

触媒技術の動向と展望 2025

— 目次 —

第一編 触媒研究の動向と展望

1. 時評

IACS と ICC

北海道大学 福岡 淳 3

2. 会長寄稿

これからの触媒開発の在り方

2024 年度触媒学会会長・九州大学 石原達己 5

3. 未来展望

元素循環技術の社会への貢献に向けて

光エネルギーで二酸化炭素を変換する触媒技術と将来への期待

豊田中央研究所 森川健志 7

4. 分野別触媒研究の現状と将来動向

[4-1] 触媒材料

(a) 金属触媒

サイズが規定された金クラスター担持触媒の堅牢化と酸化触媒機構の解明

東京大学 増田晋也・佃 達哉 28

(b) 酸化物触媒

ナノ酸化物修飾金属ナノ粒子触媒による選択的脱水素

東京大学 谷田部孝文 38

(c) 錯体・有機合成触媒

有機合成を志向した遷移金属錯体触媒を用いる二酸化炭素変換反応

京都大学 藤原哲晶 48

(d) その他

多元機能型ゼオライト内包金属微粒子触媒

東京科学大学 多湖輝興・木村健太郎 58

京都大学 藤墳大裕

[4-2] 触媒反応

(a) 高分子分野

メチルアルミノキサン系助触媒の構造の相違がオレフィン重合に与える影響

広島大学 田中 亮 68

(b) 資源・エネルギー変換分野

Mo 亜酸化物触媒を用いた CO₂ 水素化反応

大阪大学 桑原泰隆 78

(c) 環境触媒分野	バイオマス由来油脂原料から有用化学品への変換	大阪大学	水垣共雄	88
(d) 光触媒分野	固体光触媒による二酸化炭素の光還元	京都大学	井口翔之・寺村謙太郎	98
(e) 電極触媒分野	電気化学的なアルコールの部分酸化反応	埼玉大学	荻原仁志	110
[4-3] 触媒解析				
(a) キャラクターリゼーション分野	三次元 XAFS-CT 計測による触媒材料のイメージング	名古屋大学	唯美津木	120
(b) コンピュータ利用分野	ハイスループット実験を基盤とした不均一系触媒のための触媒インフォマティクス	北陸先端科学技術大学院大学	中野渡淳・藤原 綾・谷池俊明	128
[4-4] 先端技術				
(1) 電気化学的変換触媒技術:化学品(NH ₃ やアルコール)の電解合成		北海道大学	菊地隆司	137
(2) Power to Liquid による持続可能な航空燃料 (SAF) の合成技術		株式会社 IHI	鎌田博之	147
5. 2024 年の科学技術政策動向および触媒関連国家プロジェクトの状況		産業技術総合研究所	花岡隆昌	154

第二編 工業触媒の技術と動向

1. 国内の触媒工業の概況について		(一社) 触媒工業協会	伊藤宏行	167
2. 触媒が関わる主要プロジェクトの動向			年鑑出版委員会	178
3. 工業触媒注目技術				
[3-1] 塩酸酸化プロセスの触媒開発・工業化と世界展開		住友化学 (株)	関 航平	186
[3-2] 自動車排ガス浄化触媒用高耐熱性ジルコニア多孔体材料の開発		第一稀元素化学工業 (株)	兒玉大志	197
4. 2024 年の海外の触媒技術動向		早稲田大学 アイシーラボ	関根 泰 室井高城	207
5. 2024 年の国内の触媒関連技術動向		三井化学 (株)	市川真一郎	245

第三編 国際会議の記録

1. 国内開催国際会議から

[1] Pre-Symposium of ZMPC 2024 & ISPM 2024

東京科学大学 横井俊之 297

[2] International symposium of Institute for Catalysis 2024

北海道大学 菅沼学史 300

2. 海外開催国際会議から

[1] 国際会議の記録

301

[2] 18th International Congress on Catalysis

大阪大学 中谷勇希 302

第四編 触媒学会活動記録

1. 2024 年度 表彰受賞者および業績一覧 307

2. TiZr 挿入ゼオライトを含む水素化分解触媒の開発と実用化

日揮触媒化成 (株) 松元雄介 308

3. 2024 年度触媒討論会の記録 312

4. 第 133 回触媒討論会注目発表

[4-1] ZSM-5 ゼオライトの骨格 Al 分布が MTO 反応過程に与える影響の実験的観測

東京大学・静岡大学 茂木堯彦 315

[4-2] 反応経路自動探索法を活用した合理的メタン燃焼触媒開発

東京大学 安村駿作 317

5. 触媒 Vol. 66 (2024) 総索引 318

6. 研究会アニュアルレポート

[1] ファインケミカルズ合成触媒研究会 323

[2] 有機金属研究会 325

[3] コンピュータの利用研究会 327

[4] 生体関連触媒研究会 329

[5] 界面分子変換研究会 331

[6] 高難度選択酸化反応研究会 332

[7] 水素の製造と利用のための触媒技術研究会 334

[8] 天然ガス転換触媒研究会 336

[9] 規則性多孔体研究会 337

[10] ナノ構造触媒研究会 339

[11] 燃料電池関連触媒研究会 340

[12] 光触媒研究会 342

[13] 環境触媒研究会 343

[14] 工業触媒研究会 344

[15] 有機資源循環触媒研究会 346

[16] 固体酸塩基点の作用と設計研究会 347

[17] 二酸化炭素変換触媒研究会	348
[18] 先端放射光活用研究会	350
[19] 元素循環に係る触媒技術のための超・研究会	351
7. 各支部活動記録	
[1] 北海道支部活動記録	352
[2] 東日本支部活動記録	354
[3] 西日本支部活動記録	356
8. 2024年触媒学会活動カレンダー	358

第五編 大学・高専・国公立研究機関における研究活動（都道府県別）

旭川工業高等専門学校	363	電気通信大学	403
北海道大学	363	東京科学大学	404
帯広畜産大学	370	東京科学大学（大岡山）	404
室蘭工業大学	370	東京大学	408
弘前大学	371	東京都市大学	414
秋田大学	373	東京農工大学	415
岩手大学	373	東京理科大学	417
石巻専修大学	374	日本大学	418
産業技術総合研究所（東北）	375	早稲田大学	418
東北大学	375	芝浦工業大学	420
産業技術総合研究所（福島）	381	成蹊大学	420
宇都宮大学	381	神奈川大学	420
群馬大学	383	慶應義塾大学	423
群馬工業高等専門学校	384	東海大学	424
茨城工業高等専門学校	385	東京科学大学（長津田）	425
筑波大学	385	防衛大学校	428
物質・材料研究機構	386	横浜国立大学	429
産業技術総合研究所（つくば）	387	信州大学	431
千葉大学	392	山梨大学	435
埼玉工業大学	395	静岡大学	436
埼玉大学	395	沼津工業高等専門学校	437
理化学研究所	396	富山県立大学	437
東洋大学	397	富山大学	438
日本工業大学	397	北陸先端科学技術大学院大学	439
工学院大学	398	福井工業高等専門学校	440
国際基督教大学	399	岐阜大学	441
東京都立大学	399	岐阜薬科大学	442
上智大学	402	産業技術総合研究所（中部）	443
中央大学	402	豊橋技術科学大学	443
帝京科学大学	403	名古屋工業大学	444

名古屋大学	445	岡山大学	481
分子科学研究所	450	海上保安大学校	483
三重大学	450	広島大学	483
立命館大学	451	県立広島大学	486
京都大学	452	産業技術総合研究所（中国）	487
京都工芸繊維大学	458	島根大学	487
京都府立大学	458	山口大学	487
同志社大学	459	山口東京理科大学	488
地球環境産業技術研究機構	461	香川大学	488
大阪大学	461	徳島大学	489
大阪工業大学	467	愛媛大学	491
大阪公立大学	468	高知工科大学	492
関西大学	471	高知大学	493
近畿大学	473	北九州市立大学	494
産業技術総合研究所（関西）	476	九州工業大学	495
奈良女子大学	476	九州大学	495
奈良先端科学技術大学院大学	477	福岡工業大学	499
神戸大学	478	福岡大学	499
神戸薬科大学	479	長崎大学	500
兵庫県立大学	479	熊本大学	501
神戸市立工業高等専門学校	479	鹿児島大学	503
甲南大学	480	琉球大学	503
鳥取大学	480		

執筆者氏名索引

423

編集後記

425

元素循環技術の社会への貢献に向けて

光エネルギーで二酸化炭素を変換する触媒技術と 将来への期待

豊田中央研究所 森川健志

1. はじめに

本稿は、触媒学会の要請に応じて、触媒技術の未来にむけての展望と期待を、筆者らの研究内容とともに解説させて頂くものである。これまでに卓越した先生方が本欄に寄稿されており、それらを継いで筆者が解説するのは大変恐縮であるが、この有難い機会に、筆者の独自の視点で意見を述べさせて頂きたく。まずは最初に、筆者が所属する企業研究所と触媒学会の関わりを述べる。調査が可能であった1995年から現在までに、弊社の研究者たちは、自動車排ガス浄化触媒、メソ多孔体応用、環境浄化用の光触媒、燃料電池用の触媒、電解水素合成、アンモニア合成、二酸化炭素(CO₂)の光エネルギーによる変換、などに関わる触媒とシステムの研究成果を、触媒討論会の場で発表し、またそれらの一部は「触媒」誌に技術解説文を寄稿させて頂いている。またいくつかの委員会や研究会にも関わらせて頂いてきた。これら30年間の研究テーマの動きを俯瞰すると、過去から現在まで、触媒学会との関わりが長期に渡る技術や、すでにほぼ講演会や論文紙上での公開の役割を終えた研究があり、さらに最近では、今後に向けて飛躍的に発展させるべき触媒研究のテーマが増加傾向にある。この様に、企業研究所の視点において重要と捉えた触媒の研究対象は、同時に触媒学会に深い関わりをもち、また時代とともに変化してきた。

本稿では、これらの研究対象の中から、企業利益だけにとどまらず社会全体の利益をも強く意識して筆者らが長期的な視点で推進している、一般に人工光合成とも称される技術の現状とその将来への期待について述べさせて頂きたく。人工光合成はCO₂と水(H₂O)と太陽光エネルギーから、常温常圧付近の温和な条件下において有機物などの有価物を合成する、太陽光エネルギーによるCO₂の資源化であると同時に、エネルギーの分子へのオンサイト貯蔵技術である¹⁻³⁾。

触媒による物質変換とそれに伴うエネルギー貯蔵においては、水の電気分解による水の還元反応で水素を生成する技術が先行しており、複数の企業がすでに製品化している。またこの水電解を、太陽光など再生可能エネルギーによって駆動する技術の開発とその大規模化にも注目が集まっている。例えば国内では、2020年に稼働を開始した世界最大級の水素製造施設、福島水素エネルギー研究フィールド「FH2R」はよく知られる。これは20 MW級の太陽光発電の電力を用いて、これとリンクした10 MWのアルカリ水電解で水素を製造するものであり、定格1,200 Nm³/hを実現するとされている。将来的には、この再生可能エネルギー由来の水素を活用し、製造から利用に至るまで一貫して二酸化炭素(CO₂)フリーの水素供給システムの確立を目指している。この

[4-1-c] 触媒材料 錯体・有機合成触媒

有機合成を志向した遷移金属錯体触媒を用いる 二酸化炭素変換反応

京都大学大学院工学研究科 藤原哲晶

1. はじめに

二酸化炭素 (CO₂) を有機資源へと再生する物質変換法の開発は、CO₂ の排出削減や隔離技術の開発と並び、エネルギー問題の解決ならびに地球環境保全の観点からも重要な研究課題である。均一系遷移金属錯体触媒を活用する CO₂ を C1 源とする有機合成反応の開発は、新しい有機合成反応開発の観点からも CO₂ 有効活用の観点からも注目を集めている¹⁾。均一系錯体触媒の最大の特徴は、様々な有機基質の精密カルボキシル化反応が実現可能な点にある。

遷移金属 (M) を触媒とする CO₂ の利用では、どのようにして金属-炭素 (M-C) 結合をもつ求核的な有機金属化学種を生成させるのが鍵となる。図 1 にはカルボキシル化反応に利用できる 5 つの素過程をまとめた。M-C 結合をもつ化学種は有機金属試薬を用いた金属交換反応によって発生する (図 1a)。また、有機ハロゲン化合物 (C-X) の酸化的付加反応は M-C 結合を構築する有力な手法である (図 1b)。また、低原子価の遷移金属錯体、不飽和炭化水素、CO₂ の酸化的環化反応により、金属を含む環状化合物が得られる (図 1c)。金属活性種 (M-Y, Y = H, C, B, Si) が不飽和炭化水素と反応し M-C 結合をもつ化学種が発生し、ここに CO₂ が挿入されることでカルボキシル化反応が進行する (図 1d)。さらに、炭素-水素 (C-H) 結合の切断を経て M-C 結合を生成するカルボキシル化反応も報告されている (図 1e)。

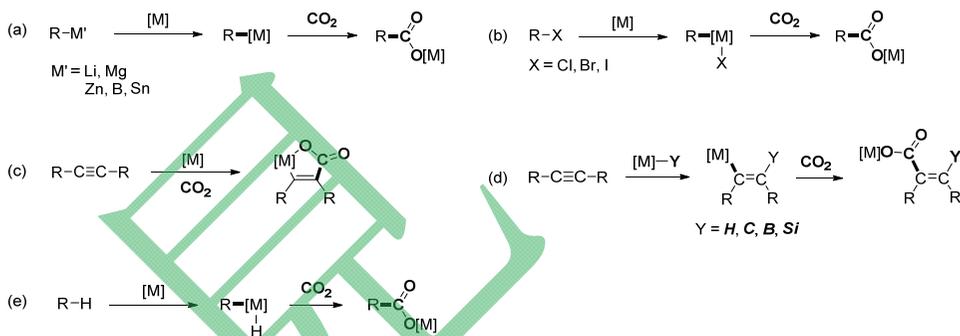


図 1. CO₂ との反応に利用する素反応: (a) 金属交換反応, (b) 酸化的付加反応, (c) 酸化的環化反応, (d) 付加反応, (e) C-H 結合活性化反応

これらの素過程を経てカルボキシル化反応が進行した後に、適切な反応試薬や還元剤を用いることにより活性種を再生することで反応が触媒的に進行する。付加反応や

[4-2-c] 触媒反応 環境触媒分野

バイオマス由来油脂原料から有用化学品への変換

大阪大学 大学院基礎工学研究科 物質創成専攻 水垣共雄

1. はじめに

地球規模での大気中の二酸化炭素濃度増加の抑制と地球温暖化対策として、化石資源に替わり再生可能資源であるバイオマスを利用する、低炭素社会の実現が望まれている。化学品製造の分野においては、これまでの化石資源に依存した物質生産に代わり、二酸化炭素が固定化されたバイオマス由来原料から化学品製造へのシフトが求められている。生産量の多い植物性バイオマス由来の出発物質としては、糖類や油脂類に加えて、非可食性バイオマス（セルロース、ヘミセルロース、リグニン）の利用が注目されている（表 1）。これらの物質は、石油や石炭などの炭化水素に比べて酸素含有量は極めて高く、炭素資源としてみると炭素密度の小さい低品位の炭素資源と言える。そのため、これらを有用な化学品へと変換するためには、酸素含有量の低減や低分子量化のために還元的な変換反応の開発が求められている^{1,2)}。上述した三つの植物性バイオマス由来の出発物質の中で、可食性の糖類については主に発酵法を利用したエタノール製造が知られており、触媒技術としてはエタノール原料からの燃料製造やエチレンなどの基礎化学品製造が注目されている。また、セルロースやリグニンなどの非可食バイオマスの利用については、近年、多くの研究がなされており、例えば種々のポリオール類の選択的水素化分解によって、プラスチック原料となるジオール類への変換などが行われている。一方で、植物性油脂の利用に関しては、古くから油脂化学工業として油脂製造と油脂加工が行われており、食用油や塗料としての利用の他、石鹼、洗剤の製造など、我々の日常生活に近いところで用いられている。油脂の成分であるトリグリセリドは長鎖脂肪酸エステルであり、近年ではメタノールとのエステル交換による脂肪酸メチルエステルをバイオディーゼル燃料として利用している。

表 1. バイオマス由来の主な出発物質と得られる化学品

出発物質	変換技術	生成物
糖類	発酵	エタノール、乳酸、コハク酸など
油脂類	エステル交換 けん化 水素化分解	脂肪酸メチルエステル（バイオディーゼル）、長鎖脂肪酸塩、長鎖アルカン（ジェット燃料）など
リグノセルロース ・セルロース ・ヘミセルロース ・リグニン	解繊 加水分解 水素化分解	セルロースナノファイバー、フルフラール、ヒドロキシメチルフルフラール、バニリンなど

[4-3-b] 触媒解析 コンピュータ利用分野

ハイスループット実験を基盤とした 不均一系触媒のための触媒インフォマティクス

北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科
中野渡 淳・藤原 綾・谷池俊明

1. はじめに

近年、マテリアルズインフォマティクス (MI) と呼ばれる、材料データと機械学習をはじめとする統計手法を組み合わせた新たな方法論によって新規材料の発見や機構の解明を加速させる試みが隆盛している¹⁾。この影響は触媒材料分野にも伝播してきており、様々な研究者によって「触媒インフォマティクス」が展開されている²⁾。実用材料を対象とした MI に共通する難しさとして、予測を行いたい複雑な組成物の分子構造が分からない点が挙げられる。同一組成を持つ物質であったとしても、製造プロセスの違いによって構造が異なり、かつ良く分からない。そのため、統計的な処理を行うにあたって、その性能傾向を説明可能な物理的特徴を割り出すことが難しくなっている。これに加えて触媒は、反応条件などの評価プロセスによっても性能が異なるため、他の材料を対象とした MI よりも統計的な予測が困難になっている。これらの状況を踏まえて本稿では、ハイスループット実験を用いた不均一系触媒における触媒インフォマティクスの最前線について解説する。

1.1 データの問題点と解決策

触媒インフォマティクスを実施する上では、良質な触媒データを訓練データとして用いることが求められる。当該分野の過去論文で報告されている実験データをまとめ、データセットとすることも考えられる³⁾。しかしそのようなデータは、研究者の興味に基づく触媒組成の偏り・記載情報の不統一・ネガティブデータの欠落などを理由として、それを訓練データとした機械学習によって新しい触媒を提案することが難しくなっている⁴⁾。この「データの問題」に対応するため、谷池研究室ではハイスループット触媒スクリーニングシステム (HTS) を開発した (図 1a)⁵⁾。触媒調製の斉一化と高速化のために、全ての触媒を共含浸法によって調製し、ガス混合器、ガス分配器、石英反応管、電気炉、オートサンプラー、四重極型質量分析計 (QMS) によって構成されるハイスループット触媒評価装置によって評価を行う。詳しくは既報を参照していただきたい。

HTS を実装したのち、触媒組成から人間の先見を可能な限り除くため、あらかじめ設定した候補触媒から評価する触媒を無作為に選定し、HTS によって斉一的に評価した触媒反応データセットを作成した (図 1b)⁶⁾。このとき、対象触媒反応としてメタンの酸化のカップリング (OCM) を選択した⁷⁾。OCM は天然ガスの主成分であるメタンを石油化学の基幹材料であるエチレンへと直接変換する触媒反応であり、1982 年に発

[4-4-1] 先端技術

電気化学的変換触媒技術:化学品(NH₃ やアルコール)の 電解合成

北海道大学大学院工学研究院応用化学部門 菊地隆司

1. はじめに

工業的に生産される多くの化学品は、化石資源や化石資源由来の水素 (H₂) を用いて、連続プロセスで生産される。これは、エネルギー的に、かつ、経済的に効率よく目的物質を合成する、という観点から追及されてきたモノづくりの方法で、限りある資源の有効利用と経済的な合理性に基づく。一方で、社会の持続可能な発展に向けて、環境保全や資源の循環的な利用、クリーンな再生可能エネルギーの利用、温室効果ガスの排出抑制といった開発目標が設定され、将来世代のニーズを満たしながら、現代社会のニーズも満たすような開発へと、モノづくりの方向性が変わりつつある。

電解合成法は、酸化反応および還元反応が進行する電極とイオン伝導体とからなる電気化学セル (反応器) を用いて、電気エネルギーを投入することで物質を変換する方法である。身近な例を挙げれば、中学校の理科の授業で実施される、水の電気分解で H₂ と酸素 (O₂) を発生させる実験は、電解合成である。水を熱化学的に分解し H₂ と O₂ を発生させようとするれば、2000℃を超える温度が必要になるのに対し、電気分解では室温でも H₂ と O₂ を発生させることができる。しかも電源のスイッチをオンオフすることで容易に電解反応の起動停止ができる。このように温和な反応条件で、容易に起動停止できることが電解合成の特徴であり、したがって、変動の大きい再生可能エネルギーとの親和性も高いと言える。また、電解合成は燃料電池発電の逆反応であることから、燃料電池同様、電解質の種類によって操作温度やセル形状が変わる。例に挙げた水の電気分解では、電解質は水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液もしくは希硫酸 (H₂SO₄) であり、電極には白金電極が用いられる。このような液体の電解質だけでなく、ナフィオン (Nafion) などの固体高分子電解質膜やイットリア安定化ジルコニア (YSZ) などの固体電解質も用いられる。電解合成の特長として、酸化反応が進行するアノードと還元反応が進行するカソードが電解質を隔てて分かれているため、アノードおよびカソードでの生成物が分離された状態で得られることが挙げられる。選択性良く電極触媒で反応を進行させることができれば、生成物の分離が不要となる。

2. アンモニア電解合成に関する研究報告

近年、再生可能エネルギーを利用し、温和な反応条件で化学物質を合成する電解合成法が報告されている¹⁾。アンモニア (NH₃) の電解合成を例に挙げると、前述の水の電気分解において H₂ が発生するカソード側に、適切な電極触媒を配置し窒素 (N₂) を供給することで NH₃ が生成する。このような電解セルの電解質としては、これまでに燃料電池に利用されている Nafion やバリウムジルコネート (BZY) といった固体電解質、および、水酸化カリウム (KOH) などの水酸化物の水溶液もしくはこれらの溶融

[4-4-2] 先端技術

Power to Liquid による持続可能な航空燃料（SAF） の合成技術

株式会社 IHI 鎌田博之

1. はじめに

気候変動による危機を乗り越えるためには、温室効果ガスの排出を抑えて産業革命前と比べた温度上昇を 2℃以下、可能な限り 1.5℃以下にすることが必要である¹⁾。温暖化の原因である CO₂ は、現在全世界で炭素基準として約 11 Gt-C/y が排出されており、その内化石資源由来の CO₂ は 9.4 Gt-C/y と全体の凡そ 85%を占めている。一方で大気中の CO₂ は海域および陸域で吸収され、その量はそれぞれ 2.5 Gt-C/y と 3.4 Gt-C/y である。大気中の CO₂ 増加量は排出量から吸収量を差し引いた約 5.1 Gt-C/y であり、経時的な CO₂ 濃度増加の原因となっている²⁾。化石資源の使用により排出される CO₂ を減少させるとともに、排出と固定・利用がバランスするいわゆるカーボンニュートラルな状態に移行することが必要である。

現在、国内外の様々な分野でエネルギー源を化石資源から再生可能エネルギーへ転換する取り組みが進んでいる。特に発電分野では再生可能エネルギーの導入が急速に進み、さらに最終エネルギー消費に対する電化の比率が増加することで 2050 年では一次エネルギーの凡そ 50%以上が再生可能エネルギー由来となると予測されている³⁾。2050 年に CO₂ 排出実質ゼロを達成するためには、再生可能エネルギーの大幅な進展が必要なのはいうまでもないが、電化等により簡単に代替できない産業分野もある。ジェット燃料を使用する航空産業も化石資源以外では代替の難しい分野である。航続距離の短いコピューター機やリージョナル機ではバッテリーや水素も燃料源として考えられるが、中・長距離の飛行ではエネルギー密度の高い液体の炭化水素燃料の使用が不可欠である。このような需要に対し持続可能な航空燃料（Sustainable Aviation Fuel, SAF）が注目されている。SAF は航空機向けのカーボンフットプリントの小さい合成燃料の総称である。現在使用されているジェット燃料とほぼ同じ性状であるため、SAF をそのままジェット燃料に混合して使用できる（drop-in）という利点がある。国際民間航空機関（ICAO）は国際航空分野において CO₂ の排出を実質ゼロにする長期目標を掲げており、化石資源から製造されるジェット燃料を SAF や水素で代替することが必要と想定している⁴⁾。現在 ASTM D7566 Annex で規定されている SAF の分類は 8 種類となっている。この内、廃油やバイオマスを原料とした SAF は製造が比較的容易なこともあり急速に供給量を伸ばしているが、一方で将来的な供給余力には限界があり、長期的にはより大量に供給できる SAF が望まれている。CO₂ と再生可能エネルギーによる電力で製造したグリーン水素を原料として液体燃料を製造するプロセスは Power to Liquid (PtL) と呼ばれ、将来の大量な SAF 供給の手段として期待されている⁵⁾。