

冠ラボ「カナデビア—産総研 循環型クリーンエネルギー創出連携研究室」の紹介

昨今、環境・経済が世界規模で急激に変化するとともに、社会で必要とされる技術・製品・サービスはますます多様化したパラダイムシフトが起こっている。企業が顧客満足度の高いサービス・製品を提供し続けるためには、時流に沿える柔軟性を持ち、訴求力ならびに、社会貢献度の高い技術力を示さなければならない。このような背景のもと、カナデビアは、(国研)産業技術総合研究所内(以下、産総研)に連携研究室(通称、冠ラボ)を設立し、産総研が保有する専門的かつ先進的な基盤技術と、自社得意とする応用展開する力を組み合わせたオープンイノベーションを通じ、SDGsや脱炭素化社会の実現に貢献するクリーンエネルギーの創出を推進している。

◆名称：カナデビア－産総研 循環型クリーンエネルギー創出連携研究室(冠ラボ)

◆設立日：2020年3月2日

◆設置場所：産総研つくば西事業所内(つくば市小野川16-1)

	第1期	第2期
実施期間	2020年3月2日～2024年3月末	2024年4月1日～現在
実施内容	下水汚泥からの水素製造プロセスの開発	CO ₂ からの直接LPG合成に関する開発
メンバー	◆Atul Sharma(産総研)	◆望月剛久(産総研)
◆室長	奥村諭*／上原慧*／青木智広	伊藤勉／田所秀之／藤田周／向井友規／越後拓海*／高野裕之*

* 冠ラボ実施期間中に産総研へ特定集中研究専門員として出向した研究員

■ワンチームで取り組む「冠ラボ」

研究機関と企業の共同研究は、取り組む研究テーマに対して実施内容を割り振り、それぞれの研究拠点で個別に実験やデータ解析を行うことが一般的である。明確な役割分担がされており、各々目標や工程を双方合意のもとで決定し、研究開発は進行する。研究機関と企業の双方が目指す最終ゴールに向けては、双方で認識の不一致やズレが生じないように、緊密な連携や情報共有が不可欠である。そのために定期的な会議の設定を行い、情報共有を図るのであるが、互いの内部における業務内容やボリューム、環境、行事の有無は基本的に異なる。また、互いの拠点間の距離が長くなるほど疎遠となりやすく、緊密な連携が常時行われるのは稀である。ウェブツールが発達した昨今、それらを活用した情報共有も当然行われるのであるが、お互いの組織下での情報のやり取りに関するルールの観点から、必ずしもウェブツールを使えば先述の問題点が解決するものではないのが実情である。

冠ラボとは、産総研とパートナーを形成する企業が産総研内に設けた連携研究室である。基盤研究から製品化へと至るまでの計画および、生じる課題を随時共有し、社会実装に向けて研究開発を推進する点は、従来の共同研究と大きな差はない。一方、冠ラボは企業の研究員は特定集中研究専門員として産総研へ出向し、常時または、長期間、連携研究室の中で研究業務を行う。時には産総研のプロパーと一緒に実験を行い、頭を突き合わせてデータ解析に取り組む。タイムリーに議論やアイデア創出を行うこともあれば、得られた実験結果をもとに、次なる方針や行動計画を共に検討し、策定す

ることも多い。このように冠ラボとは、従来の共同研究よりもさらに一歩お互いが近づき、ブレインとなる研究員が一つの研究拠点に集い、ワンチームとなって取り組む研究テーマの社会実装を本気で目指す所である。



2020年3月冠ラボ設立の記念撮影
(日立造船は旧社名)

■カナデビアの取り組み

当社は、2020年に「循環型クリーンエネルギー創出連携研究室」を設立した。名前にも示されている通り、当社が得意とする廃棄物や使い古した資源を、再利用可能な有価値物へと転換し、資源循環を可能とするための技術を以って、人類と自然の調和に挑むことを目指した研究室である。資源循環は、地球環境の保全と持続可能な社会の実現に向けて重要な技術であり、中でもエネルギーに関しては世界規模で注目を集めているテーマである。当社は本研究室の中で二つの資源循環に関する研究開発テーマに取り組んでおり、ここでは各々のテーマについて概要や特徴、研究開発の進捗と今後の展望について紹介する。

ケミカルループ方式による下水汚泥からの水素製造プロセスの開発

下水汚泥は、下水処理場の年間電力消費量の約1.6倍（約120億kWh）のエネルギーポテンシャルを有する質・量ともに安定したバイオマス資源である¹⁾。これまで下水汚泥からのエネルギー回収技術として、消化ガス利用、固体燃料化、焼却排熱利用、ガス化（熱分解）等の取り組みが行われてきているものの、2022年度時点における下水汚泥のエネルギーとしての有効利用率は約26%に留まる。中でもガス化は、生成した燃料ガスを発電利用できるほか、将来的には水素や化学品原料への転換が可能であり、地球温暖化係数の高いN₂O排出量を削減できるメリットもある。しかしながら従前より、各種バイオマスのガス化ではタール発生が度々問題となっていたり、技術普及を妨げる大きな要因のひとつになっている。一方、ケミカルループガス化（CLG: Chemical Looping Gasification）技術は、エネルギー回収のみならずCO₂回収にも展開可能であり、汚染物質の排出低減という観点において、従来よりも大きな利点を有する技術として注目されている。そこで当社と産総研は、冠ラボにおいて3塔式循環流動ガス化炉を用いたCLGによる下水汚泥からの水素製造プロセスの開発を行った。



キーワード

下水汚泥、ケミカルループ、熱分解、水素

■ CLGの特長

バイオマスのガス化技術の課題を解決する有望技術のひとつとして着目したのがCLG技術である。従来のガス化技術は、ガス化炉へ酸素（空気）を直接供給し原料の部分燃焼によって炉の温度維持をしながら燃料ガスを生成させていた。一方、CLGは、ガス化炉と燃焼炉の間を連続的に循環する金属酸化物（酸素キャリア）によって、酸素および炉の温度維持に必要な熱を間接的に供給する新しいガス化技術である（図1）。CLGの特長を下記に示す。

- ① ガス化剤として、空気ではなく金属酸化物及び水蒸気を用いる。そのため、燃料ガスはN₂フリーとなり、従来ガス化技術と比較して発熱量の高い燃料ガスが得られる。
- ② 金属酸化物（還元状態）はタール改質機能を有しており、タール含有量の少ない燃料ガスが得られる。

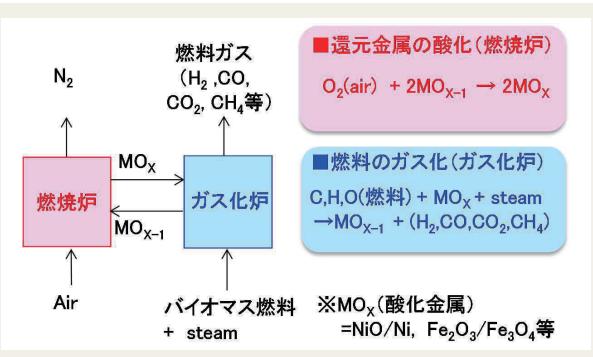


図1 CLG技術の基本概念

- ③ 還元状態の金属酸化物は、燃焼炉にて再生（酸化状態）し循環利用できる。

■ 産総研との共同研究の概要

(1) 3塔式循環流動ガス化炉

CLGを実現するための装置として、3塔式循環流動ガス化炉を開発した（図2）。本ガス化炉は産総研が保有する石炭ガス化流動層技術を、下水汚泥の燃料ガス化用に改良、カスタマイズしたものである。

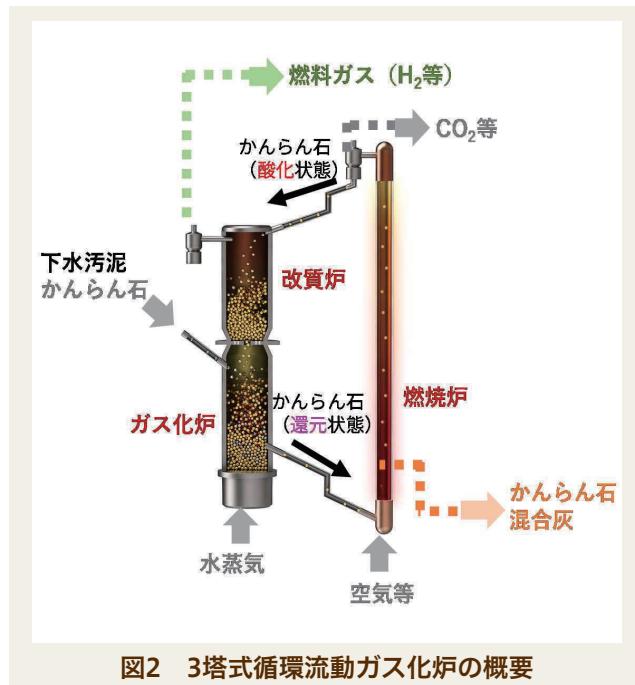


図2 3塔式循環流動ガス化炉の概要

本ガス化炉は、主にスチーム（流動ガス）により下水汚泥をH₂、CO、CH₄、CO₂等を主成分とする燃料ガスとチャーに転換する“ガス化炉”、燃料ガス中のタール成分を分解しH₂、CO等の燃料ガス成分に転換する“改質炉”、チャー燃焼によって熱媒体（循環流動砂）を加熱して改質炉へ熱を供給する“燃焼炉”の3つの流動層から構成されている。流動媒体（熱媒体）としては、一般的な流動焼却炉や流動ガス化炉では、珪砂が使用される。一方、本技術では、流動媒体（熱媒体および酸素キャリア）として、かんらん石を適用した。かんらん石は、マグネシウムや鉄等を主成分とした天然鉱石である。また、かんらん石は肥料原料としても利用されているため、本ガス化改質システムから排出される下水汚泥焼却灰は高付加価値肥料原料として利用できる可能性がある。

(2) これまでの開発成果概要

図3に試験設備の外観と試験の実施内容を示し、これまでの試験実績とその成果を述べる。

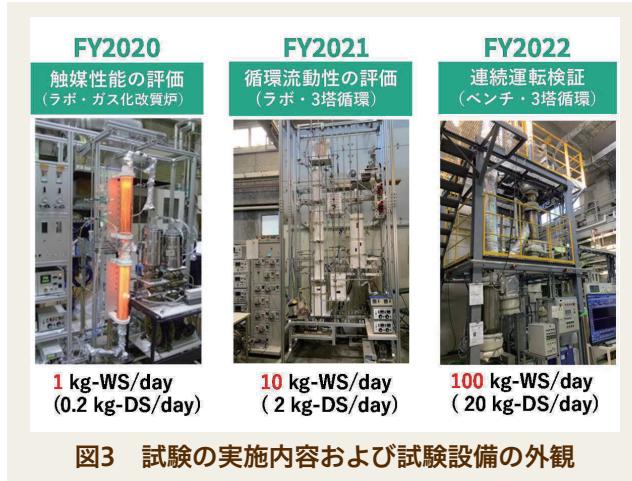


図3 試験の実施内容および試験設備の外観

〈I〉 かんらん石の触媒性能評価 (FY2020)

2020年度には、3塔式循環流動ガス化炉のうちガス化炉+改質炉（燃焼炉を省略）を模擬したガス化改質試験装置を作製し、乾燥汚泥のガス化改質試験を実施した。試験では、従来の熱分解ガス化炉で流動媒体として使用される珪砂、タール触媒効果が報告されているCaO²⁾ および、かんらん石の触媒性能を比較した。図4に試験結果の一例を示す。本図により、かんらん石を流動媒体として利用した場合には、珪砂の場合と比べてタール量を94%削減できること、且つ、燃料ガス回収量を約1.8倍増加させることができ、下水汚泥のガス化反応におけるかんらん石の有効性を確認できた。また、燃料ガス中の合成ガス成分 (H₂+CO) 濃度が約75%の水素リッチガスを製造できることを確認した³⁾。

〈II〉 かんらん石の循環流動性の評価 (FY2021)

2021年度には、3塔式循環流動ガス化炉を模擬した循環試験装置を作製した。既存の循環流動床において

流動砂は主に熱媒体として機能するが、CLGプロセスにおける流動砂（かんらん石）は、熱媒体のみではなく、酸素キャリアとして燃料との化学反応に関与するため、かんらん石の循環量と下水汚泥の供給量を適切に制御する必要がある。そこで、本試験では、燃焼炉空塔速度や下水汚泥供給量をパラメータとして所望の燃料ガス組成が得られる最適条件を獲得するとともに、かんらん石が安定して循環できることを確認した。

〈III〉 連続運転検証 (FY2022)

2022年度に試験に使用したベンチスケール循環流動床試験装置は、ガス化改質炉は塔径150mm φ ID × 3,000mH、燃焼炉は塔径φ 200mm × 6,000mHの規模で、処理量は～20kg-DS/日である。これまでに、本装置を用いて、各炉の温度やスチーム量、ガス化への汚泥供給箇所等をパラメータとして合計1000時間以上の試験を実施して最適条件探索とスケールアップデータを取得するとともに、連続運転や実用化に向けた課題抽出とその解決のための要素技術を確立した。

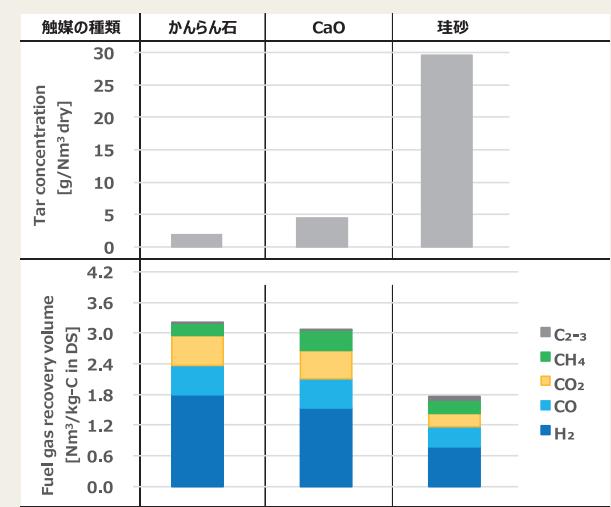


図4 触媒性能試験結果の一例

■ おわりに

ケミカルループガス化 (CLG) による下水汚泥からの燃料ガス製造に関して要素技術を確立した。現在は、上述の開発成果を踏まえて、鹿児島市内の下水処理場内にパイロット規模試験設備（約2t-WET/日）を設置しフィールド試験を実施中である。本試験では、CLGによる燃料ガス製造と製造した燃料ガスの発電利用を実証するとともに、精製水素へのアップグレードにおける技術課題を把握し、対応策を検証していく。

参考文献

- 1) https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewage_tk_000124.html,
国土交通省ホームページ（確認日：2025.8.1）

- 2) T.Shiraki et al, *J. of Material and Waste Management*, Analysis of chemical looping method for production of hydrogen gas from sewage sludge, 27, 558-571 (2025)
- 3) T.Shiraki et al, *J. of Material and Waste Management*, Chemical looping gasification of sewage sludge using a two-stage bubbling fluidized bed reactor, 27, 2637-2651 (2025)

文責者

カナデビア株式会社 環境事業本部
開発センター 熱化学プロセスグループ
奥村 諭
E-mail: okumura_sa@kanadevia.com

CO₂からLPガスへの合成技術の開発

我が国で広く利用されている気体燃料は都市ガスと液化石油ガス（Liquified Petroleum ガス：LPガス）である。料理や風呂炊き用、さらには産業用の加熱源として、また輸送車両等にも使われており、一般生活には欠かせない燃料である。これらの燃料は、基本的に炭素原子と水素原子から成る、炭化水素である。例えば都市ガスはメタン（CH₄）が、LPガスはプロパン（C₃H₈）、ブタン（C₄H₁₀）が主成分である。我が国のLPガスの需要家数は、都市ガスのそれとほぼ等しい。LPガスは携帯性や可搬性に優れており、地方を中心に全国で幅広く利用されている。自然災害と上手に付き合っていかなければならない我が国において、例えばカセットガスの形態で販売されているLPガスは、大きな災害発生時に速やかに必要となる緊急用燃料として有効である。そのため、今後もLPガスは重要なエネルギー源の一つとしてその役割を担うものと考えられ、カーボンニュートラルの達成目標となっている2050年においてもその需要は堅調に続くと言われている⁴⁾。その一方で、現在は世界が複雑な状況に置かれているとはいえ、化石燃料への依存から脱却する方向へとシフトしつつある。LPガスは基本的に化石燃料の採掘に随伴して得られているため、今後は化石燃料に依らない新しい獲得手段が必要である。このような背景をもとに当社と産総研は、資源循環による低炭素化社会の実現もアシストできるよう、CO₂からLPガスの合成技術の開発に取り組んでいる。

**キーワード**

低炭素化、CO₂再利用・再資源化、合成LPG

■ 化石燃料とCO₂の排出

我が国に限らず、世界中で多くの化石燃料が使用されている。化石燃料は種々の炭化水素が主要構成物である。炭化水素は酸素と結びつくことで燃焼し、エネルギー源として大きな熱エネルギーを生み、エネルギーを得られると同時にCO₂と水を生ずる。19世紀の産業革命以来、人類は石炭や石油を燃料として用いることで技術革新を進めてきた。その歴史と共に、大気中のCO₂濃度は時を同じくして上昇しているという背景から、地球の平均気温の上昇や、これまでに経験したことのないような気候変動や生態系環境の変化が発生し始めた要因のひとつとして、化石燃料の使用による大気中のCO₂濃度の上昇が挙げられている。近年、大気中のCO₂濃度を極力上げないようにすべく、化石燃料に依存せずに太陽、風といった自然の力を活用する手段や、資源循環によるエネルギー生産と利用方法

に関心が集まり、世界規模で研究開発や実証試験が推進されている。

■ カーボンニュートラル社会へと繋ぐCCU技術

クリーンエネルギーの代表格として、太陽光や風力といった再生可能エネルギー、水素やアンモニアが挙げられる。水素もアンモニアも、構造中に炭素原子を持たないため、燃料として使う場面でも基本的にはCO₂を生じることはなく、我が国で大きな注目を集めている次世代のエネルギー源である。2050年に向けて、これらを主体とするカーボンニュートラル社会へとシフトするために、制度やインフラの整備、量産化やコストダウンが進められていくと思われる。しかしながら従来のエネルギー利用形態から急激に水素やアンモニアを用いたシステムへと切り替えることは容易

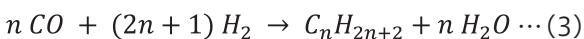
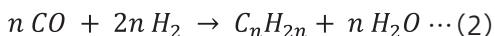
ではなく、ある程度の時間を要し、段階的に進むことが予想される。加えて水素やアンモニアに置き換えることができない航空用燃料や、我が国が置かれている地勢を考慮すれば、国土面積の9割以上で使用されているLPガスのような炭化水素燃料は、今後も必要であり続けると想像される。従って、水素やアンモニア、再生可能エネルギーが主力となるカーボンニュートラル社会の実現へと繋ぐため、あるいは、代替し難い産業用向けに、新たに化石燃料を採掘することなく、大気中のCO₂濃度上昇を極力抑えるための技術が必要である。その技術としてCarbon Capture & Utilization(CCU)が挙げられる。CO₂を資源と捉え、大気中あるいは、産業排ガスを回収し、大気中のCO₂濃度上昇を上げることなく再び燃料等に変換して再利用する技術である。燃料に限らず、化成品などへの転用や、ドライアイス、ハウス栽培用に直接利用する手段もある(図5)。



図5 CCUのイメージ

■ CO₂からのLPガスの合成方法

CO₂の再資源化による燃料合成においては、例えばメタンを主成分とするe-メタン、自動車や航空用の液燃料となるe-fuelが先行して研究開発されている。一方、LPガスを主目的として合成する研究開発例はそれほど多くない。LPガスの主成分であるプロパンおよびブタンをCO₂から化学的に合成する場合、式(1)で示す逆水性ガスシフト反応(Reverse Water Gas Shift; RWGS反応)を通して一旦COを合成し、さらに式(2)および式(3)に示すFischer-Toropsh反応(FT反応)を経て合成できる。



FT反応は基本的にAnderson-Schulz-Flory則(ASF則)に従い、一定の分布を示すような形で炭素数の異なる多数の炭化水素が同時に合成される(図6)。そのため、LPガス成分(C₃, C₄)を選択的に得るために、FT反応下において、適度に炭素同士が連鎖成長するように触媒の機能性をコントロールさせることや、LPガス成分よりも炭素数の多い、C₅以上の炭化水素を分解してLPガス成分へと転化させるような工夫が必要である。

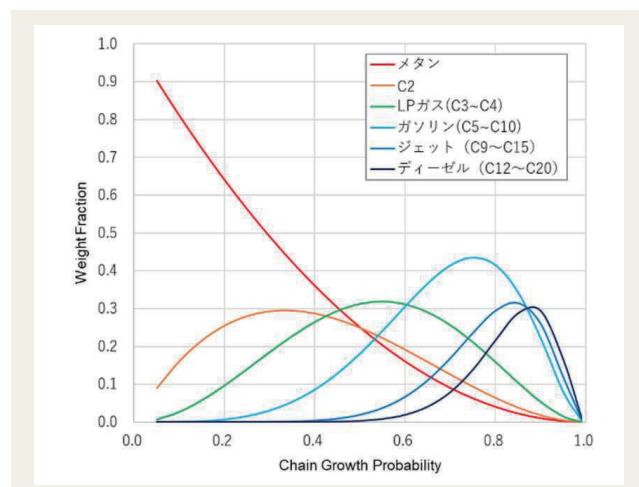


図6 FT合成における合成炭化水素の分布

さらに、RWGS反応を高効率に行うことも重要である。RWGS反応は化学平衡の制約上、高圧かつ500°C以上の高温条件で実行することが望ましい。一方でFT反応は、比較的低い圧力でも実行でき、反応温度は選択する触媒材料にも依るが、200~350°C程度である。反応圧力も、必ずしも高い値は要求されず、1 MPaG以下でも実行可能である。従って高効率でCO₂からLPガス成分を合成するにあたり、双方の反応がそれぞれの最適な反応環境下で進められるよう、個別の反応プロセスを用意するのが一般的である。さりとて、二つの異なるプロセスでの運用はコストアップの要因となる。そこで双方の反応に対して効果を発揮する触媒を考えた。式(2)および、式(3)で示すFT反応を促進させてCOの消費を高めれば、式(1)のRWGS反応における化学平衡は幾分COの生成側に傾くため、CO₂転化率は比較的温和な、FT反応の最適温度条件でも向上することが期待される。一つの反応場で両反応を十分進めることができれば、機器点数の削減とプロセスの省略化、すなわちワンプロセスでの合成が可能となり、よりシンプルな合成システムと成り得る(図7)。これらの効果が期待できることをモチベーションとし、当社と産総研は、これまでに行ったCO₂からの効率的なe-メタンの合成方法⁵⁾⁻⁸⁾を通して得た、CO₂の反応性に関する知見をもとに、CO₂からワンプロセスかつ、高効率でLPガスを選択的に合成するための触媒および、反応プロセスの開発に挑戦している。

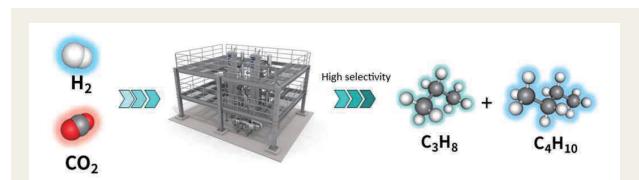


図7 ワンプロセスによるCO₂からのLPガス合成イメージ

■ 研究成果の一例

図8に、開発触媒を用いてCO₂からの直接LPガス成分の合成を実験した結果を示す。触媒は鉄を主体とする金属材料と、機能性を付与した市販品のMFI型ゼオライトを物理的にブレンドしたものを用いた。開発した触媒は、反応圧力0.75 MPaGと一般的な反応圧力よりも低い圧力条件で比較的高いCO₂転化率（1段：>40%、2段：>65%）を示した。また、2段反応下においては、LPガス成分の選択率は約50 C-mol.%と高い選択率を示し、合成されたLPガス成分はプロピレン等のオレフィン類はほとんど観測されず、プロパンやブタンであり、CO₂から直接LPガス成分の合成が可能であることを示した。

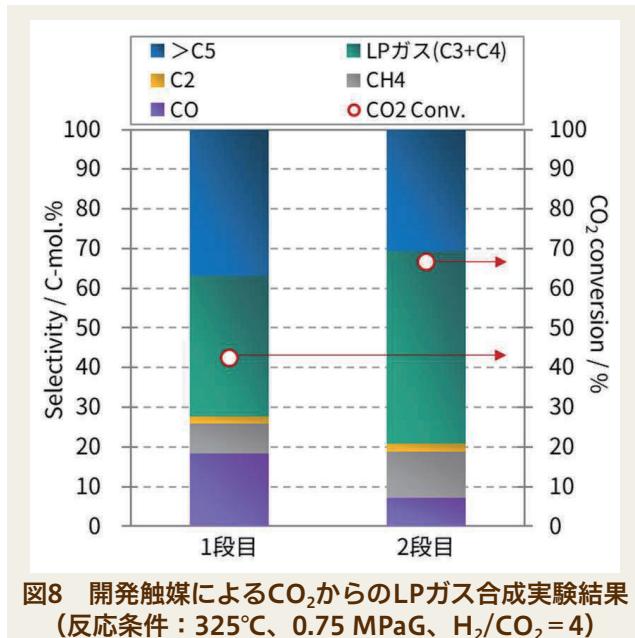


図8 開発触媒によるCO₂からのLPガス合成実験結果
(反応条件: 325°C, 0.75 MPaG, H₂/CO₂=4)

■ 今後の展望

我々は2025年3月より、産総研・つくば西事業所内で年間3~4トンのLPガスが合成可能なベンチスケール試験装置を用いた実証試験を進めている。触媒開発も継続して改良を重ね、さらに高いLPガス選択性を持ち、反応効率を高めた触媒を新たに見出している。新触媒は2025年度下半期にベンチスケール試験装置へ導入する予定である。実証試験においては、全合成物からLPガス成分を抽出する試験や、プロセスの最適化、コストダウンのための設計検討も併せて進めている。そう遠くないうちにベンチスケール規模のパッケージ型LPガス合成装置の上市を図り、さらに合成装置のスケルアップ開発を進め、2030年代には低炭素化に寄与できる合成LPガスを社会に提供する計画である。

参考文献

- 4) 日本LPガス協会、「LPガス業界におけるカーボンニュートラルに向けた取り組み状況について」、関西次世代燃料フォーラムNEXT 2025
(<https://www.kansai.meti.go.jp/3-9sekiyu/jisedai/2025/2025kouen6.pdf>)
- 5) H. Takano. et al., *Int. J. Hydrogen Energy* **2015**, 40, 8347-8355.
- 6) H. Takano. et al., *Applied Surface Science* **2016**, 388, 653– 663.
- 7) F. Kosaka et al., *Int. J. Hydrogen Energy* **2020**, 45, 12911-12920.
- 8) F. Kosaka et al., *Chemical Engineering Journal* **2022**, 450, 138055.

文責者

カナデビア株式会社 開発本部 技術研究所
地球環境・エネルギー研究センター 化学グループ

(出向先) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
カナデビア-産総研
循環型クリーンエネルギー創出連携研究室
高野裕之
E-mail: takano_hi@kanadevia.com
/takano-h@aist.go.jp