

# 航空業界の脱炭素化に貢献する バイオマスガス化 FT 合成バイオジェット燃料の実証

Demonstration Activity of the Bio-Jet Fuel Contributing  
for the Carbon Neutrality in the Aviation Industry



山内 康弘\*<sup>1</sup>  
Yasuhiro Yamauchi

篠田 克彦\*<sup>2</sup>  
Katsuhiko Shinoda

山下 登敏\*<sup>3</sup>  
Takatoshi Yamashita

田邊 一太郎\*<sup>4</sup>  
Ichitaro Tanabe

小嶋 保彦\*<sup>5</sup>  
Yasuhiko Kojima

水野 拓哉\*<sup>6</sup>  
Takuya Mizuno

航空業界の脱炭素化に関し、国際民間航空機関 (ICAO: International Civil Aviation Organization) が 2021 年以降 CO<sub>2</sub> 排出量増加制限の目標を掲げ、その主な対策として持続可能な航空機燃料 (以下、SAF: Sustainable Aviation Fuel) の導入・普及が挙げられている。三菱重工業株式会社 (以下、当社) が開発したバイオマスガス化技術とフィッシャー・トロプシュ合成 (FT: Fischer-Tropsch) 技術の組合せによるバイオジェット燃料もこれに含まれる。当社は、株式会社 JERA、東洋エンジニアリング株式会社、及び国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency) と共同で、2017 年から 2021 年にかけてバイオマスガス化-FT 合成技術によるパイロットプラントを建設して、バイオジェット燃料 (以下、BJF: Bio Jet Fuel) を製造し、燃焼及びエンジン試験を行うと共に、JAL フライトに供給した。当社のバイオマスガス化技術はエナジートランジションの一角を担うエネルギー変換技術であり、この技術を活用して航空業界脱炭素化へのソリューションを提供していく。

## 1. はじめに

航空機燃料について、化石燃料由来のジェット燃料 (ケロシン) の代替として、水素やアンモニア、さらに電動航空機の開発が行われているが、未だ実用化に至っておらず、特に長距離フライトにはジェット燃料に替わるものは見当たらない。航空機業界では、国連の専門機関である ICAO が 2021 年以降 CO<sub>2</sub> 排出量を増加させないとの目標を掲げ、2035 年までの国際航空路線におけるカーボンオフセット及び削減スキーム (CORSIA: Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) を設定した。目標達成のため、管制の効率化、新規機材の導入の他、主要な対策として SAF は必須と期待されている。植物由来の原料、動物油、回収 CO<sub>2</sub> と再生エネルギー電力を用いた電解水素から作られたものを Neat SAF と呼び、JetA-1 燃料と混合したものを SAF と呼んでいる。Neat SAF は、燃焼によって発生した CO<sub>2</sub> が持続可能なエネルギー循環を行える燃料のことである。Neat SAF としては各種油脂や、アルコールから合成するもの、植物をガス化した合成ガスを、FT 合成を用いて製造するものの実用化が検討されている。

当社では 1990 年代末頃より、カーボンニュートラルなバイオマスの熱化学変換の要となるガス化技術の開発に取り組んできた。その中で 2017 年から 2021 年に国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 委託事業で株式会社 JERA、東洋エンジニアリング株式

\*1 パワードメイン ETP 事業本部 SPMI 事業部ボイラ技術部 主幹技師 工博

\*2 MHI Executive Experts 株式会社 技術士 (機械部門)

\*3 パワードメイン ETP 事業本部 SPMI 事業部ボイラ技術部 次長

\*4 株式会社 JERA 国内事業運営・開発統括部 国内事業開発部 事業創出ユニット 課長

\*5 東洋エンジニアリング株式会社 エンジニアリング・技術統括本部 プロセスエンジニアリング部 担当部長 技術士 (化学部門)

\*6 国立研究開発法人 宇宙研航空究開発機構 航空技術部門 航空環境適合イノベーションハブ 主任研究開発員

会社及び国立研修開発法人宇宙航空研究開発機構との共同研究として、株式会社 JERA 新名古屋火力発電所構内に木材を原料としたガス化FT合成パイロット設備を建設して、木材からBJFまで一貫して製造できることを実証した。製造したBJFは2021年6月にJAL羽田-新千歳便に搭載し、実フライトに供することができた。本報ではこの事業の内、BJFの利用技術について述べると共に、当社が開発したバイオマスガス化技術を基にしたエネルギー転換技術について述べる。

## 2. バイオマスガス化 FT 合成プラントの特徴

### 2.1 ガス化炉形式の特徴

持続可能なBJFを製造するには、持続可能な原料から製造する必要がある、森林資源は適正に管理された植林と成長量に見合う伐採量にすれば持続可能な資源となりうる。このような木質バイオマスのBJF合成技術として、[図1](#)に示すガス化FT合成があるが、重要なのは、安定的かつ高効率にFT合成を可能とする原料ガスを生成できるガス化技術にある。ガス化型式には、[図2](#)の通り粉体とガスの混相流である固気混相流の形態により固定充填層、流動層、噴流層がある。バイオマスのハンドリングの面からは20~30mmのチップを利用できる固定充填層、流動層に利点がある。また、水分が多い場合には熱容量が大きな流動層に利点がある。一方、バイオマスガス化で問題となるタール発生に関しては温度が高いほど発生量が少ないが、温度が高いとバイオマスの灰がクリンカを生成するリスクが高まる。この場合固体が互いに接触しにくい噴流層の方がクリンカを生じるリスクが少なく、ガス化温度も上げることが可能でタール発生には有利となる。このようにバイオマスハンドリングとガス化の安定性は相反するところがあり両者を両立するのは難しい。

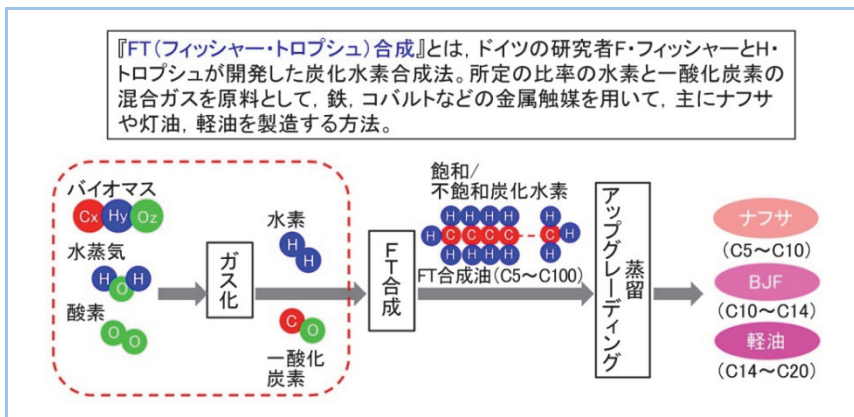


図1 ガス化 FT 合成によるBJF製造

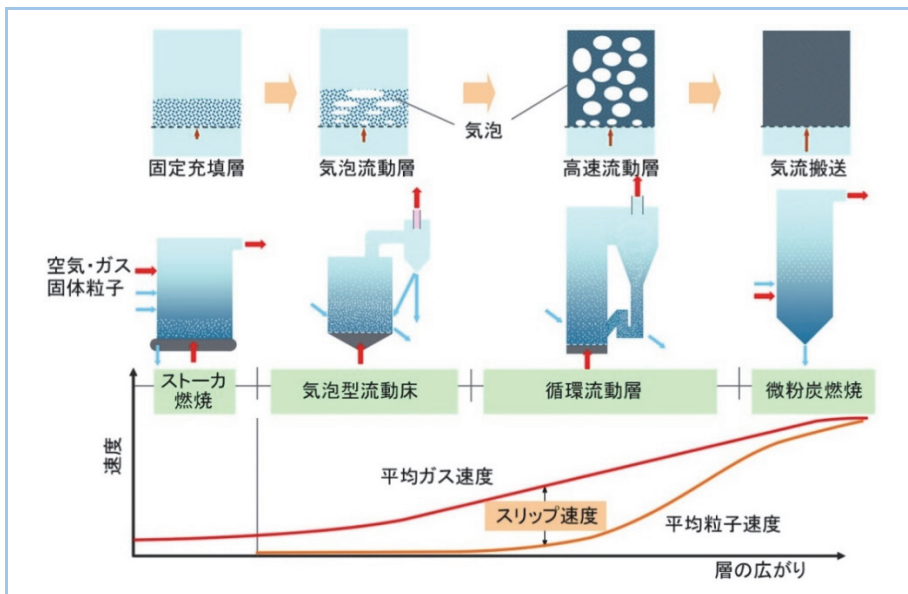


図2 ガス化に用いられる固気混相流技術

当社では、石炭のガス化技術で噴流層式を採用しているが、粉体を加圧されたガス化炉に供給するためにロックホップシステムを用いており、閉塞防止のため石炭を流動性がよい粉体形状・粒径に粉砕する必要がある。一方、一般的にバイオマスは繊維質のために粉砕性が悪く、石炭のように細かく粉砕するには大きな動力を要する。そこで比較的粗い 10mm 程度までの粉砕に留めて噴流層でガス化できる技術を開発してきた。図3に示すようにガス化炉の形状を工夫することで粗い粒子から細かい粒子に必要な炉内滞留時間を持たせることでガス化することができるガス化炉である。このようにすることでガス化温度が高い利点を持ちつつ、粉砕動力を低減することができる。

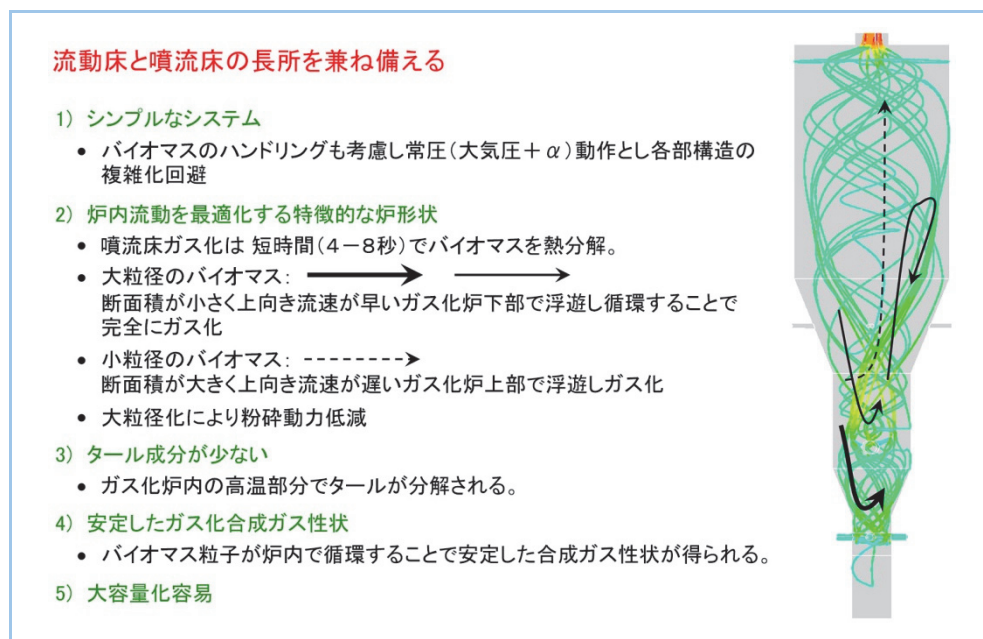


図3 バイオマス噴流層ガス化炉の特徴

## 2.2 バイोजェット燃料製造システムパイロット試験

2017年から2021年にかけてこのガス化を用いて、図4に示す東洋エンジニアリング株式会社のFT合成装置と組み合わせ、バイオマスからジェット燃料まで連続生産するパイロットプラントを建設し、製造した燃料を商用フライトに供給した。

パイロットプラントによる検証試験は図5に示す体制で実施し、株式会社 JERA 新名古屋火力発電所構内の敷地に図6に示すバイオマス処理量 0.7ton/日の設備を建設した。ガス化設備は当社が、FT合成設備を東洋エンジニアリング株式会社が建設した。JAXAは製造したバイオジェット燃料の燃焼特性・エンジン特性試験を実施した。

ガス化設備は合計 3079 時間、FT合成設備は 1543 時間運転され、30 日間の連続運転を JERA の運転員だけで実施しており、製造した改質油は 4233L、その内純 BJF は 2366L で、全て ASTM 規格に適合した。このパイロット試験でプロセスとしての成立性が実証できたと評価している<sup>(1)</sup>。

製造した燃料の燃焼特性について、従来燃料 JET A-1 との混合比を 0~100%に変化させて評価した結果、図7に示すように、排気ガス組成などの燃焼特性は JET A-1 燃料と遜色なく、特に PM(Particle Matter)発生量は芳香族炭化水素が少ないため JET A-1 燃料に比較して顕著な低減が見られた。PMの低減対策としてもBJFの優位性が示された。またコロナ禍の影響で実エンジン試験ができなかったものの、高知工科大学が所有する模型ジェットエンジンを用いた性能計測でも JET A-1 燃料と比較し推力、吸気流量、燃料消費率、排気温度等の性能に差がないことが確認されている<sup>(2)</sup>。

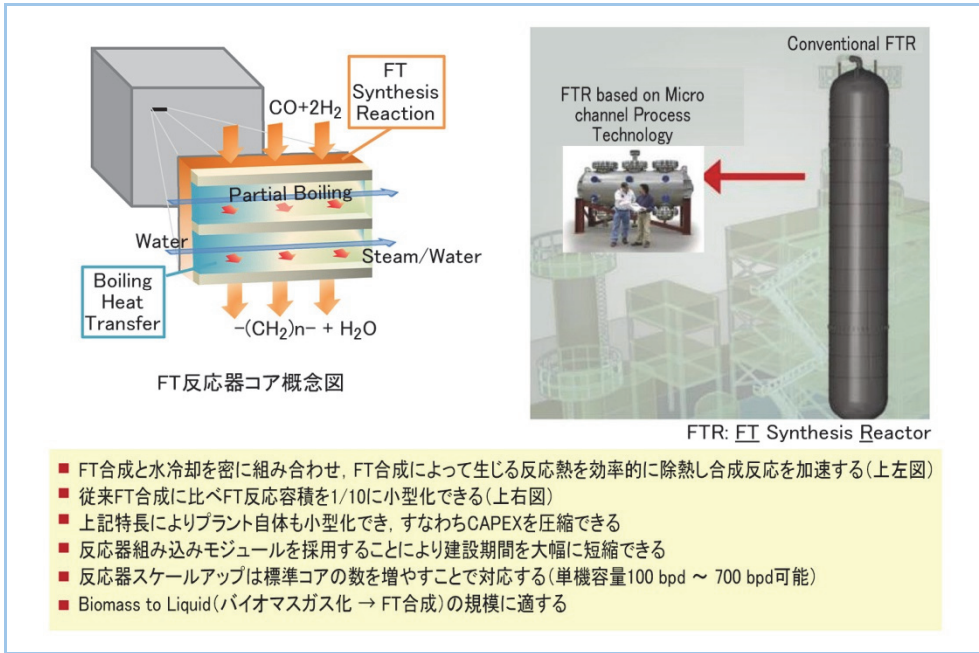


図4 FT合成装置の概要

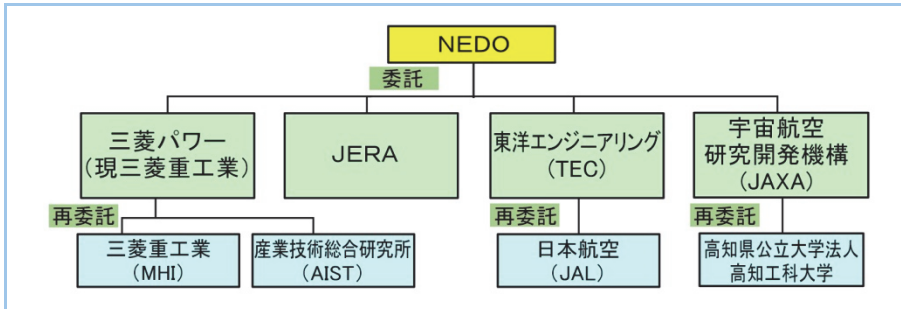


図5 パイロットプラント研究実施体制

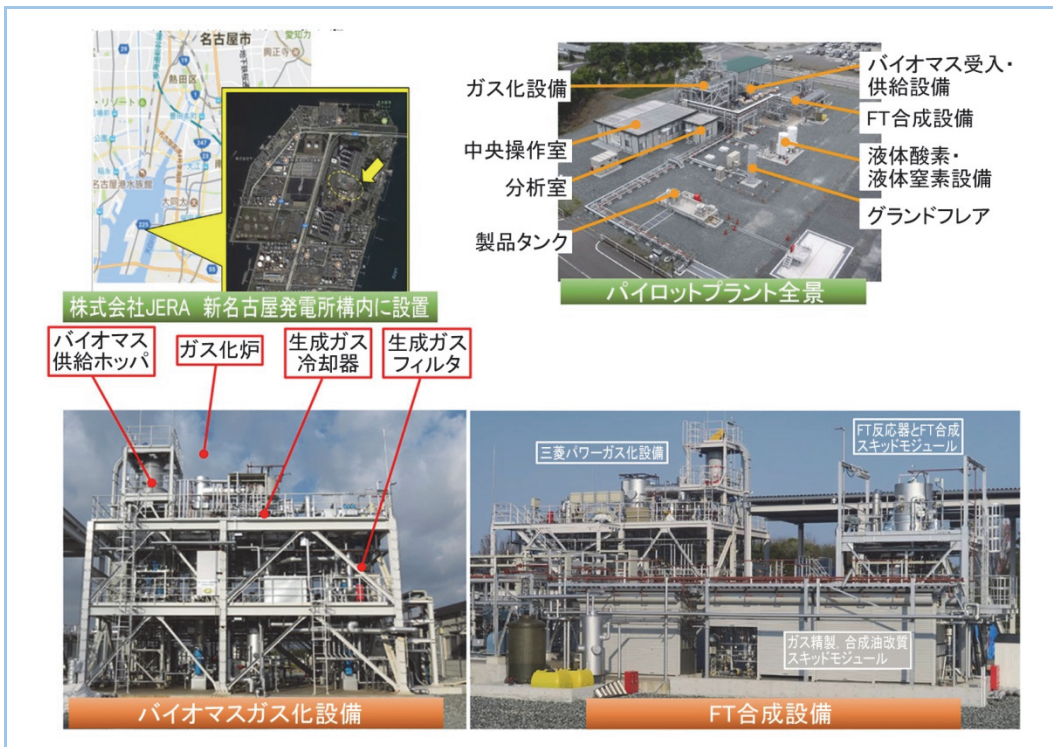


図6 パイロットプラント設備

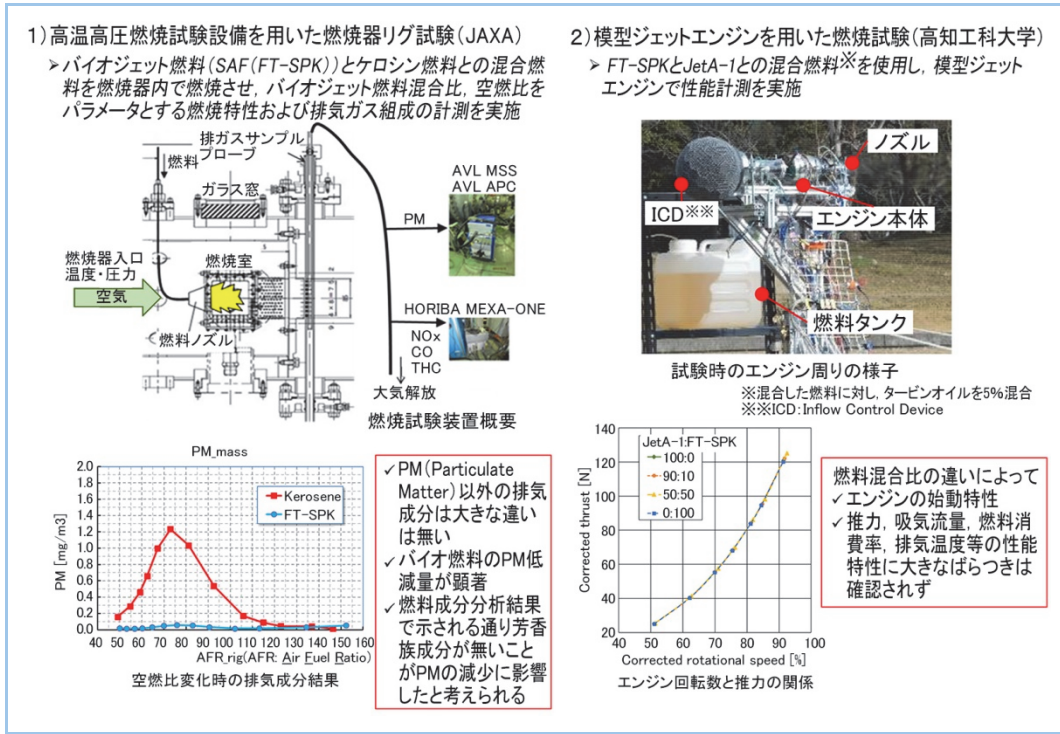


図7 SAFの燃料燃焼特性試験

### 2.3 商用フライトへの適用

製造したBJFの内283Lを石油会社の工場にJET A-1燃料と混合し、SAFとして2195Lを、2021年6月17日のJAL515東京/羽田発新千歳行きにドロップイン燃料として搭載、飛行した。Neat SAF及びJET-A1混合後のSAFとの双方のASTM規格に合致しているかどうか検査を行いながら進めた。また、混合量は3%であり国土交通省のプレスリリース<sup>(3)</sup>に公表されている。木質バイオマスから一貫システムで製造されたバイオジェット燃料で商用フライトを飛行させたのは世界でも初めてである。これにより、図8に示すバイオジェットの製造から航空機への供給までの手順が実証された。

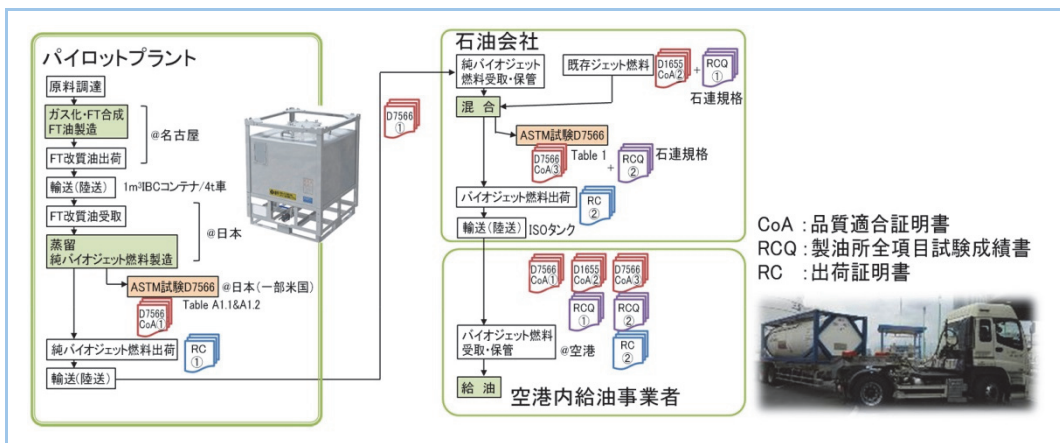


図8 バイオジェットの製造から航空機への供給までの手順

## 3. SAFの規格・認証

SAFの規格はASTM D7566に定められており、同規格のAnnexに定められた原料及び製造方法でしか製造することができず、製造方法毎に従来ジェット燃料との混合上限比率が定められている。新規の製造方法を用いる場合にはASTMの規格委員会の承認を得る必要がある。ガス化FT合成技術はAnnex1に既に登録された技術で、最大50%まで混合することができる技術である。表1に2020年時点で承認されている技術を示す<sup>(4)</sup>。

また、CORISIA で用いる SAF を製造するには、CORISIA 適合燃料(CEF; CORISIA Eligible Fuel)であることを証明する基準に従って製造する必要がある、第三者認証機関によって審査・認証が行われる。CEF には持続可能な航空燃料(SAF)と低炭素化石燃料(LCAF: Low Carbon Aviation Fuel)がある。何れも CORISIA の持続可能性基準を満たす必要がある。CORISIA の持続可能性基準は、燃料製造の間接土地利用変化を含むライフサイクルベースで、少なくとも化石燃料比 10%の正味温室効果ガス削減の実現と、高い炭素ストックをもつ土地から得られたバイオマスをを用いていないことが求められる。高い炭素ストックをもつ土地とは、かつて原生林、湿地、泥炭地であった土地から 2008 年1月1日以降に転換された土地を示す。また、2008 年1月1日以降の土地利用変化を伴う場合には、IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)の土地区分を用いて間接土地利用変化(ILUC: Induced Land use Change)による排出量を算定し、製造による排出値(Core LCA)に加算することになっている。CEF の LCA を求めるには ICAO が定めるデフォルト値をそのまま利用する方法と ICAO が定める方法で算出した実測値を利用する方法がある。図9に CEF の LCA デフォルト値の例を示す<sup>(6)</sup>。ガス化 FT 合成(FTJ)は他の製造方法に比べて低いデフォルト値とされている。

表1 ASTM D7566 規格の Annex(2020 年時点)

Annex	精製方法	混合率
Annex 1	Fisher-Tropsch 法により精製される合成パラフィンケロシン (FT-SPK)	最大 50%
Annex 2	植物油等の水素処理により精製される合成パラフィンケロシン (Bio-SPK 又は HEFA)	最大 50%
Annex 3	発酵水素化処理糖由来のイソパラフィン (SIP)	最大 10%
Annex 4	非化石資源由来の芳香族をアルキル化した合成ケロシン (SPK/A)	最大 50%
Annex 5	アルコール・ジェット由来の合成パラフィンケロシン (ATJ/SPK)	最大 50%
Annex 6	脂肪酸エステル・脂肪酸の熱変換により精製される合成ケロシン (CHJ)	最大 50%
Annex 7	炭化水素・エステル・脂肪酸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 (HC-HEFA SPK)	最大 10%

出展 石油連盟 航空燃料専門委員会 持続可能な代替航空燃料(SAF)の取扱要領 初版, 2021 年8月

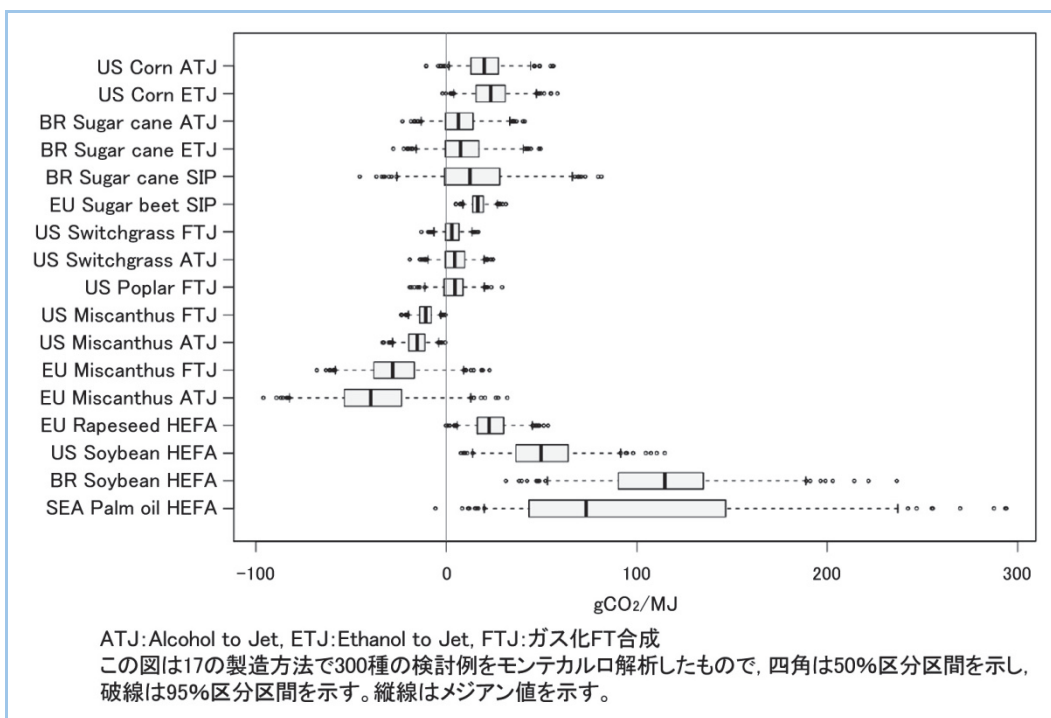


図9 CFE の LCA デフォルト値の例

現在基準を保有する団体は ISCC (International Sustainability and Carbon Certification) と RSB (Roundtable in Sustainable Biomaterials) の二団体であり、この二団体が承認した認定機関が、認証を行う第三者認定機関を審査・認定する<sup>(6),(7)</sup>。認証は Chain of Custody 基準 (CoC 基準) で行

われる。CoC 認証は、原料の発生地から回収、加工、商社にいたるまで透明性のあるサプライチェーンを保証するもので、サプライチェーンの各取引ポイントで ISCC/RSB 認証された製品が認証された生産者から調達した原料であることを保証する。CoC 基準は基準の要件を満たす管理システム、ISCC/RSB 認証に登録されているサプライヤーの確認、取引書類、取引量の照合、トレーサビリティの確認、製品の識別及びラベル付けを行うことが原則として求められる。認証を得ようとする製造者は第三者認証機関に申請書を提出・契約し、基準書で求められる要件を満足するか内部監査を行って審査を受ける必要がある。

#### 4. バイオマスガス化によるエナジートランジション

ガス化・FT 合成では、バイオジェット燃料の他にディーゼル油、ナフサ、LPG が副生される。これらもバイオマス由来のグリーン燃料であり、例えばナフサは化学合成に適した純度の高いものでプラスチックの原料として利用可能である。また、製造過程で発生する CO<sub>2</sub> はバイオマス由来の CO<sub>2</sub> であり、回収することで、現在国内製油所の統廃合で供給不足となっている国内 CO<sub>2</sub> の新たな供給源として期待される可能性がある。ガス化炉から排出されるチャーもバイオマス由来であるため、地中炭素固定や肥料としての利用などが考えられる。また、一酸化炭素と水素から合成できるものであれば FT 合成の代わりにプロセスを置き換えることで製造可能である。

このように、バイオマスガス化は従来化石燃料が担ってきた化学工業プロセスを代替できるエナジートランジション技術の一つであると言える。近年再生可能エネルギー固定価格買取制度 (FIT: Feed in Tariff 制度) の施行により、国内にバイオマス発電設備が数多く建設されてきた。同じ固体燃料であることから石炭の代替・脱炭素燃料として発電用に用いられたものである。一方、今後ゼロエミッションを目指すのであれば石油の代替・脱炭素も議論されていくこととなる。この場合、原料として考えられているのがバイオマス、あるいは大気中 CO<sub>2</sub> と再エネ水素による炭化水素合成技術である。将来的に再エネ電力価格が低減し、大気中から CO<sub>2</sub> を安価で取り出すことができれば CO<sub>2</sub> と再エネ水素を原料とできるが、それまでの間はバイオマスを原料として用いることが考えられる。バイオマスガス化による化学製品の合成は、まずは代替手段がない航空燃料の製造によって、技術的に進展し、社会実装が行われるであろうが、将来的に脱炭素化の進展で状況によっては、化学製品の主要な原料となる可能性がある。この時にバイオマスガス化技術は主要なエナジートランジション技術として重要な役割を占めていくと期待している。

#### 5. まとめ

当社は 1990 年代末頃より開発してきたバイオマスガス化技術を SAF の一つであるバイオジェット製造に適用して、プロセス実証を行って実用化可能な技術であることを実証した。本技術は安定した性状のガス化ガスを生成できるため、化学合成プロセスに適したガス化技術であり、将来的に石油に代わって環境性能に優れた燃料及び化学製品製造に適した原料を生み出す炭素エネルギー変換技術である。

当社としてはバイオジェット製造用ガス化技術として実用化を進めながら、将来的には化学製品用原料を供給する技術となることを期待している。

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP17005) の結果得られたものです。

#### 参考文献

- (1) 藤井篤ほか、バイオジェット燃料製造技術の開発、三菱重工技報、Vol.58 No.3(2021)
- (2) K. Okai etc. Emission and Engine Operation with SAF (Sustainable Aviation Fuel) Produced through Integrated Process of Woody Biomass Gasification and Fisher-Tropsch Synthesis, AIAA Propulsion and Energy Forum, August 9-11, 2021

- 
- (3) 国土交通省ホームページ, 報道・広報, 国産 SAF を使用した本邦航空会社によるフライトを実施しました, 令和3年6月18日, [https://www.mlit.go.jp/report/press/kouku08\\_hh\\_000023.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/kouku08_hh_000023.html)
  - (4) 石油連盟 航空燃料専門委員会 持続可能な代替航空燃料(SAF)の取扱要領 初版, 2021年8月
  - (5) CORSIA SUPPORTING DOCUMENT CORSIA Eligible Fuels-Life Cycle Assessment Methodology, June 2019
  - (6) ISCC ウェブサイト Sustainable Aviation Fuels Certification with ISCC  
<https://www.iscc-system.org/about/sustainable-aviation-fuels/corsia/>
  - (7) RSB ウェブサイト CORSIA CERTIFICATION, <https://rsb.org/rsb-corsia-certification/>