

運輸交通分野のカーボンニュートラル化を巡って

② CO₂ から作る代替燃料“e-Fuel”に高まる期待

連載 2 回目の今回は、大気中などから回収した CO₂ を原料に作られる合成燃料 “e-Fuel” を取りあげます。化石燃料の代替として既存のインフラや車両で使用できるのが最大の利点です。パワートレイン電動化のトレンドは変わりませんが、耐用年数の長い自動車の買替えは一朝一夕では進まず、当面のあいだ保有台数の大半を占めるのは内燃機関搭載車です。e-Fuel を用いれば、「走行時に排出される CO₂」を「原料として使用した CO₂」で相殺でき、排出量実質ゼロ（カーボンニュートラル）に一歩近づく可能性があります。船舶や航空機の代替燃料としても注目されており、国内外で実用化に向け研究開発が急加速しています。

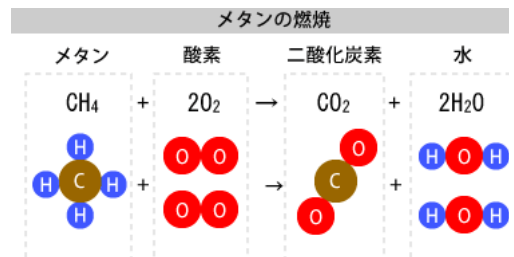
1. CO₂ から生まれる代替燃料“e-Fuel”

石炭やガソリン、天然ガスなどの化石燃料は、炭素（C）と水素（H）から成る様々な種類の“炭化水素”の混合物である。それゆえ、燃焼する（＝酸素と結びつく）と CO₂ が生じる（＜図表 1＞参照）。温室効果ガスの代表格として削減が急がれる CO₂ だが、これを資源として利活用する道を開こうというのが CCUS¹あるいはカーボンリサイクルと呼ばれる取組である。

本稿で取り上げる e-Fuel もその 1 種で、CO₂ を原料とする合成燃料の総称である。CO₂ を水素と化学合成すると、液体または気体状の炭化水素が作られる。この炭化水素は化石燃料の代替として利用出来る（＜図表 2＞参照）。e はドイツ語の再生可能エネルギー “Erneuerbare Energie” の頭文字とされ、合成プラントの稼働を再エネなどのカーボンフリー電源で賄うことで、生産工程での CO₂ 排出をゼロにする。

＜図表 1＞炭化水素の燃焼

下図は、天然ガスの主成分であるメタンの例。



（出典）東邦大学ウェブサイト
バーチャルボラトリーVol.11「燃焼化学」

2. なぜ今、e-Fuel なのか

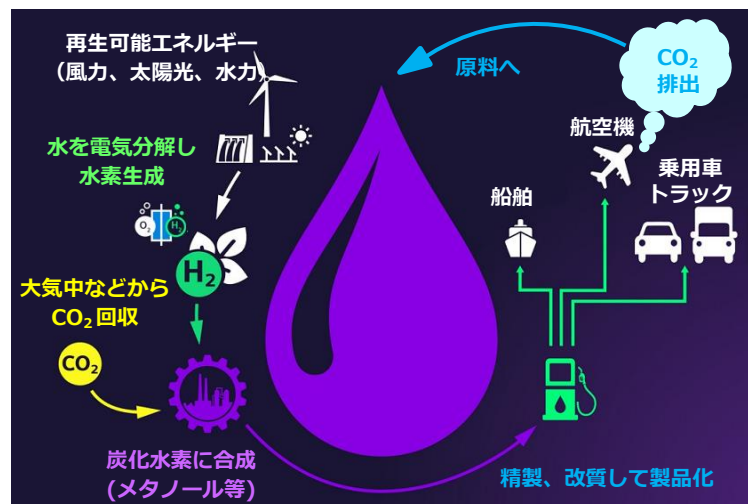
（1）従来型車両の脱炭素化実現のカギ

運輸交通部門は世界の CO₂ 排出量の 24.8%（2018 年）²を占めており、脱炭素化に向けた社会的要請は年々強まっている。複数の国・地域で 2035 年前後に乗用車の新車販売規制が導入されることは前号で報告したとおりで³、化石燃料から電気や水素へのシフトは先進国を中心に引き続き強く推進されていくと見られる。

しかし、世界全体では新興国の経済成長や人口増に伴って乗用車の需要は今後も増加が見込まれている（＜図表 3＞参照）。

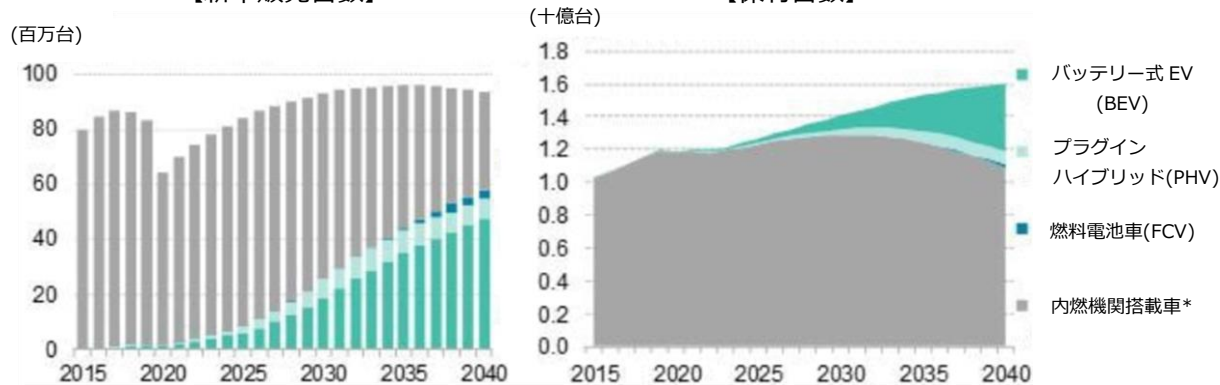
また、物流は新興国のみならず先進国でも需要拡大が予想されている。商用車は大型になるほど積載量も移動距離も増加するため、バッテリーには適さず電動化の推進が難しいとされる（＜図表 4＞参照）。そのため、化石燃料で走る車両が保有台数の大半を占める時代が当面続くことが予想されている。

＜図表 2＞e-Fuel の概念図



（出典）Siemens Energy より訳出（青字部分は筆者追記）

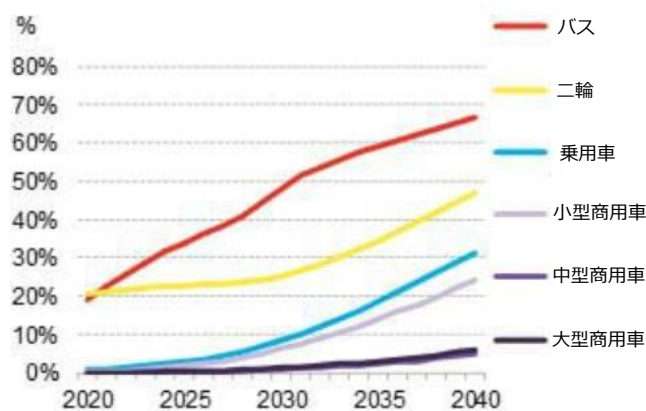
＜図表3＞将来予測① 世界の乗用車台数とパワートレイン
【新車販売台数】 【保有台数】



*原典に明記が無いが、ガソリン車、ディーゼル車に加え、ハイブリッド車はここに含まれていると考えられる。
(出典) Bloomberg New Energy Finance “Electric Vehicle Outlook 2020 Executive Summary”

炭化水素の e-Fuel は燃焼すると CO₂ が生じる。したがって、Tank to Wheel (車両使用時のみ) の評価では、走行時に CO₂ 排出の無い BEV (バッテリー式電気自動車) や水素を用いる FCV (燃料電池自動車) には敵わない。しかし、近年重視される Well-to-Wheel (車両使用時と、その手前の燃料の生産工程などを含む) の評価⁴では、排出される CO₂ を原料に使われた CO₂ で相殺できるため、内燃機関搭載車でも排出量実質ゼロ (カーボンニュートラル) と見做せる可能性がある。ハイブリッド車やプラグインハイブリッド車にも適用できる。大型車と同様の理由で電動化が難しい船舶や航空機への適用も期待されている。

＜図表4＞将来予測② 世界の車種別電動化率



(出典) 図表 3 に同じ

(2) 確立された手法×再エネ×水素が揃う

合成手法が確立している点も実用化の見通しを明るくしている。代表的な手法のフィッシャー・トロプシュ法⁵は 1920 年代にドイツで開発され、第 2 次世界大戦では石炭から、戦後は中東、アフリカなどで天然ガスから液体燃料を生産するために広く用いられてきた⁶。この手法を応用した CO₂ からの燃料生成は 20 世紀終盤から研究されていたが、近年、再エネの発電コストの低下と、水素の活用機運の高まりによる水素価格の低下が期待できるようになり、経済合理性のある商用-Fuel の生産も現実味を帯びてきた。

特に EU 圏では実用化が喫緊の課題となっている。改正再生可能エネルギー指令 (RED II、2018 年) が、運輸交通部門で消費されるエネルギーの 14%以上を 2030 年までに再エネで供給するよう燃料供給業者に義務付けたのだ。この 14%を BEV 等への買替え促進だけで突破できる国は少数と見られ、既存の車両に広く適用できる e-Fuel へのニーズが高まっている。

(3) バイオ燃料の供給量に歯止め

化石燃料の代替として実用化が先行するバイオ燃料だが、廃材や残渣由来のみでは需要を賄えず、安定供給のためにはトウモロコシ・サトウキビなどの作物や木材が大量に必要な。前者は生産量が極端に多い米国とブラジル以外の国では調達の持続可能性に懸念があり、燃料需要の拡大が食料や飼料価格の上昇を招いたこともある⁷。

また、バイオ燃料の需要拡大が森林の伐採や農地の拡大という ILUC (Indirect Land Use Change、間接的土地利用変化) を招き、かえって環境破壊が進んでいるとの批判も強まっている。EU では、バイオ燃料化を目的とする林業・農業の実施と材木・作物の輸入は最低限にすべきとの方針が示された⁸。この点からも天然資源を棄損しない化学合成の e-Fuel の実用化が急がれるようになった。

3. 加速する e-Fuel 生産 ～“メタノールエコノミー”の誕生か～

化学合成でできる炭化水素は数百種類あるが、e-Fuel に最適な物質は何であろうか。ノーベル化学賞を受賞したジョージ・オラー博士⁹は、メタノールこそ化石燃料の代替に最適であるとして“メタノールエコノミー”構想を 1990 年代に提唱した (<BOX>参照)。博士の予見したとおり、メタノール合成をベースとした e-Fuel プラントの建設が進んでいる。

(1) メタノールの特性

メタノール (CH₃OH) は、沸点 64.4℃、凝固点 -97.6℃ 常温常圧で液体を維持するため、貯蔵や運搬に適している。既存インフラを軽微な改修でほぼそのまま利用でき、既存のエンジンも問題なく作動する¹⁰。ガソリンの半分程度のエネルギー密度しかないため、ガソリン 1ℓ と同じエネルギーを得るにはメタノールが 2ℓ 消費されるが¹¹、BEV のバッテリーや FCV 向けの高圧水素ガスと比較すれば数倍のエネルギーを有している。当初はガソリンやディーゼル等に低率で混合した利用が想定されていることから、燃費の面に大きな影響はないと考えられる。シーメンスの最新の研究によれば、15～20% 程度の混合であれば既存のエンジンの改造は必要ないという¹²。このメタノールをさらに精製、改質してガソリンやジェット燃料等の性質に近づけることも可能である。

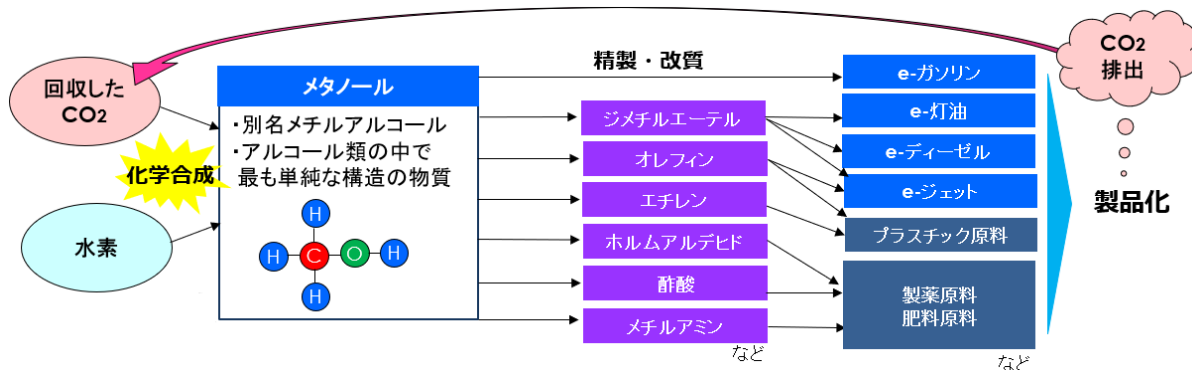
(2) 大型のメタノールプラント建設

合成燃料に長い歴史を持つドイツでは、水素戦略の一環として e-Fuel の実用化に向けた大掛かりな動きが続いている。自動車メーカーでは Volkswagen グループの Audi、ポルシェ、ベントレーなど高級車ブランドを中心に研究が進む。BMW も米イェール大学発の e-Fuel 生産のスタートアップ Prometheus Fuels に出資を行っている¹³ほか、サプライヤーのボッシュ等も研究に取り組む¹⁴。メルセデスは「電動化対応を先送りするための言い訳だ」として e-Fuel に否定的だが¹⁵、業界団体の自動車工業会(VDA)では e-Fuel の実用化を脱炭素化の重要施策と位置付け、普及に向けた市場整備の支援を政府に求めている¹⁶。

<BOX> “メタノールエコノミー” 構想

メタノール(別名メチルアルコール)は、それ自体も燃料や化学原料として製品になるが、アルコール類の中で最も単純な構造の物質のため、他の炭化水素(ジメチルエーテル、オレフィン等)への改質も容易に行える非常に有用な物質である。改質後は、家庭での調理・暖房用のガス燃料を代替できるほか、プラスチック、肥料、薬剤等の原料として利用できる。

メタノールの世界需要は年間約 8,100 万 t(換算 1,021 億 ℓ)あり、今後も経済成長に伴う需要拡大が予想されている。現在は主に天然ガスから生産されているが、これを CO₂ 原料のメタノールに置き換えられれば、運輸交通のみならず、家庭での熱源やプラスチック製品の利用なども含めた代替石油製品と CO₂ の資源循環サイクルが生まれる。これがオラー博士の描くメタノールエコノミーである。なお、本邦の「カーボンリサイクル技術ロードマップ(2019年6月)」においても、主要な基幹物質としてメタノールが掲げられている。



(出典) Siemens Energy および G.A.オラーほか著、小林四郎ほか訳「メタノールエコノミー —CO₂ をエネルギーに変える逆転の発想—」、化学同人社、2010 年より筆者作成

研究歴が長いことで知られるのは Audi だが¹⁷、商用プラントを建設中なのはポルシェである。ポルシェは 2,000 万ユーロを投じてシーメンス、エクソンモービル等と共に南米チリにメタノール合成プラントを建設している¹⁸。チリ南部は風況が良く、風力発電、電気分解による水素の生成、CO₂との合成、燃料製品としての精製をすべて 1 拠点に集約して行う。CO₂は大気中から回収する Direct Air Capture (DAC) で調達する。ドイツ政府から 800 万ユーロの資金提供も受け、2022 年には代替ガソリン年間 13 万ℓの量産に着手する。その後、2024 年までに 5,500 万ℓ、2026 年には 5 億 5,000 万ℓの生産を目指す。

シーメンスは地中海沿岸のモロッコにも水素とメタノールの大規模プラントを建設する。水力、風力、太陽光発電の適地が多く、欧州向けの生産・輸出を担う重要拠点とする計画だ¹⁹。欧州では EU 指令でガソリンの 3%までメタノールの混合が認められており、低率での実証研究は進めやすい環境にある。

本年 3 月半ば、交通デジタル・インフラ省のショイアー大臣は 2035 年までに自動車における化石燃料の使用を段階的に廃止していく考えを示した²⁰。そして、EV の拡販やそのためのインフラ拡充を進める一方で、将来に向けてドイツの高い内燃機関技術の競争力を維持し続けるために、合成燃料 (e-Fuel) の早期の大量生産と実用化が求められると述べ、競争力のあるクリーンな代替燃料の開発を促進する制度設計に着手するとしている。e-Fuel の実用化に向けて一段と弾みがつきそうだ。

中国からも年間 5,000t (換算 約 630 万ℓ) 規模の生産能力を持つメタノールプラントの稼働試験に成功したとのリリースがある²¹。メタノールの国内需要量も高く、推進中の再エネと水素を活用し、自国の産業部門や運輸交通部門の脱炭素化を図る。中国ではメタノールの混合率 15%~100%までの自動車が事業用車両を中心に存在し、規制枠組みが既にあるため、こちらも実用化に向けた実証研究が進みそうだ。

4. e-Fuel の実用化・普及に向けた課題

(1) 価格の抑制

一般的には高い価格が普及のネックと言われ、2015 年時点では 4.5~7 ユーロ超/ℓと見積もられていた²²。しかし、直近ではシーメンスは 1.3 ユーロ/ℓ程度²³、ボッシュも 2030 年には 1.2~1.4 ユーロ/ℓで提供可能との見立てを公表しており²⁴、急激に価格が下がってきている。e-Fuel は製造までに大量の電力を必要とする。水を分解して水素を作り、その水素をさらに CO₂と合成させ、その後は製品化するための精製のプロセスを踏む。燃料価格を下げるためには、再エネ発電を安価で行える土地に大規模プラントを建設するのが定説になってきている。国内の再エネ比率 4 割のドイツが国外にプラントを建設しているのはそのため、潤沢な再エネ資源に恵まれた国以外は輸入に頼らざるを得ない。

最終的なユーザーの購入価格については、ドイツも日本と同様、ガソリン価格の半分を税金が占めているため^{25,26}、ガソリンや軽油と同等の価格帯になるかどうかは税制次第と言えよう。ドイツでは、水素と e-Fuel に対して税制優遇を求めるロビーイングが始まっている²⁷。

中長期的なコスト高要因として懸念すべきは、合成時の触媒に用いられる希少金属の確保かもしれない。鉄、コバルト、銅などが用いられるが、触媒は 1~2 年で交換する必要がある。特にコバルトは、バッテリー材料にも使われるため近年価格が高騰している。フィッシャー・トロプシュ法の改良は続けられており、本邦でも富山大学は触媒におけるコバルトの含有量を従来の 30~40% (重量比) から 5~10%以下まで削減できる手法を開発し²⁸、東京大学は触媒に金属を用いない合成手法を考案している²⁹。このような合成手法の一層の改良が望まれる。

(2) 原料となる CO₂ の調達

短期的には、製鉄やセメントなどの産業部門、火力発電所など CO₂の大量排出が避けられない事業者の排気から高濃度の CO₂を取り出すことが可能である。しかし、こうした事業者も排出量削減に取り組んでいる。ドイツ勢のプラントは当初から DAC を前提としているものが多いが、特に 2030 年以降は CO₂ 調達のために、プラントの立地を問わず DAC が必須の技術になると考えられている³⁰。

(3) 部品の劣化影響と安全性の検証

メタノールは鋼鉄を腐食させないが、アルミ、亜鉛、マグネシウムに対しては腐食させる性質がある。また、樹脂に対して強力な溶剤として働くため、ゴムなどの部品を軟化し破損を早めるリスクがある³¹。既存車両への利用を解禁するためには、燃料と接する部品の耐久性から混合率を検討する必要がある。

尤も、日本では2001年から数年間、100%のメタノールを燃料とする自動車が低公害車として推奨されたことがあった。初年度の自動車130台、メタノールスタンド34か所という規模以上に普及することはなかったが³²、メタノールの性質が車両部品等に与える影響は既に研究されているものと考えられる。

5. おわりに～日本もカーボンリサイクルに注力する転機～

運輸交通部門の車両の買替えは一朝一夕では進まない。この現実を踏まえた時、e-Fuel活用はカーボンニュートラル実現への方策の1つとして大いに可能性がある(＜図表5＞参照)。自動車、船舶、航空機それぞれに適した化石燃料の代替物質を化学合成で提供できる。ドイツのエネルギー省が実施した研究では、2050年に運輸交通部門がカーボンニュートラルを達成するためには、グローバルベースで＜図表6＞に示すエネルギー分担であるべきだとされている。研究者らは、電気以外の形態の燃料のニーズは一定規模で存在し続けるにも拘らず e-Fuel の重要性が過少評価されていると主張する³³。

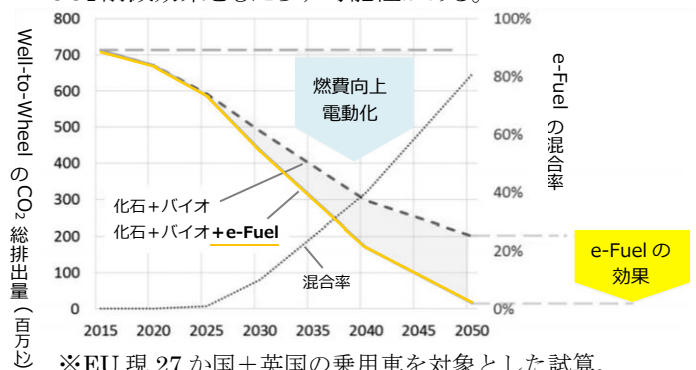
米国でも、エネルギー省傘下の国立アルゴンヌ研究所が e-Fuel の生産方法の低コスト化と貨物輸送を対象にエンジンへの影響の研究に着手すると発表している³⁴。SAE International (自動車技術者協会) も e-Fuel は短期的にも中期的にも運輸交通部門のCO₂削減に大きく貢献するものと認めており、今後動きが出てくる可能性がある³⁵。

日本では、代替燃料として水素を長らく政策の中心に据えてきたため、大規模なカーボンリサイクル事業は検討されてこなかった経緯がある³⁶。しかし、2019年に転機があり、年初のダボス会議で安倍前首相がCO₂を資源として活用することの重要性を語った³⁷。以降、2020年1月の「革新的環境イノベーション戦略」、同年12月の「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」ではカーボンリサイクル技術の開発と低価格での e-Fuel の生産・商用化が政策課題に掲げられるようになった。

自動車工業会も内燃機関の脱炭素化もCO₂削減手段であるとして、バイオ燃料と合成燃料の将来的な活用

＜図表5＞e-Fuel がもたらすCO₂削減効果

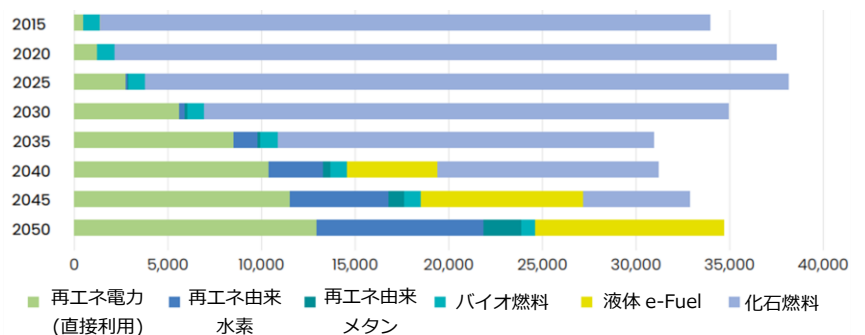
混合利用を開始することで2025～2050年に最大2.8GtのCO₂削減効果をもたらす可能性がある。



※EU 現 27 개국+英国の乗用車を対象とした試算。

(出典) Bosch “Roadmap to a de-fossilized powertrain, 2017 より訳出

＜図表6＞将来予測③ 運輸交通部門の最終エネルギー



(出典) Ram M., Galimova T., Bogdanov D., Fasihi M., Gulagi A., Breyer C., Micheli M., Crone K. “Powerfuels in a Renewable Energy World - Global volumes, costs, and trading 2030 to 2050”, LUT University and Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Lappeenranta, Berlin., 2020 より訳出

を視野に入れる長期ビジョンを2019年に公表している³⁸。トヨタ、ホンダ、日産がe-Fuelの研究に着手との報道もあり³⁹、マツダは欧州でe-Fuel関連のロビーイング団体に加盟した⁴⁰。航空機向けでは、全日空、東芝、出光興産らがe-Fuel実用化に向けた検討に着手すると発表している⁴¹。

前号でも触れたとおり、化石燃料はエネルギー効率が良く、取扱いやインフラも確立されているため、これを完全に代替できる燃料は未だ見つかっていない。車種や用途、インフラへのアクセスしやすさなどを踏まえて最適なエネルギーを選択していく必要があり、運輸交通部門のカーボンニュートラル化は様々なパワーtrainの組み合わせで実現されると考えられる。e-Fuelがその一角を担うことができるのか、実用化に向けた国内外の動向は今後も注視したい。

【主任研究員 新添 麻衣】

- 1 Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage. 空気中などのCO₂を回収・貯蔵し、何らかの形で再利用すること。
- 2 IEA CO₂ Emissions from Fuel Combustion
- 3 未来研トピックス 2020 Vol.30 「運輸交通分野のカーボンニュートラル化を巡って ① 自動車の環境性能を左右する日本のエネルギー事情」参照。なお、ハイブリッド車(HV)の新車販売を禁じるかどうかは国・地域により扱いが分かれている。
- 4 前号でも触れたが、日本がホストを務めた2019年6月のG20会合では、Well-to-Wheel分析を加味することの重要性が合意文書に盛り込まれた。また2030年度燃費基準(2020年4月適用)から世界に先駆けてWtWの燃費規制を導入した。
- 5 一酸化炭素と水素の混合ガスから液体の炭化水素を合成する方法で、1~50気圧、200~300℃の条件下で、鉄やコバルト、銅などの触媒を用いて行われる。
- 6 (独法)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油・天然ガス資源情報ウェブサイト
- 7 G.A.オラー、A.ゲッペールト、G.K.S.ブラカーシュ著、小林四郎、齋藤彰久、西村晃尚訳、「メタノールエコノミー—CO₂をエネルギーに変える逆転の発想—」、化学同人社、2010年
- 8 European Commission “EU Biodiversity Strategy for 2030”, May 20, 2010
- 9 1994年に「カルボカチオン化学への貢献」の功績でノーベル化学賞を単独受賞している。
- 10 前脚注7
- 11 前脚注7
- 12 Siemens Energy “e-Methanol A universal green fuel”, Dec., 2020
- 13 BMW Group “BMW i Ventures Funds Prometheus Fuels, a Company Converting CO₂ in Air to Carbon-Neutral Gasoline.”, June 9, 2020
- 14 Bosch “Denner’s view Jumping to conclusions”, May 7, 2020
- 15 AUTOCAR “Mercedes R&D boss: synthetic fuel not a viable option”, May 21, 2020
- 16 VDA “VDA-Stellungnahme zur nationalen Wasserstoffstrategie und zur nationalen Umsetzung der REDII”, Feb., 2020
- 17 Audi “Fuel of the future: Research facility in Dresden produces first batch of Audi e-diesel”, April 21, 2015
- 18 Porsche “Porsche and Siemens Energy, with partners, advance climate-neutral eFuels development”, Dec.2, 2020
- 19 Siemens Energy “Morocco-to-X: Badr Ikken and his team at IRESEN plan to transform the country into a hub for e-Fuels”, April 23, 2020
- 20 Welt “Unser Ziel muss das Auslaufen des fossilen Verbrenners bis 2035 sein”, March 14, 2021
- 21 中国化工报社「全球首套二氧化碳加氢制甲醇工业试验装置建成」, Sep. 29, 2020
- 22 Concawe Review “Role of e-fuels in the European transport system (2030-2050) (Literature review)”, Volume 28 Number 1, Oct. 2019
- 23 前脚注12
- 24 Bosch “Denner’s view Jumping to conclusions”, May 7, 2020
- 25 財務省ウェブサイト「自動車関係諸税・エネルギー関係諸税に関する資料」(Visited Feb. 25, 2021)
- 26 ADAC “Benzin- und Dieselpreis: So entstehen die Spritpreise”, Jan. 1, 2020
- 27 VDA “VDA-Stellungnahme zur nationalen Wasserstoffstrategie und zur nationalen Umsetzung der REDII”, Feb., 2020
- 28 富山大学、科学技術振興機構(JST)「従来の定説を覆す新規なF T合成触媒~コバルト含有量の大幅削減に成功~」、2018年8月14日
- 29 東京大学「重金属フリーFT型反応の発見 二酸化炭素から人造石油合成の新展開を期待」、2020年8月23日。同大学院工学系研究科の野崎京子教授、バル・シュリンワツ特任助教らは、重金属の代わりにホウ素(石の成分)を用い、室温で燃料用途の炭化水素を合成する全く新しい触媒設計の方向性を示した。
- 30 Ram M., Galimova T., Bogdanov D., Fasihi M., Gulagi A., Breyer C., Micheli M., Crone K. “Powerfuels in a Renewable Energy World - Global volumes, costs, and trading 2030 to 2050”, LUT University and Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Lappeenranta, Berlin., 2020
- 31 前脚注7
- 32 総務省「世界最先端の「低公害車」社会の構築に関する政策評価書」、平成21年6月
- 33 前脚注30
- 34 Argonne National Laboratory “Argonne investigates potential for e-fuels in heavy duty transportation”, April 6, 2020
- 35 SAE International “e-Fuel Production via Renewables and the Impact on the In-Use CO₂ Performance”, Sep. 2020
- 36 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット「二酸化炭素資源化に関する調査報告書~パリ協定遵守に向けた国内外動向、および燃料・化学品へのCO₂変換技術~」、2020年3月
- 37 首相官邸「世界経済フォーラム年次総会 安倍総理スピーチ」、2020年1月23日
- 38 日本自動車工業会「地球温暖化対策長期ビジョン」、2019年6月
- 39 日経クロステック「トヨタ・日産・ホンダが本腰、炭素中立エンジンに新燃料e-fuel」、2020年7月3日
- 40 Mazda Motor Europe “Mazda first OEM to join the e-Fuel Alliance”, Feb. 5, 2021
- 41 東芝エネルギーシステムズ株式会社、株式会社東芝、東洋エンジニアリング株式会社、出光興産株式会社、全日本空輸株式会社、日本 CCS 調査株式会社「カーボンリサイクルのビジネスモデル検討を開始 一掃ガスなどからのCO₂を「持続可能なジェット燃料」に転換—」、2020年12月2日