

「二酸化炭素 (CO₂) 削減を目指す最新の工業触媒」 目 次

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 LaAlO₃-CoAl2O₃
 - 2.4 CoMgNi/Al2O₃
 - 2.5 NiO/BaCO₃-TiO₂
 - 2.6 Mg-Al-Mn 複合酸化物
 - 2.7 Ni/Al2O₃/SiC (モノリス)
 - 2.8 Ni 微粒子内包ゼオライト
 - 2.9 Ni@Y2O₃
 - 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/La2O₃/SiO₂
 - 3.2 Ni/Al2O₃
4. トリリフォーミング (TriReforming)
 - 4.1 Ru/MgO
 - 4.2 NiO-Mg/Ce-ZrO₂/Al2O₃

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-Mo2C/γ-Al2O₃
 - 2.2.4 Ni系触媒
 - 2.2.5 Cu25Ni75/Al2O₃
 - 2.2.6 Ni2Mg/Spinnel触媒
 - 2.2.7 Ni/ZrO₂ コーティング触媒
 - 2.2.8 NiO/ZrO₂

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/Al2O₃
 - 2.2 DirectMCHTM
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 NH₃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(NH₂)₂
 - 4.5.3 Ru/CeO₂
 - 4.5.4 Ru/BaLaCeO₂
 - 4.5.5 Ru/CaFH
 - 4.6 Topsoe SOC4NH₃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 CO₂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/Al2O₃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/ZrO₂触媒
 - 6.1.2 プレート型構造体触媒

- 6.2 IH
- 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 CO₂ の回収とメタン化
- 8. 自燃着火プロセス
- 9. スパイク型構造体触媒
- 10. バ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 Electrochaea 社

第2章 LPG 合成触媒

- 1. CO₂ 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 H₂ 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. CO₂ と水素からガソリンの製造
- 2. CO₂ 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 Fe304/HZSM-5
 - 2.2 CO₂ からガソリン実証パイロットプラント
 - 2.3 Fe203/MCM-22
- 3. CO₂ 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 In203/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/TiO₂

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 CO₂ 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 JohnsonMattheyCANS 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 LanzaJetATJ プロセス
 - 2.2 JetanolTM プロセス
 - 2.3 VERTIMASS
 - 2.4 BYOGY
 - 2.5 ATJSAF 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 TOPSOEMTJTM プロセス
 - 3.3 UOPeFining
- 4. バイオガスのガス化合成ガス
- 5. CO₂ 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. CO₂ からオレフィンの合成
 - 2.1 Fe304/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 FMTP プロセス
 - 4.4.3 DTP プロセス
 - 4.5 メタノールから C₃, C₄

第2章 芳香族製造触媒

1. CO₂ から直接芳香族の製造
 - 1.1 Si 修飾 H-ZSM-5
 - 1.2 Cr₂O₃ と ZSM-5 のハイブリッド触媒
2. CO₂ から p-キシレン
 - 2.1 ZnAl_{0.5} と Si 修飾 H-ZSM-5 の混合触媒
 - 2.2 Cr₂O₃-H-ZSM-5@Si 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 SiO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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サーと触媒
5. CO₂ 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 In₂O₃/ZrO₂ 触媒
 - 6.2 大気中 CO₂ 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. CO₂ 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 CO₂ から DMC
 - 1.1.1 CeO₂
 - 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. CO₂ からエタノール合成平衡収率
2. CO₂ 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 CO₂ 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 BPSaaBre
 - 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-Al₂O₃/SiO₂ (SynDol 触媒)
 - 1.3 P/ZSM-5
 - 1.4 HPA/SiO₂
2. エタノールからプロピレン
 - 2.1 P-ZSM-5
 - 2.2 ZrO₂
 - 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/SiO₂
 - 4.3 Zn/Zr/SiO₂
 - 4.4 Ta₂O₅/SiO₂
 - 4.5 ZnZrMFI
 - 4.6 HfO₂/SiO₂
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. CO₂ から誘導できる化学品
2. CO₂ から C₃ アルコール
3. 尿素誘導体の合成
 - 3.1 CO₂ 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 Econic Technology
 - 1.2 ジオールと CO₂ からポリオールカーボネート
 - 1.2.1 Zn(OTf)₂ (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-シアノビリジンを用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 CO₂ 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