

**バイオジェット燃料生産技術開発事業／技術動向調査／
国内外におけるS A F（持続可能な航空燃料）の製造技術
ならびに低コスト化技術に係る動向調査**

成果報告書（抜粋）

6.2 取り纏め結果

6.1 に記した調査成果を踏まえ、SAF 商用化に向けた 2025 年度以降の技術開発等の検討課題について以下のとおり取り纏めた。

6.2.1 バイオマスガス化・FT 合成(BtL)

(1) バイオマスガス化・FT 合成技術の概要とこれまでの日本の取組み

1) 技術概要

本プロセスは、バイオマスに対してガス化、FT 合成(Fischer Tropsh Synthesis)などを行うことでジェット燃料を製造する、熱化学的なプロセスである。本プロセスは主に、バイオマスの前処理、バイオマスのガス化、合成ガスの精製、合成ガスの FT 合成、水素化分解、異性化からなる。

バイオマスのガス化では、前処理として、乾燥により含水率を低下させ、粉碎により粒子径を小さくした後にガス化を行う。得られた合成ガスにはハロゲン化物、タールなどの不純物が含まれるため、水でスクラビング(除去)を行い、合成ガスを精製する。精製後、FT 合成の運転圧力への適合のためにガスを 25bar 以上に加圧し、FT 合成工程へ移送する。

FT 合成では、CO 重合反応と水素化触媒反応が起こり、生成物はアルカン、アルケン、アルコール、アルデヒドなどを含む可能性があるため、ジェット燃料に適したパラフィンに対する選択性が高くなるよう、運転温度、触媒、合成ガスの H_2/CO 比などを設定する必要がある。 H_2/CO 比については、反応効率の観点から、WGS(water gas shift)や外部水素の追加により、1:2 とすることが多い。FT 合成においては固体物であるワックス(炭素数 19 以上の炭化水素)も生成されるが、ワックスに対して水素化分解と異性化を行うことで、炭素鎖の短い LPG やナフサ、ジェット燃料に変換することが可能である。

2) 日本におけるこれまでの取組み

日本においては「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発」(2010 年～2016 年)において、個々のプロセスレベルでの技術開発として触媒開発、FT 合成生成ワックスの処理技術開発、合成ガスクリーン技術開発、そして BTL プロセスの効率化及び小型化検討開発が行われた。また、「バイオジェット燃料生産技術開発」(2017 年～2024 年)において、BTL によるバイオジェット燃料製造の一貫プロセス開発が行われている。これらにより、FT 合成による原理的な製造技術及びサプライチェーン全体を通しての実証は実施されている。一方で、今後の自立的な商用化に向けては、バイオマス原料の収集も含めた効率化や処理の低コスト化などによる全体コストの削減が必要であると考えられる。

(2) 諸外国における技術開発・商用化動向

1) 商用化の動向

バイオマスガス化・FT 合成により安定的に SAF を製造する商用化事例は存在しないが、最も商用化に近い例としては Fulcrum Bioenergy 社の取り組みであり、TRL は 9 に至る⁷³。本プロジェクトでは、2022 年 12 月 20 日、埋立地廃棄物から燃料を製造する世界初の商業規模プラントである Sierra BioFuels プラントで、埋立地廃棄物を原料として低炭素合成原油の製造に成功したことが発表された。また 2023 年 2 月 9 日、同プラントで製造された世界初の埋立地廃棄物由来の合成原油 (SynCrude) を、燃料にアップグレードするために戦略的パートナーである Marathon Petroleum に出荷したことが発表された。

2) 欧州の技術開発動向

欧州においては主に CAPEX 低減に関する取り組みが行われている。これは、過去、ガス化・FT 合成の技術開発を進めた結果、高額な CAPEX が石油会社に受け入れられなかったことを踏まえ得られた CAPEX 削減手法のアイデアに取り組んでいるものである。COMSYN(2017 年～2021 年)においては VTT 等が参画し、30～150MW ユニットでのバイオマスガス化設備の分散化とコスト削減の実証を実施した。小型分散化することにより CAPEX 及び OPEX を低減しトータルコストを従来と比較して最大 35%削減することで、ディーゼルの生産コストを 0.80 ユーロ/リットル未満とすることを目標としている(2023 年時化石燃料コストと同水準)。小型化及びプロセスの効率化として新規材料・プロセスによる脱硫技術やフィルタ技術の実証を行っている。

COMSYN に参画していた VTT における取組みとして、CAPEX 低減のためにガス化・FT 合成の一貫プロセスにおける効率化を図り、プロセスの削減によるコスト削減の検討が行われている。具体的には、酸素透過膜技術によるコスト削減や硫黄除去における後処理の簡素化が検討され、CAPEX を大幅に削減する可能性が示唆されている。

3) 米国の技術開発動向

米国においては、バイオマスのガス化・FT 合成時に発生する CO₂を分離回収し地層へ貯留する事で、FT 合成によって得られる SAF の LCA 値を低減させ環境価値を向上させる構想が練られている。Kreutz et.al(2020)⁷⁴においては、合成ガス精製時に発生する CO₂及び FT 合成反応後の残留ガスより CO₂除去を行い、敷地内にある油田へ EOR 用途として CO₂を提供する場合の経済性評価を実施し、SAF 製造がコスト優位になる要件を調査している。他にも、残留ガスを発電燃料として利用することで、併産物の利活用による収益化についても調査がなされている。

また、米国 SAF Grand Challenge Roadmap においては、全体プロセスでの効率化を図るため、原料から完成燃料への処理のために輸送されるさまざまな中間体の流れに焦点を当て、産業化達成のための中間変換の研究開発計画を策定としている。⁷⁵

⁷³ IEA Bioenergy, Status report on thermal gasification of biomass and waste 2021, <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2022/03/FS-op-final.pdf> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

⁷⁴ Thomas G. Kreutz, et.al, Techno-economic prospects for producing Fischer-Tropsch jet fuel and electricity from lignite and woody biomass with CO₂ capture for EOR, Applied Energy, Volume 279, 2020, 115841

⁷⁵ DOE, DOT, USDA, EPA, SAF Grand Challenge Roadmap,

表 6-4 バイオマスガス化・FT 合成技術における諸外国の主な取り組み

分野	技術開発の方向性	諸外国の主要取り組み
ガス化・FT 合成技術	① 各要素技術によるコスト削減	原料調達及びガス化・合成ガスの処理・FT 合成触媒の保守(脱硫およびフィルタ技術)のコスト削減、低圧 FT 合成炉設計(VTT)
	② 小型化・簡素化	プロセス簡素化による CAPEX 低減(VTT)
	③ CCS 付きガス化・FT 合成	原理的なプロセスフロー構想、技術経済評価(Kreutz et.al)

出所)三菱総合研究所作成

(3) 今後の技術開発・商用化の方向性

バイオマスガス化・FT 合成は、その一貫プロセスについて既に実証が行われており、一定の成果を挙げている。一方で、コストの観点から未だ安定した商用化には至っていない。今後の技術開発課題としては如何に CAPEX・OPEX を低減し経済性を向上させるかという点が挙げられる。

1) 各要素技術によるコスト削減

バイオマスガス化・FT 合成においては、原料調達及びガス化、合成ガスの処理、FT 合成触媒の保守(脱硫およびフィルタ技術)における OPEX が大きい。とくに、ガス化によって得られる合成ガスの圧力は既存の FT 合成に直接用いるには低圧であり、これの加圧による電力消費が大きい点が課題である。今後のコスト低減の可能性として、VTT でも行われているような低圧 FT 合成に関する技術開発は検討に値するのではないかと(なお、本邦 NEDO 事業においても一部低圧 FT 合成に関する技術検討があった)。また、合成ガスの処理については、特に脱硫の効率化は次に示す小型技術に関連することや、FT 合成において重要な役割をもつ触媒の保守の効率化につながるため、重要と考えられる。また、残留ガスの発電燃料利用など、併産物の利活用によるビジネスモデルの確立も重要な論点である。

2) 小型化技術

CAPEX 低減及び地域からの効率的な原料回収において、ガス化・FT 合成炉の小型分散化は、一定度の生産量が確保されれば小型化によるプラントコストの絶対値を押し下げ、かつ分散している原料サプライに対して近隣でのプロセスを可能とする技術であり、有用であると思われる。EU においては既に小型分散化の検討がされており、水電解装置による水素製造と組み合わせた 50MW 級の実証を実施している。また、小型化による CAPEX 低減のメリットを得るには、ガス化から FT 合成にかけてのプロセスにおいて、脱硫や残留ガスのクリーニングプロセスの最適化が必要であることが分かっている。今後は合成ガスの処理プロセス等の効率化によってプラント全体としてのサイズを如何に低減できるかが重要な課題と考えられる。なお、前述のとおり欧州においては過去の実証から得られた高額な CAPEX の教訓をベースにコスト削減に取り組んでおり、日本においてもこれまでの取り組みによる技術的知見を元にコスト削減手法が検討されることが望まれる。

3) CCS 付きガス化・FT 合成技術

今後炭素価格が上昇する場合、SAF 製造時の LCA 低減はより一層重要となる。現状考えられているバイオ燃料に対しての CCS はカーボンネガティブとして大きな価値を生む可能性があり、今後の研究に値する。CCS 技術自体は既に確立されているが、ガス化・FT 合成への CCS 技術適用に関しては、現状では原理的なプロセスフローが示されているだけであり、実際のコスト等は実証等によって確認する必要があると考えられる。また、商用化に際しては、原料調達から FT 合成までの一貫プロセスを考慮した上で、CO₂を回収しそれらを貯留層まで輸送することができるようなサプライチェーンを本邦にて構築可能かを実証等により確認する必要があると考えられる。上記を加味し、CCS 付きガス化・FT 合成は、先進的な取り組みとして実証を進めていくことが本邦においても有用と考える。また、CO₂ 回収および FT 合成の両者において、合成燃料の研究開発とのカップリングによる効率的な研究開発を構想することも有効と考えられる。

6.2.2 アルコール・トウ・ジェット(主に第二世代)

(1) アルコール・トウ・ジェット(主に第二世代)技術の概要とこれまでの日本の取組み

1) 技術概要

セルロース系バイオマスから製造されるエタノールを第二世代バイオエタノールと呼称する。第二世代バイオエタノールをはじめとするアルコールの製造技術として、原料の前処理・糖化・発酵・精製のプロセスを経る方法、および原料のガス化・ガス合成/発酵のプロセスを経る方法の 2 種類に大別される。糖化プロセスはさらに、酸糖化法・酵素糖化法の 2 種類に大別される。

アルコールをジェット燃料に変換する技術をアルコール・トウ・ジェット技術(ATJ 技術)と呼称する。変換技術として、脱水・重合・蒸留・水素化処理のプロセスを経る。ASTM D7566 では Annex5(ATJ-SPK)および Annex8(ATJ-SKA)として記載されており、ATJ-SPK としてはイソブタノールおよびイソブテンを原料とする変換技術(Gevo・Global Bioenergies⁷⁶)、およびエタノールを原料とする変換技術(LanzaJet)が、ATJ-SKA としては複数種(炭素数 2~5)のアルコールを原料とする変換技術(Swedish Biofuels)が認証されている⁷⁷。いずれも 50%を上限として Jet 燃料へのドロップインが許容されているが、ATJ-SKA 技術で製造される SAF は芳香族化合物等も含むことから、将来的には 100%SAF 技術としての認証が期待されている。

2) 日本におけるこれまでの取組み

第二世代バイオエタノールをはじめとするアルコール製造技術開発に向けては、「セルロース系エタノール革新生産システム開発」(2009~2013)や「セルロース系エタノール生産システム総合開発実証」

⁷⁶ Global Bioenergies, “Global Bioenergies’ SAF technology receives ASTM certification”, <https://www.global-bioenergies.com/la-technologie-saf-de-global-bioenergies-recoit-la-certification-astm/?lang=en>(2023 年 10 月 23 日閲覧)

⁷⁷ ICAO, “Conversion processes”, <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

(2014～2019)等において、多数の研究開発や実証に取り組んできた。ATJ 技術開発に向けては、「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発」(2010～2016)や、「バイオジェット燃料生産技術開発」(2017～2024)において小規模製造実証を実施しているほか、「グリーンイノベーション基金事業/SAF 製造に係る技術開発」(2022～2026)により、大規模製造実証を実施している。

(2) 諸外国における技術開発・商用化動向

1) 商用化の動向

都市ゴミを原料としたガス化・発酵技術によるエタノール製造と LanzaJet の ATJ-SPK 技術による SAF の商用プラントが多数計画されている。また、2023 年 8 月に Swedish Biofuels が ATJ-SKA 技術の ASTM の認証を得ており、複数の商用プラントも計画している。

原料となるアルコールは、ガス化・発酵プロセスによるもの、および第一世代エタノールである。セルロースの糖化・発酵プロセスによるエタノールを原料とする SAF 製造技術は商用化に至っておらず、コストダウンの余地がある。

2) 欧州の技術開発動向

第二世代バイオエタノールをはじめとするアルコール製造に関する技術開発動向として、草木系バイオマスを原料とした大規模商用化実証(Clariant)、製造コスト削減に向けた連続発酵技術開発(Sekab・Terranol)、レトロフィット支援(BIOFIT)などを実施している。これらの事業では、酵素コスト削減、C5 糖・C6 糖の同時発酵、バッチ処理からの転換、レトロフィット技術などの技術開発が進められている。

ATJ に関する技術開発動向として、2023 年 8 月に Swedish Biofuels の ATJ-SKA 技術がドロップイン上限 50%として ASTM D7566 Annex8 の認証を取得しており、同社は当該技術による 100%SAF 認証に向けて引き続き取り組むとしている。また、海外ヒアリングにより、同社は、米国 KBR 社と連携しライセンスを世界展開する見込みであることが聞かれている。⁷⁸

また Global Bioenergies は、イソブテンを中間生成物とする ATJ-SPK 技術にて 2023 年 6 月に ASTM D7566 Annex5 の認証を取得しており、エタノール以外の中間生成物に関する研究開発も進展している。中間生成物の開発については、それ自体をバイオ原料として利用・販売するビジネスモデルも検討されている。

3) 米国の技術開発動向

第二世代バイオエタノールをはじめとするアルコール製造に関する技術開発動向として、製造コスト削減に向けた技術開発を複数実施しており、酵素回収・再利用による連続糖化技術開発(NREL)、薬品(酸)利用の転換・再利用技術開発(D3MAX、AVAPCO、IOGEN)、連続発酵技術の開発(オハイオ州立大学、ADM・Gevo 等)、第一世代施設へのレトロフィット技術開発(D3MAX)が挙げられる。こ

⁷⁸ KBR, KBR Launches Sustainable Aviation Fuel Technology in Alliance with Swedish Biofuels, <https://www.kbr.com/en/insights-news/press-release/kbr-launches-sustainable-aviation-fuel-technology-alliance-swedish> (2023 年 9 月 30 日閲覧)

これらの事業では、酵素コスト削減、薬品(酸)コスト削減、バッチ処理からの転換、レトロフィット技術などの技術開発が進められている。

ATJ に関する技術開発動向として、脱水・重合コスト削減に向けた触媒の開発(PNNL・アラバマ大学)を実施する他、Methanol-to-Jet 技術開発(Enerkem)の事例も見られる。また ATJ-SKA 認証に向けて Byogy がエタノールを原料とする触媒変換技術開発を実施しており、将来的な 100%SAF 認証に向けて製造実証を実施する。

またエタノール以外の中間生成物の研究開発も進展しており、2,3-ブタンジオール製造菌株の市場投入(NREL)による SAF 等のバイオ燃料市場の拡大の他、中間生成物自体のバイオポリマー、バイオ化学品への利活用も期待されている。

表 6-5 アルコール・トゥ・ジェット(主に第二世代)技術における諸外国の主な取り組み

分野	技術開発の方向性	諸外国の主要取組み
アルコール・トゥ・ジェット技術(主に第二世代)	① ATJ-SPK	脱水・重合反応の速度向上に向けた触媒の改良(PNNL、アラバマ大学)
	② ATJ-SKA (100%SAF)	C2-C5 アルコールを原料とする 100%SAF 製造(2023 年 8 月 ASTM 認証取得)(Swedish Biofuels) エタノールを原料とする 100%SAF 製造(Byogy)
	③ エタノール以外の中間生成物	イソブテン Pathway の ASTM 認証(Global Bioenergies)、2,3-ブタンジオール発酵菌株の開発(PNNL)、Methanol-to-Jet 技術の開発(Enerkem 等)
	④ 酵素・薬品コスト削減	オンサイト酵素製造(Clariant)、酵素回収膜の開発(NREL)、薬品利用の転換(D3MAX)、薬品再利用技術開発(AVAPCO・IOGEN)
	⑤ C5 糖の有効利用	C5 糖・C6 糖同時発酵が可能な菌株の開発(Clariant、Terranol)
	⑥ 連続糖化・発酵技術	糖濃度監視技術開発(Sekab・Terranol)、アルコール連続抽出膜の開発(ADM・Gevo)、酵素回収・再利用技術開発(NREL)、連続発酵用の耐久型菌株の開発(Terranol、オハイオ州立大学)
	⑦ レトロフィット技術	複数の産業プロセスに対するバイオ技術適用可能性の検討(BIOFIT)、第二世代技術の第一世代施設へのレトロフィット(D3MAX)

出所)三菱総合研究所作成

(3) 今後の技術開発・商用化の方向性

1) ATJ 関連技術

ASTM D7566 においては、新たに ATJ-SKA が Annex8 として認証を取得し、都市廃棄物や草木系等のセルロース系原料から得られるエタノールを含めた、複数種のアルコールから SAF の製造が可能になりつつある。

ATJ 技術については、都市ごみを由来とする排ガス発酵により製造されたエタノールを商用化する計画はあるものの、第一世代エタノールを原料とした商用展開も見込まれているとことが海外ヒアリングにおいて聞かれている。ATJ 技術の実装に当たっては、商用性を確保するために、まずは第一世代エタノールを原料とすることを主に導入が進められる可能性がある点にも留意する必要がある。また、今後、新たに Annex5 や Annex8 に適合する ATJ 技術ライセンスが開発されることも念頭に置く必要がある。

また、今後の社会実装においては様々な SAF 製造技術・Pathway や中間生成物自体を販売・利活

用するビジネスモデル展開等への適用可能性を検討する必要がある点に留意すべきである。なかでも、将来的に100%SAF製造技術の需要が高まるなか、ATJ-SKA技術への適合を想定した技術開発や国内展開の可能性については重要な論点になると考えられる。

2) 第二世代バイオエタノールのコスト削減技術

ATJによるSAFのコスト削減には、原料となる第二世代バイオエタノールのコスト削減が必須である。海外でも第二世代エタノールのコスト削減技術開発事例が数多く確認される中、各技術がどの程度コスト削減に寄与するかは一概に言えない。一方、消耗品である酵素のコストが課題である点は、文献調査⁷⁹の他、現地調査でも確認しており、海外では酵素の再利用技術の開発や、酵素メーカー・酵母メーカーの連携による一貫プロセス検討による共有技術の開発事例も確認されている。

一方、日本においても複数の企業が酵素に関する要素技術を保有するほか、各大学では糖化法に関する基礎研究もなされており、例えば酵素に代わる微生物糖化・発酵技術に関する研究が進められている。酵素コストの課題解消に向けては、各企業の技術改良や基礎研究の進展が重要である他、さらに酵素や糖化法に関する要素技術を保有する企業との連携が有効であると考えられる。これには、糖化・発酵を合わせた一貫プロセスにおける共有技術の開発や、酵素に関する研究会の場を活用した有識者や企業間の連携が重要と考えられる。

また、糖化・発酵プロセスにおいては、原料の加水分解で得られるC5糖・C6糖のうち、C5糖については発酵されず焼却処理される例も確認されている。C5糖の発酵技術の進展によりエタノール収率の向上が期待できることから、欧州ではC5糖の発酵促進に向けた研究や酵母の改良が行われている。欧州ではさらに連続発酵技術の開発を行い、制御技術や設備構成等を従来から変更することにより投資コスト・製造コストの大幅削減を実現している。日本においても、C5糖の発酵促進や連続糖化・発酵に係る技術開発は第二世代バイオエタノール等のアルコール製造コストの大幅削減に寄与すると考えられる。

なお、海外ヒアリングでは第二世代エタノールの商用化は製紙工場において実現することが比較的容易との声が聞かれた。製紙工場における第二世代エタノールの製造は、製紙工程(具体的には、アルカリ蒸解かサルファイト蒸解か)によって適用可能な技術が異なるケースも想定されることから、開発・実証する技術については適用先にも留意して選定する必要があるものと考えられる。

6.2.3 HtL 含む DtL・コプロセッシング

(1) HtL 含む DtL・コプロセッシング技術の概要とこれまでの日本の取組み

1) 技術概要

DtL(Direct thermochemical liquefaction、直接熱化学的液化)は、バイオマス等の原料を熱化学的に分解して炭化水素を得る方法であり、溶剤液化と熱分解の2通りの方法が存在する。

⁷⁹ IEA Bioenergy, Advanced Biofuels – potential for Cost Reduction, <https://task39.sites.olt.ubc.ca/files/2020/02/Advanced-Biofuels-Potential-for-Cost-Reduction-Final-Draft.pdf> (2023年10月23日閲覧)

溶剤液化は、高温高压の溶媒中でバイオマスを分解する方法である。中でも、溶媒として水を利用する方法を HtL (Hydrothermal Liquefaction、水熱液化)と呼称する。HtL では、高温高压(温度 280～370℃, 圧力 10～25 MPa)の液体の熱水を溶媒として、熱水中にて原料中の炭素鎖を分解し、酸素を水(脱水)や二酸化炭素(脱炭酸)として取り除くことで酸素含量を減らし、炭化水素主成分のバイオ原油(バイオクルード)を得る。得られたバイオ原油を水素化処理することで硫黄、窒素、酸素、金属などの不純物を含む化合物を分解・除去し、また改質・分解することで燃料として精製する。HtL に利用可能なバイオマス原料には、木材、農業廃棄物、林業残渣、藻類、食品廃棄物、都市固形廃棄物、下水汚泥の他、使用済みプラスチックや廃タイヤなど非バイオ原料など、幅広い原料を使用することができる。溶媒に水を使用するので原料の予備乾燥が不要な点、また後述の熱分解法と比較し低温・低圧のプロセスが可能な点が特徴である。

熱分解は、固体バイオマスを酸素のない高温環境下で分解する。中でも急速熱分解法は、バイオマスを無酸素下で毎秒 10℃～100℃の速度で急速に 450℃-600℃まで加熱することでバイオマス中の揮発成分を蒸発させた後、即座に冷却することでバイオオイルを得る。熱分解により得られるバイオオイルは、熱的に不安定な酸性化合物や反応性化合物を含んでおり変質・固化してしまう課題があり、生成されたバイオオイルに対して脱酸素処理等のプロセスが必要である。

バイオマス由来の原料(油脂等)や製油所に投入可能な中間生成物を、既存の石油精製プロセスにて処理する方法をコプロセッシングと呼称する。民間航空機用のジェット燃料規格 ASTM D1655 においては、モノ・ジ・トリグリセリド、遊離脂肪酸、脂肪酸エステルなどの油脂、及び鉄またはコバルト触媒を使用した FT 合成油のコプロセッシングが体積比率で 5%まで認められている。

2) 日本におけるこれまでの取組み

HtL、熱分解については、NEDO「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発」(2010～2016)において関連技術開発を対象とするプロジェクトが採択・実施されてきた。

コプロセッシングについては、「製油所の脱炭素化研究開発事業⁸⁰⁾」(2024 年度まで継続)において、コプロセッシング基盤技術開発に取り組んでいる。ただし、当該事業の目的はデータベースと解析技術開発であり、コプロセッシングの実証そのものは実施されていない。この他、石油元売各社においても取組が進んでいる⁸¹⁾。

(2) 諸外国における技術開発・商用化動向

1) 商用化の動向

2023 年現在、DtL のうち HtL は小規模実証の段階である一方、高速熱分解は各国で商用規模で

⁸⁰⁾ JPEC, 2022 年度(令和 4 年度)事業報告書, https://www.pecj.or.jp/wp-content/uploads/2023/08/2022_business_report.pdf (2023 年 10 月 23 日閲覧)

⁸¹⁾ ENEOS, ENEOSと三菱ケミカル共同のプラスチック油化事業実施について ～国内最大規模のプラスチックケミカルリサイクル設備を建設～, https://www.eneos.co.jp/newsrelease/20210720_01_01_2006437.pdf (2023 年 10 月 23 日閲覧)、出光興産, 使用済みプラスチックリサイクル事業化に向けた基本設計を開始 ―原料調達に向けた業務提携の検討開始、ケミカルリサイクル・システム構築へー, <https://www.idemitsu.com/jp/news/2022/220913.html> (2023 年 10 月 23 日閲覧)、太陽石油, 廃タイヤ分解油化によるケミカルリサイクル事業の共同検討を開始, <https://www.taiyooil.net/news/2022/22-062.html> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

の実証が実施されている。例えば、米国 Alder Fuels では農業残渣や木質残渣から熱分解油を製造する商用実証が検討されている。

コプロセッシングに関しても各国で実証が実施されている。米国 PNNL は 2014 年、大豆油や熱分解油を用いた FCC 及び水熱液化や熱分解を用いたバイオ原油の水素化処理プロセスにおけるコプロセッシングについての検討を実施している。他にも、Repsol は自社技術にてパーム油や廃食油等の混合原料を使用したコプロセッシング実証を実施している他、Marathon もソルガムやバイオ原油のコプロセッシング実証を実施している。ただし、いずれの実証例も原料の混合率は低いものと推察され、大規模なコプロセッシングの実現には至っていない。また、ASTM D1655 における混合率の上限が 5% となっていることも、商用化に向けた壁の一つとなっている。

2) 欧州の技術開発動向

欧州においては、森林残渣、ユーカリ、わら等を原料とした熱分解油を用いて多様なプロセスの組合せ(安定化、脱酸素化、コプロセッシング投入ポイント等)でコプロセッシングを行い、熱分解油の利用可能性評価や各パスウェイのコスト評価を行う 4Refinery プロジェクトが実施されている。4Refinery プロジェクトには Repsol を含む複数の製油所が参画し、実際にバイオ原油を製油所で使用することについて評価を行っている。

また、4Refinery の後継プロジェクトとして、2023 年より REFOLUTION プロジェクトが開始されており、4Refinery よりも組み合わせるプロセスを拡充する形で実証が進められている。また、用途先も航空だけでなく海洋、ガソリン、化学原料等幅広く見据えている。海外ヒアリングを行った結果、特に、安定化だけでなく脱酸素化も必須のプロセスとなりうるか等については 4Refinery から引き続きの検証が必要となっており、REFOLUTION プロジェクトの実施内容として組み込まれている。

3) 米国の技術開発動向

米国では、上述の PNNL によるコプロセッシング実証をはじめとして、コプロセッシングに関する多様な研究開発・実証がなされている。海外ヒアリングに基づき調査を行った結果⁸²、コプロセッシング技術の課題として、木質廃棄物由来熱分解油の水素化処理へのコプロセッシングにおける目詰まり、不活性化、緩和等、FCC へのコプロセッシングに適したリアクターのプロセス開発や触媒開発、下水由来の HtL バイオ原油の活用等が挙げられている。さらに、微細藻類を原料とする HtL についても検討が進められており、水素化処理へのコプロセッシングの結果、ジェット燃料の物性値許容範囲に収まることが確認されている。

また、Shell は熱分解技術と独自の触媒技術を組み合わせた IH2 と呼ばれる SAF 製造法を確立しており⁸³、現在は ASTM D7566 への認証手続き中である。

⁸² BETO, 2023 Project Peer Review, <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/2023-project-peer-review> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

⁸³ Shell, IH2 Technology, <https://www.shell.com.cn/en/cn/business-customers/catalysts-technologies/licensed-technologies/benefits-of-biofuels/ih2-technology.html> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

表 6-6 HtL 含む DtL・コプロセッシング技術における諸外国の主な取り組み

分野	技術開発の方向性	諸外国の主要取組み
HtL・DtL・コプロセッシング	① HtL のバリューチェーン確立	食品残渣等の湿性廃棄物を原料とする HtL バリューチェーン実証(Waste2Road、PNNL) 微細藻類を原料とする HtL バリューチェーン実証(PNNL)
	② コプロセッシングに適した中間原料の開発(HtL 油、DtL 油を含む)	森林残渣、ユーカリ、わら(4Refinery、REFOLUTION) 森林残渣、パーム油、廃食油(Repsol) ペイマツ由来熱分解油やその他バイオ原油(Petrobras) 廃食油(Hellenic Petroleum) ソルガム等(Marathon)
	③ 有望なコプロセッシング投入ポイントの特定	バイオ原油への FCC におけるコプロセッシングの有用性は実証で確認済。プロセスデザイン、影響評価、経済性評価等と合わせて検討が進む(4Refinery、REFOLUTION)
	④ コプロセッシングプロセスへの技術的影響の改善	水素化処理への投入の場合：反応器内への熱発生による処理への悪影響を回避するためのバイオ原油からの酸素除去・処理制御等 水素化分解への投入の場合：触媒への悪影響についての分析 FCC への投入の場合：触媒への悪影響についての分析
	⑤ その他熱分解油を原料とする SAF 製造プロセスの開発	IH2(Shell, Alder Fuels)

出所)三菱総合研究所作成

(3) 今後の技術開発・商用化の方向性

1) 既存の製油所設備を活用した地域分散型コプロセッシングモデルの確立

コプロセッシング技術の利点のひとつに、既存の設備の利用が可能であるため新規設備投資を抑制でき、小規模生産に係るハードルも比較的低いことが挙げられる。日本においては、林地残材等の地理的に分散して発生するバイオマス原料が豊富に存在することから⁸⁴、CAPEX の軽減と同時に、地理的に分散するバイオマス資源の活用を促進することを視野に、FS のステージから検討を開始し、最終的にはサプライチェーンモデル構築を目指すことが方向性として考えられる。

2) 原料前処理プロセスの開発

HtL、DtL 及びこれらのプロセスを通じて生成されるバイオ原油の利用拡大に向けては、原料の安定調達が重要なポイントの一つとなる。セルロース系バイオマス(農業残渣、木質残渣等)、微細藻類、都市ごみ等、原料の多角化を想定し、各種原料から精製したバイオ原油の性能評価を進めていくことが方向性として考えられる。特に微細藻類は、HtL プロセスに投入することで、油脂抽出プロセスと異なり乾燥・抽出を省略できるためコスト・エネルギー削減が期待される。

また、上述の検討の結果製造されたバイオ原油をコプロセッシングに用いるにあたり、脱酸素プロセスの必要性、原油中の不純物(金属、硫黄、塩素等)の制御等の技術的課題の検討を行うことも必要である。

なお、HtL、DtL については、過去、戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発において取り

⁸⁴ 農林水産省、バイオマス種類別の利用率等の推移、
<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/index-53.pdf> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

組まれた経緯があるが、本格的な技術実証には至っていない。昨今、SAF 等の新たな需要の可能性が生じている中、改めて商用化の出口を念頭に技術開発に取り組むことが望まれるが、欧州においても技術確立には時間を要する見込みが聞かれており、商用化の実現にはハードルが高い点も意識する必要がある。

3) ASTM 認証

コプロセッシングの利用拡大に向けては、ASTM 認証における混合率の上限の引き上げが不可欠である。現在混合率を 5%から 30%まで引き上げる取組が進展している他、Phillips66 がタスクフォースを形成し、廃タイヤを原料とするコプロセッシングの ASTM への追加を検討している。また、Exxon Mobil は水熱処理油のコプロセッシングのタスクフォースを運営している。

しかし、上記事例でタスクフォースが形成されていることからわかるように、ASTM D1655 の取得を個社が行うことは非常に難しい。今後、国内企業において ASTM への追加に向けた活動に関する要望の声が複数上がる可能性も念頭に、海外において ASTM 追加に取り組むプレイヤーと連携することが望まれる。⁸⁵

6.2.4 原料開発・調達

(1) 原料開発・調達の概要

1) 技術概要

SAF に適用されるバイオマス原料は、主に HEFA パスウェイに使用することができる植物油脂や廃食油、廃獣脂などの油脂系原料、ATJ に使用することができるサトウキビ、トウモロコシを由来としている。しかし、廃食油や廃獣脂などは併産される量に限りがあり、またサトウキビやトウモロコシは食料競合が懸念されることや、土地利用変化による炭素ストックの減少等の環境影響が懸念されることから、これらに代わる原料の確保が課題となっている。

上記の条件を満たすバイオマス原料の候補は、各原料に適用され得るパスウェイの差異から、油脂作物、回収難易度の高い油脂、セルロース系燃料作物、藻類に大別される。

- ・ 油脂植物：種子等に含まれる油を抽出する目的で栽培される作物であり、食料競合の懸念や土地利用変化による環境影響のない栽培を要する。
- ・ 藻類：太陽光と栄養分を利用して脂質、タンパク質、炭水化物などの主要成分を含む。海水や各種廃水を利用して培養できるため土地利用変化の懸念が抑制的である。
- ・ 回収難易度が高い油脂：例としてパーム油工場の廃水から回収される廃液である POME、飲食店等から発生し、油脂分離阻集器（グリーストラップ、排水をそのまま下水に流さないように油分と水分を分離する装置）から回収される油脂、固形物、洗剤の混合物であるブラウングリースが

⁸⁵ CAAFI, ASTM Qualification of Synthetic Aviation Turbine Fuel (SATF), https://www.caafi.org/resources/pdf/SAF_Virtual_Conf_June2023_Session_14_Mark_Rumizen_and_Gurhan_Andac.pdf (2023 年 10 月 23 日閲覧)にあるとおり現在 3 件のコプロセッシングに関するタスクフォースが設置されている。

挙げられる。

- ・ セルロース(残渣・燃料作物): 残渣としては農業残渣、森林残渣。作物としてはススキ、スイッチグラスなどの草本類や早生樹。

上記に示した油脂植物、藻類、回収の難易度が高い油脂、セルロース(草本系、早生樹)にはそれぞれ技術的な課題等があり 2023 年時点では商用レベルの大規模 SAF 生産へは至っていない。それぞれの原料タイプについて、商用化へ向けた課題は以下のとおり整理される。

表 6-7 SAF の新たな原料のタイプと商用化に向けた主な課題

原料タイプ	原料例	商用化への主な課題
油脂植物	ポンガミア、カメリナ、ソラリス	- 商業規模で育成・生産可能な適正地の特定
藻類	微細藻類、大型藻類(海藻)、シアノバクテリア	- 培養に要する土地、肥料、水資源 - 培養の安定化やコスト削減(オープンポンドでは季節によっての育成変動、死滅リスク対策。PBR ではコスト削減) - 油脂等の収率向上
回収難易度の高い油脂	ブラウングリース	- 油脂、固形物、洗剤の混合物である。金属やリン類、塩素等の不純物の処理を要する。
	POME	- 90~95%が水分、残油、土粒子、浮遊物を含んでいる。処理において環境への悪影響を軽減する必要がある。
セルロース残渣	農業残渣、森林残渣	- 収集コストの軽減や変換プロセス含むサプライチェーンの構築を要する
セルロース(草本系作物)	スイッチグラス、ススキ、ミスカンサス	- 物理的、化学的な不均一性への対処 - 収穫や輸送におけるコスト、CO ₂ 排出の抑制
セルロース(木質系作物)	ポプラ、ヤナギ	- SAF への変換効率が比較的低い - 収穫された後の貯蔵中の劣化への対処

出所)三菱総合研究所作成

2) 日本におけるこれまでの取り組み

日本国内において供給する視点では油脂植物の育成適正地が少ない等の理由から、藻類やセルロース系原料についてより重点的に技術開発が行われてきた。

- ・ 藻類: 2010~17 年度、微細藻類由来バイオ燃料製造技術開発を推進し、ボツリオコッカスを始めとする様々な藻類株の育種や変換技術の開発を実施。その後バイオジェット燃料生産技術開発事業において、大規模培養実証とともに HC-HEFA SPK を Annex7 として ASTM D7566 に登録。現在は 2024 年度にかけて、微細藻類基盤技術開発として微細藻種の選定、育種や多様な培養方法に取り組まれている。
- ・ セルロース(残渣・燃料作物): 木質バイオマス燃料(チップ、ペレット)の安定的・効率的な製造・輸送等システムの構築に向けた実証事業、新たな燃料ポテンシャル(早生樹等)を開拓・利用可能とする“エネルギーの森”実証事業を 2021~28 年度に実施。

この他にも、回収難易度の高い油脂については、ブラウングリースの回収についてフィージビリティ・スタディが行われており、オンサイト型の油脂抽出装置によるブラウングリース発生場所(飲食店舗)で

の油脂分離、清掃業者による油分回収についての検討や賦存量の調査、汚泥残渣を利用したメタン回収、有効利用などが検討されている。⁸⁶

油脂作物に関しては、沖縄でボンガミアの農園開発が検討されている例もあるが⁸⁷、大規模供給としては海外から調達することを念頭に置いた活動があり、例として豪州クイーンズランド州でのボンガミア植林・原料確保、SAF サプライチェーン構築の検討が挙げられる。⁸⁸

(2) 諸外国における技術開発・商用化動向

1) 欧州における取組

油脂作物

欧州における油脂作物の取組みとしては、以下のとおり、既存の品種(カメリナ、ソラリス)の耕作、生産実証を行っている例が見られる。

- ・ 耐干性のある油脂植物であるカメリナを、バイオ炭と他の土壌改良剤を組み合わせた手法で栽培することにより、土壌の肥沃度と気候変動の影響に対する回復力を高めると同時に炭素を土壌に固定し、低 ILUC のバイオ燃料を生産する。(ITAKA,BIO4A)
- ・ 特許取得済みのタバコ植物の品種であるソラリス(ニコチンフリー、非遺伝子組み換え、競合する食物がないものとされる)を欧州で栽培実証、バリューチェーンの構築、経済性の実証を行う。(Solaris)

藻類

藻類についてはより収率の高い栽培方法や前処理方法、変換方法についての開発、ライフサイクル全体の評価に関するプロジェクトの支援を行っている。

- ・ 藻類の収集から燃料使用に至るまで、環境、経済、社会の持続可能性の観点からライフサイクル全体の分析。(AQUAFUELS)
- ・ 生産性の高い褐色、赤色、緑色の海藻を使用した海藻栽培のための輪作計画を開発することにより、バイオマス供給を増加する。海藻の前処理と保存を改善し、経済的に適切な濃度で発酵性糖と転換性糖を生産する。バイオエタノールの生産を経済的に実行可能な濃度まで増加させる。海藻からバイオ燃料までのチェーン全体の統合的な技術経済、持続可能性、リスク評価。(MacroFuels)

回収難易度が高い油脂

POME に関して、ノッティンガム大学(英国)においてマレーシアの機関と共同で POME をバイオエネルギーに変換する統合型廃棄物管理システムを構築する取り組みが進む。

⁸⁶ 国立環境研究所、国立環境研究所ニュース Vol.36(2017), <https://www.nies.go.jp/kanko/news/36/36-4/36-4.pdf> (2023 年 8 月 31 日閲覧)

⁸⁷ (一般)環境・エネルギー事業支援協会、バイオマス液体燃料発電事業の現状と将来的な方向性について(2020), https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/062_06_00.pdf (2023 年 8 月 10 日閲覧)

⁸⁸ J-オイルミルズ、プレスリリース(2023), https://www.j-oil.com/press/article/230308_003897.html (2023 年 8 月 10 日閲覧)

セルロース(残渣・燃料作物)

入手可能性やサプライチェーン全体の評価や開発、変換効率の向上、セルロース系燃料作物としては草木類について生産プロセスの持続可能性評価を行っている。

- ・ セルロース原料の EU 内および第三国からの入手可能性を評価し、施肥システム、物流の改善、土壌の炭素回収システム、革新的な輪作計画などを策定 (BECOL, SWEETFUEL, ADVANCEFUEL)
- ・ 草木系、木質系セルロース系、セルロース系バイオマス残留物と都市廃棄物の有機分を変換する改良技術を開発 (FLEXI-GREEN FUELS, LIGNINFIRST)
- ・ 木質系セルロース廃棄物から中間体を取り出すための基材を開発し、基材の入手可能性とサプライチェーン構築について検討 (ABC-SALT)
- ・ キャスター (Ricinus Communis、多年草)、ミスカンサス、スイッチグラスなどの草木類について、低 ILUC リスクの生産ルートの信頼性を調査および実証、環境的、社会的、経済的持続可能性を評価する (BIKE, REWOFUEL, Torero)
- ・ 異なるセルロース系燃料作物の LCA、ILUC、GHG パフォーマンスを理解し、それに対する変換パスウェイを特定する。(中国との共同研究) (ALTERNATE)

2) 米国における取組

米国ではエネルギー省バイオエネルギー技術局 (BETO) において、米国内のバイオマスや廃棄物資源を持続的に利用できるような研究・開発・実証を支援しており、2023 年の Project Peer Review において以下のプロジェクトを報告している。

藻類

BETO では藻類の開発を一つのカテゴリーを立て重点的に支援を行っており、現在合計 32 プロジェクト (4 千万 US ドル/年) の技術開発費を藻類関連プロジェクトに当てており、技術開発テーマは以下のとおりである。

- ・ バイオ燃料の収率が高い藻類株の探索。具体的には Picochlorum renovo、Nannochloropsis oceanica に関するゲノムライブラリの形成など。(NREL 他)
- ・ 屋外培養において一年を通して安定して生産できる高収率の藻類株の特定。具体的には、適切な藻類株を特定できるスクリーニング・プラットフォーム (培養可能な場所、必要な養分、土地、水資源、変換施設の要否などの情報) の形成 (PNNL 他)
- ・ 藻類培養工程の技術開発。例として、下水処理システムへの組み込みや、DAC を使った高濃度の CO₂ を藻類培養施設に提供することによる高効率化 (イリノイ大学他)
- ・ 屋外培養における天候や寄生虫による藻類死滅リスクへの対応 (培養中の藻類をリアルタイムでモニタリングする技術、モニタリングデータのデータベース化) (アリゾナ州立大学他)
- ・ HtL 変換においてコスト面で有利な藻類原料の特定、HTL で容易に処理できるようにするための前処理方法の開発、技術経済分析 (TEA) のためのデータ開発。(NREL 他)

回収難易度の高い油脂

米国では、Applied Research Associates Inc. (ARA) 社による ASTM D7566 規格に

Annex6として認証済みの触媒水熱分解(Catalytic Hydrothermolysis:CHJ)によって、ブラウングリースを SAF に変換する取り組みが進展している。当該技術は、ブラウングリースに含まれる金属やリン類、塩素を経済的に取り除くことができるとされ、6 万 BPD の生産を計画しているものとされる。⁸⁹

セルロース(残渣・燃料作物)

セルロース(残渣・燃料作物)に関して BETO が取り組む技術開発は以下のとおりである。米国における重要なバイオマス資源であるトウモロコシ残渣を対象としたサプライチェーンの検討、残渣系やスイッチグラスの安定供給、セルロース燃料作物の高収率化の他、原料の特性(不均一性や不純物など)に対応するための技術開発が進められている。

- ・ コーンストーバーの収集・貯蔵技術を開発することで、収集効率の向上(天候の影響対策等)、輸送時の積載率の向上に取り組む(アイダホ国立研究所他)
- ・ 安定したバイオマス原料(農業残渣、スイッチグラスなど)の供給、輸送効率化の為のサプライチェーンの構築モデル開発、シミュレーション(イリノイ大学)
- ・ 草本系、木質系セルロース燃料作物(スイッチグラスの荒廃地での生産等)の高収率化の為の耕作、管理、収穫、貯蔵、運輸方法の最適化研究(アイダホ国立研究所他)
- ・ 被覆作物を育成することによる主作物の高収率化、低炭素化、また被覆作物自体のバイオ燃料原料利用の検討(オークリッジ国立研究所他)
- ・ 草本系、木質系、廃棄物系のセルロース原料の不均一性解消の為、センサーの開発や前処理技術の研究、不純物、汚染物除去技術(アイダホ国立研究所他)
- ・ 原料ライブラリの形成(成分・発熱量・かさ密度・含水率等の物理的性質データ)(アイダホ国立研究所)

(3) 今後の技術開発・商用化の方向性

1) 全体戦略

前述のとおり今後 SAF を生産する為のパスウェイは多様であり、変換技術の今後の成熟についても様々な可能性が考えられることから、今後の SAF の生産を拡大するに当たっては、原料種についても多様化していくことが有効と考えられる。

例として、世界的な SAF 生産企業である NESTE 社は、ウェブサイトにおいて短期的には、バイオマス原料として酸性油、ブラウングリース、POME、廃プラスチック、新たな油脂植物を使用しつつ、将来的には、藻類、リグノセルロース等をバイオマス原料として使用していく計画を掲げている⁹⁰。このため、日本においても、原料の調達可能性については全方位的に検討し、その活用可能性を検討すべきと考えられる。

一方、バイオマス原料開発、原料調達は、地理的条件が大きく影響することから、他国の戦略をその

⁸⁹ Applied Research Associates Inc., RENEWABLE DIESEL PRETREATMENT, <https://www.ara.com/products/renewable-diesel-pretreatment-fat-oil-grease-cleanup/> (2023 年 7 月 03 日閲覧)

⁹⁰ NESTE, Future raw materials, <https://www.neste.com/products/all-products/raw-materials/future-raw-materials#15604a0e> (2023 年 10 月 17 日閲覧)

まま日本の原料開発、調達支援戦略として適用することはできない。また、米国や欧州における取組みに見られるとおり、特に作物（油脂植物、セルロース燃料作物）の利用に際しては、土地利用変化などの持続可能性リスクの回避を前提とした検討が必要になる。これらの前提に立ち、日本における SAF 原料の技術開発の方向性について、海外事例を参考とすると、以下のとおりの可能性が考えられる。

2) 油脂植物

日本には熱帯、亜熱帯地域が少なく、このような地域が適正地である油脂植物を大規模に耕作することが難しい。他方、前述のとおり、海外で栽培された油脂植物由来の原料を大規模に輸入するケースも、日本において先行して見られている。豪州におけるポンガミア生産は閉鎖炭鉱のリハビリを兼ねた検討ともなっており⁹¹、海外で栽培された植物由来の原料を調達する場合には、土地利用変化への配慮や、栽培が行われる地域各々の事情に照らした検討が必要と考えられる。

3) 藻類

米国、欧州両者において藻類による SAF 生産を念頭とした技術開発は引き続き進められており、特に米国では広大な土地を持つ地理的優位性から、継続的に大規模な技術開発支援（4 千万 US ドル/年）を行っている。なお、海外へのヒアリングでは、欧州においては藻類の商用化は 2030 年、米国においては 2040 年の商用化を見据えているとの声も聞かれている。

これまで NEDO は、藻類の生産効率の改善などの技術開発の支援を行ってきた実績があり、継続して培養効率の向上やバイオ燃料収率の向上に取り組むことで、国内での SAF 原料調達に将来的に貢献できるものと考えられる。

その際、米国では藻類技術開発において、株の特定～培養技術の開発～変換技術まで包括的に取り組まれることを参考に、日本において取り組む技術開発テーマを相対化することも一つのアプローチであるものと考えられる。

4) 回収難易度の高い油脂

前述のとおり、ブラウングリースに関しては、既に日本においても、賦存量の推計、飲食店舗におけるオンサイトの油脂抽出装置の導入、油脂抽出・残渣からの有用物質生産に関するフィージビリティ・スタディが行われている。例として関東圏域にある飲食店から回収されるブラウングリースは年間約 14 万トンと推計されており⁹²、これらを SAF 生産用にすることができれば、将来的に国内産の SAF 生産に貢献することができると考えられる。米国では、ブラウングリースの SAF への変換技術については D7566 Annex6 の CHJ 技術が活用可能であるものとされており、当該技術を用いたブラウングリースの SAF への活用を見込んだ検討が望まれる。なお、日本において公共下水道の維持・管理は市町村が行うものと下水道法に規定されており⁹³、ブラウングリースの活用のための方策を検討するに当たっ

⁹¹ The University of Queensland, The tree legume *Pongamia pinnata* on coal mine spoil: an integrated and sustainable rehabilitation, bioenergy and carbon farming production system (2013–2016), <https://researchers.uq.edu.au/research-project/14175> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

⁹² 国立環境研究所, 国立環境研究所ニュース Vol.36 No.4(2017 年 10 月), <https://www.nies.go.jp/kanko/news/36/36-4/36-4.pdf> (2023 年 10 月 19 日閲覧)

⁹³ 下水道法第三条

ては、地方自治体との連携が重要であるものと考えられる。

POME については英国のケースで見られるとおり、パーム生産国であるマレーシアやインドネシアと連携した取り組みが必要であると考えられる。

5) セルロース(残渣・燃料作物)

木質系(森林残渣)、草木系(農業残渣)の国内賦存量は他の原料と比して多いが⁹⁴、日本では森林が山地にあることから木質系の回収効率や変換効率の向上が課題となる。欧米の取組みに見られるように、これまで通り日本においてもサプライチェーン構築や評価の検討は継続されるべきと考えられる。

また、国内でのセルロース原料生産の向上を見据え、例えば米国のように被覆作物も兼ねたセルロース系の燃料作物の活用可能性を探り、日本における適性を評価することも一案と考えられる。

なお、海外からの原料調達の可能性に目を向けると、国内機関がセルロース系残渣からの液体燃料生産に取り組む例もあり⁹⁵、セルロース系残渣を SAF の原料として活用することも方向性の一つとして考えられる。

6.2.5 合成燃料(PtL, E-Fuel)

(1) 合成燃料(PtL, E-Fuel)の概要とこれまでの取組み

1) 技術概要

合成燃料は、CO₂と H₂を合成して製造される燃料を指す。この中で特に、電力(再エネ等のゼロエミッション電源由来)により製造された H₂、CO₂により製造される輸送用液体燃料は PtL (Power-to-Liquid, E-Fuel)と呼ばれる。

PtL に適用されるケロシン(ジェット燃料)への最終変換プロセスとしては、主に FT 合成および ATJ が挙げられる。これらのプロセスに供給される中間生成物は、FT 合成においては合成ガス(CO/H₂)、ATJ プロセスにおいては e メタノールである。合成ガス(CO/H₂)は水と CO₂の逆シフト反応や SOEC による共電解、e メタノールは H₂による CO₂の還元による製造法、光触媒による製造法、直接電解法などにより製造される。

各々のパスウェイによって熟度は異なるが、特に逆シフト反応による合成ガスの製造と、FT 合成の組み合わせによる SAF 製造については今後数年以内に商用化を目指す計画が多数見られる。この他、共電解を適用する計画、メタノールを経由して SAF を製造する計画も複数存在する。特に FT 合成によるパスウェイの現状は、一般的に各工程別に以下のとおりに整理されている⁹⁶。工程別には技術が確立している分野である。

- ・ 水素製造技術:アルカリ水電解、PEM は実用化済(各国でコスト削減に取り組む)

⁹⁴ JTTRI, 我が国における SAF の普及促進に向けた課題・解決策,
<https://www.mlit.go.jp/koku/content/001479537.pdf> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

⁹⁵ 国立研究開発法人科学振興機構, 無秩序なパーム農園拡大にストップ! OPT を活用し持続的農園へ,
https://www.jst.go.jp/global/kadai/h3001_malaysia.html (2023 年 9 月 4 日閲覧)

⁹⁶ 例として Opportunities for hydrogen in commercial aviation(CSIRO,2021)に合成燃料製造技術の構成要素と概況が整理されており、当該文献から記述した。

- ・ CO₂ 回収技術：アミン吸収法、物理吸収法は商用化済み(TRL9)（次世代の技術としてゼオライト・MOF 等の吸着法(TRL7)、膜分離法(TRL5)）。DAC(Direct Air Capture)については固体吸着剤、高温の水溶液ベースの吸収法が TRL9。
- ・ 合成ガス製造：逆シフト反応は技術確立済み。合成ガスの比率が高い高温帯(800℃以上)での安定運転が課題。共電解は TRL6-7、高温帯での SOEC 耐久性など課題。
- ・ FT 合成：技術確立済み。ケロシンを直接製造する場合の選択率向上

2) 日本におけるこれまでの取り組み

日本においては現在、グリーンイノベーション基金事業「CO₂等を用いた燃料製造技術開発」プロジェクトにおいて、2028 年までのパイロットスケール(300BPD 規模を想定)を目指し、逆シフト反応と FT 合成による基盤技術の確立が進められている。この他、石油エネルギー技術センター(JPEC)や石油元売等が連携した研究開発、エアラインや製造装置メーカーが連携したビジネスモデルの検討、石油元売り大手による合成燃料製造計画⁹⁷も進められている。

(2) 諸外国における技術開発・商用化動向

1) 商用化の動向

現在、諸外国(特に欧州)において、商用規模の合成燃料による SAF 製造を含む計画(数千～数万 kL の規模)が多数発表されている。具体的には、各社の発表ベースの情報として、以下の例が挙げられる。

- ・ Infinium 社 Ultra-Low Carbon Fuels Project(FT 合成、2023 年運開を目標、0.7 万 kL/年)
- ・ Arcadia eFuels 社(逆シフト反応・FT 合成、2024 年運開を目標、約 8 万 kL/年)
- ・ Norsk eFuel 社(逆シフト反応 or 共電解・FT 合成、2026 年運開を目標、5 万 kL/年)
- ・ Nordic Electrofuel 社(逆シフト反応・FT 合成、2026 年運開を目標、5 万 kL/年)
- ・ INERATEC 社 Pioneer plant(逆シフト反応・FT 合成、2024 年運開を目標、0.42 万 kL/年)

なお、実証規模(～数百 kL)では INERATEC 社が取り組む Next Gate プロジェクトが 350 トン/年(420kL/年)の規模ですでに運転開始済みとなっている⁹⁸。同社は合成燃料製造プロセスのモジュール化技術を得意としており⁹⁹、Next Gate プロジェクトにおいて適用されたモジュール技術を展開することを想定すると、H₂や CO₂の安定供給を実現すれば、2024 年運転開始予定の Pioneer plant においても運転開始を実現できるものと推測される。

なお、ドイツにおいては 0.42 万 kL/年(3.5kt/年)規模のプラントが 2024 年に実現したとしても野心的とも言える 2026 年 0.5%(50kt/年に相当)の PtL 導入義務を 2021 年 9 月に導入しており

⁹⁷ 出光興産、事業構造改革に向けた戦略、<https://sustainability.idemitsu.com/ja/themes/518>

⁹⁸ Ineratec, Plant Commissioning in Hamburg started, <https://www.ineratec.de/en/news/plant-commissioning-hamburg-started> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

⁹⁹ Ineratec, We have the most advanced technology, <https://www.ineratec.de/en/investors/technology> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

¹⁰⁰、政策が技術の商用化を担うプロジェクト実施主体を後押ししているともいえる。

2) 欧州の技術開発動向

欧州における合成燃料に係る技術開発プロジェクトとしては、VTT が中心となり、EU の支援による ICO2CHEM プロジェクト(2017～2022 年)、Business Finland の支援による e-Veturi プロジェクト(2021～2023 年)が実施されている。

ICO2CHEM プロジェクトでは逆シフト反応器とモジュール式 FT 反応器の組み合わせで構成される MOBSU(Mobile Synthesis Unit)を開発、実装し、逆シフト反応の実証や FT 合成反応の速度論的法則の特定(FT 合成原油の最適化技術の検討)などが行われた。

e-Veturi プロジェクトでは、SOEC による水素製造装置と、CO₂回収装置、ICO2CHEM で開発された MOSBU を組み合わせた合成燃料製造プロセスが形成され(当初は SOEC による共電解との組み合わせも検討)、2022 年 5 月から運転されている。当該プロジェクトでは、接触部分酸化(CPOX)と逆シフト反応の組み合わせを含む、全体の統合プロセスを 1000 時間以上、安定的に運転することが目指されたものである。

また、SOEC による高温共電解については現在、MegaSyn プロジェクト(2021～2025 年)において、SOEC のコスト削減、耐久性向上に向けた技術開発が進められており、合成ガスの大規模製造実証を目指している状況にある。

この他 EU が技術開発を支援している事例として、オランダ基礎エネルギー研究所(DIFFER)が中心となりプラズマ CO₂分離等を用いた PtL モジュール装置の開発実証を行う KEROGREEN、オランダ応用科学研究機構(TNO)が中心となり、エチレンを経由して CO₂と H₂から SAF を製造する技術を開発する TAKE-OFF などがある。

また、e メタノールを経由したパスウェイ¹⁰¹については、EDF グループに属する hynamics 社等が、2019 年頃に開始した ReWest100 プロジェクトがある。当該プロジェクトでは、30MW の水電解装置により製造するグリーン水素と産業排ガス(セメント工場から排出される CO₂)を活用し、メタノールと航空燃料を製造する構想が示されている。

3) 米国の技術開発動向

米国では前述のとおり Infinium 社が FT 合成プロセスを用いた商用化を目指しているが、エネルギー省バイオエネルギー技術局(DOE BETO)では、エタノール工場の CO₂を利用するプロセスに着目、CO2Rue(CO₂ Reduction and Upgrading for e-Fuels Consortium)として CO₂由来燃料の実証コンソーシアムを形成し、嫌気性合成ガスの生物学的変換による燃料利用が検討されている。

以上の諸外国において取り組まれる技術開発の方向性を纏めると以下のとおりとなる。

¹⁰⁰ Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs, https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger BGBl&start=%2F%2F%2A%5B%40attr_id=%27bgbl121s4458.pdf%27%5D#_bgbl_%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s4458.pdf%27%5D_1698059295370 (2023 年 10 月 23 日閲覧)

¹⁰¹ なお、ジェット燃料の製造は対象外であるが、チリにおいて HIF Global 社が実施する Haru Oni プロジェクトにおいて、メタノール合成燃料と、これを経由したガソリン製造が運転開始している。メタノール生産量約 750kL/年、一部はガソリンに変換(130kL/年)の規模である。

表 6-8 合成燃料(PtL、E-Fuel)技術における諸外国の主な取り組み

分野	技術開発の方向性	諸外国の主要取り組み
合成燃料(PtL)	① 長期間にわたる統合プロセスの安定運転	接触部分酸化(CPOX)と逆シフト反応の組合せの長時間(1000 時間)運転実証。(VTT・e-Veturi) ドイツではロードマップにおいて工業規模での全体的な技術統合・互換性を検討することを位置付け
	② 逆シフト反応・FT 合成装置のモジュール開発	逆シフト反応器と FT 反応器の組み合わせによるモジュールの開発(VTT・ICO2CHEM)
	③ FT 合成原油の最適化技術	FT 合成反応の速度論的法則の特定(VTT・ICO2CHEM)
	④ SOEC による共電解技術	SOEC のスケールアップ・コスト削減・耐久性向上(Sunfire・OMV)
	⑤ e メタノールを経由したパスウェイの実証	産業排ガスを活用した e メタノール製造とケロシンの供給(EDF 他)
	⑥ その他新規技術	プラズマ CO ₂ 分離等を用いた PtL モジュール(DIFFER 他)、エチレンを経由した合成燃料製造技術(TNO 他)、エタノール工場由来の回収 CO ₂ 利用(BETO)

出所)三菱総合研究所作成

(3) 今後の技術開発・商用化の方向性

1) 長期間にわたる統合プロセスの安定運転

前述のとおり、特に逆シフト反応・FT 合成によるパスウェイについては、個別の工程における技術は確立されているが、e-Veturi プロジェクトに見られるとおり、新たな統合プロセスの長時間の安定的な運転に向けた実証に当たっては、2023 年現在も諸外国において支援がある。商用化の目途が不透明な新たな統合プロセスを実装するに当たっては、引き続き長期安定運転のための実証に取り組むことが重要であるものと考えられる。

2) 反応装置の小型化・モジュール化とビジネスモデルの開発

VTT や INERATEC 社が参画した ICO2CHEM プロジェクトでは、逆シフト反応・FT 合成装置のモジュールの開発が行われた。合成燃料の製造においては分散型の再生可能エネルギー由来の電力の活用や CO₂ 排出源の活用も想定されることから、小型化・モジュール化された装置を分散して展開することも、合成燃料由来の SAF の商用化に向けて有効と考えられる。

3) e メタノールを経由した SAF 製造パスウェイの検討とビジネスモデルの開発

欧州においては e メタノールを経由したパスウェイを実装する構想が存在する。メタノールについては、特に海運燃料分野において導入を推進する取り組み¹⁰²も開始されており、他セクターにおける併産品の供給も含めたビジネスモデルを構想し、実装していくことに期待が持たれる。

4) 技術の商用化と政策スケジュールの連携

¹⁰² 例として以下の取り組みがある。<https://www.maersk.com/news/articles/2023/06/26/maersk-orders-six-methanol-powered-vessels> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

前述の商用化に関して述べた記述のとおり、ドイツでは PtL 導入義務が技術の商用化を後押ししている面も推察される。日本においては、SAF 官民協議会において規制と支援策が検討されているが、逆シフト反応、FT 合成技術に取り組む本邦企業もあり、これら技術の商用化を見据えた早期(2030 年以前、速やか)の規制スケジュールや支援策が設定されることが望まれる。

6.2.6 その他の分野

(1) HEFA 技術

水素化脱酸素技術を適用したプラントは、世界において陸上輸送用燃料向けの HVO (Hydrotreated Vegetable Oil)の生産用に商用化されて久しく、SAF を製造する事例も多数ある。HEFA 技術は少なくとも世界において 5 社の特許取得済みのライセンスが確立されており、水素化脱酸素反応、異性化反応の各々において、汎用的に用いられてきた触媒が適用されている。

一方で、技術開発への取り組みとしては、回収難易度が高く従来は原料として未活用のグリセリンなどの油脂原料の回収・変換技術開発が進展しており、英国の HYDROGAS プロジェクトでは、バイオディーゼル製造時に発生する廃棄物であるグリセリンを原料に、触媒技術を用いた接触改質技術開発により HEFA による SAF 製造を行う技術開発を行う。グリセリン回収の点では、EU の GLAMOUR プロジェクトにて都市ゴミからグリセリンを回収する技術、および前処理技術の開発事例がみられる。この他、ブラウングリースなどの回収難易度の高い油脂については、NESTE が HEFA による SAF 製造の原料としての活用を検討している。これらは国内に賦存する SAF 原料として期待が大きいため、回収・有効利用するための前処理技術等などの技術について、取組みを推進することが期待される。

日本国内においては、技術開発としては、水素化脱酸素反応と異性化反応の二つの機能を有する触媒を用いることによるコスト削減技術の開発が行われたが、2023 年現在においては商用化の計画が複数見られている。水素化脱酸素向けを含む触媒技術は従来、日本において基礎研究が継続されてきた分野であることから、今後他分野においても、日本の触媒技術の専門性を生かした技術開発が期待される。

(2) 水相改質による SAF 製造技術(HDO-SAK)

水相改質(Aqueous Phase Reforming, APR)は、低温(180℃～300℃)、低圧(1 Mpa～9 MPa 程度)環境下で触媒を介して糖などを水と反応させることで酸素含有量を減少させ、炭化水素を生成させる方法である。

米国の Virent 社は、水相改質に適用する独自の触媒を開発し、バイオ・パラキシレンの製造法などを開発してきたが、2021 年末にジェット燃料向けの芳香族成分(HDO-SAK: Hydrodeoxygenation Synthetic Aromatic Kerosene)を HEFA に添加することで 100%SAF としてテストフライトを実現させた。¹⁰³

日本においてはこれまで、高温及び超臨界領域の熱分解を得意とし取り組んできたが、分散型の原

¹⁰³ Virent, Virent's BIOFORM fuel component used in test flight of 100% sustainable aviation fuel, <https://www.virent.com/news/virents-bioform-fuel-component-used-in-test-flight-of-100-sustainable-aviation-fuel/> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

料の供給を想定する場合、低温低圧領域の処理技術も重要となることから、前述の水熱処理の領域も含めた技術的な知見の蓄積が今後期待される。

6.2.7 SAF 製造技術の開発等により目指す姿

以上の各分野における諸外国の動向などを踏まえ、これまで記した技術開発課題・事業性確保のための検討課題について、今後、下図に示すスケジュールを念頭に取り組むことが期待される。

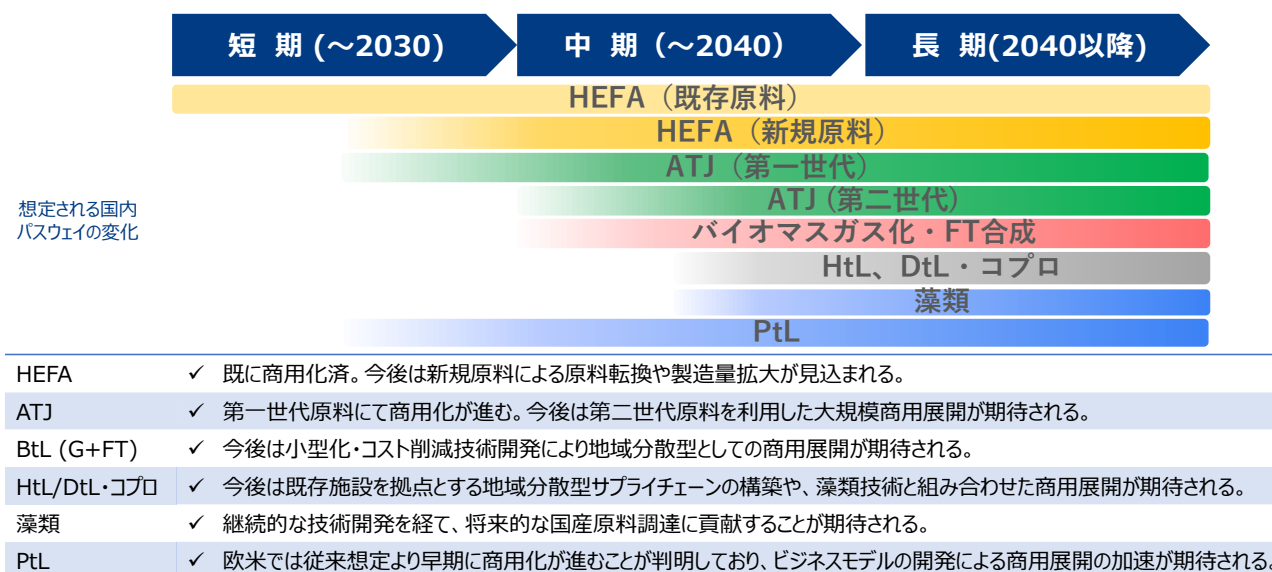


図 6-1 SAF 製造技術の開発等により目指す姿

出所)三菱総合研究所作成

HEHA については、既存原料由来の SAF が既に商用化されている一方、新規の油脂作物やブラウングリース等の回収の難易度が高い原料利用の開発も進んでいる。これらの変換技術は、既に確立された技術の適用が想定されることから、早期(2020 年代)の本格導入が期待される。

ATJ については、第一世代原料由来のアルコールを中間生成物とする大規模 SAF 製造計画が各地で立ち上がりつつある。今後は第二世代バイオエタノール等の中間生成物のコスト削減や効率改善に取り組むことで、中期的(2030 年頃)に原料を第二世代にシフトさせつつ、引き続き大規模製造を行うことが期待される。

BtL(バイオマスガス化・FT 合成)については、中期的な視点(2030 年以前)を見据え、過去の実証成果を生かしつつコスト削減等に取り組むとともに、原料となるセルロース系原料が地理的に分散している特性を踏まえた SAF 製造事業のモデル、そして次世代の技術として CCS との組み合わせを検討することが期待される。

HtL/DtL、コプロセッシングについては、急速熱分解技術や HtL 技術による原油製造、およびコプロセッシング技術ともに実証が進みつつある。今後は、中長期的な観点(2030 年頃)からも見据えながら、既存石油精製施設を拠点とした HtL 油・DtL 油のコプロセッシングによる地域分散型サプライチェーンの構築や、微細藻類のコプロセッシングによる SAF 製造プロセスの実用化が期待される。

微細藻類については、HtL 及びコプロセッシング等の変換技術や SAF の原料としての生産技術の開

発に引き続き取り組み、中長期的な観点(2030年以降)からも見据えながら SAF の原料として実用化されることが期待される。

PtL については、欧州ではドイツを中心に、足元においてすでに商用規模のプラントが運転開始する可能性が示唆されている。日本においても欧州の流れを注視しつつ、足元の実証事業の成果や、本邦企業が有する要素技術の活用、更には水素製造コストの削減やビジネスモデルの確立等により、早期(2030 年以前、速やか)に商用化を目指すことが望まれる。

なお、これらの SAF 製造技術の開発等により目指す姿(時期)については、2023 年 11 月に ICAO が開催予定の Third Conference on Aviation Alternative Fuels (CAAF/3)など、航空部門における排出削減に係る最新の議論を踏まえ、適宜調整を行うことが必要と考えられる。¹⁰⁴

¹⁰⁴ ICAO, Third ICAO Conference on Aviation and Alternative Fuels (CAAF/3), <https://www.icao.int/Meetings/CAAF3/Pages/default.aspx> (2023 年 10 月 23 日閲覧)

契約管理番号

22102224-0