

「二酸化炭素原料化基幹化学品製造プロセス技術開発」基本計画

材料・ナノテクノロジー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

①政策的な重要性

日本の化学産業は出荷額約44兆円、従業員数約88万人を擁する我が国の一大産業であり、高い技術力と国際競争力を誇る製品を多数生み出している。その一方で、同産業は基幹化学品から機能性化学品まで様々な化学品の原料としてナフサ等の化石資源を大量に消費し、二酸化炭素(CO₂)排出量においても産業分野の約22%を占めている。近年、地球温暖化が懸念され、輸入に頼る石油の価格上昇や枯渇リスクに直面する中、化学品製造における革新的イノベーションの実現により、こうした課題を乗り越えていくことが急務になっている。将来的に化石資源の供給リスクを克服し、かつ、持続可能な低炭素社会を実現していくためには、太陽エネルギー等の非化石エネルギーを活用し、化石資源に頼らない水素の製造技術やCO₂を炭素源とする化学品の製造技術が必要であり、本事業はこれら技術の確立を目指すもので、我が国の化学産業の将来の成長の糧となるイノベーションを創出する未来開拓研究プロジェクトの一つとして実施されているものである。

このような背景の下、本事業は、「環境エネルギー技術革新計画」(2013年9月13日、内閣府総合科学技術会議)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。

②我が国の状況

人工光合成は、太陽光の光エネルギーを光触媒等によって化学エネルギーに変換するプロセスと、さらに化学エネルギーを有機物等の貯蔵物質に変換するプロセスの二つから成る。化学エネルギー変換プロセスでは、我が国において世界に先駆けて1969年に酸化チタン電極への紫外線照射で水が水素と酸素に分解されるという“本多-藤嶋効果”が見出されて以降、光エネルギーから化学エネルギーへの変換効率の向上を目指した光触媒材料の研究開発が実施されている。また、人工光合成の貯蔵物質変換プロセスとしては、近年、光エネルギーから変換された化学エネルギーの媒体である水素イオンや電子等を用いてCO₂を還元し、ギ酸、メタン、メタノール等の有機物の高効率な合成を目指した研究が実施されている。

③世界の取組状況

海外においても、長期的視野に立って、人工光合成プロセスの実用化により化石資源からの脱却を目指した研究開発が進められている。米国では、同国エネルギー省の「エネルギー・イノベーション・ハブ」プログラムの下、人工光合成ジョイントセンター（JCAP）が設立され、太陽エネルギーを化学燃料に変換する技術の商用化を目指した研究開発が開始されている。

人工光合成プロセスに関する技術開発は、世界的に見てもまだ要素技術の基礎研究の段階であり、実用化の際に最も重要となる光触媒の太陽エネルギー変換効率については、現段階において植物の効率（0.2～0.3%）と同程度である。本事業は、光触媒の太陽エネルギー変換効率を実用化が可能なレベルとなる10%に高めることを目標の一つとし、同時に開発する他の要素技術も融合して、太陽エネルギーによる水分解で得られる水素とCO₂を原料とした基幹化学品の合成プロセスの開発を実施するものである。

④本事業のねらい

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を製造（ソーラー水素）し、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。

(2) 研究開発の目標

①アウトプット目標

本事業の終了時及び中間時点におけるアウトプット目標は以下のとおりとする。

【最終目標】

研究開発項目①ソーラー水素等製造プロセス技術開発

- ・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。
- ・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。

研究開発項目②二酸化炭素資源化プロセス技術開発

- ・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】

研究開発項目①ソーラー水素等製造プロセス技術開発

【2014年度末】

- ・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。
- ・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。

【2016年度末】

- ・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。
- ・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。

【2019年度末】

- ・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。
- ・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

【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。

【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。

【2019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。

②アウトカム目標

上記アウトプット目標を達成することにより、CO₂排出量の削減と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。

本事業の成果を適用し、2030年時点で2009年時の石油由来のC₂～C₄オレフィン製造量の2割である250万トン/年を製造することを想定している。これは、オレフィン出荷額として約3,500億円/年規模に相当する。これにより、原料としてCO₂が固定化され、約868万トン/年の削減が期待される。さらに、目的とする単独オレフィンの高収率化製造技術開

発により、約147万トン／年のCO₂削減が期待される。

③アウトカム目標達成に向けての取組

本プロジェクトで開発した成果を基に、プロジェクト終了後に委託先各企業が実用化に向けた検討を行い、事業化する見込みである。NEDOは、実用化が早期に達成されるよう、本プロジェクトの成果目標が着実に達成されるべく進捗管理を行うとともに、必要に応じて、各企業が主体的に実施する実用化に向けた技術開発への支援を行う。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

【委託事業】

研究開発項目①：ソーラー水素等製造プロセス技術開発

研究開発項目②：二酸化炭素資源化プロセス技術開発

本研究開発は、実用化まで長い期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

プロジェクトマネージャーにNEDO材料・ナノテクノロジー部の土井 隆志主査を任命して、プロジェクトの進行全体の企画・管理を担当させ、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。本研究開発は、我が国の将来の成長の糧となるイノベーションを創出する未来開拓研究プロジェクト「革新的触媒」において実施されるものであり、2012年度に経済産業省により、企業、大学等（委託先から再委託された研究開発実施者を含む。）から公募によって研究開発実施者が選定され、プロジェクトの推進を目的とする研究開発組織（技術研究組合等）を構築し、2012年度から委託により実施されている。2014年度よりNEDOが本研究開発の運営・管理を承継するに当たっては、2013年度の進捗状況を踏まえた研究開発内容・計画及び実施体制の妥当性について、外部有識者による審議を含めた評価を行った上で最適な研究開発体制を構築し、委託して実施する。

また本研究事業の研究開発項目①「ソーラー水素等製造プロセス技術開発」においては、大学が有する基盤技術を活用するため、集中研を設置し、大学と企業が一体となって研究を推進することとする。

なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOは研究開発責任者（プロジェクトリーダー）として三菱ケミカル株式会社の瀬戸山 亨エグゼクティブフェロー・Setoyama Laboratory 所長を選定し、各実施者はプロジェクトリーダーの下で研究開発を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理、執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる項目を実施する。

①研究開発の進捗把握・管理

NEDOは、主としてプロジェクトリーダーを通して研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討委員会を組織し、定期的に技術評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

3. 研究開発の実施期間

本プロジェクトの実施期間は2014年度から2021年度までの8年間とし、研究開発項目ごとの実施期間は以下のとおりとする。

なお、本プロジェクトは、2012年度から2013年度までは経済産業省により実施したが、2014年度からNEDOの事業として実施する。

研究開発項目①：2014年度より8年間とする。

研究開発項目②：2014年度より8年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義及び将来の産業への波及効果等について、外部有識者による評価を実施する。

本プロジェクトの中間評価は、経済産業省での事業開始から通算して3、5、8年目に、事後評価を終了年度の次年度に実施する。具体的な評価時期については以下のとおりとする。なお、評価の時期については、当該研究開発に係わる技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

[中間評価]

研究開発項目①：2014年度、2016年度、2019年度

研究開発項目②：2014年度、2016年度、2019年度

[事後評価]

研究開発項目①：2022年度

研究開発項目②：2022年度

5. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

①共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発実施者は、研究成果の広範な導入・普及に努めるものとする。NEDOは、研究開発実施者による研究成果の広範な導入・普及を促進する。

②標準化施策等との連携

本研究開発で得られた成果については、標準化等との連携を図るため、標準案の提案等を必要に応じて実施する。

③知的財産権の帰属

本研究開発の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応を行う。

(3) 根拠法

本プロジェクトは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第一号ロ及び第二号に基づき実施する。

6. 基本計画の改定履歴

- (1) 2014年2月、制定。
- (2) 2014年9月、プロジェクトリーダーの委嘱に伴う改訂。
- (3) 2017年1月、研究開発項目②の開発内容の拡充に伴う改訂。
- (4) 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。
- (5) 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。
- (6) 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。
- (7) 2021年3月、プロジェクトマネージャー変更に伴う改訂。

(別紙1) 研究開発計画

研究開発項目①「ソーラー水素等製造プロセス技術開発」

1. 研究開発の必要性

本開発項目は、水と二酸化炭素(CO₂)等から太陽エネルギーを利用して基幹化学品を製造する本プロジェクトの中で、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、高効率分離膜により、生成する水素を分離・精製する技術を開発するものであり、後段に続くCO₂を原料としたプラスチック原料等の基幹化学品の製造に用いられる水素を製造する重要なプロセスである。

CO₂を原料とした基幹化学品の製造に必須な水素を、化石資源に頼らず製造する方法として、太陽エネルギーを利用した水分解による水素の製造は従来から試みられてきたが、変換効率の向上を図ることによって、実用化を目指す研究としては端緒についたばかりであり、世界最先端の開発となる。

2. 研究開発の具体的内容

太陽エネルギーにより水から水素を製造することを目的に、光触媒や助触媒、水素分離膜、及びこれらのモジュール化技術等の研究開発を行う。

具体的には、光触媒のバンド準位の制御による吸収波長の長波長化や欠陥の少ない触媒の合成、光触媒と助触媒の界面の設計等の研究開発を行うほか、大表面積と物質拡散性を両立するモジュールの設計等を行う。この際、大規模な展開を考慮して希少金属を使用しない元素戦略的な触媒設計を目指す。また、水素分離膜については、より小さい開孔径を有する薄膜の生成機構の解明やそれを踏まえた薄膜合成法等の研究開発や水素を安全に分離可能なモジュールの設計を行う。

これにより、研究開発項目②「二酸化炭素資源化プロセス技術開発」に必要な不可欠な水素等を低コストで安全に製造するプロセス基盤を確立する。

3. 達成目標

【中間目標(2014年度末)】

- ・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。
- ・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。

- ・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。
- ・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。

【最終目標（2021年度末）】

- ・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。
- ・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。

研究開発項目②「二酸化炭素資源化プロセス技術開発」

1. 研究開発の必要性

本開発項目は、水と二酸化炭素（CO₂）から太陽エネルギーを利用して基幹化学品を製造する本プロジェクトの中で、最終製品である基幹化学品を製造する触媒とプロセスを開発するものであり、本開発により、前段のソーラー水素等製造プロセス技術開発により製造される水素の用途が開拓されるとともに、CO₂の固定化が図られる重要なプロセスである。

水素とCO₂から飽和炭化水素を製造することは従来から研究されてきたが、炭素数2～4のオレフィンの製造プロセスの研究は端緒についたばかりであり、世界最先端の開発となる。

さらに、CO₂を原料として目的とする単独オレフィンを高収率に製造するプロセスの開発により、更なるCO₂の化学品への固定化が図られる革新的な化学製造プロセスに展開することが期待される。

2016年度までの研究開発において研究開発項目②の合成ガスから炭素数2～4のオレフィンを効率的に製造する反応-分離プロセス及び触媒の研究開発が得られた。その実用化と更なるCO₂削減を推進するためには、炭素数2、3、4のそれぞれの目的とする単独オレフィンを効率的に製造し、各市場ニーズに対応可能な製造技術の確立する技術開発が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

水素とCO₂からプラスチック原料等基幹化学品を高選択的に製造することを目的に、「合成触媒」及び「反応プロセス」の研究開発、小型パイロットでの実証試験等を行う。

具体的には、触媒の組成探索による炭素数2～4のオレフィン選択性の高い合成触媒の研究開発や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の検討及び小型パイロットでの連続運転による触媒寿命の長期化等の検証等を行う。

2016年度までの研究成果に基づき、さらに、水素及びCO₂由来の炭素から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ことを目的に、「合成触媒」、「合成プロセス」、合成プロセス用の「反応分離膜」の研究開発を行う。

具体的には、水素及びCO₂からメタノール合成を高収率で行うための反応分離膜、反応分離膜プロセスの開発、炭素数2、3、4それぞれの目的とする単独オレフィンの高い選択性を有する合成触媒と反応分離膜開発、シミュレーションによる反応プロセスの最適化検討並びに小型パイロットの連続運転による触媒寿命の長期化等の検証等を行う。

本技術開発により、従来は石油からのみであった化学品原料製造方式にCO₂を原料にした製造方式の多様化にて省エネ、CO₂削減を可能にする炭素数2、3、4のそれぞれの目的とする単独オレフィンを高収率に製造する基盤技術を確立する。

これにより、研究開発項目①のソーラー水素等製造プロセス技術開発の研究開発と組み合わせることで、石油資源に依存しないCO₂と水を原料とした太陽エネルギーによるプラスチック原料等の基幹化学品を製造するプロセス基盤を確立する。

3. 達成目標

【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。

【中間目標（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（2019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（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。

(別紙2) 研究開発スケジュール

研究開発項目	個別テーマ	2012年度		2013年度		2014年度		2015年度		2016年度		2017年度		2018年度		2019年度		2020年度		2021年度	
		経産省直執行 ← 中間評価 ↓ NEDO → 中間評価 ↓ 事後評価 ↓																			
研究開発項目① ソーラー水素等製造プロセス技術開発	①-a 光触媒	変換効率1%				変換効率3%				変換効率7%				変換効率10%							
		光触媒の開発／合成法の探索				光触媒材料候補の絞り込み／合成法の見極め				光触媒材料系の大量合成方法の検討／光触媒の高効率化の検討				光触媒材料系の実用的合成プロセスの検討／光触媒の高効率化と長寿命化の検討							
		助触媒の開発／光触媒への担持法の検討				助触媒の開発／光触媒への担持法の確立				光触媒・助触媒界面の最適化検討				光触媒・助触媒界面の長寿命化の検討							
	光触媒モジュール化の技術課題の抽出				光触媒モジュールの構造・仕様 の明確化				小型バッチ式光触媒モジュールの設計・試作				小型フロー式光触媒モジュールの設計・試作／大面積化と耐久性の検討								
	①-b 分離膜	各分離膜材料(方式)における分離膜性能の向上				候補分離膜材料における分離性能の向上				モジュール向け分離膜作製技術の検討				モジュール向け分離膜作製技術の確立／耐久性の検討							
		各分離膜方式における課題の抽出				各分離方式におけるモジュール構造、仕様 の明確化				モジュールベースでの安全な水素分離技術の確立				分離膜モジュールの耐久性向上／光触媒モジュールとの連結適合性の検討							
研究開発項目② 二酸化炭素資源化プロセス技術開発	②合成触媒	合成触媒とプロセスの検討				小型パイロットを用いた検討				目的オレフィン合成触媒・プロセス／高効率反応分離プロセスの検討				目的オレフィン小型パイロットの確立							