

# 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)削減を目指す 最新の工業触媒

Advanced Industrial Catalysts for Achieving Carbon Neutrality

- 私たちの想定を上回る速度で進む地球温暖化の原因となっている二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)削減の力ぎを握る「触媒」！
- 本質的なCO<sub>2</sub>削減には、バイオマス起源のCO<sub>2</sub>または大気中で増加したCO<sub>2</sub>を高付加価値利用するCCUが重要！
- 工業用触媒の開発に長年従事、触媒関連の技術コンサルタントおよびNEDOイノベーション戦略センター客員フェローを務める著者によるCO<sub>2</sub>を原料とする触媒反応についての最新調査レポート！

## ＜発行要項＞

- 発行：2026年2月5日
- 著者：室井 高城
- 定価：本体（冊子版）110,000円(税込)  
本体+CD (PDF版) 132,000円(税込)
- 体裁：A4判 並製 238頁
- 編集・発行：(株)シーエムシー・リサーチ
- ISBN：978-4-910581-80-4

## = はじめに =

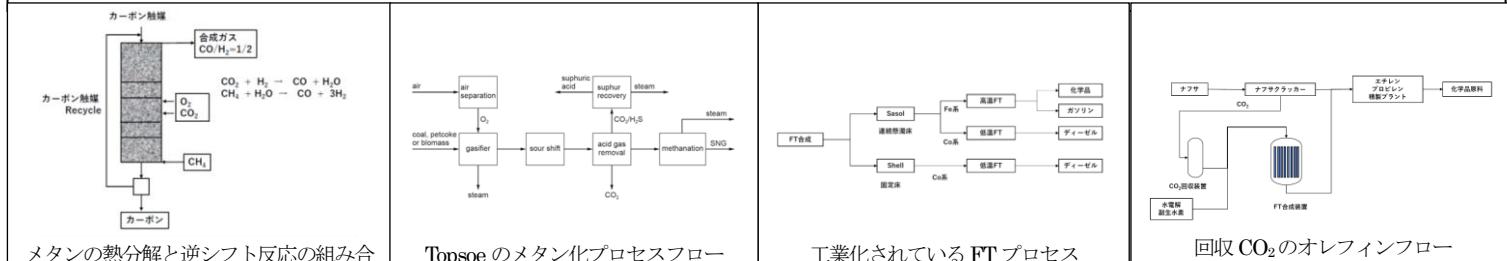
地球温暖化は、私たちの想定を上回る速度で進行している。自然是正直であり、「数十年に一度」のはずの異常気象が数年おき、あるいは毎年のように発生し、世界各地で甚大な被害をもたらしている。さらに、私たち人類よりも脆弱な生態系である野生動物や植物は、その変化をより敏感に受け止めているように思える。

温暖化の主因が、人間活動により増加したCO<sub>2</sub>であることはもはや疑いない。私たちが引き起こした温暖化は、何としても私たちが抑制しなければならない。その方策として提案されるCCS (Carbon Capture and Storage) は、地下や海底へCO<sub>2</sub>を圧入して一時的に貯留する方法であって、本質的なCO<sub>2</sub>削減技術ではない。地殻変動等に伴う漏えいリスクや、将来世代または新興国への負担転嫁という課題を抱える。さらに、化石資源由来の排出ガスを回収して燃料・化学品に再投入しても、最終的に燃焼されれば化石由来CO<sub>2</sub>が再び大気に戻るだけで、削減にはつながらない。

CO<sub>2</sub>削減には、原料のCO<sub>2</sub>はバイオマス起源、あるいは大気中の増加したCO<sub>2</sub>由来のものでなければならない。燃料の大部分は再生可能エネルギーを直接、例えば電力として活用する方向や化学品は非化石由来CO<sub>2</sub>と再エネ水素から合成する方向へと転換しなければならない。最終的にはScope 3まで見据えた排出削減が不可欠であり、そのためには再生可能炭素の確保、なかでもCO<sub>2</sub>の高付加価値利用(CCU)の拡大が鍵となる。

その鍵を握るのが「触媒」である。本稿では、CO<sub>2</sub>を原料とする触媒反応について、できる限り最新の情報を調査した。地球温暖化対策に取り組む研究者や実務家の皆様の少しでもお役に立つことができれば幸いである。

2026年2月 室井 高城



注文書		メルマガ会員の登録	登録済み／登録希望	ご注文・お問合せ
品名	二酸化炭素(CO <sub>2</sub> )削減を目指す最新の工業触媒	価格	本体(冊子版)：100,000円(税込110,000円) 本体+CD(PDF)：120,000円(税込132,000円) ※メルマガ会員は定価の10%OFF	編集発行： <b>(株)シーエムシー・リサーチ</b> 101-0054 東京都千代田区神田錦町 2-7 東和錦町ビル3F FAX: 03(3291)5789 TEL: 03(3293)7053 URL: <a href="https://cmcre.com">https://cmcre.com</a> E-mail: <a href="mailto:order_7053@cmcre.com">order_7053@cmcre.com</a>
会社名		TEL		
部課名		FAX		
お名前		E-mail		
住 所	〒			 ← 二次元コードを読み込むと メール作成テンプレートが 開きます

\*書籍はご注文を受けた翌営業日以降順次発送いたします。請求書は別途送付いたします。\*お支払いは請求書指定口座に納品日の翌月末日までに振り込みでお願いします。

はじめに

**第1編 合成ガス製造触媒****第1章 ドライリフォーミング触媒**

## 1. ドライリフォーミング反応 (DRM)

## 2. DRM触媒

## 2.1 Ru/MgO

## 2.2 Ni/MgO

2.3 LaAlO<sub>3</sub>-CoAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>2.4 CoMgNi/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>2.5 NiO/BaCO<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>

## 2.6 Mg-Al-Mn複合酸化物

2.7 Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC (モノリス)

## 2.8 Ni微粒子内包ゼオライト

2.9 Ni@Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## 2.10 ゼオライトで包摶Ni触媒

## 3. オートサーマルドライリフォーミング

3.1 Rh/La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>3.2 Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## 4. トリリフォーミング (TriReforming)

## 4.1 Ru/MgO

4.2 NiO-Mg/Ce-ZrO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**第2章 逆シフト触媒**

## 1. シフト反応

## 1.1 シフト反応条件

## 1.2 耐硫黄シフト触媒

## 2. 逆シフト反応 (Reverse Water Gas Shift Reaction)

## 2.1 逆シフト反応平衡反応

## 2.2 逆シフト反応触媒

## 2.2.1 発表されている逆シフト反応触媒

## 2.2.2 複合酸化物

2.2.3 K-Mo<sub>2</sub>C<sub>y</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## 2.2.4 Ni系触媒

2.2.5 Cu<sub>25</sub>Ni<sub>75</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>2.2.6 Ni<sub>2</sub>Mg/Spinnel触媒2.2.7 Ni/ZrO<sub>2</sub>コーティング触媒2.2.8 NiO/ZrO<sub>2</sub>**第3章 水素製造触媒**

## 1. 水蒸気改質

## 1.1 工業化改質装置

## 1.2 コンパクトリフォーミングプロセス

## 1.2.1 Velocys

## 1.2.2 eSMR

## 2. オートサーマルリフォーミング

## 3. ターコイズ水素

## 3.1 メタンの熱分解

## 3.2 Hazer社

## 3.3 モノリスマテリアル

## 3.4 Hycamite TCD Technologies

## 3.5 BASFのメタン分解による水素製造

## 3.6 メタンの熱分解と逆シフト反応の組み合わせ

## 4. 光触媒による水素製造

## 4.1 光触媒

## 4.2 ARPChem

## 4.3 一段型触媒

## 4.4 紫外光量子収率ほぼ100%触媒

## 4.5 タンデム型光触媒

## 4.6 半導体光触媒

## 4.7 太陽電池と電解による水素製造

## 4.8 集光型太陽電池

**第4章 水素キャリア製造触媒**

## 1. 水素キャリア

## 2. メチルシクロヘキサン (MCH)

2.1 PtSx/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## 2.2 Direct MCHTM

## 3. ジベンジルトルエン

## 4. アンモニア

## 4.1 アンモニア合成反応

## 4.2 アンモニア合成反応装置

## 4.2.1 多段反応層

## 4.2.2 Topsoe S-300 Basket反応器

## 4.3 アンモニア合成工業プロセス

4.4 Flexible NH<sub>3</sub>合成プロセス

## 4.5 アンモニア合成触媒

## 4.5.1 工業化アンモニア合成触媒

4.5.2 Ru/Ba-Ca(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>4.5.3 Ru/CeO<sub>2</sub>4.5.4 Ru/BaLaCeO<sub>2</sub>

## 4.5.5 Ru/CaFH

4.6 Topsoe SOC<sub>4</sub>NH<sub>3</sub>プロジェクト**構成および内容 1**

## 4.7 アンモニアの電解合成

## 4.8 アンモニア分解触媒

## 5. ギ酸

## 5.1 ギ酸メチル経由

5.2 CO<sub>2</sub>と水素から直接製法

## 6. 水素キャリアのエネルギー効率

**第2編 燃料の合成触媒****第1章 メタン製造触媒**

## 1. メタネーション

## 2. メタネーション平衡反応

## 3. メタネーション触媒

## 3.1 メタネーション工業触媒

## 3.2 Topsoe MCR触媒

## 3.3 クラリアント触媒

## 3.4 メタネーションプロセスと触媒

## 4. メタネーションプロセス

## 4.1 Topsoeのメタン化プロセス

## 4.2 開発されているメタネーションプロセスと触媒

## 4.3 Hy2gen Germany プラント

## 5. メタネーション反応の特徴

## 5.1 メタネーション反応発熱曲線

5.2 Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>によるメタン化反応

## 6. グリーンメタン触媒の開発

## 6.1 カナデビア

6.1.1 Ni/ZrO<sub>2</sub>触媒

## 6.1.2 プレーント型構造体触媒

## 6.2 IHI

## 6.3 大阪ガス

## 6.4 クラリアント

## 6.5 東芝

## 6.6 複合酸化物担体

7. 二元機能材料 (DMF) によるCO<sub>2</sub>の回収とメタン化

## 8. 自然燃着火プロセス

## 9. スペイラル型構造体触媒

## 10. バイオガスからメタン

## 11. 発酵法によるメタンの合成

## 11.1 MicrobEnergy社

## 11.2 Electrochaea社

**第2章 LPG合成触媒**1. CO<sub>2</sub>と水素からLPG合成

## 1.1 ハイブリッド触媒

## 1.2 グリーンLPG研究会

## 1.2.1 日本LPG協会

## 1.2.2 グリーンLPG推進協議会提案プロセス

2. COとH<sub>2</sub>からLPG合成触媒

## 2.1 混合ハイブリッド触媒

## 2.2 コアシェル触媒

## 2.3 GTI Energy

**第3章 ガソリンの製造触媒**1. CO<sub>2</sub>と水素からガソリンの製造2. CO<sub>2</sub>と水素からFT合成中間体経由によるガソリンの製造2.1 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-52.2 CO<sub>2</sub>からガソリン実証パイロットプラント2.3 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MCM-223. CO<sub>2</sub>と水素からメタノール中間体経由によるガソリンの製造3.1 In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-52.3

## 4. COと水素からガソリン

## 5. メタノールからガソリン

## 5.1 MTG (Methanol to Gasoline) プロセス

## 5.2 流動床によるMTGプロセス

## 5.3 TIGAS プロセス

5.4 Ru/TiO<sub>2</sub>**第4章 FT合成触媒**

## 1. FT合成

## 1.1 FT合成反応

## 1.2 低温FT合成と高温FT合成

## 1.3 反応温度

1.4 CO<sub>2</sub>の影響

## 2. FT合成触媒

## 2.1 Co粒子径

## 2.2 Co結晶構造

## 2.3 触媒粒子径

## 2.4 FT合成触媒調製法

## 2.4.1 Sasol触媒

## 2.4.2 Shell触媒

## 2.4.3 OMX法

## 3. Co触媒の劣化

## 3.1 劣化原因

## 3.2 CoFT触媒再生

## 4. FT合成工業化触媒

## 4.1 工業化触媒

## 4.2 Co触媒工業化触媒例

## 4.3 日本のFT触媒

## 5. FT合成生成物

## 6. 工業化FT合成プロセスと触媒

## 7. 小型FT合成装置

## 7.1 マイクロチャネル反応器

## 7.2 Johnson Matthey CANS反応器

## 7.3 Velocys社のマイクロチャネル反応器

## 7.4 INERTECが開発したモジュール型反応器

## 8. アップグレーディング

**第5章 SAF製造触媒**

## 1. 油脂、廃食油からのSAF

## 1.1 油脂からSAFの製造

## 1.2 水素化脱酸素 (Hydrodeoxygenation / Decarboxylation / Decarbonylation)

## 1.3 水素化異性化 (Hydroisomerization)

## 1.4 油脂からSAF製造プロセス

## 1.4.1 Ecofining

## 1.4.2 ISOTERRAプロセス

## 1.4.3 油脂原料SAFのプロセスライセンサー

## 2. バイオアルコールからSAF

## 2.1 LanzaJet ATJプロセス

## 2.2 JetanolTMプロセス

## 2.3 VERTIMASS

## 2.4 BYOGY

## 2.5 ATJ SAFプロセスライセンサー

## 3. メタノールからSAF (MTJ)

## 3.1 MTJプロセス

## 3.2 TOPSOE MTJTMプロセス

## 3.3 UOP eFining

## 4. バイオガスのガス化合成ガス

5. CO<sub>2</sub>からSAF

## 6. FT合成によるSAF

**第3編 化学品製造触媒****第1章 オレフィンの合成触媒**

## 1. 合成ガスからオレフィンの合成

2. CO<sub>2</sub>からオレフィンの合成2.1 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-5

## 2.2 Fe系ナノ触媒

## 2.3 微生物によるエチレン合成

## 3. COからオレフィンの合成

## 3.1 合成ガスからエチレンの合成

## 3.2 COから軽質オレフィンの合成

## 4. メタノールから軽質オレフィンの合成

## 4.1 DMTOプロセス

## 4.2 S-MTOプロセス

## 4.3 UOPのMTOプロセス

## 4.3.1 MTO/OCPプロセス

## 4.3.2 MTO反応機構

## 4.4 メタノールからプロピレン

## 4.4.1 MTPプロセス

## 4.4.2 FMTTPプロセス

## 4.4.3 DTPプロセス

4.5 メタノールからC<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>**第2章 芳香族製造触媒**1. CO<sub>2</sub>から直接芳香族の製造

## 1.1 Si修飾H-ZSM-5

1.2 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とZSM-5のハイブリッド触媒2. CO<sub>2</sub>からp-キシレン2.1 ZnAlO<sub>x</sub>とSi修飾H-ZSM-5の混合触媒2.2 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H-ZSM-5@S1カプセル触媒

## 3. COから芳香族の合成

## 3.1 テトラメチルベンゼン

## 3.2 COからp-キシレン

## 4. メタノールから芳香族の合成

## 4.1 MTAプロセス

## 4.2 MTGによる芳香族の製造

## 4.3 メタノールからp-キシレン

4.3.1 Zn-P-ZSM-5表面SiO<sub>2</sub>修飾触媒

## 4.3.2 Zn/ZSM-5シリケートコーティング触媒

**第3章 メタノール合成触媒**

## 1. メタノール合成反応

1.1 CO<sub>2</sub>によるメタノール合成

## 1.2 メタノール合成反応機構

## 構成および内容 2

1.3 活性低下原因	1.1.1 CeO <sub>2</sub>	6.4 エタノールとエチレンから芳香族
1.4 Cu触媒の触媒毒	1.1.2 2-ピコリンの脱水	7. バイオエタノールからp-キシレン
2. メタノール合成触媒	1.1.3 工業化プロセスの提案	8. エチレンからプロピレン
2.1 CO <sub>2</sub> 原料メタノール合成触媒	2. プロピレングリコール、ジメチルカルボネート併産法	8.1 CHA型ゼオライト
2.2 メタノール合成触媒の製法	2.1 青島アスピットケミカル (Qingda Aspirit Chemical)	8.2 バイオエチレンからメタセシス反応によるバイオプロピレン
2.3 メタノール合成触媒のスタートアップ	2.2 遼寧奥克社	9. バイオエチレンから芳香族
3. 各社開発触媒	3. COからDMC (ジメチルカルボネート)	第9章 機能化学品合成触媒
3.1 RITEとNITE開発触媒	第7章 エタノール合成触媒	1. CO <sub>2</sub> から誘導できる化学品
3.2 三井化学	1. CO <sub>2</sub> からエタノール合成平衡収率	2. CO <sub>2</sub> からC <sub>3</sub> アルコール
3.3 三菱ガス化学触媒	2. CO <sub>2</sub> と水素からエタノールの合成	3. 尿素誘導体の合成
3.4 Johnson Matthey (JM)	2.1 FeCuZnKによるエタノール合成	3.1 CO <sub>2</sub> の回収アミン
3.5 Topsoe	2.2 PdCuNPsによるエタノール合成	3.2 カルバミン酸アンモニウム塩
3.6 クラリアント	2.3 Na-Fe@CとK-CuZnAl混合触媒	4. ジエチルカルボネート(DEC)
4. メタノールプロセスライセンサーと触媒	2.3.1 混合触媒特性	5. MEG (モノエチレングリコール)
5. CO <sub>2</sub> からメタノール合成工業化プラント	2.4 蔗類によるCO <sub>2</sub> からエタノールの合成	6. アクリル酸
5.1 Carbon Recycling International (CRI)	2.5 水素菌によるエタノール合成	6.1 CaRLa (Catalysis Research Laboratory)
5.2 世界のe-Methanol Plants	3. COと水素からエタノールの合成	6.2 BASFによるアクリル酸
6. 新規メタノール合成触媒	3.1 過去の開発触媒	7. イソシアネート
6.1 In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZrO <sub>2</sub> 触媒	3.2 Rhによるエタノール合成	第4編 ポリマー合成触媒
6.2 大気中CO <sub>2</sub> からメタノールの合成	3.3 COから発酵法によるエタノールの製造	第1章 ポリアルキレンカーボネート合成触媒
第4章 メタノール誘導体製造触媒	4. 酢酸の還元	1. ポリアルキレンカーボネート
1. メタノールの重要性	4.1 セラニーズ	1.1 アルキレンカーボネート樹脂
1.1 多様な原料からの合成	4.2 大連化学物理研究所 (DICP)	1.2 ポリエチレンカーボネート(PEC)
1.2 ガソリンブレンド	5. 酢酸メチルの水素化分解	1.3 ポリプロピレンカーボネート(PPC)
1.3 エネルギーキャリアーとしてのメタノール	5.1 DMEの気相カルボニル化	2. ポリアルキレンカーボネートの工業化
1.4 エネルギー貯蔵としてのメタノール	5.2 酢酸メチルの還元	2.1 中国、韓国での工業化
2. メタノールから化学品の合成	5.3 BP SaaBre	2.2 Novomer
2.1 エチレングリコール	5.4 合成ガスからエタノールの一気通貫プロセス	第2章 ポリカーボネート合成触媒
2.2 メタノールからホルムアルデヒド	第8章 エタノール誘導体製造触媒	1. ポリカーボネートポリオール
2.3 トリオキサン	1. エタノールからエチレン	1.1 プロピレンオキサイドによるポリカーボネートポリオール
2.4 POM (Polyoxymethylene)	1.1 エタノールからエチレン工業化プロセス	1.1.1 Covestro社
2.5 グリコール酸	1.2 MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> (SynDol触媒)	1.1.2 Econic Technology
2.6 DME誘導体	1.3 P/ZSM-5	1.2 ジオールとCO <sub>2</sub> からポリオールカーボネート
2.6.1 OME (オキシメチレンエーテル)	1.4 HPA/SiO <sub>2</sub>	1.2.1 Zn(OTf) <sub>2</sub> (Zinc triflate)を用いたポリグリセロールカーボネートの合成
2.6.2 酢酸メチル	2. エタノールからプロピレン	1.2.2 2-シアノピリジンを用いたポリカーボネート合成
2.6.3 DMEから酢酸	2.1 P-ZSM-5	1.2.3 生成水の蒸留分離によるポリカーボネートジオールの合成
2.6.4 酢酸ビニル	2.2 ZrO <sub>2</sub>	2. ジフェニルカーボネート
第5章 DME合成触媒	2.3 CHA型ゼオライト	2.1 エチレングリコール併産法
1. DME (ジメチルエーテル)	3. エタノールからエチレングリコール(MEG)	2.2 フェノールとCO <sub>2</sub> からポリカーボネート
1.1 DMEの用途	4. エタノールからブタジエン	3. ヒドロキシポリウレタン
1.2 DMEの合成レート	4.1 Lebedev法とOstromislensky法	4. DURABIO <sup>®</sup>
2. DME 製造技術	4.2 CuO/SiO <sub>2</sub>	5. 糖からの環状カーボネート
3. 直接法によるDMEの製造	4.3 Zn/Zr/SiO <sub>2</sub>	第3章 PHA合成触媒
3.1 懸濁床と固定床	4.4 Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub>	1. PHBH
3.2 懸濁床プロセス	4.5 ZnZrMFI	2. AirCarbon
3.3 気相固定層プロセス	4.6 HfO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>	3. 世界のPHAメーカーと原料
4. CO <sub>2</sub> からDMEの合成	5. エタノールから酢酸エチル	
4.1 三菱重工	6. エタノールから芳香族の合成	
4.2 カプセル触媒	6.1 脱水素環化	
5. 内部凝縮型反応器によるDMEの合成	6.2 コカ・コーラ社	
第6章 DMC合成触媒	6.3 Virent	
1. DMC (炭酸ジメチル)		
1.1 CO <sub>2</sub> からDMC		

### 著者: 室井 高城

#### [略歴]

1968年 福島高専工業化学科卒業後、住友金属鉱山(株)入社  
1969年 日本エンゲルハルド(株) (旧エヌ・イーケムキャット(株)) 出向  
1970年 化学触媒、自動車触媒の開発に従事  
1982年 Engelhardプロセスのライセンシング、カスタム触媒グループリーダー  
1998年 化学触媒事業部長 (貴金属触媒、ガス精製触媒、石油精製触媒、ファインケミカル触媒、貴金属の回収精製)  
2002年 事業開発部長 (燃料電池・ポリオレフィン触媒)  
2003年 執行役員  
2006年 触媒学会 副会長 早稲田大学 招聘研究員  
2007年 エヌ・イーケムキャット 常勤顧問、神奈川大学 非常勤講師  
2008年 アイシーラボ 設立、BASFジャパン 主席顧問  
2009年 日本ガス合成 執行役員  
2012年 フロンティア・ラボ顧問  
2014年 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) イノベーション戦略センター客員フェロー

#### [表彰]

2005年 触媒学会 功績賞

