

e-fuelとは何か —CO₂とH₂で作る低炭素燃料の可能性—



三井物産戦略研究所
技術・イノベーション情報部インダストリーイノベーション室
稲田雄二

Summary

- e-fuelの利点は、グリーン水素と大気中のCO₂を原料とすればカーボンニュートラル燃料となることである。基本的に化石燃料と同等の品質のため、既存のインフラやエンジンとの互換性があり、航空・海運・長距離トラックなどの電化が困難な輸送手段の代替燃料となる。
- e-fuelの課題は、化石燃料やバイオ燃料より高コストであることで、水素製造およびCO₂の回収、製造プロセスの高効率化を図る技術開発を進める必要がある。
- 種々あるe-fuelの中で、メタノールが最も技術開発が進み、コスト改善が図られ、船用燃料として、また、化学品の基礎原料としての需要も見込まれる。

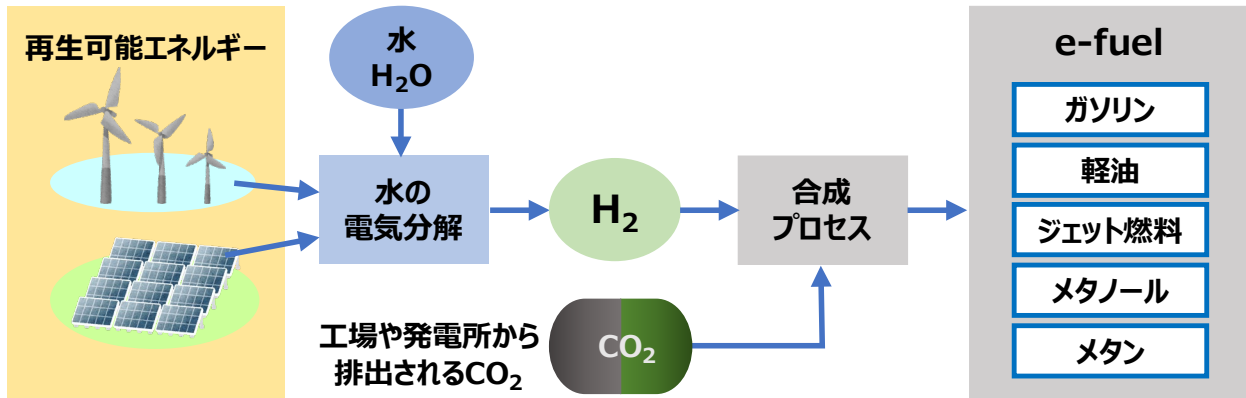
1. e-fuelとは何か？

e-fuelとは、CO₂（二酸化炭素）とH₂（水素）を合成して製造される燃料で、ガソリンや軽油、ジェット燃料などと同等の性能をもつことから、化石燃料の代替として利用できる。また、工場や発電所から排出されるCO₂や大気中のCO₂と再生可能エネルギーで作られるH₂を使ってe-fuelを製造すれば、新たにCO₂を排出することなく燃料として利用できるため、カーボンニュートラルな燃料として期待されている（図表1）。

e-fuelのeは、再エネの電気を使い水電解で製造したH₂を原料に使うことからelectro-fuelとイメージし、頭文字のeから名付けられたといわれている¹。その他の呼び方として、H₂とCO₂を合成することから合成燃料（synthetic fuel）と表現されることもある。

¹ 語源には他にも、ドイツ語の「Erneuerbarer Strom：再生可能エネルギーで発電した電気」の頭文字のEに、「燃料」の英語である「fuel」を付けたものという解釈もある。

図表1：e-fuelの製造概要

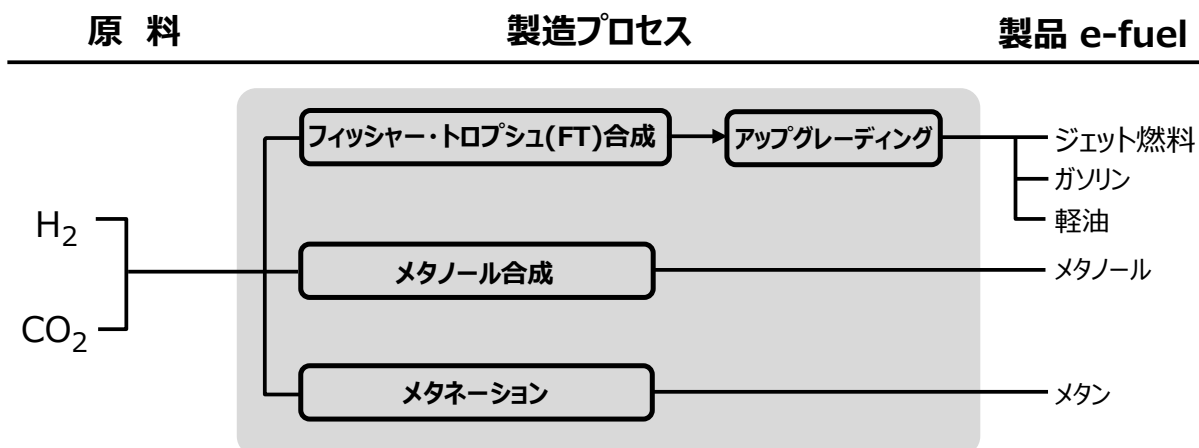


出所：三井物産戦略研究所

2. e-fuelの技術と特徴

e-fuelの製造プロセス、製品の概略を図表2に示す。現在、e-fuelの製造プロセスには3つの主要なプロセスがある。ガソリン、軽油、ジェット燃料、の製造にはフィッシャー・トロプシュ合成とアップグレーディングを組み合わせた製造プロセス、メタノール製造にはメタノール合成、メタン製造にはメタネーションといったCO₂とH₂からe-fuelを合成する製造プロセスがある。次項より、原料のCO₂とH₂の製造や各製造プロセスの特徴について解説する。

図表2：e-fuelの原料、製造プロセス、製品



出所：三井物産戦略研究所

2-1. 原料のH₂とCO₂

H₂には、天然ガスなどの化石燃料から製造されるグレー水素と、再エネを用いて水から電解装置で製造されるグリーン水素がある。e-fuelは、CO₂削減のために利用する燃料なので、原料の水素はグリーン水素が前提となる。

CO₂には、発電所や製鉄所などで化石燃料を燃焼させて排出されるCO₂（化石由来CO₂）、大気から回収するCO₂（大気由来CO₂）という2種類の調達手段がある。CO₂回収コストの観点からすると、工場排ガス中に濃度10～15%で排出されるCO₂を回収する方が、大気中に0.042%しか存在しないCO₂を回収するより効率が高くコストが安い。しかし、冒頭で解説したようにe-fuelの原料として望ましいのは大気由来CO₂を原料とすることである。e-fuelが脱炭素に貢献するためには、化石由来CO₂に頼らず、直接大気からCO₂を回収し、大気中のCO₂濃度を下げることが重要である。

H₂はグリーン水素、CO₂は大気由来を原料の条件とすると、それぞれの製造技術について最も効率が良く、低コストな技術を選択することも重要になってくる²。

2-2. e-fuelのガソリン、軽油、ジェット燃料

e-fuelのガソリン、軽油、ジェット燃料を製造するプロセス概要を図表3に示す。この製造プロセスは、逆シフト反応、フィッシャー・トロプシュ合成³（FT合成）、アップグレーディングという3つのプロセスで構成される。原料H₂とCO₂は逆シフト反応によりH₂とCO（一酸化炭素）から成る合成ガスに変換される。CO₂は、他の物質と反応を起こしづらい不活性な性質をもつ。そのため、逆シフト反応によりCO₂を反応しやすいCOに変換する必要がある。逆シフト反応はe-fuelの前処理ともいえる。次のFT合成では、合成ガス（H₂とCOの混合ガス）を合成粗油と呼ばれる炭化水素に変換する。合成粗油とは、さまざまな炭素と水素が結合した油分を意味する。FT合成は、目的とするe-fuelだけを製造することが難しい。

例えば、主にジェット燃料を製造するFT合成では、合成粗油は炭素数12水素数26（C₁₂H₂₆）のジェット燃料が大部分を占めるように製造するが、炭素数8水素数18（C₈H₁₈）のガソリン成分やナフサ（C₆H₁₄）も合成される。何種類かの炭化水素が同時に合成されてしまうため、FT合成に続くアップグレーディングで蒸留操作により精製し、ジェット燃料とガソリン、ナフサを分離し、それぞれの用途に応じた製品として出荷する。また、重油成分の水素と炭素の結合を改質してジェット燃料成分を増量するプロセスも採用されて

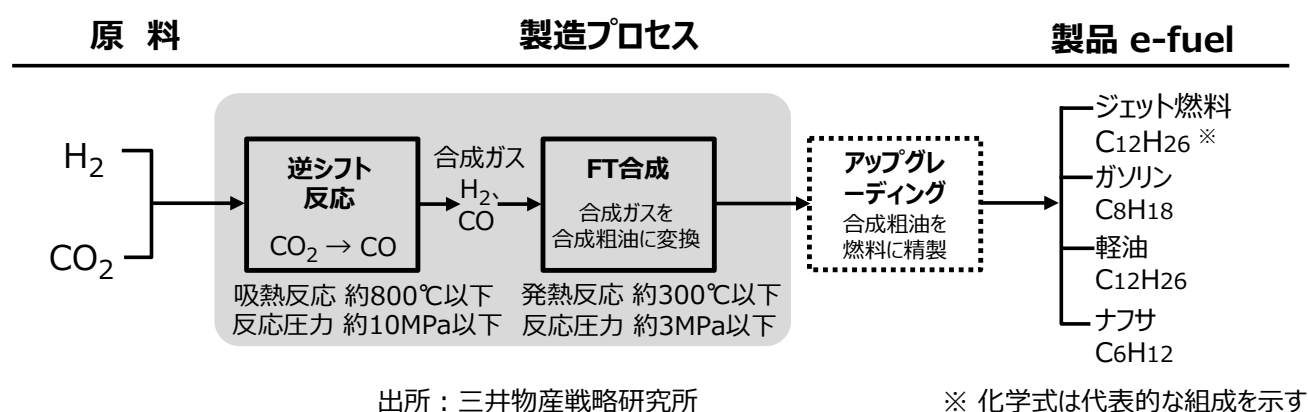
² グリーン水素製造では、アルカリ水電解（AWE）、固体高分子形水電解（PEM）、固体酸化物形水電解（SOEC）が現在主流となっている。大気からCO₂を回収する技術は、DAC（Direct Air Capture）と呼ばれ、主に化学吸収法、物理吸着法、膜分離法がある。それぞれの技術特徴を把握し、目的とするe-fuelの製造量を条件としながら、製造地点での利用可能な再エネのコストや量、技術進展の期待度などを考慮したH₂製造、CO₂回収方法を選択することが必要である。

³ ドイツの研究者フランツ・フィッシャーとハンス・トロプシュによって1920年代に開発されたことからフィッシャー・トロプシュ合成と呼ばれている。

いる。

合成原油中のジェット燃料成分を最大化するために、e-fuelでは、目的とする燃料油に沿ったFT合成の触媒や温度、圧力といった反応条件を見だし、最も効率が高いプロセスを選択あるいは開発することが鍵となる。逆シフト反応は鉄、銅、ニッケルなどを触媒に圧力1M～10MPa、約500～800℃の吸熱反応で、外部からの熱供給が必要となる。FT合成は鉄やコバルトを触媒とし、圧力2M～3MPa、約300℃の発熱反応である。

図表3：ジェット燃料、ガソリン、軽油 e-fuelの製造プロセス



2-3. e-メタノール

e-メタノールを製造するプロセス概要を図表4に示す。 H_2 と CO_2 は、1段階のメタノール合成プロセスを経てメタノールとなる。上述のFT合成によるe-fuel製造のように、逆シフト反応で CO_2 からCOを作る必要がなく、1つの反応リアクターでシンプルに製造できることが特徴である。メタノール合成は、銅系の触媒を用いる200～300℃の発熱反応であり、圧力3～10MPaで進行する。e-fuelの中で最も技術的に確立されているプロセスである。

図表4：e-メタノールの基本的な製造プロセス

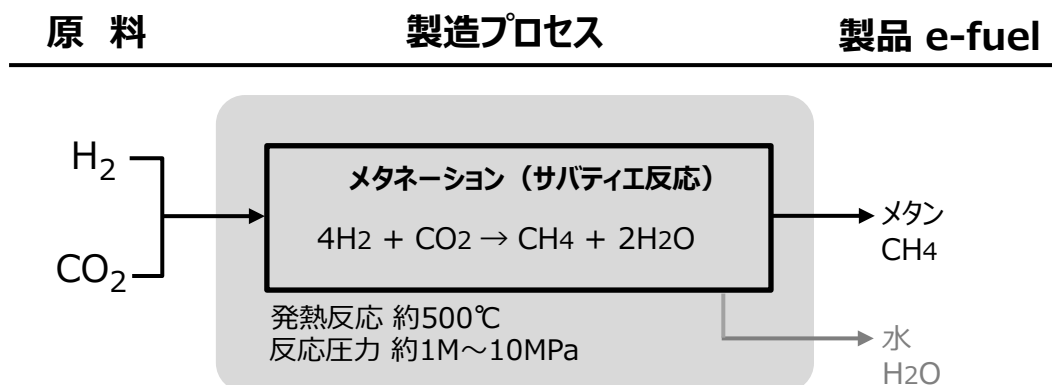


出所：三井物産戦略研究所

2-4. e-メタン

e-メタンを製造するプロセス概要を図表5に示す。メタネーションと総称される合成反応は、約100年前にフランスの化学者ポール・サバティエが発見し、サバティエ反応としても古くから知られていた。この反応は、 CO_2 と H_2 を500℃、1M～10MPaの条件下でルテニウムなどの触媒に接触させメタンを合成する。100年以上も前に発見されている反応だが、これまで大規模なe-メタン製造は行われてこなかった。その理由は、500℃の高温発熱反応であるため、効率良く除熱を行わなければ、反応を制御することができず、事故につながるリスクがあるからである。研究室の小さな実験装置で短時間の反応は可能でも、化学プラントの大きなリアクターで実現するのは技術的に難しいとされてきた。

図表5：e-メタンの製造プロセス



出所：三井物産戦略研究所

図表6に各e-fuelの製造プロセスをまとめた。2050年にカーボンニュートラルを目指す中で、e-メタンも商業規模での生産を目指し、研究機関や企業が開発に取り組むようになってきている。このような状況も含め次項では、各種e-fuelの開発を進めるプロジェクトを紹介する。

図表6：e-fuel製造プロセスのまとめ

e-fuel	プロセス	温度条件	特徴/課題
ジェット燃料 ガソリン、軽油	逆シフト反応+フィッシャー・トロプシュ（FT）合成 アップグレーディングで精製	逆シフト 800℃、吸熱反応 FT合成 300℃、発熱反応	・開発済み技術 ・逆シフトは吸熱反応のため、外部からの熱投入が必要 ・逆シフトとFT合成の2段階の反応装置が必要 ・狙った製品の収率向上のために触媒開発が重要
メタノール	メタノール合成	300℃ 発熱反応	・開発済み技術 ・発熱反応だが、既存技術で対応可能
メタン	メタネーション （サバティエ反応）	500℃ 発熱反応	・開発中の技術 ・高温発熱反応のため熱除去による反応制御が困難

出所：三井物産戦略研究所

3. e-fuelのプロジェクト事例

e-fuelプロジェクトの事例を図表7に示す。ジェット燃料は米HIF、米Infinium、デンマークOrstedなどの米国、欧州企業で開発が進み、2025年以降に生産が開始される見込みである。メタノールは、2012年よりアイスランドCarbon Recycling Internationalが地熱発電で製造するH₂を利用しe-メタノールを商業生産したのが最も古い事例である。近年は、Boyuan Chemicalなどの中国企業が多数のプロジェクトを進めている。欧州もEuropean Energy社などが開発を進める。

図表7：e-fuel プロジェクト事例

企業	e-fuel	生産量 (百万ガロン/年)	生産 開始年	場所	H ₂ 源	CO ₂ 源
HIF	ジェット燃料 ガソリン、メタノール	509	2028以降	オーストラリア、米国	PEM水電解	化石由来 バイオ由来
Infinium	ジェット燃料、軽油 ナフサ	38	2026	米国	水電解	化石由来
Orsted	ジェット燃料	164	2025	ドイツ	PEM水電解	バイオ由来 (DACの計画あり)
Twelve	ジェット燃料	0.04	2025	米国	PEM水電解 CO ₂ 電解	化石由来 バイオ由来
Sunfire	ジェット燃料	13	2026	ノルウェー	PEM水電解 CO ₂ 電解	バイオ由来
Carbon Recycling International	メタノール	1.3	2012	アイスランド	PEM水電解	地熱随伴CO ₂
Boyuan Chemical	メタノール	3.3	2024	中国	PEM水電解	不明
European Energy	メタノール	10.7	2024	デンマーク	PEM水電解	バイオ由来
大阪ガス	メタン	10 Nm ³ /h	2025	日本	SOEC電解 CO ₂ 電解	TBD

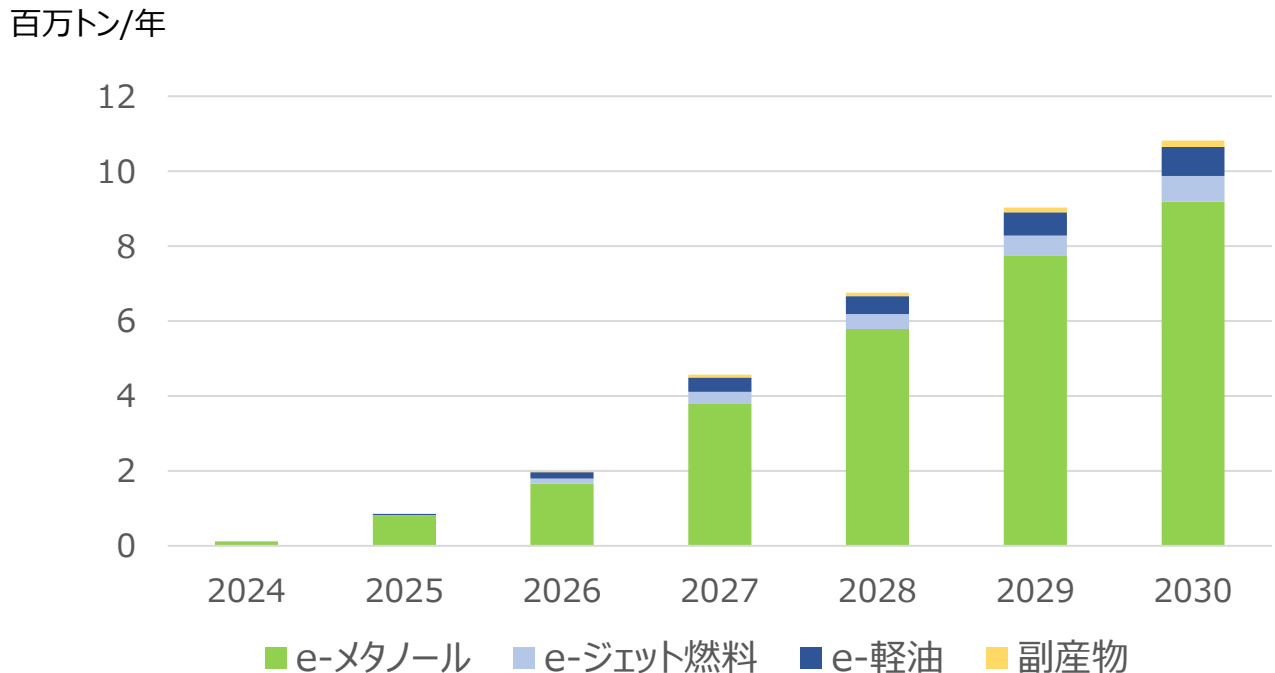
出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

メタンは、大阪ガスが国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のグリーンイノベーション基金事業により開発中で、2025年にメタン生産量10Nm³/hの小規模プラントを、2030年頃に400Nm³/hの商業規模に向けた実証プラントを建設する計画となっている。経済産業省は2030年頃に都市ガスの1%をe-メタンに置き換える目標を立てており、NEDO主導でガス事業者による開発を推進、e-メタンの商業規模での実現に注力している。

4. e-fuelの生産予測

2030年までのe-fuel生産予測の一例を図表8に示す。2025年に年間0.85百万トンを生産し、2030年には約11百万トンのe-fuelが生産される見込みとなっている。およそ8割がメタノールを占め、ジェット燃料と軽油が残り2割という構成である。e-メタノールは製造技術が確立され商業規模での生産が可能で、船用燃料や化学品の基礎原料としての需要が見込めることから生産量が多く予測されていると推察される。

図表8：e-fuel 生産予測



出所：IDTechExから三井物産戦略研究所作成

e-fuelは気候変動対策の一環として注目されており、各国で政策的支援が進んでいる。EUでは2030年までに温室効果ガス排出量を55%削減する目標を掲げたFit for 55パッケージの一環として、2023年にReFuelEU AviationおよびFuelEU Maritimeが採択された。これにより航空・海運分野でe-fuelを含む再生可能な燃料の導入目標値が設定されるなど、長期的な政策が進められている。一方、米国では、インフレ抑制法（IRA）によりCO₂を利用して燃料または化学品を製造する事業に対して免税措置が設定されている。このように、国家レベルの目標設定や支援策により、今後も普及が後押しされると予測される。

5. e-fuelの課題と展望

e-fuelの価格は、化石燃料やバイオ燃料よりも現状2～4倍と高価である。原料となるH₂、CO₂の調達コストを下げることで、生産プロセスについては安全性を担保しつつ生産効率を改善する技術開発などが対策として挙げられる。また、欧州では、CO₂削減効果を正当化、最大化するために大気由来もしくはバイオ由来のCO₂を原料とするよう規制する動きもある。これにより、製鉄、セメント、発電所などから大量に確保可能な化石由来CO₂の使用が将来的に制限される可能性があり、事業化の課題となる。

さまざまな課題があるが、温室効果ガスのCO₂と再生可能なH₂から燃料を製造することは究極の脱炭素技術であり、技術開発や価格差支援などの継続的な政策支援のもと普及促進されることが考えられる。

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できるとされる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社および三井物産グループの統一した見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社および三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。