

「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)

NEDO 材料・ナノテクノロジー部

2022年11月10日

1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

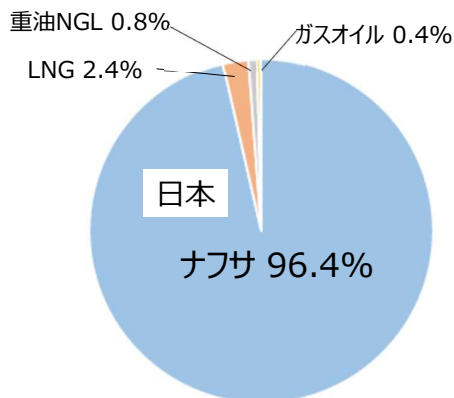
◆事業実施の背景と事業の目的

■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

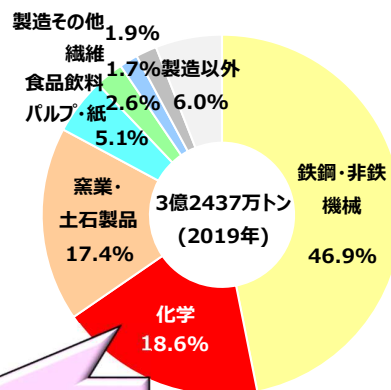
事業の目的

化石資源依存からの脱却と
CO₂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CO₂排出量
(2019年)

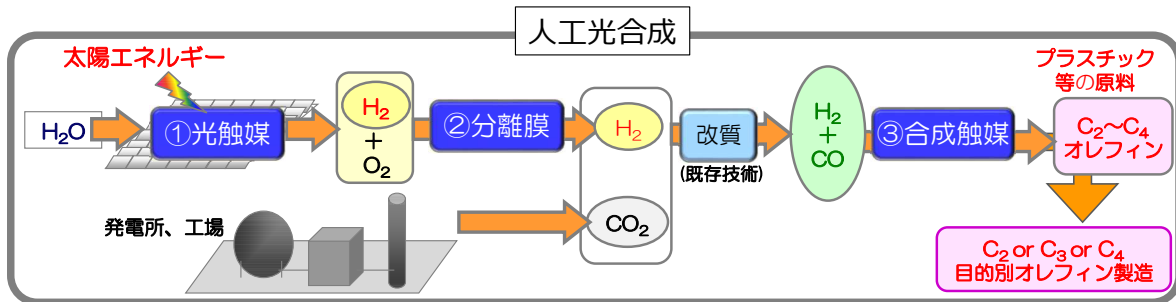
出典 国立環境研究所

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

■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CO₂排出量の大幅削減に貢献する

◆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

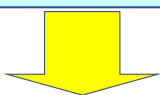
※代表事例を記載	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年
●カーボンリサイクル化学品 コスト目標 50年100円/kg (=既製品と同等) (人工光合成によるプラスチック原料)							・大規模実証	・コスト低減・補助金等による導入支援
コスト目標 既製品と同等 廃プラスチック・廃ゴムやCO ₂ 直接合成等のプラ原料							・コスト低減・補助金等による導入支援	
コスト目標 既製品と同等 バイオ技術による化学品						・実証	導入拡大・コスト低減	商用的拡大
							・実証	導入拡大・コスト低減 商用的拡大

人工光合成によるプラスチック原料製造技術開発のロードマップに加え、
保安・安全基準の検討必要性も言及されている

◆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 (CO₂削減・固定化) ⇒ 社会的必要性大
- ・「グリーン水素」と「CO₂」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 ₂ 削減効果	▲868万トン/年^{※1}	省エネルギー + CO ₂ 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 ₂ 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

◆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CO₂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、CO₂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"> 光触媒等のエネルギー変換効率10%を達成する。 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。
①-b 分離膜	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。
②合成触媒	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。

2. 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

◆プロジェクト費用

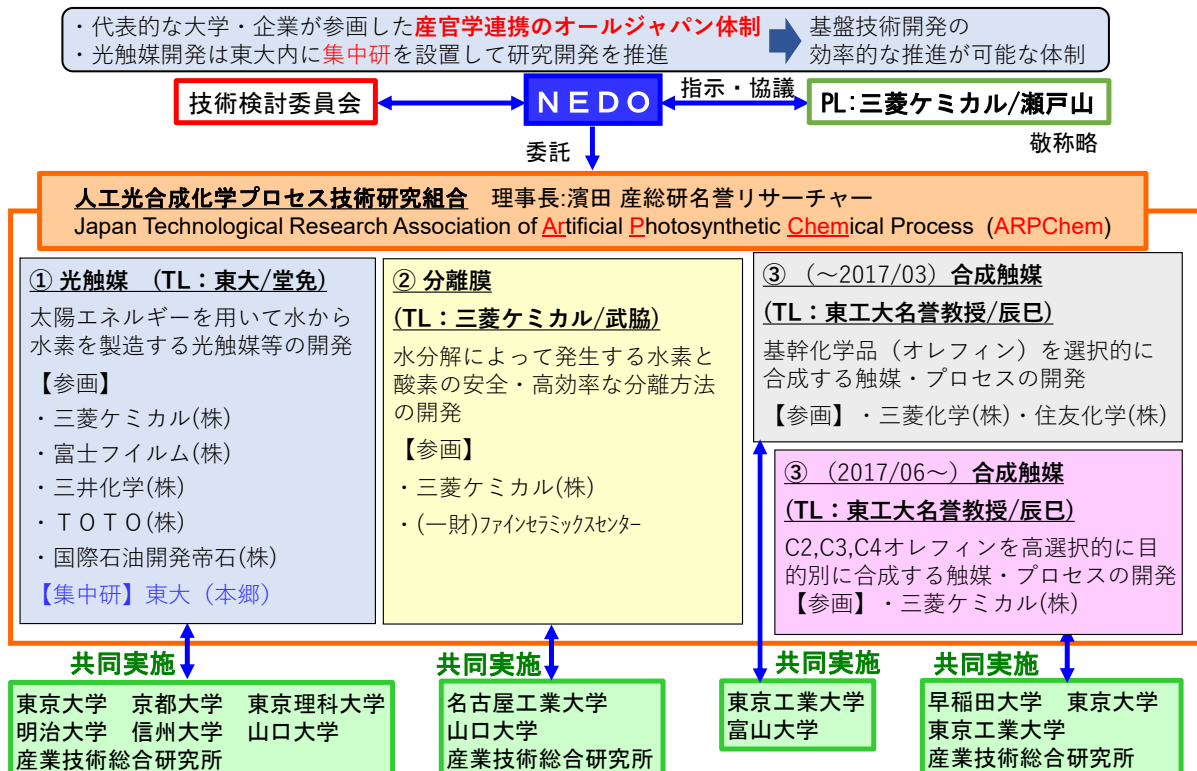
研究開発項目	2012年度*1	2013年度*1	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	合計
① 光触媒・分離膜 (①-a, ①-b)	1,338	1,224	1,254	1,240	1,033	1,639	1,430	1,370	1,680	1,680	
② 合成触媒	62	214	196	395	287						
合計 (うち加速予算)	1,400	1,438	1,450	1,635 (135)	1,320	1,639 (139)	1,430	1,370	1,790*2 (110)	1,680*2	15,042 (384)

* 1 : 経済産業省の直執行

* 2 : 2020年度内訳 ①-a : 73%、①-b : 13%、② : 14%
2021年度内訳 ①-a : 74%、①-b : 12%、② : 14%

2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

◆研究開発の実施体制



2. 研究開発マネジメント (4) 研究開発の進捗管理の妥当性

◆研究開発の進捗管理

- 実施者**
- ・月報の提出
各Gの各月の実施事項・進捗状況をTL、PLへ報告
* G数：20グループ
 - ・分科会の開催（2回/年）
各テーマ毎に半期の進捗状況をレビューし、翌期の計画を見直す
* テーマ：3テーマ
 - ・全体会議（1回/年、12月頃）
PJ全体の目標・成果の共有
* 成果発表（ポスターセッション）：2019年度実績 44件
2020年度実績 39件(オンライン開催)
2021年度実績 46件(オンライン開催)

NEDO – 実施者

- ・技術研究組合ARPCHEMと打合せを1回/月で実施：2019年度実績 12回
2020年度実績 9回
2021年度実績 12回
- ・PL、ARPCHEMと実用化や次年度計画等を議論
毎年年度末に必ず、次年度の実施計画について、非常に突っ込んだ議論を行ってきた。それを元に実施計画を作成/変更。
- ・各拠点を最低1～2回/年訪問して、技術打ち合わせ及び研究施設を見学
ここ2年はコロナのため拠点訪問は未実施、代わりにオンラインで技術討議
- ・技術検討委員会(2回/年)を実施。2021年度は年1回実施+成果報告会実施(2022/1/25)

◆実用化につなげる為の取組

- ・PL：企業の研究者を任命
- ・組合内の柔軟な人材流動・交流
- ・組合集中研(東大)での企業人と大学人の知見・経験の融合。密なコミュニケーション
(参)約4割は企業経験者



- ・初期段階から企業の視点を交えた研究開発
- ・実用化を見据えた研究課題の早期把握
- ・企業人が新材料の理解深化

2. 研究開発マネジメント (4) 研究開発の進捗管理の妥当性

◆動向・情勢の把握と対応

情勢	対応
2019年度の技術検討委員会にて、光触媒系と分離膜系を連結し実際に水素を安全に分離回収できることをある程度の長期間に渡り実証し、太陽電池+水電気分解に対抗できる技術であることを示してほしい、との指摘	2019～2021年に東大・柿岡研究設備(屋外)に100m ² の光触媒パネルと生成ガスの分離・回収システムを設置し、将来の実用化を見据えての課題抽出と屋外実証を実施。約1年に渡り継続して水分解と高純度水素の回収が出来る事、適切に設計されたシステムにより混合ガスを安全に取り扱える事を確認した。
2020年度の技術検討委員会にて、最終年度に向けて各テーマの技術ポイント、予定、目標や成果の形を明確にして欲しい、との指摘。	2020年度第2回の検討委員会にて左記項目をプレゼン資料に織り込み、21年度の研究計画に反映。

◆中間評価結果への対応

指摘	対応
中間評価（2019年10月2日）にて、今後の科学技術の世界的発展や、本技術開発から得られる公共の利益を考慮すると、国内外の若手研究者・技術者の養成も重要である一方、技術開発の国外への流出の懸念もあり、柔軟な対応が望まれる。	従来より光触媒材料開発とノウハウを含むシステム開発を分担配置する等の技術流出防止を意識した対応を行って来た。具体的には前者は主に大学が担当し(外国人ポスドクも参加)、育成も兼ねて積極的に対外発表を行ったが、後者のモジュールと安全システム開発は日本人のみが担当し重要な部分はノウハウ秘匿とした。
中間評価（2019年10月2日）にて、トータルシステムとしての実用化は目指すべき目標であるが、実用化に近い技術は、それ単独でも早期に実用化に移されることが望まれる。	各要素技術成果を単独で実用化していくことも念頭に入れて研究開発を実施した。特に後段のメタノール合成とMTOについては将来の技術ライセンスも見据え特許出願を行っており、後継のGI基金事業では早期の社会実装を目指して研究を加速させる予定。

◆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

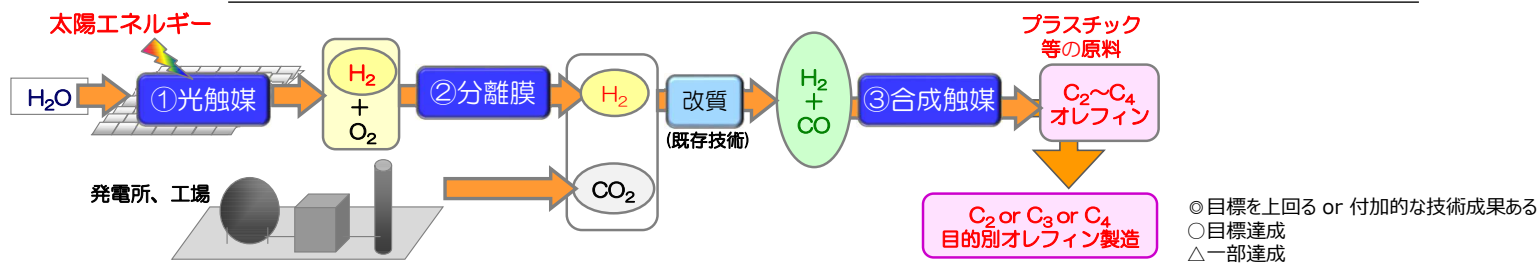
・技術研究組合にて「知的財産権取扱規程」、「発明小委員会規則」等を策定し知財活動を実行

■オープン&クローズ戦略

基礎科学研究に近く中国はじめ世界的に研究が盛んな光触媒自体の開発は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)、

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

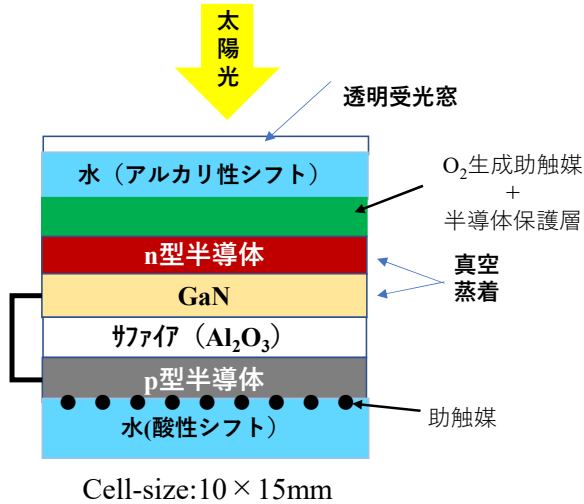


研究開発項目	研究開発目標(最終目標)	成果	達成度
①-a 光触媒	<ul style="list-style-type: none"> 光触媒等のエネルギー変換効率10%を達成する。 小型フロー式でエネルギー変換効率を最大限引き出し、長期耐久性も兼ね備えたモジュールを設計する。 	<ul style="list-style-type: none"> Ta₃N₅アノードを用いたタンデムセル型で最終目標の変換効率10%を達成 Al:SrTiO₃微粒子光触媒で近紫外光において、量子収率~100%を達成(Nature掲載) 100m²級パネルでのField-test実施(Nature掲載) 	◎
①-b 分離膜	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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 H₂/O₂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 	◎
②合成触媒	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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 MeOH, MTOそれぞれの小型パイロットの連続運転を実施 	○

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H₂/O₂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

光触媒開発 ③

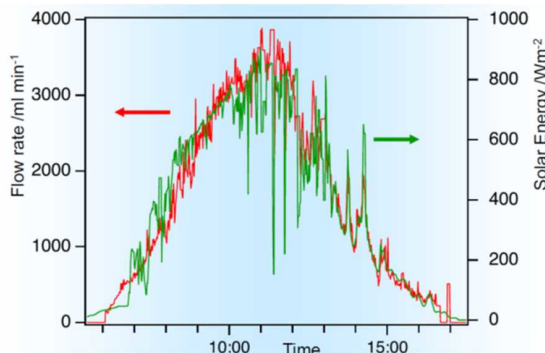
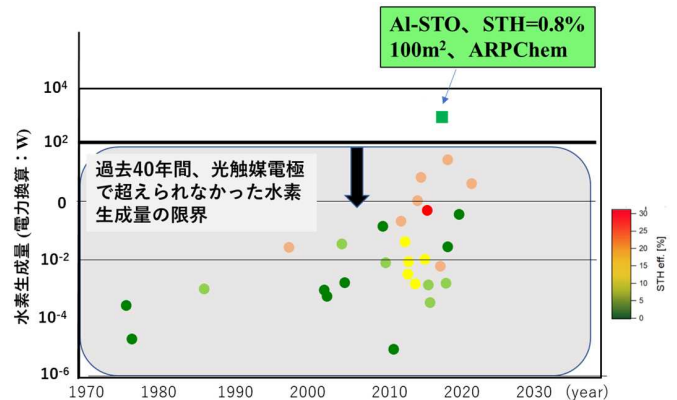
Al-doped-SrTiO₃による光触媒シートのscalabilityの実証



柿岡爆発試験設備でのAl-STO触媒での
100m²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

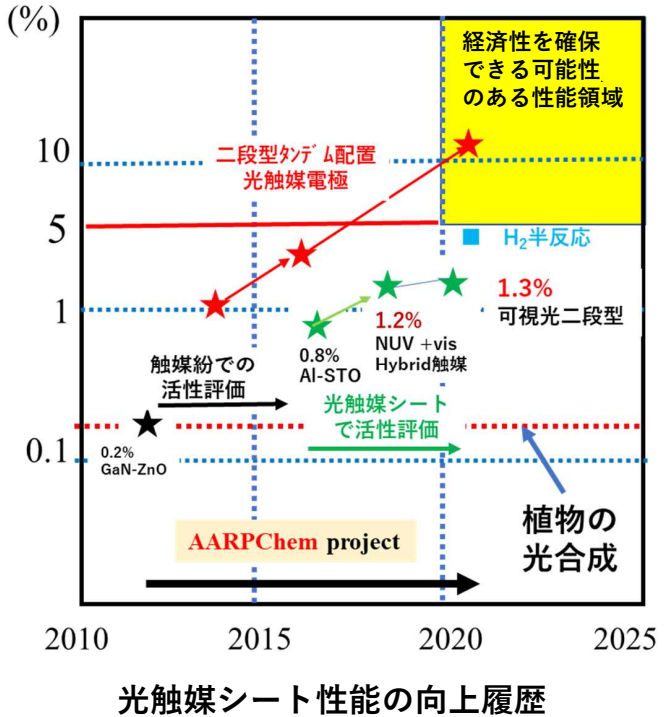
- 二段型tandem光触媒電極で数時間、STH>10%を実現
- ➔ 低コスト化、スケールアップに難あり、事業化対象とはしない。

② 一段型触媒の成果

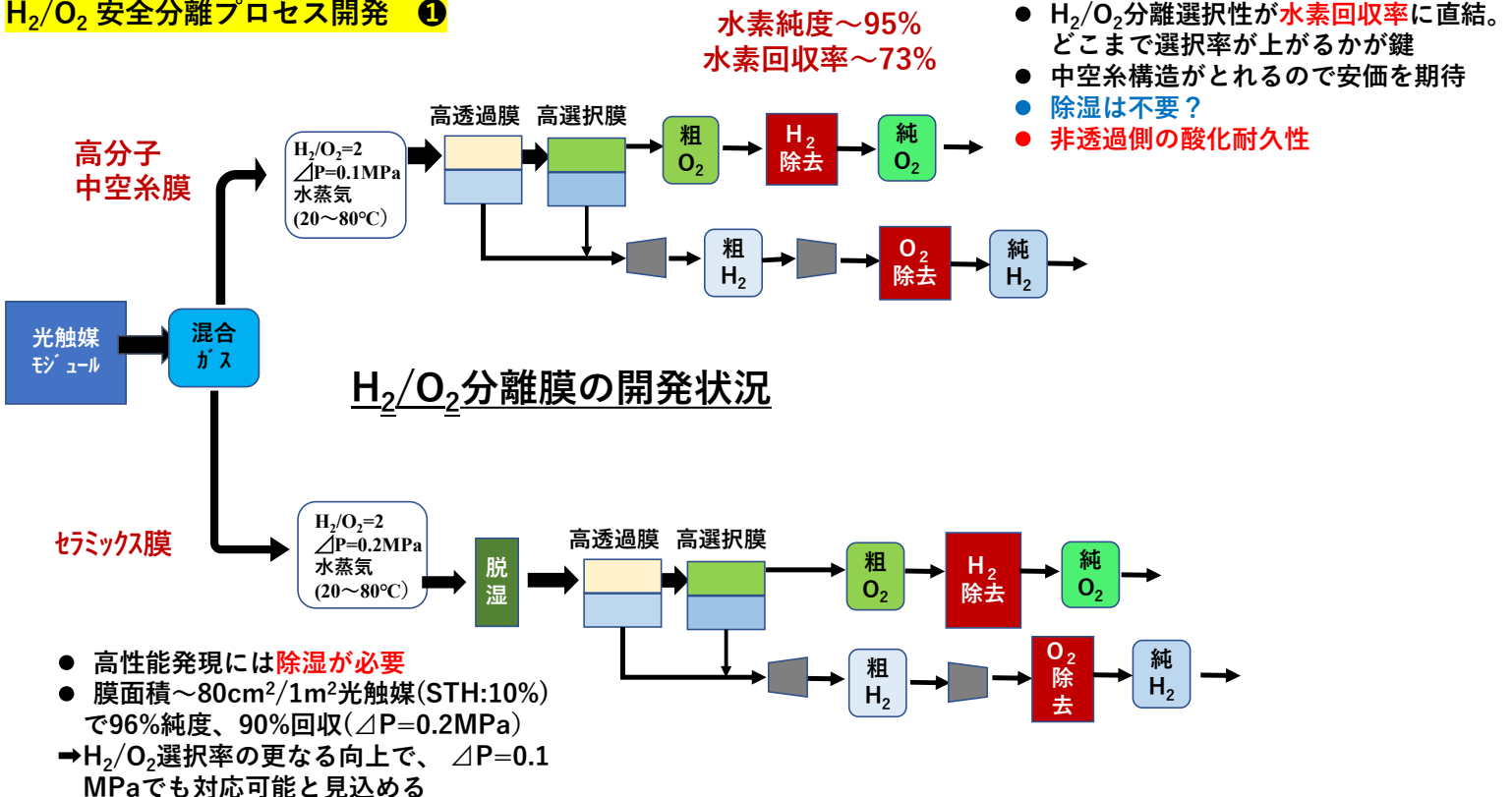
- 近紫外光応答のAl-doped-SrTiO₃において、QE≒100%実現。これを用いた触媒シートで100m²級の屋外試験実施。
- BaTaO₂N、Ta₃N₅、Y₂Ti₂O₅S₂で、低活性ながら全分解が実現。
- フラックス法合成の複数の酸硫化物触媒において、水素生成半反応において高い量子収率が実現 (QE≒30%は出色)。但し全分解は未達。
- ➔ 低酸素生成能の解明が重要。それに基づく触媒設計
- 光半導体の結晶性、欠陥、不純物
- 助触媒との界面設計

③ 二段型触媒の成果

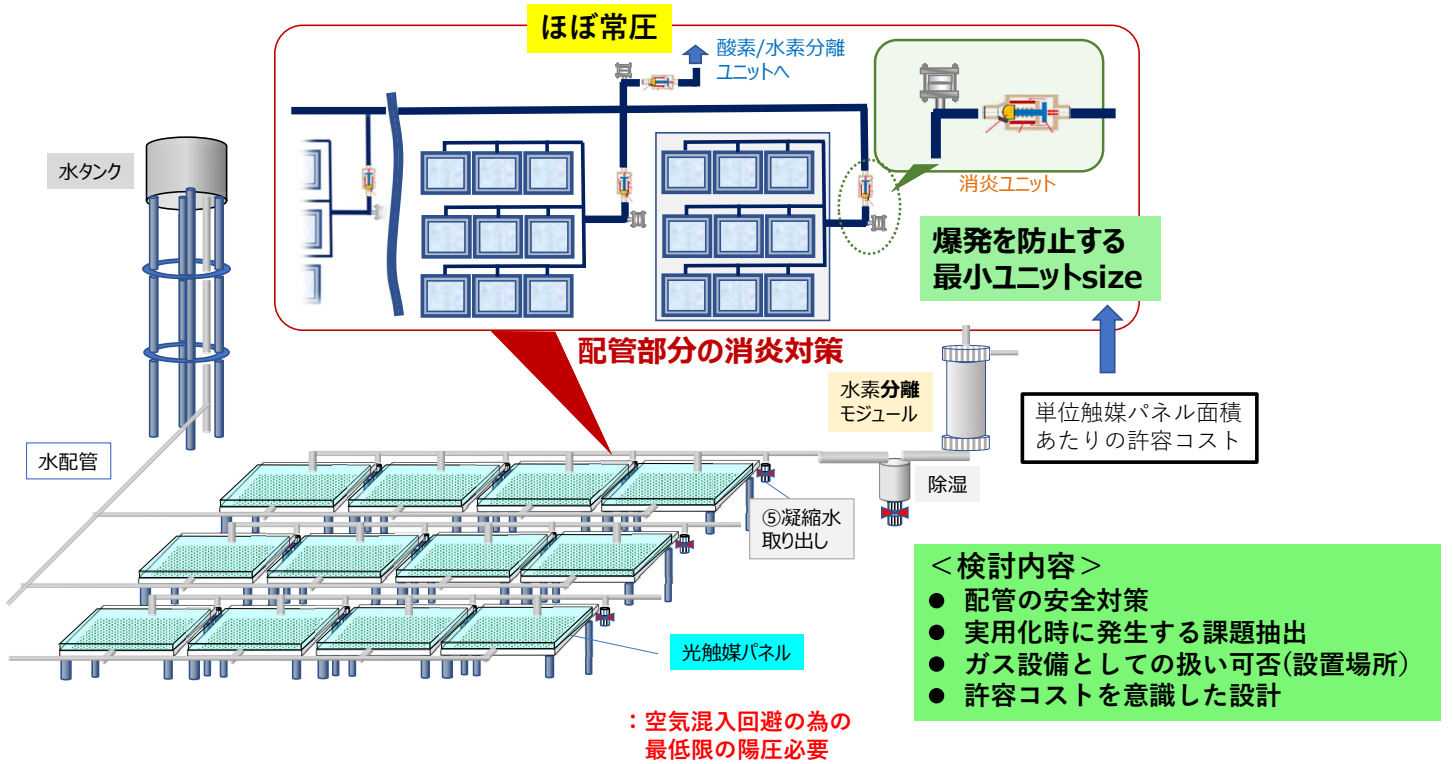
- 可視光照射下でLTCA/Au/BiVO₄系でSTH>1.3%を達成
- LTCA : La₅Ti₂Cu_{0.9}Ag_{0.1}S₅O₇
- ➔ STH>8%(Tandem型)の可能性がある、触媒系としての最適化を実施予定



H₂/O₂ 安全分離プロセス開発 ①

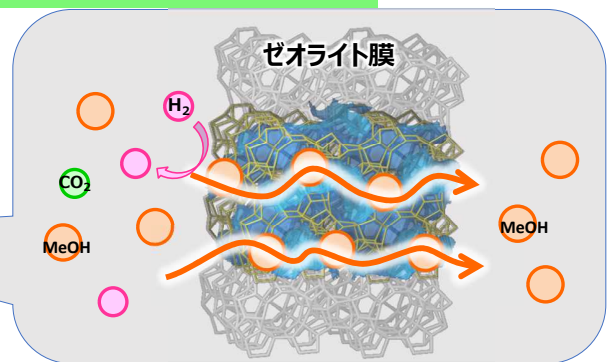
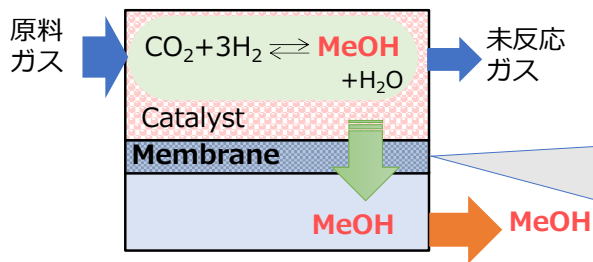


H₂/O₂ 安全分離プロセス開発 ②

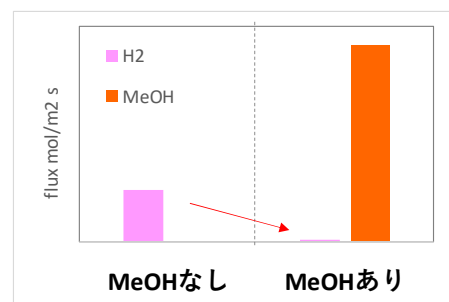
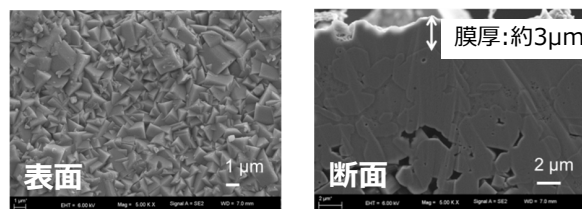


メタノール選択透過膜 ①

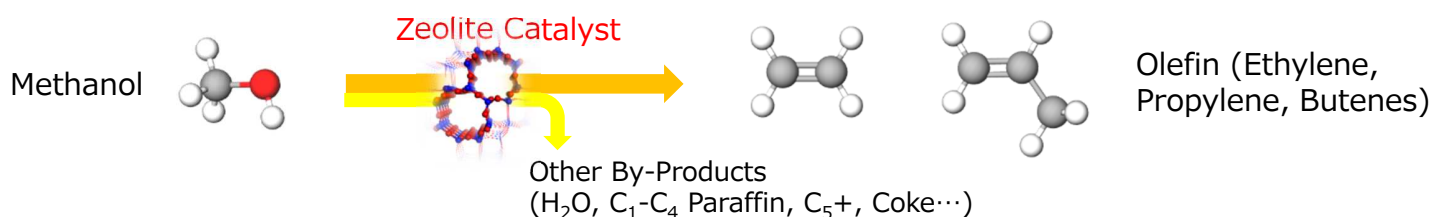
分子サイズの大きなメタノールが、CO₂やH₂に優先して透過する分離膜の設計



- ゼオライトの吸着能を利用してメタノール&水を選択的に透過可能 (size認識ではない)



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%

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%

※IHSレポートを元に算出

※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。

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

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 (3) 成果の実用化・事業化の見通し: 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CO₂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/Nm³-H₂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术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・高効率化による日本独自の革新技术**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。**

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 = (償却中×17年 + 償却後×13年) ÷ 30年

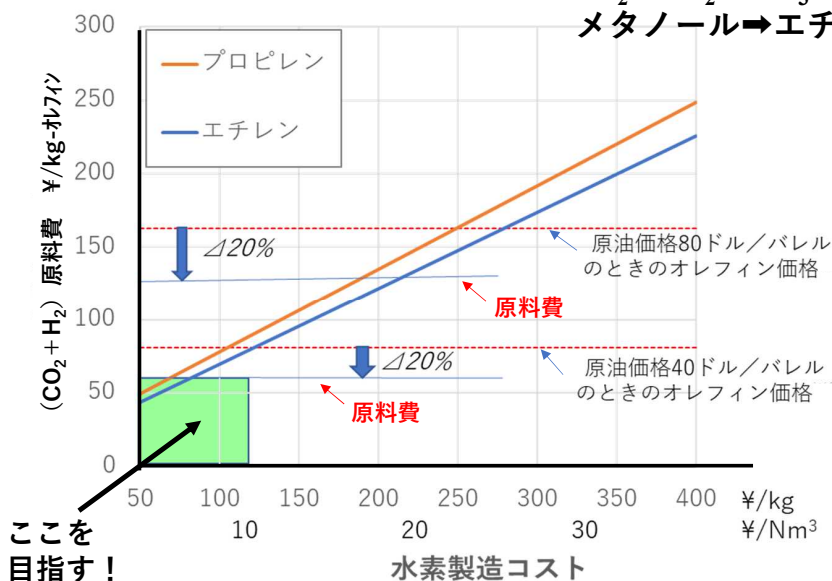
立地(想定)		日本			赤道直下		
年間日射量(想定)		1,050 kWh/m ²			1,950 kWh/m ²		
STH		η=4%	η=7%	η=10%	η=4%	η=7%	η=10%
水素製造量 (kg/m ² ・年)		1.3	2.3	3.2	2.4	4.1	5.9
設置コスト 20,000円/m ²	償却後(円/Nm ³)	37	21	15	3	2	1
	30年平均(円/Nm ³)	104	60	42	40	22	16
設置コスト 10,000円/m ²	償却後(円/Nm ³)	29	17	12	3	2	1
	30年平均(円/Nm ³)	64	36	26	22	12	9
設置コスト 5,000円/m ²	償却後(円/Nm ³)	25	15	10	3	2	1
	30年平均(円/Nm ³)	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¥/m²) + STH = 5~10%が達成できれば、20¥/Nm³以下、場合により10¥/Nm³以下が見込める。



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

3H₂ + CO₂ → CH₃OH(メタノール) : 反応分離(超省エネ)
メタノール → エチレン、プロピレン : 欲しいものだけ製造



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/Nm³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¥/Nm³ のコスト破壊が鍵！

社会実装に向けての活動 : GI基金 : CO₂等を用いたプラスチック原料製造技術開発

アルコール類からの化学品製造技術の開発/人工光合成型化学原料製事業化開発

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

② CO₂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
- 光触媒粉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 等

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 等

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

- CO₂とH₂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

共同実施

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

- CO₂とH₂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

CO₂とグリーンH₂を原料とした化学品の製造の実現

概要

最終更新日 2022年 10月 4日

プロジェクト名	二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発	プロジェクト番号	P14002
担当推進部/PM または担当者	<p>担当推進部 2012.10-2014.03 経済産業省 製造産業局 化学課機能性化学品室 2014.04-2018.03 環境部 環境化学グループ 2018.04-現在 材料・ナノテクノロジー部 化学グループ</p> <p>経済産業省 担当者氏名 (2012-2013 年度) 課長補佐 (技術担当) 松田 正樹 2012.10-2013.03 課長補佐 (技術担当) 五嶋 俊一 2013.04-2014.03 技術係長 山田 智也 2012.10-2013.05 技術企画・調査係長 岡野 泰久 2013.06-2014.03</p> <p>環境部/材料・ナノテクノロジー部 PM または担当者氏名 (2014 年度以降) 主任研究員 山野 慎司 2014.04-2016.04 主任研究員 吉澤 由香 2016.05-2018.04 主任研究員 山野 慎司 2018.05-2020.03 主任研究員 尾畑 英格 2020.04-2022.02 主査 土屋 裕子 2014.04-2015.03 主査 並木 泰樹 2014.04-2015.03 主査 池田 洋子 2014.06-2016.06 主査 橘高 節生 2015.04-2017.03 主査/PM 服部 孝司 2015.04-2018.03 主査/PM 小川 宗成 2017.04-2019.03 主査 山田 浩 2017.07-2019.03 主査/PM 佐川 雅一 2018.04-2020.03 主査/PM 山本 祥史 2019.04-2019.12 主査/PM 土井 隆志 2019.12-2021.11 主査 内山 博幸 2020.04-2022.02 主査 奥 智行 2021.10-2022.02 主査 結城 究 2021.10-2022.02 主査 伊藤 智行 2021.12-2022.02</p>		
0. 事業の概要	<p>日本の化学産業は高い国際競争力を誇る製品を多数生み出しているが、その一方で、主要な原料として化石資源のナフサを大量に消費しており、価格及び供給安定性の面で課題を有する。また、化石資源を原料にしていることで、二酸化炭素排出量は日本の製造業の約 22%と大きな割合を占めている。</p> <p>本事業は、従来のナフサに代えて、水と二酸化炭素を原料に再生可能エネルギーである太陽エネルギーを利用して基幹化学品を製造するための基盤技術を開発するものであり、次の 3 つの研究開発を実施する。</p> <p>研究開発項目①「ソーラー水素等製造プロセス技術開発 (革新的光触媒)」 ①-a: 光触媒や助触媒及びこれらのモジュール化技術等の研究開発 (略称: 光触媒) ①-b: 水素分離膜及びモジュール化技術等の研究開発 (略称: 分離膜)</p> <p>研究開発項目②「二酸化炭素資源化プロセス技術開発 (プラスチック原料等基幹化学品への変換触媒)」 (略称: 合成触媒) 光触媒開発 (①-a) においては、目標とする効率を植物の 30 倍に当たる 10%に設定し、世界最高効率を目指すとともに、光触媒のモジュール化を実施する予定である。分離膜開発 (①-b) においても、これまで世界で実用化されていない水素と酸素の分離を爆発の危険が無い安全な状態で行う必要があり、分離膜そのものとモジュールを開発する。さらに、合成触媒 (②) においては、これまでに実用化されていない低級オレフィン (炭素数 2-4 のオレフィン) の合成を高効率で実施する触媒とそのプロセス開発を実施する。</p>		
1. 事業の位置付け・必要性について	<p>本事業については、2011 年 7 月 29 日の総合科学技術会議における「科学技術に関する基本政策について」に関する意見具申において、グリーンイノベーションの推進における重要課題達成のための施策の推進として、本事業を含む「革新的触媒技術に関する研究開発を推進する」こととしている。また、第 112 回内閣府総合科学技術会議 (2013 年 6 月 6 日) で策定された「科学技術イノベーション総合戦略」において、クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現のために重点的に取り組むべき技術開発 (二酸化炭素等多様な原料から効率的にエネルギー・化学品の生産を図る革新的触媒技術) として、位置付けられている。本事業については、その後も引き続き「科学技術イノベーション総合戦略 2014」(2014 年 6 月 24 日閣議決定)、「科学技術イノベーション総合戦略 2015」(2015 年 6 月 19 日閣議決定) に記載され、「科学技術イノベーション総合戦略 2016」(2016 年 5 月 24 日閣議決定) において、エネルギーシステム全体を横断して各分野の機能を維持・向上し、大幅な省エ</p>		

エネルギーへ貢献する技術として、「革新的な材料・デバイス等への幅広い分野への適用」の中で重要な課題として位置付けられている。さらに本事業は、第114回内閣府総合科学技術会議（平成25年9月13日）で策定された「環境エネルギー技術革新計画（改定案）」において、環境・エネルギー制約の解決と経済成長に必要な推進すべき革新的技術の一つとして、新たに追加されたところであり、また、「科学技術イノベーション総合戦略2017」（2017年4月21日、内閣府総合科学技術・イノベーション会議、2017年6月2日、閣議決定）において、エネルギーシステム全体を横断して各分野の機能を維持・向上し、大幅な省エネルギーへ貢献する重要な技術に位置付けられるものである。

また、経済産業省のグリーン・サステナブルケミストリー分野の技術マップ2010、及び経済産業省、NEDOのグリーン・サステナブルケミストリー分野の技術マップ2011において、研究開発項目①「ソーラー水素等製造プロセス技術開発（革新的光触媒）」については「高効率水素製造」として、研究開発項目②「二酸化炭素資源化プロセス技術開発（プラスチック原料等基幹化学品への変換触媒）」については、「非枯渇性資源の化学品・材料化（化学品原料の転換・多様化）」として重要テーマに位置付けられている。

パリ協定に基づく成長戦略としての「地球温暖化対策計画」（2016年5月13日、閣議決定）にて、最終到達時点として「脱炭素社会」を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現することを旨とするともに、2050年までに80%の削減に大胆に取り組むとされている。その中で、第2章：各分野のビジョンと対策・施策の方向性、2. 産業：脱炭素ものづくり に貢献する重要な技術に位置付けられるものである。

「カーボンリサイクルロードマップ」（2019年6月7日、経済産業省策定）にて、エネルギーアクセス改善と気候変動問題の二つの課題を同時解決するため、あらゆる技術的な選択肢を追求しつつ、化石燃料から排出されるCO₂の問題に正面から取り組むものとされている。具体的には、カーボンリサイクル技術のイノベーションを加速するため、①CO₂を資源として利用可能な物資毎に、技術の現状、コスト低減に向けた課題を明確化、技術進展のステップを記載し、②既存製品と同等のコストを目指し、2030年・2050年のコスト目標を設定し、カーボンリサイクルに貢献する重要な技術に位置付けられるものである。

2020年10月、菅総理(当時)は「2050年カーボンニュートラル」を宣言した。温暖化への対応を経済成長の制約やコストとする時代は終わり、成長の機会と捉える時代に入らつつある。こうした中、「経済と環境の好循環」を作っていく産業政策として「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が2021年6月18日に日本政府により策定された。本戦略の水素の成長戦略「工程表」の中で光触媒は水素製造における将来の革新的技術の1つと位置付けられ、2030年代半ばまで開発・実証を行いそれ以降に導入を支援する計画となっている。また、カーボンリサイクル・マテリアル産業の成長戦略「工程表」においても人工光合成によるプラスチック原料の製造技術が代表事例として記載されており、今後の大規模実証と社会実装を最適に進めていくための保安・安全基準の検討必要性にも言及されている。

上述の通り本事業は政策に合致しており、実施する内容は、従来のナフサに代えて、水と二酸化炭素を原料として基幹化学品を製造するための基盤技術を開発するものであり、求められる研究開発の難易度は非常に高い。また、光触媒や分離膜は基礎的な材料開発から実用化を念頭に置いたモジュール化検討の実施といった広範囲に亘る技術開発が必要なことから、産官学の知見を結集して研究開発を実施する必要がある。民間活動のみでは達成できないと考えられる。また、本事業は、日本の基幹化学品の製造原料である化石資源の代替として二酸化炭素を原料とするため、輸入に依存している化学原料の転換に貢献できると同時に、国家的課題である二酸化炭素排出量の削減にも貢献可能であるため、社会的必要性は大きいと言える。基幹化学品やその誘導品といった石油化学製品は、プラスチック、繊維、ゴムといった工業の原料となり、これらを部材として様々な製品が製造されている。従って、本事業で開発するソーラー水素と二酸化炭素を原料とした革新的な基幹化学品製造プロセス基盤技術は、化学産業のみならず日本の全産業に波及するものであると同時に、国際的にみて日本の化学産業の競争力強化に貢献可能である。さらに、本事業は、産官学の知見を結集して10年間という長期にわたって基盤技術から実用化を念頭に置いた技術開発までを実施することから、開発リスクが高いだけでなく投資規模も大きくなる。このように、本事業は技術的な内容を含むプロジェクトマネジメントの難易度が極めて高く、効率的に事業を実施するためには、NEDOの技術的な知見とプロジェクトマネジメントの経験が必須である。

以上より、本事業は、NEDOが持つこれまでの知見、実績を活かして推進すべきものと考えられる。

2. 研究開発マネジメントについて

事業の目標

本事業では、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（ソーラー水素）を製造し、高効率分離膜により生成する水素を分離・生成して、更にソーラー水素と二酸化炭素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、二酸化炭素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。

本事業の実施内容は大きく2つの研究開発項目に分けられ、以下の3つの研究開発を実施する。研究開発項目①「ソーラー水素等製造プロセス技術開発（革新的光触媒）」[開発期間10年間]

①-a：光触媒や助触媒及びこれらのモジュール化技術等の研究開発

①-b：水素分離膜及びモジュール化技術等の研究開発

研究開発項目②「二酸化炭素資源化プロセス技術開発（プラスチック原料等基幹化学品への変換触媒）」【開発期間 5 年間】

本事業において、実施期間が 10 年である研究開発項目①では、2014 年度（事業開始から通算して 3 年目）、2016 年度（同 5 年目）、2019 年度（同 8 年目）にそれぞれ中間目標を設定し、中間評価を実施する。また、実施期間が 5 年の研究開発項目②では、2014 年度（事業開始から通算して 3 年目）、2016 年度（同 5 年目）、2019 年度（同 8 年目）にそれぞれ中間目標を設定し、中間評価を実施する。

本事業における最終目標及び中間目標は以下のとおりである。

研究開発項目①「ソーラー水素等製造プロセス技術開発（革新的光触媒）」

【最終目標（2021 年度末）】

（光触媒）・光触媒等のエネルギー変換効率 10%を達成する。

- ・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。

」:

（分離膜）・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。

【中間目標（2014 年度末）】

（光触媒）・光触媒等のエネルギー変換効率（太陽エネルギーが水素等の生成に寄与する率）1%を達成する。

- ・光触媒等のエネルギー変換効率を最大限引き出すモジュール化に向けた技術課題の抽出を行う。

（分離膜）・水素と窒素系で高い透過係数を持つ複数の分離膜を開発し、水素・酸素分離膜候補を抽出する。

【中間目標（2016 年度末）】

（光触媒）・光触媒等のエネルギー変換効率 3%を達成する。

- ・光触媒等のモジュール化の個別要素技術を確立する。

（分離膜）・水素・酸素系での分離膜性能を確認し、分離膜を確定する。また、安全に分離できるモジュールの仕様を明確にする。

【中間目標（2019 年度末）】

（光触媒）・光触媒等のエネルギー変換効率 7%を達成する。

- ・小型バッチ式でエネルギー変換効率を最大限引き出すモジュールを設計する。

（分離膜）・モジュールベースで水素を安全に分離する技術を確立する。

研究開発項目②「二酸化炭素資源化プロセス技術開発（プラスチック原料等基幹化学品への変換触媒）」

研究成果の実用化及び更なる二酸化炭素削減の推進を目的に、目標を高度化して研究開発を継続するため、2016 年 6 月に研究開発項目②を開発内容拡充した。2017 年度から 5 年間計画で、高収率のメタノール合成及び目的とする単独オレフィンを高選択的に製造するため、合成触媒、合成プロセス及び合成プロセス用の反応分離膜の研究開発を実施することになり、中間目標（2019 年度末）及び最終目標（2021 年度末）を設定した。

【最終目標（2021 年度末）】

・投入された水素又は二酸化炭素由来の炭素の目的とする炭素数 2、3、4 の単独オレフィンへの導入率として、それぞれ 70%（ラボレベル）を達成する。

- ・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。

【中間目標（2019 年度末）】

・投入された水素又は二酸化炭素由来の炭素のオレフィンへの導入率として、それぞれ 50%（ラボレベル）を達成する。

- ・コストシミュレーションによる反応プロセスの最適化を行い、目的とする単独オレフィン製造用の小型パイロットの仕様を確定する。

【最終目標（2016 年度末）】

・投入された水素又は二酸化炭素由来の炭素のオレフィンへの導入率として 80%（ラボレベル）を達成する。

- ・小型パイロット規模でのプロセスを確立する。

【中間目標（2014 年度末）】

・投入された水素又は二酸化炭素由来の炭素のオレフィンへの導入率として 70%（ラボレベル）を達成する。

- ・プロセスのコストシミュレーションによる反応プロセスの最適化を行い、小型パイロットの仕様を確定する。

事業の計画内容	主な実施事項	2012 _{fy}	2013 _{fy}	2014 _{fy}	2015 _{fy}	2016 _{fy}	2017 _{fy}	2018 _{fy}	2019 _{fy}	2020 _{fy}	2021 _{fy}	2022 _{fy}
	研究開発項目① ソーラー水素等製造プロセス技術開発(革新的光触媒)	←			▼ 中間評価		▼ 中間評価			▼ 中間評価		
研究開発項目② 二酸化炭素資源化プロセス技術開発(プラスチック原料等基幹化学品への変換触媒)	←		▼ 中間評価			▼ 事後評価	←		▼ 中間評価			▼ 事後評価
事業費推移 (会計・勘定別にNEDOが負担した実績額を記載) (単位：百万円)	会計・勘定	H24fy	H25fy	H26fy	H27fy	H28fy	H29fy	H30fy	H31fy/R1fy	R2fy	R3fy	合計
	一般会計	1,400	1,438									
	特別会計(需給)			1,450	1,500	1,320	1,500	1,430	1,370	1,680	1,680	
	加速予算 (成果普及費を含む)				135		139			110		
	総予算額	1,400	1,438	1,450	1,635	1,320	1,639	1,430	1,370	1,790	1,680	15,042
開発体制	経産省担当原課	製造産業局化学課、素材産業課										
	プロジェクトリーダー	三菱ケミカル株式会社 エグゼクティブフェロー 瀬戸山 亨										
	プロジェクトマネージャー	環境部 服部 孝司 (2015.04-2018.03) 材料・ナノテクノロジー部 小川 宗成 (2018.04-2019.03) 材料・ナノテクノロジー部 山本 祥史 (2019.04-2019.12) 材料・ナノテクノロジー部 土井 隆志 (2020.01-2021.11)										
	委託先 (組合が委託先に含まれる場合は、その参加企業数及び参加企業名も記載)	委託先 人工光合成化学プロセス技術研究組合(参画：5社+1団体) ・参画企業 2012.10-2022.02 三菱化学(株)、三井化学(株)、国際石油開発帝石(株)、(一財)ファインセラミックスセンター、富士フィルム(株) 2013.04-2017.03 住友化学(株) 2013.06-2022.02 TOTO(株) ・共同実施先 2012.11-2022.02 京都大学、東京工業大学、東京大学、東京理科大学、名古屋工業大学、山口大学 2013.04-2022.02 産業技術総合研究所、明治大学 2013.04-2017.03 富山大学 2013.04-2016.03、2017.06-2022.02 信州大学 2017.04-2022.02 早稲田大学										
情勢変化への対応	2014年度に本事業を経済産業省直執行からNEDOに移管した。それに伴い、実用化を見据えた研究開発の取り組みを強化するために、アカデミアから企業の研究員にプロジェクトリーダーを承継した。											
中間評価結果への対応	指摘事項に対しては、実施方針及び実施計画書に反映させることにより、対応を図った。特に、3つの研究テーマの連携の強化と実用化に向けた想定に関する検討の深化に注力した(2014年度中間評価)。 研究成果の実用化及び更なる二酸化炭素削減の推進を目的に、目標を高度化して研究開発を継続するため、研究開発項目②を開発内容拡充した。2017年度から5年間計画で、高収率のメタノール合成及び目的とする単独オレフィンを高選択的に製造するため、合成触媒、合成プロセス及び合成プロセス用の反応分離膜の研究開発を実施する(2016年度 中間評価)。 光触媒よりも実用化に近い技術(メタノール合成とMTO)は単独でも早期実用化すべく技術ライセンスも見据え特許出願を行っており、後継のGI基金事業ではステージを上げ社会実装を目指した研究開発を加速させる。(2019年度中間評価)											
評価に関する事項	事前評価	-										
	中間評価	2014年度 中間評価実施、2016年度 中間評価実施、 2019年度 中間評価実施										

		事後評価	2022年度 事後評価実施
3. 研究開発成果について	<p>本事業で研究開発を進める3つの研究開発項目について、以下の成果を達成した。</p> <p>研究開発項目①「ソーラー水素等製造プロセス技術開発（革新的光触媒）」</p> <p>① -a：光触媒や助触媒及びこれらのモジュール化技術等の研究開発 水素発生用光触媒シート及び酸素発生用光触媒シートを組み合わせたパラレルセルを作成し、最終目標である太陽エネルギー変換効率 10%を達成した。また、吸収した太陽光エネルギーをほぼ 100%の効率で水素エネルギーに変換可能な紫外光吸収光触媒を世界で初めて開発した。更に、この光触媒を用いて、世界最大となる 100m²規模の光触媒パネル反応器と市販の分離膜モジュール（水蒸気除去用のものを水素酸素分離に転用）を用いたフィールドテストを行い、水素濃度が約 94%の透過ガスを約 73%の回収率で分離可能であることを実証した。</p> <p>① -b：水素分離膜及びモジュール化技術等の研究開発 高透過であるシリル化 CHA 膜と高選択であるシリカ膜を連結したモジュールを試作し、透過側水素濃度 98.0%、水素回収率 90.4%を達成した。これらは、「プロセス上の期待性能」、すなわち、透過側水素濃度を 96%超として爆轟範囲を回避しつつ、水素回収率も 90%超として高効率化することのいずれも満足する結果であった。また、爆発安全性に関する検討を行い、万が一、着火が起こっても火炎が伝播しない消炎構造についての最適化を行った。</p> <p>研究開発項目②「二酸化炭素資源化プロセス技術開発（プラスチック原料等基幹化学品への変換触媒）」</p> <p>メタノール合成に関しては、従来よりもはるかに高性能の反応分離用分離膜を見出したことで、従来プロセスと比較して、建設費・変動費を低減したプロセスでのメタノール合成が可能となることを明らかにした。MTO 合成用ゼオライト触媒に関しては、C₂、C₃、C₄ オレフィンのいずれについても、本PJの最終目標であるリサイクル収率 70%を達成可能な触媒を見出した。特に C₂ オレフィン（エチレン）および、C₃ オレフィン（プロピレン）については、ワンパス収率で 70%以上を達成可能な触媒の開発、という大きな成果が得られた。これは、実用されている MTO 触媒と比較して優れた特性である。</p> <p>反応混合物として生成するオレフィンを分離・精製するプロセス開発については、高性能のオレフィン分離用分離膜を開発した。更に、プロセスシミュレーションにより、従来の精留塔のみを用いた分離方式に対し、精留塔とオレフィン分離膜を組み合わせた分離方式を適用することで、オレフィン分離精製に必要なエネルギーを大幅に削減可能であることを提案した。</p>		
	投稿論文	「査読付き」115 件	
	特 許	「出願済」国内 160 件、外国 57 件、PCT33 件、「登録」国内 44 件、海外 28 件、「実施」0 件	
	その他の外部発表（プレス発表等）	約 400 件（プレス発表 11 件）	
4. 成果の実用化に向けた取組及び見直しについて	<p>本事業では、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つの基盤技術を用いた新規化学プロセスについて、工業化を目的とした大型実証等の試験設備の設計に必要な基盤技術を確認することを実用化と定義し、開発を進めた。</p> <p>本プロジェクトで達成された研究成果の社会実装を目的として、グリーンイノベーション基金（GI 基金）事業プロジェクトの一環として、（CO₂等を用いたプラスチック原料製造技術開発／アルコール類からの化学品製造技術の開発／「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」および「CO₂等を原料とする、アルコール類及びオレフィン類へのケミカルリサイクル技術の開発」が採択され、2022年3月より、実用化に向けた取り組みを開始した。</p>		
5. 基本計画に関する事項	作成時期	2013年2月制定	
	変更履歴	<p>2014年9月プロジェクトリーダーの委嘱に伴う改訂。 2015年2月評価制度の見直しに伴う改訂。 2015年6月「技術調査の実施」の追加、法人名称等の変更に伴う改訂。 2015年11月研究開発項目②の事後評価時期の変更に伴う改訂。 2017年1月研究開発項目②の研究開発内容の拡充に伴う改訂。 2017年5月プロジェクトリーダーの所属機関名変更に伴う改訂。 2018年4月NEDO担当部署の変更及びプロジェクトマネージャー変更に伴う改訂。データ・数値の更新。 2019年9月プロジェクトマネージャー変更に伴う改訂。プロジェクトリーダー役職名、所属変更に伴う改訂。データ・数値の更新、和暦を西暦表記に変更。 2021年3月プロジェクトマネージャー変更に伴う改訂。</p>	