

# 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>)削減のカギを握る「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 =

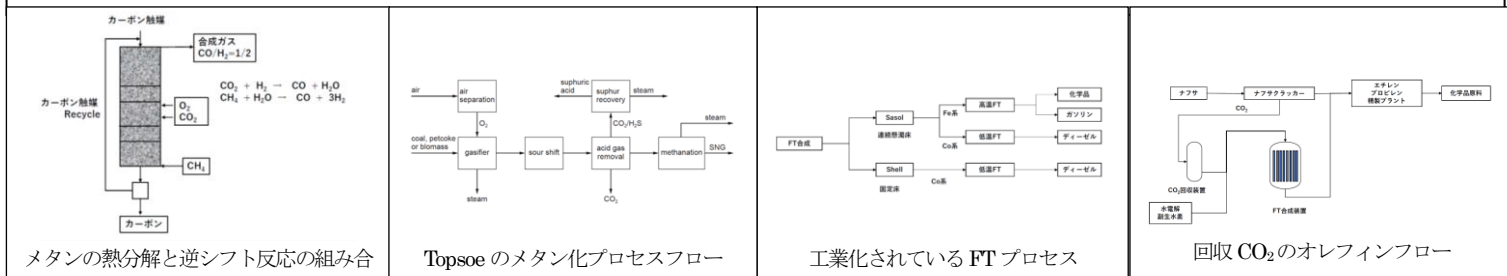
地球温暖化は、私たちの想定を上回る速度で進行している。自然は正直であり、「数十年に一度」のはずの異常気象が数年おき、あるいは毎年のように発生し、世界各地で甚大な被害をもたらしている。さらに、私たち人類よりも脆弱な生態系である野生動物や植物は、その変化をより敏感に受け止めているように思える。

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 <b>FAX : 03 (3291) 5789</b> <b>TEL : 03 (3293) 7053</b> URL : <a href="https://cmcre.com">https://cmcre.com</a> E-mail : <a href="mailto:order_7053@cmcre.com">order_7053@cmcre.com</a>  ← 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
会社名		TEL		
部課名		FAX		
お名前		E-mail		
住所	〒			

\*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をお願いします。

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 ゼオライトで包摂 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/γ-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

- 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. 自然着火プロセス
9. スパイラル型構造体触媒
10. パイオマスからメタン
11. 発酵法によるメタンの合成
  - 11.1 MicrobEnergy 社
  - 11.2 Electrochaeca 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 コアシエル触媒
  - 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>3</sub>O<sub>4</sub>/HZSM-5
  - 2.2 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-22
3. 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ス
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 プロセスライセンス
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>3</sub>O<sub>4</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/OCF 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 FMTP 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

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

## 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 日本エンゲルハルト(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

