

R1-2 バイオジェット燃料の最新動向

1. はじめに

ICAO (International Civil Aviation Organization: 国際民間航空機関) が成長を続ける航空輸送需要を念頭に、2020 年以降の航空セクターにおける CO₂ 排出量増加抑制を目指す CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) の施行が目前に迫っている。航空の CO₂ 排出量抑制には、非石油由来・とりわけバイオマスのように製造段階において空気中の CO₂ を取り込む原料から精製され、運航時の CO₂ 排出量を差し引きし、系総量としての CO₂ 排出量削減 (この考え方を、「カーボンオフセット」という) を実現するバイオジェット燃料の普及が不可欠であるとされ、世界中で投資・実用化推進が進んでいる。本稿では、バイオジェット燃料の最新動向に関して概説する。

2. バイオジェット燃料の研究開発～普及の背景

2.1 二酸化炭素排出量削減に向けた業界の取組

ビジネスのグローバル化、開発途上国の発展に伴い、航空輸送は今後も大きく成長を続けることが見込まれる。ICAO が 2016 年に行った試算によると、グローバルの航空輸送需要は 2012 年以降 30 年間で年率 4.5% の成長を見込んでいる¹⁾。他方、輸送業界においては自動車に EV シフトの波が押し寄せるなど、脱 CO₂ の動きが加速している。航空業界としても CO₂ 排出量の削減を要求する声が高まり、業界の自主的な取り組みとして、2016 年の ICAO 総会において二酸化炭素 (および温室効果ガス) 排出量削減制度を導入することで合意した²⁾。

この合意では、2021 年以降の国際航空輸送分野の CO₂ 排出量を 2020 年レベルに留めることとした。この合意は CORSIA という市場メカニズムを活用した制度を導入し、参画する各国航空会社には、所定の CO₂ 排出上限量が割り当てられ、燃費改善やバイオジェット燃料の導入による達成が求められる。未達量に関してはカーボンクレジット購入によるカーボンオフセットを持って達成を促すものである。中でも、バイオジェット

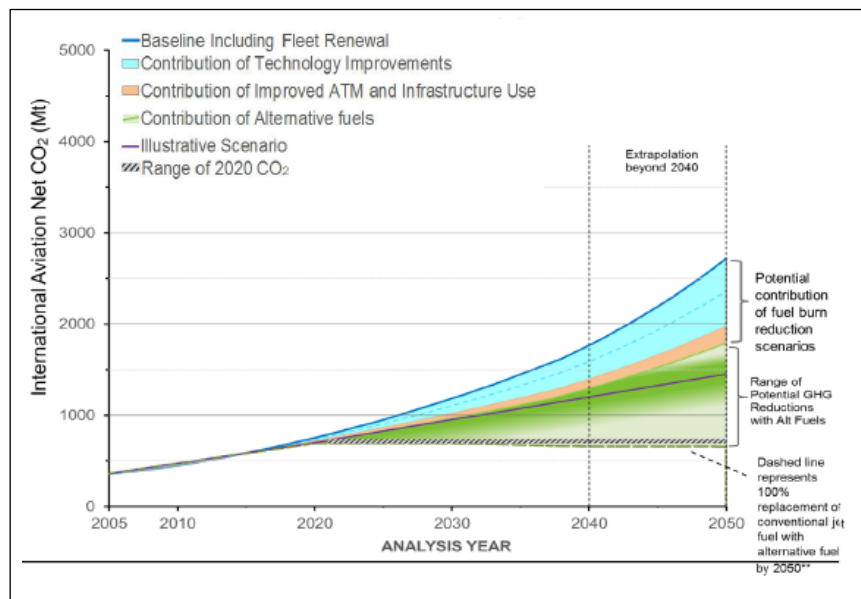


図 2.1-1 ICAO が予測する 2050 年までの国際航空輸送セクターによる CO₂ 排出量と各技術革新による予測削減量³⁾ (緑色部分がバイオジェット燃料による寄与分)

燃料の導入は、問題解決の決定的要素として位置づけられている(図 2.1-1 参照)³⁾。

この動きに前後して、バイオジェット燃料の開発・普及活動が進んできた。2009 年にバイオジェット燃料を含む、非石油由来ジェット燃料の国際規格である ASTM D7566⁴⁾が制定され、今日までに 5 種類のバイオジェット燃料の商業利用が認められてきた。また、同時に今日に至るまでに様々な開発・商業飛行が実施されており、欧米の航空会社を中心に、商用定期便への適用が進められている。

2.2 バイオジェット燃料を使った商業飛行にあたっての要件

既に普及が先行していたバイオディーゼルと違い、民間航空機向けバイオ燃料には、関連するインフラ整備への巨額の投資回避や、製品の長いライフサイクルへの対応のため、ドロップイン型であることが要請された。ドロップイン型とは、現行の化石由来燃料と基本的に同様の品質・仕様であり、既存のジェットエンジンにそのまま投入（ドロップイン）し、使用可能であることを意味する。

航空機に商用使用するためのバイオジェット燃料は、国際規格として ASTM D7566 において要件が定義されている。この規格では、純バイオジェット燃料および石油由来ジェット燃料との混合バイオジェット燃料に関する要件が、原料や製造方法ごとに定義、認証されている。なお、前述の通りバイオジェット燃料はドロップイン型とされる一方で、現時点では石油由来ジェット燃料との混合の上で使用することが義務付けられており、ASTM D7566 において種別にブレンド率が 10~50%の範囲で定義されている。これは、安全性を特に重視する航空業界において、バイオジェット燃料は未だ安全実績を積み上げるステージにあるため、後述の通り試験飛行レベルにおいては数社が 100%バイオ燃料飛行を成功させている。

従来の石油由来ジェット燃料は、炭素数 9~15 の炭化水素で構成されており、石油を分留することによって得られる。バイオジェット燃料製造の基本的な流れは、非石油由来の各種原料（バイオマスや廃食油、動植物油脂、都市ゴミなど）を、種々化学反応を用いることで石油由来ジェット燃料に近い炭化水素に改質・抽出し、ジェット燃料化する。

バイオジェット燃料の商業使用にあたっては、石油由来ジェット燃料との混合の上で使用することが義務付けられていることは先に述べた通りであるが、混合燃料の基本的な在り方としては純バイオジェット燃料（ニートバイオジェット燃料）製造後に、厳密な設備管理の上で石油由来ジェット燃料と混合されることが求められる。その一方で、原料段階において石油とバイオ系原料（ないしは中間加工後原料）を混合する混合改質（Co-Processing）の試みも技術実証が進められており、現在は動植物性油脂等をベースとした原料については 5%までの混合改質が、石油由来ジェット燃料の国際規格である ASTM D1655 において認められている⁵⁾。この混合改質は、既存の石油精製設備をそのまま活用できるため、バイオ燃料普及の上で常に障壁となる、新規設備投資を抑制する解として期待がかかる。

2.3 現在認められているバイオジェット燃料の種類と普及状況

ASTM 規格は原料と製造方法の組み合わせで認証されており、認証にあたっては別途ジェット燃料の新規規格の設定要領規格である ASTM D4054 STANDARD PRACTICE FOR EVALUATION OF NEW AVIATION TURBINE FUELS AND FUEL ADDITIVES において制定されている審査基準（物質組成分析から、エンジンテストまで）をクリアしている必要がある⁶⁾。今日までに、認証が完了しているバイオジェット燃料（厳密には、石油由来原料以外からなる代替ジェット燃料）は6種類である。

① ASTM D7566 Annex1 FISCHER-TROPSCH HYDROPROCESSED SYNTHESIZED PARAFFINIC KEROSENE

通称 FT-SPK。主な原料は木質バイオマスや都市ゴミなど有機物全般。これらをガス化(Fischer-Tropsch 合成)後、水素化処理を行いジェット燃料化する。商業飛行にあたっては、50%までの混合が認められている。

② ASTM D7566 Annex2 SYNTHESIZED PARAFFINIC KEROSENE FROM HYDROPROCESSED ESTERS AND FATTY ACIDS

通称 HEFA-SPK。主な原料は廃食油、動植物油脂といった生物系油脂。これらを水素化処理によってジェット燃料化する。使用設備が既存の石油精製設備の改造で済むこともあり、現時点で最も多く商業化されている技術である。商業飛行にあたっては、50%までの混合が認められている。

③ ASTM D7566 Annex3 SYNTHESIZED ISO-PARAFFINS FROM HYDROPROCESSED FERMENTED SUGARS

通称 SIP。主な原料はサトウキビのようなバイオマス糖。これらを発酵技術により炭化水素(ファルネセン)に転換し、水素化によってバイオジェット燃料化する。商業飛行にあたっては、10%までの混合が認められている。

④ ASTM D7566 Annex4 SYNTHESIZED KEROSENE WITH AROMATICS DERIVED BY ALKYLATION OF LIGHT AROMATICS FROM NON-PETROLEUM SOURCES

通称 SPK/A。非石油由来の芳香族をアルキル化することにより、合成ケロシン化する。商業飛行にあたっては、50%までの混合が認められている。

⑤ ASTM D7566 Annex5 ALCOHOL-TO-JET SYNTHETIC PARAFFINIC KEROSENE (ATJ-SPK)

通称 ATJ。バイオマス糖や都市ゴミより得られるバイオイソブタノールや、都市ゴミ・工場排気ガス由来のバイオエタノールをエチレンへ転換・重合し、バイオジェット燃料化する。商業飛行にあたっては、50%までの混合が認められている。

⑥ ASTM D7566 Annex6 SYNTHESIZED KEROSENE FROM HYDROTHERMAL CONVERSION OF FATTY ACID ESTERS AND FATTY ACIDS

通称 CHJ。廃食油、動植物油脂などの生物系油脂を水熱処理→水素化処理する技術

その他、ASTM 規格において主に下記技術に関する新規認証の検討が進められている⁷⁾。

- ① CPK (Integrated Hydrolyolysis and Hydroconversion Cycloparaffinic Kerosine) – 主に木質バイオマスを特殊な触媒技術で熱分解し、炭化水素化する技術
- ② HC-HEFA (Hydroprocessed Hydro Carbons, Esters and Fatty acids) – 主に特殊な藻類 *Botryococcus braunii* が分泌する藻油(炭化水素)を水素化処理しバイオジェット燃料化する技術。改質技術自体は Annex2(HEFA)のものと同一。日本の IHI が推進しているプロジェクトである(後述)。
- ③ FT Co-Processing – 既にニート燃料の製造技術として認められている、FT-SPK の工程で作られる中間材料(木質バイオマスや都市ゴミなど有機物全般を Fischer-Tropsch 合成して得られた炭化水素)と石油の混合改質の新規認証も検討が進められている。

主に航空会社を中心に、上記のようなバイオジェット燃料普及に向けた投資が活発化しており、上記の製造技術を用いた様々な製油所づくり・プロジェクトが進められている。次節において、各設備の稼働状況や進行中・構想段階の将来プロジェクトを記述する。

3. 世界におけるバイオジェット燃料の動向

認証作業中のものも含め、数々のバイオジェット燃料製造技術の規格認証が進むと共に、バイオジェット燃料の普及・投資活動が進んでいる。CAAFI(Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative – FAA を中心としたバイオジェット燃料の商業導入を目的としたイニシアチブ)の試算によると、2016年に米国単体での民間航空機用ジェット燃料需要は2,000億ガロン以上あったのに対し、2019年2月現在で将来の供給計画を含めグローバルで計2億ガロン以上のバイオジェット燃料供給契約が、航空会社と燃料事業者間において締結されている⁸⁾。それら試みの一部を以下に記述する。

3.1 World Energy 社

World Energy 社自体は全米においてバイオディーゼル製造を手掛ける業者であるが、カリフォルニア州パラマウントにおいて稼働する製油所(旧 AltAir Fuels)は実質的に世界初且つ唯一の商業バイオジェット燃料専門供給拠点(但し、副生物としてバイオディーゼルやナフサも販売)である。同製油所は従来の石油精製所をレトロフィットしたもので、初期投資が抑えられている点も特徴である。また、同製油所で生産されるバイオジェット燃料はロスアンゼルス空港へ直結するパイプラインで供給されており、これもバイオジェット燃料としては世界初の試みである。改質技術は Honeywell UOP 社が提供する水素化技術で、HEFA-SPK を製造する。主な原料は近隣外食産業から有償提供される廃食油などである。

設立にあたってはユナイテッド航空から多額の投資を受けているが、同社は他航空会社のデモフライトプロジェクトにおいてバイオ燃料供給者として参画している。近年では、

サンフランシスコ空港、オスロ空港といったロスアンゼルス以外の空港にもコンテナによるバイオ燃料供給を行っている。

3.2 Neste 社

World Energy と同じ生物系油脂を水素化技術によって改質したバイオ燃料製造を行う。同社はフィンランド発の水素化処理用触媒の製造・技術提供を主とする石油改質技術メーカーであるが、独自にバイオ燃料製油所を北欧とシンガポールで運営し、燃料販売も行っている。大部分はバイオディーゼルの供給であるが、北欧系航空会社や空港に対してバイオジェット燃料供給も手掛けている。

3.3 Gevo/Lanzatech 社

両社は各々バイオ原料由来の工業用アルコール製造技術を持ち、Alcohol-to-Jet (ATJ)技術の普及を進めている。Gevo 社は主に木質バイオマスより得られるバイオイソブタノールを基とし、Lanzatech 社は都市ゴミや工場排気ガスから得られるバイオエタノールを基材としてバイオジェット燃料を製造する。

Gevo 社は出資者である Virgin グループが運営する Virgin Atlantic ほか、アラスカ航空などの航空会社とも将来的 ATJ 燃料長期供給契約を締結済である。また、オーストラリア政府・ブリスベン空港への ATJ 供給契約を締結済で、オーストラリアにおける ATJ 製油所構築準備が進められている。

Lanzatech 社も既に中国などに原料であるバイオエタノールの商業製造設備を稼働しており、ANA やサンフランシスコ空港と改質後 ATJ の供給契約を締結するなど、ATJ の商業化に向けて前進している。

3.4 Fulcrum 社

現在、認証検討が進む FT Co-Processing 技術を推す。JAL・丸紅・JOIN といった日系企業が資本参加を決めている。大都市圏において発生する都市ゴミの活用を念頭に置き、原料入手性の良さから業界の期待を集めている。ユナイテッド航空も資本参加しており、第一号プラントをミネバダ州において 2020 年より商業稼働開始予定である。

3.5 Boeing 社、Airbus 社

航空機体メーカーもバイオジェット燃料の普及促進に積極的に関わっており、様々な試みを行っている。

Boeing 社はバイオジェット燃料開発初期段階より、デモフライトプロジェクトへの参画など積極的に活動してきた。HEFA-SPK の ASTM 規格認証を主導し、燃料技術開発にも多く関与している。2018 年にはニートバイオジェット燃料のみでの試験飛行を実施するなど⁹⁾、バイオジェット燃料促進活動に積極的である。

Airbus 社も同様に積極的にバイオジェット燃料促進に携わっており、SIP の ASTM 規格認証を主導した。また、同社からのエアラインへの機体引き渡し時の飛行の際には、エアラインがバイオ燃料搭載を選択できるサービスを提供している。この試みはボーイング社も追随し、今年から同様サービスを開始した。

3.6 軍用機への展開

米国では環境問題への対応に加えて、原油輸入依存からの脱却というエネルギー保障上の観点からも、軍用機へのバイオ燃料展開を積極的に進めてきた。米海軍は 100%バイオジェット燃料搭載のジェット戦闘機による試験飛行を完了しており、2020 年のジェット燃料を 50%までバイオジェット燃料化する”Great Green Fleet”構想を打ち出しているほか、米空軍もバイオ燃料に関する研究を積極的に進めている。

前述のエネルギー保障という観点からも軍用機への展開は広がりつつあり、他国においても同様にバイオジェット燃料の積極的な採用検討が進んでいる。オランダ空軍は 2030 年までに使用燃料の 70%をバイオ燃料など非石油由来ジェット燃料への転換を目指している。スウェーデン空軍、インド空軍も 2020 年以降のバイオジェット燃料採用開始を狙い試験飛行を実施している。

3.7 今後の展望と課題

① 市況価格

原油価格の乱高下に影響される石油由来ジェット燃料であるが、近年は概ね\$80/バレル程度で推移している。これに対して、バイオジェット燃料の相場は種々政府補助なども加味したうえで、石油由来燃料のおよそ 2 倍程度と言われている¹⁰⁾。燃料のコストはエアラインの事業コストの 2 割以上を占めるとも言われ、バイオ燃料の導入による運航コストへのインパクトは甚大な影響がある。各エアラインは積極的にバイオジェット燃料の普及に投資を行う一方、このような現行の石油由来ジェット燃料との大きな価格差や、更にバイオジェット燃料の商業利用にあたってのインフラ改修など副次的投資の必要性から、バイオジェット燃料の商業利用は未だ限定的な使用に留まり、本格的な使用開始には二の足を踏んでいる状況にある。このことから、更なる投資による製造規模のスケールアップと、歩留まり改善など技術革新の両面によるバイオジェット燃料の一層のコストダウンが期待されている。

② エネルギーと温室効果ガス (Green House Gas, GHG) 削減： ICAO Core LCA について

バイオジェット燃料普及のもう一つの課題として各種の燃料が実際の GHG 削減への寄与度についての議論がある。基本的に、バイオ燃料の製造には水素化処理のための水素源など多量のエネルギーを要する。そのため、バイオジェット燃料の製造にあたって発生するエネルギー収支や、GHG 排出量はそのバイオジェット燃料のライフサイクルにおいて、

石油系ジェット燃料に対して削減されていることが肝要である。また、特に原料が農産物である場合は、生産方法が食料問題・更なる環境破壊や労働者問題に関与していないことといった、いわばサステナブルな手法で作られていることが求められる。ICAO では、バイオジェット燃料の各種原料や製造法に関してクライテリアを設け、エネルギー収支や GHG 排出量、諸環境影響などのスコア化を進めている¹¹⁾。しかし、この方式は各種製造方法の優劣を定めることになり、各方面での利害対立を生み出す可能性があり、CORSA 施行にあたってその算定方法の確立に向けた議論が続いている。また、サステナブルな原料であっても世界的に高まるバイオ燃料需要（バイオディーゼルも含む）によって、原料価格の高騰を生むなど、副次的な作用が生まれ始めている¹²⁾。

③ 運航上の課題、石油由来ジェット燃料との共存

先に述べた通り、バイオジェット燃料の第一条件はドロップイン型であることで、本来であれば既存の石油由来ジェット燃料と同様に取り扱うことができる。しかし、その製造にあたっては、石油由来燃料・原料とのコンタミ防止など数多くの対策を行う必要がある。また、燃料に含まれる金属成分など一部クライテリアは、石油由来燃料に比して安全サイド（オーバースペック）に設定されていることなど、本来の構想に対して規格・制度面が追いついておらず、バイオジェット燃料が石油由来燃料に対してコストアップする遠因となっている。これらの規制・規格面での追加管理条件の緩和がバイオジェット燃料普及の大きなカギとなる。

その一方で、性能面においてバイオジェット燃料が既存の石油由来ジェット燃料に対して優れている点も発見されている。バイオジェット燃料は一般的に石油由来ジェット燃料に対して芳香族や不純物（金属成分など）が少ない傾向にあり、この点が燃料燃焼後の煤の低減に繋がり、メンテナンス性の向上や飛行中の飛行機雲形成が抑制されるという研究結果がある。飛行機雲の形成は地球温暖化の補助要因となっているという説もあり¹³⁾、バイオジェット燃料の性能面のメリットとして期待されている。

4. 我が国におけるバイオジェット燃料の動向

4.1 IHI

ボツリオコッカスと呼ばれる、特殊な油（炭化水素）を分泌する微細藻類種を使用したバイオジェット燃料事業を推し進めている。同社のプロジェクトは、経産省所管の国立研究開発法人である新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「バイオジェット燃料生産技術開発事業」の委託を受けて進められている¹⁴⁾。日本由来の微細藻類を温暖なタイにおいて大量培養し、バイオジェット燃料一貫生産スキームの構築を検討中である。同種が分泌する油は脂肪酸ではなく炭化水素であり、水素化処理（ジェット燃料への改質）の際の脱酸素が不要な分、効率が良いと考えられる。2030 年代の商用化を目指し、現在、ASTM D7566 において新規規格認証取得作業が進行しており、2020 年の規格認証取得を目指している。

4.2 三菱日立パワーシステムズ、JERA、東洋エンジニアリング、宇宙航空研究開発機構

既に ASTM D7566 において認証されている FT-SPK (Annex1) 技術を用いて木質バイオマスの国産バイオジェット燃料化プラントの構築を目指している。連続安定運転に向けたデータ収集を念頭に置いた基盤技術の習得と経済性などの評価完了を目標としている。こちらにも NEDO の「バイオジェット燃料生産技術開発事業」の委託を受けたものである。

4.3 ユーグレナ社

日本発のバイオベンチャー企業であるユーグレナ社は、IHI 同様に微細藻類を基にしたバイオジェット燃料の開発を進めている。同社は ASTM D7566 認証が完了した CHJ 技術を使ったバイオジェット燃料製造を目指しており、横浜市鶴見区にバイオジェット・ディーゼル燃料製造実証設備の建設が完了している。このプロジェクトには横浜市、千代田化工建設株式会社、伊藤忠エネクス、ANA、いすゞ自動車などが参画しており、2020 年に同実証設備において製造されたバイオジェット燃料による商業飛行を目指している。

4.4 GEI 社

東京大学発のバイオベンチャーである GEI 社は、独自の発酵技術によってバイオマス原料をバイオイソブタノール・バイオエタノールに転換する。ここで得られた原料を ATJ によってバイオジェット燃料化するスキームを目指している。同社は JAL と日本環境設計と共同で古着（コットン）由来のバイオジェット燃料を製造し、2020 年の試験飛行を計画している。

5. まとめ

ICAO による CORSIA 施行開始を控え、バイオジェット燃料開発・普及の気運は世界中で高まっている。現に、ロスアンゼルス空港のように実用化の途に就いた事業者がいる一方で、コスト面や環境面での問題解決が必要であり、一層の業界努力とイノベーションが待たれる。

参考資料

- 1) ICAO, Present and future aircraft noise and emissions trends, 2016,
https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/WP/wp_055_en.pdf
- 2) ICAO, Assembly Resolution A39-3: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection – Global Market-based Measure (MBM) scheme, 2016,
https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/Resolution_A39_3.pdf

- 3) ICAO, Sustainable Aviation Fuels Guide, 2017,
https://www.icao.int/environmental-protection/knowledge-sharing/Docs/Sustainable%20Aviation%20Fuels%20Guide_vf.pdf
- 4) ASTM International, ASTM D7566-18a : Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, 2019,
www.astm.org
- 5) ASTM International, ASTM D1655-18b : Standard Specification for Aviation Turbine Fuels, 2019,
www.astm.org
- 6) ASTM International, ASTM D4054-19 : STANDARD PRACTICE FOR EVALUATION OF NEW AVIATION TURBINE FUELS AND FUEL ADDITIVES, 2019,
www.astm.org
- 7) CAAFI, Fuel Certification and Qualification, 2018,
http://www.caafi.org/resources/pdf/2.12_ASTM.pdf
- 8) CAAFI, Focus Areas : End Users (ホームページ), 2019,
http://www.caafi.org/focus_areas/end_users.html
- 9) Boeing, 2018 ecoDemonstrator to begin flight testing, 2018,
<https://www.boeing.com/company/about-bca/washington/eco-demonstrator-03-02-18.page>
- 10) AIN Online, Gulfstream Waiting for Wider Biofuel Availability, 2018,
<https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2018-05-30/gulfstream-waiting-wider-biofuel-availability>
- 11) ICAO, CORSIA SUPPORTING DOCUMENT : CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology, 2019,
https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Supporting%20Document_CORSIA%20Eligible%20Fuels_LCA%20Methodology.pdf
- 12) Reuters, Fat profits: Asian traders cash in as Europe thirsts for waste oils, 2018,
<https://www.reuters.com/article/us-asia-europe-wasteoil-idUSKCN1MK00E>
- 13) European Commission, Condensation trails from biofuels/kerosene blends scoping study, 2016,
<https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Contrails-from-biofuels-scoping-study-final-report.pdf>
- 14) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業総合開発機構, 2019年度実施方針: バイオジェット燃料生産技術開発事業, 2019,
<https://www.nedo.go.jp/content/100892092.pdf>