

令和4年度燃料安定供給対策に関する調査事業
(製油所の事業転換に向けた技術動向に関する調査)
調査報告書

令和5年3月



一般財団法人石油エネルギー技術センター
Japan Petroleum Energy Center (JPEC)

目 次

1. 事業名		1
2. 事業目的		1
3. 事業内容		1
4. 調査方法		2
5. 事業期間		2
6. 納入物		2

調査報告書

1. 事業名

令和4年度燃料安定供給対策に関する調査事業（製油所の事業転換に向けた技術動向に関する調査）

2. 事業目的

国内の民間石油企業は石油需要の大幅な減少等の厳しい経営環境にある中、製油所閉鎖といった対応を進めていく一方で、2050年に向けたカーボンニュートラル目標の達成と共に、転換期・過渡期における一次エネルギーとしての石油・輸送用液体燃料の重要性への対応も含め、製油所等の製造・供給インフラを経済合理的かつ効率的に維持・強化することにより産業・企業・製品としての国際競争力を高め、エネルギー安定供給の責務を果たすことが強く求められている。しかしながら、その実現は一朝一夕にはいかない困難なことであり、我が国および我が国石油産業は、世界の先行事例を大いに参考にし、我が国に実装可能なモデルの選択と、その実現のための課題の整理と解決を議論していく必要がある。

本調査では、カーボンニュートラルに向けて既存設備の機能を大胆に活用・転換している海外主要国（欧州・北米・アジア地域）の先進的な取り組み実績・計画について技術的な側面からの調査等を実施することで、国内石油産業の国際競争力向上のための政策立案と民間企業の戦略立案に役立てることを目的とし、調査結果については、国民、国内企業、研究機関に対して、その理解促進のために発信する。

3. 事業内容

海外主要国（欧州、北米、アジア地域）におけるカーボンニュートラルに向けた製油所の事業転換に関する調査

海外主要国では、既存設備の次世代バイオリファイナリーへの転換、プラスチックリサイクルへの活用、合成燃料等の低炭素燃料設備の新設等を実現、または構想として打ち出している事例が増加している。これらの先行する事例について、我が国への実装に向けたアプローチとして、その背景やコンセプト、設備構成、適用・活用技術の実態や開発動向、導入する上での安全、性状、規格、環境面での制約等に注目して、特に下記項目を中心に最新情報を収集・整理した。

＜調査事項＞

- ① 注目されている製油所転換事例の規模・設備構成、適用・活用技術等
- ② 低炭素燃料の製造に関わる技術開発、性状と品質、製品化の動向等

4. 調査方法

事業内容の調査は、主として以下の方法により実施した。

(1) 海外現地調査

- ・ 欧州、北米、中国への調査員の長期派遣などにより、現地企業、団体、研究機関、政府との面会による直接的なヒアリング及び学会やセミナーへの参加を実施し、詳細な情報の収集・緻密な分析調査を実施した。

(2) インターネット・文献等による調査

- ・ 海外主要国における製油所の事業転換に向けた技術動向等について、各種報道、文献、報告書、プレスリリース、白書などの資料から調査を実施した。

(3) その他

- ・ 上記の事業内容について、提案書の内容に沿って調査を行った。
- ・ 調査の実施に当たって、資源エネルギー庁資源・燃料部石油精製備蓄課担当者に対し、原則1か月に1回以上面会して、調査内容の進捗報告及び意見交換等を行った。
- ・ 担当者から随時行われる質問事項への対応を迅速に行うとともに、仕様書の調査項目に関連するもので、取りまとめを行う上で補完的に調査を実施すべき事項については、調査を実施した。

5. 事業期間

令和4年9月21日から令和5年3月31日まで

6. 納入物

添付1：注目されている製油所転換事例の規模・設備構成、適用・活用技術等

添付2：合成燃料の製造に関わる技術開発

添付3：バイオ燃料の製造に関わる技術開発、性状と品質、製品化の動向等

以上

添付 1 :
**注目されている製油所転換事例の規模・設備構成、
適用・活用技術等**

令和 4 年度燃料安定供給対策に関する調査事業
(製油所の事業転換に向けた技術動向に関する調査)

令和 5 年 3 月



一般財団法人 石油エネルギー技術センター
Japan Petroleum Energy Center (JPEC)

はじめに

本報告書は、一般財団法人石油エネルギー技術センターが、経済産業省資源エネルギー庁から委託を受けて、令和 4 年度燃料安定供給対策に関する調査事業（製油所の事業転換に向けた技術動向に関する調査）の一部として実施した、「注目されている製油所転換事例の規模・設備構成、適用・活用技術等」についてとりまとめたものである。

国内の民間石油企業は石油需要の大幅な減少等の厳しい経営環境にある中、製油所閉鎖といった対応を進めていく一方で、2050 年に向けたカーボンニュートラル目標の達成と共に、転換期・過渡期における一次エネルギーとしての石油・輸送用液体燃料の重要性への対応も含め、製油所等の製造・供給インフラを経済合理的かつ効率的に維持・強化することにより産業・企業・製品としての国際競争力を高め、エネルギー安定供給の責務を果たすことが強く求められている。

しかしながら、その実現は一朝一夕にはいかない困難なことであり、我が国および我が国石油産業は、世界の先行事例を大いに参考にし、我が国に実装可能なモデルの選択と、その実現のための課題の整理と解決を議論していく必要がある。

本調査では、カーボンニュートラルに向けて既存設備の機能を大胆に活用・転換している海外主要国（欧州・北米・アジア地域）の先進的な取り組み実績・計画について技術的な側面からの調査を実施するとともに、我が国への適用・導入可能性、さらには導入する場合における実現上の制約等の課題について分析・考察を行う。

具体的には、海外主要国では、既存設備の次世代バイオリファイナリーへの転換、プラスチックリサイクルへの活用、合成燃料等の低炭素燃料設備の新設等を実現、または構想として打ち出している事例が増加している。これらの先行する事例について、我が国への実装に向けたアプローチとして、その背景やコンセプト、設備構成、適用・活用技術の実態や開発動向など、最新情報を収集・整理した。

本調査が、我が国石油産業の今後の経営基盤強化の一助となれば幸いである。

令和 5 年 3 月

一般財団法人石油エネルギー技術センター

目次	頁
1. 調査目的・内容	6
1. 1 調査の背景及び目的	
1. 2 調査内容	
2. 調査結果	7
2. 1 欧州石油産業における製油所転換の背景	7
2. 2 主要石油精製企業の転換事例	9
(1) スペイン Repsol 社	
(2) フランス TotalEnergies 社、La Mède 製油所	
(3) オランダ Shell 社、ロッテルダム (Pernis) 製油所	
(4) スウェーデン Preem 社、Gothenburg 製油所	
2. 3 低炭素燃料 (LCF) 製造技術の動向	16
(1) 石油代替・低炭素燃料の分類と特徴	
(2) バイオ燃料製造およびプラスチックなど廃棄物の活用技術	
(3) 合成燃料の活用技術	
3. まとめ	32
引用文献	34

図目次

- 図 2.1.1 将来製油所への転換イメージ
- 図 2.1.2 EU の 2050 年に向けた輸送用燃料の転換シナリオ
- 図 2.1.3 欧州グリーンディールの枠組みにおける主要な戦略

- 図 2.2.1 Repsol 社概要
- 図 2.2.2 Repsol 社の製油所転換イメージ（現在と将来）
- 図 2.2.3 Repsol 社の低炭素燃料（LCF）転換ロードマップ
- 図 2.2.4 Repsol 社の E-Fuels デモプラント計画
- 図 2.2.5 Shell ロッテルダム（Pernis）製油所全景
- 図 2.2.6 Preem 社の二つの製油所
- 図 2.2.7 Pyrocell 熱分解プラントを含む木材から燃料油製造工程

- 図 2.3.1 石油代替・低炭素燃料の分類
- 図 2.3.2 低炭素燃料の TRL 推移（2035 年まで）
- 図 2.3.3 再生可能燃料の製造技術成熟度 TRL と燃料準備レベル FRL
- 図 2.3.4 世界と EU 域のバイオ燃料製造量
- 図 2.3.5 世界の HVO 製造拠点
- 図 2.3.6 EU 域の HVO 新設製造拠点
- 図 2.3.7 2021 年世界の HVO 需要量と製造量
- 図 2.3.8 EU 域 2050 年までのバイオエネルギー需要目標
- 図 2.3.9 EU 域 2050 年時に必要なバイオマス原料
- 図 2.3.10 2050 年に向けた EU 域 LCF と必要なバイオ資源
- 図 2.3.11 2050 年に向けた EU 域 LCF 製造用新規プラントの試算
- 図 2.3.12 各種廃棄物からの燃料油製造技術概要
- 図 2.3.13 バイオマスの分解反応条件（HTL と Pyrolysis）
- 図 2.3.14 ガス化炉（反応）タイプ
- 図 2.3.15 中間合成油の製油所プロセスへの投入位置
- 図 2.3.16 合成燃料—PtX 製造工程イメージ
- 図 2.3.17 合成燃料の製造工程と技術成熟度（TRL）
- 図 2.3.18 各合成燃料（1MJ）製造時のエネルギー消費量
- 図 2.3.19 各合成燃料製造・供給時のコスト（軽油 1L 換算）

表目次

表 2.3.1	新設プラントの設備コスト (CAPEX) 例
表 2.3.2	廃棄物系燃料転換技術のプロジェクト実績と設備投資コスト
表 2.3.3	前提とした電解技術と CO ₂ 回収技術の条件
表 2.3.4	eFuels Production Map 記載一連 (抜粋)

1. 調査目的・内容

本調査の背景・目的、調査内容、調査方法は以下の通りである。

1. 1 調査の背景及び目的

国内の民間石油企業は石油需要の大幅な減少等の厳しい経営環境にある中、製油所閉鎖といった対応を進めていく一方で、**2050** 年に向けたカーボンニュートラル目標の達成と共に、転換期・過渡期における一次エネルギーとしての石油・輸送用液体燃料の重要性への対応も含め、製油所等の製造・供給インフラを経済合理的かつ効率的に維持・強化することにより産業・企業・製品としての国際競争力を高め、エネルギー安定供給の責務を果たすことが強く求められている。しかしながら、その実現は一朝一夕にはいかない困難なことであり、我が国および我が国の石油産業は、世界の先行事例を大いに参考にし、我が国に実装可能なモデルの選択と、その実現のための課題の整理と解決を議論していく必要がある。

本調査では、カーボンニュートラルに向けて既存設備の機能を大胆に活用・転換している海外主要国（欧州・北米・アジア地域）の先進的な取り組み実績・計画について技術的な側面からの調査を実施するとともに、技術面における我が国への適用・導入可能性、さらには導入する場合における実現上の制約等の課題について分析・考察を行う。これらの調査・分析を行うことで、国内石油産業の国際競争力向上のための政策立案と民間企業の戦略立案に役立てることを目的とする。

1. 2 調査内容

海外主要国（欧州、北米、アジア地域）におけるカーボンニュートラルに向けた製油所の事業転換に関する調査を行う。海外主要国では、既存設備の次世代バイオリファイナリーへの転換、プラスチックリサイクルへの活用、合成燃料等の低炭素燃料設備の新設等を実現、または構想として打ち出している事例が増加している。これらの先行する事例について、我が国への実装に向けたアプローチとして、その背景やコンセプト、設備構成、適用・活用技術の実態や開発動向、導入する上での安全、性状、規格、環境面での制約等に注目して、特に下記項目を中心に最新情報を収集・整理する。また、それらの我が国への適用・導入可能性、実現上の制約等の課題について分析・考察を行う。

本報告は、特に以下の調査事項について特化して実施した結果とする。

＜調査事項＞

① 注目されている製油所転換事例の規模・設備構成、適用・活用技術等

2. 調査結果

2. 1 欧州石油産業における製油所転換の背景

欧州石油産業は 2050 年のカーボンニュートラルに向けた事業戦略と技術動向に関連して、製油所転換のイメージを発信している。図 2.1.1 は JPEC が予てから技術調査にて連携している欧州石油環境保全連盟（Concawe、“Conservation of Clean Air and Water in Europe”）が製油所”Vision 2050”として発表しているイメージである。

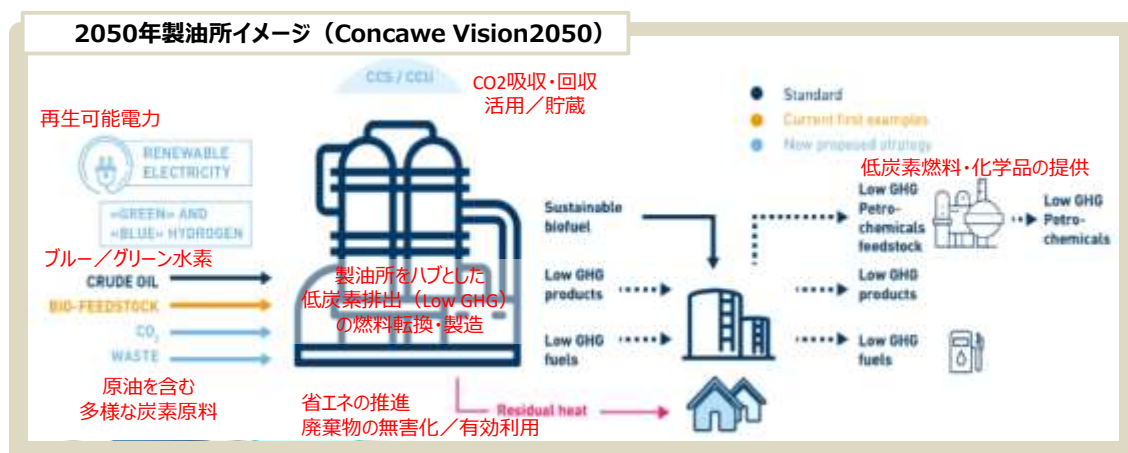


図 2.1.1 将来製油所への転換イメージ（Concawe Vision 2050）

このような製油所転換を図る背景としては、欧州では 2050 年カーボンニュートラル達成に向け、現状は石油が大宗を占めている輸送用燃料について、バイオ燃料、合成液体燃料（E-Liquids、E-Fuels）、水素、電気など、いわゆる石油代替としての低炭素燃料（LCF: Low Carbon Fuels）に置き換わる必要があると解析されている。その実現に向けたエネルギー政策として、再生可能エネルギー指令（RED: Renewable Energy Directive）などがあり、エネルギー産業はその達成のための戦略策定と実装に向けた動きを加速させている。一例として、欧州委員会（European Commission）の 2050 年に向けた輸送用燃料転換シナリオを図 2.1.2 に示す。

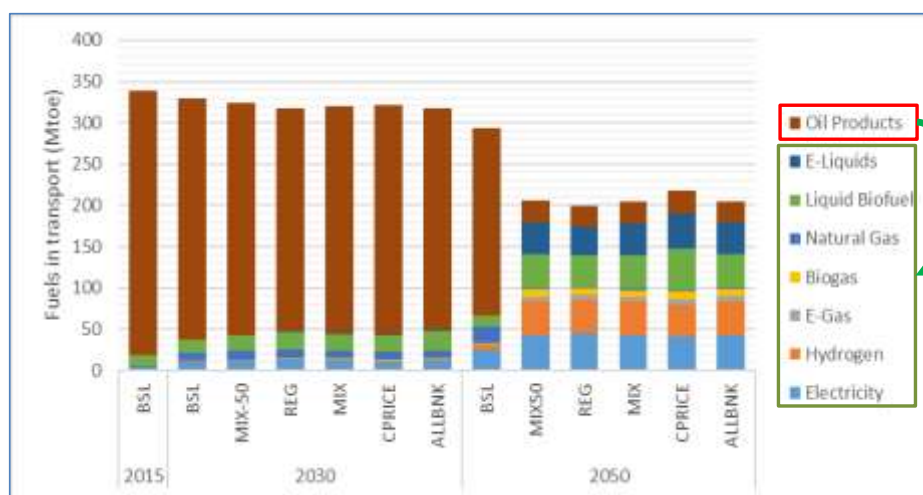


図 2.1.2 EU の 2050 年に向けた輸送用燃料の転換シナリオ¹⁾

世界レベルでの輸送用の LCF の需要見込みは、例えば McKinsey & Company から報告されており²⁾、それによると 2020 年約 120 百万トン（96%は陸上）が 2050 年にはおよそ 400 百万トンに達し、陸上（Road）と航空（Aviation）需要が同程度で大半を占める。LCF の製造に必要な原料も需要増に伴い変化し、当面の食用（Edible）バイオ原料は 2030 年には供給上限に達し、その後は廃棄物（Waste）やリグノセルロース系バイオマス（Lignocellulosic）や CO₂ と H₂ からの合成燃料*が主流になると予測している²⁾。この傾向は EU での予測とほぼ同様である。

※非生物起源の再生可能燃料 RFNBO（Renewable Fuels of Non-Biological Origin）と記載

2022 年 6 月 JPEC が Concawe と合同で実施した第 11 回日欧石油技術会議において、欧州委員会・運輸総局（DG Move）から説明を受けた、欧州グリーンディールの枠組みにおける運輸部門での GHG 削減および燃料転換政策を図 2.1.3 にまとめた。これによると、2021 年 7 月に発表した”Fit for 55”で定めた GHG 削減目標が、ロシアによるウクライナ侵攻を受けた 2022 年 5 月の”RePowerEU”によって強化されたことが示されている。

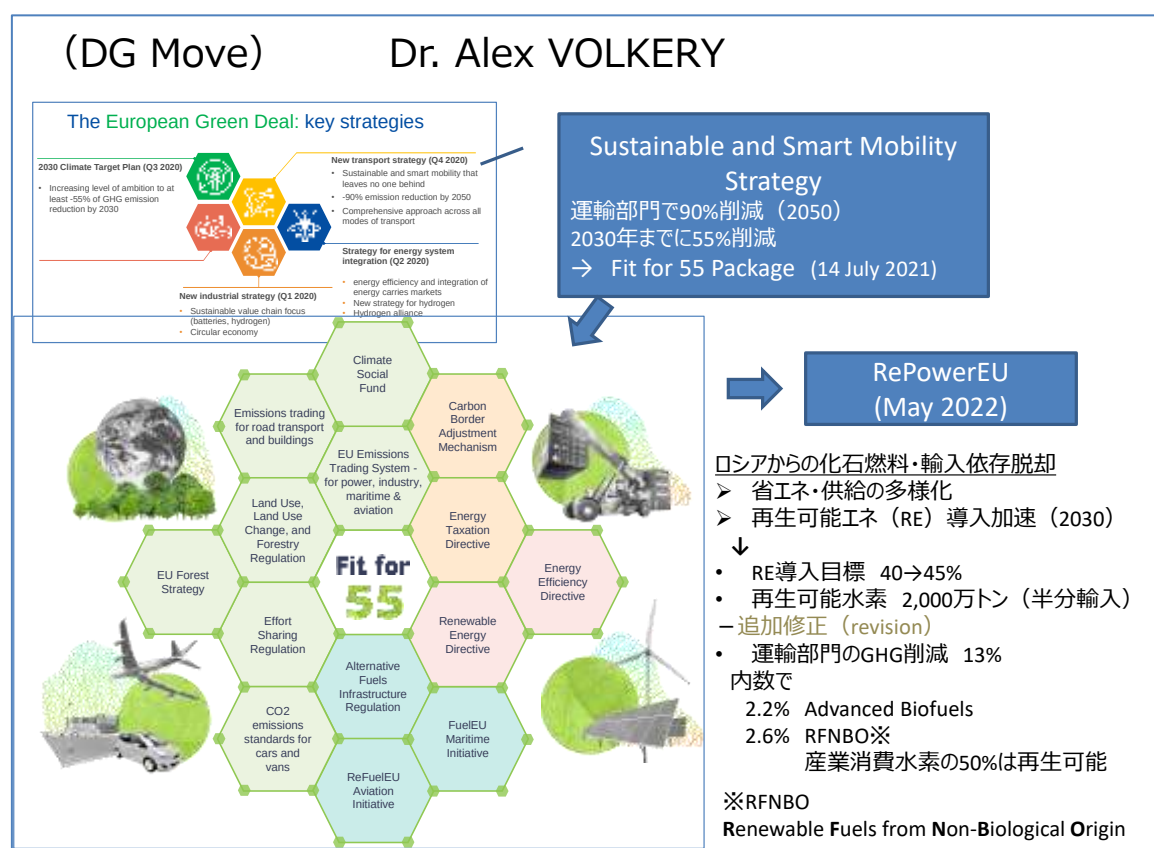


図 2.1.3 欧州グリーンディールの枠組みにおける主要な戦略（EU 運輸部門資料）

2. 2 主要石油精製企業の転換事例

Concawe Vision 2050 の将来製油所イメージをさらに具体化した形で、大手の石油エネルギー各社から将来を見据えた製油所イメージが提案されている。実現可能性や我が国への適用可能性を見極めるためには、さらに踏み込んだ調査が必要で、転換過程を含む類型分類、装置構成、開発技術の動向などについて複数の主要石油精製企業の転換事例を調査した。

(1) スペイン Repsol 社

1986 年創業。スペインの石油とガスの複合多国籍企業。石油・ガス産業のすべての分野（石油開発、石油精製、石油販売、石油化学、発電、トレーディングなど）で事業を展開する垂直統合型企業（図 2.2.1）。

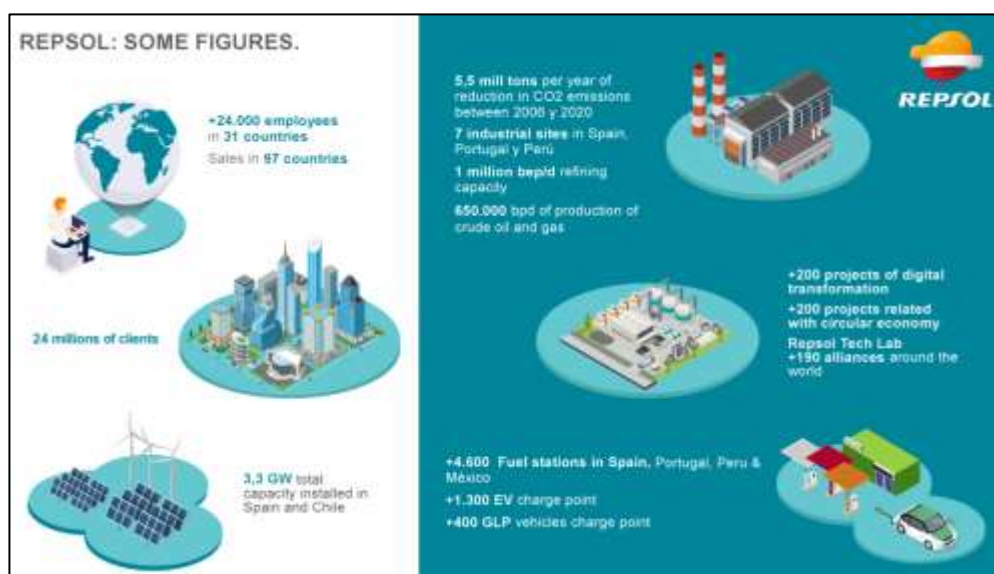


図 2.2.1 Repsol 社概要³⁾

同社は低炭素燃料（LCF）製造を主とする将来型製油所転換モデルを目指している（図 2.2.2）。2025 年までの LCF への転換に向けたポートフォリオ（Portfolio）などは同社の HP で公開されている。

REPSOL Strategic Plan 2021-2025:

<https://www.cnmv.es/portal/verDoc.axd?t=%7B8f14066b-eab8-42d5-9f9c-1b53b940193f%7D>

LCF の製造に向けたラインアップは図 2.2.3 に示される。

特に水素化植物油 HVO（Hydrotreated Vegetable Oil）と持続可能な航空燃料 SAF（Sustainable Aviation Fuel）の生産量増強が課題で、2025 年までに+300 kt/y、2030 年までにさらに+275 kt/y とする計画である。このため同社 Cartagena 製油所においては、バイオ残渣や廃棄物からの LCF, 250 kt/y 製造プロセスに投資し、2023 年の稼働を目指している。

<https://www.biobased-diesel.com/post/repso-plans-188-million-euro-renewable-diesel-saf-plant-in-cartagena-spain>

Cartagena 製油所での SAF 製造は、新設装置等ハードは仕上げの段階にある。
 なお、同社ではすでに HVO やバイオジェットを製造し出荷しているが、これは水素
 化処理装置 (HydroTreater) へのバイオ Co-processing (Puertollano と Tarragona)
 で製造とのこと。SAF は当然規約に従って混合比率は 5%以下である。

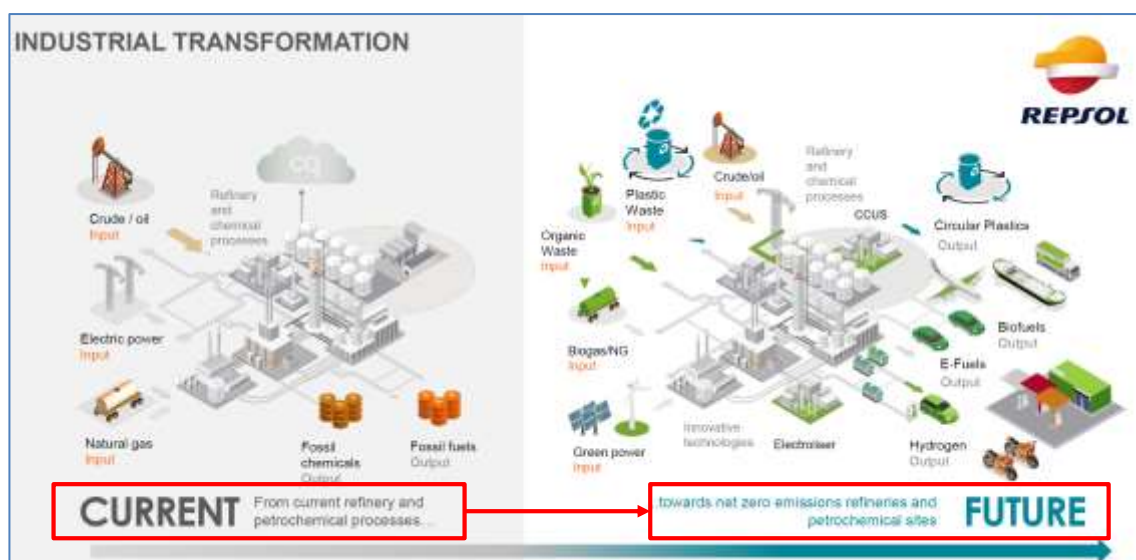


図 2.2.2 Repsol 社の製油所転換イメージ (現在と将来) ³⁾

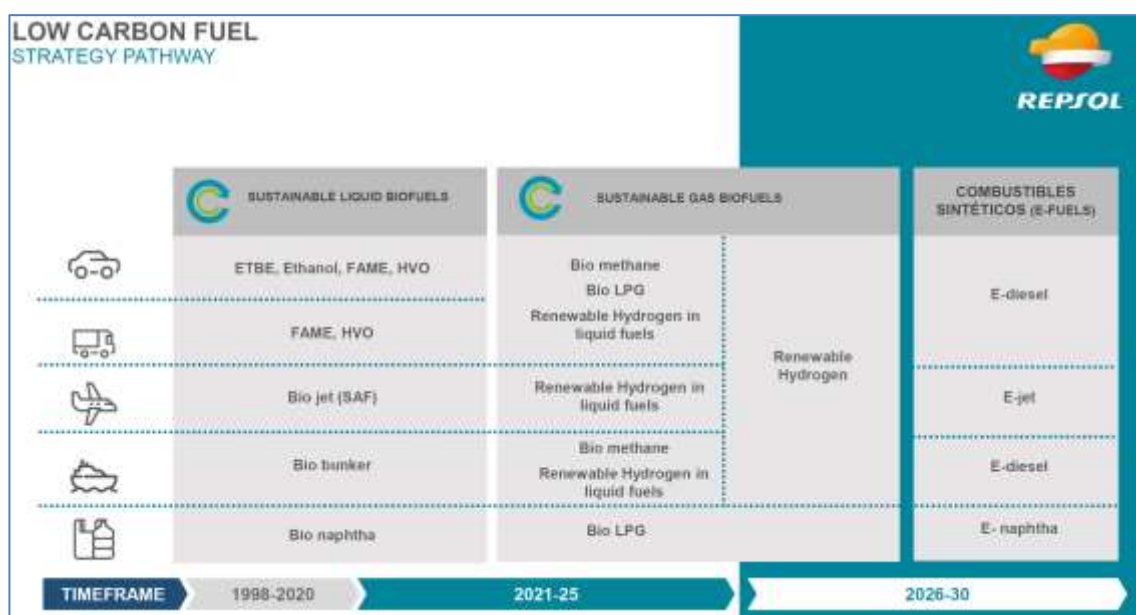


図 2.2.3 Repsol 社の低炭素燃料 (LCF) 転換ロードマップ ³⁾

同社はマドリッド本社近くにテクノロジーセンター（TC）を有し、アライアンス企業からの技術を含めた開発技術の FS、テスト、デモ実証を行い、本社と連携して商業化提案を行っている。この中に Bilbao の E-Fuels 製造も含まれる（図 2.2.4）。

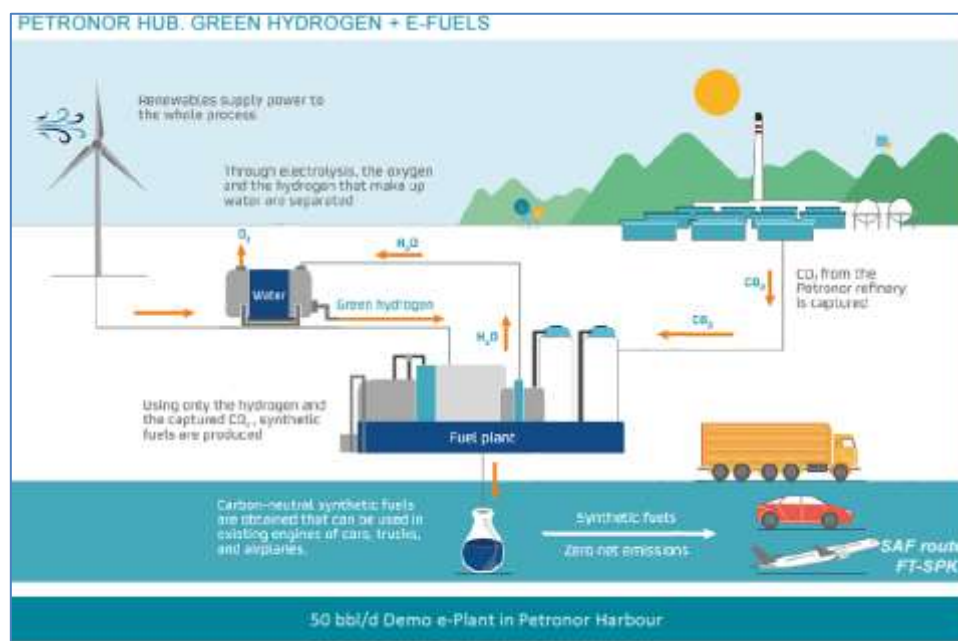


図 2.2.4 Repsol 社の E-Fuels デモプラント計画³⁾

(2) フランス TotalEnergies 社、La Mède 製油所

1924 年創業。130 カ国以上で事業を展開する大手国際石油・ガス会社であり、また世界クラスの化学メーカー。世界のスーパーメジャーの 1 つ。石油と天然ガスの探査、生産、精製、マーケティング、新エネルギー、化学品など、石油エネルギー産業のあらゆる分野をカバー。

2019 年に 0%だった低炭素燃料（同社は”New Molecules”：Bio、H₂、e-gas、e-fuel と称す。前述の LCF と同義）を 2030 年に 5%、2050 年には 25%（熱量ベース）、50 Mt/y にする目標。その間、石油は 1/3 にまで低減。

具体的な製油所転換としては、以下 3 点を実施。

- 1) 14 か所の製油所、内 2 か所をバイオ製油所に転換
- 2) 28 か所の石油化学工場、内 2 か所はバイオポリマー、内 2 か所はプラスチックリサイクル
- 3) 6 か所の石油・石化統合製造プラットフォーム
USA : Port Arthur、EU : Normandy、Antwerp、中東 : Jubail、Qatar、
Korea : Daesan

関係先リンク（①アントワープ、②Grandpuits、③Recycled Plastic）

- ① <https://totalenergies.com/news/antwerp-reborn>

- ② <https://totalenergies.com/expertise-energies/projets/bioenergies/grandpuits-biofuels-bioplastics>
- ③ <https://totalenergies.com/media/news/press-releases/totalenergies-doubles-its-recycled-plastic-production-capacity-france>

ア. La Mède 製油所（バイオ製油所への転換）

同製油所は 1935 年創業で世界でも古い方。2015 年に製油所としての生き残りをかけてバイオ製油所への転換を中心にした投資を決定（330 M€）

- ・バイオ（HVO）： 400 kt/y（HP によれば製造能力 500 kt/y）
前処理と HDT（水素化）+HDI（異性化）の水素化处理、75%はバイオ軽油、残りはバイオナフサ、プロピレン
- ・太陽光発電 Solar： 8 MW（2022 年現状）
- ・その他： 尿素用 Ad Blue（50,000 m3/y）、石油製品の貯蔵・提供ハブ、トレーニングセンター（2,500 人／年、社外も対象）

<https://totalenergies.com/media/news/press-releases/total-starts-la-mede-biorefinery>（03/07/2019）

（3）オランダ Shell 社、ロッテルダム（Pernis）製油所

Shell ロッテルダム（Pernis）製油所は、1902 年に生産開始した最古の製油所の一つで、現在は 40.5 万 BPD の EU 域最大の製油所。60 ユニット以上を有する。以下の HP などで情報公開を積極的に行っている。

- ・ <https://www.shell.nl/over-ons/shell-pernis-refinery.html>
- ・ <https://www.shell.nl/over-ons/shell-pernis-refinery/news-archive-pernis/berichten-2022/shell-pernis-is-jarig.html>



図 2.2.5 Shell ロッテルダム（Pernis）製油所全景（同社 HP）

実施中の製油所転換プロジェクトとして以下の三つが挙げられる。

ア. CO₂ CCS プロジェクト “Porthos”

CO₂ キャプチャーは 1999 年から着手しており、最近では Porthos プロジェクトで Shell を含む四つの CO₂ 排出企業（Air Liquide、Air Products、ExxonMobil、Shell）と関係エンジニアリング企業等がパートナーシップを結び、2024 年の稼働を目指し北海への CCS を含むネガティブ CO₂ を準備中。CO₂ 貯蔵量は、2.5 百万トン／年×15 年を予定。

<https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/grootste-nederlandse-project-voor-co2-reductie-porthos-ligt-op-schema>

イ. グリーン水素製造 “HH1”

200MW の電解（風力からの供給）水素製造・提供を目指すプロジェクト
グリーン水素製造量：80tpd （製油所内で使用）

FID（Final Investment Decision）を 2023 年、RFSU（Ready for Start Up、試運転完了）は 2025 年を予定。

- <https://www.worley.com/news-and-media/2021/contract-to-help-create-green-hydrogen-factory>, 2 June 2021
- https://www.shell.nl/media/nieuwsberichten/2021/shells-commitment-aan-nederland/_jcr_content/par/textimage.stream/1640002586685/8a963d01f36e79cdfb81676c26b07c9fa875bd61/commitmentnl.pdf, 10 December 2021
- Shell to start building Europe’s largest renewable hydrogen plant, 6 July 2022
<https://chemicalparks.eu/news/shell-build-europe-largest-renewable-hydrogen-plant-rotterdam-the-netherlands>

ウ. HEFA（HVO+SAF）製造プロジェクト

2021 年、最終投資決定 FID（Final Investment Decision）済み、すでに建設に着手しており、2024 年 Q3 に稼働予定。

820 kt/y の HEFA（Hydro-processed Esters and Fatty Acids、軽油、ジェット燃料用途）製造装置で、大きく三つのプロセスから構成

- HMU 水素製造装置
- PTU 前処理装置
- HVO 水素化・異性化装置

バイオ原料は、隣接の港から供給され、以下の構成を予定。

Crop 25%、UCO EU-10%、Import-30%、Animal EU-5%、Import-15%、Waste15%

Shell lets contract for Rotterdam SAF, Oct 20, 2021

<https://www.ogj.com/refining-processing/refining/construction/article/14212455/shell-lets-contract-for-rotterdam-saf-renewable-diesel-complex>

(4) スウェーデン Preem 社、Gothenburg 製油所

設立 1996 年、スウェーデン最大の燃料会社。石油燃料、再生可能燃料を精製・販売。スウェーデンの製油所能力の 80%、北欧の製油所能力の 30%を占める。ヨーテボリ Gothenburg とリセキル Lysekil にある 2 製油所は、ヨーロッパで最も近代的で環境に適応した製油所（原油処理能力 106 千 BPD、210 千 BPD）。ヨーテボリでは潤滑油を生産、全国に約 600 カ所のガソリンスタンドを有す。



図 2.2.6 Preem 社の二つの製油所（同社 HP）

Gothenburg 製油所は、二つある製油所の一つで、10 万 BPD 程度の製油所を少数で運営。製油所グリーン化は、2010 年の Green Hydrotreater（Synsat : Criterion/Lummus 社の軽油脱硫装置）から着手しており、原料は主に、トール油 Tall Oil※やおがくず Saw Dust からの熱分解油で Preem と Setra のジョイント企業 Pyrocell が運用している。図 2.2.7 に木材から Pyrocell 熱分解プラントを経て Preem 製油所で処理するバリューチェーンを示す。

※トール油 Tall Oil : マツ属木材を原料としてパルプをつくるときに得られる黄褐色または暗褐色の油状副産物。クラフトパルプ製造時の蒸解液上部に集まる黒液は、濃縮中にトール油セッケンを分離する。これを酸で処理したものがトール油である。収率はパルプ 1t 当り 20～90kg。

Preem 社では、今後のバイオ軽油（HVO）需要増に応えるため、HVO の増産を製油所の Co-processing 能力増で計画。さらに CO₂-CCS のパイロットテストを終了させ、炭素優遇制度の動向を見ながら、その商業化を視野に入れている。技術的課題はすでに解決し、実装判断はコスト次第で待ちの状態ということであった。

Preem 社関連資料

- <https://www.etipbioenergy.eu/images/soren-eriksson.pdf>
- <https://www.preem.se/globalassets/om-preem/hallbarhet/hallbarhetsredovis>



図 2.2.7 Pyrocell 熱分解プラントを含む木材から燃料油製造工程（同社 HP）

2. 3 低炭素燃料（LCF）製造技術の動向

「2. 1 欧州石油産業における製油所転換の背景」で記したのは欧州の例であるが、この動きは日本を含む世界全体に広がっており、2050 年カーボンニュートラル達成に向け現状の石油系輸送用燃料を、バイオ燃料、合成液体燃料（E-Liquids、E-Fuels）、水素、電気など、いわゆる石油代替としての低炭素燃料（LCF）に置き換える必要がある。ここでは石油代替・低炭素燃料の製造技術関連動向を調査し、今後の製油所に活用される可能性のある先進技術について特徴をまとめた。

（1）石油代替・低炭素燃料の分類と関連事項概要

図 2.3.1 は石油代替・低炭素燃料を「原料」、「製造プロセス（工程）」ならびに「代替燃料（製品）」の 3 つのレイヤーに分け、製品としての各々の代替燃料がどの原料（大きくバイオマス系と非バイオ系）からどの製造プロセスを経て製造されるかを模式的に示したものである。個別技術については、必要に応じ後段で説明する。

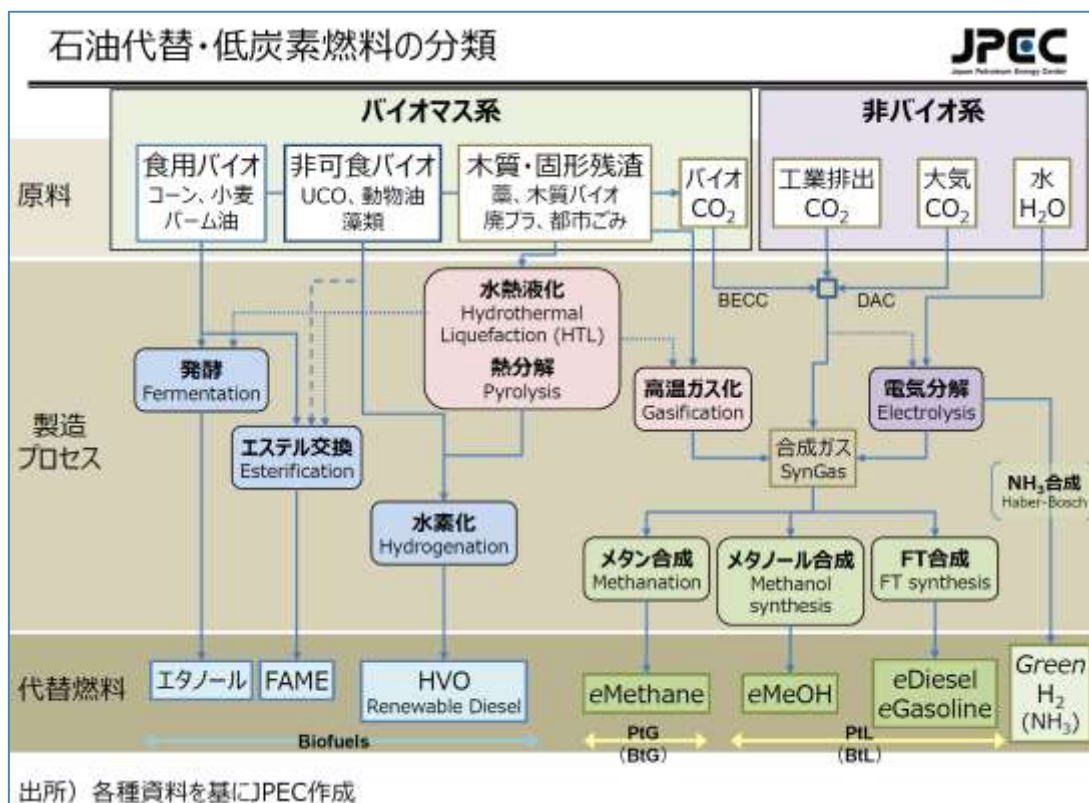


図 2.3.1 石油代替・低炭素燃料の分類
(各種参考資料 4), 5), 6), 7), 8), 9) を基に JPEC 作成)

これらの中で、例えばバイオ燃料のエタノール、FAME や HVO はすでに工業化され商業生産され製造規模も広がってきているが、合成燃料の eMethane から eDiesel などは開発中の技術であり、いわゆる技術成熟度 TRL (Technology Readiness Level) が異なる。TRL は個別製造プロセスとそれらの組合せによっても異なることに加え、製造拠点の場所

と時期でも変化するため、一概に TRL 数値を明示することは困難である。一例として Concawe/ERATRAC (The European Road Transport Research Advisory Council) が示す低炭素燃料の TRL 推移 (2035 年まで) を図 2.3.2 に示す。

Table. Research needs for Energy Carriers

	Research Needs for Energy Carriers	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Electricity	Carbon-neutral electricity generation and balanced grid	Research recommendations out of the scope of this document (see ETIP SNET reports)													
Biofeedstocks	Biomass availability for biofuels production Impact of biomass cultivation and collection on biodiversity Mobilisation of biomass to biorefineries Waste availability for renewable fuels Optimized practices for crops and forestry Algae & micro-organisms	Continuous evaluation													
Green H ₂	Alkaline electrolyser Polymer-electrolyte membrane electrolyser (PEM) High temperature (co-)electrolyser cell (SOEC)	Mature, with continuous improvements													
CO ₂	Direct capture from air (DAC) CO ₂ from biomass upgrading CO ₂ from flue gas (concentrated source)*	TRL 4-6													
Biofuels	Transesterification Hydrotreatment Biomass to Liquids via Gasification + FT Hydrothermal Liquefaction + upgrading Pyrolysis + co-processing / upgrading* Alcohol to synfuels* Sugar-to-Diesel Algae to liquid Biotechnological fuel production Bio-DME and bio-OME	Mature, with continuous improvements													
E-fuels	Paraffinic e-fuels through Reverse Water Gas Shift (RWGS) and Fischer-Tropsch** e-methanol synthesis e-DME synthesis through e-methanol pathway e-olefins synthesis through e-methanol pathway Oligomerization of e-hydrocarbons through e-methanol pathway Hydrotreatment through e-methanol pathway	Mature, with continuous improvements													
Gaseous fuels	Carbon-neutral production of biogas and power-to-gas	Research recommendations out of the scope of this document (see Gas for Climate report)													

* Several technologies having different maturities

** Only RWGS is not a mature technology in this process

図 2.3.2 低炭素燃料の TRL 推移 (2035 年まで) ⁸⁾

さらに新規の燃料の市販化に対しては、CAAFI (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative) が燃料準備レベル FRL (Fuel Readiness Level) を提唱している¹⁰⁾。図 2.3.3 は、ドイツバイオマス研究センター (DBFZ) が再生可能燃料の製造技術に対して、TRL と FRL を比較して示しているものである⁹⁾。これによると、TRL で 7 と 8 は共にデモレベルであるが、FRL ではその間に 6, 7, 8 が挿入され細分化されており、燃料品質 (fuel qualification) を定める重要な準備段階として位置づけられていることが分かる。

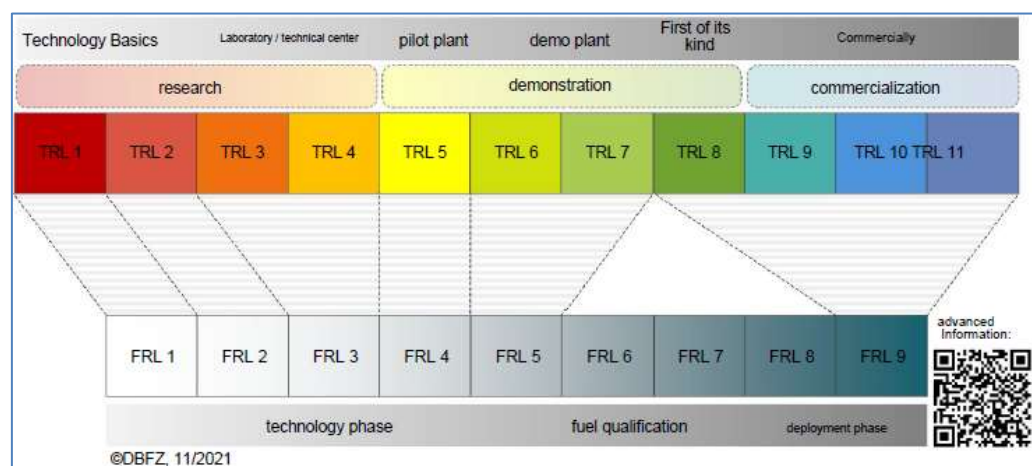


図 2.3.3 再生可能燃料の製造技術成熟度 TRL と燃料準備レベル FRL⁹⁾

これらを製造するためのプラント新設に要するコストに関する情報は限られている。その中、Concawe レポートで紹介されている例 (表 2.3.1)¹¹⁾を紹介する。この情報によれば、HVO 製造設備の新設は、前述の TotalEnergy 社 La Mède 製油所のような実例があり実績に基づいている。一方、BTL (Biomass-to-Liquid) や合成燃料 e-fuels プラントは、実績がないため、前提や仮定を置いた幅のある数値であり、参考値である。

表 2.3.1 新設プラントの設備コスト (CAPEX) 例¹¹⁾

Basis (per plant)	Capacity - Industrial scale ⁽²⁾ (Mtoe/y)	CAPEX ^(****) (M€)	CAPEX intensity (M€/ktoe/y)
New-built HVO plant	0.5	275	0.55
BTL plants ^(**) (Lignocellulosic)	0.15	610 - 900	4.0 - 6.0
e-fuels	0.2 ^(****)	400 - 650 ^(*****)	2.0 - 3.3

(2) バイオ燃料製造およびプラスチックなど廃棄物の活用技術

ア. 現状のバイオ燃料製造

図 2.3.4 に、世界と EU 域を対象にしたバイオ燃料製造量（稼働中と準備済み）を示す。これによると世界では（発酵法による）エタノールが 140 百万トン／年、FAME が 90 百万トン／年、HVO が 6.4 百万トン／年の順となっているが、EU 域では FAME がエタノールよりも多く世界の 1/3 程度に当たる 30 百万トン、HVO は約半分超に相当する 3.6 百万トンでとなっている、ことが特徴である。同資料から、世界の HVO 製造拠点マップを図 2.3.5 に示す。

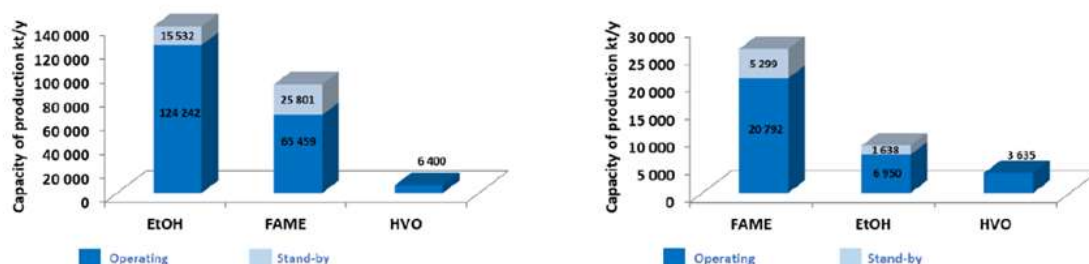


Figure 11 World (left) and European (right) production capacity for the main available biofuels today [11]

図 2.3.4 世界（左図）と EU 域（右図）のバイオ燃料製造量（単位 kt/y）⁴⁾
 ([11] Statas advisors, “Database biofuels capacity details”, Feb. 2021)

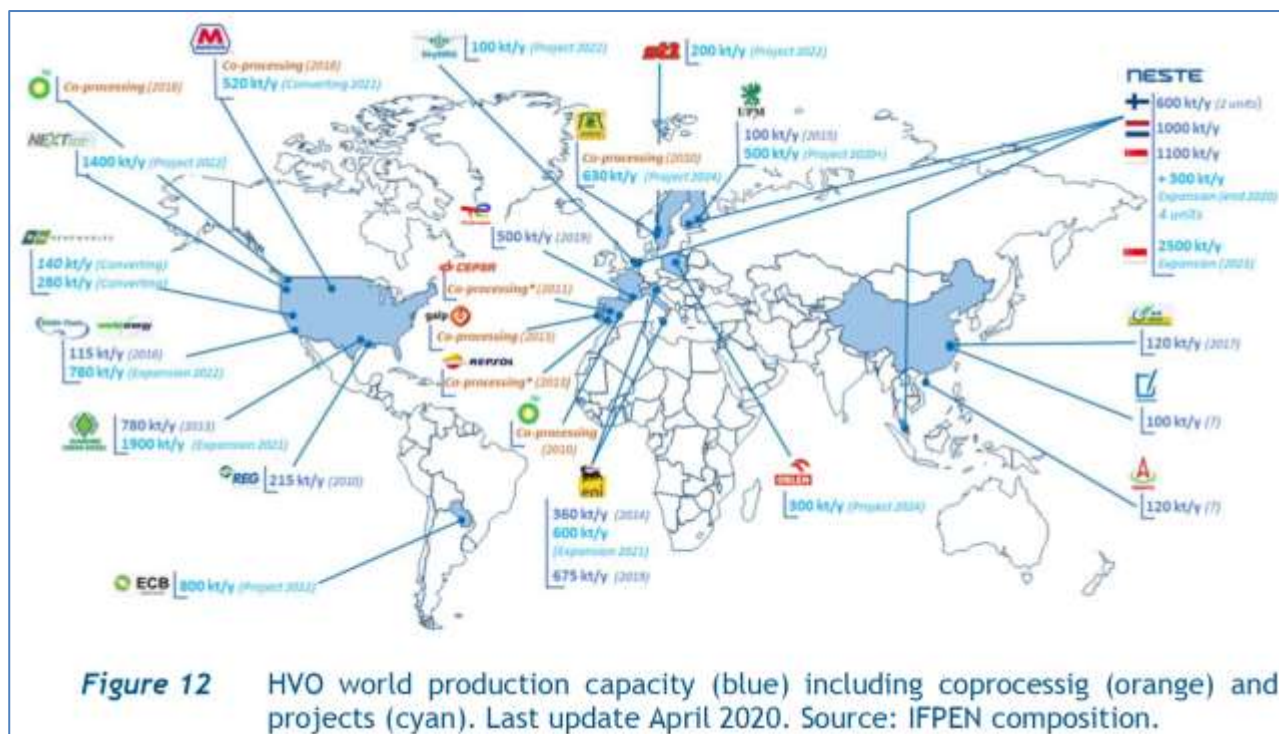


図 2.3.5 世界の HVO 製造拠点⁴⁾

同資料によると、図 2.3.5 マップ作製時の 2020 年 4 月以降にも 19 社（EU 域では、SCA, STL, PREEM, TotalEnergies, REPSOL、図 2.3.6）から、HVO に関する新設／追加設備がアナウンスされており、HVO 製造拠点とその容量の増加が顕著である。

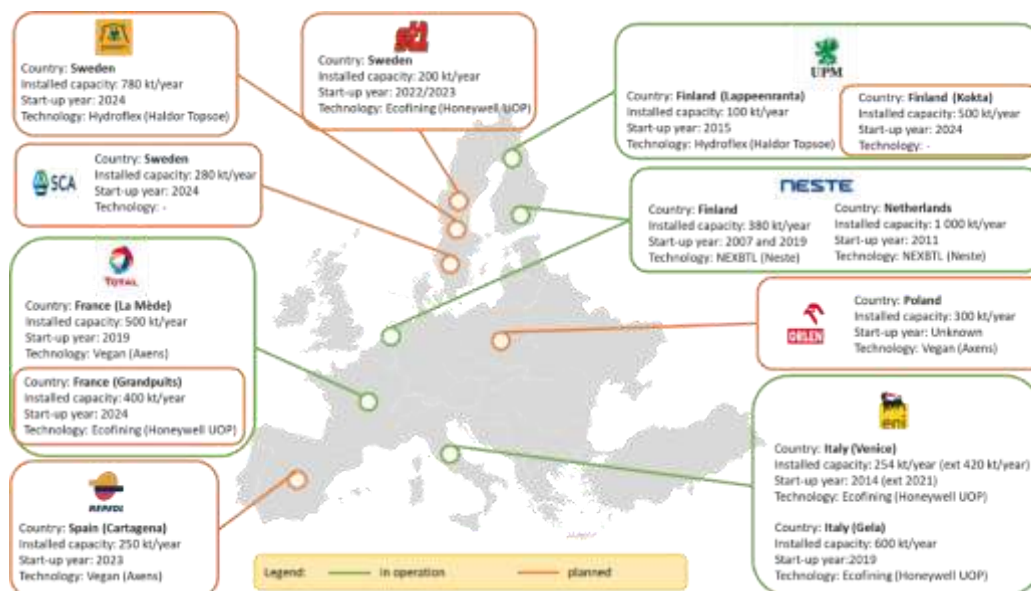


図 2.3.6 EU 域の HVO 新設製造拠点

出所) <https://europetro.com/media/2021/european-refiners-towards-renewable-fuels>

2021 年 NEXANT による同様の検討から、HVO 需要は世界で 7.6 百万トン、北米と EU 域がその大半で、再生可能ディーゼル（RD）が主な用途、一方、製造側では主要な需要国に加えて中国を含むアジアが 2 割で、メーカー別では Neste と Eni の 2 社で 5 割を占める（図 2.3.7）。

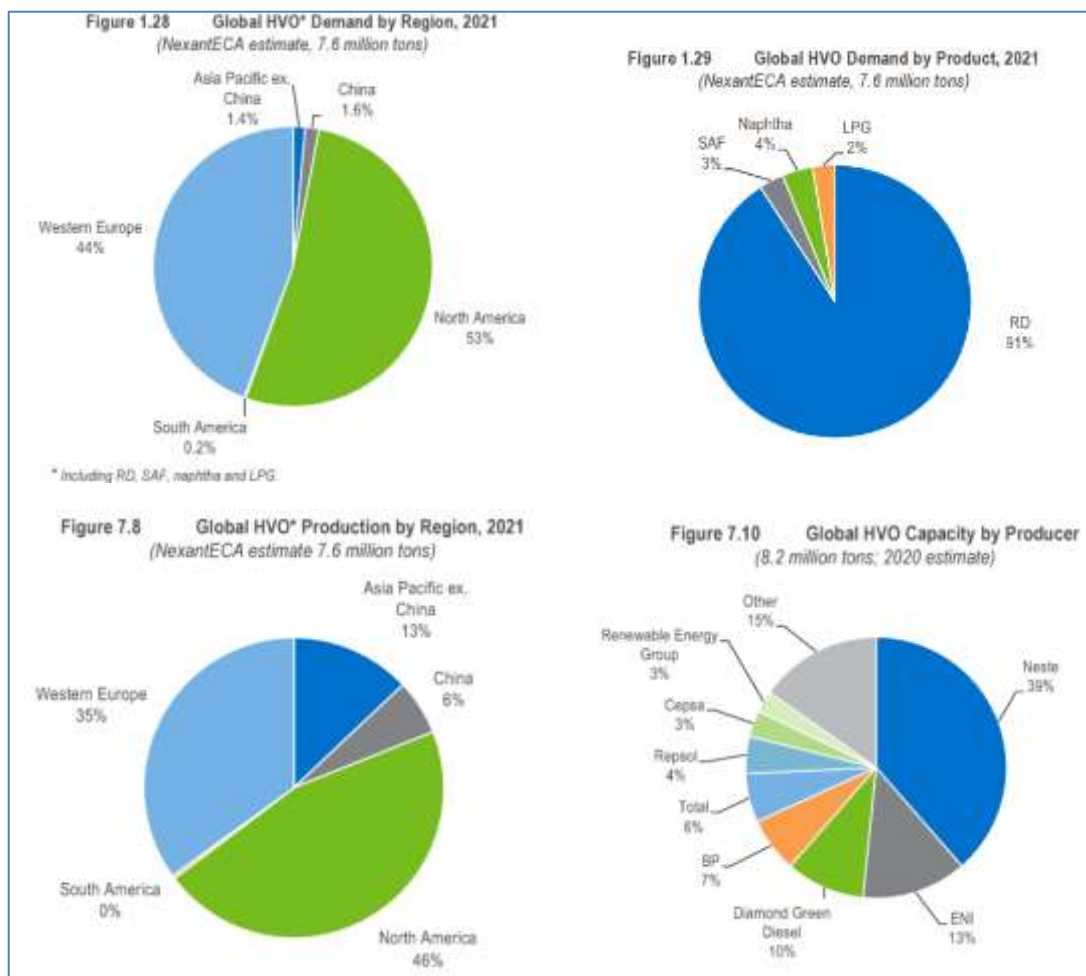


図 2.3.7 2021 年世界の HVO 需要量（上段）と製造量（下段）
出所）NEXANT 2021 Study

イ. 2050 年カーボンニュートラルに向けたバイオ燃料製造

今後増加するバイオ燃料需要に対応するために必要なバイオマス原料については、燃料油だけでなくエネルギー分野全体でのバイオマス利用量という観点で、考える必要がある。EU 域で詳しい解析がなされているので例として以下、解説する。

EU 域でのバイオエネルギー需要目標は、2050 年に向け図 2.3.8 で示されるようになっている¹²⁾。これによると現在 150 百万トン／年弱のバイオエネルギーは、2050 年には 250 百万トン／年近くまで増加する。その内の輸送用燃料は、現在 15 百万トン／年が 2050 年にはおよそ 50 百万トン／年まで増加するとされている。



図 2.3.8 EU 域 2050 年までのバイオエネルギー需要目標 ¹²⁾

このエネルギーに必要なバイオマス利用量は、Concawe レポートとして Imperial College London による詳細な試算結果が報告されている ^{7), 11)}。EU 域内の潜在的バイオマス利用可能量は、バイオエネルギー部門として 2050 年、215-370 百万トン／年と試算されている（図 2.3.9）。

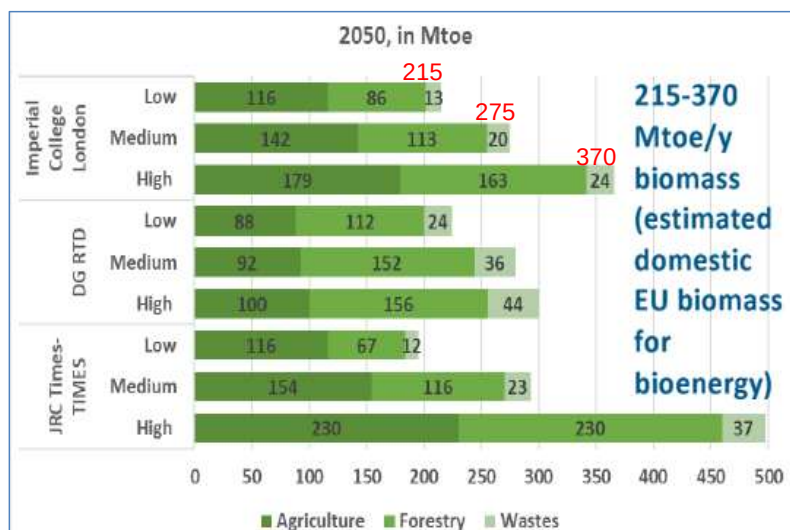


図 2.3.9 EU 域 2050 年時に必要なバイオマス原料 ^{7), 11)}

ウ. 2050 年 EU 域運輸部門で必要な低炭素燃料（LCF）シナリオ（Concawe）

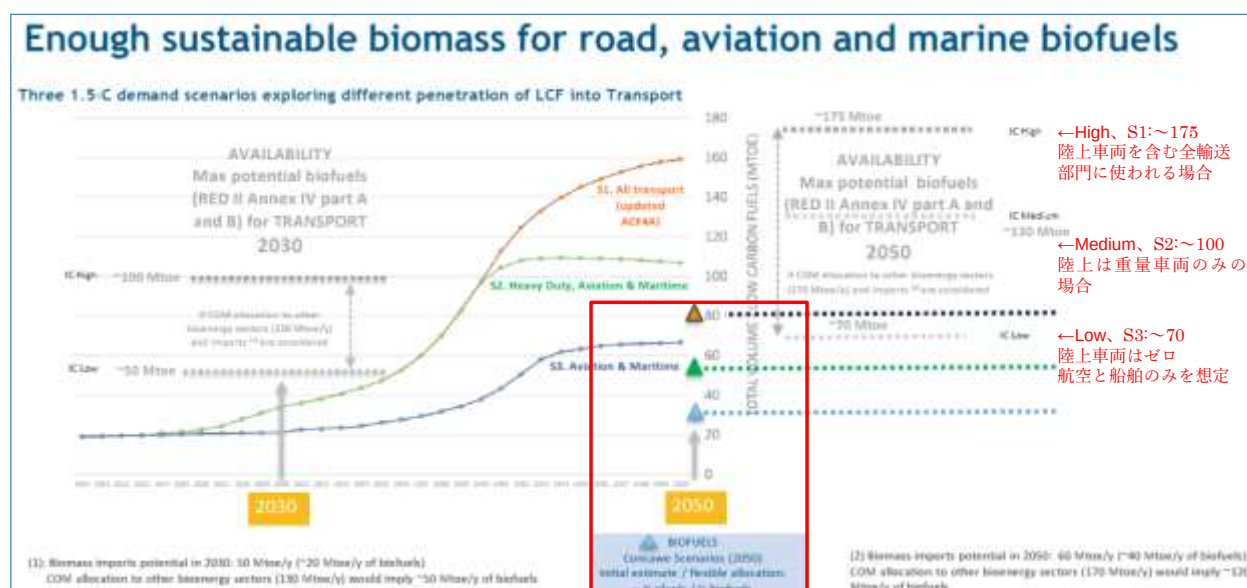


図 2.3.10 2050 年に向けた EU 域 LCF と必要なバイオ資源（Concawe）¹¹⁾

Concawe はそれらの結果を受け、EU 域の運輸部門で必要な低炭素燃料（LCF）を三つのシナリオ（High：陸上車両を含む全輸送部門に使われる場合、Medium：陸上は重量車両のみの場合、Low：陸上車両はゼロ、航空と船舶のみを想定）で検討。その結果（図 2.3.10）、エネルギー量としては 2050 年時、低シナリオから高シナリオまで、70 百万トンから 175 百万トン／年の範囲であり、先の図 2.3.9 バイオマス原料の供給範囲内である。なお、Concawe は、原料としてバイオマスが輸入できる場合と、さらに LCF にはバイオ燃料に加えて、合成燃料（e-fuels）が 2050 年には相当量市場投入されること、も考慮された分析を行っている。

以上を達成するために必要な製造技術と各容量に関しても解析がなされており、その結果を図 2.3.11 に示す。これによると、当初はバイオ燃料プラント（第一世代と HVO）が中心となり導入が進むが、次にセルロース系バイオマス原料によるプラントが、さらに 2035 年以降は e-fuels プラントの導入も進み、2050 年時点では、セルロース系と e-fuels が LCA のメインとなり、必要量を充当する生産能力に達するとの試算となっている¹¹⁾。



図 2.3.11 2050 年に向けた EU 域 LCF 製造用新規プラントの試算 (Concawe) ¹¹⁾

エ. プラスチック等廃棄物の活用技術

Concawe 資料 (図 2.3.11) の「セルロース系バイオマス原料によるプラント」は、木質バイオマス等セルロースを原料としており、広義の意味では廃プラスチック他バイオ系の廃棄物を含んでいる。これらの原料を燃料油に転換するための技術は、例えば E4tech から図 2.3.12 のように、混合廃プラスチックは熱分解 (Pyrolysis)、有機汚泥は水熱液化 (Hydrothermal Liquefaction、HTL)、都市廃棄物は高温ガス化 (Gasification) など、に分類されている ¹³⁾。

原料	WASTE RESOURCE	前処理	PRIMARY CONVERSION (1)	PRIMARY PRODUCT	製油所での処理・転換	REFINERY CONVERSION	製品	MAIN FINISHED PRODUCTS (2)
Mixed Plastic Waste	混合プラスチック廃棄物		Pyrolysis (without fractionation)	Synocrude	to crude distillation unit (CDU)		Diesel; jet; gasoline; other products	
					to Fluid Catalytic Cracking (FCC)		Gasoline; C3/C4 olefins (fuel-oil; coke; gas)	
					to Hydrocracking (HCK)		Diesel; jet; gasoline	
Sewage Sludge	廃液処理有機汚泥		Hydrothermal Liquefaction (without upgrading)	Hydrothermal Liquefaction Oil	to hydrotreatment		Diesel (naphtha; fuel-oil)	
					to Fluid Catalytic Cracking (FCC)		Gasoline (fuel-oil; coke; gas)	
					to Hydrocracking (HCK)		Diesel; jet; gasoline	
Mixed residual waste	混合残渣廃棄物 (都市廃棄物)		Gasification + Fischer-Tropsch Synthesis	Fischer-Tropsch Synocrude	to crude distillation unit (CDU)		Diesel; jet; gasoline; other products	
					to Fluid Catalytic Cracking (FCC)		Gasoline; C3/C4 olefins (fuel-oil; coke; gas)	
					to Hydrocracking (HCK)		Diesel; jet; gasoline	
Municipal biowaste (incl. food and garden waste)	一般バイオ廃棄物		Anaerobic Digestion + Steam Reforming + Fischer-Tropsch Synthesis	Fischer-Tropsch Synocrude	to crude distillation unit (CDU)		Diesel; jet; gasoline; other products	
					to Fluid Catalytic Cracking (FCC)		Gasoline; C3/C4 olefins (fuel-oil; coke; gas)	
					to Hydrocracking (HCK)		Diesel; jet; gasoline	

図 2.3.12 各種廃棄物からの燃料油製造技術概要 (E4tech) ¹³⁾

これらから得られた中間合成油（Syncrude）は、製油所にて原油に混合されるか、二次装置の水素化処理（Hydrotreating）、接触分解（FCC）もしくは水素化分解（HCK）で処理され、石油系燃料と同品質のガソリン、灯油（ジェット）、軽油（ディーゼル）などを代替する低炭素燃料として利用される。

なお、水熱液化（HTL）と熱分解（Pyrolysis）については、IEA Bioenergy が図 2.3.13 のように分類している⁵⁾。HTL は 250～370℃で、水蒸気熱処理を高圧（最大 20MPa）下で数分、バイオオイル収率は 40～50%程度。Fast Pyrolysis は約 500℃で、常圧下で数秒、発生ガスからのバイオオイル収率は 60～70%程度である。

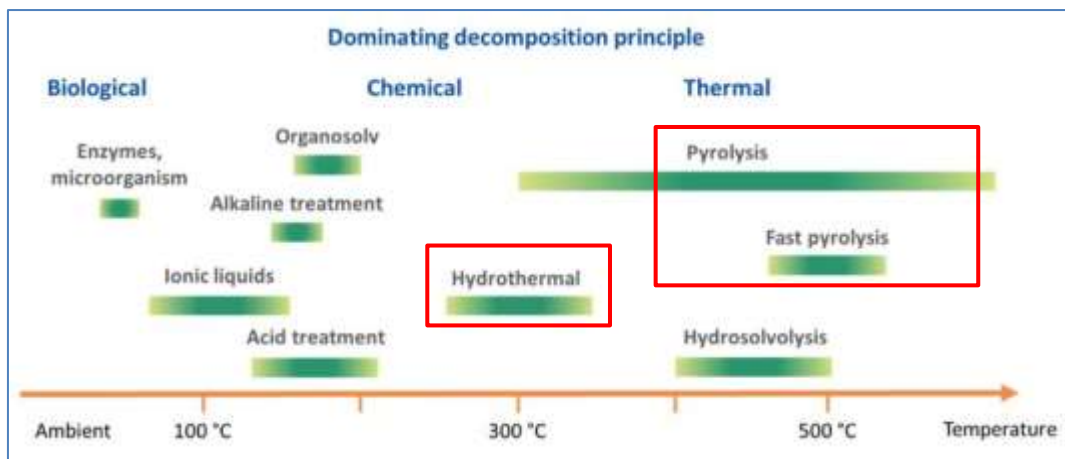


図 2.3.13 バイオマスの分解反応条件（HTL と Pyrolysis）⁵⁾

高温ガス化（Gasification）は E4tech から解説されており¹⁴⁾、ガス化炉（反応タイプ）は図 2.3.14 で分類されている。反応条件はタイプによって異なるが、同伴流ガス化装置（Entrained Flow Gasifier）は 1,200～1,500℃の高温、流動床ガス化装置（Fluidized Bed）はおおよそ 900℃、プラズマ（Plasma）は 1,500 から 5,000℃程度の超高温である。

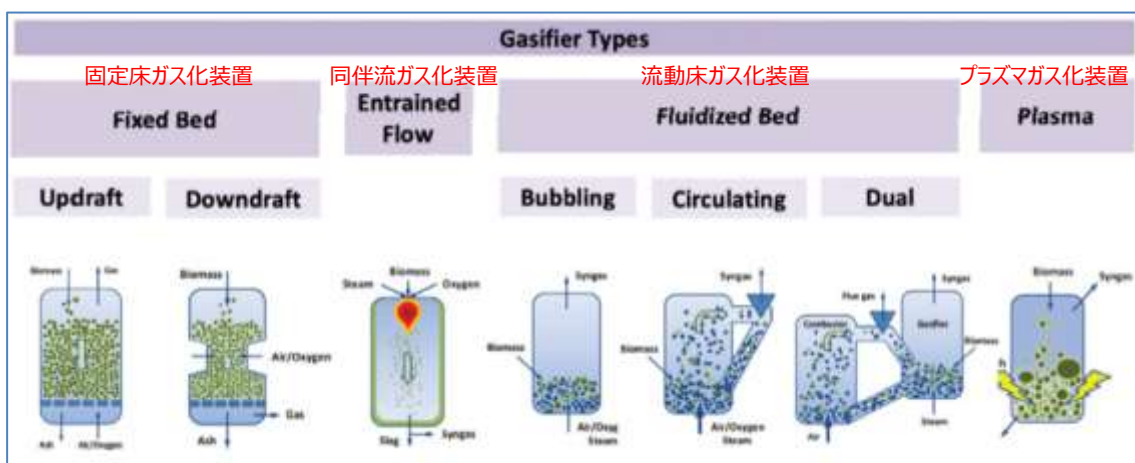


図 2.3.14 ガス化炉（反応）タイプ（E4tech）¹⁴⁾

詳しい技術説明および経済性などは、Concawe & Energy Institute から解説されている¹⁵⁾。ここではその中から参考情報として、中間合成油の製油所プロセスへの投入位置を図 2.3.15 として示す。

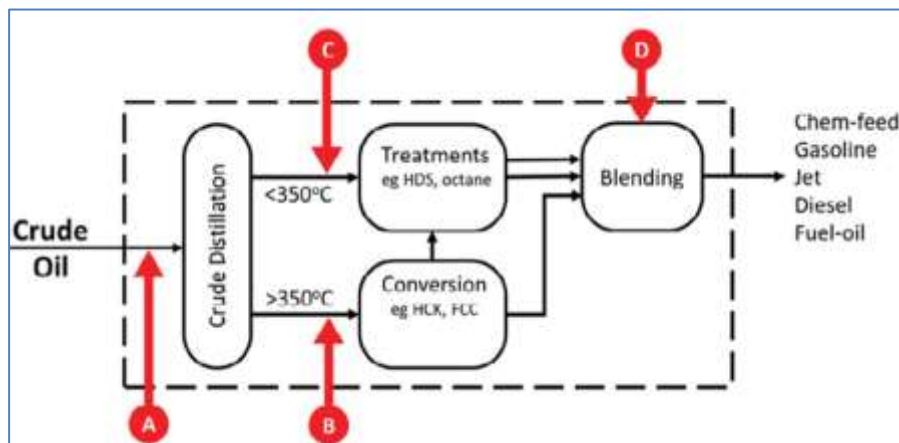


図 2.3.15 中間合成油の製油所プロセスへの投入位置¹⁵⁾

実用に近いプロジェクト実績および設備投資コストは、表 2.3.2 で示されている。実用化ならびに商業運転のほとんどは今からであり、今後の実績蓄積に期待したい。最近の技術動向及びコスト見通しなどは、論文で報告されている¹⁶⁾。

表 2.3.2 廃棄物系燃料転換技術のプロジェクト実績と設備投資コスト¹⁵⁾

Primary Conversion(s)	Developing company	Organisations involved in project consortium	CAPEX (million EUR)	CAPEX (million)	CAPEX currency and year	Biofuel product(s)	Products capacity (kt/a)	Location	Feedstock	Feedstock capacity (kt/a)	CAPEX intensity (Million EUR/kt)	Project status
Pyrolysis to pyrolysis oil	Quantafuel	Vitol, BASF	14,8	17,5	USD, 2018	Diesel, gasoline, fuel oil	13,1	Skov, Denmark	Plastics	20,0	0,74	Operational
Pyrolysis to pyrolysis oil	Recycling technologies	Recycling Technologies, Ben group, Zero Waste Scotland	5,7	5,0	GBP, 2018	Gasoline, jet, diesel	5,3	Perth, UK	Plastics	7,0	0,81	Under construction
HTL to HTL oil	Genifuel Corporation	PRILL (technology), Zeton Inc. (Canada)	4,7	5,5	USD, 2018	Biocrude	0,3	Vancouver, Canada	Waste (feedstock volumes are wet)	3,2	1,46	Under construction
Gasification + FT to wax	Fulcrum Bioenergy Inc.	TRI (ThermoChem Recovery International), Air BP	180,0	200,0	USD, 2015	FT diesel, jet	31,0	McCarran, USA	Waste	157,5	1,14	Under construction
Gasification + FT to wax	Veloops	TRI, and in talks with several more potential partners	265,8	300,0	USD, 2017	Diesel or jet fuel	31,0	Natchez, USA	Lignocellulose	252,0	1,05	Planned

Sources: Company press releases, E4tech Advanced Fuels database. Note: annual average historical exchange rates used

(3) 合成燃料の活用技術

再生可能エネルギーからの電解水素と CO₂ を原料として炭化水素系燃料を合成する合成燃料 (E-Liquids、E-fuels、PtX、PtL) が、原料制約を受けないカーボンニュートラル燃料として期待されている。合成燃料に関する詳しい情報については別の報告書で行うので、ここでは製油所を主体として合成燃料を活用する方向での技術概要および主に Concawe によるコストなどの見通しを概要として報告する。

ア. 製油所での合成燃料プラント計画と典型的技術フロー

石油精製会社では、Shell 社や Repsol 社などが、再生可能電力から電解技術によるグリーン水を使い合成燃料を製造するイメージを発表している (図 2.3.16 は Shell 社の例)。

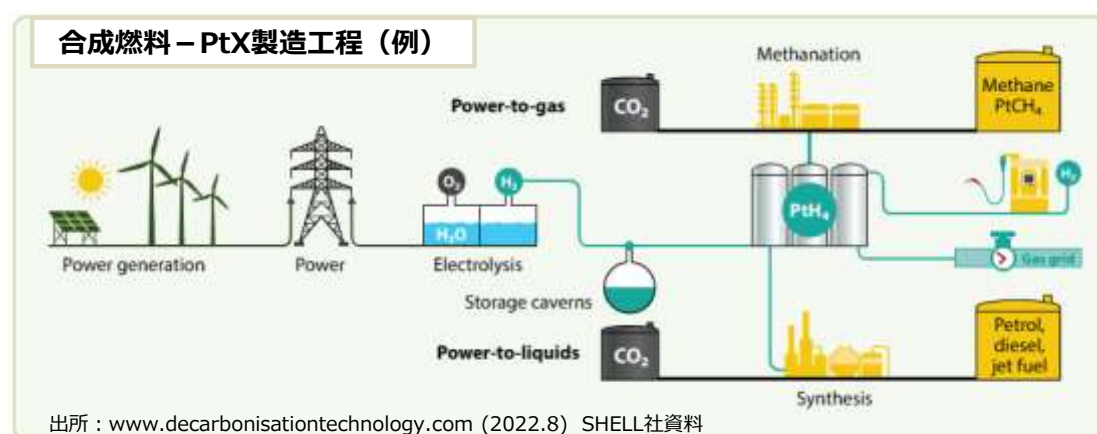


図 2.3.16 合成燃料-PtX 製造工程イメージ (Shell 社)

出所: www.decarbonisationtechnology.com (2022.8)

スペイン Repsol 社は、同社ペトロノール製油所に隣接したビルバオに合成燃料のデモプラントを建設すると発表した。

<https://www.repsol.com/en/press-room/press-releases/2022/josu-jon-imaz-presents-repsols-progress-on-decarbonization-projects-in-bilbao/index.cshtml>
ビルバオ・デモプラント、パートナー: Aramco

投資額: 103 M€、稼働開始時期: 2024 年、
合成燃料生産量: 2,100t/年 (50 BPD)、水素電解槽容量: 10MW

しかし、電解技術など高効率化と同時に大容量化が必須で、ベンチャー企業を含め世界的な開発競争の中にあり、商業的に製造するレベルには達していない。

図 2.3.17 に、Repsol 社が示した合成燃料の製造工程と各プロセスの技術成熟度 (TRL) を示す。同社が主と示している、電解技術、CO₂ 分離・回収技術、逆シフト (RWGS) および FT 合成を経て、ガソリンなど最終製品に至る各プロセスは、TRL としては DAC (Direct Air Capture) を除きレベル 7 (試運転段階) に達しているが、これらを組合せての運転実績が無い状況下では、最低の TRL (この場合は RWGS の 7) が律速とな

る。また、組合せ時の課題が新たに生じることで、TRL のより低い研究開発レベルに戻ることもあり得る。

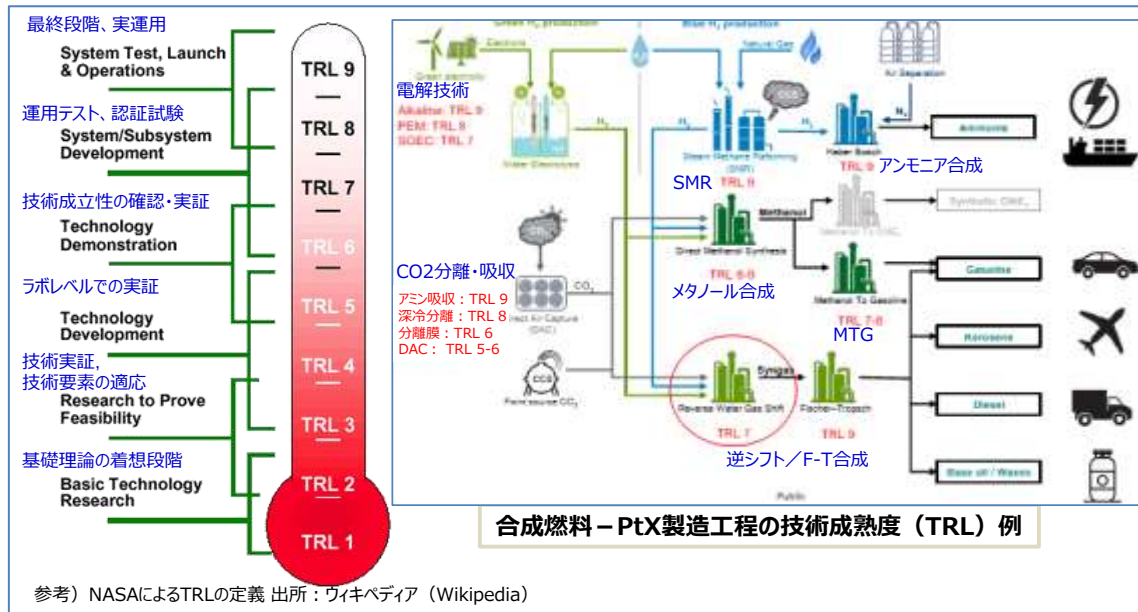


図 2.3.17 合成燃料の製造工程と技術成熟度 (TRL)

出所) Repsol, “POWER TO LIQUIDS - PTL”, Concawe Symposium 2021

イ. Concawe による合成燃料 (E-fuels) の製造効率などの見通し

Concawe 主導で、LBST (ドイツのエネルギー関連技術調査会社) と Aramco (パリの Aramco Fuel Research Center) 他との共同検討の結果として合成燃料 (E-fuels) 製造に関する技術・経済性評価が報告された¹⁷⁾。その報告書から抜粋する形でエッセンスを紹介する。

① 前提条件 表 2.3.3

- 再生可能電力からの電解水素は、低温アルカリ電解セルをデフォルト技術として設定し、今後の開発による変換効率の向上を考慮。
- CO2 源は、2030 年までは Concentrated source (製油所・水素製造装置 SMR のオフガスからの高濃度 CO2) を、2035 年以降は DAC (大気中からの CO2 直接回収) に限定。

② E-fuels 製造時のエネルギー効率 図 2.3.18

2050 年時を想定、1MJ の各燃料製造に必要な投入エネルギー

- 合成される分子の長さや経路の複雑さによって、E-fuels 製造のエネルギー消費量は増加し、エネルギー効率は低下する。(特にドロップイン燃料)
- 経路が簡素で効率の高い e-H2 や e-NH3 は新しい車両やインフラを必要とすることが課題。
- CO2 源が DAC となった場合、エネルギー効率は約 10%低下する。

表 2.3.3 前提とした電解技術と CO2 回収技術の条件

Table 1: Electrolysis technology and efficiency chosen for this specific study

	2020	2030	2050	2050 Accelerated technology
Electrolysis technology	100% Alkaline	100% Alkaline	100% Alkaline	100% SOEC Co-electrolysis
Electrolysis efficiency	66.5%	68%	75%	82% (Sunfire)

Table 9: Energy consumptions and CO2 concentrations for different carbon capture options

Source Stream of CO ₂	Concentrated	Average	Diluted
Proxy technology	Steam Reforming (SMR) pre-combustion gas	Natural Gas Power Plant (NGPP) flue gas capture	Direct Air Capture (DAC)
Power Consumption [MJ/kgCO ₂]	0.14 ⁽¹⁾	0.27 ⁽²⁾	1.44 ⁽³⁾
Heat consumption [MJ/kgCO ₂]	0.90 ⁽¹⁾	3.00 ⁽²⁾	5.76 ⁽³⁾
CO ₂ concentration [by volume]	45%	8.5%	0.04%

Sources: (1) [Skrebergene 2015]
(2) [IPCC 2005]
(3) [Beuttler et al. 2019]

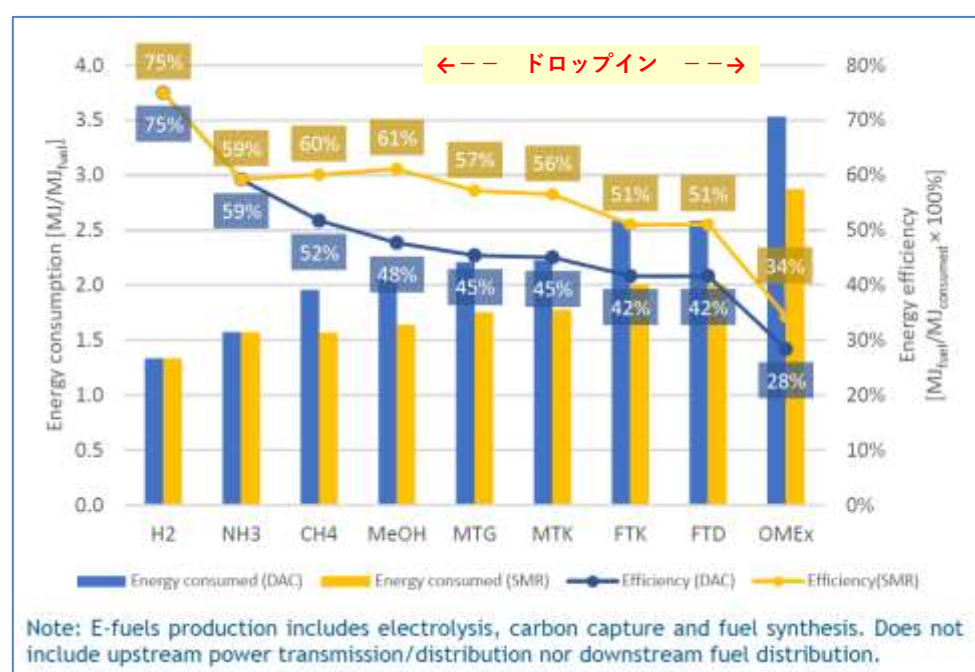


図 2.3.18 各合成燃料（1MJ）製造時のエネルギー消費量

③ E-fuels 製造・使用 (CtG: Cradle to Grave) 時の GHG 排出量 (CO₂ 換算値)

- CtG (Cradle-to-grave) 時の GHG 排出量に関しては、燃料毎の大きな差は見られない。ただし、化石燃料と比較した場合、いずれの E-fuel でも CO₂ 削減割合として 95%前後の大きな削減効果を示す。
- DAC 利用により CO₂ 供給時の影響が大きくなり、炭化水素系 E-fuels の GHG 排出量が増加 (CO₂ として 3%程度)。
- FT 合成により e 軽油 (FTD) を製造した場合の、地域別 GHG 排出量を比較すると、ノルウェー (北欧) が最も低く、次いでサウジアラビア (中東)、スペイン (南欧)、ドイツ (中欧) となった。

④ E-fuels 製造・供給までのコスト (2050 年、中欧・ドイツ想定) 図 2.3.19

- 炭化水素系 E-fuels は、合成経路が複雑になるほど合成コストが大きくなり全体コストを引き上げる。さらに DAC によるコスト増が追加される。
- 気体燃料は、液体燃料より配送コストが高い。液体 E-fuels は、域外からの輸入や域内での移送に際しそのコストへの影響は相対的に少なくなる。
- 特に e 水素は SS での充填コストが上積みされ e アンモニアより高くなる。
- 以上の結果、2050 年における製造・供給コストは、1.4~2.4€/L のレンジ (化石系軽油は 0.8€/L) となる。

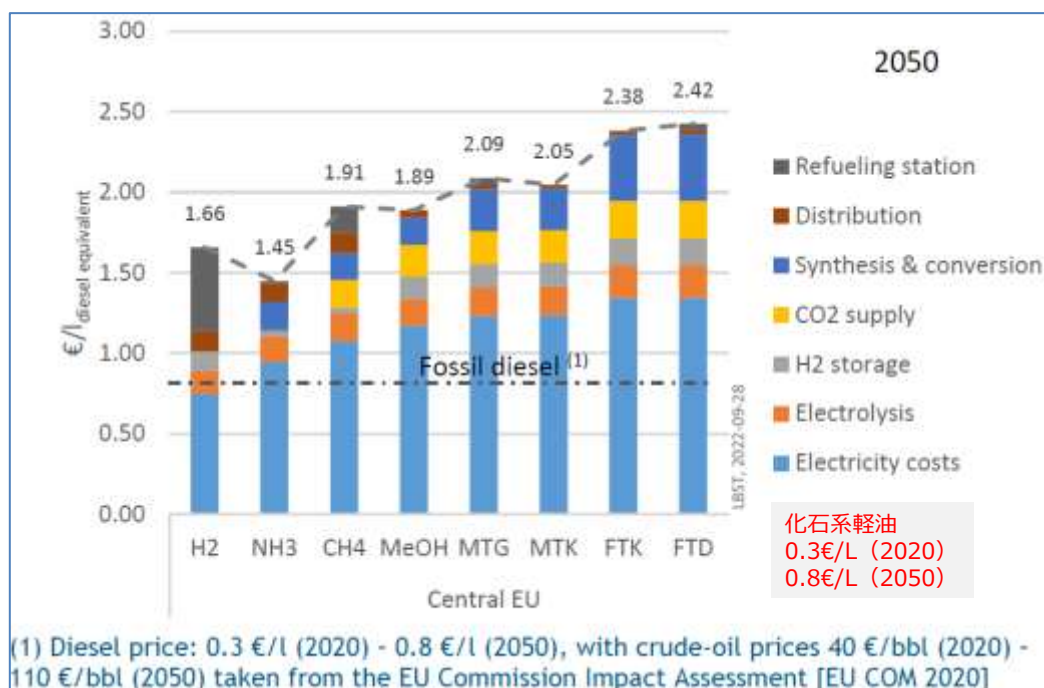


図 2.3.19 各合成燃料製造・供給時のコスト (軽油 1L 換算)

地域別製造コストも比較しており、サウジアラビア (中東)、スペイン (南欧) のコストが低く、次いでドイツ (中欧)、ノルウェー (北欧) となった。なお、ノルウェーでは洋上風力発電 100%で試算しており、水力発電を用いた場合、製造コストはさらに低くなる。

ウ. 合成燃料（E-Fuels）製造拠点マップ（eFuel Alliance）

eFuel Alliance のホームページに「eFuels Production Map」が公開されている。

2023 年 3 月時、世界で 18 ケ所が登録されている。

<https://www.efuel-alliance.eu/efuels/efuels-production-map>

表 2.3.4 eFuels Production Map 記載一連（抜粋）

PJ	Methods / Products	Capacity ¹⁾	Companies
Haru Oni	Power to Methanol Power to Gasoline	2022 130 kL 2024 55 ML 2026 550 ML	Hif global Siemens 他
Next GATE	Naphtha, Diesel, WAX	2022 350 t	Mabanaft 他
Norsk e-Fuel Alpha	Liquid fuels via FT	2024 12.3 ML 2026 25 ML	Norsk e-Fuel Sunfire 他
Bilbao Decarbonization Hub	PtX via FT	2024 2,750 kL	Repsol Aramco 他
CAC Synfuel Plant	e-Gasoline & e-Kerosene via Methanol-to-Fuel	2010 1,000 kL	CAC
Synhelion Solar Fuels	e-Kero, Gasoline, Diesel via Sun-to-Liquid	2023 10 kL	Synhelion
Synhelion Solar Fuels Spain	e-Kero, Gasoline, Diesel via Sun-to-Liquid	2025 500 kL	Synhelion
George Olah Renewable Methanol	e-Methanol via PtL	2012 4,000 Mt	CRI (Carbon Recycling International)
Bell Bay Powerfuels	e-Methanol	2024 70 kt	ABEL Energy Thyssenkrupp
NEOM Green Hydrogen	Green H2 & Green NH3	2026 650 t/day H2 1.2 Mt/年 NH3	NEOM Air products 他
Nordic Electrofuel P1	e-Kerosene	2025 4.4 ML 2026 10.5 ML	Nordic Electrofuel
HIF USA	e-Fuels	2026 200 M-gallons (760 ML)	Hif global Siemens 他
Infinium Electrofuels	e-Kerosene & e-Diesel	2025 58 ML	Infinium
ReuZe	e-Kerosene & e-Diesel	2026 145 ML	Engie Infinium 他
INERATEC Pioneer Plant	e-Fuels via FT	2022 4.6 ML	INERATEC
Atmosfair Fairfuel	e-Crude via FT	2022 350 t	Atmosfair, Siemens, Ineratec 他
FlagshipONE	e-Methanol	2023 50 kt	Liquid Wind, Siemens, Worley 他
Arcadia eFuels	e-Kerosene & e-Diesel	2025 75 kt (100 ML)	Arcadia eFuels Topsoe 他

1) 特に記載がない場合、年単位の生産量

3. まとめ

本報において、海外主要国（欧州、北米、アジア地域）におけるカーボンニュートラルに向けた製油所の事業転換に関する調査の一環として、主に注目されている製油所転換事例の規模・設備構成、適用・活用技術等を行った結果をまとめた。

海外主要国として先行する欧州を中心に、既存設備の次世代バイオリファイナリーへの転換、プラスチックリサイクルへの活用、合成燃料等の低炭素燃料設備の新設等を実現、または構想として打ち出している事例が増加しており、これらの先行する事例について、我が国への実装に向けたアプローチとして、その背景やコンセプト、設備構成、適用・活用技術の実態や開発動向など、最新情報を収集・整理した。

（１）欧州石油産業における製油所転換の背景

欧州では 2050 年カーボンニュートラル達成に向け、現状は石油が大宗を占めている輸送用燃料についても、バイオ燃料、合成液体燃料（E-Liquids、E-Fuels）、水素、電気などに置き換わる必要があると解析されている。その実現に向けた政策として、再生可能エネルギー指令（RED: Renewable Energy Directive）などがあり、エネルギー産業はその達成のための戦略策定と実装に向けた動きを加速させている。これらを解析し発信している Concawe レポートなどを参考に背景としてまとめた。

（２）主要石油精製企業の転換事例

欧州の大手石油各社から将来を見据えた製油所イメージが提案されている。実現可能性や我が国への適用可能性を見極めるためには、転換過程を含む類型分類、装置構成、開発技術の動向などを複数の主要石油精製企業の転換事例を調査した。

① スペイン Repsol 社

② フランス TotalEnergies 社、La Mède 製油所

③ オランダ Shell 社、ロッテルダム（Pernis）製油所

④ スウェーデン Preem 社、Gothenburg 製油所

以上の調査結果は以下の通り、総括される。

石油系燃料は需要に応じ減らしつつ LNG やバイオなど低炭素燃料への製造拡大は既に着手済み、さらに、廃棄物からの次世代バイオ、再生エネルギーからの水素や合成燃料への転換を視野に入れている。

バイオマス系再生可能燃料（HVO、SAF）を製造・販売供給するための製油所転換事例としては、大きく二つのケースに分類される。

A. Tall Oil など原料の確保から前処理（熱分解・液化）までをジョイント企業と連携しサプライチェーンに組み込み、製油所で Co-processing 処理し、付加価値燃料 HVO として自社 SS で販売（Preem 社）

B. 既存製油所内に再生可能電力やバイオ集積・前処理設備など新たな機能を付加し、既存製油所機能と統合することで、SAF など再生可能燃料の増産ニーズに対応（TotalEnergies 社 La Mède 製油所、Shell 社ロッテルダム（Pernis）製油所）

（３）低炭素燃料（LCF）製造技術の動向

石油代替・低炭素燃料の製造技術関連動向を調査し、今後の製油所に活用される可能性のある先進技術の特徴をまとめた。

まず石油代替・低炭素燃料を「原料」、「製造プロセス（工程）」ならびに「代替燃料（製品）」の３つのレイヤーに分け、製品としての各代替燃料がどの原料（大きくバイオマス系と非バイオ系）からどの製造プロセスを経て製造されるかの分類を図 2.3.1 に示した。これらの中には、すでに工業化され商業生産が開始され製造規模も広がっている技術がある一方で、合成燃料のように開発中の技術もある。それらを分類する手段として、技術成熟度 TRL（Technology Readiness Level）と燃料準備レベル FRL（Fuel Readiness Level）の状況を調べた。

次に以下の２つの技術については、現状の取組み状況ならびに 2050 年に向けた技術開発と目標など活用状況について調査した結果をまとめた。

- ① バイオ燃料製造およびプラスチックなど廃棄物の活用技術
- ② 合成燃料の活用技術

いずれも 2050 年カーボンニュートラルを達成するために必要と想定される各低炭素燃料に対して、適する製造技術と各容量に関しても解析が進められており、その中で原料種別ならびに製品としての低炭素燃料種に依存した「転換技術」の動向や実用化に向けたプロジェクト、ならびに設備投資などコスト見通しが、検討されその一部を報告した。

これらの情報は、我が国での製油所転換に向けた戦略ならびに石油エネルギー産業でのカーボンニュートラルに向けた低炭素燃料製造戦略の立案などの参考情報として、活用されることを期待する。

引用文献

- 1) European Commission, “2030 Climate Target Plan”, Fig. 63, Sep. 17, 2020
https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal/2030-climate-target-plan_en
- 2) McKinsey & Company, “Global Energy Perspective 2022”, April 2022
- 3) Repsol, “Decarbonization Technologies”, June 14, 2022
- 4) Concawe Report 18/22, “Future diesel-like renewable fuels – a literature review”, Dec. 2022
- 5) IEA Bioenergy, “Direct Thermochemical Liquefaction”, July 2020
- 6) P. Vignesh et al., “Biodiesel and green diesel generation: an overview”, Oil Gas Sci. Technol. – Rev. IFP Energies Nouvelles, Volume 76, 6 (2021)
- 7) C. Panoutsou et al., “Sustainable biomass availability in the EU, to 2050”, Imperial College London for Concawe, 2021
- 8) ERTRAC (The European Road Transport Research Advisory Council), “A Mapping of Technology Options for Sustainable Energies and Powertrains for Road Transport”, Dec. 12, 2022
- 9) DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH), “Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr (Production technologies to provide renewable Fuels)”, Jan. 16, 2023
- 10) CAAFI (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative), “Fuel Readiness Level (FRL)”, https://www.caaafi.org/information/pdf/FRL_CAAFI_Jan_2010_V16.pdf
- 11) Concawe Report 7/21, “Transition towards Low Carbon Fuels by 2050: Scenario analysis for the European refining sector”, Aug. 2021
- 12) European Commission, “2030 Climate Target Plan”, Fig. 77, Sep. 17, 2020
- 13) E4tech, “A look into waste to fuels supply chains: from feedstocks to final products”, Concawe Symposium 2021
- 14) E4tech, “Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes”, June 2009
- 15) Concawe & Energy Institute, “Waste to products – Technology and economic assessment (phase 1)”, July 2022
- 16) S.M.Santos et al., “Waste Gasification Technologies: A Brief Overview”, Waste 2023, 1, 140–165. (<https://doi.org/10.3390/waste1010011>)
- 17) Concawe Report 17/22, “E-Fuels: A technoeconomic assessment of European domestic production and imports towards 2050”, Nov. 2022

無断転載・複製を禁ず

一般財団法人石油エネルギー技術センター
調査国際部

〒105-0011 東京都港区芝公園 2-1-1

電話 03-5402-8502

添付 2 :

合成燃料の製造に関わる技術開発

令和 4 年度燃料安定供給対策に関する調査事業
(製油所の事業転換に向けた技術動向に関する調査)

令和 5 年 3 月



一般財団法人石油エネルギー技術センター

Japan Petroleum Energy Center (JPEC)

目 次

要旨	1
1. 調査の概略	2
1.1 調査の背景	2
1.2 調査の目的	2
1.3 調査の方法	2
2. 合成燃料の製造技術開発動向	4
2.1 欧州における合成燃料の製造技術開発	4
2.1.1 ドイツ・オーストリアのプロジェクト	4
2.1.2 英国の合成燃料プロジェクト	11
2.1.3 北欧における e-fuel プロジェクト動向	13
2.2 米州における合成燃料の製造技術開発	26
2.3 中国における合成燃料の製造技術開発	34
2.4 欧米石油会社の合成燃料製造への関わり	35
2.4.1 石油会社の合成燃料プロジェクト	35
2.4.2 製油会社の技術技術ライセンス	35
2.4.3 製油所への合成燃料(e-fuel)プラント導入	36
3. 合成燃料の規格化に関する検討	41
3.1 合成燃料のサステナビリティ評価	41
3.2 合成燃料の製造規格	44
4. まとめ	46

要 旨

合成燃料(e-fuel)の技術開発は、2010 年以降、ドイツが世界の先陣を切って進めてきた。その中で、輸送用燃料となる e-fuel 分野では、昨年来、複数のデモンストレーションプラントがドイツ国内で稼働する状況となっている。

欧州では、2050 年のネットゼロ社会に向け、持続可能な航空燃料(SAF)として、バイオ由来燃料だけでなく e-fuel の混合義務化も検討されていることから、ドイツだけでなく欧州各国でプロジェクトが立ち上がっている。

欧米を中心に輸送用燃料向け合成燃料(e-fuel)の情報収集を行った結果、40 件強の合成燃料(e-fuel)製造プロジェクトがアナウンスされていることが確認され、現状で 5 カ所が稼働、2023 年にさらに 2 カ所の稼働見込みを確認した。

本調査では、e-fuel 製造を開始したドイツ CAC や P2X-Europe、米州ではチリの HIF Global や米国の Infinium に注目し、現状と今後の計画について情報を整理した。

製造技術の現状についてみると、e-fuel 用のグリーン水素調達については、燃料製造者はグリーン水素の製造に必要な再生可能電力を確保した上で、自社に電解槽を設置して水素製造を行う場合と、社外からグリーン水素を調達する場合がある。CO₂ 原料の確保においては、現時点では、化学あるいはバイオマス工場で発生する CO₂ を分離回収する方法が主流である。

プロジェクトを実証段階に進めるためには、これら原料調達と供給の整備が遅れると、e-fuel の製造開始の延期につながるが、今回情報収集したプロジェクトのうち、原料供給のサプライチェーンの構築時期が明らかな事例は限定的であり、商業運転に向けての課題は多く残っている。

なお、e-fuel のサステナビリティ認証基準や製造規格については、ドイツ ISCC や米国 ASTM の機関で検討が始まっていることは確認できたが、制度の内容確定までにはまだ時間を要する状況である。

1.調査の概略

次世代液体燃料として位置付けられる低炭素燃料は、GHG 排出量の削減、カーボンニュートラル実現の切り札の一つとしての期待が大きく、我が国の石油業界を含め研究が立ち上がっている。

その製造技術に関しては海外での開発事例が報じられているが、実用化に向けた課題は依然多く残っており、さらなる技術開発が行われている。

これまで石油系の輸送用・産業用液体燃料を供給してきた石油産業では、培った燃料設計技術やサプライチェーンを生かした新たな事業の可能性という観点で低炭素燃料、特に合成燃料の将来性を調査する必要がある。

欧州、北米、アジアにおける低炭素燃料(合成燃料)製造に関わる技術開発を行っている研究機関や企業の開発状況に関し、情報収集・分析を行った。

1.1 調査の背景

次世代液体燃料として位置づけられる低炭素燃料は、GHG 排出量の削減、カーボンニュートラル実現の切り札の一つとしての期待が大きく、我が国の石油業界を含め研究が立ち上がっている。

その製造技術に関しては海外での開発事例が報じられているが、実用化に向けた課題は依然多く残っており、さらなる技術開発が行われている。

これまで石油系の輸送用・産業用液体燃料を供給してきた石油産業では、培った燃料設計技術やサプライチェーンを生かした新たな事業の可能性という観点で低炭素燃料、特に合成燃料の将来性を調査する必要がある。

1.2 調査の目的

欧米を中心に、注目される合成燃料製造プロジェクトの検討状況や石油会社の参入動向について現状と今後の計画を調査する。

欧州では特にドイツ、米州ではチリと米国のプロジェクトの進捗につきより詳しく調査を行う。

合成燃料、特に e-fuel について、市場投入に向けたサステナビリティ評価法や製造規格に関する国際関係機関での審議状況を把握する。

1.3 調査の方法

各地域の政府または民間主催の会議(コンファレンス、ワークショップ、ウェビナー)への参加、及び低炭素燃料(合成燃料)関連団体や企業、研究機関との面談等を通じ、製造技術に関する最新情報の収集・分析を行う。

プロジェクト情報や技術情報について、欧米政府機関や企業の発信情報及びインタビューをもとに調査を実施した。

- 欧州

- ・欧州委員会欧州気候・インフラ・環境執行機関 CINEA
- ・ドイツ政府 Kopernikus プロジェクト
- ・ドイツ団体・研究機関(エネルギー機構 dena、カールスルーエ工科大 等)
- ・国際認証機関(ドイツ ISCC Systems、スイス RSB)
- ・コンサルタント(ドイツ frontier economics、ドイツ LBST 等)
- ・業界団体(ドイツ eFuel Alliance 等)
- ・国際会議(E-fuels Conference、Fuels of the Future Conference 等)
- ・関連企業

- 米州

- ・エネルギー省、運輸省、州政府支援技術開発プロジェクト
- ・カナダ BC-SMART Consortium
- ・燃料規格開発機関(米 ASCENT、米 ASTM)
- ・関連企業

- 中国

- ・現地エネルギー・燃料関連機関

2. 合成燃料の製造技術開発

低炭素燃料のうち、本調査では、e-fuel を中心に合成燃料の技術開発動向を調査し、製油所の転換プロセスとしての可能性を調査する。

e-fuel とは、再エネ電力による水電気分解で得られるグリーン水素を原料とする炭化水素化合物やメタノール、アンモニア、メタン等を言う。また、Power-to-X と呼ばれ、液体の場合は Power-to-Liquid (PtL)、ガス状生成物では Power-to-Gas (PtG) と表記される場合もある。

本調査では、合成燃料のカテゴリーに含まれる e-fuel のうち、炭化水素化合物とメタノールを目的化合物とするプロジェクトの現状について情報収集を行った。

本年度に収集した情報を欧州と米州に分けてとりまとめた。

2.1 欧州における合成燃料の製造技術開発

欧州では、プラント完工、建設中、建設計画等プロジェクトの進捗段階が報じられている中で、特に市場への製品供給の実現性に着目する。

2.1 項末に添付した表 2-5 「合成燃料(e-fuel)プロジェクト一覧(欧州)」から、ドイツ、オーストリア、英国、北欧の合成燃料プロジェクトについて以下に記す。

いずれのプロジェクトも EU または各国政府から公的資金の支援を受けている。

2.1.1 ドイツ・オーストリアのプロジェクト

(1) Chemieanlagenbau Chemnitz (CAC) e-fuel プロジェクト

ドイツ・ザクセン州に本社を持つプラントメーカー CAC は、TU Bergakademie Freiberg(フライベルク工科大学)と協力して e-fuel (Synfuel¹と登録)を開発した。

2009 年に同大学敷地内にデモプラントを建設、2017 年 連邦経済エネルギー省 (BMWi) ファンド KEROSyN100 プロジェクトに参画した。

メタノール経由の e-ガソリン製造プラントであり、MTG 合成は独自のゼオライト触媒プロセスとしている。

メタノールは外部からの調達をしており、供給元は開示されていない。

2018 年 8 月からは、自動車での燃料評価のため、ドイツ政府支援のコンソーシアム C3 Mobility プロジェクト²に参画し、e-fuel 供給を行っていた。

このプロジェクトは 2021 年 11 月に終了し、この成果はドイツ政府の e-fuel 推進政策に活用された³。

以下に、CAC とのインタビューで提供された技術情報を記載する。

<技術概要>

- MTG ユニットの特徴
- ・ワンステップでの変換(メタノール→炭化水素)。

¹ <https://www.cac-synfuel.com/en/gasoline>

² C3-MOBILITY 30partners <http://www.c3-mobility.de/en/home/>

³ 現地新聞 Chemnitzer Zeitung (2022/2/15) Synthetisches Benzin ist reif für die Tankstellen
https://www.cac-synfuel.com/fileadmin/cac-synfuel/images/news/Freiepresse_C3Mobility220215.pdf

メタノールから炭化水素への変換を1つのリアクターの1ステップで行えるため、省スペース化が可能。

※通常はメタノール→ジメチルエーテル→炭化水素とするため、リアクターが2つ必要

- ・反応管の周囲には溶融塩が流れており、反応で生じる熱を吸収し、温度を正確にコントロールする。

溶融塩システムは、MAN ソリューションズと共同開発。 ※温度域 300-450℃、圧力 5 bar

- e ガソリンの得率

- ・MTG ユニットから得られる最終生産物の割合は、ガソリン 75%、ヘビーガソリン(C9-C10、芳香族が主) 7-8%、その他に LPG、Fuel Gas を生産。

- e ガソリンの品質

- ・オクタン価以外、ガソリン規格 EN228 を満足する(エタノール添加で規格を満足)。
- ・エタノール以外の添加物を用いてオクタン価を満足させる取組みも進めている。
- ・2022 年 5 月 28 日、ADAC ドイツ自動車連盟ニュルブルクリンク 24 時間レースの代替燃料クラスにトヨタ GR スープラ GT4 で参戦、代替燃料カテゴリーの 3 位。

※全 27 クラスのうち代替燃料クラスには 6 車種(ポルシェ、トヨタ、フォード、ドッジ)が参戦。

- ・CAC の合成燃料 Racing eFuels98 合成燃料を使用。
- ・最大 90%の CO2 排出量削減を謳う。
- 生産規模
 - ・フライベルク工科大学敷地内に 120 リットル/h のデモプラント⁴(所有者はフライベルク工科大学)及び、自社研究所に 1 リットル/h のラボプラントを持つ。
 - ・2020 年に年間 30KL の e ガソリンを生産。

<今後の予定>

- e ガソリンの性能評価。

- ・2023 年1Qもしくは2Qより、約 300トンの e ガソリンを生産し、パートナー企業と連携のもと、e ガソリンをベースとした E10、E20 ガソリン等を製造。

この E10、E20 ガソリン等を使用した際の、配管やポンプ、タンク等の評価テストを実施し、市場導入に向けた取組みを進める。

- ・プロジェクトは 2023 年1Qから開始し、期間は 4 年間を予定。
- ・上記プロジェクトに向けて、2023 年前半にて e ガソリン 20KL を生産するバッチテストを実施し、長期稼働に向けたデモプラントのユニットを改造する。

同社は、2023 年 1 月に立ち上がったドイツ のコンソーシアムプロジェクト DeCarTrans⁵(Demonstrating a Circular Carbon Economy in Transport Along the Value Chain)に参画した。

今後 4 年間で、プロジェクトパートナーは、約 38 万リットルの再生可能燃料を工業規模で生産できることを実証し、燃焼時の汚染物質の排出を最小限に抑えるために、プロセス効率を改善し(熱の再統合などにより)、製品の品質を向上させる。

さらに、コンソーシアムはサプライチェーンの評価のため、可能な販売および市場投入のシナリオと関連する法

⁴ ドイツ CAC プラント映像(共同研究先であるフライベルク工科大学の敷地内)

https://www.youtube.com/watch?v=3DxjcNW_DQU

⁵ www.decartrans.de

的枠組み（RED II を含む）を評価する。

本プロジェクトは、ドイツ連邦デジタル・交通省(German Federal Ministry for Digital and Transport, BMDV) の資金を 4 年間で 1,280 万ユーロの資金を受けることとなった。

(2) Atmosfair PtL プロジェクト

本プロジェクトは、Atmosfair (国際 NPO)、Siemens、EWE、INERATEC からなるコンソーシアムとしてドイツで初めて稼働した実証プラントがある。

2021 年 10 月、世界初の PtL ケロシンパイロットプラントとして、メルケル前首相を迎えて、ドイツ Werlte (ヴェルルテ) での開所式が行われた。

同サイトには蒸留分離施設がないため、生成物 (e-crude) をドイツ北部の Heide 製油所までトラック輸送し、ジェット燃料に混合している。

フル稼働状況ではないとの一部報道があり、生産量等の情報も開示されていない。



図 2-1 Atmosfair PtL プラント開所式

(出所) ドイツ政府放映

表 2-1 Atmosfair PtL 製造体制

AtmosfairのPtL製造体制	
開発時間	2017-2020
atmosfair諮問委員会による承認	2018年
実施状況（2021年8月時点）	建設が完了し、現在試運転が進行中
環境基準品質シール「atmosfair fairfuel」の開発	開発連邦環境庁UBA-atmosfair諮問委員会を設置し、連邦エネルギー・環境研究所IFEUとatmosfairが担当
製油所（合成原油をジェットA1に加工）	Heide製油所にてCo-processing
最初のユーザー	2つのドイツの航空会社
連邦排出規制法BImSchG承認（暫定）	2020年12月発行
システム	
敷地面積	1000平方メートル
製品	合成原油
接続負荷	2.5 MW (Siemens Silyzer 200 PEM)
年間CO2使用量	1,100トン
年間使用H2量	160トン
CO2供給源	(1) 食品廃棄物と残留物からのバイオガス（アミン洗浄） (2) DAC
電源	EEG報酬のない2.5MWポストEEG風力タービンシステム
システムの保守性	オプションのネットワークオペレーターへのアクセス ネットワーク需要ピーク時はシステムをシャットダウン
合成原油の配送	2週間毎に製油所へタンクローリー輸送

(出所) Atmosfair⁶

(3) Synhelion Sun-to-Liquid プロジェクト

Synhelion は 2016 年、スイス連邦工科大学チューリヒ(ETH)のスピンオフ企業として設立された。

Synhelion は、ドイツ国内施設建設前の研究サイトとして、スペイン IMDEA Energy Institute(スペイン・マドリッド近郊モストレス)での SUN-to-LIQUID project 研究を終了し、その成果が科学雑誌 Joule に掲載された⁷。

この技術では、水電気分解によるグリーン水素ではなく、太陽光エネルギーにより水を高温で熱分解して水素を発生、CO₂ との触媒反応により液体燃料を生成するプロセスである。パイロットプラント建設まで進む事例として初となる。

2022 年 9 月に、ドイツ連邦経済エネルギー省 BMWK の追加ファンド 392 万ユーロを受け、ドイツ航空宇宙センター DLR Institute for Future Fuels⁸のユーリッヒ施設に燃料製造用デモプラント建設開始を発表した。

・建設スケジュール

R&D 用施設として、2023 年 完工、年間数 KL 製造見込み

商業1号機 2025 年 スペインに建設予定、年間約 150KL 製造見込み

・技術の特徴

⁶ https://fairfuel.atmosfair.de/wp-content/uploads/2021/10/Short-description_atmosfair_E-Kerosene-plant_EN_092021.pdf

⁷ <https://www.energy.imdea.org/events/2022/sun-liquid-project-publishes-successful-hermochemical-kerosene-production-using-solar> (2022/7/21)

⁸ https://www.dlr.de/sf/en/desktopdefault.aspx/tabid-8560/15527_read-44867/

多焦点太陽光集光タワー

英国 Wood 社改質技術

太陽熱による熱化学反応器での合成ガス製造

ガス状 CO₂ と水の混合物を循環伝熱流体 (HTF) として採用

• 供給燃料

スイス航空と SAF 供給契約を締結済み。

多焦点集光タワーで回収された熱を使い、水蒸気と CO₂、追加の炭素源のメタンヲ原料に酸化セリウム CeO₂ による酸化還元反応により水素と CO を発生した後、FT 法により液体燃料を生成する。

スペインの 50kW ソーラー反応器実験装置では、太陽光からの合成ガス製造効率 4.1% を達成した。

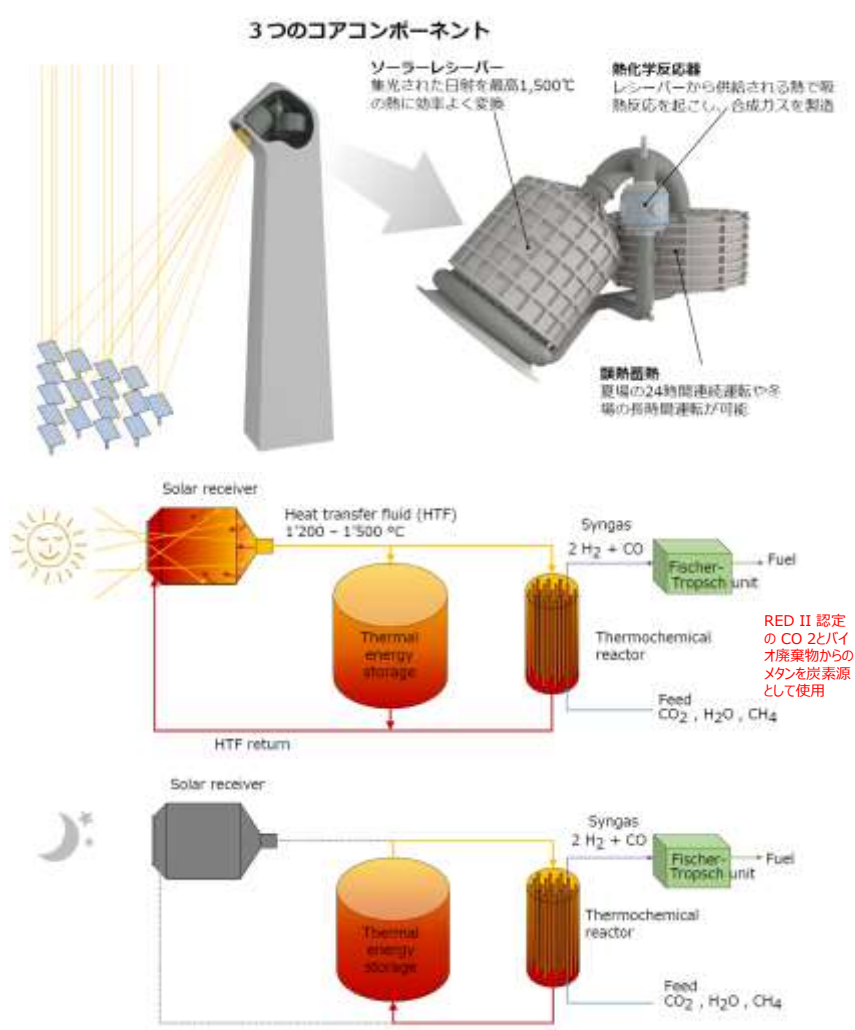


図 2-2 Synhelion の多焦点太陽光集光タワープロセス概要

(出所) Synhelion⁹

⁹ 試験場ビデオ“Synhelion : Turning sunlight into fuel” 公開 (2022/9/2)

<https://www.youtube.com/watch?v=GoVca4pmQss>

なお、Sun-to-Liquid 技術は、EU の Horizon Europe の SUNERGY¹⁰プロジェクトとしても新たな研究開発が進められており、新たな液体燃料化技術として注目される。

(4) Shell Rheinland 製油所

EU の Horizon 2020 プログラムの資金支援により REFHYNE プロジェクトとして、製油所に 10MW の PEM 電解槽を導入しグリーン水素の製造実験を行った。

2021 年 7 月から稼働を開始し、プロジェクトが終了した。

同製油所では、第 2 段として、100MW PEM 導入プロジェクト REFHYNE II が進行中であり、グリーン水素製造拡大時には、SAF を製造するとしている。

表 2-2 Shell Rheinland 製油所における Horizon 2020 プロジェクト

 Clean Refinery Hydrogen for Europe II		
REFHYNE II プロジェクト		
開始：2021年10月1日 終了：2026年9月30日 (5カ年)		
全体予算： € 148,956,405 EUファンド： € 32,431,618 (21.8%補助) 民間支出： € 116,524,787		
プロジェクトコーディネーター	国籍	各社EUファンド
SINTEF AS	ノルウェー	€ 890,635
開発実施者 (8者)		
ITM LINDE ELECTROLYSIS	ドイツ	€ 170,875
SHELL DEUTSCHLAND OIL GMBH	ドイツ	€ 8,672,250
LINDE GMBH	ドイツ	€ 8,646,548
ITM POWER (TRADING) LIMITED	英国	€ 11,425,750
ITM POWER GMBH	ドイツ	€ 1,164,734
FUNDACION TECNALIA RESEARCH & INNOVATION	スペイン	€ 170,875
ELEMENT ENERGY	フランス	€ 148,125
CONCAWE IVZW	ベルギー	€ 464,500

公表日 2021年9月16日

<https://cordis.europa.eu/project/id/101036970>

(出所) EC CORDIS¹¹

プロジェクト第 1 段のプロジェクトのまとめとして、製油所に初めて導入された電解槽に関わる教訓としてレポート「EU REFHYNE project Lessons Learnt」を 2022 年 9 月に公表した¹²。

プロジェクトを通じて気付きを 5 項目でまとめている。

製油所現場では、これまで納入実績がない電解槽の扱いとその装置の供給者がこれまで製油所プラントエンジニアリング会社とは異なる中小規模メーカーであることから、製油所の安定操業を続けながら、未経験の装置を製油所のプロセスフローに追加する際の難しさを報告している。

¹⁰ <https://sunergy-initiative.eu/suner-c/>

¹¹ EU Horizon 2020 <https://www.refhyne.eu/publications/>

¹² https://www.refhyne.eu/wp-content/uploads/2022/09/REFHYNE-Lessons-Learnt_Aug22_PU_FV.pdf

【要点】

- コストとタイミングに関する教訓(石油会社への中小企業の新規技術の導入に向けた協議の時間と頻度)
- 技術的な課題(電解用超純水の供給、配管規格、交流/直流変換等の未経験の課題)
- 製油所の既存コントロールシステム(Shell DCS (Honeywell 社製)に ITM DCS (Siemens 製)を組み込んで電解槽を円滑に稼働する
- グリッドとの連動(安定的で廉価な再エネ電力調達*)
 - *現状ではグリーン水素製造用再エネ電力の定義不確定
- 政策との連動(再エネ電力調達の市場整備が未確立)

欧州委員会では、グリーン水素の認証制度の検討が行われている、同製油所では、100MW PEM 稼働時に製造されるグリーン水素の認証を得るため、ドイツの認証実施機関 TÜV Rheinland Industrie Service GmbH と準備を進めている。

電解槽プラントの製造、設置、試運転中の適合性評価および防爆試験として下記を実施する必要がある。

【主要評価項目】

- Conformity assessment with regard to the Pressure Equipment Directive (圧力機器指令に関する適合性評価)
 - Assessment of safe operation and CE conformity assessment of the overall plant (安全運転の評価とプラント全体の CE 適合性評価¹³⁾)
 - Integration and verification of the interfaces within the refinery production facilities (製油所の生産施設内のインターフェースの統合と検証)
- 性能目標
- Expansion of the capacity up to 100MW, i.e. an annual production of 100,000 tons of hydrogen (最大 100MW 容量への PEM 拡張による年間 10 万トンの水素製造)

(5) OMV Schwechat 製油所

Horizon 2020 プロジェクトとして、2021 年から 2025 年の 4 カ年実施される。

産業用 Power-to-X 市場向けの大規模共電解のデモンストレーションを行うため、Schwechat 製油所に固体酸化物電解槽セル(SOEC)を導入して合成ガス製造を実証すると同時に、コストと耐久性で競争力のある電解槽開発を目指す。

このプロジェクトは、メガワット規模の共電解による合成ガス製造では世界初の事例とされている。

コンソーシアムメンバーの Sunfire は共電解槽の設計・建設、デンマーク工科大学とグラーツ工科大学は、電解槽のセルとスタックの劣化や精製ガスの純度向上に関する技術蓄積、Paul Wurth は製油所システムとの統合運転を担当する。

¹³ 「CE」はフランス語の「Conformité Européenne(英語: European Conformity)」の略
<https://www.jetro.go.jp/world/qa/04S-040011.html>

電解槽設置後、2年間で計 900kg 超の合成ガスの製造実証を完了し、共電解槽ベースのシステムが Power-to-X の原料を製油所で製造するだけでなく、化学産業と統合したメガワット規模のシステムとしての実用化を目的としている。

表 2-3 OMV Schwechat 製油所における Horizon 2020 プロジェクト

 Megawatt scale co-electrolysis as syngas generation for e-fuels synthesis		
MegaSynプロジェクト		
開始：2021年4月1日 終了：2025年3月31日 (4カ年)		
全体予算： € 7,785,793.75 EUファンド： € 4,999,449.39 (64.2%補助) 民間支出： € 2,786,344.36		
プロジェクトコーディネーター	国籍	各社EUファンド
デンマーク工科大学 (DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET)	デンマーク	€ 649,937.50
開発実施者 (4者)		
SUNFIRE GMBH	ドイツ	€ 1,961,747.38
OMV DOWNSTREAM GMBH	オーストリア	€ 1,864,667.63
グラーツ工科大学 (TECHNISCHE UNIVERSITAET GRAZ)	オーストリア	€ 420,000.00
PAUL WURTH SA	ルクセンブルク	€ 103,096.88

公表日 2021年9月29日

<https://cordis.europa.eu/project/id/101007108>

(出所) EC CORDIS¹⁴

2.1.2 英国の合成燃料プロジェクト

EU から独立した英国では政府の Jet Zero Strategy (ジェットゼロ戦略) にもとづく合成燃料製造プロジェクトが進行中である。

英国政府は 2030 年までにジェット燃料の少なくとも 10% SAF の義務付け (120 万トン/年)、2025 年までに 5 カ所の英国製造拠点を整備することを目標としている。

英国では e-fuel の導入目標は設定されておらず、現状は FT 法 (BtL、WtL) と植物油水素化、エタノール転換による SAF 製造を予定している。

製油所を活用した SAF 製造は Phillips 66 Humber のみであり、他は新設のプラントとなる。

なお、英国政府は SAF 生産量を 2050 年に 650 万トンまでに拡大の計画があるが、原料調達に課題があるとの指摘もされている。

¹⁴ <https://cordis.europa.eu/project/id/101007108>

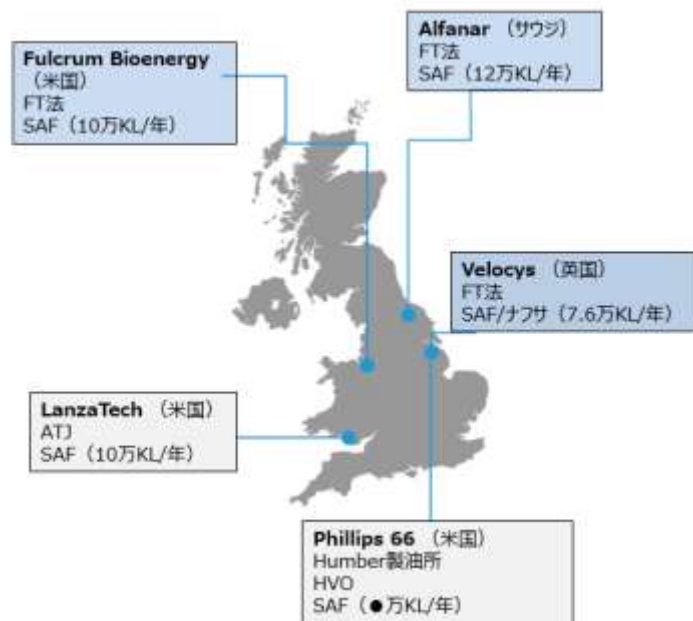


図 2-3 英国における SAF 製造計画プラント

(出所)英国 Sustainable Aviation レポート¹⁵

各プラントの概要を以下に記す。

•Fulcrum Bioenergy

チェシャー州 Essar Energy の Stanlow 製油所内に新設
60 万トンの廃棄物を使用して、FT 法により年間 10 万 KL/年の SAF を生産する計画

•Alfanar

サウジアラビアに本社を置く Alfanar は、廃棄物から FT 法により年間 12 万 KL の SAF を生産
投資額 10 億ポンド
建設期間中は 700 人、操業開始後は 240 人のフルタイム雇用を創出する予定。

•Velocys FT 法

Altalto ハンバーサイド州イミングハム市
Altalto は、Velocys と British Airways の共同開発で、年間数十万トンの廃棄物を SAF に変換

•LanzaTech

製鉄所の排ガスやその他の廃棄物から作られるエタノールを原料に、商業規模の Alcohol-to-Jet(ATJ) 技術により年間 10 万 KL の SAF 製造を計画

•Phillips 66 HVO SAF(●万/年)

Humber 製油所にて、廃食油から SAF を生産し、既存のパイプラインインフラを通じて、英国の空港に直接供給している。

¹⁵ <https://www.sustainableaviation.co.uk/news/update-on-uk-sustainable-aviation-fuel-potential/>
(2022/11/29)

2.1.3 北欧における e-fuel プロジェクト動向

現在、スカンジナビア地域全体で 36 カ所グリーン水素施設が稼働しており、2022 年から 2030 年にかけて、さらに 64 件のプロジェクトが立ち上がる予定と報道されている。この地域における現在のグリーン水素の生産能力は年間 1 万 3,000 トンで、進行中のプロジェクトに基づくと、2030 年までに総生産能力は年間 210 万トン超に達することとなり、e-fuel 向けに供給の拡大が期待できる。

一方、e-fuel 製造には、グリーン水素に加え、炭素源となる大量の CO₂ の確保が課題となる。直接空気回収 (DAC) は実用化までに時間がかかるため、中期的には、工場から排出される CO₂ の回収が実用化で先行するとみられる。そのため、北欧各国は e-fuel 製造拠点ともなり得る CO₂ の排出源となる工場 232 カ所を調査し、産業分類別に整理を行った。

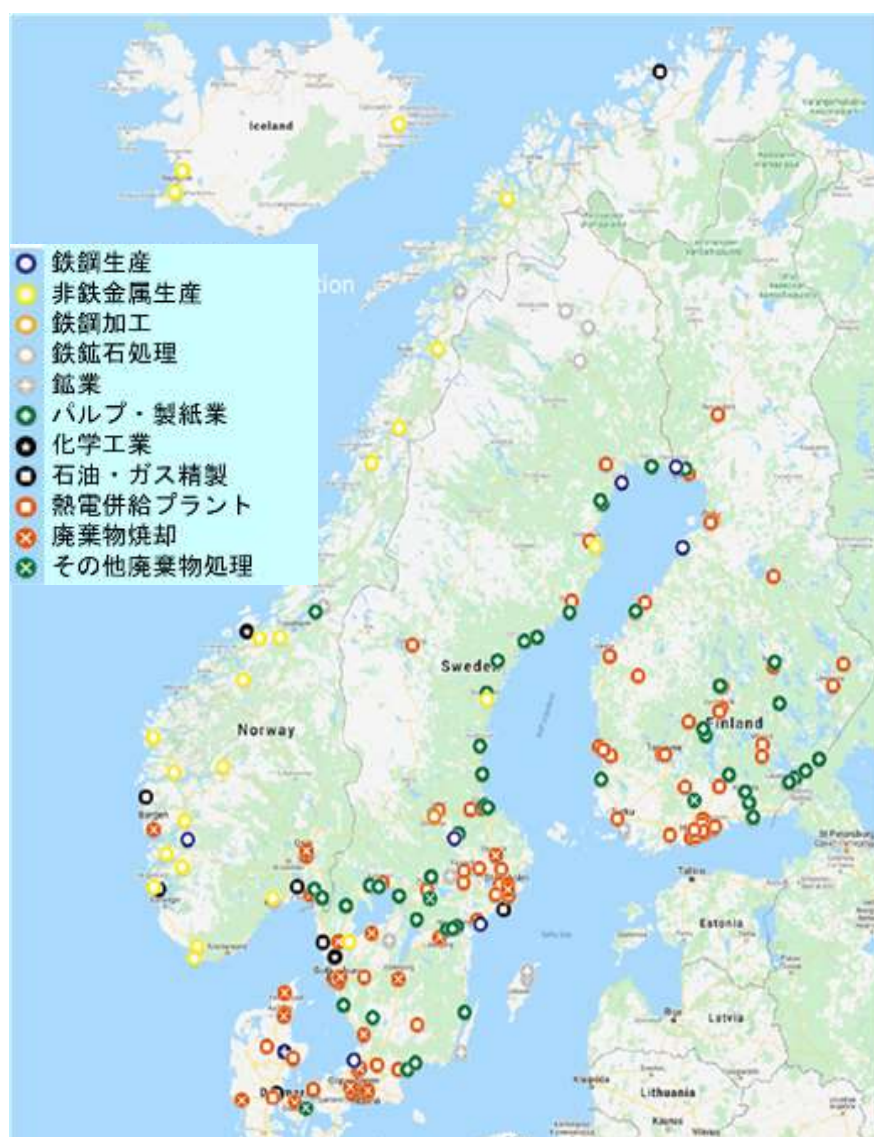


図 2-4 産業活動別に分類された e-fuel 製造用 CO₂ 排出源調査 232 カ所

(出所) Nordic Energy Research¹⁶

¹⁶ “Nordic Energy Research, Nordic Power 2X for Sustainable Road Transport” (2020/9/28)
<https://www.nordicenergy.org/publications/nordic-power-2x-for-sustainable-road-transport/>

図 2-4 に示すように、スウェーデンとフィンランドは豊富な森林資源を持つため、パルプ関連工場や木質バイオマス発電所が南部で稼働しており、CO₂ 排出源となっている。

このうち、輸送用燃料を製造している石油会社は、ノルウェーに 1 カ所 (Equinor)、スウェーデンに 3 カ所 (Preem, St1)、フィンランドに 1 カ所 (Neste)、デンマークに 2 カ所 (Klesch, Crossbridge Energy) あり、気候変動対策として、バイオ燃料やグリーン水素、e-fuel 製造への取組みを公表している。この中で、e-fuel 製造については、フィンランドとスウェーデン、デンマークの石油会社 3 社がプロジェクトに参画している。

表 2-2 の欧州プロジェクトリストより、北欧5カ国での e-fuel プロジェクトの事例を以下に記載する。

(1) ノルウェー

①Norsk e-Fuel

2019 年設立の同社は、当初、第 1 号プラントをノルウェー南部の Herøya に建設と発表していたが、2022 年 2 月に北部の Mosjøen (モーシェーン) に建設地を変更すると発表した。

現時点での建設計画は、2023 年に第 1 号機建設開始、2024 年末に年間生産能力 1.25 万 KL で運転を開始し、2026 年には装置をフル稼働して年間 2.5 万 KL の SAF 用 e-fuel を製造するとしている。

グリーン水素は、Gen2 Energy AS¹⁷ から調達するとしており、同社は Mosjøen の海岸にプラントを建設し、国内及び欧州市場向けの水素輸送を開始すべく、2024 年に建設を開始し、2025 年前半に水素の製造が始まる。

また、再生可能電力は Mosjøen 近郊の丘陵に建設中の Øyfjellet (オイフェレ) 風力発電所 (400MW) から調達の見込みであり、風力発電所は 2022 年稼働を開始している。

株主には、ドイツの電解槽メーカー Sunfire や直接空気回収 (DAC) ライセンサーであるスイス Climeworks、ルクセンブルグのエンジニアリング会社 Paul Wurth、さらにノルウェーの投資会社 Valinor 等が含まれており、国際的な経営体制となっている。

2022 年から現時点までの情報を時系列で以下に整理した。

2022 年 2 月、第 1 号プラントを Herøya に建設とこれまで報告していたが、北部の Mosjøen (モーシェーン) に変更と発表。

ノルウェー Gen2 Energy AS からグリーン水素を調達すると発表。

Gen2 Energy が Mosjøen の商業区画を購入してグリーン水素の生産施設を海岸に建設、ヨーロッパとノルウェーの関連市場にグリーン水素を輸送する。

再生可能電力は Mosjøen 近郊の丘陵に建設中の Øyfjellet (オイフェレ) 風力発電所 (400MW) から調達の見込み。

発電所は 2022 年の第 1 四半期に稼働開始。

2023 年 e-fuel 第 1 号機の建設開始

2024 年年末 検収、生産能力 (1.25 万 KL/年)

2025 年前半にグリーン水素の生産を開始。

2026 年 フル稼働、生産能力 (2.5 万 KL/年)¹⁸

(プロジェクト公表当初は 12.5KL/年としていたが、小規模生産から開始に変更。)

¹⁷ <https://gen2energy.com/>

¹⁸ <https://www.norsk-e-fuel.com/about-us>

②Nordic Electrofuel

同社は、2015年に設立され、資金調達のため、国際会議等で頻繁に事業戦略の発表を行っている。プロジェクト初期は、ドイツ Sunfire が電解槽供給メーカーとして参画していたが、途中、離脱し、他社のアルカリ電解槽に変更している。

また、将来の製品の流通を見据え、ドイツのエネルギー製品輸送会社 Marquard & Bahls からの出資契約を締結、ノルウェー科学技術大学 (NTNU) が開発した部分酸化反応と逆水性ガスシフト反応器 (POX-RWGS) の導入も決定している。e-fuel 製造用電力調達のため、子会社 Nordic Wind を設立している。

2021年5月、ノルウェー大手エンジニアリング会社 Aker Solutions と FEED 契約を結んだ後、2022年1月に Herøya 工業団地内でプラント建設に着工した。当初、2023年に第1号機の運転開始を公表していたが、計画が都度見直されており、現時点では2025年に稼働開始がずれ込んでいる。

製造能力年間1万KL規模で設備投資額は1.2億ユーロとし、資金調達は表2-4の構成となっている。

表 2-4 Nordic Electrofuel の1号プラントの資金調達構成

	出資者	出資額(百万 €)	出資比率 (%)
助成金	ノルウェー投資銀行 ENOVA / 欧州投資銀行 (EIB)	30	25
融資	商業銀行/輸出信用機関 (ECA)	30	25
株主	産業界/戦略的投資家/ IPO	60	50
合計		120	100

(出所) Nordic Electrofuel

さらに、年間20万KL規模でのフィージビリティスタディ中であるが、設備投資は2.62億ユーロと公表している。

同社は、ドイツ連邦環境庁 (UmweltBundesamt, UBA) の e-fuel スタディ(図2-3)を引用し、バイオ燃料製造にはバイオマス資源確保に大量の水と土地が必要であるが、e-fuel は水需要が極めて少なく、単位面積当たりの飛行距離が極めて長いことで優位性があると一貫して主張している。

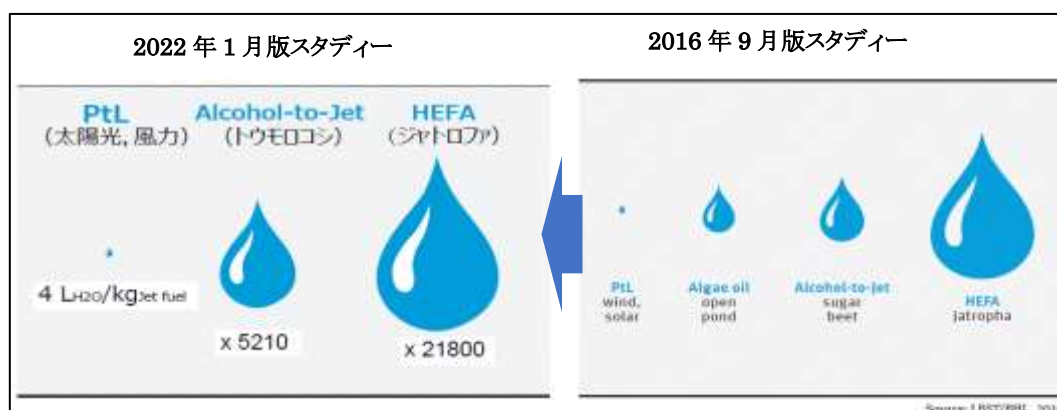


図 2-5 航空燃料製造(PtL、合成とバイオマス由来燃料)における水需要量比較

*HEFA: Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (植物油、藻類由来油、廃食油、獣脂)

(出所) ドイツ連邦環境庁 (UmweltBundesamt, UBA)¹⁹

また、2030～2035 年には航空燃料向け e-fuel として、バイオ系航空燃料である Alcohol-to-Jet 製品と同等の価格になるとの分析を行っており、長期計画として、ノルウェー国内に e-fuel プラントを展開し、2050 年に年間生産規模 100 万 KL を目指すとしている。

③Finnfjord

ノルウェー北部の Finnfjord (フィンフィヨルド) 精錬所からの排出 CO₂ と水力発電事業者 Statkraft による電解水素から e メタノールを年間 10 万トン製造するプロジェクトとして、当初、2021 年末に最終投資決定が行われると発表されていたが、決定が 2023 年末に延期されている。

プラントの開示情報が限られているが、燃料化技術には、アイスランドでの e メタノール製造に採用されている Carbon Recycling International (CRI) の Emissions-to-Liquids (ETL) 技術を採用するとしている。

(2) スウェーデン

①Liquid Wind

Liquid Wind とデンマーク風力発電大手 Ørsted が共同出資する FlagshipONE は、スウェーデン初の大規模なグリーン電力燃料プラントを中部海岸の Örnsköldsvik (エルンシェルスビク) で建設する申請を 2021 年夏に行い、2022 年 7 月に認可が下りた。計画では、2022 年に投資決定、2024 年に稼働開始としている。

パートナーとして、スウェーデンの熱交換器メーカー Alfa Laval や CO₂ 回収技術を提供する英国の Carbon Clean、グリーン水素製造用 PEM 型電解槽メーカーであるドイツ Siemens Energy、フィッシャー・トロプシュ (FT) 合成ユニットを供給する Topsoe 等が参画している。

2022 年 6 月には、Liquid Wind は、Sundsvall Energi (スンズヴァル・エネルギー) の Korstaverket (コルスタベルケット) サイトに 2 番目の e-fuel 施設の建設「FlagshipTWO」計画を発表した。CO₂ 供給は、Sundsvall Energi (スンズヴァル・エネルギー) が担う。

このプラントは、FlagshipONE プラント (年間 5 万トン) の 2 倍の年間 10 万トンの製造能力を有し、船舶用 e メタノールを製造する。最終投資決定は 2023 年後半、生産開始は 2025 年末から 2026 年初頭と計画している。Liquid Wind は、このような Flagships プラントを 2030 年までに国内 10 か所以上に建設することを計画している。

(3) フィンランド

①Neste - VTT

石油精製会社 Neste とフィンランド技術研究センター (VTT) は、2021 年 2 月に e-fuel 製造のデモプロジェクトを立ち上げると発表した。

2022 年 6 月に開催されたオンラインでのプロジェクト進捗報告会からの情報を以下に記す。

政府ファンド 330 万ユーロを獲得済みである。

¹⁹ “Power-to-Liquids A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation”
https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/power-to-liquids_ptl_barrierrefrei.pdf

建設場所は VTT の Bioruukki(ビオルューキ) 研究所内であり、FT 合成にはドイツ INERATEC のモジュールを採用、電解槽等も専門メーカーから調達し、統合プロセスを構築することを目指している。

2022 年 5 月に建設を開始しており、2023 年後半にデモンストレーション装置が完成することとなっている。

Neste は、化石燃料中心の製油所をバイオ燃料等の次世代燃料や化学品の製造拠点へ転換することを進めており、欧州で e-fuel が航空燃料として利用が義務化されることを見据え、自国での製造技術開発に取り組むとしている。

このプロジェクトには国内の電解槽メーカーと CO₂ 回収プラントメーカーも参画しており、VTT は液体燃料製造と関連プラント全体の運営を行うこととなっている。

Neste はこのプロジェクトでの生成物を化学品原料や燃料製品に転換する部分に携わるとしている。

デモンストレーションプラントの建設スケジュールも公表されており、2022 年 5 月に建設開始となっている。

本プロジェクトは小規模のものであるが、2030 年以降には次世代燃料の原料変換や PtX の技術導入が急速に進むとの Neste 見立てであることから、このプロジェクトの成果を踏まえて、本格的な事業展開につなげる位置付けとみられる。

②St1

北欧でのエネルギー製造・販売事業を手掛けているフィンランド St1 は、スウェーデンの Gothenburg(ヨーテボリ) 製油所で石油製品の製造を行っているが、2022 年 10 月、フィンランド初の e メタノール製造プロジェクトを立ち上げたと発表した。

同社は、Lappeenranta(ラッペーンランタ)の Ihalainen(イハライネン)工業用地にある Finnsementti(フィンセメント)工場の隣に、グリーン水素利用したパイロットプラントによる合成メタノールの製造を計画している。フィンランド経済・雇用省は、欧州復興ファンドを活用して 3,540 万ユーロの資金を供与するとしており、欧州委員会の決定待ちの状況となっている。

事業計画と、環境影響評価等、許可に必要なすべての手続きが完了後、プロジェクトの投資決定段階に進むが、現時点で時期は公表されていない。計画通りに進めば 2026 年に年間 2.5 万トンの e メタノール製造プラントが稼働するとしている。

(4) デンマーク

政府の“Power-to-X Strategy”²⁰により、2022 年に入り、プロジェクトの発表が続いている、

e-fuel 製造者だけでなく、同国には、脱炭素ソリューションを提供する国際的な企業であるエンジニアリング会社 Topsoe や Ramboll、洋上風力会社 Ørsted、風力発電機メーカー Vestas があることも再生可能エネルギー産業の発展に貢献するとしている。

図 2-6 に示したデンマークの Power-to-X プロジェクトマップには、グリーン水素、e-fuel、e メタノール、グリーン水素製造拠点が含まれる。北欧の中でも、これだけ具体的なプロジェクトを政府戦略文書に謳っているのはデンマークだけである。

以下、e-fuel と e メタノールのプロジェクト(図 2-6 の中で番号を□で囲った 4 か所)に関わる企業について概要を述べる。

²⁰ https://ens.dk/sites/ens.dk/files/ptx/strategy_ptx.pdf

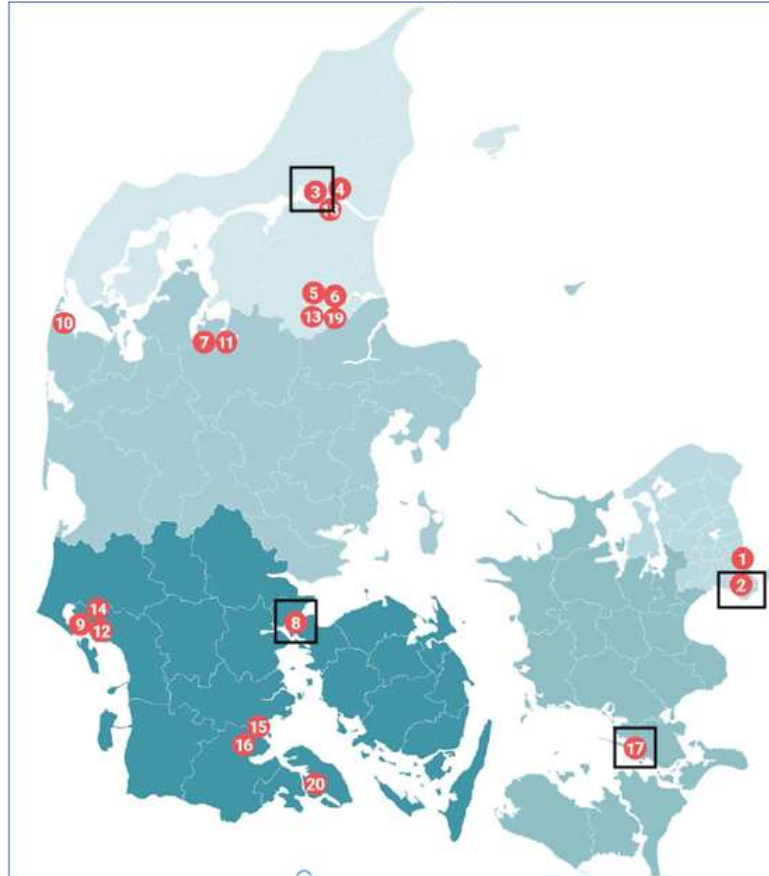


図 2-6 デンマーク政府 Power-to-X 戦略におけるプロジェクトマップ

(出所) “Power-to-X Strategy”の 18 頁)

①Reintegrate (図 2-6 の③)

同社は、Aalborg(オールボー)大学の eMethanol 合成研究からスピナウトしたスタートアップ企業で、大学敷地内にパイロットプラントを建設した。港湾地区での CCU プロジェクトの一環として、バイオマス由来 CO₂ とグリーン水素から輸送用 e メタノールの製造を目指している。2030 年に年間 50 万 KL のプラント稼働を目指しているが、グリーン水素の調達に課題があるとのことで、プロジェクトの具体的な情報発信が滞っている。

②Everfuel (図 2-6 の⑧)

HySynergy PtX プロジェクトとして、デンマークエネルギー庁より 650 万ユーロのファンドを獲得している。

プロジェクトは 3 つのフェーズで計画されており、Phase 1 として既に着工している。パートナー企業として同国の電力関連企業が参画しており、本年中に 20 MW の電解槽によるグリーン水素製造を始める。

Phase 2 は 2025 年から開始され、電解槽能力を 300MW に拡張、さらに Phase 3 に入る 2030 年には 1 GW の能力を計画している。

このプロジェクトの中核となる水素製造及び輸送会社 Everfuel は、電解槽プラントに隣接する Crossbridge Energy の Fredericia(フレゼリシア)製油所へのグリーン水素の供給とともに、製油所から CO₂ の供給を受け、e-fuel の製造を目指している。

ただし、グリーン水素の事業を優先しているため、e-fuel 製造の検討は、本年 6 月から政府の研究ファンドを獲得して、Aalborg 大学と調査を始めた段階である。

③Arcadia eFuels (図 2-6 の⑦)

2030 年までにデンマークでカーボンニュートラルなフライトを実現するという同国の戦略に呼応して、ネットゼロの航空燃料の生産を目的に 2021 年に設立されたコペンハーゲンに本社を持つ新興企業である。

2022 年 2 月に Port of Vordingborg (ボアディングボー港)に第 1 号プラントを建設する計画を発表した。同 3 月には、フランスのエンジニアリング会社 Technip Energies がプラントの基本設計に着手しており、本年末までに最終投資決定を行うとしている。

生産規模は年間約 10 万 KL とし、内訳として航空用燃料(同社は eJet と呼ぶ)を年間 5.5 万トン、ナフサ 2.5 万トンを見込んでいる。

燃料製造にはデンマーク Topsoe と南アフリカ Sasol が共同でライセンスしている FT 合成のための統合 G2L™ eFuels 技術を導入する。

順調にいけば、2023 年に建設に着手し、2026 年末に商業運転を開始する予定となっている。

④Green Power Denmark (図 2-6 の②)

同社は、2022 年に Dansk Energi (Danish Energy)、Wind Denmark、Solar Power Denmark が合併して設立され、再生可能エネルギー関連企業からの人材により構成される非営利の事業組織である。

水素製造・販売の Everfuel や洋上風力発電の Ørsted 等が参画した大型プロジェクトとなっている。

PtX プロジェクト Green Fuels for Denmark (GFDK) と称して、3 つのフェーズで電解槽の拡張を行う。

Phase 1 (2021～2023 年)では、電解槽能力 10MW で、年間 1,000 トンのグリーン水素と 5 万トンの e メタノールを生産、Phase 2 では、当初 2027 年としていた電解槽能力 250MW を 2 年前倒しすることも検討されており、eJet と e メタノールを生産する。eJet については持続可能な航空燃料(SAF)として、国内需要に対応する。その後 Phase 3 では、2030 年頃に 1.3GW の電解槽能力到達を目標としている。

(5) アイスランド

①Carbon Recycling International (CRI)

2006 年設立の CRI は、アイスランド南東部の Svartsengi (スヴァルツェンギ)の地熱発電所の煙道ガスと工場排ガスからの CO2 を利用した e メタノール製造プラントを 2012 年から稼働している。

開発過程では、水素は電解槽からのグリーン水素と天然ガス改質装置からのブルー水素を利用しているとみられるが、その比率は公表されていない。現在、e メタノールの生産規模は年間 4 千トンと報じられている。

CRI はこのプロセスを Emissions-to-Liquids (ETL) 技術と称して海外展開しており、ノルウェーでの e メタノール製造プロジェクトに 1 件、中国に 2 件をライセンスしている。

なお、CRI は、2015 年に中国を代表する国際的な自動車グループ吉利グループ (Geely Group) の出資を受け、吉利を取締役会のメンバーとしている。

表 2-5 合成燃料(e-fuel)プロジェクト一覧(欧州)

No.	燃料製造企業／研究機関(国籍)	建設地	プロジェクトステージ	スケジュール／BD規模／事業費	技術要素／製造プロセス(共電解、D-FTなど)	政府支援の有無
1	Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH (CAC) (ドイツ)	ドイツ・Freiberg工科大学敷地内	実証プラント稼働中	2009年 デモプラント完工、公称能力 合成ガソリン年間千KL ブランド名 "Synfuel" 2022年欧州自動車レーシング燃料として使用実績 今後のプラント拡張計画 1万トン、5万トン、その後、南アフリカにて25万トンの構想	旭化成のアルカリ電解槽導入 MTG合成に独自のゼオライト触媒プロセス	Freiberg工科大学へのドイツ州政府支援
2	P2X-Europe(ドイツ) H & R Refining GmbHとMabanaft GmbHの合弁会社	ドイツ・ハンブルク	実証プラント稼働中 2022/9/14 ハンブルク プラント開所式	2022/9/7 ブランド名 "SynZero" 発表 特殊化学品とe-fuel生産開始	INERATEC社のFTモジュールを導入	—
3	P2X-Portugal (ドイツ) P2X-Europe(ドイツ・ハンブルク)とNavigator(ポルトガル)の合弁	ポルトガル中部Gigueira da Foz(フィゲイラダフォス)工業団地	計画公	投資額 5.5～6億ユーロ 2023年半ば FID 2026年 SAF商業運転開始(SAF年間8万トン)	製紙会社NavigatorからのCO2利用	ポルトガル政府ファンド
4	P2X-Europe(ドイツ) Veolia(フランス)、LIPOR(ポルトガル)、グリーン水素生成P2X-Europeの3社	ポルトガル	計画公表	2022/2/17 計画発表	廃棄物とグリーン水素からのSAF製造 CCS併設	—
5	Haltermann Carless(ドイツ) (親会社HCS Group GmbH)	ドイツSpeyer (シュパイアー)工場	計画発表	2018/4/3 HCS Group が横浜に合同会社を設立 2024年 SAF製造開始	—	—
6	Atmosfair Fairfuel(ドイツ) パートナー:Siemens、EWE、INERATEC	ドイツ北部ニーダーザクセン州Werlte	実証プラント稼働中	2017～2020年 開発・建設 2021年8月 完工 2021年10月 稼働開始 生産規模 350トン/年	CO(バイオガス及びDACによるCO2由来)とグリーン水素によるFT合成 2.5 MW (Siemens Silyzer 200 PEM) e-crudeをHeide製油所に輸送、co-processingによりe-kerosene配合品製造	ドイツ政府
7	TotalEnergies(フランス) パートナー:Sunfire、Fraunhofer	ドイツTotalEnergies Leuna製油所	研究開発: Fraunhofer Hydrogen Lab Leuna 実証プロジェクト準備	2019年10月 e-CO2Met project共同開発契約締結 2021年6月 プロジェクト開始@ Fraunhofer 2022/9/16 Sunfireより製油所に向け電解槽出荷 150百万ユーロ(メタノール製造含め事業一式)(メタノールからのSAF合成視野)	1MW (SOEC)電解槽	EUファンド ドイツザクセン・アンハルト州政府支援
8	WESTKUSTE100(ドイツのコンソーシアム) コンソーシアム:10社(Ørsted、Raffinerie Heide GmbH 他)	ドイツHeide製油所を中心とした工業地帯	実証プラント建設中	2019年7月18日、89百万€の開発計画公表 2020年8月プロジェクト開始、 5か年(eメタノールからのFTケロシン合成は別プロジェクト-KEROSyN100で進行) 2023年 30MW電解槽FID	30MW電解槽による製油所向け水素 本PJ終了後、50～100MW(パイロット)、700MW(大型化)へ移行	2020年8月3日、政府支援予算30百万€獲得 (コンソーシアム負担 59百万€)
9	Shell Rheinland(ドイツ) パートナー:SINTEF(ノルウェー ITM Power(英国)、Linde(ドイツ)他	ドイツShell Rheinland製油所@Wesseling	グリーン水素製造プラント拡張中 完成簿、燃料製造プラント建設に着手	Refhyne II プロジェクト(100MW PEM設置) 2022年後半、最終投資決定(FID) 2024年 電解槽導入 2026年9月 プロジェクト終了 2021年2月にPTL計画をリリースしたが、その後追加発表なし	英国ITM Power社PEM(10MW)稼働(2021年7月s EU Refhyne I プロジェクト) 後継プロジェクトで100MW PEMを導入し、グリーン水素をeSAFプロセスに使用する計画	Refhyone I&II (EU Horizon2020)
10	MiRO(ドイツ) REF4FUコンソーシアムパートナー: KIT, TU Bergakademie Freiberg, CAC, Porsche AG他	ドイツ・Karlsruhe	研究開発	2022～2025年 MiRO製油所でのアップグレード実験	ドイツカールスルーエ工科大学KITreFuelsプロジェクト(MtGとFT由来ガソリンの製造と評価)の一環 Ineratec FTプロセス 生成油(e-crude)をSAF等にアップグレード	連邦交通デジタル省(BMDV)のファンド全体742万ユーロ
11	Industriepark Höchst(ドイツ)	ドイツ・フランクフルト Industriepark Hoechst	実証プラント建設中	2022年 製造開始 投資額 €30MM e-メタノール(4600KL/年)予定	INERATECのFT合成モジュール導入	H2020 ICO2CHEMプロジェクト ヘッセン州政府支援
12	Caphenia(ドイツ) パートナー:Oxxynova GmbH、Avacon Natur GmbH、LühmannGmbH	ドイツ	研究開発	2022年 フランクフルト-ヘキストに第1段として、3000-4000KL製造施設の建設開始	バイオガスを使ったプラズマを利用した3段1塔式合成ガス製造技術 Power-and-Biogas-to-Liquid (PBtL) proces	ニーダーザクセン州の水素イニシアチブ「EnZaH2」プロジェクト
13	Synhelion(スイス) 航空宇宙センター(DLR)(ドイツ) パートナー:ハンブルク工科大学(ドイツ)、John Brown Voest GmbH(ドイツ)	ドイツ・Jülich(ユーリッヒ)	実証プラント拡張工事中	2023年 完工 生産量 SAF年間数KL 供給先 スイス航空	スイス連邦工科大学(ETH チューリッヒ)開発の多焦点太陽光集光器による合成ガス製造 英国Wood社改質技術 INERATEC FTモジュール導入	パイロット研究段階はEU Horizon資金活用 実証段階ではドイツ連邦経済エネルギー省BMWK支援
14	PtX Lab Lausitz	ドイツ・ラウジッツ (Lusatia)	実証プラント計画中	2022年11月 FS終了 建設・運営会社決定:ARCUS Planung + Beratung、Bauplanungsgesellschaft mbH 年間約 10,000 トン グリーン合成ケロシン	再エネ電力:54MW CO2必要量:42,000 t (DAC技術はFraunhofer Research Institutionが担当) 水需要:60,000 t 用地面積:3 ha	—
15	OMV(オーストリア) パートナー:Sunfire、PAUL WURTH、TECHNISCHE UNIVERSITAET GRAZ	オーストリア・Schwechat製油所	EU研究開発プロジェクト進行中	MegaSyn project プロジェクト期間:2021年4月～2025年3月 プロジェクト総額: 7.8百万€ プロジェクトファンド:5百万€ (本プロジェクトにはFT合成部分は含まず)	1MW高温共電解(Sunfire設計)	Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU)

No.	燃料製造企業／研究機関(国籍)	建設地	プロジェクトステージ	スケジュール／BD規模／事業費	技術要素／製造プロセス(共電解、D-FTなど)	政府支援の有無
16	Synkero(オランダ) パートナー:Port of Amsterdam, Royal Schiphol Group, SkyNRG, KLM	オランダ	計画発表	2021年2月8日発足 既存ジェット燃料パイプラインがあるアムステルダム港にプラント設置 2027年 完工 (年間5万トンのSAF製造)	DACによるCO2とグリーン水素から製造	—
17	INOVYN(ベルギー)(INEOSグループ) Power to Methanol Antwerp コンソーシアム: ENGIE, Oiltanking, Indaver, Fluxys, the Flemish Environmental Holding Company (Vlaamse Milieu Holding) ,Port of Antwerp	ベルギー・ INOVYN化学工場	商業プラント計画発表	メタノール年間8千トン製造	ベルギーのアントワープで排ガスからの回収CO2とグリーン水素からメタノール合成のFS実施中	—
18	Infinium(米国) パートナー:アマゾン, 米国三菱重工、英国APベンチャーズ, 独Neuman & Esser, グランサム環境トラスト	フランス北部 Dunkirk(ダンケルク)	プロジェクト開始 2022/2/7 仏電力・ガス会社Engieと提携発表	生産量 年間10万トン(e-fuel, eナフサ)	Engieがグリーン電力供給 ArcelorMittal製鉄所CO2 を年間30万トン利用	フランス政府支援
19	Repsol(スペイン) パートナー:HydrogenPro(ノルウェー電解槽メーカー)、Ariema(スペイン電力会社)、Aramco	スペイン・Bilbao製油所近 郊港湾地区	実証プラント建設準備中	2024年 50bpd規模でe-fuel製造 第1弾で6千万ユーロ投資	e-fuel 製造: 10MW(アルカリ)電解槽 eWGS: Johnson Matthey HyCOgen™ technology(ライセンス第一号) FT技術:BP・Johnson Matthey CANST™ technology(別プロジェクト) グリーン水素:100MW電解槽(2025年稼働)	欧州イノベーション・ファンド応募(2021年末採否決定)
20	Synhelion(スイス)	スペイン	計画発表	2025年 商業1号機 生産量 年間150KL	多焦点太陽光集光器による合成ガス製造	—
21	Arcadia eFuels(デンマーク)	デンマーク南部 Vorgingborg(ボアディン グボー)	商業プラント建設着手	2022/2/16 第1号プラント建設計画発表 生産規模 年間10万KL(eJET, eナフサ) 2022年末 FID 2023年 建設開始 2026年末 商業運転開始	FEED及びEPC Technip Energies(フランス) FT技術 G2L(Topsoe+Sasol)	—
22	Everfuel(デンマーク) Crossbridge Energy Aarborg(オールボー)大学協力	デンマークFredericia(フ レデレシア)	計画発表	HySynergy PtXプロジェクト フェーズⅠ 建設中、2022年後半に20MWで稼働 フェーズⅡ 2025年、300MW フェーズⅢ 2030年、1GW 2022/6/11 Fredericia製油所でのHySynergy フェーズⅡliquid e-fuel study発表	Topsoe電解槽の水素と製油所CO2からe-fuelを製造	デンマークエネルギー庁 DKK 5.8m(約1億円)
23	REintegrate ApS(デンマーク) (2020年、Aalborg(オールボー)大学からスピンオフ)	デンマーク・Aalborg (オールボー)港	計画発表	2030年 年間50万KLのe-メタノール製造計画	バイオ由来CO2とグリーン水素からeメタノール製造	デンマークエネルギー庁支援
24	Topsoe(デンマーク) パートナー:Ørsted, Copenhagen Airport, A.P. Moller – Maersk, DSV Panalpina, DFDS, SAS, Nel, Everfuel(デンマーク)	デンマーク	実証事業準備中	2023年 10MW SOEC電解槽 2027年 250MW 2030年 1.3GW	電解水素とCO2から船舶用再エネメタノールやeSAFを生産	デンマークビジネス開発局 支援 3千万ユーロ
25	Green Power Denmark(デンマーク) (2022/3/23 Dansk Energiら3社が合併) パートナー: Ørsted, Copenhagen Airports, A. P. Moller-Maersk, DSV Panalpina, DFDS, SAS, Everfuel, NEL, Molslinjen, Haldor Topsoe他	デンマーク・Copenhagen	建設準備中	グリーン水素製造から着手 Phase 1 (2021-2023): 電解槽 10MW Phase 2 (2023-2027): 電解槽 250MW Phase 3 (2027-2030+): 電解槽 1.3 GW	PtXプロジェクトGreen Fuels for Denmark (GFDK) 洋上風力発電による水素製造、CO2回収によるeメタノールとeSAF製造	EU 欧州共通利益に適合する重要プロジェクト(IPCEI) ファンド 1.14億ユーロ
26	Norsk e-Fuel(ノルウェー) パートナー: Climeworks, Sunfire, Paul Wurth, Valinor	ノルウェーHeroyaから北 部Mosjoen(モーシェー ン)に変更	建設着手	2023年 建設開始 2024年(Phase1) 年間1.25万KL 180bpd 2026年(Phase2) 年間2.5万KL 1,800bpd	SOEC 共電解槽 FT合成 Gen2 Energy社からグリーン水素調達 Oyfjellet(オイフェレ)社からグリーン電力調達	—
27	Nordic Electrofuel(ノルウェー) パートナー: Marquard & Bahls, ARVOS, Aker Solutions, Emerging Fuels, Norwegian Technological University(NTNU)	ノルウェーHeroya	建設着手	2021年5年 Aker SolutionsとFEED契約 2022年1月 建設開始 2025年 1万KL/年(172bpd) 運転開始 設備投資 €120MM 20万KL(3450bpd)規模のFS中 設備投資 €262MM	NTNU開発POX-rWGS反応器 アルカリ電解槽 FT合成 2022/8/25 プロセスシミュレーターサービス会社BPTと提携	独エネルギーロジ会社Marquard & Bahlsが2020年1月,10月に出資
28	Finnfjord AS パートナー:Statkraft AS Carbon Recycling International (CRI)	ノルウェー・Finnfjord フィンフィヨルド	計画発表	2023年末 最終投資決定 建設に2年 eメタノール年間10万トン	Finnfjord精錬所からの排出CO2利用 水力発電を利用した電気分解水素 Emissions-to-Liquids (ETL) 技術	—
29	Liquid Wind FlagshipONE パートナー:Alfa Laval, Carbon Clean, Falkor, Topsoe, Siemens Energy, Uniper	スウェーデン・ Örnsköldsvik (エルンシエルツビク)	計画発表	2021年5月 豪州エンジ会社WorleyとFEED契約 2022年 最終投資決定 2024年 商業運転開始	Siemens製70MW PEM 年間7万トンのCO2から船舶用eメタノール 年間5万トン製造	2021年6月 複数投資家4百万€出資
30	Liquid Wind FlagshipTWO パートナー:Sundsvall Energi	スウェーデン・ Korstaverket (コルスタベルケット)	計画発表	2023年後半 最終投資決定 2025～2026年 製造開始	船舶用eメタノール 年間10万トン製造	—

No.	燃料製造企業／研究機関(国籍)	建設地	プロジェクトステージ	スケジュール／BD規模／事業費	技術要素／製造プロセス(共電解、D-FTなど)	政府支援の有無
31	Neste、VTTフィンランド技術研究センター パートナー:AW-Energy、Helen、Carbon ReUse Finland、Kleener Power Solutions、Agco Power、ESL Shipping、Meriaura Group、ABB、 INERATEC	フィンランドBioruukki	フィンランド国立研究所VTTで研究開発中	2021/2/8 プロジェクト立ち上げ 2022年5月 デモプラント建設開始(VTT研究所内) 2023年後半 デモプラント完工	固体酸化物電解槽セル(SOEC) INERATEC FTモジュール e-fuel製造効率改善10～15%を目指す。	政府Business Finland 3.3百万€出資 (民間負担 3百万€)
32	St1 パートナー:LUT University	フィンランド Lappeenranta	研究開発	2022/10/4 欧州復興ファンドを活用、€35.4 MM承認待ち 今後、事業申請と影響評価の後、最終投資決定 2026年 稼働開始	風力発電によるグリーン水素と隣接セメント工場の CO2利用によるeメタノール 年間2.5万トン製造	—
33	Carbon Recycling International (CRI)	アイスランド・ Svartsengi (スヴァルツェンギ)	商業プラント稼働中	2012年 George Olah Renewable Methanol Plant稼働開始 eメタノール 年間4千トン製造	地熱発電所煙道及び工場煙道からの回収CO2と工 場及び電解槽由来水素を使ったeメタノール製造 独自技術Emissions-To-Liquid™(ETL)	—

2.2 米州における合成燃料の製造技術開発

米州(北米、南米)での合成燃料の導入義務化の動きは、欧州ほど顕著ではないが、気候変動対策に向けた国際的な低炭素燃料の需要の高まりが予測されることから、製品輸出も視野に入れたプラント建設計画が2年ほど前から報じられている。

表 2-7「合成燃料(e-fuel)プロジェクト一覧(米州)」として本年度の調査で得られた情報を整理した。

この中では、HIF Global のチリプロジェクトが世界の注目を浴びており、国際会議やインタビューを通じて得られた情報を整理した。

(1) HIF Global プロジェクト

チリ政府が2021年に公表した一連の水素プロジェクト(図 2-7)にはグリーン水素やグリーンアンモニア製造関連が複数含まれるが、炭化水素系 e-fuel 製造プロジェクトは HIF (Highly Innovative Fuels の略)のみである。

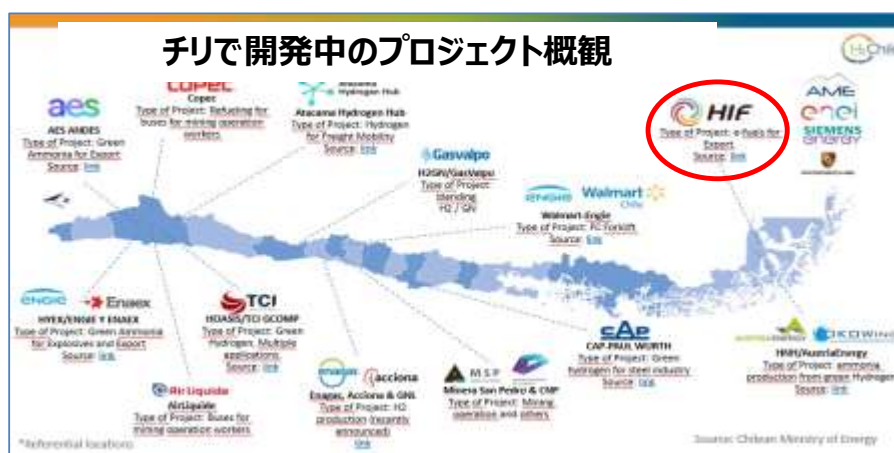


図 2-7 チリ政府グリーン水素プロジェクト

(出所) Chile's Hydrogen Project Pipeline²¹ (2021/12/7)

チリ政府とドイツ政府は e-fuel のサプライチェーン構築に向け早くから協議を行っており、Siemens、Porsche が初期から関わっていた。HIF のチリ Haru Oni のパイロットプラントは2022年末に稼働開始したことが、2022年の米州での最大のニュースとなった。

2022年12月20日の開所式には、チリ政府やチリ企業だけでなく、出資者であるドイツ Siemens 等の欧州関係者も参加し、その様子は世界に配信された。

図 2-8 の映像にある透明のドーム部分で式典が行われ、その後、施設見学が行われた。

このパイロットプラントは、大型風力タービンによる電力のみで賄われており、電力網には接続していない。CO₂は直接空気回収(DAC)の導入まではバイオマス由来 CO₂を使用する。

生産されるメタノールとガソリンのうち、ガソリン留分は全量 Porsche に供給される。

HIF はこの実績をもとに、チリでの大型プラントの建設、さらに米国やオーストラリアでのプロジェクトを計画して

²¹ <https://ax.legal/2021/12/07/chiles-hydrogen-project-pipeline/>

いる。



図 2-8 HIF Global チリ Haru Oni パイロットプラント開所式

(出所) HIF Global 提供²²

表 2-6 に「HIF Global e-fuel プラント建設計画」として、これまでの情報を整理した。

米国の中でも大規模な再エネ電力ポテンシャルを有するテキサス州メキシコ湾岸でのグリーン水素を活用した e-fuel プロジェクトがアナウンスされており、カリフォルニア州や欧州での将来の合成燃料市場の拡大を見込んでいる。

Haru Oni のプラントが稼働開始するまで、投資規模や製造関連設備の能力等、数値的なものは都度変更されてきており、投資額は 2021 年の政府発表時は 5,100 万ドルとしていたが、現在は 7,400 万ドルと修正されている。

親会社 HIF Global はドイツにもオフィスを開所したことから、昨年来、コンファレンスやウェビナーでプロジェクトの進捗についてプレゼンテーションを多々行っているが、Haru Oni 以外は FID 決定前の段階であるためか、会議の度に生産能力や生産量、建設スケジュールの情報にばらつきが発生している。

今後、プロジェクトの進行具合により数値の見直しの可能性があるとの、同社関係者の発言もあった。

商業段階での e-fuel プラント規模は、チリで 7.3 万 BPD、米国で 3.6 万 BPD、オーストラリアで 3.7 万 BPD となり、グローバルでの装置規模は約 15 万 BPD を計画している。

生産品はガソリンとメタノールを主とするが、その供給比率については地域特性に合わせ、自動車向けだけでなく、航空、船舶向けの需要も想定している。

²² HIF Global チャンネル: Primeros litros Haru Oni - First liters Haru Oni

<https://www.youtube.com/watch?v=zJnt7FTLze4>

ITV Patagonia (現地テレビ局)

<https://www.youtube.com/watch?v=oIUKSET9Qts>

製造装置のライセンサーについても一律ではなく、ガソリン製造について、チリでは ExxonMobil が担当したが、米国ではデンマークの Topsoe の技術を選定するとしている。

米国やオーストラリアでは、グリーン水素製造のための再エネ電力の調達や CO₂ の供給者の確保を進めており、直近の 2023 年 3 月上旬には、Baker Hughes の DAC 技術を採用するとの共同発表が行われた。

Baker Hughes の Mosaic DAC 技術には、金属有機構造体 (Metal-organic frameworks, MOFs) と呼ばれる新技術が使われており、あらたな DAC 技術のプレーヤーとしても注目される。

また、オーストラリアのタスマニア州のプロジェクト構想では、同州環境保護庁に施設認可申請済みと、2022 年 9 月に韓国で開催された水素国際会議にて報告されている。

表 2-6 HIF Global e-fuel プラント建設計画

HIF Global	HIF Chile		HIF USA	HIF Asia Pacific
プラント名	Haru Oni demonstration Plant	—	Matagorda eFuel Facility	Tasmania eFuels Plant
投資額	7,400万ドル	—	40億ドル	—
建設場所	チリ Magallanes州 Punta Arenas	チリ Magallanes州 Punta Arenas	米国 テキサス州Matagorda郡	豪州 タスマニア州Hampshire
敷地面積	3.7 ヘクタール	—	—	—
発電設備容量	3.4 MW (風力)	—	再エネ電力5 GW	—
水電解設備容量	Siemens PEM 1.2 MW	—	Siemens PEM 1.8GW	250 MW
水素製造量	—	—	30万トン/年	—
CO2利用量	(DAC+バイオCO2) Baker Hughes社Mosaic DAC	(DAC+バイオCO2)	当面、Denbury産業供給CO2 2百万トン/年 将来、Baker Hughes Mosaic DAC技術	バイオCO2 26万トン/年
合成技術	ExxonMobil MTG法 (Sinopec Engineering、建設と試運転担当)	—	Topsoe TIGAS ガソリン合成法	—
建設計画	パイロットプラント建設(7BPD) 稼働開始 2022年12月	Phase 1 建設(1,000BPD) 2021Q4～2026Q2 Phase 2 建設(3.6万BPD) 2025Q3～2028Q2 その後、3.6万BPD増強	EPC Bechtel FEED 2022年12月開始 Phase 1 建設(1.2万BPD) 2024～2027年 稼働開始 2027Q2 その後、1.2万BPDずつ2回増強	2023年末 FID Phase 1 建設(1,000BPD) 2024Q4～2026Q4 稼働開始 2027Q1 その後、1.2万BPずつ3回増強
最終プラント規模	7BPD	7.3万BPD	3.6万BPD	3.7万BPD
生産計画	eメタノール 350 トン/年 (eガソリン 130 KL/年 相当)	Phase 1 プラント eメタノール 14万トン/年 (eガソリン 6.5万KL/年相当) Phase 2 プラント eメタノール 390万トン/年	Phase 1 プラント eメタノール 140万トン/年 (eガソリン 76万KL/年相当)	Phase 1 プラント eメタノール 18.5万トン/年 (eガソリン 8万KL/年相当)
操業年数		—	—	40年
ファイナンス	ドイツ政府ファンド、Siemensに1千万ドル	チリ政府、Siemensのpre-FEEDに1,700万ドル	Morgan Stanley Societe Generale	—
製品供給先	欧州市場		欧州及び米国加州市場	豪州及びアジア

(2) 米国 Infinium プロジェクト

再エネ導入では欧州に出遅れていたが、世界的な GHG 削減の動きは米国のエネルギー産業にも波及しており、大規模な再エネ電力ポテンシャルを有するテキサス州等のメキシコ湾岸州でのグリーン水素を活用した e-fuel プロジェクトとして、米国 Amazon を筆頭に、日本、韓国、シンガポール等から資金調達を行った。

同社は、Robert Schuetzle 氏 CEO を務める Greyrock Energy の新規事業として 2020 年に設立された。

これまで実績のある天然ガス向け GTL 触媒 GreyCat™ 技術を、e-fuel 用 FT 技術に応用するという。

従来の GTL 触媒に比べ、ワックスを生成せず、直接、目的物を生産できるため、トータルシステムが簡素化され低コストのプラントとなることが特徴と謳っている。

同氏が特許保持者であり両社の CEO を兼務しており、2021 年以降、10 件余のプロジェクト構想があり、それらの総電力容量は >3GW 以上に達するとしている。

●テキサス州プロジェクト

Corpus Christi の建設プラントの tax break が決定したと 2022 年 11 月に行政発表された²³。

この工場は Infinium の社名ではなく、Net Zero Carbon One, LLC として 2021 年 10 月に登記されている。

2023 年稼働開始で、アマゾン向け e 軽油のほか、e ナフサ、eSAF も製造予定とのこと。

同州では、エネルギー開発会社 Denbury と CO₂ 供給で提携し、2025 年稼働の第 2 号プラント建設をヒューストン近郊で計画 중이다。

生産品は Amazon のカリフォルニア州の配送トラック用 e-fuel (e-Diesel) や SAF としているが、プラント規模や製造量の数値は公表されていない。

なお、Corpus Christi には Valero 等石油精製会社 5 社 (Buckeye Texas Processing LLC, Citgo Refining & Chemical Inc., Flint Hills Resources LP, Magellan Processing LP, Valero Refining Co) の集約地帯であり、同市は連邦政府支援の水素ハブプロジェクト²⁴にも選定されており、工業地帯全体の低炭素化を進めている。

(3) Louisiana Green Fuels プロジェクト

Strategic Biofuels LLC の子会社 Louisiana Green Fuels は、ルイジアナ州でのプラント建設について、2021 年 4 月に州知事から建設計画の発表があり、プロジェクトの内容について、徐々に情報開示されている。

本プラントでは製造予定の再生可能ディーゼルと SAF を合計 12 万 KL/年、Johnson Matthey-BP の FT CANS 技術を導入する。

投資額 28 億ドル、森林廃棄物からの回収 CO₂ を使う。

稼働開始は 2025 年から 2026 年初期を予定

2023 年 3 月時点では、連邦「クリーンエネルギーローン」16 億ドルの審査手続き中となっている。

²³ <https://news.cctexas.com/news/releases-20221115-6883210> (2022/11/15)

²⁴ <https://portofcc.com/port-of-corpus-christi-horizons-clean-hydrogen-hub-and-trans-permian-h2hub-merge-to-create-integrated-regional-clean-hydrogen-hub-proposal/> (2023/2/14)

(4) DG Fuels SAF プロジェクト

DG Fuels は、北米と欧州でいくつかのプラント建設を目指しており、廃棄原料からの炭素と再生可能資源からのグリーン水素を組み合わせることで、SAFを生産する。

ルイジアナの施設は、同社の最初の主要プロジェクトで、ノルウェーの電解槽メーカーHydrogen Pro、Shell 触媒技術による FT 技術を有する英国 Velocys の技術を導入する。

建設場所: ルイジアナ州

投資額: 36 億ドル、その内 DOE 融資 25 億ドル申請中。

製造プロセス: バイオマスガス化と水電気分解、FT 合成

生産量: SAF 57 万 KL/年

プロセス設計: 米国 Black & Veatch

電解槽: ノルウェーHydrogenPro(最大 839MW)

FT 技術: 英国 Velocys ライセンス

稼動開始: 2024 年後半

FT 装置を供給する Velocys は、装置組み立て工場をオハイオ州に建設中であり、2023 年 5 月に完工予定となっている。

(5) カナダ SAF+ Consortium プロジェクト構想

2019 年1月設立の SAF+社は、ドイツ HY2GEN を含めたコンソーシアムを立ち上げ、SAF 向け PtL プロジェクトを準備中とアナウンスした²⁵。

2030 年までに、モントリオール国際空港への PtL 供給プラントを含め、北米に 3 カ所建設、年間 6 千万ガロン(23 万 KL)規模を目指すとし、2022 年 6 月の米国 Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI)会議で報告された。

コンソーシアムの具体的な情報開示は進んでいないが、カナダ政府の脱炭素化政策にも連動しているため、今後の動きを注視する必要がある。

²⁵ <https://safplusconsortium.com/blog/the-first-production-of-saf-sustainable-aviation-fuel-developed-in-canada/>

表 2-7 合成燃料(e-fuel)プロジェクト一覧(米州)

No.	燃料製造企業／研究機関(国籍)	建設地	プロジェクトステージ	スケジュール／BD規模／事業費	技術要素／製造プロセス(共電解、D-FTなど)	政府支援の有無
1	HIF Chile(チリ) Haru Oni プロジェクトパートナー: チリ電力会社AMF、AIM子会社HIF(Highly Innovative Fuels)、チリ国営石油ENAP、 イタリア Enel、ドイツ(Siemens, Porsche, BMWi)、 米ExxonMobil 販売:Uniper	チリ・マガジャネス州	実証プラント稼働中	2021年9月10日 起工式 2022年(パイロット) Q4稼働開始、eガソリン 130KL/y 2025年(Phase1) eガソリン 5.5万KL/y 2027年(Phase2) eガソリン 55万KL/y	風力発電タービン:3.4MW Siemens PEM型1.2MW電解槽 MTG合成(EM Fluidized bed MTG技術、建設は、 中国Sinopecが担当) パイロット投資額 7,400万ドル	Siemensは、ドイツ連邦経済エネルギー省(BMWi) から8百万ユーロの補助獲得
2	HIF USA(米国)	米国テキサス州 Matagorda郡	建設準備中	2022/1/8発表、投資額:40億ドル 2023年 着工 2025年 稼働開始 e-fuel生産量:年間76万KL	FEED:ベクテル 風力又はソーラー発電:1.7GW CO2原料:DAC、工場排ガス eメタノール合成:Topsoe eメタノール製造技術 eガソリン: Topsoe TIGAS技術	—
3	Infinium(米国) パートナー:アマゾン、米国三菱重工、英国APベン チャーズ、独Neuman & Esser、グランサム環境トラ スト	米国テキサス州 コーパスクリスティ	建設着手 第1号プラント建設地:同州Corpus Christi (2020年に天然ガスからのFTプロセス設計会 社Greyrock Energyからe-fuel専門会社とし て分社化) 第2号プラントもテキサス州内に建設予定。	2021/10/7 Net Zero Carbon One,LLC設立 2022/9/20 事業計画発表 2023年 eディーゼル生産開始(Amazonの南カリ フォルニア州配送トラック用)、 eSAFとeナフサも同時生産。 製品計画に含まれる。	水電解槽で、グリーン水素を製造 独自触媒を使用したリアクターで、CO2とグリーン水 素から合成ガスを生成 FT合成法によりe-fuelを合成 従来のGTL技術特有のワックスを生成せず目的物を 生産でき、低コストでシンプルなプロセス 第1号プラントのCO2調達先:Howard Energy Partners 第2号プラントのCO2調達先:石油ガス開発会社 Denbury	英国のベンチャー投資ファンド・APベンチャーズ(AP Ventures)が資金募集したコンソーシアム (2021年1月26日公表、出資額、出資割合などは非 公表) ①アマゾン気候変動対策基金(Amazon's Climate Pledge Fund)、②米国三菱重工、③APベンチャー ズ(AP Ventures)、④独Neuman & Esser、⑤グラ ンサム環境トラスト
4	Oxy Low Carbon Ventures(米国) (Occidentalの子会社) パートナー:Rusheen Capital Management社(未 公開株式投資会社)(米国)	米国テキサス州 パーミアン盆地	実証プラント建設準備中	2022年 カナダCarbon Engineeringライセンスの DAC建設開始年間100万トンCO2回収 回収CO2の一部は AIR TO FUELS技術 (Greyrock Energyライセンス)によりe-fuel製造を計 画 *Carbon EngineeringにChevron出資	DACによるCO2回収 年間100万トン 回収CO2の一部は AIR TO FUELS技術 (Greyrock Energyライセンス)によりe-fuelを製造	—
5	DG Fuels(米国ルイジアナ州)	米国ルイジアナ州	建設準備中	2024年後半 稼働開始 SAF 年間57万KL生産予定	プロセス設計:米国Black & Veatch 電解槽:ノルウェーHydrogenPro高压アルカリ電解 槽(840MW) FT技術;英国Velocys社	36億ドル(うちDOE融資25億ドル申請中)
6	Louisiana Green Fuels LCC(米国ルイジアナ州) (親会社 Strategic Biofuels LLC) パートナー:Linde、BP、Johnson Matthey、 Haldor Topsoe他	米国ルイジアナ州 Caldwell Parish (コールドウェル教区)	計画発表	建設費: 4.5億ドル 2023年 FID 再生可能ディーゼル 年間34 million gallons	グリーン水素と木質バイオマス由来CO2からのSAF 合成 BPのFT技術導入 TopsoeのSAFプロセス導入	州政府から2.5億ドル借り入れ
7	Prometheus Fuels(米国加州) パートナー:BMW I Ventures Maersk(デンマーク)他	米国カリフォルニア州	計画発表(この2年新たな発表なし)	(2020年10月の加州政府への報告では、2021年初 めの認可が下りれば) 2021年夏 ガソリン製造・販売 2020年 ジェット燃料製造 (アナウンス以降、大幅な遅れ。製造開始の実績なし)	PEM電解 生成アルコールから炭化水素合成(FT合成使わず) 水中の未反応アルコール分離に自社分離膜(カーボ ンナノチューブ)技術	2020年6月、BMWのベンチャーファンド(BMW I Vetures)が12.5百万ドル出資 2021年1月 米国CES(Consumer Electronics Show)にてBMWが公表 2021年7月、アメリカン航空が最大1,000万ガロンの SAF購入を合意 2021年9月23日 デンマークの海運最大手である Merskが出資発表
8	Oberon Fuels(米国カリフォルニア州)	米国カリフォルニア州 Brawley	増強商業プラント稼働中	2021年5月 再生可能DME 5700KL/年	—	—
9	twelve(米国加州) 米国空軍	米国	計画発表	ブランド名 "E-Jet"	光合成プロセス	Alaska Airlines, Microsoft
10	The SAF+ Consortium(カナダ) ドイツHY2GENを含めたコンソーシアム	カナダ	計画発表	2030年までに、モントリオール国際空港へPtL供給 北米に3カ所建設構想 年間6千万ガロン(23万KL)規模を目標	—	—
11	HIF Asia Pacific(豪州)	オーストラリア・タスマニア 州Hampshire	計画発表	2022年7月 タスマニア州環境保護庁に建設認可申 請 2030年 商業運転開始 e-fuel生産量 年間8万トン	250 MW電解槽 森林廃材バイオCO2 年間26万トン利用	—

2.3 中国における合成燃料の製造技術開発

中国 Jiangsu Sailboat Petrochemical²⁶(江蘇帆船石化有限公司)は Carbon Recycling International (CRI) の合成技術を導入し、中国河南省安陽市で CO₂-to-Methanol プラントの建設を 2020 年に開始した。

2022 年 2 月の完工後、試運転を経て 2022 年 10 月から本格稼働を開始した²⁷。

このプラントはアイスランドの Carbon Recycling International (CRI) の ETL(Emission-to-Liquids)技術によるもので、回収した二酸化炭素と水素ガスから、燃料や化学原料となるメタノールを年間年間 11 万トン生産する能力を持つ。

現時点では、既存の石灰製造の排出ガスから回収した二酸化炭素とコークス炉のガスから回収した水素からメタノールを合成しているため e-fuel には該当しないが、将来の e-fuel 製造に向けた技術ロードマップの途中との位置付けとしている。

さらに、中国 Jiangsu Sailboat Petrochemical は CRI と 2 号プラントの契約を 2021 年に締結しており、2023 年後半に稼働開始の予定となっている。

なお、CRI は、2015 年に中国を代表する国際的な自動車グループ吉利グループ (Geely Group) の出資を受け、吉利を取締役会のメンバーとしている。

中国の e-fuel との関わりについては、HIF Haru Oni プロジェクトで ExxonMobil ライセンスの MTG プラントを Sinopec が建設と試運転を担当した実績がある。

Sinopec 子会社の Sinopec Engineering は、2023 年 1 月、Sinopec Engineering (Group) R&D センターと広州エンジニアリングはプロジェクトコンソーシアムを 2021 年 3 月に立ち上げ、Haru Oni プロジェクトのコアユニットである流動層式メタノール・ガソリンの設計、調達、製造統合、および国内での試運転を成功裏に完了したと報道した²⁸。

ExxonMobil は 2015 年 Sinopec に MTG 設備のライセンスを供与済みであり、今回は Sinopec Engineering が建設と試運転を担当したことを、HIF Global チリにも事実確認を行った。風力発電のブレードも中国製であり、Haru Oni プロジェクトでは複数の中国企業が製造受託した模様である。

なお、サウジアラビアで計画中的の e-fuel プロジェクトでも ExxonMobil の MTG を採用すると Aramco が発表していることから、この装置の建設もサウジと中国が受託する可能性が大きいと考えられる。

²⁶ 江蘇帆船石化有限公司は、江蘇省最大の企業の一つである盛虹石化有限公司の子会社で、非上場企業。

²⁷ <https://www.carbonrecycling.is/projects-shunli>

²⁸ http://segr.sinopec.com/segr-segr/news/com_news/20230130/news_20230130_538770193442.shtml

2.4 欧米石油会社の合成燃料製造への関わり

2.4.1 石油会社の合成燃料プロジェクト

欧米の合成燃料プロジェクト一覧(表 2-5、表 2-7)から製油所でのプロジェクトを抜粋し、表 2-9 にまとめた。

9 件すべて欧州の製油所であり、中でもドイツでの取組みが 4 件となっている。ドイツ政府の合成燃料への取組み政策とも一致している。

2.4.2 製油会社の技術技術ライセンス

e-fuel を含む合成燃料製造プロジェクトには、スタートアップが数多く関わっているが、燃料化プロセスについては欧米石油大手を中心に、C1 ケミストリーとして過去に技術蓄積された Gas-to-Liquid 技術が合成燃料製造技術に生かされている。

製造技術ライセンスにとどまる石油会社とライセンスを受けて製造設備の導入計画をする石油会社とに大別される。

その中で、Shell は現行の天然ガス GTL 事業をベースに、ライセンス事業と製油所転換を進めている。

■ライセンス技術を有する石油会社

① Fischer Tropsch 技術

BP:JM と組んで “FT CANS Technology”を欧米に展開中

Shell:Velocys (英国)に技術ライセンス

TotalEnergies;IFP-Axens にライセンス

Chevron :Chevron Lummus Global (CLG) を通じた技術ライセンス

Sasol : Topsoe-Sasol (デンマーク・南アフリカ) ”G2L™ eFuels technology”

② MTG 技術

ExxonMobil:HIF チリ デモプラントに採用

Aramco NEOM デモプラントへの導入検討中

■製油所での合成燃料製造計画を公表の石油会社

Shell Rheinland 製油所 (MTJ 技術)、 Heide 製油所 (MTJ 技術)、

OMV Schwechat 製油所 (MTJ 技術)、 Neste Porvoo 製油所 (FT 技術)、

Repsol Bilbao 製油所 (BP-JM の FT 技術採用) 合成燃料製造技術に生かされている。

2.4.3 製油所への合成燃料(e-fuel)プラント導入

欧州石油環境保全連盟 (Concawe) と Aramco が共同で実施した e-fuel スタディ「E-Fuels: A techno-economic assessment of European domestic production and imports towards 2050」では、欧州の製油所に e-fuel プラントを建設するケース 3 つ (独立型プラント、外部調達 e-crude 処理プラント、完全統合型プラント) を挙げ、関連設備の追加導入の必要性に言及している。

既存製油所との完全統合型プラントと場合は、電解槽と合成反応器は新設が必須、CO₂ 回収 DAC 装置は実用化レベルに達するまでは CCS 付き蒸気メタン改質装置を使用することで、e-fuel の製造が可能としている。また、Scope1 を削減することにもつながる。

表 2-8 e-fuel プラント建設シナリオ

	独立型プラント	外部調達e-crude処理プラント	完全統合型プラント
コンセプト	水素やCO ₂ の回収から最終製品製造までの全プロセスを含む独立したプラント。 直ちに燃料製品を生産できる。	e-fuel合成プラントからの生産物は(e-crude、off-specなど)は最終製品とはならないため、既存の製油所の機能とのシナジー効果(副産物利用、アップグレードユニット、ユーティリティシステムの共有)により製品化が可能となる。そのため、製油所から離れている場合は輸送体制の整備が必要となる。	e-fuel合成プラントからの生産物は(e-crude、off-specなど)は最終製品とはならないため、既存の製油所の機能とのシナジー効果(副産物利用、アップグレードユニット、ユーティリティシステムの共有)により製品化が可能となる。
プラント規模	どの構成でもプラントサイズに違いはない場合		
関連プロセス設備(新設、既存設備)	(新設) 直接空浮き回収(DAC)装置 水電解槽 合成反応器 水素化分解装置 蒸留塔 ユーティリティ	(新設) 直接空浮き回収(DAC)装置 水電解槽 合成反応器 Mild hydrocracking e-crude受入設備 (既存) 水素化分解装置、蒸留塔、ユーティリティ	(新設) 2020～2030年 SMR排出CO ₂ 回収装置 2050年以降 DAC 水電解槽 合成反応器 (既存) 水素化分解装置、蒸留塔、ユーティリティ

(出所) concawe-aramco²⁹

一方、米国側のスタディとしては、米国ワシントン DC を拠点とする NPO 世界資源研究所(World Resources Institute, WRI)は、2021 年 10 月、次世代の製油所シナリオに関するレポート「製油所の脱炭素に向けた技術的道筋」Technological Pathways for Decarbonizing Petroleum Refining」を公表した。³⁰

このレポートでは、米国が持つ再生可能エネルギーと化石資源を組み合わせ、資源循環型の環境負荷を低減した製油所に変換する将来の製油所像を提示している。

- CO₂ パイプライン

製油所からの CO₂ 回収に加え、中西部のバイオエタノール工場からの CO₂ パイプラインとメキシコ湾岸の工業地帯の CO₂ の回収・輸送ネットワークの構築が可能としている。

- 水素製造

製油所が集中する米国南部メキシコ湾沿岸では天然ガス等から大量の水素供給が可能としている。

- グリーン水素のポテンシャル

太陽光の場合はメキシコ湾岸、風力発電の場合は米国中央部平原地帯からの再生可能電力を調達して、製油所でのグリーン水素の製造が可能としている。

- 木質バイオからの水素製造

²⁹ <https://www.concawe.eu/publication/e-fuels-a-techno-economic-assessment-of-european-domestic-production-and-imports-towards-2050/> (2022/11/7)

³⁰ <https://files.wri.org/d8/s3fs-public/2021-10/technological-pathways-decarbonizing-petroleum-refining.pdf?VersionId=oCHsIJ44.gemRzrzXlix7dYSIQD0OFrW>

中西部の北部地帯の製油所数は限られているが、森林資源に恵まれているため、バイオマスガス化による水素製造を行い、製油所での利用が可能と評価している。

製油所の低炭素化を図るモデルとして、WRI はセミ・サーキュラー (Semi-circular) 製油所コンセプトを提示した(図 2-9)。

従来の石油精製プロセスフローに、バイオマス廃棄物由来原料を投入し、太陽光又は風力による再生可能電力を使った加熱炉、天然ガス由来の水素をブルー又はグリーン水素に転換、さらに CO₂ の逆水性シフト反応による CO 製造とフィッシャー・トロプシュ反応工程が組み合わされている。

将来の製油所像については欧州石連などもスタディを行っており、今回の WRI と共通するのは、再生可能電力を如何に調達し、製油所のプロセスの電化を進めるかが鍵となっている。

これまで取り組んできたプロセスの省エネルギー化を飛躍的に改善する再生可能電力の導入については、我が国の製油所を次世代型へ転換するための大きな検討課題と考えられる。

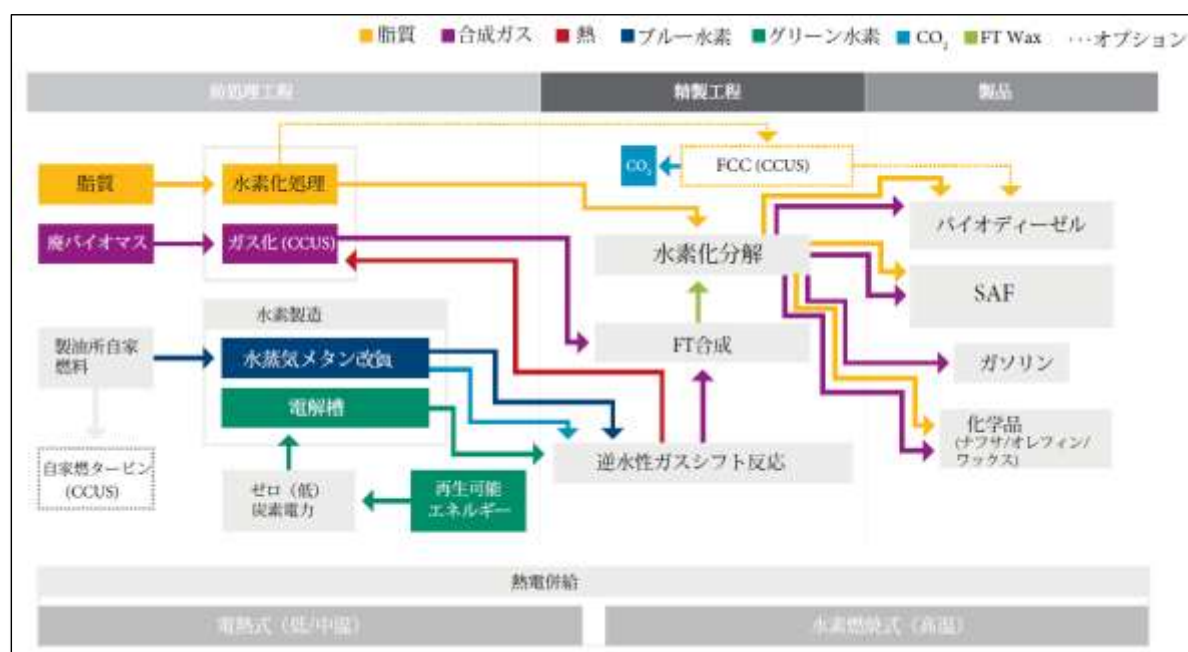


図 2-9 セミ・サーキュラー製油所転換コンセプト

(出所)WRI

WRI はレポートのまとめとして、以下のように製油所の役割を整理している。

- ・野心的な脱炭素政策と電気自動車の普及が進んでいるが、今後数十年は輸送用燃料と石油化学製品の需要が続く。しかし、製油所は、米国の気候目標を達成するために脱炭素化する必要がある。
- ・製油所の脱炭素化を進めることで、国内 GHG 排出量のほぼ 3%を削減でき、地域の大気質を改善する可能性がある。その対策には、現場の熱発生装置や精製プロセスからの排出量を削減することが必要である。
- ・精製部門は、化石燃料から低炭素およびゼロカーボン水素への切り替えや低・中程度の熱源の電化によって GHG 排出量を削減しながら、年間の熱需要を満たすことができる。プロセスからの GHG 排出量は、CCS によって軽減することができる。

- 種々の開発レベルの気候変動対策技術が普及してきており、今後も技術革新が進み利用は拡大する。
- CO₂ や水素への対応が即時にできれば、FT 合成などの既存のアプローチを通じて、製油所は低炭素および炭素ネガティブ燃料を製造することができる状況にある。
- 長期的には、製油所は、主に航空およびトラック輸送用に、従来の燃料用の原油の処理から合成燃料用の再生可能な原料に切り替えることができ、燃料の炭素強度を最大 80%削減できる。

表 2-9 合成燃料(e-fuel)プロジェクト一覧(製油所)

No.	燃料製造企業／研究機関(国籍)	建設地	プロジェクトステージ	スケジュール／BD規模／事業費	技術要素／製造プロセス(共電解、FT、MTG)	政府支援の有無
7	TotalEnergies(フランス) パートナー:Sunfire、Fraunhofer	ドイツTotalEnergies Leuna製油所	研究開発:Fraunhofer Hydrogen Lab Leuna 実証プロジェクト準備	2019年10月 e-CO2Met project共同開発契約締結 2021年6月 プロジェクト開始@Fraunhofer 2022/9/16 Sunfireより製油所に向け電解槽出荷 150百万ユーロ(メタノール製造含め事業一式) (メタノールからのSAF合成視野)	1MW (SOEC)電解槽	EUファンド ドイツザクセン・アンハルト州政府支援
8	WESTKUSTE100(ドイツのコンソーシアム) コンソーシアム:10社(Ørsted、Raffinerie Heide GmbH 他)	ドイツHeide製油所を中心 とした工業地帯	実証プラント建設中	2019年7月18日、89百万€の開発計画公表 2020年8月プロジェクト開始、 5か年(eメタノールからのFTケロシン合成は別プロ ジェクトKEROSyN100で進行) 2023年 30MW電解槽FID	30MW電解槽による製油所向け水素 本PJ終了後、50～100MW(パイロット)、700MW(大 型化)へ移行	2020年8月3日、政府支援予算30百万€獲得 (コンソーシアム負担 59百万€)
9	Shell Rheinland(ドイツ) パートナー:SINTEF(ノルウェー)、ITM Power(英 国)、Linde(ドイツ)他	ドイツShell Rheinland製 油所@Wesseling	グリーン水素製造プラント拡張中 完成簿、燃料製造プラント建設に着手	Refhyne II プロジェクト(100MW PEM設置) 2022年後半、最終投資決定(FID) 2024年 電解槽導入 2026年9月 プロジェクト終了 2021年2月にPTL計画をリリースしたが、その後追加 発表なし	英国ITM Power社PEM(10MW)稼働(2021年7月 s EU Refhyne I プロジェクト) 後継プロジェクトで100MW PEMを導入し、グリーン 水素をeSAFプロセスに使用する計画	Refhyone I&II (EU Horizon2020)
10	MiRO(ドイツ) REF4FUコンソーシアムパートナ: KIT, TU Bergakademie Freiberg, CAC, Porsche AG他	ドイツ・Karlsruhe	研究開発	2022～2025年 MiRO製油所でのアップグレード実 験	ドイツカールスルーエ工科大学KITreFuelsプロジェ クト(MtGとFT由来ガソリンの製造と評価)の一環 Ineratec FTプロセス 生成油(e-crude)をSAF等にアップグレード	連邦交通デジタル省(BMDV)のファンド全体742万 ユーロ
15	OMV(オーストリア) パートナー:Sunfire、PAUL WURTH、 TECHNISCHE UNIVERSITAET GRAZ	オーストリア・ Schwechat製油所	EU研究開発プロジェクト進行中	MegaSyn project プロジェクト期間:2021年4月～2025年3月 プロジェクト総額: 7.8百万€ プロジェクトファンド:5百万€ (本プロジェクトにはFT合成部分は含まず)	1MW高温共電解(Sunfire設計)	Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU)
19	Repsol (スペイン) パートナー:HydrogenPro(ノルウェー電解槽メー カー)、Ariema(スペイン電力会社)、Aramco	スペイン・Bilbao製油所近 郊港湾地区	実証プラント建設準備中	2024年 50bpd規模でe-fuel製造 第1弾で6千万ユーロ投資	e-fuel 製造: 10MW (アルカリ)電解槽 eWGS: Johnson Matthey HyCOgen™ technology(ライセンス第一号) FT技術:BP-Johnson Matthey CANST™ technology (別プロジェクト) グリーン水素:100MW電解槽(2025年稼働)	欧州イノベーション・ファンド応募(2021年末採否決 定)
22	Everfuel(デンマーク) Crossbridge Energy Aarborg(オールボー)大学協力	デンマークFredericia(フ レデレシア)	計画発表	HySynergy PtXプロジェクト フェーズ I 建設中、2022年後半に20MWで稼働 フェーズII 2025年、300MW フェーズIII 2030年、1GW 2022/6/11 Fredericia製油所でのHySynergy フェーズII liquid e-fuel study発表	Topsoe電解槽の水素と製油所CO2からe-fuelを製造	デンマークエネルギー庁 DKK 5.8m(約1億円)
31	Neste、VTTフィンランド技術研究センター パートナー:AW-Energy、Helen、Carbon ReUse Finland、Kleener Power Solutions、Agco Power、ESL Shipping、Meriaura Group、ABB、 INERATEC	フィンランドBioruukki	フィンランド国立研究所VTTで研究開発中	2021/2/8 プロジェクト立ち上げ 2022年5月 デモプラント建設開始(VTT研究所内) 2023年後半 デモプラント完工	固体酸化物電解槽セル(SOEC) INERATEC FTモジュール e-fuel製造効率改善10～15%を目指す。	政府Business Finland 3.3百万€出資 (民間負担 3百万€)
32	St1 パートナー:LUT University	フィンランド Lappeenranta	研究開発	2022/10/4 欧州復興ファンドを活用、€35.4 MM承認待ち 今後、事業申請と影響評価の後、最終投資決定 2026年 稼働開始	風力発電によるグリーン水素と隣接セメント工場の CO2利用によるeメタノール 年間2.5万トン製造	—

3. 合成燃料の規格化に関する検討

3.1 合成燃料のサステナビリティ評価

新たな輸送用燃料のサプライチェーンの構築には製造規格に加え、国際的な認証制度が必須であり、現時点では合成燃料の国際的な統一ルールは整備されていない。

しかし、輸送用バイオ燃料のサステナビリティ認証制度に続き、非バイオ系燃料である合成燃料(e-fuel, PtL 等)の国際的な認証制度の開発は進んでいる。

本調査では、世界をリードする2大サステナビリティ認証機関の一つである ISCC (国際持続可能性カーボン認証、本部:ドイツ)に注目し、ワーキンググループのイベントに参加して、合成燃料認証に関わる検討情報の収集を行った。

(1) ISCC サステナビリティ認証

ドイツやチリでは、e-fuel デモンストレーションプラントが稼働し、生成物が市場にで始めている。

ドイツは国内向けの燃料規格に基づき、e-fuel 混合ガソリンのテスト販売を初めているが、HIF Global はチリ Haru Oni 製品の海外輸出を行うため、製品認証への取組みを進めており、その認証準備状況について、2022 年 12 月の ISCC の会議³¹にて紹介があった。

Power-to-X に対する ISCC の認証検討状況

- Power to X (PtX)とは？

再生可能な電力を、グリーン水素を介して、燃料、ガス、その他製品に変換するプロセス。

- 何故 PtX なのか？

エネルギー生産の CO2 ニュートラルなエネルギー源へのシフトを支援し GHG 削減目標を達成する

- バイオ燃料の認証は可能となっているが、PtX の認証はできるのか？

ISCC PLUS: 特定地域のボランタリーベースの手法であるため、現在、既に認証が可能な制度。

ISCC EU: ISCC は、グリーン水素とその誘導体の認証手法のためのパイロットに参加中であり、現時点では認証可能ではない。

ISCC CORSIA: ISCC は ICAO 内で PtL SAF に関するワーキンググループのメンバーとして活動中であり、現時点で認証は可能ではない。

HIF Haru Oni 製品の認証への取組み

- ISCC 認証取得予定の e-fuel 製品: e メタノール、e ガソリン、e 液化ガス

- 今後の予定

ISCC PLUS、ISCC EU での認証が可能になった場合、その「認証プラットフォーム」ソフトの開発を行う。

「認証プラットフォーム」とは、非バイオ由来の再生可能燃料(RFNBO)のサプライチェーンを認証でカバーする ISCC アプローチのことという。

EU が先導する RFNBO のジェット燃料向け認証が ICAO の制度と整合性を持つことが、今後の国際的な製

³¹ <https://www.iscc-system.org/event-recap-iscc-event-renewable-fuels-of-non-biological-origin/>

品取引には必須となる。その他、ガソリンや軽油代替の e-fuel についても、国際的な事業展開を目指す HIF Global の取組みは参考となるため、引き続き検討状況を注視する必要がある。

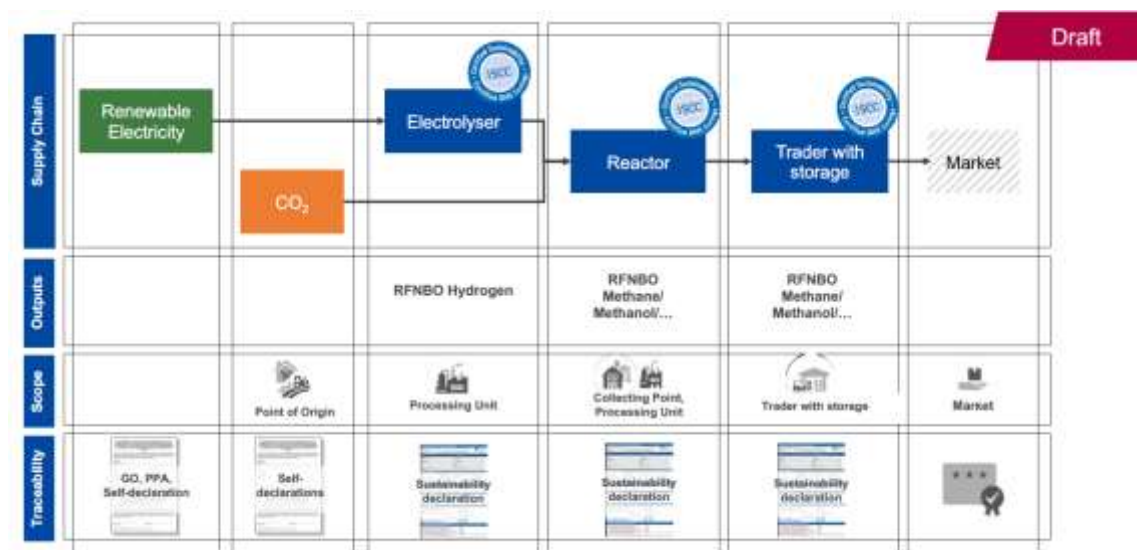


図 3-1 RFNBO「認証プラットフォーム」での認証の流れ

(出所) ISCC Stakeholder Meeting³²

(2) 合成燃料の GHG 削減効果とコストに関するスタディ

ドイツの航空コンサルタント・バウハウス・ルフトファールト協会が 2022 年 6 月に発表したレポート「Synthetic Jet Fuels and the Long Journey to Climate Neutrality」³³では、石油系ジェット燃料とバイオ系、非バイオ系の GHG 削減効果と将来に向けた販売価格の相関性を分析した。

図 3-2 で示すように、現時点では、合成燃料種 (Power-to-Liquid、Sun-to-Liquid、Biomass-to-Liquid) は、実用化されているバイオ燃料よりも GHG 削減効果は大きいが高価格であるが、今後合成燃料の価格が徐々にバイオ燃料に近づくと分析している。

合成燃料による GHG 排出削減効果は大きく、将来的な価格低下により、利用促進を図る必要があるとし、EU で議論されている SAF 中の e-fuel 混合義務化を支持するまとめとなっている。

また、航空機用液体水素は長距離飛行には不向きであるが GHG 削減と価格の点で近距離飛行では優位があるとも記している。

³² https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2022/12/4_ISCC_RFNBOS011222_HIF-Global.pdf

³³ <https://www.bauhaus-luftfahrt.net/de/newsroom> (2022/6/24)
<https://www.youtube.com/watch?v=T3uMJXrlhJ4&t=323s>

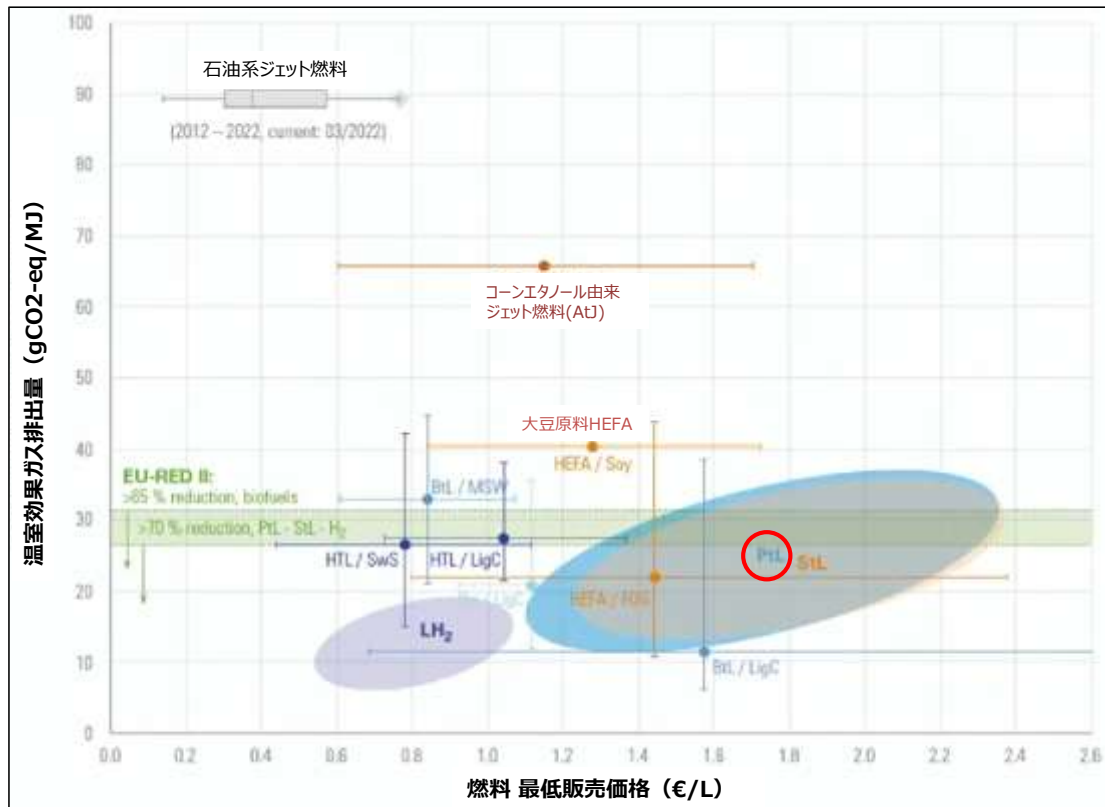


図 3-2 将来に向けた液体燃料の GHG 排出量と販売価格の関係

略語

HEFA: 水素化処理エステル・脂肪酸
FOG: 廃水中脂肪・油・グリース (Fats, Oils & Grease)
BtL: biomass-to-liquid法
HTL: 水熱液化法 (hydrothermal liquefaction)
StL: ソーラー液化法 (Sun-to-Liquid)
MSW: 都市廃棄物 (Municipal Solid Waste)
LigC: リグノセルロース (ligno-cellulosic biomass)
SwS: 下水汚泥 (sewage sludge)
LH₂: 液化水素

(出所) Bauhaus Luftfahrt @ILA Berlin 2022

3.2 合成燃料の製造規格

米国の 2 機関に着目し、最新の燃料規格化に携わる検討状況を調査した。

(1) ASTM International

米国を拠点に、輸送用燃料の国際的な規格化を検討している機関。

e-fuel の規格については、6 月と 12 月の定例会議にて Committee D02 Subcommittees -D02.J0.06 (Emerging Turbine Fuels) の議題となっていることは確認できたが、現在検討中の技術課題について情報開示されていない。

米国民間航空代替燃料イニシアチブ (CAAFI) 主催の隔年会議 (2022 年 6 月) においても、ASTM³⁴にて PtL の規格化の議論が進んでいると言及されていることから、今後はより多面的な調査手法にて情報収集する必要がある。

(2) 米国連邦航空局 (FAA) SAF Program

FAA は ASCENT³⁵ (The Aviation Sustainability Center、航空持続性センター) にて、新しい SAF であるグリーン水素と PtL の製造研究を行うための資金提供をしている。

航空機用 e-fuel (PtL) の導入に向けて、Advisory Committee Alternative Fuels 080 (Hydrogen and Power-to-Liquid (PtL) Concepts for Sustainable Aviation Fuel Production) にて、下記研究課題をマネジメントしている。

- 航空用グリーン水素と PtL 技術の新しいコンセプトを評価
- LCA と技術経済評価のための定量的データの取得
- 将来の廃棄物/バイオ資源を補完する実行可能な PtL 評価

³⁴ https://www.caafi.org/resources/pdf/CBGM2022/ASTM_Certification_Qualification_Update.pdf

³⁵ 米国の主要な 16 の大学と 60 を超える民間セクターの利害関係者の連合体で、FAA、NASA、国防総省、カナダ運輸省、および環境保護庁から資金提供を受けている。

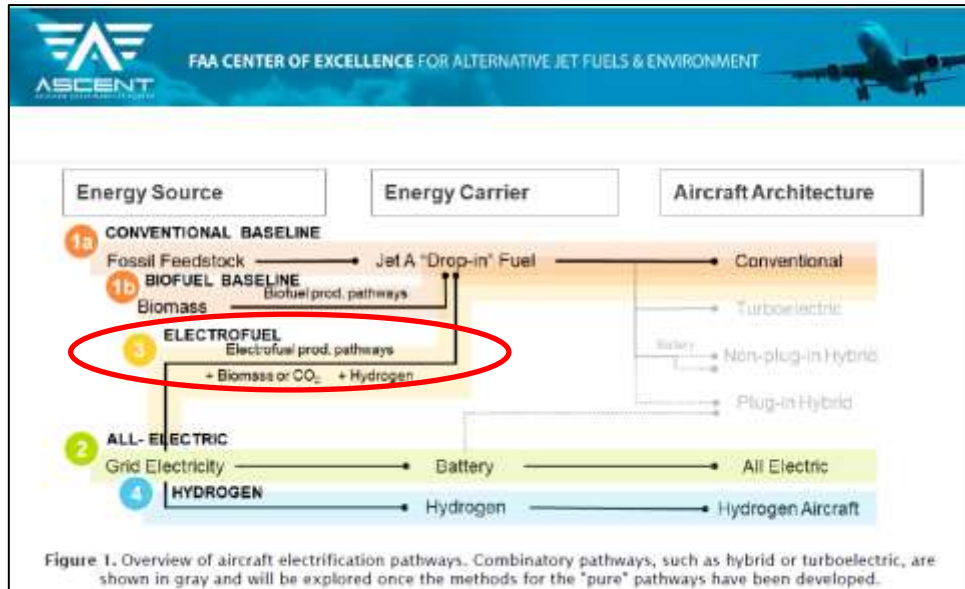


図 2-12 FAA のe-fuel 製造経路に関する評価体制

(出所) FAA³⁶

現時点では、研究成果は報告されていないため、引き続き注視する必要がある。

³⁶ <https://www.faa.gov/headquartersoffices/ang/sustainable-administration-aviation-fuels-saf>
(2022/3/22-23)

4. まとめ

合成燃料(e-fuel)の技術開発は、2010 年以降、ドイツが世界の先陣を切って進めてきた。その中で、輸送用燃料となる e-fuel 分野では、昨年来、複数のデモンストレーションプラントがドイツ国内で稼働する状況となっている。

欧州では、2050 年のネットゼロ社会に向け、持続可能な航空燃料(SAF)として、バイオ由来燃料だけでなく e-fuel の混合義務化も検討されていることから、ドイツだけでなく欧州各国でプロジェクトが立ち上がっている。

欧米を中心に情報収集を行った結果、40 件強の合成燃料(e-fuel)製造プロジェクトが公表され、現状で 5 カ所が稼働、2023 年にさらに 2 カ所の稼働見込みを確認した。

本調査では、特に e-fuel 製造を開始したドイツ CAC や P2X-Europe、米州ではチリの HIF Global や米国の Infinium に注目し、現状と今後の計画について情報を整理した。

e-fuel 用のグリーン水素調達については、燃料製造者はグリーン水素の製造に必要な再生可能電力を確保した上で、自社に電解槽を設置して水素製造を行う場合と、社外からグリーン水素を調達する場合がある。

CO₂ 原料の確保においても、現時点では、化学あるいはバイオマス工場で発生する CO₂ を分離回収する方法が主流である。

プロジェクトを実証段階に進めるためには、これら原料調達と供給の整備の遅れは、e-fuel の製造開始を延期することにつながる。

今回情報収集したプロジェクトのうち、原料供給のサプライチェーン構築について具体化できているものは限定的であった。

また、e-fuel のサステナビリティ認証基準や製造規格については、ドイツ ISCC や米国 ASTM の機関で検討が始まっている模様であるが、制度内容の確定までにはまだ時間を要すると見込まれる。

以上、低炭素燃料のうち e-fuel に着目し、技術開発動向と実用化に向けた制度や技術課題についてとりまとめた。

e-fuel 製造には石油精製業での燃料製造技術では未経験の多種の技術要素が関与するため、引き続き実用化に向けた技術調査を行う必要がある。

無断転載・複製を禁ず

一般財団法人石油エネルギー技術センター

調査国際部

〒105-0011 東京都港区芝公園 2-11-1

電話 03-5402-8502

JPEC-2022P-12

添付 3 :

バイオ燃料の製造に関わる技術開発、性状 と品質、製品化の動向等

令和 4 年度燃料安定供給対策に関する調査事業

(製油所の事業転換に向けた技術動向に関する調査)

令和 5 年 3 月



一般財団法人石油エネルギー技術センター

Japan Petroleum Energy Center (JPEC)

はじめに

本報告書は、一般財団法人石油エネルギー技術センターが、経済産業省資源エネルギー庁から委託を受けて、令和4年度燃料安定供給対策に関する調査事業（製油所の事業転換に向けた技術動向に関する調査）の一部として実施した「バイオ燃料の製造に関わる技術開発、性状と品質、製品化の動向等」について取り纏めたものである。

低炭素燃料の製造に関わる技術開発の動向として、米国政府が支援する技術開発動向、欧米のライセンサーの技術開発動向、プラスチックリサイクル油の技術開発動向について調査した。

調査の結果、米国エネルギー省（DOE）などは、巨額の資金援助をして、低炭素燃料の研究開発を進めていた。また、欧米のライセンサーは、持続可能な航空燃料（SAF）の製造技術に注力しているようで、結果として複製する再生可能ディーゼルや再生可能ナフサの利用も検討していた。プラスチックのリサイクルにおいては、油にする技術はごく少数派で、ほとんどが再生可能プラスチックの原料とする技術が多かった。その中で、Nesteとbpはプラスチックの再生油にも力を入れている。

低炭素燃料の性状と品質に関しては、以前、バイオディーゼルは低温流動性が悪いので、寒冷地では使用できないとよく言われていたが、実際には北欧や米国北西部でもバイオディーゼル100%のB100などが販売やフリートテストで実装していることが分かった。

低炭素燃料の製品化の動向等では、欧州で販売されている再生可能ディーゼル100%燃料への対応車は、燃料噴射量の調整を行っていることが判明した。これは、バイオ系のディーゼル燃料は、石油系の軽油と比較して発熱量が低いため、その分多くの燃料を噴射する必要があるためである。バイオディーゼルや再生可能ディーゼルの最も多く生産している米国では、今後は生産量が伸び悩む予想をしている。これは、これからは航空用のSAFや船舶油のバイオ燃料も増加することが予測されるため、原料の大幅な増加は望めず、結果としてディーゼル車用のバイオ燃料は伸び悩むというものである。最後にバイオディーゼルの取扱いであるが、一般的な軽油とほぼ同等であることが分かった。

本調査の実施にあたり、文献、インターネットの活用等の情報収集と分析、必要に応じて海外の調査会社への外注調査を実施して情報収集を行った。

本調査報告書については、経済産業省、情報収集調査研究会等での議論も踏まえながら纏めた。本報告書の取り纏めにあたり、ご協力を頂いた関係者各位に感謝申し上げます。

本調査が、今後の石油産業の経営基盤強化の一助となれば幸いである。

令和5年3月

目次

	頁
1. 低炭素燃料の製造に関わる技術開発	1
1. 1. 米国政府が支援する技術開発動向	1
1. 2. 欧米のライセンサーの技術開発動向	10
1. 3. プラスチックリサイクル油の技術開発動向	14
2. 低炭素燃料の性状と品質	18
2. 1. 低炭素燃料の製造方法の違いによる品質への影響	18
2. 2. 気候の地域差、石油系軽油の性状の違いによる低炭素燃料と 石油系燃料の混合割合	22
3. 低炭素燃料の製品化の動向等	28
3. 1. 欧米で販売されている 100%低炭素燃料の使用適合車に 関する動向	28
3. 2. バイオディーゼルや再生可能ディーゼルの生産量予測に関する情報 の収集と整理	32
3. 3. 低炭素燃料の取り扱いや安全性に関する検討状況	41

図番号	頁
図 1 リグニンを芳香族化合物に選択的に変換できるプロセス.....	10
図 2 Honeywell UPO が提唱する概念図.....	11
図 3 Neste の廃プラスチック処理の目標.....	15
図 4 アクロンにある Alterra Energy の廃プラスチック液化ユニット.....	16
図 5 欧州のバイオ燃料の普及状況.....	27
図 6 ブリュッセルのガソリンスタンドの HVO100 の案内.....	29
図 7 ブリュッセルのガソリンスタンドの HVO100 の計量機.....	29
図 8 Optimus の Vector System.....	31
図 9 米国のバイオディーゼルと再生可能ディーゼルの生産量と輸入量の予測.....	33
図 10 米国のディーゼル燃料の予測（リファレンスケース）.....	33
図 11 CoverCress 社のカバーグレース.....	40

表 1	BETO の資金提供に採択されたプロジェクト.....	2
表 2	持続可能なバイオ燃料の生産を加速するための 17 のプロジェクト.....	4
表 3	DOT の助成金の採択者、資金総額、プロジェクトの内容.....	7
表 4	軽油とバイオディーゼルの規格の抜粋.....	18
表 5	インドネシアのバイオ燃料（100％）規格と日本の軽油規格の比較.....	23
表 6	マレーシアのバイオディーゼルの導入計画と実際の導入時期.....	24
表 7	ブラジルの軽油へのバイオディーゼルの混合義務.....	25
表 8	B100 の健康被害.....	41
表 9	B100 の暴露経路別の応急処置.....	42
表 10	B100 の火災時の処置.....	43
表 11	B100 の取扱い及び保管.....	43
表 12	B100 の偶発的放出の対応.....	44
表 13	B100 の暴露管理と個人保護.....	44
表 14	B20 の暴露経路別の応急処置.....	46
表 15	B20 の火災時の処置.....	47
表 16	B20 の偶発的放出の対応.....	48
表 17	B20 の取扱い及び保管.....	49
表 18	B20 の追加の保管に関する情報.....	50
表 19	B20 の暴露管理と個人保護.....	51

1. 低炭素燃料の製造に関わる技術開発

1. 1. 米国政府が支援する技術開発動向

1. 1. 1. 米国のエネルギー省（DOE）や国立研究所での技術開発動向

2022年3月22日、DOEは、廃棄物をバイオ燃料に変換するための、現在の科学とインフラを改善するために、3,450万ドルの資金調達機会（funding opportunity announcement：FOA）を発表した。DOEは、このFOAは、次世代の低炭素バイオ燃料とバイオ製品をサポートする、改良された有機と無機の触媒の開発のためのものであると説明している。それは、バイオエコノミーの成長を加速し、経済的および技術的な実行可能性を改善して、負担が大きく費用のかかる廃棄物を貴重なバイオエネルギー資源に変えるための影響力の大きい研究開発をサポートする。DOEは、航空などの脱炭素化が困難な部門からの排出量を削減する低炭素バイオ燃料を生産するために、廃棄原料の利用と堅牢な変換プロセスを可能にするプロジェクトに資金を提供する。

FOAには、以下の4つのトピック分野がある。

- (1) 都市固形廃棄物原料技術
- (2) 堅牢な微生物細胞
- (3) 堅牢な触媒プロセス
- (4) 有機廃棄物からの地域規模の資源とエネルギーの回収

2022年6月1日、DOEは、航空および海運部門におけるバイオ燃料およびバイオ製品の生産を加速するための5,900万ドルの資金調達機会（FOA）を発表した。このFOAは、開発のあらゆる段階で再生可能ディーゼル、再生可能な航空燃料（SAF）、再生可能な船舶燃料、再生可能な鉄道燃料を生産できるバイオリファイナリープロジェクトをサポートするために、バイオリファイナリー開発と原料改善プロジェクトを推進することを目指している。これは一連の「スケールアップ」FOAの2番目である。2021年9月、DOEは、低コストで低炭素のバイオ燃料を生産する技術とプロセスの開発に重点を置いた22のプロジェクトに6,400万ドルを授与した。

2022年11月、DOE傘下のアルゴンヌ国立研究所（ANL）は、国立再生可能エネルギー研究所（NERL）、パシフィック・ノースウェスト国立研究所（PNNL）、およびアイダホ国立研究所（INL）と協力して、バイオ燃料と高度なエンジン設計を組み合わせることで、温室効果ガスの排出量を約60%削減しながら、燃料効率を改善したり大気汚染物質の排出を削減したりできると発表した。これらの国立研究所は、さまざまなエンジンタイプに適した有望な燃料を特定する作業を実施した。研究者らは、コスト、環境への影響、および商用市場への拡大の可能性を検討した。この研究は、DOEのエネルギー効率および再生可能エネルギー局（EERE）が共同で主導する、燃料とエンジンの共同最適化（Co-

Optima) イニシアチブによってサポートされている。

Co-Optima による、技術、経済およびライフサイクル分析に基づく、高度なマルチモードエンジン用のバイオマス由来燃料のコストと環境への影響の主要要因の特定というレポートでは、マルチモード内燃エンジンを最適化するための 12 のバイオ燃料生産経路を評価している。マルチモードエンジンは、運転の要求に応じて、さまざまな点火、燃焼および/または燃料供給方法を使用することで、効率を高め、コストを削減することができると報告している。

2 番目の研究では、混合制御圧縮着火エンジン用の選択されたバイオ由来ブレンド基材の環境、経済、および大量生産化に関する考察で、混合制御圧縮着火として知られるタイプのエンジンに最適化されたバイオ燃料を生産する 25 の方法を分析している。このディーゼルエンジンは、主に貨物輸送に使用されている。

2022 年 12 月、DOE のバイオエネルギー技術局 (BETO) は、DOE と Minority Serving Institution STEM Research & Development Consortium (MSRDC) との省庁間協定に基づいて、資金提供のために 3 つのプロジェクトを採択した。MSRDC は、2014 年に米陸軍との協力協定に基づいて結成された 70 を超える機関の非営利メンバーグループである。採択された 3 つのプロジェクトを表 1 に示す。

表 1 BETO の資金提供に採択されたプロジェクト

研究機関	連邦のコスト負担	プロジェクトの内容
Topic Area: 高度な藻類システム		
North Carolina Agricultural and Technical State University	\$280,861	農業廃水中での同時嫌気性ろ過と付属の微細藻類培養の支持媒体として、新規の微細藻類由来のバイオチャー・ヒドロゲル・鉄複合材料を使用したバイオ濾過・微細藻類共生システムの開発。生物ろ過付着微細藻類共生システムと対応する新規炭素質複合支持媒体により、廃水中の微細藻類生産を改善。
Topic Area: 高度な陸生廃棄物原料技術		
Florida A&M University	\$476,787	熱効率を高め、プロセスコストを削減するために、マイクロ波を介した水熱炭化を使用して食品廃棄物からハイドロチャーを生成する。ハイドロチャーは、バイオ燃料生産またはバイオマス

		発電のための安定した一貫した原料として使用できる。チームは、フロリダ州立大学の国立高磁場研究所と協力する。
Topic Area: バイオ燃料生産のための触媒開発の加速		
University of New Mexico	\$250,000	バイオマス由来のエタノールを SAF にアップグレードするための新しい触媒アプローチを開発する。最先端の特性評価技術を利用して、触媒失活の課題を克服するために、新しい単一原子触媒をどのように活用できるかを示すことを目的としている。UNM の研究者に、ChemCatBio で同様の課題に取り組んでいる DOE 国立研究所のパートナーと協力する機会を提供する。

出所：DOE ホームページより JPEC で作成

2023 年 1 月 20 日、BETO は、DOE 傘下のアルゴンヌ国立研究所（ANL）と国立再生可能エネルギー研究所（NREL）の BETO が資金提供する科学者の共同チームが、二酸化炭素を手頃な価格のバイオ燃料とバイオ製品に変換する研究を計画していると発表した。また、産業、輸送、農業によって発生する二酸化炭素を SAF やその他の有用なバイオ製品に変換することで、より有効利用できる炭素利用技術を開発するとしている。この研究の目的は、航空燃料などの製品を製造できる触媒を特定することである。さらに、この研究では、温室効果ガス排出量の削減に貢献し、気候変動との闘いに役立つ可能性が高いメタノールの可能性を探っている。この開発では、燃料電池に使用したり、ボイラーの暖房用燃料として使用したり、道路、船舶、または航空用の持続可能な燃料、または発電用に混合燃料として使用することを対象としている。BETO は、ホルムアルデヒド、酢酸、その他の健康およびライフサイエンス製品を合成するための化学産業の原料として、メタノールが使用されていると説明している。また、研究の長期的な課題は、科学的発見を商業的応用に拡大することであるとしている。

2023 年 1 月 26 日、DOE は、持続可能なバイオ燃料の生産を加速するための 17 のプロジェクトに 1 億 1,800 万ドルの資金を提供すると発表した。採択された 17 のプロジェクトを表 2 に示す。

採択されたプロジェクトは、大学や民間企業で実施され、化石燃料に関連する GHG 排出量を削減する持続可能な燃料を生み出すために、プレパイロットからデモンストレーションまでバイオリファイナリーの開発を進めることで、バイオ燃料とバイオ製品の国内生産を支援することを目的としている。

採択されたプロジェクトには、既存のバイオマスを最終的に年間数百万ガロンの低炭素燃料を生み出す燃料技術にスケールアップする、プレパイロット、パイロット、および実証プロジェクトが含まれている。このプロジェクトは、2030 年までに年間 30 億ガロン、2050 年までに年間 350 億ガロンの SAF の生産を可能にするという米国の SAF グランドチャレンジの目標もサポートしている。

採択されたプロジェクトは、9 つの州とワシントン D.C. にあり、嫌気性消化 (Anaerobic Digestion、濃厚な有機性成分を含む排水をメタンガス、炭酸ガス、水などとして無害化すること)、セルロース糖の SAF への変換、触媒バイオリファイニングなどの技術に焦点を当てている。

表 2 持続可能なバイオ燃料の生産を加速するための 17 のプロジェクト

採択者	場所(市,州)	プロジェクトのタイトル	連邦の支援
Topic Area 1: 統合バイオリファイナリーのプレパイロットスケールアップ			
Algenisis Corporation	Cardiff, CA	藻類ベースのジェット燃料とポリウレタンモノマーのプレパイロットスケール生産	\$4,987,974
Captis Aire LLC	East Point, GA	100%SAF を可能にする再生可能なブレンディング基材	\$2,000,000
Comstock Inc.	Virginia City, NV	リグノセルロース系バイオマスからの再生可能ディーゼル、SAF、ガソリン、船舶用燃料の製造で、歩留まり、効率、コストの大幅な向上	\$2,000,000
Global Algae Innovations	San Diego, CA	マルチエーカーのレースウェイへの DAC のスケールアップ	\$3,600,000
MicroBio Engineering Inc.	San Luis Obispo, CA	空気-CO ₂ を利用したバイオ燃料生産のための藻類フローウェイ	\$3,978,199
Research Triangle Institute	Research Triangle Park, NC	SAF のためのトウモロコシ茎葉の熱分解経路	\$2,000,000
University of	Riverside, CA	SAF およびバイオ船舶燃料	\$2,000,000

California: Riverside		向けハイブリッド触媒によるバイオ燃料製造のスケールアップデモンストレーション	
University of Utah	Salt Lake City, UT	SAF の生産のための合成ガス発酵による噴流バイオマスガス化	\$2,000,000
Viridos, Inc.	La Jolla, CA	パイロット前の統合された SAF の藻類バイオリファイナー	\$2,000,000
Topic Area 2: 統合バイオリファイナーのパイロットスケールアップ			
LanzaTech, Inc.	Skokie, IL	残留物をエネルギーに変換して生態系を補充	\$1,640,286
MicroBio Engineering Inc.	San Luis Obispo, CA	統合バイオリファイナーにおける超臨界水酸化による熱水液化のスケールアップ	\$579,673
Topic Area 3: 統合バイオリファイナーの実証スケールアップ			
Alder Fuels, LLC	Washington DC	空の脱炭素化 - バイオ原油からの SAF 製造	\$2,000,000
AVAPCO LLC	Thomaston, GA	AVAP バイオリファイナー: Net Zero™ の実現	\$80,000,000
Topic Area 4: 第 1 世代のトウモロコシからのエタノールによる排出削減			
Green Plains	Omaha, NE	グリーンプレーンズバイオリファイナーの排出削減技術	\$500,000
Lincolnway Energy LLC	Nevada, IA	廃油およびその他の原料からのバイオガスによる炭素強度の低いエタノール	\$453,000
Marquis, Inc	Hennepin, IL	炭素精製: コーンエタノール 2.0	\$8,547,047
RenewCO2 Inc	Cranford, NJ	バイオエタノール排出物からカーボンネガティブ化学物質への CO2 の統合電極触媒変換	\$499,953

出所: DOE ホームページより JPEC で作成

2023 年 1 月 31 日、ユナイテッド航空、Tallgrass、および Green Plains Inc.は、エタノールを原料として使用する、新しい SAF 製造技術を開発および商品化するための合弁会社（Blue Blade Energy）の設立を発表した。Blue Blade の新しい SAF 技術は、DOE 傘下のパシフィック・ノースウェスト国立研究所 (PNNL) の研究者によって開発された。

2023 年 2 月 6 日、BETO が資金提供した研究施設である Advanced Biofuels and Bioproducts Process Development Unit (ABPDU) は、SAF の開発プロセスで揮発性分子の捕捉に成功したことを発表した。ABPDU は、BETO の Bioprocessing Separations Consortium および Argonne National Laboratory (ANL) の研究者と協力して、揮発性生成物の回収を進めるための新しい実験装置と技術を開発した。このコラボレーションにより、ABPDU は、実際の発酵で発生するオフガスを安全に回収するための機能と専門知識を得ることができた。その後、ABPDU は、合成生物学の会社である Amyris Inc. と提携した。2003 年にビル&メリンダ・ゲイツ財団からの助成金を受けて設立された Amyris は、2000 年代初頭におけるバイオ燃料の分子生物学とプロセス開発のパイオニアであり、SAF の製造に使用されるテルペン分子に関する専門知識を保持している。

2023 年 2 月 8 日、DOE は 2,550 万ドルの FOA を発表した。その内容は、農業廃棄物や藻類などの国内のバイオマスや廃棄物資源を持続可能な低炭素のバイオ燃料やバイオ製品を生産できるようにするためのものである。この FOA は、BETO の再生可能炭素資源 (RCR) プログラムを通じて実施される。科学に基づいた戦略と技術開発により、農業廃棄物や藻類などの再生可能な炭素資源を、バイオ燃料やバイオ製品に費用対効果が高い方法で変換することを目指している。

この FOA は、2 つの異なるトピック分野をカバーしている。1 つ目は気候に配慮した農業慣行に焦点を当てたもので、2 つ目は藻類の作物保護に焦点を当てたものである。トピック分野 1 のプロジェクトでは、バイオ燃料用のバイオマス原料の炭素強度 (CI) を削減する、気候に配慮した農業慣行の有効性を評価する。特に農業廃棄物から低 CI 原料を生産し、温室効果ガス排出量を抑えて SAF 生産を可能にするには、気候に配慮した農業慣行の実施が不可欠である。トピック分野 1 のプロジェクトには、2 つのサブトピック分野がある。サブトピック分野 1a は、農業残渣由来の低 CI 原料を生産するための気候に配慮した農業慣行で、サブトピック分野 1b は、Biochar 土壌の炭素レベルを高めるための戦略と、エネルギー生産のための作物の農業上の利点である。

トピック分野 2 の藻類作物保護では、藻類栽培システムの作物保護方法と戦略の開発に焦点を当てている。Advanced Biofuels and Bioproducts Process Development Unit (ABPDU) は、DOE の BETO によって資金提供された研究施設である。2023 年 2 月 6 日、BETO は、ABPDU が、SAF の開発プロセスで揮発性分子の捕捉に成功したことを発表した。ABPDU は、BETO の Bioprocessing Separations Consortium および アルゴンヌ国立研究所 (ANL) の研究者と協力して、揮発性生成物の回収を進めるための新し

い実験装置と技術を開発した。このコラボレーションにより、ABPDU は、実際の発酵のためにオフガス回収を安全に展開するための機能と専門知識を開発することができたとしている。その後、ABPDU は、合成生物学の会社である Amyris Inc.と提携した。酵母株の遺伝学を操作し、サトウキビシロップで発酵させることにより、植物糖を炭化水素分子に変換する技術を開発し、SAF の製造に応用することが期待されている。

1. 1. 2. 米国の運輸省（DOT）での技術開発動向

2022 年 10 月 6 日、DOT の連邦航空局（FAA）は、SAF、将来の推進力、大気質と騒音を改善する研究プロジェクトのために、全米の 14 の大学に 1,600 万ドル以上の助成金を授与した。授与された大学のチームは、FAA の Aviation Sustainability Center (ASCENT) のメンバーである。ASCENT は、航空業界の課題に対して科学に基づくソリューションを作成するために協力する 16 の大学の連合で構成されている。ASCENT は、国際的な研究プログラム、連邦機関、国立研究所と協力して情報を交換し、航空産業に固有の環境障害を克服している。このグループは、FAA、米国航空宇宙局（NASA）、国防総省（DOD）、カナダ運輸省、および環境保護庁（EPA）によって共同で資金提供されている。助成金の採択者、資金総額、プロジェクトの内容を表 3 に示す。

表 3 DOT の助成金の採択者、資金総額、プロジェクトの内容

採択者	資金総額	プロジェクトの内容
Topic Area 1:持続可能な航空燃料（SAF）		
Washington State University, University of Tennessee, Pennsylvania State University	\$769,136	地域の代替ジェット燃料サプライチェーンと、国内の燃料生産と地方の経済発展に対するそれらの可能性を評価
Washington State University, Massachusetts Institute of Technology	\$758,026	ライフサイクル排出量とコストを削減した SAF を生産するための新しい方法と手順を特定
Purdue University, Massachusetts Institute of Technology	\$800,000	SAF による気候への環境上の利点を評価
University of Dayton, University of Illinois, Stanford University	\$2,394,940	新しい燃料タイプのテストを実施し、安全に使用できることを確認し、既存の航空機で 100%SAF の使用を承認する取り組みをサポート

Missouri University of Science & Technology	\$2,050,000	SAF からの燃焼排出削減量の測定
Topic Area 2: 将来の推進力		
Massachusetts Institute of Technology	\$460,000	水素とバッテリー駆動での飛行の課題と機会を理解
Purdue University, Georgia Institute of Technology	\$750,000	燃料噴射器の設計と燃料の予熱を使用して、ジェットエンジンからのすすの排出量を削減する方法を調査
Georgia Institute of Technology, Massachusetts Institute of Technology	\$1,050,000	航空機とエンジンの設計を通じて騒音と排出量を削減する機会を検討
Topic Area 3: 大気浄化と騒音		
Georgia Institute of Technology, Massachusetts Institute of Technology	\$1,890,000	航空機の CO2 排出量と騒音を規制するための新しいより厳しい耐空性基準の開発をサポートするための分析を実施
Massachusetts Institute of Technology	\$250,000	地上走行、離陸、巡航、着陸を含む航空機ミッション全体での窒素酸化物排出量を定量化するための新しい指標を開発
Boston University	\$549,921	コミュニティの大気質に対する航空排出の影響を測定

出所：DOT ホームページより JPEC で作成

1. 1. 3. DOE の支援の成果の例

米国エネルギー省の国立再生可能エネルギー研究所（NREL）、マサチューセッツ工科大学（MIT）、およびワシントン州立大学の研究者は、ドロップインの 100% 持続可能な航空燃料（SAF）への道としてリグニンを使用することに成功したと報告している。これらの研究者は、前例のない炭素収率でリグニンをジェット燃料の沸点範囲の芳香族化合物に選択的に変換できるプロセスを開発したと 2022 年 9 月 23 日に発表した。図 1 にこのプロセスの概念図を示す。

現在製造されている SAF は、ASTM D7566 の Annex2 で規定された、植物油等の水素化処理により精製される合成パラフィンケロシン（Bio-SPK または HEFA）がほとんどであり、燃料組成はパラフィンである。一方、石油系ジェット燃料は、パラフィンの他に、芳香族やシクロアルカンなど、さまざまな炭化水素分子の混合物である。パラフィンの中でも、Bio-SPK や HEFA に多く含まれるノルマルパラフィンは、低温でワックスを形成しやすく、ASTM D1655 で規定されている石油系ジェット燃料の Jet A-1 規格にお

ける析出点が -47°C 以下を満足するのは難しい。その点、芳香族は、ワックスを形成しないという利点があり、石油系ジェット燃料には 20%ほど含まれている。

現在の SAF100%の製造技術と石油系ジェット燃料との混合割合の上限を定めた、ASTM D7566 では、石油系ジェット燃料への混合割合は最大で 50%となっている。芳香族化合物の SAF が製造できれば、石油系ジェット燃料との混合比率を高めることが期待できる。

この研究では、ポプラ由来のリグニンからジェット燃料の沸点範囲の芳香族炭化水素を、水素化脱酸素で連続的に生成した。リグニンは、植物の細胞壁の硬い部分を構成しているため、化学的に分解して有用な製品に変換することが難しく、バイオ燃料の原料としては、ほとんど見過ごされてきた。リグニンは扱いにくいため、通常、熱と電力のために燃焼されるか、価値の低い用途にのみ使用されている。以前の研究では、27%から 34%の範囲の高い酸素含有量を持つリグニン油が得られていたが、ジェット燃料として使用するには、含酸素量を 0.5%未満に減らす必要がある。酸素含有量を減らすために他のプロセスも試みたが、使用する触媒には高価な貴金属が必要であり、収率が低いことが証明されている。3つの機関の研究者は、地球に豊富に存在する炭化モリブデンを触媒として連続プロセスで使用する効率的な方法を実証し、約 1%の酸素含有量を達成した。結果的に、リグニンから酸素を除去するために開発したプロセスを実証し、結果として生じる炭化水素は、50%未満であればジェット燃料のブレンド基材として使用できるようにした。

この研究には、DOE の BETO と Center for Bioenergy Innovation (CBI) が資金を提供した。



出所：greencarcongress ホームページ

図 1 リグニンを芳香族化合物に選択的に変換できるプロセス

<https://www.greencarcongress.com/2022/09/20220923-lignin.html>

<https://biofuels-news.com/news/catalytic-process-with-lignin-could-enable-100-saf/>

1. 2. 欧米のライセンサーの技術開発動向

1. 2. 1. Honeywell UOP

2022 年 10 月 14 日、Honeywell UOP は、生産者がトウモロコシベース、セルロースベース、または砂糖ベースのエタノールを SAF に変換できるようにする、新しいエタノールからジェット燃料への（ETJ）処理技術を導入したと発表した。図 2 に Honeywell UOP が提唱する概念図を示す。

Honeywell UOP のエタノールからジェット燃料へのプロセスから生成された SAF は、石油系のジェット燃料と比較して、ライフサイクル全体で温室効果ガス（GHG）排出量を 80%削減できるとしている。

同社の革新的なエタノールツージェット（ETJ）プロセスは、10 年以上の実績を活用しているとして、以下の利点をあげている。

- ・ 高ジェット収率出力
- ・ CAPEX と OPEX の削減
- ・ GHG 排出量の削減
- ・ 関連技術の経験
- ・ 大規模な商業化能力



出所：Honeywell UOP ホームページ

図 2 Honeywell UOP が提唱する概念図

<https://biofuels-news.com/news/honeywells-ethanol-to-jet-fuel-technology-boosts-saf-supply/>

<https://uop.honeywell.com/content/dam/uop/en-us/documents/industry-solutions/renewable-fuels/Honeywell-UOP-Ethanol-to-Jet-infographic.pdf>

1. 2. 2. Topsoe

2022 年 10 月 20 日、Topsoe はブラジルで最初の SAF 生産施設をサポートすると発表した。ブラジルの Brasil BioFuels (BBF) は、SAF と第 2 世代のバイオ燃料を生産する新しいバイオリファイナリーを建設する予定である。BBF は、アマゾンの熱帯雨林の脱炭素化とブラジル北部地域のエネルギーマトリックスの変革を目的として、2008 年に設立された企業である。

2021 年 11 月、BBF はペトロブラスの販売子会社である Vibra とブラジルのマナウス自由貿易地域に再生可能ディーゼルを生産するためのバイオリファイナリーを設立するためのパートナーシップを発表していた。BBF は、荒廃した地域での油ヤシの植え付け、植物油の生産からバイオ燃料 (SAF と再生可能ディーゼル) の製造までを実施する予定である。SAF と再生可能ディーゼルは、ブラジル市場で 2025 年から 2026 年の間に年間最大 50 万トンの規模で利用可能になる予定である。

今回はこのバイオリファイナリーの装置のライセンサーとして、Topsoe が選ばれた。Topsoe は、Hydroflex™および H2bridge™技術を提供し、生産をサポートすることになる。Topsoe の水素化処理技術により、バイオリファイナリーは低炭素燃料を生産すると同時に、バイオリファイナリーの運用に統合される水素の生産プロセスからガスと液体をリサイクルすることができるとしている。

Topsoe の Hydroflex™は、さまざまな種類と品質の原料から再生可能燃料を生産することができる水素化処理技術であり、現在 10 件の当該採用プラントが稼動中である。2021 年から 2024 年にかけてさらに 31 件のスタートアップが予定されている。

欧州では UCO の 40%を中国からの輸入に頼っており、今後は安定した確保が不透明（中国内で消費する可能性あり）である点に言及し、農業残渣や下水汚泥、林業残渣、都市ゴミなどからなるいわゆる固形バイオを原料とした Solid to Liquid への投資を強く推奨している。

H2bridge は、HydroFlex からのオフガス (LPG やナフサ) を原料に、水素を製造する循環型ソリューションであり、GHG 削減や製造コスト削減に貢献する。

Topsoe の HydroFlex と H2bridge を組み合わせたプロセスを採用したのは、BBF 以外にも、米国のルイジアナ州にある Grön Fuels, LLC の再生可能ディーゼル製造所があ

り、2020 年 12 月にライセンス契約をしている。

<https://simpleflying.com/bill-gates-energy-saf-same-price-fossil-fuel/>

<https://biofuels-news.com/news/topsoe-to-support-first-saf-production-facility-in-brazil/>

<https://www.csrsinc.com/projects/gr%C3%B6n-fuels-%E2%80%93-renewable-diesel-refinery>

1. 2. 3. Johnson Matthey

Johnson Matthey は、SAF の製造ルートとして、(1)FT 合成 (HyCOgen と FT CANS 触媒)、(2)ATJ でのバイオフォーミングの 2 つの取組を主に説明している。

まずは、HyCOgen 技術であるが、逆水性ガスシフト反応 (RWGS) により、グリーン水素と回収した CO₂ を、FT プロセス用合成ガスに変換する触媒プロセスであり、現在第 1 世代 HyCOgen の導入を進めている。RWGS のスケール化 (商業規模) は反応温度の高さや複雑な装置構成により困難であるが、Johnson Matthey は再生可能電力ベースの合成ガス生産率で従来技術より高いと述べている。

次に、FT CANS 触媒である。これは、BP 社と共同で開発したモジュラー触媒容器で構成されており、物質移動と動力学が改善され、圧力損失が低いリアクターとコバルト触媒の組み合わせである。固定床用 FT 技術であり、触媒ロス (製品への混入) を防ぐことができる。メタンより長鎖である n-パラフィン (合成原油) を選択的に得ることができ、HyCOgen との組合せで、95%以上の CO₂ を合成原油に変換することが可能である。なお、合成原油から得られる SAF の収率は、2 次処理装置により変化するが、70%と試算している。FT CANS 触媒は、Fulcrum BioEnergy のプラントに導入されており、2022 年に稼働して、年間 175,000 トンの都市ごみ原料を処理し、1,100 万ガロンの再生可能な合成原油を生産している。また、HyCOgen と FT CANS 触媒の組み合わせの導入例では、Repsol のビルバオ製油所 (e-Fuel プラント) に導入して 2024 年に稼働すると、年間 2,100 トンの持続可能な合成燃料を生産する予定である。

最後にバイオフォーミングであるが、触媒作用により、トウモロコシやサトウキビなどの再生可能な原料を BioFormate と呼ばれる製品に変換する。BioFormate は合成芳香族ケロシン (SAK) などのバイオ燃料の製造に使用できる。合成パラフィニックケロシン (FT-SPK) や HEFA は、化石燃料への混合を 50 容量%までに制限されているが (芳香族が少なく、燃料規格を満たせなくなるため)、この SAK は多くの芳香族を含むため、HEFA や FT-SPK とのブレンドにより、100%SAF として使用が可能となる見込みであるとしている。2016 年よりウィスコンシン州マディソンに本社を置く、BioForming®技術の商業化に取り組んでいる Virent 社と開発を進め、本技術はライセンス供与できる段

階であるとしている。

1. 3. プラスチックリサイクル油の技術開発動向

1. 3. 1. Neste

廃プラスチックのリサイクルは、世界中のさまざまな企業で行われているが、プラスチック原料となる石油化学にリサイクルする事例がほとんどで、リサイクル油の製造を目指している企業は、まだ少ないと言える。

Plastics Europe は、2018 年に合計 2,900 万トンの廃プラスチックが欧州で処理のために収集されたと指摘している。このうち、940 万トン（32%）のみがリサイクルに向けられ、約 3～400 万トンが実際にリサイクルされた。残りの 40%以上はエネルギー回収に向けられ、25%近くが埋め立てられた。

このような中、フィンランドの Neste は、従来の製油所で原油の処理を停止し、原料を持続可能な代替物に置き換えようとしている。当社のバイオ製油所では、すでにさまざまなバイオベースの原材料から、年間 300 万トンを超える再生可能製品を生産しているが、図 3 に示すように、2030 年までに、年間 100 万トン以上の廃プラスチックを液化することを目指している。

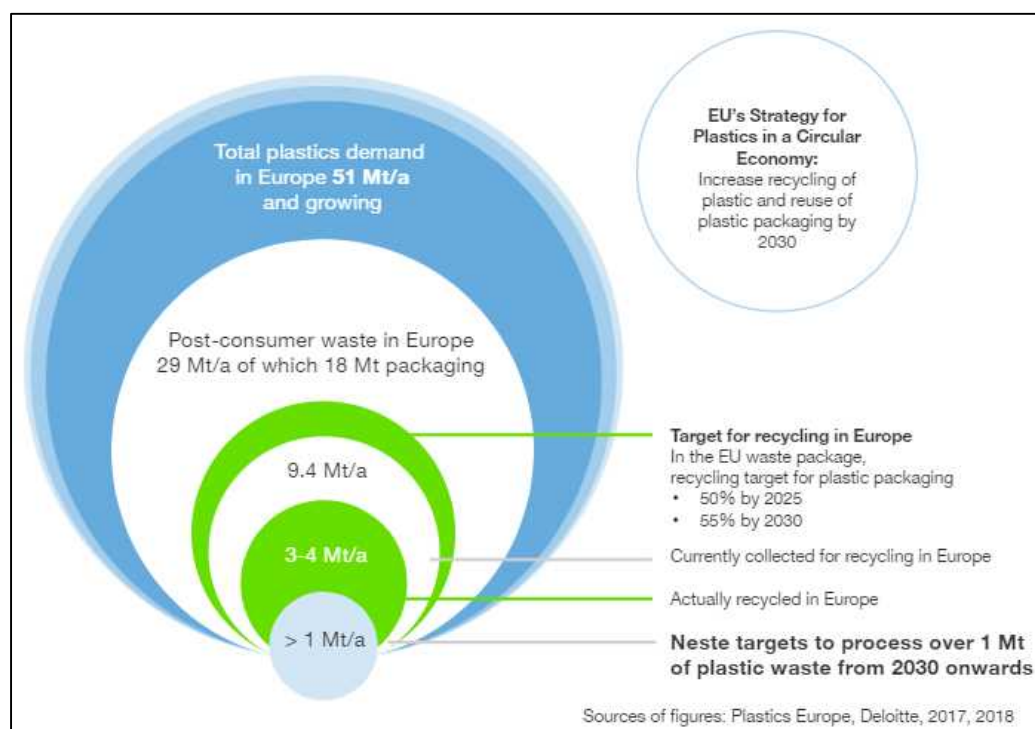
Neste は、2020 年秋にフィンランドの製油所で液化廃プラスチックを使用した最初の商業規模の処理に成功したとホームページで発表している。この Neste の最初の産業規模の試験運転では、400 トンの液化廃プラスチックを処理し、これは 20,000 人の平均的な欧州市民が年間で廃棄する量に相当するとしている。

Neste は、プラスチック廃棄物のリサイクルの中でも、特にケミカルリサイクルの技術と能力を開発するためにいくつかのパートナーシップを確立している。ケミカルリサイクルは、着色された多層多素材のパッケージやフィルムを、プラスチック燃料や新しいプラスチックの原材料に効率的にリサイクルできるため、機械的リサイクルを補完するとしている。

2022 年 6 月 27 日、Neste は、Alterra Energy の液化技術に対する欧州の権利を購入し、ケミカルリサイクルを推進するために、同社との取り組みをさらに強固にしたと発表した。Alterra Energy は、リサイクルが困難なプラスチックを液化するための独自の熱化学ソリューションを開発した米国オハイオ州アクロンを拠点とする企業である。オハイオ州アクロンでは、同社はすでに使用済みプラスチックを灯油、軽油などの中間留分に変換する産業規模の施設を運営しており、さらに軽質留分は石油化学製品の原料にしている。

ネステは Alterra Energy から供与された廃プラスチックを液化する技術を使用して、フィンランドの Porvoo 製油所で廃プラスチックの処理能力を拡大するためのフィージビ

リティスタディを実施している。ケミカルリサイクルを通じて、同社はバージン化石資



出所：Neste ホームページ

図3 Nesteの廃プラスチック処理の目標

源への依存を減らし、ポリマーや化学物質の生産における循環性を加速することを目指している。

図4に米国オハイオ州アクロンにある **Alterra Energy** の廃プラスチック液化ユニットの外観を示す。**Neste** と **Alterra Energy** の間で進行中の共同技術開発と、**Alterra Energy** のアクロン施設での混合プラスチックフィードの継続的な処理により、**Neste** は、**Alterra Energy** 技術が廃プラスチック材料の液化に対する勝利のためのソリューションの1つであると確信していると述べている。

Alterra Energy のCEOであるフレデリックシュムック氏は、「持続可能燃料の世界的リーダーといえる **Neste** が、欧州全体でプラスチックの循環性に向けた取り組みをさらに加速するために、**Alterra Energy** の高度なりサイクル技術を採用したことを嬉しく思う」と述べた。また、「世界の他の地域を通じて、石油化学業界のプレーヤーがブランド所有者と消費者への持続可能性への取り組みを果たすのを引き続きサポートします」とも述べた。

Neste は欧州でこの技術の権利を取得しているが、Alterra Energy はライセンス供与を通じて技術を商業化することを目的として、世界の他の地域で独立して事業を継続している。Neste はパートナーおよび株主として、Alterra Energy の技術の継続的な開発を支援し、世界レベルでのプラスチック廃棄物のケミカルリサイクルにおける主要なソリューションの 1 つとして確立することに尽力していると述べている。



出所：Neste ホームページ

図 4 アクロンにある Alterra Energy の廃プラスチック液化ユニット

<https://www.neste.com/products/all-products/raw-materials/future-raw-materials/waste-plastics#0e75d25d>

<https://www.neste.com/releases-and-news/plastics/neste-successfully-completed-its-first-industrial-scale-processing-run-liquefied-waste-plastic>

<https://www.neste.com/releases-and-news/circular-economy/chemical-recycling-plastic-neste-acquires-european-rights-alterra-energys-thermochemical>

1. 3. 2. bp と Clean Planet Energy

2022 年 5 月 9 日、英国のエネルギー大手である bp と英国と米国に拠点を置くクリーンテクノロジー企業である Clean Planet Energy (CPE) は、難リサイクル性プラスチックの循環型ソリューション推進するための 10 年間の新たな長期契約の締結を発表した。

CPE は現在、リサイクルが困難な廃プラスチックを循環型石油化学原料や超低硫黄ディーゼル (ULSD) に転換するための施設 (エコプラント) の開発を進めている。

現在、CPE はイングランド北東部のティーズサイドに、プラスチックリサイクルの最初の施設を建設中であり、bp は生産開始後に製品を受け取る。当施設では、リサイクル困難なプラスチックをナフサに変換し、循環型プラスチックバリューチェーンの原料として使用するものである。これは、循環性を通じて新しい価値の源を解き放ち、製品と材料をより長く使用し続けるという bp の目的と一致している。

CPE のエコプラントは、従来のリサイクルセンターでは受け入れられず、埋め立てや焼却に回されることが多かったプラスチックの処理を可能にするとしている。ティーズサイドの施設では、年間 20,000 トンの廃プラスチックを処理して、ナフサと ULSD を製造することが期待されている。

CPE の ULSD は、従来の石油系ディーゼルの使用と比較して、GHG 排出量を 75%削減できるとしている。

bp はすでに、地域の産業の脱炭素化を支援するティーズサイドとその周辺で開発されている一連の主要な水素と炭素の回収および貯蔵プロジェクトを主導している。

CPE は、リサイクル困難なプラスチックの廃棄を年間 100 万トン以上削減する目標を掲げている。CPE は現在、世界各地で 12 基のエコプラントを建設中で、そこから毎年 25 万トンの廃棄物を埋立地や自然環境から除去していく。今回の両社の契約によると、CPE は bp 社にティーズサイド以外の工場からも、プラスチックリサイクル製品を提供する予定である。

<https://esgiournaljapan.com/world-news/16206>

<https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-and-clean-planet-energy-reach-agreement-to-help-advance-the-circular-plastics-economy.html>

2. 低炭素燃料の性状と品質

2. 1. 低炭素燃料の製造方法の違いによる品質への影響

JPEC では、米国の調査会社を通じて、Clean Fuels Alliance America のテクニカルディレクターである Scott Fenwick 氏にインタビューをして情報を収集した。同氏は、最近 25 名のメンバーからなる ASTM インターナショナルの取締役会のメンバーに任命され、燃料の品質を監視するための数十年の技術的専門知識を持っている。以前は、石油製品、液体燃料、潤滑油に関する ASTM 国際委員会の委員長を務めていた。また、カナダ一般基準委員会のガソリンおよび中間蒸留物の作業グループのメンバーも務めていた。彼は、国際標準化機構（ISO）の 2 つの石油グループの代表団の米国技術諮問グループの責任者であった。

参考のために、表 4 に軽油とバイオディーゼルの規格の抜粋を示す。

表 4 軽油とバイオディーゼルの規格の抜粋

		米国の軽油規格	バイオディーゼルの規格	
			ASTM	EN
品質項目	単位	ASTM D975	ASTM D6751	EN 14214
引火点	℃	60～80	130以上	101以上
曇り点	℃	-15以下から-5以下	-12以下から-3以下	-
流動点	℃	-35以下から-15以下	-16以下から-15以下	-
目詰まり点	℃	-8以下	5以下	-
セタン価		40以上	47以上	51以上
動粘度（40℃）	mm ² /s	2.0～4.5	1.9～6.0	3.5～5.0
酸価	mg KOH/g			
遊離グリセリン	mass%	-	0.02以下	0.02以下
総グリセリン	mass%	-	0.24以下	0.25以下

Q1.原料の種類（大豆、菜種、パーム油、牛脂、廃食用油など）によるバイオディーゼルの品質の違いは？

Scott Fenwick 氏によると、石油系の軽油とバイオディーゼルのセタン価と低温流動性（曇り点、流動点、目詰まり点）の違いはごく僅かである。現在の違いは、より低い炭素強度（CI）スコアに関する規制要件と定義によるものである。低温流動性は燃料の品質においては問題ではない。原料が異なれば、完成したバイオ燃料は異なる曇り点を持つが、現在、単一ソースの原料を使用している生産施設はほとんどない。バイオディーゼル 100%（B100 の曇り点は、原料に応じて約-3～30℃の範囲になる。また、再生可能ディーゼル（HVO）は、多くのバイオディーゼル（B100）サンプルよりも、曇り点、流動点、目詰まり点で判定される低温流動性が悪い状況であり、現在米国の市場全体で見られる傾向に注意することも重要かも知れない。

Q2. ASTM D975 と ASTM D6751 の起源と違いは？

ASTM D975 は、米国の軽油の規格で、D6751 はバイオディーゼルの規格である。ASTM D6751 には、燃料の混合使用に関しては適用さない、遊離グリセリンおよび総グリセリンの規格があり、その試験方法は ASTM D6584 で規格化されている。

Fenwick 氏によると、バイオディーゼル固有の問題は、燃料の試験方法ではなく、生産時の運転方法の結果である。ASTM D975 と D6751 の両方で、蒸留の 90%留出温度が同じ値で規定されているが、石油系の軽油の蒸留曲線は、50%留出温度を中心に、左右対称的な S 字カーブになる。一方で、バイオディーゼルは、石油系の軽油より高い沸点成分を多く含んでおり、沸点曲線の高沸点側がなだらかになる傾向がある。硫黄含有量などの特性は政府機関によって規制されており、性能に基づくものではない。

D6751 のバイオディーゼルの規格において、遊離グリセリンおよび総グリセリンの規制値とともに、金属含有量などの規制値があることは、石油系の軽油には適用されない、バイオディーゼルの製造に使用される技術に基づいている。例えば、グリセリンは、再生可能ディーゼルを製造するための水素化分解プロセスでは副産物としてはできないが、バイオディーゼル製造時では副産物としてでるため、除去が必要となる。

D6751 の起源は、バイオディーゼルが初めて米国市場に登場した 30 年前に、エンジンメーカーとの話し合いに基づいている。一方、D975 は 100 年近く使用されている。D6751 は過去 20 年間に 25 回改訂され、さまざまな問題が提起された。現在、許容される総金属含有量を合計 4 ppm 以下に変更し、セタン価を 45 に下げるための承認がほぼ完了している（市場における原料の変動性による）。元のセタン価の上限である 47 は恣意的なもので、エンジンの性能によるものではなかった。セタン価の上限を現在のディーゼル仕様の最低値 40 に合わせるという提案があったが、エンジンメーカーは、現在の市場のバイオディーゼルのセタン価が、下限より高い値を維持していることに満足していた。今日の ASTM D975 の軽油のセタン価の下限は、40 まで低くすることができる。しかし、現在のバイオディーゼルのセタン価の下限は 47 であり、ASTM D6751 は、バイオディーゼルのセタン価を 45 に下げることができるよう、まもなく改訂される予定である。

現在の D975 には、軽油の金属に関する規定はない。委員会の参加者は、軽油が金属で汚染される可能性があることを知っているが、汚染は製造プロセスに起因するものではない。ASTM が金属の規格を検討した理由は、自動車の排気ガス浄化触媒への影響のためである。自動車メーカーは金属の規格の追加を求めており、これにより D6751 が変更され、将来的には D975 が変更される可能性がある。バイオディーゼルの製造プロセスは、触媒の使用により金属が製品内に混ざる可能性がある。ASTM が改訂する金属の規格を承認して公開すると、Clean Fuels Alliance America が実施した市場分析により、米国市場の現在のバイオディーゼルの総量の 95%以上が、すでに金属規格の下限を満たしていることが示された。

バイオディーゼル燃料と軽油の間の他の試験方法の多くは同じままである。

Q3. 製造方法の違いによるプラスチック再生油の品質への影響は？

プラスチック、タイヤ、その他のリサイクル製品からの熱分解油の品質は大きく異なる。熱分解は、施設でプラスチックを処理する唯一の方法である。現在、これらの燃料と原料に対する規制や規格はない。実用的な試験方法や、セタン価などのテストの規格について、誰も同意していない。例えば、色を測定する場合、コンセンサスを得たテスト方法や規制値はない。

これらのリサイクル油は、透明なサンプルもあれば、黒いサンプルもある。しかし、ASTM 内の誰も規格制定に同意していない。ASTM は初期の規格の開発に取り組んでいる。熱分解基準が整備されるまでには、おそらく数年かかるであろう。

Q4. B20 よりもバイオディーゼルの混合比率が高くなる可能性（米国の現状と将来予測）

Fenwick 氏によれば、市場では B20 を超える高いブレンド比率が差し迫っている。

一部の小規模フリートでは、すでに Optimus Technologies 社の Vector B100 システムを使用している。Fenwick 氏は、アイオワ州が B30 以上のブレンドに対する新しい税制優遇措置を可決したと述べた。B30 は 2023 年の夏の終わり頃に、アイオワ州で標準化されると予想されている。同氏によれば、他の州もアイオワ州に続くかも知れない。それにもかかわらず、カリフォルニア州は、バイオディーゼルのブレンドを B20 に制限する規制を設定した。バイオディーゼルは手頃な価格であるため、一般的に再生可能ディーゼルと混合され、100%再生可能な低炭素強度ディーゼル代替燃料を実現する可能性もある。

Fenwick 氏は、暖房油や船舶用燃料などの他の用途では、路上輸送用燃料で B20 よりバイオディーゼルの混合が多い燃料が普及する前に、バイオディーゼルをより高いブレンド比率にした燃料を利用する可能性が高いと考えている。これらの市場は、より高いブレンドに移行しないことで失うものの方が多い。暖房油がバイオディーゼルのより高いブレンドに移行しない場合、州議会はそれらを電気ヒートポンプに向けて規制する。船舶燃料については、国際海事機関 (IMO) によって規制されと考えている。IMO は政府機関よりも速いペースで再生可能燃料の普及に前進している。これらの船舶のエンジンメーカーは、すでにより高いバイオディーゼルのブレンドをサポートしている。Fenwick 氏は、国際船舶用燃料仕様 (ISO 8217) の次の改訂版では、B100 までの使用が許可され、2024 年初頭に発行される予定であると考えている。

Fenwick 氏は、メタノールまたはアンモニアが、将来的に一部の船舶でディーゼル燃料に取って代わる可能性があることを認めた。同氏は、燃料としてメタノールまたはアンモニアを使用する場合、貯蔵には 2 倍以上の容積が必要であり、船内の貯蔵タンクの設置場所に影響を与えたり、制限されたりするとも述べた。一方で、バイオディー

ゼルの使用は、エンジンの改造を必要とせず、既存の技術やタンクが使用できる。これは、既存のインフラと技術を使用することができ、この業界で最も低コストの運用となる。その結果、Fenwick 氏は、バイオディーゼルがこの市場で引き続き役割を果たすと考えている。

Fenwick 氏によると、今後 2 年から 5 年で、6 社のエンジンメーカーが、バイオディーゼルのより高いブレンドの承認を発表するとのことである。エンジン専用メーカー（OEM：相手先商標製造会社）は燃料を制御できないため、燃料に対する保証はない。エンジンの保証は、エンジンの部品と仕上がりのみを対象としている。しかし、いくつかの大手エンジンメーカーは、おそらく B100 ほどの高ブレンドを認めると発表すると予測している。そのため、低炭素のニーズを満たすために、すぐに高ブレンドのバイオディーゼルを使用するフリートが見られるであろう。

Q5. 酸素含有燃料であるバイオディーゼルの車両燃料システムへの影響は？

バイオディーゼルは、高度な排ガス低減技術に悪影響を及ぼさず、これらのテクノロジーの法廷耐用年数が短縮されることはない。逆に、バイオディーゼルは、ほぼすべての排出ガス基準の汚染物質を低下または削減する。Clean Fuels Alliance America の調査によると、ディーゼル・パティキュレート・フィルター（DPF）や尿素 SCR システムへの影響は見られない。

バイオディーゼルと腐食との間の相関関係を検証し、高圧コモンレール噴射装置を搭載したエンジンの酸化安定性の下限を正当化するために、より多くの研究が行われてきた。世界中のほぼすべてのバイオディーゼルの規格には、より高い酸化安定限界が規定されている。Fenwick 氏によると、現在の調査に基づくと、米国には酸化安定性試験は 3 時間のテスト手法しかない。しかし、最近の業界調査では、燃料の品質を監視し続ける限り、バイオディーゼルは少なくとも 2～3 年間は保存できることが示されている。OEM は、酸化安定性試験の試験方法を 8 時間に増やすことを望んでいる。ただし、Clean Fuels のすべてのデータは、3 時間のテストで十分であることを示している。この変数は、燃料の品質よりもタンクの清浄度に関するものであるため、貯蔵寿命に関するものではない。

Q6. 再生可能ディーゼルは、石油系の軽油と混合することなく、100%で現在のディーゼル車に使用できるか？ いいえの場合、問題は何か？

Fenwick 氏によれば、シール材料がより新しい技術（過去 25 年以内）である限り、100%再生可能ディーゼルの使用は問題ない。これは、再生可能ディーゼルが芳香族を含まないことで説明できる。天然ゴムなどの古い技術のシール材料を使用する場合は、石油系軽油を低レベルでブレンドする必要がある。燃料中の芳香族化合物は、古いシール材料を膨張させて、シールを形成する化合物である。古い燃料システムに芳香剤が含

まれていない場合、O リングまたはガスケットが膨張しないと、燃料漏れが発生する可能性がある。

Q7. バイオディーゼルと再生可能ディーゼルの使用拡大における課題は？

Fenwick 氏によれば、原料の収集がバイオディーゼルと再生可能ディーゼルの使用拡大における最大の課題であり、今後もそうあり続けるであろうと予測している。より多くの原料が利用可能であれば、業界はより多くのプラントを建設するために必要な資金を確保するであろう。

SAF の需要の高まりに対応するために、今後数年間で、新しい大豆粉砕プラントが稼働し、大豆油原料が 35%増加すると予想されている。この中には、World Energy、GEVO、その他の主要なエネルギーリーダーによる、新たな計画を発表も含まれている。

Fenwick 氏は、業界においてカバークレス（CoverCress 社が遺伝子組換えで開発した、ウモロコシや大豆との輪作に適合した穀物）とカメリナ（アブラナ科アマナズナ属の一年草）の進歩を、原料として期待できると信じている。米国農務省（USDA）は、被覆作物をサポートする気候に配慮した実践に、数十億ドルの投資を行っている。このサポートが今後 5 年以上にわたって有意義な影響を及ぼし、より多くの原料を市場に送り出すことを期待している。

2. 2. 気候の地域差、石油系軽油の性状の違いによる低炭素燃料と石油系燃料の混合割合

2. 2. 1. インドネシア

インドネシアでは、2020 年 1 月から軽油にバイオディーゼルを 30%混合した「B30」の使用義務化が世界に先駆けて実施された。

2022 年 6 月 28 日、インドネシアは、40%のパーム油を含む 2 種類のバイオディーゼルの試験を開始した。同試験は、当初は 2022 年 2 月から実施する予定であったが、パーム油の価格高騰などを理由に延期していた。2022 年 11 月までの 5 カ月にわたってテストされる燃料は 2 種類ある。1 つは、B40 と呼ばれる脂肪酸メチルエステル（FAME）40%と軽油 60%の混合物である。もう 1 つは、B30D10 と呼ばれる、FAME30%と精製、漂白、脱臭されたパーム油（refined, bleached and deodorised palm oil ; RBDPO）10%を、軽油 60%と混合したものである。FAME はパーム油由来のものもあるが、インドネシアではヒマシ油（*Ricinus communis*）、ジェトロファ（*Jatropha curcas*）、フィリピン桐（*Reutealis trisperma*）、ククイの実（*Aleurites moluccanus*）、テリハボク種子油（*Calophyllum inophyllum*）なども原料として利用されている。

バイオディーゼルの FAME 濃度を上げる課題は、FAME がエンジンに使用されているシール材料やガスケット材料を膨潤することや、低温でワックスを形成する性質があることである。その対策として、自動車部品の材料変更や特別な取り扱いと貯蔵設備が必要

である。

表 5 にインドネシアのバイオ燃料（100%）規格と日本の軽油規格の比較を示す。インドネシアのバイオ燃料（100%）規格では、流動点が 18℃以下であり、一年を通じて暑い地域であることから、日本の軽油規格の流動点と比較して非常に高い。つまり、ワックスを形成することは、インドネシアでは問題とならない可能性が高い。したがって、エンジンのシール材料やガスケット材料を膨潤する影響を、4 万～5 万 km 走行で確認するものと思われる。

表 5 インドネシアのバイオ燃料（100%）規格と日本の軽油規格の比較

試験項目		単位	インドネシア	日本				
				特1号	1号	2号	3号	特3号
引火点		℃	55以上	50以上	50以上	50以上	45以上	45以上
蒸留性状	90%留出温度	℃	360以下	360以下	360以下	350以下	330以下	330以下
	95%留出温度							
流動点		℃	18以下	5以下	-2.5以下	-7.5以下	-20以下	-30以下
残留炭素分		質量%	0.2以下	0.1以下	0.1以下	0.1以下	0.1以下	0.1以下
セタン指数		-	70以上	50以上	50以上	45以上	45以上	45以上
動粘度	@30℃	mm ² /s	2.0以上、4.5以下	2.7以上	2.7以上	2.5以上	2.0以上	1.7以上
	@40℃	mm ² /s						
硫黄分		ppm	10以下または50以下	10以下	10以下	10以下	10以下	10以下

出所：インドネシアのエネルギー・鉱物資源省のデータで JPEC 作成

2022 年 12 月 16 日、インドネシア政府は、2023 年 1 月 1 日からバイオディーゼル混合を 35%に増やした B35 を導入すると発表した。これは、世界的なエネルギー価格が高騰する中、燃料の輸入を削減し、よりクリーンなエネルギーに移行することを目的としている。

2. 2. 2. マレーシア

マレーシアでは、バイオディーゼルは国家バイオ燃料政策 2006 として最初に導入された。環境にやさしく持続可能なエネルギー源を利用して化石燃料への依存を減らし、パーム油産業を安定させることを目的としていた。2007 年、マレーシア議会はバイオ燃料産業法を可決した。この法律には、国家バイオ燃料政策の条項が含まれており、バイオディーゼルブレンド命令を実施している。プランテーション産業商品省（MPIC）の下部組織であるマレーシアパーム油委員会（MPOB）が、マレーシアでパームバイオディーゼルプログラムを実施することを委託された。この政策の具体的な目的は、B5、B7、B20 の 3 つの異なる段階で、輸送部門と産業部門でバイオディーゼルの使用を増やすことであっ

た。表 6 にマレーシアのバイオディーゼルの導入計画と実際の導入時期を示す。

当初の計画では 2008 年までに B5 を実施する予定であったが、東マレーシアでは B5 が 2014 年まで達成されなかった。その後、Crude Palm Oil (CPO) の在庫の増加と CPO の価格の低下により、マレーシア政府は、マレーシアの一部の州で 2015 年 1 月 1 日から運輸部門のバイオディーゼルの混合義務を、B5 から B7 に引き上げることを決定した。その後、2016 年に B7 目標の完全な実施が全国的に達成された。

運輸部門でのバイオディーゼルの国内消費をさらに促進するために、マレーシア政府は 2015 年に第 11 次マレーシア計画 (2016-2020) と呼ばれる 5 か年戦略を発表し、2020 年までにブレンド比率を段階的に 20% (B20) まで引き上げた。ただし、B7 を超えるブレンド比率に対応するためには、車両を改造するためにコストがかかると、輸送業界からの反対があったため、この計画の進捗は遅れている。

第 11 次マレーシア計画 (2016-2020) では、2020 年には B20 への移行を予定していたが、MPIC は B20 の導入日を州ごとに段階的に 2021 年半ばに修正した。

2020 年初めに新型コロナウイルス (COVID-19) のパンデミックが始まったことで、マレーシア政府が導入したロックダウン戦略により、燃料の需要が急落した。同時に、バイオディーゼルの 80% が EU に輸出されていたが、欧州連合 (EU) がパーム油誘導体から製造されたバイオディーゼルの使用を減らすことを目的とした新規制も影響を与えた。

2021 年 7 月、COVID-19 やその他の要因により、MPIC は再び B20 指令の全国的な実施を 2022 年末まで延期した。

表 6 マレーシアのバイオディーゼルの導入計画と実際の導入時期

ブレンド比率	輸送部門 *	
	政府の導入計画	実際の導入 **
B5	2008年	2014年 (全国展開)
B7	2015年1月1日	2016年 (全国展開)
B10	2019年の早い時期	2019年2月1日
B20	2020年	ペンディング (2022 年末を予定)
* 乗用車、トラック、バン、ピックアップトラック、漁船		
** すべてのガソリンスタンドでバイオディーゼルブレンドが利用できる		

出所：米国農務省 (USDA) の公開データより JPEC で作成

<https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/5.0113176>

2. 2. 3. ブラジル

ブラジルの軽油へのバイオディーゼルの混合義務を表 7 に示す。2008 年 1 月、ブラジルは自動車用軽油に対して、バイオディーゼル (FAME) を 2 % 混合することを義務付けた。その後、2008 年 7 月からは 3 %、2009 年 7 月からは 4 %、2010 年 1 月からは 5 % に混合割合を引き上げられ、2018 年 3 月以降、バイオディーゼルの混合義務は 10% に設定された。2017 年 11 月の国家エネルギー政策審議会 (National Energy Policy Council) Resolution #23 では、2019 年 6 月にバイオディーゼルの混合義務は 11% に引き上げ、その後毎年 1% ずつ段階的に引き上げて、2023 年 3 月までに 15% (B15) とするよう勧告されていた。しかし、2020 年 3 月に混合義務は 12% に引き上げられたが、COVID-19 の影響によりバイオディーゼルが不足したことから、2020 年 6 月から混合義務は 12% から 10% へと限定的に引き下げられていた。

ブラジル政府のエネルギー政策諮問委員会 (CNPE) は、軽油に対するバイオディーゼルの混合義務を、2023 年 3 月 31 日まで 10% に維持することを決定したと、鉱山エネルギー省 (Ministério de Minas e Energia : MME) が 2022 年 11 月 21 日に明らかにした。同省によると、2023 年 4 月以降は、これを 15% に引き上げるとした上で、1 月に発足する次期政権がこの決定を変更する可能性があるとの含みを残した。同国のバイオディーゼルは、大半が圧搾加工過程で生じる大豆油から生産されている。

表 7 ブラジルの軽油へのバイオディーゼルの混合義務

規制年月	混合義務
2008年1月	B2
2008年7月	B3
2009年7月	B4
2010年7月	B5
2014年8月	B6
2014年11月	B7
2017年3月	B8
2018年3月	B10
2019年9月	B11
2020年3月	B12
2020年9月	B10
2020年11月	B11
2021年1月	B12
2021年3月	B13
2021年5月	B10
2021年9月	B12
2021年11月	B10
2022年1月	B10
2023年1月	B10

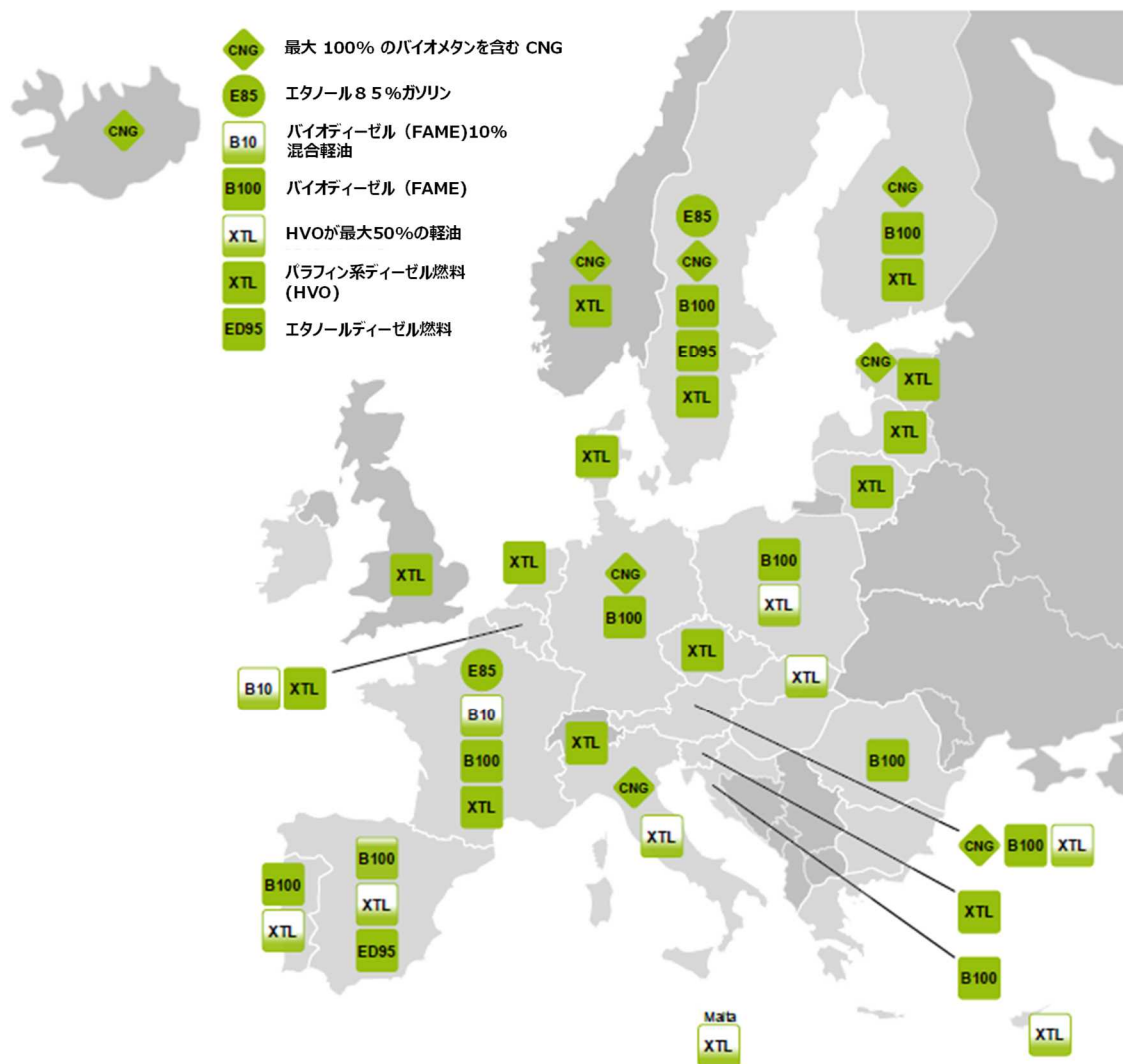
2. 2. 4. 欧州

欧州では、ドイツ、英国、オランダ、スウェーデンなどの国々は、ディーゼルエンジンの燃料源として、バイオディーゼル混合を奨励している。図 5 に欧州のバイオ燃料の普及状況を示す。この図より、さまざまなバイオ燃料が欧州で発売されていることがわかる。ここで、バイオディーゼル (FAME) 100%は B100、再生可能ディーゼル (HVO) 100%は XTL と表記してある。一般的に、バイオディーゼルや再生可能ディーゼルは、低温流動性が悪く、冬場にワックスを形成して燃料フィルターの目詰まりを起こしやすいといわれていたが、スウェーデンやフィンランドのような寒冷地でも、B100 や XTL が販売されているのは驚きである。

フランスでは、バイオ燃料に対して、輸送用燃料に課される汚染事業統合税 (TGAP) とエネルギー製品の国内消費税 (TICPE) の免税措置を実施することにより、バイオ燃料の導入量を拡大してきた。TGAP は現在も継続しているが、TICPE は 2015 年に終了している。

TGAP は 2005 年の金融法第 32 条により、ガソリンとディーゼル燃料に対する汚染事業統合税 (GENERAL TAX ON POLLUTING ACTIVITIES :TGAP) として導入され、ガソリン、ディーゼル燃料の売上高に対して課税されることとなった。

TGAP はバイオ燃料の導入目標を達成した事業者に対して免税措置が講じられており、事実上の導入義務付け (未達成の場合にペナルティ) となっている。例えば 2019 年にディーゼル燃料の販売量に占めるバイオディーゼルの割合が 7.9%を超えた場合、TGAP は免税されるが、目標未達の場合は、未達分に応じて課税される。



出所：DBFZ ホームページ

図 5 欧州のバイオ燃料の普及状況

<https://www.dbfz.de/footer/meta/warenkorb/>

3. 低炭素燃料の製品化の動向等

3. 1. 欧米で販売されている 100%低炭素燃料の使用適合車に関する動向

JPEC の欧州長期出張員事務所があるベルギーのブリュッセルでは、HVO が 100%であるディーゼル燃料が販売されている。図 6 にブリュッセルのガソリンスタンドの HVO100 の案内を、図 7 にブリュッセルのガソリンスタンドの HVO100 の計量機を、それぞれ示す。2021 年 11 月、JPEC の欧州長期出張員が Neste のガソリンスタンドで、自家用のディーゼル車に HVO100 を給油しようとしたところ、店員に給油口に“XTL”の表示があるディーゼル車のみ給油を進めており、HVO100 は高価でもあるのでやめた方が良くと指摘された。この給油口に“XTL”の表示があるディーゼル車とは何かを調べてみた。

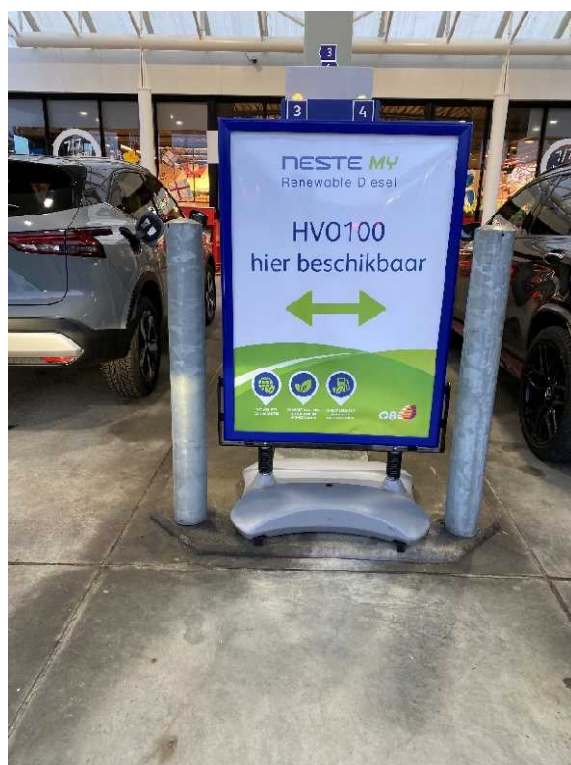
トヨタは、2022 年 7 月 20 日、西欧でのディーゼル車のラインアップを HVO100 ディーゼル燃料に対応すると発表した。具体的には、ランドクルーザーとハイラックスを HVO100 ディーゼルに適合すると記述されている。HVO100 ディーゼルは、2023 年の第 1 四半期から製造されたハイラックスおよびランドクルーザーのディーゼルモデルで利用できるようなっている。

すでに、小型商用車の Proace は、HVO100 ディーゼル対応となっているようである。

HVO100（水素化植物油）は、パラフィン系ディーゼルの規格である EN 15940 品質基準を満たしている。石油系の軽油よりもセタン価が高く（セタン価 80 位）、硫黄と芳香族の含有量が低い。植物油（パーム油、菜種油）または廃棄物ベースの原料（UCO など）から製造されている。

前章でも述べたが、HVO100 ディーゼルが給油可能なガソリンスタンドは、欧州で一般的になりつつあり、ベルギー、デンマーク、フィンランド、エストニア、ラトビア、リトアニア、オランダ、ノルウェー、スウェーデンで、すでに約 1,000 カ所になっている。より多くの顧客が HVO100 に切り替えると同時に、生産量は増加しており、現在の年間生産量は約 400 万トンから 2030 年までに 1,550 万トンに達するという野心的目標がある。

トヨタによると、HVO100 ディーゼルを使用する際に、特別なアクションや運転スタイルの変更は不要である。HVO100 対応車が現行のディーゼル車から技術的な変更をした主な点は、HVO100 ディーゼルは、石油系の軽油より燃料密度が低いため、燃料噴射量を増やすために燃料噴射システムを調整しているようである。この変更は、石油系軽油で走行しても、車両の能力に影響を与えないため、どちらの燃料も日常的に使用できるとしている。HVO100 の使用と噴射システムの調整の結果、最大エンジン出力がわずかに増加するとも記載されている。



出所：JPEC で撮影

図 6 ブリュッセルのガソリンスタンドの HVO100 の案内（2021 年 11 月）



出所：JPEC で撮影

図 7 ブリュッセルのガソリンスタンドの HVO100 の計量機（2021 年 11 月）

<https://newsroom.toyota.eu/toyotas-diesel-line-up-in-western-europe-to-be-made-compatible-with-hvo100-diesel-fuel/>

米国では、Optimus がディーゼルエンジンで 100%のバイオディーゼルで動作することを可能にする高度な燃料システム技術である Vector System を製造している。市販されている中型および大型トラック用で、唯一の EPA 準拠のバイオディーゼルエンジンシステムである。Vector System は、わずか 12 時間で取り付けられるボルトオンテクノロジーである。劇的な炭素削減に加えて、バイオディーゼルを使用すると、PM が最大 50%、未燃炭化水素（HC）が約 70%削減され、その他のさまざまな有毒な排気物質も削減できる。

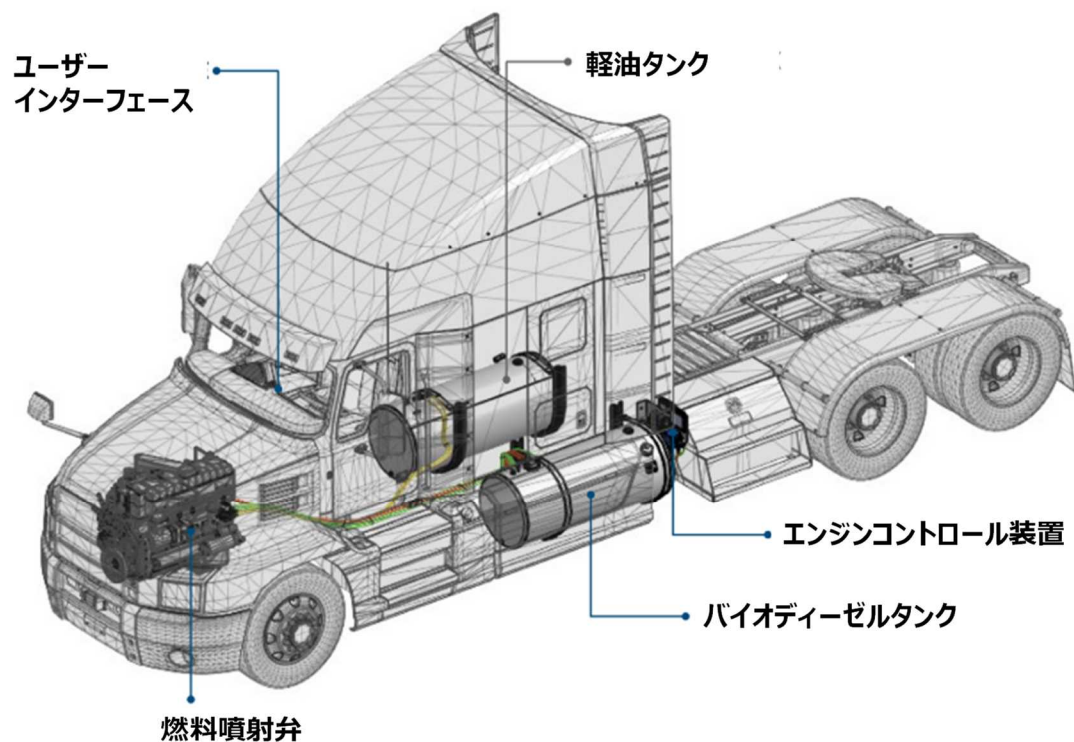
Optimus Technologies の CEO である Colin Huwyler 氏は、再生可能燃料業界のベテランである。Optimus の CEO になる前は、再生可能燃料会社である Fossil Free Fuel の創設者兼 CEO であった。彼はいくつかの Optimus の特許の共同発明者であり、ピッツバーグ大学で機械工学の博士号を取得している。

Huwyler 氏は次のように述べている。企業や地方自治体によって設定される規制や排出基準がますます増えていが、低炭素排出基準の実施には課題がある。当社の技術は、企業や地方自治体が低炭素排出に移行するのに役立つ二重燃料システムを採用している。図 8 に Optimus の Vector System を示す。Vector System は軽油との二元燃料システムで、運転条件によりバイオディーゼルの使用を自動的に最適化しながら走行できる。それは完全に自動化された複数のエンジン/車両の技術であり、ドライバーは燃料が切り替わることに気付かず、運転の際に予備知識も不要である。代替燃料のフリートテストは、実施者が GHG 排出量の削減と、通常運行機能の継続という両方の課題を解決することを確認するために実施される。その際に、ドライバーに対して、追加の負担が発生しないことが、代替燃料への移行を容易にするために重要である。

Optimus Technologies のホームページによると、現在 70 台のトラックに Vector System が搭載されている。ワシントン D.C.の DC 公共事業局（DPW）では、ごみ収集車 6 台に Vector System を導入し、問題なく運航している。さらに、87 台の新しいごみ収集車に Vector System を取り付ける予定と公表している。

ウィスコンシン州マディソン市でも、B20 を超えるバイオディーゼルのブレンドに興味を持ち調査していたところ、ウィスコンシン大豆委員会が資金を提供することに同意し、Vector System を紹介された。同市では、15 台の大型車両を B100 対応にアップグレードするとしている。

アイオワ州エイムズ市でも、2020 年以来、12 台の市の多目的トラックに Vector System を導入して、B100 を使用している。同市では、2022 年にシェブロンに買収された Renewable Energy Group（REG）を通じて Optimus Technologies が紹介された。



出所：Optimus Technologies 社のホームページを基に JPEC で作成

図 8 Optimus の Vector System

アイオワ州は農業地帯であり、エイムズ市は、より持続可能な組織になり、コミュニティ内で再生可能エネルギーを促進することに取り組んでいるとしている。そのために、事業の運営方法、購入する機器、提供するサービスおよび組織の意思決定を導くポリシーにおいて、環境に配慮した選択を行うことに取り組んでおり、Optimus Technologies はまさにそれに当てはまるとしている。

北米最大のバイオディーゼル生産者である REG（現シェブロン REG）は、2010 年以来、Optimus Technologies と協力している。REG は、当時はフリート車両を所有していなかったが、2019 年 4 月に最初の 2 台の車両を B100 対応にアップグレードし、それ以来フリート全体をアップグレードした。B100 テクノロジーに切り替えることで、REG 自身が生産する製品に自信を持って顧客に提供することができたとしている。そのため、顧客に Optimus の Vector System を薦めているという。

3. 2. バイオディーゼルや再生可能ディーゼルの生産量予測に関する情報の収集と整理
3. 2. 1. 米国でのバイオディーゼルや再生可能ディーゼルの生産量予測

EIA は 2022 年 3 月に発表した年間エネルギー見通し 2022 (AEO 2022) において、2022 年のリファレンスケースでは、バイデン政権の法律と規制を反映しており、近い将来、再生可能ディーゼルの供給（国内生産と純輸入）がバイオディーゼルの供給を上回ると予測した。再生可能ディーゼルの供給量は、2022 年には 130,000 バレル/日、2050 年には 145,000 バレル/日に増加すると予測している。図 9 に米国のバイオディーゼルと再生可能ディーゼルの生産量と輸入量の予測、図 10 に米国のディーゼル燃料の予測（リファレンスケース）をそれぞれ示す。

バイオマスペースのディーゼル燃料には、バイオディーゼルと再生可能ディーゼルが含まれ、どちらも同じ種類の脂肪、植物油、グリース原料などから精製される。再生可能ディーゼルは、化学的に石油系軽油と区別がつかない（ドロップインディーゼル燃料として知られている）ため、既存のインフラやディーゼルエンジンで使用するための仕様を満たしており、混合割合の制限を受けない。一方、バイオディーゼルは、アルキルエステルとして知られる含酸素化合物の混合物であり、B5 や B20 として知られるように、5%から 20%のブレンドで石油系軽油と混合する割合が国や地域により制限されている。

既存の配送インフラやエンジンとの互換性、再生可能燃料生産に対する州および連邦政府の目標の引き上げ、税額控除によるインセンティブ、および既存の製油所の再生可能ディーゼル製造所への転換により、再生可能ディーゼル供給の生産量が増加すると予測している。

再生可能ディーゼルの増加に貢献する目標とインセンティブには、再生可能燃料基準 (RFS)、カリフォルニア州の低炭素燃料基準 (LCFS)、米国のバイオマスペースのディーゼルブレンダークレジットが含まれる。必要な量のバイオディーゼルまたは再生可能ディーゼルが石油系軽油と混合され、販売または取引またはビジネスで使用される。これらの政策措置による再生可能ディーゼルの経済性の改善に対応して、米国内の生産能力は、新規に建設されたバイオ燃料工場とバイオ燃料製造設備に変換された製油所の両方の形で増加した。

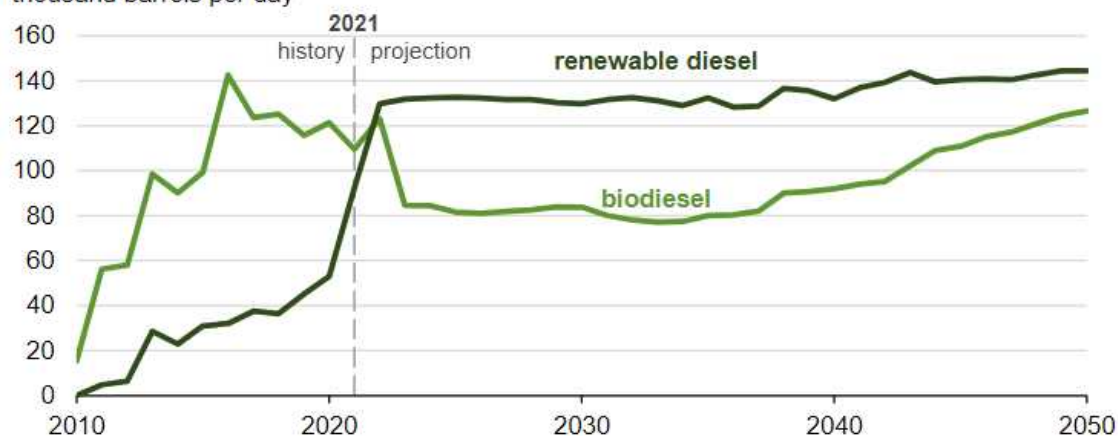
AEO 2022 のリファレンスケースでは、市場の需要ではなく政策がバイオマスペースのディーゼル燃料の採用を促進すると想定している。再生可能ディーゼルとバイオディーゼルは同じ原料をめぐって競合するため、予測される再生可能ディーゼル生産の増加の一部は、バイオディーゼル生産に取って代わることになる。これら 2 つの燃料は、2050 年の米国のディーゼル生産の 8%未満を占め、より大きなディーゼル市場の比較的小さな部分にとどまると予測している。

再生可能ディーゼルには混合制限はないが、バイオディーゼルよりも生産コストが比較的高くなる。

Biomass-based diesel supply: domestic production and net imports (2010–2050)

AEO2022 Reference case

thousand barrels per day

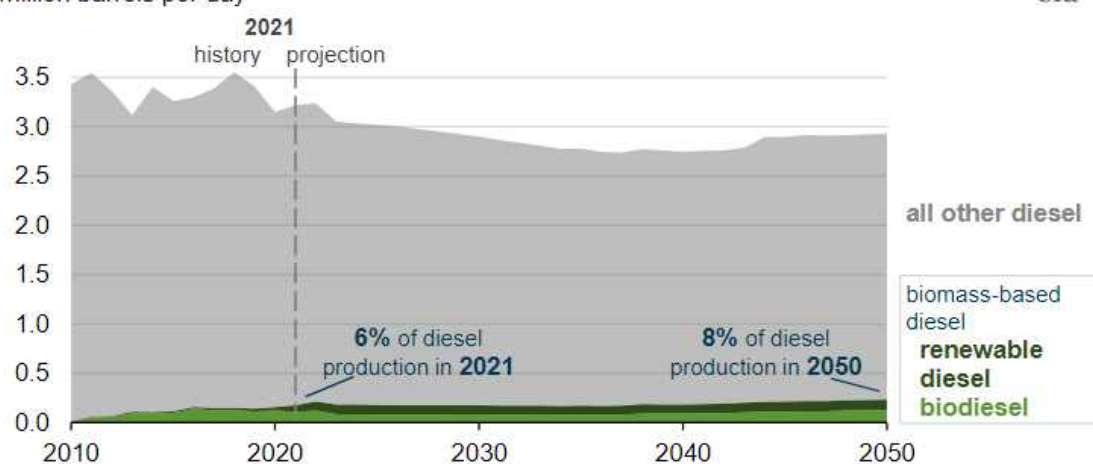


出所：EIA AEO 2022

図 9 米国のバイオディーゼルと再生可能ディーゼルの生産量と輸入量の予測

Diesel production, AEO2022 Reference case (2010–2050)

million barrels per day



出所：EIA AEO 2022

図 10 米国のディーゼル燃料の予測（リファレンスケース）

<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=51778#>

3. 2. 2. 米国でのバイオディーゼルや再生可能ディーゼルの生産状況

(1) World Energy

World Energy は、1998 年に設立された再生可能燃料メーカーであり、バイオディー

ゼル、グリセリン、脂肪酸、再生可能ディーゼル、および SAF を生産している。World Energy は、北米で初めて商用規模の SAF を生産した企業である。

World Energy は、Delek U.S. Holdings が所有していた、カリフォルニア州パラマウントにある AltAir Paramount バイオリファイナリーを 2018 年に 7,200 万ドルで購入した。この施設は、2016 年に SAF の生産を開始し、現在 3,500 万ガロン/年 (2,300 b/d) の SAF を生産しており、そのほとんどすべてがロサンゼルス国際空港でユナイテッド航空に供給されている。

World Energy は買収時に、3 億 3,000 万ガロン/年 (21,525 b/d) の再生可能燃料を生産するために、製油所を完全に転換するための 3 億 5,000 万ドルの投資を発表した。当時、World Energy は、転換プロジェクトは 2023 年に完全に完了すると述べていた。

2021 年 9 月 9 日、World Energy は、水素化処理により脂肪、植物油、グリースを原料として、2024 年までに SAF の生産量を 1 億 5,000 万ガロン/年 (9,800 b/d) に増やす計画を発表した。World Energy は、バイデン政権が壮大な持続可能な航空燃料チャレンジを発表したときに、この発表を行った。

World Energy は、この拡張プロジェクトに対してカリフォルニア州から 1,100 万ドルの税額控除を受けており、州の低炭素燃料基準税額控除と 1 ガロンあたり 1 ドルのバイオディーゼル税額控除の恩恵も受けることになっている。

(2) Gevo

Gevo は、South Hampton Resources Inc.と協力して、テキサス州の Silsbee でバイオリファイナリーの実証運転を行っている。Gevo はこの施設で、ATJ-SPK 技術を使用して、イソブタノールから SAF とイソオクタンを主に製造している。現時点では、Silsbee 施設は最大 80,000 ガロン/年 (約 5 b/d) と、比較的小規模な SAF の生産を行っている。

現在、Gevo はデルタ航空、Trafigura、Haltermann Carless、Air Total、および スカンジナビア航空と、SAF とガソリン用の再生可能なイソオクタンの両方で約 2 億 5,000 万ガロン/年 (16,300 b/d) のオフテイク契約を結んでいる。2020 年 8 月の時点で、Gevo は当時のオフテイク契約から 15 億ドル以上の長期収益を報告している。

2021 年 9 月 9 日、Gevo とシェブロンは、非食用トウモロコシから SAF および自動車ガソリン用の再生可能なイソオクタンを製造するための、1 つまたは複数の新しい施設を建設および運営する意向書を発表した。契約に基づき、Gevo は独自の技術により SAF とイソオクタンを製造し、シェブロンは顧客のために 1 億 5,000 万ガロン/年 (9,800 b/d) の製品を引き取る権利を有している。

2021 年 9 月 13 日、Gevo はバイデン政権の持続可能な航空燃料グランドチャレンジへの参加を発表した。グランドチャレンジは、米国エネルギー省 (DOE)、運輸省 (DOT)、農務省 (USDA)、およびその他の連邦政府機関の支援を受けて、SAF を生産するための新技術を開発している。

2021年10月、GevoはAxens North America Inc.と戦略的提携契約を結び、エタノールからSAFを製造するプロジェクトの展開を検討することにした。GevoとAxensは、SAF生産用に既存のエタノールプラントを転換する可能性を評価する予定である。

2022年2月初旬以来、Gevoは米国の主要航空会社との契約を含め、バイオリファイナリーで大きな進歩を遂げてきた。2022年3月21日、GevoはOne World Allianceの航空会社14社と、2027年から毎年2億ガロンのSAFを供給するという契約を締結した。

2022年3月22日、Gevoは年間7,500万ガロンのSAFをデルタ航空に供給する契約を発表した。2026年半ばに開始される予定で、契約は7年間続くとしている。

2022年6月7日、Gevoは年間530万ガロンのSAFを日本航空に供給する契約を発表した。2027年から5年間の契約であり、日本航空はOne World Allianceのメンバーであることから、上記の年間2億ガロンの契約の一部と考えられる。

2022年7月22日、Gevoは年間1億ガロンのSAFをアメリカン航空に供給する契約を発表した。この契約は、アメリカン航空にとって最大のSAF購入契約であり、2026年からSAFを受け取り始める予定である。アメリカン航空もOne World Allianceのメンバーであることから、上記のGevoとOne World Allianceとの年間2億ガロンの契約の一部と考えられ、半数がアメリカン航空に供給されることになる。

2022年8月3日、Gevoはアラスカ航空と5年間SAFを供給する契約を締結した。2026年に開始される予定のこの契約は、年間3,700万ガロンのSAFをアラスカ航空に供給する。アラスカ航空もOne World Allianceのメンバーであることから、上記のGevoとOne World Allianceとの年間2億ガロンの契約の一部と考えられる。

2022年10月、Gevoは、現在のSAF契約の予想年間売上高が約23億ドルになると発表した。また、航空会社の需要を満たすために、今後4年間でさらに多くの工場を建設する予定であると述べている。

(3) CVR Energy

2020年12月、CVR Energy（以下、CVR）は、同社のオクラホマ州ワインウッド製油所を改造して、年間1億ガロン（6,500 b/d）の再生可能ディーゼルと年間600万ガロン（390 b/d）の再生可能ナフサを生産する計画を取締役会が承認したと発表した。

CVRはコストが約1億1,000万ドルになると予想しており、2022年末までに、そのすべてを再生可能識別番号（RIN）の取得と販売、およびカリフォルニアの低炭素燃料基準クレジットを通じて回収する必要があるとしていた。

2021年5月11日、CVRの理事会は、ワインウッド製油所での再生可能ディーゼルプロジェクトのフェーズ2に、最大1,000万ドルの支出を承認した。これには、炭素強度と原料コストを削減する前処理プラントの追加が含まれている。

この支出は、カンザス州コフィービル製油所にある既存の水素化処理装置を改造して

再生可能ディーゼルを生産するフェーズ 3 の設計費用もカバーしている。

2021 年 8 月 3 日、CVR は再生可能原料の価格が高いため、ワインウッドでの転換プロジェクトの完了を遅らせることを発表した。再生可能燃料製造のための新規プロセスの建設は計画どおりに進み、会社は製油所転換を完了する準備ができていた。しかし、現時点で転換を完了するのは、経済的に意味がないと、CVR の CEO である Dave Lamp 氏は述べた。大豆油の価格は、2020 年の 1 ポンドあたり 31.32 セントと比較して、2021 年の第 3 四半期には、1 ポンドあたり平均で 65.44 セントと高騰したためである。

ワインウッド製油所の施設での運転遅延に関わらず、CVR のフェーズ 3 プロジェクトのプロセス設計作業はまだ進行中であり、完成すればコフィービル製油所で再生可能ディーゼルの生産能力が発生することになる。

2023 年 2 月 22 日に開催された、CVR の 2022 年第 4 四半期の収支報告で、ワインウッド製油所を再生可能ディーゼル製造施設に転換し、2022 年 10 月にフル稼働で生産を開始したと発表した。CVR は、2023 年の第 3 四半期に完成予定のワインウッド製油所での原料前処理装置の開発を引き続き進めている。その前処理装置により、施設はより幅広い再生可能原料を処理できるようになる。

CVR はまた、同社の再生可能エネルギー事業を分離するための内部再編を検討していることも発表し、今後数年間で再生可能エネルギー事業を拡大する予定であると述べた。

<https://biodieselmagazine.com/articles/2518563/cvr-energy-restructures-its-renewables-business>

(4) ダイヤモンド・グリーン・ディーゼル (DGD)

2019 年 9 月 9 日、ダイヤモンド・グリーン・ディーゼル (以下、DGD) は、テキサス州ポートアーサーに新しい再生可能燃料製造施設を検討していると発表した。

提案された製造施設は、年間 4 億ガロン (26,100 b/d) の再生可能ディーゼルと、年間 4,000 万ガロン (2,600 b/d) の再生可能ナフサが生産できるように設計されている。

ポートアーサーの製造施設が完成すれば、DGD の再生可能ディーゼル生産量は年間約 11 億ガロン (71,755 b/d) に増加し、再生可能ナフサの生産量は年間 1 億ガロン (6,525 b/d) に達する。

2020 年 10 月、DGD は、テキサス環境品質委員会 (Texas Commission on Environmental Quality) がポートアーサー製造施設の建設を進めるために必要な大気許可 (air permits) を発行したことを発表し、同社はフェーズ 3 のエンジニアリング計画とコスト見積もりを行っていた。

2021 年 1 月 28 日、Darling Ingredients と Valero は、DGD がそれぞれの取締役会から再生可能燃料製造施設の建設を進める承認を得たことを発表した。新しい製造施設の

費用は14億5,000万ドルと予想され、資金はジョイントベンチャーパートナーのDarlingとValeroの間で均等に分割され、内部のDGDのキャッシュフローから資金が調達される。この施設は2023年後半に完成する予定である。

2021年5月14日、Howard Energy PartnersはDGDと長期契約を結び、タンク貯蔵、パイプライン、線路、積み下ろし施設、深海ドックの建設を通じて物流ソリューションを提供した。2021年10月21日、Valero Energyは、2021年第3四半期の結果を発表し、ポートアーサーの製造施設建設は順調に進んでおり、2023年前半に操業を開始する予定であると発表した。EIAによると、この再生可能ディーゼル装置は2023年2月現在稼働中である。

(5) HollyFrontier

2019年、HollyFrontierは、ニューメキシコ州アルテシアの製油所に再生可能ディーゼルの前処理装置(PTU)を建設する計画を発表した。PTUはAlpha Laval社によって供給され、1億7,500万から2億2,500万ドルの費用であると推測されている。PTUにより、この製油所は2022年から、年間約1億2,000万ガロン(8,000 b/d)の再生可能ディーゼルをオンサイトで生産できるようになる。EIAによると、この再生可能ディーゼル製造装置は2023年2月現在稼働中である。

HollyFrontierは、2020年5月29日に、ワイオミング州シャイアンにある52,000 b/dの製油所を、年間9,000万ガロン(6,000 b/d)の再生可能ディーゼル製造施設に転換したと発表した。HollyFrontierは、シャイアンの装置でのすべての石油精製を停止し、2022年から動物性脂肪、コーン油、大豆油から再生可能ディーゼを生産する予定であった。

EIAによると、この再生可能ディーゼルの製造装置は2023年2月現在稼働中である。

アルテシア製油所は、シャイアン製油所へPTUで前処理した原料を提供する。プロジェクトの費用は1億2,500万ドルから1億7,500万ドルと予想されている。これは、2019年から2022年の間に6億5,000万ドルから7億5,000万ドルを費やすという同社のより大きな計画の一部であり、再生可能燃料を将来の事業の大きな部分を占めるようにする。HollyFrontierは、このプロジェクトが20~30%の内部収益率を生み出すと予想している。

シャイアン製油所からの生産と合わせて、HollyFrontierは年間2億ガロン(14,000 b/d)以上の再生可能ディーゼを生産できるようになる。アルテシア製油所のPTUでは、アルテシアとシャイアンの両製油所で処理する原料の80%以上を前処理する。

PTUは原料の柔軟性を持ち、HollyFrontierが低炭素強度の飼料を使用して価値を生み出すことを可能にしている。期待される内部収益率は10~15%である。PTUは、脱ガムおよび未精製の大豆油、漂白可能なファンシータロー、蒸留器の残渣コーン油を処理する。原料の柔軟性は、HollyFrontierの収益を原料市場の潜在的な変動から保護することを目的としている。

(6) Calumet Specialty Products Partners

2021 年 2 月、Calumet Specialty Products Partners は、モンタナ州グレートフォールズにある 30,000 b/d の製油所を再生可能燃料製造施設に転換する計画を発表した。このプロジェクトは、10,000~12,000 b/d 再生可能ディーゼルを製造するために、製油所の 18,000 b/d のマイルド水素化処理装置（拡張プロジェクトの一環として 2016 年に追加）を再構成している。

Calumet は、このプロジェクトは、現在提案されているこのタイプの業界プロジェクトの中で、1 バレルあたりの資本対コストが最も低いと主張している。プロジェクトの費用は 2 億ドルである。

2021 年 9 月、Calumet は Burns & McDonnell と、既存の水素化分解装置を再構成して再生可能ディーゼルを製造するための設計、調達、建設（EPC）サービスを委託する契約を結んだ。2022 年 4 月から、同施設は牛脂と大豆油の原料から 5,000 b/d の再生可能ディーゼを生産している。

2022 年後半に前処理装置が完成すると、Calumet はカメリナ油、キャノーラ油、マスタード油、およびその他の非大豆油を含む、地元の牧場からの再生可能な原料の混合物を処理する。EIA によると、再生可能ディーゼル製造装置は 2023 年 2 月現在稼働中である。

2024 年までに、ボトルネック解消プロジェクトが完了すると、同施設は 18,000 b/d（年間 2 億 7,594 万ガロン）でフル稼働に達すると予想されている。

グレートフォールズ製油所には、2022 年秋に稼働開始予定の再生可能なグリーン水素プラントも含まれている。請負業者の身元は発表されていないが、固定費の EPC 契約が締結されている。

転換プロジェクトが完了した後でも、Calumet は 10,000 b/d から 12,000 b/d の西カナディアンセレクト原油を精製する能力は保持する。

デュアルトレインの製油所として、Calumet は従来のガソリン、軽油、ジェット燃料、ナフサ、アスファルトをモンタナ州、アイダホ州、カナダの地元市場に供給し続け、再生可能ディーゼル、SAF、再生可能 LPG、再生可能ナフサを米国西海岸とカナダのクリーン製品市場へ供給する。

(7) Ryze Renewables

Ryze Renewables は、ネバダ州ラスベガス郊外にある既存のバイオディーゼル処理施設を再利用して、植物油、脂肪、グリースから再生可能ディーゼを生産している。

プロジェクトの費用は 2 億 8,000 万ドルと予想され、7,500 b/d の再生可能ディーゼを生産している。Ryze は、カリフォルニアにおける再生可能ディーゼの需要は 150,000 b/d を超えると主張している。

2018 年 8 月 27 日、Ryze は Phillips 66 と長期の供給および引き取り契約を締結した

と発表した。Phillips はプラントに原料を供給し、再生可能ディーゼルの 100%を購入してカリフォルニア州の顧客に販売するというものである。

Ryze は当初、ラスベガスに製造施設を建設し、ネバダ州リノに別の製造施設を建設することを計画していた。Ryze はリノ製油所の開発と資金提供を行っていたが、2020 年にプロジェクトの株式を売却し、現在はラスベガスの製造施設の開発に注力した。ラスベガスの製造施設は 2020 年に完成予定であったが、会社のウェブサイトによると、この製造施設は再生可能ディーゼルを生産するために必要な追加のインフラと水素化処理装置の再利用を実施した。プロジェクトの設計、調達、および建設 (EPC) は、ラスベガスを拠点とする MMC Inc.社によって実施された。

EIA によると、再生可能ディーゼル装置は 2023 年 2 月現在稼働中である。

(8) シェル

ルイジアナ州セントチャールズ教区にあるシェルのノルコ製造施設は、化学プラントと製油所が統合されており、シェルのグローバルポートフォリオの中で米国で唯一、エネルギーおよび化学品パークと名付けられている。ノルコの新しい製造施設では、水素化処理された植物油 (HVO) の技術を使用して、100%バイオ原料を再生可能ディーゼルに加工している。HVO は、第 1 世代の FAME (脂肪酸メチルエステル) であるバイオディーゼルよりも、クリーンな燃焼を実現し、問題が発生しにくい新世代のバイオベースのディーゼル技術である。EIA によると、この再生可能ディーゼルの製造装置は 2023 年 2 月現在稼働中である。

3. 2. 3. 米国で今後期待されるバイオ原料

米国の再生可能エネルギーの関係者は、将来的には航空や船舶にもバイオ燃料が使用されることが予測されるため、追加の原料の確保が急務としている。そこで、潜在的な原料として、被覆作物が候補にあがりつつある。被覆作物とは、カバークロップ (cover crop) と呼ばれ、冬などに肥料が流出したり土壌が浸食されたり、雑草がはびこったりするのを防ぐために植える植物である。カバークロップの例として、図 11 に CoverCress 社のカバークロップを示す。

カバークロップは、大豆やトウモロコシなどとペアで二期作により栽培すると、バイオ燃料としての追加の原料が収穫できるとともに、冬の作物として、根の構造、栄養密度、土壌中の炭素の貯蔵も強化する。また、農家にとっては貴重な追加の収入源になる。さらに、農場でこれらの原料から生産されたバイオ燃料を農耕機械の燃料として使用すると、より持続可能な世界に貢献することになる。



出所：CoverCress 社ホームページ

図 11 CoverCress 社のカバーグレース

3. 3. 低炭素燃料の取り扱いや安全性に関する検討状況

3. 3. 1. バイオディーゼル 100%での取り扱いや安全性

米国の TARGRAY 社が販売している B100 BIODIESEL の化学物質等安全データシート (Material Safety Data Sheet : MSDS) を入手したので、その詳細について述べる。

表 8 に B100 の健康被害を示す。この内容をみると、人体に対しては大きな影響はないことがわかる。吸入した場合でも、新鮮な空気を吸えば回復し、目に入っても水で洗浄すれば、大きな障害は発生しないことがわかる。

表 8 B100 の健康被害

組成・成分情報：本品には有害物質は含まれておりません。		
健康被害	吸入	加熱して蒸気を発生させない限り、無視できます。蒸気や細かい霧状の物質は、粘膜の刺激、めまい、吐き気を引き起こす可能性があります。影響を受けた人は、新鮮な空気の場合に移動する必要があります。
	目に入った場合	刺激を引き起こす可能性があります。患部を多量の水で 15 ～ 20 分間洗浄します。症状が続く場合は、医師の診察を受けてください。
	皮膚への接触	長時間または繰り返し接触しても、重大な皮膚刺激を引き起こす可能性は低い。材料が高温にさらされると、熱傷の可能性もあります。
	摂取	偶発的な摂取による危険は予想されません。

表 9 に B100 の暴露経路別の応急処置を示す。こちらも健康被害とほぼ同じで、刺激、不快感、症状が続いた場合のみ、医師の診断を受けることを推奨している。

表 10 に B100 の火災時の処置を示す。消火剤は、日本の消防法では放水は避けて、泡消火剤か粉末消火剤を用いることになっているが、こちらでは水のスプレーも含まれている。ただし、水流により延焼する可能性は記載されている。異常な火災および爆発の危険性は、日本の軽油の取扱いとほぼ同等である。

表 9 B100 の暴露経路別の応急処置

応急処置		
暴露経路別の応急処置	吸入	新鮮な空気に移動します。刺激の症状が続く場合は、医師の診察を受けてください。
	目に入った場合	まぶたを上げ、大量のきれいな水で洗い流します。不快感が続く場合は、医師の診察を受けてください。
	皮膚への接触	露出した部分を石鹼と水でよく洗い流してください。
	摂取	コップ1～2杯の水を飲む。胃腸の症状が現れた場合は、医師の診察を受けてください。意識のない人に製品を経口投与しないでください。

表 11 に B100 の取扱い及び保管を示す。日本では、軽油の保管の場合は、屋外でも許可されているが、この B100 の場合は、直射日光を避けて保管という条項が入っている。これは、おそらく B100 は FAME が主成分であり、個々の分子が酸素原子と二重結合を有していることから、酸化安定性を考慮しているものと思われる。直射日光などで、ドラム缶の一部が高温になると、酸化劣化の発生やそれに伴うスラッジが発生する可能性があるので、注意を促していると考えられる。

表 12 に B100 の偶発的放出の対応を示す。これをみる限り、日本の軽油が漏洩した場合の対応とほぼ同じと思われる。大量の漏洩時に対しては、再利用まで考慮しているところが再生可能エネルギーらしいともいえる。

表 13 に B100 の暴露管理と個人保護を示す。これらの内容をみると、日本の一般的な軽油の取扱い方法と同等であることがわかる。

表 10 B100 の火災時の処置

火災時の処置	
引火点 (使用される方法)	130.0℃または266.0 F (ASTM 93) 可燃限界: 該当なし。
消火剤	水スプレー (噴霧)、乾燥化学薬品、泡、ハロン (管轄区域によっては許可されない場合があります)。水流により燃えている液体が飛び散り、延焼するおそれがあります。
特別な消火手順	水スプレーを使用して、火にさらされたドラム缶を冷却します。
異常な火災および爆発の危険性	バイオディーゼルを浸した雑巾またはこぼれた吸収剤 (オイルドライ、ポリプロピレンの靴下、砂など) は、可燃物の近くに保管し、適切に取り扱わないと、自然発火を引き起こす可能性があります。バイオディーゼルに浸した雑巾やこぼれた吸収剤は、承認された安全な容器に保管し、適切に廃棄してください。オイルを染み込ませた布は、石鹼と水で洗い、換気の良い場所で乾かしてください。消防士は、煙や蒸気にさらされないように自給式呼吸器を使用する必要があります。

表 11 B100 の取扱い及び保管

取扱い及び保管	
•	密閉容器で、50°F (10℃) ~120°F (48.9℃) の温度で保管してください。
•	酸化剤、過度の熱、発火源から遠ざけてください。
•	換気の良い場所で保管および使用してください。
•	熱、火花、炎の近くで保管または使用しないでください。直射日光を避けて保管してください。
•	この容器に穴を開けたり、引きずったり、滑らせたりしないでください。
•	ドラムは圧力容器ではありません。圧力をかけて空にしないでください。

表 12 B100 の偶発的放出の対応

偶発的放出の対応	
・	発火源を取り除き、こぼれたものを可能な限り狭い範囲に封じ込めます。可能であれば漏れを止めてください。
・	少量のこぼれは吸収材で吸い上げ、自然発火を避けるために適切に廃棄してください（上記の異常な火災や爆発の危険を参照してください）。
・	再利用または処分のために大量のこぼれは回収します。
・	固い表面は安全に溶剤または洗剤で洗浄して、残っている油膜を取り除きます。製品の脂っこい性質により、表面が滑りやすくなります。

表 13 B100 の暴露管理と個人保護

暴露管理と個人保護	
呼吸保護	蒸気またはミストが発生する場合は、NIOSH認定の有機蒸気/ミスト呼吸マスクを着用してください。
防護服	霧や液体のしぶきから目を保護するために、安全メガネ、ゴーグル、またはフェイス シールドを推奨します。皮膚への接触を防ぐために、PVC コーティングされた手袋をお勧めします。
その他の保護措置	従業員は、皮膚の露出した部分を毎日数回洗い、汚染された衣類を再使用する前に洗濯するなど、適切な個人衛生を实践する必要があります。

以下に、TARGRAY 社が追加で記載している、連邦 OSHA 危険通信基準についてのコメントを記述する。

この B100 は、連邦 OSHA の危険通信基準 (29 CFR 1910.1200) の下では危険ではない。ただし、この製品を熱処理して分解ガスが発生すると危険な場合がある。

米国環境保護庁 (EPA) では、2021 年 1 月 6 日付けの連邦官報において、有害物質規制法 (TSCA) の第 6 条の(h)項に基づき、5 種類の難分解性、生体蓄積性および毒性を有する化学物質 (PBT 物質)、当該物質を含有する製品および成形品の製造、加工および商業的流通を禁止および制限する規則を公表した。この B100 は TSCA にリストされており、内容は以下のとおりである。

- ・ CERCLA (包括的対応補償および責任法) : 報告不可。
- ・ SARA TITLE III (スーパーファンド修正および再認可法) セクション 312 非常に危険な物質: なし。
- ・ セクション 313 有毒化学物質: なし。
- ・ セクション 311/312 危険カテゴリ: 非危険物。

EPA が所管する資源保全回復法 (RCRA) は、国家の廃棄物管理システムを確立する連邦法で、主な目的は以下の 4 点である。

- ・ 廃棄物の処理処分が及ぼしかねない害から人々の健康や環境を保護する。
- ・ エネルギーや天然資源を無駄にしない。
- ・ 廃棄物の発生量を抑制する。
- ・ 環境に配慮した方法で廃棄物の処理処分を行う。

この B100 は、RCRA において購入して廃棄された場合、この製品はリストに記載されるか、または特性によって有害廃棄物ではない。ただし、RCRA の下では、廃棄時に、製品を含む材料または製品から派生した材料を有害廃棄物として分類するかどうかを決定するのは使用者の責任となっている。

JPEC では、同じく米国の RBF Port Neches 社が販売している B99 の MSDS を入手したが、内容は TARGRAY 社の B100 とほぼ同様であった。

<https://www.targray.com/biofuels>

<https://www.rbfuels.com/company/>

3. 3. 2. バイオディーゼル 20%ブレンド (B20) での取り扱いや安全性

BP がオーストラリアで発売している、FAME を軽油に 20%混合した、BP Biodiesel Blend の MSDS を入手したので、その詳細について述べる。

表 14 に B20 の暴露経路別の応急処置を示す。これは、B100 や一般的な軽油が暴露した場合の応急処置とほぼ同じで、刺激、不快感、症状が続いた場合のみ、医師の診断を受けることを推奨している。

表 14 B20 の暴露経路別の応急処置

応急処置		
暴露経路別の応急処置	吸引	吸入した場合は、空気の新鮮な場所に移す。症状が現れた場合は、医師の診察を受けてください。
	目に入った場合	すぐに多量の水で少なくとも 15 分間洗い流してください。刺激が生じた場合は、医師の手当てを受けてください。 石鹼と水で洗います。刺激が生じた場合は、医師の手当てを受けてください。
	皮膚への接触	石鹼と水で洗います。刺激が生じた場合は、医師の手当てを受けてください。
	摂取	飲み込んだ場合、吐かせてはならない。意識のない人には口から何も与えないでください。飲み込むと肺に入り、損傷を引き起こす可能性があります。医師の診察を受けてください。
治療は一般に、対症療法であり、影響を緩和することを目的としています。 この製品は、嚥下時または胃内容物の逆流後に吸引される可能性があり、緊急の治療が必要な重篤で致命的な可能性がある化学性肺炎を引き起こす可能性があります。誤嚥の危険性があるため、嘔吐や胃洗浄の誘発は避けるべきです。胃洗浄は、気管内挿管後にのみ実施する必要があります。不整脈を監視します。		

表 15 に B20 の火災時の処置を示す。ここでは、消火剤は泡または粉末消火剤となっており、日本の消防法とほぼ同じである。これは、B20 は 80%が石油系の軽油であるため、B100 とは異なる点である。火災の際に分解成分として一酸化炭素などがでることに注意喚起しているのも、B100 と異なる点である。その他の項目に関しても、B100 よりはかなり詳しく処置方法が記載されている。

表 15 B20 の火災時の処置

火災時の処置	
消火剤	消火には、泡または汎用粉末薬品を使用してください。この物質は水生生物に対して有毒です。この物質で汚染された消火用水は封じ込め、いかなる場所にも放出されないようにしなければなりません。
不適切な消火	ウォータージェットは使用しないでください。
危険有害な分解生成物	分解生成物には、次の物質が含まれる場合があります。 二酸化炭素 一酸化炭素 その他の有害物質
異常な火災/爆発の危険	可燃性の液体および蒸気。蒸気により引火するおそれがあります。蒸気は、低い場所や狭い場所に蓄積したり、着火源までかなりの距離を移動して逆火することがあります。下水道への流出は、火災や爆発の危険を引き起こす可能性があります。
特別な消火手順	何か物に火災が到達した場合、消火しないでください。火から遠ざかって燃やします。火災が発生した場合は、火災現場の近くからすべての人を遠ざけることにより、現場を速やかに隔離します。まず、人をシーンの視界から外し、窓から遠ざけます。
消防士の保護	消防士は、陽圧自給式呼吸装置 (SCBA) と出動装備を着用する必要があります。

表 16 に B20 の偶発的放出の対応を示す。こちらでは、少量の漏洩を除いて、B100 と比較してかなり詳細に対応方法が記載されている。特に想定される危険性をくまなく盛り込んだものとなっており、石油系の軽油とほぼ同じ対応の仕方といえる。

表 17 に B20 の取扱い及び保管を示す。これをみると、涼しく歓喜の良い場所で保管と記載されている。日本では軽油は第 2 石油類であり、屋外での保管も認められているが、オーストラリアは気温が高く、乾燥地帯が多いのと日差しが強いため、涼しい場所で保管することが定められていると思われる。さらに、表 18 に B20 の追加の保管に関する情報を示すが、“炭化水素の軽質分の蒸気がタンクのヘッドスペースに蓄積することがあります”との記載があり、高温下での危険性も示しているようである。なお、この MSDS では B20 の性状として発火点は 220℃超となっており、通常の保管では爆発の危険はないものとしている。

表 19 に B20 の暴露管理と個人保護を示す。こちらは、一般的な軽油の暴露管理や個人保護方法とほぼ同じ内容となっている。

表 16 B20 の偶発的放出の対応

偶発的放出の対応	
個人的注意事項	人的リスクを伴う、または適切な訓練を受けていない行動はとられません。周辺地域から避難してください。不必要で保護されていない人員が入らないようにしてください。こぼれた物質に触れたり、その中を歩いたりしないでください。すべての発火源を遮断します。危険区域での発煙筒、喫煙、炎の禁止。蒸気やミストを吸い込まないようにしてください。十分な換気を行ってください。換気が不十分な場合は、適切な呼吸器を着用してください。適切な個人用保護具を着用してください。
環境に関する注意事項	こぼれた物質の飛散や流出、および土壌、水路、排水管、下水道との接触を避ける。製品が環境汚染（下水道、水路、土壌または空気）を引き起こした場合は、関係当局に通知してください。水質汚染物質が大量に放出されると、環境に有害な場合があります。
大量の漏洩	危険がなければ漏れを止める。流出区域から容器を移動します。風上から流出場所に近づきます。下水道、水路、地下室、または密閉された場所への立ち入りを防ぎます。こぼれたものは排水処理場に洗い流すか、次の手順に従ってください。流出物を不燃性の吸収材で封じ込め、収集します。砂、土、バーミキュライトまたは珪藻土を廃棄し、地域の規則に従って廃棄するための容器に入れます。防火工具と防爆装置を使用してください。 許可を受けた廃棄物処理業者を通じて廃棄してください。汚染された吸収材は、こぼれた製品と同じ危険をもたらす可能性があります。
少量の漏洩	危険がなければ漏れを止める。流出区域から容器を移動します。不活性物質で吸収させ、適切な廃棄物処理容器に入れる。防火工具と防爆装置を使用してください。 許可を受けた廃棄物処理業者を通じて廃棄してください。

表 17 B20 の取扱い及び保管

取扱い及び保管	
取扱い	飲み込むと吸引の危険。肺に入り、損傷を引き起こす可能性があります。摂取しないでください。飲み込んだ場合、吐かせたり、口から吸い上げないでください。蒸気、スプレー、ミストの吸入を避ける。十分な換気が必要な場所でのみ使用してください。熱、火花、炎から遠ざけてください。火災や爆発を避けるため、材料を移送する前に、容器と機器をアースし、結合することにより、移送中の静電気を消散させてください。 防爆型の電気（換気、照明、マテリアルハンドリング）機器を使用してください。こぼれた物質や流出物が土壌や地表の水路と接触しないようにしてください。取扱い後はよく洗うこと。 使用中は、飲食、喫煙をしないでください。
保管	容器は密閉して保管してください。容器を涼しく換気の良い場所に保管してください。この製品で使用するよう設計された機器/容器でのみ保管および使用してください。 空パッケージには、残りの製品が含まれている場合があります。危険警告ラベルは、空のパッケージを安全に取り扱うためのガイドであり、はがしてはなりません。タンクが十分に換気されていて、タンクの雰囲気に含まれる炭化水素蒸気濃度が燃焼下限の1%未満で、酸素濃度が少なくとも20%であることが示されている場合を除き、呼吸装置なしで貯蔵タンクに入らないでください。 迅速な救助を行うために、適切な呼吸装置と装備を備えた十分な数の人員を常にタンクの外に待機させてください。
燃焼性の分類	オーストラリア クイーンズランド州労働安全衛生法 (WHS 法) 可燃性液体クラス C1 (AS 1940)

表 18 B20 の追加の保管に関する情報

追加の保管に関する情報
この製品は、オーストラリアの基準に従って取り扱う必要があります（可燃性および可燃性液体の保管と取り扱い [基準 1940-2004]） 炭化水素の軽質分の蒸気がタンクのヘッドスペースに蓄積することがあります。これらは、通常の引火点よりも低い温度でも可燃性/爆発の危険を引き起こす可能性があります（注：引火点は、タンクのヘッドスペース内の蒸気の潜在的な可燃性の信頼できる指標と見なしてはなりません）。タンクのヘッドスペースは常に潜在的に可燃性であると見なされるべきであり、貯蔵タンクからの充填、除雪、およびサンプリング中に静電気放電およびすべての発火源を避けるように注意する必要があります。引火点以上に加熱すると引火の危険がありますが、通常の保管温度で液体燃料は実質的に火災の危険はありません。燃料が高温の表面に接触したり、高圧燃料パイプから漏れたりすると、生成された蒸気やミストが引火や爆発の危険を引き起こします。 製品で汚染された雑巾、紙、またはこぼれを吸収するために使用される材料は、火災の危険性があるため、蓄積させてはなりません。使用後はすぐに安全に廃棄してください。 空の容器には、可燃性の製品残留物や蒸気が含まれている可能性があるため、火災の危険があります。 空の容器を溶接、はんだ付け、ろう付けしないでください。 火災を避けるため、発火源を排除してください。

表 19 B20 の暴露管理と個人保護

暴露管理と個人保護	
生物学的限界値	生物学的制限は割り当てられていません。
暴露制御	
職業暴露管理	空気中の蒸気の濃度をそれぞれの職業暴露限界未満に保つために、排気換気またはその他の工学的制御を提供します。適切な産業衛生と安全作業慣行に従い、空気中の暴露は実行可能な最低レベルに制御する必要があります。
衛生対策	化学製品を扱った後、食事、喫煙、トイレを使用する前、および作業終了時には、手、前腕、顔をよく洗います。
個人用保護具	
呼吸保護	十分な換気が必要な場所でのみ使用してください。蒸気やミストを吸い込まないでください。
肌と体	皮膚との接触を避ける。適切な保護服を着用してください。
手の保護	長時間または繰り返し接触する可能性がある場合は、保護手袋を着用してください。 保護手袋の正しい選択は、取り扱う化学物質、作業および使用の条件、および手袋の状態によって異なります（最高の耐薬品性手袋でさえ、化学薬品に繰り返しさらされると壊れます）。ほとんどの手袋は、廃棄して交換しなければならないまでの短い保護期間しか提供しません。特定の作業環境や資材の取り扱い方法はさまざまであるため、意図する用途ごとに安全手順を策定する必要があります。したがって、手袋は供給業者/製造業者と相談し、作業条件を十分に評価して選択する必要があります。
目の保護	サイドシールド付き安全メガネを着用してください。

<https://www.bp.com/en/global/corporate.html>

無断転載・複製を禁ず

一般財団法人石油エネルギー技術センター
調査国際部

〒105-0011 東京都港区芝公園 2-1-1

電話 03-5402-8502