

「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

西脇文男

1. はじめに

いま世界的に、再エネ電力由来の水素（グリーン水素）とリサイクル利用の二酸化炭素（CO₂）から作る合成燃料「e-fuel」が注目されている。

2023年3月、ヨーロッパ連合（EU）は、2035年以降ガソリンなどで走るエンジン車の販売を全面的に禁止する方針を転換し、e-fuelのみを使用する自動車は2035年以降も容認することを発表した。また航空分野では2022年、国際民間航空機関（ICAO）が2050年にCO₂排出量を実質ゼロとする長期目標を採択し、その実現にはe-fuelを含むSAF（持続可能な航空燃料）が中心的役割を果たすとしている。海運分野でも、国際海事機関（IMO）は2023年7月に同様の2050年ネットゼロ目標を採択した。

こうした動きを受け、モビリティの次世代カーボンニュートラル燃料として、20年代後半以降e-fuelに対する需要が盛り上がるが見込まれる。供給サイドでも、商業規模のe-fuel製造プラントの建設を目指すプロジェクトが数多く計画されている。

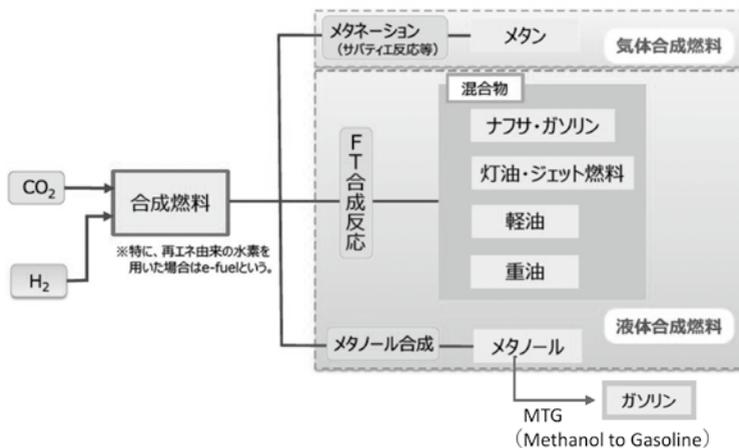
本稿では、e-fuelの特徴、モビリティの脱炭素化に向けた世界の最新動向、代表的なe-fuel製造プロジェクトを俯瞰し、環境面やコストに関する課題と見直し、わが国が今後取り組むべき方向・施策を考える。

2. e-fuel の種類と特徴

e-fuel は再エネ電力由来の水素（グリーン水素）とリサイクル利用の二酸化炭素（CO₂）から作るカーボンニュートラルな合成燃料である。合成燃料は気体合成燃料と液体合成燃料に大別されるが、モビリティの燃料に使われるのは主に液体燃料である。

製造方法として代表的なのはFT合成法（Fischer-Tropsch 合成反応）だ。これは、CO₂からCO（一酸化炭素）に転換し（逆シフト反応）、そのCOをH₂と反応（FT合成）させ、ガソリン・灯油・軽油などの混合物を合成するものである。

また、COをH₂と反応させメタノールを生成（メタノール合成）する方法も広く知られている。メタノールはそれ自体が船舶等の燃料として使われるほか、MTG（Methanol to Gasoline）プロセスによってガソリンにも転換できる。



出典：経済産業省「合成燃料研究会 中間とりまとめ（2021.4）」を一部改変

図1 e-fuelの製法と種類

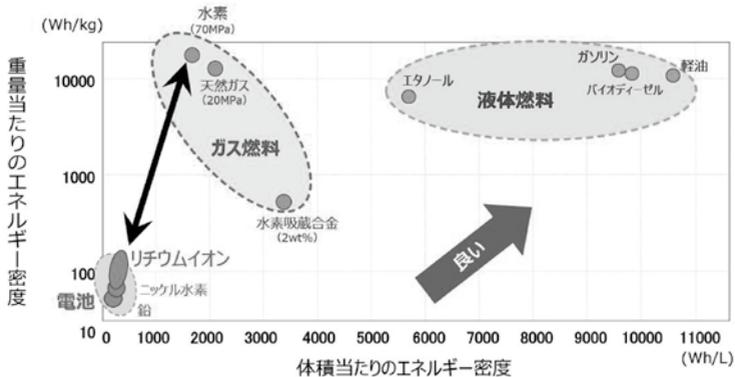
「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

その特徴は、

- (1) 原料に制約のあるバイオ燃料に比べ大量生産が可能。
- (2) 液体燃料は、化石由来のガソリンや軽油同様、エネルギー密度が高い。(図2)
- (3) 既存のガソリン車・ディーゼル車やジェット機に Drop in 燃料として利用可能。

また、輸送・貯蔵・給油等も、既存インフラをそのまま使うことができる。

特に (2) と (3) の理由から、e-fuel はモビリティの次世代燃料として優れた適性がある。



出典：トヨタ自動車

図2 各燃料のエネルギー密度比較

3. 次世代自動車燃料 e-fuel

3-1 自動車脱炭素化と e-fuel

自動車脱炭素化の主役は電動化 (EV シフト) である。世界の EV 市場は飛躍的な成長を遂げている。2022 年には販売台数が 1,000 万台を超え、

新車販売台数に占める EV のシェアは 14% に達した。EU 始め多くの国で 35 年以降ガソリン車の販売を禁止する方針が出され、今後さらに EV シフトが加速すると見込まれている。

しかし、新たに作る車はよいが、既存のガソリン車を電動化することはできない。走っている車すべての CO₂ を削減するためにも e-fuel への期待は高い。また、パワーや航続距離の観点から EV シフトが進まない大型重量車両にも、e-fuel は有力な選択肢となる。

次世代クリーン燃料では、バイオエタノールやバイオディーゼルなどバイオ燃料が既に実用化されている。バイオエタノールはガソリンに混ぜて自動車の CO₂ 排出量を減少させる目的で、欧米諸国やブラジル等では規制を設けて使用を義務づけている。ただ、原料にサトウキビやトウモロコシを使うため、耕作にエネルギーや化学肥料を多く使うのでライフサイクル全体の CO₂ 削減効果は必ずしも高くない。また、食糧との競合問題や耕作地開拓による環境破壊の問題が指摘されている。近年食品廃棄物や微細藻類を原料とする技術の研究開発が進んでいるが、コスト高や大量生産が難しいことから、未だ実用レベルには達していない。

e-fuel は水素と CO₂ から合成する工業製品なので大量生産も問題ない。ガソリンやディーゼル油と混合して（単独でも）使用できるので、EV 化の難しい大型重量車両や、35 年以降も存在する既存のガソリン車・ディーゼル車の脱炭素化に有効と考えられている。

3-2 e-fuel の開発・実用化で先行するドイツ

e-fuel の研究開発ではドイツの自動車メーカーが先行している。アウディは、2018 年にドイツの Global Bioenergies 社と共同で、世界で初めて e-gasoline を生産することに成功した。ポルシェはチリの Haru Oni プロジェクト（後述）で生産された e-fuel を使ってレース車を走らせている。

なぜドイツなのか？ 背景にドイツのエコカー戦略があると言われている。ドイツを始めヨーロッパの自動車メーカーは、クリーンディーゼルを

「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

排ガス対策の中軸とする戦略を採ってきた。ところが2015年にフォルクスワーゲンの排ガス検査不正が発覚し、クリーンディーゼルはクリーンなイメージを失墜し販売台数は激減した。そこでドイツ（およびヨーロッパ）のメーカーは一斉にEVを軸とする戦略に転換した。この結果、ヨーロッパ自動車市場でEVシフトが急速に進んだ。

ところが、EVシフトが進むことはドイツにとってよいことばかりではない。ガソリン車やディーゼル車など内燃機関の車は、3万点もの部品をすり合わせて1台の完成車を作り上げる。そのため、ドイツのような自動車大国には高い技術を持った部品産業が集積している。

一方、EVは部品点数が半分程度で、モジュール化された部品も多く、技術的ハードルは内燃機関の車より低いとされる。EV比率がどんどん高まると、ドイツの部品産業は仕事を失い、雇用を守れない、ということになりかねない。もしe-fuelがモノになれば、部品産業を守ることができ、完成車メーカーも強い競争力を持つガソリン車やディーゼル車を作り続けることができる。

こうしたドイツ自動車業界の思惑はEUの脱炭素政策にも影響を及ぼしている。EUは2035年以降、ガソリンなどで走るエンジン車の販売を全面的に禁止する方針であったが、ドイツ政府がe-fuelを使用する車両は認めるべきだと主張。イタリア・東ヨーロッパ諸国もこれに同調し、2023年3月、条件付き容認に方針転換した。今後、燃料の基準や利用方法など制度設計を行ない、正式決定となる見込みだ。

3-3 日本の取り組み

エンジン車を重視することでは日本もドイツと同じだ。今回のEUの方針転換は日本にとっても歓迎すべきものだ。特に、日本が得意とするハイブリッド車が2035年以降も販売可能となったことは、ドイツ以上に日本にとってメリットが大きい。

e-fuelの実用化に向け、トヨタをはじめとする自動車メーカー各社や石

油元売り大手の ENEOS、出光興産などが研究開発に本腰を入れている。国も強力に支援する構えだ。2023 年 2 月に閣議決定された「GX 実現に向けた基本方針」では、e-fuel と SAF（サステナブル航空燃料）の製造技術開発、製造設備に今後 10 年間で 1 兆円の官民投資を行なう方針だ。また、23 年 6 月に発表された「合成燃料（e-fuel）の導入促進に向けた官民協議会（中間とりまとめ）」では、従来 2040 年頃としていた e-fuel 商業化の時期を 2030 年代前半に前倒しすることが明記された。背景には 2035 年までに間に合わせたいというスケジュール感があると思われる。

3-4 世界初の e-fuel 商業生産を目指すチリの HARU ONI プロジェクト

いま、チリで世界初となる商業規模の e-fuel 製造プラント構築を目指す Haru Oni プロジェクトが動き出している。「Haru Oni」は原住民の言葉で「強風」を意味する。プロジェクトのサイトがあるチリ南部のマガジャネス地方は、強い風が年を通して安定的に吹き続ける風力発電には最適の場所だ。この電力を使って水を電気分解すれば、極めて低コストでグリーン水素を製造することができる。もう一つの原料 CO₂ については、大気中の CO₂ を直接捕集（DAC）する。

プロジェクトメンバーにはチリ電力会社 AME の関連企業 HIF グローバル（Highly Innovative Fuels Global）、シーメンス・エナジー（独）、ボルシェ（独）、エネル（伊）、エクソンモービル（米）などが名を連ねる。プロジェクトオーナーは HIF グローバルであるが、実質的にプロジェクトを主導するのはドイツの 2 社である。シーメンス・エナジーは風力発電機、電解装置など主要機器のサプライヤーであり、システムインテグレーターとしてプロジェクト全体を統括する。ボルシェは HIF グローバルの設立時からの出資者であり、本プロジェクトのオフテイカー（製品の購入を予め約束）でもある。また、ドイツ政府からは 800 万ユーロ（約 12.8 億円）の助成金が出ている。

2021 年 7 月からプラントの建設がスタートし、22 年 12 月には最初の製

「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

品 2,600 リットルの e-fuel が出荷された。製造能力は、パイロットプラント段階の現在は年間 130 キロリットルであるが、2025 年に 5 万 5 千キロリットル、2027 年に 55 万キロリットルへと、規模を拡大する計画である。



Haru Oni project のパイロット工場（出典：HIF Global）

HIF グローバルは HARU ONI プロジェクトで得た経験や知見を生かし、e-fuel 生産をグローバルに展開していく方針である。

米国では、テキサス州マタゴルダ郡に約 60 億ドルを投資して、年間 2 億ガロン（約 76 万キロリットル）の e-fuel を生産する工場を建設する計画だ。2024 年に着工し 27 年完成を目指している。

このプロジェクトもシーメンスとボルシェがバックアップしている。シーメンスは電解装置（総容量 1.8GW）を供給する。製品の販売先は米国内と見られるが、余剰分はボルシェが引き取るものと思われる。米国では、昨年成立したインフレ抑制法により、グリーン水素製造には水素 1kg あたり最大 3 ドルの生産税控除（実質的な補助金）が受けられる。これにより米国で製造する e-fuel のコストは再エネ発電コストの低いチリより安くなる。

また豪州では、グループ会社の HIF タスマニアがタスマニア州北西部サリー・ヒルズで、オーストラリア初となる商業規模の e-fuel 工場建設を計画している。250 メガワットのグリーン水素と木質バイオマス由来の CO₂ から年間 2,000 万ガロン（約 7.6 万キロリットル）の e-fuel を、2028 年から生産する計画である。

4. 次世代船舶燃料アンモニアとメタノール

4-1 海運の脱炭素化

国際海運が排出する CO₂ は世界の総排出量の 2.1% を占める（2018 年、出典：IEA）。これはドイツ 1 国の排出量に匹敵する量だ。

国連の専門機関である国際海事機関（IMO）は今年 7 月、ロンドンで開いた委員会で、CO₂ 排出量を 2008 年と比べて 2030 年までに 20～30% 削減、2040 年までに 70～80% 削減、2050 年頃までに実質ゼロとする新たな目標を 175 の加盟国の全会一致で採択した。

荷主からの要請も強まっている。自動車メーカーは輸出する車を運ぶ自動車運搬船の脱炭素化を要求する。また、アップル（アメリカ）のように、2030 年までにグローバルサプライチェーンの 100% 脱炭素化を宣言した企業では、部品のサプライヤーや製品の販売企業も海上輸送の脱炭素化が必要になる。

世界の海運業界は、IMO 目標や荷主の要請に迫られて脱炭素の動きを早めている。

当面の対策として有力なのが、燃料を重油から液化天然ガス（LNG）に転換することだ。LNG も化石燃料だが、重油に比べ CO₂ 排出量を 25% 削減できる。次世代カーボンニュートラル（CN）燃料への「つなぎの燃料（bridge fuel）」という位置づけである。

ヨーロッパの認証機関 DNV によると、LNG 燃料船は 2022 年 1 月時点で 251 隻が運航中、403 隻が発注中または建造中で、合計 654 隻を数える。

「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

クラークソンズリサーチ（英国の海運調査会社）によれば、2022年にも397隻発注されており、数年後には1000隻を超えるLNG燃料船が世界の海を航行することになる。

4-2 次世代船舶燃料の種類と特徴

2050年カーボンニュートラルに向けては、航行時にCO₂をまったく出さないCN燃料に全面的に切り替える必要がある。主な船舶用CN燃料としては、水素、アンモニア、バイオメタノール、e-メタノール（再エネ水素とリサイクルCO₂から作る合成燃料）などがある。なお、バイオメタノールとe-メタノールは燃焼時にCO₂を排出するが、バイオマスやリサイクルCO₂を原料としているのでカーボンニュートラルとされる。

表1 次世代船舶燃料の種類と特徴

	燃料	CO ₂ 排出※	燃料体積(重油比)	技術レベル	課題	想定される用途
化石燃料	LNG	CO ₂ 削減率25% (重油比)	1.7倍	実用化済み	CO ₂ 削減効果は限定的 メタンスリップの発生	外航船で既に稼働 (当面の対応)
CN燃料	メタノール (バイオ/合成)	CO ₂ 排出実質ゼロ	2.4倍	機器：実用化済み 燃料：開発・実証段階	燃料のコスト、供給量	外航船
	アンモニア	CO ₂ 排出ゼロ	2.7倍	燃焼技術開発段階	毒性、難燃性への対応 N ₂ O(温室効果300倍)	外航船
	水素(内燃機関)	CO ₂ 排出ゼロ	液化水素：4.5倍 圧縮水素：7.8倍 (70MPa) **	燃焼技術開発段階	超低温(液化水素の場合) 燃料体積が大きい	外航船/大型内航船
	水素(燃料電池)	CO ₂ 排出ゼロ NO _x 等の排出もゼロ		自動車等で既に実用化	航続距離が短い	小～中型内航船
外部電源	電動化 (バッテリー方式)	再エネ電力ならCO ₂ 排出ゼロ、NO _x もゼロ	燃料搭載なし (蓄電池搭載)	自動車等で既に実用化	航続距離が極めて短い	小型で航続距離の短い内航船

CN=carbon neutral

※ 走行時のCO₂排出量(燃料製造時および輸送時の排出は含まず。メタンスリップ等も考慮せず)

** 圧縮水素は容器(高压ガスタンク)の重量、体積が大きいため、その分更に大きくなる

出典：筆者作成

水素は燃やしてもCO₂を排出しない最もクリーンなエネルギーだが、体積エネルギー密度が低い。マイナス253度の極低温で液化すれば体積は800分の1に縮小するが、それでも熱量当たりの燃料体積は重油の4.5倍にもなる。長距離航行する外航船には燃料タンクが大きくなり過ぎる。

こうしたことから、外航船・大型船の次世代燃料としては、アンモニアとメタノールが有力だと見られている。

4-3 日本はアンモニアを本命に

日本の海運・造船業界はアンモニアを次世代燃料の本命とする戦略だ。その理由としては下記のようなことが挙げられる。

- (1) 日本は発電部門の脱炭素化にアンモニア発電の研究開発・実証事業に取り組んできた。そのため、アンモニア燃料についての知見、燃焼技術の蓄積がある。
- (2) アンモニアはLNGと同じ気体燃料で、LNG燃料船からの転換が容易。
- (3) アンモニアはe-メタノールに比べ、より低コストで大量生産できる可能性が高い（アンモニアは既に大量生産が確立しており世界に工場も多い、e-メタノール製造ははまだ実証段階、かつ原料にリサイクルCO₂を使うのでCO₂回収コストが余分に掛かる）。

アンモニア燃料船の実用化には、エンジンや燃料供給システムの開発、アンモニアの毒性への安全対策などが必要だ。海運大手3社は国内造船会社と協力して、アンモニア燃料船の開発に乗り出している。

日本郵船は、ジャパンエンジンコーポレーション、IHI原動機、日本シッパヤード、日本海事協会と共同で、大型アンモニア燃料焚きアンモニア輸送船の開発・建造に着手している。2026年に竣工し、その後実証運航に入る予定だ。

商船三井も、三菱造船、名村造船所と共同で、同様のアンモニア燃料焚きアンモニア輸送船の基本設計を進めている。また、ドイツのマン社との間で、マン社が開発中のアンモニア燃料エンジン発注に向けた基本協定書を締結済みだ。

川崎汽船は20万トン級の大型ばら積み船を、伊藤忠商事、日本シッパヤード、三井E&Sマシナリー、NSユナイテッド海運と共同で開発を進めている。

「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

アンモニア燃料船の本格的な普及は、燃料コストの低下動向にもよるが2030年代に入ってからとなる。

4-4 欧州海運業界の取組み

一方、ヨーロッパ勢はメタノール燃料に着目している。メタノールは現在でもLNGと同様、つなぎの燃料として一部実用化されている。現在は大部分が化石燃料から作られており、CO₂削減率は重油に比べ10%減とLNGより劣る。ただ、メタノールは液体燃料なので、重油船と同様のエンジン、燃焼技術、バンキングなど、既存の技術、設備が利用可能という利点がある。また、将来的にバイオメタノールやe-メタノールの低コスト化が進んだ時点で、エンジンやタンクなどの設備を改修することなくCN燃料に転換が可能である。

この1～2年、ヨーロッパの船主やオペレーターはメタノール燃料船に積極的な投資を行っている。中でも、世界最大のコンテナ海運会社マースク（デンマーク）は、2021～2023年上期に合計25隻のメタノール燃料船を発注した。これらの新造船は重油とメタノールをシームレスに燃焼させることができるデュアルフューエルエンジンを搭載しており、当面は重油も使いつつメタノールの比率を徐々に引き上げCO₂削減率向上を図る。

4-5 スウェーデンのe-メタノールプロジェクト

次世代船舶燃料のうちアンモニア燃料については、大規模なグリーンアンモニア製造プロジェクトが世界の多くの地域で計画されている。

e-fuelに限れば、e-メタノールの商業生産を目指すプロジェクトが、欧州および米国でようやく動き出したところだ。その中で、スウェーデンのFlagship One、Flagship Twoという2つのプロジェクトが先行している。グリーン水素と生物起源のCO₂を合成してe-メタノールを製造する。Flagship Oneは既に建設が始まっており、25年に操業開始見込みで生産規模は年間5万トン。Flagship Twoは24年に建設開始、26年稼働予定

で生産規模は年間 10 万トンである。

2つのプロジェクトの開発企業はスウェーデンの e-fuel 開発会社 Liquid Wind AB であるが、このうち Flagship One を 22 年 12 月、世界最大の洋上風力発電事業者オーステッド（デンマーク）が買取り、オーステッドの下で建設が進められている。オーステッドは海運の脱炭素化を可能にするために大量の e-メタノールを生産することを経営の重点施策に掲げ、Flagship One に続き、米国メキシコ湾岸地域で 30 万トンの「Project Star」、デンマークで「Green Fuels for Denmark」プロジェクトの開発にも着手している。オーステッドのプロジェクトの多くは、同じデンマークの海運会社マースクがオフテーカーとなっている。

一方 Flagship Two は引き続き Liquid Wind AB が地元の再エネ発電事業者 Sundsvall Energi と共同で開発を進めている。この 2つのプロジェクトの開発コンセプトは e-メタノールを生産するための複製可能な施設を開発することで、Liquid Wind AB は 2030 年までにスカンジナビアで同様の施設を少なくとも 10 ヲ所開発する計画を表明している。

5. 次世代航空燃料 SAF

5-1 航空部門の脱炭素化

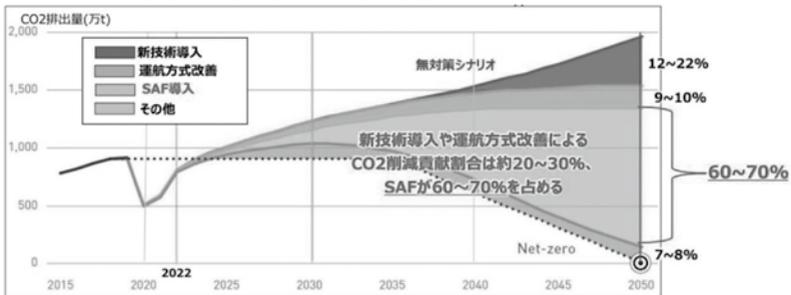
国際民間航空が排出する CO₂ は世界の総排出量の 1.8% を占める（2018 年、出典：IEA）。国際民間航空機関（ICAO）は 2022 年 10 月開催の第 41 回総会で、2050 年までに CO₂ 排出量を実質ゼロにする長期目標を採択した。「2020 年以降、国際航空での温室効果ガス（GHG）の総量を増加させない」との従来の目標から、カーボンニュートラルへと大きく舵を切ったことになる。

航空業界のサステナビリティを推進する団体、航空輸送行動グループ（ATAG：Air Transport Action Group）は、ICAO の長期目標達成に向けた CO₂ 排出削減シナリオを提示している（図 3）。（筆者注一図 3 では

「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

2035年までのCO₂削減のベースラインが2019年レベルをキープするようになっているが、実際に採択された長期目標は19年レベルの85%をベースラインとしている。このシナリオでは、新型機材等の新技術導入と運航方式の改善で20～30%削減、SAF（Sustainable Aviation Fuel、持続可能な航空燃料）導入で60～70%、残る7～8%は市場メカニズム（カーボンオフセットなど）と、2050年までの具体的な削減目標を示しており、特にSAFのウェイトが大きい。

航空機のCN燃料としては、電動化や水素燃料もあるが、これらは大量の燃料を必要とする長距離飛行には適していない。大型ジェット機には、従来燃料と同様に液体燃料で、重量当たりでも体積当たりでもエネルギー密度が最も高いSAFが最適である。



出典：定期航空協会（原典は ATAG 「Waypoint2050」）

図3 国際航空におけるCO₂排出削減シナリオ

5-2 SAFの利用状況と将来需要見通し

SAFは従来のジェット燃料と同様の性状を有するドロップイン燃料であり、CO₂削減効果はLCA（Life cycle assessment）で80%程度である。現在はバイオマスを原料として作られているが、水素とリサイクルCO₂から作るe-SAFも実用化に近い段階に来ている。

米国の規格設定機関 ASTM International が、原料と製造方法の組合せ

により7つのカテゴリー（Annex）に分類し、Annex 毎に従来燃料との混合上限比率を規定（表2）。これがSAFの国際規格となり、この規格に基づいて2010年代後半からSAFの使用が始まった。

表2 SAFの国際規格

ASTM D7566	製造技術	従来の燃料との混合上限	原料
Annex1	Fischer-Tropsch 法により精製される合成パラフィンケロシン (FT-SPK)	50%	有機物全般
Annex2	植物油等の水素処理により精製される合成パラフィンケロシン (Bio-SPK 又は HEFA)	50%	生物系油脂
Annex3	発酵水素化処理糖類由来のイソ・パラフィン (SIP)	10%	バイオマス糖
Annex4	非化石資源由来の芳香族をアルキル化した合成ケロシン (SPK/A)	50%	有機物全般
Annex5	アルコール・ジェット由来の合成パラフィンケロシン (ATJ-SPK)	50%	バイオマス糖紙ごみ
Annex6	Catalytic Hydrothermolysis Jet (C HJ)	50%	生物系油脂
Annex7	Hydrocarbon-HEFA (HC-HEFA)	10%	微細藻類

出典：国土交通省 航空機運航分野におけるCO₂削減に関する検討会資料（2021.3）

原典は ASTM International

表2の各製造方法のうち、現時点で商業的に生産されているものの大部分は、Annex 2の廃食油などを原料としたHEFAである。HEFAの主なメーカーは、フィンランドNeste、フランスTotal、米国World Energy、米国Phillips 66などである。しかしながら、原料の調達量が十分でないことから、供給量の拡大は難しい状況にある。また、製造コストも従来のジェット燃料と比べ3～5倍高い。

国際航空運送協会（IATA）によれば、2022年の世界のSAF生産量は24万トンから38万トン（30万キロリットルから45万キロリットル）と推定され、ジェット燃料総需要の0.1%から0.15%程度しかカバーしてい

「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

ない。従来のジェット燃料との間には大きな価格差があるにもかかわらず、生産された SAF は一滴残らず航空会社に販売された。これらの購入は、2022 年の単年度で 3 億 2,200 万ドルから 5 億 1,000 万ドルの追加コストを業界にもたらした¹⁾。

先述 ATAG の CO₂ 削減シナリオでは、2050 年には需要量は 4.1 億～5.5 億キロリットル（世界のジェット燃料の 90%）まで増加すると見込まれている。

5-3 SAF の利用と供給拡大に向けた規制と支援策

EU 理事会は 2023 年 10 月、航空燃料に SAF を一定割合混合することを義務づける新たな規制を採択した。義務化は 25 年から始まり、下表の通り 5 年ごとに混合割合が引き上げられていく。また、バイオ燃料の供給制約への対策として、SAF の中で e-fuel の割合を増やしていくことを求めている。2050 年には SAF の混合割合が 70%、うち 35% 以上が e-fuel でなければならない。

これにより、欧州を発着するほぼすべての航空会社は SAF の使用を義務づけられることになり、供給サイドでは SAF（特に e-fuel）の商用化促進、生産拡大が求められる。

一方支援策としては、時限的に SAF の CO₂ 排出ゼロとして扱う（排出枠の調達は不要）ことや、航空会社に対して、SAF の使用量に応じて、追加的に排出枠が割り当てられる（SAF を供給すればするほど、市場に売却可能なクレジットを追加的に得ることができる）等が出されている。

表 3 EU の SAF・合成燃料混合規制

	2025 年	2030 年	2035 年	2040 年	2045 年	2050 年
SAF	2%	6%	20%	34%	42%	70%
うち合成燃料	—	1.2%	5%	10%	15%	35%

出典：欧州航空安全機関

米国では、2021年発表の「SAF グランドチャレンジ」において、2030年にSAF混合率10%、50年には軍用も含めて100%SAFに置き換える目標（義務ではない）を設定している。支援策としては、2022年インフレ抑制法で、GHG削減率が50%以上のSAFを混合する事業者に対し1.25ドル／ガロン（約48円／L）、GHG削減率に応じて最大1.75ドル／ガロン（約67円／L）まで税額控除（実質的な補助金）を認める。

日本でも、30年時点の使用量の10%をSAFに置き換える目標が設定されている。義務化されてはいないが、ANA、JALの両社は目標通り10%（171万キロリットル相当）を使用することを公約している。

5-4 欧州のe-SAFプロジェクト

EUのSAF混合比率規制（正式決定以前からEU委員会によって提案されていた）を受け、欧州ではe-SAF製造プロジェクトが数多く存在する。パイロットプラントや実証ベースのプラントが既にいくつか動き出しており、商業規模のプラントも10を超えるプロジェクトが計画されている。

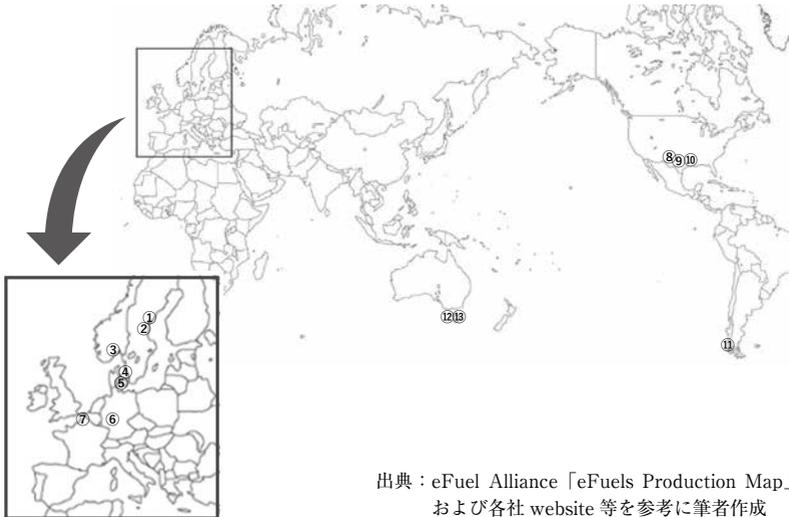
その中で、世界初の商業生産を目指しているのがアルカディア・イーフューエルズ（デンマーク）が主導するe-fuelプロジェクトだ。このプロジェクトには、FT合成に豊富な経験と知見を有する世界的な化学・エネルギー企業であるSasol（南アフリカ）とCO₂排出削減技術の世界的リーダーであるTopsoe（デンマーク）の2社が協力し、プラント建設のエンジニアリングはテクニップ・エナジーズ（仏）が担当する。第1号のプラントをデンマークのヴォーディングボリに建設し、26年に商業運転を開始、稼働後は年間10万キロリットルのe-ケロシンとe-ナフサを生産する計画である。アルカディアは、さらに27年にかけて同規模のプラントを2カ所建設する計画も表明している。

これらに続き、20年代後半には欧州で商業規模のプラントが次々と生産を開始する見込みである。

「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

表 4 主な商用規模 e-fuel プロジェクト

	プロジェクト名	国名	主な参加企業	CO2 供給源	生産する e-fuel の種類	主な用途				生産目標 (稼働予定)
						自動車	船舶	航空	化学品	
①	Flagship One	スウェーデン	Ørsted	BIO	メタノール		○			5.5 万トン/年 (2025)
②	Flagship Two	スウェーデン	Liquid Wind AB, Sundsvall Energi	BIO	メタノール		○			10 万トン/年 (2026)
③	Norsk e-Fuel Alpha	ノルウェー	Sunfire, Climeworks, Paul Wurth	DAC	ジェット燃料			○		5 万 kL/年 (2026)
④	Green Fuels for Denmark	デンマーク	Ørsted, A.P.Møller-Maersk	BIO	メタノール ジェット燃料		○	○		5 万 kL/年 (2027) 25 万 kL/年 (2030)
⑤	Arcadia eFuels	デンマーク	Arcadia eFuels, Topsoe, Sasol, Technip Energies	DAC, BIO	ジェット燃料 ディーゼル、ナフサ	○		○	○	10 万 kL/年 (2026)
⑥	INERATEC Pioneer Plant	ドイツ	INERATEC, Engie, Safran	BIO	ジェット燃料			○		3,500kL/年 (2026)
⑦	Reuze Project	フランス	Engie, Infinium, ArcelorMittal	CCU	ジェット燃料 ディーゼル、ナフサ		○	○	○	10 万 kL/年 (2026)
⑧	Ultra-Low Carbon Fuels Project	米国	Infinium	CCU	ジェット燃料 ディーゼル	○		○		非公表 数十万トン/年 (2025～)
⑨	HIF USA	米国	HIF Global	DAC, CCU	ガソリン	○				76 万 kL/年 (2026)
⑩	Project Star	米国	Ørsted	BIO	メタノール		○			30 万トン/年 (2027)
⑪	Haru Oni	チリ	HIF Global, Siemens, Porsche, ENEL, Exxon	DAC	ガソリン	○				5.5 万 kL/年 (2027) 55 万 kL/年 (2030)
⑫	Bell Bay Power-fuels Project	豪州	ABEL Energy	BIO	メタノール	○	○		○	30 万トン/年 (2027)
⑬	HIF Tasmania	豪州	HIF Global	BIO	ガソリン	○				7.6 万 kL/年 (2028)



出典：eFuel Alliance 「eFuels Production Map」
および各社 website 等を参考に筆者作成

6. e-fuel の環境性と DAC（直接空気回収技術）

6-1 e-fuel はカーボンニュートラルか？

ここで問題となるのは e-fuel の環境性だ。発電所や工場などで排出する CO₂ を再利用（カーボンリサイクル）した場合、これを化学製品やセメントなどの原料に使う分には CO₂ を排出しないが、e-fuel の場合には使用すれば燃焼して CO₂ を排出することになる。この排出責任を原排出者（工場など）と最終排出者（e-fuel 使用のエンジン車）のどちらが負うかがポイントとなる。仮に半々とすれば、e-fuel 側の削減率は最大でも 50% にとどまる。

EU の再生可能エネルギー指令（RED：Renewable Energy Directive）では、非バイオマス由来の再生可能燃料（RFNBO：Renewable fuels of non-biological origin）の基準を CO₂ 削減率 70% 以上と規定している。2035 年以降の e-fuel を使用するエンジン車の販売を容認する方針の詳細（CO₂ 削減基準など）はいまだ公表されていないが、おそらく RFNBO 基準が準用されることになろう。そうなると、化石燃料起源の CO₂ を利用した e-fuel はクリーン燃料と認定されない可能性が高い。

この点をクリアするには、原料となる CO₂ はバイオマス由来の CO₂ か、大気中から直接捕集（DAC：Direct Air Capture）した CO₂ でなければならない。チリの Haru Oni プロジェクトで DAC が使われているのはそのためだ。

6-2 DAC（直接空気回収技術）について

DAC（Direct Air Capture、直接空気回収技術）は、大気から直接 CO₂ を分離・回収する技術である。回収した CO₂ を CCS（Carbon dioxide Capture and Storage、CO₂ を分離・回収し地中などに貯留する技術）と同じように地下貯留すれば、大気中の CO₂ を実質的に減少させるネガティブエミッション技術であり、気温上昇を 1.5℃ 未満に抑えるという

「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

パリ協定の長期目標を達成するためには不可欠の技術とされている。

ただ、大気中の約 0.04% という希薄な CO₂ を取り出すため、工場などの排ガスから回収する CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) に比べ技術的難易度は高く、その分コストも高くなる。国際エネルギー機関 (IEA) の分析によれば、DAC のコストは 134 ~ 342 ドル / t-CO₂ と推計され、火力発電や製鉄からの回収 (40 ~ 100 ドル) に比べ 3 倍以上高い²⁾。

米国エネルギー省は、今後 10 年間で 100 ドル / t-CO₂ に削減する目標を設定し、研究開発助成プログラム (22 年 ~ 24 年予算額 24 百万ドル)、炭素管理技術への助成金 (DAC および CCS の 33 の研究開発プロジェクトに対し総額 1.3 億ドル) 等により民間の技術開発を支援する。また、米国インフレ抑制法では、DAC 実施者に対し CO₂ 回収 1 トン当たり 130 ドル ~ 180 ドルの税額控除 (実質的な補助金) を設けている (表 5)。これによって米国内で DAC がビジネスとして成り立つ可能性が広がった。

表 5 炭素回収・貯留に対する税額控除 (米国インフレ抑制法)

CCS (回収・貯留)	85 ドル / t-CO ₂
EOR* (回収・貯留)	60 ドル / t-CO ₂
DAC (回収・貯留)	180 ドル / t-CO ₂
DAC (回収・利用)	130 ドル / t-CO ₂

*EOR (Enhanced Oil Recovery) は CCS の 1 種で、老朽油田に CO₂ を圧入し原油生産量の増進を図る技術

DAC の事業化に向けて欧米のベンチャー企業、Climeworks (スイス)、Carbon Engineering (加)、Global Thermostat (米) などが動き始めている (表 6 参照)。これら 3 社で 18 の DAC プラントが (大多数は小規模なパイロットプラントであるが) 稼働しており、その CO₂ 回収量は合計年間 8,000 トン弱である³⁾。

米国では本格的な商用 DAC 施設の建設も始まっている。石油開発大手のオキシデンタル社傘下の 1PointFive 社が Carbon Engineering と提携して、テキサス州エクター郡で進める STRATOS プロジェクトだ。2025 年の稼働後は年間最大 50 万トンの CO₂ を回収（その後年間最大 100 万トンまで拡張見込み）する計画で、回収した CO₂ は、一部は地下貯留（カーボンクレジットとして販売）し、一部は e-fuel の原料として販売される。

表 6 DAC 先進企業の概要とプロジェクト

	Cimeworks	Carbon Engineering	Global Thermostat
Location	Switzerland	Canada	United States
System type	Solid sorbent	Liquid solvent	Solid sorbent
Thermal energy needs	80-120°C / 176-248°F	900°C / 1652°F	105-120°C / 221-248°F
Thermal energy source	Non-fossil energy resources (geothermal, waste heat, etc.)	Natural gas with CCS	Energy resource agnostic
Projects	15 plants around Europe with a collective capacity of just under 6,000 tCO ₂ /yr	Pilot plant in Canada; developing 1 MtCO ₂ /yr capacity plant in Southwest United States	2 plants in the United States with a collective capacity of 1,500 tCO ₂ /yr
Investments	Most recent round of funding, in March 2022, reached \$650 million	Received \$70 million in total investment from governments and corporates	Received investments of \$68 million in most recent round of funding in 2019

出典：世界資源研究所 (WRI) 「6 Things to Know About Direct Air Capture」
日本語部分は筆者追記

7. e-fuel 製造コストはどこまで下がる？

もう一つの、そして最大の課題はコストだ。資源エネルギー庁の試算によれば、e-fuel の製造を原料調達から製造まですべて国内で行った場合、約 700 円／リットルのコストがかかる。このうち約 9 割がグリーン水素のコストであり、その内訳は電気分解に使う再エネ電力のコストが大半を占

「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

める。再エネコストの安い海外の水素を輸入し国内で e-fuel を製造するケースは約 350 円／リットル、すべて海外で製造するケースは約 300 円／リットルと試算されている（表 7）。

表 7 e-fuel の製造コスト（現状の試算値）

H ₂	CO ₂	製造コスト	
100円/Nm ³ ×6.34Nm ³ /ℓ	5.91円/kg×5.47kg/ℓ		※NEDO CO ₂ からの液体燃料製造技術に関する開発シナリオ評価のための調査（2020.8）の結果に基づき試算。
= 634円/ℓ	+ 32円/ℓ	+ 33円/ℓ	= 約700円/ℓ
32.9円/Nm ³ + 14.65円/Nm ³	×6.34Nm ³ /ℓ		国内の水素を活用し、国内で合成燃料を製造するケース
= 301円/ℓ	+ 32円/ℓ	+ 33円/ℓ	= 約350円/ℓ
32.9円/Nm ³ ×6.34Nm ³ /ℓ			海外の水素を国内に輸送し、国内で合成燃料を製造するケース
= 209円/ℓ	+ 32円/ℓ	+ 33円/ℓ	= 約300円/ℓ
20円/Nm ³ ×6.34Nm ³ /ℓ			合成燃料を海外で製造するケース
= 127円/ℓ	+ 32円/ℓ	+ 33円/ℓ	= 約200円/ℓ
			将来、水素価格が20円/Nm ³ になったケース

出典：経済産業省審議会資料「CO₂等を用いた燃料製造技術開発プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性」2021年10月

国内のガソリン価格は174.7円（2023年12月第1週のレギュラーガソリン全国平均価格）⁴⁾、税金（72.4円）と激変緩和補助金（22円）を差し引きすると、正味124.3円となる。仮に流通経費＋利潤を20%とすれば、ガソリンの国内製造コストは100円程度と試算されるので、e-fuelのコストは国内製造で7倍、再エネ発電コストの安い海外で製造しても3倍高い。DACを使った場合はさらに割高となる。e-fuel 実用化には、ガソリン税の非適用やカーボンプライシング導入等の支援策を前提としても、コスト差を2倍以内に抑えることが必要であろう。

e-fuel 製造コストのうち、表7に見る通り水素のコストが大きなウェイト（国内製造で9割、海外製造で7割）を占めている。したがって、いかに低コストのグリーン水素を調達できるかがカギとなる。

国際エネルギー機関（IEA）は、中東、アフリカ、オーストラリア、チリなど、再エネ資源に恵まれた地域では、グリーン水素製造コストは、2030年までに1.6ドル/kgまで下がる可能性があるとして予測している⁵⁾。これを表6の数式に当てはめれば、2030年のe-fuel製造コストは国内ガソリン原価の2倍以内の199円（1ドル145円で換算）となる。

また、eFuel Alliance*の分析によれば、e-fuel製造は2030年には0.98～1.75ユーロ（152～271円、1ユーロ=155円で換算）、2040年には0.84～1.54ユーロ（130～239円）に低下すると予測している。

これらの予測を前提とすれば、2030年代にはe-fuelが実用化される可能性は十分にあると思われる。

* eFuel Alliance：カーボンニュートラル燃料（climate-neutral synthetic fuels）を確立・普及させ、世界中で使用されることを目標に掲げる団体。ドイツに事務局があり、在欧企業を中心に石油、自動車、機械・プラントエンジニアリング、航空・海運、化学、エネルギー業界等が加盟。

8. おわりに～日本が取り組むべき施策

e-fuelの早期実用化に向けて、いま日本が取り組むべき施策が3つある。

1つはDACの技術開発をスピードアップすること。CCUのリサイクルカーボンから作ったe-fuelではEUの2035年以降のエンジン車に適合しない恐れがあるからだ。

第2に、e-fuelの普及を早めるために、税制優遇などのインセンティブ、あるいはガソリンにe-fuelを一定割合混合することを義務づけるなどの施策を導入すること。確実な需要が見込まれれば生産規模の拡大が促され、コスト低下が進むことが期待できる。

3つ目は、e-fuelをコストの安い海外で大量に作って日本に輸入するサプライチェーンの構築だ。日本は気象条件に恵まれていないハンデもあり、再エネ発電コストが高い。その結果グリーン水素を低コストで大量に作ることは極めてハードルが高い。前掲表7の通り、e-fuelの製造を原料

「e-fuel」はモビリティ脱炭素化の切り札となるか？

調達から製品まですべて国内で行う場合のコストは、すべて海外で製造するケースに比べ2倍以上も高い。再エネ資源に恵まれた国で、相手国側と協調してグリーン水素や e-fuel の製造プロジェクトを組成し、安定的に輸入できる体制を築いていくことが肝要だ。なお、海外で e-fuel 製造まで行なって輸入する場合は、海外で回収した CO₂ を日本国内で排出することになるので、2 国間で CO₂ をオフセットする枠組みの整備が必要となる。

注

- 1) 国際航空運送協会 (IATA) 「SAF Deployment」 p.1
SAF Deployment (iata.org)
- 2) 国際エネルギー機関 (IEA) 「Is carbon capture too expensive? 」 (2021.2)
<https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>
- 3) 世界資源研究所 (WRI) 「6 Things to Know About Direct Air Capture」
- 4) 燃料油価格激変緩和補助金 | 経済産業省 資源エネルギー庁 (nenryo-gekihen-kanwa.jp)
- 5) 国際エネルギー機関 (IEA) 「Global Hydrogen Review 2023」 (2023.9) p.80
GlobalHydrogenReview2023.pdf (windows.net)

参考資料

経済産業省 審議会資料

- 合成燃料研究会 中間とりまとめ (2021.4)
20210422_1.pdf (meti.go.jp)
- 第1回 商用化推進ワーキング・グループ (2022.12)
合成燃料に関する海外の技術動向について (みずほリサーチ & テクノロジーズ 作成)
001_07_00.pdf (meti.go.jp)
- 持続可能な航空燃料 (SAF) の導入促進に向けた官民協議会 中間とりまとめ (2023.5)
003_07_00.pdf (meti.go.jp)

国土交通省

- 船舶の脱炭素化（国土交通省 海事局 2021.12）
[001447792.pdf \(mlit.go.jp\)](#)
- 国際海運の 2050 年カーボンニュートラルに向けて（2022.3）
国際海運の 2050 年カーボンニュートラルに向けて（概要）
- 「内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会」とりまとめ（2022.12）
[001447040.pdf \(mlit.go.jp\)](#)
- 航空機運航分野における CO₂ 削減に関する検討会 第 1 回（2021.3）
[001395880.pdf \(mlit.go.jp\)](#)
- 同 第 5 回 航空機運航分野における脱炭素化の取組について（2022.9）
[001510269.pdf \(mlit.go.jp\)](#)

日本船主協会：海運資料室：海と船の Q&A

海と船の Q&A | JSA 社団法人日本船主協会 (jsanet.or.jp)

海事プレス ONLINE（2022.9）

《連載》内航海運の脱炭素化（上）「連携」と「支援」で排出削減 | 海運〈経営・全般〉ニュース | 海事プレス ONLINE (kaijipress.com)

《連載》内航海運の脱炭素化（下）電動船の適用範囲拡大が焦点 | 海運〈経営・全般〉 | ニュース | 海事プレス ONLINE (kaijipress.com)

航空機国際共同開発促進基金「バイオジェット燃料の最新動向」(2019.2)

<http://www.iadf.or.jp/document/pdf/r1-2.pdf>

石油エネルギー技術センター (JPEC)「持続可能な航空燃料 (SAF) の動向」(2022.4)

https://www.pecj.or.jp/wp-content/uploads/2022/04/JPEC_report_No.220401.pdf

同上「液体合成燃料の自動車用燃料への利用に向けた取り組み」(2023.3)

[JPEC_report_No.230301.pdf \(pecj.or.jp\)](#)

国際エネルギー機関 (IEA)

Global Hydrogen Review 2023 (windows.net)（2023.9）

EU レポート「欧州連合 (EU) における非生物由来の再生可能燃料」2022.11.15

[2022.5547_kjna31292enn.pdf](#)

欧州議会 (Think Tank, European Parliament)「ReFuelEU Aviation initiative

Sustainable aviation fuels and the 'fit for 55' package」(2023.11)

「e-fuel」はモビリティー脱炭素化の切り札となるか？

RefuelEU Aviation Regulation (europa.eu)
クラークソンズリサーチ (clarksons.net) (2023.1)
Green Technology Tracker: January 2023 - Clarksons Research
航空輸送行動グループ (ATAG=Air Transport Action Group) 「Waypoint2050」
「Waypoint 2050 Second Edition: September 2021」
米国エネルギー省 (DOE) ニュースリリース (2023.1.30)
DOE Invests More Than \$130 Million to Lower Nation's Carbon Pollution |
Department of Energy
世界資源研究所 (WRI) 「6 Things to Know About Direct Air Capture」 (2022.5)
Direct Air Capture: 6 Things To Know | World Resources Institute (wri.org)

