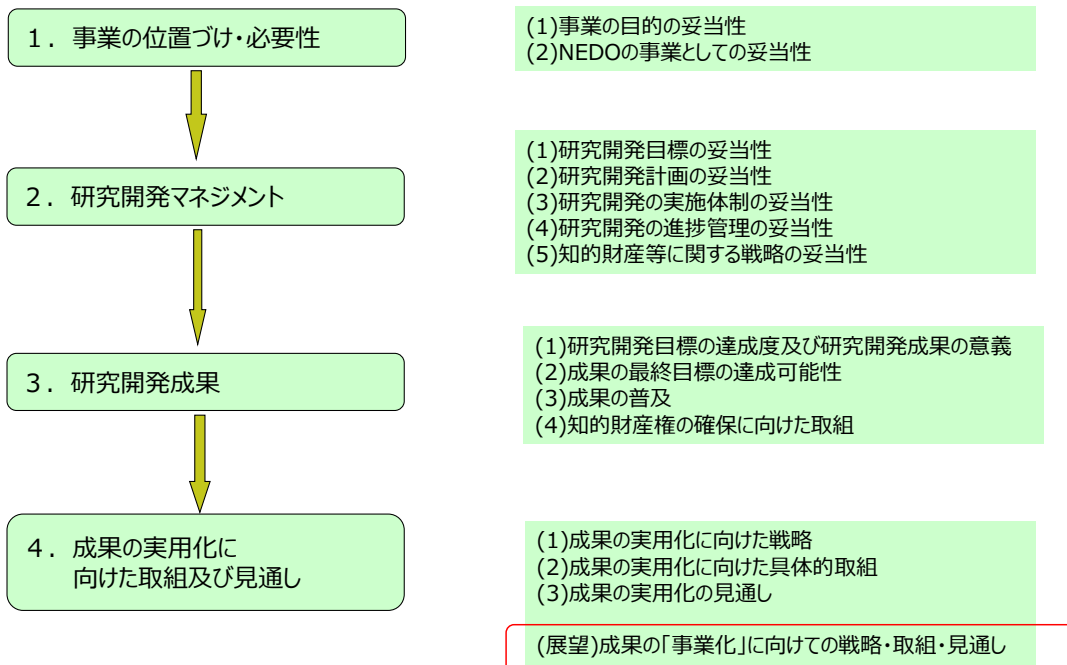
## 実用化に向けた戦略、具体的取組、実用化の見通し

	基本戦略	具体的取組	実用化の見通し
① 光触媒法によるグリーン水素製造	粉末触媒の高活性化触媒シート化	酸窒化物/酸硫化合物触媒 一段型/二段型触媒シート	STH>5%を目指せる触媒系提案 100m <sup>2</sup> 級屋外試験
② 安全・選択的な水素分離	無機膜高性能化 爆発回避安全対策	ゼオライト、シリカ、炭素膜開発 狭流路、配管構造設計	高透過膜+高選択膜直列構造 爆発閾値のsystem依存性の検証
③ 安価でLCA優位なオレフィン製造技術	省エネ型MeOH合成 特定オレフィン選択合成	反応分離によるMeOH 平衡平衡break MTE、MTP独自触媒開発	ゼオライト膜の平衡break 500時間レベルでの寿命試験 独自のMTE用DDR触媒、MTP用CON触媒

- グリーン水素コスト： 20¥/Nm<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>以下、好ましくは10¥/Nm<sup>3</sup>以下の実現 → 目標とする光触媒性能、モジュール単価の実現
- 革新的オレフィン製造プロセス：
  - ・ 超省エネを実現できる反応分離膜性能の実現と反応器設計
  - ・ オレフィン収率>70%の実現（エチレン、プロピレンそれぞれ）

**GI基金による2030年頃の大型実証の完遂**

## 発表内容



4. (展望)成果の「事業化」に向けての戦略・取組・見通し： **成果の意義と波及効果**

**事業化に向けた取り組み：現状と人工光合成の価値と波及効果**


- 2050年頃のカーボンneutralの実現に向けて、日本政府も**2030年の実用化を見据えた革新的技術開発**を支援する政策・仕組み作りを急いでいる。
- カーボンneutralの実現には**カーボンnegativeな燃料・原料、及びその革新的製造法が必要**。
- ➔ **グリーン水素とCO<sub>2</sub>からの化学原料・燃料製造技術**は、**カーボンnegativeに寄与**できる有用な次世代技術である。
- **PV+電気分解によるグリーン水素**は、電力原単位と付帯設備の大きさ等により**製造コスト削減限界が存在**する。2円/KWhの電力が使用できても、20円/Nm<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>と見込まれる。
- ➔ **光触媒シートは大面積化に繋がる少設備投資・破壊的な低コストのグリーン水素を目指す革新プロセス**に繋がる最もインパクトの大きい革新技術に発展できる可能性が高い。
- グリーン化学原料としての**メタノール**、グリーン燃料として期待される**アンモニア**は共に発熱を伴う平衡反応であり、**高圧・リサイクル必須のエネルギー多消費型プロセス**である。
- ➔ **反応分離プロセス**はメタノール、アンモニア等を水素キャリアとして考えた場合に、従来技術では成しえない**低圧化・高収率化による日本独自の革新技術**となりうる。
- 日本の化学産業は、**高付加価値化によりEnergy Intensity (売上高当たりのエネルギー使用量) を世界最低水準**にしている一方、クラッカーによる**連産品呪縛**から逃れられていない。
- ➔ **On-demandオレフィン合成**は、**原料・製品のグリーン化は更なる高付加価値化とEnergy Intensityの低下が両立し、経済的観点/LCA的観点で日本の化学産業の更なる成長に繋がる**。

4. (展望)成果の「事業化」に向けての戦略・取組・見通し

**再生電力を用いた水の電気分解のコスト構造解析**

**水の電解設備**

**再生電力**



電力単価  
14円/KWh(日本)  
6~円/KWh(EU:風力)  
≤2円/KWh  
(中東：太陽光)



5.7km

UAEの太陽光発電所 日照：4000時間/年 発電量：1.2GW 面積：7.8km <sup>2</sup> 設備コスト：1.5万円/m <sup>2</sup> 電力コスト：~2.5円/KWh	国内太陽電池 2000時間/年 5~6万円/m <sup>2</sup> 10~円/KWh
--	--

**水素製造プロセス構成**

- 再生電力製造設備 (PV,風力)
- 電圧調整 (>1.5ボルト)
- 蓄電設備(運転平準化)
- 電気分解装置



必要な電力量：5.0KWh/Nm<sup>3</sup>-水素 (理論限界は4KWh/Nm<sup>3</sup>)

電気単価 → ×2 水素コスト

(円/KWh)	(円/Nm <sup>3</sup> )
14(日本)	140
6(EU)	60
2(中東)	20

**水素製造コストは設備導入コストの償却費(ロ-ン)が8割 → 電気代の約2倍**

**PV+電気分解では低コスト化には明らかな限界有!**

**世界展開する為には、水素製造のコスト破壊が必要**

**グレー/ブルー水素製造コスト**

原油価格	水素製造コスト
70ドル/バレル	30円/Nm <sup>3</sup>
40ドル/バレル	17円/Nm <sup>3</sup>

## 目標設定：水素コストと光触媒活性、モジュールコスト、立地の関係の明確化

### ◆ 水素製造コスト(酸素副生控除なし)

※30年平均 = (償却×17年 + 償却後×13年) ÷ 30年

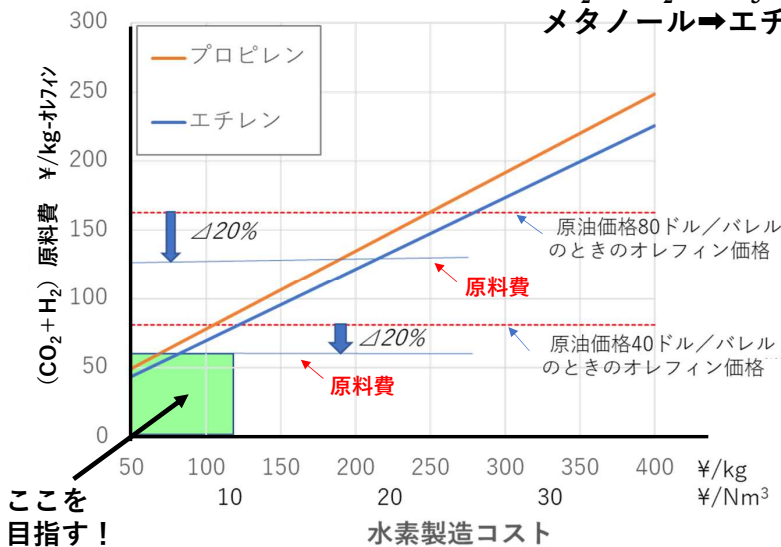
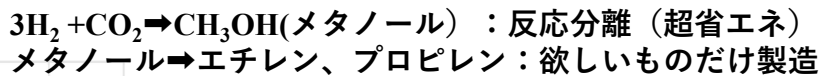
立地(想定)		日本			赤道直下		
年間日射量(想定)		1,050 kWh/m <sup>2</sup>			1,950 kWh/m <sup>2</sup>		
STH		η=4%	η=7%	η=10%	η=4%	η=7%	η=10%
水素製造量 (kg/m <sup>2</sup> ・年)		1.3	2.3	3.2	2.4	4.1	5.9
設置コスト 20,000円/m <sup>2</sup>	償却後(円/Nm <sup>3</sup> )	37	21	15	3	2	1
	30年平均(円/Nm <sup>3</sup> )	104	60	42	40	22	16
設置コスト 10,000円/m <sup>2</sup>	償却後(円/Nm <sup>3</sup> )	29	17	12	3	2	1
	30年平均(円/Nm <sup>3</sup> )	64	36	26	22	12	9
設置コスト 5,000円/m <sup>2</sup>	償却後(円/Nm <sup>3</sup> )	25	15	10	3	2	1
	30年平均(円/Nm <sup>3</sup> )	43	25	18	13	7	5

- 光触媒法は、現在の中東でのSi-PV程度の面積単価 (1.5万¥/m<sup>2</sup>) + STH = 5~10%が達成できれば、20¥/Nm<sup>3</sup>以下、場合により10¥/Nm<sup>3</sup>以下が見込める。



UAE: Sweihamの太陽光発電所  
発電量：1.2GW 面積：7.8km<sup>2</sup>  
設備コスト：1.5万円/m<sup>2</sup>

## エチレン/プロピレンの製造コストと水素製造コストの関係

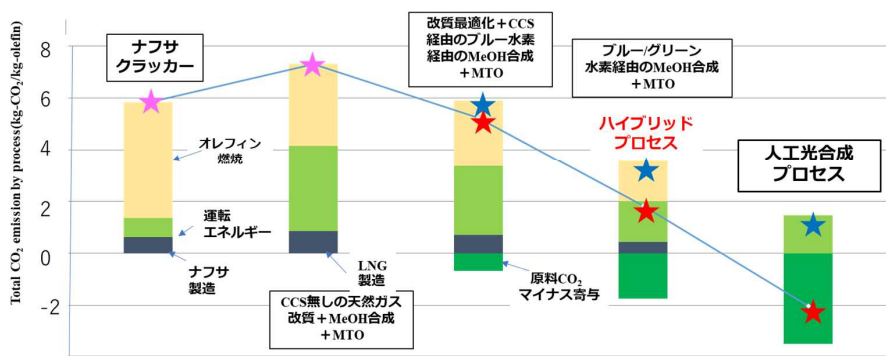


将来の原油・天然ガス価格は正確に見通すことはできないが、想定するどのような価格であっても、それ以下の製造コストを実現できれば、十分な経済性を得られる！  
→ 世界展開 (技術輸出) 可能な日本の独自プロセスになりうる！

どの国も、どこの企業も10円/Nm<sup>3</sup>を表明していない！

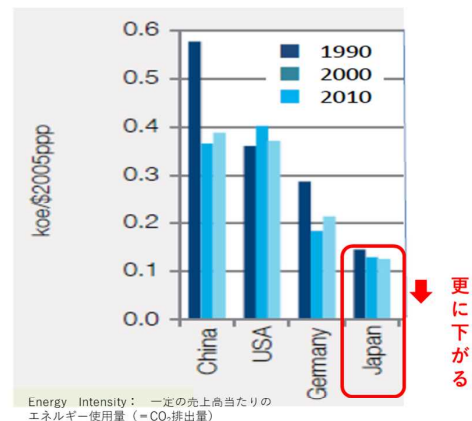
\* : 技術の世界展開・貢献を意識するなら、Green水素<10¥/Nm<sup>3</sup>のコスト破壊が鍵！

4. (展望)成果の「事業化」に向けての戦略・取組・見通し



オレフィン製造プロセス毎のLCA比較

化石資源を用いCCSを未実施の場合の一貫CO<sub>2</sub>排出量: ★  
 化石資源を用い究極のCCSを実施した場合の一貫CO<sub>2</sub>排出量: ★  
 グリーン-CO<sub>2</sub>(バイオマス究極系, DAC): ★



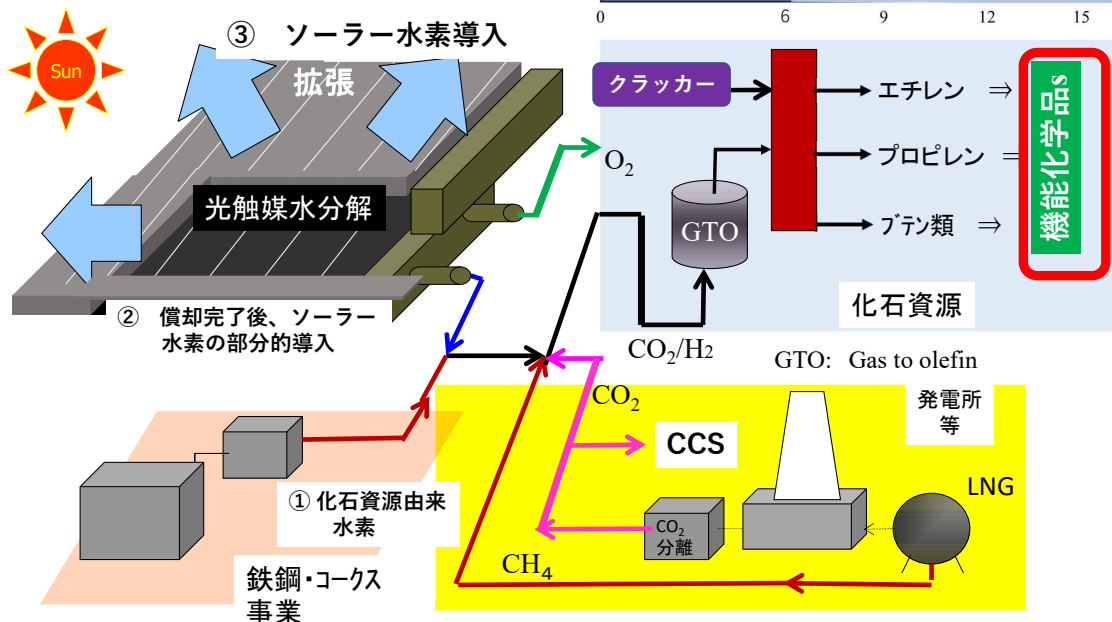
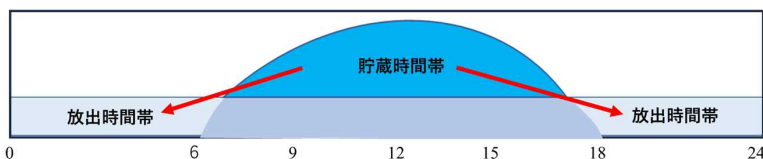
主要経済大国の化学産業のEnergy Intensity比較

日本の化学産業のEnergy-intensityは高付加価値化により世界最小レベル  
 → グリーン原料転換は、高付加価値化と更なるEnergy-Intensity低下の両立が目指せる

4. (展望)成果の「事業化」に向けての戦略・取組・見通し

社会実装に必要な事業化戦略(例)

サンベルト地帯：最も日照時間が長い、水素発生不安定性の解消が必須



4. (展望)成果の「事業化」に向けての戦略・取組・見通し

社会実装に向けての活動 : GI基金 : Post人工光合成PJ

アルコール類からの化学品製造技術の開発

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

② メタノール、エタノール等からの基礎化学品製造技術の開発・実証

人工光合成化学プロセス技術研究組合 (ARPCHEM)

組合員：INPEX、JX金属、京セラ、大日本印刷、デクセリアルズ、東レ、トヨタ自動車、日本製鉄、フルヤ金属、三井化学、三菱ケミカル  
共同実施：東京大学、信州大学、東京理科大学、東北大学、京都大学、名古屋大学、山口大学、宮崎大学、岐阜大学、AIST

研究開発の内容

光半導体水分解触媒による安全安価なグリーン水素製造プロセス開発

- 高活性な水分解半導体光触媒系の開発
- 光触媒の塗布法等による光触媒シート開発
- 水素分離システムを組み込んだモジュール開発
- 水素製造モジュールの量産化技術開発

社会実装に向けた取組内容

- 屋外試験設備での目標水素製造コストの実現可能性検証

三菱ケミカル (幹事会社)

研究開発の内容

- メタノール反応分離プロセス開発
  - 革新的オレフィン製造技術開発
- 共同実施：東京大学、東京工業大学

社会実装に向けた取組内容

- CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>を原料とし、反応分離プロセスを用いたメタノール製造の大型実証
- メタノールからのオレフィン製造実証
- 2029年度以降屋外試験設備での目標水素製造コストの実現可能性検証

三菱ガス化学

研究開発の内容

- メタノール反応分離プロセス
- 反応分離に適したメタノール触媒、プロセスの開発、実証等

社会実装に向けた取組内容

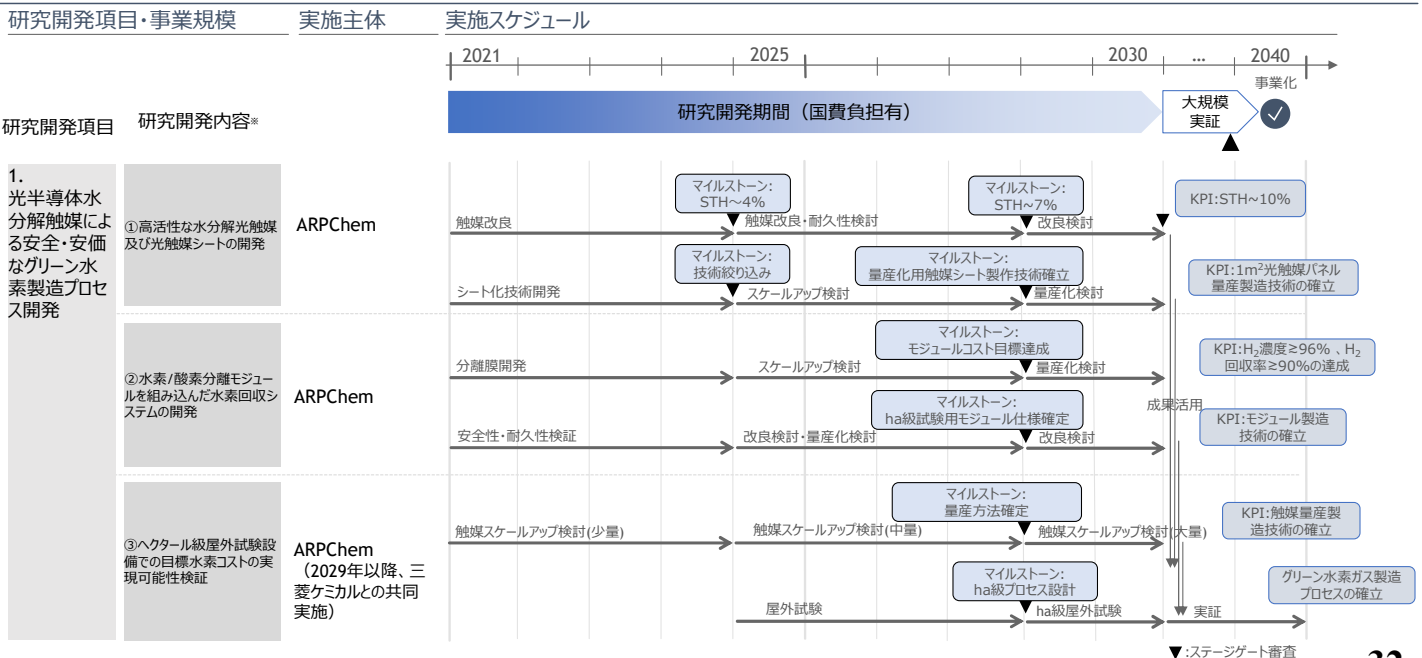
- CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>を原料とし、反応分離プロセスを用いたメタノール製造の大型実証等

CO<sub>2</sub>とグリーンH<sub>2</sub>を原料とした化学品の製造の実現

4. (展望)成果の「事業化」に向けての戦略・取組・見通し

研究開発計画／実施スケジュール

複数の研究開発を効率的に連携させるためのスケジュールを計画





4. (展望)成果の「事業化」に向けての戦略・取組・見通し

研究開発計画／実施スケジュール

複数の研究開発を効率的に連携させるためのスケジュールを計画

