

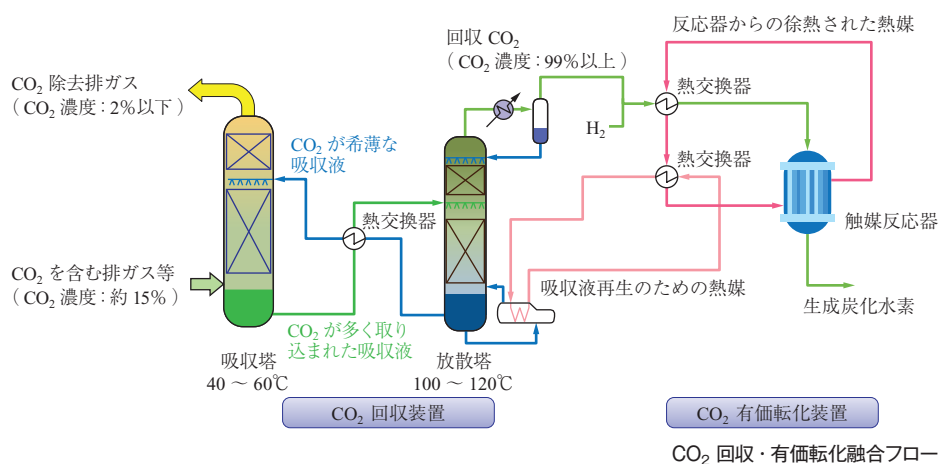
# カーボンリサイクル技術による 脱CO<sub>2</sub>・炭素循環型社会の 実現への加速

## CO<sub>2</sub> 回収技術と CO<sub>2</sub> 有価転化技術の融合

地表にあるさまざまなガス中に含まれる CO<sub>2</sub> を炭素源として、燃料や化成品などの有価物に変換し活用する、炭素循環型社会の実現を加速するために、CO<sub>2</sub> 回収技術・有価転化技術を融合させ、経済性に優れたシステムを提案する。

株式会社 IHI  
資源・エネルギー・環境事業領域  
事業開発部

遠藤 巧



### はじめに

世界的な脱CO<sub>2</sub>の流れのなかで、炭素循環型社会の実現は喫緊の課題となっている。その手法の一つとして、CO<sub>2</sub>を炭素源として捉え、水素(H<sub>2</sub>)との反応によりさまざまな有価物(炭化水素)に変換するカーボンリサイクルが注目されている。IHIグループでは、CO<sub>2</sub>の回収技術だけでなく、水素を効率的に製造する技術、また、CO<sub>2</sub>と水素との反応により有価物に変換する技術の開発を行っている。これら技術の融合により、究極的には、地中から採掘される化石資源を炭素源とするのではなく、すでに地表にある炭素源(バイオマスエネルギー源として使用した際に排出

されるCO<sub>2</sub>や大気中CO<sub>2</sub>)を利用することで、大気中CO<sub>2</sub>が増加しない世界を実現することが可能となる。

CO<sub>2</sub>を燃料であるメタン(CH<sub>4</sub>)に変換するメタネーションでは、都市ガスの主成分であるメタンガスを製造するので、既存の生活インフラ(例えば都市ガス網や家庭用ガスコンロ)をそのまま利用しながら、結果的にCO<sub>2</sub>の排出削減が可能となる。つまり、一般家庭や工場でも特別な設備を導入することなく、CO<sub>2</sub>排出削減に貢献することが可能となる。しかし、メタネーションのコストは、CO<sub>2</sub>の回収コスト、水素の供給コストの影響により天然ガスよりも大幅に高くなる事が分かっており、コスト低減のための施策が必要

となる。そこで、CO<sub>2</sub> 回収設備とメタネーションのような有価転化設備とを系統的に融合することで、全体コストを低減する手法を提案する。

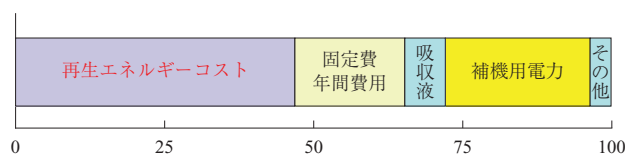
また、プラスチックの原材料になる低級オレフィンに変換する技術（オレフィン化）についても詳述する。低級オレフィンとは、2～4 個の炭素がつながった（そのうち最低一つは2重結合）化学構造をしており、多くの主要基礎化学品の原料となるエチレン、プロピレン、ブテンなどのことを示す。この低級オレフィンからは、ペットボトル、ポリエステル繊維、発泡スチロールや合成ゴムなどが製造される。一般的にはオレフィンがナフサ（軽質油）の分解によって製造されるが、CO<sub>2</sub> を原料とすることでカーボンフットプリント（原料や生産工程などで発生する CO<sub>2</sub> 排出量）の低いプラスチックを作ることが可能となり、循環型社会の実現に貢献できる。

## CO<sub>2</sub> 回収技術と有価転化技術の融合

多くの CO<sub>2</sub> 回収技術のうち、化学吸収法は、アミンなどのアルカリ性水溶液を吸収液とし、化学的な吸収・放出反応を利用して CO<sub>2</sub> を燃焼排ガスなどから回収する優れた技術である。具体的には、CO<sub>2</sub> 回収・有価転化融合フロー図に示すように、発電所からの燃焼排ガスを「吸収塔」に誘引し、CO<sub>2</sub> が希薄な吸収液と接触させ、排ガス中の CO<sub>2</sub> を選択的に吸収液に取り込ませる。次いで、この CO<sub>2</sub> が多く取り込まれた吸収液を「放散塔」に送り、加熱することで吸収液に取り込まれた CO<sub>2</sub> を気体として分離し、冷却・圧縮させることで、99%以上の高純度な CO<sub>2</sub> を回収することができる。この回収工程のなかで「放散塔における吸収液から CO<sub>2</sub> を分離するために要するエネルギー（再生エネルギー）の消費」が、CO<sub>2</sub> 回収コスト構成費図に示すように、全体コストの約半分を占め、経済的に大きなインパクトを与えている。

そこで、IHI では再生エネルギーの低減技術を開発し、パイロットプラントにて、従来プロセスから再生エネルギーコストを約 40%低減可能であることを示した。

CO<sub>2</sub> 回収装置単独では、CO<sub>2</sub> 回収の再生エネルギーを外部システムから入手する必要があるが、CO<sub>2</sub> 回収と有価転化を融合したプロセスにおいては、有価転化



(注) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成 14 年度調査報告書  
「地球温暖化対策技術開発に関する調査 二酸化炭素分離・回収技術に関する調査研究」を基に作成

CO<sub>2</sub> 回収コスト構成費 (%)

反応で発生する熱を CO<sub>2</sub> 回収の再生エネルギーとして利用することが可能である。例えば CO<sub>2</sub> 回収装置とメタネーション装置を組み合わせたプロセスの場合、CO<sub>2</sub> 回収装置で回収した CO<sub>2</sub> を水素と共にメタネーション反応器に導入し、反応器内で CH<sub>4</sub> を製造する。本反応では次の反応式に示されるように CO<sub>2</sub> 1 mol あたり 165 kJ の熱が発生する。



一方で CO<sub>2</sub> 回収装置での CO<sub>2</sub> の回収には外部からのエネルギーが必要となるが、この値がメタネーション反応に伴う発熱量より小さい場合、CO<sub>2</sub> 回収装置とメタネーション装置を融合させることで、実質的に外部からの熱（蒸気）を必要としないプロセスが可能となる。IHI が開発した CO<sub>2</sub> 回収装置における再生エネルギーの低減技術を適用した場合、十分に熱自立を達成でき、プロセス全体の効率化、大幅な運転コストの低減が可能となる。

なお、水素製造にも熱エネルギーを利用するプロセスがある。CO<sub>2</sub> 回収・水素製造・有価転化全体プロセスのなかで熱エネルギーを効率的に利用することで、さらなる低コスト化も期待できる。

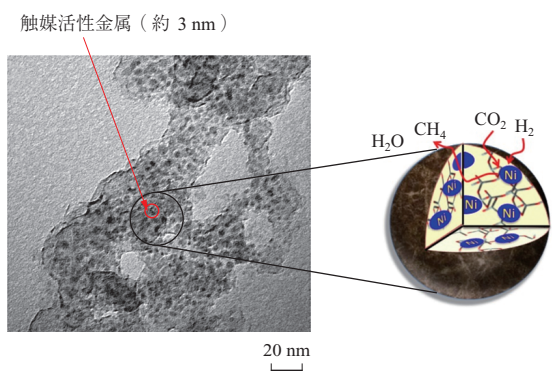
## CO<sub>2</sub> の燃料化技術 ～メタネーション～

IHI グループでは、有価転化技術の開発に先行して CO<sub>2</sub> 回収技術の開発を行ってきており、酸素燃焼技術や前述のアミン吸収法の実証を完了している。もともとは回収した CO<sub>2</sub> の行き先として、地下貯留することを想定して大型化などの開発を行ってきた。しかし、経済性への課題に加え、政策や制度、パブリックアクセプタンス（地域住民の理解と容認）に関しても解決すべき課題が多くあり、解決には時間がかかるものと想定している。そこで、回収した CO<sub>2</sub> を地下貯留するのではなく、有価物に転換、利用する技術が

必要となっており、その一つとしてメタネーションが注目されている。

IHI グループでは、石炭やバイオマスをガス化することで製造した合成ガス（シンガス： $H_2$  および  $CO$  の混合ガス）をメタンに変換する触媒技術を開発した。本技術をカーボンリサイクルに応用するため、排ガス中に含まれる  $CO_2$  を回収し触媒の存在下で  $H_2$  と反応させ、メタンガスを製造する技術の開発を行っている。この技術により、化石燃料利用（例えば火力発電所や製鉄所）から発生した  $CO_2$  を、メタンガスに変換し、既存の都市ガスパイプラインへ導入すれば、一般家庭や工場などで広く  $CO_2$  の排出を削減することが可能となり、炭素循環に一歩近づくことが可能となる。

この研究開発を加速するため、2011年にシンガポール A\*STAR（Agency for Science, Technology and Research：科学技術研究庁）傘下の化学工学研究所



IHI-ICES 開発触媒写真と模式図  
 （出典：<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.03.003>）

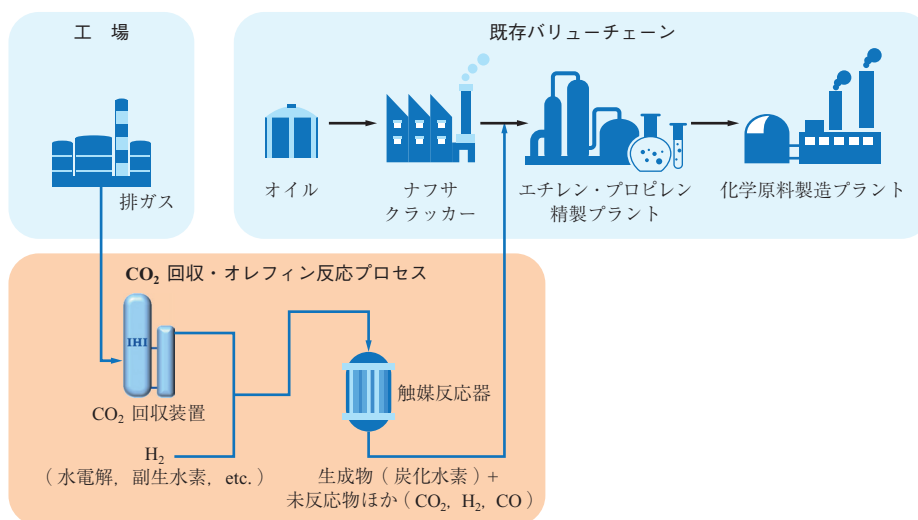
ICES（Institute of Chemical and Engineering Sciences）と共同研究を始め、高活性で長寿命な触媒を開発した。シンガポールおよび IHI 横浜工場内の試験装置でこの触媒のさらなる評価を終え、2020 年度には  $CO_2$  フリー水素を活用した研究を推進している、そうま IHI グリーンエネルギーセンターで実証試験を行う予定である。

## $CO_2$ の化学原料化技術 ～オレフィン化～

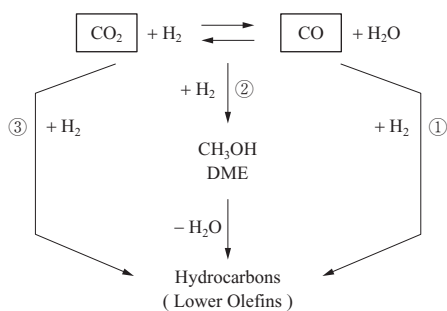
$CO_2$  をさらに価値の高い物質に変換するため、 $CO_2$  を樹脂やプラスチックの原材料である低級オレフィンに変換する技術を開発している。

現在の樹脂やプラスチックの原料であるオレフィン（ナフサ）は、重油を分留して得られるナフサをナフサクラッカーで分解することで製造され、それぞれの化学工場に供給される。これに対し、本技術においては、排ガスから回収した  $CO_2$  で合成したオレフィンを、化石原料由来のオレフィンの代替として、利用することができる。つまり、オレフィン化技術もメタネーション技術と同様に、既存のインフラを大幅に改造することなく、製品のカーボンフットプリントを下げることが可能であり、トータルの  $CO_2$  の排出削減に貢献できる。

$CO_2$  からオレフィン類を製造する方法としては、① 水性逆シフト反応を利用して反応性の低い  $CO_2$  をいったん  $CO$  に変換してから使用する方法（FT 反応：Fischer-Tropsch）、② メタノールやジメチルエーテ



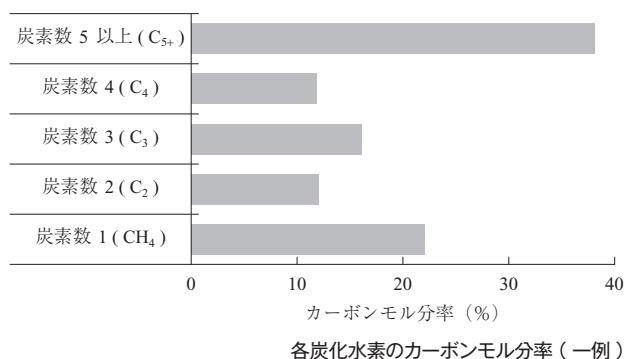
回収  $CO_2$  のオレフィン化フロー



方式	特徴
① FT 反応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・逆シフト反応 + FT 合成</li> <li>→ 反応段数：二段法</li> <li>・CO 濃度上昇に高温条件が必要</li> </ul>
② MTO 反応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・メタノール合成時の圧力 10 MPa と高圧</li> <li>・流動層 2 塔での運転が必須</li> <li>→ 反応段数：二段法</li> <li>・オレフィン選択率が高い</li> </ul>
③ CO <sub>2</sub> -FTO 反応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CO<sub>2</sub> から直接オレフィンへ変換</li> <li>→ 反応段数：一段法</li> <li>・運転圧力が 1.5 MPa で、水素・CO<sub>2</sub> 供給側との親和性が高くオレフィン選択率も高い</li> </ul>

IHI 開発技術

オレフィン製造プロセスと特徴



で開発した改良 Fe 系ナノ触媒での各炭化水素のカーボンモル分率（一例）を示した。本触媒では、生成した炭化水素の約 4 割（カーボンモル分率として 0.4）が C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> の低級炭化水素となっているが、反応温度や圧力のほか、触媒成分により大きくその分布が異なる。また、触媒の還元や活性化条件によっても収率が異なる。したがって、今後は、低級オレフィン収率が最大となるように触媒成分や活性化方法、運転条件などを検討し、実証を重ねていく予定である。

### 有価転化技術の今後の展開

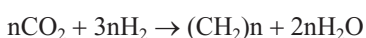
CO<sub>2</sub> の排出を削減するための回収・貯留コストを負担するよりも、CO<sub>2</sub> を炭素源として再度有価物に変換し炭素循環させることで、CO<sub>2</sub> 回収に新たな価値を創造することができる。IHI グループでは、メタネーションやオレフィン化などをそのための代表的な技術として、早期商用化に向け技術開発を継続するとともに事業の開発を行う予定である。同時に、本技術のもう一つの原料である水素の安定供給についても不可欠であると考えている。IHI グループがもつ国内外の再生可能エネルギー資源を有効利用するための技術を活用し、CO<sub>2</sub> の排出削減へのトータルソリューションを提供することで、炭素循環型社会の実現に貢献していく。

問い合わせ先

株式会社 IHI  
 資源・エネルギー・環境事業領域  
 事業開発部  
 電話 (03) 6204-7521  
<https://www.ihico.jp/>

ル (DME) を経由して、それらを脱水する方法 (MTO 反応: Methanol to Olefin), ③ CO<sub>2</sub> を直接水素化する方法などが挙げられる。それぞれの特徴を表に示したが、IHI では、③ CO<sub>2</sub> を直接水素化する方法に属する技術として、Fe 系ナノ触媒を使い CO<sub>2</sub> を一段で水素化して低級オレフィン合成する方法 (CO<sub>2</sub>-FTO 反応: CO<sub>2</sub>-Fischer-Tropsch to Olefin) の開発を進めている。この方式では、CO やメタノールなどを經由することなく、CO<sub>2</sub> から直接低級オレフィン合成することで、設備や運転費用を大幅に低減することが可能であると考えている。なお本触媒についても、メタネーション触媒同様に ICES と共同で開発を進めている。

一般的に、原料に CO を用いた FT 反応において、Fe 系触媒はオレフィン化率が高く、低級オレフィンに対応する炭化水素の合成に高い選択性を有している。したがって、CO<sub>2</sub> からの低級オレフィン合成向け触媒としても期待されている。CO<sub>2</sub> を直接水素化してオレフィン合成する反応は以下で示される。



しかし、実際の触媒反応では、低級オレフィン類だけでなく、より重質なオレフィン類 (上記 n が 5 以上) やパラフィン系の炭化水素 (炭素同士の結合が全て一重結合であるもの) も生成される。IHI-ICES