

化学産業における CO₂ 排出量の削減とメタノールを カギ化合物とするカーボンリサイクルの可能性

Reduction of CO₂ Emissions in the Chemical Industry and the Possibility of Carbon Recycling Using Methanol as a Key Compound

藤田照典^{*1} 市川真一郎^{*2}

1. はじめに¹⁾

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 6 次評価報告書 (2021 年) において、地球温暖化の主たる原因は人類の活動に起因する大気中 CO₂ 濃度の上昇にあると断定された²⁾。

CO₂ は、人類による化石資源の消費により日々大量に排出されている (約 335 億 t, 2019 年・世界)。大気中の濃度は、18 世紀後半の産業革命前に比べて 40% 以上増加し、その結果、世界の平均気温は約 1℃ 上昇した。この僅かとも思える気温上昇により、集中豪雨・洪水や猛暑・熱波、干ばつ、森林火災、海面上昇による浸水などの異変が世界各地で起きている。

上記の報告書によれば、今世紀末には最大で 5.7℃ の気温上昇が起これると予想されている。加速する地球温暖化への対応を誤れば、取り返しのつかない事態に陥る可能性が高い。

このような状況下、日本政府は、2050 年までにカーボンニュートラル (CO₂ の排出量と吸収量の均衡) を実現すると宣言した。日本全体での CO₂ 排出量 10 億 4,400 万 t (2020 年, 国立環境研究所) のうち、光合成により 30% の CO₂ が吸収される²⁾ と

仮定すれば、カーボンニュートラル実現の目安は CO₂ 排出量の 70% 削減 (7 億 3,100 万 t 削減) となる。

実現には、すべての分野 (産業・民生) において CO₂ 排出量の大幅削減が必要である。そのためには、再エネ電力 (水力・太陽光・風力発電など) の主力電源化とともに徹底的な省エネが必須となる。

また、化石資源の燃焼熱利用から電力利用 (再エネ電化) への転換が必要となる。さらに、電化が難しい航空機や大型車両への燃料 (製造時の CO₂ 排出量少) の供給も求められる。一方、CO₂ の資源化 (カーボンリサイクル) という観点から CO₂ を原料とする化学品の製造も期待されている。

本稿では、カーボンニュートラル実現に向けての化学産業における CO₂ 排出量の削減と CO₂ からの化学品の製造について筆者らの考えを紹介したい。併せて、CO₂ からのメタノール合成をベースとするカーボンリサイクルの 1 つの可能性についても触れたい。

2. 化学品製造の原料とエネルギー³⁾

2.1 化学品の重要性と製造原料

合成樹脂・合成ゴム・合成繊維や精密化学品に代表される化学品は、プラスチック製品/包材 (食品トレイ, 包装フィルム, ボトル, コンビニの弁当箱, ゴミ袋など)・自動車・家電/デジタル家電・文房具・スポーツ用品・靴/シューズ・寝具・衣類・洗剤など日常生活に欠かせない製品の重要な原材料である。また、消毒剤/除菌剤・医薬/診断薬・医療器具/医療機器・衛生用品 (紙オムツ, マスク, ゴーグル, ガウン, 仕切り板等) の製造に必要な原材料でもある。従って、コロナを契機として化学品の重要性は増している。

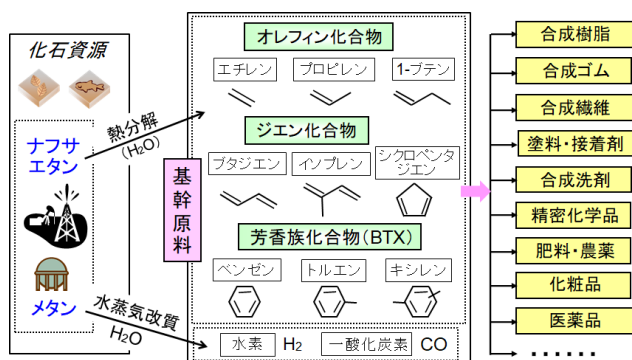


図 1 化石資源を原料とする化学品製造の流れ

*1 中部大学 先端研究センター 特任教授

*2 三井化学(株) 研究開発企画管理部 主席部員

上述の化学品は、現在、化石資源であるナフサ（石油）、エタン（天然ガス、石油ガス）、メタン（天然ガス）を主要な原料として製造されている（図1）。

しかし、将来的には化石資源の有限性とカーボンニュートラルの実現という観点から、化学品の製造原料はバイオマスおよびCO₂にシフトしていくと考えられる。

ここで、バイオマスは再生可能資源ではあるが、嵩張る・水分が多い・収集／運搬／管理の負荷が大きいという問題がある。また、エネルギー利用（バイオマス発電、エタノール合成原料）と競合するため量の確保は容易ではないと考えられる。

バイオマスの量的ポテンシャルのイメージは、「全世界で生産された穀物（トウモロコシ、小麦、米など）27億2,400万t（2021年）を全量エタノールに変換し、エネルギーとして利用しても世界のエネルギー需要の4%しか満たすことができない⁴⁾」である。従って、バイオマスは資源として補完的な位置付けになると思われる。

一方、対照的に、CO₂の資源量は無限と考えてよい。また、競合する用途も事実上存在しない。さらに、CO₂は水素や電力などの還元力があれば再生可能資源（5.および6.参照）となる。従って、化学品製造の主要な原料は最終的にはCO₂になると考えられる。

2.2 化学品製造のためのエネルギー

上述の通り、現状、化学品の主要な原料源は化石資源（ナフサ・エタン・メタン）である。一方、同様に化学品製造のエネルギー源（熱・電力源）としても化石資源（およびその由来物）が用いられている。すなわち、重油・天然ガス・石炭や化学品の製造プロセスで副生する分解ガス、経済価値のない副生物の燃焼熱が熱・電力源として利用されている。従って、化石資源は化学産業にとって原料とエネルギーの両面をもつ有用な化合物となっている。

しかし、カーボンニュートラル実現のためには、化石資源の燃焼熱の利用（燃焼によりCO₂が排出される）から再エネ電力利用（再エネ電化）への転換が必要である。この再エネ電化という流れの中で、化学産業においても化石資源の燃焼を用いない、電力による熱供給を目指す研究開発が進められている（3.参照）。

3. 化学品製造におけるCO₂排出と排出量の削減^{5,6)}

化学品の製造においては、「反応により生成する

CO₂（例：シフト反応 $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ）」と「投入エネルギーに由来するCO₂（製造プロセスにおける加圧・加熱・冷却・攪拌・移液などに必要なエネルギーに由来するCO₂）」が排出されている。日本では、投入エネルギーに由来するCO₂の排出が多く、総排出量の90%を超える（筆者らの推算）。従って、投入エネルギーの少ない化学品製造プロセスの開発は重要である。

現在、化学産業におけるCO₂排出量の50～60%は、化石資源からの基幹原料〔オレフィン化合物（エチレン、プロピレンなど）・ジエン化合物（ブタジエンなど）・BTX（ベンゼン・トルエン・キシレン）・水素・CO〕の製造（図1）に由来するといわれている。これは、化石資源が化学的に安定な炭化水素化合物であること、および基幹原料の生産量が多いことに起因している。

すなわち、化石資源は安定な化合物であるため、その変換反応〔熱分解、水蒸気改質（ $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$ ）、ドライ改質（ $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{H}_2 + 2\text{CO}$ ）〕は通常高温（750～900℃）でなければ起こらず、しかも吸熱反応である。その結果、反応を進行させるためには、大きな熱エネルギーの投入が必要であり、この投入エネルギーに由来する大量のCO₂が排出される。例えば、ナフサの熱分解によるエチレン・プロピレンの製造では、エチレン・プロピレン1t当たり1.2tのCO₂が排出される。

一方、化学品の製造をプロセスという切り口から見ると、分離・精製プロセスに由来するCO₂の排出が多い。特に、蒸留プロセスでの排出が多く、化学産業全体のCO₂排出量の30～40%を占めるともいわれている。従って、反応成績（原料転化率・目的物選択率）の改善とともに、蒸留に代わる低エネルギー消費型の分離・精製技術の開発が求められている。

参考として、図2に現行の化石資源を原料源／エネルギー源とする化学品製造におけるCO₂排出量低減のための着眼点をまとめた。

CO₂の排出量を大幅に低減させるためには、投入エネルギーを削減させる技術開発に加えて、エネルギー源を転換させる技術開発、すなわち化石資源の燃焼熱利用を電力利用（再エネ電化）に転換させる技術開発も必要である。CO₂排出量の多いエチレン・プロピレンや水素などの基幹原料の製造（高温吸熱反応）における電気加熱技術の開発は特に重要である。

BASF（ドイツ）は、再エネ電力により加熱する

ナフサの熱分解反応技術（～850℃）を開発中である。反応管を直接電流で加熱する方法と、反応管傍に置かれた発熱体の放射熱で間接加熱する2つの方式が検討されている。2023年には、6メガワットの再エネ電力を投入し、1時間当たり4tのナフサが処理できるパイロットプラントが稼働する予定である。技術が完成すればCO₂排出量が最大90%削減されるとしている。

一方、TOPSOE（デンマーク）は、再エネ電力を熱源とするメタンの水蒸気改質反応（ $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$ ）技術（約800℃）を開発し2021年にデモプラントを稼働させた。電力で直接加熱されるFeCrAl製の管に触媒を被覆した反応器が用いられており、従来の反応器に比べて大幅に小型化（1/100程度）できる可能性がある⁷。目的化合物をメタノール（ $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ ）としているが水素（ $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$ ）やアンモニア（ $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$ ）の製造も視野に入れている。

近年、水素の重要性から水蒸気改質の代替技術としてメタン分解（ $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}$ ：吸熱反応）による水素の製造が注目されている。当該法ではメタンの炭素が固体炭素として得られる利点があるが、水素の3倍重量生成する炭素の用途開発が必要である。固体炭素は鉄鋼やアルミニウムの製造プロセスに利用することが想定されている。

BASFは、電気加熱を用いるメタンの熱分解反応（1,300℃程度、無触媒）の検討を進めており、2030年までには大型プラントの建設を行う予定である⁸。一方、Hazer（オーストラリア）は、化石資源の燃焼熱の利用ではあるがFe触媒（鉄鋼石）を用いるメタン分解プロセス（800-900℃）を開発しており、2021年に水素100t/年のデモプラントを建設した。将来的に再エネ電力での加熱が可能となれば優れた水素製造法となる可能性を秘めている。

化学品の製造は、一般に、室温～500℃程度の反

応温度（発熱反応・吸熱反応）で実施されている。CO₂排出量の削減のためには、再エネ電力による加熱と共に、反応熱や廃熱を回収して有効利用することが重要である。この観点から、ヒートポンプやケミカルヒートポンプの開発が行われている。

ヒートポンプは、気体を圧縮すると温度が上がり、膨張させると温度が下がるという性質を利用している。電力は熱を移動させる動力として用いられるため、燃焼（天然ガス・重油）に比べてCO₂排出量を大幅に削減させることができる。民生用のヒートポンプ（エアコン・冷蔵庫など）は広く普及しているが、産業用については、食品工場における温水/冷水供給（ボイラーと冷凍機両方の役割を果たす）などに限定されている。化学産業でヒートポンプを広く適用するためには、現状100℃程度である供給温度の高温化が必須となる。現在、160℃程度の供給温度が可能になりつつあるが、更なる高温化のためには、冷媒や圧縮機などの要素技術の開発、高効率なヒートポンプサイクルの構築などが必要である。

ケミカルヒートポンプは、熱移動の駆動源（吸熱・発熱）として可逆的に進行する化学反応を用いる。電力消費が小さく、かつ媒体あたりの熱移動量は大きく、さらに熱エネルギーを物質の形で蓄熱することもできる。ケミカルヒートポンプの開発では、化学反応の選択（反応熱・安全性・媒体の貯蔵容易性など）がカギとなる。

Qpinch（ベルギー）は、リン酸のオリゴマー化反応を利用して80～130℃の廃熱を120～230℃まで昇温できるケミカルヒートポンプの開発に成功している。25kWhというわずかな電力により1tの高温スチームが得られる（例：130℃の廃熱を230℃まで昇温）。2021年には、商用機が欧州で稼働している。

一方、300℃以上に昇温が可能であるMg(OH)₂/H₂O/MgO、Ca(OH)₂/H₂O/CaOなどの無機水和物系システムの開発も進んでいる。例えば、Ca(OH)₂/H₂O/CaO系を用いると高温の廃熱（400℃前後）が必要ではあるが530℃程度まで昇温可能である⁹。今後の技術開発が期待される。

なお、電気が困難な加熱については、再エネ由来の水素やアンモニアの燃焼熱の利用もありうる。しかしながら、本来、水素・アンモニアは化学品の原料として用いるべきものである（燃やすのはもったいない）。従って、水素やアンモニアは発電に使用し、その燃焼または燃料電池の廃熱を用いる（コジェネ

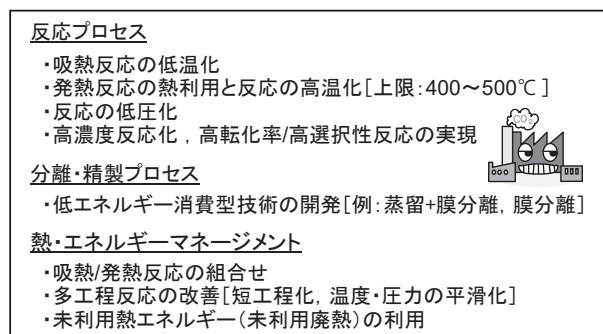


図2 CO₂排出の少ない化学品製造プロセス開発の着眼点

レーション) という工夫が必要である。

4. CO₂ からの化学品製造^{10, 11)}

将来の化学品製造の中核になると考えられる CO₂ を利用する化学品の製造について以下にまとめる。

CO₂ を原料として用いる化学品の合成は古くから行われており、ヒドロキシ安息香酸、尿素、ジメチルカーボネートなどの合成は実用化されている。しかし、これらの実用化は CO₂ の資源化を目的としたものではなく、狙った化合物の合理的な合成法、競争力のある合成法を目指す研究開発の結果、達成されたものである。

CO₂ を利用する化学品の合成は、何れも CO₂ 炭素原子への電子供与的反応がベースとなっているが、CO₂ が“最終的に果たす役割”から (1) COO 源 (付加反応: 例, ヒドロキシ安息香酸), (2) CO 源 (付加脱離反応: 例, 尿素・ジメチルカーボネート) および (3) 炭素源 (還元反応: 例, メタノール・メタン) の3つに分類することができる。

これら3つの役割の中で、化学品合成への展開の広さという観点から (3) の「炭素源」としての利用が将来的に最も重要である。

5. CO₂ の炭素源としての利用¹⁰⁻¹²⁾

5.1 CO₂ を炭素源として利用する前提

CO₂ の還元反応をベースとする炭素源としての利用では、CO・メタノール・エタノール・エチレンなどの化学品原料として重要な化合物が合成できる (図3)。しかし、カーボンニュートラルの観点から、再エネ由来の還元力 (水素・電力) を用いる必要がある。従って、CO₂ を炭素源として利用する前提は、十分な量の再エネ由来の還元力の獲得である。

例えば、日本国内で生産されているエチレン・プロピレン・ベンゼン/トルエン/キシレン [BTX]

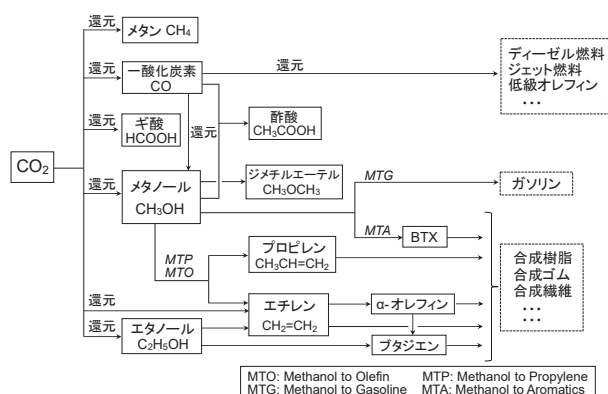


図3 CO₂ の炭素源としての利用/化学品合成への展開

(合わせて 2,326 万 t, 2020 年) を CO₂ と水素から製造するとすれば、必要な水素量は 960 万 t (必要な CO₂ 量: 7,500 万 t) である。この水素の合成に必要な電力 (仮定: 水の電気分解: 電解電圧 1.3V, 電解効率 100%) は、約 4,000 億 kWh であり、日本の年間消費電力の約 40% に相当する。

一方、この水素を水の光触媒分解 [仮定: 太陽エネルギー変換効率 10%, 1日 7.6 時間 標準太陽光 (AM1.5G)] により調達するとすれば、200m × 200m (40,000m²) のプール型の水素製造プラントが 32,000 設備必要となる。土地 (プールだけで横浜市の 3 倍の面積) および水 (8,500 万 t) の確保は容易ではないだろう。

以上から、CO₂ を炭素源として利用するためには莫大な量の再エネ由来還元力 (水素・電力) が必要であることが分かる。実現には、還元力獲得に関わる技術開発と共に大きな投資も必須となる。

5.2 CO₂ からの CO・メタノール・エタノール・エチレン等の合成

将来的な再エネ由来還元力の獲得を前提として、熱化学反応 (水素還元) および電気化学反応 (電解) を用いる CO₂ の CO・メタノール・エタノール・エチレン等への変換反応 (図3) が世界中で精力的に検討されている。

電気化学反応は、水素製造工程が不要であるため、水素を用いる熱化学反応に比べて短工程となる。従って、反応に必要なエネルギー投入量を少なくできる可能性がある。技術開発が先行しているのは熱化学反応である。

図3の中で展開が最も広く、かつ有用性も高いのは CO₂ からのメタノール合成である。メタノールがあればエチレン・プロピレン [工業プロセス: MTO (Methanol to Olefin), MTP (Methanol to Propylene)], ガソリン [工業プロセス: MTG (Methanol to Gasoline)] や BTX [パイロット実証段階: MTA (Methanol to Aromatics)] が製造できる。従って、メタノールは現行のナフサと同等の役割を果たすことができる。

CO₂ の水素還元によるメタノールの合成は、基盤技術 (Cu/ZnO 系触媒) が確立され、実用化のステージに入りつつある。2009 年、三井化学はパイロットプラント (100t/年) による世界初の技術実証を行い、ナフサクラッカーから排出される CO₂ を化学吸収法 (アミン吸収液) により分離回収した CO₂ を原料として、高生産性で高純度 (99.97%) のメタノールが得られることを明らかにしている¹³⁾。

この技術に再エネ由来の水素（CO₂フリー水素）を利用すれば、投入エネルギーに由来するCO₂の排出を考慮しても、メタノール1t当たり0.8tのCO₂が削減可能である（CO₂の絶対量を削減）。この結果は、CO₂と再エネ由来水素から合成したメタノールを用いる化学品製造がCO₂削減の切り札になることを示唆している。

6. カーボンリサイクルの1つの可能性

CO₂を資源としてとらえ、分離・回収し化学品として再利用するカーボンリサイクルは、カーボンニュートラルを実現するためのキーテクノロジーの1つと位置づけられている。

現在、化学品の中で最も生産量が多いのは合成樹脂（プラスチック）である（国内生産量：1,045万t、2021年、日本プラスチック工業連盟）。うち4大汎用プラスチック（ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリ塩化ビニル、ポリスチレン）の生産量は724万t（69%）であり、4大汎用プラスチックの生産だけでも約1,000万tのCO₂が排出されている（筆者らの推算）。

一方、廃棄物としてもプラスチック（廃プラスチック、以下「廃プラ」と表示）が最も多い（822万t、2020年、プラスチック循環利用協会）。従って、廃プラのカーボンリサイクルが実現すればそのインパクトは大きい。

廃プラは、2020年（822万t発生）を例に取れば、マテリアルリサイクル（173万t、21%）、ケミカルリサイクル（27万t、3%）、サーマルリサイクル（509万t、62%）であり、有効利用率86%（710万t）でリサイクルされている。

これらのリサイクルにおいて、マテリアルリサイクルはポリマー物性の低下が避けられない。また、ケミカルリサイクルでは、化学的に安定なプラスチックを分解するために投入されるエネルギー由来

のCO₂排出量は一般に多い。一方、サーマルリサイクルにおいてはエネルギー回収（熱・発電）というメリットがあるものの廃プラ（509万t）の燃焼により約1,600万tのCO₂が排出されている。

先述の通り、CO₂は水素還元によりメタノールに変換可能であり、再エネ由来の水素を反応に用いればCO₂の絶対量が削減できる（-0.8kg-CO₂/kg-メタノール）。また、メタノールをエチレン・プロピレンに変換する技術は既に確立されている（図3）。さらに、エチレン・プロピレンがあればほぼ全てのプラスチックが製造可能である¹⁴⁾。

これらの知見や技術から、筆者らはサーマルリサイクルにより排出されるCO₂の回収／再エネ由来水素還元により製造したメタノールをベースとするプラスチックのカーボンリサイクルが可能であると考えている（図4）。現状のサーマルリサイクルにより生成するCO₂から約500万tのプラスチックがCO₂の排出を抑えて製造できる。

実際の運用においては、分別された廃プラごとに、「マテリアルリサイクル」、「ケミカルリサイクル」、「サーマルリサイクル／CO₂回収・資源化」の3つを投入エネルギー（CO₂排出量）、製品品質、コスト等から総合的に判断して組み合わせることにより、効率の良いカーボンリサイクルの実現を目指すことになる。

7. おわりに

化学産業におけるCO₂排出量の削減とカーボンリサイクルの可能性について筆者らの考えをまとめた。共通するキーワードは、再エネ由来還元力（水素・電力）の獲得である。再エネ由来還元力の重要性は強調しても、し過ぎることはない。

参考文献

- 1) 藤田照典, 市川真一郎, 二酸化炭素の排出量削減と有用化学品への変換, エネルギー・資源, **40** (3), 165-171 (2019).
- 2) Climate Change 2021: the Physical Science Basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report (2021).
- 3) 藤田照典, 化学産業におけるCO₂排出量の削減とCO₂からの化学品製造, MATERIAL STAGE, **22** (7), 1-8 (2022).
- 4) 瀬川幸一編, 石油がわかれば世界が読める, (2008), 朝日新聞出版, 東京.

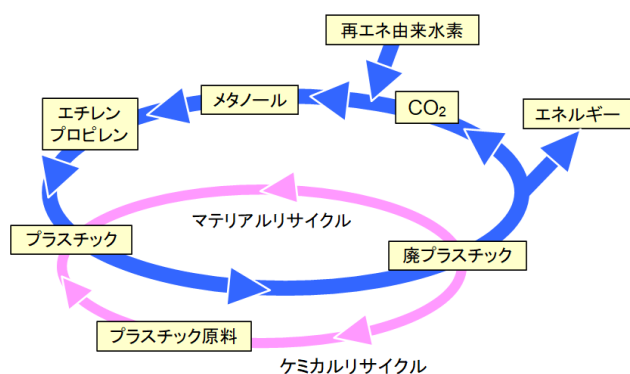


図4 カーボンリサイクルの1つの可能性

- 5) 藤田照典, 市川真一郎, 二酸化炭素利活用技術～CO₂削減に向けた最新研究～, 66-85 (2022), 情報機構, 東京.
- 6) 藤田照典, SDGs の経営・事業戦略への導入と研究開発テーマの発掘, 進め方, 542-553 (2022), 技術情報協会, 東京.
- 7) S. T. Wismann *et al.*, Electrified Methane Reforming: A Compact Approach to Greener Industrial Hydrogen Production, *Science*, **364** (6442), 756-759 (2019).
- 8) A. Bazzanella, D. Krämer (ed.), Technologies for Sustainability and Climate Protection-Chemical Processes and Use of CO₂, 80-87 (2019), BMBF.
- 9) 小林晋, ケミカルヒートポンプ技術, *Panasonic Technical Journal*, **62** (2), 49-53 (2016).
- 10) 藤田照典, 市川真一郎, 二酸化炭素利活用技術～CO₂削減に向けた最新研究～, 146-167 (2022), 情報機構, 東京.
- 11) 藤田照典, 市川真一郎, これからの化学品製造, *エネルギー・資源*, **43** (1), 23-28 (2022).
- 12) 藤田照典, 化学産業における CO₂ 排出量の削減と将来の化学品製造, 研究開発リーダー, **18** (10), 4-10 (2022).
- 13) 村上雅美, 二酸化炭素と水素からのメタノール合成技術, *エネルギー・資源*, **38** (3), 140-143 (2017).
- 14) 市川真一郎, 藤田照典, 将来の化学品原料源の選択と開発すべき技術, *エネルギー・資源*, **38** (3), 126-130 (2017).

著者略歴



藤田照典 (フジタ テルノリ)
 中部大学 先端研究センター／大学院
 経営情報学研究科 特任教授. NEDO
 技術戦略研究センター フェロー. 元・
 三井化学(株) 取締役 研究本部長. 専門:
 触媒化学. 高分子化学. 有機合成化学. R & D マ
 ネジメント. PhD (ルイ・パスツール大学ストラス
 ブール, フランス).



市川真一郎 (イチカワ シンイチロウ)
 三井化学(株) 研究開発企画管理部 主
 席部員. 触媒学会 常務理事. 専門:
 触媒化学. コロイド化学. 博士(工学)
 (東京工業大学).